

基于 GIS 的三江平原表层土壤有机碳 储量估算及空间分布研究

杨安广¹, 苗正红¹, 邱发富¹, 杨清臣¹, 王宗明², 毛德华²

(1. 吉林省水利水电勘测设计研究院, 吉林 长春 130012;

2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130021)

摘要: [目的] 研究三江平原 2010 年表层(0—30 cm)土壤有机碳储量空间分布规律和不同土地利用类型对有机碳空间分布的影响。[方法] 采用地统计学和 GIS 相结合的方法。[结果] (1) 2010 年三江平原表层土壤有机碳总储量为 1161.28 Tg; (2) 表层土壤有机碳空间分布变异性较大, 中部和西南地区较低, 东北、西北、东南地区较高; (3) 不同土地利用类型土壤有机碳密度和储量有所不同, 旱地表层土壤有机碳储量最大, 为 412.10 Tg, 草地最小, 表层土壤有机碳储量为 2.31 Tg; (4) 不同植被类型表层土壤有机碳密度大小顺序为: 沼泽湿地 > 林地 > 草地 > 水田 > 旱地, 沼泽湿地表层土壤有机碳密度为 147.84 Mg/hm²。[结论] 三江平原土壤有机碳密度空间分布存在较大的分异性, 土壤有机碳密度的空间分布特征受土地利用类型分布的影响。

关键词: GIS; 土壤有机碳密度; 地统计学; 三江平原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0155-04

中图分类号: S158.5, P75

A Study on Storage and Distribution of Soil Organic Carbon in Sanjiang Plain Based on GIS

YANG Anguang¹, MIAO Zhenghong¹, QIU Fafu¹, YANG Qingchen¹, WANG Zongming², MAO Dehua²

(1. Jilin Provincial Water Resource and Hydropower Consultative Company, Changchun, Jilin 130012, China;

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

Abstract: [Objective] This paper aimed to illustrate the distribution of soil organic carbon(SOC) storage and its differences caused by land use types. [Methods] Using GIS and geostatistical methods. [Results] (1) In 2010, total reserves of SOC in the surface(0—30 cm) was 1 161.28 Tg; (2) SOC distributed spatially heterogeneously, in the central and southwest of Sanjiang Plain, SOC was lower than that in the northwest, northeast and southeast; (3) The storage and density of SOC of different land use types were quite different. For example, farmlands had the highest surface storage of SOC with a value of 412.10 Tg, but grasslands contained the lowest SOC, that was only 2.31 Tg; (4) Surface SOC density of different vegetation types ranked as: marsh > woodland > grassland > paddy > farmland. Among them, the surface SOC density of marsh was 147.84 Mg/hm². [Conclusion] There are large difference of spatial distribution of SOC in Sanjiang Plain, and the distribution of surface SOC was affected by land use types.

Keywords: GIS; soil organic carbon density; geostatistic; Sanjiang Plain

工业革命以后,大气中的 CO₂ 等温室气体浓度不断增加,导致全球气候变暖^[1]。而增加陆地生态系统中的碳储量被认为是一种非常有效的 CO₂ 等气体减排措施,土壤是地球陆地生态系统中最大的碳库场所,全球约有 1 500 Pg 碳是以有机质形态储存于土壤中。而表层土壤有机碳储量占整个深度(1 m)有

机碳总储量的比重较大^[2]。所以研究土壤表层土壤有机碳储量对于全球气候变化具有重要意义。

三江平原位于中国黑龙江省东北部,是我国最大的淡水沼泽湿地分布区,也是近 50 a 来湿地开发最严重的地区^[3],同时它也是我国国家战略储备和重要的商品粮生产基地。研究三江平原表层土壤有机碳

收稿日期:2014-09-05

修回日期:2014-10-13

资助项目:中国科学院重点部署项目“北方毗邻地区资源环境关键问题及科学数据库建设”(KZZD-EW-08-02);国家基础科学研究(973)计划项目(2009CB421103)

第一作者:杨安广(1960—),男(汉族),吉林省长春市人,本科,高级工程师,主要从事遥感与 GIS 应用研究。E-mail:miaozhengh@163.com。

储量现状及其空间分布对农业生产、湿地保护及政府宏观决策都具有重要的意义。目前国内外学者多数从土地利用方式变化方面研究三江平原土壤有机碳,而且大多数研究湿地生态系统^[4-6],但是缺少对三江平原有机碳总库的大小、时空分布及其他农田、林地、草地等生态系统土壤有机碳储量的研究。近几十年来,三江平原土地利用类型变化迅速,其中变化的比较剧烈的土地利用类型是耕地和湿地,三江平原垦殖率已由 1949 年的 7.2% 增至 1994 年的 50.0%,农田成为该区的主要景观类型,而湿地和林地面积减少^[7]。三江平原土壤表层有机碳储量现状及其总体空间分布规律等一系列问题尚未解答。本研究以三江平原土壤表层有机碳储量为研究对象,拟基于大量土壤数据,利用 GIS 和地统计学方法,估算 2010 年三江平原表层土壤有机碳总储量,并且分析其空间分布规律。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三江平原包括完达山以北的松花江、黑龙江和乌苏里江冲积形成的低平原和完达山以南的乌苏里江及其支流与兴凯湖形成的冲积湖积平原,地理纬度,最北端为北纬 48°27'56",最南端为北纬 45°01'05",西部边缘为东经 130°13'1",东部抵达东经 135°05'26"。总面积 $1.09 \times 10^5 \text{ km}^2$,平均海拔 50~60 m,地势由西南向东北缓缓倾斜。除西部和西南部边界的小兴安岭、老爷岭、张广才岭和横亘中部完达山为森林覆盖的山区外,广阔的冲积低平原和河流形成的阶地、河漫滩上广泛发育着沼泽和沼泽化草甸。该区气候类型为温带湿润、半湿润大陆性季风气候,土壤以暗棕壤、黑土、白浆土、草甸土和沼泽土为主,土地的自然肥力较高^[7]。

1.2 数据及其预处理

在三江平原选取水田、旱田、林地、草地、湿地五种类型土地覆被类型,土地利用/覆盖数据由 2010—2011 年的 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。于 2010—2011 年在三江平原调查了 367 处样地(附图 9),其中 286 个样点的采样时间为 2010 年 11 月,81 个样点的采集时间为 2011 年 3 月,在这里统一为 2010 年,从附图 9 可以看出,367 个调查点基本覆盖了研究区主要的土壤类型和覆被类型,基本能够代表三江平原的植被特征、土壤特征及土壤有机碳储量等信息。在每个采样点周围取 3 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 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 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。土壤容重采用环刀法 (100 cm^3) 采集 0—30 cm 的土壤样品,所采集的土壤样品自然风干后,以四分法取样。用于测定有机碳的土样,风干后挑去根系和 $> 2 \text{ mm}$ 的砾石,利用 FW-100 粉碎机粉碎,过 100 目筛。本研究采用重铬酸钾外加热氧化法测定土壤有机碳含量^[8]。

1.3 统计学与地统计学方法

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^[9]。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^[10],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。Excel 和 SPSS 软件用来计算统计参数,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,通过决定系数 R^2 来确定,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。计算公式为:

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

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,计算公式^[11]为:

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

式中: λ_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。

利用 GS⁺ 和 VARIOWIN 软件来计算半变异函数及确定最优模型^[12-13],模型的最佳指数值(IGF)在 0.000 5~0.005 9 之间,表示该模型模拟效果最佳。ArcGIS 9.2 和 Origin 8.0 软件进行空间插值和制图。

1.4 土壤有机碳储量计算

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^[14],所以参考此深度计算表层土壤有机碳储量,参考杨元合^[15]所提出的方法进行土壤表层有机碳密度的估算,计算公式为:

$$\text{SOCD}_h = \text{BD}_h \cdot \text{SOC}_h \cdot (1 - C_h) \quad (3)$$

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^3),土壤容重(g/cm^3),土壤有机碳含量(g/kg)和大于 2 mm 的砾石含量(%),由于三江平原多为平原区,表层土壤 > 2 mm 粒径的颗粒可以忽略不计。

由于采样及样品处理过程中旱地和水田共 12 个土壤容重数据缺失,参考宋郭韩^[16]等方法,采用已有

的旱地和水田土壤有机碳含量与对应的土壤容重数据建立关系,从而利用此方程计算出缺失的土壤容重数据。由于缺少数据较少,类型相近,而且拟合结果精度较高,该方法可行有效,具体拟合方程为:

$$\text{BD} = 1.4459 \times \exp(-0.006 \times \text{SOC})$$

$$(R^2 = 0.4436, p < 0.01) \quad (4)$$

式中:BD——缺失的土壤容重数据;SOC——对应的土壤有机碳含量。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳密度描述性统计特征

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,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,所以可以进行空间插值。2010 年三江平原表层土壤有机碳密度的平均值为 $9.96 \text{ g}/\text{cm}^3$,最大值为 $94.46 \text{ g}/\text{cm}^3$,最小值为 $1.98 \text{ g}/\text{cm}^3$ (表 1)。

表 1 三江平原表层(0—30 cm)土壤有机碳密度描述性统计(样点数为 367)

项目	最小值/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最大值/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	平均值/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	标准差	变异系数/ %	偏态值	峰态值
土壤有机碳密度	1.98	94.46	9.96	7.73	77.65	4.95	41.81
土壤有机碳密度对数	0.68	4.55	2.13	0.55	25.90	0.48	1.36

2.2 半变异函数参数确定

表 2 为表层(0—30 cm)土壤有机碳密度半方差模型参数。从表 2 可以看出,2010 年表层土壤有机碳密度的半变异函数是高斯模型,IGF 值分别为

0.004 47,表示属于最佳拟合(图 1)。

2010 年的块金效应为 15%(<25%),表示其具有强烈的空间相关性,主要是由于土壤母质、地形、土壤类型等非人为的结构性因素引起的变异。

表 2 表层(0—30 cm)土壤有机碳密度半方差模型参数

变量	年份	模型	变程/km	块金值	基台值	块金效应/%	IGF
土壤有机碳密度	2010	Gaussian	33.59	0.28	1.90	15	4.47E-03

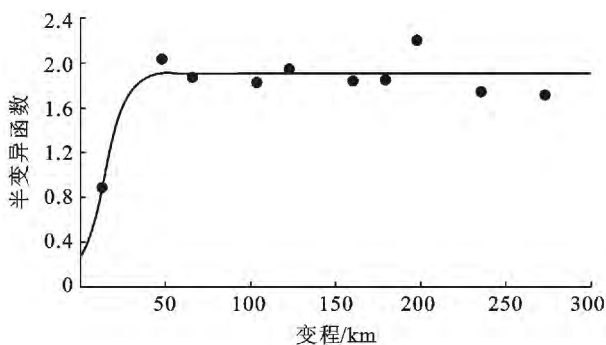


图 1 三江平原 2010 年表层土壤有机碳密度半变异函数

2.3 三江平原表层土壤有机碳密度空间分布

附图 10 为三江平原表层土壤有机碳密度的空间分布图。从附图 10 可以看出,三江平原土壤有机碳密

度表现出较大的空间变异,具体表现为中部和西南地区较低,东北、西北、东南地区较高的,这主要是因为该地区主要植被类型为林地和沼泽湿地。其中旱地和水田分布较多的中部和西南地区表层土壤有机碳密度的值多数都在 $10 \text{ kg}/\text{m}^2$ 以下,最低值在 $6 \text{ kg}/\text{m}^2$ 以下。而东北、西南和东南地区的值多数都在 $10 \text{ kg}/\text{m}^2$ 以上,甚至有些地区的土壤有机碳密度值大于 $14 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。

2.4 三江平原不同土地利用类型的表层土壤有机碳

由表 3 可知,2010 年表层三江平原土壤有机碳库为 1161.28 Tg 。不同土地利用类型的土壤有机碳储量不同,其中旱地总储量的最大,为 412.10 Tg ,其次为林地,而面积较小草地储量最小,2010 年表层土壤有机碳储量为 2.31 Tg 。从土壤有机碳密

度上来看,从大到小的顺序为:沼泽湿地>林地>草地>水田>旱地,2010年沼泽湿地的表层土壤有机碳密度为147.84 Mg/hm²,这主要是由于沼泽湿地具有较强的固碳作用,林地的表层土壤有机碳密度仅低于沼泽湿地,由于人类活动的影响,耕地的土壤有

机碳密度最低,其中水田的土壤有机碳密度高于旱地,旱地表层土壤有机碳密度达到97.17 Mg/hm²。这主要水田的固碳能力要高于旱地。三江平原旱地表层土壤碳密度最低,其总储量最大,主要原因是旱地面积较大(附图9)。

表3 三江平原2010年不同地类表层土壤有机碳储量

土地利用类型	林地	草地	水田	旱地	沼泽湿地
土壤有机碳储量/Tg	339.10	2.31	191.00	412.10	76.71
土壤有机碳密度/(Mg·hm ⁻²)	114.14	106.53	98.80	97.17	147.84

3 结论

(1) 应用地统计学理论,基于GS⁺和Variowin等软件,选取最佳匹配指数确定最优半变异模型,对2010年土壤有机碳密度进行空间预测,提高了方法的应用性。

(2) 三江平原2010年表层土壤有机碳库为1161.28 Tg,不同植被类型的土壤有机碳储量大小顺序为:旱地>林地>水田>沼泽湿地>草地,从土壤有机碳密度上来看,沼泽湿地土壤有机碳密度最高,其具有较强的固碳能力,而受人类活动影响的旱地土壤有机碳密度最低,旱地表层土壤有机碳密度达到97.17 Mg/hm²。

(3) 从空间上看,三江平原土壤有机碳空间分异性较大,东北、西北和东南地区较高,多数值在10 kg/m²以上,中部和西南地区较低,低于10 kg/m²。土壤有机碳密度的空间分布特征受土地利用分布的影响。

(4) 由于野外采集数据未对土地利用类型中非植被类型进行采样,所以本研究只分析了林地、草地、沼泽湿地、旱地和水田的土壤有机碳储量和空间特征。

[参 考 文 献]

[1] Change I P O C. Climate change 2007: The physical science basis[J]. Agenda, 2007,6(7):333.
 [2] Wang Shaolang, Huang Mei, Shao Xuemei, et al. Vertical distribution of soil organic carbon in China[J]. Environmental Management, 2004, 33(1): 200-209.
 [3] 白军红,邓伟,朱颜明,等.湿地土壤有机质和全氮含量分布特征对比研究[J].地理科学,2002,22(2):232-237.
 [4] 刘吉平,吕宪国,杨青,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.
 [5] 刘景双,杨继松,于君宝,等.三江平原沼泽湿地土壤有

机碳的垂直分布特征研究[J].水土保持学报,2003,17(3):5-8.

[6] 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(6):656-660.
 [7] 刘兴士.三江平原自然环境变化与生态保育[M].北京:科学出版社,2002.
 [8] Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21(4): 471-479.
 [9] Paz-Gonzalez A, Vieira S R, Castro M T T. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon[J]. Geoderma, 2000, 97(3): 273-292.
 [10] 陈彦.绿洲农田土壤养分时空变异及精确分区管理研究[D].新疆石河子:石河子大学,2008.
 [11] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999.
 [12] Bivand R S, Pebesma E J, Gómez-Rubio V, et al. Applied Spatial Data Analysis with R[M]. New York: Springer, 2008.
 [13] 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.
 [14] Yang Yuanhe, Fang Jingyun, Ma Wenhong, et al. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s[J]. Global Change Biology, 2010, 16(11):3036-3047.
 [15] 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.
 [16] Song Guohan, Li Lianqing, Pan Genxing, et al. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J]. Biogeochemistry, 2005, 74(1): 47-62.