



HAL
open science

Research progresses on the impacts of volcanic eruptions on vegetation and terrestrial carbon cycle

Yuan Zhang, Eryuan Liang, Tao Wang, Shilong Piao

► To cite this version:

Yuan Zhang, Eryuan Liang, Tao Wang, Shilong Piao. Research progresses on the impacts of volcanic eruptions on vegetation and terrestrial carbon cycle. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69 (2), pp.160 - 168. 10.1360/tb-2023-0247 . hal-04574884

HAL Id: hal-04574884

<https://hal.science/hal-04574884>

Submitted on 14 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



火山喷发对陆地植被与碳循环影响的研究进展

张原^{1,2*}, 梁尔源^{1,3}, 汪涛^{1,3}, 朴世龙^{1,3,4}

1. 中国科学院青藏高原研究所, 高寒生态重点实验室, 北京 100101;

2. Laboratory for Sciences of Climate and Environment, Institute Pierre-Simon Laplace, French Alternative Energies and Atomic Energy Commission/French National Centre for Scientific Research/Versailles-St-Quentin University, Gif sur Yvette 91191, France;

3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;

4. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871

* 联系人, E-mail: yuan.zhang@itpcas.ac.cn

2023-03-19 收稿, 2023-06-07 修回, 2023-07-13 接受, 2023-07-19 网络版发表

国家自然科学基金(41988101)资助

摘要 1991年, Pinatubo火山喷发导致全球大气二氧化碳浓度上升态势出现停滞, 这一现象揭示了地球内部系统可以通过火山活动对地表生物地球化学循环产生重大影响. 近些年, 火山喷发对陆地生态系统的影响及其驱动机制引起科学界的广泛讨论. 本文系统梳理了火山喷发对陆地生态系统影响的研究, 总结了火山活动的辐射效应和气候效应对树木生长和陆地碳循环产生影响的机制. 大型火山喷发形成的平流层气溶胶一方面引起散射辐射增加促进光合作用, 另一方面, 还引起总辐射减弱抑制光合作用, 由于散射辐射的影响相比更强, 总体上火山辐射效应有利于陆地碳汇的增加. 火山的气候效应体现在全球尺度的降温和区域降水的改变. 降温作用在低纬地区促进植物的光合作用, 在高纬地区抑制光合作用, 同时在全球尺度减弱生态系统的呼吸作用, 总体上也有利于增加碳汇. 对火山造成降水变化影响的评估目前还存在较大不确定性. 在对这些机制总结的基础上, 本文评述了当前的认识盲点和研究难点, 以期对未来进一步推进火山喷发影响的研究、完善地球内外系统联动机制的认识提供参考.

关键词 火山爆发, 陆地生态系统, 火山冷却效应, 散射辐射, 碳循环

自工业革命以来, 人类活动导致了大气中CO₂浓度持续上升, 对全球气候系统产生了深远影响. 然而, 过去有关全球碳循环的研究主要集中在地球表层系统中. 位于菲律宾的Pinatubo火山在1991年发生剧烈喷发, 随后大气CO₂浓度上升出现了短暂停滞^[1], 这一现象被主要归结于火山喷发引发了陆地碳汇的显著增强^[2], 表明地球内部系统能够通过火山活动对全球碳循环造成显著影响. 自此, 探究火山活动对陆地生态系统的影响成为碳循环研究的一大热点.

然而, 陆地植被生长和碳循环过程主要受气候变

化的影响, 从陆地植被和碳循环变化中分离出火山喷发的影响是本领域的研究难点. 火山喷发对陆地生态系统的影响存在多样性, 与火山地理位置、火山规模以及植被类型都密切相关. 例如, 20世纪的不同火山喷发事件对陆地总初级生产力(gross primary production, GPP)的影响能够相差10倍以上, 对同一喷发事件, 不同区域的植被响应也存在很大的差异^[3], 这进一步增加了研究火山喷发影响的困难. 传统的遥感观测结合统计分析能够在在大尺度上对陆地植被变化进行归因分析, 但由于有遥感观测以来大规模火山喷发事件太少, 基

引用格式: 张原, 梁尔源, 汪涛, 等. 火山喷发对陆地植被与碳循环影响的研究进展. 科学通报, 2024, 69: 160–168

Zhang Y, Liang E Y, Wang T, et al. Research progresses on the impacts of volcanic eruptions on vegetation and terrestrial carbon cycle (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 160–168, doi: [10.1360/TB-2023-0247](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0247)

于遥感的统计分析还难以可靠地分离火山的影响。近年来,在陆地生态系统模型和大气化学模型中,与火山喷发相关的物理和生态过程在逐步完善,如气溶胶参与下的大气辐射传输以及散射辐射在冠层中的传输等。通过数值模拟实验,可分离出复杂系统中某一驱动因子的影响,这也成为当前在大尺度上研究火山活动影响的主要手段^[3-5]。然而,数值模拟对火山影响的研究受限于模型过程的完善程度和模型参数的优化情况,常常存在较大的不确定性。

大型火山喷发属于偶发事件,在对陆地生态系统进行大量观测以来,火山喷发指数达到6的喷发事件仅发生过一次,即1991年的Pinatubo火山喷发。自1980年以来,火山喷发指数超过5的喷发事件也仅有6次(<https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW5> 2022.5.0)。相比之下,更小规模的火山喷发对植被生长与碳循环的影响往往有限。通过有限的火山喷发观测无法准确解析火山活动对大尺度植被生长与碳循环的影响及其机制。而树木年轮对火山喷发事件的记录为研究这一问题提供了关键窗口。在木本植物的整个生命周期中,木质部的形成过程是高度动态的,其细胞分裂的速度和细胞壁木质化等过程受光周期、辐射强度、温度、降水、生长季时间等多种气候要素影响^[6,7]。随着对树轮认识的深入和树轮观测资料的大量积累,火山喷发引起的气候突变影响木质部细胞的发育,导致其产生异常结构的效应被逐渐发现。由于树轮能够长时间保存,因此可以通过树轮序列将火山影响的研究时间极大地向前拓展。尽管如此,树轮的信息存在一定的空间局限性,在树木稀少的非森林生态系统中或者树轮留存较少的区域,较早期火山喷发影响的信息还难以获得;同时,基于树轮的工作大都以定性研究为主,难以定量反映植被对火山活动的响应。尽管这些研究手段都有各自的不足,人们还是在这些研究手段的帮助下逐渐揭开了火山活动通过其辐射效应和气候效应对陆地植被的影响机制。对这些机制系统深入的理解将有助于更加准确地预估未来的气候变化,评估未来可能的火山喷发事件对全球气候的影响和其带来的环境风险,从而制定更加合理的应对政策。近年来,模拟火山喷发向平流层注入气溶胶的太阳辐射管理地球工程也得到广泛的讨论^[8],被认为是有潜力缓解全球气候变暖的应急手段,认识火山活动对植被的影响也是评估太阳辐射干预手段风险的重要基础。然而,目前还没有研究对火山喷发的大尺度植被影响进行系统梳理,本文旨在梳理

和总结近年来火山喷发对陆地植被和碳循环影响的研究(表1),并对该领域仍未解决的问题进行讨论和展望。本文着重关注火山喷发对大尺度植被和碳循环的影响,而在小尺度上火山岩浆对生态系统毁灭性的破坏效应与火山对土壤的影响不在本文的讨论范畴。

1 火山喷发的辐射效应对陆地碳循环的影响

大型火山喷发会将大量SO₂与火山灰喷射至平流层,并逐渐转化成硫酸盐气溶胶,随着大气环流扩散至全球。这些气溶胶能在高空对进入大气层的太阳辐射进行反射与散射,导致两个后果:一方面,穿过大气层到达地面的“辐射总量”(radiation quantity)变小,即总辐射减弱^[28];另一方面,在到达地面的辐射中,“辐射质量”(radiation quality)显著改变,散射辐射的占比得到增大。这两种辐射效应能够对陆地碳循环产生完全不同的影响。

1.1 火山喷发引起的总辐射减弱抑制受辐射限制生态系统的光合作用

太阳辐射是植物光合作用的能量来源,辐射强度对植物光合作用的影响可以用光响应曲线来描述(图1)。当辐射强度没有达到光饱和点时,总辐射减弱才会抑制植物的光合作用。因此,火山喷发导致的总辐射减弱通常只对受辐射限制的生态系统产生显著影响。例如,树轮证据显示,火山喷发后受辐射限制的高纬多云地区的树木生长受到的影响显著超过其他地区^[9];同样,在受辐射限制热带雨林中^[20,29],这一过程也可能导致生产力的降低。

1.2 火山喷发引起的散射辐射比例增加促进植被生长

散射辐射对光合作用的影响与其在冠层中的分布有关。与直射辐射相比,散射辐射在植被冠层中传输时不会被上层叶片完全阻挡,这使受辐射限制的下层叶片能获取更多光照进行光合作用;与此同时,未被遮挡的叶片接收到的辐射总量有所减少,但由于这些叶片已经接近或已经达到光饱和,其光合作用速率并不会显著减小(图1)。在生态系统尺度上,散射辐射的增加能够提升植物光能利用效率,增强植被生产力^[21,30],即散射辐射的施肥效应。值得注意的是,散射辐射的作用机制与植被冠层中叶的相互遮挡有关,因此在不同的生态系统中存在差异,在草地或演替早期的森林等叶

表1 火山活动的环境效应及其对陆地生态系统的影响

Table 1 Environmental effects of volcanic activity and its impact on terrestrial ecosystem

环境因子	火山喷发的影响	陆地生态系统的响应	
		植被生长	生态系统碳循环
辐射	平流层气溶胶导致到达地表的短波辐射总量降低	高纬多云地区树木生长速度减缓 ^[9]	受辐射限制的热带雨林地区生产力可能降低
	气溶胶散射作用使到达地表的辐射中散射辐射比例上升	散射辐射施肥效应致使火山喷发后1~4年树木水分利用效率显著上升 ^[10]	20世纪大型火山喷发的散射辐射施肥效应使全球陆地生态系统光合作用短期增加5~10 PgC a ⁻¹ ^[3] ; Pinatubo火山后1~2年内森林站点光合作用速率增加了8%~23% ^[11] , 2年内陆地碳汇增大了1~3.2 PgC a ⁻¹ ^[3,5,12]
温度	到达地表辐射减弱导致气温降低	高纬与高山地区木材生长受到影响, 树轮变窄, 密度降低 ^[13,14] , 极端情况下形成霜轮、浅轮、蓝轮等特殊年轮 ^[15-17]	抑制高纬光合作用, 促进低纬度光合作用, 同时抑制呼吸作用, 总体增加陆地碳汇 ^[4,18-20] ; 减小水汽压亏缺, 促进光合作用 ^[21]
降水	改变海陆热力差异, 引起大气环流变化, 导致全球降水减少 ^[22] , 区域降水异常 ^[23,24] , 但存在很大不确定性	热带大规模火山喷发导致亚洲季风区降水显著减少, 造成数轮轮宽、密度、同位素等指标异常 ^[25-27]	大尺度生态系统的响应取决于降水异常发生区域的生态系统是否受水分限制

面积较小、冠层结构相对简单的生态系统中, 这一影响相对较弱^[31].

大型火山喷发形成的平流层气溶胶能够通过改变散射辐射对陆地植被光合作用产生显著的促进作用. Pinatubo火山喷发后的前2年, 由火山喷发引起的散射辐射变化导致站点尺度上观测到的森林光合作用分别增加了23%和8%^[11]. 此外, 过去1000年来树轮同位素的证据也显示, 在大型火山喷发后的2~4年中, 植被光合作用普遍增强^[10], 上述证据进一步支持了火山喷发引

发的散射辐射施肥效应.

在全球尺度上, 陆地生态系统模型估算的大型火山喷发带来的散射辐射增强可在1~2年内使全球陆地生态系统的总初级生产力增加5~10 PgC a⁻¹^[3]. 但随着平流层气溶胶的减少, 陆地生态系统总初级生产力会在数年内回归到火山喷发前的水平. 散射辐射对生态系统呼吸并没有直接影响, 但其施肥效应显著促进了植被生产力, 进而增加了生态系统碳库, 因此会增强生态系统呼吸. 基于陆地生态系统模型模拟结果显示, 火山喷发引起的散射辐射变化在火山喷发后的1~2年内对生态系统呼吸的影响要弱于其对总初级生产力的影响, 但是其对呼吸的影响时间远长于其对总初级生产力的影响, 从而导致生态系统呼吸速率即便在火山喷发几十年后仍高于喷发前的水平^[3].

由于光合与呼吸对散射辐射的响应差异, 火山喷发导致的散射辐射比例增加能够在短期内增强陆地碳汇. 例如, 在Pinatubo火山喷发后的2年内, 散射辐射增强对植被生产力的促进作用使得生态系统碳汇增加了1~3.2 PgC a⁻¹^[3,5,12], 这抵消了当前全球人为年碳排放的10%~30%. 尽管火山活动的散射辐射效应能在短期导致陆地碳汇显著增加, 但这一碳汇并非永久存在, 火山活动停止后生态系统会逐渐回归平衡状态, 吸收的碳将通过呼吸作用重新释放到大气中. 长期来看, 单次的火山活动并不能从根本上改变陆地碳循环的变化趋势. 尽管如此, 这些增加的碳汇至少需要数十至数百年才会被完全释放到大气中, 1850年以来, 火山喷发贡献的碳汇仍有3.9 PgC储存在陆地生态系统中^[3]. 值得注意

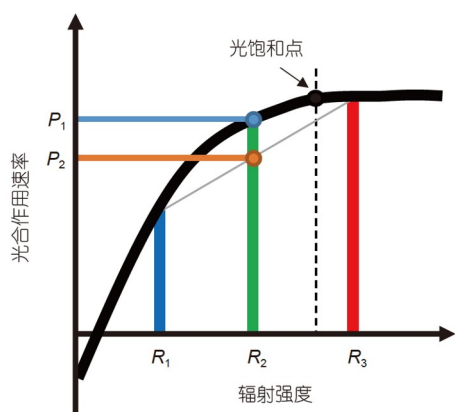


图1 散射辐射效应示意图. R_1 、 R_3 分别代表直射辐射下遮荫叶和向阳叶接收的太阳辐射, R_2 是散射辐射下叶片接收的太阳辐射. 在散射辐射下, 叶片的光合作用水平(P_1)强于直射辐射下向阳叶与遮荫叶光合作用水平的均值(P_2)

Figure 1 Diffuse radiation fertilization effect. R_1 and R_3 represent the radiation received by shaded and sunlit leaves under direct light conditions. R_2 is the radiation received by leaves under diffuse light condition. The leaf photosynthesis rate under diffuse light condition (P_1) is larger than the average photosynthesis rate of sunlit and shaded leaves under direct light condition (P_2)

的是,火山喷发的散射辐射效应与喷发规模以及发生的纬度都有直接关系^[3],然而目前还没有对这些差异进行详细的研究。

1.3 火山喷发的辐射效应总体上有利于植被生长

在火山喷发中,气溶胶引起“辐射总量”和“辐射质量”变化,哪个对陆地生态系统的影响更大,将决定总的辐射效应是否有助于增加陆地碳汇。尽管目前还没有直接对火山喷发引发的这两种辐射效应进行定量比较的研究,但根据对人为气溶胶影响的研究,当气溶胶光学厚度超过1~2时,总辐射减弱的影响才会强于散射辐射的影响^[32]。1850年以来火山喷发形成的气溶胶光学厚度不到0.2^[33]。因此,在全球尺度上,火山喷发引起的总辐射减弱对生长的抑制作用还不太可能超过散射辐射增加导致的促进作用。

2 火山喷发的气候效应对陆地植被和碳循环的影响

火山喷发形成的气溶胶辐射效应还会通过改变区域与全球气候影响陆地植被生长与碳循环。一方面,火山喷发带来的总辐射减弱一般会导致区域乃至全球范围的气温降低^[34];另一方面,火山气溶胶的存在会改变海陆热力差异,影响大气环流与水汽输送,从而导致区域性降水异常^[23,24]。

2.1 火山喷发引起的冷却效应对植被的影响

火山喷发的冷却效应对陆地植被影响的观测证据主要来自树轮。极端低温能使地表或近地表树干水分凝结,从而导致正在分化的管胞和木质部母细胞解体,在死亡的细胞组织中留下永久性的未木质化完全和皱褶的管胞,形成霜轮。公元536年被认为发生了一次强火山爆发事件,高纬度地区树木样本中的霜轮是印证此火山喷发事件的关键证据^[35-37]。1816年东印度群岛Tambora火山的爆发和1980年美国St Helens火山喷发也都在高纬度树木中形成了霜轮^[16]。除霜轮外,极端低温还可能导致木质部晚材部分仅由一个或极少几个细胞壁较薄的细胞组成,在显微镜下较正常年晚材细胞明显暗淡^[15],形成浅轮;或者影响细胞木质化过程,使木材切片在番红-阿斯特拉蓝染色下,在早材或晚材中出现蓝色的一层连续未木质化的轴向管胞,形成蓝轮^[17]。这些与低温相关的树轮异常也往往与火山喷发有关^[38-40]。

除树轮异常外,树轮轮宽与密度也受到火山冷却效应的影响。火山强迫冷却通常会使得高纬度地区与高山树线等温度限制区树木木质部细胞分裂速率降低,产生窄轮,在一些极端情况下甚至产生缺失轮^[39]。极端低温也会使木质部细胞壁木质化程度降低,从而使木材密度降低。应用高纬度地区与高山树线等温度限制区树轮轮宽与密度对夏季温度的重建可以确定历史上的凉夏,而大多数的凉夏都对应了火山喷发事件^[13,14]。然而,由于树线树木轮宽年表表现出较高的年际自相关性,即上年的生长状况会对当年生长有较强影响,而这可能会低估火山喷发后极端低温出现的突然性和严重性,因此,轮宽并不是最适合定量火山冷却效应的树轮参数。目前,最大晚材密度(the maximum latewood density, MXD)是识别火山喷发事件一致性最强的树轮代用指标,对夏季温度骤降有明显响应^[14,41]。例如,对环北极383个MXD年表的研究表明,北半球生长季节平均温度的高频变化与火山喷发时间有明显、准确的对应关系^[42]。但最大晚材密度有时会高估火山喷发的冷却效应,因为火山霾的酸性物质也可能破坏细胞壁结构^[43]。

树轮的证据主要反映了火山冷却效应对高纬和高山区域植被的影响,在更大的时空尺度上,火山冷却效应对陆地生态系统碳循环的影响更为复杂。一方面,温度降低会通过改变植物光合作用酶活性来影响陆地生态系统碳吸收,其影响的大小和方向在不同地区的生态系统中存在显著的差异,与当前环境温度是否高于植物光合最适温度密切相关。例如,人为气溶胶引起的降温作用在中高纬度表现为抑制植被生产力^[18,20],而在低纬度表现为增强植被生产力^[20],这主要归结于低纬度的环境温度基本接近或高于植被生长最适温度^[44]。火山气溶胶冷却效应对植被生产力的影响也有着类似的纬向分异^[4,19]。另外,气溶胶带来的冷却效应还能降低饱和水汽压、减小大气水汽压亏缺,从而增大叶片气孔导度、增强植被光合作用^[45]。在正午时刻,这一机制对植被光合作用的影响甚至超出了散射辐射效应^[21],未来亟需在全球尺度上评估火山喷发引起的大气水汽压亏缺变化对植被生长的影响。

另一方面,火山的冷却效应还显著影响生态系统呼吸大小。不同于植被光合作用,降温会导致生态系统呼吸普遍减弱,在散射辐射的效应被发现之前,这一过程被认为是造成火山喷发后陆地生态系统碳汇增加的主要驱动机制^[4,18]。因此,准确评估火山喷发的冷却效

应对生态系统碳汇的影响需综合考虑生产力和呼吸两大过程。由于植被光合产物的短期积累能在较长时间尺度上影响生态系统呼吸大小,火山冷却效应对陆地碳循环的影响在不同的时间尺度上表现出差异。在短期内,火山冷却效应能够增强中低纬度的陆地碳汇,减弱高纬度的碳汇,在全球尺度上表现为碳汇增加^[4,19]。然而,由于短期碳汇的增大,中低纬度生态系统的碳库得到增大,在火山气溶胶的影响减弱后,温度回归正常,增加的碳库导致额外的呼吸作用,使更长时期呼吸作用增强,导致短期内累积的碳在较长时间尺度上被重新释放^[46,47]。

2.2 火山引起的区域降水异常对植被生长的影响

火山喷发对降水变化的影响通常是区域性的。基于降水观测资料与气候模型模拟表明,热带大规模火山喷发导致亚洲季风区降水显著减少^[23,24]。基于树木年轮的降水重建记录^[25-27],热带大规模火山喷发显著降低区域降水。例如,1815年的Tambora火山喷发导致了1650年以来喜马拉雅中部地区最严重的干旱事件^[26],还引发了俄罗斯阿尔泰地区极端水文异常现象^[25]。1887年智利Lonquimay火山的喷发也在附近区域的树轮碳、氧同位素($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)中留下了干旱的证据^[27]。

在全球尺度上,火山喷发总体上减少了全球降水,但降水变化的空间格局还存在很大不确定性^[22]。对气溶胶降水效应的认识不足是当前评估气溶胶对陆地植被生长影响的最大不确定性来源^[20]。同时,火山降水作用对植被生长的影响在不同生态系统中也可能存在差异,受水分限制显著的草地与半干旱森林相比,湿润森林和湿地等生态系统可能更易受到火山引起降水异常的影响。另外,火山喷发引起的气溶胶辐射与冷却效应还能通过改变植被气孔导度影响陆面蒸散发过程^[48],从而引发降水变化。然而,当前针对这方面的研究仍十分匮乏。

3 结论与展望

地球是一个有机的整体,当前学界对地球内部与表层系统的认识集中在各自的系统内部,对这两个系统间相互作用的研究还严重不足。火山活动则是联系地球内部与表层系统的关键纽带,是影响地球气候系统的内在驱动力,能在短期内对气候系统产生巨大影响。本文系统梳理了火山喷发通过其辐射效应和气候

效应等机制对植被生长与陆地碳循环的影响。火山喷发的辐射效应主要表现为总辐射降低对光合作用的抑制和散射辐射比例上升引起的施肥效应。在全球尺度上,散射辐射施肥效应的影响要远强于总辐射减弱的影响,因此火山喷发的辐射效应总体上增加陆地碳汇。火山喷发的气候效应主要表现为全球范围内的气温降低和区域降水异常,前者在高纬地区抑制光合作用,在低纬地区促进光合作用,同时在全球尺度上抑制呼吸作用,整体上增加陆地碳汇;而后者能在区域尺度上影响植被生长,但由于目前对火山引起降水变化的认识还比较欠缺,其在大尺度上对植被的影响还需要进一步探究。尽管近年来针对火山对陆地植被影响的研究取得了一些成果,但总体上针对火山活动如何影响陆地表层过程的认识仍十分有限,亟待从以下几个方面进行提升。

首先,目前大部分研究使用的方法都相对单一,在大尺度上依赖数值模型对光合作用、呼吸作用的模拟,而基于观测的证据主要来自树轮。要全面地评估陆地生态系统对火山活动的响应,还需要综合不同尺度、更多来源的观测和方法。遥感观测可以作为研究大尺度植被变化的重要手段,也可以作为验证模型模拟火山喷发后植被响应的重要参照^[18],但是需要对其进行仔细校准以消除平流层气溶胶的干扰^[49]。此外,火山喷发释放的化学物质和同位素也会在树轮中积累,通过对树轮元素和同位素进行分析,可以确定历史时期火山喷发的准确时间^[50-52],这为进一步研究过去火山的影响提供了重要的依据。

其次,当前的气候和陆地生态系统模型还不够完善,这导致基于模型对火山影响的研究存在较大的不确定性。当前的气候模型中,火山喷发的气候效应,尤其是火山喷发引起的降水格局变化,与观测的结果存在着较大的不同^[22],而不同模型对于气溶胶降水效应的模拟也存在巨大差异^[20],这直接导致陆地生态系统响应估算的误差。目前的陆地生态系统模型也存在很大的不确定性,例如,不同模型中,土壤水对辐射变化的敏感性相差很大,这导致模型对气溶胶植被影响的巨大差异^[53]。针对这些不确定性,可以使用多模型比较的方式对模型的不确定性进行评估,结合观测使用涌现约束(emergent constraint)等方式减小其不确定性^[54]。如要进一步减小不确定性,还需要进一步优化模型中大气辐射传输、水汽传输、降水、土壤水分平衡等过程。此外,陆地生态系统模型中还缺乏对树轮形成

过程的描述, 致使其对火山影响的模拟难以使用当前树轮的观测验证, 需要在模型中开发相关的模块以使两种手段的研究能够相互印证。

最后, 当前的研究对火山喷发影响的研究在以下几个方面仍然存在欠缺。(1) 火山活动与气候变化的相互关系仍然不完全明确, 特别是火山活动对极端低温、干旱、洪水等极端气候事件的影响还需要更进一步的定量研究, 这些影响的植被效应也需要进一步评估。在区域尺度上, 火山喷发后水汽压亏缺改变、局地水循环变化等关键过程的影响还鲜有人探讨。(2) 当前研究对生态系统响应的评估仍不全面, 一方面, 当前还主要关注火山喷发对生态系统前几年的影响, 对这之后的恢复过程还研究得较少, 因火山喷发增加的陆地碳汇能够在多长时间尺度上对减缓大气二氧化碳浓度升高作出多大贡献, 需要进一步评估; 另一方面, 已有研究聚焦在生态系统的生产力和植被生长, 极少有研究关注生物多样性、生态系统的稳定性等指标, 致使难以对火山活动的风险作出完整评估。(3) 火山活动对海洋生态系统的影响仍然有很大的不确定性, 与陆地生态系统不同, 海洋中二氧化碳的溶解对海洋碳汇有

巨大的贡献, 而火山活动引起的大气和海洋环流改变也对其碳汇的分布有重要影响^[55]。了解火山活动对陆地和海洋生态系统影响的差异, 对于全面评估火山活动对全球碳循环的影响至关重要。(4) 火山活动对人类活动的影响还研究不足。火山活动引起的辐射效应和气候效应可能会影响农业生产^[56]、水资源管理和基础设施建设等领域, 这些影响可能会进一步对人类社会产生冲击, 潜在地影响陆地生态系统。因此, 在评估火山活动对地球生态系统的影响时, 还需要考虑这些间接因素。(5) 目前的研究与政策联系仍然不足, 火山喷发规模和位置对陆地生态系统的影响还不明确, 当前的研究大都聚焦在1991年Pinatubo大型火山喷发事件, 缺乏对火山规模和位置影响的评估。因此, 目前的认识还不足以准确评估未来不同规模火山灾害带来的生态、气候与社会风险, 以及火山事件对未来减排目标的影响, 从而制定有效地应对不同规模火山事件的政策。针对平流层气溶胶注入的太阳辐射管理策略, 也需要更多的研究评估不同气溶胶注入方案对陆地生态系统的影响, 进而为未来制定相关政策的可行性与安全性提供依据。

参考文献

- 1 Sarmiento J L. Atmospheric CO₂ stalled. *Nature*, 1993, 365: 697–698
- 2 Farquhar G D, Roderick M L. Pinatubo, diffuse light, and the carbon cycle. *Science*, 2003, 299: 1997–1998
- 3 Zhang Y, Ciais P, Boucher O, et al. Disentangling the impacts of anthropogenic aerosols on terrestrial carbon cycle during 1850–2014. *Earth Future*, 2021, 9: e2021EF002035
- 4 Jones C D, Cox P M. Modeling the volcanic signal in the atmospheric CO₂ record. *Glob Biogeochem Cycle*, 2001, 15: 453–465
- 5 Mercado L M, Bellouin N, Sitch S, et al. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. *Nature*, 2009, 458: 1014–1017
- 6 Cuny H E, Rathgeber C B K, Kiessé T S, et al. Generalized additive models reveal the intrinsic complexity of wood formation dynamics. *J Exp Bot*, 2013, 64: 1983–1994
- 7 Rossi S, Deslauriers A, Anfodillo T, et al. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia*, 2007, 152: 1–12
- 8 Boucher O, Randall D, Artaxo P, et al. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 571–657
- 9 Stine A R, Huybers P. Arctic tree rings as recorders of variations in light availability. *Nat Commun*, 2014, 5: 3836
- 10 Cabon A, Anderegg W R L. Large volcanic eruptions elucidate physiological controls of tree growth and photosynthesis. *Ecol Lett*, 2023, 26: 257–267
- 11 Gu L, Baldocchi D D, Wofsy S C, et al. Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: Enhanced photosynthesis. *Science*, 2003, 299: 2035–2038
- 12 Roderick M L, Farquhar G D, Berry S L, et al. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia*, 2001, 129: 21–30
- 13 D'Arrigo R, Wilson R, Anchukaitis K J. Volcanic cooling signal in tree ring temperature records for the past millennium. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118: 9000–9010
- 14 Wang F, Arseneault D, Boucher É, et al. Tropical volcanoes synchronize eastern Canada with Northern Hemisphere millennial temperature variability. *Nat Commun*, 2022, 13: 5042

- 15 Filion L, Payette S, Gauthier L, et al. Light rings in subarctic conifers as a dendrochronological tool. *Quat Res*, 2017, 26: 272–279
- 16 LaMarche Jr V C, Hirschboeck K K. Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions. *Nature*, 1984, 307: 121–126
- 17 Piermattei A, Crivellaro A, Krusic P J, et al. A millennium-long ‘Blue Ring’ chronology from the Spanish Pyrenees reveals severe ephemeral summer cooling after volcanic eruptions. *Environ Res Lett*, 2020, 15: 124016
- 18 Lucht W, Prentice I C, Myneni R B, et al. Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science*, 2002, 296: 1687–1689
- 19 Obata A, Adachi Y. Earth system model response to large midlatitude and high-latitude volcanic eruptions. *J Geophys Res Biogeosci*, 2019, 124: 1865–1886
- 20 Zhang Y, Goll D, Bastos A, et al. Increased global land carbon sink due to aerosol-induced cooling. *Glob Biogeochem Cycle*, 2019, 33: 439–457
- 21 Zhang Y, Bastos A, Maignan F, et al. Modeling the impacts of diffuse light fraction on photosynthesis in ORCHIDEE (v5453) land surface model. *Geosci Model Dev*, 2020, 13: 5401–5423
- 22 Iles C E, Hegerl G C. Systematic change in global patterns of streamflow following volcanic eruptions. *Nat Geosci*, 2015, 8: 838–842
- 23 Anchukaitis K J, Buckley B M, Cook E R, et al. Influence of volcanic eruptions on the climate of the Asian monsoon region. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L22703
- 24 Trenberth K E, Dai A. Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L15702
- 25 Churakova (Sidorova) O V, Fonti M V, Saurer M, et al. Siberian tree-ring and stable isotope proxies as indicators of temperature and moisture changes after major stratospheric volcanic eruptions. *Clim Past*, 2019, 15: 685–700
- 26 Liang E, Dawadi B, Pederson N, et al. Strong link between large tropical volcanic eruptions and severe droughts prior to monsoon in the central Himalayas revealed by tree-ring records. *Sci Bull*, 2019, 64: 1018–1023
- 27 Tognetti R, Lombardi F, Lasserre B, et al. Tree-ring responses in *Araucaria araucana* to two major eruptions of Lonquimay Volcano (Chile). *Trees*, 2012, 26: 1805–1819
- 28 Stenchikov G L, Kirchner I, Robock A, et al. Radiative forcing from the 1991 Mount Pinatubo volcanic eruption. *J Geophys Res*, 1998, 103: 13837–13857
- 29 Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300: 1560–1563
- 30 Gu L, Baldocchi D, Verma S B, et al. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *J Geophys Res Atmos*, 2002, 107: 4050
- 31 Niyogi D. Direct observations of the effects of aerosol loading on net ecosystem CO₂ exchanges over different landscapes. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L20506
- 32 Yue X, Unger N. Aerosol optical depth thresholds as a tool to assess diffuse radiation fertilization of the land carbon uptake in China. *Atmos Chem Phys*, 2017, 17: 1329–1342
- 33 Sato M, Hansen J E, McCormick M P, et al. Stratospheric aerosol optical depths, 1850–1990. *J Geophys Res*, 1993, 98: 22987–22994
- 34 Robock A. Volcanic eruptions and climate. *Rev Geophys*, 2000, 38: 191–219
- 35 D’Arrigo R, Frank D, Jacoby G, et al. Spatial response to major volcanic events in or about AD 536, 934 and 1258: Frost rings and other dendrochronological evidence from Mongolia and northern Siberia. Comment on R. B. Stothers, ‘Volcanic dry fogs, climate cooling, and plague pandemics in Europe and the Middle East’ (*Climatic Change*, 42, 1999). *Clim Change*, 2001, 49: 239–246
- 36 Lara A, Villalba R. A 3620-year temperature record from *Fitzroya cupressoides* tree rings in southern South America. *Science*, 1993, 260: 1104–1106
- 37 Salzer M W, Hughes M K. Bristlecone pine tree rings and volcanic eruptions over the last 5000 yr. *Quat Res*, 2017, 67: 57–68
- 38 Liang E, Shao X, Qin N. Tree-ring based summer temperature reconstruction for the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau. *Glob Planet Change*, 2008, 61: 313–320
- 39 Szeicz J M. White spruce light rings in northwestern Canada. *Arctic Alp Res*, 1996, 28: 184–189
- 40 Zhu H F, Shao X M, Yin Z Y, et al. August temperature variability in the southeastern Tibetan Plateau since AD 1385 inferred from tree rings. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2011, 305: 84–92
- 41 Jones P D, Briffa K R, Schweingruber F H. Tree-ring evidence of the widespread effects of explosive volcanic eruptions. *Geophys Res Lett*, 1995, 22: 1333–1336
- 42 Briffa K R, Jones P D, Schweingruber F H, et al. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature*, 1998, 393: 450–455
- 43 Kleemann K. Maximum latewood density analysis solves long-standing mystery between temperature reconstructions and historical records. *Paleoceanogr Paleoclimatol*, 2022, 37: e2022PA004444
- 44 Huang M, Piao S, Ciais P, et al. Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes. *Nat Ecol Evol*, 2019, 3: 772–779

- 45 Wang X, Wu J, Chen M, et al. Field evidences for the positive effects of aerosols on tree growth. *Glob Change Biol*, 2018, 24: 4983–4992
- 46 Foley A M, Willeit M, Brovkin V, et al. Quantifying the global carbon cycle response to volcanic stratospheric aerosol radiative forcing using Earth System Models. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119: 101–111
- 47 Segschneider J, Beitsch A, Timmreck C, et al. Impact of an extremely large magnitude volcanic eruption on the global climate and carbon cycle estimated from ensemble Earth System Model simulations. *Biogeosciences*, 2013, 10: 669–687
- 48 Chakraborty T C, Lee X, Lawrence D M. Strong local evaporative cooling over land due to atmospheric aerosols. *J Adv Model Earth Syst*, 2021, 13: e2021MS002491
- 49 Vermote E, Saleous N E, Kaufman Y J, et al. Data pre-processing: Stratospheric aerosol perturbing effect on the remote sensing of vegetation: Correction method for the composite NDVI after the Pinatubo eruption. *Remote Sens Rev*, 1997, 15: 7–21
- 50 Bertin L J, Christie D A, Sheppard P R, et al. Chemical signals in tree rings from northern Patagonia as indicators of Calbuco volcano eruptions since the 16th century. *Forests*, 2021, 12: 1305
- 51 D'Arcy F, Boucher É, De Moor J M, et al. Carbon and sulfur isotopes in tree rings as a proxy for volcanic degassing. *Geology*, 2019, 47: 825–828
- 52 Pearson C L, Brewer P W, Brown D, et al. Annual radiocarbon record indicates 16th century BCE date for the Thera eruption. *Sci Adv*, 2018, 4: eaar8241
- 53 O'Sullivan M, Zhang Y, Bellouin N, et al. Aerosol-light interactions reduce the carbon budget imbalance. *Environ Res Lett*, 2021, 16: 124072
- 54 Cox P M, Huntingford C, Williamson M S. Emergent constraint on equilibrium climate sensitivity from global temperature variability. *Nature*, 2018, 553: 319–322
- 55 Tjiputra J F, Grini A, Lee H. Impact of idealized future stratospheric aerosol injection on the large-scale ocean and land carbon cycles. *J Geophys Res Biogeosci*, 2016, 121: 2–27
- 56 Proctor J, Hsiang S, Burney J, et al. Estimating global agricultural effects of geoengineering using volcanic eruptions. *Nature*, 2018, 560: 480–483

Summary for “火山喷发对陆地植被与碳循环影响的研究进展”

Research progresses on the impacts of volcanic eruptions on vegetation and terrestrial carbon cycle

Yuan Zhang^{1,2*}, Eryuan Liang^{1,3}, Tao Wang^{1,3} & Shilong Piao^{1,3,4}

¹ Key Laboratory of Alpine Ecology, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² Laboratory for Sciences of Climate and Environment, Institute Pierre-Simon Laplace, French Alternative Energies and Atomic Energy Commission/French National Centre for Scientific Research/Versailles-St-Quentin University, Gif sur Yvette 91191, France;

³ Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

⁴ College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author, E-mail: yuan.zhang@itpcas.ac.cn

The 1991 Pinatubo eruption caused a noticeable slowdown of the increase of atmospheric CO₂ concentration, drawing attention to the impact of the Earth's interior on the biogeochemical cycle at the land surface through volcanoes. Since then, many studies have emerged which investigate the impacts of volcanoes on terrestrial ecosystems and to elucidate the underlying mechanisms. With advances in modelling tools and in collections of tree ring data, several pathways through which volcanoes affect the terrestrial ecosystems were revealed. In order to identify the gaps in current understanding and stimulate future studies, we provide a comprehensive review of the recent progress made and the known mechanisms underlying the volcanic impacts, focusing on the impacts of volcanoes on vegetation and terrestrial carbon cycle at regional to global scales.

Previous studies have yielded a range of insights into the impacts of volcanoes on terrestrial ecosystems, in particular on the impact of volcanic stratospheric aerosols via changes in radiation and climate. The radiative impacts encompass a dimming effect and an increase of diffuse radiation. While the dimming effect decreases gross primary production (GPP) in ecosystems that are limited by radiation, the increase of diffuse radiation increases GPP because diffuse light distributes more evenly in vegetation canopy. The effect of diffuse radiation on the GPP is much stronger than the dimming effect, resulting in an overall positive radiative effect on GPP. The diffuse radiation effect was estimated to have induced global net land C sink of ~3.2 PgC a⁻¹ global C sink during the 2 years after the Pinatubo eruption in 1991. However, this increase in C sink is short-lived and most of the sequestered C will be released back into the atmosphere gradually on a timescale of decades to centuries. The dimming effect of volcanic aerosols on the surface energy budget leads to further climatic effects, including a global cooling and changes of precipitation regimes at regional scales. The cooling interrupts the growth of wood, leading to abnormal tree rings in high latitudes and high elevation regions in the years following a volcanic eruption. At global scale, it reduces GPP in high latitudes and increases GPP in low latitudes. Meanwhile, the lower temperature decreases ecosystem respiration at global scale, resulting in an increased carbon sink. The precipitation regime changes caused by volcanoes can strongly affect vegetation growth in some regions. However, current understandings on the impacts of aerosols on precipitation remain poor, leading to significant uncertainty when assessing volcano impacts.

Despite recent progresses, gaps remain in current studies. First, few efforts have been made to link volcano impacts at different scales and to synthesize the tree ring evidence and large-scale simulations. Second, large uncertainties in model-based quantification of volcano impacts on the land C cycle remain, which require further improvement of model processes on aerosol impacts on climate, especially on precipitation to reduce. Finally, many gaps still exist in current understandings: The responses of vegetation to volcano-induced climate extremes and local hydrological changes remain understudied. The recovery of ecosystem from the volcanic disturbances and the long-term fate of the C sink due to volcanic eruptions remain poorly quantified. The impacts of volcano on marine system and human societies are also important to understand the full volcano impacts on the C cycle. In the end, volcano impact studies need to be more related to policies for supporting evaluating climate and ecological risks, making adaptation policies, and also for developing more efficient and safe solar radiation management strategies.

volcanic eruptions, terrestrial ecosystem, volcanic cooling effect, diffuse radiation, carbon cycle

doi: [10.1360/TB-2023-0247](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0247)