

华北典型潮土区土壤质量综合评价

徐用兵^{1,3}, 张天鹏¹, 雷秋良^{1*}, 张淑香¹, 潘君廷¹,
武淑霞¹, 杜新忠¹, 邱实⁴, 孙福军², 刘宏斌¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/北方干旱半干旱高效利用全国重点实验室/农业农村部面源污染控制重点实验室/北京昌平土壤质量国家野外科学观测研究站, 北京 100081; 2. 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866; 3. 深圳市源清环境技术服务有限公司, 广东 深圳 518055; 4. 东软集团股份有限公司, 辽宁 沈阳 110170)

摘要: 【目的】为了有针对性选取典型潮土区的土壤质量评价最优方法, 而进行不同种植制度下的土壤质量评价。【方法】以华北典型潮土区为研究区域, 结合实测与调研数据, 运用主成分分析法筛选最小数据集, 基于线性和非线性两种评分指标方法与加性 (SQIa)、加权加性 (SQIw) 和记忆 (SQIn) 三种不同的土壤质量指数法。选取最优方法的同时, 评价典型潮土区不同种植制度下的土壤质量。【结果】①描述性统计分析表明, 河北省中部潮土区土壤 pH 变异系数属于弱变异性, 其余指标都属于中等变异性; 有效磷、阳离子交换量 (CEC)、土壤有机质 (SOM)、土壤的速效养分含量的变异系数较大。②相关性研究表明, 作物单产与 SOM、全氮 (TN) 和缓效钾含量显著正相关, 与土壤 pH、速效钾、水溶态硼、有效铜、有效锌和有效铜含量呈显著负相关。③方法研究表明, 典型潮土区最小数据集是 SOM、缓效钾、有效铁、水解性氮、有效锌、有效磷、有效硫含量。不同方法最小数据集 (MDS) 与总数据集 (TDS) 的相关性强弱为: SQIw-NL > SQIa-NL > SQIw-L > SQIa-L > SQIn-L > SQIn-NL。④空间特征研究表明, 研究区的土壤质量主要由中等等级 II、III 和 IV 等级主导。土壤质量指数 (SQI) 从南到北减少。⑤土地利用研究表明, 不同种植制度土壤质量的大小顺序为: 小麦-玉米/豆 > 花生 > 麦-玉米 > 棉花 > 玉米。【结论】华北潮土区的最佳土壤质量评价方法是 SQIw-NL 法, 最小数据集为 SOM、缓效钾、有效铁、水解性氮、有效锌、有效磷、有效硫含量, 不同管理措施一定程度上影响了作物的生长发育, 且小麦-玉米/豆轮作可以提升土壤质量, 献县的土壤质量相对较高。

关键词: 潮土区; 土壤质量评价; 最小数据集; 种植制度

中图分类号: S16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)06-1271-11

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022110201

徐用兵, 张天鹏, 雷秋良, 张淑香, 潘君廷, 武淑霞, 杜新忠, 邱实, 孙福军, 刘宏斌. 华北典型潮土区土壤质量综合评价 [J]. 土壤通报, 2023, 54(6): 1271 - 1281

XU Yong-bing, ZHANG Tian-peng, LEI Qiu-liang, ZHANG Shu-xiang, PAN Jun-ting, WU Shu-xia, DU Xin-zhong, QIU Shi, SUN Fu-jun, LIU Hong-bin. Comprehensive Evaluation of Soil Quality in Typical Fluvo-aquic Soil Region of North China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(6): 1271 - 1281

【研究意义】土壤质量是土壤管理的一个重要指标, 可以帮助维持土壤生产力和土壤质量, 同时促进动植物健康^[1]。因此, 准确评价土壤质量有助于土壤环境可持续发展。【前人研究进展】土壤质量可以通过物理、化学、生物等综合属性评估, 土壤有机质 (SOM)、全氮 (TN)、土壤 pH、容重 (BD)、阳离子交换量 (CEC)、土壤结构、团聚体稳定性和微生物活性, 是评价土壤质量最广泛使用的指标^[2-3]。目前, 提出多种评价土壤质量的方法, 如动态土壤质量模型法^[3]、土壤质量卡片法^[4]、地统计学法^[5]、土壤质量指数法 (SQI)^[6] 等。其中 SQI

具有简单性、实用性和定量灵活性的特点, 常被应用于监测和评估不同土地利用管理下生态系统的土壤质量^[7-10]。

目前量化 SQI 主要有三个步骤: (1) 选择适当的指标, 建立最小数据集; (2) 确定指标评分方法, 进行指标评分, 如线性和非线性评分系统; (3) 根据权重及指标得分计算 SQI^[11-13]。在土壤质量评估研究中通常使用总数据集 (TDS) 和最小数据集 (MDS) 两种方法, 其中 MDS 可以从大量预选指标中筛选出少量最合适的反映土壤质量指标, 有效地减小数据冗余^[14-16]。目前, 已有多种数学和统计方法

收稿日期: 2022-11-02; 修订日期: 2022-12-12

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目 (U20A20114) 和中国农业科学院科技创新工程 (CAAS-ZDRW202201) 资助

作者简介: 徐用兵 (1994-), 男, 湖北十堰人, 硕士, 主要研究方向为农业面源污染防治。E-mail: 2212527262@qq.com

*通讯作者: E-mail: leiquliang@caas.cn

筛选 MDS, 如主成分分析法、聚类分析法、偏最小二乘回归法、多元线性回归等^[17-20]。然而, MDS 建立很难标准化, 因为它在很大程度上取决于研究的现实因素^[10]。

【本研究切入点】潮土是我国重要的农业土壤, 我国潮土面积约 38488 万 hm^2 , 占全国总耕地面积约 15.9%。其中华北平原潮土区大多地势平缓、土壤耕层深厚、生产力好, 是我国重要的农作物生产基地^[21], 为小麦和玉米的主产区。在潮土的形成过程中, 人为耕作是关键因素^[22], 其一年两熟制的高复种指数和高利用强度的种植制度对潮土养分消耗巨大^[21], 同时近 30 年的研究发现, 潮土 pH 值下降了 0.28 个单位^[22]。目前, 部分学者使用了 SOM、TN、速效磷、有效钾等指标, 分析了我国的封丘县、山东禹城市、禹城和垦利等典型农业县市土壤肥力演变, 表明长期过量施肥使潮土区土壤肥力变差^[23-26], 然而, 缺乏构建潮土区土壤质量评价体系的研究。

【拟解决的问题】本研究以华北典型潮土区为研究对象, 结合实测数据与调研数据, 运用主成分分析法筛选最小数据, 基于线性和非线性两种评分指标方法与加性 (SQIa)、加权加性 (SQIw) 和记忆 (SQIn) 三种不同的土壤质量指数法, 选取最优方法的同时, 评价典型潮土区不同种植制度下的土

壤质量, 以期建立华北平原潮土区的土壤质量指标评价体系, 为农业生产活动指导提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

华北典型潮土区位于廊坊市的南部和沧州市的西部, 包括任丘市、大城县、任丘市肃宁县、献县和河间市 (图 1), 地处华北平原中北部, 属于典型的低平原地貌, 洼地密布, 带状岗地穿插其间, 境内主要种植小麦、玉米等粮食作物。其中河间市位于河北省中南部, 地貌属湖积冲积平原, 地势自西南向东北逐渐降低, 气候类型与任丘市相同, 受季风影响, 四季分明, 年平均气温 $12.4\text{ }^{\circ}\text{C}$; 大城县地处河北省东中部, 廊坊市最南端, 全境地势平坦, 自西南向东北逐渐降低; 肃宁县地处华北平原中北部, 属海河水系黑龙港流域洪积冲积平原, 地势开阔平坦, 无山峰丘陵, 主要的粮食作物为冬小麦和夏玉米, 是国家级商品粮食基地, 是河北省核心的几个产粮大县之一, 属于暖温带亚湿润大陆性季风气候, 四季鲜明, 阳光充足, 热量比较丰富。年平均气温 $12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$; 献县位于河北省东南部, 盛产小麦、玉米、棉花和红枣。

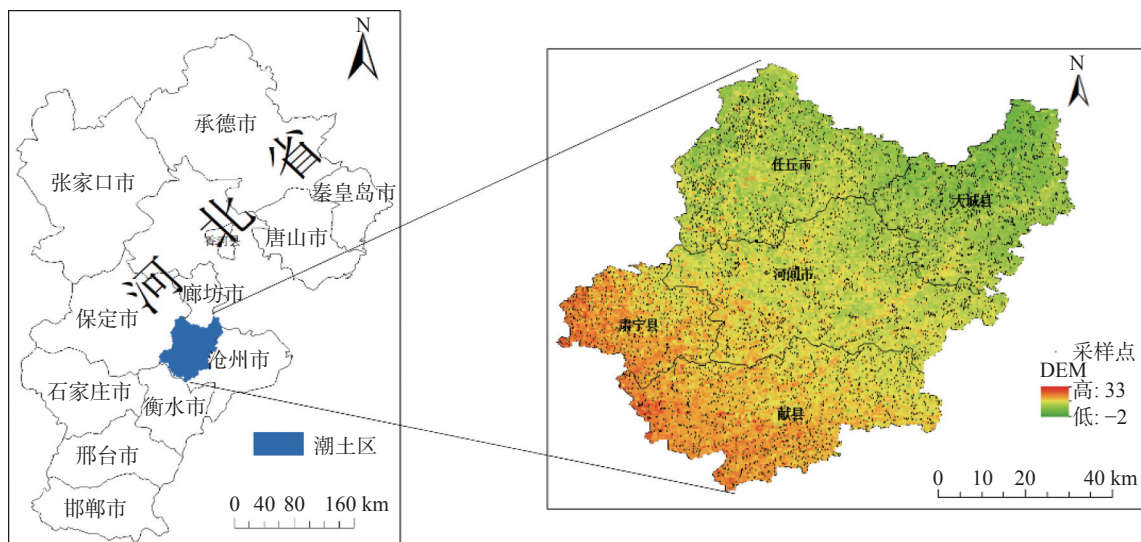


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 样品采集和实验室分析

在 2007 年、2008 年采集典型潮土区 6216 个农田土壤表层 ($0\sim 20\text{ cm}$) 样品, 同时收集了采样点

位置信息、环境条件、作物种植情况、作物产量等进行了观测和记录。

SOM 测定采用重铬酸钾-外加热容量法; TN 采

用浓 H_2SO_4 消煮—半微量开氏法, 采用全自动开氏定氮仪 (KDY-9830, 北京); 水解性氮测定采用碱解扩散法; 土壤速效磷测定用 $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提—钼锑抗比色法; 土壤速效钾用 $1 \text{ mol L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAC}$ 浸提—火焰光度计法; 土壤缓效钾采用热硝酸浸提、火焰光度计法测定; 土壤 pH 用 pH 计测定水土比为 2.5 : 1 悬液的 pH 值; 土壤水溶性硼采用甲亚胺比色法; 土壤有效锰采用乙酸铵浸提—高锰酸钾比色法; 土壤有效锌和有效铜采用火焰原子吸收光谱法; 土壤有效铁采用 DTPA 溶液浸提—原子吸收分光光度法测定; 土壤有效硫的测定采用磷酸盐—乙酸或氯化钙浸提—硫酸钡比浊法。

1.3 土壤质量评价方法

加性土壤质量指数^[27-28]、加权加性土壤质量指数^[27,29]和记忆土壤质量指数^[9]是将无因次指标整合到 SQI 中最常用的三种方法^[6,30-31], 并且这些综合方法都已成功地应用于世界各地的 SQI 评估^[9,27,29,32-33]。对于数据集 (即 TDS 和 MDS), 根据 SQI 将土壤属性组合成三个不同的组, 包括 SQIa (公式 1)、SQIn (公式 2) 和 SQIw (公式 3):

$$SQIa = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (1)$$

$$SQIn = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{min}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \quad (2)$$

$$SQIw = \sum_{i=1}^n W_i \times N_i \quad (3)$$

其中, N_i 、 n 、 P_{ave} 、 P_{min} 和 W_i 分别是指标得分、指标数量、平均值、每个采样点得分最小值和分配给每个指标的权重。

1.4 评分函数和权重的确定

在确定土壤质量指数的 MDS 变量后, 使用线性、非线性和标准评分函数将每个变量转换并归一化为 0 到 1 之间的无量纲值^[27,34]。以土壤可持续性和生产力为目标, 通过解释各变量的土壤函数, 选择合适的评分算法。“越多越好” (如有效氮、磷、钾)、“越少越好” (如容重和障碍层厚度) 或“最佳”曲线 (如土壤 pH) 是指标得分的有效函数^[34]。不同的土壤质量变量根据其土壤质量函数进行分类, 使用线性、非线性和标准得分函数方程计算土壤质量函数, 如下所述:

对于线性评分, “越多越好”使用函数 (4),

“越少越好”使用公式 (5):

$$SL = \frac{x}{x_{max}} \quad (4)$$

$$SL = \frac{x_{min}}{x} \quad (5)$$

其中 SL 是土壤指标的线性分数, x 是土壤指标值, x_{max} 和 x_{min} 值是处理中观察到的每个土壤指标的最大值和最小值^[27,35]。

对于非线性评分, 见等式 (6), 详情如下:

$$SLN = \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b} \quad (6)$$

其中 SLN 是土壤变量的非线性分数, 范围在 0 到 1 之间, a 是本研究中等于 1 的最高分数, x 是土壤变量的值, x_0 是整个数据集的变量的平均值, b 是方程的斜率, 对于“越多越好”曲线, SLN 为 2.5 时, 对于“越少越好”曲线, SLN 为 2.5 时^[36-37]。

1.5 数据处理与制图

本文采用 Microsoft Excel 2019、Origin Pro 2020、SPSS 26 和 ArcGIS 10.6 进行数据统计、分析和制图。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质的基本特征

研究区的土壤有机质范围为 $1.2 \sim 48.7 \text{ g kg}^{-1}$ (表 1), 参照全国第二次土壤普查的分级标准属于 4~6 级。土壤 pH 的范围 $6.8 \sim 9.2$, 大部分偏碱性, 速效钾范围在 $5 \sim 720 \text{ mg kg}^{-1}$ 之间, 各个级别均包含在内。有效磷变异系数最大, 表明其有很强的空间异质性, 土壤速效磷也是反映土壤质量变化最为敏感的指标。土壤 pH 变异系数较小, 表明潮土区不同管理措施下土壤的酸碱度的变化不大。所测得的土壤指标变异系数除了土壤 pH 外, 都在大于 10, 均属较高变异。现有研究表明^[38], 土壤 pH 的变异性相对较低, 而土壤 AP 的变异系数很高, 在大小为 $2.5 \times 4.0 \text{ km}$ 的区域内, 土壤 AP 的变异系数高达 199%。根据变异系数划分变异程度^[39], 分类范围为: $CV < 10\%$ 时, 弱变异性; $CV > 100\%$ 时, 强变异性; 当 $10\% < CV < 100\%$ 时, 属于中等变异性。从表中可知, 河北省中部潮土区土壤 pH 属于弱变异性, 其余指标都属于中等变异性; 有效磷、阳离子交换量、有机质、土壤的速效养分的变异系数都较大, 表明潮土区不同管理措施主要影响了土壤速效养分, 而

表 1 土壤指标的描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of soil indices

土壤特性 Soil property	最小值 Minimum value (mg kg ⁻¹)	最大值 Maximum value (mg kg ⁻¹)	均值 Average value (mg kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation (mg kg ⁻¹)	变异系数 Coefficient of variation (%)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
土壤pH	6.80	9.20	8.01	0.32	3.95	-0.14	-0.02
有机质	1200.00	48700.00	12430.00	4070.00	32.75	1.10	3.55
水解性氮	0.30	201.00	69.52	29.09	41.84	-0.14	0.23
缓效钾	160.00	1775.00	781.59	169.05	21.63	0.22	0.28
速效钾	5.00	720.00	123.17	58.15	47.21	2.57	12.92
水溶态硼	0.12	9.98	1.16	0.55	47.67	2.64	24.21
有效锌	0.02	9.07	1.38	0.87	63.15	2.23	9.35
有效铜	0.19	25.28	1.79	1.28	71.55	8.81	116.90
有效铁	1.00	38.60	9.94	4.64	46.64	1.08	0.91
有效锰	0.90	32.10	12.07	3.38	27.98	0.77	1.16
有效硫	0.10	275.80	33.31	19.49	58.50	2.35	16.04
有效磷	0.10	165.10	14.79	11.37	76.85	2.95	16.40
全氮	30.00	3600.00	680.00	200.00	29.57	1.19	8.70
作物单产	125.00	600.00	226.64	47.70	21.05	1.08	27.78

作物吸收养分的直接来源就是速效养分，因此，在不同管理措施下，作物的生长发育会受到一定的影响。

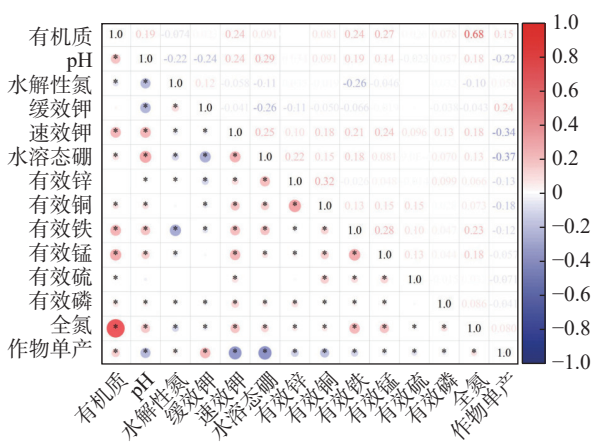
2.2 土壤养分指标的相关性分析

对研究区 6216 个取样点的土壤养分指标和作物产量进行了相关性分析 (图 2)。作物产量与所有的指标都存在显著的相关性，其中作物单产与有机质、全氮和缓效钾含量显著正相关 ($P < 0.05$)，与土壤 pH、水溶态硼、有效铜、有效锌和有效铜含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)；有机质与有效铁、有效锰、速效钾含量和土壤 pH 呈显著的正相关 ($P < 0.05$)；土壤 pH 与水解性氮和缓效钾含量呈显著的负相关 ($P < 0.05$)；速效钾与有效铁、有效锰、有效铜和水溶态硼含量呈显著的正相关 ($P < 0.05$)。

择适当的变量来创建 SQI 的 MDS (表 2)。首先对这 12 个指标进行偏相关度 KMO 检验。KMO 值是 0.678, $P < 0.001$, 说明指标之间存在相关性, 适合进行因子分析。然后, 选择特征值大于 1 的主成分, 共选择了 6 个大于 1 的主成分, 累计贡献率 66.50%; 在每个特征值 ≥ 1 的主成分 (PC) 中, 选择接受最大载荷的 10% 以内的载荷值的变量, PC-1 筛选了有机质和全氮, PC-2 筛选了缓效钾, PC-3 筛选了有效铁和水解性氮, PC-4 筛选了有效锌和有效铜, PC-5 筛选了有效磷, PC-6 筛选了有效硫。当每组中保留多个变量时, 检查变量之间的相关性, 以确定是否还有其他变量是冗余的。如果每组内的变量之间存在显著相关性, 则将保留具有最高 Norm 值的变量。由于第一组有机质与全氮的相关性较高, 第四组中有效锌和有效铜的相关性较高, 而有机质的 Norm 值和有效锌更高, 故而去除了全氮和有效铜。最终选择的最小数据集是有机质、缓效钾、有效铁、水解性氮、有效锌、有效磷、有效硫含量。

2.4 土壤质量评价方法比较

鉴于不同的土壤质量评估方法在本研究中被证明能够产生准确的评价和应用实用性, 基于最小数据集对这两种方法的适用性进行了测试。通常使用两个数据集之间的评价结果的一致性来评估最小数据集的应用 [12,32], 基于交叉验证, 比较了六种土壤质量评估方法 (SQIw-L, SQIw-NL, SQIn-L, SQIn-NL, SQIa-L 和 SQIa-NL)。总体而言, 采用不同方法计算的土壤质量空间分布趋势相似 (图 3), 但评估结果局部存在明显差异。当使用相同的指标体系时, 线性评分方法的结果不如非线性方法 (图 3)。



注: $P < 0.05$, 圆圈大小表示相关性的强弱。

图 2 指标的相关性热图

Fig.2 Correlation heat map of indices

2.3 典型潮土区最小数据集的建立

运用主成分分析 (PCA) 作减少变量工具, 以选

表 2 土壤指标主成分分析的结果
Table 2 The results of principal component analysis of soil indices

土壤特性 Soil property	主成分变量 (荷载值) Principal component variable						公因子方差 Communality	TDS权重 TDS weight	MDS权重 MDS weight	Norm值 Norm
	PC-1	PC-2	PC-3	PC-4	PC-5	PC-6				
有机质	0.90	0.02	0.12	-0.00	0.13	0.03	0.83	0.10	0.17	1.22
全氮	0.90	0.11	0.06	0.05	0.03	-0.01	0.83	0.10		1.18
有效硫	0.02	-0.02	-0.02	0.03	-0.02	0.90	0.80	0.09	0.16	0.88
有效锌	0.02	0.12	-0.13	0.81	0.13	-0.19	0.74	0.09	0.15	0.92
有效铜	0.05	0.03	0.16	0.78	0.01	0.26	0.78	0.08		0.90
水解性氮	0.00	-0.22	-0.73	0.01	0.27	0.19	0.69	0.08	0.14	0.90
有效磷	0.07	0.03	-0.12	0.07	0.79	-0.21	0.66	0.08	0.13	0.60
缓效钾	0.01	-0.78	0.09	-0.03	0.10	-0.03	0.63	0.07	0.13	0.90
有效铁	0.16	0.05	0.73	0.02	0.21	0.12	0.63	0.07	0.13	0.90
速效钾	0.10	0.23	0.24	0.07	0.60	0.30	0.57	0.07		0.76
水溶态硼	0.01	0.64	0.12	0.24	0.22	-0.02	0.53	0.06		0.93
pH	0.16	0.63	0.28	-0.07	0.11	-0.04	0.52	0.06		0.93
有效锰	0.34	-0.08	0.42	0.11	0.40	0.21	0.51	0.06		0.81
特征值	1.79	1.55	1.47	1.36	1.34	1.13				
贡献率%	13.80	11.93	11.32	10.46	10.30	8.70				
累积贡献率%	13.80	25.72	37.04	47.50	57.80	66.50				

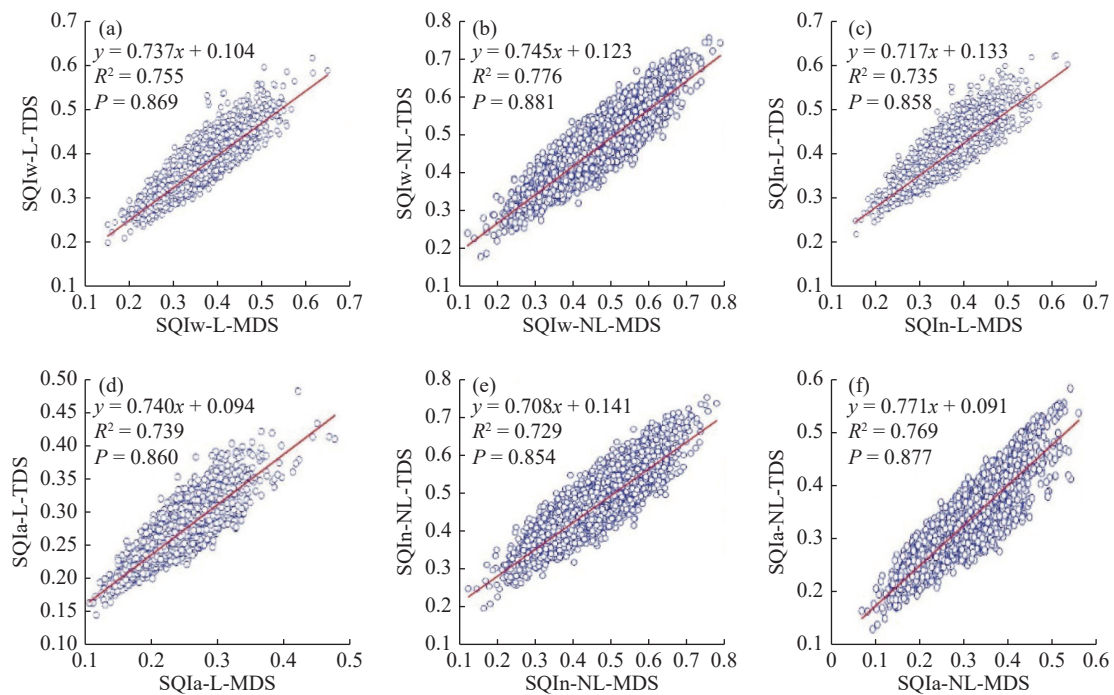


图 3 不同模型的 TDS 和 MDS 指标方法之间的线性关系

Fig.3 The linear relationship between TDS and MDS indicator methods for different models

比较不同的指标,发现在相同的计分方法下, SQIw 中 TDS 和 MDS 的一致性高于 SQIn 和 SQIa。不同指标方法之间的线性关系表明 MDS 和 TDS 在所有模型中都有较高的相关系数,并且在交叉验证测试的结果中以相似的趋势表示: SQIw-NL ($R^2 = 0.881$) > SQIa-NL ($R^2 = 0.877$) > SQIw-L ($R^2 = 0.869$) > SQIa-L ($R^2 = 0.860$) > SQIn-L ($R^2 = 0.858$) > SQIn-NL ($R^2 = 0.854$)。此外,使用非线性评分法时,

SQI 分布范围更广,这使得不同耕地水平之间的差异更加显著。

2.5 土壤质量评价

由于基于非线性评分方法的 TDS 和 MDS 之间具有良好的 consistency,因此选择非线性 SQIw 指数来评估研究区域内农田的土壤质量。通过汇总网格正方形的总数(每个网格正方形为 30×30 m)来计算每个等级的面积。

将十三种代表性土壤特性定义为 TDS 指标，以评估土壤质量。表 1 显示了采样点上不同指标的范围值，标准偏差和变异系数 (CV)。由于有机质、全氮、速效钾和有效磷值较高，因此研究中的土壤养分水平良好。土壤的 pH 值 (6.8 ~ 9.2) 从中性到碱性，变化不大。在研究区域中观察到微量元素的显著变化，并且有效铜、有效铁和有效锌均具有较高的变异系数。根据主成分分析 (表 2)，SOM 和 TN 在 TDS 中的权重最高 (0.096)，SOM 在 MDS

中的权重也最高 (0.168) (表 2)。由于变异系数较小 (表 1)，因此土壤 pH 显示出较低的权重 (表 2)。

2.6 土壤质量的空间分异

研究区的土壤质量主要由中等等级 II, III 和 IV 等级主导, V 级的比例高于 I 级 (图 4)。通过两种指标方法获得的结果在空间分布上是一致的: SQI 从南到北减少, 南边的献县的土壤质量较高, 北部的任丘市土壤质量相对较差。

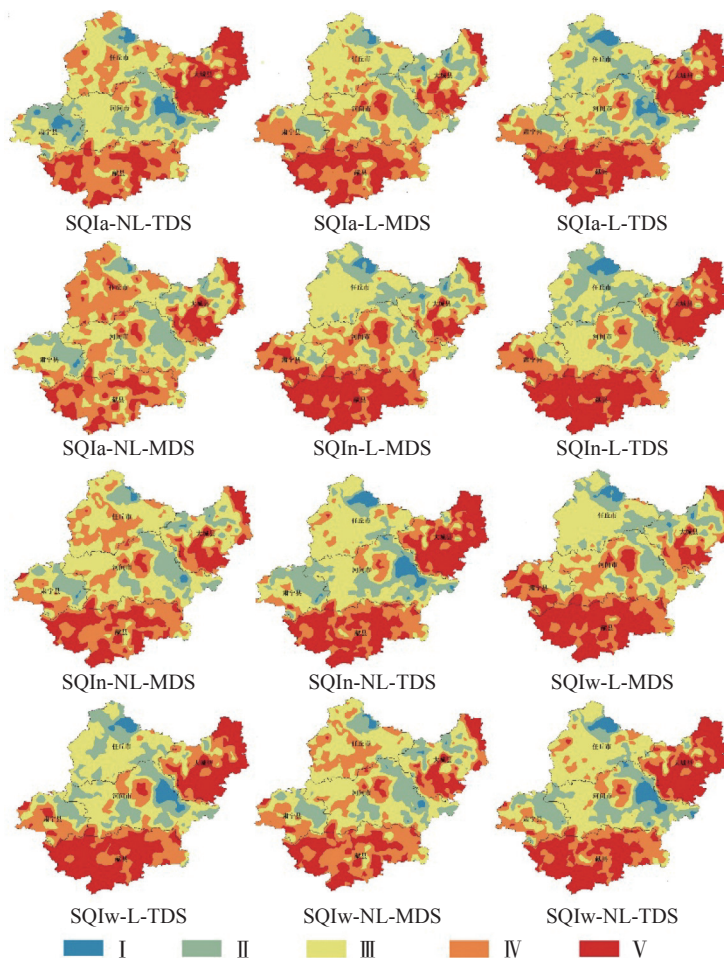


图 4 研究区域中的 SQI 分布图
Fig.4 The distribution of SQI in the study area

研究区的自然环境条件相近，对土壤质量影响较小。鉴于土壤质量在空间上有较大的差别，且不同样点之间的种植制度存在差异，因此分析典型种植制度对土壤质量的影响。结果表明，不同种植制度土壤质量的大小顺序为小麦—玉米/豆 > 花生 > 麦—玉米 > 棉花 > 玉米。小麦—玉米/豆轮作的土壤质量相对较高，其次是花生。在空间上，小麦—玉米/豆轮作主要分布于研究区的南部，而南部的土壤

质量相对较高，因此，不同种植制度对典型潮土区的土壤质量产生了较大的影响，轮作提高了潮土区南部的土壤质量 (图 5)。

3 讨论

3.1 研究区的土壤质量

在本研究中，有机质与有效铁、有效镁、速效钾含量和土壤 pH 呈显著的正相关 ($P < 0.05$)，土

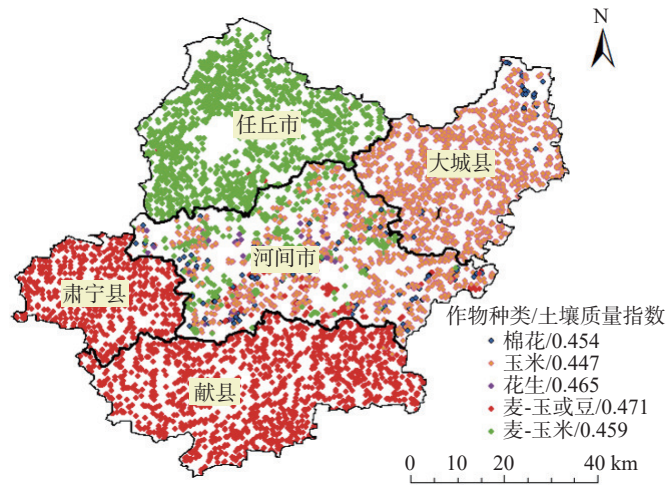


图5 典型种植制度的土壤质量指数以及空间分布图

Fig.5 Soil quality indices and spatial distribution maps of typical cropping systems

壤 pH 与水解性氮和缓效钾含量呈显著的负相关 ($P < 0.05$), 速效钾与有效铁、有效锰、有效铜和水溶态硼含量呈显著的正相关 ($P < 0.05$), 这与其他区域的研究结果一致^[39-40]。其中土壤有机质与全氮含量之间存在极显著正相关, 这是由于 SOM 主要来源于动植物残体分解, 为土壤提供有机氮的同时提高了土壤微生物群落多样性, 使微生物量碳、氮和土壤养分含量提高^[26]。土壤中微量元素含量也可以表征土壤肥力的特征, 对于提高作物产量和品质有重要意义, 其直接关系到作物的经济产量^[41-42]。土壤中的铜 (Cu)、锌 (Zn)、铁 (Fe)、锰 (Mn)、硼 (B) 等是农作物生长所必需的元素, 它们大部分会直接参与植物体内生理和生物化学过程, 是叶绿体和酶的主要构成元素, 参与植株的生理代谢^[43], 因此, 本研究中 MDS 加入部分元素。研究表明, 土壤中有效态元素 Cu 和 Fe 与 SOM 含量相关性较强^[44], 是因为果园 SOM 中的酸性基团能够使土壤中的微量元素活化, 进而提高了微量元素的有效性^[45], 同时土壤中的 Cu、Zn、Fe 含量互相存在极显著正相关 ($P < 0.01$)。土壤中有效铜与有效锌含量之间呈极显著正相关^[46], 主要原因是受母质的影响, 因为 Cu 与 Zn 都是亲 S 元素^[47]。有效铁与有效锰含量之间存在较为显著的正相关, 这与喻阳华等研究结果一致^[48], 原因是 Mn 是亲 Fe 元素。

华北典型潮土区的最小数据集是有机质、缓效钾、有效铁、水解性氮、有效锌、有效磷、有效硫含量。前人使用频率最高的 10 个 MDS 评价指标^[49], 本研究中最小数据集 7 个评价指标中, 有机质和有

效磷含量属于使用频率最高的 10 个 MDS 评价指标, 这主要是由于大多数 MDS 未考虑微量元素, 原因是微量元素的空间变异性较低, 而本研究在 MDS 中加入了微量元素指标可使研究结果更为精确。本研究中有有效铁、有机质、有效磷含量 3 个指标与赵贺等^[50]对江苏省稻麦轮作区进行土壤质量评价中有机质、有效磷、速效钾、有效铁和有效硼含量进入 TDS 的结果一致; 有机质、有效磷、有效锌和水解性氮 (碱解氮) 含量 4 个指标与刘金山等^[51]关于水旱轮作区的研究结果中有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、有效硼、有效钼和有效锌含量进入最小数据集的结果一致, 证明本研究结果具有可靠性。此外, 由于样本量过大, 考虑到成本问题, 本文评价指标体系偏向于土壤化学指标, 缺乏物理指标和生物指标, 存在一定的局限性。

3.2 评分方法和指数法选取

当使用相同的指标体系时, 虽然剔除了较高和较低的值, 线性评分方法的结果仍然不如非线性评分方法, 这与目前已有研究结果具有一致性^[52-53]。由于线性计分方法的结果很大程度上受到每个指标方差的影响, 如果不剔除高分或低分, 随后的分数将会不合理地倾斜^[12]。因此, 无论是在农学领域还是在其他环境领域, 使用线性评分往往都是不合理的^[12]。但在种植作物秸秆产生的生物炭对土壤质量影响的研究中^[54], 线性评分方法的结果优于非线性评分方法, 两种方法的 SQI 之间具有较高的相关性 ($r > 0.60$), 在评价森林砍伐和集约农业的土壤质量的研究中, 发现线性评分系统对所有 SQI 的一致性值更高^[54-55]。

因此,在特殊的条件下,优先筛选评分方法有助于高效评价土壤质量。

在众多的土壤质量评价方法中, SQI 以其简单、灵活的特点得到了广泛的应用。但是,对于不同的区域,不同的 SQI 的效果不同。比较不同的指标,发现在相同的计分方法下, SQI_w 中 TDS 和 MDS 的一致性高于 SQI_n 和 SQI_a, 这说明 SQI_w 和 NL 方法适用于典型潮土区的土壤质量评价,但在评价伊朗北部森林砍伐和集约农业的土壤质量的研究中^[55], SQI_n 法要优于其它两种方法,表明对于不同的区域,评价方法优先级不同。

3.3 轮作与土壤质量的关系

华北典型潮土区的土壤质量存在空间异质性。本研究中小麦—玉米/豆轮作的土壤质量相对较高,其次是花生。小麦—玉米/豆轮作主要分布于研究区的南部,而南部的土壤质量相对较高,因此,不同种植制度对典型潮土区的土壤质量产生了较大的影响。植被覆盖类型可以对土壤特性产生正向或负向影响^[56],主要是由于凋落物和根系分泌物向土壤中输入的有机物的质量和数量^[57]。多数研究表明轮作显著提高了马铃薯连作田有机质、碱解氮、有效磷含量,提升土壤质量^[58]。但张智勇等^[59]研究发现,轮作降低了土壤中有效磷含量。本研究结果与前者相似,小麦-玉米/豆轮作增加了土壤中有有机质和有效磷含量,提高了土壤质量。这是由于玉米—大豆轮作种植体系增强了土壤酶活性,提高了土壤微生物群落的多样性,改变了根际土壤微生物群落功能利用能力和碳源的利用种类,进而提升土壤质量^[60]。武晓森^[61]研究也表明小麦—玉米轮作结合施肥处理不仅增加了土壤中细菌的数量,而且增加了土壤中细菌的多样性,提升土壤质量。

4 结论

(1) 河北省中部潮土区土壤 pH 属于弱变异性,其余指标都属于中等变异性;有效磷、CEC、有机质、土壤的速效养分含量的变异系数较大,表明在不同管理措施下,潮土区的土壤速效养分指标受到一定的影响,同时速效养分也是作物吸收养分的直接来源,因此不同管理措施一定程度下影响了作物的生长发育。

(2) 作物单产与有机质、全氮和缓效钾含量显著正相关,与土壤 pH、速效钾、水溶态硼、有效铜、

有效锌和有效铜含量呈显著负相关;典型潮土区最小数据集是有机质、缓效钾、有效铁、水解性氮、有效锌、有效磷、有效硫含量;采用 SQI_w-NL 评分更适合潮土区的土壤质量评价。

(3) 研究区的土壤质量主要由中等等级 II、III 和 IV 等级主导。SQI 从南到北减少,位于南边的献县的土壤质量较高,北部的任丘市土壤质量相对较差;不同的种植制度显著影响了典型潮土区的土壤质量,不同种植制度土壤质量的大小顺序为:小麦—玉米/豆 > 花生 > 麦—玉米 > 棉花 > 玉米。

参考文献:

- [1] Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment[M]. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy: 1994.
- [2] Obade V, Lal R. A standardized soil quality index for diverse field conditions[J]. Science of The Total Environment, 2015, 541: 424 – 434.
- [3] Larson W E, Pierce F J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management[J]. Defining Soil Quality for A Sustainable Environment, 1994.
- [4] Ditzler C A, Tugel A J. Soil quality field tools[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(1): 33 – 38.
- [5] Zahedifar M. Assessing alteration of soil quality, degradation, and resistance indices under different land uses through network and factor analysis[J]. Catena, 2023, 222: 106807.
- [6] Andrews S S, Karlen D, Mitchell J. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2002, 90(1): 25 – 45.
- [7] Nabiollahi K, Golmohamadi F, Taghizadeh-Mehrjardi R, et al. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate[J]. Geoderma, 2018, 318: 16 – 28.
- [8] Nabiollahi K, Taghizadeh-Mehrjardi R, Eskandari S. Assessing and monitoring the soil quality of forested and agricultural areas using soil-quality indices and digital soil-mapping in a semi-arid environment[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2018, 64(5): 696 – 707.
- [9] Rahmanipour F, Marzaioli R, Bahrami H A, et al. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran[J]. Ecological Indicators, 2014, 40: 19 – 26.
- [10] Zhang G, Bai J, Xi M, et al. Soil quality assessment of coastal wetlands in the Yellow River Delta of China based on the minimum data set[J]. Ecological Indicators, 2016, 66: 458 – 466.
- [11] Karlen D L, Andrews S S, Weinhold B J, et al. Soil quality: Humankind's foundation for survival[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 58(4): 171 – 179.

- [12] Herrick J E. Soil quality: an indicator of sustainable land management?[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15: 75 – 83.
- [13] Andrews S S, Karlen D L, Cambardella C A. The soil management assessment framework[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 1945 – 1962.
- [14] Podwika M, K Sole k-Podwika, Kaleta D, et al. The effect of land-use change on Urban grassland soil quality (Southern Poland)[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 20(4): 473 – 483.
- [15] 梅楠, 谷岩, 李德忠, 等. 基于最小数据集的吉林省黑土耕层土壤质量评价[J]. *农业工程学报*, 2021, 37 (12): 91 – 98.
- [16] 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.
- [17] 刘湘君, 乔冠宇, 郭丰浩, 等. 基于最小数据集的黄淮海旱作区耕层土壤质量评价及障碍分析[J]. *农业工程学报*, 2023 , 39 (12): 104-113.
- [18] 钟 鑫, 乔云发, 赵红飞, 等. 基于多元线性回归的东北风沙土耕层土壤质量评价[J]. *安徽农业科学*, 2020, (2): 10 – 12.
- [19] 陈正发, 史东梅, 金慧芳, 等. 基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 256 – 164.
- [20] 张 沛, 李 毅. 偏最小二乘回归方法提取土壤质量单项评价指标初探[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(5): 72 – 78.
- [21] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [22] 曹志洪, 周健民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [23] 张金涛, 卢昌艾, 王金洲, 等. 潮土区农田土壤肥力的变化趋势 [J]. *中国土壤与肥料*, 2010, (5): 6 – 10.
- [24] 钦绳武, 顾益初. 潮土肥力演变与施肥作用的长期定位试验初报[J]. *土壤学报*, 1998, 35(3): 367 – 375.
- [25] 杨玉建, 杨劲松. 潮土区土壤有机质含量的趋势演变研究——以禹城市为例[J]. *土壤通报*, 2005, (5): 647 – 651.
- [26] 王 乐, 张淑香, 马常宝, 等. 潮土区29年来土壤肥力和作物产量演变特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 25 – 34.
- [27] Askari M S, Holden N M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management[J]. *Geoderma*, 2014, 230-231: 131 – 142.
- [28] Fang B, Lee X, Zhang J, et al. Impacts of straw biochar additions on agricultural soil quality and greenhouse gas fluxes in karst area, Southwest China[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2016, 62(5-6): 1 – 8.
- [29] Raiesi F, Kabiri V. Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 198 – 207.
- [30] Nabiollahi K, Taghizadeh-Mehrjardi R, Kerry R, et al. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 482 – 494.
- [31] Nabiollahi K, Taghizadeh-Mehrjardi R, Eskandari S. Assessing and monitoring the soil quality of forested and agricultural areas using soil-quality indices and digital soil-mapping in a semi-arid environment[J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*. 2017, 64(5): 696-707.
- [32] Qi Y, Darilek J L, Huang B, et al. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China[J]. *Geoderma*, 2009, 149(3-4): 325 – 334.
- [33] Cheng J, Ding C, Li X, et al. Soil quality evaluation for navel orange production systems in central subtropical China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 155: 225 – 232.
- [34] Guo L L, Sun, Z, Ouyang Z, et al. A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River[J]. *Catena*, 2017, 152: 135 – 143.
- [35] Raiesi F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 307 – 320.
- [36] Sinha S, Mastro R E, Ram L C, et al. Rhizosphere soil microbial index of tree species in a coal mining ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(9): 1824 – 1832.
- [37] Zhang C, Xue S, Liu G B, et al. A comparison of soil qualities of different revegetation types in the Loess Plateau, China[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347: 163 – 178.
- [38] Tsegaye T, Hill R L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth, and nutrient uptake measurements[J]. *Soil Science*, 1998, 163(2): 143 – 154.
- [39] 邓邦良, 袁知洋, 温卫华, 等. 武功山山地草甸土壤有机质、全氮及碱解氮分布格局及关系[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(11): 414 – 417.
- [40] 景宜然, 邓湘雯, 邓东华, 等. 湘西南不同石漠化程度土壤理化性质及相关性分析[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 189 – 195.
- [41] 武 婕, 李玉环, 李增兵, 等. 南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1596 – 1605.
- [42] 刘建明, 亓昭英, 刘善科, 等. 中微量元素与植物营养和人体健康的关系[J]. *化肥工业*, 2016, 43(3): 85 – 90.
- [43] Zhang X P, Wei D, Yang X M. The background concentrations of 13 soil trace elements and their relationships to parent materials and vegetation in Xizang (Tibet), China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21(2): 167 – 174.
- [44] 董鹏, 潘 琪, 袁嘉玮. 苹果园土壤有效态微量元素与有机质的关系分析[J]. *山西农业科学*, 2020, (6): 952 – 955.
- [45] 赵串串, 王 媛, 高瑞梅. 青海省黄土丘陵区主要林分土壤微量元素丰缺状况研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(3): 130 – 135.
- [46] 姜 北, 未红红, 王 森, 等. 河北麻山药种植区土壤微量元素空间变异研究[J]. *北方园艺*, 2013, (13): 188 – 191.
- [47] 李广文, 张福平, 冯 起, 等. 西咸地区土壤重金属特征及土壤性质关系分析[J]. *土壤通报*, 2015, 46(5): 1259 – 1263.
- [48] 喻阳华, 杨丹丽, 钟欣平. 黔中喀斯特区典型土地利用类型的土

- 壤亲合性元素特征[J]. *地球与环境*, 2019, 47(4): 429 – 435.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] Li P, Wu M C, Kang G D, et al. Soil quality response to organic amendments on dryland red soil in subtropical China[J]. *Geoderma*, 2020: 373.
- [53] Mukhopadhyay S, Mastro R, Yadav A, et al. Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 542(15): 540 – 550.
- [54] Bilgili A V, Aydemir S, Altun O, et al. The effects of biochars produced from the residues of locally grown crops on soil quality variables and indexes[J]. *Geoderma*, 2019, 345: 123 – 133.
- [55] Mojtaba Z, Esmaeil B, Mehdi H, et al. Assessing the effects of deforestation and intensive agriculture on the soil quality through digital soil mapping[J]. *Geoderma*, 2020: 363.
- [56] Selvaraj S, Duraisamy V, Huang Z J, et al. Influence of long-term successive rotations and stand ages of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations on soil properties[J]. *Geoderma*, 2017, 306: 127 – 134.
- [57] Miao Y, Dan Y, Xuan Y. Soil microbial communities and enzyme activities in sea-buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) plantation at different ages[J]. *Plos One*, 2018, 13(1): e0190959.
- [58] 张海斌. 轮作模式对马铃薯生育、土壤养分和产质量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [59] 张智勇, 董秀秀, 王绍明, 等. 不同连作障碍消减措施对新疆棉花根系形态生理特征的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 140(4): 162 – 169.
- [60] 丁俊男, 王 慧, 于少鹏, 等. 玉米-大豆轮作对土壤酶和根系微生物群落多样性的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2021, (4): 11 – 16.
- [61] 武晓森. 小麦—玉米轮作体系中不同施肥制度对土壤微生物特性的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2014.

Comprehensive Evaluation of Soil Quality in Typical Fluvo-aquic Soil Region of North China

XU Yong-bing^{1,3}, ZHANG Tian-peng¹, LEI Qiu-liang^{1*}, ZHANG Shu-xiang¹, PAN Jun-ting¹,
WU Shu-xia¹, DU Xin-zhong¹, QIU Shi⁴, SUN Fu-jun², LIU Hong-bin¹

(1. State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China, Key Laboratory of Non-point Source Pollution Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ National Field Station of Soil Quality, Changping, Beijing 100081, China; 2. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 3. Shenzhen Yuanqing Environmental Technology Service Co., Ltd, Shenzhen 518055, China; 4. Neusoft Corporation, Shenyang 110170, China)

Abstract: [Objective] In order to select suitable evaluation methods for soil quality in typical fluvo-aquic soil region, soil quality under different planting systems was evaluated. [Method] The typical fluvo-aquic region of North China was taken as the study area, combined the measured and investigation data, the principal component analysis method was used to select the minimum data. Based on the two scoring methods of linear and nonlinear and three different soil quality index methods of SQIa, SQIw and SQIn, the optimal method was selected to evaluate the soil quality under different planting systems in typical fluvo-aquic area. [Result] ① Descriptive statistical analysis showed that the coefficient of variation of soil pH in the fluvo-aquic soil region of central Hebei Province belongs to weak variability, while the other indices belong to moderate variability, and the coefficients of variation of available phosphorus, cation exchange capacity, organic matter and soil available nutrients are relatively large. ② Correlation studies showed that crop yield per unit area was significantly positively correlated with organic matter, total nitrogen and slowly available potassium, and negatively correlated with available potassium, water-soluble boron, pH, available copper, available zinc and available copper. ③ The results showed that the minimum data set of typical fluvo-aquic soil area were organic matter, slowly available potassium, available iron, hydrolytic nitrogen, available zinc, available phosphorus and available sulfur. The correlation between MDS and TDS by different methods is as follows: SQIw-NL > SQIa-NL > SQIw-L > SQIa-L > SQIn-L > SQIn-N. ④ The spatial characteristics showed that the soil quality in the study area was mainly dominated by medium grade II, III and IV. The soil quality index (SQI) decreased from south to north. ⑤ Land use research showed that the order of soil quality of different planting systems was as follows: wheat-corn / bean > peanut > wheat-corn > cotton > corn. [Conclusion] The best soil quality evaluation method in the fluvo-aquic soil region of North China is SQIw-NL method, and the minimum data set are organic matter, slowly available potassium, available iron, hydrolytic nitrogen, available zinc, available phosphorus and available sulfur. Different management measures affect the growth and development of crops to a certain extent, and wheat-corn / bean rotation can improve soil quality, and the soil quality of Xianxian County is relatively higher.

Key words: Fluvo-aquic area; Soil quality evaluation; Minimum data set; Planting system

[责任编辑: 裴久渤 高晓丹]