

# 典型黑土区坡耕地退化程度诊断与评价

张守昊<sup>1</sup>, 孙 蕾<sup>1</sup>, JAMSHIDI Abdul Hakim<sup>1</sup>, 牛 勇<sup>2</sup>, 刘 霞<sup>1</sup>, FAN Zhaofei<sup>3</sup>

(1. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心/江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037;

2. 山东农业大学 林学院 山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室/国家林业局泰山森林生态站, 山东 泰安 271018;

3. School of Forestry and Wildlife Sciences, Auburn University, Auburn AL36819, USA)

**摘 要:** 为了对黑土区坡耕地退化程度进行全面、综合、客观的诊断与评价, 通过文献计量法和频度分析法对国内外耕地退化评价文献内的高频指标进行了统计分析, 建立了适用于东北典型黑土区坡耕地退化程度诊断与评价的指标体系(TIS)。同时以拜泉县为研究区域, 通过聚类分析建立了土壤退化程度诊断与评价最小指标集(MIS)。结果表明: (1) TIS 共包括物理、化学、生物和侵蚀特征因子 4 类共 11 项指标: 腐殖质层厚度、黏粒含量、有机质含量、pH 值、坡度、垄坡角、沟壑密度、容重、水稳性大团聚体含量、土壤阳离子交换量和作物产量, 其中前 6 项指标组成了 MIS。(2) 研究区未退化土壤占 12%, 轻度退化土壤占 12%, 中度及以上退化土壤占 76%。坡度可能是影响研究区土壤退化的主要因素之一, 坡度与垄坡角之间存在协同关系。此外, 施用农药、化肥以及连作导致土壤酸化问题突出。

**关键词:** 坡度; 垄坡角; 沟壑密度

中图分类号: S158.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)02-0001-06

## Evaluation of the Degradation Degree of Sloping Cropland in Typical Black Soil Region

ZHANG Shouhao<sup>1</sup>, SUN Lei<sup>1</sup>, JAMSHIDI Abdul Hakim<sup>1</sup>, NIU Yong<sup>2</sup>, LIU Xia<sup>1</sup>, FAN Zhaofei<sup>3</sup>

(1. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China/Jiangsu Province

Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Nanjing Forestry University,

Nanjing 210037, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration/

Taishan Forest Ecosystem Research Station, College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taian,

Shandong 271018, China; 3. School of Forestry and Wildlife Sciences, Auburn University, Auburn AL36849, USA)

**Abstract:** A comprehensive evaluation indicator system is needed to provide a complete and integrated assessment of the degradation degree of sloping cropland. We employed bibliometrics to perform statistical analysis on research studies involving cropland degradation. Frequency analysis was then used to identify high-frequency indicators to construct a total index set (TIS) for evaluation of the degradation degree of sloping cropland in black soil region. In addition, soil measurement data from sloping cropland in Baiquan County, were used as a basis to construct a minimum index set (MIS). The TIS included the following 11 indexes: A-horizon thickness, clay content, organic matter content, pH value, slope gradient, ridge-slope angle, gully density, bulk density, large water-stable aggregate content, soil cation exchange capacity, and crop yield. The first six of these were included in the MIS. In the studied area, undegraded soil, mildly degraded soil, and moderately degraded soil and above accounted for 12%, 12% and 76% of investigated sloping croplands, respectively. Slope gradient is one of the main factors affecting soil degradation, there is a synergistic relationship between slope gradient and ridge-slope angle. In addition, the application of pesticides, fertilizers and continuous cropping resulted in soil acidification.

**Keywords:** slope gradient; ridge-slope angle; gully density

收稿日期: 2021-03-21

修回日期: 2021-04-08

资助项目: 科技部国家重点研发项目(2018YFC0507005); 国家自然科学基金面上项目(32071840)

第一作者: 张守昊(1995—), 男, 甘肃环县人, 博士研究生, 研究方向为水土保持监测与评价。E-mail: zshmyz@njfu.edu.cn

通信作者: 刘霞(1971—), 女, 山东菏泽人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持监测与评价研究。E-mail: liuxia@njfu.edu.cn

东北黑土区耕地面积 18.3 万 km<sup>2</sup>, 占黑土区面积的 32.9%, 其中 0.25° 以上坡耕地占耕地总面积的 48.5%<sup>[1]</sup>。坡耕地以长缓坡为主, 坡长一般为 500~2 000 m<sup>[2]</sup>。研究表明, 特殊的地形、气候及人为不合理的耕作管理措施是导致黑土区坡耕地退化的主要原因<sup>[3]</sup>。第一次全国水利普查显示, 东北黑土区侵蚀沟有近 30 万条<sup>[4]</sup>。严重侵蚀的坡耕地腐殖质层已流失殆尽, 呈现“破皮黄”, 土壤肥力显著降低, 多沦为低产田<sup>[5]</sup>。目前改造中低产田、培肥、提升坡耕地地力成为黑土区亟需解决的问题<sup>[6]</sup>, 而建立土壤退化诊断与评价体系, 确定坡耕地退化程度是进行坡耕地改良和地力提升的前提<sup>[7]</sup>。

目前关于黑土退化程度诊断与评价的研究较少。孙永光<sup>[8]</sup>发现, 黑土退化的特征主要体现在腐殖质层变薄、土壤化学营养元素降低、容重增加、侵蚀沟大量出现、有机质含量降低和土地生产力下降等。刘宝元<sup>[9]</sup>、阎百兴<sup>[10]</sup>等认为土壤侵蚀是导致黑土区坡耕地退化的主要驱动因素, 其影响主要为坡面耕层变薄, 土壤理化及生物学性质恶化和地力下降。因此, 本研究黑土退化程度诊断与评价指标选取主要围绕土壤侵蚀、剖面性状、地力和土壤质量等方面进行。

纵观一系列土壤退化评价研究, 评价指标选取多根据经验数据和模型, 且缺乏统一标准。鉴于不同区域土壤侵蚀过程及主导因子的差异, 其诊断与评价指标很难适用于其他区域。因此, 建立适用于典型黑土区坡耕地退化程度诊断与评价指标体系实属必要。本文运用文献计量法和频度分析法对国内外耕地退化评价文献内的高频指标进行统计并加以分析, 同时结合典型黑土区坡耕地环境及耕作管理特点, 构建较为全面的诊断与评价体系, 为摸清典型黑土区坡耕地退化程度奠定基础, 也为坡耕地地力提升提供科学依据和支撑。

## 1 研究区概况

拜泉县位于典型黑土区<sup>[1]</sup>, 隶属于黑龙江省齐齐哈尔市, 地理坐标为 125°30′—126°31′E, 47°20′—47°55′N (图 1), 总面积 3 600 km<sup>2</sup>, 耕地面积占比为 57.4%。温带大陆性气候, 春季大风频繁, 夏季炎热, 降雨集中在 6—9 月, 冬季严寒, 多年平均气温 1.2℃, 年平均降雨量 490 mm, 无霜期 122 d。耕作土壤以黑土为主, 肥力高, 适合大豆、玉米、小麦、马铃薯和芸豆等的耕作和生产。根据全国水土保持规划<sup>[11]</sup>, 研究区一级区属东北黑土区, 二级区属东北漫川漫岗区, 水土流失较为剧烈, 植被覆盖低且侵蚀沟密布。

典型黑土区内坡度 >0.25° 的农地是水土流失的优先防治对象, 如按其他地区采用的农地坡度 5° 标准判断农地是否发生水土流失, 会造成水土流失严重低估<sup>[1]</sup>,

故本研究以坡度 >0.25° 的坡耕地作为研究对象, 在坡上、坡中和坡下分别测量腐殖质层厚度。同时采集表层 0—20 cm 土样尽快带回实验室风干用于测定土壤容重、水稳性大团聚体、黏粒、土壤有机质、pH 值和土壤阳离子交换量 (CEC)<sup>[12-13]</sup>; 沟壑密度用 2018 年春季卫星影像提取计算侵蚀沟长度, 计算其与样地总面积之比得到; 利用遥感影像和数字高程模型 (DEM) 对垄向和坡向进行解译计算两者的夹角 (即垄坡角)。若垄坡角在 0°~10° 间则定义为顺垄, 10°~80° 为斜垄, 80°~90° 为横垄<sup>[14]</sup>。作物产量 (玉米) 通过调查走访农户获得。

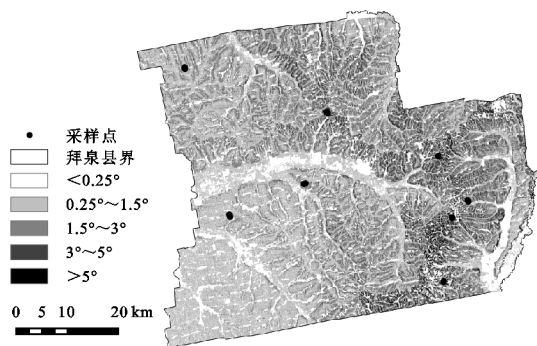


图 1 研究区坡度分级及采样点分布

## 2 研究方法

用文献计量法和频度分析法进行文献搜集和指标筛选, 遵循主导性、实用性、独立性和稳定性的原则构建土壤退化程度诊断与评价体系 (TIS)。所用数据库为中国期刊全文数据库 (CNKI) 和 Web of Science。CNKI 数据库文献收录年限为 1979 年至今, Web of Science 文献收录年限为 1950 年至今。若不同文献对同一指标的表述有异, 则将此类指标及其使用频率进行合并。经筛选, 共获得耕地土壤退化密切相关文献 451 篇, 指标 85 个, 其中涉及典型黑土区文献共 78 篇, 指标 63 个 (表 1)。

频率计算公式如下:

$$F_i = T_i / S \quad (1)$$

式中:  $F_i$  为  $i$  指标的使用频率;  $T_i$  为  $i$  指标的使用频数;  $S$  为文献总数。

土壤退化指数 (SDI) 是集成土壤退化程度评价指标的综合指数<sup>[15]</sup>, 阈值为 [0~1] (公式 2)。本研究按等距离法将土壤退化程度划分 5 级: 未退化 ( $0 \leq \text{SDI} < 0.2$ )、轻度退化 ( $0.2 \leq \text{SDI} < 0.4$ )、中度退化 ( $0.4 \leq \text{SDI} < 0.6$ )、重度退化 ( $0.6 \leq \text{SDI} < 0.8$ ) 和剧烈退化 ( $0.8 \leq \text{SDI} \leq 1$ )。根据各指标对 SDI 的正负效应,  $\mu(x_i)$  分为“S”型函数和反“S”型函数<sup>[16]</sup>。以第二次全国土壤普查时研究区内肥力较高的土壤剖面数据作为衡量坡耕地是否退化的标准, 即隶属函数阈值上限 ( $b$ ); 野外实地调查中退化最严重的采样点数据

作为隶属函数阈值的下限( $a$ )。隶属度计算见公式(3—4)。运用 SPSS 22.0 中主成分分析功能计算各指标的权重。计算公式如下:

$$SDI = \sum_{i=1}^n W_i N_i \tag{2}$$
$$\mu(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \geq b \text{ (“S”型函数)或} x_i \leq a \text{ (反“S”型函数)} \\ \frac{x_i - a}{b - a} \text{ (“S”型函数)或} \frac{x_i - b}{a - b} \text{ (反“S”型函数),} & a < x_i < b \\ 0, & x_i \leq a \text{ (“S”型函数)或} x_i \geq b \text{ (反“S”型函数)} \end{cases} \tag{3}$$
$$N_i = \mu(x_i) \tag{4}$$

式中: SDI 为土壤退化指数;  $W_i$  为第  $i$  个指标的权重;  $x_i$  为第  $i$  个指标的实测值;  $a$  为隶属函数阈值下限;  $b$  为隶属函数阈值上限;  $N_i$  为第  $i$  个指标的隶属度,  $N_i$  通过函数  $\mu(x_i)$  计算。

用 Nash 有效系数( $E_f$ )和相对偏差系数( $E_r$ )评价 MIS 的精确度<sup>[17]</sup>。

$$E_f = 1 - \frac{\sum (R_{0i} - R_{cali})^2}{\sum (R_{0i} - \bar{R}_0)^2} \tag{5}$$
$$E_r = \frac{|\sum_{i=1}^n R_{0i} - \sum_{i=1}^n R_{cali}|}{\sum_{i=1}^n R_{0i}} \tag{6}$$

式中:  $R_{0i}$  为根据 TIS 计算的第  $i$  个采样点的 SDI;  $\bar{R}_0$  为所有采样点的 SDI 平均值;  $R_{cali}$  为根据 MIS 计算的第  $i$

个采样点的 SDI。  $E_f$  越接近 1 或  $E_r$  越接近 0, 表明使用该 MIS 对土壤退化程度的评价结果越精确。

表 1 文献计量法构建 TIS 所用检索词及检索结果

检索词	检索结果	选用	典型黑土区
土壤退化-评价指标	346	14	4
耕地质量评价-评价指标	386	144	17
耕地质量评价-黑土	14	6	6
耕地地力评价-评价指标	303	187	19
耕地地力评价-黑土	25	2	2
土壤质量评价-黑土	29	12	12
侵蚀土壤退化	253	16	3
耕地退化	109	16	5
soil quality assessment-cropland	84987	36	10
soil degradation evaluation	14972	18	—
合计	101424	451	78

注: “—”代表未发现。

3 结果与分析

3.1 典型黑土区坡耕地退化程度诊断与评价 TIS 构建

将典型黑土区耕地退化程度诊断与评价所涉及的指标划分为 5 类(图 2), 每一类中按照指标使用频率排序, 选出高频指标(频率分布曲线突变点以上的指标)并进行综合分析, 共得到以下高频指标: 质地、容重、黏粒含量、土壤压实度、自然含水量、水稳性大团聚体含量、平均质量直径、田间持水量、总孔隙度、饱和持水量、有效含水量、团聚体分散率、毛管孔隙度、砂粒含量、比重、几何平均直径、水稳性团聚体分形维数、团聚体破坏率、紧实度、粉粒含量、土壤团粒结构、土壤侵蚀程度、土壤侵蚀模数、耕层厚度、有效土层厚度、腐殖质层厚度、质地构型、剖面构型

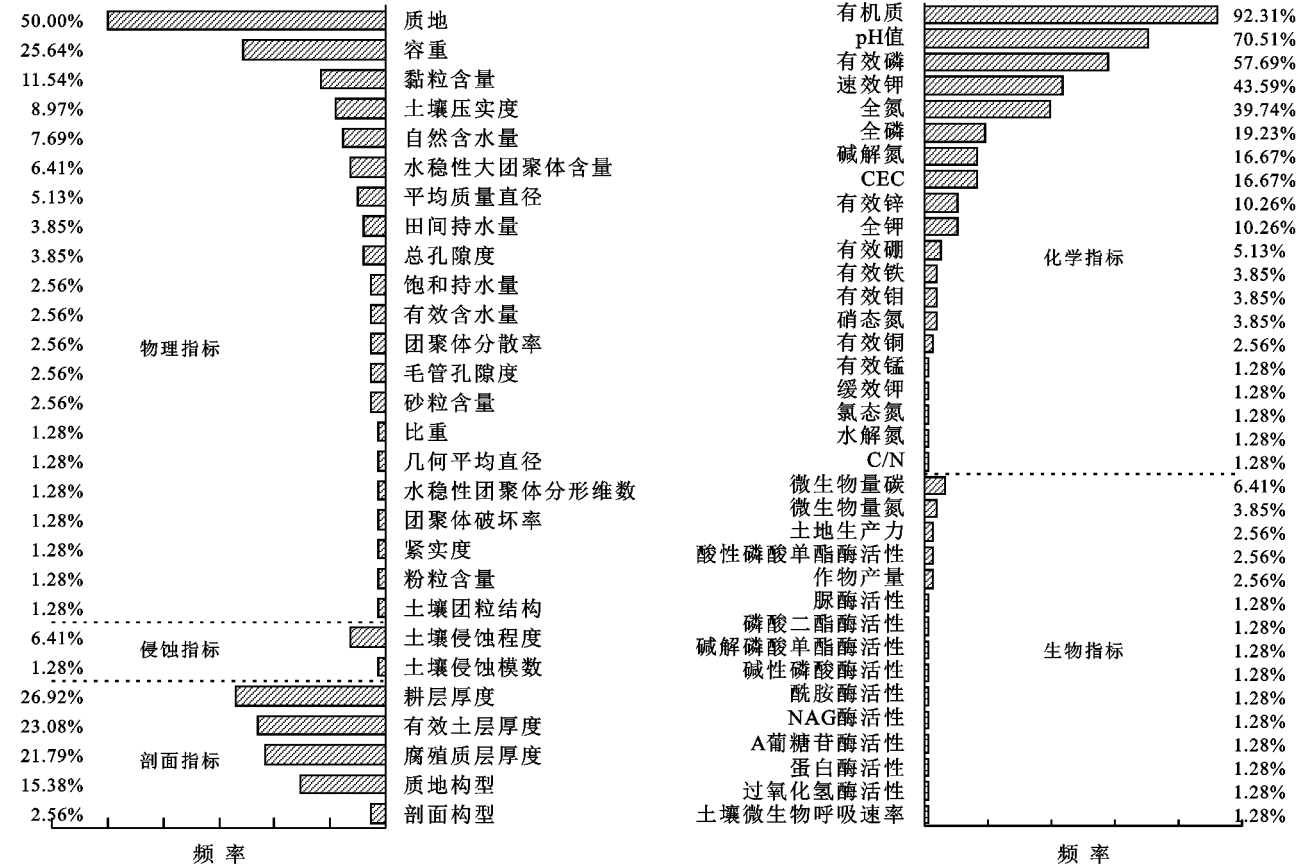


图 2 基于频度分析法的土壤退化程度评价指标频率分布



土壤容重直接影响土壤孔隙状况和持水性能,对土壤退化有较好的响应<sup>[18]</sup>。侵蚀是引起东北黑土退化的主要原因之一,侵蚀的结果主要导致大量细小黏粒流失和大团聚体(>0.25 mm)破碎。水稳性大团聚体含量是揭示黑土肥力退化的关键指标之一<sup>[19]</sup>。因此即使水稳性大团聚体含量在文献中的使用频率仅为 6.4%,本研究仍将其纳入 TIS。腐殖质层厚度减薄是典型黑土区坡耕地退化最直接的体现,腐殖质层的残存情况可以表征土壤侵蚀程度,所以侵蚀指标中的土壤侵蚀程度由腐殖质层厚度替代。土壤速效养分较全量养分更能表征土壤养分的供应情况,但因其易受施肥和环境等因素的影响,因此未将速效养分和全量养分纳入 TIS。黑土耕地中微生物量碳/氮与有机质呈显著正相关<sup>[20-21]</sup>,根据易获得的原则,用土壤有机质替代土壤微生物量碳/氮。作物产量是土地生产力的最直接反映,也是土壤退化重要的参考指标,而且作物产量数据较易获取,因此纳入 TIS。此外,通过查阅文献及野外调查发现,垄作方向对坡耕地退化影响显著<sup>[14,22]</sup>。结合黑土区的区域特色并参考其他区域坡耕地退化评价体系,将垄坡角、坡度和沟壑密度纳入 TIS。综上所述,本研究共选取 11 项指标构建 TIS 对黑土坡耕地退化程度进行评价(图 3)。

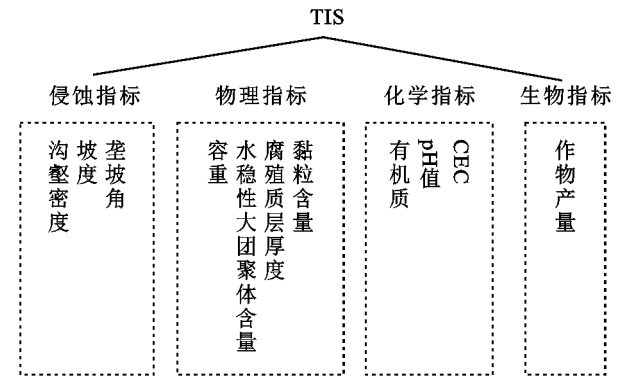


图 3 典型黑土区坡耕地退化程度诊断与评价指标体系(TIS)

3.2 典型黑土区坡耕地退化程度诊断与评价 MIS 构建

研究区坡耕地土壤容重、pH 值和作物产量的变异系数依次为 9.8%,8.0%,4.4%,均小于 10%,属于弱变异(表 2),沟壑密度变异系数达 141.6%,属于强变异。其余指标变异系数表现为:腐殖质层厚度>垄坡角>坡度>有机质>黏粒含量>CEC>水稳性大团聚体含量。

在聚合水平为 12~15 时,评价指标划分为 4 类(图 4),沟壑密度、坡度、容重和垄坡角为第一类,主要表征坡耕地地形特征;pH 值为第 2 类,表征土壤环境;有机质、腐殖质层厚度和作物产量为第 3 类,表征土壤生产性能;黏粒含量、CEC 和水稳性大团聚体含量为第 4 类,表征土壤肥力特征。黑土区坡耕地坡度多为 1°~5°,但坡长可达几百米甚至上千米,为降雨雨滴冲击及径流产生

提供了良好的下垫面,土壤侵蚀严重<sup>[23]</sup>。垄向影响地表径流,进而影响侵蚀沟的产生,根据主导性原则,聚类分析第一类中选取坡度和垄坡角。有机质含量降低和腐殖质层减薄是黑土区坡耕地土壤退化的主要形式<sup>[24]</sup>,而作物产量除受土壤本身的肥力影响外,施肥对其影响很大,根据稳定性及主导型原则,第 3 类选择有机质含量和腐殖质层厚度。黏粒是土壤主要的无机胶体,对 CEC 和水稳性团聚体的形成都有重要作用(相关系数分别为 0.460\* 和 0.493\*,达到显著水平(表 3),根据主导性和独立性原则,第 4 类中选择黏粒含量进入 MIS。综上所述,MIS 包括有机质含量、腐殖质层厚度、pH 值、黏粒含量、坡度和垄坡角 6 项指标。

表 2 研究区黑土坡耕地土壤参数统计特征

土壤参数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%
容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.04	1.50	1.22	0.12	9.80
水稳性大团聚体含量/%	57.07	89.34	77.42	7.93	10.20
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	14.05	65.65	38.60	13.41	34.70
pH 值	3.73	6.09	5.41	0.43	8.00
CEC/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	15.40	52.00	35.40	8.20	23.10
腐殖质层厚度/cm	5.00	110.00	42.50	30.70	72.20
黏粒含量/%	13.20	34.80	22.20	5.20	23.40
作物产量/(t·hm <sup>-2</sup> )	8.25	9.00	8.65	0.38	4.40
沟壑密度/(km·km <sup>-2</sup> )	0.00	8.59	2.33	3.30	141.60
坡度/(°)	0.75	5.57	3.11	1.62	52.10
垄坡角/(°)	0.00	82.61	44.0	28.00	63.70

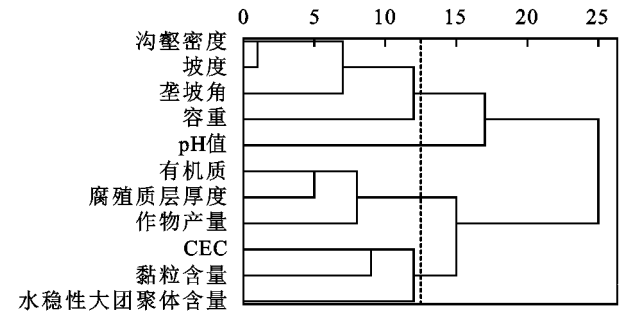


图 4 典型黑土区坡耕地退化程度诊断与评价指标聚类分析

典型黑土区坡耕地退化程度评价 TIS 和 MIS 中各指标的权重见(表 4)。基于 TIS 的 SDI(SDI-TIS)分布范围为 0.102~0.821,基于 MIS 的 SDI(SDI-MIS)分布区间为 0.160~0.850。 $E_f$  为 0.795, $E_r$  为 0.124。SDI-MIS 与 SDI-TIS 高度线性相关, $R^2$  为 0.888(图 5)。因此,MIS 精度较高,可用来评价典型黑土区坡耕地的退化程度。结果显示,未退化土壤占 12%,轻度退化土壤占 12%,中度及以上退化土壤占 76%。研究区内未退化和轻度退化坡耕地主要分布特点是坡度小(<1.5°)、沟蚀少、顺垄或小角度斜垄耕作以及腐殖质层厚,主要分布在研究区西北部 and 西南平原区。中度及以上退化坡耕地则以坡度大、沟蚀多、大角度斜垄或横垄耕作以及腐殖质层薄为主要特点,分布在北部漫川漫岗区 and 东南部丘陵区。

表 3 典型黑土区坡耕地退化程度诊断与评价 TIS 中各指标的 Spearman 相关系数

评价 指标	有机质	腐殖质层 厚度	黏粒 含量	pH 值	坡度	垄坡角	容重	水稳性大 团聚体含量	CEC	作物 产量	沟壑 密度
有机质	1										
腐殖质层厚度	0.557 **	1									
黏粒含量	0.404 *	0.309	1								
pH 值	0.002	0.155	-0.175	1							
坡度	-0.351	-0.617 **	-0.563 **	0.233	1						
垄坡角	-0.048	-0.265	-0.654 **	0.330	0.593 **	1					
容重	-0.286	-0.490 *	-0.307	-0.027	0.665 **	0.045	1				
水稳性大团聚体含量	-0.041	0.485 *	0.460 *	-0.064	-0.584 **	-0.489 *	-0.226	1			
CEC	0.154	0.280	0.493 *	0.078	-0.629 **	-0.359	-0.468 *	0.326	1		
作物产量	0.586 **	0.470 *	-0.144	0.365	0.078	0.279	0.036	-0.144	0.103	1	
沟壑密度	-0.440 *	-0.656 **	-0.395 *	0.205	0.843 **	0.516 **	0.654 **	-0.352	-0.437 *	-0.114	1

注: \* 表示  $p<0.05$ , \*\* 表示  $p<0.01$ ; 字体加粗的指标表示已纳入最小指标集。

表 4 典型黑土区坡耕地退化程度评价 TIS 和 MIS 中各指标的权重

TIS	有机质	腐殖质层 厚度	黏粒 含量	pH 值	坡度	垄坡角	容重	水稳性大 团聚体含量	CEC	作物 产量	沟壑 密度
权重	0.091	0.095	0.080	0.064	0.119	0.116	0.097	0.076	0.061	0.110	0.091
MIS	有机质	腐殖质层 厚度	黏粒 含量	pH 值	坡度	垄坡角					
权重	0.167	0.195	0.170	0.089	0.190	0.189					

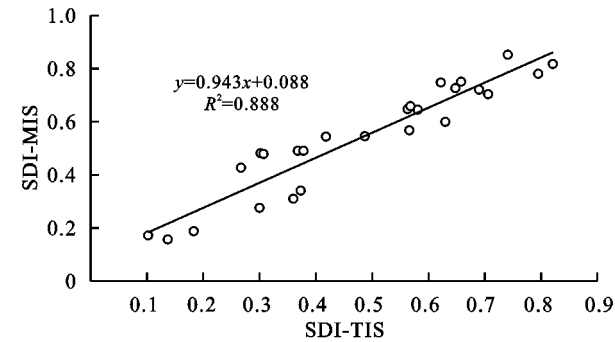


图 5 基于 TIS 与 MIS 的土壤退化指数(SDI)的回归分析

3.3 不同退化程度坡耕地土壤特征

由表 5 可知,SDI 与坡度、垄坡角、容重和沟壑密度呈极显著正相关( $p<0.01$ ),与腐殖质层厚度、CEC、有机质、水稳性大团聚体和黏粒含量呈极显著负相关( $p<0.01$ )。未退化土壤腐殖质层平均厚度为 100 cm,有机质含量平均为 64 g/kg;而剧烈退化的土壤腐殖质层平均厚度仅为 10 cm,有机质含量约占未退化土壤的 1/3(表 6)。土壤 pH(均值 5.4)较第二次全国土壤普查时拜泉县土壤 pH(均值 7)显著下降,呈酸化趋势。研究区内坡耕地退化不仅表现在土壤理化性质恶化,还表现在沟蚀造成的坡耕地面

表 5 土壤退化指数与土壤性质的相关性分析

项目	有机质	腐殖质层 厚度	黏粒 含量	pH 值	坡度	垄坡角	容重	水稳性大 团聚体含量	CEC	作物产量	沟壑密度
SDI	-0.585 **	-0.860 **	-0.642 **	-0.013	0.846 **	0.518 **	0.646 **	-0.512 **	-0.514 **	-0.226	0.826 **

注: \* 表示  $p<0.05$ ; \*\* 表示  $p<0.01$ 。

积缩减。坡度可能是影响研究区内土壤退化的主要因素之一,坡度越大,土壤有机质、CEC、水稳性大团聚体和黏粒含量越低,坡耕地退化越严重(表 5)。此外,坡度与垄坡角呈显著正相关,说明顺垄主要分布在坡度较小的坡面上,斜垄和横垄多分布在坡度较大的坡面上。垄坡角与沟壑密度呈显著正相关,即横垄和大角度斜垄耕作时土壤沟壑密度大,这与贯丛<sup>[14]</sup>、李飞等<sup>[25]</sup>的研究结果一致,顺垄与小角度斜垄坡面沟壑密度小更多可能是将坡面径流由单个垄沟相对均匀地导向了坡下,不易形成较大规模股流,而横垄在修建过程中往往做不到完全沿等高线构筑,在坡面纵向低凹处往往将附近坡面径流由“横垄”全部导向低凹处,更易形成集中股流而产生侵蚀沟。与王磊<sup>[26]</sup>、边锋<sup>[27]</sup>等的研究不一致,可能是由于这些前人的研究多采用模拟试验,研究土壤侵蚀与垄作方向关系时对不同垄作方向设定相同的坡度而未考虑坡度与垄坡角之间的协同关系,作物产量主要受有机质含量和腐殖质层厚度影响,但与 SDI 相关性不高,原因可能是由于长期重用轻养造成土壤性质恶化,产量难以保证,为了获得高产,农民大量施用农药和化肥,因此不同退化程度土壤上作物产量相差不大。

表 6 不同退化程度坡耕地土壤性质分布范围及均值

项目	未退化		轻度退化		中度退化		重度退化		剧烈退化	
	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	62.24~65.65	64.02	37.32~40.28	38.76	32.09~51.49	41.73	14.05~47.11	31.35	21.79~26.00	23.90
腐殖质层厚度/cm	80~110	100	25~70	43.33	20~80	51.25	5~60	24.50	5~15	10.00
黏粒含量/%	28.74~30.35	29.28	28.33~34.84	30.93	13.21~24.73	20.35	15.90~23.97	19.73	17.03~18.86	17.94
pH 值	4.93~5.53	5.33	5.28~5.50	5.38	5.13~6.09	5.53	3.73~5.90	5.34	5.21~5.70	5.45
坡度/(°)	0.75	0.75	1.26	1.26	1.78~3.41	2.75	3.01~5.57	4.32	4.02~5.57	4.80
垄坡角/(°)	0	0	21.24	21.24	22.01~71.77	55.7	21.93~82.61	55.29	21.93~60.56	41.25

4 结 论

典型黑土区坡耕地退化程度诊断与评价 TIS 包括 11 项指标,分别为沟壑密度、坡度、垄坡角、容重、水稳性大团聚体含量、有机质、pH 值、CEC、腐殖质层厚度、黏粒含量和作物产量。MIS 包括有机质、腐殖质层厚度、pH 值、黏粒含量、坡度和垄坡角。经验证,基于聚类分析构建的 MIS 有较高精确度,可用来评价典型黑土区坡耕地退化程度。本研究根据已有黑土区耕地退化程度评价的高频指标,同时借鉴其他区域耕地退化程度评价的相关指标,并根据野外调查新增了反映黑土区区域特色指标,是对前人研究的总结和完善。

研究区处于漫川漫岗区,地势起伏变化较复杂,坡度可能是影响土壤退化的主要原因之一,坡度较大的坡面上,土壤有机质含量显著降低,土壤粗化现象明显,结构性变差,沟蚀严重。近年来,施用农药、化肥以及连作导致土壤 pH 值下降,酸化问题日益突出,应采取有效措施降低坡度和垄作对土壤退化的影响。

参考文献:

[1] 刘宝元,张甘霖,谢云,等.东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J].科学通报,2021,66(1):96-106.

[2] 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J].水土保持学报,2004,18(2):66-70.

[3] 桑琦明,王磊,郑粉莉,等.东北黑土区坡耕地斜坡垄作与顺坡垄作土壤侵蚀对比分析[J].水土保持学报,2020,34(3):73-78.

[4] 中华人民共和国水利部.第一次全国水利普查水土保持情况公报[J].中国水土保持,2013(10):2-3.

[5] 阎百兴,沈波,刘宝元.东北黑土区水土流失与生态安全研究[M].北京:科学出版社,2009.

[6] 张兴义,张少良,刘爽,等.严重侵蚀退化黑土农田地力快速提升技术研究[J].水土保持研究,2010,17(4):1-5.

[7] 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.

[8] 孙永光.吉林省榆树市黑土退化机理的差异性研究[D].长春:东北师范大学,2006.

[9] 刘宝元,阎百兴,沈波,等.东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):1-8.

[10] 阎百兴,杨育红,刘兴土,等.东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J].中国水土保持,2008(12):26-30.

[11] 中华人民共和国水利部.全国水土保持规划(2015—2030)[Z].北京:2015.

[12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.

[13] 李晓玲,温美丽,高晓飞.吸管法与激光粒度仪法测定土壤机械组成的比较研究[J].安徽农业科学,2015,43(3):57-59.

[14] 贯丛,张树文,王让虎,等.三岔河流域坡耕地垄向与侵蚀沟分布耦合分析[J].资源科学,2019,41(2):394-404.

[15] 金慧芳,史东梅,陈正发,等.基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J].农业工程学报,2018,34(7):155-164.

[16] 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.

[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] 王加旭.关中农田土壤物理质量退化特征[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.

[19] 卢嘉,郑粉莉,安娟,等.降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征[J].生态学报,2016,36(8):2264-2273.

[20] 薛菁芳,高艳梅,汪景宽,等.土壤微生物量碳氮作为土壤肥力指标的探讨[J].土壤通报,2007,38(2):247-250.

[21] 臧逸飞,郝明德,张丽琼,等.26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J].生态学报,2015,35(5):1445-1451.

[22] 赵玉明,姜洪涛,王世界.东北黑土区不同地形垄向坡度的相对水土保持效益研究[J].水土保持研究,2014,21(5):28-34.

[23] 王计磊,李子忠.东北黑土区水力侵蚀研究进展[J].农业资源与环境学报,2018,35(5):389-397.

[24] 单洪伟,葛文锋,荣建东.东北黑土区土壤退化表现及产生因素分析[J].黑龙江水利科技,2009,37(4):199.

[25] 李飞,张树文,杨久春,等.侵蚀沟与耕地垄向之关系探究[J].水土保持研究,2015,22(1):1-4.

[26] 王磊,何超,郑粉莉,等.黑土区坡耕地横坡垄作措施防治土壤侵蚀的土槽试验[J].农业工程学报,2018,34(15):141-148.

[27] 边锋,郑粉莉,徐锡蒙,等.东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比[J].水土保持通报,2016,36(1):11-16.