

# 水库消落带不同海拔狗牙根草地土壤可蚀性研究

杨玲<sup>1,2</sup>, 贺秀斌<sup>1</sup>, 鲍玉海<sup>1</sup>, 郑晓岚<sup>1,2</sup>, 宋娇<sup>1,3</sup>, 李进林<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331)

**摘要:**土壤可蚀性  $K$  值对土壤侵蚀定量研究具有重要意义,目前消落带土壤可蚀性研究较为缺乏。采集了三峡水库典型消落带不同海拔狗牙根草地 0—20 cm 表层土壤,并以 180 m 海拔未淹水的狗牙根草地为对照,采用 EPIC 模型计算了各海拔样地土壤可蚀性  $K$  值,分析了  $K$  值的空间分异规律,并探讨了土壤颗粒组成、水稳定性团聚体含量、有机质等对其的影响。结果发现:(1) 表层(0—20 cm)土壤黏粒含量、体积分形维数、大于 0.25 mm 水稳性团聚体和有机质含量均低于对照,且随海拔升高而增加;0—10 cm 土层土壤有机质高于 10—20 cm 土层,而 0—10 cm 土层土壤黏粒含量和  $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量则显著低于 10—20 cm 土层;(2) 表层(0—20 cm)土壤可蚀性  $K$  值为 0.049 6~0.061 2,均值为 0.054 1,比未淹水对照高 7.33%,属于高可蚀性土壤; $K$  值随海拔升高而降低;0—10 cm 土层的  $K$  值低于 10—20 cm 土层,但两者无显著差异( $p>0.05$ );(3) 土壤可蚀性  $K$  值与土壤黏粒含量、 $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量和有机质含量呈极显著负相关( $p<0.01$ ),与土壤颗粒的体积分形维数呈负相关,与土壤粉粒和砂粒含量呈正相关。综上,可通过消落带植被恢复防止波浪和降雨径流对表层土壤黏粒含量的冲刷,改良土壤结构,增加有机质含量,从而有效降低土壤可蚀性。

**关键词:**土壤可蚀性  $K$  值; EPIC 模型; 草地; 空间分异; 水库消落带

中图分类号: S151.9; S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)05-0001-06

## Soil Erodibility of *Cynodon dactylon* Grassland at Different Altitudes in the Reservoir Riparian Zone

YANG Ling<sup>1,2</sup>, HE Xiubin<sup>1</sup>, BAO Yuhai<sup>1</sup>, ZHENG Xiaolan<sup>1,2</sup>, SONG Jiao<sup>1,3</sup>, LI Jinlin<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences,

Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** The  $K$  value of soil erodibility is of great significance to the quantitative study of soil erosion. At present, research on soil erodibility in the reservoir riparian zone is relatively scarce. In this study, 0—20 cm topsoils of *Cynodon dactylon* grassland at different altitudes in the typical riparian zone of the Three Gorges Reservoir were collected, and the soil in *Cynodon dactylon* grassland at 180 m altitude was used as the control. The soil erodibility  $K$  values of the sample plots at different altitudes were calculated by EPIC model, and the spatial variation of  $K$  values was analyzed. Meanwhile, the effects of soil particle composition, waterstable aggregate content and organic matter on the  $K$  values were discussed. The results show that: (1) the content of clay, volumetric fractal dimension, water-stable aggregates ( $>0.25$  mm) and organic matter in the surface layer (0—20 cm) are lower than those in the control (180 m), and increase with the elevation; the soil organic matter content in the 0—10 cm layer is higher than that in the 10—20 cm layer, while the clay content and water-stable aggregates ( $>0.25$  mm) in the 0—10 cm layer are significantly lower than those in the 10—20 cm layer; (2)  $K$  value in the 10—20 cm layer ranges from 0.049 6 to 0.061 2 with an average value of 0.054 1, which is 7.33% higher than that of non-flooded control, belonging to high erodibility soil; the results also show that the  $K$  values decrease with the increase of altitude, and  $K$  value of 0—10 cm soil layer is lower

收稿日期: 2021-03-19

修回日期: 2021-03-31

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(41977075; 41771321); 国家自然科学基金联合基金(U2040207); 四川省科技厅区域创新合作项目(2020YFQ0002)

第一作者: 杨玲(1996—), 女, 湖北襄阳人, 在读硕士, 主要从事水土保持研究。E-mail: yangling1996@126.com

通信作者: 鲍玉海(1981—), 男, 山东成人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: byh@imde.ac.cn

than that of 10—20 cm layer, but there is no significant difference between them ( $p > 0.05$ ); (3)  $K$  value is significantly negatively correlated with the contents of soil clay, water-stable aggregates ( $> 0.25$  mm) and organic matter, negatively correlated with the volumetric fractal dimension of soil particles, and positively correlated with the contents of silt and sand. In conclusion, the vegetation restoration in the riparian zone can prevent the erosion of wave and rainfall runoff on the clay content of surface soil, improve the soil structure and increase the content of organic matter, so as to effectively reduce the soil erodibility.

**Keywords:** soil erodibility  $K$  value; EPIC model; grassland; spatial variation; reservoir riparian zone

周期性反季节高压淹水一出露过程使消落带植被、土壤特性短时间内发生剧烈变化,加之库水波浪、降雨径流、水位涨落等水动力作用和人类活动干扰,使得大型水库消落带在不同程度上面临着复杂多样的生态环境问题<sup>[1]</sup>,尤其是消落带土壤侵蚀问题较为突出,水文条件骤变导致消落带土壤侵蚀强度远高于陆地坡面<sup>[2-3]</sup>。强烈的土壤侵蚀将会造成消落带土壤质量下降、植被生长受限、库岸失稳、水体环境恶化等危害,严重影响消落带本身应有的生态缓冲、生物多样性维持、水库水质保障等生态服务功能的有效发挥,其土壤侵蚀过程与防治对策的研究已逐渐成为国际社会和学者关注的热点<sup>[1,3]</sup>。消落带土壤侵蚀的影响因素涉及气候、地形地貌、土壤、外营力等多方面,其中土壤抗蚀性是重要因素之一。而土壤可蚀性  $K$  值是衡量土壤抗蚀性的重要指标<sup>[4]</sup>,是土壤侵蚀过程与机理研究的重要内容,常用来评价土壤被侵蚀营力分离、冲蚀和搬运的难易程度<sup>[5]</sup>,对消落带土壤侵蚀定量评价和水土保持措施机理研究均有重要科学意义。

我国学者在土壤可蚀性  $K$  值研究方面已有众多成果,针对土壤可蚀性研究方法、区域土壤可蚀性特征、不同土地利用类型土壤可蚀性评价、土壤可蚀性实测与估算的定量对比研究等均开展了一系列的研究<sup>[6-12]</sup>。目前,普遍利用估算模型进行土壤可蚀性  $K$  值的计算,主要有土壤可蚀性诺谟方程、修正诺谟方程、EPIC 模型、Torri 公式以及 Shirazi 公式<sup>[6-7]</sup>。紫色土地区常使用 EPIC 模型进行  $K$  值的计算<sup>[4,6,8]</sup>。但研究区域主要集中在陆地坡面,针对水库消落带土壤可蚀性  $K$  值的估算较为缺乏。三峡水库高强度淹水和极端干湿交替环境改变了消落带土壤结构、化学性质和力学特性<sup>[13-16]</sup>,导致土壤中值粒径增大、团聚体稳定性降低、有机质含量减少<sup>[17-19]</sup>,上述土壤特性的改变将可能会引起土壤可蚀性的增加。而消落带不同海拔梯度的淹水时长、淹水深度、淹水一出露频率等差异,造成土壤特性、植被等条件具有较强的空间异质性<sup>[20-21]</sup>,使土壤可蚀性产生空间差异。目前,大型水库蓄水运行造成的消落带土壤可蚀性变化趋势及其空间分异规律尚不明确。由于目前水库消落

带缺少长期土壤侵蚀定位观测资料,本研究以三峡水库典型库段消落带草地为例,利用紫色土地区土壤可蚀性研究中常见的估算方法进行消落带土壤可蚀性  $K$  值研究,以期探明三峡水库运行后消落带土壤可蚀性在海拔梯度和土层深度上的分异规律,探讨其主要影响因素,为消落带土壤侵蚀预测评价和水土保持措施配置提供理论支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于三峡水库重庆市忠县石宝镇库段消落带(107°32′—108°14′E,30°03′—30°35′N),是三峡水库典型的土质消落带。该区属于亚热带季风性湿润气候,四季分明,夏季高温多雨。年平均气温 19.2℃,年平均降水量 1 150 mm,主要集中在 5—9 月,日照充足。该段消落带地形平缓,土壤母质为侏罗系沙溪庙砂页岩( $J_2s$ ),土壤类型以紫色砂岩或页岩风化后形成的紫色土为主,此外,还有少部分水稻土和黄棕壤<sup>[19]</sup>。三峡水库蓄水前,消落带的土地利用方式主要有旱地、水田和林地。主要种植的粮食作物有玉米(*Zea mays*)、水稻(*Oryza glaberrima*)、红薯(*Ipomoea batatas*)、黄豆(*Glycine max*)、油菜(*Brassica campestris*)等。三峡水库蓄水后,消落带土地利用方式主要为草地(自然恢复和人工种植)和局部林地(人工种植),其中 145~160 m 低海拔地区主要为草地,160~175 m 较高海拔区域以草地为主并局部分布有条带状林地。研究区草本植物以狗牙根(*Cynodon dactylon*)分布最为广泛,其次为苍耳(*Xanthium sibiricum*)、扁穗牛鞭草(*Hemarthria compressa*)、空心莲子草(*Alternanthera Philoxeroides*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)等<sup>[22]</sup>。本研究选用的狗牙根草地属于人工恢复草地,于 2007 年种植,已经历 10 a 以上的周期性淹水一出露过程。研究区消落带位于长江干流,淹没和成陆规律与三峡水库水位调度节律一致,每年 9 月末、10 月初开始因水库蓄水逐渐淹没,一般在 11 月上旬消落带 145~175 m 全部淹水,次年 1—4 月消落带逐次从 175 m 向 156 m 出露,5 月末消落带

全部出露,6—9月受汛期洪水影响145~160 m消落带遭受短时间淹水过程。该区域淹水前土壤理化特性背景调查显示<sup>[19]</sup>,研究区消落带土壤淹水前土壤容重、酸碱度、有机质、全氮、全磷、全钾、硝态氮、氨态氮、速效磷、速效钾等各测定指标在不同海拔高程之间的差异均不显著( $p>0.05$ )。

## 1.2 样地选择与土壤样品采集

2020年6月在研究区155 m,160 m,163 m,166 m,169 m,172 m海拔选取生境类型、地形平缓的紫色土岸坡,布设样地采集土壤样品,样地土地利用类型淹水前为旱地,淹水后为狗牙根草地。每个海拔设置3个重复采样点,采集0—10 cm和10—20 cm的表层土壤,并以未淹水180 m海拔区域狗牙根草地土壤为对照。每个样点采集1 kg左右土壤样品,带回实验室,进行去杂、自然风干等前处理。

## 1.3 土壤理化性质分析

采用马尔文MS-2000激光粒度分析仪(英国马尔文仪器有限公司)测定土壤的颗粒组成。土壤粒径分级分为:0—0.002 mm,0.002—0.05 mm,0.05—0.1 mm,0.1—0.25 mm,0.25—0.5 mm,0.5—1 mm,1—2 mm,计算砂粒(0.05—2 mm)、粉粒(0.002—0.05 mm)、黏粒(<0.002 mm)含量。采用王国梁等提出的土壤颗粒分形维数分析方法计算体积分形维数<sup>[23]</sup>。采用Vario MACRO Cube元素分析仪(德国Elementar公司)测试土壤有机质。采用Yoder湿筛法<sup>[24-25]</sup>测定土壤水稳定性团聚体组成,并计算 $W_{>0.25}$ (>0.25 mm土壤水稳定性团聚体含量)指标。

## 1.4 土壤可蚀性K值计算

本文采用EPIC模型计算土壤可蚀性K值,公式为<sup>[6,8]</sup>:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 \text{SAN}(1 - \text{SIL}/100)]\} \cdot \left[ \frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right]^{0.3} \times \left[ 1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \cdot \left[ 1.0 - \frac{0.7\text{SN1}}{\text{SN1} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SN1})} \right]$$

式中:SAN为砂粒(0.05~2 mm)含量(%);SIL为粉粒(0.002~0.05 mm)含量(%);CLA为黏粒(<0.002 mm)含量(%);C为有机碳含量(%);SN1=1表示SAN/100。计算的土壤可蚀性K值为美国制单位,将其乘以0.1317则转变为国际制单位( $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ )。

## 1.5 数据处理与统计分析

利用IMB SPSS 20.0和Excel 2016软件进行数据处理、统计分析和Pearson相关性分析。图件制作采用

Origin软件。组间差异显著性分析采用IMB SPSS 20.0软件的单因素方差分析,显著性水平为0.05。

# 2 结果与分析

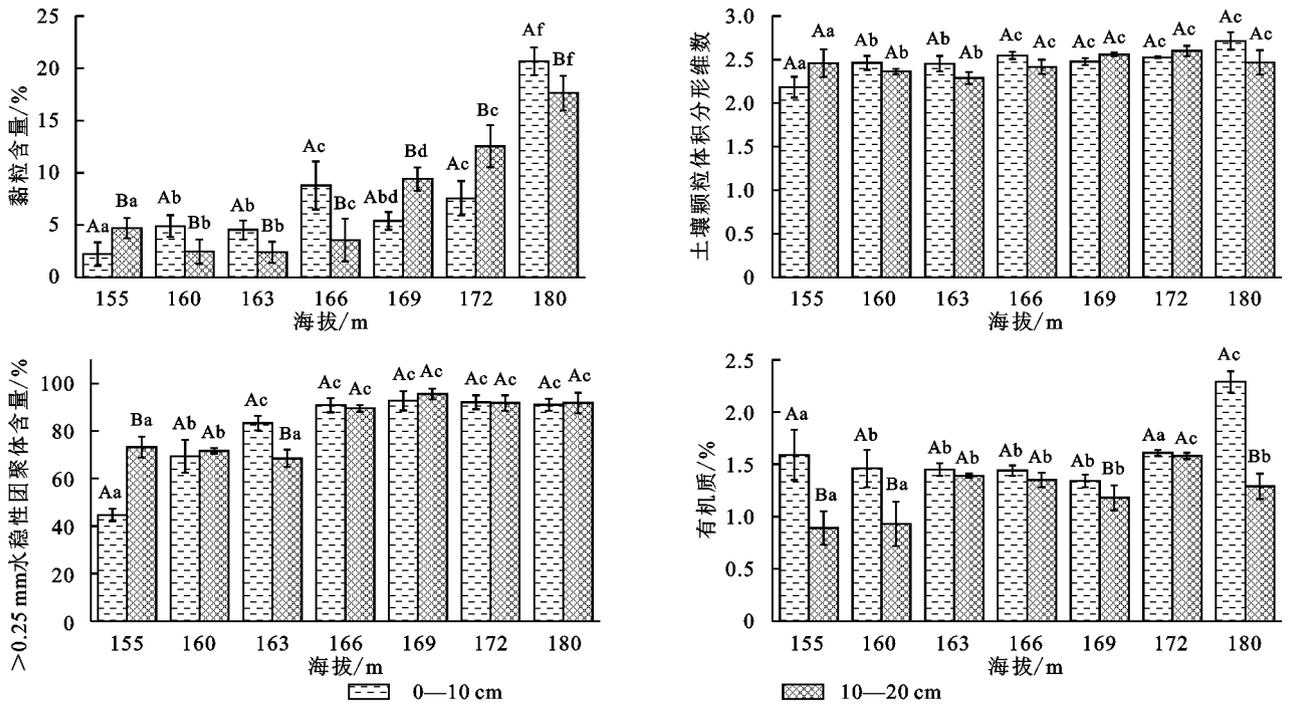
## 2.1 土壤理化性质空间异质性

由图1可见,消落带与未淹水对照0—20 cm表层土壤黏粒含量存在显著差异( $p<0.05$ ),消落带土壤黏粒含量较对照大幅降低,减少幅度达41.19%~79.81%。受水库水位涨落节律的影响,不同海拔消落带土壤遭受淹水胁迫时长和程度有着明显的不同,表层土壤理化性质沿海拔梯度存在明显的空间异质性,表现为:172 m>169 m>166 m>160 m>163 m>155 m,土壤黏粒含量为3.45%~10.05%(见表1)。土壤颗粒的体积分形维数与黏粒含量分布规律一致,随海拔升高而增大,其中155~163 m低海拔区域的分形维数显著低于166 m以上区域( $p<0.05$ ),差幅可达10.16%~19.54%,但166 m海拔以上区域无显著差异( $p>0.05$ )。从土壤团聚体含量来看,>0.25 mm水稳性团聚体含量较对照明显降低,且有随海拔增加而增加的趋势,尤其155~163 m低海拔区域与对照差异显著( $p<0.05$ )。消落带土壤有机质平均含量1.20%~1.60%(见表1),显著低于对照的1.79%( $p<0.05$ ),且与海拔呈正相关。

土壤理化性质在不同土层上也具有一定的差异性,总体来看,0—10 cm土层有机质含量高于10—20 cm土层,平均差值为0.26%,而0—10 cm土层土壤黏粒含量和>0.25 mm水稳性团聚体含量均显著低于10—20 cm土层( $p<0.05$ ),分别减少0.28%和2.88%。0—10 cm土层土壤颗粒的体积分形维数稍高于10—20 cm土层,但差异幅度较小,仅为0.01,两者差异不显著( $p>0.05$ )。

## 2.2 土壤可蚀性K值的空间异质性

消落带0—20 cm表层土壤可蚀性K值的统计分析表明,消落带表层土壤K值为0.049 6~0.061 2,均值0.054 1,属于高可蚀性土壤。由图2可知,消落带土壤可蚀性因子K值高于对照,平均比对照高7.33%,呈现出随海拔升高而降低的趋势,其中155 m,160 m海拔与对照具有显著性差异( $p<0.05$ ),平均增加幅度达到对照的30.63%,而163~172 m海拔的K值与对照之间差异不显著( $p>0.05$ ),相对增幅仅有3.49%。消落带所有样地的K值偏度为0.536,峰度为-0.329,均小于1,变异系数CV值为12.74%,说明消落带土壤可蚀性K值在各海拔梯度上基本服从正态分布,空间变异性为中等。在土层分布上,0—10 cm土层的平均K值低于10—20 cm土层,后者是前者的1.03倍,但两者无显著差异( $p>0.05$ )。



注:图中不同大写字母表示同一海拔各土层之间存在显著差异( $p < 0.05$ ),不同小写字母表示同一土层不同海拔之间存在显著差异( $p < 0.05$ )。

图 1 不同土层土壤理化性质随海拔的变化

表 1 消落带表层 0—20 cm 土壤主要理化性质  
随海拔的变化

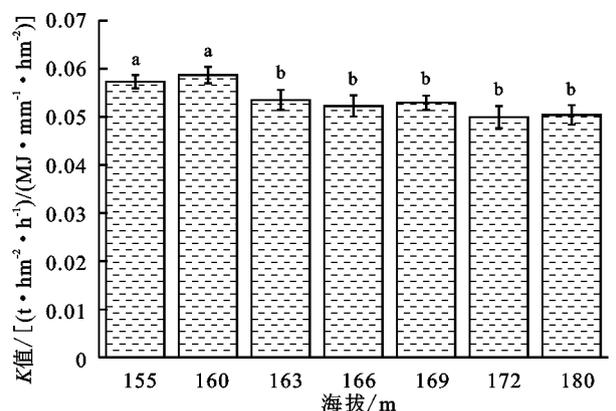
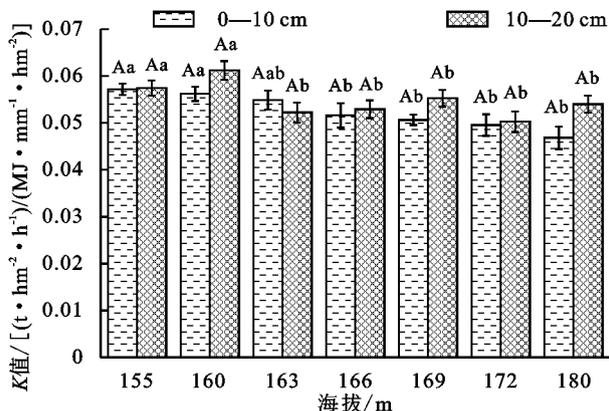
海拔/m	黏粒 含量/%	体积 分形维数	$W_{0.25}$ 含量/%	有机质/%
155	3.45±1.02a	2.32±0.14a	58.98±6.94a	1.24±0.38ab
160	3.68±1.23b	2.41±0.05b	70.52±8.20ab	1.20±0.29a
163	3.47±0.98a	2.37±0.082b	75.90±6.82b	1.42±0.04c
166	6.17±2.08c	2.48±0.065c	80.83±7.39bc	1.40±0.06c
169	7.40±1.01d	2.52±0.04c	94.19±2.36c	1.26±0.09b
172	10.05±1.99e	2.56±0.037c	92.00±2.25c	1.60±0.03d
180	17.09±1.51f	2.59±0.12c	91.47±2.37c	1.79±0.55e

注:表中数据为平均值±标准差( $n=3$ ),不同小写字母表示不同海拔之间存在显著差异( $p < 0.05$ )。

### 2.3 表层土壤可蚀性 $K$ 值与影响因子相关性

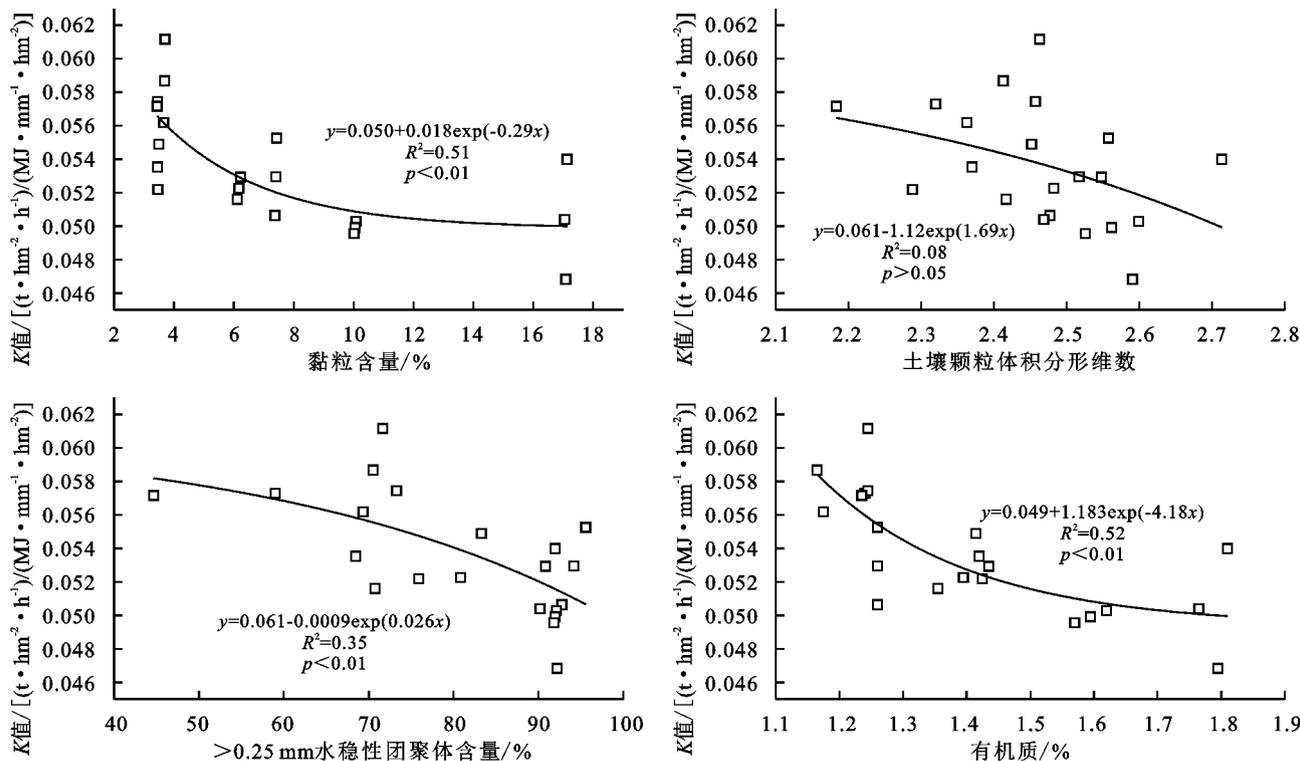
由图 3 可知, $K$  值大小与土壤黏粒含量、体积分形维数、 $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量和有机质等土

壤理化性质密切相关。 $K$  值与各指标的 Pearson 相关性分析表明, $K$  值与土壤黏粒含量、 $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量和有机质含量呈极显著负相关,相关系数分别为 $-0.652$ , $-0.628$ 和 $-0.705$ ( $p < 0.01$ );与土壤颗粒的体积分形维数呈负相关,相关系数为 $-0.427$ ( $p > 0.05$ );而  $K$  值与土壤粉粒和砂粒含量呈正相关,相关系数分别为 $0.419$ , $0.105$ ( $p > 0.05$ )。综上所述,土壤可蚀性因子  $K$  值随黏粒含量、 $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量和有机碳含量的增加而减小,随粉粒和砂粒含量的增加而增大。图 3 的曲线拟合结果同样表明  $K$  值与土壤理化因子之间具有上述相关性。由此可知,通过植被恢复改善土壤结构,增加  $>0.25$  mm 水稳性团聚体和有机质含量,防止波浪和降雨径流对表层土体的冲刷,保持消落带土壤黏粒含量,可有效降低土壤可蚀性。



注:图中不同大写字母表示同一海拔各土层之间存在显著差异( $p < 0.05$ ),不同小写字母表示同一土层不同海拔之间存在显著差异( $p < 0.05$ )。

图 2 土壤可蚀性  $K$  值空间分布特征

图3 土壤可蚀性  $K$  值与土壤理化因子的拟合曲线

### 3 讨论

三峡水库消落带典型断面 155~172 m 海拔范围内的狗牙根草地表土可蚀性  $K$  值为 0.049 6~0.061 2, 均值为 0.054 1, 按饶良懿等<sup>[7]</sup>土壤可蚀性分级标准, 达到高可蚀性。远高于全国 30 个省(市、区) 0.023 5~0.046 0 范围的土壤可蚀性  $K$  值<sup>[5]</sup>。但不同估算模型算法会对  $K$  值结果产生重要影响, 且每个算法的适用性因区域而异<sup>[6-8]</sup>。紫色土地区的已有研究表明, EPIC 算法较适宜于紫色土地区<sup>[6]</sup>。因此, 本研究采用了该算法对消落带土壤可蚀性  $K$  值进行了分析。根据采用同一算法对不同土地利用类型土壤  $K$  值研究结果, 紫色土地区坡耕地、荒地和林地的土壤可蚀性  $K$  值(国际制单位)介于 0.041~0.052 8 之间<sup>[6,8]</sup>, 明显低于本研究消落带土壤的  $K$  值。这表明周期性淹水一出露一淹水的极端水文变化过程, 导致了消落带土壤  $K$  值的升高, 其根本原因在于消落带遭受长时间、反季节、高压淹水胁迫, 消落带土壤特性、植被群落结构均在短时间发生显著变化<sup>[3,21,26]</sup>, 表现在植被消亡演替、剧烈土壤侵蚀、土壤结构劣化等<sup>[13-15,21]</sup>, 并引起土壤有机质、氮磷钾等养分含量的显著下降<sup>[19]</sup>, 从而影响土壤可蚀性。

消落带内部土壤可蚀性  $K$  值随土层和海拔的分布差异, 主要原因是不同海拔土壤的淹没时间、库水压力、淹水一出露频率和水位变动幅度等均具有差异, 遭受的土壤侵蚀情况也不同<sup>[27]</sup>, 导致坡面侵蚀产沙、团聚体组成和稳定性、植物根系分形特征、有机质含

量等具有一定的空间异质性<sup>[18-19,21-27]</sup>。相关研究表明, 消落带低海拔区域淹水时间和淹水深度显著高于高海拔区域, 植被可利用的生长时间减少, 造成植被群落多样性和覆盖度降低, 根系固土作用减弱, 使土壤团聚体更易分散<sup>[18]</sup>。本研究结果表明, 与未淹水的 180 m 海拔对照样地土壤相比, 消落带 155~163 m 低海拔区域土壤 >0.25 mm 的团聚体平均含量显著降低( $p<0.05$ ), 这表明周期性淹水浸泡和波浪冲击的特殊水文环境导致消落带土壤大粒径团聚体崩解破碎, 使得团聚体粒径降低。这可能也与消落带水位快速升降引起的团聚体崩解有关<sup>[18]</sup>。消落带不同海拔植被组成与群落结构的差异, 也会影响到土壤养分的积累与分解存在空间异质性, 消落带土壤在经历多次淹水一出露一淹水的干湿循环后, 土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量均显著下降<sup>[28]</sup>, 且呈现随海拔升高而升高的趋势<sup>[29]</sup>。土壤可蚀性是由土壤内在理化性质决定的特征参数<sup>[6]</sup>,  $K$  值大小与土壤颗粒组成和有机质密切相关<sup>[7]</sup>。消落带土壤特性在海拔梯度上的空间异质性, 将导致土壤可蚀性  $K$  值沿海拔梯度存在空间差异。本研究结果表明消落带 0—20 cm 表层土壤有机质、黏粒、>0.25 mm 水稳定性团聚体等含量均随着海拔的降低而降低(图 1), 且上述因子均与土壤可蚀性  $K$  值呈极显著负相关( $p<0.01$ ), 最终导致消落带土壤可蚀性  $K$  值随海拔升高而降低。

### 4 结论

(1) 消落带土壤理化性质在海拔和土层上均具

有明显的空间异质性,0—20 cm 表层土壤颗粒的体积分形维数与黏粒含量在不同海拔表现为:对照 > 172 m > 169 m > 166 m > 160 m > 163 m > 155 m。155~163 m 低海拔区域的分形维数显著低于 166 m 以上区域 ( $p < 0.05$ ), 差幅可达 10.16%~19.54%。消落带大于 0.25 mm 水稳性团聚体和有机质含量较对照明显降低,与海拔呈正相关关系。0—10 cm 土层有机质含量高于 10—20 cm 土层,而 0—10 cm 土层土壤黏粒含量和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量均显著低于 10—20 cm 土层 ( $p < 0.05$ )。

(2) 消落带 0—20 cm 表层土壤可蚀性  $K$  值平均为 0.054 1, 高于对照,且随海拔的升高而降低。0—10 cm 和 10—20 cm 土层的土壤可蚀性  $K$  值无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。

(3) 消落带土壤黏粒含量、>0.25 mm 水稳性团聚体含量和有机质含量对土壤可蚀性  $K$  值有重要影响,与  $K$  值呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ )。土壤颗粒的体积分形维数与  $K$  值呈负相关。而土壤粉粒和砂粒含量则与  $K$  值呈正相关。

#### 参考文献:

- [1] 李姗泽,邓玥,施凤宁,等.水库消落带研究进展[J].湿地科学,2019,17(6):689-696.
- [2] Su X L, Nilsson C, Pilotto F, et al. Soil erosion and deposition in the new shorelines of the Three Gorges Reservoir[J]. Science of The Total Environment, 2017, 599/600:1485-1492.
- [3] Bao Y H, Gao P, He X B. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir: A unique geomorphological unit [J]. Earth-Science Reviews, 2015,150:14-24.
- [4] 陈英,魏兴萍,雷珊.青木关岩溶槽谷流域不同土地利用类型土壤可蚀性分析[J].中国岩溶,2020,39(6):836-844.
- [5] 梁音,刘宪春,曹龙熹,等.中国水蚀区土壤可蚀性  $K$  值计算与宏观分布[J].中国水土保持,2013(10):35-40.
- [6] 史东梅,陈正发,蒋光毅,等.紫色丘陵区几种土壤可蚀性  $K$  值估算方法的比较[J].北京林业大学学报,2012,34(1):32-38.
- [7] 饶良懿,徐也钦,胡剑汝,等.砭砂岩覆土区小流域土壤可蚀性  $K$  值研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(4):763-773.
- [8] 徐文秀,韦杰,李进林,等.三峡库区紫色土坡耕地地表土的可蚀性研究[J].水土保持通报,2019,39(3):7-11,18.
- [9] 刘宝元,张科利,焦菊英.土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J].自然资源学报,1999,14(4):345-350.
- [10] 史学正,于东升,邢廷炎.用田间实测法研究我国亚热带土壤的可蚀性  $K$  值[J].土壤学报,1997,34(4):399-405.
- [11] 梁音,史学正.长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性  $K$  值研究[J].水土保持研究,1999,6(2):47-52.
- [12] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.
- [13] Wang Y J, Chen F Q, Zhang M, et al. The effects of the reverse seasonal flooding on soil texture within the hydro-fluctuation belt in the Three Gorges reservoir, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18 (1):109-115.
- [14] Ran Y, Ma M, Liu Y, et al. Hydrological stress regimes regulate effects of binding agents on soil aggregate stability in the riparian zones[J]. Catena, 2021,196:104815. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104815>
- [15] 朱强,张志永,胡红青,等.淹没一出露条件下三峡水库小江消落带土壤性质变化研究[J].土壤,2014,46(5):927-932.
- [16] 吕发友,鲍玉海,贺秀斌,等.三峡水库消落带淹水一落干交替下紫色土力学特性变化模拟[J].水土保持学报,2017,31(3):79-84.
- [17] 吕发友,唐强,张淑娟,等.三峡水库消落带紫色土物理性质对反复淹水作用的响应[J].水土保持研究,2018,25(1):276-281.
- [18] 张淑娟,贺秀斌,鲍玉海,等.三峡水库消落带不同水位高程土壤团聚体变化特征[J].水土保持研究,2021,28(1):25-30.
- [19] 常超,谢宗强,熊高明,等.三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响[J].自然资源学报,2011,26(7):1236-1244.
- [20] Su X L, Bejarano M D, Yi X M, et al. Unnatural flooding alters the functional diversity of riparian vegetation of the Three Gorges Reservoir[J]. Freshwater Biology, 2020,65:1589-1595.
- [21] 贺秀斌,鲍玉海.三峡水库消落带土壤侵蚀与生态重建研究进展[J].中国水土保持科学,2019,17(4):160-168.
- [22] 徐文秀,杨玲,鲍玉海,等.大型水库消落带 2 种典型耐淹草本植物单根抗拉力学特性[J].水土保持研究,2020,27(5):259-264,272.
- [23] 王国梁,周生路,赵其国.土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J].土壤学报,2005,42(4):545-550.
- [24] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1936,28(5):337-351.
- [25] 陈琳,王健,宋鹏帅,等.降雨对坡耕地地表结皮土壤水稳性团聚体变化研究[J].灌溉排水学报,2020,39(1):98-105.
- [26] 张爱英,熊高明,樊大勇,等.三峡水库蓄水对长江干流河岸植物组成的影响[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):145-156.
- [27] Bao Y H, He X H, Wen A B, et al. Dynamic changes of soil erosion in a typical disturbance zone of China's Three Gorges Reservoir [J]. Catena, 2018,169:128-139.
- [28] 王晓荣,程瑞梅,肖文发,等.三峡库区消落带初期土壤养分特征[J].生态学杂志,2010,29(2):281-289.
- [29] 王娅傲,陈芳清,张森,等.不同植被恢复模式下三峡库区万州段消落带土壤养分及其空间分布特征[J].农业资源与环境学报,2016,33(2):127-133.