

DOI: 10.5846/stxb202110112858

闫洋洋, 王谢, 严坤, 刘勤, 李明, 徐佩. 干热河谷区泥石流滩地不同景观类型土壤与微生物量 C、N、P 生态化学计量特征. 生态学报, 2023, 43(11): 4734-4746.

Yan Y Y, Wang X, Yan K, Liu Q, Li M, Xu P. C:N:P ecological stoichiometry characteristics of soil and microbes of different landscape types in debris flow beach of dry-hot valley. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4734-4746.

干热河谷区泥石流滩地不同景观类型土壤与微生物量 C、N、P 生态化学计量特征

闫洋洋^{1,2}, 王 谢^{3,4}, 严 坤^{1,2}, 刘 勤^{1,2}, 李 明^{1,2}, 徐 佩^{1,2,*}

1 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299

2 三峡工程运行安全综合监测系统万州典型区水土保持监测站, 万州 404020

3 四川省农业科学院农业资源与环境研究所, 成都 610066

4 农业农村部西南山地农业环境重点实验室, 成都 610066

摘要:生态化学计量是研究生态系统元素平衡与评价地球化学循环的重要方法,明确泥石流滩地不同景观类型下植物群落与土壤和微生物化学计量特征对揭示泥石流滩地脆弱生态系统的物种营建机制与植被生态修复具有重要意义。选择泥石流滩地设置撂荒地、荒滩地、无水溪沟和有水溪沟 4 种景观类型,调查其物种组成、植物群落特征以及土壤和微生物量碳(C)、氮(N)、磷(P)及其生态化学计量特征,探讨了泥石流滩地植被分布规律,并通过多样性指数、冗余分析和单因素方差分析等方法对植物群落和土壤因子进行比较分析。研究结果表明:(1)物种数在 4 种景观类型中表现为荒滩地>无水溪沟>撂荒地>有水溪沟,Margalef 丰富度指数表现为无水溪沟>荒滩地>撂荒地>有水溪沟,Simpson 优势度指数表现为撂荒地>有水溪沟>无水溪沟>荒滩地,且有水溪沟的植物群落密度、平均高度、盖度以及地上生物量均显著高于其它景观类型。(2)有水溪沟土壤 N、P 含量显著高于其他景观类型土壤;撂荒地土壤 C 含量最少,显著低于其他景观类型土壤;土壤 C:N、C:P 表现为荒滩地>无水溪沟>有水溪沟>撂荒地;各景观类型土壤 N:P 差异不显著。(3)微生物量碳(MBC)表现为无水溪沟>荒滩地>有水溪沟>撂荒地;荒滩地土壤 MBC:MBN、MBC:MBP 均显著高于有水溪沟景观类型;微生物量氮(MBN)、微生物量磷(MBP)以及 MBN:MBP 在各景观类型下无显著差异。(4)不同景观类型下植物与土壤、微生物量 C、N、P 含量及化学计量特征的相关性存在差异,表明养分在植物与土壤间流动与转化对植物群落特征有着重要的影响。对植物群落特征影响显著的环境因子依次为土壤 C:N、MBP、N、MBC、P;Simpson 优势度指数与土壤 P、MBP 呈显著正相关;植物群落盖度与土壤 N、P、MBP 呈极显著正相关,与土壤 C:N、C:P、MBP 呈极显著负相关;地上生物量与土壤 N、P、MBP 呈极显著正相关;土壤 C 含量与 MBC、MBN、MBC:MBN、土壤 C:P、MBN:MBP 比之间具有极显著正相关性,表明该泥石流滩地脆弱生态系统中植物群落与土壤以及微生物生态化学计量特征的变化是相互影响的。

关键词:干热河谷;泥石流滩地;植物群落特征;生态化学计量学

C:N:P ecological stoichiometry characteristics of soil and microbes of different landscape types in debris flow beach of dry-hot valley

YAN Yangyang^{1,2}, WANG Xie^{3,4}, YAN Kun^{1,2}, LIU Qin^{1,2}, LI Ming^{1,2}, XU Pei^{1,2,*}

1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China

2 Key Station of Ecological Environment Monitoring in Typical Area of Wanzhou, Wanzhou 404020, China

3 Institute of Agricultural Resources and Environment, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China

4 Southwest Key Laboratory of Mountain Agricultural Environment, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Chengdu 610066, China

基金项目:中国科学院战略先导专项 A 类项目(XDA23090501)

收稿日期:2021-10-11; **网络出版日期:**2023-02-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xupe@imde.ac.cn

Abstract: Ecological stoichiometry is a significant method to study the element balance and evaluation of geochemical cycle. Defining the relation of plant community characteristics and the ecological stoichiometry characteristics of the soil and microbial under different landscape types is of great significance to reveal the species coexistence mechanism and vegetation ecological restoration of fragile ecosystem in debris flow beach. In this paper, four landscape types (fallow, barren beach, anhydrous gully, and water gully) were selected as research objects. Species composition, plant community characteristics, carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P), and its ecological characteristics of soil and microbial biomass under different landscape types were analyzed. By means of diversity index, redundancy analysis and one-way ANOVA, the comparative analysis of plant community and soil factors was carried out to discuss the distribution law of vegetation in debris flow beach. The results showed that: (1) the species numbers of the four landscape types were barren beach>anhydrous gully>fallow>water gully. Margalef richness index showed the order of anhydrous gully>barren beach>fallow>water gully. Simpson dominance index showed that fallow>water gully>anhydrous gully>barren beach. The plant community density, average height, coverage and aboveground biomass of water gully were significantly higher than those of other landscape types. (2) Soil N and P contents in water gully were significantly higher than those in other landscape types. The C content of fallow soil was the lowest, significantly lower than that of other landscape soils. Soil C:N and C:P showed barren beach>anhydrous gully>water gully>fallow. There was no significant difference in soil N:P among the landscape types. (3) Microbial biomass carbon (MBC) showed as follows: anhydrous gully>barren beach>water gully>fallow. The soil MBC: microbial biomass nitrogen (MBN) and MBC: microbial biomass phosphorus (MBP) of barren beach were significantly higher than those of gully landscape. MBN, MBP and MBN:MBP had no significant differences among different landscape types. (4) The correlations between plant and soil, microbial C, N, P contents and stoichiometric characteristics were different under different landscape types, indicating that nutrient flow and transformation between plant and soil had important effects on plant community characteristics. Soil C:N, MBP, N, MBC and P had significant effects on plant community characteristics. Simpson dominance index was positively correlated with soil P and MBP. There was a significantly positive correlation between plant community coverage and soil N, P and MBP, and a significantly negative correlation between plant community coverage and soil C:N, C:P and MBP. The aboveground biomass was positively correlated with soil N, P and MBP. There were significantly positive correlations between soil C content and MBC, MBN, MBC: MBN, soil C:P, MBN:MBP ratios, indicating that the changes of plant community, soil and microbial ecological stoichiometry in the fragile ecosystem of debris flow beach were mutually influenced.

Key Words: dry-hot valley; debris flow beach; plant community characteristics; ecological stoichiometry

为践行习近平总书记“两山理论”,开拓“美丽中国”新境界,中国科学院于 2019 年在四川省凉山州干热河谷区热水流域启动了“美丽中国生态文明建设科技工程”项目,旨在通过绿色产业发展关键技术研发与灾害风险管理协同,保障中高风险山区生态安全,支撑西南山区乡村振兴战略、生态文明以及美丽中国建设。研究区地处西南干热河谷区,因地质灾害频发造成热水河流域下游河道泥石流致滞缓堆砌形成滩地,大面积河滩地资源浪费,植被退化明显,生态减灾功能极差。因此,增加地表植被覆盖、提升水土流失拦截、加强生态系统减灾功能已成为该区域脆弱生态系统修复和绿色产业发展的内在需求。干热河谷区因其特殊的地理位置和独特的水热条件使得植被恢复极为困难^[1-2]。近年来,已有大量针对干热河谷区植被恢复物种筛选培育、生态修复关键技术以及生态脆弱性评价等方面的研究,也取得了丰富的理论和技术成果^[3-5]。然而,干热河谷区的植物源、土壤以及地貌特征差异较大,植被恢复和群落营建难度仍然很大,尤其是在干热河谷泥石流滩地植被营建机制和生态化学计量方面尚未明确,亟需进一步探究。

植物作为陆地生态系统的重要组成部分,在物质能量交换、地球化学循环以及维持生态系统稳定中扮演着重要角色。同时,在多尺度区域生态修复中扮演着重要角色,植物群落在生态系统重构、养分和能量循环以

及生态系统初级生产力估算等方面均具有重要指示作用,也成为退化生态脆弱区监测和评价的关键性指标^[6]。群落结构决定了群落内部现有植物的物种组成结构。目前,群落构建机制理论可概括为两类:中性理论与生态位理论^[7]。基于过程的生态位理论认为生物与环境相互作用是群落构建的关键驱动^[8,9]。环境筛选理论认为筛选具有相近适应能力和生态位的物种在相似环境中共存,导致生物群落的功能结构聚集^[10]。相反,竞争排斥导致生物群落中生态位相同的物种发生生态位分化而共存,使得生物群落的功能结构发散^[11]。这些过程在群落构建中往往同时发挥作用,但大量研究表明环境筛选和生物间相互作用的强度可能随环境胁迫的强弱而有所不同。例如,在恶劣环境中环境筛选对生物群落起主要作用^[12],而生物间相互作用在有利环境中更为重要^[13]。因此,揭示环境筛选和生物间相互作用在植物群落构建过程中的相对重要性取决于何种环境因素,对于深入理解群落构建机制是十分必要的。

土壤养分是植被能否成功营建的关键性因素^[14],直接决定着地上部分有机体的形成和生物量^[15],对植被演替、植物群落形成也具有重要的影响^[16]。土壤化学计量特征是反映土壤 C、N、P 等养分循环的重要指标,在植被恢复和生态系统内稳性方面扮演着重要角色^[17-18]。目前,国内已经陆续开展了森林、草地以及农田等生态系统生态化学计量方面的研究^[19-21],并揭示了植被在不同演替阶段、耕作制度以及耕作方式等背景下的“土壤-植物”碳、氮、磷化学计量特征^[22]。然而,关于泥石流滩地土壤 C、N、P 的研究较少。泥石流滩地作为典型生态脆弱系统,其生态系统土壤 C、N、P 平衡相对较弱,对其土壤化学计量的研究有助于中高风险山区脆弱生态系统植被生态修复。

土壤微生物是土壤环境中最活跃的生物组分,在土壤养分转化和化学循环中发挥着重要的驱动作用^[23]。研究发现,土壤微生物量 C、N、P 及其化学计量平衡与植被营建有着密切联系^[24]。在植被营建初期,土壤微生物量 C、N、P 的变化较为活跃;当植被处于次生演替时,土壤微生物量 C、N、P 变化趋于温和^[25]。近年来,关于生态系统化学计量方面的研究逐渐增多,但多数集中于草地、森林以及农田生态系统,关于脆弱生态系统的生态化学计量研究相对较少,特别是泥石流滩地,尚处于空白阶段。为此,本研究以干热河谷区脆弱生态系统泥石流滩地为研究区,选择休止型泥石流滩地设置样地,通过对该区域植物群落特征、土壤和土壤微生物量 C、N、P 及其化学计量特征进行分析,探究该区域泥石流滩地浅层植物定植规律,明确泥石流滩地植被营建与生态化学计量之间关系,以期为实现该区域脆弱生态系统的植被恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省凉山彝族自治州干热河谷区(28°6'27"—28°6'32"N, 102°16'33"—102°16'45"E),属亚热带干湿分明的季风气候,海拔 1780m。年均温度 14.1℃,多年平均降雨量约 1006mm,区域土壤为山地红壤(1800m 以下)。

1.2 样点设置及样品采集

依据典型性原则,选择具有代表性的泥石流滩地作为研究区,纵向坡长 200m,呈“△”型(图 1)。在水营力搬运作用下泥石流滩地砾石裸露,水土流失严重。为遏止泥石流向前推移,2015 年 5 月泥石流滩地增设 11 级梯式拦挡墙(横剖面为高 3m、上底 2m、下底 6m 的梯形体,取材为滩地砾石),各级拦挡间距离为 25m。该研究区近 5 年内未发生泥石流推移,滩地植被空间分布存在显著差异(图 1)。2020 年 9 月下旬,根据泥石流滩地景观类型差异,将泥石流滩地划分为荒滩地、无水溪沟、有水溪沟及撂荒耕地(客土,土壤主要来源于流域内土壤较厚地区)4 种景观类型(图 1),并设置样方进行植被调查与土样采集,每个样点各挖取 0—20cm 土样 1000g。采集土样分成两份,一份用于理化性质分析,另外一份冷藏(4℃)用于土壤微生物量碳氮磷的测定。

1.3 植物群落调查

主要对不同景观类型下植物群落物种组成、群落总盖度、群落高度、群落地上生物量、Margalef 丰富度指

数、Shannon-wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数进行调查分析。根据景观类型差异,选择具有代表性的样地布设样方。每个样方面积为 1m^2 ($1\text{m}\times 1\text{m}$),采用七级目测法^[26],记录各样点出现的植物物种及其种群特征,部分物种以《中国植物志》为依据进行鉴定。测定样方内物种个体高度(从植株基部垂直至植物自然直立状态的冠层最高点),每种三株,以多度为权重加权平均获取群落平均高度。采用数码相机(Canon C500 Mark II)对于样方进行垂直拍照,获取样方总盖度。随后,齐地平割获取样方植物地上部分,分装标记,于 75°C 烘箱烘干至恒重重获取地上生物量。



图1 泥石流滩地不同景观类型样点分布位置

Fig.1 Distribution locations of different landscape types in debris flow beach

2020年10月大疆无人机拍摄于凉山州喜德县红莫镇;图中WG红线代表无水溪沟;YG红线代表有水溪沟,常年有活水经过;HD代表荒滩地,原始泥石流堆积形成,经过人为分级形成11级采样区;GD代表撂荒耕地,采用客土方式人为改造泥石流滩地形成的耕地撂荒景观

1.4 样品采集与测定

研磨风干土样过 2mm 、 1mm 、 0.25mm 筛处理。土壤有机碳含量采用重铬酸钾-外加热法进行测定;土壤全氮采用 C/N 元素分析仪(2400II CHNS/O Elemental Analyzer, Perkin-Elmer, 美国)进行测定;土壤全磷采用过氧化钠碱熔-钼锑抗比色法^[27];土壤采用微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)、微生物量磷(MBP)氯仿-熏蒸法测定^[28]。在风干新鲜土壤中加入无酒精氯仿进行真空干燥, 25°C 下培养 24h 后取出氯仿,反复抽除土壤中残余氯仿,加入 K_2SO_4 溶液于 25°C 下充分振荡 30min 后过滤浸提;额外称取土壤样品直接用 K_2SO_4 溶液进行浸提。土壤微生物量碳采用浸提总有机碳(TOC)仪进行测定,微生物量氮采用连续流动分析仪进行测定。微生物量磷的测定是将无酒精氯仿处理后(如微生物量碳、氮测定方法)的土样加入 $\text{pH}=8.5$ 的 NaHCO_3 ($\text{pH}=8.5$) 溶液于 25°C 下充分振荡 30min, 滤液中磷浓度采用钼锑抗比色法测定^[29-30]。

1.5 数据分析

通过 SPSS 23.0 软件对土壤和微生物量碳、氮、磷含量及其化学计量特征数据进行单因素方差分析。在检验方差齐性时,若方差齐性,使用最小显著差数法(LSD)多重比较分析;若非齐性方差时,使用 Tamhane 检验法进行多重比较。使用 Origin 2018 分别绘制植物群落特征分布图。对植物群落特征和土壤因子的对应关系进行冗余分析(RDA)。利用 R3.5.1 软件对土壤、微生物 C、N、P 含量及生态化学计量特征进行 Pearson 相关分析,并绘制相关性热图。

2 结果与分析

2.1 泥石流滩地不同景观类型下植物群落特征

调查结果显示(表1),研究区共有植被37种,隶属15科35属。其中,以禾本科物种最多,有10属11种,占该区域物种总数的29.73%;其次是菊科植物,有7属7种,占该区域物种的18.92%;豆科有3属4种,占该区域物种的10.81%;唇形科、堇菜科、锦葵科、蓼科、马桑科、毛茛科、木贼科、松科、玄参科、荨麻科、醉鱼草科、酢浆草科等占比相对较少。不同景观类型间物种分布存在较大差异,其中滩地物种数最多,有14科29属32种,占该区域物种总数的86.49%,以蔗茅、蒙古蒿、戟叶酸模、长波叶山蚂蝗为优势物种;无水溪沟有8科18属18种,占该区域物种的48.65%,以蔗茅、水香薷为优势物种;有水溪沟有5科9属9种,占该区域物种的24.32%,以水香薷、飞机草为优势物种;撂荒耕地有6科14属14种,占该区域物种的37.84%,以蒙古蒿、一年蓬为优势物种。

表1 泥石流滩地不同景观类型下植物种类分布

Table 1 Distribution of plant species under different landscape types in the debris flow beach

景观类型 Landscape types	科名 Family name	属数 No. of genera	种数 No. of species	物种 Species name
荒滩地 Barren beach	禾本科 Gramineae	10	11	狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 、金发草 <i>Pogonatherum paniceum</i> 、荩草 <i>Arthraxon hispidus</i> 、十字马唐 <i>Digitaria cruciata</i> 、茅叶荩草 <i>Arthraxon lanceolatus</i> 、蜈蚣草 <i>Eremochloa ciliaris</i> 、细柄草 <i>Capillipedium parviflorum</i> 、园果雀稗 <i>Paspalum orbiculare</i> 、早熟禾 <i>Poa annua</i> 、蔗茅 <i>Erianthus rufipilus</i> 、紫马唐 <i>Digitaria violascens</i>
	菊科 Compositae	5	5	白叶鬼针草 <i>Bidens alba</i> 、飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i> 、蒙古蒿 <i>Artemisia mongolica</i> 、万寿菊 <i>Tagetes erecta</i> 、长裂苦苣菜 <i>Sonchus brachyotus</i>
	唇形科 Labiatae	2	2	水香薷 <i>Elsholtzia kachinensis</i> 、风轮菜 <i>Clinopodium chinense</i>
	豆科 Leguminosae	2	3	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> 、长波叶山蚂蝗 <i>Desmodium sequax</i> 、小叶三点金 <i>Desmodium microphyllum</i>
	堇菜科 Violaceae	1	2	早开堇菜 <i>Viola prioantha</i> 、紫叶堇菜 <i>Viola hediniana</i>
	蝶形花科 Papilionaceae	1	1	轮叶棘豆 <i>Oxytropis chiliophylla</i>
	锦葵科 Malvaceae	1	1	赛葵 <i>Malvastrum coromandelianum</i>
	蓼科 Polygonaceae	1	1	戟叶酸模 <i>Rumex hastatus</i>
	毛茛科 Ranunculaceae	1	1	甘青铁线莲 <i>Clematis tangutica</i>
	木贼科 Equisetaceae	1	1	节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i> Desf.
	松科 Pinaceae	1	1	云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>
	玄参科 Scrophulariaceae	1	1	马先蒿 <i>Pedicularis reupinanta</i>
	荨麻科 Urticaceae	1	1	水麻 <i>Debregeasia orientalis</i>
	醉鱼草科 Buddlejaceae	1	1	醉鱼草 <i>Buddleja lindleyana</i>
无水溪沟 Anhydrous gully	禾本科 Gramineae	6	6	狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 、荩草 <i>Arthraxon hispidus</i> 、蜈蚣草 <i>Eremochloa ciliaris</i> 、细柄草 <i>Capillipedium parviflorum</i> 、蔗茅 <i>Erianthus rufipilus</i> 、紫马唐 <i>Digitaria violascens</i>
	菊科 Compositae	4	4	飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i> 、蒙古蒿 <i>Artemisia mongolica</i> 、万寿菊 <i>Tagetes erecta</i> 、长裂苦苣菜 <i>Sonchus brachyotus</i>
	豆科 Leguminosae	3	3	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> 、长波叶山蚂蝗 <i>Desmodium sequax</i> 、紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>
	唇形科 Labiatae	1	1	水香薷 <i>Elsholtzia kachinensis</i>
	蓼科 Polygonaceae	1	1	戟叶酸模 <i>Rumex hastatus</i>
	马桑科 Coriariaceae	1	1	马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>
	莎草科 Cyperaceae	1	1	丛毛羊胡子草 <i>Eriophorum comosum</i>
	醉鱼草科 Buddlejaceae	1	1	醉鱼草 <i>Buddleja lindleyana</i>
有水溪沟 Water gully	禾本科 Gramineae	3	3	狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 、细柄草 <i>Capillipedium parviflorum</i> 、蔗茅 <i>Erianthus rufipilus</i>

续表

景观类型 Landscape types	科名 Family name	属数 No. of genera	种数 No. of species	物种 Species name
撂荒耕地 Fallow	菊科 Compositae	3	3	白叶鬼针草 <i>Bidens alba</i> 、飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i> 、蒙古蒿 <i>Artemisia mongolica</i>
	唇形科 Labiatae	1	1	水香薷 <i>Elsholtzia kachinensis</i>
	豆科 Leguminosae	1	1	长波叶山蚂蝗 <i>Desmodium sequax</i>
	荨麻科 Urtica ceae	1	1	水麻 <i>Debregeasia orientalis</i>
	菊科 Compositae	5	5	飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i> 、蒙古蒿 <i>Artemisia mongolica</i> 、万寿菊 <i>Tagetes erecta</i> 、长裂苦苣菜 <i>Sonchus brachyotus</i> 、一年蓬 <i>Erigeron annuus</i> 、翼齿六棱菊 <i>Laggera pterodonta</i>
	豆科 Leguminosae	3	3	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> 、长波叶山蚂蝗 <i>Desmodium sequax</i> 、紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>
	禾本科 Gramineae	3	3	荩草 <i>Arthraxon hispidus</i> 、细柄草 <i>Capillipedium parviflorum</i> 、紫马唐 <i>Digitaria violascens</i>
	蓼科 Polygonaceae	1	1	戟叶酸模 <i>Rumex hastatus</i>
	荨麻科 Urticaceae	1	1	水麻 <i>Debregeasia orientalis</i>
	酢浆草科 Buddlejaceae	1	1	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>

研究区植物群落平均植物密度为 312—553 株/m²,有水溪沟植物密度最大,撂荒耕地最小,有水溪沟与其他景观类型差异性显著($P<0.05$)。泥石流滩地植物群落平均高度为 43.96—57.79cm,荒滩地植物群落平均高度最大,有水溪沟最小。泥石流滩地植物群落盖度为 36.71%—71.68%,不同景观类型之间存在较大差异,其中有水溪沟群落盖度最高(71.67%),荒滩地群落盖度最低(36.71%),有水溪沟显著高于其他景观类型($P<0.05$),撂荒耕地显著高于无水溪沟和荒滩地($P<0.05$)。泥石流滩地植物群落地上生物量为 214.29—427.65 g/m²,其中有水溪沟地上生物量显著高于其他景观类型($P<0.05$)(表 2)。

表 2 泥石流滩地不同景观类型下植物群落基本特征

Table 2 Basic characteristics of plant communities under different landscape types in the debris flow beach

景观类型 Landscape types	植物密度/(株/m ²) Plant density	群落平均高度/cm Mean community height	群落盖度/% Community coverage	地上生物量/(g/m ²) Aboveground biomass
荒滩地 Barren beach	371±71b	57.78±4.43 a	36.71±4.59 ^c	235.85±21.67b
无水溪沟 Anhydrous gully	328±121b	53.34±8.77 a	41.23±10.09 ^c	214.29±13.24 b
有水溪沟 Water gully	553±96 a	44.36±3.79 a	71.67±8.11 a	427.65±23.54 a
撂荒耕地 Fallow	312±35 b	43.96±8.78 a	55.34±6.75 b	241.52±21.84b

不同小写字母代表显著性差异

通过对泥石流滩地不同景观类型的植物群落的 Margalef 丰富度指数分析(图 2),发现无水溪沟 Margalef 丰富度指数最大(2.06±0.04),有水溪沟最小(0.71±0.05),有水溪沟 Margalef 丰富度指数显著低荒滩地和无水溪沟($P<0.0001$)。撂荒耕地植物群落 Simpson 优势度指数最大(0.96±0.004),荒滩地最小(0.73±0.03),滩地 Simpson 优势度指数与撂荒耕地之间差异显著($P=0.0047$)。无水溪沟植被群落 Shannon-wiener 多样性指数最大 2.00±0.09,撂荒耕地最小(1.18±0.11),各景观类型间差异不显著。有水溪沟 Pielou 均匀度指数最大(0.97±0.19),撂荒耕地最小(0.59±0.02),各景观类型间差异不显著。

2.2 土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量特征差异性

通过对不同景观类型土壤 C、N、P 含量比较分析可知(表 3),荒滩地土壤 C 最高,较无水溪沟、有水溪沟高出 26.74%、28.27%,但差异不显著;撂荒耕地土壤 C 含量最少,仅占荒滩地的 16.16%,显著低于其他类型($P<0.05$)。有水溪沟土壤 N 含量均值最高,为(1.85±0.05)g/kg,在全国土壤养分含量分级标准^[29]中表现出高水平的分布特征,而荒滩地、无水溪沟和撂荒耕地土壤 N 分别表现为中、中、低水平。统计结果表明,有水

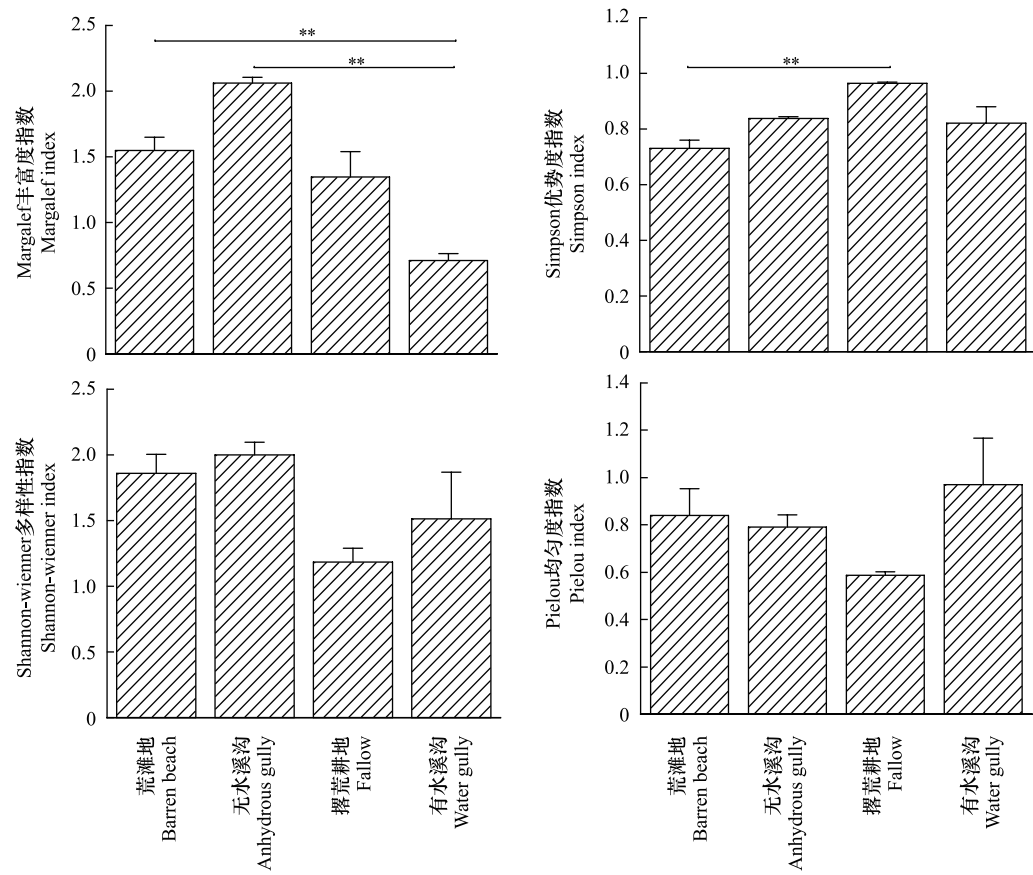


图2 泥石流滩地不同景观类型植物丰富度指数、优势度指数、多样性指数及均匀度指数

Fig.2 Plant richness index, dominance index, diversity index and evenness index of different landscape types in the debris flow beach

* * 代表显著性水平为极显著

溪沟土壤 N 含量也显著高于其他类型 ($P<0.05$), 分别是其土壤 N 含量 2.36 倍、2.52 倍和 2.76 倍。各景观类型间土壤 P 含量差异不显著, 有水溪沟最高, 荒滩地最低。

表3 泥石流滩地不同景观类型的土壤碳、氮、磷含量及化学计量比

Table 3 Soil nutrient characteristics of different soil types in mud-rock flow

景观类型 Landscape types		土壤有机碳 SOC/(g/kg)	土壤全氮 TN/(g/kg)	土壤全磷 TP/(g/kg)	土壤碳:氮 C:N	土壤碳:磷 C:P	土壤氮:磷 N:P
荒滩地 Barren beach	均值 mean/(g/kg)	23.70±3.81a	0.78±0.01b	0.27±0.03a	28.80±3.50a	87.36±13.07a	2.93±0.68a
	变异系数 CV/%	57.53	22.95	10.87	37.95	56.24	23.28
无水溪沟 Anhydrous gully	均值 mean/(g/kg)	17.36±4.31a	0.91±0.02b	0.36±0.07a	17.99±4.01b	75.74±23.51a	3.54±0.35a
	变异系数 CV/%	63.81	23.03	42.27	57.80	93.19	72.58
有水溪沟 Water gully	均值 mean/(g/kg)	17.00±4.86a	1.85±0.05a	0.66±0.17a	9.62±2.25c	25.72±4.04b	2.89±0.38a
	变异系数 CV/%	27.69	23.87	8.82	33.06	22.20	32.81
撂荒耕地 Fallow	均值 mean/(g/kg)	3.83±1.09b	0.67±0.02b	0.50±0.12a	5.53±1.51c	7.74±2.51c	1.36±0.08a
	变异系数 CV/%	37.72	17.28	11.43	21.69	41.04	21.77

同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)

对泥不同景观类型土壤 C、N、P 生态化学计量比分析发现 (表 3), 荒滩地土壤 C:N 最大, 均值为 28.80 ± 3.50 , 显著高于其他类型 ($P<0.05$), 且是撂荒耕地的 5.21 倍; 无水溪沟土壤 C:N 均值为 17.99 ± 4.01 , 显著高于有水溪沟和撂荒耕地 ($P<0.05$); 有水溪沟土壤 C:N 均值为 9.62 ± 2.25 ; 撂荒耕地土壤 C:N 最小, 均值为 $5.53\pm$

1.51。荒滩地土壤 C:P 值最大,均值为 87.36 ± 13.07 ,显著高于有水溪沟和撂荒耕地 ($P < 0.05$);有水溪沟土壤 C:P 均值为 25.72 ± 4.04 ,显著高于撂荒耕地 ($P < 0.05$);撂荒耕地土壤 C:P 最小,均值为 7.74 ± 2.51 。在泥石流滩地不同景观类型中无水溪沟土壤氮:磷(N:P)值最大,均值为 3.54 ± 0.35 ;撂荒耕地土壤 N:P 最小,均值为 1.36 ± 0.08 ;各景观类型间土壤 N:P 差异并不显著。

表 4 泥石流滩地不同景观类型土壤微生物碳、氮、磷含量及化学计量比

Table 4 C、N、P ecological stoichiometric ratios of soil and microbial in different landscape types of debris flow beach

景观类型 Landscape types		土壤微 生物量碳 MBC/ (mg/kg)	土壤微 生物量氮 MBN/ (mg/kg)	土壤微 生物量磷 MBP/ (mg/kg)	微生物量 碳氮 MBC:MBN	微生物量 碳磷 MBC:MBP	微生物量 氮磷 MBN:MBP
荒滩地	均值 mean/(g/kg)	$54.04 \pm 9.46a$	$5.66 \pm 1.41a$	$42.73 \pm 9.71a$	$21.55 \pm 0.18a$	$7.39 \pm 0.83a$	$0.43 \pm 13.95a$
Barren beach	变异系数 CV/%	66.58	108.64	94.23	91.74	127.18	118.00
无水溪沟	均值 mean/(g/kg)	$57.12 \pm 14.49a$	$6.51 \pm 1.52a$	$40.07 \pm 10.58a$	$9.12 \pm 0.03b$	$5.53 \pm 1.08a$	$0.53 \pm 19.67a$
Anhydrous gully	变异系数 CV/%	66.28	57.07	70.32	30.89	105.63	101.86
有水溪沟	均值 mean/(g/kg)	$11.65 \pm 3.17b$	$5.99 \pm 1.99a$	$103.99 \pm 31.60a$	$2.19 \pm 0.04b$	$0.13 \pm 0.03b$	$0.06 \pm 2.23a$
Water gully	变异系数 CV/%	21.66	43.96	34.54	27.61	37.46	45.53
撂荒耕地	均值 mean/(g/kg)	$6.93 \pm 1.84b$	$1.92 \pm 0.58a$	$67.21 \pm 16.58a$	$5.92 \pm 0.07b$	$0.10 \pm 0.02b$	$0.04 \pm 1.23a$
Fallow	变异系数 CV/%	39.03	50.36	7.59	80.54	43.32	1.76

同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 土壤微生物量 C、N、P 含量与生物生态化学计量特征

泥石流滩地不同景观类型土壤 MBC、MBN、MBP 含量表现出较大的差异(表 4)。其中,无水溪沟和荒滩地 MBC 含量均值较大,撂荒耕地最小;荒滩地和无水溪沟土壤 MBC 含量分别比有水溪沟分别高 4.64 倍和 4.90 倍 ($P < 0.05$),荒滩地和无水溪沟土壤 MBC 含量分别比撂荒耕地分别高 7.79 倍和 8.24 倍 ($P < 0.05$)。土壤 MBN 表现为无水溪沟>有水溪沟>荒滩地>撂荒耕地,在不同景观类型中差异并不显著。土壤 MBP 含量表现为有水溪沟>撂荒耕地>荒滩地>无水溪沟,各景观类型间差异不显著。泥石流滩地土壤 MBC:MBN、MBC:MBP、MBN:MBP 平均值分别为 9.70、3.29、0.27。其中,荒滩地 MBC:MBN 均值为 21.55 ± 0.18 ,显著高于其他景观类型 ($P < 0.05$);有水溪沟 MBC:MBN 最小,荒撂荒耕地、无水溪沟与有水溪沟之间差异性不显著。泥石流滩地 MBC:MBP 均值为 7.39 ± 0.83 ,显著高于有水溪沟和撂荒耕地 ($P < 0.05$)。泥石流滩地土壤 MBN:MBP 在各景观类型间差异不显著。

2.4 不同景观类型下植物群落与土壤、微生物量 C、N、P 含量及化学计量特征的相关关系

对不同景观类型下植物群落特征与土壤因子的关系进行 RDA 排序(图 3):前两个排序轴的特征值分别为 0.84 和 0.15,占总特征值的 99.77%。对植物群落特征影响显著的环境因子依次为土壤 C:N、土壤微生物量 P、总氮、土壤微生物量 C、总磷。对不同景观类型下植物群落与土壤、微生物量 C、N、P 含量及化学计量特征做 Pearson 相关分析发现,植物 Margalef 指数与土壤 C 含量呈显著负相关 ($P = 0.015$),与土壤 N 呈极显著负相关 ($P = 0.007$);Simpson 优势度指数与土壤 P、MBP 呈显著正相关 ($P < 0.05$),与土壤 C、C:N、C:P、MBN:MBP 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)。植物密度与土壤 C、C:N 之间呈显著负相关 ($P < 0.05$)。群落盖度与土壤 N、P、MBP 呈极显著正相关 ($P < 0.001$),与土壤 C:N、C:P、MBP 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。地上生物量与土壤 N、P、MBP 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

土壤和土壤微生物量 C、N、P 含量以及生态化学计量比进行 Pearson 相关分析可知(图 4),土壤 C 与 MBC、MBN、MBC:MBN、MBC:MBP、MBN:MBP 之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与土壤 N:P、MBN:MBP 之间呈显著正相关性 ($P < 0.05$),与 MBP 呈显著负相关 ($P < 0.05$),而土壤 N 与其他生态化学计量比之间相关性不显著。土壤 P 与 MBP 呈极显著正相关 ($P < 0.01$),而其他化学计量比与土壤 P 均呈负相关性,其中 MBC:MBN、MBC:MBP、MBN:MBP 与土壤 P 呈显著相关性 ($P < 0.05$),土壤 P 与 C:N、C:P、MBC 呈极显著相关性 ($P <$

0.01)。MBC 与土壤 P 和 MBP 呈显著性负相关外($P<0.05$),而与 MBN、MBC:MBP、MBN:MBP 均呈显著正相关($P<0.05$)。

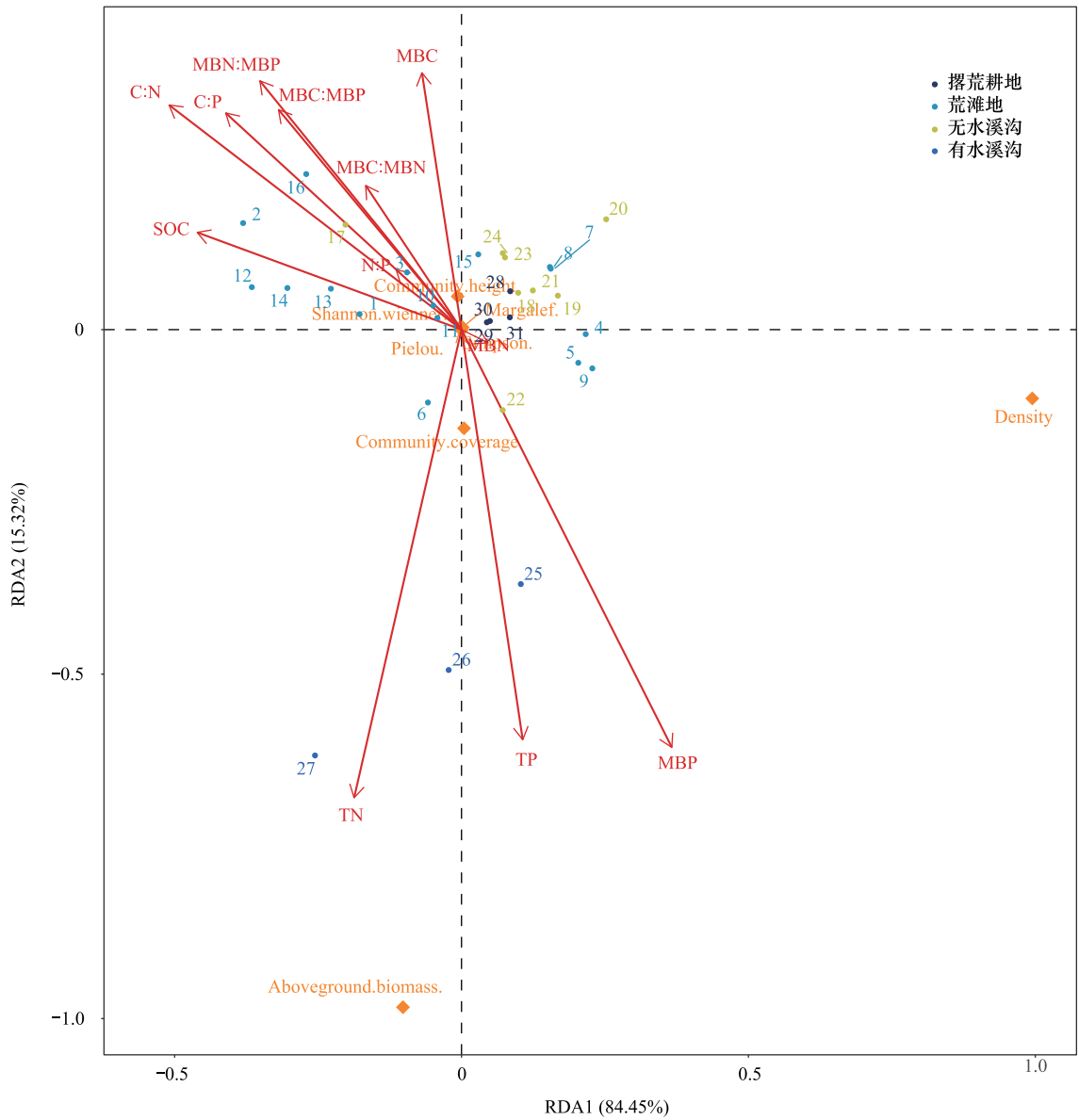


图 3 植物群落特征与土壤因子关系的 RDA 排序图

Fig.3 RDA ordination diagram of relationship between plant community characteristics and soil factors

soc:土壤有机碳 Soil organic carbon;TN:全氮 Total nitrogen;TP:全磷 Total phosphorus;C:N:碳氮比;C:P:碳磷比;N:P:氮磷比;MBC:微生物量碳 Microbial biomass carbon;MBN:微生物量氮 Microbial biomass nitrogen;MBP:微生物量磷 Microbial biomass phosphorus;MBC:MBN:微生物量碳氮比;MBC:MBP:微生物量碳磷比;MBN:MBP:微生物量氮磷比;Margalef:丰富度指数;shannon-wienner:香农指数;simpson:辛普森指数;pielou:均匀度指数;density:密度;communityheight:群落高度;community coverage:群落盖度;aboveground biomass:地上生物量

3 讨论

3.1 泥石流滩地植物群落的营建机制

泥石流滩地作为我国西南山区典型的脆弱生态系统之一,较未受到干扰的植被-土壤界面表现出更多的砂粒、块石分布,极大地影响着植物定植与群落重构^[31]。然而,在泥石流滩地形成初期,部分原坡面物种被土

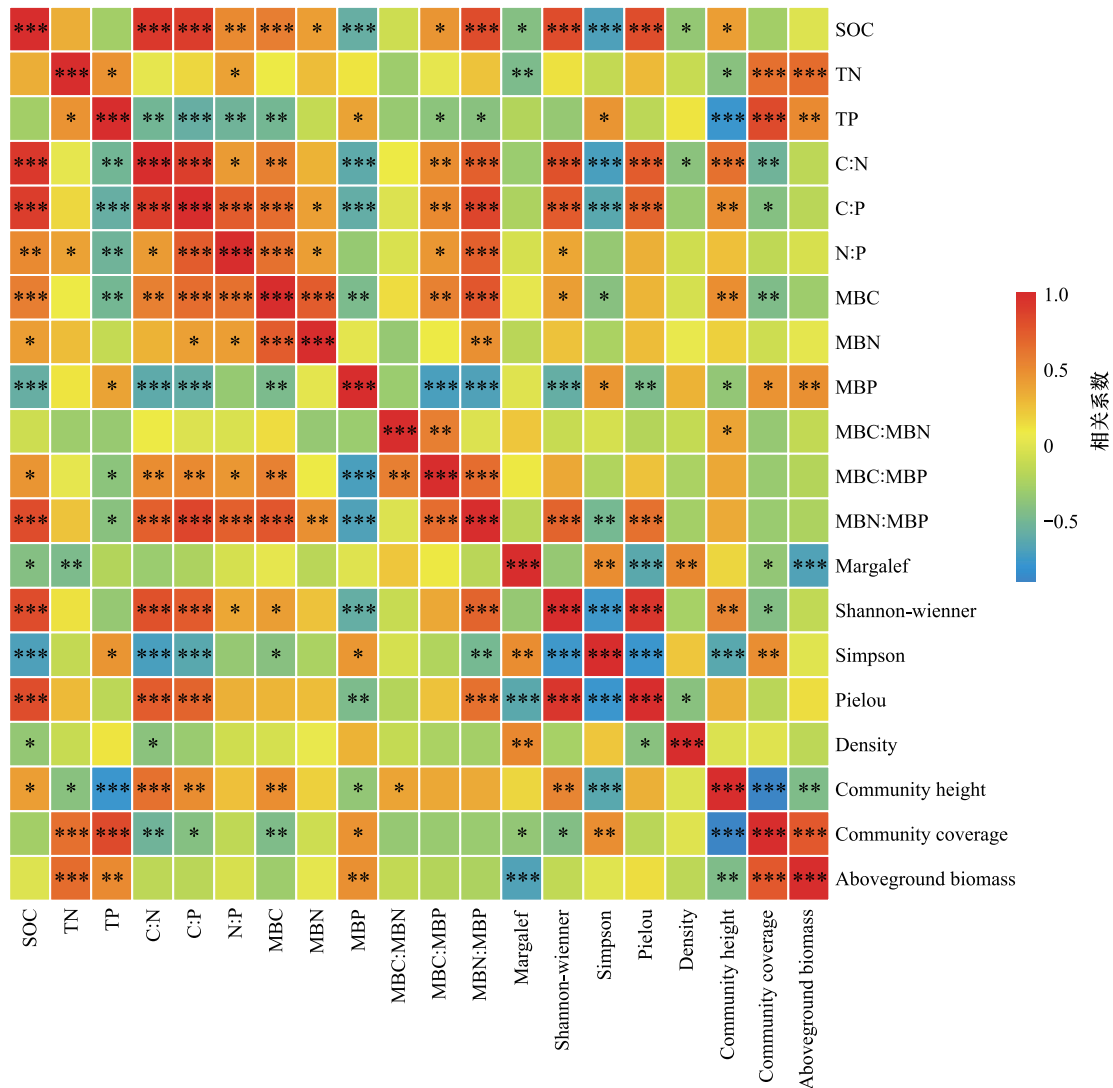


图4 土壤与土壤微生物量 C、N、P 含量及生态化学计量的相关关系

Fig.4 Correlation between soil and soil microbial C, N, P contents and ecological stoichiometry

* $P<0.05$, ** $P<0.01$; *** $P<0.001$

壤携带、迁移后沉积,形成泥石流滩地植被群落的初期演替,这对该区域植被修复有着重要的指示作用^[32]。本文依据景观差异将泥石流滩地划分为荒滩地、无水溪沟、有水溪沟、撂荒耕地 4 种景观类型,研究尺度更小,更能直接反映微观尺度的植被群落物种组成、多样性以及群落生物量的斑块分布差异。研究发现,干热河谷区泥石流滩地植被具有显著的景观差异性、非地带性以及变化性的特征,这与严思维等^[33]在蒋家沟泥石流沉积区植被群落分布特征调查结果较为类似。同时,在有水沟道附近土壤相对湿润处植被覆盖度可达 75% 左右,但这样的生境在研究区占比极少,大面积生境极为干燥形成广泛的干旱、稀疏、低矮的以蔗茅、蒙古蒿、戟叶酸模、长波叶山蚂蝗为优势物种的旱生型灌丛植被,表现出明显的矮化、叶片小型化、植株多具刺等特征,这与李云琴等^[34]在金沙江上游干旱河谷植被特征调查结果相似。对比泥石流滩地不同景观类型植物群落调查结果,发现各种景观类型的物种具有较高的同源性,荒滩地物种数更是占据该区域物种的 86.49%。此外,研究发现有水溪沟附近物种组成、Margalef 丰富度指数虽然最低,但其植被密度、群落盖度以及地上生物量均显著高于其他景观类型,说明生境的水分条件可能仍是限制该区域地表覆盖与植被群落营建的关键。

3.2 泥石流滩地不同景观类型对土壤 C、N、P 含量及生态化学计量特征的影响

本研究发现泥石流滩地土壤中 C 含量在 4 种景观类型间表现为荒滩地>无水溪沟>有水溪沟>撂荒耕地,这可能与土壤中生物残体等有机质输出和土壤微生物分解平衡有关,生境中植被群落为适应其生存环境而调整自身养分分配策略进而影响土壤养分的平衡与分配^[35-36]。本研究发现有水溪沟附近土壤 C、N、P 含量相对较高,撂荒耕地的土壤 C、N、P 含量较低,说明在泥石流滩地生态修复过程中,有水溪沟对土壤质量的改良作用明显高于撂荒耕地。本研究发现有水溪沟的植物密度、群落平均高度、群落盖度、地上生物量等植物群落基本特征指标较高,且土壤 C、N、P 含量较高,这可能是与有水溪沟附近土壤中运输、吸附和固定有关。另外,地上部分植物群落、植物生活型以及管理模式对土壤养分的积累均有较大的影响^[37]。土壤 C:N、C:P 是土壤有机碳矿化及元素有效性的重要指示性指标。本研究中有水溪沟和撂荒耕地景观类型下土壤 C:N、C:P 的平均值略低于全国土壤 C:N、C:P 水平^[38],说明这类景观类型下土壤有机碳矿化和土壤 P 元素的有效性较高,养分较为贫乏,这与研究区存在的人为活动和水土流失有着密切联系。但是,荒滩地和无水溪沟景观类型的土壤 C:N、C:P 高于全国土壤 C:N、C:P 水平,说明这与这类景观类型下 N、P 养分含量有关,这可能是造成荒滩地和无水溪沟景观类型的植物密度、群落平均高度、群落盖度、地上生物量等植物群落基本特征指标低的根本原因。不同景观类型下土壤 C:N、C:P 差异显著,说明泥石流滩地的脆弱生态系统中 C:N、C:P 并非保持在相对稳定的状态。在本研究中,土壤 N:P 比值变化范围为:0.70—4.26,远低于全球(13.10)以及全国水平(9.3)^[39-40],说明该区域土壤中土壤养分的生物利用有效性低。

3.3 泥石流滩地不同景观类型对土壤微生物量 C、N、P 含量及其化学计量特征的影响

土壤微生物是有机质的分解者,直接影响着土壤养分的循环与有效性^[35,41]。本研究发现,土壤微生物量 C 含量在 4 种景观类型间表现为无水溪沟>荒滩地>有水溪沟>撂荒耕地,且部分景观类型间存在显著差异,这可能与地上部分的植物群落特征有着密切联系。微生物量 C、N、P 是衡量土壤微生物活性的敏感指标,其数值的高低直接说明土壤肥力的好坏^[42]。在本研究中微生物量 C、N 与土壤 C 含量呈极显著正相关,与土壤 C:N 呈极显著和显著正相关,这是因为土壤微生物分解与矿化作用较大的缘故。土壤微生物量 C:N 比值在泥石流滩地脆弱生态系统中并非恒定,各景观类型间的差异也比较大,主要分布在 2.15—21.73 之间,均值为 8.22,小于李克让等^[43]土壤微生物量 C:N 的比值(10.1),说明土壤微生物内稳性较差。土壤微生物量 C:P 通常被作为衡量土壤有机质释放或固持 P 潜力的指标,生态系统中其比值一般为 7—30。在本研究中,土壤微生物量 C:P 极低,表明微生物在矿化土壤有机质的过程中释放 P 潜力增大以补充滩地土壤 P 消耗。

4 结论

泥石流滩地不同景观类型中植物物种组成和植物群落特征存在明显的空间分异,以蔗茅、蒙古蒿、戟叶酸模、长波叶山蚂蝗为优势物种的滩地景观类型物种数最多,以水香薷、飞机草为优势物种的有水溪沟景观类型物种数最少。有水溪沟物种数和 Margalef 丰富度指数总体上小于其他景观类型,但其植物群落密度、平均高度、盖度以及地上生物量均显著高于其它景观类型。有水溪沟土壤 N、P 含量高于其他景观类型土壤,土壤 C:N、C:P 表现为荒滩地>无水溪沟>有水溪沟>撂荒耕地。有水溪沟土壤 MBC、MBC:MBN、MBC:MBP 显著低于荒滩地景观类型。对植物群落特征影响显著的环境因子依次为土壤 C:N、MBP、N、MBC、P,说明养分在土壤与微生物间流动与转化对植物群落特征有着重要的影响,且泥石流滩地植被生长受 N、P 共同限制。从整体上来看,虽然土壤有机质矿化率及磷的有效性较高,但土壤、微生物量 C、N、P 含量及化学计量比总体偏低,养分含量较为贫乏。同时,研究区内植物群落特征的变化不仅受土壤养分含量及化学计量特征的影响,也与土壤微生物量碳及生态化学计量特征的变化紧密相关。然而,本研究未考虑不同景观类型下土壤微生物分布特征及其在养分循环中的作用,还有待进一步对土壤微生物在养分循环和定量分配过程中作用进行更加深入的研究。

参考文献(References):

- [1] 许峰,蔡强国,吴淑安. 坡地农林复合系统土壤养分过程研究进展. 水土保持学报, 2000, 14(1): 82-87.
- [2] 王霖娇,汪攀,盛茂银. 西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素. 生态学报, 2018, 38(18): 6580-6593.
- [3] 杨阳,刘秉儒. 荒漠草原不同植物根际与非根际土壤养分及微生物量分布特征. 生态学报, 2015, 35(22): 7562-7570.
- [4] 李昌龙,肖斌,王多泽,魏林源,郭树江. 石羊河下游盐渍化弃耕地植被演替与土壤养分相关性分析. 生态学杂志, 2011, 30(2): 241-247.
- [5] 陈云,李玉强,王旭洋,牛亚毅. 中国典型生态脆弱区生态化学计量学研究进展. 生态学报, 2021, 41(10): 4213-4225.
- [6] 彭少麟,杜卫兵,李志安. 不同生态型植物对重金属的积累及耐性研究进展. 吉首大学学报: 自然科学版, 2004, 25(4): 19-26.
- [7] 王少鹏. 基于中性理论的群落多样性机制研究. 北京: 北京大学, 2012.
- [8] Diaz S, Cabido M, Casanoves F. Plant functional traits and environmental filters at a regional scale. *Journal of Vegetation Science*, 1998, 9(1): 113-122.
- [9] Cavender-Bares J, Kozak K H, Fine P V A, Kembel S W. The merging of community ecology and phylogenetic biology. *Ecology Letters*, 2009, 12(7): 693-715.
- [10] Lavorel S, Garnier E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*, 2002, 16(5): 545-556.
- [11] Webb C O, Ackerly D D, McPeck M A, Donoghue M J. Phylogenies and community ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2003, 33(1): 475-505.
- [12] Le Bagousse-Pinguet Y, Gross N, Maestre F T, Maire V, De Bello F, Fonseca C R, Kattge J, Valencia E, Leps J, Liancourt P. Testing the environmental filtering concept in global drylands. *Journal of Ecology*, 2017, 105(4): 1058-1069.
- [13] Coyle J R, Halliday F W, Lopez B E, Palmquist K A, Wilfahrt P A, Hurlbert A H. Using trait and phylogenetic diversity to evaluate the generality of the stress-dominance hypothesis in eastern North American tree communities. *Ecography*, 2014, 37(9): 814-826.
- [14] 李胜平,王克林. 桂西北喀斯特山地草地土壤养分季节变化规律及其对植被多样性的响应. 水土保持学报, 2016, 30(04): 199-205.
- [15] 盛才余,刘伦辉,刘文耀. 云南南涧干热退化山地人工植被恢复初期生物量及土壤环境动态. 植物生态学报, 2000(05): 575-580.
- [16] 郭志彬,王道中,刘长安,刘枫,李凤民. 引入草木樨对半干旱黄土高原区早期植物群落演替和土壤养分的影响(英文). 西北植物学报, 2012, 32(04): 787-794.
- [17] 刘作云,杨宁. 紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤生态化学计量特征. 中国农学通报, 2015, 31(18): 163-167.
- [18] Chen X Y, Daniell T J, Neilson R, O'Flaherty V, Griffiths B S. Microbial and microfaunal communities in phosphorus limited, grazed grassland change composition but maintain homeostatic nutrient stoichiometry. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75: 94-101.
- [19] He J S, Fang J Y, Wang Z H, Guo D L, Flynn D F B, Geng Z. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China. *Oecologia*, 2006, 149(1): 115-122.
- [20] 叶迎,赵考诚,马军,庄恒扬. 农田生态化学计量研究进展. 湖北农业科学, 2021, 60(7): 5-9, 23-23.
- [21] 孙龙,窦旭,胡同欣. 林火对森林生态系统碳氮磷生态化学计量特征影响研究进展. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2021, 45(2): 1-9.
- [22] 张晗,欧阳真程,赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响. 环境科学学报, 2019, 39(3): 939-951.
- [23] 胡敏,李芳柏. 土壤微生物铁循环及其环境意义. 土壤学报, 2014, 51(4): 683-698.
- [24] Zhang X, Zhao X, Zhang M. Functional diversity changes of microbial communities along a soil aquifer for reclaimed water recharge. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, 80(1): 9-18.
- [25] 陈雅昕,邓娇娇,周永斌,殷有,魏亚伟,白雪娇,朱文旭. 蒙古栎天然次生林土壤微生物群落特征及其与土壤理化特性的关系. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(4): 409-416.
- [26] Wang N N, Wang M J, Li S L, Sui X, Han S J, Feng F J. Effects of variation in precipitation on the distribution of soil bacterial diversity in the primitive Korean pine and broadleaved forests. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2014, 30(11): 2975-2984.
- [27] Schafer J L, Mack M C. Short-term effects of fire on soil and plant nutrients in palmetto flatwoods. *Plant and Soil*, 2010, 334(1/2): 433-447.
- [28] Blume H P, Stahr K, Leinweber P. *Bodenkundliches Praktikum*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011.
- [29] 李春越,郝亚辉,薛英龙,王益,党廷辉. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1783-1791.

- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [31] 王道杰, 周麟, 谢洪, 王士革. 开发利用对泥石流滩地土壤肥力特性的影响. 土壤通报, 2004, 35(1): 16-20.
- [32] 王雅飞, 尹明, 唐礼贵, 赵敏, 喻晓钢. 文家沟泥石流区植被调查. 农学学报, 2014, 4(2): 63-67.
- [33] 严思维, 杜锟, 陈爱民, 林勇明, 邓浩俊, 张广帅, 吴承祯, 洪伟. 蒋家沟泥石流频发区不同植被类型与土壤养分及酶的关系. 应用与环境生物学报, 2016, 22(1): 49-57.
- [34] 李云琴, 杜凡, 汪健, 李瑞年, 刘洋. 金沙江上游干旱河谷植被. 生物多样性, 2016, 24(4): 489-494.
- [35] Cotrufo M F, Soong J L, Horton A J, Campbell E E, Haddix M L, Wall D H, Parton W J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 776-779.
- [36] Qualls R G, Haines B L. Biodegradability of dissolved organic matter in forest throughfall, soil solution, and stream water. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 578-586.
- [37] 董莉丽, 郑粉莉. 黄土丘陵沟壑区土地利用和植被类型对土壤质量的影响. 兰州大学学报: 自然科学版, 2010, 46(2): 39-44.
- [38] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术. 北京: 农业出版社, 1992.
- [39] Zhao F Z, Sun J, Ren C J, Kang D, Deng J, Han X H, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X. Land use change influences soil C, N and P Stoichiometry under 'Grain-to-Green Program' in China. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 10195.
- [40] Andersen T, Elser J J, Hessen D O. Stoichiometry and population dynamics. *Ecology Letters*, 2010, 7(9): 884-900.
- [41] 许景伟, 王卫东, 李成. 不同类型黑松混交林土壤微生物、酶及其与土壤养分关系的研究. 北京林业大学学报, 2000(01): 51-55.
- [42] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [43] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学: D 辑, 2003, 33(1): 72-80.