

土壤侵蚀因素对紫色丘陵区坡耕地耕层质量影响

史东梅¹, 蒋光毅², 蒋平³, 娄义宝¹, 丁文斌¹, 金慧芳¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市水土保持生态环境监测总站, 重庆 401147;
3. 重庆市水利电力建筑勘测设计研究院, 重庆 400020)

摘要: 土壤侵蚀是导致坡耕地耕层土壤质量退化和土壤生产力不稳定的关键因素。该文以紫色丘陵区坡耕地为例, 对坡耕地不同地力等级耕层土壤质量、渗透性能及耕层类型进行聚类分析, 讨论了土壤侵蚀对坡耕地耕层厚度影响及合理耕层土体构型。结果表明: (1) 紫色土坡耕地耕层土壤质量具有中等程度变异性, 有效土层厚度 (15~80 cm) 和耕层厚度 (15~25 cm) 变异系数分别为 12.18% 和 37.26%, 土壤有效磷变异系数可达 94.51%, 说明土壤物理指标变异性小于化学指标变化; 三级以下地力耕层构型为近似全虚或全实剖面结构, 五等地力坡耕地产量下降 50% 左右。(2) 紫色土坡耕地不同坡位、不同垂直深度的耕层土壤物理性质、持水性能及耕作性能差异显著 ($P < 0.05$), 土壤容重为上坡 > 下坡 > 中坡, 土壤抗剪强度为上坡 > 中坡 > 下坡, 土壤稳定入渗为下坡 > 中坡 > 上坡, 土壤贯入阻力表现为中坡 > 上坡 > 下坡; 除土壤入渗外, 土壤容重、抗剪强度、贯入阻力均表现为底土层 > 心土层 > 耕层; 坡耕地 0~40 cm 土层中蓄存降水可被农作物利用 70% 左右。(3) 中度侵蚀程度坡耕地, 年均耕层厚度薄化值为 1.04~3.04 mm, 坡耕地合理耕层建立可选择有效土层厚度、耕层厚度、土壤容重、土壤抗剪强度、土壤有机质、土壤渗透性为坡耕地合理耕层评价最小数据集, 耕层构型总体保持上虚下实型、耕层厚度 20~25 cm、有效土层厚度 50~60 cm。(4) 紫色土坡耕地可分为四种耕层类型, 其障碍耕层主要表现为有效土层厚度限制型 (第 II 类)、耕层厚度限制型 (第 III 类) 和土壤养分限制型 (第 IV 类), 分别占耕层总量 30%、10%、3%; 紫色土坡耕地合理耕层建立应重点关注有效土层厚度和耕层厚度调控。研究结果可为客观认识土壤侵蚀与紫色土坡耕地耕层退化关系、合理耕层构建提供理论依据和技术参数支持。

关键词: 土壤; 侵蚀; 养分; 耕层; 坡耕地; 土壤质量; 最小数据集; 紫色丘陵区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.13.036

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-13-0270-10

史东梅, 蒋光毅, 蒋平, 娄义宝, 丁文斌, 金慧芳. 土壤侵蚀因素对紫色丘陵区坡耕地耕层质量影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 270-279. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.13.036 http://www.tcsae.org

Shi Dongmei, Jiang Guangyi, Jiang Ping, Lou Yibao, Ding Wenbin, Jin Hui Fang. Effects of soil erosion factors on cultivated-layer quality of slope farmland in purple hilly area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(13): 270-279. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.13.036 http://www.tcsae.org

0 引言

耕层指人类为了栽培农作物, 利用工具对土壤进行扰动的深度层, 耕层培育是提高土壤生产力的重要前提条件^[1]; 坡耕地是中国重要耕地资源类型之一, 南方地区如以每年 0.2~1.0 cm 的土壤侵蚀速率计算, 则耕地肥沃表土层将在 100~50 a 内被侵蚀掉, 花岗岩、紫色页岩和石灰岩区均属强度潜在危险区^[2]。紫色丘陵区坡耕地主要分布在四川盆地, 可占中国 51.28%, 既是重庆市和四川省农业生产主体区域, 也是长江流域重要侵蚀地带^[3]。因此对坡耕地合理耕层进行科学界定和客观评价是防治坡耕地耕层侵蚀退化、保证坡耕地土地生产力持续稳定的

重要基础, 对于保障国家粮食安全和生态安全意义重大。耕地地力是在多种自然因素、人为因素共同作用下形成的^[4], Pierce 等^[5]以土壤质量评价为基础, 以土壤自然属性和社会属性为依据建立的土壤生产力指数模型 (Soil productivity index model, 即 PI 模型), 重点分析土壤持水量、土壤容重与土壤 pH 值等对作物生长的适应性; Ddela 等^[6]采用土壤侵蚀可持续模型 (ImpelERO) 不仅评价土壤侵蚀脆弱性 (敏感性), 同时重点研究流失土层厚度对作物产量的影响。中国农业部在 2000 年建立了 1 套包括气候、立地条件、剖面性状、耕层理化性质、土壤养分状况、障碍因素、土壤管理 7 类共 64 项指标的公用指标体系以开展全国地力评价^[7]。美国农业部 LESA 系统的 Land Evaluation (LE) 部分由地力等级、土壤生产力等级、土壤潜在等级和重要农田等级四部分组成, Site Assessment (SA) 部分包括除土壤外评价农业用地适宜性的因素; 当用于耕地保护目的时, LE 与 SA 权重比为 1:2^[8]。上述 2 类农地地力评价体系均包含了诸多土壤自然物理、化学指标和人为耕作活动指标, 这种地力评价

收稿日期: 2017-02-12 修订日期: 2017-04-25

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目“坡耕地合理耕层评价指标体系建立 (201503119-01-01)”; 重庆市水利局科技项目“重庆市水力侵蚀监测点背景侵蚀环境调查 (2016)”研究成果

作者简介: 史东梅, 女, 甘肃灵台人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土生态工程、土壤侵蚀与水土保持研究。重庆 西南大学资源环境学院, 400715。Email: shidm_1970@126.com

指标筛选原则在中国耕地质量评价^[9-11]及国外土壤生产力评价^[12-13]中均得到广泛应用。坡耕地与基本耕地相比，具有地形破碎化、水土流失严重、耕层质量退化明显、农作物产量低而不稳的特殊性，而目前尚未见系统的土壤侵蚀、耕层（土壤）质量、耕层退化类型方面的研究报告。鉴于坡耕地在区域性农业生产中重要地位以及目前坡耕地合理耕层评价尚未见可参照做法，本文选择紫色丘陵区坡耕地典型“油菜-玉米/红苕”种植制度为研究对象，采用模型分析和野外调查方法，在对特定耕作制度大样本坡耕地耕层数值特征分析基础上，构建了坡耕地合理耕层诊断指标体系并定量评价了自然因素和经济因素对耕层质量变化的贡献率，辨识合理耕层和问题耕层的变化区间，研究结果可为紫色丘陵区及西南区坡耕地合理耕层诊断、坡耕地水土资源持续利用和水土保持提供理论依据和技术范式。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

重庆市坡耕地面积 118.9 万 hm^2 ，占全市耕地面积 47.14%， $15^\circ\sim 25^\circ$ 坡耕地为 78.5 万 hm^2 ， 25° 以上坡耕地为 40.4 万 hm^2 ，紫色土是重庆市农耕地（尤其是坡耕地）面积分布最广的土壤类型。紫色丘陵区坡耕地垦殖指数 49.04%、复种指数为 180%，土壤侵蚀模数在 3 798~9 831 $\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 之间^[14]，侵蚀土壤退化严重。重庆市属亚热带季风气候区，多年平均降水量 1 200 mm 且时有大雨和短历时高强度暴雨发生，高温伏旱各地 95%年份均有发生，多年平均气温 $15\sim 18^\circ\text{C}$ ，日照时数。针对紫色丘陵区“油菜-玉米/红苕”种植制度，选取 30 个坡耕地耕层剖面样本^[14]，记录坡耕地耕作环境、土壤质量、作物产量及相应地力水平如表 1 所示。

表 1 坡耕地典型种植模式的土壤质量与农业生产条件

Table 1 Soil quality and agricultural production conditions of typical planting patterns for slope farmland

地块号 Block number	行政区域 Administrative region	母质 Parent material	坡度 Slope/ ($^\circ$)	有效土层 厚度 Effective thickness of soil layer/cm	耕层 厚度 Topsoil thickness /m	土壤 质地 Soil texture	土壤 结构 Soil structure	土壤 紧实度 Soil compaction	土壤有 机质 Soil organic matter/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	阳离子 交换量 Cation exchange capacity/ $\text{cmol}(+)\cdot\text{L}^{-1}$	土壤全氮 Soil total nitrogen/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤有效磷 Soil available phosphorus/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	作物产量 Crop yield/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	地力等级 Productivity grade of cultivated land
1	万州区	灰棕紫色泥页岩	5	40	20	重壤	粒状	疏松	19.5	32.1	0.974	12	9	一
2	万州区	灰棕紫色泥页岩	5	45	22	沙壤	粒状	疏松	10	27.6	0.664	10	6~7.5	二
3	万州区	红棕紫色泥岩	10	50	20	重壤	粒状	疏松	9.69	16.3	0.906	2.9	4.5~6	三
4	万州区	灰棕紫色泥页岩	15	20	15	沙壤	粒状	疏松	7.02	19.9	0.41	10	4.5	四
5	万州区	红棕紫色泥岩	25	20	20	重壤	粒状	疏松	9.93	18.9	0.816	2.6	4.5	五
6	长寿区	遂宁组泥岩	—	45	20	重壤	粒状	疏松	10.5	31.5	0.662	16.6	10.5~12	一
7	长寿区	遂宁组泥岩	—	30	18	重壤	粒状	疏松	13.3	22.5	0.97	12.1	9~1.05	二
8	长寿区	遂宁组泥岩	—	45	20	重壤	粒状	疏松	11	22.5	1.02	12.5	8.25~9	三
9	长寿区	遂宁组泥岩	—	40	18	重壤	粒状	较紧实	13.7	22.9	1.07	10.2	7.5~8.25	四
10	长寿区	须家沟组	25	80	20	中壤	粒状	较紧实	9.68	21.8	0.665	4	6.75~7.5	五
11	荣昌县	沙溪庙组	—	35	20	中壤	团粒	疏松	14.9	21.6	0.97	11.3	9~1.05	二
12	荣昌县	沙溪沟组	—	35	20	沙壤	粒状	疏松	12.2	22.1	0.792	20.9	7.5~9	三
13	荣昌县	须家庙组	—	30	20	中壤	粒块	疏松	7.37	20.3	0.793	4.04	6~7.5	四
14	荣昌县	沙溪庙组	—	20	20	中壤	粒状	疏松	10.3	石 16.8	0.795	5.86	4.5~6	五
15	荣昌县	沙溪庙组	—	45	20	中壤	粒状	疏松	10.5	石 23.8	1.79	1.3	4.5~6	五
16	云阳县	蓬莱镇组	<6	40	25	中壤	团粒	疏松	14.6	石 31.8	0.885	9.39	9.5~10	一
17	云阳县	沙溪庙组	5~10	50	25	砂壤	团块	松	8.99	21.1	0.608	6.61	9~9.5	二
18	云阳县	巴东组	10~15	40	24	轻粘	小块	较紧实	19.9	石 22.4	1.36	5.57	7.5~8.5	三
19	云阳县	蓬莱镇组	10~22	40	20	砂壤	团粒	松	12.3	石 24.8	0.72	3.74	6~7	四
20	云阳县	蓬莱镇组	15~25	20	20	砂壤	粒状	松散	5.29	石 28.4	0.412	4.31	4.5~6	五
21	巴南区	第四系全新统近代冲积物	—	30	20	轻壤	粒状	较疏松	22.8	石 13	1.28	51	9.1~9.75	一
22	巴南区	第四系全新统近代冲积物	—	40	20	砂壤	粒状	较疏松	15.5	25.8	0.953	8.4	7.75~9.1	二
23	巴南区	第四系全新统近代冲积物	—	25	15	重壤	粒状	疏松	32.3	石 12.7	1.49	27	6~7.75	三
24	巴南区	第四系全新统近代冲积物	—	20	20	中壤	小粒状	疏松	14.8	石 21.4	1.02	14	5.55~6	四
25	巴南区	第四系全新统近代冲积物	18~25	20	20	砂壤	小粒状	疏松	12.6	石 17.3	0.845	18	<5.55	五
26	北碚区	沙溪庙组	5	35	20	中壤	粒状	疏松	12.4	28.4	0.891	18	9	一
27	北碚区	沙溪庙组	5	40	19	砂壤	粒状	疏松	12.9	24.7	1.02	6.3	7.5~8.25	二
28	北碚区	沙溪庙组	10	30	20	中壤	粒状	疏松	16.6	17.4	1.14	45	6.75~7.5	三
29	北碚区	珍珠冲组	—	25	25	轻壤	粒状	疏松	10	20.8	0.606	1.2	6~6.75	四
30	北碚区	须家河组	25	15	15	沙壤	粒状	疏松	10.6	28.8	0.654	6.1	5.25~6	五

注：1) 地力等级划分采用重庆市耕地地力等级；2) 此地土壤质量指坡耕地 0~20 cm 处耕层土壤质量变化；3) 典型种植模式指“油菜-玉米/红苕”。
Note: 1) The gravitational grading of cultivated land in Chongqing was adopted; 2) The soil quality refers to the soil quality change of the tillage layer at 0-20 cm; 3) The typical planting pattern refers to “rape - corn / sweet potato”.

1.2 坡耕地耕层调查及指标分析

1.2.1 耕层土壤采样及理化性质分析

在万州王家沟小流域分上坡、中坡、下坡开展坡耕地耕层野外调查,记录耕层剖面土体构型(图1所示),分别0~20、20~40、40~60 cm采集土壤样品带回室内,自然风干后进行土壤理化性质分析,其中土壤机械组成采用法吸管法测定。土壤入渗采用室内环刀法测定。

同时在调查现场分别0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm测定土壤力学指标,其中土壤抗剪强度采用荷兰产便携式14.10Pocket Vane Tester型三头抗剪仪,土壤紧实度采用TJSD-750-II土壤紧实度仪测定,土壤贯入阻力采用PT袖珍型贯入仪测定。

1.2.2 土壤持水性能指标计算

坡耕地耕层土壤持水性能采用土壤水库容量大小进行分析,各项库容指标、计算公式及在农业生产中应用见表2所示,据此对紫色土坡耕地耕层土壤蓄水抗旱性能进行分析、评价。

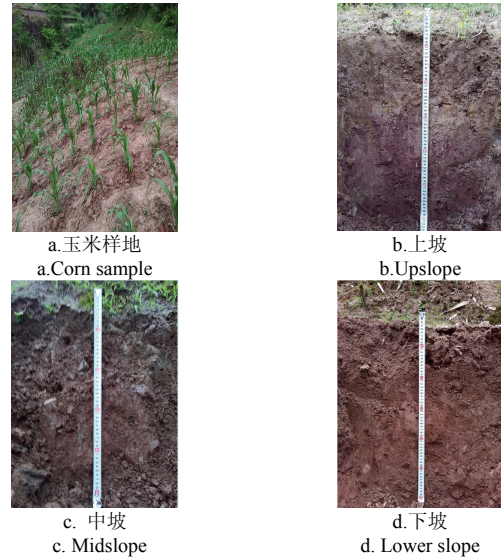


图1 坡耕地上、中、下坡位的耕层剖面示意图
Fig.1 Layout of section of plough layer at upper, middle and lower part of slope farmland

表2 土壤水库特征值评价及其农业价值

Table 2 Evaluation of soil reservoir characteristics and its agricultural value

指标 Indicators	计算公式 Calculation formula	应用价值 Application values
总库容 Total reservoir storage	$TS = 0.1 \sum_{i=1}^n (S_i \times r_i \times H_i)$	土壤涵养潜力的最大值,反映了土壤涵养水源、调节水分循环和水土保持功能
死库容 Dead storage	$DS = 0.1 \sum_{i=1}^n (W_i \times r_i \times H_i)$	不能被作物生长所利用,是作物生长的最低水量需求
兴利库容 Usable storage	$US = 0.1 \sum_{i=1}^n [(C_i - W_i) \times r_i \times H_i]$	作物生长水分的重要来源,通过实际含水量确定最佳补给量,既满足作物生长,又实现节水灌溉
最大有效库容 Maximal available storage	$MS = 0.1 \sum_{i=1}^n [(S_i - W_i) \times r_i \times H_i]$	最大程度地减少水的损失,尽可能的减少地表径流冲刷
最大蓄水能力 Maximum water capacity	$MC = 10 \sum_{i=1}^n (S_i \times H_i)$	土壤蓄水潜力的最大值,反映土壤涵养水源、蓄水保墒能力
土壤有效水分 Soil available moisture	$SM = 10 \sum_{i=1}^n [(F_i - W_i) \times H_i]$	土壤中能被作物根系吸收的水分,供作物生长利用

注: S_i 为饱和持水量, %; W_i 为凋萎含水量, %; r_i 为土壤密度, $g \cdot cm^{-3}$; H_i 为土层厚度, cm; n 为土壤层次; C_i 为毛管持水量, %; F_i 为田间持水量, %。
Note: S_i is the saturation moisture capacity, %; W_i is the wilting moisture content, %; r_i is the soil bulk density, $g \cdot cm^{-3}$; H_i is the soil depth, cm; n is the soil layers; C_i is the capillary moisture capacity, %; F_i is the field moisture capacity, %.

根据南京土壤研究所《土壤物理指标测定》,采用环刀法测定土壤饱和含水量、威尔科克斯法测定田间持水量、土壤凋萎含水量根据土壤最大吸湿水乘上系数1.5间接求得。

1.3 耕层数据处理方法

采用SPSS16.0软件对坡耕地耕层土壤质量有效土层厚度、耕层厚土、土壤有机质、阳离子交换量、全氮和有效磷指标进行描述性统计分析。利用此软件聚类分析模块Ward法对坡耕地耕层进行类型划分,Ward法基本思想是先将 n 个样品各自看作一类,此时离差平方和 $W=0$,然后每次将其中某2个合并为一类,每减少一类离差平方和就要增加,每次选使 W 增加最小的两类进行合并,直至所有样品合并为1类。Ward法把某2个样品合并后增加的离差平方和作为类间距离。

$$D_{pq}^2 = W_r - (W_p + W_q)$$

式中 D_{pq}^2 为聚类分析的类间距离; W_r 、 W_p 、 W_q 分别为第 r 、 p 、 q 类样品的离差平方和。

2 结果与分析

2.1 坡耕地耕层土壤质量特征及适宜性分析

对于坡耕地特定地块、种植制度的农业生产周期而言,耕层土壤质量由耕作、水蚀交互作用的生态过程决定,耕层质量具有明显的水蚀对耕作扰动的累积效应;根据坡耕地兼具侵蚀性和生产性的特点,将坡耕地耕层土壤质量参数在农作物产量形成过程中的功能分为保水、保土、保肥、稳定耕层4个方面,各项土壤质量指标的主要功能及其正、负效应见表3所示;由于受耕层调查数据所限,本文重点分析坡耕地耕层厚度及土壤肥力指标变化特征。根据对紫色土坡耕地30个耕层样本统计分析可见(表3),耕层土壤质量均处于中等程度变异性,其中耕层厚度在15~25 cm之间变化,变异性仅为12.18%;而有效土层厚度变化幅度为15~80 cm,变异系数可达37.26%,这说明紫色土坡耕地耕层厚度比较稳定,但土壤侵蚀危险性较大,有效土层厚度可相差5倍以上。坡耕地耕层土壤有机质平均

质量分数为 13.04 g/kg、变异系数 39.88%；阳离子交换量为 23.35 cmol(+)/L，变异系数为 18.42%；土壤全氮、有效磷的平均质量分数分别 0.91、12.03 g/kg，相应变异系数分别为 31.87%、94.51%；土壤有效磷变异系数最大，总体上紫色

土坡耕地耕层土壤物理指标变异性小于化学指标变化。根据紫色土土壤侵蚀和农业生产特点，基于重庆市一、二级地力水平，认为紫色土坡耕地耕层厚度适宜值在 20~25 cm 之间，有效土层厚度适宜值在 40~60 cm 之间。

表 3 坡耕地耕层土壤质量的诊断指标变化
Table 3 Change of soil diagnosis index of cultivated-layer for slope farmland

诊断指标 Evaluation index	统计特征 Statistical characteristics						适宜性 特征值 Suitability eigenvalue	诊断指标对产量形成作用 Effect of diagnostic index for crop yield			
	样本数 Number of sample	最大值 Maximum Value	最小值 Minimum Value	平均值 Average Value	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%		S	T	F	G
有效土层厚度 Effective thickness of soil layer/cm	30	80	15	35	13.04	37.26	30~50	+	-	-	+
耕层厚度 Topsoil thickness/cm	30	25	15	20.03	2.44	12.18	18~25	+	+	+	*
土壤有机质 Soil organic matter/(g·kg ⁻¹)	30	32.30	5.29	13.04	5.20	39.88	8.99~22.8	*	+	+	+
阳离子交换量 Cation exchange capacity/(cmol(+)-L ⁻¹)	20	16.3	22.5	23.35	4.30	18.42	21.1~32.1	*	*	+	*
土壤全氮 Soil total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	30	1.79	0.41	0.91	0.29	31.87	0.66~1.02	*	*	+	*
土壤有效磷 Soil available P/(mg·kg ⁻¹)	30	51	1.20	12.03	11.37	94.51	6.3~18	*	*	+	*

注：1) S-保水作用，T-保土作用，F-保肥作用，G-稳定耕层作用。2) “+”、“-”分别反映该指标在坡耕地产量形成过程中所发挥的保水、保土、保肥、稳定耕层正效应、负效应，“*”表示无明显正、负效应。3) 适宜性特征值为一、二级地力的土壤指标均值。
Note: 1) S-soil water retention, T-soil retention, F-fertilizer retention, G-Stable plowing effect. 2) “+”, “-” reflect the indicators in the formation of sloping land production in the process of water conservation, soil conservation, fertilizer, stable tillage positive effect, negative effects, respectively, “*” indicating no significant positive and negative effects. 3) Suitability eigenvalue is the average value of soil index for first-class or first-class slope cultivated land.

在土壤侵蚀有效控制前提下，产量是坡耕地土壤管理的最终目标，因此较为系统地总结了紫色土坡耕地不同地力水平的土壤质量及相应产量水平如表 4 所示。一、二等地力水平坡耕地土壤质量具有类似特点，主要表现为耕层厚度 21 cm，有效土层厚度 40~45 cm，耕作层土壤结构为粒状，土壤有机质、阳离子交换量、全氮、有效磷分别在 12.60~15.96 g/kg、23.88~30.67 cmol(+)/L、0.86~0.94 g/kg、9.12~21.40 g/kg 范围变化；而五等地力水平坡耕地，其耕

层厚度 19 cm，有效土层厚度为 31.4 cm；耕层土壤阳离子交换量为 23.88~30.67 cmol(+)/L，未表现出明显下降趋势；而土壤有机质和土壤有效磷仅为一级地力水平的 61.65%和 28.13%下降明显。此外从表 1 中万州、云阳坡度与坡耕地地力水平看，其与坡度呈明显负相关，15° 以上坡耕地基本处于四级、五级水平；坡度越大，虽然耕层土壤有机质、阳离子交换量、全氮等肥力因素不是最低，但农作物产量表现最低，仅为一级地力水平的 42.6%。

表 4 不同地力水平紫色土坡耕地耕层土壤质量特征
Table 4 Soil quality characteristics of cultivated-layer for slope farmland under different soil fertility levels

地力等级 Land productivity level	剖面 厚度 Profile thickness/ cm	土壤 质地 Soil texture	土壤结构 Soil structure	土壤 紧实度 Soil compaction	土壤 有机质 Soil organic matter/ (g·kg ⁻¹)	阳离子 交换量 Cation exchange capacity/ (cmol(+)-L ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	有效 土层厚度 Effective thickness of soil layer/cm	坡度 Slope/ (°)	作物产量 Crop yield/ (t·hm ⁻²)
一等 Level 1	耕作层 Topsoil	21	中壤	粒状	疏松	15.96	30.67	0.94	21.40		
	心土层 Subsoil	21~38	中壤	小块状	较紧实	9.28	22.63	0.51	5.95	45	0~6
	底土层 Bottom soil	>38	轻粘	小块状	较紧实	6.76	19.4	0.80	4.73		9.6
二等 Level 2	耕作层 Topsoil	21	砂壤	粒状	疏松	12.60	23.88	0.86	9.12		
	心土层 Subsoil	21~42	重壤	小块状	较紧实	21.33	23.88	0.66	4.35	40	5~15
	底土层 Bottom soil	>42	中壤	小块状	较紧实	6.57	23.92	0.52	1.51		8.63
三等 Level 3	耕作层 Topsoil	20	重壤	粒状	疏松	16.95	19.58	1.12	18.98		
	心土层 Subsoil	20~38	重壤	小块状	疏松	10.42	18.7	0.72	5.39	37.5	10~15
	底土层 Bottom soil	>38	重壤	整体状	紧实	10.30	19.4	0.74	5.90		7.35
四等 Level 4	耕作层 Topsoil	21	砂壤	粒状	疏松	10.87	20.98	0.77	7.20		
	心土层 Subsoil	21~31	重壤	小块状	较紧实	6.96	21.13	0.58	2.75	29.1	10~22
	底土层 Bottom soil	>31	重壤	块状	较紧实	8.54	22.2	0.52	3.77		6.30
五等 Level 5	耕作层 Topsoil	19	砂壤	粒状	疏松	9.84	23.17	0.85	6.02		
	心土层 Subsoil	20~40	重壤	小块状	紧实	6.22	23.5	0.52	1.8	31.4	15~25
	底土层 Bottom soil	40~80	重壤	小块状	紧实	4.19	21.7	0.526	1.58		5.51

注：1) 地力等级划分按照重庆市确定的等级体系；2) 种植作物都为麦、玉、薯等当地常种作物。
Note: 1) The division of the gravitational hierarchy is based on the grading system of Chongqing; 2) Planting crops are wheat, jade, potato and other local crops.

不同地力水平坡耕地耕层土壤肥力指标均表现为耕作层>心土层>底土层, 心土层与底土层差异不很明显; 一、二等地力水平的耕层构型总体都表现为上虚下实型, 土壤质地、紧实度的垂直分布及组合特点是影响耕层剖面结构性能的主要因素。而三级以下地力水平耕层构型则表现为近似全虚或全实的剖面结构, 土壤质地的层次分布特征也反映了这一特点, 这会导致坡耕地蓄水、保土、保肥能力显著降低, 最终表现为坡耕地农作物产量下降 50%左右。

2.2 坡耕地耕层土壤入渗及耕性分析

坡耕地耕层透水性与持水性能直接关系耕层坡面径流侵蚀能力及耕作土壤抗旱性能, 由于耕作活动对耕层土壤表现为均匀化、机械性松动的过程, 而坡面地表径流会造成耕层土壤分选性搬运和输移过程, 从而造成耕

层土壤物理、力学性能差异性表现, 以万州刘家沟小流域不同坡位坡耕地为例进行分析(表 5)。土壤容重是反映坡耕地耕层质量的重要物理指标之一, 与土壤透气性、透水性及农作物根系生长密切相关。坡耕地土壤容重总体表现为上坡(1.52 g/cm³)>下坡(1.47 g/cm³)>中坡(1.26 g/cm³), 中部土壤容重最小, 这是由于中部位置粉粒、砂粒、粘粒组成配比适合, 表土层与心土层孔隙度均比上坡和下坡同层次大; 而不同坡位坡耕地耕层土壤容重均表现为 0~20、20~40、40~60 cm 依次增大现象, 呈现上虚下实型耕层剖面结构。土壤饱和导水率随着土壤容重增大而减小, 由大到小依次为中坡(1.42 mm/min)>下坡(0.98 mm/min)>上坡(0.91 mm/min), 反映出中坡位置坡耕地耕层蓄水性能较上坡位和下坡位更为适宜。

表 5 坡耕地耕层土壤入渗特征与径流侵蚀特征

Table 5 Soil infiltration characteristics and its runoff erosion of cultivated-layer for slope farmland

坡位 Slope position	土层 深度 Soil layer depth	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	饱和 导水率 Saturated hydraulic conductivity/ (mm·min ⁻¹)	孔隙度 Porosity/ %	颗粒组成 Particle composition(%)			土壤入渗特征 Soil infiltration rate (mm/min)			土壤抗剪 强度 Soil shearing strength/ (kg·cm ⁻²)	贯入阻力 Penetration resistance/ kPa
					粉粒 Silt (1~0.05 mm)	砂粒 Sand (0.05~0.001 mm)	粘粒 Clay (<0.001mm)	初始 Initial	稳定 Steady	30 min		
上坡 Top slope	0~20	1.42Ca	1.03Ac	46.26Ac	55.61Bc	24.59Ba	19.80Aa	13.88Bc	2.87Ac	2.15Ac	8.58Ca	227.25Ca
	>20~40	1.56Bb	0.90Bb	41.23Ab	43.60Bb	30.00Bc	26.40Ab	10.68Ab	1.95Ab	0.89Ab	16.24Cb	484.80Bc
	>40~60	1.57Bb	0.81Aa	40.70Aa	39.21Ba	27.99Bb	32.80Cc	0.00Aa	0.00Aa	0.00Aa	19.30Cc	474.70Bb
	平均值	1.52	0.91	42.73	46.14	27.53	26.33	5.85	1.61	1.01	14.71	395.58
中坡 Middle slope	0~20	1.14Aa	2.01Cc	56.88Cc	42.80Ac	26.60Ca	30.60Cc	251.67Cc	6.72Cb	9.35Cb	4.92Ba	121.20Ba
	>20~40	1.22Ab	1.23Cb	54.08Cb	35.60Aa	37.40c	27.00Ba	35.25Bb	10.25Bc	15.12Bc	11.76Bb	611.05Cb
	>40~60	1.41Ac	1.02Aa	46.79Ba	37.01Ab	33.99Cb	29.00Bb	8.00Ba	5.14Ba	2.27Aa	16.02Bc	1035.25Cc
	平均值	1.26	1.42	52.58	38.47	32.66	28.87	86.56	1.71	8.91	10.90	589.17
下坡 Bottom slope	0~20	1.34Ba	1.18Bc	49.40Bc	66.40Cc	11.00Aa	22.60Ba	13.50Aa	4.33Ba	2.95Ba	3.44Aa	165.65Aa
	>20~40	1.50Bb	0.95Bb	43.34Ba	55.00Cb	16.60Ab	28.40Cc	90.67Cb	54.25Cc	26.13Cc	5.91Ab	267.65Ab
	>40~60	1.57Aa	0.82Ba	48.41Cb	51.80Ca	20.40Ac	27.80Ab	120.83Cc	18.50Cb	22.81Cb	8.91Ac	409.05Ac
	平均值	1.47	0.98	47.05	57.73	16.00	26.27	75.00	25.69	17.30	6.09	247.45

注: 1) 同列数据不同大写字母表示同一垂直深度不同坡位差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一坡位不同垂直深度差异显著 ($P<0.05$); 2) 当地 2 a 一遇最大降雨强度为 0.49 mm/min, 5 a 一遇最大降雨强度为 0.63 mm/min, 10 a 一遇最大降雨强度为 0.74 mm/min。

Note: 1) Values followed by different capital letters in a column indicate that the same vertical depth and different slope position is significant differences ($P<0.05$), different small letters in a column indicate that the same slope position and different vertical depth is significant differences ($P<0.05$); 2) The maximum rainfall intensity of the local 2 a is 0.49 mm/min, the maximum rainfall intensity of 5a is 0.63 mm/min, the maximum rainfall intensity of 10a is 0.74 mm/min.

不同坡位紫色土耕层、不同垂直深度的土壤入渗特征差异显著 ($P<0.05$), 不同坡位耕层土壤入渗变化均表现为初始入渗率>30 min 入渗率>稳定入渗率, 这一现象造成原因入渗初期, 土壤处于未饱和状态, 而随着入渗过程进行土壤达到饱和状态, 同时土壤细小颗粒在下渗过程中堵塞土壤孔隙, 从而导致入渗速率减小并最终稳定在一个入渗水平。土壤初始入渗以中坡(85.56 mm/min)最大, 是上坡土壤初始入渗 14.63 倍; 而土壤稳定入渗变化则表现为下坡(25.69 mm/min)>中坡(1.71 mm/min)>上坡(1.61 mm/min), 这主要是由于下坡位的坡耕地耕层土壤粉粒含量在 50%以上且导致土壤孔隙垂直分布较为均匀, 因此具有较大土壤稳定入渗率, 土壤质地和孔隙度是影响耕层蓄水性能的主要因素。

土壤抗剪强度指土壤受到剪应力作用时土体抵抗土粒或土团剪切变形破坏的阻力, 可用于评价土壤抗侵蚀

性能与耕作性能。坡耕地土壤抗剪强度平均值表现为上坡(14.71 kg/cm²)>中坡(10.90 kg/cm²)>下坡(6.09 kg/cm²), 耕层(0~20 cm)抗剪强度也表现为上坡(8.58 kg/cm²)>中坡(4.92 kg/cm²)>下坡(3.44 kg/cm²), 这说明上坡土壤耕层具有较强抵抗剪切破坏能力, 同时具有较高力稳定性。对于 3 个坡位而言, 土壤抗剪强度均表现为随土层深度而逐渐增大趋势, 以中坡抗剪强度增加幅度最大, 其底土层土壤抗剪强度为表土层 3.24 倍, 上坡和下坡其土壤抗剪强度增加幅度接近, 保持在 2.5 倍左右, 这可能会成为农作物根系生长和产量形成的潜在障碍因素; 而耕层(0~20 cm)抵抗剪切破坏能力最弱, 这在一定程度上可解释土壤侵蚀是造成坡耕地耕层退化主要原因, 以及坡耕地产量较同区域基本农田产量明显偏低现象。此外农作物正常生长除了适宜水肥条件外, 还需要有适宜的土壤松紧度。由表 5 可见, 坡耕地土壤贯入阻力总体表现为中坡(589.17 kPa)>上坡

(395.58 kPa)>下坡(247.45 kPa),各坡位耕层(0~20 cm)贯入阻力为上坡(227.25 kPa)>下坡(165.65 kPa)>中坡(121.20 kPa),但土壤贯入阻力垂直变化幅度差异明显,中坡20~40 cm心土层和底土层贯入阻力增大至耕层的5.04和8.54倍。一般而言,坡面中部位置也是坡耕地最为集中分布地带,虽然耕性蓄水性能较其他坡位存在优势,但农作物根系生长难以穿透土壤层,存在一定物理障碍,这在农业生产应引起足够重视。

2.3 坡耕地耕层土壤水库及持水性能分析

土壤水库是整个非饱和带土层的蓄水空间,土壤总库容包括死库容、兴利库容和滞洪库容;土壤水库库容对分析土壤抗旱能力及区域土壤侵蚀的潜在危害性有重要作用^[2]。耕层土壤水库具有贮蓄天然降水的功能,能满足

农作物正常生长需求;土壤水库蓄水能力及其变化特征直接影响到坡耕地耕层抵御季节性干旱的能力。由不同坡位坡耕地耕层土壤水库特征(表6)可知,坡耕地耕层不同坡位、不同垂直深度土壤水库、持水能力差异显著($P<0.05$);土壤总库容以坡耕地中坡最大(858.86 t/hm²),下坡次之(837.57 t/hm²),而上坡最小(788.11 t/hm²),这与坡耕地土壤饱和含水量、田间持水量、凋萎含水量变化相同,均表现为中坡>下坡>上坡;土壤死库容与总库容变化规律一致,这说明在坡耕地中部位置,土壤水库无效水分较多、农作物可利用水分较少、土壤水分循环效率较低;土壤最大有效库容表现为下坡(736.91 t/hm²)>上坡(727.82 t/hm²)>中坡(724.91 t/hm²),但上坡位和中坡位之间差异不明显。

表 6 坡耕地耕层土壤水库特征及持水性能特征

Table 6 Soil reservoir characteristics and its soil water holding capacity of cultivated-layer for slope farmland

坡位 Slope position	土层深度 Soil layer depth(cm)	土壤含水量特征 Soil moisture content characteristics/%			土壤水库特征库容 Characteristic reservoir capacity of soil reservoir/(t·hm ⁻²)				
		饱和含水量 Saturated water content	田间持水量 Field capacity	凋萎含水量 Wilting point	总库容 Total storage capacity	死库容 Dead storage capacity	兴利库容 Active storage capacity	滞洪库容 Flood detention storage capacity	最大有效库容 Maximum available capacity
上坡 Top slope	0~20	27.86Aa	23.03Aa	2.38Aa	791.22Aa	67.59Aa	586.46Aa	137.17Aa	723.63Aa
	>20~40	25.24Ab	22.67Aa	1.83Ab	787.49Aa	57.10Ab	650.21Ab	80.18Ab	730.39Aa
	>40~60	25.02Bb	22.33Aa	1.79Ab	785.63Aa	56.21Ab	644.96Bb	84.47Ac	729.42Aa
	平均值	26.04	22.68	2.00	788.11	60.30	627.21	100.61	727.82
中坡 Middle slope	0~20	37.84Ba	31.63Ba	6.13Ba	862.75Ba	139.76Ba	581.40Aa	141.59Ba	722.99Aa
	>20~40	35.17Bb	30.42Bb	5.50Bb	858.15Ba	134.20Bb	608.05Bb	115.90Bb	723.95Aa
	>40~60	30.78Ac	28.36Bc	4.60Bc	855.68Ba	127.88Bc	660.53Bc	67.28Bc	727.80Aa
	平均值	34.26	30.14	5.41	858.86	133.95	616.66	108.25	724.91
下坡 Bottom slope	0~20	35.71Ca	30.40Ba	5.94Ca	957.03Ca	159.20Ca	655.45Ba	142.31Bc	797.76Bc
	>20~40	28.10Cb	23.65Bb	2.95Cb	843.00Bb	88.41Cb	621.09Bb	133.50Cb	754.59Bb
	>40~60	26.01Bc	23.31Cb	1.98Cc	712.67Cc	54.28Ac	584.41Ac	73.98Ca	658.39Ba
	平均值	29.94	25.79	3.62	837.57	100.65	620.32	116.6	736.91

注: 同列数据不同大写字母表示同一垂直深度不同坡位差异显著($P<0.05$), 不同小写字母表示同一坡位不同垂直深度差异显著($P<0.05$)。

Note: Values followed by different big letters in a column indicate that the same vertical depth and different slope position is significant differences ($P<0.05$), different small letters in a column indicate that the same slope position and different vertical depth is significant differences ($P<0.05$).

在紫色土坡耕地不同坡位,土壤持水性能随耕层深度呈现增加趋势,坡耕地兴利库容0~20 cm耕层为581.40~655.45 t/hm²,20~40 cm心土层则在608.05~650.21 t/hm²变化,而40~60 cm底土层为584.41~660.53 t/hm²。在上坡和中坡位置,土壤最大有效库容在表土层、底土层与心土层之间差异不明显;而在下坡,其土壤兴利库容和最大有效库容则表现为表土层>心土层>底土层,说明20~60 cm土层持水性能下降。由表6中土壤含水量特征和表2土壤最大蓄水能力和有效水分定义可知,坡耕地上、中、下坡0~40 cm土层最大蓄水能力(饱和持水量)分别106.2、146.02、127.62 mm,所能接纳的土壤有效水分依次为82.98、100.84、90.32 mm,坡耕地蓄存降水可被农作物利用率在70%左右变化。研究表明对于不存在障碍性层次土壤,有10%以上根系分布在20~35 cm土层中,因此在坡耕地合理耕层构建中,应重视坡耕地耕层土壤水库调控和利用,提高坡耕地抵御季节性干旱的能力。

2.4 坡耕地耕层类型及障碍因素评价

耕层类型划分有助于分析影响坡耕地土壤质量变化

的主要生态过程和障碍因素,本文根据坡耕地耕层有效土层厚度、耕层厚度、土壤有机质、土壤全氮、土壤有效磷5个指标对30个坡耕地耕层样本(表1)采用离差平方和法(Ward法)进行个案(Q型)系统聚类分析,为了更好地表现出坡耕地耕层类间差异性,将距离阈值定为5,依次得到耕层聚类分析的并类过程和谱系图,可将30个坡耕地耕层样本分为4类。

第I类包括19、27、9、22、16、18、1、2、8、6、3、15、17、12、26、7、11共17个耕层样本,该类耕层厚度为20.6 cm,有效土层厚度为40.9 cm,土壤有机质为13.05 g/kg,土壤全氮为0.96 g/kg,土壤有效磷为9.87 mg/kg;本类耕层特点表现为土壤质量各指标均处于适宜值范围;该类耕层类型中具有最大耕层厚度25 cm(耕层16、17样本)。第II类包括24、25、13、29、5、14、20、4、30共9个耕层样本,其耕层厚度为19.4 cm,有效土层厚度为21 cm,土壤有机质为9.77 g/kg,土壤全氮为0.71 g/kg,土壤有效磷为7.35 mg/kg。本类耕层除有效土层厚度(21 cm)低于适宜值水平外,其余土壤质量指标均处于适宜值水平;该类耕层具有最大耕层厚度

25 cm (耕层 29 样本)。第 III 类包括 21、28、23 共 3 个耕层样本, 耕层厚度为 18.3 cm, 有效土层厚度为 28.3 cm, 土壤有机质为 23.9 g/kg, 土壤全氮为 1.03 g/kg, 土壤有效磷为 41 mg/kg; 表现为有效土层厚度 (28.3 cm) 低于适宜水平, 耕层厚度处于适宜水平, 而土壤有机质、全氮、有效磷均高于适宜水平; 其中耕层 23 样本的土壤有机质 (32.3 g/kg)、耕层 21 样本的土壤有效磷 (51.00 mg/kg) 为 30 个样本最高值。第 IV 类只有耕层 10 样本, 其有效土层厚度 80 cm, 耕层厚度 20 cm, 土壤有机质 9.68 g/kg, 土壤全氮 0.67 g/kg, 土壤有效磷仅为 4 mg/kg, 本类耕层有效土层厚度 (80 cm) 远高于紫色土坡耕地适宜水平和平均厚度 (35 cm), 而土壤有效磷 (4 mg/kg) 远低于正常水平。

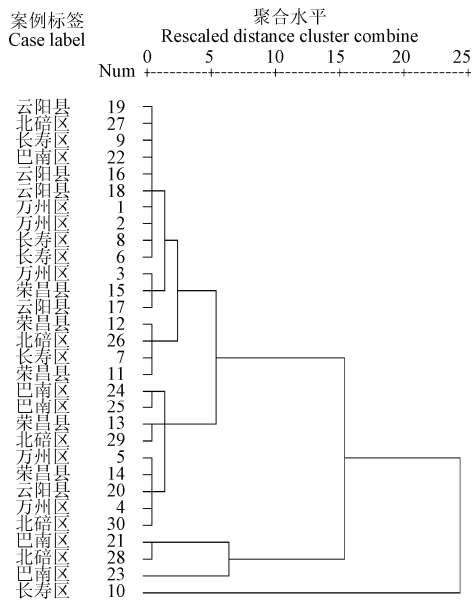


图 2 坡耕地耕层类型聚类分析谱系图

Fig.2 Hierarchical cluster graph for plough layer type of slope farmland

根据对耕层类型聚类谱系的综合分析可见, 紫色土坡耕地耕层土壤质量限制因素主要表现为有效土层厚度

限制型 (第 II 类)、耕层厚度限制型 (第 III 类) 和土壤养分限制型 (第 IV 类), 分别占耕层样本总量 30%、10%、3%, 这说明紫色土坡耕地合理耕层建立应重点关注对有效土层厚度和耕层厚度建设调控; 同时结合对紫色土坡耕地耕层土壤质量、入渗持水性能分析, 初步拟定紫色土合理耕层诊断和建设标准为: 有效土层厚度 50~60 cm、耕层厚度 20~25 cm、土壤容重 1.2~1.4 g/cm³、土壤有机质>14.13 g/kg、阳离子交换量>26.14 cmol(+)/L、土壤全氮>0.898 g/kg、土壤有效磷>20 mg/kg。本文认为与坡耕地侵蚀控制、生产能力密切相关的耕层厚度、田面坡度、土壤容重、土壤质地、土壤饱和导水率、土壤有机质应为紫色土坡耕地合理耕层评价的最小数据集 MDS (Minimum data sets) 主要指标, 合理耕层构建应以耕层厚度、有效土层厚度、耕层剖面构建等土壤物理性质为重点。

3 讨论

3.1 土壤侵蚀及耕作活动对坡耕地耕层厚度的作用

耕层厚度浅化一方面由于机械压实导致的犁底层上移, 另一方面在于土壤侵蚀导致的土壤退化。紫色土坡耕地多采用人力锄耕方式, 在耕层剖面中只发现厚度约 0.8~1.0 cm 类似犁底层结构; 因此其耕层浅薄化主要在于严重土壤侵蚀过程。研究表明, 土壤侵蚀退化机理可分为土壤薄层化过程、土壤养分循环失衡、土壤性质劣化和贫瘠化、土壤砂质化和砾质化 4 个方面^[15]; 紫色土退化类型分为土壤物理性退化、土壤构造性退化和土壤营养性退化 3 类, 退化紫色土具有粗骨性、易蚀性、易旱性特征^[16]; 川中丘陵区坡耕地土层深度由耕作侵蚀和水蚀共同作用^[17], 人为耕作扰动使土壤颗粒组成、孔隙结构发生显著变化^[18]; 人类耕作措施不当和种植制度不合理等活动是三峡库区紫色土坡地土壤退化的主要驱动力^[19]。根据对紫色土坡耕地农业生产调查并综合相关研究成果^[20-23], 对各种农业耕作活动对耕层土壤扰动深度以及土壤侵蚀程度对耕层浅薄化影响做了对比分析 (表 7)。

表 7 耕作活动与土壤侵蚀对坡耕地耕层厚度作用

Table 7 Effect of tillage activities and soil erosion on cultivated-layer thickness for slope farmland

耕作活动 Cultivation activity	扰动深度 Disturbance depth/cm	土壤侵蚀对土层厚度影响 Effects of soil erosion on soil thickness/mm				
		侵蚀程度 Erosion degree	坡度 Slope/(°)	年均流失厚度 Annual average loss thickness	年均成土厚度 Annual average soil formation thickness	年均耕层薄化度 Annual average topsoil thinning out thickness
整地 Soil preparation	20~30	I 微度侵蚀	3	0.8	0.96	-0.16
播种 Seeding	5~10	II 轻度侵蚀	>3~5	>0.8~2	0.96	-0.16~1.04
除草 Weeding	5~10	III 中度侵蚀	>5~8	>2~4	0.96	1.04~3.04
中耕 Intertillage	15~20	IV 强度侵蚀	>8~15	>4~6	0.96	3.04~5.04
收获 Harvest	>20~30	V 极强度侵蚀	>15~25	>6~12	0.96	5.04~11.04
秸秆、绿肥还田 Straw and green manure returning	>30~40	VI 剧烈侵蚀	>25	>12	0.96	>11.04

注: 1) 沙溪庙组和蓬莱镇组成土速率为 1200 t/(km²·a)^[19], 按照紫色土平均容重 (1.25 g/cm³) 计算流失厚度和成土厚度, 耕层初始厚度 40 cm;

2) 年均耕层厚度薄化值=年均流失厚度-成土厚度; 当年均耕层厚度薄化值>0 时, 抗侵蚀年限=耕层初始厚度/年均耕层厚度薄化值。

Note: 1) The soil formation rate of Shaximiao group and Penglai town group are 1200 t/(km²·a)^[19], according to the average density(1.25g/cm³) of purple soil, calculating the loss thickness and the soil formation thickness. The initial thickness of the topsoil is 40 cm; 2) Annual average topsoil thinning out thickness = annual average loss thickness-soil formation thickness; when annual average topsoil thinning out thickness is more than 0, erosion age= initial thickness of the topsoil / annual average topsoil thinning out thickness.

坡耕地耕层薄化值随侵蚀程度加深而增大，当坡耕地为 I 微度侵蚀时，耕层厚度年均增加 0.16 mm；而当坡耕地为 II 轻度侵蚀时，年均耕层厚度薄化值为 -0.16 ~ 1.04 mm，III 中度侵蚀时年均耕层厚度薄化值为 1.04 ~ 3.04 mm；当坡耕地坡度大于 25° 时，其年均耕层厚度薄化值高于 11 mm。在紫色丘陵区农作物产量下降速率与铲土厚度（侵蚀程度）呈递增指数关系，在铲土 10 cm 条件下，玉米、小米产量减少 10.5%^[24]；朱波等^[25]研究发现，土层厚度是紫色丘陵区雨养农业条件的重要限制因子，从土壤抵御夏季连续干旱角度而言，60cm 土层厚度可作为紫色土坡地生产力的临界土层厚度。因此，耕层厚度和全土层厚度保持和调控是紫色土坡耕地水土保持和土壤生产力保持的根本条件。

3.2 坡耕地合理耕层构型及调控

坡耕地合理耕层在一定耕作制度下，可持续维持农作物正常生长且能实现侵蚀控制双重目标的坡耕地耕层土壤质量基准（benchmark），采用在地块尺度上可综合反映土壤生产力过程和土壤侵蚀控制的土壤属性（或多）指标表征。坡耕地耕层剖面构型指土壤质地、容重、孔隙度、机械阻力在土壤中的垂直分布特征，对于特定耕层构型而言，耕层厚度及土壤有效厚度是影响耕层水分库、养分库容量的关键因素。紫色丘陵区 73% 坡地土层厚度分布在 20~60 cm，其中 20~40、40~60 cm 土层厚度比例分别为 32%、41%^[25]。根据耕层研究^[1]及紫色土区农业生产实践，可将紫色土坡耕地土体分为耕作层、心土层、底土层（图 3a），其中耕作层又分为表土层（0~15 cm）和犁底层（15~20 cm）。心土层（20~40 cm）土壤结构比较紧密，透水通气性能较差，养分水分因素比较稳定，可供作物后期生长的需求。而底土层（>40 cm）对农作物产量形成几乎没有调控作用。深松技术可通过深翻心土层、爆破改土或打破犁底层，增加耕层厚度（图 3b），深松条件下耕作层分为活动层、稳定层、保证层。深松技术通过改善耕层剖面结构、降低耕层土壤容重、提高土壤孔隙度以改善农作物根系生长空间和条件，优化土壤蓄水保土肥效，从而实现农作物增产稳产目标；但针对紫色丘陵区年降雨量较大且土壤具粗骨性特点，深松时间和周期对坡耕地侵蚀控制和持续利用非常关键。

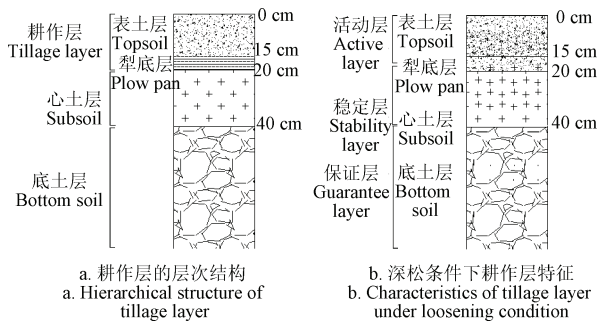


图 3 耕层土壤剖面构型分析

Fig.3 Analysis of soil profile configuration

农户水土保持行为是地块尺度上坡耕地合理耕层构建的主要社会经济因素，土壤侵蚀农户边际损失^[26]指单

位土壤侵蚀厚度引起的土壤生产力下降水平，是引导农民实施土壤管理措施的主要驱动力。由图 4 可知，对于表土层厚薄不同的 C 地块（土层厚度在 a-b 范围变化）和 D 地块（土层厚度在 c-d 范围变化），同样 4 cm 表土层厚度改变，C 地块产量下降 10 个单位，而 D 地块产量下降 0.8 个单位，即原表土层浅薄地块其土壤侵蚀边际农户成本更高、产量提升潜力更高、土壤管理措施更为必须。

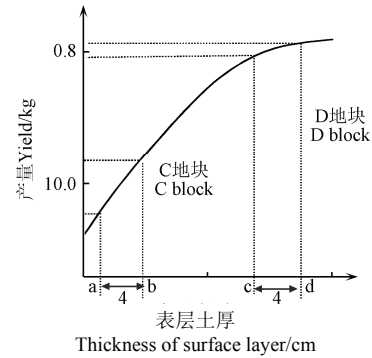


图 4 土壤侵蚀农户边际损失^[26]

Fig.4 Marginal losses of farmers caused by soil erosion

由此拟定土壤管理临界表土层厚度是坡耕地水土保持重要量化依据，在三峡库区耕地土壤厚度预警标准为表层厚度 < 15 cm、全土层厚度 ≤ 50 cm，理想标准为表层厚度 ≥ 20 cm、全土层厚度 > 50 cm，可实施土壤环境重建“RUSLE”工程^[27]。紫色土坡耕地水土保持 RUSLE 工程核心在于以降低土壤可蚀性为目标改良耕作土壤理化性质并保持一定厚度耕作土层，以保土排水为目标实施可改善坡耕地微观地形改造工程（生物梯田、植物篱和生物篱埂），以降低坡耕地土壤侵蚀危险性和季节性干旱危险性^[28]。相关研究表明，虚实并存耕层是提高土地生产力和农田水分利用效率的最优耕层结构，也是旱作农区合理耕层构建的重要途径^[29]；生物炭即能提高土壤导水率以减少地表径流和土壤侵蚀发生，同时也可增加土壤有效持水量，有利于农作物抗旱^[30]。

4 结论

1) 紫色土坡耕地耕层土壤质量具有中等程度变异性，土壤物理指标变异性小于化学指标变化；耕层厚度 15~25 cm、有效土层厚度 15~80 cm，两者变异系数分别为 12.18%、37.26%；耕层土壤有效磷变异系数最大（94.51%）；五等地力坡耕地土壤肥力指标未明显下降，但耕层厚度、有效土层厚度明显变薄，产量下降可达 50% 左右；而三级以下地力耕层构型为近似全虚或全实剖面结构。

2) 紫色土坡耕地不同坡位、不同垂直深度的耕层土壤容重、入渗、耕性差异显著。土壤容重为上坡 (1.52 g/cm³) > 下坡 (1.47 g/cm³) > 中坡 (1.26 g/cm³)，土壤稳定入渗为下坡 (25.69 mm/min) > 中坡 (1.71 mm/min) > 上坡 (1.61 mm/min)，土壤抗剪强度平均值及耕层 (0~20 cm) 均表现为上坡 > 中坡 > 下坡，而土壤贯入阻力表现为中坡 (589.17 kPa) > 上坡 (395.58 kPa) > 下坡 (247.45 kPa)；除土壤入渗外，土壤

容重、抗剪强度、贯入阻力均表现为底土层>心土层>耕层。

3) 在紫色土坡耕地不同坡位, 土壤持水性能随耕层垂直深度呈增加趋势但差异不明显, 坡耕地土壤总库容以中坡最大(858.86 t/hm²), 下坡次之(837.57 t/hm²), 而上坡最小(788.11 t/hm²); 上、中、下坡0~40 cm土层最大蓄水能力分别106.20、146.02、127.62 mm, 该土层中蓄存降水可被农作物利用70%左右。

4) 紫色土坡耕地耕层土壤质量具有明显水蚀对耕作扰动的累积效应, 中度侵蚀程度坡耕地, 年均耕层厚度薄化值为1.04~3.04 mm; 其合理耕层建立以实现土壤侵蚀有效控制和土壤生产力稳定保持为目标, 有效土层厚度、耕层厚度、土壤容重、土壤抗剪强度、土壤有机质、土壤渗透性可作为坡耕地合理耕层评价最小数据集, 耕层构型总体上虚下实型。

5) 紫色土坡耕地耕层类型可分为4类, 障碍耕层主要为有效土层厚度限制型(第II类)、耕层厚度限制型(第III类)和土壤养分限制型(第IV类), 初步拟定其合理耕层诊断和建立标准为有效土层厚度50~60 cm、耕层厚度20~25 cm、土壤容重1.2~1.4 g/cm³、土壤有机质>14.13 g/kg、土壤有效磷>20 mg/kg。

[参 考 文 献]

- [1] 韩晓增, 邹文秀, 陆欣春, 等. 旱作土壤耕层及其肥力培育途径[J]. 土壤与作物, 2015, 4(4): 145—150.
Han Xiaozeng, Zou Wenxiu, Lu Xinchun, et al. The soil cultivated layer in dryland and technical patterns in cultivating soil fertility[J]. Soil and Crop, 2015, 4(4): 145—150. (in Chinese with English abstract)
- [2] 史德明, 韦启潘, 梁音, 等. 中国南方侵蚀土壤退化指标体系研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 1—9.
Shi Deming, Wei Qipan, Liang Yin, et al. Study on degradation index system of eroded soils in southern china[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(3): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [3] 赵燮京, 刘定辉. 四川紫色丘陵区旱作农业的土壤管理与水土保持[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 6—10, 16.
Zhao Xiejing, Liu Dinghui. Soil Management and Soil and Water Conservation of Dryland Agriculture in Sichuan Purple Hilly[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(5): 6—10, 16. (in Chinese with English abstract)
- [4] 闫一凡, 刘建立, 张佳宝. 耕地地力评价方法及模型分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 204—210.
Yan Yifan, Liu Jianli, Zhang Jiabao. Evaluation method and model analysis for productivity of cultivated land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(5): 204—210. (in Chinese with English abstract)
- [5] Pierce F C, Larson W E, Dowdy R H, et al. Productivity of soils: Assessing long-term changes due to erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983(38): 39—44.
- [6] Ddela R, Moreno J A, Mayol F, et al. Assessment of soil erosion vulnerability in western Europe and potential impact on crop productivity due to loss of soil depth using the ImpelERO model[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2000, 81(3): 179—190.
- [7] 全国农业技术推广服务中心. 耕地地力评价指南[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006: 14—18.
- [8] James R. Pease, Robert E. Coughlin. Land Evaluation and Site Assessment: A guidebook for Rating Agricultural Lands, Second Edition[M]. Ankeny, Iowa: Soil and Water Conservation Society, 2014.
- [9] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区侵蚀土壤质量评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 285—293.
Xu Mingxiang, Liu Guobin, Zhao Yunge. Quality assessment of erosion soil on hilly Loess Plateau[J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2005, 11(3): 285—293. (in Chinese with English abstract)
- [10] 钱凤魁, 王秋兵, 边振兴, 等. 凌源市耕地质量评价与立地条件分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 325—329.
Qian Fengkui, Wang Qiubing, Bian Zhenxing, et al. Farmland quality evaluation and site assessment in Lingyuan city[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 325—329. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王芳, 卓莉, 覃新导, 等. 广东边际性土地能源植物种植潜力适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 276—284.
Wang Fang, Zhuo Li, Qin Xindao, et al. Evaluation on suitability of planting potential of energy plants on marginal land of Guangdong Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(19): 276—284. (in Chinese with English abstract)
- [12] Gunther Fischer, Harrij van Velthuisen, Mahendra Shah, et al. Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results[M]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2002.
- [13] Lothar Mueller, Uwe Schindler, Wilfried Mirschel, et al. Assessing the productivity function of soils: A review[J]. Agronomy of Sustainable Development, 2010, 30: 601—614.
- [14] 李伟主. 重庆耕地地力研究与评价(一)(二)(三)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [15] 程冬兵, 蔡崇法, 左长清. 土壤侵蚀退化研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 252—254.
Cheng Dongbing, Cai Chongfa, Zuo Changqing, et al. Advances in research of soil degradation by erosion[J]. Soil and Water Conservation Research, 2006, 13(5): 252—254. (in Chinese with English abstract)
- [16] 何毓蓉. 中国紫色土(II)[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 2—11, 43—45, 398—404.
- [17] 苏正安, 张建辉, 聂小军. 紫色土坡耕地土壤物理性质空间变异对土壤侵蚀的响应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 54—60.
Su Zheng'an, Zhang Jianhui, Nie Xiaojun. Response of spatial variability of soil physical properties to soil erosion in purple soil slope farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(5): 54—60. (in Chinese with English abstract)
- [18] 丁文斌, 蒋光毅, 史东梅, 等. 紫色土坡耕地土壤属性差异对耕层土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 1—14.
Ding Wenbin, Jiang Guangyi, Shi Dongmei, et al. Effect of different soil properties on plow-layer soil quality of sloping farmland in purple hilly areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 1—14. (in Chinese with English abstract)
- [19] 董杰, 段艺芳, 许玉凤, 等. 三峡库区紫色土坡地土壤退化程度评价及驱动机制[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 51—56.
Dong Jie, Duan Yifang, Xu Yufeng, et al. Evaluation and driving mechanism of land degradation in a sloping field of purple soil in three gorges reservoir area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 51—56. (in Chinese with English abstract)
- [20] 景可, 王万忠, 郑粉莉. 中国土壤侵蚀与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [21] 李兰, 周忠浩, 杜树汉, 等. 紫色土成土速率的估算与田间测定[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 393—400.
Li Lan, Zhou Zhonghao, Du Shuhan, et al. Model-based estimation and field measurement of purple soil formation rate[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 393—400. (in Chinese with English abstract)
- [22] 倪晋仁, 李秀霞, 韩鹏. 试论水利部土壤侵蚀分级方法的适用性[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(6): 965—969.
Ni Jinren, Li Xiuxia, Han Peng. Application of the classification method of soil erosion intensity[J]. Acta Sci

- entiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(6): 965—969. (in Chinese with English abstract)
- [23] 史志华, 蔡崇法, 蔡强国, 等. GIS 支持下土壤侵蚀潜在危险度的分级研究[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(2): 190—193.
Shi Zhihua, Cai Chongfa, Cai Qiangguo, et al. Study on gradation of soil erosion potential danger using GIS[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(2): 190—193. (in Chinese with English abstract)
- [24] Zhao Li, Jin Jie, Du Shuhan, et al. A quantification of the effects of erosion on the productivity of purple soils[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9: 96—104.
- [25] 朱波, 况福虹, 高美荣, 等. 土层厚度对紫色土坡地生产力的影响[J]. 山地学报, 2009, 27(6): 735—739.
Zhu Bo, Kuang Fuhong, Gao Meirong, et al. Effects of soil thickness on productivity of sloping cropland of purple soil[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(6): 735—739. (in Chinese with English abstract)
- [26] 诸培新, 曲福田. 农户层次土壤侵蚀成本理论分析[J]. 生态农业研究, 1999, 7(2): 9—13.
Zhu Peixin, Qu Futian. Cost of soil erosion at household level[J]. Eco-agriculture Research, 1999, 7(2): 9—13. (in Chinese with English abstract)
- [27] 章家恩, 徐琪. 三峡库区退化土壤的恢复与重建研究[J]. 长江流域资源与环境, 1997, 4(1): 100—108.
Zhang Jiaen, Xu Qi. The restoration and reconstruction of degraded soils in the Three-gorge Reservoir Area[J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 1997, 4(1): 100—108. (in Chinese with English abstract)
- [28] 史东梅. 基于 RUSLE 模型的紫色丘陵区坡耕地水土保持研究[J]. 水土保持学报, 2012, 24(3): 39—44, 251.
Shi Dongmei. Soil and water conservation on cultivated slope land in purple hilly area based on RUSLE model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 24(3): 39—44, 251. (in Chinese with English abstract)
- [29] 白伟, 孙占祥, 郑家明, 等. 虚实并存耕层提高春玉米产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 81—90.
Bai Wei, Sun Zhanxiang, Zheng Jiaming, et al. Furrow loose and ridge compaction plough layer improves spring maize yield and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(21): 81—90. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王红兰, 唐翔宇, 张维, 等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 107—112.
Wang Honglan, Tang Xiangyu, Zhang Wei, et al. Effects of biochar application on till soil hydraulic properties of slope cropland of purple soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(4): 107—112. (in Chinese with English abstract)

Effects of soil erosion factors on cultivated-layer quality of slope farmland in purple hilly area

Shi Dongmei¹, Jiang Guangyi², Jiang ping³, Lou Yibao¹, Ding Wenbin¹, Jin Huifang¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Eco-environment Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Chongqing 401147, China;

3. Chongqing Surveying and Design Institute of Water Resources Electric Power and Architecture, Chongqing 400020, China)

Abstract: Cultivated layer soil quality is highly sensitive to both soil erosion and artificial farming tillage in Purple Hilly Area. Soil erosion is a key factor that causes soil degradation and soil productivity instability of cultivated layer for slope farmland. Taking slope farmland in purple hilly area as an example, this paper has conducted cluster analysis on soil quality, permeability and cultivated layer type of slope farmland with different land productivity grades, and further discussed the effect of soil erosion on thickness of cultivated layer and the soil body configuration with reasonable cultivated layers of slope farmland. Results indicated that: (1) The soil quality of cultivated layer for purple soil slope farmland presented a moderate variability, the variation coefficients were 12.18% and 37.26% for the effective soil layer thickness (15-80 cm) and the cultivated layer thickness (15-25 cm), respectively, and the variation coefficient was 94.51% for the soil available phosphorus, indicating that the variability of soil physical properties was weaker than that of chemical properties. The cultivated layer configuration below the third grade of land productivity was almost full virtual or full real profile structures, and meanwhile, the production of slope farmland with the fifth grade of land productivity fell by about 50%. (2) There were significant ($P < 0.05$) differences in soil physical properties, water-retention properties and tillage performances of cultivated layer at different slope position and different vertical depth of purple soil slope farmland, in which the soil bulk density showed upper slope > lower slope > middle slope, and soil shear strength showed upper slope > middle slope > lower slope, the soil stable infiltration rate showed the contrary order, and the soil penetration resistance was middle slope > upper slope > lower slope. The soil bulk density, shear strength and penetration resistance all presented bottom soil layer > subsoil layer > cultivated layer except soil infiltration; about 70% of the rain stored in 0-40 cm soil layer of slope farmland could be used by crops. (3) The average annual thinning of cultivated layer thickness varied between 1.04 and 3.04 mm for the moderate erosion degree of slope farmland. The reasonable cultivated layer of slope farmland could be established effectively by regulating such means as the minimum data set (MDS), which included soil layer thickness, cultivated layer thickness, soil bulk density, soil shear strength, soil organic matter and soil infiltration capacity for evaluating the cultivated layer soil quality of slope farmland, and moreover, the reasonable cultivated layer configuration overall should maintain the type of upper part loose and lower part tight, the cultivated layer thickness of 20-25 cm and the effective soil layer thickness of 50-60 cm. (4) Purple soil slope farmland could be divided into 4 kinds of cultivated layer types, whose obstacle cultivated layer was mainly manifested as the effective soil layer thickness restricted type (Class II), the cultivated layer thickness restricted type (Class III) and the soil nutrients restricted type (Class IV), accounting for 30%, 10% and 3% of total cultivated layer, respectively; so the regulating of reasonable cultivated layer of purple soil slope farmland should focus on effective soil layer thickness and cultivated layer thickness. These results can not only deepen the objective understanding of relationship between soil erosion and cultivated layer degradation but provide some essential parameters and technical supports for constructing reasonable cultivated layer of slope farmland in purple hilly area.

Keywords: soils; erosion; nutrients; cultivated-layer; slope farmland; soil quality; minimum data set; purple hilly area