

红壤坡耕地耕层质量特征与障碍类型划分

金慧芳 史东梅 宋 鸽 段 腾 叶 青 江 娜

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 为有效防止坡耕地耕层质量退化,以红壤小流域典型种植制度坡耕地耕层为研究对象,采用耕层质量指数法(Cultivated-layer quality index, CLQI)分析了坡耕地耕层质量变化特征,基于聚类和主成分分析法划分了耕层障碍类型,并定量辨识了耕层质量环境影响因子作用特点。结果表明:红壤小流域坡耕地耕层土壤属性参数变化特征差异明显($P < 0.05$),其中耕层平均厚度为(18.88 ± 3.17) cm,接近作物生长适宜厚度;土壤饱和导水率为(3.39 ± 2.6) mm/min,耕层土壤入渗及持水性能略低;平均 pH 值为 5.06 ± 0.64,土壤呈弱酸性;土壤全量养分贫瘠,速效养分含量丰富。小流域坡耕地耕层质量总体处于合理水平,但存在明显退化趋势,以合理耕层(Ⅲ级)为主(占 72.2%),较不合理耕层(Ⅳ级)占 22.2%,中度合理耕层(Ⅱ级)占 5.6%;不同坡位耕层质量指数由大至小依次为坡下(0.482)、坡上(0.454)、坡中(0.444)。红壤坡耕地耕层类型可划分为粘重板结型障碍耕层、养分贫瘠型障碍耕层、水分限制型障碍耕层、土壤酸化型障碍耕层、薄化型障碍耕层和无障碍耕层 6 类;粘粒含量、土壤有机质含量、土壤饱和导水率、pH 值和耕层厚度可作为耕层障碍类型诊断及调控指标。红壤坡耕地耕层质量关键性环境影响因子为有效土层厚度、单位面积坡耕地化肥施用量、坡向和耕作方式,施有机肥、深松耕作和秸秆覆盖具有明显调控效应。研究结果可为红壤坡耕地耕层土壤有效恢复、调控途径拟定及坡耕地合理耕层构建技术选择提供理论指导。

关键词: 红壤坡耕地; 耕层质量; 障碍类型; 影响因素; 辨识

中图分类号: S157.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)12-0313-09

Cultivated-layer Quality Characteristics and Obstacle Types Division of Red Soil Sloping Farmland

JIN Huifang SHI Dongmei SONG Ge DUAN Teng YE Qing JIANG Na
(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: It is of great importance to prevent the quality deterioration of cultivated-layer and reasonable improvement of the cultivated-layer quality by analyzing the quality change characteristics, critical environmental impact factors and dividing the main obstacle types of the cultivated-layer for red soil sloping land. Taking cultivated-layer with typical planting system of the sloping farmland in red soil watershed as the research object, the quality change characteristics of the cultivated-layer were analyzed by the method of cultivated-layer quality index (CLQI), the obstacle types were defined and the key environmental factors' function characteristics that affecting the cultivated-layer quality were identified by the methods of clustering and principal component analysis, respectively. Results showed that the soil parameters characteristics of cultivated-layer of red soil sloping farmland varied significantly, and the average thickness of cultivated-layer was (18.88 ± 3.17) cm, which was closely to the suitable thickness for crop growth. The soil saturated hydraulic conductivity was (3.39 ± 2.6) mm/min, indicating that the soil infiltration and water holding capacity of the cultivated-layer were slightly lower. The soil pH value was 5.06 ± 0.64, which was faintly acidic. The soil with total nutrient content were poor and the quick-acting nutrients were abundant. The cultivated-layer quality was generally at a reasonable level of red soil watershed, but existed degradation trend, with the reasonable degree (Ⅲ) of 72.2%, and unreasonable

收稿日期: 2019-04-28 修回日期: 2019-06-13

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503119-01-01)

作者简介: 金慧芳(1987—),女,博士生,主要从事土壤侵蚀与水土保持效益研究,E-mail: jinhuifangcola@163.com

通信作者: 史东梅(1970—),女,教授,博士,主要从事水土生态工程、土壤侵蚀与水土保持研究,E-mail: shidm_1970@126.com

degree (IV) of 22.2%, and moderately degree (II) of 5.6%. The CLQI of different slope positions was ordered as lower slope (0.482), upper slope (0.454) and middle slope (0.444). The cultivated-layer types of red soil sloping farmland can be divided into six types of sticky knot type, nutrient infertility type, moisture restriction type, soil acidification type, no obstacle type and cultivated-layer thinning type. Clay content, soil organic matter, soil saturated hydraulic conductivity, pH value and cultivated-layer thickness can be used as diagnostic indicators of obstacle types for cultivated-layer. The effective soil thickness, amount of fertilizer applied per unit sloping farmland area, slope direction and the tillage method were the key environmental factors which affected the cultivated-layer quality of the red soil sloping farmland. Application of organic fertilizer, sub soiling and straw covering had obvious regulatory effects on improving cultivated-layer quality. These results could provide useful parameter supports not only for the effective restoration and regular routes selection, but also for constructing the reasonable cultivated-layer of red soil sloping farmland.

Key words: red soil sloping farmland; cultivated-layer quality; obstacle type; influencing factor; identification

0 引言

耕层是人类为了栽培农作物,利用农业耕作工具对耕地土壤进行扰动后,形成的具有一定深度(通常为0~20 cm)的土壤层^[1],是作物根系分布的主要区域。与土壤质量不同,耕层质量在农业生态系统中具有保持作物生产力、维持生态环境质量和促进作物生长的能力^[2-3]。目前基于耕层质量的研究多集中在耕层土壤属性特征、质量评价和指标选择、障碍因素诊断等方面。丁文斌等^[4-5]比较了不同区域紫色土坡耕地土壤属性参数的差异性,并对耕层蓄水保土及耕作性能进行了研究。史东梅等^[6]分析了侵蚀因素对紫色土坡耕地耕层质量的影响。陈正发等^[7]基于土壤管理评估框架,对云南坡耕地耕层质量进行了评价。李桂林等^[8]通过筛选影响土壤质量的敏感性指标,进行土壤质量评价与监测。金慧芳等^[9]比较了聚类分析和主成分分析两种方法,筛选出红壤坡耕地耕层质量诊断最小数据集指标。在障碍因素方面,刘志鹏等^[10]研究表明,养分贫瘠化、粘重化和酸化是红壤坡耕地低产耕层面面临的主要障碍因素。有机质和全氮含量过低是导致土壤养分贫瘠化的主要因子^[11],且土地利用类型变化对土壤演变及障碍因子有明显影响^[12]。刘洋等^[13]指出,降雨侵蚀和风蚀是造成辽西风沙半干旱区坡耕地耕层退化的主要原因,而土壤抗风蚀、水蚀性差,耕层土壤薄化,土壤有机质含量下降,肥料利用率低等是制约辽西地区农业经济发展的主要障碍因子。可见,明确耕层质量特征及障碍因素对促进耕层质量恢复和改良有重要作用。但目前研究主要集中于耕层障碍因子诊断方面,对耕层障碍类型的判断和划分还不够详细,影响坡耕地耕层质量的关键环境因子的研究也鲜见报道。

红壤坡耕地是我国南方丘陵区重要的耕地资源

之一,该区域水、热、光资源丰富,作物生产潜力巨大,是我国重要的农业生产区域^[10]。由于农户盲目耕作和降雨时空分布不均等因素影响,红壤坡耕地面临水土流失、养分退化、耕层薄化和土壤生产力下降等环境问题。本文以红壤小流域典型种植制度坡耕地为研究对象,分析坡耕地耕层质量特征,对红壤坡耕地耕层障碍类型进行划分,并明确关键性环境影响因子,以期对南方红壤坡耕地耕层土壤恢复和改良、指导农业生产和坡耕地合理耕层构建提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省南昌市进贤县三和红壤小流域(116°12'~116°18'E,28°12'~28°18'N),流域面积约41.21 km²,属亚热带季风性湿润气候区,降雨充沛,光照充足,多年平均年降水量1587 mm;地貌类型以低丘岗地为主,坡度在2°~35°之间,红壤为小流域内分布最广泛的土壤类型,土层深厚呈酸性,土壤质地以壤质粘土为主。花生-油菜轮作、花生-玉米/甘蔗轮作等为该地区典型种植制度,以一年一熟或一年两熟制为主。研究区位于我国红壤分布的中心区域,地形、地貌及土壤条件在南方红壤区具有代表性。

1.2 样品采集与分析

于2017年7月在当地农业部门有经验的研究人员协助下,分别在流域上游、中游和下游各选择2个坡耕地广泛分布的区域,各区域均选择3个红壤坡耕地典型坡面,各坡面坡度和坡长适宜,种植作物为花生、甘薯等当地典型作物,满足坡耕地耕层质量分析要求。分上坡、中坡和下坡布设采样点,共布设采样点54个,且保证各样点处于不同农户耕种的地块上,使得各样点均具有典型性和代表性。选择采样点中间位置挖掘土壤剖面,分0~10 cm和10~20 cm

两层采集土壤样品,每层采集 1~2 kg 土壤样品装入硬质塑料盒带回实验室。将采集的土壤样品自然风干,过筛后用于土壤理化性质测定,采集土壤环刀(100 cm³)样品用于土壤容重和饱和导水率测定,分别重复 3 次。采样完成后,继续垂直向下挖掘土壤剖面至植物根系消失,用钢卷尺沿剖面测量 90% 作物根系分布区域即为耕层厚度。土壤抗剪强度和贯入阻力分别采用三头抗剪仪(便携式 14.10 Pocket Vane Tester 型,荷兰)和 PT 袖珍型贯入仪(江苏省漂阳市天目仪器厂)测定。pH 值采用土水质量比 1:1 电极法测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定,土壤全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定,土壤有效磷含量采用 Olsen 法测定,土壤速效钾含量采用 1 mol/LNH₄Ac 提取-火焰光度法测定。基于影响坡耕地耕层质量的环境因子对耕种各采样地块的农户进行走访和水土保持问卷调查,共获得与耕层剖面调查相匹配的有效农户水土保持问

卷 54 份,满足大样本数量。

1.3 耕层质量指数构建

耕层质量指数可综合定量地表征各采样点及红壤丘陵区坡耕地耕层质量状况,数值越大,耕层质量合理性水平越高^[5]。从反映耕层土壤抗侵蚀性能、耕作性能和生产性能角度,选择 11 项评价指标。根据评价指标对耕层质量的正负效应,建立指标与耕层土壤生产力之间的隶属函数,耕层厚度、土壤饱和导水率、土壤抗剪强度、土壤有机质含量、土壤全氮含量、土壤有效磷含量和土壤速效钾含量与耕层质量呈正相关,界定为 S 型函数;土壤贯入阻力是反映土壤耕作性能的重要指标,与耕层质量负相关,则界定为反 S 型函数^[9,11],评价指标的最小值和最大值作为函数的转折点。土壤容重、土壤质地(粘粒含量)和 pH 值与耕层质量存在适宜临界范围,则界定为抛物线型函数,抛物线型函数指标的转折点参照文献^[7,9]及野外实测数据分析,详见表 1。

表 1 指标类型及隶属函数类型

Tab. 1 Indicator type and membership function

函数类型	评价指标	隶属函数	隶属函数参数			
			a_1	b_1	b_2	a_2
S 型	耕层厚度 X_1/cm		13			26
	土壤饱和导水率 $X_2/(mm \cdot min^{-1})$		0.95			8.56
	土壤抗剪强度 $X_3/(kg \cdot cm^{-2})$		1.17			6.97
	土壤有机质质量比 $X_4/(g \cdot kg^{-1})$	$u(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq a_2) \\ (x - a_1)/(a_2 - a_1) & (a_1 < x < a_2) \\ 0 & (x \leq a_1) \end{cases}$	5.84			25.08
	土壤全氮质量比 $X_5/(g \cdot kg^{-1})$		0.64			1.47
	土壤有效磷质量比 $X_6/(mg \cdot kg^{-1})$		13.59			119.60
	土壤速效钾质量比 $X_7/(mg \cdot kg^{-1})$		32.25			270.00
反 S 型	土壤贯入阻力 $X_8/(kg \cdot cm^{-2})$	$u(x) = \begin{cases} 1 & (x \leq a_1) \\ (x - a_2)/(a_2 - a_1) & (a_1 < x < a_2) \\ 0 & (x \geq a_2) \end{cases}$	3.9			0.93
抛物线型	土壤容重 $X_9/(g \cdot cm^{-3})$	$u(x) = \begin{cases} 1 & (b_2 \geq x \geq b_1) \\ (x - a_1)/(b_1 - a_1) & (a_1 < x < b_1) \\ (x - a_2)/(b_2 - a_2) & (a_2 > x > b_2) \\ 0 & (x \leq a_1 \text{ 或 } x \geq a_2) \end{cases}$	1.04	1.25	1.35	1.51
	土壤质地(粘粒质量分数) $X_{10}/\%$		0	20	30	100
	pH 值 X_{11}		4.08	5.50	6.50	8.00

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; b_1 、 b_2 为最适值的上下界点。

权重系数可以定量表征关键指标对土壤质量的贡献程度,为确保权重系数的客观性和准确性各指标权重均由主成分分析获得^[14]。各指标公因子方差占公因子方差之和的比例即为各数据集中评价指标权重,坡耕地耕层质量指数公式为

$$CLQI = \sum_{i=1}^n W_i N_i \quad (1)$$

式中 W_i ——第 i 个评价指标权重
 N_i ——第 i 个评价指标隶属度
 n ——评价指标个数

1.4 数据处理

各采样地块耕层质量参数数据通过坡耕地耕层

剖面调查、室内试验分析和农户水土保持问卷调查获得。使用 SPSS 21.0 软件进行主成分分析,其中耕作方式等定性指标采用赋值法进行定量化处理,Excel 2013 和 Origin 2017 软件进行数据处理和绘图。

2 结果与分析

2.1 红壤坡耕地耕层土壤参数统计特征

土壤物理、化学及力学等性状是反映农业土壤质量特征的重要参数,制约着土壤协调水、肥、气、热的能力。耕层厚度、土壤有机质含量等土壤参数对促进作物生长、农业环境保护以及坡耕地持续利用

等方面具有重要意义。对研究区耕层土壤参数进行描述性统计分析(表2),结果表明红壤坡耕地耕层各土壤参数特征差异明显。耕层平均厚度(18.88 ± 3.17) cm,接近红壤坡耕地耕层适宜厚度,深松耕作是增厚耕层的有效措施。土壤容重平均值为(1.26 ± 0.1) g/cm³,处于合理水平。土壤饱和导水率(3.39 ± 2.6) mm/min,耕层土壤入渗及持水性能略低。土壤抗剪强度平均值为(3.78 ± 1.01) kg/cm²,这是因为研究区季节性干旱频发,土壤含水率较小时,土壤颗粒间摩擦力降低,造成土壤抗剪强度小,抗侵蚀性能降低。土壤贯入阻力较小,平均值为

(1.97 ± 0.65) kg/cm²,耕作及作物根系下插性能增强,但存在作物倒伏风险。根据全国第二次土壤普查养分分级标准,土壤有机质质量比、全氮质量比平均值分别为(15.46 ± 4.58) g/kg和(1.09 ± 0.22) g/kg,均为第4级,处于中度贫瘠化水平;土壤有效磷质量比和速效钾质量比分别为(74.19 ± 37.7) mg/kg和(121.32 ± 59.89) mg/kg,处于第2级,养分含量丰富。测土配方施肥是提高耕层养分供给,促进作物增产的有效措施。pH值平均为5.06 ± 0.64,土壤呈弱酸性,施用有机肥可调节土壤酸碱度。

表2 红壤坡耕地耕层土壤参数统计特征

Tab.2 Statistical characteristics of soil parameters for cultivated-layer of red soil sloping farmland

土壤参数	X_1/cm	$X_2/(mm \cdot min^{-1})$	$X_3/(kg \cdot cm^{-2})$	$X_4/(g \cdot kg^{-1})$	$X_5/(g \cdot kg^{-1})$	$X_6/(mg \cdot kg^{-1})$	$X_7/(mg \cdot kg^{-1})$	$X_8/(kg \cdot cm^{-2})$	$X_9/(g \cdot cm^{-3})$	$X_{10}/%$	X_{11}
最小值	13.00	0.95	1.17	5.84	0.64	13.59	32.25	0.93	1.04	2.25	4.08
最大值	26.00	8.56	6.97	25.08	1.47	119.6	270.00	3.90	1.51	38.10	8.00
平均值	18.88	3.39	3.78	15.46	1.09	74.19	121.32	1.97	1.26	22.28	5.06
标准差	3.17	2.60	1.01	4.58	0.22	37.70	59.89	0.65	0.10	6.72	0.64
变异系数 $C_V/%$	17	77	27	30	20	51	49	33	8	55	13
偏度	0.44	2.18	0.06	0.67	1.11	2.38	1.16	0.26	0.20	0.52	0.93
峰度	0.52	6.15	0.66	0.39	1.98	9.12	0.16	0.47	0.84	0.57	0

各土壤参数总体上处于中、低度敏感性水平。敏感性水平越高(变异性越大),表明该指标对耕层质量差异性影响程度越高,敏感性水平越低,则影响程度越低^[15]。土壤饱和导水率、粘粒含量、有效磷含量和速效钾含量为中度敏感参数(C_V 为40%~100%),是耕层质量需要调控的关键参数,说明降雨不均和季节性干旱是主要影响因素。属于低度敏感(C_V 为10%~40%)参数有耕层厚度、土壤抗剪强度、土壤贯入阻力、土壤有机质和土壤全氮,是维护耕层土壤稳定性的主要因素,pH值(C_V 为13%)和土壤容重(C_V 为8%)变异系数相对较低,接近或处于不敏感($C_V < 10%$)水平,这表明土壤酸化是红壤坡耕地的重要障碍因素,而研究区域内土壤类型相同或耕作方式相近可能是导致土壤容重变异系数低的主要原因。

2.2 红壤坡耕地耕层质量变化特征

为更加直观评价红壤坡耕地耕层质量变化水平,采用等距离法对研究区红壤坡耕地耕层质量进行等级划分,共分为5级耕层(图1)^[4,9]。分别为高度合理耕层(I级,耕层合理性水平较高,作物生长状况良好)、中度合理耕层(II级,耕层合理性水平高,作物生长状况好)、合理耕层(III级,耕层合理性水平适中,作物生长状况适中)、较不合理耕层(IV级,耕层合理性水平较低,作物生长状况较差)和不

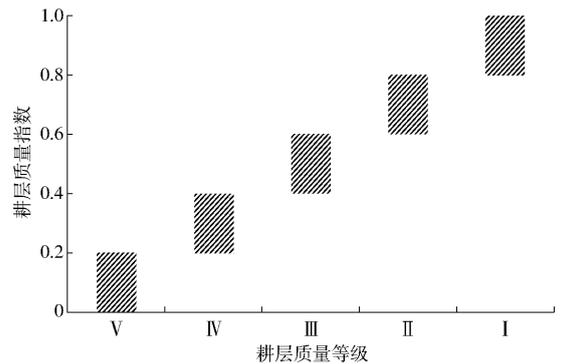


图1 耕层质量等级划分标准

Fig.1 Grading standards of cultivated-layer quality

合理耕层(V级,耕层合理性水平低,不适宜作物生长)。红壤小流域坡耕地耕层质量指数平均值为0.459,变化幅度为0.274~0.672,变异系数为19.08%,耕层质量总体处于合理耕层(III级)等级,但是耕层质量水平偏低,趋近较不合理耕层等级,说明耕层质量有待调控和改善。III级合理耕层平均质量指数为0.479,其分布面积占比为72.2%,较不合理耕层(IV级)平均质量指数为0.334,分布面积占流域总面积的22.2%,该等级耕层存在土壤有机质、全氮等养分含量偏低等问题,制约了红壤坡耕地的耕层质量水平。中度合理耕层(II级)平均质量指数为0.634,其面积占比为5.6%。无高度合理耕层(I级)和不合理耕层(V级)分布。

对红壤小流域不同坡位耕层质量特征分布频率进行统计(图 2),发现不同坡位耕层质量有差异。耕层质量平均指数由大到小依次为坡下(0.482)、坡上(0.454)、坡中(0.444),说明坡下部位耕层质量优于其他坡位,该区域耕层质量退化程度最低。坡下部位坡度较其他坡位缓,降雨条件下,土壤颗粒在坡下部位沉积;深松机等保护性耕作机械在坡下部位使用程度较高;同时横坡耕作等水土保持型措施的实施对减少水土流失,促进耕层质量改良有重要作用。坡上和坡中部位耕层质量相对较差,由于降雨侵蚀造成耕层土壤颗粒及养分沿坡面向下位移,造成坡上和坡中部位耕层土壤薄化、水土及养分流失,进而导致耕层质量退化明显。

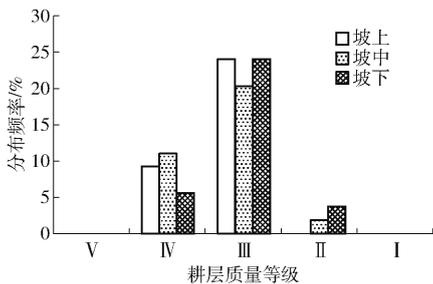


图 2 不同坡位耕层特征分布频率

Fig. 2 Distribution frequency of cultivated-layer characteristics at different slope positions

2.3 红壤坡耕地耕层质量障碍类型划分

长期机械化耕作及单一传统耕作、不合理施肥和种植方式等导致红壤坡耕地耕层出现明显影响作物生长的土壤障碍^[16]。明确耕层障碍类型并进行准确划分有助于分析影响坡耕地耕层质量变化的主要生态过程和障碍因素。本文基于耕层质量评价的 11 个参数(表 1),采用 ward-euclidean 法对其对应的 54 个耕层样本进行个案(Q 型)系统聚类分析,在距离阈值 2~3 之间,可将 54 个耕层样本划分为 6 类(图 3)。

第 I 类为粘重板结型障碍耕层,包括样本 1、14、2、13、3、39、4、15,共 8 个样本,该类耕层土壤粘粒含量高,平均值为 36.5%,最大值为 38.1%(样本 13);土壤容重偏大,平均值为 1.37 g/cm³,其中最大容重为 1.46 kg/cm³(样本 39),其他土壤参数接近研究区样点参数平均值,处于适宜范围内(表 2)。第 II 类为养分贫瘠型障碍耕层,共 14 个样本(包括样本 6、30、23、8、28、47、46、7、20、19、27、31、35、36),土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾平均质量比分别为 10.88 g/kg、0.87 g/kg、24.66 mg/kg、47.5 mg/kg,土壤养分含量较低,其他土壤参数处于适宜水平。第 III 类为水分限制型障碍耕层,共 10 个样本,分别为样本 10、12、11、17、45、37、16、43、40、44,季节性干旱

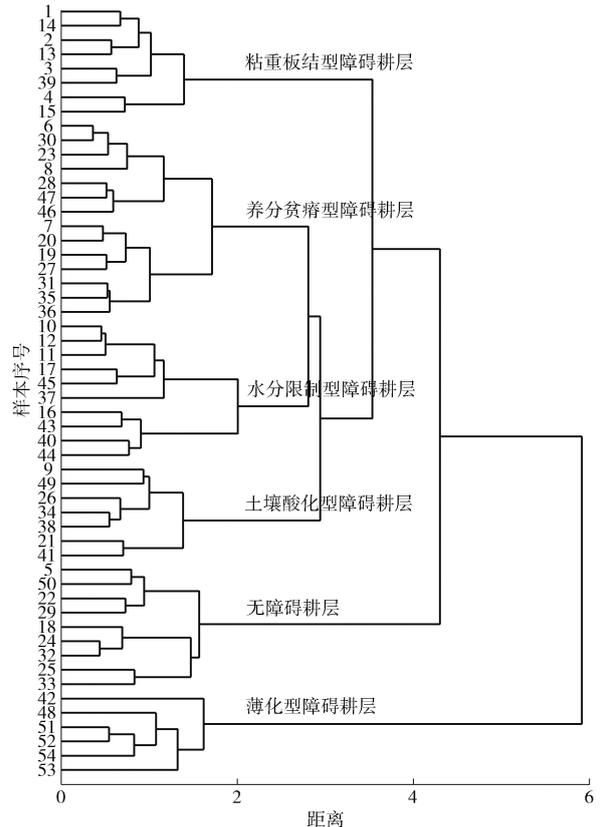


图 3 红壤坡耕地耕层类型聚类分析谱系图

Fig. 3 Cluster analysis pedigree map of cultivated-layer types for red soil sloping farmland

是红壤坡耕地的典型特征,土壤饱和导水率平均值为 2.34 mm/min,其中最小值(样本 45)为 1.40 mm/min,土壤抗剪强度较其他耕层类型大,两者呈显著负相关,相关系数为 -0.431,其他耕层土壤参数均接近适宜水平,说明疏松耕层,提高耕层蓄持性能,可有效拦截地表径流,缓解径流侵蚀,提高耕层土壤抗旱性能。第 IV 类为土壤酸化型障碍耕层,共 7 个样本(样本 9、49、26、34、38、21、41),pH 值最大(样本 38)和最小(样本 41)值分别为 5.33 和 4.08,耕层土壤酸化明显,土壤有机质等养分含量略低于其他耕层类型,其他耕层质量参数处于适宜水平。第 V 类为无障碍耕层(样本 5、50、22、29、18、24、32、25、33),共 9 个样点分布,耕层平均厚度为 21.55 cm,平均土壤饱和导水率为 5.73 mm/min,土壤抗剪强度平均值为 3.87 kg/cm²,土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾平均质量比分别为 15.73 g/kg、1.34 g/kg、87.78 mg/kg 和 99.25 mg/kg,土壤贯入阻力平均值为 1.86 kg/cm²,平均土壤容重 1.26 g/cm³,平均土壤粘粒质量分数 23%,平均 pH 值为 5.5,各样本耕层土壤参数总体处于适宜水平。第 VI 类为薄化型障碍耕层(样本 42、48、51、52、54、53,共 6 个),耕层平均厚度为 17 cm,其中最小耕层厚度仅为 13 cm(样点 42),平均土壤容重为 1.37 g/cm³,超出适宜范

围,土壤饱和导水率略低于适宜水平,平均值为 3.02 mm/min ,这可能与径流冲刷作用下,表土被剥离后,下层未扰动土壤上移,导致土壤容重增大,水分入渗性能降低有关。

由图3可见,红壤坡耕地主要耕层类型可为粘重板结型障碍耕层(I类)、养分贫瘠型障碍耕层(II类)、水分限制型障碍耕层(III类)、土壤酸化型障碍耕层(IV类)、无障碍耕层(V类)和薄化型障碍耕层(VI类)。结合红壤坡耕地各类耕层障碍特点,认为粘粒含量、土壤有机质含量、土壤饱和导水率、pH值和耕层厚度可作为红壤坡耕地耕层障碍类型诊断指标。各耕层类型依次占样本总量的 14.81% 、 25.93% 、 18.52% 、 12.96% 、 16.67% 和 11.11% ,说明红壤坡耕地耕层质量总体存在退化趋势,养分贫瘠、水分限制和粘重板结是红壤坡耕地面临的主要障碍因素,红壤坡耕地耕层质量调控应以蓄水保土、地力提升和固土抗蚀为重点。

2.4 红壤坡耕地耕层质量关键性环境影响因子分析

自然因素和人类活动的共同作用,对坡耕地耕层质量产生重要影响。红壤坡耕地耕层质量受多种因素的影响,将有效土层厚度(F1)、坡度(F2)、坡向(F3)、坡位(F4)、耕作方式(F5)、单位面积坡耕地化肥施用量(F6)、植被覆盖度(F7)和农户水土保持行为(F8),共8维因子数据进行主成分分析,定量分析红壤坡耕地耕层质量环境影响因子作用的强弱(图4),箭头所处象限代表环境因子与耕层质量的正负相关性,箭头连线长度及投影长度表示对耕层质量影响程度^[17]。前4个公因子累积方差贡献率达 75.48% ,可以反映耕层质量环境影响因子的绝大部分信息;其对耕层质量影响的贡献率分别为 30.14% 、 18.08% 、 14.38% 和 12.88% 。

从图4a可以看出,环境因子中有效土层厚度(0.586)载荷绝对值最大;其次为坡度(-0.570),说明有效土层厚度对耕层质量呈显著正相关,有效土层越厚则耕层质量越优,有效土层是土壤养分、水分以及植物根系可以运移抵达的深度层,是维持耕层质量的保证层。坡度对耕层质量呈显著负相关,坡度越大则耕层质量越低,耕层退化越严重。在第2主成分上单位面积坡耕地化肥施用量和植被覆盖度的载荷绝对值较大,分别为-0.532和-0.509,对耕层质量产生负向影响。农户不合理施肥不利于耕层质量培育,而植被覆盖率低不利于拦截坡面径流,造成水土流失,耕层土壤水分蓄持能力降低。第3主成分上坡向因子载荷绝对值较大,为0.510,说明阳坡坡面光热充足,利于作物生长,提高作物与土壤、环境互补作用。第4主成分上耕作方式载荷绝

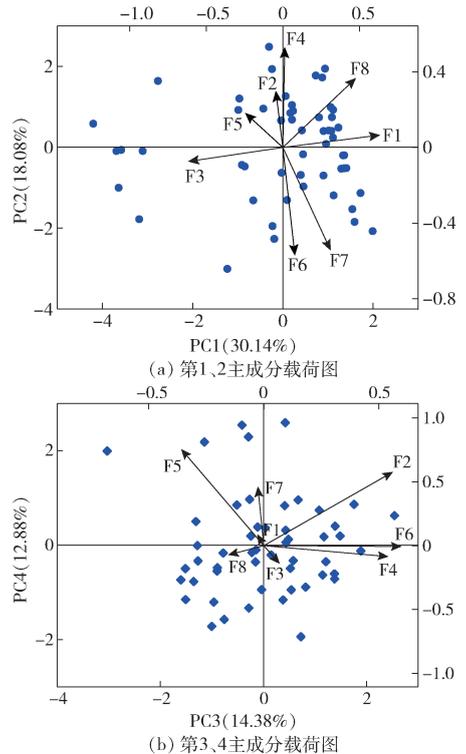


图4 红壤坡耕地耕层质量影响环境因子主成分分析
Fig.4 Principal component analysis of environmental factors affecting cultivated-layer quality of red soil sloping farmland

对值最大,为0.714,对耕层质量有明显正向影响作用(图4b),这是因为农业机械使用程度的提高促进坡耕地耕作方式由不合理耕作方式(陡坡耕作、顺坡耕作、轮歇地耕作周期减短等)向机械耕作(深松保护性耕作)、横坡耕作等转变,使水土流失和土壤板结程度降低,对耕层质量产生正向促进作用。结果表明,有效土层厚度、单位面积坡耕地化肥施用量、坡向和耕作方式是红壤坡耕地耕层质量的关键性环境影响因子。

3 讨论

3.1 红壤坡耕地障碍耕层形成原因

本文研究结果表明,红壤坡耕地耕层质量特征差异明显,耕层质量总体处于合理水平,但存在明显退化趋势,养分贫瘠型障碍耕层、水分限制型障碍耕层和粘重板结型障碍耕层是红壤坡耕地的主要障碍耕层类型,土壤养分贫瘠、季节性干旱和粘重板结是红壤坡耕地面临的主要障碍因素,与前人研究结果一致^[12-13]。坡度、降雨^[18]、耕作方式^[19]、肥料施用量^[20]等均是造成耕层养分退化的主要因素。横坡耕作是减少坡面径流、养分流失的有效措施^[21-22]。降水时空分布不匀,且少雨季节与强蒸发、高温期重叠,造成红壤坡耕地季节性干旱频繁发生^[23],降雨侵蚀造成坡面土层薄化^[24],降低了红壤的储水能力,导致红壤坡耕地水分蓄持水能力低、有效库容降

低,土壤导水性能下降,阻碍深层水分上升,加剧了季节性干旱的发展,形成水分限制型耕层^[25]。春夏水蚀和夏秋季节性干旱严重阻碍了红壤坡耕地耕层土壤的合理利用^[26]。降雨侵蚀作用下,耕层土壤持水量增大,团聚体受到破坏^[27],尤其在强降雨条件下,雨滴动能明显大于土壤颗粒内部粘结力,粘结力在雨强较大时易被破坏,造成坡面粘粒大量富积^[28],粘粒含量增加形成粘重板结型障碍耕层。不同颗粒表面化学性质不同,其抗分解能力存在本质区别^[29-30]。各级土壤颗粒与有机碳等相结合对耕作、施肥等农业措施的反应也有差异^[31]。图 4 结果表明,红壤坡耕地耕层质量受多种环境因子影响,其中有效土层厚度、单位面积化肥施用量、坡向和耕作方式是关键性环境影响因子,这与前人研究结论相似^[19-20,24,31]。

3.2 红壤坡耕地障碍耕层调控途径及效应

基于图 3 分析结果,共划分出 5 类障碍耕层,拟定粘粒含量、土壤有机质含量、土壤饱和导水率、pH 值和耕层厚度为红壤坡耕地耕层障碍类型诊断指标,与前人研究结果相同^[12-13,32-33]。张晓林等^[32]认为红壤坡耕地土壤粘重板结,土壤颗粒以粉、粘粒级为主。刘志鹏等^[10]分别以土壤有机质含量、粘粒

含量和 pH 值表征前 3 类障碍耕层特征。王峰^[33]认为红壤坡耕地季节性干旱的关键调控参数是土壤饱和导水率。黄尚书等^[34]认为深松耕作是增厚耕层,解决耕层瘠薄化问题的关键核心技术之一。

表 3 列出了不同措施对红壤坡耕地耕层障碍指标的调控效应及技术参数^[32-42],长期施用有机肥显著提高了红壤坡耕地 pH 值和土壤有机质等养分含量,对提升耕层肥力水平和抑制土壤酸化起到了重要作用^[32,36-37],且长期施用有机肥条件下土壤颗粒复合体解离度明显降低,对调控粘重板结型障碍耕层作用明显^[32]。通过深松耕作打破犁底层,加深耕作层,疏松土壤且增加疏松土层孔隙度,改善土壤的渗透性能^[34,38,41],改善土壤的物理性状,形成虚实并存土壤结构,减少土壤水分蒸发,增加土壤对大气降水的蓄存能力,营造耕层水分库,提高雨水资源利用率和耕层土壤蓄水保墒性能,对薄化型和水分限制型障碍耕层调控效应明显。秸秆覆盖对耕层质量改善作用明显^[35,42],与无措施坡耕地相比,土壤容重降低 1.55%~3.88%,土壤总孔隙度增加 1.28%~3.21%,有利于提高土壤通气透水能力,促进作物根系下扎,加强其抗倒伏能力,土壤有机质等养分含量明显增加,对耕层土壤养分改良效果明显。

表 3 红壤坡耕地障碍耕层调控措施及效应

Tab.3 Control measures and effects of barrier cultivation in red soil sloping farmland

措施类型	土壤参数调控变化率/%				技术参数
	粘粒含量	土壤有机质含量	饱和导水率	pH 值	
施有机肥	-22.3 ~ -13.1	10.0 ~ 25.4	4.9 ~ 30.1	4.0 ~ 10.7	有机肥施用量 15 t/hm ² ,连续 3 年
深松耕作			74.2 ~ 93.2		50 ~ 150 深松 30 ~ 50 cm,3 年深松 1 次或 5 年 2 次
秸秆覆盖		7.2 ~ 12.7	28.6 ~ 50.2		秸秆长度 2 ~ 10 cm,覆盖厚度 5 ~ 15 cm,连续 3 年

4 结论

(1)红壤小流域坡耕地耕层土壤参数变化特征差异明显($P < 0.05$),耕层平均厚度为(18.88 ± 3.17) cm,接近作物生长适宜厚度;土壤饱和导水率为(3.39 ± 2.6) mm/min,耕层土壤入渗及持水性能略低;pH 值平均为 5.06 ± 0.64,土壤呈弱酸性;土壤全量养分贫瘠,速效养分含量丰富;各土壤参数变异系数总体处于中、低度敏感水平。

(2)红壤小流域坡耕地耕层质量总体处于合理水平,但存在明显退化趋势,以合理耕层(Ⅲ级)为主,占流域总面积 72.2%,较不合理耕层Ⅳ级占 22.2%,中度合理耕层Ⅱ级占 5.6%。不同坡位耕层质量指数由大到小依次为坡下(0.482)、坡上(0.454)、坡中(0.444),坡下部位耕层质量优于其

他坡位。

(3)红壤坡耕地耕层类型有粘重板结型障碍耕层、养分贫瘠型障碍耕层、水分限制型障碍耕层、土壤酸化型障碍耕层、薄化型障碍耕层和无障碍耕层 6 类;粘粒含量、土壤有机质含量、土壤饱和导水率、pH 值和耕层厚度可作为红壤坡耕地耕层障碍类型诊断及调控指标。红壤坡耕地耕层质量调控应以蓄水保土、地力提升和固土抗蚀为重点。

(4)红壤坡耕地耕层质量退化关键性环境影响因子为有效土层厚度(0.586)、单位面积坡耕地化肥施用量(-0.532)、坡向(0.510)和耕作方式(0.714),在前 4 个主成分上载荷绝对值最大;施有机肥(降低粘重化程度,增加养分含量,降低酸化程度)、深松耕作(增厚耕层,增强水分蓄持能力)和秸秆覆盖(提高储水能力,提升地力)对耕层培育作用明显。

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)
- [2] DALSGAARD K. Defining soil quality for a sustainable environment[J]. Geoderma, 1995, 66(Supp. 1-2):163-164.
- [3] ANDREWS S S, KARLEN D L, MITCHELL J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production system in Northern California[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2002, 90(1): 25-45.
- [4] 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):195-208.
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):195-208. (in Chinese)
- [5] 丁文斌,蒋平,史东梅,等.紫色土坡耕地耕层蓄水保土及耕性特征研究[J].水土保持学报, 2016, 30(6):24-29.
DING Wenbin, JIANG Ping, SHI Dongmei, et al. The study of soil and water conservation and tillage characteristics of cultivated-layer in purple soil farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6):24-29. (in Chinese)
- [6] 史东梅,蒋光毅,蒋平,等.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.
SHI Dongmei, JIANG Guangyi, JIANG Ping, et al. Effects of soil erosion factors on cultivated-layer quality of slope farmland in purple hilly area[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13):270-279. (in Chinese)
- [7] 陈正发,史东梅,金慧芳,等.基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J].农业工程学报,2019,35(3):256-267.
CHEN Zhengfa, SHI Dongmei, JIN Huifang, et al. Evaluation on cultivated-layer soil quality of sloping farmland in Yunnan based on soil management assessment framework (SMAF)[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 256-267. (in Chinese)
- [8] 李桂林,陈杰,孙志英,等.基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定[J].生态学报,2007,27(7):2715-2724.
LI Guilin, CHEN Jie, SUN Zhiying, et al. Establishing a minimum data-set for soil quality assessment based on soil properties and land use change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7):2715-2724. (in Chinese)
- [9] 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.
JIN Huifang, SHI Dongmei, CHEN Zhengfa, et al. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7): 155-164. (in Chinese)
- [10] 刘志鹏,史东梅,金慧芳,等.红壤坡耕地耕层土壤质量特征及障碍因素研究[J].中国土壤与肥料, 2018(3):7-13.
LIU Zhipeng, SHI Dongmei, JIN Huifang, et al. Soil quality and its limitation factors of slope farmland plough layer of red soil [J]. Soil and Fertilizer Science in Chinese, 2018(3):7-13. (in Chinese)
- [11] 杨奇勇,杨劲松,姚荣江.基于GIS的耕地土壤养分贫瘠化评价及障碍因子分析[J].自然资源学报, 2010, 25(8):1375-1384.
YANG Qiyong, YANG Jingsong, YAO Rongjiang. 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. (in Chinese)
- [12] 苏晓燕,黄标,王虹,等.我国华南地区不同利用条件下土壤演变对障碍因子的影响[J].土壤, 2013(1):135-142.
SU Xiaoyan, HUANG Biao, WANG Hong, et al. Evolution of soil properties and soil limitation factors in different soil use and genetic conditions in South China[J]. Soils, 2013(1):135-142. (in Chinese)
- [13] 刘洋,孙占祥,肖继兵,等.辽西风沙半干旱区坡耕地耕层存在的问题及对策[J].辽宁农业科学, 2016(6):48-52.
LIU Yang, SUN Zhanxiang, XIAO Jibing, et al. Problems and countermeasures of cultivated-layer of sloping farmland in wind-sand semi-arid area, western Liaoning Province[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2016(6):48-52. (in Chinese)
- [14] 马芊红,张光辉,耿韧,等.我国东部水蚀区坡耕地土壤质量现状分析[J].中国水土保持科学, 2017, 15(3):36-42.
MA Qianhong, ZHANG Guanghui, GENG Ren, et al. Present condition analysis of sloping farmland soil quality in the eastern water erosion zone of China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(3):36-42. (in Chinese)
- [15] 许明祥.黄土丘陵区生态恢复过程中土壤质量演变及调控[D].杨凌:西北农林科技大学, 2003.
XU Mingxiang. Soil quality evolution mechanism in the process of ecosystem restoration and its management in Loess hilly-gully region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2003. (in Chinese)
- [16] 刘杰.湘中南红壤地区土壤质量特征与退化红壤的肥力调控技术研究[D].长沙:湖南农业大学, 2010.
LIU Jie. Red soil quality characteristics and fertility ameliorating measures in central-south Hunan Province[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [17] 张金屯.数量生态学[M].北京:科学出版社,2004:158-180.
- [18] WU Lei, PENG Mengling, QIAO Shanshan, et al. Assessing impacts of rainfall intensity and slope on dissolved and adsorbed nitrogen loss under bare loessial soil by simulated rainfalls[J]. CATENA, 2018, 170:51-63.
- [19] 王帅兵,王克勤,宋娅丽,等.高反坡阶对昆明市松华坝水源区坡耕地氮、磷流失的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):39-45.

- WANG Shuaibing, WANG Keqin, SONG Yali, et al. Effects of contour reverse-slope terrace on nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland in the water resource area of Songhua dam in Kunming City[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 39–45. (in Chinese)
- [20] KARIMI R, AKINREMI W, FLATEN D. Nitrogen- or phosphorus-based pig manure application rates affect soil test phosphorus and phosphorus loss risk[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 111(2/3): 217–230.
- [21] 陈晓安, 杨洁, 郑太辉, 等. 赣北第四纪红壤坡耕地水土及氮磷流失特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 162–167.
CHEN Xiaolan, YANG Jie, ZHENG Taihui, et al. Sediment, runoff, nitrogen and phosphorus losses of sloping cropland of quaternary red soil in northern Jiangxi[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(17): 162–167. (in Chinese)
- [22] 张展羽, 吴云聪, 杨洁, 等. 红壤坡耕地不同耕作方式径流及养分流失研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(3): 241–246.
ZHANG Zhanyu, WU Yuncong, YANG Jie, et al. Runoff generation and nutrient loss under different modes of cultivation in red-soil sloping land [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2013, 41(3): 241–246. (in Chinese)
- [23] 贾秋洪, 景元书, RUTHAIKARN B. 亚热带红壤丘陵区季节性干旱判别研究[J]. *江西农业大学学报*, 2015, 37(4): 749–758.
JIA QiuHong, JING Yuanshu, RUTHAIKARN B. Study of seasonal drought discriminating in subtropical red soil hilly regions [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2015, 37(4): 749–758. (in Chinese)
- [24] 廖承彬. 红壤坡地水土流失过程分析与水土保持措施设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
LIAO Chengbin. Analysis on the process of wter and soil losses and measure layout of soil and water conservation on red soil slope land[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [25] 魏强. 水蚀导致的土壤储水和导水变化对红壤季节性干旱的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
WEI Qiang. Effects of changes of soil water storage and hydraul conductivity caused by water erosion on the red soil seasonal drought[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [26] 黄道友, 王克林, 黄敏, 等. 我国中亚热带典型红壤丘陵区季节性干旱[J]. *生态学报*, 2004, 24(11): 2516–2523.
HUANG Daoyou, WANG Kelin, HUANG Min, et al. Seasonal drought problems in the red soil hilly region of the middle subtropical zone of China[J]. *Acta Ecologica Sinca*, 2004, 24(11): 2516–2523. (in Chinese)
- [27] 刘冬. 不同侵蚀度红壤团聚体中粘粒矿物分布特征及其对团聚体稳定性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
LIU Dong. Composition of clay minerals in aggregates and effect of aggregate stability of red soils under different erosion[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [28] 吴凤至, 史志华, 岳本江, 等. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1235–1240.
WU Fengzhi, SHI Zhihua, YUE Benjiang, et al. Particle characteristics of sediment in erosion on hill slope [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1235–1240. (in Chinese)
- [29] SCHULTEN H R, LEINWEBER P. Influence of long-term fertilization with farmyard manure on soil organic matter: characteristics of particle-size fractions[J]. *Biol. Fert. Soils*, 1991, 12(2): 81–88.
- [30] CHAN K Y, HEENAN D P, OATES A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management[J]. *Soil Till. Res.*, 2002, 63(3–4): 133–139.
- [31] CHRISTENSEN B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *Eur. J. Soil Sci.*, 2001, 52(3): 345–353.
- [32] 张晓林, 和丽忠, 陈锦玉, 等. 云南植烟红壤不同施肥条件下有机无机复合颗粒大小分组研究[J]. *西南农业学报*, 2006, 19(增刊): 188–195.
ZHANG Xiaolin, HE Lizhong, CHEN Jinyu, et al. Particle size fractionation of orgainc-mineral complexes in red soils planted flue-cured toabcco under different fertilization conditions in Yunnan[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Science*, 2006, 19(Supp.): 188–195. (in Chinese)
- [33] 王峰. 亚热带红壤-作物系统对季节性干旱的响应与调控[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
WANG Feng. The response and regulation of red soil-crop system to seasonal drought in subtropical region [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [34] 黄尚书, 钟义军, 叶川, 等. 深松与压实对红壤坡耕地土壤物理性质的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1347–1353.
HUANG Shangshu, ZHONG Yijun, YE Chuan, et al. Effects of deep loosening and mechanical compaction on soil physical properties in red soil slope field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6): 1347–1353. (in Chinese)
- [35] 彭春瑞, 陈先茂, 钱银飞. 秸秆覆盖对红壤旱地作物生长及土壤质量的影响[J]. *中国农业气象*, 2011(增刊1): 51–54.
PENG Chunrui, CHEN Xianmao, QIAN Yinfei. Effects of straw mulching on the crop growth and soil quality of red upland soil [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011(Supp. 1): 51–54. (in Chinese)
- [36] 李大明, 柳开楼, 叶会财, 等. 长期不同施肥处理红壤旱地剖面养分分布差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(3): 633–640.
LI Daming, LIU Kailou, YE Huicai, et al. Differences of soil nutrient distribution in profiles under long-term fertilization in upland red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3): 633–640. (in Chinese)
- [37] LIANG Yin, LI Decheng, LU Xixi, et al. Soil erosion changes over the past five decades in the red soil region of southern China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 7(1): 92–99.

- ZHANG Tianjiao, LIU Gang, WANG Shengwei. Estimation of heavy metal pollution loads from non-point sources based on GIS/RS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 124 - 132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s121&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.021. (in Chinese)
- [24] 许斌, 谢贤健, 甄英. 基于 DEM 和分形理论的沱江流域划分及河网提取[J]. 水电能源科学, 2018, 37(7): 19 - 22. XU Bin, XIE Xianjian, ZHEN Ying. Extraction of watershed characteristics of Tuojiang basin based on DEM and fractal theory [J]. Water Resources and Power, 2018, 37(7): 19 - 22. (in Chinese)
- [25] 杨永侠, 孙婷, 张丽红, 等. 京津冀地区耕地质量空间分布分形机制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 165 - 171. YANG Yongxia, SUN Ting, ZHANG Lihong, et al. Fractal mechanism of spatial distribution of arable land quality in Beijing - Tianjin - Hebei region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 165 - 171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170222&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.022. (in Chinese)
- [26] 王倩, 邹欣庆, 朱大奎. 基于 GIS 技术的秦淮河流域水系分维研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(6): 751 - 756. WANG Qian, ZOU Xinqing, ZHU Dakui. On the dimensions of Qinhuai river networks based on the GIS technology[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(6): 751 - 756. (in Chinese)
- [27] 郭兆纲, 胡振鹏. 不同周期数据递归图中的类分形自相似结构研究[J]. 统计与决策, 2016(11): 151 - 153. GUO Zhaogang, HU Zhenpeng. Research on class fractal self-similar structure in recursion graph of data with different periods [J]. Statistics and Decision, 2016(11): 151 - 153. (in Chinese)
- [28] 王彬, 邱景. 基于分形理论的小流域相似性判别初探[J]. 吉林水利, 2010(2): 48 - 50. WANG Bin, QIU Jing. Discussion on the similarity of small-sized basin based on fractal theory[J]. Jilin Water Resources, 2010(2): 48 - 50. (in Chinese)
- [29] FERNÁNDEZ-ONDOÑO E, BACCHETTA G, LALLENA A M, et al. Use of BCR sequential extraction procedures for soils and plant metal transfer predictions in contaminated mine tailings in Sardinia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, 172: 133 - 141.
- [30] 赵斌, 朱四喜, 杨秀琴, 等. 草海湖沉积物中重金属污染现状及生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2019, 32(2): 235 - 245. ZHAO Bin, ZHU Sixi, YANG Xiuqin, et al. Pollution status and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Caohai Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(2): 235 - 245. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 321 页)

- [38] 肖继兵, 孙占祥, 杨久廷, 等. 半干旱区中耕深松对土壤水分和作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 709 - 714. XIAO Jibing, SUN Zhanxiang, YANG Jiuting, et al. Effect of subsoiling on soil water and crop yield in semi-arid area[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 709 - 714. (in Chinese)
- [39] 廖青, 韦广泼, 陈桂芬, 等. 蔗叶还田对土壤微生物、理化性状及甘蔗生长的影响[J]. 西南农业学报, 2011, 24(2): 658 - 662. LIAO Qing, WEI Guangpo, CHEN Guifen, et al. Effect of trash returning on microbial communities, physical and chemical properties of soil and plant growth of sugarcane[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(2): 658 - 662. (in Chinese)
- [40] 张丽娜, EVANS A, 张陆勇, 等. 耕作方式对旱地红壤物理特性的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 46 - 50. ZHANG Li'na, EVANS A, ZHANG Luyong, et al. Effects of tillage methods on the physical characteristics of red soil of upland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 46 - 50. (in Chinese)
- [41] 陈恩凤. 耕翻深度与耕层的层次发育[J]. 中国农业科学, 1962, 2(12): 1 - 6. CHEN Enfeng. Plowing depth and layer development of cultivated-layer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1962, 2(12): 1 - 6. (in Chinese)
- [42] 黄国勤, 周丽华, 杨滨娟, 等. 红壤旱地不同复种方式养地效果[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5191 - 5199. HUANG Guoqin, ZHOU Lihua, YANG Binjuan, et al. Improving soil fertility with different multiple cropping patterns in upland red soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5191 - 5199. (in Chinese)