

DOI: 10.11686/cyxb2024154

http://cyxb.magtech.com.cn

欧翔, 连海, 陈荣强, 等. 不同施肥处理种植王草后对稀土尾矿土壤理化性质和酶活性的影响. 草业学报, 2025, 34(2): 94—108.

OU Xiang, LIAN Hai, CHEN Rong-qiang, et al. Effects of different fertilization treatments on soil physical and chemical properties and enzyme activity of rare earth mine tailings after planting king grass. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2): 94—108.

# 不同施肥处理种植王草后对稀土尾矿土壤理化性质和酶活性的影响

欧翔, 连海, 陈荣强, 邱静芸, 吴丽娟, 操贤洪, 张强, 雷小文\*

(赣州市畜牧水产研究所, 江西 赣州 341401)

**摘要:**为探究不同施肥处理对种植王草修复稀土尾矿土壤的改良效果, 设置化肥(CK)、沼液(Z)、腐熟牛粪(N)、腐熟牛粪+沼液(N+Z)、蚯蚓粪(Q)、蚯蚓粪+沼液(Q+Z)6个处理进行田间等氮量施肥试验, 分析连续3年各处理对稀土尾矿土壤理化性质、酶活性及其相互作用规律的影响。结果表明: 1) 连续3年各组土壤容重呈下降趋势, 最大持水量、毛管持水量、孔隙度、通气度、pH、有机质、氮、磷、钾、碱解氮、速效磷呈上升趋势; 在修复第3年Q+Z组对土壤容重、持水量、孔隙度、通气度、pH、速效磷、速效钾的改良效果优于其他处理。2) 连续3年N、N+Z、Q、Q+Z组土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性呈上升趋势, 第3年均显著高于CK组, 土壤脱氢酶活性仅N+Z组第1年显著高于同期CK组, 其中Q组对土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性的提升优于其他处理。3) 土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性与土壤容重呈极显著负相关, 与pH、有机质、速效养分、持水量、孔隙度、通气度呈极显著相关, 脱氢酶活性与全磷呈极显著相关, 与全钾、碱解氮、速效磷、有机质、毛管持水量、孔隙度、通气度显著相关。通过模糊数学隶属函数法进行综合评价发现, 施用蚯蚓粪+沼液处理连续3年综合排序第一, 可作为种植王草修复赣南离子型稀土尾矿土壤的最佳施肥处理。

**关键词:** 稀土尾矿; 王草; 施肥; 土壤理化性质; 土壤酶活性

## Effects of different fertilization treatments on soil physical and chemical properties and enzyme activity of rare earth mine tailings after planting king grass

OU Xiang, LIAN Hai, CHEN Rong-qiang, QIU Jing-yun, WU Li-juan, CAO Xian-hong, ZHANG Qiang, LEI Xiao-wen\*

Ganzhou Animal Husbandry and Fisheries Research Institute, Ganzhou 341401, China

**Abstract:** The aim of this study was to determine the effect of different fertilization treatments on the growth of king grass (*Pennisetum purpureum* × *Pennisetum americanum* cv. Reyan No. 4) planted as a strategy to rehabilitate soil in rare earth tailings. A field experiment was conducted with six treatments, namely chemical fertilizer (CK), biogas slurry (Z), decomposed cow dung (N), decomposed cow dung + biogas slurry (N+Z), earthworm castings (Q), and earthworm castings + biogas slurry (Q+Z). The effects of the different treatments on soil physical and chemical properties, soil enzyme activities, and the patterns of enzyme interactions were determined in three consecutive years. The results showed that: 1) In each group, the soil bulk density showed a downward trend over the three years, and the maximum moisture capacity, capillary moisture capacity, porosity, aeration, pH, and contents of

收稿日期: 2024-04-30; 改回日期: 2024-06-05

基金项目: 中央引导地方科技发展项目(20221ZDF0317)和江西省高层次高技能领军人才培养工程入选项目(赣人社发[2022]34号)资助。

作者简介: 欧翔(1993—), 男, 江西赣州人, 硕士。E-mail: ouxiang9393@126.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 343224896@qq.com

organic matter, nitrogen, phosphorus, potassium, alkaline nitrogen, and available phosphorus showed an upward trend. In the third year of restoration, the Q+Z treatment had the strongest effect to improve soil bulk density, moisture capacity, porosity, aeration, pH, and available phosphorus and available potassium contents. 2) The activities of soil urease, acid phosphatase, and sucrase showed an increasing trend in the N, N+Z, Q, and Q+Z treatments over the three years, and their values were significantly higher than those in the CK group in the third year ( $P < 0.05$ ). Soil dehydrogenase activity was significantly higher in the N+Z treatment than in CK in the first year. The activities of soil urease, acid phosphatase, and sucrase were higher in the Q treatment than in the other treatments. 3) The activities of soil urease, acid phosphatase, and sucrase showed highly significant negative correlations with soil bulk density, and highly significant positive correlations with soil pH, organic matter, available nutrients, moisture capacity, porosity, and aeration. The dehydrogenase activity showed a highly significant correlation with total phosphorus content, and significant correlations with total potassium, alkaline nitrogen, available phosphorus, and organic matter contents, and capillary moisture capacity, porosity, and aeration. Through a comprehensive evaluation using a fuzzy mathematics membership function method, it was found that the application of earthworm cast+biogas slurry was the most effective treatment to repair soil over three consecutive years. Therefore, this treatment was identified as the best fertilization treatment for cultivating king grass to repair the soil of ion-type rare earth tailings in Gannan.

**Key words:** rare earth tailings; king grass; fertilization; soil physical and chemical properties; soil enzyme activity

我国离子型稀土矿是世界主要中重稀土来源之一,其中大部分分布于江西赣州地区。因特殊的浸矿开采工艺,长时间的无序开采以及滞后的环境保护,离子型稀土尾矿土壤酸化、容重过高、肥力下降,地表植被难以建立,生态环境遭受严重破坏<sup>[1]</sup>。植物修复不仅能控制水土流失,防治土壤退化,同时还具有投资少、易管理、无二次污染、效果好等优点,是防治土壤退化最有效的措施之一<sup>[2]</sup>。王草(*Pennisetum purpureum* × *Pennisetum americanum* cv. Reyan No. 4)是禾本科狼尾草属多年生草本植物,其根系发达、抗逆性强,被广泛应用于荒山荒坡生态环境治理中<sup>[3]</sup>。研究表明,施肥可有效改良土壤,促进植物生长,缩短修复周期,而施用有机肥的效果优于化肥<sup>[4]</sup>。牛排泄物发酵产生的沼液,以及牛粪发酵或养殖蚯蚓产生的腐熟牛粪、蚯蚓粪是南方主要的有机肥之一,不仅能提升土壤肥力和有机质含量,满足作物营养需求<sup>[5-7]</sup>,同时还具有土壤修复剂的效用,可有效增强土壤微生物和酶的活性,调节土壤容重,改善持水率,减少土壤养分流失<sup>[8-10]</sup>。因此在稀土尾矿施用沼液、腐熟牛粪、蚯蚓粪等有机肥后种植王草,不仅对实现生态修复具有一定可行性,还可构建种草养牛—粪肥还田种草的循环模式,具有显著的社会和经济效益。

土壤环境质量和修复效果对植物修复效果的评价尤为重要,其对土壤的改良主要体现在土壤理化性质和土壤酶活性的改变<sup>[11]</sup>。土壤酶由土壤微生物代谢或土壤动物、植物残体分解产生<sup>[12]</sup>,其活性可以作为评价土壤环境质量和土壤修复效果的重要指标<sup>[13]</sup>。研究表明,土壤酶活性与土壤理化指标关系密切,然而不同地域、不同植被类型、不同修复处理对土壤酶活性的影响不尽相同。宋达成等<sup>[14]</sup>发现甘肃双龙沟废弃矿区人工沙棘(*Hippophae rhamnoides*)林脲酶、磷酸酶活性在造林10年间呈先下降后上升趋势,而蔗糖酶活性则随造林年限持续上升。权国玲等<sup>[15]</sup>发现河北坝上羊草(*Leymus chinensis*)草原在施用腐殖酸后土壤脲酶、蔗糖酶活性显著降低,而磷酸酶活性无显著变化。张童等<sup>[16]</sup>发现黑龙江地区森林、草原、农田10~20 cm土层土壤脲酶、蔗糖酶活性无显著差异,农田脱氢酶活性显著高于森林和草原。因此,研究赣南地区离子型稀土尾矿植物修复后酶活性对不同施肥处理的响应,对评价修复后土壤环境质量和修复效果具有重要意义。前人对稀土尾矿修复的研究多集中于修复剂筛选、修复植物与模式筛选以及不同修复模式对土壤理化性质的影响<sup>[17-19]</sup>,而针对稀土尾矿植物修复后土壤理化性质和土壤酶的变化规律鲜有报道。因此,本研究以种植王草修复稀土尾矿土壤为对象,以施用化肥为对照组,沼液、腐熟牛粪、蚯蚓粪为处理组,研究连续3年不同施肥处理下稀土尾矿土壤理化性质和酶活性的变化规律,及分析该两者的相关性,为探究赣南离子型稀土尾矿最佳的土壤修复模式提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于江西省赣州市定南县岭北镇蔡阳村稀土尾矿区(25°01'27.47" N, 115°04'47.53" E, 海拔 458 m), 具体区位见图 1。定南县稀土资源丰富, 是首批 11 个国家稀土规划矿区之一, 属中亚热带季风湿润气候区, 境内气候温和, 多年最高气温 38 °C, 年平均气温 19 °C, 无霜期 293 d, 年均日照时数为 1777.1 h, 年均降水量 1520.4 mm。试验矿区地表裸露, 几乎无植被覆盖, 土壤质地为沙质壤土, 其与尾矿周边未经破坏林地土壤的理化性质见表 1。

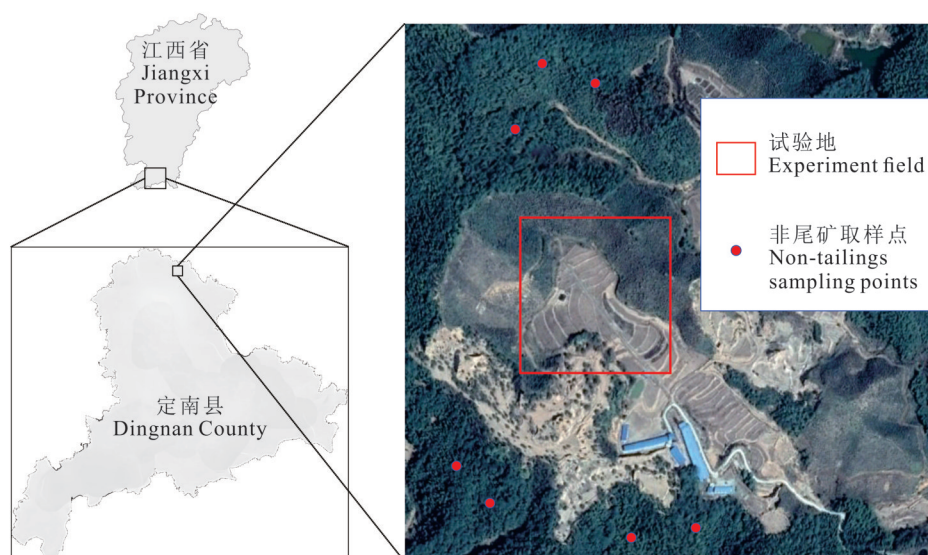


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of study area

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2019)3266 号标准地图制作, 底图边界无修改。Based on the standard map of GS (2019) 3266 of the standard map service network of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

表 1 尾矿与非尾矿土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tailings and non-tailings soil

项目 Items	尾矿土壤 Tailing soil	非尾矿土壤 Non-tailing soil
pH	4.20±0.29	5.86±0.10
有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	2.30±0.44	15.39±3.56
全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )	0.06±0.01	0.63±0.04
全磷 Total phosphorus (g·kg <sup>-1</sup> )	0.15±0.01	1.38±0.60
全钾 Total potassium (g·kg <sup>-1</sup> )	10.53±0.89	19.66±2.55
碱解氮 Alkaline nitrogen (mg·kg <sup>-1</sup> )	3.78±0.29	94.67±15.53
速效磷 Available phosphorus (mg·kg <sup>-1</sup> )	0.92±0.12	20.55±7.37
速效钾 Available potassium (mg·kg <sup>-1</sup> )	56.68±3.95	875.50±122.39
容重 Bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	1.37±0.24	1.14±0.05
最大持水量 Maximum moisture capacity (g·kg <sup>-1</sup> )	266.86±28.91	510.27±5.76
毛管持水量 Capillary moisture capacity (g·kg <sup>-1</sup> )	147.45±16.98	382.06±10.17
田间持水量 Field moisture capacity (g·kg <sup>-1</sup> )	139.71±17.46	229.80±22.97
土壤孔隙度 Soil porosity (%)	36.54±2.08	58.16±4.55
土壤通气度 Soil aeration (%)	19.76±1.39	30.16±2.09

## 1.2 试验材料

试验种植品种为‘热研4号’王草(*P. purpureum* × *P. americanum* cv. Reyan No. 4), 沼液、腐熟牛粪、蚯蚓粪由定南县鼎瑞牧业有限公司提供, 其养分含量见表2。

表2 沼液、腐熟牛粪、蚯蚓粪养分含量

Table 2 Nutrient content of biogas slurry, decomposed cow dung and earthworm cast (%)

项目 Items	沼液 Biogas slurry	腐熟牛粪 Decomposed cow dung	蚯蚓粪 Earthworm cast
水分 Water content	—	30.93 ± 2.17	50.81 ± 2.11
有机质 Organic matter	0.79 ± 0.04	47.80 ± 4.13	42.34 ± 1.10
全氮 Total nitrogen	0.62 ± 0.04	1.81 ± 0.12	1.87 ± 0.06
全磷 Total phosphorus	0.09 ± 0.01	1.54 ± 0.30	3.15 ± 0.07
全钾 Total potassium	0.08 ± 0.00	2.21 ± 0.27	2.26 ± 0.22

注: 沼液养分含量以湿重计, 腐熟牛粪、蚯蚓粪养分含量以干重计。

Note: The nutrient content of biogas slurry was calculated by wet weight, and the nutrient content of decomposed cow dung and earthworm cast is calculated on dry basis.

## 1.3 试验设计

采用田间随机区组试验设计, 设置6种施肥处理: CK(化肥)、Z(沼液)、N(腐熟牛粪)、N+Z(腐熟牛粪+沼液)、Q(蚯蚓粪)、Q+Z(蚯蚓粪+沼液), 组间缓冲带1 m, 每组5个小区, 共计30个小区, 每个小区30 m<sup>2</sup>(5 m × 6 m), 各施肥处理施氮量均为1000 kg·hm<sup>-2</sup>。根据N总量计算各有机肥施用量, CK组施用化肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O为14:16:15, 总养分≥45%), 其余组沼液、腐熟牛粪、蚯蚓粪施用量见表3。2020年5月翻耕土地, 按行株距1.0 m × 1.0 m种植王草, 所有施肥处理在种植前及每年出芽前条施基肥1次, 第1年刈割3茬, 第2、3年刈割4茬。除每年最后一茬外, 每茬刈割后均撒施追肥1次。

## 1.4 土壤样品采集

土壤样品分别于2021、2022、2023年3月(施肥前)采集, 每个小区利用5点取样法采集地下20 cm土壤样品, 每个取样点采集3个环刀原状土供物理性质测定, 在同一取样点另取土壤样品1 kg混合均匀, 剔除石块、植物残根等杂物后, 一部分原土样保存于4℃冰箱中用于土壤酶活性测定, 另一部分置于室内风干, 研磨后过2和0.25 mm筛供化学性质测定。同时另取尾矿区周边未经开发的林地地下20 cm土壤原状土用于检测非尾矿土壤理化性质。

## 1.5 测定指标与方法

土壤物理性质中, 土壤容重、最大持水量、毛管持水量、田间持水量、孔隙度、通气度, 均采用环刀法测定, 计算方法参考行业标准《森林土壤水分—物理性质的测定(LY/T 1215-1999)》<sup>[20]</sup>。

土壤化学性质检测方法参照鲍士旦<sup>[21]</sup>《土壤农化分析》, 其中土壤pH采用电位法测定, 土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定, 土壤全氮采用半微量凯式法测定, 土壤碱解氮采用碱解扩散中和滴定法测定, 土壤全磷、速效磷采用钼锑抗比色法测定, 土壤全钾、速效钾采用火焰光度计法测定。

土壤酶活性检测方法参照关松荫<sup>[22]</sup>《土壤酶及其研究方法》, 其中脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定, 酸性磷酸酶活性采用对硝基苯磷酸二钠比色法测定, 蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 脱氢酶活性采用TTC(2,3,5-氯化三苯基四氮唑)比色法测定。

## 1.6 数据分析及综合评价

利用Microsoft Excel 2013进行数据统计分析, SPSS 24.0进行单因素、双因素方差分析和显著性分析, 结果以平均值±标准差(mean±SD)表示, 折线图、柱状图通过Microsoft Excel 2013绘制, 进行Pearson相关性分析, 相关性分析图通过OriginPro 2021绘制。

采用模糊数学隶属函数法对各施肥处理的土壤修复效果进行综合评价。其中pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、最大持水量、毛管持水量、田间持水量、土壤孔隙度、土壤通气度、脲酶活性、酸性磷酸酶

活性、蔗糖酶活性、脱氢酶活性与土壤修复效果呈正相关,用公式(1)表示。容重与土壤修复效果呈负相关,用公式(2)表示。在求得各指标隶属函数值后,通过公式(3)求得各处理的隶属函数值,数值越大,表明综合修复效果越好。

$$U(X_i)=(X_i - X_{min})/(X_{max} - X_{min}) \quad (1)$$

$$U(X_i)=1 - (X_i - X_{min})/(X_{max} - X_{min}) \quad (2)$$

$$U = \frac{\sum U(X_i)}{n} \quad (3)$$

式中: $U(X_i)$ 为测定指标的隶属函数值, $U$ 为处理组隶属函数值, $X_i$ 表示该项指标的测定值, $X_{max}$ 为该项指标的最大值, $X_{min}$ 为该项指标的最小值, $n$ 表示指标数。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理对稀土尾矿土壤理化性质的影响

由表4可知,不同施肥处理组间土壤pH、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、容重、最大持水量、毛管持水量、田间持水量、孔隙度、通气度差异均极显著( $P<0.01$ )。施肥处理不同年份间土壤pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾、容重、最大持水量、毛管持水量、田间持水量、孔隙度、通气度差异均极显著( $P<0.01$ ),速效磷差异显著。在不同处理组和不同年份交互作用下,土壤pH、碱解氮、容重、最大持水量、田间持水量、通气度差异均极显著( $P<0.01$ ),土壤全氮、全钾、毛管持水量差异均显著( $P<0.05$ )。

**2.1.1 不同施肥处理对土壤容重的影响** 研究区土壤容重为  $1.37 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,属于紧实土壤( $1.35 \sim 1.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )(表1)。图2所示,在施肥并种植王草后,尾矿土壤容重呈逐年下降趋势。Q+Z、Q、N+Z组连续3年均显著低于CK组( $P<0.05$ ),N组在第1年和第3年显著低于CK组( $P<0.05$ ),其中Q+Z组连续3年均最低并达到适宜土壤级别( $1.00 \sim 1.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),Q、N+Z组在第2年达到适宜土壤级别,N组在第3年达到适宜土壤级别。

**2.1.2 不同施肥处理对土壤持水量、孔隙度和通气度的影响** 由表5可知,在种植王草并施用不同肥后,尾矿土壤最大持水量、毛管持水量、孔隙度、通气度均呈上升趋势,不同施肥处理间有较大差异。连续3年Q+Z、Q、N+Z、N组最大持水量、毛管持水量

表3 各处理施肥用量

Table 3 Fertilization amount of each treatment

施肥用量 Fertilization amount	施肥种类 Fertilization type	CK	Z	N	N+Z	Q	Q+Z
基肥用量	沼液 Biogas slurry ( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	0	161.40	0	80.70	0	80.00
Ground fertilizer amounts	腐熟牛粪 Decomposed cow dung ( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	0	0	80.00	40.00	0	0
	蚯蚓粪 Earthworm cast ( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	0	0	0	0	108.80	55.00
	氮总量 Total nitrogen ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	1000.00	1000.68	1000.13	1000.14	1000.80	1001.92
	磷总量 Total phosphorus ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	1142.86	145.26	1232.00	688.63	3427.20	1804.50
	钾总量 Total potassium ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	1071.43	129.12	1768.00	948.56	2458.88	1307.00
	单次追肥用量	沼液 Biogas slurry ( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	0	80.70	0	40.30	0
Single additional fertilizer amounts	腐熟牛粪 Decomposed cow dung ( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	0	0	40.00	20.00	0	0
	蚯蚓粪 Earthworm cast ( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	0	0	0	0	54.40	27.50
	氮总量 Total nitrogen ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	500.00	500.34	500.07	499.89	500.40	500.96
	磷总量 Total phosphorus ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	571.43	72.63	616.00	344.32	1713.60	902.25
	钾总量 Total potassium ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	535.71	64.56	884.00	474.28	1229.44	653.50

注:各处理组有机肥用量以湿重计。

Note: The amount of organic fertilizer in each treatment group was measured by wet weight.

表 4 不同施肥处理对稀土尾矿土壤理化性质的双因素方差分析结果

Table 4 Two-way analysis of variance results of different fertilization treatments on soil physical and chemical properties of rare earth tailings

土壤理化性质 Soil physical and chemical properties	组 Group		年份 Year		组×年份 Group×year	
	F	P	F	P	F	P
pH	64.07***	<0.001	45.04***	<0.001	6.04***	<0.001
有机质 Organic matter	1.93	0.114	82.23***	<0.001	1.55	0.163
全氮 Total nitrogen	7.28***	<0.001	36.18***	<0.001	2.54*	0.020
全磷 Total phosphorus	6.55***	<0.001	7.54**	0.002	0.49	0.886
全钾 Total potassium	13.96***	<0.001	101.49***	<0.001	2.34*	0.030
碱解氮 Alkaline nitrogen	47.32***	<0.001	93.26***	<0.001	9.91***	<0.001
速效磷 Available phosphorus	113.87***	<0.001	4.55*	0.017	1.85	0.087
速效钾 Available potassium	54.93***	<0.001	45.79***	<0.001	1.56	0.160
容重 Bulk density	113.02***	<0.001	62.85***	<0.001	3.29**	0.004
最大持水量 Maximum moisture capacity	153.58***	<0.001	104.89***	<0.001	3.24**	0.004
毛管持水量 Capillary moisture capacity	183.22***	<0.001	89.43***	<0.001	2.52*	0.020
田间持水量 Field moisture capacity	62.01***	<0.001	7.47**	0.002	2.97**	0.008
土壤孔隙度 Soil porosity	101.75***	<0.001	70.65***	<0.001	1.72	0.113
土壤通气度 Soil aeration	31.78***	<0.001	57.60***	<0.001	3.44**	0.003

注：\*表示 0.01<P<0.05, \*\*表示 0.001<P<0.01, \*\*\*表示 P<0.001, 下同。

Note: \* indicates 0.01<P<0.05, \*\* indicates 0.001<P<0.01, \*\*\* indicates P<0.001, the same below.

均显著高于 CK 组 ( $P<0.05$ ), 其中 Q+Z 组连续 3 年均最高, 最大持水量分别较同期 CK 组提升了 48.24%、57.32%、45.55%, 毛管持水量分别较同期 CK 组提升了 97.09%、94.79%、76.02%。除 Z 组 2022、2023 年外, 所有处理组田间持水量在各个年份均显著高于 CK 组 ( $P<0.05$ ), Q+Z 组在 2021 和 2023 年均最高, 分别较同期 CK 组提升了 54.66%、35.83%, 2022 年 Q 组最高, 较同期 CK 组提升了 25.47%。

连续 3 年 Q+Z、Q、N+Z、N 组土壤孔隙度均显著高于 CK 组 ( $P<0.05$ ), 其中 Q+Z 组 3 年均最高, 分别较同期 CK 组提升了 35.00%、40.90%、28.42%。土壤通气度 2021 年仅 Q+Z 组显著高于 CK 组 ( $P<0.05$ ), 提升幅度为 28.72%。2022 和 2023 年除 Z 组外, 其余处理组均显著高于 CK 组 ( $P<0.05$ )。两年分别为 Q+Z 组和 N+Z 组最高, 分别较同期 CK 组提升了 80.54%、40.97%。

**2.1.3 不同施肥处理对土壤 pH 的影响** 稀土尾矿区周边林地非尾矿土壤 pH 为 5.86, 属于酸性土壤, 研究区土壤 pH 为 4.20, 属于极强酸性土壤 (表 1)。如图 3 所示, 在种植王草并通过不同施肥处理后, 除 CK、Z 组外, 其他施肥处理均在不同程度上提升了土壤 pH。Q+Z 组在修复第二年时 pH 达到 5.77, 分级达到酸性土壤, 接近非尾矿区土壤 pH, 并在第 3 年仍有上升趋势, N+Z、Q 组在修复第三年时土壤 pH 超过 5.5, 分级达到酸性土壤, N 组在修复第 3 年时仍属于强酸性土壤。

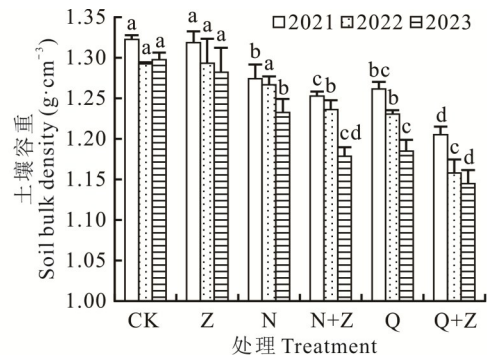


图 2 不同施肥处理对土壤容重的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on soil bulk density

CK: 化肥 Chemical fertilizer; Z: 沼液 Biogas slurry; N: 腐熟牛粪 Decomposed cow dung; N+Z: 腐熟牛粪+沼液 Decomposed cow dung + biogas slurry; Q: 蚯蚓粪 Earthworm cast; Q+Z: 蚯蚓粪+沼液 Earthworm cast+biogas slurry. 不同小写字母表示同一年份不同施肥处理间差异显著 ( $P<0.05$ ), 下同。Different lowercase letters indicated that there were significant differences among different fertilization treatments in the same year ( $P<0.05$ ). The same below.

表5 不同施肥处理对土壤持水量、孔隙度和通气度的影响

Table 5 Effects of different fertilization treatments on soil water holding capacity, porosity and aeration

处理 Treatment	年份 Year	最大持水量 Maximum moisture capacity ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	毛管持水量 Capillary moisture capacity ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	田间持水量 Field moisture capacity ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	土壤孔隙度 Soil porosity (%)	土壤通气度 Soil aeration (%)
CK	2021	293.58±11.16c	173.74±6.83c	151.69±10.16e	38.83±1.44c	18.77±2.39bc
	2022	314.73±12.06e	201.90±5.58e	180.76±9.45c	40.68±1.61d	17.32±2.79d
	2023	350.71±9.44d	233.70±11.90d	176.50±6.92d	45.50±0.92c	22.60±1.03c
Z	2021	303.31±30.89c	182.72±16.34c	167.32±3.93d	39.96±3.63c	17.90±3.71c
	2022	329.55±4.12e	214.54±3.80e	194.74±8.44bc	42.62±1.13d	17.42±0.68d
	2023	350.85±19.29d	230.88±23.06d	171.88±3.97d	44.94±1.72c	22.90±2.58c
N	2021	368.19±11.08b	261.60±15.29b	190.50±7.09c	46.90±0.80b	22.63±0.62ab
	2022	380.04±17.59d	268.13±12.50d	211.61±21.50ab	48.14±2.29c	21.35±3.80c
	2023	425.40±3.33c	317.82±4.01c	192.91±10.90c	52.37±1.16b	28.63±1.99b
N+Z	2021	389.53±9.65b	276.43±12.53b	209.69±4.22b	48.80±1.23ab	22.53±0.69ab
	2022	407.21±7.77c	286.51±8.68c	207.24±6.99ab	50.33±1.08c	24.72±0.60bc
	2023	486.18±4.01ab	365.48±6.58b	214.64±11.30b	57.05±0.56a	31.86±1.54a
Q	2021	377.05±15.09b	290.08±15.00b	219.54±7.44b	47.55±1.81b	19.87±2.15abc
	2022	432.03±7.21b	334.38±13.11b	226.80±7.39a	53.15±0.73b	25.25±0.28b
	2023	483.30±9.24b	386.12±10.46ab	224.50±4.32b	57.02±0.63a	30.53±0.65ab
Q+Z	2021	435.20±27.82a	342.42±37.15a	234.60±7.62a	52.42±2.99a	24.16±2.56a
	2022	495.12±14.27a	393.28±7.88a	225.10±12.31a	57.32±1.26a	31.27±1.13a
	2023	510.45±22.76a	411.37±28.06a	239.74±11.70a	58.43±2.36a	30.99±1.37ab

注：同列不同字母表示同一年份不同处理组间差异显著( $P<0.05$ ),下同。

Note: Different letters in the same column indicate that there are significant differences among different treatment groups in the same year ( $P<0.05$ ), the same below.

**2.1.4 不同施肥处理对土壤养分的影响** 由表6可知,土壤养分对不同施肥处理的响应有较大差异。土壤有机质含量连续3年Q+Z、Q、N+Z、N组均显著高于CK组( $P<0.05$ ),2021、2023年Q组最高,分别较同期CK组提升了493.94%、270.99%;2022年Q+Z组最高,较同期CK组提升了188.84%。

土壤全氮含量2021年各处理组均显著低于CK组( $P<0.05$ ),随后除2022年Q+Z组较CK组显著提升了33.96%( $P<0.05$ )外,2022和2023年各处理组与CK组均无显著差异( $P>0.05$ )。土壤全磷含量2021年Q、N+Z组较高,分别较同期CK组提升了80.00%、53.33%( $P<0.05$ );2022年各处理间均无显著差异( $P>0.05$ ),2023年Q+Z、Q组较高,分别较同期CK组提升了100.00%、108.00%( $P<0.05$ )。土壤全钾含量连续3年各处理组与CK组差异均不显著( $P>0.05$ )。土壤碱解氮含量2021年Q+Z、Q组显著高于CK组( $P<0.05$ ),其中Q组最高,较同期CK组提升了98.09%;2022年除Z组外,其他处理组均显著高于CK组( $P<0.05$ ),其中Q+Z组最高,较同期CK组提升了302.18%;2023年各施肥处理均显著高于CK组( $P<0.05$ ),其中N+Z组最高,较同期CK组提升了170.33%。土壤速效磷含量2021年各处理间无显著差异( $P>0.05$ ),2022和2023年除Z组外,其余处理组均显著高于CK组( $P<0.05$ ),2年分别为

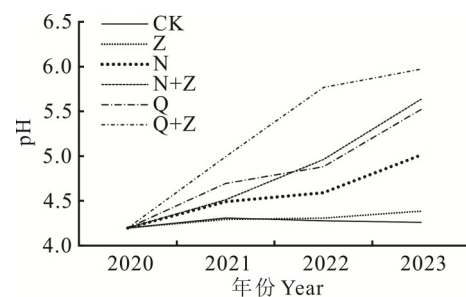


图3 不同施肥处理对土壤pH的影响

Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on soil pH

Q 组和 Q+Z 组最高, 分别较同期 CK 组提升了 290.26%、443.40%。土壤速效钾含量除 Z 组外, 其余处理组连续 3 年均显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 2021 年 Q 组最高, 较同期 CK 组提升了 354.49%; 2022 和 2023 年均为 Q+Z 组最高, 分别较同期 CK 组提升了 350.80%、320.16%。

表 6 不同施肥处理对土壤养分的影响

Table 6 Effects of different fertilization treatments on soil nutrients

处理 Treatment	年份 Year	有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total potassium (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkaline nitrogen (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available phosphorus (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available potassium (mg·kg <sup>-1</sup> )
CK	2021	2.31±0.33b	0.27±0.09a	0.15±0.03c	10.91±0.99ab	7.34±1.39b	4.28±1.90a	60.84±3.60c
	2022	7.35±1.16b	0.53±0.03b	0.17±0.01a	12.88±0.93ab	15.60±4.82b	4.93±1.42d	75.40±9.10b
	2023	6.17±1.76b	0.47±0.11a	0.25±0.07c	13.81±2.14ab	25.78±2.32c	5.00±2.00d	72.67±8.62c
Z	2021	3.00±1.75b	0.15±0.06b	0.16±0.02c	9.45±1.20b	9.67±0.83ab	5.37±1.92a	83.40±11.13c
	2022	9.65±2.91b	0.49±0.04b	0.19±0.04a	9.35±3.46b	38.51±9.98ab	6.51±1.78cd	85.54±14.82b
	2023	8.35±1.93b	0.43±0.18a	0.22±0.08c	10.49±2.49b	46.72±14.01b	8.50±1.82cd	76.33±10.69c
N	2021	13.19±1.20a	0.12±0.03b	0.19±0.04bc	11.48±2.37ab	13.01±3.07ab	7.23±1.60a	189.56±23.57b
	2022	16.07±2.38a	0.51±0.12b	0.23±0.12a	13.67±3.16ab	56.72±19.37a	12.69±2.46abc	227.37±39.49a
	2023	21.10±3.04a	0.64±0.19a	0.35±0.06bc	15.72±1.99a	66.32±10.53a	14.58±1.92bc	194.67±27.59b
N+Z	2021	11.92±1.57a	0.12±0.03b	0.23±0.07ab	12.01±1.07a	13.91±3.73ab	6.07±1.87a	242.68±23.71a
	2022	19.43±3.00a	0.58±0.09b	0.21±0.07a	15.09±1.98a	54.09±18.84a	13.92±2.40ab	272.84±37.78a
	2023	19.48±4.07a	0.63±0.15a	0.34±0.07bc	15.10±1.97a	69.69±10.76a	21.57±4.31ab	191.67±30.75b
Q	2021	13.72±1.37a	0.12±0.05b	0.27±0.03a	13.06±1.17a	14.54±4.92a	9.16±1.76a	276.51±56.17a
	2022	18.13±3.15a	0.51±0.04b	0.25±0.04a	14.85±1.52a	51.12±12.07a	19.24±2.87a	262.30±35.82a
	2023	22.89±2.13a	0.54±0.19a	0.52±0.09a	14.81±1.74a	65.52±4.41a	24.70±2.29a	275.67±9.07a
Q+Z	2021	12.15±2.54a	0.14±0.04b	0.19±0.01bc	12.95±1.53a	14.35±4.66a	8.40±2.28a	269.25±8.68a
	2022	21.23±2.45a	0.71±0.05a	0.17±0.07a	14.31±2.20a	62.74±12.01a	12.26±1.88bc	339.90±43.62a
	2023	21.70±3.50a	0.68±0.17a	0.50±0.12ab	14.78±1.82a	61.45±5.59ab	27.17±2.15a	305.33±27.79a

## 2.2 不同施肥处理对土壤酶活性的影响

由表 7 可知, 不同施肥处理间、施肥处理不同年份间、不同施肥处理和不同年份交互作用下土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性均呈极显著差异 ( $P < 0.01$ ), 土壤脱氢酶活性在不同年份间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同处理组、处理组和年份双重影响差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。

如图 4 所示, 不同施肥处理对稀土尾矿种植王草后土壤酶活性的影响有较大差异。土壤脲酶活性除 Z 组外, 其余处理组连续 3 年均呈升高趋势, 2021 年 Q+Z 组最高, 较同期 CK 组提升了 36.36% ( $P < 0.05$ ), 2022 和 2023 年除 Z 组外, 其他处理组均显著高于 CK 组, 两年均为 Q 组最高, 分别较同期 CK 组显著提升了 66.67%、100.00%。土壤酸性磷酸酶活性 2021 年 Q+Z、Q、N 组显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 2022 和 2023 年除 Z 组外其他处理组均显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 连续 3 年均均为 Q 组最高, 分别较同期 CK 组提升了 32.97%、66.73%、86.98%。土壤蔗糖酶活性 2021 年 Q+Z、Q 组分别较 CK 组显著提升了 19.70%、13.56% ( $P < 0.05$ ), 2022 和 2023 年除 Z 组外其他处理组均显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 2022 年 N+Z 组最高, 2023 年 Q 组最高, 分别较同期 CK 组提升了 52.69%、49.10%。土壤脱氢酶活性 2021 年 Q+Z、N+Z 组较 CK 组显著提升了 13.71%、14.52%, 2022 和 2023 年各处理组组间及与 CK 组均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

表7 不同施肥处理对稀土尾矿土壤酶活性的双因素方差分析

Table 7 Two-way analysis of variance of soil enzyme activity of rare earth tailings under different fertilization treatments

酶种类 Kinds of enzyme	组 Group		年份 Year		组×年份 Group×year	
	F	P	F	P	F	P
脲酶活性 Urease activity	30.76***	<0.001	48.17***	<0.001	4.57***	<0.001
酸性磷酸酶活性 Acid phosphatase activity	110.03***	<0.001	80.63***	<0.001	7.28***	<0.001
蔗糖酶活性 Sucrase activity	39.40***	<0.001	13.25***	<0.001	3.29**	0.004
脱氢酶活性 Dehydrogenase activity	1.08	0.39	3.55*	0.039	0.78	0.648

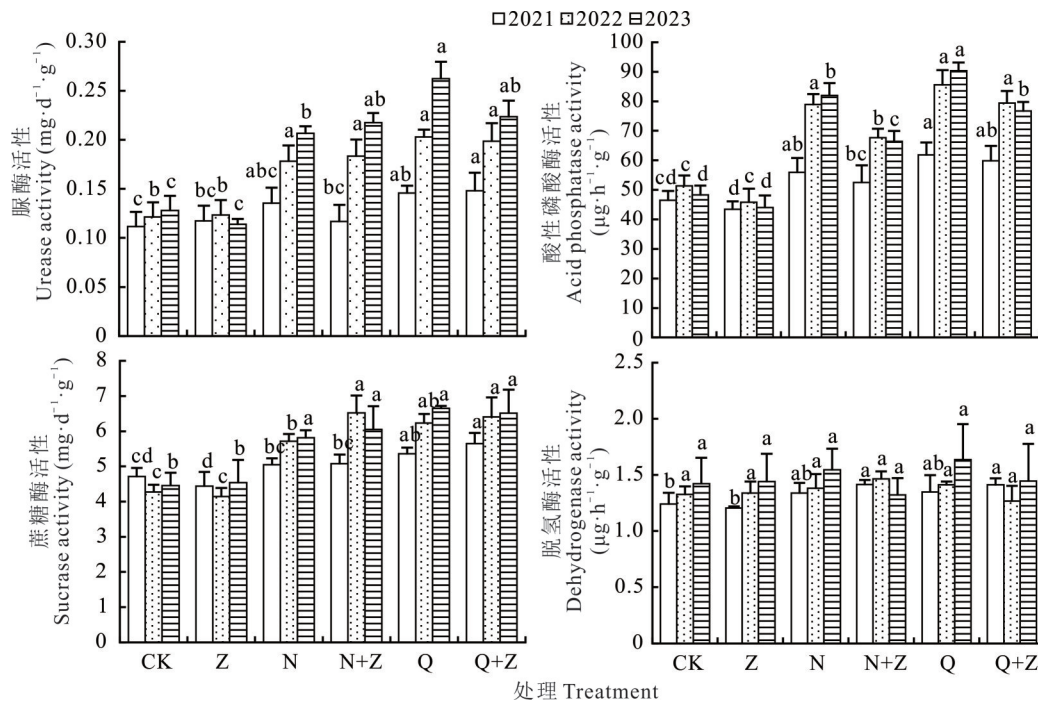


图4 不同施肥处理对稀土尾矿土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、脱氢酶活性的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization treatments on the activities of urease, acid phosphatase, sucrase and dehydrogenase in rare earth tailings soil

### 2.3 土壤酶活性与土壤理化性质的相关性分析

由图5可知,土壤容重与土壤pH、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质均呈极显著负相关,与土壤全氮呈显著负相关。土壤最大持水量与土壤pH、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质均呈极显著相关,与土壤全氮呈显著相关。土壤毛管持水量与土壤pH、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质均呈极显著相关。土壤田间持水量与土壤pH、速效磷、速效钾、有机质均呈极显著相关,与土壤全磷、全钾、碱解氮呈显著相关。土壤孔隙度与土壤pH、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质均呈极显著相关,与土壤全氮呈显著相关。土壤通气度与土壤pH、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质均呈极显著相关。

土壤脲酶活性与土壤pH、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质、最大持水量、毛管持水量、田间持水量、孔隙度、通气度均呈极显著正相关,与土壤容重呈极显著负相关。酸性磷酸酶和蔗糖酶活性与土壤pH、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质、最大持水量、毛管持水量、田间持水量、孔隙度、通气度均呈极显著正相关,与土壤全氮呈显著相关,与土壤容重呈极显著负相关。脱氢酶活性与土壤全磷呈极显著正相关,与全钾、碱解氮、速效磷、有机质、毛管持水量、孔隙度、通气度呈显著相关。

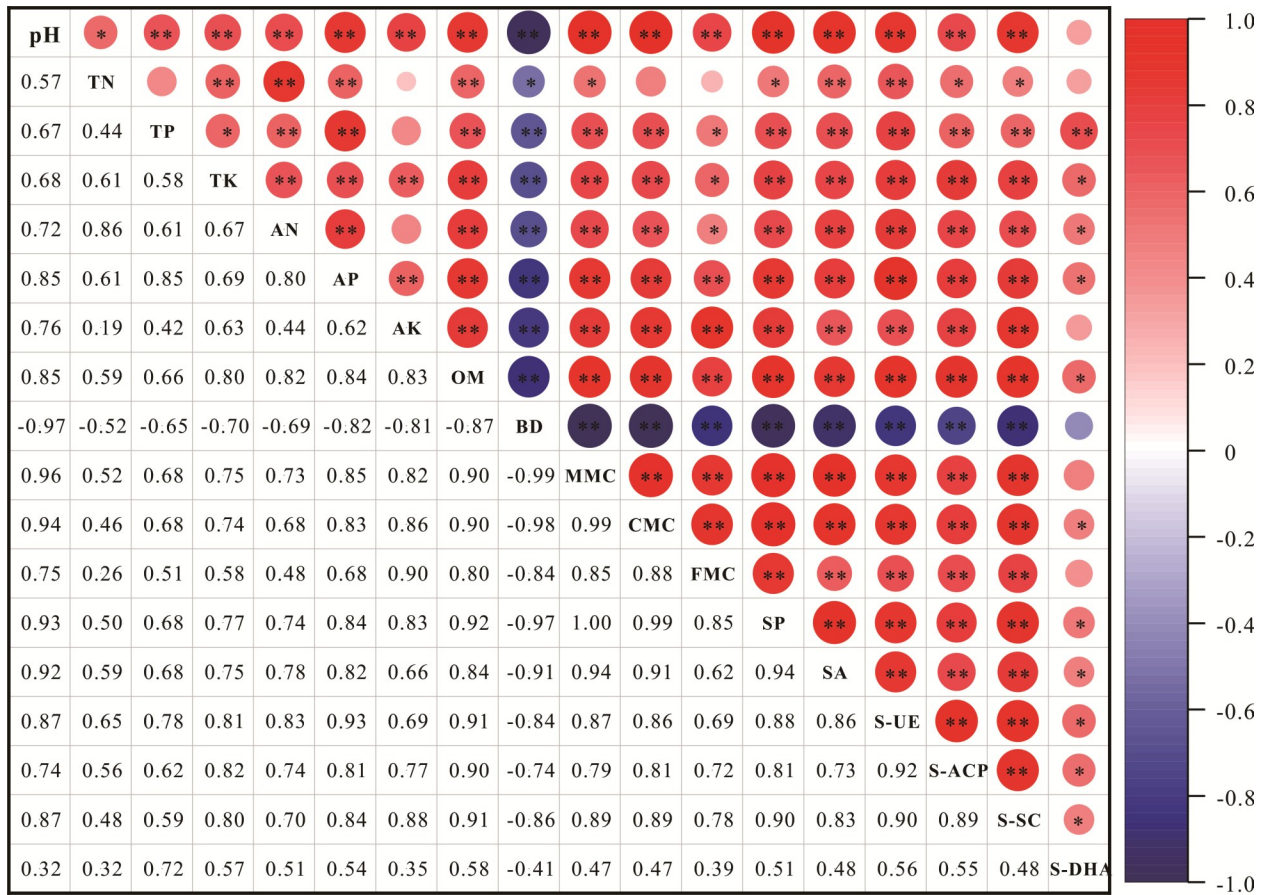


图 5 土壤酶活性与土壤理化性质的相关性

Fig. 5 Correlation between soil enzyme activity and soil physical and chemical properties

TN:全氮 Total nitrogen; TP:全磷 Total phosphorus; TK:全钾 Total potassium; AN:碱解氮 Alkaline nitrogen; AP:速效磷 Available phosphorus; AK:速效钾 Available potassium; OM:有机质 Organic matter; BD:容重 Bulk density; MMC:最大持水量 Maximum moisture capacity; CMC:毛管持水量 Capillary moisture capacity; FMC:田间持水量 Field moisture capacity; SP:土壤孔隙度 Soil porosity; SA:土壤通气度 Soil aeration; S-UE:土壤脲酶活性 Soil urease activity; S-ACP:土壤酸性磷酸酶活性 Soil acid phosphatase activity; S-SC:土壤蔗糖酶活性 Soil sucrose activity; S-DHA:土壤脱氢酶活性 Soil dehydrogenase activity. “\*\*”, “\*”分别表示在 0.01,0.05 水平上显著相关。圆形颜色深浅反映相关系数大小,数字为正代表正相关,数字为负代表负相关。“\*\*”, “\*”indicate significant correlation at 0.01,0.05 levels. The depth of the circular color reflects the size of the correlation coefficient. A positive number represents a positive correlation, and a negative number represents a negative correlation.

2.4 不同施肥处理对稀土尾矿土壤修复效果的综合评价

不同施肥处理对稀土尾矿土壤修复效果的隶属函数值见表 8,数值越大,说明该处理的土壤修复效果越好,综合 3 年土壤修复效果排序为 Q+Z>Q>N+Z>N>Z>CK, Q+Z 组连续 3 年效果均最好,隶属函数均值达 0.8751。

表 8 不同施肥处理下稀土尾矿土壤修复效果的隶属函数值

Table 8 Subordinate function values of soil remediation effect of rare earth tailings under different fertilization treatments

年份 Year	CK	Z	N	N+Z	Q	Q+Z
2021	0.1188	0.0899	0.5466	0.6075	0.7546	0.8897
2022	0.0722	0.1134	0.5238	0.6428	0.7455	0.8379
2023	0.0841	0.1065	0.6265	0.6898	0.8710	0.8976
平均值 Average	0.0917	0.1033	0.5656	0.6467	0.7904	0.8751
排序 Rank	6	5	4	3	2	1

### 3 讨论

#### 3.1 不同施肥处理对稀土尾矿土壤理化性质的影响

赣南离子型稀土矿浸矿工艺需剥离表层土壤注入酸性浸矿液,导致尾矿土壤酸化,持水量和孔隙度降低,容重增加,有机质和速效养分极度缺乏,生态系统多样性遭受严重破坏<sup>[23-24]</sup>。有机肥具有提供土壤养分、改良土壤结构的功效,施用有机肥促进地表植被恢复和重建已成为废弃矿山生态修复的有效方法<sup>[25]</sup>。本研究通过土地复垦种植王草后发现,单施蚯蚓粪、腐熟牛粪或粪肥配施沼液的效果均显著优于化肥,稀土尾矿土壤pH值升高至周边未经破坏的林地水平,容重从紧实土壤水平下降至适宜土壤水平,土壤持水量、孔隙度、通气度、有机质和速效养分均得到显著提升,土壤理化性质得到了明显改善。原因在于施肥可有效促进地表植被的构建,在每次刈割和除草后的植物组织补充了表层土壤的有机质,而腐熟牛粪和蚯蚓粪自身就含有大量有机质,在种植前和刈割后施肥可对土壤有机质进行有效补充。植物的生长可有效疏松土壤,粪肥中腐殖质能够与土壤黏粒及部分离子形成螯合物,促进土壤团聚体结构形成<sup>[26]</sup>,增强了土壤蓄水保肥能力,改善理化性质,这与前人研究结果相符<sup>[27-29]</sup>。

稀土尾矿土壤理化性质对不同施肥处理的响应有所不同。Zewide等<sup>[9]</sup>发现蚯蚓粪对酸性土壤pH和容重的改良效果优于腐熟牛粪,本研究中蚯蚓粪+沼液处理对土壤pH、容重的改良效果均优于腐熟牛粪或配施沼液处理,与前人研究结果相符。在修复第2年时蚯蚓粪+沼液处理土壤pH、容重已基本达到同一地区未经破坏的林地水平,原因可能是蚯蚓粪在腐殖化的过程中消耗酚基等基团产生了羟基<sup>[30]</sup>,牛粪转化为蚯蚓粪后显著提升了铵离子等碱性物质含量<sup>[31]</sup>,提升了土壤pH;研究发现,蚯蚓粪+沼液处理可有效促进尾矿区王草生长发育,其地上及地下生物量分别是化肥处理的5.40、25.20倍,同时也优于腐熟牛粪处理<sup>[32-33]</sup>,植株的发育提供大量凋落物补充土壤有机质,同时良好发育的植物根系具有疏松土壤的作用,可有效降低土壤容重。从不同处理对土壤养分的提升效果上看,施用粪肥优于施用沼液和化肥,而粪肥配施沼液处理与单独施用粪肥、沼液与化肥间差异不大。其原因可能是本研究中沼液有机质和氮磷钾元素的含量均较低,促进地表植被建立的效果较差,在稀土尾矿蓄水保肥能力差的沙质壤土中外源施入的养分流失严重。然而沼液相较于蚯蚓粪和腐熟牛粪加工处理更加便捷,成本更低,在达到同等养分提升效果的前提下,粪肥配施沼液的经济效益要优于单独施用粪肥。在本研究中,各处理组土壤氮、磷、钾含量第1年均较低,其中土壤全钾、速效磷含量处理组与CK组差异不显著,而全氮含量处理组显著低于CK组,究其原因在于第1年时各处理组王草长势较好,迅速吸收了土壤中的养分,而CK组王草长势较差,对土壤养分的利用较少。在第2年后,各处理组土壤氮、磷、钾含量逐步提升或基本稳定在同一水平,其原因可能是随着地表植被的建立以及后续追肥的补充,养分的循环利用逐步稳定下来。

研究表明,通过植物修复建立地表植被后,植物根系的发育可有效疏松土壤<sup>[34]</sup>,进而提升稀土尾矿土壤持水量和孔隙度<sup>[35]</sup>。本研究中,在种植王草后连续3年各施肥处理均不同程度上提升了土壤最大持水量、毛管持水量、孔隙度、通气度,与前人研究结果相似<sup>[36-37]</sup>。蚯蚓粪单施和配施沼液对提升土壤持水量和孔隙度的效果优于腐熟牛粪,其原因可能在于,蚯蚓粪不仅在促进王草生长发育的效果上优于腐熟牛粪<sup>[33]</sup>,同时经蚯蚓消解后的有机质颗粒细小、质地均匀,具有良好的通气性和保水性,可有效改善土壤结构<sup>[38]</sup>,在植物根系发育和蚯蚓粪改良的共同作用下有效提升了土壤持水量、孔隙度和通气度。

#### 3.2 不同施肥处理对稀土尾矿土壤酶活性的影响

土壤酶活性的强弱与土壤中生物代谢和物质转化速度有关,可反映土壤环境质量和土壤修复效果。脲酶能促进土壤有机氮水解为植物所需的氨态氮,可评估土壤氮素供应能力;磷酸酶能催化磷酸酯的水解及无机磷酸的释放,可评估土壤磷素供应能力;蔗糖酶可将蔗糖分子水解成易于植物吸收的葡萄糖和果糖,可评估土壤碳素供应能力;脱氢酶属于胞内酶,其活性可反映土壤微生物新陈代谢的整体活性<sup>[22]</sup>。王翔等<sup>[39]</sup>发现植被恢复可有效提升土壤酶活性,张英等<sup>[40]</sup>发现施用牛粪有机肥的土壤酶活性高于施用化肥。本研究中在单施腐熟牛粪、蚯蚓粪或配施沼液后,与施用化肥相比,连续3年种植王草均显著提升了土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性,与前人的研究结论一致。土壤中动植物和微生物的活动及残体的分解是土壤酶活性提高的重要来源之一<sup>[41]</sup>,经过3年的植物修复,稀土尾矿地表植物群落不断完善,土壤生态功能逐渐恢复,同时连续多年有机肥的施入有效改善了土壤

氮、碳、磷元素贫瘠的现状,土壤脲酶、磷酸酶、蔗糖酶活性均得以逐步提高。

不同施肥处理对土壤酶活性影响有所不同,单施蚯蚓粪对土壤脲酶和酸性磷酸酶活性的提升效果优于配施沼液和腐熟牛粪处理,原因可能是在等氮施肥条件下,蚯蚓粪用量单施高于配施沼液,而土壤脲酶、酸性磷酸酶活性随蚯蚓粪添加量的升高而升高<sup>[42]</sup>,同时有研究发现,牛粪经蚯蚓堆肥后脲酶活性显著提升<sup>[43]</sup>,蚯蚓的分泌物和排泄物也可提高磷酸酶活性<sup>[44]</sup>,施入土壤后提升了土壤脲酶、酸性磷酸酶活性。然而本研究中土壤脱氢酶活性在有机肥处理较化肥处理未有显著提升,原因可能是脱氢酶活性与土壤温度和植物生长状况相关。低温会显著降低脱氢酶活性<sup>[45]</sup>,同时植物生长缓慢的时期土壤微生物活性较弱,脱氢酶活性较低<sup>[46]</sup>。本研究土壤取样时间在3月,土温较低,植被生长缓慢,导致脱氢酶活性在有机肥处理与化肥处理间无显著差异。

### 3.3 稀土尾矿土壤理化性质和酶活性的相关性分析

本研究中,土壤容重与pH和土壤养分含量呈显著或极显著负相关,土壤持水量与pH和土壤速效养分含量呈显著或极显著相关,土壤孔隙度和通气度与pH和土壤养分含量呈显著或极显著相关。说明通过施肥处理后,土壤物理性质和化学性质的改良存在一定的相互促进作用,施肥可提升土壤养分含量,促进植物生长,加速植物群落的恢复,植物根系的发育及有机质的补充改善了土壤孔隙度和通气度,同时土壤容重、持水量、孔隙度和通气度的改善有效提升了土壤蓄水保肥能力,减少土壤养分随径流和下渗的流失。

土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性除了与特定表征的氮、磷、有机质等含量显著相关外,同时与其他土壤理化性质均呈显著或极显著相关。原因可能在于,稀土尾矿土壤理化性质、酶活性均处于较低水平,在施用有机肥种植王草后,土壤养分迅速得到补充,物理性质得到有效改善,土壤有效养分的增加,土壤结构的改善等均会对微生物群落结构产生影响,腐熟牛粪、蚯蚓粪均含有丰富的微生物,而酶活性主要来源于微生物分泌及高等植物根系分泌,从而土壤酶活性得到有效提升<sup>[47]</sup>。脱氢酶活性可反映土壤微生物活性,本研究中脱氢酶活性与全磷含量极显著相关,与全钾、碱解氮、速效磷、有机质等养分含量显著相关,这与前人研究结果一致<sup>[46]</sup>,同时也与毛管持水量、孔隙度显著相关,原因可能是土壤水分含量的提高可有效促进微生物生长,这与张童等<sup>[16]</sup>的研究结果一致。

## 4 结论

1)在稀土尾矿种植王草,通过蚯蚓粪和腐熟牛粪单施或配施沼液均可显著提升尾矿土壤pH、氮、磷、钾和速效养分含量、持水量、孔隙度、通气度、脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶活性,降低土壤容重,其中蚯蚓粪+沼液处理对土壤pH、容重、持水量、孔隙度和通气度的改良效果最好,而单施蚯蚓粪处理对土壤脲酶、酸性磷酸酶活性的提升效果更好。

2)土壤物理性质和化学性质间存在显著相关性,表明两者间存在相互促进作用,土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性与土壤理化性质显著相关,脱氢酶活性与全磷、全钾、碱解氮、速效磷、有机质、毛管持水量和孔隙度显著相关,说明土壤理化性质的改善可显著提升稀土尾矿土壤酶活性。

3)通过模糊数学隶属函数法进行综合评价发现,施用蚯蚓粪+沼液处理(基肥:蚯蚓粪 $55\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ +沼液 $80\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,追肥:蚯蚓粪 $27.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ +沼液 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )连续3年综合排序第一,可作为种植王草修复赣南离子型稀土尾矿土壤的最佳施肥处理。

## 参考文献 References:

- [1] Yu W, Feng P, Qiong W, *et al.* The effect of different remediation treatments on soil fungal communities in rare earth tailings soil. *Forests*, 2022, 13(12): 1987–1987.
- [2] Zheng X K, Feng X J, Chen Z, *et al.* Research progress on environmental problems of ionic rare earth mining and restoration of abandoned land. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(3): 681–684.  
郑先坤, 冯秀娟, 陈哲, 等. 离子型稀土矿开采环境问题及废弃地修复治理研究进展. *应用化工*, 2019, 48(3): 681–684.
- [3] Yang J, Xu X L, Liu M X, *et al.* Effects of Napier grass management on soil hydrologic functions in a karst landscape, Southwestern China. *Soil & Tillage Research*, 2016, 157: 83–92.
- [4] Lei X W, Qiu J Y, Li J J, *et al.* Effects of earthworm cast and biogas slurry treatment on planting *Pennisetum hybridum* and soil

- improvement in rare earth tailings in Gannan. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(11): 191–196.
- 雷小文, 邱静芸, 李建军, 等. 蚯蚓粪及沼液处理对赣南稀土尾矿种植皇竹草及改良土壤的影响. *江苏农业科学*, 2021, 49(11): 191–196.
- [5] Wang J Q, Gu D Y, Yu X D, *et al.* Application effects of biogas slurry partly substituting for chemical fertilizer on autumn tomato production in winter-solar greenhouse. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(1): 243–250.
- 王靖荃, 谷端银, 于晓东, 等. 沼液部分替代化肥在日光温室秋番茄上的应用效果. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 243–250.
- [6] Wang F, Li W, Liu X, *et al.* Bacteria communities of *Medicago sativa* rhizosphere soil in response to composted cow manure. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(3): 603–611.
- 王芳, 李伟, 刘鑫, 等. 紫花苜蓿根际土壤细菌群落对腐熟牛粪响应. *草地学报*, 2022, 30(3): 603–611.
- [7] Shang L R, Tong Z Y, Liu G Q, *et al.* Effects of organic fertilizer on plant species diversity and biomass of common species of *Leymus chinensis* steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(2): 344–349.
- 商丽荣, 仝宗永, 刘国庆, 等. 有机肥对羊草草原植物群落物种多样性和生物量的影响. *草地学报*, 2019, 27(2): 344–349.
- [8] Wu J C, Pan X Y, Yang Y H, *et al.* Effects of long-term application of biogas slurry on soil nutrient content and enzyme activity. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, 50(7): 76–86.
- 武继承, 潘晓莹, 杨永辉, 等. 长期施用沼液对土壤养分含量和酶活性的影响. *河南农业科学*, 2021, 50(7): 76–86.
- [9] Zewide I, Singh S, Wogi L, *et al.* Soil physico-chemical properties as affected by integrated use of blended fertilizer, cattle manure, vermicompost and mineral nitrogen and phosphorus in potato (*Solanum tuberosum*) in acidic soil of south-western Ethiopia. *Indian Journal of Agronomy*, 2021, 66(4): 474–482.
- [10] Zhao F, Zhang Y, Li Z, *et al.* Vermicompost improves microbial functions of soil with continuous tomato cropping in a greenhouse. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(1): 380–391.
- [11] Li G Q, Zhao P P, Shao W S, *et al.* Studies on the soil physical and chemical properties and enzyme activities of two fenced plant communities in desert steppe grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(7): 49–59.
- 李国旗, 赵盼盼, 邵文山, 等. 围封条件下荒漠草原两种植物群落土壤理化性状与酶活性的研究. *草业学报*, 2019, 28(7): 49–59.
- [12] Zhang D, Hou C, Ma W M, *et al.* Study on soil enzyme activities under shrub encroachment gradients in alpine grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(9): 79–92.
- 张东, 侯晨, 马文明, 等. 高寒草地不同灌丛化梯度下土壤酶活性研究. *草业学报*, 2023, 32(9): 79–92.
- [13] Banerjee S, Bora S, Thrall P H, *et al.* Soil C and N as causal factors of spatial variation in extracellular enzyme activity across grassland-woodland ecotones. *Applied Soil Ecology*, 2016, 105: 1–8.
- [14] Song D C, Wu H, Wang L D, *et al.* Distribution of heavy metals and their effects on enzymatic activity in soil of artificial *Hippophae rhamnoides* forests of different ages near abandoned mines in Shuanglonggou. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(8): 61–70.
- 宋达成, 吴昊, 王理德, 等. 双龙沟废弃矿区不同造林年限人工沙棘林土壤重金属分布特征及其对酶活性的影响. *草业学报*, 2023, 32(8): 61–70.
- [15] Quan G L, Xie K Y, Tong Z Y, *et al.* The effect of compound bio-fertilizers on soil physical and chemical properties and soil enzyme activity in *Leymus chinensis* steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(2): 27–36.
- 权国玲, 谢开云, 仝宗永, 等. 复合微生物肥料对羊草草原土壤理化性质及酶活性的影响. *草业学报*, 2016, 25(2): 27–36.
- [16] Zhang T, Liu Y F, Sui X, *et al.* Land use patterns effects on soil physical and chemical properties and enzyme activities in the Western Heilongjiang. *Journal of Agriculture*, 2021, 11(5): 33–41.
- 张童, 刘宇飞, 隋心, 等. 土地利用方式对黑龙江西部地区土壤理化性质和酶活性的影响. *农学学报*, 2021, 11(5): 33–41.
- [17] He Y Z, Tian Z Y, Ma R, *et al.* Response of super-absorbent polymers to dry-wet cycle and effect on soil moisture in rare earth tailing area. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(1): 210–219.
- 贺燕子, 田芷源, 马瑞, 等. 保水剂对干湿循环的响应及对稀土尾砂土壤水分状况的影响. *江西农业大学学报*, 2023, 45(1): 210–219.
- [18] Shen F X, Zheng T H, Duan J, *et al.* Feasibility on artificial cultivation of bryophytes in rare earth tailings in Southern Jiangxi. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(4): 136–144.
- 沈发兴, 郑太辉, 段剑, 等. 赣南稀土尾矿人工培育苔藓植物的可行性. *中国水土保持科学*, 2022, 20(4): 136–144.

- [19] Dai W J, Liu R L, Yang F, *et al.* Denitrifying bacteria agent together with composite materials enhanced soil chemical properties and denitrifying functions in rare earth tailings: A field study. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 448: 130913–130913.
- [20] Zhang W R, Yang G Y, Tu X N, *et al.* Determination of forest soil water-physical properties, LY/T 1215-1999. 张万儒, 杨光滢, 屠星南, 等. 森林土壤水分—物理性质的测定, LY/T 1215-1999.
- [21] Bao S D. *Soil agrochemical analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2005. 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [22] Guan S Y. *Soil enzymes and their research methods*. Beijing: Agricultural Press, 1986. 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [23] Chen M, Zhang D C, Zhu Q J, *et al.* Ionic rare earth mine of abandoned land of ecological restoration of research progress. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2017, 35(4): 461–468. 陈敏, 张大超, 朱清江, 等. 离子型稀土矿山废弃地生态修复研究进展. *中国稀土学报*, 2017, 35(4): 461–468.
- [24] Luo J, Zhang Q, Luo M M, *et al.* Degradation characteristics of soil in different functional areas of an ion-type rare earth mine. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2022, 40(2): 329–338. 罗杰, 张崧, 罗密密, 等. 某离子型稀土矿不同功能区土壤退化特征. *中国稀土学报*, 2022, 40(2): 329–338.
- [25] Shan D, Guo J Y, Rong H, *et al.* Effect and evaluation of fertilization on soil quality in metal tailing pond in arid and semi-arid steppe regions. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(3): 208–217. 珊丹, 郭建英, 荣浩, 等. 施肥对于旱半干旱草原区金属矿山尾矿库土壤质量的影响及其评价. *安全与环境工程*, 2022, 29(3): 208–217.
- [26] Huang X R, Li H, Li S, *et al.* Role of cationic polarization in humus-increased soil aggregate stability. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(3): 341–350.
- [27] Zhou C Y, Zhang Q, Zhao X M, *et al.* Soil quality changes of rare earth tailings before and after reclamation in South Jiangxi Province, China. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1): 89–95. 周彩云, 张崧, 赵小敏, 等. 赣南某原地浸析稀土尾矿复垦前后土壤质量变化. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(1): 89–95.
- [28] Yang Q, Zhao L, Hou H, *et al.* Effect of soil ameliorants on abandoned rare mine tailing in Jiangxi province. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(2): 211–214. 杨侨, 赵龙, 侯红, 等. 土壤改良剂对赣南废弃稀土尾矿的改良效应. *应用化工*, 2018, 47(2): 211–214.
- [29] Chen L M, Chen S S, Zhang Y, *et al.* Co-occurrence network of microbial communities affected by application of anaerobic fermentation residues during phytoremediation of ionic rare earth tailings area. *Science of the Total Environment*, 2022, 856(2): 159223–159223.
- [30] Wang F L, Wang X X, Song N N. Biochar and vermicompost improve the soil properties and the yield and quality of cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in plastic shed soil continuously cropped for different years. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 315: 107425.
- [31] Kurovsky A, Kornievskaya E, Gummer Y, *et al.* The balance of nitrogen forms and number of microorganisms of the nitrogen cycle in vermicomposts based on leaf litter and cow manure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 935(1): 012002.
- [32] Qiu J Y, Lei X W, Lian H, *et al.* Response of imperatoria yield and root growth to fertilizations in rare earth tailings. *Chinese Journal of Ecology*, 1–12[2024-04-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20240108.1127.002.html>. 邱静芸, 雷小文, 连海, 等. 稀土尾矿王草产量和根系生长对施肥的响应. *生态学杂志*, 1–12[2024-04-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20240108.1127.002.html>.
- [33] Ou X, Lei X W, Chen R Q, *et al.* Effects of fertilization treatments on agronomic traits, yield and quality of king grass in rare earth tailings. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(10): 3185–3193. 欧翔, 雷小文, 陈荣强, 等. 施肥处理对稀土尾矿王草农艺性状、产量及品质的影响. *草地学报*, 2023, 31(10): 3185–3193.
- [34] Guo X, Gao Y, Zhang C, *et al.* Effects of different vegetation restoration types on soil physical and chemical properties of abandoned land in coal logistics park. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 67–73. 郭鑫, 高永, 张超, 等. 不同植被恢复类型对煤炭物流园区废弃地土壤理化性质的影响. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 67–73.

- [35] Chen T, Qu N, Wang J, *et al.* Effects of different ecological restoration methods on the soil physicochemical properties and vegetation community characteristics of the Baotou light rare earth tailings pond in Inner Mongolia, China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2024, 31(13): 19725–19737.
- [36] Wu J F, Wei X J, Lu Z H, *et al.* A study of the effects of soil conditioner and *Pennisetum alopecuroides* on repair on tailings soil in abandoned rare earth mining area. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2019, 41(6): 1222–1226.  
吴建富, 魏雪娇, 卢志红, 等. 土壤调理剂与狼尾草联合修复废弃稀土矿区尾砂土壤研究. *江西农业大学学报*, 2019, 41(6): 1222–1226.
- [37] Zhu W T. Study on the stability and hydraulic characteristics of ionic rare earth tailings aggregates under the action of vegetation roots. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.  
朱文韬. 植被根系作用下离子型稀土尾矿团聚体稳定性及水力特性研究. 赣州: 江西理工大学, 2022.
- [38] Wang Z H, Shen D K, Shen F, *et al.* Kinetics, equilibrium and thermodynamics studies on biosorption of Rhodamine B from aqueous solution by earthworm manure derived biochar. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 120: 104–114.
- [39] Wang X, Li J C, Yue J Y, *et al.* Comparison of soil fertility among open-pit mine reclaimed lands in Antaibao regenerated with different vegetation types. *Environmental Science*, 2013, 34(9): 3601–3606.  
王翔, 李晋川, 岳建英, 等. 安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较. *环境科学*, 2013, 34(9): 3601–3606.
- [40] Zhang Y, Wu S X, Lei Q L, *et al.* Effects of different manures on soil enzyme activity and microbial community. *Soils*, 2022, 54(6): 1175–1184.  
张英, 武淑霞, 雷秋良, 等. 不同类型粪肥还田对土壤酶活性及微生物群落的影响. *土壤*, 2022, 54(6): 1175–1184.
- [41] Qi L, Li Y L, Zhao W, *et al.* Effect of *Avena sativa* L. on soil enzyme activity and microbe functional diversity under strontium pollution. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(13): 4888–4896.  
齐琳, 李艳玲, 赵威, 等. 锶污染下燕麦对土壤酶活性和微生物群落功能多样性的影响. *生态学报*, 2018, 38(13): 4888–4896.
- [42] Chen X J, Shen P F, Chen B Y, *et al.* Effects of different vermicompost additions on microorganisms and enzyme activities in red soil. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(11): 443–445.  
陈小锦, 沈鹏飞, 陈博阳, 等. 不同蚓粪添加量对红壤微生物及酶活性的影响. *江苏农业科学*, 2016, 44(11): 443–445.
- [43] Kumar R P, Denish B, Kumar K M, *et al.* Juxtaposing the quality of compost and vermicompost produced from organic waste amended with cow dung. *Environmental Research*, 2022, 214(4): 114119–114119.
- [44] Hoang T D, Razavi S B, Kuzyakov Y, *et al.* Earthworm burrows: kinetics and spatial distribution of enzymes of C-, N- and P- cycles. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 99: 94–103.
- [45] Subhani A, Liao M, Huang C Y, *et al.* Effects of some management practices on electron transport system (ETS) activity in paddy soil. *Pedosphere*, 2000, 10(3): 257–264.
- [46] Zhou D X, Li X, Ning Y C, *et al.* Effect of chemical fertilizer combined with vermicompost on soil characters and enzyme activity in paddy fields. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2021, 52(2): 25–35.  
周东兴, 李欣, 宁玉翠, 等. 蚯蚓粪配施化肥对稻田土壤性状和酶活的影响. *东北农业大学学报*, 2021, 52(2): 25–35.
- [47] Pathan S I, Ceccherini M T, Pietramellara G, *et al.* Enzyme activity and microbial community structure in the rhizosphere of two maize lines differing in N use efficiency. *Plant and Soil*, 2015, 387(1/2): 413–424.