



文章

<https://doi.org/10.1038/s41467-025-56598-z>

# 全球土壤生物化学关系的火灾驱动的破坏

Received: 9 September 2024

Accepted: 20 January 2025

Published online: 30 January 2025

Check for updates

周贵瑶<sup>1</sup>, 尼科·艾森豪尔<sup>2,3</sup>, 杜正刚<sup>4</sup>, 曼努埃尔·埃斯特班·卢卡斯·博尔哈<sup>5</sup>, 蔡凯燕<sup>1,6</sup>, 米格尔·贝尔多古<sup>6</sup>, 段辉民<sup>8</sup>, 吴汉<sup>4</sup>, 刘圣根<sup>9</sup>, 丹尼尔·雷维利尼<sup>3</sup>, 塔迪奥·塞斯-桑迪诺<sup>10</sup>, 蔡华<sup>4</sup>, 周旭辉<sup>4</sup> & 德尔加多·巴凯里索<sup>1</sup>



火灾改变有机物的稳定性并促进土壤侵蚀，这威胁到土壤生物地球化学循环的基本耦合。然而，土壤生物地球化学及其环境驱动因素如何对火灾做出反应，在全球范围内几乎一无所知。在这里，我们整合了实验观测和随机森林模型，并揭示了全球土壤生物地球化学属性对火灾反应的显著差异，包括土壤碳（C）、氮（N）和磷（P）含量。火灾通常降低土壤碳含量，对总氮的影响不显著，而它增加了无机氮和磷的含量，其中一些影响持续数十年。在寒冷气候、针叶林以及高强度和高频率的野火下，火灾的影响最为强烈。我们的工作提供了证据，表明火灾在全球范围内解耦土壤生物地球化学，并有助于确定关键土壤生物地球化学成分特别不平衡的优先生态系统，这对于管理受更严重、更频繁和更广泛野火影响的生态系统至关重要。

火灾是普遍的自然事件，自然影响生态系统发展和演替<sup>1</sup>，并且已知会改变全球生物多样性和生态系统功能的多个方面<sup>2, 3</sup>。虽然自然火灾可以通过促进植物多样性（例如，减少竞争排斥）、植物发芽和生态系统更新来使生态系统受益，但人为火灾的速率和严重程度也代表了生态系统健康和人类福祉的严重威胁，因为它们在地上变得更加严重并覆盖了更大的区域<sup>1, 2</sup>。火灾对

生态系统服务预计将进一步加剧，尽管人类干预试图管理和预防火灾<sup>3, 4</sup>。因此，预计在未来几十年内将发生更严重和更频繁的火灾，其对陆地生态系统及其为人类提供的多种生态系统服务的后果仍描述不清。我们知道碳（C）、氮（N）和磷（P）在

<sup>1</sup>生物多样性实验室和生态系统功能研究所。塞维利亚自然资源和农业生物学研究所（IRNAS）。西班牙塞维利亚，阿维尼达·雷伊娜·梅塞德斯10号，E-41012塞维利亚。ficas (CSIC)。 <sup>2</sup>德国综合生物多样性研究中心（iDiv）哈雷-耶拿-莱比锡，普舒斯特街4号，04103莱比锡，德国。 <sup>3</sup>莱比锡大学生物学研究所，普舒斯特街4号，04103莱比锡，德国。 <sup>4</sup>碳中和研究所，教育部可持续森林生态系统管理重点实验室，东北林业大学生态学院，哈尔滨150040，中国。 <sup>5</sup>卡斯蒂利亚-拉曼查大学农业和林业工程技术与生物技术高等技术学校，阿尔巴塞特，西班牙。 <sup>6</sup>森林生态学实验站，中国科学院森林生态系统与经营管理重点实验室，应用生态研究所，中国沈阳110016。 <sup>7</sup>生物多样性、生态学和进化系，康普顿斯大学生物学学院，28040马德里，西班牙。 <sup>8</sup>生态与生物多样性研究所，山东大学生命科学院，青岛，中国。 <sup>9</sup>福建农林大学林业学院，福州，中国。 <sup>10</sup>霍克斯伯里环境研究所，西悉尼大学，新南威尔士州彭里斯。 [zhouguiyao@gmail.com](mailto:zhouguiyao@gmail.com); [m.delgado.baquerizo@csic.es](mailto:m.delgado.baquerizo@csic.es)



自然生态系统<sup>5</sup>（参见补充图S1中的示例）。然而，火灾会减少植物生物量、改变有机物质库、并促进土壤侵蚀<sup>2,6</sup>，这可能导致C、N、P生物地球化学耦合（以下简称解耦）的根本性变化，进而破坏植物生产力<sup>7,8</sup>等生态系统服务。更重要的是，我们可能低估了生态系统对火灾的未来响应，因为大多数先前的研究都集中在火灾对土壤碳和氮的影响上，而忽略了土壤碳和氮的响应如何与土壤磷的响应和耦合。鉴于土壤生物地球化学对生态系统可持续性的基础性重要性，探索土壤生物地球化学对火灾的全球响应模式至关重要。这种知识对于预测陆地生态系统的未来和增强全球变化下的管理实践至关重要。

重要的是，我们知道碳、氮和磷元素在土壤中的来源和可用性各不相同。虽然碳和氮可以从大气中生物固定并经常在生态系统发展过程中积累，但磷来自热诱导的矿化和灰烬沉积，且在生态系统发展过程中，磷的可用性随时间下降，尤其是在森林中<sup>4,9</sup>。然而，生物和地球化学对养分循环的控制可能在火灾后通过植物生物量的下降、凋落物输入内容的转变以及几天到几十年尺度上的土壤侵蚀而改变<sup>4,10,11</sup>。因此，火灾，尤其是频繁和严重的野火，可能对全球土壤生物地球化学循环的耦合产生关键影响。我们预测，在全球范围内，火灾会导致土壤碳含量的减少和与植被灰烬沉积相关的矿物元素（如磷）含量的增加。尽管生物地球化学循环对生态系统功能和服务的至关重要性，但还没有研究评估火灾严重程度和频率的同时增加如何影响全球土壤碳、氮和磷的含量。更重要的是，先前研究土壤生物地球化学影响的元分析由于观测值的数量高度可变<sup>12-15</sup>，结果不一致，这可能在为火灾对土壤生物地球化学的影响提供清晰的图景时造成巨大挑战。因此，对火灾对土壤生物地球化学的影响进行全面评估对于减少全球变化下陆地生态系统未来预测的不确定性至关重要。

气候是全球植物生产力的主要驱动因素，也是土壤生物地球化学和土壤微生物生物量的基本调节器。气候还在改变火灾制度（例如，严重程度、频率）中发挥着关键作用，在干燥生态系统和积累大量燃料负荷的生态系统中，可能导致更加严重和频繁的火灾。相比之下，热原生态系统正面临着气候变化和人类干预的问题，历史上重要的火灾已被阻止，从而改变了之前稳定的土壤生物和非生物条件。尽管对火灾影响的研究引起了广泛关注，但大多数全球研究都忽略了气候在塑造生物群落对火灾响应中的作用。同样，我们也不知道主要森林类型，如被子植物、针叶植物和不同菌根类型占主导地位的森林，如何调节土壤生物地球化学对火灾的响应。因此，尽管对某些土壤生物地球化学属性（如土壤呼吸和土壤磷）的火灾影响已有详细记录，但我们仍然缺乏对火灾如何影响全球不同气候和植物功能类型土壤生物化学耦合的全面研究。

在这里，我们利用5460个观测值（图1）进行了全球综合分析，以研究火灾频率、严重程度和类型对主要全球气候和植物功能类型（例如，针叶植物与被子植物、丛枝菌根与外生菌根植物）表层土壤（0–20 cm）中碳、氮和磷含量的平衡的影响。我们的全球综合分析提供了土壤碳、土壤氮和土壤磷含量对火灾响应的信息，以及植物生物量和土壤有机质（SOM）分解如何对火灾做出反应。火灾

微生物生物量以及土壤有机质（SOM）分解对全球火灾的响应。我们使用对数响应比率（lnRR）比较了特定变量在给定时间（年份）内受到火灾影响的平均值与对照（成对参考生态系统的未燃烧地块；详见方法）之间的差异，以确定土壤碳、氮、磷、SOM分解和土壤微生物生物量对火灾的响应。具体而言，我们假设：（1）火灾将破坏碳、氮和磷之间的生物地球化学耦合，因为火灾预计会去除生物驱动的元素，如碳和氮，同时使基岩恢复活力并释放化学驱动的元素，如磷；（2）在寒冷气候和野火强度和频率较高的针叶林中，火灾对土壤生物地球化学的负面影响将更大，因为这些生态系统以较慢的养分循环和较低的微生物活性为特征，使它们更容易受到严重和频繁火灾的干扰。

## 结果与讨论我们的全球综合分析表明

的证据表明，平均而言，火灾显著地解耦了全球土壤碳、氮和磷含量（图1，补充图S6，S7）。这些解耦影响在更严重和频繁的火灾下尤其强烈，并且在野火而不是规定火灾之后（图1）。气候和植物功能类型在解释火灾后土壤元素响应的变异性中发挥了关键作用，与被子植物和丛枝菌根生态系统相比，土壤元素在针叶和外生菌根生态系统中的响应更为敏感（图2和3）。我们的结果还表明，与干旱和热带/温带生态系统相比，土壤碳、氮和磷含量在寒冷气候地区对火灾更为敏感（图2和4）。重要的是，我们的分析还揭示，火灾对土壤生物地球化学的影响可能持续半个世纪以上，大多数元素在火灾后的时间变异性都很重要（图5）。总之，这些结果表明，火灾在全球范围内解耦了土壤生物地球化学，这种响应预计会随着人为气候变化的加剧而变得更加强烈，并可能随后影响多个生态系统服务，如植物生产力和碳封存。

火灾解耦全球土壤生物地球化学关系与我们的第一个假设一致，我们的工作提供了

火灾在全球范围内破坏了碳、氮和磷的土壤生物地球化学耦合的实证证据（图1）。我们发现火灾显著降低了土壤碳含量，对总氮没有影响，并增加了无机氮和磷，表明火灾后养分矿化水平较高<sup>6,26</sup>（补充图S6）。然后我们使用三种独立的网络分析、斯皮尔曼相关分析和主成分分析交叉验证了我们的结果，仍然发现火灾解耦了土壤碳、氮和磷含量（图2，补充图S8）。由于火灾后凋落物或地表植被的保护作用不足，土壤退化或侵蚀的加剧将阻碍微生物的底物获取，从而降低土壤碳<sup>15,27</sup>。火灾引起的植物生物量（如凋落物质量和根系生产）的减少也可能减少大量土壤和根际及其共生体中易变碳的输入，导致微生物多样性、微生物生物量以及土壤碳库的减少（图1，补充图S8）<sup>2,27</sup>。土壤碳含量的火灾诱导减少进一步改变了碳与氮或磷的耦合，限制了生态系统缓冲不断增长的大气二氧化碳浓度的能力，并限制了植物和微生物的生产力和多样性<sup>28-30</sup>。我们的分析进一步揭示了火灾制度的重要性，因为与温和、罕见或预定火灾相比，在严重、频繁和野火条件下，火灾对生物化学耦合的影响更为明显（图1）。野火通过减少植物生物量和有机物质输入、促进土壤侵蚀和基岩更新，大大改变了陆地生态系统中生物与非生物控制之间的平衡，对生态系统产生了重要的影响。

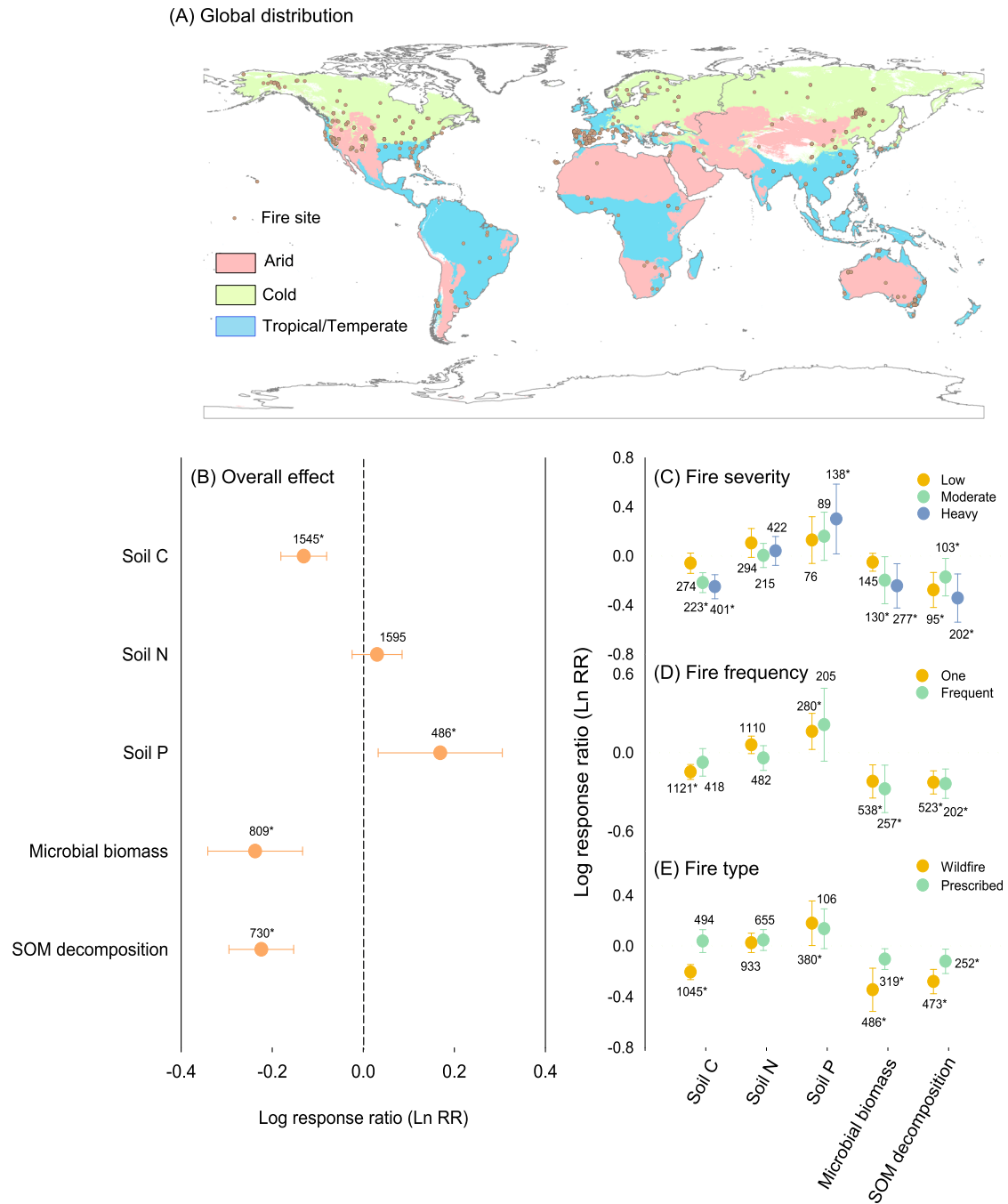


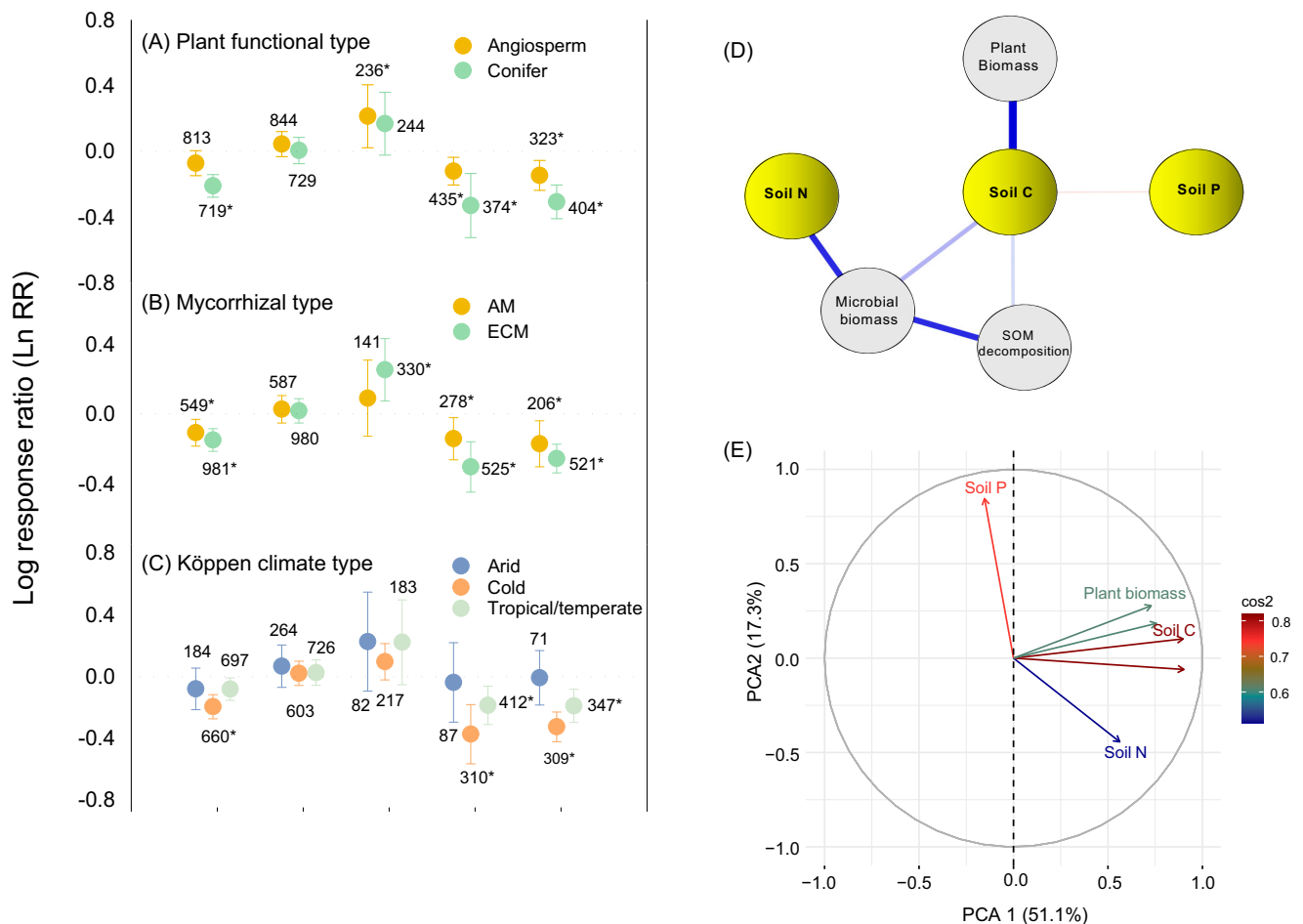
图 1 | 火灾对土壤生物地球化学的全球影响。所选实验地点的全球分布 (A)。地图中的颜色代表当前柯本气候区的分布。土壤碳、土壤氮、土壤磷、土壤微生物生物量和土壤有机质分解的对数响应比率的估计 ( $\pm 95\%$  置信区间) (B)。不同火灾严重程度 (C)、火灾频率 (D) 和火灾类型 (E) 下土壤碳、土壤氮、土壤磷、土壤微生物生物量和土壤有机质分解的对数响应比率的估计 ( $\pm 95\%$  置信区间)。虚线绘制在  $\ln RR = 0$  处。每个点的数值表示样本大小。误差线表示 95% 置信区间 (CI)，星号 \* 表示统计显著性。SOM 土壤有机质。

、土壤氮、土壤磷、土壤微生物生物量和土壤有机质分解的估计 ( $\pm 95\%$  置信区间)，以及不同火灾严重程度 (C)、火灾频率 (D) 和火灾类型 (E) 下的估计。虚线绘制在  $\ln RR = 0$  处。每个点的数值表示样本大小。误差线表示 95% 置信区间 (CI)，星号 \* 表示统计显著性。SOM 土壤有机质。

发展。火灾还可以刺激机械岩石风化以及灰烬融入土壤，通过矿物沉积释放或直接植被灰烬输入增加土壤磷含量，可能促进矿化过程<sup>10,31</sup>。然而，先前的一项元分析表明，火灾会降低陆地生态系统的土壤碳和土壤氮含量<sup>15</sup>。这种差异可能源于我们包括了土壤无机氮作为土壤氮成分的一部分，它由于土壤氮矿化和硝化作用的增强而对火灾表现出积极反应<sup>32</sup>。此外，本研究的数据集比以往的工作更大，这为不同环境条件提供了更广泛的覆盖，并增加了统计检验的效力。

结论在此。虽然生态系统的发展通常会导致重要的土壤碳和氮积累以及表层土壤的磷损失，但我们表明火灾可以产生相反的效果。这些结果共同表明，火灾破坏了土壤生物化学耦合，因此可能会在全球变化的情况下损害陆地生态系统的未来可持续性。

生物地球化学在寒冷和针叶生态系统中的火灾脆弱性达到顶峰我们的全球综合分析进一步表明，植被类型和气候是调节土壤生物地球化学对



**图 2 |** 火灾在全球范围内显著解耦土壤生物地球化学。土壤碳、土壤氮、土壤磷、微生物生物量和土壤有机质分解在不同植物功能类型 (A)、菌根类型 (B) 和本气候类型 (C) 下的对数响应比率的估计 ( $\pm 95\%$  置信区间)。虚线绘制在  $\ln RR = 0$  处。每个点的数值表示样本大小。误差线表示 95% 置信区间 (CI)，符号 \* 表示统计显著性。火灾对六个土壤生物地球化学属性生态连通性网络的影响 (D)。网络中的每个属性都是一个节点，

连接表示在条件化所有其他变量后，两个变量之间的部分相关系数。蓝色和红色链接分别表示正负相关性。链接的厚度表示部分相关系数。主成分分析 (PCA) 显示了多种土壤生物地球化学属性对火灾 (E) 的响应 ( $\ln RR$ )。SOM 土壤有机质，AM 丛枝菌根真菌，ECM 外菌根真菌，SOM 土壤有机质。

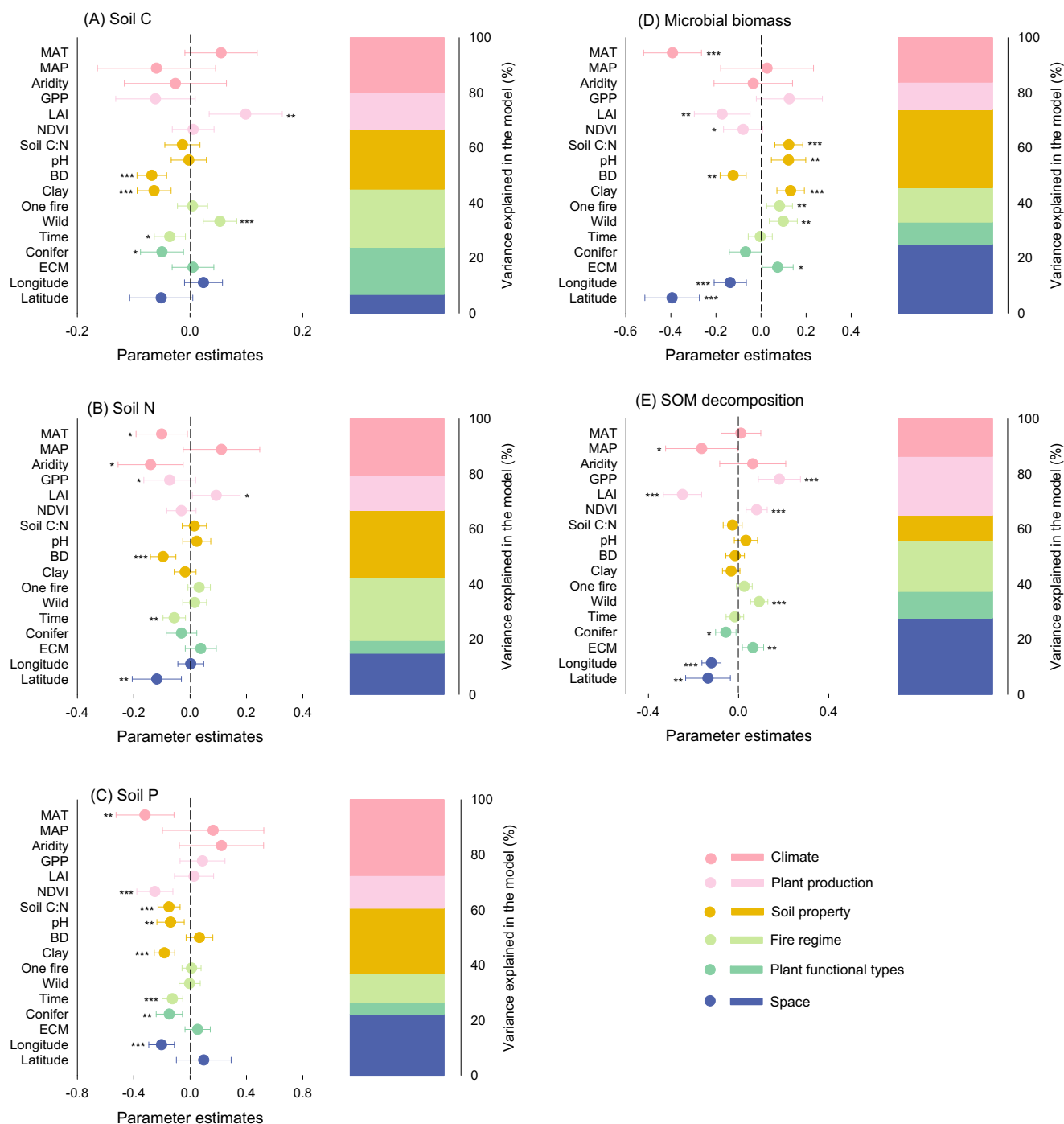
fire across the globe. 针叶林、以丛枝菌根共生关系为主的生态系统和寒冷地区对火灾的响应最强，正如我们所预测的 (图 2，补充图 S8)。我们发现，土壤生物地球化学，特别是在针叶和丛枝菌根为主的生态系统中与碳相关的措施，比被子植物和丛枝菌根生态系统更容易受到火灾相关损害，表现出土壤碳、土壤微生物生物量和土壤有机质分解的显著负响应。众所周知，针叶植物由于含有更多可燃物质 (例如树脂) 以及火灾响应中凋落物生物量输入的增加，会促进高严重程度的火灾<sup>33</sup>。同样，火灾可能导致以丛枝菌根 (ECM) 植物物种为主的生态系统比与丛枝菌根 (AM) 真菌相关的植物为主的生态系统损失更多的土壤碳、土壤微生物生物量和土壤有机质分解，因为 ECM 植物倾向于产生更多难降解凋落物并在土壤中储存更多的碳<sup>22,34</sup>。这些结果表明，火灾对较冷地区的土壤生物地球化学的影响大于较暖地区，尽管针叶林和 ECM 植物在亚热带地区广泛分布

区域，因为 MAT 与土壤生物地球化学属性 (如土壤碳含量和土壤有机质分解) 呈正相关，在火灾 (图 2，补充图 S9) 之后。较冷地区的较高土壤碳库和土壤微生物生物量可能充当更大的碳库，并且在火灾期间其燃烧可能对寒冷气候地区的土壤指标的影响比热带/温带地区更为显著。重要的是，我们的多元回归模型进一步证实了气候和植被类型在调节火灾后土壤生物地球化学中的关键作用 (图 3，补充图 S10)。总的来说，我们的结果表明，火灾对寒冷和针叶生态系统的土壤生物地球化学有更强的效应，这应在未来的土地管理中考虑，以更好地实现全球气候变化缓解目标。

全球火灾对土壤生物地球化学的影响映射为了进一步确定报道的全球土壤生物地球化学差异

土壤生物地球化学对火灾响应的响应，我们使用随机森林模型开发了土壤生物地球化学对火灾响应的全球地图 (图 4，补充图 S11)。我们的地图考虑了不确定性区域。



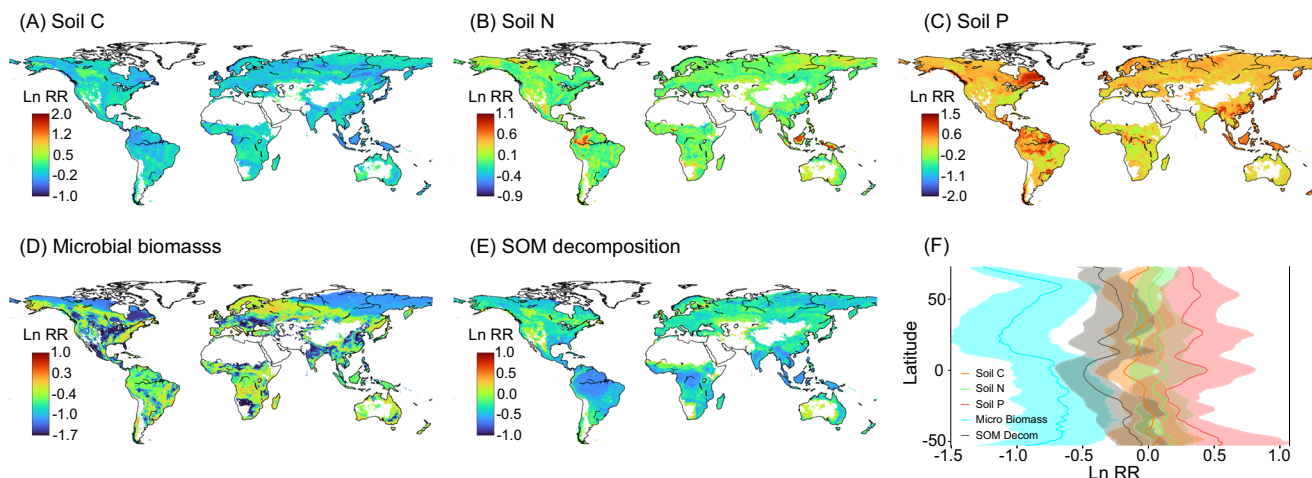


**图 3 | 火灾对土壤生物地球化学的全球驱动因素。**多重排序回归揭示了最重要的预测因子对土壤碳 (A)、土壤氮 (B)、土壤磷 (C)、土壤微生物生物量 (D) 和土壤有机质分解 (E) 的影响的相对重要性。模型的标准回归系数以及相关的95%置信区间显示在每个预测因子上。\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ , \*\*\* $P < 0.001$ 。条形图显示了相对

每个预测组 (由y轴上的变量表示) 的重要性, 以解释的方差百分比表示。土壤生物地球化学的生物和非生物预测因子包括: 气候、空间、植物生产力、土壤特性、火灾制度和植物功能类型。MAT平均年温度, MAP平均年降水量, GPP总初级生产力, LAI叶面积指数, NDVI归一化植被指数, BD体积密度, SOM土壤有机质。

较小的样本量, 其中未报告预测结果 (补充图S12)。模型验证表明, 随机森林模型在预测火灾对土壤生物地球化学的影响方面表现良好 (补充图S13)。土壤碳、土壤氮和土壤磷含量的火灾诱导变化揭示了不同的纬度模式, 表明生态系统对火灾的生物地球化学响应解耦是普遍存在的。我们的地图进一步表明, 火灾对土壤生物地球化学的影响在寒冷地区 (如欧洲北部和中国东北) 比在较温暖地区 (例如亚热带和热带) 更强, 这与上述结果 (图2C) 一致。总的来说, 我们的地图有助于确定地球上可能对土壤生物地球化学产生更大影响并可能严重破坏全球土壤生物化学关系的气候区、生态系统类型和位置。

在寒冷地区, 如欧洲北部和中国东北, 对土壤生物地球化学的影响比在较温暖地区 (例如亚热带和热带) 更强, 这与上述结果 (图2C) 一致。总体而言, 我们的地图有助于确定地球上可能对土壤生物地球化学产生更大影响并可能严重破坏全球土壤生物化学关系的气候区、生态系统类型和位置。



**图4 | 基于机器学习建模预测火灾后土壤生物地球化学的分布。预测火灾对土壤碳、土壤氮、土壤磷、土壤微生物生物量和土壤有机质分解的影响分布 (A–E)。火灾后土壤生物地球化学的纬度分布 (F)。R<sup>2</sup>值分别为0.45、0.41、0.62、0.56和0.43。提供包含模型不确定性的信息图，见补充图S12。我们还在补充图S13中包括了模型验证性能。微生物生物量，土壤微生物生物量；SOM decom，土壤有机质分解。**

土壤有机质分解分别为0.45、0.41、0.62、0.56和0.43。提供包含模型不确定性的信息图，见补充图S12。我们还在补充图S13中包括了模型验证性能。微生物生物量，土壤微生物生物量；SOM decom，土壤有机质分解。

火灾对土壤生物地球化学的影响可以持续数十年我们研究了土壤生物地球化学恢复到火灾前或未燃烧状态所需的时间

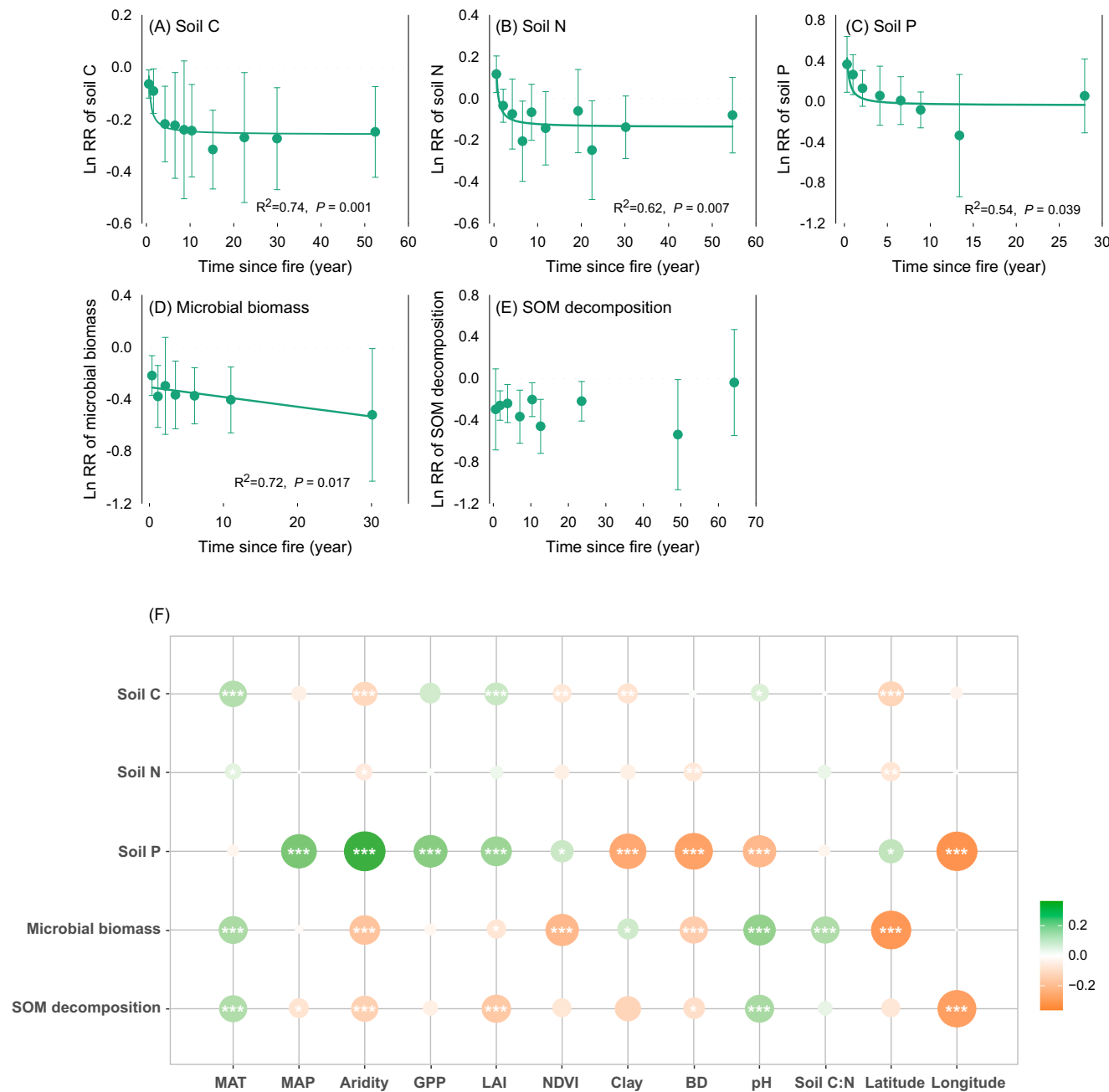
以及控制水平以及这些变化如何影响生态系统的长期可持续性<sup>12,18,38</sup>。我们的结果表明，火灾对土壤生物地球化学的影响可以持续数十年（图5），这与Dove等人<sup>39</sup>的研究结果一致。火灾后的生态系统似乎会过渡到新的替代状态，土壤功能水平降低，可能对生态系统特征（例如植物群落或碳封存）产生影响，并诱导稳定反馈，如增加反照率、减少生物对土壤水分储存或群落组成变化的影响<sup>39–41</sup>。具体而言，我们的分析表明，火灾对土壤碳的影响可以持续长达55年，而火灾对土壤氮和磷动态的影响在短期（不到五年）内大于十年尺度（图5）。短期内土壤碳的强烈下降可能与植物碳输入的减少以及易变碳生物降解速率的增加密切相关（补充图S8），而土壤磷的增加可能是由于高磷植被灰烬输入、热诱导微生物磷矿化增加以及生物风化增加<sup>15,42</sup>。相比之下，火灾引起的土壤微生物生物量减少与火灾发生时间呈负相关（图5），表明土壤微生物对火灾干扰的敏感性高于土壤碳、氮和磷含量<sup>12</sup>。与大多数生物地球化学特性的火灾影响进行额外的交叉验证显示出相似的模式（补充图S14），进一步证明了火灾引起的全球土壤C、N和P生物化学关系的破坏可以持续数十年。重要的是，在分析时，无论是通过生态预测因子（例如气候、土壤特性）与土壤生物地球化学之间的偏相关还是随机森林模型，控制火灾发生时间的变化后，我们的结果都是一致的（图5F，补充图S15）。

火灾管理与影响我们在此提供了可靠的证据，表明

火灾显著破坏了陆地生态系统中碳、氮和磷含量的土壤生物化学耦合，并且火灾制度、植被类型以及气候可以调节全球火灾影响。规定火已被作为土地管理策略应用了数百年，包括澳大利亚土著人或美洲原住民部落的传统做法<sup>29,30</sup>，我们的结果建议，谨慎使用规定火可以作为高风险火灾区域主动火灾扑救的实际替代方案

以更好地防止土壤碳库的更大损失，从而促进生态系统可持续性，与严重的野火相比。更重要的是，火灾往往对针叶林和寒冷气候中由外生菌根共生关系主导的生态系统中的生物地球化学特性产生更大的影响。这些结果突出了这样一个事实：在寒冷气候区域内种植混合菌根类型（包括AM被子植物树）的森林具有更大的潜力来抵抗火灾影响，因此更能有效地应对气候变化。总之，科学家、管理者、政策制定者和当地社区之间更积极的合作对于陆地生态系统的长期可持续性至关重要，包括促进防火带的建立、积极利用规定火以及林分更新时增加阔叶树种等

我们注意到，我们的全球分析并非没有局限性，这些局限性应在未来的实验中考考虑，以改善我们对全球变化下生态系统可持续性的当前理解。大多数火灾实验都是在北美洲和西欧进行的，例如西班牙和森林生态系统（图1）。我们还确定了热带和南半球地区，如巴西和非洲，这些地区研究不足，在评估火灾对土壤生物地球化学的影响时可能会引发不确定性。在开发新的实验工作时，应优先考虑这些地区，以提供更全面的土壤生物地球化学循环图景，并促进在遭受更严重和频繁野火的世界中生态系统的可持续性。尽管我们的研究提供了火灾对土壤生物地球化学影响的认识，但我们注意到，大多数研究中火灾影响的实验持续时间不到10年，长期响应可能会偏向于高严重程度生物群落（例如，内华达山脉森林中的高严重程度野火）<sup>39</sup>，如果我们旨在精确评估与全球变化下土壤生物地球化学相关的多种生态系统服务，可能会引发一些不确定性。因此，有必要进行长期研究，涉及更多级别的火灾严重程度，并跨越全球更多地区，以更好地了解火灾对土壤生物地球化学的影响。此外，气候可能与土壤类型和植被恢复等多种其他环境因素相互作用，调节土壤生物地球化学及其与植物生物地球化学在火灾后的联系，而全球模式仍然几乎未知<sup>43</sup>，这对生态系统管理构成了挑战。



**图 5 |** 火灾对土壤生物地球化学的影响取决于火灾发生的时间。火灾发生以来土壤碳 (A)、土壤氮 (B)、土壤磷 (C)、土壤微生物生物量 (D) 和土壤有机质分解 (E) 的变化。影响以平均响应比率 ( $\pm 95\%$  自举置信区间) 表示。当置信区间不与零重叠时, 认为火灾影响具有统计学意义。偏相关分析表明, 即使在控制火灾发生时间后, 生态和环境因素也与火灾诱导的变化显著相关。圆圈的大小表示相关系数。绿色和橙色分别代表正负相关性。MAT 平均年温度, MAP 平均年降水量, GPP 总初级生产力, LAI 叶面积指数, NDVI 归一化植被指数, BD 容重密度, SOM 土壤有机质。星号表示显著性 \* $P < 0.05$ ; \*\* $P < 0.01$ ; \*\*\* $P < 0.001$ 。

促进土壤健康和恢复力。我们的研究共同为未来深入研究土壤生物地球化学对火灾的反应打开了大门。

总之, 了解火灾对陆地生态系统土壤生物地球化学的影响至关重要, 这对于可持续生态系统管理至关重要<sup>fire11</sup>。尽管火灾是一种强大的生态和进化力量, 它塑造了生态系统服务<sup>19</sup>, 但我们的全球研究提供了确凿证据, 表明火灾显著解耦了土壤生物地球化学, 土壤生物地球化学特性对火灾的反应存在显著差异, 这种差异可能持续数十年。这些

火灾的解耦效应在对比鲜明的生态系统类型和气候区域中是一致的, 而在针叶林、以外生菌根植物为主的生态系统和寒冷地区发现了最显著火灾影响。大多数当代地球系统模型仍然考虑耦合的土壤生物地球化学循环或未能考虑植物功能类型和气候驱动因素差异。我们的研究表明, 下一代地球系统模型应明确纳入火灾干扰后土壤生物地球化学的解耦效应, 以更好地预测多个生态系统服务与全球变化之间的反馈。此外, 我们的研究强调了

火灾制度对土壤生物地球化学的重要性，揭示了火灾对这些关键生态系统过程十年影响，这应再次提醒我们，我们必须采取行动减轻气候变化，以最大限度地减少持续火灾对土壤过程的影响，并促进生态系统可持续性和人类健康。

## 方法

全球土壤生物地球化学火灾影响调查我们使用ISI Web of 搜索了相关期刊文章

科学和《中国知网》数据库（CNKI）使用以下关键词组合进行期刊文章搜索：“火灾”或“燃烧”或“野火”或“规定火”和“（土壤）”和“（碳”或“氮”或“磷”或“土壤呼吸”或“养分”或“碳通量”或“土壤有机质”或“SOM分解”或“微生物生物量”或“PLFA”或“细菌”或“真菌”或“生物地球化学”），时间范围为1950年至2023年。土壤生物地球化学被分为土壤碳、土壤氮、土壤磷、土壤微生物生物量（即微生物生物量）和土壤有机质（SOM）分解（补充表S1）。每个属性仅包含在一个类别中。以下标准被应用于严格选择允许直接比较生物化学过程并避免出版选择偏差的火灾研究：（i）火灾实验是在野外进行的；（ii）对照组和火灾处理的环境条件（例如，土壤类型和生态系统类型）和气候相同；（iii）上述选定的变量中至少有一个被记录（补充表S1）；（iv）对照组和火灾处理中选定的变量的平均值可以直接从相关数据集、表格或数字化图表中提取；（v）选定的研究应以配对图设计进行，对照组是基于空间（未燃烧地块与相邻燃烧地块的比较）或时间（火灾前与火灾后的比较）比较建立的。

使用这些 five 严格的筛选标准，如补充图S2中的PRISMA图所示，共选择了471项研究，包含5460个观测值（图1，补充图S3和补充文本S1），以评估 fire 在 fluences 土壤生物地球化学循环方面的影响。目前的大多数研究分布在温带气候区，尤其是在西欧和北美洲，其中大部分来自森林生态系统（图1）。在这些研究中，50项研究同时包括土壤碳（C）、氮（N）和磷（P），217项研究包括土壤C和N，58项研究包括土壤C和P，78项研究包括土壤N和P。同时，1545项报告了土壤C的响应，1595项报告了土壤N，486项报告了土壤P，809项报告了微生物生物量，730项报告了SOM分解，295项报告了植物生物量。我们进一步使用谷歌学术重复了文献检索，并按相关性排序，以确保我们的搜索涵盖了所有相关研究。所有通过谷歌学术找到的符合我们标准的、排名前200的研究都已包含在我们的数据集中。总之，这是迄今为止对量化 fire 对土壤生物地球化学影响的最为全面的综合研究，有助于获得对未来在更严重、更频繁、影响更广的野 fire 环境下生态系统功能的一般性理解。

同时，我们还编制了包括纬度和经度在内的地理信息，以及平均年温度（MAT）和降水量（MAP）等气候信息。MAT和MAP直接来自原始研究或该研究中引用的论文。如果这些数据没有提供，则从WorldClim数据库（[www.worldclim.com](http://www.worldclim.com)）使用地理信息提取。年降水量与潜在蒸发量之比也从WorldClim数据库获得，用于计算干旱指数（AI），即年降水量与干旱指数的比率。土壤pH值、粘土、体积密度（BD）和C:N的数据来自SoilGrids数据库（<https://www.isric.org/explore/soilgrids>）。植物生产力包括归一化植被指数（NDVI）、总

初级生产力（GPP）和叶面积指数（LAI）来自NASA陆地过程分布式主动存档中心（<https://lpdaac.usgs.gov/>）20年产品平均值。我们遵循Beck等人<sup>44</sup>的方法，将柯本气候分类划分为干旱、寒冷和热带温带区（表S2）。植物功能类型分为菌根共生关系和功能类型。我们使用了王秋（2016）<sup>45</sup>和Soudzilovskaia等人<sup>46</sup>的数据库，以区分优势物种为丛枝菌根真菌（AM）和外菌根真菌（ECM）（补充表S2）。我们数据集中的大多数研究都集中在AM和ECM上，因为非菌根物种（NM）的生物群落太少，无法进行分析。对于具有混合菌根类型的生态系统，如具有ECM树木和AM草的草原，菌根状态根据ECM植物相对于AM植物的相对丰度来定义<sup>47</sup>。植物功能类型根据可用的信息分为被子植物和针叶植物，以测试火灾对土壤生物地球化学的影响是否取决于树木类型。由于火灾严重程度、频率和类型的标准可能因不同地点而异，我们直接使用所选参考文献或引用论文中这些因素的信息，以避免任何偏差。具体来说，火灾严重程度分为低、中、重；火灾频率分为“一次”和“频繁”（补充表S2）。如果所选地点在过去20年中火灾次数为两次或更多，则将火灾频率归类为“频繁”。根据文献中报告的火灾制度，将火灾类型分为“野火”或“预定火灾”（补充表S2）。我们承认，这些相当宽泛的分类可能只代表了自然界中火灾复杂性的部分，但更精细的分类可能不会为稳健的元分析提供足够的样本。此外，我们还从协调世界土壤数据库（HWSD，<https://gaez.fao.org/pages/hwstd>）收集了所选地点的土壤分类信息。我们的数据集中记录了24种土壤类型，包括淋溶土、钙质土、轻质土、灰化淋溶土、泥炭土、砂土、酸性土、盐土、灰化土、灰化土、泥炭土、黑钙土、灰钙土、石膏土、粘土、火山土、栗钙土、铝土、粘土、黑土、灰土、铁铝土和人为土。

火灾对土壤生物地球化学的影响 To analyze the direction and magnitude of

火灾干扰下土壤生物地球化学变化，进行了一项元分析，这是一种定量、科学的综合工具，可以提供可靠、广泛规模的结论<sup>48</sup>。具体而言，使用Mooney等<sup>49</sup>和Crouzeilles等<sup>50</sup>描述的对数响应比率（LnRR）=  $\ln(\text{火灾/对照})$  作为LnRR=  $\ln(\text{火灾/对照})$  来探索全球火灾影响。在这里，火灾是在给定时间（年）内受到火灾干扰的特定变量的平均值，而对照是未燃烧对照的值（即，没有附近自然参考生态系统的火灾干扰）。当火灾处理的特定变量的值高于对照处理时，对数响应比率是正的。然后，我们计算了土壤生物地球化学中所有变量的平均LnRR值，也计算了按不同植物功能类型和柯本分类分组变量的平均LnRR值。首先通过Egger回归测试以及检查漏斗图<sup>51</sup>来测试潜在的发表偏倚。Egger回归测试使用元分析残差进行应用，这些残差包括抽样误差以及正常残差等效的效应量水平效应<sup>52</sup>。然后，我们使用R中的metafor包进行交叉验证，因为Rosenthal的安全数可以同时考虑线性和非线性假设，并且可以广泛用于多种类型的元分析<sup>53</sup>。Egger回归测试和Rosenthal的安全数都使用metafor包在R中进行。元分析残差的Egger回归测试显示存在一些潜在的漏斗不对称性（补充图S4）；然而，Rosenthal的安全数表明不存在发表偏倚的证据（补充表S3）。综合考虑，发表偏倚



我们全球数据集的样本量非常有限，数据库中包含的研究可以被视为现有研究的代表性样本。为了与先前的研究保持一致，我们采取了Mooney等描述的保守方法，即不根据其方差对效应大小进行加权。<sup>49</sup>，与使用加权方法<sup>50</sup>得到的结果相似。这种方法与其他加权指标相比具有很大优势，因为它只需要两组因变量的平均值，而其他加权指标需要一些方差（例如，标准差）和对照组及治疗组的样本量。这使得我们能够分析包含>5000观测值的大型数据集。然后，我们创建了一个子数据集，其中方差（即标准差）占到了总数据的90%以上，以进一步使用方差加权方法<sup>15</sup>对我们的结果进行交叉验证，这证实了火灾破坏了土壤生物化学耦合（补充图S5）。

火对土壤生物地球化学和尺寸效应的影响我们遵循了周等<sup>55</sup>和Eldridge & De

Igado-Baquerizo (2017)<sup>56</sup> 为了量化火灾对土壤生物地球化学循环属性的平均影响，使用R包lme4中的线性混合模型，以lnRR作为因变量。这些模型的显著性通过似然比检验进行测试。阻力估计来自限制性最大似然估计和来自似然轮廓估计的95%置信区间。我们考察了土壤生物地球化学的时空变化，这些变化受MAT、MAP、干旱度、GPP、LAI、NDVI、土壤碳氮比、pH、BD、粘土、经度和纬度的影响。

多元回归模型我们使用了多元回归

模型来评估气候、植物生产力、土壤特性、火灾制度、植物功能类型、时间和空间对土壤生物地球化学属性以及植物生物量的联合影响。这种方法基于变异分解模型，使我们能够隔离特定变量（例如，气候）的独特贡献，同时考虑其他预测因子（例如，土壤特性）的影响。我们包括MAT、MAP和干旱度作为气候变量。植物生产力由GPP、NDVI和LAI表示，而土壤特性包括pH、粘土含量、体积密度（BD）和土壤碳氮比。火灾制度包括火灾类型（即是否属于野火）和上次火灾以来的时间。鉴于植物功能类型在我们分析中的重要性，我们还包括了ECM和针叶树的影响，以探索植物功能类型（包括菌根共生关系）如何调节火灾对土壤生物地球化学的影响。此外，我们还包括了纬度和经度作为空间因素。所有预测因子和响应变量在分析之前都进行了标准化，使用Z分数来解释参数估计的可比尺度。每个预测因子的估计参数系数使用R统计软件的relaimpo包计算。

偏相关分析和随机森林分析鉴于时间的影响强烈，偏相关分析

n次分析进行了交叉验证，以检验MAT、MAP、纬度、GPP、NDVI、LAI、土壤碳氮比、pH和粘土等不同生态多样性对土壤生物地球化学的影响，同时控制火灾发生以来的时间。部分相关性分析使用R中的ggm和psych包进行，如陈等人所述。<sup>57</sup>。相关系数和显著性（ $P < 0 < 0.05$ ）以热图形式呈现，对比颜色代表正负相关性，圆圈大小表示系数的大小。同时，我们使用R包randomForest、rfPermute和A3进行随机森林分析，以探索土壤分类、植物生产力、土壤特性、火灾制度、植物功能类型和空间在驱动土壤生物地球化学对火灾响应中的相对重要性。

主成分分析（PCA）考虑到非线性方法

s可能在高度多样化的数据上过度参数化，因此我们对多样化土壤生物地球化学的多变量空间进行了主成分分析（PCA）（见周等<sup>55</sup>）。具体而言，生态系统属性使用z变换进行了标准化。然后，我们提取了每个成分（PCA）的解释方差以及每个生物地球化学指标的载荷，展示了每个土壤生物地球化学过程对相关PCA轴的贡献。

土壤生物地球化学属性对火灾的响应关系网络分析被用来评估不同土壤生物地球化学属性之间的关联。

geochemistry attributes associated with each other, assessed which attribute was the most central<sup>58</sup>, and then identified clusters of attributes with similar responses to fire. Specifically, the pairwise Markov random field network model was used to estimate the Partial correlation networks, which was optimized using the extended Bayesian information criterion ('EBICglasso') with the 'bootnet' package<sup>59</sup>. We then computed the centrality by summing the absolute values of partial correlations to obtain the higher values quantified as important attributes to assess the importance of attributes in the network<sup>59</sup>. The strength of correlation was calculated using the accumulated values of absolute partial coefficients between a focal attribute and all other connected attributes in the network. The strength in the network was standardized by subtracting the mean from the specific values and dividing it by the standard deviation. Larger strength values indicate higher central attributes.

火灾驱动的全球土壤生物地球化学关系中断fire预测全球土壤生物地球化学对火灾响应的范围

为了研究火灾，我们使用以下变量进行了随机森林回归分析：年均温度（MAT）、年均降水量（MAP）（来自WorldClim数据库[www.worldclim.com](http://www.worldclim.com)）；土壤特性，包括粘土、BD和pH，来自Soilgrids数据库；植被覆盖来自2010年全球植被覆盖生产<sup>60</sup>；降雨侵蚀力来自全球降雨侵蚀力数据库（GloREDA）<sup>61</sup>；高程、方位和坡度来自全球地形数据库<sup>62</sup>；叶面积指数（LAI）、总初级生产力（GPP）和归一化植被指数（NDVI）来自NASA陆地过程分布式主动存档中心的20年平均产品<https://lpdaac.usgs.gov/>。具体来说，LAI来自MCD15A2H，GPP来自MOD17A2H和MYD17A2H产品的平均值，NDVI来自MOD13A2H和MYD13A2H产品的平均值。由于我们全球观测点的时空变化，我们将火灾以来的平均时间作为预测变量，与其他变量（如土壤特性和气候）一起纳入模型。同时，我们使用平均值来绘制同一地点具有多个土壤生物地球化学过程指标（例如，土壤碳、土壤氮）的全球影响图。所有网格数据均重采样到 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的分辨率。该模型通过寻找最稳健地预测训练样本的协变量组合集来构建，重复2000次。然后，我们将我们的全球土壤生物地球化学图与所有位置的生态系统属性相关联。我们的模型选择基于在训练阶段选择决定系数（R<sup>2</sup>）大于0.3的模型。我们还计算了预测变量的参数空间与原始数据集的差异，以测试基于随机森林模型的预测计算的准确性。预测土壤生物地球化学属性的变异系数（CV）是通过1000次并行运行随机森林模型计算的。我们遵循Piñeiro等人<sup>63</sup>的方法，通过返回预测值（y轴）来验证建模方法。

与观测值（x轴）相比。所有网格数据均汇总到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 空间分辨率。

#### 模型验证 基于的机制

使用机器学习方法，我们使用了70%的数据作为“训练”数据，剩余的30%数据被用作“验证”数据来验证全球地图中相关的变量（例如，土壤碳、土壤氮、土壤磷、土壤微生物生物量、土壤有机质分解和植物生物量）。由于存在潜在的空间自相关，我们采用了K折交叉验证方法来验证每个变量的机器学习模型。训练数据集被随机分为五组，其中四组用于模型训练，一组保留用于测试。这种随机划分是以分层方式进行，基于生态系统类型和气候区，以确保训练和测试数据集中对各种生态系统和气候条件的全面代表性。此外，每个火灾地点仅被分配到单个组，以便评估模型在先前未观察到的地点的性能。我们使用留一法交叉验证方案计算了每个相关变量的交叉验证模型 $R^2$ 、均方根误差（RMSE）和中值绝对误差（MAE）。在每次保留一个观测值的情况下，训练了随机森林集成，并使用最高的 $R^2$ 进行全球预测。

#### 数据可用性所有生成和使用的数

该研究分析的数据已存档于figshare数据库（<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28034705>）。

#### 代码可用性处理这些数据的代码可用

本研究中使用的e数据已存档于figshare数据库（<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28034960>）。

#### 参考文献 1. Belcher, C.

M. 火灾现象与地球系统：火灾科学的跨学科指南（Wiley-Blackwell, 2013）。2. Pellegrini, A. F. 等人。火灾对土壤有机质持久性和长期碳储存的影响。自然地球科学 15, 5-13 (2022)。3. Feng, X. 等人。去监管化、干旱和火灾增加对亚马逊生物多样性的影响。自然 597, 516-521 (2021)。4. Bowd, E. J., Banks, S. C., Strong, C. L. & Lindenmayer, D. B. 野火和伐木对森林土壤的长期影响。自然地球科学 12, 113-118 (2019)。5. Ochoa-Hueso, R. 等人。生态系统耦合：理解生态系统功能和恢复的统一框架。一个地球 4, 951-966 (2021)。6. Agbeshie, A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T. & Awuah, R. 森林火灾对土壤特性的影响综述。林业研究杂志 33, 1419-1441 (2022)。7. Finzi, A. C. 等人。耦合生物化学循环：耦合生物地球化学循环对气候变化的响应和反馈。陆地生态系统的例子。前沿生态与环境 9, 61-67 (2011)。8. Delgado-Baquerizo, M. 等人。全球干旱区土壤养分循环的解耦与干旱度的关系。自然 502, 672-676 (2013)。9. Wardle, D. A. & Walker, L. R., Bardgett, R. D. E. 对比长期演替序列中生态系统特性和森林衰退。科学 305, 509-513 (2004)。10. Bauters, M. 等人。火灾衍生磷肥化对非洲热带森林的影响。自然通讯 12, 5129 (2021)。11. Wilkinson, S. L. 等人。野火和退化加速北方泥炭地碳释放。自然气候变化 13, 456-461 (2023)。12. Xu, S. 等人。火灾频率和类型调节土壤碳循环和储存对火灾的响应：跨土壤深度和生态系统的元分析。科学总环境 825, 153921 (2022)。

13. Dooley, S. R. & Treseder, K. K. 火灾对微生物生物量的影响：基于现场研究的元分析。生物地球化学109, 49-61 (2012)。14. Cheng, Y. 等。火灾对森林生态系统土壤碳循环库的影响：全球元分析。科学总环境 895, 165001 (2023)。15. Li, J. 等。火灾对土壤碳和氮时空变异的影响：全球元分析。全球变化生物学27, 4196-4206 (2021)。16. Liang, C. & Balser, T. C. W. 温化和氮沉降减少微生物残留对土壤碳库的贡献。自然通讯3, 1222 (2012)。17. Tang, R. 等。陆地生态系统对秋季冷却和变暖的响应：碳释放增加。自然气候变化12, 380-385 (2022)。18. Gold, Z. J. 等。草本植被对草原和森林中实验性火灾的响应取决于生物群落和气候。生态学通讯26, 1237-1246 (2023)。19. McLauchlan, K. K. 等。火作为基本生态过程：研究进展和前沿。生态学杂志108, 2047-2069 (2020)。20. Zhou, Y. 等。几十年火灾抑制下草原碳库的增加有限。自然603, 445-449 (2022)。21. Brianne, P., Rebecca, H. & David, L. 火灾后生物土壤结皮命运的元分析。全球生态保护24, e01380 (2020)。22. Phillips, R. P., Brzostek, E. & Midgley, M. G. 根际营养经济：预测温带森林中碳-养分耦合的新框架。新植物学199, 41-51 (2013)。23. Zhou, Y., Biro, A., Wong, M. Y., Batterman, S. A. & Staver, A. C. 火灾降低土壤酶活性和微生物介导的养分循环重组：元分析。生态学103, e3807 (2022)。24. Zhou, L. 等。火灾降低陆地生态系统土壤呼吸及其组分。功能生态学37, 3124-3135 (2023)。25. Butler, O. M., Elser, J. J., Lewis, T., Mackey, B. & Chen, C. 土壤-植物系统中火灾的磷富集特征：全球元分析。生态学通讯 21, 335-344 (2018)。26. Su, W. Q., Yu, M., Lin, J., Tang, C. & Xu, J. 火灾降低北方森林土壤的总体矿化速率，但不会改变总体硝化速率。土壤生物学与生物化学175, 108838 (2022)。27. Hu, M., Wang, J., Lu, L., Gui, H. & Wan, S. 火灾后土壤微生物的全球恢复模式。土壤生物学与生物化学183, 109057 (2023)。28. Vitousek, P. M. 营养循环与限制：夏威夷作为模型系统（普林斯顿大学出版社，2004）。29. McGill, W. B. & Cole, C. V. 通过土壤有机质循环有机碳、氮、硫和磷的比较方面。土壤学26, 267-286 (1981)。30. Ryan, K. C., Knapp, E. E. & Varner, J. M. 北美森林和林地中规定性火灾的历史、当前实践和挑战。前沿生态与环境11, e15-e24 (2013)。31. Lindenmayer, D. B. 等。伐木增加了2019-20年澳大利亚森林火灾中高严重程度火灾的概率。自然生态学与进化6, 533-535 (2022)。32. Meng, C. 等。土壤质地限制的营养可用性和微生物特性调节森林火灾对总体氮矿化的影响。森林生态与管理541, 121067 (2023)。33. Bodí, M. B. 等。野地火灾灰烬：生产、组成和生态水力地貌效应。地球科学评论130, 103-127 (2014)。34. Popović, Z., Bojović, S., Marković, M. & Cerdà, A. 基于植物特性的树种易燃性：综合。科学总环境800, 149625 (2021)。35. Hawkins, H. J

37. Patoine, G. 等人。全球土壤微生物碳在二十年的驱动因素和趋势。自然通讯 13, 4195 (2022)。38. Chapin, F. S., Matson, P. A. & Mooney, H. A. 地球生态系统生态学原理 (Springer, 2002)。39. Dove, N. C. 等人。高严重程度的野火导致针叶林土壤生物地球化学的数十年影响。生态应用 30, e02072 (2020)。40. Schmitz, O. J. 等人。营养恢复可以扩大自然气候解决方案。自然气候变化 13, 324–333 (2023)。41. D'Odorico, P., Okin, G. S. & Bestelmeyer, B. T. 灌木入侵的反馈和驱动因素的综述。生态水文学 5, 520–530 (2012)。42. González-Pérez, J. A., González-Vila, F. J., Almendros, G. & Knicker, H. 火对土壤有机物的影响——综述。环境国际 30, 855–870 (2004)。43. Dube, O. P. 连接火和气候：与土地利用、植被和土壤的相互作用。当前环境与可持续性观点 1, 161–169 (2009)。44. Beck, H. E. 等人。现在和未来的Köppen-Geiger气候分类图1公里分辨率。科学数据 5, 1–12 (2018)。45. Wang, B. & Qiu, Y. L. 陆生植物菌根的系统发育分布和进化。菌根 16, 299–363 (2006)。46. Soudzilovskaia, N. A. 等人。FungalRoot：植物菌根共生关系的全球在线数据库。自然植物学 227, 955–966 (2020)。47. Luo, S. 等人。混合菌根策略的森林具有更高的生产力。自然通讯 14, 1377 (2023)。48. Gurevitch, J., Koricheva, J., Nakagawa, S. & Stewart, G. 元分析和研究综合科学的科学。自然 555, 175–182 (2018)。49. Mooney, K. A. 等人。捕食者之间的相互作用以及脊椎动物食虫动物对节肢动物群落和植物级联效应的影响。美国国家科学院院刊 107, 7335–7340 (2010)。50. Crouzeilles, R. 等人。在热带森林中，自然恢复的生态恢复成功率高于主动恢复。科学进展 3, e1701345 (2017)。51. Egger, M., Smith, G. D., Schneider, M. & Minder, C. 通过简单图形测试检测到的元分析偏差。英国医学杂志 315, 629–634 (1997)。52. Nakagawa, S. & Poulin, R. 元分析对进化生态学的见解：介绍和综合。进化生态学 26, 1085–1099 (2012)。53. Liu, Z. 等人。全球盐沼种植成功驱动因素的分析以及对生态系统服务的启示。自然通讯 15, 3643 (2024)。54. Viechtbauer, W. 使用metafor包在R中进行元分析。统计软件杂志 36, 1–48 (2010)。55. Zhou, G. 等人。温度和降雨模式限制了全球森林的多维恢复。科学进展 9, 2201144 (2022)。56. Eldridge, D. J. & Delgado-Baquerizo, M. 大陆尺度放牧对生态系统支持和调节服务的影响。土地退化与发展 28, 1473–1481 (2017)。57. Chen, L. 等人。土壤有机质稳定性对启动效应的调节作用在广泛地理尺度上的研究。自然通讯 10, 5112 (2019)。58. Poorter, L. 等人。多维热带森林恢复。科学 374, 1370–1376 (2021)。59. Epskamp, S. & Fried, E. I. 正则化偏相关网络的教程。心理方法 23, 617–634 (2016)。60. Hansen, M. C. 等人。21世纪

63. Piñeiro, G. 等人。如何评估模型：观察值与预测值或预测值与观察值之间的比较？生态模型216,316–322 (2008)。64. Gordó-Vilaseca, C. 等人。从北海到巴伦支海的海洋浮游生物分布的未来趋势。自然通讯15, 5637 (2024)。65. 周G. 数据库.xls。图分享, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28034705> (2025)。66. 周G. 代码。图分享, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28034960.v1> (2025)。

## 致谢

G.Y.Z. 感谢提供支持

来自拉蒙·伊·卡哈尔奖学金 (RYC2022-035226-I)，由西班牙科学创新部资助，欧盟下一代EU计划 (MICIU/AEI/10.13039/501100011033y el FSE+)，以及西班牙国家研究委员会的卓越研究项目AYUDAS DE EXCELENCIA RYC-MAX 2023。N.E. 感谢Div ([德国研究基金会, DFG]-FZT 118, 202548816)，以及DFG (Ei 862/29-1; Ei 862/31-1) 的支持。耶拿实验由DFG (FOR 5000) 资助。M.D.-B. 感谢西班牙科学创新部对I+D+i项目PID2020-115813RA-I00的支持，该项目由MCIN/AEI/10.13039/501100011033资助。M.D.-B. 还得到欧洲区域发展基金 (FEDER) 和安达卢西亚自治区经济转型、工业、知识和大学委员会 (FEDER Andalucía 2014-2020 Objetivo temático “01-加强研究、技术开发和创新”) 与科研项目P20\_00879 (ANDABIOMA) 相关联的项目支持。M.B. 得到西班牙科学部颁发的拉蒙·伊·卡哈尔奖学金 (RYC2021-031797-I)。X.H.Z. 得到中国国家自然科学基金重点项目 (2020YFA0608403) 的支持。D.R. 得到来自欧洲地平线欧洲计划 (MSCA-PF-2021-101064192-FUNVINE) 的MSCA博士后奖学金的支持。我们感谢Nan Li, Yuan Qi, Jingjing Meng和Jianing Pei在数据提取方面的帮助。我们感谢所有将数据和工作纳入本全球综合分析的科学家的支持。

作者贡献M.D.-B. 和 G.Y.Z. 构思了这项研究

是工作。G.Y.Z.、Z.G.D.和H.W.开发了该方法。G.Y.Z.、M.D.-B.、N.E.、M.B.撰写了原始草案。N.E.、M.E.L.、K.Y.Z.、S.E.L.、H.M.D.、H.W.、D.R.、T.S.S.、H.C.、X.Z.审阅并编辑了最终稿件。

利益冲突作者声明无利益冲突。

## 附加信息

补充信息在线版本包含补充材料，可在

<https://doi.org/10.1038/s41467-025-56598-z>。

通讯和材料请求应寄给周贵瑶或德尔加多-巴凯里索。

同行评审信息自然通讯感谢罗鹏，他与李红林共同审稿，以及另一位匿名审稿人对本工作的同行评审所做的贡献。同行评审文件可供查阅。

重印和版权信息可在<http://www.nature.com/reprints>

出版者说明斯普林格自然对已发表地图中的司法主张和机构隶属关系保持中立。

开放获取 本文受 Creative Commons 知识共享署名-非商业性使用-禁止演绎 4.0 国际许可协议的许可，允许任何非商业性使用、分享、分发和以任何媒介或格式进行复制，只要您适当引用原始作者（们）和来源，提供 Creative Commons 许可协议的链接，并指明您是否修改了许可材料。您无权根据本许可协议分享从本文或其部分改编的材料。本文中的图像或其他第三方材料受 Creative Commons 许可协议的许可，除非在材料来源行中另有说明。修改了。您无权根据本许可协议分享从本文或其部分改编的材料。本文中的图像或其他第三方材料受 Creative Commons 许可协议的许可，除非在材料来源行中另有说明。’。如果材料未包含在本文中，且您的使用未获得法定法规的许可或超出许可范围，您需要直接从版权持有人处获得许可。要查看本许可协议的副本，请访问 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>。

© 作者（们）2025