

川中丘陵区镶嵌式田坎土壤可蚀性 变化特征及影响因素

郑江坤^{1, 2} 冉至立¹ 韩雨婧¹ 胡水蓝¹ 刘思艺¹ 曾衡³¹

(1. 四川农业大学林学院, 长江上游林业生态工程四川省重点实验室,

长江上游森林资源保育与生态安全国家林业和草原局重点实验室,

四川 成都 611130; 2. 成都水生态文明建设研究重点基地, 四川 成都 611231;

3. 四川省遂宁市安居区水土保持服务中心, 四川 遂宁 629006)

【摘要】: 田坎土壤可蚀性是影响梯田稳定的关键因素, 为探讨不同修建年限田坎土壤可蚀性, 以遂宁市安居区镶嵌式田坎为研究对象, 结合野外采样和室内分析, 研究了镶嵌式田坎修建 1、3 和 5 年的土壤可蚀性(K 值)变化及影响因素。结果表明: (1)K 值范围 $0.05\sim 0.06(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$, 田的 K 值大于坎, 随着镶嵌式田坎的修建年限的增加, 坎 K 值呈减小趋势, 建成 5 年时达显著性水平。(2)坎黏粒含量随修建年限递减, 而粉粒与砂粒含量呈递增趋势; 建成 1 年的坎土壤容重显著大于建成 3 年和 5 年; 建成 1 年和 3 年时, 田和坎的土壤团聚体破坏率(PAD)、不稳定团粒指数(E_{T})、风干土团聚体分形维数(风干 D)、水稳性团聚体分形维数(水稳 D)、风干性团聚体平均质量直径(风干 MWD)和风干性团聚体几何平均直径(风干 GMD)有显著差异; 建成 5 年时则无显著差异, 说明建成 5 年时田和坎的土壤物理性质趋于一致。(3)镶嵌式田坎上的土壤有机质含量随修建年限呈增加趋势, 建成 5 年时达显著性水平。(4)K 值与 PAD、 E_{T} 和水稳 D 呈极显著正相关, 与风干 GMD、水稳 MWD 呈极显著负相关。镶嵌式田坎 K 值与团聚体关系紧密, 建成 5 年后 K 值显著减小。

【关键词】: 修建年限 镶嵌式田坎 土壤可蚀性 土壤团聚体 川中丘陵区

【中图分类号】: S157.31 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)08-1845-08

川中丘陵区是紫色土坡耕地集中分布区域, 水土流失严重, 是三峡库区和长江上游的泥沙重要来源^[1]。梯田工程作为重要的水土保持措施, 能够减缓田面坡度, 改良土壤质地, 因而在该区得到了大面积推广^[2]。田坎是梯田工程的重点部位, 位于田面和田面(或坡面)的衔接处, 有一定高差和较陡坡度, 其稳定性是决定坡改梯工程成败的关键^[3]。前人围绕梯田工程稳定, 探讨了分层土体的水分入渗特征^[4]、土体的抗剪强度^[5]、稳定性评价^[6]以及工程优化设计^[7]。田坎土壤可蚀性是梯田稳定的主要影响因子,

作者简介: 郑江坤(1982~), 男, 副教授, 主要研究方向为生态水文和水土保持. E-mail: jiangkunzheng@126.com;

基金项目: 成都水生态文明建设研究重点基地科研项目(SST2019-2020-07); 省级大学生创新创业训练计划项目(202010626093); 中国博士后科学基金面上项目(2012M511938)

然而土壤可蚀性的研究主要集中在坡耕地表土及其空间分异上^[8,9],很少人关注田坎的土壤可蚀性,定量评价梯田田面及其田坎的土壤可蚀性有益于合理选择田坎建造形式和可持续开发利用梯田。

镶嵌式田坎技术近年在川中丘陵区坡改梯工程中大面积推广,具有成本低,结实耐用,可重复利用等优点。本文通过比较不同修建年限镶嵌式田和坎土壤可蚀性变化并分析其原因,可为田坎的水土保持效益评价提供数据支撑,也可为田坎防护措施的时效性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

遂宁安居区地处川中丘陵区核心位置,属涪江水系的一级支流琼江流域,海拔 258~351m,气候类型为亚热带湿润季风气候,年均气温 18.2℃,多年平均降水量 902mm,其中 5~9 月的降水量约占全年降水量的 73%,年均蒸发量 897.2mm,年均无霜期 296d。土壤为侏罗系遂宁组岩层发育而成的紫色土,土壤松散,大多是砂、页、泥岩风化形成的幼年土,结构性差,土壤 pH 呈中性到微碱性,土壤抗冲刷和抗蚀能力弱^[10]。

1.2 样地设置和样品采集

样地位于安居区聚贤镇和横山镇境内的坡改梯工程实施区,田坎均为条形块镶嵌式砌筑于控制的凹槽中,上下有压顶和基础,条形块采用国家标准水泥砖,尺寸为 240mm×115mm×53mm,田坎自然搁荒,上方连接水平梯田,田面略低于压顶,种植油菜 (*Brassica campestris*) 玉米 (*Zeamays*) 等农作物 (图 1)。

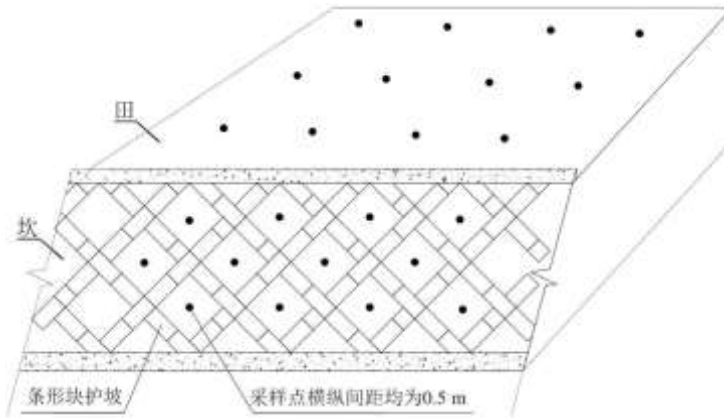


图 1 镶嵌式田坎工程及采样点示意图

选择 2015、2017 和 2019 年分别实施坡改梯工程的坡度 34.5°、32.9° 和 25.5° 典型田坎进行采样,采样时间为 2020 年 6 月,采用均匀布点法在各样地设置 24 个采样点,即坎上 12 个采样点(横×纵: 4 个×3 个),田上 12 个采样点(横×纵: 4 个×3 个),采样点行间距约 0.5m(图 1)。剪除地表植物及枯落物,使用环刀、土袋和自制原状土采样器采集 0~20cm 的表层土壤,带回实验室处理备用,并在土样采集点附近利用土壤硬度计测定土壤硬度。

1.3 指标测试计算

采用环刀法测定土壤容重及孔隙度,重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机质含量^[11],采用马尔文激光粒度仪测定土壤颗粒

组成(美国制),采用土壤干湿筛法测定土壤团聚体并计算土壤团聚体破坏率(PAD)、不稳定团粒指数(E_{LT})、团聚体几何平均(GMD)、团聚体平均质量直径(MWD)、风干土团聚体分形维数(风干D)和水稳性团聚体分形维数(水稳D)^[12,13]。

采用 Erosion-Productivity Impact Calculator(EPIC)模型中 Williams 等^[14]提出的公式计算土壤可蚀性 K 值。

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 S_a \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{S_i}{C_i + S_i} \right)^{0.3} \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)} \right] \quad (1)$$

式中： $S_n = 1 - S_a / 100$ ； S_a 为砂粒(0.05~2mm)含量，%； S_i 为粉砂(0.002~0.05mm)含量，%； C_i 为黏粒(<0.002mm)含量，%；C为有机碳含量，%；K为土壤可蚀性因子，单位为美国制，按照公式计算后将K值乘以0.1317转化为国际制，单位($t \cdot hm^2 \cdot h$) / ($MJ \cdot mm \cdot hm^2$)。

1.4 土壤指标变化率

采用土壤指标变化率表征坡改梯后田和坎的土壤指标相对变化，以此来探讨田坎的保土效益，公式如下：

$$V_{\Delta} = \frac{V_{坎} - V_{田}}{V_{田}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： V_{Δ} 为土壤指标变化率； $V_{坎}$ 为坎上土壤指标值； $V_{田}$ 为田上土壤指标值。

1.5 数据统计与处理

采用 Duncan 对土壤指标进行差异性检验($P < 0.05$)，对试验数据标准化处理后采用 Pearson 相关分析法对土壤指标进行相关性分析；采用 Origin2019 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 田坎土壤理化性质变化特征

田坎的土壤黏粒、粉砂和砂粒含量分别为 36.77%~41.12%、57.50%~59.03%和 1.38%~4.20%，田面的土壤黏粒、粉砂和砂粒含量分别为 37.77%~43.2%、56.07%~59.31%和 0.67%~2.92%，整体上田坎土壤黏粒含量小于田面，而砂粒含量大于田面；且田坎土壤黏粒含量和砂粒含量随修建年限分别呈递增和递减趋势(表 1)。

田坎土壤容重随修建年限呈递减趋势，建成 1 年的田坎土壤容重显著大于建成 3 年和 5 年($P < 0.05$)，而建成 1 年的田坎土壤毛管孔隙度与总孔隙度均显著小于建成 3 年和 5 年，田坎和田面的土壤容重和土壤硬度均无显著差异(表 2)。

表 1 不同修建年份田坎土壤颗粒组成

指标	坡改梯位置	2015 年	2017 年	2019 年
黏粒含量 (%)	田坎	36.77 ± 1.42 ^{Bb}	37.07 ± 1.20 ^{Ab}	41.12 ± 0.48 ^{Ba}
	田面	39.25 ± 0.33 ^{Ab}	37.77 ± 1.35 ^{Ab}	43.27 ± 1.18 ^{Aa}
粉砂含量 (%)	田坎	59.03 ± 1.06 ^{Aa}	58.89 ± 0.97 ^{Aa}	57.50 ± 0.69 ^{Aa}
	田面	58.24 ± 1.03 ^{Aa}	59.31 ± 0.61 ^{Aa}	56.07 ± 1.04 ^{Ab}
砂粒含量 (%)	田坎	4.20 ± 1.57 ^{Aa}	4.04 ± 2.12 ^{Aa}	1.38 ± 0.35 ^{Aa}
	田面	2.51 ± 0.88 ^{Aab}	2.92 ± 1.44 ^{Aa}	0.67 ± 0.14 ^{Bb}

注：不同大写字母表示相同修建年限不同坡改梯位置之间差异显著，不同小写字母表示不同修建年限同一坡改梯位置之间差异显著 (P<0.05)。下同。

表 2 不同修建年份田坎土壤硬度、土壤容重和孔隙度

指标	坡改梯位置	2015 年	2017 年	2019 年
土壤容重 (g · cm ⁻³)	田坎	1.50 ± 0.01 ^{Ab}	1.543 ± 0.04 ^{Ab}	1.76 ± 0.13 ^{Aa}
	田面	1.47 ± 0.07 ^{Aa}	1.60 ± 0.05 ^{Aa}	1.50 ± 0.15 ^{Aa}
土壤硬度 (kg · cm ⁻²)	田坎	263.50 ± 54.77 ^{Aa}	191.50 ± 64.73 ^{Aa}	315.50 ± 104.25 ^{Aa}
	田面	91.17 ± 39.46 ^{Ba}	164.67 ± 49.29 ^{Aa}	149.75 ± 27.48 ^{Aa}
毛管孔隙度 (%)	田坎	35.91 ± 1.58 ^{Aa}	36.46 ± 0.76 ^{Aa}	32.13 ± 0.32 ^{Ab}
	田面	37.33 ± 2.00 ^{Aa}	37.43 ± 0.68 ^{Aa}	30.34 ± 4.39 ^{Ab}
非毛管孔隙度 (%)	田坎	2.15 ± 0.46 ^{Aa}	1.15 ± 0.28 ^{Ab}	0.58 ± 0.16 ^{Ab}
	田面	3.48 ± 1.39 ^{Aa}	0.701 ± 0.08 ^{Ab}	1.45 ± 0.58 ^{Ab}
总孔隙度 (%)	田坎	38.06 ± 1.29 ^{Aa}	37.96 ± 0.95 ^{Aa}	32.70 ± 0.36 ^{Ab}
	田面	40.81 ± 2.21 ^{Aa}	38.14 ± 0.65 ^{Aa}	31.79 ± 4.44 ^{Ab}

建成 1 年的田坎土壤 PAD、E_{LT}、分形维数 (D) 均显著大于建成 3 和 5 年，而田坎土壤风干性 GMD、风干性 MWD、水稳性 GMD 与水稳性 MWD 均显著小于建成 3 和 5 年的坎土壤。建成 1 和 3 年的田坎土壤 PAD、E_{LT}、水稳 D 均显著小于同期的田面土壤，而水稳性 MWD、水稳性 GMD 均显著大于同期的田面土壤。建成 5 年的田坎土壤有机质显著大于建成 3 和 5 年，但其和田面间没有显著性差异 (表 3, 表 4)。

表 3 不同修建年份田坎土壤团聚体及其表征指标

指标	坡改梯位置	2015 年	2017 年	2019 年
PAD (%)	田坎	29.80±0.04 ^{Bb}	26.38±0.07 ^{Bb}	48.59±0.02 ^{Aa}
	田面	54.94±0.04 ^{Aa}	48.03±0.02 ^{Aa}	48.10±0.03 ^{Aa}
ELT (%)	田坎	30.30±0.04 ^{Bb}	27.01±0.06 ^{Bb}	49.55±0.02 ^{Aa}
	田面	55.50±0.04 ^{Aa}	48.55±0.02 ^{Aa}	48.92±0.03 ^{Aa}
风干 MWD (mm)	田坎	7.08±0.33 ^{Aab}	7.26±0.11 ^{Aa}	6.72±0.16 ^{Ab}
	田面	6.90±0.01 ^{Ab}	7.16±0.07 ^{Aa}	6.75±0.19 ^{Ab}
风干 GMD (mm)	田坎	2.28±0.07 ^{Aa}	2.31±0.04 ^{Aa}	2.15±0.03 ^{Ab}
	田面	2.22±0.02 ^{Aab}	2.28±0.03 ^{Aa}	2.17±0.05 ^{Ab}
风干 D	田坎	1.92±0.08 ^{Ab}	2.01±0.07 ^{Aab}	2.10±0.07 ^{Aa}
	田面	2.01±0.09 ^{Aa}	2.04±0.05 ^{Aa}	2.07±0.10 ^{Aa}
水稳 MWD (mm)	田坎	2.98±1.08 ^{Ab}	4.55±0.59 ^{Aa}	1.27±0.08 ^{Ac}
	田面	1.18±0.21 ^{Bb}	1.96±0.22 ^{Ba}	1.15±0.21 ^{Ab}
水稳 GMD (mm)	田坎	1.05±0.18 ^{Ab}	1.39±0.13 ^{Aa}	0.68±0.02 ^{Ac}
	田面	0.64±0.04 ^{Bb}	0.76±0.04 ^{Ba}	0.67±0.03 ^{Ab}
水稳 D	田坎	2.72±0.02 ^{Bb}	2.69±0.03 ^{Bb}	2.83±0.01 ^{Aa}
	田面	2.86±0.02 ^{Aa}	2.83±0.01 ^{Aab}	2.83±0.01 ^{Ab}

表 4 不同修建年份田坎土壤有机质

指标	坡改梯位置	2015 年	2017 年	2019 年
有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	田坎	16.08±2.42 ^{Aa}	9.24±2.55 ^{Ab}	7.79±1.39 ^{Ab}
	田面	11.96±1.45 ^{Aa}	7.29±0.77 ^{Ab}	6.75±0.86 ^{Ab}

2.2 田坎土壤指标变化率

田坎建成 1~5 年, 田坎土壤黏粒含量变化率均小于 0, 且田坎建成 5 年时变化率最小为-6.3%; 同时田坎建成 1~5 年, 田坎土壤砂粒含量变化率均大于 0, 且田坎建成 1 年时变化率最大为 107.0%。随着镶嵌式田坎修建年限的不断增加, 田坎土壤容重的差异逐渐减小, 田坎变化率从 17.2%减小到 1.8%; 建成 1 年, 坎土壤毛管孔隙度和总孔隙度均大于田, 田坎变化率大于 0, 建成

3~5年, 坎土壤毛管孔隙度和总孔隙度均小于田, 田坎变化率小于0(表5)。

此外, 镶嵌式田坎建成1~5年, 田坎土壤水稳MWD、水稳GMD的变化率大于0; 镶嵌式田坎建成1年, 田坎土壤PAD、 E_{LT} 、风干D与水稳D的变化率均大于0, 而建成3~5年田坎土壤相应指标变化率小于0; 田坎建成1年, 田坎土壤风干MWD、风干GMD的变化率小于0, 建成3~5年, 田坎变化率大于0, 所有土壤团聚体指标变化率的绝对值均随田坎修建年限呈递增趋势。田坎建成1~5年, 土壤有机质和土壤硬度的变化率均大于0, 其中土壤有机质含量变化率随田坎修建年限的增加呈递增趋势(表5)。

表5 不同修建年份田坎土壤理化性质变化率特征

指标	田坎变化率(%)		
	2015年	2017年	2019年
黏粒含量(%)	-6.3	-1.8	-5.0
粉砂含量(%)	1.4	-0.7	2.6
砂粒含量(%)	67.2	38.2	107.0
PAD(%)	-45.8	-45.1	1.0
ELT(%)	-45.4	-44.4	1.3
风干MWD(mm)	2.6	1.3	-0.4
风干GMD(mm)	2.7	1.3	-0.8
风干D	-4.6	-1.3	1.8
水稳MWD(mm)	153.6	132.7	9.8
水稳GMD(mm)	63.5	81.9	1.7
水稳D	-5.0	-4.9	0.1
土壤容重($g \cdot cm^{-3}$)	1.8	-3.8	17.2
土壤硬度($kg \cdot cm^{-2}$)	189.0	16.3	110.7
毛管孔隙度(%)	-3.8	-15.2	5.9
非毛管孔隙度(%)	-38.3	62.4	-60.3
总孔隙度(%)	-6.7	-0.5	2.9
有机质($g \cdot kg^{-1}$)	34.4	26.8	15.3

2.3 田坎土壤可蚀性

土壤可蚀性K值分布范围在 $0.05 \sim 0.06(t \cdot hm^2 \cdot h) / (MJ \cdot mm \cdot hm^2)$, 田坎建成1年, 田坎K值略大于田面, 田坎K值变化率

大于 0, 但田面和田坎间无显著差异(图 2)。随着田坎的修建年限的增加, 田坎土壤可蚀性 K 值呈递减趋势, 建成 5 年 K 值最小为 $0.05 (t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$, 田坎变化率最小达-6%, 显著小于建成 1 和 3 年, 且田面和田坎间土壤可蚀性 K 值差异显著。

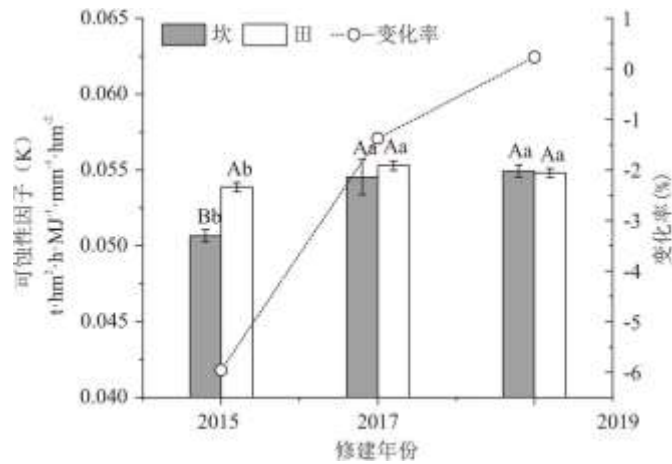


图 2 不同修建年份土壤可蚀性因子(K)的变化特征

注: 不同大写字母表示相同修建年份不同坡改梯位置之间差异显著, 不同小写字母表示不同修建年份同一坡改梯位置之间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 土壤可蚀性影响因素

土壤可蚀性 K 值与 PAD、 E_{LT} 和水稳 D 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.702、0.707 和 0.700; K 值与风干 GMD 和水稳 MWD 呈极显著负相关, 相关系数分别为 -0.624 和 -0.608; K 与风干 MWD、水稳 GMD 呈显著负相关; K 与风干 D、土壤硬度、土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度相关性不大(表 6)。

表 6 土壤可蚀性与土壤物理性质的相关性

指标	K	PAD	E_{LT}	风干 MWD	风干 GMD	风干 D	水稳 MWD	水稳 GMD	水稳 D	土壤硬度	土壤容重	毛管孔隙度	非毛管孔隙度
PAD	0.702**	1											
E_{LT}	0.707**	1.000**	1										
风干 MWD	-0.587*	0.589*	0.597**	1									
风干 GMD	-0.624**	0.628**	0.640**	0.967**	1								
风干 D	0.42	0.366	0.382	-0.203	-0.438	1							
水稳 MWD	-0.608**	0.917**	0.918**	0.761**	0.762**	0.229	1						

水稳 GMD	-	-	-	0.700**	0.712**	-	0.993**	1					
	0.603*	0.941**	0.941**			0.260							
水稳 D	0.700**	0.993**	0.993**	-	-	0.411	-	-	1				
				0.564*	0.617**		0.905**	0.938**					
土壤 硬度	-0.092	0.011	0.009	-0.006	0.039	-	-0.206	-0.230	0.050	1			
						0.241							
土壤 容重	0.285	0.111	0.112	-0.090	-0.126	0.149	-0.148	-0.151	0.131	0.070	1		
毛管 孔隙 度	-0.209	-0.104	-0.112	0.556*	0.536*	-	0.374	0.296	-	0.106	-0.384	1	
						0.083			0.108				
非毛 管孔 隙度	-0.12	0.148	0.140	-0.105	0.002	-	-0.141	-0.118	0.082	0.012	-	0.249	1
						0.357					0.640**		
总孔 隙度	-0.213	-0.101	-0.109	0.465	0.478*	-	0.314	0.262	-	0.069	-0.546*	0.953**	0.529*
						0.157			0.119				

注：**. 在 0.01 水平相关性显著(双尾), *. 在 0.05 水平相关性显著(双尾).

土壤影响因子间也表现出一定的相关性, 其中 PAD 与 E_{LT} 、水稳 D 呈极显著正相关, 与风干 GMD、水稳 MWD、水稳 GMD 呈极显著负相关, 与风干 MWD 呈显著负相关 ($P < 0.05$); E_{LT} 与风干 GMD、风干 MWD、水稳 MWD 和水稳 GMD 呈极显著负相关, 与水稳 D 呈显著正相关; 风干 MWD 与风干 GMD、水稳 MWD 和水稳 GMD 呈极显著正相关, 与毛管孔隙度呈显著正相关, 与水稳 D 呈显著负相关; 水稳 MWD 与水稳 GMD 呈极显著正相关, 与水稳 D 呈极显著负相关; 土壤容重与非毛管孔隙度呈极显著负相关, 与总孔隙度呈显著负相关, 毛管孔隙度与总孔隙度呈极显著正相关。

3 讨论

土壤可蚀性 K 值是评价土壤对侵蚀敏感程度的重要参数, K 值越小, 土壤抗侵蚀能力越强^[14]。该区土壤 K 值分布范围在 0.05~0.06 ($t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$), 明显高于黔中喀斯特地区、南方红壤地区和东北丘陵漫岗区^[15], 说明紫色土具有高可蚀性。本研究发现镶嵌式田坎的修建年限对土壤可蚀性 K 值有显著影响, 随着修建年限的增加, 田坎 K 值呈递减趋势, 说明田坎土壤可蚀性显著减少, 田坎在建成 5 年时作用显著, 说明田坎修建的土壤可蚀性具有明显的时效性。随镶嵌式田坎修建年限的增加, 坎土壤黏粒含量递减, 坎土壤粉砂含量与砂粒含量递增。而大量研究表明, 土壤可蚀性 K 值与砂粒含量呈显著负相关, 与粉粒含量呈显著正相关^[8], 与土壤黏粒含量呈显著负相关^[15], 与本研究结果有较大差异。这是因为紫色土坡耕地土壤侵蚀过程中, 黏粒粒径小, 首先被输送, 粒径越小, 越容易输送, 经过径流不断冲刷, 田坎土壤砂粒含量增加, 粉粒和黏粒含量减少^[15], 使得砂粒成为田坎土壤颗粒的主要组成部分。此外, 随镶嵌式田坎修建年限的增加, 坎土壤有机质含量随之增加, 随植被恢复年限的增加, 有机质呈增加趋势^[16], 且撂荒地土壤可蚀性低于农田用地^[17]。田坎建成后进行自然植被恢复, 随着修建年限的增加, 田坎上植物可以通过根系分泌物和残体向田坎土壤提供碳源, 从而增加土壤有机质含量, 进而减少其土壤可蚀性, 这与 Adornis 等^[18]的研究结果一致, 因此, 增加土壤有机质含量是防治土壤侵蚀的有效途径。

团聚体是土壤的基本结构单元,作为反映土壤团聚体稳定性的重要指标, PAD、 E_{LT} 、D 值越小, MWD、GMD 值越大, 土壤团聚体越稳定, 土壤抗侵蚀能力越强^[19,20,21]。随着修建年限的增加, 土壤团聚体逐渐稳定, 有机质含量也逐年增加, 有研究表明, 免耕土壤中腐殖质的积累使土壤有机物增加, 可提高土壤团聚体的稳定性^[22], 修建镶嵌式田坎的土壤相当于免耕土壤, 田坎土壤的有机质含量随时间增加, 土壤的黏结性增大, 土壤颗粒间胶结作用更强, 能提高田坎土壤团聚体的稳定性, 从而降低田坎土壤的 K 值。土壤容重是衡量土壤紧实程度的重要指标, 与土壤孔隙度呈极显著负相关^[23], 容重小, 土壤疏松, 土壤孔隙多, 降雨入渗能力强^[24], 土壤抗蚀能力增强。

土壤可蚀性 K 值与 PAD、 E_{LT} 和水稳 D 呈极显著正相关, 与风干 GMD、水稳 MWD 呈极显著负相关, 与风干 MWD、水稳 GMD 呈显著负相关, 这与王文鑫等^[25]、李程程等^[26]的研究结论一致, D、PAD、 E_{LT} 值越大, MWD、GMD 值越小, 土壤团聚效果越差, 土壤可蚀性越高, 土壤可蚀性 K 值越大。有机质含量与 GMD 呈极显著正相关, 与 PAD、D 呈极显著负相关^[25], 有机质含量的增加对土壤团聚体的稳定性具有重要作用, 有机质含量增加, 促进细颗粒物质的形成^[27], 土壤的黏结作用增强, 土壤中的大团聚体不易分解为粒径较小的团聚体和颗粒, 土壤团聚体分形维数较小, 且随修建年限的增加, 有机质含量显著影响土壤可蚀性, 二者呈负相关变化关系, 因此镶嵌式田坎的修建是增加土壤有机质含量, 提升团聚体稳定性, 是防止土壤侵蚀的有效途径。

4 结论

田坎的 K 值总体低于田面, 随镶嵌式田坎的修建年限的增加而减小, 建成 5 年后田坎的 K 值减小到 $0.05(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$, 较建成 1 年和 3 年显著减小。田坎修建对土壤黏结性、团聚体稳定性、土壤疏松度和有机质含量有明显增强作用, 田坎 K 值与 PAD、 E_{LT} 和水稳 D 呈极显著正相关, 与风干 GMD、水稳 MWD 呈极显著负相关, 与风干 MWD、水稳 GMD 呈显著负相关, 说明提高土壤有机质和团聚体稳定性是有效降低土壤可蚀性的重要途径。

参考文献:

- [1]ZHANG J H, NI S J, SU Z A. Dual roles of tillage erosion in lateral SOC movement in the landscape[J]. European Journal of Soil Science. 2012, 63 (2) :165-176.
- [2]范玉芳, 罗友进, 魏朝富. 西南丘陵山区坡耕地水平梯田工程设计分析[J]. 山地学报, 2010, 28 (5) :560-565.
- [3]王秀茹. 水土保持工程学(2 版)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009. WANG X R. Water and soil conservation engineering(2nd)[M]. Beijing:China Forestry Publishing House, 2009.
- [4]黎娟娟, 韦杰, 李进林, 等. 紫色土坡耕地土质埂坎分层入渗试验研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31 (4) :69-74.
- [5]丁文斌, 何文健, 史东梅, 等. 干湿作用对紫色土坡耕地生物埂土壤抗剪强度衰减—恢复效应[J]. 草业学报, 2017, 26 (6) :56-67.
- [6]李进林, 韦杰, 贺秀斌. 紫色土坡耕地不同规格土坎稳定性分析[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16 (5) :19.
- [7]刘佳丽, 田佳, 郑田恬, 等. 基于边坡稳定的黄土梯田优化设计[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18 (4) :21-28.
- [8]徐文秀, 韦杰, 李进林, 等. 三峡库区紫色土坡耕地表土的可蚀性研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39 (3) :7-11, 18.
- [9]宋春风, 陶和平, 刘斌涛, 等. 长江上游地区土壤可蚀性空间分异特征[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21 (9) :1123-1130.

-
- [10]唐柄哲, 何丙辉, 闫建梅. 川中丘陵区土地利用方式对土壤理化性质影响的灰色关联分析[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5):1445-1452.
- [11]中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [12]尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7):1969-1976.
- [13]魏亚飞, 王辉, 谭帅, 等. 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[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5):1617-1624.
- [14]PANAGOPOULOS T, DE JESUS J, BLUMBERG D, et al. Spatial variability of durum wheat yield as related to soil parameters in an organic field[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2014, 45(15):2018-2031.
- [15]区晓琳, 陈志彪, 陈志强, 等. 闽西南崩岗土壤理化性质及可蚀性分异特征[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3):84-92.
- [16]张若曦, 秦富仓, 李龙, 等. 水力侵蚀对砷砂岩区土壤有机碳空间变异性的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6):117-124.
- [17]杨满元, 杨宁, 欧阳美娟, 等. 紫色土丘陵坡地土壤水溶性有机碳对植被恢复的响应及其与土壤因子的关系[J]. 草地学报, 2019, 27(3):784-788.
- [18]NCIIZAH A D, WAKINDIKI I I C. Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility[J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2015, 61(6):827-842.
- [19]ZHU G Y, SHANGGUAN Z P, DENG L. Soil aggregate stability and aggregate associated carbon and nitrogen in natural restoration grassland and Chinese red pine plantation on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2017, 149:253-260.
- [20]袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3):159-165.
- [21]XIAO H, LIU G, ZANG Q, et al. Quantifying contributions of slaking and mechanical breakdown of soil aggregates to splash erosion for different soils from the Loess plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178:150-158.
- [22]TANG F K, CUI M, LU Q, et al. Effects of vegetation restoration on the aggregate stability and distribution of aggregate associated organic carbon in a typical karst gorge region[J]. *Solid Earth*, 2016, 7:141-151.
- [23]程汉亭, 李勤奋, 王晓敏, 等. 不同植被恢复策略对贵州喀斯特生态系统土壤渗透特性的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6):110-116.
- [24]黄乾, 杨海龙, 朱柱, 等. 青海云杉造林密度与水源涵养功能的响应关系[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4):279-286.
- [25]王文鑫, 王文龙, 郭明明, 等. 黄土高塬沟壑区植被恢复对沟头土壤团聚体特征及土壤可蚀性的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(16):2845-2857.

[26]李程程, 曾全超, 贾培龙, 等. 黄土高原土壤团聚体稳定性及抗蚀性能力经度变化特征[J]. 生态学报, 2020, 40(6):2039-2048.

[27]邓羽松, 李双喜, 丁树文, 等. 鄂东南崩岗不同层次土壤分形特征及抗蚀性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1):63-70.