

基于土壤剖面质地构型的土壤质量评价^①

——以河南省封丘县为例

李开丽¹, 檀满枝², 密术晓³, 陈 杰⁴

(1 江苏第二师范学院城市与资源环境学院, 南京 210013; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008;

3 苏州市国土资源局, 江苏苏州 215004; 4 郑州大学水利与环境学院, 郑州 450000)

摘 要: 土壤剖面质地构型是土壤质量和土壤生产力的重要影响因子, 对冲积平原地区来讲尤其重要。然而, 现有的土壤质量评价研究中, 很少采用该因子, 且评价指标筛选大多缺乏明确的生物学意义。本研究利用河南省封丘县 39 个剖面数据及 113 个土钻样点数据, 使用模糊 C 均值聚类方法 (FCM) 结合 Kriging 插值方法获取的 9 种土壤剖面质地构型在空间上分布的单一类别隶属度图; 在此基础上结合专家知识, 针对平原地区旱作物及耕地的耕性对土壤剖面质地构型的性状进行打分, 以分值为参照, 在 ArcGIS 9.2 中 9 个单一类别隶属度栅格文件进行栅格计算, 获取了研究区土壤剖面质地构型栅格的综合分值。利用包括土壤剖面质地构型在内的多个土壤属性, 结合作物产量数据, 使用主成分分析 (PCA) 方法确定了最小数据集 (MDS); 应用指数和法, 基于两种途径对土壤质量进行了评价, 并结合测产获取的作物产量对两种评价结果进行了对比分析。结果表明: 土壤质量指数与作物产量有较好的相关性, 土壤质量评价结果能够较好地反映研究区的土壤质量状况。在添加剖面质地构型因子后, 土壤质量评价结果有进一步的改善, 可见在黄河泛滥冲积平原地区, 剖面质地构型是土壤质量评价必不可少的因子。

关键词: 土壤剖面质地构型; 土壤质量; 冲积平原; 模糊 C 均值 (FCM); 最小数据集 (MDS); 主成分分析 (PCA)

中图分类号: S159.9

土壤质量与可持续发展是土壤学、农学及环境科学界共同关注的热点课题之一^[1]。土壤剖面质地构型, 也称土体构型, 是指土体内不同质地土层的排列组合。早在 1978 年, 陈恩凤^[2]就指出土体构型直接影响土壤的水肥气热状况, 是土壤肥力研究的重要部分。Dobos 等^[3]也指出土壤剖面观测是野外观测到最主要的土壤信息, 它代表着土壤最确定的信息。颜春起^[4]指出三江平原土壤的水分特性以作物根系的发育和深度与土体构型有密切关系。崔浩浩等^[5]对宁夏某葡萄基地土壤的田间持水量、饱和导水率和体积质量进行了分析, 研究了不同土体构型下的土壤持水性能。结果表明, 土壤土体构型不同, 其体积质量、田间持水量、土壤饱和导水率也不同。李学敏等^[6]采用多点定位观测, 查明不同土体构型及其属性, 研究了河北省东南部冲积平原土体构型及其属性, 结果表明不同土体构型对于土壤的理化性状和生产性能有重大影响。对河南省潮土区的研究也表明土壤剖面质地

构型对作物产量的影响显著^[7-8]。

然而, 尽管有关土壤剖面质地构型的定量化方法已得到发展^[9-13], 但当前的土壤质量评价多集中于土壤的表层深度^[14]。国际范围内, 除中国外, 土体构型作为土壤质量的重要因子使用较少; 且以往研究中土体构型的数据来源多为二次土壤普查的历史数据, 土体构型的量化方法多仅仅依靠专家知识进行^[15-16]。本研究的目的: 对封丘县的土壤质量进行评价; 对比土壤剖面质地构型对土壤质量指数的影响; 选择适合研究区的土壤质量指标最小数据集。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

封丘县地处河南省东北部, 地理位置 34°53′ ~ 35°14′N, 114°14′ ~ 114°45′E, 是典型的黄河中下游冲积平原区。气候属于北暖温带半干旱型季风气候区。封丘县属平原地面范畴, 其地面形态之间的差异

基金项目: 江苏第二师范学院“十二五”科研规划课题项目(311903)和中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX1-YW-09-02)资助。

作者简介: 李开丽(1977—), 女, 山东沂水人, 博士, 讲师, 主要从事遥感与 GIS 应用、土壤资源演变、土壤空间预测及土壤调查制图研究。E-mail: lklcelery@163.com

性小,地势平坦。区域面积 1 220 km²,其中耕地面积 771 km²。封丘县是全国商品粮生产县之一,土地利用方式主要为旱地,种植方式为一年两熟,盛产作物有小麦、玉米。本县境内分布的主要土壤是潮湿锥形土,占全县土壤总面积的 98% 以上。成土母质为黄河冲积物,由于黄河的多次泛滥冲积,土壤在垂直与水平方向上质地层次分布较为复杂,砂黏相间、层理交错、剖面质地构型多样。

1.2 样品采集与分析

以遥感影像为底图,以 2 km × 2 km 网格在研究区布置低密度土壤样点 278 个,土壤样品采集于 2007 年 9 月份实施,样点由 GPS 精确定位,以定位样点为中心、在半径 20 m 范围内的 5 ~ 8 处取样点分别采集表层土壤(0 ~ 20 cm),经充分混合后以四分法获得 1 kg 样品。样点分布如图 1 所示。

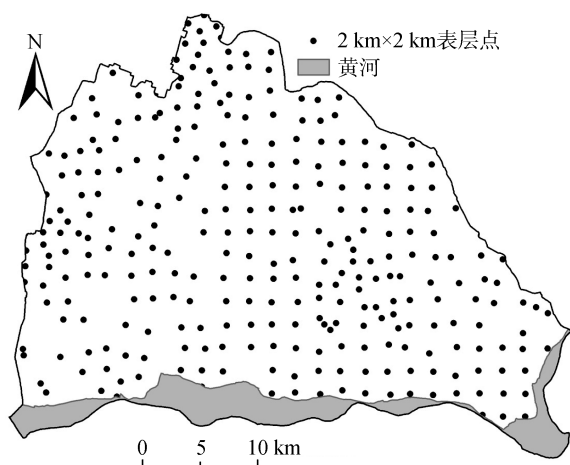


图 1 封丘 2 km × 2 km 土壤样点分布图

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites at 2 km × 2 km grid in Fengqiu

依据土壤类型、微域地形、空间上均衡等原则,在研究区布设标准土壤剖面样点 40 个(图 2),于 2008 年 7 月对布设土壤剖面进行观测、描述与记载并采集分层土壤样品共 172 个(采样深度 0 ~ 100 cm)。土钻样点观察记录于 2009 年 3 月底结束。共计观测、记录土钻样点 114 个,钻探深度 100 cm。样点选择依据土壤类型进行,兼顾空间均匀原则。

为了确定具有明确的生物学意义的土壤质量评价指标和权重,本研究对研究区作物进行测产。在实施表层土壤采样的基础上,依据高、中、低产合理布局原则,兼顾土壤类型和空间上相对均匀原则,在封丘试区布置测产田块 131 个。研究区面积较大的土种类型至少布置 2 个样区;若某种土壤类型在研究区中

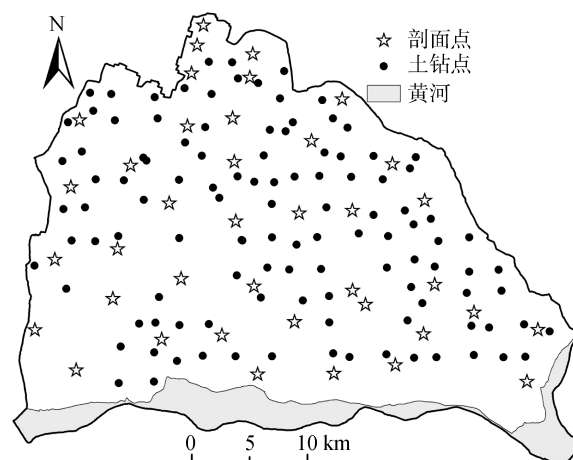


图 2 封丘土壤剖面点和土钻点分布图

Fig. 2 Distribution of soil profile sites and soil auger sites in Fengqiu

出现的次数较多,则在该土壤类型面积较大的区域中间选取样点作为测产点。土壤样品的采集于 2008 年 9 月进行,样点位置采用 GPS 系统进行地理定位;在布置采样点的田块(农田)或一定半径范围内取 5 ~ 8 点进行混合,四分法采集 1 kg,装入土袋并标号,分别采集 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 深的土样各 131 个,共 262 个(图 3)。测产分 4 次进行,分别于 2008、2009 年小麦和玉米的收获季节采集、烤种,2008、2009 年小麦样品分别为 121、129 个;玉米样品数据 119 个、116 个。

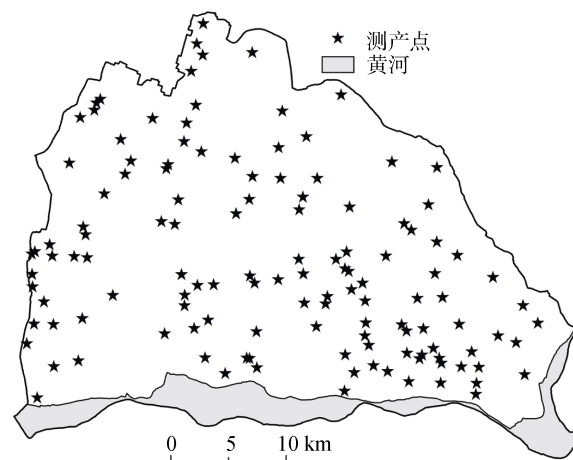


图 3 封丘测产点分布图

Fig. 3 Distribution of yield-estimation sites in Fengqiu

将采集的样品风干、磨碎、过筛,对土壤属性包括有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾、pH、CEC、体积质量、电导率和土壤质地进行分析,测定方法依据《土壤农业化学分析方法》^[17]。

1.3 研究方法

本研究从土壤供应能力和肥力保证功能两个方面确定了 13 项指标作为土壤质量指标体系的候选数据集。土壤养分供给因素包括土壤养分储量指标有机质、全氮、全磷、全钾以及养分有效状态速效磷、速效钾。土壤肥力保证因素主要包括 pH、CEC、体积质量、表层土壤质地、土壤剖面质地构型。

利用基于河南省封丘县 39 个剖面数据及 113 个土钻样点数据，使用模糊 C 均值聚类方法(FCM)结合 Kriging 插值方法获取的 9 种土壤剖面质地构型在空间上分布的单一类别隶属度图；在此基础上结合专家知识，针对平原地区旱作作物及耕地的耕性对土壤剖面质地构型的性状进行打分，以分值为参照，在 ArcGIS 9.2 中 9 个单一类别隶属度栅格文件进行栅格计算，获取研究区土壤剖面质地构型栅格的综合分值。

采用 Li 等^[18]提出的 Norm 值方法来进行最小数

据集的选择，在最终的取舍时考虑作物产量与候选因子的关系来进行取舍。应用模糊数学方法计算每个参评因子的隶属度函数^[19]。但由于研究区目前土壤盐分含量普遍较低，原有的盐分隶属度函数不能反映研究区土壤盐分含量的差异，本研究基于 EC 与粮食产量的散点图，对土壤电导率的隶属度函数进行了调整。采用 3 种形式的函数(上升型、下降型、顶点型)进行因子的隶属度函数计算。各土壤属性相应的拐点如表 1，对应隶属度函数如式 1，2，3。

$$f(x)=\begin{cases}1.0 & x\geq x_2 \\ 0.1+0.9(x-x_1)/(x_2-x_1) & x_1<x<x_2 \\ 0.1 & x\leq x_1\end{cases}\quad (1)$$

$$f(x)=\begin{cases}0.1 & x\geq x_2 \\ 1.0-0.9(x-x_2)/(x_2-x_1) & x_1<x<x_2 \\ 1.0 & x\leq x_1\end{cases}\quad (2)$$

$$f(x)=\begin{cases}0.1 & x\leq x_1, x\geq x_4 \\ 0.1+0.9(x-x_1)/(x_2-x_1) & x_1<x<x_2 \\ 1.0 & x_2\leq x\leq x_3 \\ 1.0-0.9(x-x_3)/(x_4-x_3) & x_3<x<x_4\end{cases}\quad (3)$$

表 1 土壤属性隶属度函数的拐点
Table 1 Inflection points of membership functions of soil properties

土壤属性	函数类型	隶属度函数参数			
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
pH	下降型	7.5	9.0		
SOM (mg/kg)	上升型	5.0	20		
EC (dS/m)	下降型	0.139	0.293		
AP (mg/kg)	上升型	5.0	25.0		
黏粒 (g/kg)	顶点型	50	150	200	450

为了能较客观地确定参数的权重，本研究利用在社会经济领域确定指标权重常用的主成分分析来计算各参数权重^[20]。土壤质量指数(Soil quality index，SQI)的计算采用加权指数和法计算。

土壤质量评价采用两种方法来进行：不考虑土壤剖面质地构型因子的土壤质量评价(SQI_a)；考虑土壤质地剖面构型时的土壤质量评价(SQI_b)，两种方法均先计算土壤质量指数后进行 Kriging 插值获取研究区空间的土壤质量指数分布图。

为了对土壤质量评价的结果进行验证，本研究基于测产数据提取了测点对应的两种土壤质量指数值，并对测点作物产量与土壤质量指数进行相关分析及回归分析。

所有的统计分析都是在 PASW statistics 18.0 (SPSS Inc.，USA) 软件中进行。

2 结果与讨论

2.1 土壤剖面质地构型的获取

通过 39 个土壤剖面 and 113 个土钻样点数据，根

据层次质地类型与其在剖面中出现位置两个基本特征定义特征质地层，在研究区最终确立了 9 种特征质地层，包括砂质表层、壤质表层、黏质表层、砂质心土层、壤质心土层、黏质心土层、砂质底土层、壤质底土层和黏质底土层。以特征质地层在已观测土壤剖面 and 土钻样本中出现缺失特征以及厚度参数为基础数据，应用模糊 C 均值算法模型，将研究区观测土壤划分为 9 种特征质地层组合类别，亦称为土壤剖面质地构型。结合普通克里格空间预测方法，实现了 9 种土壤剖面质地构型在空间上分布的单一类别隶属度图。预测精度基本正确率达到 88.3%，空间预测结果基本可信；不吻合的样点在空间上主要分布在研究区的南边黄河附近，由于黄河附近微地貌相对来说比较复杂，对空间预测结果的精度会产生一定的影响^[21]。

根据研究区的土层排序状况、所占面积比例、性状来讲可以归并为 7 类，将壤-黏-壤归并到壤-黏-黏，壤-壤-砂归并到壤-壤-壤。针对平原地区旱作作物及耕地的耕性请专家对土壤剖面质地构型的性状

进行打分(表 2)。以分值为参照在 ArcGIS 9.2 中 9 个单一类别隶属度栅格文件进行栅格计算,获取了研究区土壤剖面质地构型栅格的综合分值。研究区土壤剖面质地构型分值图如图 4 所示。

表 2 研究区土壤剖面质地构型的分值
Table 2 Assigned scores for texture configurations of soil profile in study area

土壤剖面质地构型	壤-壤-黏	壤-黏-黏	黏-黏-黏	砂-砂-黏	砂-砂-砂	砂-壤-壤	壤-壤-壤
分值	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	1.0	0.9

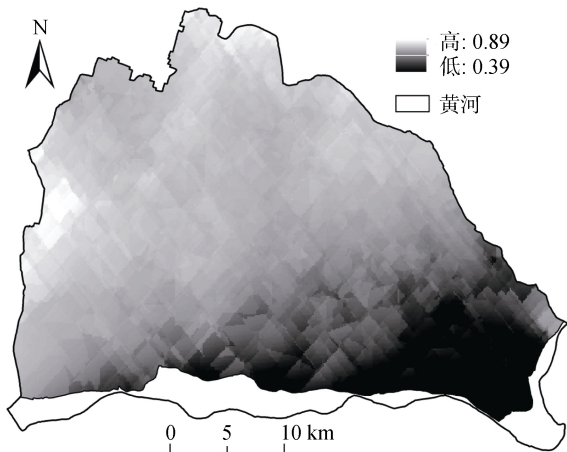


图 4 研究区土壤剖面质地构型分值图
Fig. 4 Score map of texture configuration of soil profile in study area

2.2 土壤属性与作物产量的关系

对四季所测作物产量与测点 0~20 cm 和 20~40 cm 的土壤属性进行相关分析,列相关性较好的指标入表 3。

由表 3 可见,土壤剖面质地构型与作物产量的相关性最好,几乎都在 0.01 的水平上显著相关,电导率与作物产量也具有很好的相关性,此外,粉粒和速效磷与 2008 年玉米产量也有较好的相关性。但有些对作物而言很重要的因子与作物产量的相关性并不好,比如有机质、CEC、速效钾等(表 3 未列出),这可能与影响作物产量的因子非常复杂有关。

表 3 作物产量与土壤属性的相关分析
Table 3 Pearson correlations of crop yields and soil properties

土壤属性	小麦产量		玉米产量		总产量		两年年平均总产量
	2008 年	2009 年	2008 年	2009 年	2008 年	2009 年	
粉粒_0-20	-0.14	-0.11	-0.19*	-0.05	-0.21*	-0.15	-0.18
pH_0-20	-0.02	0.05	-0.12	0.03	-0.12	-0.05	-0.10
EC_0-20	-0.17	-0.23*	-0.19*	-0.01	-0.23*	-0.12	-0.16
AP_0-20	-0.09	-0.03	0.20*	-0.11	0.08	-0.02	0.02
EC_20-40	-0.18	-0.13	-0.28**	-0.11	-0.32**	-0.12	-0.31**
AP_20-40	-0.01	0.07	0.19*	-0.10	0.09	0.02	0.05
TN_20-40	0.02	0.11	0.12	0.11	0.09	0.14	0.247*
土壤剖面质地构型	0.27**	0.32**	0.59**	0.18	0.59**	0.26**	0.60**

注:粉粒_0-20 即 0~20 cm 的粉粒含量,AP_20-40 即为 20~40 cm 的速效磷含量,其他以此类推;*表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平,**表示相关性达到 $P<0.01$ 显著水平,下同。

2.3 不考虑土壤剖面质地构型的土壤质量评价(SQI_a)

对候选土壤指标进行因子分析,选取 7 个主成分,累积贡献率达到 80.67%。其主成分及分组状况见表 4。

按 Norm 值大小应选因子为有机质、粉粒、黏粒、速效钾、全钾、pH 和体积质量。但考虑到 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 样点的土壤属性体积质量数据个数很有限,同时粉粒、黏粒已经代表质地状况,所以以速效磷替代体积质量,电导率 EC 对研究区的作物产量影响较大,选择电导率替代速效钾。因此,选取的 MDS 实际为有机质、粉粒、黏粒、电导率、全钾、pH 和速效磷。

对有机质、粉粒、黏粒、电导率、全钾、pH 和速效磷进行相关分析得表 5。

由表 5 可见,全钾与速效磷,粉粒与电导率,黏粒与有机质在 $P<0.01$ 水平上显著相关,同时,粉粒与有机质,黏粒与 EC 在 $P<0.05$ 水平上也显著相关。由于速效养分更能够被作物吸收,所以选择速效磷;考虑到 EC 对于研究区土壤质量的重要性,舍弃粉粒;黏粒与有机质虽然也显著相关,但黏粒能够反映土壤质地,有机质也是土壤质量评价不可或缺的指标,所以两者都保留。最终确定土壤质量评价的指标为有机质、黏粒、电导率、pH 和速效磷。

利用主成分分析法确定 MDS 的权重如表 6。

表 4 候选土壤参数的 PCA 分析及分组
Table 4 PCA analysis and grouping of candidate soil parameters

土壤参数	分组	1	2	3	4	5	6	7	Norm
SOM	1	0.84	0.19	0.21	0.11	-0.04	-0.17	0.06	1.22
TN	1	0.83	-0.07	0.20	0.03	0.11	0.09	-0.06	1.16
粉粒	2	0.02	0.96	0.07	0.14	-0.01	0.11	-0.07	1.29
砂粒	2	-0.14	-0.76	-0.56	-0.17	0.07	-0.08	0.13	1.29
黏粒	3	0.21	0.08	0.87	0.12	-0.11	0.00	-0.13	1.21
CEC	3	0.23	0.23	0.65	0.07	0.25	0.22	0.09	1.04
AK	4	0.15	0.07	0.03	0.86	0.10	0.13	0.06	1.11
EC	4	-0.03	0.20	0.20	0.78	-0.07	-0.28	-0.13	1.09
TK	5	0.01	0.13	0.10	-0.12	-0.82	-0.18	-0.02	1.07
TP	5	0.09	0.09	0.15	-0.09	0.80	-0.17	0.09	1.04
pH	6	-0.05	0.14	0.13	-0.06	-0.01	0.92	-0.01	1.00
BD	7	-0.40	-0.28	0.08	-0.28	-0.08	0.08	0.68	1.01
AP	7	0.32	0.02	-0.25	0.19	0.35	-0.09	0.66	0.98
特征值		1.81	1.75	1.74	1.56	1.54	1.11	0.98	
各 PC 的方差贡献率(%)		13.92	13.48	13.39	12.00	11.82	8.56	7.51	
累积贡献率(%)		13.92	27.40	40.79	52.78	64.60	73.16	80.67	

表 5 最小数据集因子之间的 Pearson 相关分析
Table 5 Pearson correlations between soil parameters in MDS

	pH	EC	AP	SOM	黏粒	粉粒	TK
pH	1.00						
EC	-0.16	1.00					
AP	-0.09	0.00	1.00				
SOM	-0.13	0.20	0.20*	1.00			
黏粒	0.14	0.25*	-0.12	0.36**	1.00		
粉粒	0.18	0.29**	-0.10	0.20*	0.12	1.00	
TK	-0.04	0.04	-0.29**	0.04	0.16	0.06	1.00

表 6 评价因子的权重
Table 6 Weights of soil parameters in MDS

指标	pH	黏粒	EC	SOM	AP
权重	0.151	0.200	0.210	0.213	0.226

利用加权指数和法，获取各点的土壤质量指数 SQI_a，在 ArcGIS 9.2 中进行 Kriging 插值，获取封丘县域土壤质量指数空间分布图。

2.4 考虑土壤剖面质地构型的土壤质量评价

对候选土壤指标进行因子分析，选取 6 个主成分，累积贡献率达到 73.14%。其主成分及分组状况如表 7。

按 Norm 值的大小应选有机质、黏粒、砂粒、全磷、EC、pH 作为 MDS。基于相同的原因，用速效磷替代全磷；因土体构型对研究区土壤质量有着不可替代的作用，所以将土体构型作为 MDS 指标；砂粒因与黏粒同是表征土壤质地状况，所以舍弃砂粒含量，保留黏粒含量。所以，最终选择有机质、黏粒、

速效磷、EC、pH、土壤质地剖面构型作为 MDS。与未添加土壤剖面质地构型时的最小数据集相比，仅仅添加了土壤质地剖面构型。

利用主成分分析法获取评价因子权重如表 8。

利用加权指数和法，获取各点的土壤质量指数 SQI_b，在 ArcGIS 9.2 中进行 Kriging 插值，获取封丘县域土壤质量指数空间分布图。

2.5 土壤质量评价结果的验证

本研究基于测产数据在 ArcGIS 9.2 中提取了测点对应的两种土壤质量指数值，并对产点作物产量与土壤质量指数进行了统计分析。

两种土壤质量评价结果分别与两年作物产量的总产值的平均值进行相关分析得表 9。

表 7 候选土壤参数的 PCA 分析及分组
Table 7 PCA analysis and grouping of candidate soil parameters

土壤参数	分组	1	2	3	4	5	6	Norm
TN	1	0.82	0.20	-0.03	0.12	0.02	0.09	1.17
SOM	1	0.81	0.23	0.19	0.05	0.10	-0.16	1.21
黏粒	2	0.22	0.87	0.08	-0.18	0.10	-0.05	1.25
CEC	2	0.20	0.68	0.16	0.24	0.08	0.26	1.08
粉粒	3	-0.02	0.13	0.93	0.01	0.11	0.14	1.28
砂粒	3	-0.12	-0.61	-0.73	0.10	-0.14	-0.08	1.32
BD	3	-0.41	0.08	-0.50	0.09	-0.29	0.11	0.97
TP	4	0.00	0.20	0.10	0.77	-0.09	-0.15	1.07
TK	4	0.03	0.05	0.07	-0.77	-0.06	-0.15	1.03
AP	4	0.27	-0.20	-0.12	0.61	0.14	-0.06	0.95
EC	5	-0.01	0.20	0.22	-0.08	0.79	-0.25	1.15
AK	5	0.20	0.06	0.09	0.16	0.77	0.08	1.07
土壤剖面质地构型	5	0.42	0.11	-0.03	-0.02	-0.53	-0.51	1.08
pH	6	-0.01	0.15	0.11	-0.04	-0.11	0.88	1.04
特征值		1.89	1.85	1.81	1.72	1.69	1.28	
各 PC 的方差贡献率(%)		13.51	13.25	12.94	12.25	12.04	9.17	
累积贡献率(%)		13.51	26.75	39.69	51.94	63.98	73.14	

表 8 评价因子的权重
Table 8 Weights of soil parameters in MDS

指标	pH	AP	EC	黏粒	OM	土壤剖面质地构型
权重	0.136	0.160	0.174	0.174	0.177	0.179

表 9 土壤质量指数与作物产量的相关性分析
Table 9 Pearson correlations of crop yields and soil quality indexes

土壤质量指数	小麦产量			玉米产量			总产量		两年年平均总产量
	2008 年	2009 年	年平均	2008 年	2009 年	年平均	2008 年	2009 年	
SQL_a	0.188*	0.261**	0.257**	0.447**	0.085	0.431**	0.431**	0.237*	0.432**
SQL_b	0.216*	0.259**	0.289**	0.572**	0.167	0.556**	0.531**	0.256**	0.529**

由表 9 可见,土壤质量指数与作物产量有着较好的相关性,添加土壤剖面质地构型因子后(SQL_b),土壤质量评价指数与作物产量的相关性进一步提高。这充分显示了在黄河泛滥冲积平原地区,剖面质地构型是影响土壤质量的非常重要的因子。

以各土壤质量指数为自变量,作物年平均总产量为因变量进行线性回归分析,得图 5。由图 5 可见,添加土壤质地剖面构型因子后,土壤质量评价的结果大大改善, R^2 由原来的 0.186 3 增大到 0.280 1,且达到了 $P<0.001$ 显著水平。

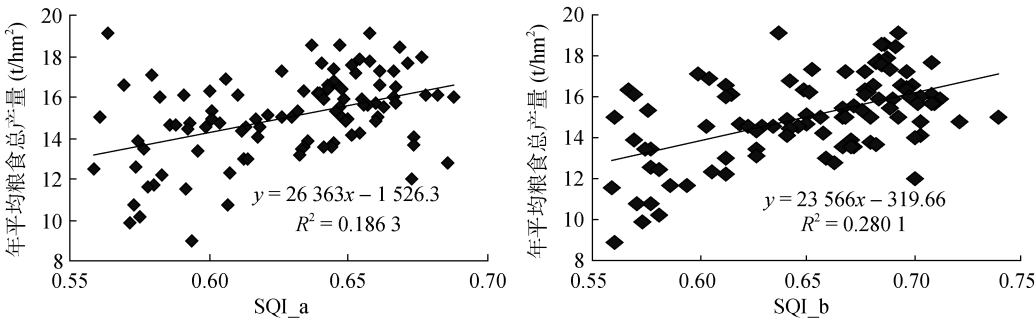


图 5 年平均粮食总产量与土壤质量指数的线性回归分析
Fig. 5 Linear regression between mean annual grain output and soil quality indexes

作为一个为生态系统服务、支持植物生活必不可少的贡献者,土壤资源必须被作为一个整体来考虑的观念已经日益被自然科学领域所认可^[22]。Hewitt^[23]在2004年也指出土壤质量应由表土和剖面特性共同决定。Merrill等^[14]对北达科他州中部两种类别相似、土壤剖面特性不同的土壤进行评价,结果表明进行土壤质量评价需要对土壤剖面 and 土壤底层、近地表土壤整体综合进行。这些观点与本研究结果一致,即土壤剖面质地构型是土壤质量评价必不可少的因子。与以往研究^[24]相比,本研究将基于FCM方法获取的土壤剖面质地构型作为评价指标,对土壤质量的评价指标进行优选,对电导率EC的隶属度函数进行了调整;本研究的土壤质量评价指标体系及方法具有明确的生物学意义,取得了较好的结果。

3 结论

1) 土壤质量指数与作物产量有较好的相关性,土壤质量评价结果能够较好地反映研究区的土壤质量状况。

2) 在添加剖面质地构型因子后,土壤质量评价结果有进一步的改善,可见在黄河泛滥冲积平原地区,剖面质地构型是影响土壤质量的非常重要的因子。

3) 适合研究区土壤质量评价的指标最小数据集为pH、速效磷、电导率、黏粒、有机质和土壤剖面质地构型。

参考文献：

- [1] Gil-Sotres F, Trasar-Cepeda C, Leiros M C, et al. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 877–887
- [2] 陈恩凤. 关于土壤肥力实质研究的来源与设想[J]. *土壤肥料*, 1978(6): 1–5
- [3] Dobos E, Carré F, Hengl T, et al. Digital soil mapping as a support to production of functional maps[J]. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. EUR, 2006: 22 123
- [4] 颜春起. 三江平原土体构型与旱涝关系的研究[J]. *土壤学报*, 1984, 21(1): 70–78
- [5] 崔浩浩, 张冰, 冯欣, 等. 不同土体构型土壤的持水性能[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 1–5
- [6] 李学敏, 翟玉柱, 李雅静, 等. 土体构型与土壤肥力关系的研究[J]. *土壤通报*, 2005, 36(6): 975–977
- [7] 赵霞, 黄瑞冬, 唐保军, 等. 潮土区不同土体构型对夏玉米生长与产量的影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(3): 538–542
- [8] 檀满枝, 李开丽, 史学正, 等. 华北平原土壤剖面质地构型对小麦产量的影响研究[J]. *土壤*, 2014, 46(5): 913–919
- [9] Rayner J H. Classification of soils by numerical methods[J]. *Journal of Soil Science*, 1966, 17(1): 79–92
- [10] Powell B, McBratney A B, MacLeod D A. Fuzzy classification of soil profiles and horizons from the Lockyer Valley, Queensland, Australia[J]. *Geoderma*, 1992, 52(1): 173–197
- [11] Van Alphen B J, Stoorvogel J J. A functional approach to soil characterization in support of precision agriculture[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 1 706–1 713
- [12] Saey T, Van Meirvenne M, Vermeersch H, et al. A pedotransfer function to evaluate the soil profile textural heterogeneity using proximally sensed apparent electrical conductivity[J]. *Geoderma*, 2009, 150(3): 389–395
- [13] Ciampalini R, Lagacherie P, Gomez C, et al. Detecting, correcting and interpreting the biases of measured soil profile data: A case study in the Cap Bon Region (Tunisia)[J]. *Geoderma*, 2013, 192: 68–76
- [14] Merrill S D, Liebig M A, Tanaka D L, et al. Comparison of soil quality and productivity at two sites differing in profile structure and topsoil properties[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 179: 53–61
- [15] 张月英. 地理信息系统支持下的大比例尺农用地质量评价研究——以衢县杜泽镇为例[D]. 浙江: 浙江大学, 2001
- [16] 张化楠. 土体构型表达与地力计算模式对耕地生产力评价的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2015
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [18] Li G L, Chen J, Sun Z Y, et al. Establishing a minimum dataset for soil quality assessment based on soil properties and land use change[J]. *Acta ecologica sinica*, 2007, 27(7): 2 715–2 724
- [19] 曹志洪, 周建民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [20] 李桂林. 城市化背景下非农用地扩张动态及其对土壤资源的综合影响——以苏州市区为例[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2007
- [21] 密术晓, 檀满枝, 陈杰, 等. 基于HSI模型的色彩合成技术在土壤模糊连续制图中的应用[J]. *土壤通报*, 2010, 41(6): 1 288–1293
- [22] Robinson D A, Hockley N, Dominati E, et al. Natural capital, ecosystem services, and soil change: Why soil science must embrace an ecosystems approach[J]. *Vadose Zone Journal*, 2012(11): 5–10
- [23] Hewitt A E. Soil properties relevant to plant growth: A guide to recognising soil properties relevant to plant growth and protection[M]. Lincoln New Zealand: Manaaki Whenua Press, 2004
- [24] 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

Evaluating Soil Quality with Texture Profile Configuration ——A Case Study of Fenqiu, Henan

LI Kaili¹, TAN Manzhi², MI Shuxiao³, CHEN Jie⁴

(1 *College of Urban, Resource and Environmental Science, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 210013, China;*
2 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;* 3 *Suzhou National Territory Resources
Bureau, Suzhou, Jiangsu 215004, China;* 4 *School of Water Conservation and Environment, Zhengzhou University,
Zhengzhou 450000, China*)

Abstract: Texture configuration of soil profile plays a great role for soil quality and soil productivity, especially in alluvial plain. However, this index was found seldom to be used in soil quality evaluation, and the selected factors for soil quality are mostly lack of explicit biological significance. In this study, 39 soil profiles and 113 soil auger samples were decided and soil samples were collected in Fenqiu county of Henan Province. 9 kinds of texture configuration of soil profiles were determined and their membership were obtained by using fuzzy C means clustering (FCM), the membership distribution map of the study area was edited with Kriging interpolation method. Based on expert knowledge, texture configuration was scored according to soil tilth and crop suitability. The comprehensive scores of texture configuration of soil profiles of the study area was edited in ArcGIS 9.2 platform. The minimum data set (MDS) was setup for soil quality evaluation by using principal component analysis (PCA) with the support of crop yield data and soil properties. Soil quality indexes (SQI) were calculated and compared by using MDS with or without texture configuration of soil profiles. The results showed this kind of assessment can disclose well soil quality in the study area, correlation was improved between SQI and crop yields when considering texture configuration of soil profiles. Thus, texture configuration of soil profiles is an essential indicator for soil quality evaluation in the alluvial plain and similar regions.

Key words: Texture configuration of soil profile; Soil quality; Alluvial plain; FCM; MDS; PCA