



艾晓军, 于小健, 陈占生, 等. 基于 GeoDetector 模型的土壤有机质空间格局及影响因子分析——以辽阳—鞍山地区为例[J]. 岩矿测试, 2025, 44(3): 420–435. DOI: [10.15898/j.ykcs.202412050251](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202412050251).

AI Xiaojun, YU Xiaojian, CHEN Zhansheng, et al. Spatial Pattern and Influence Factor Analysis of Soil Organic Matter Based on the GeoDetector Model: Taking Liaoyang—Anshan Area as an Example[J]. Rock and Mineral Analysis, 2025, 44(3): 420–435. DOI: [10.15898/j.ykcs.202412050251](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202412050251).

基于 Geodetector 模型的土壤有机质空间格局及影响因子分析 ——以辽阳—鞍山地区为例

艾晓军^{1,2}, 于小健^{1,2}, 陈占生^{1,2}, 侯红星³, 陈雪^{1,2}, 龚仓⁴, 李子奇⁵, 霍东^{1,2}, 刘玖芬^{5,6,7*}

- (1. 中国地质调查局地球物理调查中心, 河北 廊坊 065000;
2. 中国地质调查局地球浅地表探测技术创新中心, 河北 廊坊 065000;
3. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065000;
4. 中国地质调查局军民融合地质调查中心, 四川 成都 611732;
5. 中国地质大学(北京), 北京 100083;
6. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055;
7. 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055)

摘要: 土壤有机质是表征土壤肥力的关键指标, 研究有机质分布空间格局及其影响因子, 可为国土空间规划和土地合理利用提供决策依据。对于辽阳—鞍山地区, 以往的研究大多集中在土壤表层, 且研究单因子影响居多, 为了系统研究土壤表层和剖面有机质分布内在规律及影响因素, 本文在辽阳—鞍山地区采集土壤表层和剖面样品, 采用重铬酸钾容量法、电感耦合等离子体发射光谱法和凯氏蒸馏-容量法测定土壤理化指标含量, 基于地统计学、相关性分析和地理探测器模型等方法探讨土壤有机质含量特征、空间格局及其影响因素。研究表明: ①研究区土壤表层有机质含量范围为 1.72~48.4g/kg, 平均值为 19.9g/kg, 变异系数为 41.9%, 属中等程度变异, 整体上呈东南向西北逐渐降低的空间格局, 剖面有机质随深度增大而降低, 剖面有机质降低与土壤含氧量、根系生物量和微生物活性降低有关; ②土壤表层和剖面有机质与全氮、全磷、黏粒和粉粒含量呈正相关, 与砂粒含量和容重呈负相关 ($p<0.01$), 这由有机质与氮、磷协同变化的生物地球化学机制和成土母质与质地的级联效应决定的; ③任意两个因子交互作用大于单个因子, 全氮与其他 16 个因子的交互作用解释力在 0.80 以上, 土壤表层有机质空间分异, 全氮、降雨量、容重和全磷是空间变异主导因子, 同时受多种因素复杂影响。

关键词: 土壤有机质; 电感耦合等离子体发射光谱法; 影响因子; 地理探测器; 辽阳—鞍山

要点:

- (1) 研究区有机质含量 10~30g/kg(Ⅲ、Ⅳ级) 面积占比 87.8%, 变异系数为 41.9%, 属中等程度变异。土壤有机质呈现东南向西北逐渐减低的空间格局, 剖面有机质随深度增大而降低。
- (2) 研究区全氮、降雨量、全磷和容重对土壤表层有机质的空间变异起主导作用。
- (3) 任何两个影响因子的交互作用对有机质空间分布影响解释力大于单个因子的影响解释力。

中图分类号: S151.93

文献标识码: A

收稿日期: 2024-12-05; **修回日期:** 2025-01-26; **接受日期:** 2025-01-28; **网络出版日期:** 2025-02-27

基金项目: 国家重点研发计划项目“黑土区土壤演变时空格局与分类分区保护利用技术的精准配置”(2023YFD1500100); 自然资源综合调查指挥中心科技创新基金项目(KC20220001); 中国地质调查局地质调查项目“辽阳—丹东黑土地表基岩调查项目”(ZD20220116); 中国地质调查局地质调查项目“鲁中丘陵区 1:25 万地表基岩调查”(DD20243192)

第一作者: 艾晓军, 硕士, 高级工程师, 主要从事地球化学和水工环调查研究。E-mail: 179263760@qq.com。

通信作者: 刘玖芬, 硕士, 正高级工程师, 主要从事地球化学和分析测试研究。E-mail: 13863858360@163.com。

土壤有机质 (SOM) 作为土壤肥力的重要参数, 不仅对土壤的物理、化学和生态特性产生影响, 还直接决定了土壤的生产能力以及生态系统的稳健状况^[1-2], 同时在土壤养分储存以及土壤团聚体的形成和稳定性中起着重要作用, 其含量和分布显著影响土地生产力和全球碳循环^[3]。受人为和自然因素的影响, 土壤有机质积累和转化过程相当复杂, 因此空间表现出不同的异质性。已有研究揭示了土壤有机质受到海拔高度、年平均气温、土壤类型、成土母质、降水量、用地方式、酸碱值、土壤黏粒含量的综合影响^[4-6]。然而, 因为地理位置各异的原因, 决定有机质的关键要素也存在多样化的情况。Zun 等^[7]认为, 年度平均温度、海拔和 pH 值是引起有机质变化的三个最直接的影响因子; 蒯雁等^[8]指出, 云南省大理市典型烟区土壤有机质空间异质性受成土母质、地形、气候、施肥、耕作等因素共同影响; 黄会前等^[9]认为, 贵州省耕地土壤有机质含量主要受地形和海拔影响; 孙欣琪等^[10]认为沙地砂质土壤对土壤有机质产生负向作用, 沙地的利用强度增大会减少有机质的含量; 刘尊方等^[11]认为影响有机质主要因素为高程、气温和土壤类型; 石光辉等^[12]则认为显著影响耕地有机质含量变化的三个因素为成土母质、质地和土地利用方式; 申楷慧等^[13]采用相关性分析和构建分段结构方程模型, 研究了广西漓江流域森林土壤有机碳空间分布驱动因子解释力; 张欣等^[14]则使用多元因素方差分析, 比较了不同成土母质、土地类型、海拔条件如何影响土壤有机质的分布情况; 而廖宇波等^[15]采用 GIS、地统计学和数据统计分析技术, 深入探索了北京市大兴区过去四十年间五个阶段 (1980 年、1990 年、2000 年、2006 年、2017 年) 农田有机质的时间-空间变化特性。纵览已有研究, 以上学者研究区域局限单一类型 (耕地或者林地), 研究对象为土壤表层, 研究方法大多应用多元统计分析、空间分析等技术探讨土壤有机质的空间分布及其影响因素, 最为普遍的方法仍是地统计学方法^[16]。

对生态环境系统开展多因素交互作用与影响研究, 对于揭示内在规律和相关机制具有重要意义。王劲峰等^[17]研发的地理探测器 (Geodetector) 能够揭露单一自变量对于因变量的影响效应, 同时也能识别两个因素之间的交互效果, 无需顾虑线性关系, 从而防止多变量导致的共线性问题, 通过 q 值指标, 可以精确评估地理探测器单变量或交互变量对土壤有机质空间差异化影响的解释能力^[18]。该方法不

依赖严格的模型设定, 克服了以往研究中类型变量的限制^[19], 常用于研究空间分异和揭示其背后的影响因子, 目前已运用到诸如水资源^[20-21]、生态环境的变化^[22]、土壤重金属污染^[23-24]、土地使用情况^[25]以及医学领域研究^[26]等众多场景, 同时结合相关系数法^[27], 研究影响有机质与影响因子的相关关系, 进一步佐证探测器探测结果。

辽阳—鞍山地区作为中国东北老工业基地的重要组成部分和粮食生产基地, 随着工业和城市化快速发展, 土地利用强度提高, 精细化管理增强, 土壤肥力较第二次全国土壤普查, 辽宁省海城市、辽阳县和灯塔市是逐年降低的, 台安县是先降低后升高, 总体表现降低, 同时由于不合理耕作, 海城市磷肥过量风险初现, 台安县碳储量赤字, 黑土退化风险较高^[28], 有机质下降程度影响了土壤环境和作物的生长, 进而影响了区域粮食安全和生态平衡。辽阳—鞍山地区涵盖耕地、林地和草地多种类型, 且地貌类型齐全, 土壤类型复杂, 为开展多因素的交互影响提供了条件。本文选取该地区作为研究对象, 通过野外采样和重铬酸钾容量法、电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP-OES) 和凯氏蒸馏-容量法测定土壤理化指标含量, 获取了土壤表层和剖面有机质含量数据, 结合地统计学、相关性分析和地理探测器模型, 在模型中输入更多以往研究没有探究的因子, 如地表基质构型和黏粒、粉粒、砂粒、全氮 (TN) 和全磷 (TP) 含量等, 分析了气候、地形、土地利用、土壤属性和人为活动等对土壤有机质分布的影响, 以期揭示研究区土壤表层和剖面有机质空间格局的内在规律, 促进农林生产合理布局和提升土地资源管护层次。

1 研究区概况

研究区位于下辽河平原辽阳—鞍山段, 地处辽东、西两侧山脉之间, 地形具有丰富多变的特征, 从山脉至中部地带, 依序散布有因侵蚀与堆积作用而形成的山前倾斜地带和扇形积石地、山前倾斜的冲积平地、略带高低起伏的山前冲积平原以及夹杂在河流之间的冲积平原和海冲积三角洲等^[29], 多数区域是河流携带泥沙累积而成, 地面高程多在 50m 以下。辽河及其支流浑河、太子河、绕阳河之水交汇于此, 最终汇至渤海的广阔平原地带, 气候类型可划归为温带大陆性季风气候, 具有半湿润和半干旱特征, 年平均降水量为 623.2mm^[30]。研究区内以耕地为主 (48.5%), 其他为旱地 (34.7%), 水田 (11.6%), 水浇地 (2.17%), 林地 (28.4%), 住宅、工矿、商业和公

共用地 (17.7%), 园地 (4.79%), 草地 (0.67%)。该地区自然资源非常丰富, 拥有广袤的农田, 如海城市入选了“2021 年全国农业现代化示范区”名单^[31]。然而, 伴随着黑土地过度开发以及城市扩展, 出现土壤酸化、土壤变硬和土地滥用等问题, 这些都使得土壤养分减少的情况愈发严峻。已有数据表明, 辽宁省约有 80.3% 的土壤是酸性^[32]。

2 实验部分

2.1 样品采集及处理

依据研究区地理环境、地质结构及土质状况, 按照 1:25 万多目标地区地球化学调查规范部署采样工作^[33], 采样点分布见图 1。平原地区基本按照 4km×4km 的网格采集一个样品, 而山区则为 6km×6km, 总采集了 368 个土壤表层 (0~20cm) 样品, 在姜家村、云柳村、西信子以及山城子的旱地采集 4 个钻孔剖面 (编号为 PMZK01、PMZK02、PMZK03 和 PMZK04) 样品 52 件, 采样深度均为 10m。所有土壤样品自然晾晒 7 天后, 去除杂物并通过 10 目尼龙筛, 装入聚乙烯袋保存, 最后交由外部实验室进行检测。

2.2 样品分析测试及数据处理

样品分析测试委托中国地质科学院水文地质环境地质研究所分析测试中心、华北有色 (三河) 燕郊中心实验室有限公司共同完成。分析质量严格执行

多目标区域地球化学调查规范 (DZT 0258—2014) 和《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T 0130—2006) 等技术标准。各项指标分析方法如下: 激光粒度仪法测定质地 (Mastersizer 2000 型); 离子选择电极法 (ISE) 测定 pH 值; 环刀重量法测定容重; 重铬酸钾容量法 (VOL) 测定有机碳 (SOC); 电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP-OES, Icap7400 型, 美国 ThermoFisher 公司) 测定全磷 (TP); 凯氏蒸馏-容量法测定全氮 (TN)。

本研究运用 ArcGIS 自然断点法将 17 个因子的数据类型处理为类型量, 采用 SPSS27 研究相关性, 并通过 ArcGIS 创建了样点空间分布图; 采用 Origin2021 来制作其他图件, 而地理探测器的实现则依赖于 GeoDetector 软件的应用, 其链接地址为: <http://www.GeoDetector.org>。

采用 3σ 原则预处理数据, 对离群数据进行剔除^[34]。

(1) 求其算术平均值 ($\bar{X}$);

(2) 计算标准偏差 (s):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

(3) 判断: 当 $\frac{|x - \bar{x}|}{s} > 3$ 时, 数据为异常值。

离群值剔除后, 对数据进行正态性检验 ($k-s$ 检验), 当渐近显著性 $p > 0.05$ 时, 数据符合正态分布,

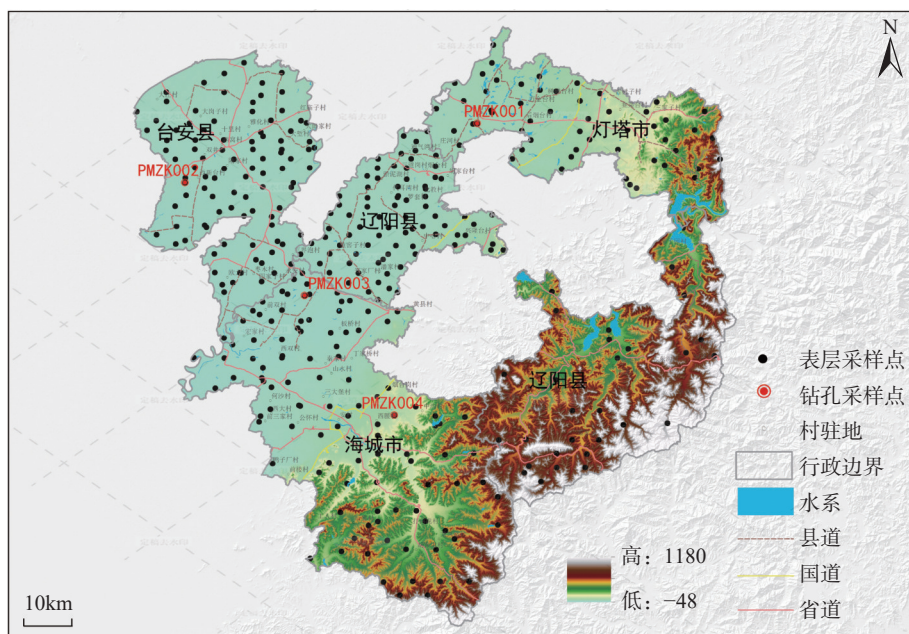


图1 研究区地貌及采样位置

Fig. 1 Geomorphology and sampling location map of the study area.

否则为非正态分布。本次样品数据 $p < 0.05$, 呈现非正态分布, 结果见表 1, 非正态分布的数据采用斯皮尔曼 (Spearman) 相关分析 [35]。

表 1 数据正态分布检验结果

Table 1 Test results of normal distribution of data.

统计参数	有机质含量	TN 含量	TP 含量	pH	容重
计数 (个)	364	365	362	368	367
平均值 (g/kg)	19.9	1.17	0.705	6.38	1.41
标准差 (g/kg)	8.34	0.466	0.290	0.929	0.207
渐近显著性 p (双尾)	0.007	0.041	0.001	0.001	0.005

2.3 实验测试数据质量控制

采用插入国家一级土壤成分分析标准物质 (GBW07544 ~ GBW07555)、重复分析、异常点检查、空白测试等手段控制分析测试质量, 分析检出限、准确度、精密度 (RSD) 及报出率见表 2。土壤样品分析方法的准确度和精密度结果满足《规范》要求, 元素测定平均值与标准值之间的对数误差 ($\Delta \lg C$) 均小于 0.016, 相对标准偏差 (RSD) 均小于 6.62%。

表 2 分析方法质量监控

Table 2 Quality control of analysis methods.

分析项目	分析方法	检出限 (mg/kg)	准确度 ($\Delta \lg C$)	RSD (%)	报出率 (%)
TP 含量	ICP-OES	5	0.002 ~ 0.016	4.78 ~ 6.28	100
TN 含量	VOL	20	0.001 ~ 0.016	3.77 ~ 4.61	100
有机碳含量	VOL	0.10*	0.002 ~ 0.011	3.03 ~ 6.62	100
pH	ISE	0.10**	0.002 ~ 0.016	0.59 ~ 6.00	100

注: “*”表示计量单位为 10^{-2} , “**”表示无量纲。

2.4 地理探测器

2.4.1 地理探测器的主要原理

地理探测器是由王劲峰等 [17] 研发的一项技术, 旨在探索地理空间分区因素如何影响风险 (灾害、疾病) 的一种方法。该方法基于比较各类变量方差总和与因变量方差总和的比例, 以评估自变量对于因变量的贡献。这种方法包含 4 个主要部分: 分异及其相关因子的探测器、交互作用探测器、风险区域探测器和生态探测器。其中, 分异及其相关因子的探测器负责寻找 Y 的空间差异性; 而其他三个则分别研究特定因子 X 如何显著地解释 Y 的空间差异, 并利用 q 值来表示这一关系 [17]。具体公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (1)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad SST = N \sigma^2 \quad (2)$$

式中: h 的值为 1, 2, 3, $\dots$; L 代表自变量 X 的种类数; N_h 和 N 分别表示种类 h 和整个区域内的单元数量; σ_h^2 和 σ^2 分别表示种类 h 和整个区域内因变量 Y 的方差。SSW 代表自变量 X 所有种类的方差之和, 而 SST 代表区域内的总方差。 q 值越大, 表明自变量 X 对因变量 Y 的影响能力越大; 反之, 影响能力越小。

交互检测器: 通过计算两个不同自变量相互作用时的 q 值, 来评估自变量间的交互作用对因变量的影响, 判别依据列于表 3。

表 3 交互作用的类型及判别依据

Table 3 The types of interaction and the basis of discrimination.

判断依据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \min(q(X1), q(X2))$	非线性减弱
$\min(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \max(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \max(q(X1), q(X2))$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

2.4.2 地理探测影响因子的选取

参考陈孟耀等 [36] 与任向宁等 [37] 对土壤有机质地理探测器因素的选择, 并根据研究区域的具体情况, 选择以下 17 项因素进行研究, 分别是: pH 值、总氮、总磷、容重、降雨量、温度、海拔高度、土地利用类型、土类、母质种类、基质构型、黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、离道路 (主干道) 的距离、离河流的距离、离居民区的距离。

3 结果与讨论

3.1 研究区土壤表层理化指标分析结果统计

对 368 份分析数据离群值进行处理, 剔除有机质 4 个、全氮 3 个、全磷 6 个、容重 1 个、粉粒含量 2 个和砂粒含量 2 个, 离群值剔除后进行分析统计 (表 4)。结果显示, 土壤有机质平均值低于中国耕地的全国平均值 (24.6g/kg) [38]。此外, 研究区土壤 TP 与 TN 含量分别为 0.705g/kg 和 1.17g/kg, 超过了

全国土壤的平均水平^[39]。该地区土壤的 pH 平均值为 6.38, 其中有 86.1% 的土壤呈酸性, 13.9% 呈碱性。容重范围为 0.780~1.93g/cm³, 黏粒含量范围为 0.0353%~7.10%, 粉粒含量范围为 27.5%~91.8%, 砂粒含量范围为 2.39%~71.9%。可见区域内土壤表层质地以粉砂为主。

表 4 研究区土壤表层的分析测试结果

Table 4 Analytical results of surface soil in the study area.

分析项目	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数 (%)
pH	8.50	3.87	6.38	0.929	14.6
TN 含量 (g/kg)	2.80	0.121	1.17	0.466	39.9
TP 含量 (g/kg)	1.75	0.188	0.705	0.290	41.2
有机质含量 (g/kg)	48.4	1.72	19.9	8.34	41.9
容重 (g/cm ³)	1.93	0.780	1.41	0.207	14.7
黏粒含量 (%)	7.10	0.0353	3.59	1.25	34.8
粉粒含量 (%)	91.8	27.5	72.7	14.8	20.3
砂粒含量 (%)	71.9	2.39	23.7	15.8	67.0

注: 土壤有机质与有机碳换算公式: 土壤有机质 (g/kg)=土壤有机碳 (g/kg)×1.724。

3.2 土壤有机质含量特征

3.2.1 土壤表层有机质含量特征

依据表 4 统计结果, 研究区土壤表层有机质平均值达到 19.9g/kg, 分别是辽宁省耕地土壤与全国耕地土壤有机质平均含量的 1.12 倍和 0.807 倍^[40]。该地区有机质含量变化范围为 1.72~48.4g/kg, 其变异系数为 41.9%, 属中等变异程度^[41]。

3.2.2 土壤剖面有机质含量特征

4 个钻孔 (10m) 有机质剖面分布规律如下: 除了 PMZK01 中 0~40cm 土壤有机质含量较低, 仅

为 9.14g/kg 外, 其他剖面土壤有机质具有相似的变化趋势, 即表层土壤有机质含量最高, 而容重与此相反 (图 2)。随着深度的增加, 土壤有机质呈现下降态势, 因为上层土壤通常有更多的植物残留物和根系生长, 这些有机质经过微生物分解后会逐渐积累形成较高的有机质含量。而随着深度增加, 土壤中的氧气、水分等条件逐渐减少, 微生物的活动也逐渐降低, 导致有机质的积累速度减缓甚至停止, 从而造成了有机质含量的降低。Liebmann 等^[42]研究认为几乎没有凋落物衍生的颗粒进入底土, 根系生物量是底土有机质的主要来源, 而根系的生物量随着深度增加减少。除了少数情况外, 土壤表层有机质含量显著高于深层, 植被凋落物及根系和传统秸秆还田在气候的作用下, 是形成这种现象的主要原因, 这一观点与王国芳等^[43]研究提出的土壤有机质具有表聚性相符。对于 PMZK01、PMZK02 和 PMZK03 剖面, 在 2.50m 有机质基本趋于稳定, 且在 0~2.50m 有机质降低明显, 分别降低了 79.2%、91.1% 和 81.8%。对于 PMZK04 剖面, 在 0~2.50m 有机质降低了 38.0%; 随着深度的增加, 有机质出现锯齿状变化特征, 深层也出现有机质高值。

3.3 土壤表层有机质空间分布特征

按照土壤第二次普查养分分级标准 (表 5), 将研究区有机质划分为 6 个含量等级, 其中 87.8% 的区域属于Ⅲ、Ⅳ级, 而Ⅰ级有机质区主要分布在山区及山前过渡带的韩家村、秦家沟和郑家厂村等地, 面积为 18.3km² (图 3)。

3.4 不同土地利用类型有机质含量特征

研究区主要土地利用类型为耕地与林地。从表 6 可知, 研究区 7 种土地利用类型的有机质含量

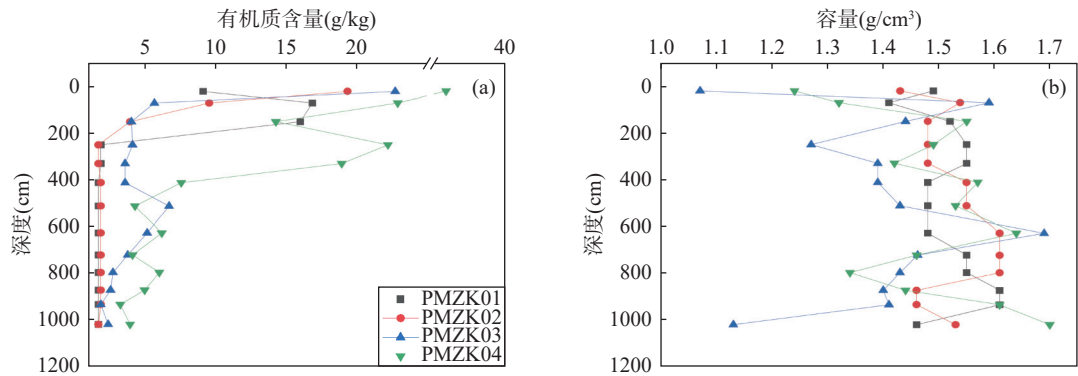


图2 土壤有机质 (a) 和容重 (b) 剖面分布图

Fig. 2 Distribution diagrams of organic matter content (a) and bulk density (b) in soil profile.

排序如下: 草地>水田>水浇地>林地>旱地>园地>住宅用地(含工矿、商业用地)。方差分析发现, 草地有机质含量显著高于其他六类, 草地仅占研究区面积的 0.67%。本次草地采集的样品偏少, 是否代表整个研究区实际情况需要进一步研究; 水田和水浇地高于其他土地利用类型, 但没有显著性差异。研究区水田和水浇地有机质稍高的原因, 与其大量

施用化肥和有机肥有关, 尤其是大量施用有机肥是引起水田和水浇地有机质高于其他类型的主要原因^[44]。园地和住宅用地(含工矿、商业用地)稍低于其他类型, 没有显著性差异, 主要原因是园地施肥结构不合理, 有机质肥投入不足, 大量施用化肥(氮磷肥), 使园地的全氮增加, 而土壤 C/N 比值下降, 造成土壤硬化, 肥力降低。住宅用地有机质低的原因

表 5 研究区土壤有机质分等标准及划分结果

Table 5 Soil organic matter content in different grades and area proportions.

土壤有机质等级	有机质含量范围 (g/kg)	面积 (km ²)	面积占比 (%)	土壤有机质等级	有机质含量范围 (g/kg)	面积 (km ²)	面积占比 (%)
I	>40	18.3	0.24	IV	10~20	3626	47.5
II	30~40	206	2.71	V	6~10	547	7.18
III	20~30	3070	40.3	VI	<6	161	2.11

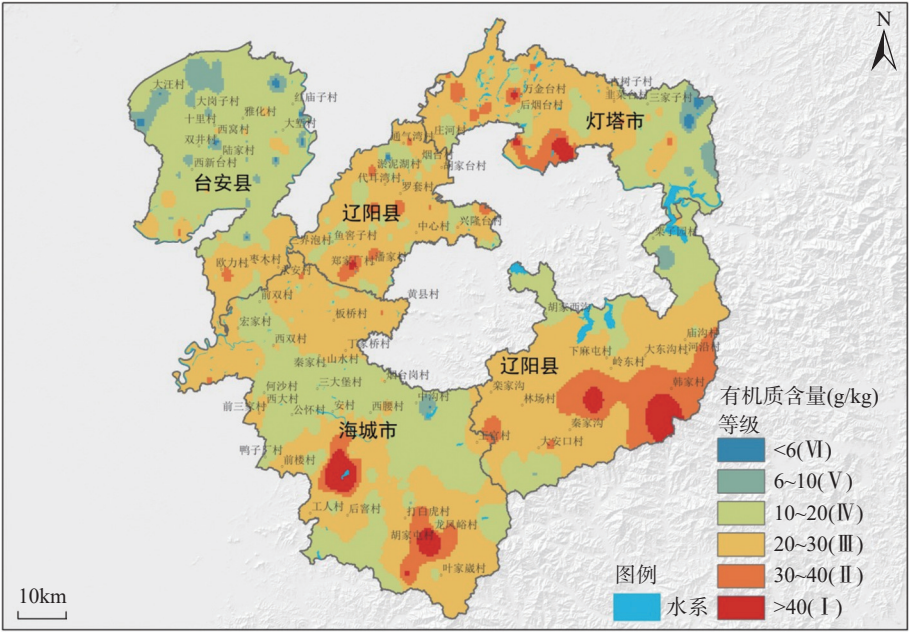


图3 土壤有机质分级图

Fig. 3 Classification map of soil organic matter.

表 6 不同利用类型区土壤有机质含量统计参数

Table 6 Statistical table of organic matter content data of different utilization types.

土地利用类型	样品数量 (件)	有机质含量变化范围 (g/kg)	有机质含量平均值 (g/kg)	标准差 (g/kg)	变异系数 (%)
旱地	173	1.72~47.2	19.5 ^b	7.75	39.7
水浇地	21	7.07~34.6	21.0 ^b	7.94	37.8
水田	44	5.86~45.5	22.7 ^b	9.00	39.6
林地	44	1.90~46.9	19.5 ^b	9.62	49.3
草地	2	24.6~48.4	36.5 ^a	16.8	46.0
园地	13	5.69~37.1	18.7 ^b	9.82	52.4
住宅用地(含工矿、商业用地等)	67	4.48~40.3	18.6 ^b	7.46	40.1

注: a、b 不同字母表示差异显著 ($p<0.05$)。

很明显,缺少有机肥和植被碳源的输入,这与寇建村等^[45]统计结果基本一致。不同土地利用类型的有机质含量变异系数均为中等强度变异。

3.5 土壤有机质与有机质含量影响因素之间的相关关系

对于土壤有机质的封存和分解过程而言,土壤物理化学特性、地形地貌及人类活动影响如离道路、水源和居住地的远近都起到了关键作用^[46];地形、气候、土壤母质、土壤侵蚀等能调节土壤中有机质空间分布^[47];人居距离因子,它主要反映了人们的行为如何影响到土壤有机质的空间布局的变化^[48]。因此,本章节利用斯皮尔曼相关系数法,探讨土壤理化特性、地形属性(海拔)以及人居距离因子(即离居民点、河流和路面的距离)等变量与土壤有机质相关关系(表7)。

3.5.1 土壤总磷和总氮含量

通过相关性分析发现,研究区表层(钻孔剖面)土壤有机质与总氮($p<0.01$)、总磷($p<0.01$)呈显著的正相关关系,这表明土壤中氮、磷元素对于土壤有机质的积累是关键性的决定因素。研究区的大分子有机物质对可吸附态磷具有很强的吸附力,同时磷也是有机质的重要来源,全氮含量增大,更有利于有机质的积累^[49]。

3.5.2 土壤黏粒、粉粒和砂粒含量

研究区土壤表层(钻孔剖面)有机质与粉粒的斯皮尔曼系数分别为 0.410 和 0.726($p<0.01$),与黏粒

含量的斯皮尔曼系数分别为 0.406 和 0.751($p<0.01$),均呈显著正相关(图4中a和b,表7),与砂粒含量呈显著负相关(图4c,表7),斯皮尔曼系数分别为-0.416 和-0.726($p<0.01$)。有机质在钻孔剖面与粉粒、黏粒和砂粒相关关系特点与表层一样,土壤粉黏比例大则有利于土壤有机质积累,砂粒含量大,保肥能力差,不利于有机质的积累^[50]。

3.5.3 土壤 pH 和容重

研究区土壤表层有机质与 pH 没有显著相关性(斯皮尔曼系数为 0.0320),但剖面有机质与 pH 呈显著负相关(斯皮尔曼系数为-0.307, $p<0.05$);土壤表层(剖面)容重与有机质呈显著负相关(斯皮尔曼系

表7 表层和剖面土壤有机质与影响因子的斯皮尔曼相关系数

Table 7 Spearman correlation coefficients between topsoil and soil profile organic matter and impact factors.

测试指标	表层土壤有机质含量 ($n=368$)	剖面土壤有机质含量 ($n=52$)
TN 含量	0.898**	0.945**
TP 含量	0.560**	0.873**
pH	0.030	-0.307*
容重	-0.284**	-0.305*
黏粒含量	0.406**	0.751**
粉粒含量	0.410**	0.726**
砂粒含量	-0.416**	-0.726**
与公路距离	0.004	—
与河流距离	-0.089	—
与居民距离	0.019	—
海拔	-0.007	—
降雨量	0.174**	—
气温	0.030	—

注:“***”代表在 0.01 级别(双尾),相关性显著;“*”代表在 0.05 级别(双尾),相关性显著,“—”代表没有统计意义。

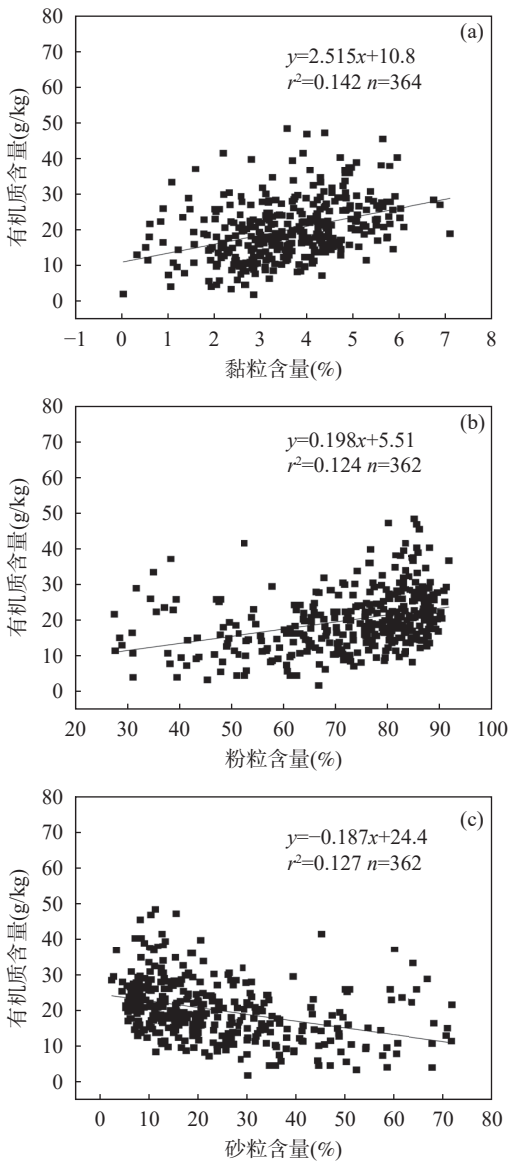


图4 表层土壤有机质含量与砂粒、粉粒和黏粒含量关系

Fig. 4 Relationship between organic matter content and sand, silt and clay content in surface soil.

数分别为 -0.284 , $p < 0.01$; -0.305 , $p < 0.05$), 土壤密度大, 土壤中的氧气供应少, 其中的微生物生长受到影响, 微生物数量减少。

3.5.4 海拔高度和距离因子

研究区表层土壤有机质含量与海拔斯皮尔曼相关系数为 0.0790 , 没有显著相关性。与多数研究得出的土壤有机质与海拔呈显著正相关^[51-52]的结果不一致。其主要原因在于研究区平原占 70% 以上, 而山区的海拔起伏也较小; 研究区表层土壤有机质含量与到河流、公路和居民住宅的距离无显著相关关系, 斯皮尔曼系数分别为 0.0120 、 -0.0130 和 0.120 , 说明研究区表层土壤有机质含量变化与河流、交通和居民因素关系不大。

3.6 地理探测器结果分析

3.6.1 土壤有机质空间分布影响因子探测结果分析

使用因子探测器来研究 17 种环境因子对土壤有机质的影响。由图 5 可见, 各种因子对土壤有机质有着不同的影响力。其中, 全氮对土壤表层有机质分布的影响最为明显, 解释力达到 0.80 ; 其次是土地利用类型, 解释力为 0.10 ; 第三位是降雨量, 解释力为 0.092 ; 全磷、容重、温度、黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、母质类型及基质构型等的独立解释力介于 $0.04 \sim 0.09$ 之间; 而 pH 值、土壤类型、海拔高度, 以及与道路、河流、居住区的距离等没有明显的解释力。

比较因子探测分析和斯皮尔曼相关性分析结果可以看出, 它们之间既有一致性也有不同之处。一致性方面: 全氮、全磷、容量、黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量和降雨量与表层土壤有机质有明显的相关性 ($p < 0.01$); 不一致的方面: 相关性分析降雨量的相

关系系数排在最后, 但在因子探测分析中却发现降雨量对表层土壤有机质地理分布的影响解释力仅排在全氮和土地利用类型之后, 原因是探测器分析的有机质与降雨量关联性包括线性和非线性, 而相关性分析只包含线性关系。

3.6.2 土壤有机质空间分布影响交互探测结果分析

由于土壤成分和结构复杂, 其有机质的空间分布往往是多个因素协同作用的结果, 无法找到一种特定的因素来决定有机质的空间分布。所以, 拟使用交互作用探测器来评估各种影响因子对土壤有机质空间分布的交互影响及贡献大小, 有助于精确地理解那些主导着有机质空间分布的关键驱动力。从交互探测分析结果 (图 6) 可以看出, 任何两类影响因子的交互作用对表层土壤有机质空间异质性分布的解释能力都要超过单一因子, 呈现出非线性的增强作用。Li 等^[53]研究认为, 地理探测器模型任意两个因子之间交互作用通常会导致非线性增强, 各类影响因子之间的交互作用也存在显著差别。总体而言, 全氮和其余 16 种影响因子的交互作用影响力最大, 达到 0.80 以上, 这也再次证明了全氮对表层土壤有机质的分布变异有着密切的关系, 其原因是有机质中的氮以有机形态存在, 全氮包含有机氮和无机氮, 有机氮可以通过微生物分解作用逐渐转化为无机氮, 全氮的含量能够影响有机质的动态平衡, 进而影响 C/N 比值平衡。此外, $\text{pH} \cap$ 全氮、 $\text{pH} \cap$ 粉粒含量、 $\text{pH} \cap$ 砂粒含量、全磷 $\cap$ 温度、温度 $\cap$ 基质类型、温度 $\cap$ 海拔、温度 $\cap$ 粉粒含量和海拔 $\cap$ 砂粒含量等各组都有较强的交互作用关系 ($q \geq 0.40$), 说明了土壤有机质空间分布受多个影响因素控制, 且影响复杂。

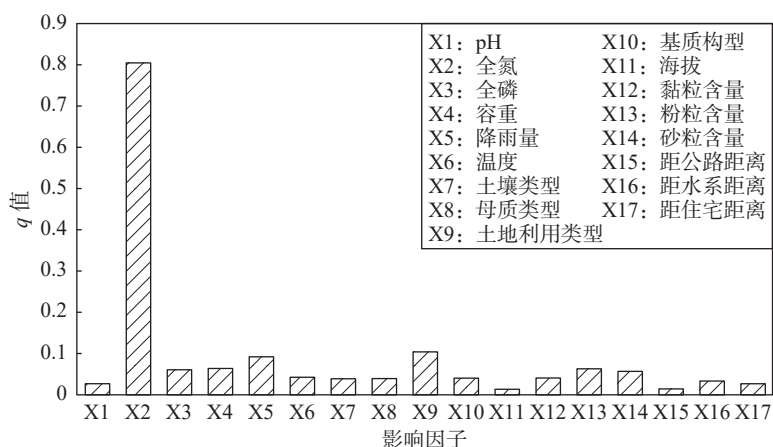


图5 单因子对表层土壤有机质的影响探测结果

Fig. 5 Effects of single factors on surface soil organic matter.

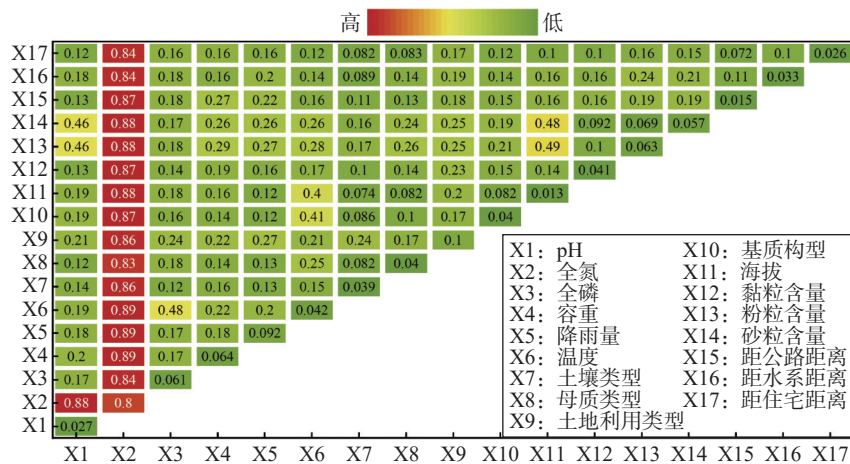


图6 土壤有机质的交互探测分析结果
Fig. 6 Detection results of cross-probing analysis for soil organic matter.

3.7 有机质空间异质性及影响因子讨论

3.7.1 土壤有机质空间格局

研究区表层土壤有机质整体上呈东南向西北逐渐降低的空间格局,有机质高值主要集中在东南部山区、山前过渡带。辽阳县—灯塔市冲积平原零星分布,东南部地区主要为山区林地,土层厚度较薄,下伏是坚硬的岩石,植被根系基本集中在表层,降雨量丰富,土壤有机质相对偏高,与 Ni 等^[54]研究结果一致;海城市城区南部有机质偏高,该区域位于山前过渡带,为林耕交错地,同时是经济作物耕作区,耕种活动影响林地生态系统,土壤有机质增加,这与徐广平等^[55]研究结果一致;研究区中部地区出现高值区,该区域河流发育,土壤类型分布大量水稻土(水田),同时随着大量肥料的投入,有机质含量高,这与长期施用有机肥和磷肥可提升水稻土综合肥力^[56]论述相符;西部台安县有机质普遍偏低,原因是土壤质地主要以砂质为主,砂土保肥能力差;剖面土壤有机质变化呈现两种类型,第一种是表层到深层连续降低直到稳定,第二种是降低后出现锯齿状变化特征,其中第二种类型的原因可能与土壤深耕、施肥等人为扰动有关。

3.7.2 土壤有机质空间格局影响因子

全氮、全磷、容重、黏粒含量、粉粒含量和降雨量与土壤有机质呈显著相关,地理探测器 q 值显示,全氮、土地利用类型、降雨量、全磷、容重和质地含量排在前六位,研究区全氮和全磷与有机质正相关,平原区氮、磷肥和有机肥的投入,影响土壤 C/N 比值,进而影响有机质分布,林地不同林分的土壤有机质空间分布受到全氮、全磷等土壤理化因

子影响显著;有机质与降雨量正相关,降雨量增加植被初级生产力,有机质随降雨量增加而增大,研究区降雨量自东南向西北呈现逐级降低的格局,与有机质空间分布格局吻合;有机质对土壤团聚体和矿质、结构影响极大,造成土壤之间的容重显著差异,大量研究证明,土壤有机质与容重呈显著负相关,这与本次研究结果一致;研究区质地东南以黏质壤土和壤土为主,中间以壤土为主,西部以砂土为主,黏粒和粉粒相对于砂粒具有更强的团聚作用。葛楠楠等^[57]研究表明土壤大团聚体含量、主要养分含量随土壤质地由细变粗(壤质黏土→黏壤土→砂质壤土)逐渐降低,这与研究区有机质分布特征吻合。

4 结论

研究区土壤表层有机质变异系数为 41.9%,空间分异中等,整体呈现东南向西北逐渐降低的空间格局,有机质在剖面上基本是表层富集;表层(剖面)土壤有机质与全氮、全磷、容重、黏粒含量、粉粒含量呈显著正相关,与砂粒含量和容重呈负相关;单因子影响强度排前六位为全氮、土地利用类型、降雨量、容重、全磷和粉粒含量,任意两个因子交互作用大于单个因子的影响,全氮与其他 16 个因子的交互作用解释力在 0.80 以上。

结合地统计学、相关性分析和地理探测器模型,全氮、降雨量、容重和全磷对土壤有机质的空间变异起着主导作用。研究成果为土地资源合理利用及土壤改良提供了科学依据。因本次未选取生物指标,影响因子有待后期进一步研究。

致谢: 论文写作过程中,中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心科技创新基金团队、地表基质调查团队和黑土重点研发计划项目团队在采样和制图方面提供了很多帮助,在此一并表示感谢。

Spatial Pattern and Influence Factor Analysis of Soil Organic Matter Based on the GeoDetector Model: Taking Liaoyang—Anshan Area as an Example

AI Xiaojun^{1,2}, *YU Xiaojian*^{1,2}, *CHEN Zhansheng*^{1,2}, *HOU Hongxing*³, *CHEN Xue*^{1,2},
*GONG Cang*⁴, *LI Ziqi*⁵, *HUO Dong*^{1,2}, *LIU Jiufen*^{5,6,7*}

(1. Center for Geophysical Survey, China Geological Survey, Langfang 065000, China;

2. Technology Innovation Center for Earth Near Surface Detection, China Geological Survey, Langfang 065000, China;

3. Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Langfang 065000, China;

4. Civil-Military Integrated Geological Survey Center of China Geological Survey, Chengdu 611732, China;

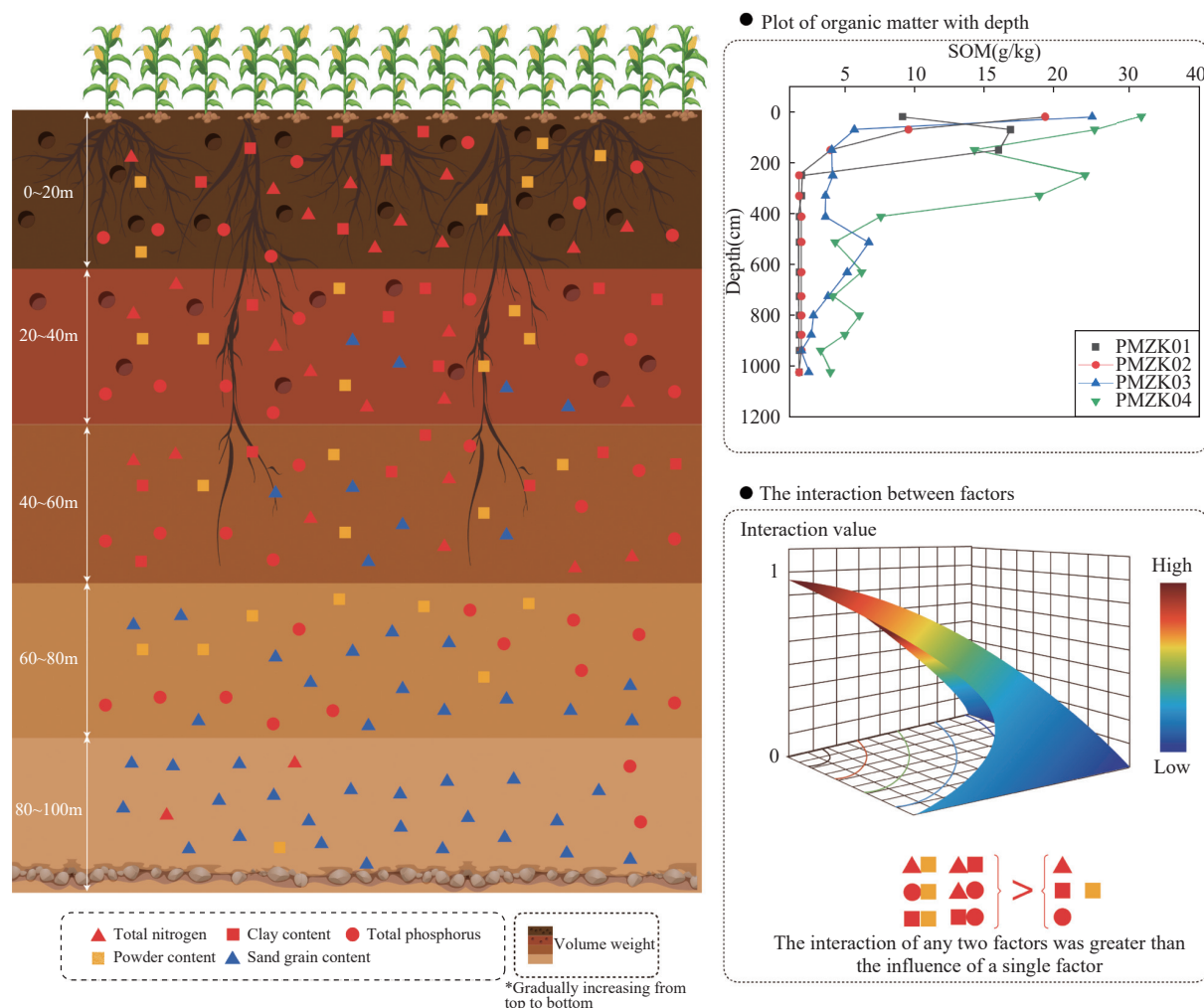
5. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

6. Command Center for Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Beijing 100055, China;

7. Key Laboratory of Coupling Process and Effect of Natural Resources Elements, Beijing 100055, China)

HIGHLIGHTS

- (1) In the study area, organic matter content of 10–30g/kg (Ⅲ, Ⅳ) accounted for 87.8% of the area, and the coefficient of variation was 41.9%, which demonstrated a moderate degree of variation. The organic matter of soil showed a decreasing trend from southeast to northwest, and organic matter of soil profile decreased with increasing depth.
- (2) Total nitrogen, rainfall, total phosphorus and bulk density played a leading role in the spatial variation of surface soil organic matter in the study area.
- (3) The explanatory power of the interaction of any two factors on the spatial distribution of organic matter was greater than that of a single factor.



ABSTRACT: Spatial pattern of organic matter distribution and its influencing factors in the study area can provide a decision-making basis for territorial spatial planning. The majority of previous studies in this area focused on the soil surface, and most of them studied the influence of single factors. Therefore, the characteristics, spatial pattern and multi-factor influence of soil horizontal and vertical organic matter content were studied. The results showed that organic matter was higher in the southeast and lower in the northwest, and decreased with increasing depth. Organic matter was positively correlated with total nitrogen, total phosphorus, viscosity and silt content, and negatively correlated with sand content and bulk density. The interaction of any two factors was greater than that of a single factor. The BRIEF REPORT is available for this paper at <http://www.ykcs.ac.cn/en/article/doi/10.15898/j.ykcs.202412050251>.

KEY WORDS: soil organic matter; inductively coupled plasma-optical emission spectrometry; influence factor; Geodetector; Liaoyang—Anshan

BRIEF REPORT

Significance: With the rapid development of industry and urbanization, the intensity of land use has increased and refined management has strengthened. Compared with the second national soil census, the overall soil fertility shows a downward trend. Meanwhile, due to irrational farming, the risk of excessive phosphate fertilizer appeared in Haicheng City, the carbon storage deficit in Tai'an County was serious (52%), and the risk of degradation of black soil was high. As an important parameter of soil fertility, soil organic matter not only affects the physical, chemical

and ecological characteristics of soil, but also directly determines the productivity of soil and the robustness of the ecosystem^[1-3]. The spatial pattern of organic matter distribution and its influencing factors in the study area can provide a decision-making basis for territorial spatial planning.

Existing studies have revealed that soil organic matter is comprehensively affected by altitude, average annual air temperature, soil type, soil parent material, precipitation, land use method, pH value and soil clay content^[4-6]. The research area studied by the above scholars was cultivated land or forest land, and the geostatistical method was still the most common research method^[16]. The research area covers various types of cultivated land, forest and grassland, and extends from the soil surface to the deep layer. The interaction of multiple factors is the key issue to be considered. In view of this, the geographical detector developed by Wang, et al^[17] can reveal the influence of a single independent variable on the dependent variable and also identify the interaction effect between the two factors. A linear relationship is not needed to prevent collinearity caused by multiple variables. The Q -value index can accurately evaluate the interpretation ability of single or interactive variables of geographic detectors on the spatial differentiation of soil organic matter^[18]. The Liaoyang—Anshan region is an important part of the old industrial base and grain production base in northeast China. Soil organic matter has a downward trend^[28], and its decline has affected soil environment and crop growth, thus affecting regional food security and ecological balance. This study combined geostatistics, correlation analysis and a geographic detector model to input more factors that had not been investigated in previous studies, such as surface matrix configuration, clay, silt, sand, total nitrogen and total phosphorus content, to analyze the impact of environmental and human factors on soil organic matter distribution.

Methods: In order to systematically study the internal laws and influencing factors of organic matter distribution in soil surface and profile, soil surface and profile samples from Liaoyang-Anshan area were collected. The Potassium dichromate volumetric method, inductively coupled plasma-optical emission spectrometry and Kaye distillation volumetric method were used to determine the physical and chemical index content of soil. The characteristics, spatial pattern and influencing factors of soil organic matter content were investigated based on geostatistics, correlation analysis and the GeoDetector model. Technical standards such as *Specification of Multi-Purpose Geochemical Survey* (DZ/T 0258—2014) and *The Specification of Testing Quality Management for Geological Laboratories* (DZ/T 0130—2006) were strictly implemented. Data processing and data quality control are shown in Table 1 and Table 2.

Data and Result: (1) The soil surface organic matter content in the study area ranged from 1.72 to 48.4g/kg, with an average value of 19.9g/kg and a coefficient of variation of 41.9%, as shown in Table 4. The spatial variation was moderate. The overall spatial pattern showed a gradual decrease from southeast to northwest, and the soil profile organic matter decreased with increasing depth, as shown in Fig.2 and Fig.3. The decrease of organic matter in soil profile was related to the decrease of soil oxygen content, root biomass and microbial activity^[42]. (2) Soil surface and profile organic matter were positively correlated with total N, total P, clay and silt content, and negatively correlated with sand content and bulk density ($p<0.01$), as shown in Table 7 and Fig.4, which was determined by the biogeochemical mechanism of organic matter, N and P covariance and the cascade effect of soil parent material and texture^[50-51]. (3) The interaction of any two factors was greater than that of a single factor, and the explanatory power of the interaction between total nitrogen and the other 16 factors was above 0.80, as shown in Fig.6. The spatial variation of soil surface organic matter was different, and total nitrogen, rainfall, bulk density and total phosphorus were the leading factors of spatial variation, which were also affected by multiple factors.

参考文献

- [1] 黎钰鑫, 赵小敏, 郭熙, 等. 南昌市近郊耕层土壤有机质空间格局及其影响因素分析[J]. *江西农业大学学报*, 2023, 45(3): 749–758.
Li Y X, Zhao X M, Guo X, et al. Spatial pattern of soil organic matter in the suburbs of Nanchang City and its influencing factors[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(3): 749–758.
- [2] 贾鲁净, 杨联安, 冀泳帆, 等. 卫星遥感反演土壤有机质研究进展[J]. *遥感信息*, 2023, 38(2): 1–9.
Jia L J, Yang L A, Ji Y F, et al. Review on inversion of soil organic matter using satellite remote sensing[J]. *Remote Sensing Information*, 2023, 38(2): 1–9.
- [3] Almaraz M, Simmonds M, Boudinot F G, et al. Soil carbon sequestration in global working lands as a gateway for negative emission technologies[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(21): 5988–5998.
- [4] Zhao H J, Luo C, Kong D, et al. Spatial and temporal variations in soil organic matter and their influencing factors in the Songnen and Sanjiang Plains of China (1984–2021)[J]. *Land*, 2024, 9: 1447.
- [5] Kong D, Chu N, Luo C, et al. Analyzing spatial distribution and influencing factors of soil organic matter in cultivated land of Northeast China: Implications for black soil protection[J]. *Land*, 2024, 13(7): 1028.
- [6] Galluzzi G, Plaza C, Priori S, et al. Soil organic matter dynamics and stability: Climate vs. time[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 929: 172441.
- [7] Zun F L, Hao C L, Hai Y S, et al. Analysis of soil organic matter influencing factors in the Huangshui River Basin by using the optimal parameter-based geographical detector model[J]. *Geocarto International*, 2023, 38(1): 2246935.
- [8] 蒯雁, 苏欣悦, 王晋峰, 等. 大理典型烟区土壤有机质与全氮时空演变特征[J]. *中国农业科技导报*, 2023, 25(12): 177–185.
Kuai Y, Su X Y, Wang J F, et al. Temporal and spatial evolution of soil organic matter and total nitrogen in typical tobacco—planting areas of Dali[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(12): 177–185.
- [9] 黄会前, 张慧, 胡震, 等. 贵州山区耕地土壤有机质及 pH 的空间分布与影响因素研究[J]. *西南农业学报*, 2023, 36(11): 2473–2479.
Huang H Q, Zhang H, Hu Z, et al. Spatial distribution and influencing between organic matter and pH of arable soil in mountainous areas of Guizhou[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 36(11): 2473–2479.
- [10] 孙欣琪, 张蚌蚌, 柴朝卿, 等. 沙地整治下榆林土地利用及土壤有机质时空分异特征[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(24): 207–217.
Sun X Q, Zhang B B, Chai C Q, et al. Spatial-temporal characteristics of land use and soil organic matter in Yulin under sandy land remediation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(24): 207–217.
- [11] 刘尊方, 雷浩川, 雷蕾. 湟水流域土壤有机质和速效磷空间布局分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(34): 15095–15102.
Liu Z F, Lei H C, Lei L. Analysis on spatial distribution of soil organic matter and available phosphorus in Huangshui River Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(34): 15095–15102.
- [12] 石光辉, 毛伟, 曾洪玉, 等. 扬州市江都区耕地土壤有机质 35 年变化特征及其影响因素分析[J]. *扬州大学学报 (农业与生命科学版)*, 2022, 43(6): 44–50.
Shi G H, Mao W, Zeng H Y, et al. Variation characteristics of soil organic matter and its influencing factors in 35 years in Jiangdu district of Yangzhou City[J]. *Journal of Yangzhou University (Agriculture and Life Science Edition)*, 2022, 43(6): 44–50.
- [13] 申楷慧, 魏识广, 李林, 等. 漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子[J]. *环境科学*, 2024, 45(1): 323–334.
Shen K H, Wei S G, Li L, et al. Spatial distribution patterns of soil organic carbon in karst forests in Lijiang River Basin and its driving factors[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(1): 323–334.
- [14] 张欣, 李梦佳, 刘洪斌, 等. 丘陵区耕地土壤剖面有机质含量分布特征及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 29(12): 2696–2708.
Zhang X, Li M J, Liu H B, et al. Distribution characteristics and influencing factors of organic matter content in cultivated soil in different horizons in hilly areas[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 29(12): 2696–2708.
- [15] 廖宇波, 温良友, 孔祥斌, 等. 近 40 年大兴区耕地土壤有机质时空变异特征及其影响因素[J]. *土壤通报*, 2020, 51(1): 40–49.
Liao Y B, Wen L Y, Kong X B, et al. Spatio-temporal variability and influencing factors of soil organic matter in cultivated land of Daxing district in recent 40 years[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(1): 40–49.
- [16] Wu X T, Jiang N, Li A Q, et al. Spatial distribution

- pattern of soil organic matter in the wind erosion region of northeastern China based on the cokriging method[J]. *CATENA*, 2025, 248: 108575.
- [17] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116–134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116–134.
- [18] 朱兴林, 司建华, 王军德, 等. 基于地理探测器的洮河流域生态环境质量时空演变及驱动力分析[J]. *水利水电技术*, 2025, 56(1): 74–84.
Zhu X L, Si J H, Wang J D, et al. Analysis of spatial and temporal evolution of ecological environment quality and driving force in Taohe River Basin[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(1): 74–84.
- [19] 齐杏杏, 高秉博, 潘瑜春, 等. 基于地理探测器的土壤重金属污染影响因素分析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(11): 2476–2486.
Qi X X, Gao B B, Pan Y C, et al. Influence factor analysis of heavy metal pollution in large-scale soil based on the geographical detector[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2476–2486.
- [20] 袁菊红, 陈拉, 胡绵好. “中四角”绿色水资源利用效率时空分异及其影响因素——基于非期望产出 SBM-DEA 和地理探测器模型[J]. *生态经济*, 2019, 39(9): 138–147.
Yuan J H, Chen L, Hu M H. Spatial-temporal differentiation of green water utilization efficiency and its influencing factors in “four-city area in middle China”: Based on SBM-DEA model with undesired outputs and geograpyical geodetector model[J]. *Ecological Economy*, 2019, 39(9): 138–147.
- [21] 刘莉, 汪丽娜. 基于地理探测器的广东省水资源利用效率影响因素研究[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(4): 40–43.
Liu L, Wang L N. Study on influencing factors of water resources utilization efficiency in Guangdong Province based on geo-detector method[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(4): 40–43.
- [22] 辛培源, 田甜, 张美露, 等. 基于 InVEST 模型和地理探测器的吉林省生境质量变化及驱动因素评估[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(10): 2853–2860.
Xin P Y, Tian T, Zhang M L, et al. Assessment of habitat quality changes and driving factors in Jilin Province based on InVEST model and geodetector[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(10): 2853–2860.
- [23] 李斯林, 王贺封, 刘佳, 等. 冀南非露天煤矿土壤重金属风险评价与影响因素分析[J]. *岩矿测试*, 2024, 43(5): 769–782.
Li S L, Wang H F, Liu J, et al. Risk assessment and influencing factors analysis of heavy metals in soil of non-surface coal mines in southern Hebei Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2024, 43(5): 769–782.
- [24] 龚仓, 王亮, 王顺祥, 等. 四川成都市唐昌镇土壤硒分布特征及影响因素[J]. *岩矿测试*, 2022, 41(3): 437–450.
Gong C, Wang L, Wang S X, et al. Distribution characteristics of soil selenium and its influencing factors in Tangchang Town of Chengdu Ctiy, Sichuan Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(3): 437–450.
- [25] 王洋, 冯卓亚, 许丽, 等. 塔里木河流域生境质量与土地利用变化响应及驱动力[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(12): 2132–2142.
Wang Y, Feng Z Y, Xu L, et al. Response and influencing factors of habitat quality and land use change in the Tarim River Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(12): 2132–2142.
- [26] 张湘雪, 程昌秀, 徐成东, 等. 基于贝叶斯时空层次模型 (BSTHM) 和地理探测器法 (GeoDetector) 对细菌性痢疾的环境风险评估[J]. *环境化学*, 2022, 41(7): 2193–2201.
Zhang X X, Cheng C X, Xu C D, et al. Environmental risk assessment of bacillary dysentery based on BSTHM and GeoDetector[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(7): 2193–2201.
- [27] Teixeira F, Basch G, Alaoui A, et al. Manuring effects on visual soil quality indicators and soil organic matter content in different pedoclimatic zones in Europe and China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 212: 105033.
- [28] 汪春鹏, 尤建功, 孙浩, 等. 辽阳市土壤重金属含量特征及潜在风险评估[J]. *地质通报*, 2021, 40(10): 1680–1687.
Wang C P, You J G, Sun H, et al. Characteristics and potential risk assessment of heavy metal contents in urban soil, Liaoyang City[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(10): 1680–1687.
- [29] 孙才志, 李秀明. 基于 ArcGIS 的下辽河平原地下水功能评价[J]. *地理科学*, 2013, 33(2): 174–180.
Sun C Z, Li X M. Groundwater function assessment based on ArcGIS in the lower reach of the Liaohe River Plain[J]. *Science Geographica Sinica*, 2013, 33(2): 174–180.
- [30] 边振兴, 蒋文浩, 陆璐, 等. 下辽河平原区典型县域非

- 耕作土地对作物干旱减缓效应[J]. *土壤通报*, 2019, 51(1): 89–98.
- Bian Z X, Jiang W H, Lu L, et al. Effects of non-cultivated land on drought mitigation in typical counties of lower Liaohe Plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 51(1): 89–98.
- [31] 艾晓军, 陈占生, 侯红星, 等. 辽阳—丹东地区土壤重金属分布特征与源解析[J]. *岩矿测试*, 2024, 43(5): 755–768.
- Ai X J, Chen Z S, Hou H X, et al. Distribution characteristics and source analysis of soil heavy metals in the Liaoyang—Dandong region[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2024, 43(5): 755–768.
- [32] 汪景宽, 徐香茹, 裴久渤, 等. 东北黑土地地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J]. *土壤通报*, 2019, 52(3): 695–701.
- Wang J K, Xu X R, Pei J B, et al. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 52(3): 695–701.
- [33] 刘玖芬, 赵晓峰, 侯红星, 等. 地表基质调查分层及分层测试指标体系设计与构建[J]. *岩矿测试*, 2024, 43(1): 16–29.
- Liu J F, Zhao X F, Hou H X, et al. Exploration on the stratification of the ground substrate survey and the design and construction of its testing indicator system[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2024, 43(1): 16–29.
- [34] 徐吉, 信自成, 兰模, 等. 冶金机理与贝叶斯优化 XGBoost 融合的 VD 炉精炼终点钢液温度预测[J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(6): 63–72.
- Xu J, Xin Z C, Lan M, et al. Predicting endpoint temperature of molten steel in VD furnace refining process using metallurgical mechanism and Bayesian optimization XGBoost[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(6): 63–72.
- [35] 杨宋琪, 高兴亮, 王丽娟, 等. 西北干旱区典型水库浮游植物群落结构特征及驱动因子[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(2): 377–387.
- Yang S Q, Gao X L, Wang L J, et al. Phytoplankton community structure and driving factors in typical reservoirs of arid region of Northwest China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(2): 377–387.
- [36] 陈孟耀, 刘啸歌, 黄达沧, 等. 基于地理探测器模型的福建省耕地土壤有机碳影响因素研究[J]. *福建农业学报*, 2024, 33(6): 738–751.
- Chen M Y, Liu X G, Huang D C, et al. Factors affecting soil organic carbon on farmland in Fujian analyzed by geodetector model[J]. *Fujian Journal of Agriculture Sciences*, 2024, 33(6): 738–751.
- [37] 任向宁, 董玉祥. 基于地理探测器的区域土壤耕层有机碳含量多元复合模型构建——以珠三角核心区为例[J]. *热带地理*, 2018, 38(4): 546–556.
- Ren X N, Dong Y X. Construction of multivariate composite calculation model of soil organic carbon content in plough horizon based on geodetector[J]. *Tropical Geography*, 2018, 38(4): 546–556.
- [38] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1047–1056.
- Yang F, Xu Y, Cui Y, et al. Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1047–1056.
- [39] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 81–83.
- Chi Q H, Yan M C. Handbook of applied geochemical element abundance data[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 81–83.
- [40] 白树彬, 裴久渤, 李双异, 等. 30 年来辽宁省耕地土壤有机质与 pH 时空动态变化[J]. *土壤通报*, 2016, 47(3): 636–644.
- Bai S B, Pei J B, Li S Y, et al. Temporal and spatial dynamics of soil organic matter and pH in cultivated land of Liaoning Province during the past 30 years[J]. *Chinese Journal Soil Science*, 2016, 47(3): 636–644.
- [41] 蒙雯洋, 饶良懿. 砒砂岩覆土区典型小流域土壤可蚀性 K 值空间变异特征[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(3): 10–19.
- Meng W Y, Rao L Y. Spatial variability of soil erodibility factor K of the typical small watershed in the soil covered area of Pisha sandstone region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3): 10–19.
- [42] Liebmann P, Wordell-Dietrich P, Kalbitz K, et al. Relevance of aboveground litter for soil organic matter formation—A soil profile perspective[J]. *Biogeosciences*, 2020, 17(12): 3099–3113.
- [43] 王国芳, 张吴平, 毕如田, 等. 县域尺度农田深层土壤有机质的估算及空间变异特征[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(22): 122–131.
- Wang G F, Zhang W P, Bi R T, et al. Estimation and spatial variability of organic matter in deep soil of farmland at county scale[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(22): 122–131.
- [44] 张维理, Kolbe H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 317–331.

- Zhang W L, Kolbe H, Zhang R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(2): 317–331.
- [45] 寇建村, 杨文权, 李尚玮, 等. 我国果园土壤有机质研究进展[J]. *北方园艺*, 2016(4): 185–191.
- Kou J C, Yang W Q, Li S W, et al. Research advance on soil organic matter of orchard in China[J]. *Northern Horticulture*, 2016(4): 185–191.
- [46] 徐云鹤, 方斌. 江浙典型茶园土壤有机质空间异质性分析[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(5): 622–630.
- Xu Y H, Fang B. Study on spatial heterogeneity of the soil organic matter in typical tea gar dens of Jiangsu Province and Zhejiang Province[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015, 17(5): 622–630.
- [47] 商靖敏, 罗维, 吴光红, 等. 洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素[J]. *环境科学*, 2015, 36(1): 301–308.
- Shang J M, Luo W, Wu G H, et al. Spatial distribution of se in soils from different land use types and its influencing factors within the Yanghe watershed, China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(1): 301–308.
- [48] 宋恒飞, 吴克宁, 李婷, 等. 寒地黑土典型县域土壤重金属空间分布及影响因素分析——以海伦市为例[J]. *土壤通报*, 2018, 49(6): 1480–1486.
- Song H F, Wu K N, Li T, et al. The spatial distribution and influencing factors of farmland heavy metals in the cold black soil region: A case of Hailun County[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(6): 1480–1486.
- [49] 宫兆宁, 李洪, 阿多, 等. 官厅水库消落带土壤有机质空间分布特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(24): 8336–8347.
- Gong Z N, Li H, A D, et al. Spatial distribution characteristics of soil organic matter in the water lever fluctuation zone of Guanting Reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8336–8347.
- [50] 陈梦, 刘汉文, 马倩, 等. 轻中度盐碱地土壤有机质空间异质性及影响因素分析——以山东省黄河三角洲农业高新技术示范区为例[J]. *山东农业科学*, 2019, 56(1): 139–146.
- Chen M, Liu H W, Ma Q, et al. Spatial heterogeneity and influencing factors of soil organic matter in light and moderate saline-alkali soil—A case study of the agricultural high-tech industry demonstration area of the Yellow River Delta[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2019, 56(1): 139–146.
- [51] 文鑫, 王艺惠, 钟聪, 等. 贵州表层土壤有机质空间变异特征及其影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 218–224.
- Wen X, Wang Y H, Zhong C, et al. Spatial variation of surface soil organic matter and its influencing factors in Guizhou Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 218–224.
- [52] 雷琪, 蒋洪丽, 吴淑芳, 等. 西北地区有机质空间分布及其影响因素研究[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 274–279, 293.
- Lei Q, Jiang H L, Wu S F, et al. Spatial distribution of organic matter and its influencing factors in Northwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3): 274–279, 293.
- [53] Li Y, Zheng S F, Wang L P, et al. Systematic identification of factors influencing the spatial distribution of soil organic matter in croplands within the black soil region of northeastern China across multiple scales[J]. *CATENA*, 2025, 249: 108633.
- [54] Ni J, Luo D H, Xia J, et al. Vegetation in karst terrain of southwestern China allocates more biomass to roots[J]. *Solid Earth*, 2015, 6(3): 799–810.
- [55] 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 等. 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1491–1503.
- Xu G P, Li Y Q, Shen Y Y, et al. Soil organic carbon distribution and components in different plant communities along a water table gradient in the Huixian karst wetland in Guilin[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(3): 1491–1503.
- [56] 黄兴成, 杨叶华, 李渝, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土综合肥力和水稻产量的影响[J]. *南方农业学报*, 2023, 54(2): 506–515.
- Huang X C, Yang Y H, Li Y, et al. Effects of long-term fertilization on integrated fertility and rice yield in yellow paddy soil[J]. *Journal of Southern Agricultural*, 2023, 54(2): 506–515.
- [57] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1626–1632.
- Ge N N, Shi Y, Yang X L, et al. Distribution of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and water stable aggregates of cropland with different soil textures on the Loess Plateau, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5): 1626–1632.