

风沙黄土区排土场不同植被类型下 土壤生态化学计量特征

王东丽¹, 于百和¹, 赵晓亮¹, 郭莹莹¹, 谢伟^{1,2}, 郭建军²

(1. 辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 内蒙古神东天隆集团股份有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: [目的] 准确评价风沙黄土区露天矿区排土场不同植被类型下土壤改良效益, 并揭示其植被恢复的养分限制性, 进而为该区生态重建与环境改善构建高效的植被恢复模式提供理论依据。 [方法] 选取鄂尔多斯武家塔排土场乔、灌、草3种植被类型的10种恢复模式的土壤为研究对象, 以新排土为对照, 开展其土壤有机碳、全氮和全磷与其化学计量特征及关系的研究。 [结果] 风沙黄土区排土场土壤有机碳、全氮、全磷含量变化分别为0.62~18.60 g/kg, 0.09~0.36 g/kg 和 0.04~0.21 g/kg, 其中乔、灌木林地的土壤有机碳、全氮养分含量显著高于新排土 ($p \leq 0.05$), 乔木林地的全磷含量显著低于其他3种样地 ($p \leq 0.05$); 在土层垂直剖面, 3种植被类型的土壤养分均表现为表层富集性, 灌木林地的土壤全氮含量在不同土层均表现最高, 乔木林地土壤有机碳平均含量最高, 草地的全磷平均含量最多。土壤C/N在不同植被类型间无显著差异 ($p > 0.05$), 土壤C/P和N/P受植被类型的影响较大, 均表现为乔木林地 > 灌木林地 > 草地 > 新排土; 在土层垂直剖面, C/N整体呈现增大的变化趋势, N/P先减小后增大的趋势。土壤有机碳与C/N, C/P, N/P均呈极显著正相关关系 ($p \leq 0.01$); 土壤全氮与C/P, N/P呈极显著正相关关系 ($p \leq 0.01$), 土壤全磷则反之。乔木林地土壤N/P较高, 植被生长受磷含量的限制; 草地、灌木林地土壤N/P较低, 植被生长受氮含量的限制。 [结论] 在植被恢复初期先种植草灌改善土壤表层养分, 并适当施加氮肥, 随着土壤肥力的提高再逐步种植乔木, 配施磷肥以增强复垦效果。

关键词: 黄河流域; 排土场; 植被恢复; 土壤改良; 生态化学计量

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0061-09

Soil Ecological Stoichiometric Characteristics Under Different Vegetation Types of Open-Pit Dump in Sandy Loess Region

Wang Dongli¹, Yu Baihe¹, Zhao Xiaoliang¹, Guo Yingying¹, Xie Wei^{1,2}, Guo Jianjun²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. Inner Mongolia Shendongtianlong Group Corporation Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to accurately evaluate the soil improvement benefits and to reveal the nutrient limitations under different vegetation types in the open-pit dump in the sandy loess area, so as to provide a theoretical basis to construct an efficient vegetation restoration model for ecological reconstruction and environmental improvement in this area. [Methods] The soils from ten kinds of vegetation restoration modes, belonging to three vegetation types of forest, shrub, and grass were selected as study samples, while the soil from the newly dumped land was selected as control. The ecological stoichiometric characteristics of

收稿日期: 2022-03-20

修回日期: 2022-03-30

资助项目: 中央引导地方科技发展专项资金计划项目“内蒙古矿区中蒙草药生态有机培植技术研发及示范基地建设”; 内蒙古自治区科技计划项目(201701024); 辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-01)

第一作者: 王东丽(1986—), 女, 山西怀仁人, 副教授, 博士, 主要从事生态恢复及荒漠化防治研究。E-mail: starhome0522@163.com

通信作者: 赵晓亮(1981—), 男, 安徽淮北人, 副教授, 博士, 主要从事矿山环境工程研究。E-mail: zhaoxiaoliang2008@126.com

<http://stbcj.paperonce.org>

soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus and their relationships were studied. [Results] The values of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus for soil under different vegetation types of dump in sandy loess region varied between 0.62~18.60 g/kg, 0.09~0.36 g/kg and 0.04~0.21 g/kg, respectively. The values of soil organic carbon and total nitrogen in the forest land and shrub land were significantly greater than those in the newly dumped land ($p \leq 0.05$), and the values of total phosphorus in the arboreal land were significantly lower than those in the other three plots ($p \leq 0.05$). In the vertical section of soil layer, the soil nutrients of three types of planting cover enriched in the surface layer. The soil total nitrogen amount of shrub land was the highest in different soil layers, the mean soil organic carbon amount of arbor land was the highest, and the mean soil total phosphorus amount of grass land was the highest. There was no significant difference in soil C/N among different vegetation types ($p > 0.05$). Soil C/P and soil N/P were greatly affected by vegetation types, and all of them showed the order: new soil dumping of arbor land > shrub land > grass land > new dump. In the vertical section of soil layer, soil C/N showed the increasing trend overall, and soil N/P firstly decreased and then increased with the increase of soil layer depth. Soil organic carbon was significantly positively correlated with soil C/N, C/P and N/P ($p \leq 0.01$). Soil total nitrogen was significantly positively correlated with soil C/P and N/P ($p \leq 0.01$), while soil total phosphorus was on the contrary. Soil N/P in arbor land was high, and vegetation growth was limited by the phosphorus amount. Soil N/P in grass land and shrub land was low, and vegetation growth was limited by the nitrogen amount. [Conclusion] It is suggested that grass and shrub should be planted at the early stage of vegetation restoration to improve soil surface nutrients; furthermore, nitrogen fertilizer should be applied appropriately. With the improvement of soil fertility, trees should be gradually planted and phosphorus fertilizer should be applied to enhance the reclamation effect

Keywords: Yellow River Basin; open-pit dump; vegetation restoration; soil improvement; ecological stoichiometry.

煤炭开采及排土场堆放,造成地表景观破坏、土地被占用,导致土壤性质不佳,植被损毁或退化,生物多样性减少等^[1],影响当地的生态环境及人居安全等。土地复垦和生态修复是解决矿山环境保护和综合治理的重要途径,而健康稳定的土壤生态系统是其实现的基础与关键。自然条件下,植被与土壤具有协同正向演替效应。排土场作为人工重塑生态系统,土壤具有层次紊乱、容重增加、含水量减少、养分贫瘠等问题^[2],人工恢复排土场生态效应和土壤质量一直是其治理的重点与难点,而有效地进行人工植被重建是恢复排土场复垦的生态功能、防止生态环境恶化的基本与关键途径^[3]。

黄河流域生态环境治理的相关研究一直受到国内外学者的高度关注,近年来黄土高原的生态环境明显改善,但由于该区煤炭资源的不断开发,导致矿区及周边环境不佳,尤其对于生态脆弱的风沙黄土区影响尤甚。该区排土场土壤主要为沙化黄土,因其干燥疏松极易遭受土壤侵蚀,水土流失严重^[4],复垦初期快速实现植被恢复并防治土壤侵蚀意义重大。此外,该区气候条件恶劣、复垦土壤瘠薄、生态需水短缺,人

工植被重建困难或者效果差,急需探究适宜、有效的人工植被恢复模式。

生态化学计量特征通常指的是有机体元素组成,对系统中主要元素的相对含量及其平衡关系发挥着重要作用,能更好地揭示生态系统各组分养分比例的调控机制,土壤碳氮磷及其比值是反映土壤肥力状况和土壤养分均衡性的重要指标,对于揭示土壤中养分的可获得性以及碳、氮、磷相互作用及平衡与制约机制具有重要意义^[5-6]。近年来,国内学者关于土壤的生态化学计量学研究多集中于森林、草地、沙地、湿地、石漠化区等自然生态系统的不同立地、植被类型、发展阶段、利用方式、干扰胁迫等内容^[7-9]。对于矿区废弃地,相关报道主要见于矿区不同植被群落叶片及枯落物之间的生态化学计量方面^[10],以土壤为对象的研究相对较少。故明确不同人工植被类型恢复下土壤养分的平衡与限制机制对于矿区复垦初期快速、有效的生态恢复至关重要。

因此,本研究以武家塔排土场复垦初期不同植被类型恢复模式下土壤为研究对象,运用生态化学计量学手段,研究不同植被类型下的土壤养分含量与生态化学计量特征及相互关系,探讨不同植被类型恢复下

排土场土壤养分状况及限制性,为理解土壤养分循环状况与平衡机制提供理论依据,为准确评价与预测植被恢复效益提供科学的建议,为该区域复垦初期有效的植被恢复模式构建提供参考价值,对防治与改善该区域生态环境问题具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区选取武家塔露天矿 4 号排土场,地处内蒙古鄂尔多斯市伊金霍洛旗补连乡境内,位于东胜煤田补连矿区的东南部,南与陕西神府煤田接壤,东与乌兰木伦河相邻,具体位置分布图见图 1。在地形上



从西北向东南倾斜近似为一坡面,海拔高程可达 1 162~1 200 m。在半干旱地区且气候类型上为典型的高原大陆性气候,故该地区冬寒夏燥、气温剧变,温差高达 74.9℃;全年少雨、暴雨集中,矿区年平均降水量 357.4 mm;多大风天气,年均风速 3.2 m/s,最大风速 24 m/s,多发生沙尘暴,年大风日数 44 d,年均沙尘暴日数 21.5 d(平均风速 > 17 m/s)。研究区内土壤类型为黄绵土和风沙土,土壤整体表现为碱性,水土流失严重^[4]。植被以草原和沙生植物为主,包括阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、沙生针茅(*Stipa glareosa*)、沙蒿(*A. desertorum*)等。

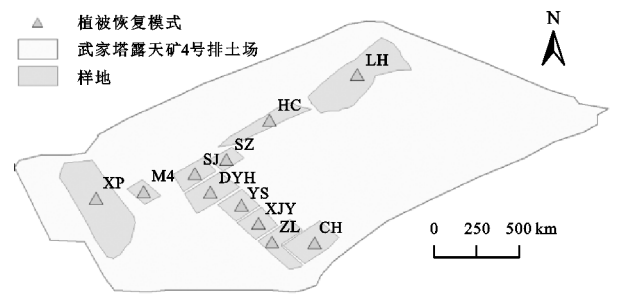


图 1 研究区与采样点示意图

Fig. 1 Location diagram of study area and sample sites

武家塔露天矿为国家绿色矿山,总面积为 9.24 km²,外排土场已停用,内排土场由东向西发展,本研究选取的 4 号排土场属于内排土场,于 2010 年开始排土堆放,现在仍在使用中,海拔高程为 1 160~1 270 m,排土线长度为 2 100 m^[11]。土地复垦采取边堆放边复垦的方式,采用周边沙化黄土进行客土,覆土厚度约为 1 m,土壤 pH 值 7.84,容重为 1.69 g/cm³,电导率 100.43 μS/cm,土壤有机质为 2.53 g/kg,全氮和全磷含量分别为 0.15 g/kg 和 0.14 g/kg。完成复垦面积近 270 hm²,涉及农作物、牧草、经济植物、林木等种植区及水域,复垦植物主要包括刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、榆树(*Ulmus pumila*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、新疆杨(*Populus alba*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、苜蓿(*Medicago sativa*)等。

在武家塔露天矿 4 号排土场复垦区选取复垦初期立地条件一致的 10 种植被恢复模式为样地,涉及乔木林地、灌木林地、草地 3 种植被类型,以新排土场为对照。各样地的具体位置分布图见图 1,样地的具体信息见表 1。

1.2 样品的采集与测定

针对上述各样地,2017 年 8 月进行土壤样品的

采集。在所选择样地内,随机选取出 3 个样带,每个样地选取 3 个样带,每个标准带选取 6 个样点,于距植株中心为圆心、半径为 30 cm 的圆周上采取多点混合取样法,采集土样时需先用工具将其植被枯枝落叶层去掉,对每个样点进行分表层(0—5 cm)、浅层(5—10 cm,10—20 cm)、中层(20—30 cm,30—40 cm)、深层(40—60 cm)六层取样,对取出的土体分别进行编号并带回实验室备用。对于土壤主要测定土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷、碱解氮、电导率、土壤含水量、土壤 pH 值,土壤有机碳采用重铬酸钾容量外加热法(油浴)测定,全氮采用开氏消煮法进行测定,全磷采用氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法测定,碱解氮用碱解扩散法测定,电导率用浸提法测定,含水量用烘干法测定,pH 采用 PHS-P 型酸度计测定。

1.3 数据分析处理

采用 Excel 2018 进行数据处理,采用 SigmaPlot 10.0 制作结果图,不同植被类型间数据组的差异采用 SPSS 20.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法 LSD 进行分析比较;采用 Pearson 相关分析法分析各因子之间的相关性,采用 RStudio 1.4.1 制作相关结果图。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample sites

序号	样地 编号	植被恢复 模式	恢复 年限	群落/优势种 高度/cm	密度/ (株·hm ⁻²)	植被 类型
1	XP	新排土	—	—	—	—
2	LH	撂荒地	1 年	19.05	698333	草地
3	HC	混草地	2 年	54.14	581667	草地
4	M4	苜蓿地-4	4 年	46.17	1436667	草地
5	SJ	沙棘	4 年	157.50	9866.7	灌木
6	DYH	大叶槐	3 年	223.61	16800.15	灌木
7	SZ	沙枣	3 年	138.75	3300	乔木
8	YS	榆树	3 年	276.67	10000	乔木
9	CH	刺槐	3 年	383.33	4000.05	乔木
10	ZL	竹柳	4 年	301.67	3900	乔木
11	XJY	新疆杨	3 年	400.00	4650	乔木

注:混草地为苜蓿、草木犀和沙打旺混合种植的草地;苜蓿地-4 为种植 4 a 的苜蓿地。

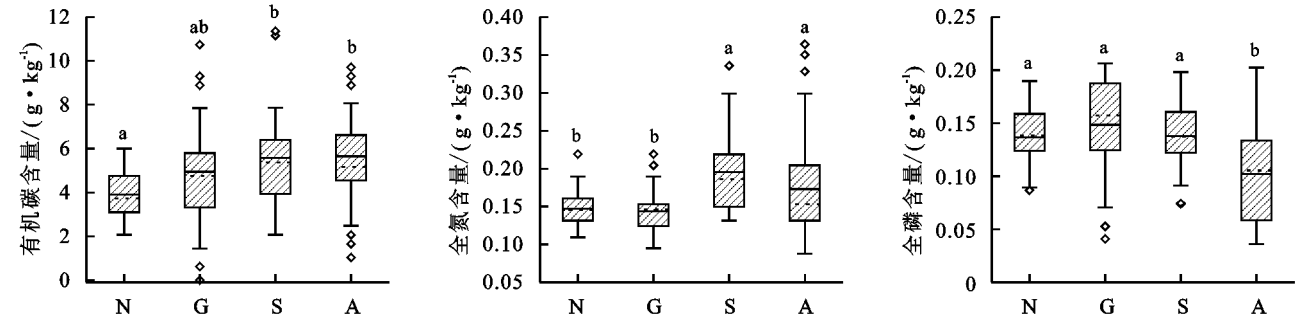
2 结果与分析

2.1 土壤 C,N,P 含量

不同植被类型下土壤有机碳、全氮和全磷含量表现出不一致的规律(图 2)。土壤有机碳含量由高到低依次表现为乔木林地>灌木林地>草地>新排土,其中乔木林地平均值高达 5.81 g/kg,乔、灌木林地显著高于新排土($p\leq 0.05$);土壤全氮含量由高到低依次表现为灌木林地>乔木林地>草地>新排土,其中灌木林地平均值最高可达 0.20 g/kg,乔、灌木林地土壤全氮含量显著高于草地和新排土($p\leq 0.05$);土壤全磷含量由高到低依次表现为草地>灌木林地>新排土>乔木林地,草地平均值最大达到 0.15 g/kg,草地、灌木林地和排土场之间差异未达到显著水平,但

均显著高于乔木林地($p\leq 0.05$)。

不同植被类型土壤有机碳、全氮和全磷含量在垂直土层的分布各异(图 3)。对于土壤有机碳,3 种植被类型均表现为在 0—5 cm 高于其他土层,尤其是乔灌木林地明显较高,除草地在 40—60 cm 明显有所增加,且均高于其他植被类型;对于土壤全氮,3 种植被类型整体表现为随着土层的增加呈下降趋势,且在 0—5 cm 明显高于其他土层,而且在各土层全氮含量均表现为灌木林地>乔木林地>草地;对于土壤全磷,3 种植被类型在土层垂直剖面变化不大,但始终表现为草地>灌木林地>乔木林地,而新排土表现为随土层深度增加而增大的变化趋势;此外,新排土的土壤有机碳和全氮含量在 20—40 cm 土层均有所增加,可能与其覆土来源有关。



注:小写字母表示不同植被类型的土壤 C,N,P 含量的差异显著性($p\leq 0.05$);虚线表示中位数,实线表示平均值;N 为新排土,G 为草地,S 为灌木林地,A 为乔木林地,下同。

图 2 不同植被类型下土壤 C,N,P 含量

Fig. 2 Soil C,N,P content under different vegetation types

2.2 土壤 C,N,P 生态化学计量

不同植被类型下土壤生态化学计量比变化不同(图 4)。C/N 的变化范围在 9.58~80.35 之间,3 种植被类型均较新排土场高,草地平均值达到最大(35.33),灌木林地平均值为最小(29.02);C/P 的变

化范围在 10.82~218.88 之间,3 种植被类型也均高于新排土,其中乔木林地显著较高($p\leq 0.05$),可达 61.67;N/P 的变化范围在 0.62~5.78 之间,草地平均值最小(1.07),乔木林地平均值达到最大(1.94),显著高于其他类型($p\leq 0.05$)。

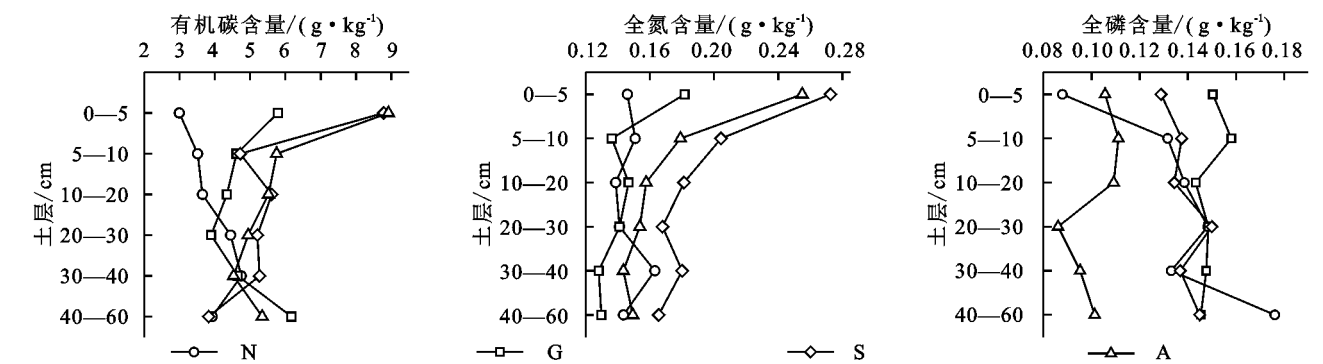


图 3 不同植被类型下土壤 CNP 在垂直土层的分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of soil CNP in vertical soil layer under different vegetation types

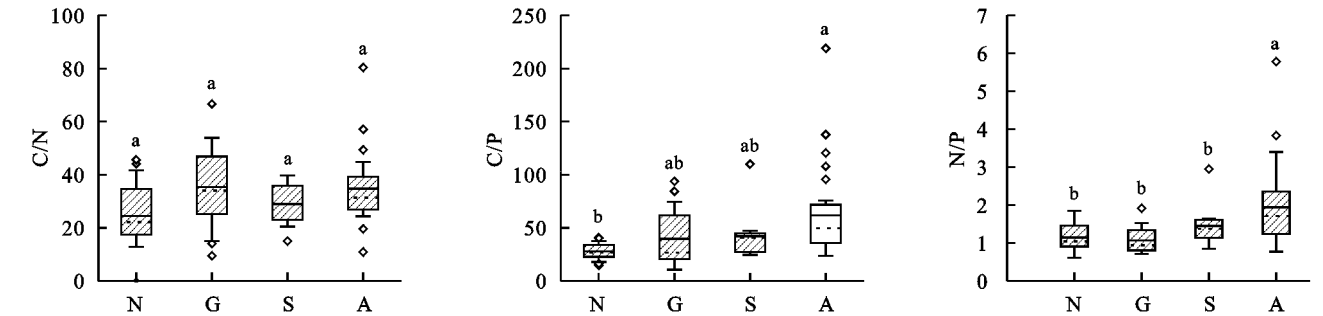


图 4 不同植被类型下土壤生态化学计量比

Fig. 4 Ecological stoichiometric ratios of different soil layers under different vegetation types

由图 5 可以看出,不同植被类型下土壤生态化学计量比在垂直土层上变化趋势各不相同。对于土壤 C/N,各类土壤表现为在 20—30 cm 趋同,无明显差异,其他土层存在不同程度的差异,不同植被类型在 0—5 cm 和 10—20 cm 均高于新排土,乔木林地 在表层(0—5 cm)最大,草地在深层(40—60 cm)最大;不同植被类型下土壤 C/P 在各土层均大于新排土,且乔木林地 C/P 比值总是大于其他植被类型,

乔灌林地土壤 C/P 随着土层深度增加整体呈逐渐减小的变化趋势,而新排土与草地无明显变化,在土壤表层(0—5 cm)表现为乔木林地>灌木林地>草地,在深层(40—60 cm)表现为乔木林地>草地>灌木林地;对于土壤 N/P,草地的垂直剖面变化较小,且均低于其他植被类型,而乔灌林地土壤 N/P 随土层深度增加整体呈变小趋势,且在表层明显高于其他土层。

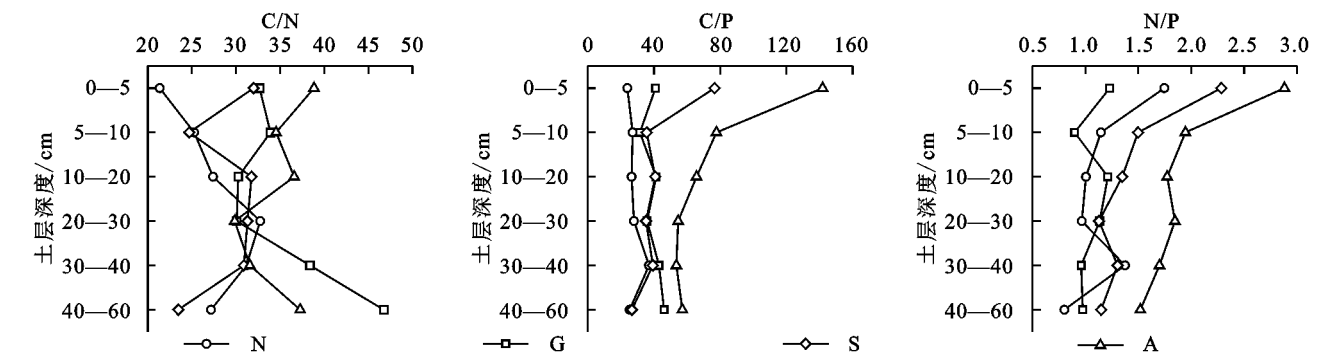


图 5 不同植被类型下土壤生态化学计量比在垂直剖面的变化特征

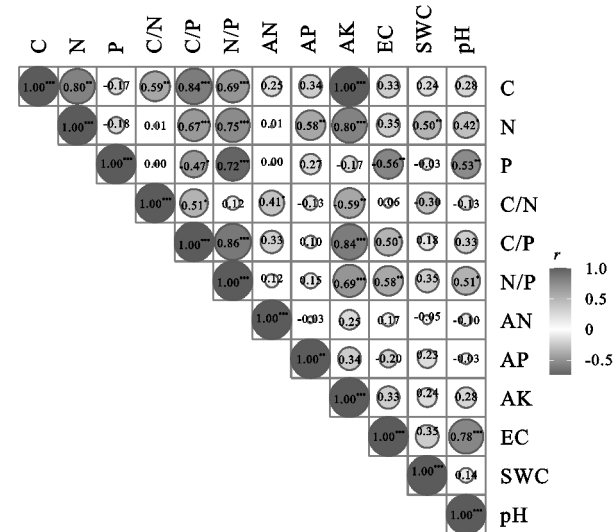
Fig. 5 Variation characteristics of soil ecological stoichiometric ratio in vertical profile under different vegetation types

2.3 土壤生态化学计量及其比值与土壤理化性质的关系

对不同植被类型下土壤生态化学计量及其比值与土壤理化性质之间进行相关性分析结果如图 6 所示。研究表明土壤有机碳与全氮,C/N,C/P,N/P,速效钾呈极显著正相关关系($p \leq 0.01$),与速效钾的

相关性最强;土壤全氮与 C/P,N/P,速效钾呈极显著正相关关系($p \leq 0.01$),其中速效钾相关系数最大,与速效磷、土壤含水量、pH 呈显著正相关关系($0.01 < p \leq 0.05$),与速效磷的相关性较强;土壤全磷与 C/P 呈显著负相关关系,与 N/P 呈极显著负相关关系($p \leq 0.01$),与电导率和 pH 呈显著负相关关系($0.01 <$

$p \leq 0.05$);土壤生态化学计量比都与速效钾呈正相关,其中与 C/P、N/P 呈极显著正相关关系($p \leq 0.01$);土壤 N/P 与 C/P、电导率呈极显著正相关关系($p \leq 0.01$),与 pH 呈显著正相关关系($0.01 < p \leq 0.05$)。pH 与电导率之间呈极显著正相关关系($p \leq 0.01$),且相关性较大。



注: * 表示 $p \leq 0.05$, ** 表示 $0.01 < p \leq 0.05$, *** 表示 $0.001 < p \leq 0.01$ 。

图 6 土壤碳氮磷含量及生态化学计量比与土壤理化性质的相关系数矩阵

Fig. 6 Correlation coefficient matrix of soil carbon, nitrogen and phosphorus content, ecological stoichiometric ratio and soil physical and chemical properties

3 讨论

3.1 植被类型对土壤碳、氮、磷含量的影响

土壤养分归还的主要来源是地表凋落物,植被凋落物的归还量一定程度上决定着土壤中碳、氮、磷的含量,故不同植被类型的凋落物储量及构成和分解速率的不同会导致不同植被类型间土壤养分含量的差异^[12]。本研究结果表明,3种植被类型恢复模式下土壤有机碳、全氮含量较新排土均不同程度地有所提高,主要在于研究区内任何植被恢复模式均可为矿区新排土不同程度地输入凋落物,进而增加矿区土壤有机碳与全氮含量,这与胡宜刚等^[13]研究人工植被重建能够促进黄土高原晋陕蒙矿区排土场土壤中养分含量的结论一致,证实了人工植被类型对矿区排土场土壤养分均具有提高作用。然而不同植被类型对土壤有不同程度的改良作用,植被类型对土壤碳、氮、磷含量的影响取决于其凋落物的差异。本研究发现乔木林地与灌木林地的土壤有机碳、全氮含量均较草地高,这也与朱秋莲等^[14]对黄土高原不同植被区的研究结果较为一致,

主要由于本研究区乔木林地和灌木林地的植被覆盖度大,凋落物较为丰富,能够为土壤补充更多的有机质,有助于土壤碳、氮的积累;而本研究中草地主要为苜蓿等豆科植物,放牧与定期刈割导致草地凋落物减少对土壤的归还,而且土壤中的养分还被苜蓿吸收并且转移出草地。土壤全磷含量则表现为乔木林地显著低于草地和灌木林地,表明其生长受磷元素的限制相对较强,与其营养吸收规律密切相关。

土壤碳、氮、磷含量在垂直土层分布的差异性主要由于不同植被恢复类型因植物群落、根系深度的不同,从而影响土壤养分含量的吸收强度^[15]。本研究发现,土壤有机碳和全氮的含量均在表层明显高于其他土层,而且乔灌木明显高于草地,这与李鑫等^[16]对黄土高原土壤的研究结果一致,一方面由于表层土壤水热条件和透气状况较好,提高植物凋落物与土壤之间进行物质和能量转换速率,在微生物作用下分解后以有机质或其他养分形式进入土壤^[17],而且地表凋落物对土壤的影响随着土层深度的增加而减弱^[18];另一方面由于草本植物根系分布较浅,很少到达深层,而灌木和乔木根系在深层活动密集,特别是刺槐和竹柳林地,林下植被生长较好,不仅提供了大量的凋落物,而且根系生物量较大,有利于增加土壤碳含量。本研究还发现以灌木作为植被恢复的样地土壤全氮含量最高,且在不同土层总是优于其他植被类型,主要原因在于灌木林地为大叶槐与沙棘地,大叶槐属豆科固氮树种,沙棘属于非豆科固氮树种,其具有串根萌蘖的特性,庞大的根系具有较强的固氮作用,大幅增加土壤氮素储量。土壤全磷含量受植被类型影响较大,但在土层剖面变化波动较小,这与赵彤等^[19]研究的变化规律一致,本研究中乔木林地土壤全磷含量显著低于其他3种土壤($p \leq 0.05$),且在深层稍有下降,这主要是由于乔木林地处于中幼林阶段,处于速生生长期,其根系相对较深,在相同的环境中吸收大量的土壤水分和养分来维系自身生长^[20];同时该区域降水较少,而土壤磷素的迁移率小,从而使其上层含量大于下层。此外,全磷含量只能反映土壤中磷的总储量^[21],以往研究表明土壤全磷在土壤剖面呈现出表聚现象,但本研究未发现相似规律,反而新排土中土壤全磷随土层有所增加,可能与其所覆土壤有关,有待进一步探明,表明土壤全磷受土壤基底影响更甚。

康冰^[22]和刘中奇^[23]等学者认为植被短时期内可依靠自然恢复和人工恢复达到很高的植被覆盖度,不同植

被恢复模式下土壤理化性质存在明显差异,当植被群落结构性较大时,可通过人工修复合合理的植物群落结构配置来缩短矿区生态恢复进程。因此,研究区排土场复垦初期优先考虑恢复灌木和草本作为先锋植被快速改良表浅层的土壤养分条件,土壤质量得到明显改善时,再进行乔木的后配,特别是为其提供快速生长所需的磷元素进行积累;同时,改善群落的结构,丰富物种多样性,保障风沙黄土区排土场土壤养分的提升与循环,进而提高植被恢复速率。

3.2 植被类型对土壤生态化学计量特征的影响

土壤 C/N、C/P 和 N/P 是反映土壤有机组成和土壤养分均衡性的重要指标,由于不同植被在生理生态特性、养分利用等方面的差异,其对各土壤肥力指标的恢复效果并不相同。C/N 比值的大小会影响土壤中有有机碳和氮的循环,一般情况下,C/N 比值与有机质含量成反比,即 C/N 比值越低,凋落物分解速率越高,有机质含量也就越高^[24]。C/N 的全国平均水平 10.0~12.0^[25],而本研究中,土壤 C/N 的均值为 31.67,高于全国平均水平,主要由于该区干旱缺水,导致凋落物难以分解或者分解速率缓慢,不利于氮的积累,而有机质和有机碳含量相对保留多。另外,有相关研究认为土壤 C/N 比值高于全国平均水平是因为酸性土壤影响了土壤的氮沉降和集聚,而本研究区土壤 pH 值呈碱性,相关分析表明土壤全氮与土壤 pH 呈显著正相关关系,表明研究区内碱性土壤同样影响土壤的氮含量。此外,本研究中各植被类型下土壤 C/N 均较新排土高,特别是草地土壤 C/N 较其他植被类型高,是因为草地多为豆科牧草地,定期会被刈割,生物量与凋落物积累少,不利于土壤有机碳归还,虽具有固氮作用,但由于其生长速率较快,消耗大于固定,均导致其值较高。C/P 比值小有利于促进土壤中全磷的增加,C/P 比值较大则会导致微生物在分解有机质过程中受到磷限制^[26],本研究结果表明乔木林地土壤 C/P 显著高于新排土场,且表现出明显的随土层的增加而下降的趋势,且在各土层均高于其他类型,表明乔木林地受磷元素的制约,与其生长对磷需求较大有关。养分供应是否充足是影响有机体生长、种群结构、物种相互作用及生态系统稳定性的重要因素,其限制性成为系统稳定性维护的前提,生态计量比能够有效反映出限制性元素的种类。N/P 是当前限制性养分判断的重要指标之一^[27]。本研究中乔木林地的 N/P 显著高于灌木林地和草地,表明乔木林对土壤中的磷含量更新和周转速率较缓慢,再次证实其受磷

素的制约。对于草地而言,虽然苜蓿具有固氮作用,但因刈割被转移走大量的氮素,导致草地的 N/P 最小,再次验证其受氮素的制约。在土壤垂直土层剖面上,草地的土壤 N/P 变化较小,且均低于其他植被类型,表明其在各土层均受氮限制影响最大;而乔灌木林地土壤 N/P 随土层深度增加整体呈变小趋势,在表层明显高于其他土层,表明这两种林地随土层加深受氮限制逐渐加强;另外,乔木林地土壤 N/P 在各土层始终高于灌木林地,表明乔木林地较灌木林地受 P 限制更强。因此,在矿区植被恢复过程中可依据不同的植被类型适当配施相应的肥料来改善土壤养分含量,建议对于草灌恢复类型适当施加氮肥,对于乔木林地配施磷肥,保障植物生长所需的养分元素,进而增强复垦效果并保障人工重建生态系统的稳定。

4 结论

不同植被类型对风沙黄土区矿区土壤质量均具有不同程度的改善作用,乔灌木显著提高土壤有机碳和全氮含量,草灌植被下土壤全磷含量较新排土稍有增加,而乔木林显著降低土壤全磷含量;土壤养分在垂直土层的变化因植被类型不同而异,乔灌木植被下土壤有机碳与全氮均表现为表层聚集性,3种植被类型下土壤全磷在垂直土层剖面变化不大,但始终表现为草地>灌木林地>乔木林地。研究区各植被类型下土壤 C/N 和 C/P 均较新排土高,乔灌木林地的土壤 N/P 较新排土高,其中草地土壤 C/N 最高,乔木林地土壤 C/P 和 N/P 最高,在垂直剖面呈逐渐下降趋势,且在各土层均高于其他类型,表明草地相对受氮元素限制,乔木林地受磷元素的制约。风沙黄土区矿区排土场不同植被类型的土壤 N/P 与全氮、全磷相关性更大,受氮含量与磷含量的双重影响,建议草地与灌木林地适当施加氮肥,乔木林地配施磷肥。为深入探明矿区植被恢复模式的生态改良效益及机制,有必要结合植物生长规律、营养需求及碳氮磷特征开展植物—土壤生态化学计量方面的研究。

参考文献:

- [1] 范英宏,陆兆华,程建龙,等.中国煤矿区主要生态环境问题及生态重建技术[J].生态学报,2003,23(10):2144-2152.
Fan Y H, Lu Z H, Cheng J L, et al. Major ecological and environmental problems and the ecological reconstruction technologies of the coal mining areas in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003,23(10):2144-2152.
- [2] 吕春娟,白中科,秦俊梅,等.黄土区大型排土场岩土侵蚀特征研究:以平朔矿区排土场为例[J].水土保持研

- 究, 2006, 13(4): 233-236.
- Lü C J, Bai Z K, Qin J M, et al. Research on the characteristics of rock and soil erosion of the large stackpile in loess area: Taking Opencast-mine Area of Pingshuo as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(4): 233-236.
- [3] 张鹏, 赵洋, 黄磊, 等. 植被重建对露天煤矿排土场土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2715-2723.
- Zhang P, Zhao Y, Huang L, et al. 2016. Effect of revegetation on soil extracellular enzyme activity in the dumping site of an open-pit coal mine in Heidaigou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): 2715-2723.
- [4] 白东晓, 王晓, 郭玉梅, 等. 露天开采煤矿水土流失防治对策及其效果: 以武家塔煤矿为例[J]. 山西水土保持科技, 2007(3): 43-45.
- Bai D X, Wang X, Guo Y M, et al. Control measures and effects of soil and water loss in open-pit mining in Wujiaata coal mine [J]. Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi, 2007(3): 43-45.
- [5] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 457-467.
- Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus element[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 457-467.
- [6] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 141-153.
- Zeng D H, Cheng G S. Ecological Stoichiometry: A science to explore the complexity of living systems [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(6): 141-153.
- [7] 赵一娉, 曹扬, 陈云明, 等. 黄土丘陵沟壑区森林生态系统生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5451-5460.
- Zhao Y P, Cao Y, Chen Y M, et al. Ecological stoichiometry in a forest ecosystem in the hilly-gully area of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5451-5460.
- [8] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 134-139.
- Wang W Q, Xu L L, Zeng C S, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [9] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5484-5492.
- Zeng D P, Jiang L L, Zeng C S, et al. Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5484-5492.
- [10] 马任甜, 方瑛, 安韶山, 等. 黑岱沟露天煤矿优势植物叶片及枯落物生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 1003-1014.
- Ma R T, Fang Y, An S S, et al. Ecological stoichiometric characteristics of leaves and litter of plants dominant in heidaigou opencast coal mining area [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(4): 1003-1014.
- [11] 王东丽, 刘阳, 郭莹莹, 等. 半干旱矿区排土场苜蓿恢复过程中土壤颗粒分形的演变特征[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4585-4593.
- Wang D L, Liu Y, Guo Y Y, et al. The fractal characteristics of soil particles during the restoration of medicago sativa in a semi-arid mining dump [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4585-4593.
- [12] 刘瑞龙, 杨万勤, 吴福忠, 等. 川西亚高山/高山森林凋落物分解过程中土壤动物群落结构及其多样性动态 [J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(3): 499-507.
- Liu R L, Yang W Q, Wu F Z, et al. Soil fauna community structure and diversity during foliar litter decomposition in the subalpine forests of western Sichuan [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2014, 20(3): 499-507.
- [13] 胡宜刚, 张鹏, 赵洋, 等. 植被配置对黑岱沟露天煤矿区土壤养分恢复的影响 [J]. 草业科学, 2015, 32(10): 1561-1568.
- Hu Y G, Zhang P, Zhao Y, et al. Effects of various vegetation patterns on soil nutrients recovery in Heidaigou coal mine [J]. Pratacultural Science, 2015, 32(10): 1561-1568.
- [14] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4674-4682.
- Zhu Q L, Xing X Y, Zhang H, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hillygully region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [15] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征 [J]. 生态学报, 2007, 27(2): 603-612.
- Wei X R, Shao A M. The distribution of soil nutrients on sloping land in the gully region watershed of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 603-612.
- [16] 李鑫, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 [J]. 环境科学, 2015, 36(3): 1084-1091.
- Li X, Zeng Q C, An S S, et al. Ecological stoichiometric characteristics in leaf and litter under different vegetation

- types of Zhifanggou watershed on the Loess Plateau, China [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3):1084-1091.
- [17] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应 [J]. *生态学报*, 2002, 22(9):1534-1544.
- Peng S L, Liu Q. The Dynamics of forest litter and its responses to global warming [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9):1534-1544.
- [18] 马寰菲, 解梦怡, 胡汗, 等. 秦岭不同海拔森林土壤—植物—凋落物化学计量特征对土壤氮组分的影响 [J]. *生态学杂志*, 2020, 39(3):749-757.
- Ma H F, Xie M Y, Hu H, et al. Effects of stoichiometric characteristics of soil-plant-litter on soil nitrogen components in different forests along an elevational gradient of Qinling Mountains [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(3):749-757.
- [19] 赵彤, 闫浩, 蒋跃利, 等. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(18):5615-5622.
- Zhao T, Yan H, Jiang Y L, et al. Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18):5615-5622.
- [20] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究 [J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1):93-96.
- Gong J, Chen L D, Fu B J, et al. Effects of vegetation restoration on soil nutrient in a small catchment in Hilly Loess Area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):93-96.
- [21] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N, P 的化学计量特征 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1):64-71.
- Liu X Z, Zhou G Y, Zhang D Q, et al. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1):64-71.
- [22] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(10):2479-2486.
- Kang B, Liu S R, Cai D X, et al. Soil physical and chemical characteristics under different vegetation restoration patterns in China south subtropical area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10):2479-2486.
- [23] 刘中奇. 哈拉沟煤矿塌陷区植物群落特征及植被恢复技术研究 [J]. *煤炭工程*, 2015, 47(4):121-123, 127.
- Liu Z Q. Plant Community feature and research on artificial phytocoenosium configuration technology in halagou sand coal mine subsidence regions [J]. *Coal Engineering*, 2015, 47(4):121-123, 127.
- [24] 刘兴锋, 刘思凡, 蒋龙, 等. 湘西北石漠化区不同植被类型土壤 C, N, P 的化学计量特征 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(2):72-78.
- Liu X F, Liu S F, Jiang L, et al. Stoichiometric characteristics of soil C, N and P in different vegetation types in the rocky desertification area of northwestern Hunan Province [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, 39(2):72-78.
- [25] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Huang C Y. *Pedology* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [26] 赵雅洁, 张静, 宋海燕, 等. 不同土壤厚度、水分和种植方式对喀斯特两种草本凋落物分解质量损失和化学计量特征的影响 [J]. *生态学报*, 2018, 38(18):6549-6558.
- Zhao Y J, Zhang J, Song H Y, et al. Effects of different soil thickness, water and planting patterns on the litter mass loss and stoichiometry characteristics of two herbs in the karst regions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18):6549-6558.
- [27] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征 [J]. *自然资源学报*, 2016, 31(11):1881-1891.
- Zeng Q C, Li X, Dong Y H, et al. Ecological stoichiometry of soils in the Yanhe Watershed in the Loess Plateau: The influence of different vegetation zones [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(11):1881-1891.