

doi: 10.11720/wtyht.2022.0186

杨泽,张一鹤,戴慧敏,等.兴凯湖平原表层土壤有机碳空间变异的主控因素[J].物探与化探,2022,46(5):1076-1086. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0186

Yang Z, Zhang Y H, Dai H M, et al. Control factor of the spatial variations in the soil organic carbon content in the topsoil of the Xingkai Lake Plain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1076-1086. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0186

兴凯湖平原表层土壤有机碳空间变异的主控因素

杨泽^{1,2,3}, 张一鹤^{1,2,3}, 戴慧敏^{1,2,3}, 刘国栋^{1,2,3}, 刘凯^{1,2,3}, 许江^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 自然资源部 黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034; 3. 辽宁省黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034)

摘要: 准确获取兴凯湖平原土壤有机碳含量及空间变异主控因素, 对土壤有机碳调控、恢复及农业可持续发展具有重要意义。本研究基于野外实地采集的 4 151 个表层(0~20 cm)土样, 探讨兴凯湖土壤平原有机碳空间分布特征及其主控因素。运用地统计学、回归分析等方法对比了成土母质、土壤质地、土壤类型、土地利用方式和土地开垦年限这 5 种因素对兴凯湖平原土壤有机碳空间分布的影响。结果表明: 研究区表层土壤有机碳含量为 0.35%~14.49%, 平均值 2.80%, 变异系数为 0.44, 属中等强度的空间变异性。块金效应 $C_0/(C_0+C)$ 为 47.06%, 表明空间分布受结构性因素和随机性因素的共同影响, 土壤有机碳总体呈现“中、西部低, 东、北部高”的分布格局。上述 5 种因素对土壤有机碳的影响均为极显著($P<0.01$), 其中成土母质、土壤类型、土地利用方式及开垦年限分别能够独立解释 6.8%、3.8%、9.2% 和 3.3% 的土壤有机碳空间变异, 而土壤质地能独立解释 30.1% 的土壤有机碳空间变异, 远大于其余 4 种因素, 是研究区土壤有机碳空间分布的主控因素。

关键词: 土壤有机碳; 空间变异; 主控因素; 兴凯湖平原

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)05-1076-11

0 引言

土壤作为陆地最大的碳库^[1]和最大的有机碳库^[2], 在全球碳循环中起着重要的作用。土壤有机碳(SOC)含量及其动态变化直接影响着全球碳循环, 也影响着土壤质量和植物生长^[3-5]。由于受结构性与随机性因素的影响, 土壤有机碳在空间分布上存在一定的异质性, 即使在相邻位置, 土壤有机碳含量也会因为复杂的环境而产生较大差异^[6-9]。因此, 准确地获取区域尺度内土壤有机碳含量及空间变异的主控因素, 对土壤有机碳的调控和恢复、农业可持续发展以及全球环境保护都具有重要意义。

目前, 国内外许多学者^[6-13]针对不同尺度上的

土壤有机碳空间变异的主控因素开展了研究, 结果表明: 在众多的影响因素中, 定性因素如成土母质、植被类型或土地利用方式以及土壤类型等对土壤有机碳空间分布的影响显著^[14-17]。不同尺度上土壤有机碳空间分布的定性主控因素也存在明显的区域差异, 如: 河北省省域尺度上土地利用方式对土壤有机碳空间变异的解释能力大于土壤类型^[11]; 徐淮黄泛平原上土地利用方式对土壤有机碳空间分布的影响大于成土母质和土壤类型^[10]; 江苏省域尺度上成土母质的影响大于土地利用方式^[18]; 江西省域尺度上秸秆还田的影响大于成土母质和土地利用方式^[6]; 县级尺度上, 福建龙海市^[19]的土壤类型较土地利用方式对土壤有机碳的空间分布影响更大, 川中丘陵县域^[7]土地利用方式较土壤类型对土壤有机碳含量的空间分布影响更大。以上研究表明, 成

收稿日期: 2022-04-13; 修回日期: 2022-08-16

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”(DD20190520)

第一作者: 杨泽(1981-), 男, 高级工程师, 2006年毕业于中国地震局地质研究所, 主要从事生态地球化学调查与研究。Email: 61421078@qq.com

通讯作者: 许江(1988-), 男, 主要从事生态地球化学研究工作。Email: 465417944@qq.com

土母质、土壤类型以及土地利用方式等定性因素对土壤有机碳空间分布的影响随着研究区域和尺度的不同而发生变化,存在明显的区域特征和尺度效应^[7]。此外,以往研究多集中于结构性因素对土壤有机碳空间变异的研究,对随机性因素考虑较少。因此,充分地考虑研究区内土壤的结构性(地形地貌、成土母质、土壤类型等)与随机性(土地利用方式、土壤开垦年限等)因素对准确把握土壤有机碳空间变异的主控因素、掌握调控土壤有机碳的关键因子等方面具有非常重要的现实意义。

兴凯湖平原位于黑龙江省东部偏南,是我国东北黑土区重要的商品粮基地之一,但多年来一直未开展过系统的多目标地球化学调查,有关整个平原区土壤有机碳的研究也鲜有报道。本研究基于2019年中国地质调查局沈阳地质调查中心在兴凯湖平原开展的1:25万土地质量地球化学调查表层土壤数据,运用地统计分析、半变异函数分析和回归分析等方法,结合成土母质、土壤质地、土壤类型、土地利用方式及开垦年限等影响因素,对兴凯湖平原土壤有机碳空间变异的主控因素进行定量研究,以期对兴凯湖平原土壤有机碳调控、恢复及农业可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

兴凯湖平原位于黑龙江省东部偏南,东与俄罗斯接壤,西至张广才岭,北依完达山,南抵兴凯湖,总面积约16 000 km²,行政区跨越虎林市、密山市等。研究区属中纬度寒温带湿润、半湿润大陆性季风气候,冬季漫长,严寒而干燥,夏季短促,温暖且湿润,年平均温度2.9~3.1℃。区内雨量充沛,多年平均降水量为526~710 mm,每年6~9月降水占全年降水量总量的70%;蒸发量为降水量的1.5~2倍,每年5~9月蒸发量占全年总量的70%。

研究区地形总体由西向东倾斜,坡降1/6 000~1/10 000,平原区地势低平,微有起伏,仅在虎林市和虎头镇散布着被地堑切割残余的孤山。地貌上,西部为侵蚀低山、丘陵区,东部为冲积—湖积平原区。区内水系比较发育,主要河流由南往北依次为穆稜河、七虎林河及阿布沁河,均为乌苏里江左翼支流。

区内成土母质以第四纪冲积、湖积物及不同时期的砂岩风化物为主。土壤类型以白浆土为主,其次为暗棕壤、沼泽土及草甸土。主要土地利用为耕地,以水田为主,其次为林地和沼泽地。粮食作物以水稻为主,兼有大豆和玉米(图1)。

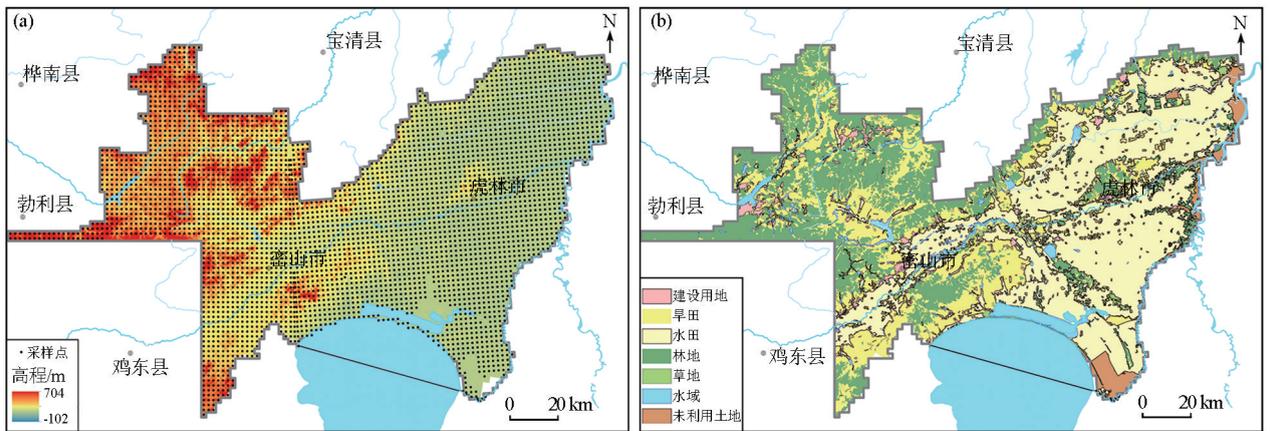


图1 研究区高程、采样点(a)及土地利用类型(b)

Fig. 1 Elevation, sampling sites (a) and land use (b) of the study area

2 数据来源及研究方法

2.1 样品采集与测试

依据《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T 0258—2014)^[20]和《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)^[21],中国地质调查局沈阳地质调查中心于2019年在兴凯湖平原开展1:25万土地质量地球化学调查工作,网格

化采集土壤表层和深层样品,表层土壤采样密度为1个点/km²,采样深度为0~20 cm(土柱),1个点/4 km²组合分析;深层土壤采样密度为1个点/4 km²,采样深度为150~200 cm(土柱),1个点/16 km²组合分析。样点均采用GPS进行定位,采集后的样品进行晾干、碎样、过20目筛,采取四分法,称取200 g后装纸袋送至实验室进行测试。共获得表层土壤组合样品4 151件,深层土壤组合样品1 000余件。本次数据源主要采用表层土壤样品数据。

土壤样品测试由辽宁省地质矿产研究院有限责任公司承担,土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾法。样品分析过程中采用国家一级标准土样监控分析测试的准确度,采用重复样监控分析测试的精密度。一级标准物质的所有分析指标合格率为100%,重复样合格率符合《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T 0258—2014)中的样品分析质量控制要求,测试指标报出率均达到100%,异常点重复性检验合格率95.8%。

2.2 其他数据来源

本文所用其他数据来源说明如下:

土地利用数据:来源于中国科学院地理科学与资源研究所,中国土地利用现状遥感监测数据库是在国家科技支撑计划、中国科学院知识创新工程重要方向项目等多项重大科技项目的支持下,经过多年的积累而建立的覆盖全国陆地区域的多时相土地利用现状数据库。采用的4期数据集包括20世纪70年代末期、1995年、2010年和2018年,数据生产制作是以各期Landsat TM/ETM遥感影像为主要数据源,通过人工目视解译生成,数据分辨率为1 km栅格数据。

土壤类数据:来源于中国科学院南京土壤研究所,原数据来自全国土壤普查办公室组织完成的《1:100万中华人民共和国土壤图》,由中国科学院南京土壤研究所完成数据库建设,属性字段包含了土纲、土类及亚类。

2.3 数据处理方法

经典统计分析、相关分析以及回归分析均在SPSS 25软件中完成;考虑到成土母质、土壤类型、土地利用方式和开垦年限为定性分类变量,研究中采用哑变量(虚拟变量)进行赋值,相关方法参见文献[6-7]。土壤有机碳数据进行对数变换后,在GS+9.0中进行半变异函数分析。由于原始数据不符合正态分布,故在ArcGIS 10.2中采用反距离权重法获得土壤有机碳空间分布图。

2.3.1 化学蚀变指数

化学蚀变指数(chemical index of alteration,

CIA)是判别由硅酸盐矿物组成的沉积物风化程度最常用的化学指标,该指标也经常被用作土壤风化程度的指标^[22]。其计算公式为

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + K_2O + Na_2O} \times 100, \quad (1)$$

式中氧化物均为分子摩尔数;CaO*为硅酸盐相,采用McLennan计算方法^[23]。CIA反映了长石风化或黏土矿物的程度,CIA值越高,指示气候温暖湿润,风化程度越高;反之,寒冷干燥,风化程度低。CIA值介于50~65为低化学风化程度,CIA值介于65~85为中化学风化程度,CIA值介于85~100为强化化学风化^[24-27]。

2.3.2 土地开垦年限

使用ArcGIS10.2值提取至点功能,将4期遥感解译土地利用状况提取至采样点,在Excel中根据采样点不同时期的土地利用情况计算采样点位置处的土地开垦年限,一直为草地、林地、湿地等自然状态的开垦年限为0,其他土地利用类型的开垦年限以实际情况计算为准,截止计算年为2019年。

3 结果与讨论

3.1 兴凯湖平原表层土壤有机碳统计特征

研究区表层土壤有机碳含量变化范围(表1)为0.35%~14.49%,平均值2.80%,变异系数为0.44,属于中等变异水平,表明研究区表层土壤有机碳空间分布存在一定的不均。从偏度来看,原始数据不符合正态分布,呈现右偏;从峰度来看,数据比较陡峭。对表层土壤有机碳含量数据进行对数变换后,数据近似服从正态分布(图2)。与以往研究结果对比(表2),研究区表层土壤有机碳高于东北黑土、东北平原以及中国大陆的平均值,低于黑龙江省的平均值(1986~1990年)。对照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中土壤养分指标等级划分标准的有机质标准,兴凯湖平原土壤有机质(折算后)含量达到丰富、较丰富水平。

表1 表层土壤有机碳含量统计

Table 1 Statistics of SOC content in topsoil

指标	样品数	最小值/%	最大值/%	均值/%	中位数/%	众数/%	标准偏差/%	方差/%	偏度	峰度	变异系数
SOC	4151	0.35	14.49	2.80	2.56	2.2	1.22	1.48	2.6	14.42	0.44
对数转换	4151	-0.46	1.16	0.41	0.41	0.34	0.17	0.03	-0.05	1.99	0.41

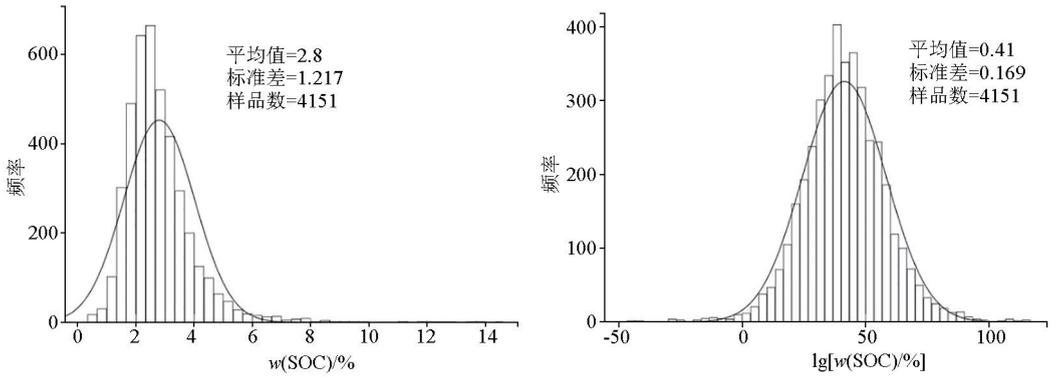


图 2 研究区土壤有机碳含量及其对数转换值的频率分布

Fig. 2 Histograms of SOC contents and its log-transformed values in the study area

表 2 研究区与其他地区表层土壤有机碳含量对比

Table 2 Comparison of SOC content in topsoil between Xingkai Lake Plain and other regions

地区	平均值/%	范围/%	参考文献
兴凯湖平原	2.80	0.35~14.49	本文
黑龙江省	4.94	0.02~53.10	[28]
东北黑土	1.93 ^a /2.55 ^b	0.68~7.47	[29]
东北平原	1.78		[30]
中国大陆	2.23 ^b	0.16~22.4	[31]

注:a 为 2002 年黑土区农田数据平均值;b 为全国第二次土壤普查时期东北黑土数据平均值。

3.2 半变异函数分析

半方差分析能较好地刻画土壤有机碳空间分布的随机性和结构性。运用 GS+ 软件对研究区土壤有机碳含量进行半变异函数拟合(表 3、图 3)。根据决定系数(R^2)、残差(RSS)等,选择变异函数的拟合模型。由表 3 可知,研究区土壤有机碳变异函数比较符合球形模型, R^2 为 0.962,拟合效果较好。块金值为 0.016,说明在当前的采样尺度范围内存在由采样误差、短距离的变异、随机因素引起的变异。块金效应为 47.06%,表明区域内存在中等强度的空间自相关性,说明研究区土壤有机碳含量空间分布

受结构性因素和随机性因素的共同影响且更倾向于受结构性因素的影响。其中,结构性因素主要是指土壤在形成过程中的母质类型、土壤类型等,随机性因素则是指诸如土地利用方式等能在一定程度上反映耕作活动、种植制度、投入管理水平差异的人为活动因素;结构性因素使得土壤属性具有空间自相关性,而随机性因素则会减弱土壤属性的空间自相关性,增大其异质性。变程(A)为 135.7 km,说明研究区土壤有机碳自相关范围较大,可能与研究区平原地貌有关。

表 3 研究区土壤有机碳半方差函数模型及其参数

Table 3 Theoretical semivariogram model for SOC content and parameters values in the study area

理论模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	块金效应 [$C_0/(C_0+C)$]	变程/km	拟合系数(R^2)	残差(RSS)
球形模型	0.016	0.034	47.06	135.7	0.962	1.27E-05

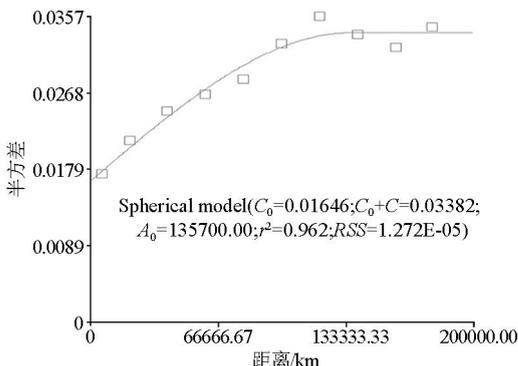


图 3 研究区土壤有机碳半方差函数

Fig. 3 Isotropic semivariogram of SOC in the study area

3.3 有机碳空间变异特征

为了更直观反映研究区土壤有机碳的空间变异特征,采用反距离加权空间插值方法获得兴凯湖平原表层土壤有机碳含量的空间分布。如图 4 所示,研究区表层土壤有机碳呈现“中、西部低,东、北部高”的分布格局,体现了兴凯湖平原土壤有机碳空间分布不均的特点。高值区(>3%)主要分布在研究区东部的兴凯湖农场—忠诚乡、北部的珍宝岛乡—东方红镇—云山农场及西北部的向阳村附近;低值区(<2%)主要分布在研究区中、西部地区。土壤有机碳含量以 2%~3% 为主,占研究区总面积的 49.35%;

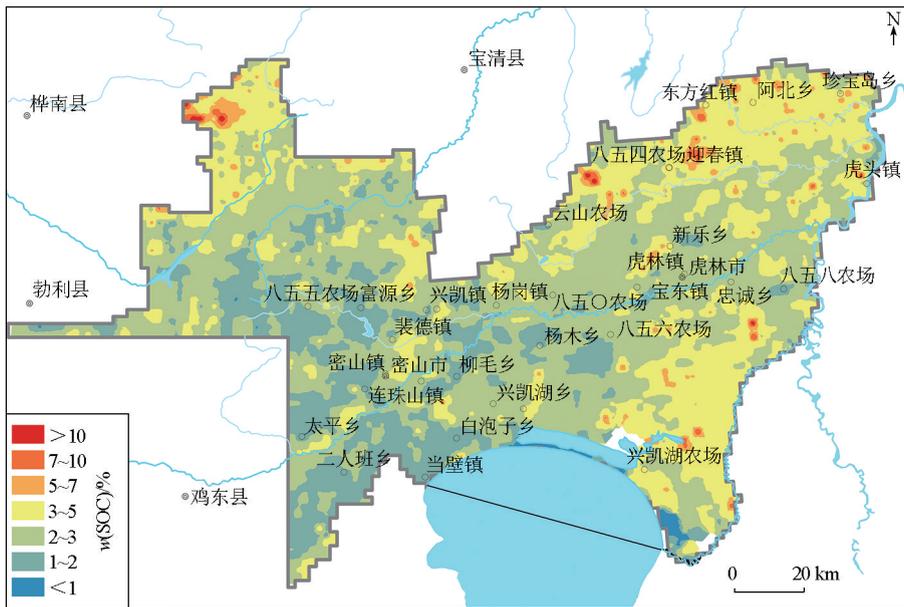


图4 研究区土壤有机碳空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of SOC in the studyarea

其次为3%~5%,占研究区总面积的30.64%。有机碳总体水平较高,与统计结果一致。大部分高值区均在海拔较低处。

3.4 土壤有机碳空间变异的影响因素

3.4.1 成土母质

成土母质对土壤有机碳含量的影响主要表现在对土壤矿物质组成、土壤风化程度与土壤质地等方面的影响。对研究区不同母质发育的土壤有机碳含量进行统计(表4),结果表明,不同成土母质间土壤有机碳均值差异明显,其中三叠纪变质岩风化物发育的土壤其有机碳含量最高,平均值为4.13%;其

次为三叠纪板岩及粉砂岩风化物(3.20%)、元古宙变质岩风化物(3.15%)、中更新世松散堆积物(3.08%)及太古宙变质岩风化物(3.03%);新近纪砂岩、砂砾岩风化物发育的土壤有机碳含量最低,其平均值仅为1.81%。同种岩性不同时代的风化物,土壤有机碳含量也有差异。以玄武岩为例,全新世玄武岩风化物发育而成的土壤有机碳含量明显低于新近系玄武岩风化物发育的土壤。从变异情况来看,各成土母质下土壤有机碳含量变异系数为0.18~0.65,除新近纪砂岩、砂砾岩母质为低变异外,其余成土母质变异系数均为中等变异。

表4 研究区不同成土母质土壤有机碳含量统计特征

Table 4 Descriptive statistics characteristics of SOC content with different soil parent materials in the study area

成土母质	样品数	平均值/%	最小值/%	最大值/%	标准差/%	偏差/%	变异系数
全新世松散堆积物	901	2.81	0.35	13.79	1.24	1.54	0.44
晚更新世松散堆积物	1275	2.98	0.73	11.84	1.07	1.14	0.36
中更新世松散堆积物	148	3.08	1.25	13.72	1.51	2.28	0.49
新近纪砂岩、砂砾岩风化物	40	1.81	1.24	2.54	0.33	0.11	0.18
白垩纪砂岩风化物	829	2.59	0.56	14.49	1.19	1.41	0.46
侏罗纪砂岩及火山碎屑岩风化物	90	2.66	1.13	8.48	1.02	1.05	0.38
三叠纪板岩及粉砂岩风化物	34	3.2	1.57	9.58	1.59	2.52	0.5
二叠纪砂岩及火山碎屑岩风化物	67	2.54	1.29	6.29	0.94	0.89	0.37
泥盆纪火山碎屑岩风化物	47	2.72	1.52	4.65	0.81	0.65	0.3
三叠纪变质岩风化物	14	4.13	2.64	6.41	1.14	1.29	0.28
寒武纪变质岩风化物	9	2.16	1.53	2.92	0.55	0.3	0.25
太古宙变质岩风化物	29	3.03	1.08	9.51	1.96	3.85	0.65
元古宙变质岩风化物	149	3.15	0.74	12.9	1.78	3.17	0.57
花岗岩风化物	351	2.37	0.86	13.39	1.14	1.29	0.48
全新世玄武岩风化物	58	2.15	1.32	6.6	0.82	0.68	0.38
新近纪玄武岩风化物	110	3.3	1.05	7.78	1.15	1.32	0.35

3.4.2 土壤质地

土壤质地是影响土壤有机碳含量的重要因素。已有研究表明,土壤机械组成影响着土壤的耕性、通透性、保水保肥性能^[32-33],特别是砂粒和黏粒含量,可以显著影响土壤有机质的累积和矿物组成^[34]。本次工作未测试土壤的质地,但可采用获得的地球化学指标侧面反映土壤的质地,如硅铝铁率^[35]、土壤化学蚀变指数(*CIA*)等。根据二者与土壤有机碳的相关系数大小,本次采用相关系数较大的土壤化学蚀变指数(*CIA*)。*CIA* 值与长石风化成黏土矿物

的程度成正比,*CIA* 值越大,风化强度越大,相应的土壤的粒级会越细。研究区土壤风化指数平均值为 66.21,范围为 52.62~80.82,变异系数为 0.05,为低变异水平。由表 5 可知,随着土壤有机碳含量的增加,*CIA* 平均值呈增大的趋势,表明土壤有机碳含量与 *CIA* 具有良好的相关关系。据相关性分析,土壤有机碳含量与 *CIA* 呈现非常显著的正相关关系($P<0.01$),相关系数为 0.549。以上分析表明,土壤质地与有机碳的空间分布具有很好的关联性。

表 5 研究区不同土壤有机碳含量土壤风化指数统计特征

Table 5 Descriptive statistics characteristics of *CIA* with different SOC content in the study area

有机碳含量/%	采样点数	平均值/%	最小值/%	最大值/%	标准差/%	方差/%	变异系数
<1	21	59.84	52.62	65.33	3.9	15.19	0.065
1~2	616	64.18	53.87	80.82	2.65	7.04	0.041
2~3	2136	65.61	55.45	78.1	2.6	6.75	0.04
3~5	1296	68.06	57.18	78.56	3.08	9.47	0.045
5~7	65	69.24	60.89	80.36	3.33	11.06	0.048
7~10	17	69.96	58.67	74.41	4.31	18.55	0.062
全区	4151	66.21	52.62	80.82	3.17	10.07	0.05

3.4.3 土壤类型

研究区不同土壤类型有机碳含量统计结果表明(表 6),不同土壤类型有机碳含量具有一定差别。沼泽土平均值最高,为 3.28%,泥炭土、草甸土、暗棕壤、白浆土及黑土次之,平均值在 2.54%~2.88%,水稻土最低,平均值为 2.47%。各土类有机

碳含量之间差距不大,最大值仅为最小值的 1.4 倍,反映出土壤类型对有机碳的空间分布影响不大。从变异系数来看,黑土的变异系数最小,为 0.24,暗棕壤的变异系数最大,为 0.50。7 种土类的变异系数平均值为 0.4,与全区土壤有机碳含量的平均变异系数接近。

表 6 研究区不同土壤类型有机碳含量统计特征

Table 6 Descriptive statistics characteristics of SOC contents under different soil types in the study area

土类	样品数	平均值/%	最小值/%	最大值/%	标准差/%	方差/%	变异系数
暗棕壤	940	2.69	0.56	14.49	1.33	1.78	0.5
白浆土	1482	2.67	0.69	13.39	1.01	1.02	0.38
草甸土	733	2.73	0.51	12.14	1.12	1.26	0.41
黑土	50	2.54	1.59	4.4	0.6	0.36	0.24
泥炭土	21	2.88	1.89	5.5	0.88	1.32	0.49
水稻土	102	2.47	1.13	5.16	0.85	0.72	0.34
沼泽土	818	3.28	0.35	13.79	1.43	2.06	0.44

3.4.4 土地利用方式

不同土地利用方式下土壤有机碳含量平均值差异明显(表 7)。草地有机碳平均值最高,达 3.33%,其次为湿地、水田、有林地,达 2.92~3.08%,滩地最低,为 2.16%。耕地中水田土壤有机碳高于旱田,约为其 1.2 倍。从变异系数来看,居民用地的变异系数最小,为 0.28;其次为水田(0.33),灌木林最大,为 0.54,其余土地利用方式变异系数在 0.4 左右。

3.4.5 开垦年限

不同开垦年限土壤有机碳含量变化明显,随着开垦年限的增加,土壤有机碳基本呈下降趋势(表 8)。开垦 5 年的土壤有机碳平均值最高,达 4.37%,开垦 10 年的平均值为 3.78%,开垦 15~20 年为 2.7%左右,25 年略有升高,开垦 40 年的土壤有机碳平均值最低,为 2.45%,为开垦 5 年土壤有机碳的 56%。未开垦的土壤多位于山区,少部分位于湿地,受立地条件差异较大,故土壤有机碳平均值略低,变异系数较大。

表 7 研究区不同土地利用方式下土壤有机碳含量统计特征

Table 7 Descriptive statistics characteristics of SOC contents under different land use types in the study area

土地利用	样品数	平均值/%	最小值/%	最大值/%	标准偏差/%	方差/%	变异系数
草地	132	3.33	0.71	7.76	1.37	1.87	0.41
湿地	285	3.08	0.35	9.58	1.46	2.15	0.48
水田	1368	2.99	0.96	12.14	0.99	0.99	0.33
有林地	775	2.92	0.69	14.49	1.44	2.08	0.49
灌木林	49	2.57	0.39	9.51	1.38	1.91	0.54
旱田	1276	2.53	0.56	13.79	1.17	1.38	0.46
居民用地	103	2.29	1.29	4.76	0.65	0.42	0.28
滩地	163	2.16	0.35	4.48	0.90	0.80	0.41
总计	4151	2.80	0.35	14.49	1.22	1.48	0.44

表 8 研究区不同开垦年限土壤有机碳含量统计特征

Table 8 Descriptive statistics characteristics of SOC contents under different reclamation years in the study area

开垦时间/a	样品数	平均值/%	最小值/%	最大值/%	标准偏差/%	方差/%	变异系数
0	1778	2.94	0.35	14.49	1.46	2.14	0.50
5	9	4.37	2.83	6.47	1.15	1.33	0.26
10	5	3.78	2.27	7.28	2.01	4.02	0.53
15	67	2.76	1.35	7.76	1.05	1.10	0.38
20	47	2.73	1.13	11.84	1.53	2.33	0.56
25	1072	2.92	0.76	12.14	1.02	1.03	0.35
40	1173	2.45	0.78	8.51	0.83	0.69	0.34

3.5 主控因素研究

为定量解释各影响因素对土壤有机碳的空间变异的独立解释能力,对成土母质、土壤质地、土壤类型、土地利用方式及开垦年限进行回归分析(表 9)。所有自变量均达到极显著水平($P < 0.01$)。结果表明,成土母质、土壤质地、土壤类型、土地利用方式及开垦年限等因素对研究区土壤有机碳均有显著性影

响,其中土壤质地对研究区土壤有机碳空间变异影响最大,能够独立解释空间变异的 30.1%,显著高于其他因素;其次为土地利用方式、成土母质、土壤类型和开垦年限。这 5 项影响因素合计能够解释 41.2%的有机碳空间变异。这表明兴凯湖平原土壤有机碳空间变异的主控因素为土壤质地,其次为土地利用方式。

表 9 研究区不同因素对土壤有机碳的回归分析结果

Table 9 Regression analysis of SOC with different factors in the study area

影响因素	F 值	决定系数(R^2)	矫正决定系数(R^2)	显著性(sig)
成土母质	30.558	0.07	0.068	<0.01
土壤质地	1788.873	0.301	0.301	<0.01
土壤类型	28.017	0.039	0.038	<0.01
土地利用方式	58.013	0.094	0.092	<0.01
开垦年限	24.893	0.035	0.033	<0.01
综合	83.58	0.415	0.412	<0.01

4 结论与讨论

4.1 结构性因素对土壤有机碳的影响

结构性因素中土壤质地的独立解释能力最高,远高于成土母质和土壤类型,是兴凯湖平原土壤有机碳空间变异的主控因素。该结果与赵明松等^[18]的研究结果一致,独立解释能力均在 30%左右。这主要是因为土壤中黏粒含量较高会增加物理和化学保护机制,即黏粒通过与有机物质结合形成有机—无机复合物,吸附稳定土壤有机质(SOM),降低了

SOM 的矿化速度,有利于有机质的积累;相反,砂粒含量较高的土壤中则减少或缺少这种保护机制,有机质矿化分解速率加快,导致有机质含量低^[36-37]。工作区受地形地貌及河流沉积作用的影响,土壤质地空间分布不均(见图 5)。工作区西部地区属低山丘陵区,CIA 值普遍小于 65,个别点位 CIA 值略大,整体反映西部土壤风化程度较低;东部和北部地区 CIA 值普遍大于 65,在北部的七虎林河以北地区普遍大于 68,东部的兴凯湖以东地区也存在大于 68 的集中分布地区,表明东部平原区土壤整体风化程度较西部地区高。土壤质地的分布于有机碳空间分

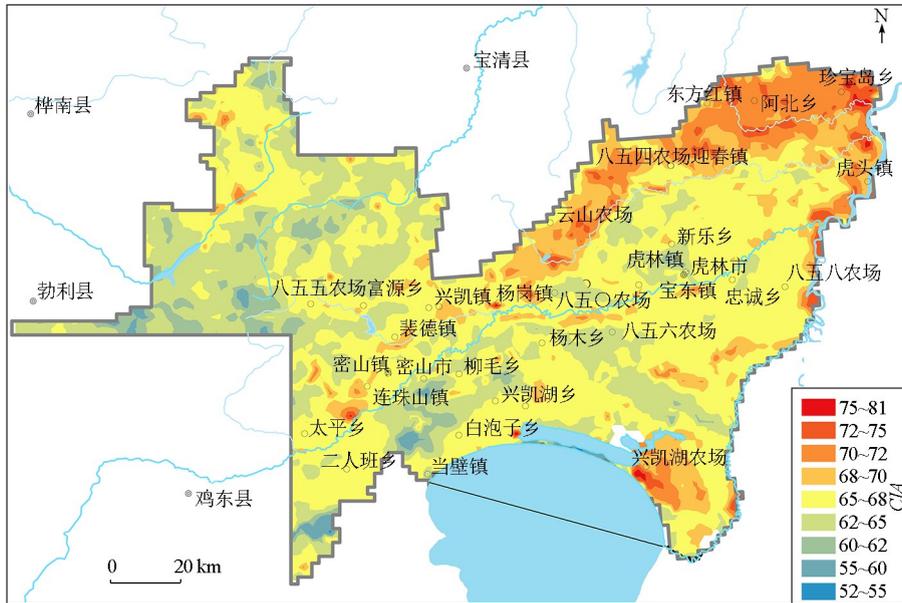


图 5 研究区表层土壤 CIA 分布

Fig. 5 CIA distribution of topsoil in the study area

布高度吻合,表明土壤质地对土壤有机碳的空间变异影响较大。

成土母质对土壤的物理性状和化学组成均有极其重要的影响。在一定的地质构造环境内,土壤元素含量(如有机碳)和土壤性状与母质有着紧密的关系^[38],但在成土母质的划分上,无法划分到粒级的级别,如第四纪松散堆积物仅划分为全新世松散堆积物、晚更新世松散堆积物、中更新世松散堆积物,不能很好地对应质地的分级,因此成土母质的独立解释能力要低。土壤类型亦是如此。有研究表明^[6-7,39],土壤类型对土壤有机碳空间变异性的独立解释能力与土壤分类级别呈反比,即土壤分类级别越低解释土壤有机碳空间变异性的能力越强。这是因为低级别的土壤类型分类是在高级别的分类基础上叠加更加精细的指标进一步分类的结果。本次未搜集到土属一级的分类,故未开展相关研究。

4.2 随机性因素对土壤有机碳的影响

本次研究的随机性因素中,土地利用方式是仅次于土壤质地的影响土壤有机碳空间变异的因素,高于土壤开垦年限。土地利用方式作为自然条件和人为活动的综合反映,通过有机物的输入以及控制土壤有机碳积累和释放速度来影响土壤有机碳含量^[11,16]。已有研究表明,不同土地利用方式下土壤有机碳含量差异显著^[12,16],同一研究区内土地利用方式对土壤有机碳空间变异的独立解释能力高于土类和亚类,但低于土属^[10-11]。本次研究结果与已有研究结果基本一致。研究区土壤有机碳平均值呈现草地>湿地>水田>有林地>灌木林>旱田>居民用地

>滩地。耕地中水田土壤有机碳含量明显高于旱田,是旱田的 1.2 倍。这是因为水田根茬残留量大,相当于部分秸秆还田,有机质归还量比旱田高,大部分被微生物稍经分解即转化为腐殖质储存于土壤中,且水田长期处于淹水状态,有机质分解缓慢,易积累,因而土壤有机碳含量较早田高。土地利用方式对有机碳空间变异的独立解释能力为 9.2%,大于土壤类型的 3.8%。以上分析表明,土地利用方式也是研究区土壤有机碳空间变异的重要因素之一,可通过改变工作区土地利用方式进行土壤碳库的调控,比如地势低洼的土地退耕还湿、还草;也可通过秸秆还田等保护性耕作制度达到提高土壤碳库的目标。

土壤开垦年限对于土壤有机碳空间变异在 4 种定性因素中解释能力最低,与土壤类型基本相当。可能原因有两方面,一方面是本次搜集的土地利用期次较少,对于开垦年限的确定不够精确,导致绝大部分采样点位于 0、25 和 40 年,其他年限采样点数量太少;另一方面,土壤开垦年限对有机碳的影响可能主要体现在土壤有机碳的变化,因此其在解释土壤有机碳变化方面的效果应该要好于土壤有机碳的空间变异。

4.3 结论

1) 兴凯湖平原表层土壤有机碳含量在 0.35%~14.49%,平均值 2.80%,这一含量水平高于东北黑土、东北平原以及中国大陆的平均值,低于黑龙江省的平均值(1986~1990 年)。变异系数分别为 0.44,属于等程度的空间变异性。土壤有机质(折算后)

含量达到丰富、较丰富水平。

2) 土壤有机碳空间自相关范围较大,其空间变异更趋向于受结构性因素的影响,在全区表现为“中、西部低,东、北部高”的分布格局。

3) 在各影响因素中,成土母质对土壤有机碳空间变异的独立解释能力为 6.8%,土壤质地的独立解释能力为 30.1%,土壤类型能独立解释 3.8%的有机碳空间变异,土地利用方式能独立解释 9.2%,开垦年限能独立解释 3.3%的有机碳空间变异。土壤质地是影响兴凯湖平原表层土壤有机碳空间变异的主控因子。

致谢:文中使用的土壤有机碳来源于多目标区域地球化学调查,该项目由自然资源部中国地质调查局沈阳地质调查中心组织实施,由于参与人员众多,无法一一列举。笔者感谢该项目参加人员付出的劳动及基础资料的支持。在此特别感谢江叶枫老师、罗由林老师给予的帮助,以及审稿老师提出的宝贵意见。

参考文献 (References):

[1] 方华军,杨学明,张晓平. 东北黑土有机碳储量及其对大气 CO₂ 的贡献[J]. 水土保持学报,2003,17(3):9-12.
Fang H J, Yang X M, Zhang X P. Organic carbon stock of black soils in northeast China and it's contribution to atmospheric CO₂ [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 9-12.

[2] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. European Journal of Soil Science,1996,7(2): 151-163.

[3] 赵其国. 提升对土壤认识,创新现代土壤学[J]. 土壤学报,2008,45(5): 771-777.
Zhao Q G. Improving knowledge of soil, innovating modern pedology[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008,45(5): 771-777.

[4] Pan G X,Smith P,Pan W N. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China [J]. Agriculture,Ecosystems and Environment,2009,129(1/3): 344-348.

[5] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science,2004,304(5677): 1623-1627.

[6] 江叶枫,饶磊,郭熙,等. 江西省耕地土壤有机碳空间变异的主控因素研究[J]. 土壤,2018,50(4):778-786.
Jiang Y F, Rao L, Guo X, et al. Study on main controlling factors of spatial variability of farmland SOC in Jiangxi Province [J]. Soils,2018,50(4):778-786.

[7] 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.

[8] 李启权,王昌全,岳天祥,等. 基于 RBF 神经网络的土壤有机质空间变异研究方法[J]. 农业工程学报,2010,26(1):87-93.
Li Q Q, Wang C Q, Yue T X, et al. Method for spatial variety of soil organic matter based on radial basis function neural network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(1):87-93.

[9] 潘成忠,上官周平. 土壤空间变异性研究评述[J]. 生态环境,2003,12(3):371-375.
Pan C Z, Shangguan Z P. Review of the research on soil spatial variability[J]. Ecology and Environment Sciences,2003,12(3): 371-375.

[10] 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.

[11] 顾成军,史学正,于东升,等. 省域土壤有机碳空间分布的主控因子——土壤类型与土地利用比较[J]. 土壤学报,2013,50(3):425-432.
Gu C J, Shi X Z, Yu D S, et al. Main factor controlling soil spatial distribution at the province scale as affected by soil type and land use[J]. Acta Pedologica Sinica,2013,50(3):425-432.

[12] 胡玉福,邓良基,张世熔,等. 川中丘陵区典型小流域土壤氮素空间变异特征及影响因素研究[J]. 水土保持学报,2008,22(3):70-75.
Hu Y F, Deng L J, Zhang S R, et al. Study on spatial variability and its influential factors of soils nitrogen in typical small watershed in the hilly region of the middle Sichuan [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2008,22(3):70-75.

[13] 李婷,张世熔,刘浔,等. 沱江流域中游土壤有机质的空间变异特点及其影响因素[J]. 土壤学报,2011,48(4):863-868.
Li T, Zhang S R, Liu X, et al. Spatial variation of soil organic matter and its influence factors in the middle reaches of Tuojiang river basin [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011,48(4):863-868.

[14] Zhang S W, Huang Y F, Shen C Y, et al. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information[J]. Geoderma, 2012, 171/172: 35-43.

[15] 房飞,唐海萍,李滨勇. 不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分影响研究[J]. 生态环境学报,2013,22(11):1774-1779.
Fang F, Tang H P, Li B Y. Effects of land use type on soil organic carbon and its fractions[J]. Ecology and Environment Sciences, 2013, 22(11): 1774-1779.

[16] 王晓丽,王媛,石洪华,等. 南长山岛不同土地利用方式下的土壤有机碳密度[J]. 环境科学学报,2014,34(4):1009-1015.
Wang X L, Wang A, Shi H H, et al. Soil organic carbon density under different land use types on the Nanchangshan Island of Miaodao Archipelago [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(4): 1009-1015.

[17] Rasmussen C, Torn M S, Southard R J. Mineral assemblage and aggregates control carbon dynamics in a California conifer forest [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(6):

- 1711-1721
- [18] 赵明松,张甘霖,李德成,等. 江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素[J]. 生态学报,2013,33(16):5058-5066.
Zhao M S, Zhang G L, Li D C, et al. Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2013,33(16):5058-5066.
- [19] 范胜龙,黄炎和,林金石. 表土有机碳区域分布的优化空间插值模型研究——以福建省龙海市为例[J]. 水土保持研究,2011,18(6):1-5.
Fan S L, Huang Y H, Lin J S. The optimized interpolation models and its relationship with soil sampling density on detecting spatial variability of farmland soil organic carbon:A case study in Longhai City,Fujian Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2011,18(6):1-5.
- [20] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0258-2014 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0258-2014 Specification of multi-purpose regional geochemical survey[S]. Beijing:Geological Publishing House,2015.
- [21] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0295-2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京:地质出版社,2016.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0295-2016 Specification of land quality geochemical assessment[S]. Beijing:Geological Publishing House,2016.
- [22] 綦巍,付建飞,王恩德,等. 基于化学蚀变指数(CIA)的辽河流域土壤风化程度研究[J]. 东北大学学报:自然科学版,2012,33(3):444-447.
Qi W, Fu J F, Wang E D, et al. Study of the soil weathering degree of the Liao River basin Based on CIA index[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*,2012,33(3):444-447.
- [23] McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. *Journal of Geology*,1993,101(2):295-303.
- [24] 王攀,宁凯,石迎春,等. 吴起全新世土壤剖面常量元素地球化学特征[J]. 土壤通报,2019,50(6):1261-1268.
Wang P, Ning K, Shi Y C, et al. Geochemical characteristics of major elements of holocene soil from Wuqi, Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2019,50(6):1261-1268.
- [25] 孙厚云,孙晓明,贾凤超,等. 河北承德锗元素生态地球化学特征及其与道地药材黄芩适应关系[J]. 中国地质,2020,47(6):1646-1667.
Sun H Y, Sun X M, Jia F C, et al. The eco-geochemical characteristics of germanium and its relationship with the genuine medicinal material *Scutellaria baicalensis* in Chengde, Hebei Province[J]. *Geology in China*,2020,47(6):1646-1667.
- [26] 徐树建,倪志超,丁新潮. 山东平阴黄土剖面常量元素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报,2016,35(2):353-359.
Xu S J, Ni Z C, Ding X C. Geochemical characteristics of major elements of the Pingyin loess in Shandong Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*,2016,35(2):353-359.
- [27] 李绪龙,张霞,林春明,等. 常用化学风化指标综述:应用与展望[J]. 高校地质学报,2022,28(1):51-63.
Li X L, Zhang X, Lin C M, et al. Overview of the application and prospect of common chemical weathering indices[J]. *Geological Journal of China Universities*,2022,28(1):51-63.
- [28] 黑龙江省土地管理局,黑龙江省土壤普查办公室. 黑龙江土壤[M]. 北京:农业出版社,1994.
Heilongjiang Land Management Bureau, Heilongjiang Province Soil Census Office. Heilongjiang soil[M]. Beijing:China agricultural machinery press,1994.
- [29] 解宏图,郑立臣,何红波,等. 东北黑土有机碳、全氮空间分布特征[J]. 土壤通报,2006,37(6):1058-1061.
Xie H T, Zheng L C, He H B, et al. Spatial distribution of soil organic carbon and total nitrogen in mollisols in the Northeast of China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2006,37(6):1058-1061.
- [30] 戴慧敏,刘国栋. 东北黑土地1:25万土地质量地球化学调查报告[R]. 中国地质调查局沈阳地质调查中心,2019.
Dai H M, Liu G D. Land quality geochemical survey report of black soil in northeast China on scale 1:250 000[R]. Shenyang Geological Survey Center, CGS,2019.
- [31] 罗梅,郭龙,张海涛. 基于环境变量的中国土壤有机碳空间分布特征[J]. 土壤学报,2020,57(1):48-59.
Luo M, Guo L, Zhang H T, et al. Characterization of spatial distribution of soil organic carbon in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*,2020,57(1):48-59.
- [32] Anderson D W, Paul E A. Organo-mineral complexes and their study by radiocarbon dating[J]. *Journal of the Soil Science Society of America*,1984,48(2):298-301.
- [33] 王茹,张凤荣,王军艳,等. 潮土区不同质地土壤的养分动态变化研究[J]. 土壤通报,2001,32(6):255-257.
Wang R, Zhang F R, Wang J Y. Temporal changing of plant nutrients in different texture soils in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2001(6):255-257.
- [34] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, et al. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*,1994,8(3):279-294.
- [35] 张秀芝,赵相雷,李波,等. 基于区域土壤元素地球化学的河北平原土壤质地类型划分[J]. 第四纪地质研究,2017,37(1):25-35.
Zhang X Z, Zhao X L, Li B, et al. The classifying of soil texture types based on the regional soil geochemical elements in Hebei plain[J]. *Quaternary Sciences*,2017,37(1):25-35.
- [36] Hook P B, Burke I C. Biogeochemistry in a shortgrass landscape:Control by topography, soil texture and microclimate[J]. *Ecology*,2000,81(10):2686-2703.
- [37] Parton W J, Schimel D S, Cole C V O N, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands[J]. *Soil Science society of america journal*,1987,51(5):1173-1179.
- [38] 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.

dervalued role of land-management [J]. Geoderma, 2009, 152

[39] Bell M J, Worrall F. Estimating a region's SOC baseline;The un-

(1-2):74-84.

Control factor of the spatial variations in the soil organic carbon content in the topsoil of the Xingkai Lake Plain

YANG Ze^{1,2,3}, ZHANG Yi-He^{1,2,3}, DAI Hui-Min^{1,2,3}, LIU Guo-Dong^{1,2,3}, LIU Kai^{1,2,3}, XU Jiang^{1,2,3}

(1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effect, Ministry of Natural Resources, Shenyang 110034, China; 3. Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effect, Shenyang 110034, China)

Abstract: Obtaining accurate soil organic carbon (SOC) content in the Xingkai Lake Plain and the main factor controlling its spatial variation is greatly significant for controlling and restoring the SOC content and achieving sustainable agricultural development. This study investigated the spatial distribution characteristics of the SOC content in the Xingkai Lake Plain and their control factor based on 4,151 topsoil samples collected at a depth of 0~20 cm in the field. Moreover, it compared the effects of soil parent materials, soil texture, soil type, land use type, and land reclamation duration (year) on the spatial distribution of the SOC content in the plain through geostatistical and regression analyses. The results are as follows. The SOC content in the topsoil of the study area is 0.35%~14.49% (average: 2.80%). It has a coefficient of variation of 0.44, indicating moderate spatial variations. It has a nugget-to-sill ratio of 47.06%, indicating that its spatial distributions are affected by both structural and random factors. It is low in the middle and west and is high in the east and north overall. All these five factors have significant effects on the SOC content ($P<0.01$). Among them, soil parent materials, soil type, land use type, and land reclamation duration can independently account for 6.8%, 3.8%, 9.2%, and 3.3% of the spatial variations in the SOC content, respectively. By contrast, soil texture can independently account for 30.1% of the spatial variations of the SOC content, which is far greater than that of the other four factors. Therefore, soil texture is the main control factor in the spatial distribution of the SOC content in the study area.

Key words: SOC; spatial variation; main control factor; Xingkai Lake Plain

(本文编辑:蒋实)