

# 安宁河干旱河谷区不同类型农用地 土壤抗冲性及与土壤性质关系

朱兆棋<sup>1,2</sup>, 刘守江<sup>2,3</sup>, 刘鲁光<sup>1,2</sup>, 陈曦<sup>1,2</sup>, 王自豪<sup>2</sup>, 李金桓<sup>2</sup>

(1.西华师范大学 生命科学学院, 四川 南充 637009; 2.西华师范大学 地理科学学院, 四川 南充 637009; 3.西华师范大学 四川省干旱河谷土壤侵蚀监测与控制工程实验室, 四川 南充 637009)

**摘要:** [目的]揭示安宁河干旱河谷区不同类型农用地土壤抗冲性变化特征, 阐明影响安宁河干旱河谷区农用地土壤抗冲性的主要土壤因子, 并进而为安宁河干旱河谷区农用地水土流失防治提供科学依据。 [方法]以桉树经济林 (EEF)、马铃薯耕地 (PCL)、牧草地 (GL)、撂荒地 (AL) 和青椒园地 (GPG) 为研究对象, 采用原状土水槽冲刷法进行土壤抗冲性试验, 同时采集土壤样品测定土壤性质, 对土壤抗冲系数与土壤性质进行 Pearson 相关性和逐步回归分析。 [结果] (1) 在 15 min 冲刷过程中, 径流含沙量随冲刷时间的延长, 先急剧下降随后趋于平缓稳定; 抗冲系数随冲刷时间的延长总体呈增长趋势, 二者关系用对数、逆函数或线性函数拟合效果较好; 选取的 5 种类型农用地土壤抗冲性表现为 GL>EEF>GPG>AL>PCL。 (2) 农用地土壤性质主要受人类活动的影响, GL 和 EEF 土壤性质优良, AL 和 PCL 较差, GPG 介于上述二者之间, 团聚体稳定性表现为 GPG>GL>EEF>AL>PCL。 (3) 相关性和逐步回归分析表明, 土壤抗冲性主要受土壤机械组成和水稳性团聚体影响, 最优回归方程为: 土壤抗冲系数 =  $84.016 - 1.135 \times <0.25 \text{ mm}$  水稳性团聚体 -  $7.413 \times$  黏粒。 [结论] 安宁河干旱河谷区耕地土壤资源受到耕作的严重危害, 土壤质量严重下降, 园地土壤抗冲性和土壤性质相对较差, 应加强对耕地和园地资源的重视和保护。

**关键词:** 干旱河谷; 农用地; 土壤抗冲性; 土壤性质; 逐步回归分析; 安宁河

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0027-08

## Soil Anti-scourability of Different Types of Agricultural Lands in the Arid Valley Area of the Anning River and Its Relationship with Soil Properties

Zhu Zhaoqi<sup>1,2</sup>, Liu Shoujiang<sup>2,3</sup>, Liu Luguang<sup>1,2</sup>, Chen Xi<sup>1,2</sup>, Wang Zihao<sup>2</sup>, Li Jinhuan<sup>2</sup>

(1.School of Life Sciences, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; 2.School of Geographical Sciences, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; 3.Sichuan Province Engineering Laboratory of Monitoring and Control for Soil Erosion on Dry Valleys, Nanchong, Sichuan 637009, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to reveal the variation characteristics of soil anti-scourability of different types of agricultural land in the Anning River arid valley, and to elucidate the main soil factors affecting soil anti-scourability of agricultural land in the Anning River arid Valley, and to provide scientific basis for the prevention and control of soil erosion in the agricultural land. [Methods] Eucalyptus economic forest (EEF), potato cultivated land (PCL), pastoral land (GL), abandoned land (AL) and green pepper garden (GPG) were taken as the research objects, the undisturbed soil flume scour method was used for soil anti-scour tests, and soil samples were collected to determine soil properties. Pearson correlation and

收稿日期: 2022-11-12

修回日期: 2023-05-10

资助项目: 国家自然科学基金(41101348, 41807075); 西华师范大学博士科研启动项目(19E066); 西华师范大学一般培育项目(416627); 西华师范大学科研创新团队(CXTD2018-10)

第一作者: 朱兆棋(1995—), 男, 四川泸县人, 硕士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 1462325392@qq.com

通信作者: 刘守江(1974—), 男, 四川泸州人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事环境生态与生物多样性研究。E-mail: 275588077@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

stepwise regression analysis between soil anti-scour coefficient and soil properties were carried out. [Results] (1) During the 15 min flushing process, the sediment content of runoff decreased sharply with the extension of flushing time and then leveled off and stabilized. The anti-impact coefficient increased with the increase of scour time, and the logarithm, inverse function or linear function could be used to fit the relationship. The flushing resistance of the five selected types of agricultural soils decreased in the order: GL>EEF>GPG>AL>PCL. (2) The soil properties of agricultural land were mainly affected by human activities. The soil properties of GL and EEF were good, AL and PCL were poor, and GPG was in between, and the stability of agglomerates showed the sequence: GPG>GL>EEF>AL>PCL. (3) Correlation and stepwise regression analysis showed that soil impact resistance was mainly influenced by soil mechanical composition and water-stable agglomerates, and the optimal regression equation was described as: soil impact resistance coefficient=84,016-1.135×<0.25 mm water-stable agglomerates-7.413×clay particles. [Conclusion] This study shows that the soil resources of cultivated land in the arid valley area of the Anning River are seriously endangered by tillage and the soil quality is seriously reduced, and the soil resistance and soil properties of garden land are relatively poor, so the attention and protection of cultivated land and garden land resources should be strengthened.

**Keywords:** arid valley; agricultural land; soil anti-scourability; soil property; stepwise regression analysis; Anning River

干旱河谷是我国西南地区极其复杂的地形和气候综合作用下形成的自然—社会—经济复合山地系统<sup>[1]</sup>。干旱河谷区气候炎热少雨,生态环境脆弱,水土流失严重<sup>[2]</sup>。恶劣的自然环境加之人类对土地的不合理开发利用,极易加速加重地区干旱程度,使植被类型有向干旱灌丛和荒漠化转变的趋势。安宁河干旱河谷区作为西南干旱河谷中的一部分,同时也是四川省水土流失综合治理的重点监测区域,在近十年来越来越受到学者们的广泛关注<sup>[1-4]</sup>。

土壤抗冲性是指土壤抵抗流水对其造成机械破坏和推移的能力,该概念由朱显谟院士于 20 世纪 60 年代初提出并定义<sup>[5]</sup>。土壤抗冲性是评定土壤抗侵蚀能力的重要指标之一,同时也是水力侵蚀机理研究中的难点和热点<sup>[6]</sup>。作为土壤自身的一种特性,其大小深受土壤自身理化性质的影响,同时也会受到土壤表层根系与地表植被覆盖的影响。以往的研究主要集中于我国黄土地区,由于黄土土质疏松极易遭受流水的侵蚀,且黄土分布地区多为干旱、半干旱气候,植被稀少,护土固土能力差,故受到学者的广泛关注<sup>[7]</sup>。随着土壤抗冲性研究的逐渐深入,学者们将研究区扩大到各个生态脆弱区,通过抗冲性研究为生态脆弱区水土流失防治提供理论基础。相关研究者主要针对不同条件土壤冲刷过程中抗冲系数的动态变化特征及相关影响因素进行研究。例如,吕刚等<sup>[8]</sup>通过原状土冲刷试验对科尔沁沙地水蚀风蚀交错区的不同土地利用类型进行土壤抗冲性研究,得到土壤抗冲性为

樟子松林地>杨树林地>荒草地>灌木林地>花生地>裸沙地,且土壤抗冲性随着坡位和坡度的下降呈现线性增加趋势;柏兰峰等<sup>[9]</sup>通过原状土冲刷试验对黄土丘陵区自然冻融条件下的坡耕地、草地和灌木地进行土壤抗冲性研究,其研究表明冻融作用会加剧土壤流失,其中草地受冻融作用影响最大、抗冲性能更差,存在加剧地区水土流失的风险;王雅琼等<sup>[10]</sup>通过野外实地放水冲刷对祁连山区典型草地的土壤抗冲性及影响因素进行了研究,认为影响祁连山区草地土壤抗冲性的主导因子为植被覆盖度和根系密度。

干旱河谷地区由于生态环境脆弱,对土地的选择和开发利用就显得尤为重要。本文以安宁河干旱河谷区 5 种类型农用地作为研究对象,即桉树经济林(EEF)、青花椒园地(GPG)、牧草地(GL)、马铃薯耕地(PCL)和撂荒地(AL),通过原状土冲刷试验进行土壤抗冲性研究,并分析土壤性质。揭示不同类型农用地间土壤抗冲性差异,甄别出土壤性质中对土壤抗冲性起主导作用的因子。同时研究结果可为安宁河干旱河谷区农用地的合理规划利用提供理论参考,为区域水土流失防治提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区地处四川省凉山州安宁河流域(101°51′—102°48′E,26°38′—28°53′N),属于干旱河谷中的干暖河谷,干旱河谷长度达 160 km,面积 1 120 km<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。地貌以

山地为主,地形环境复杂,海拔 924~5 261 m<sup>[3]</sup>。该区域属于低纬度高海拔的亚热带季风气候,夏季炎热干燥,降水集中,多为暴雨,干湿季明显,年平均气温 12.71℃。年平均降雨量为 1 006.1 mm,年平均陆面蒸发量为 960.4 mm<sup>[11]</sup>。土壤以紫色土为主,水土流失严重<sup>[12]</sup>。

## 1.2 样地选择与设置

于 2022 年 4—7 月,对安宁河干旱河谷区农用地进行调查取样。该区域将农用地划分为 5 种类型,分别为耕地、园地、林地、牧草地和他农用地,占比面积表现为林地>耕地>牧草地>其他农用地>园地。结合当地农用地实际情况,5 种类型农用地选取为桉树(*Eucalyptus*)经济林、马铃薯(*Solanum tuberosum*)耕地、牧草地、撂荒地和青花椰(*Zanthoxylum schinifolium*)园地。在每种类型农用地上设置 1 m×1 m 的样方 3 个,在每个样方内用特制矩形环刀(10 cm×10 cm×20 cm)采集土样,带回室内进行土壤抗冲性试验,合计 15 份土样;采用 100 cm<sup>3</sup> 的标准环刀取土壤样品带回实验室用于测定土壤容重和孔隙度,合计 90 份土样(45 份用于容重,45 份用于孔隙度);采用塑封袋和铝盒收集取样点表层土壤用于测定土壤有机质、土壤机械组成和土壤团聚体,合计 90 份土样(45 份用于土壤机械组成和有机质,45 份用于土壤团聚体)。

## 1.3 研究方法

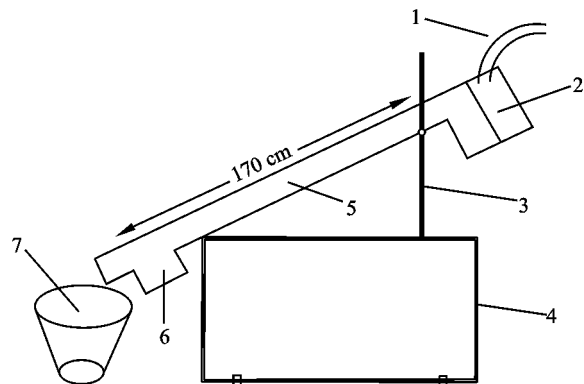
**1.3.1 土壤抗冲性测定** 土壤抗冲性试验采用改进后的原状土冲刷试验法,所使用原状土冲刷水槽如图 1 所示。为保证各农用地土样冲刷条件相同,冲刷坡度设置为 15°,冲刷流量设置为 2 L/min(用标准径流小区(20 m×5 m)在暴雨条件下产生的最大径流量计算),具体试验步骤参考金晓和陈丽华的试验操作<sup>[7]</sup>。土壤抗冲性用土壤抗冲系数(ANS)表示,表示每冲走 1 g 土所需水量,ANS 越大,土壤抗冲性越强<sup>[13]</sup>,计算公式如下:

$$ANS = (f \times t) / W \quad (1)$$

式中:ANS 为抗冲系数(L/g); $f$  为冲刷流量(L/min); $t$  为冲刷时间(min); $W$  为烘干泥沙质量(g)。

**1.3.2 土壤性质的测定** 土壤性质测定方法如下<sup>[14-15]</sup>,土壤容重采用环刀法测定;土壤大团聚体水稳性采用 H.N.萨维诺夫(CaBBNHOB)法测定,由于筛法和湿筛法两部分组成,用重量百分比(%)表示;土壤机械组成采用吸管法测定;土壤有机质采用水合热重铬酸钾氧化—比色法测定;土壤比重采用比重瓶法测定;土壤总孔隙度通过公式计算得到,计算公式如下:

$$\text{土壤总孔隙度} = \left(1 - \frac{\text{容重}}{\text{比重}}\right) \times 100\% \quad (2)$$



1.输水管;2.稳流室;3.可调节高度支架;4.底座;5.冲刷槽;6.土样室;7.采样桶。

图 1 土壤抗冲试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil anti-impact test device

**1.3.3 土壤团聚体稳定性的测定** 通过土壤团聚体湿筛结果计算得到平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数( $D$ )和团聚体破坏率(PAD),来表示土壤团聚体的稳定性,计算公式如下<sup>[16]</sup>:

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (3)$$

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (4)$$

$$\frac{V(r < R_i)}{V_T} = \left( \frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (5)$$

$$PAD = \frac{DS_{>0.25} - WS_{>0.25}}{DS_{>0.25}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $W_i$  为  $i$  粒级团聚体的重量百分比(%); $X_i$  为  $i$  粒级团聚体的平均直径(mm); $n$  为粒径分组的组数; $D$  为土壤颗粒分形维数; $r$  为土壤粒径; $R_i$  为粒径等级  $i$  的土壤粒径( $\mu\text{m}$ ); $V_T$  为土壤颗粒总体积百分含量(%); $R_{\max}$  为土壤粒径的极大值( $\mu\text{m}$ ); $V$  为土壤粒径小于  $R_i$  的土壤体积百分含量(%); $DS_{>0.25}$  为干筛处理下  $>0.25$  mm 团聚体含量; $WS_{>0.25}$  为  $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量。

**1.3.4 数据统计分析** 采用 SPSS 26.0 对数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)、Pearson 相关性和逐步回归分析,使用 LSD 进行多重比较,采用 Duncan 进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同类型农用地土壤抗冲性特征

**2.1.1 径流含沙量动态变化特征** 由图 2 可知,在同样冲刷坡度和流量下,各农用地产沙量随冲刷时间的延长所表现出来的趋势基本相似。在第 1 分钟时

产沙量最大,随后产沙量急剧下降,在 5 min 后趋于稳定状态。由于原状土取样时不可避免会对土壤表面造成一定扰动,从而产生一些松散土壤颗粒,加上土壤表层自带的松散颗粒,使得径流含沙量在第 1 分钟时数值异常大。但这并不影响不同类型农用地之间径流含沙量的差异,在本研究的 5 种农用地中,土壤产沙量总体变化表现为  $PCL(17.58\text{ g}) > AL(4.28\text{ g}) > GPG(0.69\text{ g}) > EEF(0.40\text{ g}) > GL(0.26\text{ g})$ 。在 15 min 冲刷过程中,PCL 的产沙量远大于其他农用地,冲刷最为严重;AL 的产沙量在第 1 分钟时最大,随后产沙量急剧下降趋于稳定,6 min 后与 GPG,EEF 和 GL 的产沙量接近;GPG,EEF 和 GL 的产沙量总体较小,且在较短的时间内趋于稳定。

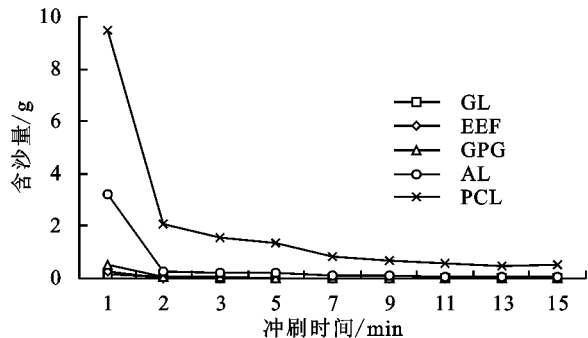


图 2 不同类型农用地含沙量随冲刷时间的变化特征  
Fig. 2 Variation characteristics of sediment content in different types of agricultural land with erosion time

2.1.2 土壤抗冲系数动态变化特征 不同类型农用地由于地表植被差异,以及人们对农用地的后续管理不同,导致不同类型农用地在土壤抗冲性能上也存在较大差异。由图 3 可知,GL,EEF 和 GPG 抗冲系数远大于 AL 和 PCL。在冲刷初期抗冲系数均较小,随着冲刷时间的延长,GL 在 7 min 时抗冲系数达到峰值(158.95 L/g),随后有所下降,但总体仍保持上升趋势,说明牧草地抗冲性最强;EEF 在 9 min 达到峰值(86.27 L/g),随后抗冲系数出现一定下降趋势;GPG 在整个时间段抗冲系数均保持稳定的增长,在第 15 分钟时抗冲系数达到 119.47 L/g;AL 抗冲系数呈现缓慢的增长趋势,在第 15 分钟时抗冲系数达到 25.36 L/g;PCL 抗冲系数变化趋势小且稳定在一个较低水平,在 7 min 后呈现出极小的增长趋势,在 15 min 内抗冲系数平均值仅为 1.18 L/g。以往众多相关研究表明,土抗冲系数随着冲刷时间延长均表现出明显增大趋势,本研究发现 PCL 在 15 min 冲刷时间内变化趋势极小,说明马铃薯耕地在暴雨的冲刷下会源源不断地被侵蚀破坏,形成严重的水土流失。根据土壤冲刷过程中抗冲系数变化特征,得到 5 种类型农用地土壤抗冲性表现为  $GL > EEF > GPG > AL > PCL$ 。

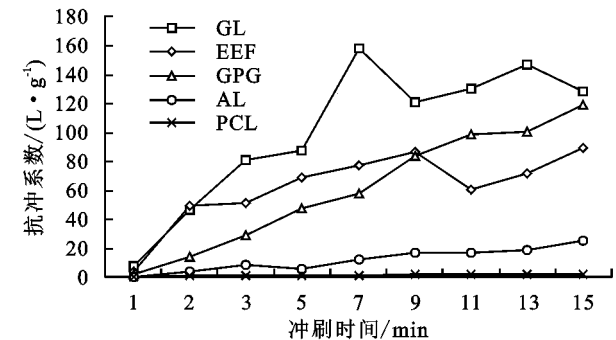


图 3 不同类型农用地土壤抗冲系数随冲刷时间的变化特征  
Fig. 3 Variation characteristics of soil anti-scour coefficient with scour time in different types of agricultural land

2.1.3 土壤抗冲系数与冲刷时间的关系 不同学者对土壤抗冲系数与冲刷时间关系的研究结果存在较大差异,得到最优拟合曲线主要有线性函数、幂函数和指数函数<sup>[7-8]</sup>。利用 SPSS 26.0 中曲线估算功能,对抗冲系数和冲刷时间做回归分析,得到不同类型农用地的最优相关关系曲线拟合模型。在 15 min 冲刷下,GL 用对数函数拟合效果较好,土壤抗冲系数随冲刷时间的延长呈对数函数增大;EEF 用逆函数拟合效果较好,土壤抗冲系数随冲刷时间的延长呈逆函数增大;GPG,AL 和 PCL 用线性函数拟合效果较好,土壤抗冲系数随冲刷时间的延长呈线性函数增大。由表 1 可知,5 种农用地的抗冲系数(ANS)与冲刷时间( $t$ )呈显著或极显著正相关。EEF 抗冲系数与冲刷时间相关系数相对较低( $p < 0.05$ ),是由于 EEF 抗冲系数在 9 min 后有所下降导致的。

表 1 不同类型农用地土壤抗冲系数与冲刷时间关系式  
Table 1 Relationship between soil anti-scour coefficient and scour time in different types of agricultural land

农用地类型	关系式	$R^2$	相关系数
GL	$ANS = 16.817 + 49.862 \lg(t)$	0.852	0.801 **
EEF	$ANS = 84.642 - 80.023t$	0.886	0.736 *
GPG	$ANS = 8.238t + 0.984$	0.977	0.988 **
AL	$ANS = 1.588t + 0.391$	0.941	0.970 **
PCL	$ANS = 0.138t + 0.17$	0.955	0.977 **

注:\* 表示相关性显著( $p < 0.05$ ),\*\* 表示相关性极显著( $p < 0.01$ )。

2.2 不同类型农用地土壤性质特征

2.2.1 土壤性质差异 从表 2 可以看出,不同类型农用地间土壤性质差异较大,且存在显著差异( $p < 0.05$ )。GL,EEF 和 AL 土壤有机质含量远高于我国耕层土壤的平均含量;GPG 的有机质含量次之;PCL 有机质含量最低,说明长期的马铃薯耕种对土壤有机质消耗过多,后续补肥不足。调查中也发现,GL,EEF 和 AL 均存在长期放牧,牲畜的排泄物会间接



提高土壤有机质含量。土壤容重和土壤总孔隙度均可以反映土壤的疏松情况,二者基本吻合,土壤疏松程度表现为  $EEF>GL>GPG>AL>PCL$ 。土壤机械组成主要由砂粒和粉粒为主,  $GL,EEF$  和  $GPG$  为粉砂质壤土,  $AL$  和  $PCL$  为砂质壤土。

通过干筛和湿筛得到不同类型农用地土壤水稳性团聚体分布特征(图 4),不同类型农用地对土壤水

表 2 不同类型农用地的土壤有机质、容重、总孔隙度和机械组成差异

Table 2 Soil organic matter, bulk density, total porosity and mechanical composition were different in different types of agricultural land						
农用地 类型	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	土壤容重/ (g · cm <sup>-3</sup> )	土壤总 孔隙度/%	土壤机械组成/%		
				砂粒 0.05~2 mm	粉粒 0.002~0.05 mm	黏粒<0.002 mm
GL	53.76±5.33a	1.21±0.08b	50.43±3.72b	40.44±3.56b	55.52±2.67b	4.03±0.89ab
EEF	55.50±5.50a	0.94±0.09c	59.95±2.73a	29.65±2.69c	66.72±1.86a	3.64±0.87ab
GPG	25.67±1.68b	1.40±0.14ab	46.46±6.18b	29.80±3.00c	64.35±2.73a	5.85±1.60a
AL	52.27±5.28a	1.40±0.07ab	45.96±2.90b	69.62±2.59a	28.54±2.64c	1.84±0.18bc
PCL	13.93±2.75c	1.47±0.03a	43.95±1.73b	70.58±2.85a	28.20±2.89c	1.22±0.03c

注:表中数据为“平均值±标准差”,同列数据后不同的小写字母表示不同类型农用地间差异性显著( $p<0.05$ ),下同。

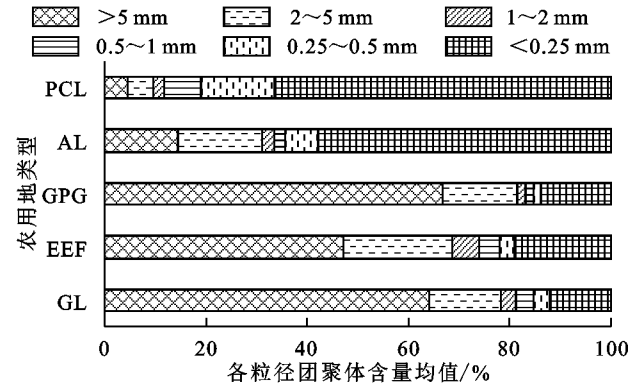


图 4 不同类型农用地土壤水稳性团聚体  
Fig. 4 Soil water stable aggregates of different types of agricultural land

2.2.2 土壤团聚体稳定性 土壤团聚体是土壤结构构成的基础,其稳定性直接影响土壤表层的水、土界面行为,特别是与降雨入渗和土壤侵蚀关系密切<sup>[17]</sup>。MWD 和 GMD 值越大,表示土壤团聚体平均粒径团聚度越高,团聚体稳定性越好。 $D$  和  $PAD$  值越小,表示土壤团聚体稳定性越好,抗侵蚀能力越强。综合 4 个指标结果(表 3),得到 5 种农用地团聚体稳定性表现为  $GPG>GL>EEF>AL>PCL$ 。这与前面 5 种农用地土壤抗冲性能结果略有不同,表明土壤团聚体只是影响土壤抗冲性的主要因子之一。同时各农用地之间差异显著性可分为两组,  $GL,EEF,GPG$  与  $AL,PCL$  存在显著差异( $p<0.05$ ),即  $GL,EEF$  和  $GPG$  的团聚体稳定性显著高于  $AL$  和  $PCL$ 。

2.3 土壤抗冲系数与土壤性质关系

对土壤抗冲系数与土壤性质进行 Pearson 相关

稳性团聚体粒径的分布影响较大。  $GL,EEF$  和  $GPG$  水稳性团聚体分布大致相同,  $>5\text{ mm}$  水稳性团聚体(47.30%~66.64%)为 3 种农用地的优势粒径;  $PCL$  和  $AL$  的优势粒径为  $<0.25\text{ mm}$  水稳性团聚体(57.81%~66.55%),占据了水稳性团聚体的一半以上。但  $AL>5\text{ mm}$  和  $2\sim5\text{ mm}$  水稳性团聚体高于  $PCL$ ,这与人为扰动减少和有机质含量提高密切相关。

性分析(图 5)。结果表明:土壤抗冲系数与粉粒和  $>5\text{ mm}$  水稳性团聚体呈显著或极显著正相关,相关系数分别为 0.608,0.682。土壤抗冲系数与砂粒、 $0.25\sim0.5\text{ mm}$  和  $<0.25\text{ mm}$  水稳性团聚体呈显著或极显著负相关,相关系数分别为 0.593,0.563,0.758。仅从相关程度看,由大到小依次为  $<0.25\text{ mm}$  水稳性团聚体、 $>5\text{ mm}$  水稳性团聚体、粉粒、砂粒和  $0.25\sim0.5\text{ mm}$  水稳性团聚体。粉粒和  $>5\text{ mm}$  水稳性团聚体越多则土壤抗冲系数越大,砂粒、 $0.25\sim0.5\text{ mm}$  和  $<0.25\text{ mm}$  水稳性团聚体越多则土壤抗冲系数越小。根据相关性结果可得到,在本文分析的土壤性质中水稳性团聚体和土壤机械组成对抗冲系数影响最大。

表 3 不同类型农用地土壤团聚体稳定性特征

Table 3 Stability characteristics of soil aggregates in different types of agricultural land				
农用地 类型	平均重量 直径(MWD)	几何平均 直径(GMD)	分形 维数(D)	团聚体 破坏率(PAD)
GL	4.76±0.09a	3.00±0.19ab	2.52±0.03b	0.07±0.01c
EEF	3.97±0.44b	2.12±0.35b	2.60±0.02b	0.06±0.01c
GPG	4.91±0.44a	3.19±0.76a	2.55±0.09b	0.11±0.05c
AL	1.67±0.13c	0.46±0.03c	2.87±0.01a	0.33±0.03b
PCL	0.70±0.18d	0.25±0.02c	2.90±0.01a	0.46±0.03a

为进一步阐明土壤抗冲性与土壤性质的关系,并减少变量间的相互混杂干扰,对土壤抗冲系数与土壤性质进行逐步回归分析。逐步回归分析结果(表 4)显示,引入剔除后留下了  $<0.25\text{ mm}$  水稳性团聚体和黏粒 2 个自变量。 $R^2$  为 0.747,对土壤抗冲系数解释度为 74.7%,剩余因子  $e=\sqrt{1-R^2}=0.50299$ ,该值较大,说明还有影响

因素未考虑到。砂粒与粉粒虽然具有显著性,但由于存在严重共线性被剔除,引入黏粒。2 个自变量对土壤抗冲系数存在显著的负影响关系( $p<0.05$ ),VIF 值小于 5,变量间不存在多重共线性问题。得到最优回归方程为土壤抗冲系数 $=84.016-1.135\times<0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体 $-7.413\times$ 黏粒。

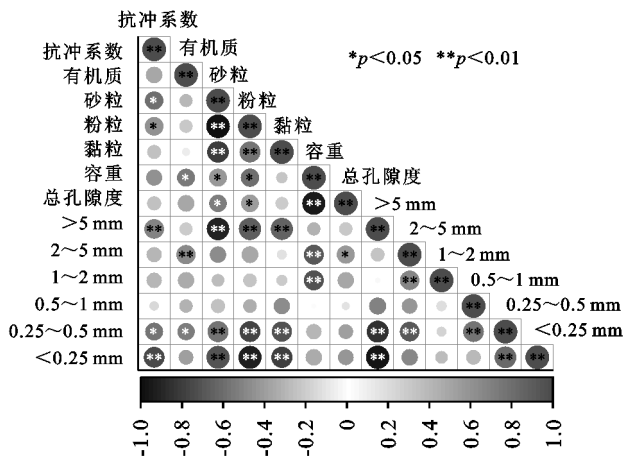


图 5 土壤抗冲系数与土壤性质相关性分析  
Fig. 5 Correlation analysis between soil anti-scour coefficient and soil properties

表 4 土壤抗冲系数与土壤性质逐步回归分析的多元回归系数参数估计值

Table 4 Parameter estimates of multiple regression coefficients for stepwise regression analysis of soil anti-scour coefficient and soil properties

模型	未标准化系数		标准化系数		t 值	显著性	VIF
	B	标准误差	Beta				
(常量)	84.016	15.086	—	5.569	0.000	—	—
0.25 mm	-1.135	0.208	-1.293	-5.468	0.000	2.655	
黏粒	-7.413	2.585	-0.678	-2.868	0.014	2.655	

### 3 讨论

#### 3.1 不同类型农用地土壤抗冲性分析

本研究针对安宁河干旱河谷区不同类型农用地土壤抗冲性进行研究。径流含沙量变化特征与大部分已有研究结果相同,径流含沙量随冲刷时间的延长逐渐减少并趋于相对稳定的状态<sup>[5,7,9]</sup>。随着土壤表层松散颗粒被冲刷带走,土壤颗粒间紧实摩擦力增大,土壤抗冲系数随之增大<sup>[18]</sup>。PCL 径流含沙量显著高于其他农用地,这与地表植被和人为干扰程度关系密切,GL 和 EEF 人为扰动较少且地表植被丰富表层土壤根系发达,根系的盘绕固结作用增强了土壤的抗冲性能<sup>[7]</sup>。土壤冲刷过程中抗冲系数随着冲刷时间的延长总体呈现出上升趋势,其中 GPG 上升趋势最为稳定。GPG 抗冲性介于 GL,EEF 和 AL,PCL 之间,受到人类农业活动的影响,但又远小于耕地农业

活动,使其土壤抗冲性维持较好,本研究结果与资如毅等<sup>[19]</sup>研究结果相同。但伏耀龙等<sup>[5]</sup>对岷江干旱河谷区不同土地利用抗冲性研究中,得到小麦耕地的抗冲性优于灌木林地,这与本文林地和园地的抗冲性能远大于耕地不同。PCL 由于长期的人为耕作活动,对土体扰动严重,土壤表层根系稀少,加之耕种者对耕地的管理不当,最终导致耕地土壤抗冲性极差。结合众多相关研究,可以得到不同土地利用下土壤抗冲性能大致表现为:草地>天然林地>人工林地>园地>荒草地>撂荒地>耕地>裸地<sup>[7-8,18,20]</sup>。

#### 3.2 不同类型农用地土壤性质分析

除去地形坡位等条件,土壤性质也是决定土地利用类型的重要条件之一,不同类型的农用地也能在一定程度上反映土壤的状况。研究区内人类活动对土壤的理化性质影响较大,根据砂粒、粉粒和黏粒百分比可以发现,AL 和 PCL 受人为扰动严重,在降雨径流的冲刷下,土壤中粉粒流失严重。AL 已经停止人类扰动多年,但土壤质地仍未恢复到自然状态。人为扰动使得土壤结构受到破坏,间接改变土壤颗粒组成,土壤抵抗径流搬运能力降低<sup>[19]</sup>。土壤有机质是土壤固相部分的重要组成部分,在土壤可持续发展中发挥着重要的作用。朱凯等<sup>[21]</sup>研究得到有机质对土壤团聚体具有显著的正向影响,高含量的土壤有机质有利于团聚体的形成。这一点在 AL 中表现明显,>5 mm 水稳性团聚体含量增加,2~5 mm 水稳性团聚体与 GL,EEF,GPG 接近。大颗粒水稳性团聚体含量越多,其抵抗水力侵蚀能力越强,即土壤抗冲性越强。PCL 和 AL<0.25 mm 水稳性团聚体显著高于 GL,EEF 和 GPG,主要受到人为耕种影响,使土壤在流水冲刷下更易被侵蚀带走。当土壤容重小孔隙度大时,土壤疏松多孔,水分和径流利于下渗,从而增强土壤抗冲性<sup>[13]</sup>。本研究中,PCL 和 AL 的土壤容重值较大,与资如毅等<sup>[19]</sup>研究结果不同。通常耕地土壤受到人为的犁耕,会使土壤变得疏松,容重减小,但该区域耕地土壤团聚体结构破坏严重,耕地多为砂质土壤,土壤表层在人为灌溉和雨水淋洗下逐渐硬实板结。GPG 的土壤容重值也较大,接近 PCL 和 AL,这也一定程度上说明园地的土壤板结严重。综合各土壤性质得到,GL 和 EEF 土壤性质优良,具有良好的土壤结构,抵抗流水侵蚀能力更强,目前看桉树的种植并没有对当地土壤造成严重危害。

#### 3.3 土壤抗冲性与土壤性质的关系分析

相关性和逐步回归分析得到,在所选因子中<0.25

mm 水稳性团聚体和黏粒为影响土壤抗冲性的主导因子。本文相关性结果可得到,水稳性团聚体和土壤机械组成对抗冲系数影响最大,这与伏耀龙等<sup>[5]</sup>研究结果相同。杨玉梅等<sup>[22]</sup>研究得到土壤容重与抗冲指数呈显著负相关,而周维等<sup>[23]</sup>研究认为土壤抗冲强弱与容重不相关。本文得到容重与土壤抗冲性呈负影响但不具备显著性,造成这种差异的原因可能是地区以及选择土地利用类型不同导致的。众多研究均得到有机质与土壤抗冲性呈显著正相关关系<sup>[5,7]</sup>,但本研究中,土壤有机质与土壤抗冲性不具有显著关系,这可能是受到 AL 影响。AL 由于长时间弃耕,地表草本植物丰富,使得有机质含量显著提高,但 AL 的土壤抗冲性则仍然较差。杨玉梅等<sup>[22]</sup>认为土壤颗粒越细,在相同冲刷流量和历时下,土壤细粒会堵塞土壤孔隙,使土壤板结,从而增强土壤抗冲性。也有研究指出,大粒径水稳性团聚体含量越多,土壤结构越佳,土壤抗冲性越强<sup>[23]</sup>。本文研究结果与后者相符合,大团聚体抵抗水力侵蚀能力更强,团聚体稳定性更强。所选土壤因子对土壤抗冲系数的解释度仅达到 74.7%,说明土壤性质不能很好地解释土壤抗冲性,土壤砾石含量和表层根系特征等同样会对土壤抗冲性产生影响,在以后的研究中应加入这些指标综合分析。

### 3.4 关于安宁河干旱河谷区农用地可持续发展的思考

5 种类型农用地中耕地会对土壤造成严重危害,园地次之。研究区内耕地水土流失问题极其严重,在如今全球气候异常的局势下,这个问题更应该引起高度重视。在农用地调查和试验过程中,发现研究区内土壤砾石含量极高,农民在耕种中会将砾石一遍又一遍清除掉,砾石的清除加剧了水土流失。研究区内地势起伏较大,随着耕作活动的开展,夏季降水径流冲刷带走土壤中细小颗粒,使土壤肥力和抗侵蚀能力严重下降。导致地区土壤质量逐渐恶化,粮食产量逐年下降,引发粮食安全问题。应完善地区耕地保护措施,同时加强园地管理,提高农民生态意识,实现土地资源的可持续利用。

## 4 结论

(1) 通过原状土冲刷试验,得到 5 种农用地径流含沙量在第 1 分钟时产沙量最大,随后产沙量急剧下降,在 5 min 后趋于稳定状态,土壤抗冲系数随冲刷时间的延长而增大,其关系用对数、逆函数或线性函数拟合效果较好。5 种农用地抗冲性由表现为  $GL > EEF > GPG > AL > PCL$ 。

(2) GL,EEF 和 AL 有机质含量较高,GPG 和 PCL 有机质则较差;5 种农用地疏松程度表现为  $EEF > GL > GPG > AL > PCL$ ;GL,EEF 和 GPG 以  $> 5$  mm 水稳性团聚体为主,PCL 和 AL 以  $< 0.25$  mm 水稳性团聚体为主,团聚体稳定性表现为  $GPG > GL > EEF > AL > PCL$ ;GL,EEF 和 GPG 为粉砂质壤土,AL 和 PCL 为砂质壤土,土壤中粉粒流失极其严重,耕地撂荒后需很长时间进行自我恢复。

(3) 土壤抗冲系数与粉粒和  $> 5$  mm 水稳性团聚体呈显著正相关,与砂粒、0.25~0.5 mm 和  $< 0.25$  mm 水稳性团聚体呈显著负相关。逐步回归分析得到最优回归方程为土壤抗冲系数  $= 84.016 - 1.135 \times < 0.25$  mm 水稳性团聚体  $- 7.413 \times$  黏粒,土壤水稳性团聚体和土壤机械组成对抗冲系数影响最大。

### 参考文献:

- [1] 范建容,杨超,包维楷,等.西南地区干旱河谷分布范围及分区统计分析[J].山地学报,2020,38(2):303-313.  
Fan J R, Yang C, Bao W K, et al. Distribution scope and district statistical analysis of dry valleys in southwest China[J]. Mountain Research, 2020,38(2):303-313.
- [2] 张荣祖.横断山区干旱河谷[M].北京:科学出版社,1992:6-20.  
Zhang R Z. Hengduan Mountain arid valley[M]. Beijing: Science Press,1992:6-20.
- [3] 姚昆,张存杰,李玉珍,等.四川省安宁河流域土壤侵蚀时空演变及预测分析[J].人民长江,2021,52(7):65-70.  
Yao K, Zhang C J, Li Y Z, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of soil erosion in Anning River Basin, Sichuan Province[J]. Yangtze River,2021,52(7):65-70.
- [4] 四川省人民政府.四川水土流失综合治理蓝图绘就[EB/OL]. <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/11716/11718/2017/1/10/10410447.shtml>. 2017-01-10.  
The People's Government of Sichuan Province. A blueprint has been drawn for the comprehensive control of soil erosion in Sichuan[EB/OL]. <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/11716/11718/2017/1/10/10410447.shtml>. 2017-01-10.
- [5] 伏耀龙,张兴昌.岷江干旱河谷区不同土地利用方式下土壤抗冲性试验[J].农业机械学报,2012,43(7):50-55.  
Fu Y L, Zhang X C. Anti-scourability of soil under different land use types in dry valley of Minjiang River[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(7):50-55.
- [6] 张素,熊东红,苏正安,等.土壤抗冲性及其影响因素研究进展[J].世界科技研究与发展,2014,36(6):721-725.  
Zhang S, Xiong D H, Su Z A, et al. Research progress of influence factors in soil anti-scourability[J]. World



- Sci-Tech. R&D, 2014, 36(6):721-725.
- [7] 金晓,陈丽华.晋西黄土区不同植被类型土壤抗冲性及表层根系分布特征[J].水土保持学报,2019,33(6):120-126.
- Jin X, Chen L H. Soil anti-scourability and root distribution characteristics in surface soil under different vegetation types in the loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6):120-126.
- [8] 吕刚,吕金昊,翟景轩,等.辽西北水蚀风蚀交错区不同土地利用类型土壤抗冲性特征[J].沈阳农业大学学报, 2021, 52(2):212-217.
- Lu G, Lu J H, Zhai J X, et al. Soil anti-scour ability characteristics of different land use patterns in the wind-water erosion crisscross region of northwest Liaoning Province[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52(2):212-217.
- [9] 柏兰峰,李占斌,马波,等.自然冻融条件下黄土丘陵区不同土地利用方式原状土的抗冲性[J].水土保持通报, 2022, 42(1):49-55, 62.
- Bai L F, Li Z B, Ma B, et al. Scourability of undisturbed soils of different land use types in loess hilly region under natural freezing and thawing conditions[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1):49-55, 62.
- [10] 王雅琼,张建军,李梁,等.祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性影响因子[J].生态学报,2018,38(1):122-131.
- Wang Y Q, Zhang J J, Li L, et al. Analysis of factors impacting soil anti-scourability of typical grassland ecosystem on the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1):122-131.
- [11] 王雪力,覃发超.安宁河流域土地利用转型及其生态环境效应[J/OL]. 西华师范大学学报:自然科学版, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1699.N.20221207.1631.001.html>. 2023-03-21.
- Wang X L, Qin F C. Land Use Transformation and Its Eco-environmental Effects in Anning River Basin[J/OL]. Journal of China West Normal University: Natural Sciences. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1699.N.20221207.1631.001.html>. 2023-03-21.
- [12] 仙巍,邵怀勇.长江上游安宁河流域植被生长变化对气候条件的响应[J].国土资源遥感,2015,27(3):108-113.
- Xian W, Shao H Y. Responses of vegetation changes to climatic variations in Anning River Basin of upper Yangtze River Region[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2015, 27(3):108-113.
- [13] 陈安强,张丹,熊东红,等.元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J].农业工程学报,2012, 28(5):108-113.
- Chen A Q, Zhang D, Xiong D H, et al. Effects of mechanical properties of surface soil on soil anti-scourability in Yuanmou dry-hot valley[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5):108-113.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Method for the determination of soil physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2000.
- Lu R K. Methods for Agricultural Chemical Analysis of Soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] 赵晶,刘美英,郝孟婕,等.植被恢复对于干旱区生态光伏电站土壤团聚体组成及有机碳的影响[J].水土保持研究, 2022, 29(5):137-143.
- Zhao J, Liu M Y, Hao M J, et al. Effects of Vegetation Restoration on Soil Aggregate Composition and Organic Carbon of Eco-Photovoltaic Power Station in Arid Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5):137-143.
- [17] 张勇,王海娣,高玉红,等.多元胡麻轮作模式对土壤团聚体特征及氮素含量的影响[J].草业学报,2023, 32(1):75-88.
- Zhang Y, Wang H D, Gao Y H, et al. Effect of multi-variate flax rotation mode on soil aggregation characteristics and nitrogen content[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(1):75-88.
- [18] 任改,张洪江,白芝兵.重庆四面山水源涵养林土壤抗冲性及影响因素[J].中国水土保持科学,2013,11(1):1-7.
- Ren G, Zhang H J, Bai Z B, et al. Soil anti-scourability of water conservation forests and its affecting factors in Simian Mountain, Chongqing City[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(1):1-7.
- [19] 资如毅,赵龙山,钱晓鹤,等.喀斯特7高原山地土壤抗冲性与土壤物理性质的关系[J].水土保持学报,2022, 36(3):23-29.
- Zi R Y, Zhao L S, Qian X H, et al. Relationship Between soil anti-scourability and soil physical properties in karst mountain areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3):23-29.
- [20] 屈东旭,吕刚,翟景轩,等.科尔沁沙地南缘不同林草措施根系对土壤抗冲性的影响[J].水土保持研究,2020, 27(1):21-25.
- Qu D X, Lu G, Zhai J X, et al. Effects of root system of different forest and grass measures on soil anti-scouring in southern margin of Horqin sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1):21-25.



- ety for Agricultural Machinery, 2014,45(1):115-120.
- [18] 鲍士旦.土壤理化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- Bao S D. Soil agrochemical analysis[M].Third Edition. Beijing:China Agricultural Press, 2000.
- [19] Banger K, Kukal S S, Toor G, et al. Impact of long-term additions of chemical fertilizers and farm yard manure on carbon and nitrogen sequestration under rice-cowpea cropping system in semi-arid tropics[J]. Plant and Soil, 2009,318(2):27-35.
- [20] 王琴,蒙仲举,汪季,等.希拉穆仁草原近自然恢复状态下植被—土壤响应特征[J].生态学报,2017,37(4):1159-1167.
- Wang Q, Meng Z J, Wang J, et al. Response of the vegetation soil under almost-natural restoration in the Xilamuren grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4):1159-1167.
- [21] 邵新庆,王堃,王赟文,等.典型草原自然恢复演替过程中植物群落动态变化[J].生态学报,2008,28(2):855-861.
- Shao X Q, Wang K, Wang Y W, et al. Dynamics of plant community during natural restoration and succession of the Inner Mongolia Steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(2):855-861.
- [22] 胡雷,王长庭,阿的鲁骥,等.高寒草甸植物根系生物量及有机碳含量与土壤机械组成的关系[J].西南民族大学学报:自然科学版,2015,41(1):6-11.
- Hu L, Wang C T, Adiluji, et al. Relationship between root biomass, soil organic carbon and soil mechanical composition in alpine meadow[J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition, 2015,41(1):6-11.
- [23] 魏巍,周娟娟,白玛嘎翁,等.西藏不同草地类型群落根系分布特征与土壤因子的关系[J].中国草地学报, 2018,40(6):33-38,46.
- Wei W, Zhou J J, Baima G W, et al. Variation analysis of morphological characterization related to yield in introduced annual ryegrass germplasma[J]. Chinese Journal of Grassland, 2018,40(6):33-38,46.
- [24] 牛存洋,阿拉木萨,刘亚,等.科尔沁沙地固沙植物根系与土壤水分特征研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(10):106-111.
- Niu C Y, Ala M S, Liu Y, et al. The characteristics of sand-fixation plantations roots and soil moisture in Horqin sandy land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015,29(10):106-111.
- [25] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, et al. Rooting characteristics of two widely distributed woody plant species growing in different karst habitats of Southwest China[J]. Plant Ecology, 2014,215:1099-1109.
- [26] 王园博,赵锐锋,张丽华,等.黑河中游湿地不同植物群落土壤有机碳分布及影响因素[J].草业科学,2020,37(5):833-844.
- Wang Y B, Zhao R F, Zhang L H, et al. Soil organic carbon and its influencing factors on the different plant communities in the middle reaches of the Heihe River wetland[J]. Pratacultural Science, 2020,37(5):833-844.
- [27] 荆佳强,萨仁其力莫格,秦洁,等.利用方式对贝加尔针茅草原土壤微生物群落结构与土壤酶活性的影响[J].中国草地学报,2022,44(2):33-40.
- Jing Jiaqiang, Sarenqili Moge, Qin Jie, et al. Effects of utilization methods on soil microbial community structure and soil Enzyme activity in *Stipa baicalensis* steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022,44(2):33-40.

(上接第 34 页)

- [21] 朱凯,马茂华,李文娟,等.三峡水库消落带不同土地利用对土壤团聚体稳定性及其碳氮分布的影响[J].长江流域资源与环境,2022,31(7):1503-1513.
- Zhu K, Ma M H, Li W J, et al. Effects of land-use types on soil aggregate stability and organic carbon and nitrogen in riparian 'zone of Three Gorges Reservoir [J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2022,31(7):1503-1513.
- [22] 杨玉梅,郑子成,李廷轩.不同土地利用方式下土壤抗冲性动态变化特征及其影响因素[J].水土保持学报, 2010,24(4):64-68.
- Yang Y M, Zheng Z C, Li T X. Soil Anti-scourability dynamic variation characteristics and its influencing factors under different land use types[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(4):64-68.
- [23] 周维,张建辉,李勇,等.金沙江干暖河谷不同土地利用条件下土壤抗冲性研究[J].水土保持通报,2006,26(5):26-30,42.
- Zhou W, Zhang J H, Li Y, et al. Soil anti-scourability under different land uses in dry-warm valleys of the Jinshajiang River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006,26(5):26-30,42.