

基于最小数据集的吉林省黑土耕层土壤质量评价

梅楠¹, 谷岩¹, 李德忠², 梁尧³, 袁静超³, 刘剑钊³, 任军³, 蔡红光^{3*}

(1. 吉林农业大学农学院, 长春 130118; 2. 吉林省土壤肥料总站, 长春 130030; 3. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部东北植物营养与农业环境重点实验室, 长春 130033)

摘要: 黑土作为吉林中部平原粮食主产区主要土壤类型, 其质量的优劣直接影响区域生态安全和农业可持续发展。该研究以吉林省典型黑土耕层土壤作为研究对象, 采集 1 401 个土壤样本, 测定 8 项土壤理化指标及玉米产量。采用最小数据集法筛选评价指标, 对于黑土耕层土壤进行质量评价, 并综合土壤质量指数和产量提出评价指标的适宜范围。结果表明: 吉林省黑土耕层土壤质量评价最小数据集由耕层容重、有机质、速效磷、pH 构成, 由全量数据集 (Total Data Set, TDS)、重要数据集 (Important Data Set, IDS) 和最小数据集 (Minimum Data Set, MDS) 分别计算的土壤质量指数之间存在显著正相关关系, R^2 分别为 0.716、0.771, 表明 MDS 可以替代 TDS 对黑土耕层土壤质量进行评价。黑土玉米种植区耕层土壤质量指数分布在 0.22~0.75 之间, 均值为 0.53, 呈现东部高西部低的趋势。土壤质量指数随产量先增加后降低。黑土耕层保持较高土壤质量及产量的评价指标适宜范围分别为: 容重为 1.23~1.43 g/cm³, 酸碱度 (pH 值) 为 4.74~6.96, 有机质为 33.14~35.81 g/kg, 有效磷为 122.46~136.06 mg/kg。该研究结果可为吉林省黑土耕层土壤质量诊断、提高黑土肥力及选择适合农田管理措施提供理论及参数支撑。

关键词: 土壤; 耕层; 最小数据集; 土壤质量评价; 土壤质量指数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.011

中图分类号: S158.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0091-08

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.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.011 <http://www.tcsae.org>

Mei Nan, Gu Yan, Li Dezhong, et al. 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 (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 91-98. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.011 <http://www.tcsae.org>

0 引言

土壤作为地球生物圈的重要组成部分, 是农业和自然生态系统的基础^[1]。土壤质量的概念是在人口增加并对土地过度开发导致土壤资源退化进而威胁农业可持续发展的背景下提出来的^[2]。土壤质量是指土壤的综合能力, 涵盖维持生产能力、保护环境质量以及促进动植物健康 3 个方面^[3], 能够敏感地反映土壤条件及土壤管理的动态变化^[4]。这一概念的提出, 对于全面理解土壤, 合理使用和分配物资、财政等起到了关键作用^[5]。因此, 土壤质量优劣与农田科学管理、区域生态安全及农业可持续发展密切相关。

土壤质量评价工作是对土壤内在属性的量化表达, 通过土壤的物理、化学和生物特性来反映^[6-8]。其分析评价方法也从定性分析^[9]发展到定量分析^[10], 其中, 土壤质量指数 (Soil Quality Index, SQI) 因其计算简单性和定

量灵活性成为最常用的方法^[11-15]。虽然土壤物理、化学、生物属性都可以反映土壤质量, 但考虑到测定成本及测试方法难易程度等因素, 需根据研究目标有针对性的筛选最具代表性指标。最小数据集 (Minimum Data Set, MDS) 可以利用最少的指标来监测反映由于土壤管理措施改变引起的土壤质量变化, 目前已广泛应用于评估土地利用方式、耕作培肥方式、种植系统的改变对于土壤质量的影响^[16-20]。基于此, 可以通过求和^[21]、相乘^[22]和求均值^[23]的方法计算 SQI。然而, 这些方法并不能比较每个指标对 SQI 的贡献。综合质量指数法通过为 MDS 中的每个指标分配权重和标准化得分, 为解决上述难题提供了一个新的契机^[11-12]。

黑土是拥有黑色或暗黑色腐殖质表土层的、性状好、肥力高的优质土地, 主要分布在中国东北温带湿润、半湿润气候区。目前关于东北黑土区土壤的研究主要集中在两个方面, 分别是黑土在耕地化过程中土壤性质的改变以及其保护途径及调控机制。东北黑土区目前已进入稳定利用时期, 此时土壤肥力的退化、维持和提升, 主要依赖于农田管理措施^[24-26]。轮作、秸秆还田、施入有机肥等措施在改善例如土壤孔隙度, 土壤有机质等土壤结构及功能相关的特定指标中发挥重要作用^[27-31]。上述表明, 针对黑土多数研究仅从个别指标着手来探明其退化的原因及改善途径, 但因土壤的复杂属性, 土壤肥力的提升也应考虑土壤性质的互作效应, 对于黑土进行土

收稿日期: 2021-03-01 修订日期: 2021-05-18

基金项目: 第五批吉林省青年科技人才托举工程 (QT202128); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-07-G-6); 吉林农业大学科研启动基金项目 (0201-202023322)

作者简介: 梅楠, 博士, 讲师, 研究方向为土壤质量评价与耕作技术原理及应用。Email: meinan413@163.com

*通信作者: 蔡红光, 博士, 研究员, 主要研究方向为土壤培肥与养分资源高效利用。Email: caihongguang1981@163.com

壤质量综合评价显得尤为重要。

吉林省黑土面积 (1.1 万 km²) 占东北黑土面积的 16.18%，主要分布在中部平原粮食主产区，以全省 64% 的耕地面积生产出全省 80% 以上的粮食^[32]，其土壤质量的优劣对于保障吉林省乃至国家粮食安全至关重要。本研究以吉林省中部典型黑土耕层土壤作为研究对象，基于土壤结构与功能指标，构建土壤质量评价模型，通过建立 MDS 来筛选评价指标，探讨评价指标体系的可行性和适用性，提出黑土保持较高土壤质量及生产力的土壤参数适宜范围。研究结果可为提高黑土生产力、选择合理农田管理措施提供理论及参数支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑土广泛分布的吉林省中部平原地区，选择吉林、四平、松原及长春 4 市的玉米连作区黑土耕层土壤 (0~20 cm) 为研究对象，成土母质为黄土或黄土状母质。其中吉林、四平均属于中温带湿润季风气候，松原、长春分别属于温带大陆性季风气候。年平均气温分别为 3.9、5.0、4.5、4.8 °C，年平均降雨量分别为 700、650、423、582 mm。该区域均具有冬季、春季大风干燥，夏季高温多雨的气候特征。各采样区基本情况及采样点分布见表 1、图 1。

表 1 吉林省黑土耕层土壤取样点信息

Table 1 Soil sampling point information of layer of black soil in Jilin Province

城市 City	县(区) County	经纬度 Coordinate	采样点数量 Number of sampling points
吉林市	舒兰市	43°51'44"38' N, 126°24'-127°45' E	6
	永吉市	43°18'-43°35'N, 125°48'-126°40'E	4
	公主岭市	43°11'-44°09'N, 124°02'-125°18'E	201
四平市	梨树县	43°02'-43°46' N, 123°45'-124°53'E	105
	四平市内	42°31'-44°09'N, 123°17'-125°49'E	19
	扶余市	44°30'-44°44'N, 125°00'-126°10'E	130
松原市	前郭县	44°17'-45°28'N, 123°35'-125°19'E	25
	长岭县	43°59'-44°42'N, 123°06'-124°45'E	14
	宁江区	45°05'-45°32'N, 124°36'-125°05'E	1
长春市	德惠市	44°02'-44°53'N, 125°14'-126°24'E	188
	九台区	43°50'-44°31'N, 125°24'-126°29'E	170
	农安县	43.55°-44°55'N, 124°31'-125°45'E	72
	双阳区	43°53'N, 125°68'E	76
	榆树市	44°30'-45°15'N, 126°01'-127°5'E	198
	长春市内	43°05'-45°15'N, 124°18'-127°05'E	192

1.2 数据来源

1.2.1 样品采集

2017、2018 年玉米收获后，每块样地 30 m×30 m 区域范围内，基于随机性和代表性原则，采用混合采样法在耕地表层 (0~20 cm) 采集土壤样本共 1 401 份。采集的土壤样品经自然风干、过筛后用于土壤理化性质测定。

1.2.2 土壤理化性质及玉米产量测定

共测定土壤理化指标 8 项，其中耕层厚度采用钢卷尺测量；土壤容重测定采用环刀法；土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法-外加热法；酸碱度测定采用土水比

1:1 电极法；全氮测定采用半微量凯氏定氮法；有效磷测定采用 Olsen 法；速效钾测定采用 1 mol/L NH₄Ac 提取-火焰光度法；速效氮采用碱解扩散法测定。玉米产量测量采用多点采样取平均值法。

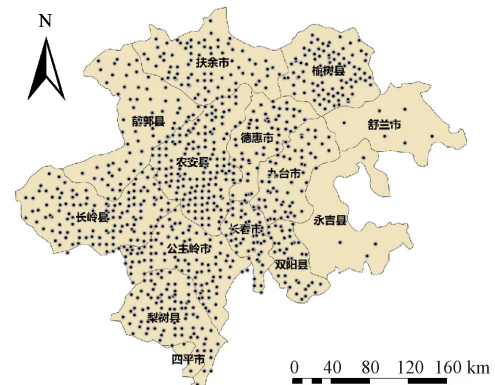


图 1 土壤采样分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of soil sampling distribution

1.3 土壤质量评价方法

1.3.1 最小数据集的构建

研究综合选取表征土壤理化性质的 8 个指标建立土壤质量全数据集 (Total Data Set, TDS)，利用皮尔森相关分析得到重要数据集 (Important Data Set, IDS)，主成分分析结合 Norm 值构建最小数据集^[14,18-19]。

Norm 值为该指标在由成分组成的多维空间中矢量常模的长度，长度越长，表明该指标在所有主成分的综合载荷越大，其解释综合信息的能力就越强。Norm 值计算公式如下：

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (\mu_{ik}^2 \cdot \lambda_k)} \quad (1)$$

式中 N_{ik} 是第 i 个指标在特征值 ≥ 1 的前 k 个主成分上的综合载荷； μ_{ik} 是第 i 个指标在第 k 个主成分上的载荷； λ_k 为第 k 个主成分的特征值。

1.3.2 土壤质量指数建立

各数据集评价指标通过因子分析确定权重，通过评价指标得分函数去量纲化得到标准得分^[2,10,22-23]。最后得到全体数据集的土壤质量指数 (SQI-TDS)、重要数据集的土壤质量指数 (SQI-IDS) 和最小数据集的土壤质量指数 (SQI-MDS)。计算公式如下：

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \cdot S_i \quad (2)$$

式中 SQI 为土壤质量指数 (Soil Quality Index)， W_i 为第 i 项土壤指标的权重， S_i 为第 i 项土壤指标的标准得分， n 为各数据集的参评指标数量。

1.4 数据处理

应用 SPSS22.0 对数据进行主成分分析及双变量相关性分析，用 Origin 2018 对数据进行线性拟合。

2 结果与分析

2.1 耕层土壤属性描述性统计分析

耕层土壤质量一般通过土壤理化指标反映，耕层土壤

属性特征差异明显（表 2）。一般采用变异系数（CV）来反映指标的敏感程度，可分为 4 种类型：不敏感指标 $CV < 10\%$ ；低敏感指标 $10\% \leq CV < 50\%$ ；中等敏感指标 $50\% \leq CV < 100\%$ ；强敏感指标 $CV \geq 100\%$ ^[33]。本研究选取 8 项理化指标作为评价因子，耕层容重为不敏感指标，变异系数为 6.37%。耕层厚度、pH 值、有机质、全氮、碱解氮、速效钾变异系数分别为 17.18%、13.54%、18.06%、25.42%、26.78%、31.94%，为低敏感指标。速效磷（54.69 mg/kg）为中敏感指标，变异系数为 64.82%。由此可以看出黑土耕层土壤化学指标的变异性普遍大于物理指标变异性。玉米产量为 3.83~15.00 t/hm²，变异系数 12.05%，接近不敏感指标，可见黑土能够维持较稳定的农田生产力。

表 2 耕层质量评价指标隶属度函数与参数
Table 2 Membership function and parameter of evaluation indicators for cultivated land quality

指标 Index	土壤属性指标对作物产量的作用 Effect of soil attribute index on crop yield	隶属函数 Membership function	隶属函数参数 Membership function parameter			
			a	b	b ₁	b ₂
耕层厚度 Top layer thickness/cm	+	$f(x) = \begin{cases} 1.0, & x \geq b \\ 0.1 + 0.9 \times \left(\frac{x-a}{b-a} \right), & a < x < b \\ 0.1, & x \leq a \end{cases}$	13.00	35.00		
全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	+		0.19	2.47		
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	+		10.63	44.97		
碱解氮 Available nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	+		23.52	282.00		
速效磷 Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	+		7.81	182.70		
速效钾 Available potassium/(mg·kg ⁻¹)	+		41.49	495.00		
耕层容重 Bulk density of topsoil/(g·cm ⁻³)	+ -	$f(x) = \begin{cases} 1.0, & b_1 < x \leq b_2 \\ 1 - 0.9 \times \left(\frac{x-b_1}{b_2-b_1} \right), & b_1 < x \leq b_2 \\ 0.1 + 0.9 \times \left(\frac{x-a}{b_1-a} \right), & a < x \leq b_1 \end{cases}$	1.11	1.53	1.27	1.39
酸碱度 pH	+ -		3.90	8.27	5.18	6.27

注：“+”表示土壤指标对产量呈 S 型曲线关系；“-”表示土壤指标对产量呈反 S 型曲线关系；“+ -”表示土壤指标对产量呈抛物线型曲线关系；a、b、b₁、b₂ 分别为隶属函数临界值。下同。

Note: “+” indicates that the relationship between soil index and yield is S-shaped curve; “-” indicates an inverse S-shaped curve relationship between soil indexes and yield; “+ -” indicates a parabolic curve relationship between soil indexes and yield; a, b, b₁ and b₂ are the critical values of membership function respectively. The same below.

由全国第二次土壤普查分级标准^[34]及吉林省第二次土壤普查结果（表 3）可知，土壤有机质（均值为 26.78 g/kg）及全氮（均值为 1.36 g/kg）与吉林省第二次土壤普查时（23.71 g/kg、1.25 g/kg）水平相近，同属于三级中等水平。说明对于黑土而言，丰厚的腐殖质层很好地调节了土壤养分循环流动，较好地保持了土壤的养分供应。速效养分（碱解氮、速效磷、速效钾）及 pH 值较吉林省第二次土壤普查结果相比，都有不同程度的提升或降低。其中碱解氮变化幅度较小（-2.17%）属于三

中等水平。速效钾及 pH 变化幅度较大（+28.30%、-15.19%），其中速效钾属于二级丰富水平，而 pH 则由中性变化为弱酸性。速效磷的变化幅度是最大的，高达 +746.59%，由原来的五级很缺乏水平提升到一级很丰富水平。产生以上较大变化的原因，可能是磷元素通过施肥得到补充，同时它在土壤中运动较慢，经过长期积累所致。而土壤 pH 从中性变为弱酸性可能是由于研究区域冬春季节干旱大风导致土壤风化程度较大，同时雨热同季使土壤富铝化作用明显，以及不合理的施肥措施所致。

表 3 吉林省黑土耕层土壤质量评价指标统计特征及第二次土壤普查结果

土壤指标 Soil index	代码 Code	最小值 Minimum value	最大值 Maximum Value	均值 Average value	中值 Median	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	吉林省第二次土壤普查结果 Results of the second soil survey in Jilin province
耕层厚度 Top layer thickness/cm	X1	13.00	35.00	19.95	20.00	3.43	17.18	--
耕层容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	X2	1.11	1.53	1.33	1.32	0.85	6.37	--
酸碱度 pH	X3	3.90	8.27	5.76	5.70	0.78	13.54	6.79
全氮 Total nitrogen of topsoil/(g·kg ⁻¹)	X4	0.19	2.47	1.36	1.36	0.35	25.42	1.25
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	X5	10.63	44.97	26.78	26.78	4.84	18.06	23.71
速效氮 Available nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	X6	23.52	282.00	119.74	117.30	32.07	26.78	122.40
速效磷 Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	X7	7.81	182.70	54.69	44.19	35.57	64.82	6.46
速效钾 Available potassium/(mg·kg ⁻¹)	X8	41.19	495.00	168.96	163.00	53.96	31.94	131.69
产量 Yield/(t·hm ⁻²)	Y	3.83	15.00	10.38	10.28	1.25	12.05	--

2.2 耕层土壤质量评价指标体系

2.2.1 最小数据集建立

本研究共选取耕层厚度（Soil Depth, SD）、容重（Bulk Density, BD）、pH 值、全氮（Total Nitrogen, TN）、速效磷（Available Phosphorus, AP）、速效钾（Available potassium, AK）、碱解氮（Available Nitrogen, AN）、有机质（Soil Organic Matter, SOM）8 个指标进行土壤质量评价构成全量数据集（Total Data Set, TDS），

从以上 8 个指标中筛选出与产量显著相关的 6 个指标（SD、BD、pH、AP、AK、SOM）构成重要数据集（Important Data Set, IDS）（表 4）。为排除 IDS 中各指标多重共线性问题，同时筛选出土壤质量评价中的关键指标，最小数据集（Minimum Data Set, MDS）被建立。对 IDS 中的各指标进行主成分分析（表 5），提取特征值>1 的 3 个主成分（累计贡献率为 68.76%）来解释大部分参评指标的变异性。

表 4 耕层土壤评价指标皮尔森相关分析系数矩阵
Table 4 Pearson correlation analysis coefficient matrix for topsoil evaluation index

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	Y
X1	1								
X2	0.054*	1							
X3	-0.065*	-0.047	1						
X4	-0.078**	-0.115**	0.031	1					
X5	-0.122**	-0.088**	0.101**	0.723**	1				
X6	0.187**	0.173**	-0.010	0.75**	0.098**	1			
X7	0.038	-0.039	-0.186**	0.336**	0.213**	0.201**	1		
X8	0.003	-0.043	0.092**	0.163**	0.416**	-0.176**	0.121**	1	
Y	-0.179**	-0.080**	0.108**	0.023	0.064*	0.041	-0.087**	-0.090*	1

注：*为相关关系显著 ($P<0.05$)；**为相关关系极显著 ($P<0.01$)。
Note: * denotes significant correlation ($P<0.05$); ** is a very significant correlation ($P<0.01$).

表 5 重要数据集中各指标主成分分析 (PCA) 结果及 Norm 值
Table 5 Principal component analysis results and Norm values of each indicator in the important data set

重要数据集指标参数 Soil index of IDS	PCA 1	PCA 2	PCA 3	Norm 值 Norm value
耕层厚度 Top layer thickness	-0.149	-0.594	-0.059	0.667
耕层容重 Bulk density	-0.040	-0.048	0.967	0.975
酸碱度 pH	0.032	0.731	-0.153	0.808
有机质 Organic matter	0.735	0.170	-0.130	0.853
速效磷 Available phosphorus	0.677	-0.466	-0.125	0.919
速效钾 Available potassium	0.565	0.233	0.153	0.698
特征值 Eigenvalue	1.251	1.175	1.012	
方差贡献率 Variance contribution /%	25.029	23.499	20.232	
累积方差贡献率 Cumulative variance contribution /%	25.029	48.528	68.760	

在各主成分中，通过 Norm 值（最高 Norm 值 10% 范围内）及各指标相关系数 (<0.4) 来判定是否入选 MDS。结合表 4 可知，主成分 1 中 SOM 与 AP 的 Norm 值较高，但两者相关系数 <0.4 ，全部被选入 MDS。主成分 2、3 中分别只有 pH 及 BD 拥有较高 Norm 值可被选入 MDS。因此黑土耕层土壤质量评价指标体系有 SOM、AP、BD、pH 值。本研究初选指标 8 个，MDS 包含 4 个指标，指标筛选过滤率达到 50.0%，较为显著地简化了评价指标体系，最大程度消除了指标间因信息重叠对评价结果造成的影响。

2.2.2 最小数据集合理性验证

最小数据集评价指标体系合理性验证是土壤质量评价的重要环节^[20]，最小数据集指标选择的合理性直接影响耕层土壤质量评价的准确性。分别对 TDS 与 IDS 中各指标进行主成分分析，得到各个指标的公因子方差确定权重（表 6）。将各指标标准化后代入 SQI 函数计算不同数据集形成的 SQI。其中全量数据集土壤质量指数 (SQI-TDS) 介于 0.28~0.71，平均值为 0.53，重要数据集土壤质量指数 (SQI-IDS) 介于 0.27~0.81，平均值为 0.59，最小数据集土壤质量指数 (SQI-MDS) 介于 0.22~0.75，平均值为 0.53。从线性回归分析结果（图 2）可知，MDS 与 IDS 计算出的 SQI 与 SQI-TDS 均存在显著的正相关关系 ($P<0.001$)，且 SQI-MDS 决定系数大于 SQI-IDS 决定系数 ($0.771>0.716$)。说明建立的黑土耕层土壤质量评价体系能够较好地反映

全量数据集中对于耕层土壤质量评价的信息，并且具有较好的代表性。

表 6 耕层土壤质量评价指标公因子方差及权重
Table 6 Common factor variance and weight of topsoil quality evaluation index

土壤指标 Soil index	公因子方差 Common factor variance			权重 Weights		
	全数 数据集 TDS	重要 数据集 IDS	最小 数据集 MDS	全数 数据集 TDS	重要 数据集 IDS	最小 数据集 MDS
耕层厚度 Top layer thickness	0.532	0.378	0.589	0.097	0.107	--
耕层容重 Bulk density	0.621	0.940	0.864	0.113	0.265	0.248
酸碱度 pH	0.615	0.553	0.572	0.112	0.156	0.164
全氮 Total nitrogen	0.772	--	--	0.141	--	--
有机质 Organic matter	0.736	0.586	0.680	0.135	0.165	0.196
碱解氮 Available nitrogen	0.726	--	--	0.133	--	--
速效磷 Available phosphorus	0.600	0.691	0.773	0.110	0.195	0.222
速效钾 Available potassium	0.870	0.397	--	0.159	0.112	--

Note: TDS, Total data set; IDS, Important data set; MDS, Minimum data set.

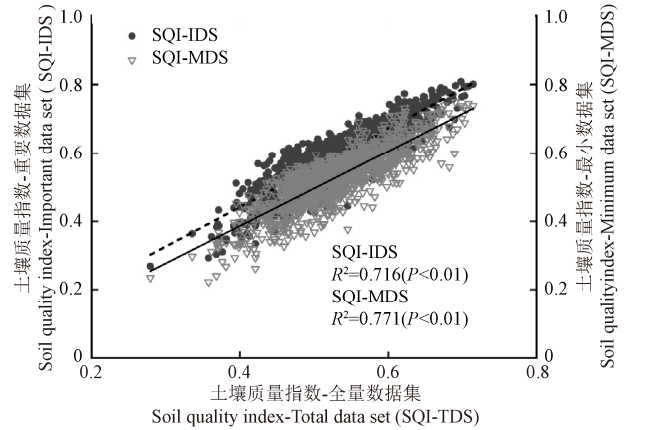


图 2 不同数据集土壤质量指数相关性
Fig.2 Correlation of soil quality indexes among different data sets

2.3 黑土耕层土壤质量评价

土壤质量指数是通过集成去量纲化的评价指标所得到的，其数值大小反映土壤综合特性。本文采用 MDS 指标体系对吉林省中部黑土耕层土壤质量进行评价。从县域尺度来看，整体呈现东部高西部低的趋势（图 3）。进一步将 SQI 结合产量来看，土壤质量指数的变化具有随产量的增加先增加后下降的趋势（图 4）。说明土壤质量的提升在一定范围内可以促进产量的提升，但当产量更大幅度提升时，则可能通过掠夺式的生产方式进而破坏土壤质量而得到的。

根据耕层土壤质量与作物生产力、隶属函数的对应关系，结合 SQI-MDS 与产量拟合曲线，黑土耕层土壤质量指数处于 0.69~0.76 区间时，能维持较好的土壤质量及较高的产量，耕层处于相对合理的状态。评价指标的隶属函数表示该指标与土壤质量指数之间的近似一元函数关系，因此当 SQI-MDS 处于 0.69~0.76 区间时，隶属函数值 $f(x)$ 也应处于 0.69~0.76 之间，从而可根据隶属函数反推计算对应评价指标的适宜范围值（表 7）。从表中可以看出，黑土耕层土壤质量评价指标体系适宜范围分别是容重为 1.23~1.43 g/cm³，pH 值为 4.84~6.96，有机

质为 33.14~35.81 g/kg, 速效磷为 122.46~136.06 mg/kg。上述耕层土壤参数适宜范围可为提升黑土玉米种植区耕层土壤质量提供依据, 即可以通过改变调控措施使核心指标处于适宜范围, 从而改善耕层土壤质量, 更大程度地发挥黑土生产水平。

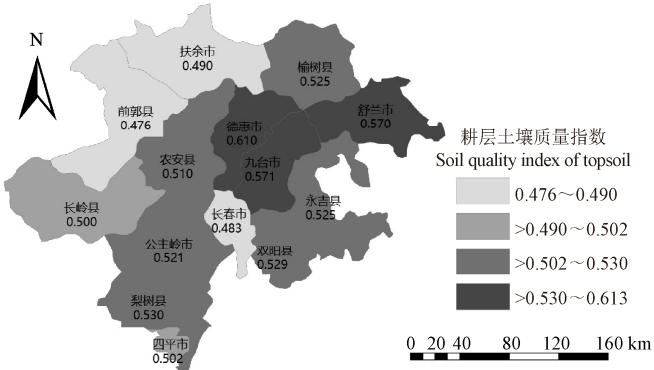


图 3 吉林省中部各县域黑土耕层土壤质量
Fig.3 Topsoil quality of black soil in different counties of central Jilin Province

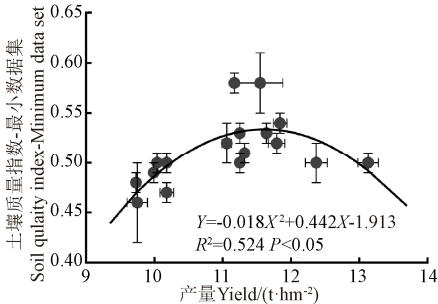


图 4 SQI-MDS 与产量关系拟合图 (县域尺度)
Fig.4 Fitting diagram of SQI-MDS and yield (county scale)

表 7 MDS 土壤评价指标体系适宜范围			
Table 7 Appropriate range of MDS soil evaluation index system			
指标 Index	隶属函数 类型 Membership function type	隶属函数 Membership function	适宜范围 Appropriate range
耕层容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	+ -	$f(x) = 1 - 0.9 \times \left(\frac{x - 1.39}{0.14} \right)$	1.23~1.43
		$f(x) = 0.1 + 0.9 \times \left(\frac{x - 1.11}{0.16} \right)$	
酸碱度 pH	+ -	$f(x) = 1 - 0.9 \times \left(\frac{x - 6.27}{2} \right)$	4.74~6.96
		$f(x) = 0.1 + 0.9 \times \left(\frac{x - 3.90}{1.28} \right)$	
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	+	$f(x) = 0.1 + 0.9 \times \left(\frac{x - 10.63}{34.34} \right)$	33.14~ 35.81
速效磷 Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	+	$f(x) = 0.1 + 0.9 \times \left(\frac{x - 7.81}{174.89} \right)$	122.46~ 136.06

3 讨论

3.1 土壤质量评价方法

在由土壤、作物、气候组成的生物小循环中, 土壤肥力、环境和生产力的可持续性土壤质量的高低息息

相关^[13]。国内外学者针对土壤质量定量评价提出了许多方法, 例如内梅罗综合指数法^[35]、灰色关联分析法^[36]、TOPSIS^[37]、土壤质量指数法^[8,10,38], 其中土壤质量指数法的最大优势是能够充分考虑评价指标实测值、权重及指标间相互作用对评价结果的共同影响。同时, 在筛选评价指标时, 最小数据集 (Minimum data set, MDS)因简单易行、经济适用和可操作性强等原因通常与土壤质量指数法相结合, 并被广泛应用^[3,5,7,10,17,18]。综合相关研究结果, 结合黑土特性及数据可获得性, 本研究分别选择排在使用频率前 6 位的化学指标 (SOM、AP、AK、AN、pH、TN) 和排在第 1 位和第 5 位的两个物理指标 (BD、SD) 作为 MDS 指标筛选的 TDS (初始指标)^[14,19]。利用 PCA 结合 NORM 值的方法尽可能避免评价指标所包含的土壤质量信息被忽略, 用较少的指标表达大部分信息量, 从而筛选出 MDS^[20,39]。MDS 中土壤有机质被筛选频率最高 (88%), 土壤容重、速效磷被筛选频率分别为 52%和 50%, 与大多数前人研究结果一致, 表明本研究所选择的 TDS 与筛选出来的 MDS 均有很好的代表性^[24,37,39]。SQI-MDS 与 SQI-TDS 的显著相关关系进一步说明 MDS 能够较好替代 TDS 指标对黑土耕层土壤质量进行正确评价 (图 2)。根据 MDS 筛选出的 4 个评价指标, 结合农业生产实际情况, 耕层容重、土壤有机质和速效磷通过耕作和施肥措施易于改善^[39], 而土壤 pH 一般通过常规的耕作和培肥措施是难以改善的, 所以在农业生产过程中, 要注意酸性肥料的施用。

3.2 吉林省黑土耕层土壤质量

通过计算 SQI-MDS 得到吉林省黑土耕层土壤质量指数各样点变化范围为 0.22~0.75, 均值为 0.54, 除长春市外, 整体呈现出自东向西逐渐递减趋势 (图 3)。基本符合评价指标有机质和速效磷东高西低、东南高西北低的空间分布特征^[40]。其中长春市 SQI 较低可能由于采样点距工业厂区较近, 土壤受到不同程度污染所致^[41]。土壤生产力的提升与可持续是研究土壤质量的重要目标之一, 县域尺度上土壤质量指数与产量的拟合关系也进一步证明了 MDS 评价土壤质量的科学性 (图 4)。与大多数研究结果一致, 黑土玉米田耕层土壤质量指数与产量存在显著的相关关系^[13,17,20,39]。不同的是, 大部分研究结果表明土壤质量指数与产量呈显著正相关关系, 而本研究则表明土壤质量指数随产量呈现先增加后下降的趋势。说明产量的提升在一定程度上可以通过提升土壤质量来实现, 但对于产量的过分追求, 采取不适当的农田管理措施则可能会对土壤质量带来负面影响。根据耕层土壤质量与作物生产力、隶属函数的对应关系, 结合 SQI-MDS 与产量拟合曲线, 能够得出较高土壤质量指数及较高产量时 MDS 指标的适宜范围, BD 为 1.23-1.43 g/cm³, pH 为 4.74~6.96, SOM 为 33.14~35.81 g/kg, AP 为 122.46~136.06 mg/kg (表 6)。对于 MDS 各指标, 其中 BD, pH 及 SOM 在相关研究中基本达成普遍共识, 而 AP 作为核心评价指标为提升黑土生产力提供了新的思考方向^[14,33,38,39,42]。

4 结 论

1) 吉林省黑土玉米种植区耕层土壤养分属于中等偏上水平, 土壤有机质 (26.78 g/kg)、全氮 (1.36 g/kg)、碱解氮 (119.74 mg/kg) 处于三级中等水平, 速效钾 (168.96 mg/kg) 处于二级丰富水平, 速效磷 (54.69 mg/kg) 处于一级丰富水平, 土壤酸化现象明显 (pH 均值为 5.76), 土壤化学指标变异系数大于物理指标。

2) 本研究所选择的 8 项黑土玉米田耕层土壤质量评价指标特征差异明显, 覆盖土壤质量评价指标中使用频率排名前 6 位的指标, 全量数据集 (TDS) 具有较好代表性。利用最小数据集 (MDS) 评价方法, 从 8 项指标中筛选出耕层容重、有机质、速效磷、pH 值 4 个指标, 构成黑土玉米田耕层土壤质量评价指标体系。通过不同数据集计算的土壤质量指数 (SQI) 之间存在显著的正相关关系, 且 SQI-TDS 均值与 SQI-MDS 均值相等, 说明筛选出的 MDS 能够很好的替代 TDS 对黑土玉米田耕层土壤质量进行评价。

3) 黑土玉米种植区耕层土壤质量指数分布在 0.22~0.75 之间, 均值为 0.53, 呈现东高西低的趋势。县域尺度上, 土壤质量指数随产量先增加后降低趋势。说明在农业生产实践中, 对于高产的追求一定要配合适当的农田管理措施, 通过提高土壤质量来达成, 不应以牺牲土壤质量作为代价。

4) 黑土玉米种植区保持较高土壤质量指数及产量的最小数据集各指标适宜范围分别为: 容重为 1.23~1.43 g/cm³, pH 值为 4.74~6.96, 有机质为 33.14~35.81 g/kg, 速效磷为 122.46~136.06 mg/kg。目前, 研究区域土壤容重、pH 处于适宜范围, 有机质与速效磷含量的提升还应通过秸秆还田、合理施用有机肥及磷肥等培肥措施来实现。

[参 考 文 献]

- [1] 黄昌勇, 李保国, 潘根兴. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [2] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 3-11.
- [4] 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. Yang Qijun, Wu Kening, Feng Zhe, et al. Advancement and revelation of the research on soil quality assessment on large spatial scales[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(3): 565-578. (in Chinese with English abstract)
- [5] Douglas L K, Kristen S V, Kenneth A S, et al. Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 195: 84-94.
- [6] 张华, 张甘霖. 土壤健康指标和评价方法[J]. *土壤*, 2001(6): 326-330, 333. Zhang Hua, Zhang Ganlin. Soil health indicators and evaluation methods[J]. *Soil*, 2001(6): 326-330, 333. (in Chinese with English abstract).
- [7] Bhardwaj A K, Jasrotia P, Hamilton S K, et al. Ecological

- management of intensively cropped agro-ecosystems improves soil health with sustained productivity[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140: 419-429.
- [8] de Paul, Obade V, Lal R. A standardized soil health index for diverse field conditions[J]. *Sci. Total Environ.*, 2016, 541, 424-434.
- [9] Karlen D L, Ditzler C A, Andrews S S. Soil quality: Why and how?[J] *Geoderma*, 2003, 114: 145-156.
- [10] Askari M S, Holden N M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management[J]. *Geoderma*, 2014, 230-231, 131-142.
- [11] Doran J W, Parkin T B. Defining and Assessing Soil Quality[M]// Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. *Defining Soil Quality for A Sustainable Environment* Madison, WI: Soil Science Society of America, 1994.
- [12] Hammac W A, Stott D E, Karlen D L, et al. Crop, tillage, and landscape effects on near-surface soil quality indices in Indiana[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80: 1638-1652.
- [13] 谢坚, 郑圣先, 杨曾平, 等. 湖南双季稻种植区不同生产力水稻土质量综合评价[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(23): 4840-4851. Xie Jian, Zheng Shengxian, Yang Zengping, et al. Comprehensive evaluation of soil quality in different productive paddy soils in typical double-rice cropping regions of Hunan Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(23): 4840-4851. (in Chinese with English abstract)
- [14] 娄义宝, 史东梅, 蒋光毅, 等. 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]. *中国水土保持学报*, 2019, 17(5): 76-85. Lou Yibao, Shi Dongmei, Jiang Guangyi, et al. 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*, 2019, 17(5): 76-85. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张亚丽, 吕家珑, 金继运, 等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 307-314. Zhang Yali, Lv Jialong, Jin Jiyun, et al. Effects of chemical fertilizer and straw return on soil fertility and spring wheat quality[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 307-314. (in Chinese with English abstract)
- [16] Rezaei S A, Gilkes R J, Andrews S S. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands[J]. *Geoderma*, 2006, 136, 229-234.
- [17] 邓绍欢, 曾令涛, 关强, 等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 13-26. Deng Shaohuan, Zeng Lingtao, Guan Qiang, et al. Minimum dataset-based soil quality assessment of waterlogged paddy field in South China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 13-26. (in Chinese with English abstract)
- [18] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 682. Gong Lu, Zhang Xueni, Ran Qiyang. Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim River based on minimum data set[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 682. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈梦军, 肖盛杨, 舒英格. 基于 CNKI 数据库对土壤质量评价研究现状的分析[J]. *山地农业生物学报*, 2018, 37(5): 41-48.

- Chen Mengjun, Xiao Shengyang, Shu Yingge. Analysis on soil quality evaluation studies based on CNKI database[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2018, 37(5): 41-48. (in Chinese with English abstract)
- [20] 乔云发, 钟鑫, 苗淑杰, 等. 基于最小数据集的东北风沙土农田耕层土壤质量评价指标[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 132-138.
- Qiao Yunfa, Zhong Xin, Miao Shujie, et al. Evaluation indicators of soil quality in plough layer of aeolian sandy land in Northeast China based on minimum data set[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 132-138. (in Chinese with English abstract)
- [21] Cambardella C A, Moorman T B, Andrews S S, et al. Watershed-scale assessment of soil health in the loess hills of southwest Iowa[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 78: 237-247.
- [22] Amirinejad A A, Kamble K, Aggarwal P, et al. Assessment and mapping of spatial variation of soil physical health in a farm[J]. Geoderma, 2011, 160: 292-303.
- [23] Svoray T, Hassid I, Atkinson P M, et al. Mapping soil health over large agriculturally important areas[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79: 1420-1434.
- [24] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土农田关键生态过程与调控[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2011.
- [25] 孙冰洁. 不同耕作方式下土壤微生物在黑土有机碳固定中的作用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- Sun Bingjie. Effects of Soil Microorganisms on Organic Carbon Fixation in Black Soil under Different Tillage Practices[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [26] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 施入不同土层的秸秆腐殖化特征及对玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 563-570.
- Zou Wenxiu, Han Xiaozeng, Lu Xinchun, et al. Effects of different soil layers on straw humification and maize yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 563-570. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张福韬, 乔云发, 苗淑杰, 等. 长期玉米连作下黑土各组分有机质化学结构特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(10): 1913-1924.
- Zhang Futao, Qiao Yunfa, Miao Shujie, et al. Chemical structure characteristics of organic matter in black soil under long-term continuous cropping of maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(10): 1913-1924. (in Chinese with English abstract)
- [28] 彭现宪. 长期不同种植模式下东北黑土理化性状和有机碳稳定性的差异研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- Peng Xianxian. Differences in Physical and Chemical Properties and Organic Carbon Stability of Black Soil in Northeast China under Different Planting Patterns[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [29] Banger K, Toor G S, Biswas A, et al. Soil organic carbon fractions after 16-years of applications of fertilizers and organic manure in a Typic Rhodalfs in semi-arid tropics[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 86(3): 391-399.
- [30] Ding X L, Han X Z, Liang Y, et al. Changes in soil organic carbon pools after 10 years of continuous manuring combined with chemical fertilizer in a mollisol in China[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 122: 36-41.
- [31] Zhang B, Li Y J, Ren T S, et al. Short-term effect of tillage and crop rotation on microbial community structure and enzyme activities of a clay loam soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(7): 1077-1085.
- [32] 窦森. 黑土地与秸秆富集深还[J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(5): 511-516.
- Dou Sen. Black earth conservation and corn stover deep incorporation to subsoil[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2016, 38(5): 511-516. (in Chinese with English abstract)
- [33] 史东梅, 江娜, 蒋光毅, 等. 紫色土坡耕地耕层质量影响因素及其敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 135-143.
- Shi Dongmei, Jiang Na, Jiang Guangyi, et al. Influencing factors and sensitivity analysis of cultivated-layer quality of purple soil slope farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(3): 135-143. (in Chinese with English abstract)
- [34] 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.
- [35] 杨玉敏, 师学义, 张琛. 基于内梅罗指数法的复垦村庄土壤重金属污染评价及空间分布[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 338-343.
- Yang Yumin, Shi Xueyi, Zhang Chen. Spatial distribution and evaluation of heavy metal pollution of reclaiming village based on Nemerow integrated pollution index method[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(4): 338-343. (in Chinese with English abstract)
- [36] 余林, 徐海宁, 肖复明. 不同施肥毛竹林土壤质量的灰色关联分析[J]. 南方林业科学, 2018, 46(3): 1-4.
- Yu Lin, Xu Haining, Xiao Fuming. Grey relation analysis of soil quality of Phyllostachys edulis stands at different fertilization[J]. South China Forestry Science, 2018, 46(3): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [37] 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 等. 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5484-5492.
- Xie Xuefeng, Pu Lijie, Zhu Ming, et al. Assessment of soil quality in coastal tidal flat reclamation areas based on MDS-TOPSIS model[J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5484-5492. (in Chinese with English abstract)
- [38] Mei N, Yang B, Tian P, et al. Using a modified soil quality index to evaluate densely tilled soils with different yields in Northeast China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26: 13867-13877.
- [39] 乔云发, 苗淑杰, 陆欣春, 等. 耕作方式和有机肥对风沙土区玉米产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(4): 124-127.
- Qiao Yunfa, Miao Shujie, Lu Xinchun, et al. Effect of tillage method and organic fertilizer on maize yield in aeolian sandy soil[J]. J Anhui Agric Sci, 2018, 46(4): 124-127. (in Chinese with English abstract)
- [40] 徐志强. 东北区耕地质量变化趋势研究[J]. 农业科技与装备, 2012(7): 12-14.
- Xu Zhiqiang. Research on the changing trend in arable land quality in Northeast China[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2012(7): 12-14. (in Chinese with English abstract)
- [41] 翟航. 长春市土壤重金属分布规律及土壤环境质量评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- Zhai Hang. Research on Distribution Characteristic of the Soil Heavy Metals and Assessment of the Soil Environmental

- Quality in Changchun[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [42] 卓志清, 李勇, 勾宇轩, 等. 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/OL]. 农业机械学报, 2021. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20210510.1046.008.html>.
- Zhuo Zhiqing, Li Yong, Gou Yuxuan, et al. Quality evaluation and obstacle diagnosis of plough horizon based on Minimum data set in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20210510.1046.008.html>. (in Chinese with English abstract)

Soil quality evaluation in topsoil layer of black soil in Jilin Province based on minimum data set

Mei Nan¹, Gu Yan¹, Li Dezhong², Liang Yao³, Yuan Jingchao³, Liu Jianzhao³, Ren Jun³, Cai Hongguang^{3*}

(1. College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. Soil and Fertilizer Station of Jilin Province, Changchun 130030, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Northeast Plant Nutrition and Agro-Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changchun 130033, China)

Abstract: Soil quality refers to the comprehensive capacity of the soil, covering three aspects of maintaining productive capacity, protecting environmental quality, and promoting animal and plant health, which can sensitively reflect the dynamic changes of soil conditions and soil management. Soil quality assessment is the quantitative expression of soil intrinsic properties, which can be reflected through soil physical, chemical, and biological properties. As the main soil type in the main grain production area of the central plain of Jilin, the quality of black soil directly affects the regional ecological security and sustainable agricultural development. In this study, the typical black soil in Jilin Province was taken as the research object, 1401 soil samples were collected, and 8 soil physical and chemical indexes and maize yield were determined. The Minimum Data Set (MDS) method was used to screen the evaluation indicators, the quality of the black soil was evaluated, and the suitable range of soil parameters was proposed by combining the Soil Quality Index (SQI) and the yield. The results showed that the surface soil nutrient of black soil maize growing area in Jilin Province was above the medium level, soil acidification was obvious, and the variation coefficient of soil chemical index was greater than that of the physical index. MDS for soil quality evaluation of black soil in Jilin Province consisted of soil Bulk Density (BD), Soil Organic Matter (SOM), Available Phosphorus (AP), and pH value. The filtering rate of indicators reached 50.0%, which significantly simplified the evaluation index system and eliminated the influence of information overlap among indicators on the evaluation results to the greatest extent. There were significant differences between the soil quality indexes calculated from the Total Data Set (TDS), the Important Data Set (IDS), and MDS. The positive correlation ($0.716(R^2_{TDS-IDS})$, $0.771(R^2_{TDS-MDS})$ respectively) showed that the MDS was suitable to replace the TDS to evaluate the soil quality of the black soil. The SQI of the cultivated layer in the black soil maize planting area was distributed between 0.22 and 0.75, the average value was 0.53 ± 0.08 , and the coefficient of variation was 0.15, showing a high trend in the east and a low trend in the west. There was a significant correlation between the SQI and the yield ($R^2=0.524$), which showed that the soil quality index increased firstly and then decreased with the yield, further proving that the MDS was scientific in evaluating soil quality, and the pursuit of yield should not be at the cost of soil quality. The optimum range of soil parameters for maintaining higher soil quality and yield in the topsoil layer of black soil was 1.23-1.43 g/cm³ for BD, 4.74-6.96 for pH, 33.14-35.81 g/kg for SOM, and 122.46-136.06 mg/kg for AP. BD and pH in the study area were within the appropriate range, and the improvement of SOM and AP content should be realized through straw returning, rational application of organic fertilizer, and phosphorus fertilizer. The results could provide theoretical and parameter support for the diagnosis of black soil quality, improvement of black soil fertility, and selection of suitable farmland management measures in Jilin Province.

Keywords: soils; topsoil layer; minimum data set; soil quality evaluation; soil quality index