

煤矸石堆场自然恢复过程中植物根际养分研究

王 杰^{1,2}, 徐秀月^{1,2*}, 王宁宁^{3,4}, 任 军^{1,2}, 韦荣乖^{1,2}, 王可伟^{1,2}

¹贵州师范学院地理与资源学院, 贵州 贵阳

²贵州省流域地理国情监测重点实验室, 贵州 贵阳

³重庆地质矿产研究院, 自然资源部重庆典型矿区生态修复野外科学观测研究站, 重庆

⁴贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年3月4日; 录用日期: 2025年4月3日; 发布日期: 2025年4月14日

摘 要

为探究煤矸石堆场自然恢复不同植物根际养分特征,本研究通过对堆场的八种植物根际煤矸石理化性质、有机碳及有效养分含量进行分析,明确不同植物对根际煤矸石养分特征的影响。结果表明:灯芯草(*Juncus effusus*)、酸模(*Rumex acetosa*)及苏门百酒(*Erigeron sumatrensis*)根际矸石pH较对照(CK)分别提高了3.43、3.86、3.18个单位,而类芦(*Neyraudia reynaudiana*)和酸模根际煤矸石的EC值较低;酸模根际煤矸石中有效磷、速效钾及有机碳含量明显高于其它植物,而辣蓼根际碱解氮含量最高。另外,除酸模外,辣蓼也能显著提高有效磷、速效钾及有机碳含量。综上,酸模和辣蓼在提高煤矸石的养分方面均具有较好的效果,二者均有助于促进矿区生态系统的恢复。因此,贵州煤矸石矿区植被恢复可优先选用酸模和辣蓼。

关键词

煤矸石, 自然恢复, 植物, 养分特征

Study on Nutrient Characteristics of Plant Rhizosphere in Spontaneous Recovery Plants of Coal Gangue Dump

Jie Wang^{1,2}, Xiuyue Xu^{1,2*}, Ningning Wang^{3,4}, Jun Ren^{1,2}, Rongguai Wei^{1,2}, Kewei Wang^{1,2}

¹School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang Guizhou

²Guizhou Provincial Key Laboratory of Geographic State Monitoring of Watershed, Guiyang Guizhou

³Observation and Research Station of Ecological Restoration for Chongqing Typical Mining Areas, Ministry of Natural Resources, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing

⁴College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

*通讯作者。

文章引用: 王杰, 徐秀月, 王宁宁, 任军, 韦荣乖, 王可伟. 煤矸石堆场自然恢复过程中植物根际养分研究[J]. 土壤科学, 2025, 13(2): 85-96. DOI: 10.12677/hjss.2025.132011

Abstract

To explore the nutrient characteristics of the rhizosphere of spontaneous recovery plants in coal gangue dumps, the study analyzed the physicochemical properties, organic carbon, and available nutrient content of the rhizosphere coal gangue of eight plant species, clarifying the impact of different plants on the nutrient characteristics of the rhizosphere coal gangue. The results indicated that the rhizosphere pH of *Juncus effusus*, *Rumex acetosa*, and *Erigeron sumatrensis* increased by 3.43, 3.86, and 3.18 units, respectively, while the EC values of *Neyraudia reynaudiana* and *Rumex acetosa* rhizosphere gangue were lower. The content of available phosphorus, available potassium, and organic carbon in the rhizosphere of *Rumex acetosa* were significantly higher than in other plants, while the content of alkali-hydrolyzable nitrogen in the rhizosphere of *Polygonum hydropiper* was the highest. Additionally, apart from *Rumex acetosa*, *Polygonum hydropiper* can also significantly increase the content of available phosphorus, available potassium, and organic carbon. In summary, both *Rumex acetosa* and *Polygonum hydropiper* had good effects in improving the nutrient content of coal gangue, and both were helpful in promoting the restoration of the ecosystem in mining areas. Therefore, in the vegetation restoration of the coal gangue mining areas in Guizhou, *Rumex acetosa* and *Polygonum hydropiper* should be given priority consideration.

Keywords

Coal Gangue, Spontaneous Recovery, Plants, Nutrient Characteristics

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济的快速发展，能源需求量增加，煤炭开采量和煤矸石排放量也随之上升。相关数据表明，我国煤矸石存量累计超过 70 亿 t，矸石山已超过 2600 座，大型煤矸石山约 1600 座[1][2]，尤其在我国西南地区，煤矸石堆场数量庞大，随着堆放时间的延长，风化、淋溶等作用加剧了重金属及其他有害物质的释放，导致土壤酸化、盐渍化和肥力下降等生态问题[3][4]。为积极践行“绿水青山就是金山银山”的两山理念，促进矿区的绿色矿山的建设和可持续发展，生态恢复是实现这一目标的有效途径[5][6]。生态恢复旨在恢复场地植被、土壤肥力、生物多样性、水文循环等，近几十年来，针对矿山生态恢复已有诸多理论研究和实践成果，但修复模式较为单一，治理效果并不理想。一些研究指出，由于矿山土壤贫瘠，养分缺乏，空气和温度条件较差，有机质含量低，土壤水分保持能力差，导致植物生长缓慢，生物量积累不足，难以形成稳定的植被覆盖[7]。

植被修复具有价格低廉、操作简便、安全可靠、植被修复不仅可以增强地表应力，减轻地质灾害，例如塌陷、山体滑坡和泥石流，同时还可以提高矿区整体环境美学，将矿区转变为视觉上吸引人且可持续发展的景观。植被修复因具备多方面的优点得到众多学者重视，被认为是解决生态破坏和环境污染的有效措施[8]。王颖哲等[9]的研究表明植被恢复对提升表层土壤速效钾和水解氮的含量具有显著性影响，可以有效改善矿区土壤的酸碱度，使土壤性质朝着良好的方向发展。而植被修复的成功关键在于修复植物的

选择,为了确保修复植物能够适应当地的土壤环境、气候条件并具有较强的抗逆性,应当优先选择本土植物物种,有助于建立更加稳定和持久的生态系统[9]。此外,本土植物与当地的微生物和生物群落有着密切的相互作用,能够更好地调控根际土壤中的养分动态及土壤理化特征[10],杨修和高林[11]的研究结果显示,水蜡烛等 12 种自然恢复植物在提升土壤有机质、改善群落生产力和增强养分循环方面表现出显著优势,被认为是铜矿纯尾砂植被恢复与重建的优良先锋草种。郭燕[12]通过对公别拉河流域西岗子露天煤矿废弃地的土壤理化性质测定、物种多样性调查及植被恢复相关问题研究发现,有效养分低是矿山废弃地植被恢复的主要限制因素,沙棘可作为研究区域内植被恢复的最佳灌木。

贵州省是我国煤矸石堆场分布较为集中的地区之一,已有相应的研究来对煤矸石堆场进行生态修复,但用于修复的植物种类单一,不利于生态系统的稳定,且对于改善或提升矸石山的营养无显著影响。因此,应该对矸石山自然恢复的植物进行调查,尤其是自然恢复植物对煤矸石堆场的营养元素的影响进行全面的调查和分析,以期对煤矸石堆场生态修复技术提供一定的理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 样品采集

本研究样品分别采自贵阳市花溪区麦坪镇和毕节市大方县小屯乡,课题组于 2024 年 6 月对 2 个矸石堆场的优势植物根际煤矸石进行采样。选择自然生长良好、覆盖率较高的植物为调查对象,两个堆场共采集八种植物,分别为酸模(*Rumex acetosa*)、辣蓼(*Polygonum hydropiper*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)、小蓬草(*Erigeron canadensis*)、毛连菜(*Picris hieracioides*)、苏门百酒(*Erigeron sumatrensis*)、琉璃草(*Cynoglossum furcatum*)、灯芯草(*Juncus effusus*)。采样时选取 3 株长势相近的植物,同时采用抖土法采集根际煤矸石,并选择无植物生长的裸露矸石作为对照组(CK)。将 3 株同种植物根际煤矸石混为 1 个样品,混合均匀后采用 4 分法取样约 200 g,装入样品袋,贴上标签带回实验室自然风干,并研磨过 2 mm 筛备用。

2.2. 煤矸石基质养分测定

煤矸石理化性质的测定方法参考《土壤农化分析》[13]。pH、Eh 及 EC 分别采用 pH 计(SH2601,上海大普),电位滴定仪(DZ-2,上海虹益)及电导率仪(DDS11A 型,上海雷磁)测定;煤矸石有机碳含量采用 K_2CrO_7 容量法(热稀释法)测定;煤矸石碱解氮含量采用碱解-扩散法测定;煤矸石有效磷含量采用 $NaHCO_3$ 浸提法测定;煤矸石速效钾含量使用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。

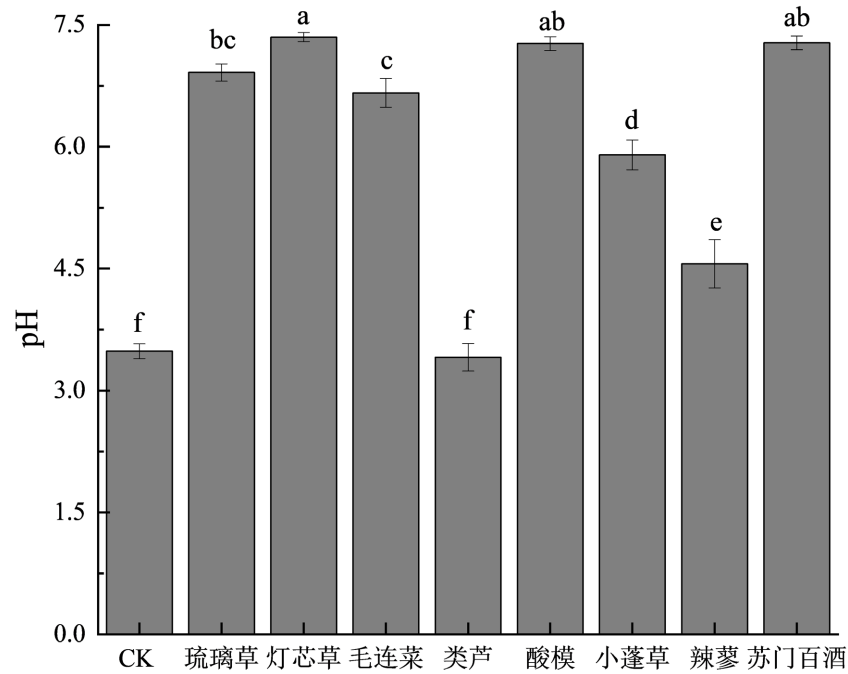
2.3. 数据处理与分析

使用 SPSS25.0 软件进行数据统计分析,采用单因素方差分析(ANOVA)和 Pearson 相关性分析。利用 Origin2021 进行作图。

3. 结果与分析

3.1. 植物生长对根际煤矸石 pH、Eh 及 EC 的影响

不同植物根际煤矸石的 pH 如图 1 所示,各植物根际煤矸石中 pH 明显不同($P < 0.05$),且灯芯草、酸模及苏门百酒的 pH 明显高于其它植物根际煤矸石的 pH ($P < 0.05$),各植物根际煤矸石 pH 大小顺序为:灯芯草 > 酸模 > 苏门百酒 > 琉璃草 > 毛连菜 > 小蓬草 > 辣蓼 > 类芦,其中灯芯草、酸模及苏门百酒根际矸石 pH 较 CK 分别提高了 3.43、3.86、3.18 个单位。pH 值的提高归因于植物和土壤成分之间的相互作用,已有研究表明,植物根系的生长及其分泌物能够有效激活土壤功能,促进土壤微生物的繁殖,改善土壤酶活性,加速土壤养分的溶解与累积,从而影响土壤 pH 值的变化[14]。



注：图中不同小写字母表示统计分析在 $P = 0.05$ 水平下差异显著，下同。

Figure 1. pH characteristics of coal gangue from different plant rhizospheres

图 1. 不同植物根际煤矸石的 pH 特征

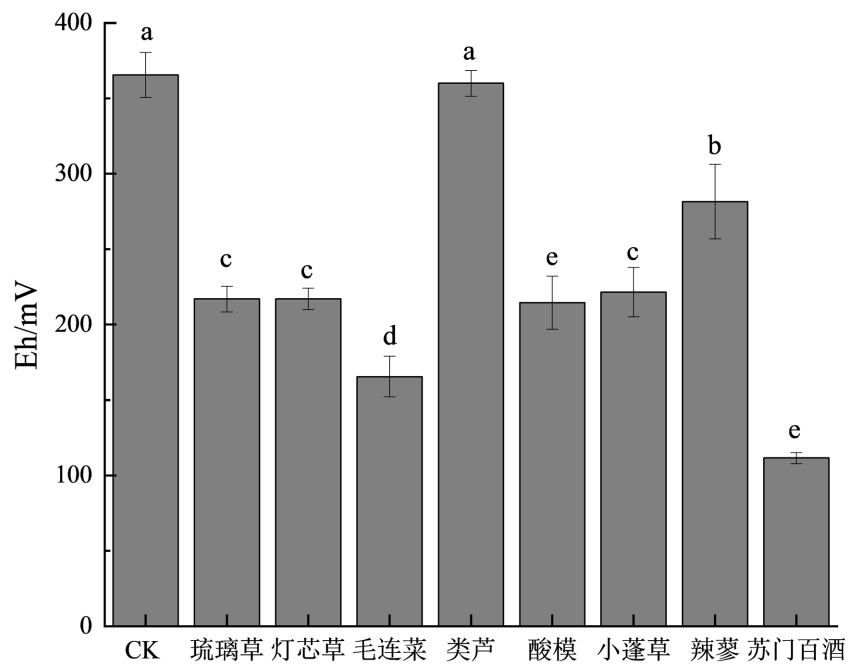


Figure 2. Eh characteristics of coal gangue from different plant rhizospheres

图 2. 不同植物根际煤矸石的 Eh 特征

Eh 是土壤中多种氧化物与还原物质化学反应的综合反映，代表土壤氧化性与还原性的相对程度，是评估土壤氧化还原状态的重要指标[15]。本研究不同植物根际煤矸石 Eh 的变化如图 2 所示，除类芦

外,植物的生长均降低了根际煤矸石的 Eh, 其中苏门百酒对 Eh 降低幅度大于其它植物, 苏门百酒的 Eh 是 CK 处的 0.31 倍, 已有研究指出, 不同植物根际 Eh 变化受到多种因素的影响, 根际分泌物可直接影响氧化还原反应[16], 如酚类化合物黄酮类, 单宁等。此外, 介质的养分状况对根际 Eh 也有明显影响, 当氮磷钾供应不足时, 根际 Eh 均有不同程度的下降, 其中钾供应不足的影响最为明显[17]。

EC 是衡量土壤溶液中可溶性盐浓度的关键指标, 对土壤的物理、化学性质以及植物生长具有重要影响。高盐分会通过影响植物的渗透调节和营养吸收等生理活动, 对植物生长产生负面影响[18]。根据图 3 所示, 不同植物根际煤矸石的 EC 值明显不同, 除毛连菜、小蓬草及苏门百酒外, 其它植物根际煤矸石中 EC 明显低于 CK 点处, 这表明它们对改善植物生长的土壤条件产生了重大影响, 相对较低的电导率值突出了植被恢复的适用性, 通过减轻过量盐分水平对水分吸收和养分可用性的不利影响进而促进植物健康生长[19]。苏门百酒、毛连菜和小蓬草根际煤矸石的 EC 值分别为 $2694 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $2198 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $1898 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, 3 种植物对盐胁迫具有一定的耐受性, 可在高 EC 值土壤环境中生存和繁衍, 因此可被选做为高盐土壤的修复物种。

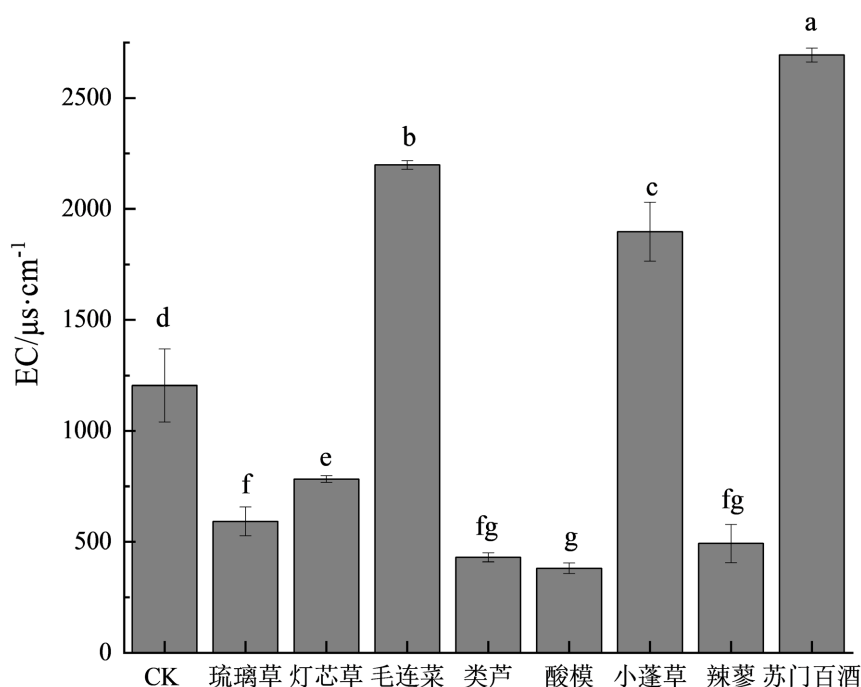


Figure 3. EC characteristics of coal gangue from different plant rhizospheres
图 3. 不同植物根际煤矸石 EC 值特征

3.2. 植物生长对根际煤矸石速效养分的影响

氮是土壤中最活跃的营养元素之一, 碱解氮含量可以反映土壤氮素的供应强度[20]。如图 4 所示, 各植物的根际煤矸石碱解氮含量存在显著差异($P < 0.05$), 且辣蓼与酸模根际碱解氮含量大于 CK, 其它植物碱解氮含量明显小于 CK, 各植物根际煤矸石中碱解氮大小顺序为: 辣蓼 > 酸模 > 类芦 > 琉璃草 > 毛连菜 > 灯芯草 > 苏门百酒 > 小蓬草, 各植物根际碱解氮分别是 CK ($109.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 1.40、1.14、0.66、0.66、0.55、0.50、0.46、0.29 倍, 小蓬草的含量最低, 为 $32.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。辣蓼和酸模提升了根际碱解氮含量, 可能是由于辣蓼和酸模同属蓼科, 根系较发达且分布较深, 根毛密度高, 能够在较大土层范围吸收更多氮素, 并通过根际沉积影响氮素循环[21]。此外, 有研究表明, 辣蓼根系分泌的有机酸(以草

酸为主)、氨基酸(以丝氨酸为主)、可溶性蛋白以及硝酸还原酶在根际难溶性养分的活化和吸收等方面起积极作用[22]。

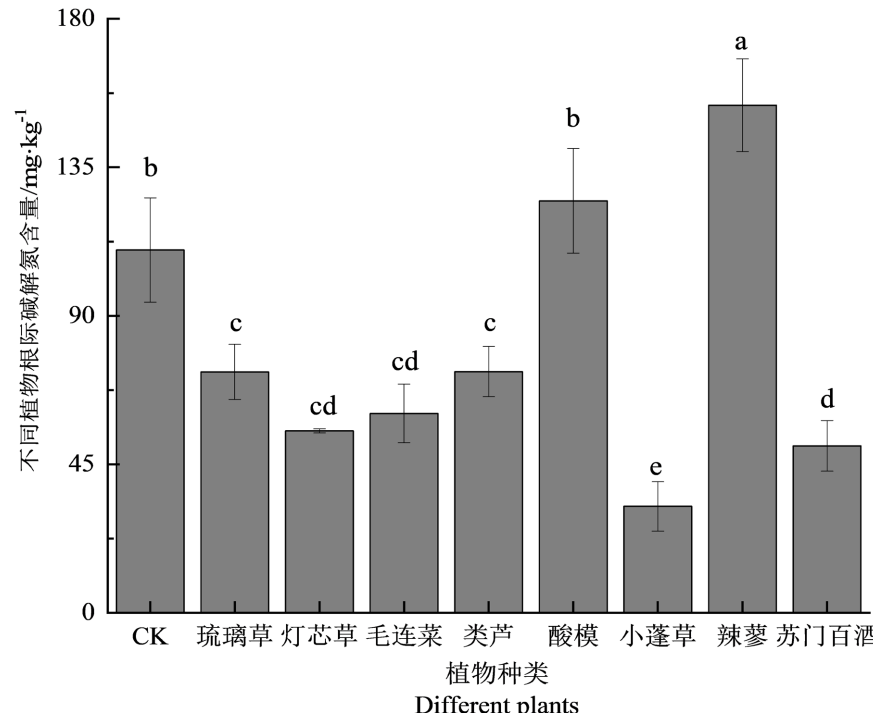


Figure 4. Rhizospheric coal gangue alkali-hydrolyzable nitrogen content across plant species
图 4. 不同植物根际煤矸石碱解氮的含量

不同植物根际煤矸石的有效磷含量如图 5 所示, 酸模根际煤矸石的有效磷含量达到 29.14 mg·kg⁻¹, 显著高于 CK 及其他植物组($P < 0.05$), 其余植物也不同程度地提高了根际煤矸石的有效磷含量, 但无显著性。相比之下, 苏门百酒和辣蓼的有效磷含量较高, 分别为 15.62 mg·kg⁻¹ 和 18.04 mg·kg⁻¹, 类芦和琉璃草的有效磷含量处于较低水平, 分别为 8.06 mg/kg、8.60 mg·kg⁻¹。在自然恢复过程中, 植物的根系分泌物(如有机酸、糖类、氨基酸等)可以促进根际微生物的活性, 这些微生物在土壤磷的矿化和溶解过程中发挥重要作用[23]。有研究表明, 酸模根系中的生物活性成分白藜芦醇苷含量与土壤速效磷含量呈显著正相关[24]。而苏门百酒作为一类外来侵入物种, 繁殖能力、适应力和抗逆性较强, 生长过程中根际土壤磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶等四种基本酶的活性以及微生物数量都显著增加, 微生物群落结构发生适应性变化, 从而促进难溶态磷向速效磷形态的转化[25]。土壤微生物如子囊菌门和担子菌门会在辣蓼根际富集, 有利于促进根际磷素的有效化和促进植物生长[26]。

土壤速效钾是易被植物快速吸收利用的钾素形态, 其含量的高低是判断土壤钾素供应能力的重要指标, 能真实反映土壤中钾素的营养丰缺状况[27]。如图 6 所示, 与 CK 相比, 除琉璃草外, 各植物根际煤矸石速效钾含量较 CK 均有显著提高($P < 0.05$), 各类植物根际煤矸石中速效钾含量顺序为: 酸模 > 辣蓼 > 灯芯草 > 小蓬草 > 毛连菜 > 类芦 > 苏门百酒, 酸模和辣蓼根际煤矸石的速效钾含量分别为 527.37 mg·kg⁻¹、470.28 mg·kg⁻¹, 明显高于 CK ($P < 0.05$)。在这 8 种草本植物中, 酸模和辣蓼根系发达, 可能增强根际土壤团聚体的形成和稳定性, 提高土壤的阳离子交换能力(CEC), 减少根际土壤钾离子的流失[28]。

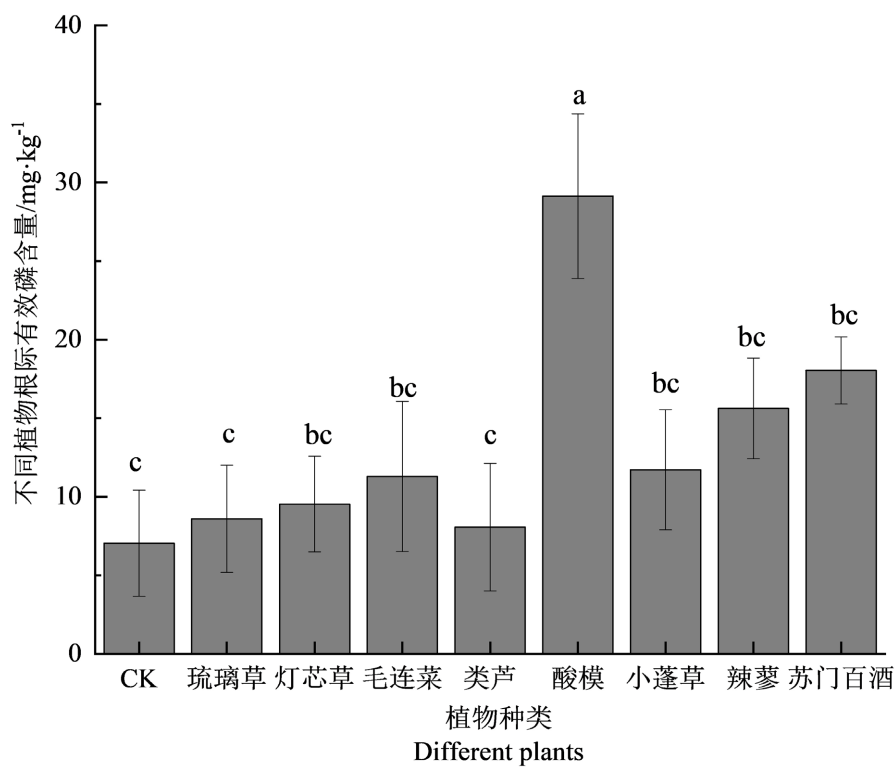


Figure 5. Rhizospheric coal gangue available phosphorus content across plant species

图 5. 不同植物根际煤矸石有效磷的含量

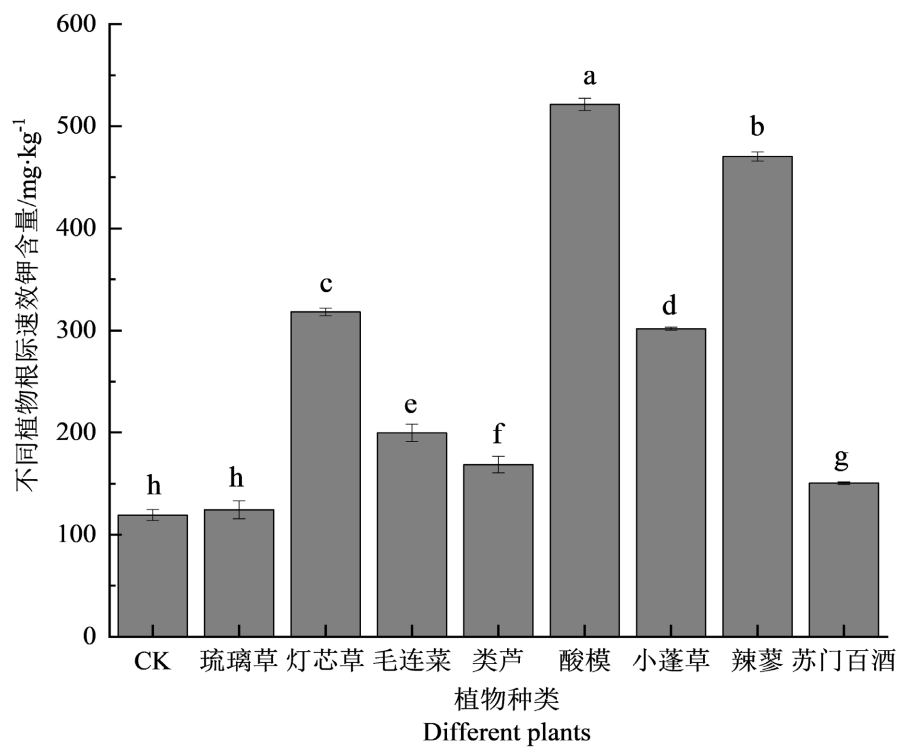


Figure 6. Rhizospheric coal gangue available Potassium content across plant species

图 6. 不同植物根际煤矸石速效钾的含量

由图 7 可知, 与 CK ($11.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)相比, 各植物根际煤矸石中的有机碳含量存在显著差异($P < 0.05$), 其中酸模根际煤矸石的有机碳含量最高, 达到 $18.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于 CK 和其他类型植物($P < 0.05$), 显示出该植物具有强大的有机质积累能力, 另外, 小蓬草和辣蓼的有机碳含量较 CK 也有提升, 但无显著差异, 而琉璃草、苏门百酒、灯芯草和毛连菜根际的有机碳含量较 CK 明显降低($P < 0.05$), 表明它们对煤矸石堆场有机碳的积累较弱, 这种差异可归因于各植物的特定生理特征。酸模干物质中含有较高的多种维生素及氨基酸, 但粗纤维含量较少有关, 这有利用微生物对枯落物的分解和转化, 促进了土壤有机质积累[29]。辣蓼生物量较大, 生长较为旺盛, 每年都有大量枯枝落叶归还给土壤, 经过腐殖化作用形成土壤有机碳。小蓬草的繁殖与扩散能力强, 能够快速繁殖出大量的子代, 数量大且分布广泛, 能短时间内形成优势群落, 其长期积累的凋落物经分解后提升了土壤有机碳含量[30]。

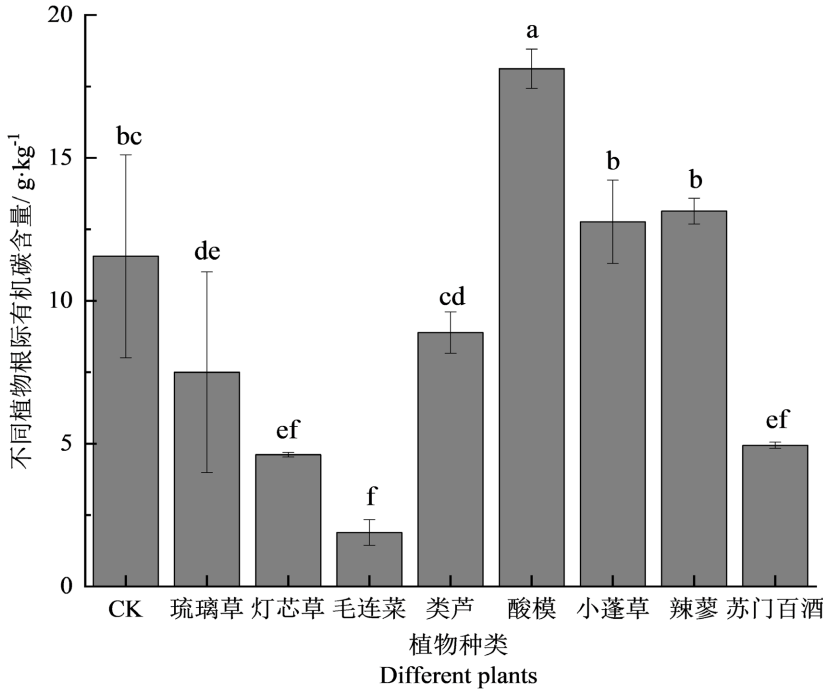


Figure 7. Rhizospheric coal gangue organic carbon content across plant species
图 7. 不同植物根际煤矸石有机碳的含量

3.3. 植物生长对根际煤矸石中有效养分化学计量比的影响

碳氮比(C:N)在生态系统中通常用于衡量有机质分解速率以及氮素矿化潜力, 是土壤质量的敏感性指标[31]。在生态恢复中, 选择适合的碳氮比植物有助于优化土壤氮素供应, 增强植被恢复效果。本研究中不同植物生长对煤矸石有效 C:N 如图 8 所示, 不同植物根际煤矸石的有效 C:N 与 CK 处差异显著($P < 0.05$), 与 CK 相比, 小蓬草、酸模和类芦的有效 C:N 显著增加($P < 0.05$), 增加比例分别达到 379%、77.10% 和 37.00%, 而苏门百酒、辣蓼、灯芯草和琉璃草的有效 C:N 有所降低但差异不显著, 而毛连菜的 C:N 明显低于 CK ($P < 0.05$), 与 CK 相比, 其下降幅度达到 63.55%。有研究表明, 碳、氮作为土壤的结构性成分, 同时受凋落物养分归还和分解的影响, 其积累和消耗过程存在相对固定的比值[31]。一般来讲, 土壤有机质 C:N 与其分解速度成反比关系, 这是因为土壤微生物在生命活动过程中, 既需要碳素做能量, 也需要氮素来构成自己的身体, 在 C:N 较高时, 微生物需要输入氮来满足他们的生长, 而在 C:N 较低时, 氮超过微生物生长所需的部分就会释放到凋落物和土壤中[32]。

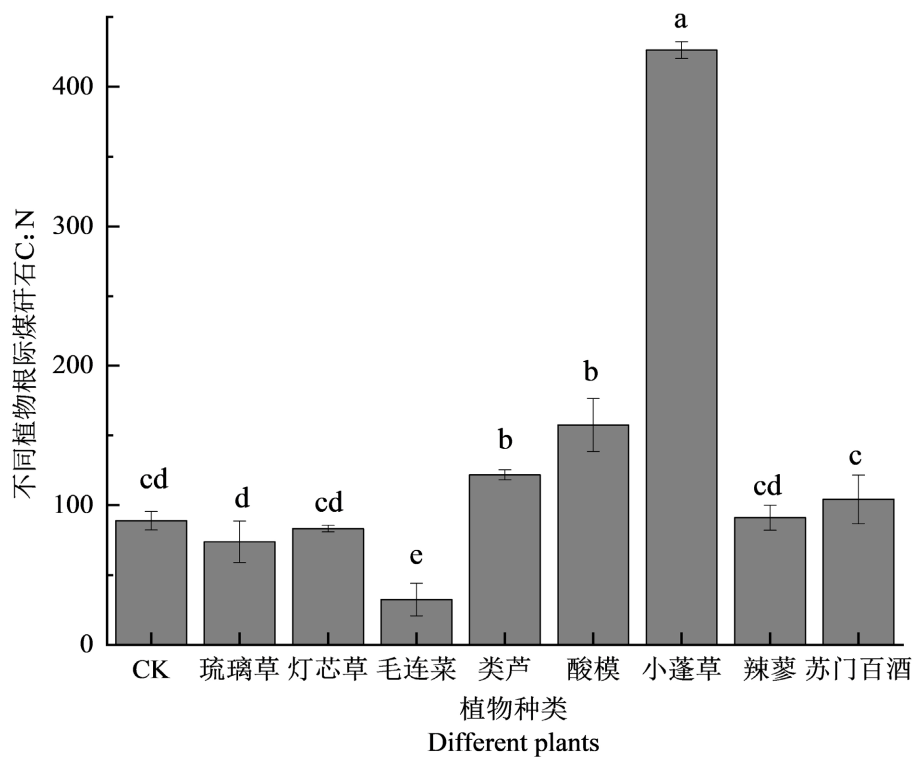


Figure 8. Rhizospheric coal gangue C:N ratio across plant species

图 8. 不同植物根际煤矸石的 C:N

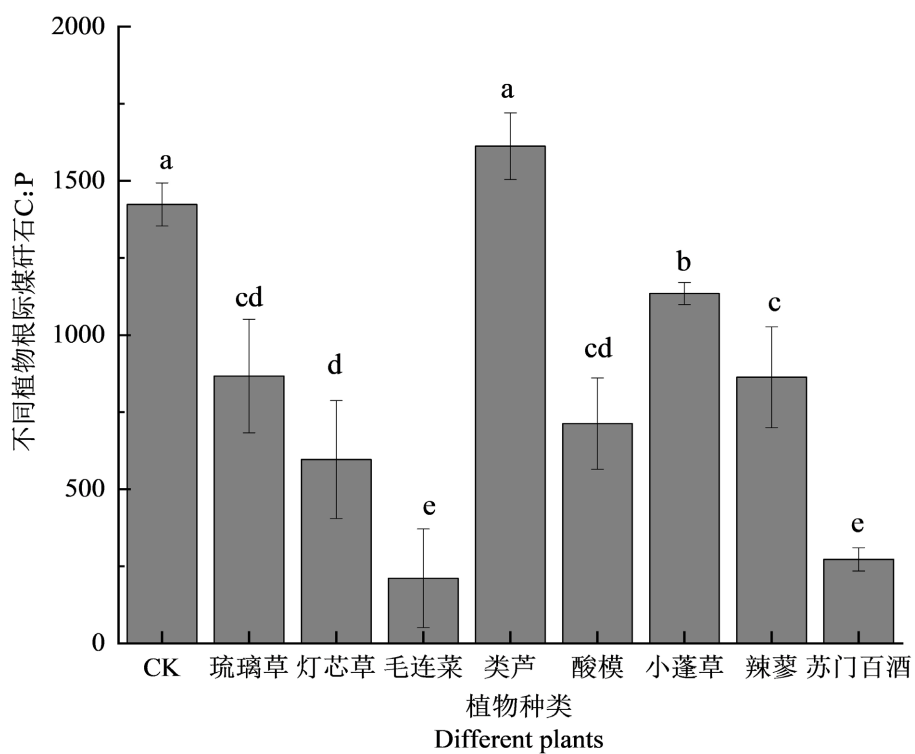


Figure 9. Rhizospheric coal gangue C:P ratio across plant species

图 9. 不同植物根际煤矸石的 C:P

土壤碳磷比(C:P)是磷素矿化能力的标志,也是衡量微生物矿化土壤有机物质释放磷或从环境中吸收固持磷素潜力的一个指标[33],从图 9 中可以看出,各植物根际煤矸石的有效 C:P 与 CK 相比差异显著($P < 0.05$),且大小顺序分别是类芦 > 小蓬草 > 琉璃草 > 辣蓼 > 酸模 > 灯芯草 > 苏门百酒 > 毛连菜,上述各植物有效 C:P 是 CK 的 1.13、0.80、0.61、0.61、0.50、0.42、0.19、0.15 倍,与 CK 相比,仅有类芦的有效碳磷比明显增加($P < 0.05$),而小蓬草、琉璃草、辣蓼、酸模和灯芯草显著降低($P < 0.05$)。

土壤氮、磷是植物生长发育所必需的矿质养分,土壤氮磷比(N:P)是养分限制的预测因子,同时也是氮饱和的判断指标[34]。如图 10 所示,CK 的有效 N:P 最高,表明无植物生长的矸石地磷限制严重,类芦、辣蓼和琉璃草 C:P 显著高于其他植物($P < 0.05$),而灯芯草、毛连菜、酸模、苏门百酒和小蓬草的 C:P 较低,且它们之间差异不显著,研究表明,有机质在分解过程中产生有机酸、腐植酸等物质,能减少土壤对磷的固持,对土壤磷起到一定的活化作用,另外,有机质丰富有利于微生物的生长,从而促进各形态磷素之间的转化,对提高土壤磷素有效性具有一定作用[35]。

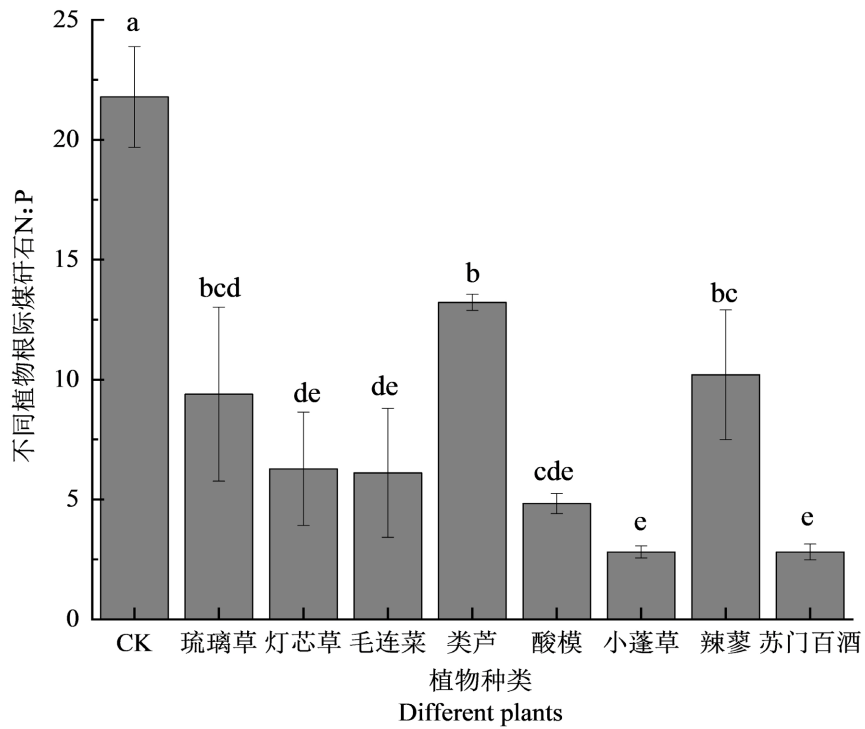


Figure 10. Rhizospheric coal gangue N:P ratio across plant species
图 10. 不同植物根际煤矸石的 N:P

4. 结论

- (1) 不同植物根际煤矸石的 pH 值存在显著差异,其中灯芯草、酸模及苏门百酒的 pH 明显高于其它种类植物根际 pH,类芦根际煤矸石表现出较高的 Eh 值,类芦和酸模对降低 EC 值有显著作用,有助于改善矿山环境。
- (2) 各植物根际土壤的碱解氮、有效磷、速效钾含量差异显著,尤其是辣蓼和酸模显著提高了碱解氮含量,酸模则在提高速效磷和速效钾含量方面表现突出。此现象表明,植物种类的不同对养分的释放和积累具有重要影响,特别是酸模和辣蓼在矸石性质改良中的潜力较大。因此,贵州煤矸石矿区植被恢复可优先选用酸模及辣蓼作为修复物种。

(3) 各植物根际煤矸石的速效养分化学计量比有显著差异, 酸模、小蓬草和类芦表现出较高的 C:N, 而类芦、辣蓼和琉璃草的 C:P 较高。这些植物不仅影响土壤的基本养分含量, 也能调节养分的矿化和循环, 进而影响生态恢复效果。

本研究结果为矿山植被修复提供了一定的科学依据, 有助于筛选合适的修复植物, 推动矿区生态修复的低成本和高效化。但是, 本研究存在某些局限性, 例如筛选出来的物种是否对矿区重金属具有强富集能力。此外, 本研究揭示了不同植物根际土壤养分含量的差异, 但对具体植物(如苏门百酒、酸模)影响的生物学机制尚缺乏深入研究。因此, 未来研究可探索植物联合修复策略, 如混合种植或与特定微生物联合应用, 以优化土壤养分与重金属修复效果。

基金项目

贵州师范学院大学生创新创业训练计划项目(No. S202310671257; S2024142231196); 贵州省教育厅高等学校科研项目(No. [2022]252 号); 贵州省科技厅黔科合基础项目(No. ZK(2024)651)。

参考文献

- [1] 张博超, 童辉, 龙雪颖, 等. 煤矸石固废高值化利用研究现状与进展[J/OL]. 洁净煤技术, 2024: 1-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.td.20230524.1257.002.html>, 2025-02-23.
- [2] 王小军. 我国矿区煤矸石处置研究及其应用[J]. 采矿技术, 2024, 24(3): 308-312.
- [3] 崔昕茹, 霍雪萍, 周炳杰, 等. 我国煤矸石空间分布特征与分级分质利用路径[J/OL]. 环境科学, 2024: 1-14. <https://doi.org/10.13227/j.hjx.202401269>, 2025-02-23.
- [4] 竹涛, 武新娟, 邢成, 等. 煤矸石资源化利用现状与进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 380-390.
- [5] 张衍, 王成楠, 王彪, 等. 生态文明背景下江西绿色矿山建设现状及思考[J]. 赣南师范大学学报, 2024, 45(6): 123-128.
- [6] Chen, J., Jiskani, I.M. and Li, G. (2023) Ecological Restoration of Coalmine-Degraded Lands: Influence of Plant Species and Revegetation on Soil Development. *Sustainability*, **15**, Article 13772. <https://doi.org/10.3390/su151813772>
- [7] 张进德, 郗富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7921-7930.
- [8] 赵云峰, 张涛, 田志君, 等. 矿区周边重金属污染土壤植物修复技术研究进展[J]. 城市地质, 2020, 15(1): 22-33.
- [9] 王颖哲. 安太堡矿区不同植被恢复模式对土壤活性有机碳的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- [10] 王从彦, 向继刚, 杜道林. 2 种入侵植物对根际土壤微生物种群及代谢的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(7): 1247-1251.
- [11] 杨修, 高林. 德兴铜矿矿山废弃地植被恢复与重建研究[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1932-1940.
- [12] 郭燕. 露天煤矿废弃地植被恢复过程中土壤理化性质及物种多样性特征[J]. 林业科技, 2012, 37(5): 51-54.
- [13] 鲍士旦. 土壤农业分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] Stefanowicz, A.M., Kapusta, P., Stanek, M., Rożek, K., Rola, K. and Zubek, S. (2023) Herbaceous Plant Species and Their Combinations Positively Affect Soil Microorganisms and Processes and Modify Soil Physicochemical Properties in a Mesocosm Experiment. *Forest Ecology and Management*, **532**, Article 120826. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120826>
- [15] 毛凌晨, 叶华. 氧化还原电位对土壤中重金属环境行为的影响研究进展[J]. 环境科学研究, 2018, 31(10): 1669-1676.
- [16] 王明霞, 周志峰. 植物根系分泌物在植物中的作用[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(11): 6357-6359.
- [17] 刘芷宇. 根际动态及其效应的研究[J]. 世界农业, 1987(8): 39-41.
- [18] 张建锋, 宋玉民, 邢尚军, 等. 盐碱地改良利用与造林技术[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(6): 124-129.
- [19] 孟繁昊, 王聪, 徐寿军. 盐胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2014, 29(3): 315-318.
- [20] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809-

- 2819.
- [21] 臧华栋, 钱欣, 杨学超, 等. 作物根际沉积氮研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(4): 120-126.
- [22] 卿悦. 矿山生态型水蓼氮素吸收特性研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2019.
- [23] 石文静. 土壤有机磷的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(33): 11697-11701+11703.
- [24] 王振月, 李瑞明, 王宗权, 等. 土壤养分与毛脉酸模根中生物活性成分含量之间的相关性研究[J]. 中国中药杂志, 2007, 32(19): 1984-1987.
- [25] 高志亮. 外来植物苏门白酒草和水花生入侵对土壤碳氮过程的影响[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [26] 蔺俞月. 磷富集植物水蓼根际微生物群落结构与功能特征[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2024.
- [27] 赵同谦, 赵阳, 贺玉晓, 等. 不同植被恢复类型对矿山废弃地土壤理化性质的影响——以焦作缝山公园为例[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(4): 60-67.
- [28] 由乐林, 王子芳, 徐曼, 等. 酒糟灰渣等改良剂对酸性紫色土酸度改良和养分提升的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(6): 1745-1755.
- [29] 包先明, 崔宏. 退耕还湖后不同植被群落湿地土壤剖面磷素形态分布特征[J]. 土壤, 2019, 51(1): 25-31.
- [30] 邱柏淞, 宋鑫, 谭智诚, 等. 蚯蚓活动下矿物对凋落物分解及腐殖化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(9): 2050-2059.
- [31] 吴鹏, 崔迎春, 赵文君, 等. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(3): 80-92.
- [32] 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): 3937-3947.
- [33] 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.
- [34] Zhao, F.Z., Sun, J., Ren, C.J., Kang, D., Deng, J., Han, X.H., *et al.* (2015) Land Use Change Influences Soil C, N and P Stoichiometry under 'Grain-to-Green Program' in China. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 10195. <https://doi.org/10.1038/srep10195>
- [35] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 260-268.