

引用格式: 刘海立, 何燕, 严鸿林, 等. 林火灰烬覆盖对坡面水文侵蚀过程的影响机制综述[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(1): 219–228. LIU Haili, HE Yan, YAN Honglin, *et al.* Overview of the impact mechanism of forest fire ash coverage on slope hydrological and erosional processes[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, 43(1): 219–228.

林火灰烬覆盖对坡面水文侵蚀过程的影响机制综述

刘海立¹, 何燕¹, 严鸿林¹, 张厚喜^{1,2}, 杨凯杰^{1,2}

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学 南方红壤区水土保持国家林业和草原局重点实验室/海峡两岸红壤区水土保持协同创新中心/福建长汀红壤丘陵生态系统国家定位观测研究站, 福建 福州 350002)

摘要: 发生林火的坡面会被林火灰烬层覆盖, 这是火后坡面水文侵蚀过程改变的重要原因。由于林火灰烬覆盖对坡面水文和侵蚀过程的影响存在多重效果相反的影响机制, 叠加效应下其影响结果具有高度变异性和条件依赖性。通过回顾相关研究文献, 总结了林火灰烬对坡面水文和侵蚀过程的影响机制和作用。林火灰烬层覆盖在土壤表面形成火灰-土壤双层系统。林火灰烬的“灰毯”效应或封闭效应可增加或减少坡面渗透性和持水性, 其易蚀特性或结壳封闭可降低或增加坡面的抗蚀性。林火灰烬层在坡面上侵蚀迁移, 可能形成火灰斑块或火灰泥浆而降低或增加地表径流侵蚀能力。林火灰烬颗粒及其水溶液进入土壤能够改变土壤理化性质, 可能堵塞土壤孔隙, 降低坡面入渗能力; 促进土壤团聚体形成, 增强坡面抗蚀能力; 通过施肥效应或生物毒性, 促进或抑制坡面生态恢复, 产生长期影响。根据不同的林火、降水和土壤条件, 识别特定条件下林火灰烬对坡面水文侵蚀过程的主导影响机制, 有助于提高火后水文侵蚀模拟能力和相关风险预测的准确性。参 73

关键词: 林火灰烬; 水文影响; 侵蚀影响; 渗透性; 抗蚀性

中图分类号: S715 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)01-0219-10

Overview of the impact mechanism of forest fire ash coverage on slope hydrological and erosional processes

LIU Haili¹, HE Yan¹, YAN Honglin¹, ZHANG Houxi^{1,2}, YANG Kaijie^{1,2}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation in the Red Soil Region of South China of National Forestry and Grassland Administration/Cross-Strait Collaborative Innovation Center for Soil and Water Conservation in the Red Soil Region/National Positioning Observation and Research Station of Red Soil Hilly Ecosystem in Changting, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: The slope where forest fire occurs is typically covered with the ash layer of the fire, which is a critical factor altering post-fire hydrological and erosional processes on hill slopes. Due to the multiple opposing effects of forest fire ash coverage on slope hydrological and erosional processes, the superimposed effects may lead to highly variable and context-dependent results. By reviewing relevant research literature, the impact mechanism and role of forest fire ash on slope hydrological and erosional processes are summarized. The fire ash layer covers the soil surface, forming a dual system of fire ash and soil. The “ash blanket” effect or sealing effect of forest fire ash can increase or decrease slope permeability and water holding capacity. The erodibility or crust

收稿日期: 2025-03-23; 修回日期: 2025-08-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (C类)(32201572)

作者简介: 刘海立 (ORCID: 0009-0002-3154-5145), 从事林火生态与水土流失研究。E-mail: evelen12138@outlook.com。通信作者: 杨凯杰 (ORCID: 0000-0001-7344-9878), 副教授, 博士, 从事林火生态与水土流失、土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: kaijieyoung@163.com

formation sealing can either reduce or increase the slope's resistance to erosion. The erosion and migration of forest fire ash layer on the slope may form fire ash patches or mud, which reduces or increases the surface runoff erosion capacity. Fire ash particles and their aqueous solutions infiltrating into soil can alter soil physicochemical properties through multiple pathways: potentially diminishing infiltration capacity via pore clogging, enhancing erosion resistance through promoting formation of soil aggregates, and exerting long-term impacts by either facilitating or inhibiting ecological recovery via fertilization effects or biological toxicity. Identification of dominant impact mechanism of forest fire ash on slope hydrological and erosional processes under specific wildfire, precipitation, and soil conditions is crucial to improving the simulation ability of post fire hydrological erosion and the accuracy of risk prediction. [Ch, 73 ref.]

Key words: forest fire ash; hydrological effects; erosion effects; infiltration; corrosion resistance

近年来,随着气候变暖和人为活动加剧,森林火灾在全球的发生概率和严重程度持续增加^[1]。在发生林火的坡面上,可燃物燃烧后残留的颗粒物会沉积在土壤表面,形成一定厚度的林火灰烬(以下简称“火灰”)层^[2],火灰层具有高孔隙率、低颗粒密度、结构松散以及成分复杂等特殊性质^[2-4]。火灰层作为火后坡面的新表层,会对坡面的水文和侵蚀过程产生显著影响^[2,5],进而对全球碳循环、下游水环境和用水安全造成负面影响^[6-10]。

近年来,作为林火研究和水土保持研究的交叉领域,火灰覆盖对火后坡面水文和侵蚀过程的影响得到越来越多的关注。大量国内外研究通过控制对比试验证实了火灰覆盖是火后坡面水文和侵蚀过程改变的关键影响因素^[11-15],但是其对坡面径流量和侵蚀量影响的方向和程度,现有研究结果却存在巨大分歧。有研究发现:火灰覆盖能够增加坡面的径流量和产沙量,增加幅度可达数十倍^[4,16-17]。也有研究表明:火灰覆盖对坡面产流产沙起到抑制作用^[12,18]。还有研究发现:在不同火灰性质、土壤性质、降雨特性等条件下,火灰覆盖坡面的水文侵蚀响应表现出明显的差异^[4,12,19-23]。

导致火灰覆盖坡面水文侵蚀响应的高变异性和情景依赖性的主要原因是火灰层能够通过多重效果相反的影响机制,对坡面的入渗能力、保水能力、抗蚀能力等水文侵蚀特性产生不同的影响,且每种机制的影响程度大小又随火灰性质、土壤性质、降雨特性等条件而变化。火灰覆盖的坡面,一方面会形成火灰-土壤双层系统,其独特的水文和抗蚀特性与火前相比和与裸土相比均有显著差异;其次,覆盖在土壤表面的火灰,会影响地表径流的流动和其侵蚀能力;最后,火灰颗粒及其水溶渗出液对土壤本身理化性质和水文特性也有显著的影响。这3个方面的变化共同影响火灰覆盖坡面的水文和侵蚀过程。本文综述了火灰覆盖对坡面水文和侵蚀过程的影响机制,并分析各机制的主要影响因素,旨在加强对火灰覆盖坡面水文侵蚀过程的理解,为提高火后水文侵蚀模拟和相关风险预测的准确性提供基础。

1 火灰-土壤双层系统的特殊性质及其影响

火灰覆盖坡面会形成火灰-土壤双层系统,该双层系统代替土壤成为火后坡面新的表层系统,导致坡面的渗透性、持水性、抗蚀性均发生改变,进而影响坡面的水文和侵蚀过程。

1.1 火灰层的“灰毯”效应

火灰层的高孔隙率和低颗粒密度使其能够截留并蓄积部分降水^[24-25],表现出延迟和减少径流的作用。同时,覆盖在土壤上方的火灰层具有保护土壤、防止雨滴击打导致裸露土壤压实和自结壳的作用,避免其渗透性降低^[11,26]。并且,由于火烧导致的土壤斥水性增加和渗透性降低,火灰层的渗透性通常高于其下方土壤的渗透性^[2],因而火灰层在降雨事件中能够储水并逐渐饱和,在火灰-土壤界面发生积水^[18,27]。这一方面增加了雨水停留在土壤表面的时间和入渗土壤的机会^[2],同时对土壤产生正向水压,促进土壤中大孔隙流的产生^[13,28],再加之饱和的火灰层中的水分子使土壤表层中两性分子的亲水性基团向土壤外侧偏移^[29],降低了土壤的斥水性^[29-31],从而增强了火灰-土壤界面及火灰-土壤双层系统整体的入渗能力^[2]。总体而言,通过上述过程,林火后覆盖在土壤表面的火灰层能够起到截留、蓄积、保护、缓冲的作用,导致火灰-土壤双层系统整体的储水能力和入渗能力比裸土增加,产流则延迟和减少。这被称为“灰毯”

效应 (ash blanket effect)。

目前已有多项研究观测到火灰-土壤双层系统的“灰毯”效应及其导致的坡面产流的延迟和减少^[12, 18]。如 BODI 等^[30]通过人工模拟降水发现：在 1.5 和 3.0 cm 厚的火灰覆盖斥水性土壤的双层系统中，“灰毯”效应使土壤的斥水性下降，并在土壤中观测到表征大孔隙流产生的指状湿润锋面。WOODS 等^[25]在美国蒙大拿州西部的研究表明：高度多孔的火灰层的储水和保护作用，短期内显著地延迟和减少了径流并降低了火灾后的侵蚀率。

“灰毯”效应的强弱与火灰厚度、降水强度、土壤特性等相关。在较厚的火灰层覆盖坡面时，“灰毯”的蓄积、保护、缓冲效果更强，整个坡面产生有效“灰毯”效应的面积占比也更大，坡面的入渗能力比裸地和较薄火灰层覆盖的坡面更强，进而导致径流量和侵蚀量更低^[13, 19, 25]。LEÓN 等^[11]通过人工模拟降水实验发现：在相同的降水条件下，厚度为 3.0 cm 的火灰层覆盖下坡面的径流系数仅为 4.73%，是 0.5 cm 厚火灰层覆盖下坡面径流系数的 0.31 倍。降水强度对“灰毯”效应强弱的影响主要源于强降水对火灰层的可能侵蚀清除作用。王冠等^[12]在关于不同降水强度下火灰覆盖对坡面水文影响的模拟研究中发现：在 30 和 60 mm·h⁻¹ 的降水强度下，坡面产流较裸地减少 70%，“灰毯”效应显著；在 90 mm·h⁻¹ 的降水强度下，坡面产流仅降低了 7%，这种差异归因于强降雨对火灰层的迅速破坏和清除。土壤特性对“灰毯”效应的影响主要源于可能发生的毛细屏障效应，即当细粒火灰覆盖粗粒土壤时，火灰层较小孔隙中的水分需要更高的压力才能进入下层干燥的土壤大孔隙中^[32]，反而导致双层系统的入渗能力降低。但该毛细屏障效应随着灰土界面积水、水压增加及下层土壤含水量的增加会迅速减弱。

1.2 火灰层的封闭效应

火灰层通常具有高孔隙度 (80%~96%)^[33]，结构松散，在强降水事件中易被雨滴的动能破坏、压实，形成一个致密的结构层。同时，火灰中含有大量斥水性物质，覆盖在土壤表面，或在雨滴击打下嵌入土壤，形成斥水表层。并且，部分粒径较小的火灰和土壤颗粒会在水蚀过程中沉积在流速较低的坡脚，形成一种致密的混合表皮^[34]。这些物理过程会导致坡面表层的入渗能力降低、坡面初始产流提前和地表径流系数的增加，并进一步增加土壤侵蚀的风险。这被称为封闭效应 (surface sealing effect)^[16, 25]。

除了上述物理过程引起的表面封闭外，化学过程引起的封闭也同样存在。火灰中的氧化物能够发生水化反应并重结晶为难溶于水的碳酸盐硬壳^[2]。如氧化钙与水 and 二氧化碳反应形成碳酸钙^[35]，碳酸钙在水中的溶解度很低，析出的碳酸钙晶体通过范德华力、静电力等相互作用力聚集，重结晶形成层状结构，从而封闭坡面表层。这个过程被称为化学封闭，其对坡面水文和侵蚀过程的影响与物理封闭相似，但封闭效果更强，影响程度通常更高^[11]。

火灰-土壤双层系统的封闭作用强弱主要与火灰的化学组分和降雨特性有关。在较低温度 (300 °C 以下) 燃烧生成的火灰通常为黑色，主要成分是烧焦的有机质和炭黑颗粒^[34]，化学性质相对稳定^[2]，主要发生物理封闭过程。随着燃烧温度的增加，火灰的颜色逐渐变浅为灰色 (主要成分是碳酸盐和硅酸盐)^[36-37] 或白色 (主要成分是金属氧化物和二氧化硅)^[34]，化学封闭过程更为显著^[2, 35]。不同降雨强度下雨滴击打动能的差异对物理封闭的发生与否和强度起决定性作用^[3]，导致化学封闭的水化反应通常在火后发生降雨时变得显著^[13]。此外，在火后降水间隔期间，已经形成的封闭结壳的水分蒸发，其封闭程度可能会进一步提升，在后续降水事件中表现出更显著的影响，因此火后的干湿交替也是封闭作用加强的重要影响因素。

目前，已有多项研究观测到火灰-土壤双层系统的结壳封闭现象，并证实了其对坡面水文和侵蚀有着显著的影响。WOODS 等^[25]在美国蒙大拿州一次高强度野火后也观察到：火灰层封闭导致坡面表层的水力传导性下降了 1 个数量级。LEÓN 等^[11]在野外模拟研究中观测到：降水事件结束后，白灰覆盖的坡面有明显的碳酸钙结壳，而黑灰覆盖的坡面上出现被压实的火灰斑块和嵌入土壤的火灰颗粒，这导致白灰和黑灰覆盖坡面的径流系数分别较裸地增加了 322% 和 110%。ONDA 等^[16]在美国加利福尼亚州的研究发现：在火后第 1 场暴雨中，火灰层形成了低导水性硬壳，导致在其后的降雨事件中，坡面径流系数相对于火后第 1 场降雨增加了 4 倍。

1.3 火灰层的易蚀效应

火灰的颗粒密度通常为 1.27~2.88 g·cm⁻³^[2]，大部分火灰颗粒质量较轻，并且火灰颗粒间通常仅存在

分子间作用力,化学键较少^[20,32],而土壤颗粒更多是在化学键、水桥、土壤胶体物质作用下形成稳定的团聚体结构^[38]。同时,火灰的主要成分热解炭(pyrogenic carbon, PyC)通常具有较强的斥水性^[20,39],火灰颗粒易在水中漂浮和移动^[12]。火灰的这些特性,导致火灰层结构相当松散脆弱,稳定性及抗剪强度低^[40],抗蚀能力弱,容易被雨滴和水流分散、运输^[14]。

火灰层作为易蚀表层,一方面其自身易被侵蚀迁移,加之火灰中养分元素和金属元素含量高、活性强^[21],对火后坡面的固体颗粒侵蚀量和元素流失量贡献大;另一方面,火灰层在火后降雨事件中被不断侵蚀移除,对土壤的保护作用和保护时间有限。这些因素导致火灰覆盖坡面的产沙量和元素流失量增加,对火后坡面的生态恢复速度造成负面影响,且极大地影响下游水质和用水安全^[41]。如WOODS等^[25]在模拟火灰覆盖坡面水文响应的野外试验中发现:火灰层抗蚀能力弱,在降水事件中大量侵蚀流失,是导致火灰覆盖坡面产沙量高于裸地的主要因素。KEMTER等^[42]对2019—2020年的澳大利亚野火后Manning流域的土壤侵蚀和下游水质进行了监测,发现抗蚀性弱的火灰层在早期降水中被侵蚀迁移,侵蚀量较火前增加了358%,河流的浊度峰值提升6倍,甚至超出了水质监测设备量程。NERIS等^[43]对2019—2020年在澳大利亚Warragamba流域野火中烧毁的林地进行了野外观测和模型模拟,证实着火后2周内发生的第1次降雨事件(30 a一遇的强降雨)中,火后覆盖在坡面上的火灰几乎全部被侵蚀迁移,约260万t火灰和30万t土壤的侵蚀迁移导致整个流域的侵蚀模数达到约 $102\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 。

火灰层的抗蚀性强弱主要取决于火灰的物理性质和组成成分,因此由不同燃烧温度和植被类型产生的火灰抗蚀性很可能存在差异。如随着燃烧温度的升高,火灰的主要成分由烧焦的有机质和炭黑转变为金属盐或金属氧化物,颗粒密度增加^[2],抗蚀性更强。同时,火灰层的厚度决定了火灰提供的易蚀物质量的多少,并可能影响火灰对土壤的保护作用和保护时间,进而影响火灰-土壤双层系统的抗蚀性表现。

需要特别指出:火灰层的“灰毯”效应、封闭效应和易蚀效应可能同时或先后发生,火灰覆盖坡面的水文和侵蚀响应通常取决于其综合影响。如火灰层的“灰毯”效应能够增加火灰-土壤双层系统的储水能力和入渗能力,从而抑制坡面产流产沙过程;同时火灰层的封闭效应则会显著降低火灰-土壤双层系统的入渗能力,促进坡面的产流产沙过程。火灰层作为易蚀表层可能导致火灰覆盖坡面的产沙量增加,而火灰层若形成封闭结壳则会使得火灰层的抗蚀性增强^[44],并且不同机制影响的强弱受到火灰特性和厚度、降水强度和时间、土壤特性等多种因素的影响。这是目前关于火灰覆盖坡面的水文和侵蚀响应的研究结论复杂多变甚至相反的重要原因。例如,已有研究发现:火灰厚度对火灰-土壤双层系统入渗能力的影响可能存在阈值效应,0.5 cm火灰覆盖通常表现为封闭效应主导,能够减少入渗,而更厚的火灰层(1.0~3.0 cm)则更多通过“灰毯”效应增加入渗^[11-12,30]。但也有研究报道了0.5 cm厚度火灰增加入渗^[19]和5.0 cm厚度火灰减少入渗^[16]的现象。这表明影响火灰层封闭效应或“灰毯”效应的火灰厚度阈值具有条件依赖性,即由于火灰厚度的影响与降雨强度等其他因子存在交互作用,在不同的降水特征、坡面地形和土壤特征条件下,其阈值效应表现及大小可能存在差异。目前已有研究结果还无法准确量化该阈值效应。未来应通过系统设计的控制实验和野外观测,深入解析多因子耦合作用机制,以厘清阈值效应的形成条件与变化规律,并构建具有普适性的定量预测模型。

2 火灰层对地表径流侵蚀能力的影响

2.1 火灰层形成火灰斑块

在火后的多次降雨事件中,坡面上不同位置的火灰层可能发生侵蚀迁移或沉积结壳,重新分布在坡面上,形成大小不一、厚度各异的火灰斑块(ash patchiness)^[4,45],或短暂或长期残留在土壤表面^[11,46-47]。火灰斑块的出现增加了坡面的粗糙程度^[11,14,26],延长了坡面径流的流动路径,减缓了流速,直接导致地表径流侵蚀能力降低,同时增加了径流在坡面上流动和下渗的时间,减少了径流量,进一步降低了地表径流的侵蚀能力。此外,火灰斑块还可能通过影响坡面上地表径流流动路径的连通性,进一步影响火灰覆盖坡面的地表径流量和径流侵蚀能力。MOODY等^[48]使用自定义水力功能连通性变量,表征火灰斑块的空间分布对径流流动路径连通性的影响,发现该变量能够一定程度上表征火灰覆盖坡面的径流响应。

不同火灰特性和降水特性下,火灰的搬移、沉积、再分布过程各异,形成的火灰斑块也可能表现出多变的分布特征,进而对火灰覆盖坡面的水文和侵蚀过程产生重要而复杂的影响,但目前相关研究

仍然较少。未来研究需量化火灰斑块的空间分布特征及其对坡面粗糙度和连通性的影响,以进一步理解火灰覆盖对坡面渗透、径流生成和侵蚀的作用。

2.2 火灰层形成火灰泥浆

由于“灰毯”效应,火灰层延迟了地表径流的开始时间,当径流开始向下坡流动时,火灰层已完全饱和,更易侵蚀流动。此时的径流会携带浓度较高的细颗粒火灰,形成火灰泥浆(ash-water slurry)^[49]。高浓度的火灰细颗粒增加了火灰泥浆的黏度,导致其在灰浆中的沉降速度降低,灰浆的输送能力增强、流体密度增加^[34],从而对坡面施加更大的剪切应力^[44]。这意味着火灰泥浆侵蚀性强,能够搬运更大、更重的颗粒,并导致灰浆流体密度和输送能力进一步增加。火灰泥浆流体密度、输送能力和侵蚀性之间产生的这一正反馈机制,会加剧火灰泥浆演变为泥石流的风险^[6, 50],并可以将大量沉积物输送到谷底。RENEAU 等^[51]报道了美国新墨西哥州 Cerro Grande 流域中,火灰泥浆演变为泥石流导致大规模火灰输出的情况。该事件的火灰输出量为 $2.1 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占火灰总量的 90% 以上。

目前已有多项研究证实火灰层形成火灰泥浆是林火发生后出现泥石流的主要触发因素之一^[6]。任云等^[49]指出:2016 年四川省九龙县的“4·28”泥石流的前期沉积物主要是火灰夹杂泥沙,而后期沉积物则是泥沙夹杂大量石块。易伟等^[50]也通过火后泥石流预警模型验证了火灰泥浆诱发的泥石流在中重度森林火灾后首次侵蚀性降水中的高发性。火灰的颗粒粒径是影响火灰泥浆形成的重要因素。在径流产生初期,细颗粒($<0.063 \text{ mm}$)火灰的剥离搬运能力相对较弱,更容易被大量携带^[20],形成浓度较高的火灰泥浆^[49],增加泥石流发生风险。尽管现有研究确认了火灰泥浆在火灾后土壤侵蚀及泥石流形成中的重要作用,但仍需进一步研究灰浆浓度、流体密度与泥石流发生概率之间的定量关系,以提高对火灾后泥石流风险的预测能力。

3 火灰层对土壤性质的影响

火灰成分复杂。大量烧焦的有机质与活化的养分和金属元素一起沉积以后,特别是降雨后,或以火灰颗粒的形式在入渗雨水的裹挟下进入土壤^[16, 30],或溶于水或与水发生反应进而迁移转化到土壤中^[21]。进入土壤的火灰颗粒及其水溶渗出液对土壤理化性质产生影响,并影响火灰覆盖坡面的水文和侵蚀过程。

3.1 火灰层对土壤物理性质的影响

火灰颗粒在湿润时会膨胀,进入土壤的火灰颗粒可能会堵塞土壤孔隙^[16, 30, 52],特别是表层 3.0 cm 内,导致土壤入渗能力降低^[13, 28, 46]。ONDA 等^[16]和 GABET 等^[44]均报道了火灰堵塞土壤孔隙,降低渗透性,增加地表径流的现象。同时,火灰中一些未被完全炭化的斥水性有机质进入土壤,可能导致土壤的斥水性增强,进一步降低土壤的入渗能力^[29]。此外,进入土壤的火灰颗粒吸水膨胀也可能增加土壤的保水能力。EBEL 等^[27]发现:这个过程导致了整个坡面范围内土壤保水能力的均匀增加。

火灰颗粒进入土壤,堵塞土壤孔隙的过程主要受到土壤和火灰质地、粒径和孔隙结构影响。这一现象在高温燃烧生成的细粒火灰覆盖于大孔隙更多的沙质土壤时更易发生^[13]。BODI 等^[30]在室内实验中监测到了火灰堵塞粗质土壤孔隙的现象,但在 LEÓN 等^[11]的实验中,同样来源的火灰并未堵塞黏土质地土壤的孔隙。同时火灰层厚度越厚、降水量越大,进入土壤的火灰颗粒越多,被堵塞的土壤孔隙比例可能越高。KIM 等^[3]证实:火灰厚度越厚,降水事件结束后土壤孔隙度就越低。火灰对土壤斥水性或保水性的影响主要与火灰成分密切相关,取决于火灰中可湿性和斥水性成分的相对比例^[53]。

3.2 火灰层对土壤化学性质的影响

当火灰堵塞土壤孔隙使土壤入渗能力降低时,火灰层会进一步积水,从而促进火灰溶解于水或与水反应释放大量溶质;同时,入渗量的减少减缓了火灰颗粒及其水溶液向深层土壤的迁移,导致火灰颗粒及其释放的溶质在土壤表层富集,造成表层土壤化学性质的显著改变^[21, 54]。

火灰中含有大量的热解炭^[20],是生物质和土壤有机质高温燃烧的产物。热解炭成分复杂,以未燃烧完全的有机质为主,也包含高温燃烧生成的有毒化合物,如多环芳香烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)等^[55]。因此热解炭颗粒及其水溶液进入土壤可能导致土壤有机质和有毒化合物的增加^[56]。同时,火灰中富含金属碳酸盐($<500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时)和金属氧化物($>500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时)^[2],因此火灰颗粒及其水溶液进入土壤还会导致土壤 pH 升高、金属元素含量增加^[21],包括部分对生物有害的重金属^[57]。

火灰影响下的土壤 pH、有机质和金属离子增加^[10, 52, 57], 可能通过多种协同机制提升土壤团聚性, 进而增强土壤抗蚀性, 减少侵蚀量。有机质与金属离子发生的配位络合反应增强, 生成稳定的有机-无机复合胶体, 提升了土壤胶体含量, 增强了土壤的团聚性^[58-59], 土壤的抗蚀能力提高^[12]。同时, 土壤中增加的 OH⁻ 离子与铁铝氧化物反应, 不溶性的氢氧化物沉淀增加, 这些沉淀可以作为胶结剂^[59], 增强土壤团聚体的稳定性。如 pH>7 时, Fe³⁺和 Al³⁺水解生成 Fe(OH)₃ 和 Al(OH)₃ 胶体, 进而通过“包膜效应”增强黏粒结合力和土壤抗剪切强度。此外, 土壤中增加的 Ca²⁺、Fe³⁺等阳离子可以与带负电的黏土矿物及有机质形成离子桥接, 促进颗粒间静电凝聚, 提升土壤团聚性^[60]。

火灰对土壤团聚体稳定性和土壤抗蚀性的提升作用在部分研究中已得到证实。GIOVANNINI 等^[61]发现: 将火灰渗滤液施用于土壤后, 较细的黏土颗粒团聚成粉砂大小的团聚体的比例增加。HOLCOMB 等^[62]在土壤表面喷洒了白灰渗滤液后观察到了黏土的絮凝, 并报道了这个过程减少土壤侵蚀的作用。多项研究提到了林火过程中火烧对土壤团聚体稳定性的负面影响^[63], 但火后火灰进入土壤对团聚体稳定性的增强作用及其是否能抵消火烧的负面影响, 还有待进一步研究。

火灰影响下的土壤有机质和养分元素的增加, 能够对土壤生物起到施肥效应 (fertilization effect), 提升土壤肥力和质量, 促进土壤微生物的活动, 改善土壤结构和功能, 加速火后植被恢复进程, 从而缩短坡面水文侵蚀过程恢复到火前状态所需的时间, 减少长期影响^[20-21]。火灰的施肥效应已得到部分研究的证实, 如包明琢等^[64]证实: 施加生物质炭能够提高杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林地土壤中部分微生物的生物量, 以及土壤全碳、全氮、全磷和速效钾的含量。SÁNCHEZ-GARCÍA 等^[54]的研究证实: 火灰导致的土壤有机碳增加能够提高土壤微生物呼吸速率, 并加速土壤有机质的矿化。

火灰影响下的土壤 pH 升高、重金属元素增加以及多环芳香烃等其他有毒化合物的出现^[17, 65], 则可能对土壤生物起到毒性作用, 长期会导致土壤有机质分解受限^[66]、可用性营养物质变少、土壤结构和功能退化, 阻碍火后的植被恢复进程, 导致坡面水文和侵蚀过程受到长期影响。多项研究证实了火灰及火灰的水提取物具有抑制土壤微生物活性、改变土壤微生物群落结构和代谢速率的潜在效应, 有害影响主要源于火灰中存在的重金属和其他不明有毒物质^[54, 67]。VALENCA 等^[39]和陈爽等^[60]指出: 土壤 pH 的上升也会抑制微生物的活性。另外, 高 pH 还可能通过影响有毒灰分成分的溶解而间接影响毒性, 如砷酸盐、铬酸盐或钼酸盐等阴离子在酸性 pH 下被更强地吸附, 而碱性 pH 下更易解吸和迁移^[68]。也有大量研究证实了火灰对种子萌发和幼苗生长的抑制作用及其对火后生态恢复的负面影响^[55, 69-70]。森林火灾产生的火灰层是导致土壤多环芳香烃污染的重要原因^[71]。多环芳香烃具有强烈的亲脂性^[72]且不易被分解或降解^[56], 容易在生物体内积累。火灰中的多环芳香烃进入土壤, 对植物、土壤微生物和土壤动物均有着较强的毒性作用^[55]。最新的研究还发现: 多氯联苯 (PCB)、多氯二苯并对二噁英 (PCDDs) 和多氯二苯并呋喃 (PCDF) 等也出现在火灰中^[73], 并对土壤生物产生潜在的毒性。

关于火灰对其覆盖土壤的施肥效应和生物毒性, 目前主要关注土壤生物的反应及其对植被恢复和微生物的影响。这个过程对火灰覆盖坡面的恢复过程及长期的水文和侵蚀过程的影响, 还缺乏定量研究和长期观测。

4 结论

火灰覆盖是火后坡面水文和侵蚀过程改变的关键影响因素, 但其影响效果具有高变异性和情景依赖性。火灰层可以通过其“灰毯”效应、封闭效应和作为新的易蚀表层, 与土壤共同组成性质独特的火灰-土壤双层系统; 可以通过形成火灰斑块和火灰泥浆, 改变地表径流流动路径和侵蚀能力; 可以通过影响其覆盖土壤的理化性质并产生施肥效应和生物毒性, 影响坡面短期水文侵蚀过程和长期生态恢复速度。这些影响机制的叠加效应决定了火灰覆盖坡面的水文和侵蚀响应的变化方向及程度, 并且不同机制作用的强弱受到火灰成分和厚度、降水强度和时间、土壤质地和火前状态等多种因素的影响。因此, 根据不同的林火、降水和土壤条件, 分析识别特定条件下的主导影响机制及其作用, 是提高火后水文侵蚀过程模拟预测能力的必要前提。

目前, 中国林火管理相关规定主要关注了火烧迹地的造林复绿等生态修复措施和技术, 对于火后水土流失的监测和治理尚未单独制定明确规范。在水土保持管理领域, 已对灾后修复工程项目提出了统一

的水土保持要求,但尚未对林火灾害后的特殊环境条件制定具有针对性的水土保持监测和防治规范。本文针对火灰层对坡面水文侵蚀的多重作用机制及影响因素进行了系统探讨,以期为中国火后水土流失监测指标体系的完善和预测预警系统的优化提供科学依据。

5 参考文献

- [1] JONES M W, KELLEY D I, BURTON C A, *et al.* State of wildfires 2023–2024[J]. *Earth System Science Data*, 2024, **16**(8): 3601–3685. DOI: [10.5194/essd-16-3601-2024](https://doi.org/10.5194/essd-16-3601-2024).
- [2] BODÍ M B, MARTIN D A, BALFOUR V N, *et al.* Wildland fire ash: production, composition and eco-hydro-geomorphic effects[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, **130**: 103–127. DOI: [10.1016/j.earscirev.2013.12.007](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.12.007).
- [3] KIM T, LEE J, LEE Y E, *et al.* Exploring the role of ash on pore clogging and hydraulic properties of ash-covered soils under laboratory experiments[J]. *Fire*, 2022, **5**(4): 99. DOI: [10.3390/fire5040099](https://doi.org/10.3390/fire5040099).
- [4] GODOY L M, SIMÕES L B, MARTINS M A S, *et al.* An exploratory study into ash mobilization using lysimeters[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2022, **70**(4): 432–441. DOI: [10.2478/johh-2022-0035](https://doi.org/10.2478/johh-2022-0035).
- [5] PEREIRA P, CERDÀ A, ÚBEDA X, *et al.* Modelling the impacts of wildfire on ash thickness in a short-term period[J]. *Land Degradation & Development*, 2015, **26**(2): 180–192. DOI: [10.1002/ldr.2195](https://doi.org/10.1002/ldr.2195).
- [6] 罗冠枝, 罗敏玄, 陈全明, 等. 森林火灾对泥石流孕灾环境及成灾机制的影响分析[J]. *矿产勘查*, 2024, **15**(8): 1517–1523. LUO Guanzhi, LUO Minxuan, CHEN Quanming, *et al.* Analysis on the influence of forest fire on the disaster environment and disaster mechanism of debris flow[J]. *Mineral Exploration*, 2024, **15**(8): 1517–1523. DOI: [10.20008/j.kckc.202408016](https://doi.org/10.20008/j.kckc.202408016).
- [7] VAHEDIFARD F, ABDOLLAHI M, LESHCHINSKY B A, *et al.* Interdependencies between wildfire-induced alterations in soil properties, near-surface processes, and geohazards[J]. *Earth and Space Science*, 2024, **11**(2): e2023EA003498. DOI: [10.1029/2023EA003498](https://doi.org/10.1029/2023EA003498).
- [8] ERSÖZ T, HANEDA K, GONDA Y. The role of volcanic ash thickness on the hydraulic conductivity of the ground and the initiation of debris flows[J]. *Natural Hazards*, 2024, **120**(12): 10969–11007. DOI: [10.1007/s11069-024-06654-6](https://doi.org/10.1007/s11069-024-06654-6).
- [9] JESUS F, MESQUITA F, SERPA D, *et al.* Effects of wildfire ash on the fatty acid and sugar profiles of bivalves—a comparative study of a freshwater and a marine species[J]. *Environmental Pollution*, 2025, **366**: 125540. DOI: [10.1016/j.envpol.2024.125540](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125540).
- [10] MAGLIOZZI L J, MATIASEK S J, ALPERS C N, *et al.* Wildland-urban interface wildfire increases metal contributions to stormwater runoff in Paradise, California[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2024, **26**(4): 667–685. DOI: [10.1039/d3em00298e](https://doi.org/10.1039/d3em00298e).
- [11] LEÓN J, BODÍ M B, CERDÀ A, *et al.* The contrasted response of ash to wetting: the effects of ash type, thickness and rainfall events[J]. *Geoderma*, 2013, **209**: 143–152. DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.06.018](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.018).
- [12] 王冠, 吴文清, 刘明明, 等. 林火前后坡面覆盖类型对产流产沙影响的模拟试验[J]. *水土保持学报*, 2022, **36**(6): 82–87. WANG Guan, WU Wenqing, LIU Mingming, *et al.* Simulation experiment on the influence of slope cover types on runoff and sediment yield before and after forest fire[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(6): 82–87. DOI: [10.13870/j.cnki.stbxb.2022.06.011](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2022.06.011).
- [13] WOODS S W, BALFOUR V N. The effects of soil texture and ash thickness on the post-fire hydrological response from ash-covered soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, **393**(3/4): 274–286. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2010.08.025](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.08.025).
- [14] CERDÀ A, DOERR S H. The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period[J]. *CATENA*, 2008, **74**(3): 256–263. DOI: [10.1016/j.catena.2008.03.010](https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.03.010).
- [15] CARRÀ B G, BOMBINO G, DENISI P, *et al.* Water infiltration after prescribed fire and soil mulching with fern in Mediterranean forests[J]. *Hydrology*, 2021, **8**(3): 95. DOI: [10.3390/hydrology8030095](https://doi.org/10.3390/hydrology8030095).
- [16] ONDA Y, DIETRICH W E, BOOKER F. Evolution of overland flow after a severe forest fire, Point Reyes, California[J]. *CATENA*, 2008, **72**(1): 13–20. DOI: [10.1016/j.catena.2007.02.003](https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.02.003).
- [17] AN Lingqiu, WANG Lunjiang, WU Tingye, *et al.* Post-wildfire wind and water erosion could accelerate toxic metals and nutrients movements on subtropical karst hillslopes[J]. *CATENA*, 2025, **254**: 109006. DOI: [10.1016/j.catena.2025.109006](https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109006).
- [18] KINNER D A, MOODY J A. Spatial variability of steady-state infiltration into a two-layer soil system on burned

- hillslopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, **381**(3/4): 322–332. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2009.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.004).
- [19] LARSEN I J, MacDONALD L H, BROWN E, *et al.* Causes of post-fire runoff and erosion: water repellency, cover, or soil sealing?[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, **73**(4): 1393–1407. DOI: [10.2136/sssaj2007.0432](https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0432).
- [20] BELLÈ S L, BERHE A A, HAGEDORN F, *et al.* Key drivers of pyrogenic carbon redistribution during a simulated rainfall event[J]. *Biogeosciences*, 2021, **18**(3): 1105–1126. DOI: [10.5194/bg-18-1105-2021](https://doi.org/10.5194/bg-18-1105-2021).
- [21] SANTÍN C, DOERR S H, OTERO X L, *et al.* Quantity, composition and water contamination potential of ash produced under different wildfire severities[J]. *Environmental Research*, 2015, **142**: 297–308. DOI: [10.1016/j.envres.2015.06.041](https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.06.041).
- [22] LOWE M A, MCGRATH G, LEOPOLD M. The impact of soil water repellency and slope upon runoff and erosion[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, **205**: 104756. DOI: [10.1016/j.still.2020.104756](https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104756).
- [23] LUCAS-BORJA M E, PLAZA-ÁLVAREZ P A, MIJAN UDDIN S M, *et al.* Short-term hydrological response of soil after wildfire in a semi-arid landscape covered by *Macrochloa tenacissima* (L.) Kunth[J]. *Journal of Arid Environments*, 2022, **198**: 104702. DOI: [10.1016/j.jaridenv.2021.104702](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104702).
- [24] MOODY J A, KINNER D A, ÚBEDA X. Linking hydraulic properties of fire-affected soils to infiltration and water repellency[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **379**(3/4): 291–303.
- [25] WOODS S W, BALFOUR V N. The effect of ash on runoff and erosion after a severe forest wildfire, Montana, USA[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2008, **17**(5): 535. DOI: [10.1071/wf07040](https://doi.org/10.1071/wf07040).
- [26] LEÓN J, ECHEVERRÍA M T, MARTÍ C, *et al.* Can ash control infiltration rate after burning? An example in burned calcareous and gypseous soils in the Ebro Basin (NE Spain)[J]. *CATENA*, 2015, **135**: 377–382. DOI: [10.1016/j.catena.2014.05.024](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.024).
- [27] EBEL B A. Wildfire impacts on soil-water retention in the Colorado front range, United States[J]. *Water Resources Research*, 2012, **48**(12): W12515. DOI: [10.1029/2012WR012362](https://doi.org/10.1029/2012WR012362).
- [28] ROBICHAUD P R, WAGENBRENNER J W, PIERSON F B, *et al.* Infiltration and interrill erosion rates after a wildfire in western Montana, USA[J]. *CATENA*, 2016, **142**: 77–88. DOI: [10.1016/j.catena.2016.01.027](https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.027).
- [29] 闵雷雷, 于静洁. 土壤斥水性及其对坡面产流的影响研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, **29**(7): 855–860. MIN Leilei, YU Jingjie. Progress in the research of soil water repellency and its influences on overland flow generation[J]. *Progress in Geography*, 2010, **29**(7): 855–860. DOI: [10.11820/dlkxjz.2010.07.012](https://doi.org/10.11820/dlkxjz.2010.07.012).
- [30] BODÍ M B, DOERR S H, CERDÀ A, *et al.* Hydrological effects of a layer of vegetation ash on underlying wettable and water repellent soil[J]. *Geoderma*, 2012, **191**: 14–23. DOI: [10.1016/j.geoderma.2012.01.006](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.006).
- [31] DOERR S H, SHAKESBY R A, WALSH R P D. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, **51**(1/4): 33–65. DOI: [10.1016/S0012-8252\(00\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00011-8).
- [32] STOOFF C R, GEVAERT A I, BAVER C, *et al.* Can pore-clogging by ash explain post-fire runoff?[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2016, **25**(3): 294. DOI: [10.1071/wf15037](https://doi.org/10.1071/wf15037).
- [33] 梁晨, 肖莉, 史忠林, 等. 森林火灾流域侵蚀泥沙来源指纹技术研究进展[J]. *水土保持学报*, 2023, **37**(3): 1–9. LIANG Chen, XIAO Li, SHI Zhonglin, *et al.* Advances on fingerprinting technology of sediment source in burned watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, **37**(3): 1–9. DOI: [10.13870/j.cnki.stbcb.2023.03.001](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcb.2023.03.001).
- [34] PEREIRA P, ÚBEDA X, MARTÍN D A. Fire severity effects on ash chemical composition and water-extractable elements[J]. *Geoderma*, 2012, **191**: 105–114. DOI: [10.1016/j.geoderma.2012.02.005](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.02.005).
- [35] FROST R L, WEIER M L. Thermal treatment of whewellite—a thermal analysis and Raman spectroscopic study[J]. *Thermochimica Acta*, 2004, **409**(1): 79–85. DOI: [10.1016/S0040-6031\(03\)00332-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00332-0).
- [36] ULERY A L, GRAHAM R C, AMRHEIN C. Wood-ash composition and soil pH following intense burning[J]. *Soil Science*, 1993, **156**(5): 358–364. DOI: [10.1097/00010694-199311000-00008](https://doi.org/10.1097/00010694-199311000-00008).
- [37] MISRA M K, RAGLAND K W, BAKER A J. Wood ash composition as a function of furnace temperature[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1993, **4**(2): 103–116. DOI: [10.1016/0961-9534\(93\)90032-Y](https://doi.org/10.1016/0961-9534(93)90032-Y).
- [38] 袁鹏丽, 覃佳宇, 周雨茜, 等. 旱改水型耕地红壤团聚体稳定性及影响因素研究[J]. *华中农业大学学报*, 2025, **44**(4): 47–57. YUAN Pengli, QIN Jiayu, ZHOU Yuxi, *et al.* Stability and affecting factors of red soil agglomerates in dryland converted paddy fields[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2025, **44**(4): 47–57. DOI: [10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.04.005](https://doi.org/10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.04.005).

- [39] VALENCA R, RAMNATH K, DITTRICH T M, *et al.* Microbial quality of surface water and subsurface soil after wildfire[J]. *Water Research*, 2020, **175**: 115672. DOI: [10.1016/j.watres.2020.115672](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115672).
- [40] WIRTH X, ANTUNEZ V, ENRIQUEZ D, *et al.* Wildfire ash composition and engineering behavior[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2024, **150**(8): 04024067. DOI: [10.1061/JGGEFK.GTENG-11683](https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-11683).
- [41] SHAKESBY R A, BENTO C P M, FERREIRA C S S, *et al.* Impacts of prescribed fire on soil loss and soil quality: an assessment based on an experimentally-burned catchment in central Portugal[J]. *CATENA*, 2015, **128**: 278–293. DOI: [10.1016/j.catena.2013.03.012](https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.03.012).
- [42] KEMTER M, FISCHER M, LUNA L V, *et al.* Cascading hazards in the aftermath of Australia's 2019/2020 Black Summer wildfires[J]. *Earth's Future*, 2021, **9**(3): e2020EF001884. DOI: [10.1029/2020EF001884](https://doi.org/10.1029/2020EF001884).
- [43] NERIS J, SANTIN C, LEW R, *et al.* Designing tools to predict and mitigate impacts on water quality following the Australian 2019/2020 wildfires: insights from Sydney's largest water supply catchment[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2021, **17**(6): 1151–1161. DOI: [10.1002/ieam.4406](https://doi.org/10.1002/ieam.4406).
- [44] GABET E J, STERNBERG P. The effects of vegetative ash on infiltration capacity, sediment transport, and the generation of progressively bulked debris flows[J]. *Geomorphology*, 2008, **101**(4): 666–673. DOI: [10.1016/j.geomorph.2008.03.005](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.03.005).
- [45] LEWIS S A, ROBICHAUD P R, HUDAK A T, *et al.* Evaluating the persistence of post-wildfire ash: a multi-platform spatiotemporal analysis[J]. *Fire-Switzerland*, 2021, **4**(4): 68. DOI: [10.3390/fire4040068](https://doi.org/10.3390/fire4040068).
- [46] THOMAZ E L. Ash physical characteristics affects differently soil hydrology and erosion subprocesses[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, **29**(3): 690–700. DOI: [10.1002/ldr.2715](https://doi.org/10.1002/ldr.2715).
- [47] MARTÍNEZ-MURILLO J F, HUESO-GONZÁLEZ P, RUIZ-SINOJA J D, *et al.* Short-term experimental fire effects in soil and water losses in southern of Spain[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, **27**(5): 1513–1522. DOI: [10.1002/ldr.2504](https://doi.org/10.1002/ldr.2504).
- [48] MOODY J A, MARTIN D A, HAIRE S L, *et al.* Linking runoff response to burn severity after a wildfire[J]. *Hydrological Processes*, 2008, **22**(13): 2063–2074. DOI: [10.1002/hyp.6806](https://doi.org/10.1002/hyp.6806).
- [49] 任云, 胡卸文, 王严, 等. 四川省九龙县色脚沟火后泥石流成灾机理[J]. *水文地质工程地质*, 2018, **45**(6): 150–156. REN Yun, HU Xiewen, WANG Yan, *et al.* Disaster mechanism of the Sejiao post-fire debris flow in Jiulong County of Sichuan[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, **45**(6): 150–156. DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.06.22](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.06.22).
- [50] 易伟, 余斌, 胡卸文, 等. 山火后首次泥石流预警[J]. *地球科学*, 2024, **49**(10): 3826–3840. YI Wei, YU Bin, HU Xiewen, *et al.* On early warning of first debris flow after a wildfire[J]. *Earth Science*, 2024, **49**(10): 3826–3840. DOI: [10.3799/dqkx.2023.145](https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.145).
- [51] RENEAU S L, KATZMAN D, KUYUMJIAN G A, *et al.* Sediment delivery after a wildfire[J]. *Geology*, 2007, **35**(2): 151. DOI: [10.1130/g23288a.1](https://doi.org/10.1130/g23288a.1).
- [52] RODRÍGUEZ-JIMÉNEZ E, CRUZ-PÉREZ N, KORITNIK J, *et al.* Revealing the impact of wildfires on groundwater quality: insights from Sierra de la Culebra (Spain)[J]. *Chemosphere*, 2024, **365**: 143375. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2024.143375](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143375).
- [53] BODÍ M B, MATAIX-SOLERA J, DOERR S H, *et al.* The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon content[J]. *Geoderma*, 2011, **160**(3/4): 599–607. DOI: [10.1016/j.geoderma.2010.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.11.009).
- [54] SÁNCHEZ-GARCÍA C, SANTÍN C, NERIS J, *et al.* Chemical characteristics of wildfire ash across the globe and their environmental and socio-economic implications[J]. *Environment International*, 2023, **178**: 108065. DOI: [10.1016/j.envint.2023.108065](https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108065).
- [55] FERNANDEZ-MARCOS M L. Potentially toxic substances and associated risks in soils affected by wildfires: a review[J]. *Toxics*, 2022, **10**(1): 31. DOI: [10.3390/toxics10010031](https://doi.org/10.3390/toxics10010031).
- [56] DENIS E H, TONEY J L, TAROZO R, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in lake sediments record historic fire events: validation using HPLC-fluorescence detection[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, **45**: 7–17. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2012.01.005](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.01.005).
- [57] CAMPBELL M, TREBLE P C, McDONOUGH L K, *et al.* Combustion completeness and sample location determine

- wildfire ash leachate chemistry[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2024, **25**(5): e2024GC011470. DOI: [10.1029/2024GC011470](https://doi.org/10.1029/2024GC011470).
- [58] 张家洋, 蔺芳, 詹乃才, 等. 紫花苜蓿与无芒雀麦不同栽培模式下土壤团聚体形态结构、组成及有机碳特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(6): 1077–1086. ZHANG Jiayang, LIN Fang, ZHAN Naicai, *et al.* Morphological structure, composition, and organic carbon characteristics of soil agglomerations for alfalfa and ryegrass planting patterns[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(6): 1077–1086. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.2019.06.004](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.2019.06.004).
- [59] 方建德, 林成芳. 土壤有机质形成转化过程及其影响因素综述[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2024, **19**(1): 24–34. FANG Jiande, LIN Chengfang. A review of the formation and transformation process of soil organic matter and its influencing factors[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2024, **19**(1): 24–34. DOI: [10.19687/j.cnki.1673-7105.2024.01.004](https://doi.org/10.19687/j.cnki.1673-7105.2024.01.004).
- [60] 陈爽, 张翅鹏, 黄臣臣, 等. 微生物在不同 pH 下对水稻土胶体中砷释放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41**(5): 959–966. CHEN Shuang, ZHANG Chipeng, HUANG Chenchen, *et al.* Effects of microorganisms on the release of arsenic from paddy soil colloids at different pH levels[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41**(5): 959–966. DOI: [10.11654/jaes.2021-1178](https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1178).
- [61] GIOVANNINI G. *Soil Erosion and Degradation as a Consequence of Forest Fires*[M]. Logroño: Geoforma, 1994: 15–27.
- [62] HOLCOMB G J, DURGIN P B. *Ash Leachate Can Reduce Surface Erosion (Research Note PSW-342)*[M]. Berkeley: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1979: 4.
- [63] AGBESHIE A A, ABUGRE S, ATTA-DARKWA T, *et al.* A review of the effects of forest fire on soil properties[J]. *Journal of Forestry Research*, 2022, **33**(5): 1419–1441. DOI: [10.1007/s11676-022-01475-4](https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4).
- [64] 包明琢, 曲雪铭, 高倩倩, 等. 磷肥和生物炭配施对杉木林地土壤微生物的影响[J]. *西北林学院学报*, 2022, **37**(2): 10–19. BAO Mingzhuo, QU Xueming, GAO Qianqian, *et al.* Effects of combined application of phosphate fertilizer and biochar on soil microorganism in Chinese fir woodland[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, **37**(2): 10–19. DOI: [10.3969/j.issn.1001-7461.2022.02.02](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-7461.2022.02.02).
- [65] HASAN M I, SINHA N, SONMEZ BAGHIRZADE B, *et al.* Wildfires in Alaskan boreal forests release elevated levels of polyaromatic hydrocarbon[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, **59**(21): 10434–10444. DOI: [10.1021/ACS.EST.4C09278](https://doi.org/10.1021/ACS.EST.4C09278).
- [66] CERTINI G. Effects of fire on properties of forest soils: a review[J]. *Oecologia*, 2005, **143**(1): 1–10. DOI: [10.1007/s00442-004-1788-8](https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8).
- [67] FRITZE H, PENNANEN T, KITUNEN V. Characterization of dissolved organic carbon from burned humus and its effects on microbial activity and community structure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(6): 687–693. DOI: [10.1016/S0038-0717\(97\)00210-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00210-1).
- [68] PIGNA M, CAPOALE A G, CAVALCA L, *et al.* Arsenic in the soil environment: mobility and phytoavailability[J]. *Environmental Engineering Science*, 2015, **32**(7): 551–563. DOI: [10.1089/ees.2015.0018](https://doi.org/10.1089/ees.2015.0018).
- [69] ABBOTT B W, ROCHA A V, SHOGREN A, *et al.* Tundra wildfire triggers sustained lateral nutrient loss in Alaskan Arctic[J]. *Global Change Biology*, 2021, **27**(7): 1408–1430. DOI: [10.1111/gcb.15507](https://doi.org/10.1111/gcb.15507).
- [70] FONTÚRBEL T, CARRERA N, VEGA J A, *et al.* The effect of repeated prescribed burning on soil properties: a review[J]. *Forests*, 2021, **12**(6): 767. DOI: [10.3390/f12060767](https://doi.org/10.3390/f12060767).
- [71] 刘发林, 向鹏. 火干扰后土壤多环芳烃时空分布特征[J]. *土壤通报*, 2016, **47**(4): 973–979. LIU Falin, XIANG Peng. Characteristics of temporal and spatial distribution of soil PAHs after fire disturbance[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, **47**(4): 973–979. DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2016.04.31](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2016.04.31).
- [72] MEHARG A A, WRIGHT J, DYKE H, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dispersion and deposition to vegetation and soil following a large scale chemical fire[J]. *Environmental Pollution*, 1998, **99**(1): 29–36. DOI: [10.1016/S0269-7491\(97\)00180-2](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00180-2).
- [73] KIM E J, OH J E, CHANG Y S. Effects of forest fire on the level and distribution of PCDD/Fs and PAHs in soil[J]. *Science of The Total Environment*, 2003, **311**(1/3): 177–189. DOI: [10.1016/S0048-9697\(03\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00095-0).