

黔西南不同程度石漠化土壤的养分、酶活性特征

杨 丹,石 菊,李 冕,杜润来,管庆丽
(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程度石漠化土壤为研究对象,运用野外定点采样和实验室测定的方法,分析不同程度石漠化土壤养分及酶活性特征,探讨不同程度石漠化土壤质量变化规律,为石漠化生态环境修复过程中土壤质量的改善提供依据。结果表明,石漠化使土壤 pH 值显著增加,增加了 4.49%~5.80%;石漠化土壤有机质、全氮含量反而高于无石漠化土壤,分别高 1.02~2.99 倍、3.65%~24.82%,但全磷全钾含量在中度和重度石漠化土壤中显著降低。随着石漠化程度加重,土壤蔗糖酶、脲酶、脱氢酶、纤维素酶活性降低。从轻度到重度石漠化土壤,蔗糖酶活性降低了 22.33%~71.46%,脲酶活性降低了 31.25%~80.14%。中度、重度石漠化土壤脱氢酶活性分别降低了 70.83%、83.33%,纤维素酶活性分别下降了 55.0%、80.0%。碱性磷酸酶活性在重度石漠化土壤中仅为无石漠化土壤的 24.78%。因此,土壤养分含量和酶活性可作为反映不同程度石漠化土壤质量的重要指标。

关键词: 喀斯特;石漠化土壤;土壤养分;酶活性;土壤质量

中图分类号: S151.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2019)11-0084-08

Characteristics of Nutrients and Enzyme Activity in Different Grades of Rocky Desertification Soils in Southwest Guizhou

YANG Dan,SHI Ju,LI Mian,DU Runlai,GUAN Qingli
(School of Biological and Environmental Engineering,Guiyang University,Guiyang 550005,China)

Abstract: In order to reveal the qualitative status of soils in rocky desertification region,different degrees of rocky desertification soils were collected from a typical karst region in Guizhou Province as research object. The nutrients content and enzymatic activity were analyzed,based on field sampling and laboratory determination,and the changes of soil quality with different degrees of rocky desertification were explored,to provide the foundation for possible soil improvement and ecological restoration in rocky desertification areas. The results showed that soil pH significantly increased by 4.49%—5.80% in rocky desertification soils. Organic matter and total nitrogen content in rocky desertification soils were higher than those in no rocky desertification soil. Soil organic matter content was 1.02—2.99 times more,and total nitrogen content was 3.65%—24.82% more in rocky desertification soils. However,total phosphorus content and total potassium content significantly decreased in moderate and severe rocky desertification soils. Activities of soil invertase,urease,dehydrogenase,cellulose showed obvious decrease as the rocky desertification aggravated. From light to severe rocky desertification,soil invertase activity declined by 22.33%—71.46%,soil urease activity decreased by 31.25%—80.14%. Soil dehydrogenase activity was 70.83% and 83.33% down,and soil cellulose activity declined by 55.0% and 80.0% respectively in moderate and

收稿日期:2019-05-06
基金项目:国家自然科学基金项目(31600442);贵州省教育厅科技拔尖人才支持计划项目(黔教合 KY 字[2018]063);贵阳学院引进人才科研启动项目(2017);贵州省高等学校大学生创新创业训练计划项目(2018520806);贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2018]295)
作者简介:杨 丹(1982-),女,贵州兴义人,副教授,博士,主要从事土壤环境质量评价与污染防治研究。
E-mail:yangdansky@163.com

severe rocky desertification soils. Alkaline phosphatase activity was only 24.78% of the no rocky desertification soil in severe desertification soil. Therefore, the nutrients content and enzyme activities could be applied as critical indicators for evaluating the soil quality in various degrees of rocky desertification soils.

Key words: Karst; Rocky desertification soils; Soil nutrient; Enzyme activity; Soil quality

石漠化是指喀斯特环境背景下,因自然地貌及人为活动干扰造成水土流失,导致地表基岩裸露,呈现出类似荒漠化景观的土地退化过程^[1-2]。根据基岩裸露度和植被、土被覆盖度等,通常将石漠化程度分为轻度、中度、重度等^[3-4]。随着石漠化程度加重,表层土壤资源减少,且土壤有机质及氮、磷等养分含量显著降低,土壤质量恶化,植物生长及生物量积累受到抑制^[5-6],区域植物多样性及覆盖度明显下降^[7-9],土壤微生物群落结构及多样性亦发生显著变化。盛茂银等^[10]的研究结果显示,不同程度石漠化环境中植被群落组成差异明显,随石漠化程度的加重,植物种类及数量逐渐降低;QI 等^[2]研究发现,土壤细菌多样性随石漠化程度的增加而降低;WANG 等^[11]研究表明,土壤真菌多样性及丰富度在不同程度石漠化土壤中差异显著。由于石漠化带来的区域土壤资源减少及养分流失,植物生长受到限制,土地生产力急剧下降,农林业生产受到威胁,石漠化地区经济效益、社会效益和生态效益受到严重影响^[12-13]。贵州省喀斯特地貌面积为全省土地面积的 73.8%^[14],石漠化已成为制约当地经济、社会发展的重大生态问题。因此,石漠化治理是喀斯特地区社会经济发展的迫切需要。

土壤酶作为反映土壤质量的生物学指标之一,对反映石漠化治理过程中土壤质量状况具有重要意义。土壤养分循环、微生物活性、养分的分解及矿化等,均可通过土壤酶活性来表征^[15],对土壤酶活性的研究有助于了解土壤肥力状况及其演变特征。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于水土流失现状及石漠化成因分析、石漠化地区土壤理化性质及植物多样性及其相关性分析等方面^[8,10,16-17],而对不同程度石漠化地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中酶活性特征的研究鲜见报道。因此,以贵州西南典型喀斯特地区不同程度石漠化土壤为研究对象,运用野外定点采样和实验室测定的方法,通过分析其酶活性,探讨不同程度石漠化对土壤理化性质的影响,为不同程度石漠化土壤治理过程中质量改善措施的制定提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省黔西南兴仁县郊区,年平均

气温约 15.2℃,年平均降水量 1 315.3 mm,平均海拔 1 359 m。土壤以黄壤为主,植被主要有以马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)为主的针叶林,零星分布的以青冈(*Quercus glauca* Thunb.)、油桐[*Vernicia fordii* (Hemsl.) Airy Shaw]为主的乔木林,以铁线莲(*Clematis uncinata* Thunb.)、刺梨(*Rosa roxbunghii*)为主的藤刺灌丛,以及以青蒿(*Artemisia carvifolia*)、狗牙根[*Cynodon dactylon* (L.) Pers.]为主的草本植物。

1.2 试验材料

根据熊康宁等^[3]对喀斯特石漠化程度分级标准,分别选取代表轻度、中度及重度石漠化程度的土壤,另外选取未见明显石漠化特征(无石漠化)土壤作为对照。每种程度选择具有代表性的 3 个典型样地,样地面积约 10 m × 10 m,按照五点法分别在每个样地内采集土壤样品,采样深度 0 ~ 20 cm,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。样地基本信息如表 1 所示。

1.3 样品处理与分析

将采集的土壤样品在室温(约 25℃)下风干,研磨后分别过 1、2 mm 筛,用于养分含量及酶活性测定。

土壤 pH 值及养分含量测定参照刘光菘^[18]的方法:土壤 pH 值采用电位法测定(水土质量比 2.5:1),有机质含量采用重铬酸钾氧化外加热法测定(GB 7859—1987),全氮含量采用凯氏定氮法测定(GB 7173—1987),碱解氮含量采用 FeSO₄ - Zn 还原碱解扩散法测定(GB 7849—1987),全磷含量采用氢氧化钠碱熔、钼锑抗比色法测定(GB 7852—1987),速效磷含量采用 NaHCO₃ 浸提、钼锑抗比色法测定,全钾含量采用氢氧化钠碱熔、火焰光度法测定(GB 7854—1987),速效钾含量采用乙酸铵浸提、火焰光度法测定(GB 7856—1987)。土壤酶活性采用关松荫^[19]的方法测定:土壤脱氢酶活性采用三苯基四氮唑法测定,纤维素酶活性采用蒽酮比色法测定,蔗糖酶活性采用 3,5 - 二硝基水杨酸比色法测定,脲酶活性采用苯酚 - 次氯酸钠比色法测定,过氧化氢酶活性采用滴定法测定,磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定。

表 1 样地基本信息
Tab. 1 Information of sampling sites

样地石漠化程度 Grade of rocky desertification of sampling site	经纬度 Latitude and longitude	平均海拔/m Average altitude	坡度/° Slope	基岩裸露率/% Exposing rate of bedrock	植被覆盖率/% Vegetation coverage	土壤深度/cm Soil depth
无石漠化 No rocky desertification	N 25°44'11" E 105°18'26"	1 087	10 ~ 15	10 ~ 15	80 ~ 85	40 ~ 70
轻度石漠化 Light rocky desertification	N 25°44'49" E 105°19'01"	1 191	15 ~ 20	35 ~ 45	50 ~ 60	20 ~ 40
中度石漠化 Moderate rocky desertification	N 25°45'24" E 105°19'55"	1 300	15 ~ 20	50 ~ 65	30 ~ 45	20 ~ 30
重度石漠化 Severe rocky desertification	N 26°07'09" E105°46'38"	1 296	20 ~ 25	75 ~ 85	10 ~ 20	10 ~ 20

1.4 数据处理

利用 SPSS 22.0 进行数据分析,用一元方差分析(One – way ANOVA)对试验结果进行分析,同时进行双尾显著性检验和皮尔逊(Pearson)相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同程度石漠化土壤的养分含量

由表 2 可知,轻度、中度及重度石漠化土壤的 pH 值差异不显著,但均显著高于无石漠化土壤,分别增加了 4.49%~4.69%、4.88%~4.95%、5.08%~5.80%。土壤有机质含量随着石漠化程度的增加显著增加,与

无石漠化土壤相比,从轻度到重度石漠化,土壤有机质含量增加了 1.02 ~ 2.99 倍。土壤全氮含量在轻度和无石漠化的土壤中无显著差异,但中度石漠化土壤中全氮含量是无石漠化土壤的 1.22 倍,重度石漠化土壤全氮含量是无石漠化土壤的 1.25 倍,石漠化土壤全氮含量比无石漠化土壤高 3.65% ~ 24.82%。土壤全磷、全钾含量在中度、重度石漠化土壤中显著低于轻度、无石漠化土壤,中度石漠化土壤中全磷、全钾含量分别是无石漠化土壤的 66.67%、89.81%,重度石漠化土壤中全磷、全钾含量分别是无石漠化土壤的 53.33%、86.57%。重度石漠化土壤中速效磷的含量与无石漠化土壤相比,显著降低 25.81%。

表 2 不同程度石漠化土壤养分含量
Tab. 2 Content of nutrients in different degrees of rocky desertification soils

项目 Item	无石漠化 No rocky desertification	轻度石漠化 Light rocky desertification	中度石漠化 Moderate rocky desertification	重度石漠化 Severe rocky desertification
pH	7.58 ~ 7.68b	7.92 ~ 8.04a	7.95 ~ 8.06a	8.02 ~ 8.07a
有机质/(g/kg) Organic matter	13.30 ± 1.41d	26.85 ± 2.30c	40.03 ± 2.65b	53.01 ± 1.25a
全氮/(g/kg) Total nitrogen	1.37 ± 0.03b	1.42 ± 0.05b	1.67 ± 0.04a	1.71 ± 0.03a
碱解氮/(mg/kg) Available nitrogen	226.34 ± 10.09a	233.59 ± 14.82a	262.33 ± 18.74a	265.04 ± 21.11a
全磷/(g/kg) Total phosphorus	0.30 ± 0.03a	0.28 ± 0.05a	0.20 ± 0.05b	0.16 ± 0.05b
速效磷/(mg/kg) Available phosphorus	12.40 ± 0.89a	11.31 ± 1.36ab	13.67 ± 1.74a	9.20 ± 0.50b
全钾/(g/kg) Total potassium	2.16 ± 0.49a	2.12 ± 0.54a	1.94 ± 0.11b	1.87 ± 0.16b
速效钾/(mg/kg) Available potassium	132.89 ± 7.37a	138.42 ± 16.47a	156.26 ± 6.00a	145.64 ± 19.08a

注:同一行中不同小写字母表示不同处理之间差异显著(P < 0.05)。
Note; Different lowercase letters in the same line indicate significant differences in different treatments(P < 0.05).

2.2 不同程度石漠化土壤的酶活性

不同程度石漠化土壤酶活性测定结果(图 1—6)表明,随着石漠化程度加重,土壤脱氢酶、纤维素酶、蔗糖酶及脲酶活性明显下降,重度石漠化土壤中碱性磷酸酶活性也显著降低。土壤脱氢酶、纤维素酶活性在

无石漠化、轻度石漠化土壤中差异不显著,无石漠化土壤中脱氢酶活性是中度石漠化土壤的 3.43 倍,是重度石漠化土壤的 6.00 倍。土壤纤维素酶活性在不同程度石漠化土壤中的变化规律与脱氢酶类似,无石漠化土壤中纤维素酶活性分别是中度、重度石漠化土壤的

2.22、5.00 倍。蔗糖酶、脲酶活性在不同程度石漠化土壤中差别较大,从轻度到重度石漠化土壤,蔗糖酶活性降低了 22.33%~71.46%,脲酶活性降低了 31.25%~80.14%,碱性磷酸酶活性在重度石漠化土壤中仅为无石漠化土壤的 24.78%。

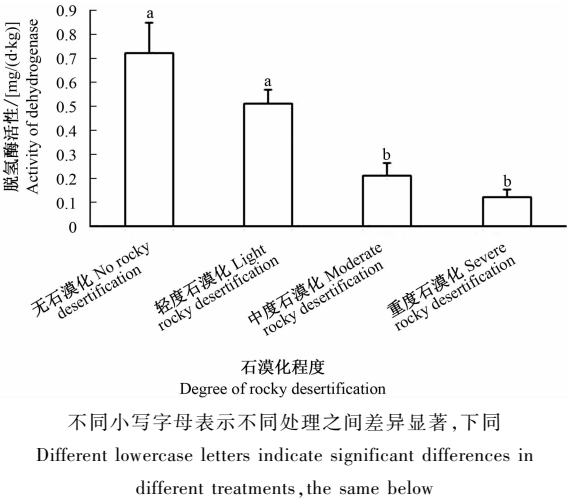


图 1 不同程度石漠化土壤脱氢酶活性

Fig.1 Activity of dehydrogenase in different degrees of rocky desertification soils

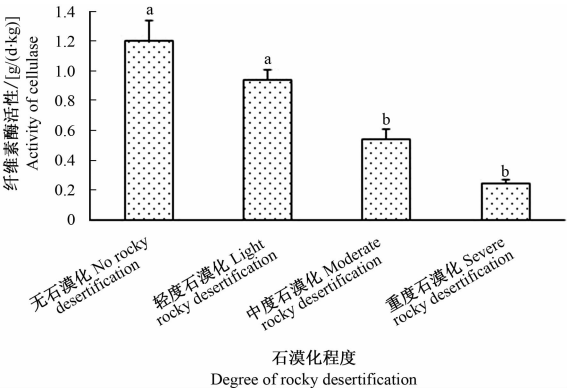


图 2 不同程度石漠化土壤纤维素酶活性

Fig.2 Activity of cellulase in different degrees of rocky desertification soils

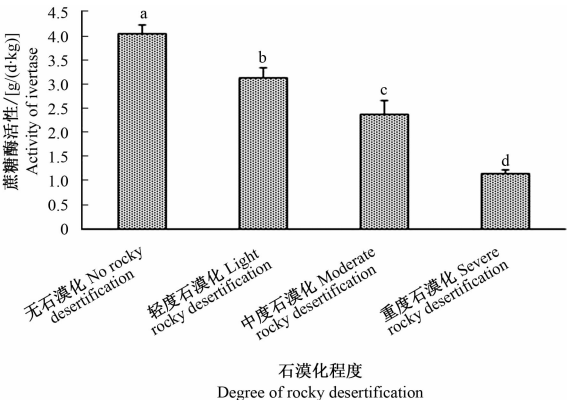


图 3 不同程度石漠化土壤蔗糖酶活性

Fig.3 Activity of ivertase in different degrees of rocky desertification soils

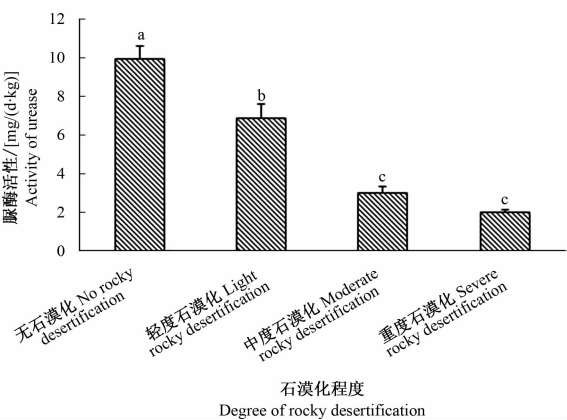


图 4 不同程度石漠化土壤脲酶活性

Fig.4 Activity of urease in different degrees of rocky desertification soils

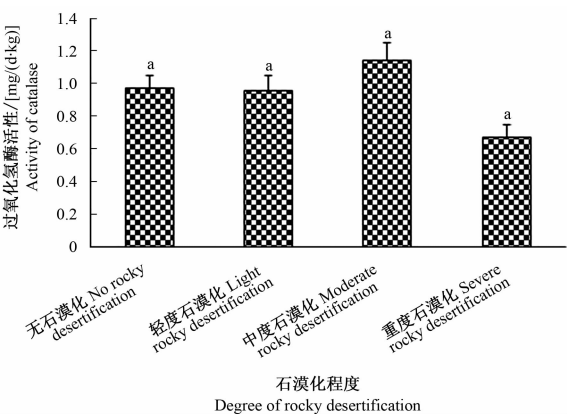


图 5 不同程度石漠化土壤过氧化氢酶活性

Fig.5 Activity of catalase in different degrees of rocky desertification soils

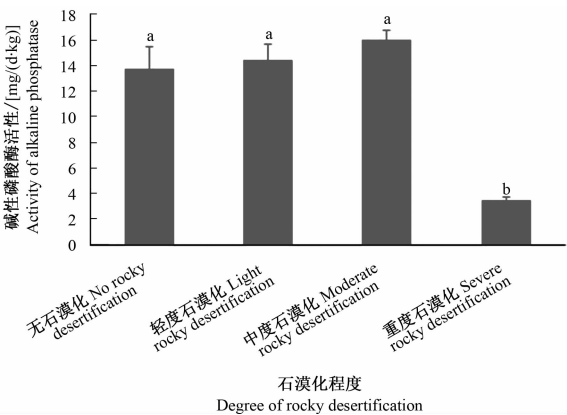


图 6 不同程度石漠化土壤碱性磷酸酶活性

Fig.6 Activity of alkaline phosphatase in different degrees of rocky desertification soils

2.3 不同程度石漠化土壤养分含量与酶活性的相关性

由相关性分析(表 3)可知,石漠化程度与土壤 pH 值呈显著正相关,与有机质、全氮含量呈极显著正相关,与全钾、速效磷含量及脱氢酶、纤维素酶、碱

表 3 不同程度石漠化土壤养分含量与酶活性相关性分析
Tab.3 Pearson's correlation coefficients between soil nutrients' content and enzymatic activities in different degrees of rocky desertification soils

项目 Item	pH	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	碱解氮 Available nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	脱氢酶 Dehydrogenase	纤维素酶 Cellulase	蔗糖酶 Ivertase	脲酶 Urease	过氧化氢酶 Catalase	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase
石漠化程度 Grade of rocky desertification	0.621 *	0.815 **	0.779 **	-0.804 **	-0.883 *	ns	-0.836 *	ns	-0.802 *	-0.816 *	-0.914 **	-0.893 **	ns	-0.620 *
pH		0.802 *	0.674 *	ns	ns	ns	ns	ns	-0.750 **	-0.750 **	-0.713 **	-0.836 **	ns	ns
有机质 Organic matter			0.887 **	-0.625 *	ns	0.747 **	ns	ns	-0.922 **	-0.922 **	-0.961 **	-0.950 **	ns	-0.624 *
全氮 Total N				-0.850 **	ns	0.725 **	ns	0.647 *	-0.857 **	-0.857 **	-0.867 **	-0.882 **	ns	ns
全磷 Total P					ns	ns	ns	ns	0.627 *	0.627 *	0.658 *	0.607 *	ns	ns
全钾 Total K						ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
碱解氮 Available nitrogen							ns	0.776 **	ns	ns	ns	0.640 *	ns	ns
速效磷 Available phosphorus								ns	0.595 *	0.595 *	0.711 *	0.740 *	ns	0.758 *
速效钾 Available potassium									ns	ns	ns	ns	ns	ns
脱氢酶 Dehydrogenase										0.912 **	0.869 **	0.901 **	ns	ns
纤维素酶 Cellulase											0.869 **	0.901 **	ns	ns
蔗糖酶 Ivertase												0.893 **	ns	0.700 *
脲酶 Urease													ns	ns
过氧化氢酶 Catalase														ns

注: * 表示显著相关($P < 0.05$), ** 表示极显著相关($P < 0.01$), ns 表示不相关。
Note: * indicate significant correlation($P < 0.05$), ** indicate extremely significant correlation($P < 0.01$), ns indicate none correlation.

性磷酸酶活性呈显著负相关,与全磷含量及蔗糖酶、脲酶活性呈极显著负相关。

土壤 pH 值、有机质、全氮含量均与脱氢酶、纤维素酶、蔗糖酶、脲酶活性呈极显著负相关,有机质含量还与碱性磷酸酶活性呈显著负相关,全磷含量则与脱氢酶、纤维素酶、蔗糖酶、脲酶活性呈显著正相关;碱解氮含量与脲酶活性呈显著正相关,速效磷含量与脱氢酶、纤维素酶、蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性均呈显著正相关。此外,某些酶活性之间亦存在相关关系,如脱氢酶活性与纤维素酶、蔗糖酶、脲酶活性之间呈极显著正相关,蔗糖酶活性与碱性磷酸酶活性之间呈现显著正相关。

3 结论与讨论

3.1 不同程度石漠化土壤的养分含量

由测定结果可知,轻度、中度及重度石漠化土壤 pH 值间差异不显著,但均显著高于无石漠化土壤,分别增加了 4.49%~4.69%、4.88%~4.95%、5.08%~5.80%,表明 pH 值可能是表征石漠化的一个指标。前人的研究同样发现,在不同程度石漠化土壤中 pH 值显著高于无石漠化土壤,这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 OH^- 浓度^[2,20]。赵朝辉^[21]研究表明,石漠化区土壤养分的一个重要特征是“缺磷少钾”。本研究发现,土壤有机质含量随着石漠化程度的增加而显著增加,与无石漠化土壤相比,从轻度到重度石漠化,土壤有机质含量增加了 1.02~2.99 倍,原因可能跟石灰岩的溶解有关。石漠化程度越严重,石灰岩的溶解程度越大,分解出的有机质越多^[22]。因此,有机质含量越高并不能说明土壤质量越好,这与 QI 等^[2]的研究结果一致。土壤全氮含量在中度、重度石漠化土壤中也显著高于轻度、无石漠化土壤,这可能是由于轻度石漠化、无石漠化土壤上植被覆盖率较高,植物吸收了土壤中的氮。土壤全磷、全钾含量在中度、重度石漠化土壤中则显著低于轻度、无石漠化土壤,在重度石漠化土壤中速效磷含量也显著降低,说明石漠化程度越高,土壤中养分限制越明显。总体来说,与无石漠化土壤相比,中度、重度石漠化土壤质量显著下降。

3.2 不同程度石漠化土壤的酶活性

土壤酶通过催化、降解、转化及合成土壤有机质等过程参与土壤生物地球化学循环,因此土壤酶活性与有机质分解及土壤质量密切相关,是重要的土壤肥力指标^[23]。土壤纤维素酶、蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性与土壤碳、氮、磷循环密切相关,纤维素

酶对分解有机质起着重要作用;蔗糖酶、脲酶及碱性磷酸酶则在碳、氮、磷循环中控制着养分的生物有效性,其活性反映了土壤微生物活性^[24-26]。本研究发现,土壤脱氢酶、纤维素酶、蔗糖酶、脲酶活性在石漠化土壤中均较低,且随着石漠化程度加重,酶活性逐渐降低,尤其在重度石漠化土壤中酶活性最低。

土壤脱氢酶是重要的氧化还原酶,能够催化土壤中有有机质脱氢,起着氢的中间传递体作用,反映土壤微生物新陈代谢的整体活性^[19],参与土壤中木质素的降解^[27]。随石漠化程度加重,土壤脱氢酶活性下降,意味着土壤微生物活性的降低,影响有机质的分解。作为与碳循环有关的胞外酶,纤维素酶对分解有机质亦起着重要作用,本研究中,不同程度石漠化土壤中纤维素酶活性与脱氢酶活性变化规律相同,在中度、重度石漠化土壤中显著低于无石漠化、轻度石漠化土壤,说明中度、重度石漠化土壤微生物活性较低。蔗糖酶是表征土壤微生物活性的一种重要的水解酶,主要参与含碳有机质的分解及腐殖质的合成,其水解产物是植物及土壤微生物的营养源,是土壤碳循环的重要物质^[19],是评价土壤肥力的重要指标之一。通常蔗糖酶活性越强,土壤肥力状况越好^[28]。本研究结果表明,土壤蔗糖酶活性随着石漠化程度的增加而显著降低,表明土壤肥力随石漠化程度的加重而显著下降,削弱了土壤碳循环。

脲酶和碱性磷酸酶活性是反映土壤质量的重要功能指标^[29]。脲酶主要来源于土壤微生物活动、植物根系分泌物,以及动植物残体腐解过程^[30],在土壤氮素循环中具有重要作用,其活性的提高能促进土壤中有有机氮向有效氮的转化^[31-33];而碱性磷酸酶则主要参与土壤磷循环,促进土壤有机磷的转化,提高磷的矿化速率及有效性^[19]。土壤养分循环过程中,植物凋落物经过微生物的分解回到土壤,为土壤微生物的生长及代谢提供营养物质,因此凋落物的成分及凋落量对土壤微生物具有重要的影响^[34]。不同程度石漠化土壤植被种类及覆盖度不同,枯枝落叶的种类与数量差异较大,适于土壤微生物生长的营养源不同,土壤微生物种类及组成亦不同。本研究中,土壤脲酶活性随石漠化程度的加重而降低,碱性磷酸酶活性在重度石漠化土壤中最低。原因可能是无石漠化土壤植被覆盖率较高,其枯枝落叶的分解产物不仅为土壤微生物提供营养物质,还在一定程度上改善了土壤的理化性质,为土壤微生物提供了良好的环境。而随着石漠化程度的提高,氮、磷等养分受到限制,植被覆盖率显著降低,土壤微生物能从枯枝落叶分解产物中获得的养分相对较低,微

生物活性受到影响。脲酶、碱性磷酸酶活性的降低,削弱了土壤氮和磷营养循环,进而在一定程度上削弱土壤供氮和供磷的能力。

3.3 不同程度石漠化土壤养分含量与酶活性的相关性

本研究发现,石漠化程度与土壤 pH 值及有机质、全氮含量呈正相关,与全磷、全钾、速效磷含量呈负相关,说明石漠化在一定程度上改变了土壤性质。土壤有机质、矿质元素等是影响土壤酶活性及稳定性的重要因素^[19],本研究中,石漠化程度与脱氢酶、纤维素酶、蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性呈负相关,证实了由石漠化导致的土壤养分变化显著改变了土壤酶活性。土壤 pH 值及有机质、全氮含量均与脱氢酶、纤维素酶、蔗糖酶、脲酶活性呈极显著负相关,有机质含量还与碱性磷酸酶活性呈显著负相关,全磷含量则与脱氢酶、纤维素酶、蔗糖酶、脲酶活性呈显著正相关;碱解氮含量与脲酶活性呈显著正相关,速效磷含量与脱氢酶、纤维素酶、蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性均呈显著正相关。相关研究表明,土壤有机质、氮、磷等肥力因子与酶活性具有很好的相关性^[8,35],而本研究中土壤有机质、全氮含量与大部分酶活性呈负相关,原因可能是不同程度石漠化土壤中,有机质、全氮含量差异主要是由石灰岩的溶解及其上生长的植被量多少引起的。石漠化程度越重的土壤,石灰岩的溶解程度越大,生长的植物越少,被吸收的养分越少,留存在土壤中的含量越多,这与 QI 等^[2]的研究结果一致。此外,各种酶在土壤生态系统中相互作用,对土壤肥力的形成和转化具有十分重要的意义^[36]。本研究发现,某些酶活性之间亦存在相关关系,如脱氢酶活性与纤维素酶、蔗糖酶、脲酶活性之间呈极显著正相关,蔗糖酶活性与碱性磷酸酶活性之间呈显著正相关,进一步说明土壤酶对养分的转化并不是独立的,而是相互促进、共同作用的。

上述研究表明,石漠化显著增加了土壤 pH 值,增幅为 4.49%~5.80%;从轻度到重度石漠化,土壤有机质含量增加了 1.02~2.99 倍;中度、重度石漠化土壤中全氮含量分别是无石漠化土壤的 1.22、1.25 倍,而全磷含量分别为无石漠化土壤的 66.67%、53.33%,全钾含量分别为无石漠化土壤的 89.81%、86.57%;重度石漠化土壤速效磷含量与无石漠化土壤相比,下降了 25.81%。与无石漠化土壤相比,中度、重度石漠化土壤脱氢酶活性分别降低了 70.83%、83.33%,纤维素酶活性分别下降了 55.0%、80.0%。从轻度到重度石漠化土壤,蔗糖酶活性降

低了 22.33%~71.46%,脲酶活性降低了 31.25%~80.14%,碱性磷酸酶活性在重度石漠化土壤中仅为无石漠化土壤的 24.78%。因此,pH 值可能是表征石漠化的一个指标;土壤有机质和全氮含量越高,并不能反映土壤肥力状况越好,石漠化程度越高的土壤中,有机质和全氮含量反而越高,原因可能跟石灰岩的溶解及植物生长有关;随石漠化程度的增加,土壤脱氢酶、纤维素酶、蔗糖酶、脲酶活性逐渐降低,对养分的转化能力变差。

参考文献:

- [1] YAN X, CAI Y. Multi-scale anthropogenic driving forces of karst rocky desertification in southwest China[J]. Land Degradation & Development, 2015, 26: 193-200.
- [2] QI D, WIENEKE X, TAO J, *et al.* Soil pH is the primary factor correlating with soil microbiome in karst rocky desertification regions in the Wushan County, Chongqing, China[J]. Front Microbiology, 2018, 9: 1027.
- [3] 熊康宁,黎平,周忠发.喀斯特石化的遥感-GIS 典型研究:以贵州省为例[M].北京:地质出版社,2002.
- [4] LI Y B, SHAO J A, YANG H, *et al.* The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area[J]. China Environmental Geology, 2009, 57: 621-627.
- [5] 彭熙,黄英,车家骧,等.不同石漠化等级条件下土壤性状变化规律研究:以贵州喀斯特中心普定站为例[J].中国岩溶,2009,28(4):402-405.
- [6] 宋海燕,张静,赵雅洁,等.不同程度石漠化对金山菜莲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.
- [7] 曾馥平,彭晚霞,宋同清,等.桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复 22 年后群落特征[J].生态学报,2007,27(12):5110-5119.
- [8] 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.
- [9] QI D, WIENEKE X, ZHOU X, *et al.* Succession of vegetation community composition and leaf functional traits in responding to karst rocky desertification in the Wushan County in Chongqing, China[J]. Community Ecology, 2017, 18: 157-168.
- [10] 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.
- [11] 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). DOI: <http://dx.doi.org/10.4238/gmr.15038460>.
- [12] HUANG Q H, CAI Y L, XING X S. Rocky desertifica-

- tion, antidesertification, and sustainable development in the karst mountain region of southwest China[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2008, 37(5): 390-392.
- [13] 李开平, 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.
- [14] 熊康宁, 陈永毕, 陈浒. 点石成金: 贵州石漠化治理技术与模式[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2011.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [20] XIE L, ZHONG J, CHEN 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] KARACA A, CEMA C C, TURGAY O C, *et al.* Soil enzymes as indicator of soil quality[M]. Berlin: Springer, 2011.
- [24] WU F, JIA Z, WANG S, *et al.* Contrasting effects of wheat straw and its biochar on greenhouse gas emissions and enzyme activities in a chernozemic soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49: 555-565.
- [25] YOO G, KANG H. Effects of biochar addition on greenhouse gas emissions and microbial responses in a short-term laboratory experiment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41: 1193-1202.
- [26] ZHOU X, ZHANG Y, DOWNING A. Non-linear response of microbial activity across a gradient of nitrogen addition to a soil from the Gurbantunggut Desert, northwestern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47: 67-77.
- [27] BURNS R G, DEFOREST J L, MARXSEN J, *et al.* Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 216-234.
- [28] 胡斌, 段昌群, 王震洪, 等. 植被恢复措施对退化生态系统土壤酶活性及肥力的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(4): 604-608.
- [29] 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.
- [30] 万忠梅, 吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(6): 87-92.
- [31] 和文祥, 孙会明, 朱明茂. 汞镉对游离和固定化脲酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2003, 40(6): 946-951.
- [32] 李冬坡, 武志杰, 陈利军, 等. 长期培肥黑土脲酶活性动态变化及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2208-2212.
- [33] 薛冬, 姚槐应, 何振立, 等. 红壤酶活性与肥力的关系[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1455-1458.
- [34] 肖育贵. 不同林型凋落物土壤微生物数量动态的研究[J]. *林业科技通讯*, 1996, 17(1): 28-29.
- [35] 刘旭辉, 覃珊, 覃勇荣, 等. 不同植被对石漠化地区土壤纤维素分解酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(18): 335-340.
- [36] 吕国红, 周广胜, 赵先丽, 等. 土壤碳氮与土壤酶相关性研究进展[J]. *辽宁气象*, 2005(2): 6-9.