

# 澜沧江黄登水电站库周土壤的崩解特性

段青松<sup>1</sup>, 保锐琴<sup>1</sup>, 黄广杰<sup>1</sup>, 罗鹏彪<sup>2</sup>, 陈丽红<sup>2</sup>

(1.云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2.云南农业大学 水利学院, 云南 昆明 650201)

**摘要:** [目的] 研究澜沧江黄登水电站库周土壤崩解特性, 为库周土壤侵蚀防控, 减少入库泥沙提供依据, 也为三江并流区水土保持和生态修复提供科学参考。[方法] 采用野外调查取样与室内试验相结合的方法, 测定库周 5 种典型土壤的崩解速率和理化性质, 分析土壤崩解速率与土壤性质的相关性。[结果] 土壤崩解性由强到弱依次为: 红壤、黄棕壤、淤积土(上)、淤积土(下)、紫色土, 饱和状态下, 土壤平均崩解速率之比依次为 8.76 : 5.65 : 5.24 : 4.29 : 1; 土壤崩解性与土壤液塑限、机械组成、孔隙度等性质密切相关; 土壤平均崩解速率与土壤粉粒、液塑限之间存在显著负相关, 与土壤粗砂粒含量、孔隙度显著正相关, 在初始含水量( $\omega_0$ )较高时与土壤有机质、水解性氮、有效磷、全氮存在显著负相关; 5 种土壤在  $\omega_0$  饱和时土壤崩解速率与全氮、粉粒和液限的线性方程拟合度高( $R^2 > 0.9$ )。[结论] 对  $\omega_0$  饱和的红壤、黄棕壤、淤积土、紫色土, 可用土壤全氮含量、粉粒含量和液限来预测土壤的崩解性。对黄登电站库周的红壤和黄棕壤采取必要的林草或工程措施进行综合治理; 对淤积土应种植适生的消落带植物, 对紫色土在加强保护的前提下宜农则农、宜林则林, 为库区乡村振兴提供更多农林用地资源。

**关键词:** 黄登水电站; 库周土壤; 崩解性; 土壤性质; 防治措施

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0195-08

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 段青松, 保锐琴, 黄广杰, 等. 澜沧江黄登水电站库周土壤的崩解特性[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 195-202. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.024; Duan Qingsong, Bao Ruiqin, Huang Guangjie, et al. Soil disintegration characteristics around Huangdeng hydropower station reservoir on Lancang River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 195-202.

## Soil Disintegration Characteristics Around Huangdeng Hydropower Station Reservoir on Lancang River

Duan Qingsong<sup>1</sup>, Bao Ruiqin<sup>1</sup>, Huang Guangjie<sup>1</sup>, Luo Pengbiao<sup>2</sup>, Chen Lihong<sup>2</sup>

(1.College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan

650201, China; 2.College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

**Abstract:** [Objective] Soil disintegration characteristics around the Huangdeng hydropower station reservoir on the Lancang River were studied in order to provide a basis for the prevention and control of soil erosion around the reservoir, reduce the sediment entering the reservoir, and provide a reference for soil and water conservation and ecological restoration in the Three Rivers parallel flow area. [Methods] We used a combination of field survey sampling and laboratory experiments to determine the disintegration rate and physicochemical properties of five typical soils around the reservoir, and to analyze the correlation between soil disintegration rate and soil properties. [Results] Soil disintegration (ranging from strong to weak) was observed to follow the order of red soil, yellow brown soil, siltation soil (top), siltation soil (bottom), and purple soil. Under the saturated soil condition, the ratio of average disintegration rates was 8.76 : 5.65 : 5.24 : 4.29 : 1. Soil disintegration was closely related to the soil liquid plastic limit, mechanical composition, porosity, and other properties; There was a significant negative correlation between the average soil disintegration rate and both

收稿日期: 2023-03-22

修回日期: 2023-05-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“三江并流区水库消落带草本植物根系水下固土机理研究”(42167046); 云南澜沧江黄登水电站库周消落带治理试验工程科研合作项目(H20200133); 云南省教育厅科学研究项目(2020Y165); 云南农业大学科研基金项目(2021XNKX026)。

第一作者: 段青松(1971—), 男(白族), 云南省大理市人, 博士, 教授, 主要从事农业水土工程方面的研究。Email: 258437886@qq.com。

通讯作者: 陈丽红(1972—), 女(汉族), 云南省祥云县人, 硕士, 副教授, 主要从事农业水土工程方面的研究。Email: 1449961163@qq.com。

soil silt and liquid plastic limit. A significant positive correlation was observed between soil disintegration rate and both the content of soil coarse sand and porosity. When the initial moisture content ( $\omega_0$ ) was high, soil disintegration rate was significantly negatively correlated with soil organic matter, hydrolytic nitrogen, available phosphorus, and total nitrogen. The linear equations between soil disintegration rate and total nitrogen, silt, and liquid plastic limit for the five soil types in the saturated state had a high fit degree ( $R^2 > 0.9$ ). [Conclusion] When  $\omega_0$  was saturated for red soil, yellow brown soil, siltation soil, and purple soil, soil total nitrogen content, silt content, and liquid plastic limit can be used to predict soil disintegration. Forests and grasslands should be established and maintained or engineering measures should be implemented to treat the red soil and yellow brown soil around Huangdeng power station reservoir. Suitable water-zone plants should be planted on siltation soil. Measures should be taken to strengthen the protection of purple soil so that it is suitable for agriculture and forests. Taking these measures will provide more agricultural and forestry land resources for rural revitalization in the reservoir area.

**Keywords:** Huangdeng hydropower station; soil around reservoir; soil disintegration rate; soil properties; prevention and control measures

澜沧江黄登水电站位于三江并流区腹地,三江并流区地处滇西北青藏高原与云贵高原过渡地带,怒江、澜沧江、金沙江贯穿其间<sup>[1]</sup>,蕴藏着丰富的水能资源,国家规划建设 26 座蓄水电站,总装机容量接近 2 个三峡电站。该区域是我国最大的世界自然遗产地,也是中国西南地区重要生态屏障的核心区,但该地区生态脆弱敏感,地质灾害频发、生态环境带幅窄且稳定性差,大量的水电开发,导致水土流失加剧,生态环境恶化,能源开发与生态环境保护矛盾突出。

土壤崩解是指土壤在静水中发生分散、碎裂、塌落解体且不可逆的物理过程,是土壤普遍存在的一种水理现象<sup>[2]</sup>。崩解是侵蚀发生的前提条件,为进一步侵蚀提供了物质基础,为此土壤崩解是研究土壤侵蚀机理的方法之一,土壤的崩解性主要用崩解速率来衡量<sup>[3]</sup>。国内最早由朱显谟<sup>[2]</sup>提出土壤静水崩解特性可作为研究土壤抗侵蚀能力的重要评价指标。近年来,土壤崩解引发的问题越来越受到关注,广大学者在相关领域开展了一些研究,主要集中在土壤理化性质、干湿交替、植物根系等对土壤崩解的影响等方面。在土壤理化性质方面,李喜安等<sup>[4]</sup>研究发现随着初始含水率( $\omega_0$ )增大黄土崩解性会减小或消失,其原因是随着  $\omega_0$  的增大,土壤塑性、孔隙性和渗水量等都减小,不利于崩解的发生,张国栋等<sup>[5]</sup>对膨胀性红黏土的研究也得出相似结果;但有学者<sup>[6]</sup>认为土壤崩解速率随土壤  $\omega_0$  的增加而增加,其原因是  $\omega_0$  较低的土壤吸水增重持续时间较长,延后了土壤进入快速崩解阶段的时间。Jensena 等<sup>[7]</sup>研究表明随着土壤有机碳含量的增加,土壤崩解速率会变慢;李敬王等<sup>[8]</sup>发现土壤崩解速率和崩解量随着容重的增加而减小,崩解完成时间随容重的增加而延长。在干湿交替方面,

王健等<sup>[3]</sup>基于 Richards 模型针对黄土的崩解性进行了研究,结果表明增加干湿交替的次数可有效减缓土壤崩解速率。在植物根系方面,肖海等<sup>[9]</sup>发现植物根系的存在能够减少土壤崩解量并降低崩解速率,因为植物根系穿插在土壤中对土壤有“加筋锚固”的作用<sup>[10]</sup>,可有效增加土壤抗崩解性。目前国内土壤崩解研究主要集中在北方黄土<sup>[2-4]</sup>、三峡紫色土<sup>[8-9]</sup>和南方花岗岩残积土<sup>[11-12]</sup>,三江并流区土壤类型丰富,侵蚀退化严重,但对该区域土壤崩解的研究尚未见报道。为此,本研究以澜沧江黄登水电站库周 5 种典型土壤为研究对象,探索土壤的崩解特性及土壤性质对崩解的影响,并针对土壤的崩解特性提出相应的治理措施及土地利用建议,为三江并流区水土保持、土壤侵蚀控制提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄登水电站位于云南省兰坪县境内,是澜沧江上游规划河段的第 6 级水电站,电站库周主要在上游的维西县境内。区内河谷狭窄,呈 V 形,两岸山坡陡峻,属高山峡谷地貌,植被丰富度、覆盖率低<sup>[13-14]</sup>。试验区年均气温 14.9 °C,年均降雨量 938.6 mm,属于亚热带与温带季风高原山地气候。土壤类型主要有红壤、棕壤、黄棕壤、黄壤、褐土、石灰岩土、紫色土、淤积土等<sup>[15]</sup>。本研究土壤选取黄登电站库周分布较为广泛的红壤、紫色土、黄棕壤和淤积土,黄棕壤、红壤、紫色土取样于电站库周,高程分别为 1 635,1 750 和 1 760 m,均为黄登库周典型土壤,淤积土取于消落带库尾河漫滩,高程分别为 1 605 m(电站水库建成前原始河道淤积),1 615 m(电站水库建成蓄水后淤

积);野外取样于 2021 年 5 月进行,遵循典型性、代表性的原则,采样时去除表面枯落物,将同一样地采集的土壤样品分层混合,带回实验室备用。

## 1.2 试验方法

**1.2.1 土样制备** 室内试验于 2022 年 4 月在云南农业大学水利学院土力学实验室进行。自然状态下土壤含水量受降雨、蒸发等环境变化的影响,而土壤初始含水率( $\omega_0$ )是影响土壤崩解性的重要指标。因此分别设置 0%,6%,12%,18%,24% 和饱和 6 个水平进行试验。土样制备时,用烘箱将土样烘干,过 2 mm 筛,加水配制至所需  $\omega_0$ ,将土样放入轻型击实筒内,用轻型击实仪击打,所有土样的干密度均控制为  $1.4 \text{ g/cm}^3$ ,取出击实过的土样,用切土刀切出  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  的样方,保证样方完好,5 类土壤 6 个含水率水平 5 个重复,共计 150 个样方。

**1.2.2 土壤基本理化性质** 按常规方法测定土壤化学常规 8 项<sup>[16]</sup>。

土壤机械组成采用筛分法和密度计法<sup>[17]</sup>,土壤颗粒分型维数按杨培岭<sup>[18]</sup>推导的公式计算:

$$\frac{W_i}{W} = \left( \frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{3-D} \quad (1)$$

式中: $D$  为土壤颗粒分形维数,无量纲; $d_i$  为两相邻粒级  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间土粒平均直径(mm); $d_{\max}$  为最大粒径的平均值(mm); $W_i$  为粒径小于  $d_i$  的累积土粒质量(g); $W$  为土壤各粒级质量的总和(g)。

采用浸泡法测定土壤孔隙度<sup>[19]</sup>,土壤孔隙度  $P$  按下式计算:

$$P = \frac{W_1 - W_0}{V} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $P$  为土壤孔隙度(%); $W_1$  为土壤饱和质量(g); $W_0$  为土壤烘干质量(g); $V$  为土样体积( $\text{cm}^3$ )。

土壤塑性液限按土工试验方法标准(GB/T50123-2019)<sup>[20]</sup>采用塑液限联合测定法:

$$I_P = \omega_L - \omega_P \quad (3)$$

式中: $I_P$  为塑性指数; $\omega_L$  为液限,为圆锥体坠入深度为 17 mm 时土样含水率(%); $\omega_P$  为土壤塑限,圆锥体坠入深度为 2 mm 时土样含水率(%)。

**1.2.3 土壤崩解试验** 采用图 1 所示装置进行崩解试验。试验开始前,将崩解架挂在拉力计上读数(水中)置零,将土样放置在崩解架上,然后将崩解架悬挂在数显拉力计(艾德堡 SH20-0.001N)上,利用升降旋钮将崩解架缓慢放入崩解容器中,直至土样的上表面与水面处于同一水平后开始计时。试验过程中,前 9 min 每 1 min 记录 1 次读数,后每 3 min 记录一次读数,试验持续 90 min。

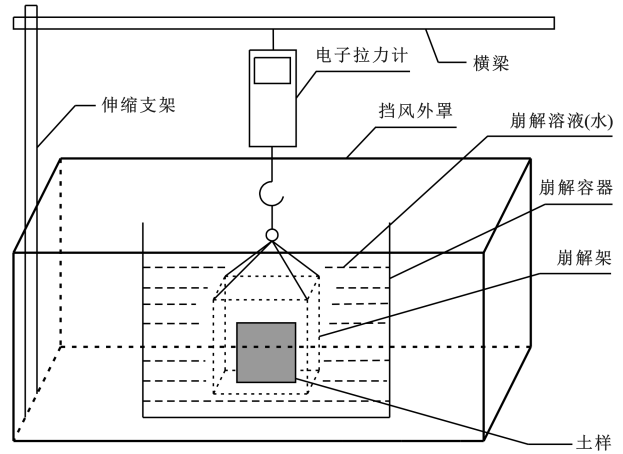


图 1 土壤崩解试验装置

Fig.1 Soil disintegration test device

土壤平均崩解速率( $\bar{v}$ ,%/min)的计算参考文献<sup>[21]</sup>,计算方法为:

$$M = M_0 - mk \quad (4)$$

$$H_0 = \frac{M}{M_0} \times 100\% \quad (5)$$

$$\bar{v} = \frac{H_0}{T} \quad (6)$$

式中: $M$  为已崩解的土壤饱和质量(g); $M_0$  为土壤样品初始饱和质量(g); $m$  为某时刻拉力计质量读数,为土壤浮重(g); $k$  为常数,等于  $\frac{\rho_{\pm}}{\rho_{\pm} - \rho_{\text{水}}}$  (紫色土、红壤、黄棕壤、淤积土(上)、淤积土(下)的土样饱和密度  $\rho_{\pm}$  分别为:1.76,1.95,1.88,1.80 和 1.84  $\text{g/cm}^3$ , $k$  值分别为:2.32,2.05,2.14,2.25,2.19); $H_0$  为土壤崩解率(%); $T$  为土壤崩解完成时间,未完全崩解则为 90 min。

对于非饱和土,土样浸水时吸水增重的同时土粒崩落质量减轻,求解过程相对麻烦,参考文献<sup>[21]</sup>简化部分条件进行近似求解,具体为在崩解完成时测量未崩解的土壤质量,此时土壤已经饱和,将土样的初始质量及已崩解的质量都换成饱和湿土的质量,计算出  $M$ ,进而求出  $\bar{v}$ 。

## 1.3 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 26.0 软件进行数据整理和分析,用 Origin 2019 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤的基本性质

供试土壤基本化学性质指标详见表 1。随着海拔的降低,土壤 pH 值整体呈上升趋势。土壤有机质对土壤团粒结构的形成和维持有重要作用,供试土壤

中,以紫色土的有机质含量最高,红壤最低,其他 3 类居中;全氮、水解性氮和有效磷含量也呈现出相同的

规律。速效钾和全钾表现为红壤最高,黄棕壤最低;全磷表现为淤积土(上)最高,红壤最低。

表 1 土壤的基本化学性质指标

Table 1 Basic chemical properties of soils

土壤类型	取样 高程/m	pH 值	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	水解性氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g · kg <sup>-1</sup> )
紫色土	1 760	6.43	40.01	192.44	9.57	90	1.63	0.56	20.04
红壤	1 750	6.51	6.29	25.76	0.41	95	0.45	0.39	22.8
黄棕壤	1 635	6.89	20.64	74.8	1.89	47.5	0.94	0.4	18.19
淤积土(上)	1 615	8.06	13.86	65.33	4.48	80	0.76	0.84	18.52
淤积土(下)	1 605	7.48	15.97	54.01	1.89	82.5	0.87	0.44	22.51

土壤机械组成详见表 2。在 5 种土壤中,紫色土中粉粒比例最高,黄棕壤和红壤中砂粒比例最高,两种淤积土中黏粒比例最高,根据国际制土壤质地分类三角坐标图分类<sup>[22]</sup>,红壤为黏壤土,淤积土(上)为黏土,其余 3 种为壤质黏土。土壤分形维数能够反映出土壤颗粒的分布特征,体现土壤质地的均一程度,

5 种土壤颗粒分形数值范围在 2.807~2.92,平均值为 2.856,大于中国多数黏土类的平均值(2.821)<sup>[23]</sup>,本研究中,土壤颗粒分形维数与黏粒含量呈极显著正相关( $p < 0.01$ ), $R^2$  均在 0.80 以上;在一定范围内,分形维数越高,土壤中的黏粒含量越丰富,这与前人研究<sup>[23]</sup>结果一致。

表 2 土壤机械组成及质地

Table 2 Mechanical composition and texture of soils

土壤类型	颗粒组成/%				颗粒分形 维数	$R^2$	质地
	砂粒 (2.0~0.2)	砂粒 (0.2~0.02)	粉粒 (0.02~0.002)	黏粒 (<0.002)			
紫色土	5.1	23.44	36.14	35.32	2.851	0.835	壤质黏土
红壤	33.1	18.73	22.42	25.75	2.807	0.977	黏壤土
黄棕壤	15.3	23.86	29.2	31.63	2.834	0.916	壤质黏土
淤积土(上)	0.5	15.06	27.21	57.23	2.920	0.812	黏土
淤积土(下)	3.3	22.8	33.4	40.5	2.867	0.838	壤质黏土

土壤界限含水率作为细粒土最基本的试验指标,反映了土的粒度组成和矿物成分之间相互作用的特征,塑性指数综合反映了黏性土的物质组成。5 种土壤中,塑限、液限和塑性指数均为紫色土最高,红壤最低,其他 3 种居中。土壤孔隙度反应了土壤通透性,对土壤质地、松紧度和结构性均有重要影响,孔隙度由大到小表现为:红壤、黄棕壤、淤积土(下)、淤积土(上)、紫色土(表 3)。

表 3 土壤界限含水率和孔隙度指标

Table 3 Soil boundary water content and porosity index

土壤类型	塑限 ( $\omega_p$ )/%	液限 ( $\omega_l$ )/%	塑性指数 ( $I_p$ )	孔隙度 ( $P$ )/%
紫色土	29.50	44.40	14.9	0.36
红壤	16.20	27.80	11.6	0.55
黄棕壤	25.10	36.80	11.7	0.48
淤积土(上)	24.70	38.90	14.3	0.40
淤积土(下)	23.10	40.50	17.4	0.44

## 2.2 土壤崩解特性

2.2.1 土壤崩解过程 以土样在水中的静置时间为横坐标,土壤崩解率为纵坐标,得出 6 组不同初始含水率( $\omega_0$ )土样崩解过程曲线(图 2)。崩解率曲线描述了土样累积崩解率与时间的关系,可反映试样整体崩解性情况。在本试验中,土壤崩解曲线基本呈现倒 L 形曲线。由图 2 可以看出,相同土壤,随着  $\omega_0$  升高,土壤崩解曲线逐渐平缓、崩解完成时间逐渐增长、崩解率逐渐降低; $\omega_0$  较低的试样放入水中,崩解初期拉力计读数在波动中上升,说明土壤在吸水的同时发生崩解,土样吸水增加的质量超过了崩解的细颗粒质量,崩解呈粉状、散粒状、鳞片状层层剥落,崩解较为剧烈;而  $\omega_0$  较高的试样放入水中,崩解初期拉力计读数上升不明显或缓慢减小,说明  $\omega_0$  高的土壤吸水不明显,崩解表现为小块状崩解,崩解较为缓慢。不同  $\omega_0$  的紫色土在 90 min 内均未完全崩解,而红壤则完全崩解;下层淤积土  $\omega_0 < 12\%$  完全崩解,而上层淤积

土和黄棕壤  $\omega_0 < 18\%$  完全崩解。在  $\omega_0$  相同时, 红壤、黄棕壤、淤积土(上)、淤积土(下)、紫色土崩解曲

线依次逐渐平缓, 崩解完成时间依次增加。因此, 在 5 种土壤中红壤崩解性最强, 紫色土最弱。

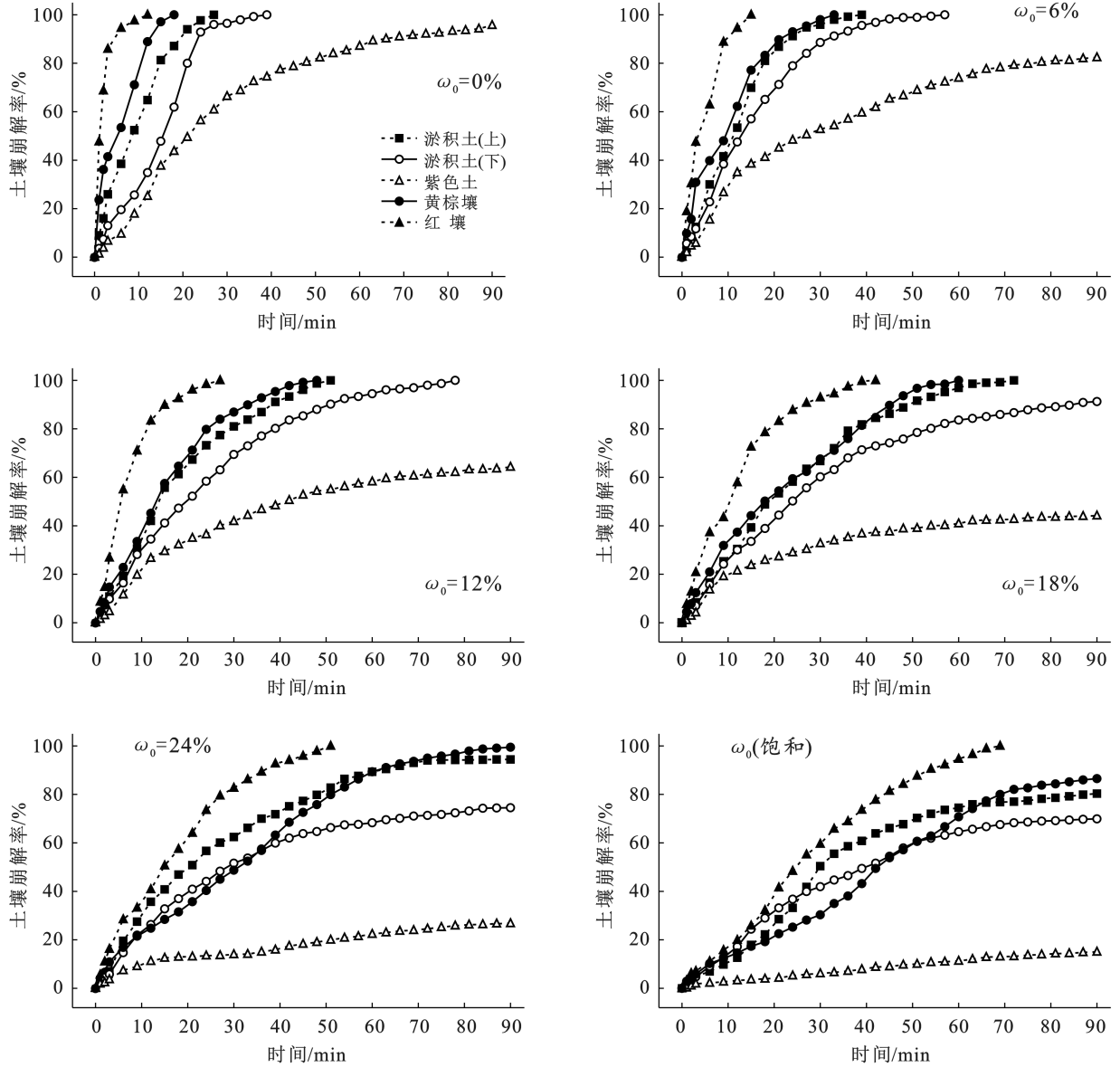


图 2 不同初始含水率( $\omega_0$ )土样土壤崩解曲线

Fig.2 Soil disintegration curve of soils with different initial water contents

2.2.2 土壤崩解速率 土壤崩解曲线的斜率即为崩解速率, 它反映了土壤崩解的快慢, 该值越大, 表示土壤在静水中被分散、碎裂、塌落的越快, 产生土壤侵蚀的概率就越高。在同一土壤, 平均崩解速率随  $\omega_0$  的升高而降低, 总体上不同  $\omega_0$  下的土壤崩解速率之间存在显著差异。相同  $\omega_0$ , 不同类型土壤崩解速率之间总体上达到显著差异。研究区  $\omega_0$  分别为 0%, 6%, 24%; 饱和时表现为: 红壤 > 黄棕壤 > 淤积土(上) > 淤积土(下) > 紫色土,  $\omega_0$  为 12% 和 18% 时表现为: 红壤 > 淤积土(上) > 黄棕壤 > 淤积土(下) > 紫色土。在 5 种土壤中, 红壤的平均崩解速率最快, 其次为黄棕壤、淤积土(上)、淤积土(下), 而紫色土平均

崩解速率最慢。以饱和土壤为例, 红壤的平均崩解速率分别为黄棕壤、淤积土(上)、淤积土(下)、紫色土的 1.55, 1.67, 2.01 和 8.76 倍(表 4)。

### 2.3 土壤理化性质与崩解性关系分析

2.3.1 土壤化学性质指标与土壤崩解的相关性 不同  $\omega_0$  下, 5 种土壤化学性质指标与土壤崩解速率的相关性分析结果详见表 5。由表 5 可知, 土壤崩解速率与土壤 pH 值、速效钾、全磷和全钾间相关性不显著, 这些指标反映不了土壤的崩解性。土壤崩解速率与有机质、水解性氮、有效磷和全氮之间存在负相关, 在  $\omega_0$  较高时存在显著或极显著负相关, 说明随着土壤有机质、水解性氮、有效磷和全氮含量的升高, 崩解性降低。

表 4 不同初始含水率土壤平均崩解速率

Table 4 Average soil disintegration rate of soils with different initial water contents

%/min

土壤类型	不同初始含水率土壤平均崩解速率					
	0%	6%	12%	18%	24%	饱和
紫色土	1.06±0.04 <sup>Da</sup>	0.92±0.10 <sup>Db</sup>	0.71±0.09 <sup>Dc</sup>	0.49±0.06 <sup>Dd</sup>	0.30±0.06 <sup>De</sup>	0.17±0.05 <sup>Df</sup>
红壤	10.06±2.25 <sup>Aa</sup>	7.92±1.81 <sup>Ab</sup>	3.85±1.05 <sup>Ac</sup>	2.41±0.38 <sup>Acd</sup>	1.98±0.27 <sup>Ad</sup>	1.49±0.28 <sup>Ad</sup>
黄棕壤	5.67±0.88 <sup>Ba</sup>	3.01±0.27 <sup>Bb</sup>	1.68±0.17 <sup>Bc</sup>	1.24±0.10 <sup>Bcd</sup>	1.10±0.01 <sup>Bd</sup>	0.96±0.05 <sup>Bd</sup>
淤积土(上)	3.79±0.51 <sup>Ca</sup>	2.59±0.34 <sup>Bcb</sup>	2.07±0.53 <sup>Bc</sup>	1.40±0.13 <sup>Bd</sup>	1.05±0.03 <sup>Bde</sup>	0.89±0.07 <sup>Bc</sup>
淤积土(下)	2.58±0.32 <sup>Cba</sup>	1.78±0.23 <sup>Cdb</sup>	1.29±0.08 <sup>Cde</sup>	1.01±0.05 <sup>Cd</sup>	0.83±0.08 <sup>Cde</sup>	0.73±0.05 <sup>Ce</sup>

注:不同大写字母表示相同 $\omega_0$ 不同土壤之间差异显著,不同小写字母表示同一土壤不同 $\omega_0$ 间显著( $p<0.05$ )。

表 5 土壤化学性质指标与土壤崩解速率的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between soil chemical property indexes and soil disintegration rate

因素	初始含水率					
	0%	6%	12%	18%	24%	饱和
pH 值	-0.273	-0.310	-0.114	-0.058	-0.083	0.036
有机质	-0.750	-0.729	-0.817*	-0.866*	-0.872*	-0.919*
水解性氮	-0.713	-0.664	-0.738	-0.802	-0.829*	-0.897*
有效磷	-0.749	-0.668	-0.682	-0.754	-0.813*	-0.880*
速效钾	0.026	0.250	0.261	0.188	0.095	-0.031
全氮	-0.801	-0.775	-0.854*	-0.900*	-0.908*	-0.950**
全磷	-0.413	-0.372	-0.192	-0.216	-0.305	-0.283
全钾	0.308	0.453	0.387	0.375	0.366	0.294

注:\*表示在 $p<0.05$ 水平上差异显著;\*\*表示在 $p<0.01$ 水平上差异显著。下同。

2.3.2 土壤物理性质指标与土壤崩解特性的相关性分析 不同 $\omega_0$ 下,5种土壤机械组成与土壤崩解速率的相关性分析详见表6。由表6可知,土壤崩解速率与细砂粒(0.2~0.02 mm)、黏粒和颗粒分型维数间

相关性不显著,与粗砂粒(2.0~0.2 mm)间存在显著正相关,与粉粒间存在显著或极显著负相关,表明在本研究中土壤随着粗砂粒含量的降低、粉粒含量的升高,崩解特性降低。

表 6 土壤机械组成与土壤崩解速率的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between soil mechanical composition and soil disintegration rate

项目	初始含水率					
	0%	6%	12%	18%	24%	饱和
2.0~0.2 mm 粗砂粒	0.919*	0.921*	0.820*	0.814*	0.830*	0.812*
0.2~0.02 mm 细砂粒	-0.318	-0.379	-0.556	-0.540	-0.455	-0.452
0.02~0.002 mm 粉粒	-0.922*	-0.900*	-0.959**	-0.967**	-0.956**	-0.949**
<0.002 mm 黏粒	-0.510	-0.502	-0.308	-0.292	-0.352	-0.275
颗粒分型维数	-0.593	-0.586	-0.401	-0.385	-0.442	-0.364

不同 $\omega_0$ 下,5种土壤界限含水率和孔隙度与土壤崩解速率的相关性分析详见表7。

由表7可知,土壤崩解速率与塑性指数间相关性不显著,与塑限、液限之间存在显著或极显著负相关,

与孔隙度间存在显著或极显著正相关。因此,可以用土壤塑限、液限和孔隙度反映土壤崩解特性,随着土壤液塑限的升高,崩解性降低;随着土壤孔隙度的升高,崩解性升高。

表 7 土壤界限含水率和孔隙度与土壤崩解速率的相关性分析

Table 7 Correlation analysis between soil boundary water content and porosity and soil disintegration rate

项目	初始含水率					
	0%	6%	12%	18%	24%	饱和
塑限	-0.889*	-0.916*	-0.918*	-0.938**	-0.947**	-0.929*
液限	-0.995**	-0.989**	-0.973**	-0.976**	-0.985**	-0.949**
塑性指数	-0.769	-0.673	-0.642	-0.632	-0.653	-0.631
孔隙度	0.940**	0.894*	0.841*	0.872*	0.921*	0.917*

2.3.3 土壤性质与土壤崩解性的回归分析 现分别以土壤有机质、水解性氮、有效磷、全氮、粗砂粒、粉粒、塑限、液限、孔隙度为自变量,以饱和土壤的崩解速率为因变量,进行回归分析,结果详见表8。土壤崩解速率与土壤性质的关系用线性函数拟合效果较好,其中,土壤崩解速率与全氮、粉粒和液限的线性方程拟合度较高, $R^2$ 均在0.9以上,模型预测效果较好,且 $p$ 均 $<0.01$ ,因此,通过土壤崩解速率分别与全氮、粉粒和液限建立的回归方程能更好地预测研究区土壤的崩解性。

表8 土壤性质与饱和土壤崩解速率的回归模型

Table 8 Regression model of soil properties and disintegration rate of saturated soil

土壤性质	回归方程		样本数
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	$y = -0.035x + 1.519$	$R^2 = 0.846$	5
水解性氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	$y = -0.007x + 1.398$	$R^2 = 0.804$	5
有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	$y = -0.116x + 1.271$	$R^2 = 0.775$	5
全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	$y = -1.046x + 1.822$	$R^2 = 0.901$	5
粗砂粒/%	$y = 0.027x + 0.539$	$R^2 = 0.572$	5
粉粒/%	$y = -0.085x + 3.356$	$R^2 = 0.901$	5
塑限/%	$y = -9.129x + 3.019$	$R^2 = 0.856$	5
液限/%	$y = -7.402x + 3.638$	$R^2 = 0.923$	5
孔隙度/%	$y = 5.953x - 1.807$	$R^2 = 0.840$	5

## 3 讨论

### 3.1 土壤化学性质指标对土壤崩解特性的影响

有机质是土壤结构稳定的重要条件,间接影响着降雨作用下水分的入渗和土壤的抗侵蚀性,土壤有机质损耗会破坏土壤结构、降低土壤团聚体稳定性<sup>[24-25]</sup>。本研究发现土壤侵蚀速率与土壤有机质含量之间存在负相关(表5),与前人<sup>[26]</sup>的结果一致,在 $\omega_0$ 较高时存在显著或极显著负相关,可能是因为土壤有机质中含有的胶体物质在处于溶胶状态时,会使土壤黏结性、黏着性增加<sup>[27]</sup>。土壤养分主要取决于成土母质、有机质和人为因素的影响,来源于土壤矿物质、有机质、降水等,有研究指出土壤有机质含量与全氮、水解性氮和有效磷含量之间密切正相关<sup>[28-29]</sup>,因此全氮、水解性氮和有效磷可以通过对有机质的影响而间接影响土壤崩解性。本研究发现土壤侵蚀速率与全氮、水解性氮含量之间存在显著负相关的关系,与张孝存等人<sup>[29]</sup>基于坡耕地土壤侵蚀研究结果一致。依据表5和表8发现土壤全氮与土壤崩解速率建立的回归方程拟合程度较高,因此可用土壤全氮含量预测土壤的崩解性。

### 3.2 土壤物理性质指标对土壤崩解性的影响

本研究所选用的紫色土、黄棕壤和红壤取样于黄登电站库周,在降雨和地表径流作用下,土壤颗粒从

上向下输移,会在地势平缓开阔区域沉积下来形成淤积土,淤积土取样于消落带库尾河漫滩。土壤侵蚀过程是一个泥沙颗粒的分选过程,造成土壤颗粒的重新分布,研究表明<sup>[30]</sup>沉积部位土壤中的黏粉粒含量通常高于原始土壤,砂粒的含量低于原始土壤,与本文结果一致。

土壤颗粒影响着土壤抗侵蚀强度,粗颗粒含量高、黏粉粒含量低的土壤,其结构疏松、黏聚力低、稳定性差、可蚀性高<sup>[8,31]</sup>。本文研究发现土壤崩解性与粉粒含量呈负相关,这与张靖宜等<sup>[32]</sup>的研究结果一致,其原因在于土壤粉粒含量高,土壤可以形成良好的土壤结构,从而提高土壤抗蚀性。土壤孔隙度对土壤质地、松紧度和结构性有重要影响<sup>[33]</sup>,土壤砂粒含量越高,团聚作用就越弱,越容易形成大孔隙;粉黏粒含量越高,土壤团聚作用越强,形成的土壤孔隙越小,孔隙度越大的架空结构土壤水稳性差,遇水容易崩解,而孔隙度小、结构密实的土壤不易崩解<sup>[34]</sup>。依据表6和表8发现土壤粉粒和土壤崩解速率建立的回归方程拟合程度较高,因此可用土壤粉粒含量预测土壤的崩解性。

界限含水量作为重要的土壤力学指标,它可以反映土壤的入渗、抗冲、抗蚀和抗剪强度等<sup>[35]</sup>,土壤塑液限增大,其抗剪强度也会增大,而塑液限低的土壤更容易表现出流体状态,强度低,抗侵蚀能力弱<sup>[36]</sup>。依据表7—8可知土壤液限和土壤崩解速率建立的回归方程拟合程度较高,土壤界限含水率试验较土壤崩解试验更简单易操作,因此可用土壤液限预测土壤的崩解性。

### 3.3 黄登电站库周水土流失防控探讨

在黄登电站库周土壤侵蚀防治、生态环境修复中,对崩解性较强的红壤和黄棕壤,采取必要的林草或工程措施进行综合治理;淤积土大多处于水库的消落带,应种植适生的消落带植物,从而控制水土流失,改善库周的生态环境,保障库区安全;对崩解性较弱且肥力较高的紫色土,在加强保护的前提下宜农则农、宜林则林,为库区乡村振兴提供更多农林用地资源。

## 4 结论

初始含水量( $\omega_0$ )饱和的红壤、黄棕壤、淤积土、紫色土,可用土壤全氮含量、粉粒含量和液限来预测土壤的崩解性。对黄登电站库周的红壤和黄棕壤采取必要的林草或工程措施进行综合治理,对淤积土应种植适生的消落带植物,对紫色土在加强保护的前提下宜农则农、宜林则林,为库区乡村振兴提供更多农林用地资源。

## [参 考 文 献]

- [1] 王国良.我国西南三江并流区域地理环境概述[J].中国地名,2019(5):43.
- [2] 朱显谟.黄土地区植被因素对于水土流失的影响[J].土壤学报,1960,8(2):110-121.
- [3] 王健,马璠,张鹏辉,等.干湿交替对黄土崩解速度的影响[J].土壤学报,2015,52(6):1273-1279.
- [4] 李喜安,黄润秋,彭建兵.黄土崩解性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):3207-3213.
- [5] 张国栋,巫锡勇,凌斯祥,等.初始含水率对膨胀性红黏土胀缩及崩解特性的影响[J].工程地质学报,2023,31(1):32-42.
- [6] 张晓媛,范昊明,杨晓珍,等.容重与含水率对砂质黏壤土静水崩解速率影响研究[J].土壤学报,2013,50(1):214-218.
- [7] Jensen J L, Schjønning P, Watts C W, et al. Soil degradation and recovery: changes in organic matter fractions and structural stability [J]. *Geoderma*, 2020, 364: 114181.
- [8] 李敬王,陈林,史东梅,等.紫色土崩解特性对容重和含水率的响应特征[J].水土保持学报,2019,33(2):68-72,78.
- [9] 肖海,彭逗逗,邵艳艳,等.狗牙根根系对三峡库区消落带紫色土崩解性能的作用机理分析[J].土壤通报,2019,50(5):1116-1122.
- [10] Smith D J, Wynn-Thompson T M, Williams M A, et al. Do roots bind soil? Comparing the physical and biological role of plant roots in fluvial streambank erosion: a mini-JET study [J]. *Geomorphology*, 2021,375:107523.
- [11] Xia Dong, Zhao Bingqin, Liu Daxiang, et al. Effect of soil moisture on soil disintegration characteristics of different weathering profiles of collapsing gully in the hilly granitic region, South China [J]. *PLoS One*, 2018,13(12):1-19.
- [12] Liu Weiping, Song Xinqiang, Huang Faming, et al. Experimental study on the disintegration of granite residual soil under the combined influence of wetting-drying cycles and acid rain [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, 10(1):1912-1927.
- [13] 刘伦.基于 3S 技术的澜沧江梯级水库消落带植物物种组成及其分布特征[D].湖北 武汉:湖北工业大学,2021.
- [14] 黄广杰,段青松,李建兴,等.三江并流区水库消落带 5 种草本根系形态及抗拉特性[J].水土保持研究,2022,29(3):389-395.
- [15] 何忠俊,王立东,郭琳娜,等.三江并流区土壤发生特性与系统分类[J].土壤学报,2011,48(1):10-20.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [17] 中华人民共和国农业行业标准. NY/T1121.3-2006 土壤检测(第 3 部分):土壤机械组成的测定[S].北京,中国农业出版社,2006.
- [18] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993(20):1896-1899.
- [19] 中国科学院南京土壤所.土壤理化分析[M].上海,上海科学技术出版社,1978.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部、国家市场监督管理总局.GB/T50123-2019 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [21] 谷天峰,袁亮,胡炜,等.黑方台黄土崩解性试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(4):62-70.
- [22] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].土壤学报,2019,56(1):227-241.
- [23] 林立文,邓羽松,杨钊仁,等.南亚热带不同林分土壤颗粒分形与水分物理特征[J].生态学杂志,2020,39(4):1141-1152.
- [24] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter [J]. *Nature*, 2015,528(7580):60-68.
- [25] Weng Z, Lehmann J, van Zwieten L, et al. Probing the nature of soil organic matter [J]. *Critical reviews in environmental science and technology*, 2022, 52(22):4072-4093.
- [26] 何淑勤,宫渊波,郑子成,等.山地森林—干旱河谷交错带表层土壤侵蚀率与土壤物理性质的关系[J].资源科学,2013,35(4):824-830.
- [27] 吕贻忠,李保国.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2008.
- [28] 吕春玲,陈延华,何文天,等.玉米种植体系土壤磷素有效性对有机肥长期施用响应的 Meta 分析[J].农业环境科学学报,2022,41(09):2011-2022.
- [29] 张孝存,郑粉莉,安娟,等.典型黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机质和氮的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):182-186.
- [30] 董博文,孙耀清,梁祥鹏,等.黄麻土工布覆盖对花岗岩红壤表土坡面侵蚀特性的影响[J].水土保持通报,2020,40(4):17-24,31.
- [31] Jiang Fangshi, Zhan Zhenzhi, Chen Jialin, et al. Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain [J]. *Catena*, 2018,169:46-58.
- [32] 张靖宜.三峡库区坡耕地土壤理化性质对土壤侵蚀阻力的影响[D].四川 成都:四川农业大学,2020.
- [33] 刘俊廷,张建军,孙若修,等.晋西黄土区退耕年限对土壤孔隙度等物理性质的影响[J].北京林业大学学报,2020,42(1):94-103.
- [34] 王念秦,魏精瑞.陕西关中地区离石黄土崩解速率实验研究[J].工程地质学报,2015,23(05):954-958.
- [35] 庄雅婷,黄炎和,林金石,等.崩岗红土液塑限特性及影响因素研究[J].水土保持研究,2014,21(3):208-211,216.
- [36] 刘朋飞,王树英,阳军生,等.渣土改良剂对黏土液塑限影响及机理分析[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(6):91-96.