

油松人工林火烧迹地早期土壤入渗动态

秦倩倩¹ 邱 聪¹ 郑大桢³ 刘艳红^{2*}

¹北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; ²北京林业大学森林资源生态系统过程北京市重点实验室, 北京 100083; ³北京林业大学林学院, 北京 100083

摘 要 土壤入渗是决定雨水或融水通过地表再分配给土壤的关键, 影响着森林生态水文过程。为研究北京油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林火烧迹地早期土壤入渗特征及其结构性控制因素, 在火灾发生(2019年3月)的当年对火烧和对照样地的0–20 cm土壤进行为期8个月(5–12月)的采集, 测定分析土壤结构和入渗对火烧干扰的响应及随土壤深度和时间的变化, 并通过路径分析探讨火烧和土壤结构性质对土壤入渗的作用机制。结果表明: 1)土壤各结构指标(除小团聚体外)随土壤深度和时间变化总体具有浅层>深层和6–8月>其他月份的趋势。火烧改变了土壤结构原有的垂直分布特征和季节动态规律, 火烧后2个月土壤>5、2–5和1–2 mm团聚体含量和容重显著增加, 其余指标均显著减少。随土层加深和时间推移, 火烧的作用减弱, 但与土壤深度和时间变化具有明显的交互效应。2)土壤入渗特征随土壤深度变化缓慢, 但随时间变化显著, 表现为雨水较多且出现强降雨事件的8月土壤初渗速率、稳渗速率、入渗总量和饱和导水率最大。火烧后0–5 cm和6–9月的土壤入渗过程与对照相比差异较大, 各月土壤入渗特征均下降, 出现峰值时间提前1–2个月。3)火烧显著影响土壤结构性质, 而土壤入渗性主要受土壤结构性质的直接影响。在未受火烧干扰的情况下, 土壤的入渗性受到土壤团聚体、容重和持水量的正效应以及孔隙度的负效应, 有机质含量和初始含水率对入渗性的直接影响均不显著, 但有机质含量可以通过影响孔隙度或持水量间接影响入渗性。火烧后土壤初始含水率是唯一显著且直接影响入渗性的因素, 且初始含水率越高, 土壤入渗越慢。综上所述, 火烧会改变或解耦火烧迹地早期土壤结构对土壤入渗及其内部的作用程度及途径而间接影响土壤入渗。

关键词 火烧干扰; 入渗过程; 土壤深度; 土壤结构; 时间变化

秦倩倩, 邱聪, 郑大桢, 刘艳红 (2021). 油松人工林火烧迹地早期土壤入渗动态. 植物生态学报, 45, 00-00. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0421

Soil infiltration dynamics in early period of a post-fire *Pinus tabulaeformis* plantation

QIN Qian-Qian¹, QIU Cong¹, ZHENG Da-Cheng³, and LIU Yan-Hong^{2*}

¹School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ²Beijing Key Laboratory of Forest Resources and Ecosystem Process, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; and ³College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract

Aims As a key factor for the redistribution of rainwater or meltwater, soil infiltration has a substantial effect on forest eco-hydrological processes. This study aims to investigate the characteristics of soil infiltration and its structural controlling factors in the early stage of a post-fire *Pinus tabulaeformis* plantation in Beijing.

Methods After a fire occurred in March of 2019, the 0–20 cm soils in both post-fire and control plots were monthly collected from May to December 2019. Soil structure and infiltration were determined to analyze their response to fire disturbance and explore how they changed with soil depth and time. Path analysis was employed to discuss the effects of fire and soil structural properties on infiltration.

Important findings The results showed that: 1) In general, the surface soil had higher values of structural indexes (except small aggregates) than subsoils, and values of structural indexes recorded from June to August were higher than those recorded in other months. The vertical distribution characteristics and seasonal dynamics of soil structure were changed by fire. The content of soil aggregates >5, 2–5 and 1–2 mm and bulk density increased significantly two months after fire, while other indicators decreased significantly after fire. The effect of fire was weakened as soil layers deepened and time went by. Also, we observed distinct interactions among fire, soil depth and time. 2) Soil infiltration characteristics changed slowly with soil depth, but changed significantly with time. In addition, soil initial infiltration rate, steady infiltration rate, cumulative-infiltration volume and saturated hydraulic

收稿日期Received: 2020-12-17 接受日期Accepted: 2021-04-13

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0504004)。Supported by the National Key R&D Program of China (2017YFC0504004).

* 通信作者Corresponding author (liuyh@bjfu.edu.cn)

conductivity were largest in August (with higher rainwater and heavy rainfall events). After the fire, soil infiltration in 0–5 cm and that from June to September considerably varied. Soil infiltration characteristics generally decreased, and the peak value in post-fire plots occurred one or two months ahead of that in control plots. 3) Fire significantly affected soil structural properties, while soil infiltration was mainly and directly affected by soil structural properties. Excluding the impact of fire disturbance, the infiltrability of soil had a significant positive correlation with soil aggregate, bulk density and water holding capacity, and a negative correlation with porosity. Although organic matter content and initial water content had no significant effect on infiltrability, organic matter content could indirectly affect infiltrability by affecting porosity or water holding capacity. However, only initial water content had a significant and direct effect on infiltrability at the early stage of a post-fire forest, and the higher the initial moisture content was, the slower the soil infiltration was. Taken together, fire could change or decouple the way soil structure affected soil infiltration and its internal part, and indirectly affected soil infiltration in the early period of post-fire.

Key words fire disturbance; infiltration process; soil depth; soil structure; time variation

Qin QQ, Qiu C, Zheng DC, Liu YH (2021). Soil infiltration dynamics in early period of a post-fire *Pinus tabulaeformis* plantation. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 00-00. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0421

土壤入渗是指雨水或融水由地表下渗形成土壤水的过程, 是森林生态系统水循环的重要环节, 能够有效地反映森林土壤水源涵养功能和抗侵蚀能力(Lundberg *et al.*, 2016)。通常, 土壤入渗越好, 径流量和侵蚀量越少(吕刚和吴祥云, 2008)。研究表明, 土壤入渗在很大程度上取决于地表条件(Robichaud, 2000)。火烧导致林冠和凋落物层截留作用减弱, 使得雨水与土壤表面直接接触, 土壤入渗速率波动较大(Doerr *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2020)。Gordillo-Rivero等(2014)通过实验得出, 重度火烧后土壤滴水穿透时间比未火烧长出230 s。王严等(2019)以四川省雅江县恶古乡火烧迹地为研究对象, 发现重度火烧迹地土壤饱和导水率较未火烧区域增加20%。这可能是由于火烧引起的高温会蒸发部分疏水性有机分子, 或驱动它们向温度较低的土壤空间移动, 并在颗粒表面凝结(Doerr *et al.*, 2000), 使地表及以下几厘米形成斥水层, 且土壤温度越高, 斥水层越厚(Certini, 2005), 土壤斥水性随之增强(Gordillo-Rivero *et al.*, 2014; Keesstra *et al.*, 2017; 刘发林等, 2019a), 阻止了水分入渗(Ebel *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2020), 尤其是在松树林(刘发林等, 2019b)。此外, 火烧也会改变土壤的结构性质, 如土壤团聚体(Jordán *et al.*, 2011)、含水量(Mikita-Barbato *et al.*, 2015)、孔隙状况(Woods & Balfour, 2008)、容重(曾素平等, 2020)和有机质(González-Pérez *et al.*, 2004)等, 这些均与土壤入渗密切相关(Leung *et al.*, 2015; Huang *et al.*, 2017; Mei *et al.*, 2018)。土壤温度升高、斥水层的产生和土壤结构的变化等都可能降低土壤水分

的有效性和增加土壤侵蚀的风险(Doerr *et al.*, 2009; Varela *et al.*, 2015; 刘发林等, 2019b), 且火烧后植被和凋落物的损失还有可能导致水土流失加剧(Onda *et al.*, 2008; Vieira *et al.*, 2015)。但火烧干扰具有时效性, 火烧后由于光照增加, 萌芽能力强和生长速度快的灌草迅速恢复(韩杰等, 2016)。植被的恢复可以改善土壤结构, 显著提高土壤的入渗能力和蓄水能力(Li & Shao, 2006; Jiao *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2016; He *et al.*, 2020)。因此, 掌握火烧迹地早期水分在土壤中的入渗情况, 对森林植被恢复管理和提升森林生态系统稳定性与生态服务功能具有重要的现实意义。

目前, 国内外学者多从土壤斥水性角度探究或通过地表径流表征土壤渗透速率, 对火烧后土壤入渗过程还缺乏足够的了解。火烧直接影响森林土壤入渗和土壤结构, 但其作用是否会随时间的推移发生变化以及如何变化尚不清楚。除土壤自身的季节变化外, 火烧引起的土壤结构的变化在火烧后不同时期, 特别是早期土壤入渗的变化中起到何种作用亟待进一步的研究。此外, 斥水性仅发生于表层土壤, 火烧后植被的蒸腾作用减少, 地下土壤水分储存增加, 因此, 连续定位监测火烧干扰后自然恢复森林表层土壤入渗的研究十分重要。鉴于此, 本研究以北京油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林重度火烧迹地为研究对象, 于2019年5–12月(即火灾发生后的2–9个月)连续按月采集火烧样地 and 对照样地表层(0–5、5–10、10–15和15–20 cm)土壤样品, 分析土壤结构和入渗对火烧干扰的响应及随土壤深度和时间

的变化,明确火烧和土壤结构对土壤入渗的直接与间接影响途径,并比较火烧和对照样地中土壤结构的作用,以期揭示重度火烧后自然恢复森林表层土壤入渗动态及其影响因素,为减少森林土壤退化和加快植被恢复提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

研究地位于北京市东北部密云和平谷的交界处(40.29° N, 116.98° E),与市中心相距82 km,是北京重要饮用水源基地和生态涵养区,周边与丫髻山旅游风景区和错河水系相连。该地属暖温带季风气候区,冬夏长,春秋短。春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽湿润,冬季寒冷干燥。四季分明,日照充足。年平均气温11.2 °C,年降水量为642 mm,风向以西北风为主,平均风向频率9%,多在11月至次年2月。土壤为山地棕壤,成土母质为花岗岩、片麻岩及其他非钙质母岩的风化物 and 均质黄土,土壤颗粒组成以粉砂为主,母质层以砂粒为多,砾质壤土,碎粒状结构,疏松多孔,多植物根。林木覆盖率高,有华北地区最大的一片人工油松林,属中龄林。乔木以油松为优势种,偶有槲树(*Quercus dentata*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、鸡桑(*Morus australis*)、山杨(*Populus davidiana*)、栎树(*Koelreuteria paniculata*)和臭椿(*Ailanthus altissima*),灌木以荆条(*Vitex negundo*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)、扁担杆(*Grewia biloba*)、多花胡枝子(*Lespedeza floribunda*)和小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*)为主,草本主要有狗尾草(*Setaria viridis*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、求米草(*Oplismenus undulatifolius*)、青绿薹草(*Carex breviculmis*)和东亚唐松草(*Thalictrum minus* var. *hypoleucum*)等。

该地于2019年3月30日发生一起山火,由于风势较大,导致火情由北京市密云区迅速向平谷区方向蔓延。受山火蔓延位置和环境等因素的影响,平谷区境内的山火由30日持续至31日,总过火面积约43 hm²。本研究在火被扑灭后的5月初立即进行实地踏勘,依据火烧强度划分标准(Keeley, 2009),在重度火烧迹地及附近立地条件相似的未经火烧干扰区域(对照)分别设置3块面积为30 m × 30 m的固定样地,即3次重复(平均海拔为158 m,平均坡度为15°,均为阳坡;平均树高和平均胸径分别为8.9 m和

14.5 cm)。火烧后自然恢复,研究期间,大多数松树没有发芽,而栎树仅从根部萌发出少量枝条,林下植被逐渐再生,无入侵植物。

1.2 样品采集与测定

于火烧干扰后早期(2019年5–12月)的每月末,在每个固定样地内以“S”形路线选取8–10个采样点,用土钻分层(0–5、5–10、10–15和15–20 cm)采集土壤样品,将各层土样混匀后用四分法取约1 kg的待测土样。同时用环刀分别取对应土层的土样,每层3个重复,采样期间未发生降水。室内用定水头法(李平等, 2020)测定土壤入渗特征(初渗速率、稳渗速率、稳渗时间、渗透总量和饱和导水率),观测时间不小于1 h,并用温度计记录水温。由于火烧后土壤结构被破坏,采用湿筛法振荡后筛内除留下一些已被水冲洗干净的砾石和砂粒外,其他部分几乎全部通过筛孔进入水中,因此采用干筛法测定土壤机械性团聚体(任清胜等, 2016);土壤有机质采用重铬酸钾氧化法分析(鲍士旦, 2000);土壤初始含水率、容重、持水性能(饱和持水量、毛管持水量和田间持水量)以及孔隙状况(毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度)均用环刀法测定(陈立新, 2005)。

1.3 数据计算与统计分析

土壤初渗速率是指入渗开始时较短时间内的入渗总量与入渗时间的比值,该值一般较大且易发生波动,在实验中也易存在读数误差以及系统误差,本实验取入渗开始前3 min的平均入渗率作为初渗速率;随时间延长,土壤中大小孔隙均被填满,水流速度逐渐减慢,单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透速率即为稳渗速率;渗透总量是一定时间内的累计入渗总量(阿茹·苏里坦等, 2019)。饱和导水率是单位水势梯度下、单位时间内通过单位面积的水量,反映了土壤入渗和导水性质,其计算公式(张一璇等, 2019)为:

$$K_s = \frac{10 \times Q \times l}{t \times S \times (h + l)} \quad (1)$$

式中, K_s 为土壤饱和导水率(mm·min⁻¹), Q 为渗出水量(mL), l 为土层厚度(cm), t 为渗透时间(min), S 为环刀横断面积(cm²), h 为水层厚度(cm)。为了便于比较不同温度下所测得的 K_s , 统一换算成10 °C时的饱和导水率,公式如下:

$$K_{10} = \frac{K_s}{0.7 + 0.03T} \quad (2)$$

式中, K_{10} 为温度为 10 °C 时的饱和导水率 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$), T 为测定时水的温度 (°C)。

采用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 计算和处理数据, 通过三因素方差分析和简单效应检验方法 (He *et al.*, 2020), 分析火烧干扰、土壤深度和时间变化及它们的交互作用对土壤结构性质及入渗特征的影响; 采用 R 4.0.3 中的 plspm 包在逐步去除膨胀因子大于 10 和因子载荷小于 0.7 的条件下进行路径分析 (Wang *et al.*, 2016), 以解释火烧和土壤结构 (团聚体、有机质、孔隙度、容重、初始含水率及持水量) 对土壤入渗 (初渗速率、稳渗速率、渗透总量及饱和导水率) 影响的直接与间接效应。全部绘图在 SigmaPlot 14.0 和 Adobe Photoshop CC 2019 上完成。

2 结果

2.1 火烧迹地早期不同深度土壤结构性质的变化

三因素方差分析表明, 火烧和对照样地 >5、2–5、1–2、0.5–1、0.25–0.5 和 <0.25 mm 团聚体、初始含水率、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度及有机质共 15 个表征土壤结构的指标均差异极显著 ($p < 0.01$), 且它们在不同土壤深度 (除总孔隙度外) 和不同月份间的变化也均达到显著 ($p < 0.05$) 甚至极显著

水平, 特别是火烧干扰、土壤深度和时间变化对土壤团聚体组成、初始含水率、容重和非毛管孔隙度具有明显的交互效应 (表 1)。

进一步对比分析 (图 1) 发现, 0–5、5–10、10–15 和 15–20 cm 土壤 >5、2–5 和 1–2 mm 团聚体含量在火烧后 2 个月 (2019 年 5 月) 与对照样地相比分别增加了 23.05%、22.07% 和 9.63%, 而 0.5–1、0.25–0.5 和 <0.25 mm 土壤团聚体则分别减少了 5.20%、6.52% 和 22.30%。其中, 对照样地 >5、1–2 和 0.5–1 mm 土壤团聚体含量随土壤深度增加而减少, 0.25–0.5 和 <0.25 mm 团聚体含量随土壤深度增加而增加, 而火烧样地各粒径团聚体含量变化与其相反。随时间变化 (5–12 月), 对照样地土壤 >5 mm 团聚体含量呈先增后减的单峰变化, 2–5、1–2、0.5–1 和 0.25–0.5 mm 均呈双峰变化。而火烧干扰后 >5 mm 团聚体含量高峰值出现的时期由 6 月推迟到 7 月, 特别地, 0–5 cm 土壤 >5 mm 团聚体含量随时间递减。2–5、1–2、0.5–1 和 0.25–0.5 mm 土壤团聚体含量相对对照而言波动较小。火烧和对照 <0.25 mm 土壤团聚体含量变化趋势基本相同, 最大值出现在 9 月, 最小值出现在 7 月。

此外, 0–5 cm 土壤初始含水率、饱和持水量、田间持水量、总孔隙度、非毛管孔隙度和有机质含量在火烧后 2 个月显著降低, 土壤容重增加 (图 2)。其中,

表 1 油松人工林土壤结构性质的三因素方差分析

Table 1 Three-way ANOVA analysis of soil structural properties in a *Pinus tabulaeformis* plantation

指标 Index		火烧干扰 Fire disturbance (<i>df</i> = 1)	土壤深度 Soil depth (<i>df</i> = 3)	时间 Time (<i>df</i> = 7)	火烧×深度 Fire × Depth (<i>df</i> = 3)	火烧×时间 Fire × Time (<i>df</i> = 7)	深度×时间 Depth × Time (<i>df</i> = 21)	火烧×深度×时间 Fire × Depth × Time (<i>df</i> = 21)
机械性团聚体 Mechanical aggregate	>5 mm	13.09***	2.76*	37.85***	3.85*	31.49***	8.26***	5.33***
	2–5 mm	22.73***	10.87***	168.02***	13.63***	26.08***	5.44***	3.04***
	1–2 mm	152.67***	4.10**	73.87***	55.90***	7.32***	4.75***	5.43***
	0.5–1 mm	250.59***	88.04***	248.94***	19.25***	81.65***	45.44***	36.07***
	0.25–0.5 mm	75.74***	12.68***	144.97***	11.12***	27.16***	7.55***	5.86***
	<0.25 mm	220.90***	5.56**	505.52***	98.28***	43.76***	14.44***	10.70***
初始含水率 Initial water content		7.04**	16.99***	107.52***	45.01***	136.38***	8.40***	12.91***
饱和持水量 Saturation moisture capacity		236.75***	6.13**	11.61***	5.71**	1.07	2.61**	2.59**
毛管持水量 Capillary moisture capacity		144.93***	7.43***	9.18***	1.55	1.29	1.89*	1.69
田间持水量 Field moisture capacity		147.69***	6.24**	37.18***	0.68	1.46	3.42***	1.53
容重 Bulk density		290.39***	4.49**	5.80***	5.45**	3.44**	2.47**	4.49***
总孔隙度 Total porosity		90.39***	2.03	18.35***	7.12***	3.56**	2.17*	0.93
毛管孔隙度 Capillary porosity		70.17***	6.13**	14.13***	2.79*	6.00***	2.51**	1.28
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity		33.90***	26.91***	39.63***	17.38***	10.96***	3.36***	3.88***
有机质含量 Organic matter content		196.99***	100.15***	3.48**	1.82	1.99	1.06	0.71

表中数据为方差分析的统计量 (F)。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$ 。

Data in the table are the statistics of ANOVA analysis (F). *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$.

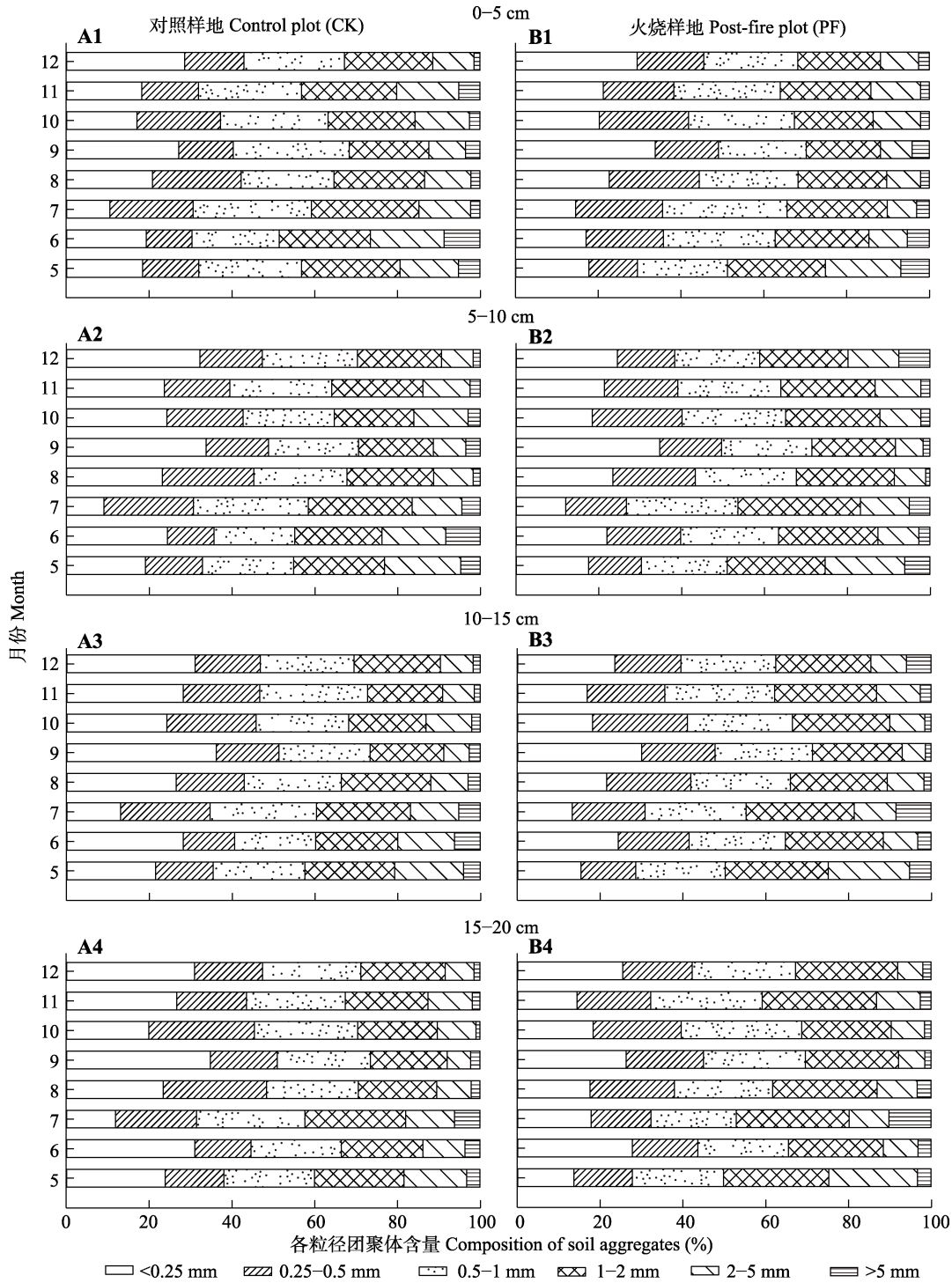


图1 油松人工林火烧迹地早期土壤团聚体组成。
Fig. 1 Composition of soil aggregates in the early period of a post-fire *Pinus tabulaeformis* plantation.

初始含水率和非毛管孔隙度降幅较大，分别为68.19%和80.72%，总孔隙度降幅最小，为13.02%，容重增幅达19.64%。对照样地0-5和5-10 cm土壤初始含水率、持水量、孔隙度和有机质含量等均较深层土壤高，而火烧样地不同深度土壤毛管持水量、田间持水量和总孔隙度等差异不大。对照样地土壤

各结构指标随时间变化趋势基本相同，表现为7-8月高于其余月份。而火烧干扰下土壤结构各指标的时间变化趋势均较对照有不同程度的减缓，相邻月份间差异不易达显著水平。

2.2 火烧迹地早期土壤入渗特征

如图3所示，火烧和对照样地不同月份不同深

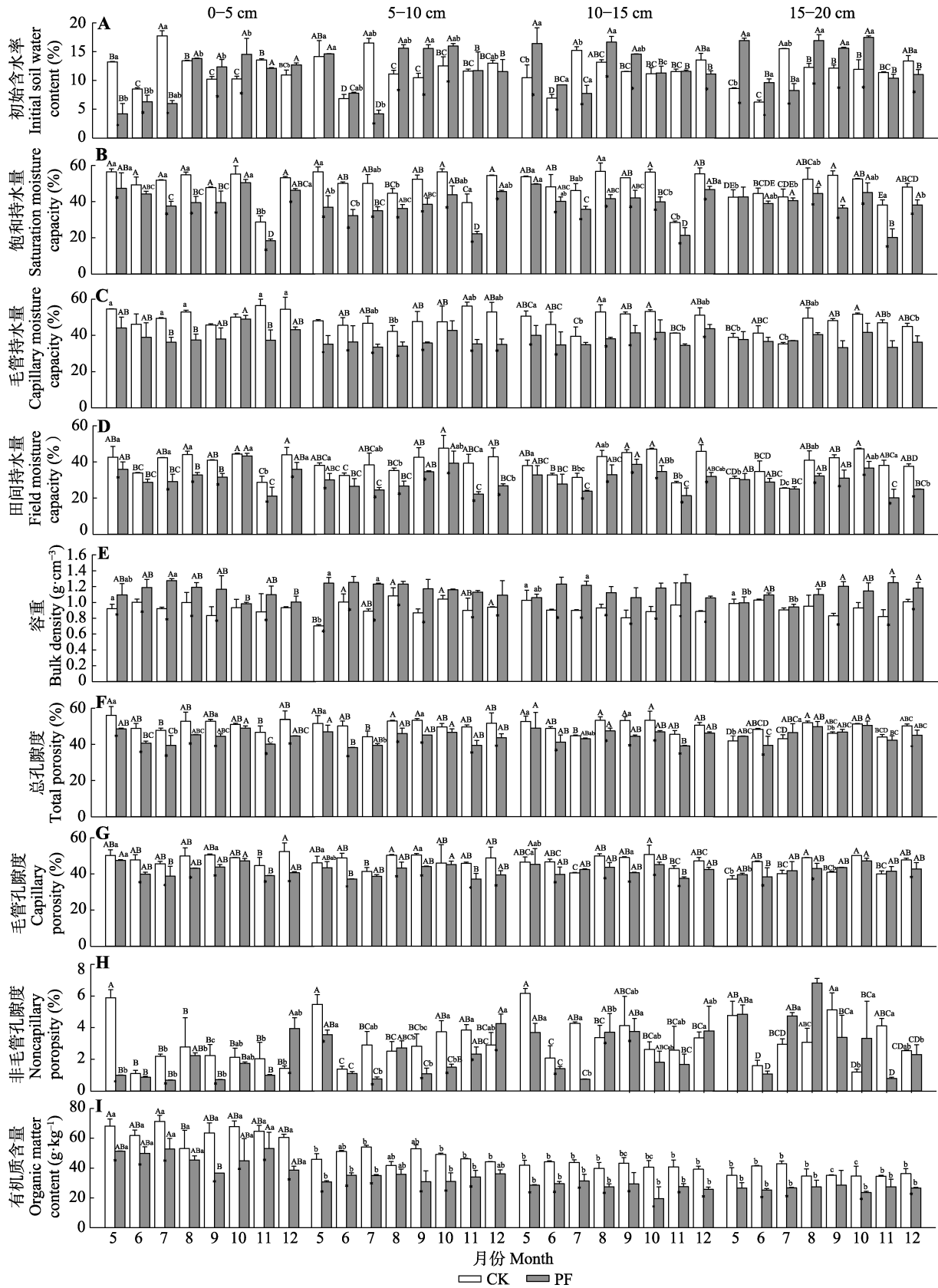


图2 油松人工林火烧迹地早期土壤结构性质(平均值±标准差)。CK, 对照样地; PF, 火烧样地。*表示火烧和对照差异显著($p < 0.05$)。不同大写字母表示不同月份间差异显著($p < 0.05$), 不同小写字母表示不同土壤深度差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 2 Soil structural properties in the early period of a post-fire *Pinus tabulaeformis* plantation (mean \pm SD). CK, control plot; PF, post-fire plot. * means significant difference between post-fire and control plots ($p < 0.05$). Different uppercase letters indicate significant differences among months ($p < 0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences among soil depths ($p < 0.05$).

度土壤入渗曲线均随入渗时间的延长趋于平缓。因此, 可将土壤入渗过程划分为瞬变、渐变和平稳3个阶段。整体而言, 入渗速率在0–3 min降幅较大, 在3–40 min降幅逐渐减小, 40–56 min以后趋于一个稳定值。

火烧和对照样地间以及不同土壤深度和时期土壤入渗曲线具体变化趋势既存在共性也存在差异, 如与对照相比, 火烧样地0–5 cm土壤和6–9月土壤入渗过程差异较大, 但部分火烧样地土壤入渗曲线与对照样地基本吻合; 同一月份, 未受火烧干扰的土壤入渗曲线初始和稳定时的速率在不同深度间基本一致; 同一土层, 不同月份间土壤入渗曲线不同, 表现为7和8月的初始入渗速率最大, 且瞬变阶段入渗速率减少得更快。结合三因素方差分析, 火烧干扰和土壤深度及三者的交互作用对土壤初渗速率、稳渗速率、入渗总量和饱和导水率的影响均未达显著水平(表2)。但土壤入渗特征随时间变化显著, 因此, 下文在整合0–5、5–10、10–15和15–20 cm各层

土壤入渗特征的基础上进一步分析火烧迹地早期土壤入渗动态。

与对照样地相比, 火烧样地各月份土壤初渗速率、稳渗速率、入渗总量和饱和导水率的平均值分别降低了12.24%、1.86%、5.58%和6.99%(表3)。但火烧样地和对照样地土壤初渗速率、入渗总量和饱和导水率的差异仅在8月达显著水平, 土壤稳渗速率在7和8月差异显著。虽然土壤入渗特征随时间变化显著, 但受火烧干扰影响, 对照样地和火烧样地变化趋势略有不同。对照样地土壤初渗速率、稳渗速率、入渗总量和饱和导水率均在8月达最大值, 分别为 $(7.34 \pm 4.20) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $(2.52 \pm 0.92) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $(173.66 \pm 70.10) \text{ mm}$ 和 $(3.81 \pm 1.56) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 显著高于其他月份, 且在11月最小, 分别为 $(2.17 \pm 1.39) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $(0.90 \pm 0.67) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $(59.81 \pm 41.45) \text{ mm}$ 和 $(1.32 \pm 0.87) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 但与5、9、10和12月差异均不显著。火烧样地土壤入渗特征达极值的月份略有不同, 且出现峰值的时间较

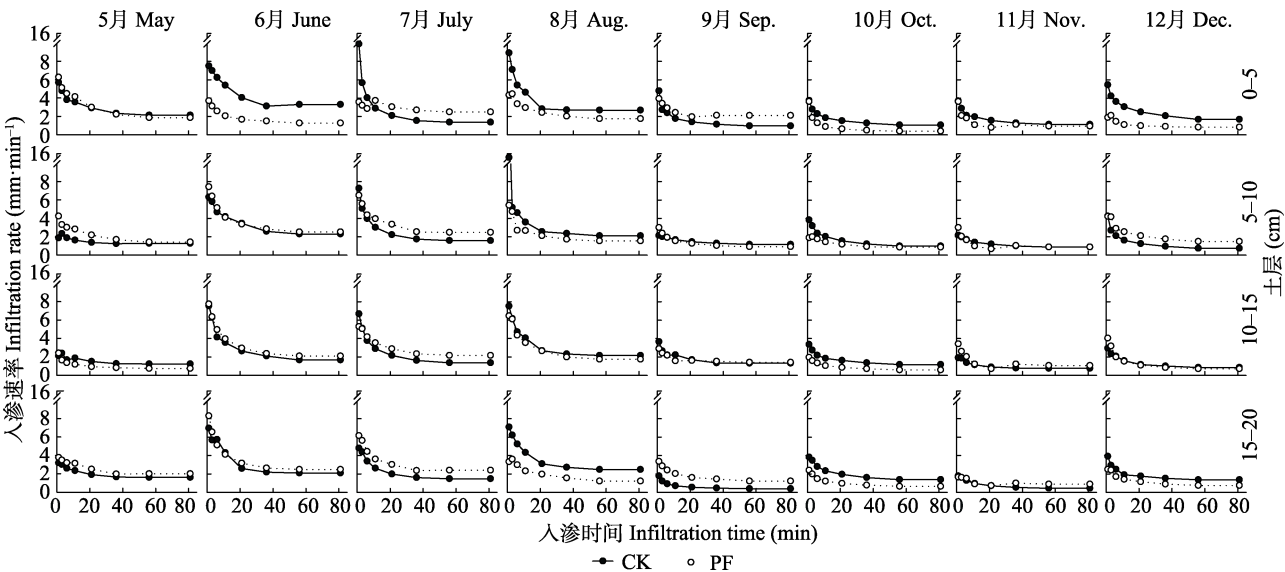


图3 油松人工林火烧迹地早期土壤入渗曲线。CK, 对照样地; PF, 火烧样地。
Fig. 3 Soil infiltration curve in the early period of a post-fire *Pinus tabulaeformis* plantation. CK, control plot; PF, post-fire plot.

表2 油松人工林土壤入渗特征的三因素方差分析
Table 2 Three-way ANOVA analysis of soil infiltration characteristics in a *Pinus tabulaeformis* plantation

指标 Index	火烧干扰 Fire disturbance (df=1)	土壤深度 Soil depth (df=3)	时间 Time (df=7)	火烧×深度 Fire×Depth (df=3)	火烧×时间 Fire×Time (df=7)	深度×时间 Depth×Time (df=21)	火烧×深度×时间 Fire×Depth×Time (df=21)
初渗速率 Initial infiltration rate (mm·min ⁻¹)	2.10	0.22	8.93***	0.75	1.05	0.49	0.38
稳渗速率 Steady infiltration rate (mm·min ⁻¹)	0.06	0.69	8.37***	0.25	2.70*	0.43	0.60
入渗总量 Cumulative-infiltration volume (mm)	0.28	0.62	8.93***	0.36	2.06	0.48	0.55
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity (mm·min ⁻¹)	0.51	0.38	9.31***	0.49	1.67	0.43	0.47

表中数据为方差分析的统计量(F)。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$ 。
Data in the table are the statistics of ANOVA analysis (F). *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$.

对照样地有所提前。除土壤初渗速率在6月达最大值外, 稳渗速率、入渗总量和饱和导水率均在7月最大, 但它们的最小值均出现在10月。

2.3 火烧和土壤结构性质对土壤入渗的作用

由表4可知, 火烧对土壤结构性质的直接路径系数(β)为0.633 ($R^2 = 0.40$), 土壤结构性质对土壤入渗性的直接路径系数为-0.187, 但火烧对土壤入渗性仅存在间接效应, 路径系数为-0.118, 说明火烧是通过影响土壤结构性质间接影响土壤入渗性。为了确定火烧迹地早期土壤入渗动态的主要结构性控制因素, 进一步比较了火烧样地 and 对照样地土壤结构性质对土壤入渗性的作用, 结果如图4所示。在对

照样地, 土壤入渗性主要受到土壤团聚体、容重和持水量的正效应以及孔隙度的负效应, 有机质含量和初始含水率对入渗性直接影响均不显著($p > 0.05$), 但有机质含量可以通过影响孔隙度($\beta = -0.023$ 8)或持水量($\beta = 0.305$)间接影响入渗性($R^2 = 0.43$)。其中, 团聚体组成是决定土壤入渗性的最重要因素($\beta = 0.396$), 在一定程度上, 土壤结构中2-5、1-2和<0.25 mm团聚体的占比越大, 土壤初渗速率、稳渗速率、入渗总量和饱和导水率(4个表征土壤入渗性的指标间呈显著正相关)越大。土壤非毛管孔隙度、持水量以及容重也是决定土壤入渗的关键因素(β 分别为-0.292、0.251和0.223), 容重、饱和持水量、

表3 油松人工林火烧迹地早期土壤入渗特征(平均值±标准差)
Table 3 Soil infiltration characteristics in the early period of a post-fire Pinus tabulaeformis plantation (mean ± SD)

样地 Plot	月份 Month	初渗速率 Initial infiltration rate (mm·min ⁻¹)	稳渗速率 Steady infiltration rate (mm·min ⁻¹)	入渗总量 Cumulative-infiltration volume (mm)	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity (mm·min ⁻¹)
对照样地(CK) Control plot	5	3.15 ± 1.36 ^{BC}	1.62 ± 0.71 ^{AB}	104.89 ± 45.94 ^{AB}	2.22 ± 0.98 ^B
	6	6.49 ± 3.44 ^A	2.50 ± 0.86 ^A	176.10 ± 73.71 ^A	3.89 ± 1.66 ^A
	7	5.75 ± 2.52 ^{AB}	1.63 ± 0.75 ^{AB}	119.54 ± 52.15 ^{AB}	2.73 ± 1.16 ^{AB}
	8	7.34 ± 4.20 ^A	2.52 ± 0.92 ^A	173.66 ± 70.10 ^A	3.81 ± 1.56 ^A
	9	2.46 ± 1.97 ^C	1.06 ± 0.89 ^B	70.06 ± 59.47 ^B	1.53 ± 1.26 ^B
	10	3.26 ± 1.66 ^{BC}	1.36 ± 0.65 ^B	88.79 ± 41.02 ^B	1.98 ± 0.91 ^B
	11	2.17 ± 1.39 ^C	0.90 ± 0.67 ^B	59.81 ± 41.45 ^B	1.32 ± 0.87 ^B
	12	3.41 ± 1.82 ^{BC}	1.29 ± 0.70 ^B	90.55 ± 50.80 ^B	1.93 ± 1.04 ^B
	平均值 Mean	4.25 ± 2.30	1.61 ± 0.77	110.43 ± 54.33	2.43 ± 1.18
火烧样地(PF) Post-fire plot	5	3.64 ± 2.66 ^{AB}	1.57 ± 1.02 ^{ABC}	112.34 ± 77.20 ^{AB}	2.35 ± 1.60 ^{ABC}
	6	6.00 ± 2.94 ^A	2.34 ± 0.83 ^A	156.78 ± 62.87 ^A	3.46 ± 1.40 ^A
	7	5.04 ± 2.37 ^{AB}	2.48 ± 1.12 ^{A*}	163.99 ± 69.79 ^A	3.50 ± 1.45 ^A
	8	4.77 ± 2.77 ^{AB*}	1.82 ± 0.99 ^{AB*}	122.48 ± 64.21 ^{AB*}	2.74 ± 1.48 ^{AB*}
	9	2.94 ± 1.40 ^{AB}	1.53 ± 0.78 ^{ABC}	94.37 ± 45.32 ^{AB}	1.99 ± 0.89 ^{ABC}
	10	2.06 ± 1.28 ^B	0.72 ± 0.42 ^C	49.63 ± 28.54 ^B	1.12 ± 0.64 ^C
	11	2.37 ± 1.22 ^B	1.10 ± 0.70 ^{BC}	61.29 ± 36.89 ^B	1.28 ± 0.75 ^{BC}
	12	3.03 ± 2.57 ^{AB}	1.10 ± 0.86 ^{BC}	73.27 ± 56.09 ^B	1.64 ± 1.30 ^{BC}
	平均值 Mean	3.73 ± 2.15	1.58 ± 0.84	104.27 ± 55.11	2.26 ± 1.19

同列不同大写字母表示各月份间差异显著($p < 0.05$), *表示火烧与对照间差异显著($p < 0.05$)。
Different uppercase letters in the same row indicate significant differences among months ($p < 0.05$), * means significant difference between post-fire and control plots ($p < 0.05$).

表4 火烧对油松人工林土壤入渗性的作用
Table 4 Effects of fire on soil infiltrability in a Pinus tabulaeformis plantation

变量 Variable	因子 Factor	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect	总效应 Total effect	p	决定系数 Determination coefficient (R^2)
土壤结构性质 Soil structural property	火烧干扰 Fire disturbance	0.633	—	0.633	<0.001	0.40
土壤入渗性 Soil infiltrability	火烧干扰 Fire disturbance	—	-0.118	-0.118	—	0.10
	土壤结构性质 Soil structural property	-0.187	—	-0.187	0.009	

表内数值为路径系数, 即标准化的回归系数(β)。
Data in the table are shown as path coefficients (i.e., standardized regression coefficients, β).

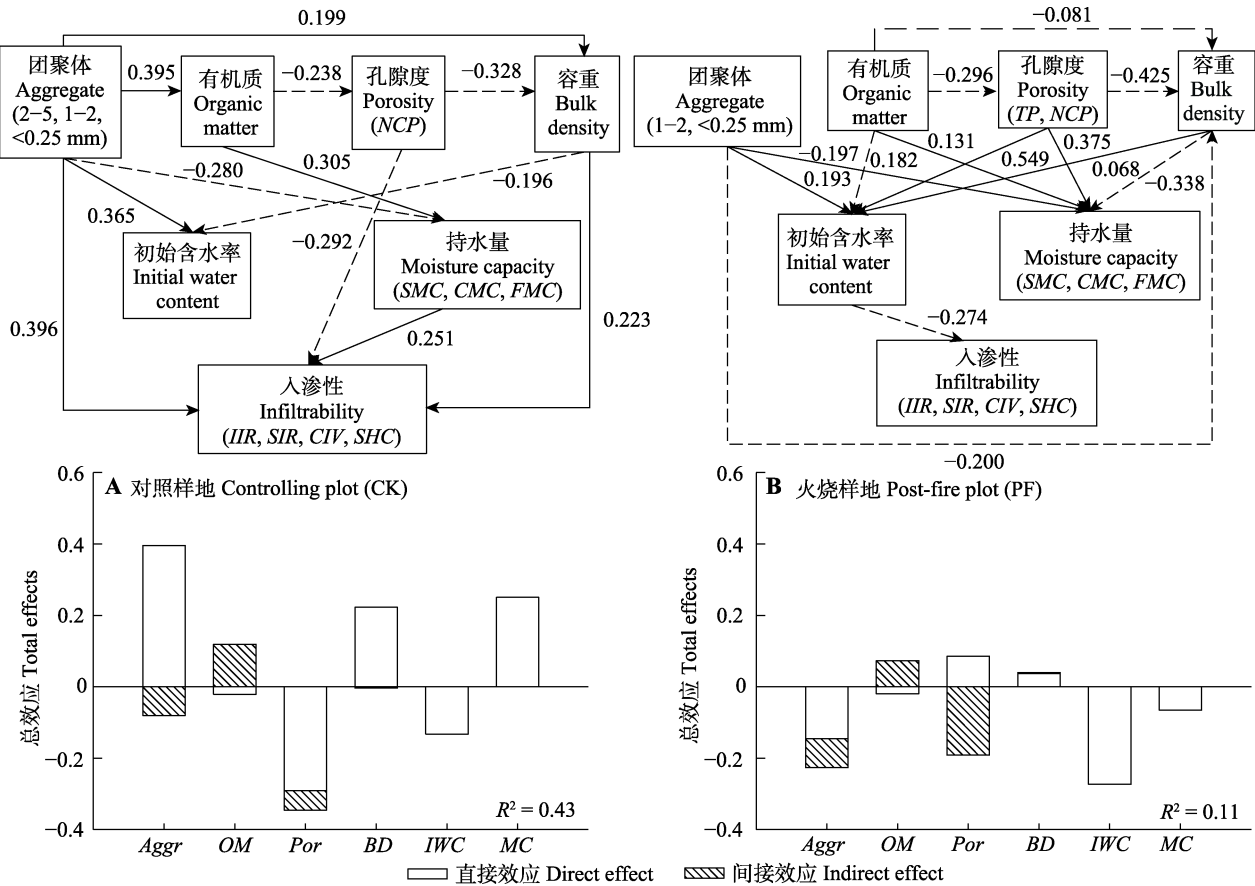


图4 油松人工林火烧迹地早期土壤结构性质对入渗性的作用。实线和虚线分别表示达到显著水平的正负作用($p < 0.05$), 未达显著水平的作用不显示。线条粗细表示作用大小, 数值表示直接路径系数, 即标准化的回归系数(β)。 R^2 为模型对土壤入渗的解释能力。Aggr, 团聚体; BD, 容重; CIV, 入渗总量; CMC, 毛管持水量; FMC, 田间持水量; IIR, 初渗速率; IWC, 初始含水率; MC, 持水量; NCP, 非毛管孔隙度; OMC, 有机质含量; Por, 孔隙度; SHC, 饱和导水率; SIR, 稳渗速率; SMC, 饱和持水量; TP, 总孔隙度。

Fig. 4 The effects of soil structural properties on infiltration in the early period of a post-fire *Pinus tabulaeformis* plantation. Solid and dashed arrows indicate positive and negative effects at significant level ($p < 0.05$), respectively. Non-significant effects are not shown. The thickness of the line indicates the effect size. Values associated represent direct path coefficients (β). R^2 values indicate the ability of the model to explain soil infiltration. Aggr, aggregate; BD, bulk density; CIV, cumulative-infiltration volume; CMC, capillary moisture capacity; FMC, field moisture capacity; IIR, initial infiltration rate; IWC, initial water content; MC, moisture capacity; NCP, non-capillary porosity; OMC, organic matter content; Por, porosity; SHC, saturated hydraulic conductivity; SIR, steady infiltration rate; SMC, saturation moisture capacity; TP, total porosity.

毛管持水量和田间持水量的增加有利于水分入渗, 但非毛管孔隙度的增加, 反而使得土壤入渗性变差。

在火烧样地, 土壤入渗性的影响因素发生了明显的改变, 土壤初始含水率成为唯一显著且直接影响土壤入渗性的因素($\beta = -0.274$), 且初始含水率越高, 土壤入渗越慢。土壤结构性质之间的作用关系与对照相比除了个别关系相同外, 其他几乎完全不同, 包括正负效应、作用大小和路径系数, 模型的解释率降至11%。火烧干扰虽然不会改变土壤有机质对孔隙度的直接负作用, 但有机质对持水量以及团聚体对初始含水率的直接作用减弱, 孔隙度对容重

的直接效应增强。同时, 火烧后团聚体对持水量和容重以及容重对初始含水率的正负效应发生了转变。此外, 孔隙度虽对入渗性的直接效应不显著, 但其通过对初始含水率和持水量的影响对入渗性的间接效应明显增大。

3 讨论

3.1 土壤结构对火烧干扰的响应及随土壤深度和时间的变化

土壤结构在支持生物生存、运输水分和颗粒、气体交换以及维持土壤的物理稳定性等方面至关重要, 其优劣可以指示土壤的恢复与退化(Rabot *et al.*,

2018; Colombi *et al.*, 2021)。土壤结构是在土壤发生发展过程中逐渐形成的, 并且在不断地变化着 (Bronick & Lal, 2005), 常用土壤团聚体、有机质含量、孔隙度、容重和持水量等指标来表征 (张建兵等, 2019; 王雅慧等, 2020)。本研究中, 火烧对0–5 cm土壤的直接影响最大, 该层土壤粒径>1 mm的团聚体和容重在火烧干扰后(2个月)显著增加, 而<1 mm的团聚体、初始含水率、饱和持水量、田间持水量、总孔隙度、非毛管孔隙度和有机质含量均显著减少。通常, 土壤团聚体会因外界环境的改变而经历形成、瓦解和再团聚等过程, 火烧后由于铁和铝硅酸盐含量的改变, 微团聚体易结合形成大团聚体, 以抵抗水的冲击 (Ibrahimi *et al.*, 2019)。当疏水有机复合物包裹着土壤团粒和矿物, 再经雨水冲刷, 土壤孔隙易被堵塞, 团粒结构也随之破坏, 土壤容重增加, 持水能力下降 (Woods & Balfour, 2008; Jordán *et al.*, 2011; Mikita-Barbato *et al.*, 2015; 曾素平等, 2020; 秦倩倩和刘艳红, 2021)。此外, 凋落物的燃烧损失(如轻微的蒸馏、炭化或者完全的氧化等)会造成有机质减少 (Hatten *et al.*, 2008)。本研究中, 火烧后土壤有机质含量减少了20%–30%, 这是由于重度火烧过程中, 炭化改变了有机质的化学成分, 原本具有生物活性的物质转变为无生命的芳香族大分子 (González-Pérez *et al.*, 2004)。但随土层加深, 火烧干扰对土壤结构的作用相对减弱, 且这种作用随时间推移对各层土壤结构性质的影响因指标不同略有差异。如, 与对照样地相比, 火烧迹地(火后2–9个月)各层土壤容重有不同程度的增加, 饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度和有机质含量在火烧后均有所减小; 而火烧后土壤初始含水率和非毛管孔隙度在各层或各月间的变化有增有减, 没有普遍规律性。这与未受干扰的土壤结构本身在垂直深度和季节变化中存在的显著差异有关。本研究中, 土壤浅层(0–10 cm)大团聚体含量(>0.5 mm)、初始含水率、持水量、孔隙度和有机质含量等均较深层土壤高。各结构指标随时间变化趋势基本相同, 表现为6–8月高于其余月份。土壤结构表现出的垂直分布和季节动态与气候息息相关, 气候通过改变温度和湿度体系以及干湿循环来影响土壤的聚集, 这些循环可以改变土壤结构 (Singer *et al.*, 1992)。同时, 土壤结构受到植物根系生长以及微生物活动的反馈作用 (Plante & McGill, 2002; Bronick & Lal, 2005)。

而火烧迹地土壤结构在不同垂直深度间的规律与其相反或变化缩小, 在不同月份间的变化趋势与对照样地相比有所减缓, 但整体趋势相差不大, 说明火烧虽然改变了原有的规律, 但因少量灌草恢复, 凋落物和根系的作用以及地下生物量和土壤微生物活性慢慢增加, 土壤结构也在慢慢改善 (朱丽琴等, 2017)。

3.2 土壤入渗对火烧干扰的响应及随土壤深度和时间的变化

土壤入渗是水分在土壤中运动的物理过程。水分最初进入土壤主要受分子力作用, 被土壤颗粒吸附而形成薄膜水, 该阶段入渗速率明显大于其他阶段; 随后, 在毛管力和重力的共同作用下, 水分主要在土壤颗粒间的孔隙传输, 并开始填充孔隙, 此阶段入渗速率逐渐减小; 当土壤孔隙被填至饱和状态, 水分仅在重力作用下进行饱和水流运动, 入渗速率维持稳定 (阿茹·苏里坦等, 2019)。因此, 在本研究中, 各样地各土层及各月份土壤入渗过程整体趋势相同, 入渗速率先迅速下降, 再逐渐减缓最后趋于稳定。不同垂直深度土壤入渗特征相似, 与Liu (2011)和Leung等(2015)的研究结果一致。但土壤初渗速率、稳渗速率、入渗总量和饱和导水率在不同月份间差异显著, 且均在8月显著高于其他月份, 这与8月该区降水强度和降水量大有关。大量研究表明, 水分穿过土壤中的渗透区域会存在优先流的现象 (Flury *et al.*, 1994; 盛丰等, 2015)。在自然降水量大的月份, 土壤入渗时水分和溶质进入土壤中后会沿着优先流通道在局部土壤中快速运动, 缩短了水在土壤中的停留时间。火烧干扰后土壤入渗的这种季节动态仍然存在, 但火烧样地土壤入渗特征达最值的月份略有不同, 且出现最值时间与对照样地相比提前了1–2个月。说明由于火烧干扰而导致的直接或间接效应, 即使在相同的气候条件下土壤入渗也存在差异。强降雨可能会对火烧迹地早期土壤结构和土壤入渗表现出明显的消极作用, 火烧后土壤结构的变化也有可能使优先流现象减弱或消失。虽然火烧样地 and 对照样地土壤入渗特征的差异仅在8月达显著水平, 但总的来说, 火烧干扰后土壤初渗速率、稳渗速率、入渗总量和饱和导水率降低。火烧引起的土壤斥水性是土壤入渗减少的最明显原因 (MacDonald & Huffman, 2004)。此外, 火烧后冠层消失也会使地表的粗糙度和截留降雨随之减少, 进一

步缩短了土壤入渗时间(Zhao *et al.*, 2016)。径流的深度和地表水对土壤的压力因冠层径流拦蓄的减少而减小, 从而抑制土壤入渗(She *et al.*, 2014)。火烧后0–5 cm和3–6个月土壤入渗过程与对照相比变化较大。通常, 表层几厘米的土壤中含有大量疏水性有机分子, 易产生斥水性(Badía-Villas *et al.*, 2014)。同时, 该时段刚好为生长季和雨季, 部分灌草开始萌芽生长, 有的物种常在叶表面产生一些耐降解的疏水化合物以维持叶片干燥以及减少昆虫和微生物的入侵, 这种疏水化合物也是形成土壤斥水性的原因之一(刘发林等, 2019b)。

3.3 火烧干扰下土壤结构性质对土壤入渗的影响

土壤结构是控制土壤入渗的重要指标(He *et al.*, 2020)。本研究中, 未受干扰的土壤入渗主要受到土壤团聚体、容重和持水量的正效应以及孔隙度的负效应, 有机质含量和初始含水率对入渗直接影响均不显著, 但有机质含量可以通过影响孔隙度或持水量间接影响入渗, 这与以往的研究存在异同点(阿茹·苏里坦等, 2019; 黎明扬等, 2019; 李平等, 2020)。土壤团聚体是判断土壤结构优劣的关键指标, 多数研究者认为团聚结构越好, 土壤孔隙越多, 持水性和通透性越好(丁康等, 2017)。导致该结果的原因可能有两个: (1)本文研究的是机械性团聚体, 其结果与水稳性团聚体存在一定的偏差; (2)不同粒径团聚体的作用存在差别, 一概而论地评价团聚结构好坏不够合理。本研究在剔除不显著和冗余的因子后发现, 土壤中2–5、1–2和<0.25 mm粒径的团聚体是影响土壤入渗的关键因子。水分可能溶解并导致小粒级团聚体随之下渗, 我们的测定实验也验证了该假设。路径分析结果表明, 该部分团聚体越多, 土壤容重越大, 这与该区土壤<0.25 mm团聚体的占比(23.78%)较大有关, 即小团聚体可有效利用空间使得固定体积下容纳的土壤团聚体更多。团聚体对有机质含量的正效应与朱丽琴等(2017)研究得出>2 mm团聚体含量越多有机质含量越多的结论基本一致。此外, 土壤中非毛管孔隙对入渗的影响较大, 与阿茹·苏里坦等(2019)的研究结果相同。非毛管孔隙又称大孔隙, 指孔隙直径大于0.1 mm的土壤孔隙。孔隙直径越大, 团聚体可能因湿润崩解而堵塞土壤孔隙, 阻止水分进一步向下入渗(Lado *et al.*, 2004)。理论上, 在土壤质地相似和土壤有机质含量相近的条件下, 土壤容重大表明土壤紧实, 透气透

水能力差(李卓等, 2009; 徐勤学等, 2018)。但该研究地土壤石砾含量较多, 其存在可能会使土壤容重增加, 但也可能制造出了除土壤孔隙外的其他水分下渗途径, 导致入渗速率快, 入渗量增多(喻明美和谢正生, 2011)。作为间接影响因子, 土壤有机质通过矿化、养分释放和胶结团聚体等过程而影响土壤入渗(Bamutaze *et al.*, 2010)。土壤含水量对入渗率有两方面的影响, 一方面是入渗前土壤初始含水率对入渗率的影响, 另一方面则是入渗过程中土壤持水性能对入渗的控制(Al-Seekh & Mohammad, 2009)。本研究中初始含水率对土壤入渗作用不显著, 然而土壤持水性能与入渗性呈显著正相关关系。

特别地, 本研究发现火后2–9个月, 火烧对土壤入渗的直接作用不明显, 土壤入渗主要受到土壤结构的显著作用, 与此同时存在火烧的间接影响。但火烧对土壤结构作用十分显著, 且其改变或解耦了土壤团聚体、有机质、孔隙度、容重、初始含水率和持水量对土壤入渗以及各自之间的作用路径。因此, 土壤结构因火烧干扰的改变增加了土壤入渗过程的不确定性, 这可能是本研究三因素方差分析中火烧对土壤入渗的作用, 以及火烧和对照样地多个月份土壤入渗特征差异未达到显著水平(表2, 表3)的原因之一。火烧后土壤初始含水率的直接负效应凸显, 说明土壤初始含水率在一定范围内波动对土壤入渗影响不大, 但超过一定范围, 其作用显著, 且随着土壤初始含水率的增加, 入渗过程中湿润峰前缘的水力学梯度减小, 入渗速率降低(Liu *et al.*, 2011)。火烧迹地早期有机质含量的降低使得土壤入渗对初始含水率的变化更为敏感(刘目兴等, 2012)。然而, 尽管火烧显著影响土壤结构, 土壤结构又显著影响土壤入渗, 但火烧对土壤入渗的间接路径系数和本研究中路径分析解释率还不够高, 说明土壤入渗还可能受到其他因子的综合作用, 且这种作用不容忽视, 亟待进一步探究。如, Cui等(2019)研究发现, 细根对土壤渗透的影响大于土壤含水量。错综分布的根系的功能性状以及其衰亡和生长过程可能是影响土壤入渗的重要因素(李平等, 2020), 灌草盖度、枯枝落叶层和降水强度等也对入渗有一定的影响(吕刚和吴祥云, 2008)。此外, 由于森林火灾具有突发性和随机性, 无法获取火烧前的本底数据, BACI (before after control impact)实验设计(Green, 1979)受到限制, 本研究采用相邻样地比较法(罗斯

生等, 2020), 在控制火烧样地和对照样地植被、地形和气候等立地条件基本相同的情况下, 选择合适的土壤样品采集方法以减小生境异质性带来的不确定性。然而, 各样地间无论是土壤的理化性质还是微环境不可能完全一致, 未来研究需继续探索和完善。

4 结论和展望

在油松人工林火烧迹地早期, 无论是受到火烧干扰、土壤深度和时间变化中单一因子的影响还是三者之间的交互作用, 土壤团聚体、有机质、孔隙度、容重、初始含水率和持水量等结构性质均会发生显著的改变, 且它们对火烧干扰和时间变化更敏感, 火烧直接影响最上层几厘米的土壤结构, 随时间推移也会影响下层土壤, 这种干扰效应持续至火烧后9个月; 而土壤入渗特征在时间尺度上的波动明显比火烧干扰下和土壤垂直深度上的大, 火烧后土壤初渗速率、稳渗速率、入渗总量和饱和导水率均降低, 季节波动仍较明显, 但出现峰值的时间与对照样地相比有所提前, 且0-5 cm土壤入渗过程有明显不同, 尤其是在雨季; 火烧对土壤入渗的直接作用不显著, 土壤结构是控制土壤入渗的重要指标, 火烧干扰会解耦或改变土壤结构内部及其对土壤入渗的作用机制, 同时增加了土壤入渗过程的不确定性。火烧不仅改变了土壤结构自身存在的垂直分布特征和季节动态规律, 可能还影响了根系及生物的生存, 后续应将植被恢复过程中根系等的作用纳入分析以更好地解释火烧迹地土壤入渗过程的动态变化。强降雨事件也可能对火烧迹地早期土壤的结构和入渗影响很大, 具体有待进一步验证。

致谢 感谢北京林业大学邓万权、张悦和刘思文在外业调查和采样工作中给予的帮助。

参考文献

Al-Seekh SH, Mohammad AG (2009). The effect of water harvesting techniques on runoff, sedimentation, and soil properties. *Environmental Management*, 44, 37-45.

Aru SULTAN, Chang SL, Zhang YT (2019). Comparative analysis and simulation of soil moisture infiltration characteristics in different communities in the forests of Tianshan Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 39(24), 9111-9118. [阿茹·苏里坦, 常顺利, 张毓涛 (2019). 天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟。

生态学报, 39(24), 9111-9118.]

Badía-Villas D, González-Pérez JA, Aznar JM, Arjona-Gracia B, Martí-Dalmau C (2014). Changes in water repellency, aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory: soil depth affected by fire. *Geoderma*, 213, 400-407.

Bamutaze Y, Tenywa MM, Majaliwa MJG, Vanacker V, Bagoora F, Magunda M, Obando J, Wasige JE (2010). Infiltration characteristics of volcanic sloping soils on Mt. Elgon, Eastern Uganda. *Catena*, 80, 122-130.

Bao SD (2000). *Soil Agrochemistry Analysis Experiment*. China Agriculture Press, Beijing. [鲍士旦 (2000). 土壤农化分析. 中国农业出版社, 北京.]

Bronick CJ, Lal R (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3-22.

Certini G (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143, 1-10.

Chen J, McGuire KJ, Stewart RD (2020). Effect of soil water-repellent layer depth on post-wildfire hydrological processes. *Hydrological Processes*, 34, 270-283.

Chen LX (2005). *Soil Experiment Practice Course*. Northeast Forestry University Press, Harbin. [陈立新 (2005). 土壤实验实习教程. 东北林业大学出版社, 哈尔滨.]

Colombi T, Kirchgessner N, Iseskog D, Alexandersson S, Larsbo M, Keller T (2021). A time-lapse imaging platform for quantification of soil crack development due to simulated root water uptake. *Soil & Tillage Research*, 205, 104769. DOI: 10.1016/j.still.2020.104769.

Cui Z, Wu GL, Huang Z, Liu Y (2019). Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils. *Journal of Hydrology*, 578, 124023. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124023.

Ding K, Xu XX, Chen WY, Kalhoro SA (2017). Soil aggregates and infiltration characteristics under different vegetations in Changwu tableland slope of northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 39(12), 44-51. [丁康, 徐学选, 陈文媛, Kalhoro SA (2017). 长武塬边坡不同植被下土壤团聚体及入渗特征. 北京林业大学学报, 39(12), 44-51.]

Doerr SH, Douglas P, Evans RC, Morley CP, Mullinger NJ, Bryant R, Shakesby RA (2005). Effects of heating and post-heating equilibration times on soil water repellency. *Australian Journal of Soil Research*, 43, 261-267.

Doerr SH, Shakesby RA, MacDonald LH (2009). Soil water repellency: a key factor in post-fire erosion//Cerdeira A, Robichaud PR. *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*. CRC Press, Enfield, USA. 213-240.

Doerr SH, Shakesby RA, Walsh RPD (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51, 33-65.

- Ebel BA, Moody JA, Martin DA (2012). Hydrologic conditions controlling runoff generation immediately after wildfire. *Water Resources Research*, 48, W03529. DOI: 10.1029/2011WR011470.
- Flury M, Flühler H, Jury WA, Leuenberger J (1994). Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study. *Water Resources Research*, 30, 1945-1954.
- González-Pérez JA, González-Vila FJ, Almendros G, Knicker H (2004). The effect of fire on soil organic matter—A review. *Environment International*, 30, 855-870.
- Gordillo-Rivero AJ, García-Moreno J, Jordán A, Zavala LM, Granja-Martins FM (2014). Fire severity and surface rock fragments cause patchy distribution of soil water repellency and infiltration rates after burning. *Hydrological Processes*, 28, 5832-5843.
- Green RH (1979). *Sampling Design and Statistical Methods for Environmental Biologists*. John Wiley, New York.
- Han J, Ying LX, Li GX, Shen ZH (2016). Spatial patterns of species diversity in the herb layer of early post-fire regeneration in mixed *Pinus yunnanensis* forests. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 200-211. [韩杰, 应凌霄, 李贵祥, 沈泽昊 (2016). 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. 植物生态学报, 40, 200-211.]
- Hatten JA, Zabowski D, Ogden A, Thies W (2008). Soil organic matter in a ponderosa pine forest with varying seasons and intervals of prescribed burn. *Forest Ecology and Management*, 255, 2555-2565.
- He ZM, Jia GD, Liu ZQ, Zhang ZY, Yu XX, Xiao PQ (2020). Field studies on the influence of rainfall intensity, vegetation cover and slope length on soil moisture infiltration on typical watersheds of the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes*, 34, 4904-4919.
- Huang Z, Tian FP, Wu GL, Liu Y, Dang ZQ (2017). Legume grasslands promote precipitation infiltration better than graminaceous grasslands in arid regions. *Land Degradation & Development*, 28, 309-316.
- Ibrahimi K, Mowrer J, Amami R, Belaid A (2019). Burn effects on soil aggregate stability and water repellency of two soil types from East and North Tunisia. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50, 827-837.
- Jiao F, Wen ZM, An SS (2011). Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China. *Catena*, 86, 110-116.
- Jordán A, Zavala LM, Mataix-Solera J, Nava AL, Alanís N (2011). Effect of fire severity on water repellency and aggregate stability on Mexican volcanic soils. *Catena*, 84, 136-147.
- Keeley JE (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18, 116-126.
- Keesstra S, Wittenberg L, Maroulis J, Sambalino F, Malkinson D, Cerdà A, Pereira P (2017). The influence of fire history, plant species and post-fire management on soil water repellency in a Mediterranean catchment: the Mount Carmel range, Israel. *Catena*, 149, 857-866.
- Lado M, Ben-Hur M, Shainberg I (2004). Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1992-1999.
- Leung AK, Garg A, Coo JL, Ng CWW, Hau BCH (2015). Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity. *Hydrological Processes*, 29, 3342-3354.
- Li MY, Liu TX, Luo YY, Duan LM, Zhang JY, Zhou YJ (2019). Study on soil infiltration process and pedo-transfer functions in semi-arid grasslands. *Journal of Hydraulic Engineering*, 50, 936-946. [黎明扬, 刘廷玺, 罗艳云, 段利民, 张俊怡, 周亚军 (2019). 半干旱草原型流域土壤入渗过程及转换函数研究. 水利学报, 50, 936-946.]
- Li P, Wang DM, Ding C, Liu RS, Zhang P, Zhang LL (2020). Soil infiltration characteristics and its influencing factors of typical vegetation type in Loess Alpine region. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 1610-1620. [李平, 王冬梅, 丁聪, 刘若莎, 张鹏, 张琳琳 (2020). 黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素. 生态学报, 40, 1610-1620.]
- Li YY, Shao MA (2006). Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Environments*, 64, 77-96.
- Li Z, Wu PT, Feng H, Zhao XN, Huang J, Zhuang WH (2009). Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 25, 40-45. [李卓, 吴普特, 冯浩, 赵西宁, 黄俊, 庄文化 (2009). 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验. 农业工程学报, 25, 40-45.]
- Liu FL, Chen XW, Zeng SP (2019a). Effects of fire disturbance on soil physiochemical properties in *Liquidambar formosana* secondary forest. *Journal of Soil and Water Conservation*, 33, 132-138. [刘发林, 陈小伟, 曾素平 (2019a). 不同火干扰强度对枫香次生林土壤理化性质的影响. 水土保持学报, 33, 132-138.]
- Liu FL, Chen XW, Zeng SP, Peng ZZ (2019b). Progress of the effects of fire disturbance on forest soil water repellency. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 1846-1852. [刘发林, 陈小伟, 曾素平, 彭早珍 (2019b). 火干扰对森林土壤斥水性的影响研究进展. 生态学报, 39, 1846-1852.]
- Liu H, Lei TW, Zhao J, Yuan CP, Fan YT, Qu LQ (2011). Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method. *Journal of Hydrology*, 396, 24-32.
- Liu MX, Nie Y, Yu J (2012). The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents. *Acta*

- Ecologica Sinica*, 32, 871-878. [刘目兴, 聂艳, 于婧 (2012). 不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程. 生态学报, 32, 871-878.]
- Lundberg A, Ala-Aho P, Eklo O, Klöve B, Kværner J, Stumpp C (2016). Snow and frost: implications for spatiotemporal infiltration patterns—A review. *Hydrological Processes*, 30, 1230-1250.
- Luo SS, Luo BZ, Wei SJ, Hu HQ, Li XC, Wu ZP, Wang ZS, Zhou YF, Zhong YX (2020). Effects of forest fires on soil organic carbon density in secondary forests of *Pinus massoniana*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 1073-1086. [罗斯生, 罗碧珍, 魏书精, 胡海清, 李小川, 吴泽鹏, 王振师, 周宇飞, 钟映霞 (2020). 中度强度森林火灾对马尾松次生林土壤有机碳密度的影响. 植物生态学报, 44, 1073-1086.]
- Lv G, Wu XY (2008). Review on influential factors of soil infiltration characteristics. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 24, 494-499. [吕刚, 吴祥云 (2008). 土壤入渗特性影响因素研究综述. 中国农学通报, 24, 494-499.]
- MacDonald LH, Huffman EL (2004). Post-fire soil water repellency. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1729-1734.
- Mei XM, Zhu QK, Ma L, Zhang D, Wang Y, Hao WJ (2018). Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a Loess hillslope. *Land Degradation & Development*, 29, 1353-1365.
- Mikita-Barbato RA, Kelly JJ, Tate III RL (2015). Wildfire effects on the properties and microbial community structure of organic horizon soils in the New Jersey pinelands. *Soil Biology & Biochemistry*, 86, 67-76.
- Onda Y, Dietrich WE, Booker F (2008). Evolution of overland flow after a severe forest fire, Point Reyes, California. *Catena*, 72, 13-20.
- Plante AF, McGill WB (2002). Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. *Soil & Tillage Research*, 66, 79-92.
- Qin QQ, Liu YH (2021). Forest soil function after severe fire disturbance. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 27, 503-512. [秦倩倩, 刘艳红 (2021). 重度火烧干扰下的森林土壤功能. 应用与环境生物学报, 27, 503-512.]
- Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, Vogel HJ (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: a review. *Geoderma*, 314, 122-137.
- Ren QS, Xin Y, Zhao YS (2016). Impact of severe burning on organic carbon and black carbon in soil aggregates in natural *Larix gmelinii* forest of Great Xing'an Mountains. *Journal of Beijing Forestry University*, 38(2), 29-36. [任清胜, 辛颖, 赵雨森 (2016). 重度火烧对大兴安岭落叶松天然林土壤团聚体有机碳和黑碳的影响. 北京林业大学学报, 38(2), 29-36.]
- Robichaud PR (2000). Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. *Journal of Hydrology*, 231-232, 220-229.
- She DL, Liu DD, Xia YQ, Shao MA (2014). Modeling effects of land use and vegetation density on soil water dynamics: implications on water resource management. *Water Resources Management*, 28, 2063-2076.
- Sheng F, Wang K, Zhang RD, Liu HH (2015). Modeling the heterogeneous soil water flow and solute transport by two-region-two-stage model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 46, 433-442. [盛丰, 王康, 张仁铎, 刘会海 (2015). 土壤非均匀水流运动与溶质运移的两区-两阶段模型. 水利学报, 46, 433-442.]
- Singer MJ, Southard RJ, Warrington DN, Janitzky P (1992). Stability of synthetic sand clay aggregates after wetting and drying cycles. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1843-1848.
- Varela ME, Benito E, Keizer JJ (2015). Influence of wildfire severity on soil physical degradation in two pine forest stands of NW Spain. *Catena*, 133, 342-348.
- Vieira DCS, Fernández C, Vega JA, Keizer JJ (2015). Does soil burn severity affect the post-fire runoff and interrill erosion response? A review based on meta-analysis of field rainfall simulation data. *Journal of Hydrology*, 523, 452-464.
- Wang J, Pan F, Soininen J, Heino J, Shen J (2016). Nutrient enrichment modifies temperature-biodiversity relationships in large-scale field experiments. *Nature Communications*, 7, 13960. DOI: 10.1038/ncomms13960.
- Wang Y, Hu XW, Yang Y, Yu ZJ, Cao XC (2019). Research on the change in soil water repellency and permeability in burned areas. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 46, 40-45. [王严, 胡卸文, 杨瀛, 于振江, 曹希超 (2019). 火烧迹地土壤斥水性和渗透性变化特性. 水文地质工程地质, 46, 40-45.]
- Wang YH, Peng ZD, Li Y (2020). Soil nutrient and structure characteristics of *Robinia pseudoacacia* in different generations in the shallow mountain areas of western Henan Province, central China. *Journal of Beijing Forestry University*, 42(3), 54-64. [王雅慧, 彭祚登, 李云 (2020). 豫西浅山区不同世代刺槐林土壤养分与结构特征. 北京林业大学学报, 42(3), 54-64.]
- Woods SW, Balfour VN (2008). The effect of ash on runoff and erosion after a severe forest wildfire, Montana, USA. *International Journal of Wildland Fire*, 17, 535-548.
- Wu GL, Yang Z, Cui Z, Liu Y, Fang NF, Shi ZH (2016). Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity. *Journal of Hydrology*, 535, 54-60.
- Xu QX, Li CM, Chen HS, Fu ZY, Wu P, Wang KL (2018). Characteristics of soil moisture infiltration in shrub land and terraces dryland in karst peaks hillslopes. *Transactions*

- of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 34, 124-131. [徐勤学, 李春茂, 陈洪松, 付智勇, 吴攀, 王克林 (2018). 喀斯特峰丛坡地灌木林地与梯田旱地土壤水分入渗特征. 农业工程学报, 34, 124-131.]
- Yu MM, Xie ZS (2011). Study on soil permeability capability of five forest types in Baiyunshan scenic spot of Guangzhou. *Research of Soil and Water Conservation*, 18, 153-156. [喻明美, 谢正生 (2011). 广州市白云山五种森林类型的土壤渗透性研究. 水土保持研究, 18, 153-156.]
- Zeng SP, Liu FL, Zhao MF, Wang GJ, Chen XW (2020). Effects of fire disturbance intensities on soil physiochemical properties of four subtropical forest types. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 233-246. [曾素平, 刘发林, 赵梅芳, 王光军, 陈小伟 (2020). 火干扰强度对亚热带四种森林类型土壤理化性质的影响. 生态学报, 40, 233-246.]
- Zhang JB, Luo WQ, Zhang HA, He LC, Yang QY, Hu BQ (2019). Response of soil structure to different cultivation patterns in the typical karst peak-cluster depression of northwest Guangxi. *Research of Soil and Water Conservation*, 26, 37-42. [张建兵, 罗为群, 张海安, 何柳春, 杨奇勇, 胡宝清 (2019). 桂西北峰丛洼地土壤结构对不同耕作模式的响应. 水土保持研究, 26, 37-42.]
- Zhang YX, Shi CQ, Yang H, Wang ZY, Zhao TN, Yan YC, An YZ (2019). Saturated hydraulic conductivity of soils of typical forests of the south coast of Guanting Reservoir in Yongding River Watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 6681-6689. [张一璇, 史常青, 杨浩, 王占永, 赵廷宁, 闫焯琛, 安一喆 (2019). 永定河流域官厅水库南岸典型林分土壤饱和导水率研究. 生态学报, 39, 6681-6689.]
- Zhao CH, Gao JE, Huang YF, Wang GQ, Xu Z (2016). The contribution of *Astragalus adsurgens* roots and canopy to water erosion control in the water-wind crisscrossed erosion region of the Loess Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 28, 265-273.
- Zhu LQ, Huang RZ, Huang GM, Huang SH, Yi ZQ, Zhang WF, Jia L, Wang H, Liu Y (2017). Effects of different artificially restored forests on aggregate composition and organic carbon in degraded red soil. *Science of Soil and Water Conservation*, 15, 58-66. [朱丽琴, 黄荣珍, 黄国敏, 黄诗华, 易志强, 张文锋, 贾龙, 王赫, 刘勇 (2017). 不同人工恢复林对退化红壤团聚体组成及其有机碳的影响. 中国水土保持科学, 15, 58-66.]

特邀编委: 戴君虎 编辑: 赵航