



紫色土坡耕地耕层质量障碍特征

宋鸽¹, 史东梅¹, 曾小英², 蒋光毅³, 江娜¹, 叶青¹

(¹西南大学资源环境学院, 重庆 400715; ²重庆市林业科学研究院, 重庆 400036; ³重庆市水土保持生态环境监测总站, 重庆 401147)

摘要: 【目的】紫色土坡耕地具有高生产力和强侵蚀性的特点, 是长江上游重要的耕地资源, 分析坡耕地障碍耕层类型及其对农作物产量的影响, 对坡耕地合理耕层构建参数确定、耕层质量调控和坡耕地持续利用具有重要应用价值。本文基于不同地力等级紫色土坡耕地耕层样本, 定量化分析坡耕地耕层质量障碍特征。【方法】采用障碍度模型及聚类分析研究不同地力等级紫色土坡耕地障碍耕层类型及耕层质量变化特征。【结果】(1) 不同地力紫色土坡耕地土壤物理属性差异显著, 随地力等级降低, 地块田面坡度显著变大、有效土层厚度显著变小, 当田面坡度由 5.1°变为 21.7°, 农作物产量可下降 45%, 五级坡耕地心土层缺失现象严重; 而土壤肥力属性未表现明显差异, 一至四级坡耕地同一地力等级土壤有机质、土壤全氮、阳离子交换量总体表现为耕作层 > 心土层 > 底土层, 五级坡耕地耕作层与底土层之间各指标差异不显著。(2) 一、二级坡耕地各土层土壤质量指数均在 0.434–0.528 之间, 同一地力等级各土层土壤质量指数表现为耕作层 > 心土层 > 底土层; 土壤物理属性对低产坡耕地土壤质量影响更为显著, 五级坡耕地田面坡度指标障碍度为一级坡耕地的 80.73 倍。(3) 紫色土坡耕地障碍耕层可分为 3 类, 即Ⅲ土壤养分限制型、Ⅳ有效土层厚度限制型、Ⅴ田面坡度限制型, 土壤物理属性为主要障碍特征时, 耕层构型疏松, 心土层缺失现象严重, 农作物产量较土壤养分限制型坡耕地低 25%。【结论】紫色土坡耕地耕层质量偏低, 障碍耕层包含土壤养分限制型、有效土层厚度限制型、田面坡度限制型 3 种类型, 土壤物理属性为主要限制因素, 田面坡度偏大, 有效土层厚度浅薄化严重。

关键词: 紫色土; 坡耕地; 耕层质量; 障碍耕层; 障碍度模型; 聚类分析

Quality Barrier Characteristics of Cultivated Layer for Sloping Farmland in Purple Hilly Region

SONG Ge¹, SHI DongMei¹, ZENG XiaoYing², JIANG GuangYi³, JIANG Na¹, YE Qing¹

(¹College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715; ²Chongqing Academy of Forestry, Chongqing 400036; ³Chongqing Eco-environment Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Chongqing 401147)

Abstract: 【Objective】The purple soil slope farmland is characterized by high productivity and strong erodibility, and is an important cultivated land resource in the upper reaches of the Yangtze River. Analyzing the types of barrier tillage layer of slope farmland and its impact on crop yield has important application value for determining reasonable tillage layer construction parameters, controlling tillage layer quality and sustainable utilization of slope farmland. Based on the sample of cultivated layer of purple soil slope farmland in different soil fertility grades, this paper quantitatively analyzed the quality barrier characteristics of slope farmland. 【Method】In this paper, the obstacle degree model and cluster analysis were used to study the types and quality characteristics of barrier tillage layer in purple soil slope farmland of different soil fertility grades. 【Result】The results showed that: (1) There were significant differences in soil physical properties between purple soil slope farmland with different soil

收稿日期: 2019-06-06; 接受日期: 2019-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(41771310)

联系方式: 宋鸽, E-mail: 2298953443@qq.com. 通信作者史东梅, E-mail: shidm_1970@126.com

fertility grades. With the decrease of soil fertility grade, the slope of the plot was significantly larger, and the thickness of the effective soil layer of plot was significantly smaller. When the slope of the plot changed from 5.1° to 21.7° , the crop yield could be reduced by 45%. The lack of soil layer in the five-slope farmland was serious. However, the soil fertility attributes did not show significant differences. The soil organic matter, soil total nitrogen and cation exchange capacity of the first to fourth grade slope farmland in the same soil fertility grade were as follows: topsoil layer > subsoil layer > bottom soil layer. There was no significant difference between the topsoil layer and the subsoil layer in the fifth grade slope farmland. (2) The soil quality index of each soil layer in the first and second grade slope farmland was between 0.434 and 0.528. The soil quality index of each soil layer of the same soil productivity grade was characterized by topsoil layer > subsoil layer > bottom soil layer; the soil physical properties had a more significant effect on the soil quality of low-yield slope farmland. The obstacle degree of the slope of the plot of the fifth-grade slope farmland was 80.73 times than that of the first-grade slope farmland. (3) The purple soil slope farmland could be classified into three types, namely, III soil nutrient limited type, IV effective soil layer thickness limited type, and V field surface slope limited type. When the soil physical property was the main obstacle feature, the cultivated layer structure was loose, the subsoil layer was seriously deficient, and the crop yield was 25% lower than that of the soil nutrient-restricted sloping farmland. 【Conclusion】 The quality of the cultivated layer in the purple soil slope farmland was low, and the barrier cultivated layer included three types: soil nutrient limitation type, effective soil layer thickness limitation type, and slope of the plot limitation type. The physical properties of soil were the main limiting factors for the quality of the cultivated layer of purple soil slope farmland. The slope of the field was too large, and the thickness of the effective soil layer was shallow and thin.

Key words: purple soil; slope farmland; cultivated layer quality; barrier cultivated layer; obstacle degree model; cluster analysis

0 引言

【研究意义】紫色土是长江上游重要的耕地资源,坡耕地面积高达 767 万 hm^2 , 占全国坡耕地面积 32%, 主要分布于重庆、四川^[1]。紫色土由紫色砂页岩发育而成,矿质养分丰富、成土速度快、土壤生产力高^[2-3], 但土层浅薄、侵蚀性高、抗旱性差、退化严重,土壤侵蚀强度在 $5\ 897\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上^[3]。因此,探究紫色土坡耕地耕层障碍特征,对于紫色土坡耕地耕层质量调控、合理耕层构建具有重要意义。【前人研究进展】坡耕地耕层质量是土壤抗侵蚀性能、生产性能等多种功能的综合表现,受降雨、土壤、人类活动等多种因素影响,耕层浅薄、犁底层增厚、养分贫瘠等是紫色土坡耕地耕层质量障碍的突出表现^[4]。长期不合理耕作加剧了坡耕地水土流失,耕地地力下降,土壤环境发生根本性变化,坡耕地面积不断减少、农作物产量下降^[5]。国内外分别从土壤物理属性、土壤肥力状况等角度对坡耕地耕层质量进行分析、评价,REZAEI 等^[6]根据土壤生产性能、稳定性能,利用 MDSS 模型进行土壤质量评价,分析土壤蓄水性能、肥力状况、抗侵蚀性能。CEVDET SEKER 等^[7]利用主成分分析法确定研究区土壤质量评价最小数据集,进行土壤质量评价,得出区域尺度评价、监测土壤质量的敏感性指标;闫建梅等^[8]以紫色土坡耕地“冬小麦-夏玉米”种植制

度为研究对象,重点分析不同施肥、耕作模式下坡耕地产流产沙特征及养分流失特征;LIN 等^[9]通过田间定位试验,分析不同植物篱类型对紫色土坡耕地土壤肥力质量的调控作用;张贝尔等^[10]以序贯高斯模拟法为基础,深入分析研究区土壤肥力低下区域及主要限制因子,并得出土壤肥力低下判定阈值;张立江等^[11]对东北黑土耕地质量进行评价,并引入障碍度模型定量分析各指标障碍度大小;樊亚男等^[12]采用主成分分析、土壤综合质量指数法对研究区土壤质量进行评价,明确土壤肥力主要障碍因子,将研究区划分为三大障碍类型区;匡丽花等^[13]基于改进的 TOPSIS 模型及障碍度模型,从时间、空间角度分析研究区耕地系统安全格局变化情况,并对其主要障碍因子进行诊断。【本研究切入点】目前对于坡耕地土壤质量的研究多集中于耕地质量评价及土壤质量改良等方面,而对坡耕地耕层构型障碍特征的研究较少,并且以定性分析为主。障碍度模型是在综合评价模型的基础上,对影响土壤质量的障碍因子进行筛选,确定主要障碍因子^[11]。【拟解决的关键问题】本文以紫色土坡耕地耕层为研究对象,基于不同地力等级坡耕地土壤物理属性、肥力状况,运用障碍度模型定量分析紫色土坡耕地耕层障碍因子,并采用聚类分析对坡耕地耕层障碍特征进行分类,可为紫色土坡耕地耕层质量改良、合理耕层构建提供参数依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆市坡耕地占全市耕地面积 47.14%, 15°—25° 坡耕地 78.5 万 hm^2 , 25° 以上坡耕地 40.4 hm^2 , 紫色土是重庆市耕地 (尤其是坡耕地) 分布最广的土壤类型^[14]。重庆市属亚热带季风性湿润气候, 多年平均降水量 1 200 mm 且多集中在 5—9 月, 约占全年总降水量 70%, 年平均气温 16—18℃^[14]。

根据《重庆市耕地地力调查》^[15], 针对“油菜-玉米”种植制度, 选取紫色土丘陵区坡耕地集中分布的万州区、云阳县、北碚区、綦江区、江津区、彭水县、巴南区共 35 个一至五级典型坡耕地耕层土壤剖面样本, 收集其土壤物理、肥力及农作物产量 3 方面指标, 如表 1 所示。

1.2 土壤属性指标权重

根据土壤属性指标与耕地地力等级相关情况, 土壤有机质、土壤全氮、土壤有效磷、阳离子交换量、耕层厚度、心土层厚度与耕地地力等级呈正相关, 界定为 S 型函数; 田面坡度与耕地地力等级表现为负相关, 界定为反 S 型函数, 评价指标的最小值、最大值为函数转折点^[4]; 评价指标权重采用主成分分析法确定, 评价指标隶属函数、参数及评价指标权重见表 2。

1.3 耕层土壤质量指数

土壤质量指数 (soil quality index, SQI) 是对土壤质量评价指标的集成, 土壤质量指数越大, 则土壤质量越高^[4], 计算公式如下:

$$\text{SQI} = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i$$

式中, W_i 为第 i 项评价指标的权重, S_i 为第 i 项评价指标隶属度, n 为评价指标个数。

1.4 耕层障碍因素诊断

根据障碍度模型定量化分析影响各土层土壤质量的障碍因素。其中, 因子贡献率 (V_i) 表示评价体系中指标 i 的权重; 指标偏离度 (B_i) 表示与该指标理想值的差距, 即评价体系中指标隶属度与 1 (100%) 之差; 障碍度 (M_i) 表示第 i 项指标对耕地地力的障碍作用程度^[16]。计算公式如下:

$$B_i = 1 - A_i$$

$$M_i = \frac{B_i V_i}{\sum_{i=1}^n B_i V_i} \times 100\%$$

式中, M_i 为指标障碍度; B_i 为指标偏离度; V_i 为因子贡献率; A_i 为指标隶属度。按照等距法将指标障碍度分为无障碍 (0)、轻度障碍 (0—10%)、中度障碍 (10%—20%) 和重度障碍 (>20%) 4 个等级^[16]。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016、SPSS 22.0、Origin 2017 进行统计分析及单因素方差分析 (One-way ANOVA), 利用 SPSS 22.0 聚类分析模块以欧氏距离衡量各样点差异大小, 对耕层障碍类型进行划分。

2 结果

2.1 坡耕地土壤属性统计特征

坡耕地耕层质量主要采用土壤物理指标、肥力指标表征, 不同地力等级耕作层、心土层、底土层之间各土壤属性存在显著差异。一至五级坡耕地田面坡度 (图 1) 分别为 5.1°、6.9°、11.1°、14.9°、21.7°, 三、四、五级坡耕地较一、二级坡耕地相差 2—4 倍。农作物产量与田面坡度呈显著负相关, 田面坡度由 5.1° 变为 21.7°, 农作物产量由 8.99 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 变为 4.96 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 降幅为 45%。不同地力等级耕层厚度在 19.3—20.7 cm 之间变化, 变异性较小; 随地力等级降低, 心土层厚度整体呈下降趋势, 一、二、三级坡耕地心土层厚度分别为 17.1、21.4、15.9 cm, 四级坡耕地心土层厚度 (7.1 cm) 显著降低, 与一级坡耕地相比下降 58%, 五级坡耕地心土层缺失。有效土层厚度随地力等级下降整体呈减小趋势, 由一级坡耕地 37.1 cm 降至五级坡耕地 20.2 cm, 其中四、五级坡耕地有效土层厚度较一、二、三级坡耕地显著下降; 农作物产量与有效土层厚度呈正相关, 有效土层厚度降低 44%, 农作物产量下降 45%。随地力等级下降, 耕作层、心土层、底土层土壤有机质、土壤全氮、土壤有效磷、阳离子交换量整体呈下降趋势 (图 2)。五级坡耕地各土壤肥力指标较一、二、三级坡耕地未表现出显著差异且高于四级坡耕地, 反映出田面坡度、有效土层厚度是限制五级坡耕地的重要因素。不同地力等级间土壤肥力指标未发生明显变化, 其原因可能是由于耕作过程中农户普遍通过施加化肥提高土壤养分含量。

由图 2 可知, 同一地力等级坡耕地土壤有机质、全氮、阳离子交换量整体表现为耕作层 > 心土层 > 底土层。与耕作层相比, 一至四级坡耕地心土层土壤有效磷降幅最大, 在 30%—79% 之间; 其次为土壤有机质, 一至四级坡耕地分别下降 34%、21%、38%、16%,

表 1 紫色土坡耕地耕层土壤属性指标及农作物产量

Table 1 Soil property index and crop yield of cultivated layer in purple soil slope farmland

地块号 Block number	行政区划 Administrative region	土壤紧实度 Soil compaction	耕层厚度 Topsoil thickness (cm)	心土层厚度 Subsoil layer thickness (cm)	有效土层厚度 Effective thickness of soil layer (cm)	田面坡度 Slope (°)	土壤有机质 Soil organic matter (g·kg ⁻¹)	阳离子交换量 Cation exchange capacity (cmol(+)·L ⁻¹)	土壤全氮 Soil total nitrogen (g·kg ⁻¹)	土壤有效磷 Soil effective phosphate (mg·kg ⁻¹)	农作物产量 Crop yield (t·hm ⁻²)	地力等级 Productivity grade of cultivated land
1	万州区 Wanzhou District	疏松 Loose	20	20	40	5	19.5	32.1	1.0	12	9.00	一级 First grade
2	万州区 Wanzhou District	疏松 Loose	22	23	45	5	10.0	27.6	0.7	10	6.75	二级 Second grade
3	万州区 Wanzhou District	疏松 Loose	20	30	50	10	9.7	16.3	0.9	3	5.25	三级 Third grade
4	万州区 Wanzhou District	疏松 Loose	15	5	20	15	7.0	19.9	0.4	10	4.50	四级 Fourth grade
5	万州区 Wanzhou District	疏松 Loose	20	0	20	25	9.9	18.9	0.8	3	4.50	五级 Fifth grade
6	云阳县 Yunyang Country	疏松 Loose	25	15	40	6	14.6	31.8	0.9	9	9.75	一级 First grade
7	云阳县 Yunyang Country	疏松 Loose	25	25	50	7	9.0	21.1	0.6	7	9.25	二级 Second grade
8	云阳县 Yunyang Country	较紧实 Relatively compact	24	16	40	12	19.9	22.4	1.4	6	8.00	三级 Third grade
9	云阳县 Yunyang Country	疏松 Loose	20	20	40	16	12.3	24.8	0.7	4	6.50	四级 Fourth grade
10	云阳县 Yunyang Country	松散 Unconsolidated	20	0	20	20	5.3	28.4	0.4	4	5.25	五级 Fifth grade
11	北碚区 Beibei District	疏松 Loose	20	15	35	5	12.4	28.4	0.9	18	9.00	一级 First grade
12	北碚区 Beibei District	疏松 Loose	19	21	40	5	12.9	24.7	1.0	6	7.88	二级 Second grade
13	北碚区 Beibei District	疏松 Loose	20	10	30	10	16.6	17.4	1.1	45	7.13	三级 Third grade
14	北碚区 Beibei District	疏松 Loose	25	0	25	15	10.0	20.8	0.6	1	6.38	四级 Fourth grade
15	北碚区 Beibei District	疏松 Loose	15	0	15	25	10.6	28.8	0.7	6	5.63	五级 Fifth grade
16	綦江区 Qijiang District	疏松 Loose	20	20	40	5	12.2	12.9	0.8	29	9.30	一级 First grade
17	綦江区 Qijiang District	较疏松 Relatively loose	20	20	40	12	14.4	22.6	1.3	6	6.00	二级 Second grade

表 2 S 型、反 S 型隶属函数、参数及权重
Table 2 S-type and anti-S-type membership functions, parameters and weights

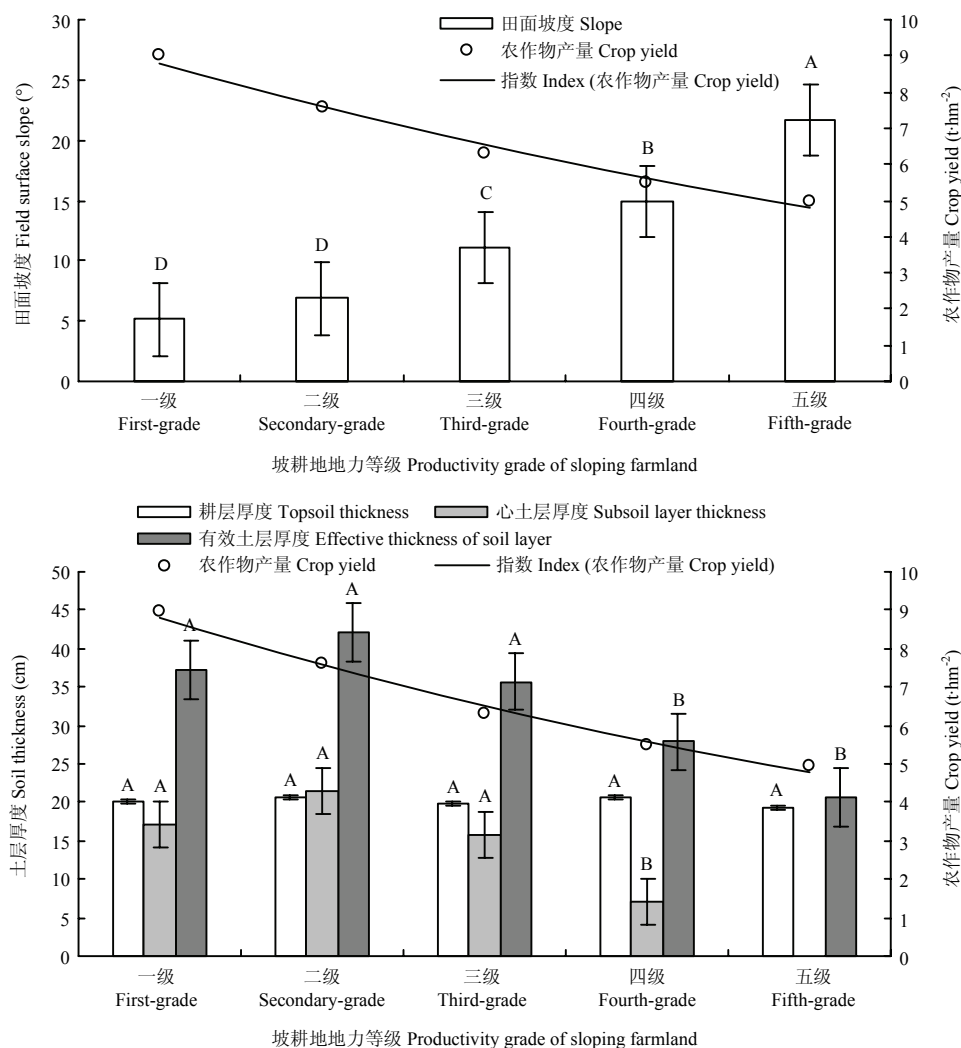
指标 Index	土壤属性指标对作物 产量的作用 Effect of soil attribute index for crop yield	隶属函数 Membership function	土层 Soil layer	隶属函数参数 Membership function parameter		权重 Weight
				<i>a</i>	<i>b</i>	
				(下限 Lower limit)	(上限 Up limit)	
土壤有机质 Soil organic matter (g·kg ⁻¹)	+	$u(x)=\begin{cases} 1, x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a}, a < x < b \\ 0, x \leq a \end{cases}$	耕作层 Topsoil layer	5.29	32.30	0.186
			心土层 Subsoil layer	5.07	21.40	0.217
			底土层 Bottom soil	3.57	16.60	0.155
土壤全氮 Soil total nitrogen (g·kg ⁻¹)	+		耕作层 Topsoil layer	0.41	1.54	0.184
			心土层 Subsoil layer	0.35	1.08	0.183
			底土层 Bottom soil	0.27	2.13	0.252
土壤有效磷 Soil available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	+		耕作层 Topsoil layer	1.20	139.00	0.128
			心土层 Subsoil layer	0.09	22.00	0.137
			底土层 Bottom soil	0.19	123.00	0.208
阳离子交换量 Cation exchange capacity (cmol(+)·L ⁻¹)	+		耕作层 Topsoil layer	0.08	32.10	0.155
			心土层 Subsoil layer	5.38	38.70	0.140
			底土层 Bottom soil	0.11	25.40	0.182
耕作层厚度 Topsoil layer thickness (cm)	+		耕作层 Topsoil layer	15.00	25.00	0.188
			心土层 Subsoil layer	-	-	-
			底土层 Bottom soil	-	-	-
心土层厚度 Subsoil layer thickness (cm)	+		耕作层 Topsoil layer	-	-	-
			心土层 Subsoil layer	5.00	30.00	0.130
			底土层 Bottom soil	-	-	-
田面坡度 Field surface slope (°)	-	$u(x)=\begin{cases} 1, x \leq a \\ \frac{x-a}{a-b}, a < x < b \\ 0, x \geq b \end{cases}$	耕作层 Topsoil layer	5.00	25.00	0.158
			心土层 Subsoil layer	5.00	16.00	0.193
			底土层 Bottom soil	5.00	25.00	0.203

土壤全氮分别下降 32%、20%、34%、18%；阳离子交换量降幅最小，一至三级坡耕地降幅在 1%—12% 之间。一级坡耕地耕作层土壤有机质含量为 16.44 g·kg⁻¹，显著高于心土层、底土层；二级、三级坡耕地耕作层土壤有机质含量、土壤全氮含量显著高于心土层、底土层；四级坡耕地耕作层、心土层、底土层之间土壤属性指标差异不显著；五级坡耕地心土层缺失，耕作层下为底土层，与耕作层相比，底土层土壤有机质、有效磷分别增加 9%、151%，土壤全氮、阳离子交换量分别降低 1%、55%，耕作层与底土层之间各指标差异不显著。

2.2 坡耕地耕层障碍因子诊断

不同地力等级坡耕地耕层质量指数变化特征如图

3 所示。同一地力等级，各土层土壤质量指数由高到低依次为耕作层、心土层、底土层。一、三、四级坡耕地心土层土壤质量指数较耕作层分别降低 7%、23%、27%；底土层土壤质量指数较心土层未表现出明显下降趋势。一、二级坡耕地耕作层、心土层、底土层土壤质量指数均在 0.434—0.528 之间，属中产耕层。与二级坡耕地相比，三级坡耕地耕作层土壤质量指数高 1%，但心土层土壤质量指数低 24%，这表明坡耕地土壤质量由耕作层、心土层、底土层共同决定，任一土层土壤质量指数偏低都会影响耕层质量，导致农作物减产。与一、二级坡耕地相比，三、四级坡耕地心土层、底土层土壤质量指数较耕作层下降趋势更为明显。



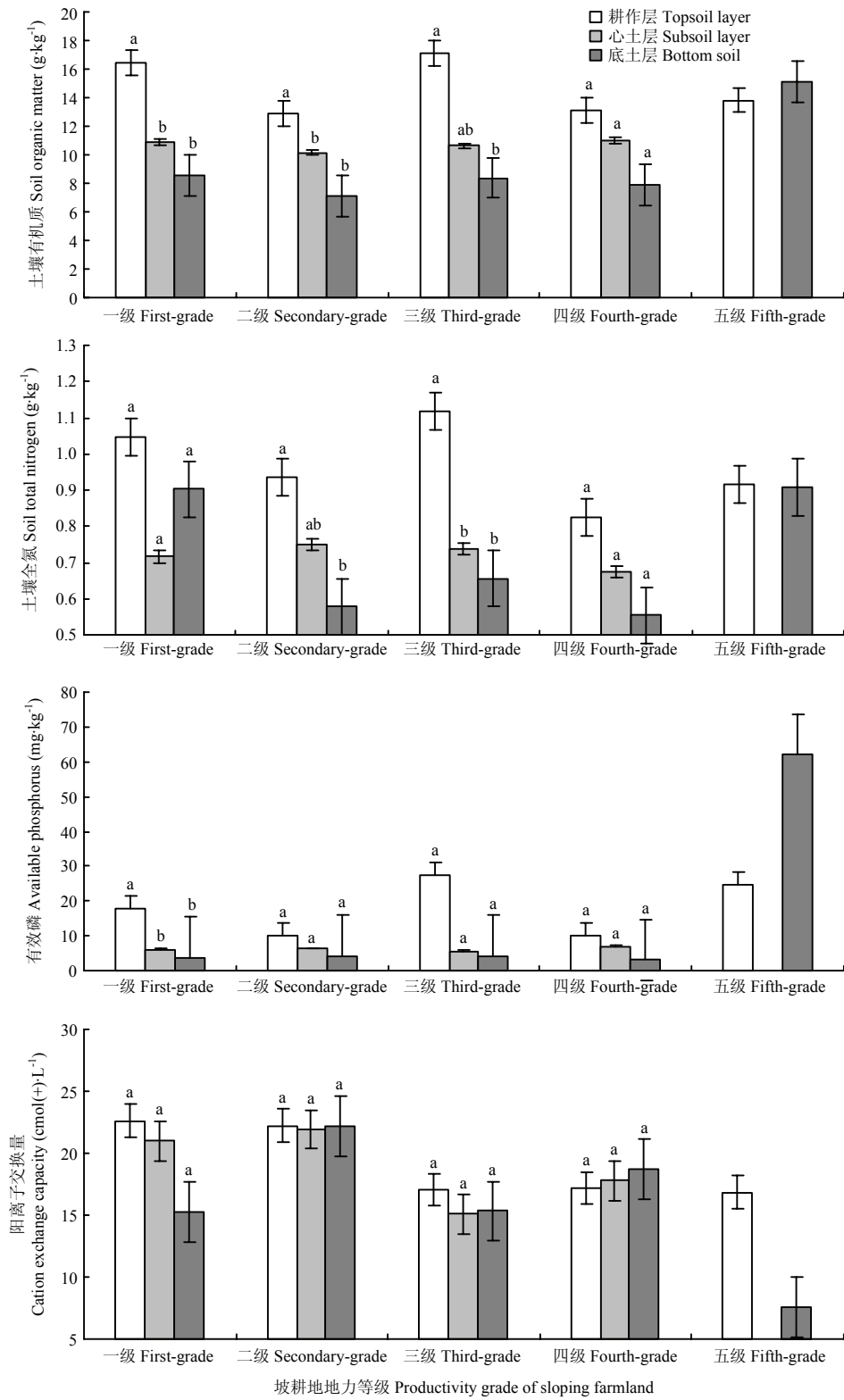
不同大写字母表示同一垂直层次不同地力等级差异显著 ($P < 0.05$)
 Different capital letters represent significant differences in different soil fertility grades at the same vertical level ($P < 0.05$)

图1 不同地力等级坡耕地土壤物理指标及农作物产量变化特征

Fig. 1 Soil physical indicators and crop yield variation characteristics of sloping farmland with different productivity grade of cultivated land

不同地力等级坡耕地土壤属性指标障碍度特征 (表 3) 表明, 随地力等级下降, 耕作层、心土层、底土层各土壤物理指标障碍度呈增大趋势, 土壤肥力指标障碍度呈逐渐减小趋势。田面坡度障碍度由一级坡耕地 (0.19%) 轻度障碍变为五级坡耕地 (29.02%) 重度障碍; 一至五级坡耕地耕作层厚度障碍度在 12.20%—19.16% 之间, 均属中度障碍。耕作层、心土层土壤肥力指标主要障碍因子为土壤有机质、土壤有效磷, 其中一、二级坡耕地耕作层土壤有机质、有效磷指标障碍度在 22.26%—24.71% 之间, 均为重度障碍;

三、四、五级坡耕地土壤有机质、土壤有效磷障碍度呈逐渐减小趋势, 五级坡耕地耕作层土壤有机质、土壤有效磷指标障碍度分别为 18.21%、15.26%, 均为中度障碍。底土层土壤肥力指标障碍因子主要为土壤全氮、土壤有效磷, 其次为土壤有机质, 各地力等级坡耕地土壤全氮、土壤有效磷指标障碍度均在 17.65%—37.53% 之间, 除五级坡耕地土壤有效磷之外, 均为重度障碍; 一至四级坡耕地土壤有机质指标障碍度在 15.49%—19.92% 之间, 均为中度障碍; 五级坡耕地阳离子交换量指标障碍度 21.99%, 重度障碍。



不同小写字母表示同一地力等级不同垂直层次差异显著 ($P < 0.05$)。图 3 同
Different lowercase letters represent significant differences in different vertical levels of the same soil fertility grade ($P < 0.05$). The same as Fig.3

图 2 不同地力等级坡耕地土壤肥力指标变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of soil fertility index of sloping farmland with different productivity grades of cultivated land

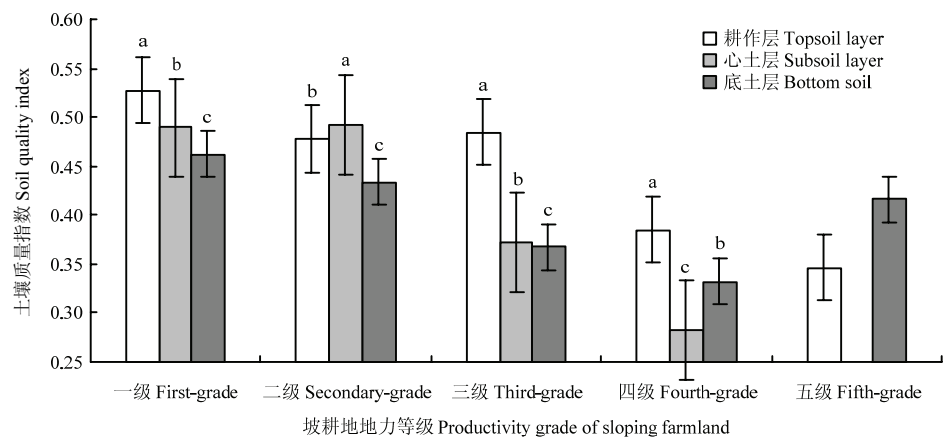


图3 不同地力等级坡耕地土壤质量指数变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of soil quality index of sloping farmland with different productivity grades of cultivated land

表3 不同地力等级坡耕地土壤属性指标障碍度特征

Table 3 Characteristics of soil attribute index obstacles in sloping farmland with different productivity grade of cultivated land

地力等级 Productivity grade of cultivated land	土层 Soil layer	土壤属性指标障碍度 Barrier degree of soil property index (%)					
		土壤有机质 Soil organic matter	土壤全氮 Soil total nitrogen	土壤有效磷 Soil available phosphorus	阳离子交换量 Cation exchange capacity	土层厚度 Soil thickness	田面坡度 Field surface slope
一级 First	耕作层 Topsoil layer	22.32	16.42	23.10	9.41	19.16	0.19
	心土层 Subsoil layer	29.41	19.21	21.11	15.69	14.15	0.43
	底土层 Bottom soil	17.82	30.82	37.53	13.56	-	0.27
二级 Secondary	耕作层 Topsoil layer	24.71	18.22	22.26	8.87	14.86	2.22
	心土层 Subsoil layer	31.66	17.54	20.75	14.96	9.48	5.61
	底土层 Bottom soil	19.92	37.09	35.55	4.11	-	3.33
三级 Third	耕作层 Topsoil layer	18.69	12.28	18.59	13.05	17.24	7.10
	心土层 Subsoil layer	24.18	14.52	17.21	16.79	12.48	14.81
	底土层 Bottom soil	15.45	31.50	31.75	11.45	-	9.84
四级 Fourth	耕作层 Topsoil layer	20.09	17.71	18.26	11.00	12.20	9.74
	心土层 Subsoil layer	20.28	14.85	13.69	12.91	17.51	20.77
	底土层 Bottom soil	15.49	31.89	30.38	7.17	-	15.07
五级 Fifth	耕作层 Topsoil layer	18.21	14.56	15.26	10.59	15.33	15.46
	心土层 Subsoil layer	-	-	-	-	-	-
	底土层 Bottom soil	3.06	28.28	17.65	21.99	-	29.02

2.3 坡耕地障碍耕层类型划分及构型特征

耕层构型是指土壤物理指标、肥力指标等在土壤中的垂直分布特征，明确耕层构型障碍特征有助于针对不同障碍类型提出具体的耕作、施肥措施，有利于合理耕层构建。综合各土壤属性指标权重及障碍度大小，基于

土壤有机质、全氮、阳离子交换量、有效土层厚度、田面坡度 5 个指标对坡耕地有效土层（耕作层+心土层）样本进行 Q 型聚类分析（图 4），可将有效土层样本明显分为 5 类，其中障碍耕层构型分别为Ⅲ土壤养分限制型、Ⅳ有效土层厚度限制型、Ⅴ田面坡度限制型。

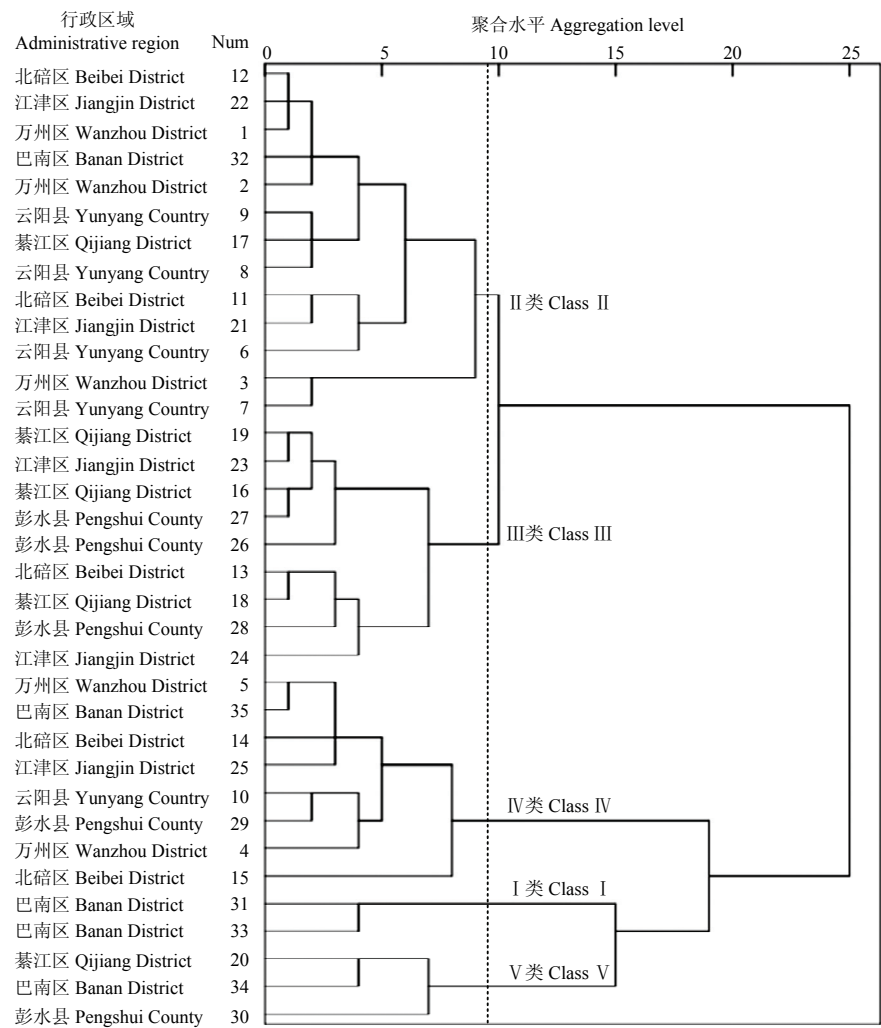


图 4 坡耕地耕层聚类分析谱系图

Fig. 4 Hierarchical cluster graph for cultivated layer of sloping farmland

I 类包括坡耕地样本 31、33，分别为一、三级坡耕地，主要特征是土壤有机质含量最大，土壤全氮含量 $1.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，阳离子交换量偏低，有效土层厚度偏小，田面坡度较为适宜，农作物产量 $7.63\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，可通过提高阳离子交换量、有效土层厚度促进农作物进一步增产；II 类包括坡耕地样本 12、22、1、32、2、9、17、8、11、21、6、3、7，主要为一、二、三级坡耕地，主要特征是土壤有机质含量偏低，阳离子交换量、有效土层厚度最大，田面坡度最小，农作物产量 $7.53\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，耕层构型上虚下实，即耕层土壤紧实度垂直分布表现为上部疏松下部较紧实；III 类包括坡耕地样本 19、23、16、27、26、13、18、28、24，主要为一、三、四级坡耕地，主要特征是土壤有机质、土壤全氮、阳离子交换量偏低，有效土层厚度较为适宜，

田面坡度 9.7° ，农作物产量 $6.95\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，耕层构型主要为全虚型，不利于土壤保水保肥及作物根系生长，可通过施加生物炭、有机肥等提高阳离子交换量及土壤养分含量，进而提升农作物产量；IV 类包括坡耕地样本 5、35、14、25、10、29、4、15，主要为四、五级坡耕地，主要特征是土壤有机质含量、土壤全氮含量最低，有效土层浅薄，田面坡度偏大，农作物产量低，该类坡耕地样本心土层缺失，耕层构型疏松，不利于农作物生长，可通过增施有机肥、聚土免耕等措施提高土壤肥力、增厚耕层；V 类包括坡耕地样本 20、34、30，主要为四、五级坡耕地，主要特征是土壤有机质含量较为适宜，土壤全氮含量最大，阳离子交换量低下，有效土层厚度偏低，田面坡度最大，农作物产量低下，耕层构型不完整，心土层缺失，可通过施加生

物炭、秸秆覆盖与少免耕相结合等方式减轻耕层土壤侵蚀。

3 讨论

3.1 坡耕地耕层构型障碍特征及调控途径

耕层构型变化是导致土壤理化性质变化、坡耕地地力等级下降的根本原因, 不同地力等级坡耕地耕层构型存在显著差异, 良好的耕层构型可为作物提供良好的生长环境, 具有保水保肥、通气透水、协调供应水、肥、气、热的优良特性^[17-18]。研究表明, 良好的耕层构型耕作层、心土层、底土层 3 个层次保持完整, 其中耕作层由表土层(0—15 cm)、犁底层(15—20 cm)构成^[14]; 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^[17]; 底土层(>40 cm)对农作物产量形成几乎没有调控作用^[14]。随着地力等级下降, 耕作层、心土层侵蚀程度逐渐增大, 耕层厚度由 20.0 cm 下降至 19.3 cm, 心土层厚度由 17.1 cm 下降至 7.1 cm, 五级坡耕地心土层缺失。相关研究也表明, 耕作层、心土层的厚薄、有无决定着土壤肥力及其生产力的大小, 随着土壤退化程度增大, 有效土层厚度显著下降^[16], 由未退化区 75—100 cm 下降至剧烈退化区低于 10 cm。

本研究表明, 随耕层质量指数不断增大, 农作物产量呈上升趋势, 通过建立耕层质量指数与农作物产量之间的响应可以确定耕层质量指数阈值(图 5), 当耕层质量指数低于 0.46 时, 农作物产量在低于平均值区域上下波动; 当耕层质量指数高于 0.46 时, 农作物产量在高于平均值区域波动, 因此确定耕层质量指数阈值为 0.46。当农作物产量低于 $6.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 主要为四、五级坡耕地, 主要障碍因素是田面坡度过大, 有效土层浅薄, 建议采取以深松耕为主的调控方式, 如合理深松和秸秆还田相结合的技术体系^[19], 有效土层厚度由 20 cm 增至 35 cm, 农作物约增产 25%。农作物产量在 $6.00—6.66 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 主要为二、四级坡耕地, 主要障碍因素是土壤肥力偏低, 建议采取增施有机肥为主的调控策略, 如推广少(免)耕保护性耕作结合增施有机肥或绿肥轮作来综合改善土壤肥力状况。

由于受耕层调查数据所限, 本文只选取了田面坡度、土层厚度两个土壤物理指标, 农作物产量指标及部分肥力指标对耕层构型障碍特征进行分析, 在后续小区定位研究中拟增加土壤容重、含水率、饱和导水

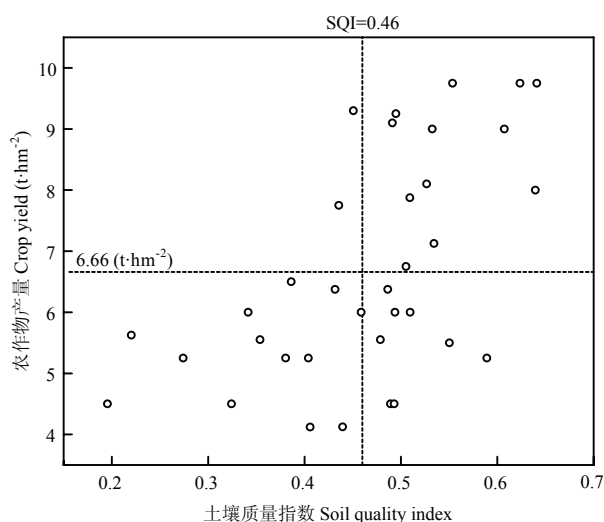


图 5 不同地力等级坡耕地农作物产量对耕层质量指数的响应特征

Fig. 5 Response of crop yield to cultivated layer quality index of sloping farmland with different land productivity grades

率等土壤物理指标, 土壤抗剪强度、贯入阻力等土壤力学指标, 以更准确地反映坡耕地耕层构型障碍特征。

3.2 坡耕地耕层厚度影响因素分析

紫色土坡耕地耕层浅薄化是自然因素、人类活动共同作用的结果, 人类不合理耕作措施及种植制度是耕层退化的主要驱动力^[20-21]。研究表明, 锄耕是紫色土坡耕地的主要耕作方式, 与等高耕作、垄作等保护性耕作相比, 传统顺坡锄耕导致的耕作侵蚀十分显著^[22-23]; 小型农机具在农业生产中广泛应用, 导致犁底层增厚并上移, 耕层变浅, 土壤理化性质不断恶化, 作物产量下降^[24]; 旋耕相比传统耕作机具能够降低耕作侵蚀 85% 以上, 但连续旋耕也会导致紫色土浅薄土层进一步薄化^[25], 旋耕方向及耕作速度对侵蚀强度有明显影响, 快挡等高耕作下侵蚀强度为 $7.69 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 慢挡上下坡交替耕作下侵蚀强度为 $4.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 旋耕机慢挡耕作可显著降低耕层土壤流失量, 上下坡交替耕作适合坡度大的地块^[25-26]; 横坡耕作产流、产沙量分别较顺坡耕作下降 26%、21%, 农家肥与化肥配施对降低坡面产流、产沙量的贡献率均大于横坡耕作^[1,8,27], 横坡耕作通过减少土壤有机碳流失、改善土壤结构、增强土壤抗蚀性, 通过改变微地形, 拦蓄降雨, 降低土壤侵蚀^[1,8]; 聚土免耕与常规耕作相比能够减少土壤侵蚀 83%, 经过多次垄沟互换耕层厚度可达

29.1 cm, 较常规耕作增加 11.8 cm^[28]; 轮作、间作、套种等水土保持栽培措施能够增加植被盖度, 提高土壤入渗性能, 减少侵蚀沟形成, 防止土壤结皮, 从而减轻耕作侵蚀^[29]。

引起紫色土坡耕地耕层薄化的自然因素主要有气候、地形、土壤类型等^[20], 研究表明紫色土丘陵区 5—9 月降雨量占全年降雨量 60%—80%, 降雨强度大, 水蚀作用强烈, 水土流失严重^[30]; 随坡度变大, 耕层土壤侵蚀量也增大, 坡度由 10°变为 15°、25°, 耕层土壤侵蚀量由 1.06 kg·m⁻² 增大至 3.99 kg·m⁻²、7.92 kg·m⁻²^[31]; 中等坡度 (17%—25%) 耕层侵蚀速率占土壤总侵蚀速率 42%—43%; 陡而短的坡耕地耕层侵蚀速率占土壤总侵蚀速率 80%以上^[32]。总体上, 紫色土坡耕地土层浅薄、结构性差、有机质含量低, 且以短、陡坡为主^[14], 不合理的耕作措施加速了侵蚀形成。采取横坡耕作、聚土免耕等保护性耕作措施^[33]及轮作、间作、套种等水土保持栽培措施并合理配施有机肥、化肥, 可显著降低土壤侵蚀, 增加耕层厚度, 促进作物增产。坡度较小的地块宜采用等高垄作并配施有机肥, 陡坡耕地宜采用少免耕方式减少人为活动对耕层土壤的扰动。

4 结 论

4.1 不同地力等级紫色土坡耕地土壤物理属性差异显著。农作物产量随田面坡度变大显著降低, 田面坡度由 5.1°变为 21.7°, 农作物产量下降 45%; 农作物产量与有效土层厚度呈正相关。不同地力等级坡耕地土壤肥力属性未表现出明显变化, 同一地力等级土壤有机质、土壤全氮、阳离子交换量整体表现为耕作层 > 心土层 > 底土层。有效土层浅薄、田面坡度过大是限制坡耕地农作物产量的主要因素。

4.2 坡耕地土壤质量由耕作层、心土层、底土层共同决定, 任一土层土壤质量指数偏低都会影响耕层质量, 导致农作物减产。土壤物理属性对低产坡耕地耕层质量的影响更为显著, 其中五级坡耕地田面坡度指标障碍度为一级坡耕地的 80.73 倍, 因此, 在农业生产中应将田面坡度、有效土层厚度等土壤物理属性作为重点调控指标。

4.3 紫色土坡耕地耕层障碍类型可明显分为 3 类, 即 III 土壤养分限制型、IV 有效土层厚度限制型、V 田面坡度限制型。土壤养分限制型坡耕地农作物产量 (6.95 t·hm⁻²) 相对较高; 土壤物理属性为主要障碍特征时, 耕层构型疏松, 心土层缺失现象严重, 农作物产量 (5.23 t·hm⁻²) 低下。

References

- [1] 张怡, 何丙辉, 王仁新, 郭志敏, 唐柄哲. 横坡和顺坡耕作对紫色土土壤团聚体稳定性的影响. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 192-198.
ZHANG Y, HE B H, WANG R X, GUO Z M, TANG B Z. Effects of across- and along-slope ploughs on soil aggregate stability. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(2): 192-198. (in Chinese)
- [2] 朱波, 况福虹, 高美荣, 汪涛, 王小国, 唐家良. 土层厚度对紫色土坡地生产力的影响. 山地学报, 2009, 29(6): 735-739.
ZHU B, KUANG F H, GAO M R, WANG T, WANG X G, TANG J L. Effects of soil thickness on productivity of sloping cropland of purple soil. *Journal of Mountain Science*, 2009, 29(6): 735-739. (in Chinese)
- [3] 史东梅. 基于 RUSLE 模型的紫色丘陵区坡耕地水土保持研究. 水土保持学报, 2010, 24(3): 39-44.
SHI D M. Soil and water conservation on cultivated slope land in purple hilly area based on RUSLE model. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 39-44. (in Chinese)
- [4] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 刘益军, 姜义宝, 杨旭. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标. 农业工程学报, 2018, 34(7): 155-164.
JIN H F, SHI D M, CHEN Z F, LIU Y J, LOU Y B, YANG X. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(7): 155-164. (in Chinese)
- [5] 丁文斌, 蒋光毅, 史东梅, 刘益军, 蒋平, 常松果. 紫色土坡耕地土壤属性差异对耕层土壤质量的影响. 生态学报, 2017(19): 195-208.
DING W B, JIANG G Y, SHI D M, LIU Y J, JIANG P, CHANG S G. Effect of different soil properties on plow-layer soil quality of sloping farmland in purple hilly areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2017(19): 195-208. (in Chinese)
- [6] REZAEI S A, GILKES R J, ANDREWS S S. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. *Geoderma*, 2006, 136(1/2): 229-234.
- [7] SEKER C, OZAYTEKIN H H, NEGIŞ H, GÜMÜŞ İLKUR, DEDEOĞLU M, ATMACA E, KARACA Ü. Identification of regional soil quality factors and indicators: A case study on an alluvial plain (central Turkey). *Solid Earth*, 2017, 8(3): 1-33.
- [8] 闫建梅, 何丙辉, 田太强. 不同施肥与耕作对紫色土坡耕地土壤侵蚀及氮素流失的影响. 中国农业科学, 2014, 47(20): 4027-4035.
YAN J M, HE B H, TIAN T Q. Effect of fertilizer levels and tillage

- methods on soil erosion and nutrient loss in purple soil area. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(20): 4027-4035. (in Chinese)
- [9] LIN C, TU S, HUANG J, CHEN Y. The effect of plant hedgerows on the spatial distribution of soil erosion and soil fertility on sloping farmland in the purple-soil area of China. *Soil & Tillage Research*, 2009, 105(2): 307-312.
- [10] 张贝尔, 黄标, 赵永存, 孙维侠, 胡文友, 张晓光. 华北平原典型区土壤肥力低下区识别及限制因子分析. *土壤学报*, 2012, 49(5): 841-849.
- ZHANG B E, HUANG B, ZHAO Y C, SUN W X, HU W Y, ZHANG X G. Identification of areas low in soil fertility and analysis of their limiting factors in the region typical of the north China plain. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5): 841-849. (in Chinese)
- [11] 张立江, 汪景宽, 裴久渤, 李双异, 安婷婷. 东北典型黑土区耕地地力评价与障碍因素诊断. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(1): 110-117.
- ZHANG L J, WANG J K, PEI J B, LI S Y, AN T T. Evaluation of cultivated land fertility and its obstacle factors diagnosis in the typical black soil area of northeast China. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(1): 110-117. (in Chinese)
- [12] 樊亚男, 姚利鹏, 瞿明凯, 胡文友, 黄标, 赵永存. 基于产量的稻田肥力质量评价及障碍因子区划——以进贤县为例. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1157-1169.
- FAN Y N, YAO L P, QU M K, HU W Y, HUANG B, ZHAO Y C. Yield-based soil fertility quality assessment and constraint factor-based zoning of paddy soil-A case study of Jinxian county. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1157-1169. (in Chinese)
- [13] 匡丽花, 叶英聪, 赵小敏, 郭熙. 基于改进 TOPSIS 方法的耕地系统安全评价及障碍因子诊断. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 1627-1641.
- KUANG L H, YE Y C, ZHAO X M, GUO X. Evaluation and obstacle factor diagnosis of cultivated land system security in Yingtan city based on the improved TOPSIS method. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9): 1627-1641. (in Chinese)
- [14] 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. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 270-279.
- SHI D M, JIANG G Y, JIANG P, LOU Y B, DING W B, JIN H F. Effects of soil erosion factors on cultivated-layer quality of slope farmland in purple hilly area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(13): 270-279. (in Chinese)
- [15] 李伟. 重庆耕地地力研究与评价 (一) (二) (三). 北京: 中国农业出版社, 2012.
- LI W. *Research and Evaluation of Cultivated Land Fertility in Chongqing (I) (II) (III)*. Beijing: China Agriculture Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 秦伟霞, 王新闯, 马守臣, 张合兵, 陈宁丽, 宋香平. 基于功能分区的土地生态质量障碍因子诊断——以新乡市为例. *水土保持研究*, 2015, 22(4): 148-154.
- QIN W X, WANG X C, MA S C, ZHANG H B, CHEN N L, SONG X P. Obstacle factors diagnosis of land ecological quality based on functional partition-A case study of Xinxiang city. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(4): 148-154. (in Chinese)
- [17] 史德明, 韦启潘, 梁音, 杨艳生, 吕喜玺. 中国南方侵蚀土壤退化指标体系研究. *水土保持学报*, 2000(3): 1-9.
- SHI D M, WEI Q P, LIANG Y, YANG Y S, LV X X. Study on degradation index system of eroded soils in southern China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000(3): 1-9. (in Chinese)
- [18] 韩晓增, 邹文秀, 陆欣春, 段景海. 旱作土壤耕层及其肥力培育途径. *土壤与作物*, 2015, 4(4): 145-150.
- HAN X Z, ZOU W X, LU X C, DUAN J H. The soil cultivated layer in dryland and technical patterns in cultivating soil fertility. *Soil and Crop*, 2015, 4(4): 145-150. (in Chinese)
- [19] 刘海涛, 姚莉, 朱永群, 王宏, 许文志, 王谢, 林超文. 深松和秸秆覆盖条件下紫色土坡耕地水分养分流失特征. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 52-57, 165.
- LIU H T, YAO L, ZHU Y Q, WANG H, XU W Z, WANG X, LIN C W. Characteristics of water and nutrients loss under subsoiling and straw mulching in purple soil slope cropland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6): 52-57, 165. (in Chinese)
- [20] 董杰, 段艺芳, 许玉凤, 杨达源, 周彬. 三峡库区紫色土坡地土壤退化程度评价及驱动机制. *水土保持通报*, 2009, 29(4): 51-56.
- DONG J, DUAN Y F, XU Y F, YANG D Y, ZHOU B. Evaluation and driving mechanism of land degradation in a sloping field of purple soil in three gorges reservoir area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(4): 51-56. (in Chinese)
- [21] ZHANG Q, LIU D, CHENG S, HUANG X. Combined effects of runoff and soil erodibility on available nitrogen losses from sloping farmland affected by agricultural practices. *Agricultural Water Management*, 2016, 176: 1-8.
- [22] ZHANG J H, LI F C. Soil redistribution and organic carbon accumulation under long-term (29 years) upslope tillage systems. *Soil Use and Management*, 2013, 29(3): 365-373.
- [23] LUO J, ZHENG Z, LI T, HE S. Spatial heterogeneity of microtopography and its influence on the flow convergence of slopes

- under different rainfall patterns. *Journal of Hydrology*, 2017, 545: 88-99.
- [24] 白伟, 孙占祥, 郑家明, 郝卫平, 刘勤, 刘洋, 冯良山, 蔡倩. 虚实并存耕层提高春玉米产量和水分利用效率. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 81-90.
- BAI W, SUN Z X, ZHENG J M, HAO W P, LIU Q, LIU Y, FENG L S, CAI Q. Furrow loose and ridge compaction plough layer improves spring maize yield and water use efficiency. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(21): 81-90. (in Chinese)
- [25] 李富程, 花小叶, 王彬. 紫色土地旋耕机耕作侵蚀特征. *中国水土保持科学*, 2016, 14(1): 71-78.
- LI F C, HUA X Y, WANG B. Rate and pattern of tillage erosion by rotary cultivator on the steep land of purple soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(1): 71-78. (in Chinese)
- [26] ZHAO P, LI S, WANG E, CHEN X, DENG J. Tillage erosion and its effect on spatial variations of soil organic carbon in the black soil region of China. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 72-81.
- [27] 任雨之, 郑江坤, 付滢, 王文武, 曾倩婷, 向明辉, 陈鑫. 不同耕种模式下遂宁组紫色土坡耕地产流产沙特征. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 30-38.
- REN Y Z, ZHENG J K, FU Y, WANG W W, ZENG Q T, XIANG M H, CHEN X. Characteristics of runoff and sediment yield in purple soil sloping farmland under different tillage patterns in Suining formation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 30-38. (in Chinese)
- [28] 朱波, 陈实, 游祥, 彭奎, 张先婉. 紫色土退化旱地的肥力恢复与重建. *土壤学报*, 2002(5): 743-749.
- ZHU B, CHEN S, YOU X, PENG K, ZHANG X W. Soil fertility restoration on degraded upland of purple soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2002(5): 743-749. (in Chinese)
- [29] 苏正安, 熊东红, 张建辉, 董一帆, 杨超, 张小波, 鲜纪绅. 紫色土坡耕地土壤侵蚀及其防治措施研究进展. *中国水土保持*, 2018(2): 42-47, 69.
- SU Z A, XIONG D H, ZHANG J H, DONG Y F, YANG C, ZHANG X B, XIAN J S. Research progress of soil erosion of purple soil slope farmland and its prevention and control measures. *Soil and Water Conservation in China*, 2018(2): 42-47, 69. (in Chinese)
- [30] 王亚男, 徐梦洁, 申燕, 黄化刚, 陈雪, 庄舜尧. 毕节市土壤耕作层厚度的空间变异特征. *贵州农业科学*, 2018, 46(10): 81-84.
- WANG Y N, XU M J, SHEN Y, HUANG H G, CHEN X, ZHUANG S Y. Spatial variation characteristics of soil tillage layer thickness in Bijie city. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2018, 46(10): 81-84. (in Chinese)
- [31] 黄少燕, 查轩. 坡耕地侵蚀过程与土壤理化特性演变. *山地学报*, 2002(3): 290-295.
- HUANG S Y, ZHA X. Study on soil erosion process and evolution of soil physicochemistry characteristics on sloping farmland. *Journal of Mountain Science*, 2002(3): 290-295. (in Chinese)
- [32] ZHANG J, QUINE T A, SHIJUN N I, FANGLONG G E. Stocks and dynamics of SOC in relation to soil redistribution by water and tillage erosion. *Global Change Biology*, 2006, 12(10): 1834-1841.
- [33] ZHANG Q, CHEN S, DONG Y, LIU D, YANG X, YANG Z. Controllability of phosphorus losses in surface runoff from sloping farmland treated by agricultural practices. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(5): 1704-1716.

(责任编辑 李云霞)