

杨 丹,杨 智,朱光旭,等. 黔西南不同程度石漠化土壤养分及微生物特征[J]. 江苏农业科学,2022,50(13):256-264.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.13.038

# 黔西南不同程度石漠化土壤养分及微生物特征

杨 丹,杨 智,朱光旭,文双喜,李 冕

(贵阳学院生物与环境工程学院,贵州贵阳 550005)

**摘要:**为了解石漠化土壤质量状况,以贵州典型喀斯特地区不同等级石漠化土壤为研究对象,运用野外定点采样和实验室测定方法,分析不同程度石漠化土壤养分含量、微生物数量及微生物生物量含量特征,探讨不同等级石漠化土壤质量的变化规律。结果表明,随石漠化程度的增加,与无明显石漠化土壤相比,土壤微生物生物量碳和生物量氮分别降低 18.53%~31.10%、21.67%~33.93%;细菌数量降低了 36.11%~90.63%,真菌数量降低了 72.59%~89.85%,放线菌数量降低了 26.38%~93.62%。土壤微生物生物量、数量与土壤养分含量之间具有较强的相关性关系;4 个土壤样本中检测到的细菌共 2 884 个属,真菌共 2 059 个属,石漠化土壤中细菌和真菌种类显著减少。玫瑰弯菌属(*Roseiflexus*)和漆斑菌(*Myrothecium*)只在 3 种石漠化土壤样本中检测到,蓝藻纲未明确属(*norank\_c\_Cyanobacteria*)和柱锈耳属(*Eocronartium*)只在重度石漠化土壤中检测到。因此,土壤微生物量、微生物数量及群落组成可用来指示不同等级石漠化土壤质量。

**关键词:**喀斯特;石漠化;微生物生物量碳氮;群落结构;土壤质量

**中图分类号:**S156 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)13-0256-09

石漠化是指喀斯特地区由于脆弱的地质环境

条件及人类活动的干扰,水土流失严重,导致土壤损失和地表植被减少,地表基岩裸露,呈现出类似荒漠化的土地退化现象<sup>[1-2]</sup>。根据植被覆盖度、基岩裸露度等,石漠化等级通常分为轻度、中度、重度<sup>[3-4]</sup>。石漠化程度越高,土壤流失越严重,植物生长及生物量积累受抑制程度越高,植物数量、种类及植被覆盖度越低<sup>[5-7]</sup>。石漠化也导致土壤微生物发生显著变化,随石漠化等级提高,土壤细菌多样性逐渐降低,真菌数量及其生物多样性在不同等级

收稿日期:2021-08-10

基金项目:国家自然科学基金(编号:31600442);贵州省教育厅科技拔尖人才支持计划[编号:黔教合 KY 字(2018)063];贵州省高层次创新型人才贵阳市培养对象支持项目;贵阳学院引进人才科研启动项目。

作者简介:杨 丹(1982—),女,贵州兴义人,博士,副教授,从事土壤环境质量评价与污染防治研究。E-mail:yangdansk@163.com。

通信作者:李 冕,硕士,副教授,从事环境污染防治与生态修复研究。E-mail:limian198772@163.com。

[14]张 木,唐拴虎,张发宝,等. 60 天释放期缓释尿素可实现早稻和晚稻的一次性基施[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(1):119-127.

[15]Wang S Q, Zhao X, Xing G X, et al. Improving grain yield and reducing N loss using polymer-coated urea in southeast China[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(3):1103-1115.

[16]魏海燕,李宏亮,程金秋,等. 缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J]. 作物学报,2017,43(5):730-740.

[17]曹 丹,宗良纲,肖 峻,等. 生物肥对有机黄瓜生长及土壤生物学特性的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(10):2587-2592.

[18]邓先亮,屠 晓,李军,等. 缓控释肥一次性基施对小麦产量及其形成的影响[J]. 中国土壤与肥料,2019(3):87-93.

[19]侯红乾,黄永兰,冀建华,等. 缓/控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国水稻科学,2016,30(4):389-396.

[20]袁英英,李敏清,胡 伟,等. 生物有机肥对番茄青枯病的防效及对土壤微生物的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(7):

1344-1350.

[21]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000:1-495.

[22]关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986:274-339.

[23]刘亚军,马 琨,李越,等. 马铃薯间作栽培对土壤微生物群落结构与功能的影响[J]. 核农学报,2018,32(6):1186-1194.

[24]罗 影. 不同种植模式对胡麻田土壤酶活性和土壤微生物群落结构及多样性的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2016:5-6.

[25]张小莉,孟 琳,王秋君,等. 不同有机无机复混肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(3):624-630.

[26]高菊生,黄 晶,董春华,等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报,2014,51(2):314-324.

[27]汤桂容,周 旋,田 昌,等. 有机无机氮肥配施对典型菜地土壤微生物和酶活性的影响[J]. 华北农学报,2017,32(4):129-136.

石漠化土壤中差异显著<sup>[2,8]</sup>。石漠化导致土壤资源减少及有机质、氮、磷、钾等养分含量降低,土壤质量恶化,土地生产力下降,严重影响当地农业生产,阻碍社会经济的可持续发展<sup>[9-11]</sup>。因此,喀斯特地区石漠化治理受到各级政府相关部门和学术界的高度重视<sup>[12-14]</sup>。

贵州省是喀斯特地貌较集中地区,也是我国石漠化最严重的省份之一,石漠化的治理是当地社会经济发展的迫切需要,而土壤质量调查与评估是开展石漠化治理的首要工作。土壤微生物数量及组成不仅反映了土壤质量的变化,也体现土壤生物活性,土壤微生物群落的丰度和结构变化特征可反映土壤质量的变化情况<sup>[15-16]</sup>。土壤微生物生物量碳、氮含量的高低是衡量土壤肥力的重要指标,可指示土壤质量与退化程度;细菌、真菌、放线菌是土壤微生物的主要类群,研究其数量对石漠化治理过程中掌握土壤质量状况具有重要意义<sup>[17]</sup>。

目前,针对喀斯特石漠化地区土壤质量的相关研究主要集中在石漠化成因分析、石漠化地区土壤理化性质及植物多样性、石漠化治理模式下的土壤理化性质及其相关性分析等<sup>[5,18-20]</sup>,而对不同程度石漠化区土壤微生物特性的研究相对较少,尤其是针对不同程度石漠化土壤微生物生物量及微生物群落组成的研究鲜见报道。因此,本研究以贵州西南典型喀斯特地区不同等级石漠化土壤为研究对象,通过分析不同程度石漠化土壤养分特征、微生物生物量,细菌、真菌、放线菌的数量,以及细菌、真

菌的群落组成,探讨不同等级石漠化对土壤性质的影响,以期为石漠化治理过程中土壤质量改善措施的制定提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于贵州省兴仁市郊,该地常年平均气温约为 15.2℃,年平均降水量为 1 315 mm,平均海拔为 1 359 m,土壤类型主要为黄壤土,主要植被有马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)为主的针叶林,零星分布的栎子青冈(*Cyclobalanopsis blakei*)、黄皮树(*Phellodendron chinense* Schneid.)、油桐(*Vernicia fordii*)乔木林,以铁线莲(*Clematis uncinata*)、忍冬(*Lonicera japonica* Thunb.)、刺梨(*Rosa roxburghii*)为主的藤刺灌丛,以及以牛蒡(*Arctium lappa* L.)、青蒿(*Artemisia caruifolia*)、狗牙根[*Cynodon dactylon* (L.) Pers.]为主的草本植物。

### 1.2 样品采集

参考熊康宁对喀斯特石漠化程度的分级标准<sup>[3]</sup>,分别对代表轻度石漠化(LRD)、中度石漠化(MRD)、重度石漠化(SRD)程度的土壤进行采样,选取未见明显石漠化特征的土壤(NRD)为对照(表 1)。每种等级选择 3 个具有代表性的样地,样方面积约 10 m×10 m,按照五点法采样,每个样方内采集的表层土壤样品混合后以四分法取 1 kg 左右,共 12 个样品。采样时间为 2017 年 8 月,采样深度为 0~20 cm。

表 1 样地基本信息<sup>[21]</sup>

石漠化程度分级	地理位置	平均海拔 (m)	坡度 (°)	基岩裸露度 (%)	植被覆盖度 (%)	土壤深度 (cm)
无明显石漠化(NRD)	25°44′11″N,105°18′26″E	1 087	10~15	10~15	80~85	40~70
轻度石漠化(LRD)	25°44′49″N,105°19′01″E	1 191	15~20	35~45	50~60	20~40
中度石漠化(MRD)	25°45′24″N,105°19′55″E	1 300	15~20	50~65	30~45	20~30
重度石漠化(SRD)	26°07′09″N,105°46′38″E	1 296	20~25	75~85	10~20	10~20

### 1.3 样品的处理与分析

采回的样品去除石砾、根系后,一部分过 2 mm 筛后保存在 4℃冰箱,用于测定微生物生物量碳含量、微生物生物量氮含量、细菌数量、真菌数量及群落结构分析,另一部分风干后用于养分含量测定。

采用氯仿熏蒸—重铬酸钾法测定微生物生物量碳含量<sup>[22]</sup>,采用氯仿熏蒸—硫酸钾提取—凯氏定氮法测定微生物生物量氮含量<sup>[23]</sup>。土壤微生物数

量采用培养基培养后计算菌落数:细菌采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基培养,真菌采用马丁—孟加拉红琼脂培养基培养,放线菌采用改良高氏 1 号琼脂培养基培养<sup>[24]</sup>。微生物菌落数计算公式如下:

$$\text{菌落数}(\text{CFU/g}) = M \times D \div m。$$

式中:  $M$  表示菌落平均数;  $D$  表示稀释倍数;  $m$  表示烘干土壤质量。

土壤细菌群落结构分析采用 Ezup 柱式土壤基

因组 DNA 试剂盒提取土壤总 DNA,利用因美纳(中国)科学器材有限公司 MiSeq 2000™ 测序仪进行高通量测序。

采用电位法测定样品 pH 值;采用重铬酸钾法测定有机质含量;采用凯氏定氮法测定全氮含量;采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定全磷含量;采用氢氧化钠碱熔-火焰光度法测定全钾含量;采用碱解扩散法测定碱解氮含量;采用  $\text{NaHCO}_3$  浸提-钼锑抗比色法测定速效磷含量;采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定速效钾含量<sup>[25]</sup>。

#### 1.4 数据处理

利用 SPSS 22.0 软件对试验结果进行单因素方差分析(one-way ANOVA),同时进行双尾显著性检验( $\alpha=0.05$ )。

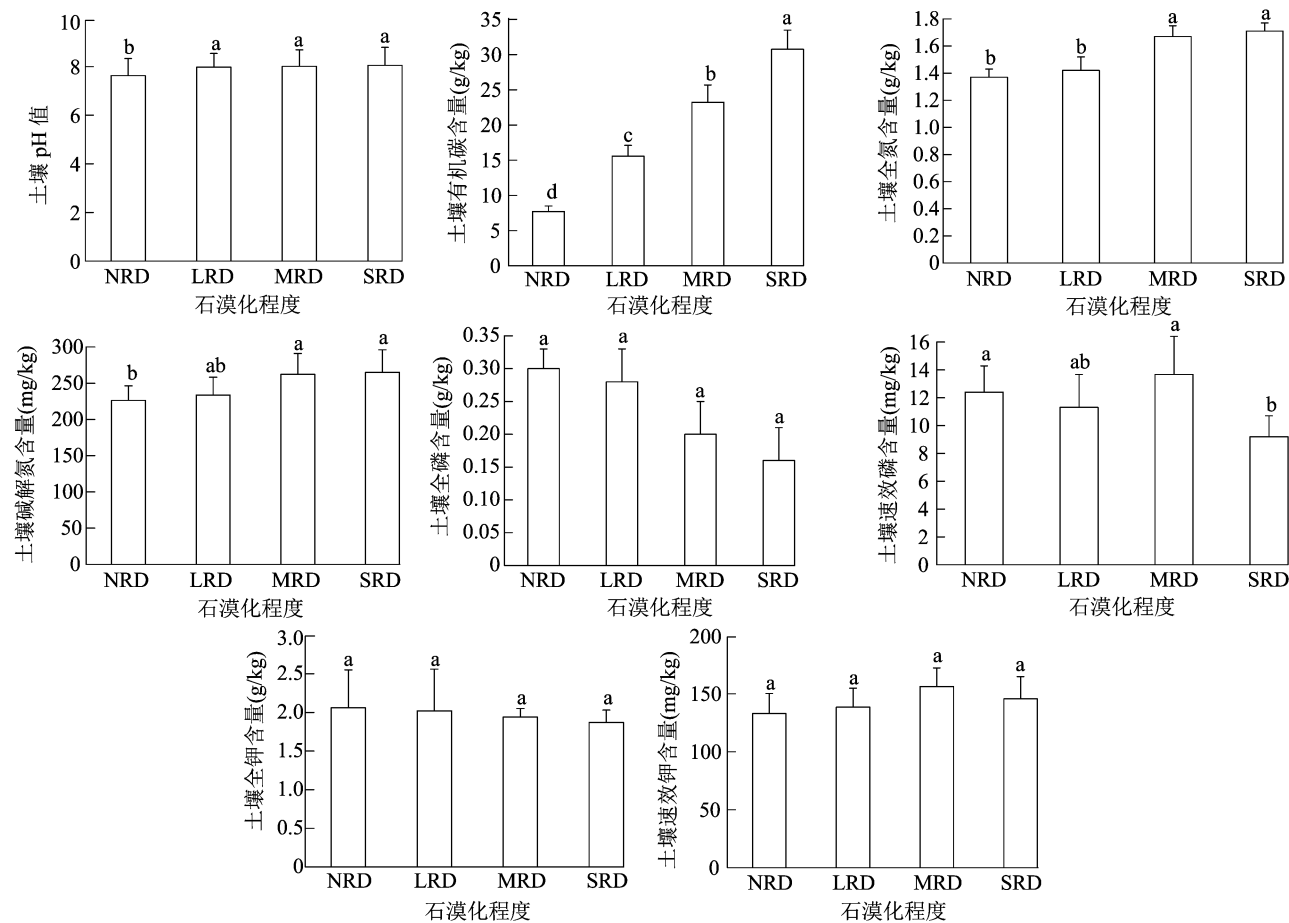
根据土壤总 DNA 测序结果,进行操作分类单元(OTU)聚类分析,利用 BLAST 软件将 OTU 序列与对应数据库比对,筛选 OTU 序列的最佳比对结果并进行过滤,将相似度大于 90% 且覆盖率大于 90% 的序列进行分类;采用朴素贝叶斯算法对每条序列在

属水平上计算其分配到该层中的概率值,进行土壤细菌和真菌丰度分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同石漠化程度土壤养分含量

由图 1 可知,石漠化土壤 pH 值显著高于无石漠化的土壤(NRD),从轻度石漠化到重度石漠化,pH 值增加了 4.46%~5.50%。与对照土壤相比,土壤有机碳含量随着石漠化程度的增加而显著增加,为对照土壤的 2.02~3.99 倍。中度、重度石漠化土壤的全氮含量分别是无石漠化土壤的 1.22、1.25 倍。土壤全磷和全钾含量在中度和重度石漠化土壤中则低于轻度和无石漠化土壤,中度和重度石漠化土壤中全磷含量分别比无石漠化土壤低 33.33%、46.67%,全钾含量分别比无石漠化土壤低 5.83%、9.22%。重度石漠化土壤中速效磷的含量较无石漠化土壤相比,降低了 25.81%<sup>[21]</sup>。石漠化土壤中碱解氮、速效钾含量均高于无石漠化土壤。



柱上不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

图1 不同石漠化程度土壤 pH 值及养分含量

2.2 不同石漠化程度对土壤微生物生物量碳、氮及土壤养分含量的影响

由表 2 可知,无石漠化和轻度石漠化土壤的土壤微生物生物量碳含量(MBC)和微生物生物量氮含量(MBN)差异不显著,在中度和重度石漠化土壤中明显降低。与对照土壤相比,中度、重度石漠化土壤中 MBC 分别降低了 18.53%、31.10%,MBN 分别降低了 21.67%、33.93%。随着石漠化程度的加重,土壤微生物生物量碳含量与总有机碳含量比值(MBC/TOC)显著降低,从轻度到重度石漠化土壤,MBC/TOC 降低了 48.92%~82.26%。相关性分析结果(表 3)表明,MBC 和 MBN 均与土壤有机质含量和全氮含量呈极显著负相关关系,MBC/TOC 与土壤 pH 值、有机质含量和全氮含量呈极显著负相关关系,MBN 与 MBC、MBC/TOC 分别呈极显著、显著正相关关系。

表 2 不同石漠化程度土壤 MBC、MBN 含量及 MBC/TOC

石漠化程度	微生物 生物量碳含量 (mg/kg)	微生物 生物量氮含量 (mg/kg)	MBC/TOC
无明显石漠化(NRD)	143.57±17.81a	17.95±2.10ab	1.86±0.04a
轻度石漠化(LRD)	148.79±10.97a	18.61±2.33a	0.95±0.10b
中度石漠化(MRD)	116.97±12.64b	14.06±1.38b	0.50±0.09c
重度石漠化(SRD)	98.92±9.54b	11.86±1.72c	0.33±0.02d

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。表 4 同。

2.3 不同石漠化程度土壤微生物数量及与土壤养分含量的相关性

由表 4 可知,不同等级石漠化土壤中微生物数量差异明显,土壤微生物数量占微生物的比例略有不同。轻度、中度石漠化土壤中,细菌数量最多,其次是放线菌,真菌数量最少。重度石漠化土壤中,细菌数量最多,放线菌数量最少。随着石漠化等级的提高,土壤细菌、真菌、放线菌数量均显著下降。从轻度到重度石漠化土壤,细菌数量降幅为 36.11%~90.63%,放线菌的降幅为 26.38%~93.62%,真菌的降幅为 72.59%~89.85%。相关性分析结果(表 3)表明,细菌、真菌、放线菌数量均与土壤 pH 值、有机质、全氮呈显著或极显著负相关关系。细菌数量与全磷含量、碱解氮含量、速效磷含量、MBC、MBN 呈显著正相关关系,与 MBC/TOC 呈极显著正相关关系;真菌数量与全磷含量、MBC、MBN 及 MBC/TOC 呈显著正相关关系;放线菌数量则与 MBC、MBN 及 MBC/TOC 呈显著正相关关系。

表 3 不同程度石漠化土壤养分含量、微生物生物量及数量相关性分析

项目	相关系数									
	pH 值	有机质含量	全氮含量	全磷含量	全钾含量	碱解氮含量	速效磷含量	速效钾含量	MBC	MBC/TOC
石漠化等级	0.621*	0.815**	0.779**	-0.804**	-0.883*	ns	-0.836*	ns	-0.892**	-0.904**
pH 值		0.802**	0.674*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0.917**
有机质含量			0.887**	-0.625*	ns	0.747**	ns	ns	-0.797**	-0.951**
全氮含量				-0.850**	ns	0.725**	ns	0.647*	-0.755**	-0.829**
全磷含量					ns	ns	ns	ns	ns	ns
全钾含量						ns	ns	ns	ns	ns
碱解氮含量							ns	0.783*	ns	ns
速效磷含量								0.667*	ns	ns
速效钾含量									ns	ns
MBC								0.887*	0.869**	0.714**
MBC/TOC								0.810**	0.668*	
MBN								0.882*	0.810*	
细菌数量									ns	ns
真菌数量										ns
放线菌数量										ns

注:\*,\*\* 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关; ns 表示无显著相关性。

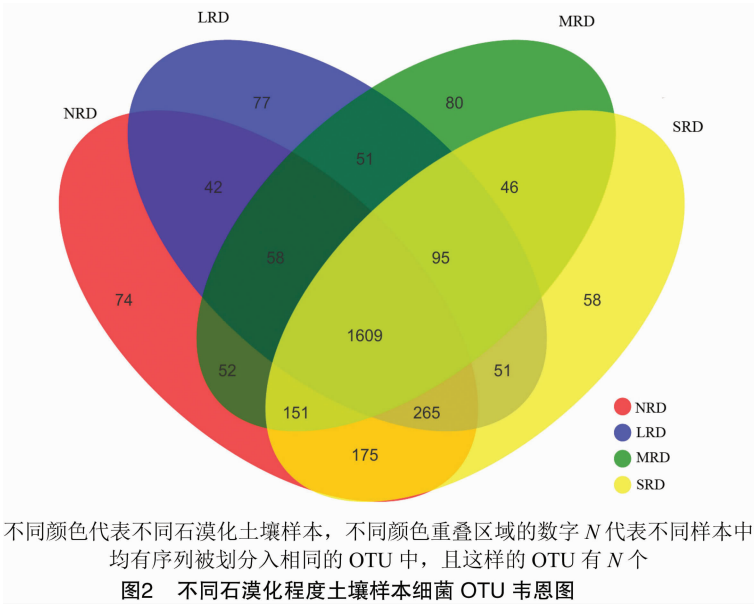
表 4 不同石漠化程度土壤微生物数量

石漠化程度	细菌数量 ( $\times 10^5$ CFU/g)	真菌数量 ( $\times 10^3$ CFU/g)	放线菌数量 ( $\times 10^5$ CFU/g)
NRD	$2.88 \pm 0.20a$	$1.97 \pm 0.12a$	$2.35 \pm 0.30a$
LRD	$1.84 \pm 0.11b$	$0.54 \pm 0.06b$	$1.73 \pm 0.21b$
MRD	$0.79 \pm 0.05c$	$0.28 \pm 0.04c$	$0.76 \pm 0.07c$
SRD	$0.27 \pm 0.03d$	$0.20 \pm 0.03c$	$0.15 \pm 0.02d$

2.4 不同石漠化程度土壤微生物群落组成

由图 2 可知,4 个土壤样本的细菌分属于 2 884 个属,优势菌群主要为微球菌科 (Micrococcaceae)、酸杆

菌纲 (Acidobacteria)、酸微菌科 (Acidimicrobiaceae)、芽单胞菌 (Gemmatimonadaceae) 和 Gaiellales。无石漠化土壤中细菌种类最多,其次为轻度石漠化土壤,中度、重度石漠化土壤中细菌种类明显较低,其中中度石漠化土壤中细菌菌属最少。轻度石漠化土壤与无石漠化土壤样本间丰度存在显著差异的菌属为 42 个,中度石漠化土壤与无石漠化土壤样本间丰度存在显著差异的菌属为 52 个,重度石漠化土壤与无石漠化土壤样本间丰度存在显著差异的菌属为 175 个。



由图 3 可知,4 个土壤样本中有 25.5% ~ 35.5% 的细菌群落为未知菌群。无石漠化土壤中 Gaiellales 目未明确属和鞘脂单胞菌属 (Sphingomonas) 丰度显著高于 3 种石漠化土壤,但轻度、中度和重度石漠化土壤中微球菌 (Micrococcaceae) 的丰度为 9.4% ~ 10.4%, 显著高于无石漠化土壤 (丰度仅 0.9%)。类诺卡氏菌 (Nocardioide)s 仅在无石漠化土壤中检测到。玫瑰弯菌属 (Roseiflexus) 仅在轻度石漠化、重度石漠化和重度石漠化土壤中检测到,而在无石漠化土壤中未检测到; 蓝藻纲未明确属 (norank\_c\_Cyanobacteria) 仅在重度石漠化土壤中检测到。

由图 4 可知,不同石漠化程度土壤样本的真菌分属于 2 059 个属,其中无石漠化土壤中真菌种类最多,其次为轻度石漠化土壤,中度石漠化土壤和重度石漠化土壤中真菌种类较低,其中中度石漠化土壤中真菌菌属最少。轻度石漠化土壤与无石漠化土壤样本间丰度存在显著差异的菌属为 77 个,中

度石漠化土壤与无石漠化土壤样本间丰度存在显著差异的菌属为 70 个,重度石漠化土壤与无石漠化土壤样本间丰度存在显著差异的菌属为 98 个。

由图 5 可知,4 个土壤样本中有 4.6% ~ 25.1% 的真菌群落为未知菌属,随石漠化程度的增加,未知菌属的丰度降低,主要优势真菌有子囊菌门 (Ascomycota)、毛壳菌科 (Chaetomiaceae)、镰刀霉菌 (Fusarium)、被孢霉属 (Mortierella) 等。无石漠化土壤中毛壳菌 (Chaetomiaceae) 丰度显著高于 3 种石漠化土壤。无石漠化土壤、轻度石漠化土壤和中度石漠化土壤中被孢霉属的丰度显著高于重度石漠化土壤,但重度石漠化土壤中子囊菌门的真菌群落丰度显著高于其他土壤。随着石漠化程度的增加,镰刀菌属的丰度呈降低趋势。链囊芽枝菌科 (Catenariaceae)、壶菌纲 (Chytridiomycetes) 和 Powellomyces 仅在无石漠化土壤中检测到。漆斑菌 (Myrothecium) 仅在轻度石漠化、重度石漠化和重度石漠化土壤中检测到,在无石漠化土壤中未检测

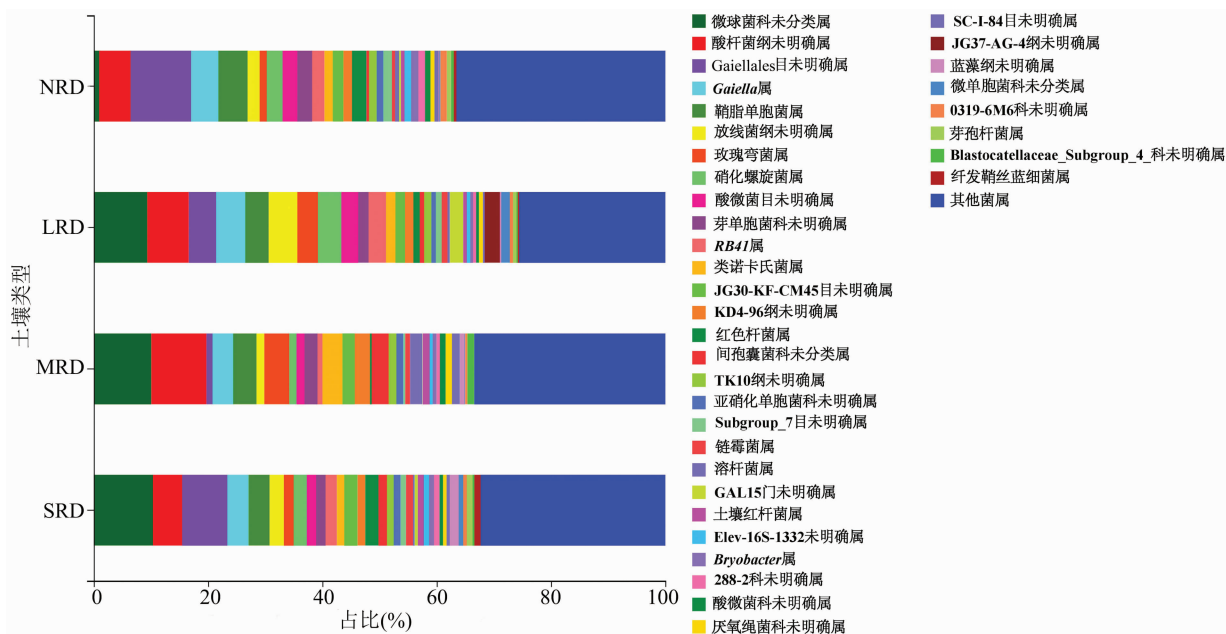


图3 不同石漠化程度土壤样本细菌属分类丰度统计

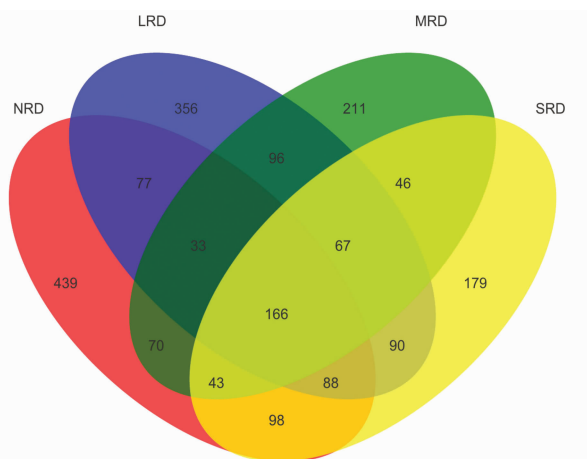


图4 不同石漠化程度土壤样本真菌 OTU 韦恩图

到。中度和重度石漠化土壤中还检测到粪壳菌目 (Sordariomycetes) 和 *Knufia*。此外,柱锈耳属 (*Eocronartium*) 只在重度石漠化土壤中检测到。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 不同石漠化程度土壤养分含量

本研究前期试验结果表明,石漠化土壤 pH 值显著高于无明显石漠化特征的土壤<sup>[21]</sup>,相关研究表明,pH 值可能是预示土壤发生石漠化的一个指标<sup>[26]</sup>。Qi 等在调查石漠化土壤细菌多样性的研究中同样发现,无论是轻度、中度、还是重度石漠化的土壤,其 pH 值均显著高于未发生石漠化的土壤,可能是由于石漠化过程中发生土壤侵蚀及石灰岩溶

解,增加了土壤溶液中  $\text{OH}^-$  浓度<sup>[2]</sup>。石漠化土壤有机质含量显著增加的原因可能跟石漠化地区石灰岩的溶解有关,溶解程度越大,分解出的有机质越多。因此,在石漠化地区,有机质含量可能不是反映土壤质量的指标。中度和重度石漠化土壤全氮含量显著高于轻度、未石漠化的土壤,这可能是由于轻度和未发生石漠化土壤上生长的植物较多,吸收了土壤中的氮;而中度和重度石漠化土壤植被覆盖率低,被植物吸收的养分相对较少,土壤微生物种类和数量也相对较少,因而积累了相对较多的有机质和氮。隋夕然等的研究也发现,重度石漠化土壤团聚体有机碳及全氮含量高于潜在石漠化土壤<sup>[27]</sup>。

盛茂银等认为,随着石漠化程度的加重,裸露的岩石聚集效应显著,大气沉降汇集的养分和岩溶产物,增加了土壤有机质和氮素的输入,且随石漠化程度的增加,可流失的土壤减少,养分流失也相应减少<sup>[19]</sup>。本研究中,土壤全磷和全钾含量在中度、重度石漠化土壤中低于轻度、未发生石漠化的土壤,在重度石漠化土壤中速效磷的含量也较低,说明石漠化程度越高,养分限制越明显。

#### 3.2 不同石漠化程度土壤微生物生物量及与土壤养分含量的相关性

土壤微生物生物量是土壤有机质的活性部分,是土壤中易于利用的养分库及有机物分解和矿化的动力,能够敏感地反映土壤质量状况。土壤微生物生物量碳含量约占土壤总有机碳含量的 1% ~



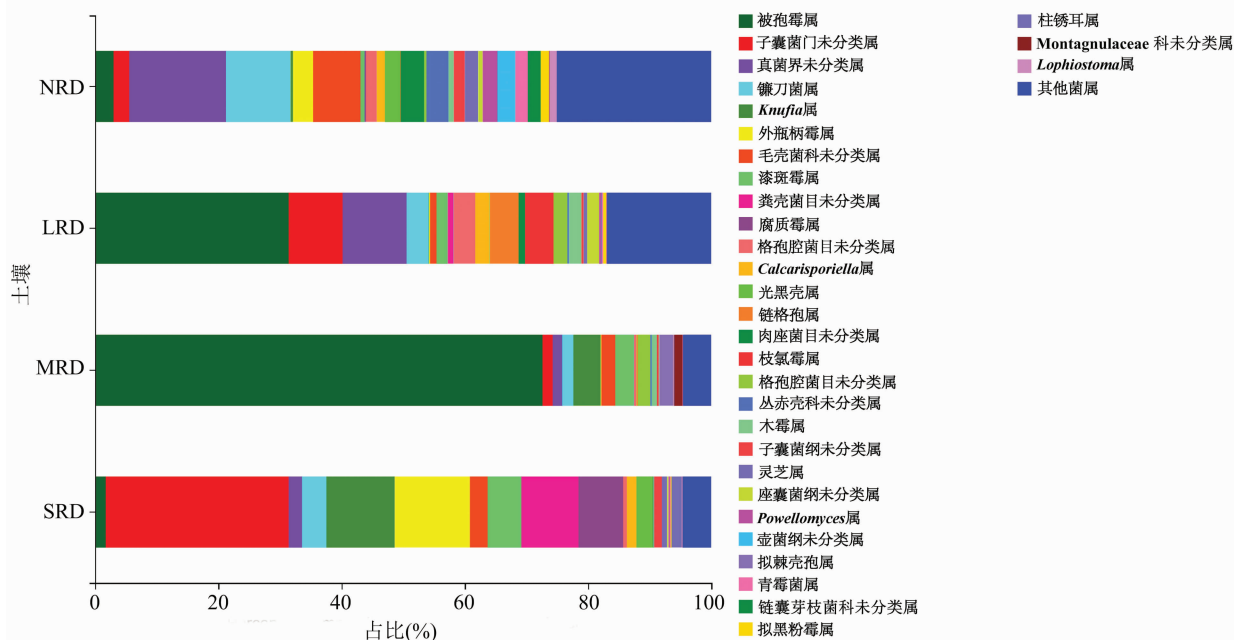


图5 不同石漠化程度土壤样本真菌属分类丰度统计

4%,是促使土壤有机物及养分转化的动力,其含量表征着土壤活性有机碳的储量<sup>[28-29]</sup>。土壤微生物生物量氮含量的变化对土壤氮循环起着重要作用。中度、重度石漠化土壤中土壤微生物生物量碳(MBC)和生物量氮(MBN)含量显著低于无明显、轻度石漠化土壤,且随着石漠化程度的加深,土壤微生物生物量碳与有机碳比值(MBC/TOC)显著下降,说明土壤活性养分供应受到影响,土壤质量下降明显。

许多研究表明,土壤 MBC 和 MBN 与土壤养分状况具有较好的相关性<sup>[24,30]</sup>。土壤微生物通过分解有机质获得维持生长及代谢所需的养分和能量,因此 MBC 与土壤总有机碳含量之间存在显著的正相关关系<sup>[31]</sup>。本研究中 MBC 和 MBN 均与土壤有机质和全氮含量呈负相关关系,MBC/TOC 与土壤 pH 值、有机质含量和全氮含量呈负相关关系,说明虽然中度及重度石漠化区土壤有机质含量和全氮含量较高,但其活性养分含量低;因此,有机质和全氮含量越高并不意味着土壤肥力越好<sup>[2]</sup>。

### 3.3 不同石漠化程度微生物数量及与土壤养分含量的相关性

土壤微生物数量,影响着土壤养分组成、转化,以及土壤透气透水性,同时也反映土壤生物活性。微生物数量的变化能够敏感地反映土壤质量,与土壤物理性质、养分含量等密切相关<sup>[32-33]</sup>。本研究发现,随着石漠化等级的提高,土壤细菌、真菌、放线菌数量均存在显著下降,说明土壤质量显著降低。

从微生物组成上看,不同等级石漠化土壤中细菌数量最多,可见对土壤生物活性起主要作用的是细菌,对于分解有机物质、提高土壤养分有效性具有重要作用。相关研究发现,不同等级石漠化土壤细菌数量及多样性随石漠化程度的增加而降低<sup>[2]</sup>;土壤真菌多样性及丰富度在不同石漠化程度土壤中差异显著<sup>[8]</sup>。本研究中微生物数量变化规律与上述研究一致。

本研究中细菌、真菌、放线菌数量均与土壤 pH 值、有机质、全氮含量呈显著负相关关系。原因可能跟研究区中度和重度石漠化土壤中的有机质和全氮含量较高有关,由于石漠化过程中石灰岩的不断溶解,释放出的有机质较多<sup>[34]</sup>;中度和重度石漠化区植被覆盖率低,被植物吸收的养分相对较少,而微生物种类和数量也相对较少,因而积累了相对较多的有机质和氮。相关性分析还表明,细菌数量与全磷、碱解氮、速效磷含量和 MBC、MBN 呈显著正相关关系,与 MBC/TOC 呈极显著正相关关系;真菌数量与总磷、MBC、MBN 及 MBC/TOC 呈显著正相关关系;放线菌数量则与 MBC、MBN 及 MBC/TOC 呈显著正相关关系,与文小琴等的研究结果<sup>[24,32]</sup>一致。

### 3.4 不同石漠化程度对土壤微生物群落组成的影响

无石漠化土壤中细菌和真菌种类最多,其次为轻度石漠化土壤,中度石漠化土壤和重度石漠化土壤中细菌和真菌种类显著较低。表明石漠化会显

著降低土壤中细菌、真菌的种类,中度石漠化土壤中细菌和真菌种数最少,说明中度石漠化是喀斯特土壤环境的不稳定阶段,这与 Qi 等的研究结果<sup>[2,8]</sup>类似。本研究中,4 种土壤样本的优势细菌群主要为微球菌、酸杆菌、酸微菌、芽单胞菌和 Gaiellales,主要优势真菌群有子囊菌、毛壳菌、镰刀霉菌和被孢霉属等。曹成亮等的研究发现,蓝细菌门(Cyanobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteria)、变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)等为石漠化生境中的优势细菌群<sup>[35]</sup>。唐源等对贵州喀斯特石漠化生境细菌多样性的研究表明,蓝细菌门、变形菌门和放线菌门是优势细菌类群,子囊菌门是优势真菌类群<sup>[36]</sup>。唐婧等在贵州喀斯特土壤微生物多样性研究中发现,变形菌门、酸杆菌门、放线菌门等是主要的优势细菌门,鞘脂单胞菌属、Gaiella 和乳杆菌属(*Lactobacillus*)的丰度最高;子囊菌门、担子菌门(Basidiomycota)、接合菌门(Zygomycota)等是主要的优势真菌门,其中子囊菌门丰度最高,镰刀菌属(*Fusarium*)、枝孢菌属(*Cladosporium*)、尾柄孢壳菌属(*Cercophora*)等的丰度也较高,同时发现土壤微生物群落丰度与土壤 pH 值显著相关<sup>[37]</sup>。李选文等在对云南石林地区石漠化可培养细菌的多样性研究中发现,假单胞菌属(*Pseudomonas*)、节杆菌属(*Arthrobacter*)和不动杆菌属(*Acinetobacter*)的相对分离率较高,可能为优势菌群<sup>[38]</sup>。这些研究结果说明,不同地区石漠化生境微生物在群落结构方面,既有一定的相似性,又有一定的差异性。

虽然石漠化土壤与无石漠化土壤中优势菌群的种类一致,但在菌群组成和丰度上存在显著差异。细菌群落分析结果表明,无石漠化土壤中 Gaiellales 菌属和鞘脂单胞菌属丰度显著高于 3 种石漠化土壤,但轻度、中度和重度石漠化土壤中微球菌的丰度为显著高于无石漠化土壤。真菌群落分析结果表明,无石漠化土壤中毛壳菌的菌落丰度显著高于 3 种石漠化土壤。无石漠化土壤、轻度石漠化土壤和中度石漠化土壤中被孢霉菌属的丰度显著高于重度石漠化土壤,但重度石漠化土壤中子囊菌门的真菌群落丰度显著高于其他土壤。随着石漠化程度的增加,镰刀菌属的丰度呈降低趋势。说明石漠化程度的加深影响了这些菌落生长。Qi 等研究表明,石漠化会影响细菌的丰度<sup>[2]</sup>;Wang 等研究也表明,石漠化会影响真菌的丰度,引起土壤微

生物群落结构的变化<sup>[8]</sup>。

细菌群落组成分析表明,玫瑰弯菌属仅在轻度石漠化、中度石漠化和重度石漠化土壤中检测到,而在无石漠化土壤中未检测到;蓝藻纲未明确属只在重度石漠化土壤中检测到。真菌群落组成分析表明,漆斑菌仅在轻度石漠化、重度石漠化和重度石漠化土壤中检测到;中度和重度石漠化土壤中还检测到粪壳菌和 *Knufia*;此外,柱锈耳属只在重度石漠化土壤中检测到。这一研究结果提示,石漠化程度会影响细菌、真菌总量及其群落多样性,原因可能是玫瑰弯菌属和漆斑菌能够适应各种石漠化土壤环境,粪壳菌和 *Knufia* 能够适应中度和重度石漠化土壤环境,而蓝藻纲未明确属和柱锈耳菌能够适应重度石漠化生境。当然,土壤养分也会影响土壤微生物的生长。

在石漠化土壤中未检测到某些菌群,如各类石漠化土壤中未检测到类诺卡氏菌、链枝菌、壶菌和 *Powellomyces* 等,轻度石漠化土壤中未检测到蓝藻纲未明确属、粪壳菌、*Knufia*,中度石漠化土壤中未检测到蓝藻纲未明确属,重度石漠化土壤中未检测到溶杆菌(*Lysobacter*)等。同时,一些种类的细菌和真菌群落丰度在不同石漠化程度的土壤中存在显著差异,如轻度石漠化土壤中 *Gaiella* 丰度最高,而在重度石漠化土壤中丰度最低,但漆斑菌的丰度在轻度石漠化土壤中最低,而在重度石漠化土壤中丰度最高。说明不同种类的细菌对石漠化的敏感性不同,石漠化在抑制一些种类细菌生长的同时,也可能促进另一些种类细菌的生长,石漠化程度对土壤细菌和真菌群落多样性的影响存在显著差异。Qi 等的研究发现,随着石漠化程度的加重,变形菌的丰度增加,而蓝细菌的丰度降低<sup>[2]</sup>。

因此,在石漠化地区,土壤中有机质和全氮含量高,并不能说明土壤养分含量高,原因可能跟石灰岩的溶解与植被生长量有关;石漠化土壤中细菌、真菌种类显著降低;随石漠化程度加重,土壤微生物生物量碳、土壤微生物生物量氮含量和细菌、真菌、放线菌数量均显著下降,土壤微生物生物量、微生物数量与土壤养分之间具有较强的相关性。土壤微生物生物量、微生物数量及群落组成可用来表征石漠化土壤质量。

#### 参考文献:

[1] Yan X, Cai Y L. Multi - scale anthropogenic driving forces of karst



- rocky desertification in southwest China[J]. Land Degradation & Development, 2015, 26(2): 193–200.
- [2] Qi D H, Wieneke X, Tao J P, et al. Soil pH is the primary factor correlating with soil microbiome in karst rocky desertification regions in the Wushan County, Chongqing, China [J]. Frontiers in Microbiology, 2018(9): 1027.
- [3] 熊康宁. 喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究——以贵州省为例[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 26–28.
- [4] Li Y B, Shao J G, Yang H, et al. The relations between land use and Karst rocky desertification in a typical karst area, China [J]. Environmental Geology, 2009, 57(3): 621–627.
- [5] 颜 萍, 熊康宁, 王恒松, 等. 喀斯特地区不同等级石漠化对土壤性质的响应[J]. 南方农业学报, 2016, 47(4): 557–563.
- [6] Qi D, Wieneke X, Zhou X, et al. Succession of plant community composition and leaf functional traits in responding to karst rocky desertification in the Wushan County in Chongqing, China [J]. Community Ecology, 2017, 18(2): 157–168.
- [7] 宋海燕, 张 静, 赵雅洁, 等. 不同程度石漠化对金山莢蒾末端小枝的生长和生物量积累及分配的影响[J]. 植物科学学报, 2018, 36(1): 103–111.
- [8] Wang P C, Mo B T, Chen Y, et al. Effect of karst rocky desertification on soil fungal communities in southwest China [J]. Genetics and Molecular Research, 2016, 15(3): 1–12.
- [9] 冯大兰, 黄小辉, 刘 芸, 等. 4 种木本植物在石漠化地区的生长状况及光合特性[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(5): 62–69.
- [10] 覃小群, 朱明秋, 蒋忠诚. 近年来我国西南岩溶石漠化研究进展[J]. 中国岩溶, 2006, 25(3): 234–238.
- [11] 李开萍, 刘子琦, 李 渊, 等. 贵州毕节地区不同石漠化程度土壤理化性质特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 205–210.
- [12] 郭 柯, 刘长成, 董 鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性及石漠化治理[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 991–999.
- [13] 张军以, 戴明宏, 王腊春, 等. 西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性[J]. 地球与环境, 2015, 43(3): 269–278.
- [14] 黄 磊, 曾亚军, 郭金鹏, 等. 3 种治理模式对石漠化地区土壤微生物群落结构的影响及治理能力比较[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(12): 201–209.
- [15] 龙 健, 李 娟, 滕 应, 等. 贵州高原喀斯特环境退化过程土壤质量的生物学特性研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 47–50.
- [16] Ding X F, Wu C D, Huang J, et al. Interphase microbial community characteristics in the fermentation cellar of Chinese Luzhou – flavor liquor determined by PLFA and DGGE profiles[J]. Food Research International, 2015, 72: 16–24.
- [17] 朴河春, 洪业汤, 袁芷云. 贵州山区土壤中微生物生物量是能源物质碳流动的源与汇[J]. 生态学杂志, 2001, 20(1): 33–37.
- [18] 熊康宁, 李 晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 878–888.
- [19] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 等. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 434–448.
- [20] 景宜然, 邓湘雯, 邓东华, 等. 湘西南不同石漠化程度土壤理化性质及相关性分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 189–195.
- [21] 杨 丹, 石 菊, 李 冕, 等. 黔西南不同程度石漠化土壤的养分、酶活性特征[J]. 河南农业科学, 2019, 48(11): 84–91.
- [22] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703–707.
- [23] Joergensen R G, Brookes P C. Ninhydrin – reactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0.5 M K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> soil extracts [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(8): 1023–1027.
- [24] 文小琴, 舒英格, 何 欢. 喀斯特山区土地不同利用方式的土壤养分及微生物特征[J]. 西南农业学报, 2018, 31(6): 1227–1233.
- [25] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 198–316.
- [26] Xie L W, Zhong J, Chen F F, et al. Evaluation of soil fertility in the succession of karst rocky desertification using principal component analysis[J]. Solid Earth, 2015, 6: 515–524.
- [27] 隋夕然, 吴丽芳, 王 妍, 等. 滇中岩溶高原不同石漠化程度土壤团聚体养分及酶活性特征[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1): 115–126.
- [28] Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21(4): 471–479.
- [29] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter[J]. Soil Research, 1992, 30(2): 195–207.
- [30] 叶莹莹, 刘淑娟, 张 伟, 等. 喀斯特峰丛洼地植被演替对土壤微生物生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 6974–6982.
- [31] 隋跃宇, 焦晓光, 高崇生, 等. 土壤有机质含量与土壤微生物量及土壤酶活性关系的研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1036–1039.
- [32] 赵朝辉. 湘西南石漠化治理模式对土壤微生物量和酶活性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012: 31.
- [33] 覃勇荣, 白新高, 刘旭辉. 桂西北岩溶地区不同植被土壤养分及微生物生理类群数量的季节变化[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(24): 273–280.
- [34] 钟远平, 唐 将, 王 力. 三峡库区土壤有机质区域分布及影响因素[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 73–76.
- [35] 曹成亮, 连 宾. 碳酸盐岩小生境石生放线菌及其矿物转化作用[C]// 欧阳自远. 中国矿物岩石地球化学学会第九次全国会员代表大会暨第 16 届学术年会论文集. 西安: 中国矿物岩石地球化学学会, 2017: 541–542.
- [36] 唐 源, 连 宾. 贵州喀斯特地区碳酸盐岩表生微生物多样性[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(2): 543–544.
- [37] 唐 婧, 李欲轲, 何馨竹, 等. 基于高通量测序分析白云岩喀斯特土壤微生物多样性[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2020, 38(5): 20–28.
- [38] 李选文, 熊 智, 喊 也, 等. 西南典型喀斯特地区石漠化可培养石生细菌多样性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(7): 177–182.