

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

隋夕然¹, 吴丽芳¹, 王妍^{1,2}, 王紫泉³, 肖羽芯¹, 刘云根^{1,2}, 杨波^{1,2}

(1. 西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学 云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室, 云南 昆明 650224; 3. 中国科学院 南京土壤研究所, 江苏 南京 210008)

摘要: 【目的】探究岩溶石漠化区土壤团聚体养分及酶活性特征, 可为该地区土壤改良和植被恢复提供理论依据。

【方法】以滇中高原 4 种不同石漠化程度(潜在、轻度、中度和重度石漠化)土壤为研究对象, 对其表层土壤 3 种团聚体(粒径<0.25 mm、粒径 0.25~2.00 mm、粒径>2.00 mm)分布特征, 团聚体 4 种水解酶(淀粉酶、脲酶、 β -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶)活性和 3 种养分(有机碳、全氮、全磷)质量分数特征进行分析。【结果】①不同石漠化程度土壤团聚体组成比例随粒径的增大而增大, 由高到低依次为粒径>2.00 mm(51.31%)、粒径 0.25~2.00 mm(36.53%)、粒径<0.25 mm(12.04%)的团聚体。②不同团聚体土壤脲酶、 β -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶、土壤酶活性几何平均数及有机碳、全氮质量分数均随粒径的增大而减小, 对有机碳、全氮、全磷及酶活性的贡献率均为粒径>2.00 mm 的团聚体最高, 其次为粒径 0.25~2.00 mm, 粒径<0.25 mm 的团聚体最低。③不同石漠化程度土壤团聚体淀粉酶活性均值为 $5.70 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 石漠化土壤的石漠化程度从大到小依次为潜在、轻度、重度、中度, 石漠化土壤有机碳、全氮、脲酶和 β -葡萄糖苷酶活性从大到小依次为重度、轻度、潜在、中度。团聚体粒径及石漠化程度均对土壤有机碳、全氮和酶活性有显著影响($P<0.05$), 但粒径和石漠化程度的交互作用对土壤养分及酶活性没有显著影响($P>0.05$)。【结论】在岩溶石漠化地区, 较大粒径的土壤团聚体在土壤组成上占优势, 对土壤养分和酶活性的贡献率也相对较高, 而较小粒径的土壤团聚体更有利于土壤养分和酶活性的积累, 其相应的含量也更高。图 2 表 6 参 45

关键词: 石漠化; 土壤养分; 土壤酶活性; 土壤团聚体

中图分类号: S154.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)01-0115-12

Characteristics of nutrient and enzyme activity in soil aggregates of different rocky desertification levels in central Yunnan Plateau

SUI Xiran¹, WU Lifang¹, WANG Yan^{1,2}, WANG Ziquan³, XIAO Yuxin¹, LIU Yungen^{1,2}, YANG Bo^{1,2}

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Key Laboratory of Ecological Environment Evolution and Pollution Control in Mountainous and Rural Areas of Yunnan Province, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 3. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] With the features of the nutrient and enzyme activity of the soil aggregates in the rocky desertification area carefully investigated, this study is aimed to provide a theoretical basis for the soil improvement and vegetation recovery. [Method] With four kinds of soils with different degrees of rocky desertification (potential, mild, moderate and severe rocky desertification) in the Central Yunnan Plateau as the

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31760245); 云南省教育厅科学研究基金资助项目(2018JS331, 2020J0407); 云南省重点实验室基金资助项目(2020YB001)

作者简介: 隋夕然 (ORCID: 000-0002-5848-1818), 从事石漠化治理研究。E-mail: 545622958@qq.com。通信作者: 杨波 (ORCID: 0000-0002-1204-4305), 工程师, 博士研究生, 从事恢复生态与植物抗逆性修复研究。E-mail: 1023138628@qq.com

research objects, an analysis was conducted of the distribution characteristics of 3 aggregates (the particle sizes were <0.25 , $0.25-2.00$, >2.00 mm respectively), the activity of 4 hydrolytic enzymes (amylase, urease, β -glucoside, acid phosphatase) and the content characteristics of 3 nutrients (organic carbon, total nitrogen, total phosphorus) in the aggregates. [Result] (1) The proportion of aggregates in soil with different degrees of rocky desertification increased with the increase of particle size, from high to low: particle size was >2.00 mm (51.31%), particle size $0.25-2.00$ mm (36.53%), particle size <0.25 mm (12.04%). (2) The geometric mean of soil urease, β -glucoside enzyme, acid phosphatase, soil enzyme activity and organic carbon and total nitrogen content of aggregates with different particle sizes all decreased with the increase of aggregate size. The contribution rate of different particle size aggregates to organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and enzyme activity is the highest when particle size was >2.00 mm, which was followed by the particle size of $0.25-2.00$ mm and the particle size of <0.25 mm in a successive pattern. (3) The mean amylase activity of aggregates with different degrees of stony desertification was $5.70 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, and the change trend for stony desertification soil was potential $>$ mild $>$ severe $>$ moderate whereas the change trend of organic carbon, total nitrogen, urease and β -glucosidase activity for stony desertification soil was severe $>$ mild $>$ potential $>$ moderate. The particle size of aggregates and the degree of rocky desertification had significant effects on soil organic carbon, total nitrogen and enzyme activity ($P < 0.05$), but the interaction of particle size and degree of rocky desertification had no significant effect on soil nutrient and enzyme activity ($P > 0.05$). [Conclusion] In karst rocky desertification areas, soil aggregates with larger particle sizes are dominant in soil composition and have a relatively higher contribution rate to soil nutrient and enzyme activity, while soil aggregates with smaller particle sizes are more conducive to the accumulation of soil nutrients and enzyme activity, with higher corresponding contents as well. [Ch, 2 fig. 6 tab. 45 ref.]

Key words: rock desertification; soil nutrients; soil enzyme activity; soil aggregate

土壤有机质是土壤的重要组成部分,是土壤团聚体形成的胶结物质,同时也是衡量土壤肥力的重要指标,其含量和质量一定程度上影响着土壤团聚体的形成和稳定^[1]。土壤酶作为直接参与土壤生态系统碳、氮、磷代谢的重要动力,主要由高等植物根系和土壤动物分泌、土壤微生物生命活动释放的一类具有高度催化作用的蛋白质组成^[2]。土壤酶中的水解酶具有高效催化水解作用,参与土壤中有机物的转化,能裂解有机化合物中的糖苷键、脂键和肽键等,把高分子化合物水解成植物和微生物可利用的营养物质,在促进土壤有机物质分解和腐殖质合成、生态系统的物质循环及能量流动中起着重要作用^[3-4]。土壤酶活性作为土壤质量的生物活性指标,比土壤物理、化学指标对土壤环境的变化更敏感^[5],它可以从本质上反映土壤碳、氮、磷的转化强度,对土壤生态系统中各种生物化学过程调控的功能发挥具有重要的意义^[6]。团聚体作为土壤结构的基本单元,能协调土壤中的水、肥、气、热以及维持和稳定不同土壤层,是形成良好土壤结构的物质基础^[7]。不同粒径团聚体不仅决定着土壤形态特征、孔隙的分布和数量等土壤理化性质,更在土壤养分供应、保持及转化等方面发挥着重要作用^[7-8]。岩溶石漠化是中国西南地区主要的土地退化形式,虽然石漠化整体扩展趋势得到了有效遏制,生态状况稳定好转^[9],但局部石漠化土地仍在扩展,加之岩溶生态系统属于脆弱生态区,石漠化治理具有长期性和艰巨性特点^[10]。多年来,石漠化区域进行了大规模的退耕还林还草等植被恢复活动,很多研究关注植被恢复过程对土壤肥力的影响,主要集中在土壤养分空间分布及在石漠化恢复过程中的变化规律^[11]、土壤水文结构特征^[12]、不同植被恢复模式的优劣^[13]、土壤微生物群落结构特征^[14]、人为活动对土壤物理化学性质的影响等方面,关于土壤酶活性,尤其是水解酶的分布特征鲜有报道。此外,以往研究土壤酶活性时多以过筛后均匀混合的土壤样品作为研究对象^[6,15-18],很少考虑到团聚体中酶活性的变化情况。事实上,不同粒径团聚体的形成环境和胶结类型不同,常导致团聚体的稳定性及内部物质组成等表现出特殊性,进而导致不同粒径团聚体之间土壤酶活性^[5]和养分的差异^[15],因此,探究岩溶区土壤团聚体碳、氮、磷含量及水解酶活性特征具有重要意义。为此,本研究选择滇中高原典型岩溶石漠化区为研究区域,以4种石漠化程

度(潜在、轻度、中度、重度)的土壤为研究对象,探究土壤团聚体分布特征以及碳、氮、磷和水解酶活性在团聚体中的分布情况,为岩溶石漠化区土壤改良和植被恢复提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市石林县(24°38′~24°58′N, 103°11′~103°29′E),海拔 1 500~1 900 m,属亚热带低纬度高原山地季风气候,干湿季差异明显,年均气温约 16.0 ℃,年均降水量 946.0 mm,多集中在 5—10 月。该县石漠化土地约占国土面积的 20%,以中度为主,其次为轻度、强度石漠化土地。境内为滇中岩溶高原红壤分布地带,土壤 pH 为 4.5~6.5,主要土壤类型为红壤、紫色土和水稻土,以石灰岩红壤分布最广,约 85.2%,石灰岩红壤普遍质地黏重,通透性差,有机质含量低。2016 年石林县林业局调查结果显示:石林岩溶石漠生境土地面积约 2.9 万 hm²,包括轻度 1.1 万 hm²、中度 1.3 万 hm² 和重度 0.5 万 hm²^[19]。研究区植物类型大都以由先锋物种构成的低矮灌丛为主,多生长于裸露岩石的缝隙中,无明显的乔木层,成零星状分布,灌木与同一地区的亚热带常绿阔叶林的次生林灌木相近,植被覆盖率均较低。优势植被主要有云南松 *Pinus yunnanensis*、桤木 *Alnus cremastogyne*、柏木 *Cupressus funebris*、清香木 *Pistacia weinmannifolia*、云南含笑 *Michelia yunnanensis*、茅叶荩草 *Arthraxon prionodes*、沙针 *Osyris wightiana*、地石榴 *Ficus tikoua*、薄皮木 *Leptodermis oblonga*、四脉金茅 *Eulalia quadrinervis*、铁仔 *Myrsine africana*、破坏草 *Ageratina adenophora* 等。

1.2 样地布设与样品采集

2018 年 4 月,选择发育类型基本相同,海拔、坡度、坡向等相近,成土母质相同且具有代表性的不同石漠化程度(潜在、轻度、中度和重度)土壤为研究对象。石漠化程度的划分参照王宇等^[20]的方法。随机设置面积为 10 m×10 m 的 3 个样方,每个样方内按“S”型设置 5 个采样点。由于石漠化区基岩裸露、土层浅薄,采集 0~10 cm 土层土壤样品。采样时先去除凋落物及腐殖质层,再采集土样,装入自封袋,带回实验室进行后续分析处理。土样沿自然结构掰成直径约 1 cm 的土块,去除动植物残体后置于室内阴凉通风处风干,风干后取一部分土样用于测定全土理化性质及酶活性,剩余部分用干筛法^[21]分离出粒径<0.25 mm、粒径 0.25~2.00 mm、粒径>2.00 mm 团聚体用于测定土壤团聚体理化性质及酶活性。土壤团聚体的分离方法如下:将土样放在筛上,按筛孔大小(直径 0.25 mm、2.00 mm)套好,用手摇动筛子,直至筛上的土团不再下漏为止,从而将土样分成粒径>2.00 mm、粒径 0.25~2.00 mm、粒径<0.25 mm 共 3 个粒级,最后收集筛上的土样,分别称量,计算各粒级土壤团聚体质量分数。样地基本概况如表 1 所示。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic information of the plot

石漠化程度	海拔/m	经度(E)	纬度(N)	pH	有机碳/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	主要植被	裸岩面积比例/%
潜在	1 853~1 855	103°20′41.8″~ 103°20′43.7″	24°46′04.1″~ 24°46′05.8″	4.68	24.20±3.14 b	1.57±0.27 c	1.08±0.15 c	云南松、云南含笑、清香木、铁仔、四脉金茅、茅叶荩草、破坏草	0~30
轻度	1 852~1 862	103°20′37.6″~ 103°20′39.5″	24°46′03.4″~ 24°46′06.0″	5.35	32.60±2.38 a	2.18±0.20 b	0.94±0.15 c	云南松、云南杨梅、铁仔、沙针、茅叶荩草、破坏草、鬼针草	30~50
中度	1 831~1 833	103°20′40.9″~ 103°20′48.5″	24°46′25.7″~ 24°46′30.6″	4.87	13.74±1.64 c	1.05±0.09 d	1.69±0.31 b	云南松、小雀花、薄皮木、铁仔、破坏草	50~70
重度	1 822~1 833	103°20′28.3″~ 103°20′31.5″	24°46′12.5″~ 24°46′13.6″	5.66	34.34±5.49 a	2.73±0.43 a	2.74±0.74 a	云南松、铁仔、茅叶荩草、破坏草、鬼针草	>70

说明:有机碳、全氮、全磷数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同石漠化程度间土壤养分差异显著($P<0.05$)。云南杨梅 *Myrica nana*; 鬼针草 *Bidens pilosa*; 小雀花 *Campylotropis polyantha*

1.3 样品的测定与分析

土壤有机碳、全氮、全磷、pH 的测定参照鲍士旦^[22]的方法进行;淀粉酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[23]测定,脲酶采用靛酚蓝比色法^[24]测定,土壤 β -葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶采用硝基苯底物比色法^[23]测定,并测定了不同粒径团聚体及混合土壤的各项指标。

土壤团聚体平均质量直径 (D_{MW} , mm) 的计算公式^[25]:

$$D_{MW} = \sum_{i=1}^n (d_i w_i) / \sum_{i=1}^n w_i \quad (1)$$

式 (1) 中: d_i 为第 i 粒径团聚体直径的平均值 (mm); w_i 为第 i 粒径团聚体的质量分数 (%)。团聚体贡献率计算公式^[26]:

$$\text{团聚体的贡献率} = \frac{\text{该级团聚体中酶活性(养分质量分数)} \times \text{该级团聚体质量分数}(\%)}{\text{土壤中酶活性(养分质量分数)}} \times 100\% \quad (2)$$

土壤酶活性几何平均数 (M)^[27] 是综合评价土壤酶活性的指标,也是指示土壤生物质量的综合指标,可以反映土壤质量的变化。计算公式为:

$$M = \sqrt[4]{E_{Amy} \times E_{Ure} \times E_{Glu} \times E_{ACP}} \quad (3)$$

式 (3) 中: E_{Amy} 为淀粉酶活性 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); E_{Ure} 为脲酶活性 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); E_{Glu} 为 β -葡萄糖苷酶活性 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); E_{ACP} 为酸性磷酸酶活性 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)。

1.4 数据处理与分析

运用 Excel 2010、SPSS 21.0 对数据进行分析处理。采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 检验相同粒径不同石漠化程度之间的差异,同时检验相同石漠化程度不同粒径之间的差异;采用双因素方差分析 (two-way ANOVA) 检验粒径、石漠化程度及其交互因子对土壤团聚体碳、氮、磷及其土壤酶活性的影响。显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同石漠化程度土壤团聚体组成及稳定性

同种石漠化程度不同粒径土壤团聚体组成比例随粒径的增大而增大。不同石漠化程度土壤团聚体质量分数从大到小依次为粒径 > 2.00 mm、粒径 $0.25 \sim 2.00$ mm、粒径 < 0.25 mm, 粒径 > 2.00 mm 和粒径 $0.25 \sim 2.00$ mm 的质量分数分别是粒径 < 0.25 mm 的 4.26 和 3.03 倍。不同石漠化程度土壤团聚体组成均以粒径 > 2.00 mm 为主,其中重度石漠化土壤团聚体质量分数高达 58.47%,显著高于中度石漠化土壤 ($P < 0.05$);重度石漠化土壤粒径 $0.25 \sim 2.00$ mm 团聚体质量分数显著低于其他石漠化程度 ($P < 0.05$);不同石漠化程度土壤团聚体平均质量直径 (D_{MW}) 从大到小依次为重度、潜在、轻度、中度,且潜在和轻度石漠化土壤的 D_{MW} 差异不显著 ($P > 0.05$) (表 2)。

2.2 不同石漠化程度土壤团聚体碳、氮、磷特征

土壤有机碳质量分数在粒径 < 0.25 mm 的团聚体中,为 $17.40 \sim 40.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,在粒径 $0.25 \sim 2.00$ mm 的

表 2 不同石漠化程度土壤团聚体组成特征

Table 2 Composition characteristics of soil aggregates at different levels of rocky desertification

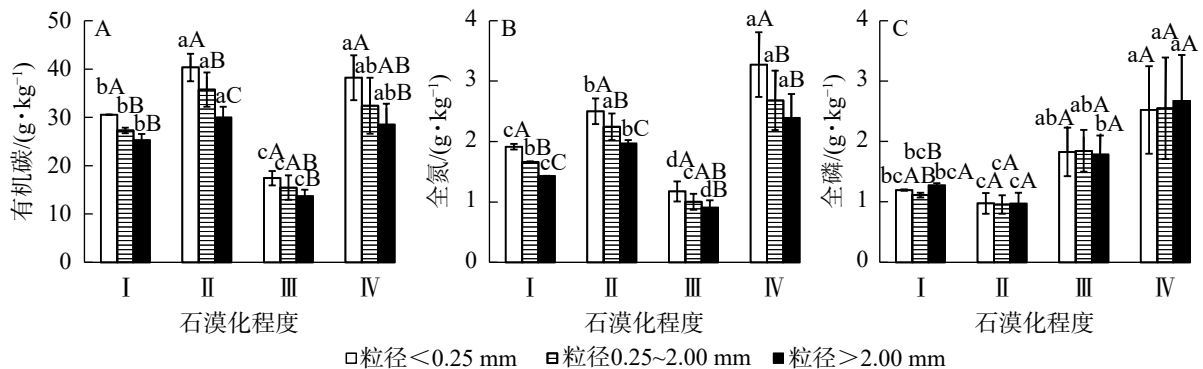
石漠化程度	土壤团聚体质量分数/%			D_{MW}/mm
	粒径 < 0.25 mm	粒径 $0.25 \sim 2.00$ mm	粒径 > 2.00 mm	
潜在	12.00 $\pm$ 0.04 aC	35.60 $\pm$ 0.06 abB	52.20 $\pm$ 0.09 abA	2.25 $\pm$ 0.26 ab
轻度	11.60 $\pm$ 0.04 aC	39.20 $\pm$ 0.08 aB	49.07 $\pm$ 0.11 abA	2.17 $\pm$ 0.31 ab
中度	14.50 $\pm$ 0.07 aB	39.86 $\pm$ 0.08 aA	45.50 $\pm$ 0.10 bA	2.05 $\pm$ 0.28 b
重度	10.07 $\pm$ 0.04 aC	31.47 $\pm$ 0.08 bB	58.47 $\pm$ 0.11 aA	2.41 $\pm$ 0.31 a

说明: 数据为平均值 $\pm$ 标准差; 同列不同小写字母表示相同粒径不同石漠化程度土壤团聚体质量分数差异显著 ($P < 0.05$); 同行不同大写字母表示相同石漠化程度不同粒径团聚体质量分数差异显著 ($P < 0.05$)

团聚体中, 为 $15.45\sim 35.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在粒径 $>2.00\text{ mm}$ 的团聚体中, 为 $13.65\sim 29.94\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 各粒径土壤团聚体有机碳质量分数随粒径的增大而降低, 且在小粒径团聚体中有机碳质量分数较高。相同粒径不同石漠化程度土壤中, 潜在和中度石漠化土壤有机碳质量分数显著低于轻度、重度石漠化土壤 (图 1A) ($P<0.05$)。表 3 表明: 粒径和石漠化程度对土壤有机碳影响显著 ($P<0.05$), 但粒径和石漠化程度的交互作用对土壤有机碳影响不显著 ($P>0.05$)。

土壤全氮质量分数在粒径 $<0.25\text{ mm}$ 时, 为 $1.17\sim 3.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在粒径 $0.25\sim 2.00\text{ mm}$ 时, 为 $1.00\sim 2.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在粒径 $>2.00\text{ mm}$ 时, 为 $0.90\sim 2.39\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 各粒径土壤团聚体全氮质量分数随粒径的增大而降低 (图 1B)。相同粒径团聚体不同石漠化程度土壤中, 潜在和中度石漠化土壤全氮质量分数显著低于轻度、重度石漠化土壤 ($P<0.05$), 其中粒径 $<0.25\text{ mm}$ 和 $>2.00\text{ mm}$ 的石漠化土壤全氮质量分数从大到小依次为重度、轻度、潜在、中度。表 3 表明: 粒径和石漠化程度对土壤全氮影响显著 ($P<0.05$), 但粒径和石漠化程度的交互作用对全氮影响不显著 ($P>0.05$)。

土壤全磷质量分数在粒径 $<0.25\text{ mm}$ 时, 为 $0.98\sim 2.52\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在粒径 $0.25\sim 2.00\text{ mm}$ 时, 为 $0.96\sim 2.55\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在粒径 $>2.00\text{ mm}$ 时, 为 $0.97\sim 2.67\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 各粒径团聚体全磷质量分数差异不显著 (图 1C) ($P>0.05$)。表 3 表明: 石漠化程度对土壤全磷影响显著 ($P<0.05$), 但粒径、粒径和石漠化程度的交互作用对全磷影响不显著 ($P>0.05$)。



I. 潜在石漠化; II. 轻度石漠化; III. 中度石漠化; IV. 重度石漠化。不同小写字母表示相同粒径不同石漠化程度土壤粒径团聚体养分差异显著 ($P<0.05$); 不同大写字母表示相同石漠化程度不同粒径团聚体土壤养分差异显著 ($P<0.05$)

图 1 不同石漠化程度土壤团聚体碳、氮、磷变化

Figure 1 Change of soil aggregates C, N, P contents under different rocky desertification degrees

表 3 土壤有机碳、全氮、全磷及土壤酶活性双因素方差分析

Table 3 Two-factor variance analysis of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and soil enzyme activity

变异来源	P						
	有机碳	全氮	全磷	淀粉酶	脲酶	β -葡萄糖苷酶	酸性磷酸酶
粒径	0.000*	0.000*	0.939	0.000*	0.000*	0.000*	0.002*
石漠化程度	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*
粒径 $\times$ 石漠化程度	0.266	0.322	0.999	0.000*	0.298	0.098	0.737

说明: *表示差异显著($P<0.05$)

2.3 不同石漠化程度土壤团聚体酶活性特征

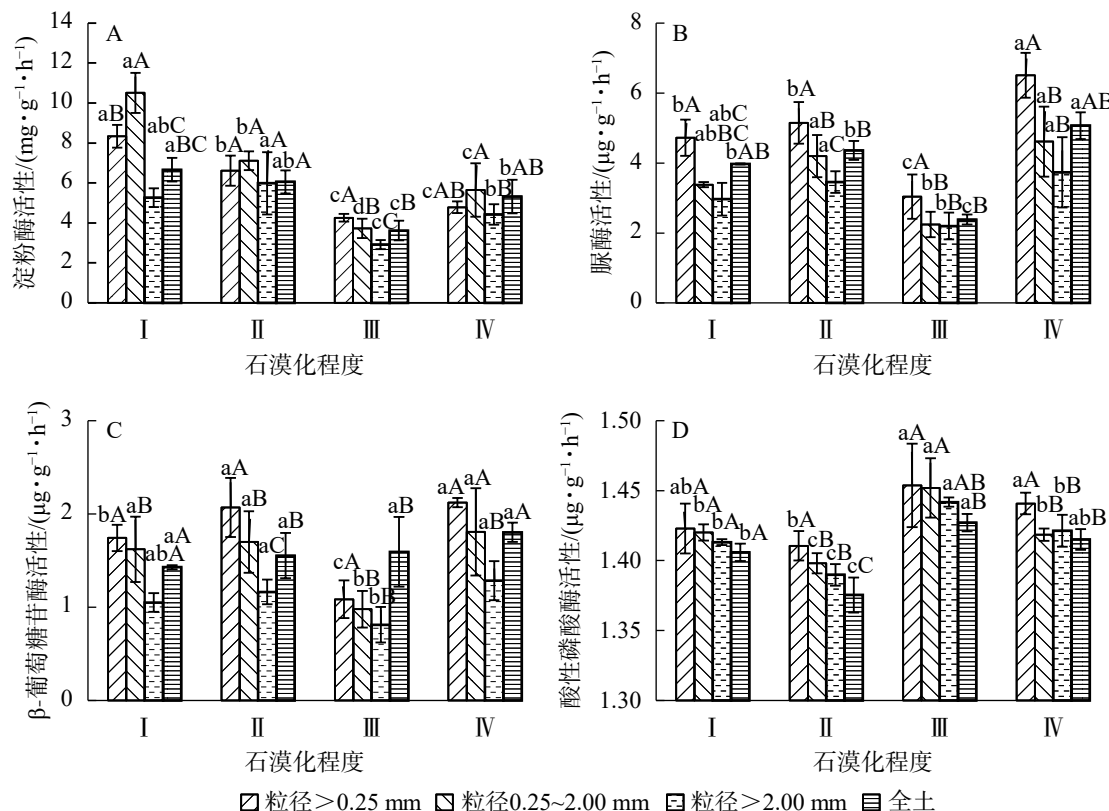
2.3.1 淀粉酶活性 不同粒径土壤团聚体淀粉酶活性为 $2.91\sim 10.51\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 各石漠化程度土壤酶活性从大到小依次为潜在、轻度、重度、中度 (图 2A)。粒径 $<0.25\text{ mm}$ 及粒径 $0.25\sim 2.00\text{ mm}$ 的团聚体土壤酶活性较高, 均值分别为 5.99 、 $6.75\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; 粒径 $>2.00\text{ mm}$ 的团聚体土壤酶活性最低 ($4.64\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)。粒径 $<0.25\text{ mm}$ 的团聚体中, 潜在、轻度与中度、重度石漠化程度土壤淀粉酶活性差异显著 ($P<0.05$); 粒径 $0.25\sim 2.00\text{ mm}$ 的团聚体中, 各石漠化程度土壤酶活性差异显著 ($P<0.05$); 粒径 $>2.00\text{ mm}$ 的团聚体中, 中度石漠化土壤淀粉酶活性显著低于潜在、轻度、重度石漠化土壤。潜在、中度石漠化不同粒径土壤酶活性差异显著, 轻度、重度石漠化程度各粒径土壤酶活性差异不显著。双因素方差分析表明: 粒

径、石漠化程度及粒径和石漠化程度的交互作用均对淀粉酶活性有显著影响 ($P < 0.05$) (表 3)。

2.3.2 脲酶活性 不同粒径团聚体土壤脲酶活性为 $2.20 \sim 6.51 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 各石漠化程度酶活性从大到小依次为重度、轻度、潜在、中度。由图 2B 可知: 不同粒径团聚体土壤脲酶活性随粒径增大而降低。由差异性分析可知: 粒径 $< 0.25 \text{ mm}$ 的团聚体中, 潜在、轻度石漠化与中度、重度石漠化土壤酶活性差异显著 ($P < 0.05$), 各石漠化程度粒径 $< 0.25 \text{ mm}$ 的团聚体土壤酶活性显著高于粒径 $0.25 \sim 2.00 \text{ mm}$ 、粒径 $> 2.00 \text{ mm}$ 的团聚体酶活性。由表 3 可知: 粒径、石漠化程度对土壤脲酶活性影响显著 ($P < 0.05$)。

2.3.3 β -葡萄糖苷酶活性 不同粒径团聚体土壤 β -葡萄糖苷酶活性为 $0.81 \sim 2.12 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 各石漠化程度土壤酶活性从大到小依次为重度、轻度、潜在、中度。由图 2C 可知: 不同粒径团聚体酶活性随粒径增大而降低。粒径 $< 0.25 \text{ mm}$ 和粒径 $0.25 \sim 2.00 \text{ mm}$ 的团聚体中, 中度石漠化土壤酶活性显著低于潜在、轻度、重度石漠化土壤酶活性 ($P < 0.05$)。由表 3 可知: 粒径、石漠化程度对土壤 β -葡萄糖苷酶活性影响显著 ($P < 0.05$), 粒径和石漠化程度的交互作用对 β -葡萄糖苷酶活性影响不显著 ($P > 0.05$)。

2.3.4 酸性磷酸酶活性 不同粒径团聚体土壤酸性磷酸酶活性为 $1.39 \sim 1.45 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 均值为 $1.42 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 2D)。不同石漠化程度及不同粒径团聚体土壤酸性磷酸酶活性差异均较小。粒径和石漠化程度均对酸性磷酸酶活性影响显著 ($P < 0.05$), 但粒径和石漠化程度的交互作用对其无显著影响 ($P > 0.05$) (表 3)。



I. 潜在石漠化; II. 轻度石漠化; III. 中度石漠化; IV. 重度石漠化。不同小写字母表示相同粒径不同石漠化程度土壤粒径团聚体养分差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示相同石漠化程度不同粒径团聚体土壤养分差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 不同石漠化程度下土壤团聚体酶活性的变化

Figure 2 Enzymatic change of soil aggregates in different degrees of rocky desertification

2.4 不同石漠化程度土壤团聚体养分与酶活性综合评价

2.4.1 土壤团聚体酶活性几何平均数 从表 4 可知: 潜在、轻度、中度和重度石漠化土壤团聚体酶活性几何平均数分别为: $12.33 \sim 17.67$ 、 $13.40 \sim 17.68$ 、 $9.25 \sim 11.91$ 、 $13.68 \sim 18.17 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。中度石漠化土壤团聚体各粒径酶活性几何平均数均显著低于潜在、轻度、重度石漠化 ($P < 0.05$), 而潜在、轻度、重度石漠化土壤各粒径团聚体酶活性几何平均数差异不显著 ($P > 0.05$)。从土壤团聚体来看, 土壤酶活性几何平均数随团聚体粒径的增大而减小, 说明小团聚体更利于土壤酶活性的积累。

表 4 土壤酶活性几何平均数

石漠化程度	几何平均数/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)			全土
	粒径<0.25 mm	粒径0.25~2.00 mm	粒径>2.00 mm	
潜在	17.67±1.09 aA	16.86±0.58 aAB	12.33±1.06 aC	15.18±0.04 aB
轻度	17.68±0.73 aA	16.27±1.35 aB	13.40±0.81 aC	15.37±0.78 aB
中度	11.91±1.21 bA	10.40±1.12 bB	9.25±0.95 bB	11.78±1.05 bA
重度	18.17±1.23 aA	16.75±3.39 aA	13.68±1.96 aB	16.53±1.21 aA

说明：数值为平均值±标准差；同列不同小写字母表示相同粒径不同石漠化程度土壤团聚体酶几何平均数差异显著($P<0.05$)；同行不同大写字母表示相同石漠化程度不同粒径团聚体土壤酶活性几何平均数差异显著($P<0.05$)

2.4.2 各粒径土壤团聚体碳、氮、磷与酶活性的贡献率 不同石漠化程度下，土壤淀粉酶、脲酶、β-葡萄糖苷酶活性及土壤有机碳、全氮、全磷贡献率均为粒径 0.25~2.00 mm、粒径>2.00 mm 的团聚体显著高于粒径<0.25 mm(表 5, 表 6)($P<0.05$)。酸性磷酸酶活性在粒径>2.00 mm 的团聚体中贡献率显著高于粒径<0.25 mm、粒径 0.25~2.00 mm 的团聚体；全氮和全磷在相同石漠化程度不同粒径团聚体中各粒级贡献率差异显著 ($P<0.05$)。重度石漠化土壤淀粉酶、脲酶、β-葡萄糖苷酶活性、有机碳、全氮、全磷各粒级贡献率差异显著 ($P<0.05$)。本研究表明：粒径>2.00 mm 的团聚体在土壤养分含量中不是最高，但在各石漠化程度中都占了优势，因此它的贡献率最高。

表 5 不同石漠化程度土壤团聚体养分贡献率

土壤养分	石漠化程度	养分贡献率/%		
		粒径<0.25 mm	粒径0.25~2.00 mm	粒径>2.00 mm
有机碳	潜在	15.80±0.01 aC	39.69±0.02 aB	55.49±0.01 aA
	轻度	14.52±0.02 abB	43.02±0.04 aA	49.38±0.06 aA
	中度	18.54±0.03 aB	45.03±0.05 aA	45.21±0.05 aA
	重度	11.15±0.03 bC	29.64±0.06 bB	48.82±0.09 aA
全氮	潜在	15.27±0.01 abC	37.30±0.02 abB	48.48±0.00 aA
	轻度	13.47±0.02 abC	40.41±0.02 aB	44.68±0.05 abA
	中度	16.12±0.02 aB	38.09±0.04 abA	38.70±0.02 bA
	重度	12.02±0.03 bC	30.91±0.07 bB	51.05±0.089 aA
全磷	潜在	13.45±0.01 abC	35.18±0.00 bcB	60.79±0.01 aA
	轻度	12.11±0.01 bcC	40.01±0.04 abB	50.67±0.06 bA
	中度	15.63±0.02 aC	43.79±0.03 aB	47.97±0.02 bA
	重度	9.25±0.03 cC	29.02±0.07 cB	56.68±0.09 abA

说明：数值为平均值±标准差；同列不同小写字母表示相同粒径不同石漠化程度土壤团聚体养分贡献率差异显著($P<0.05$)；同行不同大写字母表示相同石漠化程度不同粒径团聚体土壤养分贡献率差异显著($P<0.05$)

3 讨论

3.1 石漠化程度对土壤团聚体组成及稳定性的影响

土壤团聚体的组成比例及稳定性是评价土壤结构的重要指标，稳定的团聚体可以减少土壤可侵蚀性及提升土壤肥力^[28]。土壤颗粒在持久性胶结物质的作用下形成粒径<0.25 mm 的微团聚体，具有抵抗机械破坏和调节土壤水、肥、气、热以及各种生物活动等功能^[29]，之后在瞬时性及暂时性的胶结物质作用下逐级形成粒径>0.25 mm 的大团聚体^[30]。团聚体的比例能反映不同石漠化程度土壤结构的稳定性。研究区不同石漠化程度土壤粒径团聚体组成比例随粒径的增大而增大，且粒径>0.25 mm 团聚体质量分数均值高达 87.84%，说明该研究区土壤团聚性较强，分散性较弱，这与黄永珍等^[31]、廖洪凯等^[32]的研究结果基本一致。该研究认为：表征土壤团聚体结构稳定性的土壤团聚体平均质量直径从大到小依次为重

表6 不同石漠化程度土壤团聚体酶活性贡献率

Table 6 Contribution rates of soil aggregates enzyme activities in different degrees of rocky desertification

土壤酶	石漠化程度	酶活性贡献率/%		
		粒径<0.25 mm	粒径0.25~2.00 mm	粒径>2.00 mm
淀粉酶	潜在	15.53±0.01 aC	55.00±0.03 aA	41.62±0.00 aB
	轻度	12.77±0.01 bB	46.53±0.07 abA	48.22±0.11 aA
	中度	17.13±0.01 aB	41.48±0.05 bcA	36.91±0.05 aA
	重度	9.02±0.02 cC	33.58±0.10 cB	48.95±0.09 aA
脲酶	潜在	14.68±0.01 aB	29.66±0.01 aA	39.36±0.06 aA
	轻度	13.74±0.01 aB	37.73±0.05 aA	38.82±0.03 aA
	中度	18.20±0.02 aB	37.41±0.03 aA	41.59±0.06 aA
	重度	13.78±0.05 aC	32.90±0.14 aB	45.02±0.07 aA
β-葡萄糖苷酶	潜在	15.08±0.00 aB	39.44±0.07 abA	38.73±0.03 aA
	轻度	16.04±0.04 aB	44.98±0.17 aA	37.31±0.06 aA
	中度	10.04±0.02 bB	25.01±0.04 bA	23.13±0.02 bA
	重度	11.82±0.03 abB	32.19±0.12 abA	41.23±0.06 aA
酸性磷酸酶	潜在	12.56±0.01 abB	12.52±0.01 abB	52.99±0.01 abA
	轻度	12.00±0.01 abB	11.89±0.01 abB	49.59±0.04 bA
	中度	14.86±0.02 aB	14.82±0.02 aB	45.73±0.02 bA
	重度	10.22±0.03 bB	10.06±0.03 bB	58.75±0.09 aA

说明：数值为平均值±标准差；同列不同小写字母表示相同粒径不同石漠化程度土壤团聚体酶活性贡献率差异显著($P<0.05$)；同行不同大写字母表示相同石漠化程度不同粒径团聚体土壤酶活性贡献率差异显著($P<0.05$)

度、潜在、轻度、中度、重度石漠化土壤团聚体平均质量直径较高，可能是由于该区虽然岩石裸露率高，植被覆盖率低，但岩石空隙草本植物较多。有研究认为：天然草地土壤团聚体稳定性高于灌木林地^[33]，潜在石漠化和轻度石漠化由于植被覆盖率及种类较多，导致植被凋落物量大且凋落物分解速率显著高于其他石漠化程度植被凋落物，使得土壤活性有机质的积累促进了较大粒径团聚体的形成^[34]。中度石漠化由于植被覆盖率较低，受到的人为干扰更多，增强了对表层土壤大团聚体的破坏。

3.2 石漠化程度对土壤团聚体碳、氮、磷及酶活性特征的影响

土壤团聚体粒径对酶活性的分布有重要影响，研究区土壤团聚体酶几何平均数、脲酶、β-葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶活性均随粒径的增大而减小，淀粉酶活性在粒径<0.25 mm和粒径0.25~2.00 mm的团聚体中较高，在粒径>2.00 mm的团聚体中最低，这与姬秀云等^[35]的研究结果一致。朱家琪等^[36]研究也显示：蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性随着团聚体粒径的减小而增大，其中粒径0.25 mm团聚体的酶活性最高。NIE等^[37]研究表明：大团聚体不利于土壤酶活性的累积。此外，在植被恢复过程中，小粒径团聚体先形成^[17]，因此导致包裹在大团聚体内部的小粒径团聚体具有稳定的有机物质、酶及其底物。

本研究显示：不同石漠化程度土壤团聚体有机碳及全氮质量分数均为重度和轻度石漠化显著高于潜在和中度石漠化，粒径<0.25 mm团聚体的有机碳、全氮质量分数均显著高于粒径0.25~2.00 mm和粒径>2.00 mm的团聚体。这是因为土壤团聚体对养分的吸附能力与比表面积呈正比，在质量相同的情况下，粒径越小的土壤团聚体，比表面积越大^[31]，其次，有机质在团聚体形成的最开始阶段起到的作用更突出，所以较小粒级团聚体中的有机碳高于较大的粒径团聚体^[38]。马瑞萍等^[39]研究显示：粒径<0.25 mm的团聚体总有机碳含量较高，可能是由于微团聚体中有机碳主要以稳定的腐殖质碳为主，而大团聚体中有机碳则主要以易分解、矿化的活性有机碳为主。因此，小团聚体中有机碳不断积累，而大团聚体中由于活性有机碳的分解、矿化，导致总有机碳含量不断降低。粒径<0.25 mm的团聚体全氮高，主要受到有机碳含量以及小粒级团聚体对铵根离子(NH_4^+)吸附力较高的影响^[40]。不同石漠化程度土壤全磷含量在各粒级团聚体中分布较均匀，这与卢怡等^[26]的研究结果一致。可能是因为全磷含量在土壤中不易迁移，从而使它在土壤中比较稳定。

本研究区重度石漠化土壤团聚体养分、酶活性均较高,这与大多数的研究结果有所不同,可能是由于该区虽然岩石裸露率高,但雨水冲击等作用导致局部土壤肥沃,岩石空隙间生长了大量的草本植物,其发达的根系,使石漠化程度严重,石灰岩的溶解程度加大,分解出的有机质增多^[41]。另外,有研究显示:岩石裸露率较高的地方养分元素并非一定减少,而是呈一定的正相关性,因为基岩裸露的过程其实也是石面土壤被侵蚀、养分物质在岩隙和石槽中沉积的过程^[42],这与杨丹等^[17]、张伟等^[42]的研究结果一致。中度石漠化区土壤团聚体有机碳、全氮含量显著低于潜在、轻度、重度石漠化,淀粉酶、脲酶、 β -葡萄糖苷酶活性均最低,酸性磷酸酶活性最高。卢怡等^[26]研究表明:土壤养分与酶活性之间有显著相关性。吴丽芳等^[43]研究显示:不同石漠化程度土壤有机碳、全氮与淀粉酶、脲酶、 β -葡萄糖苷酶活性呈显著正相关,与酸性磷酸酶活性呈负相关,表明酶活性对土壤中各形态有机碳及全氮之间的相互转化起到重要作用。还有研究表明:有机质含量高的土壤团聚体中酶活性较高^[44]。研究区中度石漠化土壤酶活性较低,是由于该区属于植被恢复初期,植被覆盖率较低,凋落物量较少,因此土壤养分含量较低。而潜在石漠化与轻度石漠化区植被覆盖率相对较高,有一定的凋落物及腐殖质覆盖在土壤表层,导致底物增加,进而诱导酶活性增强^[19]。酸性磷酸酶活性在不同石漠化程度土壤团聚体中差异不明显,是因为酸性磷酸酶活性是影响土壤磷素有效性的重要因子,而土壤中的磷素大部分是以迟效性状态存在^[45],在土壤中移动性较小。土壤碳、氮已被广泛证实是影响土壤酶活性的主要因素^[17]。因此要提高岩溶石漠化区土壤酶活性,应优先提高土壤有机质含量,而进行植被修复又是提高岩溶区土壤养分含量的有效措施。

3.3 不同粒径团聚体对土壤养分的贡献率

将不同粒径团聚体的组成比例与团聚体中土壤养分进行综合考虑,可以全面反映各粒径团聚体对土壤养分的贡献率。本研究发现:不同石漠化程度土壤中,粒径 $>2.00\text{ mm}$ 和粒径 $0.25\sim 2.00\text{ mm}$ 的团聚体是土壤养分的主要来源,粒径 $<0.25\text{ mm}$ 的团聚体对土壤碳、氮、磷及土壤酶活性贡献率最低。虽然土壤有机碳、全氮、全磷及脲酶、 β -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶活性在粒径 $>2.00\text{ mm}$ 的团聚体中均较低,但由于土壤中粒径 $>2.00\text{ mm}$ 团聚体的组成比例最高,所以粒径 $>2.00\text{ mm}$ 的团聚体对土壤养分的贡献率才显示出较高值。这也进一步说明不同粒径团聚体对土壤养分及酶活性的贡献率与团聚体含量的高低有关。邱莉萍等^[38]研究也发现:团聚体含量是引起团聚体养分贡献率变化的主要因素。

4 结论

在岩溶区不同石漠化程度土壤粒径团聚体中,较大粒径的土壤团聚体在土壤组成上占优势,对土壤养分和酶活性的贡献率也相对较高,而较小粒径的土壤团聚体更有利于土壤营养元素和酶活性的积累,其相应的含量也更高。土壤养分及酶活性在土壤团聚体中的分布情况,可作为评价石漠化地区土壤地力的指标之一,为该地区土壤改良和植被恢复提供数据支撑和理论依据。在不同石漠化程度土壤中,淀粉酶活性变化趋势从大到小依次为潜在、轻度、重度、中度的石漠化土壤,有机碳、全氮、脲酶和 β -葡萄糖苷酶活性变化趋势从大到小依次为重度、轻度、潜在、中度的石漠化土壤。研究区重度石漠化土壤养分及酶活性较高,可对重度石漠化区进行一定的植被恢复。

5 参考文献

- [1] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(10): 2176 – 2182.
PENG Xinhua, ZHANG Bin, ZHAO Qiguo. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, 23(10): 2176 – 2182.
- [2] 孔爱辉, 吴京科. 我国土壤水解酶活性研究进展[J]. *现代农业科技*, 2012(16): 251 – 253.
KONG Aihui, WU Jingke. Research advances for soil hydrolase activity in China [J]. *Modern Agric Sci Technol*, 2012(16): 251 – 253.
- [3] GRANDY A S, NEFF J C, WEINTRAUB M N. Carbon structure and enzyme activities in alpine and forest ecosystems [J]. *Soil Biol Biochem*, 2007, 39(11): 2701 – 2711.
- [4] RUTIGLIANO F A, CASTALDI S, ASCOLI R D, *et al.* Soil activities related to nitrogen cycle under three plant cover types in Mediterranean environment [J]. *Appl Soil Ecol*, 2009, 43(1): 40 – 46.

- [5] 齐思明, 韩瑛, 陈祥伟. 植被恢复对典型黑土层土壤团聚体水解酶活性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2017, **45**(6): 42–46.
QI Siming, HAN Ying, CHEN Xiangwei. Effect of vegetation restoration on soil aggregates enzyme activity in typical black soil region [J]. *J Northeast For Univ*, 2017, **45**(6): 42–46.
- [6] 范艳春, 王鹏程, 肖文发, 等. 三峡库区2类典型森林5种土壤酶季节动态及其与养分的关系[J]. *华中农业大学学报*, 2014, **33**(4): 39–44.
FAN Yanchun, WANG Pengcheng, XIAO Wenfa, *et al.* Seasonal dynamics of soil enzymes and its relationship with nutrients for two forests in Three Gorges Reservoir Area [J]. *J Huazhong Agric Univ*, 2014, **33**(4): 39–44.
- [7] SIX J, PAUSTIAN K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool [J]. *Soil Biol Biochem*, 2014, **68**: A4–A9.
- [8] EGAN G, CRAWLEY M J, FORNARA D A. Effects of long-term grassland management on the carbon and nitrogen pools of different soil aggregate fractions [J]. *Sci Total Environ*, 2018, **613/614**: 810–819.
- [9] 陈洪松, 岳跃民, 王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理: 成效、问题与对策[J]. *中国岩溶*, 2018, **37**(1): 37–42.
CHEN Hongsong, YUE Yuemin, WANG Kelin. Comprehensive control on rocky desertification in karst regions of southwestern China: achievements, problems, and countermeasures [J]. *Carsologica Sin*, 2018, **37**(1): 37–42.
- [10] 陈霄. 岩溶区栓皮栎次生林恢复过程微生物与有机碳矿化特征及影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
CHEN Xiao. *Research on the Characteristics of Microorganisms and Organic Carbon Mineralization and Their Influences during the Recovery of Secondary Quercus Variabilis Forest in the Karst Region* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [11] 胡培雷, 王克林, 曾昭霞, 等. 喀斯特石漠化地区不同退耕年限下桂牧1号杂交象草植物-土壤-微生物生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2017, **37**(3): 896–905.
HU Peilei, WANG Kelin, ZENG Zhaoxia, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics of plants, soil, and microbes of *Pennisetum purpureum* cv. Guimu-1 pastures at different rehabilitation ages in a karst rocky desertification region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(3): 896–905.
- [12] 张勇, 王晶晶, 李玉辉. 云南石林景区恢复植被的土壤水文结构功能研究[J]. *中国岩溶*, 2009, **28**(3): 293–299.
ZHANG Yong, WANG Jingjing, LI Yuhui. Study on the soil hydro-structure function of restored vegetations in the Yunnan Shilin Park of China [J]. *Carsologica Sin*, 2009, **28**(3): 293–299.
- [13] 徐贵生, 吴小勇. 退化岩溶生态地区植被恢复对土壤化学性质的影响——以石林地区为例[J]. *宜春学院学报*, 2009, **31**(6): 110–113.
XU Guisheng, WU Xiaoyong. Effects of vegetation recovery on soil chemical properties in karst areas of degraded ecosystems: a case in Shilin region [J]. *J Yichun Coll*, 2009, **31**(6): 110–113.
- [14] 张平究, 潘根兴. 植被恢复不同阶段下喀斯特土壤微生物群落结构及活性的变化——以云南石林景区为例[J]. *地理研究*, 2010, **29**(2): 223–234.
ZHANG Pingjiu, PAN Genxing. Changes of soil microbial communities and activities along a vegetation succession in karst soil: a case study of Stone Forest, Yunnan, China [J]. *Geogr Res*, 2010, **29**(2): 223–234.
- [15] 刘烁, 王秋兵, 史文娇, 等. 喀斯特典型集水区土壤水解酶活性空间异质性及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(8): 2615–2623.
LIU Shuo, WANG Qiubing, SHI Wenjiao, *et al.* Spatial heterogeneity of soft hydrolase activities and their influencing factors in a typical Karst catchment of Guizhou Province, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **29**(8): 2615–2623.
- [16] 刘璐, 陈浩, 李德军, 等. 喀斯特山区植被恢复过程中土壤水解酶和氧化酶活性的响应[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(9): 3528–3534.
LIU Lu, CHEN Hao, LI Dejun, *et al.* Changes of soil hydrolytic and oxidized enzyme activities under the process of vegetation restoration in a karst area, southwest China [J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 2017, **37**(9): 3528–3534.
- [17] 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.
YANG Dan, SHI Ju, LI Mian, *et al.* Characteristics of nutrients and enzyme activity in different grades of rocky desertification soils in southwest Guizhou [J]. *J Henan Agric Sci*, 2019, **48**(11): 84–91.
- [18] 赵海燕, 徐福利, 王渭玲, 等. 秦岭地区华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性变化[J]. *生态学报*, 2015, **35**(4): 1086–1094.
ZHAO Haiyan, XU Fuli, WANG Weiling, *et al.* Soil nutrients and enzyme activities in *Larix principis-rupprechtii*

- plantations in the Qinling Mountains, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(4): 1086 – 1094.
- [19] 陈俊松, 赵磊磊, 朱仕荣, 等. 云南石林县石漠化综合治理分区及治理方向[J]. *亚热带水土保持*, 2018, **30**(1): 20 – 22, 28.
- CHEN Junsong, ZHAO Leilei, ZHU Shirong, *et al.* Zoning and management orientation for the comprehensive management of rocky desertification in Shilin County of Yunnan Province [J]. *Subtrop Soil Water Conserv*, 2018, **30**(1): 20 – 22, 28.
- [20] 王宇, 张贵. 滇东岩溶石山地区石漠化特征及成因[J]. *地球科学进展*, 2003, **18**(6): 933 – 938.
- WANG Yu, ZHANG Gui. On the desertification and genesis of karst stone mountain area in east Yunnan [J]. *Adv Earth Sci*, 2003, **18**(6): 933 – 938.
- [21] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. *土壤学报*, 2006, **43**(3): 422 – 429.
- LI Huixin, YUAN Yinhong, HUANG Qianru, *et al.* Effects of fertilization on soil organic carbon distribution in various aggregates of red paddy soil [J]. *Acta Pedol Sin*, 2006, **43**(3): 422 – 429.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shidan. *Soil Agrochemical Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN Songyin. *Soil Enzyme And Its Research Method*[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [24] KANDELER E, GERBER H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium [J]. *Biol Fert Soils*, 1988, **6**(1): 68 – 72.
- [25] EYNARD A, SCHUMACHER T E, LINDSTROM M J, *et al.* Effects of aggregate structure and organic C on wettability of Ustolls [J]. *Soil Tillage Res*, 2006, **88**(1/2): 205 – 216.
- [26] 卢怡, 龙健, 廖洪凯, 等. 喀斯特地区不同土地利用方式下土壤团聚体中养分和酶活性的研究——以花江为例[J]. *环境化学*, 2017, **36**(4): 821 – 829.
- LU Yi, LONG Jian, LIAO Hongkai, *et al.* Distribution of nutrients and enzyme activities in soil aggregates of karst hills under different land use patterns [J]. *Environ Chem*, 2017, **36**(4): 821 – 829.
- [27] GARCIA R R, OCHOA V, HINOJOSA M B, *et al.* Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems [J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, **40**(9): 2137 – 2145.
- [28] WIESMEIER M, STEFFENS M, MUELLER C W, *et al.* Aggregate stability and physical protection of soil organic carbon in semi-arid steppe soils [J]. *Eur J Soil Sci*, 2012, **63**(1): 22 – 31.
- [29] 王春燕, 谢贤健, 周贵尧, 等. 巨桉人工林下土壤团聚体分形特征及碱解氮分布研究[J]. *水土保持研究*, 2015, **22**(3): 88 – 92.
- WANG Chunyan, XIE Xianjian, ZHOU Guiyao, *et al.* Fractal features of soil aggregates and distribution of alkaline hydrolytic nitrogen in different types of *Eucalyptus grandis* plantations [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2015, **22**(3): 88 – 92.
- [30] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, *et al.* A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil Tillage Res*, 2004, **79**(1): 7 – 31.
- [31] 黄永珍, 王晟强, 叶绍明. 杉木林分类型对表层土壤团聚体有机碳及养分变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(9): 2857 – 2865.
- HUANG Yongzhen, WANG Shengqiang, YE Shaoming. Effects of *Cunninghamia lanceolata* stand types on the changes of aggregate-related organic carbon and nutrients in surface soil [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2020, **31**(9): 2857 – 2865.
- [32] 廖洪凯, 龙健, 李娟. 不同小生境对喀斯特山区花椒林表土团聚体有机碳和活性有机碳分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(1): 156 – 160.
- LIAO Hongkai, LONG Jian, LI Juan. Effect of different micro-habitats types on organic carbon and labile organic carbon distribution in surface soil aggregates in Chinese prickly ash orchard of karst mountain area [J]. *J Soil Water Conserv*, 2012, **26**(1): 156 – 160.
- [33] 刘梦云, 常庆瑞, 安韶山, 等. 土地利用方式对土壤团聚体及微团聚体的影响[J]. *中国农学通报*, 2005, **21**(11): 247 – 250.
- LIU Mengyun, CHANG Qingrui, AN Shaoshan, *et al.* Effects of land use on soil aggregates and microaggregates [J]. *Agric*

- Bull China*, 2005, **21**(11): 247 – 250.
- [34] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *J Soil Sci*, 1982, **33**(2): 141 – 163.
- [35] 姬秀云, 李玉华. 黄土高原植被恢复对不同粒径土壤团聚体中酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2018, **38**(1): 24 – 28.
JI Xiuyun, LI Yuhua. Effects of different revegetation types on soil enzyme activities in different aggregates fractions in Loess Plateau [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2018, **38**(1): 24 – 28.
- [36] 朱家琪, 满秀玲, 张岷, 等. 大兴安岭北部针叶林土壤团聚体酶活性研究[J]. 森林工程, 2020, **36**(4): 1 – 11.
ZHU Jiaqi, MAN Xiuling, ZHANG Di, *et al.* Study on the enzyme activity of soil aggregates in coniferous forests in the north of Daxing'an Mountains [J]. *For Eng*, 2020, **36**(4): 1 – 11.
- [37] NIE M, PENDALL E, BELL C, *et al.* Soil aggregate size distribution mediates microbial climate change feedbacks [J]. *Soil Biol Biochem*, 2014, **68**: 357 – 365.
- [38] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J]. 生态学报, 2006, **26**(2): 364 – 372.
QIU Lipin, ZHANG Xingchang, ZHANG Jin'ai. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26**(2): 364 – 372.
- [39] 马瑞萍, 刘雷, 安韶山, 等. 黄土丘陵区不同植被群落土壤团聚体有机碳及其组分的分布[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(3): 324 – 332.
MA Ruiping, LIU Lei, AN Shaoshan, *et al.* Soil organic carbon and its fractions in aggregates under different plant communities in the hill-gully region of the Loess Plateau [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2013, **21**(3): 324 – 332.
- [40] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中碳、氮、磷含量与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2000, **33**(5): 65 – 71.
XU Yangchun, SHEN Qirong. Influence of long-term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes [J]. *Sci Agric Sin*, 2000, **33**(5): 65 – 71.
- [41] 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.
ZHONG Yuanping, TANG Jiang, WANG Li. Distribution characteristic of soil organic carbon in Three Gorges Reservoir district [J]. *J Soil Water Conserv*, 2006, **20**(5): 73 – 76.
- [42] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 种植方式和裸岩率对喀斯特洼地土壤养分空间分异特征的影响[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(7): 1459 – 1463.
ZHANG Wei, CHEN Hongsong, WANG Kelin, *et al.* Effects of planting pattern and bare rock ratio on spatial distribution of soil nutrients in karst depression area [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, **18**(7): 1459 – 1463.
- [43] 吴丽芳, 王紫泉, 王妍, 等. 喀斯特高原不同石漠化程度土壤碳、氮、磷化学计量特征和酶活性的关系[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(12): 2332 – 2340.
WU Lifang, WANG Ziquan, WANG Yan, *et al.* Relationship between Soil C, N, P stoichiometric characteristics and enzyme activity in karst plateau soils with different degree of rocky desertification [J]. *Ecol Environ Sci*, 2019, **28**(12): 2332 – 2340.
- [44] LAGOMARSINO A, GREGO S, KANDELER E. Soil organic carbon distribution drives microbial activity and functional diversity in particle and aggregate-size fractions [J]. *Pedobiologia*, 2012, **55**(2): 101 – 110.
- [45] 高照琴, 白军红, 温晓君, 等. 珠江河口新、老围垦区湿地土壤全磷含量分布特征[J]. 湿地科学, 2015, **13**(6): 772 – 777.
GAO Zhaoqin, BAI Junhong, WEN Xiaojun, *et al.* Distribution of total phosphorus in soils of the young and old reclaimed regions in the Pearl River Estuary [J]. *Wetland Sci*, 2015, **13**(6): 772 – 777.