



周文涛,潘岳,徐圣贤,张淇,朱金余,佟长福,王贵平,杨智,李品芳. 基于内蒙古黄河南岸灌区的土壤质量评价卡制定研究[J]. 中国农业大学学报,2025,30(04): 206-216.

ZHOU Wentao, PAN Yue, XU Shengxian, ZHANG Qi, ZHU Jindi, TONG Changfu, WANG Guiping YANG Zhi, LI Pinfang. A soil quality assessment card developing based on the south irrigation area of the Yellow River in Inner Mongolia[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(04): 206-216.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.04.17

基于内蒙古黄河南岸灌区的土壤质量评价卡制定研究

周文涛¹ 潘岳¹ 徐圣贤¹ 张淇² 朱金余³ 佟长福⁴ 王贵平⁵
杨智⁵ 李品芳^{1*}

1. 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193;
2. 中冶沈勘工程技术有限公司, 沈阳 110169;
3. 开封市农林科学研究院, 河南 开封 475004;
4. 水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020;
5. 杭锦旗黄河灌排服务中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017400)

摘 要 为进一步将土壤质量评价结果应用于生产实践,以干旱半干旱区重要的农业生产地内蒙古黄河南岸灌区为研究区域,采集并测定了该地区67个土壤样品的11项理化指标,基于最优的方法组合计算土壤质量指数,并结合障碍因素诊断模型和克里金空间插值法进行综合评价,为制定该地区土壤质量评价卡提供关键要素信息。结果表明:研究区整体的土壤质量指数在0.25~0.71,平均值为0.47,速效磷和速效钾的含量较高,有机质含量较低。土壤含水量和孔隙度是限制土壤质量的主要障碍因素,障碍度分别为0.173和0.160;土壤质量在空间上呈东部和南部高,中部和北部低的趋势,这与土壤含水量在东西方向和孔隙度在南北方向上的分布规律有关;基于综合评价结果制定土壤质量评价卡,其中包含了5项化学指标和2项物理指标,在呈现形式上创新性地融入了区域评价指标的分级标准和土壤质量的空间分布图,并提供了计算不同指标数据集土壤质量指数的方法。土壤质量调查人员能够根据卡片的信息结合评价指标的测定结果进行填写,并最终给使用者提供直观的土壤质量信息。土壤质量评价卡的制定是科学研究结果与实际生产实践紧密结合的有效探索,将为区域土壤质量的保护利用与农业种植管理提供关键依据。

关键词 土壤质量评价卡;土壤质量指数;障碍度;空间分布;黄河南岸灌区

中图分类号 S114

文章编号 1007-4333(2025)04-0206-11

文献标志码 A

A soil quality assessment card developing based on the south irrigation area of the Yellow River in Inner Mongolia

ZHOU Wentao¹, PAN Yue¹, XU Shengxian¹, ZHANG Qi², ZHU Jindi³, TONG Changfu⁴,
WANG Guiping⁵, YANG Zhi⁵, LI Pinfang^{1*}

- (1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2. Shen Kan Engineering and Technology Corporation MCC, Shenyang 110169, China;
3. Kaifeng Academy of Agriculture and Forestry, Kaifeng 475004, China;
4. Pastoral Water Conservancy Science Research Institute of the Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China;
5. Hangjin Banner Yellow River Irrigation and Drainage Service Center, Ordos 017400, China)

收稿日期: 2024-07-12

基金项目: 鄂尔多斯市科技重大专项项目(2021ZD社17-18)

第一作者: 周文涛(ORCID:0009-0001-2529-0804),博士研究生,E-mail:zhouwentao971004@163.com

通讯作者: 李品芳(ORCID:0000-0003-0108-5010),教授,主要从事盐土及盐生植物开发与利用研究,E-mail:pfli@cau.edu.cn

Abstract In order to apply soil quality assessment results on practical production, this study focuses on the southern bank of the Yellow River in Inner Mongolia, a crucial agricultural production zone in the arid and semi-arid regions. A total of 11 physical and chemical indicators of 67 soil samples collected in this region were measured. Based on the optimal combination of methods, the soil quality index was calculated and a comprehensive evaluation was conducted using an obstacle factor diagnosis model and Kriging spatial interpolation to provide essential information for the soil quality assessment card developing in the study area. The results indicate that: The overall soil quality index in the study area ranged from 0.25 to 0.71, with an average value of 0.47. The levels of available phosphorus and potassium were relatively high, whereas the organic matter content was low. The soil water content and porosity were identified as the primary limiting factors for soil quality with obstacle degrees of 0.173 and 0.160, respectively. The soil quality exhibited a spatial trend of being higher in the eastern and southern regions and lower in the central and northern regions, which correlated with the distribution of soil water content in the east-west direction and porosity in the north-south direction. The soil quality assessment card developed from the comprehensive evaluation results included five chemical and two physical indicators. The card innovatively integrated grading standards for regional evaluation indicators and spatial distribution maps of soil quality, providing a practical method for calculating the soil quality index from different indicator datasets. Soil quality surveyors can fill out the card using the provided information in conjunction with the measured indicators, ultimately provide users with intuitive soil quality information. In conclusion, the formulation of the soil quality assessment card represents a significant advancement in integrating scientific research with practical agricultural practices, providing a crucial foundation for the protection and utilization of regional soil quality and agricultural management.

Keywords soil quality assessment card; soil quality index; obstacle degree; spatial distribution; irrigation area south of the Yellow river

随着世界人口数量增加、耕地面积减少以及各种环境压力影响,土壤质量问题引起了广泛关注^[1-2]。在土壤质量评价研究发展日益成熟的大背景下,使研究结果为生产实践提供有效的科学信息,将会对区域土壤资源的保护利用与农业产业的快速发展具有重要意义。

目前,已有多种土壤质量的评价方法被开发。在土壤质量的定量计算方面,土壤质量指数法的应用最为广泛,其易于使用并与土壤管理实践相关^[3-4]。土壤质量指数的计算基本都遵循着评价指标的选择、指标权重的确定、评价样点的赋分和评价结果的精度验证这一过程。由于研究区域的不同,具体研究在这些方法的选择上也存在差异^[5-6]。为了更准确高效的计算土壤质量指数,王斌等^[7]和刘湘君等^[8]研究构建了最小数据集的评价指标体系,并探讨了多种权重确定方法和指标评分方法。研究表明进一步结合土壤障碍因素的诊断分析能够为土壤质量的提升提供关键依据,有利于管理者制定针对性的土壤保护利用措施^[9-11]。在土壤质量的空间分布特征方面,利用地统计学方法对土壤属性的空间变异特征进行分析逐渐成为了土壤质量

评价研究的另一种常用方法^[12-13]。在准确评价土壤质量的同时,使用多种插值方法结合多元统计分析工具研究土壤理化指标的空间变异特征,能够直接呈现研究区域土壤质量的空间变化趋势,为土壤质量变化的内部关联研究提供合理的分析依据^[14]。然而,目前大多数关于土壤质量评价的研究仍停留在理论和方法层面,关注提高评价体系的合理性和评价结果的准确性,最终的评价结果对实际生产实践的指导作用可能十分有限。虽然不同地区的土壤质量评价方法并不相同,但独立的评价结果同样具有重要的实际意义。如何将这些已有成熟方法获得的土壤质量评价结果服务于生产实际并发挥作用,需要首先明确评价的用户^[15],并在用户与评价结果之间建立起一座高效便捷的“桥梁”。印度政府于2015年2月启动了土壤健康卡计划,使用者可以通过卡片上土壤的养分信息和肥料需求建议了解土壤的质量状况^[16]。Purakayastha等^[17]制定了包含11个化学指标、4个物理指标和3个生物指标以及土壤健康指数等信息的土壤健康卡,并在印度西北部的哈里亚纳邦进行了应用。尽管土壤健康卡的实际应用还面临着诸多问题,但使用者仍然对

此抱有积极的态度^[18]。因此,根据区域特点制定土壤健康卡或土壤质量评价卡或许是连接科学评价结果与目标用户的有效纽带^[19],我国的土壤质量评价研究结果当前亟需这种新型的呈现形式。

因此,本研究拟以干旱半干旱地区重要的商品粮生产基地内蒙古黄河南岸灌区为例,测定并计算67个土壤样本的11项理化指标,使用土壤质量指数法、障碍因素诊断模型和克里金空间插值法对研究区域的土壤质量进行综合评价,从多个方面提供制定土壤质量评价卡的关键要素信息,进而制定研究具有应用价值的土壤质量评价卡,力求将科学研究结果与实际生产实践相连,以期为研究区域土壤质量的保护利用与农业种植管理提供合理依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗北部的黄河南岸灌区(40°76′~40°81′ N,107°65′~108°11′ E),地处黄河“几”字弯南岸,南连库布齐沙漠,东西长约90 km,南北宽2~10 km(图1)。研究区属于干旱半干旱地区,温带大陆性季风气候,平均海拔1 040 m,年降水量168 mm左右。多年平均气温7.9℃,昼夜温差大,日照时间长,年平均日照

时数3 100~3 600 h,年平均生长期180 d,无霜期154 d。研究区内耕地面积14 000 hm²、草地面积173 333 hm²、林地面积23 333 hm²^[20]。土壤质地以黏土为主,耕性较差,但当地具有丰富的沙质资源,对黏重土壤普遍采用掺沙的改良措施。除玉米、葵花外,还种植有甘草、苜蓿以及引种了藜麦等耐盐作物。

1.2 样品采集与指标测定

土壤样品的采集与指标的测定参考文献[4]中的土壤质量指数计算方法。以2.6 km×2.3 km的规则经纬网格设计研究区的采样点位,其中难以获取的样点在设计点位附近进行替代采样。土壤样品采集于2021年8—9月,以实际采样点为中心,采集10 m半径内3~5个0~20 cm的表层土壤样品,混合均匀后四分法留取1 kg带回室内风干、研磨、过筛用于评价指标的测定。在每个采样点处使用100 cm³的环刀采集表层原状土壤,重复采集3次用于测定土壤容重、孔隙度和含水量。共获取土壤样品67个(图1),根据已有土壤质量评价研究中总结的指标选择频率以及研究区的特点测定并计算11项土壤理化指标。包括:容重(BD)、孔隙度(SP)、含水量(WC)、土壤pH、电导率(EC)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)、有机质(OM)、有机碳密度(SOCD)。

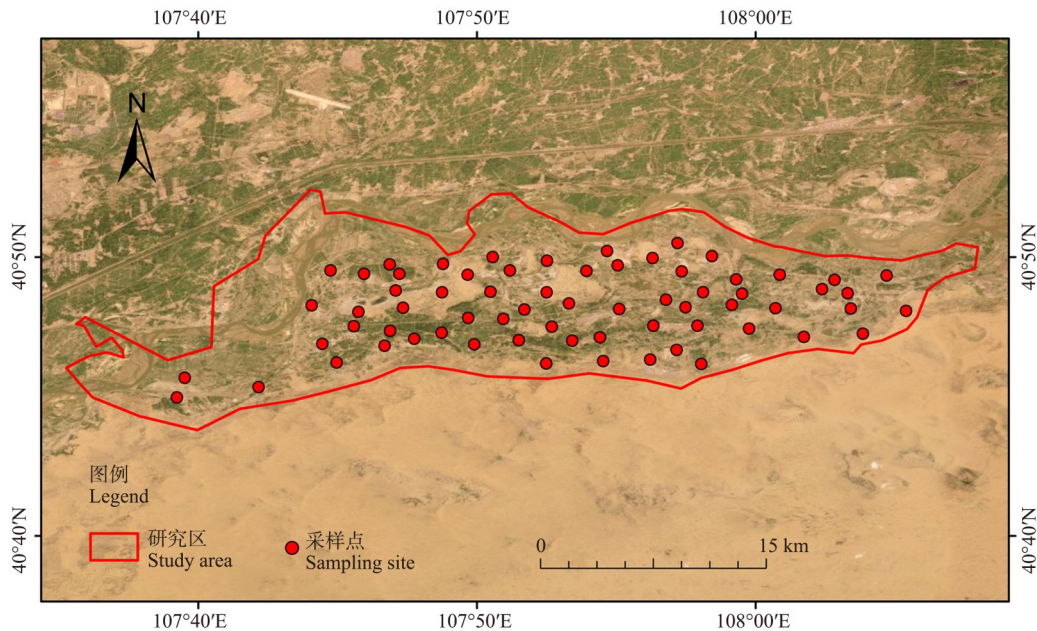


图1 研究区位置示意与采样点分布图

Fig. 1 The study area location and sampling sites distribution diagram

1.3 土壤质量指数的计算

基于本课题组在同一研究区域内已发表的关于最优土壤质量指数计算方法比较的研究结论^[4], 选择层次分析法确定指标权重, 隶属度函数确定指标评分的土壤质量指数计算方法。并且, 继承了最小数据集指标: 容重、有机碳密度、硝态氮、pH。根据研究区域的实际情况, 结合现场调查与专家经验, 使用 Saaty 成对比较矩阵^[21]对指标进行标度, 构造判断矩阵, 在计算结果通过一致性检验后获得指标权重。权重是对评价体系中不同指标的标度, 而样点分值的计算则是对各采样点指标实测值的定量描述, 综合指标权重和样点分值即可计算土壤质量指数。本研究主要使用了S型和反S型隶属函数计算样点分值, 这2种隶属度函数^[22]计算公式如下:

S型隶属函数:

$$u(x) = \begin{cases} 1, & x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & x \leq a \end{cases} \quad (1)$$

反S型隶属函数:

$$u(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{x-b}{a-b}, & a < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为评价指标实测值; a 、 b 分别为指标临界值的下限和上限, 在本研究中为指标实测的最小值和最大值。

土壤质量指数的计算公式如下^[23]:

$$SQI = \sum_{i=1}^n w_i N_i \quad (3)$$

式中: w_i 为第 i 个评价指标权重; N_i 为第 i 个评价指标分值; n 为评价指标个数。

1.4 土壤障碍因素诊断模型

为了综合评价研究区域的土壤质量, 使用土壤障碍因素诊断模型对土壤的关键障碍指标进行分析。障碍度计算公式如下^[24-25]:

$$M_{ij} = \frac{P_{ij} W_j}{\sum_{j=1}^m P_{ij} W_j} \quad (4)$$

$$P_{ij} = 1 - N_{ij} \quad (5)$$

$$M_j = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ij}}{n} \quad (6)$$

式中: M_{ij} 为第 i 个样点第 j 个指标的障碍度; N_{ij} 表示第 i 个样点第 j 个指标的隶属度; W_j 为单项指标的权重; m 为评价指标的个数; M_j 为第 j 个指标在所有样点中的平均障碍度; n 为样点的个数。

1.5 克里金空间插值法

克里金法 (Kriging) 是对随机过程进行空间建模和预测的回归算法, 该方法在随机过程中能够给出最优线性无偏估计。普通克里金是一种最优线性无偏估值方法, 插值过程中的权重来自对空间数据的分析计算, 是目前应用最为广泛的克里金插值法之一, 计算公式如下^[26]:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (7)$$

式中: $Z(x_i)$ 为点 x_0 附近若干点上获得的实测值; $Z(x_0)$ 为预测点 x_0 上的内插估计值; λ_i 为权重系数, 由协方差矩阵与距离矩阵计算得到。

1.6 数据处理

试验数据在 Microsoft Excel 2016 中进行计算处理后使用 R v4.2.3 进行分析, 并使用 yaahp 进行层次分析。采样点空间分布图的制作使用 ArcGIS v10.2 创建, 其他图片使用 Origin 2021 和 Power Point 2016 进行绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤质量评价指标的描述性统计分析

研究区域土壤理化指标的描述性统计分析结果见表1。可知: 研究区域土壤的平均含水量为 17.09%, 土壤水分含量较低, 这是因为干旱的气候条件导致区域的降水量稀少; 土壤容重的平均值为 1.59 g/cm³, 孔隙度的平均值为 40.05%, 容重和孔隙度的大小反映了土壤的疏松程度, 有机质含量高、结构性好的土壤容重小, 而研究区域土壤紧实, 总体的土壤孔隙度较低; 土壤的平均 pH 和电导率分别为 8.65 和 1.90 dS/m, 土壤呈碱性, 同时还面临着严重的盐渍化问题。这一方面是由于干旱半干旱的气候条件导致区域蒸发量远大于降雨量, 土体中的盐基离子随着强烈的蒸发被源源不断地带到土壤表层。另一方面区域农业生产种植过程中不合理的灌溉同样会造成土壤次生盐渍化问题。此外, 土壤中的速效养分指标速效磷、速效钾、硝态氮、铵态氮的平均值分别为 16.05、210.29、20.81 和 3.74 mg/kg, 说明尽管土壤样品的采集时间是作物的收获期, 但各类大量元素的速效养分仍处在

较高水平。沿河区域土壤有机质的平均值为7.24 g/kg, 质含量较低,处于第5级,而速效磷和速效钾分别为第3级和第1级,土壤硝态氮也处于充足水平。

表1 研究区域土壤理化指标描述性统计分析

Table 1 Descriptive statistical analysis of soil physicochemical indicators in the study area

评价指标 Evaluation indicator	WC/ %	BD/ (g/cm ³)	SP/ %	pH	EC/ (dS/m)	AP/ (mg/kg)	AK/ (mg/kg)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg/kg)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg/kg)	OM/ (mg/kg)	SOCD/ (g/m ²)
最小值 Minimum value	0.11	1.32	30.89	7.69	0.05	1.44	47.50	1.65	1.25	1.11	0.20
最大值 Maximum value	45.55	1.83	50.03	9.72	12.61	53.70	691.00	137.91	7.19	13.58	2.60
平均值 Average value	17.09	1.59	40.05	8.65	1.90	16.05	210.29	20.81	3.74	7.24	1.33
标准差 Standard deviation	11.06	0.10	3.87	0.40	2.93	13.07	141.45	32.38	1.16	2.90	0.52
变异系数/% Coefficient of variation	64.71	6.45	9.65	4.62	153.81	81.43	67.26	155.64	31.01	40.11	39.24

注:表中 WC、BD、SP、EC、AP、AK、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、OM、SOCD 分别代表土壤含水量、容重、孔隙度、电导率、速效磷、速效钾、硝态氮、铵态氮、有机质、有机碳密度。下同。
Note: In the table, WC, BD, SP, EC, AP, AK, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N, OM, and SOCD represent soil water content, bulk density, soil porosity, electrical conductivity, available phosphorus, available potassium, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, organic matter, and organic carbon density, respectively. The same below.

2.2 土壤质量指数计算与障碍因素诊断

分别使用全体数据集和最小数据集指标体系计算研究区土壤质量指数,结合评价指标的障碍度综合评估研究区整体的土壤质量。全体数据集的土壤质量指数在0.25~0.71,平均值为0.47,变异系数为21.65%,最小数据集在0.16~0.78,平均值为0.45,变异系数为25.61%。由图2各评价指标的障碍度计算结果可知:各指标的障碍度排序为:WC(0.173)>SP(0.160)>BD(0.160)>SOCD(0.110)>OM(0.101)>pH(0.072)>NO₃⁻-N(0.066)>AP(0.050)>AK(0.046)>NH₄⁺-N(0.041)>EC(0.021)。土壤的物理指标是限制研究区域土壤质量的主要因素,化学指标对土壤质量的限制相对较小,这与描述性统计分析结果保持一致。代表土壤盐碱化程度的指标均获得了较低的障碍度,尤其是电导率。而在实际测定结果的分析中,土壤的pH和电导率也同样是限制地区土壤质量的重要指标。

2.3 土壤质量与障碍因素的空间分布特征

采用克里金插值法对全体数据集土壤质量指数和2个障碍因素指标进行空间插值分析结果见图3。可见:土壤质量指数在空间上主要呈现东部和南部

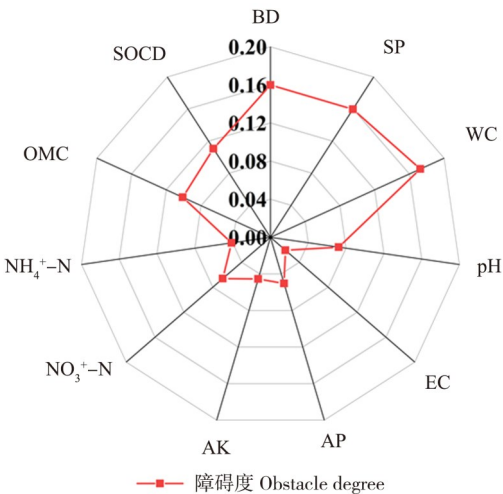


图2 土壤质量各评价指标障碍度计算结果
Fig. 2 Calculation results of each soil quality assessment indicator barriers

高,中部和北部低的分布特征,东部最高为0.71,北部最低为0.25;由于研究区南部紧邻库布齐沙漠,所以沙地散落分布在整个区域内,土壤含水量受到土壤质地的影响,部分区域仅为0.11%~3.80%,并在东西方向呈现两边高中部低的分布特征,而在南北方向的变化趋势则并不明显。良好的土壤物理结构应具有适宜的土壤孔隙,不同类型孔隙的存在为种植的作

物或自然生长的植物提供了良好的根系生长条件,有利于根系在土体中穿插,并有效地吸收养分供给地上部生长。然而,研究区域内土壤孔隙度最高仅为50.03%,最低为30.89%,土壤总体较为紧实,不利

于作物生长。物理结构良好的土壤集中分布在研究区域的南部和东部,而这些区域的土壤质量同样较高。土壤孔隙度在南北方向上的变化趋势与土壤质量的变化趋势相似。

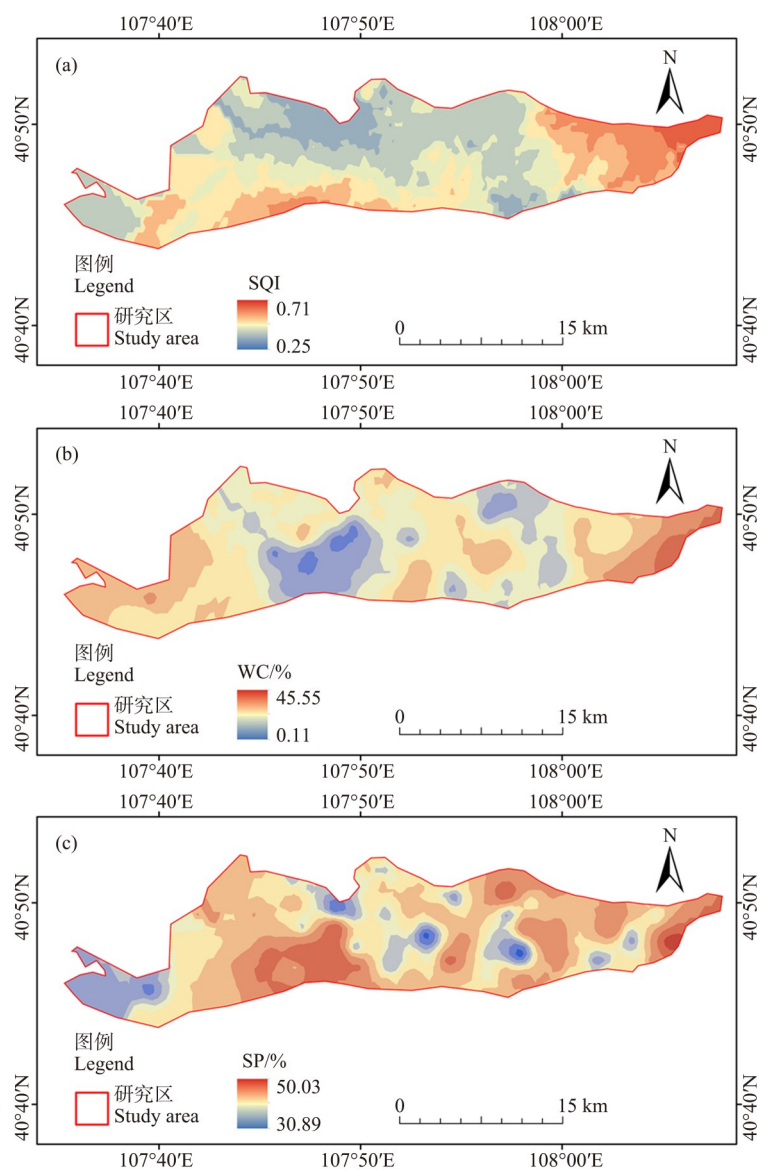


图3 研究区域土壤质量指数(a)、土壤含水量(b)、土壤孔隙度(c)空间分布趋势图

Fig. 3 Spatial distribution trend map of soil quality index (a), soil water content (b), and soil porosity (c) of the study area

2.4 土壤质量评价卡的制定

土壤质量指数的计算、障碍因素的诊断以及空间分布特征是本研究制定土壤质量评价卡的基本呈现要素。制定评价卡的目标是为土壤质量评价结果的实际应用提供有效载体,为指导生产实践提供科学信息。确定评价指标的分级标准将会提供研究区域的整体情况,也是土壤质量评价卡发挥作用的关键。

2.4.1 土壤理化指标的分级标准

研究区域土壤理化指标的分级标准如表2所示。土壤养分指标AP、AK和OM不是限制本研究区土壤质量的主要障碍因素,因此,这些指标的分级完全参照我国第二次土壤普查养分分级标准确定^[27]。由于本研究所有土壤pH和孔隙度的测定值均超出了以往研究规定的阈值,并且土壤含水量

作为易变指标没有相应的分级标准,所以参考张凤荣等^[28]研究中运用的等间距法,根据本研究区土壤的实测值对这3个指标进行等距分级,这在一定程度上能够实现研究区域内土壤质量的可比性。土

壤电导率的分级标准是参考Yu等^[29]研究中的分级方法,并结合了本研究区域的实际情况增加了 $EC>1.6\text{ dS/m}$ 的分级进行补充。土壤质量指数则同样参照等间距法划分为5个等级。

表2 土壤质量评价卡关键指标分级标准
Table 2 Grading standards for key indicators of the soil quality assessment card

分级 Classification	AP/ (mg/kg)	AK/ (mg/kg)	OM/(g/kg)	pH	SP/%	WC/%	EC/ (dS/m)	SQI
I	>40	>200	>40	7.69~8.44	41.42~50.03	20.47~27.89	<0.2	0.8~1.0
II	20~40	150~200	30~40	8.44~8.65	38.14~41.42	10.34~20.47	0.2~0.4	0.6~0.8
III	10~20	100~150	20~30	8.65~9.22	30.89~38.14	3.27~9.54	0.4~0.8	0.4~0.6
IV	5~10	50~100	10~20				0.8~1.6	0.2~0.4
V	3~5	30~50	6~10				>1.6	0~0.2
VI	<3	<30	<6					

2.4.2 土壤质量评价卡的制定

根据土壤理化指标的分级标准,制定研究区域的土壤质量评价卡如图4所示。评价卡的正面包括了土壤化学指标pH、电导率、有机质、速效磷、速效钾,以及物理指标含水量和孔隙度。这些指标的选择主要考虑了障碍因素诊断模型的分析结果,并涵盖了能够直接表征土壤肥力的营养元素指标。评价卡的左侧还包括了调查地块的位置描述、地理坐标、土壤质地、种植作物等基本信息,下方则显示了

评价指标的分级标准。评价卡的背面设置为本研究区域整体的土壤质量空间分布特征与评价指标的障碍度,使用者可以通过经纬度信息确定调查地块在研究区域内的位置,了解所在地块的基本土壤质量情况。此外,评价卡还提供了全体数据集和最小数据集两种指标体系计算土壤质量指数的公式与对应指标评分的计算公式,这为调查人员获得评价指标实测数据后填写土壤质量评价卡提供了便捷。

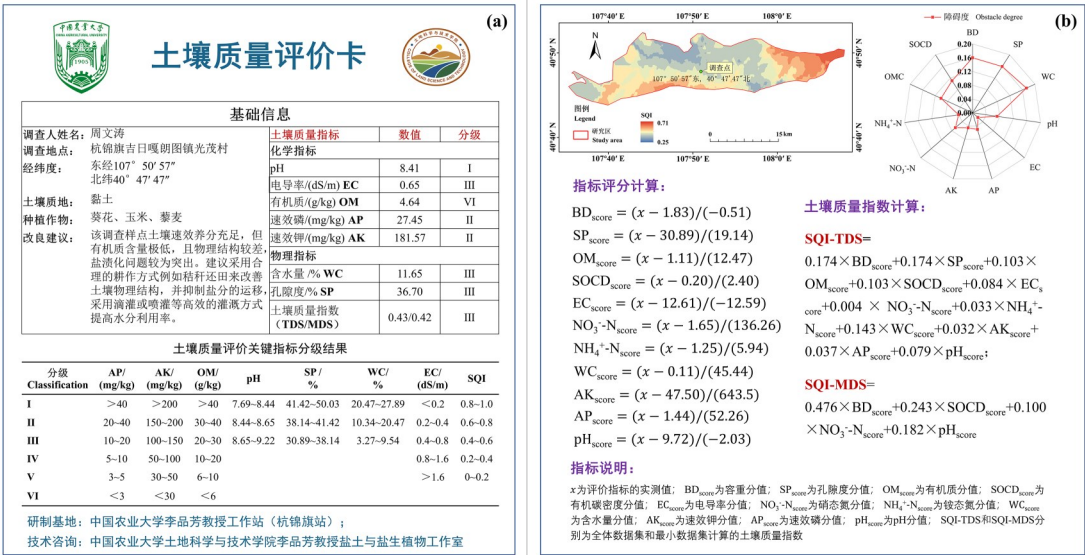


图4 土壤质量评价卡正面(a)和反面(b)示例

Fig. 4 Example of the front (a) and back (b) of the soil quality assessment card

3 讨论

3.1 灌区土壤质量综合评价

本研究从土壤质量指数计算、障碍因素诊断和空间分布特征3个方面综合评价了内蒙古黄河南岸灌区的土壤质量。评价指标体系的确定,土壤质量指数计算方法的选择以及最小数据集的构建仍是目前土壤质量综合评价研究的重点^[30-32]。而本研究则基于作者以往研究中土壤质量指数的最优计算方法组合和最小数据集指标^[4,9],对研究区的土壤质量指数进行了定量计算,并进一步对土壤质量的障碍因素和空间分布特征进行分析,为土壤质量评价卡的制定提供了关键的科学要素。

障碍因素诊断模型是土壤质量综合评价研究中的常用方法,而障碍因素的诊断结果由于研究区域、评价指标、评价方法等多种因素的影响有所差异。以往研究显示黄淮海旱作区耕层土壤的障碍因素主要为土壤有机质含量、阳离子交换量、耕层厚度和耕层压实度^[8];东北旱作区为耕层穿透阻力、土壤全氮含量和有机质含量^[10];而南方丘陵区为黏粒含量、pH、耕层厚度和土壤抗剪强度^[11]。本研究区土壤障碍因素的诊断结果则主要以物理指标土壤含水量和孔隙度为主。此外,根据指标实测值的分级结果和空间分布趋势,土壤pH和电导率或许同样是研究区域的障碍因素,但这2项指标并未被障碍因素诊断模型有效识别。这主要是由于障碍因素诊断模型的核心是基于指标的隶属度和权重进行障碍度的计算^[24-25],而指标权重和隶属度确定的主要目标是计算土壤质量指数,这就会造成障碍因素诊断结果的偏差。因此,完全依赖障碍因素诊断模型识别障碍因素是不足的,还需要根据研究区的实际情况,通过评价指标分级结果和空间分布特征综合判断土壤质量的障碍因素。

反距离权重法和普通克里金法是2种常用的空间插值方法,以往的研究结果表明,反距离权重法的插值结果在丘陵地形较为理想,而普通克里金法则更适用于平原地区^[14]。杨奇勇等^[25]使用克里金法探究了黄淮海平原禹城市土壤养分和障碍因子的空间分布情况。吴文元等^[33]使用克里金法探究了福建省耕地质量的空间分布特征。由于本研究土壤质量综合评价的目的是为土壤质量评价卡的制定提供区域性的科学信息和关键要素,因此,本

研究也同样使用普通克里金法对土壤质量指数和障碍因素进行空间插值分析。

3.2 土壤质量评价卡的实际应用

土壤质量评价卡的应用能够为实际的生产提供理论指导。以本研究区域内的调查田块为例,进行土壤质量评价卡的填写。该调查田块的土壤质量处于中等水平,虽然速效养分的供应十分充足,但较低的土壤孔隙度仍在很大程度上影响了土壤质量^[34]。并且,目前土壤有机质的含量难以持续满足作物生长所需要的养分供应。针对以上问题,土壤物理结构的改良是提高该调查地块土壤质量的关键。应适时中耕,并采取免耕、少耕等保护性耕作方式在增加土壤有机质含量的同时改善耕层土壤物理结构。土壤质量评价卡的应用能够为使用者提供有效的管理信息,并且也可以使使用者更加关注土壤质量与作物高产之间存在的密切联系。

目前,与土壤质量评价卡制定有关的研究仍较少。Purakayastha等^[17]针对印度-恒河平原西北部的冲积土研发了包含11个化学指标、4个物理指标和3个生物指标的土壤健康卡。本研究土壤质量评价卡中的指标则是对已有土壤健康卡指标的进一步缩减,也可以称作为“简易土壤质量评价卡”,仅保留关键的土壤物理化学指标,暂未涉及生物指标。这是由于在当地严重的土壤盐碱化环境中,影响土壤质量的关键酶和微生物的活性较弱^[30,35],并且这些生物指标属于极易变指标,受到多种复杂因素的影响而呈现不稳定的数值结果。同时进一步考虑到指标的相对易获取性,本研究仅选择了传统的评价指标。Priya等^[36]的一项关于土壤健康卡使用效果的调查结果则表明,67%的使用者能够认知卡片呈现的具体内容,但在实际的生产中却很少有人遵循健康卡上的建议进行施肥管理。本研究制定的土壤质量评价卡则主要依靠调查人员根据评价指标测试结果与卡片内容进行填写,最终呈现给使用者卡片上的具体信息以供参考。因此,本研究制定的土壤质量评价卡创新性地融入了土壤质量评价关键指标的分级标准、土壤质量空间分布图以及评价指标的障碍度诊断结果,并提供了适用于本研究区域计算全体数据集和最小数据集土壤质量指数相关的详细公式。调查人员在获得评价指标的测定结果后对卡片进行填写并发放给使用者,以期实现土壤质量评价科学研究与生产实践的紧

密结合。一项使用者对土壤健康卡使用积极性的研究显示,100名使用者中有超过20%的使用者持强烈赞成的态度,接近一半(46%)的使用者持中立和良好的态度^[18]。因此,本研究制订的土壤质量评价卡具有一定的实用价值,并且,在使用的过程中还应关注对使用者科学观念的引导。

土壤质量评价卡中包含的关键信息能够使使用者根据指标和土壤质量的分级结果及时采取相应的管理措施。高效的田间管理在提高作物产量的同时也促进了自然资源的合理利用,减少环境污染的产生^[37]。土壤质量综合评价的科学研究是为实际的生产实践提供理论基础,而土壤质量评价卡的制定可以使科研结果简明地呈现给生产一线的使用者,使他们能够直接了解到耕种土壤的基本情况,并为日后的生产实践提供参考依据,这也是土壤质量评价研究的实际意义与价值体现。

4 结 论

本研究使用土壤质量指数法、障碍因素诊断模型和克里金空间插值法综合评价了内蒙古黄河南岸灌区土壤质量,并基于综合评价结果制定了土壤质量评价卡。主要结论如下:

1)研究区整体的土壤速效养分含量处在较高水平,而较低的有机质含量则显示了土壤实际肥力水平的不足。结合障碍因素诊断模型和评价指标分级标准识别出含水量、孔隙度、pH和电导率是限制土壤质量的主要障碍因素。并且,土壤质量的空间分布特征也受到这些限制因素的影响,呈东部和南部高、中部和北部低的趋势。

2)制定的土壤质量评价卡包含了研究区域内7项物理化学指标的分级标准和2种土壤质量指数的计算方法,使调查人员能够结合评价指标分级和空间分布图、利用土壤质量指数计算公式明确调查地块的土壤质量信息。最终将评价卡呈现给从事农业生产的农户,为制定高效的耕作管理措施和提升土壤质量提供有价值的参考信息。

参考文献 References

- [1] Yamaguchi T, Blumwald E. Developing salt-tolerant crop plants: Challenges and opportunities [J]. *Trends in Plant Science*, 2005, 10 (12): 615-620
- [2] 周文涛,刘琪,黄元仿. 深化黑土耕地质量认知 加强耕地质量评价监测 [J]. *中国农业综合开发*, 2022(11): 15-18

- Zhou W T, Liu Q, Huang Y F. Deepen the cognition of cultivated land quality in black soil and strengthen the evaluation and monitoring of cultivated land quality [J]. *Agricultural Comprehensive Development in China*, 2022(11): 15-18 (in Chinese)
- [3] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality [M]//Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, Stewart B A, eds. *SSSA Special Publications*. Madison: WI, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 2015: 1-21
- [4] 周文涛,潘岳,乔冠宇,朱金余,佟长福,王贵平,杨智,李品芳. 杭锦旗黄河南岸灌区土壤质量指数计算方法比较研究 [J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29(4): 251-263
- Zhou W T, Pan Y, Qiao G Y, Zhu J D, Tong C F, Wang G P, Yang Z, Li P F. Comparative study on the calculation methods of soil quality index in the south bank of Yellow River irrigation area of Hangjin Banner [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29 (4): 251-263 (in Chinese)
- [5] 吴春生,刘高焕,黄肿,刘庆生,管续栋. 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
- Wu C S, Liu G H, Huang C, Liu Q S, Guan X D. Soil quality assessment of the Yellow River Delta based on MDS and fuzzy logic model [J]. *Resources Science*, 2016, 38(7): 1275-1286 (in Chinese)
- [6] 赵振亚,姬宝霖,宋小园,左舒扬,许可. 基于层次分析和模糊数学法的公乌素土壤质量评价 [J]. *干旱区研究*, 2014, 31(6): 1010-1016
- Zhao Z Y, Ji B L, Song X Y, Zuo S Y, Xu K. AHP and fuzzy mathematics based soil quality evaluation in gongwusu [J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(6): 1010-1016 (in Chinese)
- [7] 王斌,李云,李瑞鹏,方菲,张江周,张俊伶. 基于最小数据集的集约化葡萄园土壤健康评价 [J]. *农业工程学报*, 2024, 40(8): 71-79
- Wang B, Li Y, Li R P, Fang F, Zhang J Z, Zang J L. Soil health evaluation in the intensive vineyard based on minimum data set [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(8): 71-79 (in Chinese)
- [8] 刘湘君,乔冠宇,郭丰浩,刘冬,李勇,勾宇轩,于茹月,周文涛,黄元仿. 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
- Liu X J, Qiao G Y, Guo F H, Liu D, Li Y, Gou Y X, Yu R Y, Zhou W T, Huang Y F. Evaluation and obstacle analysis of cultivated horizon soil quality based on MDS in the dry farming areas of Huang-Huai-Hai Region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(12): 104-113 (in Chinese)
- [9] 周文涛,兰天,潘岳,公衍丽,高云悦,李品芳. 土壤质量评价中少量样本最小数据集的构建: 以内蒙古杭锦旗黄河南岸灌区典型地块为例 [J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(6): 225-235
- Zhou W T, Lan T, Pan Y, Gong Y L, Gao Y Y, Li P F. Construction of minimum data set with small number of samples for soil quality assessment: A case study of a typical land in the south bank of Yellow River irrigation area of Hangjin banner, Inner Mongolia [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(6): 225-235 (in Chinese)
- [10] 卓志清,李勇,勾宇轩,赵云泽,黄元仿,兴安. 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*, 2021, 52(9): 321-330
- Zhuo Z Q, Li Y, Gou Y X, Zhao Y Z, Huang Y F, Xing A. 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*, 2021, 52(9): 321-330 (in Chinese)

- [11] 金慧芳, 史东梅, 钟义军, 黄尚书, 宋鸽, 段腾. 红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 84-93
Jin H F, Shi D M, Zhong Y J, Huang S S, Song G, Duan T. Diagnosis of obstacle factors and degradation characteristics of cultivated-layer quality for red soil sloping farmland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(20): 84-93 (in Chinese)
- [12] Marchetti A, Piccini C, Francaviglia R, Mabit L. Spatial distribution of soil organic matter using geostatistics: A key indicator to assess soil degradation status in central Italy[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(2): 230-242
- [13] 吴玉红, 田霄鸿, 侯永辉, 周密, 同延安. 基于田块尺度的土壤肥力模糊评价研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(8): 1422-1431
Wu Y H, Tian X H, Hou Y H, Zhou M, Tong Y A. Preliminary study on the subject concerning fuzzy assessment method of soil fertility based on field scale[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(8): 1422-1431 (in Chinese)
- [14] 李增兵, 赵庚星, 赵倩倩, 李百红, 武婕. 县域耕地地力评价中土壤养分空间插值方法的比较研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(20): 230-236
Li Z B, Zhao G X, Zhao Q Q, Li B H, Wu J. Comparison of spatial interpolation methods for soil nutrients in cultivated land fertility evaluation [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(20): 230-236 (in Chinese)
- [15] Tang H Z, Niu J C, Niu Z B, Liu Q, Huang Y F, Yun W J, Shen C Y, Huo Z J. System cognition and analytic technology of cultivated land quality from a data perspective[J]. *Land*, 2023, 12(1): 237
- [16] Tal S, Kaur M, Sharma D. Constraints faced by the farmers in adoption of soil health card scheme [J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2020, 9(9): 100-108
- [17] Purakayastha T J, Pathak H, Kumari S, Biswas S, Chakrabarty B, Padaria R N, Kamble K, Pandey M, Sasmal S, Singh A. Soil health card development for efficient soil management in Haryana, India[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 191: 294-305
- [18] Patel J K, Chauhan N. Attitude of farmers towards soil health card (SHC) programme [J]. *Asian Journal of Soil Science*, 2012, 7(1): 114-116
- [19] Naik M R, Kumar B K, Manasa K. Importance of soil health card to sustain the living dynamic system [J]. *An Asian Journal of Soil Science*, 2017, 12(1): 217-220
- [20] 内蒙古自治区统计局. 内蒙古统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023
Inner Mongolia Autonomous Region Statistics Bureau. *Inner Mongolia Statistics Yearbook 2023* [M]. China Statistics Press, 2023 (in Chinese)
- [21] Saaty T L. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation* [M]. New York: McGraw-Hill Book Co. 1980
- [22] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 90(1): 25-45
- [23] Vasu D, Singh S K, Ray S K, Duraisami V P, Tiwary P, Chandran P, Nimkar A M, Anantwar S G. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India [J]. *Geoderma*, 2016, 282: 70-79
- [24] 王琪琪, 濮勋杰, 朱明, 李建国, 张濛. 沿海滩涂围垦区土壤质量演变研究: 以江苏省如东县为例[J]. 地理科学, 2016, 36(2): 256-264
Wang Q Q, Pu L J, Zhu M, Li J G, Zhang M. Soil quality evolution in coastal reclamation zones: A case study of Rudong County of Jiangsu Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(2): 256-264 (in Chinese)
- [25] 杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江, 黄标, 孙维侠. 基于GIS的耕地土壤养分贫瘠化评价及其障碍因子分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1375-1384
Yang Q Y, Yang J S, Yao R J, Huang B, Sun W X. GIS-based evaluation of soil nutrient depletion and analysis of its limiting factors in Yucheng City [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(8): 1375-1384 (in Chinese)
- [26] Le N D, Zidek J V. *Statistical analysis of environmental space-time processes* [M]. New York: Springer, 2006: 101-134
- [27] 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
National Soil Census Office. *Soil General Survey Technology in China* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1992 (in Chinese)
- [28] 张凤荣, 安萍莉, 王军艳, 张军连, 刘黎明, 陈焕伟. 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
Zhang F R, An P L, Wang J Y, Zhang J L, Liu L M, Chen H W. Soil quality criteria and methodologies of farmland grading [J]. *Resources Science*, 2002, 24(2): 71-75 (in Chinese)
- [29] Yu R H, Liu T X, Xu Y P, Zhu C, Zhang Q, Qu Z Y, Liu X M, Li C Y. Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao Irrigation District of North China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 1952-1960
- [30] Yao R J, Yang J S, Gao P, Zhang J B, Jin W H. 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
- [31] Qi Y B, Darilek J L, Huang B, Zhao Y C, Sun W X, Gu Z Q. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China [J]. *Geoderma*, 2009, 149(3/4): 325-334
- [32] 石海龙, 张林星, 甘凤玲, 蒲俊兵, 苟俊菲, 刘涓. 喀斯特槽谷区侵蚀坡面的土壤质量评价及障碍因子[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 126-135
Shi H L, Zhang L X, Gan F L, Pu J B, Gou J F, Liu J. Soil quality evaluation and obstacle factors of erosion slope in Karst trough valley area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 126-135 (in Chinese)
- [33] 吴文元, 金海涛, 王玉雯, 张卫清, 张华, 廖文强, 姜玉英, 林德喜, 郭九信. 基于土壤质量指数法省级尺度耕地土壤质量评价及空间分布特征研究: 以福建省为例[J]. 土壤通报, 2024, 55(2): 310-320
Wu W Y, Jin H T, Wang Y W, Zhang W Q, Zhang H, Liao W Q, Jiang Y Y, Lin D X, Guo J X. Cultivated soil quality assessment and spatial distribution at provincial scale based on soil quality index method: a case of Fujian [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(2): 310-320 (in Chinese)
- [34] 马海霞, 张德罡, 陈瑾, 郭春秀, 董永平, 马源, 康玉坤, 陈璐, 杜凯, 陈建纲. 祁连山东段高寒草甸土壤持水能力在小尺度不同坡面位置的分异特征[J]. 草业学报, 2020, 29(1): 28-37
Ma H X, Zhang D G, Chen J, Guo C X, Dong Y P, Ma Y, Kang Y K, Chen L, Du K, Chen J G. Change in factors influencing soil water holding capacity at microsites along a slope transect in alpine meadow in the eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(1): 28-37 (in Chinese)
- [35] Bois G, Bertrand A, Piché Y, Fung M, Khasa D P. Growth, compatible solute and salt accumulation of five mycorrhizal fungal species grown over a range of NaCl concentrations [J]. *Mycorrhizal*, 2005, 16(2): 99-109
- [36] Priya N K, Padmodaya B. Perception and adoption of soil health cards (SHCs) by the farmers in Kadapa district [J]. *Agriculture Update*, 2020,

15(1 and 2): 90-97

Situation in India, 2019, 76(7): 29-32

[37] Grover D, Singh J M, Kumar S. Impact of soil health card scheme on production, productivity and soil health in Punjab [J]. *Agricultural*

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 周文涛, 中国农业大学土地科学与技术学院在读博士研究生。中国土壤学会学生会员。主要研究方向为耕地质量评价、污染物来源解析与吸附、土地退化中性研究。以第一作者发表论文6篇, 包括SCI论文3篇。



通讯作者简介: 李品芳, 博士, 中国农业大学教授, 博士生导师。主要研究领域为盐碱地整治与改良利用、盐生植物资源利用、土壤质量与土壤健康评价以及水、土资源可持续利用等。主持和参与国家重点研发计划、国家自然科学基金项目、科技部重点研发专项以及地方重大科技项目等。长期致力于盐碱地资源利用、盐碱地改良效果评价、盐生植物资源开发与利用, 在盐土农业的推进与发展等方面有一定的理论积累与实践经验。主编盐碱地相关国家标准1项, 参编国家标准3项, 行业标准1项。发表论文60余篇, 出版专业书5本(主编、副主编或参编), 获得国家授权发明专利3项。