doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.02.034

基于最小数据集的黄土丘陵区耕地土壤质量评价

司　瑞[1,2]　孙军刚[1,3]　赵子豪[1,3]　李新斌[1,3]　康成鑫[1,3]　常　亮[1,3]
喜俊生[1,3]　张　姚[1,3]　权国荣[1,3]　赵荣昌[2]
(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 西安 710100; 2. 中国地质调查局黑河流域水循环野外站, 张掖 734023;
3. 秦岭-黄土高原过渡带水土要素耦合与生物资源保育野外观测研究站, 渭南 714000)

摘要: 土壤质量评价是精细化农业生产和土地科学管理的关键依据,对保障国家粮食安全具有重要意义。为明确黄土丘陵区耕地土壤质量,以黄土高原南缘韩城市为研究区,采集土壤表层(0~20 cm) 134 个土壤样品,测定了涵盖土壤物理、养分和环境特征的 27 项指标,基于主成分分析和 Norm 原则构建最小数据集(Minimum data set, MDS),同时结合土壤质量指数(Soil quality index,SQI)法和地统计分析,对研究区土壤质量进行评价。结果表明:研究区土壤偏碱性(pH 平均值为 8.31),质地属于粘壤土,土壤环境处于轻度生态风险,环境质量良好,土壤养分中碱解氮含量较缺乏,有机碳和有效磷含量处于适中水平,全磷和速效钾含量较为丰富。黄土高原南缘韩城地区土壤质量评价最小数据集由土壤含水率、比重、毛管孔隙度、有机碳含量、锌含量、镍含量和粗砂粒含量 7 项指标构成,其中有机碳含量在土壤质量评价指标中权重最大,即有机碳含量为控制该区域土壤质量的关键因子。最小数据集土壤质量指数(SQI-MDS)均值(0.522)与全量数据集土壤质量指数(SQI-TDS)均值(0.537)相差较小,在土壤质量分级上均属于同一等级。SQI-MDS 的变化区间和变异系数均高于 SQI-TDS,且 SQI-MDS 与 SQI-TDS 拟合决定系数 R^2 为 0.812。因此,基于最小数据集的土壤质量评价法在该区域具有更好的适用性,且评价准确度较高。半变异函数为高斯函数时,预测精度最高,土壤质量在空间上呈现一定的分布规律,靠近河流区域,土壤质量指数越高,土壤质量越好。最小数据集和土壤质量指数评价法相结合可以准确高效全面反地映土壤质量,为解决土壤质量评价过程中土壤指标多、测试成本高和计算复杂等问题提供了新方法。

关键词: 黄土丘陵区; 土壤质量评价; 最小数据集; 主成分分析; 地统计分析
中图分类号: S158　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)02-0354-10　　**OSID**:

Evaluation of Soil Quality of Cropland in Loess Hilly Area Based on Minimum Data Set

SI Rui[1,2]　SUN Jungang[1,3]　ZHAO Zihao[1,3]　LI Xinbin[1,3]　KANG Chengxin[1,3]　CHANG Liang[1,3]
XI Junsheng[1,3]　ZHANG Yao[1,3]　QUAN Guorong[1,3]　ZHAO Rongchang[2]
(1. *Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an* 710100, *China*
2. *Watercycle Field Station of the Heihe River Basin, China Geological Survey, Zhangye* 734023, *China*
3. *Field Observational Stations of Natural Resource Coupling Process and Biological Resources Conservation Across Transitional Zone from Qinling Mountains to Loess Plateau in China, Weinan* 714000, *China*)

Abstract: Soil quality evaluation is a key basis for refined agricultural production and scientific land management, which is of great significance in guaranteeing national food security. To clarify the soil quality of arable land in loess hilly areas, Hancheng on the southern edge of the Loess Plateau was taken as the target area, totally 134 soil samples were collected from the soil surface layer (0~20 cm), and 27 indexes covering soil physical, nutrient and environmental characteristics were measured, and then a minimum data set was constructed based on principal component analysis and Norm principle. The results showed that the soil in the study area was slightly alkaline (with a average pH value of 8.31), and its

收稿日期: 2024-08-02　修回日期: 2024-11-29
基金项目: 自然资源综合调查指挥中心科技创新基金项目(KC20240010)和中国地质调查局项目(WCSHR-2024-05、DD20242461、DD20220882、DD20242563)
作者简介: 司瑞(1994—),女,助理工程师,主要从事生态环境研究,E-mail: sirui@lzb.ac.cn
通信作者: 孙军刚(1987—),男,高级工程师,博士,主要从事地质环境研究,E-mail: 348979976@qq.com

texture belonged to clay loam. The soil environment was at a mild ecological risk, with good environmental quality. The content of alkali-hydrolyzable nitrogen in soil nutrients was relatively deficient, the contents of organic carbon and available phosphorus were at a moderate level, and the contents of total phosphorus and available potassium were relatively rich. The minimum data set for soil quality evaluation in the Hancheng area on the southern edge of the Loess Plateau consisted of seven indicators: soil moisture content, specific gravity, capillary porosity, organic carbon content, zinc content, nickel content and coarse sand content. Among them, the organic carbon content had the largest weight in the soil quality evaluation indicators, that was, the organic carbon content was the key factor controlling the soil quality in this area. The mean value of the soil quality index (SQI - MDS) in the minimum dataset (0.522) and the mean value of the soil quality index (SQI - TDS) in the full dataset (0.537) differed slightly, and both belonged to the same grade in soil quality classification. The variation range and coefficient of variation of SQI - MDS were both higher than those of SQI - TDS, and the determination coefficient R^2 of the fitting result between SQI - MDS and SQI - TDS were 0.812. Therefore, the soil quality assessment method based on the minimum data set had better applicability in this area and higher evaluation accuracy. When the semi-variogram was a Gaussian function, the prediction accuracy was the highest. The soil quality showed a certain distribution pattern in space. In the area close to the river, the higher the soil quality index was, the better the soil quality would be. The combination of the minimum data set and the soil index evaluation method can accurately, efficiently and comprehensively reflected soil quality, providing an approach to solve problems such as numerous soil indicators, high testing costs and complex calculations in the process of soil quality evaluation.

Key words: loess hilly area; soil quality evaluation; minimum data set; principal component analysis; geostatistical analysis

0　引言

中国经历了几十年的高速城市化发展阶段,耕地面积逐渐缩减,土壤生态环境恶化。与此同时,近年来国际形势愈发复杂,粮食安全问题逐渐凸显。土壤作为粮食生产和生态系统的根基,其质量与农业和生态可持续发展密切相关。土壤质量定义为土壤在土地利用范围内作为重要生命系统维持陆地动植物生产力、提高水和空气质量、支持人类健康和居住的能力[1],其能精准捕捉土壤的状态和特性[2]。因此,针对土壤质量进行评价对于科学管理农田,保障粮食安全,促进区域生态可持续发展和维护人类健康具有重要意义。

土壤质量是土壤物理、化学和生物信息等属性的综合反映[3-5],土壤质量评价是对土壤属性的量化诠释。在土壤质量评价方法上,国内外广泛使用的有土壤质量指数评价法、模糊判别法、灰色聚类法、T 值分级法等,其中,土壤质量指数因其综合性强且简单灵活而成为最常用的方法[6-10]。尽管土壤的物理、化学和生物属性均可作为衡量土壤质量的指标,且指标越全越能全面反映土壤质量信息,但土壤指标间存在高度自相关,且在实际操作过程中,需综合考量测定成本以及测试方法的难易程度等因素。因此,为了确保研究的有效性和经济性,应根据具体的研究目标有针对性地筛选出最具代表性的土壤指标。MDS 法是在主成分分析和 Norm 原则的基础上通过解决数据间共线问题,降低数据冗余,从而筛选出最关键的信息,该方法广泛用于评估土地利用方式、耕作培肥方式和土壤质量评价等[11-15]。将构建的最小数据集和土壤质量指数评价法相结合可以准确高效全面地反映土壤质量,这为解决土壤质量评价过程中土壤指标多、测试成本高和计算复杂等问题提供了新方法。

黄土丘陵沟壑区是我国重要的粮食生产基地之一[16],黄土土质疏松,垂直节理发育,遇水易塌陷,水土流失问题严重,长时间的土壤侵蚀使得土壤耕层养分流失,地表作物覆盖率降低,土壤理化性质恶化,如土壤颗粒粗化,团粒结构减弱,土壤保水保肥能力下降[17-18],这又将进一步加剧土壤质量退化。但目前针对黄土高原土壤质量评价的研究大多聚焦在土壤水分和养分含量[19]等单类指标,而缺乏对黄土土壤质量的综合评价,这在一定程度上影响了对其土壤健康状况的综合判断和有效管理。因此,在粮食安全形势愈发严峻的大背景下,黄土高原作为我国重要的农业生产区,亟需加强对其土壤质量科学系统地评价。陕西省韩城市是承担国家耕地保护与质量提升项目的试点县市之一,本研究以黄土高原南缘韩城市为研究区,采用涵盖土壤物理、养分和环境的 27 项土壤属性指标,基于主成分分析和 Norm 原则构建 MDS,评估研究区土壤质量,以期为黄土高原丘陵区科学管理农田、提高黄土生产力和促进农业可持续发展提供数据支撑和科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

韩城市位于陕西省东部黄河西岸,关中盆地东北隅,地势西北高,东南低。该区域属于暖温带大陆性季风气候,冬寒夏暖,年平均气温为 13.5℃,平均降水量为 559.7 mm。土壤类型主要以黄绵土为主,水土流失问题严重。花椒是韩城市著名的经济作物,其种植园区主要集中在韩城市南部芝阳和芝川镇。由于该区域地处祁、吕、贺山字型构造前弧东翼边缘的内弯部和新华夏系第三沉积带东部,在长期的地质构造演变中,沉积了较为丰富的矿产资源,主要分布在秦岭山地向黄土台塬过渡地带,能源工业发达。

1.2 样品采集与分析测试

土壤样品采集方法是基于《多目标区域地球化学调查规范(1∶250 000)》规范,同时综合考虑到土地利用类型和自然环境条件,共计均匀布设土壤采样点 134 个(图 1),其中每个采样点采集 3 个样品作为重复。使用土钻人工采集土壤表层 0 ~ 20 cm 土样(去除枯枝落叶及腐殖质),其中一部分装进铝盒中,采用干燥法测定土壤含水率;另一部分装进塑封袋,做好标记,带回实验室风干、研磨和过筛,从而测定其余土壤属性指标。同时在相应的采样点使用环刀采集原状土用于测定土壤容重、毛管孔隙度和非毛管孔隙度。其他土壤指标测定方法如下:土壤机械组成采用比重法测定,pH 值采用水土比 1∶1电位法测定,砷和汞含量采用原子荧光光谱法测定,镉、铬、铜、镍、铅和锌含量采用等离子体质普法测定,总碳含量采用高频燃烧-红外吸收光谱法测定,总氮含量采用凯氏定氮法测定,总磷含量采用 X 射线荧光光谱法测定,全盐量采用重量法测定,有机碳含量采用重铬酸钾容量-外加热法测定,碱解氮含量采用碱解扩散法测定,阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定。

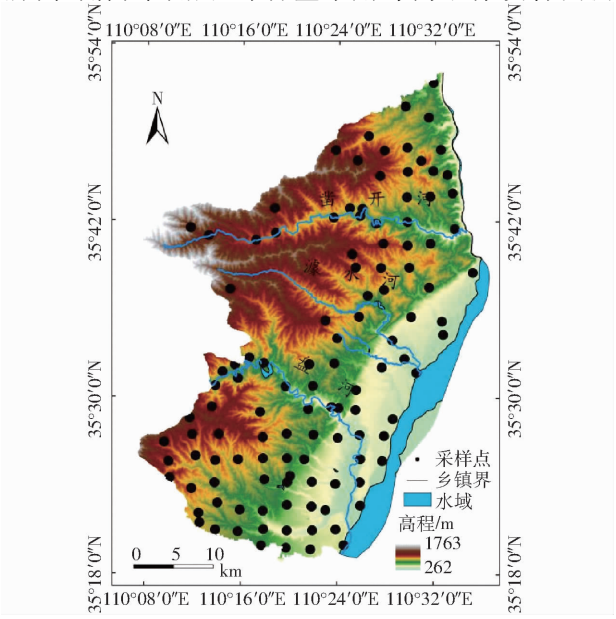

图 1 研究区采样点分布图

Fig. 1 Map of sampling sites in study area

1.3 基于最小数据集的土壤质量评价

1.3.1 最小数据集构建

基于 MDS 的土壤质量评价是通过少量但关键的指标全面反映土壤质量状况的方法,该方法的核心为选取能最大程度代表土壤物理、化学和环境等特性的指标,以减少评价过程中的工作量并提高评价效率。选取的全量指标中土壤物理性质指标包括粘粒含量、粉(砂)粒含量、细砂粒含量、粗砂粒含量、含水率、比重、容重、毛管孔隙度和非毛管孔隙度;土壤养分指标有阳离子交换量、全盐量和总碳、总氮、全磷、有机碳、碱解氮、有效磷、速效钾含量;土壤环境指标有 pH 值和砷、镉、铬、铜、汞、镍、铅、锌含量,共计 27 项土壤属性指标,基本能全面代表影响土壤质量评价结果的土壤因子,因此将这 27 项土壤指标作为评价土地质量的全量数据集(Tatal data set,TDS)。基于 TDS,采用主成分分析和皮尔逊相关分析方法,同时遵循 Norm 筛选原则,对 TDS 进行降维,剔除初选指标间的冗余信息,筛选出综合解释信息能力强的指标,从而构建 MDS。具体构建方法如下:使用 SPSS 21.0 软件对 TDS 进行主成分分析,提取特征值大于等于 1 的主成分(Principal component,PC),当某一主成分中有多个评价指标的载荷绝对值大于等于 0.5 时,且其在最大 Norm 值的 90% 范围内,同时与最大 Norm 值对应的评价指标的相关系数 r 小于 0.5,各指标均遴选入 MDS 中;当某一主成分中只有 1 个评价指标大于等于 0.5 时,则该指标遴选入 MDS 中。Norm 值越大,表明某变量解释综合信息的能力越强。其计算公式为

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} u_{ik}^2 \lambda_k} \tag{1}$$

式中 N_{ik}——第 i 个评价指标在特征值大于等于 1 情况下前 k 个主成分综合载荷

u_{ik}——第 i 个变量在第 k 个主成分的载荷

λ_k——第 k 个主成分的特征值

1.3.2 土壤评价指标隶属函数选择

分别从土壤物理性质、土壤养分状况和环境质量 3 个维度构建土壤质量评价指标隶属函数。考虑到土壤属性对土壤质量的作用机理,总碳含量、总氮含量、全磷含量、有机碳含量、碱解氮含量、有效磷含量、速效钾含量、阳离子交换量、含水率和毛管孔隙

度选用升型隶属函数；土壤 pH 值、粘粒含量、砂粒含量、细砂粒含量、粗砂粒含量和容重选用适宜性隶属函数；砷含量、镉含量、铬含量、铜含量、汞含量、镍含量、铅含量、锌含量、非毛管孔隙度和比重选用降型隶属函数。适宜性隶属函数中土壤指标的适宜性阈值根据文献[20]和研究区实际情况确定。

1.3.3　土壤质量指数

土壤质量指数(SQI)综合表征了土壤质地情况、养分富集和环境清洁程度，耕层土壤质量指数越高，表明土壤质量越好。本研究运用农业用地土壤质量评价模型[21]，模型表达式为

$$SQI = \sum_{i=1}^{n} N_i W_i \qquad (2)$$

式中　N_i——第 i 项土壤指标隶属度

W_i——第 i 项土壤指标权重(主成分分析中各指标公因子方差与所有指标公因子方差和的比值)

n——数据集中土壤质量评价指标总数

1.3.4　土壤质量评价精度

为验证 SQI－MDS 的评价精确度，将其与 SQI－TDS 进行回归分析，选用回归模型中的相关系数 r 和决定系数 R^2 评价模型精度。当 r 和 R^2 越接近 1，说明 SQI－MDS 越接近 SQI－TDS，即 SQI－MDS 能够更好地反映 SQI－TDS 信息，模型精度越高。

1.4　数据处理

数据的前期处理在 Microsoft Excel 2017 中进行；数据正态检验、描述性统计和主成分分析在软件 SPSS 21.0 中完成；相关分析热图和数据拟合图在 Origin 2021 中完成；借助 ArcMap 10.8 进行地统计分析和空间分异图绘制。

2　研究结果

2.1　土壤质量评价指标统计学特征

对研究区 27 项土壤指标进行统计分析，结果表明研究区土壤 pH 平均值为 8.31(表 1)，呈碱性。土壤环境指标砷、镉、铬、铜、汞、镍、铅、锌含量均小

表 1　土壤质量评价指标特征值

Tab.1　Characteristic values of soil quality evaluation indicators

指标	平均值	中位数	标准差	最小值	最大值	变异系数	偏度	峰度
砷含量	12.04 mg/kg	12.20 mg/kg	1.80 mg/kg	3.75 mg/kg	15.90 mg/kg	14.95%	－1.48	5.41
镉含量	0.16 mg/kg	0.17 mg/kg	0.02 mg/kg	0.11 mg/kg	0.25 mg/kg	13.50%	0.43	2.11
铬含量	54.44 mg/kg	53.50 mg/kg	6.87 mg/kg	36.00 mg/kg	71.50 mg/kg	12.62%	0.47	0.22
铜含量	28.72 mg/kg	28.60 mg/kg	4.01 mg/kg	14.20 mg/kg	41.40 mg/kg	13.96%	0.13	2.38
汞含量	0.06 mg/kg	0.04 mg/kg	0.11 mg/kg	0.06 mg/kg	0.93 mg/kg	183.33%	6.67	49.95
镍含量	34.87 mg/kg	34.90 mg/kg	4.10 mg/kg	17.80 mg/kg	48.90 mg/kg	11.76%	－0.35	3.41
铅含量	21.73 mg/kg	21.70 mg/kg	2.38 mg/kg	14.00 mg/kg	32.00 mg/kg	10.95%	0.48	4.34
锌含量	80.09 mg/kg	80.20 mg/kg	9.52 mg/kg	44.60 mg/kg	112.00 mg/kg	11.89%	－0.18	2.55
总碳含量	21.97 g/kg	21.20 g/kg	6.66 g/kg	11.30 g/kg	52.10 g/kg	30.31%	1.17	3.55
总氮含量	0.95 g/kg	0.70 g/kg	0.24 g/kg	0.20 g/kg	1.60 g/kg	25.26%	－0.17	0.49
全磷含量	0.84 g/kg	1.26 g/kg	0.29 g/kg	0.41 g/kg	1.84 g/kg	34.52%	1.31	2.06
速效钾含量	266.19 mg/kg	241.16 mg/kg	85.32 mg/kg	121.66 mg/kg	538.50 mg/kg	32.05%	1.03	1.13
有效磷含量	13.01 mg/kg	9.12 mg/kg	14.57 mg/kg	1.25 mg/kg	83.02 mg/kg	111.99%	2.43	7.07
全盐量	0.63 g/kg	0.60 g/kg	0.32 g/kg	0.20 g/kg	2.70 g/kg	50.79%	3.20	17.89
有机碳含量	15.86 g/kg	9.56 g/kg	4.79 g/kg	2.97 g/kg	29.35 g/kg	30.20%	1.82	4.53
碱解氮含量	76.13 mg/kg	71.40 mg/kg	29.13 mg/kg	8.93 mg/kg	179.00 mg/kg	38.26%	0.72	1.24
阳离子交换量	11.08 cmol/kg	11.30 cmol/kg	3.84 cmol/kg	2.39 cmol/kg	22.40 cmol/kg	34.66%	0.34	0.74
粘粒含量	21.22%	21.28%	2.95%	15.19%	31.39%	13.90%	0.56	1.10
粉(砂)粒含量	34.30%	35.30%	5.65%	18.39%	44.54%	16.47%	－1.06	0.89
细砂粒含量	37.75%	38.12%	5.00%	24.05%	49.61%	13.25%	－0.14	0.13
粗砂粒含量	6.73%	4.69%	5.52%	0.20%	26.89%	82.02%	1.85	3.31
比重	2.60 g/cm^3	2.60 g/cm^3	0.03 g/cm^3	2.53 g/cm^3	2.66 g/cm^3	1.15%	0.06	－0.42
容重	1.23 g/cm^3	1.20 g/cm^3	0.15 g/cm^3	0.99 g/cm^3	1.71 g/cm^3	12.20%	0.98	0.51
含水率	18.66%	18.90%	3.04%	10.29%	29.47%	16.29%	0.27	2.03
毛管孔隙度	44.66%	43.42%	9.72%	23.55%	95.89%	21.76%	2.67	12.76
非毛管孔隙度	6.93%	6.48%	3.98%	0.40%	24.15%	57.43%	1.04	2.31
pH 值	8.31	8.32	0.16	7.66	8.92	1.93%	－0.06	5.91

于 GB 15618—2018《农用地土壤污染风险管控标准》中给出的风险筛选值,即研究区土壤环境处于轻度生态风险等级;根据《全国第二次土壤普查养分划分标准》,土壤养分指标碱解氮含量处于较缺乏水平,有机碳、有效磷含量处于中等水平,全磷含量处于较丰富水平,速效钾含量处于丰富水平;土壤机械组成主要以细砂粒、粉粒、粘粒含量为主,总占比为 93.37%,质地类型属于粘壤土。土壤比重和 pH 值为弱变异(变异系数小于 10%),有效磷、汞含量为强变异(变异系数大于 100%),其余指标均为中等程度变异(变异系数为 10% ~100%),且土壤物理指标和环境指标变异程度小于土壤养分指标。

2.2 土壤耕层质量评价最小数据集建立和验证

2.2.1 最小数据集建立

选用 27 项土壤指标,基于主成分分析方法,建立 MDS 评价土地质量。运用 SPSS 软件,对土壤指标进行 KMO 和巴特利特球形检验,得到 KMO 为 0.639,巴特利特球形度检验显著性为 0,说明所选用的土壤指标适合做主成分分析。主成分分析发现前 7 个主成分的特征值均大于 1(表 2),且累计贡献率为 70.45%,满足主成分分析成分提取要求。按照 MDS 筛选原则中载荷绝对值划分依据,pH 值、全盐量、锌含量、总氮含量、铅含量、有机碳含量、铜含量、镉含量、碱解氮含量、速效钾含量、有效磷含量、铬含量和全磷含量归为第 1 组,砷、粉(砂)粒、细砂粒、粘粒含量归为第 2 组,粗砂粒含量、含水率和容重归为第 3 组,阳离子交换量和比重归为第 4 组,总碳、汞含量归为第 5 组,毛管孔隙度和非毛管孔隙度均归为第 6 组。

对比各组中 Norm 值,并选取在最大 Norm 值 90%范围内的指标,然后分析每组中所选指标与最大 Norm 值所代表指标的相关性,当相关系数小于

表 2 主成分载荷矩阵及 Norm 值计算结果

Tab.2 Principal component loading matrix and calculated Norm values

指标	分组	主成分							Norm 值
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	
锌含量	1	0.86	-0.16	-0.05	0.14	-0.01	0.00	0.11	2.22
总氮含量	1	0.82	0.17	0.00	-0.06	0.01	0.07	-0.06	2.13
铅含量	1	0.79	0.10	0.17	0.33	-0.26	-0.04	0.01	2.11
有机碳含量	1	0.67	0.50	0.23	0.13	-0.20	0.10	0.11	2.03
铜含量	1	0.66	-0.32	-0.11	0.37	0.05	-0.09	0.23	1.90
pH 值	1	-0.66	0.21	0.07	0.29	0.13	0.09	0.18	1.80
镉含量	1	0.64	0.35	0.14	0.08	-0.06	-0.12	-0.18	1.81
碱解氮含量	1	0.62	0.15	-0.06	-0.28	0.04	-0.03	-0.11	1.67
速效钾含量	1	0.61	0.24	0.03	-0.23	0.17	-0.07	-0.21	1.69
有效磷含量	1	0.61	0.17	0.12	-0.39	0.29	-0.01	0.15	1.73
铬含量	1	0.55	-0.38	-0.24	0.35	0.42	-0.24	-0.04	1.80
全磷含量	1	0.53	0.48	0.25	-0.13	0.38	0.01	0.21	1.77
全盐量	1	0.40	0.21	0.04	-0.24	-0.44	-0.26	-0.07	1.30
镍含量	2	0.48	-0.75	-0.07	0.24	-0.08	-0.11	-0.05	1.95
砷含量	2	0.29	-0.68	0.27	-0.08	-0.15	-0.21	-0.32	1.65
粉(砂)粒含量	2	-0.18	-0.56	0.51	0.02	-0.22	-0.26	0.13	1.52
细砂粒含量	2	-0.18	0.52	0.31	0.02	0.25	-0.15	-0.46	1.37
粘粒含量	2	0.23	-0.52	-0.30	-0.51	-0.04	0.43	-0.04	1.54
粗砂粒含量	3	0.23	0.38	-0.64	0.23	0.02	0.17	0.30	1.50
含水率	3	0.21	-0.18	0.64	0.16	0.30	0.32	0.05	1.35
容重	3	-0.13	0.35	-0.64	0.17	0.01	-0.05	-0.18	1.32
阳离子交换量	4	0.31	-0.24	-0.33	0.46	-0.07	0.16	-0.01	1.25
比重	4	-0.38	0.37	0.40	0.42	-0.03	-0.37	0.22	1.56
总碳含量	5	0.20	0.45	0.26	-0.02	-0.70	0.27	0.14	1.46
汞含量	5	0.13	0.18	0.30	0.30	0.32	0.28	-0.25	1.00
毛管孔隙度	6	-0.07	-0.34	0.46	0.13	0.00	0.56	0.02	1.20
非毛管孔隙度	6	0.09	-0.16	0.13	-0.43	0.24	-0.52	0.24	1.04
特征值		6.48	3.84	2.66	1.98	1.63	1.28	1.18	
方差贡献率/%		23.99	14.21	9.85	7.30	6.05	4.71	4.34	
累计贡献率/%		23.99	38.20	48.05	55.35	61.40	66.11	70.45	

0.05 时，则入选 MDS。在第 1 组中锌含量的 Norm 值最大，为 2.22，该组中总氮、铅、有机碳含量均在其 90% 范围内，锌含量与总氮、铅含量的相关系数均大于 0.5（图 2，As 表示砷含量；Cd 表示镉含量；Cr 表示铬含量；Cu 表示铜含量；Hg 表示汞含量；Ni 表示镍含量；Pb 表示铅含量；Zn 表示锌含量；TC 表示总碳含量；TN 表示总氮含量；TP 表示全磷含量；AK 表示速效钾含量；AP 表示有效磷含量；Salt 表示全盐量；SOM 表示有机碳含量；AN 表示碱解氮含量；CEC 表示阳离子交换量；NL 表示粘粒含量；FL 表示粉（砂）粒含量；XSL 表示细砂粒含量；CSL 表示粗砂粒含量；PP 表示比重；BD 表示容重；SW 表示土壤含水率；CP 表示毛管孔隙度；NCP 表示非毛管孔隙度；* 表示 $P \leqslant 0.05$），与有机碳含量相关系数小于 0.5，因此，锌、有机碳含量进入 MDS。第 2 组中镍含量 Norm 值最大，为 1.95，且该组中无指标在其 90% 范围内，因此该组中只有镍含量进入 MDS。第 3 组中粗砂粒含量 Norm 值最大，仅有含水率指标在其 90% 范围内，且粗砂粒含量与含水率相关系数小于 0.5，因此，粗砂粒含量和含水率进入 MDS。第 4 组中，比重 Norm 值最大，为 1.56，且该组中无指标在其 90% 范围内，因此该组只有比重进入 MDS。第 5 组中，总碳含量 Norm 值最大，该组中无指标在其 90% 范围内，因此该组中只有总碳含量进入 MDS。第 6 组中毛管孔隙度 Norm 值最大，且非毛管孔隙度 Norm 值不在该组最大 Norm 值的 90% 范围内，因此毛管孔隙度进入 MDS。综上所述，最终有土壤含水率、比重、毛管孔隙度、有机碳含量、锌含量、镍含量和粗砂粒含量 7 项指标入选 MDS。

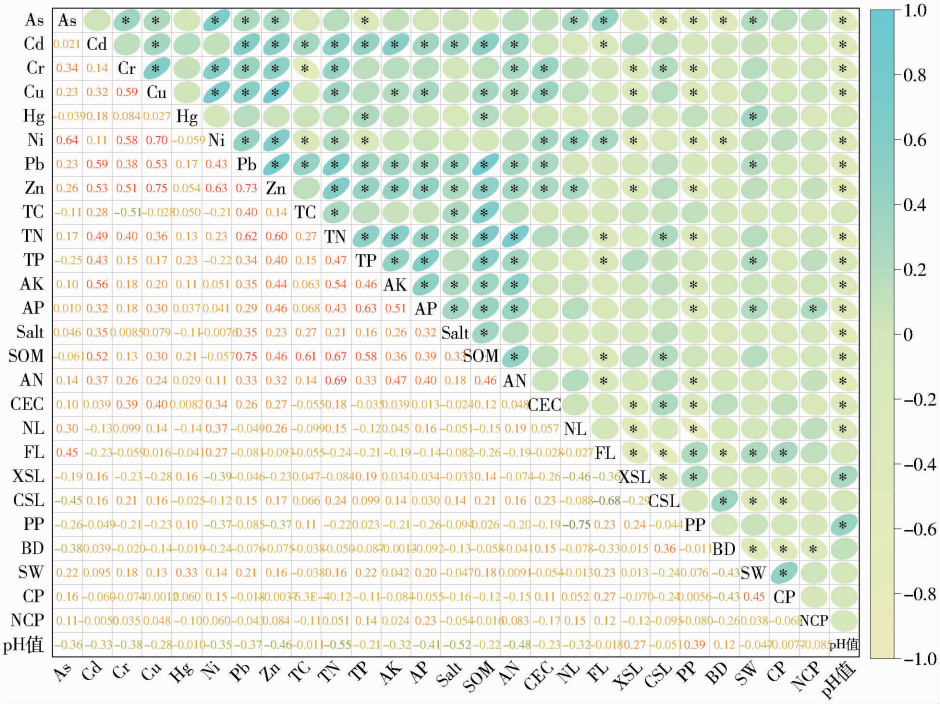

图 2　土壤初选指标相关性矩阵

Fig. 2　Correlation matrix of soil primary indicators

2.2.2　最小数据集验证

基于 MDS 法筛选出的指标评价土壤质量直接影响评价结果的科学性，因此需对 MDS 评价指标体系的准确性进行验证。对 TDS 和 MDS 进行主成分分析，分别得到公因子方差，从而确定土壤指标权重系数（表 3）。将标准化后的 TDS 和 MDS 指标值和权重系数分别代入土壤质量指数中求得 SQI－TDS 和 SQI－MDS。SQI－MDS 为 0.255～0.785，均值为 0.522，变异系数为 24%；SQI－TDS 为 0.330～0.729，均值为 0.537，变异系数为 17%，即 SQI－MDS 的变化区间和变异程度均高于 SQI－TDS。因此，MDS 法对土壤质量指数的变化情况反应更为敏感。此外，在 MDS 中有机碳含量权重最大，说明有机碳含量对土壤质量评价的贡献率最大。

对 SQI－MDS 和 SQI－TDS 进行回归分析验证 MDS 评价土壤质量精度。从拟合结果看（图 3），SQI－MDS 和 SQI－TDS 显著相关（$P < 0.05$），回归模型为 $y = 0.901x + 0.179$，相关系数 r 为 0.901，且决定系数 R^2 为 0.812，说明基于 MDS 法筛选出的土壤指标所建立的土壤质量评价体系能更好地解释基于 TDS 法所评价的土壤质量信息。

2.3　土壤质量评价

利用地统计方法，选择最优预测精度的半变异函数模型，对研究区所有样点的SQI－MDS进行

表 3 土壤质量评价指标权重

Tab. 3 Weight of soil nutrient index

指标	TDS		MDS	
	公因子方差	权重	公因子方差	权重
砷含量	0.805	0.04		
镉含量	0.613	0.03		
铬含量	0.865	0.04		
铜含量	0.771	0.04		
汞含量	0.475	0.02		
镍含量	0.908	0.05	0.78	0.12
铅含量	0.863	0.04		
锌含量	0.830	0.04	0.87	0.13
总碳含量	0.935	0.05	0.71	0.11
总氮含量	0.722	0.04		
全磷含量	0.770	0.04		
速效钾含量	0.565	0.03		
有效磷含量	0.683	0.03		
全盐量	0.767	0.04		
有机碳含量	0.844	0.04	0.91	0.14
碱解氮含量	0.507	0.03		
阳离子交换量	0.547	0.03		
粘粒含量	0.894	0.04		
粉(砂)粒含量	0.748	0.04		
细砂粒含量	0.746	0.04		
粗砂粒含量	0.842	0.04	0.54	0.08
比重	0.819	0.04		
容重	0.618	0.03		
含水率	0.731	0.04	0.69	0.11
毛管孔隙度	0.709	0.04	0.68	0.10
非毛管孔隙度	0.710	0.04		
pH 值	0.787	0.04		

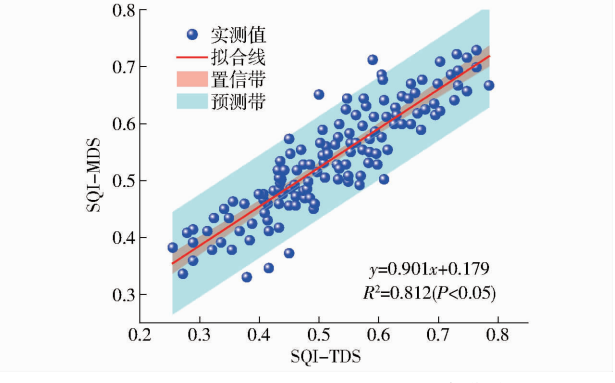

图 3 SQI－MDS 和 SQI－TDS 拟合曲线

Fig. 3 SQI－MDS and SQI－TDS fitting plot

普通克里金插值,当模型的标准化均方根误差接近于 1,且均方根误差越小,平均误差、标准化平均误差和平均标准误差接近于 0 时,预测模型精度和适用性较高[22](表 4)。结果表明高斯模型插值精度最优,在此模型下绘制研究区土壤质量空间分异图(图 4)。

参考文献[23]土壤质量划分标准将土壤质量分级为Ⅰ~Ⅴ级,对应土壤质量指数分别为(0~0.4]、(0.4~0.5]、(0.5~0.6]、(0.6~0.7]和>0.7,指数分级含义分别为差、较差、中等、良好和优质。评价结果表明:韩城市土地质量总体处于中等及以上水平,面积为 1 478.20 km^2,占总面积的 92.8%,其中良好水平土地面积为 813.57 km^2,占总面积的 51.1%,横向贯穿韩城市的中部地区;优质水平土地面积为 90.01 km^2,占总面积的 5.60%,主要分布在龙门镇。土壤质量在空间上呈现一定的分布规律,越靠近河流的区域,土壤质量指数越高,土壤质量越好。

表 4 半变异函数参数

Tab. 4 Semi-variable function parameters

半变异函数	平均误差	均方根误差	标准化平均误差	平均标准误差	标准化均方根误差
三角函数	-4.558×10^{-4}	0.069	-0.005	0.083	0.891
指数函数	-5.538×10^{-5}	0.069	-0.006	0.082	0.896
高斯函数	-6.170×10^{-5}	0.069	-0.004	0.081	0.901
球面函数	-4.588×10^{-4}	0.069	0.006	0.084	0.889

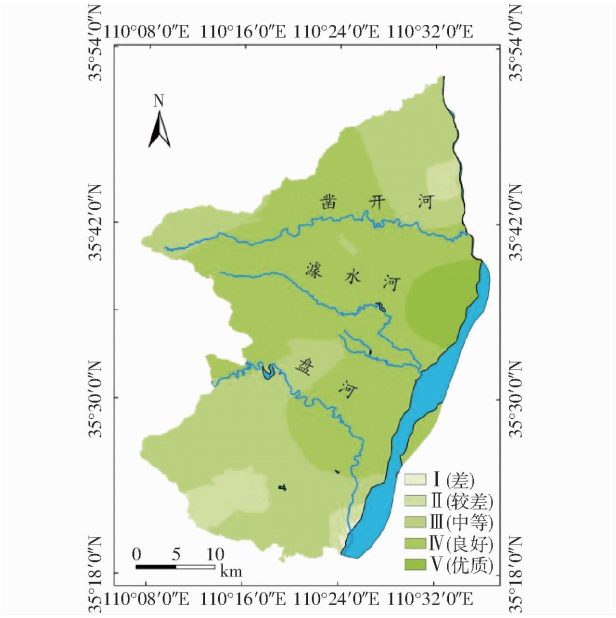

图 4 韩城市土壤质量分级空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil quality grading in Hancheng City

3 讨论

土壤是由大气圈、水圈、岩石圈、生物圈和时间相互作用的结果,影响土壤质量评价因子多样,形成过程复杂。传统的土壤质量评价可能涉及复杂的实验和数据处理过程,这需要大量的时间和人力资源。通过简化评价方法,可以更快速地获取土壤质量信息,这对于大规模的土壤调查或实时监测尤为重要。目前使用较为广泛的土壤质量评价方法有土壤质量指数法[24-25]、TOPSIS[26]、梅罗综合指数法[27]和灰

色关联分析法[28]。其中土壤质量指数法不仅考虑每个指标的实测值和权重，还关注指标之间相互作用机理对评价结果的影响，从而能更准确地反映土壤质量的整体状况。同时最小数据基法在筛选指标时保留最关键和最具代表性的数据，避免了数据的冗余和重复。本研究以黄土为研究对象，综合考虑黄土特性和数据的可获得性，选择涵盖土壤物理特性、土壤养分特性和土壤环境特性的 27 项土壤指标作为初选指标评价土壤质量，利用主成分分析和 Norm 原则构建 MDS，同时结合土壤质量指数法，筛选出 7 项土壤指标作为土壤耕层质量评价的重要指标，筛选率高达 60%，简化了评价指标的同时又防止影响土壤质量的关键指标被忽略，显著降低了冗余信息对评价结果的影响，提高了评价效率。

MDS 方法虽能降低单样本的指标量，减少数据冗余，但在实际应用中，需根据具体的数据特性和资源条件权衡和取舍，确保其他指标的全面性和重要性。本研究基于 MDS 方法最终有土壤含水率、比重、毛管孔隙度、机碳含量、锌含量、镍含量和粗砂粒含量 7 项指标入选 MDS，其中有机碳含量是衡量土壤养分的主要指标，是作物高产稳产和农业可持续发展的基础，在土地质量评价中被广泛而普遍使用；锌和镍含量是表征土壤环境的指标，韩城市矿产资源极为丰富，其中闪锌矿、硫化镍矿、煤矿、铝土矿等占主要地位，锌和镍元素含量对研究区的环境质量影响较大；粗砂粒含量、含水率、比重和毛管孔隙度表征土壤的物理性质，黄土是在干燥气候条件下形成的多孔性具有柱状节理的黄色粉性土，其机械组成以粉砂含量为主，多孔隙，但毛管孔隙度占比低，含水率和比重也相对较低。因此，本研究基于 MDS 所筛选的指标涵盖了土壤质量的物理、环境和养分特征，且与研究区黄土的独有特性也能较好吻合。目前关于土壤质量评价中土壤指标筛选频率较高的有土壤孔隙度和有机碳、粘粒、总氮、粉粒、砂粒、有效磷含量等[29]，这与本研究结论相似[30]。但本研究中未出现总氮、全磷含量等入选频率较高的指标，这主要是因为土壤碳、氮和磷是土壤养分的重要组成部分，三者在物质循环过程中相互耦合，相互影响[31]，存在极强的共线关系，同时在主成分分析中土壤有机碳和含氮、磷形态的指标被划分在一组，而土壤有机碳含量的 Norm 值最大。因此，土壤养分指标中只有土壤有机碳含量入选 MDS，这也符合前人的研究结果：在土壤质量评价体系中，土壤有机碳含量被选入 MDS 的频率最高[32]。

对土壤质量进行分级的主要目的是准确评价土壤质量状况并发现是否存在问题，为如何提高土壤质量提供依据。而在土壤质量指数变化区间较小的情况下，会使土壤质量的识别和分类增加难度（土壤质量指数变化区间和变异系数代表土壤质量指数对不同环境条件变化响应的敏感程度，土壤质量指数变化区间和变异系数越大，对环境条件变化响应敏感程度越高，能更清晰地反映出土壤质量变化的影响因素，从而对提升土壤质量提供有效指导）。本文发现 SQI－MDS 土壤质量指数变化区间（0.255 ~ 0.785）和变异系数（24%）均大于 SQI－TDS 土壤质量指数变化区间（0.330 ~ 0.729）和变异系数（17%）。因此，SQI－MDS 方法更为实用和科学。此外，通过 SQI－TDS 和 SQI－MDS 进行拟合进一步验证土壤质量评价指标筛选的精确度，相关系数 r = 0.901 和决定系数 R^2 = 0.812 说明本研究筛选出的土壤指标能有效地替代 TDS 指标对黄土耕层土壤质量进行精准且恰当的评价。基于上述结果，与 SQI－TDS 方法相比，SQI－MDS 方法在该区域具有更好的适用性，并且能较准确地进行土壤质量评价。

本研究基于地统计方法选择最优预测精度的半变异函数高斯模型预测韩城市土地质量总体处于中等及以上水平，这与前人研究结果趋于一致[33－34]，在空间分布上呈现出越靠近河流土壤质量越高的变化趋势。还有研究指出[12]，土壤中的微生物及微量元素均为评估土壤质量的重要因子，未来需要进一步探讨如何优化 MDS，以增强其实际应用性与科学准确性。

4　结论

（1）研究区土壤属于粘壤土，土壤偏碱性（pH 平均值为 8.31）。根据 GB 15618—2018《农用地土壤污染风险管控标准》和《全国第二次土壤普查养分分级标准》研究区土壤环境质量较好，属于轻度生态风险等级，土壤养分中碱解氮含量较缺乏，有机碳和有效磷含量处于适中水平，全磷和速效钾含量较为丰富。

（2）基于主成分分析和 Norm 原则，黄土高原南缘韩城地区土壤质量评价 MDS 由土壤含水率、比重、毛管孔隙度、有机碳含量、锌含量、镍含量和粗砂粒含量 7 项指标构成，MDS 可以解释 TDS 的 70.45% 信息。有机碳含量在 MDS 评价体系指标中权重最大，即有机碳含量为控制该区域土壤质量的关键因子。

（3）SQI－MDS 均值（0.522）与 SQI－TDS 均值（0.537）相差较小，在土壤质量分级上均属于同一等级。SQI－MDS 变化区间和变异系数均高于 SQI－TDS，且 SQI－MDS 与 SQI－TDS 拟合结果 R^2 为

0.812。因此,基于最小数据集的土壤质量评价法在该区域具有更好的适用性,并且能较准确地进行土壤质量评价。

(4)半变异函数为高斯函数时,预测精度最高,土壤质量在空间上呈现一定的分布规律,越靠近河流的区域,土壤质量指数越高,土壤质量越好。研究结果可为黄土丘陵区土壤改良和科学有效利用提供依据。

参 考 文 献

[1] 赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境 Ⅰ. 土壤质量的定义及评价方法[J]. 土壤, 1997,29(3): 113 - 120.

[2] 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)

[3] 杨莹攀, 尹娟, 朱银浩, 等. 水氮调控对宁夏中部旱区马铃薯产量与土壤质量的影响[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 358 - 370, 458.
YANG Yingpan, YIN Juan, ZHU Yinhao, et al. Effects of water and nitrogen regulation on potato yield and soil quality evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 358 - 370, 458. (in Chinese)

[4] 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.

[5] PAUL D, OBADE V, LAL R. A standardized soil quality index for diverse field conditions[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541: 424 - 434.

[6] DALSGAARD K. Defining soil quality for a sustainable environment[J]. Geoderma, 1995, 66(1 - 2): 163 - 164.

[7] 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.

[8] 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)

[9] 耿婷婷, 刘金巍, 宋绵, 等. 基于突变理论的土地质量地球化学评价方法研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 374 - 381.
GENG Tingting, LIU Jinwei, SONG Mian, et al. Land quality geochemical evaluation based on catastrophe theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 374 - 381. (in Chinese)

[10] 金慧芳, 史东梅, 宋鸽, 等. 红壤坡耕地耕层质量特征与障碍类型划分[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 313 - 321, 340.
JIN Huifang, SHI Dongmei, SONG Ge, et al. Quality characteristics and barrier types of cultivated land in red soil slope[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 313 - 321, 340. (in Chinese)

[11] 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.

[12] 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):1326 - 1333. (in Chinese)

[13] 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 - 689.
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 - 689. (in Chinese)

[14] 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)

[15] 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 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)

[16] 陈伟, 李亚新, 王红阳, 等. 黄土丘陵区坡耕地与撂荒地土壤水分对降雨的响应特征[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 332 - 339.
CHEN Wei, LI Yaxin, WANG Hongyang, et al. Dynamic response characteristics of soil moisture on slope cultivated land and abandoned land to different rainfall intensities in the loess hilly region[J]. Acta Ecologica Snica, 2022, 42(1): 332 - 339. (in Chinese)

[17] 郑粉莉, 张锋, 王彬. 近 100 年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6044 - 6051.

ZHENG Fenli, ZHANG Feng, WANG Bin. Quantifying soil quality degradation over 100 years after deforestation under erosional environments[J]. Acta Ecologica Snica, 2010, 30(22): 6044 – 6051. (in Chinese)

[18] 肖培青, 郑粉莉, 汪晓勇, 等. 黄土坡面侵蚀方式演变与侵蚀产沙过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 24 – 27.
XIAO Peiqing, ZHENG Fenli, WANG Xiaoyong, et al. Experimental study on erosion pattern evolvement and sediment process on loessal hillslopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1): 24 – 27. (in Chinese)

[19] LI Y S, HUANG M B. Pasture yield and soil water depletion of continuous growing alfalfa in the Loess Plateau of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 124: 24 – 32.

[20] 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.
ZHUO Zhiqing, LI Yong, GOU Yuxuan, et al. 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)

[21] 农用地质量分等规程: GB/T 28407—2012[S]. 2012.

[22] HANI A, PAZIRA E, MANSHOURI M, et al. Spatial distribution and mapping of risk elements pollution in agricultural soils of southern Tehran, Iran[J]. Plant, Soil and Environment, 2010, 56(6): 288 – 296.

[23] LI X, LI H, YANG L, et al. Assessment of soil quality of croplands in the corn belt of Northeast China[J]. Sustainability, 2018, 10(1): 248.

[24] ASKARI M S, HOLDEN N M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management[J]. Geoderma, 2014, 230 – 231: 131 – 142.

[25] 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.

[26] 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)

[27] 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 on Soil and Water Conservation, 2016, 23(4): 338 – 343. (in Chinese)

[28] 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)

[29] 李桂林, 陈杰, 檀满枝, 等. 基于土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 16 – 25.
LI Guilin, CHEN Jie, TAN Manzhi, et al. Establishment of a minimum data set for soil quality assessment based on land use change[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(1): 16 – 25. (in Chinese)

[30] LI X Y, WANG D Y, REN Y X, et al. Soil quality assessment of croplands in the black soil zone of Jilin Province, China: establishing a minimum data set model[J]. Ecological Indicators, 2019, 107: 105251.

[31] 曹小玉, 李际平, 杨静, 等. 不同龄组杉木林土壤碳、氮、磷的生态化学计量特征[J]. 土壤, 2019, 51(2): 290 – 296.
CAO Xiaoyu, LI Jiping, YANG Jing, et al. Stoichiometric characterization of soil C, N, and P of different age-group Chinese fir plantations[J]. Soils, 2019, 51(2): 290 – 296. (in Chinese)

[32] 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.
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 CSAE, 2021, 37(12): 91 – 98. (in Chinese)

[33] 高红兵, 李小娅, 张权峰. 韩城市农业土壤养分丰缺状况分析与评价[J]. 现代农业科技, 2017(10): 188 – 189, 191.
GAO Hongbing, LI Xiaoya, ZHANG Quanfeng. Analysis and evaluation on abundance and deficiency of nutrients in agricultural soils in Hancheng City[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2017(10): 188 – 189, 191. (in Chinese)

[34] 张权峰, 胡明, 白鸽. 韩城市农田土壤养分演化趋势[J]. 陕西农业科学, 2015, 61(1): 23 – 26.
ZHANG Quanfeng, HU Ming, BAI Ge. Trend of soil nutrient evolution in Hancheng City farmland[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2015, 61(1): 23 – 26. (in Chinese)