DOI: 10.5846/stxb202103200736

韦慧,邓羽松,林立文,黄娟,王金悦,黄海梅,黄智刚.喀斯特生态脆弱区典型小生境土壤团聚体稳定性比较研究.生态学报,2022,42(7): 2751-2762.

Wei H, Deng Y S, Lin L W, Huang J, Wang J Y, Huang H M, Huang Z G.Comparative study on the stability of soil aggregates in typical microhabitats in karst ecologically fragile areas. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2751-2762.

喀斯特生态脆弱区典型小生境土壤团聚体稳定性比较 研究

韦 慧1,邓羽松1,2,*,林立文1,黄 娟1,王金悦1,黄海梅1,黄智刚3

1. 广西大学林学院,南宁 530004

2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站,环江 547100

3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081

摘要:为探究喀斯特小生境类型对土壤团聚体稳定性影响,揭示小生境土壤团聚体主要失稳机制,选取研究区内石缝、石沟、石槽、石土面和土面 5 种典型小生境为研究对象,采用干筛法、Elliott 湿筛法和 Le Bissonnais 法测定土壤团聚体稳定性。结果表明:湿筛后,团聚体分布以水稳性团聚体(WR₅₀₂₅)为主,含量在 81.26%以上,团聚体破坏率(PAD)介于 8.93%—17.39%之间,平均重量直径(MWD)在 1.94—2.85 mm 间,均小于干筛,团聚体稳定性表现为石槽最好,土面最差,石土面次之。LB 法处理后, MWD 值变化趋势为慢速湿润(SW)>预湿润后扰动(WS)>快速湿润(FW),即小生境土壤团聚体最大破坏机制为大雨或暴雨时快速湿润 FW 产生的消散作用,团聚体稳定性同样以石槽最好,土面最差,石土面次之。相关性分析显示,LB 法测定的 MWD 均与湿筛法的 WR₅₀₂₅呈显著正相关,与 PAD 呈显著负相关,即 LB 法和湿筛法具有良好的相关性,LB 法用于测定喀斯特地区土壤 团聚体稳定性是可行的(P<0.05)。LB 法 FW 处理的 MWD 值与有机质呈显著正相关,即有机质对团聚体稳定性有重要影响; 全氮、全磷、全钾与 WR₅₀₂₅、SW 处理的 MWD 值呈显著正相关,与 PAD 呈显著负相关,即稳定的团粒结构对养分蓄积有正向效 应(P<0.05)。综合不同测定方法的结果表明,土面、石土面易造成土壤流失,应加强雨季对喀斯特生态脆弱区土面、石土面小生境的防护。

关键词:小生境;土壤团聚体;稳定性;喀斯特

Comparative study on the stability of soil aggregates in typical microhabitats in karst ecologically fragile areas

WEI Hui¹, DENG Yusong^{1, 2, *}, LIN Liwen¹, HUANG Juan¹, WANG Jinyue¹, HUANG Haimei¹, HUANG Zhigang³

1 College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China

2 Huanjiang Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China

3 Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: In order to investigate the influence of karst microhabitat types on the stability of soil aggregates and to reveal main destabilization mechanisms of soil aggregates in microhabitats, five typical microhabitats in the study area, namely stone crevices, stone ditch, stone sink, stone and earth surfaces, and earth surface are selected. The dry sieve method, Elliott wet sieve method, and Le Bissonnais method are used to determine the stability of soil aggregates. The results show that after wet sieving, the distribution of agglomerates is dominated by water-stable agglomerates ($WR_{>0.25}$) with a content of

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505402);中央引导地方科技发展专项(桂科 ZY20198007)

收稿日期:2021-03-20; 网络出版日期:2021-11-17

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: denny2018@gxu.edu.cn

over 81.26%, the percentage of aggregate destruction (PAD) ranged from 8.93% to 17.39%, the mean weight diameter (MWD) ranged from 1.94 to 2.85 mm, all smaller than the MWD of the dry sieving method, and the stability of the agglomerates shows that the stone sink is the best, the earth surface is the worst, and stone and earth surfaces is the second worst. The trend of MWD values after Le Bissonnais method treatment is slow wetting (SW) > pre-wetting and strirring (WS)>fast wetting (FW), indicating that the maximum damage mechanism of soil agglomerates in microhabitats is the dissipative effect of fast wetting FW during heavy or stormy rainfall, and the stability of the agglomerates is shown to be best in the stone sink, worst in the earth surfaces and stone and earth surfaces is the second worst. Correlation analysis shows that the MWD determined by the Le Bissonnais method are all significantly positively correlated with $WR_{20.25}$ for the wet sieve method and negatively correlated with PAD (P < 0.05), indicating that the Le Bissonnais method and the wet sieve method have good correlation and that the Le Bissonnais method is feasible for determining the stability of soil aggregates in karst areas (P < 0.05). The MWD under the FW treatment in the Le Bissonnais method is significantly positively correlated with organic matter, indicating that organic matter has an important effect on agglomerate stability; total N, total P and total K is significantly positively correlated with MWD under WR >0.25 and SW treatments, and negatively correlated with PAD, indicating that a stable agglomerate structure has a positive effect on nutrient accumulation (P < 0.05). The results of the different measurement methods show that earth surface and stone and earth surfaces microhabitats are prone to soil erosion and that protection of them in karst ecologically fragile areas should be strengthened during the rainy season.

Key Words: microhabitat; soil aggregates; stability; karst

团聚体是土壤的重要组成部分,是形成土壤良好结构的物质基础,其粒径分布特征对土壤孔隙度大小、数量及分布情况均产生重大影响^[1]。团聚体稳定性更是影响侵蚀过程中土壤颗粒间剥离、搬运、结皮现象以及水分入渗的重要因素^[2],是衡量土壤抗蚀性和质量的重要指标。观测土壤团聚体稳定性已成为评价土壤可蚀性以及进行土壤侵蚀和水土保持研究的重要方法^[3]。

喀斯特地区在岩溶作用强烈、基岩裸露程度不同和起伏不定、植被分布不均共同作用下形成许多破碎小 生境,已有研究^[4-10]将小生境分为:石缝、石沟、石槽、石土面以及土面等。因小生境间环境因子异质性,更增 加了喀斯特地区土壤侵蚀的不确定性。近年来对喀斯特小生境土壤关注度提高,并获得一定的成果,相关学 者研究发现不同小生境土壤 pH、含水率、碳素、氮素变化等影响碳酸盐岩溶蚀成土速率及土壤微生物群落分 布^[4-5],而采伐迹地中土壤侵蚀深度受小生境类型影响^[6]。小生境类型甚至影响其土壤的成土方式^[7]及有 机碳含量^[8-10]。但已有研究鲜有涉及对小生境土壤结构与理化性质相关分析,对土壤失稳机理缺乏深入探 讨,未能充分说明小生境异质性对土壤构成以及抗蚀能力的影响程度,尤其是小生境土壤团聚体特征研究。 团聚体作为土壤的基本组成结构单元,其分布和稳定性可作为评价土壤质量和抗蚀性的重要指标^[11],团聚体 稳定性是指团聚体抵御外力作用或环境变化而保持自身原有形态的能力^[12],并受多种因素影响。而在土壤 资源稀缺的喀斯特地区,土壤附着于各类小生境中^[13],且小生境在水热状况、土层厚度、面积大小等均存在差 异,势必引起团聚体特征异质性,加上近年来因人口激增、作物结构改变和极端天气影响下,水土流失严重,而 对小生境土壤团聚体的分布及其稳定性特征仍未清楚,其防治措施缺乏合理依据。因此,研究喀斯特生态脆 弱区小生境土壤团聚体特征对当地的农林业生产以及土壤资源保护有重要意义。

我国西南地区为典型的喀斯特地貌,受成土机制限制,更是具有成土缓慢、土体不连续、土层浅薄的特点^[14-15],因特殊地质构造形成复杂的地上地下二元结构,造成水土资源极易漏失、土壤环境脆弱、生态容量低、灾害承受阀值小的现状^[16]。土壤环境脆弱性决定了其生态脆弱性^[17],并且导致环境破坏后自然恢复过程十分缓慢的现状,明确造成小生境土壤团聚体失稳的主要机制更是迫在眉睫。因此,本文以广西环江毛南族自治县喀斯特地区次生林下石沟、石槽、石缝、石土面和土面 5 种典型小生境为研究对象,探讨小生境异质对土壤团聚体的影响,揭示小生境间土壤理化性质差异,旨在为喀斯特生态脆弱区石漠化综合治理、实现可持

续发展和适用性管理措施提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西环江毛南族自治县喀斯特地区内(24°55′N,107°57′E),属典型喀斯特峰丛洼地,区内地 势起伏大,海拔高度在 376—816 m 间。为南亚热带季风气候,年平均温度为 16.5—20.5℃,年平均降雨量为 1389.1 mm,年平均降雨天数为 130—140 d,雨热同期,易产生季节性旱害、涝害。样地以钙质石灰土为主,土 体连续性低,有大片裸露的基岩,部分区域基岩裸露率可达 70%—80%以上,土层浅薄,坡度在 10°—30°之间。 样地内植被优势种有八角枫(Alangium chinense)、灰毛浆果楝(Cipadessa cinerascens)、牧荆(Vitex cofassus)、粉 苹婆(Sterculia euosma)等,伴生种扁担藤(Tetrastigmaplanicaule)、藤黄檀(Dalbergiahancei)等藤本及麒麟尾 (Epipremnumpinnatum)、芦竹(Arundo donax)、肾蕨(Nephrolepiscord@ lia)、五节芒(Miscanthus sinensis Anderss) 等林下种。林下地表有草本覆盖,覆盖度达到 65%,林分郁闭度为 0.6。

1.2 样品采集

2020年7月进行土壤样品采集,为控制地形因素的影响,在试验地上、中、下坡位分别设置3个20m×20m样地,并按照石缝、石沟、石槽、石土面以及土面5种小生境类型进行土样采集。因土层浅薄几乎无明显分层,进行表层0—20cm土样的采集,各样地中小生境均设置3—5个重复。采样前移除表面枯枝落叶层,用铁锹铲取2kg原形块状土壤,移入塑料盒中编号,避免运输对土壤团聚体的破坏,记录样地相关信息后带回实验室,去除土样中石头、动植物残体,采用四分法对同类型生境进行混合后,研磨过筛,用于土壤理化性质测定。一部分原状土自然风干至田间持水量的20%时,沿自然缝隙掰成直径约为10mm小土块继续风干,用于土壤团聚体性质测定。各类型小生境分类标准^[4–10,18]和特征如表1。

Fable 1 Status of unreferent types of incronabilit characteristics							
小生境类型 Microhabita type	土壤与凋落物厚度 Soil and litter thickness	小生境土壤面积 Microhabitat soil area/m ²	土体状况 The soil conditions	植被状况 Vegetation conditions	小生境分类标准 Microhabitat classification criteria		
SC	土层厚度为 15—30 cm, 无明显分层,凋落物厚度 为 0.5—1.5 cm	0.5—0.8	土壤似裂隙或条带状填 充于裂隙间,连续性差, 土壤浅薄,土壤来源为岩 石风化、腐殖化为主	多数蕨类和少量苔藓分 布,高度为 10—30 cm, 覆盖度为 30%—40%	深宽比小于 2 的岩溶侵蚀沟 或裂缝		
SD	土层厚度可达 15—25 cm,无明显分层,调落物 厚度为2—3 cm	0.5—1.5	土壤呈现浅沟状分布于 凹地中倾斜凹地中,连续 性差。属以腐殖化为主 的成土过程	较多蕨类和低矮灌木分 布,高度大致为1-2m, 覆盖度为60%-80%	深宽比大于2的倾斜凹地		
SS	厚度大致为 10—25 cm, 无明显分层,凋落物厚度 为 2—3 cm	0.3—2.0	土壤分布于土壤呈多边 形或漏勺形分布于开放 性凹地中,属以腐殖化为 主的成土过程	灌木层发达,有少数乔木 分布,树高达3-5m,下 层草本植物生长,覆盖度 为60%-80%	形状不规则的近水平洼地		
SE	土层浅薄,厚度仅为 5— 8 cm,无分层,凋落物厚 度为0.5—1 cm	0.2—1.5	少量土壤分布于近似水 平石面和台地凹陷处上, 属岩石风化为主的主要 成土过程	有较多苔藓和极少量蕨 类植物分布,高度约为 5-20 cm,覆盖度为 30%-50%	岩石裸露率大于 30%,似土 面的小型台地		
ES	土体较为厚实,可达 30—50 cm 左右,有明显 分层,调落物厚度为1— 2 cm	1—5	土体连续性相对较高,土 层中植物粗根系和石块 较多,属以岩石风化和腐 殖化为主的成土过程	乔木层和灌木层较为发达,高度可达 6—10 m, 下层有草本植物覆盖,覆 盖度为 50%—60%	土面为岩石裸露率小于 30% 且面积较大的连续性土体		

表 1 不同类型小生境特征状况 Table 1 Status of different types of microbabitat characteristics

SC:石缝 Stone crevices; SD:石沟 Stone ditch; SS:石槽 Stone sink; SE:石土面 Stone and earth surfaces; ES:土面 Earth surface

1.3 土壤指标测定方法

(1)干筛法:将500g风干土样用干筛机,筛分为>2、2-1、1-0.5、0.5-0.25、<0.25 mm,5 个粒径,称重,

计算团聚体稳定性参数。

(2)Elliott 湿筛法^[19]:将干筛法测定各粒径团聚体按比例配置 50g 土样,放入土壤团粒分析仪,设置好时间(30 min)和振幅(38 mm)进行湿筛,其筛组粒径分布与干筛一致,再用纯水将各粒径团聚体转移至铝盒中放入 40℃烘箱烘干称重,测定团聚体水稳定性参数。

(3) Le Bissonnais 法^[20]:将干筛后的 3—5 mm 粒径土壤团聚体放置于 40℃烘箱中烘干至恒重,称取土样 5 g,分别进行快速湿润(FW):将5 g 团聚体迅速浸入纯水中,待 10 min 后吸取多余水分;慢速湿润(SW):将5 g 团聚体放置于滤纸上,沿边缘缓慢滴加无水乙醇至团聚体完全浸湿后静置 30 min;预湿润振荡(WS):将5 g 团聚体用无水乙醇浸没 10 min,再吸取多余酒精并将团聚体转移至呈有纯水 250 mL 锥形瓶中并加水至 200 mL,封口后上下匀速震荡 20 次,并静置 30 min,再除去多余水分,3 种处理后分别将土样用无水乙醇转移至铝 盒并放入烘箱 40℃烘干至恒重,过 2、1、0.5、0.25、0.1、0.05 mm 套筛,万分之一天平称重,计算稳定性参数。

(4)土壤理化性质采用常规测定方法^[21],有机质采用重铬酸钾-硫酸外加热法;pH采用1:2.5 土水比浸 提-pH 计法;开氏法测定土壤全氮 TN;全磷(TP)采用紫外分光光度法;全钾(TK)采用火焰光度法吸管法测定 土壤机械组成,土壤质地以美国划分标准为依据,砂粒(2—0.05 mm)、粉粒(0.05—0.002 mm)、粘粒(<0.002 mm)。

1.4 数据分析与处理

土壤团聚体稳定性参数,平均重量直径 MWD、>0.25 mm 土壤团聚体百分比 R_{>0.25}、团聚体结构破坏率 PAD、相对消散指数 RSI 和相对机械破碎指数 RMI 计算公式如下^[11,22]。

(1)平均重量直径(Mean weight diameter, MWD, mm)计算公式为:

$$\mathbf{MWD} = \sum_{i=1}^{n} x_i w_i$$

式中:xi为各粒径土壤团聚体的平均直径(mm);wi为各粒径土壤团聚体的质量百分比(%)。

(2) 土壤稳定性大团聚体含量 $R_{>0.25}$ 、土壤团聚体破坏率(Percentage of aggregate destruction, PAD,%) 计算 公式为:

$$R_{>0.25} = \frac{C_W}{C_T} \times 100\%$$

$$PAD = \frac{DR_{>0.25} - WR_{>0.25}}{DR_{>0.25}} \times 100\%$$

式中: C_w 干筛或湿筛>0.25 mm 土壤团聚体重量(g); C_T 为土壤团聚体总重量(g); $DR_{>0.25}$ 为干筛后>0.25 mm 大团聚体质量分数(%)即机械稳定性团聚体; $WR_{>0.25}$ 为湿筛后>0.25 mm 的大团聚体质量分数(%)即水稳性 团聚体。

(3)相对消散指数(Relative dissipation index, RSI)、相对机械破碎指数(Relative mechanical crushing index, RMI)计算公式为:

$$RSI = \frac{MWD_{SW} - MWD_{FW}}{MWD_{SW}} \times 100\%$$
$$RMI = \frac{MWD_{SW} - MWD_{WS}}{MWD_{SW}} \times 100\%$$

式中:MWD_{FW},MWD_{ws},MWD_{sw}分别为快速湿润(FW)、预湿润振荡(WS)和慢速湿润(SW)3种不同处理获得的 MWD 值。

原始数据采用 Excel 2010 整理, SPSS 21.0 软件的 Pearson 相关系数法进行相关性分析, One-way ANOVN 和 Duncan 法对数据进行差异性分析, 显著性水平 α=0.05, 表格数据表现形式为: 均值±标准差, 采用 Origin 21 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同类型小生境土壤理化指标

从表2可知,不同生境土壤机械组成不同,土壤砂粒、粉粒和粘粒含量从均值来看,粉粒39.28%>砂粒31.91%>粘粒28.81%。其中石土面砂粒含量高,与石槽、石沟呈显著差异,与石缝、土面差异不显著(P<0.05);石槽、石沟粉粒含量高于土面、石土面呈显著差异,石槽与石缝差异不明显(P<0.05);石槽、土面粘粒显著高于石沟、石土面,与石缝无显著差异(P<0.05)。不同小生境土壤pH值也存在差异,除石土面、石缝土壤呈碱性与石槽、土面呈显著差异外(P<0.05),石沟、石槽、土面均为中性偏弱酸性土壤;小生境土壤有机质SOM含量在45.54—65.55g/kg之间,其中石槽、石沟SOM含量显著高于石土面、土面,与石缝无显著差异(P<0.05)。石沟、石槽、石土面生境全氮TN含量显著高于石缝、土面,石缝TN含量显著高于土面(P<0.05)。 土面全磷TP含量显著低于其他生境,石缝、石槽全钾TK显著高于石沟、石土面、土面,土面显著低于石沟、石土面(P<0.05)。

小生境类型 — Microhabitat type	土壤机械组成 Granulometric composition/%				SOM /	TNI /	TD /	
	砂粒 Sand (2—0.05 mm)	粉粒 Slit (0.05—0.002 mm)	粘粒 Clay (<0.002 mm)	рН	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)
SC	35.33±8.71ab	$37.25 \pm 3.73 \mathrm{bc}$	27.43±4.98ab	7.45±0.06a	60.24±3.30ab	$3.22 \pm 0.06 \mathrm{b}$	0.98±0.02a	7.67±0.32a
SD	$25.71{\pm}0.24\mathrm{b}$	48.98±0. 86a	25.31 ± 0.63 b	$7.02{\pm}0.08{\rm b}$	65.00±3.89a	3.75±0.03a	0.98±0.01a	$6.40 \pm 0.08 c$
SS	$23.74{\pm}3.57\mathrm{b}$	45.18±2.98ab	31.08±3.37a	$6.90{\pm}0.12{\rm c}$	65.55±0.07a	3.81±1.02a	1.00±0.01a	$7.23{\pm}0.14\mathrm{b}$
SE	38.43±1.71a	$34.72 \pm 1.86c$	$26.86{\pm}1.71\mathrm{b}$	7.43±0.15a	$54.30{\pm}9.36{\rm b}$	$3.55 \pm 0.04a$	0.95±0.03a	$6.20{\pm}0.04{\rm c}$
ES	34.90±0. 52ab	35.27±3.64c	31.84±3.12a	6.55±0.31c	$45.54{\pm}5.45\mathrm{b}$	2.11±0.20c	$0.88{\pm}0.04{\rm b}$	$4.60{\pm}0.08{\rm d}$

表 2 不同小生境类型土壤理化指标 Table 2 Soil physical and chemical indexes of different microhabitats

SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; *TN*: 土壤全氮 Total nitrogen; *TP*: 土壤全磷 Soil total phosphorus; *TK*: 土壤全钾 Soil total potassium;不同小写字母表示不同 小生境间在 *P*<0.05 水平差异显著

2.2 不同小生境土壤团聚体分布特征

由图 1 可知,团聚体在>2、2—1、1—0.5、0.5—0.25、<0.25 mm,5 个粒径间分布存在差异性。干筛后小生



图 1 不同小生境土壤团聚体分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of soil aggregates in different microhabitat

D 表示干筛后土壤团聚体分布特征, W 表示湿筛后土壤团聚体分布特征; SC:石缝 Stone crevices; SD:石沟 Stone ditch; SS:石槽 Stone sink; SE:石土面 Stone and earth surfaces; ES:土面 Earth surface

境各风干团聚体以>2、2—1 mm 粒径为主,均值分别为 80.36% 和 10.84%,以<0.25 mm 粒径分布最少,均值为 1.72%,团聚体粒径分布变化趋势为随粒径减小而降低。石土面、石缝在>2、2—1 mm 粒径中团聚体含量分别 为 65.83%、78.55%及 18.53%、12.68%显著低于石沟、石槽和土面(P<0.05)。而石土面 1—0.5、0.5—0.25 mm 团聚体分别为 18.53%、9.63%,显著高于所有生境(P<0.05)。

湿筛过后,团聚体粒径分布以>2、2—1 及<0.25 mm 粒径为主,变化范围分别在 34.84%—76.56%、4.91%—40.28%、10.76%—18.74%之间,其他的粒径分布较少。团聚体分布随粒径减小先降低后上升的趋势。石土面和石缝团聚体在>2、2—1 mm 粒径分布中显著低于石槽、石沟、土面,3 者间差异不明显,而在 1—0.5 mm、0.5—0.25 mm 粒径中石土面分布显著高于其他生境,土面团聚体在<0.25 mm 粒径中显著高于所有生境(P<0.05)。

2.3 不同小生境土壤团聚体稳定性特征

由表 3 可知,5 种小生境干筛法测定的 MWD 均高于湿筛法,即小生境土壤团聚体以机械稳定性团聚体为 主。干筛后 MWD 在 2.77—3.21 mm 间变化,由大到小依次为石槽>石沟>土面>石缝>石土面。其中,石土面 MWD 显著低于所有生境,石槽 MWD 显著高于石缝、石土面,而石缝、石沟、土面无显著差异(P<0.05)。湿筛 MWD 变化趋势与干筛一致,分布范围在 1.94—2.85 mm 之间。湿筛后石槽、石沟 MWD 值显著高于石缝、土 面、石土面,石缝、土面差异不显著,但显著高于石土面,即石土面团聚体水稳定性较低(P<0.05)。

由表3还可见,各小生境机械稳定性团聚体(DR_{>0.25})介于97.48%—98.63%间,水稳定性团聚体含量 (WR_{>0.25})分布在81.26%—89.24%之间,即小生境大团聚体含量较高,机械稳定性好。其中土面WR_{>0.25}含量 最低与其他生境差异显著(P<0.05)。PAD可反应湿筛后团聚体破碎程度,其值越大,团聚体受破坏程度越 高,水稳性越差。本文研究显示,各生境PAD值在9.32%—17.39%之间变化,由大到小依次为土面、石沟、石 土面、石缝、石槽。土面PAD值显著高于石缝、石沟、石槽、石土面,除土面外其他生境间无显著差异(P<0.05)。

Table 5 Stability characteristics of son aggregates in unrefert incrohabilit								
生境类型	平均重量直径 MWD Mean weight diameter/mm		$R_{>0.2}$	PAD/%				
Microhabitat type —	MWD _D	MWD _W	DR _{>0.25}	WR _{>0.25}				
SC	2.99±6.22b	2.51±1.63c	98.41±0.07ab	89.24±0.88a	9.32±0.83b			
SD	$3.14 \pm 2.78 \mathrm{ab}$	$2.75 \pm 6.96 \mathrm{ab}$	98.59±0.53a	87.58±1.55a	$11.17{\pm}1.86{\rm b}$			
SS	3.21±0.16a	2.85±0.09a	$97.48{\pm}0.37{\rm b}$	88.62±0.34a	$9.09{\pm}0.69{\rm b}$			
SE	$2.77 \pm 0.06c$	$1.94 \pm 1.10d$	98.76±0.00a	88.41±0.80a	$10.48 \pm 0.89 \mathrm{b}$			
ES	3.12 ± 0.06 ab	$2.64 \pm 2.27 bc$	$98.36{\pm}0.16{\rm ab}$	$81.26{\pm}1.22\mathrm{b}$	17.39±1.31a			
	-							

表 3 不同生境土壤团聚体稳定性特征 Table 3 Stability characteristics of soil aggregates in different microbability

MWD: 平均重量直径 Mean weight diameter; MWD_D: 干筛平均重量直径 Dry sieve mean weight diameter; MWD_W: 湿筛平均重量直径 Wet sieve mean weight diameter; *R*_{>0.25}:>0.25 mm soil aggregate content; *DR*_{>0.25}: 机械稳定性团聚体 Mechanical stability aggregate; *WR*_{>0.25}: 水稳性团聚体 Water stability aggregate; PAD : 团聚体破坏率 Percentage of aggregate destruction

2.4 基于 LB 法处理下小生境土壤团聚体分布特征

LB 法处理后小生境团聚体分布情况见图 2,经 3 种处理后团聚体分布都主要以>2 mm 粒径为主,FW 处理后>2 mm 粒径团聚体均值达 84.04%,其他粒径占比较小,均值分别为 2—1 mm(4.23%)、1—0.5 mm (3.50%)、0.5—0.2 mm(2.30%)、0.2—0.1 mm(0.89%)、0.1—0.05 mm(0.68%)、<0.05 mm(4.38%),团聚体分布呈现随粒径的减小先降低再升高的趋势。SW 处理下,团聚体基本稳定,>2 mm 粒径均值为 94.68%,其次是<0.05 mm 粒径最多,均值为 3.56%,其他粒径均值分布范围仅在 0.10%—0.88%之间。WS 处理后,团聚体分布以>2 mm 和<0.05 mm 粒径为主,均值分别为 89.50%和 4.46%,其他粒径分布极少,仅为 0.27%—5.02%之间。





FW: 快速湿润 Fast wetting; SW: 慢速湿润 Slow wetting; WS: 预湿润振荡 Pre-wetting and strirring; LB: Le Bissonnais

2.5 基于 LB 法处理下小生境土壤团聚体稳定性特征

LB 法处理后 5 种小生境 MWD 值如表 4 所示。FW 处理下, MWD_{FW}值分布在 1.83—3.23 mm 之间, 团聚 体稳定性变异系数为 4.07%, 由大到小依次为石槽、石沟、石土面、石缝、土面, 石槽、石沟 MWD 值显著高于石缝、石土面和土面, 石缝和石土面显著高于土面(P<0.05); SW 处理时, MWD_{SW}值分布在 2.40—3.42 mm 之间, 稳定性变异系数为 1.89%; WS 处理下 MWD_{ws}值分布在 2.12—3.29 mm 间, 稳定性变异系数为 2.98%, 介于 FW、SW 处理之间。SW 与 WS 处理后显示土面 MWD 值显著低于其他生境(P<0.05)。

从表 4 中可以看到,小生境团聚体在 3 种处理下 MWD 值及变异系数的变化趋势,表现为 SW>WS>FW。 各小生境 RSI、RMI 值均为土面最大,且 RSI 整体远大于 RMI,甚至呈现倍数关系,即小生境土壤团聚体对消 散作用更为敏感,土面团聚体受影响程度最大。

了口从四大半天女人生体上惊口取住在白树

Table 4 Stability characteristics of soil aggregates in different microhabitats treated by LB method							
小生境类型	平均重量	平均重量直径 Mean weight diameter/mm			DMI		
Microhabitat type	MWD _{FW}	MWD _{SW}	MWD _{WS}	- KSI	KMI		
SC	2.85±3.38b	3.38±1.55a	3.16±1.59a	15.70±0.00b	6.46±0.00a		
SD	3.15±4.75a	3.35±3.36a	3.26±0.14a	5.89±0. 17c	$2.83 \pm 0.90 \mathrm{b}$		
SS	3.23±1.87a	3.42±1.16a	3.29±2.53a	$5.22 \pm 0.03 c$	$3.63 \pm 0.01 \mathrm{b}$		
SE	$2.94 \pm 0.06 \mathrm{b}$	$3.34 \pm 1.50a$	3.20±0.11a	$7.67{\pm}0.15{\rm bc}$	$4.04 \pm 0.10 \mathrm{b}$		
ES	$1.83 \pm 0.18c$	$2.40\pm0.86b$	$2.12 \pm 1.71 \mathrm{b}$	23.95±0.49a	12.14±0.04a		

	衣 4	LB 法个问处理/	5式下谷小生現工場	回衆仲梞正性特	征
4	Stability chara	cteristics of soil a	ogregates in differen	t microhabitats t	reated by I

MWD_{FW}: 快速湿润后团聚体平均重量直径 Mean weight diameter of aggregates after fast wetting treatment; MWD_{SW}: 慢速湿润后团聚体平均重 量直径 Mean weight diameter of aggregates after slow wetting; MWD_{WS}: 预湿润震荡后团聚体平均重量直径 Mean weight diameter of aggregates after pre-wetting and strirring; RSI: 相对消散指数 Relative dissipation index; RMI: Relative mechanical crushing index; LB: Le Bissonnais

2.6 不同小生境土壤表面形态分布特征

如图 3 所示,将各小生境土壤团聚体在电镜下放大至 1000 倍时观测到的 SEM 图像可见不同小生境土壤 微形态特征存在显著差异;相对于其他生境,石沟和石槽生境土壤颗粒表面为形态表现为更为粗糙、骨骼颗粒 细小且排列紧密具有定向性;小生境间形状颗粒中有较多微孔隙分布。



图 3 小生境土壤电子显微镜(SEM)图像不同放大倍数 Fig.3 Different magnification of electron microscope (SEM) images of microhabitat soils

http://www.ecologica.cn

将图放大至 10000 倍时可以看出土面、石土面生境土壤微结构颗粒较小排列紧密且磨圆度较高,石缝次之,而 石沟、石槽生境土壤结构体呈现絮片状,边缘形状多样,结构疏松而不松散。

2.7 湿筛法、LB法处理下团聚体稳定性指标与土壤理化指标相关性分析



图 4 小生境土壤理化性质相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of soil physical and chemical properties in microhabitat

PH:氢离子浓度 Hydrogen ion concentration; SOM:土壤有机质 Soil organic matter; TN:土壤全氮 Soil total nitrogen; TP:土壤全磷 Soil total phosphorus; TK:土壤全钾 Soil total potassium; PAD:团聚体破坏率 Percentage of aggregate destruction; WR>0.25:水稳性团聚体 Water stability aggregate; MWDW:湿筛平均重量直径 Wet sieve mean weight diameter; MWDFW:快速湿润后团聚体平均重量直径 Mean weight diameter of aggregates after fast wetting treatment; MWDSW:慢速湿润后团聚体平均重量直径 Mean weight diameter of aggregates after slow wetting; MWDWS: 预湿润震荡后团聚体平均重量直径 Mean weight diameter of aggregates after pre-wetting and strirring

3 讨论

喀斯特地区存在多类型小生境,小生境在水、肥、气、热等环境因子异质性使得土壤性质发生变化^[23]。本 文研究显示石槽、石沟、石缝养分相对较高,是因其土壤分布于负地表且较为开放,受地面风及流水搬运作用 使凋落物更易于堆积^[23],加上温度适宜土壤微生物对凋落物进行降解,因此有机质等养分含量较高。石土面 土层极为浅薄,以耐旱性植被为主(表1),凋落物少,全天温度变化剧烈,土壤水分稀缺,不利于微生物活 动^[7,23-24],而养分含量较低。因研究区裸岩对降雨及养分有重新分配作用^[25],岩面产流携同养分多汇集到石 缝、石沟、石槽中,且土面生境大型植被较多,可能造成土壤蓄积养分与植物生长供需失衡,造成土面养分含量 下降。研究区土壤 pH 在 6.55—7.45 之间,与于杨等^[26]研究结果相似,原因为该区水热丰富可引起土壤中钙、 镁元素流失,加上土壤微生物呼吸释放 CO₂及有机质组分中的胡敏酸可综合土壤碱性物质,使 pH 呈中性或偏 酸性^[4,27]。造成生境土壤机械组成差异,主要因成土方式不同,如以岩石风化为主时,则砂粒含量较高。

稳定的团聚体分布特征对形成土壤良好结构及物质循环有积极作用,而不稳定团聚体更易破碎成为可移动颗粒,加剧土壤侵蚀和养分流失^[28-29]。石缝、石土面干筛后团聚体分布最为分散,机械稳定性较差;而土面 团聚体虽机械稳定性较好,但经湿筛后大团聚体更易破碎为非水稳性团聚体(即<0.25 mm 粒径),造成团聚 体结构破坏严重。原因在于有机质含量不同,团聚体自身形成过程也十分复杂,由矿物颗粒经作用力、根系分 泌物及微生物活动产生的胶结物质等作用下形成的多孔结构体,其稳定性受到诸多因素影响,有机质为最大 影响因素之一^[11]。已有研究发现,增加有机质含量可提高大团聚体的占比,其作为有机胶结物质可增加土壤 整体的粘聚力和斥水性来提高团聚体的稳定性^[30-31]。因此有机质含量相对较低的石缝、石土面及土面生境 经干筛和湿筛处理后团聚体团粒结构破坏最为显著。

湿筛法还可通过测定 WR_{>0.25}、PAD、MWD 等指标来评价团聚体水稳定性^[11]。WR_{>0.25}通常也称为团粒结构体,其数量越多,土壤质量越好,结构越稳定;PAD 反应湿筛后团聚体破碎程度,值越小,土壤结构越稳定; MWD 为反应团聚体结构稳定性的另一重要指标,值越大则团聚体越稳定。本研究显示各小生境团聚体在湿筛后,土面 WR_{>0.25}最低为 81.26%,PAD 以土面最大,同样与土面有机质含量有关。小生境可影响土壤凋落物的进出而对土壤养分产生影响,使有机质输入及团粒胶结物质的含量减少,降低团聚体稳定性,因此湿筛后, 有机质含量较低的土面团聚体破碎最为严重;湿筛后石土面 MWD 值显著低于所有生境,除受有机质影响外, 还因其成土方式为岩石风化,砂粒较多(表1),土体结构松散,机械稳定性较低,造成>2、2—1 mm 粒径显著低 于其他生境(图1),再经湿筛处理后,团聚体更为破碎,因此 MWD 值最小。而土面、石缝成土方式除岩石风 化外还有部分腐殖化成土,土壤颗粒组成及机械稳定性较好,MWD 值较高。石槽和石沟土壤有机质含量高, 土壤颗粒胶结能力强,成土方式以腐殖化为主,团聚体结构最为稳定,抗蚀能力强。但土面虽 MWD 值高于石 土面、石缝,而湿筛后 PAD 最高,WR_{>0.25}最小,受破坏程度最大,稳定性较差。综合 3 项指标来看,湿筛后小生 境团聚体稳定性表现为石槽>石沟>石缝>石土面。

应用 LB 法测定小生境土壤团聚体稳定性,结果表明,不同处理对团聚体破坏程度为 FW>WS>SW,与 Li 等^[32]人的研究结果相似,说明 FW 处理引起的消散作用为小生境土壤团聚体破碎的主要破坏机制。因为 FW 是模拟大雨或暴雨条件下团聚体被迅速浸没水中时,团聚体孔隙中蓄积的空气受挤压,超过自身承受极限时 发生"气爆"引起团聚体崩解^[33],同时水分渗透作用使土体颗粒间的胶结作用减弱^[34],因此对团聚体结构破 坏性最大;WS 是模拟雨滴击打和径流剪切力对团聚体的破坏作用;SW 是模拟小雨对团聚体的破坏,因酒精 湿润可消除团聚体内部的空气,使粘粒的不均匀膨胀作用效果达到最大,但仍远小于土壤毛管张力,因此对团 聚体的破坏性最小。本研究中 FW 对团聚体的破坏作用较大,以相对消散指数 RSI 和相对机械破碎指数 RMI 来衡量团聚体对不同破坏机制的敏感程度,结果显示各小生境土壤 RSI 远大于 RMI,甚至呈现倍数关系,说明 小生境土壤团聚体的最大破坏机制为大雨或暴雨条件下引起的消散破坏作用,并对消散作用最为敏感。

LB 处理后,小生境团聚体稳定性表现为石槽>石沟>石缝>石土面>土面,土面团粒结构体即大于 0.25 mm 粒径团聚体含量、MWD 值均最低,团聚体破碎程度最严重,除了受有机质影响外,相对于其他小生境其基岩 裸露率较低(表1),在出现强降雨天气时,土面凋落物拦蓄作用弱,地表径流剪切以及雨滴对团聚体的直接击 溅作用较强,降低了土面团聚体稳定性。就小生境土壤团聚体表面不同倍数 SEM 图像(图4)显示石槽、石沟 表面结构更为粗糙,排列具有定向性,石缝次之,更有助于土体胶结物质附着,而石土面和土面土体颗粒磨圆 度较高则与之相反,同样对团聚体稳定性造成影响。

本研究中,对小生境土壤团聚体采用3种研究方法,结果显示干筛、湿筛法测定 MWD 值变化趋势一致, 但均小于干筛法,与魏亚飞^[35]研究结果相同,虽干筛法是团聚体分析方法之一,但因各类型土壤的团聚能力 差异大,目前没有相关研究对不同土质的干筛的强度和时间等重要变量进行细分。因此,湿筛法更能直观反 应小生境异质性对土壤团聚结构的影响。湿筛法为衡量团聚体水稳定性最常用的方法,考虑了风干团聚体浸 入水中瞬间引起的消散作用及湿筛过程的机械破坏作用对团聚体的影响,LB 法在湿筛法基础上更为细化,将 土壤侵蚀过程中的对团聚体不同破碎机制(消散作用、机械破坏作用、黏土矿物不均匀膨胀作用)根据不同处 理加以区分。本文研究显示湿筛法和 LB 法测定小生境土壤团聚体稳定性存在一定差异,湿筛法 MWD 值为 石土面最小,LB 法为土面最小。原因可能在于 LB 法和湿筛法研究的团聚体粒径范围不同(LB 为 3—5 mm, 湿筛为干筛后按比例配土),已有研究显示,不同粒径团聚体土壤有机碳含量差异显著^[23,36],说明不同粒径团 聚体蓄积有机质能力不同,可能会引起矿物颗粒间的胶结能力差异,对两种方法研究结果造成一定影响,但相 关性分析显示湿筛法 WR_{0.25}及 PAD 与 LB 法 3 种处理的 MWD 值有显著相关性,说明 LB 法对测定喀斯特小生 境土壤团聚体稳定性是可行的,综合两种方法的测定结果,小生境土壤团聚体中稳定性最好,抗蚀性最高的为 石槽生境,而抗蚀性和稳定性最差的为石土面和土面生境。

研究区拥有丰富的水热条件,地表径流对土壤进行剪切、破碎和搬运,造成土壤出现破碎、剥离和移动,可 移动土壤颗粒再经复杂地下结构漏失,引起土壤侵蚀^[37]。本研究显示,喀斯特土壤在遇到大雨、暴雨条件下 引起的消散作用对团聚体破碎程度最严重,极易造成水土流失并引起土地生产力下降。因此,在喀斯特地区 应注重在雨季的有效防护,尤其是针对分布面积最广的土面和以岩石风化为主要成土方式的石土面生境,在 喀斯特生态脆弱区应选择在短期内提高土壤有机质、增加植被覆盖度和土壤大团聚体含量的水土保持树种为 增强土壤抗蚀性的有效方法。

4 结论

(1)湿筛法测定 5 种小生境土壤团聚体分布均以>0.25 mm 粒径为主,其中土面生境含量最低为 81.26%, PAD 介于 8.93%—17.39%之间,以土面最大,MWD 值在 1.94—2.85 mm 间以石土面为最小,均小于干筛法测 定的 MWD。团聚体稳定性表现为石槽最大,土面最差,石土面次之。主要受小生境土壤有机质含量与成土方 式影响。

(2)LB法3种处理后,各小生境土壤团聚体MWD值变化趋势均为SW>WS>FW,RSI远大于RMI,即喀斯特各类小生境土壤团聚体最主要的破坏机制和敏感程度最高的为大雨或暴雨时造成的消散作用。其中表现为石槽团聚体稳定性最好,土面最差,石土面次之。

(3) LB 法 3 种处理的 MWD 均与湿筛法团聚体稳定性指标 WR_{>025}呈显著正相关、与 PAD 呈显著负相关,即两种测定方法具有良好的相关性,LB 法用于测定喀斯特小生境土壤团聚体稳定性是可行的,SW 和 WS 处理 MWD 值与有机质、TN、TP、TK 呈显著正相关,即有机质作为有机胶结物质对团聚体稳定性有重要影响,团粒结构越稳定土壤蓄积养分能力越好。

(4)综合不同测定方法团聚体稳定性参数显示,土面、石土面土壤抗蚀性最差,团聚体稳定性最低。在喀斯特生态脆弱区应加强雨季对土面和石土面生境土壤的防护。

参考文献(References):

- [1] 陈正发,史冬梅,谢均强,张兵.紫色土旱坡地土壤团聚体稳定性特征对侵蚀过程的影响.中国农业科学,2011,44(13):2721-2729.
- [2] Bryan R B. Development of laboratory instrumentation for the study of soil erodibility. Earth Science Journal, 1968, 2(1): 38-50.
- [3] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels. Catena, 2002, 47 (2): 133-149.
- [4] 吴求生, 龙健, 李娟, 廖洪凯, 刘灵飞, 吴劲楠, 肖雄. 茂兰喀斯特森林小生境类型对土壤微生物群落组成的影响. 生态学报, 2019, 39 (3): 1009-1018.
- [5] 龙健,吴求生,李娟,廖洪凯,刘灵飞,黄博聪,张菊梅.贵州茂兰喀斯特森林不同小生境类型对岩石溶蚀的影响.土壤学报,2021,58 (1):151-161.
- [6] 殷清慧,谢世友,蔡先立.喀斯特石漠化皆伐迹地不同微地形和小生境下的土壤侵蚀差异.水土保持通报,2019,39(4):44-47,53-53.
- [7] 刘方,王世杰,罗海波,刘元生,刘鸿雁.喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性.土壤学报,2008,45(6):1055-1062.
- [8] 廖洪凯,龙健,李娟,杨江江,冯业强.喀斯特地区不同植被下小生境土壤矿物组成及有机碳含量空间异质性初步研究.中国岩溶, 2010,29(4):434-439.
- [9] 廖洪凯,龙健,李娟,杨江江,冯业强.西南地区喀斯特干热河谷地带不同植被类型下小生境土壤碳氮分布特征.土壤,2012,44(3): 421-428.

[10]	王兴富,黄先飞,黄	钥继伟, 张珍明.	喀斯特石漠化过程中小生境	这岩性的演替对土	上壤有机碳的影响.	水土保持学报,	2020,	34(4):
	295-303.							

- [11] 林立文,邓羽松,王金悦,杨钙仁,蒋代华,王玲.南亚热带人工林种植对赤红壤团聚体分布及稳定性的影响.应用生态学报,2020,31 (11):3647-3656.
- [12] Domżł H, Hodara J, Słowińska-Jurkiewicz A, Turski R. The effects of agricultural use on the structure and physical properties of three soil types. Soil and Tillage Research, 1993, 27(1/4); 365-382.
- [13] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 陈洪松, 舒世燕, 谭卫宁. 桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征. 生态学报, 2011, 31(11): 3036-3043.
- [14] Wang S J, Ji H B, Ouyang Z Y, Zhou D Q, Zhen L P, Li T Y. Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock. Science in China Series D: Earth Sciences, 1999, 42(6): 572-581.
- [15] Chen X B, Zheng H, Zhang W, He X Y, Li L, Wu J S, Huang D Y, Su Y R. Effects of land cover on soil organic carbon stock in a karst landscape with discontinuous soil distribution. Journal of Mountain Science, 2014, 11(3): 774-781.
- [16] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性. 云南地理环境研究, 1990, 2(1): 21-29.
- [17] 熊康宁,池永宽.中国南方喀斯特生态系统面临的问题及对策.生态经济,2015,31(1):23-30.
- [18] 王世杰,卢红梅,周运超,谢丽萍,肖德安.茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法.土壤学报,2007,44 (3):475-483.
- [19] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.
- [20] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: Theory and methodology. European Journal of Soil Science, 1996, 47(4): 425-437.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 266-289.
- [22] 汪三树,黄先智,史东梅,郭彦军,郭宏忠,彭旭东,李叶鑫.基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究.生态学报,2013,33(18):5589-5598.
- [23] 廖洪凯,李娟,龙健,张文娟,刘灵飞.贵州喀斯特山区花椒林小生境类型与土壤环境因子的关系.农业环境科学学报,2013,32(12): 2429-2435.
- [24] 张邦琨,韦小丽,曾信波.喀斯特森林不同小生境的小气候特征.贵州农学院学报,1996,15(1):7-10.
- [25] 张兴. 喀斯特地区典型小生境产流产沙及养分流失特征[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [26] 于扬,杜虎,宋同清,彭晚霞,曾馥平,王克林,鹿士杨,范夫静,卢成阳.喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征.生态学报,2013,33(23):7455-7466.
- [27] 杜有新, 潘根兴, 李恋卿, 胡忠良, 王新洲. 黔中喀斯特山区退化生态系统生物量结构与 N、P 分布格局及其循环特征. 生态学报, 2010, 30(23): 6338-6347.
- [28] 霍琳,杨思存,王成宝,姜万礼,温美娟.耕作方式对甘肃引黄灌区灌耕灰钙土团聚体分布及稳定性的影响.应用生态学报,2019,30 (10):3463-3472.
- [29] Zou X M, Ruan H H, Fu Y, Yang X D, Sha L Q. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigationincubation procedure. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(10): 1923-1928.
- [30] Briedis C, de Moraes Sá J C, Caires E F, de Fátima Navarro J, Inagaki T M, Boer A, Neto C Q, de Oliveira Ferreira A, Canalli L B, Santos J B D. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. Geoderma, 2012, 170: 80-88.
- [31] Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 7-31.
- [32] Li Z X, Cai C F, Shi Z H, Wang T W. Aggregate stability and its relationship with some chemical properties of red soils in subtropical China. Pedosphere, 2005, 15(1): 129-136.
- [33] 郭伟, 史志华, 陈利顶, 闫峰陵, 李朝霞, 蔡崇法. 不同湿润速率对三种红壤坡面侵蚀过程的影响. 土壤学报, 2008, 45(1): 26-31.
- [34] 李朝霞,蔡崇法,史志华,王天巍,张琪,孙站成.鄂南第四纪粘土红壤团聚体的稳定性及其稳定机制初探.水土保持学报,2004.18 (4):69-72.
- [35] 魏亚飞, 王辉, 谭帅, 田大作, 卢佳宇, 张先登. 套种对南方红壤坡耕地经济果园土壤团聚体分布及稳定性的影响. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1617-1624.
- [36] 范倩玉,刘振华,李晋,班旦赤列,杨珍平,薛建福,黄春国,高志强.不同轮作模式对潮土团聚体及其有机碳分布的影响.应用与环境 生物学报,2021,27(1):81-88.
- [37] 彭旭东,戴全厚,李昌兰,袁应飞,赵龙山.模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响.农业工程学报,2017,33(2): 131-140.