

栗子坪自然保护区不同海拔梯度土壤入渗特性研究

陆其伟¹, 脱云飞^{1*}, 郑阳², 骆伟², 代勤龙², 何霞红¹

(1. 西南林业大学水土保持学院, 云南 昆明 650224; 2. 四川栗子坪国家级自然保护区管理局, 大熊猫小种群保护与复壮研究开放实验室, 栗子坪大熊猫生态与保护四川省野外科学观测研究站, 四川 石棉 625499)

摘要:【目的】探究四川栗子坪国家级自然保护区土壤入渗对不同海拔梯度土壤类型响应特征。【方法】以自然保护区4个海拔梯度(1 900、2 100、2 300和2 500 m)土壤为采样对象,通过环刀法测定不同海拔梯度土壤入渗特征,采用通径及相关性分析法明确影响土壤入渗特征的关键因子,并用Kostiakov、Philip、Horton等入渗模型进行拟合,分析其适宜性。【结果】土壤入渗速率与海拔呈极显著负相关关系($P < 0.01$),而土壤微生物生物量与入渗速率呈显著正相关关系($P < 0.05$),促进了土壤水分入渗;在入渗前20 min,海拔1 900、2 100 m土壤入渗率降低了50%左右,海拔2 300、2 500 m降低了72%~85%,海拔2 300、2 500 m入渗衰弱速率明显快于海拔1 900、2 100 m,这主要是受到土壤有机质含量、团聚体粒级结构及微生物生物量影响;模型拟合发现,Kostiakov模型 R^2 为0.896~0.959,Philip模型 R^2 为0.874~0.965,Horton模型 R^2 为0.945~0.984,综合考虑土壤入渗模型决定系数 R^2 大小以及拟合值与实测值精确度的一致性,Kostiakov模型更适合对研究区域土壤入渗进行拟合。【结论】海拔梯度对土壤入渗特征影响显著,主要是受到土壤有机质含量、团聚体粒级结构及微生物生物量等因素影响。

关键词:海拔梯度;土壤理化性质;入渗特征;模型拟合;栗子坪自然保护区;微生物生物量

中图分类号:S714.7

文献标志码:A

文章编号:1000-2006(2025)02-0143-10

Research on characteristics of soil infiltration at different altitude gradients in Liziping Nature Reserve

LU Qiwei¹, TUO Yunfei^{1*}, ZHENG Yang², LUO Wei², DAI Qinlong², HE Xiaohong¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Sichuan Liziping National Nature Reserve Administration, Open Laboratory of Shimian Research Center of Giant Panda Small Population Conservation and Rejuvenation, Liziping Giant Panda's Ecology and Conservation Observation and Research Station of Sichuan Province, Shimian 625499, China)

Abstract: 【Objective】The purpose of this study was to explore how soil infiltration responds to different elevation gradients in Liziping National Nature Reserve, Sichuan. 【Method】Soil samples were collected from four elevation gradients (1 900, 2 100, 2 300, and 2 500 m) within the nature reserve. Soil infiltration characteristics at these gradients were measured using the ring knife method. Key factors affecting soil infiltration were identified through path and correlation analyses. Additionally, the suitability of infiltration models, including Kostiakov, Philip and Horton, was evaluated by fitting and analyzing the data. 【Result】Soil infiltration rates showed a highly significantly negative correlation with elevation ($P < 0.01$). Soil microbial biomass had a significant positive correlation with infiltration rates ($P < 0.05$), promoting water infiltration. In the first 20 min, soil infiltration rates decreased by about 50% at elevations of 1 900 and 2 100 m, and by 72% to 85% at elevations of 2 300 and 2 500 m. The rate of infiltration decreased at 2 300 and 2 500 m was significantly faster than that at 1 900 and 2 100 m, primarily due to differences in soil organic matter, aggregate grain structure, and microbial biomass. The model fitting showed that the R^2 values were 0.896–0.959 for the Kostiakov model, 0.874–0.965 for the Philip model, and 0.945–0.965 for the Horton model. Based on the R^2

收稿日期 Received: 2023-10-11

修回日期 Accepted: 2024-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979134); 四川省栗子坪国家级自然保护区陆生动物生境调查研究项目(2021ZD0125)。

第一作者: 陆其伟(xnlyluqiwei@163.com)。*通信作者: 脱云飞(tyunfei@163.com)。

引文格式: 陆其伟, 脱云飞, 郑阳, 等. 栗子坪自然保护区不同海拔梯度土壤入渗特性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2025, 49(2): 143–152. LU Q W, TUO Y F, ZHENG Y, et al. Research on characteristics of soil infiltration at different altitude gradients in Liziping Nature Reserve[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2025, 49(2): 143–152. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202310013.

values and the alignment between fitted and measured values, the Kostikov model was found to be the most suitable for the study area. 【Conclusion】Elevation gradients significantly affect soil infiltration characteristics, primarily influenced by soil organic matter, aggregate grain structure, and microbial biomass.

Keywords: elevation gradient; soil physical and chemical property; infiltration characteristic; model fitting; Liziping Nature Reserve; microbial biomass

土壤入渗是降雨、地表水以及大气水分等地表水从土壤表面渗入土壤中形成土壤水的重要水文过程^[1],其性能会影响大气-植物-土壤体系中的水分循环以及植物根系区的水分分布状况,是限制森林植被生长的关键因子之一。同时,土壤入渗性能作为评价土壤水分调节和涵养水源的重要指标,也是影响地表径流和土壤侵蚀的重要因素^[2]。而土壤水分入渗过程受土壤类型以及水热条件等多因素影响,土壤入渗能力与土壤结构和质量呈正比^[3];由海拔差异导致的森林垂直带林分类型、凋落物储量以及根系分布情况差异,也影响土壤入渗性能^[4]。因此,研究不同海拔土壤入渗特征及其影响因素,可以为森林植被恢复与改造提供科学依据^[5]。

栗子坪自然保护区森林植被资源丰富,是野生大熊猫放生的重要基地。因此,研究该区域土壤入渗这一重要水文过程,对研究区森林植被多样性发展、保护野生动物及其繁衍至关重要。有研究表明,土壤渗透性与植被类型、土壤结构、土壤质地以及海拔等因子关系密切^[6]。海拔是影响土壤环境的重要因素,随着海拔变化,植物类型与土壤养分等都随之改变^[7],而海拔梯度变化会导致降水量、温度以及光照强度等水热条件有所差异,间接影响土壤理化性质和植被状况等进而诱导水文效应特征^[8]。Gao等^[9]认为海拔梯度不同,使土壤容重和有机质含量等存在差异,导致土壤入渗特征变化;卢振启等^[10]在河北雾灵山不同海拔油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林地研究发现,土壤渗透率不完全与海拔梯度变化趋势一致;胡晓聪等^[11]在云南西双版纳热带山地雨林的研究发现不同海拔土壤渗透率与总孔隙度和非毛管孔隙度呈极显著正相关;亢晨波等^[12]在关帝山研究表明土壤入渗率随海拔增加呈先增加后减小变化趋势。刘瑞等^[13]在湖南衡山发现稳定入渗率随海拔的升高而增大;Fu等^[14]研究表明土壤团聚体结构会影响土壤入渗率,细团聚体结构比例越大,则土壤入渗能力越差;印家旺等^[15]发现土壤入渗能力与土壤质地、土壤机械组成以及团聚体分布有关;云慧雅等^[16]认为土壤有机质含量低会导致微生物活动减弱,使改

善土壤结构的作用减弱,造成土壤入渗性能下降。土壤微生物多样性与土壤理化性质密切相关^[17],不同海拔梯度之间土壤理化性质存在显著差异^[18],进而导致土壤微生物群落组成的差异。因此,不同海拔梯度会导致土壤林分类型、土壤质地、机械组成、团聚体以及微生物等因子存在差异,进而影响土壤入渗特征。

本研究以四川栗子坪国家级自然保护区4个不同海拔梯度土壤为研究对象,探究不同海拔梯度土壤入渗特征的差异性,厘清土壤理化及微生物对入渗特征的影响机制,确定影响土壤入渗的主要影响因子,并用Kostikov、Philip、Horton等入渗模型进行拟合评价,筛选出适用于自然保护区的适宜入渗模型,为森林可持续经营、森林水文效益提升以及水土流失防治提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

四川栗子坪国家级自然保护区(102°10'33"~102°29'07"E,28°51'02"~29°08'42"N),由南向北纵越23 km,自东向西横跨17.8 km,占地面积47 940 hm²,位于横断山区东缘部分、四川盆地西南缘的大渡河中上游、贡嘎山东南面石棉县境内。属于亚热带季风气候,年均气温为11.7~14.4℃,年均降水量800~1 250 mm,海拔越高,降水量越多,森林覆盖率90%以上。海拔相对高差大,垂直带性明显,最高海拔达4 310 m。土壤类型以山地黄棕壤、山地棕壤、山地暗棕壤、棕色森林土及亚高山草甸土为主;植被类型以亚高山灌丛、亚高山寒温带针叶林、高山灌丛草甸、山地针阔叶混交林,以及山地常绿针叶林为主。4个海拔梯度(1 900、2 100、2 300和2 500 m)的林分类型依次为青冈-川杨阔叶混交林(*Quercus glauca*-*Populus szechuanica* broad-leaved mixed forest)、栓皮栎落叶阔叶林(*Q. variabilis* deciduous broad-leaved forest)、冷杉-云杉针叶混交林(*Abies fabri*-*Picea asperata* coniferous mixed forest)、石棉玉山竹林(*Yushania lineolata* forest)。各海拔梯度样地相关信息如表1、表2所示。

表 1 各海拔梯度样地基本信息
Table 1 Basic information of each elevation gradient plot

海拔/m altitude	林分类型 forest type	优势群落 dominant community	土壤类型 soil type	经度(E) longitude	纬度(N) latitude	郁闭度/% canopy
1 900	青冈-川杨阔叶混交林 <i>Quercus glauca- Populus szechuanica</i> broad-leaved mixed forest	青冈、川杨、 木姜子(<i>Litsea pungens</i>)	山地黄棕壤	102°21'36"	28°52'58"	50~60
2 100	栓皮栎落叶阔叶林 <i>Quercus variabilis</i> deciduous broad-leaved forest	栓皮栎、 槐(<i>Styphnolobium japonicum</i>)	山地棕壤	102°16'38"	29°02'56"	50~60
2 300	冷杉-云杉针叶混交林 <i>Abies fabri-Picea asperata</i> coniferous mixed forest	云杉、冷杉、 白桦(<i>Betula platyphylla</i>)	山地棕壤	102°23'34"	29°00'07"	50~60
2 500	石棉玉山竹林 <i>Yushania lineolata</i> forest	石棉玉山竹 (<i>Y. lineolata</i>)	山地暗棕壤	102°24'15"	28°59'40"	60~70

表 2 各海拔梯度样地土壤性质信息
Table 2 Basic information of each elevation gradient soil

海拔/m altitude	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) bulk density	总孔隙度/% total porosity	含水率/% water content	毛管持水量/% capillary water holding capacity	毛管孔隙度/% capillary porosity	非毛管孔隙度/% non-capillary porosity	有机质质量分数/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) organic matter fraction
1 900	1.00±0.01 b	62.14±0.01 b	29.07±0.06 a	37.43±0.02 a	37.54±0.02 a	24.60±0.02 c	49.54±6.67 a
2 100	1.10±0.06 a	58.54±0.06 a	34.25±0.08 a	41.99±0.08 a	45.72±0.07 a	12.82±0.05 d	31.11±6.45 bc
2 300	1.00±0.03 b	62.15±0.03 b	13.10±0.02 b	15.77±0.02 b	15.59±0.01 b	46.56±0.01 a	37.45±2.37 b
2 500	1.17±0.04 a	55.93±0.04 a	12.29±0.04 b	16.74±0.04 b	19.46±0.05 b	36.47±0.07 b	25.10±7.26 c

注:同列数据后小写字母表示各海拔间的差异性,不同字母表示差异显著($P<0.05$,LSD 检验)。下同。The lowercase letters after the same column of data indicate the difference among the altitudes, and the different letters indicate significant difference ($P<0.05$, LSD test). The same below.

1.2 样品采集与指标测定

1)样地设置与样品采集。2022 年于栗子坪国家级自然保护区选取 4 个不同海拔梯度(1 900、2 100、2 300、2 500 m)典型样地,在每个海拔典型样地布设地形、地貌及坡向等基本一致的 3 个 20 m×20 m 样方,共计 12 个。在每个大样方内按“S”形均匀布设 5 个 1 m×1 m 小样方作为土壤试验采样点,共计 60 个采样点。环刀采样时,使用100 cm³环刀取原状土壤,并且采样前将土壤表面枯枝落叶及腐殖质层先去除后再进行采样,采集后贴标签区分并用保鲜膜密封,用于孔隙度和入渗等物理指标测定。同时,将散落土壤剔除石砾和根系等杂物后装入密封袋中,土壤样品均避光保存,并尽快带回实验室用于土壤理化性质及微生物等指标测定。

2)指标测定方法。土壤机械组成用火焰光度计测定^[19],质地划分标准为,砂粒(0.050,2.000] mm、粉粒(0.002,0.050] mm、黏粒(0,0.002] mm;土壤团聚体采用干筛法^[20]分离出<0.25 mm、[0.25,1.00)mm、[1.00,2.00)mm、≥2.00 mm 共 4 个粒级的土壤团聚体,分别称质量并计算各粒级质

量百分比。土壤微生物生物量碳、氮含量采用氯仿熏蒸法^[21]进行测定。土壤微生物指标采用高通量测序法^[22]测定,具体步骤为:①从新鲜土壤完成基因组 DNA 抽提后,利用质量分数 1%琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 抽提质量;②按指定测序区域,合成带有 barcode 的特异引物,将样本的 PCR 产物进行纯化、定量和均一化后检测,利用 AxyPrepDNA-Seq Kit 进行纯化,Tris-HCl 洗脱;2%琼脂糖电泳检测;③参照电泳初步定量结果,将 PCR 产物用 Quanti-Fluor™-ST 蓝色荧光定量系统进行检测定量;④Miseq测序得到的 PReads,区分样本后进行 OTU 聚类分析和物种分类学分析。土壤入渗速率采用环刀法进行测定^[23],用环刀取掉上盖后套 1 个空环刀,为防止接口处漏水用防水胶布粘紧,放置在铁架台上(漏斗放在铁圈处),漏斗下方放置 1 个空烧杯。然后向上部空环刀加满水,从土壤开始向外滴出第一滴水开始计时,每 2 min 记录 1 次,并更换烧杯用量筒测量下渗水的体积。试验过程中要及时向上部空环刀内加水,使上部的环刀水量一直处于满的状态;试验进行到连续 3 次更换的烧杯

内水量相同时,可以视为达到稳定状态,并停止本轮试验。每个样地,土壤入渗过程重复测定 3 次。初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和入渗总量是评价土壤入渗特征的重要指标,本试验以开始后第 2 min 时入渗量除以时间(2 min)作为初始入渗率,每隔 2 min 测量 1 次入渗量,当入渗量连续 3 次都一致时,即视为达到稳定入渗状态。平均入渗率用刚达到稳定状态时入渗总量除以达到稳定状态所需的时间。

3) 土壤水分入渗模拟。采用 Kostiakov、Philip 和 Horton 模型分别拟合 4 个海拔梯度土壤入渗过程,探究试验区土壤入渗特征拟合效果。3 种土壤入渗 $[f(t)]$ 模型公式如下:

Kostiakov 模型^[24] $f(t)=at^{-b}$ 。(1)
式中: t 为入渗时间,min; a 、 b 为拟合参数。

Philip 模型^[25] $f(t)=0.5St^{-0.5}+A$ 。(2)
式中: A 为稳定入渗率,mm/min; S 为土壤吸水率。

Horton 模型^[26] $f(t)=A+(A_0-A)e^{-kt}$ 。(3)
式中: A_0 为初始入渗率,mm/min; k 为经验参数。

1.3 数据处理

使用 Excel 2016 对土壤理化、入渗速率及微生物

物指数等进行统计和计算;用 SPSS 27.0 对土壤养分等理化及入渗等指标进行检验,确认是否符合正态分布,运用线性拟合分析因子与入渗速率的关系,确定关键影响因子;用 Origin 2021 对土壤入渗特征等进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同海拔梯度土壤理化性质特征

研究区各海拔梯度之间土壤理化性质存在较大差异,但总体呈现出一定规律(表 3)。土壤砂粒、粉粒、黏粒含量在不同海拔间无显著差异,其中砂粒含量总体上随海拔升高而增大,而粉粒含量变化相反;同一海拔梯度间,粉粒含量最高,砂粒次之,黏粒含量最低。4 种粒级土壤团聚体含量在不同海拔间无显著差异,但 ≥ 2 mm 团聚体含量在海拔 1 900 m 处时含量最高,且呈现出海拔越高其含量越低的趋势;而 $[1.00, 2.00)$ 、 $[0.25, 1.00)$ 、 <0.25 mm 团聚体含量在各海拔梯度间相差不大。海拔 1 900 m 土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)含量与其他 3 个海拔存在显著差异($P<0.05$),其含量随海拔梯度的升高而减少。

表 3 各海拔梯度土壤理化性质

Table 3 Physical and chemical properties of soil at each altitude gradient

海拔/m altitude	机械组成/% mechanical composition			团聚体粒径分布/% agglomerate distribution				微生物 生物量碳 质量分数/ (mg·kg ⁻¹) MBC mass fraction	微生物 生物量氮 质量分数/ (mg·kg ⁻¹) MBN mass fraction
	砂粒 sand	粉粒 silt	黏粒 clay	≥ 2.00 mm	$[1.00, 2.00)$ mm	$[0.25, 1.00)$ mm	<0.25 mm		
1 900	25.89±7.84 a	62.16±6.37 a	10.49±1.94 a	37.39±6.05 a	19.64±5.98 a	25.4±3.54 a	16.47±3.32 a	0.94±0.28 a	0.058±0.018 a
2 100	23.10±13.87 a	56.39±14.25 a	17.12±5.84 a	30.47±10.20 a	21.74±5.59 a	32.31±9.12 a	14.66±4.80 a	0.44±0.16 b	0.040±0.013 b
2 300	29.04±7.42 a	54.54±8.21 a	12.62±1.68 a	29.91±3.60 a	26.57±1.80 a	30.83±4.70 a	12.32±1.02 a	0.32±0.07 b	0.033±0.010 bc
2 500	32.45±10.36 a	55.93±2.24 a	10.99±1.88 a	27.2±22.18 a	17.32±10.65 a	34.99±16.20 a	20.27±8.59 a	0.30±0.18 b	0.023±0.004 c

注:MBC: microbial biomass carbon; MBN: microbial biomass nitrogen。

2.2 不同海拔梯度土壤水分入渗特征

4 个海拔梯度土壤水分入渗过程见图 1,不同海拔梯度土壤入渗速率存在一定差异,但总体呈现出在前 20 min 迅速衰弱(图 1a)。土壤水分入渗速率在 0~20 min、海拔 1 900 m 条件下由 12.00 降至 6.00 mm/min,降低了 50%;海拔 2 100 m 处由 9.75 降至 5.25 mm/min,降低了 46.15%;海拔 2 300 m 处由 10.25 降至 1.50 mm/min,降低了 85.37%;海拔 2 500 m 处由 2.50 降至 0.70 mm/min,降低了 72%。海拔较低的 1 900 和 2 100 m 的土壤入渗衰弱速率明显慢于海拔较高的 2 300 和 2 500 m。土壤入渗性能能够通过土壤初始入渗率、稳定入渗率和平均

入渗率表示,比对其大小就可以反映出土壤入渗能力强弱。海拔 1 900、2 100 以及 2 300 m 土壤入渗特征与海拔 2 500 m 之间存在显著的差异(图 1b),海拔 1 900、2 100 以及 2 300 m 的土壤入渗能力明显优于海拔 2 500 m。海拔 1 900、2 100、2 300 以及 2 500 m 的土壤初始入渗速率依次为 6.67、5.83、5.12 和 1.43 mm/min;稳定入渗率依次为 3.27、3.17、2.82 和 0.78 mm/min;平均入渗率依次为 4.81、4.31、4.02 和 1.05 mm/min。研究结果表明,不同海拔梯度之间土壤入渗能力大小依次为海拔 1 900、2 100、2 300、2 500 m。

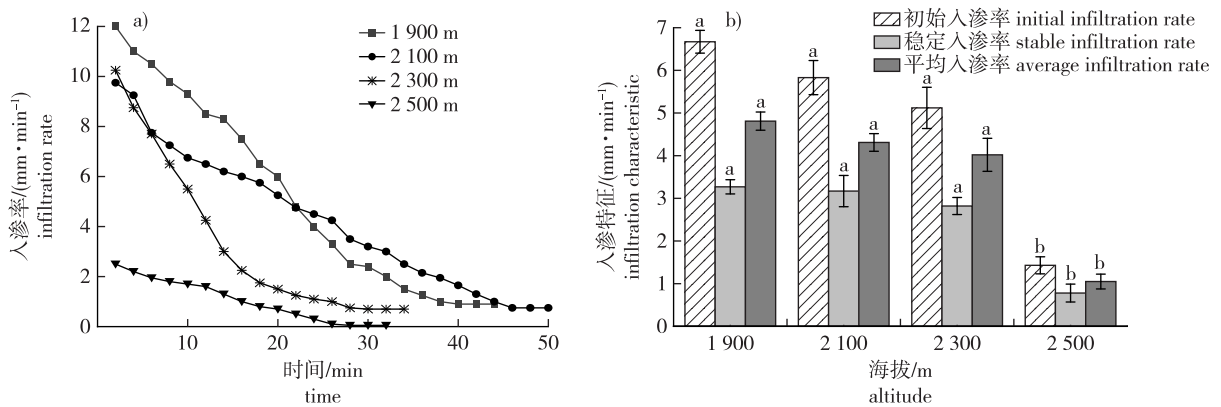


图 1 各海拔梯度土壤入渗率随时间的变化及入渗特征

Fig. 1 Variation of soil infiltration rate and characteristics of each altitude gradient with time

2.3 不同海拔梯度土壤微生物指数特征

各海拔土壤细菌、真菌丰富度 (Ace 和 Chao1 指数) 及多样性 (Shannon 和 Simpson 指数) 信息见表 4。不同海拔梯度土壤细菌、真菌的覆盖率均大于 99.9%, 表明现有的细菌、真菌测序深度能够真实地反映出栗子坪保护区不同海拔梯度土壤细菌、真菌群落的变化特征, 此结果参考陆其伟等^[27] 的研究。土壤细菌丰富度 (ACE 和 Chao1 指数) 和多样性 (Shannon 和 Simpson 指数) 在各海拔梯度间

差异不显著。土壤真菌丰富度 (ACE 和 Chao1 指数) 在 4 个海拔间存在一定差异, 表现为海拔 2 500 m 的显著比海拔 2 100 和 2 300 m 的多, 说明海拔 2 100 和 2 300 m 土壤真菌物种数量多于海拔 2 500 m 的。土壤真菌多样性 Simpson 指数在各海拔梯度间差异不显著, 说明各海拔的土壤真菌物种集中度比较相似; 土壤真菌多样性 (Shannon 和 Simpson 指数) 在海拔梯度间无显著差异。

表 4 各海拔梯度微生物指数及覆盖度

Table 4 Microbial indexes and coverage of each altitude gradient

微生物 microbial	海拔/m altitude	ACE 指数 ACE index	Chao1 指数 Chao1 index	Simpson 指数 Simpson index	Shannon 指数 Shannon index	覆盖度 coverage
细菌 bacteria	1 900	1 473.20±417.83 a	1 470.07±418.19 a	0.996±0 a	9.21±0.52 a	0.999 8±0 a
	2 100	1 216.00±307.29 a	1 212.14±306.28 a	0.996±0 a	8.93±0.50 a	0.999 8±0 a
	2 300	1 317.23±90.60 a	1 312.54±89.10 a	0.997±0 a	9.24±0.15 a	0.999 7±0 a
	2 500	1 239.97±310.18 a	1 235.82±309.98 a	0.996±0 a	9.09±0.47 a	0.999 7±0 a
真菌 fungi	1 900	815.87±25.56 ab	811.25±26.53 ab	0.961±0 a	6.42±0.07 a	0.999 7±0 b
	2 100	518.39±75.44 b	516.56±74.74 b	0.886±0.040 a	5.46±0.51 a	0.999 9±0 a
	2 300	599.71±213.69 b	597.87±215.06 b	0.966±0.020 a	6.67±0.80 a	0.999 9±0 a
	2 500	1 141.87±303.42 a	1139.62±304.14 a	0.895±0.090 a	5.85±1.11 a	0.999 8±0 ab

2.4 不同海拔土壤入渗过程拟合

各海拔梯度土壤入渗模型拟合结果见表 5。在 Kostiakov 模型中土壤初始入渗率、入渗衰弱程度拟合结果与实测结果一致。在 Philip 模型中, 土壤吸水率 (S) 拟合结果为海拔 2 300 m 的入渗能力强于海拔 2 100 m, 而实测结果为海拔 2 100 m 的强于海拔 2 300 m; 稳定入渗率 (A) 拟合值呈现出海拔 2 100 m 的大于海拔 1 900 m, 而实测值为海拔 1 900 m 的大于海拔 2 100 m, 其余海拔拟合值与实测值一致。Horton 模型拟合结果为海拔 2 300 m 的强于海拔 2 100 m, 而实测结果为海拔 2 100 m

的强于海拔 2 300 m; A 拟合值大小排序依次为海拔 2 300、2 100、1 900、2 500 m, 而稳定入渗率实测值与海拔梯度呈反比, Horton 模型中 A₀ 和 A 的拟合值于实测值存在较大差异。此外, 经验参数 (k) 值为入渗衰弱率, k 值越大则越快达到稳定状态, 其拟合的 k 值与实测一致。决定系数 R² 明确模型对土壤入渗拟合效果, Kostiakov 模型 R² 为 0.896 ~ 0.959, 平均值为 0.935; Philip 模型 R² 为 0.874 ~ 0.965, 平均值为 0.929; Horton 模型 R² 为 0.945 ~ 0.984, 平均值为 0.971。由上述土壤入渗模型分析以及决定系数 R² 大小, 综合考虑拟合值与实测

值的一致性以及拟合精确度,表明 Kostiakov 模型 更适合该研究区域土壤入渗特征。

表 5 各海拔土壤入渗模型拟合结果

Table 5 Analysis of fitting results of soil infiltration model at different altitude

海拔/m altitude	Kostiakov 模型 Kostiakov model			Philip 模型 Philip model			Horton 模型 Horton model			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>R</i> ²	<i>A</i> ₀	<i>A</i>	<i>k</i>	<i>R</i> ²
1 900	7.01	0.39	0.937	10.89	1.66	0.915	7.91	1.11	0.34	0.984
2 100	6.14	0.34	0.896	8.76	1.87	0.874	6.80	2.38	0.20	0.967
2 300	5.75	0.42	0.931	9.77	0.89	0.934	7.53	2.51	0.48	0.945
2 500	1.44	0.62	0.959	2.28	0.31	0.965	2.02	0.73	0.62	0.980

2.5 土壤入渗特征与环境因子的通径及相关性分析

将土壤机械组成(砂粒、粉粒、黏粒)、团聚体、微生物生物量碳、氮质量分数以及微生物指数(ACE、Chao1、Shannon、Simpson 指数)等指标作为自变量,平均入渗速率作为因变量。在通径分析过程中,砂粒、[1,2) mm 团聚体含量、细菌 ACE、Chao1、Simpson 指数和真菌 Chao1 指数等 6 个因子与土壤平均入渗速率之间相关性太小,系统自动剔除;剩余粉粒、黏粒、团聚体[≥2.00 mm、[0.25, 1.00) mm、<0.25 mm] 含量、MBC、MBN、细菌 Simpson 指数以及真菌 ACE、Shannon、Simpson 指数等 11 个因子,以此进行逐步回归分析,得到:

$$y = - 8.2 - 0.12 X_1 + 0.84 X_2 + 2.77 X_3 + 6.55 X_4 + 1.65 X_5 + 5.96 X_6 + 10.17 X_7 + 1.22 X_8 - 0.001 X_9 - 8.22 X_{10} + 1.43 X_{11}, (R^2 = 1, P < 0.05)。$$

(4)

式中:*y* 为土壤平均入渗率;*X*₁ 为粉粒含量;*X*₂ 为黏粒含量;*X*₃ 为<0.25 mm 团聚体含量;*X*₄ 为[0.25, 1.00) mm 团聚体含量;*X*₅ 为≥2.00 mm 团聚体含量;*X*₆ 为 MBC;*X*₇ 为 MBN;*X*₈ 为细菌 Shannon 指数;*X*₉ 为真菌 ACE 指数;*X*₁₀ 为真菌 Simpson 指数;*X*₁₁ 为真菌 Shannon 指数。

环境因子与土壤平均入渗率的通径分析显示(表 6),黏粒、<0.25 mm 团聚体、[0.25, 1.00) mm 团聚体、≥2.00 mm 团聚体含量、MBC、MBN、细菌 Shannon 指数以及真菌 Shannon 指数土壤平均入渗速率产生直接正向影响;粉粒含量、真菌 ACE 和 Simpson 指数对土壤平均入渗速率产生直接负向影响;其中,MBC 对土壤平均入渗率产生的直接正效应最大(0.861),真菌 Shannon 指数次之(0.742);砂粒含量对土壤平均入渗率产生的直接

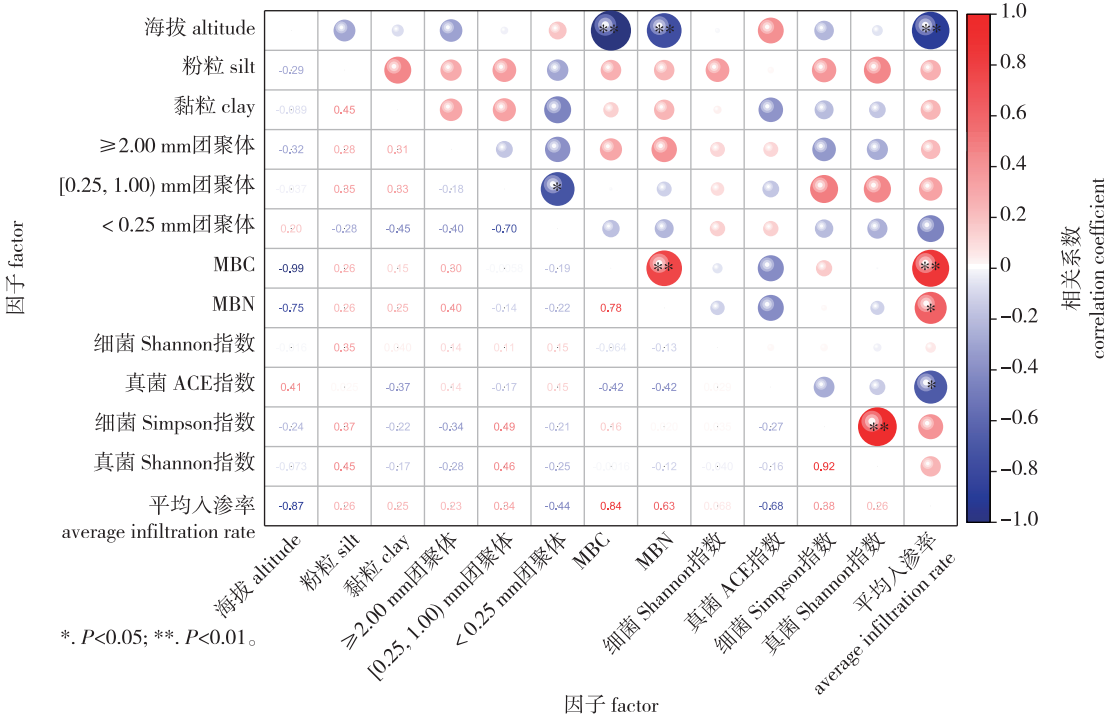
负效应最大(-0.654),真菌 Simpson 指数次之(-0.31)。此外,土壤粉粒含量和真菌 Simpson 指数对土壤平均入渗速率产生直接负效应,但受到 MBC 和真菌 Shannon 指数的间接正效应影响,产生了强烈的间接正效应;[0.25, 1.00) mm 团聚体、≥2.00 mm 团聚体含量、MBC、细菌 Shannon 指数、真菌 Shannon 指数对土壤平均入渗速率产生直接正效应,但受到粉粒含量、MBC、真菌 Simpson、Shannon 指数的间接负效应影响,抑制土壤入渗速率;真菌 ACE 指数,对土壤平均入渗速率产生直接负效应,受 MBC 和真菌 Shannon 指数间接负效应影响,促进了其对土壤的抑制作用。MBN 对土壤平均入渗速率产生直接正效应,受微生物生物量碳的间接正效应影响,加强其对土壤入渗作用。通过分析环境因子对土壤平均入渗率的直接作用、间接作用以及决策效应发现,MBC(0.866)、粉粒含量(-0.644)、真菌 Shannon 指数(0.511)、真菌 Simpson 指数(-0.329)为影响土壤入渗速率的主要因子。

相关性分析(图 2)表明,土壤平均入渗速率、MBC 及 MBN 与海拔呈极显著负相关关系(*P*<0.01),土壤真菌 ACE 指数与土壤平均入渗速率呈显著负相关关系(*P*<0.05),MBN 与土壤平均入渗速率呈显著正相关关系(*P*<0.05),MBC 与土壤平均入渗速率呈极显著正相关关系(*P*<0.01);此外,MBC 与 MBN 呈极显著正相关关系(*P*<0.01),两者相互影响,相互促进;[0.25, 1.00) 与<0.25 mm 团聚体呈显著负相关关系(*P*<0.05),说明<0.25 mm 团聚体含量越少,则[0.25, 1.00) 团聚体含量越多,而[0.25, 1.00) 和≥2.00 mm 团聚体含量与土壤平均入渗速率呈正相关关系,表明大粒级的团聚体含量越多,对土壤水分入渗效果越好。

表 6 环境因子对土壤平均入渗率的途径系数
Table 6 Path coefficient of environmental factors on average soil infiltration rate

因子 factor	DR	R	间接途径系数 indirect path coefficient											决策系数 coefficient	排序 sort	
			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁			IDR
X ₁	-0.654	0.164		0.096	0.058	0.100	-0.016	0.224	0.034	0.109	-0.003	-0.113	0.330	0.819	-0.644	11
X ₂	0.214	0.217	-0.293		0.065	0.096	-0.026	0.127	0.033	0.012	0.048	0.068	-0.127	0.003	0.173	4
X ₃	0.208	0.257	-0.184	0.067		-0.051	-0.023	0.261	0.052	0.043	-0.018	0.106	-0.204	0.049	0.113	5
X ₄	0.290	0.280	-0.226	0.071	-0.036		-0.041	-0.005	-0.018	0.035	0.023	-0.151	0.338	-0.010	0.188	3
X ₅	0.058	-0.424	0.184	-0.095	-0.083	-0.204		-0.162	-0.029	0.046	-0.019	0.065	-0.186	-0.483	-0.030	9
X ₆	0.861	0.857	-0.170	0.031	0.063	-0.002	-0.011		0.101	-0.020	0.055	-0.051	-0.001	-0.005	0.886	1
X ₇	0.130	0.634	-0.169	0.054	0.083	-0.040	-0.013	0.672		-0.040	0.054	-0.006	-0.091	0.504	0.006	8
X ₈	0.312	0.046	-0.228	0.009	0.028	0.032	0.008	-0.055	-0.017		-0.004	-0.011	-0.030	-0.268	0.055	6
X ₉	-0.131	-0.678	-0.016	-0.079	0.029	-0.050	0.008	-0.361	-0.054	0.009		0.082	-0.116	-0.548	0.026	7
X ₁₀	-0.310	0.336	-0.220	-0.047	-0.071	0.141	-0.012	0.140	0.003	0.011	0.035		0.686	0.666	-0.329	10
X ₁₁	0.742	0.179	-0.291	-0.037	-0.057	0.132	-0.015	-0.002	-0.016	-0.012	0.021	-0.287		-0.564	0.551	2

注:DR.直接途径系数 direct path coefficient; R.相关系数 correlation coefficient; IDR 总间接途径系数 total indirect path coefficient。



*, $P<0.05$; **, $P<0.01$ 。

图 2 环境因子与土壤平均入渗率的相关性分析
Fig. 2 Correlation analysis between environmental factors and average soil infiltration

3 讨论

3.1 海拔梯度对入渗特征的影响

以四川栗子坪自然保护区 4 个海拔典型样地为试验点进行土壤入渗特征试验,结果发现土壤入渗速率随海拔升高而减弱,呈现出土壤入渗速率与海拔梯度呈反比的规律。有研究表明^[14-16,28],土壤机械组成、团聚体分布、微生物以及人为干扰等因素均会对土壤入渗速率造成影响。李志等^[28]对

武功山草甸土壤渗透性研究发现土壤入渗特征不完全与海拔梯度变化相对应,本研究中土壤入渗特征随海拔升高而降低。这种现象可能是因为武功山为旅游景区受到人为干扰的强度较高,而栗子坪保护区为野生大熊猫保护区受到人为干扰可能性较低而造成。石玉龙等^[29]在西藏色季拉山研究发现海拔越高土壤渗透能力越差,与本研究结果一致;土壤容重随海拔增加而增大,土壤质地在较高海拔处更紧实,从而抑制土壤水分渗透能力。微生

物生物量碳、氮含量与海拔梯度呈极显著负相关关系($P<0.01$),说明土壤微生物生物量碳、氮含量随海拔升高而降低;曹瑞等^[30]在川西海拔高山峡谷区发现,土壤微生物生物量随海拔梯度呈先增加后减少再增加趋势;丛静等^[31]在神农架自然保护区发现土壤微生物生物量随海拔的上升而增加;本研究与曹瑞等^[30]、丛静等^[31]研究结果存在些许差异,这是由研究区水热条件、区域小气候以及土壤理化性质等因素差异导致^[32]。土壤微生物生物量是土壤微生物发挥作用的物质基础,可以反映土壤环境质量的微小变化^[33];同时,土壤微生物生物量的差异,会影响土壤机械组成的粒级结构^[34]和团聚体粒级结构^[35],而土壤机械组和团聚体又是影响土壤入渗速率的主要因素。相关性分析显示,海拔与微生物生物量碳、氮含量梯度呈极显著负相关关系($P<0.01$),而微生物生物量碳、氮含量与土壤平均入渗速率呈显著正相关关系($P<0.05$),说明微生物生物量对土壤入渗速率有促进作用。一方面是微生物生物量高,对土壤凋落物及团聚体里养分矿化、硝化分解速率更快,改变土壤小环境从而促进了土壤水分入渗;另一方面是养分矿化、硝化分解速率快,加速了养分在土壤中的循环速率,促进了植物根系的生长,使得土壤质地疏松,从而加快了土壤水分入渗。

3.2 环境因子对入渗特征的影响

不同海拔梯度呈现出不同的土壤质地、微生物生物量及微生物特征,导致土壤入渗速率存在显著差异性,表现为海拔梯度越高则土壤入渗能力越差。通过通径分析和相关性分析发现,粉粒、微生物生物量、团聚体以及真菌 ACE、Shannon 和 Simpson 指数等指标是影响土壤水分入渗的主要因素;其中微生物生物量、真菌 Shannon 对土壤水分入渗产生促进作用,这是因为土壤微生物促进土壤凋落物、有机质分解和养分转化以及调节生态系统碳、氮循环等^[36],而枯落物和腐殖质在分解过程中会改善土壤生境,促进土壤团聚体的形成,使土壤孔隙度增加,加强土壤水分渗透能力^[23]。真菌 Simpson 指数对土壤水分入渗产生抑制作用,是因为海拔越高土壤真菌群落集中度越高,对地表枯落物和腐殖质的分解不充分,不广泛从而抑制土壤水分入渗。通径分析显示,粉粒对土壤水分入渗产生直接负作用,但是受到微生物生物量碳和真菌 Shannon 指数的间接正向作用,改变了土壤质地从而促进了土壤水分入渗。同时,发现土壤有机质含量及微生物生物量与入渗速率成正比,这是因为有

机质和微生物生物量的增加,对土壤孔隙结构改善起到关键性作用^[37],从而增加了土壤入渗率。在入渗前 20 min 土壤入渗速率迅速减弱,在海拔 1 900、2 100、2 300、2 500 m 处分别衰弱了 50.00%、46.15%、85.37%、72.00%,且海拔 1 900、2 100 m 从初始入渗率到稳定入渗率所需要时间多于海拔 2 300、2 500 m。这是因为海拔 1 900、2 100 m 的土壤有机质和毛管孔隙度显著高于海拔 2 300、2 500 m,而有机质有利于土壤团聚体的形成,团聚体粒级结构又与孔隙状况与有关^[38],说明有机质含量高则土壤孔隙状况好,入渗能力增强,因此衰弱速率较慢;另一方面是因为海拔 2 300、2 500 m 含水率低,不利于植被生长及其根系发育,从而抑制了土壤水分入渗。此外,各海拔梯度土壤入渗特征均表现为初始入渗率>平均入渗率>稳定入渗率,符合土壤入渗过程特征^[39]。

综上,本研究结果表明,海拔梯度与土壤入渗速率呈负相关关系,且在入渗前 20 min 海拔 1 900、2 100 m 的土壤入渗衰弱速率明显慢于海拔 2 300、2 500 m;通过相关性、通径分析发现这主要是受到土壤质地、团聚体以及微生物生物量等因素影响。此外,土壤入渗模型拟合效果表明,Kostiakov 模型 R^2 为 0.896~0.959,平均值为 0.935;Philip 模型 R^2 为 0.874~0.965,平均值为 0.929;Horton 模型 R^2 为 0.945~0.984,平均值为 0.971;综合考虑拟合值与实测值的一致性以及拟合精确度,认为 Kostiakov 模型更适合该研究区域土壤入渗特征。

参考文献(reference):

- [1] SCHWARTZ R C, SCHLEGEL A J, BELL J M, et al. Contrasting tillage effects on stored soil water, infiltration and evapotranspiration fluxes in a dryland rotation at two locations[J]. Soil Tillage Res, 2019, 190: 157-174. DOI: 10.1016/j.still.2019.02.013.
- [2] 刘目兴, 杜文正, 张海林. 三峡库区不同林型土壤的入渗能力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(3): 299-306. LIU M X, DU W Z, ZHANG H L. Research on the soil infiltration capacity of different forest types in the Three Gorges reservoir area [J]. Resour Environ Yangtze Basin, 2013, 22(3): 299-306.
- [3] 陈娟, 陈林, 宋乃平, 等. 荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 18-23. CHEN J, CHEN L, SONG N P, et al. Soil infiltration characteristics of different soils types in desert steppe [J]. J Soil Water Conserv, 2018, 32(4): 18-23. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.04.004.
- [4] 周维, 张建辉. 金沙江支流冲沟侵蚀区四种土地利用方式下土壤入渗特性研究[J]. 土壤, 2006, 38(3): 333-337. ZHOU W, ZHANG J H. Soil infiltration under different patterns of land use in gully erosion area of the Jinshajiang River basin [J]. Soils, 2006, 38(3): 333-337. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-9829.2006.

- 03.017.
- [5] 刘茜茹,冯天骄,王平,等.晋西黄土区长期植被恢复对土壤表层入渗与水分储量差异的影响[J].水土保持通报,2023,43(2):50-59.LIU X R,FENG T J,WANG P,et al.Effect of long-term vegetation restoration on surface soil water infiltration and water storage in loess area of western province[J].Bull Soil Water Conserv,2023,43(2):50-59.DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.007.
- [6] 赵洋毅,王玉杰,王云琦,等.渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2010,30(15):4162-4172.ZHAO Y Y,WANG Y J,WANG Y Q,et al.Effects of structures of plantation forests on soil infiltration characteristics in source water protect areas in northern Chongqing City[J].Acta Ecol Sin,2010,30(15):4162-4172.
- [7] 舒健,张家春,张珍明,等.不同海拔梯度下梵净山土壤机械组成及养分特征[J].四川农业大学学报,2017,35(1):52-59.SHU K,ZHANG J C,ZHANG Z M,et al.Soil mechanical composition and nutrient properties along an elevational gradient in Fan-jing Mountain[J].J Sichuan Agric Univ,2017,35(1):52-59.DOI: 10.16036/j.issn.1000-2650.2017.01.008.
- [8] JERÁBEK J,ZUMR D,DOSTÁL T.Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance[J].Soil Tillage Res,2017,174:231-240.DOI: 10.1016/j.still.2017.07.008.
- [9] GAO L L,BECKER E,LIANG G P,et al.Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon[J].Geoderma,2017,288:97-104.DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.11.005.
- [10] 卢振启,黄秋娟,杨新兵.河北雾灵山不同海拔油松人工林枯落物及土壤水文效应研究[J].水土保持学报,2014,28(1):112-116.LU Z Q,HUANG Q X,YANG X B.Research on hydrological effects of forest litters and soil of *Pinus tabulaeformis* plantations in the different altitudes of Wuling Mountains in Hebei[J].J Soil Water Conserv,2014,28(1):112-116.DOI: 10.13870/j.cnki.stbctb.2014.01.003.
- [11] 胡晓聪,黄乾亮,金亮.西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J].应用生态学报,2017,28(1):55-63.HU X C,HUANG Q L,JIN L.Hydrological functions of the litters and soil of tropical montane rain forest in Xishuangbanna,Yunnan,China[J].Chin J Appl Ecol,2017,28(1):55-63.DOI: 10.13287/j.1001-9332.201701.018.
- [12] 亢晨波,郭汉清,张垚,等.关帝山不同海拔和坡向土壤水分入渗特征[J].东北林业大学学报,2022,50(6):76-82.KANG C B,GUO H Q,ZHANG Y,et al.Infiltration characteristics of soil moisture at different altitudes and slopes of Guandi Mountain[J].J Northeast For Univ,2022,50(6):76-82.DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2022.06.018.
- [13] 刘瑞,夏卫生,梁羽石,等.湖南省衡山不同海拔高度土壤的入渗特征[J].水土保持通报,2019,39(4):82-88.LIU R,XIA W S,LIANG Y S,et al.Soil infiltration characteristics at different altitudes in Hengshan Mountains of Hu'nan Province[J].Bull Soil Water Conserv,2019,39(4):82-88.DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.013.
- [14] FU Y,LI G L,ZHENG T H,et al.Splash detachment and transport of loess aggregate fragments by raindrop action[J].CATENA,2017,150:154-160.DOI: 10.1016/j.catena.2016.11.021.
- [15] 印家旺,阿拉木萨,苏宇航,等.科尔沁沙地不同土地利用类型土壤入渗特征比较研究[J].水土保持通报,2022,42(4):90-98.YIN J W,Alamusa,SU Y H,et al.Comparative study on soil infiltration characteristics of different land use types in Horqin sandy land[J].Bull Soil Water Conserv,2022,42(4):90-98.DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.012.
- [16] 云慧雅,毕华兴,王珊珊,等.不同林分类型土壤理化特征及其对土壤入渗过程的影响[J].水土保持学报,2021,35(6):183-189.YUN H Y,BI H X,WANG S S,et al.Soil physical and chemical characteristics of different forest types and their effects on soil infiltration process[J].J Soil Water Conserv,2021,35(6):183-189.DOI: 10.13870/j.cnki.stbctb.2021.06.025.
- [17] 张利荣,李惠通,郑立津,等.不同林龄杉木人工林的林下植被与土壤理化特性[J].亚热带农业研究,2021,17(3):165-172.ZHANG L R,LI H T,ZHENG L J,et al.Undergrowth vegetation of Chinese fir plantations of different ages and soil physical and chemical properties[J].Subtrop Agric Res,2021,17(3):165-172.DOI: 10.13321/j.cnki.subtrop.agric.res.2021.03.004.
- [18] 李新星,刘桂民,吴小丽,等.马衙山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J].生态学杂志,2020,39(3):758-765.LI X X,LIU G M,WU X L,et al.Elevational distribution of soil organic carbon,nitrogen and phosphorus contents and their ecological stoichiometry on Maxian Mountain[J].Chin J Ecol,2020,39(3):758-765.DOI: 10.13292/j.1000-4890.202003.004.
- [19] 韦慧,邓羽松,林立文,等.喀斯特生态脆弱区典型小生境土壤团聚体稳定性比较研究[J].生态学报,2022,42(7):2751-2762.WEI H,DENG Y S,LIN L W,et al.Comparative study on the stability of soil aggregates in typical microhabitats in Karst ecologically fragile areas[J].Acta Ecol Sin,2022,42(7):2751-2762.DOI: 10.5846/stxb202103200736.
- [20] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996.LIU G S.Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles[M].Beijing:Standards Press of China,1996.
- [21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.BAO S D.Soil and agricultural chemistry analysis[M].3rd ed.Beijing:China Agriculture Press,2000.
- [22] 刘艳娇,刘庆,贺合亮,等.亚高山粗枝云杉人工林土壤原核微生物群落结构与功能变化[J].应用生态学报,2023,34(12):3279-3290.LIU Y J,LIU Q,HE H L,et al.Changes in the structure and function of soil prokaryotic communities in subalpine *Picea asperata* plantations[J].Chin J Appl Ecol,2023,34(12):3279-3290.DOI: 10.13287/j.1001-9332.202312.031.
- [23] 阿茹·苏里坦,常顺利,张毓涛.天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟[J].生态学报,2019,39(24):9111-9118.ARU SULTAN,CHANG S L,ZHANG Y T.Comparative analysis and simulation of soil moisture infiltration characteristics in different communities in the forests of Tianshan Mountains,China[J].Acta Ecol Sin,2019,39(24):9111-9118.DOI: 10.5846/stxb201810072160.
- [24] 牛文全,邹小阳,刘晶晶,等.残膜对土壤水分入渗和蒸发的影响及不确定性分析[J].农业工程学报,2016,32(14):110-119.NIU W Q,ZOU X Y,LIU J J,et al.Effects of residual plastic film mixed in soil on water infiltration,evaporation and its uncertainty analysis[J].Trans Chin Soc Agric Eng,2016,32(14):110-119.DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.016.
- [25] 郑健,张彦宁,王燕,等.沼液穴灌入渗特征及 Philip 入渗模型拟合[J].干旱地区农业研究,2019,37(1):144-150.ZHENG J,ZHANG Y N,WANG Y,et al.Infiltration characteristics and Philip model fitting analysis of biogas slurry hole-irrigation[J].

- Agric Res Arid Areas, 2019, 37(1): 144–150. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2019.01.20.
- [26] 曾江敏, 何丙辉, 李天阳, 等. 喀斯特槽谷区不同林草恢复模式下土壤入渗特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 58–64. ZENG J M, HE B H, LI T Y, et al. Soil infiltration characteristics under different forest and grass restoration models in Karst trough-valley region[J]. J Soil Water Conserv, 2019, 33(4): 58–64. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.04.009.
- [27] 陆其伟, 脱云飞, 冯永钰, 等. 栗子坪自然保护区林分类型对土壤化学计量特征、微生物及其季节动态响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 285–295. LU Q W, TUO Y F, FENG Y Y, et al. Response of forest stand types to soil stoichiometric characteristics, microorganisms and their seasonal dynamics in Liziping Nature Reserve[J]. J Soil Water Conserv, 2024, 38(5): 285–295. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.035.
- [28] 李志, 袁颖丹, 胡耀文, 等. 海拔及旅游干扰对武功山山地草甸土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 635–645. LI Z, YUAN Y D, HU Y W, et al. Effects of elevation and tourism disturbance on meadow soil infiltration on Wugong Mountain[J]. Acta Ecol Sin, 2018, 38(2): 635–645.
- [29] 石玉龙, 周晨亮, 王建峰, 等. 西藏色季拉山不同海拔梯度急尖长苞冷杉林土壤入渗特征研究[J]. 林业资源管理, 2015(4): 98–103. SHI Y L, ZHOU C N, WANG J F, et al. Soil infiltration characteristics in *Abies georgei* var. *smithii* forest of Sygara Mountains in Tibet based on different elevations[J]. For Resour Manag, 2015(4): 98–103. DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2015.04.017.
- [30] 曹瑞, 吴福忠, 杨万勤, 等. 海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1257–1264. CAO R, WU F Z, YANG W Q, et al. Effects of altitudes on soil microbial biomass and enzyme activity in alpine-gorge regions[J]. Chin J Appl Ecol, 2016, 27(4): 1257–1264. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201604.018.
- [31] 丛静, 刘晓, 卢慧, 等. 神农架自然保护区土壤微生物生物量碳、氮沿海拔梯度的变化及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2014, 33(12): 3381–3387. CONG J, LIU X, LU H, et al. Changes of soil microbial biomass carbon and nitrogen along the altitude gradient and its influence factors in Shennongjia Natural Reserve, China[J]. Chin J Ecol, 2014, 33(12): 3381–3387. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2014.0303.
- [32] 胡璟, 刘兴良, 胡宗达, 等. 川西亚高山典型灌丛土壤微生物量及其碳氮磷化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(2): 220–228. HU J, LIU X L, HU Z D, et al. Changes in soil microbial C:N:P stoichiometry in different shrub types in subalpine regions of western Sichuan Province, China[J]. Chin J Appl Environ Biol, 2024, 30(2): 220–228. DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2023.05017.
- [33] 胡嵩, 张颖, 史荣久, 等. 长白山原始红松林次生演替过程中土壤微生物生物量和酶活性变化[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 366–372. HU S, ZHANG Y, SHI R J, et al. Temporal variations of soil microbial biomass and enzyme activities during the secondary succession of primary broadleaved-*Pinus koraiensis* forests in Changbai Mountains of northeast China[J]. Chin J Appl Ecol, 2013, 24(2): 366–372. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2013.0168.
- [34] 王彦武, 罗玲, 张峰, 等. 河西绿洲荒漠过渡带梭梭林土壤保育效应[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 749–762. WANG Y W, LUO L, ZHANG F, et al. Soil conservation effect of *Haloxylon ammodendron* bushes in Hexi oasis-desert ecotone[J]. Acta Pedol Sin, 2019, 56(3): 749–762. DOI: 10.11766/trxb201806260176.
- [35] 李秋嘉, 薛志婧, 周正朝. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体养分特征及微生物特性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 137–145. LI Q J, XUE Z J, ZHOU Z C. Effects of vegetation restoration on nutrient and microbial properties of soil aggregates with different particle sizes in the Loess Hilly regions of Ningxia, northwest China[J]. Chin J Appl Ecol, 2019, 30(1): 137–145. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201901.022.
- [36] 翟辉, 张海, 张超, 等. 黄土峁状丘陵区不同类型林分土壤微生物功能多样性[J]. 林业科学, 2016, 52(12): 84–91. ZHAI H, ZHANG H, ZHANG C, et al. Soil microbial functional diversity in different types of stands in the hilly-gully regions of Loess Plateau[J]. Sci Silvae Sin, 2016, 52(12): 84–91. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20161210.
- [37] ISLAM M U, JIANG F H, GUO Z C, et al. Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis[J]. Soil Tillage Res, 2021, 209: 104926. DOI: 10.1016/j.still.2020.104926.
- [38] 冯娜, 刘冬冬, 赵荣存, 等. 岩溶山地植被恢复中碳酸盐岩红土入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 162–169, 175. FENG N, LIU D D, ZHAO R C, et al. Infiltration characteristics and influencing factors of carbonate laterite from Karst Mountain areas during vegetation restoration[J]. J Soil Water Conserv, 2019, 33(6): 162–169, 175. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.06.023.
- [39] 郭海云, 王根绪, 孙守琴. 氮添加对亚高山针叶林土壤结构及水分入渗性能的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 238–245. GUO H Y, WANG G X, SUN S Q. Effects of nitrogen addition on soil structure and water infiltration of subalpine coniferous forest[J]. J Soil Water Conserv, 2023, 37(1): 238–245. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.01.031.

(责任编辑 孟苗婧)