



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2600665

引用格式:王梦璐,鲁力,王史年,等.基于多源数据的松嫩平原西部土壤养分空间变异与分区管理[J].科学技术与工程,2026,26(27):11662-11673.

Wang Menglu, Lu Li, Wang Shinian, et al. Spatial variation of soil nutrients and zoning management in western Songnen Plain based on multi source data[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(27): 11662-11673.

基于多源数据的松嫩平原西部土壤养分 空间变异与分区管理

王梦璐^{1,2,3}, 鲁力^{1,2,3}, 王史年^{1,2,3}, 苏小四^{1,2,3}, 宋铁军^{1,2,3}, 沈晓芳^{1,2,3}, 董维红^{1,2,3*}

(1. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130012; 2. 吉林大学新能源与环境学院, 长春 130012;

3. 吉林省水资源与水环境重点实验室, 长春 130012)

摘 要 松嫩平原西部是中国重要的商品粮基地,但土壤盐碱化和肥力退化问题共同制约着农业发展,且养分空间异质性增加了农田管理的难度。针对该区域养分失衡与盐碱并存的复杂条件,采集了 61 个 0~20 cm 表层土壤样品,测试了 pH、电导率(electrical conductivity, EC)、总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)、总有机碳(total organic carbon, TOC)和含水率(moisture content, MC)等指标,融合了统计分析、地统计学和模糊 C 均值聚类法(fuzzy C-means, FCM),通过模糊性能指数(fuzzy performance index, FPI)和归一化分类熵(normalized classification entropy, NCE)确定最优分区数,并采用 ANOVA 和 LSD 检验进行结果验证,为区域精准施肥和分区管理提供了科学方案。研究表明:①土壤整体呈弱碱性, pH 变异小(变异系数 CV=8.7%),其他指标均呈中等变异(CV=50.3%~76.5%);②pH 与 TN、TP、TOC 呈显著负相关($P<0.01$), TN、TP 与 TOC 呈显著正相关($P<0.01$);③EC 和 MC 呈强空间相关性,受结构性因素控制; pH 和养分指标呈中等空间相关性,受结构与随机因素共同影响;④研究区划分为 4 个管理分区(MZ1~MZ4),各分区面积均衡(20.83%~29.03%)、土壤属性差异显著,整体呈现自西南至东北土壤肥力递增、盐碱化递减的空间格局: MZ1 位于松原市南部与白城市西部,实施精准施肥与盐碱改良结合策略; MZ2 位于松原市西部和长春市西部,实施平衡施肥与水肥一体化管理策略; MZ3 位于白城市,遵循先改盐、后培肥的策略; MZ4 位于长春市,推行精准培肥与差异化水肥管理方针。

关键词 松嫩平原西部; 空间变异; 管理分区; 精准施肥

中图法分类号 S158;

文献标志码 A

Spatial Variation of Soil Nutrients and Zoning Management in Western Songnen Plain Based on Multi Source Data

WANG Meng-lu^{1,2,3}, LU Li^{1,2,3}, WANG Shi-nian^{1,2,3}, SU Xiao-si^{1,2,3}, SONG Tie-jun^{1,2,3},
SHEN Xiao-fang^{1,2,3}, DONG Wei-hong^{1,2,3*}

(1. The Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130012, China; 3. Jilin Provincial Key Laboratory of

Water Resources and Environment, Changchun 130012, China)

[Abstract] The western Songnen Plain is an important commodity grain base in China, but the issues of soil salinization and fertility degradation jointly restrict agricultural development, and the spatial heterogeneity of nutrients increases the difficulty of farmland management. In response to the complex conditions of nutrient imbalance and coexisting salinization in this region, 61 surface soil samples (0~20 cm) was collected, testing indicators such as pH, electrical conductivity (EC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total organic carbon (TOC), and moisture content (MC). The statistical analysis, geostatistics, and fuzzy C-means clustering (FCM) was integrated, determining the optimal number of zones through the fuzzy performance index (FPI) and normalized classification entropy (NCE), and validating the results using ANOVA and LSD tests. A scientific solution for regional precision fertilization and zoning management was provided. The findings show follows. The soil is overall weakly alkaline, with a small variation in pH (CV = 8.7%), while other indicators exhibit moderate variation (CV = 50.3%~76.5%); pH is significantly negatively correlated with TN, TP, and TOC ($P<0.01$), while TN, TP, and TOC are significantly positively correlated with each other ($P<0.01$); EC and

收稿日期: 2026-01-30 修订日期: 2026-03-24

第一作者: 王梦璐(2002—),女,汉族,黑龙江大庆人,硕士研究生。研究方向:旱区地下水文过程与生态效应。E-mail: mlwang24@mails.jlu.edu.cn。

* 通信作者: 董维红(1974—),女,汉族,河北保定人,博士,教授。研究方向:水文地球化学。E-mail: dongweihong@jlu.edu.cn。

MC show strong spatial correlation, controlled by structural factors, while pH and nutrient indicators exhibit moderate spatial correlation, influenced by both structural and random factors. The study area is divided into four management zones (MZ1 ~ MZ4), with balanced areas (20.83% ~ 29.03%) and significant differences in soil properties, showing a spatial pattern of increasing soil fertility and decreasing salinization from southwest to northeast. MZ1 is located in the southern part of Songyuan and the western part of Baicheng, implementing a combined strategy of precision fertilization and salinity improvement; MZ2 is located in the western part of Songyuan and the western part of Changchun, implementing a balanced fertilization and water-fertilizer integration management strategy; MZ3 is located in Baicheng, following the strategy of first improving salinity, then enhancing fertility; MZ4 is located in Changchun, promoting precision fertilization and differentiated water-fertilizer management strategies.

[**Keywords**] Western Songnen Plain; spatial variation; management zones; precision fertilization

土壤是农业生产的基础,其质量状况直接影响作物产量与土地资源的可持续利用^[1]。松嫩平原是中国重要的商品粮主产区之一,该平原西部地区以旱作耕地为主,农田在空间上连片分布,呈现出典型的集约化农田利用特征^[2]。然而,季节性干旱与土壤盐碱化等问题共同破坏了该地区的土壤水盐环境,造成养分积累与利用困难,进而制约了农业生产的稳定性^[3-5]。因此,揭示松嫩平原西部土壤养分的空间分异规律,并在此基础上科学合理地划分管理分区,对实施精准施肥、提升农业管理效率、保障农业可持续发展至关重要。

在上述背景下,如何借助量化方法刻画土壤养分的空间分异特征,并据此开展科学合理的管理分区,成为当前研究关注的重点^[6-7]。地统计学与空间聚类方法的引入,为该问题提供了重要的技术支撑。例如,基于地理信息系统(geographic information system, GIS)的空间分析能够有效刻画如环巢湖地区土壤养分的空间变异格局^[8];在不同作物种植区的实践中,研究者已通过融合测土配方数据、地理信息技术及多种土壤属性,实现了县域尺度的专用肥配方筛选与分区管理,为提高养分利用效率提供了可行路径^[9-10];在某些沿海地区,通过引入模糊聚类方法划分养分管理单元,为类似生态脆弱农田的精准管理提供了有益参考^[11-12]。在方法层面,模糊聚类方法,尤其是模糊C均值聚类(fuzzy C-means, FCM),因其能够反映土壤属性在空间上的连续渐变特性,相较于K均值等硬聚类方法,在处理复杂、异质性高的土壤系统时表现出更好的适应性与合理性^[13-15]。

然而,现有研究普遍存在一定的局限性。许多研究仅关注单一或少数土壤指标,无法全面反映土壤系统的综合空间变异特征;尤其是针对松嫩平原西部这一典型集约化农业区,融合多源土壤属性开展系统性管理分区研究仍显不足。为此,以松嫩平原西部(吉林省)为研究区,通过野外调查与室内分析获取多种土壤属性数据,综合运用经典统计学、地统计学和FCM聚类方法,揭示土壤养分的空间分异规律,并基于此划分科学合理的管理分区。不仅采用综合性的方法体系,而且通过系统性地融合土

壤多源数据,可为该地区以及类似农业区域的精准农业实践提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处中国松嫩平原西部(吉林省)(43°57'N ~ 46°09'N, 122°31'E ~ 126°14'E),行政区划涵盖吉林省白城市、松原市及长春市部分区域(图1)。区域整体地势平坦,属冲积-洪积平原地貌,主要由松花江、嫩江等河流长期冲积作用形成,地表起伏较小,平均海拔为200 ~ 300 m。

松嫩平原西部(吉林省)气候类型为中温带半干旱-半湿润大陆性季风气候,冬季寒冷漫长,夏季温热多雨。多年平均降水量为300 ~ 650 mm,降水主要集中于5—9月,且由东向西递减,形成“东部相对湿润、西部偏干旱”的水分分布格局。

在地貌与气候条件的综合影响下,松嫩平原西部(吉林省)发育了以黑土、草甸土和盐碱土为主的土壤类型。其中,黑土和草甸土主要分布于中东部地区,而西部低平地及排水条件较差区域盐碱土分布广泛,土壤理化性质的空间差异较为显著。上述自然条件的综合作用使松嫩平原西部土壤属性呈现出显著的空间分异特征,为开展土壤空间变异分析和农田管理分区研究奠定了良好的区域基础。

1.2 土壤样品采集与分析

根据采样点的代表性和空间分布均匀性原则,综合考虑成土母质、土壤类型、地形地貌单元及土地利用类型等因素,于2024年9—10月在研究区共采集了61个土样,取样深度为0 ~ 20 cm。在每个样点采集0 ~ 20 cm表层土壤样品,样品密封后带回实验室,土样经自然风干、研磨,并通过2 mm筛后备用。土壤样品的各项理化指标测定方法如下:电导率(electrical conductivity, EC)采用重量法辅助的浸出液测定;含水率(moisture content, MC)采用烘干称重法测定;总有机碳(total organic carbon, TOC)含量通过重铬酸钾氧化-容量法测定;全氮(total nitrogen, TN)含量依据凯氏定氮法测定;全磷(total phosphorus, TP)含量利用酸溶-钼锑抗比色法检测;

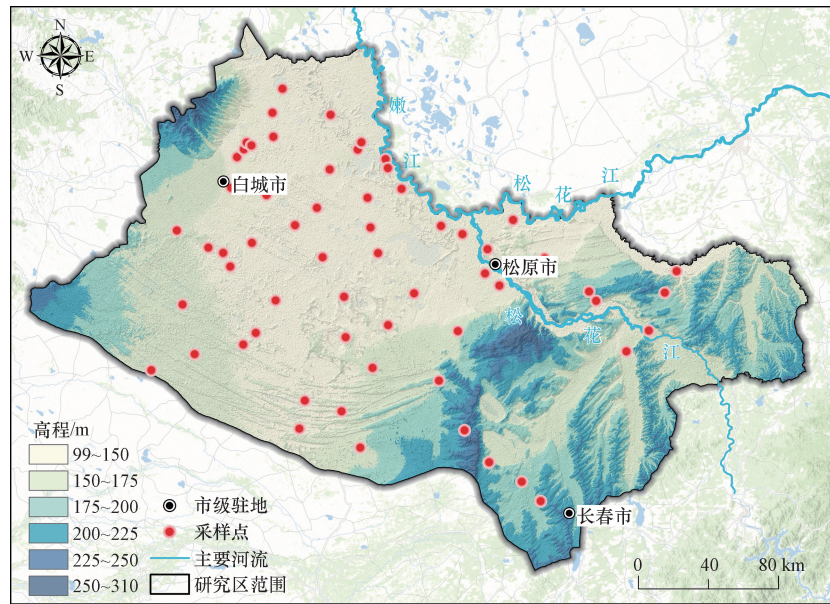


图1 研究区地理位置及采样点分布图

Fig. 1 Geographical location of the study area and soil sampling sites

pH 使用 PHS-3C 型 pH 计测定。以上所有样品测试工作在吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室完成,具体操作方法参照《土壤农业化学分析方法》^[16]。

1.3 地统计学方法

地统计学是定量刻画土壤空间变异特征、构建空间预测模型并生成土壤属性分布图的重要分析工具^[17]。其基本分析流程主要包括数据准备、探索性数据分析、实验半方差函数分析、理论模型拟合以及克里金插值等步骤。

首先运用 SPSS 20.0 进行土壤属性描述性统计分析,并采用柯尔莫可洛夫-斯米洛夫检验方法 (Kolmogorov-Smirnov test, K-S test) 对土壤各理化属性数据的正态分布特征进行检验。同时,计算土壤属性之间的相关系数矩阵,以分析不同变量的变异特征及其相关关系。在此基础上,为进一步揭示土壤属性的空间分布规律,借助 ArcGIS 10.8 软件开展空间分析。其中,半方差函数作为定量表征土壤属性空间变异结构的核心工具被引入,是克里金插值方法的理论基础,其计算公式为

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

式(1)中: h 为样本分类距离; $Z(x_i)$ 为变量在空间位置 x_i 处的值; $Z(x_i + h)$ 为变量在空间位置 $x_i + h$ 处的值; $N(h)$ 为分离距离为 h 的样本对数。

在半方差函数中,包含块金值 (C_0)、基台值 ($C_0 + C$) 和变程 (Range) 3 个核心参数,并由此衍生出反映变量空间相关性的块金效应 [$C_0 / (C_0 + C)$]。块金值 C_0 表示随机因素引起的变异,其来源

包括采样误差以及小于最小采样间隔内土地利用方式、耕种等人为因素。偏基台值 C 表示结构因素 (地形、地下水埋深、土壤母质等) 引起的变异^[18]。块金效应 $C_0 / (C_0 + C)$ 表示随机因素引起的变异占系统总变异的比,可作为判断研究区变量空间相关程度的依据。

1.4 模糊 C-均值聚类

模糊 C 均值聚类算法 (fuzzy C-means clustering, FCM) 的基本原理是通过迭代优化目标函数,使其在预设迭代次数或收敛准则下逐步逼近最小值。作为一种无监督学习方法,该算法无需人工指定样本类别,能够自动挖掘输入数据的内在结构特征,进而实现对高维数据的聚类分析^[19]。FCM 算法已广泛应用于农业分区、地形地貌分类等领域,其显著优势在于量化样本点对不同簇的隶属程度,充分利用样本数据中的隐含的关联信息,从而有效提升复杂数据场景下聚类分析精度。该算法的目标函数及约束条件表述为

$$J_m(U, \nu) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ik}^m d_{ik}^2 \quad (2)$$

式(2)中: $J_m(U, \nu)$ 为模糊 C 均值聚类的目标函数值; n 为样本数; c 为聚类类别总数; u_{ik} 为第 k 个样本的土壤属性对于第 i 个聚类类别的隶属度值; m 为模糊加权指数 ($1 \leq m < \infty$); d_{ik} 为第 k 个样点的土壤属性与第 i 个聚类中心之间的距离。

1.5 聚类有效性检验

利用模糊性能指数 (fuzzy performance index, FPI) 和归一化分类熵 (normalized classification entro-

py,NCE) 两个指标来评估分区结果是否合理^[20]。FPI 表示数据矩阵 X 的模糊 C 均值分区的模糊度,其取值范围在 $0 \sim 1$,取值越接近 0 说明不同分区的模糊度越小,分类界线越清晰;取值越接近 1,说明不同分区的模糊度越大,分类界线越模糊。其计算公式为

$$FPI = 1 - \frac{c}{c-1} \left(1 - \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^c u_{ik}^2/n \right) \tag{3}$$

$$NCE = \frac{n}{n-c} \left(- \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^x u_{ik} \log_a u_{ik}/n \right) \tag{4}$$

式中:FPI 为模糊性能指数;NCE 为归一化分类熵; a 为常数。

NCE 用来模拟数据矩阵 X 的模糊 c 分区的分解量,其取值范围在 $0 \sim 1$,取值越接近 0,说明分类界线越明显,聚类效果越好。

2 结果与分析

2.1 土壤属性特征

松嫩平原西部表层土壤各属性的描述统计结果如表 1 所示,研究区土壤整体呈碱性,pH 变化范围为 $6.87 \sim 10.46$,变异微弱($CV = 8.7\%$);土壤电导率(EC)的变化范围为 $66.9 \sim 673 \mu\text{s}/\text{cm}$ 。全氮(TN)、全磷(TP)、总有机碳(TOC)和含水率(MC)的变化范围分别为 $270.68 \sim 1\,937.09 \text{ mg}/\text{kg}$ 、 $141.36 \sim 1\,274.68 \text{ mg}/\text{kg}$ 、 $3.25 \sim 31.41 \text{ g}/\text{kg}$ 和 $3.17\% \sim 43.4\%$ 。基于变异系数(CV)的空间变异性分析表明,除 pH 属于弱变异性外,其余属性(EC、TN、TP、TOC、MC)的变异系数介于 $50.3\% \sim 76.5\%$,

符合中等变异性标准($10\% \leq CV < 100\%$),表现出中等强度的空间变异。

2.2 土壤属性相关性分析

在 SPSS 20.0 中,采用柯尔莫可洛夫-斯米洛夫检验方法(Kolmogorov-Smirnov test,K-S test)对土壤属性进行正态检验,然后基于相关性分析得到相关系数矩阵(表 2)。相关性分析结果表明,土壤 pH 与全磷(TP)、全氮(TN)和总有机碳(TOC)均呈显著负相关关系($r = -0.373$ 、 -0.460 和 -0.431 , $P < 0.01$)。此外,土壤 pH 与电导率(EC)呈显著正相关关系($r = 0.548$, $P < 0.01$),而 pH 与土壤含水率(MC)之间相关性不显著($r = -0.208$, $P > 0.05$)。

不同养分指标之间表现出较强的相关性,其中 TN 与 TOC 之间呈极显著正相关($r = 0.963$, $P < 0.01$),TP 与 TN、TP 与 TOC 之间亦呈显著正相关($r = 0.735$, 0.724 , $P < 0.01$)。此外,TP、TN 和 TOC 与土壤含水率(MC)之间均呈显著正相关($r = 0.337$, $P < 0.01$; $r = 0.323$, $P < 0.01$; $r = 0.280$, $P < 0.05$)。

2.3 土壤属性的空间分布特征

为系统揭示研究区土壤属性的空间分布规律,首先基于 GS+ 软件构建了各土壤属性的实验半方差函数,并通过拟合理论模型对其空间结构特征进行分析(图 2)。在此基础上,采用 ArcGIS 10.8 中的普通克里金插值方法,对 6 项土壤属性进行线性无偏最优估计,并绘制了相应的土壤养分空间分布图(图 3),以实现从空间结构分析到空间分布格局表达的完整表征。

表 1 土壤属性描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of soil properties

土壤属性	极小值	极大值	中位数	均值	等级	标准差	偏度	峰度	变异系数/%
pH	6.87	10.46	8.77	8.75	弱	0.76	-0.16	1.22	8.7
电导率/($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	66.90	673.00	116.80	166.82	中	127.55	2.52	6.49	76.5
全磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	141.36	1 274.68	362.84	422.13	中	217.91	1.65	3.25	51.6
全氮/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	270.68	1 937.09	738.20	846.88	中	425.73	0.82	-0.12	50.3
总有机碳/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	3.25	31.41	8.93	10.58	中	5.88	1.21	1.53	55.6
含水率/%	3.17	43.40	10.79	13.04	中	8.37	1.67	3.07	64.2

表 2 土壤各属性的相关系数表($n = 61$)
Table 2 Correlation coefficients among measured soil properties ($n = 61$)

土壤属性	pH	电导率	全磷	全氮	总有机碳	含水率
pH	1					
电导率	0.548**	1				
全磷	-0.373**	-0.050	1			
全氮	-0.460**	-0.238	0.735**	1		
总有机碳	-0.431**	-0.216	0.724**	0.963**	1	
含水率	-0.208	0.094	0.337**	0.323*	0.280*	1

注:*表示在 $P < 0.05$ 水平上显著,**表示在 $P < 0.01$ 水平上显著。

在空间结构分析方面,块金效应(Nugget/Sill)被用作判定土壤属性空间相关性程度的重要指标^[21]。通常认为,块金效应值小于25%表明强空间相关性,25%~75%为中等空间相关性,大于75%则为弱空间相关性。由表3可知,土壤pH、TP、TN和TOC的块金效应值分别为25.9%、35.0%、27.5%和27.2%,均属于中等空间相关性范畴,表明这些属性的空间变异同时受到结构性与随机性因素的共同影响。相比之下,EC与MC的块金效应值分别仅为2.7%和9.2%,表现出较强的空间相关性,说明其空间格局主要受土壤形成过程、母质等结构性因素主导。进一步分析表明,各土壤属性的理论半方差模型拟合效果良好。其中,pH、EC与含水量符合指数模型,TP与TN符合高斯模型,TOC则符合线性模型。各模型的标准平均值接近0,标准均方根接近1,说明模型拟合效果理想,理论模型能较好地反映实际空间变异结构(表3)。

从空间分布格局来看(图3),各土壤属性在研

究区内呈现出明显的地域分异与斑块化分布特征,东西方向差异尤为突出。具体表现为:TP、TN、TOC与MC整体呈“西部低、东部高”的分布趋势,白城市及松原市西部地区含量较低,松原市东部与长春市部分区域相对富集,且土壤水分与养分含量在空间上表现出明显的协同性;而pH与EC则呈“西部高、东部低”的分布格局,白城市西部土壤碱性最强,向东逐渐过渡为中性土壤环境,显示出与养分指标相反的空间变化趋势。

2.4 土壤养分管理分区

土壤养分管理分区的本质是依据土壤养分含量空间分异特征,将区域土地划分为若干同质管理单元,使同一分区内土壤属性具有空间趋同性,不同分区间存在显著差异。基于土壤属性的描述性统计结果,采用模糊C均值聚类(fuzzy C-means, FCM)算法对研究区土壤养分数据进行聚类分析(通过Python编程实现聚类计算)。由聚类有效性指数的结果可见,基于插值数据的FPI/NCE在C=4

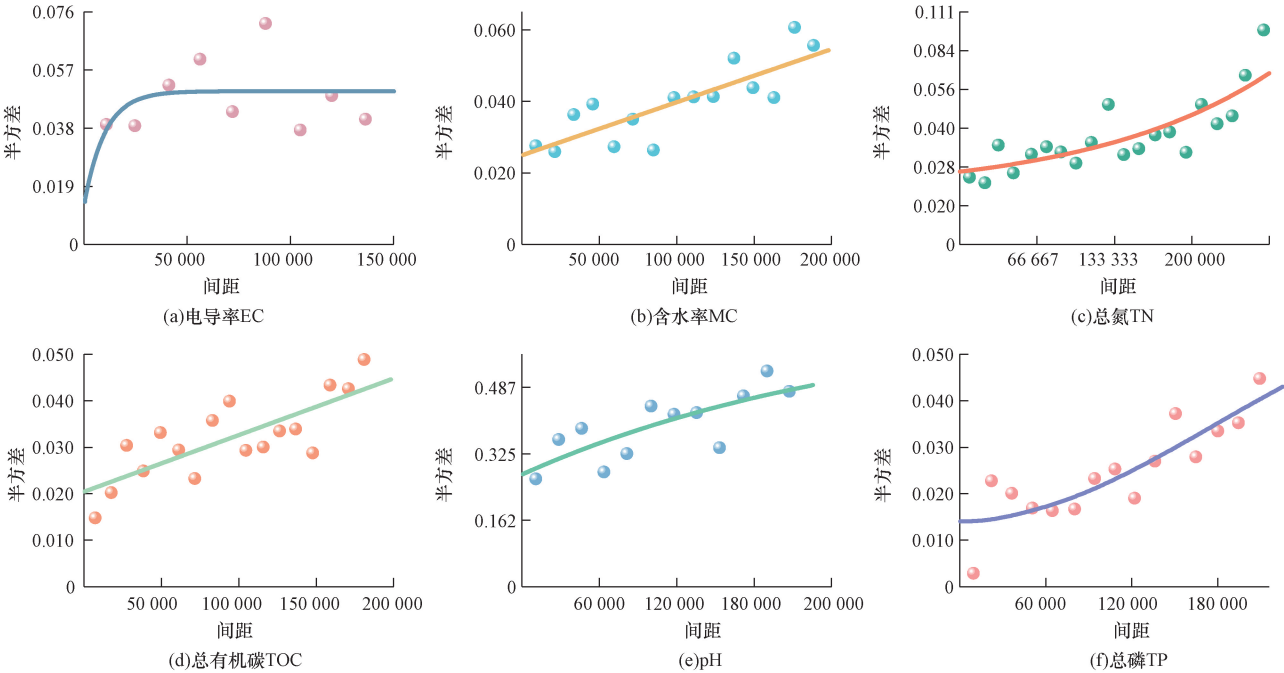


图2 半变异函数图

Fig. 2 Plot of semi-variance function

表3 土壤属性变异函数模型及相关参数

Table 3 Variation function model and related parameters of soil properties

土壤属性	理论模型	块金值(C_0)	偏基台值(C)	块金效应 $[C_0/(C_0 + C)]$	标准平均值	标准均方根
pH	指数模型	0.534 4	0.670 9	0.259	0.036 5	0.996 7
电导率	指数模型	0.601 8	0.398 2	0.027	0.032 2	0.789 7
全磷	高斯模型	0.686 0	0.377 8	0.350	0.004 1	1.048 3
全氮	高斯模型	0.541 8	0.581 9	0.275	0.014 4	0.928 3
总有机碳	线性模型	0.509 8	0.556 9	0.272	0.012 2	0.895 1
含水量	指数模型	0.806 5	0.226 1	0.092	0.020 3	0.899 4

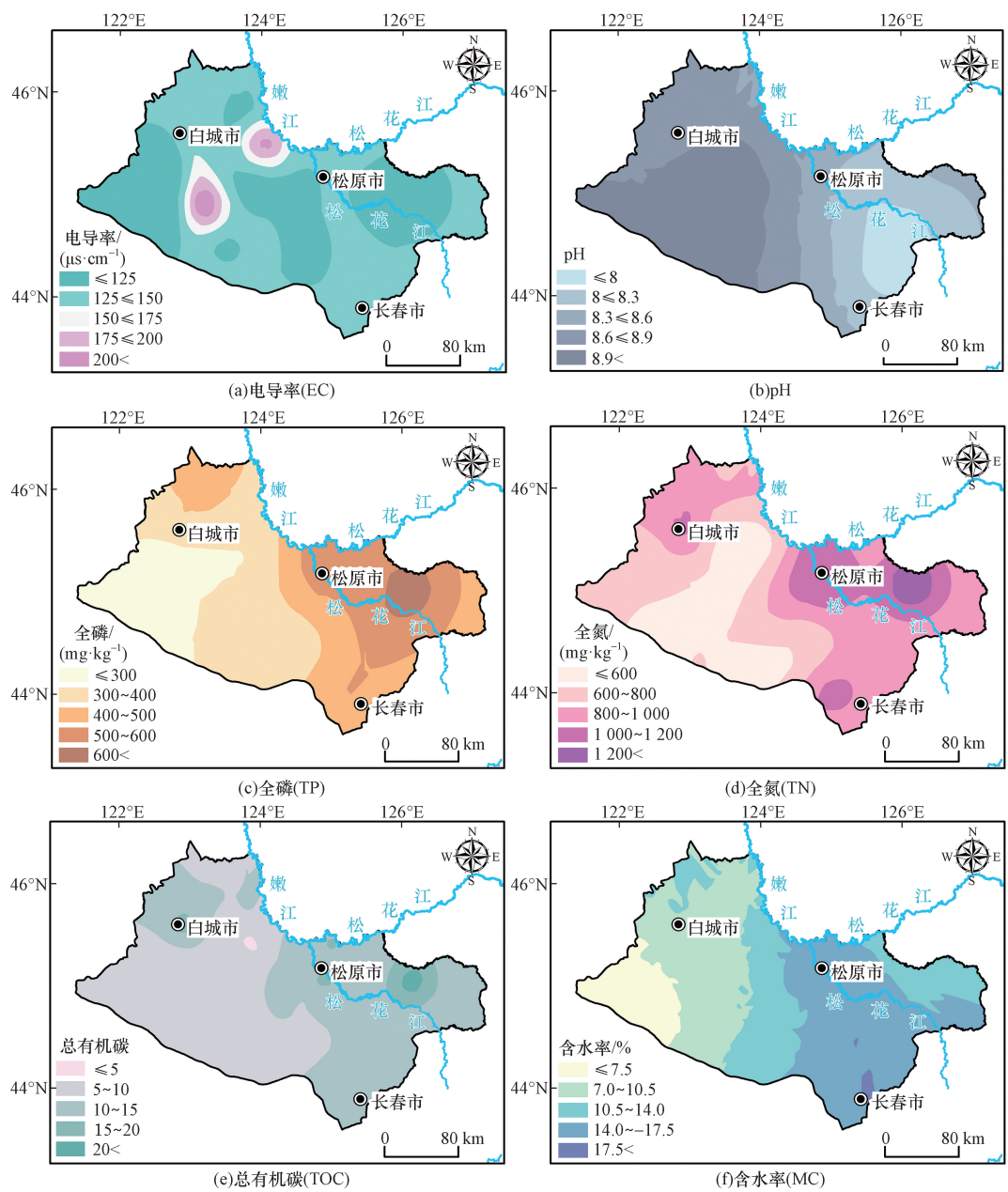


图3 不同土壤属性指标的空间分布图

Fig.3 Spatial distribution map of different soil property indicators

时达到最优(接近0),表明此时不同分区间的模糊度最低、分类效果最佳(图4)。据此,将研究区域划分为4个土壤养分管理分区记为MZ1~MZ4(图5)。

各分区的土壤属性如下:MZ1分区位于松原市南部和白城市西部,EC介于109.91~135.81 μs/cm,TN、TP和TOC分别处于565.42~1 032.28 mg/kg、260.59~426.62 mg/kg和7.07~13.45 mg/kg,土壤养分总体适中。MZ2分区大部分位于松原市西部、长春市西部,小部分位于白城市西部,EC介于117.23~134.77 μs/cm,TN、TP和TOC分别为672.38~1 088.81 mg/kg、320.88~558.21 mg/kg和7.93~14.19 g/kg,土壤养分含量较高,适宜常规

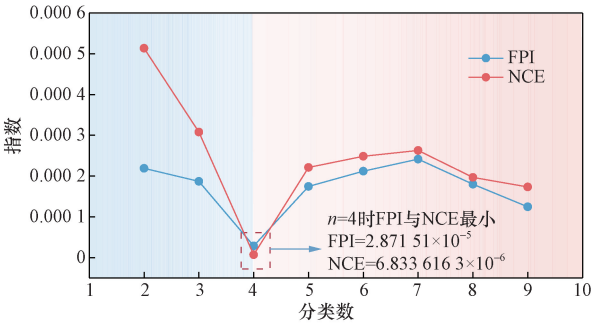


图4 不同聚类数下的模糊性能指数(FPI)和归一化分类熵(NCE)曲线图

Fig.4 Fuzziness performance index and normalized classification entropy values versus number of clusters

农业生产。MZ3 分区集中于白城市, EC 介于 109.74 ~ 141.19 $\mu\text{s}/\text{cm}$, TN、TP 和 TOC 分别在 458.85 ~ 773.63 mg/kg 、253.38 ~ 390.39 mg/kg 和 5.26 ~ 9.32 g/kg , 土壤养分水平较低, 盐碱化问题突出。MZ4 分区位于长春市, EC 介于 109.90 ~ 126.39 $\mu\text{s}/\text{cm}$, TN、TP 和 TOC 分别为 858.06 ~ 1 399.90 mg/kg 、429.86 ~ 622.99 mg/kg 和 10.38 ~ 20.22 g/kg , 土壤肥力最优。整体上, 4 个分区呈现出自西南向东北土壤养分水平逐步升高的空间分异规律。

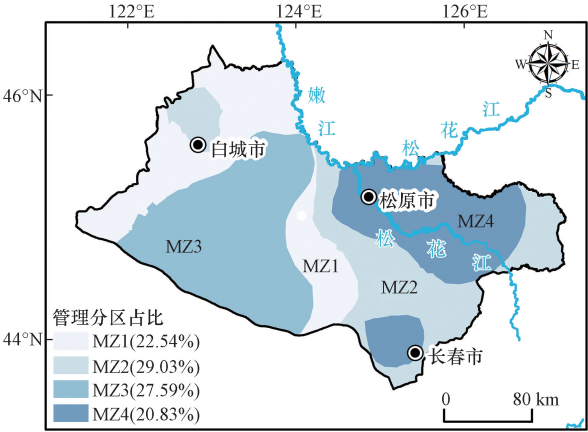


图5 研究区土壤养管理分区及其面积占比(MZ1 ~ MZ4)

Fig.5 Soil nutrient management zones and their area proportions in the study area (MZ1 ~ MZ4)

2.5 管理区精度校验

为了验证基于模糊 C 均值聚类 (FCM) 方法构建的管理分区在表征土壤属性空间异质性方面的有效性,从“分区间差异显著性”和“分区内属性一致性”两个核心维度进行了精度校验。

分析过程中,主要依托表 4(土壤属性描述性统计及 ANOVA-LSD 结果)和图 6(土壤属性均值对比图)中的数据。

表 4 展示了 6 项关键土壤属性 pH、电导率 (EC)、全氮(TN)、全磷 (TP)、含水率 (MC) 和总有机碳(TOC)的描述性统计数据,包括极小值、极大值、均值、标准差和变异系数等信息。如图 6 所示为带误差线的柱状图,直观展示了各分区在土壤属性上的均值差异,并通过误差线反映了各分区内部属性的离散程度。图 6 中所示的误差线与表 4 中的变异系数数据相互印证,共同支持了分区内属性一致性的结论。

ANOVA 分析显示,所有土壤属性在 MZ1 ~ MZ4 分区间存在极显著差异 ($P < 0.01$),表明不同分区在土壤属性上具有显著差异。通过 LSD 多重比较进一步验证了分区间的明确差异。在分区内属性一致性方面,各分区土壤属性的变异系数均较低 (0.01 ~ 0.14),表明各分区内土壤属性一致性较好,具有较小的变异性。此外,4 个分区的面积占比相对均衡 (20.83% ~ 29.03%),分布合理,有利于后续实施分区管理与精准农业措施。

表 4 各管理分区土壤属性的描述性统计及 ANOVA-LSD 多重比较结果

Table 4 Descriptive statistics of soil properties and results of ANOVA-LSD multiple comparisons for each management zone

分区	变量	pH	电导率/ $(\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1})$	全氮/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	全磷/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	含水率/%	总有机碳/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$
MZ1	极小值	8.41	109.91	565.42	260.59	8.38	7.07
	极大值	9.05	135.81	1032.28	426.62	13.66	13.45
	均值	8.77 ^b	128.95 ^a	763.22 ^c	352.04 ^c	10.79 ^c	9.43 ^c
	标准差	0.11	3.74	85.24	40.22	1.20	1.13
	变异系数	0.01	0.03	0.11	0.11	0.11	0.12
MZ2	极小值	8.19	117.23	672.38	320.88	10.06	7.93
	极大值	8.96	134.77	1088.81	558.21	15.58	14.19
	均值	8.55 ^c	118.96 ^c	871.98 ^b	460.76 ^b	12.56 ^b	10.75 ^b
	标准差	0.13	2.21	63.28	42.93	0.78	0.89
	变异系数	0.01	0.02	0.07	0.09	0.06	0.08
MZ3	极小值	8.62	109.74	458.85	253.38	7.45	5.26
	极大值	9.58	141.19	773.63	390.39	13.15	9.32
	均值	9.1 ^a	123.78 ^b	579.4 ^d	303.95 ^d	9.95 ^d	7.17 ^d
	标准差	0.17	6.66	55.82	28.09	1.33	0.70
	变异系数	0.02	0.05	0.10	0.09	0.13	0.10
MZ4	极小值	7.61	109.90	858.06	429.86	11.32	10.38
	极大值	8.75	126.39	1 399.90	622.99	16.82	20.22
	均值	8.29 ^d	108.43 ^d	1 057.36 ^a	544.97 ^a	13.42 ^a	13.20 ^a
	标准差	0.19	3.49	100.61	45.02	1.15	1.81
	变异系数	0.02	0.03	0.10	0.08	0.09	0.14
ANOVA 显著性		$P < 0.01$	$P < 0.01$	$P < 0.01$	$P < 0.01$	$P < 0.01$	$P < 0.01$

注:小写字母为显著性标记,不同分区无相同字母表示存在显著性差异($P < 0.05$),有相同字母则代表无显著差异,每项土壤属性的均值按从大到小依次标注为 a、b、c、d。

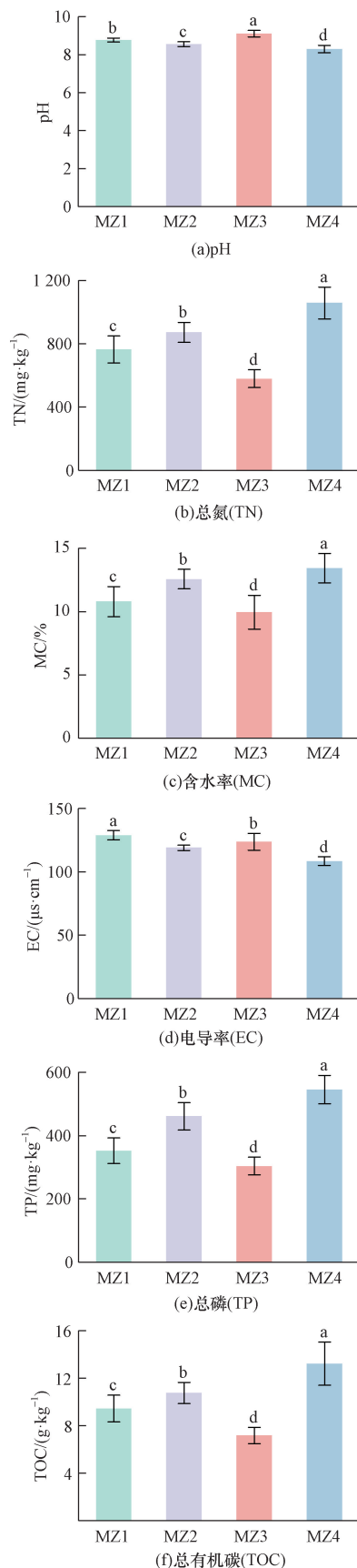


图6 各管理分区土壤属性均值对比图

Fig. 6 Comparison of soil property mean values across management zones

综上所述,基于 FCM 聚类法的管理分区在“分区间差异显著性”和“分区内属性一致性”方面均表现优异,为精准施肥和分区管理提供了可靠依据。

3 讨论

3.1 不同土壤属性间相关性的驱动机制

研究区地形由西向东逐渐抬升,并伴随年降水量增加、蒸发量和干燥度指数降低的水热条件变化(图7)。这一地形与气候格局决定了不同区域土壤水分补给与蒸发强度的差异,从而影响盐分在土壤中的迁移与累积方式。

已有研究表明,在降水较少、蒸发较强的地区,盐分随土壤水分上移并在表层积累,土壤 pH 和 EC 通常维持在较高水平;而在水分条件相对较好的地区,盐分向下迁移增强,土壤碱化程度随之降低^[22-25]。同时,在高 pH、高 EC 条件下,磷易与 Ca^{2+} 结合形成难溶性磷酸盐,限制其在土壤中的积累;盐碱胁迫还可降低微生物活性并改变有机质分解过程,从而减少土壤氮和有机碳的储存^[26-28]。上述过程在盐碱化程度相近的区域内往往同时发生,使不同养分指标呈现出相似的变化趋势。

相关性分析结果(表2)表明,土壤 pH 与 TN、TP 和 TOC 均呈显著负相关,而 TN、TP 与 TOC 之间则具有较强的正相关关系。这表明,在研究区内,养分含量随盐碱化程度变化而同步增减。空间分布结果进一步印证了这一关系(图3):研究区西部白城市相关区域 pH 与 EC 较高, TN、TP 与 TOC 含量整体偏低;中部松原市相关区域表现为过渡特征;东部长春市相关区域 pH 与 EC 较低,对应的养分含量相对较高。

综合土壤 pH、EC 与 TN、TP 和 TOC 之间的相关性分析结果(表2)以及上述指标的空间分布特征(图3)可以看出,研究区内土壤 pH 和 EC 与养分含量之间具有一致的变化规律,表现为高 pH、高 EC 区域对应较低的养分水平,而低 pH、低 EC 区域则对应较高的养分含量。

3.2 土壤管理分区方案的合理性分析

在松嫩平原(吉林省)的土壤属性分区方案中,基于模糊 C 均值聚类(FCM)方法将研究区划分为4个管理分区(MZ1~MZ4)。MZ1 分区位于松原市南部以及白城市西部。MZ2 分区大部分区域位于长春市、松原市西部,小部分位于白城市西部。MZ3 分区位于白城市。MZ4 分区位于长春市。通过对土壤属性空间分异特征的分析,可以看出该分区结果较好地对应了区域土壤属性的空间分异格局,并与当地的地形、水热条件相吻合,体现了划分方法的科学性与合理性。

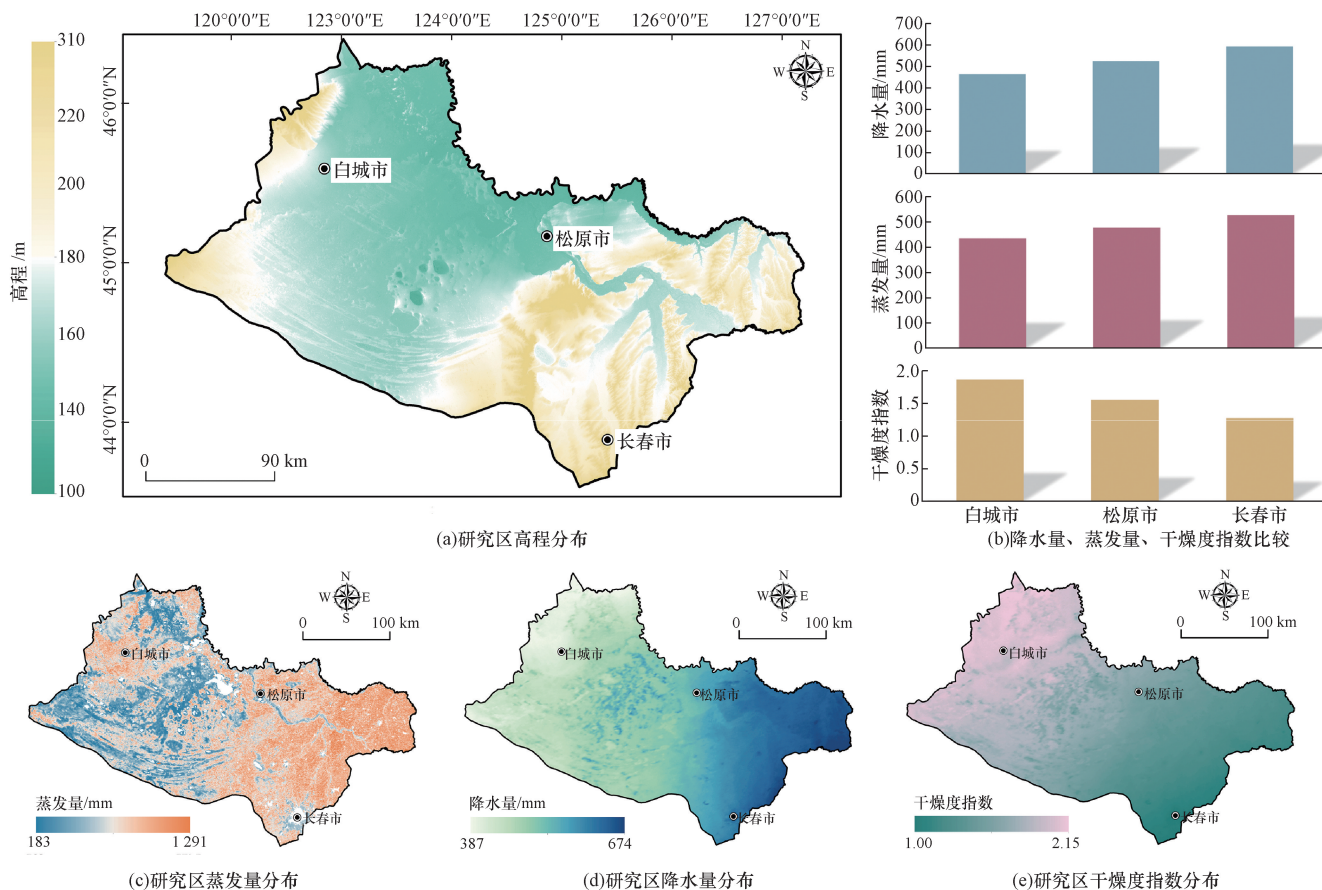


图7 研究区地形、水热气候因子及干燥度指数的空间分布特征

Fig. 7 Spatial distributions of topography, hydro-climatic factors, and aridity index in the study area

MZ1 分区中白城市区域覆盖了大面积的盐碱地,导致该分区的 EC 在 4 个分区中最高。为确保分区方案的全面性和科学性,在分区过程中不仅参考了盐分指标,还综合考虑了土壤养分的空间差异。从盐碱地分布图(图 8)可以看出,松原市南部有少部分盐碱地分布,但由于该区域其他部分土壤养分条件较好,因此没有将其划入土壤条件较差的 MZ3 分区。结合 DEM 分布图(图 7)可见,该区域地势较低,土壤水分容易积聚且排水困难,进一步加剧了盐碱化问题。这一特征与盐碱地分布情况一致,验证了 MZ1 分区划分的合理性。

相比之下, MZ2 的土壤养分水平整体处于 MZ1 ~ MZ4,表现为较为适中的盐碱化程度和较高的养分含量。此分区的土壤 pH 和电导率适中,养分含量较高,且变异系数较小,显示出该区域土壤条件的均一性。结合区域内适中的降水量和较低的蒸发量(图 7), MZ2 为适合常规农业生产的区域,能够实施差异化的农业管理策略。

MZ3 分区表现为高 pH、高 EC 及低养分的特征,盐碱化问题突出。该区降水量较低、蒸发量较大(图 7),土壤干旱与盐碱化相互叠加,条件显著区别于其他分区,独立划分为一区有利于实施针对性治理。

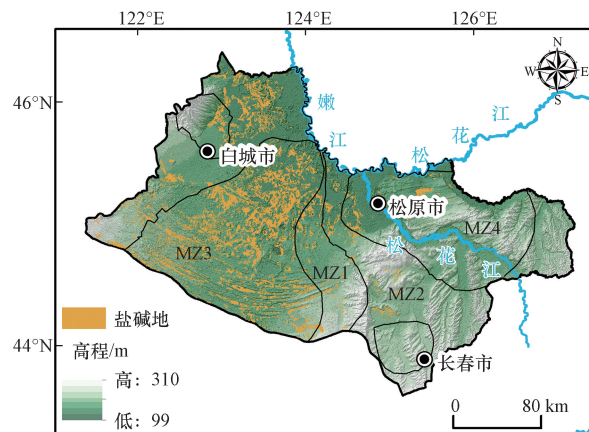


图8 研究区盐碱地分布图

Fig. 8 Distribution map of saline-alkali land in the study area

MZ4 位于研究区东部长春地区,土壤条件最为优越。该区域土壤肥力较高,盐碱化程度低,水热条件优越,分区体现了优质土壤资源的空间集聚。

综上所述,4 个分区面积均衡、特征分明,其划分综合考虑了土壤属性、地形及气候等多重因素。分区方案不仅为土壤改良、精准施肥和水资源管理提供了理论依据,而且为后续的农业生产管理提供了有效的参考,充分证明了分区方法的科学性和合理性。

3.3 管理分区的应用价值与农业指导意义

基于前述分区结果,松嫩平原4个管理分区(MZ1~MZ4)受地形、水热条件及土地利用方式差异的影响,区域内土壤属性空间分异显著。这为实施差异化的农业管理策略提供了直接依据。

MZ1分区土壤盐碱化问题突出,其电导率(EC)均值为 $128.95\ \mu\text{S}/\text{cm}$,为所有分区中最高(表4,图6),尤其以白城市区域更为严重。该分区土壤养分(TN、TP、TOC)整体处于中低水平。根据内部差异,针对松原市南部的土壤特点,实施精准施肥与水肥协同调盐策略,优化氮、磷、钾的施用比例,同时辅以秸秆还田以提高土壤肥力。此外,采用少量多次的灌溉方式,避免土壤盐分积聚。对于白城市西部的土壤特点,重点采取盐碱改良措施,同时进行适度施肥^[29]。通过深松、深耕破除土壤板结层,配合施用生石灰与腐殖酸有机肥,对盐碱地进行改良^[30]。在施肥过程中增加钾肥的使用,以提升作物的抗盐能力,同时推行膜下滴灌技术,兼顾节水和土壤控盐需求^[31]。

MZ2分区土壤EC适中(均值 $118.96\ \mu\text{S}/\text{cm}$),养分含量较为均衡(TN(均值 $871.98\ \text{mg}/\text{kg}$),TP(均值 $460.76\ \text{mg}/\text{kg}$)。养分含量均衡,且分区内属性均一性较高,是研究区开展常规农业生产的核心区域。首先在施肥管理上,该区域应遵循平衡配肥与分期施用的原则,依据作物不同生育期的养分需求,合理调控基肥与追肥的比例。其次根据当地适宜的水热条件(图7),在灌溉管理中推广水肥一体化喷灌模式,可有效提升水分与养分的利用效率。

MZ3分区盐碱化最为严重,EC均值为 $123.78\ \mu\text{S}/\text{cm}$,且养分含量低(TN均值仅 $579.4\ \text{mg}/\text{kg}$)。针对该区域的治理,遵循先改盐、后培肥,轻施肥、强淋洗的基本原则,采取化学、生物与物理相结合的改良模式。在土壤改良方面,针对不同盐碱程度实施差异化处理:重度盐碱区应配施生石灰与脱硫石膏,以中和土壤碱性、降低钠吸附比;中度盐碱区则酌情减量施用改良剂。同时,全域推广施用腐殖酸有机肥与腐熟农家肥,并结合深松深耕等农艺措施,改善土壤结构,增强保肥保水能力。在施肥管理上严格控制氮素用量,整体减少化肥施用量,优先选用腐植酸型磷钾肥和缓释氮肥,避免施用速效肥加重土壤盐化风险。在灌溉管理上,由于该区域降水较少且蒸发量较大(图7),应采用有利于盐分淋洗且避免积水的方式,且该分区的灌溉应严格控制,避免水分过度积聚并加剧盐碱化。

MZ4分区土壤条件最为优越,EC均值为 $108.43\ \mu\text{S}/\text{cm}$,养分含量较高(TN均值 $1\ 057.36$

mg/kg ,TP均值 $544.97\ \text{mg}/\text{kg}$)。在施肥管理上,遵循平衡培肥与精准运筹的原则,根据玉米、水稻等主栽作物的需肥特性,优化氮磷钾配施比例。其中,建议水稻种植区推行氮肥后移策略,精准调控不同生育期的施肥量,以提升肥料利用效率。灌溉上实施差异化管理:玉米种植区采用喷灌或微喷灌模式,水稻种植区则采用节水灌溉,并配合水氮追肥,有效提升水肥耦合效应。在培肥管理上,建议推行秸秆全量还田与绿肥轮作相结合的模式,构建玉米-大豆-绿肥轮作体系,逐步减少化肥施用比例,维持黑土肥力的长期稳定^[32]。

综上所述,基于土壤属性的空间异质性,综合多源数据与模糊C均值聚类(FCM)方法,将松嫩平原(吉林省)划分为4个管理分区(MZ1~MZ4)。各分区在盐碱化程度、养分状况等方面差异显著,且分区结果与区域地形、水热及盐碱地分布高度吻合,因此在土壤改良、施肥和水分管理上需采取因地制宜的差异化措施。该分区方案面积均衡($20.83\% \sim 29.03\%$)、分区内属性一致性高、分区间差异极显著,并为每个分区量身定制了可直接操作的精准农业措施,为松嫩平原(吉林省)化肥减量增效、盐碱地综合治理及农业可持续发展提供了科学支撑,也为同类生态脆弱农区的精准农业管理提供了可靠参考。

4 结论

以松嫩平原西部为研究区,通过野外采样与室内检测分析获取土壤属性数据,综合运用统计学方法、地统计方法和模糊C均值聚类算法进行管理分区划分,对土壤养分的空间分异特征及其管理分区进行了系统分析。得到如下主要结论。

(1)松嫩平原西部表层土壤理化属性具有显著的空间异质性。研究区土壤整体呈碱性,土壤pH的空间变异程度较弱($CV = 8.7\%$),而电导率(EC)、全氮(TN)、全磷(TP)、有机碳(TOC)和含水率(MC)均表现为中等强度的空间变异($CV = 50.3\% \sim 76.5\%$),表明除酸碱度外,多数土壤属性在区域尺度上存在明显的空间差异。

(2)土壤养分指标之间有明显的相关关系和协同变化特征。土壤的pH与TN、TP、TOC呈显著负相关($|r| = 0.373 \sim 0.460, P < 0.01$),而TN、TP与TOC之间表现出极强的显著正相关(最高 $r = 0.963$)。半方差分析结果表明,各土壤属性具有明确的空间结构特征。EC和MC表现出强空间相关性,主要受结构性因素控制,而pH、TN、TP和TOC表现为中等空间相关性,其空间变异同时受到结构

性因素与随机因素的共同影响。

(3) 基于土壤属性的空间异质性, 将松嫩平原(吉林省)划分为4个管理分区(MZ1~MZ4), 并为每个分区制定了差异化的精准农业策略。结果表明, MZ1 盐碱严重且养分不足, 需精准施肥与盐碱改良并重; MZ2 养分均衡, 适宜平衡施肥与水肥一体化; MZ3 盐碱最重, 需先改盐后施肥; MZ4 土壤优良, 应推行精准培肥与差异化施肥。该分区策略为区域化肥减量、盐碱地治理和农业可持续发展提供了科学依据与可推广的技术方案。

参 考 文 献

- [1] 李英姿, 李子君, 郑树伟, 等. 沂河流域土壤有机质空间分异及其影响因素[J]. 环境科学, 2025, 46(6): 3865-3876.
Li Yingzi, Li Zijun, Zheng Shuwei, et al. Elucidating the spatial differentiation of soil organic matter and influencing factors within the Yihe River Basin[J]. Environmental Science, 2025, 46(6): 3865-3876.
- [2] 王世睿, 黄迎新. 松嫩平原盐碱地改良治理研究进展[J]. 土壤与作物, 2023, 12(2): 206-217.
Wang Shirui, Huang Yingxin. Research progress on saline-alkali land improvement in Songnen Plain[J]. Soils and Crops, 2023, 12(2): 206-217.
- [3] Zhu W, Zhao D, Yang F, et al. Effects of groundwater with various salinities on evaporation and redistribution of water and salt in saline-sodic soils in Songnen Plain, Northeast China[J]. Chinese Geographical Science, 2023, 33(6): 1141-1152.
- [4] Huang J, Wu Z, Xue K, et al. An evaluation framework for identifying saline croplands for improvement: a case study of Songnen Plain[J]. Geoderma Regional, 2025, 41: e00963.
- [5] 宋春伟, 杜慧诗. 松嫩典型黑土带土壤碳氮磷储量空间分布特征[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(10): 4028-4038.
Song Chunwei, Du Huishi. Spatial distribution characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus reserves in Songnen typical black soil belt[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(10): 4028-4038.
- [6] 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.
- [7] 谢恩怡, 姚东恒, 廖宇波, 等. 粮食主产区耕地土壤有机碳空间分异特征及其影响因素: 以河北省为例[J]. 环境科学, 2024, 45(10): 6002-6011.
Xie Enyi, Yao Dongheng, Liao Yubo, et al. Spatial differentiation characteristics of soil organic carbon and its influencing factors in cultivated land in major grain-producing areas: a case study of Hebei Province[J]. Environmental Science, 2024, 45(10): 6002-6011.
- [8] 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. Spatial variation of soil nutrient characteristics around Chaohu Lake based on GIS results[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(7): 1522-1531.
- [9] 郭军玲, 王永亮, 郭彩霞, 等. 基于 GIS 和测土配方数据的晋北县域春玉米专用肥配方筛选[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 158-164.
Guo Junling, Wang Yongliang, Guo Caixia, et al. Formulas screening of special fertilizer for spring maize in county area of northern Shanxi based on GIS and soil testing data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 158-164.
- [10] 杜龙全, 刘峰, 史舟, 等. 大面积高寒山区土壤养分空间预测与管理分区[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1273-1282.
Du Longquan, Liu Feng, Shi Zhou, et al. Spatial prediction and management zoning of soil nutrients in large-scale alpine mountainous areas[J]. Soils, 2022, 54(6): 1273-1282.
- [11] Venugopal A, Kannan B, Patil S G, et al. Nutrient variability mapping and demarcating management zones by employing fuzzy clustering in southern coastal region of Tamil Nadu, India[J]. Sustainability, 2024, 16(5): 2095.
- [12] 朱昌达, 高明秀, 王文倩, 等. 基于 GIS 的滨海盐渍化农田土壤空间变异及其分区管理[J]. 生态学报, 2020, 40(19): 6982-6990.
Zhu Changda, Gao Mingxiu, Wang Wenqian, et al. Spatial variability and zoning management of coastal salinized farmland soil based on GIS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6982-6990.
- [13] Shukla A K, Behera S K, Basumatary A, et al. PCA and fuzzy clustering-based delineation of soil nutrient (S, B, Zn, Mn, Fe, and Cu) management zones of sub-tropical Northeastern India for precision nutrient management[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 365: 121511.
- [14] Zeraatpisheh M, Ayoubi S, Brungard C W, et al. Disaggregating and updating a legacy soil map using DSMART, fuzzy C-means and K-means clustering algorithms in Central Iran[J]. Geoderma, 2019, 340: 249-258.
- [15] Durai M V, Godi A, Golla B. Geospatial mapping of soil properties of forest types using the K-means fuzzy clustering approach to delineate site-specific nutrient management zones in Goa, India[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2025, 53(7): 2057-2085.
- [16] 中国土壤学会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
Chinese Society of Soil Science. Routine analytical methods for soil agrochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [17] 王婕, 牛文全, 张文倩, 等. 农田表层土壤养分空间变异特性研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 37-46.
Wang Jie, Niu Wenquan, Zhang Wenqian, et al. Spatial variability of soil nutrients in topsoil of cultivated land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 37-46.
- [18] 夏利恒, 申江龙, 孙语彤, 等. 县域耕地土壤养分时空变异特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 238-247.
Xia Liheng, Shen Jianglong, Sun Yutong, et al. Characteristics of spatial and temporal variability of soil nutrients in cropland of

- Baishui County [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(3): 238-247.
- [19] Cardone B, Di Martino F. A novel fuzzy-entropy based online fuzzy C-means clustering algorithm for massive data [J]. *Evolutionary Intelligence*, 2025, 18(4): 8686.
- [20] 陈世超, 杜太生, 王素芬. 基于模糊 C 均值聚类法的玉米农田管理分区研究 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 293-300.
- Chen Shichao, Du Taisheng, Wang Sufen. Delineating management zones in maize field based on fuzzy C-means algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 293-300.
- [21] 冯家东, 吴炳孙, 王晶晶. 基于协同克里格的橡胶园土壤速效钾空间变异性 [J]. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 915-921.
- Feng Jiadong, Wu Bingsun, Wang Jingjing. Spatial variability of soil available potassium in rubber plantation based on coKriging [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(4): 915-921.
- [22] 苏春利, 纪情楠, 陶彦臻, 等. 河套灌区西部土壤盐渍化分异特征及其主控因素 [J]. *干旱区研究*, 2022, 39(3): 916-923.
- Su Chunli, Ji Qiannan, Tao Yanzhen, et al. Differentiation characteristics and main influencing factors of soil salinization in the West of Hetao Irrigation Area [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(3): 916-923.
- [23] 申得有, 李升, 高远, 等. 新疆喀什噶尔河流域土壤盐渍化分布特征及时空演化分析 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(24): 10461-10469.
- Shen Deyou, Li Sheng, Gao Yuan, et al. Distribution characteristics and spatial-temporal evolution of soil salinization in the Kashgar River Basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(24): 10461-10469.
- [24] Zhang Y, Hou K, Qian H, et al. Characterization of soil salinization and its driving factors in a typical irrigation area of Northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 837: 155808.
- [25] Slama F, Gargouri-Ellouze E, Bouhlila R. Impact of rainfall structure and climate change on soil and groundwater salinization [J]. *Climatic Change*, 2020, 163(1): 395-413.
- [26] 汤洁, 陈静书, 李昭阳, 等. 氮磷肥料的添加对盐碱旱田有机碳矿化和激发效应的影响 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(29): 12226-12234.
- Tang Jie, Chen Jingshu, Li Zhaoyang, et al. Effects of nitrogen or phosphorus fertilizer on organic carbon mineralization and priming effect in saline-alkaline upland [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(29): 12226-12234.
- [27] Liu B, Huang L, Zhang F, et al. High pH decreases the contents of stable organic nitrogen fractions and nitrogen supply capacity by inhibiting soil organic carbon in saline-sodic paddy fields [J]. *Soil and Tillage Research*, 2026, 258: 106621.
- [28] Xu T, Xu M, Zhang M, et al. Spatial effects of nitrogen deposition on soil organic carbon stocks in patchy degraded saline-alkaline grassland [J]. *Geoderma*, 2023, 432: 116448.
- [29] 殷厚民, 胡建, 王青青, 等. 松嫩平原西部盐碱土旱作改良研究进展与展望 [J]. *土壤通报*, 2017, 48(1): 236-242.
- Yin Houmin, Hu Jian, Wang Qingqing, et al. Advance and prospect of the research on improvement by dry farming measures of saline-alkali soils in western Songnen Plain of China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(1): 236-242.
- [30] Wang X, Ding J, Wang J, et al. Humic acid enhances the soil amelioration effect of biochar on saline-alkali soils in cotton fields [J]. *Agronomy*, 2025, 15(10): 2449.
- [31] 吕翠美, 曹继鹏, 凌敏华, 等. 基于能值理论的节水农业综合效益量化方法 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(6): 2445-2453.
- Lü Cuimei, Cao Jipeng, Ling Minhua, et al. Quantification method of comprehensive benefits of water-saving agriculture based on emergy theory [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(6): 2445-2453.
- [32] 吴玉红, 王吕, 崔月贞, 等. 轮作模式及秸秆还田对水稻产量、稻米品质及土壤肥力的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(11): 1926-1937.
- Wu Yuhong, Wang Lü, Cui Yuezheng, et al. Rice yield, quality, and soil fertility in response to straw incorporation and rotation pattern [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(11): 1926-1937.