

岩溶断陷盆地高原面洼地不同坡位土壤抗蚀性研究

刘 鹏^{1, 2, 3)}, 蒋忠诚^{2, 3)}, 李衍青^{2, 3)*}, 蓝芙蓉^{2, 3)}, 于 洋⁴⁾, 黄映霞⁵⁾

1)广西大学林学院, 广西南宁 530001; 2)中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004;

3)自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 广西桂林 541004;

4)北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 5)南宁师范大学地理科学与规划学院, 广西南宁 530001

摘要: 为揭示断陷盆地区高原面洼地不同坡位土壤的抗蚀性能, 以高原面洼地不同坡位灌草地(上坡、中坡、下坡、坡底)不同土层(0~20 cm、20~40 cm)土壤为研究对象, 通过对土壤抗蚀性16个指标的测定与分析, 研究了不同坡位对土壤抗蚀性的影响。结果表明: 在不同深度土层中, 土壤水稳定性大团聚体含量都呈现出上坡>下坡>坡底>中坡($P < 0.05$), 且随着土层深度的增加含量减少; 各坡位土壤抗蚀性, 0~20 cm 土层, 上坡>下坡>坡底>中坡($P < 0.05$), 20~40 cm 土层, 下坡>坡底>上坡>中坡($P < 0.05$), 随着土层深度的增加, 土壤抗蚀性逐渐降低; 粘粒、有机碳、电导、PAD、MWD_{wet}为评价喀斯特断陷盆地坡位土壤抗蚀性的最佳五指标。建议根据各坡位土壤抗蚀性的差异采取不同措施, 减小水土流失同时增强土壤的抗蚀能力, 以改善当地生态环境。

关键词: 断陷盆地; 土壤抗蚀性; 坡位; 洼地

中图分类号: P951 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.091401

A Study of Soil Anti-erodibility of Different Slope Positions on Plateau Depression in Karst Gabin Basin

LIU Peng^{1, 2, 3)}, JIANG Zhong-cheng^{2, 3)}, LI Yan-qing^{2, 3)*}, LAN Fu-ning^{2, 3)}, YU Yang⁴⁾, HUANG Ying-xia⁵⁾

1) Forestry College of Guangxi University, Nanning, Guangxi 530001;

2) Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004;

3) Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification,
Ministry of Natural Resources, Guilin, Guangxi 541004;

4) School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

5) School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi 530001

Abstract: In order to reveal the anti-erodibility of soil of different slope positions on Plateau depression in karst gabin basin, the authors took the soil of different soil layers (0~20 cm, 20~40 cm) in different slope positions (up slope, middle slope, downhill and slope bottom) in plateau depression area as the research object. Through the determination and analysis of 16 soil anti- erodibility indexes, the influence of different slope positions on soil anti-erodibility was studied. The results are as follows: In different depths of soil layer, the content of soil water stable macro-aggregate is in order of up slope > downhill > slope bottom > middle slope ($P < 0.05$), decreasing with soil depth. The soil anti-erodibility is in order of 0~20 cm soil layer, up slope > downhill > slope bottom > middle slope($P < 0.05$), 0~40 cm soil layer, downhill > slope bottom > upper slope > middle slope ($P < 0.05$). With the increase of soil depth, soil anti-erodibility gradually decreases; clay, organic carbon, electric conductance, PAD and MWD_{wet} are five best indexes for evaluating the soil anti-erodibility of slope position in karst fault basin. It is suggested that different measures should be taken according to the difference of soil anti-erodibility of different slope positions, so as to reduce water and soil leakage, enhance soil anti erosion

本文由国家重点研发专项计划课题(编号: 2016YFC0502503)、广西重点实验室建设项目(编号: 19-185-7)、国家自然科学基金青年基金(编号: 41502342)和国家自然科学基金面上项目(编号: 41471447)联合资助。

收稿日期: 2020-07-31; 改回日期: 2020-09-08; 网络首发日期: 2020-09-15。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 刘鹏, 男, 1987年生。博士研究生。生态学专业。E-mail: guaiguizuhai@126.com。

*通讯作者: 李衍青, 男, 1982年生。高级工程师。主要研究方向为水土流失。E-mail: lyq@karst.ac.cn。

capability and improve the local ecological environment.

Key words: fault basin; soil anti-erodibility; slope position; depression

土壤退化作为 21 世纪国际土壤学、环境科学、农学等学科共同关注的热点问题，对全球环境质量、水土保持、甚至食物安全、人畜健康等有重要的影响(Montanarella et al., 2016)。其中，土壤结构退化是土壤退化的重要过程，表现为营养元素流失、有机质含量下降、土体物理性质变化以及土壤抗侵蚀能力的降低(Duchicela et al., 2013)。土壤退化问题在我国西南喀斯特地区同样突出。西南喀斯特地区，其形成土壤的母岩大都为古老坚硬、质纯、层厚的碳酸盐岩，由于碳酸盐岩成土物质的先天不足(酸不溶物含量低)，使其成土速度十分缓慢(袁道先, 1994)。因成土速率慢，流失的土壤很难得到及时补充，使得喀斯特石山区土壤退化的危害甚至比黄土高原地区更加严重(王世杰, 2003; 张信宝等, 2007; 蒋忠诚等, 2014)。

作为西南喀斯特四种主要地貌类型之一的断陷盆地主要分布于云南省大部及四川部分地区，其不仅是长江和珠江发源地和主要补给区，也是长江和珠江上游重要的天然生态屏障，水土保持地位非常重要(刘鹏等, 2019)。断陷盆地特殊之处在于，受地质作用形成对比强烈的盆地和山地地形，相对高差大，地下岩溶裂隙和地下河管道发育，坡面土壤侵蚀严重，水土流失过程中携带的泥沙沉积于洼地及地下河管道，造成洼地、渠道泥沙淤积，发生内涝，严重制约了当地经济发展(王宇等, 2017; 柯静等, 2021)。因此，对断陷盆地坡面抗蚀性机制与机理研究方面，亟需深入开展。

以往学者在喀斯特地区土壤抗蚀性研究大多集中于不同土地利用对土壤抗蚀性的影响，从不同的植被类型、上覆条件及地下根系与土壤物化、微生物状况等方面对土壤抗蚀性产生影响(王佩将等, 2014; 胡阳等, 2015; 刘宽梅和周秋文, 2020)，且研究区集中于喀斯特峰丛洼地、岩溶高原区(陈佳等, 2012; 鲍乾等, 2017; 肖盛杨等, 2019)，对断陷盆地的相关研究鲜有报道，而坡位对土壤抗蚀性的影响尚不明确，阻碍了该区水土流失治理与生态恢复的进程，也难以为工程建设提供有效的科技支撑(陈洪松等, 2018)。为系统揭示喀斯特断陷盆地高原面洼地不同坡位土壤抗蚀性，本文选择南洞地下河流域高原面西北勒乡一典型洼地坡面为研究对象，选用土壤物理化学性质等 16 个指标，计算各坡位抗蚀性综合指数，并对指数进行评价，找出影响土壤抗蚀性关键指标，分析洼地不同坡位土壤抗蚀性的影响因素，以期为水土流失的防治及后期开展的水

土流失边坡植物篱建设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于断陷盆地高原面西北勒乡一洼地的自然荒草坡，地理坐标为(23°28'43"N, 103°27'49"E)，海拔 2073~2156 m(如图 1)。山区年平均气温 14.8°C，极端最高气温 30.3°C，极端最低气温-6.4°C，年均降雨量 1 214.1 mm，年均蒸发量 1 509.6 mm。该区域受到西南季风影响，降雨集中于 5—10 月，占全年降雨的 80.1%，每年侵蚀性降雨 10~14 场。地层为三叠系中统个旧组第二段(T_2g^2)，地带土壤为灰岩风化形成的石灰土，植被主要有车桑子(*Dodonaea viscosa*)、斑地锦(*Euphorbia maculata*)、紫茎泽兰(*Crofton Weed*)、云南羊蹄甲(*Bauhinia yunnanensis*)、肾蕨(*Nephrolepis auriculata*)、白头翁(*Anemone chinensis*)、盐茉木(*Rhus chinensis*)、沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)、莱菜(*Ophiopogon bodinieri*)等。

1.2 土壤样品采集与处理

本实验选取径流小区旁一自然荒草为主的北坡，坡长约 400 m，坡顶到洼地底部高差 80 m，平均坡度 11.6°。按照自然形态，将坡顶到坡底，自上而下，每隔 10 m 取一个点为主样点，共 10 个记为 H1-H10；另外，在每个主样点等高左右大于 10 m 无基岩出露处，各取一个副样点；运用五点取土法，取样深度为 0~20 cm、20~40 cm，(H1 点因土层厚度较小，仅取到 0~20 cm)，共 27 个点。根据坡形

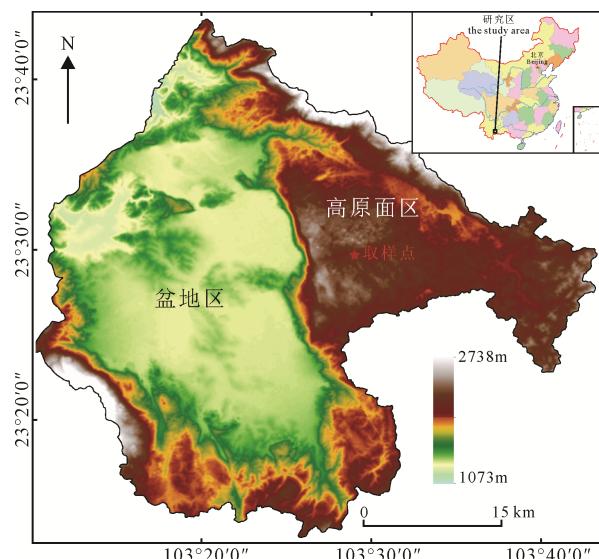


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

及坡度, 将该坡划为上坡(H1-H3, 坡度为 $30^{\circ}\sim35^{\circ}$)、中坡(H4-H6, 坡度为 $33^{\circ}\sim41^{\circ}$)、下坡(H7-H9, 坡度 $<10^{\circ}$)、坡底 H10 四个部分。各点取 3 个环刀样用于测试土壤容重, 并用方形塑料盒采集原状土并小心放置于泡沫箱中, 带回实验室处理, 分别用于测定土壤团聚体及土壤理化性质。

土壤团聚体采用 Yoder 法, 机械性团聚体筛选采用 LN-200 振荡器, 水稳定性团聚体采用日本产的 DIK2011 湿晒仪, 测试在中国地质科学院岩溶地质研究所实验室测试完成。有机碳测定采用重铬酸钾-加热氧化法; 土壤全氮采用半微量开氏法; 碱解氮采用凯氏定氮蒸馏法; 全磷采用高氯酸-硫酸溶液钼锑抗比色法; 速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法; 土壤机械组成运用湿筛法测试获得, 以上指标的测试在中国科学院西北生态环境资源研究院水土资源研究室完成。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2016 对数据进行初步分析与整理, Origin 9.0 绘图, SPSS 20.0 对数据进行统计及主成分分析, Pearson 相关系数评价不同因子间的相关性, LSD 法对各指标进行方差分析, 显著性水平为 0.05, 运用 z-score 法对数据归一化并对关键指标进行多元线性回归。

1.4 抗蚀性指标的选取

评价土壤抗蚀性指标通常分为无机颗粒、团聚体水稳定性、有机胶体、土壤物理化学性质等方面(赵洋毅等, 2007; 胡宁等, 2008), 本研究初选影响土壤抗蚀性的 16 个指标, 进行主成分分析及抗蚀性综合值得计算, 并通过相关性及敏感性分析, 筛选其中的关键性指标进行多元线性回归。

1)无机颗粒类:

X_1 =沙粒($50\sim2000 \mu\text{m}$, %); X_2 =粉粒($2\sim50 \mu\text{m}$, %); X_3 =粘粒($\leq 2 \mu\text{m}$, %)。

2)团聚体类:

$X_4=WSA_{0.25}$ ($>0.25 \text{ mm}$ 水稳定性团聚体含量, %);

$X_5=WSA_{0.5}$ ($>0.5 \text{ mm}$ 水稳定性团聚体含量, %);

$X_6=PAD_{0.25}$ (团聚体破坏率);

$PAD_{0.25}=(\geq 0.25 \text{ 团聚体干筛值} - \geq 0.25 \text{ 团聚体湿筛值}) \div \geq 0.25 \text{ 团聚体干筛值} * 100\%$;

$X_7=MWD$ (团聚体平均重量直径);

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{n}_i w_i;$$

\bar{n}_i 为某一粒级团聚体平均直径, w_i 为某粒级团聚体重量。

3)有机胶体类:

X_8 =有机质含量(g/kg)。

4)物理性质类:

X_9 =土壤容重(g/cm^3); X_{10} =pH 值; X_{11} =电导率($\mu\text{s}/\text{cm}$)。

5)营养元素类:

X_{12} =全氮含量(g/kg); X_{13} =全磷含量(g/kg); X_{14} =碱解氮(mg/kg); X_{15} =速效磷(mg/kg); X_{16} =总碳(g/kg)。

2 结果

2.1 不同坡位土壤机械组成

土壤机械组成也称为土壤质地, 是指土壤中矿物颗粒的大小及其组成比例, 是影响土壤抗蚀性的重要指标之一(唐夫凯, 2016)。一般而言, 土壤砂粒增加利于水分下渗, 不易形成地表径流, 土质松散, 无胀缩性; 粘粒增加会导致土壤的通气和透水性下降, 使土壤易于板结, 但粘粒能较好的胶结有机质; 而粉砂则介于两者之间。图 2 为坡面各部位不同土壤深度下的机械组成, 从图中可知, 坡面不同部位的机械组成具有显著性差异($P < 0.05$)。0~20 cm 土层中, 粘粒在坡面上总体表现为坡底(63.3%)>中坡(53.9%)>下坡(49.2%)>上坡(33.2%), 不同坡位上粘粒含量随土壤深度的增大而增加; 砂粒总体表现与粘粒相反的趋势, 表现为上坡(47.6%)>中坡(29.9%)>下坡(23.8%)>坡底(10.7%), 含量随土壤深度增大而减少; 粉粒总体表现为坡底(26.0%)>下坡(22.1%)>上坡(19.2%)>中坡(16.2%), 除下坡外, 粉粒含量在各坡位呈现出随深度先增加后减小的趋势。20~40 cm 土层机械组成除中坡粘粒突然增大以外其他坡位表现与表层基本一致; 土壤表层粘粒含量低而随着深度的增加粘粒含量增大, 也从侧面反映了可能存在土壤颗粒向下的移动。

2.2 不同坡位土壤团聚体特征

干筛测定的是自然状态下土壤机械稳定团聚体含量, 较少破坏土壤中的临时性有机胶结物。

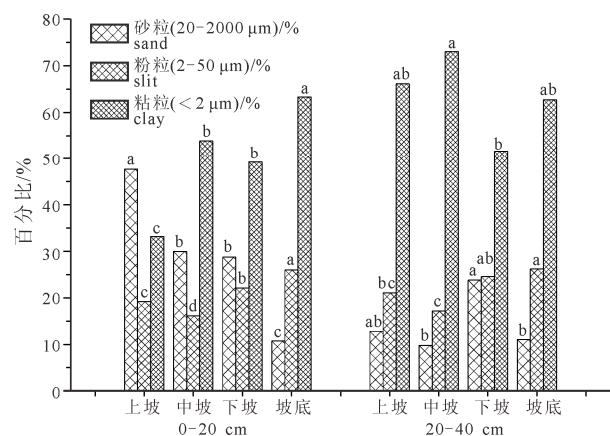


图 2 各坡位不同深度土壤机械组成

Fig. 2 Soil mechanical composition of different slope positions and depths

表 1 不同坡位土壤机械性团聚体特征(干筛)
Table 1 Characteristics of soil mechanical aggregates in different slope positions

深度	坡位	土壤机械性团聚体粒径分布/%							MWD/mm
		>7 mm	7~5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm	
0~20 cm	上坡	75.28a	8.19a	8.38b	2.04c	2.28b	1.88b	1.95b	7.24a
	中坡	51.91c	10.57a	18.23a	4.15a	4.86a	3.89a	6.39a	5.81c
	下坡	65.12b	6.89a	9.62b	3.28b	4.76a	4.11a	6.21a	6.59b
	坡底	68.18b	2.66b	11.63b	3.44ab	4.76a	3.43a	5.9a	6.48b
20~40 cm	上坡	66.87ab	10.04b	12.29bc	2.49c	2.89b	2.18b	3.24c	6.79ab
	中坡	46.67c	12.11a	21.03a	4.24a	4.66a	4.13a	7.16a	5.56c
	下坡	58.74b	9.49b	14.07b	3.46b	4.68a	4.19a	5.37b	6.17bc
	坡底	75.73a	5.08c	8.49c	2.41c	3.14b	2.06b	3.09c	7.11a

注: 不同小写字母表示不同坡位土壤在相同粒级的差异性($P < 0.05$)。

表 2 不同坡位土壤水稳定性团聚体特征(湿筛)
Table 2 Characteristics of soil water stable aggregates in different slope positions

深度	坡位	土壤水稳定性团聚体粒径分布/%					MWD/mm	PAD/%	FD
		>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm			
0~20 cm	上坡	74.83a	7.29b	2.95b	1.46b	13.47a	4.66a	11.75c	2.62a
	中坡	18.24c	22.88a	22.36a	12.3a	24.22a	1.71c	19.05a	2.42b
	下坡	41.39b	16.03a	15.16a	9.14a	18.28ab	2.91b	15.39b	2.45b
	坡底	27.14c	19.55a	19.15a	11.3a	22.88a	2.14c	18.04a	2.46b
20~40 cm	上坡	21.04a	31.62a	21.18a	7.43b	18.73b	1.97b	16.01b	2.2c
	中坡	9.7b	25.26b	21.3a	13.32a	30.42a	1.24c	25.05a	2.48a
	下坡	28.68a	24.43b	18.32b	8.95b	19.62b	2.31a	15.06b	2.34b
	坡底	26.7a	30.06a	17.97b	7.92b	17.36b	2.24a	14.72b	2.44ab

注: 不同小写字母表示不同坡位土壤在相同粒级的差异性($P < 0.05$)。

土壤机械性团聚体各粒级的组成比例在不同坡位存在显著差异($P < 0.05$)(表 1)。在土壤 0~20 cm 层中, 各坡位都是以>7 mm 的粒级含量为主, 比例分别达到 75.28%、51.91%、67.07% 和 68.18%。在 20~40 cm 土壤层中, 上坡、中坡和下坡>7 mm 粒级含量比例略有降低, 分别为 66.87%、46.67%、58.74%, 而坡底则增加到了 75.73%, 可能与坡底长期沉积有关。

土壤粒径>0.25 mm 土壤团聚体通常称为大团聚体, 是土壤结构组成的重要单元, 其是土壤肥力调节器, 对维持土壤水肥有重要作用, 同时, 其在一定程度上对土壤的抗蚀性有指示意义。用湿筛法获得的水稳定性团聚体各粒径分布如(表 2)所示, 在不同深度土层中, 土壤水稳定性大团聚体含量为上坡>下坡>坡底>中坡($P < 0.05$), 随着土壤深度的增加含量减少。

团聚体平均直径(MWD)反映的是土壤团聚体粒级大小分布状况, 其值越大则表示土壤团聚体的平均粒径团聚度越高, 稳定性越强(周虎等, 2007)。在 0~20 cm 土层中, 不同坡位 MWD 总体的表现为上坡>下坡>坡底>中坡。在 20~40 cm 土壤层中, 表现为下坡>中坡>坡底>上坡。

土壤团聚体结构破坏率(PAD)越大, 土壤结构

越容易崩解破碎, 土壤越容易被侵蚀, PAD 越小, 团聚体的稳定性相对越高(李阳兵等, 2002)。在 0~20 cm 土壤以及 20~40 cm 土壤中, 土壤团聚体结构破坏率(PAD)都表现出同样的趋势, 总体为中坡>坡底>下坡>上坡。中坡的 PAD 最大, 也最易崩解破碎。

土壤团聚体分形维数(FD)可用于表征团聚体的稳定性以及物理性质的优劣, 数值越小, 结构稳定性和物理性质越好, 相反则越差。在表层的 0~20 cm 土壤中, 上坡(2.62)>坡底(2.46)>下坡(2.45)>中坡(2.42)。在 20~40 cm 土壤中, FD 表现为中坡(2.48)>坡底(2.44)>下坡(2.34)>上坡(2.20)。表层 0~20 cm 的分形维数较深层 20~40 cm 的分形维数较大, 说明表层土壤的结构稳定性比下层土壤差。

2.3 不同坡位土壤抗蚀性综合指数

为了综合土壤抗蚀性的评价结果, 考虑各因子的关联性, 对 16 个因子进行了主成分分析。前 4 个公因子特征值都大于 1, 主成分累积贡献率达到了 85.73%, 满足了主成分分析要求(表 3), 可以比较全面的描述土壤的抗蚀性能(王向栋等, 2017; 张华渝等, 2019)。第一主成分方差贡献达到 50.1%, 为物理化学类指标, 其中碱解氮、总碳、有机碳超过了 0.9, 沙粒、粘粒超过了 0.8; 第二主成分方差

表 3 主成分分析特征值
Table 3 Eigenvalues of principal component analysis

指标	主成分			
	1	2	3	4
有机碳	0.966			
总碳	0.964			
碱解氮	0.956			
总氮	0.929			
沙粒	0.880			
粘粒	-0.831			
MWD _湿	0.719			
电导			0.571	
WSA _{0.25}		0.935		
WSA _{0.5}		0.905		
PAD		-0.899		
全磷		0.927		
速效磷		0.888		
粉粒		0.623		
容重		-0.729		
pH		0.684		

贡献达 15.4%，为水稳定性团聚体类指标， $WSA_{0.25}$ 、 $WSA_{0.5}$ 、 PAD 共 3 个指标超过了 0.8；第三主成分方差贡献为 12.4%，为化学类指标，其中速效磷、全磷指标超过了 0.8，粉粒超过了 0.6；第四主成分贡献 7.9%，为物理类基础指标，只有土壤容重、pH、电导值三个指标超过了 0.5。

将各个指标向量进行标准化，得到各指标主成分分值，再根据各主成分所占的比例，计算出不同坡位的主成分综合值，按照每个主成分比例，计算出各坡位不同深度的土壤抗蚀性综合指数。土壤抗蚀性综合指数越高，说明土壤抗侵蚀能力越强；综合指数值正负并不具有实际意义，是指标标准化的结果，正值说明土壤抗蚀性高于平均水平(韩鲁艳等, 2009)。通过计算可知(图 3)，0~20 cm 土层，不同坡位抗蚀性上坡(10.80)>下坡(3.18)>坡底(0.23)>中坡(-1.42)，各坡位差异显著($P < 0.05$)；20~40 cm 土层土壤抗蚀性为下坡(-0.39)>坡底(-0.90)>上坡(-4.47)>中坡(-7.03)，除下坡和坡底外，各坡位差异显著($P < 0.05$)。随着土层深度的增加，土壤抗蚀性逐渐降低。

2.4 抗蚀性综合指数评价

本研究中初选指标达 16 个，尽管多指标能综合全面反应土壤抗蚀性的真实情况，但很多指标是重叠的，甚至会掩盖另一些指标的作用。为了简化抗蚀性评价的工作量，同时确保抗蚀性评价指标和信息的综合性和科学性，将计算得出的土壤抗蚀性指数，同各因子进行皮尔森相关分析与基于变异系数的敏感性分析。

强敏感会带来计算上的误差，弱敏感会使计算

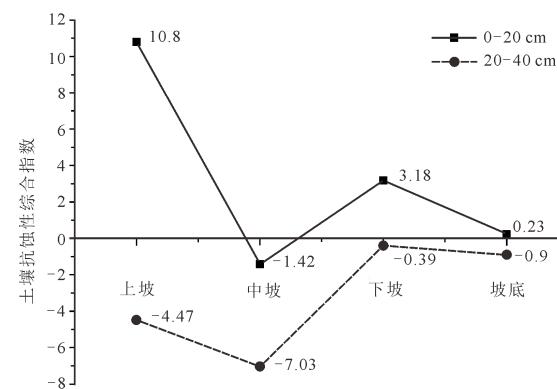


图 3 各坡位不同深度的土壤抗蚀性综合指数
Fig. 3 Comprehensive index of soil anti-erodibility of different slope positions and depths

表 4 回归系数估计
Table 4 Regression coefficient estimation

变量	常数	标准误差	VIF
截距	-4.214	0.942	
粘粒(X_1)	-0.050	0.012	3.304
有机碳(X_2)	0.130	0.013	6.424
$MWD_{\text{湿}}(X_3)$	0.383	0.211	6.340
$PAD(X_4)$	-0.012	0.002	2.914
电导(X_5)	0.026	0.004	1.610

带来迟钝效应，因此本文选择变异系数 0.3~1 的高敏感指标。抗蚀性指标与综合评价指数相关性大于 0.6 的依次为碱解氮(0.945)、总碳(0.940)、有机碳(0.938)、总氮(0.911)、 $MWD_{\text{湿}}$ (0.895)、粘粒(-0.865)、 PAD (0.706)。敏感性在 0.3~1.0 之间的指标分别为有机碳(0.74)、总碳(0.68)、 $MWD_{\text{湿}}$ (0.51)、沙粒(0.61)、全磷(0.41)、电导(0.35)、 PAD (0.35)、粘粒(0.31)。通过综合分析，筛选出粘粒、有机碳、 $MWD_{\text{湿}}$ 、 PAD 、电导等 5 个指标为自变量，抗蚀性综合指数为因变量，建立多元回归模型，所得结果如表 4 所示：

通过表 4，得出断陷盆地高原面坡地土壤抗蚀性综合指数计算公式为：

$$Y = -0.05X_1 + 0.13X_2 + 0.383X_3 - 0.012X_4 + 0.026X_5 - 4.214$$

构建的综合评价模型的因子判定系数 $R^2=0.992$, $F=440.2$ ，达到极显著相关水平，模型的拟合度较高，说明粘粒、有机碳、 $MWD_{\text{湿}}$ 、 PAD 、电导等 5 个指标能够很好的反映断陷盆地高原面洼地不同坡位的土壤抗蚀性综合能力。

3 讨论

3.1 坡位与土壤抗蚀性

由于喀斯特洼地坡面受到长期的物理化学因素作用，对不同坡位机械组成、大团聚体、营养元素等方面产生了影响，导致其土壤抗蚀性具有显著性差异($P < 0.05$)。通过对土壤抗蚀性综合评价，发现表层土壤抗蚀性上坡>下坡>坡底>中坡；深层

土壤抗蚀性为下坡 > 坡底 > 上坡 > 中坡，且随着土层深度的增加，土壤抗蚀性逐渐降低。付允等(2011)对坡耕地不同地貌部位表层土壤抗蚀性研究表明上坡 > 下坡 > 坡底 > 坡顶，坡耕地对土壤抗蚀性影响主要在于耕作行为对土壤性质的改变而引起不同坡位土壤抗蚀性的差异。罗为群等(2008, 2014)运用侵蚀泥沙法在平果果化试验基地，发现了喀斯特坡面水土流失的“地貌效应”，从上坡到坡底，侵蚀强度逐渐增加。有研究表明，在降雨和植被条件不变的前提下，坡度是影响水土流失的关键因素(陆树华等, 2016)。另有学者认为，坡面坡度较大及植被较少处土壤易遭受强降雨，使土壤形态发生改变，并形成一些可渗透的和不易水土流失的地貌(Ribolzi et al., 2011)。而本研究中的灌草坡人为干扰较小，其不同坡位土壤抗蚀性的差异一方面是受坡度的影响，另一方面与岩溶区特殊的土壤结构有关。不同坡位坡度的变化会引起坡面土壤理化性质的分异，同时，岩溶区裂隙发育易导致土壤向下漏失，造成营养元素流失，机械组成改变，土壤大团聚体含量下降，土壤成分与结构退化加剧，从而使土壤抗蚀性下降。

3.2 理化性质与土壤抗蚀性关系

从粘粒、有机碳、 $MWD_{\text{湿}}$ 、 PAD 、电导五个评价土壤抗蚀性最优指标表明，研究区土壤抗蚀性与土壤理化性质及颗粒组成紧密相关。为了探究喀斯特地区坡面土壤营养元素与土壤抗蚀性的关系，沿坡面从上到下取样(H1 到 H10)，其营养元素的含量变化如(图 4b)，不同坡位上营养元素差异性显著($P < 0.05$)。上坡到坡底有机碳含量依次为上坡(54.97 g/kg) > 下坡(25.31 g/kg) > 坡底(19.52 g/kg) > 中坡(19.21 g/kg)。全氮从坡上到山坡底部含量依次为上坡(4.7 g/kg) > 下坡(2.34 g/kg) > 坡底(2.17 g/kg) > 中坡(1.79 g/kg)。全磷从坡上到山坡底部含量依次为下坡(1.8 g/kg)=坡底(1.8 g/kg) > 上坡(1.12 g/kg) > 中坡(0.95 g/kg)。对比可知，有机碳、全氮和土壤抗

蚀性综合指数具有相同趋势，而磷因聚集效应，会随水土流失沉积于下坡和坡底(鲍士旦, 2007)。从变异系数分布(图 4a)上可以看出中坡位取样点的变异系数最大，而营养元素的变异系数与含量呈现出相反的趋势。

土壤团聚体是土壤的重要组成，是由土壤颗粒在有机质的胶结作用下形成(Barthes and Roose, 2002)，是土壤结构最基本的单元，其与有机质的胶结是维持土壤结构和保护土壤抵御外力侵蚀的基础，其稳定性对水分入渗和径流产生与发展具有重要影响(Fokom et al., 2012)。粘粒含量会引起土壤团聚体的消散与膨胀作用，既能胶结物质，增强团聚体的稳定性，也能因自身膨胀破碎而导致团粒间的粘黏作用被削弱(唐美凯, 2016)。当团聚体破碎时，粘粒沿着土体裂隙随径流向下滑失，由于自身很强的养分吸附能力，使得营养元素大量的流失(张立新和李生秀, 2007)。而营养元素具有表聚性质，水土漏失越严重，营养元素表层被剥离越深，含量越低，其变异越大(魏兴萍, 2011)。各项团聚体指标分析，中坡的 $MWD_{\text{湿}}$ 、 $WSA_{0.25}$ 、 $WSA_{0.5}$ 最小， PAD 最大，表明在此过程中，团聚体破碎严重，土壤抗蚀性综合指数降低。

相较于峰丛洼地，断陷盆地高原面与盆地区巨大的海拔高差，使得岩溶垂向发育更明显，水土漏失过程更为复杂，生态恢复困难。该区也是盆地径流系统的上游补给区，是沉积平原区水土调节的输送通道和生态屏障(王宇等, 2017)。对高原面洼地不同坡位土壤抗蚀性与水土漏失的研究，针对性采取水土保持措施，以改善当地生态环境，具有积极的科学意义。

4 结论

(1) 在不同深度土层中，土壤水稳性大团聚体含量都呈现出上坡>下坡 > 坡底>中坡($P < 0.05$)，且随着土层深度的增加含量减少。

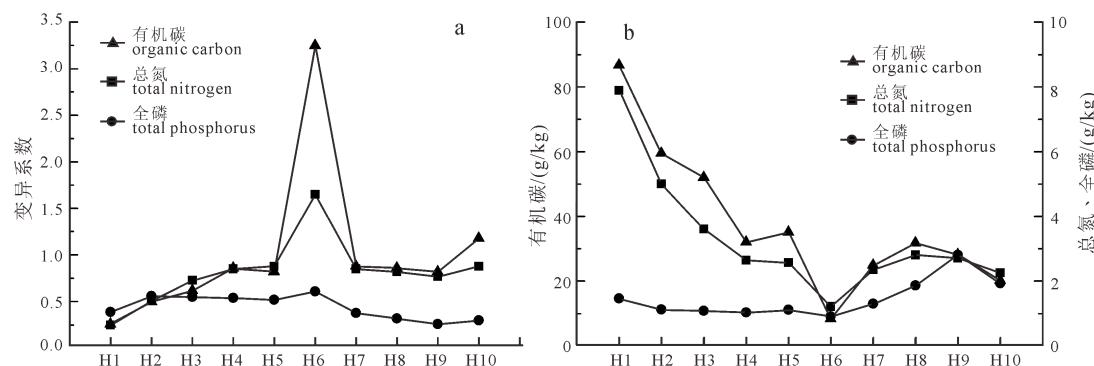


图 4 沿坡位各点营养元素变异系数图(a)和沿坡位各点营养元素含量图(b)
Fig. 4 Coefficient of variation of nutrient elements along the slope (a) and nutrient content along the slope (b)

(2)不同坡位土壤抗蚀性综合指数, 0~20 cm 土层, 上坡(10.80)>下坡(3.18)>坡底(0.23)>中坡(-1.42)($P < 0.05$); 20~40 cm 土层, 下坡(-0.39)>坡底(-0.90)>上坡(-4.47)>中坡(-7.03)($P < 0.05$), 随着土层深度的增加, 土壤抗蚀性逐渐降低。

(3)通过对抗蚀性指标进行评价, 粘粒、有机碳、电导、PAD、MWD_湿等5个指标就能较好的对土壤抗蚀性综合指数进行拟合, 极大的简化了抗蚀性评价的工作量。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0502503), Guangxi Key Laboratory Construction Project (No. 19-185-7), and National Natural Science Foundation of China (Nos. 41502342 and 41471447).

参考文献:

- 鲍乾, 杨瑞, 李万红, 聂朝俊, 陆发俊. 2017. 喀斯特高原峡谷区不同恢复模式的土壤生态效应[J]. 水土保持学报, 31(03): 154-161, 168.
- 鲍士旦. 2007. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社.
- 陈洪松, 冯腾, 李成志, 付智勇, 连晋姣, 王克林. 2018. 西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J]. 水土保持学报, 32(01): 10-16.
- 陈佳, 陈洪松, 冯腾, 王克林, 张伟. 2012. 桂西北喀斯特地区不同土地利用类型土壤抗蚀性研究[J]. 中国生态农业学报, 20(01): 105-110.
- 付允, 贾亚男, 蓝家程. 2011. 岩溶区不同土地利用方式土壤抗蚀性分析[J]. 水土保持研究, 18(5): 5-9.
- 韩鲁艳, 郝乾坤, 焦菊英. 2009. 黄土丘陵沟壑区人工林地的土壤抗蚀性评价[J]. 水土保持通报, 29(03): 159-164.
- 胡宁, 傅瓦利, 马志敏, 甄晓君, 袁红. 2008. 岩溶石漠化山地不同退耕模式土壤抗蚀性及其与结构体分形关系研究[J]. 中国岩溶, 27(02): 115-121.
- 胡阳, 邓艳, 蒋忠诚, 马祖陆, 罗为群, 朱鑫. 2015. 典型岩溶山区植被恢复对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 35(01): 61-67.
- 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 曹建华, 覃星铭, 李衍青, 杨奇勇. 2014. 岩溶峰丛洼地水土流失及防治研究[J]. 地球学报, 35(05): 535-542.
- 柯静, 邓艳, 岳祥飞, 梁锦桃, 李旭尧, 曹建华, 吴松. 2021. 典型岩溶断陷盆地溶蚀速率对海拔高度和土地利用方式的响应[J]. 地球学报, 42(3): 407-416.
- 李阳兵, 谢德体, 魏朝富, 周宝同. 2002. 利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 11(05): 451-455.
- 刘宽梅, 周秋文. 2020. 典型喀斯特森林土壤的抗蚀性[J]. 生态学报, 40(02): 568-577.
- 刘鹏, 蒋忠诚, 蓝美宁, 李衍青, 于洋. 2019. 土地利用对溶丘洼地土壤容重、水分和有机质空间异质性的影响——以南洞流域驻马哨洼地为例[J]. 中国岩溶, 38(01): 100-108.
- 陆树华, 李先琨, 徐广平, 黄甫昭, 李冬兴, 蒋忠诚. 2016. 基于Cs-137示踪的西江流域典型丘陵坡地土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 30(02): 38-43.
- 罗为群, 蒋忠诚, 韩清延, 曹建华, 裴建国. 2008. 岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤分布及其侵蚀特点[J]. 中国水土保持, 12(12): 46-49.
- 罗为群, 张辉旭, 蒋忠诚, 金克漠, 李衍青, 王志广. 2014. 岩溶峰丛洼地不同环境水土流失差异及防治研究——以广西果化岩溶生态研究基地为例[J]. 地球学报, 35(04): 473-480.
- 唐夫凯. 2016. 岩溶峡谷区不同土地利用方式土壤抗蚀性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院.
- 王佩将, 戴全厚, 丁贵杰, 程富东. 2014. 退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化[J]. 土壤学报, 51(04): 806-815.
- 王世杰. 2003. 喀斯特石漠化—中国西南最严重的生态地质环境问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 22(2): 120-126.
- 王向栋, 戴全厚, 李翠莲, 严友进. 2017. 草海上游石漠化过程中土壤抗蚀性变化[J]. 水土保持研究, 24(03): 13-18, 23.
- 王宇, 张华, 张贵, 王波, 彭淑惠, 何绕生, 周翠琼. 2017. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. 中国岩溶, 36(03): 283-295.
- 魏兴萍. 2011. 岩溶槽谷区水土流失特征及机理研究[D]. 重庆: 西南大学.
- 肖盛杨, 舒英格, 陈梦军. 2019. 喀斯特高原峡谷区不同植被类型的土壤抗蚀性[J]. 水土保持通报, 39(04): 30-35, 81.
- 袁道先. 1994. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社.
- 张华渝, 王克勤, 宋娅丽. 2019. 滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤抗蚀性[J]. 水土保持学报, 33(05): 50-57.
- 张立新, 李生秀. 2007. 水分胁迫下氮、钾对不同基因型夏玉米氮代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 13(4): 554-560.
- 张信宝, 焦菊英, 贺秀斌, 文安邦, 何永彬, 张云奇, 龙翼. 2007. 允许土壤流失量与合理土壤流失量[J]. 中国水土保持科学, 5(02): 114-116, 121.
- 赵洋毅, 周运超, 段旭, 周玮. 2007. 黔中喀斯特地区不同植被土壤抗蚀性研究[J]. 农业现代化研究, 28(05): 633-636.
- 周虎, 吕贻忠, 杨忠臣, 李保国. 2007. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 40(09): 1973-1979.

References:

- BAO Qian, YANG Rui, LI Wan-hong, NIE Chao-jun, LU Fa-jun. 2017. Soil Ecological Effects of Different Restoration Models in the Karst Plateau Gorge Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 31(03): 154-161, 168(in Chinese with English abstract).
- BAO Shi-dan. 2007. Agrochemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agriculture Press(in Chinese).
- BARTHES B, ROOSE E. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels[J]. Catena, 47(2): 133-149.

- CHEN Hong-song, FENG Teng, LI Cheng-zhi, FU Zhi-yong, LIAN Jin-jiao, WANG Ke-lin. 2018. Characteristics of Soil Erosion in the Karst Regions of Southwest China: Research Advance and Prospective[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 32(01): 10-16(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jia, CHEN Hong-song, FENG Teng, WANG Ke-lin, ZHANG Wei. 2012. Anti-soil erodibility of different land use types in Northwest Guangxi Karst Regions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 20(01): 105-110(in Chinese with English abstract).
- DUCHICELA J, SULLIVAN T S, BONTTI E, BEVER J D. 2013. Soil aggregate stability increase is strongly related to fungal community succession along an abandoned agricultural field chronosequence in the Bolivian Altiplano[J]. *Journal of Applied Ecology*, 50(5): 1266-1273.
- FOKOM R, ADAMOU S, TEUGWA M C, BEGOUDE A D, NANAA W L, NGONKEUB M E L, TCHAMENIA N S, NWAGAC D, TSALA G, AMVAM P H. 2012. Glomalin related soil protein, carbon, nitrogen and soil aggregate stability as affected by land use variation in the humid forest zone of south Cameroon[J]. *Soil and Tillage Research*, 120: 69-75.
- FU Yun, JIA Ya-nan, LAN Jia-cheng. 2011. Analysis of Soil Anti-erodibility of Slope Farmland in Karst Mountain Area Based on Tillage Erosion[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 18(5): 5-9(in Chinese with English abstract).
- HAN Lu-yan, HAO Qian-kun, JIAO Ju-ying. 2009. Soil Anti-erodibility of Artificial Woodlands in the Hilly-gullied Region of the Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 29(03): 159-164(in Chinese with English abstract).
- HU Ning, FU Wa-li, MA Zhi-min, ZHEN Xiao-jun, YUAN Hong. 2008. Study on erosion resistance of soil and fractal features of soil aggregates under different patterns of farmland set-aside in karst rock desertification area[J]. *Carsologica Sinica*, 27(02): 115-121(in Chinese with English abstract).
- HU Yang, DENG Yan, JIANG Zhong-cheng, MA Zu-lu, LUO Wei-qun, ZHU Xin. 2015. Effects of Vegetation Restoration on Distribution and Stability of Soil Aggregate in Typical Karst Mountains[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 35(01): 61-67(in Chinese with English abstract).
- JIANG Zhong-cheng, LUO Wei-qun, DENG Yan, CAO Jian-hua, QIN Xing-ming, LI Yan-qing, YANG Qi-yong. 2014. The Leakage of Water and Soil in the Karst Peak Cluster Depression and Its Prevention and Treatment[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(05): 535-542(in Chinese with English abstract).
- KE Jing, DENG Yan, YUE Xiang-fei, LIANG Jin-tao, LI Xu-yao, CAO Jian-hua, WU Song. 2021. The Response of the Karst Dissolution Rate to Altitude and Land Use Types in Typical Karst Faulted Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(3): 407-416(in Chinese with English abstract).
- LI Y Q, JIANG Z C, CHEN Z H, YU Y, LAN F N, SHAN Z J, SUN Y J, LIU P, TANG X B, JESUS R C. 2020. Anthropogenic Disturbances and Precipitation Affect Karst Sediment Discharge in the Nandong Underground River System in Yunnan, Southwest China[J]. *Sustainability*, DOI: 10.3390/su12073006.
- LI Yang-bin, XIE De-ti, WEI Chao-fu, ZHOU Bao-tong. 2002. A study of features of water-stable soil aggregate structure under different land use in karst mountains[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 11(05): 451-455(in Chinese with English abstract).
- LIU Kuan-mei, ZHOU Qiu-wen. 2020. Study on soil anti-erodibility of typical karst forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(02): 568-577(in Chinese with English abstract).
- LIU Peng, JIANG Zhong-cheng, LAN Fu-ning, LI Yan-qing, YU Yang. 2019. Effects of landuse on spatial heterogeneity of soil bulk density, moisture and organic material in karst hilly depressions: An example of the Zhumashao depression of Nandong watershed[J]. *Carsologica Sinica*, 38(01): 100-108(in Chinese with English abstract).
- LU Shu-hua, LI Xian-kun, XU Guang-ping, HUANG Pu-zhao, LI Dong-xing, JIANG Zhong-cheng. 2016. Assessment of Soil Erosion the Typical Hilly Upland of Xijiang River Basin Based on Cs-137 Tracer Method[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 30(02): 38-43(in Chinese with English abstract).
- LUO Wei-qun, JIANG Zhong-cheng, HAN Qing-yan, CAO Jian-hua, PEI Jian-guo. 2008. Soil distribution and erosion characteristics of different geomorphic parts in karst peak cluster depression[J]. *Soil and Water Conservation in China*, (12): 46-49(in Chinese with English abstract).
- LUO Wei-qun, ZHANG Xu-hui, JIANG Zhong-cheng, JIN Ke-mo, LI Yan-qing, WANG Zhi-guang. 2014. The Difference in Soil Erosion in Different Environments of Karst Peak-cluster Depression and the Study of Soil Erosion Prevention: A Case Study of Guohua Karst Ecological Experimental Site, Guangxi[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(04): 473-481(in Chinese with English abstract).
- MONTANARELLA L, PENNOCK D J, MCKENZIE N, BADRAOUI M, CHUDE V, BAPTISTA I, MAMO T, YEMEFAK M, AULAKH M S, YAGI K, HONG S Y, VIJARNSORN P, ZHANG G L, ARROUAYS D, BLACK H, KRASILNUKOV P, SOBOCKA J, ALERE J, HENRIQUEZ C R, LOURDES M D, TABOADA M, VICTORIA D E, ALSHANKITI A, ALAVIPANAH S K, ELSHEIKH E A, HEMPEL J, ARBESTAIN M C, NACHTERGAELE F, VARGAS R. 2016. World's soils are under threat[J]. *Soil*, 2: 79-82.
- RIBOLZI O J, PATIN L M, BRESSON K O, LATSAKHACK E, MOUCHE O, SENGTAHEUANGHOUNG N, SILVERA J P, THIÉBAUX C, VALENTIN C. 2011. Impact of slope gradient on soil surface features and infiltration on steep slopes in northern Laos[J]. *Geomorphology*, 127: 53-63.
- TANG Fu-kai. 2016. Study of soil anti-erodibility of different land

- use types in karst valley region[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Sciences(in Chinese with English abstract).
- WANG Pei-jiang, DAI Quan-hou, DING Gui-jie, CHENG Fu-dong. 2014. Variation of soil anti-erodibility during restoration of degraded karst vegetation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 51(04): 806-815(in Chinese with English abstract).
- WANG Shi-jie. 2003. The Most Serious Eco-geologically environmental Problem in Southwestern China—Karst Rocky Desertification[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 22(2): 120-126(in Chinese with English abstract).
- WANG Xiang-dong, DAI Quan-hou, LI Cui-lian, YAN You-jin. 2017. Variation of Soil Anti-erodibility During Rocky Desertification in Upper Reaches of Caohai[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 24(03): 13-18, 23(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, WANG Bo, PENG Shu-hui, HE Rao-sheng, ZHOU Cui-qiong. 2017. Zoning of environmental geology and functions in karst fault-depression basins[J]. *Carsologica Sinica*, 36(03): 283-295(in Chinese with English abstract).
- WEI Xing-ping. 2011. The Study on the Characteristics and Mechanism of soil Erosion in Karst Valley Area[D]. Chongqing: Southwest University(in Chinese with English abstract).
- XIAO Sheng-yang, SHU Ying-ge, CHEN Meng-jun. 2019. Soil Anti-erodibility Under Different Vegetable Types in Karst Plateau Gorge Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 39(04): 30-35, 81(in Chinese with English abstract).
- YUAN Dao-xian. 1994. China karst study[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHANG Hua-yu, WANG Ke-qin, SONG Ya-li. 2019. Soil Erosion Resistance Under Different Land Use Types in Jianshan River Watershed in Middle Yunnan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 33(05): 50-57(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Li-xin, LI Sheng-xiu. 2007. Effects of application of N and K fertilizers on nitrogen metabolism of two genotype varieties of maize under water-stressed condition[J]. *Plant Nutrition and Fertilizers*, 13(4): 554-560(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xin-bao, JIAO Ju-ying, HE Xiu-bin, WEN An-bang, HE Yong-bin, ZHANG Yun-qi, LONG Yi. 2007. Soil loss tolerance and reasonable soil loss[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 5(02): 114-116, 121(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yang-yi, ZHOU Yun-chao, DUAN Xu, ZHOU Wei. 2007. Soil Anti- erodibility of Different Vegetation in Karst Area in Central Part of Guizhou[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 28(05): 633-636(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Hu, LÜ Yi-zhong, YANG Zhi-cheng, LI Bao-guo. 2007. Effects of Conservation Tillage on Soil Aggregates in Huabei Plain, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 40(09): 1973-1979(in Chinese with English abstract).