

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.02.022

江胜国, 肖蒙, 刘广明, 等. 天津小站稻种植区土壤质量综合评价. 土壤, 2022, 54(2): 371–378.

天津小站稻种植区土壤质量综合评价^①

江胜国¹, 肖蒙², 刘广明^{2*}, 詹华明^{1*}, 王志刚¹, 王西玉¹

(1 天津市地质研究和海洋地质中心, 天津 300170; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 为了解天津小站稻种植区土壤养分水平与肥力状况, 本次调查分析了稻田土壤 pH、盐分、有机质、速效量和全量氮磷钾、铜锰硫等中微量元素共 24 项指标, 通过主成分分析法对土壤质量进行综合评价。结果表明: 研究区土壤 pH 介于 7.80~8.95, 平均盐分含量为 1.6 g/kg, 有机质、全氮与碱解氮含量属于中下水平, 钾素含量丰富而磷素缺乏, 中微量元素铜、锰、硫含量比较丰富; 铜、硫、锌等与土壤速效钾及脲酶活性呈显著正相关, 锰与酶活性和土壤速效养分呈显著负相关; 利用最小数据集方法筛选得到有机质、速效钾、盐分等 11 个主要评价指标组成最小数据集, 与全量数据集具有显著相关性。综合评价结果显示, 处于 I 等级和 II 等级质量水平的土壤面积占研究区面积的 55.14%, 有机质、全钾及有效铜含量丰富, 土壤质量综合评价结果较优, 建议对土壤增加盐碱改良措施并补施磷肥。本研究可为提高小站稻耕作区土壤质量提供重要理论依据, 助力天津市小站稻振兴战略。

关键词: 天津小站稻; 土壤质量; 主成分分析; 综合评价

中图分类号: S153.61 **文献标志码:** A

Comprehensive Evaluation of Soil Quality in Xiaozhan Rice Planting Area of Tianjin

JIANG Shengguo¹, XIAO Meng², LIU Guangming^{2*}, ZHAN Huaming^{1*}, WANG Zhigang¹, WANG Xiyu¹

(1 Tianjin Geology Research and Marine Geological Center, Tianjin 300170, China; 2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: In order to understand soil nutrients and fertility of Tianjin Xiaozhan rice planting area, this study analyzed 24 indicators of paddy soil such as pH, salinity, organic matter, total N, P and K, available nutrients (N, P, K, Cu, Fe, Mn, Zn, Ni, B, Mo, Si, Se, F, S) etc., and then evaluated comprehensively soil quality based on PCA (principal component analysis). The results showed that pH was 7.80–8.95; salt was meanly 1.6 g/kg; organic matter, total and alkali-hydrolyzated N were below the average level; K was rich but P deficient; Cu, Mn and S were abundant; Cu, S and Zn were positively correlated with available K and enzyme activities, but Mn was negatively correlated with other available nutrients and enzyme activities; the minimum data set, which including 11 main evaluation indicators such as organic matter, available K and salinity etc., was significantly correlated with the full data set. The comprehensive evaluation results showed that 55.14% of the soil area was in the grade I and II of soil quality, in which, organic matter, total K and available Cu were rich, soil quality were better, and it was suggested to improve saline soil and apply P fertilizer. The research results can provide important theoretical basis for improving soil quality of this study area, and promote the strategy of revitalization of the Tianjin Xiaozhan rice.

Key words: Tianjin Xiaozhan rice; Soil quality; Principal component analysis; Comprehensive evaluation

土壤质量常被定义为土壤在自然生态系统中或土地利用边界范围内维持植物和动物生产力健康发展的能力^[1]。为系统定量地揭示土壤质量发展水平, 常需要一种或几种评价方法。土壤质量综合评价方法主要有综合指数法^[2]、模糊综合评价法^[3]和土壤质量

指数法等^[4-5]。其中, 土壤质量指数法能够充分考虑评价指标实测值、权重及指标间相互作用而被广泛使用^[6]。土壤质量评价中需考虑到多种土壤理化指标^[7], 如有机质、全氮等, 特殊的有无脊椎动物如线虫、蚯蚓等土壤动物指标, 它们可以反映土壤中有毒物质含

①基金项目: 国家自然科学基金项目(U1806215)、战略性国际科技创新合作重点专项(2018YFE0206403)和天津华北地质调查局科研项目(HK2020-B1Z)资助。

* 通讯作者(gmliu@issas.ac.cn; 393322378@qq.com)

作者简介: 江胜国(1982—), 男, 山东济宁人, 硕士, 高级工程师, 主要从事农业地质调查研究和土壤改良工作。E-mail: 273212714@qq.com

量^[8]。近年来,土壤微生物数量及酶活性指标也常作为主要评价指标之一^[9]。而考虑到以上众多评价指标时,容易模糊研究重点,需要根据研究目标有针对性地筛选最具代表性指标。

最小数据集(minimum data set, MDS)最早是由 Larson 和 Pierce 提出的一种土壤质量评价的工具,可以辅助筛选最能反映土壤质量的指标,反映出土壤质量最少的指标参数的集合^[10],常用来评估和监测耕地土壤质量变化^[11]。在构建 MDS 时常用到的方法有主成分分析法、聚类分析、典范对应分析等,其中,主成分分析法(PCA)可将多个变量转化为少数且包含信息不重复的综合指标,最大限度地保留原始数据信息,应用频率最高^[12-13]。目前,应用 PCA 构建 MDS 后结合土壤质量指数法已成为土壤质量评价研究中较常用的方法,还可结合 GIS 展现土壤质量等级分布^[14]。

天津地处华北平原北部,东临渤海,具有先天利于水稻生长的生态气候和地理位置。随着天津市稻作经济农业的不断发展,天津小站稻以其醇香口感、丰富营养价值在国内和天津市场都获得了较大的认可度和品牌影响力,天津小站稻的种植面积在 2021 年将达到 100 万亩(15 亩=1 hm²),主要分布在宝坻区和宁河区。目前对于天津小站稻生长条件的专项调查及影响因素研究未见系统性报道,为实现小站稻的提质增效,对天津稻田土壤质量及环境要素开展深入研究

是非常必要的。本次调查采集了小站稻适宜生长区的土壤样品,选取了土壤盐分、pH、有机质等共 24 项主要理化指标,并加入了与作物品质相关的土壤中微量元素指标,系统探讨了影响小站稻生长的土壤因素,采用主成分分析与最小数据集方法,筛选得到影响天津市小站稻的土壤质量主要指标,得出不同样点土壤质量综合得分并进行等级划分,综合评价了研究区土壤质量,将为小站稻种植推广及品质提升提供一定理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于天津小站稻产业振兴规划区内(图 1),面积约 160 km²,主要包括宝坻区黄庄镇及其周边区域,属于河流冲积型和滨海型平原地貌,地形以平原为主,其次为洼地,海拔从北部宝坻区到南部津南区逐渐下降。由于永定河冲击扇尾部向东缓慢倾斜,造成研究区西北高、东南部低的地势。南部由于地势低洼和第四纪经历海侵等原因,表层冲海积沉积层发育,土壤类型多为盐化潮土。

研究区属大陆性-暖温带半干旱、半湿润季风气候。主要受季风环流的支配,四季分明,春季多风、干旱少雨;夏季炎热、雨水集中;秋季气爽、冷暖适中;冬季寒冷、干燥少雪。年平均气温 11.4~12.9℃,

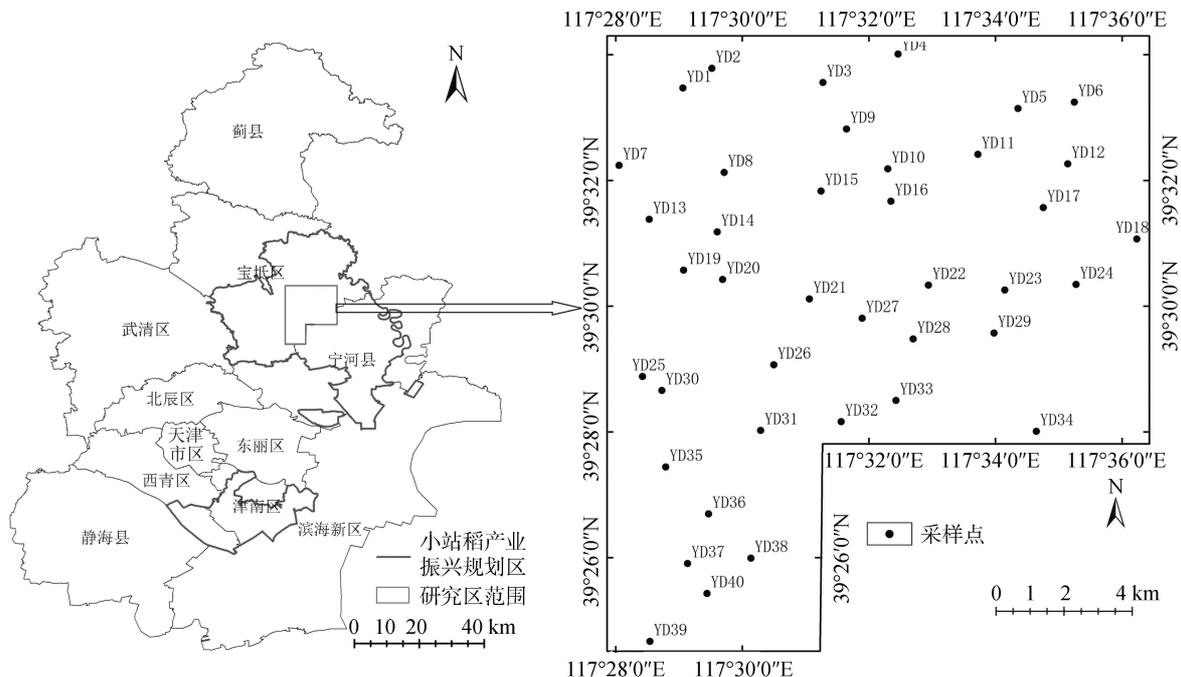


图 1 研究区位置及采样点分布图

Fig.1 Diagrams for study area and soil sampling sites

其中1月最低,平均气温为 $-3.0\sim-5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;7月最高,平均气温为 $25.9\sim 26.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。春季气温迅速回升,由3月的 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右回升至5月的近 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$;秋季气温下降明显,11份日平均气温降至 $4\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年平均降水量为 $520\sim 660\text{ mm}$,降水天数 $63\sim 70\text{ d}$ 。在地区分布上,山地多于平原,沿海多于内地;在季节分布上,6、7、8三个月份的降水量占全年的75%左右。年蒸发量为 $1\ 500\sim 2\ 000\text{ mm}$,全年以5月份蒸发量最大。年日照时数 $2\ 470\sim 2\ 900\text{ h}$,全年5月份日照最长,总辐射量也最大。7、8月份平均相对湿度最大,达80%。

1.2 样品采集与分析

在研究区采集40个样品($n=40$),采集层位为耕作层,采样深度为 $0\sim 20\text{ cm}$ 。区内每 4 km^2 设1个采样区,在每个采样区内,选定代表性点位,然后以代表性点位为中心等距(200 m)选定4个点位,采用“梅花采样法”多点取样,最后组合成一个样品,样品原始重量大于 $1\ 000\text{ g}$ 。

土壤分析测定方法均参照《土壤农化分析》^[11],测定指标包括:①盐分指标:全盐含量、电导率、脱盐率、pH、盐分八大离子组成等;②物理指标:渗漏速率、导水率、团粒结构、容重等;③养分指标:全氮、速效氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾、有机质、腐殖质等;④生物学指标:脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶;⑤地球化学特征:有效铜、有效铁、有效锰、有效锌、有效镍、有效硼、有效钼、有效硅、有效硒、有效氟、有效硫。

1.3 数据处理方法

采用 Excel 2010 进行数据处理与汇总, Origin 2019 绘图, SPSS 20.0 进行主成分降维与计算。

1.3.1 最小数据集筛选 选择与作物品质、产量具有显著相关性的指标进行土壤质量综合评价。由于土壤质量影响因子众多,选择最小数据集法对土壤质量影响因子进行筛选,其主要原理是利用主成分分析降维得到主要的主成分因子,根据每个主成分中载荷的高低(占比90%以上)得出主要土壤指标,其值越大对该主成分贡献越大,当某一个主成分中高因载荷变量只有一个时则该指标直接进入最小数据集;当高因子载荷变量不止一个时则对各变量分别做相关性分析,若相关系数均低($r<0.7$)时,各指标均被选入最小数据集,若相关系数出现高值($r>0.7$),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^[6,15]。

1.3.2 土壤质量综合评价 主成分因子载荷是主成分因子与原始变量因子之间的相关系数,根据主成

分分析得到初始因子载荷矩阵值 M ,主成分载荷矩阵除以主成分相对应特征值再开平方根,即为各个主成分中每个指标所对应的系数—特征向量。可由下列公式计算得:

$$U_i = M_i / \sqrt{\lambda_i} \quad (1)$$

式中: U_i 为每个主成分因子代表特征向量值, M_i 为每个主成分因子代表因子载荷矩阵值, λ_i 为每个主成分因子代表特征值。

在进行土壤质量综合评价时,可以利用主成分得分对不同级别土壤质量进行排序,各主成分的特征向量与各土壤指标标准化后数据的乘积之和得出各主成分得分,本次评价共采用土壤指标24个,为了更清楚直观地比较不同样点的土壤质量状况,需要计算各因子得分,即:

$$F_i = \sum A_i X \quad (2)$$

式中: A_i 是因子得分系数的第 i 列向量; X 为标准化后的土壤评价指标。

由上述方程可得到每个样点对应的主成分得分,形成主成分矩阵,最后根据每个主成分因子的权重得到综合质量评价,具体方程如下:

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

式中: F : 综合评价得分, F_i : 各主成分因子得分, W_i : 各主成分分子所占权重。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质及酶活性

由表1所示,研究区土壤电导率范围在 $400\sim 1\ 550\ \mu\text{S}/\text{cm}$,离散程度较大;pH介于 $7.80\sim 8.42$,均值为 8.04 ;平均盐分含量为 $0.97\text{ g}/\text{kg}$,变异系数为14%;有机质含量为 $12.10\sim 31.40\text{ g}/\text{kg}$,均值为 $20.09\text{ g}/\text{kg}$,变异系数为22%,属于弱变异,按照全国第二次土壤普查养分分级标准^[16],有机质含量位于土壤养分分级中的Ⅲ级,属于中等偏上的养分含量水平;全氮含量为 $0.84\sim 1.92\text{ g}/\text{kg}$,全磷含量为 $0.67\sim 1.15\text{ g}/\text{kg}$,均属于养分等级中的Ⅲ级水平;有效磷和碱解氮的平均含量分别为 $18.11\text{ mg}/\text{kg}$ 和 $83.64\text{ mg}/\text{kg}$,属于土壤养分等级中的Ⅳ级;全钾及速效钾含量丰富,为Ⅰ级水平;总体而言,研究区土壤处于有机质、全氮、磷素和pH均较高而土壤盐分含量较低的状况。

土壤酶活性是反映土壤新陈代谢强度的重要生化指标,影响土壤养分的有效性与植物吸收,可以客

表 1 土壤理化指标描述性统计($n=40$)
Table 1 Descriptive statistics of soil physiochemical indicators

指标	最大值	最小值	平均值	标准偏差	变异系数(%)
pH	8.42	7.80	8.04	0.12	1.55
电导率($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1 550.00	400.00	905.00	249.68	27.59
盐分(g/kg)	1.33	0.73	0.97	0.13	14.00
有机质(g/kg)	31.40	12.10	20.09	4.49	22.00
全氮 (g/kg)	1.92	0.84	1.30	0.24	18.67
全磷 (g/kg)	1.15	0.67	0.77	0.09	11.42
全钾 (g/kg)	25.40	20.40	22.53	1.22	5.42
速效钾 (mg/kg)	322.00	223.00	274.95	26.04	9.47
有效磷 (mg/kg)	43.10	9.10	18.11	6.51	35.96
水解性氮 (mg/kg)	154.00	52.50	83.64	19.68	23.53
过氧化氢酶 (U/g)	98.43	97.50	97.88	0.20	0.21
磷酸酶(nmol/(d·g))	9.35	1.19	4.22	2.05	48.56
脲酶 (U/g)	424.69	100.83	149.17	70.68	47.38

观地反映土壤肥力状况^[17], 常被作为评价土壤生物活性和土壤肥力的重要指标。土壤中的酶多来自微生物、土壤动物和植物根的根本微环境, 以脲酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶为典型代表, 揭示并反映土壤呼吸强度及促进磷素等养分的有效性^[18]。对小站稻种植区酶活性的调查显示(表 1), 过氧化氢酶活性平均为 97.88 U/g, 变异系数为 0.21%, 变化幅度较小; 磷酸酶范围在 1.19 ~ 9.35 nmol/(d·g), 变异系数为 48.56%, 为中强度变异; 脲酶活性与磷酸酶活性变化规律相同。

2.2 土壤中微量元素含量变化特征及规律

土壤中所含的中微量元素对植物的生长发育及循环过程具有重要的意义^[19]。对研究区的微量元素调查发现(表 2), 有效铜、有效锰和有效镍的分散程度较大, 变异系数较高(17%~33%)。其中, 有效铜平均含量为 5.68 mg/kg, 属高等水平; 有效锰平均含量为 41.73 mg/kg, 根据天津市土壤微量元素指标分级标准^[16]属于极高水平; 有效硒的含量最低, 在 0.01 ~ 0.023 mg/kg; 有效铁的含量在 77.8 ~ 214 mg/kg, 平均含量为 123.79 mg/kg, 属极高水平; 有效硅平均含量为 363.55 mg/kg, 水溶性氟含量在 18.7 ~ 25.7 mg/kg, 其他中微量元素变异程度较小。

2.3 土壤理化指标相关性分析

由土壤理化指标相关性分析得出(表 3), 电导率与 pH 之间为显著的负相关关系, 有机质与氮磷全量养分和速效养分均呈极显著正相关关系($P<0.01$), 而脲酶与 pH、磷酸酶呈极显著正相关关系($P<0.01$)。土壤理化指标与有效态微量元素之间相关性显示(表 4), 土壤盐碱指标如土壤 pH、电导率和水溶性盐主

要与有效锌、有效硼以及有效态硫呈显著的相关性; 脲酶活性与有效铜、有效锌、有效镍、有效硼呈极显著正相关($P<0.01$); 土壤有机质、全氮、碱解氮则与有效铁、有效铝、有效硅、有效硒及有效硫呈极显著或显著正相关, 而与有效锰呈极显著负相关($P<0.01$); 速效钾与有效态铜、铁、锌、镍、硼均呈现极显著正相关性($P<0.01$); 有效锰与有机质、全氮和碱解氮等呈显著的负相关($P<0.01$), 而与全钾和速效钾为显著正相关($P<0.05$)。

表 2 土壤微量元素指标描述性统计(mg/kg, $n=40$)
Table 2 Descriptive statistics of soil microelement indicators

指标	最大值	最小值	平均值	标准偏差	变异系数(%)
有效铜	7.41	3.81	5.68	0.97	17
有效铁	214.00	77.80	123.79	28.16	23
有效锰	77.00	23.90	41.73	13.70	33
有效锌	6.24	0.97	1.74	0.84	48
有效镍	0.72	0.35	0.55	0.10	18
有效硼	3.24	1.55	2.29	0.34	15
有效铝	0.35	0.11	0.20	0.05	28
有效硅	669.00	245.00	363.55	76.06	21
有效硒	0.023	0.01	0.02	0.00	22
水溶性氟	25.70	18.70	23.19	1.75	8
有效硫	345.00	105.00	210.05	67.17	32

2.4 土壤质量综合评价分析

2.4.1 评价指标与方法

基于数据调查及土壤养分与微量元素相关性分析, 选择土壤 pH、电导率、水溶性盐分等 3 个盐碱度指标, 有机质、全氮、全磷、全钾、速效钾、有效磷、碱解氮等 7 个土壤养分指标, 碱性磷酸酶、过氧化氢酶及脲酶等 3 个土壤酶活性指

表 3 土壤理化指标相关性分析
Table 3 Correlation of soil physiochemical indicators

	pH	电导率	水溶性盐	过氧化氢酶	磷酸酶	脲酶	有机质	全氮	全磷	全钾	速效钾	有效磷	碱解氮
pH	1												
电导率	-0.678**	1											
水溶性盐	0.199	0.038	1										
过氧化氢酶	0.262	-0.096	0.123	1									
磷酸酶	-0.035	-0.039	0.035	0.026	1								
脲酶	0.415**	-0.318*	0.279*	0.218	0.452**	1							
有机质	-0.198	0.132	0.113	0.174	0.367**	0.121	1						
全氮	-0.548**	0.423**	-0.119	0.078	0.224	-0.133	0.852**	1					
全磷	0.029	0.090	0.218	0.047	0.237	0.240	0.400**	0.202	1				
全钾	0.028	0.004	-0.046	-0.113	-0.070	0.022	-0.260	-0.334*	0.465**	1			
速效钾	0.611**	-0.491**	0.351*	-0.060	0.386**	0.524**	0.186	-0.256	0.385**	0.163	1		
有效磷	0.075	-0.076	0.204	0.118	0.385**	0.301*	0.546**	0.352*	0.732**	0.012	0.359**	1	
碱解氮	-0.514**	0.482**	-0.159	0.042	0.175	-0.200	0.782**	0.934**	0.155	-0.406**	-0.260	0.322*	1

注：*、** 分别表示相关性达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平，下表同。

表 4 土壤理化指标与有效态微量元素相关性分析
Table 4 Correlation between soil physiochemical indicators and available microelements

	pH	电导率	水溶性盐	过氧化氢酶	磷酸酶	脲酶	有机质	全氮	全磷	全钾	速效钾	有效磷	碱解氮
有效铜	0.394**	-0.271	0.091	0.278*	-0.077	0.466**	0.276*	0.009	0.247	0.055	0.407**	0.207	-0.031
有效铁	0.098	0.026	0.170	0.123	0.235	0.205	0.441**	0.300*	0.613**	0.109	0.359**	0.728**	0.273
有效锰	0.263	0.015	0.195	-0.138	0.133	0.270	-0.501**	-0.571**	0.027	0.295*	0.319*	-0.104	-0.491**
有效锌	0.457**	-0.281*	0.449**	0.107	0.128	0.494**	0.208	-0.213	0.311*	0.114	0.686**	0.228	-0.220
有效镍	0.547**	-0.311*	0.184	0.200	0.074	0.408**	0.107	-0.205	0.375**	0.244	0.660**	0.255	-0.208
有效硼	0.689**	-0.320*	0.462**	0.101	0.251	0.569**	0.119	-0.279*	0.287*	0.070	0.804**	0.284*	-0.256
有效钼	-0.114	-0.162	0.067	0.085	0.344*	0.059	0.722**	0.574**	0.225	-0.170	0.208	0.437**	0.474**
有效硅	-0.081	0.025	0.019	0.137	0.090	-0.049	0.411**	0.435**	0.063	-0.192	-0.090	0.169	0.358**
有效硒	0.044	-0.139	-0.014	0.127	0.065	0.128	0.501**	0.323*	0.140	-0.061	0.238	0.147	0.219
水溶性氟	0.351*	-0.056	-0.032	0.286*	-0.061	-0.108	0.002	-0.076	-0.148	-0.154	0.019	-0.045	-0.013
有效硫	-0.374**	0.371**	0.589**	0.056	0.103	0.004	0.534**	0.550**	0.195	-0.322*	-0.062	0.286*	0.484**

标，有效铜、有效铁、有效锰、有效锌、有效镍、有效硼等 11 个土壤中微量元素指标，共 24 个相关指标作为土壤评价指标，并采用主成分分析法对这些指标进行降维，选取主成分特征值大于 1 的主成分因子 5 个，累计贡献率为 71.79%(表 5)。

2.4.2 最小数据集筛选指标 根据主成分分析结果与指标之间的相关性系数，得到第一主成分中有机质，全氮，有效磷，中微量元素铜、硫为主导因子，而根据其不同指标之间的相关性系数(表 6, $r > 0.7$)，有机质的相关性系数之和最大，因此有机质进入最小数据集。第二主成分中，土壤中微量元素铁、锰、锌、镍、硼为主导因子，不同指标的相关性系数 $r < 0.7$ ，因此，中微量元素铁、锰、锌、镍、硼均进入最小数据集。第三主成分中，pH、盐分与过氧化氢酶因子

载荷系数较高，其不同指标间相关性系数 $r < 0.7$ ，因此，3 个指标均进入最小数据集。第四主成分中，速效钾的相对因子载荷系数较高，进入最小数据集。第五主成分磷酸酶进入最小数据集。综合得出，由有机质，速效钾，pH，盐分，过氧化氢酶，磷酸酶与中微

表 5 土壤指标主成分因子与特征值
Table 5 Principal component factors and eigenvalues of soil indicators

主成分因子	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%
PC1	6.691	27.880	27.880	6.691	27.880	27.880
PC2	3.925	16.356	44.236	3.925	16.356	44.236
PC3	2.547	10.614	54.850	2.547	10.614	54.850
PC4	2.187	9.114	63.964	2.187	9.114	63.964
PC5	1.880	7.834	71.798	1.88	7.834	71.798

表 6 土壤指标的因子载荷系数
Table 6 factor loading coefficients of soil indicators

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
pH	-0.27	0.27	0.64	0.43	-0.17
电导率	0.24	0.39	-0.16	-0.66	0.16
水溶性盐	0.29	0.38	0.58	-0.03	-0.48
过氧化氢酶	0.25	0.15	0.59	0.14	-0.25
磷酸酶	0.26	0.13	-0.13	0.51	0.57
脲酶	0.04	0.34	0.24	0.53	0.23
有机质	0.96	-0.15	-0.02	-0.01	0.08
全氮	0.96	-0.10	-0.04	-0.03	0.15
全磷	0.41	0.38	-0.55	-0.03	-0.49
全钾	-0.36	0.20	-0.52	-0.16	-0.37
速效钾	0.11	0.17	-0.41	0.60	0.31
有效磷	0.86	-0.06	-0.09	-0.13	0.23
水解性氮	0.61	0.34	-0.27	0.18	-0.34
有效铜	0.85	0.16	-0.05	0.05	0.05
有效铁	0.55	0.70	-0.23	0.02	-0.11
有效锰	-0.63	0.67	0.00	0.02	0.19
有效锌	0.15	0.62	-0.07	-0.16	0.14
有效镍	-0.02	0.78	-0.19	0.08	0.05
有效硼	0.25	0.70	0.37	-0.17	0.33
有效钼	0.67	-0.41	-0.04	0.27	-0.05
有效硅	0.54	-0.15	0.11	0.27	-0.21
有效硒	0.47	-0.60	0.04	-0.25	0.20
水溶性氟	0.21	0.21	0.43	-0.55	0.37
有效硫	0.77	0.00	0.32	-0.06	-0.28

量元素铁、锰、锌、镍、硼等 11 个指标构成可代表绝大多数土壤指标信息的土壤质量评价最小数据集。

2.4.3 土壤质量综合评价 土壤质量评价最小数据集(11 个指标)可概括代表全量数据集(24 个指标)的绝大部分信息。分别对该 11 个指标和 24 个全部指标进行土壤质量综合评价,得到对天津小站稻种植区的土壤质量等级划分结果,并进行相关性分析(图 2)。可知,最小数据集土壤质量评价结果与全量数据集土壤质量评价结果具有显著的相关性($R^2=0.8629$),由此可以验证,最小数据集能够代表全量数据集的绝大部分信息,可作为土壤评价的主要指标。

由土壤质量综合评价方法结合主成分分析得到不同样点的土壤综合质量得分,并根据总分频率曲线法^[20],将综合得分进行频率统计,得到不同样点的等级划分即排序,将研究区土壤质量划分为 4 个等级,并利用 ArcGIS10 地统计学分析模块成图(图 3)。从样点数量分析, I 等级样地 10 个, II 等级样地 12 个, III 等级样地 15 个, IV 等级样地 3 个。从研究区面积分析, I 等级土壤面积约 39.37 km², 占全区面

积的 24.61%; II 等级土壤面积约 48.85 km², 占全区面积的 30.53%; III 等级土壤面积约 67.92 km², 占全区面积的 42.45%; IV 等级土壤面积约 3.86 km², 占全区面积的 2.41%。

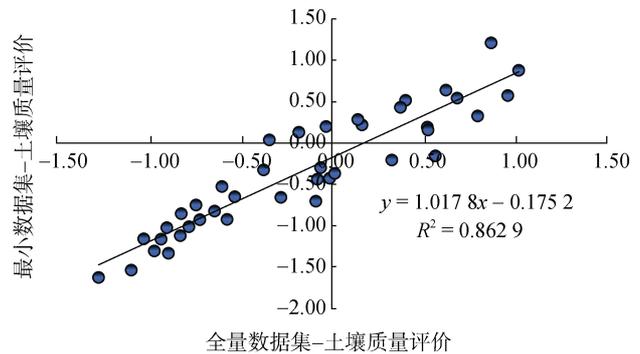


图 2 最小数据集与全量数据集土壤质量评价综合得分相关性

Fig.2 Correlation of synthesis scores between minimum and full data sets

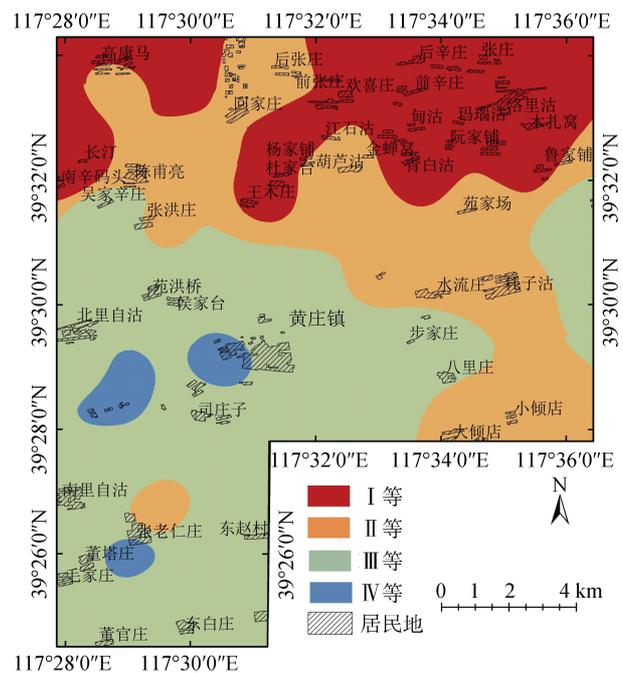


图 3 研究区土壤质量评价图

Fig. 3 Diagram of comprehensive evaluation of soil quality in study area

3 讨论与结论

本研究结果表明天津市小站稻种植区表层土壤有机质、氮素、磷素含量均为中下等,钾素含量丰富,土壤大面积缺硒,也有部分土壤缺钼,而锌和硼含量中等偏上,铜、锰、硫含量比较丰富。大部分小站稻所在的土壤呈弱碱性,部分呈强碱性;依据全国第二次土壤普查养分分级标准和天津市土壤微量元素指

标分级标准^[16], 有机质含量属于中等偏低, 氮与磷元素缺乏, 钾元素丰富尤其是全钾含量为极丰富水平, 中微量元素有效铁、锰、铜、锌、硼的含量均超过了微量元素分级临界值, 属于很高等级; 对比 2008 年天津市水稻田 0 ~ 20 cm 土壤特征条件^[21], 天津市宝坻小站稻种植区土壤中的大量及中微量元素的总含量变化较小, 土壤全磷和有效磷含量缺乏, 主要由于研究区的盐碱度较高, 限制了养分的有效性; 土壤质量综合评价发现总体土壤等级为 I、II 等级和 III 等级, IV 等级的土壤面积较小, 主要是由于土壤耕作历史时间长、面积广, 对土壤盐分与 pH 有部分消减作用。因此建议对土壤养分及综合肥力的提高应从盐碱改良方向着手, 适当添加土壤化学改良剂达到调碱抑盐的效果。

土壤酶活性是反映土壤微环境的重要指标, 也是表征土壤肥力的因素^[22]。研究结果显示, 有效锰对养分含量及酶活性呈显著的负效应, 其他微量元素与养分及酶活性之间均为正相关关系; 土壤磷酸酶与有效磷、速效钾以及有机质含量呈现出了极显著的正相关关系, 这与岳中辉等^[23]、许景伟等^[18]研究结果相一致, 表明了盐碱土中的碱性磷酸酶对土壤中有效养分的活化作用更加显著。脲酶的活性则可以用来反映土壤有机氮水解为无机氮的强度^[24]。一些中微量元素与酶的蛋白质分子、微生物胞外酶等进行生化作用, 对土壤酶有一定的刺激或抑制效应^[25]。研究结果中, 脲酶与有效铜、有效锌、有效镍、有效硼有显著的正相关关系。在对梭树林土壤酶活性与微量元素之间关系的研究中, 土壤脲酶活性与元素锰有显著正相关关系, 与锌为负相关关系^[26], 而在本研究中土壤脲酶活性与有效态锰关系不显著, 究其原因可能是由于研究的土壤环境不同, 森林土壤因为成土母质及风化时间较短, 其中微量元素含量较高, 稻作农田土壤中因施肥等人为因素使得常量元素较高, 而中微量元素较低, 对土壤微生物环境的影响较小。应根据对农田土壤微量元素含量的调查结果及与作物品质之间的关系增施对作物品质及产量有益的微量元素。

土壤质量评价应包含了对土壤物理指标、化学指标以及植被发展过程中的微生物活动及酶活性等性质的概括^[27]。鉴于评价尺度与目的不同, 不同的评价方法反映出土壤综合质量水平和影响因素也有所差异, 因此, 对土壤质量的综合评价应选择合适的指标与方法。杨黎敏等^[28]选择最小数据集(MDS)对长春市耕地土壤质量进行综合评价, 筛选出的最小数据集包括了有机质含量、全氮含量、阳离子交换量、pH

等 6 项指标, 对其进行综合分析得出长春市耕作农田土壤质量分级。但土壤属性因子在不同空间的复杂表达导致土壤综合评价的不确定性^[29]。本研究提取出表征天津市小站稻种植区土壤质量的主要代表性土壤指标为有机质、速效钾、pH、盐分、过氧化氢酶、磷酸酶与中微量元素铁、锰、锌、镍、硼等 11 个指标; 并根据综合得分法计算得出土壤综合质量得分, 与最小数据集评价结果呈现高度相关性, 可以反映出土壤养分与微量元素对小站稻生长环境综合土壤质量的影响。结果表明天津市小站稻种植区土壤质量总体较优, I 等级和 II 等级土壤质量区占研究区总面积的 55.14%, 由于采样时间与地点的限制未测得土壤容重等物理指标、土壤重金属含量及水稻产量等农艺性状, 因此, 若对土壤质量进行更加全面的分析, 可采用更加合适的评价方法或选择更广泛的监测数据进行模型构建及评价。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境 I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. *土壤*, 1997, 29(3): 113-120.
- [3] 单奇华, 张建锋, 唐华军, 等. 质量指数法表征不同处理模式对滨海盐碱地土壤质量的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1095-1103.
- [4] 姚荣江, 杨劲松, 陈小兵, 等. 苏北海涂围垦区土壤质量模糊综合评价[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(6): 2019-2027.
- [5] 杨淇钧, 吴克宁, 冯喆, 等. 大空间尺度土壤质量评价研究进展与启示[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3): 565-578.
- [6] 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.
- [7] 刘广明, 吕真真, 杨劲松, 等. 基于主成分分析及 GIS 的环渤海区域土壤质量评价[J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(1): 67-72.
- [8] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. *生态学报*, 2006, 26(3): 901-913.
- [9] 李鑫, 张文菊, 郭磊, 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.
- [10] 黄勇, 杨忠芳. 土壤质量评价国外研究进展[J]. *地质通报*, 2009, 28(1): 130-136.
- [11] 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.
- [12] Yao R J, Yang J S, Gao P, et al. Determining minimum data set for soil quality assessment of typical salt-affected farmland in the coastal reclamation area[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 128: 137-148.

- [13] Lima A C R, Brussaard L, Totola M R, et al. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 64: 194–200.
- [14] 王飞, 李清华, 林诚, 等. 福建冷浸田土壤质量评价因子的最小数据集[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1461–1468.
- [15] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 等. 基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(16): 265–273.
- [16] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [17] 兰雪, 戴全厚, 喻理飞, 等. 喀斯特退化森林不同恢复阶段土壤酶活性研究[J]. *农业现代化研究*, 2009, 30(5): 620–624.
- [18] 许景伟, 王卫东, 李成. 不同类型黑松混交林土壤微生物、酶及其与土壤养分关系的研究[J]. *北京林业大学学报*, 2000, 22(1): 51–55.
- [19] 乔依娜, 刘洪斌. 农田土壤有效态微量元素空间预测方法及影响因子定量分析[J]. *土壤*, 2019, 51(2): 399–405.
- [20] 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.
- [21] 郑育锁, 张鑫, 常华, 等. 天津市水稻田土壤养分与施肥情况调研分析[J]. *天津农业科学*, 2019, 25(9): 63–67.
- [22] Diwu F, Wang S Y, Guo Y H, et al. Cd induced biphasic response in soil alkaline phosphatase and changed soil bacterial community composition: The role of background Cd contamination and time as additional factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 757: 143771.
- [23] 岳中辉, 王博文, 于东, 等. 松嫩盐碱草地土壤酶活性与肥力因子的典型相关分析[J]. *中国草地学报*, 2009, 31(6): 88–93.
- [24] 隗英华, 陈利军, 武志杰. 温度和脲酶抑制剂影响下的土壤脲酶动力学行为[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2009, 28(6): 1021–1025.
- [25] Singh D K, Kumar S. Nitrate reductase, arginine deaminase, urease and dehydrogenase activities in natural soil (ridges with forest) and in cotton soil after acetamiprid treatments[J]. *Chemosphere*, 2008, 71(3): 412–418.
- [26] 李跃林, 彭少麟, 李志辉, 等. 桉树人工林地土壤酶活性与微量元素含量的关系[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(3): 345–348.
- [27] 于淑会, 周向莉, 卿冀川, 等. 河北滨海盐碱土地生态安全评价[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(5): 778–786.
- [28] 杨黎敏, 李晓燕, 任永星, 等. 基于最小数据集的长春市耕地土壤质量评价[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(20): 305–310.
- [29] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality - A critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105–125.