

基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标

金慧芳¹, 史东梅^{1※}, 陈正发², 刘益军¹, 娄义宝¹, 杨旭¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650051)

摘要: 为准确评价红壤坡耕地耕层土壤质量特征, 该文采用聚类分析法(CA)和主成分分析法(PCA)分别建立了南方红壤丘陵区坡耕地耕层质量诊断最小数据集(minimum data set, MDS), 并利用最小数据集土壤质量指数(soil quality index-CA, SQI-CA)和土壤质量指数-PCA(SQI-PCA)和全量数据集土壤质量指数(soil quality index-total, SQI-T)对坡耕地耕层特征进行分析。结果表明: 1) 红壤坡耕地耕层土壤质量变化特征差异明显, 其中耕层平均厚度(19.93 ± 4.9) cm, 接近作物生长适宜水平; 土壤有机质、全氮平均含量分别为(17.43 ± 8.71)和(0.97 ± 0.42) g/kg, 处于中度贫瘠化水平; 土壤有效磷和速效钾含量丰富, 平均含量分别为(26.1 ± 22.22)和(155.46 ± 88.35) mg/kg; pH 均值为(5.34 ± 0.77), 土壤呈弱酸性。2) 红壤坡耕地耕层土壤质量评价最小数据集由耕层厚度、土壤容重、土壤贯入阻力、土壤有机质、pH 值和有效磷组成。基于不同数据集的耕层土壤质量评价结果差异明显, 土壤质量指数变化范围、均值表现为 SQI-T > SQI-CA > SQI-PCA, 变异系数表现为 SQI-T < SQI-CA < SQI-PCA, SQI-CA 与 SQI-T 的 Nash 有效系数和相关度高于 SQI-PCA, 而相对偏差系数和平均相对误差则低于 SQI-PCA, 这表明基于聚类分析最小数据集(MDS-CA)较基于主成分分析最小数据集(MDS-PCA)更适合替代全量数据集(total data set, TDS)对耕层土壤质量进行评价。3) 从保水、保土、保肥及增产潜力角度看, 红壤坡耕地合理耕层诊断指标适宜性阈值为耕层厚度 ≥ 20.39 cm, 土壤容重 $0.92 \sim 1.21$ g/cm³, 土壤贯入阻力 ≤ 1.21 kg/cm³, 土壤有机质含量 ≥ 18.82 g/kg, pH 值 $5.04 \sim 5.38$, 有效磷 ≥ 28.83 mg/kg。合理深松是构建合理耕层的有效措施之一。该研究结果可为南方红壤丘陵区坡耕地耕层质量恢复、农作物生产适宜性调控和坡耕地水土流失阻控提供参考, 有利于红壤丘陵区坡耕地资源持续利用。

关键词: 土壤; 聚类分析; 主成分分析; 最小数据集; 红壤坡耕地; 合理耕层; 土壤质量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.07.020

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-07-0155-10

金慧芳, 史东梅, 陈正发, 刘益军, 娄义宝, 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[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 155—164. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.07.020 <http://www.tcsae.org>

Jin Huifang, Shi Dongmei, Chen Zhengfa, Liu Yijun, Lou Yibao, Yang Xu. 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 (Transactions of the CSAE), 2018, 34(7): 155 — 164. (in Chinese with English abstract) doi : 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.07.020 <http://www.tcsae.org>

0 引言

红壤坡耕地是中国南方丘陵区分布最为广泛的耕地类型。土壤酸化、有机质缺乏、养分贫瘠、黏重板结, 水土流失严重并出现耕层退化等现象, 是该区域红壤坡耕地耕层土壤质量下降的突出表现。坡耕地耕层土壤质量是反映土壤抗侵蚀性能和生产性能等多种功能的综合体现, 其优劣受降雨、土壤和人类活动等多种因素的影响。准确提取适宜评价指标是耕层土壤质量评价的重要环节, 而在评价指标筛选中, 除了利用原始变量作为评价指标外, Larson 等提出采用土壤参数最小数据集来鉴别评价指标间的相互关系以及反映对土壤特性和作物的影响^[1], 从大量土壤参数中筛选出相对独立、影响土壤质

量的敏感性指标建立最小数据集。最小数据集作为一种评价指标筛选方法, 在土壤质量评价及监测工作中使用广泛^[2-4]。目前该方法在国内外不同气候区、不同土壤类型以及不同土地利用类型土壤质量评价中得到了广泛的应用^[5-7]。土壤质量指数比较法^[8]、作物产量与最小数据集指标相关性分析法^[9], 最小数据集指标与未入选指标相关性分析法^[10]等是当前最小数据集合理性验证的主要方法。

近年来, 关于红壤区土壤质量评价的研究已成为热点, 王效举等^[11]对红壤质量时空变化的定量化评价做了研究, 并根据红壤自身特点来选取评价指标。孙波等^[12]对退化红壤质量评价指标及方法进行总结, 提出了红壤质量评价指标选择原则。史志华等^[13]研究了红壤丘陵区两个时期土地利用变化对土壤质量的影响, 表明土地利用方式和管理措施是影响土壤质量演变方向和强度的关键因子。王华等^[14]基于定位研究对不同轮作系统红壤区稻田土壤质量进行评价, 当前对红壤区土壤质量研究多侧重于农用地土壤质量评价结果、方法及影响因素分析, 而针对红壤坡耕地耕层土壤质量的评价且关于评

收稿日期: 2017-09-11 修订日期: 2018-02-28

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项“坡耕地合理耕层评价指标体系建立(201503119-01-01)”

作者简介: 金慧芳, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。

Email: jinhuifangicola@163.com

※通信作者: 史东梅, 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。Email: shidm_1970@126.com

价指标筛选和最小数据集建立的研究较少。因此,本文以南方丘陵区红壤坡耕地耕层土壤为研究对象,基于反映抗侵蚀性能和生产性能的土壤质量指标,通过聚类分析和主成分分析分别建立最小数据集,并采用土壤质量指数法验证最小数据集指标合理性,探讨了应用最小数据集衡量红壤坡耕地耕层土壤质量特征的可行性和适用性,研究结果可为中国南方丘陵区红壤坡耕地耕层土壤质量调控、作物增产和合理施肥提供重要依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国红壤坡耕地广泛分布的南方丘陵区,选择广东、广西、江西和云南4省(自治区)的红壤坡耕地耕层土壤为研究对象,成土母质为第四纪红色黏土。土体深厚、结构紧实、质地黏重,通透性差,以棱状或大块状结构为主。广东采样点具有大陆性气候特征,四季分明,常年平均气温19.7℃,年均降雨量

1 550 mm,年日照时数1 654.7 h,全年无霜期273 d,≥10℃有效积温在6 100℃以上。广西采样点属于中亚热带湿润季风气候,年均气温18.9~23.3℃,年平均降雨量1 949.5~2 450 mm,降雨量年分配不均,秋冬季干燥少雨;年平均日照时数1 670 h左右,全年无霜期300~336 d,≥10℃有效积温5 064~6 380℃以上。江西采样点属于亚热带东南季风气候,年均温度18~22℃,年降雨量1 600~2 000 mm,多集中在4~6月,年均日照1 860 h左右,无霜期284~320 d,≥10℃有效积温6 135~6 699℃以上。云南采样点属于北亚热带、南温带和中温带多种气候带并存的低纬高原季风气候区,年均气温13.4~20.3℃,年均降雨量950~1 150 mm,年均日照2 450 h左右,无霜期241~315 d,≥10℃有效积温2 500℃以上。研究区常见种植制度有花生—玉米/甘蔗轮作、花生—油菜轮作、大豆—甘薯轮作等,主要为一年一熟或一年两熟制,近年来,三熟制开始逐渐增多,各采样区基本情况见表1。

表1 红壤坡耕地采样区基本情况
Table 1 Situation of sampling sites for red soil slop land

省份 Province	采样地点 Sampling sites	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡长 Slope length/m	坡位 Slope position	作物类型 Crop types	耕作方式 Tillage methods	采样点数量 sampling points
广东	南雄	114°26'35"~114°27'4"E, 25°09'15"~25°10'23"N	124.3~147.5	2~5	27.6~57	坡上、坡中、 坡下	花生、红薯	垄作	6
	桂林	110°7'24"~110°18'20"E, 25°2'18"~25°4'46"N	124.5~151.9	3~12	8~46.5	坡上、坡中、 坡下	甘蔗、玉米	顺坡耕作、 垄作	9
广西	来宾	108°7'33"~108°57'41"E, 23°22'10"~23°24'20"N	78~80	2~6	25~60	坡中	甘蔗	顺坡、 等高耕作	4
	百色	106°58'12"~107°23'11"E, 23°41'1"~23°42'24"N	113~118	2	10~48	坡中	甘蔗、玉米	顺坡耕作	2
江西	进贤	106°58'9"~107°23'11"E, 28°19'33"~28°75'16"N	24~65	2~30	40~62	坡上、坡中、 坡下	花生、西瓜	顺坡耕作	8
	余江	116°44'30"~116°48'23"E, 28°7'10"~28°43'24"N	63~65	2~3	45~62	坡中	木薯	深翻耕、 免耕	2
	兴国	115°22'13"~115°23'25"E, 26°9'23"~26°10'15"N	104~185	2	2.5~2.9	坡中	花生	顺坡耕作、 免耕	2
云南	宣威	103°5'2"~103°9'11"E, 26°8'35"~26°14'45"N	2 066~2 071	5	19~30	坡中	玉米	等高耕作	2
	马龙	103°22'17"~103°38'30"E, 25°26'5"~25°33'14"N	1 961~1 974	5~7	30~40	坡上、坡中	玉米	垄作、 等高耕作	2
	石林	103°26'20"~103°27'12"E, 24°51'3"~24°52'46"N	1 921~1 922	7	13~26.6	坡中	玉米	顺坡耕作	2
	宁洱	101°37'11"~101°39'7"E, 23°31'43"~23°39'26"N	1 339~1 359	11~21	10.5~13.2	坡中、坡下	玉米	顺坡耕作	2

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集

于2015年7月和2016年7月在4个区域选择典型红壤坡耕地地块进行耕层质量调查,于样点中间位置布置1 m×1 m样框,采集0~20 cm耕层土壤样品,装入硬质塑料盒带回实验室自然风干,过筛后用于土壤理化性质测定。

1.2.2 土壤理化及力学性质测定

共测定土壤物理和化学指标11项,方法如下:耕层厚度采用钢卷尺测量;土壤饱和导水率和土壤容重测定采用环刀法;黏粒、粉粒和砂粒含量测定采用吸管法;

土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法-外加热法;pH值测定采用土水比1:1电极法;全氮测定采用半微量凯氏定氮法;有效磷测定采用Olsen法;速效钾测定采用1mol/LNH4Ac提取-火焰光度法。采用产自荷兰便携式14.10Pocket Vane Tester型三头抗剪仪测定土壤抗剪强度,采用江苏省溧阳市天目仪器厂生产的PT型袖珍贯入仪测定土壤贯入阻力。

1.3 最小数据集建立

1.3.1 聚类分析法

聚类分析是以欧式距离来衡量评价指标之间的差异性,将各指标分类并建立最小数据集,在土壤质量评价

中应用广泛。在 SPSS19.0 中运用欧式距离最短法对评价指标进行 R 型聚类分析。在相应聚合水平之间, 将评价指标划分为反映耕层土壤质量不同方面特征的若干分组。根据相关分析, 每组中相关性显著的指标可相互代替, 与野外调查、文献资料和前人研究成果相结合, 剔除冗余指标, 选择具有代表性且相互独立的指标进入最小数据集。

1.3.2 主成分分析法

主成分分析是最小数据集建立的核心方法, 通过降维将多个指标转化为少数指标, 消除多重指标间的相关性, 使彼此之间具有独立性^[15]。运用 SPSS19.0 对评价指标进行主成分分析, 提取特征值 ≥ 1 的主成分, 将同一主成分载荷 ≥ 0.5 的指标分为 1 组, 若某评价指标在各主成分上的载荷均低于 0.5, 则将其划分到载荷值最高的一组, 计算评价指标的 Norm 值。Norm 值为该指标在由成分组成的多维空间中矢量常模的长度, 长度越长, 表明该指标在所有主成分的综合载荷越大, 其解释综合信息的能力就越强。Norm 值计算公式如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (u_{ik}^2 \cdot \lambda_k)} \quad (1)$$

式中, N_{ik} 是第 i 个指标在特征值 ≥ 1 的前 k 个主成分上的综合载荷; u_{ik} 是第 i 个指标在第 k 个主成分上的载荷; λ_k

是第 k 个主成分的特征值。

分别计算各组指标 Norm 值, 选取每组中 Norm 值在最高总分值 10% 范围的指标^[16], 进一步分析每组所选指标的相关性, 高度相关, 则 Norm 值最大的指标进入最小数据集 (minimum data set, MDS), 相关度低则同组指标均进入 MDS。考虑本研究区跨度较大, 选择相关系数 >0.3 即为高度相关^[10,17]。

1.4 土壤质量指数构建

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。计算土壤质量指数对土壤质量进行评价, 可为土壤质量状况和合理耕层形成障碍因素分析提供依据。根据评价指标对耕层土壤质量的正负效应, 建立指标与土壤生产力之间的隶属函数, 耕层厚度、土壤饱和导水率、土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾与耕层质量呈正相关, 界定为 S 型函数; 土壤抗剪强度和贯入阻力是土壤侵蚀的重要表征指标, 但与耕层质量表现为负相关, 则界定为反 S 型函数^[18-19], 土壤容重、黏粒、粉粒、砂粒以及 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, 评价指标的最小值和最大值作为函数的转折点, 抛物线型函数指标的转折点参见相关文献^[20], 详见表 2。

表 2 耕层土壤质量评价指标隶属函数^[18-20]
Table 2 Subordinate function of soil quality evaluation index

隶属函数类型 Membership function type	计算公式 Calculation formula	参数表达 Parametric expression	评价指标 Evaluating indicator	隶属函数含义 Subordinate function meaning
S 型 隶属函数	$u(x) = \begin{cases} 1, & x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & x \leq a \end{cases}$	$u(x)$: 隶属函数, x : 指标实际值, a : 指标阈值上限, b : 指标阈值下限。	耕层厚度、土壤饱和导水率、土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾。	一定范围内评价指标与土壤功能成正相关。
反 S 型 隶属函数	$u(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{x-b}{a-b}, & a < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases}$	$u(x)$: 隶属函数, x : 指标实际值, a : 指标阈值上限, b : 指标阈值下限。	土壤抗剪强度、土壤贯入阻力	一定范围内评价指标与土壤功能成负相关。
抛物线型 隶属函数	$u(x) = \begin{cases} 1, & b_2 \geq x \geq b_1 \\ \frac{x-a_1}{b_1-a_1}, & a_1 < x < b_1 \\ \frac{x-a_2}{b_2-a_2}, & a_2 > x > b_2 \\ 0, & x \leq a_1 \text{ 或 } x \geq a_2 \end{cases}$	$u(x)$: 隶属函数, x : 指标实际值, a_1 : 指标临界值上限, a_2 : 指标临界值下限, b_1 : 最适宜值上界点, b_2 : 最适宜值下界点。	土壤容重、黏粒、粉粒、砂粒、pH 值。	评价指标值对土壤功能有最佳适宜范围, 偏离程度越大, 对土壤功能的影响越小。

基于不同数据集, 各指标权重均由主成分分析获得。分别对 3 种数据集指标做主成分分析, 提取评价指标的公因子方差, 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值, 计算不同数据集的土壤质量指数, 计算公式如下:

$$SQI = \sum_{i=1}^n w_i \cdot N_i \quad (2)$$

式中 w_i 是第 i 个评价指标权重, N_i 是第 i 个评价指标隶属度值, n 为评价指标个数。

1.5 耕层土壤质量评价精度验证

利用 Nash 有效系数 (E_f) 和相对偏差系数 (E_r) 分

别评价基于聚类分析和主成分分析最小数据集的精确程度^[21]。计算公式为:

$$E_f = 1 - \frac{\sum (R_0 - R_{cal})^2}{\sum (R_0 - \bar{R}_0)^2} \quad (3)$$

$$E_r = \left| \sum_{i=1}^n R_{oi} - \sum_{i=1}^n R_{cal} \right| \left/ \sum_{i=1}^n R_{oi} \right. \quad (4)$$

式中 R_o 和 R_{cal} 为基于全量数据集 (total data set, TDS) 计算得出的耕层土壤质量指数值和土壤质量指数平均值, R_{cal} 为基于 MDS 计算得出的耕层土壤质量指数值。有效系数 (E_f) 越接近于 1, 表示基于 MDS 计算的耕层土壤

质量指数与基准值越接近, 精度较高。相对偏差系数(E_r)越接近于0, 表明基于 MDS 计算的耕层土壤质量指数相对于基准值偏差越小, 结果越精确。

2 结果与分析

2.1 红壤坡耕地耕层土壤质量特征

农业土壤质量一般采用土壤物理、化学和力学指标反映, 红壤坡耕地耕层土壤质量特征差异明显。对研究区耕层土壤质量进行描述性统计特征分析, 由表 3 可知, 耕层平均厚度(19.93 ± 4.9) cm, 接近适宜作物生长的耕层厚度 20 cm^[15], 黏粒、粉粒和砂粒平均质量分数分别为(16.17 ± 10.69)%、(49.7 ± 14.68)% 和(24.13 ± 14.44)%, 土壤抗剪强度平均值为(3.0 ± 1.12) kg/cm², 不合理耕作活动和

水土流失造成耕作土壤结构破坏、耕作性能降低, 可采取适当翻耕等耕作措施。土壤贯入阻力平均值为(1.21 ± 0.69) kg/cm³, 这主要是因为农业机械长期碾压没有翻耕所致其紧实, 应采取适当耕作措施(如 22~24 cm 以下深松等)^[22]。根据全国第二次土壤普查养分分级标准, 土壤有机质、全氮平均值分别为(17.43 ± 8.71) g/kg 和(0.97 ± 0.42) g/kg, 均为第 4 级, 处于中度贫瘠化水平; 土壤有效磷和速效钾分别为(26.1 ± 22.22) mg/kg 和(155.46 ± 88.35) mg/kg, 处于第 2 级, 养分含量丰富。合理耕作和施肥, 可促进作物生长, 提高作物产量。平均 pH 值为(5.34 ± 0.77), 土壤偏酸性, 农户盲目施肥和过量施肥是导致土壤酸化的主要原因, 深松深耕、秸秆还田等耕作技术可有效调节土壤酸碱度。

表 3 红壤坡耕地耕层质量评价土壤参数统计特征

Table 3 Soil parameters statistical characteristics of cultivated plough quality evaluation of red soil slop cultivate land

土壤参数 Soil parameters	代码 Code	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S 检验 K-S test
耕层厚度/cm	X1	11	31	19.93	4.9	24.8	0.87	0.36	0.759
土壤饱和导水率/%	X2	0.08	50.52	23.79	15.9	65.5	0.36	1.21	0.956
土壤容重/(g·cm ⁻³)	X3	0.92	1.48	1.24	0.15	12.1	0.19	0.60	0.496
黏粒/%	X4	2.2	49.4	16.17	10.69	66.1	0.93	0.83	0.79
粉粒/%	X5	18	87.8	49.7	14.68	29.5	0.61	0.37	0.698
砂粒/%	X6	6.4	57.4	34.13	14.44	42.3	0.12	1.07	0.755
土壤抗剪强度/(kg·cm ⁻²)	X7	1.23	7.1	3.00	1.12	37.2	1.14	3.1	0.678
土壤贯入阻力/(kg·cm ⁻³)	X8	0.18	3.59	1.21	0.69	57.2	0.93	1.60	0.751
土壤有机质/g/kg	X9	2.9	36.59	17.43	8.71	50	0.56	0.40	0.725
pH 值	X10	4.1	8	5.34	0.77	14.3	1.41	3.65	0.964
全氮/(g·kg ⁻¹)	X11	0.21	1.87	0.97	0.42	43.3	0.39	0.14	0.751
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	X12	1.92	114.8	26.1	22.22	85.1	1.84	4.85	0.991
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	X13	38.0	375	155.4	88.35	56.8	0.87	0.08	1.247

变异系数(CV) 主要反映耕层土壤质量空间变异性及敏感性, 变异系数越大说明评价指标对土壤质量差异性越敏感。由表 3 可以看出各评价指标总体上处于中低度敏感性水平。土壤饱和导水率、黏粒、砂粒、土壤贯入阻力、土壤有机质、有效磷和速效钾为中度敏感指标(CV 为 40%~100%), 是土壤质量调控与恢复的主要目标。属于低度敏感(CV 为 10%~40%) 指标有耕层厚度、土壤容重、粉粒、土壤抗剪强度、pH 值和全氮, 是维护耕层土壤结构稳定的主要因素, 其中 pH 值(CV 为 14.3%) 和土壤容重(CV 为 12.1%) 变异系数相对较低, 接近不敏感(CV<10%) 水平, 这说明土壤酸化是红壤坡耕地合理耕层面临的主要障碍因素, 而土壤类型相同可能是导致土壤容重变异系数低的主要原因。K-S 检验结果表明, 各项指标均服从正态分布($P>0.05$)。

2.2 红壤坡耕地耕层最小数据集 MDS 建立

2.2.1 基于聚类分析最小数据集 MDS 建立

基于聚类分析法中 R 型聚类, 对全量数据集 13 个评价指标进行分类且分类意义明确。图 1 表明, 在聚合水平 14~17 之间, 指标可明显划分为 6 类, 土壤有机质、

全氮、耕层厚度和土壤饱和导水率为第一类, 表征土壤生产性能; 有效磷和速效钾进入第二类, 表征耕层养分特征; 第三类为 pH 值和砂粒, 表征土壤酸碱度; 土壤贯入阻力和粘粒为第四类, 表征土壤耕性特征; 第五类有土壤容重和土壤抗剪强度, 表征土壤抗侵蚀性能; 土壤粉粒成为第六类, 表征土壤颗粒组成特征。

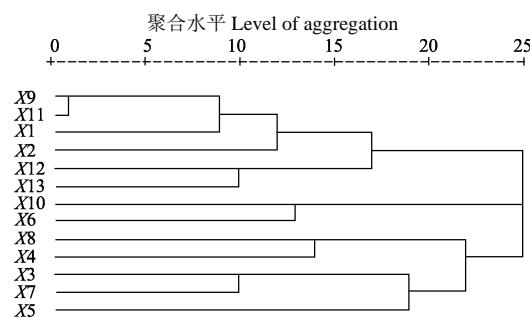


图 1 红壤坡耕地耕层质量评价指标聚类分析树状图

Fig.1 Clustering analysis deprogram of red soil cultivate plough quality evaluation index

由表 4 可见, 第一类中土壤有机质与全氮(0.885^{**})、

土壤饱和导水率 (0.618***) 均为高度相关, 有机质含量的增加会促进全氮含量的增加; 通过合理施肥提高土壤有机质含量, 可对土壤饱和导水率进行有效调控, 选择有机质进入最小数据集。耕层厚度是土壤生产力的基本限制条件, 坡耕地随着坡度增加, 耕层厚度变薄, 耕作条件逐级变差, 前人研究表明土壤质量评价指标中耕层厚度累积使用频率达 50%, 是反映土壤质量的重要指标, 则耕层厚度进入 MDS。第二类中有效磷是作物从土壤中获取的主要养分资源, 受施肥等外在措施补给效果甚微, 王华等^[14]指出红壤中有效磷含量的变化可以反映土壤质量的变化, 许明祥^[20]在坡耕地质量评价中选择有效磷代替速效钾进入 MDS, 因此, 选择有效磷进入 MDS。 pH 值是衡量土壤酸碱度的主要指标, 砂粒和 pH 值呈显著正相关 (0.387*), 土壤酸化导致红壤坡耕地质地疏松、砂粒含量高, 选择 pH 值进入最小数据集。土壤贯入阻力与黏粒相关性显著 (0.441**), 两者选一项指标即可, 土壤贯入阻力是反映土壤耕性的重要指标且与抗剪强度有

较高相关度 (0.350*), 可反映耕层土壤质量多方面特征, 第四组中将黏粒剔除。第五组中土壤容重和土壤抗剪强度是反映土壤抗侵蚀性能的重要指标, 两者具有显著相关性 (0.476**), 土壤容重能反映土壤孔隙特征、入渗性能等土壤可蚀性多方面特征, 是影响土壤抗剪强度的重要因素, 土壤抗剪强度与贯入阻力相关性高, 可通过土壤贯入阻力解释部分信息, 鉴于指标选择有重复性, 选择土壤容重进入最小数据集。黏重板结是红壤坡耕地的主要障碍因素, 本研究中反映红壤坡耕地土壤颗粒组成特征的黏粒、粉粒、砂粒变异系数分别为 66.1%、29.5% 和 42.3%, 粉粒的敏感性最低, 只能反映土壤颗粒组成的少量信息, 不具有代表性, 因此, 第六组中粉粒暂不考虑。最终确定耕层厚度、土壤容重、土壤贯入阻力、土壤有机质、 pH 值和有效磷共 6 个指标进入最小数据集。基于主成分分析法得到指标权重分别为耕层厚度 0.161、土壤容重 0.207、土壤贯入阻力 0.108、土壤有机质 0.172、有效磷 0.208 和 pH 值 0.144。

表 4 红壤坡耕地耕层评价指标 Person 相关系数矩阵

Table 4 Person correlation coefficient matrix of red soil cultivate plough quality evaluation index

评价指标 Evaluation index	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
X_1	1											
X_2	0.245	1										
X_3	-0.269	-0.614**	1									
X_4	0.090	0.232	-0.132	1								
X_5	-0.023	-0.251	0.127	-0.387*	1							
X_6	-0.043	0.084	-0.031	-0.347*	-0.731**	1						
X_7	-0.271	0.004	0.476**	-0.098	0.112	-0.041	1					
X_8	-0.574**	-0.095	0.286	0.441*	-0.076	-0.175	0.350*	1				
X_9	0.561**	0.618**	-0.522**	0.286	0.072	-0.286	-0.277	-0.264	1			
X_{10}	-0.338*	0.299	0.026	-0.210	-0.219	0.378*	0.409**	0.223	-0.312*	1		
X_{11}	0.502**	0.401**	-0.283	0.107	0.111	-0.192	-0.151	-0.262	0.885**	-0.219	1	
X_{12}	0.369*	0.121	-0.372*	0.043	0.111	-0.145	-0.306	-0.310*	0.449**	-0.458**	0.281	1
X_{13}	0.182	-0.156	-0.190	0.386*	-0.106	-0.178	-0.272	0.125	0.222	-0.228	0.226	0.482**

Note: ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$

2.2.2 基于主成分分析最小数据集 MDS 建立

基于主成分分析结果, 红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标中特征值大于 1 的有 4 个主成分, 累计贡献率达 73.51%, 满足信息提取的要求。土壤速效钾在 4 个主成分中因子载荷都小于 0.5, 则将其划分到载荷值最高的一组 (见表 5)。耕层厚度、土壤容重、土壤有机质、全氮和有效磷进入第一组, 耕层厚度与全氮、有机质相关性高 (0.502**, 0.561**), 则 Norm 值最高的土壤有机质进入最小数据集。土壤有机质和土壤容重相关性高 (-0.522**), 结合 Norm 值将土壤容重剔除。土壤有机质和有效磷相关性高 (0.449**), 则土壤有机质进入 MDS。第二组中粉粒和砂粒相关性高 (-0.731**), 结合 Norm 值粉粒被剔除。第三组黏粒和土壤贯入阻力有较相关性 (0.441*), 比较两者 Norm 值大小, 土壤贯入

阻力进入 MDS。第四组土壤抗剪强度和速效钾相关性低, 均进入最小数据集。最终确定土壤饱和导水率、砂粒、土壤贯入阻力、土壤抗剪强度、土壤有机质、 pH 值和速效钾共 7 个指标进入最小数据集。提取评价指标的公因子方差, 得到最小数据集指标权重依次为土壤饱和导水率 0.184、砂粒 0.137、土壤贯入阻力 0.142、土壤抗剪强度 0.133、土壤有机质 0.182、 pH 值 0.144 和速效钾 0.078。

2.2.3 最小数据集合理性验证

最小数据集评价指标体系合理性验证是耕层土壤质量评价的重要环节。计算基于不同数据集的土壤质量指数, 全量数据集土壤质量指数 (SQI-T) 变化幅度为 0.318~0.696, 均值为 0.529 ± 0.09 , 变异系数为 20.1%, 属中度变异性。基于聚类分析土壤质量指数 (SQI-CA) 在 0.349~0.636 之间变化, 均值为 0.476 ± 0.11 , 变异系数为 23.1%,

为中度变异性。基于主成分分析土壤质量指数(SQI-PCA)的变化区间值为 $0.298\sim0.529$, 均值和变异系数分别为 0.463 ± 0.12 和 53.9%, 接近高度变异性。SQI-CA 较 SQI-PCA 变化幅度、均值和变异系数更接近 SQI-T。将 SQI-T 分别与 SQI-CA、SQI-PCA 作散点图, 进行回归分析, 从拟合效果来看(图 2), SQI-T 与 SQI-CA、SQI-PCA 均呈显著正相关, 但 R^2 分别为 0.745 和 0.706, SQI-T 与 SQI-CA 拟合效果更优, SQI-T 与 SQI-CA、SQI-PCA 的 Nash 有效系数分别为 0.539 和 0.528, 偏差系数分别为 0.122 和 0.124, 平均相对误差分别为 0.122 和 0.128。结果表明采用基于聚类分析最小数据集(MDS-CA)较基于主成分分析最小数据集(MDS-PCA)对红壤坡耕地耕层土壤质量进行评价准确性更高, 故选择 MDS-CA 替代全量数据集对红壤坡耕地耕层土壤质量进行评价。

表 5 红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标载荷矩阵和 Norm 值

Table 5 Load matrix and Norm value of red soil cultivate plough quality evaluation index

评价指标 Evaluation index	分组 Grouping	主成分 PCA Principal component PCA				
		PC-1	PC-2	PC-3	PC-4	Norm 值
X_1	1	0.707	0.055	-0.271	-0.033	1.454
X_3	1	-0.642	-0.404	-0.034	0.021	1.409
X_9	1	0.894	0.08	0.113	0.346	1.841
X_{11}	1	0.74	0.029	0.005	0.379	1.547
X_{12}	1	0.659	-0.21	-0.079	-0.268	1.392
X_2	2	0.463	0.649	0.193	0.469	1.479
X_{10}	2	-0.487	0.593	0.075	0.323	1.372
X_4	2	0.041	-0.733	-0.339	0.492	1.334
X_6	2	-0.254	0.759	-0.277	-0.417	1.391
X_5	3	0.286	-0.019	0.84	-0.113	1.273
X_8	3	-0.464	-0.135	0.744	0.124	1.384
X_7	4	-0.523	-0.011	0.136	0.545	1.262
X_{13}	4	0.41	-0.256	0.449	-0.456	1.227
主成分特征值		3.949	2.188	1.809	1.61	—
主成分方差贡献率/%		30.374	16.83	13.918	12.385	—
主成分累积贡献率/%		30.374	47.204	61.721	73.506	—

计算采样点基于 MDS-CA 的土壤质量指数值来衡量研究区耕层土壤质量水平。将红壤坡耕地耕层土壤质量等距离划分为低($0 < \text{SQI-CA} < 0.33$)、中($0.33 \leq \text{SQI-CA} <$

0.66)、高($0.66 \leq \text{SQI-CA} < 1$) 3 个等级。耕层土壤质量指数等级分属低等和中等的采样点分别占 12.19% 和 87.81%, 无高等样点分布。这说明红壤坡耕地大部分耕层土壤质量处于中等水平, 少量耕层土壤质量偏低, 通过合理耕作和施肥可有效调节耕层土壤质量。

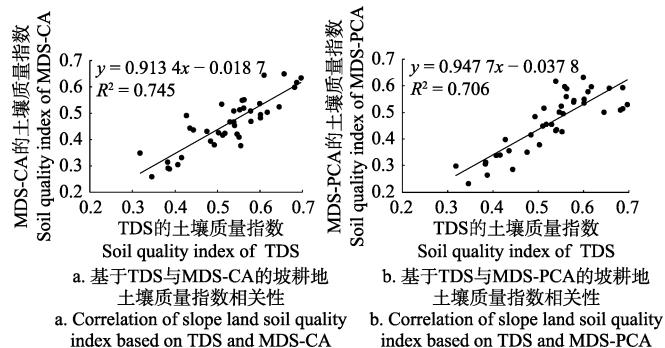


图 2 基于不同数据集红壤坡耕地土壤质量指数的相关性

Fig.2 Correlation of red soil slope land soil quality index based on different data set

2.3 红壤坡耕地耕层合理性诊断

基于红壤坡耕地耕层质量 MDS 诊断结果, 以基于聚类分析得出的最小数据集指标, 耕层厚度、土壤容重、土壤贯入阻力、土壤有机质、pH 值和有效磷作为合理耕层诊断指标。土壤质量指数(SQI-CA)取值范围在 $0\sim1$ 之间, 其值越高, 表明各诊断指标对作物生长贡献率越大, 作物产量越高^[23], 根据耕层土壤质量与作物产量的对应关系, 判定土壤质量指数($0 < \text{SQI-CA} \leq 0.33$)属于低产耕层。土壤质量指数($0.33 < \text{SQI-CA} \leq 0.66$)属于中产耕层, 土壤质量指数($0.66 < \text{SQI-CA} \leq 1$)为高产耕层, 而研究区无高产耕层分布(表 6)。合理耕层能最大限度地蓄纳并协调耕层中水、气、热状况, 为作物生长及增产提供良好的环境和条件^[24]。构建合理耕层可提高土壤保水、保肥能力, 促进作物根系生长^[25], 有利于加深耕层及恢复地力, 有利于蓄水保墒防止径流及保护土壤提高产量^[27]。因此可以推测, 具备保水、保土、保肥及增产潜力的红壤坡耕地合理耕层(中产、高产耕层)应具备较厚的耕层厚度, 适当的土壤容重、有机质含量和 pH 值, 较小的贯入阻力, 较高的有效磷含量^[26], 而合理深松并施用有机肥是构建合理耕层的有效措施之一。

表 6 红壤坡耕地合理耕层适宜性阈值诊断
Table 6 Diagnosis of reasonable threshold of cultivated land in red soil slope

MDS 指标 Minimum data set index	指标隶属度 Membership grade	低产耕层 Low yield cultivated layer		中产耕层 Middle yield cultivated layer		合理耕层适宜性阈值 Reasonable threshold of cultivated layer
		变化范围 variation range	平均值 Average value	变化范围 Variation range	平均值 Average value	
耕层厚度/cm	≥ 18	14~20	15.6	14~31	20.39	≥ 20.39
土壤容重/(g·cm ⁻³)	$0.92\sim 1.48$	1.18~1.48	1.38	0.92~1.52	1.21	$0.92\sim 1.21$
土壤贯入阻力(kg·cm ⁻³)	≤ 1.49	0.76~1.4	1.16	0.18~3.59	1.21	≤ 1.21
土壤有机质/(g·kg ⁻¹)	≥ 15.37	2.9~10.2	7.36	7.48~36.59	18.82	≥ 18.82
pH 值	$5.0\sim 7.6$	4.6~5.4	5.04	4.8~8.0	5.38	$5.04\sim 5.38$
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	≥ 25.9	1.92~14.93	7.96	6.35~114.84	28.83	≥ 28.83
耕层特点	—	耕层厚度偏薄, 土壤容重和贯入阻力偏大, 土壤有机质和有效磷含量低, 土壤偏酸性。		耕层厚度适中, 土壤容重和贯入阻力适宜, 土壤有机质和有效磷含量较高, pH 值呈若酸性。		耕层厚度偏厚, 土壤容重、土壤贯入阻力和 pH 值适当, 土壤有机质和有效磷含量较高。

综合分析野外调查、室内试验结果以及评价指标隶属度函数类型, 表明上述指标中土壤容重、土壤有机质和 pH 值存在一个合理耕层适宜区间, 多或少都将成为限制因子。耕层厚度、土壤有机质和有效磷是越大越好, 土壤贯入阻力则是越小越好, 超过某一值, 影响将越来越小。由于土壤参数变异性较大, 以耕层土壤参数平均值为参考基准, 结合诊断指标隶属度为 1 表征最优值, 隶属度为 0 表征最差值, 将土壤参数适宜度等距离划分为不适宜、较适宜和最适宜^[27], 选择土壤参数隶属度在较适宜(0.33~0.66)和最适宜(0.66~1)为土壤参数适宜范围。综合分析及比较各采样点土壤参数较适宜和最适宜变化范围以及土壤质量指数为中产、高产样点对应土壤参数变化范围, 初步界定红壤坡耕地合理耕层适宜性阈值(合理耕层土壤参数变化范围临界值)为: 耕层厚度 $\geq 20.39\text{ cm}$, 土壤容重 $0.92\sim 1.21\text{ g/cm}^3$, 土壤贯入阻力 $\leq 1.21\text{ kg/cm}^3$, 土壤有机质含量 $\geq 18.82\text{ g/kg}$, pH 值 $5.04\sim 5.38$, 有效磷 $\geq 28.83\text{ mg/kg}$ 。

3 讨论

坡耕地耕层土壤质量评价一般是基于农作物的生产力、土壤理化及力学性质。基于国内外通过建立 MDS 对耕地土壤质量评价的研究成果^[17,20,28-35], 本研究对其全量数据集和最小数据集评价指标进行了汇总及对比分析, 结果表明土壤质量评价指标涉及范围广泛, 几乎涵盖了土壤质量的物理、化学和生物等各个方面的特征。

图 3 分别列出了全量数据集和最小数据集评价指标中使用频率最高的前 10 个指标。从全量指标使用频率排序(图 3a)来看, 土壤容重、黏粒、pH 值是土壤质量评价中几乎必须考虑的指标, 使用频率达 90%; 全氮使用频率为 70%; 团聚体平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、粉粒、砂粒、有机质和孔隙度次之, 均为 60%; 使用频率为 50% 的是有效磷。最小数据集(图 3b)中使用频率最高的前 3 位是土壤容重、pH 值和 MWD, 三者均为 40%; 有机质、全氮和钠吸附比次之, 使用频率为 30%; 使用频率为 20% 的有粘粒、土壤有效含水量、有效磷和有机碳。本研究 13 个全量数据集评价指标中有 7 个进入全量数据集评价指标使用频率前 10 位; 最小数据集(MDS-CA)6 个评价指标中有 4 个进入最小数据集评价指标使用频率前 10 位, 与前人研究结果相似, 表明本研究中全量数据集和最小数据集评价指标体系均有较好代表性, 适宜于耕层土壤质量评价。

土壤侵蚀是衡量土壤质量的关键因素, 土壤侵蚀的发生会加速耕层退化, 导致土壤养分和生产力逐渐减弱, 作物产量和耕层质量降低^[29]。在土壤侵蚀的过程中, 随着土层深度增加, 土层厚度不断减薄, 土壤抗侵蚀性能和生产力不断降低。红壤坡耕地耕层厚度与作物产量呈显“上梯型”关系, 耕层越厚, 产量越高, 以 20 cm 处为显著分界点, 高于此厚度, 作物产量有很大提高^[15]。土壤容重对土壤入渗有重要影响, 容重越大, 其阻碍水分入渗越明显。当容重为 1.15 g/cm^3 时为红壤坡耕地防止土壤侵蚀, 增加水分入渗的最佳状态^[36]。土壤贯入阻力

越大, 土壤稳定性越强, 耕作频率和施肥处理均可通过改变土壤容重和含水率来改变红壤坡耕地耕层土壤贯入阻力大小^[37]。随着土壤侵蚀程度的加剧, 红壤坡耕地耕层土壤养分流失越明显, 土壤有机质含量在 $20.1\sim 38.08\text{ g/kg}$, 有效磷含量在 $0.31\sim 1.33\text{ mg/kg}$, pH 值在 $4.06\sim 4.16$ 之间时为轻度侵蚀或无明显侵蚀程度^[38-39]。其中磷素流失主要集中在 6~9 月, 强暴雨下对土壤的冲刷是造成红壤坡耕地养分流失的直接原因。本研究中红壤坡耕地耕层厚度总体处于适宜水平, 土壤平均容重 1.24 g/cm^3 , 抗侵蚀性能较强、入渗性能略差。土壤贯入阻力偏小, 有利于作物根系生长。土壤有机质和有效磷总体处于轻度或无明显侵蚀程度, pH 值处于中度侵蚀水平。总体上看, 土壤侵蚀程度将直接影响到耕层土壤质量和作物产量高低。在坡耕地采取深松少耕、秸秆还田等保护性耕作措施以及合理施肥调节土壤酸碱度, 可减少土壤侵蚀, 改进耕层土壤质量, 促进作物增产。

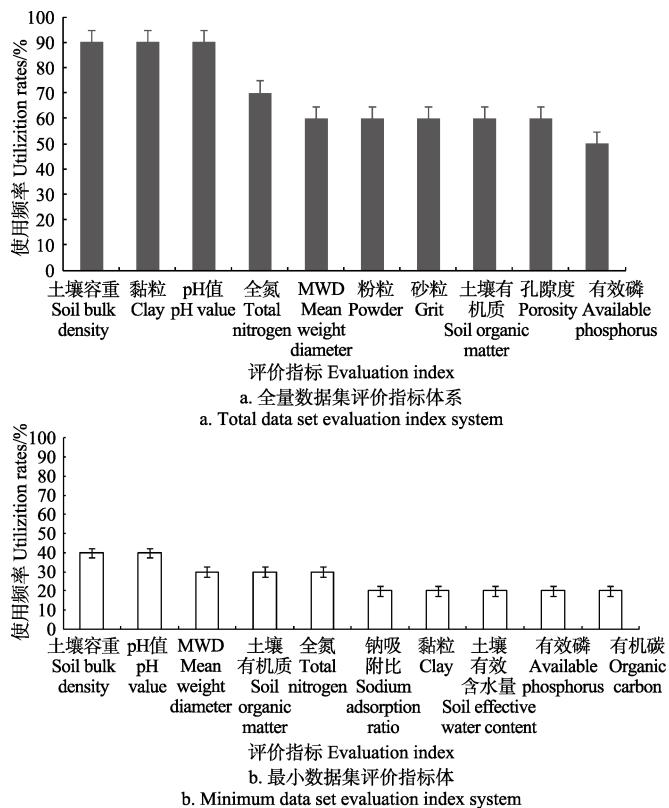


图 3 全量数据集与最小数据集耕地土壤质量评价指标使用频率排序

Fig.3 Frequency rankingslope land soil quality index based on TDS and MDS

4 结论

1) 红壤坡耕地耕层土壤各评价指标特征差异明显。耕层平均厚度($19.93\pm 4.9\text{ cm}$), 接近作物生长适宜厚度; 土壤有机质和全氮平均含量分别为 (17.43 ± 8.71) 和 $(0.97\pm 0.42)\text{ g/kg}$, 处于中度贫瘠化水平; 有效磷和速效钾平均含量分别为 $(26.1\pm 22.22)\text{ g}$ 和 $(155.46\pm 88.35)\text{ mg/kg}$, 含量丰富; 平均 pH 值为 (5.34 ± 0.77) , 土壤呈若酸性。各评价指标总体处于中低度敏感水平。

2) 红壤坡耕地最小数据集由耕层厚度、土壤容重、土壤贯入阻力、土壤有机质、pH 值和有效磷组成。不同数据集耕层土壤质量评价结果及相关性差异明显, 土壤质量指数变化范围表现为 SQI-T(0.318~0.696)>SQI-CA(0.349~0.636)>SQI-PCA(0.298~0.529), 平均值为 SQI-T(0.529±0.09)>SQI-CA(0.476±0.11)>SQI-PCA(0.463±0.12)。变异系数表现为 SQI-T(20.1%)<SQI-CA(23.1%)<SQI-PCA(53.9%), SQI-T 与 SQI-CA、SQI-PCA 的 Nash 有效系数分别为 0.539 和 0.528, 偏差系数分别为 0.122 和 0.124, 平均相对误差分别为 0.122 和 0.128。SQI-T 与 SQI-CA 的相关度高于 SQI-PCA, 说明 MDS-CA 较 MDS-PCA 更适合替代全量数据集对耕层土壤质量进行评价。

3) 红壤坡耕地大部分耕层土壤质量处于中等水平, 具备保水、保土、保肥及增产潜力合理耕层应具备较厚的耕层厚度, 适当的土壤容重、有机质含量和 pH 值, 较小的土壤贯入阻力, 较高的有效磷含量。初步确定红壤坡耕地合理耕层适宜性阈值为: 耕层厚度≥20.39 cm, 土壤容重 0.92~1.21 g/cm³, 土壤贯入阻力≤1.21 kg/cm³, 土壤有机质含量≥18.82 g/kg, pH 值 5.04~5.38, 有效磷≥28.83 mg/kg, 合理深松是构建合理耕层的有效措施之一。

[参 考 文 献]

- [1] Lason We, Pierce F J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management[C] Doran J W, Coleman DC, Bezedick D F, et al, eds. Defining soil quality for sustainable environment. Soil Sci.Soc. Am, Special Pub No.35, Am, Soc, Agron, Madison, Wise, U.S.A.1994: 37—51.
- [2] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2002, 90(1): 25—45.
- [3] Sparling G P, P Schipper L A, Bettjeman W, Soil quality monitoring in new zealand:Practical lessons from a 6-year trial[J]. Agri-culture Ecosystems and Environment, 2004, 104: 523—534.
- [4] Govaerts B, Sayre K D, Deckers J. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 87(2): 163—174.
- [5] Rahmanipour F, Marzaioli R, Bahrami H. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of qavon province, Iran[J]. Ecological indicators, 2014, 40(5): 19—26.
- [6] Volchko Y, Norman J, Rosen L, et al. A minimum date set for evaluating the ecological soil functions in remediation projects[J]. Journal of soils and sediments, 2014, 14(11): 1850—1860.
- [7] 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]. Ecologic Science. 2007,
- 27(7): 2715—2724. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李桂林, 陈杰, 檀满枝, 等. 基于土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 16—25.
Li Guilin, Chen Jie, Tan Manzhi, et al. Establishment of a minimum dataset for soil quality assessment based on land use change[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(1): 16—25. (in Chinese with English abstract)
- [9] Zhang C, Xue S, Liu G B. A comparison of soil qualities of different revegetation types in the Loess Plateau, China[J]. Plant and Soil, 2011, 347(1/2): 163—178.
- [10] 邓绍欢, 曾令涛, 关强等. 基于最小数据集的南方冷浸田土壤质量评价[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 1326—1333.
Deng Shaohuan, Zeng Lingtao, Guan Qiang, et al. Minimum dataset-based soil quality assessment of waterlogged paddy field in south china[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(2): 1326—1333. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王效举, 龚子同. 红壤丘陵小区域水平上不同时段土壤质量变化的评价和分析[J]. 地理科学, 1997, 17(2): 141—149.
Wang Xiaoju, Gong Zitong. Evaluation and analysis of soil quality changes in different time periods at small regional level in red soil hilly regions[J]. Scientia Geographica Sinica, 1997, 17(2): 141—149. (in Chinese with English abstract)
- [12] 孙波, 赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法[J]. 地理科学进展, 1999, 18(2): 118—128.
Sun Bo, Zhao Qiguo. Evaluation indexes and methods of soil quality concerning red soil degradation[J]. Progress in Geography, 1999, 18(2): 118—128. (in Chinese with English abstract)
- [13] 史志华, 蔡崇法, 王天巍. 红壤丘陵区土地利用变化对土壤质量的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(6): 537—543.
Shi Zhihua, Cai Congfa, Wang Tianwei. Influence of landuse changes on soil quality in hilly region of red soil[J]. Resources and environment in the Yangze Basin, 2001, 10(6): 537—543. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王华, 黄宇, 阳柏苏, 等. 中亚热带红壤地区稻-稻-草轮作系统稻田土壤质量评价[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3271—3281.
Wang Hua, Huang Yu, Yang Bosu, et al. Paddy soil quality assessment under rice-ryegrass rotation system in red soil region of mid-subtropics[J]. Ecologic Science. 2005, 25(12): 3271—3281. (in Chinese with English abstract)
- [15] 蒋端生. 红壤丘陵区耕地肥力质量演变规律及其影响因素研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.
Jiang Duansheng. Studies on the Evolution Law of the Fertility Quality of Arable Land and Its Influencing Factors in Red Soil Hilly Areas[D]. Chang Sha:Hunan Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [16] 贡路, 张海峰, 吕光辉, 等. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 4136—4143.
Gong Lu, Zhang Haifeng, Lü Guanghui, et al. Soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River[J]. Ecologic Science. 2011, 31(14): 4136—4143. (in Chinese with English abstract)

- Chinese with English abstract)
- [17] 吴春生, 刘高焕, 黄翀, 等. 基于 MDS 和模糊逻辑的黄河三角洲土壤质量评估[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1275—1286.
Wu Chunsheng, Liu Gaohuan, Huang Chong, et al. Soil quality assessment of the yellow river delta based on MDS and fuzzy logic model[J]. Resources Science, 2016, 38(7): 1275—1286. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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 Tilt Characteristics of Cultivated-layer in Purple Soil Farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 24—29. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张爱国, 李锐, 杨勤科. 中国水蚀土壤抗剪强度研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 5—9.
Zhang Aiguo, Li Rui, Yang Qinke. Study on soil anti-shearing intensity of water erosion in China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(3): 5—9. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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 Ming Xiang. Soil Quality Evolvement Mechanism in the Process of Ecosystem Restoration and Its Management in the Hilly Loess Plateau[D]. Yang Ling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [21] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models[J]. A discussion of principles. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282—290.
- [22] 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]. Ecologic Science. 2017, 37(19): 1—14. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张银平, 杜瑞成, 刁培松, 等. 机械化生态沃土耕作模式提高土壤质量及作物产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 33—38.
Zhang Yinping, Du Ruicheng, Diao Peisong, et al. Mechanical and ecological tillage pattern improving soil quality and crop yields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(7): 33—38. (in Chinese with English abstract)
- [24] 姜小凤, 张步陡, 王玲英, 等. 不同耕作方式对旱地土壤酸解有机总氮的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2006, 41(1): 48—51.
Jiang Xiaofeng, Zhang Budou, Wang Lingying, et al. Effect of no-tillage with straw cover on soil organic nitrogen in dry land[J]. Journal of gansu agricultural university, 2006, 41(1): 48—51. (in Chinese with English abstract)
- [25] 郑洪兵, 齐华, 刘武仁, 等. 玉米农田耕层现状、存在问题及合理耕层构建探讨[J]. 耕作与栽培, 2014, 5: 39—42
Zheng Hongbin, Qi Hua, Liu Renwu, et al. Press and problem of tillage layer of maize cropland and discussion of optimum tillage layer[J]. Tillage and Cultivation, 2014, 5: 39—42. (in Chinese with English abstract)
- [26] 宫亮, 邢月华, 刘艳, 等. 棕壤土合理耕层标准调查研究[J]. 玉米科学, 2016, 24(5): 94—99.
Gong Liang, Xing Yuehua, Liu Yan, et al. Investigation on standards of the rational plough layer of brown soil[J]. Maize Sciences, 2016, 24(5): 94—99. (in Chinese with English abstract)
- [27] 陈海生, 刘国顺, 刘大双, 等. GIS 支持下的河南省烟草生态适宜性综合评价[J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2425—2433.
Chen Haisheng, Liu Guoshun, Liu Dashuang, et al. Studies on comprehensive evaluation of tobacco ecological suitability of henan province supported by GIS[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(7): 2425—2433. (in Chinese with English abstract)
- [28] 段兴武, 谢云, 冯艳杰, 等. 东北黑土区土壤生产力评价方法研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1656—1664.
Duan Xingwu, Xie Yun, Feng Yanjie, et al. Study on the Method of Soil Productivity assessment in northeast black soil regions of china[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(5): 1656—1664. (in Chinese with English abstract)
- [29] 杨维鸽. 典型黑土区土壤侵蚀对土壤质量和玉米产量的影响研究[D]. 杨凌: 中国科学院大学, 2016.
Yang Weige. Investigating the Impacts of Soil Erosion on Soil Quality and Corn Yield in the Typical Black Soil Region[D]. Yang Ling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李强, 许明祥, 赵允格, 等. 黄土高原坡耕地沟蚀土壤质量评价[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 1001—1012.
Li Qiang, Xu Mingxiang, Zhao Yunge, et al. Gully erosion soil quality assessment on the cultivated slope land in the loess plateau region, china[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(6): 1001—1012. (in Chinese with English abstract)
- [31] Mohammad S, Nicholas H. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 150(6). 57—67.
- [32] Zhi W, Li Z W. Assessing the soil quality of long-term reclaimed waste water-irrigated cropland[J]. Geoderma, 2003, 114(3-4): 261—278.
- [33] Shaba H, Emami. Pore size distribution as a soil physical quality index for agricultural and pasture soils in northeastern iran[J]. Pedosphere, 2013, 23(3): 312—320.
- [34] Duraisamy V, Surendra KS. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid deccan plateau india[J]. Geoderma, 2016, 282(11) : 70—79.
- [35] Ranjbar A, Emami.H, Khorassani R. Soil quality assessments in some iranian saffron fields[J]. JAST, 2016, 18: 865—878.
- [36] 刘晓梅, 吕殿青. 土壤容重对红壤坡地降雨侵蚀和入渗的影响[J]. 长沙大学学报, 2013, 27(2): 13—18.
Liu Xiaomei, Lü Dianqing. Effects of soil bulk density on rainfall erosion and infiltration in red soil slope[J]. Journal of changsha university, 2013, 27(2): 13—18. (in Chinese with English abstract)

- [37] 高冰可. 红壤穿透阻力的影响因素及预测[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
Gao Bingke. Influencing Factors and Prediction Model on Red Soil Penetration Resistance[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [38] 窦晓琳, 李铭, 王伟波, 等. 福建红壤区不同侵蚀强度马尾松林地土壤营养元素变化特征[J]. 植物科学学报, 2012, 30(2): 161—168.
Dou Xiaolin, Li Ming, Wang Weibo, et al. Changes in soil nutrients in different eroded soils in pinus massoniana forest
- ecosystems in Fujian Province, China[J]. Plant Science Journal, 2012, 30(2): 161—168. (in Chinese with English abstract)
- [39] 左继超, 胡建民, 王凌云, 等. 侵蚀程度对红壤团聚体分布及养分含量的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 112—117.
Zuo Ji chao, Hu Jianmin, Wang Lingyun, et al. Effects of soil erosion intensity on aggregate size distribution and nutrient content in red soil region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 2017, 37(1): 112—117. (in Chinese with English abstract)

Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis

Jin Hufang¹, Shi Dongmei^{1*}, Chen Zhengfa², Liu Yijun¹, Lou Yibao¹, Yang Xu¹

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

2. Kunming Engineering Corporation Limited of POWERCHINA, Kunming 650051, China)

Abstract: The minimum data set (MDS) is the least indicators collection that can reflect the information of total soil quality well, which can effectively improve the real-time characteristic and application of soil quality assessment. In order to characterize the soil quality of cultivated layer for slope farmland in southern red soil hilly area, the paper established the MDS for quality diagnosis of cultivated layer for slope farmland by cluster analysis (CA) and principal component analysis (PCA) respectively, and furthermore analyzed soil quality characteristics of cultivated layer adopting 3 different soil quality indices (SQI), including SQI-T (data from total soil indicators), SQI-CA (data from CA indicators) and SQI-PCA (data from PCA indicators). The results showed: 1) Soil quality of cultivated layer for slope farmland varied significantly among different red soil sites. The average cultivated layer thickness of 19.93 ± 4.9 cm was in suitable level for crop growth, and the soil organic matter content of 17.43 ± 8.71 g/kg and the soil total nitrogen content of 0.97 ± 0.42 g/kg were in moderately barren level, but the soil nutrients of effective phosphorus of 26.1 ± 22.22 mg/kg and available potassium of 155.46 ± 88.35 mg/kg were rich for crop growth. The soil pH value of 5.34 ± 0.77 was faintly acidic. 2) The MDS on soil quality diagnosis of cultivated layer for red soil slope farmland included such indicators as cultivated layer thickness, soil bulk density, soil penetration resistance, soil organic substance, pH value and soil available phosphorus. The assessment results of soil quality of cultivated layer based on 3 different data sets are distinct greatly, the variation range and the mean of soil quality index were showed as SQI-T > SQI-CA > SQI-PCA and the variation coefficients presented as SQI-T < SQI-CA < SQI-PCA. Furthermore, the relevance and Nash efficiency coefficient between SQI-CA and SQI-T were higher than that between SQI-PCA and SQI-T, and the relative deviation coefficient and the average relative error between SQI-CA and SQI-T were lower than that between SQI-PCA and SQI-T, which illustrated that MDS-CA (MDS based on CA) was more appropriate than MDS-PCA (MDS based on PCA) to reflect the information of the total data set (TDS) for soil quality assessment of cultivated layer for red soil slope farmland. 3) From the perspective of soil and water conservation, fertilizer conservation and yield-increasing potential, the suitability thresholds of those diagnostic parameters for cultivated layer of red soil slope farmland were indicated as follows: the cultivated layer thickness of ≥ 20.39 cm, the soil bulk density of $0.92\text{--}1.21$ g/cm³, the soil penetration resistance of ≤ 1.21 kg/cm³, the soil organic matter content of ≥ 18.82 g/kg, the pH value of 5.04—5.38 and the effective phosphorus content of ≥ 28.83 mg/kg. Rational deep-loosening is one of the effective measures for reasonable cultivated layer construction. These results can provide some useful parameters not only for the soil quality recovery of the cultivated layer but also for the suitability regulation of the crop growth and the control of soil and water loss of slope farmland, which are also conducive to the sustainable utilization of the slope farmland resources in red soil hilly area.

Keywords: soils; cluster analysis; principal component analysis; minimum data set; red soil slope farmland; reasonable cultivated layer; soil quality