

# 基于最小数据集的银川平原农田土壤健康评价<sup>①</sup>

吴霞<sup>1,2</sup>, 蔡进军<sup>1,2\*</sup>, 王长军<sup>1,2</sup>, 郭鑫年<sup>1,2</sup>, 李维倩<sup>1</sup>, 陈刚<sup>1</sup>

(1 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002; 2 国家农业环境银川观测实验站, 银川 750002)

**摘要:** 土壤健康评价需要考虑区域自然禀赋和环境特征, 评价指标的选择应依据不同区域特征来确定。为确保所选指标能够代表银川平原农田土壤的关键属性和功能, 本研究在调查采集银川平原农田土壤样点 147 个, 测试分析土壤物理、化学和生物 16 项指标的基础上, 采用主成分分析法筛选与构建农田土壤健康评价最小数据集, 并应用土壤健康指数法评价了银川平原农田土壤健康状况。结果表明: 银川平原农田土壤健康评价最小数据集包含土壤含水率、水稳性大团聚体、pH、全盐、全氮、有效磷、有机质和微生物生物量碳 8 个指标, 采用加权综合法计算所得的最小数据集健康指数与全数据集健康指数, 其线性回归方程拟合效果良好 ( $R^2=0.846$ ,  $P<0.001$ ), 表明所构建的最小数据集可代表全数据集进行银川平原农田土壤健康评价。基于最小数据集计算的银川平原农田土壤健康指数介于 0.18~0.78, 平均值 0.52, 土壤健康指数在空间分布上整体呈现出南高北低趋势, 局部地区分布不均, 空间异质性较大。本研究结果可为银川平原农田土壤健康评价以及农业绿色生产提供理论依据。

**关键词:** 最小数据集; 主成分分析; 农田土壤; 健康评价; 银川平原

中图分类号: S158 文献标志码: A

## Soil Health Evaluation of Farmland in Yinchuan Plain Based on Minimum Data Set

WU Xia<sup>1,2</sup>, CAI Jinjun<sup>1,2\*</sup>, WANG Zhangjun<sup>1,2</sup>, GUO Xinnian<sup>1,2</sup>, LI Weiqian<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>

(1 *Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China*; 2 *Station of Observation and Experiment National Agricultural Environment in Yinchuan, Yinchuan 750002, China*)

**Abstract:** Soil health evaluation needs to consider regional natural endowment and environmental characteristics, and the selection of evaluation indicators should be determined based on different regional characteristics. To ensure that the selected indicators can represent the key attributes and functions of farmland soils in Yinchuan Plain, in this study, 147 farmland soil samples were collected, 16 soil physical, chemical and biological indicators were determined, principal component analysis (PCA) was used to screen and construct the minimum data set (MDS) for farmland soil health evaluation, and soil health index (SHI) method was adopted to evaluate the health status of farmland soils. The results showed that the MDS for soil health evaluation contained eight indicators: soil water content, water-stable macroaggregates, pH, total salt, total nitrogen, available phosphorus, organic matter and microbial biomass carbon. The linear regression equation fitted between soil health indices derived from the MDS and the total data set (TDS) using the weighted synthesis method showed a good performance, which indicated that the constructed MDS could represent the TDS for soil health evaluation in the study region. The soil health index for farmland in the Yinchuan Plain, calculated based on the MDS, ranges from 0.18 to 0.78 with an average value of 0.52. Spatially, the soil health index exhibits a general trend of higher values in the south and lower values in the north. However, distribution remains uneven in certain areas, indicating significant spatial heterogeneity. The results of this study can provide theoretical support for the evaluation of farmland soil health in the Yinchuan Plain as well as for green agricultural production.

**Key words:** Minimum data set; Principal component analysis; Farmland; Health assessment; Yinchuan Plain

①基金项目: 宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范课题(NGSB-2021-11-01)、国家自然科学基金项目(U23A20158)和宁夏回族自治区科技创新领军人才项目(2023GKLRX20)资助。

\* 通信作者(nxyccai@163.com)

作者简介: 吴霞(1984—), 女, 宁夏吴忠人, 硕士, 副研究员, 主要从事土壤调查与健康评价研究。E-mail: wuxia-xia@163.com

土壤在农业生产中起着关键作用,对农作物生长和农业可持续发展具有决定性影响<sup>[1]</sup>。传统以高投入、高产为特征的石化农业导致耕地土壤污染、养分失衡、结构破坏等一系列问题,直接影响到了粮食生产和农业可持续发展,对食品安全和人类健康造成了严重威胁<sup>[2-3]</sup>。随着社会经济的发展,城市化、工业化及不合理的土地利用导致土壤健康状况不断恶化,土壤健康问题已经成为社会各界关注的焦点<sup>[4]</sup>。联合国粮农组织(FAO)将 2015 年确定为“国际土壤年”,并以“健康土壤带来健康生活”为核心议题开展了一系列探讨和研究,指出健康的土壤是健康食品生产的基础,保护土壤健康是保障食品安全和实现农业绿色可持续发展的基本需求<sup>[5]</sup>。我国土壤环境总体状况堪忧,部分地区污染问题突出,为应对这一挑战,必须从守护耕地土壤健康这一根本出发,以支撑我国农业的高质量与可持续发展<sup>[6]</sup>。因此,开展土壤健康调查评价,掌握土壤健康状况、变化趋势及其影响因素等,是实现土壤健康保护和可持续利用的基础,对生态系统安全和人类健康具有重要意义。

开展土壤健康评价是提升土壤质量和培育健康土壤的基础。近年来,针对土壤健康评价的方法选择、体系构建、指标选取、工具开发等理论研究和实践探索不断深入,模糊数学、降维模型等方法不断被引入到不同时空尺度的土壤健康评价研究中<sup>[7]</sup>。国内外已逐步形成了多个较为成熟的土壤健康评价体系。美国农业部的 Andrews 等<sup>[8]</sup>提出的土壤管理评价框架(SMAF)和康奈尔大学建立的康奈尔土壤健康评价方法(CASH)<sup>[9]</sup>是应用较广的土壤健康评价方法。新西兰的土壤指标(SINDI)法采用网络在线评价工具,将土壤指标数据与已有数据库信息进行比较获得土壤健康信息,进而提出不同目标的管理措施<sup>[10]</sup>,较好地指导了当地的作物生产。我国主要采用耕地地力综合指数法开展土壤质量评价<sup>[11-13]</sup>,通过定量与定性相结合的方法,确定区域耕地质量评价指标,采用系统聚类方法、德尔菲(DELPHI)法等充分综合自然条件、土壤条件、土壤管理等多因素,能够比较全面地反映土壤质量状况。

虽然目前国内外不少学者已经提出了土壤健康评估体系,但仍没有统一的标准和方法,尤其是指标选择各有不同,需要不断改进和完善,以满足不同区域、不同尺度的土壤健康管理需要<sup>[14]</sup>。大量实践研究表明,全面的指标能够更真实地反映土壤健康状况,但完整的指标数据获取难度较大,且指标

间存在重叠和冗余信息,增加了指标权重计算过程的不确定性,因此,从大量土壤物理、化学及生物指标中选取对土壤质量敏感的评价参数,进而构建最小数据集(Minimum data set, MDS)来评价土壤健康的方法被广泛采用<sup>[15]</sup>。Devine 等<sup>[16]</sup>选取土壤含水量、容重、阳离子交换量和有机碳等 10 个指标,采用聚类分析法构建了美国加利福尼亚州中部土壤健康评价模型,对研究区土壤健康进行了评价和划分。李桂林等<sup>[17]</sup>通过主成分分析法(PCA)将土壤要素在主成分上的综合荷载作为候选参数的筛选依据,以多变量方差分析定量土地利用变化对土壤各参数的贡献,采用均值多重比较确定了其对土壤性质的定量影响,最终得到既能减少参数包含土壤质量信息的损失又能最大限度代表所有参数的最小数据集,得到了较好的土壤健康评价结果。尽管目前已有众多土壤健康评价方法和实践案例,但所针对的评价目标、评价区域、评价尺度等不尽相同,选取的评价指标及其权重等也具有一定的局限。因此,需要根据不同区域实际情况筛选适宜的评价指标,建立土壤健康评价方法。

银川平原位于贺兰山与鄂尔多斯高原之间,经黄河及平原湖沼长期淤积而成,是我国西北重要的优质粮产区。由于人类活动频繁以及长期粗放式灌溉耕种,导致区域农业面源污染严重、灌溉水质恶化、土壤次生盐渍化、土壤质量退化等问题,严重威胁银川平原农田土壤健康和农业绿色可持续发展<sup>[18]</sup>。目前,已有不少学者针对银川平原土壤质量、耕地质量、环境质量等开展评价研究,例如,胥涛和丁凯<sup>[19]</sup>依据 GB/T33469—2016《耕地质量等级》标准对宁夏耕地质量的评价显示,银川平原是宁夏耕地质量等级较高的地区,但仍不及全国平均水平;李白云等<sup>[20]</sup>采用主成分分析法筛选与构建宁夏耕地质量评价最小数据集,包括土壤全氮、全磷、胡敏酸、交换性钙和交换性镁 5 个指标,并采用灰色关联度和非线性模型开展评价,结果表明该数据集能有效表征区域土壤质量差异,为耕地管理提供了依据,但该研究未包含微生物量、酶活性等生物指标,可能影响评价的系统性和生态意义。因此,针对现有评价体系中生物指标缺乏的问题,本研究以银川平原农田土壤为研究对象,选取土壤物理、化学、生物等指标,采用主成分分析法筛选与构建土壤健康评价最小数据集,并对农田土壤健康状况进行定量化评价,为银川平原农田土壤健康保护和农业高质量发展提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

银川平原位于宁夏回族自治区北部(37°46'N~39°23'N, 105°45'E~106°56'E), 南北长约 165 km, 东西宽约 60 km, 区域面积约为 7 615 km<sup>2</sup>, 包括石嘴山市惠农区、大武口区和平罗县, 银川市兴庆区、金凤区、西夏区、贺兰县、永宁县, 以及银川市灵武市和吴忠市利通区、青铜峡市部分地区(图 1)。该区域平均海拔 1 100 m, 属内陆温带干旱区, 年均降水量不足 200 mm, 年均蒸发量近 2 000 mm, 年平均光照 3 000 h 左右, 四季分明, 气候温和, 区域内黄河流域约 280 km, 年过境水量约 325 亿 m<sup>3</sup>, 光、热、水、土等农业自然资源配合良好, 自古以来就是我国西北重要的灌溉农业区, 玉米、小麦、水稻及瓜果蔬菜等农作物高产稳产, 品质优良, 素有“天下黄河富宁夏”的美名<sup>[21]</sup>。

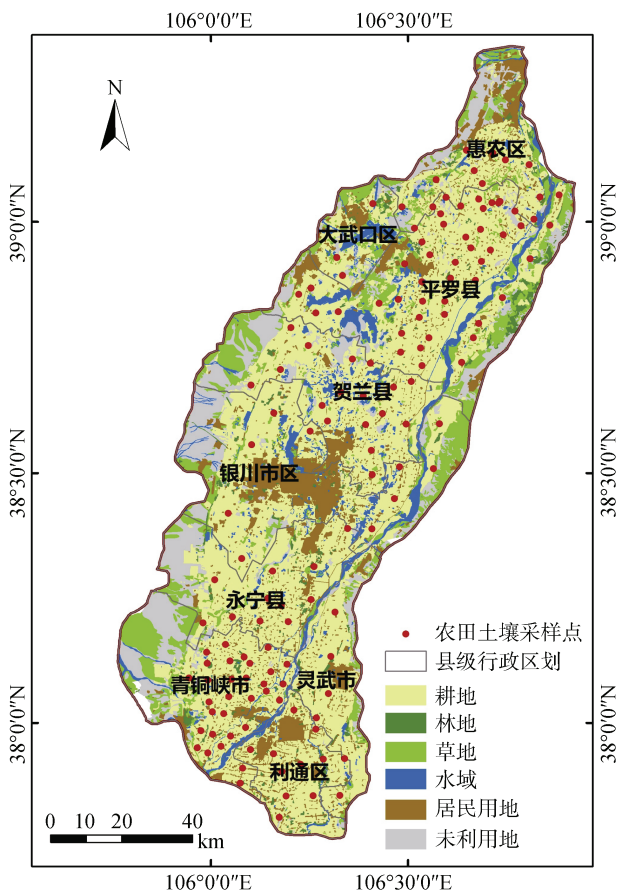


图 1 研究区位置及采样点分布示意图

Fig. 1 Locations of research area and soil sampling sites

### 1.2 土壤样品采集

2021 年 9 月 1 日—10 月 16 日对银川平原种植大田作物的农田土壤进行调查采样。根据研究区土地利

用、土壤类型和作物种植情况选择代表性田块, 每一田块内用土钻按照梅花法采集 10~15 个样点混合为 1 个样品, 采样深度 0~20 cm。每个样品去除明显根系, 充分混匀, 过 2 mm 筛后用无菌袋分别分装。其中, 装取 50 g 左右土样 1 份, 存于 -80℃ 冰箱, 用于土壤细菌高通量测序; 装取 100 g 左右土样 2 份, 存于 -20℃ 冰箱, 分别用于土壤酶活性和微生物生物量碳氮的测定; 剩余土样全部装入大白封袋, 带回实验室风干过 2 mm 筛后, 用于常规土壤理化性质测定。此外, 用 100 cm<sup>3</sup> 环刀沿田块对角线分别取 3 个容重样品, 用硬质塑料盒取 2 kg 原状土用于土壤水稳性团聚体筛分。采样同时, 用 GPS 记录采样田块中心点坐标。研究区共采集 147 个农田土壤样品, 样点土壤类型以灌淤土和潮土为主, 采样地农作物包括玉米、水稻、小麦、蔬菜等。各县(区)采样点分布如图 1 所示, 样点基本信息如表 1 所示。

### 1.3 土壤样品测定

土壤样品测定包含 4 个物理指标、6 个化学指标和 6 个生物指标, 共 16 个指标。测定方法参考《土壤农化分析》<sup>[22]</sup>。测试过程中严格按照要求设置标准样品、做两次平行样等方法进行质量控制, 对测试异常值进行复测, 并结合采样点实际进行核验。结果显示, 147 个农田土壤样点 16 项指标数据质量良好, 可进行下一步分析。

**1.3.1 土壤物理指标** 土壤含水率(SWC)采用烘干法测定, 容重(SBD)采用环刀法测定, 机械组成(黏粒含量, Clay)采用六偏磷酸钠分散-比重计法测定, 水稳性大团聚体含量(>0.25 mm 团聚体质量分数, WSA)采用干筛-湿筛法测定。

**1.3.2 土壤化学指标** 土壤 pH 采用电位法(水土质量比 2.5 : 1)测定, 全盐(TS)采用电导法(水土质量比 5 : 1)测定, 阳离子交换量(CEC)采用乙酸钙交换法测定, 土壤全氮(TN)采用浓硫酸消煮-半微量凯氏定氮法测定, 有效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定, 速效钾(AK)采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。

**1.3.3 土壤生物指标** 土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾和硫酸氧化-硫酸亚铁滴定法测定, 微生物生物量碳(MBC)和氮(MBN)采用氯仿熏蒸提取法测定; 土壤脲酶(Soil urease, SUE)活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定, 碱性磷酸酶(ALP)活性采用磷酸苯二钠比色法测定。土壤样品 DNA 使用 HiPure Soil DNA 试剂盒(Magen, 广州) 提取, PCR 扩增引物为 341F(5'-CCTACGGGNGGCWGCAG-3') 和 806R(5'-

表 1 各县(市、区)农田土壤调查样点统计  
Table 1 Backgrounds of samples of farmland soils in each county

县(市、区)	样点数	农田面积(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	平均气温(°C)	降水量(mm)	土壤类型	采样地作物
银川市	10	3.88	10.8	145.5	灌淤土、灰钙土、风沙土	水稻、玉米、露地蔬菜
永宁县	11	3.53	11.1	177.2	灌淤土、灰钙土	水稻、玉米、露地蔬菜
贺兰县	16	4.28	9.9	147.0	灌淤土、潮土、盐土、风沙土	水稻、玉米、露地蔬菜
灵武市	6	2.44	9.8	149.8	灌淤土、潮土	水稻、玉米
惠农区	16	2.81	10.7	137.5	灌淤土、潮土、风沙土	玉米、油菜、苜蓿
平罗县	47	6.38	9.7	141.1	灌淤土、潮土、盐土、风沙土	水稻、玉米、小麦、露地蔬菜
利通区	10	3.08	11.2	205.0	灌淤土、潮土	水稻、玉米、露地蔬菜
青铜峡市	31	3.91	10.1	200.9	灌淤土、潮土、灰钙土、新积土	水稻、玉米、小麦、露地蔬菜

GGACTACHVGGGTATCTAAT-3'), 扩增区域为 V3~V4 区, 扩增产物分离纯化采用琼脂糖凝胶电泳法。细菌高通量测序采用 Illumina 平台(PE250), 原始测序序列采用 Usearch 方法进行拼接、过滤, 按 ≥97% 相似度聚类为操作分类单元(OTU), 比对 NCBI 16S rDNA 数据库进行物种分类注释, 按最小样本序列抽平 OTU 进行土壤细菌多样性分析, 用细菌 Shannon 指数表示微生物多样性<sup>[21]</sup>。

#### 1.4 土壤健康评价

**1.4.1 评价指标隶属函数选择** 本研究采用测试获得的所有 16 个土壤指标建立土壤健康评价全数据集(Total data set, TDS), 并运用因子分析法计

算所有指标权重<sup>[23]</sup>。为消除不同指标之间的量纲差异, 需要对指标原始数据进行归一化处理。根据研究区不同指标与土壤健康的关系建立隶属函数, 值越高越有利于土壤健康的指标确定为 S 型函数, 而值越高越不利于土壤健康的指标确定为反 S 型函数, 存在适宜临界值的指标则确定为抛物线型函数。隶属函数计算公式中: a 和 b 分别为指标实测最小值和最大值, 若实测最小值和最大值超出 3 倍标准差, 则以 3 倍标准差值代替; a<sub>1</sub> 和 b<sub>1</sub> 为抛物线函数最适上、下界值, 通过研究区域实测值和专家意见综合对比确定<sup>[24]</sup>。不同评价指标权重及其隶属函数如表 2 所示。

表 2 土壤健康评价指标隶属函数及权重  
Table 2 Membership functions and weights of soil health evaluation indicators

隶属函数类型	计算公式	评价指标	隶属函数参数				指标权重
			a	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	b	
S 型	$f(x) = \begin{cases} 1 & x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \leq a \end{cases}$	SWC(%)	6.23			28.03	0.061 0
		WSA(%)	4.01			76.56	0.058 5
		CEC(cmol/kg)	2.61			21.45	0.051 0
		TN(g/kg)	0.21			1.56	0.073 1
		AK(mg/kg)	50.00			546.42	0.075 6
		SOM(g/kg)	4.11			26.00	0.069 2
		MBC(mg/kg)	16.73			340.96	0.053 5
		MBN(mg/kg)	1.70			39.02	0.068 7
		SUE(mg/(g·d))	0.05			1.53	0.067 0
		ALP(mg/(g·d))	0.32			5.48	0.061 6
反 S 型	$f(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases}$	Shannon	8.21			10.43	0.051 4
		pH	7.70			9.09	0.078 7
		TS(g/kg)	0.30			4.84	0.073 5
抛物线型	$f(x) = \begin{cases} 1 & a_1 \leq x \leq b_1 \\ \frac{x-a}{a_1-a} & a < x < a_1 \\ \frac{b-x}{b-b_1} & b_1 < x < b \\ 0 & x \geq b \text{ 或 } x \leq a \end{cases}$	SBD(g/cm <sup>3</sup> )	1.11	1.25	1.35	1.59	0.047 9
		Clay(%)	6.88	15.00	25.00	42.08	0.051 2
		AP(mg/kg)	6.50	30.00	40.00	76.78	0.058 1

**1.4.2 最小数据集构建** 土壤理、化、生指标之间存在一定的相关性，为避免指标之间的信息重叠，采用主成分分析法结合 Norm 值和皮尔逊相关分析筛选与构建土壤健康评价最小数据集 (Minimum data set, MDS)，并计算入选最小数据集指标的权重<sup>[24]</sup>。指标筛选具体步骤为：运用 SPSS 25 对所有指标进行主成分分析，提取特征值  $\geq 1$  的所有主成分及各指标在特征值  $\geq 1$  主成分上的载荷值，计算各指标在特征值  $\geq 1$  的所有主成分上的综合载荷，即 Norm 值。将同一主成分中载荷值绝对值  $\geq 0.5$  的指标划分为一组。若该指标在多个主成分上的载荷值绝对值均  $\geq 0.5$ ，则将该指标划分到与其他指标相关性较低的一组；若该指标在所有主成分上的载荷值绝对值均  $< 0.5$ ，则将该指标划分到载荷值最高的一组。初步选取各组中 Norm 值变化范围在该组最大 Norm 值 10% 以内的指标，以相关系数绝对值 0.5 为选取标准，若每组中指标间相关系数绝对值  $\geq 0.5$ ，则选取 Norm 值最高的进入 MDS；若指标间的相关系数绝对值  $< 0.5$ ，则均进入 MDS<sup>[20,24]</sup>。指标综合载荷 Norm 值计算公式<sup>[24]</sup>如下：

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

式中： $N_{ik}$  为第  $i$  个指标在特征值  $\geq 1$  的  $k$  个主成分上的综合载荷值； $k$  为特征值  $\geq 1$  的主成分数量； $U_{ik}$  为第  $i$  个指标在第  $k$  个主成分上的载荷值； $\lambda_k$  为第  $k$  个主成分特征值。

**1.4.3 土壤健康指数计算** 参照土壤肥力和土壤质量评价方法<sup>[11,23]</sup>，利用土壤健康指数 (Soil health index, SHI) 表示农田土壤健康状况。土壤健康指数采用加权法计算，本研究分别计算全数据集土壤健康指数 (SHI-TDS) 和最小数据集土壤健康指数 (SHI-MDS)，计算公式如下：

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

式中：SHI 为土壤健康指数； $W_i$  为第  $i$  个土壤指标权重； $S_i$  为第  $i$  个土壤指标标准化得分； $n$  为数据集指标数量。

## 1.5 数据处理

采用 Excel 2016 进行原始数据整理；采用 SPSS 25 对土壤属性数据进行描述性统计分析、相关分析、主成分分析和因子分析；采用 ArcGIS 10.2 绘制研究区样点分布图和土壤健康评价图。

## 2 结果与分析

### 2.1 评价指标描述性统计

土壤物理、化学和生物指标描述性统计结果如表 3 所示。物理指标中，土壤含水率、容重、黏粒含量和水稳性大团聚体含量分别为 16.61%、1.35 g/cm<sup>3</sup>、26.60% 和 37.69%，其中土壤容重变异系数为 6.87%，变异性较弱 (CV < 10%)，含水率、黏粒含量和水稳性大团聚体含量均达到中等变异水平 (10%  $\leq$  CV  $\leq$  100%)。化学指标中，土壤 pH 介于 7.70~9.09，平均值 8.33，变异程度较弱，表明研究区土壤属于碱性土壤；土壤全盐含量平均值 1.29 g/kg，达到轻度盐渍化水平 (1~3 g/kg)，但变异程度较强 (CV=91.98%)，最小值仅为 0.30 g/kg，最大值达 8.72 g/kg；土壤阳离子交换量平均值 9.64 cmol/kg，变异系数 40.82%，属于中等程度变异；土壤全氮含量均值为 0.82 g/kg，有效磷和速效钾含量均值分别为 28.43 mg/kg 和 229.30 mg/kg，均属于中等程度变异。生物指标中，有机质含量介于 4.11~26.00 g/kg，平均值仅为 14.42 g/kg，处于较低水平；微生物生物量碳、氮含量均值分别为 125.64 mg/kg 和 13.03 mg/kg，脲酶、碱性磷酸酶活性均值分别为 0.58 mg/(g·d) 和 2.42 mg/(g·d)，细菌 Shannon 指数均值为 9.71。除细菌 Shannon 指数变异程度最小 (CV=5.15%)，属于弱变异外，其余生物指标均达到中等变异强度。

### 2.2 最小数据集构建

研究区 16 个土壤健康评价指标主成分分析结果如表 4、表 5 所示，特征值  $\geq 1$  的主成分有 5 个，累积贡献率为 67.84%。分组 1 中因子载荷值绝对值  $> 0.5$  且在最大 Norm 值 10% 范围内的指标有土壤全氮、有效磷、速效钾、脲酶和碱性磷酸酶 5 个指标，5 个指标中土壤全氮 Norm 值最高，除有效磷外，其他 3 个指标与土壤全氮之间的相关系数绝对值均  $> 0.5$  (表 4)，故分组 1 中选取土壤全氮和有效磷进入最小数据集；分组 2 中仅有土壤有机质 Norm 值符合入选最小数据集条件；分组 3 中土壤含水率和全盐符合 Norm 值筛选条件，两个指标之间的相关系数为 0.34， $< 0.5$ ，故均入选最小数据集；分组 4 中微生物生物量碳和氮 Norm 值均符合初选条件，但两个指标间的相关系数  $> 0.5$ ，故只能选择 Norm 值较大的微生物生物量碳进入最小数据集；同分组 2 筛选方法，分组 5 中水稳性大团聚体和 pH 均进入最小数据集。最终，确定用于研究区土壤健康评价的最小数据集包含土壤全氮、有效磷、有机质、含水率、全盐、微生

表 3 土壤健康评价指标描述性统计  
Table 3 Descriptive statistics of soil health evaluation indicators

指标类型	评价指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数 CV(%)
物理指标	SWC(%)	6.23	28.03	16.61	4.90	29.49
	SBD(g/cm <sup>3</sup> )	1.11	1.59	1.35	0.09	6.87
	Clay(%)	6.88	42.08	26.60	7.60	28.58
	WSA(%)	4.01	76.56	37.69	20.04	53.17
化学指标	pH	7.70	9.09	8.33	0.26	3.08
	TS(g/kg)	0.30	8.72	1.29	1.19	91.98
	CEC(cmol/kg)	2.61	28.26	9.64	3.94	40.82
	TN(g/kg)	0.21	1.60	0.82	0.25	30.09
	AP(mg/kg)	6.50	106.40	28.43	16.12	56.70
	AK(mg/kg)	50.00	561.30	220.30	108.71	49.35
	SOM(g/kg)	4.11	26.00	14.42	4.47	30.99
生物指标	MBC(mg/kg)	16.73	359.69	125.64	71.77	57.13
	MBN(mg/kg)	1.70	46.87	13.03	8.66	66.46
	SUE(mg/(g·d))	0.05	1.53	0.58	0.39	66.27
	ALP(mg/(g·d))	0.32	6.12	2.42	1.02	42.10
	Shannon	6.59	10.43	9.71	0.50	5.15

表 4 评价指标主成分因子载荷及 Norm 值  
Table 4 Principal component factor loading of evaluation indexes and Norm values

评价指标	主成分					分组	Norm 值
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5		
SBD	-0.51	-0.15	0.10	-0.38	-0.30	1	1.13
TN	0.71	0.49	0.05	0.16	0.15	1	1.52
AP	0.71	0.01	0.32	-0.06	0.13	1	1.37
AK	0.70	0.28	0.49	0.05	-0.14	1	1.51
SUE	0.78	-0.04	-0.33	0.06	-0.05	1	1.49
ALP	0.62	0.49	-0.03	0.05	0.21	1	1.38
Clay	0.20	0.71	-0.05	0.04	-0.07	2	1.18
CEC	0.10	0.68	0.06	0.29	0.03	2	1.15
SOM	0.56	0.56	0.11	0.28	0.20	2	1.41
SWC	-0.06	0.47	0.61	0.14	0.21	3	1.19
TS	0.04	-0.21	0.86	0.09	0.10	3	1.27
Shannon	-0.07	-0.12	-0.58	0.45	0.00	3	1.05
MBC	0.29	0.34	-0.05	0.61	-0.07	4	1.11
MBN	0.00	0.16	0.11	0.84	0.03	4	1.17
WSA	-0.03	0.45	0.25	-0.39	0.46	5	1.09
pH	-0.19	0.02	-0.11	-0.04	-0.90	5	1.10
特征值	3.24	2.47	2.01	1.81	1.32		
方差贡献率(%)	20.24	15.46	12.57	11.30	8.27		
累积贡献率(%)	20.24	35.70	48.27	59.57	67.84		

表 5 评价指标之间的相关性分析  
Table 5 Correlations between soil health evaluation indicators

	SWC	SBD	Clay	WSA	pH	TS	CEC	TN	AP	AK	SOM	MBC	MBN	SUE	ALP	Shannon
SWC	1															
SBD	-0.19*	1														
Clay	0.28**	-0.37**	1													
WSA	0.34**	0.03	0.1	1												
pH	-0.20*	0.28**	-0.06	-0.26**	1											
TS	0.34**	0.01	-0.13	0.11	-0.20*	1										
CEC	0.26**	-0.20*	0.40**	0.12	-0.14	0.03	1									
TN	0.21*	-0.41**	0.39**	0.20*	-0.27**	0.02	0.47**	1								
AP	0.18*	-0.25**	0.19*	0.19*	-0.28**	0.20*	0.08	0.49**	1							
AK	0.40**	-0.35**	0.35**	0.15	-0.08	0.33**	0.30**	0.58**	0.63**	1						
SOM	0.39**	-0.47**	0.36**	0.25**	-0.25**	0.07	0.48**	0.86**	0.34**	0.54**	1					
MBC	0.13	-0.29**	0.23**	-0.02	-0.01	-0.06	0.34**	0.45**	0.15	0.21*	0.48**	1				
MBN	0.19*	-0.27**	0.13	-0.08	-0.04	0.05	0.30**	0.23**	0.06	0.14	0.30**	0.50**	1			
SUE	-0.20*	-0.41**	0.10	-0.09	-0.08	-0.21*	0.12	0.50**	0.29**	0.36**	0.38**	0.30**	0.04	1		
ALP	0.21**	-0.41**	0.40**	0.25**	-0.26**	-0.05	0.36**	0.65**	0.47**	0.50**	0.61**	0.40**	0.14	0.38**	1	
Shannon	-0.23**	-0.11	-0.02	-0.33**	0.11	-0.39**	-0.01	-0.10	-0.12	-0.21**	-0.03	0.10	0.20*	0.06	-0.03	1

注：\*、\*\*分别表示在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  水平上显著相关。

物生物量碳、水稳性大团聚体和 pH 共 8 个指标。运用公因子方差计算的最小数据集评价指标权重如表 6 所示。

表 6 最小数据集(MDS)评价指标公因子方差及权重  
Table 6 Common factor variance and weights of minimum data set(MDS) evaluation indicators

MDS 评价指标	公因子方差	权重
SWC	0.482	0.110 7
WSA	0.386	0.088 7
pH	0.373	0.085 7
TS	0.477	0.109 6
TN	0.850	0.195 3
AP	0.381	0.087 5
SOM	0.831	0.190 9
MBC	0.573	0.131 6

### 2.3 最小数据集准确性验证

为验证基于最小数据集评价研究区土壤健康的合理性和准确度，分别将全数据集 16 个指标和最小数据集 8 个指标的标准化值及其权重代入土壤健康指数计算公式，得出基于全数据集和最小数据集的土壤健康指数 SHI-TDS 和 SHI-MDS。结果显示，SHI-TDS 介于 0.21~0.72，平均值 0.50，变异系数 19.42%；SHI-MDS 介于 0.18~0.78，平均值 0.51，变异系数 24.05%。基于最小数据集与全数据集的健康指数均值相近，前者变异程度略大于后者。SHI-MDS 和 SHI-TDS 之间的线性回归分析结果如图 2 所示，

可见，二者所构建线性回归方程拟合效果良好 ( $R^2=0.846$ ,  $P<0.001$ )。由此可见，本研究所筛选的最小数据集可以较好地代表全数据集对研究区土壤健康状况进行评价。

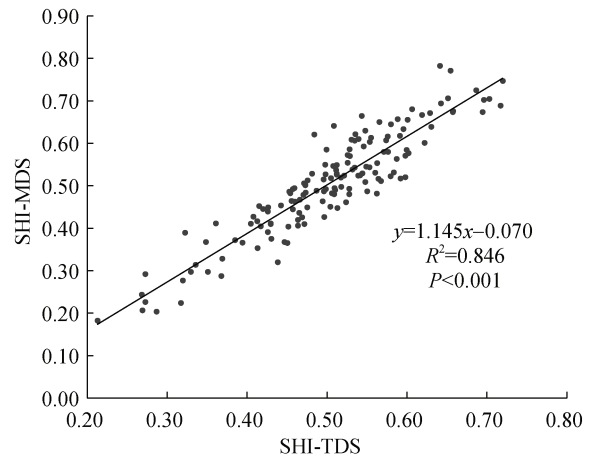


图 2 基于最小数据集与全数据集的土壤健康评价指数线性回归分析

Fig. 2 Linear regression analysis of SHI-MDS and SHI-TDS

### 2.4 农田土壤健康评价

基于最小数据集的银川平原农田土壤健康指数空间分布如图 3 所示，各县(市、区)土壤健康指数统计结果见表 7。结果显示，银川平原农田土壤健康指数整体呈现由南向北逐渐降低的趋势，局部地区分布不均，空间异质性较大。位于银川平原南部的青铜峡

市农田土壤健康指数均值最高(0.57), 其次为南部的利通区、灵武市和永宁县, 而位于银川平原北部的平罗县农田土壤健康指数均值最低(0.43), 同时位于北部的惠农区以及中部的银川市农田土壤健康指数均值较低。

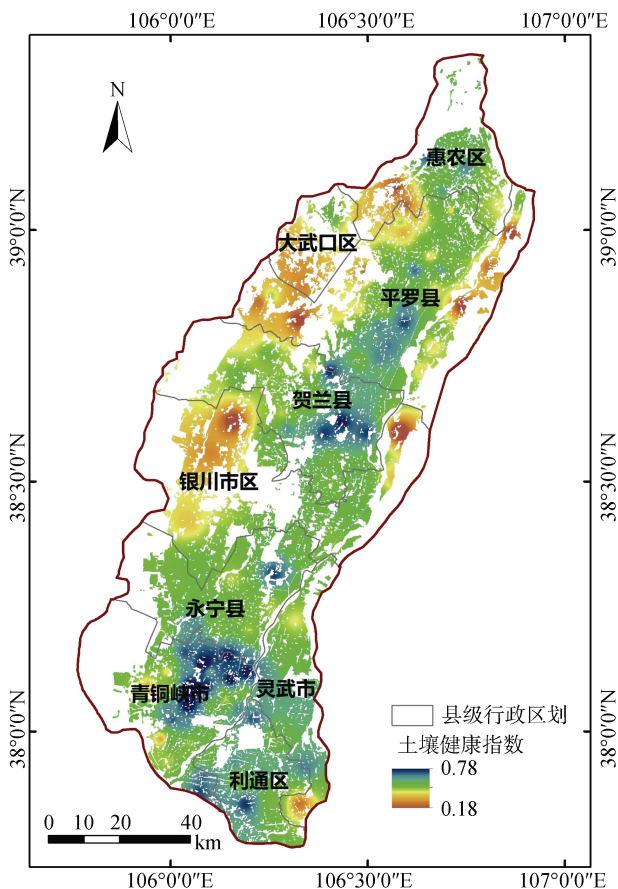


图 3 基于最小数据集的银川平原农田土壤健康指数分布  
Fig. 3 Distribution of farmland SHI-MDS of Yinchuan Plain

表 7 基于最小数据集的各县(市、区)农田土壤健康指数统计

Table 7 Statistics on farmland SHI-MDS in each county

县(市、区)	最小值	最大值	平均值	标准差
银川市	0.18	0.55	0.44	0.08
永宁县	0.45	0.69	0.53	0.04
贺兰县	0.37	0.70	0.53	0.06
灵武市	0.30	0.65	0.53	0.06
惠农区	0.24	0.64	0.48	0.08
平罗县	0.21	0.69	0.43	0.09
利通区	0.39	0.68	0.56	0.04
青铜峡市	0.37	0.78	0.57	0.08

### 3 讨论

#### 3.1 银川平原农田土壤健康评价最小数据集构建 最小数据集构建指标的筛选是土壤健康评价体

系构建的基础。为有效降低土壤健康评价的成本和工作量, 本研究利用主成分分析法结合 Norm 值, 从银川平原农田土壤 16 个属性中筛选出土壤含水量、水稳性大团聚体、pH、全盐、全氮、有效磷、有机质和微生物生物量碳 8 个评价指标, 构建土壤健康评价最小数据集。与全数据集相比, 评价指标数量减少一半, 且基于最小数据集与全数据集的土壤健康指数具有较高的线性拟合关系, 相关性达到极显著水平, 表明所筛选的最小数据集可用于评价研究区农田土壤健康状况。众多研究表明, 物理指标中选取率较高的有土壤容重、含水率、机械组成、总孔隙度、水稳性团聚体等<sup>[25]</sup>。本研究中, 土壤含水率和水稳性团聚体入选最小数据集, 与大多数研究结果一致, 但入选率最高的物理指标土壤容重并未入选, 主要是因为容重与全氮、有效磷等指标同属分组 1, 而其 Norm 值较低。pH、全氮和有效磷作为选取率较高的化学指标同样入选本研究的最小数据集, 与前人研究结果高度一致<sup>[25]</sup>。土壤全盐在盐渍化地区土壤评价中具有广泛的应用<sup>[25-27]</sup>。银川平原是西北重要的盐渍化灌区, 全盐含量入选最小数据集进一步说明本研究筛选的评价指标具有较高的代表性。土壤有机质是所有土壤属性中选取率最高<sup>[25]</sup>的核心指标, 同样入选了本研究中的最小数据集。而微生物生物量碳、微生物生物量氮、脲酶、磷酸酶、细菌多样性等常选取的微生物指标<sup>[25]</sup>中, 仅有微生物生物量碳进入最小数据集, 其余微生物指标因与其他指标相关性较高被排除。综合来看, 本研究筛选的最小数据集指标不仅涵盖了土壤物理、化学和生物指标, 且包含了现有研究中选取率较高的有机质、含水率、pH、全氮、有效磷等指标, 以及表征研究区土壤盐渍化程度的重要指标土壤全盐, 因此, 应用最小数据集评价研究区农田土壤健康具有较高的准确性和代表性。

#### 3.2 银川平原农田土壤健康评价

银川平原农田土壤健康评价指数介于 0.18~0.78, 均值 0.51, 整体呈现由南向北逐步降低的趋势, 与宁夏耕地地力评价<sup>[28]</sup>和宁夏耕地质量监测报告<sup>[29]</sup>等研究结果基本一致。对滨海盐渍土区的研究发现, pH 和全盐较高的区域土壤质量较差, 而地势较低的滩涂、盐荒地等由于排盐困难, 通常 pH 和全盐含量较高<sup>[27]</sup>。银川平原南部地势较高, 灌排设施畅通, 盐渍化程度较低, 而北部则地势低洼, 排水不畅, 地下水位较高, 土壤盐渍化较重<sup>[30]</sup>。本研究中, 位于南部灌区上游的青铜峡市土壤 pH 均值 8.26, 全盐均值 0.91 g/kg, 属于非盐化土壤, 而北部灌区下游的平

罗县土壤 pH 均值 8.40, 全盐均值 1.69 g/kg, 土壤碱性程度和盐化程度均高于青铜峡市, 这是银川平原南部土壤健康指数显著高于北部的的主要原因。王斌等<sup>[31]</sup>通过测定 20 项土壤物理、化学和生物学指标构建最小数据集对葡萄园土壤健康状况进行评价, 认为土壤压实、养分不平衡和有机碳含量低是葡萄园土壤健康的主要障碍因子。卓志清等<sup>[32]</sup>运用基于最小数据集的耕层质量指数和障碍因子诊断模型, 明确了东北旱作区粮食高中低产区存在耕层结构恶化和养分限制等障碍因素。本研究结果表明, 银川平原南部土壤健康指数较高, 主要得益于其良好的物理结构与养分水平。数据显示, 银川平原南部土壤的水稳性大团聚体含量(43.07%)、有机质含量(14.68 g/kg)、全氮含量(0.90 g/kg)、有效磷含量(33.06 mg/kg)及微生物活性(微生物量碳含量 130.92 mg/kg)等关键指标均整体优于北部地区, 这进一步证实了土壤结构和养分状况是导致其健康指数存在区域差异的核心原因。因此, 在银川平原, 对于土壤结构较差、盐渍化程度较重的北部地区应改善土壤结构, 增加土壤有机质含量, 提升土壤健康状况。

### 3.3 银川平原土壤健康评价体系构建的局限性

土壤健康评价是对复杂生态系统功能进行综合评估, 是对造成土壤质量下降的关键障碍因子进行识别和诊断的有效方法。构建最小数据集的核心是有效指标的选取。本研究分析测试了研究区 16 个农田土壤物理、化学、生物指标, 筛选出 8 个指标构建了最小数据集, 与一些研究选择 7 个类别 63 个评价指标相比有一定的差距<sup>[7,25]</sup>。基于最小数据集获得的土壤健康综合指数, 虽聚焦关键指标, 但在反映区域土壤系统的多维复杂性及具体管理响应上仍显不足。由于区域尺度上可量化变量有限, 单一指数在全面刻画土壤整体健康状况时存在客观局限性。姬丽等<sup>[33]</sup>和陈林等<sup>[34]</sup>对宁夏农田土壤和作物重金属的长期监测研究发现, 银川平原土壤重金属含量低, 平均含量均未超过限定值, 土壤环境总体良好, 因此本研究未检测农田土壤重金属、污染物等环境指标。但是, 陈林等<sup>[34]</sup>研究发现, 银川平原个别作物存在汞累积现象, 因此有必要在以后的土壤健康评价中补充土壤环境指标。由于农田耕作制度多样(如旱地、水田、水旱轮作), 土壤指标对环境变化的响应也发生变化, 指标权重分配难以全面反映实际环境对土壤指标变化的影响, 难免出现片面性。本研究采用土壤健康指数法开展区域评价, 在将其与反映土壤关键功能、系统敏感性与抗性的指标相结合方面尚显不足, 这种综

合性分析的欠缺, 是导致难以全面识别和确认影响区域土壤质量关键障碍因子的重要原因。大尺度农田土壤健康与初级生产力之间存在显著的相关性, 表明土壤健康与生态系统功能之间的紧密联系<sup>[35]</sup>。为了阐明土壤健康在不同环境下对生产力的影响, 未来的研究应进一步探讨土壤健康与其他生态系统功能的关系, 特别是与农田管理要素投入的关系, 以全面了解银川平原土壤健康对农田生态系统动态的影响。

## 4 结论

本研究在综合考虑土壤物理、化学和生物属性的基础上, 采用主成分分析法结合 Norm 值筛选并构建了银川平原农田土壤健康评价最小数据集, 包含土壤含水率、水稳性大团聚体、pH、全盐、全氮、有效磷、有机质和微生物生物量碳 8 个指标。基于最小数据集的土壤健康指数与基于全数据集的土壤健康指数之间的线性回归方程拟合效果良好( $R^2=0.846$ ,  $P<0.001$ ), 表明构建的最小数据集可代表全数据集对银川平原农田土壤健康状况进行评价。基于最小数据集计算的银川平原农田土壤健康指数介于 0.18~0.78, 均值 0.51, 整体呈现由南向北逐渐降低的趋势, 局部地区分布不均, 空间分布差异性较大。

### 参考文献:

- [1] Tahat M M, Alananbeh K M, Othman Y A, et al. Soil health and sustainable agriculture[J]. Sustainability, 2020, 12(12): 4859.
- [2] 周启星. 健康土壤学——土壤健康质量与农产品安全[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 赵方杰, 谢婉滢, 汪鹏. 土壤与人体健康[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 1-11.
- [4] 曾希柏, 张丽莉, 苏世鸣, 等. 土壤健康——从理念到实践[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [5] 武雪萍, 徐明岗, 潘根兴. 土壤管理与可持续利用——献给 2015 国际土壤年及《中国农业科学》创刊 55 周年[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4603-4606.
- [6] 张桃林. 守护耕地土壤健康 支撑农业高质量发展[J]. 土壤, 2021, 53(1): 1-4.
- [7] 张江周, 王光州, 李奕赞, 等. 农田土壤健康评价体系构建的若干思考[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 879-891.
- [8] 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.
- [9] Moebius-Clune B N, Moebius-Clune D J, Gugino B K, et al. Comprehensive assessment of soil health-The Cornell Framework. Edition 3.2[M]. Geneva, NY: Cornell University, 2016.
- [10] Gonz á lez-Quiñones V, de La Torre A, Garc í a M P, et al. Application of the FAO quantitative and SINDI methods to

- assess the quality of different soils in Castilla-La Mancha (Spain)[J]. *Environmental geology*, 53(3):527-531.
- [11] 全国农业技术推广服务中心, 农业部耕地质量监测保护中心, 沈阳农业大学. 东北黑土区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [12] 农业农村部耕地质量监测保护中心. 西北区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [13] 全国农业技术推广服务中心, 农业部耕地质量监测保护中心, 华中农业大学. 长江中游区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [14] 王怀嵩, 张涛. 农业土壤健康评价体系研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(9): 1093-1100.
- [15] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(7): 155-164.
- [16] Devine S M, Steenwerth K L, O'Geen A T. A regional soil classification framework to improve soil health diagnosis and management[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2021, 85(2): 361-378.
- [17] 李桂林, 陈杰, 孙志英, 等. 基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2715-2724.
- [18] 邓茜月, 王永生. 黄河流域九省(区)农业面源污染与农业产值脱钩研究[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(11): 2644-2656.
- [19] 胥涛, 丁凯. 耕地质量等级评价与农用地质量分等浅析——以宁夏为例[J]. *农业与技术*, 2021, 41(18): 60-62.
- [20] 李百云, 李慧, 郭鑫年, 等. 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*, 2021, 49(9): 195-201.
- [21] 吴霞, 蔡进军, 王长军, 等. 银川平原农田土壤细菌群落结构与驱动因子分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(10): 126-134.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 冯慧敏, 郭小丽, 肖远业, 等. 基于主成分分析不同种养模式下的土壤肥力评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(10): 1-10.
- [24] 周文字, 杨小虎, 杨海昌, 等. 基于最小数据集的典型绿洲农田土壤质量评价[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(7): 117-122.
- [25] 李鑫, 张文菊, 郭磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(14): 3043-3056.
- [26] 江胜国, 肖蒙, 刘广明, 等. 天津小站稻种植区土壤质量综合评价[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 371-378.
- [27] 吕真真, 刘广明, 杨劲松, 等. 黄河三角洲滨海盐渍土区土壤质量综合评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(6): 93-97.
- [28] 马玉兰, 徐润邑, 张学俭, 等. 宁夏耕地土壤与地力[M]. 银川: 阳光出版社, 2019.
- [29] 刘文玲, 尹建国. 宁夏耕地质量保护与提升的思路和对策[J]. *农业开发与装备*, 2022(12): 133-134.
- [30] 张旭, 贾科利, 魏慧敏, 等. 银川平原土壤盐分空间分异及影响因子研究[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(4): 949-960.
- [31] 王斌, 李云, 李瑞鹏, 等. 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.
- [32] 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]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 321-330.
- [33] 姬丽, 马琨, 谢铁娜, 等. 宁夏供港蔬菜田土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2024, 45(6): 3512-3522.
- [34] 陈林, 李虹, 马建军, 等. 宁夏不同生态区土壤-作物系统重金属风险评估[J]. *环境科学*, 2024, 45(12): 7209-7217.
- [35] Romero F, Labouyrie M, Orgiazzi A, et al. Soil health is associated with higher primary productivity across Europe[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2024, 8(10): 1847-1855.

(责任编辑: 于 飞)