

基于最小数据集的东北旱作区耕层质量评价与障碍诊断

卓志清<sup>1,2</sup> 李 勇<sup>1,2</sup> 勾宇轩<sup>1,2</sup> 赵云泽<sup>1,2</sup> 黄元仿<sup>1,2</sup> 兴 安<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 为准确评价东北旱作区耕层质量特征, 针对全部初选指标采用主成分分析法 (PCA) 建立了东北旱作区耕层质量评价的最小数据集 (Minimum data set, MDS), 并运用最小数据集耕层质量指数 (MDS - Plough horizon integrated quality index, MDS - PHIQI) 和障碍因子诊断模型对研究区耕层质量及主导障碍因子进行分析。结果表明: 东北旱作区耕层质量评价的最小数据集由土壤有机质含量、全氮含量、有效磷含量、粘粒含量、耕作层穿透阻力和压实层厚度组成, 最小数据集可替代全部初选指标对东北旱作区耕层质量进行评价; 东北旱作区耕层质量指数分布在 0.10 ~ 0.53 之间, 均值为 0.30, 整体处于低和中等水平。东北旱作区合理耕层指标参数的适宜范围为: 有机质质量比大于等于 37.16 g/kg, 全氮质量比大于等于 1.75 g/kg, 有效磷质量比大于等于 26.38 mg/kg, 粘粒质量分数为 4.60% ~ 6.19%, 耕作层穿透阻力小于等于 364.56 kPa, 压实层厚度小于等于 8.18 cm。东北旱作区粮食产量低产区耕层多存在结构型障碍, 中产区耕层结构型障碍和养分限制共存, 而高产区耕层主要表现为养分限制型障碍。整体来看, 研究区耕层质量的主要障碍因素为耕作层穿透阻力、土壤全氮含量、有机质含量, 需针对上述指标采取针对性的耕作和施肥措施。

**关键词:** 旱作区; 耕层质量; 聚类分析; 最小数据集; 压实层; 障碍度

中图分类号: S158.5      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2021)09-0321-10      OSID: 

Quality Evaluation and Obstacle Diagnosis of Plough Horizon Based on Minimum Data Set in Dry Farming Region of Northeast China

ZHUO Zhiqing<sup>1,2</sup> LI Yong<sup>1,2</sup> GOU Yuxuan<sup>1,2</sup> ZHAO Yunze<sup>1,2</sup> HUANG Yuanfang<sup>1,2</sup> XING An<sup>1,2</sup>

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China  
2. Key Laboratory of Agricultural Land Quality, Ministry of Natural Resources, Beijing 100193, China)

**Abstract:** In order to evaluate the quality of plough horizon in dry farming region of Northeast China, the principal component analysis (PCA) was used to establish the minimum data set (MDS), and the characteristics of plough horizon quality were indicated by using the MDS - Plough horizon integrated quality index (MDS - PHIQI). In addition, the regional classification of soil samples was studied based on systematic cluster analysis, and the negative factors of plough horizon quality were identified by obstacle factor diagnosis model. The results showed that the MDS suitable for use in the assessment of plough horizon quality for study area included such indicators as soil organic matter (SOM) content, total nitrogen (TN) content, available phosphorus (AP) content, clay particle content, plough layer penetration resistance (PLP) and compacted layer thickness (CLT). The MDS can replace the total data set to evaluate the quality of plough horizon in dry farming region of Northeast China. The quality index of plough horizon in study area was between 0.10 and 0.53, with an average value of 0.30, which was at medium and low levels. From the perspective of fertilizer conservation and yield-increasing potential, the suitability thresholds of those diagnostic parameters for reasonable plough horizon of dry farming region of Northeast China were indicated as follows: soil organic matter content of greater than or equaled 37.16 g/kg, total nitrogen content of greater than or equaled 1.75 g/kg, the clay particle content of 4.60% ~ 6.19%, available phosphorus content of greater than or equaled 26.38 mg/kg, the plough layer penetration

收稿日期: 2020-09-22    修回日期: 2020-11-27  
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300801)和国家自然科学基金项目(41571217)  
作者简介: 卓志清(1989—),男,博士生,主要从事土壤养分与土地利用研究,E-mail: zhiqingzhuo@cau.edu.cn  
通信作者: 黄元仿(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事计量土壤学和数字农业研究,E-mail: yfhuang@cau.edu.cn

resistance of less than or equaled 364.56 kPa, and the compacted layer thickness of less than or equaled 8.18 cm. In the research, geographic areas can be characterized as high, medium or and low levels of grain yields. Different types of barrier factors for plough horizon in the study area can be divided into plough horizon structure barriers (low grain yield areas), comprehensive barriers of structure and soil fertility constraints (medium grain yield areas), and soil fertility constraints (high grain yield areas). Viewed as a whole, the main obstacles to the improvement of the quality of plough horizon were penetration resistance of plough layer, total nitrogen content, and soil organic matter content, appropriate tillage and fertilization measures should be taken in view of the above three obstacle factors. The research can provide theoretical basis and parameters for the evaluation of plough horizon quality and the construction of reasonable plough horizon in dry farming region of Northeast China.

**Key words:** dry farming region; plough horizon quality; cluster analysis; minimum data set; compacted layer; obstacle degree

0 引言

农田耕层是指人类为了栽培农作物,利用工具对土壤进行扰动的深度层,其能够协调土壤水、肥、气、热的关系,维持作物的生产<sup>[1]</sup>。但长期高强度的开发利用以及重用轻养的管理方式导致我国局部地区农田耕层出现基础地力下降、耕层结构恶化等问题,直接影响了农作物的高产、稳产及农业可持续发展<sup>[2]</sup>。耕层质量是反映耕层土壤肥力和生产性能的综合性指标,准确评价农田耕层质量并识别其主要障碍因素,对区域合理耕层的构建具有重要意义。由于耕层质量受多种自然因素及人为因素共同作用的影响,尚未有统一的评价指标体系和固定(可靠)的方法。目前,常用的耕层质量评价方法包括多变量指标克立格法、土壤质量动力学方法、综合指数法及相对质量评价法等<sup>[3]</sup>。其中,综合指数法是目前国内外应用最为广泛的一种耕层质量评价方法,其将各相对独立的评价指标值,通过德尔菲法、层次分析法、主成分分析法、聚类分析法等方法赋予权重后加权求和,得到综合评价结果<sup>[4]</sup>。国内外学者已采用上述方法在不同区域尺度上对耕层质量进行了评价,如贡璐等<sup>[5]</sup>和金慧芳等<sup>[6]</sup>采用综合指数法分别对干旱区绿洲和红壤坡耕地耕层质量进行了评价;SANTOS-FRANCÉS等<sup>[7]</sup>则在半干旱农业生态系统中比较了综合指数法和内梅罗法对耕层质量的评价结果,结果表明综合指数法能够更准确地反映当地农田耕层质量。此外,ASKARI等<sup>[8]</sup>和TURAN等<sup>[9]</sup>采用光谱法对耕层质量进行了评价和预测,结果表明在一定区域尺度下光谱法是一种快速有效的耕层质量评价方法,其能够预测退化地区耕层质量的变化。

在针对不同评价方法的指标选取上,高旺盛等<sup>[10]</sup>通过文献调研和专家咨询,筛选出理论上适用于大空间尺度下耕层土壤质量评价的14个指标,其中有机质含量、全氮含量、土壤质地、容重及土层厚

度等指标出现的频率较高<sup>[4]</sup>。实践研究表明,基于全部指标的大空间尺度耕层质量评价方法数据可获得性较低,指标间重叠且存在大量冗余信息;同时在指标权重的计算过程中增加了不确定性。因此有学者提出了基于最小数据集的耕层质量评价方法,并采用土壤质量指数比较法、作物产量与最小数据集指标相关性分析法,最小数据集指标与未入选指标相关性分析法等方法来验证指标筛选的合理性<sup>[5]</sup>。如陈正发等<sup>[11]</sup>采用最小数据集方法对云南省坡耕地的耕层质量进行了评价,并比较了不同耕作条件、土壤类型下耕层质量的差异;邓绍欢等<sup>[12]</sup>和CHAHAL等<sup>[13]</sup>分别应用最小数据集方法评价了水田和旱地的耕层质量,验证结果均表明该方法能够替代全部指标数据集对耕层质量进行评价。虽然目前基于最小数据集的耕层质量评价减少了参评指标的数量,但在指标选取过程中仍侧重于农田表层土壤的理化性质,而忽略了耕层的结构特征及其对耕层质量的影响,特别是针对区域尺度的耕层质量评价中,缺少量化耕层结构特征的参数<sup>[14]</sup>。此外,科学选取评价指标的最小数据集、确定其隶属度函数及其临界值、验证评价结果仍是耕层质量评价的关键。本文以东北旱作区为研究对象,基于反映耕层土壤理化性状及耕作层、压实层的厚度及穿透阻力等指标,构建旱作农田耕层质量指数评价模型(Plough horizon integrated quality index, PHIQI),并采用最小数据集(Minimum data set, MDS)法筛选评价指标,对研究区耕层质量进行评价,分析评价结果的准确性,探讨区域耕层质量指标参数的适宜范围,以期对东北旱作区合理耕层诊断及调控提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

基于2015年黑龙江省、吉林省和辽宁省的1 km<sup>2</sup>网格土地利用现状图,根据有关坡度分级标准,将地形坡度小于5°、1 km<sup>2</sup>网格内旱地占耕地面

积 40% 以上的区域作为旱作区<sup>[15-16]</sup>。区域涵盖黑龙江省、吉林省和辽宁省各自的 46、19、20 个县(市),涉及县级行政单元总面积约 29.56 万 km<sup>2</sup>。区域多年平均日照时数 2 400 ~ 2 700 h,大于等于 10℃ 积温 2 000 ~ 3 400℃。黑龙江省东部、北部和吉林省东部等半湿润易旱区年降水量 500 ~ 600 mm,土壤类型以黑土、白浆土和草甸土为主;黑龙江省西部、吉林省西部和辽宁省西部等半干旱区和半干旱偏湿润区年降水量 350 ~ 500 mm,土壤类型主要为黑钙土、棕壤和盐渍土。研究区地貌属于山麓冲洪积平原及台地,耕地破碎度较小且耕作条件良好,主要种植玉米、小麦等粮食作物和大豆、甜菜等经济作物,是我国北方重要旱作作物种植区及商品粮基地(图 1)。

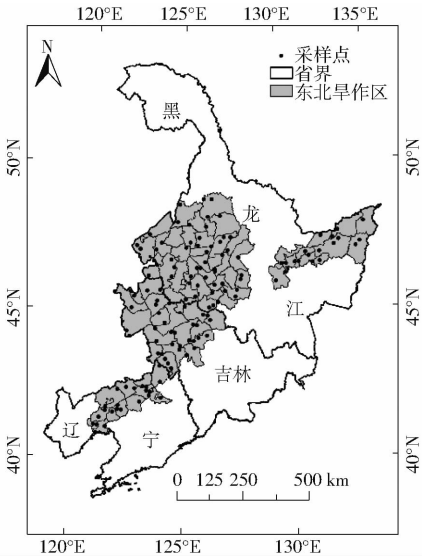


图 1 东北旱作农业区分布图

Fig. 1 Distribution of dry farming region of Northeast China

1.2 样品采集与分析

利用 ArcGIS 10.3 软件提取土地利用类型现状图中的旱地斑块(含水浇地),将所提取数据和研究区行政区划矢量数据叠置,获得空间属性数据。在研究区以 15 km × 15 km 网格布点并抽取旱地斑块(含水浇地),结合土壤亚类进行分层抽样,抽样时考虑种植体系、分布面积和集中程度等因素,主要在黑土、黑钙土、棕壤、潮土、草甸土等土类布设,保证每个土壤亚类均有样点分布。根据上述样点布设和抽样规则共确定 132 个采样点,其中黑土采样点 35 个;黑钙土采样点 33 个;棕壤、暗棕壤采样点 18 个;潮土、草甸土采样点 36 个,其余土类采样点共计 10 个。土样采于 2017 年 5—6 月,现场测定土壤紧实度,并用 GPS 记录样点经纬度。按 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm 分层采集土样,同时采用环刀法取原状土测定各层土壤容重(Bulk density, BD)。将各样品按四分法取 1 kg 土

样带回实验室,经自然风干、研磨、过筛后,用于分析土壤理化性质。土壤颗粒组成采用激光粒度仪测定;基于土壤穿透阻力突变分析的结果判断耕作层厚度(Plough layer thickness, PLT)、压实层厚度(Compacted layer thickness, CLT),并计算耕作层穿透阻力(Plough layer penetration resistance, PLP)和压实层穿透阻力(Compacted layer penetration resistance, CLP)的平均值<sup>[17]</sup>。土壤有机质(Soil organic matter, SOM)含量采用重铬酸钾外加热法测定;全氮(Total nitrogen, TN)、全磷(Total phosphorus, TP)含量采用流动分析仪测定;有效磷(Available phosphorus, AP)含量采用 Olsen 法测定;速效钾(Available K, AK)含量采用 NH<sub>4</sub>OAc 提取—火焰光度法测定;土壤碳氮比(C/N)采用质量比;土壤电导率(Electrical conductivity, EC)采用电极法测定;土壤 pH 值采用电位法测定。研究区粮食产量数据源于 2017 年东北各省统计年鉴,为消除因行政区划调整对数据分析的影响,本文以研究区最新行政区划为准,进行统计分析。

1.3 耕层质量评价

1.3.1 评价指标体系及隶属函数选择

基于土壤管理评估框架,同时考虑东北旱作区耕地利用特征,分别从耕层土壤物理、化学及剖面特征 3 方面选择耕层质量评价指标(表 1),构建初选指标评价体系<sup>[18]</sup>。根据研究区土壤特点及评价指标与耕层质量的相关性情况,建立指标与耕层质量之间的隶属函数,有机质含量、全氮含量、全磷含量、有效磷含量、有效钾含量和耕作层厚度界定为 S 型隶属函数;压实层厚度、压实层和耕作层的穿透阻力和电导率则界定为反 S 型隶属函数,粘粒(Clay)含量、容重及 pH 值与碳氮比存在适宜临界范围,则界定为抛物线型隶属函数。S 型和反 S 型隶属函数以东北旱作区采样点各指标参数实测值的最小值  $m_1$  和最大值  $m_2$  作为函数的转折点,抛物线型隶属函数对应指标的转折点通过文献资料和野外实测数据结果获得<sup>[19]</sup>,采用主成分分析法确定各指标权重。

1.3.2 最小数据集指标筛选

为剔除初选各指标之间的重叠信息,减少参评指标的数量,建立基于 MDS 的耕层质量评价方法。具体步骤如下:运用 SPSS 21.0 软件对初选评价指标进行主成分分析,提取特征值大于等于 1 的主成分(Principal component, PC),将同一 PC 上载荷大于等于 0.5 的指标分为一组,若某一项评价指标同时在两个 PC 上的载荷均大于等于 0.5,则将其归并到与其他参数相关性较低的一组;若评价指标在各 PC 上的载荷均小于 0.5,则将其划分到载荷最高的

表 1 东北旱作区耕层质量评价指标隶属函数

| Tab. 1 Subordinate function of plough horizon quality evaluation index in dry farming region of Northeast China |        |       |       |          |           |                                                                                                                                                                                                        |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-------|----------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 指标                                                                                                              | 参数     |       |       |          | 隶属函数类型    | 计算公式                                                                                                                                                                                                   | 权重   |
|                                                                                                                 | $m_1$  | $n_1$ | $n_2$ | $m_2$    |           |                                                                                                                                                                                                        |      |
| SOM 质量比/(g·kg <sup>-1</sup> )                                                                                   | 8.63   |       |       | 66.43    | S 型隶属函数   | $\mu(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq m_2) \\ \frac{x - m_1}{m_2 - m_1} & (m_1 < x < m_2) \\ 0 & (x \leq m_1) \end{cases}$                                                                               | 0.12 |
| TN 质量比/(g·kg <sup>-1</sup> )                                                                                    | 0.52   |       |       | 3.14     |           |                                                                                                                                                                                                        | 0.09 |
| TP 质量比/(g·kg <sup>-1</sup> )                                                                                    | 0.26   |       |       | 1.55     |           |                                                                                                                                                                                                        | 0.02 |
| AP 质量比/(mg·kg <sup>-1</sup> )                                                                                   | 11.60  |       |       | 39.40    |           |                                                                                                                                                                                                        | 0.08 |
| AK 质量比/(mg·kg <sup>-1</sup> )                                                                                   | 79.60  |       |       | 222.70   |           |                                                                                                                                                                                                        | 0.09 |
| PLT/cm                                                                                                          | 5.00   |       |       | 25.00    | 反 S 型隶属函数 | $\mu(x) = \begin{cases} 1 & (x \leq m_1) \\ \frac{m_2 - x}{m_2 - m_1} & (m_1 < x < m_2) \\ 0 & (x \geq m_2) \end{cases}$                                                                               | 0.05 |
| CLT/cm                                                                                                          | 5.00   |       |       | 17.50    |           |                                                                                                                                                                                                        | 0.07 |
| CLP/kPa                                                                                                         | 689.89 |       |       | 2 564.60 |           |                                                                                                                                                                                                        | 0.07 |
| PLP/kPa                                                                                                         | 145.17 |       |       | 1 100.76 |           |                                                                                                                                                                                                        | 0.04 |
| EC/(μS·cm <sup>-1</sup> )                                                                                       | 87.00  |       |       | 650.00   |           |                                                                                                                                                                                                        | 0.03 |
| 粘粒质量分数/%                                                                                                        | 3.85   | 40.00 | 55.00 | 91.49    | 抛物线型隶属函数  | $\mu(x) = \begin{cases} 1 & (n_1 \leq x \leq n_2) \\ \frac{x - m_1}{n_1 - m_1} & (m_1 < x < n_1) \\ \frac{m_2 - x}{m_2 - n_2} & (n_2 < x < m_2) \\ 0 & (x \geq m_2 \text{ 或 } x \leq m_1) \end{cases}$ | 0.11 |
| BD/(g·cm <sup>-3</sup> )                                                                                        | 1.00   | 1.20  | 1.40  | 1.65     |           |                                                                                                                                                                                                        | 0.12 |
| pH 值                                                                                                            | 4.39   | 6.50  | 7.50  | 8.04     |           |                                                                                                                                                                                                        | 0.03 |
| C/N                                                                                                             | 6.50   | 8.00  | 15.00 | 18.53    |           |                                                                                                                                                                                                        | 0.08 |

注： $n_1$ 、 $n_2$ 为最适值的上下界点，其值通过研究区域实测结果综合对比确定。

一组。分别计算各组中指标的 Norm 值,并选取每组中 Norm 值在该组最大 Norm 值的 10% 范围内的指标,分析每组中所选指标间的相关性,若相关系数大于等于 0.5,则选择 Norm 值最高的指标进入 MDS;反之,若相关系数小于 0.5,则二者均进入 MDS<sup>[20]</sup>。Norm 值越大则表明其解释综合信息的能力越强,评价指标的 Norm 值计算式为

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

(1)

式中  $N_{ik}$ ——第  $i$  个变量在特征值大于等于 1 的前  $k$  个主成分上的综合载荷

$U_{ik}$ ——第  $i$  个变量在第  $k$  个主成分上的载荷

$\lambda_k$ ——第  $k$  个主成分的特征值

1.3.3 耕层质量指数

耕层质量指数 (Plough horizon integrated quality index, PHIQI) 集成了农田土壤物理、化学及剖面特征评价指标,耕层质量指数越高,则耕层质量越好。本研究参照土壤质量和农用地质量评价模型<sup>[18]</sup>,通过全指标 (Total data set, TDS) 和最小数据集 (Minimum data set, MDS) 的方法构建耕层质量评价模型,对东北旱作区耕层质量进行定量化评价,耕层质量指数计算式为

$$PHIQI = \sum_{i=1}^n K_i C_i$$

(2)

式中  $PHIQI$ ——耕层质量指数,为 0~1

$K_i$ ——第  $i$  个评价指标的隶属度

$C_i$ ——第  $i$  个评价指标的权重

$n$ ——评价指标总数

通过 TDS 指标计算得到的耕层质量指数用 TSD-PHIQI 表示,以 MDS 指标计算得到的耕层质量指数用 MSD-PHIQI 表示。根据 MSD-PHIQI,将其等距划分为 3 个等级<sup>[5]</sup>,分别为低((0,0.33])、中((0.33,0.66])和高((0.66,1])。

1.3.4 耕层质量评价精度验证

为验证基于 MDS 耕层质量评价结果的精度,采用模型有效系数  $E_f$  和相对偏差系数  $E_r$  来评价模型的精度<sup>[21]</sup>。有效系数越接近于 1,表示 MDS 法计算结果与基准值越接近,计算精度较高;相对偏差系数越接近于 0,表明 MDS 法计算值相对于基准值的偏差越小,结果越精确。

1.3.5 障碍因素诊断

障碍度模型采用因子贡献度  $C_n$ 、指标偏离度  $D_n$  和障碍度  $Y_n$  进行诊断,然后对障碍度进行排序,从而确定各障碍因子的主要和次要关系。本研究主要参照匡丽花等<sup>[22]</sup>的分析方法,其中  $C_n$  表示因子对总目标的贡献度,即因子的权重  $W_n$ 。 $D_n$  表示指标与最大目标之间的差距,设为指标标准化值与 1 之间的差距; $Y_n$  表示指标对研究区耕层质量的影响,公式为

$$Y_n = \frac{D_n C_n}{\sum_{i=1}^{131} D_i C_i} \times 100\%$$

(3)

其中

$$D_n = 1 - X'_n$$

(4)

式中  $X'_n$ ——指标的标准化值

$D_i$ ——第  $i$  个评价因子的障碍度

1.4 数据处理

数据统计分析在 Microsoft Excel 2017 和 SPSS 24.0 中完成;应用 SPSS 24.0 软件对数据进行正态分布检验、方差分析、主成分分析和相关性分析;应用 ArcGIS 10.5 软件中的空间分析工具制图。

2 结果与分析

2.1 耕层质量评价的最小数据集建立及验证

2.1.1 最小数据集建立

通过主成分分析表明,研究区耕层质量评价指标中特征值大于 1 的 5 个主成分累计贡献率达 70.79%,满足信息提取的要求,但各主成分指标对总体方差解释能力存在差异性(表 2)。在 PC1 中载荷绝对值大于 0.50 的初选指标有粘粒含量、容重、有机质含量、全氮含量、有效钾含量,其中有机质含量的 Norm 值最高,为 1.72,且在其 10% 范围内的指标中,有机质含量与容重、全氮含量及有效钾含量的相关系数均大于 0.50,与粘粒含量的相关系数则小于 0.50,因此有机质含量和粘粒含量进入 MSD(表 3)。在 PC2 中载荷绝对值大于 0.50 的初选指标为有效磷含量和 pH 值,由于有效磷含量与 pH 值的相关系数大于 0.50,所以有效磷含量进入 MSD。在 PC3 中载荷绝对值大于 0.50 的初选指标有全氮含量、全磷含量和电导率,其中全氮含量的 Norm 值最高,为 1.63,而全磷含量和电导率的 Norm 值均不在其 10% 范围内,因此仅 Norm 值最高的全氮含量进入 MSD。在 PC4 中载荷绝对值大于 0.50 的指标

有耕作层穿透阻力、压实层穿透阻力和碳氮比,其中耕作层穿透阻力的 Norm 值最高,为 0.98,而压实层穿透阻力和碳氮比的 Norm 值不在其 10% 范围内,所以耕作层穿透阻力进入 MSD。在 PC5 中载荷绝对值大于 0.50 的指标有耕作层厚度和压实层厚度,其中压实层厚度的 Norm 值最高,为 1.08,而耕作层厚度的 Norm 值不在其 10% 范围内,所以压实层厚

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

| 参数      | 分组 | 主成分   |       |       |       |       | Norm 值 |
|---------|----|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|         |    | PC1   | PC2   | PC3   | PC4   | PC5   |        |
| 粘粒含量    | 1  | 0.76  | 0     | -0.07 | 0.15  | 0.13  | 1.58   |
| BD      | 1  | 0.74  | 0.22  | 0.33  | 0.18  | 0.18  | 1.60   |
| SOM 含量  | 1  | 0.78  | 0.27  | 0.39  | 0.13  | 0.01  | 1.72   |
| AK 含量   | 1  | 0.82  | -0.15 | -0.06 | 0.15  | 0.06  | 1.70   |
| AP 含量   | 2  | 0.25  | 0.85  | -0.01 | 0.08  | -0.03 | 1.20   |
| pH 值    | 2  | 0.07  | -0.85 | -0.02 | -0.12 | -0.10 | 1.11   |
| TN 含量   | 3  | 0.71  | 0.29  | 0.51  | -0.09 | -0.10 | 1.63   |
| TP 含量   | 3  | 0.20  | 0.17  | 0.76  | -0.07 | 0.11  | 1.24   |
| EC      | 3  | -0.02 | 0.20  | -0.75 | -0.17 | 0.07  | 1.34   |
| C/N     | 4  | 0.25  | 0.03  | -0.12 | 0.50  | 0.32  | 0.55   |
| PLP     | 4  | 0.03  | 0.14  | 0.08  | 0.86  | -0.02 | 0.98   |
| CLP     | 4  | 0.22  | 0.05  | 0.10  | 0.78  | -0.16 | 0.47   |
| PLT     | 5  | 0.04  | -0.03 | 0.22  | 0.05  | 0.86  | 0.84   |
| CLT     | 5  | 0.12  | 0.09  | -0.15 | -0.09 | 0.73  | 1.08   |
| 特征值     |    | 4.21  | 1.58  | 1.51  | 1.45  | 1.16  |        |
| 方差贡献率/% |    | 30.08 | 11.29 | 10.81 | 10.35 | 8.26  |        |
| 累计贡献率/% |    | 30.08 | 41.37 | 52.18 | 62.53 | 70.79 |        |

表 3 东北旱作区耕层质量评价初选指标之间的相关系数

Tab.3 Perason correlation coefficient matrix of plough horizon quality evaluation index in dry farming region of Northeast China

|        | SOM 含量   | TN 含量     | TP 含量     | C/N      | AP 含量     | AK 含量    | EC       | pH 值     | Clay 含量  | BD       | PLT      | CLT    | PLP      | CLP |
|--------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|-----|
| SOM 含量 | 1        |           |           |          |           |          |          |          |          |          |          |        |          |     |
| TN 含量  | 0.879 ** | 1         |           |          |           |          |          |          |          |          |          |        |          |     |
| TP 含量  | 0.448 ** | 0.473 **  | 1         |          |           |          |          |          |          |          |          |        |          |     |
| C/N    | 0.339 ** | 0.010     | 0.050     | 1        |           |          |          |          |          |          |          |        |          |     |
| AP 含量  | 0.376 ** | 0.349 **  | 0.203 *   | 0.140    | 1         |          |          |          |          |          |          |        |          |     |
| AK 含量  | 0.519 ** | 0.421 **  | 0.100     | 0.206 *  | 0.110     | 1        |          |          |          |          |          |        |          |     |
| EC     | -0.210 * | -0.294 ** | -0.302 ** | 0.05     | 0.110     | -0.11    | 1        |          |          |          |          |        |          |     |
| pH 值   | -0.172 * | -0.170    | -0.070    | -0.050   | -0.568 ** | 0.050    | -0.020   | 1        |          |          |          |        |          |     |
| 粘粒含量   | 0.467 ** | 0.391 **  | 0.172 *   | 0.177 *  | 0.236 **  | 0.589 ** | -0.040   | -0.030   | 1        |          |          |        |          |     |
| BD     | 0.782 ** | 0.704 **  | 0.373 **  | 0.315 ** | 0.346 **  | 0.527 ** | -0.222 * | -0.160   | 0.496 ** | 1        |          |        |          |     |
| PLT    | 0.120    | 0.030     | 0.245 **  | 0.183 *  | 0.010     | 0.120    | -0.030   | -0.070   | 0.172 *  | 0.235 ** | 1        |        |          |     |
| CLT    | 0.050    | 0.050     | -0.080    | 0.070    | 0.050     | 0.090    | 0.070    | -0.130   | 0.130    | 0.150    | 0.370 ** | 1      |          |     |
| PLP    | 0.185 *  | 0.060     | 0.060     | 0.247 ** | 0.178 *   | 0.140    | -0.090   | -0.186 * | 0.175 *  | 0.252 ** | 0.070    | -0.090 | 1        |     |
| CLP    | 0.313 ** | 0.219 *   | 0.050     | 0.208 *  | 0.160     | 0.250 ** | -0.193 * | -0.100   | 0.246 ** | 0.266 ** | -0.070   | -0.020 | 0.548 ** | 1   |

注:\*\* 表示差异极显著( $P < 0.01$ ), \* 表示差异显著( $P < 0.05$ )。

度进入 MSD。最终入选 MSD 的指标包括有机质含量、全氮含量、有效磷含量、粘粒含量、耕作层穿透阻力和压实层厚度共计 6 项指标。

2.1.2 最小数据集验证

为验证 MDS 指标体系评价的精度,比较基于 TDS 计算的耕层土壤质量指数(TDS-PHIQI)和基于 MDS 计算的耕层土壤质量指数(MDS-PHIQI)的一致性。结果表明 MDS-PHIQI 的均值为 0.30,变异系数为 0.35;TDS-PHIQI 的均值为 0.38,变异系数为 0.29,MDS-PHIQI 变异系数的波动幅度相对 TDS-PHIQI 较大。通过对 MDS-PHIQI 和 TDS-PHIQI 进行回归分析对 MDS 指标进行验证(图 2)。结果表明 MDS-PHIQI 与 TDS-PHIQI 呈极显著正相关关系( $R^2=0.517,n=132$ ),说明 MDS 指标能够较好代替 TDS 指标,这与前人的研究结果相一致<sup>[23]</sup>。MDS-PHIQI 与 TDS-PHIQI 之间的有效系数( $E_f$ )为 0.682,相对偏差系数( $E_r$ )为 0.128,说明 MDS-PHIQI 与 TDS-PHIQI 较为接近,且相对偏差较小,评价精度较高,可知基于 MDS 的耕层质量指

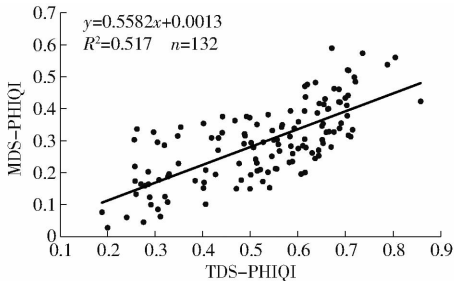


图 2 基于 MDS-PHIQI 与 TDS-PHIQI 的耕层质量指数相关性

Fig.2 Correlation of plough horizon quality index based on MDS-PHIQI and TDS-PHIQI

数可用于东北旱作区耕层质量评价。

2.2 合理耕层最小数据集指标阈值诊断

假设 MDS-PHIQI 越高,对作物生长贡献率越大<sup>[24]</sup>,据此划分研究区耕层质量指数的范围。其中 MDS-PHIQI 大于 0 小于等于 0.33 为低质量耕层,MDS-PHIQI 大于 0.33 小于等于 0.66 为中质量耕层,MDS-PHIQI 大于 0.66 小于等于 1 为高质量耕层,并以 MDS 指标(有机质含量、全氮含量、有效磷含量、粘粒含量、耕作层穿透阻力和压实层厚度)作为东北旱作区合理耕层诊断指标。结果表明,研究区低质量耕层、中质量耕层的样点比例分别为 64%、36%,无高质量耕层样点分布。因此将具备一定保水、保土、保肥能力及增产潜力的中质量耕层作为合理耕层评价的参照,并以中质量耕层中各指标的平均值为参考基准(表 4)。对于 S 型隶属函数的耕层质量指标,中质量耕层所对应各项指标的平均值可作为适宜范围的下限,指标值越大,对耕层质量提升的贡献率也越大;对于反 S 型隶属函数的耕层质量指标,中质量耕层所对应各项指标的平均值可作为适宜范围的上限,指标值越大,对耕层质量提升的贡献率越小;而对于抛物线型隶属函数的耕层质量指标,其合理耕层适宜范围由上限值和下限值构成。综合分析中质量耕层对应的各指标参数变化,并结合各指标本身的适宜范围,初步界定东北旱作区合理耕层适宜性阈值为:土壤有机质质量比大于等于 37.16 g/kg,全氮质量比大于等于 1.75 g/kg,有效磷质量比大于等于 26.38 mg/kg,粘粒质量分数为 4.60%~6.19%,耕作层穿透阻力小于等于 364.56 kPa,压实层厚度小于等于 8.18 cm。

表 4 东北旱作区合理耕层 MDS 指标阈值及适宜范围

Tab.4 Threshold value and suitable range of MDS index in reasonable tillage in dry farming region of Northeast China

| MDS 指标                        | 低质量耕层           |        | 中质量耕层         |        | 适宜范围      | 指标类别   |
|-------------------------------|-----------------|--------|---------------|--------|-----------|--------|
|                               | 变化范围            | 平均值    | 变化范围          | 平均值    |           |        |
| SOM 质量比/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 4.79~67.44      | 23.02  | 9.99~83.87    | 37.16  | ≥37.16    | 土壤生物指标 |
| TN 质量比/(g·kg <sup>-1</sup> )  | 0.34~3.06       | 1.25   | 0.40~3.70     | 1.75   | ≥1.75     | 土壤化学指标 |
| AP 质量比/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 8.30~39.40      | 22.13  | 13.00~40.70   | 26.38  | ≥26.38    | 土壤化学指标 |
| 粘粒质量分数/%                      | 1.17~11.68      | 4.60   | 2.12~15.59    | 6.19   | 4.60~6.19 | 土壤物理指标 |
| PLP/kPa                       | 121.52~1 557.00 | 611.86 | 121.41~754.14 | 364.56 | ≤364.56   | 土壤剖面特征 |
| CLT/cm                        | 5.00~17.50      | 6.96   | 5.00~12.50    | 8.18   | ≤8.18     | 土壤剖面特征 |

2.3 不同粮食产量区耕层质量及障碍因素分析

依照全国耕地类型区等级划分标准,将东北旱作区各县域单位划分为粮食高产区(大于等于 6.0 t/hm<sup>2</sup>)、中产区(4.5~6.0 t/hm<sup>2</sup>)和低产区(小于等于 4.5 t/hm<sup>2</sup>)。分析研究区粮食产量及基于最小数据集的耕层质量指数空间分布特征(图 3),结

果表明粮食高产区和中产区集中分布在黑龙江、吉林两省旱作区中部以及辽宁省旱作区北部,低产区主要分布在黑龙江省旱作区北部及吉林省、辽宁省旱作区局部地区。研究区耕层质量指数的变化范围在 0.10~0.53 之间,均值为 0.30,整体呈现出东北高、西南低的空间分布格局。黑龙江省旱作区北部

及三江平原大部耕层质量较高,而辽宁省、吉林省旱作区西部边缘地区的耕层质量整体较低,这与粮食产量的空间分布特征存在一定差异。

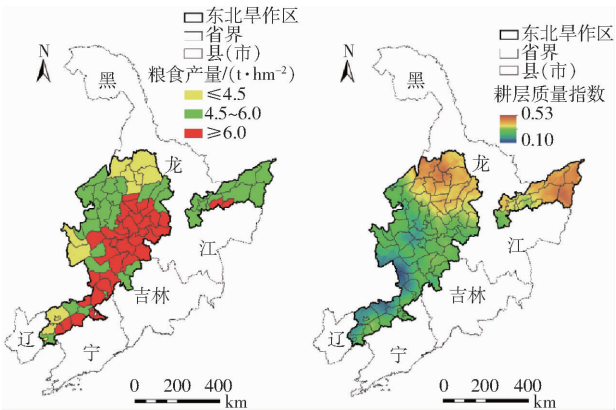


图 3 不同粮食产量区及耕层质量指数空间分布特征  
Fig. 3 Spatial pattern of grain yield and MDS-PHIQI in dry farming region of Northeast China

以合理耕层指标的阈值为参考,分析各指标在不同粮食产量区的障碍度<sup>[22]</sup>(图 4,图中不同小写字母表示区域间差异显著( $P < 0.05$ )).结果表明,各粮食产量区土壤有机质含量、全氮含量的障碍度由大到小均表现为高产区、中产区、低产区,且高产区土壤全氮含量的障碍度显著高于低产区( $P < 0.05$ )。土壤粘粒含量、耕作层穿透阻力的障碍度在低产区最大,分别为 0.20、0.38;其中低产区耕作层穿透阻力的障碍度显著高于高产区( $P < 0.05$ )。中产区土壤有效磷含量、压实层厚度的障碍度分别为 0.15、0.18,均高于其他类型区,但其在各类型区间差异不显著( $P > 0.05$ )。从不同耕层障碍类型来看,研究区粮食低产区耕层多存在结构型障碍,主要表现为耕作层穿透阻力、粘粒含量障碍度高;有机质、全氮和有效磷含量障碍度较小的特征。相对低产区而言,中产区耕层结构型障碍和养分型障碍共存,主要表现为全氮、有效磷含量和耕层穿透阻力障碍度较高;而高产区耕层总体呈现养分型障碍,且主要表现为全氮含量障碍度高,有效磷、有机质含量和其他结构性指标障碍度相对较小的特点。从研究区各指标障碍度均值的变化可知,东北旱作区耕层质

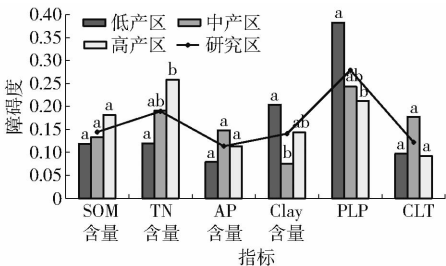


图 4 基于最小数据集的东北旱作区耕层障碍度  
Fig. 4 Obstacle degree of plough horizon based on MDS index in dry farming region of Northeast China

量的主要障碍因素为耕作层穿透阻力和土壤全氮、有机质含量,表明在现有耕地利用条件下,研究区需改进耕作技术方法、改善耕层土壤结构及肥力,从而实现耕层质量的提升<sup>[25-26]</sup>。

3 讨论

3.1 最小数据集构建

本研究以东北旱作区农田耕层为研究对象,利用多项土壤养分、环境及剖面特征指标构建了旱地耕层质量评价指标体系。通过对比 MDS 法和 TDS 法计算所得的耕层质量指数,验证了 MDS 法在研究区耕层质量评价的适用性。初选指标共 14 个,经 MDS 法筛选后的指标包含有机质含量、全氮含量、有效磷含量、粘粒含量、耕作层穿透阻力和压实层厚度 6 项指标。指标筛选过滤率达到 50% 以上。国内外基于 MDS 建立的土壤质量评价指标体系中入选 MDS 频率较高的指标包括土壤容重、粘粒含量、pH 值、全氮含量、粉粒含量、砂粒含量、有机质含量和孔隙度、有效磷含量等<sup>[27]</sup>。而本研究中有有机质含量、全氮含量、有效磷含量、粘粒含量 4 个指标进入 MDS,这与大多数国内外研究结果一致<sup>[28]</sup>,但前人研究中入选频率较高的土壤容重、pH 值等指标未进入 MDS。这主要由于在 MDS 指标筛选过程中容重与有机质含量进入同一组,有机质含量的 Norm 值最大且与同组的其余各项指标高度相关,因此仅有机质含量入选 MDS。此外,区域尺度和样本量也是影响 MDS 指标构成的重要因素<sup>[29]</sup>。在田块尺度或小样本量的条件下,因受较多外在因素的影响,容重、pH 值与有机质含量并不一定存在较高的相关性,所以在评价过程中以上指标入选频率较高;而本研究的区域尺度及样本量均较大,土壤容重与土壤穿透阻力、pH 值与有效磷含量等指标本身存在较强的共线性<sup>[30]</sup>,因此二者均未进入 MDS。本研究耕层质量评价指标中特征值大于 1 的 5 个主成分累计贡献率虽然达到了 70.79%,但同时说明仍有其他指标没有纳入初选指标体系,未考虑指标的筛选及其对区域耕层质量的影响。在指标组成上,本研究也与前人的研究成果存在一定差异,主要体现在耕层的剖面特征指标上。前人在耕层质量评价指标的选取过程中更多关注土壤理化参数,而忽略了耕层的垂直构造(结构)特征<sup>[14]</sup>。但农田耕层质量不仅受表层土壤肥力的影响,耕层构造特征也是开展旱作农田合理耕层构建的重要参考指标。因此,根据 MDS 指标的确定方法,耕作层穿透阻力、压实层厚度均进入 MDS,且在后续耕层质量监控过程中应重点关注上述几项指标。

3.2 合理耕层指标阈值及障碍度分析

本研究以中质量耕层各项指标的平均值作为合理耕层评价的参考基准,探讨了东北旱作区合理耕层的指标阈值。结果表明研究区 MDS 指标的适宜性阈值为:土壤有机质质量比大于等于 37.16 g/kg,全氮质量比大于等于 1.75 g/kg,有效磷质量比大于等于 26.38 mg/kg,粘粒质量分数为 4.60% ~ 6.19%,耕作层穿透阻力小于等于 364.56 kPa,压实层厚度小于等于 8.18 cm。其中土壤有机质含量、全氮含量的阈值与韩晓增等<sup>[1]</sup>对松嫩平原中部及三江平原地区的研究结果一致,但高于前人针对红壤、紫色土坡耕地合理耕层有机质含量的下限值,这主要是因为东北旱作区的中质量耕层样点主要分布于松嫩平原,以中质量耕层为参照的土壤有机质含量整体高于南方坡耕地<sup>[31-32]</sup>。从耕层的剖面特征来看,研究区耕作层穿透阻力的适宜性阈值与关中平原、皖北地区及辽宁棕壤区的研究结果较为一致,说明该指标的阈值具有合理性<sup>[33-34]</sup>。不同粮食产量区耕层质量的差异能够反映出人类活动(土地利用强度、农机投入、化肥投入)对耕层质量的影响,本研究的结果表明粮食中、高产区的耕层质量指数以中等水平为主,耕作层穿透阻力、全氮含量障碍度高,耕层结构障碍和养分限制共存。这主要是由于长期高投入高产出的农业发展模式,导致耕地高强度超负荷利用,从而出现基础地力下降、耕层退化等现象<sup>[2]</sup>。因此,改善耕层结构,提升耕层土壤肥力,保持增产潜力是粮食产量中、高产区合理耕层构建

的主要目标。此外,本研究中的粮食产量数据是各县市统计的面状数据,可能与以点位数据划分的结果存在一定误差,今后的研究中需考虑将作物遥感估产数据与耕层质量相结合,实现点对点的分析,从而提升区域耕层质量评价指标阈值诊断的精度。

4 结论

(1)基于最小数据集(MDS)筛选出的土壤有机质含量、全氮含量、有效磷含量、粘粒含量、耕作层穿透阻力和压实层厚度 6 项指标,能够替代全部初选指标对东北旱作区耕层质量进行评价。东北旱作区耕层质量指数分布在 0.10 ~ 0.53 之间,均值为 0.30,整体处于低和中等水平。

(2)东北旱作区合理耕层指标参数的适宜范围分别为:有机质质量比大于等于 37.16 g/kg,全氮质量比大于等于 1.75 g/kg,有效磷质量比大于等于 26.38 mg/kg,粘粒质量分数为 4.60% ~ 6.19%,耕作层穿透阻力小于等于 364.56 kPa,压实层厚度小于等于 8.18 cm。

(3)东北旱作区不同粮食产量区耕层障碍类型存在差异,低产区耕层多存在结构型障碍,中产区耕层结构型障碍和养分限制共存,而高产区耕层主要表现为养分限制型障碍。从区域整体来看,研究区耕层质量的主要障碍因素为耕作层穿透阻力、土壤全氮含量和有机质含量,需针对上述指标采取针对性的耕作和培肥措施。

参 考 文 献

[1] 韩晓增,邹文秀,陆欣春,等. 旱作土壤耕层及其肥力培育途径[J]. 土壤与作物,2015,4(4):145-150.  
HAN Xiaozeng, ZOU Wenxiu, LU Xinchun, et al. The soil cultivated layer in dryland and technical patterns in cultivating soil fertility[J]. Soil and Crop, 2015, 4(4): 145-150. (in Chinese)

[2] 郑洪兵,齐华,刘武仁,等. 玉米农田耕层现状、存在问题及合理耕层构建探讨[J]. 耕作与栽培,2014,6(5):39-42.  
ZHENG Hongbing, QI Hua, LIU Wuren, et al. Present and problem of tillage layer of maize cropland and discussion of optimum tillage layer[J]. Tillage and Cultivation, 2014, 6(5): 39-42. (in Chinese)

[3] 樊亚男,姚利鹏,瞿明凯,等. 基于产量的稻田肥力质量评价及障碍因子区划——以进贤县为例[J]. 土壤学报,2017,54(5):1157-1169.  
FAN Ya'nan, YAO Lipeng, QU Mingkai, et al. Yield-based soil fertility quality assessment and constraint facctor based zoning of paddy soil—a case study of Jinxian Country[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(5): 1157-1169. (in Chinese)

[4] 杨洪钧,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)

[5] 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)

[6] 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.  
JIN Huifang, SHI Dongmei, CHEN Zhengfa, et al. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7): 155-164. (in Chinese)

[7] SANTOS-FRANCÉS F, MARTÍNEZ-GRAÑA A, ÁVILA-ZARZA C, et al. Comparison of methods for evaluating soil quality of semiarid ecosystem and evaluation of the effects of physico-chemical properties and factor soil erodibility Northern Plateau, Spain

- [J]. *Geoderma*, 2019, 354(1): 113872.
- [8] ASKARI M S, O'ROURKE S M, NICHOLAS M. Evaluation of soil quality for agricultural production using visible-near-infrared spectroscopy[J]. *Geoderma*, 2015, 243–244: 80–91.
- [9] TURAN N D, DENGIZ O, ZKAN B. Spatial assessment and mapping of soil quality index for desertification in the semi-arid terrestrial ecosystem using MCDM in interval type-2 fuzzy environment[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 164: 104933.
- [10] 高旺盛, 陈源泉, 石彦琴, 等. 中国集约高产农田生态健康评价方法及指标体系初探[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(10): 131–137.  
GAO Wangsheng, CHEN Yuanquan, SHI Yanqin, et al. Constructing an index system for ecological health evaluation of croppingsystem in China main food production areas[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(10): 131–137. (in Chinese)
- [11] 陈正发, 史东梅, 金慧芳, 等. 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 Zhengfa, SHI Dongmei, JIN Huifang, et al. Evaluation on cultivated-layer soil quality of sloping farmland in Yunnan based on soil management assessment framework (SMAF) [J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(3): 256–267. (in Chinese)
- [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): 1326–1333.  
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] CHAHAL I, VAN EERD L L. Quantifying soil quality in a horticultural-cover cropping system[J]. *Geoderma*, 2019, 352: 38–48.
- [14] 宋鸽, 史东梅, 朱红业, 等. 不同耕作措施对红壤坡耕地耕层质量的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3): 610–622.  
SONG Ge, SHI Dongmei, ZHU Hongye, et al. Effects of tillage measures on quality of cultivated-layer in red soil slope farmland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(3): 610–622. (in Chinese)
- [15] 卓志清, 兴安, 孙忠祥, 等. 东北旱作区农业生态系统协同发展与权衡分析[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(6): 892–902.  
ZHUO Zhiqing, XING An, SUN Zhongxiang, et al. Synergies and trade-offs of agro-ecosystem in dry-farming areas in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(6): 892–902. (in Chinese)
- [16] 孙忠祥, 李勇, 赵云泽, 等. 旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 255–262.  
SUN Zhongxiang, LI Yong, ZHAO Yunze, et al. Analysis on spatial distribution characteristics and driving forces of soil organic carbon density in dry farming region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(1): 255–262. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190128&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190128&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.028. (in Chinese)
- [17] ZHUO Zhiqing, XING An, CAO Meng, et al. Identifying the position of the compacted layer by measuring soil penetration resistance in a dryland farming region in Northeast China[J]. *Soil Use and Management*, 2020, 36(3): 494–506.
- [18] 农用地质量分等规程: GB/T 28407—2012[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.
- [19] 卓志清, 兴安, 孙忠祥, 等. 东北旱作区粮食产量冷热点格局及耕层特征差异[J]. *土壤通报*, 2019, 50(4): 154–162.  
ZHUO Zhiqing, XING An, SUN Zhongxiang, et al. Cold and hot spot patterns of grain yield and soil properties of plough horizon and plow pan in the dry farming region of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(4): 904–912. (in Chinese)
- [20] 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 area based on MDS–TOPSIS model[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(12): 5484–5492. (in Chinese)
- [21] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part 1: a discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282–290.
- [22] 匡丽花, 叶英聰, 赵小敏, 等. 基于改进 TOPSIS 方法的耕地系统安全评价及障碍因子诊断[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 1627–1641.  
KUANG Lihua, YE Yingcong, ZHAO Xiaomin, et al. Evaluation and obstacle factor diagnosis of cultivated land system security in Yingtan City based on the improved TOPSIS method[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9): 1627–1641. (in Chinese)
- [23] 乔云发, 钟鑫, 苗淑杰, 等. 基于最小数据集的东北风沙土农田耕层土壤质量评价指标[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 132–138.  
QIAO Yunfa, ZHONG Xin, MIAO Shujie, et al. Evaluation indicators of soil quality in plough layer of aeolian sand land in Northeast China based on minimum data set[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(4): 132–138. (in Chinese)
- [24] 张银平, 杜瑞成, 刁培松, 等. 机械化生态沃土耕作模式提高土壤质量及作物产量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 33–38.  
ZHANG Yinping, DU Ruicheng, DIAO Peisong, et al. Mechanical and ecological tillage pattern improving soil quality and

- crop yields[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 33–38. (in Chinese)
- [25] DAS B, CHAKRABORTY D, SINGH V K, et al. Evaluating fertilization effects on soil physical properties using a soil quality index in an intensive rice-wheat cropping system[J]. Pedosphere, 2016, 26(6): 887–894.
- [26] MASTO R E, CHHONKAR P K, SINGH D, et al. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid inceptisol[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 118(1–4): 130–142.
- [27] 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 dataset for soil quality assessment based on land use change[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(1): 16–25. (in Chinese)
- [28] 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.
- [29] TESFAHUNE G B, TAMENE L, VLEK P L G. Evaluation of soil quality identified by local farmers in Mai-Negus catchment, northern Ethiopia[J]. Geoderma, 2011, 163(3–4): 209–218.
- [30] 卓志清, 李勇, 兴安, 等. 东北旱作区土壤碳氮磷生态化学计量特征及其影响因素[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 259–268, 336.  
ZHUO Zhiqing, LI Yong, XING An, et al. Characteristic of ecological stoichiometry of soil C, N and P and its influencing factors in dry farming region of Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 259–268, 336. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20191030&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191030&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.030. (in Chinese)
- [31] 史东梅, 蒋光毅, 蒋平, 等. 土壤侵蚀因素对紫色丘陵区坡耕地耕层质量影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 270–279.  
SHI Dongmei, JIANG Guangyi, JIANG Ping, et al. Effects of soil erosion factors on cultivated-layer quality of slope farmland in purple hilly area[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 270–279. (in Chinese)
- [32] 刘志鹏, 史东梅, 金慧芳, 等. 红壤坡耕地耕层土壤质量特征及障碍因素研究[J]. 中国土壤与肥料, 2018, 6(3): 7–13.  
LIU Zhipeng, SHI Dongmei, JIN Huifang, et al. Soil quality and its limitation factors of slope farmland plough layer of red soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018, 6(3): 7–13. (in Chinese)
- [33] 葛畅, 刘慧琳, 张世文, 等. 耕作方式和土壤类型对皖北旱作农田土壤紧实度的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 89–94.  
GE Chang, LIU Huilin, ZHANG Shiwen, et al. Effect of tillage methods and soil types on characteristics of soil compaction in rainfed farmland in northern Anhui Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 89–94. (in Chinese)
- [34] 石磊, 王娟铃, 许明祥, 等. 陕西省农田土壤紧实度空间变异及其影响因素[J]. 西北农业学报, 2016, 25(5): 770–778.  
SHI Lei, WANG Juanling, XU Mingxiang, et al. Spatial variability and influence factors of cropland soil compaction in Shaanxi Province[J]. Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinic, 2016, 25(5): 770–778. (in Chinese)

(上接第 311 页)

- [34] 杨小振, 张显, 马建祥, 等. 滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 109–118.  
YANG Xiaozhen, ZHANG Xian, MA Jianxiang, et al. Effects of drip irrigation and fertilization on growth, yield and quality of watermelon in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 109–118. (in Chinese)
- [35] 李建明, 于雪梅, 王雪威, 等. 基于产量品质和水肥利用效率西瓜滴灌水肥制度优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 75–83.  
LI Jianming, YU Xuemei, WANG Xuwei, et al. Optimization of drip irrigation water and fertilizer system for watermelon based on yield, quality and water and fertilizer use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 75–83. (in Chinese)
- [36] 王新, 马富裕, 刁明, 等. 不同施氮水平下加工番茄植株生长和氮素积累与利用率的动态模拟[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1043–1050.  
WANG Xin, MA Fuyu, DIAO Ming, et al. Effects of different nitrogen application levels on plant growth, nitrogen accumulation and utilization efficiency of tomato[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1043–1050. (in Chinese)
- [37] 刘志刚, 任红松, 王岩萍, 等. 不同施氮处理对设施甜瓜生长发育、产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2019, 32(10): 36–41.  
LIU Zhigang, REN Hongsong, WANG Yanping, et al. Effects of different nitrogen application treatments on growth, yield and quality of greenhouse muskmelon[J]. China Cucumis and Vegetables, 2019, 32(10): 36–41. (in Chinese)
- [38] 奚辉, 李国雷, 陶安安, 等. 滴灌施用有机液肥对红美人柑橘园土壤环境、柑橘产量、品质和经济效益的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 4(11): 670–677.  
XI Hui, LI Guolei, TAO Anan, et al. Effects of drip irrigation on soil environment, yield, quality and economic efficiency of citrus in Red Beauty citrus orchard[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 4(11): 670–677. (in Chinese)
- [39] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924.
- [40] 戴健, 王朝辉, 李强, 等. 氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 956–965.  
DAI Jian, WANG Chaohui, LI Qiang, et al. Effects of nitrogen fertilizer rates on dryland winter wheat yield and soil nitrate nitrogen changes during the summer fallow period[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 956–965. (in Chinese)