

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.043.

刘芳, 夏栋, 马佳鑫, 等. 人工修复边坡植被演替初期有机碳组分及土壤生态化学计量特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 68-75.

Liu Fang, Xia Dong, Ma Jiaxin, et al. Change Characteristics of Organic Carbon Components and Stoichiometric Ratios of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in the Early Stage of Vegetation Succession in Artificial Slope Restoration[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 68-75.

人工修复边坡植被演替初期有机碳组分及 土壤生态化学计量特征

刘芳^{1,3}, 夏栋^{1,3,4}, 马佳鑫^{3,4}, 罗婷^{2,3}, 闫书星^{1,3}, 张森⁵

(1.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2.三峡大学 土木与建筑学院,
湖北 宜昌 443002; 3.三峡大学 水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心, 湖北 宜昌 443002;
4.三峡大学 生物与制药学院, 湖北 宜昌 443002; 5.华北理工大学 建筑工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要: [目的] 研究人工修复边坡植被演替初期土壤有机碳组分、碳氮磷含量及其化学计量比, 揭示气候因子对人工修复边坡演替初期土壤有机碳组分、碳氮磷含量及其化学计量比的影响, 以为后期人工修复边坡的养护提供指导和建议, 确保人工修复边坡的正向演替。 [方法] 在湛江、梧州、宜昌、南阳、焦作、潍坊、加查采集了初期基材配制相同、植物配制相近, 修复年限为 2~4 年的植被混凝土人工修复边坡土样, 通过实验获得土样有机碳组分、碳、氮、磷的数据, 采用冗余分析, 开展气候因子对人工修复边坡演替初期土壤有机碳组分、碳氮磷含量及其化学计量比的影响研究。 [结果] 人工修复边坡演替初期 F_1 含量的变化范围为 1.10~3.64 g/kg; F_2 含量的变化范围为 1.33~3.04 g/kg; F_3 含量的变化范围为 2.02~3.34 g/kg; F_4 含量的变化范围为 10.86~15.24 g/kg; TOC 含量变化范围为 15.52~24.71 g/kg; TN 含量变化范围为 0.61~0.93 g/kg; TP 含量的变化范围为 0.81~1.22 g/kg; C : N 变化范围为 23.55~27.95; C : P 变化范围为 17.26~23.09; N : P 的变化范围为 0.72~0.98; C : N : P 的变化范围为 17.26 : 0.75 : 1~24.81 : 0.95 : 1。 [结论] 演替初期人工修复边坡碳磷表现为中等及以上, 氮表现为缺乏; 有机碳组分以惰性有机碳为主且有机碳稳定性较强。有机碳组分的主要影响因子为年平均温度、物种丰富度和年平均降水; 土壤碳氮磷含量及其化学计量比主要影响因子为年平均温度、物种丰富度、pH 和容重。

关键词: 演替初期; 人工修复边坡; 有机碳组分; 碳氮磷含量; 碳氮磷化学计量比

中图分类号: X825

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0068-08

Change Characteristics of Organic Carbon Components and Stoichiometric Ratios of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in the Early Stage of Vegetation Succession in Artificial Slope Restoration

Liu Fang^{1,3}, Xia Dong^{1,3,4}, Ma Jiaxin^{3,4}, Luo Ting^{2,3}, Yan Shuxing^{1,3}, Zhang Sen⁵

(1.College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2.College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3.Hubei Engineering Research Center of Cement-based Ecological Restoration Technology, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 4.College of Biological & Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 5 College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to study the effects of climate factors on soil organic carbon

收稿日期: 2023-03-14

修回日期: 2023-04-05

资助项目: 内蒙古自治区科技重大专项课题“改性湖泊底泥协同寒旱地区堆填场生态修复技术研究”(2021ZD0007-03); 国家自然科学基金面上项目“干旱-碱性环境下丛枝菌根对植被混凝土生态修复植物抗逆性的影响”(51979147)

第一作者: 刘芳(1998—), 女, 湖北建始县人, 硕士研究生, 研究方向为生态修复和水土保持。E-mail: 2480139783@qq.com

通信作者: 夏栋(1985—), 男, 湖北黄冈市人, 博士, 副教授, 研究方向为生态修复。E-mail: xiadongsanxia@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

components, carbon, nitrogen and phosphorus contents and their stoichiometric ratios in the early stage of artificial slope restoration, to reveal the effects of climate factors on soil organic carbon components, carbon, nitrogen and phosphorus contents and their stoichiometric ratios in the early stage of artificial slope restoration, and to provide guidance and suggestions for the maintenance of artificial slope restoration in the later stage and ensure the positive succession of artificial slope restoration. [Methods] Slope soil samples artificially repaired by vegetated concrete with the same initial base material preparation and similar plant preparation were collected from Zhanjiang, Wuzhou, Yichang, Nanyang, Jiaozuo, Weifang and Jiacha. Data of organic carbon components, carbon, nitrogen and phosphorus of soil samples were obtained through determination. Redundancy analysis was adopted. The effects of climate factors on soil organic carbon component, carbon, nitrogen and phosphorus content and stoichiometric ratio in the early stage of slope restoration were studied. [Results] The F_1 content of artificial repaired slope varied from 1.10 to 3.64 g/kg at the initial stage of succession. The variation range of F_2 content was 1.33 ~ 3.04 g/kg. The content of F_3 varied from 2.02 to 3.34 g/kg. The content of F_4 ranged from 10.86 to 15.24 g/kg. TOC content ranged from 15.52 to 24.71 g/kg. TN content ranged from 0.61 to 0.93 g/kg. TP content ranged from 0.81 to 1.22 g/kg. C : N ranged from 23.55 to 27.95. C : P ranged from 17.26 to 23.09. N : P ranged from 0.72 to 0.98. C : N : P ranged from 17.26 : 0.75 : 1 to 24.81 : 0.95 : 1. [Conclusion] In the early stage of the artificial restoration slope, carbon and phosphorus are medium and above, and nitrogen is insufficient. The organic carbon component is mainly inert organic carbon and the organic carbon has strong stability. The main influencing factors on organic carbon components were mean annual temperature, species richness and mean annual precipitation. The main factors affecting soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and their stoichiometric ratios were annual mean temperature, species richness, pH and bulk density.

Keywords: early stage of succession; manually repaired slope; organic carbon component; carbon, nitrogen and phosphorus content; stoichiometric ratio of carbon, nitrogen and phosphorus

有机碳是表征土壤质量和土壤生产力的重要指标,其中不同组分的有机碳在土壤中的周转周期不同,对于环境变化的响应也不尽相同。根据有机碳氧化稳定性可以分为极易氧化有机碳(F_1)、容易氧化有机碳(F_2)、较易氧化有机碳(F_3)、稳定有机碳(F_4)^[1,2]。碳氮磷化学计量比能反映碳氮磷含量之间的平衡关系,是描述土壤养分状况,反映土壤生态过程变化中养分限制状态的重要指标^[3]。人工修复边坡土壤和天然土壤相比人为干扰更强,植被恢复难度更大,研究人工修复边坡土壤的有机碳组分和碳氮磷含量及其化学计量比对于其植被恢复有重要意义。

在植被的演替过程中,土壤肥力影响着群落优势物种的拓殖和更替,有研究表明演替初期是预测生态系统未来的群落结构、演替轨迹和功能动态的关键时期,演替初期土壤状态的变化对植被群落的演替方向和演替速率具有重要的影响^[4-6]。尤其退化土地植被演替前期往往受到土壤环境因素的制约,从而导致演替方向改变,演替速率变慢。目前许多学者对演替初期的土壤状态进行了研究,但研究大多集中在森林^[7]、丘陵^[8]、草地等^[9]天然环境中,对于人为影响较大的人工修复的土壤

报道较少。工程扰动不可避免地形成了裸露边坡,植被混凝土生态防护技术通过构建可供植被生长的生境基材进行边坡修复,目前这项技术已经在全国得到了广泛应用。植被混凝土修复基材符合典型的演替过程(裸地—草—草、灌)。在本地物种未大量入侵的演替初期,先锋物种单一且为非本土物种容易受土壤环境制约而改变群落演替方向和演替速率^[10-11]。有研究表明向家坝水电站人工修复边坡初始各物种重要值接近,后受环境因子的影响最终各样地表现的生长型结构明显不一致^[12]。因此开展演替初期的基材有机碳组分及C,N,P化学计量比的研究十分必要,不仅便于总体掌握基材质量,还能为后期的养护提供指导和建议,以保证人工修复边坡向着预想的演替方向发展。

1 材料与方法

1.1 样地设置

在广东湛江(21.72°N,110.13°E)、广西梧州(23.49°N,112.26°E)、湖北宜昌(30.41°N,111.22°E)、河南南阳(33.56°N,112.25°E)、河南焦作(35.21°N,113.24°E)、西藏加查(29.14°N,92.56°E)选择按《水电工程陡边

坡植被混凝土生态修复技术规范》(NB/T35082-2016)^[13]配制的初始基材,初始基材性质相似、植物配制相近,修复 2~4 a 的典型植被混凝土修复边坡

进行土样采集、植被调查,各边坡基本情况与基材性质见表 1。各样地的年平均温度和年平均降水信息来源于中国气象信息中心。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic situation of sample site

气候带	地区	编号	采样地	经纬度	修复年限	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	pH
热带	广东湛江	ZJ	玉湛高速	21.72°N, 110.13°E	2 a	1.21	8.16
	广西梧州	WZ	狮卧山	23.49°N, 112.26°E	2 a	1.19	7.98
亚热带	湖北宜昌	YC	杨家湾	30.41°N, 111.22°E	2 a	1.35	8.43
	河南南阳	NY	天池抽水蓄能水电站	33.56°N, 112.25°E	3 a	1.37	7.69
暖温带	河南焦作	JZ	候玉沟矿山	35.21°N, 113.24°E	2 a	1.32	8.08
	山东潍坊	WF	潍坊抽水蓄能水电站	36.43°N, 119.06°E	2 a	1.27	8.21
高原气候带	西藏加查	DG	大古水电站	29.14°N, 92.56°E	4 a	1.02	7.34

1.2 样品采集

在采集土壤样品的过程中,于每个样方内设置 3 个土壤取样重复点。因人工植被恢复措施覆土层厚度约为 10 cm,故各样点取土时取表层土壤(0—10 cm)。在每个样地内按照“S”形,选取 5~10 个点,去除土壤表层覆盖的未完全腐化枯落物,将采集的土样进行混合,保存于密封袋中带回实验室,仔细去除其中的植物残体及土壤动物,进行自然风干,过筛,用于土壤碳、氮、磷的测定以及有机碳组分的测定。

1.3 测定指标与方法

全氮采用半微量开氏法^[3],全磷采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法^[8]。土壤 TOC 采用重铬酸钾外加热法,氧化有机碳组分采用改进 Walkley-Black 方法^[11]测定,在 10 ml 浓度为 0.167 mol/L 的重铬酸钾溶液中分别加入浓度为 6, 9, 12 mol/L 的硫酸 5, 10, 20 ml, 然后进行加热,后进行滴定。其中极易氧化有机碳(F_1)为 6 mol/L 时测得有机碳含量,容易氧化有机碳(F_2)为 9 mol/L 测得有机碳含量与 6 mol/L 测得有机碳含量之差,较易氧化有机碳含量(F_3)为 12 mol/L 测得有机碳含量与 9 mol/L 测得有机碳含量之差,难氧化有机碳含量(F_4)为总有机碳(TOC)与 12 mol/L 测得有机碳含量之差^[11]。

1.4 数据处理

试验数据使用 Office 2010 进行初步统计分析,图形绘制采用 Origin 2018,单因素方差分析(Tukey's-b)和 Pearson 相关性分析采用 SPSS 22.0 进行处理,冗余分析用 CANOCO 5.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 植被演替初期基材有机碳组分

人工修复边坡演替初期基材有机碳组分如图 1 所示, F_1 含量的变化范围为 1.10~3.64 g/kg; F_2 含量的变化

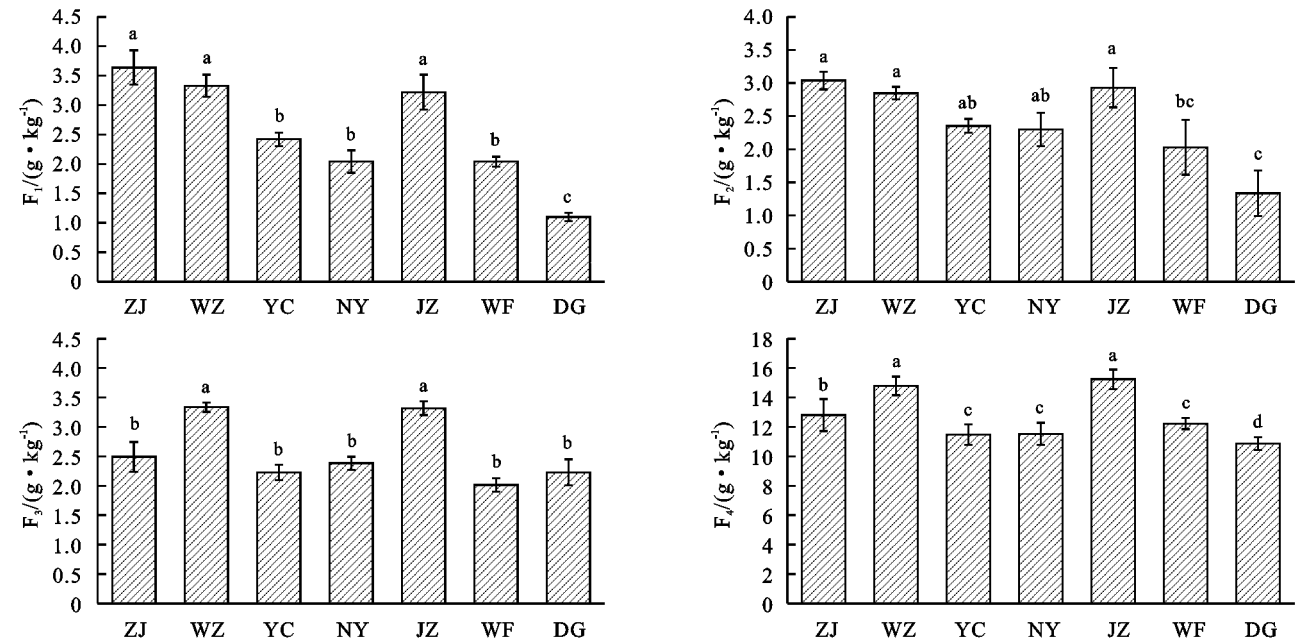
范围为 1.33~3.04 g/kg; F_3 含量的变化范围为 2.02~3.34 g/kg; F_4 含量的变化范围为 10.86~15.24 g/kg。其中 F_4 含量最高,占 TOC 含量的 50% 以上,明显高于其他 3 个组分,说明人工修复边坡在演替初期有机碳以惰性有机碳为优势。人工修复边坡演替初期有机碳各组分占有机碳百分比如表 2 所示, F_1/TOC , F_2/TOC , F_3/TOC , F_4/TOC 的变化范围为 7.05%~16.55%, 8.60%~13.82%, 11.00%~14.36%, 58.29%~69.98%。从热带到亚热带、暖温带再到高原气候带,各样地的 F_1 占 TOC 百分比呈现下降的趋势,其中位于热带的 ZJ F_1 占 TOC 百分比是位于高原气候带 DG 的 2.34 倍。随着气候带的变化 F_2 占 TOC 的百分比也呈现下降的趋势,但下降幅度较 F_1 占 TOC 百分比小,其中 ZJ 的 F_2 占 TOC 百分比是 DG 的 1.61 倍。 F_3 占 TOC 百分比随气候带的变化无明显规律, F_4 占 TOC 百分比呈现上升的趋势,从 ZJ 的 58.29% 上升到 DG 的 69.98%。不同气候带下 F_1 , F_2 , F_4 含量有显著性差异($p < 0.05$), F_3 含量无显著性差异($p < 0.05$),表明气候的变化主要影响 F_1 , F_2 , F_4 的含量。

2.2 不同气候带植被演替初期基材 C, N, P 含量及化学计量比

人工修复边坡演替初期的 TOC、TN、TP 含量如图 2 所示,其中 TOC 含量变化范围为 15.52~24.71 g/kg; TN 含量变化范围为 0.61~0.93 g/kg; TP 含量的变化范围为 0.81~1.22 g/kg。根据全国第二次土壤普查养分分级标准^[14],演替初期的人工修复边坡 TOC 表现为中等(DG)、丰富(ZJ, YC, NY, WF)、很丰富(WZ, JZ); TN 含量表现为很缺乏(DG)、缺乏(ZJ, WZ, YC, NY, JZ, WF); TP 含量表现为中等(NY)、丰富(WZ, WF, DG)、很丰富(ZJ, YC, JZ)。随着气候带的变化,除了 JZ 其他样地的 TOC 总体上表现为下降的趋势; TN 含量表现为热带>亚热带>暖温带>高原气候带,且

TOC 和 TN 的总体变化趋势相同;TP 含量随着气候

带的变化总体上无明显规律。



注:不同小写字母表示相同指标不同样地间有显著性差异($p<0.05$)。

图 1 人工生态修复边坡演替初期各组分有机碳含量

Fig. 1 Organic carbon content of each component in slope at the early stage of succession was repaired by artificial ecology

表 2 演替初期人工生态修复边坡有机碳组分占有有机碳百分比

Table 2 Percentage of organic carbon components in slope repaired by artificial ecology in the early stage of succession %

气候带	样地编号	F ₁ /TOC	F ₂ /TOC	F ₃ /TOC	F ₄ /TOC
热带	ZJ	16.55±2.37a	13.82±2.09ab	11.34±1.46d	58.29±2.70c
	WZ	13.71±0.22b	11.71±1.74ab	13.73±2.26a	60.85±1.08c
亚热带	YC	13.08±1.93b	12.74±0.91a	12.05±2.79cd	62.13±2.14bc
	NY	11.17±1.33b	12.59±1.63a	13.06±0.19bc	63.17±2.09b
暖温带	JZ	13.02±2.04ab	11.86±2.75ab	13.43±0.37a	61.69±0.78c
	WF	11.15±0.60b	11.09±2.33ab	11.00±1.98d	66.76±1.93a
高原气候带	DG	7.06±2.35c	8.60±2.23b	14.36±2.77b	69.98±2.59a

注:不同小写字母表示相同指标不同样地间有显著性差异($p<0.05$)。

人工修复边坡演替初期碳氮磷化学计量比如表 3 所示,C: N 变化范围为 23.55~27.95;C: P 变化范围为 17.26~23.09;N: P 的变化范围为 0.72~0.98;C: N: P 的变化范围为 17.26: 0.75: 1~24.81: 0.95: 1。C: N,C: P,N: P 的变异系数分别为 7.08%, 11.99%, 12.15%。从变异系数可以看出,不同气候带下修复样地的碳氮比最稳定,氮磷比最不稳定,说明气候带的不同对修复样地的碳氮比变化影响最小,对氮磷比变化影响最大。

2.3 修复基材有机碳、全氮、全磷含量及其生态化学计量比与环境因子的相关性

以有机碳组分为响应变量,以气候、土壤性质、物种丰富度为解释变量进行 RAD 分析,分析结果见图 3,表明第一轴和第二轴分别解释了 69.07%,4.07%,其中年平均温度、物种丰富度和年平均降水量的贡

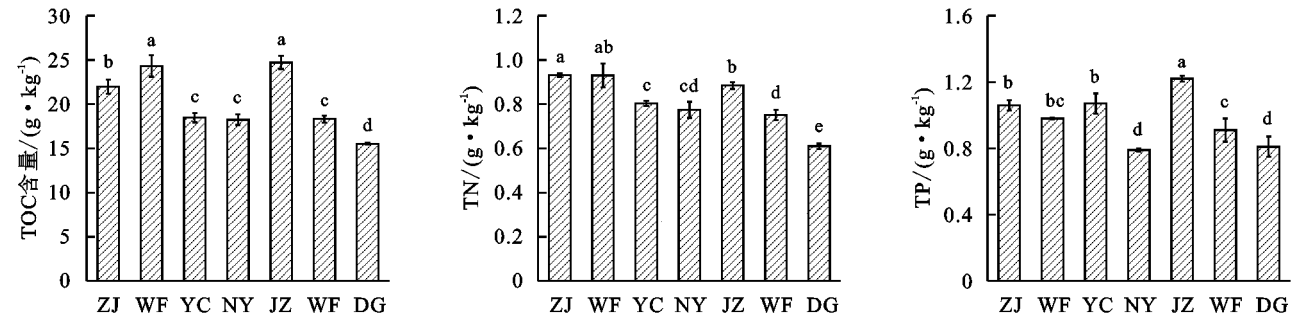
献率为 42.7% ($p<0.05$), 27.3% ($p<0.01$), 10.6% ($p<0.05$), 是有机碳组分的主要影响因子。年平均温度、物种丰富度与 F₁, F₂, F₃, F₄ 均为正相关;年平均降水量与 F₁, F₃, F₄ 呈正相关,与 F₂ 呈负相关。以碳氮磷以及碳氮磷化学计量比为响应变量,以气候、土壤性质和物种丰富度为解释变量进行 RAD 分析,分析结果显示第一轴和第二轴分别解释了 56.41%, 8.68%, 其中年平均温度、物种丰富度、pH、容重的贡献率分别为 32.6% ($p<0.05$), 33.9% ($p<0.01$), 13.4% ($p<0.05$), 13.4% ($p<0.01$), 为碳氮磷含量及其化学计量比的主要影响因子。年平均温度、物种丰富度与碳氮磷含量及其化学计量比均为正相关;pH 与氮磷比、碳磷比呈负相关,与碳氮磷含量和碳氮比呈正相关;容重与氮磷比呈负相关,与碳氮磷含量、碳氮比、碳磷比呈正相关。

表 3 演替初期人工生态修复边坡碳氮磷化学计量比

Table 3 Stoichiometric ratio of carbon, nitrogen and phosphorus in slope repaired by artificial ecology at the early stage of succession

气候带	样地编号	C : N	C : P	N : P	C : N : P
热带	ZJ	23.6±0.86cd	20.74±1.18bc	0.88±0.02b	20.74 : 0.88 : 1
	WZ	26.13±1.83ab	24.81±1.38a	0.95±0.06ab	24.81 : 0.95 : 1
亚热带	YC	22.98±0.47d	17.26±1.17d	0.75±0.4cd	17.26 : 0.75 : 1
	NY	23.55±0.19cd	23.09±0.83ab	0.98±0.03a	23.09 : 0.98 : 1
暖温带	JZ	27.95±0.95a	20.25±0.38c	0.72±0.01d	20.25 : 0.72 : 1
	WF	24.39±0.76cd	20.13±1.91c	0.83±0.06bc	20.13 : 0.83 : 1
高原气候带	DG	25.45±0.86bc	19.16±1.14cd	0.75±0.06cd	19.16 : 0.75 : 1
变异系数		7.08%	11.99%	12.15%	

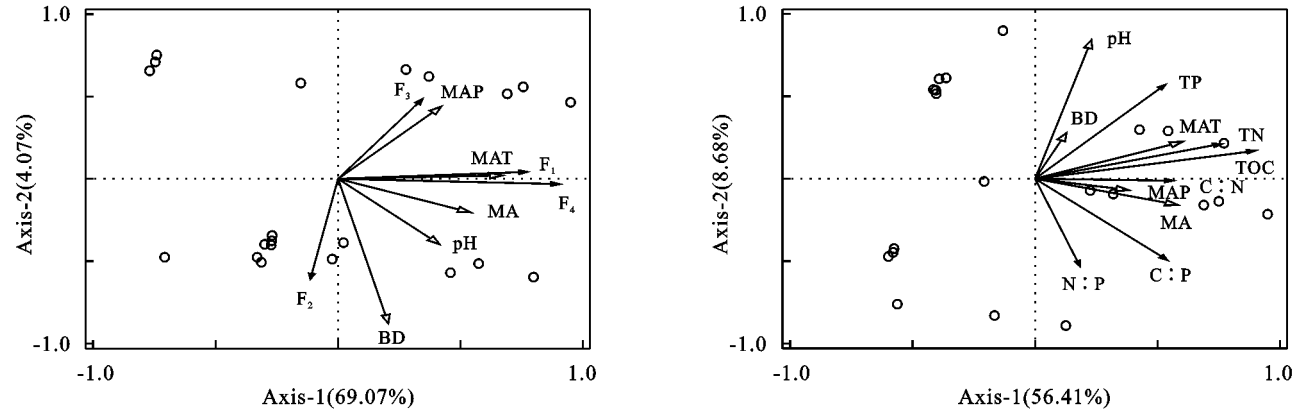
注:不同小写字母表示相同指标不同样地间有显著性差异($p<0.05$)。



注:不同小写字母表示相同指标不同样地间有显著性差异($p<0.05$)。

图 2 人工生态修复边坡演替初期 TOC,TN,TP 含量

Fig. 2 TOC, TN and TP contents in slope restoration by artificial ecology at the early stage of succession



注:MAP 表示年平均降水量;MAT 表示年平均温度;MA 表示物种丰富度。

图 3 有机碳组分、碳氮磷含量及化学计量比与环境因子的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of organic carbon component, carbon, nitrogen and phosphorus content, stoichiometric ratio and environmental factors

3 讨论

3.1 演替初期土壤有机碳组分变化特征

有机碳氧化稳定性组分反映了有机碳氧化的难易程度,对土壤的质量和碳循环有重要的意义。其中 F_1 , F_2 化学稳定性较差对环境变化十分敏感,容易被微生物分解利用,在土壤中周转速率快; F_3 和 F_4 化学稳定性强,不易被分解利用,周转周期长。凋落物在

微生物的分解下可快速的转化成活性有机碳,而活性有机碳向惰性有机碳的转化较为缓慢^[15-16]。地上生物量的增加会导致凋落物的增加。大量易分解的有机碳输入土壤增加了活性有机碳含量,改变了土壤有机碳的稳定性。此次研究的所有样地的 $(F_4 + F_3)/TOC$ 的变化范围为 69.63%~84.34%,高于长期施肥的黄土高原(28%)^[17] 和不同草地类型(35%)^[18],基本低于贫瘠沙化土壤(84%)^[19]。表明各样地有机碳以惰性有机碳为

主,且土壤有机碳质量低于长期施肥的黄土高原和不同类型的草地土壤,高于贫瘠沙化土壤。主要原因是演替初期地上生物量不足导致凋落物减少,凋落物数量的减少导致其所分解产生的活性有机碳也随之减少。从表2可以看出,随着气候带的变化,有机碳的氧化损失逐渐下降,有机碳的固存逐渐上升。温度和降水会影响有机碳各组分的含量,而有机碳组分对温度、降水的响应程度主要取决于其对温度、水分的敏感性大小^[20]。 F_1 , F_2 化学性质不稳定,对于环境的变化十分敏感。同时温度和降水会降低微生物和酶的活性,减缓凋落物的分解,从而降低活性有机碳的输入;温度和降水的减少还会抑制有机碳的矿化,有利于有机碳的固存^[21]。冗余分析也证实年平均温度、年降水量和物种丰富度是有机碳组分主要影响因子。

3.2 演替初期土壤碳氮磷含量变化特征

土壤中的碳氮磷元素是植物生长所必需的元素,其含量对植物的生长和生态系统有重要影响。土壤氮素输出过程包括气体丢失、淋溶和植物吸收利用。其中植物吸收利用的氮素主要是铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)两种无机氮形态。根据全国第二次土壤普查养分分级标准^[14]发现人工修复边坡演替初期表现为氮缺乏,可能是因为植被混凝土人工修复边坡为弱碱环境。有研究发现弱碱环境会加快土壤中氮的氨化和硝化作用,促进氮素从有机氮转化为铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N),从而不仅易于被植物吸收利用还易于由地表径流流失和变成气体消失^[22-23]。本研究发现,随着气候的变化 TOC 和 TN 总体上都呈现下降的趋势,这可能是不同气候带雨热条件差异引起的。土壤中的碳氮主要来源于植物根系分泌物和凋落物的分解^[24]。温度的升高和降水的增加一方面增加了凋落物的产量,另一方面提高了微生物和酶的活性,促进了凋落物的分解。植被也是土壤碳氮含量的另一影响因子,植被主要通过凋落物的输入和根系分泌物来影响土壤碳氮的含量^[25]。低纬度地区较高的温度、丰富的降水以及丰富的植被有利于碳氮的积累。不同气候带下各样地基材中的 TP 含量有显著性差异($p < 0.05$),但从气候带上看无明显规律,这与亚热带地区马尾松人工林土壤 TP 含量的纬度格局一致。有研究发现土壤中的 TP 含量在短期内相对稳定,受环境的影响较小,土壤 TP 含量主要受土壤母质、气候和植物等多种因素的影响^[26-27]。其中土壤母质是土壤 TP 的主要来源,气候主要通过降水和淋溶作用来影响土壤中的 TP 含量。本研究的样地从南到北纬度跨越较大,土壤母质也千差万别,因此本研究中土壤 TP 含量的变化可能是气

候和土壤母质共同作用的结果。

3.3 演替初期土壤碳氮磷化学计量比变化特征

土壤碳氮磷化学计量比能有效反映土壤质量和养分循环状态。本研究中土壤 C : N 的变化范围为 22.98~27.95 高于中国土壤 C : N 的平均值 14.4,基材中氮缺乏造成 C : N 偏高。C : P 的变化范围为 17.2~24.81 远远低于中国土壤 C : P 的平均值 136; N : P 的变化范围为 0.72~0.98 显著低于中国土壤 N : P 平均值 9.3^[28],从基材碳氮磷化学计量比可以看出基材表现为明显的磷富集。土壤中的磷元素主要来源于岩石的风化,在植被演替过程中,植被对磷的吸收增加,导致磷元素逐渐下降^[29]。但是由于本研究中人工修复边坡演替时间短,短时间内植被吸收的磷元素有限,且基质中添加的活化添加剂中含有磷元素,因此本研究中人工修复边坡基质表现为磷富集。本研究中随着气候带的变化各样地基材的 C : N 比相对稳定,变异系数为 7.08%,表明碳氮的变化在空间上具有一致性,这与全国 C : N 相对稳定的结果一致^[30]。C : N 和 N : P 的变异系数相对较大,分别为 11.99%,12.15%,主要是因为各样地基材中 TP 含量差异显著($p < 0.05$)且无明显的变化规律。

4 结论

演替初期人工修复边坡有机碳组分主要以惰性有机碳为主,有机碳稳定性较强;温度和水分会影响有机碳组分的含量且主要影响稳定性较差的活性有机碳。在低纬度地区有机碳容易氧化损失,因此在后期养护中要对低纬度地区的有机碳含量进行适当的监测,以保证植物的正常生长。

演替初期人工修复边坡碳磷表现为中等及以上,氮表现为缺乏,并且温度的降低和降水的减少会使土壤中碳氮的含量下降,对于磷素无明显影响。在后期养护中需要施加氮肥,尤其是温度低降水少的地区,避免出现氮限制而抑制植物的生长。演替初期的人工修复边坡的碳氮磷化学计量比表现为磷富集,在后期的养护中可以避免因为磷限制而抑制植物的生长。

人工修复边坡演替初期基材中有机碳组分的主要影响因子为年平均温度、物种丰富度和年平均降水;土壤碳氮磷含量及其化学计量比主要影响因子为年平均温度、物种丰富度、pH 和容重。

参考文献(References):

- [1] 张春霞,郝明德,魏孝荣等.黑垆土长期轮作培肥土壤有机质氧化稳定性的研究[J].土壤肥料,2004(03):10-12,16.
Zhang C X, Hao M D, Wei X R et al. Study of long-term rotation and fertilizations on black loessal soil on

- the oxidation stability of soil organic matter[J]. Soil Fertilizer, 2004(03):10-12, 16.
- [2] Sun C, Xue S, Chai Z, et al. Effects of land-use types on the vertical distribution of fractions of oxidizable organic carbon on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(2):221-231.
- [3] 朱玉荷, 肖虹, 王冰, 等. 蒙古高原草地不同深度土壤碳氮磷化学计量特征对气候因子的响应[J]. 植物生态学报, 2022, 46(3):340-349.
- Zhu Y H, Xiao H, Wang B et al. Stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus along soil depths in response to climatic variables in grasslands on the Mongolia Plateau[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(3):340-349.
- [4] Kashian M D, Romme H W, Tinker B D, et al. Carbon storage on landscapes with stand-replacing fires[J]. BioScience, 2006, 56(7):598-606.
- [5] Li D, Waller D. Long-term shifts in the patterns and underlying processes of plant associations in Wisconsin forests[J]. Global Ecology & Biogeography, 2016, 25(5):516-526.
- [6] Hansen W D, Romme W H, Ba A, et al. Shifting ecological filters mediate postfire expansion of seedling aspen (*Populus tremuloides*) in Yellowstone [J]. Forest Ecology and Management, 2016, 362:218-230.
- [7] 张佳慧, 王兴昌, 王传宽. 帽儿山温带森林演替初期土壤碳、氮、磷计量特征的变化[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10):3189-3195.
- Zhang J H, Wang X C, Wang C K et al. Changes in stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in the early stage of temperate forest succession in Maershan, Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10):3189-3195.
- [8] 张健, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区植被次生演替灌木初期的土壤养分特征[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(1):53-57.
- Zang J, Liu G B, Xu M X et al. Soil Nutrients characteristics in shrub appearance stage of vegetation Secondary Succession in the Hilly-gullied Loess Region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(1):53-57.
- [9] 汤茜, 丁访军, 朱四喜, 等. 茂兰喀斯特地区不同植被演替阶段对土壤化学性质与酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(10):1943-1952.
- Tang Q, Ding F J, Zhu S X et al. Effects of different vegetative succession stages on soil chemical properties and enzyme activities in Karst region of Maolan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(10):1943-1952.
- [10] 罗婷, 许文年, 程虎, 等. 向家坝水电站不同修复模式下根际土壤微生物化学计量特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2):450-458.
- Luo T, Xu W N, Cheng H et al. Stoichiometric characteristics of rhizosphere soil in different restoration models of Xiangjiaba Hydropower Station [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(2):450-458.
- [11] 丁瑜, 胡文静, 夏振尧, 等. 生态护坡生境基材土壤肥力动态变化研究[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(2):31-37.
- Ding Y, Hu W J, Xia Z Y et al. Soil fertility dynamics of substrate used for ecological slope protection[J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(2):31-37.
- [12] 夏振尧. 向家坝水电站扰动边坡人工植被群落初期演替过程与稳定性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- Xia Z Y. Earlier Succession and stability of artificial vegetation community on disturbed slope in Xiangjiaba Hydropower Station[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [13] 国家能源局. NB/T35082—2016, 水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- National Energy Administration. NB/T35082-2016, Technical code for eco-restoration of vegetation concrete on steep slope of hydropower projects[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [14] 张智, 安冰, 付军等. 广西国有派阳山林场桉树人工林土壤肥力质量评价[J]. 西南农业学报, 2022, 35(09):2137-2143.
- Zhang Z, An B, Fu J et al. Soil fertility quality evaluation in eucalyptus plantation of state-owned Paiyangshan Forest Farm in Guangxi[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(09):2137-2143.
- [15] 胡月华. 土壤有机碳组分及微生物功能多样性对耕作方式与秸秆覆盖量的响应[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(4):206-212.
- Hu Y H. Responses of soil organic carbon components and microbial functional diversity to tillage methods and straw mulch[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(4):206-212.
- [16] 黄凯文, 马珍, 苦君月, 等. 土壤有机碳损失机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(24):26-32.
- Huang K W, Ma Z, Shan J Y et al. Research progress of soil organic carbon loss mechanism[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, [16]2022, 50(24):26-32.
- [17] Ding S, Xue S, Liu G. Effects of long-term fertilization on oxidizable organic carbon fractions on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2016, 008(4):579-590.
- [18] Chan K Y, Bowman A, Oates A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an oxic paleustalf under different pasture leys[J]. Soil Science, 2001, 166(1):p 61-67.

- [19] Guareschi R F, Pereira M G, Perin A. Oxidizable carbon fractions in Red Latosol under different management systems[J]. *Revista Ciência Agronômica*, 2013, 44(2):242-250.
- [20] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, 440(7081):165-173.
- [21] 孙彩丽, 刘国彬, 马海龙, 等. 不同沙生植被土壤易氧化有机碳组分及其含量的差异[J]. *草地学报*, 2012, 20(5):863-869.
- Sun C L, Liu G D, Ma H L et al. Variation characteristics and fractions of oxidizable organic carbon in different sandy vegetation soil[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(5):863-869.
- [22] Ye Y, Liang X, Chen Y, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus accumulation and partitioning, and C : N : P stoichiometry in late-Season rice under different water and nitrogenmanagements[J]. *Plos One*, 2014, 9(7): e101776.
- [23] Dolezal J, Homma K, Takahashi K, et al. Primary succession following deglaciation at Koryto Glacier valley, Kamchatka [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2008, 40(2):309-322.
- [24] 王艳丹, 余建琳, 张梦寅等. 施氮对干热河谷农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, No.305(09):8-17.
- Wang Y D, Yu J L, Zhang M Y et al. Effects of nitrogen application on agricultural soil organic carbon and its components in the dry-hot valley[J]. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2022, No.305(09):8-17.
- [25] Hans L, John A R, Gaius R S, et al. Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23(2):95-103.
- [26] 简尊吉, 倪妍妍, 徐瑾, 等. 马尾松人工林土壤碳氮磷生态化学计量学特征的纬度变化[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(2):1-8.
- Jian Z J, Ni Y Y, Xu J et al. Latitudinal variations of soil C-N-P stoichiometry in *Pinus massoniana* (Lamb.) plantations[J]. *Forest Research*, 2022, 35(2):1-8.
- [27] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(5):870-879.
- Zeng Q C, Li X, Dong Y H et al. Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(5):870-879.
- [28] 刘耀辉, 郑洪元, 文杰, 等. 江西省森林土壤碳氮磷含量及其化学计量比特征分析[J]. *南方林业科学*, 2021, 49(2):42-46.
- Liu Y H, Zheng Q Y, Wen J et al. Carbon nitrogen phosphorus and its chemical measurement ratio characteristics in forest soils in Jiangxi Province[J]. *South China Forestry Science*, 2021, 49(2):42-46.
- [29] 刘丹, 游郭虹, 宋小艳等. 施磷对川西北高寒草地土壤磷形态及有效性的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(06):2378-2387.
- Liu D, You G H, Song X Y et al. Effects of phosphorus fertilization on soil phosphorus fractions and availability in an alpine grassland of northwestern Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(06):2378-2387.
- [30] Chen L, Li P, Yang Y. Dynamic patterns of nitrogen: Phosphorus ratios in forest soils of China under changing environment[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2016, 121(9):2410-2421.

(上接第 67 页)

- [26] 李婧. 渭北旱塬两种轮作制度中绿肥的效应研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- Li J. Effects of Green Manure in Two Crop Rotation Systems in Weibei Rainfed Highland[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2012.
- [27] 李顺. 黄土旱塬冬小麦-夏绿肥模式的水肥效应及土壤微生物多样性研究[D]. 山西太谷:山西农业大学, 2020.
- Li S. Study on Soil Water-fertilizer Effect and Microbial Diversity with Different Winter Wheat-summer Green Manure Model in Dryland of Loess Plateau[D]. Taigu, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2020.
- [28] 苏晨. 不同绿肥与小麦轮作对土壤水肥环境及小麦生长的影响[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- Su C. Effects of the Rotation of Different Green Manures and Wheat on Soil Water-fertility and Growth of Wheat [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2014.
- [29] 杨宁. 豆科绿肥-冬小麦轮作提高小麦产量和营养元素含量的效应与土壤机制[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- Yang N. The Effect and Soil Mechanism of Improving Wheat Yield and Nutrients Content with Legume-winter Wheat Rotations[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2012.