

森林火灾流域侵蚀泥沙来源指纹技术研究进展

梁晨^{1,2}, 肖莉^{3,4}, 史忠林¹, 文安邦¹

(1.中国科学院,水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041;2.中国科学院大学,北京 100049;
3.四川省公路规划勘察设计研究院有限公司,成都 610041;4.四川省公路生态环境工程技术研究中心,成都 610041)

摘要: 指纹识别技术是量化流域侵蚀泥沙来源的有效手段,如何应用于火烧流域,仍有一些问题值得探讨。通过回顾相关文献,总结森林火灾通过植被、土壤和灰烬加剧土壤侵蚀的机制,介绍应用指纹技术研究火烧流域泥沙来源的案例,重点分析放射性核素、矿物磁性、物理性质、地球化学元素和有机组分等指纹因子在火烧迹地的含量和性质变化,论述各类指纹因子在火烧流域泥沙来源研究中的适用性,并提出未来应重点关注指纹技术的物理基础、火灾后土壤性质的时空变化规律、指纹因子稳定性验证、燃烧灰烬的影响以及大粒径泥沙的识别等问题。为促进火烧迹地指纹识别技术的研究、理解森林火灾对于流域产沙格局的影响、提升火灾流域水土保持和生态修复的有效性提供理论依据。

关键词: 森林火灾; 火烧迹地; 土壤侵蚀; 泥沙来源; 指纹技术

中图分类号: TV141.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)03-0001-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.03.001

Advances on Fingerprinting Technology of Sediment Source in Burned Watershed

LIANG Chen^{1,2}, XIAO Li^{3,4}, SHI Zhonglin¹, WEN Anbang¹

(1.*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041*; 2.*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*;
3.*Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu 610041*;

4.*Sichuan Highway Ecological Environment Engineering Technology Research Center, Chengdu 610041*)

Abstract: The fingerprinting technology is an effective method to quantify sediment sources in watershed. How to apply it to burned areas is still worth discussing. Based on the review of relevant literature, the mechanisms of forest fire aggravating soil erosion through vegetation, soil and ash was summarized. This paper introduced the case of applying fingerprinting technology to study the source of sediment in the fire basin. The content and property variations of fingerprint factors such as fallout radionuclides, mineral magnetism, physical indexes, geochemical elements and organic compounds in the burned area were analyzed emphatically. The applicability of various fingerprinting tracers in the study of sediment sources in burned areas was discussed. Additionally, some key investigation directions were provided, including the physical basis of fingerprinting technique, the spatio-temporal variation of burned soil properties, the stability verification of fingerprint tracers, the impact of burning ash, and the identification of large sediment particles. This review paper could provide a theoretical basis for promoting the research of the fingerprinting technique in burned areas, understanding the impact of forest fire on sediment yield patterns, and improving the effectiveness of water and soil conservation and ecological restoration in burned watershed.

Keywords: forest fire; burned area; soil erosion; sediment source; fingerprinting technology

林火是营林用火和森林火灾的统称,前者包括计划火烧和控制火烧,是营林过程中的一种生产措施,其燃烧过程、火烧强度、火烧范围受人为控制。森林火灾指发生在城市市区以外的一切森林、林木和林地

内的火烧灾害,特点是火烧发生不可预料,火烧过程不可控制,常对自然环境和人类安全造成一定损害。发生森林火灾后,尚未恢复至原状态的土地,称为火烧迹地。根据国家统计局数据^[1],近 20 年(2002—

收稿日期:2022-09-05
资助项目:中国科学院西部青年学者项目(中国科学院人事局[2022]4 号)
第一作者:梁晨(1992—),男,河北廊坊人,博士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:liangchen@imde.ac.cn
通信作者:史忠林(1984—),男,山西柳林人,副研究员,主要从事侵蚀泥沙示踪技术研究。E-mail:shizl@imde.ac.cn

2021 年)我国共发生森林火灾 12.3 万起,累计受灾森林面积超 145 万 hm^2 (图 1)。得益于严格的管控政策,近年来我国森林火灾发生次数总体呈下降趋势,但由于森林覆盖度不断增加,同时大气环流、气候变化以及人类活动等为森林火灾的发生带来更多不确定性因素^[2],华南、西南和东北等地仍受森林火灾的严重威胁,是我国森林火灾的高发地。

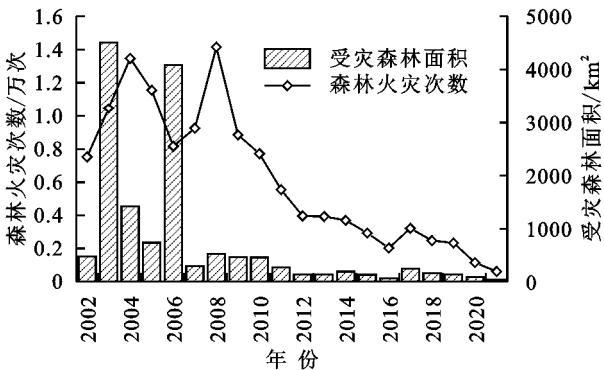


图 1 近 20 年中国森林火灾发生次数和受灾森林面积

森林火灾对生态环境的破坏性体现在多个方面,对流域土壤侵蚀产沙的影响显著、持久且复杂。火灾发生多年后,火烧迹地侵蚀产沙量仍可达未受灾流域的数倍乃至数十倍^[3],灾后最初的侵蚀泥沙可在流域中滞留上百年^[4],流域侵蚀产沙来源也受火灾影响发生改变^[5]。此外,由于土壤、气候、地形、火烧强度不同,火烧迹地土壤侵蚀特征在空间上具有很大差异^[6]。即便是中低火烧强度的营林用火,虽然未对生态系统造成不可逆的损害,也可能降低土壤持水能力,从而提高土壤侵蚀强度^[7]。俞新妥等^[8]在福建杉木林地的试验表明,炼山初年土壤流失量可达 2 481.1 t/km^2 ,是对照小区的 88 倍,而另有研究^[9]显示,同等燃烧强度下,火灾样地的产沙量约比计划烧除样地高 30%。

可靠的泥沙来源信息对针对性地进行流域水土流失治理和河流泥沙减控具有重要意义。20 世纪 70 年代以来,基于泥沙性质(指纹因子)的指纹识别技术兴起并逐渐发展成为泥沙来源研究的热点技术之一。指纹识别技术主要应用于流域尺度的水力侵蚀中,以物质守恒理论为基础,以目标泥沙(悬移质、沉积物等)全部来自已知源地为前提,忽略泥沙迁移过程,认为源汇泥沙的指纹因子可直接比较,利用某种或一组在不同沙源地间具有显著差异的指纹因子,建立源/汇泥沙之间的对应关系,然后运用混合模型定量各源地对目标泥沙的相对贡献比例。流域内指纹因子的稳定性(指纹因子在迁移过程中保持不变或变化量可预测)和辨识性(指纹因子在同一物源内相似、在不同物源间差异明显),是保证预测结果准确性的关键^[10]。然而,燃烧对土壤不同性质的影响程度差异明显,势必会改变不同指纹因子在火烧流域的适用

性^[11],尤其是对于燃烧/非燃烧区或不同燃烧强度区域的区分。目前,国内关于森林火灾的研究主要集中在火灾发生规律、影响因素、预防和管理等方面^[12],少有学者关注森林火灾对土壤侵蚀的影响,以及火烧迹地侵蚀泥沙来源的识别方法,这方面与国外相比还存在较大差距。

总结国内外研究成果,阐述森林火灾影响土壤侵蚀的机理,剖析燃烧背景下土壤、泥沙性质的潜在变化及其原因,介绍指纹技术在火烧迹地侵蚀产沙来源方面的最新进展,并提出今后的研究重点,以期加深对火烧迹地侵蚀产沙变化的认知,为火灾流域侵蚀泥沙治理提供参考。

1 森林火灾对土壤侵蚀的影响

土壤侵蚀受降雨、土壤、地形、地质、植被和管理措施等多种因素影响,森林火灾直接干预植被和土壤,而燃烧后的灰烬通过对地表覆盖和土壤物理化学性质的改变,也对土壤侵蚀产生影响。

1.1 植被烧毁加剧土壤侵蚀

乔木的林冠和树干对降雨有截留作用,被截留的降雨,以蒸发形式消耗或被林木枝叶吸收,未直接补充地表径流。枯落物和林下植被对土壤水分循环的作用更为显著^[6],一方面通过对地表径流蓄积,延缓产流时间并降低峰值流量,减轻面蚀危害;另一方面,拦挡雨滴击溅,对表层土壤起到保护作用。当枯落物厚度超过 1~2 cm 时,即可完全避免溅蚀发生^[13]。有研究^[14-15]表明,我国森林林冠截留率为 11%~36%,干流率(树干茎流流量占降雨量的百分比)为 0.1%~15%,枯落物存量为 3.5~26.8 t/ha ,持水量为 0.7~7.1 mm。

森林火灾发生后,植被和枯落物首先遭到破坏,因此,国内对于森林火灾燃烧强度(燃烧释放的能量^[16])的划分,主要依据森林生态系统中植被和枯落物被消耗的程度进行推算,分为轻度、中度、重度 3 个等级^[17](表 1)。由于植被和枯落物被燃烧消耗,土壤表面粗糙度下降,导致径流量增加,同时径流冲走地表燃烧产物,使粗糙度进一步下降而加剧土壤侵蚀,此过程可达 12 个月^[18]。土壤侵蚀加剧程度一般与植物和枯落物的消耗程度有关,高强度火烧地区,总产沙量可达中强度地区 5 倍和低强度地区 10 倍^[9]。

表 1 燃烧强度等级划分

指标	轻度	中度	重度
烧死木比例/%	≤30	30~70	>70
乔木熏黑高度/m	≤2	2~5	>5
林下乔灌、枯落物烧毁程度/%	≤50	>50	100

火灾干扰后,植被的恢复速度受燃烧强度、地形、气候、植被类型等多种因素影响,机制较为复杂。已有研究^[19]表明,轻度火烧主要损毁林下灌草,恢复周

期相对较短,约6~9年可恢复至灾前水平;重度火烧后林地郁闭度降低,有利于灌草生长,前期恢复速度较快,但由于乔木严重受损后主要依靠幼苗更新^[20],恢复周期可长达11年以上^[19]。此外,一些森林植被对山火有较强的适应能力,严重火烧后仍能够在较短周期内恢复,而相比针叶林,针阔混合林的恢复速度相对较快^[21]。森林火灾一般导致坡面侵蚀产沙贡献提高,伴随灾后植被恢复,坡面侵蚀产沙贡献均有下降趋势,且侵蚀格局的变化模式与流域面积、地形、地质、土壤和植被类型等因素无关^[11],体现出植被在火烧迹地水土保持中发挥的重要作用。

1.2 表土性质影响土壤侵蚀

森林火灾影响土壤有机质、储水量、质地、斥水性和团聚体稳定性等与侵蚀相关的性质,程度与燃烧温度和时长有关。若土壤水分含量较高,燃烧初期土壤温度不超过95℃^[22];土壤水分耗尽后,枯落物层最高温度可达850℃,但由于土壤导热性较差,表层物质燃烧的高温很难传递到深层,矿质土壤5cm深处温度不超过150℃,20cm以下土壤温度基本没有升高^[23]。但在可燃物充足的区域,燃烧的时间更长,温度更高,对深层土壤的危害更显著。

室内研究^[18]表明,燃烧对土壤有机质的作用一般存在温度阈值(200~300℃),低于此阈值时有机质含量基本不变,超过该阈值后有机质含量显著降低。受有机质降低影响,土壤孔隙率降低、容重增加,导致土壤储水量发生变化。储水量与温度并非线性关系,当温度高于200℃时,储水量下降,至400~500℃稍有回升^[24],可能由于高温时充分燃烧的灰烬和土壤细粒组分的增加,部分抵消有机质降低的影响^[25]。

燃烧对土壤质地的影响机制较为复杂。有研究^[24]表明,高温状态下铁铝硅酸盐、氧化物和氢氧化物对砂砾的形成起到胶结作用,而羟基组分在温度超过400℃时分解消失导致黏土矿物晶体结构破坏^[26],土壤砂砾含量增加而黏粒含量减少。也有研究^[18]指出,高温可加速物理风化过程,导致火灾过后土壤砂砾含量减少而黏粒、粉粒含量增加。

高温条件下土壤中某些有机质分解产生斥水物质,或可燃物燃烧挥发的疏水化合物冷凝于土壤颗粒表面,都有可能使土壤产生斥水现象^[27]。土壤斥水性的形成与温度有关,100~200℃时斥水性(水滴入渗时间WDPT<1min)变化不大,300~400℃时斥水性显著提高(WDPT>10min),而500℃以上时,由于有机物的损失,斥水性完全消失(WDPT=0s)^[28]。受土壤类型和燃烧时间的影响,不同研究中导致斥水性发生改变的阈值有所差异,但变化趋势基本相似^[29]。

土壤团聚体的稳定性与有机质含量和结构、微生

物量、斥水性、质地和矿质含量等土壤性质有关,很多研究^[30]以室内控制试验或火烧迹地采样检测的方式,探究高温后土壤团聚体稳定性的变化,但所得结论差异较大。有研究^[24]表明,低强度火烧时团聚体稳定性变化不显著,但随着燃烧持续、温度升高,有机质和黏粒含量下降,土壤团聚体稳定性下降。也有研究^[31]表明,虽然高温处理后的土壤有机质几乎耗尽,但土壤凝胶脱水、铁铝氧化物的重聚合等作用超过有机质消耗的影响,团聚体的稳定性提高。

综上所述,受森林火灾影响,土壤的有机质含量下降、孔隙率降低、储水量下降、斥水性增强,将导致降雨入渗量下降、径流量增加,灾后更容易发生土壤侵蚀。而从团聚体稳定性角度讲,火灾对于土壤抗冲性的影响机制较为复杂,仍需要深入研究。此外,由于地形、地质,以及燃烧时可燃物分布、土壤水分条件、风速风向等因素,森林火灾的燃烧强度可能与土壤升温幅度的分布并不一致^[18],因此,森林火灾对土壤性质的影响程度通常难以预测。

1.3 燃烧灰烬影响土壤侵蚀

灰烬是森林生态系统可燃物质燃烧后的主要产物之一,其含量和成分与可燃物数量、类型和是否充分燃烧有关。灰烬以颗粒态残留于地表或与表土混合,影响地表覆盖和土壤性质,是火烧迹地侵蚀特征变化的主要原因之一。

实验室研究^[32]表明,燃烧温度影响灰烬的构成。当温度低于450℃时,不充分燃烧产生的灰烬成分以有机物为主;温度超过450℃时,有机质挥发殆尽,碳酸盐、硅酸盐等无机物质占比提高;温度超过580℃时,灰烬的主要成分为氧化物。不同燃烧温度产生的灰烬,其物理性质也有所差异。温度由300℃升高到700℃时,细粒灰烬占比增加,中值粒径显著下降;当温度继续升高到900℃以上,由于矿质晶粒聚合,粗粒含量稍有回升,中值粒径变为300℃时的76%^[33]。在升温过程中,灰烬的颗粒密度呈升高趋势,但由于孔隙率较高(80%~96%),其容重(0.06~0.62g/cm³)始终低于典型矿质土壤(1.0~1.6g/cm³)^[32]。对于灰烬的斥水性研究目前还没有统一结论,有研究^[34]指出,不充分燃烧形成的灰烬斥水性较高(WDPT>10000s),当燃烧温度高于450℃时,斥水性显著降低。另有研究^[33]则显示,不同燃烧温度生成的灰烬都表现出亲水性(WDPT<5s),但高温产生的灰烬田间持水率更高(48%)、饱和导水率更低(0.002cm/s)。

野外条件下,地表灰烬通常不在固定位置停留太久,风蚀、水蚀都造成灰烬的重新分布^[35],包括水平空间上的位移以及垂直方向上与土壤的融合,进而影响火烧迹地的土壤侵蚀特征。灰烬对土壤侵蚀

的影响机制较为复杂,研究^[33]证实,低温燃烧产生的焦炭物质或高温燃烧产生的氧化物,易在土壤表面形成密封形态的斥水层,或者具有斥水性质的细粒灰烬阻塞土壤孔隙^[36],可能导致入渗率下降和径流量增加,促进土壤侵蚀的发生和加剧^[37]。也有研究^[33]发现,具有高持水率的灰烬能够滞留水分以降低径流系数、延缓产流时间,同时,灰烬结皮对下层矿质土壤起到保护作用,降低侵蚀速率^[36]。灰烬对土壤侵蚀可表现出促进或减缓 2 种截然不同的作用,或许

与灰烬厚度、性质、土壤类型、地形以及降雨等因素有关^[32]。此外,未完全燃烧的植物残体,在特定情况下(如地形平坦、水土流失轻微)能以灰分的形式补充有机质,改变有机质组分,有利于后期土壤环境和地表植被的恢复。

2 火灾流域泥沙来源指纹技术应用进展

目前,应用指纹识别技术定量火灾流域泥沙来源的研究较少,主要集中在澳大利亚、西班牙、加拿大以及智利等地(表 2),国内尚未见相关报道。

表 2 火烧迹地泥沙来源指纹法研究案例

研究区 位置	流域名称:面积/km ² (燃烧占比/%)	所用指纹 因子	泥沙 粒径/μm	流域名称:泥沙源地 (贡献率/%)	作者及文献
Victoria, Australia	MC:0.233(100) SC:0.073(100)	核素(¹³⁷ Cs、 ²¹⁰ Pb _{ex} 、 ²³⁹ Pu 等)	<10	MC:坡面表层(22~69)/沟岸(78~31) SC:坡面表层(32~74)/沟岸(68~26)	Smith 等 ^[38]
Victoria, Australia	SRC:1.36(98)	核素(¹³⁷ Cs、 ²¹⁰ Pb _{ex})	<63	坡面表层(100)/坡面次表层(0)	Smith 等 ^[39]
New South Wales, Australia	GC:17(31) NRu:446(57) NRd:629(69) LR:183(99)	核素(¹³⁷ Cs、 ²¹⁰ Pb _{ex})	<10	GC:表层(10)/次表层(90) NRu:表层(45)/次表层(55) NRd:表层(71)/次表层(29) LR:表层(86)/次表层(14)	Wilkinson 等 ^[5]
Mallorca Island, Spain	SFV:4.8(71)	颜色、核素(¹³⁷ Cs、 ²¹⁰ Pb _{ex})	<63	上游:燃烧区表层(61.3)/沟岸(38.7) 全流域:燃烧区表层(84.6)/未燃烧区表层(5.7)/沟岸(9.7)	Garcia-Comendador 等 ^[40]
Mallorca Island, Spain	SCF:2.3(—)	核素(¹³⁷ Cs、 ²¹⁰ Pb _{ex})	<63	上游:燃烧区表层(87)/燃烧区沟岸(13)全流域:未燃烧区表 层(7)/未燃烧区沟岸(5)/燃烧区表层(75)/燃烧区沟岸(13) 全流域:燃烧区(92)/未燃烧区(8)	Garcia-Comendador 等 ^[41]
Mallorca Island, Spain	BSC:9.8(40)	核素(¹³⁷ Cs、 ²¹⁰ Pb _{ex})	<63	燃烧区(12)/未燃烧区(88)	Estrany 等 ^[42]
Alberta, Canada	CR:714.6(7)	地球化学元素	<63	未火烧流域(20)/火烧流域(43)/火烧并采取砍伐措施的流域 (37)	Stone 等 ^[3]
British Columbia, Canada	Fishtrap:158(62) Jamieson:215(0)	核素(¹³⁷ Cs、 ²¹⁰ Pb _{ex})	<63	Fishtrap:表层(8.5)/次表层或沟岸(91.5) Jamieson:表层(0)/次表层或沟岸(100)	Owens 等 ^[43]
del Maule Region, Chile	Quivolgo:0.4(100)	地球化学元素、 核素(²¹⁰ Pb _{ex} 、 ²³² Th、 ²³⁸ U 等)	<63	表层(13.2)/次表层(41.5)/道路(18.9)/沟岸(26.3)	Muñoz-Arcos 等 ^[44]

注:燃烧占比为森林火灾对研究流域的影响比例,其中—表示未提及。

主要研究结论为:

(1)从整体上讲,森林火灾显著提高流域产沙量。Stone 等^[3]研究流域内不同子流域的产沙贡献比例,虽然子流域具有相似的坡度和连通性,但遭受山火的子流域,在火灾发生 6~7 年后,仍以 14%的面积占比,贡献超过 80%的泥沙。

(2)森林火灾提高了坡面表层的侵蚀产沙贡献占比,提高程度与燃烧比例呈正比。García-Comendador 等^[40]研究表明,燃烧发生 1 个月之后,火烧区坡面表土侵蚀泥沙贡献可达 80%以上,而未发生火灾地区的坡面表土贡献率不到 10%;14 个月之后,两者贡献率分别为 20%~50%,30%~65%,差异有所下降,说明燃烧造成的影响在逐渐降低。而 Wilkinson 等^[5]研究发现,随着燃烧比例的增加,坡面表土侵蚀贡献率也随之增加,燃烧面积占比分别 31%,57%,69%,99%的几个流域,坡面表土泥沙贡献率分别为 10%,45%,71%,86%。

(3)森林火灾可能改变流域侵蚀产沙空间格局。智利 Quivolgo 流域在火灾发生前道路侵蚀泥沙贡献率最大(约 40%)^[45],但火灾发生后 3 个月,道路产沙贡献率降为 18.9%,而坡面次表层(41.5%)和沟岸(26.3%)成为流域主要产沙来源^[44];火灾发生 8 个月后,流域侵蚀产沙空间格局基本恢复到与火灾发生前一致。而 Owens 等^[43]通过对比燃烧与未燃烧流域的侵蚀产沙来源发现,侵蚀产沙空间格局受火灾影响并不显著。未受森林火灾影响的流域,泥沙来源以坡面次表层为主(约 100%),而受火灾影响的流域虽然坡面表层的泥沙贡献率有所提高(约 10%),但主要来源仍为坡面次表层(约 90%)。尽管燃烧导致土壤侵蚀发生机制改变,但由于火灾发生后最初一段时间内缺乏足够的降雨驱动,导致坡面次表层实际产沙量有限^[43]。

3 火灾流域泥沙来源潜在指纹因子及适用性探讨

指纹技术是目前流域侵蚀泥沙来源研究的重要

手段。常用的指纹因子包括放射性核素、矿物磁性、物理性质(如颜色)、地球化学元素和有机组分等^[10]。森林火灾对这些指纹因子有不同程度的影响,使得它们在火烧迹地的适用性有所差异(表 3),并于下文

详细讨论。深刻认知火烧迹地土壤和泥沙指纹性质的变化规律,有助于有的放矢地选择指纹因子,对应用指纹技术开展火烧流域泥沙来源研究具有重要意义。

表 3 火灾流域指纹因子适用性总结

指纹因子类型	优点	缺点	适用性
放射性核素(如 ¹³⁷ Cs、 ²¹⁰ Pb _{ex} 等)	燃烧导致土壤表层核素含量变化,表层/次表层含量差异有可能提高,连续沉降核素尤为明显	含量变化主要原因为燃烧灰烬的加入或散失,其稳定性待证实	可用于辨识表层/次表层或燃烧/非燃烧区
矿物磁性(如磁化率、剩磁等)	高温可使土壤矿质成分转变,从而提高部分土壤的磁性	矿物磁性可能与粒径、有机质等因素高度相关,且相关关系可能较为复杂	可用于辨识燃烧/非燃烧区或不同燃烧强度
颜色(如色相、明度、色度等)	土壤或泥沙颜色随燃烧强度变化显著	燃烧强度与土壤升温的空间差异,可能导致土壤颜色变化不显著;颜色在泥沙迁移过程中的稳定性有待验证	可用于辨识燃烧/非燃烧区或不同燃烧强度
地球化学元素(如常量元素、微量元素、稀土元素等)	元素种类繁多,不同元素在燃烧影响后可能表现多种差异	常规研究中表现出稳定性的元素,受燃烧影响短暂微弱;某些元素高温后活性变化复杂	需根据实际情况考察稳定性与辨别性
有机组分(如孢粉、酶、类脂物等)	燃烧可产生某些有机组分	有机组分含量受燃烧温度影响显著,高强度燃烧时有机组分将大量消耗	可尝试用于辨识燃烧/非燃烧区

3.1 放射性核素

大气沉降放射性核素(¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex}等)在土壤剖面中具有独特的分布特征,往往表现为表层含量较高,随土层深度增加含量降低,因此,在流域泥沙来源调查中应用广泛,常用来区分表层和次表层泥沙来源^[10],也是目前火烧流域泥沙来源研究的主要手段。

森林火灾主要影响土壤表层的核素含量变化,变化程度与燃烧强度、地表植被类型以及核素自身性质有关。森林火灾发生后,地表植被和枯落物中吸附的核素可能以灰烬为载体进入土壤,致使表层土壤核素含量升高^[6],对²¹⁰Pb_{ex}影响尤为显著。连续沉降的²¹⁰Pb_{ex}在灰烬中的含量比表土中更高^[43],灰烬进入土壤使火烧后表土²¹⁰Pb_{ex}含量可达火烧前的 2.7 倍^[41];另一方面,高温也可能导致核素含量降低。Cs 的沸点较低(679℃),在高强度火烧区域可能以气化的方式散失,导致其在表土中含量下降^[46]。Pb 的沸点虽然较高(1 749℃),但其氯化物或硫酸盐沸点低(450℃和 600℃),气化或富含²¹⁰Pb_{ex}的细粒灰烬、烟气被气流吹离原位也可能导致表土中的²¹⁰Pb_{ex}含量降低^[47]。

森林火灾导致的土壤核素含量变化为区分表层/次表层或燃烧区/非燃烧区泥沙来源贡献提供了可能,但在应用中需注意燃烧强度、温度以及地表覆盖等在空间上的差异所导致的土壤核素含量的空间变异。采样时应在详尽的野外调查基础上,合理布设采样点,加大采样密度或采用多点混合的方法,增加样品的代表性,降低核素空间变异对指纹识别结果的影响。

3.2 矿物磁性

矿质磁性是土壤的基本属性之一,其描述指标包括磁化率[体积磁化率(κ)、质量磁化率(χ)、频率磁化率

(χ_{fd})等]、剩磁[非滞后剩磁(ARM)、等温剩磁(IRM)、饱和等温剩磁(SIRM)等]及其衍生或比例关系等。影响土壤磁性的因素众多,大尺度范围,地质构造和成岩过程决定了磁性矿物的数量、种类和形态,而气候、植被、水文等通过岩石风化过程影响土壤磁性的差异;小尺度范围,磁性因子在不同的植被覆盖、土地利用或地貌特征中,表现出的性质也有所不同。由于土壤磁性测试简单、快速、廉价、可重复性强、对样品无破坏性,相比其他指纹因子具有一定优势,已有研究^[48]成功应用矿质磁性因子实现对侵蚀泥沙来源的定量识别。

磁性对温度变化较为敏感,火烧迹地普遍存在表土磁性增强现象,重度火烧区坡面表土 $<10\text{ }\mu\text{m}$ 细粒物质的低频磁化率(χ_{lf})可达到未火烧土壤的 10 倍之多,其他磁性参数如非磁滞磁化率(χ_{ARM})、饱和等温剩磁(SIRM)等也表现出不同程度的增强^[49]。土壤磁性的增强与含铁矿物的转换有关。在升温 and 冷却过程中,土壤中弱磁性的氧化铁和氢氧化铁在有机质存在的条件下通过氧化还原反应转化为磁铁矿、磁赤铁矿等强磁性矿物,其磁性增强程度与土壤氧化铁和有机质含量有关^[50]。而土壤中的铝代换针铁矿在受热过程中会生成铝代换赤铁矿,也对土壤磁性有增强作用^[51]。此外,由于磁性矿物以单粒、团粒或胶膜等形式赋存于土壤或泥沙中,磁性因子的稳定性受土壤或泥沙粒径影响显著^[52],不同粒径组分的土壤,其磁性因子受高温影响后增强的程度有所差异,其中细粒组分($<500\text{ }\mu\text{m}$)对燃烧温度较为敏感^[49],而由于影响机制较为复杂,已有的基于线性关系的指纹粒径校正方法可能并不适用。

森林火灾导致火烧迹地表土磁信号显著增强,为

矿质磁性因子在火烧迹地指纹识别技术中的应用提供可能,但目前相关研究不多。火烧迹地土壤磁性增强的程度与过火时间、燃烧强度、土壤中本底磁性矿物含量以及有机质等多个因素有关;同时,火烧区地形、森林密度、植被类型、土壤含水率等也对火烧强度及土壤温度具有重要影响,从而导致土壤磁性增强程度呈现较大空间变异。土壤本底磁性的固有空间变异与火烧影响下磁性增强的差异相互叠加,给泥沙来源研究中物源采样方案的设计带来一定挑战,样点位置的选择和样本量将直接影响采样的代表性,从而影响源解析结果的可靠性。利用磁性作为指纹因子在火灾流域侵蚀泥沙来源研究中具有极大潜力,但在实际应用中仍可能面临一定问题。

3.3 颜色

土壤颜色是土壤中腐殖质含量和矿物质成分差异的综合反映,是土壤物理性质的重要指标。常用的颜色指标包括孟塞尔系统的色相、明度、色度,RGB系统的红、绿、蓝色值,GIE xyY 色彩空间的明度、色度,CIE Luv 色彩空间的亮度、色度等,可通过色度仪、扫描仪或分光仪获取。理论上,颜色受土壤或泥沙的主要成分控制,相比其他指纹因子,侵蚀泥沙成分在输移过程中的微小变化对颜色指标的影响不大,意味着颜色因子具有较好的稳定性^[53]。此外,由于土壤颜色的测定成本低廉,方法相对简单,在泥沙来源研究中得到了一定应用^[54]。

土壤有机质燃烧或地表灰烬混入土壤,将导致土壤颜色发生变化。颜色的改变与燃烧的充分程度有关。低温燃烧时,有机物脱水灰烬或土壤呈现黑色、褐色,随着温度升高,燃烧更加充分,有机碳氮含量降低而无机物和氧化物含量升高,灰烬亮度逐渐提高,颜色也变为灰色进而变为白色^[32-33],而燃烧导致矿质土壤中黄色的针铁矿逐渐转变为红棕色的磁赤铁矿和红色的赤铁矿使土壤更接近红色,且燃烧后土壤颜色的变化可维持 3 个月以上^[55]。此外,由于燃烧温度在土壤剖面梯度较大,不同深度的土壤颜色变化不同。野外观测^[56]表明,火烧区土壤表层 1—8 cm 形成了具有高色度、高明度的红色部分,而 9—23 cm 的土层明度更低,接近黑色。García-Comendador 等^[40]研究表明,火灾发生 1 个月左右,应用颜色因子得出的产沙贡献比率,与应用放射性核素因子所得结果基本一致。

颜色因子在火烧迹地泥沙来源研究中的应用处于起步阶段。从目前结果看,颜色因子在区分火烧与非火烧区之间,或火烧区不同强度之间的泥沙来源方面具有应用潜力,尤其是中、高程度火烧条件下,有机物质被消耗,颜色因子能更准确反映土壤矿质成分,但需注意几点:(1)在野外条件下森林火灾对土壤的

升温作用受多种因素影响,燃烧程度能否造成土壤颜色的显著性变化需要验证;(2)反映土壤颜色的指标繁多且一些指标间存在相关性,因此测定、筛选的流程和方法需要规范;(3)颜色因子在不同空间尺度上随泥沙迁移过程中的稳定性需要进一步研究。

3.4 地球化学元素

地球化学元素包括常量元素、微量元素和稀土元素等,元素数量众多,易受地质、土壤、水文、气候、植被和人类活动等因素的长期影响,对多种物源类型都有良好的分辨能力,并且测试相对简单,是目前指纹技术中常用的一类指纹因子。

地球化学元素种类众多,受燃烧影响的变化程度各有不同,且与植被和土壤类型等因素有关,根据实际情况筛选地球化学因子,或结合其他类型指纹因子,可为火烧迹地侵蚀泥沙来源提供新的认识,但目前应用较少^[3]。森林火灾对地球化学元素辨识性与稳定性的影响,主要体现的方面有:

(1)可燃物燃烧释放、燃烧灰烬进入土壤或燃烧导致的土壤成分变化等,都可能对土壤中某些地球化学元素的含量起到增加作用,但是除氮磷之外这种作用通常短暂而轻微。这些元素包括 Mn、Fe、Cu、Zn、Ca、Mg、K、Na 等^[57],有研究^[58]表明,此类元素在火灾发生后 1 年基本恢复到灾前水平。

(2)燃烧导致某些元素挥发或气化,使其在土壤中的含量降低。包括 Hg($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$)、N($>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时以氮气、氮氧化物或氨气形式气化)、S($>375\text{ }^{\circ}\text{C}$)、K($>760\text{ }^{\circ}\text{C}$)、P($>774\text{ }^{\circ}\text{C}$)、Na($>880\text{ }^{\circ}\text{C}$)、Ca($>1\,240\text{ }^{\circ}\text{C}$)、Mg($>1\,107\text{ }^{\circ}\text{C}$)、Mn($>1\,962\text{ }^{\circ}\text{C}$)等元素,在特定燃烧温度下都有损耗迹象^[32]。

(3)燃烧可转变元素存在形式,从而提高或降低元素在土壤中的含量。例如,燃烧可将土壤中的有机 P 转换为生物可利用的正磷酸盐^[59],而可用磷和不稳定磷在 7 个月之后仍高于对照组^[60]。高温破坏钠钾硅酸盐矿物,使非活性态的 K 元素转化为活性态,提高 K 的有效性,其中速效 K 在土壤中流动性较强,更容易通过淋溶等作用流失^[61]。此外,火烧后土壤中交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 离子都有升高趋势^[62],而火烧 1 年后,速效养分以及阳离子交换量基本恢复到最初水平^[63]。

(4)燃烧耗尽有机酸、释放阳离子,通常导致土壤 pH 上升,土壤酸碱特征的改变也影响部分地球化学元素的活性。在酸性土壤中,正磷酸盐通过化学吸附与 Al、Fe 和 Mn 的氧化物结合,而在中性或碱性土壤中,正磷酸盐与钙矿物结合,或以离散态的钙磷酸盐形式析出^[7]。此外,pH 升高也容易导致矿物质分散,从而更易受侵蚀作用而流失^[64]。

3.5 有机组分

土壤和泥沙中源于高等植物的某些有机组分(如孢子或花粉^[65]、土壤酶^[66]、植物类脂物^[67]等),已被用于侵蚀泥沙来源研究。相比其他指纹因子,有机组分对地表植被和土地利用类型较为敏感,在识别此类物源的泥沙贡献比例时具有优势。有机组分的丰度、成分、活性、碳氮稳定同位素组成等特征,是泥沙来源研究中常用的指纹因子。

森林火灾显著影响土壤有机质含量,低强度火烧虽然对土壤自身有机质含量的影响不大,但未完全燃烧的灰烬中有机质含量较高,混入土壤后能对有机质起到一定补充作用,超过某一温度阈值后,土壤有机质含量将显著降低直至耗尽。尽管有机组分由于燃烧挥发或封存为细烟颗粒所造成的损失显著,可燃物燃烧仍生成某些有机物质。林地可燃物燃烧产生大量多环芳烃,富集特征是灰烬高于土壤,土壤表层高于深层。山火发生6~12个月以后,多环芳烃从土壤中挥发,含量大幅下降^[68]。在低温燃烧阶段,有机质不仅含量变化,结构也发生变化。Fernández等^[69]研究表明,220℃时表层土壤有机质中72%的纤维素和半纤维素、56%的水溶性化合物、46%的木质素和25%的脂质受到损失,因此,相比于未燃烧区土壤,燃烧区土壤中不稳定性有机质比例增加。当温度升高到350℃时,趋势更为明显。

土壤中有机组分的来源和属性,使其在判别不同覆被、不同土地利用类型等泥沙来源时具有应用潜力,但有机组分含量和成分的变化与植被类型、燃烧程度有关,森林火灾发生后,可能仅在低强度火烧区域仍保留相关指纹信息。当灾后林地环境恢复到一定程度后,部分微生物(如固氮细菌)活性可能增加,进一步导致有机组分变化。此外,有机组分在泥沙输移过程中的降解、富集作用十分复杂,常规的统计方法很难识别^[10]。目前,利用有机组分识别火烧迹地侵蚀泥沙来源的研究尚未见报道。

4 展望

森林火灾通过燃烧植被、破坏土壤、产生灰烬等,提高火烧迹地土壤侵蚀风险,加剧流域生态压力,但作用机制是复杂的。地形、气候、植被、土壤、燃烧特征及火灾后的恢复程度等因素,都会影响火烧迹地的产流产沙特征,改变流域侵蚀泥沙来源及贡献。高温条件下土壤性质的变化,为利用指纹技术判别火烧流域泥沙来源提供可能,但由于不同土壤性质对火烧的响应程度各异,也对指纹技术的应用提出挑战。建议未来重点开展的研究为:

(1)加强室内试验研究,夯实指纹法的物理基础。目前,泥沙来源研究中指纹因子的选择大多基于统计

检验法,从众多的测试指标中选择判别能力较强的指标作为指纹因子。这种方法需要测试多种土壤泥沙指标,费时费力,且往往很难解释筛选出的指纹因子对不同泥沙源地的判别原理。对于火烧流域泥沙来源指纹法研究,需开展室内控制性模拟试验,研究不同温度梯度下土壤性质的变化特征及规律,为指纹因子的预判和筛选提供基础。

(2)火烧迹地土壤性质时空变化特征。目前,长时间尺度的火烧流域泥沙来源指纹法研究,往往仅依靠物源地单次采样来识别不同年份流域出口的泥沙来源,而忽略了物源指纹性质在时间尺度上的变化。此外,由于地形、地表覆盖、风向变化等导致的火烧强度和燃烧温度在空间上的差异,火烧区域土壤泥沙性质可能存在较大的空间变异,从而对指纹判别结果带来一定的不确定性。

(3)指纹因子稳定性验证。指纹因子稳定性是指纹技术的理论基础,但燃烧对土壤性质的影响较为复杂,不同指纹因子在泥沙输移过程中的稳定性仍需进一步验证。

(4)燃烧灰烬对指纹识别结果的影响。燃烧对土壤中地球化学元素、大气沉降核素和有机组分等指纹因子的改变,很大程度上是地表植被或枯落物的燃烧灰烬进入土壤造成的。因此,灰烬在土壤中的赋存形式及其与土壤颗粒结合的紧密程度,对指纹因子在泥沙输移过程中的稳定性具有重要影响,目前此类工作开展较少。

(5)大粒径泥沙来源。发生火灾的流域由于地表植被严重被破坏,暴雨条件下极易发生山洪、泥石流等灾害事件。这类泥沙颗粒的粒径范围广,粗颗粒占比大,而目前指纹技术主要用于识别泥沙中细粒物质(如 $<63\mu\text{m}$)的来源。未来可利用指纹技术的基本原理,探索其应用于大粒径泥沙来源研究的可行性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴2003—2022[M].北京:中国统计出版社,2003—2022.
- [2] Fang K Y, Yao Q C, Guo Z T, et al. ENSO modulates wildfire activity in China[J]. Nature Communications, 2021,12(1):e1764.
- [3] Stone M, Collins A L, Silins U, et al. The use of composite fingerprints to quantify sediment sources in a wildfire impacted landscape, Alberta, Canada[J]. Science of the Total Environment, 2014,473/474:642-650.
- [4] Moody J A, Martin D A. Initial hydrologic and geomorphic response following a wildfire in the Colorado Front Range[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001,26(10):1049-1070.

- [5] Wilkinson S N, Wallbrink P J, Hancock G J, et al. Fallout radionuclide tracers identify a switch in sediment sources and transport-limited sediment yield following wildfire in a eucalypt forest[J]. *Geomorphology*, 2009, 110(3/4):140-151.
- [6] 俞新妥, 杨玉盛. 林火与水土流失[J]. *世界林业研究*, 1992(3):30-35.
- [7] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: A review[J]. *Oecologia*, 2005, 143(1):1-10.
- [8] 俞新妥, 杨玉盛, 何智英, 等. 炼山对杉木人工林生态系统的影响 I 炼山初期林地水土流失的初步研究[J]. *福建林学院学报*, 1989(3):238-248.
- [9] 刘发林, 杨继敏. 火干扰对径流及土壤侵蚀的模拟研究[J]. *土壤通报*, 2015, 46(4):858-865.
- [10] Collins A L, Blackwell M, Boeckx P, et al. Sediment source fingerprinting: Benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(12):4160-4193.
- [11] Smith H G, Blake W H, Owens P N. Discriminating fine sediment sources and the application of sediment tracers in burned catchments: A review[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(6):943-958.
- [12] 王睿琛, 龙腾腾, 王秋华. 2000—2020 年中国森林火灾研究进展分析[J]. *消防科学与技术*, 2021, 40(10):1529-1533.
- [13] 韩冰, 吴钦孝, 刘向东, 等. 林地枯枝落叶层对溅蚀影响的研究[J]. *防护林科技*, 1994(2):7-10.
- [14] 王佑民. 我国林冠降水再分配研究综述(I) [J]. *西北林学院学报*, 2000, 15(3):1-7.
- [15] 温远光, 刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析[J]. *林业科学*, 1995(4):289-298.
- [16] Keeley J E. Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, 18(1):e116.
- [17] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 等. 林火干扰对广东省杉木林土壤有机碳及其组分的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(12):108-118.
- [18] Stoof C R. Fire effects on soil and hydrology[D]. Wageningen: Wageningen University, 2011.
- [19] 林思美, 黄华国. 基于 3PGS-MTCLIM 模型模拟根河林区火后植被净初级生产力恢复及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11):3712-3722.
- [20] Kennard D K, Gould K, Putz F E, et al. Effect of disturbance intensity on regeneration mechanisms in a tropical dry forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 162(2/3):197-208.
- [21] Bright B C, Hudak A T, Kennedy R E, et al. Examining post-fire vegetation recovery with Landsat time series analysis in three western North American forest types[J]. *Fire Ecology*, 2019, 15(1):1-14.
- [22] 许鹏波, 屈明, 薛立. 火对森林土壤的影响[J]. *生态学报*, 2013, 32(6):1596-1606.
- [23] De B L F. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: A review[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231/232:195-206.
- [24] Badia D, Martí C. Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils[J]. *Arid Land Research and Management*, 2003, 17(1):23-41.
- [25] Wesseling J G, Stoof C R, Ritsema C J, et al. The effect of soil texture and organic amendment on the hydrological behaviour of coarse-textured soils[J]. *Soil Use and Management*, 2009, 25(3):274-283.
- [26] Terefe T, Mariscal-Sancho I, Peregrina F, et al. Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils. A laboratory study[J]. *Geoderma*, 2008, 143(3/4):273-280.
- [27] 刘发林, 陈小伟, 曾素平, 等. 火干扰对森林土壤斥水性的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2019, 39(5):1846-1852.
- [28] Stoof C R, Wesseling J G, Ritsema C J. Effects of fire and ash on soil water retention[J]. *Geoderma*, 2010, 159(3/4):276-285.
- [29] 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.
- [30] Mataix S J, Cerdà A, Arcenegui V, et al. Fire effects on soil aggregation: A review[J]. *Earth Science Reviews*, 2011, 109(1/2):44-60.
- [31] Guerrero C, Mataix-Solera J, Navarro-Pedreño J, et al. Different patterns of aggregate stability in burned and restored soils[J]. *Arid Land Research and Management*, 2001, 15(2):163-171.
- [32] Bodi 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.
- [33] Balfour V N, Woods S W. The hydrological properties and the effects of hydration on vegetative ash from the Northern Rockies, USA[J]. *Catena*, 2013, 111:9-24.
- [34] Bodi M B, Mataix S 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.
- [35] 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.

- [36] 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):e535.
- [37] Gabet E J, Bookter A. Physical, chemical and hydrological properties of Ponderosa pine ash[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2011, 20(3):e443.
- [38] Smith H G, Sheridan G J, Nyman P, et al. Quantifying sources of fine sediment supplied to post-fire debris flows using fallout radionuclide tracers[J]. *Geomorphology*, 2012, 15(139/140):403-415.
- [39] Smith H G, Sheridan G J, Lane P N J, et al. Changes to sediment sources following wildfire in a forested upland catchment, southeastern Australia[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(18):2878-2889.
- [40] García-Comendador J, Martínez C N, Fortesa J, et al. Analysis of post-fire suspended sediment sources by using colour parameters [J]. *Geoderma*, 2020, 379: e114638.
- [41] García-Comendador J, Fortesa J, Calsamiglia A, et al. Source ascription in bed sediments of a Mediterranean temporary stream after the first post-fire flush [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(11):2582-2595.
- [42] Estrany J, López T J A, Smith H G. Wildfire effects on suspended sediment delivery quantified using fallout radionuclide tracers in a Mediterranean catchment[J]. *Land Degradation and Development*, 2016, 27(5):1501-1512.
- [43] Owens P N, Blake W H, Giles T R, et al. Determining the effects of wildfire on sediment sources using ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb : The role of landscape disturbances and driving forces[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(6):982-994.
- [44] Muñoz-Arcos E, Castillo A, Cuevas A A, et al. Sediment source apportionment following wildfire in an upland commercial forest catchment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(6):2432-2449.
- [45] Bravo L C, Schuller P, Castillo A, et al. First use of a compound-specific stable isotope (CSSI) technique to trace sediment transport in upland forest catchments of Chile[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1114-1124.
- [46] Paliouris G, Taylor H W, Wein R W, et al. Fire as an agent in redistributing fallout ^{137}Cs in the Canadian boreal forest[J]. *Science of the Total Environment*, 1995, 160/161:153-166.
- [47] Perreault L M, Yager E M, Aalto R. Application of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ inventories to measure net hillslope erosion at burned site[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(2):133-145.
- [48] 史忠林, 文安邦, 严冬春, 等. 基于磁化率和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的金沙江下游小流域泥沙来源研究[J]. *地球与环境*, 2021, 49(2):125-133.
- [49] Blake W H, Wallbrink P J, Doerr S H, et al. Magnetic enhancement in wildfire-affected soil and its potential for sediment-source ascription [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(2):249-264.
- [50] Hanesch M, Stanjek H, Petersen N. Thermomagnetic measurements of soil iron minerals: The role of organic carbon[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 165(1):53-61.
- [51] Schwertmann U, Fechter H. The influence of aluminum on iron oxides: XI. Aluminum-substituted maghemite in soils and its formation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(6):1462-1463.
- [52] Pulley S, Collins A L, Van der Waal B. Variability in the mineral magnetic properties of soils and sediments within a single field in the Cape Fold mountains, South Africa: Implications for sediment source tracing[J]. *Catena*, 2018, 163:172-183.
- [53] Pulley S, Collins A L. A rapid and inexpensive colour-based sediment tracing method incorporating hydrogen peroxide sample treatment as an alternative to quantitative source fingerprinting for catchment management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 311: e114780.
- [54] Pulley S, Collins A L. The potential for colour to provide a robust alternative to high-cost sediment source fingerprinting: Assessment using eight catchments in England[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 792: e148416.
- [55] Ketterings Q M, Bigham J M. Soil color as an indicator of slash-and-burn fire severity and soil fertility in Sumatra, Indonesia[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5):1826-1833.
- [56] Ulery A L, Graham R C. Forest fire effects on soil color and texture[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1):135-140.
- [57] 朱文舟, 王俊坚, 曾辉. 森林火灾对土壤及水体重金属浓度水平的潜在影响研究进展[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(9):2641-2649.
- [58] Costa M R, Calvão A R, Aranha J. Linking wildfire effects on soil and water chemistry of the Marão River watershed, Portugal, and biomass changes detected from Landsat imagery[J]. *Applied Geochemistry*, 2014, 44:93-102.

- [13] Zhu H X, Fu B J, Wang S, et al. Reducing soil erosion by improving community functional diversity in semi-arid grasslands[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(4):1063-1072.
- [14] 李盼盼, 李彬彬, 王兵, 等. 模拟氮沉降对白羊草地群落特征及其坡面流水动力特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(16):52-61.
- [15] 陈科兵, 吴发启, 姚冲. 黄土高原南部地区人工模拟暴雨条件下不同坡度谷子坡耕地产流产沙过程[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3):90-95.
- [16] 张科利, 蔡强国, 柯奇画. 中国土壤侵蚀研究重大成就及未来关键领域[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(4):373-380.
- [17] Ben-Hur M, Faris J, Malik M, et al. Polymers as soil conditioners under consecutive irrigations and rainfall[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 53(4):1173-1177.
- [18] Clark P J, Evans F C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations[J]. *Ecology*, 1954, 35(4):445-453.
- [19] Mason N W H, Mouillot D, Lee W G, et al. Diversity functional richness, functional evenness and functional divergence: The primary components of functional diversity[J]. *Oikos*, 2005, 111(1):112-118.
- [20] Liu J E, Wang Z L, Yang X M, et al. The impact of natural polymer derivatives on sheet erosion on experimental loess hillslope[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 139:23-27.
- [21] 李瑞栋, 王文龙, 姜义宝, 等. 模拟降雨条件下砾石含量对壤土工程堆积体坡面产流产沙的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(11):3027-3036.
- [22] 陈泽勋, 刘廷玺, 王怡璇, 等. 模拟降雨条件下典型草原坡面初始产流时间及产流产沙量[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(7):1316-1323.
- [23] Liu X N, Fan D X, Yu X X, et al. Effects of simulated gravel on hydraulic characteristics of overland flow under varying flow discharges, slope gradients and gravel coverage Degrees [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9:e19781.
- [24] 朱慧鑫, 胡晓静, 程金花, 等. 草被覆盖下坡面流土壤侵蚀水动力学特征[J]. *东北农业大学学报*, 2018, 49(7):48-57.
- [25] 杨坪坪, 李勇, 宋涛, 等. 典型喀斯特区侵蚀性降雨特征及坡面生物措施水土流失防控效应[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(1):53-62.

(上接第 9 页)

- [59] Cade M B J, Berch S M, Preston C M, et al. Phosphorus forms and related soil chemistry of Podzolic soils on northern Vancouver Island. I. A comparison of two forest types[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30:1714-1725.
- [60] Romany J. Effects of slash burning on soil phosphorus fractions and sorption and desorption of phosphorus[J]. *Forest Ecology and Management*, 1994, 65(2/3):89-103.
- [61] 谷会岩, 金靖博, 陈祥伟, 等. 不同火烧强度林火对大兴安岭北坡兴安落叶松林土壤化学性质的长期影响[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(7):1114-1121.
- [62] 耿玉清, 周荣伍, 李涛, 等. 北京西山地区林火对土壤性质的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(5):66-70.
- [63] 杨玉盛, 俞新妥, 何智英, 等. II 炼山初期土壤肥力变化初步研究[J]. *福建林学院学报*, 1989, 9(3):248-255.
- [64] Durgin P B, Vogelsang P J. Dispersion of kaolinite by water extracts of Douglas-Fir ash[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1984, 64(3):439-443.
- [65] Clark R L. Pollen as a chronometer and sediment tracer, Burrinjuck Reservoir, Australia[J]. *Hydrobiologia*, 1986, 143:63-69.
- [66] Nosrati K, Govers G, Ahmadi H, et al. An exploratory study on the use of enzyme activities as sediment tracers: Biochemical fingerprints? [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2011, 26(2):136-151.
- [67] Reiffarth D G, Petticrew E L, Owens P N, et al. Sources of variability in fatty acid (FA) biomarkers in the application of compound-specific stable isotopes (CSSIs) to soil and sediment fingerprinting and tracing: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565:8-27.
- [68] 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.
- [69] Fernández I, Cabaneiro A, Carballas T. Organic matter changes immediately after a wildfire in an atlantic forest soil and comparison with laboratory soil heating[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(1):1-11.