doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2023.09.019

赤泥型地质肥的制备及对石漠化土壤基质条件的改良效果

程俊伟,黄明琴,颜雄

(遵义师范学院,贵州 遵义 563006)

摘要:以赤泥作为堆肥载体制备地质肥料,施加改良石漠化土壤,通过模拟设置不同雨强冲刷和雨量浸润条件,测试分析了横向界面和径向剖面结构土壤的颗粒组成、容重、团聚体及养分指标变化,对地质肥料的改良效果进行了立体化的评价分析。结果表明:赤泥基地质肥可有效增强石漠化土壤横径向界面抗雨水冲刷和下渗侵蚀能力,在15～90 mm/h雨强条件下,土壤横向流失率降幅可保持在19.49%～72.20%,土壤黏粒降幅小于20%,OM、TN、TP等各营养指标降幅率最低至3.89%。0～20 cm表层土壤容重由1.18 g/cm^{3}逐级降至0.86 g/cm^3,水稳性团聚体量由45.33%增加至75.57%,在1 000～3 000 mm雨量浸润侵蚀条件下,径向剖面各层OM、TN、AP和AK等营养指标下渗率均明显降低,整体流失率最低至2.86%。红外特征分析显示,地质肥中多种营养有机基团特征吸收峰强度显著增强,赤泥地质肥粒料多孔结构有助于营养基质的载留附着。综合考虑土壤物化指标流失率趋势特征及土层构造影响等因素,赤泥基地质肥15%施加量对研究区石漠化土壤的改良效果最佳。

关键词:赤泥;地质肥料;石漠化土壤;改良

中图分类号:X705 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-7545(2023)09-0150-09

Preparation of Red Mud Geological Fertilizer and Its Improvement Effect on Soil Matrix Condition of Rocky Desertification

CHENG Junwei, HUANG Mingqin, YAN Xiong

(Zunyi Normal University, Zunyi 563006, Guizhou, China)

Abstract: Red mud was used as a compost carrier to prepare a geological fertilizer that was used to improve rocky desertification soil. The composition of particles, bulk density, aggregates and nutrient indexes of the soil transverse interface and radial profile was then tested and analyzed under simulation of varying rainfall erosion and infiltration conditions. Further, a three-dimensional evaluation and analysis of the improvement caused by the geological fertilizer was conducted. The results show that the red mud-based fertilizer enhances the resistance to rainfall erosion and infiltration of the transverse and radial interfaces of the rocky desertification soil. Under rainfall intensities of 15－90 mm/h, the transverse loss of soil could be maintained in the range of 19.49%－72.20%. In addition, the clay content of the soil drops by less than 20%, whereas organic matter (OM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and other nutrient indexes drops to a minimum of 3.89%. The bulk density of the 0－20 cm top soil decreases

收稿日期:2023-03-20

基金项目:遵义市校联合科技项目(遵市科合HZ字[2020]19);贵州省高等学校黔北现代山地高效农业科技成果转移转化服务乡村示范基地项目(黔教技[2022]067)

作者简介:程俊伟(1989-),男,硕士,讲师;**通信作者:**颜雄(1981-),男,博士,教授

progressively from 1.18 g/cm^3 to 0.86 g/cm^3, while the water-stable aggregate volume rises from 45.33% to 75.57%. Under infiltration conditions that vary from 1 000 mm to 3 000 mm, the infiltration rates of OM, TN, available phosphorus, available potassium, and other nutrient indexes in each layer of the radial soil profile decrease significantly. Overall, the lowest attrition rate is 2.86%. Data from infrared analysis shows that intensities of absorption peaks that are characteristic of nutrients in the geological fertilizer are significantly enhanced. The porous structure associated with particles of the red mud-based geological fertilizer promotes the retention and adhesion of nutrients in the soil matrix. Considering the trends of losses associated with physical and chemical indexes and effects of the soil structure, improvement effect of 15% red mud base mass fertilizer on rocky desertification soil is the best.

Key words: red mud; geological fertilizer; rocky desertification soil; infiltration

石漠化是基于脆弱的喀斯特环境下,由人为或自然因素造成的水土流失、土壤营养元素迁移丧失、岩表风化裸露、土地生产力衰退现象,呈现出一定的荒漠化特征[1]。贵州省是我国典型的石漠化分布区,石漠化面积占全省面积的 20.39%,严重威胁地区经济的发展和人类生存。目前采取的石漠化治理模式以植被恢复为主[2],其首要任务即是解决土壤质地改善和营养元素固定均衡问题,成为林草修复技术的关键点。

赤泥是铝业生产过程排放的固体废弃物,中国作为世界最大氧化铝生产国,每年排放的赤泥高达近千万吨,仅贵州省赤泥年排放量已超过 300 多万吨,而综合利用量不足 5%。由于赤泥具有较大的比表面积和较高的铁、铝、硅、钙氧化物和氢氧化物含量,可以作为一种有效的氮磷吸附和固定材料应用于贫瘠沙质土壤的改良中[3],不仅能够提高沙土的保肥保水能力,而且延伸拓展了赤泥的产业利用率。SNARS 等[4]将赤泥作为改良剂施入沙土,结果表明,赤泥能有效减少氮磷元素渗漏,增加土壤矿物质和养分,并改善了土壤酸性。FEIGL 等[5]研究表明,赤泥能够在短期内提高酸性沙质土壤的微生物活性,底土中 5%～20%的赤泥对微生物群落活性具有持久的增强作用,改善土壤环境,形成养分积累。SUMMERS 等[6]将赤泥施入沙壤土研究牧草生长状况,结果表明,赤泥中的硅、钙、镁元素具有较好弱酸溶性,可明显改善植物细胞组织,使植物形成硅化细胞,提高植物生理效能,并能固化沙土中交换态的 Cd、Zn、Ni 等元素。此类研究均表明将赤泥作为一种石漠化贫瘠土壤的改良剂具有一定的可行性和优势性。

目前,利用赤泥配施其他固体废物修复和改良土壤的研究大多是简单混合后施入土壤中,对于强度石漠化贫瘠土壤效果稳定性欠佳,且评价方式缺乏综合性和立体性。因此,本文首先以赤泥、污泥和秸秆添加生物菌剂经固态发酵技术制成地质肥料,提升物料与土壤的亲和性,然后按一定比例施入石漠化土壤,通过不同雨强冲刷和雨水浸润量的条件设置对石漠化土壤横向界面和径向剖面的物化指标进行测定分析,形成立体性的评价依据,为赤泥的综合利用和石漠化土壤的改良提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于贵州省西南部关岭花江示范区,地处东经 105.6188°、北纬 25.9424°,海拔 600～1 250 m,总面积 51.62 km^2,其中喀斯特面积占 87.92%,该区地层主要为三叠统地层,碳酸盐岩占 95%以上,区域冬春干旱,夏秋湿热,年均气温 18.4 ℃,年均降水量 1 100 mm,但时空分布不均,暴雨频繁。区域内森林覆盖率较低,水土流失、石漠化严重,裸露基岩面积比重达 70%以上,形成了典型的土壤侵蚀、流失等石漠化区域特征。本文选取研究区强度石漠化中心典型位置样点进行剖面土样采集,剖面采集坑构造为 1.5 m×1 m×1 m,按土壤发生层自下而上分别采集 0～20、>20～40 和>40～60 cm 三个剖面层土壤各 3～5 kg,置于 PP 样盒中固形,保持剖面结构,编号记录带回。

1.2　试验原料理化特征

试验用赤泥料取自贵州省遵义某铝厂拜耳法产排经板框压滤后堆存 1 年龄赤泥,主要氧化物成分为(%):Na_2O 9.62、SiO_2 19.39、Al_2O_3 25.66、Fe_2O_3 26.91、CaO 9.82、TiO_2 3.82、MgO 1.22、P_2O_5 0.15、K_2O 1.35。秸秆为当地典型作物辣椒秸秆,活性污泥取自遵义南部某污水处理厂浓缩后污泥(含水率 60%),具体组分理化特性如表 1 所示。

表1 试验原料组分及理化特性

Table 1 Raw material components and physicochemical properties

理化指标	TN/(g·kg^{-1})	TP/(g·kg^{-1})	TK/(g·kg^{-1})	OM/(g·kg^{-1})	pH	EC/(μS·cm^{-1})
秸秆	8.96	0.62	11.56	40.45	6.83	392.15
活性污泥	23.17	12.63	5.58	17.22	6.31	564.73

1.3 试验原理与方法

1.3.1 赤泥基型堆肥地质肥料的制备

堆肥料制备采用固态基质堆肥发酵,以恒重干秸秆、活性污泥和赤泥作为基准混合料,活性污泥和赤泥过60目标准筛、秸秆料平均粒径1 cm,以秸秆和污泥原料调节初始C/N配比为30.0~35.0,赤泥掺混量15%,含水率控制为50%~55%,施加0.2% EM复合菌剂以加快反应进程。堆肥试验在玻璃棚内进行,自然通风,环境温度(24±1) ℃,固态条垛长宽高为1.0 m×0.8 m×0.6 m的平顶梯形堆,堆肥开始2周内每2天翻堆一次,以后每4天翻堆一次,以未添加赤泥样作为平行对照。

1.3.2 横向冲刷迁移试验

取研究区0~20 cm土层作为研究对象,堆肥腐熟料的施肥比例分别为0、5%、10%、15%和50%。为模拟石漠化地研究区石灰岩的摩擦效果(摩擦因数0.35~0.40),选取聚氯乙烯材料矩形槽为载体(120 cm×50 cm×60 cm,内面摩擦因数0.38~0.44),掺混料铺层厚度20 cm,槽体设置10°冲刷坡度;采用自制定时计量喷淋装置进行淋溶模拟,设计雨强梯度为15、50、90 mm/h,每次淋溶时长1 h,间隔24 h,共计3次。末端收集水流和泥沙,取槽内试样测试颗粒样粒径特征、肥力特征等指标。以施肥比例和不同雨强条件正交组合设置横向冲刷研究梯度,分别记为LS1-LS16,如表2所示。

1.3.3 径向淋溶沉积试验

取研究区0~20、20~40和40~60 cm三个剖面层土壤,以PP材料圆柱体(直径9.6 cm,高85 cm)作为淋溶填充土柱,柱体设有3个取样阀和排水阀口,堆肥腐熟料施加于0~20 cm表层土样,施肥比例分别为0、5%、10%、15%和50%。将混合样按照取样剖面构造和厚度填充于圆柱槽中,进行模拟对比试验。采用间歇式淋溶法,淋溶雨强设置为50 mm/h,依据岩溶地区多雨特点,总雨量分别设置为1 000、2 000、3 000 mm,间隔施雨时间6 h,取样测试各填充模拟层容重率、颗粒特征、肥力特征等指标。以施肥比例和不同总雨量条件正交组合设置径向淋溶研究梯度,分别记为RL1-RL16,如表3所示。

表2 横向冲刷试验条件组合

Table 2 Combination of transverse scour test conditions

试样编号	施肥比例/%	降雨强度/(mm·h^{-1})
LS1	0	0
LS2	0	15
LS3	0	50
LS4	0	90
LS5	5	15
LS6	5	50
LS7	5	90
LS8	10	15
LS9	10	50
LS10	10	90
LS11	15	15
LS12	15	50
LS13	15	90
LS14	50	15
LS15	50	50
LS16	50	90

表3 径向淋溶试验条件组合

Table 3 Combination of radial leaching test conditions

试样编号	施肥比例/%	总雨量/mm
RL1	0	0
RL2	0	1 000
RL3	0	2 000
RL4	0	3 000
RL5	5	1 000
RL6	5	2 000
RL7	5	3 000
RL8	10	1 000
RL9	10	2 000
RL10	10	3 000
RL11	15	1 000
RL12	15	2 000
RL13	15	3 000
RL14	50	1 000
RL15	50	2 000
RL16	50	3 000

1.3.4 测试方法与数据分析

参考相关文献[7-8],样品测定分析方法如表4所示。样品原始数据经Excel 2010整理取各指标3次平行测定平均值,再采用SPSS 19.0进行统计性分析,运用Origin 8.0进行作图。

表 4　样品指标测定方法与仪器

Table 4　Sample index measurement methods and instruments

样品指标及缩写	方法与仪器
pH	电位法
电导率(EC)	电位法
容重(BD)	环刀法
水稳性团聚体	湿筛法
有机质(OM)	重铬酸钾—容量法
全氮(TN)	凯氏定氮法
氨氮(AN)	碱解扩散法
硝态氮(NN)	酚二磺酸比色法
全钾(TK)	NaOH 熔融—火焰光度计法
速效钾(AK)	NH_4COOH—火焰光度计法
全磷(TP)	$HClO_4$-H_2SO_4熔融钼锑抗比色法
有效磷(AP)	盐酸—硫酸浸提法
粒径(PS)	激光粒度分析仪(Mastersizer 3000)
红外光谱(IR)	傅里叶变换红外光谱仪(FTIR-650)

2　结果与分析

2.1　赤泥地质肥料红外特征分析

图 1 显示了原料赤泥、纯秸秆堆肥产物和赤泥地质肥三种物质的 FTIR 图谱特征。图谱中分别出现了三种物料的特征基团峰，950 cm^{-1}和 1 091 cm^{-1}处为原料赤泥的 Si—O 键弯曲和 Si—O—Si 键反对称伸缩振动吸收峰；2 930 cm^{-1}和 3 348 cm^{-1}处为秸秆堆肥料中 C—H[—CH_3、—CH_2—]的伸缩振动和游离 N—H 键的伸缩振动吸收峰，3 430 cm^{-1}处为醇[R—OH]、酚[Ar—OH]、羧酸[—OH]的振动吸收峰，均带有显著的生物质特征；988 cm^{-1}和 3 628 cm^{-1}处分别为赤泥地质肥中 Si—OH 和缔合 N—H 键的伸缩振动吸收峰，1 430 cm^{-1}处为芳香环内 C=O 形成的振动吸收峰，1 260 cm^{-1}处为[C—O]醇形成的伸缩振动峰，表明赤泥的多孔硅基结构和多氧化物组分特性在有机物堆肥过程中能够提供更多的反应活性点位和良好的氧化还原环境，有效提升 C、N 等营养元素的转化固定率[9]，1 662 cm^{-1}处出现的有机胺的 C=O 拉伸和 C—N 拉伸对应吸收峰强度较其他两种物质显著增强，进一步说明赤泥地质肥粒料的比表面积增大有助于营养基质的载留附着。

2.2　石漠化土壤层横向界面改良效果特征

2.2.1　横向界面土壤流失率与颗粒机械组成变化特征

土壤的颗粒机械组成与土壤水、肥、气、热状况均有极密切的联系，其各级微粒的组分变化直接影响土壤的生物理化特性和肥力状况。降雨侵蚀是土壤质地微粒组成变化的重要影响因素之一[10]，雨水的溅蚀与地表径流形成的薄层水流将土壤颗粒均匀剥离和搬运，造成水土的流失，在土壤质地极不均衡的石漠化地区尤为严重。图 2 为在不同降雨强度下经赤泥基地质肥料改良前后研究区沙化土壤的质地变化及流失率特征，由图 2 可知，研究区土壤机械组成中砂粒和粉砂占比超过 93%，黏粒占比仅为 6.16%，沙化特征显著。在 90 mm/h 雨强时达到峰值 32.34%，此时黏粒占比降低至 1.53%，形成更为严重的沙化质地。在 5%、10%、15%和 50%掺混比例下，黏粒分别达 7.13%、9.98%、12.43% 和 17.85%，土壤微粒之间的黏着吸附效果显著增强。相比未掺混土样，施加赤泥基地质肥后土壤流失率均显著降低，15 mm/h 雨强冲刷的流失率降幅为 24.55%～72.20%，50 mm/h 雨强冲刷的流失率降幅为 8.28%～63.19%，90 mm/h 雨强冲刷的流失率降幅为 19.49%～53.93%，均在 15%掺混比例下达到峰值，且对低雨强(15 mm/h)抗侵蚀效果最佳。对比同一掺混比例在不同雨强冲刷下黏粒占比结果显示，随着雨强由 15 mm/h 提升至 90 mm/h，0、5%、10%、15%和 50%的赤泥基掺混比例样的黏粒占比降幅分别为 63.83%、14.31%、25.75%、18.50%和 31.99%，掺混后土样均产生一定的抗侵蚀能力，15%掺混比例在保持较高有机微粒引入量前提下，黏粒占比降幅仍低于 20%，对降雨溅蚀和片蚀均保持较高的抗侵蚀效果。

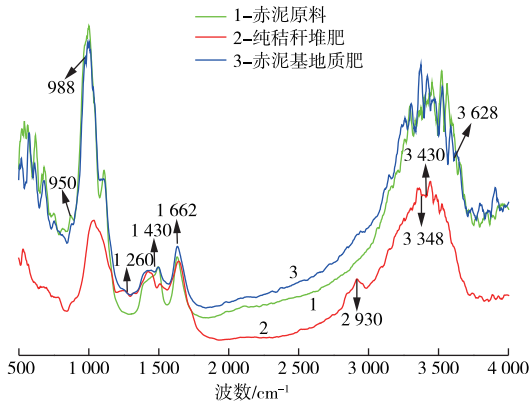

图 1　原料赤泥、纯秸秆堆肥产物和赤泥地质肥的 FTIR 图谱

Fig. 1　FTIR spectrum of red mud raw material, pure straw compost products, and geological fertilizer of red mud

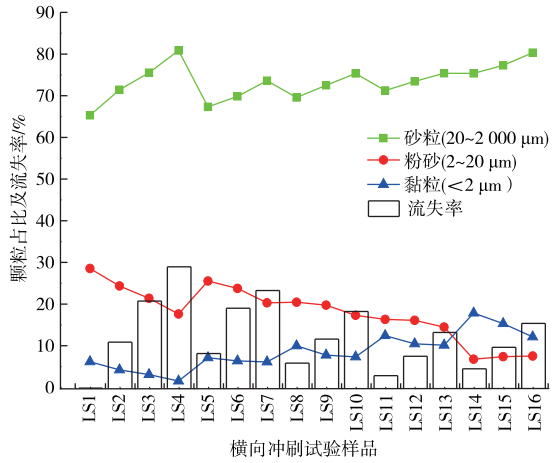

图 2　不同降雨冲刷强度、肥料施加配比对土壤横向质地及流失率的改良影响

Fig. 2　Effects of different rainfall scour intensity and fertilizer ratio on soil lateral texture and soil loss rate

2.2.2　横向界面土壤养分指标变化特征

图 3(a)反映了降雨横向冲刷强度对不同赤泥基地质肥料施加配比改良土壤的 pH 和电导率(EC)的影响。由图 3(a)可以看出，施加赤泥基堆肥地质肥料可显著提升沙土的 pH，随着施加配比由 5%增加至 50%，pH 分别增加 0.05、0.08、0.2 和 0.64 个单位，呈偏碱性递增。EC 值反映了土壤可溶性盐分含量，体现植物生长所需的盐离子浓度。随着地质肥施加比例的增加，土壤 EC 值由 169.31 μS/cm 迅速提升至 733.12 μS/cm，土壤质量改善显著，趋向利于植物优势生长。随着降雨强度的增加，溅蚀和冲刷效应加速了溶解性离子的流失，混施前后土壤 pH 和 EC 值均呈一定的降低趋势。未改良沙土的 pH 和 EC 降幅分别为 0.24%～1.35%和 8.85%～34.52%，不同配比混施改良后沙土 pH 降幅分别为 0.24%～1.34%、0.36%～1.82%、0.24%～1.31%和 0.57%～2.27%，EC 降幅分别为 4.72%～19.15%、4.26%～11.34%、2.59%～12.30%、1.70%～8.24%，体现出赤泥基地质肥的高浓度混施有效增加了土壤横向冲刷抗性。

图 3(b)为降雨横向冲刷强度对改良前后沙土营养元素和有机质含量的流失变化影响。有机质含量是土壤肥力指标的重要组成部分，由图 3(b)可知，随着地质肥料施用配比的增加，沙土混合物中有机质含量呈递增趋势，提升均值达 13.73%/5%施用量，这与赤泥地质堆肥产品本身丰富的有机质含量相关。施加改良前后营养元素结果显示，随着地质肥料施用量增加，营养元素均能达到数倍的增长，沙土中 TN、TP、AP、AK、氨氮(AN)和硝态氮(NN)含量在 50%地质肥料施加量时达到最大，分别为未施加肥料的 1.93、1.86、4.70、6.88、3.11 和 1.74 倍，说明地质肥料经堆肥处理后使 N、P、K 的有效态转化率提升明显，为沙化土壤内植被的生长提供了良好的基质条件。降雨横向冲刷试验结果显示，与未施加赤泥堆肥地质肥料相比，经混合施加后沙土的 N、P、K、有机质等流失率均呈降低趋势。土壤中 NN

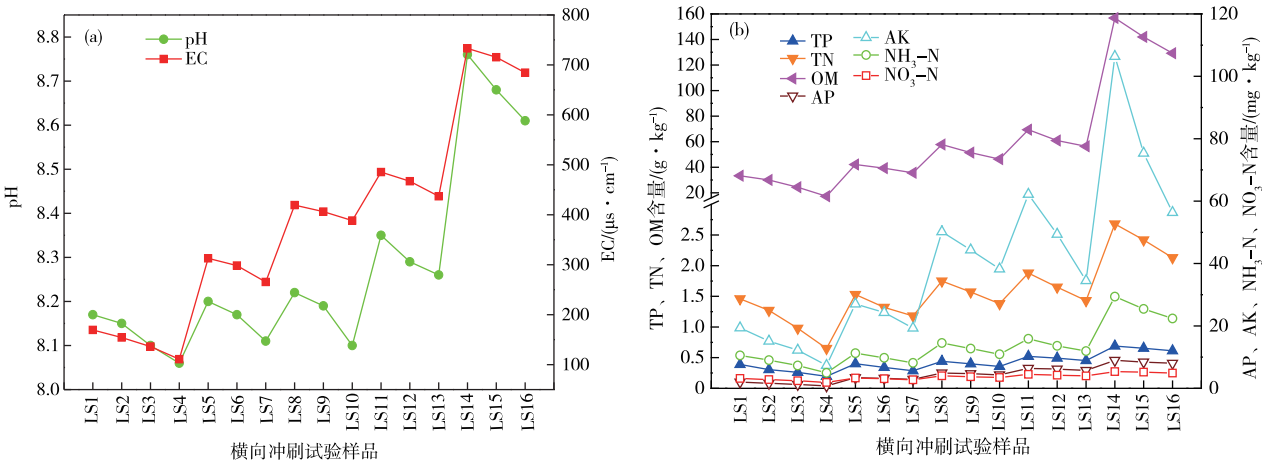

图 3　降雨冲刷强度和肥料施加配比对土壤横向 pH 和 EC(a)及土壤横向养分指标(b)的改良影响

Fig. 3　Effects of different rainfall scour intensity and fertilizer ratio on soil lateral pH value and EC (a), and soil lateral nutrient indexes (b)

在 50%施入量时最低达 2.72%～11.43%，AN 在 15%施加量时流失率即达到最低，不同降雨强度下流失率为 8.42%～31.16%，超过该施加量时流失率反而有所增加。TP、AP、AK 和有机质分别在 15%、15%、10%、50%施加量时达到流失率最低值，分别为 4.58%～17.03%、3.89%～14.07%、6.66%～28.83%和 4.70%～23.62%，说明赤泥地质肥料对沙土中四类营养元素的补充和固定效果均存在阈值范围，同时，TP 和有机质的流失率在 50～90 mm/h 高强度降雨条件下具有反复性，说明高雨强条件仍是影响改良后沙土 TP 和有机质流失不可忽略的因素。

2.3　石漠化土壤层径向剖面改良效果特征

2.3.1　径向剖面土壤容重与团聚性特征变化特征

土壤容重和水稳性团聚体量是影响水分、盐分和养分运移、有机物分解的重要影响因素，不同施肥掺混比例径向层土壤容重和水稳性团聚体随雨量变化特征如图 4 所示。随着赤泥地质肥料在 0～20 cm 土层的施加量逐渐增加，0～20 cm 表层土壤容重由 1.18 g/cm^{3}逐级降至 0.86 g/cm^3，水稳性团聚体的含量由 45.33%增加至 75.57%，均在地质肥施加量为 50%时达到极值点，主要原因是赤泥地质肥料在堆肥过程中形成大量的有机产物和颗粒团聚体，在一定程度上改善了土壤的组分环境和紧致度，>20～40 cm、>40～60 cm 土层虽未施用地质肥料，但受表层土壤的压实程度随有机物的增加而降低，土壤容重呈 4.58%～6.34%的降低趋势。采用间歇式降雨法分别模拟总雨量分别为 1 000、2 000、3 000 mm 降雨径向入渗环境，结果显示，随着降雨量的增加，未施加赤泥地质肥 0～20 cm 土层容重增幅达 2.54%～6.78%，最大可达 1.26 g/cm^3；>20～40 cm 和>40～60 cm 土层容重增幅分别为 1.59%～3.97%和 1.53%～3.82%，影响效果随剖面深度增加而降低，受径向雨水入渗影响较小。随着赤泥地质肥施加量由 5%增加至 50%，0～20 cm 土层容重增幅逐级降低并趋于稳定，分别为 1.74%～5.22%、1.82%～4.55%、1.94%～2.91%和 1.16%～2.32%，>20～40 cm 土层的容重增幅仅为 0.85%～1.69%。水稳性团聚体随雨量渗流变化结果显示，随雨量增加水稳性团聚体量均呈降低趋势，但不同赤泥肥施加量导致的团聚体降幅存在较大差异。在 0～20 cm 土层，赤泥肥施加量为 0、5%、10%、15%、50%样的团聚体降幅量分别为 9.16%～26.12%、6.49%～19.01%、2.03%～11.08%、0.48%～7.93%和 1.83%～3.06%。受径向入渗影响，多数的表层土壤团聚颗粒容易发生沉降和堆积，在深度土层界面处形成不同强度的团聚力，在一定程度上降低了中下层土壤团聚体的沉降和分散，产生了>20～40 cm 和>40～60 cm 土壤水稳性团聚体量降幅分别为 26.16%降至 10.93%、39.37%降至 35.78%的趋势，从土层不同深度的施加综合改良效果考虑，15%赤泥地质肥施加量较为适宜。

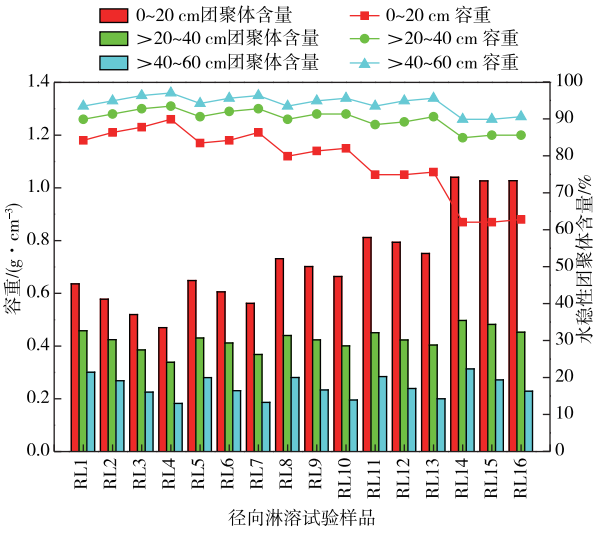

图 4　不同浸润雨量、肥料施加配比对土壤径向容重和团聚体的改良影响

Fig. 4　Effects of different infiltration rainfall and fertilizer ratio on soil radial bulk density and aggregate improvement

2.3.2　径向剖面土壤养分指标含量变化特征

图 5 反映了不同施肥掺混比例径向层土壤养分指标随雨量浸渗影响的变化特征。由图 5 可知，研究区样点不同深度径向剖面土壤中 TN、AP、AK 和有机质含量表现出较大差异，以 0～20 cm 土层含量最高，但均处于土壤肥力值缺乏水平。随着降雨渗流量增加，未施加地质肥土壤中四种营养成分均呈现不同程度的下渗迁移和流失，0～20 cm 土层 AP、AK、TN 和有机质下渗率分别达 42.93%、49.17%、63.69%和 44.72%，受渗流迁移作用影响最为显著；>20～40 cm 土层受下渗量补充和基质缓冲截留作用，AP、AK、TN 和有机质的下渗率分别为 14.61%、30.22%、12.19%和 41.40%；>40～60 cm 土层 AP、AK、TN 和有机质的下渗率分别为 21.43%、35.18%、44.20%和 39.82%，剖面层四种营养成分整体流失率分别达 32.52%、40.69%、40.99%和 42.74%。随着赤泥地质肥料在 0～20 cm 土层的掺

混量由 5%增加至 50%,四种养分指标首先在 0～20 cm 表层土壤中呈现优势累积,AP、AK、TN 和有机质的含量在 50%掺混量时最高分别可达 8.62 mg/kg、133.3 mg/kg、2.82 g/kg 和 163.38 g/kg,达到含量很丰富水平标准。

降雨浸渗结果显示,经不同赤泥地质肥掺混比例改良后,四种养分指标在不同剖面层的浸渗率和固定量存在较大差异。随着降雨总量由 0 增加至 3 000 mm,有效磷(AP)在 0～20 cm 和>40～60 cm 剖面层的下渗率分别为 19.61%～39.93%和 7.14%～14.29%,>20～40 cm 剖面层 AP 含量反而增加 80.90%～177.53%,相比未掺混赤泥地质肥,整体流失率减小至 2.86%～10.64%,说明赤泥地质肥的添加对各剖面层 AP 浸渗率和固定量均有显著改善效果。同时,基于沙化土壤剖面层上松下紧的粒性构造,导致上层浸润效率高于下层,使 AP 在一定时段>20～40 cm 剖面层形成累积效应。改良后速效钾(AK)在 0～20、>20～40、>40～60 cm 剖面层的下渗率分别为 31.79%～41.83%、9.96%～27.02%和 15.94%～27.74%,整体流失率为 27.64%%～36.10%,相比未掺混赤泥地质肥流失率下降 4.59%～13.05%,这与赤泥地质肥所引入的强交换性阳离子固定了钾元素分布密切相关。经掺混改良后三个土层中 TN 和有机质(OM)的剖面下渗率分别为 7.45%～29.17%和 37.12%～50.94%、4.07%～8.94%和 14.98%～35.30%、5.13%～20.77%和 25.93%～38.61%,综合考虑地质肥掺混量和对土层结构的影响等因素,当赤泥肥施加量在 15%时,TN 和有机质(OM)在 1 000～3 000 mm 雨量浸润条件下,土层保有量分别在 3.47 g/kg 和 75.56 g/kg 以上,均处于较丰富水平。

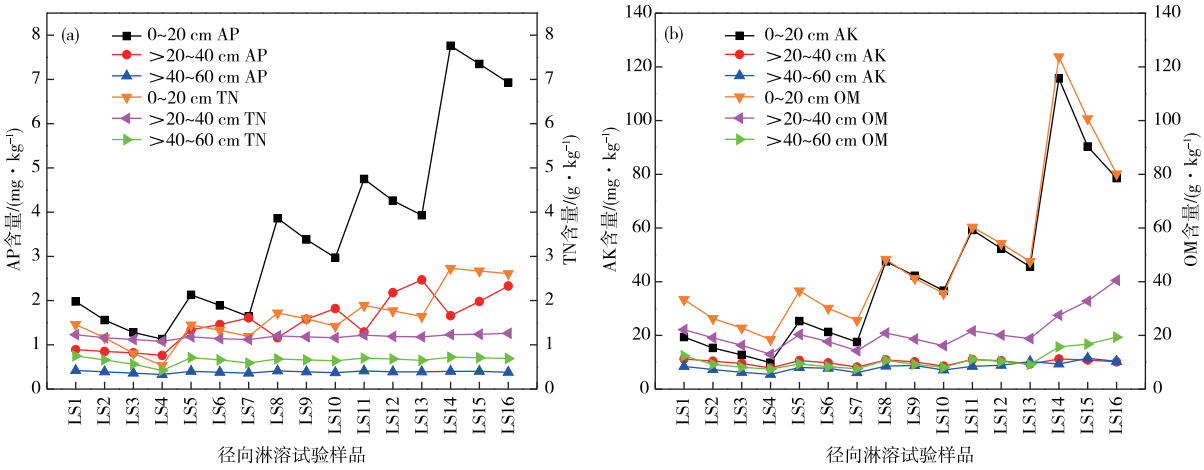

图 5　不同浸润雨量、肥料施加配比对土壤径向 AP 和 TN(a)及土壤径向养分指标(b)的改良影响

Fig. 5　Effects of different infiltration rainfall and fertilizer ratio on soil radial AP and TN (a), and soil radial nutrient indexes (b)

3　讨论

赤泥基地质肥的改良施加对石漠化土壤理化性质产生了较大影响,同时对土壤层横向和径向指标性能的改良效果又存在一定差异。土壤的颗粒组成是土壤理化特性和肥力状况的直接影响因素之一。本研究中,花江原始石漠化土层中砂粒、粉砂及黏粒处于沙化分散状态,且主要以砂粒和粉砂为主(占比超过 93%),在横向层结构上,随着降雨强度的增加,土粒不断被薄层水流剥离,土壤流失率不断上升。当掺混施加一定量赤泥基地质肥后,一方面,地质肥中经堆肥产生的大量强吸附性有机黏粒被引入土壤,提升了土质中黏粒的占比,增加了土壤微粒之间黏着吸附效果,使土壤具备一定的分散和抗冲刷侵蚀性;另一方面,赤泥基地质肥引入了大量介于粉砂粒径范围的多孔性赤泥微粒,使原本处于分散体系的砂粒和黏粒在赤泥吸附特性的影响下形成临时结皮,抗侵蚀性增强,这与罗征鹏等[11]的研究结果相似。相比未掺混土样,施加赤泥基地质肥后土壤流失率均显著降低,且对低雨强(15 mm/h)抗侵蚀效果最佳,原因在于随着掺混比例的增加,虽在一定程度上增加了黏粒和粉砂的含量占比,但赤泥无机颗粒的增加也增加了土壤对雨水的渗透性,流量汇聚形成线状水流,片蚀效应增强[12]。

由于赤泥本身含有较多的可溶性碱性元素,本研究中将赤泥基地质肥施入石漠化土壤后,吸持作

用使得土壤中交换性 H^+ 和 Al^{3+} 减少，土壤的盐基饱和度大幅提升，显著提高了沙化土壤的 pH 和 EC 值，趋向利于植物优势生长的盐分浓度转变。在相同降雨强度下，相比未改良土壤，横向表层土壤 pH 和 EC 降幅最低分别仅为 0.24%和 1.70%，说明高浓度的赤泥基地质肥料混施配比为沙土输入更多的粉砂、黏粒和有机质组分的同时，提供了更多离子吸附所需的零电荷点[13]，促进了土质颗粒对各养分的吸附，有效增加了土壤横向冲刷抗性，但施加比例超 50%有产生植物生长抑制和土壤盐碱化的风险可能。

土壤容重和水稳性团聚体量是影响水分、盐分和养分运移、有机物分解的重要因素，受降雨入渗影响，两者在土壤径向剖面构造中含量的变化也直接决定了土壤的可生化性能。本研究中，随着入渗降雨量的增加，土壤黏土矿物水化膨胀、团聚体分散和微粒迁移程度显著提升，入渗雨水使土壤颗粒孔隙发生积压和坍塌堆叠，紧致度增加，原始石漠化 0～20 cm 表层土壤容重增幅达 6.78%，最大可达 1.26 g/cm^3，远超植物根系生长所需容重环境[14]。随着赤泥地质肥的施加和浓度提升，堆肥料中赤泥颗粒和有机质在土壤中分别起支撑和锁水作用，提升了土壤的抗渗流侵蚀能力，同时，表层土壤中引入的过量有机团聚物随渗流量增加发生分解和沉降，有效缓冲了中下土层的致密组分，容重增幅仅为 0.85%～1.69%。另一方面，赤泥地质肥对维持和改善土壤剖面层结构中水稳性团聚体量也有重要作用，除赤泥肥本身含有大量团聚体进行添加补充外，赤泥肥的缓流、锁水作用可以使土壤中分散性的有机、无机颗粒在径流浸润过程中形成新的稳定大团聚体，形成了一定的抗性平衡，这与高定等[15]研究的污泥堆肥料具有一定的共性特征。

除上述物理特性外，赤泥基地质肥对石漠化土壤中营养元素和有机质的含量稳定和形态转化也具有较大的改良效果。在横向土层结构中，施加赤泥地质肥土样中 TN、TP、AP、AK、AN 和 NN 含量远超未施加原石漠化土壤，说明地质肥料经堆肥处理后使 N、P、K 的有效态转化率提升明显，为沙化土壤内植被的生长提供了良好的基质条件，同时，经高强度降雨冲刷后，土样的 N、P、K、有机质等流失率均呈不同程度降低趋势，这是由于赤泥地质肥料施入增加了土壤的阳离子负荷，能够与土壤中磷酸盐、硝态氮、有机酸盐等负电荷性物发生吸附强化，增加了流失抗性，但过高的赤泥肥料施加量使土壤碱性风险增加，容易提升 AN 的气化流失[16]，施加掺混不宜超过 50%。研究区土壤径向剖面层中，TN、AP、AK 和有机质含量表现出较大差异，但均处于肥力值缺乏水平。相比未施加地质肥原土样，经赤泥地质肥的肥效补充，掺混样中 AP、AK、TN 和有机质含量首先在 0～20 cm 表层土壤中呈现优势累积，达到含量很丰富水平标准。随着降雨渗流量的增加，营养基质出现溶解下渗，地质肥中多孔性赤泥和生物质颗粒既能够吸附以阴离子基团从土壤解吸释放出的氮磷元素，又能通过抑制可溶性氮磷与其他离子结合，保证单剖面层有效氮磷的固定量，这与翟政等[17]的研究结果一致。相比之下，AK 的下渗量较高，流失率降幅仅为 4.59%～13.05%，阳离子性营养基质的固定提升应作为后续研究的重点。当赤泥地质肥施加量为 15%时，在 3 000 mm 强雨量反复浸润条件下，石漠化土壤中 TN 和 OM 保有量分别达 3.47 g/kg 和 75.56 g/kg 以上，均处于较丰富水平，整体流失率相比低至 11.26%，此施加比例较为适宜石漠化土壤的改良。

4　结论

1)多孔硅基结构赤泥作为有机堆肥基质材料，能够提供更多的反应活性点位和良好的氧化还原环境，有效提升 C、N 等营养元素的转化固定率，增加了营养基质的载留附着量。

2)赤泥基地质肥可有效增强石漠化土壤横向界面抗雨水冲刷侵蚀能力，在 15～90 mm/h 不同雨强条件下，土壤流失率降幅可保持在 19.49%～72.20%，土壤黏粒降幅小于 20%，OM、TN、TP 等各营养指标降幅率最低至 3.89%，保证了石漠化土壤的生物生长基质条件。

3)施加赤泥基地质肥可降低径向剖面土壤容重，显著提升水稳性团聚体量，在 1 000～3 000 mm 雨量浸润侵蚀条件下，OM、TN、AP 和 AK 等营养指标下渗率均明显降低，径向整体流失率最低至 2.86%，保持中、上土层处于营养丰富水平。

4)从土壤 pH、横径向界面营养指标流失率趋势、侵蚀性抗性差异、土质构造等因素综合考虑，赤泥基地质肥 15%施加量对研究区石漠化土壤的改良效果最佳。

参考文献

[1]　何茂林，张玉珊，高家勇，等. 喀斯特区土壤侵蚀与石漠化协同演变及交互关系[J]. 水土保持学报，2023，37(1)：140-150.

HE M L，ZHANG Y S，GAO J Y，et al. Synergistic

evolution and interaction of soil erosion and rocky desertification in karst area[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(1):140-150.

[2] XIAO K C, HE T G, CHEN H, et al. Impacts of vegetation restoration strategies on soil organic carbon and nitrogen dynamics in a karst area,southwest China[J]. Ecological Engineering,2017,101:247-254.

[3] 张雪,王重庆,曹亦俊.赤泥固废土壤化修复研究进展[J].有色金属(冶炼部分),2021(3):84-92.
ZHANG X,WANG C Q,CAO Y J. Research progress on soilification of red mud solid waste[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),2021(3):84-92.

[4] SNARS K E,GILKES R J,WONG M T F. The liming effect of bauxite processing residue (red mud) on sandy soils[J]. Australian Journal of Soil Research, 2004,42:321-328.

[5] FEIGL V,UJACZKI E,VASZITA E,et al. Influence of red mud on soil microbial communities:application and comprehensive evaluation of the Biolog EcoPlate approach as a tool in soil microbiological studies[J]. Science of the Total Environment,2017,595:903-911.

[6] SUMMERS R N,BOLLAN M D A,CLARKE M F. Effect of application of bauxite residue (red mud) to very sandy soils on subterranean clover yield and P response[J]. Australian Journal of Soil Research, 2001,39:979-990.

[7] 徐春燕,王涛,贾晨波,等.贺兰山东麓荒漠植物对土壤化学性质和酶活性的影响[J].生态环境学报,2020,29(12):2346-2354.
XU C Y,WANG T,JIA C B,et al. Effects of different desert plants on the soil chemical properties and enzyme activities in Helanshan Eastern Region[J]. Ecology and Environmental Sciences,2020,29(12):2346-2354.

[8] 黄璐,赵国慧,李廷亮,等.秸秆还田对黄土旱塬麦田土壤团聚体有机碳组分的影响[J].农业工程学报,2022,38(13):123-132.
HUANG L,ZHAO G H,LI T L,et al. Effects of straw returning on the organic carbon components of soil aggregates in wheat fields on the loess plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2022,38(13):123-132.

[9] ZHANG K Y,HU H P,ZHANG L J,et al. Surface charge properties of red mud particles generated from Chinese diaspore bauxite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2008,18(5):1285-1289.

[10] 陈琳,王健,宋鹏帅,等.降雨对坡耕地地表结皮土壤水稳性团聚体变化研究[J].灌溉排水学报,2020,39(1):98-105.
CHEN L,WANG J,SONG P S,et al. Effect of rainfall on water stability aggregates of crust soil on slope surface[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2020,39(1):98-105.

[11] 罗征鹏,熊康宁,许留兴.生物土壤结皮生态修复功能研究及对石漠化治理的启示[J].水土保持研究,2020,27(1):394-404.
LUO Z P,XIONG K N,XU L X. Study on the role of biological soil crust in ecological restoration and its enlightenment to the control of rocky desertification[J]. Research of Soil and Water Conservation,2020,27(1):394-404.

[12] 李芦頔,吴冰,李鑫璐,等.土壤侵蚀中的片蚀研究综述[J].地球科学进展,2021,36(7):712-726.
LI L D,WU B,LI X L,et al. Sheet erosion study in soil erosion:a review[J]. Advances in Earth Science,2021,36(7):712-726.

[13] 王未平,戴友芝,贾明畅,等.磁性海泡石表面零电荷点和吸附 Cd^{2+} 的特性[J].环境化学,2012,31(11):1691-1696.
WANG W P,DAI Y Z,JIA M C,et al. Surface point of zero charge of magnetic sepiolite and adsorption characteristics of cadmium[J]. Environmental Chemistry,2012,31(11):1691-1696.

[14] 杨勇,江荣风,李花粉,等.土壤容重改变对锌/镉超累积植物遏兰菜根系特征及吸镉的影响[J].环境科学,2010,31(12):3043-3049.
YANG Y,JIANG R F,LI H F,et al. Effect of the soil bulk density on the root morphology and cadmium uptake by *Thlaspi caerulescens* grown on Cd-contaminated soil[J]. Environmental Science,2010,31(12):3043-3049.

[15] 高定,刘洪涛,陈同斌,等.城市污泥堆肥用于草坪基质的生物与环境效应[J].中国给水排水,2009,25(15):119-121.
GAO D,LIU H T,CHEN T B,et al. Biological and environmental effects of municipal sludge compost used as turf substrate[J]. China Water & Wastewater,2009,25(15):119-121.

[16] ESFANDBOD M,PHILLIPS I R,MILLER B,et al. Aged acidic biochar increases nitrogen retention and decreases ammonia volatilization in alkaline bauxite residue sand[J]. Ecological Engineering,2017,98:157-165.

[17] 翟政,田野,秦广震,等.杨树人工林林下植被对非生长季土壤磷素形态与转化的影响[J].生态学杂志,2021,40(12):3778-3787.
ZHAI Z,TIAN Y,QIN G Z,et al. Effects of understory vegetation on soil phosphorus fraction and availability in non-growing season in poplar plantation[J]. Chinese Journal of Ecology,2021,40(12):3778-3787.