

doi: 10.12097/gbc.2022.06.014

基于最小数据集的三江平原黑土地土壤质量评价 ——以黑龙江宝清县平原区为例

何金宝, 赵建, 刘洪博, 刘博文, 孔繁鹏*

HE Jinbao, ZHAO Jian, LIU Hongbo, LIU Bowen, KONG Fanpeng*

中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江 牡丹江 157000

Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Mudanjiang 157000, Heilongjiang, China

摘要: 土壤质量评价是实施精细化农业生产和土地科学管理的关键。对不同土地利用方式下的土壤质量进行评估并对其空间分布进行绘制, 可以为优化土地利用空间布局, 客观准确评价土壤质量和科学管理土地资源提供依据。以黑龙江宝清县平原区黑土地土壤为研究对象, 综合选取 31 项评价指标作为全数据集 (TDS), 采用主成分分析 (PCA) 和相关性分析方法, 确定不同土地利用类型的土壤质量评价的最小数据集 (MDS)。利用地统计学方法, 基于普通克里格插值法绘制土壤质量的空间分布图。结果表明, 不同土地利用方式下的土壤质量存在明显差异, 土壤质量整体表现为, 草地>林地>旱地>水田。半变异函数为高斯函数的模型最适合预测土壤质量的空间分布。土壤质量在空间分布上呈现一定的规律性, 越靠近北部挠力河流域, 质量越好, 大部分土壤质量处于中上水平, 生产潜力较大。

关键词: 黑土地; 土地利用类型; 最小数据集; 地统计学; 半变异函数

中图分类号: P62; S151.9³ **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)10-1841-14

He J B, Zhao J, Liu H B, Liu B W, Kong F P. Evaluation of black soil quality in Sanjiang Plain based on minimum data set: Taking the plain area of Baoqing County in Heilongjiang Province as an example. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(10): 1841-1854

Abstract: Soil quality evaluation is the key to the implementation of fine agricultural production and land scientific management. Evaluating the soil quality under different land use patterns and mapping its spatial distribution can provide a basis for optimizing the spatial layout of land use, objectively and accurately evaluating soil quality and scientifically managing land resources. In this study, the black soil in Baoqing Plain was taken as the research object, and 31 evaluation indexes were selected as the total data set (TDS). Principal component analysis (PCA) and correlation analysis were used to determine the minimum data set (MDS) of soil quality evaluation for different land use types. By using geostatistical methods, the spatial distribution map of soil quality was drawn based on the ordinary Kriging interpolation method. The results showed that there were significant differences in soil quality under different land use patterns. The overall performance of soil quality was grassland > forest land > dry land > paddy field. The model with Gaussian semi-variogram function was most suitable for predicting the spatial distribution of soil quality. The spatial distribution of soil quality showed a certain regularity. The closer to the northern Naoli River Basin, the better the soil quality. Most of the soil quality was in the middle and upper level, and the production potential was large.

Key words: black land; land use type; minimum data set; geostatistics; semi-variogram

随着人口规模不断增长和城市化程度不断提高, 耕地面积不断缩减, 粮食安全的关注度越来越高

(Zhang et al., 2018)。土壤作为土地的重要载体、生物多样性的基础, 土地利用和管理方式对土壤质量

收稿日期: 2022-06-07; 修订日期: 2023-10-08

资助项目: 中国地质调查局项目《三江平原宝清地区黑土地地表基基层调查》(编号: DD20211588)

作者简介: 何金宝(1992-), 男, 硕士, 工程师, 从事自然资源调查监测评价研究。E-mail: jimbao92@yeah.net

* 通信作者: 孔繁鹏(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事自然资源调查监测评价研究。E-mail: 315706831@qq.com

变化有很大影响(Wang et al., 1998; 汪媛媛等, 2011)。过度耕作、不合理轮作、土壤侵蚀、用养失衡、化肥农药污染、肥力下降和其他自然资源问题一直加剧着土壤退化,合理科学的土地管理实践能够改善土壤质量,有助于缓解土壤退化,也是保证土地生产产力可持续的基础(韩晓增等,2018a)。黑土地是富含有机质,具有内在生产产力且十分珍稀的土地,土壤环境质量好、性状好、肥力高,具有黑色或暗黑色的腐殖质表土层(韩晓增等,2018b)。然而,作为“耕地中的大熊猫”也同样面临着退化的风险,制约着黑土地的生产力,因此需要采取适当的管理方法减少土壤的退化和保持更好的土壤质量。

农业的可持续发展和土壤质量高度相关,土壤质量定义为土壤在土地利用范围内作为重要生命系统维持陆地动植物生产产力、提高水和空气质量、支持人类健康和居住的能力(赵其国等,1997)。土壤质量难以直接测量,但可以通过测量作为其质量评价指标的土壤物理、化学和生物特性进行量化(Mulat et al., 2021)。然而,许多土壤质量评价指标是相互关联的,最小数据集(Minimum Data Set, MDS)可以剔除多余指标,减少分析的成本和时间,优化土壤评价的模型(Abdel et al., 2021)。东北黑土地土壤质量评价工作研究程度较高,梅楠等(2021)对吉林中部平原黑土耕层土壤进行了质量评价,并将研究结果与玉米产量进行了定量分析研究;杨黎敏等(2019)基于 MDS 对长春市耕地土壤质量空间分布进行了评

价,并对不同环境因素影响的程度进行了分析;苗淑杰等(2019)采用聚类分析方法建立了 MDS,并分析了不同耕作措施对土壤质量的影响;吴海燕等(2018)对不同施肥措施下的土壤肥力质量进行了分析研究,提出通过有机肥与无机肥结合来促进农业的可持续利用。尽管前人对东北黑土地土壤质量做了较多研究,但多为耕层土壤。本次研究旨在探究不同土地利用类型下的黑土地土壤质量评价指标体系及其空间分布特征,通过主成分分析建立黑龙江宝清平原区不同土地利用的黑土地质量的最小数据集,为不同评价指标选择评分函数,结合地理信息系统和地统计分析方法,绘制土壤质量的空间分布图,全面地认识宝清平原区的土壤性质,识别问题区域,为保护和恢复黑土地提供理论基础和参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

三江平原宝清县地理坐标位于东经 $131^{\circ}12' \sim 133^{\circ}30'$ 、北纬 $45^{\circ}45' \sim 46^{\circ}55'$,隶属黑龙江省东北部双鸭山市,三江平原南缘,气候类型为温带大陆性季风气候,年降水量为 400~600 mm,水土资源丰富,适宜多种作物生长,是国家级生态示范区试点县、全国粮食生产先进县和重要的商品粮生产基地。完达山脉以北,地势呈现从东北向西南逐渐抬升的态势,海拔较低,矿产资源丰富,煤炭埋藏量很大。本次研究区域为宝清县广阔的平原地区(图 1)。

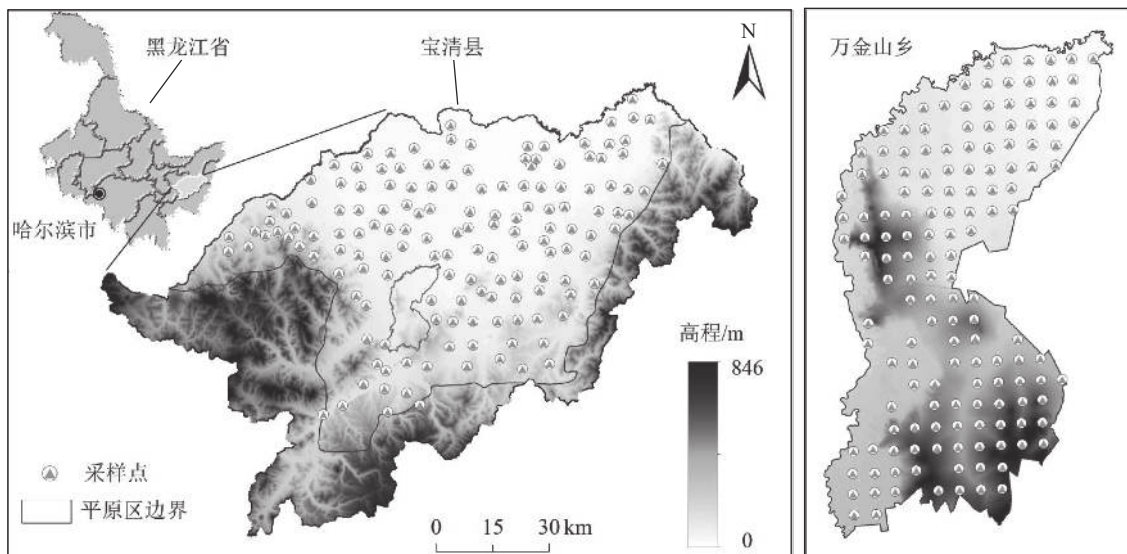


图 1 研究区位置及采样点分布图

Fig. 1 Location of the study area and the distribution of sampling points

1.2 数据来源

1.2.1 土壤样品采集与处理

在宝清县万金山乡按 1 点/km² 的密度布设土壤采样点 149 个, 其他地区综合考虑土地利用类型及其空间分布, 均匀布设土壤采样点 150 个(图 1), 其中林地和草地分布较少, 分别布设了 13 个和 11 个采样点, 水田和旱地广泛分布, 分别布设了 92 个和 183 个采样点。2021 年 5 月, 以网格法在每个样地中采集 4 个黑土地表层(0~20 cm)土壤混合成一个样品, 样品经自然风干、研磨、过 2 mm 筛供测定。在相同深度采用 2 个 100 cm³ 环刀采集土壤原状样品, 并使用塑料薄膜密封。

样品在黑龙江省地质矿产实验测试研究中心完成测试分析。含水率采用烘干法测定, 容重、毛管孔隙、非毛管孔隙采用环刀法测定, 比重采用比重瓶法测定, 黑土层厚度通过洛阳铲人工揭露后采用钢卷尺测量获取, pH 采用玻璃电极法测定, 有机质采用重铬酸钾容量法测定, 碱解氮采用碱解扩散法测定, 阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定, 全碳采用高频燃烧-红外吸收光谱法测定, 速效钾采用乙酸铵浸提-原子吸收法测定, 土壤质地采用比重计法测定, 含盐量采用重量法测定, 有效磷含量采用紫外分光光度法测定, 全氮含量采用凯氏定氮法测定, 铬、全钾、全磷、铅、铜、锰、锌、镍采用 X 射线荧光光谱法测定, 镉采用等离子体质谱法测定, 砷、汞采用原子荧光法测定。检出限、测定下限、精密度、准确度、线性范围等各项质量控制参数均满足或优于 DZ/T0130—2006《地质矿产实验室测试质量管理规范》(尹明等, 2006)、DZ/T0258—2014《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(奚小环等, 2014)、DZ/T0295—2016《土地质量地球化学评价规范》(杨忠芳等, 2016)的相关要求。

1.2.2 地形数据

在地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn>) 下载完全覆盖宝清县平原区的 ASTER DEMV2 版数字高程数据, 进行坡度和高程的提取, 其空间分辨率为 30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 MDS 的构建

MDS 的构建是通过综合选取表征黑土地土壤的 31 个指标建立质量评价全数据集 (Total Data Set, TDS), 这些指标涵盖土壤的物理、化学性质、立地条件、环境清洁程度, 基本能够代表土壤质量评价因子

(李桂林等, 2008)。采取主成分分析法 (Principal Component Analysis, PCA) 遴选 MDS。选取特征值大于 1 的主成分、各主成分中因子载荷绝对值大于 0.5 且大于 Norm 最大值 90% 以上的指标(廖程等, 2021), 当 1 个主成分高因子载荷指标只有 1 个时, 该指标进入 MDS。当 1 个主成分中有超过 1 个高因子载荷指标时, 若相关系数 $r < 0.5$, 各指标均被选入 MDS; 若相关系数 $r > 0.5$, 认为存在冗余指标, 采用多变量相关分析进行指标的取舍(Chandel et al., 2018)。

1.3.2 土壤质量评价

在土壤质量指数 (Soil Quality Index, SQI) 的计算中, 由于不同的指标单位不同, 为使评价指标具有可比性, 需要进行归一化处理, 依据评价指标对土壤质量的影响程度, 全碳、有机质、氮、磷、钾、碱解氮、速效钾、有效磷、阳离子交换量、黑土层厚度、毛管孔隙、含水率选取升型隶属函数(公式(1)); 含盐量、高程、坡度、非毛管孔隙、比重和 As、Cr、Cd、Cu、Mn 等重金属元素选择降型隶属函数(公式(2)); 粘粒含量、粉粒含量、砂粒含量、容重、pH 选取适宜型隶属函数(公式(3)), 其上、下限值参考前人研究(许明祥, 2003; 卓志清等, 2021)及研究区实际情况确定(表 1)。

升型隶属函数: $F(x_i) = (x_i - x_{imin}) / (x_{imax} - x_{imin})$ (1)

适宜型隶属函数:

$$F(x_i) = \begin{cases} 0.1 + 0.9 \times \frac{x_i - x_{imin}}{L - x_{imin}} & x_{imin} < x_i < L \\ 1 & L < x_i < H \\ 1 - 0.9 \times \frac{x_i - H}{x_{imax} - H} & H < x_i < x_{imax} \end{cases} \quad (2)$$

降型隶属函数: $F(x_i) = (x_{imax} - x_i) / (x_{imax} - x_{imin})$ (3)

式中, $F(x_i)$ —各土壤指标的隶属度值; x_i —各指标实测值; x_{imax} , x_{imin} —第 i 项指标中实测的最大值和最小值; L , H 为最优范围的下限值和上限值, 各指标权重系数 (W_i) 由主成分分析计算的各指标公因子方差占所有指标公因子方差之和的比例来计算。

表 1 适宜型隶属函数上、下界限取值

Table 1 The upper and lower bounds of the appropriate membership function

指标	粘粒含量/%	粉粒含量/%	砂粒含量/%	容重/(g·cm ⁻³)	pH
下限值	40	40	20	1.2	6.5
上限值	55	55	50	1.4	7.5

土壤质量指数采用加权求和模型进行计算:

$$SQI = \sum_i^n N_i W_i \tag{4}$$

式中, N_i , W_i —第*i*项土壤指标所对应的隶属度值和权重系数, n —数据集中的土壤指标数量。

1.4 数据处理

运用 Excel 软件对评价指标隶属度值进行计算,

通过 ArcGIS 软件进行空间分析和制图, 利用 SPSS 数据处理软件对数据进行描述性统计, 主成分分析及相关性分析使用 Origin 软件对数据进行可视化表达。

2 结果与分析

2.1 土壤评价指标特征

对土壤 31 项指标进行统计分析, 结果(表 2)

表 2 土壤质量评价指标描述性统计特征

Table 2 Descriptive statistical characteristics of soil quality evaluation indexes

指标	平均值	中位数	标准差	最小值	最大值	变异系数	偏度	峰度
粘粒/%	31.46	31.00	8.76	4.00	52.00	0.28	0.05	-0.26
粉粒/%	41.90	43.00	8.45	3.00	59.00	0.20	-1.07	1.99
砂粒/%	26.64	24.00	12.45	5.00	93.00	0.47	1.77	4.85
毛管孔隙/%	41.47	41.64	5.60	26.15	62.95	0.14	0.44	0.95
非毛管孔隙/%	8.73	7.83	4.42	2.11	26.03	0.51	1.01	1.04
黑土层厚度/cm	52.48	50.00	30.17	0.00	175.00	0.57	1.02	1.22
含水率/%	31.67	29.86	9.14	15.24	80.82	0.29	1.54	3.88
比重	2.54	2.54	0.08	2.32	2.73	0.03	0.02	-0.23
容重/(g·cm ⁻³)	1.18	1.19	0.17	0.76	1.57	0.15	-0.13	-0.55
高程/m	83.09	73.54	24.27	53.99	250.08	0.29	1.78	6.60
坡度/°	1.08	0.40	1.55	0.05	10.82	1.43	3.20	13.47
全碳/(mg·kg ⁻¹)	2.93	2.69	1.31	0.85	11.30	0.45	2.83	13.28
有机质/(g·kg ⁻¹)	47.57	43.79	22.22	13.96	192.74	0.47	2.99	14.64
全氮/(g·kg ⁻¹)	2.23	1.97	0.99	0.62	7.80	0.45	2.41	8.95
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.83	0.78	0.25	0.40	1.95	0.30	1.50	3.13
全钾/(g·kg ⁻¹)	19.20	19.20	1.44	14.20	24.00	0.07	-0.07	1.57
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	205.41	196.10	81.29	52.00	618.10	0.40	1.89	6.33
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	231.33	218.00	87.67	73.00	566.00	0.38	0.66	0.15
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	20.73	17.50	16.70	0.40	146.80	0.81	2.18	10.82
含盐量/(g·kg ⁻¹)	0.43	0.41	0.17	0.14	0.90	0.39	0.49	-0.24
阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹)	31.01	30.60	8.18	11.00	53.50	0.26	0.26	-0.43
pH	6.33	6.22	0.59	5.30	8.38	0.09	1.35	1.78
As/(mg·kg ⁻¹)	10.72	10.46	2.92	4.72	18.97	0.27	0.37	-0.44
Cr/(mg·kg ⁻¹)	67.68	67.30	10.71	35.80	115.40	0.16	0.63	2.81
Cu/(mg·kg ⁻¹)	24.59	24.70	4.74	11.10	47.00	0.19	0.53	1.85
Cd/(mg·kg ⁻¹)	0.08	0.08	0.03	0.03	0.18	0.34	1.08	1.38
Hg/(mg·kg ⁻¹)	0.04	0.04	0.01	0.02	0.13	0.29	3.12	21.03
Mn/(mg·kg ⁻¹)	859.49	851.00	418.01	153.00	1784.00	0.49	0.13	-0.96
Ni/(mg·kg ⁻¹)	30.21	29.90	6.00	15.10	58.10	0.20	0.91	3.06
Pb/(mg·kg ⁻¹)	25.33	24.80	3.30	13.60	38.30	0.13	0.44	0.98
Zn/(mg·kg ⁻¹)	63.96	64.20	12.33	23.70	100.80	0.19	-0.16	0.11

显示,研究区土壤 pH 整体呈弱酸性,依据全国第二次土壤普查养分划分标准(全国土壤普查办公室, 1998),有机质、全氮、碱解氮、速效钾含量均处于丰富水平,全磷和有效磷含量均处于较丰富水平,全钾含量处于中等水平。土壤比重、全钾含量、pH 均为弱变异,坡度为强变异,其余指标均为中等变异(李百云等, 2021)。As、Cd、Cr 等重金属元素均低于 GB15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(生态环境部, 2018)中给出的风险筛选值,处于轻度生态风险等级。已有研究表明,三江平原地区土壤环境总体优越,无潜在污染风险(宋运红等, 2022),其对于土壤质量评价结果的影响可以忽略,故予以剔除。

2.2 不同土地利用类型 MDS 的建立

MDS 可以最大程度地筛选评价土壤质量的最少指标集合,有效降低指标的维度,浓缩数据信息,同时尽量减少信息损失和数据冗余(Armenise et al., 2013;贡璐等, 2015; 姜义宝等, 2019)。对不同土地利用下的评价指标进行主成分分析(表 3—表 6)和 Pearson 相关分析(图 2),并结合 Norm 值选取原则进行 MDS 筛选。最终确定水田 MDS 入选指标为碱解氮、含水率、速效钾、pH、砂粒含量、非毛管孔隙、黑土层厚度、高程;旱地 MDS 入选指标为全碳、速效钾、砂粒含量、容重、非毛管孔隙、黑土层厚度、高程;林地 MDS 入选指标为碱解氮、速效钾、磷、粉粒含量、砂粒含量、毛管孔隙、非毛管孔隙、

表 3 水田土壤指标主成分分析结果及因子

Table 3 Principal component analysis results and factors of paddy soil index

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	Norm值
全碳	0.871	0.363	0.178	-0.042	-0.088	-0.056	2.110
有机质	0.858	0.357	0.178	-0.050	-0.107	-0.068	2.082
阳离子交换量	0.604	0.143	0.620	0.183	0.127	0.133	1.788
全钾	-0.806	-0.146	0.139	-0.262	-0.027	-0.024	1.901
全氮	0.868	0.340	0.211	-0.065	-0.107	-0.021	2.103
全磷	0.755	-0.017	-0.041	-0.160	-0.016	0.145	1.735
含盐量	0.081	-0.117	0.814	0.109	0.023	-0.010	1.438
碱解氮	0.875	0.361	0.144	-0.054	-0.103	0.000	2.112
速效钾	0.223	-0.110	0.755	0.175	-0.182	0.122	1.456
有效磷	0.140	-0.103	0.180	0.176	0.056	0.621	0.900
pH	-0.236	0.177	0.627	-0.005	0.401	-0.057	1.348
粘粒	0.131	0.132	0.530	0.509	-0.336	0.040	1.305
粉粒	-0.030	0.051	0.200	0.833	0.045	-0.068	1.265
砂粒	-0.063	-0.114	-0.453	-0.835	0.181	0.017	1.479
含水率	0.324	0.890	-0.068	0.087	-0.166	-0.014	1.824
比重	-0.331	-0.719	-0.068	0.015	-0.073	-0.048	1.535
容重	-0.268	-0.872	0.021	-0.085	-0.279	0.072	1.766
毛管孔隙	0.198	0.834	-0.066	0.045	-0.421	-0.015	1.696
黑土层厚度	0.077	-0.082	-0.041	0.279	0.264	-0.735	1.021
非毛管孔隙	-0.078	-0.072	-0.026	-0.041	0.850	-0.011	1.092
高程	-0.033	0.014	-0.413	-0.147	0.302	0.554	1.051
坡度	-0.199	-0.032	-0.236	0.349	0.051	-0.041	0.795
特征值	5.130	3.425	2.960	2.102	1.577	1.314	
贡献率/%	23.320	15.568	13.455	9.553	7.166	5.973	
累计贡献率/%	23.320	38.888	52.342	61.895	69.061	75.034	

表 4 旱地土壤指标主成分分析结果及因子

Table 4 Principal component analysis results and factors of dryland soil index

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	Norm值
全碳	0.915	0.190	0.105	0.171	-0.062	0.032	0.120	2.104
有机质	0.917	0.197	0.085	0.154	-0.071	0.033	0.076	2.103
阳离子交换量	0.528	0.567	0.228	0.161	-0.137	0.130	0.188	1.587
全钾	-0.490	0.405	-0.268	-0.016	0.152	-0.211	0.013	1.379
全氮	0.921	0.125	0.065	0.123	-0.172	0.032	0.022	2.102
全磷	0.782	-0.025	-0.019	0.072	0.025	-0.174	-0.003	1.772
含盐量	0.076	0.804	0.029	-0.059	-0.133	-0.096	0.030	1.338
碱解氮	0.895	0.056	0.121	0.107	-0.044	0.004	-0.064	2.028
速效钾	0.297	0.778	0.021	0.053	-0.085	0.033	0.007	1.437
有效磷	0.064	-0.042	0.153	0.045	-0.080	0.757	0.032	0.924
pH	-0.158	0.576	-0.039	0.036	-0.196	0.095	0.395	1.129
粘粒	0.316	0.461	0.355	0.097	-0.462	0.015	-0.191	1.339
粉粒	0.007	-0.083	0.832	0.005	0.268	0.069	0.025	1.291
砂粒	-0.246	-0.296	-0.842	-0.078	0.170	-0.059	0.129	1.474
含水率	0.107	-0.003	0.265	0.589	-0.107	-0.371	-0.139	1.073
比重	-0.278	-0.231	-0.077	-0.602	0.173	-0.013	-0.166	1.172
容重	-0.250	0.093	0.001	-0.883	0.005	-0.105	-0.058	1.400
毛管孔隙	0.306	-0.221	0.474	0.176	-0.115	-0.476	0.316	1.264
黑土层厚度	0.093	0.128	-0.030	0.012	-0.047	-0.026	0.841	0.969
非毛管孔隙	-0.070	-0.007	-0.400	0.607	0.137	0.503	-0.203	1.245
高程	-0.198	-0.165	0.060	0.060	0.806	-0.059	-0.155	1.230
坡度	0.008	-0.114	0.040	-0.157	0.806	0.019	0.004	1.134
特征值	5.041	2.639	2.180	2.053	1.841	1.329	1.195	
贡献率/%	22.914	11.996	9.910	9.330	8.370	6.040	5.432	
累计贡献率/%	22.914	34.910	44.820	54.150	62.520	68.560	73.992	

表 5 林地土壤指标主成分分析结果及因子

Table 5 Principal component analysis results and factors of forest soil index

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	Norm值
全碳	0.954	0.040	-0.004	0.224	0.089	2.380
有机质	0.947	0.000	-0.004	0.253	0.109	2.372
阳离子交换量	0.493	0.730	0.184	0.156	0.177	2.120
全钾	0.005	-0.204	-0.948	-0.059	-0.099	1.785
全氮	0.900	0.103	-0.120	0.335	-0.005	2.302
全磷	0.485	0.447	0.567	-0.266	-0.015	1.924
含盐量	0.405	0.799	0.301	0.113	0.126	2.166
碱解氮	0.964	-0.124	-0.011	-0.010	0.030	2.392
速效钾	0.391	0.891	0.122	0.010	-0.031	2.266
有效磷	0.086	-0.075	-0.017	-0.056	0.863	1.239
pH	-0.157	0.746	0.009	0.092	-0.281	1.799
粘粒	0.043	0.757	-0.210	0.353	0.349	1.924

续表 5

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	Norm值
粉粒	0.447	0.141	-0.798	0.142	0.278	1.896
砂粒	-0.234	-0.597	0.511	-0.313	-0.372	1.887
含水率	0.445	-0.005	0.212	0.779	-0.032	1.692
比重	-0.751	-0.327	0.072	-0.257	-0.126	2.047
容重	-0.447	0.113	-0.463	-0.442	0.551	1.749
毛管孔隙	0.473	0.246	-0.069	0.789	0.043	1.802
黑土层厚度	-0.108	0.792	-0.086	-0.040	0.054	1.841
非毛管孔隙	-0.412	-0.360	0.094	-0.348	-0.610	1.663
高程	0.263	-0.689	0.219	0.320	0.009	1.820
坡度	0.020	-0.267	0.786	0.434	-0.095	1.698
特征值	6.065	5.230	3.269	2.496	1.949	
贡献率/%	27.568	23.774	14.859	11.347	8.858	
累计贡献率/%	27.568	51.342	66.200	77.548	86.405	

表 6 草地土壤指标主成分分析结果及因子

Table 6 Principal component analysis results and factors of grassland soil index

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	Norm值
全碳	0.964	0.096	0.133	-0.020	-0.113	-0.069	0.049	2.223
有机质	0.960	0.082	0.147	-0.108	-0.093	-0.025	0.041	2.217
全钾	-0.640	0.108	0.350	-0.499	0.410	-0.040	-0.035	1.898
全氮	0.947	0.000	-0.138	-0.160	-0.124	-0.087	0.024	2.194
全磷	0.618	0.117	-0.475	0.312	-0.290	0.147	0.088	1.820
含盐量	-0.197	-0.244	0.864	0.076	0.032	0.105	-0.307	1.813
碱解氮	0.890	0.167	-0.079	0.399	-0.032	-0.013	0.033	2.152
速效钾	0.056	-0.002	-0.235	-0.908	0.046	0.167	-0.122	1.553
有效磷	-0.069	0.079	0.225	0.016	0.124	0.928	0.087	1.355
pH	0.017	0.083	0.981	0.039	0.016	0.021	0.108	1.866
粘粒	-0.034	-0.806	0.073	0.102	0.131	0.359	0.392	1.739
粉粒	-0.143	-0.048	-0.087	-0.104	0.211	-0.062	-0.948	1.371
砂粒	0.137	0.816	-0.007	-0.023	-0.280	-0.303	0.310	1.759
含水率	-0.005	0.928	-0.053	0.180	0.008	0.191	0.236	1.864
比重	-0.451	-0.172	-0.026	0.187	0.846	0.011	-0.058	1.676
容重	-0.182	-0.692	-0.290	0.367	0.369	-0.146	0.153	1.726
毛管孔隙	0.080	0.821	-0.425	0.208	-0.006	0.124	-0.026	1.824
黑土层厚度	0.061	0.196	0.330	0.286	0.414	-0.751	0.031	1.469
非毛管孔隙	0.530	-0.225	0.280	-0.521	-0.141	-0.042	-0.519	1.772
高程	0.111	0.327	0.032	0.326	-0.807	0.015	0.243	1.500
坡度	0.247	0.109	-0.586	0.681	-0.003	0.090	-0.011	1.669
阳离子交换量	0.378	-0.139	0.722	-0.045	-0.134	0.042	0.284	1.689
特征值	5.164	3.732	3.561	2.569	2.161	1.812	1.786	
贡献率/%	23.472	16.964	16.184	11.677	9.824	8.236	8.116	
累计贡献率/%	23.472	40.436	56.621	68.298	78.122	86.358	94.474	

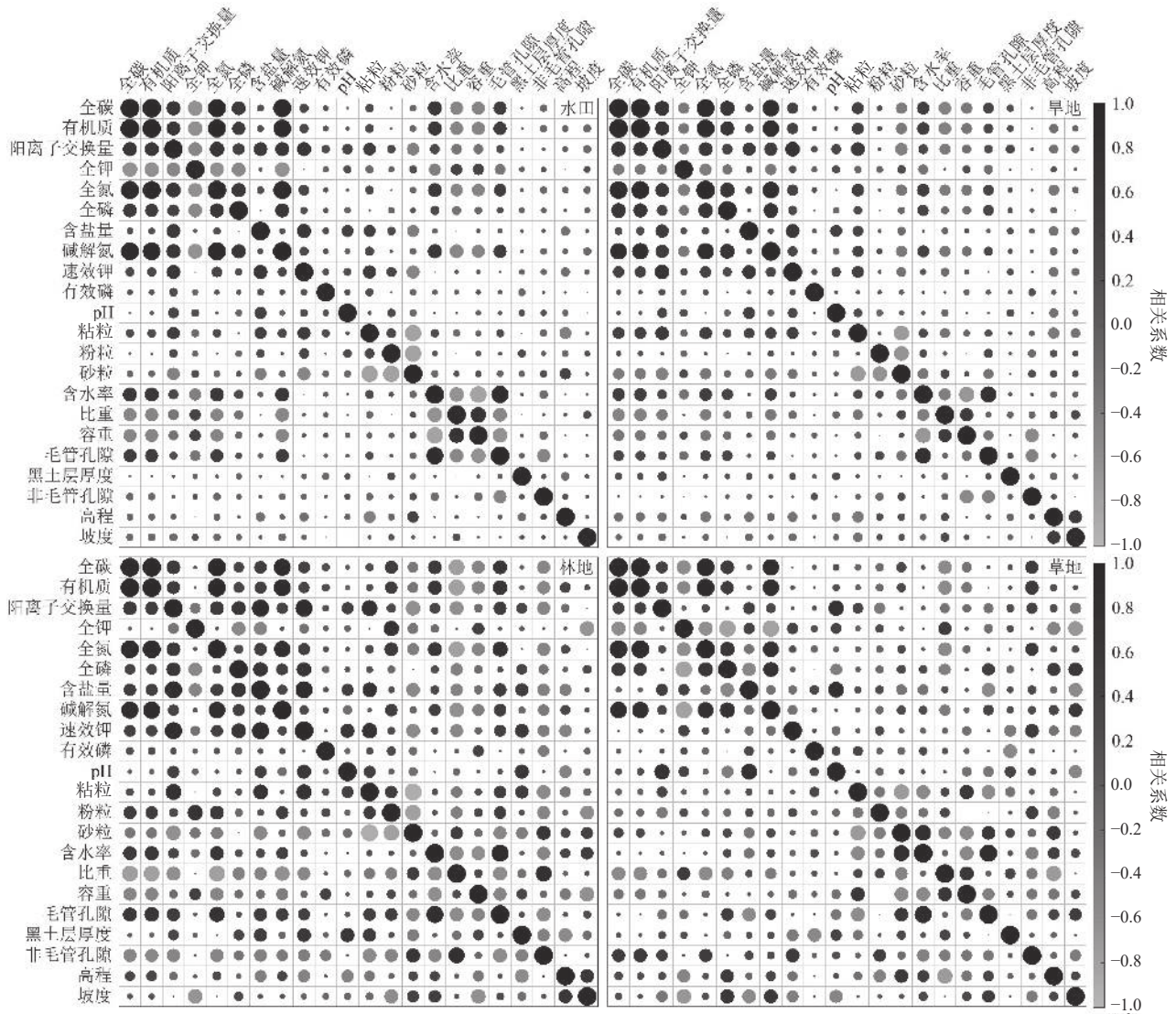


图2 不同土地利用类型评价指标相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient of evaluation indexes of different land use types

容重; 草地 MDS 入选指标为全碳、含水率、pH、速效钾、比重、非毛管孔隙、黑土层厚度。为进一步确定不同土地利用类型 MDS 入选指标信息冗余程度, 对其开展进一步分析(图 3)。依据因子载荷高低、Norm 值大小及相关性强弱的选取原则, 水田 MDS 舍弃含水率、速效钾; 旱地 MDS 舍弃非毛管孔隙; 林地 MSD 舍弃磷、砂粒含量、非毛管孔隙; 草地 MDS 舍弃比重和非毛管孔隙。

2.3 评价精度分析

MDS 评价结果的精度验证是必不可少的。通过不同土地利用类型的 MDS 评价指标公因子方差计算得到权重(表 7), 并依据评价指标得到土壤的功能

属性效应标准得分, 并对 MDS 和 TDS 的土壤质量指数进行回归分析(图 4)。拟合结果显示, 两者在不同土地利用类型下均显著相关, 表明不同土地利用类型 MDS 具有很好的可靠性, 能够较好地代替 TDS 的土壤质量评价信息。不同土地利用类型的 SQI 值存在较大差异(图 5), 水田、旱地、林地、草地的 SQI 值变化范围分别为 0.27~0.71、0.30~0.72、0.26~0.71、0.45~0.73, 4 种土地利用类型的平均 SQI 排序为草地>林地>旱地>水田。

2.4 土壤质量评价

利用地统计学方法, 基于普通克里格法绘制土壤质量的空间分布, 比较分析不同半变异函数模型

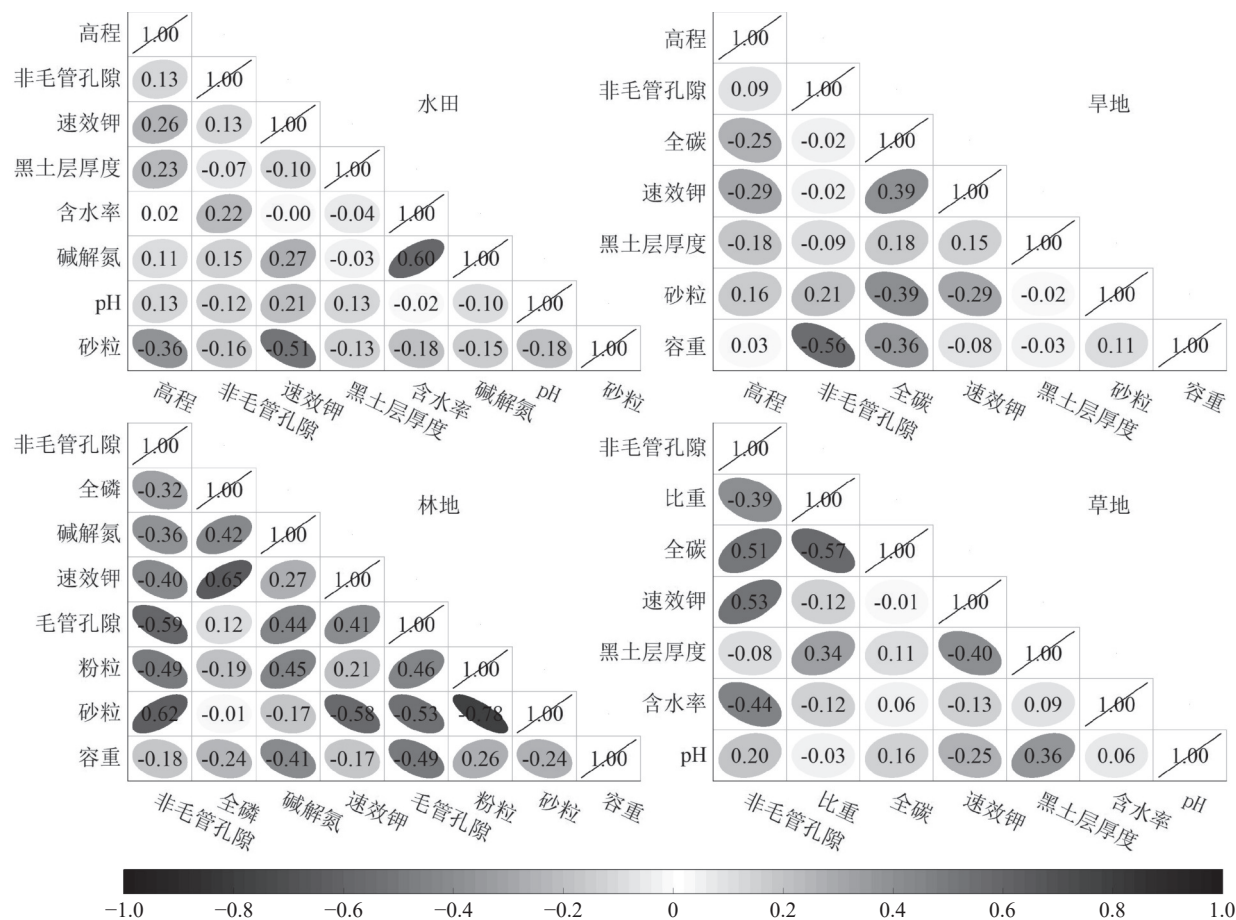


图 3 不同土地利用类型候选指标相关系数

Fig. 3 Correlation coefficient of candidate indexes of different land use types

下的预测精度, 选择最优的函数模型; 当平均误差、标准化平均误差、平均标准误差接近于 0, 均方根误差越小且标准化均方根误差接近于 1 时, 表明预测模型的精度和适用性较高(Hani et al., 2010)。结果显示(表 8), 高斯模型与数据吻合情况最好, 更适合预测土壤质量的空间分布。

在 ArcGIS 软件中选择高斯模型作为半变异函数进行插值, 绘制土壤质量的空间分布图。由于以往研究中土壤评价指标选取的差异性, 土壤质量指数等级划分标准也不统一, 笔者参考前人关于东北黑土地的土壤质量等级划分方法(Li et al., 2018)将其划分为 5 个等级(图 6), 其中Ⅲ级土壤面积最大, 占比 56.65%; 其次为Ⅱ级土壤, 面积占比 37.63%; I 级土壤面积占比 3.27%; IV、V 级土壤面积最小, 总面积占比不足 2.50%。可以看出, 土壤质量在空间分布上呈现一定的规律性, 越靠近北部挠力河流域, 土壤质量越好。Ⅲ级以上土壤在研究区广泛分布,

土壤质地良好, 粘粒、粉粒、砂粒比例适中, 保水保肥能力强, 土壤养分含量高。IV、V 级土壤主要分布在宝清县周边, 由于城市化程度较高, 土壤质量相对较差, 总体来看, 中北部土壤质量较周边山区附近更好。Ⅲ级以上土壤面积占比达到 97.55%, 说明研究区土壤质量处于中上水平, 生产潜力较大。

3 讨论

MDS 是能够反映土壤质量的最少指标集合, 对于科学评估土壤质量, 实现简明有效的土壤健康判别具有重要的意义。本次研究共选取土壤的物理性质、化学性质、立地条件、清洁程度等 31 项指标作为土壤质量评价的初选指标, 不同土地利用类型选取的 MDS 指标并不一致, 表明土地利用对土壤指标的影响是复杂的。研究区土壤有机质、全碳、碱解氮是高度相关的, 水田和旱地共同入选 MDS 的指标为有机质、砂粒含量、黑土层厚度、高程。有机质、黑

表 7 最小数据集中土壤指标的公因子方差及权重

Table 7 Common factor variance and weight of soil index in minimum data set

土地利用类型	土壤指标	公因子方差	权重
水田	高程	0.579	0.196
	非毛管孔隙	0.512	0.173
	碱解氮	0.422	0.143
	黑土层厚度	0.395	0.134
	pH	0.469	0.159
	砂粒	0.576	0.195
旱地	高程	0.511	0.162
	全碳	0.692	0.220
	速效钾	0.513	0.163
	黑土层厚度	0.412	0.131
	砂粒	0.413	0.131
	容重	0.610	0.194
林地	碱解氮	0.611	0.172
	速效钾	0.355	0.100
	毛管孔隙	0.731	0.205
	粉砂粒	0.922	0.259
	容重	0.940	0.264
草地	全碳	0.904	0.327
	速效钾	0.635	0.230
	黑土层厚度	0.625	0.226
	含水率	0.088	0.032
	pH	0.508	0.184

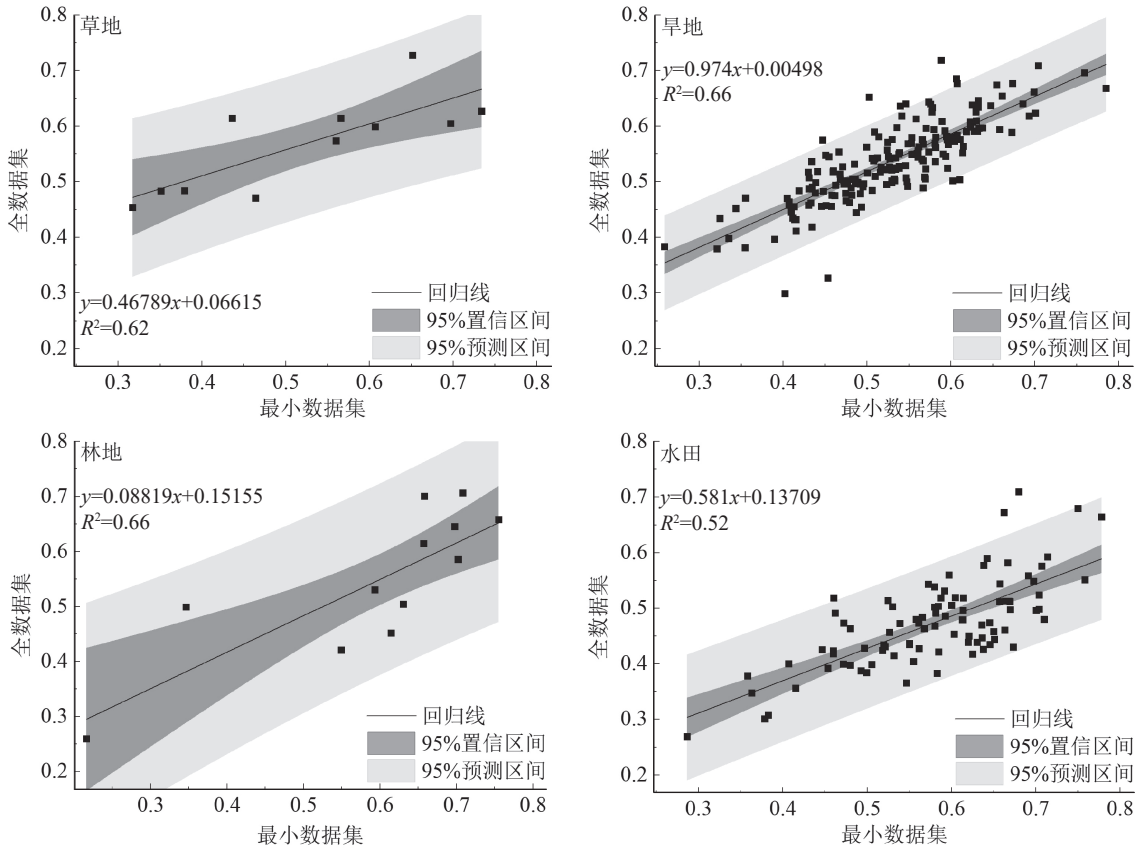


图 4 基于 MDS 与 TDS 的土壤质量指数线性拟合

Fig. 4 Linear fitting of soil quality index based on MDS and TDS

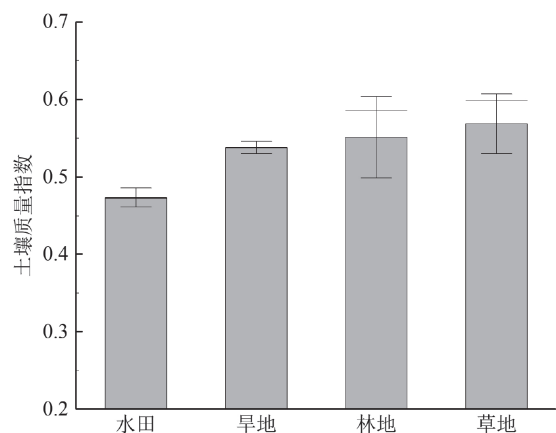


图 5 不同土地利用类型的土壤质量指数

Fig. 5 Soil quality index of different land use types

土层厚度能够有效改善土壤结构并提高其持水功能,主要反映了土壤的养分状况;砂粒含量影响着土壤的抗侵蚀和养分保留能力,质地较细的土壤往往具有更大的储存土壤养分的能力,主要反映了土壤质地特征;高程主要反映了土壤构型,已有研究表明,在冲积平原地区高程显著影响着土壤构型的分布(檀满枝等,2011)。林地和草地共同入选 MDS 的指标为有机质、速效钾,其中速效钾是最重要的土壤养分之一,能够有效促进植物根部生长,提高抗旱能力。综合国内外关于土壤质量评价的 MDS 研究成果,研究选取的不同土地利用类型 MDS 指标被广泛纳入 MDS(Bünemann et al., 2018; 杨振奇等, 2019; 张福平等, 2019; 王文武等, 2021),与大多数前人研究结果一致。此外,高程、黑土层厚度也被选入 MDS,说明该研究区土壤质量的影响因素还与土壤构型和黑土层厚度有关,这也为黑土地土壤质量评价指标的选择提供了新方向。另外,有研究表明,土壤中的微生物、微量元素也是评价黑土地土壤质量的重要因素(邓绍欢等, 2016)。因此今后需要深入研究如何进一步优化最小数据集,提高其适用性和科学性。

土壤质量参数受不同土地利用类型的评价指标

影响。研究区不同土地利用类型的土壤质量存在较大差异。水田和旱地平均 SQI 值低于林地和草地,林地和草地相比旱地和水田能够有效积累有机质,增加土壤保留氮、磷等养分的能力。水田和旱地由于长期耕作,土壤中的养分流失较多。林地的 SQI 空间变异性高,林地的土壤采样点部分位于农田附近且不同程度地受农药污染、机械压实、毁坏树木等人为活动的影响,导致土壤结构恶化和养分逐渐减少。水田平均 SQI 值较低的原因可能是由于部分水田位于河流周边,土壤的砂粒含量较高,有机质含量相对较低,黑土层厚度较薄。另外,近年来已有大量研究表明,随着水稻种植面积的增加,大面积的引水灌溉、江河水位抬高等原因导致三江平原地下水水位降低(王韶华等, 2003),因此需注意合理优化水资源和土地利用的配置来缓解水资源供需矛盾。研究区土壤质量整体处于中上水平,呈现从周边山区附近向中部区域增加的趋势,这与前人的研究结果具有高度的一致性(Tan et al., 2020; Jiang et al., 2020),突出了土地利用类型在改善或保持黑土地土壤质量方面的潜力。

4 结 论

本次研究采用主成分分析与 GIS 相结合的方式,选取 31 个评价指标对黑龙江宝清县平原区的水田、旱地、林地、草地的土壤质量进行了评价,主要取得以下结论。

(1)基于 MDS 和 TDS 计算得到的不同土地利用类型(水田、旱地、林地、草地)的土壤质量评价结果具有高度一致性,验证了评价方法的可靠性。

(2)不同土地利用方式下的土壤质量差异显著,林地和草地的平均 SQI 值高于水田和旱地,表明植被覆盖对土壤质量有积极影响。

(3)研究区域土壤质量整体处于中上水平,且在空间分布上呈现从周边山区附近向中北部地区增加

表 8 土壤质量半变异函数参数

Table 8 Semi-variogram parameters of soil quality

函数类型	平均误差	均方根误差	标准化平均误差	平均标准误差	标准化均方根误差
指数	-4.589E-05	0.072	0.006	0.084	0.882
高斯	-6.024E-04	0.072	-0.003	0.082	0.899
球面	-4.558E-04	0.072	-0.005	0.083	0.895
三角	-5.543E-04	0.072	-0.006	0.083	0.897

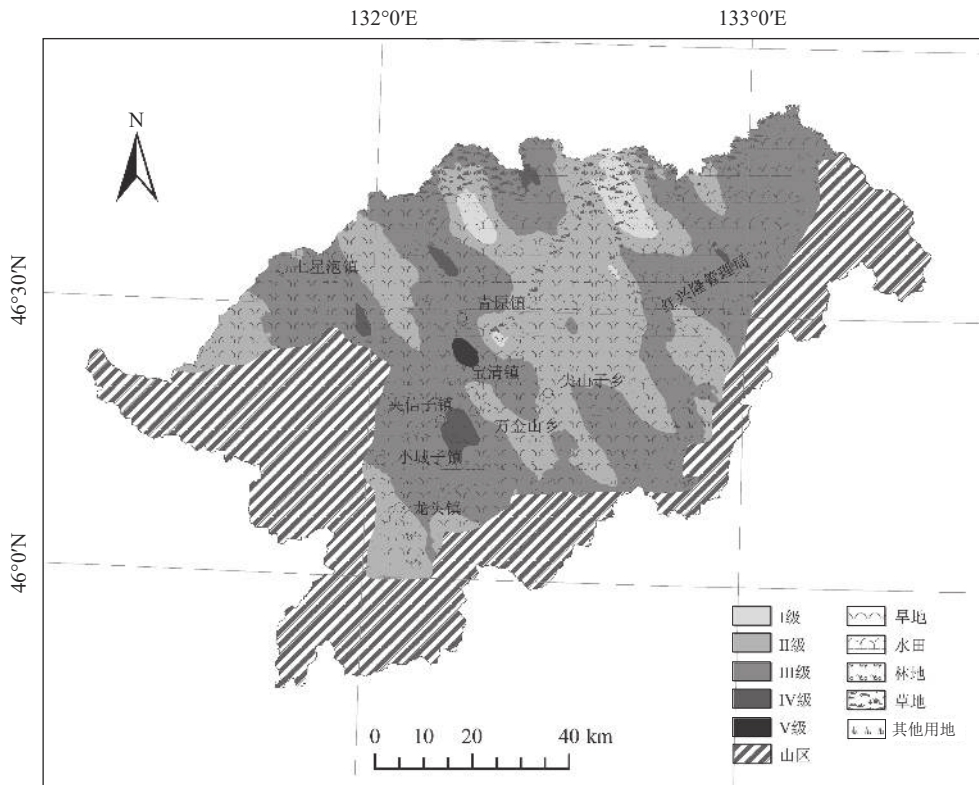


图6 平原区土壤质量的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of soil quality in plain area

的趋势。高斯模型最适合预测该区域土壤质量的空间分布,进一步证明了主成分分析与GIS结合使用在评估黑土地土壤质量方面的有效性和准确性。

References

- Armenise E, Redmile-Gordon M A, Stellacci A M, et al. 2013. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 130: 91–98.
- Abdel-Fattah M K, Mohamed E S, Wagdi E M, et al. 2021. Quantitative evaluation of soil quality using Principal Component Analysis: The case study of El-Fayoum depression Egypt[J]. *Sustainability*, 13(4): 1824.
- Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z, et al. 2018. Soil quality—A critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 120: 105–125.
- Chandel S, Hadda M S, Mahal A K. 2018. Soil quality assessment through minimum data set under different land uses of submontane Punjab[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(6): 658–674.
- Deng S H, Zeng L T, Guan Q, et al. 2016. Minimum dataset-based soil quality assessment of waterlogged paddy field in South China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 53(5): 1326–1333 (in Chinese with English abstract).
- Gong L, Zhang X N, Ran Q Y. 2015. Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim River based on minimum data set[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 52(3): 682–689 (in Chinese with English abstract).
- Hani A, Pazira E, Manshouri M, et al. 2010. Spatial distribution and mapping of risk elements pollution in agricultural soils of southern Tehran, Iran[J]. *Plant, Soil and Environment*, 56(6): 288–296.
- Han X Z, Li N. 2018a. Research progress of black soil in Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 38(7): 1032–1041 (in Chinese with English abstract).
- Han X Z, Zhou W X. 2018b. Effects and suggestions of black soil protection and soil fertility increase in Northeast China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33(2): 206–212 (in Chinese with English abstract).
- Jiang M, Xu L, Chen X, et al. 2020. Soil quality assessment based on a minimum data set: a case study of a county in the typical river delta wetlands[J]. *Sustainability*, 12(21): 9033.
- Li G L, Chen J, Tan M Z, et al. 2008. Establishment of a minimum dataset for soil quality assessment based on land use change[J]. *Acta Pedologica Sinica*, (1): 16–25 (in Chinese with English abstract).
- Li X, Li H, Yang L, et al. 2018. Assessment of soil quality of croplands in the Corn Belt of Northeast China[J]. *Sustainability*, 10(1): 248.
- Lou Y B, Shi D M, Jiang G Y, et al. 2019. Evaluation of soil quality in the cultivated-layer of sloping farmland in purple hilly area based on minimum data set[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 17(5): 75–85 (in Chinese with English abstract).
- Liao C, Wang D W, Tang L, et al. 2021. Construction of soil nutrient

- comprehensive evaluation system based on minimum data set in Chengdu Plain[J]. *Earth and Environment*, 49(2): 189–197 (in Chinese with English abstract).
- Li B Y, Li H, Guo X N, et al. 2021. Evaluation of soil quality of cultivated land in Ningxia area based on minimum data set[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 49(9): 195–201 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Ecology and Environment. 2018. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land (Trial)(GB 15618-2018)[S]. Beijing: China Environment Press (in Chinese).
- Mei N, Gu Y, Li D Z, et al. 2021. Soil quality evaluation in topsoil layer of black soil in Jilin Province based on minimum data set[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 37(12): 91–98 (in Chinese with English abstract).
- Miao S J, Zhao H F, Qiao Y F, et al. 2019. Assessment of tillage effects on soil quality for aeolian sandy soil in northeast China with tilth index[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, (4): 9–15 (in Chinese with English abstract).
- Mulat Y, Kibret K, Bedadi B, et al. 2021. Soil quality evaluation under different land use types in Kersa sub-watershed, eastern Ethiopia[J]. *Environmental Systems Research*, 10: 1–11.
- National Soil Survey Office. 1998. Chinese Soil[M]. Beijing: China Agricultural Press (in Chinese).
- Song Y H, Yang F C, Liu K, et al. 2022. A multivariate statistical analysis of the distribution and influencing factors of heavy metal elements in the cultivated land of the Sanjiang Plain[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 46(5): 1064–1075 (in Chinese with English abstract).
- Tan M Z, Mi S X, Li K L, et al. 2011. Influence of elevation factor on soil profile texture configuration: a case study of the alluvial plain of Fengqiu County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 31(8): 2060–2067 (in Chinese with English abstract).
- Tan Y, Chen H, Lian K, et al. 2020. Comprehensive evaluation of cultivated land quality at county scale: A case study of Shengzhou, Zhejiang Province, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4): 1169.
- Wang X, Gong Z. 1998. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China[J]. *Geoderma*, 81(3/4): 339–355.
- Wang S H, Tian Y. 2003. Preliminary research on groundwater table change and causes in San-jiang Plain[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, (2): 61–64 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y Y, Yang Z F, Yu T. 2011. Research progress of soil quality evaluation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 39(36): 22617–22622, 22657 (in Chinese with English abstract).
- Wu H Y, Jin R D, Fan Z W, et al. 2018. Assessment of fertility quality of black soil based on principal component and cluster analysis[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 24(2): 325–334 (in Chinese with English abstract).
- Wang W W, Zhu W Z, Li X, et al. 2021. Soil quality assessment of typical vegetation in dry and warm valley of Dadu River based on minimum data set[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 19(6): 54–59 (in Chinese with English abstract).
- Xi X H, Chen G G, Zhang D C, et al. 2014. Specification of Multi-Purpose Regional Geochemical Survey (1: 250 000) (DZ/T0258-2014)[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- Xu M X. 2003. Soil quality evolvement mechanism in the process of ecosystem restoration and its management in Loess hilly-gully region[D]. PhD Thesis of Northwest A&F University: 60–72. (in Chinese with English abstract).
- Yang Z F, Yu T, Li M, et al. 2016. Specification of land quality geochemical assessment(DZ/T0295-2016)[S]. Beijing: Geological Press (in Chinese).
- Yang L M, Li X Y, Ren Y X, et al. 2019. Soil quality evaluation of cultivated land in Changchun City based on minimum dataset[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 47(20): 305–310 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z Q, Qin F C, Yu X J, et al. 2019. Construction of artificial forest soil quality evaluation indices in the feldspathic sandstone region based on minimum data set[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 50(5): 1072–1078 (in Chinese with English abstract).
- Yin M, Wang S M, Ye J Y, et al. 2006. The specification of testing quality management for geological laboratories(DZ/T 0130-2006)[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- Zhang J, He C, Chen L, et al. 2018. Improving food security in China by taking advantage of marginal and degraded lands[J]. *Journal of Cleaner Production*, 171: 1020–1030.
- Zhang F P, Gao Z, Li X J, et al. 2019. Soil quality assessment of kiwifruit field using MDS method in Zhouzhi County[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 35(1): 69–75 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Q G, Sun B, Zhang T L. 1997. Soil quality and sustainable environment I. Definition and evaluation method of soil quality[J]. *Soils*, (3): 113–120 (in Chinese).
- Zhuo Z Q, Li Y, Gou Y X, et al. 2021. Quality evaluation and obstacle diagnosis of plough horizon based on minimum data set in dry farming region of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 52(9): 321–330 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 邓绍欢, 曾令涛, 关强, 等. 2016. 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*, 53(5): 1326–1333.
- 贡璐, 张雪妮, 冉启洋. 2015. 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*, 52(3): 682–689.
- 韩晓增, 李娜. 2018a. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. *地理科学*, 38(7): 1032–1041.
- 韩晓增, 邹文秀. 2018b. 我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议[J]. *中国科学院院刊*, 33(2): 206–212.
- 李桂林, 陈杰, 檀满枝, 等. 2008. 基于土地利用变化建立土壤质量评价

- 最小数据集[J]. [土壤学报](#), (1): 16–25.
- 娄义宝, 史东梅, 蒋光毅, 等. 2019. 基于最小数据集的紫色丘陵区坡耕地耕层土壤质量评价[J]. [中国水土保持科学](#), 17(5): 75–85.
- 廖程, 王德伟, 唐亮, 等. 2021. 基于最小数据集的成都平原某区土壤养分综合评价体系的构建[J]. [地球与环境](#), 49(2): 189–197.
- 李白云, 李慧, 郭鑫年, 等. 2021. 基于最小数据集的宁夏耕地土壤质量评价[J]. [江苏农业科学](#), 49(9): 195–201.
- 苗淑杰, 赵红飞, 乔云发, 等. 2019. 基于耕作指数评价耕作措施对东北风沙土耕层土壤质量的影响[J]. [中国土壤与肥料](#), (4): 9–15.
- 梅楠, 谷岩, 李德忠, 等. 2021. 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](#), 37(12): 91–98.
- 全国土壤普查办公室. 1998. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社.
- 生态环境部. 2018.《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)[S]. 北京: 中国环境出版社.
- 宋运红, 杨凤超, 刘凯, 等. 2022. 三江平原耕地土壤重金属元素分布特征及影响因素的多元统计分析[J]. [物探与化探](#), 46(5): 1064–1075.
- 檀满枝, 密术晓, 李开丽, 等. 2011. 冲积平原区高程因子对土壤剖面质地构型的影响——以封丘县为例[J]. [生态学报](#), 31(8): 2060–2067.
- 王韶华, 田园. 2003. 三江平原地下水埋深变化及成因的初步分析[J]. [灌溉排水学报](#), (2): 61–64.
- 汪媛媛, 杨忠芳, 余涛. 2011. 土壤质量评价研究进展[J]. [安徽农业科学](#), 39(36): 22617–22622, 22657.
- 吴海燕, 金荣德, 范作伟, 等. 2018. 基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价[J]. [植物营养与肥科学报](#), 24(2): 325–334.
- 王文武, 朱万泽, 李霞, 等. 2021. 基于最小数据集的大渡河干暖河谷典型植被土壤质量评价[J]. [中国水土保持科学](#), 19(6): 54–59.
- 许明祥. 2003. 黄土丘陵区生态恢复过程中土壤质量演变及调控[D]. 西北农林科技大学博士学位论文: 60–72.
- 奚小环, 陈国光, 张德存, 等. 2014.《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T0258—2014)[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 尹明, 王苏明, 叶家喻, 等. 2006.《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T 0130—2006)[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 杨忠芳, 余涛, 李敏, 等. 2016.《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295—2016)[S]. 北京: 地质出版社.
- 杨黎敏, 李晓燕, 任永星, 等. 2019. 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](#), 47(20): 305–310.
- 杨振奇, 秦富仓, 于晓杰, 等. 2019. 基于最小数据集的砭砂岩区人工林地土壤质量评价指标体系构建[J]. [土壤通报](#), 50(5): 1072–1078.
- 赵其国, 孙波, 张桃林. 1997. 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](#), (3): 113–120.
- 张福平, 高张, 李肖娟, 等. 2019. 基于最小数据集的周至县猕猴桃园地土壤质量评价[J]. [生态与农村环境学报](#), 35(1): 69–75.
- 卓志清, 李勇, 勾宇轩, 等. 2021. 基于最小数据集的东北旱作区耕层质量评价与障碍诊断[J]. [农业机械学报](#), 52(9): 321–330.