

## 三江平原地区土壤有机碳及其组分的空间分布特征

曹宏杰<sup>1,2</sup>, 王立民<sup>2</sup>, 罗春雨<sup>2</sup>, 刘赢男<sup>2</sup>, 倪红伟<sup>2\*</sup>

1. 哈尔滨师范大学, 黑龙江 哈尔滨 150025; 2. 黑龙江省科学院自然与生态研究所, 黑龙江 哈尔滨 150040

**摘要:**以三江平原地区为研究对象, 基于网格法取样, 用经典统计学和地统计学综合分析了土壤有机碳及其组分的空间变异特征。结果表明: 土壤有机碳 (TOC)、颗粒有机碳 (POM-C)、轻组有机碳 (LFOC)、溶解性有机碳 (DOC) 和微生物量碳 (SMBC) 的平均质量分数分别为 28.174 8、4.944 6、2.476 4 g·kg<sup>-1</sup>, 367.92 和 372.03 mg·kg<sup>-1</sup>。土壤有机碳及其组分具有较高的空间异质性, 变异系数在 32.18%~113.55%之间; 有机碳各组分最佳拟合模型均为指数模型, RSS 值均很小, 拟合程度均很高; TOC、SOC<sub>s</sub>、POM-C、LFOC 含量的空间分布受着空间因素的强烈作用, SMBC 空间异质性只受随机因素的影响。TOC、SOC<sub>s</sub> 和 POM-C 的变程较大, SMBC 的变程只有 0.60 km。三江平原地区土壤有机碳及其组分存在明显的空间变异。研究区域内, TOC、SOC<sub>s</sub>、POM-C 空间分布格局相似, 由西南向东北方向增加, 高值区域出现在抚远县以及饶河县和宝清县交界处; LFOC 和 DOC 整体的空间分布格局为中间低四周高。

**关键词:** 有机碳; 分组; 空间分布; 三江平原

**中图分类号:** X144

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2013) 07-1111-08

**引用格式:** 曹宏杰, 王立民, 罗春雨, 刘赢男, 倪红伟. 三江平原地区土壤有机碳及其组分的空间分布特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1111-1118.

CAO Hongjie, WANG Limin, LUO Chunyu, LIU Yingnan, NI Hongwei. Spatial distribution patterns of soil organic carbon and its fractions in Sanjiang Plain [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1111-1118.

土壤有机碳是反映土壤质量或土壤健康的一个重要指标, 直接影响土壤肥力和作物产量的高低。20 世纪 70—80 年代, 人们从有机质的分解转化方面, 对有机质分组进行了更深入的研究, 提出了土壤活性有机质的概念。虽然土壤活性有机碳占土壤总有机碳的比例很低, 但是它对土壤养分的生物有效性及其循环转化起着非常重要的作用<sup>[1]</sup>。Anderson 认为, 研究土壤活性有机碳可以达到快速判断土壤质量变化方向的目的<sup>[2]</sup>。倪进治等提出, 土壤生物活性有机质的大小和周转通过微生物间接地影响温室气体排放<sup>[3]</sup>。Biederbeck 等通过动力学研究指出, 土壤有机碳的波动主要发生在易氧化、易分解部分, 这些活性指标比农业变量对土壤有机碳的敏感性高得多, 完全可以指示土壤有机碳的早期变化<sup>[4]</sup>。

三江平原是我国沼泽湿地面积分布最大的地区, 也是近 50 年来湿地开垦面积最大的地区, 区内耕地面积已由 1949 年的 78.6×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>, 增加到目前的 452×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup><sup>[5]</sup>。三江平原区域土壤环境的显著变化使其成为人类活动影响下湿地变化最为显著的热点区域之一<sup>[6]</sup>。王书伟等研究了三江平原东北

部不同农业利用方式下土壤有机碳和全氮的分布规律<sup>[7]</sup>, 刘子刚, 张坤民对三江平原湿地土壤有机碳储量变化情况进行了研究<sup>[8]</sup>; 张金波等研究了三江平原地区不同土地利用方式下开垦年限对土壤有机碳的影响<sup>[9]</sup>; 刘吉平等对三江平原地区环型湿地土壤有机碳分布规律进行了研究<sup>[10]</sup>, 王丽丽等研究了三江平原湿地不同土地利用方式下土壤有机碳储量的变化<sup>[11]</sup>。三江平原地区土壤有机碳研究关注的重点在湿地开垦及不同土地利用方式下土壤有机碳及其储量的变化规律, 对土壤有机碳分布状况尤其是能够指示土壤有机碳早期变化的活性有机碳的空间分布状况研究较少。本文对三江平原地区土壤有机碳尤其是活性有机碳的空间分布状况进行了研究, 以期为三江平原地区土壤有机碳增汇及其有机碳变化预警提供数据支持。

### 1 研究区域和调查方法

#### 1.1 研究区域

三江平原是我国最大的沼泽分布区, 是广义的东北平原的一部分。位于 45°01'~48°27'56" N, 130°13' ~ 135°05'26" E, 中国东北角, 包括佳木斯市、鹤岗市、双鸭山市、七台河市和鸡西市等所属

**基金项目:** 黑龙江省自然科学基金项目 (C201032); 黑龙江省基本科研业务费专项基金项目

**作者简介:** 曹宏杰 (1978 年生), 男, 博士研究生, 主要从事土壤生态学和全球气候变化方面的研究。E-mail: hjcao781228@163.com

\*通信作者

**收稿日期:** 2013-03-04

的21个县(市),总面积约 $10.89 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。本研究区域包括抚远、同江、绥滨、萝北在内的18个县(市),总面积约 $9.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。三江平原属温带湿润、半湿润大陆性季风气候,全年日照时数2400~2500 h,无霜期120~140 d,冻结期长达7~8个月,最大冻深1.5~2.1 m,年降水量500~650 mm,75%~85%集中在6—10月,1月平均气温 $-21 \sim -18 \text{ }^\circ\text{C}$ ,7月平均气温 $21 \sim 22 \text{ }^\circ\text{C}$ 。土壤类型主要包括草甸土、沼泽土、白浆土、黑土等。

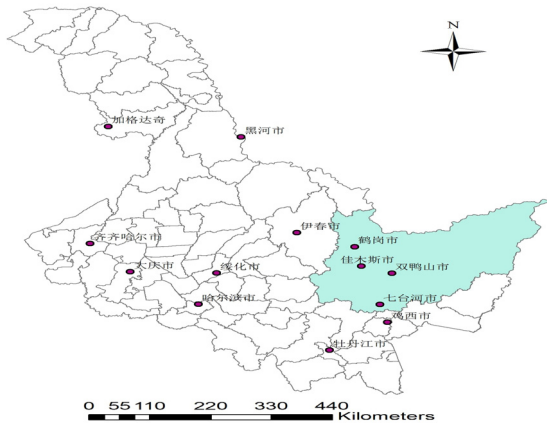


图1 研究区域位置图

Fig.1 Location of research district

## 1.2 调查方法与土壤分析

研究区域一共布置采样点270个(用GPS定位,图2),采样点设置遵循均匀化和代表性原则。在每个样点周围进行5次重复采样(0~20 cm),采取4分法混合组成待测土样。每个样品表层土壤分成2份,1份 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 下密封保存用于测定溶解性有机碳(DOC)和微生物量碳(SMBC);另1份风干处理用于土壤有机碳(TOC)、轻组有机碳(LFOC)、颗粒有机碳(POM-C)测定。样品经前处理后,各有机碳组分用总有机碳氮分析仪测定碳含量(德国

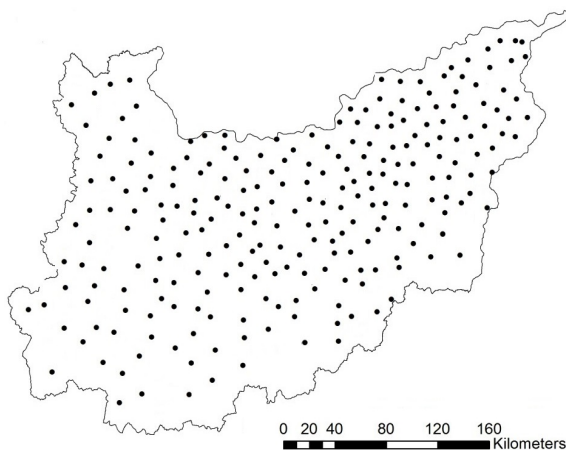


图2 采样点分布图

Fig.2 Distribution of sampling sites

耶拿 multi N/C 2100s),每测20个样品间隔加测2个标样,测定后的数值用标样进行校对。

## 1.3 数据处理与统计分析

描述性统计分析在SPSS 16.0中完成。文中数据采用样本均值加减3倍标准差识别特异值,在此区间外的数据均定为特异值,分别用正常的最大和最小值代替<sup>[12]</sup>,后续计算均采用处理后的原始数据。半方差分析在GS+中完成。Kriging等值线图在ArcGIS9.3中完成。地统计学有关方法及原理见文献[13]所述。

土壤有机碳储量( $\text{SOC}_s$ )采用以下公式计算:

$$\text{SOC}_s = C \times B \times D \times 10^{-1}$$

式中: $\text{SOC}_s$ 为某一深度的土壤有机碳储量( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ); $C$ 为土壤的 $w(\text{SOC})$ 含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); $B$ 为土壤容重( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ); $D$ 为土壤厚度( $\text{cm}$ )。

### 1.3.1 空间自相关分析

空间自相关分析是生态学上常用的空间分析方法,主要用于度量某一变量是否存在空间依赖关系以及变量自身在较近的空间中是否有较强的关联。常用的空间自相关系数有Moran's  $I$ 系数和Geary's  $C$ 系数,本文用Moran's  $I$ 系数进行空间自相关分析,计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: $x_i$ 和 $x_j$ 分别是变量 $x$ 在相邻配对空间点 $i$ 和 $j$ 上取值; $w_{ij}$ 是相邻权重; $n$ 是空间单元总数; $I$ 系数取值从-1到1;当 $I=0$ 时代表空间不相关,取正值时为正相关,取负值为负相关。

### 1.3.2 半方差函数分析

半方差函数是应用最广泛的空间格局描述工具,半方差函数公式为:

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

式中: $I(h)$ 为半方差函数值; $N(h)$ 是间距为向量 $h$ 的点对总数; $Z(x_i)$ 是区域化变量 $Z$ 在 $x_i$ 处的实测值; $Z(x_i + h)$ 是与 $x_i$ 距离为向量 $h$ 样点的值。一般认为半方差函数只有在最大间隔的1/2内才有意义,在本研究中没有特殊说明半方差函数的有效滞后距都设为其最大采样间隔的1/2。本文对半变异函数的拟合主要采用指数模型,其公式为:

$$\gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}) \quad (3)$$

式中: $C_0$ 为块金值(Nugget); $C_0 + C$ 为基台值

(Sill);  $a$ 是变程(Range);  $h$ 为滞后距离。指数模型的变程为 $3a$ 而不是 $a$ 。半方差函数的块金值表示随机变异的大小,主要来源于最小取样间隔内的自然过程造成的变异和实验误差,基台值通常表示系统内的总变异包括结构性变异和随机性变异,块金值和基台值受自身因素和测量单位的影响较大,不能用于比较不同变量间的随机变异,但块金值和基台值之比反映了块金方差占总空间异质性变异的大小,它反映了土壤属性的空间依赖性,一般认为 $<25\%$ 时,空间变量为强烈的空间自相关,在 $25\% \sim 75\%$ 之间时,为中等空间自相关, $>75\%$ 为弱空间自相关<sup>[14]</sup>。变程表明属性因子空间自相关范围的大小,它与观测尺度以及在取样尺度上影响土壤微生物的各种生态过程和相互作用有关,在变程之内,变量具有空间自相关性,反之则不存在,即变程提供了研究某种属性相似范围的一种测度<sup>[15]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 经典统计描述

由表 1 可以看出,三江平原地区 TOC、SOC<sub>s</sub>、POM-C、LFOC、DOC、SMBC 平均含量分别为 28.174 8 g·kg<sup>-1</sup>、55.549 4 t·hm<sup>-2</sup>、4.944 6 g·kg<sup>-1</sup>、2.476 4 g·kg<sup>-1</sup>、367.92 mg·kg<sup>-1</sup>、372.03 mg·kg<sup>-1</sup>。三江平原地区土壤有机碳及其组分的变异系数偏大,在 32.18%~113.55%之间,反映了三江平原地区土壤有机碳及其组分的高度异质性。通过对偏度、峰度的观察和 K-S 法进行非参数检验,在 5%的检验水平下,各项指标均不符合正态分布,经 Johnson 转换后符合正态分布。由表 2 可知,除 POM-C 与 DOC 之间具有显著的正相关关系,其它各组分之间相关性均达到极显著水平,说明各组分土壤有机碳含量很大程度上取决于 TOC 的含量,并且各有机碳组分均处于相互转化过程中<sup>[16]</sup>。对土壤有机碳及其组分的常规统计分析能够概括土壤有机碳及

表 2 土壤有机碳及其组分的相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficients matrix for Soil organic carbon and its fractions

有机碳组分	TOC	SOC <sub>s</sub>	POM-C	LFOC	DOC	SMBC
TOC	1.000					
SOC <sub>s</sub>	0.911**	1.000				
POM-C	0.725**	0.647**	1.000			
LFOC	0.763**	0.671**	0.567**	1.000		
DOC	0.249**	0.219**	0.136*	0.188**	1.000	
SMBC	0.337**	0.258**	0.334**	0.281**	0.241**	1

\*\*表示在 0.01 水平显著; \*表示在 0.05 水平显著

其组分的全貌和整体特征,但不能反映其局部的变化特征,即只在一定程度上反映样本全体,而不能定量地刻画土壤有机碳及其组分的随机性和结构性、独立性和相关性。为了更好地了解土壤有机碳及其组分的空间变异特征,必须进一步采用地统计学方法对它们的空间变异结构进行分析和探讨。

### 2.2 空间自相关

土壤有机碳及其组分在研究区域内呈现一定的空间结构,土壤有机碳及其组分的空间结构差异较大(图 3)。随着滞后距的增大,TOC 呈直线下降,65 km 后呈负相关关系,随后上下波动并趋于平稳,Moran's  $I$  最小时为-0.077, SOC<sub>s</sub> 和 TOC 具有相似的空间结构, Moran's  $I$  最小时为-0.071; 随滞后距的增大 POM-C 现下降,65 km 后呈负相关关系,随后缓慢上升并表现为正相关, Moran's  $I$  最小时为-0.054; LFOC 随滞后距增大迅速下降 32 km 附近为负相关关系而后上升并随滞后距增大呈上下波动趋势 162 km 处 Moran's  $I$  最小时为-0.100 6, 随后上升并呈负相关关系; DOC 随滞后距增大总体呈下降趋势,变化过程中波动幅度较大, Moran's  $I$  最小时为-0.045 9; SMBC 随滞后距增大向上升,71 km 处 Moran's  $I$  最大,随后下降并表现为负相关关系。

表 1 土壤有机碳及其组分的描述性统计分析结果及正态分析检验结果

Table 1 Results of Soil organic carbon and its fractions for descriptive statistics and K-S test

有机碳组分	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数	偏度	峰度	K-S 检验	分布类型
TOC	7.60	109.19	28.17	18.708	66.39	2.566	7.815	0.000	*
TOC <sup>#</sup>	-1.89	2.30	0.0018	0.9949	—	0.131	-0.448	0.622	N
SOC <sub>s</sub>	15.39	170.39	55.54	26.889	48.41	2.041	5.586	0.000	*
SOC <sub>s</sub> <sup>#</sup>	-2.14	2.36	0.0186	0.9974	—	0.054	-0.399	0.542	N
POM-C	0.61	17.50	4.94	3.619	73.19	1.724	2.719	0.000	*
POM-C <sup>#</sup>	-2.27	2.03	-0.0040	1.0040	—	-0.034	-0.496	0.498	N
LFOC	0.02	13.88	2.47	2.812	113.55	2.872	8.242	0.000	*
LFOC <sup>#</sup>	-2.70	2.40	-0.0015	1.1058	—	0.026	-0.207	0.690	N
DOC	146.47	888.20	367.92	118.396	32.18	1.339	3.860	0.000	*
DOC <sup>#</sup>	-2.23	2.77	-0.0208	0.9992	—	0.122	-0.081	0.467	N
SMBC	97.59	1135.25	372.03	233.035	62.64	1.589	2.547	0.000	*
SMBC <sup>#</sup>	-2.12	2.19	-0.0215	1.0085	—	0.087	-0.352	0.635	N

\*表示  $\alpha < 0.05$  时,不符合正态分布; #表示经 Johnson 转换后结果, N 符合正态分布

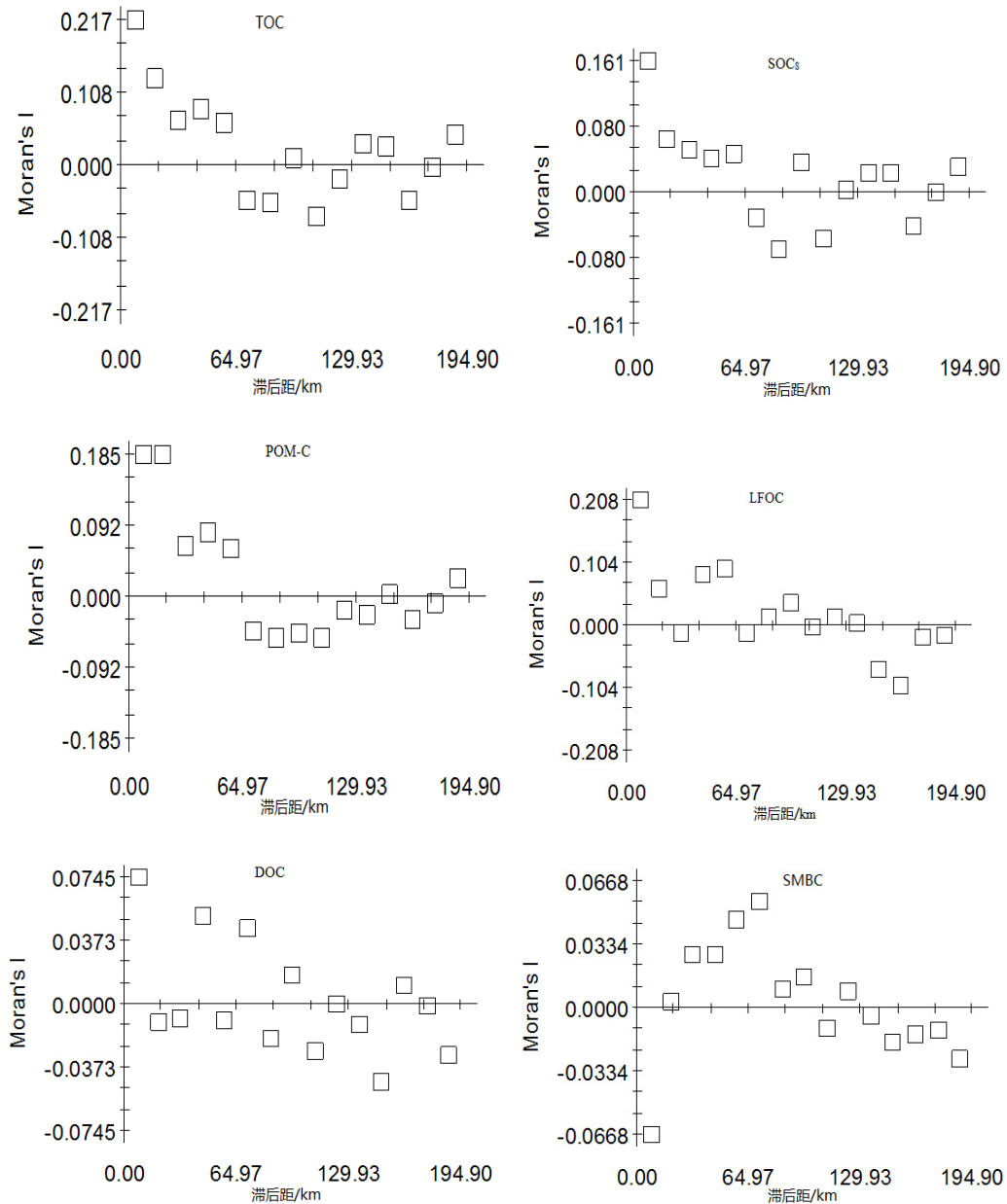


图3 土壤有机碳及其组分空间相关图

Fig. 3 Spatial correlograms of Soil organic carbon and its fractions

### 2.3 空间结构分析

$C_0$ 表示块金值,由实验误差和小于实验取样尺度上施肥、作物、管理水平等随机因素引起的变异; $C$ 为结构方差,由土壤母质、地形、气候等非人为的区域因素(空间自相关部分)引起的变异; $(C_0 + C)$ 为基台值(半方差函数随间距递增到一定程度后出现的平稳值),表示系统内总的变异。土壤有机碳及其组分的最佳理论模型均为指数模型, RSS值均很小,拟合程度较好(图4和表3)。由表3可看出,三江平原地区土壤有机碳及其组分的基台值( $C_0 + C$ )均为正值,说明存在着由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异引起的各种正基底效应。土壤有机碳及其组分分布是由结构性和随机性因素共同作

用的结果。结构性因素,如气候、母质、地形、土壤类型等可以导致土壤有机碳及其组分强的空间相关性,而随机性因素如施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动使土壤有机碳及其组分的空间相关性减弱,朝均一化发展<sup>[17]</sup>。TOC、SOC<sub>S</sub>和POM-C的块金值与基台值的比值都是49.95%,在25%~75%之间,具有中等强度的空间相关性,即TOC、SOC<sub>S</sub>和POM-C的空间异质性与空间位置具有较强的相关性,性状的空间分布受着空间因素的影响明显。结构系数与基台值的比值 $C/(C_0 + C)$ 均为0.500,表明其空间异质性受结构因素和随机因素影响。LFOC的块金值与基台值的比值15.55%,小于25%,显示出强烈的空间相关性,即LFOC的空间异

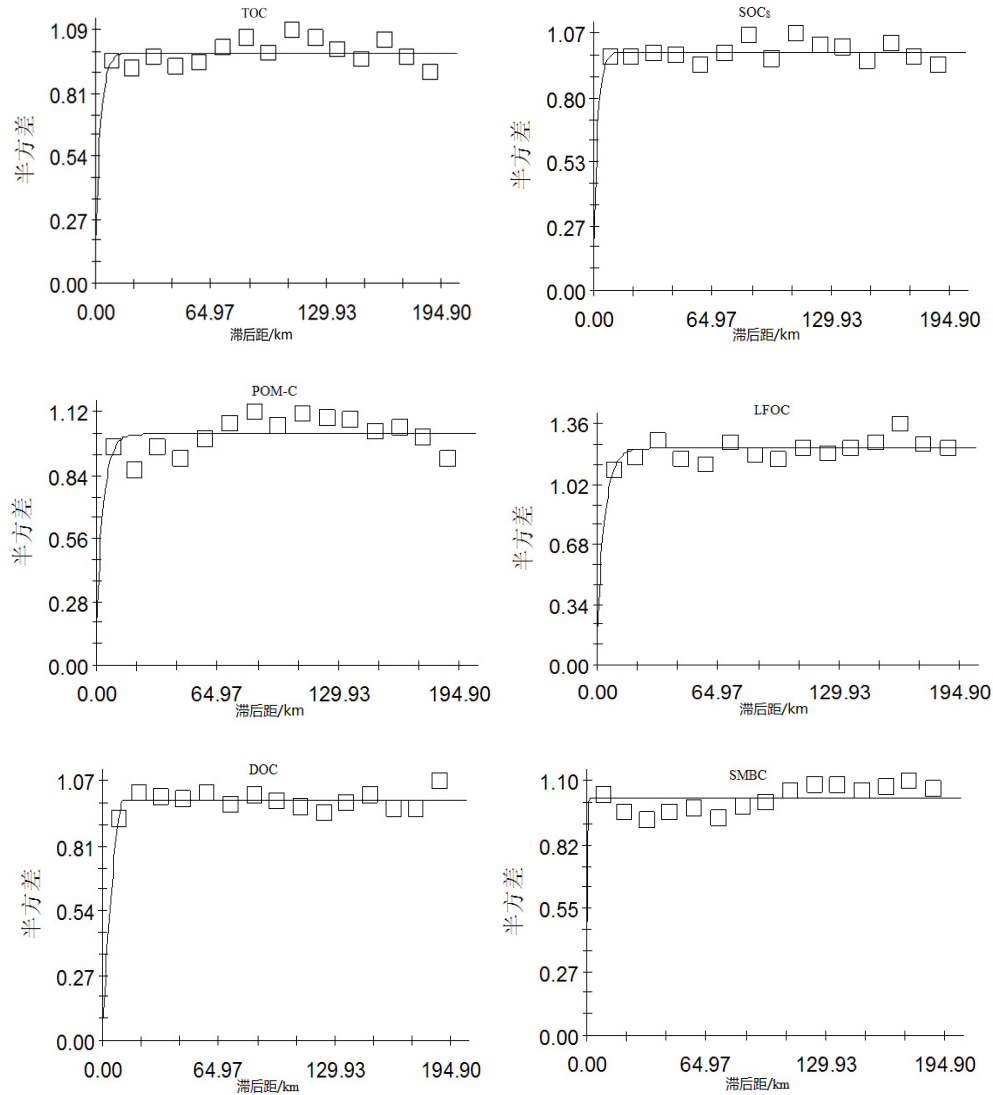


图4 土壤有机碳及其组分的半方差函数

Fig.4 Semivariogram of Soil organic carbon and its fractions

质性与空间位置具有显著的相关性,含量的空间分布受着空间因素的强烈作用。结构系数与基台值的比值 $C/(C_0+C)$ 为0.844,表明其空间异质性主要是受结构因素影响。DOC的块金值与基台值的比值14.95%,小于25%,其空间异质性与空间位置具有显著的相关性,含量的空间分布受着空间因素的强烈作用。结构系数与基台值的比值 $C/(C_0+C)$ 为0.850,表明其空间异质性主要是受结构因素影响。

SMBC的块金值与基台值的比值100.0%,大于75%,空间异质性与空间位置具有的相关性较差,含量的空间分布受着空间因素的作用较小;结构系数与基台值的比值 $C/(C_0+C)$ 为0,表明其空间异质性只受随机因素的影响,不受结构因素影响,因此不适宜采用空间插值的方法进行空间预测。TOC、SOC<sub>s</sub>和POM-C的变程较大,而LFOC、DOC和SMBC变程较小,SMBC的变程只有0.60 km。

表3 土壤有机碳及其组分的半方差函数的模型类型及参数

Table 3 Semivariogram theoretical models and parameters for Soil organic carbon and its fractions

有机碳组分	样本数	模型	$C_0$	$C_0+C$	$C/C_0+C$	a/km	$r^2$	RSS
w(TOC)/(g·kg <sup>-1</sup> )	270	Exponential	0.581	1.163	0.500	105.9	0.660	0.0915
SOC <sub>s</sub> /(t·hm <sup>-2</sup> )	270	Exponential	0.576	1.153	0.500	80.4	0.580	0.0913
w(POM-C)/(g·kg <sup>-1</sup> )	270	Exponential	0.601	1.203	0.500	114.9	0.641	0.0124
w(LFOC)/(g·kg <sup>-1</sup> )	270	Exponential	0.207	1.331	0.844	14.1	0.766	0.011
w(DOC)/(mg·kg <sup>-1</sup> )	270	Exponential	0.157	1.05	0.850	12.6	0.456	0.027
w(SMBC)/(mg·kg <sup>-1</sup> )	270	Exponential	1.011	1.011	0.000	0.60	0.106	0.0219

## 2.4 土壤有机碳及其组分的空间格局

利用Kriging方法制作的等值线更深刻、全面和直观地揭示了三江平原地区土壤有机碳及其组分的空间分布格局(图5)。TOC的空间整体分布特征为由西南向东北方向增加, TOC含量最高的区域出现在饶河县和宝清县交界处和抚远、同江、饶河交界处, 佳木斯市及其周边地区以及绥滨县的大部分地区  $w$ (土壤有机碳)含量最低, 等值线范围在  $13.74\sim 22.79\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。SOC<sub>S</sub>的空间分布格局与TOC的空间分布格局相似, 由西南向东北方向成条带状分布。宝清与饶河交界处以及抚远县大部、萝北县三个区域SOC<sub>S</sub>最高, 而有机碳储量最低的区域出现在绥滨县和佳木斯及其周边地区等值范围在  $31.47\sim 44.89\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间。等值线范围在  $44.89\sim 49.98\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的面积达到总面积的26.27%, 通过测算我们初步计算出研究区域表层土壤有机碳储量大约为

$0.514\text{ Pg C}$  ( $P=10^{15}$ )。POM-C的空间分布格局与TOC、SOC<sub>S</sub>的空间分布格局相似, 最大等值线范围出现在抚远县以及宝清和饶河交界处的两个区域, 以富锦东部、绥滨县大部和佳木斯市周边的汤原、桦南  $w$ (土壤颗粒有机碳)含量最低, 等值线范围在  $0.167\sim 0.342\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。LFOC整体的空间分布格局为中间低四周高, 最高值出现在抚远县东部, 萝北县东北部以及宝清和饶河交界处, 质量分数等值线范围在  $0.380\sim 1.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间; 集贤县、友谊县、宝清县西南、绥滨县南部质量分数最低等值线范围在  $0.075\sim 0.137\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。DOC整体的空间分布格局中间低四周高的特征更加明显, 最低点出现在三江平原中心部位的富锦市质量分数等值线范围在  $255\sim 322\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 质量分数最大区域出现在宝清和饶河交界处以及宝清、富锦和同江交界处, 其等值线范围在  $422\sim 507\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。

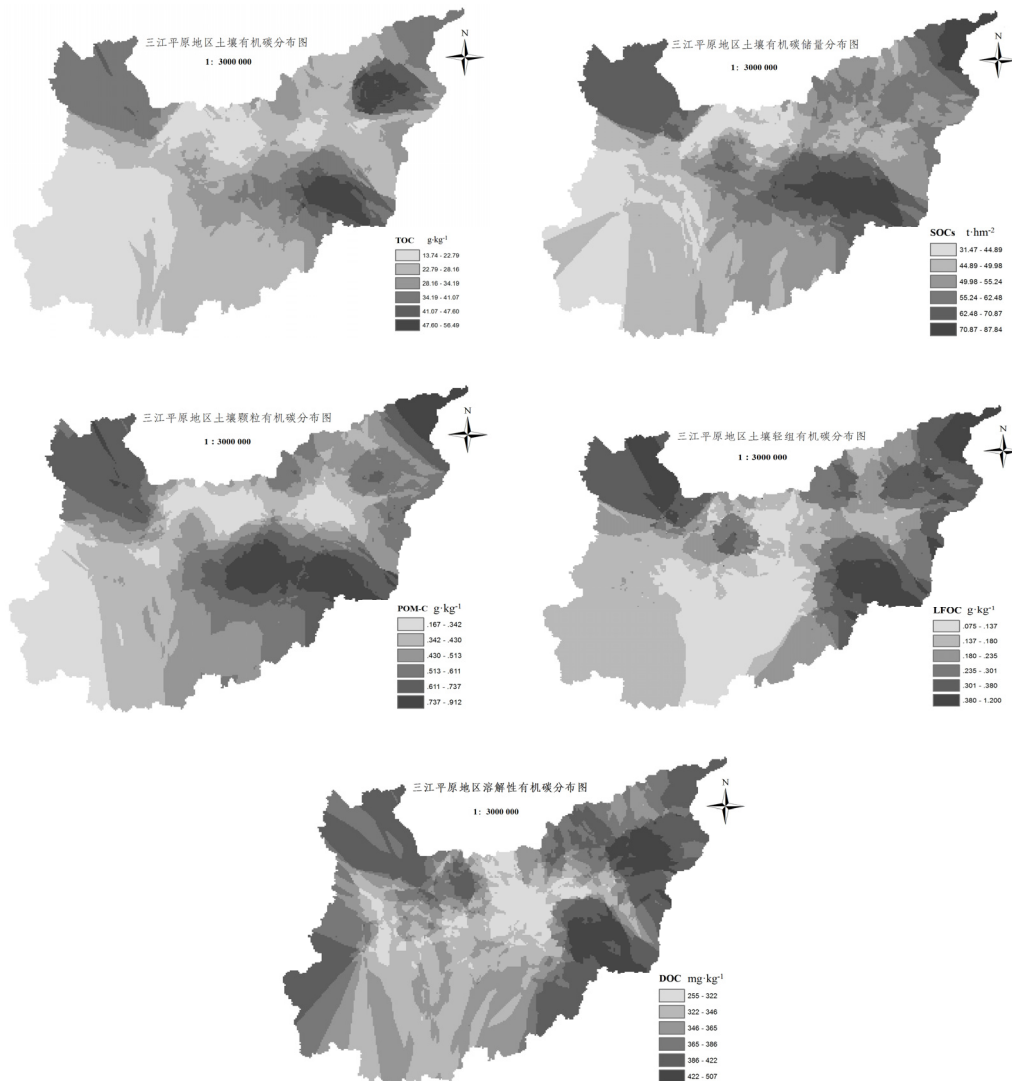


图5 土壤有机碳及其组分的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of Soil organic carbon and its fractions

### 3 结论与讨论

#### 3.1 讨论

三江平原微地形发达,土壤类型分布复杂,农业开垦时间长短不一,加之农业利用方式的多样性使得三江平原地区土壤有机碳及其组分的变异系数偏大。土壤有机碳及其组分的空间异质性与空间位置具有较强的相关性,性状的空间分布受着空间因素的影响明显,但是三江平原地区土壤地带性不明显,成土过程中非地带性因素起主导作用如水分条件同时受到结构性因素如气候和地形等结构性因素影响。该地区随机因素明显还表现在,三江平原地区土壤正处于不同的开垦时期,加之传统耕作方式向现代农业的转变使得不同地区土壤有机碳变化处于迅速下降、相对平衡和缓慢上升的过程状态。使得 TOC、SOC<sub>S</sub>、POM-C、LFOC 和 DOC 的空间异质性不仅受结构因素的影响还受到非结构性因素即耕作等的随机性因素影响。SMBC 的块金值与基台值的比值 100.0%,空间异质性与空间位置具有的相关性较差,含量的空间分布受着空间因素的作用较小,其空间异质性只受随机因素的影响,不受结构因素影响,而且分析结果表明 SMBC 的变程只有 0.60 km,因此无法运用地统计学的空间差值方法进行 SMBC 的空间分布规律描述。

TOC、SOC<sub>S</sub>、POM-C 空间分布格局相似,由西南向东北方向增加,高值区域出现在抚远县以及饶河县和宝清县交界处;LFOC 和 DOC 整体的空间分布格局为中间低四周高。由此可见虽然土壤有机碳及其组分具有显著的相关关系,但却呈现出不同的空间分布规律,出现这种状况的原因可能与土壤自身属性有关。土壤是覆盖在地球表面上具有一定肥力并能生长植物的疏松层,是受母质、气候、生物、地形、时间和人为因素共同作用形成的非均质和变化的时空连续体,具有高度的空间变异性。已有研究表明,成土母质、地形、人类活动等对土壤有机碳的空间变异均有较大影响,即使在土壤类型和质地相同的区域内,同一时刻土壤特性在空间上也有明显差异,这种属性称为土壤特性的空间变异性<sup>[18]</sup>。同时,三江平原地区由于水系的广泛分布造成该区域微地形非常发达,生物和人类活动的影响使得土壤有机碳及其组分的空间变异加强。三江平原是近 50 年来湿地开垦面积最大的地区,也是我国农业扰动最大的区域之一,大量的湿地开垦为农田,分散经营、生产管理方式差异,农业生产中的耕种制度、肥料投入、翻耕灌溉及其他的一系列生产管理措施都是引起土壤有机碳及其组分变化的重要原因<sup>[19]</sup>。本研究只是应用 GIS 和地统计方法对较大空间尺度范围进行土壤有机碳及其组分的空

间结构分析的一次尝试,已有研究表明不同的采样尺度可能得到不同的结果,因此本研究只能揭示土壤有机碳及其组分的空间分布格局,而难以反映较小尺度上的变异性。

#### 3.2 结论

1) 三江平原地区土壤有机碳及其组分质量分数的变异系数偏大,在 32.18%~113.55%之间,土壤有机碳及其组分质量分数的值域分布范围均较广。

2) 三江平原地区土壤 TOC、SOC<sub>S</sub>、POM-C、LFOC 和 DOC 均具有较强的空间自相关性,空间自相关范围较广;LFOC、DOC 的  $C_0/C_0+C$  在 <25%,其空间变异主要由土壤母质、地形、气候等自然因素(结构性变异)引起,TOC、SOC<sub>S</sub>、POM-C 的  $C_0/C_0+C$  在 25%~75%之间,非结构性因素对 TOC、SOC<sub>S</sub>、POM-C 的影响较大。

3) 采用克里格插值法得到三江平原地区表层土壤有机碳及其组分的空间分布图,发现 TOC、SOC<sub>S</sub>、POM-C 空间分布格局相似,由西南向东北方向增加,高值区域出现在抚远县以及饶河县和宝清县交界处;LFOC 和 DOC 整体的空间分布格局则表现为中间低四周高。

#### 参考文献:

- [1] 沈宏,曹志洪,胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32-38.
- [2] ANDERSON T H, DOMSCH K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils[J]. Soil Biochem, 1989, 21: 471-483.
- [3] 倪进治,徐建民,谢正苗. 土壤生物活性有机碳库及其表征指标的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1): 56-63.
- [4] BIEDERBECK V O, JANZEN H H, CAMPBELL C A, et al. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26: 1647-1656.
- [5] 陈宜瑜. 中国湿地研究[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995: 108-117.
- [6] LIU Z G, MA X H. Effect of Reclamation on Soil Environment in Sanjiang Plain[J]. Pedosphere, 1997, 7(1): 73-78.
- [7] 王书伟,颜晓元,林静慧,等. 不同土地利用方式下三江平原东北部土壤有机碳和全氮分布规律[J]. 土壤, 2010, 42(2): 190-199.
- [8] 刘子刚,张坤民. 黑龙江省三江平原湿地土壤碳储量变化[J]. 清华大学学报, 2005, 45(6): 788-791.
- [9] 张金波,宋长春,杨文燕. 三江平原不同土地利用方式下碳、氮的动态变化[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 52(5): 548-550, 556.
- [10] 刘吉平,吕宪国,杨清,等. 三江平原环型湿地土壤养分的空间分布规律[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 247-255.
- [11] 王丽丽,宋长春,葛瑞娟,等. 三江平原湿地不同土地利用方式下土壤有机碳储量研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(6): 656-660.
- [12] 刘付程,史学正,于东升,等. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间分布特征[J]. 地理研究, 2004, 23(1): 63-70.
- [13] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 43-195.
- [14] CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, PARKIN T B, et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils[J]. Soil

- Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [15] TRANGMAR B B, YOST R S, UEHARA G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties[J]. *Advances in Agronomy*, 1986, 38: 45-94.
- [16] 张伟,张宏. 青藏高原东缘红原地区三种不同草甸土壤活性碳特征[J]. *山地学报*, 2008, 26(2):205-211.
- [17] SAUER T J, MEEK D W. Spatial variation of plant-available phosphorus in pastures with contrasting management[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 67: 826-836.
- [18] 程先富, 史学正. 江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局[J]. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(1):64-67.
- [19] CATTLE S R, KOPPII A J, MCBRATNEY A B. The effect of cultivation on the Properties of a Rhodoxeralf from the wheat/sheep belt of New south wales[J]. *Geoderma*, 1994, 63: 215-225.

## Spatial distribution patterns of soil organic carbon and its fractions in Sanjiang Plain

CAO Hongjie<sup>1,2</sup>, WANG Limin<sup>2</sup>, LUO Chunyu<sup>2</sup>, LIU Yingnan<sup>2</sup>, NI Hongwei<sup>2\*</sup>

1. Harbin Normal University, Harbin 150025, China;

2. Institute of Natural Resources and Ecology, Science Academy Heilongjiang Province, Harbin 150040, China

**Abstract:** Geostatistics and traditional statistics were used for analysis the spatial variability of soil organic carbon (SOC), storage of soil organic carbon (SOCs), light fraction of soil organic carbon (LFOC), carbon of particulate organic matter (POM-C), dissolved organic carbon (DOC), soil microbial biomass carbon (SMBC) on Sanjiang Plain. The total area was  $9.48 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, and it was divided into 16×16 km grid, giving 270 sampling points. The results indicated that average concentrations of TOC、POM-C、LFOC、DOC and SMBC were 28.174 8 g·kg<sup>-1</sup>, 4.944 6 g·kg<sup>-1</sup>, 2.476 4 g·kg<sup>-1</sup>, 367.92 mg·kg<sup>-1</sup> and 372.03 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. The soil organic carbon and its fractions showed higher spatial heterogeneity and the coefficients of variation for all the variables ranged from 32.18%-113.55%. The semi-variogram for soil organic carbon and other variables were best fitted by exponential model, and RSS values were small, indicating the good fit of the model. The spatial distribution of SOC, SOC<sub>s</sub>, POM-C and LFOC were influenced by spatial factors strongly, while the spatial heterogeneity of SMBC was influenced by random factors. The spatial patterns in SOC, SOC<sub>s</sub> and POM-C showed a big range (80.4-114.9 km), while the range of SMBC was only 0.6 km. The soil organic carbon and its fractions showed strong spatial variability. In the research areas, the spatial distribution patterns were similar for TOC, SOC<sub>s</sub>, and POM-C. They were distributed in a band, of which high contents were in the northeast. The area of high contents located in Fuyuan County and the conjunction of Raohe and Baoqing County. Low contents were in the southwest part. The spatial distribution patterns of LFOC and DOC were that contents were higher in the middle areas and lower in the surrounding areas.

**Key words:** soil organic carbon; fraction; spatial distribution; Sanjiang Plain