

电动汽车市场增长面临的挑战

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。

摘要

电动汽车可以在交通运输行业的脱碳化过程中发挥重要作用。它有助于减缓气候变化，减少二氧化碳、氮氧化物、二氧化硫和细颗粒的排放，对城市的空气质量产生积极影响。然而，为了使电动汽车更加环保，我们还必须加倍努力，减轻稀土材料（特别是电池和发动机所需的稀土材料）在开采及其生产过程中造成的环境和社会负担。与此同时，必须转用可再生能源发电，同时推动制定关于电池再利用和回收的明确指南。

导言

由于二氧化碳排放量日益增加，城市的空气质量日渐恶化，使用电动汽车已被视为一个双赢的解决方案。我们需要内燃机汽车的替代品，而电动汽车提供了一个有希望的解决方案，因为电动汽车不使用汽油，也不排放二氧化碳、氮氧化物和其他有害气体或颗粒。虽然使用和增加公共交通和软出行应该仍然是土地和城市规划过程中的优先事项，但个人

按来源分类的全球电力生产

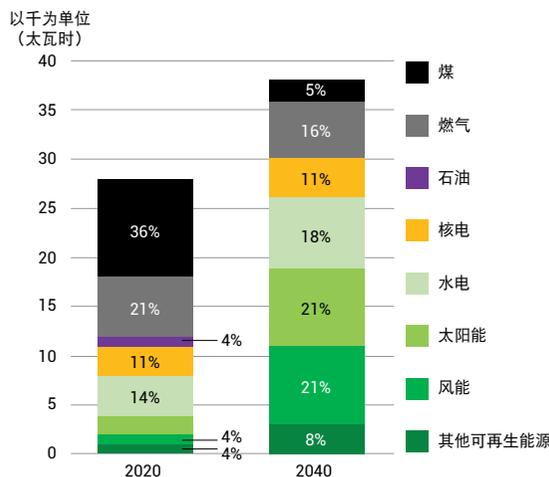


图1：2020年和2040年按来源分类的全球电源结构。可再生能源用绿色表示。将需要使用可再生能源额外发电18000太瓦时，才能将其在总电力中的份额从29%增加到68%。交通运输行业用电占总电力的10%，将导致电力需求增加3800太瓦时。¹

交通需求仍然存在，消费型电动汽车可以在这方面发挥重要作用。

为了实现最大的改善，为汽车电池充电的电力来源必须以可再生能源为基础，这样才能提供所需的生态友好型替代品。2020年，全球电源结构的61%来自化石燃料（煤：36%，燃气：21%，石油：4%，图1）。在过去几年中，可再生能源的发电量迅速增加，预计未来20年也会延续这一趋势。到2040年，68%的电力将来自可再生能源。交通运输将占可再生能源使用量的10%。¹

仔细观察电动汽车生命周期的所有阶段，可以发现有两个“挑战”需要关注和解决，才能使电动汽车成为一种更环保的选择：

- 1) 电池和电动汽车发动机的生产过程需要使用稀土元素，能耗高；以及
- 2) 在电动汽车的电池使用寿命结束时，有必要实施再利用、回收和处置电池的战略。

现在正在考虑潜在的威胁和挑战，以及生产和使用电动汽车及其电池的解决方案。



充电站的电动汽车

© Smile Fight / Shutterstock.com

有什么发现？

碳足迹

电动汽车和传统汽车之间的碳足迹差异已经被广泛研究——跟传统汽车比，电动汽车优势明显，尽管这种积极效果主要取决于生产汽车（尤其是其电池）的能源是如何产生的，以及用什么能源给电池充电。在德国，煤炭占能源结构大约40%，可再生能源占30%，一辆中型电动汽车必须行驶125000-219000公里，才能与柴油车的二氧化碳排放量持平；与汽油车相比，则必须行驶60000-127000公里。^{6,7}美国的情况与德国类似，但在核电为主的法

国或再生能源丰富的挪威，电动汽车的优势就不那么明显了，对于寿命为15万公里的中型电动汽车来说，行驶4万公里时其二氧化碳排放量就会与传统汽车持平。在这些国家，在电动汽车的整个寿命周期内，二氧化碳排放量约为70-80克/公里，这与德国190克/公里的二氧化碳排放量形成鲜明对比。⁸一辆普通的欧洲传统汽车的二氧化碳排放量超过250克/公里，而在目前的条件下，其对应的电动汽车二氧化碳排放量为130克/公里，几乎为其一半（图4）。在考虑到汽车整个生命周期的情况下，最近的研究发现，在目前的发电碳排放强度下，电动汽车的排放量在世界大部分地区已经低于传统汽车。⁹

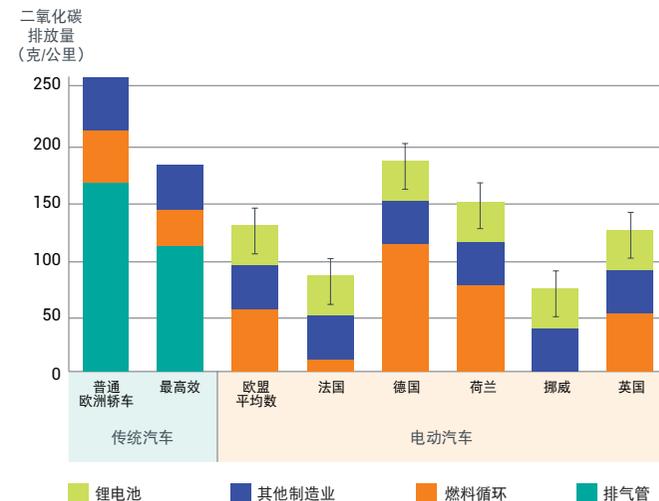


图4：2015年欧洲电动汽车和传统汽车的生命周期排放量（超过15万公里）。⁷

各国将需要进一步提高其可再生能源的比例，这将稳步提高电动汽车对传统汽车的优势。如果汽车及其电池的生产以可再生能源为基础，并使用可回收材料，那么这一优势还可以进一步扩大。一些汽车制造商已经朝着这个方向迈进。

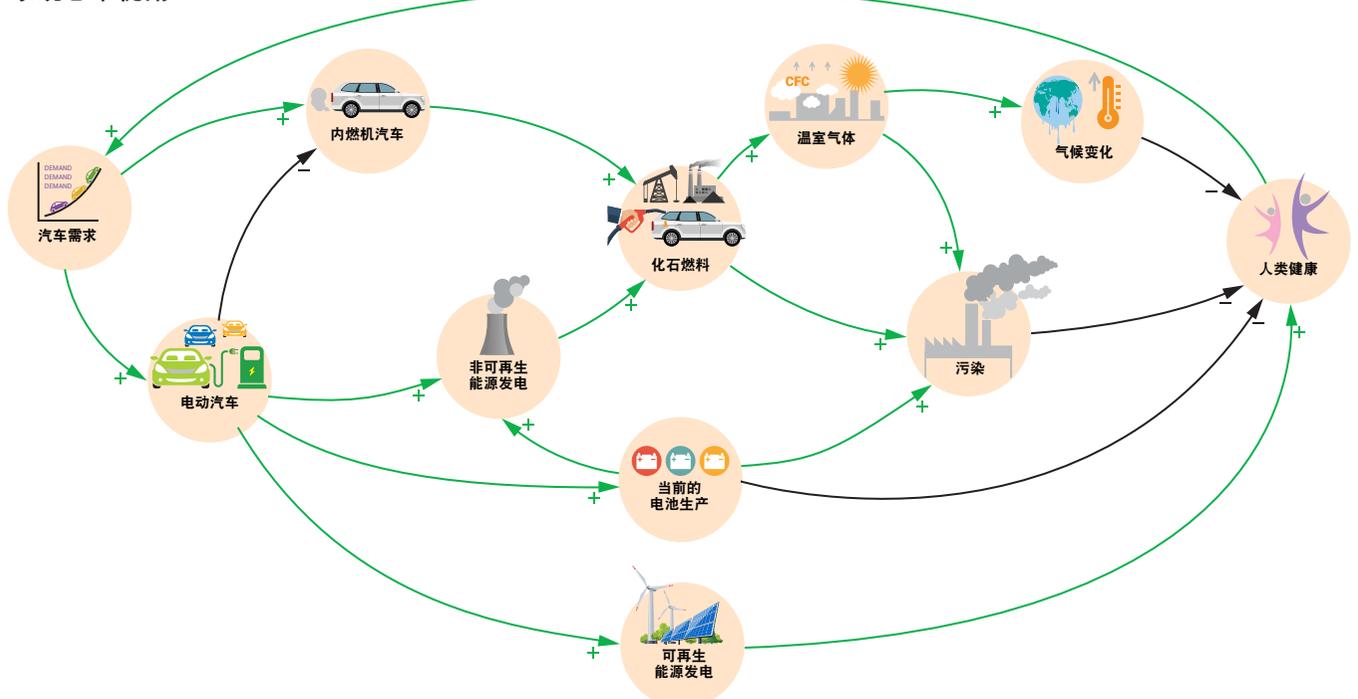
环境足迹

除了影响气候的温室气体排放，本简报还探讨了电动汽车产生的其他环境足迹，同时请谨记对传统汽车而言，开采石油所产生的影响，如环境污染以及运输和炼油过程中的能耗，也是主要的负担。

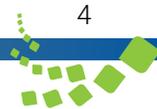
成分/矿物

人们把大部分的注意力都集中在锂上，然而电池的其他元素，如钴、镍和石墨也需要考虑。中小型电动汽车的电池重量约为200-300公斤，容量为30-45千瓦时。根据电池类型，电池将由5-80公斤

系统思维视角



私家车辆需求中的主要因果循环和可供考虑的替代方案。汽车需求推动了汽车的生产 and 供应。内燃机汽车使用化石燃料，造成污染，增加温室气体，加剧气候变化，进而对人类健康产生不利影响。电动汽车如果使用可再生能源和可回收的部件（如电池）来制造和使用，将有助于改善人类健康。这种方法反过来将更可持续地加强车辆需求。(+)影响是加强的，在同一方向上，(-)影响是平衡的，在相反的方向上。



的锂，8-20公斤的钴，多达50公斤的石墨和100公斤的镍组成。^{3,10,11}

大多数电动汽车使用钕铁硼永磁体，其中含有高达1公斤的钕¹²、高达100克的镨¹³以及镧。2015年，全球对稀土元素的需求有一半就源自于此。

• 环境影响

如果没有明确的政策和行动，电动汽车的生产和使用就有可能导致人类毒性、淡水生态毒性、淡水富营养化和金属耗竭等方面的影响显著增加。这些影响主要来自汽车供应链。生命周期评估表明，电池生产是造成所有影响的主要阶段。¹⁴⁻¹⁷ 所使用的回收材料类型也起着重要作用。应实施加快研制新型电池的新政策，以减少对环境的影响。

电动汽车电池对主要矿物的需求量将从2018年的约20万吨增加到2030年的710万吨（图5）。¹⁸

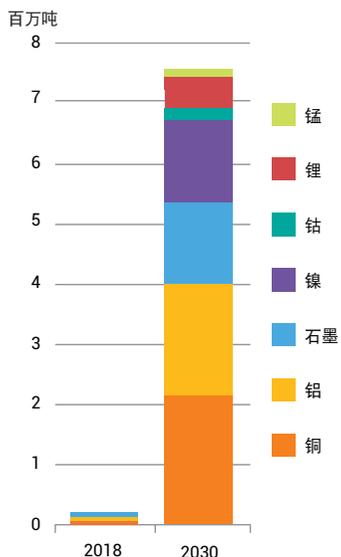


图5：乘用车电动汽车锂离子电池组的金属和材料需求。¹⁸

密集的采矿作业会对周围环境产生明确的影响，如：酸性矿井排水、水污染、尾矿坝溃堤和洪水、废弃物产生、空气污染、土壤侵蚀和污染、水的供应、生态系统的破坏、放射性辐射、海底/河流尾矿处置。¹⁹ 这些都应该得到更好的监管。有许多关于为电动汽车开采矿物的负面影响的报告，如锂²⁰⁻²²、镍^{23,24}、钴^{25,26}或石墨²⁷，并描述了这种开采对当地居民和环境的影响。

以锂为例，生产一吨锂需要250至750吨富含锂的材料。²⁸ 有一份报告指出，“每开采一吨稀有金属，就会释放出9600至12000立方米的废气——其中含有粉尘浓缩物、氢氟酸、二氧化硫和硫酸。还会产生大约75立方米的酸性废水，以及大约一吨的放射性废物残渣”。²⁹ 后者是由于放射性的钷和铀往往与这些稀土存在关联。

一些金属来自小矿场，那里几乎没有采取任何环保措施，工人使用的设备非常差，其中还有童工。²⁶ 需要制定新的政策并加以执行，以保护采矿工人的健康并禁止使用童工。

在地球上开采矿石只是稀土元素生产的一小部分。将这些产品提炼成可销售的产品，才是稀土生产及其环境（和相关的社会）影响的主要方面。

• 水

除了采矿的常见后果——沉积物、灰尘、有毒废物流等等——之外，在开采锂的国家，一个主要的问题是加工锂需要耗费大量的水。¹⁰ 玻利维亚和智利的数据表明，每生产一吨最终电池级碳酸锂需要耗费5至50立方米的淡水。³⁰ 其他来源显示淡水消耗量高达2000立方米。²² 这种开采对当地农民产生了重大影响。²¹ 在干旱地区（例如在阿塔卡马沙漠），矿山和农民之间争夺水资源，导致局势

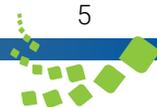
高度紧张。需要更好地考虑水的使用和新的开采技术。

• 电力

好消息是，在电动汽车的使用阶段，电动汽车保有量增加对电力消耗的影响相当小。以德国为例，1000万辆电动汽车将意味着增加5%或30太瓦时的额外电力。³¹ 或者，在极端的情况下：如果德国所有乘用车全部为电动汽车，那么行驶全部里程——在2015年，这大约是6300亿公里——所需的电能将“仅”相当于当前电力消耗的20%左右。



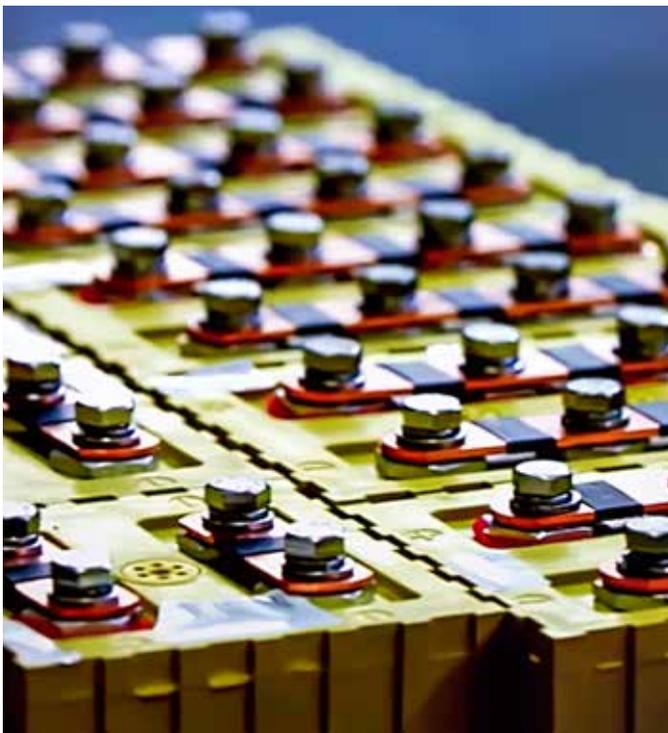
© Petair / Shutterstock.com



正在采取哪些措施？

电动汽车生产过程

由于人们更深刻地认识到小型非法采矿场对周围环境造成了不受控制的影响，最近一些国家已经关闭了许多这样的小矿场。^{23,32} 来自公司和国际协议的压力越来越大，迫使采矿管理在环境和社会方面得到改善。随着电池效率的迅速提高，能源和材料的投入与产出比相应地下降，电池的环境足迹因此也不断减少。世界各地正在研发各种各样的电池技术，例如少用或不用钴，并减少使用有害物质，这将稳步改善电动汽车的环境足迹。



环保型电动汽车所用锂电池的生产
© Fishman64 / Shutterstock

回收电池

截至2011年，在欧洲使用的稀土元素和锂离子电池中只有很小的一部分得到了回收（不到1%的稀土和5%的锂离子电池），³³⁻³⁶ 大多数都被填埋，³⁷ 造成了相当大的资源浪费。虽然电动汽车电池在未来多年后才会被淘汰，但应尽早组织并监管回收流程。

回收量有限有几个原因。例如，生产电池需要采用各种化学工艺，很难制定标准化回收工艺；回收成本高；所涉及的金属价值低；废旧锂电池的回收有限；缺乏激励措施。^{38,39} 回收工艺成本过高，目前购买回收锂的费用是购买新锂的五倍。³⁹ 需要实施纠正措施，使回收利用成为常态。然而，一些公司 确实在回收 锂离子电池，但它们只回收电池中价值较高的钴和镍¹⁰。

目前使用最广泛的工艺包括将电池加热到高温（>600°C），这使得电池中的二氧化碳含量非常高，只能回收数量有限且部分低质量的矿物。⁴⁰⁻⁴² 一些公司正在改进程序，使用机械销毁来提高回收率，这最终将催生更循环的经济模式。在回收之前，这些电池还可以重新用于能量缓冲和储存，或用作移动电话信号塔的备用电源。

欧盟已出台法规，要求电池制造商支付收集、处理和回收电池的费用，尽管相关法规只设置了最低标准。要想达成从现在到2030年回收1100万吨废旧锂离子电池的目标³⁵，汽车制造商和回收商需要齐心协力，打造尽可能高效且具有成本效益的回收工艺流程。

对政策有什么影响？



© Zhang Sheng / Shutterstock.com

改变我们的出行方式

要减少个人交通的影响，首先要减少对个人交通的需求。最为重要的是，在设计交通系统时，要更全面地看待个人交通、土地使用和城市规划等问题，以便形成一个有效的公共交通和软出行网络。我们需要全新的出行理念——出行可以有机的（自行车、步行），也可以是电气化的（例如地铁、火车、电动巴士、电动自行车、电动滑板车/摩托车），但不一定依赖私家车。

各国政府应侧重于减少个人乘坐小汽车的出行，并实施激励措施，让个人改用公共交通工具，并鼓励软出行。荷兰的一些城市或爱沙尼亚的塔林便是成功的例子，那里的公共交通是免费的。在哥本哈根，62%的市民骑自行车上下班和上学。⁴³ 而在瑞士，乘坐火车比在其他国家更受欢迎。

在汽车生产和使用阶段迅速转用可再生能源和材料

从内燃机汽车转向电动汽车，需要同时迅速转向使用可再生能源发电。可再生能源也应该用于汽车生产。

负责任的采矿

对于制造阶段的所有金属的生产，应采用公司的尽职调查程序。美国对于一些冲突矿物，如锡、黑钨和黄金，已经开展此类调查。欧盟也有类似的法规，但不包括某些矿物，例如钴。

由于欧洲的矿物进口中有很大大一部分被认为来自管理不善的矿区，可能会对环境造成有害影响，因此有必要通过国际、欧盟和国家政策来解决这种情况。缺乏治理能力的国家、需要更多资源进行环境管理的采矿公司，以及技术水平低下的老矿区，都是采矿业需要改进的领域。这种环境保护不仅有利于环境，也会造福于受采矿影响最严重的人群。

采矿企业应遵守国际标准，如《负责任的采矿保证倡议》——这是一项独立的倡议，其使命是增强社会和经济福祉、加强环境保护和建立公平治理。

电池再利用

目前，正在以建筑物中蓄电设施的形式进行汽车电池再利用的测试。电池效率降低对电动汽车行驶里程构成了一个问题，但如果将大量电池包装在一起，用来储存来自屋顶光伏系统的剩余能量，效率降低的影响就会微乎其微。然而，一些人认为，钴含量高的电池应该立即被回收，以增加钴的供应，从而避免长期开采。⁴⁴二手电动汽车电池的供应量，到时将远远超过二手市场所能消化的数量。⁴⁵

电池回收

需要迅速扩大当前系统规模，以处理未来几年大量推出电动汽车后预计会产生的大量材料废物。^{46,47}还

必须有设计好的生产、再利用、收集和回收计划来辅助这一过渡。

欧盟已经通过2006年《矿业废弃物指令》和针对新采矿活动的强制性环境影响评价（EIA），来应对欧盟内部矿业废弃物设施带来的环境挑战。进口原材料造成的环境问题通过“欧洲原材料倡议”来解决，该倡议提倡“可持续发展”，但没有制定确切的目标和政策工具。¹⁹迫切需要进一步完善《欧洲电池指令》，为电池制造商和电动汽车制造商规定较高的回收配额。

对于每个制造商来说，运营自己产品的回收工厂是合情合理的，因为制造商最了解自己电池组的结构和组成。最理想的状态是回收工厂能够靠近电池工厂，以尽可能实现封闭式循环。特斯拉已经在其位于内华达州的一号超级工厂落实了这一理念。³¹如果电池能够标准化并设计成可拆卸，从而便于部件的重复使用和材料的回收，这将会更有助益。

推动替代材料的研发

用其他材料替代目前在动力系统和电池制造中使用的稀有材料，可能是实现关键金属可持续利用的一个良好的长期战略。⁴⁸持续研发电池极大地提高了电池效率并降低了成本。也许在未来，新的电池技术将减少使用稀土材料导致的一些负面足迹。

对重型汽车征税

减少汽车（包括电动汽车和传统汽车）的环境足迹也需要缩小汽车尺寸，减轻汽车重量。对环境友好的程度在很大程度上取决于电池的大小和汽车的重量。研发重型汽车不仅不利于提高效率，而且还会影响交通安全。重型汽车的存在影响着其他汽车的设计方式（在发生事故时的保护方面），因此这往往鼓励制造商设计更重的汽车。

此外，电动汽车不应用于减少存量汽车的平均排放量。例如，根据从2020年开始逐步实施，从2021年全面实施的欧盟立法，欧盟整个存量汽车中新车平均二氧化碳排放量目标将是95克/公里。然而，汽车制造商正在利用电动汽车来降低整个存量汽车的平均能耗。这意味着——除非选择一个不生产电动汽车的品牌——一位消费者购买了电动汽车后，就会间接地让另一位消费者能够购买一辆功率强大的运动型多功能车（SUV）。应该改进立法，不但包括平均排放量目标，而且包括最高排放量目标——最高排放目标也将调低。监管机构应考虑到重量问题，对重型车辆征税，并为电动汽车和传统汽车中的小型车制定激励措施。

结论

电动汽车不仅对减少个人交通产生的温室气体起到重要作用，而且还带来了静音和保护空气质量的共同效益。如果本《前瞻研究简报》中提出的问题能够得到解决，将在很大程度上改善电动汽车的环境足迹。

购买电动汽车的客户都有环保意识。如今购买一辆新车，就意味着决定在汽车的生命周期内，也就是在未来20年内，使用何种推进技术——汽油还是电力。当电动汽车成为常态时，最环保的汽车制造商将拥有营销优势，而且最可能还拥有税收优势。目前，针对传统汽车的税收是为了降低排放量，下一步应该是立法支持最环保的电动汽车。

因此，销售对环境影响最小的汽车也符合电动汽车行业的利益。

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

审稿人: Rob de Jong, Alexander Körner, Pascal Peduzzi, Sandor Frigyik, Angeline Djampou, Virginia Gitari, Samuel Opiyo

联合国环境规划署《前瞻研究简报》小组: Alexandre Caldas, Sandor Frigyik, Audrey Ringler, Erick Litswa, Pascil Muchesia

联系方式

unep-foresight@un.org

免责声明

所采用的名称与呈现方式并非表明联合国环境规划署或合作机构关于任何国家、领土、城市或地域的法律地位或其权力的任何意见，亦非关于其边界划定的任何意见。

© 地图、照片和插图来源请参照说明。

参考文献

1. International Energy Agency. *World Energy Outlook 2019*. Paris, 2019.
2. Gomer, M., Scheffer, S., Cazzola, P., 2019. Electric vehicles. Tracking Clean Energy Progress [WWW Document]. URL <https://www.iea.org/tcep/transport/electricvehicles/> (Accessed: 10 August 2019).
3. Swiss Resource Capital AG. *Battery Metals Report 2019: Everything You Need to Know about the Battery Metals Lithium, Cobalt and Vanadium!* 2019. https://download.resource-capital.ch/fileadmin/reports/2019/en_DS_BMR2019.pdf.
4. International Energy Agency. *Global EV Outlook 2019: Scaling-up the transition to electric mobility*. Paris: OECD, 2019. <https://doi.org/10.1787/35f660bd-en>.
5. Alpiq. *Electric vehicle market penetration in Switzerland by 2020*. Lausanne, 2009. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/003/43003896.pdf. 6. Held, M., Graf, R., Wehner, D., Eckert, S., Faltenbacher, M., Weidner, S. et al. *Abschlussbericht: Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen*. Berlin: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH), 2016. <https://edocs.tib.eu/files/e01fn16/871331055.pdf>
7. Jungmeier, G., Canella, L., Pucker-Singer, J. and Beermann, M. *Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen*. 2019.
8. Hall, D. and Lutsey, N. *Effects of Battery Manufacturing on Electric Vehicle Life-cycle Greenhouse Gas Emissions*. International Council on Clean Transportation, 2018.
9. Knobloch, F., Manderson, S.V., Lam, A., Pollitt, H., Salas, P., Chewprecha, U. et al. Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time. *Nature Sustainability* 3, 2020, 437-447. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7>.
10. Persson, A. and Öman, D. *Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles: Sustainable to what extent?* KTH Royal Institute of Technology, 2018. <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1216809/FULLTEXT01.pdf>
11. Del Maestro, A. and van Oorschot, J. *The Outlook for electric vehicles*. Strategy and PwC, June 2018.
12. VHM Limited. *Rare Earths*. VHM Limited, 2018. <https://www.vhmltd.com.au/products/rare-earths/>.
13. East, A. Investors toast rare earths as electric cars drive 'magnet metals' demand. *Stockhead*, 30 January 2018. <https://stockhead.com.au/resources/investors-toast-rare-earths-as-electric-car-demand-drives-magnet-metals/>
14. Cusenza, M. A., Bobba, S., Ardenne, F., Cellura, M. and Di Persio, F. Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Cleaner Production* 215, 2019, 634-649. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.056>.
15. Bicer, Y. & Dincer, I. Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles. *Resources, Conservation and Recycling* 132, 2018, 141-157. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.036>.
16. Matheys, J. and Autenboer, W. V. *SUBAT: Sustainable Batteries - Work package 5: Overall Assessment. Final Public Report*. 2005. <http://etec.vub.ac.be/publications/2005Matheys215.pdf>.
17. Zackrisson, M., Avellán, L. and Orlenius, J. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles - Critical issues. *Journal of Cleaner Production* 18(15), 2010, 1519-1529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.004>.
18. Bloomberg New Energy Finance. *Electric Vehicles Outlook 2018*. 2018. <https://bnf.turtl.co/story/ev2018>.
19. Dolega, P., Degreif, S., Buchert, M. and Schüller, D. *Outlining Environmental Challenges in the Non-Fuel Mining Sector*. STRADE Policy Brief No. 04/2016. 2016. http://stradeproject.eu/fileadmin/user_upload/pdf/PolicyBrief_04-2016_Sep2016_FINAL.pdf.
20. Frankel, T.C. and Whoriskey, P. Tossed aside in the 'white gold' rush: Indigenous people are left poor as tech world takes lithium from under their feet. *The Washington Post*, 19 December 2016. <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/tossed-aside-in-the-lithium-rush/>.
21. Katwala, A. The spiralling environmental cost of our lithium battery addiction. *Wired UK*, 5 August 2018. <https://www.wired.co.uk/article/lithium-batteries-environment-impact>.
22. Merchant, E. *Lithium-ion battery production is surging, but at what cost?* Greentech Media, 20 September 2017. <https://www.greentechmedia.com/articles/read/lithium-ion-battery-production-is-surging-but-at-what-cost>.
23. Cruz, E.D. and Serapio, M. Jr. Philippines to shut half of mines, mostly nickel, in environmental clampdown. *Reuters*, 2 February 2017. <https://www.reuters.com/article/us-philippines-mining/philippines-to-shut-half-of-mines-mostly-nickel-in-environmental-clampdown-idUSKBN15H0BQ>.
24. Opray, M. Nickel mining: the hidden environmental cost of electric cars. *The Guardian*, 24 August 2017. <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/aug/24/nickel-mining-hidden-environmental-cost-electric-cars-batteries>.
25. Frankel, T.C. The cobalt pipeline. Tracing the path from deadly hand-dug mines in Congo to consumers' phones and laptops. *The Washington Post*, 30 September 2016. <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/congo-cobalt-mining-for-lithium-ion-battery/>.
26. Kelly, A. Children as young as seven mining cobalt used in smartphones, says Amnesty. *The Guardian*, 19 January 2016. <https://www.theguardian.com/global-development/2016/jan/19/children-as-young-as-seven-mining-cobalt-for-use-in-smartphones-says-amnesty>.
27. Whoriskey, P. In your phone, in their air: A trace of graphite is in consumer tech. In these Chinese villages, it's everywhere. *Advanced Biofuels* 3 October 2016. <https://advancedbiofuelsusa.info/in-your-phone-in-their-air-a-trace-of-graphite-is-in-consumer-tech-in-these-chinese-villages-its-everywhere/>.
28. Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 575, 75-86, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>.
29. Smith, T. Rare Earthenware: a journey to the toxic source of luxury goods. *The Guardian*, 15 April 2015. <https://www.theguardian.com/environment/gallery/2015/apr/15/rare-earthenware-a-journey-to-the-toxic-source-of-luxury-goods>.
30. Flexer, V., Baspineiro, C.F. and Galli, C.I. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of The Total Environment* 639, 15 October 2018, 1188-1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>.
31. Hohnhorst Brothers. Die Elektrifizierung der Mobilität: Warum die Zukunft elektrisch fahren wird - und das schneller, als man denkt. Medium, 20 November 2018. <https://medium.com/@lukasvh/die-elektrifizierung-der-mobilit%C3%A4t-warum-die-zukunft-elektrisch-fahren-wird-und-das-schneller-e21e0d98a5f6>.
32. Bloomberg. Rare Earth Metals Electrified by China's Illegal Mining Clean-Up. *Bloomberg News*, 7 September 2017. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-09-07/rare-earth-metals-electrified-by-china-s-illegal-mining-clean-up>.
33. Anderson, R. L.A. Multi-tactic approach to manage weed population dynamics in crop rotations. *Agronomy Journal* 97(6), 2005, 1579-1583. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0194>.
34. Friends of the Earth. Lithium. 2013. https://www.foeurope.org/sites/default/files/publications/13_factsheet-lithium-gb.pdf.
35. Gardiner, J. The rise of electric cars could leave us with a big battery waste problem. *The Guardian*, 10 August 2017. <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/aug/10/electric-cars-big-battery-waste-problem-lithium-recycling>.
36. United Nations Environment Programme and International Resource Panel. *Recycling Rates of Metals: A Status report*. 2011. http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8702/Recycling_Metals.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
37. Mayyas, A., Steward, D. and Mann, M. The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive Li-ion batteries. *Sustainable Materials and Technologies* 19, April 2019, e00087. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00087>.
38. Binnemans, K., Jones, P.T., Blanpain, B., Van Gerven, P., Yang, Y., Walton, A. et al. Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production* 51, 2013, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>.
39. Christmann, P., Gloaguen, E., Labbé, J.-F., Melleton, J. and Plantone, P. Global lithium resources and sustainability issues. In *Lithium Process Chemistry: Resources, Extraction, Batteries and Recycling* 1-40. Elsevier, 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801417-2.00001-3>.
40. Boyden, A., Soo, V.K. and Doolan, M. The environmental impacts of recycling portable lithium-ion batteries. *Procedia CIRP* 48, 188-193, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.100>.
41. Ciez, R.E. and Whitacre, J.F. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *Nature Sustainability* 2, 2019, 148-156. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0222-5>.
42. Romare, M. and Dahlöf, L. *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries*. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017.
43. City of Copenhagen. Et bedre København. *Københavns Kommune*, 2019. <https://www.kk.dk/etbedrekbh>.
44. Reaugh, L. American Manganese: VRIC Conversation with President and CEO Larry Reaugh - MoonShot Exec, 25 January 2018. <https://moonshotexec.com/american-manganese-vice-conversation-with-president-and-ceo-larry-reaugh/>.
45. Sun, S. I., Chipperfield, A. J., Kiaee, M. and Wills, R. G. A. Effects of market dynamics on the time-evolving price of second-life electric vehicle batteries. *Journal of Energy Storage* 19, 2018, 41-51.
46. Eckart, J. Batteries can be part of the fight against climate change - if we do these five things. *World Economic Forum*, 28 November 2017. <https://www.weforum.org/agenda/2017/11/battery-batteries-electric-cars-carbon-sustainable-power-energy/>.
47. Calma, J. The electric vehicle industry needs to figure out its battery problem. *The Verge*, 6 November 2019. <https://www.theverge.com/2019/11/6/20951807/electric-vehicles-battery-recycling>.
48. Pavel, C.C., Thiel, C., Degreif, S., Blagojeva, D., Buchert, M., Schüller, D., and Tzimas, E. Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric road transport applications. *Sustainable Materials and Technologies* 12, 2017, 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.01.003>.
49. Transport & Environment. *Electric vehicle life cycle analysis and raw material availability*. 2017. https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2017_10_EV_LCA_briefing_final.pdf.



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>