DOI: 10.13758/j.cnki.tr.202507200284 CSTR: 32214.14.tr202507200284
侯栋栋, 黎永康, 王移, 等. 西南干旱河谷林火迹地土壤渗透性能的动态变化研究—— 基于三年原位监测. 土壤, 2026, 58(4): 950–960.

西南干旱河谷林火迹地土壤渗透性能的动态变化研究——基于三年原位监测①

侯栋栋[1]，黎永康[1]，王 移[1,2,4*]，曹龙熹[3]，覃晓松[1]，王雨凡[1]，任 平[1]

(1 四川师范大学地理与资源科学学院，成都 610101；2 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室，成都 610066；3 成都天府永兴实验室，成都 610213；4 四川高校农田生态服务能力建设工程中心，成都 610068)

摘 要：为探究西南干旱河谷林火迹地土壤入渗性能的动态变化及影响因素，选取典型林火迹地与未经火灾干扰的林地(CF)作为研究对象，于灾后的半年(0.5YAF)、1 年(1YAF)、2 年(2YAF)、3 年(3YAF)连续原位测定其水分入渗能力。结果表明：对照林地土壤非饱和导水率为 3.01 cm/d，不同恢复年限林火迹地土壤非饱和导水率表现为：1YAF (4.19 cm/d) > 3YAF (2.83 cm/d) > 2YAF (2.67 cm/d) > 0.5YAF (2.28 cm/d)；累积入渗过程可以用二次多项式拟合，Philip 模型对其模拟效果最优(R^2 平均值为 0.78)。土壤非饱和导水率与根重密度(r=0.553**)和地面生物量(r=0.454**)呈极显著正相关，与 >2 mm 水稳性团聚体含量(r=0.397*)显著正相关，与降雨量(r= –0.600**)、残留灰烬厚度(r= –0.494**)和容重(r= –0.465**)呈极显著负相关。地面生物量和根重密度等表征火灾后植被恢复的指标与环境因子和土壤属性关系密切，且对土壤入渗性能的影响最显著，总效应为 0.789。本研究可为干旱河谷地区林火迹地土壤保持与生态风险评估提供科学依据。

关键词：林火扰动；自然恢复；土壤渗透性能；动态变化；干旱河谷

中图分类号：S715.3 **文献标志码：**A

Study on Dynamic Change of Soil Permeability in Forest Fire-burned Land in Southwest Arid Valley：Based on Three-years *in-situ* Monitoring

HOU Dongdong[1], LI Yongkang[1], WANG Yi[1,2,4*], CAO Longxi[3], QIN Xiaosong[1], WANG Yufan[1], REN Ping[1]

(1 *The Faculty Geography Resource Sciences*, *Sichuan Normal University*, *Chengdu* 610101, *China*; 2 *Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest for Ministry of Education*, *Chengdu* 610066, *China*; 3 *Tianfu Yongxing Laboratory*, *Chengdu* 610213, *China*; 4 *Engineering Research Center for the Development of Farmland Ecosystem Service Functions*, *Chengdu* 610068, *China*)

Abstract: To explore the trend of dynamic changes in soil infiltration capacity and the influencing factors during the natural recovery process of wildfire-damaged land in southwestern arid valleys, soil water infiltration capacity was continuously measured *in situ* at half a year (0.5YAF), one year (1YAF), two years (2YAF) and three years (3YAF) after the fire, and at forest land not disturbed by fire (CF). The results showed that soil unsaturated hydraulic conductivity (UHC) followed the order: 1YAF (4.19 cm/d)>CF (3.01 cm/d)>3YAF (2.83 cm/d)>2YAF (2.67 cm/d)>0.5YAF (2.28 cm/d). The infiltration process could be fitted by a quadratic polynomial, and the Philip model had the best simulation effect (the average R^2=0.78). UHC was significant positively correlated with root weight density (r=0.553**), aboveground biomass (r=0.454**) and >2 mm water-stable aggregate content (r=0.397*), and negatively correlated with rainfall(r= –0.600**), ash thickness(r= –0.494**), and bulk density (r= –0.465**). The trend of vegetation restoration after fire was closely related to environmental factors and soil properties, and vegetation had the most significant influence on water conductivity, with a total effect of 0.789. This study can provide a scientific basis for assessing soil erosion and ecological risks in areas affected by forest fires.

Key words: Forest fire disturbance; Natural restoration; Soil infiltration performance; Dynamic changes; Arid valley

---

①基金项目：西南土地资源评价与监测教育部重点实验室面上基金项目(TDSYS202310)、四川省科技计划项目(2023NSFSC1979)和四川省自然科学基金面上项目(2024NSFSC0105)资助。

* 通信作者(wang1984yi@126.com)

作者简介：侯栋栋(1999—)，女，安徽宿州人，硕士研究生，主要从事土壤侵蚀和土壤质量研究。E-mail：hdd199952@163.com

林火扰动特别是重度火灾会破坏地表植被和土壤属性，是森林结构和功能变化的主要驱动因素[1]。火灾后，改变的土壤理化性质与植被状况再叠加过火区域独特的气候特征会使得土壤的入渗性能发生变化，甚至导致林火迹地山洪和泥石流等地质灾害的发生[2]。因此，厘清林火迹地在其自然恢复过程中土壤入渗性能的动态变化特征有利于明确森林火灾后生态环境风险的演变趋势，从而辅助灾后土壤保持与生态恢复。干旱河谷分布在西南横断山的高山峡谷区[3]，在高空西风环流、印度洋和太平洋季风环流的影响下，形成独特的干湿分明的气候特征，大部分的降雨主要分布在每年的夏季，冬春两季降雨稀少，且该区域日照长、蒸发量大，使得空气干燥[4]。此外，该地区森林主要是云南松为主的亚热带偏干性常绿阔叶林，林间植被类型丰富，地面枯枝落叶较多，导致该区域近年来火灾频发。据统计，2019—2024 年间该区域就发生 5 次重大森林火灾，近 200 次较大和一般规模森林火灾[5]，给当地生态环境和人民生命财产安全带来极大安全隐患。已有学者就该区域火灾发生的驱动因素进行分析，认为该地火灾发生主要与区域的独特气候、典型植被和特殊地形密切相关[6-7]，也对灾后植被演替、土壤属性[8]以及土壤质量[9]变化进行了相应研究，发现林火扰动，特别是重度火灾在短时间内破坏植被与土壤孔隙结构，土壤属性的急剧变化将导致水分入渗性能发生突变[10]，但是对于林火迹地土壤水分入渗性能在其自然恢复过程中的动态变化趋势及相关影响因素的研究较少。阐明林火迹地自然恢复过程中水分入渗性能的动态演变规律，对准确预测火灾后土壤侵蚀风险至关重要。然而，受限于耗时长、成本高等因素，现有关于林火迹地入渗性能的研究多集中于短期观测[11]，或采用空间替代时间的方法进行间接推断，缺乏系统的原位定点长期试验数据来揭示火灾后入渗能力的完整演变过程[12]。

土壤水分入渗是陆地生态系统中水文循环中一个复杂的动态过程，主要指地表水通过土壤表面进入土壤的过程，其性能与土壤水分再分配、养分运移等过程密切相关[13]，是衡量土壤水土保持和涵养水源能力的重要指标之一[14]。有研究表明，评估土壤饱和导水率是评价水分入渗性能的主要参数，但在野外原位试验中，大多以非饱和入渗为主，因此非饱和导水率更能直接反映土壤水分入渗性能[15]。已有学者使用单环法、双环法、人工模拟降雨法、微型圆盘入渗仪(Mini-disk infiltrometer)等方法对不同研究区域、不同土壤类型以及不同土地利用类型的入渗性能展开了相关研究[16-19]。结果表明，水分入渗不但受土地利用类型、植被覆盖度、植物根系等外在因素影响[20-21]，也与土壤质地、有机质、容重、孔隙度和团聚体的稳定性等内在因素密切相关[22-23]。林火迹地自然恢复过程中，地面残留灰烬逐渐减小，地表植被和地下根系均随植被重建发生改变，相应的土壤理化性质也会发生改变，继而导致土壤入渗性能的动态变化。因此，本研究选择凉山干旱河谷地区冕宁县 2021 年‘4·20’火灾后的林火迹地为研究对象，使用微型圆盘入渗仪测定其在自然恢复过程中的非饱和导水率，以表征其入渗性能的动态变化，并在此基础上进一步分析影响其入渗性能的主要因素，以期为干旱河谷地区林火迹地的水土流失和生态风险评估提供科学依据。

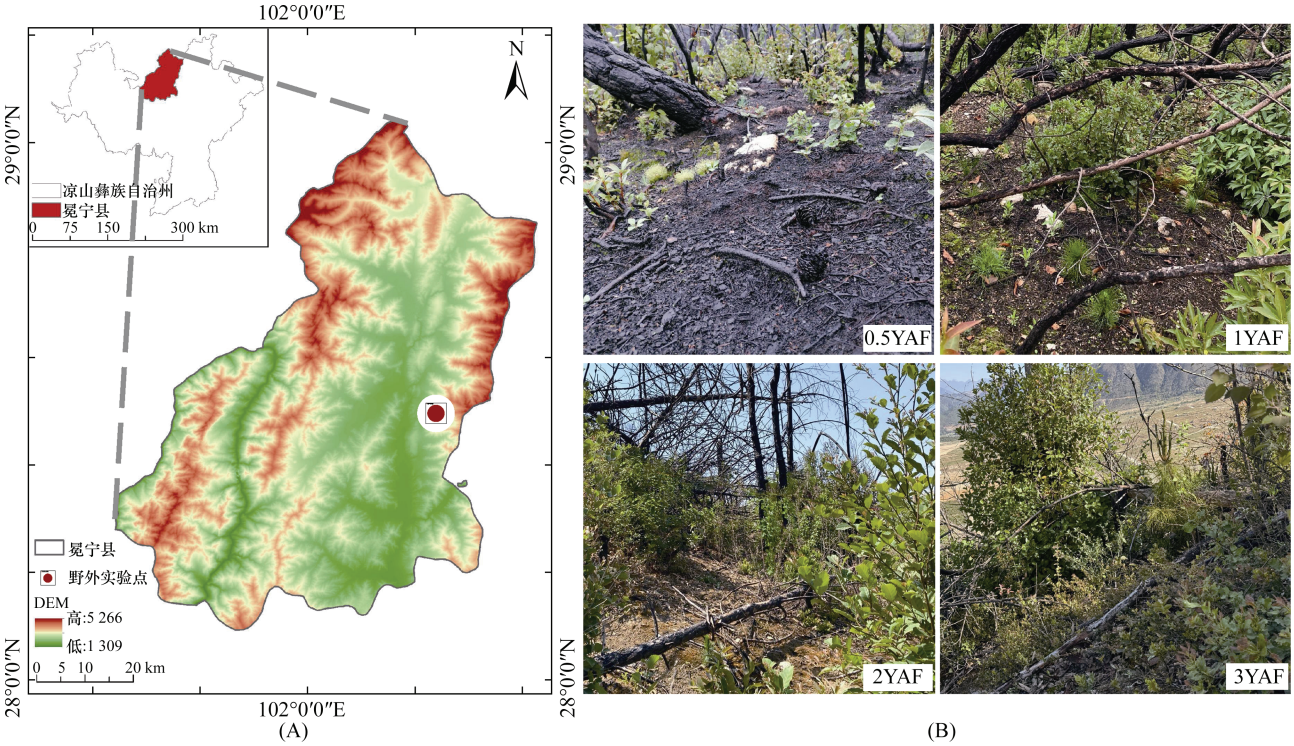
1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区地处凉山干旱河谷地区，具体位于四川省凉山彝族自治州冕宁县(图 1A)，海拔高度为 1 990~3 800 m，属于低纬度高海拔地区，多为山地地形，山坡陡峭。依据中国土壤分类系统，该地区土壤类型主要为山地黄棕壤[24]。植被以云南松林为主，林间伴生华山松、木荷、杨树等乔木，灌木层包括小叶杜鹃、高山栎、密油枝等，还含有火绒草、苔草、蕨类为主的草本植物[25]，林下常年积累大量的松针和其他枯枝落叶等易燃载荷物[26]。该地区为典型的亚热带季风气候，年均降雨量少且 80% 主要集中于雨季(5—10 月)，仅有少量降雨分布在旱季(11 月至次年 4 月)，全年日照时数长、蒸发量大[25]。此外，冬春两季空气干燥再加上高山峡谷的特殊地形导致焚风效应显著，在此期间极易引发森林火灾。

1.2　样地设置

本研究区于 2021 年 4 月 20 日发生森林火灾。此次火灾持续 6 日才得以完全扑灭，过火面积约 40 hm^2[25]。地表植被完全烧毁，地面残留大量灰烬及树桩，树干表面无绿叶覆盖且因高温呈现明显碳化特征。根据火灾对森林生态系统的破坏程度，可将火灾强度划分为 3 个等级：轻度、中度和重度火烧[27]。本次火灾可判定为重度火灾[28]。通过实际踏勘，在林火迹地中心位置选择了约 400 m(长)× 300 m(宽)坡面作为研究对象，并选择与其直线距离约 1.5 km，林分结构与其相似且未经火干扰的林地为对照样地(CF)。对照样地的海拔高度、坡度和坡向与火烧迹地基本一致。在林火迹地和对照样地的上、中、下 3 个坡位各选择面积约



(该图基于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改)

图 1　研究区位置概况(A)和不同恢复年限林火迹地(B)

Fig. 1　Geographical location and DEM of research area (A) and forest fire areas in different restoration years (B)

为 20 m × 20 m 的样方，进行标记以便后续固定监测和采样，每个坡位间隔约 80 m。考虑到林火迹地的可达性，首次采样于火灾后的半年(0.5YAF，即 2021 年 10 月)，此后在其自然恢复的 1 年、2 年和 3 年(即 2022 年 4 月、2023 年 4 月和 2024 年 4 月，分别标记为 1YAF、2YAF、3YAF)连续进行原位试验、样地调查和样品采集(图 1B)。在研究期间，还通过哥白尼气候变化服务中心数据库(https://cds.climate.copernicus.eu)下载了研究区的降雨量和蒸发量等相关气象数据(图 2)。

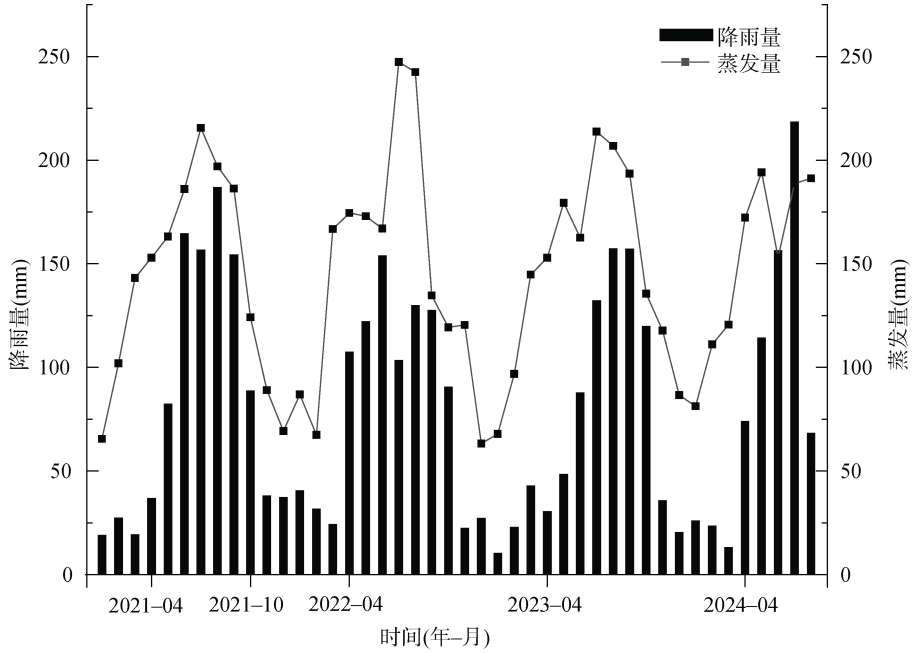


图 2　不同恢复年限林火迹地的降雨量及蒸发量

Fig. 2　Rainfalls and evaporations in forest fire areas with different restoration years

1.3　土壤水分入渗试验

使用美国 METER 公司生产的微型圆盘入渗仪对不同恢复年限林火迹地土壤水分入渗性能进行原位测定(图 3)。微型圆盘入渗仪由上下两个腔室组成，上腔室为气泡室，通过保持恒定的水头来控制虹吸程度，下腔室为储水室，以虹吸管控制的速度使水分渗透到土壤中[29]。试验前先去除地表的枯枝落叶，然后将入渗仪水平放置于地表，设置入渗仪上端的负压为 2 cm，并读取初始刻度，此后每 3 min 读取一次水位，直至入渗速率趋于平稳，试验总时长为 30 min 左右。在不同恢复年限林火迹地的上、中、下 3 个坡位各进行 15 次重复。另外，首次试验在对照样地的上、中、下 3 个坡位也分别进行了 15 次重复，共计 225 次原位入渗试验。

通过公式(1)计算出土壤累积入渗量。

$$I = C_1\sqrt{t} + C_2 t \tag{1}$$

式中：I 为累积入渗量(cm)；t 为时间(min)；C_1、C_2 为常数。最后将土壤累积入渗量数据代入公式(2)计算土壤非饱和导水率。

$$\mathrm{Ku} = \frac{C_3}{A} \tag{2}$$

式中：Ku 为土壤非饱和导水率(cm/d)；C_3 为累积入渗量和时间平方根的曲线斜率；A 是与土壤质地有关的参数[15]。

在原位入渗试验的同时段，于试验样地附近的上、中、下 3 个坡位按“S”形各设置 3 个采样点采集 0~10 cm 的表层土样，研究期间共获得 45 个土壤样品(林火迹地 36 个，对照样地 9 个)。参考《土壤农化分析》[30]测定土壤团聚体平均重量直径(MWD)、>2 mm 水稳性团聚体稳定性(WSA_2)、容重和有机质。此外，在每次入渗试验前，调查林火迹地的植被盖度、地面生物量和根重密度，并测定地面残留灰烬厚度的变化，相关结果见表 1。分析不同恢复年限林火迹地的土壤机械组成，其砂粒、粉粒、黏粒含量的变化范围分别为 75%~80%、14%~17% 和 6%~8%，依据美国制土壤质地分级标准，其土壤类型属于砂壤土[31]。



图 3　林火迹地不同恢复年限水分入渗试验

Fig. 3　Water infiltration experiments in forest fire areas with different restoration years

表 1　林火迹地不同恢复年限样地概况

Table 1　Overview of sample plots in forest fire areas with different restoration years

样地	MWD (mm)	WSA_2 (%)	容重 (g/cm^3)	有机质含量 (g/kg)	地面生物量 (t/hm^2)	植被盖度 (%)	灰烬厚度 (cm)	根重密度 (kg/m^3)
CF	3.30	46.48	1.31	25.52	155.08	92.68	–	2.98
0.5YAF	2.34	35.75	0.91	70.64	16.03	21.93	6.73	1.24
1YAF	2.56	39.35	0.95	52.41	28.53	28.93	2.58	1.26
2YAF	2.73	39.63	1.02	40.29	44.74	39.86	1.76	1.38
3YAF	2.90	38.84	0.99	26.32	57.25	56.87	0.69	1.79

1.4　土壤水分渗透性能计算与模拟

土壤水分入渗模型可以用来表征水分在土壤中的入渗过程[15]。为进一步探究林火迹地在其自然恢复过程中土壤水分入渗性能的动态变化特征，本研究选取了 Kostiakov、Philip 和 Horton 3 种经典的水分入渗模型对不同恢复年限林火迹地土壤水分入渗过

程进行拟合。

Kostiakov 模型：

$$f(t)=at^{-b} \tag{3}$$

式中：$f(t)$为入渗速率(cm/d)；t 为入渗时间(d)；a、b 为根据实测数据确定的拟合参数。

Philip 模型：

$$f(t)=0.5St^{-0.5}+A \tag{4}$$

式中：$f(t)$为入渗速率(cm/d)；t 为入渗时间(d)；A 为稳定入渗速率(cm/d)；S 为土壤吸水率(cm/d)。

Horton 模型：

$$f(t)=f_c+(f_o-f_c)e^{-kt} \tag{5}$$

式中：$f(t)$为入渗速率(cm/d)；t 为入渗时间(d)；f_o 和 f_c 分别为初渗率和稳渗率(cm/d)；k 为模型参数。

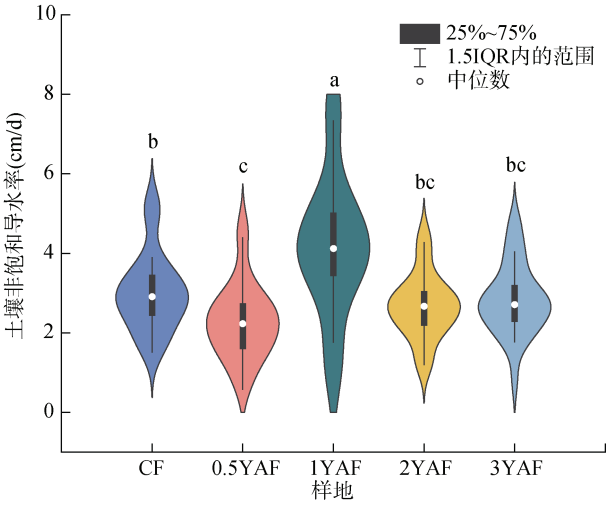
1.5 数据统计与分析

使用 Excel 2021 和 SPSS 26.0 软件进行数据处理与分析，采用 Origin 2022 软件进行绘图。首先分别使用 Shapiro-Wilk 和 Levene 方法对试验数据进行正态分布和方差齐性检验，在符合后续统计分析要求的基础上(P>0.05)，通过单因素方差分析(One-way ANOVA)并结合 LSD 法检验了林火迹地不同恢复年限土壤的非饱和导水率差异性；采用 Pearson 相关性分析探讨了土壤属性和植被因子与土壤非饱和导水率之间的关系；进一步采用主成分分析(PCA)对影响土壤非饱和导水率的多因素进行分类；最后使用 R 4.3.3 软件构建偏最小二乘路径模型(PLS-PM)，识别影响林火迹地土壤非饱和导水率变化的主要因素。考虑到重度火灾之后地表植被和腐殖质层基本消失，同时火灾强烈扰动导致的土壤属性剧变将影响植被恢复进程[32]，在构建模型路径结构时将土壤属性放在植被因子之前。

2 结果与分析

2.1 不同恢复年限林火迹地土壤导水性能动态变化特征

土壤非饱和导水率也称渗透系数，是土壤在非饱和状态下的导水能力[33]。本研究测定了不同恢复年限林火迹地土壤非饱和导水率(图 4)，发现林火迹地在火灾后 1 年的非饱和导水率显著高于对照林地和其他恢复年限(P<0.05)，火灾后 2 年和 3 年的非饱和导水率与对照林地差异不显著。其中，对照林地的非饱和导水率介于 1.51~5.22 cm/d，平均值为 3.01 cm/d。火灾后半年，非饱和导水率表现出明显的下降趋势，较对照林地显著降低 24%，说明林火的剧烈扰动会显著改变土壤的入渗性能。火灾后 1 年，土壤非饱和导水率显著提高，其平均值分别是火烧后半年和对照林地的 1.83 倍和 1.39 倍。火灾后 2 年，土壤非饱和导水率与火灾后 1 年相比显著下降，但与火灾后半年相比仍小幅上升。火灾后 3 年，土壤非饱和导水率逐渐趋近于对照林地。不同恢复年限土壤非饱和导水率排序为：1YAF>CF>3YAF>2YAF>0.5YAF。



(图中小写字母不同表示对照林地以及不同恢复年限林火迹地间土壤非饱和导水率差异显著(P<0.05))

图 4 不同恢复年限林火迹地土壤非饱和导水率

Fig. 4 Soil unsaturated hydraulic conductivities in forest fire areas with different restoration years

根据公式(1)，分析不同恢复年限林火迹地土壤累积入渗量与入渗时间平方根之间的关系(图 5)，其二次多项式的拟合效果均较好，R^2 均在 0.99 以上。

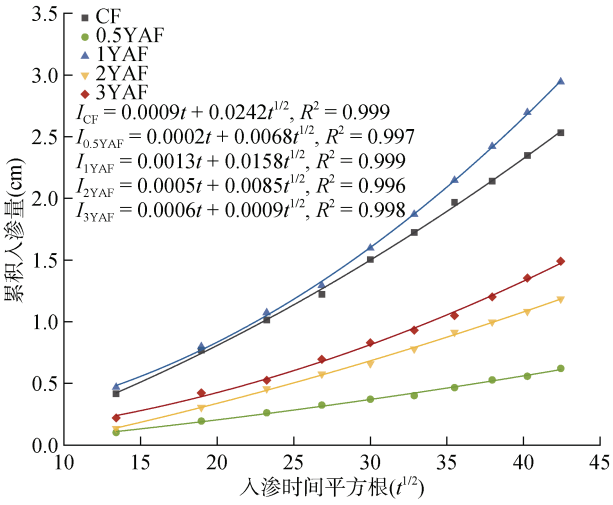


图 5 不同恢复年限林火迹地土壤累积入渗曲线及其拟合方程

Fig. 5 Cumulative infiltration curves and fitted equations in forest fire areas with different restoration years

不同恢复年限下土壤水分累积入渗量均随入渗时间的增加而增加。火灾后 1 年，累积入渗量随时间增加的趋势明显高于对照林地，其拟合方程的二次项系数较对照林地提高 44.44%。而火灾后半年，累积入渗量随时间增加的速度要显著低于对照林地，其拟合方程的系数较对照林地降低了 77.78%。随着恢复年限的延长，累积入渗量随入渗时间增加的趋势也在逐步提高，但在火灾后第 3 年累积入渗量随时间增加的趋势仍低于对照林地。

2.2　土壤水分入渗过程模拟

进一步使用 Kostiakov 模型、Philip 模型和 Horton 模型对不同恢复年限林火迹地土壤水分的入渗过程进行拟合(表 2)。不同模型的拟合精度不同，其中 Kostiakov 模型拟合的 R^2 介于 0.45~0.53，平均值为 0.50；Horton 模型拟合的 R^2 介于 0.57~0.73，平均值为 0.63；而 Philip 模型的拟合精度最高，为 0.64~0.86，平均值为 0.78。3 种模型对火烧迹地土壤入渗性能的拟合精度排序为：Philip 模型>Horton 模型>Kostiakov 模型。

表 2　不同恢复年限林火迹地土壤入渗过程模型参数

Table 2　Parameters of soil infiltration processes models in forest fire areas with different restoration years

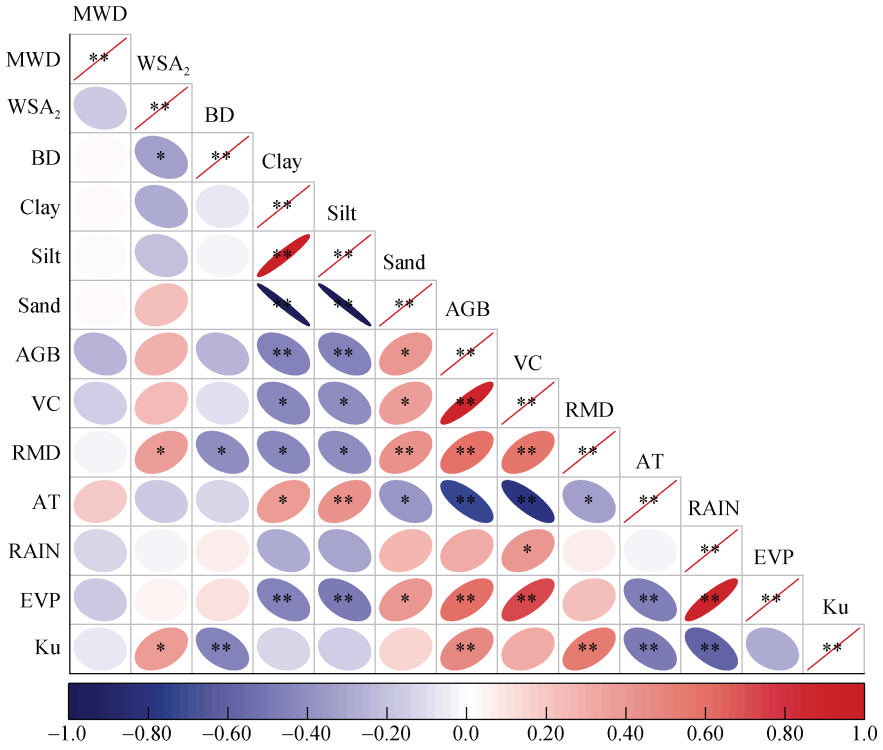
样地	Kostiakov 模型 $f(t)=at^{-b}$			Philip 模型 $f(t)=0.5St^{-0.5}+A$			Horton 模型 $f(t)=f_c+(f_0-f_c)\,e^{-kt}$		
	a	b	R^2	S	A	R^2	f_c	f_0	R^2
CF	16.75	0.29	0.52	3.65	50.30	0.76	66.40	121.76	0.57
0.5YAF	6.17	0.30	0.47	1.04	25.15	0.64	13.37	25.87	0.57
1YAF	35.90	0.15	0.53	5.04	65.39	0.86	60.36	120.72	0.64
2YAF	13.87	0.18	0.45	4.19	33.69	0.81	30.18	75.45	0.73
3YAF	14.81	0.25	0.52	2.68	27.67	0.81	40.24	87.51	0.64
平均值	17.5	0.23	0.50	3.32	40.44	0.78	42.11	86.26	0.63

Kostiakov 模型中，a 表示初始入渗速率，有研究认为它与土壤孔隙度、容重等因素相关[34]。不同恢复年限下，拟合 a 值的变化范围为 6.17~35.90，其中火烧后半年的 a 值最小，最大值 35.90 出现在火灾后 1 年。Kostiakov 模型中 b 值表示入渗速率随入渗时间衰减的速度，其值越大表明入渗速率减小的速度越快[35]。从表 2 可以看出，火灾后半年土壤入渗速率衰减速度最快。Philip 模型中的 S 和 A 分别表示土壤吸水率和稳定入渗速率，其中，S 越大表示土壤入渗性能越强。本研究火灾后不同恢复年限下 S 变化范围为 1.04~5.04，稳定入渗速率 A 的变化范围为 25.15~65.39，不同恢复年限间表现为 1YAF>CF>2YAF>3YAF>0.5YAF，这与实测土壤非饱和导水率结果较为接近。Horton 模型中，f_0 和 f_c 分别表示初始入渗速率和稳定入渗速率，变化范围分别为 25.87~121.76 和 13.37~66.40。拟合后 f_0 和 f_c 的最大值和最小值均分别出现在火灾后 1 年和火灾后半年，与实际测定结果有所不同。

2.3　土壤导水性能的主要影响因素

土壤团聚体、容重等理化性质，地表残留灰烬、植被恢复状况，以及降雨等气候因素，均会影响林火迹地的土壤入渗性能[35]。因此，本研究选取了林火迹地的土壤属性和地面生物量、植被盖度、根重密度、地面灰烬厚度、降雨量等 12 个指标与土壤非饱和导水率进行 Pearson 相关分析(图 6)。结果显示，随着 >2 mm 水稳性团聚体含量增加，土壤非饱和导水率显著提高(r=0.397，P<0.05)，即土壤团聚体结构越好，土壤的透水性也越好；不同恢复年限林火迹地土壤非饱和导水率与根重密度(r=0.553，P<0.01)以及地面生物量(r=0.454，P<0.01)呈极显著正相关，与降雨量(r= –0.600，P<0.01)、地面灰烬厚度(r= –0.494，P<0.01)和土壤容重(r= –0.465，P<0.01)呈极显著负相关。

进一步采用主成分分析法对上述土壤非饱和导水率的影响因子进行分类。由表 3 可知，前 4 个主成分累计解释了所收集数据中总方差的 82.67%。第一主成分方差贡献率达 40.50%，主要影响因子包括土壤黏粒、粉粒、砂粒和团聚体平均重量直径等，其中砂粒与土壤非饱和导水率呈正相关，团聚体平均重量直径、黏粒和粉粒与之呈负相关(图 7)。第二主成分的方差贡献率为 19.60%，地面灰烬厚度、植被盖度与地面生物量在其中具有较大载荷，其中，植被盖度和地面生物量与土壤非饱和导水率呈正相关，地面灰烬厚度则呈负相关。另外，第 3 和第 4 主成分方差贡献率分别为 13.23% 和 9.34%，载荷最大的指标分别为降雨量和容重，降雨量呈正相关，容重呈负相关。



(MWD：土壤团聚体平均重量直径；WSA_2：>2 mm 水稳性团聚体含量；BD：容重；Clay：黏粒含量；Silt：粉砂粒含量；Sand：砂粒含量；AGB：地面生物量；VC：植被盖度；RMD: 根重密度；AT：地面灰烬厚度；RAIN：降雨量；EVP 蒸发量；Ku：土壤非饱和导水率；下同。*、**分别表示相关性达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平)

图 6 土壤非饱和导水率与其影响因子之间的相关性

Fig. 6 Relationship between soil unsaturated hydraulic conductivity and influencing factors

表 3 PCA 分量的特征值和方差

Table 3 Eigenvalues and explained variances of principal components from PCA

主成分	初始特征值	方差百分比 (%)	累计方差百分比 (%)
主成分 1	5.26	40.50	40.50
主成分 2	2.54	19.60	60.10
主成分 3	1.72	13.23	73.33
主成分 4	1.21	9.34	82.67

为了进一步研究林火迹地土壤入渗性能的影响因素，利用偏最小二乘路径模型(PLS-PM)量化植被、土壤属性、环境等不同因子与林火迹地土壤非饱和导水率之间的关系(图 8)，模型的拟合优度为 0.596。根据模型可知，包括降雨量和蒸发量等指标的环境因子以极显著的负向作用直接影响土壤非饱和导水率(路径系数= –0.721，$P<0.01$)，并且显著影响火灾后植被因子的变化(路径系数=0.411，$P<0.01$)，对土壤属性的影响不显著。但土壤属性与火灾后植被的恢复重建关系密切(路径系数=0.474，$P<0.01$)。包括根重密度和地面生物量等指标的植被因子对土壤非饱和导水率的影响最为显著(路径系数=0.789，$P<0.01$)。深入探究各显变量对土壤非饱和导水率的直接效应、间接效应和总效应(图 8B)，进一步证实植被因子对土壤非饱和导水率的影响程度最大，其总效应为 0.789；土壤属性指标的总效应为 0.499；环境因子的直接效应为 –0.721，间接效应为 0.294，总效应表现为 –0.427。

3 讨论

3.1 不同恢复年限林火迹地土壤非饱和导水率的动态变化

本研究结果表明，凉山干旱河谷地区林火迹地自然恢复过程中，土壤非饱和导水率随恢复年限呈动态变化趋势(图 4)。火灾后半年，林火迹地土壤非饱和导水率较未受火灾干扰的林地显著下降，这与孙龙等[36]的研究结果一致，即林火的剧烈扰动会明显改变土壤的入渗性能，并且这种变化往往在短期内影响最为明显。灾后 1 年，林火迹地土壤非饱和导水率又出现显著提升，这可能是由于该时段地面植被覆盖度较低，且试验区在此阶段内经历了一个完整的干湿交替(图 2)，土壤表层裂隙增加，孔隙度升高，从而

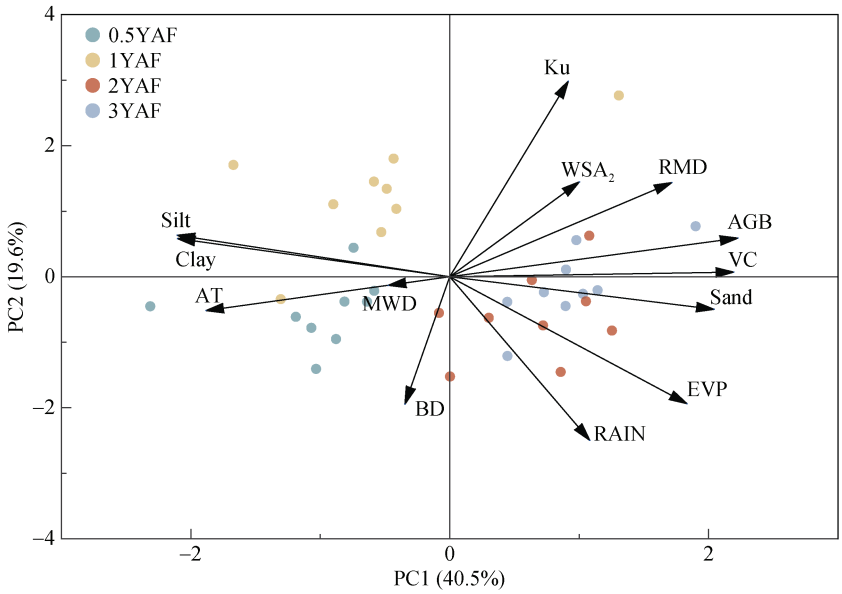
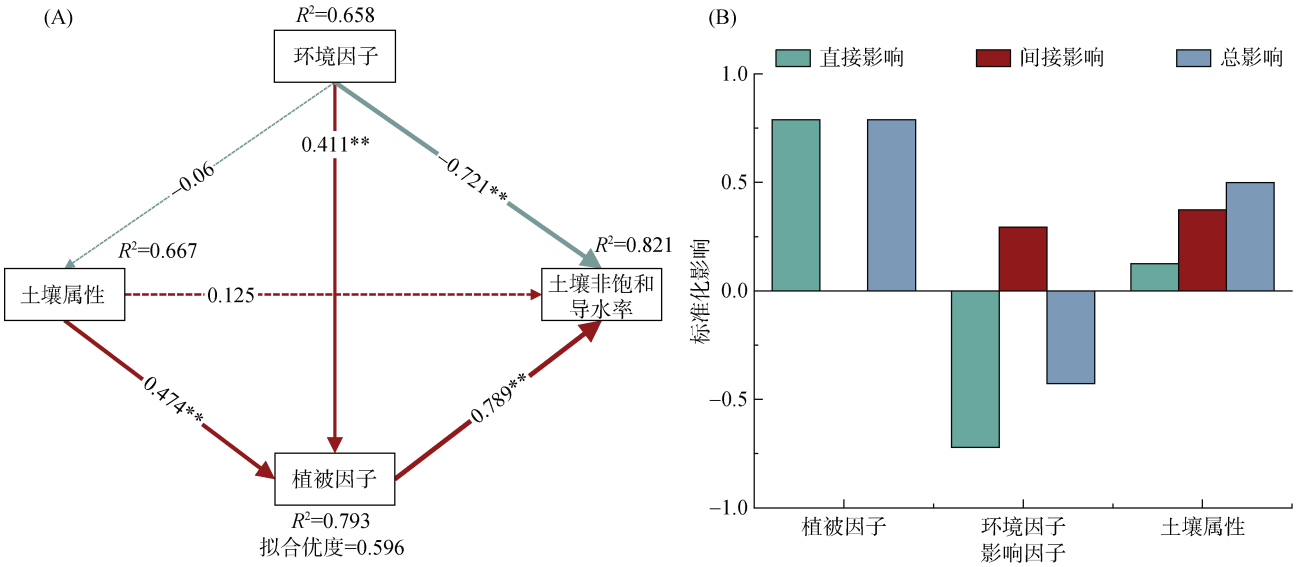


图 7　土壤非饱和导水率与其影响因子之间的主成分分析

Fig. 7　Principal component analysis of soil unsaturated hydraulic conductivity and influencing factors



(图 A 表示影响因子对土壤非饱和导水率的影响路径，其中环境因子包括地表灰烬厚度、降雨量和蒸发量等；土壤属性包括>2 mm 水稳性团聚体含量和土壤容重等；植被因子包括根重密度和地面生物量等。图中红色箭头表示正向作用，绿色箭头表示负向作用；实线表示影响显著，虚线表示影响不显著；线条粗细表示因果关系的强度，线条上数值表示直接路径系数，即标准化的回归系数(β)；**表示达 P<0.01 显著水平；R^2 表示各因子的解释能力)

图 8　基于最小二乘法的林火迹地不同影响因子对土壤非饱和导水率的影响路径

Fig. 8　Impact pathways of influencing factors on soil unsaturated hydraulic conductivity in forest fire areas revealed by least squares method

增加了水分入渗[37]。随着时间推移，林火迹地植被虽有恢复，但是其植被覆盖度仍然较低(表 1)，裸露土壤在雨滴长期打击的作用下容易形成物理结皮[34]，从而降低了土壤入渗速率，这使得火灾后 2 年的土壤非饱和导水率与火灾后 1 年相比显著降低。火灾后 3 年，土壤非饱和导水率逐渐恢复，这可能是因为植被重建逐渐起到主导作用，植物根系的延伸有利于增加土壤孔隙度，从而提高其入渗性能[38]。此外，未受到火灾干扰的林地土壤的非饱和导水率与阮静茹[39]对相近研究区云南松林地所测得的土壤非饱和导水率的结果基本一致。总的来说，本研究不同恢复年限林火迹地土壤非饱和导水性能表现为：1YAF>CF>3YAF>2YAF>0.5YAF，这与 Perkins 等[40]对美国加利福尼亚北部湾区火灾后使用微型圆盘入渗仪测得的土壤入渗性能的变化趋势基本一致。不同入渗模型对水分入渗过程的拟合效果也存在差异，本研究所

选用的 3 种入渗模型拟合精度最好的为 Philip 模型，效果较差的是 Kostiakov 模型，这可能与 Kostiakov 模型中参数 a 对土壤容重、孔隙等属性指标较为敏感有关[34]。在本研究监测时段内，容重、孔隙等指标差异显著，导致 Kostiakov 模型拟合效果较差；而 Philip 模型结构较为简单，可通过线性拟合获取符合林火迹地条件的参数，因而该模型的拟合效果最好。这与张灯煜等[41]对紫色土壤水分入渗拟合结果一致，但与赵银荧等[42]对凉山干热河谷典型坡耕地的土壤入渗性能的拟合结论不符。这可能是因为本研究对象为林火迹地，重度火烧会严重破坏地表植被，对土壤属性产生显著影响，在其自然恢复过程中也表现出与其他研究对象不一致的现象[34]。

3.2 不同恢复年限林火迹地土壤非饱和导水率的主要影响因素

林火迹地土壤入渗性能会受到土壤属性、孔隙结构、植被状况、气候条件等诸多因素的影响[43]。本研究中土壤非饱和导水率与降雨量、地表灰烬厚度、容重呈极显著负相关(P<0.01)，这可能是因为在重度火灾后残留大量灰烬层堆积在地表，雨季降雨的集中出现使得灰烬细颗粒在雨滴击溅和径流冲刷作用下进入到土壤内部，堵塞土壤孔隙[36]。此外，林火迹地在恢复初期，植被盖度相对较小，大量裸露的地表在雨滴长期击打作用下，导致土壤紧实，容重增大[44]，以上因素都不利于水分入渗。这与本研究中环境因子对林火迹地土壤导水率主要起到负向直接效应(路径系数=–0.721，P<0.01，图 8)的结果一致。同时，土壤非饱和导水率与地面生物量、根重密度呈极显著正相关(P<0.01)，与>2 mm 水稳性团聚体含量呈显著正相关(P<0.05)，这可能是因为林火迹地的植被状况随恢复年限延长而逐步改善(表 1)。植被盖度逐渐增加了地面生物量，有利于减弱雨滴对地表的直接打击，植物根系在土壤中生长穿插，降低了土壤紧实度，增加土壤孔隙度，优化土壤团聚结构，从而提高水分入渗性能[45-46]。这也印证了林火迹地植被的重构是影响土壤入渗性能最直接且最重要的显著因素，总效应为 0.789(图 8B)。但火灾后植被恢复指标(如地面生物量与根重密度)不仅显著受环境因子影响(路径系数=0.411，P<0.01)，也与土壤属性密切相关(路径系数=0.474，P<0.01)。

本研究所测定的土壤理化指标对非饱和导水率的总效应为 0.499，弱于火灾后植被因子的影响。然而，植被恢复受土壤属性显著影响。因此，基于林火迹地土壤理化特征来深入揭示土壤入渗性能的作用机理仍有待提升。其中，土壤大孔隙是水分入渗和运移的重要通道[47]，林地遭到火灾扰动后地面残留灰烬可能在雨滴打击作用下堵塞原有土壤孔隙；另一方面，由于地表植被烧毁，地下根系逐渐死亡腐烂可形成孔隙通道，同时植被恢复的新生细根也会显著影响土壤孔隙的形成。由此可见，土壤孔隙在火灾扰动后将受多种因素影响而发生复杂变化，因而探明火烧迹地土壤微观孔隙结构对于揭示土壤入渗性能的响应机理至关重要，后续研究中可结合 CT 扫描等技术探究土壤大孔隙特征的变化趋势，以期为干旱河谷林火迹地恢复过程中的土壤保持以及生态环境保护工作提供理论基础和科学依据。

4 结论

1) 林火迹地的土壤入渗性能随火灾后恢复年限呈动态变化趋势，其中，土壤非饱和导水率表现为：1YAF>CF>3YAF>2YAF>0.5YAF。采用二次多项式可以很好地拟合水分入渗过程，在 3 种常用入渗模型中，Philip 模型整体上能较好地预测林火迹地土壤入渗过程，而 Kostiakov 模型的拟合效果相对较差。

2) 林火迹地的土壤非饱和导水率与根重密度、地面生物量和>2 mm 水稳性团聚体含量呈显著正相关，与降雨量、残留的灰烬厚度和土壤容重呈显著负相关。降雨量等环境因子对土壤非饱和导水率总体表现为负效应，但可以显著促进林火迹地的植物生长，植被恢复也与土壤属性关系密切，而且植被因子对林火迹地土壤入渗性能影响最显著，总效应为 0.789。

研究结果有助于揭示西南干旱河谷地区林火迹地自然恢复过程中土壤入渗性能的动态变化，并为该区域林火迹地的生态修复提供科学依据。

参考文献：

[1] Moradizadeh H, Heydari M, Omidipour R, et al. Ecological effects of fire severity and time since fire on the diversity partitioning, composition and niche apportionment models of post-fire understory vegetation in semi-arid oak forests of Western Iran[J]. Ecological Engineering, 2020, 143: 105694.

[2] 雷鸣宇, 崔一飞, 倪钧钧, 等. 浅层滑坡型火后泥石流起动机理研究进展与案例分析[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 786–797.

[3] 中国科学院青藏高原综合考察队. 横断山区干旱河谷[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 1–211.

[4] 范建容, 杨超, 包维楷, 等. 西南地区干旱河谷分布范围及分区统计分析[J]. 山地学报, 2020, 38(2): 303–313.
[5] 梁月琴, 杨普淋, 王超. 凉山州森林防火现状及对策分析[J]. 森林防火, 2025, 43(2): 55–59.
[6] 白夜, 王博, 武英达, 等. 凉山州森林火灾形成的火环境研究[J]. 林业资源管理, 2020(5): 116–122, 130.
[7] 盛行军. 冕宁县森林火灾主要影响因素及对策[J]. 四川林业科技, 2021, 42(1): 1–5.
[8] Tian Y P, Wu Z C, Li M Z, et al. Forest fire spread monitoring and vegetation dynamics detection based on multi-source remote sensing images[J]. Remote Sensing, 2022, 14(18): 4431.
[9] Wang Y, Li Y K, Cao L X, et al. Temporal variation in soil macropore properties and hydraulic conductivity in croplands in the dry-hot valley region of Southwest China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2024, 24(4): 1576–1590.
[10] 张晓茹, 刘志强, 焦钒栩, 等. 雨滴击溅下表土孔隙变化及其对入渗能力的影响[J]. 土壤, 2024, 56(3): 601–609.
[11] Ramirez R A, Jang W, Kwon T H. Wildfire burn severity and post-wildfire time impact mechanical and hydraulic properties of forest soils[J]. Geoderma Regional, 2024, 39: e00856.
[12] Vieira D C S, Malvar M C, Martins M A S, et al. Key factors controlling the post-fire hydrological and erosive response at micro-plot scale in a recently burned Mediterranean forest[J]. Geomorphology, 2018, 319: 161–173.
[13] Sajjadi S A H, Mirzaei M, Nasab A F, et al. Effect of soil physical properties on infiltration rate[J]. Geomechanics and Engineering, 2016, 10(6): 727–736.
[14] 吕振豫, 刘姗姗, 秦天玲, 等. 土壤入渗研究进展及方向评述[J]. 中国农村水利水电, 2019(7): 1–5.
[15] 马关媛, 蒋小金, 刘佳庆, 等. 不同林型橡胶林土壤水分入渗特征及影响因子[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 57–65, 72.
[16] 朱列坤, 戴全厚, 李焱秋, 等. 喀斯特浅层裂隙土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 47–54.
[17] 亢晨波, 郭汉清, 张垚, 等. 复垦区不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(5): 71–80.
[18] 刘卓昕, 高鹏, 穆兴民, 等. 黄土区植被恢复对土壤水文物理性质的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 206–213.
[19] 马蒙蒙, 林青, 徐绍辉. 不同因素影响下层状土壤水分入渗特征及水力学参数估计[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 347–358.
[20] 张玉红, 孙铭隆, 刘彤. 林火对大兴安岭典型植被土壤理化性质的影响[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(6): 41–43, 107.
[21] 于振江. 雅江县恶古乡林火对火烧迹地土壤结构及水理性质影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
[22] 王自豪, 李金桓, 余宇首, 等. 西昌泸山火后植被恢复过程中土壤团聚体组成特征分析[J]. 林业科技通讯, 2023(4): 62–66.
[23] 朱美菲, 程金花. 永定河典型护岸植被土壤水分入渗特征及影响因素[J]. 土壤, 2023, 55(5): 1129–1137.
[24] 全国信息分类编码标准化技术委员会.中国土壤分类与代码: GB/T 17296—2009[S]. 中国标准出版社, 2009.
[25] 范康, 何涛, 张丽霞, 等. 冕宁县火烧迹地植被恢复案例[J]. 草学, 2021(6): 84–86.
[26] 杨光曦. 冕宁县森林防火现状与优化策略[J]. 乡村科技, 2021, 12(14): 91–92.
[27] 唐尧, 王立娟, 邓琮, 等. 高分遥感技术助力森林火灾应急扑救及隐患预判——以冕宁“4·20”森林火灾为例[J]. 遥感学报, 2021, 25(9): 2015–2026.
[28] 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): 116–126.
[29] Kargas G, Londra P, Anastasiou K, et al. A note on one- and three-dimensional infiltration analysis from a mini disc infiltrometer[J]. Water, 2018, 10(12): 1783.
[30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
[31] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227–241.
[32] 宫大鹏, 闫淳, 郭赞权. 基于遥感指数的草原火后植被恢复研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(6): 204–210.
[33] 钟超. 大兴安岭过火区谷地和坡地植被演替的差异研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2023.
[34] 王丽红, 辛颖, 赵雨森, 等. 大兴安岭重度火烧迹地植被恢复过程中土壤入渗特征研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 13–17, 22.
[35] 李松阳, 刘康妮, 余杭, 等. 云南省蒋家沟不同植被类型土壤物理性质对水分入渗特征的影响[J]. 山地学报, 2021, 39(6): 867–878.
[36] 孙龙, 赵俊, 胡海清. 中度火干扰对白桦落叶松混交林土壤理化性质的影响[J]. 林业科学, 2011, 47(2): 103–110.
[37] 李平, 王冬梅, 丁聪, 等. 黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1610–1620.
[38] 韩杰, 应凌霄, 李贵祥, 等. 云南松混交林火烧迹地更新早期草本层物种多样性的空间格局[J]. 植物生态学报, 2016, 40(3): 200–211.
[39] 阮静茹. 凉山干热河谷不同土地利用土壤导水性能与孔隙特征研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2024.
[40] Perkins J P, Diaz C, Corbett S C, et al. Multi-stage soil-hydraulic recovery and limited ravel accumulations following the 2017 Nuns and Tubbs wildfires in northern California [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2022, 127(6): e2022JF006591.
[41] 张灯煜, 冯梦蝶, 徐绮雯, 等. 紫色土区不同农林复合模式土壤入渗特征及影响因素[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 114–121.

[42] 赵银荧, 阮静茹, 何伟, 等. 凉山干热河谷典型坡耕地土壤入渗能力动态变化特征研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2023, 46(3): 398–405.
[43] 姚璐, 侯瑞萍, 王云琦, 等. 火烧对缙云山典型林分土壤水分物理特征的短期影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(3): 78–85.
[44] Gabriel J L, García-González I, Quemada M, et al. Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content[J]. Geoderma, 2021, 386: 114911.
[45] 李若萱, 范碧航, 林珂, 等. 黄土高塬沟壑区不同植被恢复方式对降雨入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4): 60–70.
[46] 张益, 林毅雁, 贾国栋, 等. 北京山区典型植被类型土壤饱和导水率及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 171–178.
[47] Kang W R, Zhang Y Y, Wu S X, et al. Spatial distribution of theoretical soil macropores on a continental scale and its eco-hydrological significance in China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2024, 24(2): 563–574.

(责任编辑：毛小芳)