

三种环境材料混施对高寒矿区边坡土壤的影响

孔令健^{1,2}, 张琳², 刘一帆², 张莹², 梅重庆², 何沁航², 黄占斌²

[1.北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875; 2.中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083]

摘要: [目的] 为解决青藏高寒地区土壤复垦过程中土壤结构较差, 水土流失严重等问题, 研究3种环境材料对土壤团粒结构改良和理化性质改善的优化组合。[方法] 以青海德尔尼铜矿为例, 利用当地蛇纹石渣土和原土, 通过土培模拟正交试验, 研究了混施黏合剂、长纤维、稻壳3种材料对边坡土壤改良的效果, 并筛选出效果最佳的混合材料比例。[结果] 正交极差结果表明: 黏合剂对土壤团聚体、总孔隙度、田间持水量和土壤容重的影响较强, 长纤维和稻壳对pH值和全盐含量的影响较强。与对照相比(CK)相比, 黏合剂的加入可以增加土壤容重, 但会降低土壤孔隙; 长纤维和稻壳可明显降低土壤pH值, 提高总孔隙度和田间持水量并适当提高全盐含量。土壤团聚体和pH值最优的组合为A₂B₂C₃(黏合剂0.074 g/kg, 长纤维2.960 g/kg, 稻壳11.110 g/kg); 土壤容重、总孔隙度和田间持水量调节以A₁B₂C₂(黏合剂0.037 g/kg, 长纤维2.960 g/kg, 稻壳7.410 g/kg)组合最优; 全盐含量最优组合为A₃B₁C₂(黏合剂0.111 g/kg, 长纤维1.480 g/kg, 稻壳7.410 g/kg)。[结论] 高寒矿区土壤基质恢复的最优配方是A_{1.5}B₂C₂, 即黏合剂0.056 g/kg, 长纤维2.960 g/kg, 稻壳7.410 g/kg为最优配比。它可以改善土壤结构, 并具有提高青藏高寒矿区水土保持的能力。

关键词: 高寒矿区; 正交设计; 土壤团聚体; 黏合剂; 极差分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0097-09

中图分类号: S156, S157.2

文献参数: 孔令健, 张琳, 刘一帆, 等. 三种环境材料混施对高寒矿区边坡土壤的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 97-105. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.011; Kong Lingjian, Zhang Lin, Liu Yifan, et al. Effects of mixed application of three environmental materials on slope soils in alpine mining areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 97-105.

Effects of Mixed Application of Three Environmental Materials on Slope Soils in Alpine Mining Areas

Kong Lingjian^{1,2}, Zhang Lin², Liu Yifan²,

Zhang Ying², Mei Chongqing², He Qinhang², Huang Zhanbin²

[1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: [Objective] The optimal combination of three environmental materials for soil aggregate structure and physicochemical properties improvements were examined, in order to solve the problems of poor soil structure and serious soil and water loss in the process of soil reclamation in the alpine region of Qinghai-Xizang region. [Methods] Using the Qinghai Delni Copper Mine as the research site and utilizing the local serpentine residue soil and raw soil, the effect of mixing three kinds of materials, namely binder, long fiber, and rice husk, on the soil improvement was investigated through the soil cultivation simulation orthogonal test, and the ratio of the mixed materials with the best effect was screened out. [Results] Orthogonal polar results showed that the binder had a stronger effect on soil aggregates, total porosity, field water holding capacity, and soil bulk density, whereas long fibers and rice husk had a stronger effect on pH value and total

收稿日期: 2024-05-31

修回日期: 2024-08-21

资助项目: 青海威斯特铜业有限责任公司科研项目“高寒矿区边坡绿化喷播基质配制及其应用技术研究”(2641-ZC-2022-00094); 国家重点研发计划项目“煤基高分子材料及其安全修复利用技术”(2020YFC1806504-01)

第一作者: 孔令健(1999—), 男(汉族), 山东省莱州市人, 博士研究生, 研究方向为土壤改良和场地修复研究。Email: ljkong2023@163.com。

通信作者: 黄占斌(1961—), 男(汉族), 陕西省武功县人, 博士, 博士生导师, 主要从事矿区生态修复, 退化土壤改良和污染土壤治理等方面的研究。Email: zbh Huang2003@163.com。

salt content. Binder incorporation increased soil bulk density but decreased soil pore space compared to the control (CK). Long fibers and rice husk significantly decreased soil pH value, increased total porosity and field water holding capacity, and suitably increased total salt content. The optimal combination for soil aggregates and pH value was $A_2B_2C_3$ (binder 0.074 g/kg, long fiber 2.960 g/kg, rice husk 11.110 g/kg). Soil bulk density, total porosity, and field water holding capacity regulation were optimized using the combination $A_1B_2C_2$ (binder 0.037 g/kg, long fiber 2.960 g/kg, rice husk 7.410 g/kg), and the optimal combination for total salt content was $A_3B_1C_2$ (binder 0.111 g/kg, long fiber 1.480 g/kg, rice husk 7.410 g/kg). [Conclusion] The optimal formula for soil matrix restoration in the alpine mining area was obtained as $A_{1.5}B_2C_2$, that is, binder 0.056 g/kg, long fiber 2.960 g/kg, and rice husk 7.410 g/kg as the optimal ratios, which could improve the soil structure and enhances the capacity of soil and water conservation in the alpine mining area of Qinghai-Xizang region.

Keywords: alpine mining areas; orthogonal design; soil aggregates; binder; extreme difference analysis

近年来,随着矿产资源的开发利用^[1],矿区土壤遭到严重破坏,表层植被覆盖率下降,水土流失加剧,土壤肥力降低,土壤短时间难以恢复到原始状态^[2]。通过改良土壤基质,可以加速矿区土壤熟化,提高水分、养分和结构保持能力,促进生态环境修复^[3]。矿区土壤改良常采用客土法的方式进行改良,但存在着工程量大,成本较高,客土资源有限等问题^[4]。添加环境材料作为矿区生态修复的关键措施之一,在推动土壤修复方面起着核心作用。就地利用当地土壤和固体废弃物并添加环境材料改良土壤,已成为当地方便经济实用的一种矿区土壤恢复措施。

土壤改良通常集中在低海拔地区,而在高寒矿区研究较少。考虑到高寒矿区海拔高、气温低、氧气稀薄、生长条件恶劣且施工困难等问题,添加环境材料是一种替代传统土壤改良的可行选择^[5]。环境材料具有环保性、经济性和高效性的优势,黏合剂(PAM)、长纤维和稻壳作为环境材料,在土壤改良中具有重要应用前景,对提升土壤团粒结构具有积极作用^[6]。矿区边坡的生态环境严重退化,缺乏熟土层和植被覆盖,导致生态环境恶化,对周围地表植被和生态系统造成了重大破坏。因此,矿区生态治理的核心在于土层增厚和土壤结构改良,而矿山边坡治理是其中的重点和难点^[7]。

黏合剂的本质是聚丙烯酰胺,作为一种高分子聚合物在土壤中遇水形成具有稳定三维空间网状结构的胶体,改善了边坡土壤的粘结性能,提高了土壤抗侵蚀的能力。研究表明,黏合剂在改善作物的水分环境,满足其生长需求,提高产量方面发挥着重要作用。同时,它还能够改善土壤的结构,促进土壤团聚体的形成,增强土壤通气性^[8]。邵社刚等^[9]研究发现PAM处理显著增加了土壤全磷、碱解氮含量,土壤 >0.25 mm水稳性团聚体含量显著增加 20.2%~

70.6%,以 0.3%PAM 处理为最大值。国内的研究集中在如何利用当地资源,如植物纤维和工业废弃物中的纤维材料来改良土壤。刘武江等^[10]利用木纤维等天然材料,通过不同配比和处理工艺,改善土壤的理化性质和持水特性。刘新等^[11]发现施用稻壳炭可改良耕地土壤的理化性质,减少土壤中氮、磷损失,能够有效地调控农业发展。目前,这几类环境材料在土壤结构改良的单项研究有一些积累,但缺乏多种环境材料复合对土壤结构改良特别是高寒矿区的应用性研究。寻求合适的环境材料对矿区进行土壤改良从而实现植被恢复是当务之急,也是矿区生态治理的重难点。

为了改善矿区渣土的水土环境,采用正交实验设计和土壤培养实验,运用极差分析、相关性分析和中值分析,探索 3 种环境材料对土壤团粒结构改良和理化性质改善的优化组合。首次提出高寒矿山蛇纹石渣土与原土配制用于植物生长的基质配比及其改良的材料组合,为青藏高原和缺土地区的生态修复和矿区废固再生利用提出新途径。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海威斯特铜矿位于青海省果洛藏族自治州玛沁县境内($34^{\circ}23'30''N, 100^{\circ}07'30''E$)德尔尼山。该矿区所属高海拔地区,地形总体呈南北高,中间低,矿区海拔高差较大,平均海拔为 4 200 m。该地区属于典型的高原大陆性气候,四季不分明,仅有冷、暖季之别,全年气温较低,年平均气温仅有一 1.2℃。降水集中在 5—9 月,年均降雨量为 375.2 mm。该地植被类型以高寒草甸类植被为主,主要生长老芒麦(*Elymus sibiricus*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)、披碱草(*Elymus nutans*)、青海冷地草熟禾(*Poa crymophila* cv *Qinghai*)等。

1.2 试验材料

(1) 土壤。本试验于 2023 年 5 月通过五点取样法采集青海威斯特铜矿区 4290 和 4138 位点储存的蛇纹石渣土和原土并将其复合使用,两种土壤的理化性质如表 1。蛇纹石与原土按 6:4 质量比例混合后静置,经测定,复合土壤的总孔隙度为 43.61%,土壤 pH 值为 8.04,土壤容重 1.51 g/cm³,有机质含量仅 7.87 g/kg,田间持水量为 18.53%,全盐含量为 0.07%,粒径 > 0.25 mm 的水稳性团聚体含量为 69.1%,土壤结构较差。将蛇纹石进行破碎后与原土分别过 1 cm 筛网以去除其中的植物残留物和大块岩石,晾干备用。

表 1 矿区蛇纹石原土和渣土理化性质
Table 1 Physicochemical properties of raw serpentine soils and sludges from mine site

指标	蛇纹石渣土	原土
有机质/(g·kg ⁻¹)	16.54	16.36
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.09	0.83
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	22.06	143.99
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	2.22	6.41
水解性氮/(mg·kg ⁻¹)	23.35	54.87
土壤含盐量/%	0.21	0.12
总孔隙度/%	46.63	40.92
土壤田间持水量/%	22.51	26.83
pH 值	8.81	7.65
土壤容重/(g·cm ⁻³)	1.34	1.38
土壤毛管孔隙度/%	28.05	35.14
电导率/(μS·cm ⁻¹)	308.30	293.70
As/(mg·kg ⁻¹)	14.9	33.4
Hg/(mg·kg ⁻¹)	0.025	0.258
Cd/(mg·kg ⁻¹)	0.108	0.275
Cr/(mg·kg ⁻¹)	1 250	111
Pb/(mg·kg ⁻¹)	2.45	24.6

(2) 黏合剂。PAM,白色颗粒,由丙烯酸钾(阴离子单体)和丙烯酰胺(中性单体)等共聚形成的线性阴离子型聚合物;分子量为 3.00×10⁶~2.50×10⁷ Da,粒径在 0.15~2.00 mm 之间,小于 0.15 mm 不超过 6%,大于 2.00 mm 不超过 2%,市场购置。

(3) 长纤维。2~3 cm 长条状草纤维,由纤维素、半纤维素和木质素等组成,市场收购。

(4) 稻壳。长度为 1~2 cm,含有一定量纤维素、半纤维素、木质素和灰分,蛋白质和脂肪的含量很低,市场收购。

(5) 试验用水。试验室去离子水,电导率(EC)为 0.73 μS/cm,pH 值为 6.40。

1.3 试验设计

为研究环境材料对高寒矿区土壤的改良能力,将

供试土壤分别添加不同配比改良剂。选用黏合剂、长纤维和稻壳进行三因素三水平正交试验设计。PAM,长纤维和稻壳用量处理见表 2—3。将混合好的改良剂—土壤样品装盆培养,每盆 500 g,每个处理设 3 个重复,置于室内避光培养 90 d。在培养期间,定期添加蒸馏水,采用称重法保持田间持水量 80%,平均每隔 3~4 d 浇蒸馏水 1 次,保证土壤表面微微湿润即可。其间取样分析,用于分析土壤容重、土壤孔隙度、土壤团粒结构等物理指标;pH 值,EC 等化学指标,以未添加改良剂土壤作为对照(CK)。获得边坡喷播基质优化配比。

表 2 三种环境材料添加量

Table 2 Addition dosage of three environmental materials

用量水平	各因素及用量/(g·kg ⁻¹)		
	黏合剂(A)	长纤维(B)	稻壳(C)
1	0.037	1.48	3.70
2	0.074	2.96	7.41
3	0.111	4.44	11.11

表 3 正交试验各处理材料用量组合

Table 3 Material dosage of orthogonal test combinations for each treatment

编号	A/(g·kg ⁻¹)	B/(g·kg ⁻¹)	C/(g·kg ⁻¹)
CK	0.000	0.000	0.000
处理 1	A ₁ (0.037)	B ₁ (1.480)	C ₁ (3.700)
处理 2	A ₁ (0.037)	B ₂ (2.960)	C ₂ (7.410)
处理 3	A ₁ (0.037)	B ₃ (4.440)	C ₃ (11.110)
处理 4	A ₂ (0.074)	B ₁ (1.480)	C ₂ (7.410)
处理 5	A ₂ (0.074)	B ₂ (2.960)	C ₃ (11.110)
处理 6	A ₂ (0.074)	B ₃ (4.440)	C ₁ (3.700)
处理 7	A ₃ (0.111)	B ₁ (1.480)	C ₃ (11.110)
处理 8	A ₃ (0.111)	B ₂ (2.960)	C ₁ (3.700)
处理 9	A ₃ (0.111)	B ₃ (4.440)	C ₂ (7.410)

1.4 测定指标与方法

通过环刀法测定土壤的容重、孔隙度以及田间持水量等物理特性;土壤 pH 值通过电极法(水土比为 2.5:1)测定;全盐含量通过烘干称重法测定。土壤团聚体通过水稳性团聚仪测定^[12]。

1.5 数据统计分析

利用 Origin 2023 绘图,通过 one-way ANVON 分析不同环境材料添加对土壤理化性质影响;使用 Microsoft Excel 对结果分析统计,极差分析有助于量化评估环境材料对土壤性质的影响程度,皮尔逊相关性可以探究各材料与理化性质间的关系。在综合评价分析中,中值法能够平衡各种指标的影响,确定最佳解决方案。

2 结果与讨论

2.1 不同环境材料组合对矿区复合土物理性质的影响

2.1.1 土壤容重和田间持水量变化 土壤的物理性质决定它的结构,对水分、养分、气体和热量的调控至关重要,直接影响植物的生长和发育^[13]。由图 1b 可知,向土壤中添加复合环境材料,均可降低土壤容重。处理 2,处理 5 土壤容重降低明显,较 CK 降低 21.68% 和 13.29% ($p > 0.05$),其他处理整体呈先下降后略微上升趋势。长纤维和稻壳可以增加土壤的孔隙度,包括微孔和介孔。这些孔隙可以增加土壤的质地松散度,使其更易于松散开来,减少土壤颗粒之间的接触,从而降低了土壤的容重^[14]。

各处理田间持水量都较对照组升高(图 1c)。其中处理 1 田间持水量最大,较 CK 升高 29.69%;处理 7 田间持水量达到最低,仅较 CK 升高 4.07%,其中处理 1 的田间持水量达到 26.43%。处理 1—3 田间持水量降低的原因可能由于长纤维和稻壳等纤维的添加可以增加土壤的表面积,因为纤维本身具有较大的表面积,这使得水分更容易被纤维吸附和固定,减少了水分在土壤中的自由运动,降低了土壤的田间持水量^[15]。处理 7 的黏合剂和稻壳都达到最大添加量,可能改变土壤的结构和质地,使得土壤更加紧密,导致水分在土壤中的存储能力降低,从而降低了土壤的持水量^[16]。三种环境材料应用于土壤中,不仅使土壤具有丰富的孔隙结构,还可以截留降水并在干旱时缓慢释放,有助于减轻青海雨、旱季时植物的水分压力。并有效地防止强降雨引起的土壤侵蚀,同时减少了雨水径流量和泥沙流失^[17]。然而随着黏合剂的用量增加,土壤田间持水量开始降低,可见黏合剂对土壤的改良效果并非用量越多越好,过量黏合剂可能导致效果欠佳。因为黏合剂的不规则线段在土壤上下纵横交错,絮团体积逐渐增大,这样就使土壤颗粒变得紧密,孔隙减少水分无法储存在土壤中^[18]。本试验添加不同配比的土壤改良材料使得土壤持水性得到明显提高,另一原因为纤维物质(长纤维、稻壳)改变土壤结构使土壤具有提高孔隙度以及持水性的功能,再辅以黏合剂,使得土壤的容重以及田间持水量得到改善。

2.1.2 土壤总孔隙度和团聚体变化 图 1d 表示复合环境材料在培养过程中对土壤总孔隙度的影响。可以看出,处理 1、处理 2 和处理 5 土壤总孔隙度较好,处理 6,7 和 8 土壤总孔隙度较小但整体处理土壤总孔隙度都较对照组好。其中处理 2 最好,较 CK 升

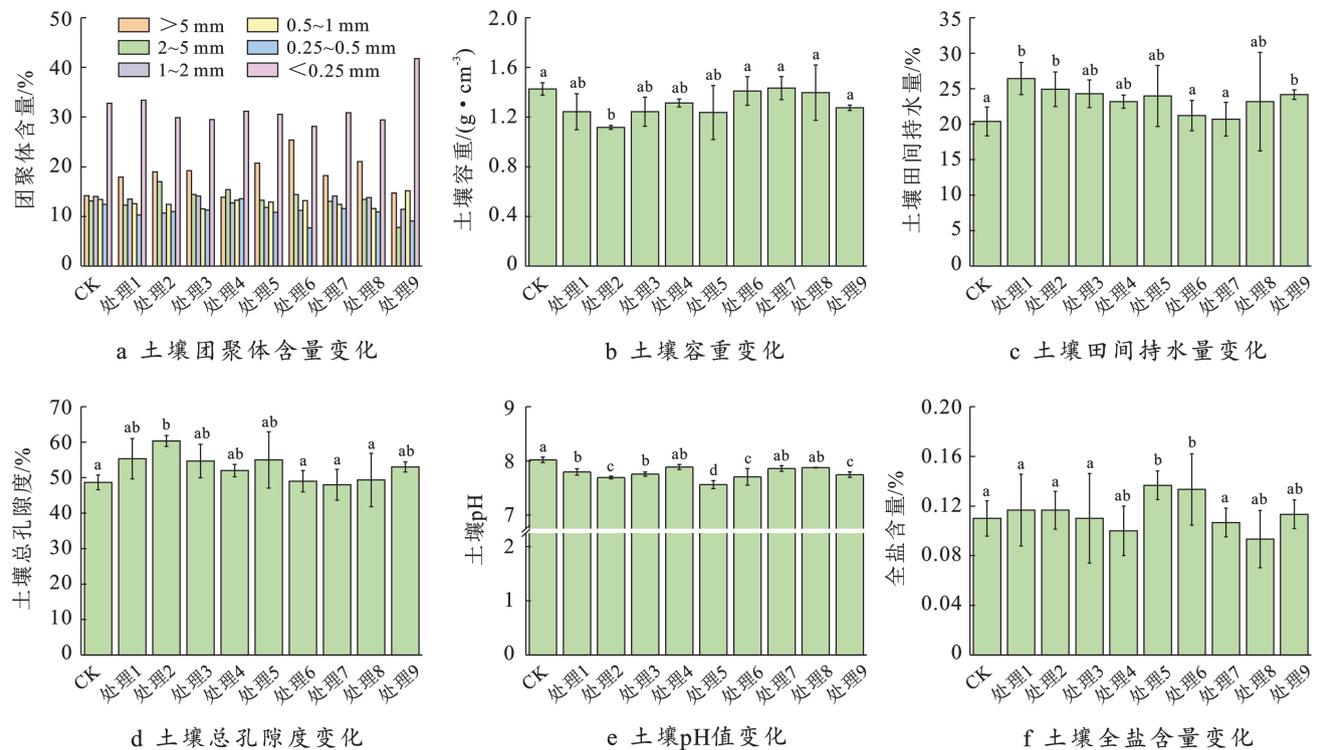
高 24.28%。处理 1—3 随着长纤维和稻壳的添加,土壤孔隙度逐渐增大。结果表明,长纤维和稻壳的添加可以改善土壤的结构,增加土壤的通透性,使水分更容易渗透到土壤深层,并有利于氧气和其他气体的交换,这进一步促进了孔隙度的增加^[19]。土壤团聚体稳定性是土壤结构的关键性指标,是土壤结构构成的基础,影响土壤的各种理化性质。团聚体的稳定性直接影响土壤表层的水、土界面行为,与降雨入渗和土壤侵蚀关系十分密切^[20]。土壤对照组土壤团聚体的含量为 67.2%(图 1a),大部分处理组的土壤团聚体含量均有不同程度的升高,其中,处理 2,处理 5 的土壤团聚体含量分别增加了 4.32%,3.3%。黏合剂和纤维能够增加土壤团粒结构的原因在于它们具有黏性和粘合力,有助于将土壤颗粒结合在一起形成更大的团粒。当遇到水中悬浮的土壤颗粒时,一个分子可以吸附多个土壤颗粒,而一个土壤颗粒又可以同多个分子吸附,使土壤形成体积很大的絮团,增加了土壤中的团聚体,形成一定数量的胶结物质,减少水与土壤的亲合力,降低土壤的分散性、增大抗蚀性,形成较好的团聚体和土壤结构。长纤维是自然界中丰富的可再生有机资源,含有 30.0% 的纤维素和 12.5% 的木质素,具备极强的抗拉伸性。将其添加到土壤中后,增加了土壤的稳定性,同时也加强了土壤团粒的结构^[16]。稻壳起到类似的作用,并进一步增强土壤团粒结构,这一点从试验结果可得到验证。综上,环境材料可以提高土壤的团粒结构。

2.1.3 土壤 pH 值和全盐含量变化 土壤 pH 值反映土壤酸碱化程度,对土壤许多化学反应和化学过程有很大影响^[21]。原土 pH 值为 8.02,属于碱性土壤。如图 1e 所示,经过土培处理,所有处理的土壤 pH 值均有一定程度降低,处理 4,处理 7—8 的降幅很小,处理 2 和处理 5 的 pH 值降低幅度较大,对比对照组分别降低了 0.33,0.46 个单位。黏合剂、长纤维和稻壳通常不会直接降低土壤的 pH 值。相反,它们对土壤的 pH 值产生影响的方式可能是通过改变土壤中的化学反应或改变土壤的生物活性。例如,可能改变土壤中微生物的活性和组成,导致一些微生物代谢产物的释放,这些代谢产物可能会影响土壤 pH 值^[22]。

土壤全盐含量是盐碱土的一个重要属性,是影响作物生长的障碍因素。原土的水溶性盐含量为 0.108%。由图 1f 可知,经过土培试验后,各处理组的全盐含量都有了提高。黏合剂和纤维通常不会直接导致土壤全盐含量的增加。相反,它们更可能通过影响土壤中水分的分布和土壤质地等因素间接影响

土壤的盐分含量。它们的存在使得水分更多地集中在土壤表层,而不是向下渗透。这可能导致土壤盐分

向表层浓缩,增加土壤的全盐含量,但适当的含盐量可以促使草种的生长从而提高植被恢复率^[13]。



注:处理 1—9 的含义见表 3;不同小写字母表示不同处理之间的差异显著($p < 0.05$)。

图 1 不同处理土壤的理化性质变化

Fig.1 Changes in physicochemical properties of soils in different treatments

2.2 不同环境材料对土壤理化性质影响因素分析

2.2.1 环境材料对土壤容重和田间持水量指标变化

经过添加 A(PAM), B(长纤维), C(稻壳)的处理,使得试验数据大部分符合预期目标。但还有组合存在土壤团聚体低、土壤容重增大,这是影响植物成苗的关键问题,因此引入极差分析,得出最优配比。不同材料配比显著改变土壤的理化性质,结果见表 4。各因素对土壤容重影响次序为: $A > C > B$, 对于降低土壤容重的优组合为 $A_1B_2C_2$, 依据如下:随着因素 A 用量的增加,土壤容重呈现出升高的趋势, A_1 的土壤容重最低,为 1.20 g/cm^3 。随着因素 B 用量的增加,土壤容重没有呈现出规律性变化, B_2 的土壤容重最低,为 1.25 g/cm^3 。随着因素 C 用量的增加,土壤容重没有呈现出规律性变化, C_2 的土壤容重最低,为 1.24 g/cm^3 。可以看出,黏合剂对土壤容重产生影响最大,长纤维对其影响最小,究其原因是黏合剂的交联作用在遇水环境会快速反应产生胶体,而长纤维和稻壳要经过微生物的自然降解等作用才能分解,作用时间较长。纤维增加了土壤的有机质含量,改善了土壤结构和孔隙度,进一步降低土壤容重^[14]。

各因素对田间持水量影响次序为: $A > C > B$, 对于提高土壤田间持水量的优组合为 $A_1B_2C_2$, 依据如下:随着因素 A 用量的增加,田间持水量呈现出降低的趋势, A_1 的田间持水量最高,为 25.22%。随着因素 B 用量的增加,田间持水量没有呈现出规律性变化, B_2 的田间持水量最高,为 24.02%。随着因素 C 用量的增加,田间持水量没有呈现出规律性变化, C_2 的田间持水量最高,为 24.09%。同样,黏合剂对田间持水量影响最大,而长纤维影响最小。若黏合剂用量过高,可能导致土壤过于密实,降低孔隙度和持水能力,因此后期应关注黏合剂的田间用量并根据情况调整。长纤维和稻壳在土壤中分解过程中,微生物的活动会消耗氧气,并可能产生一定量的有机酸或其他分解产物。这些产物可能暂时改变土壤的物理和化学性质,影响土壤的持水能力。

2.2.2 环境材料对团聚体和总孔隙度指标变化 各因素对土壤团聚体影响次序为: $A > C > B$, 对于提高土壤团聚体含量的优组合为 $A_2B_2C_3$, 依据如下:随着因素 A 用量的增加,土壤团聚体含量没有呈现出规律性变化, A_2 土壤团聚体含量最高,为 70.1%。随着

因素 B 用量的增加,土壤团聚体含量没有呈现出规律性变化, B_2 的土壤团聚体含量最高,为 70.0%。随着因素 C 用量的增加,土壤团聚体含量没有呈现出规律性变化, C_3 的土壤团聚体含量最高,为 69.7%。黏合剂对土壤团聚体的影响最大,稻壳次之,长纤维最低。黏合剂可以通过其分子间的网状结构将土壤颗粒黏结在一起,形成更稳定的土壤团聚体。这些团聚体更能抵抗水蚀和风蚀,减少土壤侵蚀。长纤维在土壤中分解时,微生物和植物根系分泌的黏性物质也会帮助土壤颗粒黏结在一起,但由于其降解速率低的原因,对形成团聚体的影响也最低^[16]。

各因素对总孔隙度影响次序为: $A > C > B$,对于提高总孔隙度的优组合为 $A_1 B_2 C_2$,依据如下:随着因素 A 用量的增加,总孔隙度呈现出降低的趋势, A_1 总孔隙度最高,为 56.9%。随着因素 B 用量的增加,总孔隙度没有呈现出规律性变化, B_2 的总孔隙度最高,为 55.1%。随着因素 C 用量的增加,总孔隙度没有呈现出规律的变化, C_2 的总孔隙度最高,为 55.3%。黏合剂的使用可以增加土壤中的孔隙,有助于提高水分和空气的渗透性。但不应过量使用,这对根系的呼吸和生长非常重要。纤维可以改善土壤结构,使得水分和空气在土壤中流动更顺畅,增强根系的生长环境^[19]。

表 4 改良渣土理化性质极差分析

Table 4 Extreme difference analysis on physicochemical properties of modified sludge

指标	土壤容重/(g·cm ⁻³)			总孔隙度/%			田间持水量/%			土壤团聚体/%			pH 值			全盐含量/%		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K1	3.60	3.99	4.05	170.8	55.3	154.2	75.65	70.31	70.82	207.1	204.5	209.1	23.25	23.54	23.38	0.344	0.322	0.344
K2	3.96	3.75	3.71	156.3	65.2	165.8	68.36	72.07	72.27	210.2	210.0	197.1	23.16	23.14	23.33	0.372	0.350	0.328
K3	4.11	3.93	3.91	151.1	57.7	158.2	68.04	69.68	68.97	197.9	200.6	209.0	23.49	23.21	23.18	0.311	0.356	0.356
k1	1.20	1.33	1.35	56.9	51.8	51.4	25.22	23.44	23.61	69.0	68.2	69.7	7.75	7.85	7.79	0.115	0.107	0.115
k2	1.32	1.25	1.24	52.1	55.1	55.3	22.79	24.02	24.09	70.1	70.0	65.7	7.72	7.71	7.78	0.124	0.117	0.109
k3	1.37	1.31	1.30	50.4	52.6	52.7	22.68	23.23	22.99	66.0	66.9	69.7	7.83	7.74	7.73	0.104	0.119	0.119
极差	0.17	0.08	0.11	6.6	3.3	3.9	2.54	0.80	1.10	4.1	3.1	4.0	0.11	0.14	0.07	0.020	0.011	0.009
主次顺序	A>C>B			A>C>B			A>C>B			A>C>B			B>A>C			A>B>C		
优水平	A ₁	B ₂	C ₂	A ₁	B ₂	C ₂	A ₁	B ₂	C ₂	A ₂	B ₂	C ₃	A ₂	B ₂	C ₃	A ₃	B ₁	C ₂
优组合	A ₁ B ₂ C ₂			A ₁ B ₂ C ₂			A ₁ B ₂ C ₂			A ₂ B ₂ C ₃			A ₂ B ₂ C ₃			A ₃ B ₁ C ₂		

注:A,B,C 分别代表黏合剂、长纤维、稻壳。

2.2.3 环境材料对 pH 值、全盐含量指标变化 各因素对土壤 pH 值影响次序为: $B > A > C$,对于降低土壤 pH 值的优组合为 $A_2 B_2 C_3$,依据如下:随着因素 A 用量的增加,pH 值没有呈现出规律性变化, A_2 的 pH 值最低,为 7.72。随着因素 B 用量的增加,pH 值没有呈现出规律性变化, B_2 的 pH 值最低,为 7.71。随着因素 C 用量的增加,pH 值呈现出降低的趋势, C_3 的 pH 值最低,为 7.73。黏合剂和长纤维等的添加可能改变土壤中微生物的活性和组成,尤其是长纤维的存在,导致一些微生物代谢产物或酶的释放,这些代谢产物可能会影响土壤 pH 值。

各因素对全盐量影响次序为: $A > B > C$,对于降低全盐量的优组合为 $A_3 B_1 C_2$,依据如下:随着因素 A 用量的增加,全盐量没有呈现出规律性变化, A_3 全盐量最低,为 0.104%。随着因素 B 用量的增加,全盐量呈现出增加的趋势, B_1 的全盐量最低,为 0.107%。随着因素 C 用量的增加,全盐量没有呈现出规律性变化, C_2 的全盐量最低,为 0.109%,均满足目标要求。黏合剂通过提高土壤的黏合强度,改善土壤的机械性

能,可能还具有吸附杂质或调节土壤内部化学反应的功能,这可能会影响到土壤中的盐分含量动态变化。通过改良土壤环境,促进植物根系的生长,增强植物对盐分的耐受性。纤维可以促进微生物的活动,进而改良土壤结构和减少盐分的负面影响,其中,稻壳作为一种天然材料,具有多孔结构,在土壤中起到填充和吸附的作用。稻壳的这种吸附能力可能影响土壤中的盐分分布^[23]。

2.3 不同复垦时间对土壤理化性质影响因素分析

为科学地评价矿区生态修复的实际效果,须对修复区域的土壤各养分指标以及土壤物理化学性质等进行连续监测。根据前期试验结果,采用配比为黏合剂 0.056 g/kg,长纤维 2.960 g/kg,稻壳 7.410 g/kg 的配方进行试验。选取 2023 年 8 月配方应用施工后 3,6 个月的样品进行修复效果分析,对比结果见表 5 所示。

运用矿区施工工艺,对边坡的施工效果进行综合评价。改良后 6 个月,土壤容重呈现下降趋势,较改良后 3 个月时降低 9.1%。说明土壤变得更加疏松,

这可能与长纤维和稻壳的添加有关,增加了土壤的孔隙度并改善通气性^[24]。土壤毛管孔隙度、总孔隙度和土壤田间持水量较改良后 3 个月时提高 41.39%, 25.35% 和 54.82%。这表明改良后土壤的结构更加有利于水分的保持和植物的呼吸生长,这可能是由于长纤维和稻壳增强了土壤的结构稳定性和保水能力。黏合剂通过填充土壤颗粒之间的空隙并在其表面形成粘性层,帮助稳定土壤结构。三种材料的混合使用有助于提高土壤的整体稳定性和抗侵蚀能力,同时还可能减少土壤容重,增加土壤的孔隙度和持水性。土壤 pH 值呈现下降的趋势,这意味着改良材料有效调节了土壤酸碱度,促进了草种在土壤中的生长环境稳定性。土壤全盐含量上升,可能是长纤维和稻壳改变土壤结构所致。需持续监测,以防盐分积累影响植物生长。土壤养分随着修复时间的增加呈现增多的趋势,其中,改良 6 个月后的有效磷、全氮、水解性氮、有机质、速效钾较改良 3 个月时升高 419.41%, 143.11%, 46.91%, 38.79% 和 252.06%。长纤维和稻壳在土壤中起到“填充物”的作用,不仅支撑土壤结构,而且它的粗糙表面有助于保水和提供微生物栖息地。稻壳缓慢分解为土壤提供了稳定的有机质,经微生物分解后转化为氮、磷等养分。黏合剂增强了土壤颗粒的黏结力,在一定程度上减少养分流失,有助于养分特别是磷的保留。此外,环境材料的分解促进微生物活性,加速有机质的矿化,释放更多养分。随着改良时间延长,有效提升了土壤肥力,改良后符合《园林绿化工程施工及验收规范》(CJJ 82—2012)。

表 5 不同时间矿区渣土改良应用效果

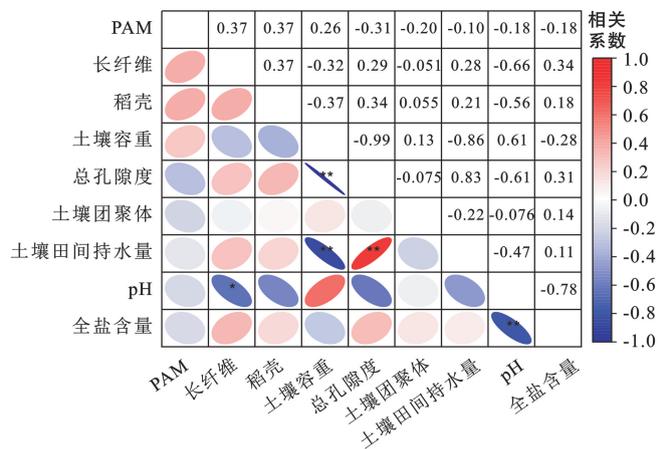
Table 5 Improvemtn effect of modified studge at different times

指标	改良 3 个月后	改良 6 个月后
土壤容重/(g·cm ⁻³)	1.32	1.20
土壤毛管孔隙度/%	32.11	45.40
总孔隙度/%	39.77	49.85
土壤田间持水量/%	24.37	37.73
pH 值	8.10	7.32
电导率/(μS·cm ⁻¹)	107.75	46.00
土壤含盐量/%	0.035	0.26
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	5.10	26.49
全氮/(mg·kg ⁻¹)	392.00	953.00
水解性氮/(mg·kg ⁻¹)	60.60	89.03
有机质/(g·kg ⁻¹)	18.20	25.26
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	49.00	172.51

2.4 环境材料对土壤理化性质影响综合评价分析

2.4.1 Pearson 相关性分析 三种环境材料与土壤性质相关性分析见图 2。发现 PAM 与土壤容重呈正相

关,与总孔隙度、土壤团聚体、土壤田间持水量、pH 值和全盐含量呈负相关,说明 PAM 有助于降低土壤 pH 值和全盐含量。长纤维与总孔隙度、土壤田间持水量和全盐含量呈正相关,与土壤容重和 pH 值呈负相关($p < 0.05$),可见其施用对土壤酸碱度和土壤容重有降低的效果。稻壳作用机理和效果与长纤维类似。研究发现,土壤容重和土壤田间持水量和总孔隙度呈显著负相关($p < 0.05$),土壤总孔隙度和土壤田间持水量呈显著正相关,全盐含量和土壤 pH 值呈显著负相关。长纤维通过形成稳定的团粒结构,减少土壤侵蚀和流失。在土壤中形成网状结构,改善通气性和透水性,特别在干旱条件下效果显著。稻壳填充土壤空隙,改良质地,使土壤松软易耕作,促进有机物和养分的均匀分布,增强根系吸收。两种纤维结合使用,综合改善土壤的物理和化学性质,提供更适宜的畜牧业土壤环境,促进牧草生长和产量。黏合剂、长纤维和稻壳共同使用也可以起到互补作用,进一步提高土壤的结构和肥力,减少盐分对土壤和植物的危害。后期应关注黏合剂的使用,不宜过多,并适当增加长纤维的用量。



注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$ 。

图 2 不同处理复合土壤的理化指标相关性变化

Fig.2 Changes in correlation of physicochemical indexes of composite soils with different treatments

2.4.2 经济性分析 经前期试验得团聚体最优组合 A₂B₂C₃ 和其他理化性质最优组合 A₁B₂C₂, 通过中值综合分析得到最终结果,即黏合剂的施用量 0.056 g/kg,长纤维的施用量 2.960 g/kg,稻壳的施用量 7.410 g/kg。其中,黏合剂 1.30 × 10⁴ 元/t,草纤维 1.50 × 10³ 元/t,稻壳 1.50 × 10³ 元/t。三种材料的总价为 4.86 元/m²,占修复单价 108 元/m² 的 4.6%,较为节约成本。虽然黏合剂价格较高,但其在土壤修复中可以有效提高土壤的粘结力,减少养分流失。平衡

高成本的黏合剂与低成本的草纤维和稻壳的使用比例,既可以保证土壤修复的效果,也可以控制整体经济成本。

3 结论

(1) 不同土壤指标的优化组合。各组合的全盐量符合要求(0.1%~0.3%),各组合的土壤 pH 值符合要求(5.6~8.5),提高田间持水量,降低土壤容重,提高土壤总孔隙度的优组合均为 A₁B₂C₂,提高土壤团聚体含量的优组合为 A₂B₂C₃,组合 A₁B₂C₂ 的土壤团聚体含量为 70.1%,比 CK 提高了 2.9%,且比组合 A₂B₂C₃ 高 0.7%,出于经济性与实用性考虑,确定优组合为 A₁B₂C₂,即:A 黏合剂 0.037 g/kg,B 长纤维 2.960 g/kg,C 稻壳 7.410 g/kg。

(2) 各因素主要贡献和作用。各因素对全盐量的影响次序一致为:A>B>C,对土壤团聚体、土壤总孔隙度、田间持水量和土壤容重影响次序一致均为:A>C>B,对土壤 pH 值影响次序为:B>A>C。可以认为,黏合剂主要作用是提高土壤团聚体、土壤孔隙度、田间持水量和土壤容重,降低土壤盐分含量。长纤维主要作用是降低土壤 pH 值和盐分含量。稻壳主要作用是提高土壤团聚体、土壤孔隙度、田间持水量和土壤容重。

(3) 利用中值综合分析,A₁B₂C₂ 和处理 A₂B₂C₃ 的处理结果最高。综合经济性认为 A_{1.5}B₂C₂ 最优,即:A 黏合剂 0.056 g/kg,B 长纤维 2.960 g/kg,C 稻壳 7.410 g/kg 为最优配比。

参考文献(References)

- [1] 沈镛.面向碳中和的中国自然资源安全保障与实现策略[J].自然资源学报,2022,37(12):3037-3048.
Shen Lei. Study on security guarantee and implementation strategy of China's natural resources towards carbon neutrality [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(12):3037-3048.
- [2] Fernández-Caliani J C, Giráldez M I, Waken W H, et al. Soil quality changes in an Iberian pyrite mine site 15 years after land reclamation [J]. Catena, 2021, 206: 105538.
- [3] 乔千洛,杨文权,赵帅,等.种草基质对木里矿区植被恢复效果的影响[J].草业科学,2022,39(9):1782-1792.
Qiao Qianluo, Yang Wenquan, Zhao Shuai, et al. Effects of grass planting substrate on vegetation restoration in the Muli mining area [J]. Pratacultural Science, 2022, 39(9):1782-1792.
- [4] 李钦韬,彭涛,杨健,等.客土改良技术在矿山废弃地生态修复中的应用[J].现代矿业,2022,38(9):210-214.
Li Qintao, Peng Tao, Yang Jian, et al. Application and research of foreign soil improvement technology in ecological reclamation of mine wasteland [J]. Modern Mining, 2022, 38(9):210-214.
- [5] 卢雁鹏.浅析矿山地质环境生态修复过程中团粒喷播技术的应用[J].中国金属通报,2023(5):129-131.
Lu Yanpeng. Analysis on the application of pellet spray seeding technology in the process of ecological restoration of mine geological environment [J]. China Metal Bulletin, 2023(5):129-131.
- [6] 陈彦昇,肖梅玲,孙凯,等.狼尾草纤维对改性红黏土混凝土力学性能影响[J].混凝土,2018(5):72-75.
Chen Yansheng, Xiao Meiling, Sun Kai, et al. Experimental research of *Pennisetum alopecuroides* fiber on mechanical properties of modified red clay concrete [J]. Concrete, 2018(5):72-75.
- [7] 陆兆华,张琳.露天煤矿排土场边坡植被恢复群落稳定性研究[J].煤炭科学技术,2024,52(1):334-344.
Lu Zhaohua, Zhang Lin. Ecological stability evaluation of revegetation community on open-pit coal mine dump slopes [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 334-344.
- [8] 冯俊义,赵萌萌,谭菁,等.四种环境材料单施对煤矿区土壤结构和性状的影响研究[J].农业资源与环境学报,2024,41(1):72-82.
Feng Junyi, Zhao Mengmeng, Tan Jing, et al. Effects of a single application of four environmental materials on soil structure and properties in a coal mining area [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(1):72-82.
- [9] 邵社刚,李婷,朱立安,等.土壤改良剂 PAM 在生土改良中的应用及效果[J].西南师范大学学报(自然科学版),2023,48(6):97-103.
Shao Shegang, Li Ting, Zhu Lian, et al. Application and effect of soil conditioner PAM in improve immature soil [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2023, 48(6):97-103.
- [10] 刘武江,段青松,杨松,等.不同改良剂对红壤土水特征曲线及吸附强度的影响[J].灌溉排水学报,2023,42(9):68-78.
Liu Wujiang, Duan Qingsong, Yang Song, et al. The effect of soil conditioners on water characteristic curves and adsorption strength of red loam soil [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9):68-78.
- [11] 刘新,赵珍,戴天磊,等.稻壳炭改良耕地土壤调控农业面源污染的应用研究[J].河南农业科学,2018,47(3):49-54.
Liu Xin, Zhao Zhen, Dai Tianlei, et al. Application of

- rice husk charcoal in cultivated soil to control agricultural non-point source pollution [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018,47(3):49-54.
- [12] 吴昊,王理德,宋达成,等.民勤退耕地不同年限退耕地土壤理化性质及酶活性[J].*干旱地区农业研究*,2021,39(1):191-199.
- Wu Hao, Wang Lide, Song Dacheng, et al. Soil properties and enzyme activities of abandoned farmland in different years in Minqin [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021,39(1):191-199.
- [13] Liu Xiaoyang, Cao Yingui, Bai Zhongke, et al. Evaluating relationships between soil chemical properties and vegetation cover at different slope aspects in a reclaimed dump [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(23):805.
- [14] 戴伟.岩石边坡生态修复技术:保水剂、粘合剂在喷混植生技术上的应用[J].*科技信息*,2012(13):45.
- Dai Wei. Ecological restoration technology of rock slope: Application of water-retaining agent and adhesive in spray-mixed planting technology [J]. *Science & Technology Information*, 2012(13):45.
- [15] 王红,张淑辉,彭福田,等.不同土壤改良剂对土壤理化性质、微生物及桃植株生长的影响[J].*山东农业科学*,2020,52(12):59-65.
- Wang Hong, Zhang Shuhui, Peng Futian, et al. Effects of different soil amendments on soil properties, microorganisms and peach plant growth [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020,52(12):59-65.
- [16] 李义强,李智,赵斌,等.多孔质混凝土植被恢复组合结构与材料性能研究[J].*材料导报*,2020,34(增刊1):199-202.
- Li Yiqiang, Li Zhi, Zhao Bin, et al. Study on composite structure and material properties of porous concrete vegetation restoration [J]. *Materials Reports*, 2020,34(Suppl.1):199-202.
- [17] 郭勇,马锐.黄石市圣水泉碎石厂矿山地质环境治理工程客土喷播绿化效果研究[J].*资源环境与工程*,2020,34(增刊1):84-89.
- Guo Yong, Ma Rui. Study on the effect of spray seeding on the guest soil in the geological environment control project of Huangshi Shengshuiquan gravel plant [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2020,34(Suppl.1):84-89.
- [18] 吕春娟,毕如田,陈卫国,等.土壤结构调理剂 PAM 对复垦铁尾矿砂物理性状的影响[J].*农业工程学报*,2017,33(6):240-245.
- Lü Chunjuan, Bi Rutian, Chen Weiguang, et al. Effect of soil structure conditioner PAM on physical properties of iron tailings in reclaiming [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017,33(6):240-245.
- [19] 黄静旭,李敏文,李知函,等.植物长纤维的提取及其在可降解复合材料中的应用[J].*复合材料学报*,2024,41(7):3335-3354.
- Huang Jingxu, Li Minwen, Li Zhihan, et al. Extraction of plant long fiber and its application in degradable composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024,41(7):3335-3354.
- [20] 李馨妤,孙东滨,张孟豪,等.不同作物种植对光伏坡地土壤团聚体稳定性与有机碳的影响[J].*农业环境科学学报*,2024,43(7):1549-1556.
- Li Xinyu, Sun Dongbin, Zhang Menghao, et al. Effects of cultivating different crops on soil aggregate stability and organic carbon content in photovoltaic slopes [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(7):1549-1556.
- [21] Gao Xiaomei, Xie Yunhu, Gao Wenbang, et al. Comprehensive evaluation of soil quality: A case study from a semi-arid area experiencing coal mine related subsidence in China [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2021,30(5):4531-4544.
- [22] Chen Jin, Mo Li, Zhang Zhechao, et al. Evaluation of the ecological restoration of a coal mine dump by exploring the characteristics of microbial communities [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020,147:103430.
- [23] Li Zhigang, Schneider R L, Morreale S J, et al. Woody organic amendments for retaining soil water, improving soil properties and enhancing plant growth in desertified soils of Ningxia, China [J]. *Geoderma*, 2018, 310:143-152.
- [24] 肖志鹏,刘勇军,郭维,等.稻壳生物炭施用方式对土壤理化特性及烤烟产质量的影响[J].*湖南农业科学*,2023(3):40-45.
- Xiao Zhipeng, Liu Yongjun, Guo Wei, et al. Effects of different application methods of rice husk biochar on soil physicochemical properties and tobacco yield and quality [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2023(3):40-45.