

东北黑土区秸秆覆盖免耕坡耕地 不同坡位土壤质量评价

张何普¹, 杨庆楠², 徐金忠², 肖洋¹

(1. 黑龙江大学 现代农业与生态环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江省水土保持实验室, 黑龙江 哈尔滨 150070)

摘要: [目的] 评价东北黑土区坡耕地秸秆覆盖免耕下不同坡位的土壤质量特征, 为该区坡耕地土壤质量调控和生态修复提供科学依据。[方法] 采用主成分分析法(PCA)和聚类分析法(CA), 分别建立东北黑土区秸秆覆盖免耕(NT)坡耕地和传统耕作(CK)坡耕地土壤质量评价最小数据集(MDS), 计算最小数据集土壤质量指数(SQI-PCA, SQI-CA), 通过与总数据集土壤质量指数(SQI-TDS)对比分析, 筛选出最适合的最小数据集土壤质量指数(SQI-MDS), 并对田间试验区土壤质量进行评价分析。[结果] ①试验区坡耕地土壤质量评价最小数据集由总孔隙度、pH值、有机质、全钾和有效磷组成。②主成分分析最小数据集土壤质量指数(SQI-PCA)与总数据集土壤质量指数(SQI-TDS)的纳什有效系数和相关系数均高于聚类分析最小数据集土壤质量指数(SQI-CA), 因此更适合使用主成分分析最小数据集(MDS-PCA)代替总数据集(TDS)进行土壤质量评价。③通过主成分分析最小数据集(SQI-PCA)进行土壤质量评价得出, 试验区秸秆覆盖免耕(NT_{坡中}, 0.661)土壤质量最优, 传统耕作(CK_{坡上}, 0.472)土壤质量最差。④制约NT处理坡耕地土壤质量的主要障碍因子为容重(0.156)和总孔隙度(0.132), CK处理坡耕地土壤质量的主要障碍因子为全磷(0.151)和速效钾(0.159)。[结论] 秸秆覆盖免耕能够有效提高东北黑土区坡耕地土壤质量, 并减少土壤养分流失与再分布。

关键词: 秸秆覆盖; 坡耕地; 土壤质量评价; 最小数据集; 东北黑土区

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2025)03-0069-10 **中图分类号:** S158, S152.4⁺5, S157.2

文献参数: 张何普, 杨庆楠, 徐金忠, 等. 东北黑土区秸秆覆盖免耕坡耕地不同坡位土壤质量评价[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 69-78. Zhang Hepu, Yang Qingnan, Xu Jinzhong, et al. Soil quality evaluation at different slope position of no-tillage land under straw mulch in black soil region of northeast China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 69-78. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.034; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.034.

Soil quality evaluation at different slope position of no-tillage land under straw mulch in black soil region of northeast China

Zhang Hepu¹, Yang Qingnan², Xu Jinzhong², Xiao Yang¹

(1. College of Modern Agriculture and Ecological Environment, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China; 2. Heilongjiang Academy of Hydraulic Sciences, Soil and Water Conservation Research Institute, Harbin, Heilongjiang 150070, China)

Abstract: [Objective] The soil quality characteristics of different slope positions under straw mulching and no-tillage in the black soil region of northeastern China were evaluated to provide a scientific basis for soil quality control and ecological restoration. [Methods] Principal component analysis (PCA) and cluster analysis (CA) were used to establish a minimum data set (MDS) for soil quality evaluation of no-tillage with straw mulching (NT) and conventional tillage (CK) sloping farmlands in the black soil region of northeast China. The soil quality indices (SQI-PCA, SQI-CA) of the minimum dataset were calculated, and the most suitable minimum dataset soil quality index (SQI-MDS) was selected by comparison with the total dataset soil quality index (SQI-TDS).

收稿日期: 2025-01-10

修回日期: 2025-02-24

采用日期: 2025-02-24

资助项目: 国家重点研发计划子课题“漫川漫岗水蚀区土壤侵蚀防治的保护性利用模式”(2021YFD150080505)

第一作者: 张何普(1999—), 男(汉族), 河北省沧州市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: 1287354588@qq.com。

通信作者: 杨庆楠(1988—), 女(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持等方面的研究。Email: 780423258@qq.com。

Furthermore, the soil quality in the field test area was evaluated and analyzed. [Results] ① The minimum data set for soil quality evaluation of sloping farmland in the test area was composed of total porosity, pH, organic matter, total potassium, and available phosphorus. ② The Nash coefficient and correlation coefficient of soil quality index in the minimum data set obtained using principal component analysis and the soil quality index in the total data set were higher than the soil quality index in the minimum data set obtained using cluster analysis, indicating that it is more suitable to use the minimum data set determined by using principal component analysis to replace the total data set for soil quality evaluation. ③ According to the minimum data set obtained using principal component analysis, the soil quality was the best in the straw-covered no-till slope (0.661), with the worst soil quality observed in the traditional tillage slope (0.472). ④ The main obstacles to soil quality under the NT treatment were bulk density (0.156) and total porosity (0.132), while the main obstacles in the CK treatment were total phosphorus (0.151) and available potassium (0.159). [Conclusion] No-tillage with straw mulch can effectively improve soil quality and reduce soil nutrient loss and redistribution on cultivated sloping land in the black soil region of northeast China.

Keywords: straw mulching; sloping land; soil quality evaluation; minimum data set; black soil region of northeast China

黑土是拥有黑色或暗黑色腐殖质表土层的土地,因其具有肥力高、结构性好、适于作物生长的特点,被誉为“耕地中的大熊猫”。东北黑土区是中国重要的粮食生产基地,生产了全国1/4的粮食,是中国粮食安全的“压舱石”。然而,黑土区旱作耕地86%的耕地为坡度 $>0.5^\circ$ 的坡耕地,具有坡缓坡长、汇水面积大的特点^[1-2],加之该区农田主要以顺垄耕作为主,加快了土壤侵蚀的发生。基于黑土地水土流失监测站点的长期监测^[2],黑土地变薄速率为2~3 mm/a,平均侵蚀强度为2 000~3 000 t/(km²·a)。已有研究^[1]显示,黑土层每变薄1 cm或土壤有机质每降低1%,玉米则减产约100 kg/hm²。为了保护和利用好黑土地,防治土地退化,秸秆覆盖保护性耕作已成为实现耕地水土保持的根本途径之一^[3]。近年来秸秆覆盖免耕在黑土区起到的重要作用已得到充分证明,以秸秆覆盖地表少免耕为核心的“梨树模式”已成为东北黑土区重要的保护性耕作模式^[4]。目前对于东北黑土区秸秆覆盖免耕下坡耕地土壤的研究多集中于对土壤物理结构、养分含量、作物产量等单一指标的描述,而对土壤质量综合效益评价研究仍显不足,制约了该技术综合效益的科学量化和优化推广。

土壤质量评价是通过对土壤的物理、化学和生物等特性来反映土壤综合属性的量化表达^[5],是多种土壤指标共同作用的结果,无法使用单一指标进行准确反映。土壤质量指数(soil quality index, SQI)因具有定量灵活性而常被用于反映土壤质量^[6]。其主要计算分析方法有主成分分析法^[7]、灰度关联分析法^[8]和隶属度函数法等^[9],如石海龙等^[9]使用非线性隶属度函数模型对喀斯特槽谷区侵蚀坡面的土壤质量进行评价;李娟等^[10]使用主成分分析法对紫色

土丘陵区进行土壤质量评价。虽然土壤物理、生物和化学性质均可用于土壤质量评价,但考虑到测试方法的难易以及指标的代表性,并且需要根据不同的需求有针对性地选择代表性指标。从大量土壤参数中筛选出相对独立影响土壤质量的敏感性指标建立最小数据集(minimum data set, MDS),使用最小数据集(MDS)来对土壤质量进行综合评价,并根据权重和标准化得分计算土壤质量指数(SQI)。基于此,本研究以东北黑土区5°坡耕地为研究对象,设置秸秆覆盖免耕处理,以传统耕作为对照。根据《耕地地力调查与质量评价技术规程(NY/T 1634—2008)》选择10个指标作为土壤质量评价因子并建立总数据集(TDS),将总数据集(TDS)进行主成分分析和聚类分析分别得到土壤质量因子最小数据集(MDS),并使用隶属度函数模型对两种方法得到的最小数据集(MDS)进行土壤质量评价,并对两种方法得到的SQI指数进行对比检验,探讨不同方法对东北黑土区秸秆覆盖免耕坡耕地土壤质量评价的合理性;同时,引入障碍因子诊断模型,进一步明确制约坡耕地不同坡位土壤质量的主要障碍因子,以期抑制黑土区坡耕地土壤侵蚀、耕层退化,促进秸秆覆盖免耕模式推广提供科学依据和参数支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于黑龙江省海伦市,地处松嫩平原黑土地带中部,属温带大陆性季风气候,年均气温1.5℃,年有效积温($\geq 10^\circ\text{C}$)为2 450℃,年均日照时数2 600~2 800 h,无霜期125 d,1961—2021年均降雨量为567 mm,降雨主要集中在6—8月。地形为典

型漫川漫岗,地形坡度 $3^{\circ}\sim 8^{\circ}$,平均海拔240 m,主要土地利用类型为林地和耕地,分别占区域总面积的13.1%和63.4%。坡耕地试验区位于海伦市前进乡光荣村($47^{\circ}26'17''\text{N}$, $126^{\circ}38'56''\text{E}$),面积为 $600\text{ m}\times 100\text{ m}$,垄向为东西垄向,坡向为东西坡向,海拔为228~255 m,坡度 5° 。土壤为第四纪黄土状亚黏土发育成的典型黑土,黑土层平均厚度约为30 cm,土壤分层明显,土壤质地为黏壤土,0—20 cm耕层沙粒、粉粒、黏粒含量分别为31.6%,30.8%,37.6%^[11]。试验区水土流失现象严重,观测年传统耕作试验区土壤侵蚀厚度为3.52 mm/a,秸秆覆盖免耕试验区土壤侵蚀厚度为0.87 mm/a。耕作模式以玉米—大豆轮作为主,耕作方式为顺垄耕作,观测年种植作物为大豆,大豆品种为巴211(国审豆20170006)。

1.2 样品采集与数据测定

试验分别设秸秆覆盖免耕(NT)处理和传统耕作(CK)处理试验区,各50垄。秸秆覆盖免耕处理为秋收时使用雷沃谷神GM100联合收割机一次作业将秸秆打碎并直接覆盖于地表,次年使用2BMFJ系列多功能免耕覆秸精量播种机在秸秆覆盖地表的情况下一次性完成精量播种、施肥和镇压作业,除播种外全年不扰动土壤,用除草剂控制杂草。传统耕作作为当地传统耕作模式,秋收后人工将秸秆全部移除,次年旋耕起垄,顺垄耕作,以传统耕作作为对照。每个处理根据海拔将试验区分为坡上(246~255 m)、坡中(237~246 m)、坡下(228~237 m)小区。采样于2023年5—9月每月初进行,共采样5次,采样时每个小区使用对角线取样法选择3个采样点,每个样点使用 100 cm^3 环刀采集3个0—10 cm深度下原状土作为重复,用于土壤物理结构测定。在环刀采样点旁采取1 kg左右土壤,将同一小区土样均匀混合为1个样品,并用密封袋封存送至实验室用于土壤养分含量测定。

选择土壤容重、总孔隙度、pH值、有机质、全氮、全磷、全钾、水解氮、有效磷、速效钾,10个指标作为土壤质量评价因子,分析秸秆覆盖免耕对坡耕地土壤质量的影响。其中容重和总孔隙度采用环刀法测量^[12];pH值采用土水比1:1电极法测量;有机质含量采用重铬酸钾氧化法测量;全氮含量采用半微量开氏法测量;全磷含量采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测量;全钾含量采用氢氧化钠浸提—火焰光度法测量;水解氮含量采用碱解扩散法测量;有效磷含量采用碳酸氢钠提取—钼锑抗比色法测量;速效钾含量采用乙酸铵浸提—火焰光度法测量^[13]。

1.3 最小数据集的构建

1.3.1 主成分分析构建最小数据集 对不同坡位的土壤理化指标进行主成分分析(PCA),提取特征值

≥ 1 的主成分,并分别计算各组指标的Norm值。将指标荷载 ≥ 0.5 的指标设为同一组,若某指标在各个主成分中荷载均 < 0.5 ,则将其并入荷载值最高的一组,若某指标在多个主成分中荷载均 ≥ 0.5 ,则将其并入相关度最低的一组。选择各组中达到最大Norm值90%范围的指标,进一步进行相关性分析,若相关性高则最大Norm值指标进入最小数据集(MDS),若相关度低则同组指标均进入最小数据集^[14]。本试验选择相关系数 > 0.6 即认为相关性高。

Norm值表示指标所在主成分的综合荷载,Norm值越大则表示该指标解释综合信息能力越强,计算公式为:

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

式中: N_{ik} 为第*i*个指标在特征值大于1的前*k*个主成分的Norm值; u_{ik} 表示第*i*个指标在第*k*个主成分的荷载; e_k 表示第*k*个主成分的特征值。

1.3.2 聚类分析法构建最小数据集 使用SPSS 25.0对不同坡位的土壤理化指标进行系统聚类分析,以Euclidean为测量距离,根据分析结果中谱系图各项指标进行分组,挑选每组中与其他指标相关性最高的指标作为代表,并选入最小数据集。

1.4 土壤质量评价方法

通过隶属度函数模型确定指标隶属度,将土壤指标实测值转换为0~1的分值。隶属度函数一般分为“S”型、反“S”型和抛物线型^[9,14-16](表1)。

通过将各个指标进行主成分分析得到各个指标的权重,结合指标得分计算土壤质量指数(SQI),计算公式为:

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

式中:SQI越大则表示土壤质量越好;*n*表示指标数量; W_i 表示指标权重; S_i 表示指标得分。

1.5 土壤质量评价精度验证

利用纳什有效系数(NSE)评价基于主成分分析最小数据集(PCA-MDS)和聚类分析最小数据集(CA-MDS)土壤质量评价精度验证^[17]。计算公式为:

$$E = 1 - \frac{\sum (R_{\text{TDS}} - R_{\text{MDS}})^2}{\sum (R_{\text{TDS}} - \bar{R}_{\text{TDS}})^2} \quad (3)$$

式中: E 表示纳什有效系数; R_{TDS} 表示基于总数据集得到的土壤质量指数; \bar{R}_{TDS} 表示基于总数据集得到的土壤质量指数平均值; R_{MDS} 表示基于最小数据集得到的土壤质量指数。纳什有效系数 E 取值负无穷到1,越接近1则表示基于MDS计算土壤质量指数与基准值越接近,精度越高,越远离1则表示计算结果越不可信。

表 1 土壤质量评价指标隶属度函数

Table 1 Subordinate function of soil quality evaluation index

隶属度函数类型	计算公式	参数表达	评价指标	函数意义
S型 隶属度函数	$S(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq a_{\max}) \\ \frac{x - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} & (a_{\min} < x < a_{\max}) \\ 0 & (x \leq a_{\min}) \end{cases}$	$S(x)$ 表示隶属度函数; x 表示指标实测值; a_{\max}, a_{\min} 分别表示所测指标的 最大值和最小值	土壤总孔隙度、 有机质、全氮、全 磷、全钾、水解氮、 有效磷、速效钾	指标在一定范围 内与土壤质量呈 现正相关
反S型 隶属度函数	$S(x) = \begin{cases} 1 & (x \leq a_{\min}) \\ \frac{x - a_{\max}}{a_{\min} - a_{\max}} & (a_{\min} < x < a_{\max}) \\ 0 & (x \geq a_{\max}) \end{cases}$	$S(x)$ 表示隶属度函数; x 表示指标实测值; a_{\max}, a_{\min} 分别表示所测指标的 最大值和最小值	土壤容重	指标在一定范围 内与土壤质量呈 现负相关
抛物线型 隶属度函数	$S(x) = \begin{cases} 1 & (b_{\max} \geq x \geq b_{\min}) \\ \frac{x - a_{\min}}{b_{\min} - a_{\min}} & (a_{\min} < x < b_{\min}) \\ \frac{x - a_{\max}}{b_{\max} - a_{\max}} & (a_{\max} > x > b_{\max}) \\ 0 & (x \geq a_{\max} \text{ 或 } x \leq a_{\min}) \end{cases}$	$S(x)$ 表示隶属度函数; x 表示指标实测值; a_{\max}, a_{\min} 分别表示所测指标的 最大值和最小值; b_{\max}, b_{\min} 分别表示最适值的 上下界限	土壤pH值	指标对土壤功能 有最佳适宜范围, 偏离程度越大, 对土壤质量影响 越小

1.6 障碍因子计算模型

通过使用障碍因子诊断模型,明确秸秆覆盖免耕处理和传统耕作处理下影响土壤质量的障碍因子,对全面了解秸秆覆盖免耕对坡耕地土壤的改善机制,进一步恢复坡耕地土壤质量具有重要意义^[18-19],计算公式为:

$$M_j = \frac{P_j W_i}{\sum_{j=1}^n P_j W_i} \quad (4)$$

式中: M_j 表示指标障碍度; P_j 表示土壤指标得分与隶属度1的差值, $P_j = 1 - S_j$ 其数字越大对土壤质量越不利; S_j 表示第j个指标的得分; W_j 表示指标对总体的贡献率,即为权重。使用等距法将指标障碍度分为3个等级:轻度障碍(0~0.1)、中度障碍(0.1~0.2)和重度障碍(>0.2)。

2 结果与分析

2.1 土壤质量评价指标统计量

试验区坡耕地土壤质量指标统计结果详见表2。变异系数表示土壤指标空间差异性和敏感性,试验结果显示,试验区土壤容重、总孔隙度、pH值敏感程度较低,接近不敏感水平($C_v < 0.1$),其他土壤指标总体上处于中低敏感水平($C_v < 1$)。秸秆覆盖免耕可显著提高土壤容重、有机质、全氮和速效钾;但会使土壤总孔隙度显著降低。秸秆覆盖免耕使坡下全氮和有效磷显著低于坡中和坡上;传统耕作使坡上有机质、全氮和水解氮含量均显著低于坡中和坡下。综上所述,秸秆覆盖免耕坡上、坡中土壤优于坡下;传

统耕作坡下土壤优于坡中、坡上。

2.2 最小数据集确立

2.2.1 基于主成分分析法建立最小数据集 对总数据集(TDS)进行主成分分析,基于分析结果(表3),秸秆覆盖免耕和传统耕作处理下质量评价指标中含有3个特征值>1的主成分,累积方差贡献为93.935%(>85%),满足信息提取的要求。将同一主成分中荷载 ≥ 0.5 的土壤指标分为1组,共分为3组。 $X_1, X_2, X_5, X_6, X_8, X_{10}$ 进入1组,其中 X_2 与 $X_1(-0.988)$, $X_5(-0.636)$, $X_6(-0.786)$, $X_8(-0.629)$, $X_{10}(0.919)$ 均相关性较高(表4),且Norm值最高,因此将 X_2 纳入最小数据集。 X_4, X_7 进入2组, X_4 与 $X_7(-0.042)$ 相关性较弱,因此将 X_4, X_7 纳入最小数据集。 X_3, X_9 进入3组, X_9 与 $X_3(0.299)$ 相关性较弱,因此将 X_3, X_9 纳入最小数据集。最终确定 X_2, X_3, X_4, X_7, X_9 这5个指标组成主成分分析最小数据集(MDS-PCA)。

2.2.2 基于聚类分析法建立最小数据集 基于聚类分析法中R型聚类,将TDS中10个评价指标进行了分类。

由图1可以看出,在聚合水平为0.3时,指标可以明显被分为5组。 X_4, X_5, X_8 为第1组,其中 X_4 与 $X_5(0.986)$, $X_8(0.928)$ 相关性均较高,因此 X_4 进入最小数据集; X_6, X_9 为第2组,其中 X_6 与 $X_9(0.775)$ 相关性较高,因此 X_6 进入最小数据集; X_1, X_3, X_{10} 为第3组,其中 X_1 与 $X_3(0.714)$, $X_{10}(0.948)$ 均相关性均较高,因此 X_1 进入最小数据集; X_2 和 X_7 分别为第4,5组,并进入MDS。最终确定 X_1, X_2, X_4, X_6, X_7 这5个指标组成聚类分析最小数据集(MDS-CA)。

表 2 试验区坡耕地土壤质量评价指标统计
Table 2 Statistics of soil quality evaluation at sloping farmland of test area

指标	秸秆覆盖免耕(NT)			传统耕作(CK)		
	坡上	坡中	坡下	坡上	坡中	坡下
X ₁	1.29±0.07 ^a	1.28±0.04 ^a	1.31±0.08 ^a	1.15±0.11 ^b	1.17±0.11 ^b	1.18±0.13 ^b
C _v	0.06	0.03	0.06	0.09	0.09	0.11
X ₂	48.24±5.54 ^b	48.39±4.25 ^b	48.08±5.66 ^b	55.02±3.52 ^a	54.01±4.95 ^a	54.53±4.42 ^a
C _v	0.11	0.09	0.12	0.06	0.09	0.08
X ₃	6.3±0.4 ^a	6.6±0.6 ^a	6.6±0.5 ^a	6.3±0.3 ^a	6.0±0.6 ^a	6.3±0.4 ^a
C _v	0.07	0.09	0.08	0.04	0.10	0.06
X ₄	79.5±9.4 ^{ab}	88.2±3.6 ^a	68.4±4.5 ^b	43.3±9.1 ^c	69.2±11.7 ^b	76.1±4.9 ^{ab}
C _v	0.12	0.04	0.07	0.21	0.17	0.06
X ₅	3.87±0.49 ^a	4.19±0.23 ^a	3.28±0.29 ^b	2.41±0.43 ^c	3.19±0.37 ^b	3.64±0.63 ^{ab}
C _v	0.13	0.05	0.09	0.18	0.12	0.17
X ₆	1.17±0.42 ^a	1.08±0.23 ^a	0.93±0.20 ^a	0.88±0.18 ^a	0.89±0.18 ^a	0.84±0.17 ^a
C _v	0.36	0.21	0.22	0.20	0.20	0.20
X ₇	17.33±7.1 ^a	16.60±5.0 ^a	19.70±2.7 ^a	17.40±2.8 ^a	19.40±4.1 ^a	23.40±2.3 ^a
C _v	0.41	0.30	0.14	0.16	0.21	0.10
X ₈	227.33±83.67 ^a	209.33±33.08 ^a	197.33±44.06 ^a	128.02±11.52 ^b	189.03±18.37 ^a	207.03±22.37 ^a
C _v	0.37	0.16	0.22	0.09	0.10	0.11
X ₉	39.8±5.7 ^a	41.9±2.4 ^a	36.4±3.6 ^b	37.1±4.3 ^{ab}	37.6±3.8 ^{ab}	37.4±5.1 ^{ab}
C _v	0.14	0.06	0.10	0.11	0.10	0.14
X ₁₀	440±20.53 ^{ab}	505±38.55 ^{ab}	520±141.23 ^a	281±43.59 ^c	289±44.68 ^c	369±80.32 ^{bc}
C _v	0.05	0.08	0.27	0.16	0.15	0.22

注:①数据为各指标平均值±标准差。②C_v为变异系数。③不同字母表示不同处理下土壤理化指标差异显著(p<0.05)。④X₁为容重(g/cm³);X₂为总孔隙度(%);X₃为pH值;X₄为有机质(g/kg);X₅为全氮(g/kg);X₆为全磷(g/kg);X₇为全钾(g/kg);X₈为水解氮(mg/kg);X₉为有效磷(mg/kg);X₁₀为速效钾(mg/kg)。下同。

表 3 试验区坡耕地土壤质量评价指标载荷矩阵和 Norm 值
Table 3 Load matrix and Norm value of soil quality evaluation indexes at sloping farmland of test area

指标	成分			Norm 值	分组
	1	2	3		
X ₁	0.903	-0.171	0.320	2.315	1
X ₂	-0.924	0.245	-0.196	2.359	1
X ₃	0.623	-0.343	0.576	1.767	3
X ₄	0.832	0.514	-0.143	2.202	2
X ₅	0.873	0.436	-0.160	2.276	1
X ₆	0.829	-0.262	-0.393	2.165	1
X ₇	-0.429	0.764	0.461	1.558	2
X ₈	0.790	0.569	-0.034	2.119	1
X ₉	0.735	-0.071	-0.568	1.971	3
X ₁₀	0.890	-0.073	0.446	2.304	1
特征值	6.336	1.648	1.410		
累积方差比例	63.360%	79.836%	93.935%		

2.3 基于两种最小数据集土壤质量评价

对建立的总数据集(TDS)和MDS-PCA, MDS-CA 分别进行主成分分析得到公因子方差和权重(表 5)。通过隶属度函数(“S”型、反“S”型函数)将最

小数据集指标转换为 0~1 的分数。通过指标权重计算出各处理下土壤质量指数(如图 2 所示)。基于主成分分析最小数据集(MDS-PCA)的隶属度函数土壤质量指数(SQI-PCA)为:秸秆覆盖免耕坡中(0.661) > 传统耕作坡下(0.651) > 秸秆覆盖免耕坡上(0.570) > 传统耕作坡中(0.543) > 秸秆覆盖免耕坡下(0.513) > 传统耕作坡上(0.472); 基于聚类分析最小数据集(MDS-CA)的隶属度函数土壤质量指数(SQI-CA)为:传统耕作坡下(0.565) > 传统耕作坡中(0.493) > 秸秆覆盖免耕坡中(0.485) > 秸秆覆盖免耕坡上(0.475) > 秸秆覆盖免耕坡下(0.389) > 传统耕作坡上(0.378)。

2.4 基于最小数据集的土壤质量评价合理性验证

最小数据集(MDS)的合理性影响着土壤质量指数计算的准确性,因此验证最小数据集(MDS)的准确性对土壤质量评价有着重要意义。通过总数据集(TDS)各指标公因子方差计算各指标权重,将各指标标准化后代入 SQI 函数计算,对基于总数据集(TDS)的土壤质量进行评价得到总数据集土壤质量(SQI-TDS)。将基于主成分分析和聚类分析最小数

据集计算得到的土壤质量指数 SQI-PCA 和 SQI-CA 分别与总数据集土壤质量指数(SQI-TDS)进行线性回归分析,得到的回归方程分别为:

$$y_1=0.6319x+0.2656 \quad (R^2=0.78, p<0.05)$$

$y_2=0.5658x+0.1932 \quad (R^2=0.53, p<0.05)$
式中: x 为总数据集土壤质量指数(SQI-TDS); y_1 为主成分分析土壤质量指数(SQI-PCA); y_2 为聚类分析土壤质量指数(SQI-CA)。

表4 试验区坡耕地土壤理化指标相关性分析

Table 4 Correlation analysis of soil physico-chemical indexes at sloping farmland of test area

指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
X_1	1									
X_2	-0.988	1								
X_3	0.714	-0.685	1							
X_4	0.597	-0.601	0.288	1						
X_5	0.627	-0.636	0.363	0.986	1					
X_6	0.711	-0.786	0.312	0.565	0.641	1				
X_7	-0.382	0.509	-0.237	-0.042	-0.108	-0.717	1			
X_8	0.655	-0.629	0.190	0.928	0.908	0.573	0.076	1		
X_9	0.410	-0.509	0.299	0.690	0.756	0.775	-0.616	0.478	1	
X_{10}	0.948	-0.919	0.854	0.648	0.680	0.562	-0.235	0.633	0.423	1

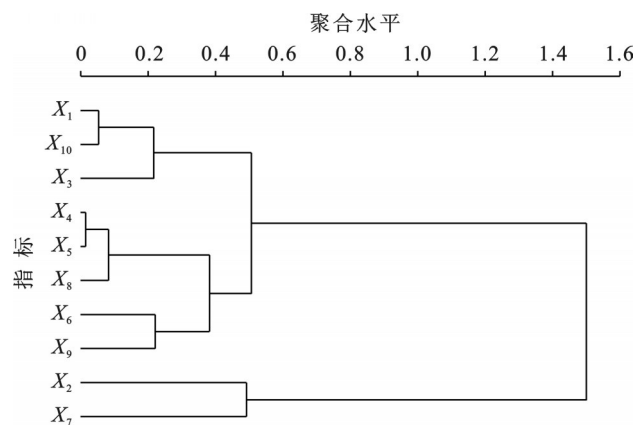


图1 各试验处理土壤质量评价指标聚类分析谱系图
Fig.1 Pedigree chart of soil quality evaluation index cluster analysis

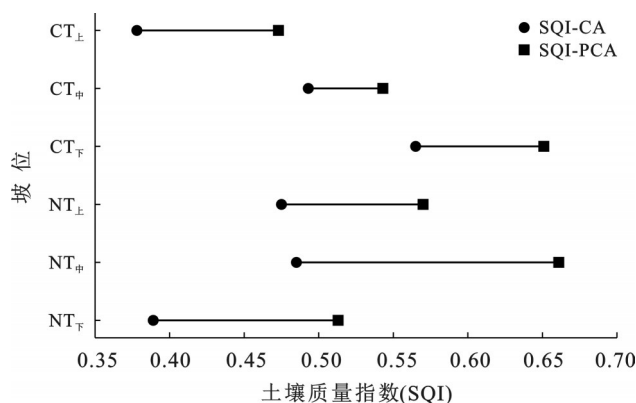


图2 基于两种最小数据集的评分模型下不同坡位的土壤质量指数

Fig.2 Soil quality index of different slope position under a scoring model based on two minimum data sets

从线性回归结果来看(图3),SQI-PCA, SQI-CA与SQI-TDS均呈显著正相关,其中 R^2 分别为

0.78和0.53,说明SQI-PCA与SQI-TDS拟合效果更好。通过NSE计算,SQI-PCA, SQI-CA与SQI-TDS的纳什有效系数分别为0.97,0.78。综上所述,土壤质量评价采用主成分分析最小数据集(MDS-PCA)较聚类分析最小数据集(MDS-CA)更准确,可以采用MDS-PCA代替总数据集对秸秆覆盖免耕坡耕地不同坡位土壤质量进行评价。

表5 各试验处理土壤质量评价最小数据集和总数据集的公因子方差和权重

Table 5 Community and weight of minimum data set and total data set for soil quality assessment

指标	TDS		MDS-PCA		MDS-CA	
	公因子方差	权重	公因子方差	权重	公因子方差	权重
X_1	0.947	0.101			0.875	0.196
X_2	0.953	0.101	0.788	0.278	0.928	0.208
X_3	0.838	0.089	0.437	0.154		
X_4	0.976	0.104	0.521	0.184	0.829	0.186
X_5	0.977	0.104				
X_6	0.910	0.097			0.878	0.197
X_7	0.980	0.104	0.394	0.139	0.954	0.214
X_8	0.948	0.101				
X_9	0.868	0.092	0.697	0.246		
X_{10}	0.996	0.106				

2.5 土壤质量障碍因子分析

通过障碍因子诊断模型对不同处理及坡位的理化指标计算分析(图4),各处理下制约土壤质量的障碍因子具有明显差异,但都属于轻度或中度障碍因子。制约秸秆覆盖免耕坡上土壤质量的主要障碍因

子是容重(0.156)和总孔隙度(0.132);制约秸秆覆盖免耕坡中土壤质量的主要障碍因子是容重(0.171)、全钾(0.164)和总孔隙度(0.149);制约秸秆覆盖免耕坡下土壤质量的主要障碍因子是容重(0.142)和全磷(0.145);制约传统耕作坡上土壤质量的主要障碍因

子是有有机质(0.149)、全氮(0.148)、水解氮(0.145)和速效钾(0.144);制约传统耕作坡中土壤质量的主要障碍因子是全磷(0.142)和速效钾(0.168);制约传统耕作坡下土壤质量的主要障碍因子是全磷(0.190)和速效钾(0.167)。

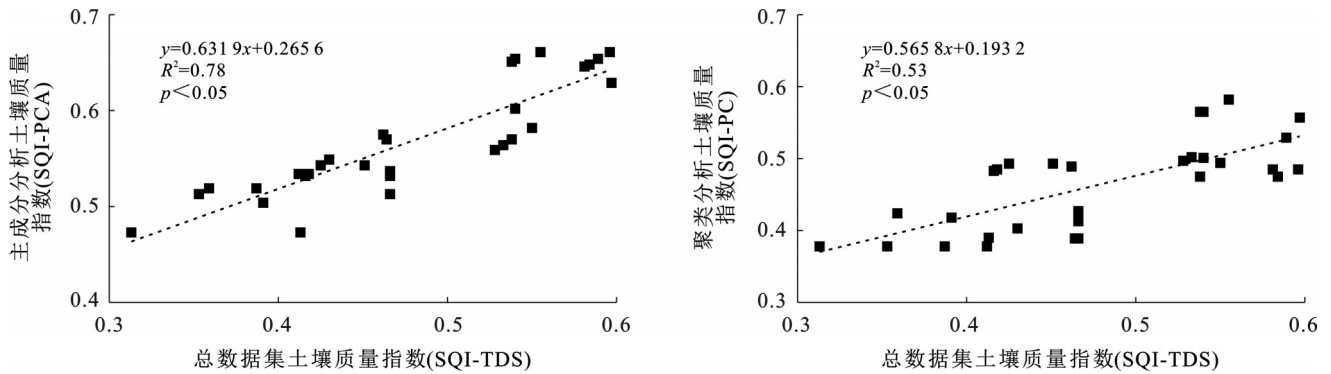


图 3 两种评价方式下最小数据集和总数据集的相关性分析

Fig.3 Relationship between minimum data set and total data set under two evaluation methods at sloping farmland of test area

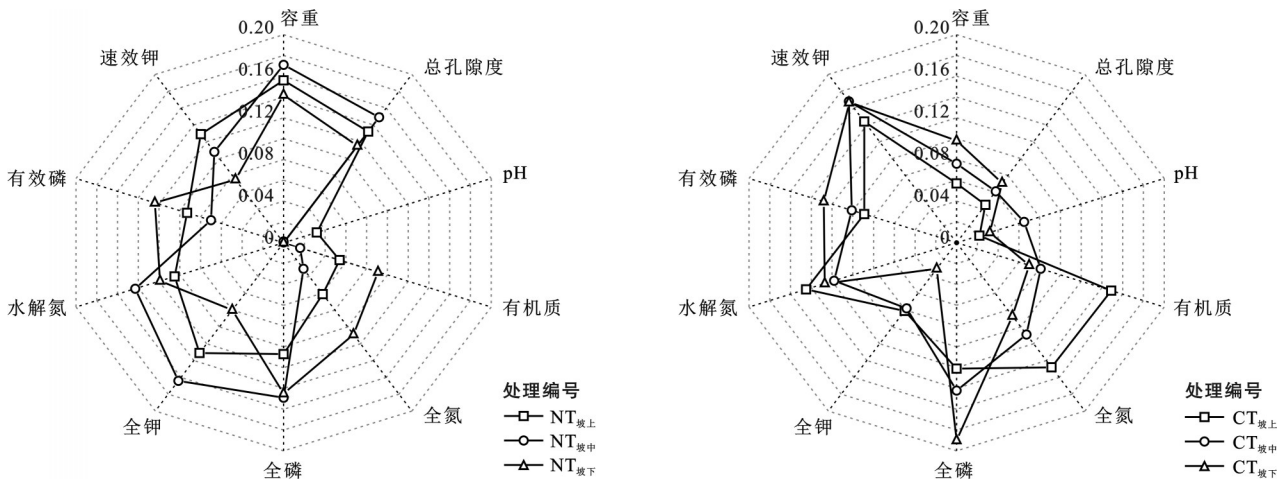


图 4 不同试验处理及坡位土壤质量指标障碍度

Fig.4 Obstacle degree of soil quality index in different treatment at different slope position

3 讨论

基于国内外研究成果,现有农田土壤质量评价体系中,建立总数据集使用频率最高的土壤频率排名前 10 的指标为容重、黏粒、pH 值、全氮、MDW、粉粒、沙粒、有机质、孔隙度、有效磷^[20-21];建立最小数据集使用频率排名前 10 的指标为土壤容重、pH 值, MDW、有机质、全氮、钠吸附比、黏粒、有效含水量、有效磷和有机碳^[20-21]。本试验在建立总数据集和最小数据集时,尽可能多的表达评价指标所包含的土壤质量信息^[22-23],总数据集 10 个指标中有 6 个进入总数据集评价指标使用频率前 10 位,最小数据集(MDS-PCA)5 个指标中有 3 个进入最小数据集评价指标使用频率前 10 位,表明本试验中选择的总数据集及最小数据集评价指标体系均有较好代表性,

对东北黑土区坡耕地土壤质量评价有一定的实用意义。

本研究使用 MDS-PCA 代替 TDS,计算得到 SQI-PCA 显示秸秆覆盖免耕处理下平均土壤质量为 0.581,传统耕作处理下平均土壤质量为 0.555。总体来说,秸秆覆盖免耕处理后土壤质量较传统耕作处理有了整体提高,这与李林源等^[24]的研究结果一致。本研究中制约秸秆覆盖免耕处理土壤质量的主要障碍因子是容重(0.156)和总孔隙度(0.132),这是因为秸秆覆盖免耕处理减少了对土壤的机械扰动,而播种和收获等农机操作也会进一步压实土壤,使土壤容重增加^[25]。制约传统耕作处理坡耕地土壤质量的主要障碍因子为全磷(0.151)和速效钾(0.159),这是因为全磷和速效钾含量与土壤质地有密切关系,极易受溶淋作用而产生再分布或向土壤深层运移^[25]。

陈强等^[26]、杨庆楠等^[11]研究结果显示,虽然秸秆覆盖免耕使土壤容重增加,但对土壤扰动次数的减少保留了土壤大孔隙,同时地表的秸秆能够有效减少土壤水分蒸发,使土壤含水量提高了2%~8%,土壤有效持水量提高了10%~20%,增加土壤蓄水保墒性能。

有研究指出,地形部位与土地利用方式是决定坡地土壤理化性质变化的重要因素^[27],坡耕地土壤养分再分布往往受到重力搬运、降雨侵蚀和耕作侵蚀等多种因素综合影响^[28]。本研究结果表明,传统耕作处理坡耕地土壤质量随坡位自上而下存在明显递增趋势,土壤养分含量随坡位升高而降低,这与王政等^[27]的研究结果一致。这说明伴随着水土流失的发生,坡耕地坡上的土壤较坡中、坡下更易贫瘠化,而坡上所冲刷下来的泥沙和养分也会逐渐在坡下富集,使坡下土壤质量显著提高^[28]。进行秸秆覆盖免耕处理后增加了土壤表面粗糙度^[29],产生风蚀或水蚀时土壤养分和泥沙在坡中被拦截^[30],不会由坡上直接转移至坡下,这是本次试验秸秆覆盖免耕坡中(0.661)土壤质量最高的原因。

本研究中秸秆覆盖免耕处理(0.581)土壤质量较传统耕作处理(0.555)整体提高,但秸秆覆盖免耕在东北黑土区的初步推广与研究显示,实施秸秆覆盖免耕对作物产量的影响仍有争议。Chen等^[31]通过连续5 a坡耕地秸秆覆盖免耕研究发现,秸秆覆盖免耕下玉米平均减产15.7%,大豆平均增产13.8%。郭晓霞等^[32]在内蒙古栗褐土连续两年实施秸秆覆盖免耕发现,大豆产量不稳定甚至造成减产。这可能是秸秆覆盖免耕初期的机械压实作用导致土壤容重显著提高,影响了土壤孔隙度使土壤导气导水性降低^[33]。同时秸秆覆盖导致地表温度降低,影响作物出苗率,在典型黑土冷凉区,温度降低也被认为是导致农作物减产最主要的原因之一^[34]。然而,郭孟洁等^[35]的16 a连续秸秆覆盖免耕试验发现无论是种植大豆还是玉米虽然产量没有显著性提高,但并不会造成减产。长期连续秸秆覆盖免耕能够有效克服短期不良效应,促进土壤可持续发展的同时恢复土壤生产力,提高土壤质量作用明显。本试验仅采用一年数据进行土壤质量评价,伴随着秸秆覆盖免耕措施实施年份的增加,土壤质量可能会持续提高,针对多年份秸秆覆盖免耕对东北黑土区坡耕地土壤质量评价后续还需长期深入研究。

4 结论

(1) 试验区坡耕地土壤质量评价方法中MDS-

PCA与TDS的非线性模型决定系数为0.78,纳什有效系数为0.97;MDS-CA与TDS的决定系数为0.53,纳什有效系数为0.78。因此MDS-PCA较MDS-CA更适合代替TDS对坡耕地土壤质量进行分析。

(2) 试验区坡耕地土壤质量评价最小数据集由总孔隙度、pH值、有机质、全钾和有效磷组成。秸秆覆盖免耕处理土壤质量排序为:坡中(0.661)>坡上(0.570)>坡下(0.513);传统耕作处理土壤质量排序为:坡下(0.651)>坡中(0.543)>坡上(0.472),不同坡位土壤质量评价结果差异明显,秸秆覆盖免耕处理较传统耕作处理土壤质量整体提高。

(3) 试验区传统耕作坡耕地土壤质量呈现:坡下>坡中>坡上的趋势,土壤养分存在由坡上向坡下迁移的现象,而秸秆覆盖免耕处理能够有效拦截土壤养分迁移。在坡耕地较高坡位进行秸秆覆盖免耕能够有效减少坡耕地土壤养分流失与再分布,改善坡耕地土壤质量。

参考文献(References)

- [1] 张兴义,胡伟,李建业,等. 水土流失防控是黑土地保护的重点[J]. 科学通报, 2024, 69(11): 1401-1405.
Zhang Xingyi, Hu Wei, Li Jianye, et al. Control of soil and water losses is the critical issue for black earth conservation [J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(11): 1401-1405.
- [2] 张兴义,刘晓冰. 中国黑土研究的热点问题及水土流失防治对策[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 340-344.
Zhang Xingyi, Liu Xiaobing. Key issues of mollisols research and soil erosion control strategies in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 340-344.
- [3] 戚颖,李铁男,白雪峰,等. 秸秆覆盖对寒旱区农田土壤理化性状的影响[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(7): 56-63.
Qi Ying, Li Tienan, Bai Xuefeng, et al. Effects of straw mulching soil physicochemical properties in cold and arid regions [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(7): 56-63.
- [4] 敖曼,张旭东,关义新. 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1203-1215.
Ao Man, Zhang Xudong, Guan Yixin. Research and practice of conservation tillage in black soil region of Northeast China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1203-1215.
- [5] 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.
- [6] Bhardwaj A K, Jasrotia P, Hamilton S K, et al. Ecological management of intensively cropped agro-ecosystems

- improves soil quality with sustained productivity [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 140(3/4):419-429.
- [7] 吴海燕,金荣德,范作伟,等.基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价[J].植物营养与肥料学报,2018,24(2):325-334.
Wu Haiyan, Jin Rongde, Fan Zuowei, et al. Assessment of fertility quality of black soil based on principal component and cluster analysis [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(2):325-334.
- [8] 覃其云,曹继钊,李军,等.马尾松人工幼林土壤肥力变化及其综合评价研究[J].中南林业科技大学学报,2013,33(3):64-69.
Qin Qiyun, Cao Jizhao, Li Jun, et al. Comprehensive evaluation on soil fertility variations in *Pinus massoniana* young plantation [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(3):64-69.
- [9] 石海龙,张林星,甘凤玲,等.喀斯特槽谷区侵蚀坡面的土壤质量评价及障碍因子[J].水土保持学报,2024,38(2):126-135.
Shi Hailong, Zhang Linxing, Gan Fengling, et al. Soil quality evaluation and obstacle factors of erosion slope in karst trough valley area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2):126-135.
- [10] 李娟,杨满元,杨宁.紫色土丘陵恢复区不同土地利用方式土壤质量综合评价[J].草地学报,2024,32(9):2875-2883.
Li Juan, Yang Manyuan, Yang Ning. Comprehensive assessment of soil quality in restoration region of hills with purple soils under different land-use types [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(9):2875-2883.
- [11] 杨庆楠,高士军,张何普,等.秸秆覆盖对土壤水热状况的影响[J].中国农学通报,2024,40(8):80-85.
Yang Qingnan, Gao Shijun, Zhang Hepu, et al. Effects of straw mulching on the soil moisture and temperature [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(8):80-85.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.
Soil Physics Research Laboratory, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Determination of Soil Physical Properties [M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [13] 杨剑虹,王成林,代亨林.土壤农化分析与环境监测[M].北京:中国大地出版社,2008.
Yang Jianhong, Wang Chenglin, Dai Henglin. Soil Agrochemical Analysis and Environmental Monitoring [M]. Beijing: China Land Press, 2008.
- [14] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(7):155-164.
- [15] 许明祥.黄土丘陵区生态恢复过程中土壤质量演变及调控[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2003.
Xu Mingxiang. Evolution and regulation of soil quality in the process of ecological restoration in loess hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2003.
- [16] 丁文斌,蒋平,史东梅,等.紫色土坡耕地耕层蓄水保土及耕性特征研究[J].水土保持学报,2016,30(6):24-29.
Ding Wenbin, Jiang Ping, Shi Dongmei, et al. The study of soil and water conservation and tillage characteristics of cultivated-layer in purple soil farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6):24-29.
- [17] 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.
- [18] 金慧芳,史东梅,钟义军,等.红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J].农业工程学报,2019,35(20):84-93.
Jin Huifang, Shi Dongmei, Zhong Yijun, et al. Diagnosis of obstacle factors and degradation characteristics of cultivated-layer quality for red soil sloping farmland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20):84-93.
- [19] 匡丽花,叶英聪,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.
- [20] 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 Ka, Li Decheng, Zhang Ganlin. Literature analysis on soil quality assessment in China based on CNKI database [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(3):736-744.
- [21] 黄佳惠,张瑶,肖凯,等.中国农田土壤质量评价指标及其发展趋势[J].资源环境与工程,2024,38(1):26-33.
Huang Jiahui, Zhang Yao, Xiao Kai, et al. Evaluation index and development trend of farmland soil quality in China [J]. Resources Environment & Engineering, 2024, 38(1):26-33.
- [22] Askari M S, Holden N M. Quantitative soil quality

- indexing of temperate arable management systems [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015,150:57-67.
- [23] Vasu D, Singh S K, Ray S K, et al. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan Plateau, India [J]. *Geoderma*, 2016,282:70-79.
- [24] 李林源,高磊,彭新华,等.典型水蚀区坡耕地黑土质量的空间分异特征及影响因素[J].*水土保持学报*,2024,38(3):382-390.
Li Linyuan, Gao Lei, Peng Xinhua, et al. Spatial variation characteristics and influencing factors of black soil quality in typical water-eroded sloping cropland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(3):382-390.
- [25] 王治统,凌俊,刘子熙,等.秸秆还田方式对土壤理化性质和玉米产量的影响[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2024,32(4):663-674.
Wang Zhitong, Ling Jun, Liu Zixi, et al. Effect of straw return practices on soil physico-chemical properties and maize yield [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024,32(4):663-674.
- [26] 陈强,孙涛,宋春雨.免耕对土壤物理性状及作物产量影响[J].*草业科学*,2014,31(4):650-658.
Chen Qiang, Sun Tao, Song Chunyu. Influence of no-tillage on soil physical properties and crop production [J]. *Pratacultural Science*, 2014,31(4):650-658.
- [27] 王政,刘久羽,彭博,等.云南红壤坡耕地烤烟生长季土壤养分迁移特征[J].*土壤*,2023,55(4):918-924.
Wang Zheng, Liu Jiuyu, Peng Bo, et al. Soil nutrient migration in flue-cured tobacco growing season in red soil slope farmland in Yunnan Province [J]. *Soils*, 2023,55(4):918-924.
- [28] Brubaker S C, Jones A J, Lewis D T, et al. Soil properties associated with landscape position [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993,57(1):235-239.
- [29] 贾红杰,傅瓦利.岩溶区坡地耕作侵蚀过程中的土壤再分布研究[J].*土壤*,2008,40(6):986-991.
Jia Hongjie, Fu Wali. On soil redistribution induced by tillage erosion in karst area [J]. *Soils*, 2008,40(6):986-991.
- [30] 李飞,韩兴,马秀兰,等.秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地产流产沙及氮磷流失的阻控[J].*水土保持学报*,2020,34(4):37-42.
Li Fei, Han Xing, Ma Xiulan, et al. Straw mulch controls runoff and nitrogen and phosphorus loss from slope farmland in black soil region of northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(4):37-42.
- [31] Chen Y, Liu S, Li H, et al. Effects of conservation tillage on corn and soybean yield in the humid continental climate region of northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011,115:56-61.
- [32] 郭晓霞,刘景辉,张星杰,等.免耕对土壤物理性质及作物产量的影响[J].*干旱地区农业研究*,2010,28(5):38-42.
Guo Xiaoxia, Liu Jinghui, Zhang Xingjie, et al. Effects of no-tillage on soil physical properties and crop yields [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010,28(5):38-42.
- [33] 陈强,Yuriy S Kravchenko,陈帅,等.不同耕作方式土壤结构季节变化[J].*土壤通报*,2015,46(1):184-191.
Chen Qiang, Kravchenko Y, Chen Shuai, et al. Seasonal variations of soil structures under different tillage systems [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015,46(1):184-191.
- [34] 张兴义,陈强,陈渊,等.东北北部冷凉区免耕土壤的特性及作物效应[J].*中国农业科学*,2013,46(11):2271-2277.
Zhang Xingyi, Chen Qiang, Chen Yuan, et al. Influences of no-tillage on soil and crop performance in the north cool region of northeast China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013,46(11):2271-2277.
- [35] 郭孟洁,李建业,李健宇,等.实施16年保护性耕作下黑土土壤结构功能变化特征[J].*农业工程学报*,2021,37(22):108-118.
Guo Mengjie, Li Jianye, Li Jianyu, et al. Changes of soil structure and function after 16-year conservation tillage in black soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021,37(22):108-118.