

# 基于 GIS 技术的土地利用变化对表层 土壤有机碳储量的影响

——以富锦市为例

苗正红<sup>1</sup>, 杨清臣<sup>1</sup>, 邱中军<sup>1</sup>, 毕强<sup>1</sup>, 王宗明<sup>2</sup>

(1. 吉林省水利水电勘测设计研究院, 长春 130012; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 长春 130021)

**摘要:**采用地统计学和 GIS 相结合的方法, 利用 1980 年和 2010 年富锦市土壤有机碳数据, 研究土地利用变化对表层(0—30 cm)土壤有机碳储量和空间分布的影响。研究结果表明:富锦市土壤有机碳库(0—30 cm)在 1980—2010 年期间呈现降低趋势, 1980 年富锦市土壤有机碳库为 107.12 Tg C, 2010 年富锦市土壤有机碳库为 94.39 Tg C, 三十年间减少了 13.49%。研究区土地利用变化主要表现为分布在中部和西南部的沼泽湿地、旱地和草地减少。而分布在北部地区水田、林地和水体的面积均有所增加。两期不同土地覆被类型土壤有机碳密度大小顺序为沼泽湿地>林地>草地>水田>旱地。沼泽湿地开垦和旱地改水田是影响富锦市土壤有机碳储量时空变化的主要因素。

**关键词:**GIS; 土壤有机碳; 地统计学; 土地利用

**中图分类号:**S153.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2015)06-0019-05

## Impact of Land Use Change on Soil Organic Carbon Stocks Based on GIS —A Case Study in Fujin City

MIAO Zhenghong<sup>1</sup>, YANG Qingchen<sup>1</sup>, QIU Zhongjun<sup>1</sup>, BI Qiang<sup>1</sup>, WANG Zongming<sup>2</sup>

(1. Jilin Province Water Resources and Hydropower Consultative Company, Changchun 130012, China;

2. Institute of Northeast Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

**Abstract:** We took soil organic carbon data of 1980 and 2010 in Fujin to analyze the effect of land use change on the surface (0—30 cm) and spatial distribution of soil organic carbon storages by using the method of combination of Geostatistics and GIS. The results showed that soil organic carbon pool (0—30 cm) in Fujin showed the decreasing trend from 1980 to 2010. The soil organic carbon pool was 107.12 Tg C in 1980, it was 94.39 Tg C in 2010. And it reduced by 13.49%. The distribution of land use change in the study area mainly was that wetlands, dry land and meadow reduced in central and southwestern regions. The paddy fields, woodland and water bodies in the north had increased. Soil organic carbon densities of different land cover types in two periods decreased in the order: wetlands>forest>grassland>paddy field>dry land. Marsh reclamation and paddy field change are the major factors on the spatial and temporal changes in soil organic carbon storage of Fujin.

**Keywords:** GIS; soil organic; geostatistics; land use

土地利用变化是影响陆地生态系统碳循环的最大因素之一, 是引起土壤碳源/汇变化的重要原因<sup>[1]</sup>。土地利用对陆地生态系统碳储量动态变化的影响主要取决于生态系统类型和土地利用方式的变化, 包括森林转换为草地或者农田、草地转换为农田以及耕地还林(草)等<sup>[2]</sup>。国内外学者通过采样分析数据研究了土地利用方式及其变化对土壤有机碳密度的影响<sup>[3-5]</sup>。

Wang 等认为不同土地利用方式下的土壤有机碳密度也不同, 各个类型中, 湿地土壤有机碳密度最高, 沙漠土壤有机碳密度最低<sup>[6]</sup>。Guo 等对 74 个关于土地利用变化对土壤有机碳库的影响的文献结果进行了 meta-analysis 分析, 结果表明, 从草地变为人工林、从森林变为人工林和农田后土壤有机碳库分别下降 10%, 13% 和 42%<sup>[7]</sup>。

三江平原是我国重要湿地保护地区,湿地面积约占全国的 2%<sup>[8]</sup>,富锦市又是三江平原的重要腹地,1980 年以来,三江平原土地利用发生巨大变化,特别是富锦市耕地面积逐步增加,该区垦殖率由 1954 年的 16.4% 增加至 2009 年的 82.9%,尤其是水田有所增加,土地利用变化剧烈<sup>[9]</sup>,土壤有机碳空间分布必然发生变化,土地利用变化对土壤有机碳影响到到底有多少还不确定。所以研究富锦市土地利用变化对土壤有机碳空间分布影响具有重要的意义。

本文以富锦市表层土壤有机碳储量为研究对象,基于 1980 年和 2010 年大量第一手的土壤剖面采样数据,利用 GIS 和地统计学方法,估算两期富锦市表层土壤有机碳总储量,分析土地利用变化对表层土壤有机碳空间分布影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

富锦市位于我国三江平原的重要地区,松花江下游,地处东经 131°25′—133°26′,北纬 46°51′—47°31′。该地区主要是由河流冲积而形成的平原,地势平坦。土壤类型复杂多样,主要分布有白浆土、黑土、草甸土和沼泽土等。年平均温度 3.6℃ 左右,无霜期约为 148 d,农作物生长期约为 143 d,年均降水量约为 339.5 mm,属寒温带地区,温湿同季。富锦市境内有松花江等多条河流。富锦市土地面积约 82 万 hm<sup>2</sup>,其中耕地面积约 61 万 hm<sup>2</sup>。主要种植玉米、水稻和大豆。

### 1.2 数据及其预处理

在研究区选取水田、旱田、林地、草地、沼泽湿地五种类型土地覆被类型,1980 年和 2010 年土地利用/覆盖数据由 Landsat TM 遥感数据经预处理、几何纠正、图像镶嵌拼接和裁剪,并经人工目视解译得到,已进行广泛的地面调查、咨询、验证和精度评价。1980 年土壤有机碳数据来自于黑龙江省第二次土壤普查<sup>[10]</sup>,根据本研究的需要,从以上材料中获取富锦市 53 个样点,数据包括土壤剖面的地理位置、土壤类型、土地利用/覆被状况、土层厚度、表层(0—30 cm)土壤容重、土壤有机质含量等基本参数。依据 Bemmelen 换算系数(0.58)及单位转换系数(10)将有机质含量换算为有机碳含量。我们于 2010 年在富锦调查了 51 处样地。2010 年采样选择是以 1980 年采样的时间、主要类型和分布情况为依据,进行采样布点。1980 年和 2010 年调查点基本覆盖了研究区主要的土壤类型和覆被类型,空间分布合理,基本能够代表富锦的植被特征、土壤特征及土壤有机碳储量等信息。

在每个采样点周围取三个点,混合土样,四分法取样,其中湿地采样方法是在每个采样点选择 3 块 4 m×4 m 的样地,采样前先去地表未腐解的凋落

物,采用多点混合采样法采集 0—30 cm 深度的土壤样品,装入无菌袋中,采集的土样迅速带回实验室,剔除可见的动、植物残体和石块,用四分法取出适量土壤样品用于测定土壤有机碳。本研究采用重铬酸钾外加热氧化法测定土壤有机碳含量<sup>[11]</sup>。

### 1.3 统计学与地统计学方法

本文选用均值、最大值、最小值、标准差、变异系数、偏度系数和峰度系数来进行土壤性质的描述行统计分析,其中偏度系数和峰度系数是用来确定数据是否服从正态分布<sup>[12]</sup>。应用地统计学的前提是数据应符合正态分布,正态分布性直接影响到插值结果的精度。对数据进行正态性检验时,如果原始数据不符合正态分布应将其进行对数转换,使转换后的数据符合或基本符合正态分布,数据正态分布的检验采用偏度峰度联合检验法<sup>[13]</sup>,通过计算得出,当偏度系数为 0,峰度系数的绝对值小于 3 时,土壤性质数据服从正态分布,并且这两个数值越接近于 0,数据的正态分布性越好,此时利用克里格插值的精度越高。Microsoft Excel 和 SPSS 用来计算统计参数,利用面积权重法来计算不同土地覆被的土壤有机碳密度和储量。

半变异函数是描述土壤特性空间变异结构的一个函数,我们通过决定系数  $R^2$  来决定,并综合考虑 RSS(残差)、块金值和有效距离确定来最优的半变异函数理论模型。计算公式如下:

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

式中: $r(h)$ ——样本距为  $h$  的半方差; $h$ ——样本距(变程 lag); $N(h)$ ——间距为  $h$  的样本对的总个数; $z(x_i)$ ——样本  $z$  在位置  $x_i$  的实测值; $z(x_i+h)$ ——与  $x_i$  距离为  $h$  处样本的值。

Kriging 方法是根据半方差函数分析提供的空间自相关程度的信息进行插值,将未测定处  $x_0$  的估计值  $Z'(x_0)$  假设为已知观测值的线性和,见公式(2)<sup>[14]</sup>:

$$Z'(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中: $\lambda_i$ ——与测点有关的加权系数。基于半方差函数,Kriging 插值可根据无偏估计和方差最小两项要求来确定。

本文利用 GS+ 和 VARIOWIN 软件来计算半变异函数及确定最优模型<sup>[15]</sup>,模型的最佳指数值(IGF)在 0.000 5~0.005 9,表示该模型模拟效果最佳。ArcGIS 10.1 进行空间插值和制图。

### 1.4 土壤有机碳储量计算方法

国际上关于表层土壤碳储量的估算一般采用 0—30 cm 深度来进行<sup>[16]</sup>,所以本文参考此深度计算表层土壤有机碳储量,参考杨元合<sup>[17]</sup>所提出的方法进行土壤表层有机碳密度的估算,公式如下:

$SOCD_h = BD_h \times SOC_h \times (1 - C_h)$  (3)

式中:  $h$ ——土壤深度 (cm),  $SOCD_h$ ,  $BD_h$ ,  $SOC_h$  和  $C_h$ —— $h$  深度处的有机碳密度 ( $g/cm^2$ ), 土壤容重 ( $g/cm^3$ ), 土壤有机碳含量 ( $g/kg$ ), 大于 2mm 的砾石含量 (%), 由于富锦为平原区, 表层土壤  $>2\text{ mm}$  粒径的颗粒可以忽略不计。

2 结果与分析

2.1 富锦市土壤有机碳密度描述性特征

根据偏度峰度联合检验法和表 1 中对偏度系数

和峰度系数的计算, 可以看出, 1980 年表层土壤有机碳密度和对数转换后均符合正态分布, 而 2010 年表层土壤有机碳密度 ( $SOCD$ ) 不符合正态分布, 但是对数转换后符合正态分布, 所以 1980 年和 2010 年数据均可以进行空间插值。

1980 年富锦市表层土壤有机碳密度平均值为  $12.62\text{ kg/m}^2$ , 而 2010 年其平均值有所下降, 1980 年表层土壤有机碳最大值为  $30.21\text{ kg/m}^2$ , 高于 2010 年的  $18.94\text{ kg/m}^2$ , 2010 年表层土壤有机碳密度最小, 值为  $6.36\text{ kg/m}^2$ 。

表 1 1980 年和 2010 年富锦市表层 (0—30 cm) 土壤有机碳密度 kg/m<sup>2</sup>

年份	参数	样点数	最小值	最大值	平均值	标准差	偏态值	峰态值
1980	土壤有机碳密度	53	3.19	30.21	12.62	6.30	1.56	1.86
	土壤有机碳密度对数		0.23	0.51	0.56	0.07	-0.29	1.03
2010	土壤有机碳密度	51	6.36	18.96	11.21	5.74	2.64	8.07
	土壤有机碳密度对数		0.20	0.63	0.45	0.06	0.14	1.09

2.2 半变异函数确定

从表 2 中可以看出, 1980 年和 2010 年表层土壤有机碳密度的半变异函数是球面模型和指数模型, IGF 值分别为 0.004 25, 0.003 82, 表示属于最佳拟合。

1980 年和 2010 年的块金效应为 41.92% 和 34.1% (25%~75%), 表示其具有中等的空间相关性, 主要是由于土壤母质、地形、土壤类型等内在原因以及人为干扰 (利用方式、耕作措施等) 的外在原因引起的变异。空间相关性有所削弱。

表 2 表层土壤有机碳密度半变异函数确定

年份	模型	变程/km	块金值	基台值	块金效应/%	最佳匹配指数
1980	球面模型	178	4.16	7.26	41.92	4.25E-03
2010	指数模型	54.2	2.80	3.98	34.10	3.82E-03

2.3 1980 年、2010 年富锦市土地利用时空变化特征

表 3 为富锦市 1980—2010 年土地利用面积变化统计表。从中可以看出, 富锦市 1980 年不同土地利用类型中旱地面积最大, 为  $4\,657.30\text{ km}^2$ , 主要分布该地区的西部和北部, 其次为沼泽湿地, 面积  $2\,924.38\text{ km}^2$ , 主要分布在东南部地区, 2010 年不同土地利用类型中, 虽然旱地面积仍为最大, 但是水田面积迅速增加, 为  $2\,954.90\text{ km}^2$ , 沼泽湿地面积减少为  $613.17$

$\text{km}^2$ , 主要分布在东南边缘地区。两年中未利用地面积均为最小, 且变化较小。

30 a 来, 沼泽湿地、旱地和草地均有减少, 其中沼泽湿地变化最大, 共减少了  $2\,311.22\text{ km}^2$ , 主要减少分布在富锦市的中部和西南部。水田、林地和水体的面积均有所增加, 其中水田增加的面积最大, 为  $2\,834.22\text{ km}^2$ , 主要分布在北部地区。林地增加的面积最小, 增加面积为  $18.07\text{ km}^2$ 。

表 3 1980 年和 2010 年富锦市土地利用变化统计 km<sup>2</sup>

年代	林地	草地	沼泽湿地	耕地		未利 用地	居民工 矿用地	水体
				水田	旱田			
1980 年	324.01	189.02	2924.38	120.67	4657.30	1.00	140.89	128.12
2010 年	342.09	0.33	613.17	2954.90	4105.50	0.93	182.48	286.01
1980—2010 年变化	-18.07	188.69	2311.22	-2834.22	551.81	0.07	-41.59	-157.90

2.4 富锦市土壤有机碳时空分布特征

富锦市土壤有机碳库 (0—30 cm) 在 1980—2010 年期间呈现降低趋势, 1980 年富锦市土壤有机碳库为  $107.12\text{ Tg C}$ , 2010 年富锦市土壤有机碳库为  $94.39\text{ Tg C}$ , 三十年间减少的土壤有机碳储量为  $12.73\text{ Tg C}$ , 减少了 13.49%。其中水田的土壤有机

碳储量增加的最多, 增加量为  $33.30\text{ Tg C}$ , 其年均增加率为  $1.11\text{ Tg C/年}$ 。沼泽湿地土壤有机碳储量减少了  $38.93\text{ Tg C}$ , 其年均损失率为  $1.30\text{ Tg C/年}$  (表 4)。1980 年各个土地覆被类型土壤有机碳库从大到小顺序为旱地  $>$  沼泽湿地  $>$  林地  $>$  草地  $>$  水田。而 2010 年各个土地覆被类型土壤有机碳库从大到小顺

序为旱地>水田>沼泽湿地>林地>草地。两期土壤有机碳密度最高的植被类型为沼泽湿地,旱地的土壤有机碳密度最小,1980 年和 2010 年分别为 10.89

kg C/m<sup>2</sup>,9.04 kg C/m<sup>2</sup>,30 a 来,不同植被类型土壤有机碳密度均有所下降,沼泽湿地变化最大,减少了 3.06 kg C/m<sup>2</sup>。林地变化最小。

表 4 不同土地覆盖类型土壤有机碳平均密度和储量统计

参数	年代	水田	旱地	林地	草地	沼泽湿地
土壤有机碳密度 /(kg C·m <sup>-2</sup> )	1980 年	11.64	10.89	12.40	11.94	15.92
	2010 年	10.50	9.04	11.42	10.81	12.86
土壤有机碳/(Tg C)	1980 年	1.06	50.51	3.98	1.97	46.89
	2010 年	34.36	42.95	3.67	0.01	7.95

图 1 为 1980,2010 年富锦土壤有机碳密度(0—30 cm)的空间分布图。从图中可以看出,两期土壤有机碳密度表现出较大的空间变异,具体表现为 1980 年富锦市的中部和东北部土壤有机碳密度较高,表层土壤有机碳多数大于 16 kg/m<sup>2</sup>,而中西部和东部地

区较低,多少低于 6 kg/m<sup>2</sup>。2010 年表层土壤有机碳密度分布特征是研究区的东南地区和西北地区土壤有机碳密度的值较高,多数值在 12 kg/m<sup>2</sup> 以上。从两期对比来看,富锦表层土壤有机碳密度 30 a 来变化比较明显,整体呈现减少趋势。

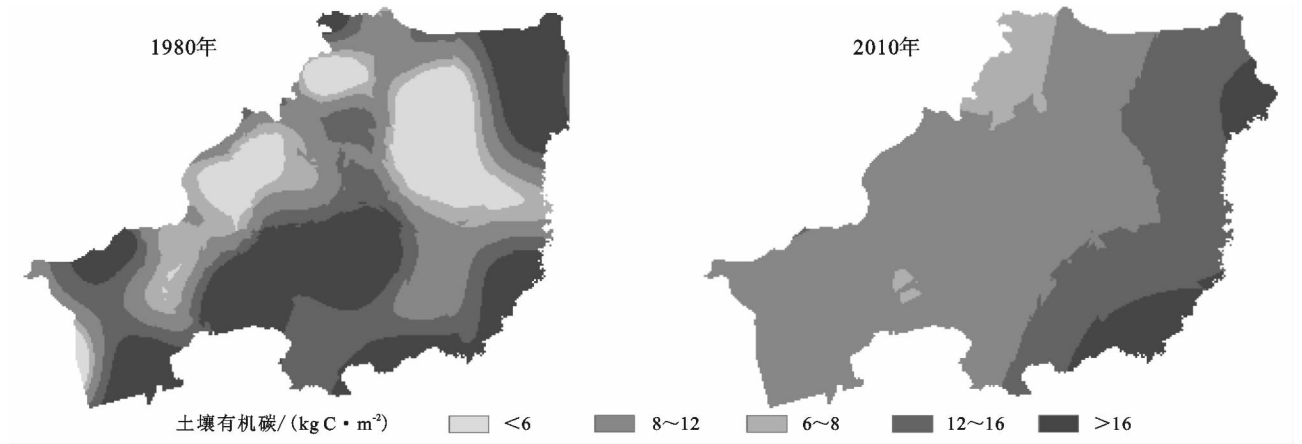


图 1 富锦市 1980 年和 2010 年表层土壤有机碳密度空间分布

本文用 2010 年富锦表层土壤有机碳密度空间数据减去 1980 年表层土壤有机碳密度空间数据,最后得到 1980—2010 年富锦土壤有机碳密度(0—30 cm)相对变化空间分布图(图 2)。从图中可以看出,三十年来,富锦表层土壤有机碳密度东北和中南地区空间变异较大,研究区东北部呈现增加的趋势,相对变化值在 0 值以上,中南地区呈现相对减少趋势,减少值多数小于 10 kg/m<sup>2</sup>。

2.5 土地利用变化对表层土壤有机碳变化的影响

(1) 沼泽湿地开垦对土壤有机碳储量影响。30 a 来,由于沼泽湿地开垦导致富锦市表层土壤有机碳损失量为 10.57 Tg C,这说明沼泽湿地开垦对表层土壤有机碳储量影响较大,1980—2010 年富锦大部分土壤有机碳损失量来源于沼泽湿地转变为旱田,其表层损失的土壤有机碳量为 8.87 Tg C,年变化率为 173.92 t C/(km<sup>2</sup>·a),要高于转化为水田的年变化率。这说明湿地开垦后,水田的土壤有机碳要明显高于旱地(表 5)。

表 5 沼泽湿地转化农田对土壤有机碳储量的影响

土地覆盖类型	沼泽湿地 >农田	沼泽湿地 >水田	沼泽湿地 >旱地
面积/km <sup>2</sup>	2206.5	506.5	1700.01
土壤有机碳储量 变化量/(Tg C)	10.57	1.7	8.87
年变化率/ (t C·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	159.68	111.88	173.92

(2) 水田增加对土壤有机碳储量的影响。三十年来,富锦市旱地转化水田的面积为 2 292.29 km<sup>2</sup>,

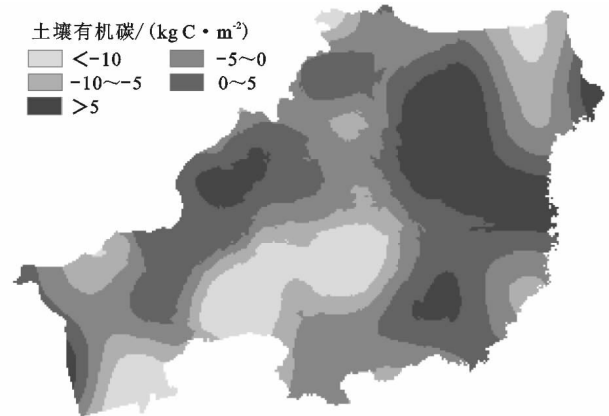


图 2 富锦市 1980—2010 年土壤有机碳密度相对空间变化

占水田面积增加的80%以上,这表明水田增加主要来源于旱地的转化。富锦市旱地转化成水田导致土壤有机碳储量增加为10.20 Tg C,占水田土壤有机碳储量增加的1/3,其年变化率为148.32 t C/(km<sup>2</sup>·a),这说明水田储量增加除受土地利用变化影响外,还可能与农业施肥、气候变化和政府政策等有关。

### 3 结论

本文采样地统计学和GIS方法,利用1980年和2010年土壤有机碳数据,分析两期富锦表层土壤有机碳储量时空分布特征,并分析土地利用变化对其影响。具体结论如下:

(1) 富锦市30 a来土地利用变化较为剧烈,主要表现为沼泽湿地减少,共减少了2 311.22 km<sup>2</sup>,主要分布在富锦市的中部和西南部。水田、林地和水体的面积均有所增加。

(2) 富锦市土壤有机碳库(0—30 cm)在1980—2010年期间呈现降低趋势,30 a间减少的土壤有机碳储量为12.73 Tg C。两期土壤有机碳密度中最高的植被类型为沼泽湿地,旱地的土壤有机碳密度最小。不同植被类型土壤有机碳密度均有所下降,沼泽湿地变化最大。

(3) 从空间上看,1980—2010年富锦土壤有机碳空间变化呈现减少趋势。富锦表层土壤有机碳密度东北和中南地区空间变异较大,研究区东北部呈现增加的趋势,相对变化值在0值以上,中南地区呈现减少趋势。

(4) 沼泽湿地开垦和旱地改水田这两种土地利用变化是影响富锦市土壤有机碳储量变化的主要原因,其中沼泽湿地开垦导致富锦市表层土壤有机碳损失量为10.57 Tg C。

#### 参考文献:

- [1] Watson R T, Noble I R, Bolin B, et al. Land use, land-use change and forestry: a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [2] 周广胜,王玉辉,蒋延玲,等. 陆地生态系统类型转变与碳循环[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 250-254.
- [3] Jiang Y, Zhang Y G, Liang W J, et al. Profile distribu-

tion and storage of soil organic carbon in an aquic brown soil as affected by land use[J]. Agricultural Sciences in China, 2005, 4(3): 199-206.

- [4] 汪明霞,朱志锋,刘凡等. 江汉平原不同土地利用方式下农田土壤有机碳组成特点[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 24-28.
- [5] 史利江,郑丽波,梅雪英. 上海市不同土地利用方式下的土壤碳氮特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2279-2287.
- [6] Wang S, Tian H, Liu J, et al. Pattern and change of soil organic carbon storage in China: 1960s—1980s[J]. Tellus B, 2003, 55(2): 416-427.
- [7] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. Global Change Biology, 2002, 8(4): 345-360.
- [8] Wang Z, Song K, Ma W, et al. Loss and fragmentation of marshes in the Sanjiang Plain, Northeast China, 1954—2005[J]. Wetlands, 2011, 31(5): 945-954.
- [9] 杜国明,潘涛,尹哲睿,等. 水田化进程中的富锦市耕地景观格局演化规律[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 207-214.
- [10] 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴 1986—2010[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [11] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter[J]. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, 1982 (methodsofsoil2), 539-579.
- [12] Liu D, Wang Z, Zhang B, et al. Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in croplands of the black soil region, Northeast China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 113(1): 73-81.
- [13] 腊贵晓,顾怀胜,刘国顺,等. 喀斯特地区烟田土壤养分的空间变异特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 48-54.
- [14] 政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [15] Pannatier Y. VARIOWIN: Software for spatial data analysis in 2D [M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [16] Lévesque J, King D J. Airborne digital camera image semivariance for evaluation of forest structural damage at an acid mine site[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 68(2): 112-124.
- [17] 杨元合. 青藏高原高寒草地生态系统碳氮储量[D]. 北京: 北京大学, 2008.