



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406677

引用格式:王婷,陆忠军,辛蕊,等.马铃薯主产区土壤养分空间异质性及其肥力评价[J].科学技术与工程,2025,25(16):6682-6689.

Wang Ting, Lu Zhongjun, Xin Rui, et al. Spatial heterogeneity and fertility evaluation of soil nutrients in main potato producing areas[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(16): 6682-6689.

农业科学

## 马铃薯主产区土壤养分空间异质性及其肥力评价

王婷<sup>1</sup>, 陆忠军<sup>1\*</sup>, 辛蕊<sup>1</sup>, 黄楠<sup>1</sup>, 刘克宝<sup>1</sup>, 付斌<sup>1</sup>, 刘艳霞<sup>1</sup>, 宁静<sup>2</sup>

(1. 黑龙江省农业科学院农业遥感与信息研究所, 哈尔滨 150086; 2. 东北农业大学公共管理与法学院, 哈尔滨 150030)

**摘要** 明确马铃薯种植区土壤肥力空间变异特征,为研究区马铃薯土壤精准施肥和培肥管理提供理论依据。以黑龙江省克山农场为研究区,在马铃薯种植区采取 100 个样点,选取土壤 pH、有机质、全氮、全磷和全钾作为评价土壤肥力的指标,采用地统计学和地理信息系统(geographic information system, GIS)相结合,分析土壤养分的空间变异特征,并利用土壤肥力综合评价法评价研究区土壤肥力。结果表明:土壤呈弱酸性, pH 变异系数小;有机质、全氮、全磷、全钾的含量处于中高水平,属于中等强度变异。土壤 pH 属于中等强度空间自相关,有机质、全氮、全磷、全钾的空间自先关较弱。有机质和全氮的空间聚集性显著。研究区土壤养分空间变化特征明显,呈东西方向变化,中部土壤养分含量相对偏低。研究区土壤肥力处于中等以上水平,肥力良好的面积占总面积的 72%。克山农场土壤肥力良好,满足马铃薯生长需求。人为因素是影响土壤养分含量的主要因素。

**关键词** 土壤养分; 空间变异; 地统计; 土壤肥力综合评价

中图分类号 S158; 文献标志码 A

### Spatial Heterogeneity and Fertility Evaluation of Soil Nutrients in Main Potato Producing Areas

WANG Ting<sup>1</sup>, LU Zhong-jun<sup>1\*</sup>, XIN Rui<sup>1</sup>, HUANG Nan<sup>1</sup>, LIU Ke-bao<sup>1</sup>, FU Bin<sup>1</sup>, LIU Yan-xia<sup>1</sup>, NING Jing<sup>2</sup>

(1. Institute of Agricultural Remote Sensing and information, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China;

2. School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**[Abstract]** The spatial variation characteristics of soil fertility in potato growing area were clarified to provide theoretical basis for soil precise fertilization and fertilizer management in the study area. Taking Keshan Farm in Heilongjiang Province as the study area, 100 sample points were selected in the potato growing area, and soil pH, organic matter, total nitrogen, total phosphorus and total potassium were selected as the indicators to evaluate soil fertility. Geostatistics and geographic information system (GIS) were combined to analyze the spatial variation characteristics of soil nutrients, and soil comprehensive evaluation method was used to evaluate soil fertility in the study area. Results show that the soil is weakly acidic and the pH variation coefficient is small. The contents of organic matter, total nitrogen, total phosphorus and total potassium are at medium and high levels, belonging to moderate intensity variation. Soil pH is a moderate spatial autocorrelation, and the spatial autocorrelation of organic matter, total nitrogen, total phosphorus and total potassium is weak. The spatial accumulation of organic matter and total nitrogen is significant. The spatial variation of soil nutrients in the study area is obvious, showing an east-west direction, and the content of soil nutrients in the middle of the study area is relatively low. The soil fertility in the study area is above the medium level, and the area with good fertility accounts for 72% of the total area. The soil fertility of Keshan farm is good, which can meet the needs of potato growth. Human factors are the main factors affecting soil nutrient content.

**[Keywords]** soil nutrients; spatial variation; geographical statistics; comprehensive evaluation of soil fertility

土壤有机质和氮磷钾是植物生长必要的营养元素,是评价土壤肥力的重要指标。近年来,中国土壤退化问题突显,导致土壤养分失衡。因此,明

确土壤养分现状和评价土壤肥力能为合理种植、精准施肥以及合理开发利用土壤资源提供理论依据。了解耕地土壤肥力现状,对改善农田管理和提高农

收稿日期: 2024-09-05; 修订日期: 2025-03-24

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0711803); 黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关课题(2021ZXJ05A0501)

第一作者: 王婷(1995—),女,汉族,黑龙江哈尔滨人,硕士,研究实习员。研究方向:土地生态。E-mail:2102439644@qq.com。

\*通信作者: 陆忠军(1975—),男,汉族,黑龙江哈尔滨人,硕士,研究员。研究方向:农业遥感。E-mail:Iszyj@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

作物产量有重要意义,是实现耕地可持续利用和保障粮食安全的重要途径。土壤受自然因素和人为因素的综合作用,空间变异性较强。地统计学和空间插值弥补了经典统计学空间上的缺陷,被广泛应用在土壤养分空间变异特征的研究中。

近年来,学者们结合遥感和地统计学探究各个尺度的土壤养分空间变异特征,是土壤学研究热点。徐新朋等<sup>[1]</sup>采用传统统计学和地统计相结合,研究了吉林省中部玉米种植区耕地表层土壤养分空间变异特征。谢珊等<sup>[2]</sup>分析了贵州典型茶园的土壤剖面酸度和养分特征。赵明松等<sup>[3]</sup>运用地统计学分析县域丘陵区土壤有机质、全氮、速效磷和有效钾的空间变异特征及地形因素、土壤质地的土壤类型对土壤养分空间变异的影响。历彦玲等<sup>[4]</sup>采用地统计学分析土壤养分空间分异特征,对比分析了普通克里金、泛克里金、反距离权重等多种插值方法在土壤养分空间预测的自适应性。贾鲁净等<sup>[5]</sup>采用地统计学探究土壤养分空间变异特征,并通过单因素分析、冗余分析(redundancy analysis, RDA)排序图等方式分析土壤类型、地形及人为因素对土壤养分含量的影响。土壤肥力评价是农作物培肥管理的基础。目前,土壤肥力评价方法趋于综合化和多样化<sup>[6-7]</sup>,包括主成分-聚类综合分析<sup>[8]</sup>、内梅罗指数法<sup>[9]</sup>和基于权重综合评价法<sup>[10-11]</sup>等。土壤肥力综合肥力指数将单因素评价结果转换成

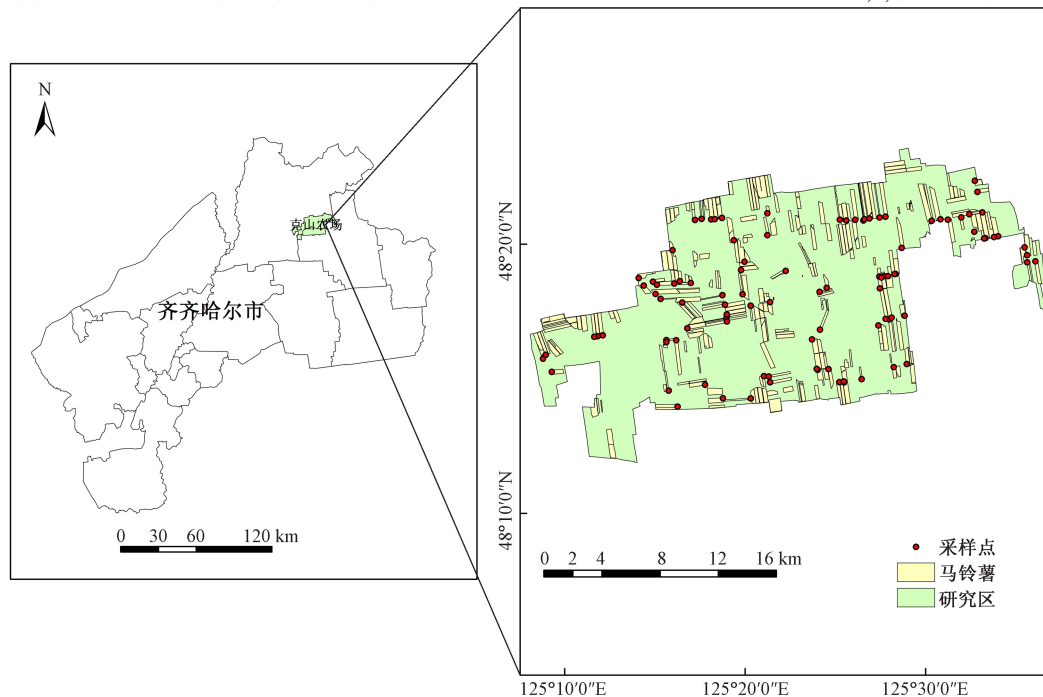
综合评价结果,能够更好地反映土壤肥力的高低。龙泽东等<sup>[12]</sup>运用模糊综合评价法计算湖南省土壤肥力综合指数并通过随机森林分析土壤肥力的主控因素。王远鹏等<sup>[13]</sup>采用地理信息系统(geographic information system, GIS)与地统计相结合分析东北稻田土壤土壤肥力指标的空间分布规律和主控因子。苏欣悦等<sup>[14]</sup>运用土壤肥力综合评价法和克里金插值评价烟田耕层土壤肥力及其空间变异特征。

综上所述,前人针对粮食作物产区土壤肥力评价的研究主要集中在稻田、烟田和玉米等,但是关于马铃薯主产区的土壤肥力研究较少。黑土区近年来土壤肥力下降,农田土壤退化问题突显。克山农场位于典型黑土区,是重要粮食产区,是马铃薯主产区之一。鉴于此,以克山农场为研究区,基于地统计学和GIS,运用土壤肥力综合评价法,探究土壤养分的空间分异特征及影响因素,并评价研究区土壤肥力水平。为克山农场精准施肥和土壤改良提供数据参考,以期马铃薯种植区土壤可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

克山农场(图1)隶属于黑龙江省农垦总局齐齐哈尔分局,地理坐标为(125°07'40"E ~ 125°37'30"E, 48°11'15"N ~ 48°24'07"N),位于黑龙江垦区西部,



基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作,底图无修改

图1 克山农场空间位置及采样点分布

Fig. 1 Spatial location and sampling point distribution of Keshan Farm

地处小兴安岭西麓,克山县与讷河市交界处。研究区土地总面积为 351.33 km<sup>2</sup>,耕地面积 291.10 km<sup>2</sup>。农场属于温凉性气候,年平均气温 1.3 °C,降水主要集中在 6~8 月,年平均降水量 503 mm,全年无霜期 120 d。海拔在 185~348 m,地势东高西低。地貌类型为漫岗丘陵主,土壤类型主要为黑土。研究区主要经济作物为大豆、玉米、马铃薯,其中马铃薯种植面积 31.13 km<sup>2</sup>,平均亩产 2.5 t,是黑龙江省马铃薯主产区之一,被誉为马铃薯之乡。

## 1.2 样品采集与分析

基于克山农场种植结构及样点分布的均匀性,于 2023 年 10 月在马铃薯种植区共采集 100 个土壤样点。利用全球卫星定位系统(global positioning system, GPS)定位,通过五点法在 0~20 cm 的耕层采集,充分混合去除杂质后,按四分法留取约 1 g 样本,并记录采样点地理位置信息。样品经过自然风干,去除异物和杂质后过筛,用于土壤理化性质测定。依据科学性、代表性和可获取性等原则,选取土壤 pH、有机质、全氮、全磷、全钾作为评价研究区土壤肥力指标<sup>[15]</sup>。土壤 pH 采用电位计法测定,有机质含量采用重铬酸钾氧化法测定,全氮含量采用半微量凯氏定氮法,全磷含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定,全钾含量采用氢氧化钠熔融-火焰光度计法测定<sup>[16]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 地统计学分析

土壤养分含量具有随机性和结构性,半变异方差函数模型是描述其空间变异程度的有效方法<sup>[17]</sup>,可表示为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式(1)中: $\gamma(h)$ 为间隔为 $h$ 的半方差函数值; $h$ 为间隔距离,又称为步长; $N(h)$ 为间隔为 $h$ 时的样点总数; $z(x_i)$ 、 $z(x_i + h)$ 分别为 $z(x)$ 在空间位置 $x_i$ 和 $x_i + h$ 处的实际测量值。

### 2.2 空间自相关

全局 Moran's  $I$  用来揭示研究变量的空间自相关程度<sup>[18]</sup>,可表示为

$$I = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式(2)中: $x_i$ 、 $x_j$ 分别为在 $i$ 和 $j$ 处的测量值,g/kg; $\bar{x}$ 为平均数; $w_{ij}$ 为空间权重矩阵; $n$ 为样本个数。

全局 Moran's  $I$  的值在 -1~1,大于 0 表示正相关,小于 0 表示负相关。|Moran's  $I$ | 越接近于 1,空

间相关性越强。利用标准化后的  $Z$  检验相关显著性,其绝对值大于 2.58,表示空间相关性显著。

### 2.3 土壤肥力评价

土壤肥力用来描述土壤支持作物的生长能力。建立完整的土壤肥力评价体系主要包括以下步骤。

(1)评价指标选取。选取土壤 pH、有机质、全氮、全钾、全磷 5 个能反映研究区土壤肥力的指标。

(2)计算权重。由于各指标对土壤肥力的贡献度不同,采用相关系数法确定各指标权重,计算公式为

$$w_i = \frac{\bar{x}_{\text{mean}}}{\sum_i \bar{x}_i} \quad (3)$$

式(3)中: $w_i$ 为指标权重; $\bar{x}_{\text{mean}}$ 为某指标与其他指标相关系数的平均值; $\sum_i \bar{x}_i$ 为各指标相关系数平均值的总和。

各指标权重如表 1 所示。

(3)确定指标隶属度。为消除评价指标实测值不同量纲的影响,利用隶属度函数对评价指标进行标准化处理。土壤 pH 隶属度运用抛物线隶属度函数[式(5)]计算<sup>[19]</sup>,土壤有机质、全氮、全钾、全磷隶属度均采用 S 型隶属度函数[式(4)]计算。

S 型可表示为

$$f(x) = \begin{cases} 1 - \frac{0.9(x - x_3)}{(x_4 - x_3)}, & x_3 < x < x_4 \\ 1, & x_2 < x < x_3 \\ 0.9(x - x_1)(x_2 - x_1), & x_1 < x < x_2 \\ 0.1, & x \leq x_1; x \geq x_4 \end{cases} \quad (4)$$

抛物线型可表示为

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq x_2 \\ \frac{0.9(x - x_1)}{x_2 - x_1} + 0.1, & x_1 < x < x_2 \\ 0.1, & x \leq x_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f(x)$ 为指标隶属度; $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 为转折点。

参考全国第二次土壤普查《全国九大农区及省级耕地质量监测指标分级标准》(GB/T 33469—2016)(表 2)和文献[15],结合克山农场实际土壤养分现状,确定隶属度函数的转折点和阈值如表 3 所示。

表 1 评价指标权重  
Table 1 Weights of evaluation indicators

指标	pH	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )
相关系数 平均值	0.30	0.31	0.24	0.42	0.18
权重	0.21	0.22	0.17	0.29	0.12

(4)计算土壤肥力综合评价指数。依据模糊矩阵加乘原则,运用各指标的隶属度和权重进行加权求和计算土壤综合肥力评价指数<sup>[20]</sup>,其计算公式为

$$IFI = \sum_{i=1}^n N_i W_i \quad (6)$$

式(6)中: $n$ 为土壤肥力评价指标个数; $N_i$ 和 $W_i$ 分别为第 $i$ 项指标的隶属度和权重值;IFI介于0~1,越接近1,土壤肥力越高。

## 2.4 数据处理

利用 Excel 进行整理指标数据;土壤肥力指标的描述性统计、K-S 检验和 Person 相关性分析在 SPSS 26.0 完成。正态分布检验  $K-S > 0.05$ ,符合正态分布,不符合正态分布需进行数据转换;半变异方差函数分析及拟合模型计算在 GS + 9.0 完成。运用 ArcGIS 10.2 进行土壤肥力指标克里金插值分析、土壤综合肥力空间特征分析及相关制图。

表 2 东北地区土壤肥力分级标准

Table 2 Soil fertility classification standards in Northeast China

指标	土壤肥力分级				
	高	较高	中	较低	低
pH	6.0~7.5	5.5~6.0	5.0~5.5	4.5~5.0	<4.5
有机质含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	>40	30~40	20~30	10~20	<10
全氮含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	>2.5	1.5~2.5	1~1.5	0.5~1	<0.5
全磷含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	>1	0.8~1	0.6~0.8	0.5~0.6	<0.5
全钾含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	>25	20~25	15~20	10~15	<10

表 3 各指标转折点

Table 3 Turning points of indicators

指标	pH	全氮含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有机质含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )
$x_1$	5.5	1.0	20	0.8	15
$x_2$	6.5	2.5	50	1.0	20
$x_3$	7.0	—	—	—	—
$x_4$	7.5	—	—	—	—

表 4 土壤养分描述性特征

Table 4 Descriptive characteristics of soil nutrients

指标	样点数	最小值	最大值	均值	标准差	偏度	峰度	变异系数/%	分布类型
pH	100	5.25	6.59	5.84	0.27	-0.04	0.32	4.58	正态分布
有机	100	27.97 g/kg	58.37 g/kg	41.81 g/kg	6.75	-0.01	-0.51	16.13	正态分布
全氮	100	0.97 g/kg	2.84 g/kg	1.86 g/kg	0.33	0.02	0.56	17.67	正态分布
全磷	100	0.72 g/kg	1.33 g/kg	0.98 g/kg	0.13	0.36	-0.05	13.42	对数正态
全钾	100	13.78 g/kg	22.53 g/kg	18.34 g/kg	2.51	-0.18	-1.35	13.69	正态分布

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤养分描述性统计

对研究区 100 个土壤样点肥力指标进行经典统计学分析,如表 4 所示。土壤 pH、有机质、全氮、全磷、全钾的均值分别为 5.84、58.37、2.84、1.33、22.53 g/kg。参考全国第二次土壤普查东北区耕地质量检测指标分级标准,土壤呈弱酸性,有机质、全氮、全磷含量均处于较高水平,全钾含量处于中等水平。变异系数在 <10%、10%~90%、>90% 区间,分别表示弱变异、中等变异、强变异。土壤 pH 变异系数最小,为 4.58%,属于弱变异。有机质、全氮、全磷、全钾的变异系数分别为 16.13%、17.67%、13.42%、13.69%,均属于中等变异。pH 和全钾的偏度值为分别为 -0.04、-0.18,其分布峰左偏。其他指标偏度为正数,分布峰右偏。经过 K-S 非参数检验,pH、有机质、全氮、全磷均符合正态分布,全钾经过对数转换后符合正态分布。

### 3.2 土壤养分空间变异特征

通过 GS + 9.0 软件对各土壤肥力指标进行地统计学分析,得出相关拟合参数如表 5 所示。依据决定系数  $R^2$  大小选择最优模型, $R^2$  越接近 1,拟合效果越好。有机质、全氮和全磷的理论模型为球状模型,pH 和全钾的理论模型为指数模型。5 个指标的决定系数均大于 0.4,理论模型具有一定有效性和合理性。pH 和有机质的块金值较大,说明随机误差较大;全氮、全磷、全钾的块金值较小,表示在采样范围内几乎其空间分布不受生态过程的影响。研究区有机质、全氮、全磷、全钾的块金系数 >75%,表明其空间变异主要受成土母质、地形等结构性因素影响,受人类活动等随机性因素影响较弱,空间自相关性较弱。土壤 pH 属于中等强度的空间相关性,其大小受随机因素和结构性因素影响。5 种指标的变程均较小,说明其空间分布区域不具有连续性,空间自相关范围较小。全局 Moran's  $I$  指数均大于 0,土壤肥力指标间呈现一定程度的空间自相关,且有机质和全氮的  $Z$  大于 2.56,表示空间聚集性显著。

### 3.3 土壤养分空间分布格局

基于对研究区土壤养分半方差函数分析,运用克里金插值进行空间分析,得出5种土壤养分的空间分布,如图2所示。研究区土壤养分空间变化特征显著,呈东西方向变化,与地形变化存在一定的一致性。有机质含量高值区主要分布在西部地势较高区域,低值主要集中在中部。全氮的高值区主要集中在东部海拔较高区域,低值区主要分布在西南部和中部。全磷的含量呈现从西向东逐渐增加的趋势,主要原因为东部土壤沉积和侵蚀现象明显。全钾含量空间呈现斑块状分布,变化趋势不规则,高值区主要分布在东部。土壤pH整体呈弱酸性,低值区主要分布在研究区西北和东南区域。整体来看,研究区中部土壤养分含量相对偏低,可能原因中部生态稳定性差,黑土区易产生侵蚀。

### 3.4 土壤养分影响因素分析

地形因素是影响土壤养分理化性质的主要因

素,同时随着人类对土地资源的开发和利用,人类活动对土壤养分的空间分布影像愈发显著。选取高程、坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、村庄距离和道路距离共7个环境因子,进一步揭示地形和人类活动等对土壤养分空间分异的影响(表6)。地形因素中,平面曲率、坡向和高程与土壤养分间不存在显著相关性。全氮含量与剖面曲率呈显著正相关( $P < 0.05$ );pH与坡度呈现显著负相关( $P < 0.01$ )。全氮和有机质含量与村庄距离呈显著负相关( $P < 0.05$ ),距离村庄越近,全氮和有机质的含量越高。由于村庄是人类活动的主要区域,村庄附近生产活动频繁,全氮和有机质含量在村庄附近累积。全磷含量与道路距离呈现显著正相关( $P < 0.05$ ),主要交通干道附近全磷含量较低。研究表明,居民点距离、道理距离等通过影响农业生产活动,进一步对土壤养分空间分布产生影响,并影响强度越来越明显<sup>[21]</sup>。

表5 土壤养分半方差函数模型及相关参数

Table 5 Semi-variance function model of soil nutrients and related parameters

指标	模型	块金值 $C_0$	基台值 $(C_0 + C)$	块金效应 $[C_0 / (C_0 + C)] / \%$	变程/m	决定系数 $R^2$	Moran's $I$	$Z$
pH	指数模型	0.010	0.057	72.6	0.54	0.706	0.036	0.713
有机质	球状模型	4.700	36.450	87.1	0.24	0.497	0.076	2.615
全氮	球状模型	0.004	0.079	94.4	0.23	0.482	0.166	2.711
全磷	球状模型	0.001	0.013	93.4	0.15	0.402	0.065	1.153
全钾	指数模型	0.002	0.017	88.0	0.24	0.523	0.024	0.209

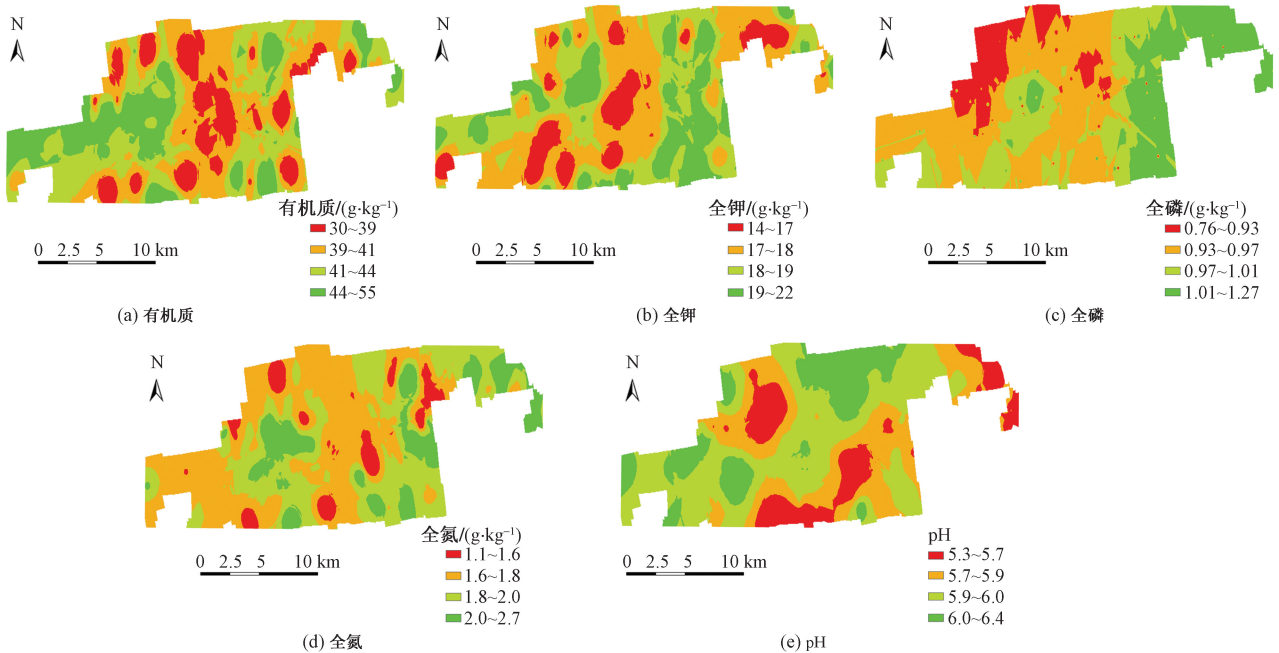


图2 土壤养分空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil nutrients

表6 土壤养分与地形及环境因子的相关系数

Table 6 Correlation coefficients of soil nutrients with topography and environmental factor

指标	水平曲率	坡面曲率	坡向	坡度/(°)	海拔/m	村庄距离/m	道路距离/m
pH	0.093	0.096	0.136	-0.274 **	-0.116	0.085	0.112
有机质	-0.119	0.074	-0.011	0.022	-0.037	-0.258 *	0.283
全氮	-0.060	0.244 *	-0.040	-0.039	0.128	-0.168 *	-0.152
全磷	0.039	-0.047	-0.103	0.138	0.135	0.214	0.124 *
全钾	-0.072	-0.096	0.062	-0.043	-0.001	0.144	0.210

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

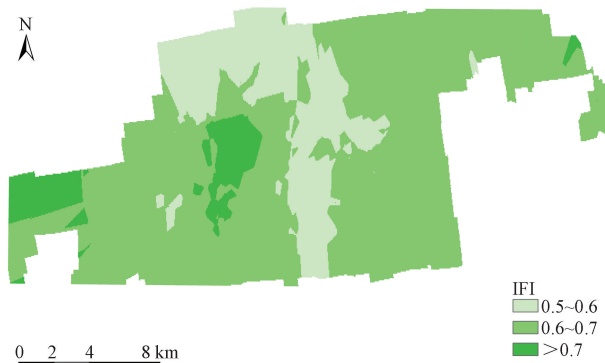


图3 土壤肥力等级空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil fertility levels

### 3.5 土壤肥力综合评价

土壤肥力评价是生产管理者深入了解农业生产管理系统和土壤质量的依据。运用土壤综合肥力指数 (IFI), 选取 pH、有机质、全氮、全磷和全钾 5 个指标, 评价研究区土壤肥力, 并通过克里金插值得出土壤肥力空间分布, 如图 3 所示。结合东北黑土区土壤肥力划分标准和研究区实际土壤现状, 将研究区土壤肥力划分为优秀 (IFI > 0.7)、良好 (0.6 < IFI ≤ 0.7)、中等 (IFI < 0.6) 3 个等级<sup>[14]</sup>。研究区肥力中等面积占总面积的 21%, 主要集中在研究区中部。有 72% 的面积土壤肥力良好。肥力优秀的面积占总面积的 7%, 呈零散分布。综上, 研究区总体土壤肥力良好。土壤肥力受土壤自身养分、作物吸收能力和各因子协调程度综合影响。因此, 农场可采用水肥一体、减肥减药等措施提高马铃薯产量, 良种良法配套, 实现马铃薯产业可持续发展。

## 4 讨论

土壤肥力是评价耕地地力, 土壤质量的重要指标。土壤肥力评价中每个指标的特点和丰富度直接影响肥力水平。研究区土壤 pH 和全钾处于中等水平, 有机质、全氮、全磷处于较高水平, 土壤肥力良好, 说明研究区总体土壤状况满足马铃薯生长需要。结果表明, 土壤 pH 呈弱酸性, 呈现弱变异, 这与吴会军等<sup>[22]</sup>的研究结果相似, 说明土壤 pH 空间自相关性较弱, 空间不连续。因此, 针对研究区西

北和东南区域土壤酸性较高区域适量施加石灰来调节, 增施有机肥, 提升土壤肥力<sup>[23]</sup>。土壤有机质和全氮的块金效应和全局自相关 Z 值较高, 表明两者空间聚集性显著, 空间变异特征存在一定相似性, 与童童等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。有机质和全氮是土壤养分重要指标, 对粮食作物产量影响较大, 是土壤稳定的关键因素<sup>[25]</sup>。针对研究区土壤有机质和全氮较低的区域, 采取秸秆还田、作物轮作、有机无机配施等一系列种植措施。全磷和全钾均属于中等强度变异, 全磷的含量与磷肥的施用息息相关, 长期投入导致土壤中磷元素难以转化, 导致土壤质量下降, 不利于作物生长。全钾与全磷相比, 钾元素在土壤中易流失。通过秸秆还田保护性耕种措施能有效改善土壤中钾的含量<sup>[5]</sup>。马铃薯种植区土壤肥力综合评价是马铃薯精准施肥和提升马铃薯产量的依据, 其土壤肥力受土壤母质、田间管理、农户自身等综合影响。因此, 研究区中部土壤肥力较低的区域, 适量增加有机肥和微量元素肥料的施用。针对肥力中高区域, 可适量减少肥料投入, 培育耐肥性好的马铃薯品种。据实地调查, 大部分马铃薯种植区化肥投入量过度, 存在面源污染的风险。应基于马铃薯需肥特点, N、P、K 三大元素的配方比例依据大配方、小调整的原则, 合理配比, 控氮、减磷、追钾, 提高马铃薯产量<sup>[26]</sup>。

## 5 结论

(1) 农场土壤呈弱酸性, pH 变异系数小; 有机质、全氮、全磷、全钾的含量处于中高水平, 属于中等强度变异; 土壤 pH 属于中等强度空间自相关, 有机质、全氮、全磷、全钾的空间自先关较弱; 有机质和全氮的空间聚集性显著。

(2) 研究区土壤养分空间变化特征明显, 呈东西方向变化, 与地形变化存在一定的一致性, 中部土壤养分含量相对偏低; 居民点距离、道理距离等人为因素是影响土壤含量的主要因素。

(3) 研究区整体土壤肥力良好, 肥力中等面积占总面积的 21%, 肥力良好面积占总面积的 72%。肥力优秀的面积占总面积的 7%。

(4)采用地统计学分析 2023 年土壤肥力指标的空间变异特征,由于数据量有限,未能对土壤养分含量的变异特征进行时空序列的详尽分析。本次研究只选取 5 种土壤理化指标进行土壤肥力评价,忽略土壤其他理化指标和养分对土壤肥力的作用。因此,未来应从大尺度角度,多重土壤养分指标,对土壤肥力指标的空间分异性及肥力评价进行更系统、深入的研究。

### 参 考 文 献

- [1] 徐新朋, 赵士诚, 张云贵, 等. 吉林省玉米种植区土壤养分空间变异特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1342-1350.  
Xu Xinpeng, Zhao Shicheng, Zhang Yungui, et al. Study on spatial variation of soil nutrients in maize growing areas of Jilin Province [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Journal, 2011, 17(6): 1342-1350.
- [2] 谢珊, 陈祖拥, 舒英格, 等. 贵州典型茶园土壤酸化及其养分变化特征[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(19): 8025-8035.  
Xie Shan, Chen Zuyong, Shu Yingge, et al. Soil acidification and nutrient change characteristics of typical tea plantations in Guizhou [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(19): 8025-8035.
- [3] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 江淮丘陵地区土壤养分空间变异特征——以安徽省定远县为例[J]. 土壤, 2016, 48(4): 762-768.  
Zhao Mingsong, Li Decheng, Zhang Ganlin, et al. Spatial variation characteristics of soil nutrients in Jianghuai hilly region: a case study of Dingyuan County, Anhui Province [J]. Soil Science, 2016, 48(4): 762-768.
- [4] 厉彦玲, 赵庚星. 黄河三角洲典型地区耕地土壤养分空间预测[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 489-503.  
Li Yanling, Zhao Gengxing. Spatial prediction of cultivated soil nutrients in typical Yellow River Delta Region [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 489-503.
- [5] 贾鲁净, 杨联安, 封涌涛, 等. 宝鸡市农耕地土壤养分空间变异及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(12): 135-143.  
Jia Lujing, Yang Lian'an, Feng Yongtao, et al. Spatial variation of soil nutrients and its influencing factors in agricultural areas of Baoji City [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(12): 135-143.
- [6] Lilburne L, Sparling G, Schipper L. Soil quality monitoring in New Zealand: development of an interpretative framework [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2004, 104(3): 535-544.
- [7] Lima A C R, Brussaard L, Totola M R, et al. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality [J]. Applied Soil Ecology, 2013, 64: 194-200.
- [8] 陈欢, 曹承富, 张存岭, 等. 基于主成分-聚类分析评价长期施肥对砂姜黑土肥力的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 609-617.  
Chen Huan, Cao Chengfu, Zhang Cunling, et al. Evaluation of long-term fertilization effect on fertility of sandy ginger black soil based on principal component and cluster analysis [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(3): 609-617.
- [9] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4197-4204.  
Bao Yaoxian, Xu Minggang, Lü Fentao, et al. Evaluation method of soil fertility change under long-term fertilization [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(20): 4197-4204.
- [10] 叶回春, 张世文, 黄元仿, 等. 北京延庆盆地农田表层土壤肥力评价及其空间变异[J]. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3151-3160.  
Ye Huichun, Zhang Shiwen, Huang Yuanfang, et al. Evaluation and spatial variation of farmland surface soil fertility in Yanqing Basin, Beijing [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(15): 3151-3160.
- [11] 柳开楼, 黄晶, 张会民, 等. 基于红壤稻田肥力与相对产量关系的水稻生产力评估[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1425-1434.  
Liu Kailou, Huang Jing, Zhang Huimin, et al. Rice productivity assessment based on the relationship between fertility and relative yield in red soil paddy fields [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Journal, 2018, 24(6): 1425-1434.
- [12] 龙泽东, 孙耿, 黄晶, 等. 近 40 年湖南省不同地区耕地土壤肥力变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2024(11): 37-48.  
Long Zedong, Sun Geng, Huang Jing, et al. In recent 40 years in different areas of Hunan Province farmland soil fertility variation characteristics [J]. Soil and Fertilizer in China, 2024(11): 37-48.
- [13] 王远鹏, 黄晶, 柳开楼, 等. 东北典型县域稻田土壤肥力评价及其空间变异[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 256-266.  
Wang Yuanpeng, Huang Jing, Liu Kailou, et al. Soil fertility evaluation and spatial variation of rice field in typical counties of Northeast China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Journal, 2020, 26(2): 256-266.
- [14] 苏欣悦, 王晋峰, 程晓梅, 等. 云南省典型县域烟田土壤肥力演变及综合评价[J]. 土壤, 2023, 55(6): 1380-1388.  
Su Xinyue, Wang Jinfeng, Cheng Xiaomei, et al. Soil fertility evolution and comprehensive evaluation of typical county tobacco fields in Yunnan Province [J]. Soil Science, 2023, 55(6): 1380-1388.
- [15] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
Xu Jianming, Zhang Ganlin, Xie Zhengmiao, et al. Soil quality index and evaluation [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
Bao Shidan. Soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] 戴巍, 赵科理, 高智群, 等. 典型亚热带森林生态系统碳密度及储量空间变异特征[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7528-7538.  
Dai Wei, Zhao Keli, Gao Zhiqun, et al. Spatial variation of carbon density and storage in typical subtropical forest ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(22): 7528-7538.
- [18] Fu W J, Zhao K L, Zhang C S, et al. Using Moran's I and geostatistics to identify spatial patterns of soil nutrients in two different long-term phosphorus-application plots [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, 174(5): 785-798.

- [19] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. 土壤学报, 1995(4): 362-369.  
Sun Bo, Zhang Taolin, Zhao Qiguo. Comprehensive evaluation of soil fertility in hilly areas of southeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1995(4): 362-369.
- [20] Chen S, Lin B W, Li Y Q, et al. Spatial and temporal changes of soil properties and soil fertility evaluation in a large grain; production area of subtropical plain China [J]. Geoderma, 2020, 357: 113937.
- [21] 杨静涵, 刘梦云, 张杰, 等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分空间变异特征及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2020, 35(3): 743-754.  
Yang Jinghan, Liu Mengyun, Zhang Jie, et al. Spatial variation of soil nutrients in a small watershed in the gully region of the Loess Plateau and its influencing factors [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(3): 743-754.
- [22] 吴会军, 张淑香, 任意. 黑龙江克山县耕地肥力要素多元分析[J]. 中国土壤与肥料, 2019(4): 53-57.  
Wu Huijun, Zhang Shuxiang, Ren Yi. Multivariate analysis of cultivated land fertility factors in Keshan County, Heilongjiang Province[J]. China Soil and Fertilizer, 2019(4): 53-57.
- [23] 袁兴超, 李博朱, 仁凤, 等. 不同钝化剂对铅锌矿区周边农田镉铅污染钝化修复研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 807-817.  
Yuan Xingchao, Li Bozhu, Ren Feng, et al. Study on remediation of cadmium and lead pollution in farmland surrounding lead-zinc mining area with different passivating agents[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2019, 38(4): 807-817.
- [24] 童童, 梅帅, 刘莹, 等. 基于 GIS 的环巢湖地区土壤养分空间变异特征研究 [J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1522-1531.  
Tong Tong, Mei Shuai, Liu Ying, et al. Study on spatial variation characteristics of soil nutrients in Chaohu Lake area based on GIS [J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2023, 42(7): 1522-1531.
- [25] 苑亚茹, 韩晓增, 李娜, 等. 不同熟化措施对黑土母质发育的新成土壤有机碳库的影响 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1175-1182.  
Yuan Yaru, Han Xiaozeng, Li Na, et al. Effects of different ripening measures on the organic carbon pool of new soil from black soil parent material development [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1175-1182.
- [26] 黄萍. 马铃薯施肥技术 [J]. 种子科技, 2023, 41(19): 112-114.  
Huang Ping. Technology of potato fertilization [J]. Seed Science and Technology, 2023, 41(19): 112-114.