



## 使用植物、土壤和水来为气候降温，为地球上的地貌景观补水

### 背景

《前瞻研究简报》由联合国环境规划署出版，其目的是强调一个环境变化热点，介绍一个新兴的科学主题，或讨论一个当代环境问题。公众有机会了解不断变化的环境正在发生哪些变化，以及自己在日常生活中做出的选择会有什么样的后果，并思考未来政策的方向。第25版可增强我们对植物、土壤和地面水之间相互交织的关系和随后的能量流动的理解，也可增强我们对大气中的能量流动以及与大气的能量交换的理解。它解释了这些能量流动如何帮助缓解气候变化，同时创造有弹性的生态系统。

### 摘要

森林的持续破坏、土壤的恶化、随之而来的陆地土壤储水的丧失以及景观中保水量的减少，都扰乱了水在大气中的流动和通过大气的流动。这种干扰造成降水的重大转变，可能导致世界上许多地区降水减少和干旱增加，区域温度上升，气候变化加剧。这些变化会影响区域气候，但也可能影响到遥远的地区。了解植物、土壤和地面水之间相互交织的关系和随后的能量流动以及大气中的能量流动，有助于缓解气候变化并创造更具弹性的生态系统。

### 导言

植被在调节气候方面发挥着重要的作用，但往往被忽视。想想在一个炎热的夏日午后，站在一片犁过的贫瘠田地上，或是站在一片茂密的森林里，这两者之间有什么区别？很明显，将森林转变为农田或城市地区，会带来可能影响气候的重大变化。

在到达植被茂密的田野表面的太阳辐射中，只有1%用于光合作用，5-10%加热空气（“显热”<sup>i</sup>）。70%以上的辐射用于植物的蒸腾作用，通过蒸腾作用，液态水被转化为水蒸气，这是一个非常需要能量的过程（“潜热”<sup>ii</sup>）（图1）。算上无植被表面和水面，到



图片来源: Shutterstock.com

达地面的大约50%的太阳能被用于水的蒸发和蒸腾（“蒸发蒸腾”<sup>ii</sup>）。<sup>1-4</sup>

当这些空气团上升到大气层时，水蒸气最终会凝结并释放出与地面上的能耗相同数量的能量，其中一些会消散到太空中。新产生的云层会反射入射的太阳辐射，成为新降水的来源。

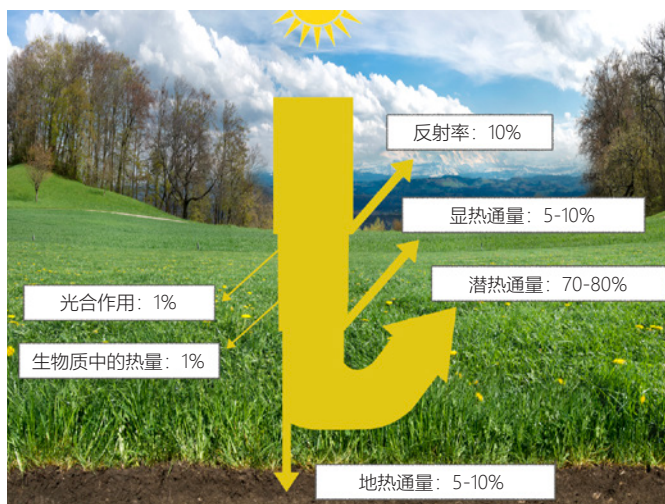
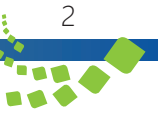


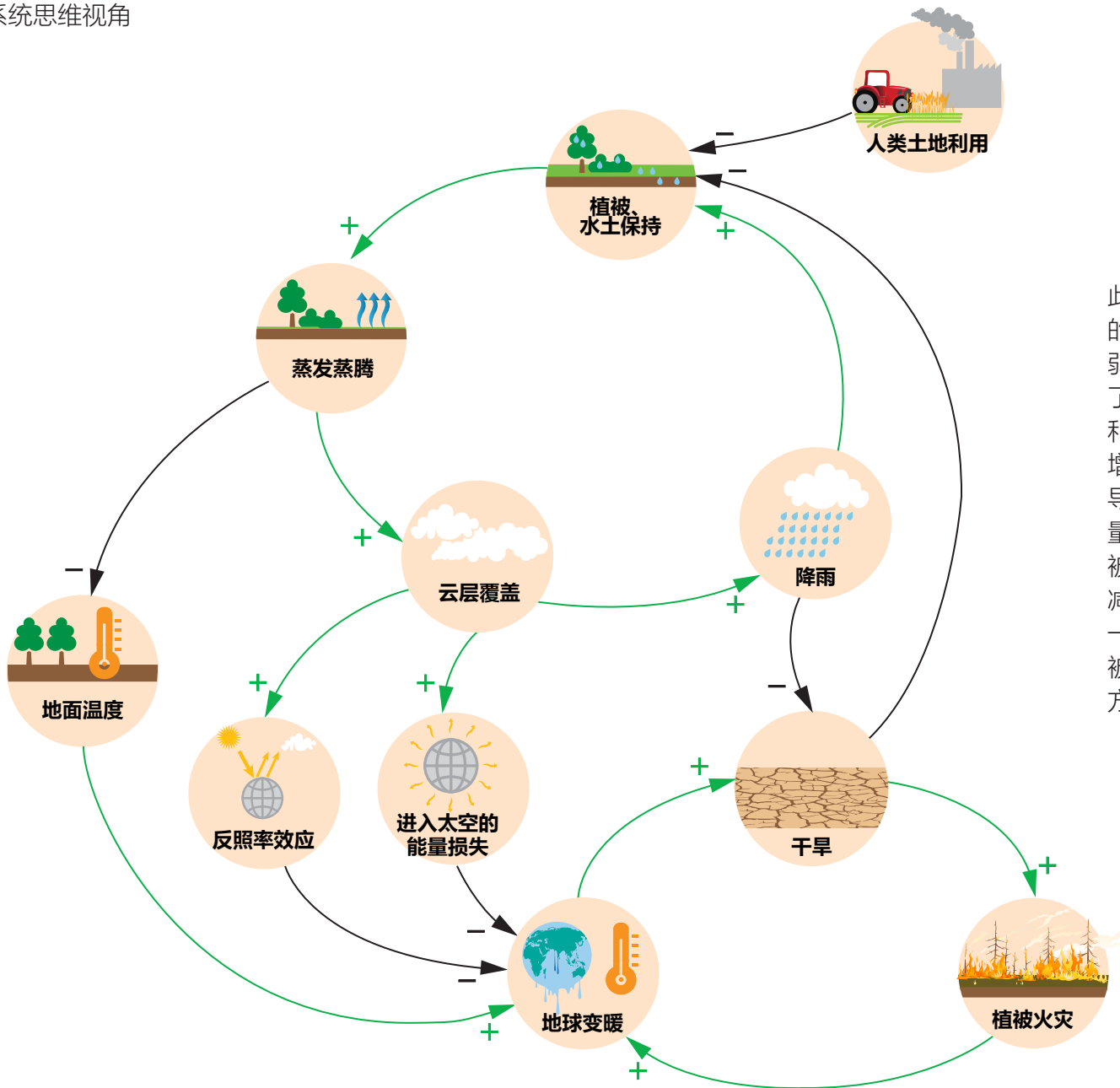
图1：入射到植被上的太阳能分布。<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 潜热和显热是在大气中释放或吸收的能量类型。潜热与液体、气体和固体之间的相变有关。显热与没有相变的气体或物体的温度变化有关。（<https://climate.ncsu.edu/edu/Heat>）

<sup>ii</sup> 水从地球表面进入大气的蒸发和蒸腾的综合过程。



系统思维视角



此系统中的关键因果影响因素——人类对土地利用的增加导致植被覆盖率降低、土壤退化、保水能力减弱，直接减少了蒸散量，增加了地面温度，进而影响了全球温度上升。增加土地上的植被将增加土壤肥力和地下水补给，增加蒸散量，进而导致云量和降雨量增加。云量增加后，通过额外反射入射的太阳辐射导致大气进一步变冷，同时还增加了转移回太空的能量，这些都对地球变暖有调节作用。当这种平衡反馈被削弱时，地球变暖将导致更多的干旱，并因降雨量减少而进一步恶化，更多的植被火灾反过来使地球进一步变暖。这些循环可以通过促进土地利用、增加植被覆盖和改善土壤保水的政策来扭转。(+)影响在同一方向上，(-)影响在相反的方向上。

## 为什么这个问题很重要？

在每年以降水形式落在陆地表面的约12万立方千米的水中，约60%来自海洋，40%来自陆地（见图2）。<sup>5,6</sup> 60-80%来自陆地的大气水分来自植物的蒸腾作用<sup>2,7,8</sup>，表明植被在为降水循环提供能量以及将能量从地面转移到高层大气上发挥着重要作用。

直到最近，与海洋蒸发相比，人类对大气中水蒸气的影响还被认为可以忽略不计。然而，人类对大气中的水蒸气的影响源于人类引起的主要土地覆盖变化，而不仅仅是像以前所认为的那样，源于工业排放。这些土地覆盖的变化确实对大气水汽循环有重大影响。<sup>9-11</sup>

自农业活动开始以来，世界上几乎一半的森林已经消失（大部分的森林砍伐发生在1950年以后）<sup>12,13</sup>，并

转化为植被更少的田地。这些人类引起的巨大土地覆盖变化对地球的水和能量通量有什么影响？

## 主要发现

### 作为水蒸气发生器的树木

森林中的每一棵树都是一个喷泉，通过根部从地下吸水，通过树干、树枝和树叶抽水，将水作为水蒸气通过树叶的孔隙释放到大气中。在一个正常的晴天，一棵树可以蒸发出几百升水，以每100升70千瓦时的功率输出为环境降温，相当于两台家用空调运行24小时的冷却效果<sup>14,15</sup>。数以十亿计的树木在空中形成了巨大的水河（“飞河”）——这些河流形成了云层，并在数百甚至数千公里外形成了降雨（图3）。<sup>16,17</sup>

### 作为降水来源的蒸发蒸腾

在全球范围内，落在陆地上的40-60%的雨水来自于通过逆风、陆地蒸发蒸腾产生的水分，主要是由蒸腾的树木产生的。<sup>11,14,18-20</sup> 在世界一些地区，这一比例达到了降雨量的70%。<sup>11</sup>这种循环在更远的内陆地区变得更加显著（图4）。

热带常绿阔叶林只占地球陆地表面的10%左右，但却贡献了全球蒸散量的22%<sup>22</sup>，凸显了其对超区域水循环的重要性。从陆地蒸发的水分在落回陆地之前在大气中传播的距离通常为500-5000公里；时间通常是8-10天。<sup>23,24</sup> 例如，中国80%的水资源来自欧亚大陆蒸发的水分。<sup>11</sup> 刚果盆地降雨的主要来源是东非上空蒸发的水分，而反过来，它又是萨赫勒地区降雨的主要水分来源。<sup>11</sup> 西非雨林的状况对尼罗河的流动尤为重要。<sup>25</sup> 这就解释了为什么即使在主要的河流流域，包括亚马逊河、刚果河和长江，降

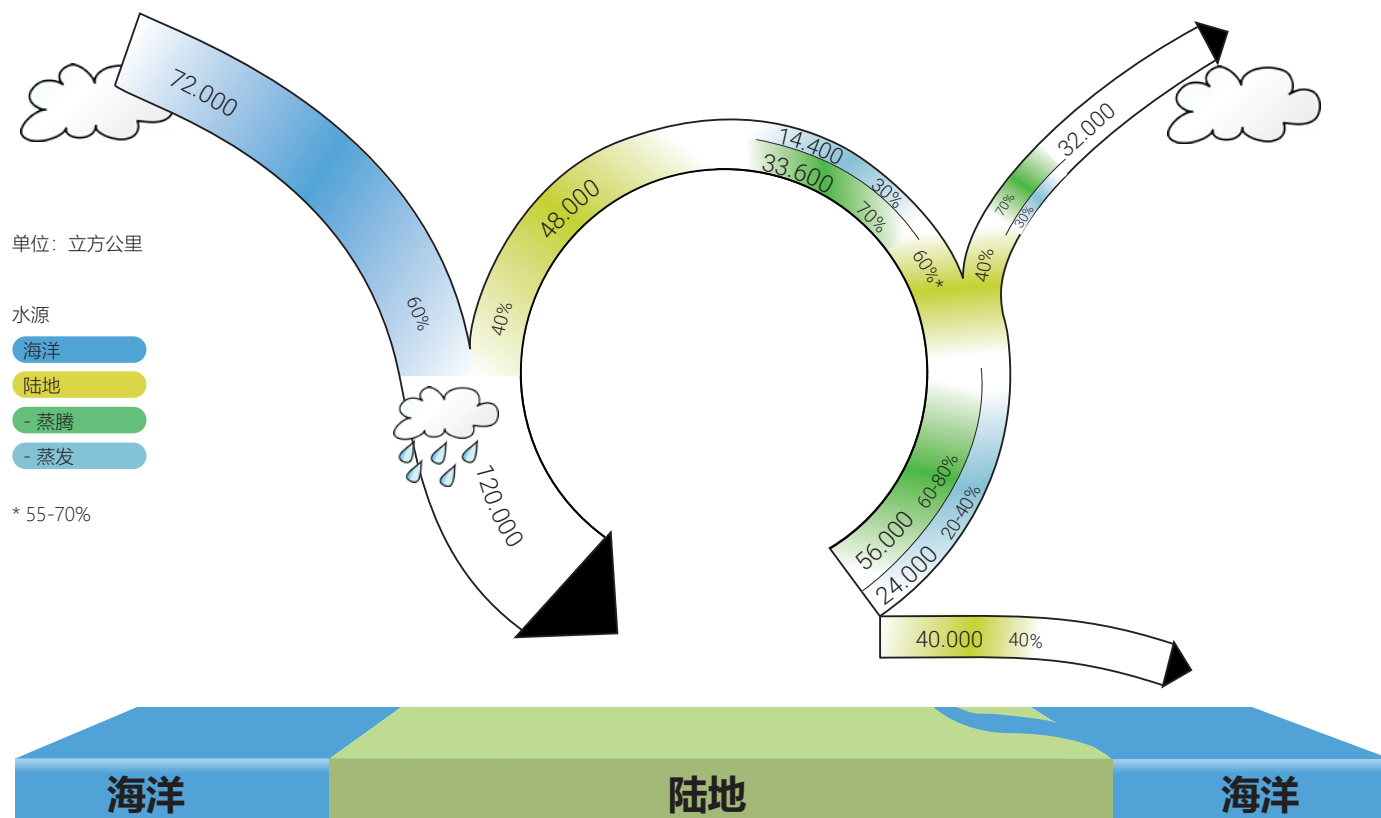
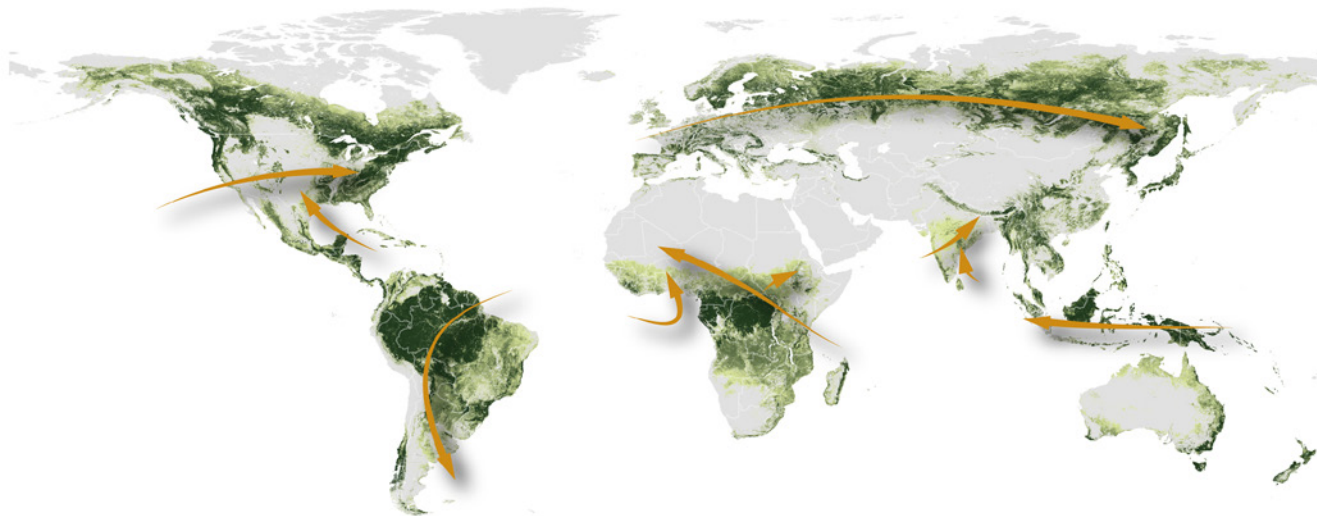


图2：全球水流动。在落在大陆上的120,000立方千米的雨水中，72,000立方千米来自海洋，48,000立方千米来自陆地。其中，60-80%来自植物的蒸腾作用，20-40%来自水体和土壤。32,000立方千米的陆地蒸发量通过湿气返回海洋；40,000立方千米经河流排入海洋。<sup>11</sup>

图形：Stefan Schwarzer, 联合国环境规划署/全球资源信息数据库日内瓦中心



**图3:** 飞河在森林覆盖的长距离内输送水蒸气，森林在产生这种蒸气中起着至关重要的作用，通过吸收和释放数十亿升的水，以湿气的形式充当一个巨大的水泵。

图形：改编自Pearce<sup>72</sup>，经美国科学促进会允许再版。

量减少，并相应减弱了亚洲夏季风环流。<sup>31</sup> 在热带地区，由于地貌景观变化（主要是森林转为作物用地），深层积云对流已被大大改变。这不仅影响到当地的降水，而且还通过被称为“遥相关”的过程在远距离产生影响。这些遥相关可能会对高纬度地区产生影响，从而显著改变这些地区的天气。<sup>10,25,32,33</sup> 即使是热带地区规模相对较小的土地覆盖扰动也会对高纬度地区造成影响<sup>34,35</sup>，例如亚马逊和美国西北部之间的联系。<sup>36</sup> 消失的森林也会导致当地降雨量减少和旱季延长，例如据报道，在巴西的朗多尼亚<sup>37</sup>或婆罗洲地区，发现森林减少最大的流域降雨量减少了15%。<sup>38</sup> 在印度，由于蒸散量减少和随后降水再循环部分的减少，印度季风期间降雨量下降的模式与印度森林覆盖率的变化相吻合。<sup>39</sup> 这展示了水蒸气和降水流动的大模式。

水受流域外发生的土地利用变化的影响比流域内更大。即使在一些未跨越多个国家的流域，流量也受到其他国家土地利用的极大影响。<sup>26</sup>

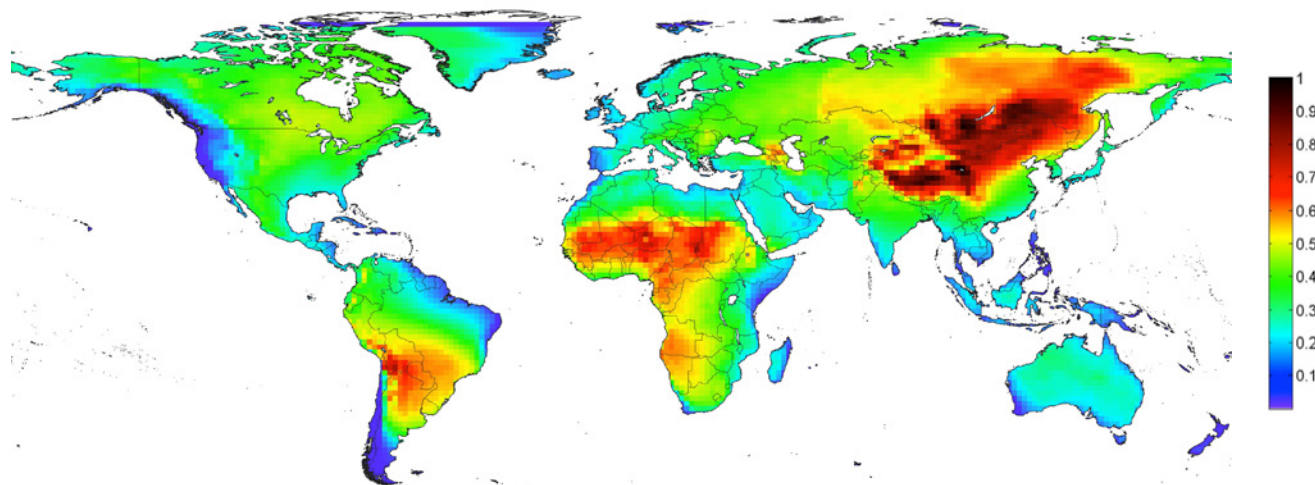
失会导致当地云量大幅减少，从而导致降雨量显著减少。<sup>30</sup> 建模表明，1700年至1850年全球大范围的森林砍伐导致印度次大陆和中国东南部的季风降雨

### 土地利用变化和改变的热通量

模型显示，从森林或草地到农田的当地变化使其年陆地蒸散量减少30-40%。<sup>27</sup> 在全球范围内，1950-2000年期间的土地覆盖变化使每年的陆地蒸散量减少了4-5%，即3,000-3,500立方千米，地表水径流增加了6.8%。<sup>27,28</sup> 另一方面，科学家发现，植被的增加具有降温效应，这是由于地表和大气之间热量和水蒸气垂直运动的效率增加导致的。<sup>29</sup>

### 由于森林砍伐导致大气模式的变化

卫星观测表明，森林对云的形成有重大影响，不仅在热带地区，而且在温带地区也是如此：森林的消



**图4:** 平均大陆降水循环率（1999-2008）。数字越大，来自陆地蒸散的降水就越多。<sup>11,21</sup>

### 裸露土壤的再辐射

通常情况下，到达地球表面的太阳辐射的50%以上将通过蒸散作用转化为潜热，而潜热又被转移到大气中，为降水循环提供能量，并部分地辐射回太空。

在裸露的表面上，例如休耕地、干燥的草地（在夏季干草收获后），以及混凝土或沥青表面，土壤将吸收更多的入射太阳辐射，加热后产生显热，并向

大气中散发与其绝对温度的四次方成正比（斯特藩-玻尔兹曼定律）的热能（图5、图6）。

根据欧洲中部的一个例子，这些裸露的表面和森林地区之间的地表温差在夏季下午可以高达20°C（图7）。<sup>40</sup> 在印度尼西亚的苏门答腊岛，发现森林和空地之间的温差高达10°C，这也是森林的蒸发冷却效应超过了较暗的森林表面产生的反照率升温效应造成的。<sup>41</sup>

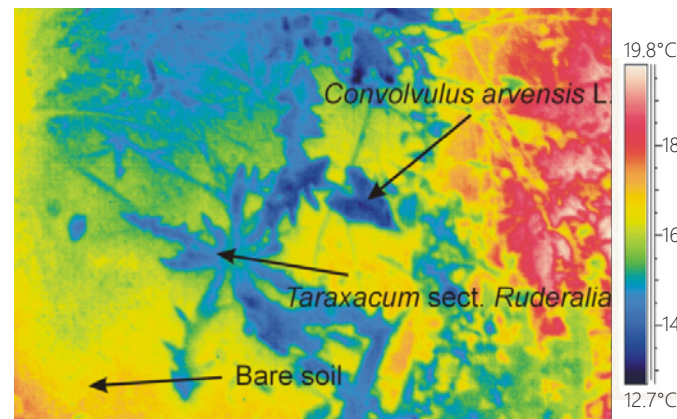
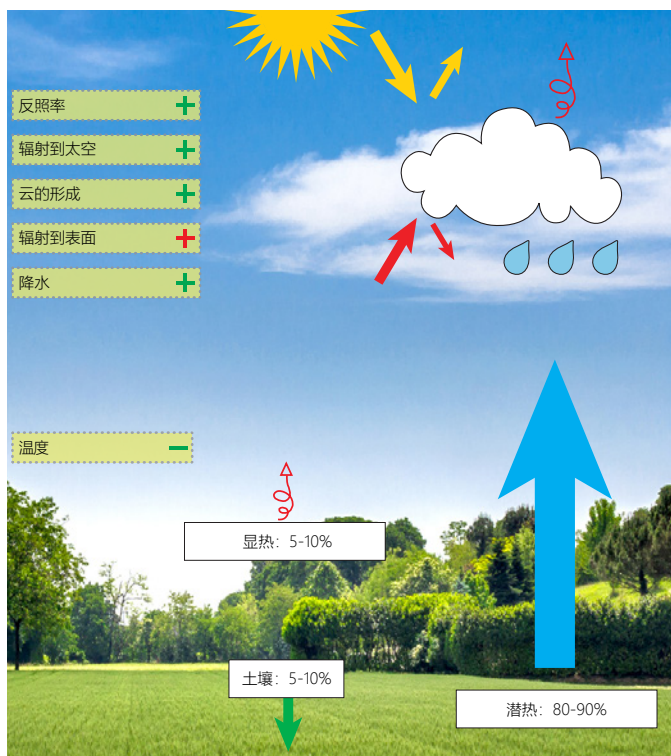


图6: 在红外光谱和可见光谱中拍摄的同一片稀疏植被。光秃秃的地面明显比因蒸腾作用而冷却的叶子表面温度高。<sup>9</sup>

这凸显了这样一个事实：由森林减少引发的当地生物物理进程可以有效地提高世界所有地区的夏季温度。<sup>42</sup>

历史上的森林砍伐确实减少了土地上的潜热通量，增加了地面的显热。<sup>43-47</sup> 从2003年到2013年的十年间，森林砍伐造成了显著的变暖，热带地区平均

图5: 蒸散作用降低了地面温度，增加了云的反照率、凝结过程中向太空的辐射、云的形成，从而增加了降水。清除植被会增加地面的温度，随着地面温度的升高，散发的热能呈指数增长，形成高压区，阻碍低压（因此是潮湿的）气团的通过，减少云的形成潜力，从而减少降水。

图形: Stefan Schwarzer, 联合国环境规划署/全球资源信息数据库日内瓦中心

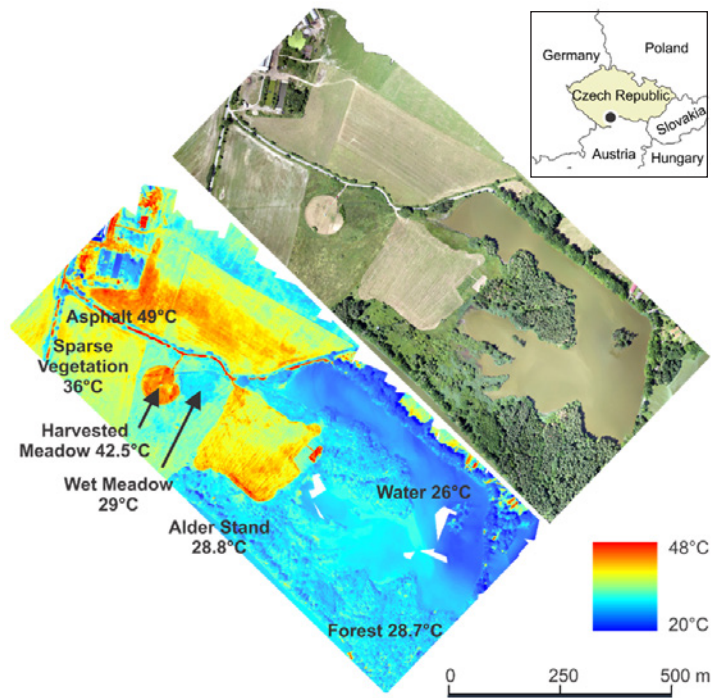


图7：混合地貌景观中的地表温度分布。<sup>14,40</sup>

气温上升高达 $0.28^{\circ}\text{C}$ ，而南部温带地区升温幅度更大，高达 $0.32^{\circ}\text{C}$ 。<sup>48</sup>按照目前的森林砍伐速度，到2100年，热带雨林的减少可能使全球气温上升 $1.5^{\circ}\text{C}$ ，这还没有考虑到人类引起的其他温度上升情况。<sup>49</sup>

1950年至2000年期间，由于土地覆盖的变化，全球地表温度上升了 $0.3^{\circ}\text{C}$ 。<sup>27</sup>2000年至2015年，植被变化对地表能量平衡造成扰动，导致在发生这些植被变化的地方，地表温度平均上升 $0.23^{\circ}\text{C}$ 。<sup>50</sup>由于土地覆盖变化导致的平均变暖可能占当前全球变暖总量的18-40%，这是因为蒸散量减少，尽管地表反照率增加。<sup>42、51、52</sup>

### 形成云层的生物气溶胶

森林除了对能量通量和降水十分重要，大型森林似乎还是生物地球化学反应器，其中生物圈和大气光化学为云和降水的形成产生核，从而维持了水文循环。<sup>53</sup>树木产生挥发性有机化合物并“释放”微生物——细菌和真菌孢子、花粉和其他生物碎片——它们生活在树叶上，并在森林生态系统的雨中和雨后通过空气传播。<sup>54-57</sup>在大气中，它们形成了云的凝结和冰核的一个重要部分，反过来又影响到云的形成和降水。<sup>53,54,57-59</sup>生物气溶胶可以通过产生冰核来进一步帮助提高冻结温度。如果没有这种现象，在云层达到 $-15^{\circ}\text{C}$ 或更低的温度时才会发生冻结；在这些冰核的帮助下，这个过程可以在接近 $0^{\circ}\text{C}$ 的温度下实现，从而能够有效地形成云层，更容易在当地产生降雨。<sup>59-62</sup>



图片来源：Shutterstock.com

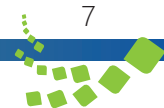


图片来源：Shutterstock.com

### 海洋是两个方向的缓冲地带

三分之一的人为二氧化碳排放和排放到大气中90%以上的额外人为热量，都被海洋吸收和缓冲。在谈论全球气温上升时，我们应该意识到，我们只看到总影响的10%左右。<sup>63,64</sup>

海洋对二氧化碳的缓冲作用也有反方向的：当我们从大气中回收二氧化碳以降低大气中的二氧化碳浓度时，由于新产生的气体压力差，海洋将重新排放二氧化碳，以图重新获得大气和海洋之间的二氧化碳浓度平衡。因此，在较短的时间内，大气中二氧化碳的快速减少将很难发生，即使我们成功地a) 停止二氧化碳排放，以及b) 开发固定二氧化碳的自然或技术解决方案。



## 对政策有什么启示？

必须认识到植被、肥沃的土壤和保水是水、能源和碳循环的主要调节器。下面列出了一些政策启示：

- 注意**正反馈回路**：如上所述，当森林被砍伐时，土地表面和气候变得更干燥和更温暖。这造成了加剧森林和植被火灾风险的条件，而森林和植被火灾会进一步排放二氧化碳并导致更多的森林砍伐，从而形成恶性循环。<sup>68,69</sup>气候变化、森林砍伐、干旱和森林火灾形成了一个强化反馈的三重循环（图8）。
- 鉴于大型森林生态系统的遥相关，这些系统应被视为提供了**全球公益物**。例如，根据《联合国气候变化框架公约》制定的REDD+机制可以提供一种模式，用于认可这些森林提供的国际水和能源服务并为其提供资金。
- 特别重要和**敏感的森林区域**应得到相应的保护和管理。
- 至关重要是**停止砍伐森林**，并在世界各地加大**重新造林**的力度。
- 农业实践应着重于**土壤建设**，全年用植物**覆盖土壤**，并采用**农林方法**<sup>iii</sup>。



图片来源：Shutterstock.com

iii 农林业是将树木或灌木融入农田和牧场的做法。

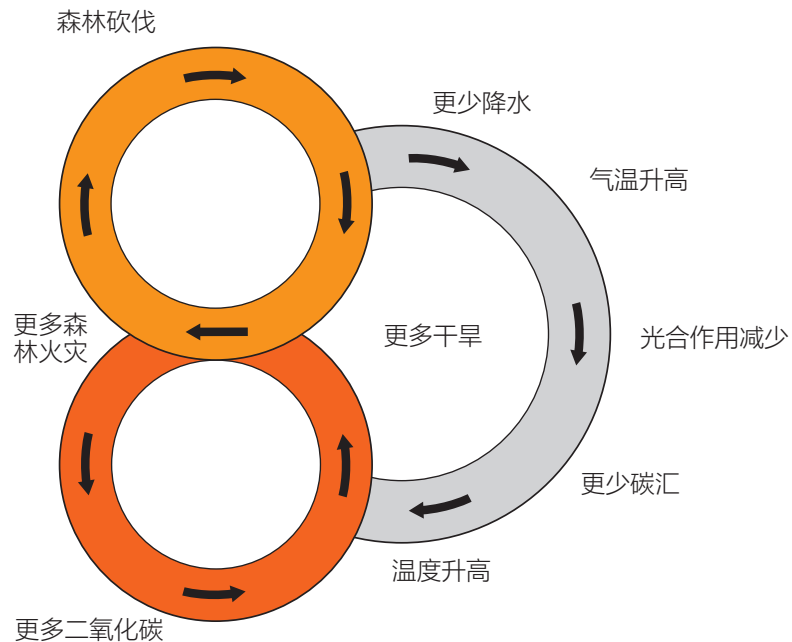


图8：由于森林火灾、森林砍伐、干旱和气候变化相互关联，如果孤立地看待其中一个过程，就无法描述相互关联的整体的复杂性。<sup>65-67</sup>

## 结论

重要的是要明白碳、水和能量循环在陆地上是紧密相连的。重建植被、土壤和大气中的大气和陆地水分循环，对于冷却地球和确保世界各地的降水模式至关重要。陆地景观的干涸是失败的代价。

如果我们要成功避免气候灾难，就必须停止砍伐森林、加大重新造林的力度并采用农林业实践。需要一种系统思维方法来理解和使用降雨形成的基本模式。让萨赫勒等地区恢复降雨，需要的不仅仅是在该地区植树，还需要在海岸线上（重新）建造森林，将潮湿的空气从海洋引入陆地。<sup>70</sup>

同时，通过再生有机运动的实践（见联合国环境规划署《前瞻研究简报》010和013），如通过覆盖作物和套种实现的全年植被覆盖或采用农林业实践来增加土壤肥力、保水和保护土壤，是另一种为水和能量循环提供能量的重要方法。想方设法增加土壤有机质是世界上大面积耕种成功的关键之一。

一般而言，我们需要转变范式，重视一般植被，特别是森林的水文和气候冷却效应，以及它们的固碳潜力。在地方、区域和大陆范围内，植被覆盖——尤其是树木——通过影响气候提供了各种惠益，这一点需要获得更广泛的认可。<sup>14, 32, 71</sup>

## 致谢

## 作者

Stefan Schwarzer, 联合国环境规划署/全球资源信息数据库日内瓦中心和日内瓦大学

## 审稿人

## 外部

David Ellison, 伯尔尼大学

Douglas Sheil教授, 瓦格宁根大学

Lera Miles, 联合国环境规划署世界保护监测中心(UNEP-WCMC)

Eleanor Milne, 科罗拉多州立大学

## 联合国环境署审稿人

Angeline Djampou, Barnabas Dickson, Gabriel Labbate, Jane Muriithi, Kaisa Uusimaa, Magda Biesiada, Pascal Peduzzi, Rachel Kosse, Samuel Opiyo, Tim Christophersen, Virginia Gitari, Ying Wang

## 联合国环境规划署前瞻研究简报小组

Alexandre Caldas, Sandor Frigiyik, Audrey Ringler, Esther Katu, Erick Litswa, Pascil Muchesia

灵感来自Walter Jehne的演讲

## 免责声明

本出版物所采用的名称与呈现方式并不意味着 联合国环境规划署或合作机构对任何国家、领土、城市及其当局的法律地位或其 边界划定表示任何意见。

© 地图、照片和插图来源请参照说明。

## 联系方式

unep-foresight@un.org



预警、新问题和未来

## 参考文献

- Pokorny, J. et al. Solar energy dissipation and temperature control by water and plants. *International Journal of Water* 5, 311 (2010).
- Jasechko, S. et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 496, 347–350 (2013).
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. & Kiehl, J. Earth's Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90, 311–324 (2009).
- Wang, K. & Dickinson, R. E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *GLOBAL TERRESTRIAL EVAPOTRANSPIRATION. Reviews of Geophysics* 50, (2012).
- Ellison, D., Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. & van Noordwijk, M. Upwind forests: managing moisture recycling for nature-based resilience. *Unasylva* 70, 13 (2019).
- Schneider, U. et al. Evaluating the Hydrological Cycle over Land Using the Newly-Corrected Precipitation Climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). *Atmosphere* 8, 52 (2017).
- Schlesinger, W. H. & Jasechko, S. Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology* 189–190, 115–117 (2014).
- Wei, Z. et al. Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration: Revisiting Global ET Partitioning. *Geophysical Research Letters* 44, 2792–2801 (2017).
- Kravčík, M., Pokorný, J., Kohutiar, J., Kováč, M. & Tóth, E. Water for the Recovery of the Climate - A New Water Paradigm. 94 (2007).
- Mahmood, R. et al. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate: LAND COVER CHANGES AND THEIR BIOGEOPHYSICAL EFFECTS ON CLIMATE. *International Journal of Climatology* 34, 929–953 (2014).
- van der Ent, R. J., Savenjeh, H. H. G., Schaeffl, B. & Steele-Dunne, S. C. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research* 46, (2010).
- Crowther, T. W. et al. Mapping tree density at a global scale. *Nature* 525, 201–205 (2015).
- FAO. *State of the world's forests 2012*. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012).
- Ellison, D. et al. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43, 51–61 (2017).
- Pokorny, J. What can a tree do?(2012).
- Weng, W., Luedeke, M. K.B., Zemp, D. C., Lakes, T. & Kropp, J. P. Aerial and surface rivers: downwind impacts on water availability from land use changes in Amazonia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 911–927 (2018).
- Nobre, A. D. The Future Climate of Amazonia.42 (2014).
- Eltahir, E. A.B. & Bras, R. L. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 120, 861–880 (1994).
- Keys, P. W., Wang-Erlandsson, L. & Gordon, L. J. Revealing Invisible Water: Moisture Recycling as an Ecosystem Service. *PLOS ONE* 11, e0151993 (2016).
- Staal, A. et al. Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change* 8, 539–543 (2018).
- van der Ent, R. J. A new view on the hydrological cycle over continents.(2014).
- Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. J., Gordon, L. J. & Savenjeh, H. H.G. Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 1: Temporal characteristics over land. *Earth System Dynamics* 5, 441–469 (2014).
- van der Ent, R. J. & Savenjeh, H. H.G. Length and time scales of atmospheric moisture recycling. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, 1853–1863 (2011).
- van der Ent, R. J. & Tuinenburg, O. A. The residence time of water in the atmosphere revisited. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 779–790 (2017).
- Gebrehiwot, S. G. et al. The Nile Basin waters and the West African rainforest: Rethinking the boundaries. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 6, e1317 (2019).
- Wang-Erlandsson, L. et al. Remote land use impacts on river flows through atmospheric teleconnections. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 4311–4328 (2018).
- Sterling, S. M., Ducharme, A. & Polcher, J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change* 3, 385–390 (2013).
- Gordon, L. J. et al. Human modification of global water vapor flows from the land surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, 7612–7617 (2005).
- Chen, C. et al. Biophysical impacts of Earth greening largely controlled by aerodynamic resistance. *Sci. Adv.* 6, eabb 1981 (2020).
- Teuling, A. J. et al. Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests. *Nature Communications* 8, (2017).
- Takata, K., Saito, K. & Yasunari, T. Changes in the Asian monsoon climate during 1700–1850 induced by preindustrial cultivation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 9586–9589 (2009).
- Pielke, R. A. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus Convective rainfall. *Reviews of Geophysics* 39, 151–177 (2001).
- Sheil, D. & Murdiyoso, D. How Forests Attract Rain: An Examination of a New Hypothesis. *BioScience* 59, 341–347 (2009).
- Chase, T. N., Pielke Sr., R. A., Kittel, T. G.F., Nemani, R. R. & Running, S. W. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Climate Dynamics* 16, 93–105 (2000).
- Chase, T. N., Pielke, R. A., Kittel, T. G.F., Nemani, R. & Running, S. W. Sensitivity of a general circulation model to global changes in leaf area index. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 101, 7393–7408 (1996).
- Medvigy, D., Walko, R. L., Otte, M. J. & Avissar, R. Simulated Changes in Northwest U.S. Climate in Response to Amazon Deforestation\*. *Journal of Climate* 26, 9115–9136 (2013).
- Coe, M. T. et al. The Forests of the Amazon and Cerrado Moderate Regional Climate and Are the Key to the Future. *Tropical Conservation Science* 10, 194008291772067 (2017).

- McAlpine, C. A. et al. Forest loss and Borneo's climate. *Environmental Research Letters* 13, 044009 (2018).
- Paul, S. et al. Weakening of Indian Summer Monsoon Rainfall due to Changes in Land Use Land Cover. *Scientific Reports* 6, (2016).
- Hesslerová, P., Pokorný, J., Brom, J. & Rejšková – Procházková, A. Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperate cultural landscape: Consequences for the local climate. *Ecological Engineering* 54, 145–154 (2013).
- Sabajo, C. R. et al. Expansion of oil palm and other cash crops causes an increase of the land surface temperature in the Jambi province in Indonesia. *Biogeosciences* 14, 4619–4635 (2017).
- Alkama, R. & Cescaati, A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science* 351, 600–604 (2016).
- Bounoua, L., Defries, R., Collatz, G. J., Sellers, P. & Khan, H. Effects of Land Cover Conversion on Surface Climate.36 (2002).
- Brovkin, V. et al. Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity. *Climate Dynamics* 26, 587–600 (2006).
- Pitman, A. J. et al. Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study. *Geophysical Research Letters* 36, (2009).
- Pongratz, J., Reick, C. H., Raddatz, T. & Claussen, M. Biogeophysical versus biogeochemical climate response to historical anthropogenic land cover change: CLIMATE EFFECTS OF HISTORICAL LAND COVER CHANGE. *Geophysical Research Letters* 37, (2010).
- Zhao, M., Pitman, A. J. & Chase, T. The impact of land cover change on the atmospheric circulation: *Climate Dynamics* 17, 467–477 (2001).
- Li, Y. et al. Potential and Actual impacts of deforestation and afforestation on land surface temperature: IMPACTS OF FOREST CHANGE ON TEMPERATURE. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121, 14,372–14,386 (2016).
- Mahowald, N. M., Ward, D. S., Doney, S. C., Hess, P. G. & Randerson, J. T. Are the impacts of land use on warming underestimated in climate policy? *Environmental Research Letters* 12, 094016 (2017).
- Duvelleroy, G., Hooker, J. & Cescaati, A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications* 9, (2018).
- Ban-Weiss, G. A., Bala, G., Cao, L., Pongratz, J. & Caldeira, K. Climate forcing and response to idealized changes in surface latent and sensible heat. *Environmental Research Letters* 6, (2011).
- Wolosin, M. & Harris, N. Tropical Forests and Climate Change: The Latest Science. *World Resources Institute* 14 (2018).
- Pöschl, U. et al. Rainforest Aerosols as Biogenic Nuclei of Clouds and Precipitation in the Amazon. *Science* 329, 1513–1516 (2010).
- Bigg, E. K., Soubeyrand, S. & Morris, C. E. Persistent after-effects of heavy rain on concentrations of ice nuclei and rainfall suggest a biological cause. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 2313–2326 (2015).
- Bowers, R. M. et al. Characterization of Airborne Microbial Communities at a High-Elevation Site and Their Potential To Act as Atmospheric Ice Nuclei. *Applied and Environmental Microbiology* 75, 5121–5130 (2009).
- Conen, F., Eckhardt, S., Gundersen, H., Stohl, A. & Yttri, K. E. Rainfall drives atmospheric ice-nucleating particles in the coastal climate of southern Norway. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17, 11065–11073 (2017).
- Joung, Y. S., Ge, Z. & Buie, C. R. Bioaerosol generation by raindrops on soil. *Nature Communications* 8, (2017).
- Després, Viviane R. et al. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 64, 1599 (2012).
- Morris, C. E. et al. Bioprecipitation: a feedback cycle linking Earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere. *Global Change Biology* 20, 341–351 (2014).
- Christner, B. C., Morris, C. E., Foreman, C. M., Cai, R. & Sands, D. C. Ubiquity of Biological Ice Nucleators in Snowfall. *Science* 319, 1214–1214 (2008).
- Lazaridis, M. Bacteria as Cloud Condensation Nuclei (CCN) in the Atmosphere. *Atmosphere* 10, 786 (2019).
- Morris, C. E., Soubeyrand, S., Bigg, E. K., Creamean, J. M. & Sands, D. C. Mapping Rainfall Feedback to Reveal the Potential Sensitivity of Precipitation to Biological Aerosols. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98, 1109–1118 (2017).
- Cheng, L. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences* 37, 137–142 (2020).
- Pörtner, H.-O. et al. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Summary for Policymakers (2019).
- Hasler, N., Werth, D. & Avissar, R. Effects of Tropical Deforestation on Global Hydroclimate: A Multimodel Ensemble Analysis. *Journal of Climate* 22, 1124–1141 (2009).
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Gobron, N. & Dolman, A. J. Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics: CLIMATE CONTROLS ON FIRES. *Global Biogeochem. Cycles* 22, n/a–n/a (2008).
- Zhao, M. & Running, S. W. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. *Science* 329, 940–943 (2010).
- Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.(Cambridge University Press, 2012). doi:10.1017/CBO9781139177245.
- International Union of Forest Research Organizations. Global Fire Challenges in a Warming World.(2018).
- Ellison, D. & Speranza, C. I. From blue to green water and back again: Promoting tree, shrub and forest-based landscape resilience in the Sahel. *Science of The Total Environment* 739, 140002 (2020).
- Lemondant, L., Gentine, P., Swann, A. S., Cook, B. I. & Scheff, J. Critical impact of vegetation physiology on the continental hydrologic cycle in response to increasing CO<sub>2</sub>. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, 4093–4098 (2018).
- Pearce, F. A controversial Russian theory claims forests don't just make rain—they make wind. *Science | AAAS* https://www.sciencemag.org/news/2020/06/controversial-russian-theory-claims-forests-don-t-just-make-rain-they-make-wind (2020).

如要在线阅读本期和往期联合国环境规划署《前瞻研究简报》和下载简报, 请访问

<https://wesr.unep.org/foresight>

