

土壤类型对优先流路径和磷形态影响的定量评价

梁建宏 吴艳宏 周俊 王吉鹏 王晓晓 李睿

(中国科学院成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041)

摘要: 以中国贡嘎山由青灰色砂质冰水堆积物发育而成的疏松岩性土壤和德国厄尔士山渍水土壤优先流路径为研究对象,通过野外染色示踪试验和改进的 Hedley 磷形态提取法,使用优先流染色面积比和优先流程度评价指数定量评价不同类型土壤的优先流程度,通过相关关系分析进一步揭示不同土壤类型中优先流路径对磷形态分布的影响。结果表明:贡嘎山和厄尔士山优先流图片总染色面积比分别为 31% 和 52%,厄尔士山渍水土优先流比贡嘎山疏松岩性土发育较好。贡嘎山疏松岩性土壤优先流发育程度与潜在生物可利用无机磷和有机磷贡献率显著正相关,而即时生物有效无机磷和磷灰石磷与厄尔士山渍水土壤优先流发育程度显著正相关。土壤类型影响优先流路径分布和土壤磷形态分布,从而影响土壤磷赋存状况和下游水质安全。

关键词: 土壤; 优先流路径; 磷; 染色示踪; Hedley 连续提取法

中图分类号: S152.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0220-08

Quantitative Evaluation of Effect of Soil Types on Preferential Flow Pathways and Soil Phosphorus Forms

LIANG Jianhong WU Yanhong ZHOU Jun WANG Jipeng WANG Xiaoxiao LI Rui

(Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: With the development of earth's critical zone, the crucial hydropedological problems are needed to be solved. The quantitative expression of preferential flow and soil structure and stratification, water flow in situ and solute transport is the key research to the earth's critical zone. Phosphorus loss from soils and water flow has been a vital water quality issue because of the critical role that phosphorus plays in eutrophication. Preferential flow pathways (PFPs) are one of main factors that affect subsurface phosphorus transport, which are the direct connections between soil surface and groundwater. The phosphorus fractions of two types of soil, Regosols from Gongga Mountain and Stagnosol from Ore Mountain, were investigated by using the modified Hedley sequential phosphorus extraction method. Regosols in Gongga Mountain was developed by the moraine colonization by plants in the relatively mild and humid climate. PFPs were identified by the dye tracer experiments using brilliant blue FCF. The tracer-infiltration patterns were parameterized by dye coverage ratio (D_c) and evaluation index of PFPs (C_v). The impact of PFPs on the distribution of phosphorus fractions was evaluated by the Pearson correlations and *T*-test. The results indicated that dye coverages of Regosols from Gongga Mountain and Stagnosol from Ore Mountain were 31% and 52%, respectively. The degree of preferential flow in Ore Mountain Stagnosol soil was tended to be larger than that in Regosols soil from Gongga Mountain; PFPs in Gongga Mountain were important contributors to the potential bioavailable inorganic phosphorus (PBPI) and organic phosphorus load, while PFPs in Ore Mountain were important contributors to the readily bioavailable inorganic phosphorus (RBPi). In conclusion, the results showed that soil types could affect both the infiltration patterns of PFPs and the transfer process of phosphorus fractions.

Key words: soil; preferential flow pathways; phosphorus; dye tracer; Hedley sequential extraction method

收稿日期: 2016-05-09 修回日期: 2016-06-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41272200)和国家重点研发计划项目(2016YFC0502401)

作者简介: 梁建宏(1982—),男,博士生,主要从事土壤优先流及其溶质运移研究,E-mail: jhliang@karst.ac.cn

通信作者: 吴艳宏(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事山地生物地球化学研究,E-mail: yhwu@imde.ac.cn

引言

土壤优先流路径是由于植物根系、土壤动物活动、干旱冻融等条件形成的通道,可以加快水分和溶质运移^[1-2]。溶质快速向深层土壤和地下水运移,致使水土养分流失,地下水污染^[3]。磷是生物生长必需营养元素,对生物能量转移和维持生态系统的群落稳定起到重要作用^[4-5],土壤磷流失是导致水环境富营养化的主要因素之一^[6]。

土壤优先流路径是除地表径流以外,对于土壤磷流失作用最大的途径^[6]。关于土壤优先流路径对磷运移的影响只有少部分研究涉及^[7]。土壤磷流失与磷的形态关系密切,研究表明土壤磷流失主要以可溶性无机磷、有机磷和颗粒态磷为主^[8-9]。广泛用于野外土壤优先流研究的方法是使用染色示踪剂,通过使用染色示踪剂以及土壤剖面图片分析方法,在高分辨率下分析土壤优先流分布特征^[1,10-12],常采用近红外光谱^[13-14]、土壤磷总量分析^[15]以及改进的 Hedley 连续提取磷方法^[16]等技术手段对土壤磷赋存状况进行研究。

综上所述,目前国内外研究尚未综合分析不同土壤类型的优先流如何影响磷形态运移。本文通过中国贡嘎山和德国厄尔士山土壤优先流路径分布及其磷形态赋存特征,对比研究土壤优先流路径对磷形态赋存的影响。

1 研究区概况

中国野外试验于 2014 年 8 月在中国科学院贡

嘎山高山生态系统观测试验站进行采样。贡嘎山(29°20'~30°20'N、101°30'~102°15'E)位于青藏高原与四川盆地过渡带,主峰海拔高度 7 556 m。根据贡嘎山海螺沟气象站(海拔高度 3 000 m)数据,研究区域年均气温 4.1℃,年降水量 1 903 mm,主要集中在夏季^[17]。贡嘎山海螺沟受海洋性山谷冰川和泥石流影响,冰川退缩迹地土壤序列上的土壤母质层为青灰色的砂质冰水堆积物。由于土壤发育于冰碛物,在土壤剖面中还夹杂有较多的石砾。根据联合国粮农组织世界土壤资源参比基础(WRB-FAO)2014 版,贡嘎山森林土壤类型为疏松岩性土(Regosols)。由于疏松岩性土成土时间较短,团聚体发育较少,导致优先流的产生决定于是否存在生物孔隙^[18]。疏松岩性土水流类型主要有均质流、非均质流以及大孔隙流^[19]。

德国野外试验于 2013 年 10 月在德国萨克森州东厄尔士山 Rehefeld 森林保护区进行。东厄尔士山(50°48'N、13°36'E)位于德国与捷克边境,岩层以硅酸盐岩为主,研究区年均气温 4.9℃,年降水量为 1 080 mm^[20],土壤类型为渍水土(Stagnosol)。渍水土主要以中度或者强烈的优先流为主^[21],发生在根系通道、土壤动物孔隙以及土壤裂缝中。本研究 2 个样地土壤基本理化性质如表 1 所示。

2 研究方法

2.1 样地选择和染色示踪试验

在 2 个研究样地分别选取尺寸为 1 m × 1 m 的样地,用木桩和线绳将其均匀网格化,在不破坏有机

表 1 研究区样地概况

Tab. 1 General characteristics of sampling sites

样地	土壤深度/cm	土壤含水率/%	pH 值	黏粒(粒径小于	粉粒(粒径 2 ~	粗砂(粒径 20 ~	植被类型	海拔高度/m
				2 μm)质量分数/%	20 μm)质量分数/%	2 000 μm)质量分数/%		
中国贡嘎山	0 ~ 10	61.8	6.56				针阔混交林 冬瓜杨和云、冷杉	2 865
	11 ~ 30	15.1	6.42	4.73	32.12	63.15		
	31 ~ 50	10.4	6.95	1.05	15.86	83.09		
德国厄尔士山	0 ~ 10	61.0	4.90				欧洲山毛榉林	800
	11 ~ 30	41.0	4.19	26.7	52.9	20.4		
	31 ~ 50	28.1	4.31	17.8	58.7	23.5		

质层的前提下,清理样地中散落的树枝等。野外染色示踪试验采用亮蓝 Brilliant Blue FCF(C. I. 42090)进行。亮蓝染色剂是一种食品添加剂,其分子式为 C₃₇H₃₄N₂Na₂O₉S₃,易溶于水,因此被广泛用于研究土壤优先流及路径中溶质迁移研究^[7]。配制亮蓝染色示踪剂(3 g/L),喷洒量为 30 L/h。为防止降雨影响,加盖雨布 12 h,次日移走雨布并使用标尺测量土壤深度,分别采集同层被染色土壤(土壤优先流

路径)和未染色土壤(土壤基质),共取 3 个土壤平行剖面,每个剖面均分为 0 ~ 10 cm、11 ~ 30 cm、31 ~ 50 cm 3 个土壤深度。

2.2 室内图片分析及试验方法

优先流染色图片分析方法参照文献[1]。土壤基本理化性质参照常规试验方法测定^[15-16]。土壤磷形态测定使用的改进 Hedley 连续提取磷形态方法^[16]以及磷形态分类表如图 1 和表 2 所示。

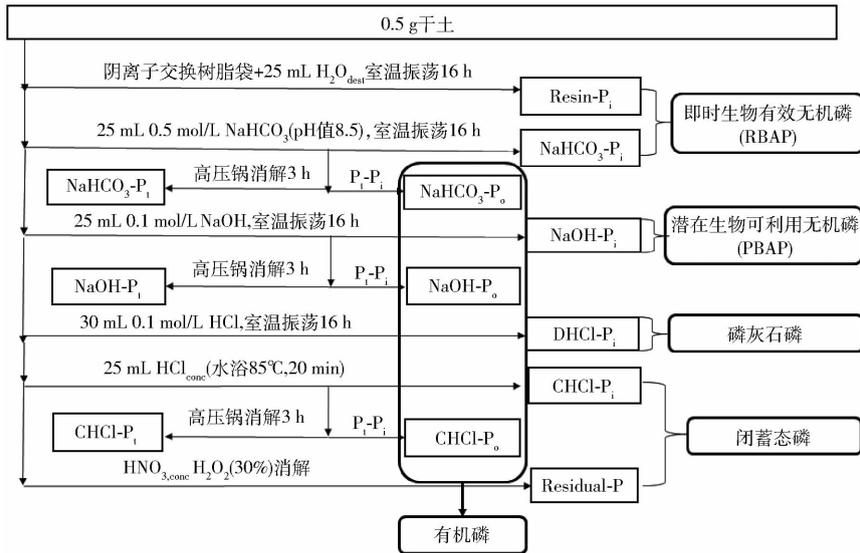


图1 改进的 Hedley 连续提取土壤磷方法及其形态分类流程图

Fig. 1 Flow chart of modified Hedley sequential phosphorus extraction method

表2 基于改进 Hedley 方法磷形态分类及其含义

Tab. 2 Description of soil phosphorus fractions detected based on modified Hedley sequence extraction method

磷形态分类	改进 Hedley 方法磷形态	含义
即时生物有效无机磷	Resin-P _i 、NaHCO ₃ -P _i	生物有效态磷, 可被生物直接吸收
潜在生物可利用无机磷	NaOH-P _i	不能被生物直接利用, 但是随着外界条件变化可被生物吸收
闭蓄态磷	CHCl-P _i 、Residual P	较难被生物吸收, 与次生矿物结合
有机磷	NaHCO ₃ -P _o 、NaOH-P _o 、CHCl-P _o	除 NaHCO ₃ -P _o 外较难被生物吸收
磷灰石磷	DHCl-P _i	较难被生物利用, 与原生矿物结合

2.3 数据处理

2.3.1 优先流路径染色图片分析

(1) 优先流染色面积比

土壤优先流剖面染色面积比是被普遍使用评价土壤优先流发育程度的指标, 染色面积比越高, 说明土壤优先流发育越发达^[22], 其计算公式为

$$D_c = \frac{D}{D + N_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中 D_c ——某土壤剖面染色面积比

D ——某土壤剖面总染色面积

N_d ——某土壤剖面未被染色面积

(2) 优先流程度评价指数

降水及地面径流沿优先流路径快速在土壤通过, 并在这一过程中与土壤基质发生渗透现象, 从而在优先流路径周边形成渗透区域。在土壤优先流路径染色试验中, 染色部分便是表征优先流的渗透区域, 由于优先流发育不同, 野外直观视觉存在染色颜色深浅区别, 如何精确定量表征优先流发育程度成为优先流分布特征研究的难点。优先流程度评价指数即优先流染色面积比变异系数^[1], 主要通过对染色土壤剖面图片进行等分处理, 计算不同土壤深度染色面积比, 利用统计学变异系数的概念, 得到染色面积比变异系数, 从而表征土壤优先流发育的相对

成熟程度。优先流染色面积比变异系数可以直观反映土壤剖面不同深度染色区域的变化, 土壤优先流染色面积比变异系数越小, 土壤优先流发育程度越高^[23], 其计算公式为

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中 C_v ——土壤优先流染色面积比变异系数

S ——染色面积比的标准差

\bar{x} ——优先流染色面积比的平均值

x_i ——土壤剖面在 i 深处染色面积比

n ——土壤剖面染色图片平均等分数, 取 30

2.3.2 优先流路径贡献率

为定量表征土壤优先流对溶质运移贡献值, 引入土壤优先流路径贡献率 R_i , 其计算公式^[24]为

$$R_i = \frac{C_{i\text{PFP}} - C_{i\text{MAT}}}{C_{i\text{MAT}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 $C_{i\text{PFP}}$ ——优先流路径(被染色部分)中总磷或者某磷形态含量

$C_{i\text{MAT}}$ ——土壤基质(未染色部分)土壤总磷或者某磷形态含量

2.3.3 数据处理

使用配对样本 *T* 检验分析对比土壤优先流和基质流路径中磷形态的显著差异,对土壤优先流分布特征参数(优先流染色面积比和优先流评价指数)和土壤优先流路径对土壤总磷和磷形态贡献率使用 Pearson 相关性检验,从而得出土壤优先流路径分布对优先流路径中土壤磷形态的影响。数据分析软件使用 IBM SPSS 19.0,使用 Origin 8.1 作图。

3 结果与分析

3.1 土壤类型对优先流路径分布特征的影响

通过对贡嘎山疏松岩性土和厄尔士山渍水土优先流路径图片分析和评价得出,不同土壤类型对土壤优先流路径分布影响较大(图 2)。贡嘎山疏松岩性土最大染色面积比为 43.5%,发生在土壤深度 37 cm 处,而厄尔士山渍水土优先流在土壤深度 0~10 cm 为均匀染色区,染色面积比在 95% 以上。优先流路径分布在 35~50 cm 处发生转折,土壤优先流染色面积比由 82.35% 快速降低到 12.24%。贡嘎山疏松岩性土优先流土壤剖面染色面积比随着土壤深度增加而增加,说明贡嘎山疏松岩性土表层优先流发育较弱,而深层优先流发育较好。而厄尔士山渍水土优先流却相反,随着土壤深度增加优先流发育程度降低(56%)。说明贡嘎山疏松岩性土表层团聚效应较好,厄尔士山渍水土表层土壤结构较为疏松,而深层土壤紧密。贡嘎山和厄尔士山优先流图片总染色面积比分别为 31% 和 52%,表明厄尔士山渍水土与贡嘎山疏松岩性土相比,优先流发育较好。

3.2 土壤类型对优先流路径中磷形态分布特征及磷运移的影响

由图 3 可以看出,贡嘎山与厄尔士山土壤总磷含量(质量比)相差不大(1 000 mg/kg 左右)。通过对土壤优先流路径和基质流路径中总磷含量的配对样本 *T* 检验,除厄尔士山 11~30 cm 土壤外,2 个样

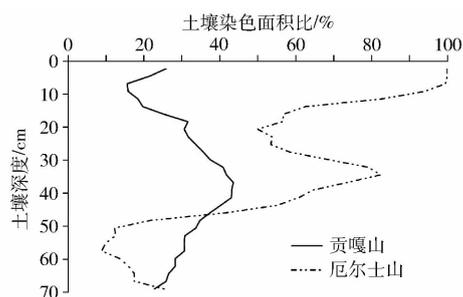


图 2 贡嘎山和厄尔士山土壤优先流路径染色面积比
Fig.2 Coverage ratios of dyed area in soil preferential flow pathways in Gongga and Ore mountains

地其他深度土壤优先流路径和基质流路径中总磷含量均有显著性差异。贡嘎山土壤优先流对于总磷的贡献率随着土壤深度增加而降低,而厄尔士山土壤优先流对于总磷的贡献率随着土壤深度增加而升高。

通过对土壤优先流路径和基质流路径中磷含量的配对样本 *T* 检验,由图 4 可以看出,即时生物有效无机磷(RBPI)在贡嘎山和厄尔士山土壤表层(0~10 cm)和底层(31~50 cm)土壤中,优先流路径和土壤基质含量对比有显著性差异,总体上,优先流路径中的 RBPI 含量高于土壤基质(6.5%~128.9%)。贡嘎山土壤 RBPI 随着土壤深度增加而有累积。而厄尔士山土壤 RBPI 随着土壤深度增加而降低。通过土壤优先流路径对 RBPI 运移贡献率计算可知(图 4),贡嘎山土壤优先流贡献率随着土壤深度先增加后稍有降低,而厄尔士山土壤优先流贡献率随着土壤深度增加而降低。2 种不同土壤类型优先流对 RBPI 贡献率的差异可能与土壤优先流分布有关,贡嘎山疏松岩性土表层优先流发育不是很发达,随着土壤深度增加,土壤优先流 D_e 值从 19% 升高到 40%,致使土壤底层优先流路径对 RBPI 贡献率较大;而厄尔士山土壤优先流路径分布随着土壤深度增加, D_e 值呈下降趋势从 96% 降低到 42%,土壤优先流贡献率随之降低。

由图 5 可以看出,贡嘎山和厄尔士山土壤潜在生物有效无机磷含量对比较为明显。厄尔士山土壤

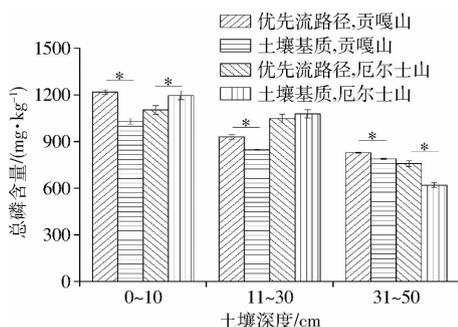


图 3 土壤优先流路径与基质路径总磷及优先流贡献率箱式图

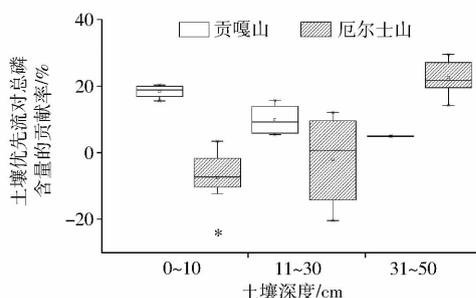


Fig.3 Total phosphorus and contributing boxplots of PFPs and soil matrix in Gongga and Ore mountains

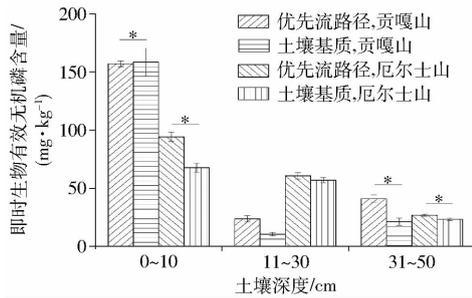


图4 土壤优先流路径与基质路径即时生物有效无机磷及优先流贡献率箱式图

Fig. 4 RBPi and contributing boxplots of PFPs and soil matrix in Gongga and Ore mountains

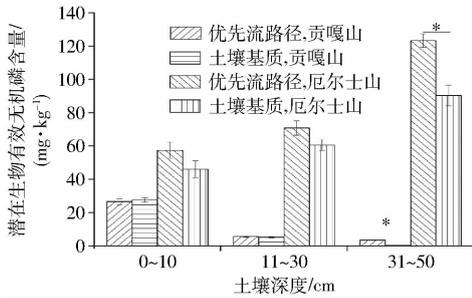
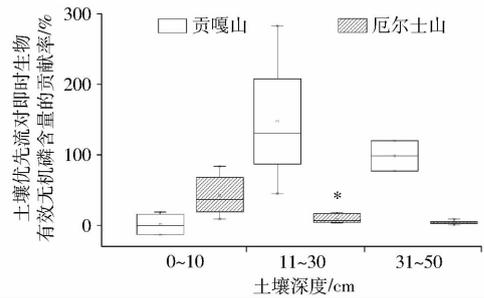
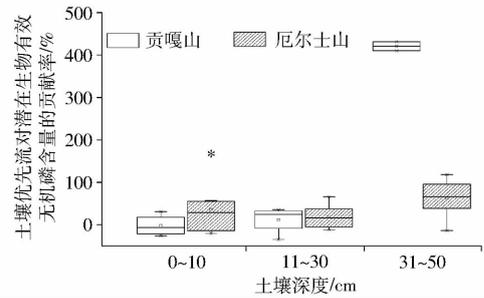


图5 土壤优先流路径与基质路径潜在生物有效无机磷及优先流贡献率箱式图

Fig. 5 PBPi and contributing boxplots of PFPs and soil matrix in Gongga and Ore mountains



潜在生物有效无机磷含量远大于贡嘎山土壤,并且随着土壤深度的增加,贡嘎山土壤潜在生物有效无机磷含量随之降低。厄尔士山潜在生物有效无机磷含量随着土壤深度增加而增加,在土壤底层达到最大值,存在一定的富集。此外,贡嘎山和厄尔士山土壤样品潜在生物有效无机磷含量只有在底层土壤(31~50 cm)优先流路径和土壤基质对比有显著性差异。土壤优先流贡献率有同样的现象发生,2个不同类型土壤的优先流贡献率都在底层达到最大值,且除在底层土壤中存在较大的差异外,2个样地表层土壤优先流贡献率没有较明显的差异。

由图6可以看出,贡嘎山和厄尔士山的闭蓄态磷含量随着土壤深度增加而降低,且优先流与基质流中闭蓄态磷含量大部分都没有明显性差异,加之2个样地土壤优先流贡献率绝对值大部分都保持在12%左右,说明土壤优先流对于较为稳定的闭蓄态

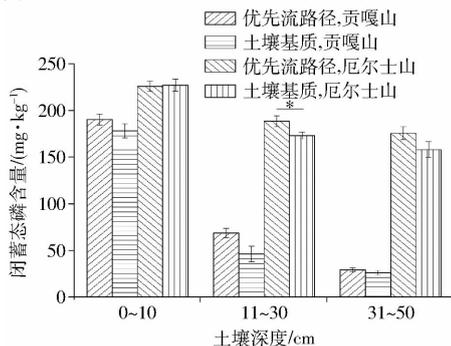


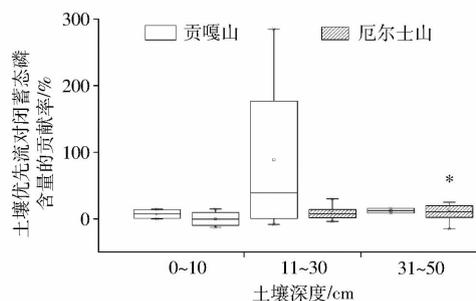
图6 土壤优先流路径与基质路径闭蓄态磷及优先流贡献率箱式图

Fig. 6 Occluded phosphorus and contributing boxplots of PFPs and soil matrix in Gongga and Ore mountains

磷分布影响较小。

与潜在生物可利用无机磷相似,磷灰石磷含量2个样地土壤对比明显,所不同的是贡嘎山土壤的磷灰石磷含量要远高于厄尔士山土壤(图7)。而且贡嘎山和厄尔士山磷灰石磷含量都随着土壤深度增加而增加。贡嘎山和厄尔士山土壤总磷含量都随着土壤深度增加而降低,在土壤浅层和底层,2个样地优先流路径的总磷含量高于土壤基质。该结果与赵牧秋等^[22]的研究结果一致,优先流路径全磷含量与土壤含磷量呈反比关系。

2个样地土壤有机磷含量变化也随着土壤深度增加而减少。厄尔士山土壤有机磷含量远高于贡嘎山土壤。其中,贡嘎山土壤中层和底层优先流路径和土壤基质的有机磷含量对比有显著性差异;而厄尔士山土壤在浅层和底层土壤优先流路径和土壤基质的有机磷含量对比有显著性差异。2个不同类型



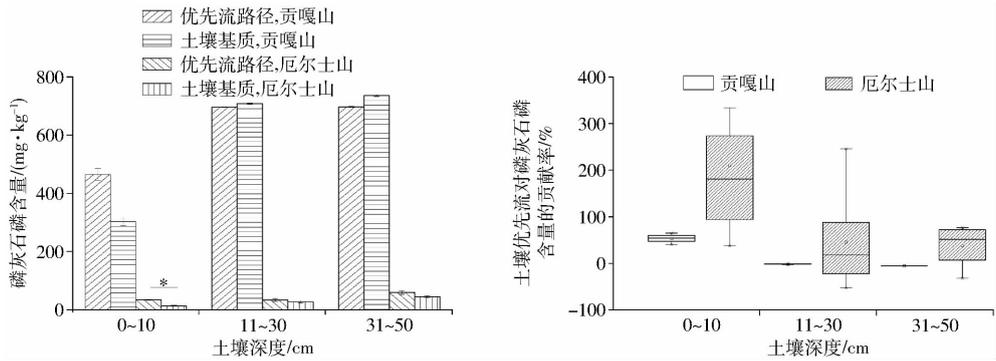


图 7 土壤优先流路径与基质路径磷灰石磷及优先流贡献率箱式图

Fig. 7 Apatite phosphorus and contributing boxplots of PFPs and soil matrix in Gongga and Ore mountains

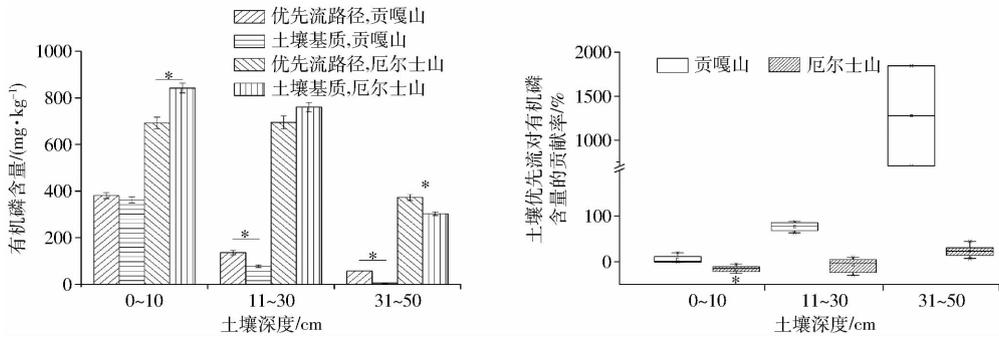


图 8 土壤优先流路径与基质路径有机磷及优先流贡献率箱式图

Fig. 8 Organic phosphorus and contributing boxplots of PFPs and soil matrix in Gongga and Ore mountains

的土壤优先流对有机磷的贡献率都随着土壤深度增加而增加,尤其是以贡嘎山土壤在深层土壤中达到最大值尤为突出。

3.3 优先流对优先流路径中磷形态的影响

为探求贡嘎山与厄尔士山土壤优先流路径分布对优先流路径中磷形态的影响,通过土壤优先流路径对磷形态贡献率与土壤优先流特征参数的相关关系分析发现,贡嘎山与厄尔士山土壤优先流对土壤优先流路径中磷形态影响存在一定的差异。以优先流染色面积比为例,贡嘎山土壤优先流中,优先流染色面积比与土壤优先流路径对潜在生物可利用无机磷和有机磷的贡献率存在显著正相关关系,而与磷灰石磷和总磷存在负相关关系(表 3)。结果表明,

伴随着优先流发育程度的增强,贡嘎山土壤优先流对潜在生物可利用无机磷和有机磷的贡献率逐渐增加,这有可能是部分可溶性无机磷、有机磷滞留在优先流路径中^[8-9]。而磷灰石磷和总磷的贡献率变化趋势则相反,土壤优先流对磷灰石磷和总磷的贡献率随着优先流程度增强而减弱,即土壤优先流路径中磷灰石磷和总磷较基质流贡献率少。

在厄尔士山土壤优先流中,优先流染色面积比与土壤优先流路径对即时生物有效无机磷和磷灰石磷的贡献率存在显著正相关关系,而与有机磷和总磷存在负相关关系(表 4)。结果说明伴随着优先流发育程度增强,厄尔士山土壤优先流对即时生物有效无机磷和磷灰石磷的贡献率随之增强,而优先流

表 3 贡嘎山土壤优先流路径中磷形态与土壤优先流特征参数相关关系分析($n = 10$)

Tab. 3 Correlation coefficient among phosphorus fractions and character indexes of PFPs in Gongga Mountain

参数	即时生物有效无机磷	潜在生物有效无机磷	有机磷	磷灰石磷	闭蓄态磷	总磷	优先流染色面积比	优先流程度评价指数
即时生物有效无机磷	1							
潜在生物有效无机磷	0.151	1						
有机磷	0.190	0.892 **	1					
磷灰石磷	-0.736 *	-0.463	-0.447	1				
闭蓄态磷	-0.091	-0.121	-0.120	-0.286	1			
总磷	-0.751 *	-0.624	-0.572	0.810 **	0.177	1		
优先流染色面积比	0.575	0.778 **	0.712 *	-0.905 **	0.153	-0.872 **	1	
优先流程度评价指数	-0.349	-0.950 **	-0.859 **	0.701 *	0.022	0.779 **	-0.929 **	1

注: **表示在 $p < 0.01$ 水平上显著相关, *表示在 $p < 0.05$ 水平上显著相关,下同。

表4 厄尔士山土壤优先流路径中磷形态与土壤优先流特征参数相关关系分析 ($n=14$)

Tab.4 Correlation coefficient among phosphorus fractions and character indexes of PFPs in Ore Mountain

参数	即时生物 有效无机磷	潜在生物 有效无机磷	有机磷	磷灰石磷	闭蓄态磷	总磷	优先流染 色面积比	优先流程度 评价指数
即时生物有效无机磷	1							
潜在生物有效无机磷	0.267	1						
有机磷	-0.422*	0.191	1					
磷灰石磷	0.369	-0.034	-0.294	1				
闭蓄态磷	-0.277	0.015	0.133	-0.506*	1			
总磷	-0.361	0.355	0.919**	-0.286	0.400	1		
优先流染色面积比	0.669**	-0.137	-0.676**	0.590**	-0.362	-0.659**	1	
优先流程度评价指数	-0.636**	-0.038	0.405*	-0.580**	0.306	0.369	-0.896**	1

路径对有机磷和总磷的贡献率则逐渐减弱。

表3和表4结果均表明2个样地优先流面积比与优先流程度评价指数呈显著负相关关系,并且优先流路径对磷形态贡献率与优先流程度评价指数的相关系数均与优先流面积比结果为负相关,因此由优先流程度评价指数与优先流染色面积比得出结果相同。

本研究综合土壤优先流路径分布特征及其对磷形态赋存贡献率进行定量分析。通过优先流路径特征和优先流路径对磷形态贡献率等指标分析,可以较为准确地得出优先流路径对溶质运移的影响,对于更深入评价优先流对水土流失、水体富营养化等环境问题有重要意义。但是本文仅对2种不同土壤类型优先流路径和磷形态进行定量分析,下一步除选取更多样地研究进一步增强数据代表性外,还需要对其他土壤类型选取具有代表性的优先流分布特征指数,需要对优先流路径中更多的溶质元素(如氮、重金属等)赋存状况进行深入研究,从而进一步揭示土壤优先流路径对于下游水质及生态系统健康稳定的重要意义。

4 结论

(1)通过优先流路径染色图片分析发现,总体上厄尔士山渍水土与由青灰色的砂质冰水堆积物发育而成的贡嘎山疏松岩性土相比,土壤优先流发育较好。

(2)通过配对样本 T 检验对比土壤优先流和基质流路径中磷形态以及土壤优先流路径贡献率分析发现,潜在生物可利用无机磷和磷灰石磷在2种不同类型土壤中对比明显,贡嘎山疏松岩性土壤优先流路径对总磷的贡献率随着土壤深度增加而递减,而厄尔士山渍水土壤则递增。2个样地土壤即时生物有效无机磷的贡献率变化规律与总磷相反。厄尔士山渍水土壤潜在生物有效无机磷在土壤底层存在一定的富集。总体上,土壤优先流路径对于总磷、即时生物有效无机磷、有机磷的贡献率变化较大,而对潜在生物有效无机磷和闭蓄态磷的贡献率比较稳定。

(3)通过对土壤优先流分布特征参数(优先流染色面积比和优先流评价指数)和土壤优先流路径对土壤总磷和磷形态的贡献率使用Pearson相关性检验分析发现,不同土壤类型的优先流路径分布对磷形态的影响不同。其中贡嘎山疏松岩性土壤优先流发育程度与潜在生物可利用无机磷和有机磷的贡献率显著正相关(相关系数介于0.712~0.950之间),而与磷灰石磷和总磷显著负相关(相关系数在0.701~0.905之间);即时生物有效无机磷和磷灰石磷与厄尔士山渍水土壤优先流发育程度显著正相关(相关系数介于0.405~0.669之间),而与有机磷和总磷的贡献率负相关(相关系数在0.580~0.659之间)。

参 考 文 献

- 陈晓冰,张洪江,程金花,等.基于染色图像变异性分析的优先流程度定量评价[J/OL].农业机械学报,2015,46(5):93-100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20150514&year_id=2015&quarter_id=5&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.014.
CHEN Xiaobing, ZHANG Hongjiang, CHENG Jinhua, et al. Quantitative evaluation of preferential flow development degree based on dyed image variability analysis [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):93-100. (in Chinese)
- 张洪江,程云,史玉虎,等.长江三峡花岗岩坡面管流产流特性研究[J].水土保持学报,2001,15(1):5-8.
ZHANG Hongjiang, CHENG Yun, SHI Yuhu, et al. Property of pipeflow production on granite slope in Three-Gorge of Yangtze

- River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1): 5 – 8. (in Chinese)
- 3 LIN H S, DROHAN P, GREEN T R. *Hydropedology: the last decade and the next decade* [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(2): 357 – 361.
- 4 MARSCHNER H, MARSCHNER P. *Marschner's mineral nutrition of higher plants* [M]. 3rd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier/Academic Press, 2012.
- 5 STERNER R W, ELSER J J. *Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- 6 HAYGARTH P M, SHARPLEY A N. Terminology for phosphorus transfer [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 10 – 15.
- 7 BACKNAS S, LAINE-KAULIO H, KLOVE B. Phosphorus forms and related soil chemistry in preferential flow paths and the soil matrix of a forested podzolic till soil profile [J]. *Geoderma*, 2012, 189 – 190: 50 – 64.
- 8 STAMM C H, FLUHLER H, GACHTER R, et al. Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(3): 515 – 522.
- 9 LIANG X, JIN Y, ZHAO Y, et al. Release and migration of colloidal phosphorus from a typical agricultural field under long-term phosphorus fertilization in southeastern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(3): 1 – 12.
- 10 BUNDT M, JAGGI M, BLASER P, et al. Carbon and nitrogen dynamics in preferential flow paths and matrix of a forest soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(5): 1529 – 1538.
- 11 陈晓冰, 程金花, 陈引珍, 等. 基于林分空间结构分析方法的土壤大孔隙空间结构研究 [J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 174 – 186. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20151124&year_id=2015&quarter_id=11&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.024.
- CHEN Xiaobing, CHENG Jinhua, CHEN Yinzheng, et al. Study of soil macropore spatial structure based on stand spatial structure analysis method [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 174 – 186. (in Chinese)
- 12 盛丰, 张仁铎, 刘会海. 土壤优先流运动的活动流场模型分形特征参数计算 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 26 – 32.
- SHENG Feng, ZHANG Renduo, LIU Huihai. Determining the active region model parameter for modeling preferential flow in unsaturated soil [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 26 – 32. (in Chinese)
- 13 李民赞, 郑立华, 安晓飞, 等. 土壤成分与特性参数光谱快速检测方法 & 传感技术 [J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(3): 73 – 87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20130315&year_id=2013&quarter_id=3&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.015.
- LI Minzan, ZHENG Lihua, AN Xiaofei, et al. Fast measurement and advanced sensors of soil parameters with NIR spectroscopy [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(3): 73 – 87. (in Chinese)
- 14 何东健, 陈煦, 任嘉琛, 等. 土壤速效磷含量近红外光谱田间快速测定方法 [J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 152 – 157. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20150321&year_id=2015&quarter_id=3&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.021.
- HE Dongjian, CHEN Xu, REN Jiachen, et al. Detection of soil available P content based on near infrared spectra [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 152 – 157. (in Chinese)
- 15 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法* [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- 16 CARTER M R, GREGORICH E G. *Soil sampling and methods of analysis* [M]. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- 17 WU Y H, LI W, ZHOU J, et al. Temperature and precipitation variations at two meteorological stations on eastern slope of Gongga Mountain, SW China in the past two decades [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(3): 370 – 377.
- 18 ZEHE E, FLUHLER H. Slope scale variation of flow patterns in soil profiles [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 247(1): 116 – 132.
- 19 WEILER M, FLUHLER H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils [J]. *Geoderma*, 2004, 120(1): 137 – 153.
- 20 BENNING R, SCHUA K, SCHWARZEL K, et al. Fluxes of nitrogen, phosphorus, and dissolved organic carbon in the inflow of the Lehmühle reservoir (Saxony) as compared to streams draining three main land-use types in the catchment [J]. *Advances in Geosciences*, 2012, 32(32): 1 – 7.
- 21 LANGE B, LUESCHER P, GERMAN P F. Significance of tree roots for preferential infiltration in stagnic soils [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2008, 13(10): 1809 – 1821.
- 22 FLURY M, FLUHLER H, JURY W A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(7): 1945 – 1954.
- 23 吴庆华, 张家发, 蔺文静, 等. 土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(7): 82 – 90.
- WU Qinghua, ZHANG Jiufa, LIN Wenjing, et al. Applying dyeing tracer to investigate patterns of soil water flow and quantify preferential flow in soil columns [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(7): 82 – 90. (in Chinese)
- 24 赵牧秋, 陈欣, 史云峰. 土壤优先流对磷素垂直迁移贡献的研究 [J]. *琼州学院学报*, 2012, 19(2): 66 – 69.
- ZHAO Muqiu, CHEN Xin, SHI Yunfeng. Study on the contribution rate of preferential flows for soil phosphorus vertical movement [J]. *Journal of Qiongzhou University*, 2012, 19(2): 66 – 69. (in Chinese)