

DOI: 10.11766/trxb202011090401

江娜, 史东梅, 曾小英, 叶青, 张健乐, 李辉丹. 土壤侵蚀对紫色土坡耕地耕层障碍因素的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59 (1): 105–117.
JIANG Na, SHI Dongmei, ZENG Xiaoying, YE Qing, ZHANG Jianle, LI Huidan. Influence of Soil Erosion on the Obstacle Factors of Cultivated Layer in Purple Sloping Farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (1): 105–117.

土壤侵蚀对紫色土坡耕地耕层障碍因素的影响*

江娜¹, 史东梅^{1†}, 曾小英², 叶青¹, 张健乐¹, 李辉丹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)

摘要: 紫色土坡耕地是长江上游重要的耕地资源, 明确不同侵蚀程度下紫色土坡耕地耕层土壤的主要障碍因素及障碍因素变化特征, 对紫色土坡耕地耕层土壤质量调控和持续利用具有重要价值。以紫色土坡耕地耕层土壤为研究对象, 设置 5 个侵蚀程度 (0、5、10、15、20 cm) 的原位控制试验。从土壤属性角度出发, 选取容重、总孔隙度、饱和导水率、土壤紧实度、土壤抗剪强度、有机质、全氮、全磷、pH、阳离子交换量等 10 个耕层质量指标, 计算耕层质量指数 (Cultivated-layer quality index, CLQI) 及障碍度 (Obstacle degree, M_{ij}), 定量评价不同侵蚀程度下耕层质量和障碍度变化特征。结果表明: (1) 土壤侵蚀导致紫色土坡耕地耕层土壤质量指标恶化。总孔隙度、饱和导水率、抗剪强度、阳离子交换量、全氮、全磷随着侵蚀程度增加而减小, 容重、土壤紧实度则随着侵蚀程度增加而增大。(2) 紫色土坡耕地耕层质量指标障碍度排序依次为土壤紧实度 (17.04%) > 饱和导水率 (15.83%) > 全氮 (11.49%) > 有机质 (11.47%) > 全磷 (10.73%), 耕层质量主要障碍因素为土壤紧实度、饱和导水率、全氮、有机质、全磷。(3) 土壤侵蚀对土壤紧实度的障碍度影响效果极显著 ($P < 0.01$); 管理措施对土壤紧实度的障碍度影响效果显著 ($P < 0.05$), 对有机质、饱和导水率的障碍度影响效果极显著 ($P < 0.01$); 土壤侵蚀与管理措施的交互作用对饱和导水率、有机质的障碍度影响效果显著 ($P < 0.05$)。紫色土坡耕地耕层主要障碍类型分为土壤养分贫瘠型和土壤酸化型。研究结果可为紫色土坡耕地耕层质量调控提供理论依据。

关键词: 耕层质量; 障碍因素; 土壤侵蚀; 耕层障碍类型; 紫色土坡耕地

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

Influence of Soil Erosion on the Obstacle Factors of Cultivated Layer in Purple Sloping Farmland

JIANG Na¹, SHI Dongmei^{1†}, ZENG Xiaoying², YE Qing¹, ZHANG Jianle¹, LI Huidan¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Academy of Forestry Sciences, Chongqing 400036, China)

Abstract: 【Objective】 Purple soil sloping farmland is an important cultivated land resource in the upper reaches of the Yangtze River. Therefore, clarifying the change characteristics and main obstacle factors influencing purple soil sloping farmland under different erosion degrees is important. 【Method】 In a cultivated layer of sloping farmland, five erosion degrees (0, 5, 10, 15, 20 cm) were set up in situ. The cultivated layer quality index (CLQI) and obstacle degree (M_{ij}) were calculated by selecting 10 quality

* 国家自然科学基金项目 (41771310) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41771310)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: shidm_1970@126.com

作者简介: 江娜 (1996—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与土壤质量评价研究。E-mail: m18725617837@163.com

收稿日期: 2020-11-09; 收到修改稿日期: 2021-07-17; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-10-21

indexes, including bulk density, total porosity, saturated hydraulic conductivity, soil compactness, soil shear strength, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, pH and cation exchange capacity. Thus, the change characteristics of cultivated layer quality and obstacle degree under different erosion degrees were quantitatively evaluated. 【Result】 Soil erosion destroyed the structure of the cultivated layer, resulting in deterioration of cultivated layer quality index. Total porosity, saturated hydraulic conductivity, shear strength, cation exchange capacity, total nitrogen and total phosphorus decreased with the increase of erosion degree, while bulk density and soil compaction increased with the increase of erosion degree. The order of obstacle degree from cultivated layer quality was soil compaction (17.04%) > saturated hydraulic conductivity (15.83%) > total nitrogen (11.49%) > organic matter (11.47%) > total phosphorus (10.73%). The main obstacle factors of cultivated layer quality were soil compaction, saturated hydraulic conductivity, total nitrogen, organic matter and total phosphorus. The effect of soil erosion and management measures on soil compaction was significant ($P < 0.01$) while the effect of management measures on organic matter and saturated hydraulic conductivity was extremely significant ($P < 0.01$). Also, the interaction between soil erosion and management measures had a significant ($P < 0.05$) effect on saturated hydraulic conductivity and organic matter. 【Conclusion】 The main obstacles of cultivated layer types of purple soil sloping farmland can be divided into soil nutrient-poor obstacle and soil acidification obstacle. All the findings above can provide a theoretical basis for quality control of purple soil sloping farmland.

Key words: Cultivated-layer quality; Obstacle factors; Soil erosion; Obstacle cultivated layer; Purple soil sloping farmland

坡耕地是重庆主要耕地资源类型, 坡耕地在未来仍然是重庆重要粮食和农产品生产基地^[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], 但土层浅薄、侵蚀性高、抗旱性差、退化严重^[3]。因此, 研究不同侵蚀条件下紫色土坡耕地耕层障碍特征, 对于紫色土坡耕地障碍耕层调控、生产力提高具有重要意义。土壤质量是土壤多种功能的综合体现, 直接关系到作物生长及产量^[4-5]; 而坡耕地耕层质量指沿土壤剖面农作物 80%~90%根系活动层及其下层的土壤质量特性、垂直组合状况及其坡面立地条件^[6], 坡耕地耕层质量受降雨、土壤、人类活动等多种因素影响, 导致土壤属性发生剧烈变化, 并且会限制土壤的生产力, 导致坡耕地面积减少、农作物产量下降, 形成影响土壤质量的障碍因素^[7]。耕层浅薄、犁底层增厚、养分贫瘠等是坡耕地耕层质量障碍的突出表现^[8]。土壤质量评价的目的既是对土壤质量的优劣进行评判, 又是对影响土壤质量的障碍因素进行寻找, 以便调控土壤质量, 维持土壤生态健康。因此, 需进一步对土壤质量进行病理诊断。为简化问题的表达, 引入“因子贡献度”、“指标偏离度”和“障碍度”^[9]。

国内外学者分别从土壤物理属性、土壤肥力状况等角度对土壤障碍进行分析、评价。Rezaei 等^[10]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、抗侵蚀性能的障碍情况。Drechsel 等^[11]对非洲撒哈拉沙漠以南

的 36 个国家耕地土壤的 N、P、K 含量进行了研究, 提出撒哈拉以南的非洲国家耕地土壤肥力状况为主要障碍; 解雪峰等^[12]基于 TOPSIS 模型及障碍度模型, 分析研究区土壤质量的变化, 并对其主要土壤物理障碍因子进行诊断。王琪琪等^[13]对江苏省如东县不同年限的滩涂围垦区采用土壤质量综合指数法进行土壤质量评价, 引入土壤质量障碍因子诊断模型分析影响土壤肥力障碍因子。张贝尔等^[14]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; 樊亚男等^[15]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 3 大障碍类型区; 杨奇勇等^[16]在 GIS 技术支持下, 引入障碍因子诊断模型对引起禹城市土壤养分贫瘠化因子进行障碍诊断。

坡耕地耕层质量评价宜从农作物生产过程中对土壤质量需求和地块尺度上土壤性质适宜程度进行综合分析, 目前障碍模型多用于生态修复过程中土壤指标间相互适应作用的评价, 而在农业生产, 尤其是坡耕地对障碍适宜性诊断中应用的研究较少。因此, 障碍度模型的引入, 不仅可以包括耕地土壤物理性指标, 而且可结合农作物产量的分析, 实现对坡耕地耕层质量的科学评价。障碍度模型是在质量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^[13]。本文以紫色土坡耕地耕层为研究对象, 基于不同侵蚀条件坡耕

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，并对坡耕地耕层障碍类型进行划分，可为紫色土坡耕地耕层质量改良、生产力提高提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验小区位于重庆市万州区，属亚热带季风气候，年平均气温 17.7 °C，年平均日照时数 1 484 h，年平均降水 1 243 mm；土壤类型以紫色砂泥页岩母质上发育的中性紫色土为主，农作物种植制度为油菜/玉米，田面坡度均为 15°。

铲土侵蚀模拟小区于 2018 年 2 月建立，8 月测定作物产量。铲土侵蚀模拟小区是人工剥离土壤侵蚀模拟试验，其原理为通过人工铲除表土，以模拟不同侵蚀程度坡面，侵蚀模拟小区具体设计参见文献[17-18]，每个试验小区面积为 12 m²（长 4m×宽 3m）。试验设侵蚀程度和管理措施两个因素，其中侵蚀程度设 0（S₀）、5（S₅）、10（S₁₀）、15（S₁₅）和 20 cm（S₂₀）共 5 个水平，以未施肥为对照（CK）、设置化肥（F）、生物炭+化肥（BF）2 种土壤管理措施，各处理设 3 次重复，为了尽可能减少铲土后小区深度不同造成小气候差异对产量的影响，试验小区的周边坡统一修整成 15°，小区内地面坡度与原始坡面坡度保持一致。根据式（1）计算不同侵蚀深度条件下耕层厚度土壤构成（表 1）。

$$m = h_0 \left(1 - \frac{d}{m}\right)^n + h_1 \left(1 - \frac{d}{m}\right)^{n-1} + h_2 \left(1 - \frac{d}{m}\right)^{n-2} + \dots + h_i \left(1 - \frac{d}{m}\right)^{n-i} + h_n \left(1 - \frac{d}{m}\right) + h_n, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中， h_i 为原始 i 土层的厚度； d 为多年平均侵蚀厚度。本文根据紫色丘陵区坡耕地径流小区观测结果， d 取 0.25 cm； m 为耕层厚度，取 20 cm； n 为侵蚀年限。将原始土层在耕层（0~20 cm）以下以 5 cm 为间隔分层。

紫色土坡耕地的土体构型（图 1b）分为耕作层（0~20 cm）、心土层（20~40 cm）、底土层（>40 cm）。耕作层又分为表土层（0~15 cm）和犁底层（15~20 cm），耕作层和心土层可为作物提供生长需求。

小区建立时生物炭以 15 t·hm⁻²，复合肥（N：P₂O₅：K₂O=25：12：18）以 277.5 kg hm⁻² 均匀撒在相应管理措施试验小区土壤表面，经过翻耕混入至耕作层土壤，玉米期根据当地种植习惯对 F 和 BF 管理措施进行两次追肥，分别为尿素（总氮 ≥ 46.4%），复合肥（N：P₂O₅：K₂O=25：12：18）。试验选用的生物炭原料为水稻秸秆，在 400 °C~500 °C 缺氧条件下热解 4 h，过 150 目筛，其 pH>7，含碳量大于 80%。

铲土侵蚀模拟试验小区采集 0~20 cm 土样，土壤样品理化性质的测定包括土壤总孔隙度（PT）、容重、饱和导水率（SC）、有机质（OM）、全氮（TN）、全磷（TP）、阳离子交换量（CEC）、pH，分析方法参见文献[19]。土壤总孔隙度、饱和导水率、容重采用环刀法测定；土壤有机质采用高温外热重铬酸钾氧化法测定；全氮采用开氏定氮法测定；全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定；阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定。pH 通过制备 1：2.5 土水质量比溶液，用 PHS-3C 型 pH 计测定。土壤抗剪强度（SS）采用便携式三头抗剪仪（14.10 Pocket Vane Tester 型，荷兰）进行测定；土壤紧实度（SCS）采用土壤紧实度测定仪（TJSD-750-II）进行测定。

表 1 不同侵蚀程度下坡耕地原位模拟小区的原始土层剩余厚度

Table 1 Residual thickness of original soil layer in situ simulation plot of sloping farmland with different erosion degree

编号 Number	模拟侵蚀深度 Simulated erosion depth /cm	模拟侵蚀年限 Simulated erosion age /a	原始土层 (h_i) Original soil layers /cm				
			0~20	20~25	25~30	30~35	35~40
S ₀	0	0	20	—	—	—	—
S ₅	5	20	15.55	4.45	—	—	—
S ₁₀	10	40	12.09	3.46	4.45	—	—
S ₁₅	15	60	9.40	2.69	3.46	4.45	—
S ₂₀	20	80	5.50	3.90	2.69	3.46	4.45

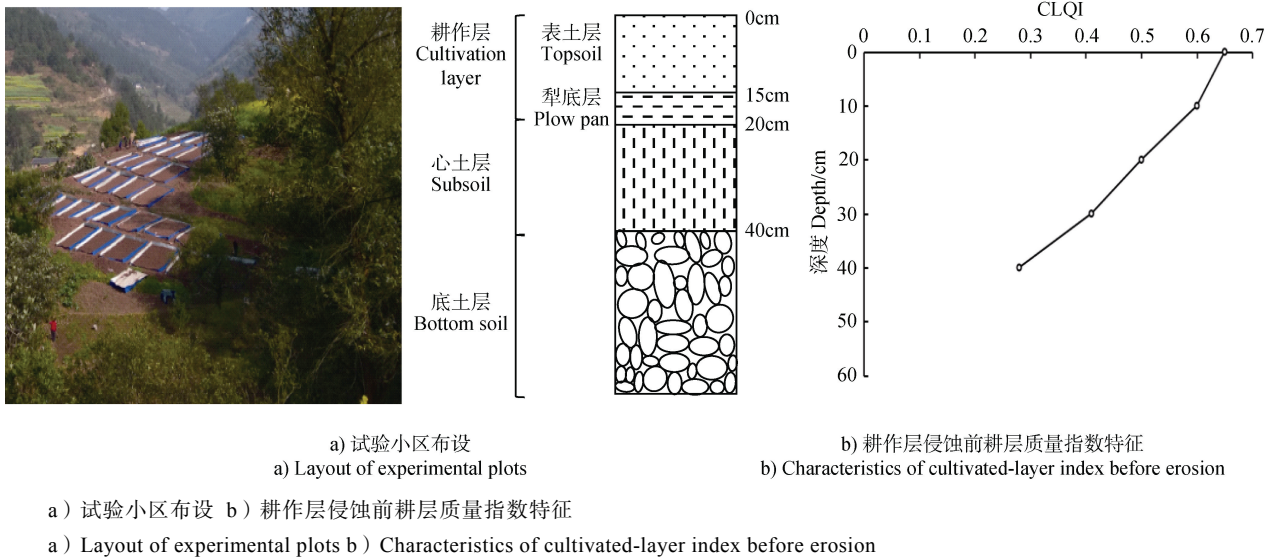


图 1 不同侵蚀程度的试验小区布设

Fig. 1 Layout of test plot with different erosion degree

1.2 耕层质量评价模型

耕层质量评价模型^[20]公式为:

$$CLQI = \prod_{i=1}^n (F_i)^{W_i} \quad (2)$$

式中, CLQI 为耕层质量指数 (cultivated-layer quality index), W_i 为第 i 个评价指标权重, F_i 为第 i 个评价指标隶属度值, n 为评价指标个数。根据土壤属性指标相关情况, 饱和导水率、土壤紧实度、抗剪强度、有机质、全氮、全磷、阳离子交换量、pH 与生产力呈正相关^[13], 界定为 S 型函数; 容重、总孔隙度界定为抛物线型函数; 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 障碍因素模型

土壤障碍因素评价可以科学反映出土壤管理措施对坡耕地耕层改良效果, 本文在耕层质量评价基础上, 选用如下耕层质量障碍因子诊断模型^[21-22], 可定量判断出不同侵蚀程度条件下, 坡耕地障碍因素变化特征。

$$M_{ij} = \frac{P_{ij}W_j}{\sum_{j=1}^m P_{ij}W_j} \times 100\% \quad (3)$$

$$\overline{M}_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ij}}{n} \quad (4)$$

式中, M_{ij} 为第 i 个地块第 j 个指标的障碍度, 第 j 项指标对耕层质量的作用, 表示耕层质量障碍因子诊断的目标与结果, \overline{M}_{ij} 为第 j 个指标的平均障碍度; $P_{ij} = 1 - N_{ij}$ 表示耕层单项指标与耕层理想状态 (隶属度为 1) 的差距, 数值越大对耕层质量越不利, N_{ij} 为第 i 个地块第 j 个指标的隶属度值; W_j 为单项指标对总体的贡献率, 即指标权重 (表 1), 由 M_{ij} 大小排序可以确定紫色土坡耕地障碍因素主次关系和各障碍因素对耕层质量影响程度。按照等距法将指标障碍度分为 I 无障碍 (0)、II 轻度障碍 (0~10%)、III 中度障碍 (10%~20%) 和 IV 重度障碍 ($\geq 20\%$) 4 个等级^[23]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016、SPSS 22.0 进行统计分析及方差分析, 采用 Design Expert 软件进行响应曲面优化法分析, 对耕层管理措施进行优化。

2 结果

2.1 土壤侵蚀对紫色土坡耕地耕层质量变化的影响

2.1.1 耕层土壤属性变化特征 土壤物理性质、土壤养分高低和供肥能力是评价耕层质量的主要参数。由图 2 可知, 土壤总孔隙度、饱和导水率 (SC)、抗剪强度 (SS) 随着侵蚀程度的增加而减小, 与 BF₀

相较 BF₅、BF₁₀、BF₁₅、BF₂₀ 饱和导水率分别减小了 18.77%、29.99%、36.45%、45.55%; 与 BF₀ 相比, BF₂₀ 抗剪强度减小程度最大 (50.78%)。不同侵蚀程度下容重 (BD) 范围为 1.30~1.45 g·cm⁻³, 容重、土壤紧实度随着侵蚀程度的增加而增加。pH 在 BF₀、BF₅ 先降低, 而后在 BF₁₀、BF₁₅ 趋于稳定, 至 BF₂₀ 逐渐下降; 阳离子交换量 (CEC)、全磷 (TP)、全氮 (TN) 含量范围为 16.60~29.21 cmol·kg⁻¹、0.60~0.88 g·kg⁻¹、0.40~0.65 g·kg⁻¹, 阳离子交换量、全磷、全氮、有机质随侵蚀程度的增加而减小。

2.1.2 土壤侵蚀对耕层土壤质量和玉米产量的影响

同一种管理措施下, 随着侵蚀程度的增加, 土壤养分降低, 供肥能力下降, 从而影响耕层质量, 导致农作物减产。由图 2 可知, 同一种管理措施下, 耕层质量指数随着侵蚀程度增加而减小。由图 3 可知, 耕层质量指数由 CK₀ 时的 0.63 降至 CK₂₀ 时的 0.12, 产量由 CK₀ 时的 1.13 t·hm⁻² 降至 CK₂₀ 时的 0.87 t·hm⁻², 减产率为 23.72%; 耕层质量指数由 F₀ 时的 0.67 降至 F₂₀ 时的 0.20, 减小了 70.14%, 产量由 F₀ 时的 1.23 t·hm⁻² 降至 F₂₀ 时的 0.90 t·hm⁻², 减

表 2 评价指标类型、隶属函数及权重

Table 2 Types, membership functions and weights of evaluation indexes

隶属函数类型 Membership function type	指标 Index	隶属函数 Membership function	隶属函数参数 Membership function parameters				公因子方差 Common factor variance	权重 Index weight
			a ₁	b ₁	b ₂	a ₂		
抛物线型 Parabola type	容重 BD/ (g·cm ⁻³)	$\mu_x = \begin{cases} 1, (b_2 \geq x \geq b_1) \\ \frac{x-a_1}{b_1-a_1}, (a_1 < x < b_1) \\ \frac{x-a_2}{b_2-a_2}, (a_2 > x > a_1) \\ 0, (x \leq a_1 \text{ or } x \geq a_2) \end{cases}$	1.25	1.30	1.40	1.49	0.962	0.105
	总孔隙度 PT/ %		42.41	45.00	55.00	67.00	0.905	0.099
	饱和导水率 SC/ (mm·min ⁻¹)		16.00	-	-	39.00	0.945	0.103
	土壤紧实度 SCS/ (kg·cm ⁻²)		30.13	-	-	132.00	0.823	0.090
	抗剪强度 SS/ (N·cm ⁻²)		4.00	-	-	9.00	0.926	0.101
S 型 S-type	有机质 SOM / (g·kg ⁻¹)	$\mu_x = \begin{cases} 1, (x \geq a_2) \\ \frac{x-a_1}{b-a_1}, (a_1 < x < a_2) \\ 0, (x \leq a_1) \end{cases}$	6.38	-	-	12.14	0.975	0.106
	全氮 TN / (g·kg ⁻¹)		0.34	-	-	0.75	0.945	0.103
	全磷 TP / (g·kg ⁻¹)		0.52	-	-	0.97	0.907	0.099
	pH		4.57	-	-	6.09	0.865	0.094
	阳离子交换量 CEC / (cmol·kg ⁻¹)		14.46	-	-	29.98	0.924	0.101

注: $\mu(x)$ 为隶属函数, x 为评价指标实测值, a_1 、 a_2 分别表示指标临界值的下限和上限, 本研究分别取实测的最小值和最大值; b_1 、 b_2 为最适值的上下界点, 其值根据研究区域实测结果综合对比确定。Note: $\mu(x)$ is the membership function and x is the measured value of the evaluation index. a_1 and a_2 represent the lower and upper limits of the index threshold, respectively. The minimum and maximum values of the measured values are taken in this study. b_1 and b_2 are the upper and lower boundaries of the optimum value, and the values are determined according to the comprehensive comparison of the measured results in the study area.

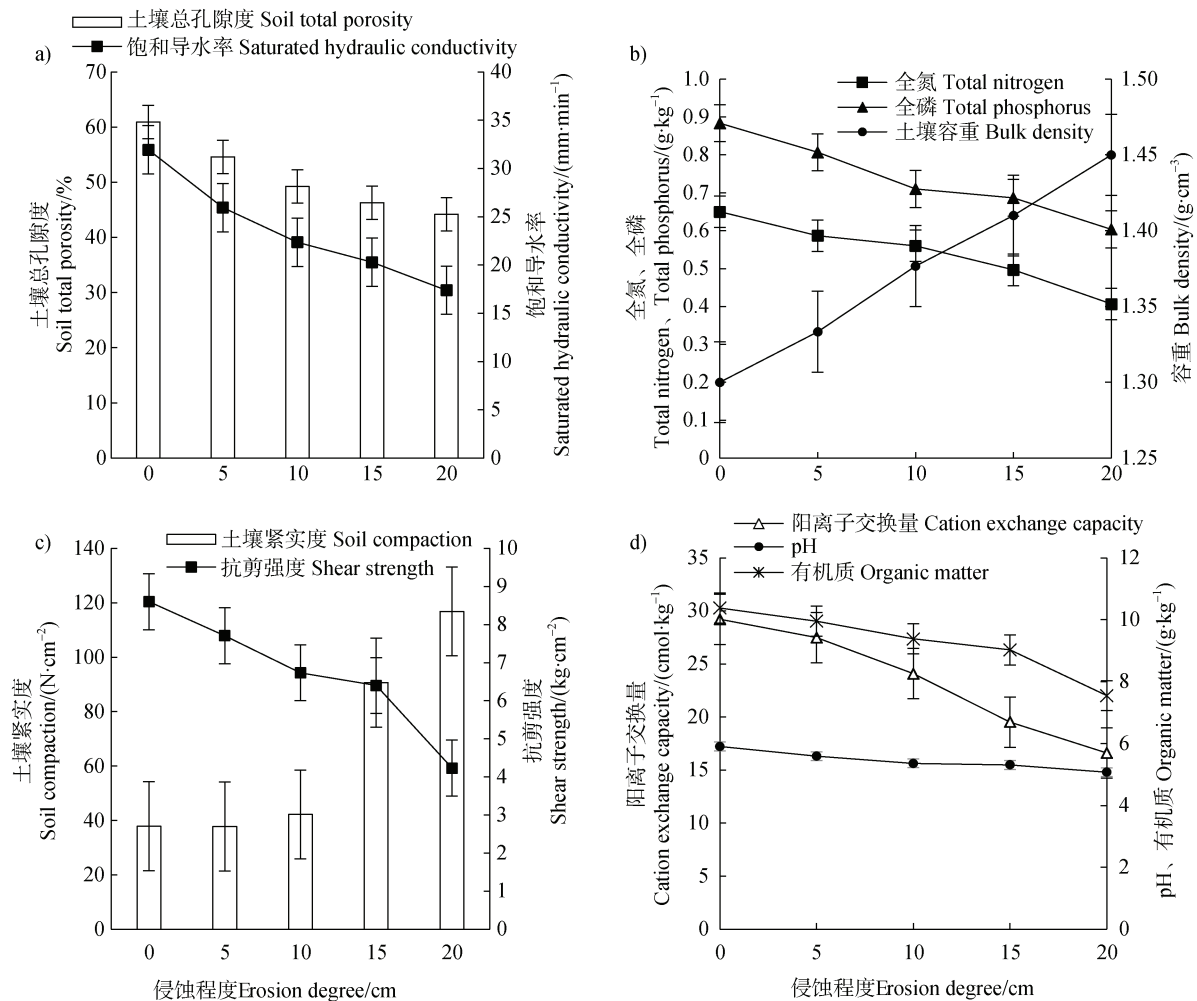


图2 耕层质量指标随侵蚀程度的变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of cultivated layer quality index with erosion degree

产率为 23.00%；耕层质量指数由 BF₀ 时的 0.68 降至 BF₂₀ 时的 0.36，减小了 47.05%，产量由 BF₀ 时的 1.35 t·hm⁻² 降至 BF₂₀ 时的 0.90 t·hm⁻²，减产率为 20.73%，表明耕层质量指数、产量随着侵蚀程度增加呈现有规律的递减，培肥后的农田生产力得到了有效的改善和提升。

不同侵蚀程度下耕层质量指数、产量模型拟合精度存在差异（图 3），未施肥代表着土壤自然生产力，施肥代表着农田生产力，施肥并加生物炭代表着培肥后的农田生产力。不同侵蚀程度下土壤自然生产力与产量、耕层质量指数模型的决定系数分别为 0.9504、0.7848；不同侵蚀程度农田生产力与产量、耕层质量指数模型的决定系数分别为 0.9798、0.8187；不同侵蚀程度培肥后农田生产力与产量、耕层质量指数模型的决定系数为 0.9592、0.8674。

从拟合优度考虑，不同侵蚀程度农田生产力与产量模型拟合效果最好，不同侵蚀程度培肥后的农田生产力与产量模型拟合效果次之，不同侵蚀程度的自然生产力与产量模型拟合效果较差；不同侵蚀程度培肥后农田生产力与耕层质量指数模型拟合效果最好，不同侵蚀程度农田生产力与耕层质量指数模型拟合效果次之，不同侵蚀程度土壤自然生产力与耕层质量指数模型拟合效果较差。

2.2 土壤侵蚀对紫色土坡耕地耕层障碍因素的影响

2.2.1 土壤属性对产量的影响

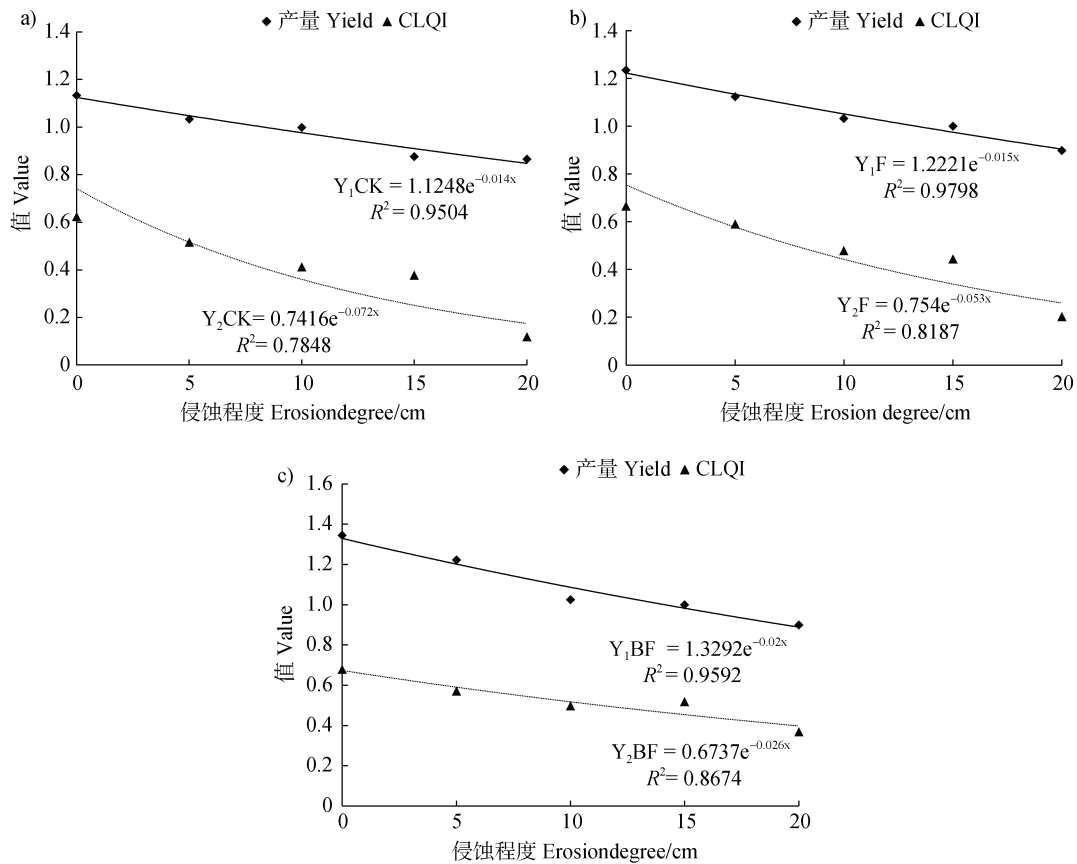
为了阐明土壤属性与产量、耕层质量之间的关系，将土壤属性进行冗余分析。土壤侵蚀程度与土壤属性指标的 RDA 排序统计结果表明，第一、第二排序轴特征值分别为 0.7014、0.0101，第一轴特征值大，表明能够反映产

量与土壤属性指标的绝大部分信息，并且主要是由第 I 轴决定。所有排序轴的特征值和为 0.9747，解释变量占 98.58%，调整解释变量 92.21%，前四轴产量与耕层物理性质相关系数均在 70.00%以上。通过蒙特卡罗置换检验，第一排序轴和所有排序轴的显著性 P 值均为 0.002，达到极显著性水平，说明样本间差异由抽样误差所致的概率较小，与其土壤属性指标间的关系较为密切。表明土壤属性指标排序结果能解释土壤属性指标与产量的关系。

通过对土壤理化性质进行蒙特卡罗检验排序（表 3），研究土壤属性指标对产量影响的重要性。表明各耕层质量指标对产量影响重要性由大到小为：PT>TP>TN>SS>CEC>SCS>SOM>pH>SC，圆圈内耕层土壤属性指标对产量影响均达到极显著水平

($P<0.01$)。从图 4 可知，排序图中耕层土壤属性的空间聚集性反映了耕层质量指标对产量的影响。在土壤属性指标排序图分布上可知，从箭头夹角而言，产量与总孔隙度、有机质、TP、CEC 呈正相关，产量与抗剪强度、饱和导水率、TN、pH 呈负相关。土壤紧实度、容重对第一轴的贡献率很大，土壤紧实度、容重与第一轴呈负相关关系。因此土壤侵蚀是导致土壤紧实度增加，土壤出现板结。

2.2.2 耕层土壤质量的障碍因素 由表 4 可知，研究区土壤质量指标障碍程度的排序为土壤紧实度 (17.04%)>饱和导水率 (15.83%)>全氮 (11.49%)>有机质 (11.47%)>全磷 (10.73%)>抗剪强度 (9.15%)>阳离子交换量 8.12%)>pH (7.95%)>总孔隙度 (6.30%)>容重 (1.94%)，根据障碍程度



注：CK 为未施肥小区，未施肥代表着土壤自然生产力；F 为施化肥小区，施肥代表着农田生产力；BF 为施生物炭+化肥小区，施肥+生物炭代表着培肥后的农田生产力。 Y_1 为耕层质量指数， Y_2 为玉米产量， x 为侵蚀程度。Note: CK is the plot without fertilization, which represents the natural productivity of soil; F is the plot of fertilizer application, and fertilization represents the productivity of farmland; BF is the plot of biochar + chemical fertilizer, and fertilization plus biochar represents the farmland productivity after fertilization. Y_1 is the topsoil quality index, Y_2 is maize yield, and x is erosion degree.

图 3 土壤侵蚀对紫色土坡耕地耕层质量及玉米产量的影响

Fig. 3 Effect of soil erosion on quality of cultivated layer and yield of maize in purple soil sloping farmland

表 3 土壤属性解释的产量重要性排序和显著性检验结果

Table 3 Results of yield importance ranking and significance test of soil attribute interpretation

土壤属性指标 Soil attribute index	重要性排序 Importance ranking	土壤属性所占解释量 Explanation of soil properties/%	F	P
容重 BD/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	5	76.3	41.8	0.00002
总孔隙度 PT/%	1	88	95.2	<0.00001
饱和导水率 SC/ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	9	23.7	4	0.06556
土壤紧实度 SCS/ ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	6	63.2	22.3	0.0004
抗剪强度 SS/ ($\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$)	4	82.2	60.2	<0.00001
有机质 SOM/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	7	62.4	21.5	0.00046
全氮 TN/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	3	83.9	67.7	<0.00001
全磷 TP/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	2	86.3	81.9	<0.00001
pH	8	53.8	15.1	0.00185
阳离子交换量 CEC/ ($\text{cmo}\cdot\text{kg}^{-1}$)	5	76.3	41.9	0.00002

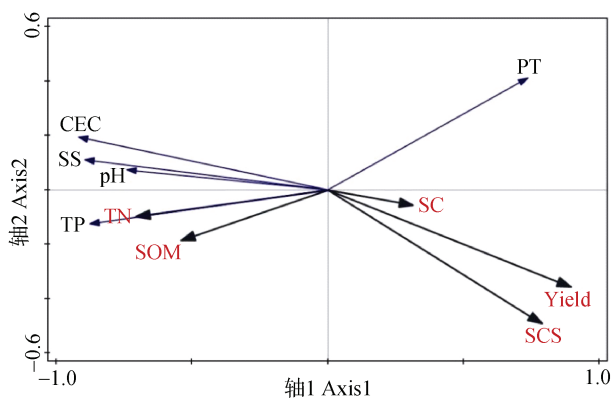


图 4 不同侵蚀程度下紫色土坡耕地 RDA 排序图

Fig. 4 RDA sequence diagram of purple soil slope farmland with different erosion degree

分级得出, 耕层质量的主要障碍因子是较高的土壤紧实度、较低的饱和导水率、全氮、有机质、全磷, 但不同侵蚀程度的障碍因子不尽相同。综合来看, S_{0} 饱和导水率和有机质对耕层质量的障碍度占主导地位, 容重、总孔隙度、饱和导水率、土壤紧实度、抗剪强度、有机质、TN 和 CEC 的障碍度随着侵蚀程度的增加而增加, 而 TP 和 pH 的障碍度先增加至 S_{10} 再减小, TP 的障碍程度虽有下降但仍然居于主导地位。阳离子交换量的障碍度由 S_{10} 时的轻度障碍 (8.05%) 变为 S_{20} 时的中度障碍 (12.43%), 增加了 54.41%。pH 的障碍度均处于轻度障碍。

2.3 坡耕地耕层土壤质量指标障碍度的响应特征

坡耕地耕层质量指标障碍度的响应曲面图可评

价侵蚀程度与管理措施对耕层障碍因子影响值的两两交互作用, 以及确定各个因素的最佳水平范围。如果一个响应曲面坡度相对平缓, 表明障碍指标可以受处理条件的影响, 而不影响到响应值的大小; 相反, 如果一个响应曲面坡度非常的陡峭, 表明响应值对于处理条件的改变非常敏感。同时等高线的形状可反映出交互效应的强弱大小, 椭圆形表示两因素交互作用显著, 而圆形则与之相反, 此时两因素交互作用可忽略^[24]。图 5a 可知, 在 BF 条件下曲面图较陡峭, 表明土壤紧实度障碍度对 BF 条件的改变非常敏感, 侵蚀程度对土壤紧实度障碍度影响极显著 ($P<0.01$)。同一管理措施条件下, 土壤紧实度障碍度随着侵蚀程度增加而减小, 同一侵蚀程度下, 土壤紧实度的障碍特征表现为: $\text{BF}>\text{F}>\text{CK}$, 由图可直观地看出侵蚀程度和管理措施交互作用对土壤紧实度障碍影响不显著。图 5b 可知, 当侵蚀程度大于 10 cm 时, 曲面图较陡峭, 表明较高侵蚀程度对饱和导水率障碍度影响较强, 等值曲线显示了管理措施对饱和导水率障碍度影响极显著 ($P<0.01$), 侵蚀程度和管理措施对饱和导水率的障碍度交互影响效应显著 ($P<0.05$)。

同一管理措施下, 饱和导水率障碍度随着侵蚀程度的增加而增加, 同一侵蚀程度下, 饱和导水率的障碍度特征为: $\text{F}>\text{BF}>\text{CK}$ 。图 5c 的等值曲线不平行, 且趋于椭圆形, 说明土壤侵蚀与管理措施交互作用对有机质障碍度影响效应极显著

($P < 0.01$), 管理措施对饱和导水率障碍度影响极显著 ($P < 0.01$)。同一侵蚀程度下, 有机质障碍度表现为: $F > BF > CK$, 同一管理措施下, 有机质障碍度随着侵蚀程度增加逐渐减小。图 5d 可知, BF 时曲面图较陡峭, 表明管理措施对全氮的障碍影

响较强。同一侵蚀程度下, 全氮的障碍度表现为: $BF > F > CK$, 同一管理措施下, 全氮障碍度随着侵蚀程度增加而增加。等值曲线趋近于圆型, 表明侵蚀程度和管理措施交互作用对全氮障碍度影响效应不显著。

表 4 不同侵蚀条件下紫色土坡耕地土壤质量指标障碍度

Table 4 Soil quality index obstacle degree of purple soil sloping farmland under different erosion conditions /%

侵蚀程度 Degree of erosion	容重 BD ^①	总孔隙度 PT ^②	饱和导水率 SC ^③	土壤紧实度 SCS ^④	抗剪强度 SS ^⑤	有机质 SOM ^⑥	全氮 TN ^⑦	全磷 TP ^⑧	pH	阳离子交换量 CEC ^⑩
S ₀	0.00	0.94	11.77	2.08	3.03	12.17	9.49	6.52	4.24	1.73
S ₅	0.00	1.70	14.32	7.92	7.43	10.78	11.83	9.85	8.28	4.43
S ₁₀	0.00	4.78	17.49	18.57	10.34	10.98	10.82	13.04	9.58	8.05
S ₁₅	2.11	4.96	17.66	24.70	10.70	11.30	12.89	12.70	9.24	12.43
S ₂₀	7.58	19.13	17.91	31.91	14.25	12.09	12.39	11.51	8.40	13.96
平均障碍度 \bar{M}_y ^⑩	1.94	6.30	15.83	17.04	9.15	11.46	11.48	10.73	7.95	8.12

①Bulk density; ②Total porosity; ③Saturated hydraulic conductivity; ④Soil compactness; ⑤Shear strength; ⑥Organic matter; ⑦Total nitrogen; ⑧Total phosphorus; ⑨Cation exchange capacity; ⑩Average obstacle

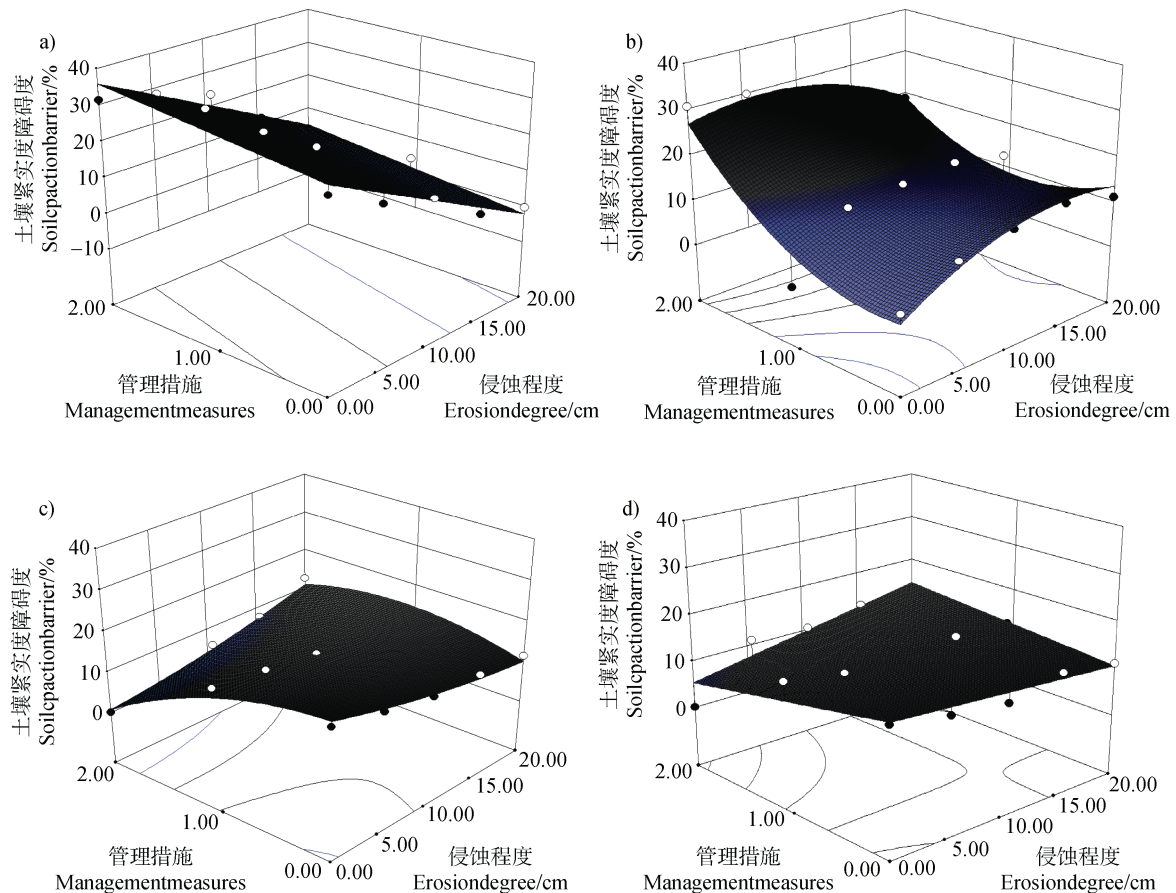


图 5 坡耕地障碍特征的响应分析

Fig. 5 Response analysis of obstacle characteristics of sloping farmland

3 讨 论

3.1 坡耕地土壤障碍层的形成过程

障碍耕层的形成是导致土壤理化性质变化、坡耕地耕层质量下降的根本原因^[25]。不同侵蚀程度下坡耕地耕层障碍存在显著差异,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^[6, 20, 26],合理耕层构建应以耕层剖面构建和土壤物理性质为重点,并且保持耕作层、心土层、底土层 3 层完整性^[6, 26]。因此,不合理耕层障碍类型应着重以耕层剖面构建及土壤物理性质为关注点,探究坡耕地障碍耕层的形成原因。坡耕地野外调查和相关文献^[6, 7, 25, 26]分析结果,紫色土坡耕地合理耕层适宜性阈值 pH 为 6.4~6.8、土壤有机质为 12.47~15.38 g·kg⁻¹、阳离子交换量为 21.6~24.2 cmol·L⁻¹、土壤全氮为 0.93~1.01 g·kg⁻¹、作物产量>7.50 t·hm⁻²。对本文耕层质量评价指标进行统计分析(表 6)可知,紫色土耕层剖面有机质均值为 9.26 g·kg⁻¹,土壤全氮均值为 0.54 g·kg⁻¹,远低于合理耕层适宜性阈值,因此,本类型的耕层为土壤养分贫瘠障碍耕层,跟相关研究结果一致^[6, 23]。由表 5 可知,紫色土耕层剖面 pH 均值为 5.45,远低于合理耕层适宜性阈值,土壤阳离子交换量均值为 23.38 cmol·kg⁻¹,高于合理耕层适宜性阈值,因此,本类型的耕层为土壤酸化障碍型耕层。紫色土的成土时间较短,土壤中矿质组分丰富,紫色土的矿物成分可能是其具有较高阳离子交换量的主要原因。阳离子交换量决定了土壤表面阳离子交换位点的数量,交换位点数量越多,土壤能够吸附的盐基阳离子也就更多,紫色土耕层剖面 pH 较低,因此中性紫色土已经出现了一定程度的酸化,酸化的紫色土具有较高的阳离子交换量^[27]。

本文根据障碍度模型做出垂直剖面耕层土壤质量指标的障碍度变化特征,耕作层饱和导水率障碍度(42.68%)远大于心土层饱和导水率障碍度(19.76%)。随着土层深度的增加,饱和导水率由重度障碍变为中度障碍,耕作层(0~20 cm)有机质由中度障碍(19.98%)增加至心土层(20~40 cm)有机质重度障碍(22.06%),土壤紧实度耕作层障碍度由轻度障碍增加到心土层的重度障碍,其原因为:一是在一些坡耕地土壤条件下,土壤有机质在一定范围内增加土壤孔性,提高土壤饱和导水率,在高

于某个范围时,土壤有机质的吸附作用将大于增加孔隙的导水作用,而降低土壤入渗性能^[28];二是土壤饱和导水率与土壤容重、土壤孔隙的多少有直接关系,土壤孔隙是土壤水分的输移通道,其孔隙数目的多少和分布直接影响饱和导水率,土壤侵蚀导致耕作层孔隙结构被破坏,而降低了土壤入渗性能,形成水分限制型耕层。当重度侵蚀时,土壤耕作层、心土层有机质均为重度障碍,心土层与耕作层有机质障碍度相比,减小了 36.56%;TP 耕作层障碍度由重度障碍(20.54%)下降至心土层中度障碍(14.41%),由于侵蚀导致耕作层土壤养分障碍程度大,形成养分贫瘠障碍耕层。生物炭既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,有利于改善农作物抗旱性能^[29],因此可通过增施生物炭改善土壤水分障碍耕层、土壤养分贫瘠障碍耕层。S₀至 S₁₀,土壤 pH 的障碍度随侵蚀程度加剧而增大,S₁₀至 S₂₀,土壤 pH 的障碍度随着侵蚀程度加剧而减小,增施有机肥可有效改善土壤酸化障碍耕层。最大障碍因素为“土壤紧实度”,其原因可能为土壤侵蚀导致土壤孔隙结构被破坏,土壤孔隙空间压缩越多,土壤越紧实,长期传统耕作导致土壤紧实形成犁底层影响土壤质量和作物生长^[30]。再者,紫色土自身质地重、风化程度大、黏粒含量高,土壤容重增加,土壤更加紧实。

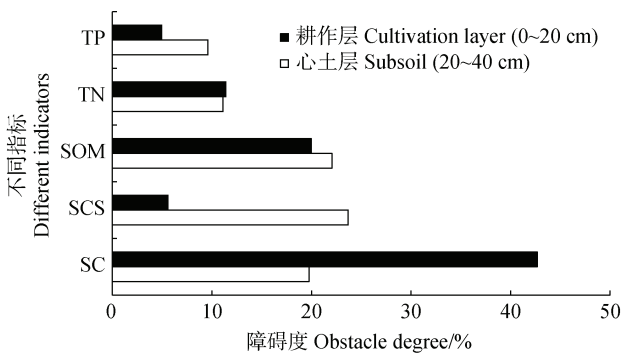
3.2 土壤侵蚀对坡耕地耕层质量的影响

土壤侵蚀导致坡耕地耕层土壤质量退化,耕层土壤质量退化直接表现为坡耕地耕层变薄,土壤物理、化学性质恶化和土壤生产力下降等特征,对坡耕地生态安全具有很大的潜在危险性,耕层变薄是导致土壤理化性质变化的根本原因^[26]。根据土壤质量指标障碍程度的排序结果可知,土壤物理指标障碍度大于土壤化学指标障碍度,土壤退化表现以土壤物理性退化为主,研究结果与 Xu 等^[20]和史东梅等^[26]研究一致。容重、土壤紧实度随侵蚀程度的增加而增加,饱和导水率、土壤总孔隙度随着侵蚀程度的增加而减小,其原因为:土壤侵蚀导致土壤孔隙结构被破坏,土壤入渗性能降低。本研究表明土壤养分退化特征表现为有机质、全氮、全磷随着侵蚀程度的增加而减小,土壤质量和养分供给能力随侵蚀程度的增加而逐渐退化,土壤有机质和全氮等养分含量明显损失。类似的相关研究,如周华

表 5 紫色土坡耕地耕层土壤质量评价指标统计特征

Table 5 Statistical characteristics of soil parameters in cultivated layer quality evaluation of purple soil sloping farmland

	平均数 Average	变异系数 Coefficient of variation/%	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	峰度 Kurtosis	偏斜度 Skewness	K-S 检验 K-S test
容重 BD/ (g·cm ⁻³)	1.37±0.061	4.45	1.25	1.49	0.197	-0.199	0.200
总孔隙度 PT/%	51.05±7.37	14.44	42.41	67.00	-0.417	0.779	0.040
饱和导水率 SC/ (mm·min ⁻¹)	23.58±6.92	29.36	16.00	39.00	0.540	1.170	0.149
土壤紧实度 SCS/ (kg·cm ⁻²)	65.05±35.20	54.11	30.13	132.00	-0.953	0.791	0.003
抗剪强度 SS/ (N·cm ⁻²)	6.73±1.56	23.15	4.00	9.00	-0.613	-0.515	0.200
有机质 SOM/ (g·kg ⁻¹)	9.26±1.62	17.46	6.38	12.14	-0.181	0.438	0.200
全氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	0.54±0.10	18.52	0.34	0.750	0.834	-0.094	0.200
全磷 TP/ (g·kg ⁻¹)	0.74±0.13	16.89	0.52	0.970	-0.083	0.504	0.129
pH	5.45±0.47	8.70	4.67	6.090	-1.269	-0.236	0.200
阳离子交换量 CEC/(cmo·kg ⁻¹)	23.38±5.37	22.98	14.46	29.98	-1.471	-0.293	0.151



TP: 全磷, Total Phosphorus; SOM: 有机质, Organic matter;
SCS: 土壤紧实度, Soil compactness; TN: 全氮, Total nitrogen;
SC: 饱和导水率, Saturated hydraulic conductivity

图 6 紫色土坡耕地土壤指标障碍度随土层深度的变化特征

Fig. 6 Variation Characteristics of vertical profile obstacle degree of purple soil sloping farmland

坤等^[31]的研究也表明土壤侵蚀越严重, 土壤养分则越贫瘠, 土壤有机质在表层流失严重, 养分含量下降会反作用于作物, 抑制作物生长, 进而诱发土壤侵蚀, 导致土壤质量持续恶化。此外, 本研究还发现, 土壤酸化过程随耕层侵蚀程度加剧表现为先下降而后趋于平稳, 然后下降的趋势, 可能原因为氮肥施入土壤后其硝化作用产生大量的 H⁺^[32]。由于受调查数据的获得性限制, 不同侵蚀程度与耕层土壤质量指标障碍模型中, 只选择了土壤物理指标、化学指标, 在后续小区定位研

究中拟增加贯入阻力、砂粒、粉粒、黏粒等指标, 以期更准确地反映坡耕地耕层障碍特征。

4 结 论

紫色土坡耕地耕层质量指标随着侵蚀程度增加变化明显, 土壤总孔隙度、饱和导水率、抗剪强度、阳离子交换量、有机质、全氮、全磷随侵蚀程度增加而减小, 容重、土壤紧实度则随侵蚀程度的增加而增加。农田生产力的侵蚀程度与产量模型拟合效果最好, 培肥后的农田生产力侵蚀程度与耕层质量指数模型拟合效果最好。土壤容重、总孔隙度、饱和导水率、土壤紧实度、抗剪强度、有机质、全氮和阳离子交换量的障碍度随土壤侵蚀程度加剧而增加, 紫色土坡耕地耕层质量指标障碍度的排序依次为土壤紧实度 (17.04%) > 饱和导水率 (15.83%) > 全氮 (11.49%) > 有机质 (11.47%) > 全磷 (10.73%) > 抗剪强度 (9.15%) > 阳离子交换量 (8.12%) > pH (7.95%) > 总孔隙度 (6.30%) > 容重 (1.94%), 耕层质量的主要障碍因子是较高的土壤紧实度、较低的饱和导水率、全氮、有机质、全磷。土壤侵蚀对土壤紧实度障碍度影响效果极显著 ($P < 0.01$), 而对有机质、饱和导水率、全氮障碍度影响效果不显著; 管理措施对土壤紧实度障碍度影响效果显著 ($P < 0.05$), 对有机质、饱和导水率障碍度影响效果

极显著 ($P < 0.01$); 土壤侵蚀与管理措施的交互作用对饱和导水率、有机质障碍度影响效果显著 ($P < 0.05$)。紫色土坡耕地的主要障碍耕层类型为土壤养分贫瘠障碍耕层、土壤酸化障碍耕层两类。生物炭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, 有利于农作物抗旱性能, 因此可通过增施生物炭改善土壤水分障碍耕层、土壤养分贫瘠障碍耕层。

参考文献 (References)

- [1] Department of Soil Research, Chengdu Branch, Chinese Academy of Sciences. Purple Soil of China (I) [M]. Beijing: Science Press, 1991. [中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土. 上篇[M]. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [2] Zhu B, Kuang F H, Gao M R, et al. Effects of soil thickness on productivity of sloping cropland of purple soil[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27 (6): 735—739. [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.]
- [3] Shi D M. Soil and water conservation on cultivated slope land in purple hilly area based on RUSLE model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24 (3): 39—44, 251. [史东梅. 基于 RUSLE 模型的紫色丘陵地区坡耕地水土保持研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24 (3): 39—44, 251.]
- [4] Chen X J, Zhao Y N, Chai G Q, et al. Integrated soil fertility and yield response to long-term different fertilization in purple soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (S1): 139—144. [陈轩敬, 赵亚南, 柴冠群, 等. 长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32 (S1): 139—144.]
- [5] Hu Q, Chen W F, Song X L, et al. Effects of reclamation/cultivation on soil quality of saline-alkali soils in the Yellow River Delta[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (4): 824—833. [胡琴, 陈为峰, 宋希亮, 等. 开垦年限对黄河三角洲盐碱地土壤质量的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57 (4): 824—833.]
- [6] Shi D M, Jiang G Y, Jiang P, et al. 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, 2017, 33 (13): 270—279. [史东梅, 蒋光毅, 蒋平, 等. 土壤侵蚀因素对紫色丘陵地区坡耕地耕层质量影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33 (13): 270—279.]
- [7] Jin H F, Shi D M, Chen Z F, et al. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (7): 155—164. [金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (7): 155—164.]
- [8] Jin H F, Shi D M, Zhong Y J, et al. Diagnosis of obstacle factors and degradation characteristics of cultivated-layer quality for red soil sloping farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (20): 84—93. [金慧芳, 史东梅, 钟义军, 等. 红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2019, 35 (20): 84—93.]
- [9] Peng B Z, An X D, Chen F, et al. A study on sustainable land use in the Yangtze River Delta[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16 (4): 305—312. [彭补拙, 安旭东, 陈浮, 等. 长江三角洲土地资源可持续利用研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16 (4): 305—312.]
- [10] Rezaei S A, Gilkes R J, Andrews S S. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands[J]. Geoderma, 2006, 136 (1/2): 229—234.
- [11] Drechsel P, Kunze D, de Vries F P. Soil nutrient depletion and population growth in sub-Saharan Africa: A Malthusian nexus?[J]. Population and Environment, 2001, 22 (4): 411—423.
- [12] Xie X F, Pu L J, Zhu M, et al. Assessment of soil quality in coastal tidal flat reclamation areas based on MDS-TOPSIS model[J]. Environmental Science, 2019, 40 (12): 5484—5492. [解雪峰, 濮励杰, 朱明, 等. 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价[J]. 环境科学, 2019, 40 (12): 5484—5492.]
- [13] Wang Q Q, Pu L J, Zhu M, et al. Soil quality evolution in coastal reclamation zones: A case study of Rudong County of Jiangsu Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36 (2): 256—264. [王琪琪, 濮励杰, 朱明, 等. 沿海滩涂围垦区土壤质量演变研究——以江苏省如东县为例[J]. 地理科学, 2016, 36 (2): 256—264.]
- [14] Zhang B E, Huang B, Zhao Y C, et al. Identification of areas low in soil fertility and analysis of their limiting factors in the region typical of the North China Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (5): 841—849. [张贝尔, 黄标, 赵永存, 等. 华北平原典型区土壤肥力低下区识别及限制因子分析[J]. 土壤学报, 2012, 49 (5): 841—849.]
- [15] Fan Y N, Yao L P, Qu M K, et al. Yield-based soil fertility quality assessment and constraint factor-based zoning of paddy soil—A case study of Jinxian County[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (5): 1157—1169. [樊亚男, 姚利鹏, 瞿明凯, 等. 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[J]. 土壤学报, 2017, 54 (5): 1157—1169.]
- [16] Yang Q Y, Yang J S, Yao R J, et al. GIS-based evaluation of soil nutrient depletion and analysis of its limiting factors in Yucheng City[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25 (8): 1375—1384. [杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江, 等. 基于 GIS 的耕地土壤养分贫瘠化评价及其障碍因子分析[J]. 自

- 然资源学报, 2010, 25 (8): 1375—1384.]
- [17] Jiang N, Shi D M, Jiang G Y, et al. Effects of soil erosion on physical and mechanical properties of cultivated layer of purple soil slope farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53 (9): 1845—1859. [江娜, 史东梅, 蒋光毅, 等. 土壤侵蚀对紫色土坡耕地耕层物理及力学特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53 (9): 1845—1859.]
- [18] Lou Y B, Shi D M, Jiang N, et al. Effects of soil erosion on soil moisture and infiltration characteristics of slope farmland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (6): 1399—1410. [娄义宝, 史东梅, 江娜, 等. 土壤侵蚀对坡耕地土壤水分及入渗特性影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (6): 1399—1410.]
- [19] Department of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Method for determination of soil physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1978: 140—148. [中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室[M]. 土壤物理性质测定方法. 北京: 科学出版社, 1978: 140—148.]
- [20] Xu M X, Li Q, Wilson G. Degradation of soil physicochemical quality by ephemeral gully erosion on sloping cropland of the hilly Loess Plateau, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 9—18.
- [21] Zhang R, Liu Y Z. Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and diagnosis of its obstacle indicators in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(7): 945—951. [张锐, 刘友兆. 我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22 (7): 945—951.]
- [22] Qin W X, Wang X C, Ma S C, et al. Obstacle factors diagnosis of land ecological quality based on functional partition—A case study of Xinxiang City[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22 (4): 148—154. [秦伟霞, 王新闯, 马守臣, 等. 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[J]. *水土保持研究*, 2015, 22 (4): 148—154.]
- [23] Song G, Shi D M, Zeng X Y, et al. Quality barrier characteristics of cultivated layer for sloping farmland in purple hilly region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53 (7): 1397—1410. [宋鸽, 史东梅, 曾小英, 等. 紫色土坡耕地耕层质量障碍特征[J]. *中国农业科学*, 2020, 53 (7): 1397—1410.]
- [24] Chen L, Tu K, Wang H, et al. Optimization of the conditions for hot-air treatment of postharvest Red Fuji apples using response surface method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22 (2): 159—163. [陈莉, 屠康, 王海, 等. 采用响应曲面法对采后红富士苹果热处理条件的优化[J]. *农业工程学报*, 2006, 22 (2): 159—163.]
- [25] Ding W B, Jiang G Y, Shi D M, 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): 6480—6493. [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): 6480—6493.]
- [26] Shi D M, Jin H F, Jiang G Y. Degradation effect of soil erosion on tillage-layer quality of slope farmland and its evaluation trend[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35 (18): 118—126. [史东梅, 金慧芳, 蒋光毅. 土壤侵蚀对坡耕地耕层质量退化作用及其评价趋势展望[J]. *农业工程学报*, 2019, 35 (18): 118—126.]
- [27] Liu L, Xie D T, Li Z Y, et al. Cations exchange and its effect on acid buffering capacity of acid purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (4): 887—897. [刘莉, 谢德体, 李忠意, 等. 酸性紫色土的阳离子交换特征及其对酸缓冲容量的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (4): 887—897.]
- [28] Liang X F, Zhao S W, Zhang Y, et al. Effects of vegetation rehabilitation on soil saturated hydraulic conductivity in Ziwuling Forest Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (2): 636—642. [梁向锋, 赵世伟, 张扬, 等. 子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29 (2): 636—642.]
- [29] Wang H L, Tang X Y, Zhang W, et al. Effects of biochar application on tillth soil hydraulic properties of slope cropland of purple soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (4): 107—112. [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.]
- [30] Wang H J, Hao J P, Feng R Y, et al. Microhole subsoiling decreasing soil compaction, and improving yield and seed quality of cotton[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (8): 7—14. [王慧杰, 郝建平, 冯瑞云, 等. 微孔深松耕降低土壤紧实度提高棉花产量与种籽品质[J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (8): 7—14.]
- [31] Zhou H K, Zhao X Q, Zhou L, et al. A study on correlations between vegetation degradation and soil degradation in the 'Alpine Meadow' of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Pratacultural Science*, 2005, 14 (3): 31—40. [周华坤, 赵新全, 周立, 等. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J]. *草业学报*, 2005, 14 (3): 31—40.]
- [32] Liu J, Chen X F, Liu M, et al. Effects of long-term fertilization on bacterial community in upland red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (2): 468—478. [刘佳, 陈晓芬, 刘明, 等. 长期施肥对旱地红壤细菌群落的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (2): 468—478.]

(责任编辑: 檀满枝)