

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.06.000

赵贺, 王绪奎, 刘绍贵, 等. 基于水稻产量的江苏省稻麦轮作区土壤质量评价. 土壤, 2020, 52(6): 1230–1238.

## 基于水稻产量的江苏省稻麦轮作区土壤质量评价<sup>①</sup>

赵贺<sup>1</sup>, 王绪奎<sup>2\*</sup>, 刘绍贵<sup>3</sup>, 高飞<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 李其胜<sup>1</sup>, 李辉信<sup>1</sup>, 焦加国<sup>1\*</sup>

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 江苏省耕地质量与农业环境保护站, 南京 210036; 3 扬州市农业环境监测站, 江苏扬州 225101)

**摘要:** 为明确江苏稻麦轮作区土壤质量状况, 本研究基于 2008—2015 年期间江苏省稻麦轮作区 10 681 个测土配方施肥样点的数据, 通过相关性和主成分分析筛选了江苏省稻麦轮作区的最小数据集(minimum data set, MDS), 并对土壤质量进行评价。结果表明: 基于水稻产量分析, 江苏省稻麦轮作区的最小数据集包括有机质、有效磷、速效钾、有效铁和有效硼。基于最小数据集得出的江苏省土壤质量指数(SQI-MDS)范围在 0.136 ~ 1.000 之间(均值 0.674), 整体处于“良 II”等级, 与基于全量数据集得出的土壤质量指数(SQI-TDS)之间呈极显著正相关关系( $R^2 = 0.720$ ), 这说明最小数据集能够较好地代替全量数据集指标。江苏省稻麦轮作区土壤质量存在空间异质性, 里下河农业区土壤质量最高, 其次是太湖农业区, 再者是宁镇扬、沿江、沿海和徐淮农业区。江苏省六大农业区的最小数据集存在差异性, 这说明不同农业区主要的限制因素存在差异。整体来看, 有机质、钾元素和微量元素是江苏省六大农业区主要肥力限制因子。

**关键词:** 江苏省; 水稻; 最小数据集; 土壤质量评价; 空间异质性

**中图分类号:** S158      **文献标志码:** A

## Evaluation of Soil Quality in Rice-Wheat Rotation Regions of Jiangsu Province Based on Rice Yield

ZHAO He<sup>1</sup>, WANG Xukui<sup>2\*</sup>, LIU Shaogui<sup>3</sup>, GAO Fei<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, LI Qisheng<sup>1</sup>, LI Huixin<sup>1</sup>, JIAO Jiaguo<sup>1\*</sup>

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2 Jiangsu Province Cultivated Land Quality Protection Station, Nanjing 210095, China; 3 Yangzhou Agricultural Environmental Monitoring Station, Yangzhou, Jiangsu 225101, China)

**Abstract:** This study is to clarify soil quality status of rice-wheat rotation regions in Jiangsu Province based on the data of 10 681 soil-measuring formula fertilization samples from the rice-wheat rotation regions of Jiangsu Province during 2008—2015. The minimum data set (MDS) of rice-wheat rotation region in Jiangsu Province was screened by correlation and principal component analysis, and then soil quality was evaluated. The results showed that based on rice yield analysis, the minimum data set of rice-wheat rotation region in Jiangsu Province included organic matter, available phosphorus, available potassium, available iron and available boron. The variation range of soil quality index based on the minimum data set (SQI-MDS) was between 0.136 and 1.000 (mean 0.674), the average value was in the "good II" grade, and was a very significant positive correlation ( $R^2 = 0.720$ ) with soil quality index based on the full data set (SQI-TDS). It showed that the minimum data set could better replace the full data set. There was spatial heterogeneity in soil quality of rice-wheat rotation regions in Jiangsu Province, the highest soil quality was in the Lixiahe agricultural area, followed by the Taihu agricultural area, and the Ningzhenyang, Riverside, coastal and Xuhuai agricultural areas. There were differences in the minimum data sets of the six major agricultural regions in Jiangsu Province, which indicated that there were differences in the main limiting factors in different agricultural regions. On the whole, organic matter, potassium and trace elements are the main limiting factors for the six major agricultural regions in Jiangsu Province.

**Key words:** Jiangsu Province; Rice; Minimum data set; Soil quality evaluation; Spatial heterogeneity

<sup>①</sup>基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300908)和江苏省农业科技自主创新基金项目(CX(17)1101)资助。

\* 通讯作者(534974828@qq.com, jiaguojiao@njau.edu.cn)

作者简介: 赵贺(1994—), 男, 河南永城人, 硕士研究生, 主要从事土壤培肥与土壤质量评价研究。E-mail: 2016103022@njau.edu.cn

土壤质量是土壤多种功能的综合体现,其综合涵盖了土壤肥力质量、土壤环境质量和土壤健康质量<sup>[1]</sup>。土壤质量不能被直接测定,但可通过间接测定指示土壤功能的指标来描述土壤质量状态<sup>[2]</sup>。目前没有一个统一的方法来选取土壤质量评价指标,因此,如何选取土壤指标是土壤质量评价的关键。Larson 和 Pierce<sup>[3]</sup>于 1991 年提出了最小数据集,即通过一定的数学方法从中筛选出具有代表性的指标,建立最小数据集,构建土壤质量指数进行土壤质量评价。最小数据集作为筛选具有代表性的评价指标的方法,在土壤质量评价中广泛使用<sup>[4-5]</sup>。利用最小数据集方法对我国土壤质量进行评价的相关研究很多<sup>[6-8]</sup>,多数使用物理指标、化学指标和生物指标。

江苏省具有典型的地理位置、水系特点、气候类型、地貌区域<sup>[9]</sup>,辖内有徐淮、里下河、沿海、沿江、宁镇扬和太湖六大农业区<sup>[10]</sup>。江苏省稻麦轮作面积和水稻总产居全国前列,单产全国水平最高,在全省和全国水稻生产中具有极其重要的地位<sup>[11]</sup>。江苏省耕地存在土壤养分非均衡化和耕层物理性状变差等问题<sup>[12]</sup>,明确江苏省稻麦轮作区土壤质量状况对全省水稻的生产有着重要的意义。关于江苏省土壤质量评价研究多是在某个地区或者某个市(县)范围<sup>[13-16]</sup>,而关于江苏省稻麦轮作区土壤质量评价研究较少<sup>[17]</sup>,因此,本研究以江苏省稻麦轮作区为研究对象,从 8 年连续监测数据和全省空间尺度上进行土壤质量分

析与评价。评价结果可为江苏省乃至我国不同稻麦轮作区的农田管理和精准施肥提供因地制宜的科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

江苏省位于中国东部沿海地区,经纬度范围为 116°18' ~ 121°57'E 和 30°45' ~ 35°20'N,总面积为 10.72 万 km<sup>2</sup>。全省为亚热带向暖温带过渡地带,气候、植被兼具南方和北方的特征,辖内有徐淮、里下河、沿海、沿江、宁镇扬和太湖六大农业区<sup>[10]</sup>。该研究区种植制度以稻麦轮作为主,土壤类型以水稻土和潮土为主,成土母质以河流冲积物、河湖沉积物和江海相沉积物为主。

### 1.2 数据来源

土壤理化数据为江苏省稻麦轮作区的测土配方施肥调查数据,数据由江苏省耕地质量保护站提供。于 2008—2015 年期间每年的水稻收获季在全省范围内采集样品(样点不重复),采样深度 0~20 cm,并同时记录样点的水稻产量,共采集 10 681 个样点(表 1)。土壤样品测定指标包括容重、pH、有机质、全氮、有效磷、速效钾、缓效钾、有效铜、有效锌、有效铁、有效锰、有效硼、有效钼和有效硅。土壤分析测定方法均参照鲁如坤<sup>[18]</sup>《土壤农化分析》。

表 1 江苏省稻麦轮作区土壤样品信息  
Table 1 Information of soil samples in rice-wheat rotation regions in Jiangsu Province

农业区	区域范围	主要土壤类型	主要成土母质	样点数
徐淮	位于淮河和苏北灌溉总渠一线以北,主要包括丰县、沛县、睢宁、灌云、滨海、新潮土沂、泗阳、赣榆、灌南、铜山、宿豫、沭阳、东海、泗洪、响水、邳州、阜宁和涟水等 18 个县、市。		河流冲积物	4 068
沿海	位于苏北灌溉总渠一线以南,主要包括东台、如东、射阳和大丰 4 个县、市。	潮土、水稻土	江海相沉积物	1 000
里下河	位于江苏省中部,主要包括建湖、宝应、盐都、高邮、兴化、洪泽和金湖等县、市。	水稻土	河湖沉积物	1 470
宁镇扬	位于江苏省西南部,主要包括南京市全部、丹徒、金坛、溧阳和盱眙等 9 个县、市。	水稻土	黄土状物	1 262
沿江	江苏省长江沿岸一带,主要包括海安、姜堰、江都、如皋、通州、泰兴、启东、海潮土、水稻土门、扬中、靖江和仪征等 11 个县、市。		河流冲积物、江海相沉积物	1 686
太湖	位于江苏省东南部,主要包括江阴、张家港、常熟、昆山、吴江、太仓、宜兴、丹阳县和武进 10 个县、市。		河湖沉积物	1 195

### 1.3 土壤质量评价

1.3.1 最小数据集指标筛选 首先,将各土壤指标与作物产量进行皮尔逊相关性分析,选取与作物产量有显著相关性的指标,再对所选取的土壤指标进行主

成分分析,选择特征值>1 的主成分作为研究对象<sup>[19]</sup>,各主成分特征值越大越能代表土壤指标体系特性。在此分析过程中,采用最大方差旋转法加强不相关组分的解释能力<sup>[20]</sup>。对于每组主成分而言,因子载荷变

量越大对该主成分贡献越大,高因子载荷指标即因子载荷绝对值达到该主成分中最大因子载荷 90% 范围内的指标<sup>[6]</sup>。当一个主成分中高因子载荷变量只有一个时,则该指标进入最小数据集,不止一个时,对其分别做相关性分析,若相关系数低( $r < 0.7$ )时,各指标均被选入最小数据集,若相关系数高( $r > 0.7$ ),最大的高因子载荷指标(2 个指标时)或相关系数之和最大的高因子载荷指标(2 个以上指标时)被选入最小数据集<sup>[21-22]</sup>。

1.3.2 指标权重值 用主成分方法确定土壤质量评价指标的权重,各指标权重值等于该指标的公因子方差与所有最小数据集指标公因子方差和的比值<sup>[22]</sup>。

1.3.3 指标评分 不同指标具有不同的单位,通过隶属度函数可将土壤质量指标测定值标准化为 0 ~ 1 之间的无量纲值,主要标准化隶属度评分函数分为 3 类<sup>[23]</sup>: 正 S 型、反 S 型、抛物线型。

$$\text{正 S 型: } f(x) = \begin{cases} 0.1, & x < L \\ 0.1 + \frac{0.9(x-L)}{(U-L)}, & L \leq x \leq U \\ 1.0, & x > U \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{反 S 型: } f(x) = \begin{cases} 1.0, & x < L \\ 0.1 + \frac{0.9(U-x)}{(U-L)}, & L \leq x \leq U \\ 0.1, & x > U \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{抛物线型: } f(x) = \begin{cases} 0.1, & x < L_1, x > U_2 \\ 0.1 + \frac{0.9(x-L_1)}{(L_2-L_1)}, & L_1 \leq x \leq L_2 \\ 1.0, & L_2 \leq x \leq U_2 \\ 0.1 + \frac{0.9(U_2-x)}{(U_2-U_1)}, & U_1 \leq x \leq U_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f(x)$  表示指标得分,  $x$  表示指标实测值,  $L$  和  $U$  分别表示下限和上限临界值。

1.3.4 土壤质量指数 土壤质量指数(SQI)采用以下公式计算<sup>[24]</sup>:

$$\text{SQI} = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i \quad (4)$$

式中:  $n$  表示指标个数,  $W_i$  表示指标权重值,  $S_i$  表示指标得分。

1.3.5 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( $E_R$ )评价最小数据集的精确程度<sup>[25]</sup>。计算公式为:

$$E_f = 1 - \frac{\sum (R_o - R_{cal})^2}{\sum (R_o - \bar{R}_o)^2} \quad (5)$$

$$E_R = \frac{\left| \sum_{i=1}^n R_{oi} - \sum_{i=1}^n R_{cali} \right|}{\sum_{i=1}^n R_{oi}} \quad (6)$$

式中:  $R_o$  和  $\bar{R}_o$  为基于全量数据集计算得出的土壤质量指数值和土壤质量指数平均值,  $R_{cal}$  为基于最小数据集计算得出的土壤质量指数值。有效系数( $E_f$ )越接近于 1, 表示基于最小数据集计算的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, 表示基于最小数据集计算的土壤质量指数相对于基准值偏差越小, 结果越精确。

## 1.4 数据处理

数据经 Excel 2016 整理汇总, 利用 SPSS 22.0 软件进行描述性统计、相关性分析和主成分分析, ArcMap10.3 作图。

## 2 结果

### 2.1 江苏省稻麦轮作区土壤理化性状

江苏省稻麦轮作区土壤理化指标统计分析结果显示(表 2): 根据全国土壤养分含量分级标准<sup>[26]</sup>, 江苏省稻麦轮作区土壤容重( $1.26 \text{ g/cm}^3$ )处于“偏紧”等级; pH(7.23)处于“中性”级别; 有机质( $22.85 \text{ g/kg}$ )、全氮( $1.41 \text{ g/kg}$ )、有效磷( $18.12 \text{ mg/kg}$ )、速效钾( $121.16 \text{ mg/kg}$ )均值处于“中等”级别; 土壤缓效钾( $600.3 \text{ mg/kg}$ )、有效铜( $3.49 \text{ mg/kg}$ )、有效铁( $72.4 \text{ mg/kg}$ )和有效锰( $33.7 \text{ mg/kg}$ )达到“极丰富”级别; 有效锌( $1.37 \text{ mg/kg}$ )和有效硅( $185.9 \text{ mg/kg}$ )达到“丰富”级别; 有效硼( $0.49 \text{ mg/kg}$ )和有效钼( $0.12 \text{ mg/kg}$ )处于“缺乏”级别。根据变异系数的划分等级标准<sup>[5]</sup>: 容重为不敏感指标( $CV < 10\%$ ); pH、有机质、全氮为低度敏感指标( $CV$  为  $10\% \sim 40\%$ ); 有效磷、速效钾、缓效钾、有效铜、有效锌、有效铁、有效硼、有效钼和有效硅为中度敏感指标( $CV$  为  $40\% \sim 100\%$ ); 有效锰为高度敏感指标( $CV > 100\%$ )。

### 2.2 土壤质量指数

2.2.1 土壤质量指标筛选 首先对 10 681 个监测样点数据的水稻产量与土壤指标进行皮尔逊相关性分析, 结果表明(表 3): 水稻产量与土壤 pH、容重、有机质、全氮、有效磷、速效钾、缓效钾、有效铜、有效锌、有效铁、有效锰和有效硼指标存在显著性相关关系, 这些指标作为土壤质量评价候选指标进行下一步的主成分分析。

表 2 江苏省稻麦轮作区土壤理化性状  
Table 2 Soil Physicochemical properties in rice-wheat rotation regions of Jiangsu Province

指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)
容重(g/cm <sup>3</sup> )	0.67	1.85	1.26	0.08	6.66
pH	4.10	9.00	7.23	0.92	12.74
有机质(g/kg)	1.07	76.00	22.85	7.83	34.29
全氮(g/kg)	0.09	3.98	1.41	0.48	33.95
有效磷(mg/kg)	0.10	167.60	18.12	13.29	73.32
速效钾(mg/kg)	2.10	765.00	121.16	66.74	55.08
缓效钾(mg/kg)	53.0	1656.9	600.3	248.4	41.38
有效铜(mg/kg)	0.06	33.49	3.49	2.22	63.53
有效锌(mg/kg)	0.03	21.92	1.37	1.14	83.47
有效铁(mg/kg)	0.1	569.1	72.4	67.2	92.76
有效锰(mg/kg)	0.2	452.0	33.7	37.4	110.93
有效硼(mg/kg)	0.01	2.90	0.49	0.29	59.87
有效钼(mg/kg)	0.01	1.37	0.12	0.08	70.33
有效硅(mg/kg)	10.4	552.0	185.9	91.4	49.16

表 3 水稻产量与土壤属性相关性分析  
Table 3 Correlation coefficients of rice yield and soil properties

	水稻产量	容重	pH	有机质	全氮	有效磷	速效钾	缓效钾	有效铜	有效锌	有效铁	有效锰	有效硼	有效钼	有效硅
水稻产量	1														
容重	-0.087**	1													
pH	0.060**	0.031**	1												
有机质	0.053**	-0.139**	-0.258**	1											
全氮	0.073**	-0.164**	-0.202**	0.709**	1										
有效磷	0.117**	-0.014	0.000	0.106**	0.046**	1									
速效钾	0.096**	0.050**	0.119**	0.101**	0.130**	0.075**	1								
缓效钾	0.169**	0.040**	0.396**	0.003	-0.046**	0.108**	0.451**	1							
有效铜	0.076**	-0.047**	-0.252**	0.205**	0.240**	0.008	0.054**	-0.104**	1						
有效锌	0.025*	-0.099**	-0.179**	0.254**	0.277**	0.108**	-0.042**	-0.127**	0.243**	1					
有效铁	0.087**	-0.059**	-0.479**	0.214**	0.236**	0.012	-0.055**	-0.289**	0.493**	0.381**	1				
有效锰	0.125**	0.025**	-0.382**	-0.004	0.045**	-0.003	-0.072**	-0.314**	0.247**	0.218**	0.546**	1			
有效硼	0.115**	0.107**	0.128**	0.005	0.013	0.082**	0.182**	0.144**	0.002	0.116**	-0.057**	-0.142**	1		
有效钼	0.002	0.087**	-0.120**	0.034**	0.042**	-0.009	-0.030**	-0.083**	0.181**	0.033**	0.164**	0.158**	0.043**	1	
有效硅	-0.014	-0.041**	0.264**	0.039**	0.000	-0.035**	0.229**	0.361**	-0.185**	-0.095**	-0.244**	-0.274**	0.014	-0.238**	1

注：\*表示相关性达  $P < 0.05$  显著水平，\*\*表示相关性达  $P < 0.01$  显著水平，下同。

2.2.2 土壤质量最小数据集建立 对相关性分析中保留的指标进行主成分分析,然后根据每个主成分中评价参数的载荷值和参数的相关性进行分析确定组成最小数据集的评价指标。采用最大方差旋转法后的主成分分析(表 4)和高因子载荷指标相关性(表 5)结果显示:特征值>1 的主成分有 4 组,总方差的累计贡献率达 59.349%。PC1 主要由有效铁 1 个因子构成,因此 PC1 中有效铁进入最小数据集;PC2 主要

由有机质和全氮 2 个因子构成,有机质与全氮的相关系数  $r > 0.7(0.709^{**})$ ,且有机质具有 PC2 中最高因子载荷,因此 PC2 中有机质进入最小数据集。PC3 主要由速效钾 1 个因子构成,因此 PC3 中速效钾进入最小数据集;PC4 主要由有效磷和有效硼 2 个因子构成,且有效磷与有效硼的相关系数  $r < 0.7(0.082^{**})$ ,因此 PC4 中有效磷与有效硼进入最小数据集。综上所述,最终确定江苏省稻麦轮作区土壤质量评价最小

数据集为：有机质、有效磷、速效钾、有效铁和有效硼。同理筛选出江苏省六大农业区的最小数据集，结果表明(表 6)：江苏省六大农业区的最小数据集存在差异性，这说明不同农业区主要的限制因素存在差异。整体来看，有机质、钾元素和微量元素是江苏省稻麦轮作区主要限制因素。

表 4 土壤质量指标主成分分析结果  
Table 4 Results of principal components analysis of soil quality evaluation indicators

指标	主成分			
	PC1	PC2	PC3	PC4
容重	0.108	-0.498	0.259	0.065
pH	-0.643	-0.178	0.245	0.098
有机质	0.192	0.838	0.135	0.091
全氮	0.231	0.829	0.153	0.058
有效磷	-0.056	0.071	-0.041	0.685
速效钾	0.006	0.054	0.846	0.025
缓效钾	-0.388	0.004	0.709	0.084
有效铜	0.646	0.144	0.22	0.016
有效锌	0.417	0.263	-0.121	0.524
有效铁	0.851	0.094	-0.047	0.065
有效锰	0.749	-0.184	-0.129	-0.054
有效硼	-0.073	-0.128	0.279	0.641
特征值	2.938	1.885	1.277	1.022
贡献率(%)	24.48	15.712	10.64	8.517
累积贡献率(%)	24.48	40.192	50.832	59.349

注：加粗的数字所对应的指标为高因子载荷指标

表 5 高因子载荷指标相关性  
Table 5 Correlation between high factor load indicators

	PC2		PC4	
	有机质	全氮	有效磷	有效硼
有机质	1		有效磷	1
全氮	0.709**	1	有效硼	0.082**

2.2.3 土壤质量指数 通过对与产量有显著相关

性的指标进行主成分分析,获得各个指标的公因子方差,利用指标公因子方差所占比例确定各个指标的权重值(表 7)。通过隶属度函数将土壤质量指标测定值标准化为 0~1 之间的无量纲值,其下限和上限临界值<sup>[13, 23, 27]</sup>见表 8。然后采用公式(4)计算 SQI-MDS 和 SQI-TDS。江苏省稻麦轮作区 SQI-MDS 介于 0.136~1.000,均值为 0.674。SQI-TDS 介于 0.247~0.955,均值为 0.635。

2.2.4 最小数据集合理性验证 验证最小数据集的合理性是土壤质量评价的重要环节。首先将对 SQI-MDS 与 SQI-TDS 两者进行回归分析,然后采用公式(5)和(6)分别计算 Nash 有效系数和偏差系数来验证最小数据集的合理性。结果表明:SQI-MDS 与 SQI-TDS 呈极显著正相关( $R^2 = 0.720$ ,图 1),Nash 有效系数和偏差系数分别为 0.401 和 0.061,偏差系数接近 0。水稻产量与 SQI-MDS( $r = 0.243^{**}$ )和 SQI-TDS( $r = 0.232^{**}$ )均具有显著相关关系。综上所述,最小数据集能够较好代替全量数据集指标。

2.3 基于最小数据集的江苏省稻麦轮作区土壤质量综合评价

根据隶属度评分函数曲线中转折点的相应取值,结合等距划分法<sup>[7, 27-28]</sup>,将土壤质量指数分为 5 个等级。基于最小数据集的江苏省稻麦轮作区土壤质量等级频率分布结果显示(表 9):江苏省稻麦轮作区土壤质量 19.71% 处于“优 I”等级;52.50% 处于“良 II”等级;24.28% 处于“中等 III”等级;3.40% 处于“差 IV”等级,0.12% 处于“很差 V”等级。整体看来,基于最小数据集的江苏省稻麦轮作区土壤质量指数均值为 0.674,整体处于“良 II”等级。图 2 和表 10 结果显示:江苏省稻麦轮作区土壤质量存在空间异质性,里下河农业区土壤质量指数最高(均值 0.768),其次是太湖农业区(均值 0.726),再者是沿海(均值 0.654)、徐淮(均值 0.649)、宁镇扬(均值 0.648)和沿江(均值 0.648)农业区。

表 6 江苏省六大农业区(稻麦轮作区)最小数据集  
Table 6 Minimum data set of six major agricultural regions (rice-wheat rotation regions) in Jiangsu Province

农业区	最小数据集
徐淮	容重、pH、有机质、全氮、有效磷、缓效钾、有效铜、有效铁、有效锰
沿海	有机质、有效磷、速效钾、缓效钾、有效锌、有效铜
里下河	有效磷、速效钾、缓效钾、有效铜、有效锌、有效锰
宁镇扬	容重、有机质、全氮、缓效钾、有效铜、有效锰、有效钾
沿江	pH、有机质、速效钾、有效铜、有效铁、有效硼
太湖	容重、有机质、有效铜、有效锌、有效锰

表 7 全量数据集和最小数据集的指标权重值  
Table 7 Weight values of soil quality indicators of full and minimum data sets

指标	全集(TDS)		最小数据集(MDS)	
	公因子方差	权重	公因子方差	权重
容重	0.409	0.048		
pH	0.503	0.059		
有机质	0.814	0.095	0.766	0.238
全氮	0.807	0.094		
有效磷	0.562	0.066	0.479	0.149
速效钾	0.690	0.081	0.719	0.224
缓效钾	0.676	0.079		
有效铜	0.492	0.057		
有效锌	0.521	0.061		
有效铁	0.752	0.088	0.740	0.230
有效锰	0.656	0.077		
有效硼	0.550	0.064	0.510	0.159
有效铝	0.581	0.068		
有效硅	0.555	0.065		

表 8 土壤质量评价指标隶属函数中下限和上限取值  
Table 8 Lower and upper limits of subordinate functions for soil quality evaluation indicators

指标	下限值(L)	上限值(U)	隶属度函数
有机质(g/kg)	15	30	正 S 型
全氮(g/kg)	0.75	1.5	
有效磷(mg/kg)	5	15	
速效钾(mg/kg)	40	100	
缓效钾(mg/kg)	250	750	
有效铜(mg/kg)	2	4	
有效锌(mg/kg)	1.5	3	
有效铁(mg/kg)	2	32	
有效锰(mg/kg)	10	20	
有效硼(mg/kg)	0.5	1	
有效铝(mg/kg)	0.1	0.3	
有效硅(mg/kg)	1.5	130	
pH	4.5(L <sub>1</sub> ) 5.5(L <sub>2</sub> )	6.5(U <sub>1</sub> ) 8.5(U <sub>2</sub> )	抛物线型
容重(g/cm <sup>3</sup> )	0(L <sub>1</sub> ) 1(L <sub>2</sub> )	1.25 (U <sub>1</sub> ) 1.55 (U <sub>2</sub> )	抛物线型

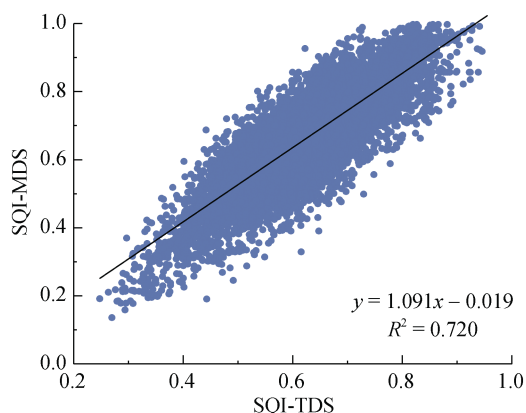


图 1 最小数据集土壤质量指数与全量数据集土壤质量指数的相关性

Fig. 1 Correlation between soil quality indexes of minimum and full data sets

### 3 讨论

如何选取具有代表性的土壤指标是土壤质量评价的关键，这要求所选取的指标能够代表土壤特性，而最小数据集通过一定的方法选择具有代表性的指标对土壤质量进行评价，这一方法在土壤质量评价中应用较多<sup>[5-8, 29-30]</sup>。一方面最小数据集筛选出来的指标具有代表性，另一方面只需要检测部分指标就能够反映土壤的真实状况，节省了大量的人力和物力。

江苏省稻麦轮作区土壤质量评价的最小数据集指标包括有机质、有效磷、速效钾、有效铁和有效硼。金慧芳等<sup>[5]</sup>研究总结出前人使用频率前 10 的最小数据集评价指标，本研究最小数据集 5 个评价指标中有

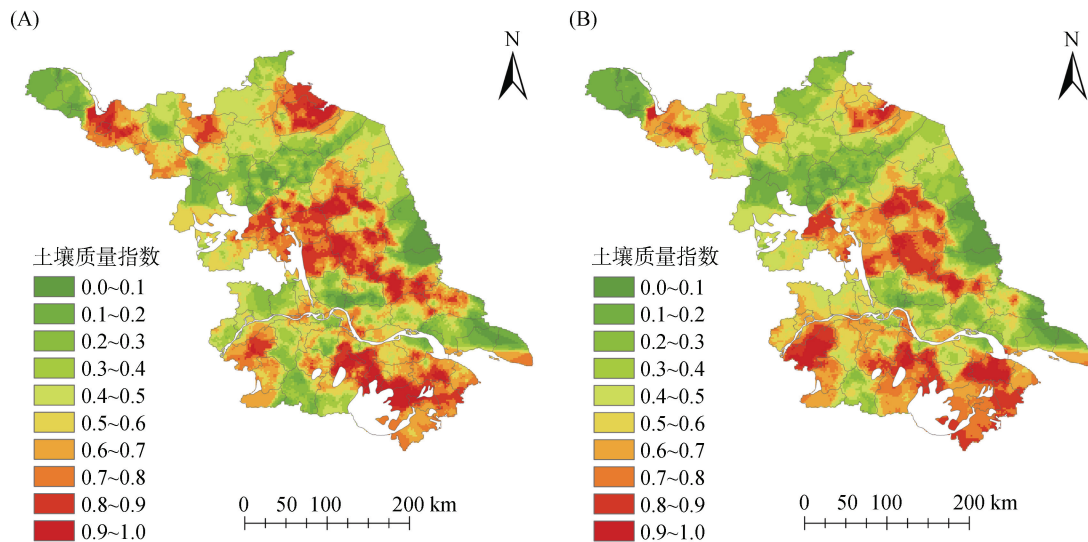


图 2 基于最小数据集(A)和全量数据集(B)的江苏省稻麦轮作区土壤质量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil quality in rice-wheat rotation region of Jiangsu Province based on minimum data set(A)and full data set(B)

表 10 基于最小数据集的江苏省六大农区土壤质量指数

Table 10 Soil quality indexes of six major agricultural regions in Jiangsu Province based on minimum data set

农业区	基于 SQI-MDS			
	极小值	极大值	区域均值	变异系数(%)
徐淮	0.136	1.000	0.649	21.13
沿海	0.191	1.000	0.654	20.74
里下河	0.295	1.000	0.768	13.87
宁镇扬	0.308	0.976	0.648	19.62
沿江	0.206	1.000	0.648	22.11
太湖	0.190	1.000	0.726	18.24

机质和有效磷进入最小数据集评价指标使用频率前 10 位。这前 10 个使用频率高的最小数据集评价指标没有包括中微量元素指标,而本研究分析了微量元素指标。本研究中有有效铁指标与邓绍斌等<sup>[8]</sup>对南方地区冷浸田进行土壤质量评价中 pH、全氮、有效锰、有效铁、C/N 和线虫数量进入最小数据集的结果一致。本研究中有有机质、有效磷、速效钾和有效硼 4 个指标与刘金山等<sup>[7]</sup>关于水旱轮作区的研究结果中有有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、有效硼、有效铜和有效锌进入最小数据集的结果一致。本研究中有有效铁和有效硼 2 个指标与赵艳<sup>[31]</sup>对宜兴市耕地质量进行的综合评价中 pH、全氮、有效铁、有效铜和有效硼指标进入最小数据集的结果一致。本研究中有有机质和有效磷 2 个指标与金慧芳等<sup>[5]</sup>对红壤坡耕地耕层土壤质量评价中耕层厚度、土壤容重、土壤贯入阻力、土壤有机质、pH 和有效磷进入最小数据集的结果一致。

江苏省地形地貌类型多样、气候类型多样、农田管理也存在一定差异,所以不同自然尺度下各农业区所筛选的最小数据集指标会存在一定差异。本研究结

果显示,江苏省六大农业区的最小数据集存在差异性,整体来看,有机质、钾元素和微量元素是江苏省稻麦轮作区主要限制因素,这与王绪奎等<sup>[12]</sup>提出的江苏省耕地土壤养分主要表现在土壤速效钾和中微量元素的亏空结果一致。

江苏省稻麦轮作区土壤质量存在空间异质性,成土母质以河湖沉积物为主的里下河农业区、太湖农业区土壤质量最高,以黄土状物为主的宁镇扬农业区土壤质量次之,以河流冲积物为主的沿江、徐淮农业区以及以江海相沉积物为主的沿海农业区土壤质量最低。黄河泛滥冲积形成徐淮黄泛平原,其土壤有机质和养分含量较低<sup>[32-33]</sup>,本研究徐淮黄泛平原区土壤质量较低结果与此一致。沈雨等<sup>[34]</sup>研究结果表明,里下河和太湖地区土壤有机碳含量比较高,本研究里下河和太湖农业区土壤质量较高结果与此相似。张庆利等<sup>[35]</sup>研究金坛市土壤质量结果表明,金坛市中部地区土壤质量指数相对较高,东部地区次之,西部地区土壤质量指数最低,本研究金坛市的土壤质量分布结果与此完全一致。赵艳<sup>[31]</sup>关于宜兴市耕地土壤质量

空间特征研究以宜兴市北部、西部地区耕地质量较高,而中部和西南部地区耕地质量较低,本研究宜兴市的土壤质量分布结果与此一致。闰豫疆<sup>[36]</sup>研究表明湖北钟祥市丘陵地区的土壤养分含量比平原养分含量高,本研究宁镇扬低山丘陵的地区、沂沭低山丘陵地区和徐州市铜山区土壤质量相近且土壤质量高于周边平原地区结果与此一致。

江苏省稻麦轮作区 SQI-MDS 与 SQI-TDS 两者相关性较高( $R^2 = 0.720$ ), Nash 有效系数(0.401)接近 1, 偏差系数(0.061)几乎接近 0, 说明评价精确度较高, 这与金慧芳等<sup>[5]</sup>和邓绍欢等<sup>[8]</sup>研究结果一致。水稻产量与 SQI-MDS 具有显著相关关系, 这与 Qi 等<sup>[13]</sup>和 Liu 等<sup>[30]</sup>研究中作物产量与土壤质量指数显著相关的结果一致。

#### 4 结论

江苏省稻麦轮作区土壤质量评价的最小数据集指标包括有机质、有效磷、速效钾、有效铁和有效硼。基于最小数据集得出的江苏省土壤质量指数(SQI-MDS)范围为 0.136~1.000(均值 0.674), 整体处于“良 II”等级, 与基于全量数据集得出的土壤质量指数(SQI-TDS)之间呈极显著正相关( $R^2 = 0.720$ ), 这说明最小数据集能够较好地代替全量数据集指标。江苏省稻麦轮作区土壤质量存在空间异质性, 以里下河农业区土壤质量最高, 其次是太湖农业区, 再者是宁镇扬、沿江、沿海和徐淮农业区。江苏省六大农业区的最小数据集存在差异性, 这说明不同农业区主要的限制因素存在差异。整体来看, 有机质、钾元素和微量元素是江苏省六大农业区主要肥力限制因子。因此, 江苏省稻麦轮作区的农田管理措施中, 要注重增施有机肥和微肥, 平衡养分的同时进一步提高土壤质量, 为粮食稳产丰产提供保障。

在本研究中, 所选取指标仅为理化指标, 在后续评价中应将土壤生物指标、土壤耕层指标、农田管理措施指标等纳入评价范围, 这样结果将更全面, 旨在为江苏省乃至我国不同稻麦轮作区的农田管理和耕地质量提升提供因地制宜的科学指导。

#### 参考文献:

[1] 陈美军, 段增强, 林先贵. 中国土壤质量标准研究现状及展望[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 1059-1071.  
 [2] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, et al. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (A guest editorial)[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 4-10.

[3] Larson W E, Pierce F J. Conservation and enhancement of soil quality[C]. Proc. of the Int. Workshop on evaluation for sustainable land management in the developing world. International board for soil resource and management( IBSRAM). proceeding 123, 2. Bangkok, Thailand, 1991: 175-203.  
 [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 & Tillage Research, 2006, 87(2): 163-174.  
 [5] 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 & Tillage Research, 2006, 87(2): 163-174.  
 [6] 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.  
 [7] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 682-689.  
 [8] 刘金山, 胡承孝, 孙学成, 等. 基于最小数据集和模糊数学法的水旱轮作区土壤肥力质量评价[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1145-1150.  
 [9] 邓绍欢, 曾令涛, 关强, 等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1326-1333.  
 [10] 赵媛, 王静爱. 江苏地理[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2011.  
 [11] 付光辉, 刘友兆. 江苏省耕地保护区划研究[J]. 中国农业资源与区划, 2008, 29(1): 11-16.  
 [12] 卮军. 近 30 年江苏省水稻生产的时空变化与效益分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2013.  
 [13] 王绪奎, 孙洋, 潘国良. 江苏省耕地质量现状、问题与对策[C]//江苏土壤肥料科学与农业环境. 2004: 12-16.  
 [14] Qi Y B, Darilek J L, Huang B, et al. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China[J]. Geoderma, 2009, 149(3): 325-334.  
 [15] 郭宗祥, 左其东, 李梅, 等. 江苏省太仓市耕地地力调查与质量评价——土壤 pH、有机质、全氮、有效磷、速效钾和 CEC 的变化[J]. 土壤, 2007, 39(2): 318-321.  
 [16] 毛志刚, 谷孝鸿, 刘金娥, 等. 盐城海滨盐沼湿地及围垦农田的土壤质量演变[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 1986-1992.  
 [17] 巫建华, 许学宏, 陈斌, 等. 江苏中部典型农区耕地环境质量评价及应用研究——以海安县为例[J]. 土壤, 2003, 35(5): 387-391, 407.  
 [18] 王绪奎, 徐茂, 汪吉东, 等. 太湖地区典型水稻土大时间尺度下的肥力质量演变[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 220-224.  
 [19] 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.  
 [20] Brejda J J, Moorman T B, Karlen D L, et al. Identification of regional soil quality factors and indicators I. central and southern high Plains[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(6): 2115-2124.



- [21] Flury B, Riedwyl H. *Multivariate Statistics. A Practical Approach*. Chapman and Hall, London, Great Britain, 1988.
- [22] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 90(1): 25–45.
- [23] Li P, Zhang T L, Wang X X, et al. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126: 112–118.
- [24] 曹志洪, 周健民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [25] Doran J W, Parkin B T. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J W, Coleman D C, Ezdicek D F, et al, eds. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America Spec. Publ. 35. Madison, WI, USA, 1994, 3-21.
- [26] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282–290.
- [27] National Soil Survey Office. *Surveying Techniques of Soil in China*. Beijing: Agriculture Press, 1992: 87-212.
- [28] 冯万忠, 马振朝, 张丽娟, 等. 河北平原冬小麦/夏玉米高产田土壤肥力质量最小数据集构建及其评价[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(15): 233–238.
- [29] 张凤荣, 安萍莉, 王军艳, 等. 耕地分等中的土壤质量指标体系与分等方法[J]. *资源科学*, 2002, 24(2): 71–75.
- [30] 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.
- [31] Liu Z J, Zhou W, Shen J B, et al. Soil quality assessment of Albic soils with different productivities for Eastern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 140: 74–81.
- [32] 赵艳. 宜兴市耕地土壤质量空间特征研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [33] 赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1): 1–11.
- [34] 刘钦普, 林振山, 周勤. 华北黄泛平原潮土土壤养分与土壤粒级的关系研究[J]. *土壤肥料*, 2006(2): 26–29, 51.
- [35] 沈雨, 黄耀, 宗良纲, 等. 基于模型和 GIS 的江苏省农田土壤有机碳变化研究[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(11): 1312–1317.
- [36] 张庆利, 潘贤章, 王洪杰, 等. 中等尺度上土壤肥力质量的空间分布研究及定量评价[J]. *土壤通报*, 2003, 34(6): 493–497.
- [37] 闫豫疆. 县域级平原与丘陵农田土壤养分空间差异性综合研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.