

沙漠绿色经济试点项目

库布其生态修复项目综述



© 2015 年版权，联合国环境规划署

ISBN: 978-92-807-3537-6

UNEP 工号: DEW/1954/NA

如出于教育或非盈利目的，可以任何形式转载本出版物的全部或部分內容，无需版权所有人特别许可，但转载方应注明出处。如转载方能提供任何引用本出版物內容的出版物，联合国环境规划署将深表感谢。

未经联合国环境规划署事先书面许可，不得将本出版物再次出售或用于任何商业目的。任何此类许可申请应说明转载目的和意图，并寄送联合国环境规划署新闻与公共信息司司长。通信地址：肯尼亚内罗毕 30552 邮政信箱，联合国环境规划署新闻与公共信息司，邮编 00100。

免责声明

本出版物所提及的商业公司或产品并不意味着联合国环境规划署或本报告作者对其认可。不得将本出版物中的产品相关信息用于宣传或广告。在编辑过程中对任何商标名称和标识的使用无意侵犯任何商标或者违反知识产权法。

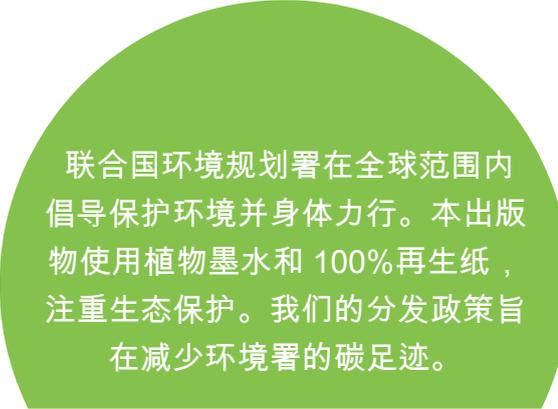
本出版物所载内容和观点均出自原作者，不反映贡献机构和联合国环境规划署的观点或政策，也不代表其立场。

引用

环境署（2015），《沙漠绿色经济试点项目：库布其生态修复项目综述》，联合国环境规划署，内罗毕。

编辑：Gemma Shepherd/UNEP

印刷：亿利公益基金会



联合国环境规划署在全球范围内倡导保护环境并身体力行。本出版物使用植物墨水和 100%再生纸，注重生态保护。我们的分发政策旨在减少环境署的碳足迹。

沙漠绿色经济试点项目

库布其生态修复项目综述



致谢

联合国环境署对亿利资源集团、中华人民共和国国家林业局、本报告作者以及评审人对本报告的贡献表示衷心感谢。

作者

Gemma Shepherd¹, Douglas W. Hubbard², 刘金龙³、于静洁⁴、姚洪林⁵

评审人

王文彪 (亿利资源集团有限公司)
何昌垂 (库布其国际沙漠论坛执行秘书长、前联合国粮农组织副总干事)
尹成国 (亿利资源集团有限公司)
韩美飞 (亿利资源集团有限公司、杭锦旗库布其种质资源有限公司)
郭宝安 (亿利沙漠生态健康股份有限公司)
张吉树 (内蒙古库布其沙漠技术研究院、亿利资源沙漠研究院)
袁勤 (内蒙古库布其沙漠技术研究院、亿利资源沙漠研究院)
李勇 (亿利公益基金会)
杨竣程 (亿利公益基金会)
贾晓霞 (国家林业局)
王国生 (国家林业局)
王峰 (中国林业科学院)
张克斌 (北京林业大学)
张金华 (环境署)
Mick Wilson (环境署)

Matt Millar (哈伯德决策研究所) 为决策分析提供支持, 彭广东 (亿利资源集团) 协助了大量资料翻译工作, 吴海蔓 (前亿利公益基金会)、贾晓霞 (国家林业局)、张金华 (环境署亚太局)、蒋南青 (环境署驻华代表处) 为整个项目的开发、执行和协调提供重要支持, 在此, 对他们的付出表示感谢。

项目管理: Gemma Shepherd、李勇
项目协调: Gemma Shepherd、杨竣程、鄢文静
设计与排版: 亿利公益基金会
封面设计: Gemma Shepherd 亿利公益基金会
图片: 亿利公益基金会
印刷: 亿利公益基金会

¹ 肯尼亚内罗毕联合国环境署

² 美国伊利诺斯州格伦艾伦哈伯德决策研究所

³ 中国人民大学林业与资源政策研究中心

⁴ 中国科学院地理科学与自然资源研究所

⁵ 内蒙古自治区库布其沙漠技术研究院

中文版致谢

“里约+20”峰会的重要成果之一，就是联合国各成员国通过将绿色经济作为实现可持续发展和消除贫困的重要途径。2014年6月，在联合国环境署总部肯尼亚内罗毕召开的首届联合国环境大会提出了以绿色发展为道路实现可持续发展与减贫的主题。

沙漠作为一个独一无二的生态系统，有力支持着植物与动物的生物多样性，并承载着世界上1.44亿人口。同时，荒漠化问题也是一个国际性挑战，引起各国与国际社会的高度重视，其也是在2015年后发展议程的大背景下实现可持续发展目标的关键所在。

自1988年起，亿利资源集团在位于内蒙古地区的库布其沙漠实施生态修复项目，并取得了显著成就。2015年，联合国环境署与国际和中国专家团队合作，从生态经济与社会可持续性角度出发，对库布其沙漠示范项目进行科学评估，重点关注政府—私营企业—社区合作伙伴关系，以期库布其模式的经验能够更好地在其他旱地生态系统得到推广，为全球旱地生态系统的可持续发展做出重要贡献。

环境署感谢亿利公益基金会对本项目在实施过程的大力支持，并感谢亿利公益基金会创建者亿利资源集团董事长王文彪先生对本报告给予的关怀。26年来，他带领亿利资源集团，创出了通向可持续发展方式的荒漠化治理模式。在中国的第7大沙漠——内蒙古库布其沙漠上，绿化了五千多平方公里的沙漠，并使十多万当地人民脱贫，形成“库布其”发展模式。他本人在“里约+20”峰会上被联合国环境规划署授予“2011年环境和发展最佳表现奖”，并获得联合国荒漠化公约组织的“全球治沙领导者”奖项。

联合国环境规划署还对为本报告翻译和出版付出辛勤工作的亿利公益基金会和中国人民大学林业与资源政策研究中心的全体工作人员表示衷心感谢。

组织协调：张世钢、王雅韬、蒋南青、张金华、李勇、窦瑞、杨竣程、鄢文静

中文版审校：蒋南青、姚洪林、刘金龙、彭广东、鄢文静

中文版翻译：梁文远、赵佳程、时卫平、徐拓远

中文版编辑：时洞宇、张利民

目录

致谢	i
中文版致谢	ii
目录	iii
图例	v
表格	vii
前言	ix
执行摘要	xi
第一部分项目概述	1
1. 简介	1
2. 库布其沙漠地缘政治历史	2
2.1 早期历史	2
2.2 集体化阶段：1950-1983 年	4
2.3 分权化阶段：1978-2000 年	5
2.4 私营企业参与荒漠化治理：2000 年至今	6
3. 库布其沙漠和库布其项目区地形	7
3.1 库布其沙漠	7
3.2 亿利资源集团库布其项目区	9
4. 沙漠生态修复	14
4.1 开创之初	14
4.2 技术创新	15
4.3 人工林	18
4.4 生产经济学	19
5. 关联企业	20
5.1 基础设施	20
5.2 制药	21
5.3 建筑材料	22
5.4 能源	23
5.5 沙漠生态旅游	23
5.6 其它企业	24
5.7 企业联系	24
6. 政府 - 私营企业 - 社区合作伙伴关系	26
6.1 历史政策与制度背景	26
6.2 公私合作伙伴关系	26
6.3 私营企业 - 社区合作伙伴关系	27

第二部分项目评估.....	29
7. 建模方法.....	29
8. 环境影响.....	31
8.1 原地环境影响.....	31
8.2 异地环境影响.....	34
9. 风险.....	37
9.1 水文风险.....	37
9.2 其它风险.....	37
10. 模型.....	39
10.1 模型开发.....	39
10.2 影响路径的基本结构.....	39
10.3 估算过程.....	41
10.4 审计程序.....	41
10.5 信息价值计算与测量.....	43
10.6 模拟结果.....	45
10.7 模拟建议.....	50
11. 结论与建议.....	51
11.1 绿色经济模式.....	51
11.2 成功要素.....	51
11.3 推广沙漠绿色经济的考量因素.....	52
附录 1 其它研究机构的技术创新.....	54
附录 2 风险 - 回报模型输入表 (节选).....	58
附录 3 风险 - 回报模型随机现金流表 (节选).....	59
术语表.....	60

图例

图 2.1 地图显示的是一根挂在黄河上的弦，与库布其沙漠北部边缘相连	2
图 3.1 内蒙古鄂尔多斯区	7
图 3.2 库布其沙漠和黄河示意图	8
图 3.3 2001-2010 年库布其沙漠预估总跳跃沉积物排放（吨）的空间分布	8
图 3.4 卫星图显示了杭锦旗北部与黄河相接及绿化区域，黄河北部区域被掩盖	9
图 3.5 杭锦旗气象站年气温数据（1959-2013 年）	10
图 3.6 杭锦旗气象站年降水量数据（1959-2013 年）	10
图 3.7 杭锦旗气象站年大风天数数据（1960-2013 年）	11
图 3.8 杭锦旗气象站年沙尘暴天数数据（1960-2013 年）	11
图 3.9 杭锦旗每 10 年年均气温（上）和降水量（下）数据	11
图 3.10 杭锦旗每 10 年年均大风和沙尘暴天数数据	12
图 4.1 从东部俯瞰项目区，图为黄河和人工林	14
图 4.2 杭锦旗与包头的关系、当前的道路网络及黄河	15
图 4.3 水冲法种植沙柳	15
图 4.4 沙柳茎、秸秆等材料捆绑而成的网格沙障技术	16
图 4.5 甘草种植	17
图 4.6 温室技术培育草木种苗和种植蔬菜	17
图 4.7 滴灌和大面积支点灌溉系统，右侧作物为甘草	18
图 4.8 黄河防护林带和稳定腹地	18
图 4.9 库布其生态修复区，主要种植区域：A 区域为黄河北岸，B 区域位于伊和乌素苏木，C 区域位于巴音恩格尔苏木。浅绿色表示种植树木，深绿色表示种植甘草，紫色表示植被固沙	19
图 4.10 黄河南岸人工林地图	19
图 5.1 黄河公路	20
图 5.2 亿利东方学校和住宅区	20
图 5.3 基于甘草的制药业	22
图 5.4 基于沙子的建筑材料	22
图 5.5 亿利资源集团太阳能和风能等可再生能源投资	23
图 5.6 库布其七星湖沙漠公园	23
图 5.7 库布其沙漠七星湖度假村	24
图 5.8 库布其国际沙漠论坛会议中心	24
图 5.9 与库布其项目相关的各类亿利资源集团企业	25
图 7.1 应用信息经济法的主要组成要素	29
图 7.2 使用应用信息经济法进行概率风险 - 回报分析的五个步骤过程	30

图 8.1 库布其项目沙漠绿化稳定转型：（上）1988 年原始状态；（中）通过防护林和棋盘沙障保护的 高速公路；（下）2012 年高速公路的绿化稳定状态	31
图 8.2 1959-2013 年库布其项目区基于降水量和气温数据的预估年蒸散量	32
图 8.3 库布其项目区月均实际蒸散量	32
图 8.4 不同时期夏季平均归一化植被差异指数的变化：(a) 1981-1983 年和 1984-1986 年；(b) 1981-1983 年和 1987-1989 年；(c) 1981-1983 年和 1990-1992 年；(d) 1981-1983 年和 1993-1995 年；(e) 1981-1983 年和 1996-1998 年	34
图 8.5 库布其项目区湖泊	35
图 8.6 库布其项目湖泊中的迁移天鹅和其它鸟类	36
图 10.1 库布其项目模型影响路径	40
图 10.2 库布其绿色经济项目的净现值结果分布	45
图 10.3 50 年内潜在水位变化	47
图 10.4 部分水位变化模拟示例	47
图 10.5 收入下降与非官方风险承受能力模拟损失超越曲线	48

表格

表 2.1 鄂尔多斯文化历史上的交错农耕和游牧活动.....	3
表 2.2 库布其开垦、种植历史	3
表 3.1 杭锦旗水资源供需分析（百万立方米 / 年），表明水资源盈余或不足区域	13
表 6.1 成功荒漠化防治科学驱动型制度变革的三大原则和九条工作原则	28
表 8.1 生态修复项目区外部水需求预估	33
表 10.1 一般模型统计数据	42
表 10.2 第四次迭代分析中发现的信息价值	43
表 10.3 最后一次迭代分析中发现的信息价值	44
表 10.4 库布其项目蒙特卡罗模拟指标	46
表 10.5 主要模型要素的成本效益的最佳估值和范围	46



2015年8月库布其行动启动仪式



2014年4月联合国环境规划署库布其沙漠生态经济示范项目正式启动

前言

沙漠和沙漠边缘地区的生态系统独一无二，具有高度的适应性，对植物与动物多样性是一个重要支撑。这些地区居住的人口有 5 亿多——接近全球人口的 8%。这里同时也是人类居住环境最为恶劣的地形之一，但也可能成为创新的主要驱动力。

库布其沙漠是中国第七大沙漠，几乎被黄河大弯曲从西、北和东部包围（鄂尔多斯环线）。海拔高度在 850-2130 米之间，呈沙化与剥蚀地貌特征，与毗邻地区相比，地理特征相当独特。



亿利资源集团库布其生态修复项目位于库布其沙漠，该项目是坚持不懈与创新的典范，并开创了全新的绿色经济。在沙漠地区开展任何业务都是非常困难的，而创立一个既具有经济价值又具备环境可持续性的项目需要真正的创造力。库布其地区温度在 -32.1° 到 38.7° 之间，全年沙尘暴天数大约为 13 天，年均降水量仅为 280mm。移动沙丘占该地区的 61%，地表主要覆盖着松散的细沙。人类影响造成的气候变化与地貌运动导致了该地区的荒漠化。

从全球来看，从过度开发与退化向更加平衡的可持续发展道路转变需要长远目光和规划。

在项目区，一种融合了当地知识和现代化创新的系统方法已经阻止了荒漠化的加剧，流动沙丘已经能够逐渐被固定。该项目始于 20 世纪 80 年代末，主要致力于在项目区大范围的实施绿色工程项目，使得企业、农民和牧民受益。项目区丰富的沙漠植物可用于制药，因此项目区建立了药厂；沙漠生态系统的沙子可用于制作沙材料，因此项目区建立了沙材料工厂；而项目区新能源的投资是对该区域其他产业很好的补充；生态旅游产业更是得益于沙漠生物多样性的增加以及沙漠绿色经济的成就。

报告阐述了项目区的历史、政治和地理背景，技术创新与私人-公共-社区伙伴关系使得绿色发展成为一种可能。通过创新性的分析实践来整合经济、生态和社会成本、收益与风险的证据，对项目区的可持续性进行评估。本报告指明了项目区成功的关键因素，并归纳了可持续沙漠绿色经济项目的一般性理论。

我希望这些认识能够启发其他沙漠与干旱地区实施可持续沙漠绿色经济，使当地社区能够从沙漠生态系统服务中受益。

A handwritten signature in black ink that reads "Achim Steiner". The signature is fluid and cursive.

联合国环境规划署执行主任，Achim Steiner



库布其绿色中国梦

执行摘要

1992年，104个国家元首齐聚里约，达成并通过了《里约环境与发展宣言》，又称《地球宪章》，旨在推动全球的可持续发展。2012年，各国首脑又一次齐聚里约，一致同意将发展绿色经济作为实现可持续发展和消除贫困的重要手段。荒漠地区气候干燥、降水极少、蒸发强烈、植被缺乏，已经占据了地球陆地面积的三分之一，构成了对人类走向可持续发展的严峻威胁。荒漠地区人民生活相对贫困，基础设施落后，生态系统十分脆弱，荒漠生态系统的恢复和可持续利用十分困难。自1988年起，亿利资源集团有限公司（以下简称为“亿利资源集团”）扎根于中国内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗，坚守库布其沙漠修复¹事业，发展沙漠绿色经济。26年来，亿利资源集团在治沙领域取得了显著的成就，吸引了国际社会的广泛关注。库布其沙漠绿色经济项目的成功有哪些推动因素呢？库布其项目原理在多大程度上适用于其它干旱地区呢？本报告将从生态经济和社会可持续性角度对库布其绿色经济试点项目²进行科学评估，其中包括政府—私营企业—社区合作的伙伴关系。

本报告共分为两个部分：第一部分介绍了亿利库布其项目的背景及相关信息，第二部分评估了库布其项目的影响和可持续性，并采用经济风险-收益模型评估项目的可持续性。

第一部分内容包括以下四个方面的内容：1) 简要概述了绿色经济的重要性，及应用于干旱和沙漠地区的潜力；2) 作为背景信息，概述了库布其沙漠的地缘政治历史和地形；3) 描述了沙漠生态修复活动及其相关企业；4) 介绍了项目获得成功的关键驱动力—政府-私营企业-社区合作伙伴关系的发展和性质。

第二部分首先描述了建模方法；在总结建模结果前，汇总了项目相关的原地和异地环境影响

¹ “修复”一词用于指代以荒漠化治理和商业生产为目的而进行的植被恢复和土地改良。历史记录表明，库布其沙漠经历了气候变化和人类活动引起的绿色和贫瘠沙漠周期。

² 库布其生态修复项目或试点项目指的是亿利资源集团在库布其沙漠开展的修复活动。

及风险证据，作为模型信息数据输入。最后总结了项目的整体可持续性，指出了其关键成功要素及推广沙漠绿色经济的考量因素。

如果不了解库布其区域的地缘政治历史，那么人们可能无法充分认识库布其试点项目的开发及促成因素。该区域动荡的历史（间或稳定时期从事农耕和游牧活动）表明，稳定的政治环境是沙漠地区发展的前提。自1950年起，在集体化阶段，土地产权发生了根本的变化，政府出台了一系列与土地管理和荒漠化治理相关的政策。自1978年起，在分散化阶段，集体土地的使用权被分配给农民，家庭被重新确认为农业活动的主体。市场开始了萌芽发展，中央和当地政府出台了一系列法律政策来支持沙漠修复。在这一阶段，私营企业和个人开始参与荒漠资源利用与管理，亿利资源集团在此背景下建立，旨在引领荒漠化治理，推动沙漠资源可持续管理。自2000年起，当地政府进一步加强了生态修复政策的制定。私营企业，尤其是亿利资源集团，从推动库布其沙漠沙化防治转为利用沙漠资源来发展草地和林地生产企业，以支持生态化的工业及相关企业。

从地形方面来看，库布其项目区属于温带大陆性干旱气候，1月和7月平均气温分别为-11.7℃和22.1℃，降水集中在6-8月，年均降水量为280毫米。自上世纪70年代起，该区域的年均气温呈上升趋势，但沙尘暴的天数有所下降。杭锦旗供水量达7.16亿立方米，其中38%源自于地下水。

上世纪80年代末，现任中华全国工商业联合会副主席与亿利资源集团董事长王文彪先生发起了生态修复活动。植树的最初目的是治沙，保护其管理下的盐场和工厂。然而，风沙和流动性大沙丘对将盐运往最近的火车站造成了严重阻碍。为此他们提议修建一条联通工厂与乌拉山火车站的长达65公里的穿沙公路。这一方案得到了政府的支持，亿利资源集团在该项目中投资了7000万元。但由于可借鉴的经验较少，路基被推平后很快便被风沙和流动性大沙丘所覆盖。

由于存活率较低，早期保护公路的植树举措大多失败了。但亿利资源集团愈挫愈坚，终于探索

出成功的生态治沙措施，即在公路附近以网格形式设置从农业区收集的秸秆沙障，并在公路两旁种植乌柳、柠条锦鸡儿和北沙柳等植物。此外，种植范围扩大到公路沿线 65 公里长、4 公里宽的绿化带，这些区域种植甘草、柳属等植物。这一种植举措获得成功的关键在于采用了水冲法和牧草飞播法等创新种植方法。

这些初期保护活动的影响不断扩大，进而可以支持一家现代化医药企业，该企业以草药为基础，从早期仅涵盖甘草，拓展到各种草药资源。亿利资源集团进行了大量的技术创新，包括与各类研究机构建立合作伙伴关系，与社区和群众签订灵活的种植协议去种植各类草药、灌木和树木，如混种林和防护林带；引入和使用先进的滴灌和中心旋转灌溉系统来灌溉甘草、药草、温室蔬菜和水果；种植饲料作物来拓展畜牧业，并用于沼气发电；基于各种有机废弃物和生物炭开发有机肥料。

亿利资源集团将沙漠公路拓展为总长达 234 公里的跨沙漠网络系统，安装了沿线水力和通讯设施。建立了亿利东方学校，并完善了住房条件。沙漠公路有助于本区域的市场开放，并创造了新的就业机会。目前，亿利天然制药集团在鄂尔多斯市共建有 6 家医药分销企业。与此同时，亿利资源集团还建立了以沙为原材料的建筑材料生产企业，并投资建立太阳能和风能等可再生能源企业，包括大型光伏电站。通过沙漠公园和沙漠酒店的开发，沙漠生态旅游也得到拓展。

政府-私营企业-社区合作伙伴关系是库布其项目取得成功的重要基础。自 2000 年起，在政府惠商政策的推动下，企业取代了精英家庭（具有强大影响力），成为防沙项目的主要投入力量。通过各种方式，100000 多位农牧民成为亿利资源集团绿色经济项目的最大受益方之一，其中包括土地租赁、参股、旅游、林业和农业开发等。接受亿利资源集团生态建设培训的工人达 100 万人次，推动了当地农牧民、社区和私营企业集体参与沙漠生态修复行动。例如，私营企业目前负责实施鄂尔多斯市 90% 的植树造林工作，亿利资源集团在这一领域的投资逐渐收缩。与科研机构建立的合作伙伴关系是项目在沙漠修复方面取得技术进展的关键，亿利资源集团正扮演着国际宣传者的角色，包括通过联合国防治荒漠化公约秘书处和联合国环境规划署开展相关宣传工作。

本报告采用应用信息经济学（Applied Information Economy）来评估项目的生态、经济和社会成本、效益和风险。该方法使用概率范围来评估成本效益的不确定性，并列出了投资净现值的分布。在需要收集进一步信息的情况下，分析结果用于指导确定监测影响项目成败的有用指标，指出在其他区域实施沙漠绿色经济举措的考量因素。

对项目环境影响的相关证据进行评估，将其作为风险-收益模型的信息输入。从异地环境影响来看，防风林带有助于降低风力，减少风积沙向黄河的流动，改善包括土壤质量在内的当地生态环境条件。项目区降水量以外的年度外部总耗水量预估为 714 万立方米，相当于年降水量仅为 1.2 毫米，或不足年度总降水量的 0.7%。

从异地环境影响来看，有明显的证据表明，杭锦旗沙尘暴的发生频率有所降低，这与从卫星图观测到的上世纪八九十年代植被绿化趋势的卫星数据所一致。库布其沙漠的生态环境获得了明显的改善，天鹅湖成为迁徙天鹅的理想湿地栖息地。尽管当地专家报告称降水量因项目区的绿化工作而有所增加，但气象站记录并未显示过去 50 年内降水量出现了任何变化。

尽管缺乏项目区的水位观测数据，但据当地居民称，在地下水位接近于地表的区域，地下水位略有下降。植树造林活动的灌溉水源来自于承压含水层，在抽水量低于补给量的情况下，灌溉水源是可持续的。假设未来 10 年灌溉的树木种植面积增加 1000 平方公里，且不出现任何气候变化的情况，那么整个项目区灌溉水需求将从当前的 714 万立方米增加到 954 万立方米。与可用的 4000 万立方米供水量相比，植树活动近期面临的水文风险相对较低。然而，这一分析并未考虑未来 10 年内的其它水利用和需求。更可靠的风险分析将需要涵盖多种水利用及区域重点的更复杂模型。当地专家认为，按照当前的灌溉实践，面临水质下降的风险较低。

从其它风险情况来看，尚未有证据表明盐碱度将会有所增加，也未有任何观测结果表明将发生任何重大的植物病虫害。然而，黄河流域易受到气候变化的影响，尤其是当青藏高原的融雪水（受到温度上升的影响）流入到黄河中时。但是，气候变化模型中的预测变化加大了评估敏感度的难度。

根据应用信息经济模型结果，过去 50 年生态修复投资收益的平均净现值为 18 亿美元，出现负净现值的概率为 12%。最大成本是初期的修复成本，其中灌溉成本相对较少，农业收益为主要收益来源。考虑到亿利资源集团持续的大量社会投资，项目的社会效益将大于模型预测值。水位被视为是项目的最大单一风险。在 55% 的情景下，水位保持稳定，即进入地下水的流入量等于或大于流出量。在 70% 的情景下，未来 50 年内的水位将下降 1 米。在 2% 的情景下，未来 50 年内水量将枯竭。模型通过使用损失超越曲线对未来收入下降风险进行了模拟，其模拟结果表明，2015-2065 年间，在 7.5% 的情景下，收入将会有所下降，而这大多源于水量过度使用的风险对农业收入的影响。

模型表明，沙漠绿化活动向邻近区域的扩展可能带来与以往投资类似的收益及风险。在库布其项目的启动初期，每公顷的初期投资约为 350-600 美元。进一步扩展项目预计平均将减少 20-80% 的成本，具体取决于项目区向拥有较少水资源的区域的扩展程度。项目区扩展面临的主要风险来自地下水的长期过度开采。

从模型结果中我们得出了以下几条关键结论：可在世界其它与库布其沙漠类似的区域开展相似的项目，具体取决于可持续水供应；建议对当前和新建项目区开展水位监测；建议将更全面的区域水文模拟作为重中之重；为了降低水文风险，建议继续投资节水技术及种植用水较少的植物品种；限制耗水量较大的乔木的种植面积尽量增加适应沙漠生成环境的灌木和草类的种植面积将是降低风险策略的关键。

大量的地理、政治和社会因素共同塑造了成功的库布其沙漠绿色经济模式。项目区的地下水状况为林草种植和生长创造了有利的环境。这些有利的条件源自于与黄河的地缘临近性、区域地质、邻近承压含水层的可用灌溉水源。树种选择、培育、定植、灌溉和管理等方面的高水平科技创新是项目获得成功的关键。沙障技术是保护基础设施投资的关键，其反过来刺激了市场发展及进一步投资。高水平的科技创新还延伸到医药和沙产业，促进了沙漠资源的高效利用。沙产业的发展刺激了社会基础设施投资，如改善住房、服务和学校设施。

政府出台的有利政策也推动了私营企业到社区的参与及良好的合作伙伴关系的建立。

尤其在推动政府关注荒漠化防治和基础设施联合投资上，亿利资源集团发挥了重要的作用。长期的愿景和想法是十分重要的，尤其是考虑到从生物措施到实现效益的长期性（20-30 年）。与科研机构建立的合作伙伴关系也促成了技术的创新。政府-私营企业-社区合作伙伴关系也是模式成功的关键。最后，本报告从评估结果中总结出了 10 条原则，可用于向其它区域推广可持续沙漠绿色经济项目。

第一部分 项目描述

1.简介

《里约环境与发展宣言》的一个关键组成部分是各国达成共识，赞同并考虑将绿色经济作为实现可持续发展和消除贫困的重要手段之一。联合国环境规划署将绿色经济定义为一种可“改善民生和社会公平，同时显著减少环境风险和生态不足”的经济形式。在绿色经济中，收入和就业增长受到政府和私营部门在以下领域的投资驱动：减少碳排放和污染；提高能源和资源利用效率；预防生物多样性和生态系统服务丧失（联合国环境规划署，2011年）。这对于生计和安全依赖于自然的贫困人口而言尤为重要。实现绿色经济的关键因素在于为政府和私人投资采纳广泛的环境社会标准并创造条件。中国的十二五规划（2011-2015年）中重点强调了绿色投资，这体现了中国对转型绿色经济的承诺。

考虑到沙漠中的恶劣条件、不可预知的环境状况及脆弱的生态系统平衡、固有的低生产潜力及有限的基础设施，干旱地区或许将为绿色经济发展带来最严峻的考验（联合国环境规划署，2006年）。当局部出现的土地退化过程影响到大片的干旱区域时，便会产生荒漠化，而荒漠化已成为一个全球的环境问题（联合国环境规划署，2007年）。全球约有20亿人口居住在干旱地区，其中90%为发展中国家的人口；且约有10%的干旱地区，或600万平方公里已受到土地退化的影响（MA，2003年）。旱地退化（以净初级生产力流失量进行测量）在萨赫勒地区和中国干旱与半干旱地区最为普遍（Zika和Erb，2009年）。此外，1951-1980年与1981-2010年的干旱分析和气候图表明，中国东北地区呈现干旱加剧及气候相关荒漠化风险增加的趋势（Sipinoni等，2014年）。

绿色经济有望通过改善资源管理逆转荒漠化趋势，改善干旱地区生计，利用现代技术和创新节水策略来促进可再生能源、灌溉农业、沙漠城市和生态旅游等领域（联合国环境规划署，2006年）。联合国环境规划署《全球沙漠展望》指出，当前的挑战仍然是制定长期整体计划，利用市场激励措施为沙漠的未来制定切实可行的发展方案，实现环境保护和经济发展。

早在1988年，亿利资源集团有限公司便开始着手修复位于中国内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗的库布其沙漠的部分地区（后来发展成为沙漠绿色经济的一部分）。通过创新的政府-私营企业-社区投资模式，进行乔木、灌木和草类的种植，实现了5000多平方公里的绿化面积（亿利资源集团，2014年）。种植甘草等高价值草药目前正在支撑着大规模的天然制药行业。经济发展包括基础设施发展、生态行业和绿色农业、新建建筑材料（沙制材料）生产、生态旅游和太阳能等可再生能源。社会发展包括建设新家园和学校及开发文化项目。生态修复减少了沙尘暴和荒漠化，修复了生物多样性。库布其项目提供了崭新的沙漠绿色经济模式。

本报告的目的是从生态经济和社会可持续性角度对库布其试点项目进行科学评估，重点关注政府-私营企业-社区合作伙伴关系，并指明沙漠绿色经济取得成功的关键因素。相关结果将用于指导其它地区沙漠绿色经济项目的开发。本报告采用应用信息经济学（AIE）来评估库布其试点项目的生态、经济和社会成本效益的不确定性（使用概率范围表示）。在需要收集进一步信息的情况下，分析结果用于指导确定监测项目影响的有用指标，指出在其他区域实施沙漠绿色经济举措的考量因素。

2. 库布其沙漠地缘政治历史

如果不了解库布其区域的地缘政治历史，那么人们可能将无法充分认识库布其试点项目的开发及其促成因素。本节提供了库布其沙漠地区人文地理的简略年表，尤其是为沙漠修复活动创造有利条件的土地政策。

2.1 早期历史

库布其沙漠位于中国内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗和达拉特旗，与鄂尔多斯高原北部边缘相连，位于黄河南岸。“库布其”为蒙古语，意思是弓上的弦，因为东西横贯的库布其沙漠处在黄河下像一根挂在黄河上的弦，故因此得名。西北、东三面均以黄河为界，呈“几”字形，就像是悬挂在杭锦旗和达拉特旗上的一根弦（图 2.1）。

在第三纪地质时期末和第四纪地质时期的初期（6550 万-260 万年前），由于喜马拉雅山体运动及鄂尔多斯高原上升运动的影响，鄂尔多斯南部和北部凹陷成洼地，形成深湖沉积物。自第四纪更新世开始后（220 万年前），世界进入大冰期，并经历了一系列环境变化，在干湿气候及冷暖气候中交替变化，进而形成了库布其沙漠。

到早更新世结束时（240 万-73 万年前），高湿度的气候变暖造成了暖温带森林草原或森林环境。然而，更新世中期（73 万年-12600 年前）的气候变得干燥、寒冷，风成物质累积于鄂尔多

斯地区。强烈的冬季风侵蚀着地表，形成风成物质累积，这些便是形成库布其沙漠的早期沙丘。在更新世末期（126000-10000 年前），气候持续变冷。由于冰河世纪的影响，沙砾物质逐渐变为流动沙丘，这加剧了库布其沙漠的形成。在全新世时期（11700 年至今），气候变得更加暖湿。阴山山脉的雪开始融化，并流入河流湖泊当中。鄂尔多斯逐渐形成繁茂的草原和森林。该区域的植被被潮湿的草甸草原和灌木所覆盖，形成了黑土壤，固定了流动沙丘。

人类活动反映了气候和相应的植被变化。早期气候活动可追溯到更新世时期（50000-37000 年前）（Li, 2012 年）。交替出现作物种植、牧业和农牧混合系统（表 2.1），往往因战争或显著的人口波动而中断。也开始出现了开垦、种植及荒漠化时期（Dong 和 Xin, 1992 年）（表 2.2）。例如，记录表明，在秦汉时期（公元前 221-206 年，公元前 206-公元 220 年），库布其的杭锦旗和达拉特旗拥有浓郁森林覆盖的良田。这时期的森林主要由松树、东方金钟柏（针叶树金钟柏属）及杜松构成。即便是今天，达拉特旗的青达门乡也仍有一些遗留下来的杜松林。

然而，额济纳绿洲自汉朝后逐渐退化为沙漠。在清朝时期（1616-1911 年），达拉特旗沿河流域生长有繁茂的野柳、芦苇和草木。在清朝中期，出于农业生产而进行的森林开垦及草地焚烧活动导致植被减少，牧场和草地也出现了荒漠化。

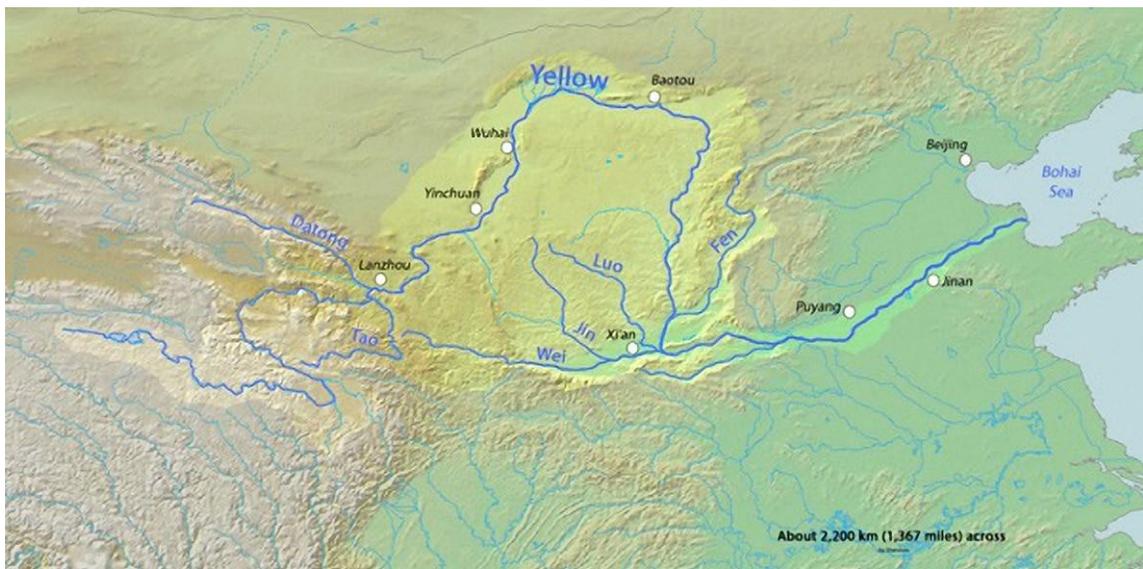


图 2.1 图示为一根挂在黄河上的弦，与库布其沙漠北部边缘相连

表 2.1 鄂尔多斯文化历史上的交替农耕和游牧活动

文化时代	时期	人类活动
仰韶文化	公元前 7000 年-公元前 5000 年	早期定居农业；随后出现农牧交替
龙山与仰韶交替文化	公元前 5000 年-公元前 4500 年	农牧交替
龙山文化	公元前 4500 年-公元前 2500 年	早期定居农业；随后出现农牧交替
青铜文化	公元前 3500 年-公元前 2200 年	早期定居农业；随后出现农牧交替
铁器文化	公元前 2000 年-公元前 1700 年	秦汉时期定居农业，随后出现农牧交替
魏晋南北朝时期	公元 220 年-公元 589 年	游牧
隋唐时期	公元 581 年-公元 907 年	农牧交替
西夏政权和元代时期	公元 1038 年-公元 1368 年	农牧交替
明清以来	自公元 1368 开始	农牧交替

来源：Yan，2004 年，经刘金龙教授修改。

表 2.2 库布其开垦、种植历史

时间	描述
公元前 270 年南北朝时期	匈奴人从事农业活动
公元前 206 年-公元 220 年	汉朝通过大规模迁移、开垦和种植活动，加强了鄂尔多斯地区的管理。在汉朝末期，有流沙记录。
公元前 156 年-公元前 87 年	汉武帝高度重视河套地区的发展，采取了一系列措施来管理该地区。例如，汉武帝派遣驻军部队和农民开辟荒地及种植粮食，另外还鼓励人口迁移。随着新的农业区的开发，鄂尔多斯地区的所有树木均被砍伐。
公元 5 年-公元 22 年	王莽时期，由于不恰当的管制和政策，匈奴开始发起战争，许多农民重返家园。在东汉时期，鄂尔多斯地区的人口达到 100000 以上，这导致沙质草地出现荒漠化。
公元 581 年-公元 907 年	隋唐时期，统治者派遣驻军部队和农民开辟荒地及种植粮食。
公元 1662 年-公元 1722 年	清朝时期，尤其是康熙帝之后，统治者实施鼓励开垦和种植的政策法规。

<p>公元 1950 年-公元 1998 年</p>	<p>经历了以下三个开垦和种植时期：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.1959 年，政府强调粮食生产，实施大规模草地开垦和种植。 2.文化大革命时期（1966-1976 年），当地政府鼓励游牧民开垦和开发草地。此外，生产建设兵团也进行部分开垦和种植活动。 3.1989-1998 年，内蒙古的耕地扩展到 23.10 亿公顷。这些耕地由以前的优质天然牧场转化而来。
----------------------------	---

来源：亿利资源集团基于历史数据编制

从历史上来看，鄂尔多斯的人口出现显著的波动：例如，汉武帝时期（公元前 156-公元前 87 年），鄂尔多斯的人口数量达到了 130 万，而东汉时期（公元 220 年）仅为 10 万。相比较之下，鄂尔多斯 2010 年的居住人口达到了 194 万。从历史角度来看，难以将气候变化的影响与人口压力对荒漠化造成的影响区分开来。

2.2 集体化阶段：1950-1983 年

1950 年后，土地使用权出现了根本变革。中央政府高度重视生态修复、经济发展和改善民生，这对荒漠化治理产生了深刻影响。1950-1983 年间，库布其沙漠被纳入国有土地范围，而传统的草地和耕地划归为集体土地，属于行政村所有。然而，由于沙漠十分广袤，国有土地与集体土地及社区之间的界限并不明确。

在集体管理体系下，如果集体土地处于贫瘠状态，那么当地政府可鼓励人们进行植树造林、修复植被。为了促进库布其沙漠的植树造林活动，1959 年初创立了杭锦旗沙日召苏木荒漠化治理中心，以推动库布其沙漠西部的荒漠化治理。随后，杭锦旗格更召苏木、浩绕柴达木苏木、阿鲁柴登、甘珠尔庙柠条保护区均建立了荒漠化治理中心。此外，原伊克昭盟在 1979 年也建立了伊克昭盟机械化造林总场，负责库布其沙漠治理项目。荒漠化治理面积预估达到 840 平方公里。国有土地面积在 1983 年以前出现迅速增加。

1958 年，中央政府制定了《中国西北部和内蒙古荒漠化治理计划》。根据该计划，中央政府认识到荒漠化有许多自然因素，也与人类活动息息相关，包括树木砍伐、过度放牧、不正确土地

利用。该计划结合了以下措施：在流沙中种植草木；固定沙丘；保护现有植被，预防沙化；开辟水道；清除敏感区域的积沙。政府还实施了轮牧和限制放牧的制度。政府政策支持了人们基本的燃料需求，减少了其对薪柴的依赖。此外，该计划建立了荒漠化治理体系，全面协调了土地治理和利用及荒漠化防治，该体系目前仍在中国的荒漠化治理行动中发挥着积极的作用。

为了响应中央政府的号召，当地政府制定了 1960-1969 年《库布其沙漠治理计划》及《农林水牧综合管理计划》（以上世纪 70 年代的治沙活动为重点）。这些计划和林业监管政策鼓励当地居民种植草木和蔬菜的行动，即所谓的“四旁种植”。³ 根据相关的政策法规，在集体化期间，在四旁种植树木的个人或社区可获得这些树木的所有权。与此同时，森林砍伐的行为将受到处罚。因此，库布其的每个村庄均有茂密的树林。黄河沿岸种植的树木防止了流沙进入河流内，这一区域因此也被称为“北部之锁”。

与此同时，也有许多限制或禁止开垦、种植的政策。上世纪 50 年代初期，政府发布相关条例，明确防止林地的开垦和种植，当地政府呼吁相关部门、社区及社会团体参与植树造林活动。1958-1960 年期间，建立了国有林场和治沙站来保护库布其的森林。政府参与荒漠化治理活动，并直接推进植树造林行动，动员当地的民兵和青年参与。1964 年起，伊克昭盟（鄂尔多斯市的旧称）政府界定了可用作耕地的区域，并要求农民在不适合耕种的土地上种植林木。

随着这些指南、政策和措施的实施，村庄绿化和黄河沿岸的绿化项目取得了重大进展。然而，尽管付出了上述努力，荒漠化却愈演愈烈，当地居民也因此饱受影响。一些当地政府领导决定推动土地开垦进行粮食种植，以解决粮食短缺问题，这无疑进一步加剧了土地荒漠化。集体土地所有权界定不明确及对集体土地使用的过度限

³ 四边种植指的是人们在河道两边、住宅区、路边及住处旁种植树木。

制，也抑制了有效土地退化管理的发展。

人们重新认识到长期有效的荒漠化防治体系和稳定的政策支持，以及技术创新的必要性。在科研部门、当地政府及当地社区的支持下，建立了政府主导型的技术合作平台。

2.3 分散化阶段：1978-2000 年

中国自 1978 年实施的经济改革政策（改革开放）始于农村地区。集体化农场和牧场被解散，牲畜和土地等财产被分发给农民，家庭被重组为农业生产活动的主体。尽管政府主导着经济、社会和生态发展，市场的作用也逐渐突显。中国经济的增长很大程度上依赖于活跃的私有经济和复合经济发展。在当地丰富的自然资源和劳动力资源的基础上，包括亿利资源集团在内的大型私营企业和混合制企业得以建立，这些企业通过转型及收购当地运营状况不佳的国有和集体所有制企业而不断发展壮大。这一过程对库布其沙漠的治理产生了重大影响。

1979 年，内蒙古自治区成为中国首批实施家庭联产承包责任制的地区之一。自 1980 年开始，库布其的农田被划分为“（家庭）供粮地”和“责任”地，其中集体所有土地被承包给个体农户。1982-1983 年，集体所有牲畜也被分发给农户。

1984 年，集体所有林地管理权和林业所有权也分发给农户。1989 年，政府出台“双权一制”政策，明晰草牧场的所有权、使用权和家庭承包责任制。1994 年，政府向农民和私营企业拍卖荒山和未经开垦的土地。这样一来，部分集体建造的国有林地和荒漠化治理场址的使用权归还至社区手中，土地由社区经营，或分发给农户。尽管土地属于国家或社区，从土地上获得的产品归农户所有。土地的使用权还可转让给企业、社会组织及可承包土地的大型农户。这一产权结构构成了企业-社区合作及企业参与荒漠化治理的基础。

中央政府和自治区当地政府颁布了一系列政策文件，包括《关于大力造林种草决议》、《加强改革和推广造林决议》、《关于牧区经济政策问题的通知》、《造林种草指示》、《牧区景观建设》。这些政策文件侧重加强造林种草活动，禁止开垦荒地，加强草地保护及荒漠化治理管理。这一系列文件表明，中央政府和自治区当地政府高度重视荒漠化治理工作。相关政策包括：动员当地政府机构、社会团体、私营企业及当地

社区参与防风固沙行动等政策，极大地推动了农牧民参与植树造林的积极性。

在这些政策文件的指导下，自 1979 年起，库布其沙漠实施了大量的工程项目，包括“三北防护林体系一期工程”（1979 年）、“荒漠化防治十年规划”（1991-2000 年）、“三北防护林体系二期工程”（1985-1986 年）及“三北防护林体系三期工程”（1986-2000 年）。这些工程项目整合了科学研究、实验、能力建设、经济激励措施、行政奖励和惩罚、监测和评估、社区建设及合作伙伴关系，其实施扩展了治沙规模，带来了显著的生态、经济和社会效益。

当地政府逐渐认识到促使私营企业和个人参与荒漠化防治生态修复活动的重要性。通过明晰控制、管理及获取效益的权利，当地政府确保尽量将土地承包给农户。这极大地刺激了公众保护和修复林地的积极性，进而有助于确保项目的预期效益及可持续性。生态保护与农业产业化发展的结合有助于促进集约化农业的可持续发展及加农民收入的增加。

随着市场逐渐成为影响中国经济增长的一个重要因素，亟需颁布相关法律来确保社会发展及生态修复行动。为此，中国的立法机关出台了一系列法律，包括《森林法》、《草原法》、《水土保持法》、《土地管理法》及《环境保护法》。中央和当地政府则发布了实施这些法律的相关细则和条例，例如，在颁布《草原法》之后，相继制定了多项法律文件，包括《内蒙古自治区草原管理条例》及《内蒙古自治区基本草牧场保护条例》。此外，中国还实施了《中华人民共和国防沙治沙法》，这是世界上首个专门针对荒漠化防治的法律文件，其中明确界定了土地使用者在荒漠化防治中的权利和义务。这一初步的荒漠化防治法律体系为库布其沙漠保护工作提供了法律框架。

公众宣传活动在推动库布其沙漠保护中发挥了重要作用。1979 年 3 月 12 日被指定为中国的植树节，以推动全国的植树造林活动，并改善环境，促进可持续发展，进而造福子孙后代。例如，杭锦旗每年春秋开展植树活动，领导人将动员社区劳动力参与植树造林活动。政府部门、立法机关和民间团体也组织公众参与植树种草活动，形成了强有力的组织和问责体系。企业社会责任对个人和当地政府的贡献进行了补充。亿利资源集团便是在这种背景下得以建立，且已证明

在荒漠化治理中取得了显著成就，积极地推动了沙漠管理行动。

研究方面的技术创新也在荒漠化治理策略的制定过程中发挥了重要作用。这些技术创新包括：适用于小农户的节水系统；作物育种和栽培技术的进步；放牧方式的改进；小型农具的开发；草木种植和管理方法的改善；作物种植技术的完善；及各类技术的整合。水资源不足、脆弱的生态系统及低质土地等生态制约因素，通过相关技术的开发得以解决，这些技术可节约水和土地面积，实现集约化栽培，减少了放牧地的压力，同时开发了林业经济，形成了综合流域管理系统。

2.4 私营企业参与荒漠化治理：2000 年至今

自 2000 年起，生态修复工程已成为中国西部大开发战略的一大关键策略。中央政府采取了一系列政策措施，如加大投资，促进私营企业参与荒漠化治理活动。在当地政府的支持下（从政策、规划到基础设施建设），亿利资源集团等新兴私营企业在库布其沙漠的荒漠化防治中发挥了重要作用。

这一时期发起了大量的荒漠化治理工程项目，例如，“三北防护林体系三期工程”、“治沙工程”、“黄河中下游森林水土保持工程”、“生态环境建设工程”、“退耕还林还草工程”。2001-2012 年，当地政府开始实施综合林业保护工程项目，除了“退耕还林工程”，还包括“天然林保护工程”、“三北防护林体系四期工程”、“野生动物与自然保护项目”、“日元贷款项目”、“防沙治沙示范区建设项目”。与此同时，政府还出台了限制和禁止放牧的政策。针对畜牧业，政府则出台了舍饲和半舍饲政策，旨在推广可持续的草原畜牧养殖实践。在“两权一制”⁴政策下，政府将牧草地分配给居民，并实施禁牧和轮牧制度。这一政策大大降低了畜牧对牧草地的压力，改变了几千年以来形成的传统游牧土地利用模式。规划、投资和金融方面的政策也推动了私营企业的参与。例如，2005-2010 年间，当地政府实施了《鄂尔多斯市林业和沙产业计划》。

私营企业，尤其是亿利资源集团，逐渐从推

动库布其防沙治沙工作，过渡到利用沙漠资源开发，以生态产业及沙产业和太阳能等为主体的生态企业。其遵循的沙产业理论为“多用光、少用水、高科技、高效益”。亿利资源集团还支持和鼓励农牧社区植树造林、种草及传统中草药。沙漠绿色经济提高了资源的价值及企业效益，增加了农民收入及政府税收。第 4、5 节部分更详细地介绍了相关方面的进展。

⁴明晰土地所有权、土地使用权和家庭责任制。

3. 库布其沙漠和项目区地形

3.1 库布其沙漠

库布其生态修复项目（以下简称“库布其项目”）⁵位于内蒙古自治区库布其沙漠西部。库布其沙漠位于鄂尔多斯高原北部边缘，黄河河湾南部（图 3.1）。鄂尔多斯高原具有独特的剥蚀沙质特征，与相邻区域形成强烈对比，海拔高度在 850-2130 米之间。库布其沙漠是中国第七大沙漠，其西、北、东三面为黄河河湾（鄂尔多斯高原）所围绕，地形呈南北走向。

库布其沙漠从西到东延伸 400 公里，从南到北延伸 50 公里，总面积约为 18600 平方公里，海拔高度在 1200-1400 米（图 3.2；Du 等人，2014 年）。流动沙丘主要为格状沙丘和链状沙丘约占其总面积的 61%。库布其沙漠 81%以上为细沙（0.1-0.25 毫米）。1956-2011 年，库布其沙漠年均温度为 6.6°C，白天平均温度在-25.7°C - 31.2°C 之间（Du 等人，2014 年）。

年降水量约为 300 毫米，其中 60%-70%的降雨发生在 7-9 月间。冬季温度较低，蒸散较少。强风天气一般出现在春季（3-6 月），1972-2011 年间，每年有 30 天以上的最大风力达到 10m/s。此外，该区域的盐碱地十分普遍。

考虑到沙丘流动性及强劲风力，风沙过程尤其是风沙跃移运动十分严重（图 3.3）。在多风季节，风积物沉积于十大支流中（图 3.2）；暴雨期间，洪水冲刷部分沉积物。这些极端密集的流动往往损坏铁路、公路和工厂，沉积物也可能造成黄河的严重淤积（Du 等人，2014 年）。

唐代（公元 618-907 年）历史记载：“这里的三尺风沙使得马无法前行”，这表明了库布其沙漠非常严峻的人类居住条件。而直到二十多年前，这一片沙漠还被称为“不毛之地”。Wang 等人（2008 年）和 Tao 等人（2011 年）在《中国荒漠化状况评论》中总结了库布其沙漠荒漠化趋势的证据。尽管库布其沙漠以“人为”沙



图 3.1 内蒙古鄂尔多斯区。来源：Zheng 和 Li，2009 年。

⁵库布其生态修复项目或试点项目指亿利资源集团在库布其沙漠开展的修复活动。

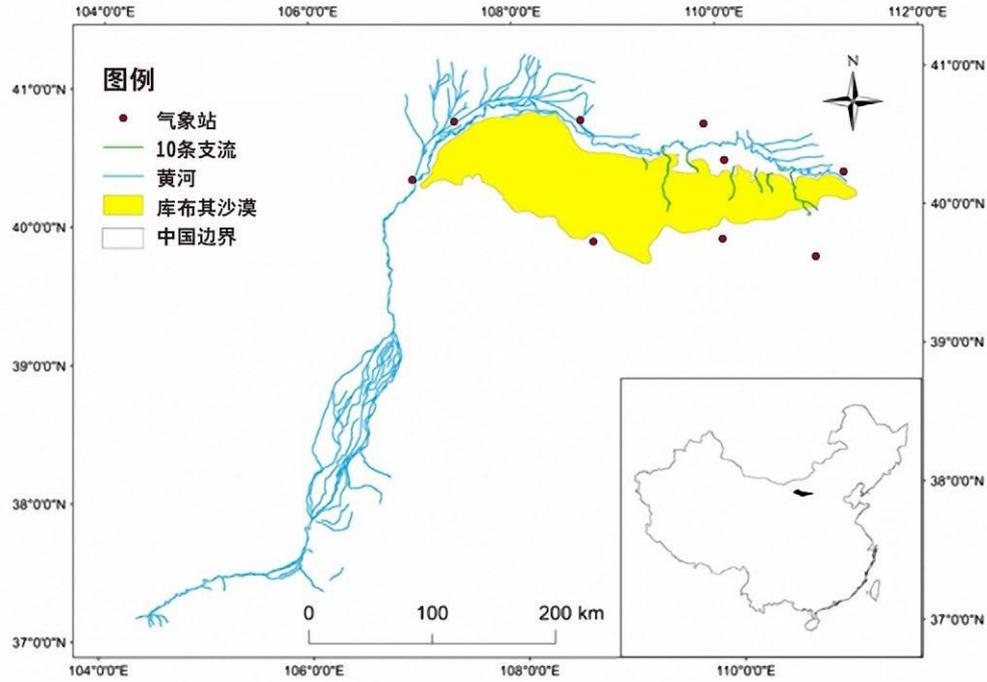


图 3.2 库布其沙漠和黄河示意
图来源：Du 等人，2014 年⁶。

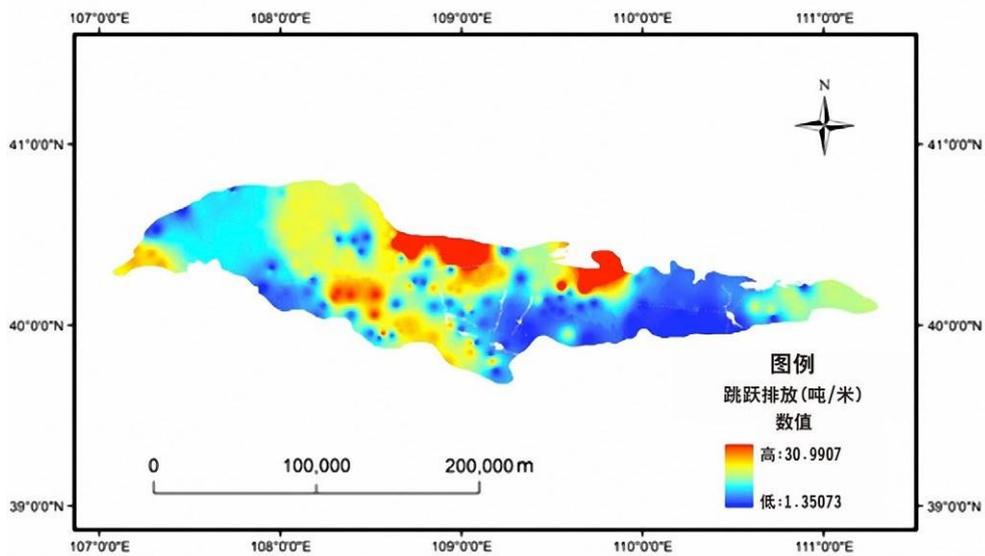


图 3.3 2001-2010 年库布其沙漠预估总跳跃沉积物排放 (吨) 的空间分布
图来源：Du 等人，2014 年⁷。

⁶该图由 Du 等于 2014 年发布，版权所有 Elsevier。

⁷该图由 Du 等于 2014 年发布，版权所有 Elsevier。

漠被世人所知，中国古代历史记载及考古学证据表明，库布其沙漠至少出现于 4000 多年前，远在人类定居该区域之前。随着气候变化的不断演化，出现了多个荒漠化和恢复阶段。监测数据表明，自 50 年代中期至今，库布其沙漠荒漠化程度（沙丘形成）稳步下降，从 70 年代中期的 68% 下降到 80 年代中期的 63%，再到 2000 年的 54%。主要形式是从固定沙丘演化为半固定沙丘，恢复过程则从流动沙丘向半固定和固定沙丘演化。在过去的 50 年间，该区域的畜牧（绵羊和山羊）和人口持续增长。尽管面临相关压力，80 年代后仍出现了一定的恢复面积。Wang 等人（2008 年）总结称，尽管不可否认人类影响加剧了荒漠化进程，但气候变化和地貌过程也难辞其咎。

鄂尔多斯景观由灌木草地（53%）、林地（17%）、耕地（6%）及不适宜开展农业活动的土地（24%）构成（Frisina 等人，2001 年）。重要的作物包括玉米、向日葵、谷子、马铃薯、小麦和亚麻。鄂尔多斯牧场属于典型的干旱气候，其植被由多种植物构成（91 科，340 属，647 种）。灌木包括锦鸡儿植物，荒漠草原以蒿属植物为主，气候湿润年份也可能出现羽毛草和杂类草。Frisina 等人（2001 年）列出了固定沙丘的重要植物物种及主要野生动物物种。后者包括 20 种重要哺乳动物及 113 种鸟类。绵羊和山羊约占家畜的 90%，2000 年达到 800 万头。家庭农场通过社区系统的混合农业维持生计，其中家庭与村民

开展紧密合作。农业区的农场规模一般为 14-20 公顷，拥有 20-30 头绵羊和山羊；牧区的牧场规模一般为 100-160 公顷，拥有 100-150 头绵羊和山羊。在牧区，12-20 公顷的区域将种植饲料作物，以达到固定沙丘和木材生产目的（Frisina 等人，2001 年）。每逢秋季农牧民割取当年旱柳的枝条作为冬季饲料，旱柳的 5-6 年生枝干可作为房屋建设的椽材使用。

3.2 亿利资源集团库布其项目区

亿利资源集团库布其生态修复项目位于杭锦旗。

3.2.1 地理位置

杭锦旗位于内蒙古自治区鄂尔多斯市（地级市，尽管大多为农村地区）西北部，占地面积达 18914 平方公里，地理坐标位于北纬 39°22'-40°52'、东经 106°55'-109°16' 范围内。杭锦旗西面和北面为黄河所环绕（图 3.4），东与达拉特旗、东胜区接壤，南与伊金霍洛旗、乌审旗为邻，西与鄂托克旗毗连。杭锦旗下辖 5 个镇、1 个苏木、1 个管委会，即锡尼镇、巴拉贡镇、呼和木独镇、吉日嘎朗图镇、独贵塔拉镇、伊和乌素苏木、塔然高勒管委会。

库布其沙漠横跨杭锦旗的中北部，将全旗自然划分为北部沿河区和南部梁外区。北部沿河区是中国最重要的商品粮基地之一，也是黄河沿岸



图 3.4 卫星图显示了杭锦旗北部与黄河相接及绿化区域，黄河北部区域被掩盖。该图所示宽度为 70 公里。

最大的自流灌区。南部梁外区是鄂尔多斯市重要的畜牧生产基地。库布其项目涵盖 8000 平方公里的库布其沙漠。如 Frisina 等人 (2001 年) 所描述, 该区域自然植被稀疏, 主要由抗旱、耐盐灌木和草类组成。

3.2.2 气象条件

杭锦旗气候特征属于典型的中温带半干旱高原大陆性气候 (科本气候分类法温带沙漠气候), 四季冷热多变, 冬季漫长寒冷, 夏季炎热短暂, 春季回暖升温快, 秋季气温下降显著。1 月份 (最冷月份) 平均气温为 -11.7°C , 极端低温 -32.1°C , 7 月份 (最热月份) 平均气温 22.1°C , 极端高温 38.7°C , 年均气温为 6.4°C 。

年均降水量为 280 毫米, 四季分布不均, 年降水量的 65% 集中在夏季的 6-8 月份。年均蒸发量达 2630 毫米, 其中仅 74% 的蒸发量出现在 5-10 月份。风速从西北到东南递增, 春季大风天气频繁 (每年平均有 24.6 天出现大风天气)。每年平均有 13.2 天出现沙尘暴天气。

根据杭锦旗气象站 ($39^{\circ}51'\text{N}, 108^{\circ}44'\text{E}$) 1959-2013 年的气象数据, 图 3.5-3.10 显示了年际和代际降水量、气温、大风和沙尘暴天数变化情况。年际降水量和大风频率几乎未表明任何时间趋势, 而气温有所增加, 年沙尘暴天数自 70 年代开始出现显著减少。

3.2.3 水系

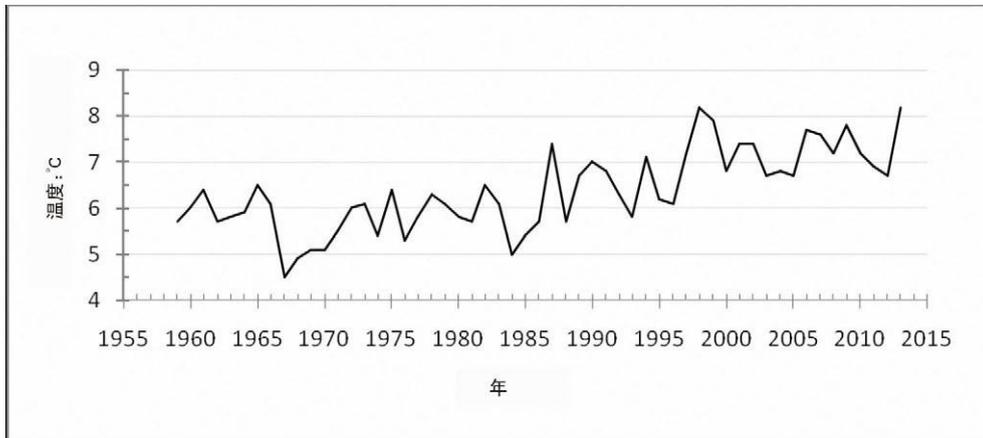


图 3.5 杭锦旗气象站年气温数据 (1959-2013 年)

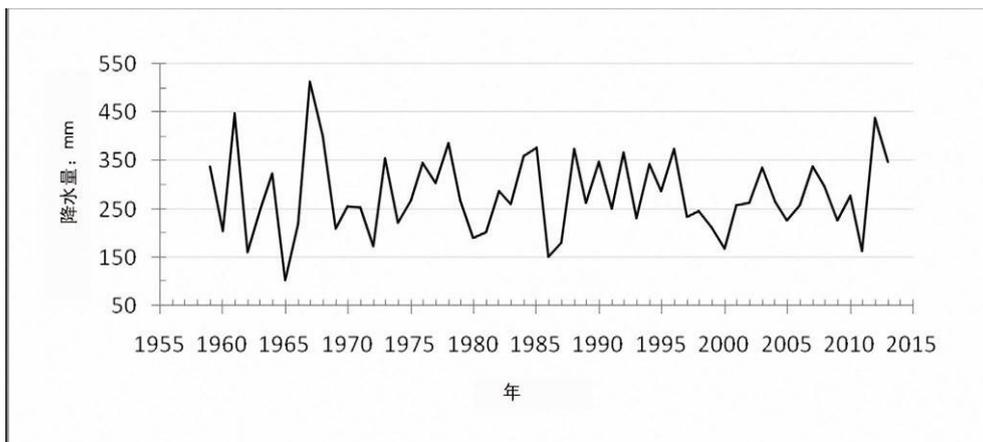


图 3.6 杭锦旗气象站年降水量数据 (1959-2013 年)

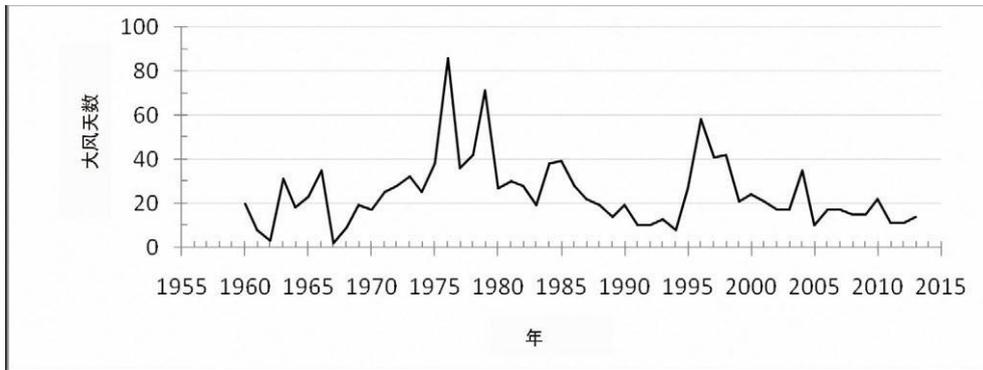


图 3.7 杭锦旗气象站年大风天数数据 (1960-2013 年)

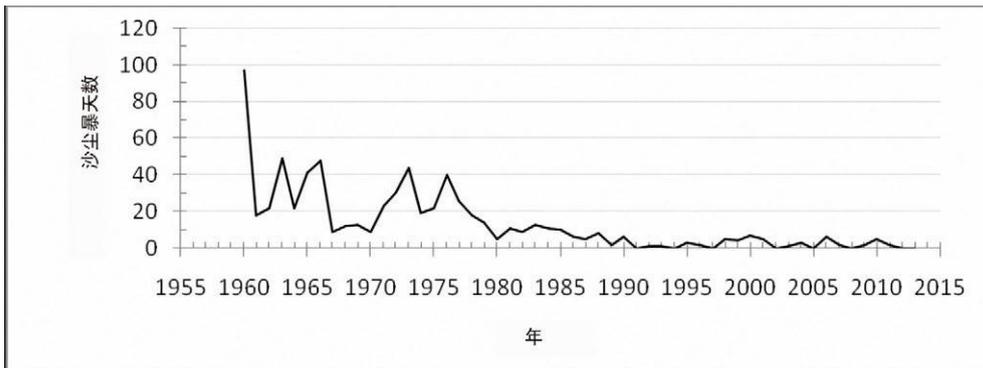


图 3.8 杭锦旗气象站年沙尘暴天数数据 (1960-2013 年)

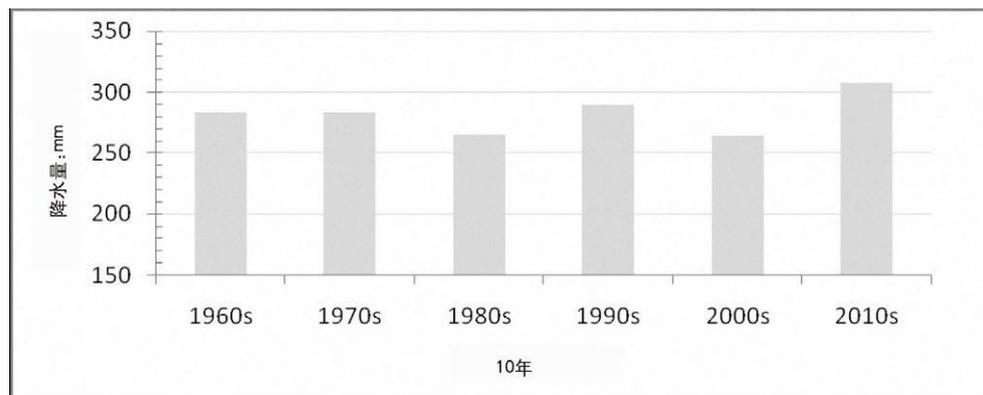
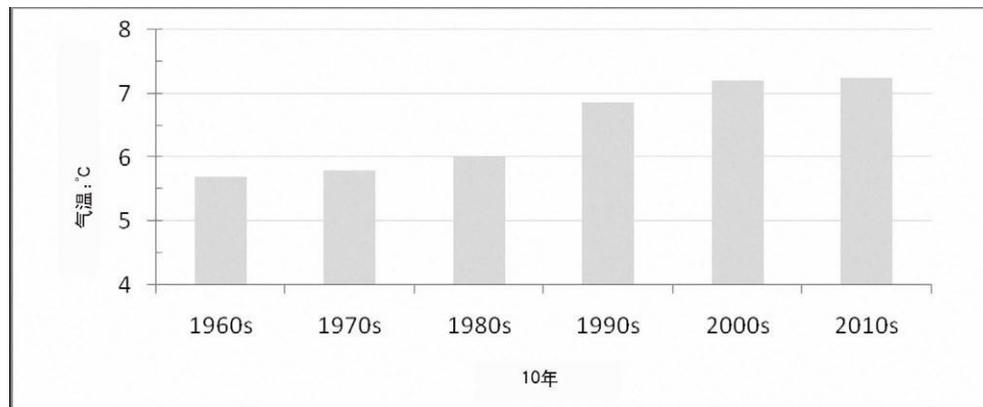


图 3.9 杭锦旗每 10 年年均气温 (上) 和降水量 (下) 数据

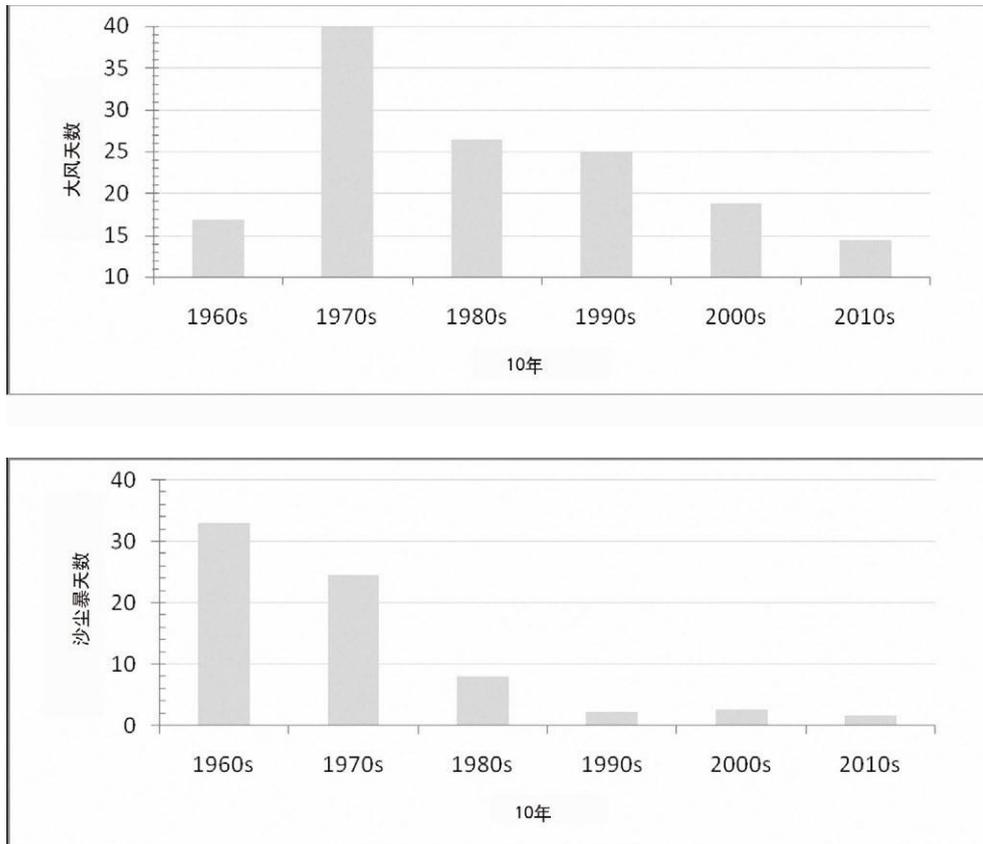


图 3.10 杭锦旗每 10 年年均大风和沙尘暴天数数据

该区域有 25 条河流，包括黄河、巴拉贡沟、毛不拉孔兑、摩林河、陶赖沟。这些河流可划分为两类：外流水系，包括黄河及其支流、巴拉贡沟、毛不拉孔兑；内陆水系，包括摩林河和陶赖沟。巴拉贡沟是一条季节性河流，流域面积达 70.4 平方公里，主沟长 27 公里，年均径流量达 232300 立方米。毛不拉孔兑也是一条季节性河流，流域面积达 1262 平方公里，主沟长 111 公里，平均比降为 4.4%，年均径流量达 757 万立方米，年均输沙量 210 万吨，土壤侵蚀模数为 1660 吨/平方公里，径流模数为 6000 立方米/平方公里/年。黄河流经杭锦旗西部和北部边界，冰冻期为 90-120 天，年均径流量达 306 亿立方米，平均输沙量为 1.24 亿吨。内陆摩林河流域面积达 5220 平方公里（在杭锦旗约占 3220 平方公里），主沟长 81 公里，平均比降 2.07%，年均径流量 861 万立方米，年均输沙量 84000 吨。陶赖沟主沟长 86 公里，平均比降 4%，流域面积为 905 平方公里，年均径流量 362 万立方米。

数据来源：杭锦旗水利勘测设计团队和杭锦

旗水资源总体规划（内蒙古自治区，2005 年）。

3.2.4 水资源

由于属于沙漠气候，库布其沙漠的水资源十分有限。水资源总量仅为 4.51 亿立方米，约占鄂尔多斯市总量的 19.1%。南部丘陵区和中部区域的水资源（地表水和地下水）低于北部平原区。

就鄂尔多斯高原而言，杭锦旗水资源相对较丰富。黄河流经杭锦旗 4 镇 1 苏木的北部边界，河道长达 254 公里。年河道流量为 31 亿立方米，其中黄河水利委员会向杭锦旗抽调 4.1 亿立方米水源用于农业灌溉。

杭锦旗水资源数据表明，2005 年和 2010 年 12 个需水单元的水资源供需平衡导致总供水量达 7.158 亿立方米，包括 2.729 亿立方米地下水和 4.429 亿立方米地表水（表 3.1）。7 个单元的供水量大于需水量，但 5 个单元水资源不足。水盈余地区主要分布在沿河区，及巴音乌素苏木梁外区。

表 3.1 杭锦旗水资源供需分析 (百万立方米/年) ，表明水资源盈余或不足区域

评估单元	可用水资源		基准年 (2005 年)		规划年 (2010 年)	
	地下水	地表水	需求	盈余或不足	需求	盈余或不足
柿锦淖尔乡	31.44	11.60 ¹	28.168	14.872	41.441	1.599
独贵塔拉镇	36.42	18.20 ¹	39.524	15.096	256.228	-201.608
呼和木独镇	11.35	146.55 ¹	146.978	10.922	100.141	57.759
伊和乌素苏木	51.57	5.864	21.281	36.153	38.316	19.118
浩绕柴达木苏木	41.73	0.837	19.684	22.919	35.441	7.126
塔然高勒乡	9.79	2.08	15.303	-3.433	35.400	-23.530
四十里梁乡	15.71	0	19.424	-3.714	34.915	-19.205
阿门其日格乡	3.16	0	10.7434	-7.583	19.354	-16.194
吉日嘎朗图乡	16.68	228.45 ¹	229.226	15.904	146.280	98.850
巴音乌素苏木	43.80	0.415	10.480	33.735	22.396	21.819
巴拉贡镇	5.27	28.552 ¹	28.933	4.889	29.855	3.967
锡尼镇	6.01	0.324	4.459	1.875	7.694	-1.360
总计	272.93	442.872		574.179		767.459

¹来自黄河

来源：杭锦旗水利勘察设计团队；杭锦旗水资源总体规划（内蒙古自治区，2005年）

4. 沙漠生态修复

4.1 发展之路

上世纪 80 年代末，现任中国人民政治协商会议常务委员、前中华全国工商业联合会副主席及亿利资源集团董事长王文彪先生发起了生态修复活动。当时（1988 年），王文彪先生是杭锦旗盐场一家采盐厂的经理。盐场由 18 平方公里的沉积物构成，这些沉积物中不仅富含盐分，还含有芒硝和天然碱等矿物质资源。这些沉积物位于沙下 2-4 米深处，在使用盐水冲洗、重新结晶后，可制成工业盐。由于缺乏电力、水或道路基础设施，采盐厂面临持续的积沙威胁。为此，王文彪先生发起了治沙工程，旨在保护盐场和采盐厂。王文彪先生从每吨盐的收益中拿出 5 元（人民币）重新投资植树活动，组建了一个 27 名林业工人的团队，这一行动产生了积极成果。

然而，另外一个更大的问题是运输。盐场距离火车站的直接距离仅为 65 公里，但车辆行驶的实际路程达 350 公里，平均车速仅为 10 公里/小时的。这些凹凸不平的道路持续面临积沙威胁，且随着流沙和流动沙丘处于不断变化。货车频繁陷于流沙之中，造成交货延误。大多数的采盐盈利也因运输成本而流失。

为此，王文彪先生提议修建一条联通工厂与乌拉山火车站的长达 65 公里的公路。这一方案获得了杭锦旗政府的支持，亿利资源集团在该项目中投资了 7000 万元。由于可借鉴的经验较少，该项目首先推平了路基，有时甚至遇到 10 米高的沙丘。然而，施工工人第二天早上醒来，可能会发现前一天完成的工程竟消失无踪，因为风沙很快将其完全覆盖了。为此，王文彪先生认识到，在修建道路的同时，还应实施保护措施。

尽管树木可用于固定风沙是一个常识，但种植哪种树木及如何种植等相关可借鉴经验甚少。尽管从外国进口了 20 多种不同的沙漠树种，早期种植抗旱树种的尝试均以失败而告终，这些树木往往在种植后不久便死亡。这里存活下来的树木必须具有耐旱、耐寒和耐碱性特征。虽然使用废弃酒瓶注水的做法提高了存活率，但往往效率过低。王文彪先生随后决定深入沙漠，借鉴牧民的传统知识。他了解到，甘草这一传统中药材对库布其沙漠的条件适应性极强。为此，他带领的团队部署了生物治沙工程措施，包括在公路两侧以



图 4.1 从东部俯瞰项目区，显示了黄河和人工林。

网格形式设置了由从农业区收集的秸秆制成的沙障，并在公路两旁种植乌柳、柠条锦鸡儿和北沙柳等树种。此外，种植范围扩大到公路沿线 65 公里长、4 公里宽的绿化带（面积达 13340 公顷，旨在保护新建的沥青公路，图 4.1），这些区域种植乌拉尔甘草、柳属等植物。这一种植举措获得成功的关键在于采用了水冲法和牧草飞播法等创新种植方法（参见下文）。公路沿线及周边区域建设了水电和通讯基础设施。这是第一条横跨库布其沙漠的公路（图 4.2），有助于采盐厂的发展，促成了亿利资源集团的建立，为周边区域 10 万农牧民带来了新的发展机遇，例如，通过改善市场准入、降低投入成本，吸引了外部投资，并为该区域创造了新的就业机会。

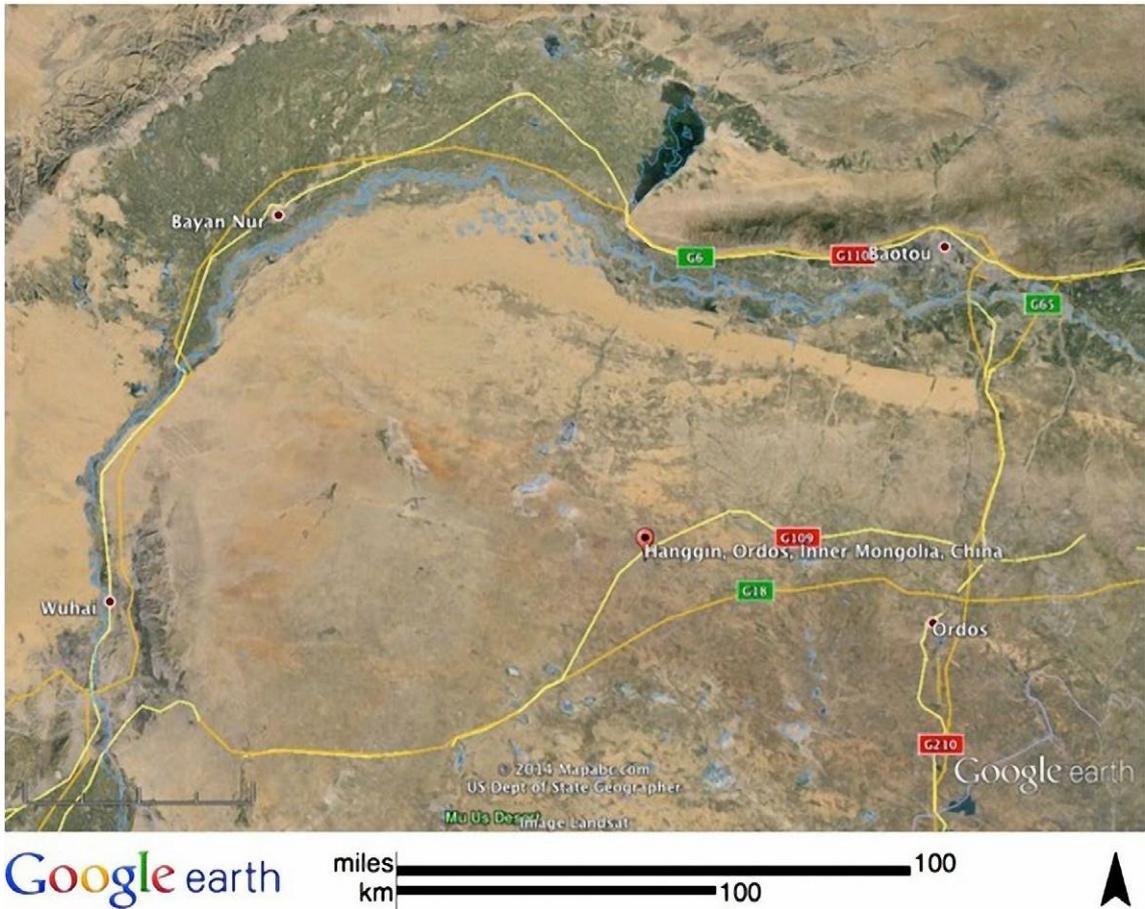


图 4.2 地图显示了杭锦旗与包头的关系、当前的道路网络及黄河
来源：谷歌地球 2015 年。

4.2 技术创新

亿利资源集团等机构进行的一系列技术创新是沙漠修复进程的关键。例如，亿利资源集团获得了 13 项技术奖项（亿利资源集团，2013 年）。随着时间的不断推移，引进的植物种类也从最初的 10 科、8 种增加到 20 科、77 种。

植树方面取得的一大重要突破是开发了“水冲法”，即将水冲入深沙层，随水将沙柳等灌木枝条插入沙中。“水冲法”可直接在流动沙丘上实施植树造林，可以促使树木存活率从 20% 上升到 85% 以上，降低了种植成本，甚至可将树木种植于高大沙丘上（图 4.3）。此外，这一方法还有



图 4.3 使用水冲法种植沙柳



图 4.4 使用沙柳、秸秆等材料捆绑而成的网格沙障技术

助于加快种植速度（仅需要 30 秒），每人每天可种植 0.5 公顷树木（亿利资源集团，2013 年）。

另外一大促成因素是用于固定沙丘的捆绑式平铺沙障技术，可采用沙柳、芦苇、秸秆等材料进行捆绑（图 4.4）。将 1×1 米或 2×2 米及 10-15 厘米高的网格沙障铺设于沙面上，其表面粗糙度为对照区域的 165-190 倍。这一技术在降低风速和风沙运动方面具有简单、快速、有效且成本低廉的优势。截止到 2013 年，这一技术的应用示范区面积达到 33 公顷。

库布其项目开发了一系列甘草种植生产实践，包括种质资源、苗木移植、田间管理、甘草最佳收获期（图 4.5）。这包括四项技术标准（生态环境质量、甘草播种深度、甘草幼苗质量和甘草质量），160 份甘草生产和质量管理文件，81 种标准操作规程及多项专利。

1998-2006 年间，亿利资源集团采用飞播造林种草，绿化面积达 30000 公顷，不同的种子采用不同的处理措施，同时使用 GPS 导航系统进行飞播作业。

为巩固植树造林成果，造林初期需要杜绝部分或所有的人类活动。根据需要，建立了三种

围封形式来保护和管理飞播区：全封闭区，禁止所有人类活动，如放牧或土地开垦，根据林地类型，实施期限为 5-7 年到 10-15 年不等；半封闭区，在特定季节允许部分人类活动，但前提是不得导致生态破坏；轮流封闭区，在全封闭和半封闭之间轮换。

2003 年，亿利资源集团与内蒙古大学合作，制定了锁阳和唐古拉特白刺等草药种植的标准化规程，以进行锁阳种子催芽，并移植白刺。确定了影响锁阳质量的主要活性成分，并利用这一技术建立了 200 公顷的标准化锁阳种植基地。

此外，还开发了立体种植技术，将防护带与草药相结合。甘草和其它中草药被种植在防护林带中，防护林带主要由北沙柳、沙枣、山杨和红枣等构成。库布其项目建立了优化利用沙漠景观体系，平衡近期、中期、长期生产效益，并实现生态、经济和社会综合效益。

与此同时，建立了由饲料和饲料作物种植组成的生态产业链，以扩大畜牧业，其中牲畜产生的粪便不仅可生产有机肥料，还可用于沼气发电。为提高活力而平茬割取沙柳、柠条等灌木可加工成饲料。



图 4.5 甘草种植

就植物育种来看，亿利资源集团与当地政府和居民开展分散化合作，涉及企业、合作社、农牧民。公司提供复合饲料和育种技术，合作社、农牧民则负责实际养殖和管理。此外，公司还负责统一采购和市场销售。

为修复盐碱土地，开发了具有成本效益的方法，使用耐盐碱植物来恢复植被。除了甘草，以下 10 种植物也适合采用：枸杞、沙棘、胡杨、沙枣、水苋菜属和梭梭。此外，还发现这些植物有助于降低土壤盐度，改良土壤特性（亿利资源集团未公开发布信息）。

温室技术（图 4.6）的开发最初是为了进行培育苗木，随后也用于生产有机蔬菜，包括辣椒、西红柿、茄子、生菜和豇豆。此外，项目引进了先进的滴灌和支点灌溉系统（图 4.7），用于灌溉甘草、草药及温室蔬菜和水果，灌溉水是从深层

地下水中泵抽而来。

库布其项目还研制了一种通过土壤、灌木枝条、作物废料、牛粪、劣质煤生产有机肥料的方法，已生产有机肥料 260 万吨，主要用于盐碱地开垦。目前正计划建立一家年产能达 500 万吨的有机肥料厂。

认识到保护该地区植物遗传多样性的重要性，亿利资源集团正在内蒙古自治区建立我国西北地区沙生灌木及珍稀濒危植物种质资源库。其宗旨是加强沙漠地区植物资源的收集、评估、保护和利用，并进一步指导内蒙古自治区和中国西北地区的生态修复工作。这将涵盖育种、种质改良和种植方法等工程项目，调控种子和苗木市场。列出有待保护的 70 多种珍稀濒危植物种包括：沙地云杉、樟子松、沙地柏、四合木、绵刺、沙冬青、胡杨等。这一举措将为该地区可持



图 4.6 使用温室技术培育草木种苗和种植蔬菜



图 4.7 滴灌和大规模支点灌溉系统，右侧作物为甘草

续发展和文化遗产做出重大贡献。其它技术创新参见附录 1。

4.3 人工林

亿利资源集团和杭锦旗政府 1997 年开展的公路保护项目，建立了占地面积达 8000 公顷的人工林封育区，在公路两旁种植了 100 公里的网格围栏。在相邻区域，建立了 2453 公顷的沙障，种植了 1000 万棵树木，并通过飞机播种了 4000 公顷草种。沙障和植被可使风速分别降低 17% 和 62%，风蚀量减少 26% 和 71%（亿利资源集团未公开发布信息）。

根据亿利资源集团编制的库布其生态修复项目地图（图 4.9），种植了乔木或灌木的密集人工林，位于杭锦旗境内地理坐标东经 107°30′-109°16′和北纬 40°10′-40°52′范围内，主要分布于 A、B、C 三个区域。A 区域为黄河北岸（沿河 110 公里，南北延伸 20 公里），该区域主要种植了甘草及其它树木。B 区域位于伊和乌素苏木，东西 70 公里长，南北 30 公里宽，主要种植甘草。C 区域位于巴音恩格尔苏木，占地面积 225 平方公里，主要种植了树木。所有种植区域地形相对平坦，水资源充足（地表水或地下水）。

沿着黄河南岸库布其沙漠的北部边缘，亿利资源集团建立了 350000 公顷的防护林，长 242 公里，宽 5-20 公里，主要由树木、灌木和草类构成。通过种植适应当地状况的物种，在流动沙丘、平

坦沙地、沙滩及盐碱地等不同区域种植适当草木品种。大面积种植的物种包括：沙枣、柠条、白杨、甘草和沙柳。

流沙覆盖区域建立了多种防护林：1）北沙柳防护林；2）沙蒿和北沙柳格状沙障；3）樟子松和北沙柳格状沙障；4）樟子松和沙枣格状沙障；5）樟子松和枝岩黄芪芦苇沙障；6）樟子松和北沙柳芦苇沙障。沙丘区的防护林包括：1）旱柳和蒙古岩黄芪；2）北沙柳和细枝岩黄芪；3）旱柳；4）沙枣；5）北沙柳。



图 4.8 黄河防护林带和绿化区

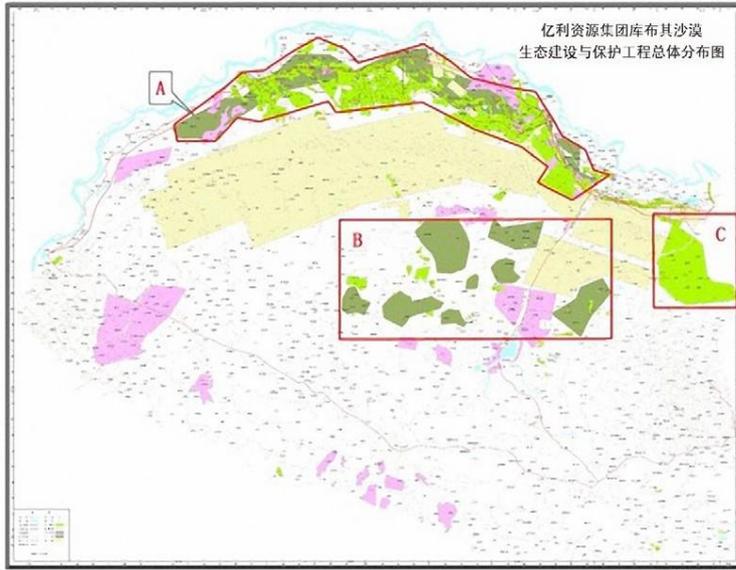


图 4.9 库布其生态修复区，主要种植区域：A 区域为黄河南岸，B 区域位于伊和乌素苏木，C 区域位于巴音恩格尔苏木。浅绿色表示种植树木，深绿色表示种植甘草，紫色表示植被固沙。

格状沙障加之植被的恢复，可降低风速和 wind 沙运动，进而防止沙丘运动。这一作用有助于固定或半固定沙丘上一年生先锋植物的生长，包括沙蓬、虫实、雾冰藜、一年生珍珠猪毛菜。此类先锋植物的生长有助于其他多年生植物的发育，及保护其它沙生植物（适合在风沙环境中生长的植物）生长。根据亿利资源集团的报告，格状沙障内蒙古岩黄芪、北沙柳、旱柳、锦鸡儿属等植物的存活率达到 80%以上，而美洲黑杨的存活率达到 74%。

4.4 生态经济学

甘草、旱生植物（适合在沙漠环境中生长的植物）及草药的种植有助于为制药业提供原材料，并带来年收益（参见第 4.2 节）。大量的植物还可提供牲畜饲料来源。根据鄂尔多斯林业资源评估，示范区的沙质林地价值 1500 元（人民币）/公顷（约 240 美元/公顷）。这意味着项目林业区总价值达 3 亿元人民币（约 4800 万美元）。示范区种植有 750000 公顷的锦鸡儿属和北沙柳。根据沙漠地区 280 元/公顷（人民币）的灌木价值，这些灌木总价值将达 1.71 亿元人民币（约 2740 万美元）。

防护林的诸多作用，包括预防和降低风力、减少水蒸发

及调节区域微气候等，成功提高了甘草产量，进而带来了可观收益和经济效益。到 2013 年，甘草种植技术已应用于 80000 公顷的半野生甘草种植基地、2500 公顷的密集种植基地及 43000 公顷的野生种子收集基地的建议。根据亿利资源集团的计算数据，示范区的防护林可增加 16%的甘草产量。2014 年的甘草产量为 1656 吨，防护工作带来的效益相当于 105 万元（168000 美元）。



图 4.10 黄河南岸人工林地图（图 4.9 中的 A 区域）

5. 相关企业

5.1 基础设施

亿利资源集团实施了通过道路系统分割沙漠的策略（图 5.1）。根据该策略，他们修建了 5 条公路，总长达 234 公里，同时开发了沿路和周边区域的相关基础设施，包括水电和通讯设施。这

些道路以总长达 242 公里的绿色生态屏障作为支撑。

亿利资源集团投资 1.1 亿元修建了亿利东方学校，引起广泛关注。这是一所现代寄宿式学校，整合了幼儿园、小学、初中、高中和职业教育。亿利东方学校位于独贵塔拉镇，建筑面积达 29000 平方米（图 5.2）。



图 5.1 黄河公路



图 5.2 亿利东方学校和住宅区

5.2 制药

亿利天然药业集团是亿利资源集团重要的产业部门之一，其业务包括三大主要组成部分：1) 种植和加工绿色中草药，主要以甘草为主（图 5.3）；2) 研发、生产和销售；3) 批发、零售和配送。公司网络拓展到中国的许多城市和地区，公司总资产达 20 亿元。2013 年，销售收入约为 60 亿元，盈利额达 1.5 亿元。“梁外甘草”这一甘草品牌在日本、韩国和东南亚各国均享有盛誉，

在食品和食品添加剂市场中占据着较大的市场份额。通过旱生植物生产和加工的天然药用植物达到了欧盟药用植物标准。

亿利天然药业集团下设有三家生产企业，共有 500 多种经官方认可的产品，其中包括 20 多种拥有自主知识产权的中药和内蒙古药材，并在鄂尔多斯市设有 6 家制药分销企业。亿利天然药业集团计划充分整合全产业链，成为中国中药和内蒙古医药行业及中药材料贸易物流行业中的领先企业。





图 5.3 基于甘草的制药业

5.3 建筑材料

亿利资源集团有权使用库布其沙漠 120 公顷的风积沙资源，用于开发与沙岩类似自然外观的沙质涂层。这些产品具有优良的抗风化、抗污染、自清洁和灵活特性（亿利资源集团，2013 年）。产品符合 JG/24-2000 国家标准，可广泛用于建筑业的各种内外装饰工程（图 5.4）。集团部署了高端现代自动生产线用于建筑材料生产。

此外，集团产品还包括将聚氯乙烯与北沙柳木纤维相结合的复合建筑材料。这种复合材料具有木材和塑料的双重属性，其优势体现在以下方面：环保、防蛀、抗菌、耐火及优良的机械性能，且生产成本较低。

另一种风积沙产品是石油压裂支撑剂（一



种液体制剂，用于水力压裂）。该产品具有高强度、低密度和低摩擦的属性（亿利资源集团，2013 年）。产品性能指标达到 SY/T5108-2006 标准。此外，该产品可替代陶粒，成为主要的压裂支撑剂，共获得 40 项国家专利。



图 5.4 用沙子制作的建筑材料



图 5.5 亿利资源集团太阳能和风能等可再生能源投资

5.4 能源

亿利资源集团目前正在投资建设库布其地区的太阳能和风能等可再生能源企业（图 5.5）。鄂尔多斯正利新能源发电有限公司正在建设 110 兆瓦的大型光伏电站，该项目将分两期进行，第一期为 10 兆瓦，第二期为 100 兆瓦。在投入运营后，该项目预计每年将节约 17650 吨标准煤，年烟尘、二氧化碳、二氧化硫和二氧化氮排放预计将分别减少 107 吨、32930 吨、241 吨和 159 吨。

亿利资源集团与中国科学院广州能源研究所合作开发了生物质气化技术，该技术充分利用北沙柳枝条产生的生物质资源。2013 年，气化示范单位的沙柳生物质使用量达到 10000 吨。

5.5 沙漠生态旅游

库布其七星湖沙漠公园（图 5.6）是亿利资源集团在杭锦旗开发的一处沙漠生态旅游度假区，其交通便利，与主干道及三大机场相联通。七星湖沙漠公园被评为国家 AAAA 级旅游风景区，且获得了诸多称号，包括：“中国首批低碳生态旅游示范区”、“国家水娱乐区”、“中国沙漠旅游实验基地”、“鄂尔多斯国家沙漠地质公园”及“中国沙漠（七星湖）汽车越野训练基地”。2011 年，七星湖沙漠公园被确定为库布其国际沙漠论坛的永久会场。七星湖沙漠公园覆盖面积达 890 公顷，包括 115 公顷的水域、41 公顷的芦苇湿地、380 公顷的草地及 384 公顷的沙漠区域。



图 5.6 库布其七星湖沙漠公园



图 5.7 库布其沙漠七星湖度假村



图 5.8 库布其国际沙漠论坛会议中心

这一综合设施区包含五星级七星湖沙漠酒店（七星湖度假村），占地面积达 40000 平方米，共 154 间客房，可接待 700 位游客，并可提供宴会和会议设施，年游客接待量达 65000 人次（图 5.7）；库布其国际沙漠论坛会议中心（图 5.8），占地面积达 14000 平方米，可容纳 1200 人，包含同传设施；沙漠科技博物馆，展示了最先进的荒漠化治理概念和技术；沙漠植物园，种植有来自全球各地的 500 多种濒危沙生植物。七星湖沙漠公园的湖内养殖有各种水禽和水草。

5.6 其它企业

其它企业包括盐业和有机肥料生产，如第 4 节所描述。亿利资源集团还建立了水务公司来修建水库。在冰川融化期间，来自黄河的溢水将流入滞洪区，这些水随后将用于灌溉。工业废水经水务公司处理后也可用于生态修复项目。水务公司的宗旨是

充分利用水资源，包括地下水和地表水。

5.7 企业联系

企业之间的资源流动是项目成功的关键（图 5.9）。甘草等沙漠修复产品将为制药业提供货源。基础设施开发，包括修建道路、通讯和供水灌溉设施等，有助于沙漠修复工程。通过荒漠化防治的生态修复工程反过来将惠益基础设施建设。沙漠修复工程还将保护建筑材料业、工厂、矿山、住房和学校的基础设施免受沙尘暴和荒漠化威胁。此外，还可节约疏浚黄河淤沙的成本。沙漠修复工程还有助于推动生态旅游。采盐业是早期沙漠修复活动的主要驱动力，如第 4.1 节所描述。所有企业获得的利润将用于支持沙漠修复活动。

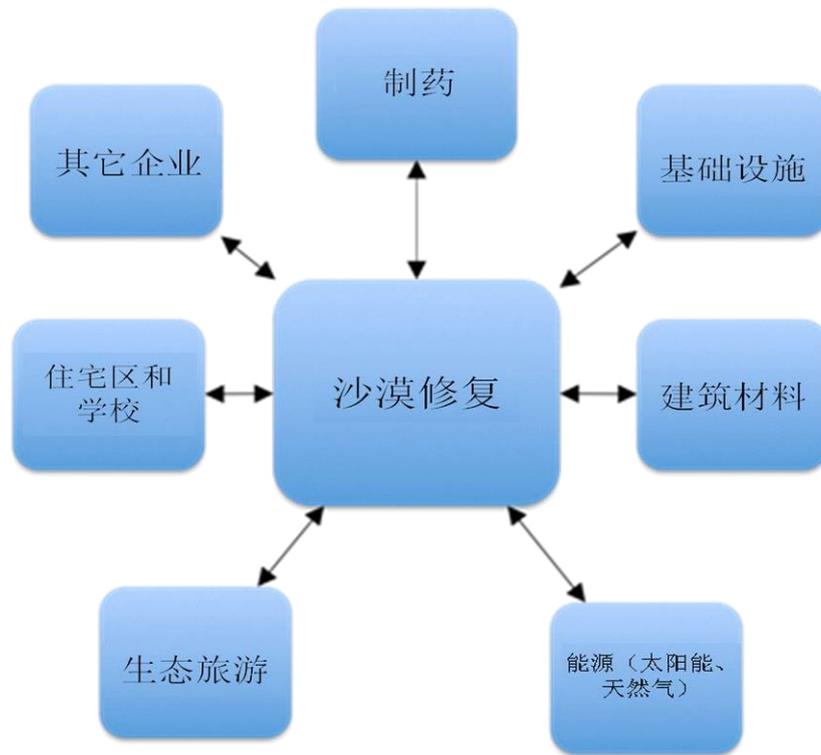


图 5.9 与库布其项目相关的各类亿利资源集团企业

6.政府-私营企业-社区合作伙伴关系

政府-私营企业-社区合作伙伴关系是库布其项目获得成功的关键。本节主要阐述库布其项目的历史和制度背景、政府和企业之间的关系及政府-私营企业-社区合作伙伴关系。

6.1 历史政策和制度背景

如第 2 节所述，中国各级行政管理机构均高度重视生态修复工作。他们认识到，改善生态环境是实现美好生活和区域经济发展的前提条件。与此同时，政府、企业和当地社区达成一致认识，只有在库布其居民达到基本生活水平以后才有望实现生态环境改善的目标。

自上世纪 80 年代初期起，中国一直在推进非集体化和市场化改革。中央政府逐渐将财政大权下放给当地政府，赋予其相对自主的经济和行政决策权力。库布其荒漠化防治工作作为一种公共服务受到高度重视，且重视程度不亚于教育、基础设施和社会保障等其它服务。杭锦旗在项目开展之前经济相对比较落后。90 年代末，当地政府收益还不足以用于支付公务员和教师的薪酬和津贴。这使得当地政府不得不增加额外的预算。当地政府 90 年代末用于解决财政困难的策略之一是拍卖荒山荒地，所得收益则用于投资生态修复工程（参见第 2 节）。自 90 年代起，当地政府明晰了耕地、草地和非耕地的使用权，并将其承包给个人。此外，当地政府还采用“谁管理、谁受益、谁造林、谁拥有及联合造林、共同所有”的政策，加速了荒漠化防治的速度和效率。

当地政府利用有限的资源最小化荒漠化防治的投入，同时最大化公共服务输出。在上世纪 90 年代，库布其荒漠化防治工作被纳入国家规划及三北防护林体系工程中（第 2 节）。对于植树造林规划中涵盖的土地，政府提供 75 元/公顷（人民币）的财政补贴。就经济回报来看，这一激励措施还不足以鼓励企业和当地精英参与荒漠化防治行动。为此，致力于荒漠化防治工作的人员将获得额外奖励，例如，如果植树造林面积达到 333 公顷（5000 亩）且保护良好，那么该家庭或企业将有权安排其子女（或年轻人）在杭锦旗政府附属机构任职。

精神激励和认可一直是推动私人投资沙漠修复工程的驱动力。例如，王文彪先生 1995 年 5 月

获得了“内蒙古自治区劳动模范”称号；2000 年荣获“全国绿化工作劳动模范”称号，并获得全国“五一”劳动奖章；2012 年再次获得“全国绿化工作劳动模范”称号。1995 年，王文彪先生是杭锦旗获得省级荒漠化防治工作劳动模范的第一人；也是杭锦旗获得该称号的唯一一人。为了认可王文彪先生及其亿利资源集团团队的杰出工作，2012 年 6 月在巴西里约热内卢召开的联合国可持续发展大会上，其被授予“联合国环境与发展奖”。王文彪先生随后还在 2013 年 9 月召开的《联合国防治荒漠化公约》第十一次缔约方大会上荣获了联合国颁发的首届“全球治沙领导者奖”。库布其项目在荒漠化防治工作中取得的成就获得了国际社会的广泛认可。

作为中国能源开发中心（大多为煤炭和天然气），鄂尔多斯业已成为中国最富有的地区之一，这也提高了政府和公众对环境改善、治沙和社会服务改善方面的期望。政府企业政策的变更推动了公私合作伙伴关系的建立。2000 年以前，防沙项目主要由精英家庭资助，但这引发了范围不足、非正式组织、监管不完善和成本高昂等问题。然而，自 2000 年后，企业取代精英家庭，成为政府亲商政策下防沙项目的主要投资主体。投资包括：鼓励土地转移；提供技术指导；限制煤矿采矿；在建设基础设施时保护生态系统；增加生态破坏补偿，如洪涝。

此外，库布其还受益于 90 年代中期起实施的分税制（其为当地政府提供激励措施，推动当地经济发展），因为当地政府和中央政府能够分享新创 GDP 所带来的财政收益。90 年代中期，杭锦旗和鄂尔多斯市是中国的极端贫困地区，严重依赖中央政府和省级政府的补贴。自 2000 年以来，鄂尔多斯市取得了显著经济进展，实现了中国最高经济增长率。快速经济增长带来的当地财政收入的增加反过来也加强了当地政府为防沙项目和农村发展提供公共服务的能力。

6.2 公私合作伙伴关系

资源和环境管理近期成为了中国公众的一个热门话题。中国政府认识到，资源和环境的可持续管理是实现“中国梦”的前提，也是公共服务的重要组成部分。然而，如果政府单独开展防沙项目，那么其可能面临复杂的实施安排、高投资成本及效率低下（由繁杂程序导致）等挑战。公

私合作伙伴关系则可克服这些局限。

亿利资源集团和政府以下领域建立了综合合作伙伴关系：

1. 融资。中央和当地政府提供了必要政策工具，与银行或金融企业及亿利资源集团建立了合作框架。其中包括与国家开发银行、中国农业银行、中国工商银行、中国建设银行及其它政府或商业银行开展合作。这一合作框架为亿利资源集团的自我发展和沙漠修复活动提供了财务保障。
2. 投资安排。中央和当地政府向私营企业开放了一些项目，例如防治荒漠化公共项目、生态修复项目和植被恢复项目。亿利资源集团可作为国家项目的服务提供商或承包商。这为亿利资源集团提供了新的盈利来源。例如，亿利资源集团中标建立北京冬季奥运会会场生态修复项目。
3. 技术创新和服务。上世纪 90 年代，主要由政府负责为企业提供技术服务。然而，自 2005 年起，亿利资源集团成为荒漠化防治技术研发的主要参与者，积极为灌溉水使用和管理引进先进的国际技术。与此同时，项目与高校合作开发荒漠化防治技术（参见第 4 节）。2014 年，亿利资源集团建立了沙漠研究所，这表明企业已成为荒漠化防治和沙产业技术的主要研发商。另一个事例是，拟建的我国西北地沙生灌木珍稀濒危植物种质资源库。政府仅需提供必要的资金，或协调相关服务，促进产业技术的开发。
4. 政策和项目。亿利资源集团已成为主要的利益相关者，参与各级政府的荒漠化防治、制度创新和治理改革。
5. 资源管理。亿利资源集团建立了森林保护系统，与政府相关部门合作建立森林公安派出所。森林公安和亿利资源集团负责管理森林公安派出所，亿利资源集团将资助森林公安派出所在偏远沙漠地区的工作。这是政府管理一项创新，有益于亿利资源集团与政府之间的良好关系。

概括说来，在沙漠生态系统治理中，政府作为主管部门；社会群体提供劳动力，指导集体社区行动，落实沙漠治理行动；企业则提供资金，充当市场力量；政府同时保护企业利益，包括经济效益。

6.3 私营企业-社区合作伙伴关系

6.3.1 作为社区一部分的私营企业

亿利资源集团是库布其沙漠社区的重要组成部分。公司最初创立于库布其沙漠，其企业价值（物质资源和精神）扎根于此。亿利资源集团与沙漠建立了紧密的联系，1) 公司的核心业务远远超出了沙产业的范围；2) 企业总部目前位于北京，具有覆盖全国的能力；3) 其产品和服务目前已进入国际市场。亿利资源集团仍被视作“沙漠企业”，这构成了企业文化的一部分。

企业创始人和早期企业家均来自库布其沙漠地区，亿利资源集团在社区公共基础设施方面进行了大量投资。其中一个事例是，亿利资源集团 2009 年捐赠 1600 万美元修建亿利东方学校，这是一所向农牧民子女开放的现代学校，结合了幼儿园、小学、初中、高中、技校和党校。学校接收了 400 多名幼儿园学生和 800 名小学生。

2008 年黄河决堤时，亿利资源集团将种植有菘蓝（板蓝根）的土地捐赠出来，用于修建新的独贵塔拉镇，供流离失所的牧民定居。亿利资源集团投资 2.85 亿美元，并在政府的支持下修建了 200 公顷的沙漠村庄，帮助 36 个牧民家庭定居，并为每个家庭提供配备有水电、公路和卫星接收器等设施的 106 平方米的住房。亿利资源集团生态项目部协助调动当地农牧民，为其提供生产和生态修复方面的技术支持，以获得相关收益，并帮助其从传统生活方式过渡到现代生活方式。对于遗留下来的牧民，则为其提供种质和“围栏放牧”相关的生态教育。此外，还进行了基础设施投资（包括黄河大桥），并在沙漠中铺设道路。

100000 多农牧民通过各种方式，成为了库布其项目绿色经济的最大受益人之一。其中包括：将沙漠租赁给企业，成为利益相关者；开发全国沙漠旅游，成为旅游业主；种植林木和草药，建立小企业；农业活动，如种植蔬菜和水果，或养殖牛羊。向企业和旅游业供应农畜产品，包括肉类、蛋类、家禽、牛奶和绿色有机食品。

荒漠化防治和生态修复方面的巨大投资带来了大量就业，亿利资源集团为鄂尔多斯市的生态修复工人开展了 100 万人次的培训。亿利资源集团组织了 200 多个施工队参与全国的生态修复产业。密切的社区关系十分重要，例如通过工人合作社小组，组织农民工开展年度季节性植树种草

活动。这些安排包括在商业合同基础上及通过生态管理合作伙伴关系进行试运营。公司还聘请了林业部门的沙站专家，为工人小组提供详细的技术指导。

亿利资源集团的领导层为其它企业参与库布其修复和治理项目提供了范例。公司推动了当地农民、社区和私营企业集体参与沙漠生态修复活动，形成了全国和全球影响（如通过联合国）。私营企业目前为鄂尔多斯市的植树造林工程提供90%的资金，亿利资源集团则逐渐缩减了这一方面的投资。内蒙古有2000多家林业融资企业，承担了90%的植树造林任务。

6.3.2 企业与其它群体的合作伙伴关系

尽管创立于偏僻的库布其地区，亿利资源集团相继联合了多家大中型国有和私营企业，包括中国神华集团、上海华谊集团、唐山冀东水泥集团、泛海、万达、汇源和蒙草。在掌握了推动因特网发展的商业思维后，亿利资源集团采用创新行业的融资模式来吸引投资，即少数股权计划开放式产权模式。与此同时，基于共享概念，公司尝试通过联合项目融资、联合承包及联合管理等手段创新业务模式，以期将库布其打造成为沙漠生态产业平台。亿利资源集团的愿景是，与相关行业领导者携手加速绿色经济发展。

国际合作伙伴关系正发挥着重要的宣传推广作用。2014年，亿利公益基金会（非政府机构）

与联合国环境规划署成功开展了全球环境展望（GEO-5）绿色青年夏令营活动。这一夏令营活动包括系列围绕全球环境展望主题的讲座，及库布其项目考察。这一活动旨在提高青年对全球环境挑战严峻性的认识。

与科研机构建立的合作伙伴关系，是项目在沙漠修复技术方面取得进展的关键（参见第4节），包括沙漠植物种质资源库的建立。亿利资源集团建立了自己的沙漠研究所，聘请了内蒙古当地院校专家开展相关工作。此外，亿利资源集团还建立了国际生态学家联盟，由来自全球57个国家的生态系统管理专家构成，例如，汇聚来自以色列农业科学院（ARO）、内盖夫本·古里安大学、中国农业大学、北京林业大学、中国科学院沙漠研究所、中国科学院新疆生态与地理研究所、内蒙古农业大学及中国林业科学研究院的专家学者。该联盟帮助建立了全球沙漠研究的科技网络。

整体而言，库布其的科学合作伙伴方法（与各种社会主体开展合作，以支持荒漠化的法律框架为支撑）实施了Yang和Li（2015年）基于中国北方调研（表6.1）提出的成功荒漠化防治科学驱动型制度变革的主要原则。Yang和Li（2015年）总结称，强有力的规则将造成更有效的科学驱动型制度变革。

表 6.1 成功荒漠化防治科学驱动型制度变革的三大原则和九条工作原则（Yang 和 Li，2015 年）

<p>主要原则 I. 可合作、有效和可持续地应用与拓展先进的科学荒漠化防治方法。</p> <ol style="list-style-type: none">1. 生物防治将为荒漠化防治提供重要技术支持。2. 农业防治将为生物及其它技术提供技术补充。3. 不同的科学荒漠化防治方法之间存在有效的协同效益。 <p>主要原则 II. 不同社会主体和组织之间开展有效合作。</p> <ol style="list-style-type: none">4. 政府是指导荒漠化防治项目的首要参与者，负责提供有利的制度安排和激励措施来鼓励所有利益相关者的参与，但不影响其它社会主体和组织的参与。5. 其它社会主体和组织，如农牧民、家庭、社区和学者，参与荒漠化防治工作，并发挥有效作用。6. 不同社会主体之间应建立协作、沟通和冲突解决机制。 <p>主要原则 III. 建立荒漠化防治相关的本地化、协作性和嵌套式法律法规和规则。</p> <ol style="list-style-type: none">7. 建立荒漠化防治相关的本地化、协作性和嵌套式法律法规。8. 建立荒漠化防治相关的本地化、协作性和嵌套式法律法规运营机制（工作原则）。9. 建立荒漠化防治相关的本地化、协作性和嵌套式规则和办法。

第二部分 项目评估

该部分对项目的影响和可持续性进行了评估，采用经济风险-收益模型的形式进行了总结。首先，阐述了建模方法。然后在导出模拟结果之前，总结了原地和异地环境影响及风险。最后，总结了项目整体可持续性、关键成功因素及扩展沙漠绿色经济考量因素的相关证据。

7. 建模方法

本研究采用应用信息经济学（AIE）来分析库布其项目相关成本、效益和风险信息的不确定性。当地存在大量在地化专业知识，面临的主要挑战为如何系统获得这些在地化专业知识和各种来源的分散数据的相关证据。由于研究时间有限，数据收集工作还需要侧重于与评价结果最相关的领域。

贝叶斯决策分析方法和信息价值分析为处理此类问题提供了框架。这种方法以概率分布形式（这不同于取平均值的做法）反映现有数据。在存在信息不确定性的情形下，这种方法可以结合在地化专业知识和收集的其他数据。贝叶斯决策分析方法通过上述决策过程来说明不确定性，因此展示了实际信息了解程度的不确定性及其对评估结果的影响。贝叶斯框架规定根据新数据来更新概率分布情况。此外，不确定性的获取有助于计算信息价值，其将指出需要进一步收集哪些信息来改善分析。应用信息经济学是贝叶斯决策分析方法的一种应用（Hubbard，2014年）。应用信息经济学是一种测度复杂和高度不确定性问题并模型化决策的方法。应用信息经济学整合了经济学、精算学及其它数学方法中的技术（图7.1）。

应用信息经济学的应用步骤汇总如下：

- 界定决策内容：应用信息经济学的第一步是界定实际决策内容，识别成本、效益、时间、风险和外部因素。作为第一步，很明显这是更好地了解测量对象的关键，并且实际决策往往不同于最初预期。对于库布其沙漠分析而言，主要问题在于从绿色经济角度分析项目的可持续性，相关决策可根据以下几个方面来界定：是否应当追求项目区的农业利润；是否将沙漠绿化模

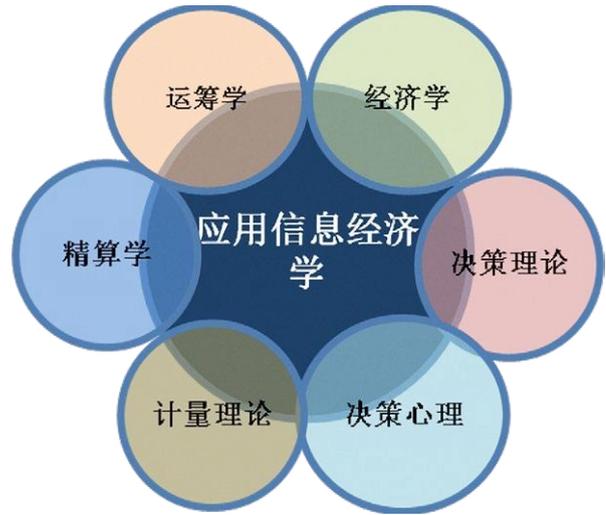


图 7.1 应用信息经济学的主要组成要素

式扩展到其它地区，或在库布其地区扩展沙漠绿化项目面积。

- 模拟当前已知信息：在通常的大型投资决策中，成本预估、市场预测、项目风险及其它变量往往未知。通常，某些变量，尤其是长期预测具有很大的不确定性。应用信息经济学并不选择某些武断的数值作为点估计值，而是侧重确定某一特定变量的潜在值范围，并赋予其概率。应用信息经济学方法可以弥补大多数专家和管理人员在预估概率分布上的显然存在的过度自信和分歧。数十年研究表明，专家们趋向于过度自信，但可以将不确定性表述为主观的“概率分布”，并可以改善预测和决策（Hubbard，2014年；Lichtenstein 等人，1982年；Kahneman 和 Traversky，1972年；1973年；Kahneman 等人，1982年）。这些数值范围随后将用于“蒙特卡洛”模拟——在电脑上生成数千种随机情景——列出每种潜在结果的概率分布情况。通常，这一方法将表明至少存在某些消极结果的风险，且这一风险可以被测度。
- 计算额外信息的价值：决策过程中，并非所有决策变量都值得进行测量，值得测量的变量往往将为决策者带来价值。如何决定是否考虑库布其项目区的地下水或项目区经济作物的水需求总量？结果通常是，

对于投资决策而言其中一个变量较之另一个变量要重要得多，但准确进行评估的唯一方式是计算信息价值。管理人员往往倾向于测量对改善决策鲜有信息价值的变量，这一现象被称为“逆向测量 (the measurement inversion)”

逆向测度：一种选择无法改善决策的变量，而忽略高价值变量的普遍现象。

(Hubbard, 2014年)。采用应用信息经济学方法时，模型中的每个变量均具有相应通过计算得到的权重，这样就可以识别出在决策中的重要变量。这一方法仅针对最可能显著降低决策整体不确定性的变量。

- 测量重要变量：信息价值将表明哪些领域需要进一步降低不确定性。即便是在获取更多测量值的时间和资源均十分有限的情况下，这种方法也可显著降低不确定性。这似乎与直觉相反，但数学运算表明，即便是少量的数据也可显著降低不确定性，甚至是在高度不确定性的情况下。为此，具有最高信息价值的变量往往最容易进行测量。
- 决策优化：决策模型的输出结果会与组织的风险偏好程度进行比较。研究表明，管理人员的实际风险厌恶水平往往频繁、无意识地变化。不同的风险承受能力出现于不同的投资，即便管理层认为这些

投资具有一致性 (Brunswick, 1955年; Kahneman 和 Tversky, 1972年、1973年; Camerer, 1981年; Kahneman 等, 1982年; Karelaia 和 Hogarth, 2008年)。应用信息经济学方法通过量化和记录风险偏好来处理这一主要的决策错误，以确保以可控、统一的方式评估分析结果。

总体而言，应用信息经济学是一种以概率分布表示专家不确定性，针对最重要的测量值，并定量表达风险的方法。

图 2 显示了迭代过程中的所有步骤之间的关系，其中测量值将更新不确定性，并最终为优化决策提供指导。

该模型通过与相关学科专家召开的一系列研讨会建立，这些专家也接受了主观概率预估方面的培训和校准。每个不确定变量的概率范围由专家得出，或使用可用数据得出，包括来自文献的数据。模拟程序和模拟结果的更详细信息请参见第 10 节。项目区和项目活动的相关背景信息将在以下章节进行介绍。

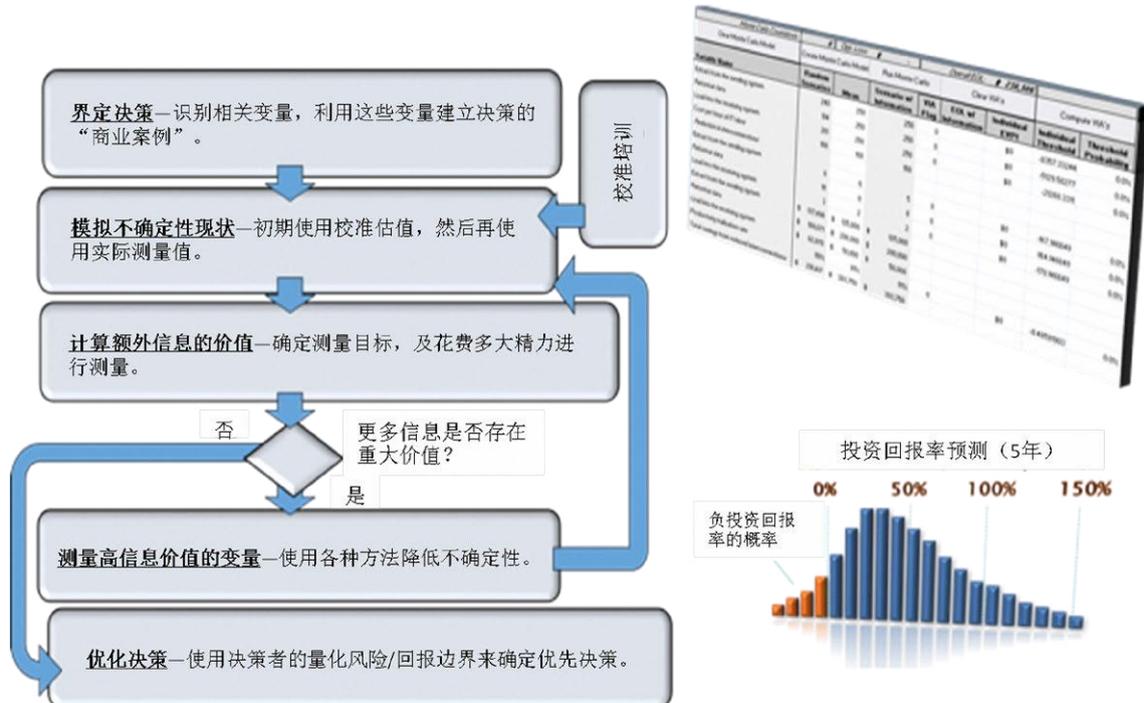


图 7.2 使用应用信息经济学方法进行概率风险-回报分析的五个步骤过程

8. 环境影响

第 1 部分业已描述了库布其项目的诸多经济和社会效益，例如，改善教育和住房条件、增加就业机会、提高农业种植活动的概率等。本节将概述项目对当地和异地环境影响的证据，这些证据将构成经济模型的基础信息输入。

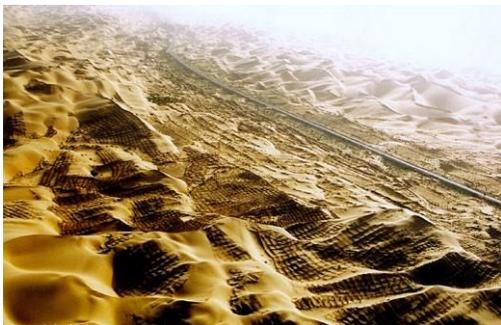


图 8.1 库布其项目沙漠绿化稳定转型：（上）1988 年原始状态；（中）通过防护林和棋盘沙障保护的高速公路；（下）2012 年高速公路的绿化稳定状态。

8.1 原地环境影响

8.1.1 风沙运动

大量文献记载了防护林在降低中国沙漠环境中的风速和风沙运动方面的效果（Cao, 1983 年；Chepil, 1949 年；Chepil 和 Woodruff, 1963 年；Wilske 等人, 2009 年）。例如，Chepil（1949 年）报告称，中国北方沙冲积土上建立的杨柳防护林（沿着田埂边缘长 120 米，宽 18 米）几乎为作物提供了完整防护。他的报告指出，完全有效防护则需要将地面 30 厘米高度的风速降低 50%，而这需要在树高 6-7 倍的距离内种植一排杨柳树。

库布其防护林带的植被覆盖率达到 65%-70%，地面 20 厘米高度的风速平均降低了 30%（亿利资源集团未公开发布的信息）。防护林带附近四个高度（0.2 米、0.5 米、1 米和 2 米）的风速测量结果表明，平均风速低于参照风速，其中 0.2 米高度的风速较之参照组降低了 61%，0.5 米高度的风速降低了 45% 以上。在 20 厘米高度处，不同灌木的防风效率报告如下：细枝岩黄芪，74%；沙棘，58%；柠条，28%；怪柳，22%（亿利资源集团未公开发布的信息）。防护林带有助于改善当地生态环境，降低风速，减少向黄河侵入的流沙（图 4.8），及保护基础设施（图 8.1）。

8.1.2 土壤健康

据相关研究报告称，项目区的防护林带有助于改善土壤物理和化学性质，包括降低 pH 和导电率，增加土壤有机质、氮、磷、钾含量。国际科学文献发表论文中的证据，支持了亿利资源集团有关改善这一环境下土壤状况的观测结果。例如，Su 和 Zhao（2003 年）研究了种植在中国北方半干旱科尔沁沙地的 0、5、13、21 和 28 年龄小叶锦鸡儿，地下 0-5 厘米及 5-20 厘米深的土壤属性。研究结果表明，灌木种植有助于提高水土保持能力，加强有机碳和总氮积累，降低 pH 和堆积密度。碳和氮浓度随着种植年龄的增加而显著提高，28 年龄灌木的碳和氮浓度较之非植被沙丘增加了 10-20 倍。早期阶段（0-13 年）的增率快于后期阶段（13-28 年）。植物冠层下的碳和氮含量更高，但“肥岛”随着种植年限的增加而扩张。与此同时，锦鸡儿属可通过改善微气候来促进草种的定植和发育。

8.1.3 水文影响

干燥度（按照年降水量划分的年潜在蒸散量）数值范围在 3.23-7.31 之间，这表明实际地表蒸散受到可用水量而非太阳能的限制。根据杭锦旗气象站的蒸发皿蒸发量数据（经短期绿色作物系数校准），1985-2009 年间，年潜在蒸散量为 1242 毫米。1985-2009 年间，库布其沙漠项目区由东到西的年均降水量在 385-170 毫米之间（Yin, 2011 年）。

库布其地区的降水量一般不足以维持树木生长，需要获得灌溉或地下水的补充。当仅依赖降水时，种植 10-20 年的树木最终将使土壤变干，生长变缓，最终可能死亡。在库布其项目中，成功植树案例仅限于河流湖泊的河岸带及低洼地，这些地区的地下水位接近于地表。在其它区域，耐旱性灌木和草本植物仅依赖当地降水量。一般来说，大面积的植被恢复将增加区域蒸散，影响区域水平衡。

当考虑水文影响分析时，很重要的一点是确定实际的蒸散量。然而，由于这一区域并不是封闭流域，在缺乏潜在蒸散、地表径流和地下水位数据的情况下，难以评估植被的实际耗水量。为此，以下仅进行了简单估算。首先，使用高桥（1979 年）公式基于气象数据计算了项目区的潜在蒸散。其次，根据野外调研数据估算了使用的灌溉水量。再次，利用水体面积和潜在蒸发率估算了开放水表的蒸发量。这三个值的总和作为区域实际蒸散量的第一近似值。

根据 1959-2013 年杭锦旗气象站的月降水量和气温数据，利用高桥方程（方程式 5.1），计算出库布其沙漠项目区的年均潜在蒸散量为 223 毫米，年际变化范围在 100-322 毫米之间。潜在蒸散量出现年际波动，但过去 54 年间没有呈现明显趋势（图 8.2）。预估最大蒸散量出现在 7 月，4-10 月生长季节的蒸散量预计占年度总蒸散量的

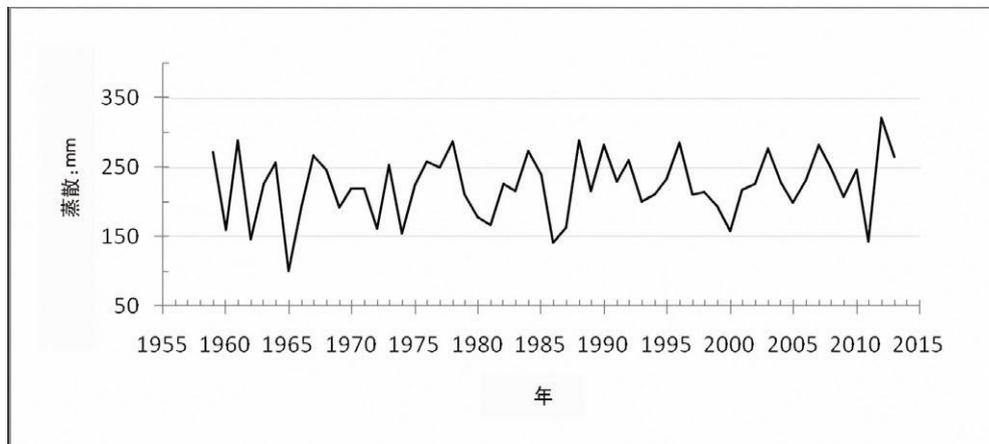


图 8.2 1959-2013 年库布其项目区基于降水量和气温数据的预估年蒸散量

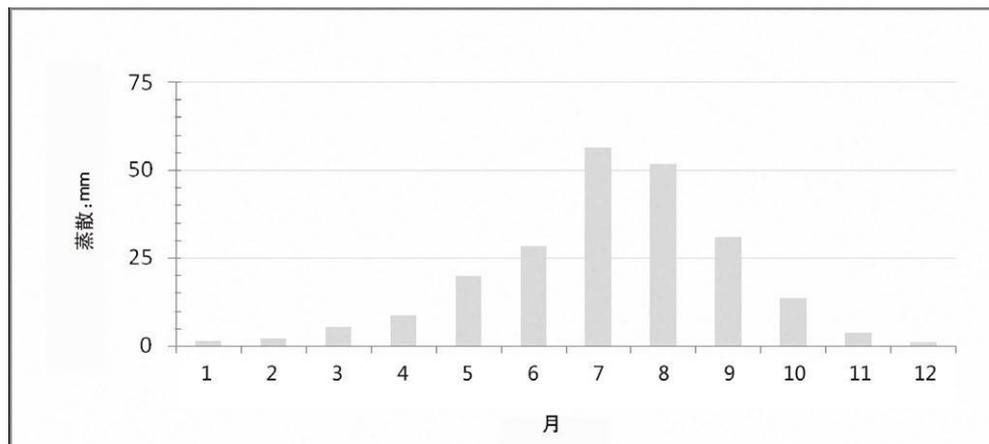


图 8.3 库布其项目区月均实际蒸散量，第 1 个月为 1 月份

94% (图 8.3)。

方程式 5.1 :

$$E_a = \frac{3100P_M}{3100 + 1.8P_M \exp\left(\frac{43.4T_M}{235.0 + T_M}\right)}$$

其中： E_a 指的是区域地表实际蒸散量，以毫米表示；

P_M 指的是月均降水量，以毫米表示；

T_M 指的是月均气温，以 $^{\circ}\text{C}$ 表示。

然而，高桥方程假设蒸发量受到降水量和气温的影响，并未考虑外部水源的蒸发量，如灌溉水和地表水。为此，高桥方程可能低估了实际的总蒸发量。因此，第 10 节描述的模型中还包含了植被总用水量，并计算了灌溉用水量。

为了得出相对可靠的耗水量数据，我们需要估算植树活动使用的平均灌溉用水量。植树和灌溉活动如表 8.1 第 1-5 行所示。整个项目周期内项目区的总灌溉用水量预估为 3850 万立方米

表 8.1 生态修复项目区外部水需求预估

固沙植树造林和灌溉活动						开放水源区域 (湖泊)
1	物种	杨树 沙枣 樟子松	梭梭 沙打旺.	甘草	中间锦鸡儿 沙柳 花棒 蒙古岩黄芪	
2	面积 (平方公里)	3200	200	1133	1333	4
3	种植密度 (株数/公顷)	200	-	-	-	
4	灌溉方法	滴灌 种植后前 2-3 年 每年灌溉 14 次	种植时进行滴 灌和喷灌	种植时进行 喷灌，每年 1 次	无灌溉	
5	每次灌溉用水量	10l/林分	12l/m ²	12l/m ²		
6	项目期总灌溉量 (10 ⁶ m ³)	8.96 =(3200*100* 200*10*14 /1000)	2.4 =(200*12 /1000)	27.192 =(1133*12 *2/1000)		4.968 =(4*1242 /100)
7	年灌溉量 (10 ⁶ m ³)	1.034 =(8.96/26*3)	0.092 =(2.4/26)	1.046 =(27.192 /26)		4.968
8	外部年需水总量 (10 ⁶ m ³)	2.172			0	4.968

沙植树造林面积为 5870 平方公里)。根据潜在蒸散率和水体面积 (4 平方公里) 计算, 开放地表水体的蒸发量达到 497 万立方米。大多数种植树木仅需要在种植后 1-2 年内进行浇水。因此, 年灌溉用水量为 2.17×10^6 立方米, 这一估值为植树造林区域总耗水量的简单算术平均值 (考虑了连续灌溉)。项目区超出降水量之外的年度总外部耗水量约为 714 万立方米, 相当于每年 1.2 毫米的水深, 仅占总年度降水量的一小部分 (0.3%-0.7%)。

Wilske 等人 (2009 年) 预估, 较之天然灌丛带, 库布其种植的白杨提高了 2% 的生长季蒸发量, 蒸发量/降水量比值从 1.0 增加到 1.5。他们总结称, 这一水量平衡变化仅在树木获取地下水 (通过灌溉或根系汲取地下水) 的情况下才可维持。这些作者还指出, 白杨种植密度可降低水位, 增加区域用水压力。第 9.1 和 10 节中进一步阐述了水文风险。

8.2 异地环境影响

8.2.1 沙尘暴

库布其项目最大的感知效益之一, 是沙尘

暴频率及严重程度的降低。自 1978 年开展的绿色长城区域植被指数时间趋势的近期研究表明, 绿色长城大大改善了植被指数, 有效减少了中国北方的沙尘暴强度 (较之邻近地区) (Tan 和 Li, 2015 年)。该项研究基于气象站的降水量和沙尘暴数据, 分析了归一化植被差异指数 (Normalized Vegetation Difference Index, NDVI) 的时间趋势, 归一化植被差异指数是卫星图像显示的绿色植被覆盖参数值。此外, 制定了沙尘暴强度指数, 其中包括频率、能见度及沙尘暴持续时间。研究中并未关注气候变化和人口压力的影响。结果发现, 归一化植被差异指数与降水量趋势无关, 沙尘暴强度与归一化植被差异指数呈负相关性。库布其项目区显示了一致的绿化趋势, 导致沙尘暴频率有所降低 (图 8.4)。杭锦旗的气象记录进一步证实了这一研究结果, 相关记录表明, 70 年代后, 每年的沙尘暴天数出现显著下降。尽管在库布其项目启动前已经出现了明显下降趋势, 目前仍会出现沙尘暴天气。然而, 没有证据表明库布其项目是否有助于减少北京的沙尘暴天气。

8.2.2 生物多样性

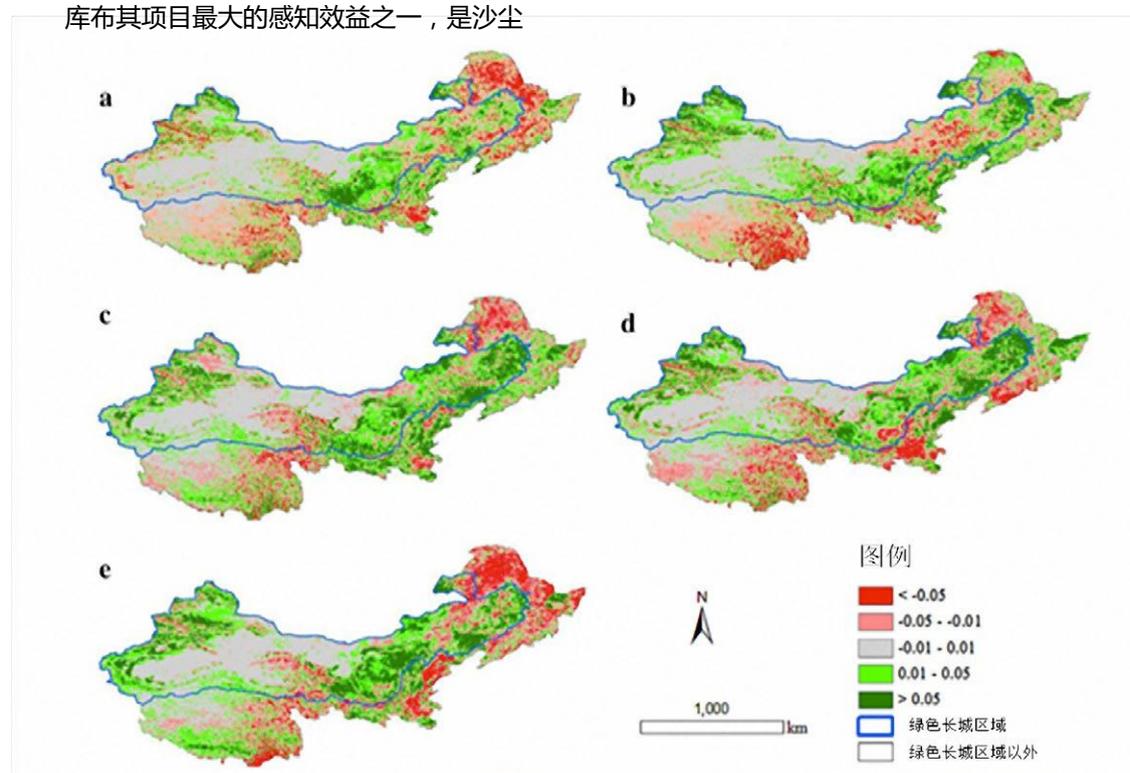


图 8.4 不同时期夏季平均归一化植被差异指数的变化: (a)1981-1983 年和 1984-1986 年; (b)1981-1983 年和 1987-1989 年; (c)1981-1983 年和 1990-1992 年; (d)1981-1983 年和 1993-1995 年; (e)1981-1983 年和 1996-1998 年。来源: Tan 和 Li 2015 年。

随着 5000 平方公里绿洲的出现，库布其沙漠的生物多样性得以逐渐恢复。库布其沙漠多个湖泊的生态环境也明显得到改善（图 8.5），距离巴彦浩特镇以东 35 公里的天鹅湖业已成为迁徙天鹅的湿地栖息地（亿利资源集团尚未公开发布的信息）。然而，并没有收集到项目区水位和变化的项目观测数据，也没有相关数据来支持有关湖泊水文修复原因的评论。

据报告称，较之新中国成立前（1949 年），整体复垦工作增加了植物多样性。2012 年开展的一份调查（亿利资源集团尚未公开发布的信息）显示，库布其拥有 374 种野生植物，包括 309 种饲料植物和 139 种药用植物，但无法将其与 1949 年的基准情况进行对比。

出于生产目的人工种植药用植物、香料植物、油料植物、纤维植物、农药植物及蜜源植物的实践也将增加生物多样性。天然牧场中的饲料植物物种出现显著增加，例如，菊科有 23 属和 41 种，禾本科有 18 属和 25 种，豆科有 12 属和 32 种。库布其项目还保护了 160000 公顷野生甘草（亿利资源集团尚未公开发布的信息）。

据报告，该地区的野生动物多样性也所有增加。野生哺乳动物大多出现在丘陵地区和沙漠中。当地专家报告称，越来越多的人看到了许多几近消失的物种，包括蒙古狼、瞪羚、狐狸、獾、野兔、刺猬、老鼠、田鼠和跳鼠（沙漠啮齿动物）。野生鸟类、两栖动物和节肢动物遍布整

个沙漠。目前常见的野生鸟类包括野鸡、鹰、猫头鹰、乌鸦、喜鹊、麻雀、鸽子、鹁、大雁、野燕子、水鸭、鹤鹑、云雀、沙鸡、岩石鹧鸪、杜鹃、啄木鸟、乌鸦、草鸡、戴胜鸟、野鸭、野生鸽子、画眉。

8.2.3 气候和土壤

当地专家报告称，绿化活动导致项目区的降水量有所增加，但这无法从杭锦旗过去 50 年中的气象记录中得到证实（参见第 3.2.2 节），尽管气温有所上升。气象站需要位于项目区的不同位置，以获得降低风速、改善土壤状况和改变蒸散机制的局部和微气候影响信息。密集树木覆盖率引起的蒸发的增加可能引起当地降水的变化（所谓的彩虹水；Keys 等人，2012 年）。人们可能认为未蒸发的大多数降水在这种干旱气候下可能会蒸发掉，然而，来自灌溉或地下水的额外水源将会增加蒸发量。

库布其项目的累积碳封存评估预估，1998-2012 年 5153 平方公里的植树造林将封存 49140 吨二氧化碳（GEP 报告）。

由于亿利资源集团不使用商业矿物肥料或农药，因此并不存在来自这些来源的环境风险。



图 8.5 库布其项目区湖泊



图 8.6 库布其项目湖泊中的迁移天鹅和其它鸟类

9. 风险

9.1 水文风险

水文风险在这里指的是某一地区的用水量超过水体承载力或水体更新能力。库布其沙漠修复项目种植活动主要使用降水、地表或地下水。如果植被的额外生长蒸发了可能会以土壤表面蒸发形式流失的水分，且用于补充灌溉的水量低于水源补给量，那么水文系统是可持续的。水量的过度使用将降低地下水位。因此，将地下水位作为模型风险分析的一个指标（第 10 节）。

在缺乏任何地下水位测量数据的情况下，研究人员采访了当地居民。根据他们的描述，在地下水位接近地表的区域，地下水位略有下降。在项目开始前，水位明显在地表以下 0.5-1.0 米，目前，水深达到 1.0-3.0 米。最大水位下降约达 3 米，年均下降率为 0.1 米。正如我们所预期，种植活动确实增加了该区域的用水量。如果地下水位持续下降，那么水文可持续性可能面临威胁。建模章节将对相关风险进行进一步分析。

用于植树造林活动的灌溉水来自于地表以下 80-120 米的承压含水层（亿利资源集团尚未公开发布的信息）。由于地下水源自于深层承压含水层，其与由树木用水而造成的地下水位变化，（树木根部无法到达承压含水层深处）无直接关联，且在泵抽量低于补给量的情况下仍是可持续的。

我们估算了未来植树造林活动的需水量。库布其项目图（图 4.10）显示了杭锦旗内人工林位置。种植了树木的区域与具有充足水源的区域一致。植树造林活动始于沙漠的南北两端及低地湖泊区域，这里蕴藏有丰富的地下水源。根据水量供需规划估算，这些区域存在水量盈余（内蒙古自治区，2005 年）。例如，伊和乌素苏木和巴音恩格尔苏木的水量盈余达到 4000 万立方米。未来的植树活动将扩展到水源较少的区域，这一趋势可能因可用水受限和增加的单位面积种植成本而放缓。与当地管理人员的访谈结果表明，灌溉固沙树木的水文相关成本，包括灌溉设施的一次性投入及其运维成本约为 1500 美元/公顷/年。

假设未来 10 年灌溉的植树面积将增加 1000 平方公里，那么年灌溉水量将相应增加 240 万立方米。另外在不考虑气候变化的情况下，整个项目区灌溉需水量将从当前的 714 万立方米增加到 954 万立方米。与 4000 万立方米的可用水量相比，

就短期灌溉用水来看，种植活动的水文风险相对较低。然而，这一分析并未考虑未来 10 年内的其它用水量和需水量。例如，上游城市需水量可能增加，而这可能减少项目区来自黄河的地下水补给。更可靠的风险分析将要求包含区域多种水用途和优先顺序的复杂模型。第 10 节中介绍的模型中考虑了白杨和松树等大树对地下水摄取量的影响。就水质而言，当地专家认为，根据当前的灌溉活动和水源质量，水质下降风险（如，通过盐度增加引起）可能较低。

9.2 其它风险

增加的土壤盐碱度，可能随着项目区盐碱土壤的出现而构成潜在风险。因低洼地地下水上升引起的盐度增加，或高蒸发率引起的灌溉区域上层土壤的盐分积聚，可能构成潜在风险。然而，截止目前，尚未有出现相关风险的证据。

亿利资源集团并未报告任何植物病虫害爆发情况，或许寒冷冬季加之降水量有限的炎热夏季有助于抑制病虫害。稳步增加植物物种多样性的策略也有助于减缓相关风险。

与此同时，还应关注维持物种的遗传多样性，尤其是对于制药业依赖的作物（如甘草）。

气候记录并未表明存在广泛波动的降水量，但气温的稳步上升可能增加蒸发率和需水量，或限制某些物种的生长。然而，超出变化灌溉需水量的短期气候变化似乎并不构成重大风险。

黄河流域易于受到气候变化的影响，尤其是因为其受到来自青藏高原融雪水的补给，后者受到长期气温上升的影响。2001-2030 年的气候变化模型预测（Wu 等人，2015 年）使用了 RegCM3 高分辨率区域气候模型，相关结果表明整个黄河流域的年径流量下降了 11.6%，项目所在交流盆地的年径流量下降了 8.0%。项目区的土壤水分预计将下降 2.7%。然而，Xu 等人（2015 年）开展的一份研究（涵盖黄河流域）指出，气候变化对河流（年均流量）影响的报告并未提及对于水管理至关重要的流量的不确定性程度。其研究表明，水文预测的最大不确定性来源在于全球环流模型的选择。

其他风险包括种植商品价格变化，及其未来如何影响作物去除通货膨胀因素后的收益。这一不确定性还将引发如下风险，即价格变化可能引起各种种植作物未来种植比例的变化，而这可能

导致更多的土地用于耗水量更多的作物。

能源价格也是一个不确定性因素，其将影响沙漠能源相关投入的成本，如泵抽成本，尤其是浅层泵抽成本（在水位显著下降的情况下）。工资的不确定性包括竞争劳动力资源的不确定性。然而，提高当地工资水平（作为一项项目成本）也是本项目的目标。工资相关的主要风险在于，从长期来看，高农业产量将大大降低水位，而这将影响农业收入。

中国经济放缓，尤其是鄂尔多斯经济的放缓可能影响库布其项目，因为中央和当地政府为包括亿利资源集团在内的绿色发展投资商提供财政支持和政策激励。然而，这可能有悖于持续的治理体系改革，后者旨在进一步发展绿色经济概念（即生态文明建设）。

10. 模型

利用前文描述的应用信息经济学方法过程（第 7 节），制定了库布其沙漠绿色经济项目模型。该模型基于 Excel 宏工具，生成蒙特卡罗模拟随机情景，并计算信息价值。本节将描述以下内容：

1. 模型开发
2. 模型影响路径的基本结构
3. 估算过程
4. 信息价值计算和减少不确定性
5. 最终结果和建议。

10.1 模型开发

2014 年 9 月通过实地考察及工作研讨会，初步列出了量化分析的范围和性质。利用哈伯德决策研究（Hubbard Decision Research）开发的电子表格工具，及与学科专家（SMEs）召开的一系列远程研讨会，制成了模型。这些研讨会旨在确定模型变量，对模型的水文和社区林业要素进行概率估算。向学科专家提供估算工作表，以收集每种植物的产量、用水量等数据的估算值。初期模型使用每个变量的预估值进行填充。然后使用哈伯德决策研究开发的电子表格工具计算了信息价值分析（VIA）和最终风险/收益分析结果。

如方法章节所述，应用信息经济学方法将成本收益分析作为模型的基本模板。成本效益分析主要分为输入表（附录 2）和现金流表（附录 3）。输入表变量将纳入现金流表的逻辑运算当中。

模型由包含 100 个自变量的 6 大部分构成。在现金流表中建立连接输入估值与收入和净现值计算的逻辑运算，现金流表由包含过去 50 年（每年为单独一列）计算值行数的 5 部分构成。大多数现金流行数用于计算与库布其项目农业相关的成本收益，包括水位变化趋势。更多详情请参照“模型要素”部分。

对于输入表的每个变量，收集的数值范围基于学科专家的估算值——“常规数据”，即，易于获得的数据。仅在信息价值计算证明必要的情况下，才考虑获取需要进一步收集和分析的数据。

使用输入数值范围有助于建模者获取引起投资困境的更多信息。这一优势的其中一个良好

示例是，计算与库布其项目沙尘暴频率降低相关的收益。尽管存在与这些沙尘暴历史成本相关的一些数据（如，每年从黄河移除的沙子数量），但是如“旅游和生态旅游增长”或“沙尘暴减少导致的住房价值增加”等许多变量与常规数据无关。忽略这些变量很明显是不正确的。提供有数值范围的变量有助于使用者将这些数值范围纳入分析当中，确保相关分析符合当前实际的确定性。随后由信息价值计算结果来决定是否需要进一步研究这些预估值（如第 7 节所述）。

10.2 影响路径的基本结构

模型有 9 大要素，其中 6 大要素出现在输入部分，所有 9 大要素均出现在现金流部分。输入部分的 6 大要素如下：

1. 经济环境
2. 水资源预算
3. 灌溉用水
4. 植物物种特性
5. 初期投资
6. 非农业收益

以上 6 大要素也出现在 50 年期的现金流预测部分，另外还包含以下 3 大要素：

7. 直接农业收入
8. 人均净收入
9. 总回报

10.2.1 水资源预算

模型中的水资源预算要素包含与降水量、水位和用水量相关的变量，其中包括平均降水量、水位区域、渗透率、蒸发率、植物摄水量和需水量等变量。我们考虑了降水趋势，但未模拟绿化活动本身引起的降水量变化。

水资源预算解决的是从水层中获取的总预测用水量及某一特定用水量将耗尽水层水资源的概率。在蒙特卡罗模拟中，现金流包括基于历史上降水数据的均值和标准差而得出的随机未来降水路径。现金流还追踪水位变化情况，并为灌溉需求和成本的计算提供信息输入。

存在这种可能，即绿化活动引起的径流量、蒸发量和蒸腾速率变化十分显著，进而导致平均

图 10.1 显示了这些要素之间的关联。详情请参见以下部分描述

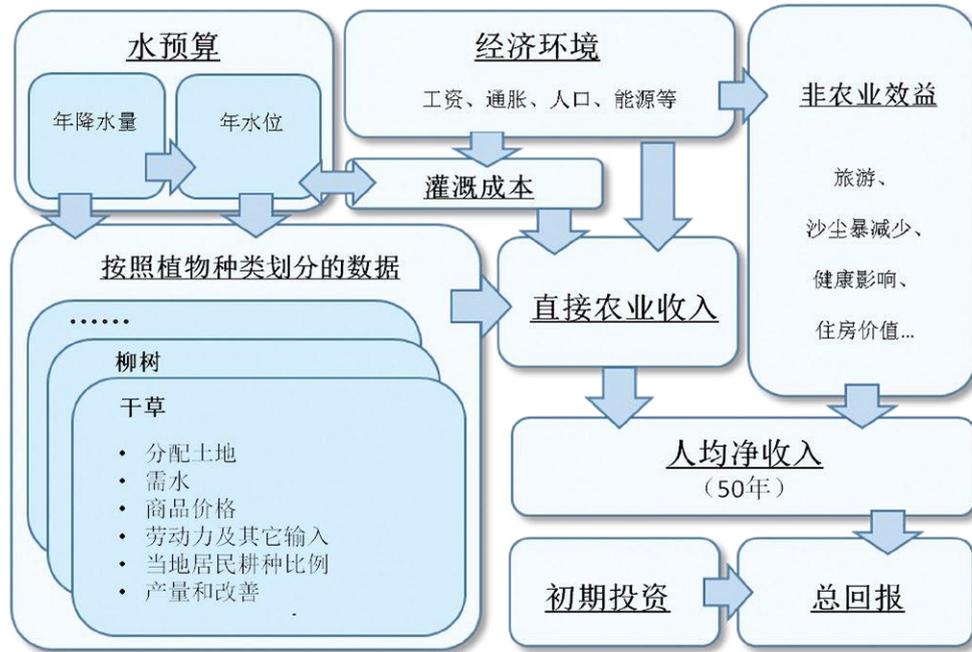


图 10.1 库布其项目模型影响路径

降水量的变化，但学科专家的反馈表明，这种情况不太可能出现在库布其项目区。为此，建立了简化式水文表达。例如，估算整个项目区全年的水资源预算，这样一来，模型便不包含按季节或降水事件表达的详细降水情况。对于地质学及当地与黄河之间的相关性等因素，仅给出了初期水位区域、深度和厚度的数值范围及可用水和用水量的数值范围。

10.2.2 灌溉用水

灌溉用水可视为是水资源预算的一个组成部分，将其分离出来是因为其可能对模型结果产生重要影响。首先以单位为公顷的静态数值（具体取决于植物类型）来模拟灌溉用水。然后，根据实际降水量以动态数值模拟灌溉用水，其中提供了总植物需水量的预估值，灌溉用水比例取决于降水量。在多雨年份，灌溉用水可能较低甚至为零，而在干旱年份，灌溉用水将用于满足大部分的植物需水量。在最新的模型版本中，根据植物种类划分和估算了植物需水量。灌溉成本取决于使用量、水位、钻孔估值及所需维护。近期研究文献改变了需水量的模拟方式，这减少了不确定性，但如下文所述，出于其它一些原因，仍需要

进一步减少不确定性。

10.2.3 植物物种数据

植物物种数据包括以下 8 类作物：

1. 甘草
2. 松树与白杨
3. 蔬菜
4. 北沙柳
5. 柠条锦鸡儿
6. 细枝岩黄芪
7. 梭梭
8. 飞播种草

学科专家为输入表中的每类作物提供了相关指标，如总公顷数、平均产量、需水量、基线商品价格、劳动力投入等。这些输入信息也用于现金流表中，且基于其他输入值进行了适当调整。例如，输入变量“平均产量”作为基线指标，现金流表中的实际年产量将取决于随机生成的降水量、灌溉水量和土壤特性。再比如，现金流表中的基线商品价格根据随机通胀路径进行了时间序列调整。

对植物产量曲线及其与摄水量和土壤有机质变更的关系的相关假设进行了简化。模拟的产量与降水量存在线性关系，但使用了较大的倍数范围来抵消这一过度简化过程，并体现关系斜率和性质方面的不确定性。

10.2.4 经济环境

模型的经济环境要素包含基本经济变量，例如，通货膨胀率、汇率、预估工资、人口和人口结构变量。大多数此类预估值以官方政府来源发布的历史数据为基础。

人口增长率预测基于内蒙古农村地区过去 20 年内的历史趋势。如果库布其项目区因当前活动而出现经济扩张，那么可以假定项目区的人口变化将不同于内蒙古其它农村地区。因此，项目区的人口正增长概率被包含在不确定性范围中。库布其项目区项目劳动力日工资估算以 2000-2010 年中期以来的数据及此后的劳动通胀估值为基础。最近期的预估值必须足以体现这些数据来源的不确定性。

10.2.5 直接农业收入

直接农业效益包括木材、蔬菜和甘草等作物及饲料作物（饲料往往源自于用于生态目的的植物物质，如柳树、锦鸡儿属和梭梭属）的收成。所有这些产量取决于单一植物特征（学科专家在估算工作表中给出）、降水量变化（水资源预算模拟）、土壤有机质和成分变化、工资和灌溉成本（衍生自经济环境变量）等变量。

这种植物可划分为两种基本类别：最初用于生态修复目的的植物物种；主要用于生产销售目的的植物。模型的不确定性很大程度上源于最初用于生态修复目的的植被最终用作饲料的比例。这些植物代表项目区种植的大部分（80%）作物，而其中饲料植物的百分比是具有第二大信息价值的变量。

10.2.6 非农业效益和初期投资

非农业效益包括生态改善相关的效益，尤其是与沙尘暴减少相关的改善效益的预估值。这些效益包括旅游、住房价值的增加；清沙成本及沙尘暴其它成本（例如健康问题和生产损失、机械损坏和停工）的降低。

初期投资以建立库布其沙漠绿化带的每平方公里的总成本的预估范围值表示。由于这一变量具有很高的信息价值，项目后续部分通过分解和

进一步研究将其作为减少不确定性的变量。

通过估算直接农业效益在当地收入中的百分比，加之沙漠绿化带来的农业及其它行业的劳动工资，计算出了人均净收入。总回报以沙漠绿化项目初期投资的净现值计算，包含所有成本及未来 50 年内的所有农业和非农业效益（以资金时间偏好进行折现表示）。

10.3 估算过程

应用信息经济学估算过程始于以校准估值范围。这些初始估值后期可通过以下两种方式进行完善：

1. 学科专家直接进行校准预估。对于模型中的许多变量，学科专家明显拥有更多的相关知识，因此，可在初始预估的基础上缩小这些变量的不确定性范围。学科专家可能不进行直接预估，但仍会给出帮助建模者排除部分初始数值范围的背景或信息。这一过程一般被视为是对主观贝叶斯估算的完善，即根据新信息完善预估值范围。
2. 通过二次研究替代初始估值。一般而言，可利用相关学术研究或其它数据结果来大大减少之前的不确定性。这包括公开文献及利益相关者收集的相关数据。

在有些情况下，模型中的变量仍为初始建模者给出的预估值，其数值范围往往较大。对于这一情况，我们可给出三种解释：1）相关变量在建模者的专业知识范围内；2）变量几乎没有任何信息价值；3）减少不确定性的难度超过了效益。减少不确定性的相关讨论将在信息价值部分进行更详细的介绍。

10.4 审计程序

这里采用了结构化的审计程序。理想情况下，审计程序仅遵从良好模拟实践。然而，对于简单模型，审计员必须假定误差是不可避免的。项目经理或模型创建者将在审计前记录三个已知误差项或添加三个误差项。将按照审计员是否找出所有误差项的情况对审计工作进行评估。审计员应具备模型相关的知识，但不应是创建模型的主要参与者。模型创建者将提供相关支持，帮助审计员进一步了解模型，并回答模型的相关问题。

表 10.1 总体模型统计数据

统计数据	数量
不确定变量总数	149 个变量
独特变量（不包括降水的时间序列）	100 个变量
学科专家校准估值	53 个变量
学科专家输入和二次研究	20 个变量
降水随机变量	50 个变量
基于当地历史数据的预估值	2 个变量
仅包含二手研究	24 个变量
现金流模拟持续时间（年）	50 年
现金流行式项目（行）	191 行

审计程序由以下八个步骤构成。审计工作围绕模型的两个工作表：输入表和现金流表。

输入表：

1. 确认所有 excel 宏的运行准确无误。
2. 对相关输出和信息价值计算试开展蒙特卡罗模拟，研究模拟结果。
3. 检查输入表，找出不适用于最终净现值或投资回报率计算的变量。在问题表中注明“删除项”，即便建模者已在评论中对其进行了解说明。
4. 检查评论—相关预估是否指明了来源和日期。请在问题记录表中注明任何来源不准确的数值范围。
5. 检查所有具有信息价值的变量，研究其净现值计算路径。

现金流表：

6. 转到现金流表或随机现金流表上的净现值输出，通过现金流逻辑运算进行反向计算，检查逻辑运算误差。
7. 在现金流表中，检查每行公式的一致性。
8. 在随机现金流表中，制定所有要素摘要行的曲线图，以直观检查许多不同情景的逻辑运算结果。

一旦完成上述步骤，项目经理或模型创建者将查看审计员是否找出了所有三个已知或增添的误差项。如果没有，那么将重复审计过程。如果找出了所有误差项，那么审计程序结束，所有发现的误差项得以确定。

10.5 信息价值计算和测量

零信息价值意味着什么？

消除信息价值意味着某一变量不具备进一步减少不确定性的经济学含义，是模型开发过程中的一个预期结果。只有当某一变量的当前不确定性可能影响整个投资决策时，这一变量才具有信息价值。

10.5.1 信息价值和不确定性的迭代降低

如应用信息经济学方法章节所述，“信息”一词可从数值方面进行界定，且具有可计算的经济价值。⁶ 这一计算（70年来一直为决策理论的一部分）可用于投资决策，将注意力和测量活动指向实际可减少投资不确定性的方面。

在该项目中，通过六次迭代计算了信息价值，这与应用信息经济学过程相一致（参见图 7.2 中的第 2-4 步）。在六次迭代分析中，共有 12 个

变量具有高信息价值。这些初始信息价值很高，一些以 10 亿美元表示。但这符合具有 50 年成本效益的高度不确定决策的建模。这里将其视为一项决策，且假设亿利资源集团还未做出这一重要决策。这些工作旨在分析这项投资是否为良好决策。此外，相同分析可用于指导未来潜在的沙漠绿化行动（目前还未做出相关决策）。

许多此类变量重复出现，但也并非总是如此。例如，在初始模拟过程（表 2）中，有 5 个变量具有较高的信息价值。在后续模拟过程（表 3）中，不确定性显著降低，5 个变量中有 3 个变量不再具有信息价值，尽管另外 2 个变量的仍具有较高信息价值。

表 10.2 列出了减少两次信息价值计算中的不确定性所采取的行动，表 10.3 中的信息价值变化证实了不确定性的降低对信息价值产生的影响。剩余的信息价值不足前一次迭代分析中的 5%，但这仍代表较高的不确定性。

表 10.2 第四次迭代分析中发现的信息价值

变量名称	信息价值	行动测量
库布其项目区劳动力日工资	\$16.81 亿	基于二次研究缩减范围。
出于盈利目的种植的柳树、锦鸡儿属、蒙古岩黄芪、梭梭属、草木的百分比	\$12.86 亿	基于学科专家研讨会缩减范围。
梭梭属平均产量 (kg/hm ²)	\$4.97 亿	基于二次研究提高下限。
沙漠修复初期成本	\$3.82 亿	进行分解。基于学科专家提供的新信息降低上限。
50 年内相对于一般成本通胀的食品通胀	\$3.68 亿	基于二次研究降低上限。

⁶ 一般而言，在进行项目投资之前计算信息价值。在本项目中，对已经进行了投资的项目开展的一种回顾性分析，但信息价值的作用方式相同，其仍然是降低本项目将如何产生净效益方面的不确定性的关键。

表 10.3 最后一次迭代分析中发现的信息价值

变量名称	剩余信息价值
库布其项目区劳动力日工资	\$1210 万
出于盈利目的种植的柳树、锦鸡儿属、蒙古岩黄芪、梭梭属、草木的百分比	\$1190 万

可采用各种方法来减少不确定性，包括：分解变量；使用学科专家意见完善预估值；二次研究；完善模型的逻辑运算；进行实证观测。原始实证研究超出了本报告的范围，但其它方法也有助于减少不确定性：

- 模型分解消除了 2 个具有高信息价值的变量的信息价值——“作物平均收益”和“项目区植被总需水量”。在早期模型版本中，这些变量高度聚合。由于这些聚合变量具有较高的信息价值，因此后续模型版本中将其分解为单种作物的成本、收益、摄水量及种植面积。
- 使用学科专家意见完善预估值的方法消除了 5 个变量的信息价值：“沙漠绿化对径流量不产生影响的概率”、“所有作物总面积”、“甘草面积”、“当前平均水位”及“初期沙漠修复成本”。对于以上大多数变量，直接征询相关学科专家的意见便有助于显著减少不确定性。对于“初期沙漠修复成本”，我们采用更多科学专家的意见和分解方法来消除信息价值。
- 模型开发、二次研究及减少其它变量的不确定性等方法消除了 3 个变量的信息价值：“与直接农业成本无关的年投入”、“梭梭属平均产量”、“粮食商品通胀”，这 3 个变量在一个或多个信息价值计算中显示有较高的信息价值，但随着模型不确定性的减少及平均投资成本变得更加积极，这些变量不再具有信息价值。
- 使用学科专家意见完善预估值及二次研究等方法降低了（但未消除）剩余 2 个变量的信息价值：“库布其项目区劳动力日工资”、“出于盈利目的种植的草木的百分比”。第二个变量包含库布其项目区的 5 类植物：北沙柳、柠条锦鸡儿、细枝岩黄芪、梭梭及“所有飞播草木”。

10.5.2 信息价值分析过程的额外评论

从信息价值计算中得出以下观测结果：

1. 所有进一步完善的变量在规定数值范围内，但数值范围有所缩减。这表明初期校准估值是合理的。这意味着，这些估值具有很大的不确定性，但包含了确定数值。
2. 不确定性的减少可能提高或降低投资的吸引力，具体取决于数值范围如何变化。就本项目而言，几乎所有不确定性的减少均有利于支持投资。唯一的一个例外是用作饲料和作为草本植物销售的各种灌木的百分比，这一数值范围的上限有所降低，但其减少了相关来源的预期收益。
3. 假定这是库布其沙漠绿化项目初期，从做决策的投资商的角度计算了信息价值。在 50 年内，这将证明是一项巨大的投资。相对于小规模扩展现有项目区的决策，这一决策将倾向于提高信息价值。

10.5.3 剩余信息价值

如上所述，在最后一次计算信息价值时，总信息价值下降了 95%。信息价值的存在要求必须存在错误成本和错误概率。在本项目中，“错误”指的是绿化项目的所有效益未超过所有投资和成本。尽管这一概率降低至 12.5%（参见后文），这一投资规模表明仍存在较高的信息价值。最后，仅有 2 个变量（“库布其项目区的劳动力成本”和“各种草木收成百分比”）保留了较高的信息价值：

1. 各种草木收成百分比是保留了较高信息价值的两个变量之一。只要 9% 以上的此类植物物种用作饲料或出售目的，那么整体投资便是积极的。追踪单个物种及进行实证测量很可能消除模型中剩余的不确定性和信息价值。
2. 库布其项目区的劳动力成本仍然具有较高的信息价值。很容易通过实证测量或征询更熟悉这一地区劳动力水平的人员的意见

等方法来减少这一变量的不确定性。这里需要提请注意的一点是，劳动力成本的信息价值仅在将劳动力视为一种成本的情况下适用。如果目标中包含库布其项目带来的当地收入效益，那么这将消除信息价值，因为在这种情况下，其既是成本，也是效益。

如前文所述，尽管在最后一次计算中，植物物种或水资源预算的单一变量不具有积极的信息价值，这两者相结合的信息价值约为\$2550000。需要再次说明的是，这些数值是从长期投资决策的角度计算得出的，并非已做出决策的库布其项目的信息价值。为此，如果有人希望开发类似规模的项目，那么建议其创建更详细的水文和植物吸收模型。

水资源相关的信息价值显著增加，具体取决于资金贴现率。与许多其它企业一样，亿利资源集团也可能在未来效益中使用贴现率。在该模型中，允许采用广泛的贴现率范围（2.5%-20%）。这意味着，50年内以净现值表示的某一效益可能不足当年同一效益值的1/100甚至1/1000。在采用固定贴现率的情况下，长期重大环境成本（如，水层枯竭）将显著减少相关影响。然而，环境决策倾向于提高长期成本效益的价值。在这种情况下，我们采用不到2%的“环境贴现率”。在1%的贴现率情景下，50年内的效益（或成本）值约为当年的60%。在这种情

况下，模型中自当前起几十年内的潜在消极结果的影响可能更突出。这表明，即便是库布其项目（30年前进行的决策），水位监测和复杂水文的进一步模拟均具有较高价值。

10.6 模拟结果

最终模型用于模拟以下四个问题的10000种潜在结果：

1. 库布其沙漠绿色经济项目是否将为亿利资源集团带来积极的投资回报？
2. 未来水位下降存在哪些风险？
3. 水资源过度使用导致的当地收入下降将产生哪些风险？
4. 是否应进一步扩展项目？

最后，我们审查了模型中未明确处理的一些问题，并提出了基于相关结果的建议。

10.6.1 投资结果

这一投资收益的平均净现值为18.4亿美元。这意味着，在10000种情景下（包含了成本效益的所有不确定性），平均收益结果为18.4亿美元。图10.2显示了潜在净现值的分布情况，表10.4中则列出了最新蒙特卡罗模拟的其它基本指标。

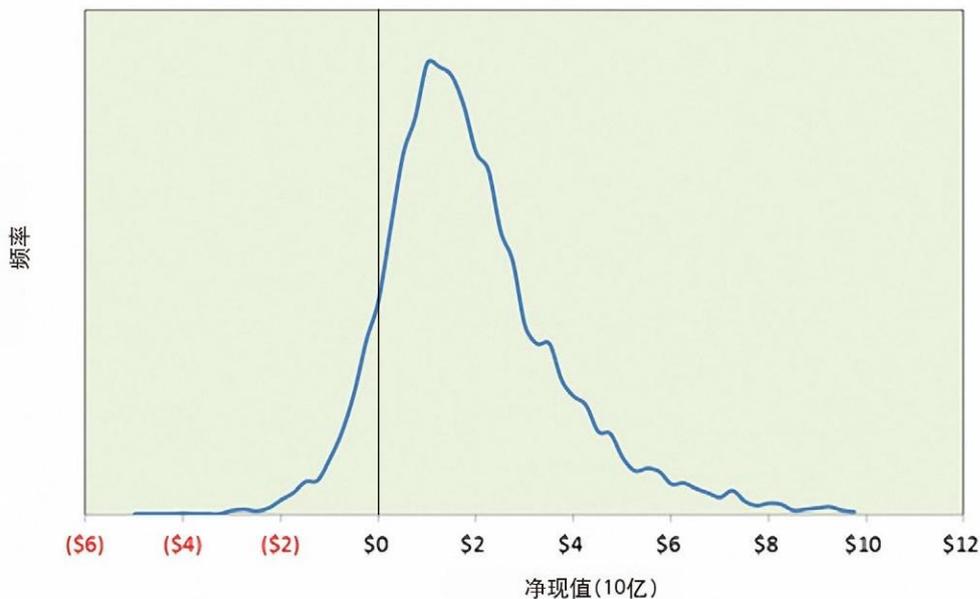


图 10.2 库布其绿色经济项目的净现值结果分布

表 10.4 库布其项目蒙特卡罗模拟指标

指标	数值
试验数	10000
负回报概率	12.1%
期望机会损失	\$8400 万
平均结果	\$18.4 亿收益
中间结果	\$15.1 亿收益
模型结果	\$10.1 亿收益
第 5 个百分位结果	-\$6.4 亿 (损失)
第 95 个百分位结果	\$55 亿效益

这些结果表明，如果库布其沙漠绿化项目是一项当前决策而非 30 年前做出的决策，那么很可能产生积极的回报。然而，从追求投资回报的投

资商的角度严格来看，这一投资 50 年内出现负净现值的概率为 12%。对于这样一项大项目，全球许多大型企业可能均无法接受这一风险。

然而，从全社会的角度来看，这一回报还是较高的，主要是因为这一项目有助于提高当地收入。这些内容部分体现在后续章节中。

表 10.5 显示了分解的主要成本效益。最大成本是初期修复成本，相比之下，灌溉成本较少。农业收益为主要效益。

10.6.2 未来水位下降风险

这一分析的主要目的之一是评估项目的可持续性，实际上可持续性问题上很大程度上取决于水位的潜在变化。模型纳入了总植物需求、蒸发和径流量估值、相对于项目区的水位区域及许多其他相关变量。这些变量用于生成动态水位预测——每年的水位值可能随各种因素而出现波动或保持不变（图 10.3、图 10.4）。模型包含了最高水位（水层抵达基岩）和最低水位（温泉等可能提供排水口，进而产生外溢）的可能性。

表 10.5 主要模型要素的成本效益的最佳估值和范围

要素	下限	最佳估值	上限
成本			
灌溉成本	\$4.4 万/年	\$352 万/年	\$1220 万/年
其它农业成本	\$1920 万/年	\$7580 万/年	\$1.9 亿/年
初期修复成本	\$6000 万 (1 次)	\$2.71 亿 (1 次)	\$34 亿 (1 次)
持续成本 (非农业)	\$51 万/年	\$130 万/年	\$603 万/年
效益			
农业收益	\$2600 万/年	\$1.05 亿/年	\$3.05 亿/年
非农业收益	\$420 万/年	\$1700 万/年	\$4400 万/年

注：实际数值在上下限之间的概率为 90%。上表给出的数值范围比较大，但代表每个变量的校准不确定性程度。

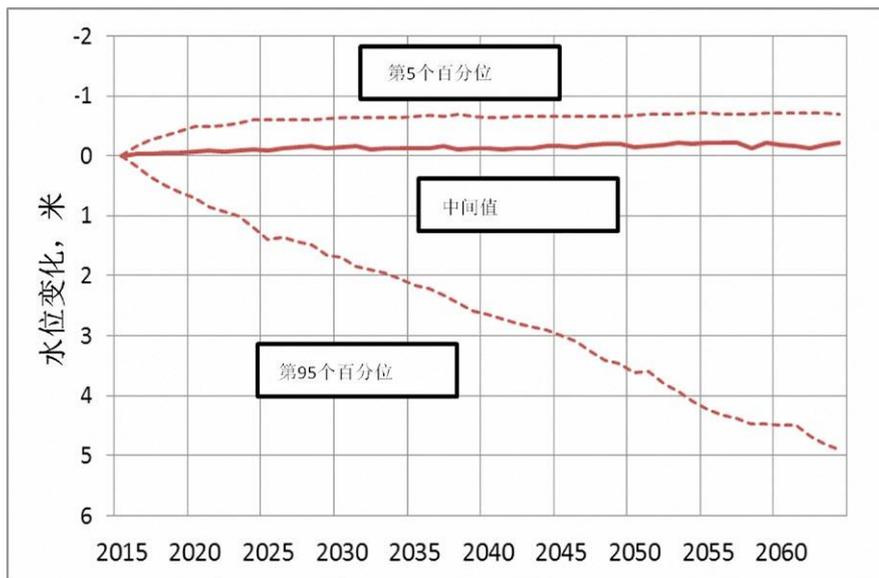


图 10.3 50 年内潜在水位变化

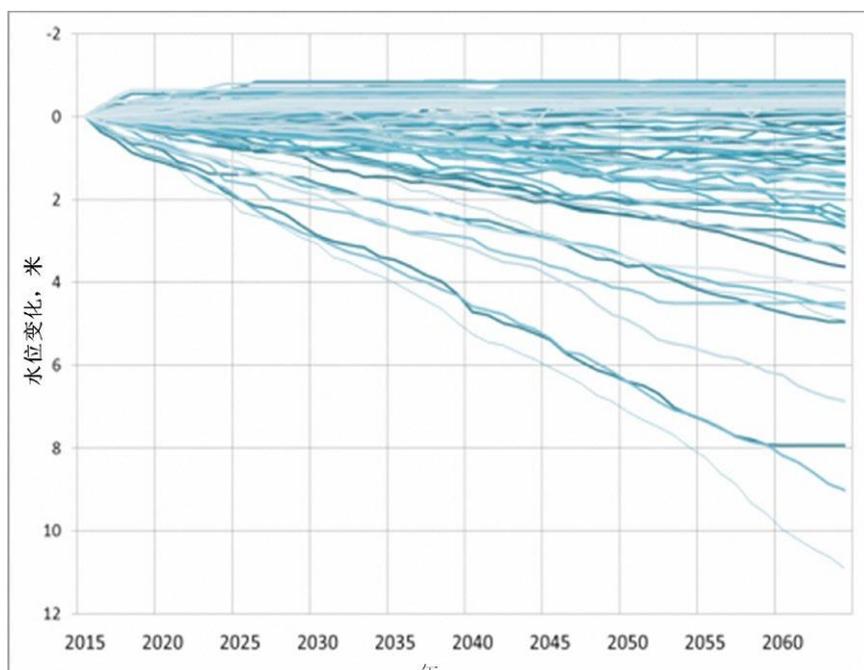


图 10.4 部分水位变化模拟示例

我们进行了大量情景模拟实验。在这些情景模拟中，样本概率分布位于 55% 的情景中，水位保持稳定，即进入地下水的流入量等于或大于流出量。样本概率分布位于 70% 的情景中，未来 50 年内水位将下降 1 米。样本概率分布位于 2% 的情景中，未来 50 年内水量将枯竭。值得指出的是，尽管这一概率相对较低，其将为政策和未来项目规划或扩展产生重要的启示。尽管这一概率的信息价值较低，⁷ 仍需要注意以下几点：1) 如信息价值分析部分所述，尽管单一的水位变量不具有信息价值，但组合变量具有较高的信息价值，且每年监测用水量和水位的成本较低；2) 如果考虑扩展当前项目区，那么水层枯竭的概率及信息价值均可能增加；3) 有些潜在的消极影响并未纳入考虑——即便水位保持不变，也可能产生下游成本，因为灌溉用水将从水层中溢出到当地河流湖泊中，进而对下游人口及其生计产生潜在影响。

10.6.3 未来收入下降风险

考虑到水层的资源局限性，未来收入将取决于绿化的可持续性。如果水层出现枯竭，那

么其将对产量和收入产生巨大影响。在水层枯竭前，泵浦能和钻孔的灌溉成本可能出现增加。收入下降风险可以“损失超越曲线”（Loss Exceedance Curve, LEC）表示。这是一种向保险和金融行业沟通常见风险的方法。损失超越曲线表示的是可能蒙受特定或更大损失的概率。在本项目中，损失超越曲线表示的是 50 年内某一具体或者甚至更多收入出现下降的概率。

图 10.5 显示了出现各种收入下降情景的概率相关的模拟结果。这一模拟表明收入保持不变或增加 92.5%。因此，该图的模型模拟结果表明，2015-2065 年间，样本概率分布位于 7.5% 的情景下出现了收入下降。该图还表明，同一时期，样本概率分布位于 2% 的情景下，实际收入下降了 25%。这一收入下降风险主要源于农业活动的过度用水风险。需要说明的是，在一次研讨会上，亿利资源集团管理层提供了一个假设的、非官方“风险承受能力”曲线。这一风险承受能力曲线不代表亿利资源集团的官方观点，而是仅反映亿利资源集团其中一些管理人员的风险偏好。该图表明，模拟的收入下降风险在某种程度上高于相关管理人员的偏好风险承受能力。

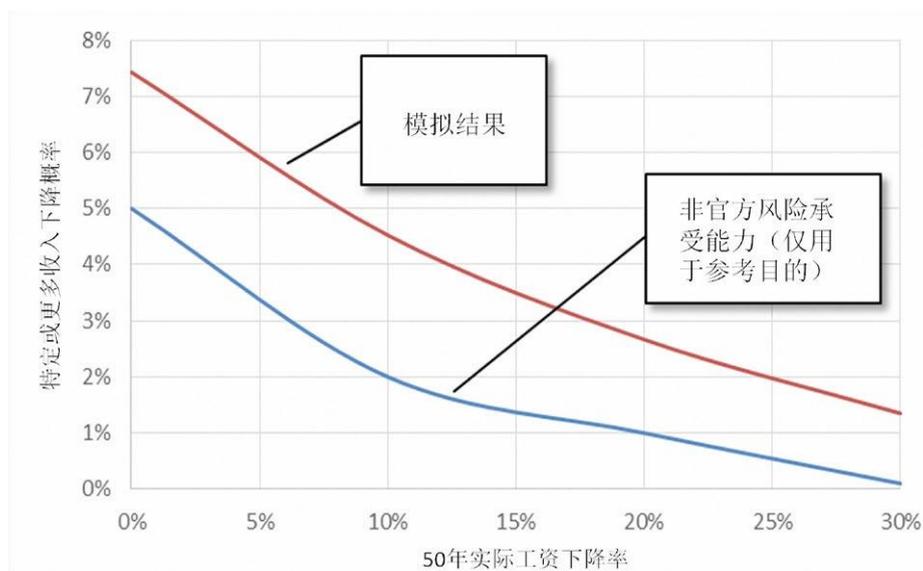


图 10.5 收入下降与非官方风险承受能力模拟损失超越曲线

⁷ 即便是出现水层枯竭的罕见情况，那么也将出现在 50 年分析后期，且将较少会对净现值产生显著影响。信息价值为何可能比较低？如果 50 年后水层将枯竭，那么请注意，项目投资前 50 年内的净现值将不会反映这一负面影响。

在理想情况下，此类工具可用于收集当地人口总体中代表性样本的风险承受能力。事实上，某种程度的风险是不可避免的，但定量表述的损失超越曲线可传达何种程度的风险是可接受的。当某部分模拟风险高于风险承受能力时，应采取一些风险减缓策略来降低相关风险，直至其达到每一点的声明风险承受能力。

10.6.4 库布其项目进一步扩展

整体而言，进一步开展绿化行动的风险和回报将至少等同于当前的风险和回报。由于现已进行了某些基础设施投资，进一步项目扩展将获得相同效益，但初期投资成本降低。

库布其项目启动初期的投资成本为\$350-\$600/公顷（包括固土、苗木基地等）。进一步项目扩展预计平均成本将减少 20%-80%。因此，从风险回报的角度来看，每增加一公顷绿化土地至少将实现短期收益，投资不当的风险相对降低。尤其是从当地群体的角度来看，短期内仍需要进行进一步绿化。

进一步项目扩展面临的主要风险是长期水量过度开采风险。尽管目前面临部分水量过度使用风险，但由于开发的项目区可能仅占整个水域的一小部分，这一风险得以部分缓解。此外，非本土蔬菜和树木等耗水型物种也仅为开发区域的一小部分，而其余物种大多为沙漠区域本土植物，这在某种程度上也减缓了水量过度使用风险。然而，项目区的进一步扩展，尤其是当耗水型植物种植面积进一步增加时，水量枯竭的风险无疑将加剧。

10.6.5 模型未涉及的方面

尽管模型涵盖了 100 多种单个变量，模型仍进行了一些简化。前文已指出，作为简化表征，模型将省去一些细节。仅使用模型中包含的变量的预估值范围来表示水文、植物生理、天气和当地经济之间的复杂关系。

此外，尽管模型尝试估算农业和某些非农业收入，但其并未尝试在分析沙尘暴减少对健康成本减少的影响之外，测量当地农村人口生活质量的改善情况。参与这一评估的分析人员将这些方法应用于环境政策、健康和安全的有关问题，但可通过开展进一步的工作来量化相关影响。

当地人群获取的效益是沙漠绿化活动与其它投入相结合的结果。亿利资源集团作出了长期承诺，将利润进行再投资，以造福当地人群。亿利资源集团积极践行这一承诺，为当地建立学校、基础设施并创造新高薪职业。评估绿化项目及亿利资源集团的大量持续社会投资的影响并非本工作的目的。

10.6.6 对其它沙漠绿化项目的启示

将模型保持相对较高的水平，但并不涉及相关领域的过多细节的一个优势在于，促使模型更适用于其它潜在项目。相关结果对于整体的沙漠绿化项目具有重要意义。以下列出了几点有关如何将相关研究结果应用于其它项目的说明：

1. 库布其沙漠的干燥程度与世界其它沙漠区可能有所不同。沙漠的一般定义为：年降水量不足 500 毫米的区域，但许多沙漠的年降水量不足 200 毫米。库布其沙漠的年均降水量为 280 毫米。另外，库布其沙漠属于温带沙漠，冬季寒冷，热带沙漠的水文条件可能不利于维持植物生长。项目区邻近黄河也是需要考虑的一个因素，另外河川径流源自于青藏高原的融雪。
2. 库布其沙漠项目通过使用大部分本地植物种，及仅开发一小部分区域的方式来控制耗水量。非本土树木和蔬菜可能将引起长期水量枯竭。只要这些耗水型植物仅占一小部分，那么则可确保项目的可持续性。
3. 库布其沙漠项目可对水位和灌溉用水进行直接的实证测量，以减少不确定性。很明显，更复杂的水文和植物生理模拟将有助于减少未来绿化项目水文方面的不确定性。
4. 有必要做出长期承诺。无论资金源于何处，显著效益的实现时间将达数十年之久。对于可提早实现经济自立的某些区域而言，增量式开发有助于持续发展。
5. 可适当要求提供政府补助。沙漠绿化的效益远远超出了企业投资商的经济效益范围。沙尘暴的减少、旅游业的发展及整体生活水平的提高等效益，不是投资商所能单独实现的。

10.7 模拟建议

基于以上研究成果，我们汇总提出了以下关键建议：

1. 考虑类似沙漠绿化项目。在世界其它与库布其沙漠（温带沙漠，年降水量在 200 毫米以上）类似的区域（可获得地下水），可开展类似项目。此外，与干燥沙漠相比，适宜温度和湿度使得库布其沙漠地区的蒸发不再构成一大问题。近期遭遇荒漠化的区域是理想的项目开发地。
2. 开发更完善的水文和植物生理关系的模型。在理想情况下，未来沙漠绿化决策将使用更详细的产量曲线（将产量作为用水量的一个函数），摄水量模型，及水层、河流、地表水体等不同区域的水文关系。即便对于当前实现绿化的区域，如库布其项目区，更详细的水文模型将有助于未来扩展决策及其它管理决策。
3. 每年监测水位和灌溉用水。每年进行追踪监测，观察项目区各监测点的水位变化情况。此类监测成本较低，将对管理决策产生直接影响，如是否减少项目区的耗水型植物或进一步扩展项目区。
4. 只有在以更优水位监测和更详细模型的支持下，才可决定进一步扩展项目。存在长期水量过度使用的风险。降低水量枯竭风险的一个关键因素是开发有限区域（相较于更大的整个水位区域）。如果项目区所需灌溉水量显著增加，或树木和作物种植区的需水量增加，那么则将面临长期的水量过度使用风险。如果建立监测系统，且将监测数据用于构建更详细非模型，那么则可在控制水量过度开采风险的同时进一步扩展项目。

11. 结论与建议

11.1 绿色经济模式

绿色经济旨在促进经济发展，并确保生态足迹不超出环境安全界限。绿色经济具有高效利用资源及社会包容性的特征，力求通过维持生态系统的活力来确保环境安全。政府和私人投资在促进收入和就业增长的同时，也应致力于减少环境风险、加强能源和资源效率及保护生物多样性和生态系统服务（联合国环境规划署，2011b）

库布其沙漠项目是如何满足这些标准的？以两个循环来表示亿利资源集团的绿色可持续发展概念模式：荒漠化防治、产业发展、生计改善、民族和谐、自然与人和谐统一的社会循环；荒漠化防治、生态修复、土地开垦和产业发展的经济循环。

在过去的 26 年间，亿利资源集团在库布其沙漠区修建了 5 条公路，并建立了水电和通讯网络。这些投资取得成功的关键在于，通过建立创新性的长达 242 公里的“绿色生态屏障”来抑制风沙。此外，亿利资源集团还通过 5000 平方公里的植树造林工程，调控了周边沙漠的稳定性。

这些绿色工程项目已经惠及政府、企业和农牧民。基于沙漠植物，建立了制药企业；以沙为原材料，创办了建筑材料企业，同时辅以可再生能源投资。此外，基于生物多样性的增长，开发了生态旅游，构建了绿色经济模式。这些企业获取的利润重新用于沙漠修复和社会基础设施扩展和创新，如改善住房和学校设施。这些项目创造了新的市场和就业机会，改善了农牧民的生活水平。例如，农牧民的年净收入从 2000 年的 2000 元增加到 2012 年的 30000 元，许多农牧民因此摆脱了贫困。沙尘暴频率的降低及沙化的减少等因素，促使环境质量出现显著改善。种植区域的土壤健康状况，尤其是有机质含量，也有所改善。

整体沙漠绿色经济投资的平均净现值为 18 亿美元。净现值的概率分布十分广泛，这一投资 50 年内出现负净现值的概率为 12%。然而，这一分析并未考虑项目明显存在的异地社会效益，及过度使用地下水的异地成本。

库布其沙漠绿色经济模型可持续性的最大不确定性在于，树木灌溉用水对水位的影响。截至目前为止，这一影响相对较小，根据当地居民反映，年水位下降不到 10 厘米，自项目启动后，水

位下降了 1-3 米。模拟结果表明，未来 50 年内出现水量枯竭的概率仅为 2%，但水位继续下降概率达到 45%。与适应沙漠气候的植物不同，密集种植乔木的工程，应仅限于防护林带，且应确保有限的种植面积，以降低耗尽水资源及引起水位下降的风险；过于密集地种植可能导致林木枯损，尤其是会造成 20-30 年大树的枯损。重点建议进行水位监测，并建立更全面的区域水文模型。为了降低水文风险，建议持续进行节水技术投资，并种植耗水量较低的植物物种。

向邻近区域扩展沙漠绿化项目可能实现与以往投资相类似的风险和回报。由于现已进行了某些基础设施投资，进一步项目扩展将获得相同效益，但初期投资成本将更低。库布其项目启动初期的投资成本为 \$350-\$600/公顷（包括固土、苗木基地等）。进一步项目扩展预计平均成本将减少 20%-80%。因此，从风险一回报的角度来看，每增加一公顷绿化土地至少将实现短期收益，投资不当的风险相对降低。尤其是从当地群体的角度来看，短期内仍需要进行进一步绿化。

进一步项目扩展面临的主要风险是长期水量过度开采风险。尽管目前面临某种程度上的水量过度使用风险，但由于开发的项目区可能仅占整个水域的一小部分，这一风险得以部分缓解。此外，非本土蔬菜和树木等耗水型物种也仅为开发区域的一小部分，而其余物种大多为沙漠区域本土植物，这在某种程度上也减缓了水量过度使用风险。然而，项目区的进一步扩展，尤其是当耗水型植物种植面积进一步增加时，水量枯竭的风险无疑将加剧。因此，我们建议在进一步扩展项目目前，应该对当地水资源状况进行全面评估，以便依据当地水文条件，选择合适的植被种类和适宜的种植密度，进而控制水量枯竭风险。

11.2 成功要素

一系列地理、政治和社会因素，共同造就了成功的库布其沙漠绿色经济模式。项目区有利的地下水状况（种植区域地表几米内含有地下水资源）为树木种植和生长创造了有利的环境。这些条件得益于与黄河的地缘邻近性及该区域的地质环境。此外，相邻的承压含水层还提供了灌溉水源。

树木选种/培育、种植、灌溉和管理方面高水平的科技创新，是项目取得成功的关键。其中，用于树木种植的“水冲法”是一项重大突破，促

使树木存活率从 20%提高到 85%以上，同时提高了种植速度、降低了成本。沙障技术对于保障基础设施投资至关重要。借助当地经验和树木种质资源，也有助于选择适应干旱气候的植物种（耐盐性、耐寒性、耐旱性），同时可产出高价值产品。高水平的科技创新将拓展到制药业和沙产业，并促进沙漠资源的高效利用。

早期基础设施投资也是沙漠绿化项目的一大驱动力，首先创造了荒漠化防治的需要，然后创造了市场机遇，鼓励沙漠产业投资。这反过来刺激了社会基础设施投资，如改善住房、服务和学校设施。

土地所有权和自然资源管理方面的国家政策，不仅提供了有利的政策环境，同时也成为沙漠化防治工作的一大驱动力。土地产权制度的变革及土地所有权和使用权、家庭联产承包责任制的明晰，为植树造林工程投资创造了激励条件。1978-2000 年颁布的一系列自然资源管理政策和法律及 2000 年后开展的多项重大荒漠化防治项目，均增强了绿化工程项目的势头。

强有力的政府-私营企业-社区合作伙伴关系更是推动项目取得成功的最重要因素。有利的政府政策促进了私营企业和社区的参与及强有力的合作伙伴关系的建立。亿利资源集团在平衡生态、改善环境及基础设施联合投资中发挥了重要作用。远见卓识和理想十分关键，尤其是考虑到植树项目效益的实现需要花费较长的时间（20-30 年）。亿利资源集团还与科研机构建立了重要伙伴关系，产学研结合推动了技术创新。政府和亿利资源集团通过上述提及的有利政策、法律和激励措施，创造就业和市场机会，建立企业组织和社区机构等方式调动当地社区参与绿化项目。

政府-私营企业-社区合作伙伴关系的一个关键特征是适应学习过程。库布其荒漠化防治的成果与亿利资源集团等企业的联系并非源于完善的计划或在行动前做好了充足的准备。事实上，基于当地的实践大胆创新，并根据积累的经验 and 理论不断调整计划，推动了库布其沙漠绿色经济项目的发展。

亿利资源集团执行机构的领导力，构成了库布其沙漠绿色经济项目的一大驱动力。亿利资源集团企业的利润用于对库布其地区企业和社会发展的再投资，推动了当地社区对绿化项目的贡献。亿利资源集团在项目初期与政府建立的合作伙伴关系，

也推动了项目进展及政府政策的制定。

11.3 扩展沙漠绿色经济的考量因素

上述章节介绍了向其它沙漠或干旱地区推广库布其沙漠绿色经济模式，需要考虑的关键因素。这些因素可进一步汇总为可持续发展沙漠绿色经济项目的几条原则：

1. 高效利用本土种质资源和相关实践经验，与技术创新相结合。
2. 确保获取可持续的水资源用于补充性灌溉，采用高效节水的灌溉技术。
3. 利用沙漠植物资源及产品来开发相关产业。
4. 对项目进行管理，最大限度减少和审慎控制需水量较多的速生林及外来和高价值作物的种植面积，以减少耗水量，同时尽量扩大需水量较少的本土植物的种植面积。
5. 要求政府提供优惠政策：1) 提供土地、林木和林木产品使用权的保障措施；2) 为植树造林和长期管理提供激励措施；3) 在开发沙漠绿色经济企业的过程中，鼓励和支持政府-私营企业-社会合作伙伴关系的建立（这包括早期基础设施投资，鼓励偏远区域投资和市场准入）；4) 促进政府投资或政府支付生态服务（这些生态服务可能为公众而非当地投资商提供）；5) 鼓励私营部门投资于生态公共福祉。
6. 制定长期投资远景和计划，并采用适应性管理和学习方法。鼓励当地社区、当地政府及私营企业中具有远见的领导人促进沙漠绿色经济长期投资。
7. 鼓励投资者树立长期思维。显著效益的实现时间可能长达数十年之久。对于可提早实现经济自立的某些区域而言，可开展增量式开发活动，以促进持续发展。
8. 鼓励将很大一部分利润重新投入沙漠企业及相关社会基础设施（如改善住房、学校设施和服务）。
9. 可适当要求提供政府补助，沙漠绿化的效益远远超出了企业投资商的经济效益范围。沙尘暴的减少、旅游业的发展及整体生活水平的提高等效益，不是投资商所能单独实现的。

10. 未来绿色经济投资的应用信息、经济学分析有助于完善计划，并证明进一步信息和监测可能有助于完善绿色经济投资决策的领域。

附录 1 其它研究机构的技术创新

本附录中列出了与亿利资源集团建立了合作伙伴关系的其他研究机构的技术创新，并确定了未来需要的研究。

荒漠化防治和沙漠植物生产

飞播植树造林荒漠化防治技术

阿拉善左旗林业治沙局阿拉善左旗林业工作站

乌兰布和沙漠与腾格里沙漠东南边缘采用了飞播技术进行植树造林，该区域的年降水量在 100-200 毫米之间。通过实验开发了一系列荒漠化防治技术，包括飞播技术。研究发现，最好选择低矮平缓沙丘地作为播种区域。采用飞播技术的主要植物包括细枝岩黄芪、沙拐枣和籽蒿。当在 6 月 20 日-7 月 10 日进行播种时，植被覆盖率可达到 12.8-50.4%。

草地荒漠化和退化综合控制技术

牧区水资源研究所

该技术体系为半干旱草地地区的生态修复和综合改善建立了优化配置模式。主要技术包括：强调草地自然修复的综合改善技术；基于青贮玉米种植不同水文年和生产量的喷灌技术；封闭家庭生态草地、天然草地和人工饲草地生产潜力的预测和计算方法。经示范推广后，示范区的平均植物覆盖率从最初的 30% 增加到 75%，环境承载力提高了 2.4 倍。

“四位一体”绿洲边缘风预防及固沙控制技术

甘肃省治沙研究所

“四位一体”沙漠绿洲边缘风预防及固沙控制技术由以下要素构成：前缘风障和挡沙防护林带；固沙防护林带；活植物沙障和封沙挡沙防护林带；林草种植带。这一技术成功应用于西北干旱沙漠绿洲边缘区域。

巴丹吉林沙漠东南边缘退化植被修复技术

甘肃省治沙研究所

开发的技术包括：沙障辅助；固定沙丘水收集；退化人工梭梭林中的怪柳和唐古特白刺掘根技术（以恢复生态功能）。实施机构提出了“外缘稀疏、内部逐渐密集”的梭梭林（在 110 毫米

年降水量的情况下，每公顷 270 株）非均匀配置模式。引进了 2 种新的棉杆沙障和 9 种新的抗旱、抗盐性植物物种。民勤县主要风沙灾害区域应用和示范了这一技术，取得了良好效果。

农牧业交错区综合控制和开发配套技术

中国科学院应用生态研究所

这一技术解决了农牧业交错区土地面临的荒漠化、退化和低生产力等关键问题。引进了先进实践技术，包括固沙和植树造林；改善沙地低产量区；提高退化土地产量；引进和种植沙地果树。此外，还开发和应用了沙化、退化土地合理开发利用的多种改良技术。

中国北方综合荒漠化防治技术

中国林业科学院；甘肃省治沙研究所；中国科学院寒区旱区环境与工程研究所等

1. 塔克拉玛干沙漠绿洲外围流沙控制技术。实施机构成功开发了缩短缓苗期的技术，即在抗旱龙（一种抗旱剂）浸泡植物根系及适用于植树造林的成套技术，即节约极端干旱地区用水，节约 70-80% 的用水量，树木存活率提高 40%-50%。
2. 河西走廊盐碱地“三系”防治技术。实施机构使用淡水淋洗盐分，通过挖沟渠进行盐分排放，并通过生物盐抑制法，培育抗盐植物，改良土壤和发展畜牧业等方式来降低盐分。据报告，0-60 厘米深的土层的盐分降低了 31%-76%。
3. 青海 - 青藏高原高海拔、寒冷和干旱荒漠化防治技术。实施机构选择了 5 种耐寒、抗旱灌木，首次将其种植于超过 3400 米海拔上限的地区。他们开发了四位一体（成熟幼苗—深埋—沙障—围地）配套技术来建立固沙防护林，以打破高原植树局限。雨养林木的存活率达到 75% 以上。
4. 河套灌溉区节水灌溉技术和综合沙地利用。实施机构使用了渗流节水灌溉技术，开发了大规模的“统一电力、水、农田、林地、公路规划，及灌木、草类、作物、草药和经济植物综合运营”的控制模式，为此，输水环节实现了 30% 以上的节水量。
5. 辽宁省西北部沙地修复和防治技术。实施机构培育了彰武松和樟子松良种，利用大规模、多层级的嵌入式配套技术来构建涵

盖多种林木及具有多重效益的区域森林保护系统，开发了樟子松固沙防护林合理密度、退化土地修复和巩固及可持续森林保护管理的相关技术。

6. 沙漠绿洲水平衡和绿洲可持续发展研究。实施机构提出了科学配水方案、灌溉周期、灌溉定额、优化灌溉单元等配套技术。

干旱沙区沙地综合防治技术 宁夏自治区农林科

学院沙漠研究所 综合防治技术包括以下内容：

3D 复合灌木草

地合理配置技术；饲料灌木遴选技术；经济和实用整地技术；低成本植树造林技术。可根据当地情况及不同季节结合使用这些技术。

新疆荒漠化防治生物技术

中国科学院新疆生态与地理研究所

这一技术包括引进和驯化固沙植物和荒漠化防治措施。成功引进 85 种植物。三种措施业已证明有效，分布为使用收集水进行植树造林；在迁移的湿沙层进行种植；秋季灌溉。这三种措施实现的存活率分布为 80-95%、80-90%（其中最干年份达到 60%）、95%。这些技术目前已广泛应用于新疆沙漠地区的荒漠化防治工作。

青海高原综合荒漠化防治技术

北京师范大学

这一技术应用并优化了不同的沙障技术（秸秆格状沙障、黏土沙障、小红柳移动沙障、小红柳和怪柳高立式沙障、尼龙沙障等）和荒漠化防治及植树造林技术（抗旱、高秆深植、小叶锦鸡儿直播等）。在青海省共和盆地沙珠玉治沙站建立了试验示范区，以进行试验推广和应用。

风障固沙林业系统优化成套技术

内蒙古林业科学研究院

根据“按区防治，突出重点和适当种植”的原则及主要沙荒造林技术，该项目为流沙地植树造林开发了“早植、深植、壮苗、水浸”技术体系，树木存活率达 85%。项目成功引进了四翅滨藜、细枝岩黄芩、黄柳、水牛角属、沙地云杉、梭梭、四倍体刺槐等物种，以促进自然植被修复。调研区域的植被覆盖率达到 70%以上，生物结皮的平均覆盖率达到 69%。

塔里木盆地沙漠公路治沙和绿色走廊建设关

键技术研发

中国科学院新疆生态与地理研究所

相关技术包括机械防沙系统结构优化技术；绿色走廊建设绿地分类技术；高抗性植物遴选技术；灌溉技术；太阳能抽水系统；沙漠腹地列当属人工接木技术。项目开发了治沙和沙漠绿色走廊建设技术，并将其应用于塔里木盆地公路建设工程。

控制干旱地区流沙危害的经济可行和环保系统设计

科威特科学研究院（KISR）

科威特使用了综合物理生物措施来控制流沙，以防止道路损坏。这些措施具有经济可行性，且环保。

低覆盖率防沙治沙技术

荒漠化研究所（CAF）

与采用其它模式具有相同覆盖率的其它固沙林相比，排状或带状固沙林的植被覆盖率为 15%-30%，雨水渗透率增加了 5%-10%，蒸发量减少了 15%-18%，水资源利用效率提高了 10%-18%，生物生产力提高了 8%-30%。植被覆盖率接近于自然植被覆盖率，且具有抗旱特征。植被和土壤的修复速度增加了 3-5 倍。与现有植树造林方法相比，所需幼苗数减少了 50%-70%，植树造林所需劳动力减少了 30%-50%，综合植树造林固沙成本减少了 40%-60%。

新疆圆柏生态特征和植树造林技术研究

内蒙古农业大学

新疆圆柏幼苗产量得以提高，冬季发芽率和存活率达到 90%以上。在此项研究中，首次筛查了 RAPD 引物新疆圆柏分子标记，显示了不同新疆圆柏微栖地环境下的不同地理变异、形态变异、演替阶段和遗传多样性。

干旱和半干旱风沙地工厂和矿山系列环境绿化技术

鄂尔多斯市林业治沙科学研究所；达拉特旗电力实业有限责任公司

这一技术包括绿色植物优化选择和绿化建设。开发了不同工厂和矿山的绿化模型。在实施

后，植被覆盖率增加到 53%。

科尔沁区沙地经济区域建设技术

通辽市林业科学研究所

这一技术基于保护网建立了农业圈、草类圈、林业圈和围地保护圈。在保护网内，实施了以下措施：修建房屋、挖井、建造小隔间、平整土地、改良土壤和建立基本农田。通过整合放牧、耕种和植树造林活动，实现了水、草、林、粮（饲料）协调管理及机械化，形成了稳定了生态系统。

沙质土壤改良和生产应用技术

内蒙古三岩矿业有限公司；内蒙古农业大学；中国科学院兰州沙漠研究所奈曼治沙站

通过采用膨润土作为主原料，然后添加植物纤维素、腐殖酸等成分，配制出了土壤改良剂。该产品具有强吸水性、膨胀、高阳离子交换能力等特征，包含植物所需的钾、磷、钠、镁、锌等微量元素。该产品有助于改善土壤团粒结构，加强土壤顺应力，降低堆积密度，中和盐碱，吸收脂肪和其他有害元素，补充作物养分，促进根系发育，并最终截留水分和养分，增加作物产量。

阿拉善干旱荒漠区列当属人工接木

阿拉善林业治沙研究所；阿拉善右旗雅布赖治沙站；阿拉善左旗林业局；阿拉善额济纳旗林业局

该项研究成功开发了列当属人工接木技术（营养诱导法和弹纸接木法），其有助于提高接木成功率及生长。采用这种技术进行列当属接木可节约 50%的种子（每个坑），大大降低了接木成本，接木面积达 3.333 km²。

白刺分析与利用

包头医学院

研究证实了白刺的营养价值和抗氧化效果。开发了 2 种白刺饮料，实现了良好的经济回报。

宁夏干旱区柠条饲料加工、利用和产业化

宁夏省农林科学院沙漠研究所

将柠条残枝或枝条用作开发粉料和全料的原材料饲料产品符合相关国家标准。

泥炭资源开发和利用技术

内蒙古林业科学研究所

将泥炭作为一种自然有机资源用于植树造林，这有助于改善沙土的含水量和水土保持能力，提高土壤肥力，促进植物生长。在应用后，泥炭可提高植树存活率和生长率。

牛心朴子生物杀虫剂生产技术

内蒙古科技大学；南开大学

利用内蒙古生长的野生有毒植物研究天然杀虫剂。开发了适用于发展绿色水果、蔬菜和花卉等绿色农业的低毒性植物杀虫剂。

根部灌溉节水技术

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所

通过安装“防堵根系灌溉滴头”或“直接插入的渗透灌溉滴头”等专利产品实施这一技术。这一技术直接将水灌溉到一定深度的植物根系土层，与地表滴灌技术相比，可实现 30%-50%的节水量。这一技术有潜力广泛应用于干旱地区的节水灌溉活动中，包括林业和水果生产活动。

技术研发需求

亿利资源集团为未来 5 年的库布其沙漠产业开发和规划指出了以下技术研发需求。

土壤改良、化肥和节水集成技术

沙漠地区截留水分和养分的能力较低，遭遇严重的沙化问题。开展水分和养分保存集成技术的相关研究，并对风沙土采取抗碱性措施，以增加耕地面积，扩大人类居住范围。

适应沙漠环境的植物物种的引进、驯化、繁殖和产业化

引进耐旱、耐寒、抗盐碱性物种，包括景观植物、花卉、水果、葡萄和草类，开展驯化、繁殖和培育研究，以实现产业化。

库布其沙漠植物资源的利用和产业化

开展沙漠灌木资源综合利用研究，例如利用野生草药生产有机饲料。从有毒沙漠灌木和草类中汲取有毒物质，用于研发生物农药、药物及其它终端产品。

现代农业技术集成和循环经济产业化

调研和示范沙漠生态家庭农场农业模式，包括研究沙漠有机水果、蔬菜和畜牧生产技术。

水资源保护和保护性利用

引进新节水灌溉技术，并促成其产业化，保护和合理利用沙漠地区的水资源。

沙漠地区清洁能源的利用和产业化

基于沙漠地区的土地、太阳能和风能资源，开发廉价的可持续清洁能源，建立大型发电站。

沙漠地区微藻类资源的开发和利用

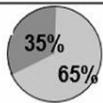
研究集成技术，示范大规模、低成本微藻类 培育收割及工业加工技术，建立微藻类产业链。

附录 2 风险-回报模型输入表 (节选)

模型输入表描述

变量名称	下限	公式&最佳估值	上限	分布类型
经济环境	2	3	4	5
成本通胀 ①	2.5%	4.5%	10.5%	4
相对于一般成本通胀的食品通胀	-0.5%	0.2%	1.2%	4
年粮食商品通胀		4.7%		
相对于一般成本通胀的劳动力通胀	-0.1%	0.5%	2.0%	4
年劳动力通胀		5.0%		
人民币/美元汇率		6.12		
库布齐农民工日工资	\$2	\$5	\$16	4
库布齐项目总开发面积 (公顷)		600,000		
项目区人口	60,000	89,000	132,000	2

- 1) 在第 1 列输入变量名称；
- 2) 在第 2 列设置变量数值范围预估下限；
- 3) 在第 3 列设置变量数值范围预估最佳估值；
- 4) 在第 4 列设置变量数值范围预估上限；
- 5) 在第 5 列中，对于具有结果范围或二元概率的变量，选择 1-5 中的一个数对应分布类型（参见下表）。

分布*	每列包含内容		布类型
	上限&下限	最佳估值	
正态分布 	代表“90%的置信区间”	仅测试数值，不用于分布计算	1
对数正态分布 	代表“90%的置信区间”；对数正态分布的绝对下限一般为0	仅测试数值，不用于分布计算	2
均匀分布 	代表绝对（100%）的上限和下限	仅测试数值，不用于分布计算	3
分割三角形分布 	代表绝对（100%）的上限和下限	代表中间值；存在相同数量较高或较低概率的一点	4
二元分布 	不适用；应为空	代表事件发生概率	5

附录 3 风险-回报模型随机现金流表 (节选)

模型现金流表描述

模型现金流表是将输入表中的变量用于构建可随时间产生不同过程结果的模型。变量的最佳估值纳入一定时限 (一般为 5-20 年) 的成本效益分析中。

将在现金流表中输入模型中的时间相依变量,但并不在现金流表中进行模拟。模拟值将在随机现金流表 (及注明分布类别的变量的输入表 H 栏) 中显示。

随机情景		2015	2016
现金流变量		1	2
经济环境			
一般价格指数		1.000	1.034
食品价格指数		1.000	1.044
劳动力价格指数		1.000	1.039
人民币/美元汇率		6.12	
水资源预算			
降水量			
年降水量, 随机变量		0.68	0.57
年降水量 (毫米)		317	293
调整降水量 (毫米)			

- 1) 在第 1 列输入变量名称;
- 2) 在前二行中注明模型年份或时限;
- 3) 在剩余表中, 使用输入表中的变量通过参考公式来创新模型总时限内的现金流。

模型设置

现金流表的设置是确定的, 所有数值参考输入表 C 列中的节点值。含有随机成分的现金流表中的变量将作为随机现金流表中的系列模拟结果。根据逻辑运算流入随机现金流表中的输入表中的数值范围 预估值将输入现金流表中。“蒙特卡罗设置”宏的自动运行将复制从现金流表到随机现金流表中的所有运算逻辑和方程。

Variable Name	Lower Bound	Formula & Best Estimate	Upper Bound	Dist. Type
Economic Environment				
Cost inflation	1.0%	1.0%	10.0%	4
Food inflation relative to general cost inflation	-0.5%	0.2%	1.2%	4
Food Commodity inflation per year		6.3%		
Labor inflation relative to general cost inflation	-0.1%	0.5%	2.0%	4
Labor inflation per year		5.0%		
RMB/\$ exchange rate		6.12		
Daily wage, Kubuji farm workers	\$2	\$5	\$16	4
Total developed area in Kubuji project, (DIA)		600,000		
Human population (in project area)	60,000	89,000	132,000	2

Random Scenario		Year		
Cash Flow Variables		2015	2016	2017
		1	2	3
Economic Environment				
General price index		1.000	1.034	1.030
Food price index		1.000	1.044	1.030
Labor price index		1.000	1.039	1.040
Yuan/dollar exchange rate		6.12		
Water Budget				
Precipitation				
Rainfall by year, stochastic variable		0.68	0.57	0.68
Rainfall by year, (mm)		317	293	190
Adjusted Rainfall (mm)		317	293	190

输入表

现金流表

术语表

术语	定义
a	年
实际蒸散量	由于蒸发和蒸腾作用，从地表流失的实际水量。
风积	由于风的运动或与风相关的活动造成
BP	距今
生物炭	生物质碳化形成的固体物质。生物炭可加入土壤当中，以改良土壤特性，减少生物质排放（这些生物质将自然分解为温室气体）。生物炭是生物有机材料（生物质）在缺氧或绝氧环境中，经高温热裂解后生成的固态产物。既可作为高品质能源、土壤改良剂，也可作为还原剂、肥料缓释载体及二氧化碳封存剂等，已广泛应用于固碳减排、水源净化、重金属吸附和土壤改良等方面。
棋盘格	在一个类似于棋盘的模块里种植替代树种的马赛克模式
成本效益分析	汇总与干预措施或投资相关的所有成本效益的一种经济分析方法。
围地	为将一些不必要动物排除在外而围起来的特定区域
蒸散	地表水分蒸发与植物体内水分的蒸腾的总和。
化石水	底土存储水，不通过年降水补给。
ha	公顷或 1000m ² 或
陶粒	用于建筑工程的结构级轻骨料。
全新世	更新世（距今 11700 日历年）后开始的地质时期，持续到现在
损失超越曲线（LEC）	描述可能超越各种损失水平的概率的曲线。
芒硝	含水的钠硫酸盐矿物
mu	中国的面积单位，1 亩相当于
MW	电力单位
净现值（NPV）	某一时段内现金流入与现金支出现值的总和。
归一化植被差异指数（NDVI）	反映土地覆盖植被状况的一种遥感指标，与叶面积指数、潜在光合作用及地面净初级生产力存在紧密相关性。
蒸发皿蒸发量	气象站记录的标准蒸发皿水量的蒸发量。这是一种结合多个气候要素影响的测量：气温、湿度、降水、干旱分散、太阳辐射和风力。也是测量参考蒸散量的一个指标。具体数值取决于蒸发皿类型。

牧民	在天然牧场放牧的农民
更新世	2588000-11700 年前的地质时期，期间经历了世界最近的多次冰
潜在蒸散量	使用地表系数校正的参考蒸散量，是衡量大气通过蒸发蒸腾作用从地表吸收水分的能力的一个指标（假设不控制供水量）。
支撑剂	处理水或液体中悬浮的沙子或类似颗粒物质，用于水力压裂，以确保保持裂缝开放状态。
沙生植物	在流动沙丘，尤其是沙漠中生长的植物。它们具有很强的适应性，可存活于风成沙中。
旗	旗是中国自治区的一个行政区划。中国有 5 个当地政府层级：省、市/州、县、乡、村。旗相当于县。
第四纪	新生代最新的一个纪，2588000 年前至今
参考蒸散量	表示环境蒸散需求，代表短绿作物（草类，完整遮蔽地面，高度均匀，土壤中拥有充足的水分）的蒸散率。
投资回报率	按照投资成本划分的投资效益（回报）；结果与百分比表示。
风险回报分析	不仅考虑某一干预措施或投资的成本效益，同时还考虑风险或获取特定回报的概率的一种经济分析方法。
RMB	人民币，中国的流通货币
跃移	风或者水运输的颗粒。经常发生在疏松材料被运输至地表之前，从河床或者基底移动，被液体承载。
沙化	应风力或水侵蚀风沙或泥沙沉积，进而引起土地退化
第三纪	6600 万-258 万年前的地质时
天然碱	非海相蒸发岩矿物
US \$	美元，美国的流通货币。美元与人民币进行换算时，按照当年的平均汇率换算。
信息价值分析（VIA）	当面临不确定时，计算进一步信息的潜在效益的一种决策分析方法。
水位	水压头等于大气压的表面；或被邻近地下水浸透的次表层物质的表面。
旱生植物	适应沙漠等缺水环境的植物物种。
yr	年



www.unep.org

United Nations Environment Programme

P.O. Box 30552 – 00100 Nairobi, Kenya

Tel.: +354 20 762 1234

Fax: +254 20 762 3927

e-mail: publications@unep.org

www.unep.org

