

王 雨, 王桂良, 沈婉仪, 等. 黄淮平原地区典型县域耕地土壤肥力评价[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(8): 1434-1445.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.08.008

黄淮平原地区典型县域耕地土壤肥力评价

王 雨, 王桂良, 沈婉仪, 赵文慧, 胡 锐, 钱晓晴
(农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室/扬州大学, 江苏 扬州 225009)

摘要: 土壤肥力是土壤基本性质及生产力的综合表现, 在江苏省响水县研究区内进行土壤肥力评价有利于了解该县土壤肥力空间分布状况, 对黄淮平原耕地资源的合理利用具有重要作用。本研究利用地统计分析法和主成分分析法筛选土壤肥力指标以构建肥力评价的最小数据集(MDS), 同时运用加权求和法计算出土壤肥力指数(SFQI), 建立反映响水县研究区土壤肥力的综合评价体系。结果表明, 响水县研究区土壤有机质、全氮、有效铁、有效铜和有效钼含量丰富, 均值整体处于一级水平; 土壤有效磷含量较为缺乏, 整体为四级水平。除 pH 以外, 变异系数均大于 10%, 各指标块基比均在 25% 以上, 空间自相关性较弱。研究区土壤肥力评价的 MDS 为 pH、容重、全氮、速效钾、有效铜、有效钼, 能够较好地反映全量数据集(TDS)对土壤肥力评价的信息。研究区整体土壤肥力处于三级地力水平, 呈现西北高东南低的空间分布特征。速效钾和有效钼是研究区的主要限制因子, 建议在施用氮、磷、钾肥时提高钾肥比重, 增施微量元素肥料, 以提高土壤肥力。本研究结果可为黄淮平原耕地土壤肥力评价和耕地土壤培肥提供参考。

关键词: 最小数据集; 主成分分析; 土壤肥力评价; 江苏响水

中图分类号: S158 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)08-1434-12

Soil fertility evaluation of cultivated land in typical counties of Huanghuai Plain

WANG Yu, WANG Guiliang, SHEN Wanyi, ZHAO Wenhui, HU Rui, QIAN Xiaoqing

(Key Laboratory of Arable Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Soil fertility is the comprehensive performance of soil basic properties and productivity. Soil fertility evaluation in the study area of Xiangshui County of Jiangsu province is beneficial to understanding the spatial distribution of soil fertility, and plays an important role in the rational utilization of cultivated land resources in Huanghuai Plain. In this study, statistical analysis and principal component analysis were used to screen soil fertility indicators to construct a minimum data set (MDS) for fertility evaluation. At the same time, weighted summation method was used to calculate soil fertility index (SFQI), and a comprehensive evaluation system reflecting soil fertility in the study area was established. The results showed that the contents of organic matter, total nitrogen, available molybdenum, available iron and available copper were abundant, and the average value was at the first level. The content of available phosphorus in soil was relatively lacking, and the overall level was the fourth level. Except for pH, the coefficients of variation of other indicators were greater than 10%, and the ratio of nugget value to sill value of each index was above 25%, and the spatial autocorrelation was

weak. MDS for soil fertility evaluation in the study area included pH, bulk density, total nitrogen, available potassium, available copper and available molybdenum, which could better reflect the information of soil fertility evaluation by total data set (TDS). The overall soil fertility in the study area was at the third level, showing the spatial

收稿日期: 2023-08-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200107)

作者简介: 王 雨(1997-), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 从事土壤改良与修复研究。(Tel) 13770195109; (E-mail) 766179290@qq.com

通讯作者: 钱晓晴, (Tel) 13511760701; (E-mail) qianxq@yzu.edu.cn

distribution characteristics of high in northwest and low in southeast. Available potassium and available molybdenum were the main limiting factors in the study area. In order to improve soil fertility, it was suggested to increase the proportion of potassium fertilizer and increase the application of trace element fertilizer. The results of this study can provide a reference for soil fertility evaluation and soil fertilization in Huanghuai Plain.

Key words: minimum data set; principal component analysis; soil fertility evaluation; Xiangshui County, Jiangsu province

肥力是土壤的综合表征,保持土壤肥力在较高水平是实现土壤可持续利用的先决条件^[1-2]。对土壤肥力开展评价工作是制订科学施肥方案、培肥土壤的有效手段^[3-4]。目前,许多研究者提出了一种用以表征土壤肥力水平的数值化指标——土壤肥力指数(SFQI)。部分研究者选取了有机质含量、速效氮含量、有效磷含量等化学属性指标评价土壤肥力水平^[5-6];也有部分学者选取物化指标评价土壤肥力,例如黏粒含量、有机质含量和盐基饱和度等^[7-8];还有部分研究者从物理、化学和微生物 3 个角度选择土壤质量评价指标,以构建土壤肥力评价体系^[9-10]。在不同的研究中,选择的评价指标也不尽相同,因此如何科学合理地选择评价指标,是土壤肥力评价的关键一环。最小数据集(MDS)的建立使土壤肥力质量指标的选择和评价更加便捷^[11]。MDS 是指可以反映土壤质量的最少的指标参数集合,可最大限度地减少数据冗余^[12]。众多研究者提出多种构建最小数据集的方法,如灰色关联法、主成分分析法、相关系数法等;采用主成分分析法构建 MDS 能确保最大限度减少原始数据信息丢失,以客观的指标反映土壤肥力情况^[13],并且从 MDS 提取出的指标与全量数据集(TDS)呈显著相关。

黄淮平原是中国重要的农业生产基地,在粮食连年丰产的表象下,存在着土壤盐渍化、养分不平衡等诸多问题^[14]。近年来,很多学者研究黄淮平原多集中在土地利用和农业区划等方面,鲜见对黄淮平原县域尺度的土壤肥力进行评价。江苏省响水县是黄淮平原典型县域之一,多年来农业生产要素的变革、人类活动等使该地区土壤养分发生较大变化。因此,研究响水县近年来耕地土壤肥力状况以及土壤养分丰缺程度,对黄淮平原耕地资源的合理利用具有重要意义。

本研究综合考虑土壤肥力的构成,选取江苏省响水县在农业生产方面具有代表性的 8 个镇的表层(0~20 cm)土壤样品,对土壤的 13 项理化指标进行

测定,运用主成分分析法构建土壤肥力评价指标最小数据集(SQI-MDS),建立反映响水土壤肥力水平的综合评价体系,论述响水县耕地土壤养分特征,并揭示该区域影响土壤肥力的限制因子,旨在为响水县耕地合理规划以及科学施肥技术方案的制订提供理论依据,为黄淮平原区域土壤资源的管理和优化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

响水县地处江苏省东北沿海地区,是长三角城市群北端的重要节点。其东面为黄海,北面为灌河,南面为中山河。县域东西方向长度为 61 km,南北方向宽度为 21 km。整个研究区内的土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域和建设用地,其中耕地是最主要的土地利用类型;土壤类型主要包括滨海盐土和潮土。县域土地总面积达 $1.473 \times 10^5 \text{ km}^2$,其中耕地总面积 $7.06 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占全县土地总面积近 50%。

响水县处于暖温带南部边界处,属于大陆季风区,同时,由于县域临海,也具有海洋性气候特点,年平均气温为 14.5℃,年平均降雨量为 928.2 mm,四季分明、雨热同期;日照充足,年平均日照时间约 2 402.7 h;无霜期较长,全年无霜期在 211 d 左右。响水县全境由黄淮冲积平原构成,地形平坦;全县土壤分为潮土、盐土两种类型。整体气候和地形条件适宜农业生产。

响水县作为国家级生态示范区和江苏省综合改革试点县,具有“中国西兰花之乡”、“全国粮棉生产先进县”等荣誉称号,在农业方面具有重要的研究价值与意义。

1.2 样品采集与测定

基于对各个镇土壤类型、地貌类型等因素的综合考量,遵循代表性、均匀性原则,于 2020 年 9–10 月分别对江苏省响水县 8 个镇的耕地土壤进行调查取样,共采集 85 个样点(因该县东北部为沿海开发

区,故本次耕地土壤肥力评价不予考虑)。从各镇中选取具有代表性的田块,每个田块面积在0.22~4.23 hm²,在每个田块布点区域 50 m 范围内,采用梅花形五点布点法,采集0~20 cm 耕层土样,将其混匀后,取 1 kg 鲜土装入聚乙烯密封袋内,在室内按序进行自然干燥、清除杂物、破碎、过 20 目和 100 目筛,以供后续测定分析。土地利用方式和具体采样点情况如图 1 所示。

选择对土壤养分和环境因素影响较大的指标进行测定,共选定 13 个指标来建立土壤肥力质量评价最小数据集^[15],包括容重、pH 值、有机质含量、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量、缓效钾含量以及中微量元素有效硼含量、有效钼含量、有效铁含量、有效锰含量、有效铜含量、有效锌含量。按《土壤农化分析》^[16]所述方法进行测定,各指标经 3 次平行测定计算出其平均值,具体测定方法如表 1 所示。

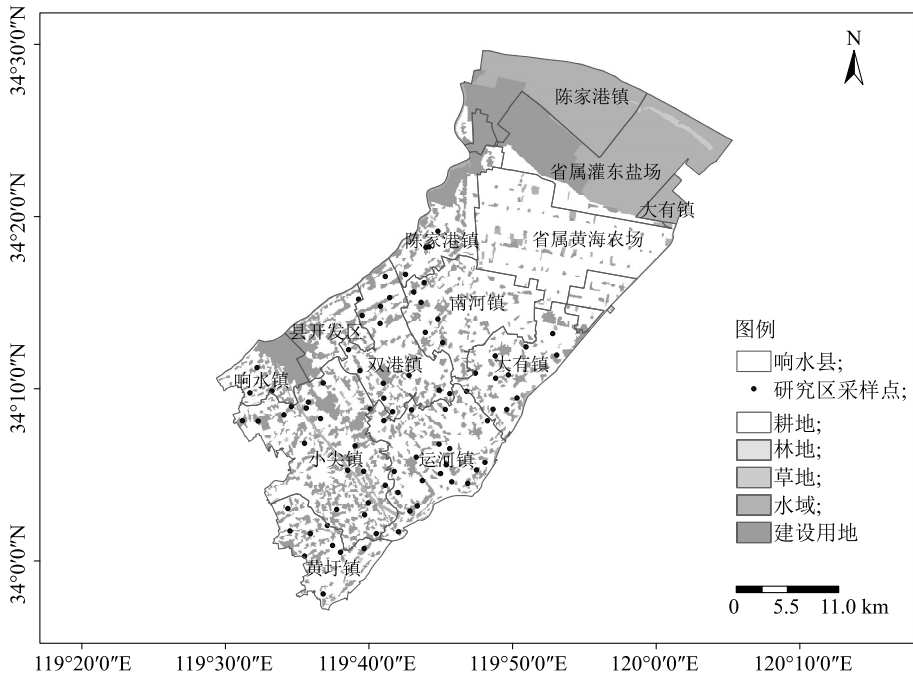


图 1 土地利用方式及采样点分布情况
Fig.1 Land use patterns and distribution of sampling points

表 1 土壤样品的测定指标及方法	
Table 1 Determination indices and methods of soil samples	
测定指标	测定方法
容重	环刀法
pH	电位法(水土比为 2.5 : 1)
有机质含量	重铬酸钾容量法-外加热法
有效磷含量	钼锑抗比色法
全氮含量	靛酚蓝比色法
速效钾含量	乙酸铵浸提-火焰光度法
缓效钾含量	热硝酸浸提-火焰光度法
锰、铁、铜、锌含量	二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法
硼含量	沸水提取-电感耦合等离子体质谱法
钼含量	草酸-草酸铵浸提-电感耦合等离子体质谱法

养分指标变异系数=标准差/平均值×100%,根据结果划分弱变异<10%,10%≤中等变异≥100%,强变异>100%^[17]。

1.3 土壤肥力等级分级标准

本研究土壤肥力等级数据来自于《全国第二次土壤普查养分分级标准》、耕地监测函〔2019〕30 号农业农村部耕地质量监测保护中心关于印发《全国九大农区及省级耕地质量监测指标分级标准(试行)》的通知中黄淮海区耕地质量监测指标分级标准^[18-19]。

1.4 土壤肥力评价方法

土壤肥力评价要求选择对土壤功能和最终评价结果有显著影响的土壤肥力指标^[20],我们选取了 13 种土壤理化性质测定值的 TDS,首先通过主成分

分析、相关性分析、Norm 值判断进行数据简化,将多项指标精简为少数指标纳入 MDS;其次根据最小数据集指标隶属函数值结合各指标权重大小得出最小数据集的土壤肥力指数(SFQI-MDS),同时结合全量数据集的土壤肥力指数(SFQI-TDS)进行两者的相关性检验;最后根据计算结果对响水县进行土壤肥力综合评价。

1.4.1 最小数据集构建步骤 一是进行 KMO 和 Bartlett 检验,若 $KMO > 0.5$, $P < 0.05$ 时,可以进行主成分分析(PCA)^[21]。二是进行主成分分析,采用最大方差旋转法加强不相关组分的解释能力,按特征值 ≥ 1 的条件选择主成分,筛选出其中的高因子载荷(≥ 10.51)纳入 MDS 候选指标。若一个指标在 2 个主成分上的载荷均 ≥ 0.5 ,则该指标归入与其他指标相关性较低的一组^[22-23]。三是计算 Norm 值, Norm 值是指该指标在所有主成分中综合载荷的特征值,数值越大综合信息的解释力越高^[24],选取每组中 Norm 值为该组最大 Norm 值 90% 以上的指标,当每组指标超过 1 个时,需要两两进行相关性分析, $r < 0.5$ 时,两者均纳入 MDS; $r \geq 0.5$ 时, Norm 值最大的纳入 MDS。 Norm 值的计算公式如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^k (U_{ij}^2 \lambda_k)}$$

式中, N_{ik} 为第 i 个指标在前 k 个主成分(特征值 ≥ 1)的综合载荷; U_{ik} 为第 i 个指标在第 k 个主成分上的载荷值; λ_k 为第 k 个主成分的特征值。

1.4.2 土壤肥力评价指数构建 (1) 隶属度函数转换。为避免不同单位的影响,数据处理需要对土壤肥力指标进行统一量化,隶属度函数包括抛物线型函数、正 S 型函数和反 S 型函数^[25]。

正 S 型函数是指土壤肥力随指标测定值的增加而提高,达到最高水平后趋于稳定,属于正 S 型函数的土壤肥力指标为有机质、全氮、有效磷、速效钾、缓效钾以及各种微量元素养分等^[26]。反 S 型函数是指土壤肥力随指标测定值的增加而降低,而后趋于稳定,属于反 S 型函数的土壤肥力指标为容重。正 S 型、反 S 型隶属度函数计算如下:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x \geq a \\ 0.9 \times \frac{x-b}{a-b} + 0.1 & b \leq x < a \\ 0.1 & x < b \end{cases}$$

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x \leq b \\ 0.9 \times \frac{x-a}{b-a} + 0.1 & b \leq x < a \\ 0.1 & x > a \end{cases}$$

式中, $f(x)$ 是指指标的隶属函数值, x 是指标自身测定值, a 、 b 分别是指标的下限和上限(参考江苏省耕地质量监测指标分级标准的最低等级值和最高等级值作为函数的转折点)。

抛物线型函数指在一定范围土壤肥力处于高水平,不在此范围时土壤肥力渐低,属于抛物线型隶属度函数的为 pH 值,抛物线型隶属度函数计算如下:

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 - 0.9 \frac{(x-c)^2}{(d-c)^2} & c < x < d \\ 1.0 & b \leq x \leq c \\ 0.9 \times \frac{x-a}{b-a} + 0.1 & a < x < b \\ 0.1 & x \leq a \text{ 或 } x \geq d \end{cases}$$

式中, $f(x)$ 为指标的隶属函数值, x 为指标的实际测定值, a 、 d 分别为指标最低级别的低值和高值; b 、 c 分别为指标最高级别的低值和高值。

(2) 权重的确定。该指标公因子方差与全部参评指标公因子方差的和之比为该指标的权重^[27]。权重数学表达式为:

$$W_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i$$

式中, W_i 是肥力指标的权重; C_i 是肥力指标的公因子方差; n 是最小数据集中包含的指标数量。

(3) 土壤肥力指数的计算。对隶属函数值和权重值运用加权求和法进行计算,得到每个样点的实际土壤肥力指数^[28]。土壤肥力指数的数学表达式为:

$$SFQI = \sum f_i \times W_i (i = 1, 2, 3, 4, \dots, n)$$

式中, $SFQI$ 为土壤肥力指数; f_i 为第 i 个指标的隶属函数值; W_i 为第 i 个指标的权重值。

1.4.3 研究区土壤肥力综合评价 按 SFQI-MDS 值对研究区耕地肥力分等级评价,根据自然断点法(Jenks)将土壤肥力等级分成 5 个级别,其中 I 级为 0.871~0.960; II 级范围为 0.811~0.870; III 级范围为 0.721~0.810; IV 级范围为 0.591~0.720; V 级范围为 0.410~0.590。从 I 级到 V 级,农业生产适宜度逐渐降低,制约度逐渐增加。

1.5 数据统计与分析

利用 SPSS 19.0 进行土壤各指标描述性统计分

析、主成分分析法、Pearson 相关分析及正态性分布检验;利用 GS+9.0 软件对数据进行半方差函数分析及模型拟合;利用 Excel 2010 完成数据分析以及 SFQI-TDS、SFQI-MDS 的线性拟合;利用 Origin 绘制土壤肥力指标相关系数矩阵图;利用 ArcMap 10.6 绘制土地利用方式和采样点位置图,用普通克里金插值法进行无偏估计未采样点土壤肥力,以绘制响水研究区土壤肥力等级空间分布图。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤肥力指标的描述性统计

研究区土壤养分指标等级标准和定量描述见表 2、表 3,pH 均值为 7.84,整体属于弱碱性土壤;土壤

容重适宜,均值为 1.04;养分含量中有机质、全氮、有效铜、有效铁、有效钼含量丰富,均值整体处于一级水平;速效钾、有效锌、有效锰含量比较丰富,处于二级水平;缓效钾、有效硼含量一般,整体为三级水平;土壤有效磷含量较为缺乏,均值为 14.70 mg/kg,整体为四级水平。研究区 pH 变异系数小于 10%,表明该肥力指标在研究区内的总体变化幅度小;有效钼变异系数大于 100%,呈现高空间变异性,表明在不同区域内差异显著;其他指标均属于中等变异。研究区土壤养分指标 K-S 检验结果显示,pH 以及有机质、全氮、有效锌、有效铁、有效锰、有效硼含量服从正态分布,其余指标进行对数转化后符合正态分布,满足统计学要求。

表 2 黄淮海区土壤养分指标等级标准

Table 2 Grading standards of soil nutrient indices in Huang-huai-hai region

指标	一级(丰富)	二级(较丰富)	三级(一般)	四级(较缺乏)	五级(缺乏)
容重	1.00~1.25	1.25~1.35, ≤1.00	1.35~1.45	1.45~1.55	>1.55
pH	6.51~7.50	7.51~8.00, 6.01~6.50	8.01~8.50, 5.01~6.00	8.51~9.00, 5.01~5.50	≥9.00, ≤5.00
有机质含量(g/kg)	>25.00	20.00~25.00	15.00~20.00	10.0~15.00	≤10.00
全氮含量(g/kg)	>1.50	1.25~1.50	1.00~1.25	0.75~1.00	≤0.75
有效磷含量(mg/kg)	>40.00	30.00~40.00	20.00~30.00	10.00~20.00	≤10.00
速效钾含量(mg/kg)	>200.00	150.00~200.00	100.00~150.00	50.00~100.00	≤50.00
缓效钾含量(mg/kg)	>1 000.00	800.00~1 000.00	600.00~800.00	400.00~600.00	≤400.00
有效铜含量(mg/kg)	>1.80	1.00~1.80	0.50~1.00	0.20~0.50	≤0.20
有效锌含量(mg/kg)	>3.00	2.00~3.00	1.00~2.00	0.50~1.00	≤0.50
有效铁含量(mg/kg)	>20.00	15.00~20.00	10.00~15.0	5.00~10.00	≤5.00
有效锰含量(mg/kg)	>30.00	15.00~30.00	10.00~15.0	5.00~10.00	≤5.00
有效硼含量(mg/kg)	>2.00	1.00~2.00	0.50~1.00	0.20~0.50	≤0.20
有效钼含量(mg/kg)	>0.20	0.15~0.20	0.10~0.15	0.05~0.10	≤0.05

以决定系数大、残差小为条件,进行半方差函数及拟合参数计算,比较各模型参数并选择最优拟合指数参数,其结果如表 4。各指标的变程为 2.56~16.42 km,说明在此空间范围内分布连续,存在空间自相关性。各指标块基比均大于 25%,说明与空间结构性关系较小,受随机性因素如灌溉、施肥、耕作等人为活动影响较大。

2.2 土壤肥力综合评价体系的建立

2.2.1 土壤肥力综合评价最小数据集的确定 首先进行 KMO 和 Bartlett 检验,KMO 为 0.71,>0.5, P 为 0,<0.05,结果表明可以进行 PCA 并有较好的

适用性。其次通过 PCA 得到 4 个主成分,其对方差变异贡献的解释率可达 76.77%,4 个主成分分别对土壤养分指标方差变异贡献的解释率可达 34.11%、22.31%、10.52% 和 9.83%,表明这 4 个主成分能较好地反映响水县研究区土壤肥力情况。

研究区土壤肥力指标主成分载荷值、Norm 值及分组情况如表 5 所示。按照 Norm 值在每组 Norm 最大值的 90% 以上选取原则,初步选取 PC1 中的速效钾、缓效钾、有效锰;PC2 中的有效铜、有效铁;PC3 中的 pH、有机质、全氮、有效硼;PC4 中的容重、

表 3 响水县研究区土壤养分指标定量描述

Table 3 Quantitative description of soil nutrient indices in the study area of Xiangshui County

指标	范围	均值	标准差	偏度	峰度	K-S 检验
容重(g/cm^3)	0.81~1.25	1.04	0.11	0.01(-0.17)	-0.82(-0.73)	0.09
pH	7.40~8.30	7.84	0.16	0.15	0.26	0.09
有机质含量(g/kg)	10.60~41.40	27.30	5.74	-0.12	0.01	0.95
全氮含量(g/kg)	0.90~2.54	1.80	0.35	0.02	-0.34	1.00
有效磷含量(mg/kg)	8.10~30.70	14.70	5.34	1.21(1.21)	0.76(0.76)	0.13
速效钾含量(mg/kg)	37.00~476.00	156.28	122.39	1.32(0.62)	0.49(-0.84)	0.79
缓效钾含量(mg/kg)	318.00~1 620.00	670.68	310.71	1.25(0.67)	0.61(-0.55)	0.09
有效铜含量(mg/kg)	0.40~6.78	2.08	1.45	1.85(0.23)	3.15(0.24)	0.75
有效锌含量(mg/kg)	0.37~5.00	2.29	1.22	0.92	-0.22	0.06
有效铁含量(mg/kg)	19.60~202.00	81.38	43.71	0.46	-0.61	0.38
有效锰含量(mg/kg)	3.90~51.10	18.10	10.24	1.36	1.82	0.06
有效硼含量(mg/kg)	0.17~1.25	0.59	0.23	0.24	-0.35	0.97
有效钼含量(mg/kg)	0.02~1.00	0.21	0.23	2.07(0.51)	3.35(0.12)	0.25

括号内为对数变换后结果。

表 4 半方差函数模型及参数

Table 4 Semi-variance function models and parameters

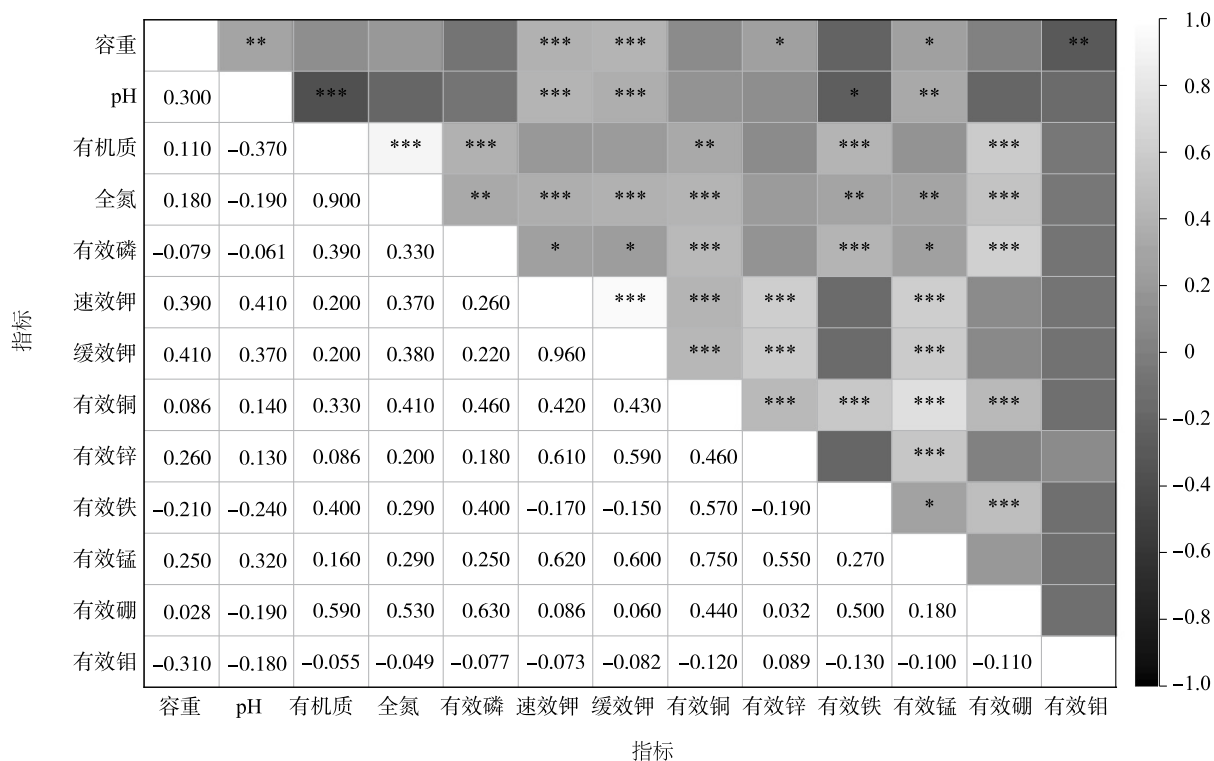
指标	模型	块金值 (C0)	基台值 (C0+C)	块基比 [C0/(C0+C)]	变程 (km)	R^2
容重	高斯模型	0.000 260	0.000 268	0.970	5.46	0.932
pH	高斯模型	0.000 001	0.000 001	1.000	2.23	0.916
有机质	球状模型	11.340 000	18.173 077	0.624	5.83	0.784
全氮	球状模型	0.038 900	0.062 945	0.618	5.58	0.802
有效磷	高斯模型	0.001 400	0.001 420	0.986	2.56	0.920
速效钾	球状模型	0.138 000	0.173 585	0.795	16.42	0.956
缓效钾	高斯模型	0.045 200	0.072 320	0.625	12.89	0.868
有效铜	指数模型	0.144 100	0.256 406	0.562	16.35	0.769
有效锌	指数模型	0.001 000	0.001 001	0.999	9.93	0.917
有效铁	指数模型	3.240 000	6.480 000	0.500	8.79	0.767
有效锰	指数模型	0.067 000	0.099 112	0.676	11.25	0.815
有效硼	高斯模型	0.013 800	0.020 721	0.666	6.77	0.848
有效钼	指数模型	0.001 000	0.001 002	0.998	11.01	0.880

有效钼。其中有效硼在两个主成分上均 >0.5 ,保留与其相关性更高的 PC3。如图 2 所示,对同一主成分下的指标进行相关性分析,PC1 中两两相关系数均 >0.5 ,保留 Norm 值最大的速效钾;PC2 中保留 Norm 值较大的有效铜;PC3 中全氮和有机质、有效

硼的相关系数 >0.5 ,与 pH 的相关系数 <0.5 ,故保留全氮与 pH;PC4 中容重与有效钼的相关系数 <0.5 ,则两者均保留。因此确定本研究土壤质量评价指标的最终 MDS 为速效钾、有效铜、全氮、pH、容重、有效钼。

Table 5 Principal component load values and Norm values of soil fertility indices in the study area of Xiangshui County

评价因子	主成分变量(载荷值)				Norm 值
	PC1	PC2	PC3	PC4	
容重	0.39	-0.26	0.18	0.66	1.22
pH	0.44	-0.02	-0.52	0.44	1.21
有机质	0.08	0.26	0.92	0.04	1.17
全氮	0.28	0.21	0.86	0.08	1.23
有效磷	0.17	0.64	0.30	-0.04	1.20
速效钾	0.91	0.01	0.14	0.17	1.94
缓效钾	0.90	0.00	0.15	0.18	1.91
有效铜	0.50	0.77	0.08	0.04	1.69
有效锌	0.81	0.04	0.04	-0.17	1.71
有效铁	-0.23	0.85	0.18	0.01	1.54
有效锰	0.72	0.50	-0.08	0.11	1.75
有效硼	-0.02	0.60	0.56	0.09	1.22
有效钼	0.10	-0.18	0.01	-0.85	1.03
主成分特征值	4.44	2.90	1.37	1.28	-
主成分贡献率(%)	34.11	22.31	10.52	9.83	-
主成分累积贡献率(%)	34.11	56.42	66.94	76.77	-



*: 相关性达 $P \leq 0.050$ 水平; **: 相关性达 $P \leq 0.010$ 水平; ***: 相关性达 $P \leq 0.001$ 水平。

图 2 响水县研究区土壤肥力指标相关系数矩阵图

Fig.2 Correlation coefficient matrix of soil fertility indices in the study area of Xiangshui County

2.2.2 土壤肥力评价指数构建 各肥力指标所属隶属度函数的转折点、隶属度均值、全量数据集与最小数据集的公因子方差和权重如表 6 所示,结合各指标的权重与隶属度均值,计算出 TDS 的土壤肥力

指数和 MDS 的土壤肥力指数,以上两类数据集的土壤肥力指数分别为0.32~0.92、0.41~0.96;平均值分别为 0.70、0.78。

表 6 全量数据集、最小数据集的隶属度均值、公因子方差和权重

Table 6 Mean membership, common factor variance and weight of total data set and minimum data set

指标	参数				隶属度均值	全量数据集		最小数据集	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>		公因子方差	权重	公因子方差	权重
pH	5.00	6.50	7.50	9.00	0.80	0.65	0.07	0.66	0.19
容重	1.55	1.25			0.89	0.69	0.07	0.53	0.15
有机质	10.00	25.00			0.92	0.92	0.09		
全氮	0.75	1.50			0.96	0.87	0.09	0.76	0.22
有效磷	10.00	40.00			0.24	0.53	0.05		
速效钾	50.00	200.00			0.74	0.88	0.09	0.67	0.19
缓效钾	400.00	1 000.00			0.45	0.86	0.09		
有效铜	0.20	1.80			0.81	0.86	0.09	0.58	0.17
有效锌	0.50	3.00			0.64	0.69	0.07		
有效铁	5.00	20.00			1.00	0.81	0.08		
有效锰	5.00	30.00			0.53	0.79	0.08		
有效硼	0.20	2.00			0.29	0.69	0.07		
有效铝	0.05	0.20			0.59	0.77	0.08	0.28	0.08

a、*d* 分别为指标最低级别的低值和高值;*b*、*c* 分别为指标最高级别的低值和高值。

为了对最小数据集的合理性进行验证,将研究区 TDS 的土壤肥力指数和 MDS 的土壤肥力指数进行线性回归分析,如图 3 所示,可看出 SFQI-MDS 的土壤肥力指数与 SFQI-TDS 的土壤肥力指数呈现 $Y=1.079\ 6x-0.146\ 8$ 的线性关系, R^2 为 0.875 4 ($P<0.01$)。结果表明,TDS 的土壤肥力指数和 MDS 的土壤肥力指数呈现极显著相关,因此构建的最小数据集指标体系可以代替全量数据集指标体系进行研究区的土壤肥力综合评价,且具有适用性和有效性。

2.3 研究区土壤肥力综合评价

响水县研究区土壤肥力指数均值为 0.78, SFQI-MDS 最小值是 0.41,最大值是 0.96。各样点土壤肥力指数 I ~ V 级占比分别为 24.71%、14.12%、32.94%、24.71%、3.53%,Ⅲ等地占比最大。经 K-S 检验,响水县研究区各样点 SFQI-MDS 土壤肥力指数满足正态分布($P=0.22>0.05$),可以进行地统计学分析,其最优理论模型为高斯模型, R^2 为 0.975, RSS 为 9.828×10^{-6} ,拟合效果较好,块基比为 0.856,说明土壤肥力指数空间自相关性较弱。

图 4 显示,从空间分布上看,研究区高肥力地土壤集中在西北部区域,低肥力地土壤集中在东南部区域,Ⅰ级地主要分布在陈家港镇、南河镇;Ⅱ级地主要分布在双港镇、大有镇;Ⅲ级地主要分布在响水镇、小尖镇;Ⅳ级地主要分布在运河镇、黄圩镇。

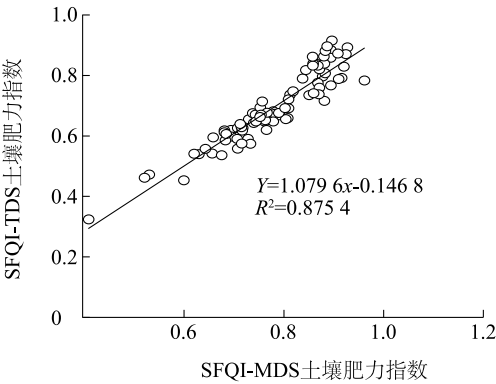


图 3 最小数据集 (SFQI-MDS) 和全量数据集 (SFQI-TDS) 的相关性

Fig.3 Correlation between minimum data set (SFQI-MDS) and total data set (SFQI-TDS)

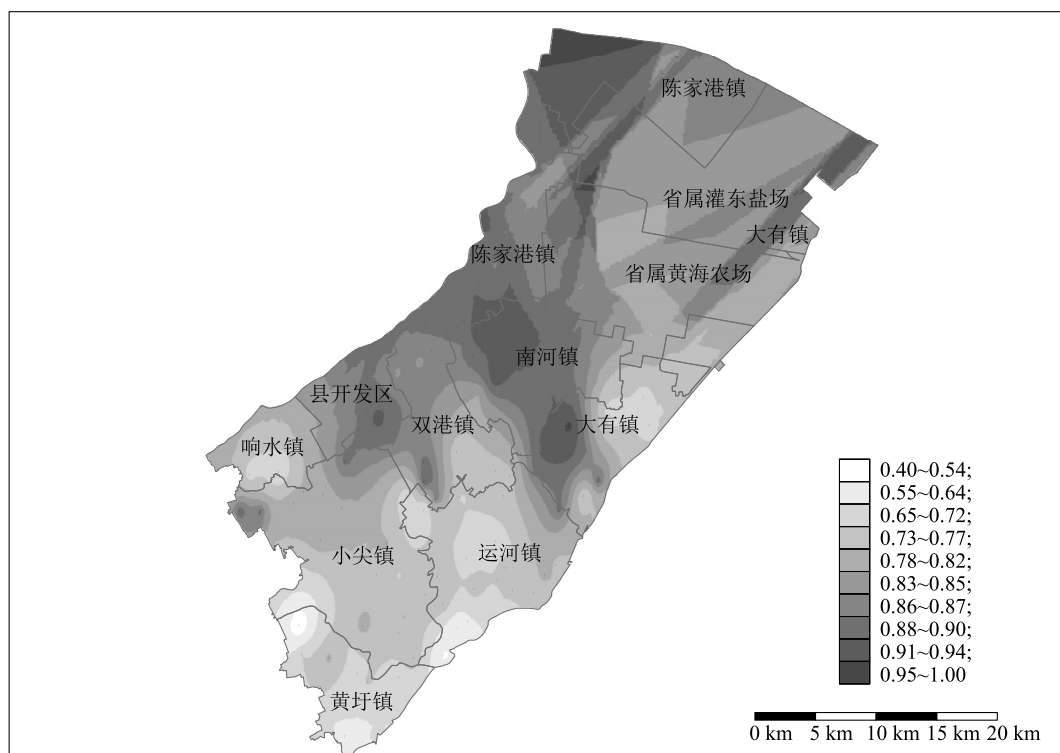


图 4 响水县研究区各镇土壤肥力指数分布图

Fig.4 Soil fertility index distribution map of each town in the study area of Xiangshui County

参照表 2 黄淮海区土壤养分指标等级标准,进一步比对分析 MDS 中定量指标各镇的 SFQI 组成结果,如图 5 所示,Ⅰ级地养分含量极为丰富,有利于提升作物产量和品质,有效钼为陈家港镇、南河镇的限制因子,可适当增施钼肥;Ⅱ级地中大有镇的土壤速效钾含量较低,双港镇的土壤有效钼含量较低,可分别适当增施钾肥和钼肥以进一步提升地力。Ⅲ级地中响水镇有效钼为主要限制因子,小尖镇速效钾、有效钼为主要限制因子;Ⅳ级地的黄圩镇和运河镇各养分均存在不同程度的缺乏,这可能与不合理的施肥方式有关,建议增施有机肥,同时增施微量元素肥料,以达到平衡施肥的目的,从而提高土壤肥力。

如图 6 所示,响水县研究区土壤类型以滨海盐土和潮土为主,潮土Ⅰ级高肥力土壤的面积大于滨海盐土。土壤质地主要为沙土、壤土、黏土,土壤较为松散,研究区黏土Ⅰ级高肥力土壤占比 53%;壤土的综合肥力高于沙土。研究区土壤 pH 呈弱碱性。速效钾、有效钼为研究区限制因子。

3 讨论

3.1 土壤肥力评价方法

基于最小数据集的土壤肥力评价法是反映土壤肥力状况的好方法之一,可在最大限度降低成本的同时,对土壤肥力作出高效评估,克里金插值能够对采样点和未采样点作出最优估计,本研究结合地统计分析法和主成分分析法筛选最小数据集,从 13 个土壤肥力指标中筛选并构建了包括 pH、容重、全氮、速效钾、有效铜和有效钼的最小数据集。从李鑫等^[20]研究结果来看,在最小数据集的评价指标中,土壤有机质、容重、pH、全氮和速效钾等选取率均达 50%以上,本研究选取容重、pH、全氮和速效钾进入数据集,与前人研究结果基本一致^[29];除此之外,土壤中微量元素也发挥着重要作用,可能成为作物产量和品质的限制因子,本研究最小数据集中有效铜和有效钼的入选表明微量元素对于研究区耕地土壤肥力具有重要指示作用。土壤肥力评价中生物指标和土壤耕层指标也极为重要,今后应在更加全面的土壤肥力评价指标中筛选最小数据集,开展大尺

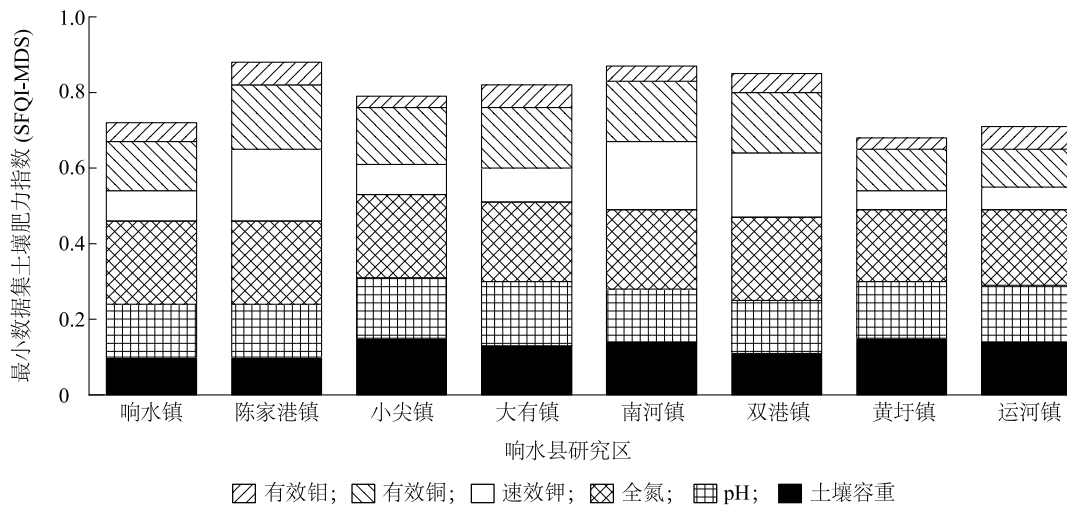


图5 响水县研究区内各镇土壤肥力指数构成堆积图

Fig.5 The soil fertility index of each town in the study area of Xiangshui County

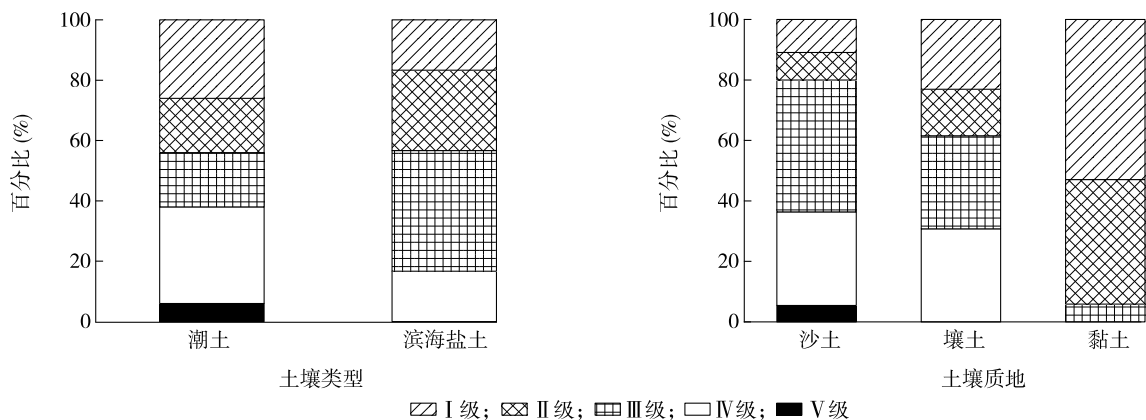


图6 不同土壤类型和质地的不同土壤肥力等级百分比堆叠图

Fig.6 Percentage stacking map of different soil fertility grades under different soil types and textures

度研究区的动态监测,以提高黄淮海农区土壤肥力评价的精准性和全面性。

3.2 研究区土壤肥力评价

对比土壤养分标准可知,全氮、有效铜处于一级标准水平,养分水平较高,结合半方差函数可知,全氮、有效铜主要受结构性和随机性共同影响,变异系数较低。该地成土母质为河湖冲积物,相同母质上发育的土壤微量元素含量相似^[30],研究区土壤全氮含量较高、速效钾含量较低可能与当地传统施肥方式(重尿素,轻磷、钾肥和有机肥)有关。研究区土壤有效钼含量较低,变异系数和块基比均为中等水平,可能是因为虽然相同成土母质造成有效钼初始值类似,但受施肥习惯等人为因素影响其分布不均。不同镇土壤养分存在差异,从整体上看,研究区西北

侧土壤肥力高于东南侧。王远鹏等^[31]研究结果表明,统一的田间管理模式和施肥量会造成不同区域土壤综合肥力的差异性持续增大,导致部分区域在空间分布上出现不连续的斑块。作物的稳产高产主要取决于土壤肥力的提高,建议研究区应在补充钾肥、钼肥的基础上,因地制宜采取更加精细化的田间管理手段,从长远角度看还应改善立地条件和土壤结构,提高有机质含量、养分库容和生物活性^[32],以进一步提升土壤质量,对边际土地产能增效及维持生态系统可持续性具有重要意义。

4 结 论

(1)描述性统计分析结果表明,研究区土壤 pH 均值为 7.84,总体属于弱碱性。有机质、全氮、有效

钼、有效铁和有效铜含量丰富,均值整体处于一级水平;土壤有效磷含量较为缺乏,均值为 14.70 mg/kg,整体为四级水平。除 pH 以外,其他指标变异系数均大于 10%,各指标在研究区内变化幅度较大。各指标块基比均在 25%以上,空间自相关性较弱。

(2)响水县研究区最小数据集的评价指标为 pH、容重、全氮、速效钾、有效铜、有效钼。TDS 的土壤肥力指数和 MDS 的土壤肥力指数决定系数为 0.875 4,验证了最小数据集对响水县研究区土壤肥力综合评价具备适用性和有效性。

(3)响水县研究区土壤肥力指数均值为 0.78,总体土壤肥力处于三级水平。土壤综合肥力指数表现为西北高东南低的空间分布特征,速效钾和有效钼是该地区的主要限制因子,应根据不同镇土地的具体土壤养分匮乏状况适当调整氮、磷、钾肥施用比例,增施微量元素肥料,从而较为准确地指导县域尺度的黄淮海农区农田施肥管理。

参考文献:

- [1] CHAI J, WANG Z, YANG J, et al. Analysis for spatial-temporal changes of grain production and farmland resource: evidence from Hubei Province, central China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 207(10): 474-482.
- [2] 汤淑娟,刘安迪. 我国耕地质量评价指标体系与方法综述[J]. *现代农业研究*, 2022, 28(3): 45-47.
- [3] HENGL T, LEENAARS J G B, SHEPHERD K D, et al. Soil nutrient maps of Sub-Saharan Africa: assessment of soil nutrient content at 250 m spatial resolution using machine learning[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 109(1): 77-102.
- [4] ZHAO Z, LIU G, LIU Q, et al. Distribution characteristics and seasonal variation of soil nutrients in the Mun River Basin, Thailand[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(9): 1818.
- [5] 李俊飞,焦晓林,毕艳孟,等. 基于药材品质的山东西洋参主产区栽培地土壤肥力质量评价[J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(19): 4598-4605.
- [6] 刘玉龙,陈瑶,刘延坤,等. 张广才岭典型森林土壤养分特征与综合质量评价[J]. *贵州农业科学*, 2023, 51(5): 28-34.
- [7] 田宇,盛浩,黄得志,等. 湘东大围山垂直带表层土壤肥力质量分析[J]. *森林与环境学报*, 2021, 41(3): 281-289.
- [8] 杨丽扬,张永清,田静,等. 基于最小数据集的生草覆盖对吉县苹果园土壤肥力质量的影响评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(3): 374-381.
- [9] ZUNGU N S, EGBEWALE S O, OLANIRAN A O, et al. Soil nutrition, microbial composition and associated soil enzyme activities in KwaZulu-Natal grasslands and savannah ecosystems soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 155: 103663.
- [10] QU Q, XU H, XUE S, et al. Stratification ratio of rhizosphere soil microbial index as an indicator of soil microbial activity over conversion of cropland to forest[J]. *Catena*, 2020, 195: 104761.
- [11] LI X, LI H, YANG L, et al. Assessment of soil quality of croplands in the Corn Belt of Northeast China[J]. *Sustainability*, 2018, 10(1): 248.
- [12] 陈方正,任健,刘思涵,等. 基于最小数据集的洞庭湖流域南部耕地土壤肥力综合评价[J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1348-1359.
- [13] YUAN P, WANG J, LI C, et al. Soil quality indicators of integrated rice-crayfish farming in the Jiangnan Plain, China using a minimum data set[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 204: 104732.
- [14] 李颖慧,姜小三. 黄淮海平原农区农用地土壤肥力评价及时空变化特征——以山东省博兴县为例[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(3): 602-612.
- [15] 裴小龙,韩小龙,钱建利,等. 自然资源综合观测视角下的土壤肥力评价指标[J]. *资源科学*, 2020, 42(10): 1953-1964.
- [16] 南京农学院. 土壤农化分析[M]. 北京:农业出版社,1980.
- [17] 雷志栋,杨诗秀,许志荣,等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. *水利学报*, 1985(9): 10-21.
- [18] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1998.
- [19] 王远鹏,黄晶,孙钰翔,等. 近 35 年红壤稻区土壤肥力时空演变特征——以进贤县为例[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(16): 3294-3306.
- [20] 李鑫,张文菊,邬磊,等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(14): 3043-3056.
- [21] CHEN S, LIN B, LI Y, et al. Spatial and temporal changes of soil properties and soil fertility evaluation in a large grain-production area of subtropical plain, China[J]. *Geoderma*, 2020, 357(1): 113937.
- [22] NAKAJIMA T, LAL R, JIANG S. Soil quality index of a crosby silt loam in central Ohio[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 323-328.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 孙波,张桃林,赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. *土壤学报*, 1995(4): 362-369.
- [26] 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[J]. *土壤*, 2020, 52(6): 1230-1238.
- [27] SHUKLA M K, LAL R, EBINGER M. Determining soil quality indicators by factor analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 87(2): 194-204.

- [28] LI P, ZHANG T, WANG X, et al. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 126:112-118.
- [29] 朱鸣鸣,徐镀涵,陈光燕,等. 基于最小数据集的喀斯特不同利用方式下土壤质量评价[J]. *草地学报*, 2021, 29(10):2323-2331.
- [30] 陶 澍,曹 军,李本纲,等. 深圳市土壤微量元素含量成因分析[J]. *土壤学报*, 2001(2):248-255.
- [31] 王远鹏,黄 晶,柳开楼,等. 东北典型县域稻田土壤肥力评价及其空间变异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(2):256-266.
- [32] 孙 波,朱安宁,姚荣江,等. 潮土、红壤和盐碱地障碍消减技术与产能提升模式研究进展[J]. *土壤学报*, 2023, 60(5):1231-1247.

(责任编辑:黄克玲)