

基于 GIS 与地统计的五大连池市黑土厚度空间分异特征及成因探析

赵国强^{1,2}, 王旭^{1,2*}, 卢彦达^{1,2}, 公成成^{1,2}, 吴怡慧^{1,2}, 孙玉雪^{1,2}, 张刘波^{1,2}, 刘健^{1,2}, 付龙龙^{1,2}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/EAE.2026010001

摘要 : 为揭示五大连池市黑土厚度的空间分布规律及形成机制, 本文以该市黑土分布区为研究对象, 通过野外采样结合 GIS 空间分析与地统计方法, 系统研究黑土厚度的空间分异特征及成因。分析发现, 五大连池市黑土厚度 8 ~ 65cm, 均值 32.6cm, 呈中等强度空间变异; 半方差函数最优拟合为球状模型, 块金值/基台值 38.7%, 中等空间相关性, 受自然与人为因素共同影响; 空间呈“中部高、边缘低”格局, 中部岗阜状平原厚度最大, 边缘低山丘陵区最小。成因上, 地貌是主导自然因素, 气候、成土母质次之, 土地利用、垦殖年限等人为因素加剧差异。研究可为黑土保护、耕地质量提升提供依据。

关键词 : GIS; 地统计; 五大连池市; 黑土厚度; 空间分异; 成因探析

Analysis of Spatial Differentiation Characteristics and Causes of Black Soil Thickness in Wudalianchi City Based on GIS and Geostatistics

Zhao Guoqiang^{1,2}, Wang Xu^{1,2*}, Lu Yanda^{1,2}, Gong Chengcheng^{1,2}, Wu Yihui^{1,2}, Sun Yuxue^{1,2}, Zhang Liubo^{1,2}, Liu Jian^{1,2}, Fu Longlong^{1,2}

1. Harbin Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : To reveal the spatial distribution pattern and formation mechanism of black soil thickness in Wudalianchi City, this study takes the black soil distribution area in the city as the research object. Through field sampling combined with GIS spatial analysis and geostatistical methods, the spatial differentiation characteristics and causes of black soil thickness are systematically investigated. The analysis reveals that the black soil thickness in Wudalianchi City ranges from 8 to 65 cm, with an average of 32.6 cm, exhibiting moderate spatial variability. The optimal fitting of the semivariogram is a spherical model, with a nugget-to-sill ratio of 38.7%, indicating moderate spatial correlation influenced by both natural and anthropogenic factors. The spatial pattern shows a "high in the center and low at the edges" distribution, with the thickest black soil found in the central hilly plain and the thinnest in the marginal low mountain and hilly regions. In terms of causes, topography is the dominant natural factor, followed by climate and parent material, while anthropogenic factors such as land use and reclamation duration exacerbate the differences. This study provides a basis for black soil conservation and improvement of cultivated land quality.

Keywords : GIS; geostatistics; Wudalianchi City; black soil thickness; spatial differentiation; cause analysis

引言

黑土是世界上最肥沃的土壤之一, 以腐殖质含量高、团粒结构好、保水保肥能力强为显著特点, 是保障粮食安全的核心战略资源^[1]。五大连池市位于黑龙江省北部, 地处东北黑土区北缘, 境内黑土面积达 109.9 万亩, 占全市总面积的 19.9%, 在耕地中占比更是高达 57.8%, 是当地农业生产不可或缺的基础^[2]。然而近年来, 受自然侵蚀与人为开垦等因素影响, 东北黑土区普遍面临黑土层变薄、肥

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目 (编号: DD20230517, DD20242507)。

第一作者: 赵国强 (1991-), 男, 本科, 中国地质大学 (武汉), 助理工程师。主要研究方向为地质工程。Email: 1369255947@qq.com

通讯作者: 王旭 (1988-), 男, 本科, 助理工程师, 中国地质大学 (武汉), 主要从事水文与水资源工程研究。E-mail: 415259651@qq.com

力下降的问题^[3]，五大连池市也面临黑土退化问题，部分坡度较大、开垦历史较长的漫岗区，黑土腐殖质层厚度已明显降低^[4]。黑土厚度的空间分异直接反映资源禀赋与退化程度，明确其规律及成因是保护的关键^[5]。现有研究多聚焦全省或更大区域，针对该市独特地貌的专项研究不足，本文通过野外采样、GIS空间分析与地统计方法结合，揭示其分异特征与成因，为精准保护和农业可持续发展提供支撑。

一、研究区概况与数据来源

(一) 研究区概况

五大连池市位于黑龙江省西北部（东经125° 42′ ~ 127° 37′、北纬48° 16′ ~ 49° 12′），总面积8745km²，地处小兴安岭与松嫩平原过渡带，地貌分四类：岗阜状平原（中部及西南部，坡度<10度，黑土主分布区）、低山丘陵（北部及东部，坡度15~20度，以暗棕壤为主）、火山熔岩台地（讷谟尔河北侧，火山砾质土）、阶地漫滩（沿河谷分布，草甸土、泛滥土）。

气候为温带大陆性季风，年均温-0.5~1.0℃，年降水量450~600mm（集中6~8月），日照2600~2800小时，无霜期110~130天，植被以针阔叶混交林、草甸草原为主，利于腐殖质积累。土壤类型中，暗棕壤占78.8%，黑土次之，分布于11个乡镇的漫岗及平原。

(二) 数据来源与预处理

1. 土壤采样数据

本研究在五大连池市全部黑土分布区开展采样。采样点布设遵循“均匀分布、兼顾地貌”原则，采用网格采样法结合随机抽样，共布设120个采样点，采样深度为0~60cm。采样时，使用北斗定位，记录地貌、土地利用等信息；实验室测容重并记录黑土厚度，剔除异常值得118个有效数据。

2. 基础地理数据

数字高程模型（DEM）数据来源于地理空间数据云，分辨率为30m，用于提取研究区坡度、海拔等地形因子；地貌类型图、土壤类型图基于《五大连池市志》及黑龙江省土壤普查数据数字化获得；土地利用数据来源于国家自然资源部年度土地利用变更调查数据（2023年），用于分析不同土地利用方式对黑土厚度的影响。

二、研究方法

(一) GIS空间分析方法

本研究运用ArcGIS10.8软件的空间分析模块，对DEM数据进行地形因子提取，获得研究区海拔、坡度等数据；通过叠加分析功能，将采样点数据与地貌类型图、土壤类型图、土地利用图进行空间关联，明确不同地貌、土地利用类型下黑土厚度的统计特征。

(二) 地统计分析方法

地统计分析的核心是半方差函数，其能够量化土壤属性的空间相关性和变异程度。半方差函数计算公式如下：
$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2$$

式中， $\gamma(h)$ 为半方差函数值； (h) 为样点间的距离（滞后距）； $(N(h))$ 为距离等于 (h) 的样点对数量； $(Z(x_i))$ 和 $(Z(x_i+h))$ 分别为土壤属性在空间位置 (x_i) 和 (x_i+h) 处的观测值。

本研究使用GS+9.0软件对黑土厚度数据进行半方差函数分析，首先确定最佳滞后距和步长，然后分别拟合球状模型、指数模型、高斯模型三种常用理论模型，根据决定系数 (R^2) 和残差平方和（RSS）选择最优模型。通过半方差函数分析获得块金值 (C_0) 、基台值 (C_0+C) 、变程 (a) 等参数，其中块金值反映随机因素引起的变异，基台值反映总变异程度，变程表示空间相关性的范围；块金值/基台值 $(C_0/(C_0+C))$ 用于判断空间相关性强度，比值<25%为强空间相关性，25%~75%为中等空间相关性，>75%为弱空间相关性。

(三) 成因分析方法

本研究采用相关性分析、单因素方差分析，结合自然与人为因素，揭示黑土厚度分异驱动机制。

三、结果与分析

(一) 黑土厚度统计特征

五大连池市黑土厚度统计特征如表1所示。其厚度介于8~65cm之间，平均值32.6cm、中位数31.8cm，整体处于中等水平但差异显著。标准差10.3cm，变异系数31.6%，属中等强度变异。最大值65cm出现在中部建设乡岗阜状平原（地势平、垦殖短、腐殖质足），最小值8cm位于东北部朝阳乡低山丘陵边缘（坡度大、流失重、发育不足）。

表1 五大连池市黑土厚度统计特征表

统计指标	数值
样本数量（个）	118
最小值（cm）	8.0
最大值（cm）	65.0
平均值（cm）	32.6
中位数（cm）	31.8
标准差（cm）	10.3
变异系数（%）	31.6
偏度	0.21
峰度	-0.35
K-S检验（P值）	0.203

(二) 黑土厚度空间相关性分析

通过GS+9.0软件对黑土厚度数据进行半方差函数分析，分别拟合球状模型、指数模型、高斯模型，拟合结果如表2所示。由表2可知，球状模型的决定系数 $(R^2=0.897)$ 最大，残差平方和（RSS=12.36）最小，因此选择球状模型作为黑土厚度空间变异的最优拟合模型。

$$\text{球状模型的表达式为: } \left(\begin{array}{l} 0 \\ \gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \\ C_0 + C \end{array} \right) \begin{array}{l} h = 0 \\ \\ h > a \end{array}$$

由表2可知, 黑土厚度的块金值((C_0))为18.7, 基台值((C_0+C))为48.3, 块金值/基台值为38.7%, 处于25%~75%之间, 表明研究区黑土厚度具有中等空间相关性。这一结果说明黑土厚度的空间变异是由结构性因素(如地貌、成土母质、气候等自然因素)和随机性因素共同作用的结果。变程(a)为8.6km, 表明在8.6km范围内, 黑土厚度具有空间相关性, 超过该范围后, 空间相关性消失, 这一范围与研究区岗阜状平原的连续分布范围基本一致。

表2黑土厚度半方差函数拟合参数表

模型类型	块金值 (C_0)	基台值 (C_0+C)	块金值 /基台值 (%)	变程 (a), (km)	决定 系数 (R^2)	残差平 方和 (RSS)
球状模型	18.7	48.3	38.7	8.6	0.897	12.36
指数模型	21.5	50.2	42.8	7.9	0.823	18.75
高斯模型	23.1	51.6	44.8	7.3	0.789	21.42

(三) 黑土厚度空间分异特征

五大连池市黑土厚度空间分异显著, 整体呈“中部高、边缘低”的圈层式分布, 且与地貌类型高度契合。

空间分布上, 高值区($>40\text{cm}$)集中在中部的岗阜状平原, 该区域地势平坦(坡度 $<5^\circ$), 成土母质为中更新统亚粘土, 有机质积累条件优越, 垦殖年限较短、退化较轻, 部分区域厚度达50~65cm; 中值区(25~40cm)分布于高值区外围, 涵盖兴隆乡、新发乡等, 以缓坡漫岗为主(坡度5~10度), 存在轻度水土流失, 厚度中等; 低值区($<25\text{cm}$)位于研究区边缘, 包括东北部朝阳乡、莲花山乡的低山丘陵区、西南部四平乡丘陵边缘及讷谟尔河沿岸阶地, 这些区域坡度较大(10~20度)、水土流失严重, 或受砾石底、砂质土等成土母质限制, 黑土发育较差, 厚度多为8~25cm, 部分靠近暗棕壤区的采样点不足10cm。此外, 黑土厚度还呈现带状分布特征: 西南部四平乡至建设乡一带, 沿岗阜状平原延伸方向呈条带状分布, 厚度35~50cm; 讷谟尔河南岸阶地与漫滩过渡区, 厚度呈狭长带状递减, 从平原区30cm以上降至阶地地区20cm以下, 契合从漫岗到河谷土壤类型(黑土→草甸土→泛滥土)的水平分布规律。

四、成因探析

(一) 自然因素对黑土厚度空间分异的影响

1. 地貌类型

地貌类型是影响五大连池市黑土厚度空间分异的主导自然因素, 不同地貌的成土条件直接决定黑土发育程度与厚度。中部岗阜状平原地势平缓(坡度 $<10^\circ$), 地表径流缓慢, 水土流失轻微, 且成土母质为中更新统亚粘土, 质地疏松、通气透水性好, 利于植被残体积累和腐殖质形成, 黑土厚度最大; 低山丘陵区地势起伏大(坡度15~20度), 地表径流冲刷强烈, 植被覆盖率低, 有机质输入少且易流失, 成土母质多为坚硬的花岗岩、

火山碎屑岩, 风化程度低, 不利于黑土发育, 厚度最小; 阶地与漫滩区受河流沉积影响, 成土母质为冲积砂、砂砾石, 土壤质地偏砂, 保肥保水能力差, 腐殖质易分解流失, 黑土厚度介于两者之间。

2. 气候条件

气候通过影响植被生长和微生物活性, 间接作用于黑土腐殖质的积累与分解, 进而影响黑土厚度^[6]。五大连池市年均气温较低, 微生物活性弱, 有机质分解慢, 利于腐殖质积累, 黑土厚度整体处于中等水平。研究区内部气候存在差异: 北部低山丘陵区海拔高, 年均气温比中部平原低1~2℃, 植被以针叶林为主, 枯枝落叶难分解, 有机质输入有限, 黑土厚度较小^[7]; 中部平原区海拔低、热量充足, 植被以草甸草原为主, 草本残体多且分解快, 有机质输入量大, 黑土厚度较大。此外, 全球气候变暖导致东北地区气温升高速率达0.31℃/10a, 高于全国平均水平, 加速了有机质分解, 使黑土厚度呈减薄趋势, 这一现象在中部平原垦殖区更为显著。

3. 成土母质

成土母质是土壤形成的物质基础, 其类型和性质直接影响黑土的发育过程和厚度^[8]。五大连池市黑土的成土母质主要为中更新统亚粘土和上更新统堆积亚粘土, 其中中部岗阜状平原的黑土母质为中更新统亚粘土, 质地均匀, 颗粒细腻, 富含矿物质养分, 通气透水性适中, 有利于植物根系生长和腐殖质的吸附积累, 因此黑土厚度较大; 西南部丘陵区的黑土母质为花岗岩风化壳, 质地偏粗, 含砾石较多, 养分含量低, 通气透水性过强, 腐殖质易淋溶流失, 黑土厚度较小; 阶地区的黑土母质为冲积砂质土, 颗粒较粗, 保肥能力差, 有机质积累有限, 黑土厚度中等。

(二) 人为因素对黑土厚度空间分异的影响

1. 土地利用方式

土地利用方式通过改变植被覆盖类型和地表扰动强度, 影响黑土厚度^[9]。研究区黑土的土地利用类型主要包括耕地、林地、草地, 其中耕地占比达71.5%, 是黑土的主要利用方式。耕地由于长期耕种, 地表植被以农作物为主, 秸秆还田率较低, 有机质输入量有限, 且耕作活动破坏了土壤结构, 加剧了水土流失, 导致黑土厚度普遍小于林地和草地; 林地和草地植被覆盖率高, 枯枝落叶和草本残体积累多, 有机质输入量大, 且地表扰动小, 水土流失轻微, 黑土厚度相对较大。

2. 垦殖年限

垦殖年限是影响耕地黑土厚度的重要人为因素。五大连池市黑土开垦历史悠久, 部分区域垦殖年限超过100年, 长期的农业生产活动导致黑土厚度逐渐减薄^[10]。这是因为随着垦殖年限的增加, 土壤侵蚀加剧, 有机质不断消耗, 且化肥的长期过量使用抑制了土壤微生物活性, 进一步加速了黑土退化, 导致黑土厚度持续减薄。

3. 水土流失治理

人为水土流失治理措施对黑土厚度具有积极影响。近年来, 五大连池市在黑土分布区实施了梯田改造、退耕还林、秸秆还田、水土保持林建设等措施, 有效减缓了黑土流失速度^[11]。例

如,中部团结乡实施梯田改造后,耕地坡度从8~10度降至3~5度,黑土厚度年均减薄速率从0.32cm/a降至0.15cm/a;而东北部朝阳乡未实施有效治理措施,黑土厚度年均减薄速率达0.45cm/a,导致该区域黑土厚度成为全市最低。

五、结语

本文基于GIS与地统计方法,通过野外采样与室内分析,系统研究了五大连池市黑土厚度的空间分异特征及成因,得出以下主要结论:

(1)黑土厚度8~65cm,均值32.6cm,中等变异;球状模型拟合优,中等空间相关性,受自然与人为因素共同影响。

(2)空间呈“中部高、边缘低”格局,沿地貌过渡带带状递减。

(3)地貌是主导自然因素,气候、母质次之;土地利用、垦殖年限、治理措施加剧差异。

基于研究结果,建议中部推广秸秆还田、轮作休耕;边缘实施退耕还林与梯田改造;建立动态监测体系。未来需扩大采样范围,结合遥感研究时空演变,探究与肥力、产量关联,支撑精细化保护。

参考文献

- [1] 鞠正山. 重视黑土资源保护, 强化黑土退化防治 [J]. 国土资源情报, 2016, (02): 22-25.
- [2] 齐昕宇, 王敬元, 姜莹, 等. 黑河大豆产业发展现状与战略选择 [J]. 农业展望, 2023, 19(09): 46-52.
- [3] 于秀春, 孙仲秀, 姜炎炎, 等. 东北黑土区主要土壤障碍层的研究进展与展望 [J]. 土壤, 2025, 57(03): 498-509.
- [4] 雷国平, 代路, 宋戈. 黑龙江省典型黑土区土壤生态环境质量评价 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(07): 243-248.
- [5] 杜国明, 梁常安, 张树文, 等. 黑土地保护的客体特性、面临形势与应对策略 [J]. 资源科学, 2023, 45(05): 887-899.
- [6] 谭晓红, 甘凤玲, 蒋莉沙, 等. 坡向对喀斯特槽谷区不同土地利用类型土壤理化性质和酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2025, 45(16): 8007-8019.
- [7] 潘英杰, 何志瑞, 刘玉林, 等. 黄土高原天然次生林植被演替过程中土壤团聚体有机碳动态变化 [J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5195-5203.
- [8] 贾磊, 刘洪, 苏悦, 等. 基于地质条件的粤港澳地区成土母质类型划分 [J]. 中国地质调查, 2025, 12(01): 69-80.
- [9] 于秀春, 孙仲秀, 姜炎炎, 等. 东北黑土区主要土壤障碍层的研究进展与展望 [J]. 土壤, 2025, 57(03): 498-509.
- [10] 腾云, 孙悦. 推动我国东北黑土区耕地轮作的策略优化研究 [J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(07): 36-51.
- [11] 周宁, 李超, 李铁男, 等. 黑龙江省水土保持规划实施效果评价 [J]. 中国水土保持, 2021, (06): 51-54.