



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(04): 251-263.

ZHOU Wentao, PAN Yue, QIAO Guanyu, ZHU Jindi, TONG Changfu, WANG Guiping, YANG Zhi, LI Pinfang. 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(04): 251-263.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.04.22

杭锦旗黄河南岸灌区土壤质量指数计算方法比较研究

周文涛¹ 潘岳¹ 乔冠宇¹ 朱金余² 佟长福³ 王贵平⁴ 杨智⁴ 李品芳^{1*}

(1. 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193;

2. 开封市农林科学研究院, 河南 开封 475004;

3. 水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020;

4. 杭锦旗黄河灌排服务中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017400)

摘要 为研究土壤质量评价过程中不同质量指数计算方法的差异与最优组合, 采集并测定了内蒙古杭锦旗黄河南岸灌区 79 个土壤样本的 11 项理化指标, 并基于主成分分析法构建最小数据集, 对比分析了主成分分析法和层次分析法 2 种权重确定方法与隶属度函数、线性评分函数和非线性评分函数 3 种指标评分方法组合下计算的土壤质量指数, 最后通过与全体数据集的自相关精度检验获取最优方法组合。结果表明: 1) 层次分析法确定的物理指标权重高于主成分分析法, 速效养分指标权重低于主成分分析法, 隶属度函数、线性评分函数、非线性评分函数对指标分值计算结果的分布趋势基本保持一致, 但隶属度函数对物理指标进行评分时具有更高的区分度; 2) 采用层次分析法确定指标权重, 隶属度函数确定指标分值计算的最小数据集土壤质量指数的自相关检验精度最高 ($R^2=0.85$), 纳什效率系数为 0.81, 相对偏差系数为 0.04; 3) 最优方法组合下全体数据集和最小数据集的土壤质量指数变化分别是 0.25~0.71 和 0.16~0.78, 平均值为 0.43 和 0.45, 表明研究区域土壤处于中等质量水平。综上, 本研究确定了准确评价杭锦旗黄河南岸灌区土壤质量的最优方法组合, 可为今后土壤质量评价研究中指标权重和分值计算方法的选择提供参考。

关键词 土壤质量指数; 主成分分析法; 层次分析法; 最小数据集; 黄河南岸灌区

中图分类号 S114

文章编号 1007-4333(2024)04-0251-13

文献标志码 A

Comparative study on the calculation methods of soil quality index in the south bank of Yellow River irrigation area of Hangjin Banner

ZHOU Wentao¹, PAN Yue¹, QIAO Guanyu¹, ZHU Jindi², TONG Changfu³, WANG Guiping⁴,
YANG Zhi⁴, LI Pinfang^{1*}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Kaifeng Academy of Agriculture and Forestry, Kaifeng 475004, China;

3. Pastoral Water Conservancy Science Research Institute of the Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China;

4. Hangjin Banner Yellow River Irrigation and Drainage Service Center, Ordos 017400, China)

Abstract The purpose of this study is to investigate the differences and optimal combinations of different quality index calculation methods in the soil quality evaluation process. A total of 11 physical and chemical

收稿日期: 2023-12-05

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, 主要从事盐土与盐生植物的开发与利用研究, E-mail: pfl@cau.edu.cn

indicators from 79 soil samples in the south bank of Yellow River irrigation area of Hangjin Banner, Inner Mongolia were collected and measured, and a minimum data set based on the principal component analysis was constructed. Moreover, this study compared the soil quality indices calculated under the combination of two weighting methods (principal component analysis and analytic hierarchy process) and three index scoring methods (membership function, linear scoring function, and nonlinear scoring function), and obtained the optimal combination of methods through the correlation accuracy test with the total data set. The results showed that: 1) The analytic hierarchy process determined higher weights for physical indicators and lower weights for available nutrient indicators than the principal component analysis. The distribution trend of index score calculation results by membership function, linear scoring function, and nonlinear scoring function was basically consistent, but the membership function had a higher degree of differentiation when scoring the physical indicators. 2) The highest accuracy of correlation test for the minimum data set soil quality index was calculated using the analytic hierarchy process to determine the weights, and the membership function to determine the index scores, with $R^2=0.85$, the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of 0.81, and the relative deviation coefficient of 0.04. 3) The range of soil quality indices calculated for two datasets under the optimal combination of methods was 0.25-0.71 and 0.16-0.78, respectively, with mean values of 0.43 and 0.45, indicating that the soil quality in the study area was at a moderate level. In summary, this study determined the optimal combination of methods to accurately evaluate the soil quality in the south bank of Yellow River irrigation area in Hangjin Banner, and provided reference for the selection of index weights and score calculation methods in further studies.

Keywords soil quality index; principal component analysis; analytical hierarchy process; minimum data set; south bank of Yellow River irrigation area

土壤质量是环境质量的3个组成成分之一^[1-2],与水资源质量和空气质量不同,土壤质量通常被广泛地定义为土壤在生态系统和土地利用过程中维持生物生产力、环境质量和促进动植物健康的能力^[3-5]。自上世纪60年代以来,各个国家和地区陆续开展了不同尺度和不同研究方法的土壤质量评价工作。其中,美国基于田块尺度开发的土壤管理评估框架(SMAF)^[6]和康奈尔土壤健康体系^[7]中的评分曲线、目标值、阈值等概念是目前进行土壤质量评价工作的主要内容。了解土壤质量以确保粮食安全一直是我国政府的优先事项,2016年GB/T 33469—2016《耕地质量等级》^[8]规定了耕地质量区域划分、指标确定、耕地质量等级划分流程等内容,其中,指标权重和赋分同样是进行耕地质量评价的关键。

然而,同一土壤质量评价体系中不同指标对土壤质量的影响存在差异^[9],这就需要对不同的指标赋予相应的权重。权重的确定方法主要有主观法和客观法,主观法中的层次分析法和客观法中的主成分分析法是目前研究中应用最多的2种方法^[10]。梅楠等^[11]通过主成分分析法构建最小数据集,计算指标权重,对吉林省黑土耕层的土壤质量进行评价,其研究结果揭示了保持较高土壤质量与作物产

量的耕层土壤所具有的指标适宜阈值;同样,Zhang等^[12]基于主成分分析利用最小数据集对中国喀斯特地区植被演替不同阶段的土壤质量进行评价,发现从耕地到次生林阶段的土壤质量均呈上升趋势;赵振亚等^[13]在对公乌素土壤进行质量评价的过程中,采用层次分析法确定指标权重,明显增加了指标权重的区分度。此外,在计算土壤质量指数的过程中,还需对同一指标不同采样点的指标进行赋分。然而,目前的研究中缺少对不同的指标评分方法的比较研究。Raiesi^[14]通过线性和非线性评分函数对于干旱半干旱区的土壤质量指数进行计算,认为这2种评分方法均具有较好的效果,在敏感度和准确性方面都可以很好的量化土地利用变化的影响。线性评分函数所需要的先验条件较少,而更依赖于观察到的属性来确定每个指标的分数,因此在设计和使用方面比较简单。而非线性评分函数则需要深入了解每个指标内在的行为和功能,相对来说更为复杂^[15]。同样,使用隶属度函数计算指标分值在土壤质量评价中也具有较好的效果。陈正发等^[16]基于土壤管理评估框架(SMAF)评价了云南坡耕地耕层的土壤质量,使用隶属度函数确定指标分值,确立了耕层土壤参数的阈值。但是,目前的研究中

往往直接使用了确定的指标权重和分值计算方法,而不同方法的选择可能会直接导致评价结果的差异。因此,对比分析不同的土壤质量指数计算方法从而准确评价区域土壤质量值得进一步深入研究。本研究拟以内蒙古杭锦旗黄河南岸灌区为例,测定分析79个土壤样本的11项理化指标,通过主成分分析法构建最小数据集,对比分析主成分分析法和层次分析法2种权重确定方法,隶属度函数、线性评分函数和非线性评分函数3种指标评分方法计算的土壤质量指数,并通过与全体数据集的自相关精度检验获取精度最高的方法组合,准确评价杭锦旗黄河南岸灌区土壤质量,以期为土壤质量评价中指标权重和分值计算方法的最优选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验区域位于内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗,40°19′~40°51′N,107°5′~108°51′E,与河套灌区隔黄河相望,地处库布其沙漠北部边缘。研究区位于干旱半干旱地区,温带大陆性季风气候,年平均降水量在146~250 mm,由东向西降雨量逐渐减少,降水主要分布在每年的7—9月,占全年降水的71%。年平均蒸发量约为2 381 mm,蒸发量远大于降水量,导致土壤盐渍化的发生。地貌类型属与黄河冲积平原,沿黄河流经方向狭长分布,整体地势

较为平坦,海拔高度在1 012~1 100 m。受气候、地质、水文等因素的影响,土壤类型以潮土、盐土、风沙土为主。沿河区域覆盖4个乡镇,5个社区和43个行政村,户籍人口77 436人。农业耕地面积为4.4万hm²。种植的粮食作物以玉米,小麦为主,经济作物以葵花为主,年农业总产值达9亿元,是内蒙古自治区重要的商品粮生产基地。

1.2 样品采集及理化指标测定

1.2.1 土样采集

通过对南岸沿河区域的野外调查,结合遥感影像,参考2.6 km×2.3 km的规则经纬格网设计吉日嘎朗图镇的采样点位。其余区域的采样点位为随机选取与吉日嘎朗图镇采样点位土壤类型和土地利用类型保持一致的土壤样点(图1)。在实际采样的过程中根据点位的可操作性和代表性,适当调整位置,难以获取的样点可在设计点位附近进行替代采样。于2021年8月中旬—9月中旬采集土壤样品,以采样点位为中心,在10 m半径内采集0~20 cm的土壤样品3~5个,混合均匀后四分法留取约1 kg土样。用GPS记录每个样点的地理坐标,共采集整个土壤样点79个,室内风干后磨碎过筛用于土壤理化指标的测定与分析。使用土钻采集土壤样品的同时,在每个采样点处使用3个100 cm³的环刀采集原状土壤,用于土壤容重和含水量的测定。基于以往综述文献研究中指标的选择频率^[17]确定

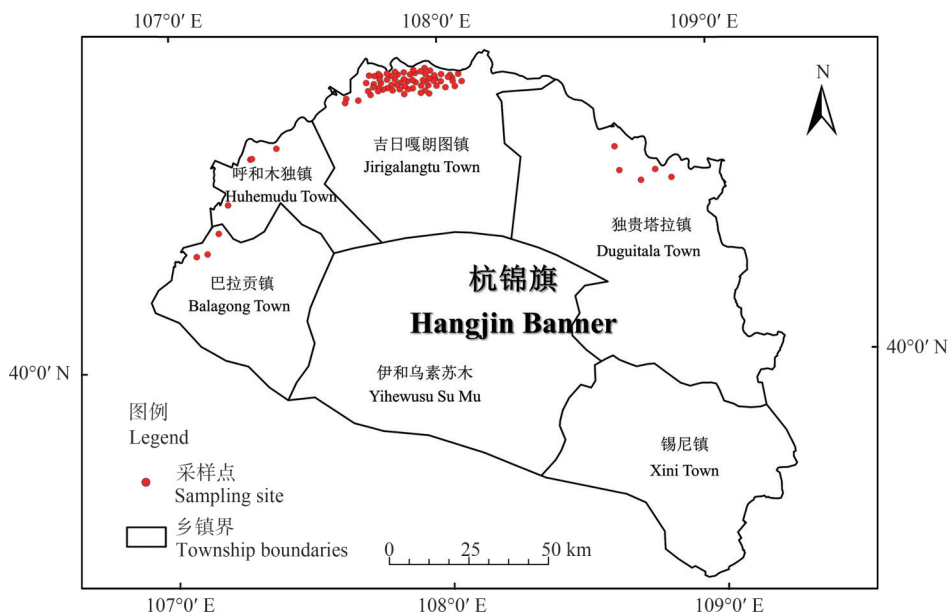


图1 研究区域与采样点位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area and sampling sites

评价指标,共测定计算以下11项土壤理化指标: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(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)、有机质(OM)、有机碳密度(SOCD)。

1.2.2 土壤理化指标的测定方法

土壤样品具体的指标测定方法如下^[18]:土壤容重和含水量采用环刀法测定原状土壤;土壤pH采用 $m(\text{水}):m(\text{土})=2.5:1$ 浸提电位法;电导率采用 $m(\text{水}):m(\text{土})=5:1$ 浸提电导法;速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用中性醋酸铵浸提火焰光度计测定;铵态氮用2 mol/L氯化钾浸提-靛酚蓝比色法;硝态氮用双波长紫外分光光度法^[19];土壤有机质采用重铬酸钾容量法;使用土壤容重和有机质换算得到土壤孔隙度和有机碳密度,研究中的土壤含水量为体积含水量,由质量含水量和容重计算得到^[20]。

1.3 最小数据集的构建方法

本研究采用主成分分析法构建最小数据集,其统计原理是通过降维精简评价指标的数量,参照评价指标之间的相关性分析结果消除多重指标间的冗余因素,使最终筛选出来的指标具有较强的独立性^[21]。对土壤的理化指标进行主成分分析,选择指标特征值 ≥ 1 的主成分,将在相同主成分中载荷 ≥ 0.5 的指标作为进入最小数据集中的备选指标。如果某项指标同时在2个主成分上的载荷都 ≥ 0.5 则该项指标应在与其他指标相关性较低的主成分中进行分析,再根据指标的相关分析结果进行筛选。本研究为了避免仅使用指标载荷作为唯一的选择标准而导致部分指标信息被忽略,引入矢量常模值Norm值,作为指标最终选入最小数据集的参考依据^[22]。某项指标的Norm值越大,则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:

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

式中: N_{ik} 为第*i*个指标在特征值 ≥ 1 的前*k*个主成分上的综合载荷; u_{ik} 为第*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。

计算各评价指标的Norm值,选取每个主成分中Norm值超过最高分95%的指标^[23]。当每组主成分中符合要求的指标 >1 时,需要对所选指标

进行相关分析,若高度相关,则Norm值最大的指标进入最小数据集,相关度低则同组指标均进入最小数据集。

1.4 土壤质量评价

1.4.1 确定评价指标权重

为了使指标权重的计算结果不仅由统计分析的主观排序决定,本研究分别选择了主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)和层次分析(Antalytic Hierarchy Process, AHP)2种权重确定方法对指标的权重进行计算。通过各项指标的公因子方差占公因子方差之和的比值确定PCA方法下指标的权重。AHP方法确定指标权重具有较强的主观因素,本研究根据研究区域的实际情况,结合现场调查与专家经验对指标进行标度,构造判断矩阵,计算结果通过一致性检验后获得AHP方法下的指标权重。

1.4.2 计算评价指标分值

权重是对评价体系中不同指标的标度,而指标分值的计算则是对各采样点指标实测值的定量描述。本研究选择了以往研究中最常用的3种指标评分函数:隶属度函数(Membership Function, MF)、线性评分函数(Linear Function, L)、非线性评分函数(Non-Linear Function, NL)分别对指标进行评分。隶属度函数公式如下^[24]:

S型隶属函数

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

反S型隶属函数

$$u(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{x-b}{a-b}, & a < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (3)$$

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

线性评分函数计算公式如下^[25]:

越多越好型

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

越少越好型

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

式中: $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为每个指标的最大值和最小值。

非线性评分函数计算公式如下^[26]:

$$F_{NL} = \frac{m}{1 + (\frac{x}{x_{ave}})^z} \quad (6)$$

式中: m 为函数评分的最大值, 本研究中将 m 定义为 1; x_{ave} 为指标的平均值; z 为公式中的斜率, 参考文献的研究结果将越多越好的土壤指标的 z 值设定为 -2.5, 越少越好的土壤指标的 z 值设定为 2.5。

1.4.3 计算土壤质量指数

土壤质量指数 (Soil Quality Index, SQI) 是一个基于指标使用的多维概念, 能够以数值的形式体现土壤质量的优劣状况。计算该指数所需的 2 个关键变量就是指标权重和指标分值, 而这 2 个变量的确定方法却并不唯一, 不同的方法计算得到的土壤质量指数也有很大的差异, 这将直接影响土壤质量的评价结果。土壤质量指数的计算公式如下^[27]:

$$SQI = \sum_{i=1}^n w_i \cdot N_i \quad (7)$$

式中: w_i 为第 i 个评价指标权重; N_i 为第 i 个评价指标隶属度值; n 为评价指标个数。

1.5 最小数据集评价土壤质量的精度验证

通过以上方法构建最小数据集计算土壤质量指数后, 以全体数据集为标准对构建的最小数据集进行自相关的精度检验。除了对 2 类数据集的结果进行线性拟合计算决定系数 (R^2) 外, 本研究还利用纳什效率系数 (Nash-satcliffe Efficient Coefficient, NSE) 和相对偏差系数 (Relative Deviation Coefficient, RDC) 对最小数据集的精确度进行验证^[28]。其计算公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum (R_T - R_M)^2}{\sum (R_T - \bar{R}_T)^2} \quad (8)$$

$$RDC = \left| \sum_{i=1}^n R_T - \sum_{i=1}^n R_M \right| / \sum_{i=1}^n R_T \quad (9)$$

式中: R_T 和 $\bar{R}_T$ 分别为全体数据集计算的各样点土壤质量指数值以及所有样点土壤质量指数的平均值; R_M 为基于最小数据集计算的各样点土壤质量指数值, n 为样点个数。NSE 越接近于 1, 表示所构建的最小数据集计算的土壤质量指数与全体数据集计算的土壤质量指数越接近, 模型精确度越高。RDC 越接近于 0, 则表示模型偏差值越小。

1.6 数据处理

试验数据在 R v4.2.3 中进行基础数据处理以及主成分分析和相关分析, 在软件 yaahp 中进行层次分析, 数据处理结果使用 Origin 2021 和 Power Point 2016 进行图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 最小数据集构建

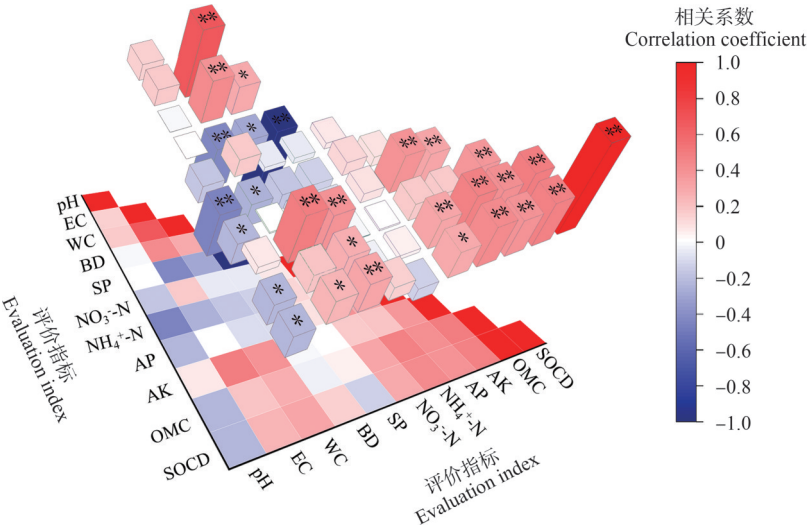
通过主成分分析筛选出具有较强独立性的指标集合作为土壤质量评价的最小数据集 (Minimum Data Set, MDS)。主成分分析的 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 与 Bartlett's (Bartlett test of sphericity) 检验结果显示 KMO 值为 0.64, $P < 0.05$, 表明本研究所选指标适合采用主成分分析的方法进行筛选^[29]。

对本研究选取的 11 项土壤理化指标进行主成分分析, 选择特征值 ≥ 1 的 4 个主成分, 数据的累计贡献率达到了 78.59%。在每个主成分中, 选择因子载荷最高的评价指标以及最高因子载荷数值 5% 以内的其他指标对主成分进行定义, 再通过指标间的相关性以及 Norm 值的大小筛选指标最终进入 MDS。特征值的大小决定主成分的解释顺序, 结果见表 1 和图 2。可见: 主成分 1 特征根的贡献率为 30.28%, 其中具有高载荷的指标有 SOCD (0.899)、OM (0.877)、AK (0.693) 和 AP (0.549)。主成分 1 主要代表了土壤的营养元素成分, 其中的 AK 和 AP 都与作物的生长直接相关, 同时, SOCD 和 OM 也是表征土壤肥力水平的主要指标。OM 和 SOCD 与 AK 和 AP 具有较高的相关性, 因此需要对冗余指标进行筛选。通过对高载荷指标 Norm 值的计算, 选择 Norm 值最高的指标 SOCD Norm 值 5% 内的指标进行筛选, 结果显示主成分 1 中仅有 OM 满足筛选条件, 实际上 OM 与 SOCD 对土壤质量的决定程度较为相似, 都表征着土壤中的有机碳含量, 所以二者任一都可以被选择进入 MDS, 参考 Norm 值的微弱差异, 本研究选择 SOCD 进入 MDS; 主成分 2 特征根的贡献率为 24.85%, 其中具有高载荷的指标有 BD (0.784)、EC (0.672) 和 WC (0.584)。主成分 2 主要代表了土壤的物理结构性状, 土壤容重的大小直接反应土壤结构的好坏, 从而影响土壤的耕性与保水能力。过高的盐分含量会导致土壤的物理结构变差, 使地表水分难以入渗, 造成表层土壤板

表 1 构建最小数据集评价指标的主成分分析结果

Table 1 Results of principal component analysis for constructing evaluation indicators for the minimum data set

评价指标 Evaluation index	主成分 Principal component				Norm 值 Norm value
	第一因子 Principal component 1	第二因子 Principal component 2	第三因子 Principal component 3	第四因子 Principal component 4	
	Principal component 1	Principal component 2	Principal component 3	Principal component 4	
含水量 WC	0.450	0.584	0.355	−0.248	1.366
容重 BD	0.202	0.784	−0.557	0.074	1.516
孔隙度 SP	−0.203	−0.783	0.557	−0.073	1.515
pH	−0.258	0.381	0.607	0.016	1.089
电导率 EC	0.496	0.672	0.286	0.147	1.484
速效磷 AP	0.549	−0.381	−0.035	0.427	1.262
速效钾 AK	0.693	0.061	0.441	−0.021	1.382
硝态氮 NO ₃ [−] -N	0.429	−0.219	0.016	0.752	1.155
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	0.436	−0.546	−0.371	−0.320	1.329
有机质 OM	0.877	−0.245	0.030	−0.222	1.667
有机碳密度 SOCD	0.899	−0.112	−0.086	−0.217	1.669
特征值 Eigenvalue	3.331	2.734	1.539	1.041	—
贡献率/% Variance	30.281	24.854	13.991	9.467	—
累积贡献率/% Cumulative variance	30.281	55.136	69.127	78.594	—



*为在 $P\leq 0.05$ 水平上显著;**为 $P\leq 0.01$ 水平上显著

* means significance at $P\leq 0.05$ level; ** means significance at $P\leq 0.01$

图 2 土壤理化指标的 Pearson 相关系数矩阵

Fig. 2 Pearson correlation coefficient matrix statistic of soil physicochemical indicators

结等。主成分2中存在2个高负载荷的指标SP(−0.783)和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (−0.546),其中孔隙度是由容重换算得出,2者呈直接的负相关关系,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 仅与EC呈显著的负相关关系。BD、EC和WC这3个指标之间存在着显著的相关性。选择Norm值最高的指标BD(Norm=1.516),并对其Norm值5%内的指标进行筛选。结果显示,EC符合筛选条件,尽管如此,因为BD更能直接代表主成分2所反应的土壤物理结构性状,所以在主成分2中选择BD进入MDS;主成分3特征根的贡献率为13.99%,其中具有高载荷的指标有pH和SP,由于孔隙度和容重在表示土壤质量上的一致性,并且BD已经选入MDS,故不再对其进行讨论。所以主成分3中仅有pH一个指标,代表了土壤的酸碱程度,选择其进入MDS;主成分4特征根的贡献率为9.47%,其中具有高载荷的指标仅有 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,代表了土壤速效氮素养分的供应,将其选入MDS。因此,根据以上分析结果,最终确定4个主成分中进入MDS的指标为SOC_D、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、BD和pH,分别代表了土壤的养分供应情况、物理结构性状和土壤的酸碱程度。

2.2 土壤质量指数的计算

2.2.1 不同方法计算指标权重及分值

本研究分别采用主成分分析法(PCA)和层次分析法(AHP)确定全体数据集(Total Data Set, TDS)与最小数据集(MDS)的评价指标权重。使用PCA分析结果中各指标的公因子方差,计算单个指标公因子方差占总公因子方差之和的比值,确定为该评价指标的权重(W-PCA)。同时,采用AHP构建不同层次的指标矩阵,在通过一致性检验的前提下,计算各评价指标的权重(W-AHP),结果见表2。可见:AHP和PCA计算的含水量权重分别为0.143和0.085,并且AHP计算物理指标的权重均高于其他指标,明显高于PCA的计算结果,而AHP计算的速效养分指标权重均低于PCA的计算结果。通过这2种方法计算得到的有机质权重则较为一致,AHP计算的有机质权重为0.103,PCA计算的为0.102。在MDS中,2种方法计算得到的权重大小顺序基本统一(表2)。与PCA相比,AHP的计算结果降低了硝态氮的权重,但提高了pH的权重。

表2 全体数据集与最小数据集的指标权重

Table 2 Indicator weights for the total data set and the minimum data set

数据集 Data set	评价指标 Evaluation index	公因子方差(PCA) Common factor variance (PCA)	因子权重 Factor weight	
			PCA	AHP
全体数据集 Total data set	WC	0.732	0.085	0.143
	BD	0.970	0.112	0.174
	SP	0.971	0.112	0.174
	pH	0.581	0.067	0.079
	EC	0.802	0.093	0.084
	AP	0.630	0.073	0.037
	AK	0.679	0.079	0.032
	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.798	0.092	0.040
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.728	0.084	0.033
	OM	0.879	0.102	0.103
	SOC _D	0.876	0.101	0.103
最小数据集 Minimum data set	BD	0.908	0.360	0.476
	pH	0.417	0.165	0.182
	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.567	0.225	0.100
	SOC _D	0.631	0.250	0.243

本研究选择隶属度函数(MF)、线性评分函数(L)、非线性评分函数(NL)分别对指标进行评分。认为WC、SP、OM、SOC、AP、AK、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N与土壤质量呈正相关,所以界定以上指标选择隶属度函数中的S型隶属函数以及线性、非线性评分函数中的越多越好型;BD、EC、pH越高,表明土壤的理化性质越差,盐碱化程度越严重,所以界定这3个指标选择隶属度函数中的反S型隶属函数和线性、非线性评分函数中的越少越好型。将指标评分值由小到大依次进行排序,各指标不同评分函数的评分分布趋势结果见图3。可见:除指标BD、SP、pH、EC外,其余指标的MF函数评分值与L函数评分值较为一致,并且都小于NL的计算结果。对于土壤有机质的评分计算,3种函数的计算结果基本保持一致;而对于表示土壤物理性质与盐碱化的指标,不同的评分函数则具有明显的差异;BD、SP、pH采用L和NL函数计算的分布趋势保持一致,但L函数的计算结果要高于NL函数,同时,这2种函数对指标评分的区分度要小于MF。

2.2.2 不同方法组合计算土壤质量指数及精度检验

通过PCA和AHP 2种指标权重确定方法,结合MF、L、NL 3种评分函数分别计算TDS与MDS 2类数据集各采样点的土壤质量指数,结果见图4。可见:AHP确定权重计算的土壤质量指数值均高于同一评分函数下PCA的计算结果。在不同评分函数类型土壤质量指数计算的结果中,采用L函数对指标评分计算结果的平均值都明显高于MF和NL函数,虽然TDS-SQI_{PCA}中的土壤质量指数分布较为集中,但TDS-SQI_{P-L}的平均值依然最高,为0.481,而TDS-SQI_{P-NL}和TDS-SQI_{P-MF}的平均值则分别为0.471和0.428。这种趋势在TDS-SQI_{AHP}和所有最小数据集土壤质量指数的计算结果中更为明显。而采用MF函数对指标评分计算的土壤质量指数在所有类型中都是最低的,但MF函数的计算结果均具有较高的变异系数,TDS-SQI_{P-MF}、TDS-SQI_{A-MF}、MDS-SQI_{P-MF}和MDS-SQI_{A-MF}的变异系数分别为24.54%、22.47%、29.19%和26.57%。

对不同方法计算的TDS和MDS 2类数据集土壤质量指数进行线性拟合,计算纳什效率系数(NSE)和相对偏差系数(RDC),验证不同函数类型

组合计算下最小数据集的评价精度结果见图5。可见:不同的权重确定方法直接影响最小数据集的评价精度,对比PCA,AHP确定的权重在所有类型指标评分函数的计算下均有较高的决定系数,同时能够获得更接近于1的NSE和更接近于0的RDC。在2种权重确定方法中,不同类型的指标评分函数具有较为一致的检验结果。因此,本研究构建的最小数据集在MF函数的计算中具有最高的自相关检验精度,并且,AHP确定指标权重能够进一步提高最小数据集的自相关检验精度($R^2=0.85$),纳什效率系数为0.81,相对偏差系数为0.04。因此,选择AHP-MF的方法组合计算2类数据集土壤质量指数对研究区域土壤质量进行综合评价。

2.3 最优方法组合的灌区土壤质量评价

结合2类数据集(TDS和MDS)土壤质量指数最优组合AHP-MF的分析结果,对研究区域土壤质量进行综合评价。全体数据集计算得到的土壤质量指数值在0.25~0.71,平均值为0.43,变异系数为22.47%,最小数据集计算的土壤质量指数值在0.16~0.78,平均值为0.45,变异系数为26.57%。按照等间距法将土壤质量划分为5个等级^[30],全体数据集的计算结果显示研究区域土壤涵盖了3个等级(Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级),此外,最小数据集的计算结果还包括了第Ⅴ级。2类数据集计算的平均结果均表明研究区域土壤处于第Ⅲ级,中等质量水平。

3 讨论与结论

3.1 不同土壤质量指数计算方法的差异

在使用层次分析法(AHP)计算指标权重时,物理指标的权重均高于其他指标,并明显高于主成分分析法(PCA)。并且,在全体数据集(TDS)中,表示土壤物理性质的容重在2种方法的计算结果中都获得了最高的权重,通过AHP计算的权重同样要明显高于PCA,这可能是由于AHP确定指标权重主要依靠先验知识,具有较高的主观因素,这与以往的研究结果保持一致^[10]。土壤有机质与大量营养元素直接相关,其含量的高低能够表征土壤的肥沃情况^[31]。通过这2种方法计算得到的有机质权重则较为一致,这也说明使用AHP计算指标权重虽然受到人为因素的控制,但该方法在评价土壤质量关键指标的权重确定方面依然与PCA具有部分一致性。以往的研究并未明确指出有机质对不同权重确定

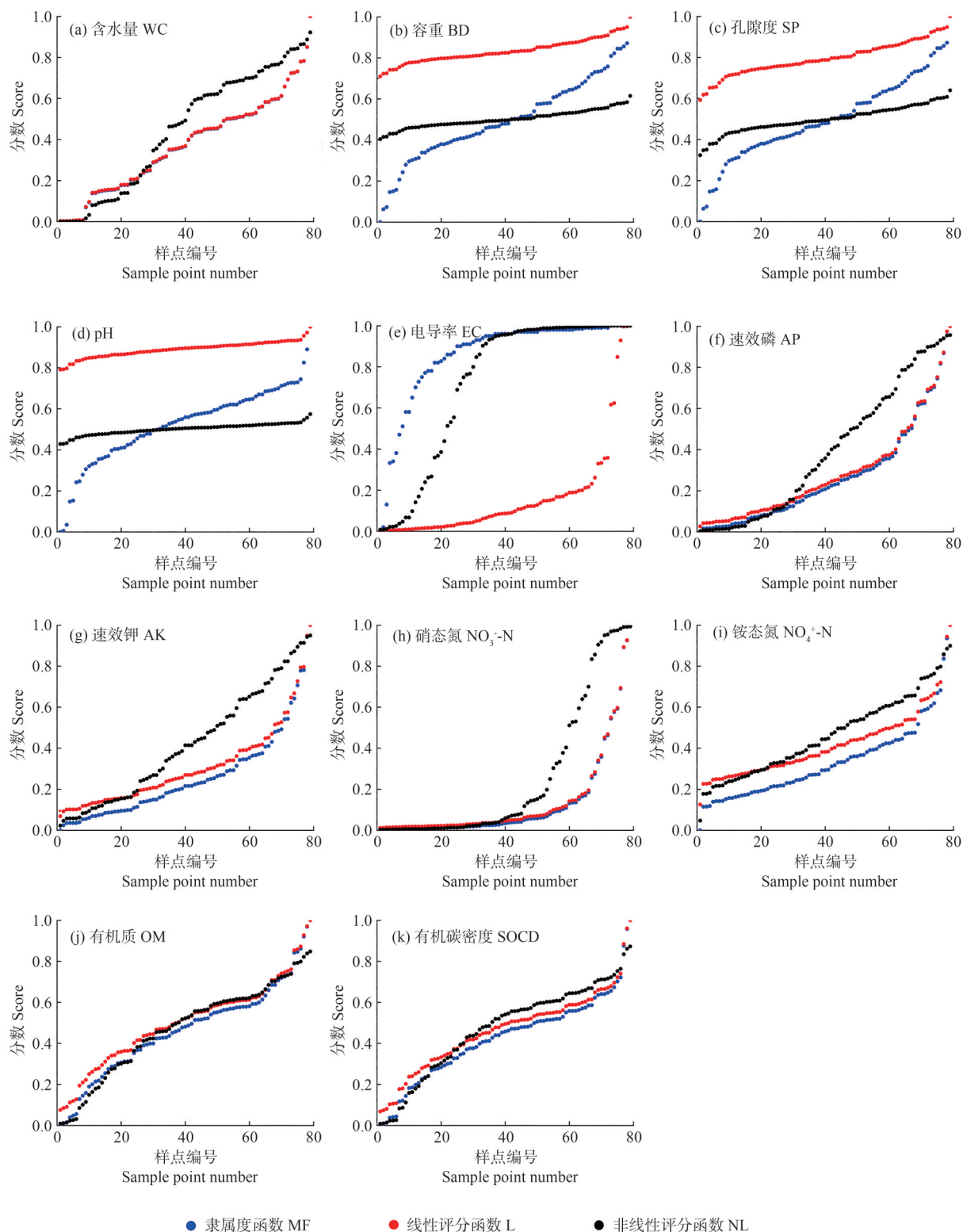


图3 不同评分函数指标评分的趋势分布

Fig. 3 Trend distribution of index scores by different scoring functions

方法的同等作用,这与研究区域和测定指标的选择有关,未来的研究可以参考本研究构建的指标体

系,在其他的研究区域探讨不同权重方法下确定有机质的差异。对比不同评分函数类型,选择S型隶

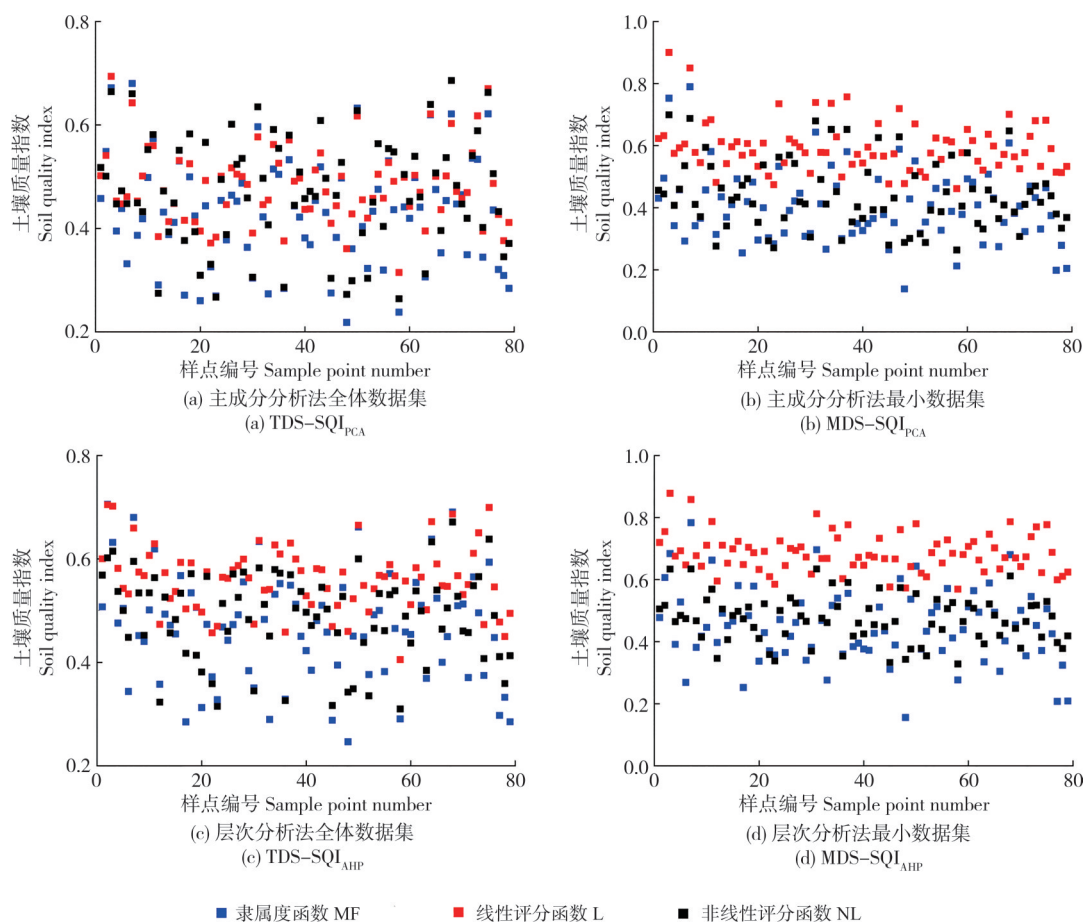


图4 不同分析方法组合的土壤质量指数分布

Fig. 4 Distribution of soil quality index calculated by different combination methods

属函数以及线性、非线性评分函数中越多越好型的样点分值分布趋势基本保持一致, NL函数对指标的赋值略高于MF和L函数;主要的差异则出现在选择反S型隶属函数和线性、非线性评分函数中越少越好型指标的计算结果中, MF函数对指标的计算能够更大范围的对指标进行评分, 使指标分值具有更高的区分度, 而L和NL函数在分布趋势上较为相似, 这与Raiesi^[14]的研究结果保持一致。指标的评分与研究区域的不同以及指标的选择有着直接关系^[11], 尽管评分函数不同, 但本质均是以所有样点实测数据集合为基础的单个样点实测值的归一化过程。

不同的权重计算方法结合不同的指标评分函数计算的土壤质量指数存在较大差异, 合适的方法组合是准确评价研究区域土壤质量的关键^[32]。AHP在整体上提高了最小数据集的自相关检验精度, 由于AHP确定的指标权重具有较强的主观因素, 而PCA则仅根据数据内部的客观关联性进行权

重计算, 这是检验结果存在差异的直接原因, 何超等^[33]的研究同样也证实了这一点。尽管L函数自相关的检验结果得到了较高的 R^2 , 但NSE和RDC显示该函数在2种权重确定方法下的数值均为负数, 因此, 该方法构建最小数据集的评价精度还有待进一步验证。Nakajima等^[34]在研究中也优先采用MF和NL函数, 这印证了本研究的结果。根据研究区域的不同以及评价指标的差异灵活选择权重计算方法与指标评分函数计算土壤质量指数是准确评价土壤质量的关键。

3.2 灌区土壤质量综合解析及对策建议

土壤的物理指标是限制杭锦旗黄河南岸灌区土壤质量的主要因素, 土壤容重普遍超出了适宜耕种的范围。同时, 在作物的收获期, 土壤中大量存在的氮磷元素结合该区域秋季大水漫灌的传统方法极易引起地下水及河流的污染^[35]。土壤中各类速效养分含量充足, 但有机质含量较为贫瘠, 这说明农作物的种植和生长很大程度上依赖化肥的施

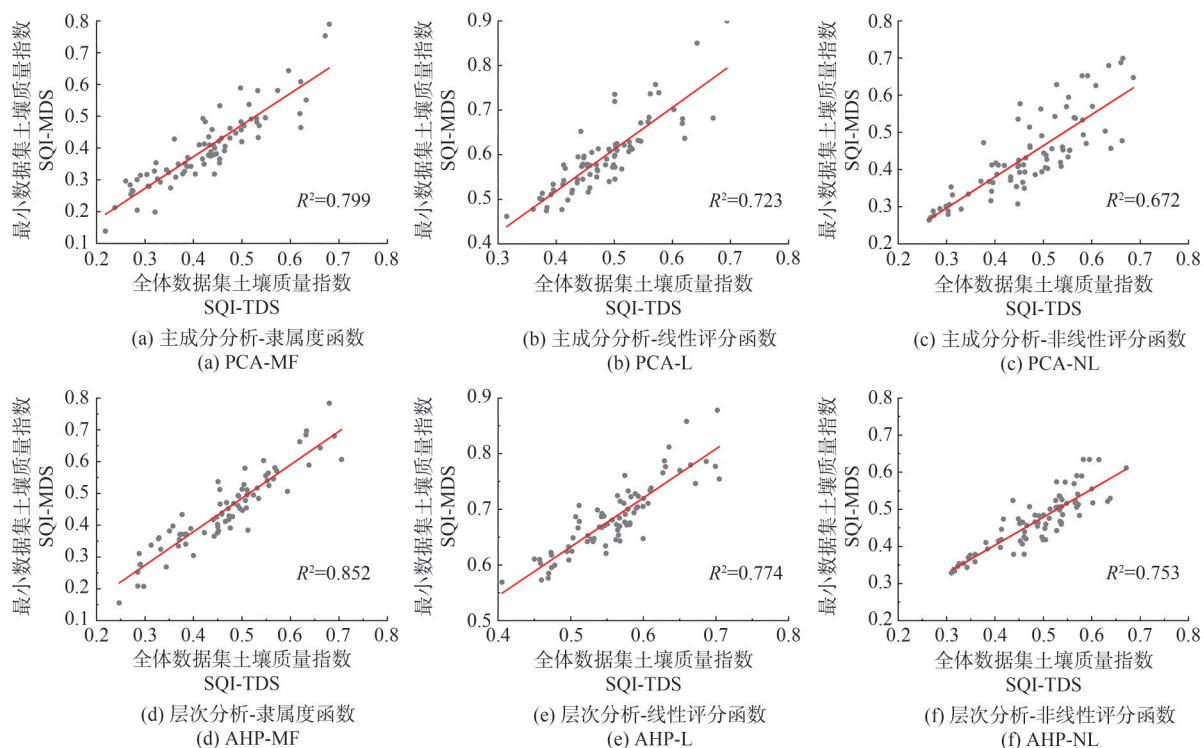


图5 不同计算方法组合下全体数据集和最小数据集土壤质量指数的相关性

Fig. 5 Correlation of soil quality index for total data set (SQI-TDS) and minimum data set (SQI-MDS) under different combinations of calculation methods

用,尽管作物能够完成生长周期,但是研究区域内耕地很可能存在着化肥施用过量的问题。综上所述,沿河区域实际的土壤质量可能会比研究结果要低。土壤的养分供应可以通过施肥得到补充,但土壤的物理特性难以轻易改变,所以物理指标就成为了限制研究区域土壤质量的主要因素。针对这个问题,应采用合理的耕作方式,改善耕层土壤物理结构,给作物的生长提供良好的土壤环境。然而,长时间的耕作同样也会增大土壤的容重^[36]。采取例如免耕、少耕、秸秆覆盖等保护性耕作措施则更有利于解决现存的问题^[37]。秸秆覆盖能够为土壤提供有机物质,经过微生物转化后的腐殖质可以改善耕层土壤的物理结构^[20]。同时,地表的覆盖还能在一定程度上减缓土壤表面的蒸发,抑制盐分向耕层的运移,起到降低土壤盐渍化的作用^[38]。因此,应适时调整种植模式与管理技术,提高杭锦旗黄河南岸灌区的土壤质量,在保证种植作物产量的同时进一步提升作物品质。

尽管本研究通过比较优选出 AHP-MF 对杭锦旗黄河南岸灌区土壤进行了质量评价研究,但最优方法的组合仍然受到区域差异和指标选择的限制,

这导致不同研究中的结果可能会有所差异。因此,在今后的研究中应深入探讨指标数值与方法选择的直接关联,研究结合主观因素与客观因素确定指标权重的综合方法。

本研究主要结论如下:

1)较强的主观因素使层次分析法确定的物理指标权重高于主成分分析法,采用隶属度函数会使指标评分具有更高的区分度。

2)采用层次分析法确定指标权重,隶属度函数确定指标分值计算的最小数据集土壤质量指数能够获得最高的自相关检验精度,可将该方法组合确定为本研究区域的最优土壤质量指数计算组合。

3)杭锦旗黄河南岸灌区土壤质量指数包含了Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级3个质量等级,平均质量指数为0.43,应适时调整种植模式与管理技术提升土壤质量。

本研究为土壤质量指数计算过程中权重确定方法与指标评分方法的选择提供了基础参考。在今后的研究中,还应深入探究不同方法的内在逻辑关联,以明确研究区域和评价指标与方法选择的直接关系。

参考文献 References

- [1] Wang L, Guo J Y, Liu X M, Li K, Ma L, Tian Y H, Wang J M, Zhang Q D, Tian Y Z, Li C R, Lu M. Assessment of soil quality in an arid and barren mountainous of Shandong Province, China[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 19966
- [2] de Paul Obade V, Lal R. A standardized soil quality index for diverse field conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 424-434
- [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] 汪媛媛, 杨忠芳, 余涛. 土壤质量评价研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(36): 22617-22622, 22657
Wang Y Y, Yang Z F, Yu T. Research progress of soil quality evaluation [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(36): 22617-22622, 22657 (in Chinese)
- [5] Doran J W, Parkin T B. Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set[M]. In: Doran J W, Jones A J, eds. *SSSA Special Publications*. Madison: Soil Science Society of America, 2015: 25-37
- [6] Andrews S S, Karlen D L, Cambardella C A. The soil management assessment framework [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 1945-1962
- [7] Moebius-Clune B N. *Comprehensive Assessment of Soil Health: The Cornell Framework Manual*[M]. New York: Cornell University, 2016
- [8] GB/T 33469—2016. 耕地质量等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016
GB/T 33469—2016. Cultivated land quality grade[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2016 (in Chinese)
- [9] 李鑫, 张文菊, 郭磊, 任意, 张骏达, 徐明岗. 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
Li X, Zhang W J, Wu L, Ren Y, Zhang J D, Xu M G. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(14): 3043-3056 (in Chinese)
- [10] 林卡, 李德成, 张甘霖. 土壤质量评价中文文献分析[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 736-744
Lin K, Li D C, Zhang G L. Literature analysis on soil quality assessment in China based on CNKI database[J]. *Chinese Journal of Soil Science*. 2017, 48(3): 736-744 (in Chinese)
- [11] 梅楠, 谷岩, 李德忠, 梁尧, 袁静超, 刘剑钊, 任军, 蔡红光. 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
Mei N, Gu Y, Li D Z, Liang Y, Yuan J C, Liu J Z, Ren J, Cai H G. 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*, 2021, 37(12): 91-98 (in Chinese)
- [12] Zhang Y H, Xu X L, Li Z W, Xu C H, Luo W. Improvements in soil quality with vegetation succession in subtropical China Karst[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145876
- [13] 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)
- [14] Raiesi F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 307-320
- [15] Liebig M A, Varvel G, Doran J. A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions [J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(2): 313-318
- [16] 陈正发, 史东梅, 金慧芳, 姜义宝, 何伟, 夏建荣. 基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 256-267
Chen Z F, Shi D M, Jin H F, Lou Y B, He W, Xia J R. Evaluation on cultivated-layer soil quality of sloping farmland in Yunnan based on soil management assessment framework (SMAF) [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(3): 256-267 (in Chinese)
- [17] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, Creamer R E, De Deyn G, de Goede R, Flesskens L, Geissen V, Kuyper T W, Mäder P, Pulleman M, Sukkel W, van Groenigen J W, Brussaard L. Soil quality: A critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105-125
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [19] 杜森, 高祥照主编, 全国农业技术推广服务中心编. 土壤分析技术规范[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2006
Du S, Gao X Z, National Agricultural Technology Extension and Service Center. *Technical Specification for Soil Analysis*[M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2006 (in Chinese)
- [20] 吕貽忠, 李保国. 土壤学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2020: 219-220
Lv Y Z, Li B G. *Agrology* [M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2020 (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] Zhang G L, Bai J H, Xi M, Zhao Q Q, Lu Q Q, Jia J. Soil quality assessment of coastal wetlands in the Yellow River Delta of China based on the minimum data set[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 458-466
- [23] 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
- [24] 陈伟业, 杨小虎, 杨海昌, 张凤华. 玛纳斯河流域绿洲农区残余盐渍化土壤质量评价[J]. 中国土壤与肥料, 2023, (4): 1-7
Chen W Y, Yang X H, Yang H C, Zhang F H. Soil quality assessment of residual salinization in oasis agricultural area of Manasi River Basin [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(4): 1-7 (in Chinese)
- [25] Mandal S, Choudhury B U, Satpati L. Data article on Soil site suitability analysis using geostatistical and visualization techniques for selected winter crops in Sagar Island, India[J]. *Data in Brief*, 2020, 31: 105930
- [26] Mastro R E, Chhonkar P K, Purakayastha T J, Patra A K, Singh D. Soil quality indices for evaluation of long-term land use and soil management practices in semi-arid sub-tropical India [J]. *Land Degradation & Development*, 2008, 19(5): 516-529
- [27] 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
- [28] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles [J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290
- [29] 刘孟宜, 田博宇, 王滢颖, 王超, 李慧静. 基于主成分分析的不同小麦品种制作的韧性饼干品质评价[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(10): 44-53
Liu M Y, Tian B Y, Wang Y Y, Wang C, Li H J. Comprehensive quality evaluation of semi-hard biscuits of different wheat varieties based on principal components analysis [J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(10): 44-53 (in Chinese)
- [30] 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)
- [31] 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)
- [32] 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)
- [33] 何超, 李萌, 李婷婷, 彭雪, 李婕, 赵锦慧. 多目标综合评价中四种确定权重方法的比较与分析[J]. *湖北大学学报: 自然科学版*, 2016, 38(2): 172-178
He C, Li M, Li T T, Peng X, Li J, Zhao J H. Comparison and analysis of the four methods of determining weights in multi-objective comprehensive evaluation [J]. *Journal of Hubei University: Natural Science*, 2016, 38(2): 172-178 (in Chinese)
- [34] Nakajima T, Lal R, Jiang S G. Soil quality index of a Crosby silt loam in central Ohio [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 323-328.
- [35] Gao S S, Xu P, Zhou F, Yang H, Zheng C M, Cao W, Tao S, Piao S L, Zhao Y, Ji X Y, Shang Z Y, Chen M P. Quantifying nitrogen leaching response to fertilizer additions in China's cropland [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 211: 241-251
- [36] Hunter A S. The nature and properties of soils, 6th edition [J]. *Agronomy Journal*, 1960, 52: 673
- [37] 成臣, 汪建军, 程慧煌, 罗亢, 曾勇军, 石庆华, 商庆银. 秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 247-257
Cheng C, Wang J J, Cheng H H, Luo K, Zeng Y J, Shi Q H, Shang Q Y. Effects of straw returning and tillage system on crop yield and soil fertility quality in paddy field under double-cropping-rice system [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1): 247-257 (in Chinese)
- [38] Soni P G, Basak N, Rai A. K, Sundha P, Narjary B, Kumar P, Yadav G, Kumar S, Yadav R K. Deficit saline water irrigation under reduced tillage and residue mulch improves soil health in sorghum-wheat cropping system in semi-arid region [J]. *Scientific Reports*, 2021(11): 1880

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。获硕士、博士学业二等奖学金。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等。已发表论文4篇, 其中包括SCI论文1篇。



通讯作者简介: 李品芳, 博士, 博士生导师, 教授。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, 水、土资源可持续利用等。承担和主持国家重点研发计划、国家自然科学基金、科技部重点研发专项项目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具有较丰富的理论积累与实践经验。