doi: 10.11720/wtyht.2026.1336
李敬杰, 王明国, 杨涛, 等. 三江平原东北部土壤有机质含量特征及其影响因素[J]. 物探与化探, 2026, 50(2): 373-384. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1336
Li J J, Wang M G, Yang T, et al. Soil organic matter content and its influencing factors in the northeastern Sanjiang Plain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(2): 373-384. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1336

三江平原东北部土壤有机质含量特征及其影响因素

李敬杰, 王明国, 杨涛, 连晟, 冯建月, 鲜杰良
(中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心, 天津 300309)

摘 要: 土壤有机质(SOM)对全球碳循环具有重要意义。本文利用统计分析和相关分析等方法研究了三江平原东北部红卫农场—大兴农场区域 105 组表层土壤有机质的含量特征及其影响因素。结果表明, 研究区 SOM 含量范围为 1.72%~13.80%, 平均值为 4.78%; SOM 在表层土壤中强烈富集, 富集系数为 10.29; SOM 含量频率分布基本符合正态分布, 空间分布具有明显的区域格局, 在研究区的东北部明显高于西北部; 典型土壤剖面 SOM 及总氮(TN)含量随着土壤深度的增加而降低, 呈表层集聚现象; 土壤理化指标含水量、黏粒含量、水稳性团聚体、氧化铁(Fe_2O_3)、TN 与 SOM 呈显著正相关, 是驱动研究区 SOM 积累的有利因素, 容重、pH 和氧化钾(K_2O)与 SOM 呈负相关; 定量评估了该区域湿地转耕地后的土壤碳库差异, SOM 平均含量表现为湿地(8.87%)>旱地(5.90%)>水田(4.21%), 同时, 湿地转化为耕地后土壤 pH 值明显增加, SOM、TN 和总磷(TP)受到不同程度的损失; 不同土壤类型中沼泽土 SOM 含量平均值最高, 为 6.77%, 表现出较高的 SOM 富集能力; 不同成土母质中第四系高漫滩冲积物形成的土壤中 SOM 含量平均值最高, 因其成分主要为湖积淤泥质黏土及亚黏土沉积, 黏粒含量高有利于 SOM 积累。本次研究成果为该区域土地资源管理和可持续利用、湿地保护与碳汇功能提升提供了科学依据。

关键词: 三江平原; SOM; 理化性质; 土地利用; 土壤类型; 成土母质
中图分类号: P632;X142;X825;P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)02-0373-12

0 引言

土壤有机质 (SOM) 是土壤肥力的重要物质基础, 其主要组成元素是 C、H、O 和 N, 主要来源是植物和居住在土壤中的动物、微生物及其残体[1]。SOM 含量与土壤碳输入和输出的平衡密切相关, 这在很大程度上取决于气候、植被覆盖和土壤物理化学性质[2-3]。有研究表明, 温度升高会刺激微生物活动, 加速有机质分解, 减少碳储量。相比之下, 降水增加通常会提高植被生产力, 从而潜在地增加土壤碳输入[4]。土壤质地, 特别是黏土颗粒, 通过促进土壤团聚体内的物理保护来增强 SOM 的固存[5]。近期研究强调了土壤地球化学, 特别是金属氧化物对 SOM 稳定具有深远影响[6]。SOM 是陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 其在养分循环和生物多样性维护等方面起着至关重要的作用[7]。

东北黑土地以肥力高、适宜农业生产而闻名, 常被称为“耕地大熊猫”, 是世界三大黑土区之一。自 20 世纪 50 年代开垦以来, 东北黑土区已成为中国重要的粮食产区, 占全国粮食总产量的 1/5。然而, 相关研究表明, 东北黑土的有机碳和营养元素含量呈下降趋势[8-9]。黑土有机碳含量高, 结构疏松, 易发生侵蚀。因此, 东北平原 SOM 动态监测与驱动因素分析有助于提高对全球尺度碳循环的认识。

本研究在三江平原东北部红卫农场—大兴农场区域采集检测土壤样品 105 组, 采用相关分析和统计分析等方法, 识别 SOM 在表层土壤中的含量特征、垂向分布特征及空间分布格局, 研判土壤理化性质、土地利用类型、土壤类型、成土母质对 SOM 含量分布的驱动作用, 以期为研究区特色农业的土地资源开发利用和保护提供支撑。

收稿日期: 2025-09-11; **修回日期**: 2025-12-10
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20230456)
第一作者: 李敬杰(1985-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为水土环境与生态修复。Email: 576095370@qq.com
通讯作者: 王明国(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为环境地球化学。Email: wangmingguo@mail.cgs.gov.cn

1　研究区概况

研究区位于黑龙江省佳木斯市完达山北麓，地处三江平原东北部的核心地带，包括七星农场、大兴农场、创业农场、红卫农场、挠力河湿地等。研究区地貌属于冲积湖积低平原，地势平坦，起伏不大。区内河流主要有别拉洪河、七星河、挠力河等。区内地下水资源丰富，沼泽湿地较发育。研究区气候属寒温带大陆性季风气候，冬季长而寒冷，夏季短而温热，年平均气温为 2.4 ℃，年降水量约为 530 mm，年平均无霜期为 135 d。区内出露地层以全新统为主，覆盖厚度 2~10 m，以第四系湖相沉积为主，约占区内地层总面积的 90%，主要为淤泥质黏土及亚黏土，构成区内主要成土母质。区内作物以水稻为主，其次是大豆和玉米。沼泽土和白浆土约占研究区土壤类型总面积的 80%，草甸土和泥炭土呈零星分布。图 1 展示了研究区土壤类型及土壤采样点的分布情况。

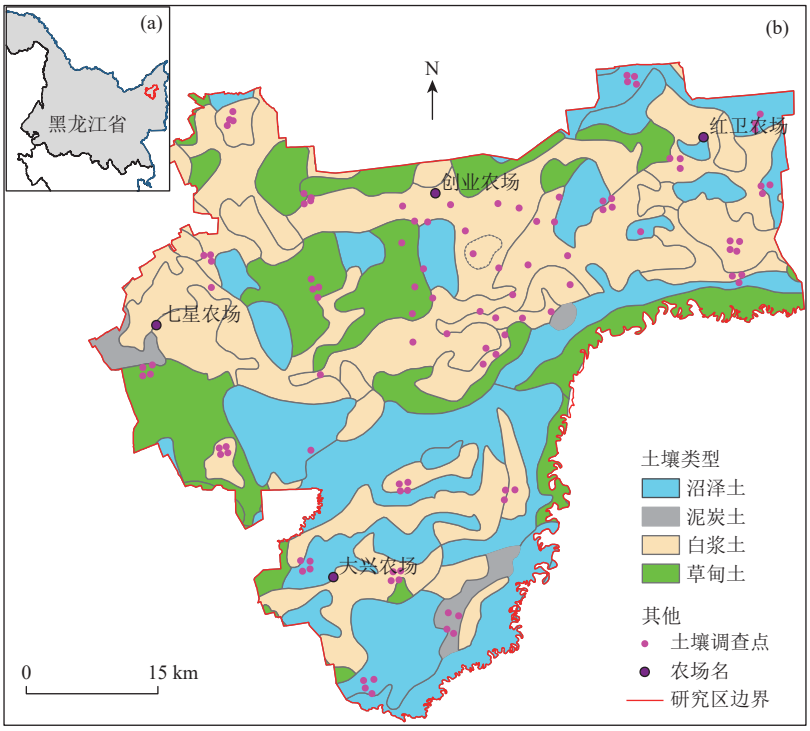


图 1　研究区位置示意(a)及土壤类型、土壤采样点分布(b)

Fig. 1　Location indication(a) and distribution diagram of soil types and sampling sites(b) in the study area

2　材料与方法

2.1　样品采集制备

2024 年 7~9 月，在研究区采集表层土壤样品(深度 0~20 cm)共 105 件，基本覆盖了区内主要土地利用方式及土壤类型。样本在室温下风干后，用木锤将土壤样品破碎，过 20 目筛(<0.84 mm)，再用球磨机研磨至 200 目(<0.074 mm)进行分析。

在湿地、林地、旱地和水田 4 种土地利用类型的典型地段，利用铁锹和洛阳铲开挖长方形土坑，深度至 1.5 m，用剖面刀将观察面刮平，去除浮土，露出自然土层结构，采集了 0~ 20 cm、20~40 cm、40~80 cm、80~120 cm、120~150 cm 深度段的土壤剖面样品。

2.2　样品分析方法

土壤样品分析测试由河北省地质实验测试中心承担，测试项目包括 SOM、pH、TN、TP、总钾(TK)、腐殖质(HS)、Fe_2O_3、K_2O、含水量、黏粒含量、水稳性团聚体和容重等元素及指标。

按照《土壤检测 第 6 部分：土壤有机质的测定》(NY/T 1121.6—2006)标准，采用酸式滴定管测试土壤 SOM；按照《凯氏定氮法》(HBS005.13—2018)标准，采用 K1100 凯式自动定氮仪测试 TN；按照《区域地球化学样品分析方法 第 34 部分：pH 值测定 离子选择电极法》(DZ/T 0279.34—2016)标准，采用 PH-SJ-3F 型酸度计测定 pH 值；按照《森林土壤腐殖质组成的测定》(LY/T 1238—1999)标准，采用酸式滴定管测试 HS；按照《土壤和沉积物 无机元素的测定 波长色散 X 射线荧光光谱法》(HJ780—2015)标准，采

用 ZSXPrimus Ⅱ X 荧光光谱仪测试 TP、TK、Fe_2O_3 和 K_2O; 按照《土壤检测 第 3 部分: 土壤机械组成的测定》(NY/T 1121.3—2006), 采用 HZT-A300 电子天平测定含水量, 采用 TM-85 土壤密度计测定黏粒含量; 按照《土壤检测 第 19 部分: 土壤水稳性大团聚体组成的测定》(NY/T 1121.19—2008), 采用 HZT-A300 电子天平测定土壤水稳性团聚体; 按照《土壤检测 第 4 部分:土壤容重的测定》(NY/T 1121.4—2006)标准, 采用 HZT-A300 电子天平测定土壤容重。

参照《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》(DD2005-03)和河北省地矿中心实验室《质量监控细则》的要求, 质量控制方案主要包括准确度和精密度监控、重复性检测及异常点抽查分析, 并统计内检合格率。本次分析结果的相对标准偏差 *RSD*≤10%, 重复样检测合格率为 97%~100%, 密码抽取异常样品单独分析, 合格率为 96%~100%, 说明分析数据质量可靠。

3　结果与讨论

3.1　表层 SOM 含量特征

研究区 SOM 含量范围为 1.72%~13.80%, 平均值为 4.78%, 背景值(剔除 3 倍标准差后的算术平均值)为 4.63%(表 1), 高于三江平原西部表层土壤(2.10%)背景值。研究区 SOM 在表层土壤(0~20 cm)的富集系数为 10.29, 达到强烈富集标准; TN 的表层富集系数为 5.00, 同样显示较强的富集特征。通过表 1 可以发现, SOM、TN 和 HS 的变异系数均大于 0.35, 反映这些化学指标在研究区土壤中含量差异性较大; TK 和 pH 的变异系数较小, 反映其在土壤中分布较均匀。

表 1　研究区表层土壤理化性质特征统计

Table 1　Statistical characteristics of physical and chemical properties of surfacesoil in the study area

指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	研究区		富集系数
						背景值	基准值	
SOM	1.72	13.80	4.78	1.81	0.38	4.63	0.45	10.29
TN	0.09	0.71	0.25	0.10	0.40	2.4	0.48	5.00
TP	0.04	0.13	0.08	0.02	0.26	0.8	0.59	1.36
TK	1.78	2.79	2.24	0.20	0.09	22.3	-	-
pH	4.82	7.96	6.00	0.65	0.11	5.98	6.92	0.86
HS	3.68	27.30	11.53	4.17	0.36	11.10	-	-

注: 样品数n=105; SOM含量单位为%, HS、TK、TP和TN含量单位为10^{-3}, pH无量纲; 富集系数=表层土背景值/深层土基准值,基准值来源于中国地质调查局沈阳地质调查中心2016~2018年开展的东北黑土地1∶25万土地质量地球化学调查项目数据; "-"表示无该项数据值。

研究区表层 SOM 含量分布如图 2 所示, 表层 SOM 基本符合正态分布, 其中 49% 的样品 SOM 含量在 4%~6%, 36% 的样品 SOM 含量在 2%~4%。研究区 SOM 的空间分布具有明显的区域格局, 西北地区含量较低, 东北和南部地区含量较高(图 3)。

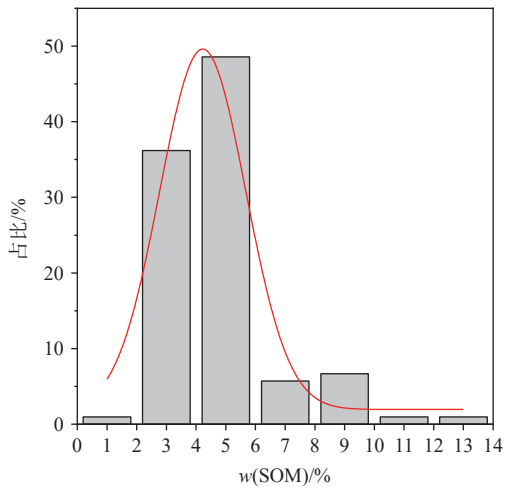


图 2　研究区表层 SOM 含量分布情况

Fig. 2　Distribution of surface SOM content in the study area

3.2　SOM 垂向分布特征

湿地、林地、旱地和水田 4 种土地利用类型的典型土壤剖面 0~ 20 cm、20~40 cm、40~80 cm、80~120、120~150 cm 深度 SOM 及 TN 含量垂向分布特征见图 4。结果表明,不同土地利用类型中 SOM 和 TN 含量均呈现随深度增加而降低的垂直分布模式, 其中 0~20 cm 表层土壤含量显著高于深层, 存在明显的表层富集效应, 与前人研究结论一致[10]。动植物残体作为土壤 SOM 和 TN 的主要来源, 其在表层土壤中通过根系密集分布和持续分泌作用, 形成了比深层土壤更显著的 SOM 和 TN 积累[11]。然而, 不同土地利用方式会显著影响 SOM 和 TN 的垂直分布格局, 具体表现为湿地和林地不同深度土壤 SOM 及 TN 含量均高于旱地和水田, 这是由于湿地因其独特的水文条件、丰富的生物多样性和相对稳定的生态环境使其 SOM 及 TN 含量高[12], 林地中的

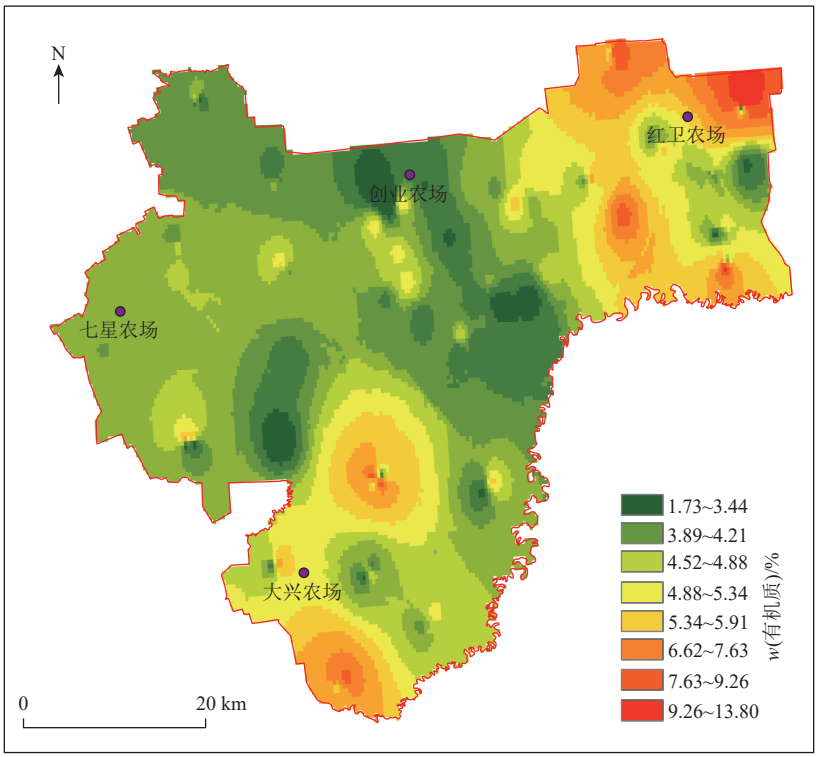


图 3　研究区表层 SOM 空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of surface SOM in the study area

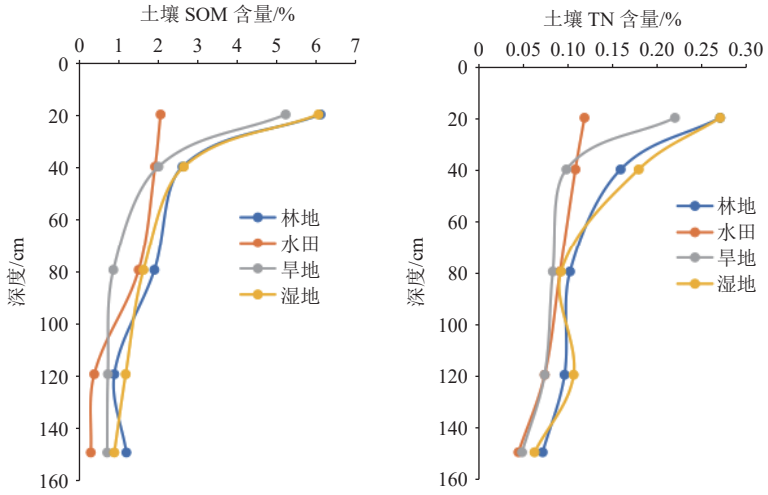


图 4　不同深度土壤 SOM 和 TN 含量分布

Fig. 4　Distribution of SOM and TN content in soils at different depths

表层土壤可通过植被枯落物分解获得丰富的 SOM 和 TN 来源。而旱地和水田受人类活动扰动大，长期耕作会导致土壤 SOM 矿化损失，碳、氮等养分元素流失[13]。

3.3　表层 SOM 含量影响因素

3.3.1　理化性质的影响

土壤理化性质对 SOM 的迁移转化具有重要影响。土壤容重作为一项重要的物理指标，综合反映了土壤固相颗粒的排列状况及其孔隙结构特征，SOM 的含量决定着土壤物理结构性，从而造成了不同土壤类型间土壤容重的显著差异[14]。大量研究表明，土壤容重与 SOM 具有显著的负相关关系[15-18]，本研究中土壤容重与 SOM 同样呈现明显的负相关关系，相关系数为 R=−0.84(P<0.01)（图 5a）。这说明当土壤容重降低时，土壤孔隙度相应增加，这种物理结构的改善不仅增强了气体交换和水分渗透能力，还为好氧微生物创造了更适宜的生态环境，从而有利于 SOM 和养分的累积[19-20]。

土壤含水量与 SOM 的矿化过程相关，有学者发现，土壤含水量通过影响土壤团聚体和微生物活性

进而影响 SOM 的积累与转化过程[21]。研究区土壤含水量与 SOM 的相关性分析结果表明, SOM 随着土壤含水量的增加而增加, 二者呈现明显的正相关关系, 相关系数为 R=0.82(P<0.01)(图 5b)。有研究指出, 土壤水分不足有利于 SOM 的矿化分解, 而高含水量有益于有机残体降解成小分子有机物质, 进而提高 SOM 含量[22]。另一方面可能是由于高含水量的土壤含氧量降低, 导致参与 SOM 矿化过程的微生物活性降低, 从而减缓了 SOM 的矿化速度[23]。

土壤黏粒和 SOM 之间存在相互作用。一方面, 黏粒具有较强的化学缔合力和较大的比表面积, 对 SOM 具有物理保护机制, 从而降低 SOM 的矿化损失[24-26]。另一方面, SOM 高的土壤中地表枯枝落叶层较厚, 能够防止土壤侵蚀, 从而降低土壤黏粒随风力、水力流失[27]。本研究中土壤黏粒与 SOM 呈显著正相关, 相关系数为 0.94(P<0.01)(图 5c), 这表明黏粒含量越丰富的土壤对 SOM 的吸附能力也就越强, 有利于 SOM 的积累[28]。

SOM 作为土壤质量和功能的核心评价指标, 与团聚体关系密切, 团聚体对 SOM 的包裹是土壤固定碳的重要途径。研究区水稳性团聚体与 SOM 呈显著正相关, 相关系数为 0.82(P<0.01)(图 5d)。相关研究已表明高含量的 SOM 可为土壤微生物活动提供充足的碳源, 从而促进团聚体的形成, 且 SOM 也可作为胶结物质促进团聚体的形成[29-30]; 同时, 土壤团聚体是 SOM 保持的场所, 可以保护 SOM, 二者相互作用, 不可分割[31]。

研究区土壤中 SOM 与 pH 呈负相关关系, 相关系数为−0.69(P<0.01)(图 5e), 这与大多数学者在不同尺度上的研究结果相一致[32-33]。SOM 的分解会释放有机酸, 导致土壤 pH 值降低。此外, 较低的 pH 值会导致微生物生长速度减慢, 并限制酸性土壤中 SOM 的分解[34]。因此, 酸性土壤对微生物生理的影响可能解释了低 pH 土壤中观察到的较高 SOM 含量。

图 5f 显示 SOM 含量随着 TN 含量的增加而增大, 二者相关系数为 0.97(P<0.01), 呈极显著正相关。微生物对有机质的分解代谢高度依赖于氮素的可用性, 矿质氮的缺乏会直接限制这一生物化学过程[35]。这种依赖关系源于约 90% 以上的土壤氮以有机氮形式赋存于有机质中, 导致 TN 含量与 SOM 含量形成协同变化的特征[36]。

土壤地球化学氧化物指标对 SOM 稳定性起着至关重要的作用。图 5g 显示研究区 Fe_2O_3 与 SOM 呈显著正相关, 相关系数为 0.82(P<0.01)。已有研究表明, 土壤中 Fe_2O_3 与 SOM 之间存在密切联系, 土壤中的铁矿物具有较大的比表面积, 可以与有机物形成强烈的化学键, 从而形成有机金属络合物[37]。同时, 铁铝氧化物是土壤黏粒矿物的重要组成部分, 有机铁结合有助于黏土大小的微团聚体的发育, 从而增强 SOM 的物理稳定性, 有利于 SOM 的积累[38-40]。除 Fe_2O_3 外, K_2O 也是重要的地球化学指标。图 5h 显示研究区 K_2O 与 SOM 呈现明显的负相关关系, 相关系数 R=−0.69(P<0.01)。K_2O 主要存在于长石矿物中, 其含量可以被视为土壤粒度组成的指标, K_2O 值越高, 表明粗粒矿物的比例越大, 粗粒矿物对 SOM 的负面影响已得到广泛认可[41]。因此, K_2O 与 SOM 之间存在相对较强的负相关关系。

3.3.2　土壤类型的影响

土壤类型是土壤发育程度、土壤成土过程及耕作方式等条件的综合体现[42]。研究区沼泽土表现出较高的 SOM 富集能力, 其 SOM 平均含量达 6.77%, 较区域均值(4.78%)高出 42%, 且 74% 的样品超过区域深层土壤基准值。相比之下, 泥炭土、草甸土和白浆土的 SOM 平均含量水平依次递减(图 6a)。值得注意的是, 与 SOM 密切相关的 TN 和腐殖质含量也同样是在沼泽土中最高(图 6b、c)。

区内白浆土 SOM 含量平均值最低, 为 4.33%。分析原因可能是白浆土土壤质地黏重, 耕性较差, 所以其本身 SOM 含量较低[43]。其次, 白浆土密度较大, 总孔隙度较小, 干缩湿胀, 导致大部分 SOM 被包裹在土壤黏粒内部, 且降解外源肥料转化为 SOM 的过程较为困难[44]。相比之下, 沼泽土显示出较高的 SOM 含量平均值(6.77%), 推测原因可能是沼泽土的成土过程经历了潜育作用, 长期的缺氧条件能够有效促进 SOM 的积累[45-46]。由此可见, 在土壤类型的影响下, 沼泽土是该区 SOM 富集的有利因素。

3.3.3　成土母质的影响

在特定的地质构造单元内, 土壤元素组成和理化性质显著受控于母质特征, 其主要通过调控土壤颗粒级配来间接影响 SOM 的积累与分布[47-49]。

研究区第四系地层约占区内总面积的 90%, 主要包括冲积层、高漫滩冲积层、湖积层+冲积层, 是研究区主要的土壤母质。图 7 表示不同地质单元中土壤 SOM 及黏粒的含量差异, 结果表明 SOM 平均含量在不同土壤母质中表现为高漫滩冲积层>冲积层>湖积层+冲积层(图 7a)。第四系高漫滩冲积层 SOM 平均含量最高, 为 5.73%, 高于研究区 SOM 平均含量(4.78%)。同时, 与 SOM 含量分布密切相关的黏粒平均含量也表现为第四系高漫滩冲积层中最

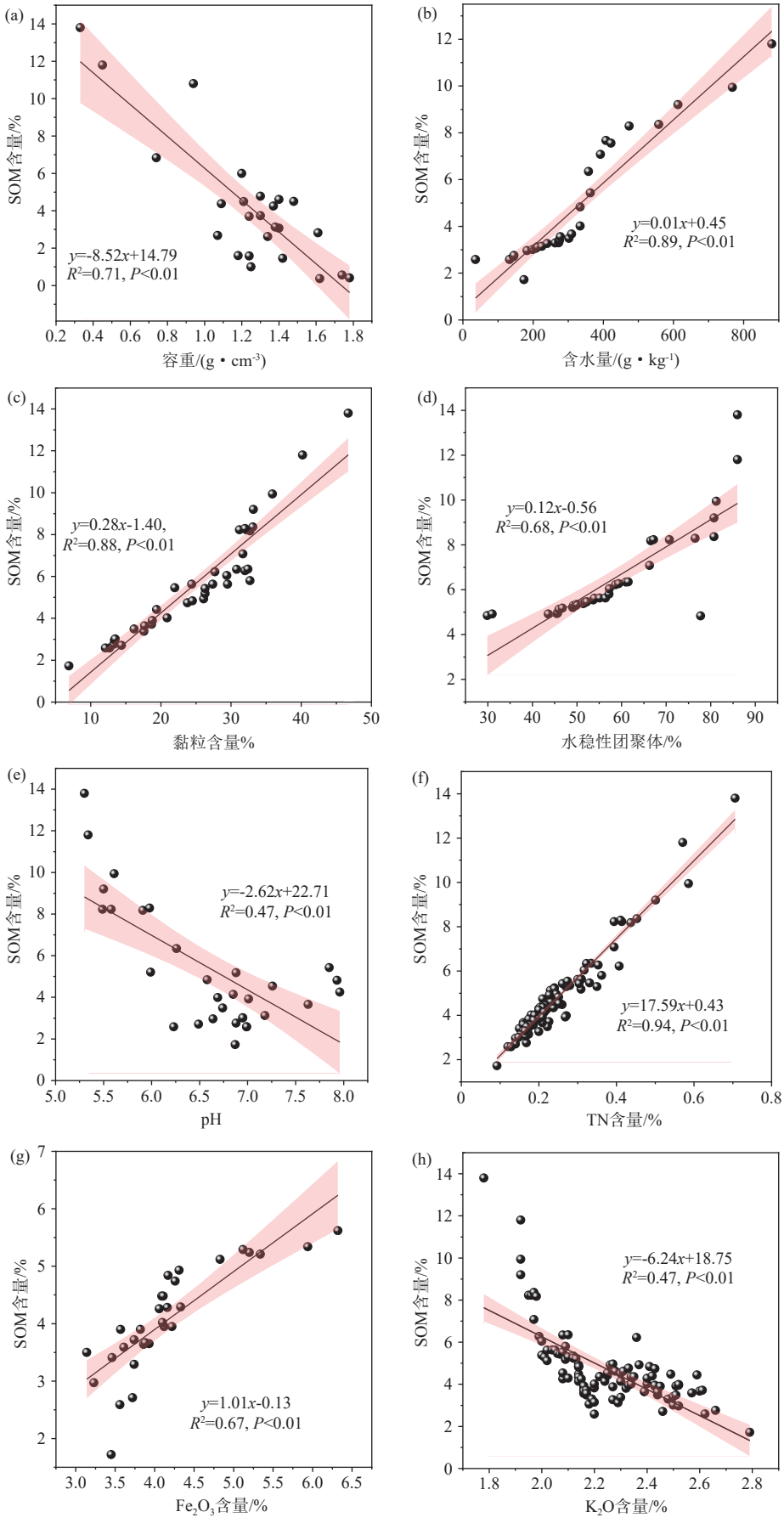


图 5　SOM 与理化指标的相关性

Fig. 5　The correlation between SOM and physicochemical properties

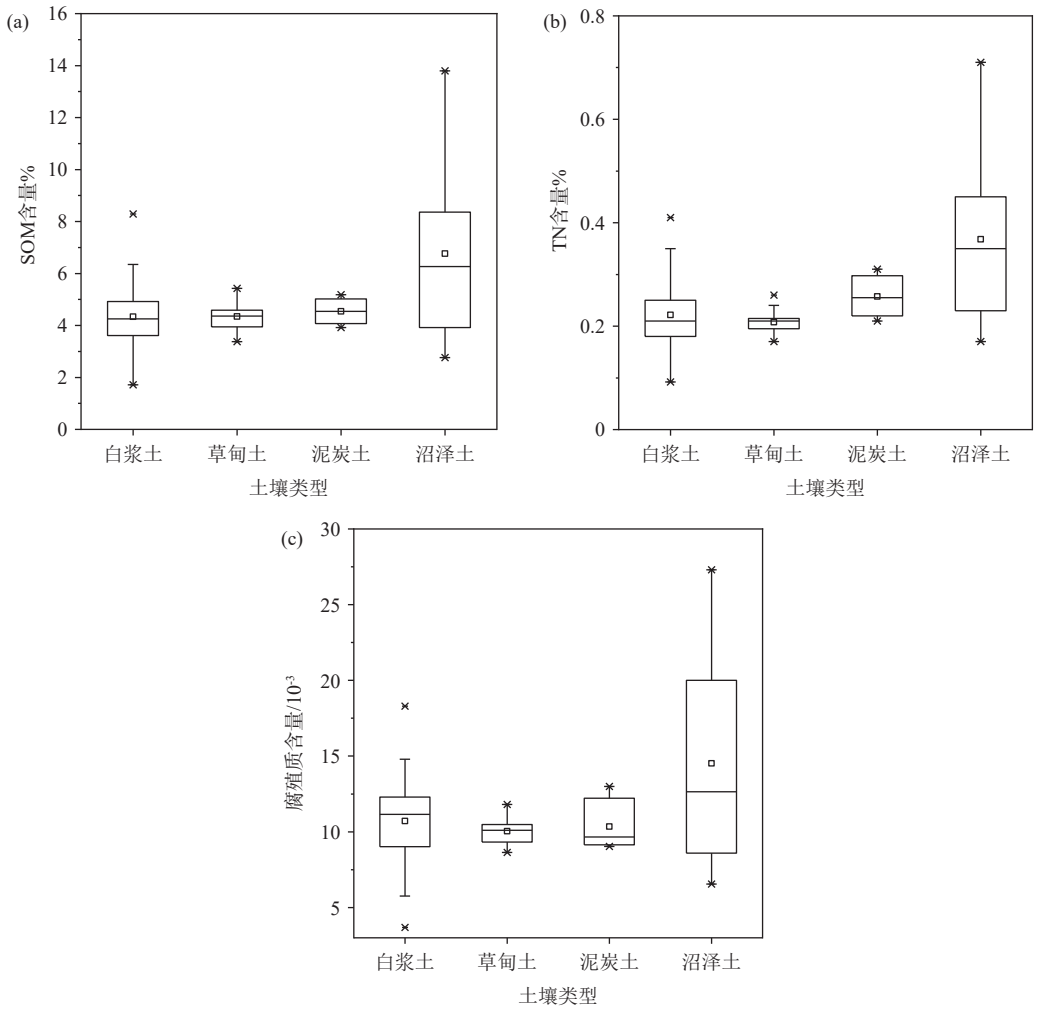


图 6　不同土壤类型 SOM 及主要理化指标含量差异

Fig. 6　Differences of SOM content and main physicochemical indexes in different soil types

高(图 7b)。这是由于第四系高漫滩冲积层属湖相沉积, 其质地为淤泥质黏土及亚黏土, 质地细腻, 该母质发育的土壤黏粒含量高, 可吸附土壤中 SOM 颗粒, 形成保护机制, 有利于 SOM 的积累[50]。

3.3.4　土地利用方式的影响

三江平原土壤肥沃, 但经过多年开垦, 土壤质量退化不容乐观。因此, 了解湿地转化为耕地过程中 SOM 等土壤养分的变化具有重要意义。图 8 表示

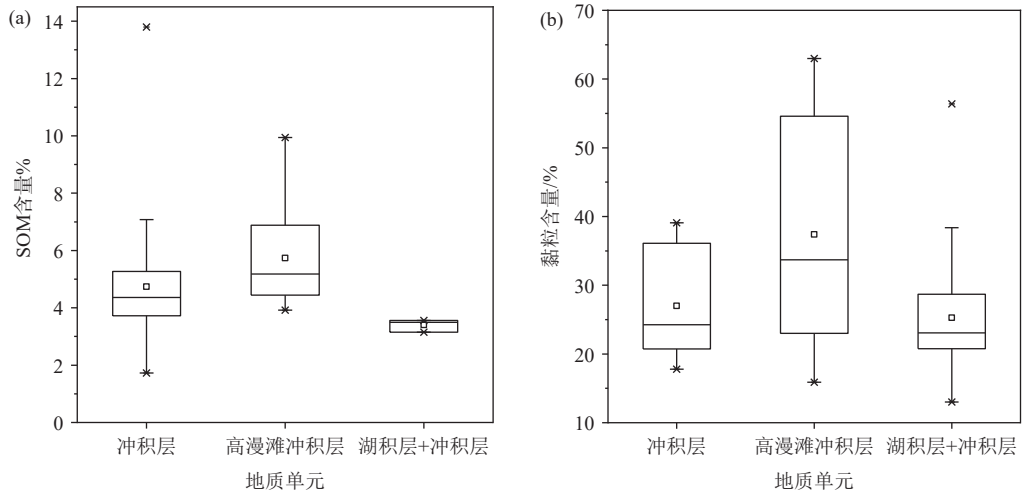


图 7　不同地质单元 SOM 含量差异

Fig. 7　Differences of SOM content in different geological units

研究区不同土地利用类型中表层土壤养分的箱线图。结果表明，湿地转耕地后土壤 pH 值明显增加，pH 平均值表现为水田(6.52)>旱地(5.94)>湿地 (5.55)(图 8a)。这是由于相较于湿地的厌氧环境，耕地系统因排水和耕作维持着较高的氧化状态，这种氧化还原差异导致两类系统在有机质矿化速率、氮素转化路径等方面表现不同，最终反映在土壤 pH 值的差异上[51]。

SOM 平均含量大小表现为湿地(8.87%)>旱地(5.90%)>水田(4.21%)(图 8b)。湿地开垦为农田后 SOM 含量降低显著，这是由于长期耕作通过两个关键途径导致土壤退化：一方面加速 SOM 的矿化分解，另一方面减少植物残体归还量，这是土壤养分最重要的自然输入源[52]。此外，在作物收获后至新一季作物形成有效植被覆盖前的裸露期，风蚀作用会加剧富含 SOM 细颗粒的损失[53]。大量研究表明，水田的碳储量比旱地高[54-55]，但本研究呈现出相反的结论，即旱地 SOM 含量高于水田，且高出水田 40.14%。这可能是由于研究区水田长期处于水淹状态，大量灌溉造成土壤氮的流失和浸出[56]，驱使微生物矿化土壤本底 SOM 的氮元素以满足生长需求，从而导致土壤中 SOM 被消耗，对土壤 SOM 积累产生了负面作用[57]。

土壤 TN 平均含量表现为湿地(0.47%)>旱地(0.32%)>水田(0.21%)(图 8c)。湿地转耕地后，TN 在不同土地利用类型中变化规律与 SOM 一致，这是由于土壤中碳、氮循环影响机制相似[58-59]。湿地开垦为耕地后，土壤由原来的厌氧环境转变为好氧环境。SOM 在好氧条件下加快分解，进而增强有机氮的矿化作用[60-62]。因此，开垦首先影响土壤 SOM 的含量，进而导致土壤表层的 TN 含量明显下降[63]。

湿地转耕地后，全磷(TP)含量降低。TP 平均含量表现为湿地(0.089%)>水田(0.081%)>旱地(0.061%)(图 8d)。在农业生产活动中，人为的翻耕、松土能促进土壤 SOM 迅速矿化，导致碳、氮、磷等养分元素无法在土壤中大量积累，而农民对作物的收割又

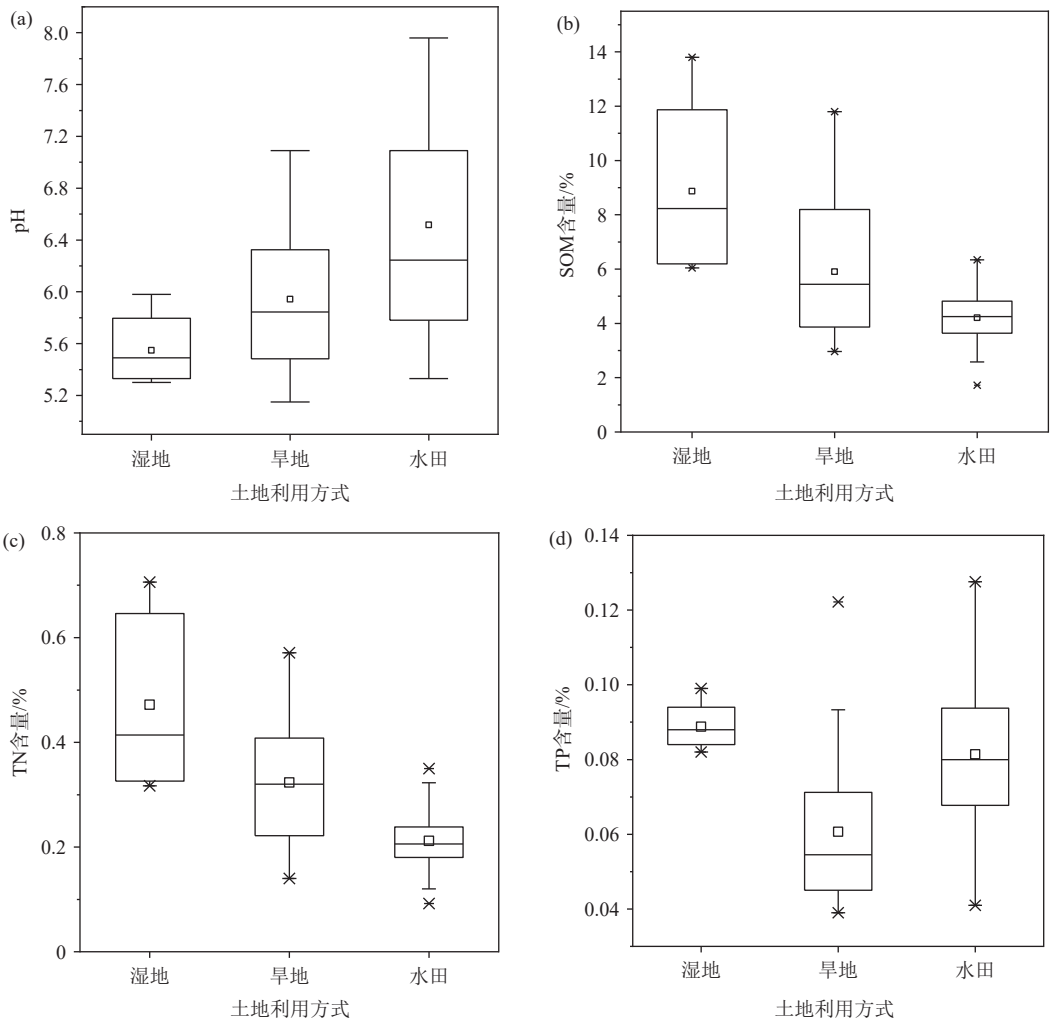


图 8　不同土地利用方式 SOM 及主要理化指标含量差异

Fig. 8　Differences of SOM content and main physicochemical indexes in different land use types

会导致磷等土壤养分的严重损失[64]。

综上可见, 湿地转化耕地过程中, 由于土壤物理结构、水分平衡等发生了变化, 土壤 pH 值明显增加, SOM、TN 和 TP 养分含量受到不同程度的损失, 表明湿地转化对土壤碳汇功能造成了一定程度的削弱。

4　结论

1)相对于区域深层土壤基准值, 研究区 SOM 在表层土壤中的富集系数为 10.29, 达强烈富集程度。SOM 空间分布具有明显的区域格局, 东北地区红卫农场含量明显高于西北地区七星农场和中部地区。SOM 和 TN 在垂向分布上随深度增加而降低, 呈现明显的表层集聚现象, 其含量峰值出现在 0~20 cm 耕作层。

2)表层 SOM 含量的差异除了受理化指标容重、含水量、黏粒含量、水稳性团聚体、pH、TN 影响外, 还较为显著地受到土壤地球化学指标 Fe_2O_3 和 K_2O 的影响。SOM 与容重、pH 和 K_2O 呈负相关, 相关系数分别为−0.84、−0.69 和−0.69; 与含水量、黏粒含量、水稳性团聚体、TN 和 Fe_2O_3 呈显著正相关, 相关系数分别为 0.82、0.94、0.82、0.97 和 0.82。

3)土壤类型的影响表现为沼泽土 SOM 平均含量最高, 沼泽土是该区 SOM 富集的有利因素。成土母质的影响表现为高漫滩冲积层中 SOM 平均含量最高, 因其母质发育的土壤黏粒含量高, 是 SOM 得到积累的有利因素之一。

4)定量评估了湿地转耕地后的土壤碳库差异, SOM 平均含量表现为湿地(8.87%)>旱地(5.90%)>水田(4.21%)。湿地转化耕地过程中由于土壤物理结构、水分平衡等发生了变化, 引起土壤 pH 值明显增加, SOM、TN 和 TP 养分含量受到不同程度的损失。这不仅表明了湿地转化对土壤碳汇功能的削弱, 同时凸显了天然湿地作为巨大且稳定的“碳汇”的核心生态功能, 为土地利用优化与生态保护提供了科学参考。

参考文献(References):

[1] 马麟英, 梁月兰, 韦国钧, 等. 东兰县林地土壤有机质含量与土壤容重的相关性分析 [J]. 湖北农业科学, 2014, 53(1): 59−62.
Ma L Y, Liang Y L, Wei G J, et al. Studies of relations between soil organic matter content and soil bulk density in different soil level in Donglan County[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(1): 59−62.

[2] Ma H H, Peng M, Yang Z, et al. Spatial distribution and driving factors of soil organic carbon in the Northeast China Plain: Insights from latest monitoring data[J]. Science of the Total Environment, 2024, 911: 168602.

[3] Liu K, Dai H M, Song Y H, et al. Climate and Soil geochemistry influence the soil organic carbon content in drylands of the Songliao Plain, Northeast China[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(5): 1394−1403.

[4] Certini G, Scalenghe R. The crucial interactions between climate and soil[J]. Science of the Total Environment, 2023, 856: 159169.

[5] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils—A review of drivers and indicators at various scales[J]. Geoderma, 2019, 333: 149−162.

[6] Chen C, Thompson A. The influence of native soil organic matter and minerals on ferrous iron oxidation[J]. Geochimicaet Cosmochimica Acta., 2021, 292: 254−270.

[7] Li Y, Chen Z M, Wagg C, et al. Soil organic carbon loss decreases biodiversity but stimulates multitrophic interactions that promote belowground metabolism[J]. Global Change Biology, 2024, 30(1): e17101.

[8] 杨亦恂, 姜晓旭, 李名升, 等. 三江平原土壤有机碳含量及其密度的空间变异特征分析 [J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1313−1319.
Yang Y X, Jiang X X, Li M S, et al. Spatial variability of soil organic carbon content and density in the Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(6): 1313−1319.

[9] Wang H, Yang S L, Wang Y D, et al. Rates and causes of black soil erosion in Northeast China[J]. Catena, 2022, 214: 106250.

[10] 杨舒媛, 张黎黎, 许燕琳, 等. 祊河流域不同土地利用方式对土壤有机质的影响 [J]. 安徽农学通报, 2021, 27(8): 118−121.
Yang S Y, Zhang L L, Xu Y L, et al. Effects of different land use types on soil organic matter in Benghe River Basin[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(8): 118−121.

[11] 胡亚伟, 孙若修, 申明爽, 等. 晋西黄土区土地利用方式对土壤 C∶N∶P 化学计量特征及土壤理化性质的影响 [J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 990−999.
Hu Y W, Sun R X, Shen M S, et al. Effects of land use types on the stoichiometric characteristics of soil C∶N∶P and the physical and chemical properties of soil in western Shanxi loess region[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 990−999.

[12] 黄郡. 七星河湿地不同恢复方式对土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2020.
Haung J. Effects on the ecological stoichiometric charateristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus under different restoration methods in Qixing River Wetland[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2020.

[13] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响 [J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 89-96.
Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N , and P after sixteen years of cropping[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(1): 89-96.

[14] 李冬初, 黄晶, 马常宝, 等. 中国农耕区土壤有机质含量及其与酸碱度和容重关系 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 252−258.
Li D C, Huang J, Ma C B, et al. Soil organic matter content and its relationship with pH and bulk density in agricultural areas of

China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 252−258.

[15] Benites V M, Machado P L O A, Fidalgo E C, et al. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil[J]. Geoderma, 2007, 139: 90−97.

[16] Shi S W, Han P F. Estimating the soil carbon sequestration potential of China's Grain for Green Project[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2014, 28(11): 1279−1294.

[17] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳贮量估算的意义 [J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3903−3910.
Chai H, He N P. Evaluation of soil bulk density in Chinese terrestrial ecosystems for determination of soil carbon storage on a regional scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13): 3903−3910.

[18] 卓志清, 李勇, 兴安, 等. 东北旱作区土壤碳氮磷生态化学计量特征及其影响因素 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 259−268.
Zhuo Z Q, Li Y, Xing A, et al. Characteristic of ecological stoichiometry of soil C, N and P and its influencing factors in dry farming region of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 259−268.

[19] 曹雯婕, 李玉强, 陈银萍, 等. 科尔沁沙地不同土地利用类型土壤化学计量特征 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3312−3320.
Cao W J, Li Y Q, Chen Y P, et al. Soil stoichiometry characteristics under different land use types in the Horqin Sandy Land, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3312−3320.

[20] 熊瑛楠, 冯天骄, 王平, 等. 晋西黄土区长期人工林恢复对土壤水分和养分性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 228−237, 246.
Xiong Y N, Feng T J, Wang P, et al. Effects of long-term artificial forest restoration on soil moisture and nutrient characteristics in the loess area of western Shanxi Province, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 228−237, 246.

[21] 邱思慧, 林少颖, 王维奇. 中国东部地区不同海拔梯度土壤有机碳库特征及其影响因素综述 [J]. 中国水土保持科学, 2022, 20(3): 143−150.
Qiu S H, Lin S Y, Wang W Q. Characteristics of soil organic carbon pool at different altitude gradients in eastern China and its influencing factors: A review[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(3): 143−150.

[22] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99−105.
Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1): 99−105.

[23] 叶钰, 徐泽, 阳冬秀, 等. 耕地土壤 pH 值和有机质含量空间分布特征及影响因素分析—以长沙县为例 [J]. 湖南农业科学, 2024(3): 37−40.
Ye Y, Xu Z, Yang D X, et al. Spatial distribution characteristics of pH value and organic matter content in farmland soil and Influencing factors in Changsha County[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2024(3): 37−40.

[24] Luo Y, Li Q, Shen J. Effects of agricultural land use change on organic carbon and its labile fractions in the soil profile in an urban agricultural area[J]. Land Degradation and Development, 2019, 30: 1875−1885.

[25] Tuo D, Xu M, Gao G. Relative contributions of wind and water erosion to total soil loss and its effect on soil properties in sloping croplands of the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 1032−1040.

[26] Egan G, Crawley M J, Fornara D A. Effects of long-term grassland management on the carbon and nitrogen pools of different soil aggregate fractions[J]. Science of the Total Environment, 2018(613/614): 810−819.

[27] Shi P, Schulin R. Erosion-induced losses of carbon, nitrogen, phosphorus and heavy metals from agricultural soils of contrasting organic matter management[J]. Science of the Total Environment, 2018, 618: 210−218.

[28] 杜佩颖, 张海涛, 郭龙, 等. 平原丘陵过渡区土壤有机质空间变异及其影响因素 [J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1286−1295.
Du P Y, Zhang H T, Guo L, et al. Variation of Soil Organic Matter in Transition Zones and Its Influencing Factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(5): 1286−1295.

[29] Qin P, Li S. Positive and negative effects of the nonnative plant, Spartina alterniflora and its ecological control[J]. Journal of Biosafety, 2012, 21(3): 167−176.

[30] 刘兴华, 章海波, 李远, 等. 黄河三角洲滩涂—湿地—旱地土壤团聚体有机质组分变化规律 [J]. 土壤学报, 2022, 56(2): 374−385.
Liu X H, Zhang H B, Li Y, et al. Variation of organic matter in soil aggregates with the succession of tidal flatland from barren land-saltmarsh-upland in the Yellow River Delta[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 56(2): 374−385.

[31] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展 [J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412−418.
Dou S, Li K, Guan S. A review on organic matter in soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(2): 412−418.

[32] Xu H F, Zhang C S. Investigating spatially varying relationships between total organic carbon contents and pH values in European agricultural soil using geographically weighted regression s[J]. Science of the Total Environment, 2021, 752: 141977.

[33] Yu W J, Weintraub S R, Hall S J. Climatic and geochemical controls on soil carbon at the continental scale: Interactions and thresholds[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2021, 35(3): 1−15.

[34] Malik A A, Puissant J, Buckeridge K M, et al. Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling processes[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 3591.

[35] 方建德, 林成芳. 土壤有机质形成转化过程及其影响因素综述 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2024, 19(1): 24−34.
Fang J D, Lin C F. A review of the formation and transformation process of soil organic matter and its influencing factors[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2024, 19(1): 24−34.

[36] 崔帅, 刘烁然, 王寅, 等. 吉林省旱地土壤有效硫含量及其与土壤有机质和全氮的关系 [J]. 中国农业科学, 2022, 55(12): 2372−2383.
Cui S, Liu S R, Wang Y, et al. Soil available sulfur content in Jilin Province and its correlation with soil organic matter and soil total nitrogen[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(12): 2372−2383.

[37] Chen C, Hall S J, Coward E, et al. Iron-mediated organic matter decomposition in humid soils can counteract protection[J]. Nature

Communications, 2020, 11(1): 2255.

[38] Asano M, Wagai R, Yamaguchi N, et al. In search of a binding agent: nano-scale evidence of preferential carbon associations with poorly-crystalline mineral phases in physically-stable, clay-sized aggregates[J]. Soil Systems, 2018, 2(2): 32.

[39] Fukumasu J, Poeplau C, Coucheney E, et al. Oxalate-extractable aluminum alongside carbon inputs may be a major determinant for organic carbon content in agricultural topsoils in humid continental climate[J]. Geoderma, 2021, 402: 115345.

[40] Wang P, Wang J D, Zhang H, et al. The role of iron oxides in the preservation of soil organic matter under long-term fertilization[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(2): 588−598.

[41] Aldis M, Aherne J. Exploratory analysis of geochemical data and inference of soil minerals at sites across Canada[J]. Mathematical Geosciences, 2021, 53(6): 1201−1221.

[42] 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 influence 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.

[43] 李敬王, 陈林, 张佳宝, 等. 砂姜黑土有机碳与微生物群落特性之间的关系 [J]. 土壤, 2019, 51(3): 488.
Li J W, Chen L, Zhang J B, et al. Relationship between soil organic carbon and microbial community in lime concrete black soil[J]. Soils, 2019, 51(3): 488.

[44] 罗澜, 席源, 华仲臣, 等. 河南省典型土壤类型及土地利用方式对土壤活性有机质及碳库管理指数的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(5): 29−37.
Luo L, Xi Y, Hua Z C, et al. Effects of typical soil types and land use patterns on soil labile organic matter and carbon pool management index in Henan province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(5): 29−37.

[45] Grybos M, Davranche M, Gruau G, et al. Increasing pH drives organic matter solubilization from wetland soils under reducing conditions[J]. Geoderma, 2009, 154(1): 13−19.

[46] 李敬杰, 杨涛, 王明国, 等. 三江平原东部土壤和农作物硒含量特征及影响因素 [J]. 环境科学, 2024, 45(10): 6195-6206.
Li J J, Yang T, Wang M G, et al. Characteristics and influencing factors of soil and crops selenium content in eastern Sanjiang Plain[J]. Environmental Science, 2024, 45(10): 6195-6206.

[47] 刘驰, 刘希瑶, 刘澎. 松辽平原典型黑土区有机质的变化及影响因素分析 [J]. 地质与资源, 2020, 29(6): 550−555.
Liu C, Liu X Y, Liu P. Analysis on the changes of organic matters and their influencing factors of typical black soil areas in Songliao Plain[J]. Geology and Resources, 2020, 29(6): 550−555.

[48] 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, 2020, 29(12): 2696−2708.
Zhang X, Li M J, Liu H B, et al. Distribution characteristics and influence factors of organic matter content in cultivated soil in different horizons in hilly areas[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(12): 2696−2708.

[49] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 四川省仁寿县土壤有机碳空间分布特征及其主控因素 [J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 34−42.
Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, et al. Spatial variability of soil organic carbon and related controlling factors in Renshou County, Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(1): 34−42.

[50] 赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析 [J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 1−11.
Zhao M S, Zhang G L, Wang D C, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xu-Huai Alluvial Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 1−11.

[51] 赵凯丽, 徐明岗, 周晓阳, 等. 南方典型红壤区旱地与水田土壤酸度的剖面差异性 [J]. 土壤, 2022, 54(5): 1010−1015.
Zhao K L, Xu M G, Zhou X Y, et al. Changes in pH at different depths of red soils under paddy field and dry land[J]. Soil, 2022, 54(5): 1010−1015.

[52] 赵哈林, 周瑞莲, 苏永中, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程中土壤有机碳和全氮含量变化 [J]. 生态学报, 2008, 28(3): 976−982.
Zhao H L, Zhou R L, Su Y Z, et al. Changes of soil organic C and total N contents as affected by desertification in Horqin Sand Land, North China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 976−982.

[53] Li F R, Zhao L Y, Zhang H, et al. Wind erosion and airborne dust deposition in farmland during spring in the Horqin Sandy Land of eastern Inner Mongolia, China[J]. Soil&Tillage Research, 2004, 75: 121−130.

[54] Wei L, Ge T, Zhu Z K, et al. Comparing carbon and nitrogen stocks in paddy and upland soils: accumulation, stabilization mechanisms, and environmental drivers[J]. Geoderma, 2021, 398: 115121.

[55] Guo L P, Lin E D. Carbon sink in cropland soils and the emission of greenhouse gases from paddy soils: a review of work in China[J]. Chemosphere-Global Change Sci., 2001, 3(4): 413−418.

[56] Zhang X, Xiao G M, Bol R, et al. Influences of irrigation and fertilization on soil N cycle and losses from wheat-maize cropping system in northern China[J]. Environmental Pollution, 2021, 278: 116852.

[57] Wei L, Ge T D, Zhu Z K, et al. Paddy soils have a much higher microbial biomass content than upland soils: A review of the origin, mechanisms, and drivers[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2022, 326: 107798.

[58] 陶冶, 张元明, 周晓兵. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2239−2248.
Tao Y, Zhang Y M , Zhou X B. Ecological stoichiometry of surface soil nutrient and its influencing factors in the wild fruit forest in Yili region, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(7): 2239−2248.

[59] 赵雯, 黄来明. 高寒山区不同土地利用类型土壤养分化学计量特征及影响因素 [J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4415−4427.
Zhao W, Huang L M. Stoichiometric characteristics and influencing factors of soil nutrients under different land use types in an alpine mountain region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4415−4427.

[60] 张金波, 宋长春. 三江平原不同土地利用方式对土壤理化性质的

影响 [J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 371−373.
Zhang J B, Song C C. Effects of different land-use on soil physical-chemical properties in the Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(3): 371−373.

[61] 袁兆华, 吕宪国, 周嘉. 三江平原旱田耕作对湿地土壤理化性质的累积影响初探 [J]. 湿地科学, 2006, 4(2): 133−137.
Yuan Z H, Lyu X G, Zhou J. Study on cumulative effects of glebe cultivation on physical and chemical properties of soil in the Sanjiang Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 4(2): 133−137.

[62] 宋长春, 王毅勇, 阎百兴, 等. 沼泽湿地垦殖后土壤水热条件变化与碳、氮动态 [J]. 环境科学, 2004, 25(3): 150−154.
Song C C, Wang Y Y, Yan B X, et al. The changes of the soil hydrothermal condition and the dynamics of C, N after the Mire Tillage[J]. Environmental Science, 2004, 25(3): 150−154.

[63] 孙志高, 刘景双, 李新华. 三江平原不同土地利用方式下土壤氮库的变化特征 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(3): 270−274.
Sun Z G, Liu J S, Li X H. Changes of nitrogen storage in soil under different land uses in the Sanjiang Plain[J]. System Sciemces and Comprehensive Studies In Agriculture, 2008, 24(3): 270−274.

[64] 李生, 张守攻, 姚小华, 等. 黔中石漠化地区不同土地利用方式对土壤环境的影响 [J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(3): 384−389.
Li S, Zhang S G, Yao X H, et al. Effect of different land use modes on soil environment in karst rocky desertification zone, middle Guizhou Province of China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(3): 384−389.

Soil organic matter content and its influencing factors in the northeastern Sanjiang Plain

LI Jing-Jie, WANG Ming-Guo, YANG Tao, LIAN Sheng, FENG Jian-Yue, XIAN Jie-Liang
(*Hydrogeology and Environmental Geology Survey Center*, *China Geological Survey*, *Tianjin* 300309, *China*)

Abstract: Soil organic matter (SOM) plays a crucial role in the global carbon cycle. Through statistical analysis and correlation analysis, this paper investigated the SOM content and its influencing factors for 105 groups of surface soil samples from the Hongwei-Daxing farms in the northeastern Sanjiang Plain. The results show that the SOM exhibited a content in the study area ranging from 1.72% to 13.80% (average: 4.78%) and significant enrichment in surface soil, with an enrichment coefficient of up to 10.29. The SOM content generally followed a normal pattern in its frequency distribution and an obvious regional pattern in its spatial distribution, with significantly higher SOM observed in the northeast than in the northwest of the study area. In typical soil profiles, both SOM and total nitrogen (TN) content showed a declining trend with the increase of soil depth, suggesting SOM aggregation in the surface soil layer. Meanwhile, the SOM content was positively correlated with some soil physiochemical indicators, such as moisture content, clay particle content, water-stable aggregates, iron oxide (Fe_2O_3), and TN, which represent favorable factors for SOM accumulation in the study area. In contrast, the SOM content exhibited negative correlations with the bulk density, pH value, and potassium oxide (K_2O). Moreover, the variations in soil carbon pools were quantitatively evaluated after the conversion of wetlands to croplands. The results indicate that the average SOM content followed the order of wetlands (8.87%) > dry lands (5.90%) > paddy fields (4.21%). Furthermore, the conversion resulted in a significant increase in soil pH and losses of SOM, TN, and total phosphorus (TP) to varying degrees. Among various soil types, boggy soil exhibited the highest average SOM content of 6.77%, representing a favorable factor for SOM accumulation in the study area. Among various parent materials, the Quaternary high-magnitude floodplain sediments presented the maximum average SOM content in the generated soil. This is attributed to their predominant composition: lacustrine mucky clays and loams, whose high content of clay particles favors SOM accumulation. These findings provide a scientific basis for enhancing the management and sustainable utilization of land resources, wetland protection, and the carbon sequestration function of the area.

Key words: Sanjiang Plain; soil organic matter (SOM); physiochemical property; land use; soil type; parent materials

（本文编辑：蒋实）