

# 旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析

孙忠祥<sup>1</sup> 李勇<sup>1</sup> 赵云泽<sup>1</sup> 黄元仿<sup>1,2</sup> 郭孝理<sup>1</sup> 曹梦<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100035)

**摘要:** 为直观显示 0~40 cm 深度不同层次的土壤有机碳密度空间分布特征,并深入分析不同空间位置上有机碳密度的主要影响因素,根据 2017 年分层采样点的测试数据计算了旱作区土壤有机碳密度,采用反距离加权法模拟了有机碳密度空间三维分布特征,用地理加权回归分析了有机碳密度的影响因素。结果表明:旱作区土壤有机碳密度呈东北高、西南低的趋势;不同类型土壤的有机碳密度差别较大。气候(温度、降水)是旱作区有机碳密度的主要影响因素。随着土层深度的增加,气候和黏粒含量对土壤有机碳密度的解释度呈增大的趋势。年平均气温与土壤有机碳密度呈负相关性,在不同区域不同深度土层中,年降水量与土壤有机碳密度的回归系数都低于 0.01,相关性很小,黏粒含量与土壤有机碳密度呈正相关性。研究成果可为探究有机碳储量估算和科学制定固碳减排政策提供数据和理论支撑。

**关键词:** 旱作区; 有机碳密度; 空间分布特征; 地理加权回归

**中图分类号:** S159.2   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0255-08

## Analysis on Spatial Distribution Characteristics and Driving Forces of Soil Organic Carbon Density in Dry Farming Region

SUN Zhongxiang<sup>1</sup> LI Yong<sup>1</sup> ZHAO Yunze<sup>1</sup> HUANG Yuanfang<sup>1,2</sup> GUO Xiaoli<sup>1</sup> CAO Meng<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. Key Laboratory of Agricultural Land Quality, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

**Abstract:** It is of great importance to intuitively exhibit the spatial distribution characteristics of soil organic carbon density (SOCD) in range of 0~40 cm soil depth and analyze the main influencing factors of organic SOCD. SOCD in dry farming region was calculated based on the sampling points obtained in 2017. The spatial three-dimensional distribution characteristics of SOCD was simulated by inverse distance weighting method, and the influencing factors of SOCD was analyzed with the help of geographical weighted regression. The results showed that the SOCD in northeast was higher than that of southwest, and SOCD in different types of soil had large difference. Climate was the major influencing factor on SOCD in dry cropping areas. Moreover, climate and clay content had upward tendency to SOCD with the increase of soil depth. Annual average temperature had negative correlation with SOCD. It can be seen from the space that the regression coefficient was the highest in the northeast dry farming region of Heilongjiang Province, followed by Jilin and Liaoning Provinces in the central region of Heilongjiang Province and low in North China in all sub-regions, the regression coefficient of precipitation and SOCD was lower than 0.01, and the correlation was very small. The clay content was positively correlated with SOCD. The research results could provide effective support for estimating of organic carbon reserves and promoting carbon sequestration and emission reduction policies in the future.

**Key words:** dry farming region; organic carbon density; spatial distribution characteristics; geographical weighted regression

## 0 引言

近年来,国际社会不断寻找控制气候变化的最

佳途径,土壤固碳效应被广泛认为是能够延缓全球气候变化的有效措施之一<sup>[1-2]</sup>。在研究全球碳循环方面,土壤学常用的土壤有机碳含量单位是 g/kg,

收稿日期: 2018-11-22 修回日期: 2018-12-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300801)

作者简介: 孙忠祥(1991—),男,博士生,主要从事土壤属性空间变异研究,E-mail: sunzhongxiang@cau.edu.cn

通信作者: 黄元仿(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事计量土壤学和数字农业研究,E-mail: yfhuang@cau.edu.cn

没有包含面积的概念,土壤有机碳密度(Soil organic carbon density, SOCD)是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量,是表征土壤质量及陆地生态系统对全球气候变化贡献和衡量土壤中有机碳储量的重要指标<sup>[3]</sup>。0~40 cm 土层是土壤变动较为频繁的部分,其有机碳也最容易受到气候等环境因素的影响。我国东北和黄淮海旱地作物种植区从北到南,土壤类型复杂,土壤性质差异巨大,因此明确其 SOCD 空间分布特征和影响因素对科学制定固碳减排政策十分重要。

已有研究表明:气候在土壤有机碳含量的分布过程中起着重要的作用,而在土壤有机碳的输入与分解过程中起作用的气候因子主要是温度和降水<sup>[4]</sup>;土壤质地对于土壤有机碳的影响也是巨大的,土壤黏粒结构可以与土壤有机碳形成有机-无机复合体,进而保护土壤有机碳不被土壤微生物分解<sup>[5]</sup>;土壤所在区域的地理环境背景不同,影响土壤有机碳的主导因素就会不同<sup>[6]</sup>。目前研究对以下2个方面较少关注:①当前有关土壤属性空间分布的研究,主要集中在二维空间<sup>[7]</sup>,土壤性质在垂直方向上是连续的,如果忽略了垂直方向的影响,对于研究不同土层的土壤性质是有缺陷的<sup>[8-9]</sup>。②目前宏观尺度上关于土壤有机碳含量分布的主要影响因素及其控制过程仍了解很少,以常规线性回归模型拟合空间数据,其估计参数仅能反映区域总体的平均状况,并不能反映出局部的地区特征情况<sup>[10]</sup>。

针对当前该领域的研究不足,本文通过2017年采集的土壤样品进行测试分析,结合中国气象科学

数据共享服务网的气象数据,对旱作区0~40 cm 土层 SOCD 进行计算,对 SOCD 空间分布进行三维模拟,深入分析不同空间 SOCD 与气候和黏粒含量的相关性,以期为制定农田土壤管理政策、促进土壤碳固定和减少碳损失提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况与数据处理

以地形坡度小于 $5^\circ$ 、 $1\text{ km}^2$  网格内旱地占耕地比在40%以上作为划分依据,界定了旱作区内涵与范围(图1),研究区年降水量300~900 mm、年平均气温 $2\sim 16^\circ\text{C}$ 。依据年降水量和年平均气温将研究区分为东北旱作区和黄淮海旱作区。其中东北旱作区主要土壤类型为黑土和黑钙土,黄淮海旱作区主要为潮土、褐土和砂姜黑土。研究区耕地破碎度小且耕作条件良好,主要种植玉米、小麦等粮食作物和大豆、甜菜等经济作物,是中国重要旱作作物种植区及商品粮基地。

实施网格采样(网格大小为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ ),并在此基础上根据土壤类型、土壤颗粒组成与耕地质量等级(原则上高、中、低产田上均有若干样点分布)进行分层抽样。采样层次为0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 和30~40 cm,为保证样品的代表性,每个样点均在中心点和相邻的2个角采集分层土样,并将同一深度土样混合组成待测样品,其中容重土样用容重钻分层采集。实际完成402个位置1608个样品(图1),采样时间为2017年,采回的土样混合后经自然风干、研磨、过筛后分析测定其有机质含

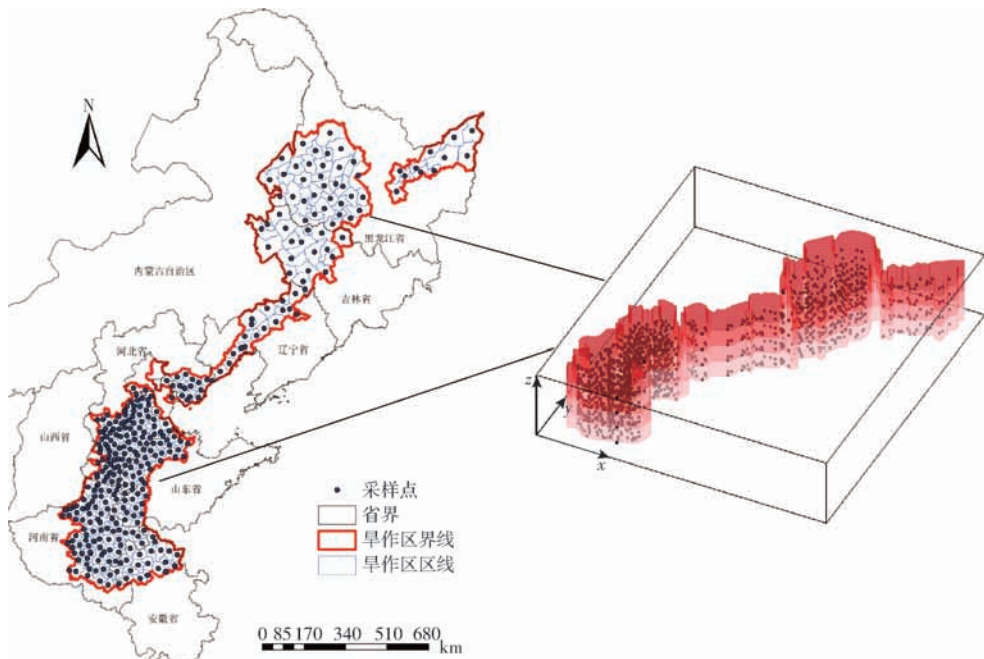


图1 旱作区采样点分布图

Fig.1 Distribution map of sampling points in dry farming region

量、容重和质地,测试方法分别为重铬酸钾外加热法、环刀法和激光粒度仪法。根据南京土壤研究所提供的 1:100 万尺度土壤类型图提取了每个采样点的土壤类型。根据中国气象科学数据共享服务网的气象数据,以距离每个采样点最近的气象站为依据,分别统计了各采样点年平均气温与年平均降水量。

## 1.2 研究方法

根据 2017 年分层采样点数据计算了旱作区 SOCD,采用反距离加权法模拟了 SOCD 空间三维分布特征,用地理加权回归分析了 SOCD 的影响因素,用方差分解分析了影响因素的驱动作用。

### 1.2.1 土壤有机碳密度

一般认为,SOCD 是由有机碳含量、砾石(粒径大于 2 mm)含量和容重共同决定的,有研究认为中国农业土壤经过长期人为的耕作熟化,耕层中粒径大于 2 mm 的砾石含量可能不大<sup>[11]</sup>,而旱作区为平原区域,大于 2 mm 的砾石含量可以忽略不计。用计算出的有机质含量乘以 Bemmelen 换算系数(0.58)得到该土层有机碳含量。某一土层  $i$  的有机碳密度计算公式为

$$S_{ocd_i} = \frac{0.58O_i D_i E_i}{100} \quad (1)$$

式中  $O_i$ ——土壤有机质含量, g/kg

$D_i$ ——容重, g/cm<sup>3</sup>

$E_i$ ——土层厚度, cm

$S_{ocd_i}$ ——有机碳密度, kg/m<sup>2</sup>

### 1.2.2 三维空间插值

土壤是一个连续的三维实体,土壤属性在各个方向上即使在很短的距离内变异也非常大<sup>[12]</sup>。对研究区 SOCD 空间分布进行三维模拟,以图形图像方式直观展示 SOCD 的三维空间分布,与二维空间分布图相比,其表达的信息量更加丰富,可以同时获取 SOCD 在水平方向和垂直方向的空间分布信息,并可对其进行旋转、平移、放大、缩小、切割等,直观展示任意土体切面的 SOCD 分布。吴亚坤等<sup>[13]</sup>分别采用三维反距离加权法和二维分层反距离加权法对南疆巴州典型绿洲区土壤全盐量进行了空间插值,结果表明三维插值结果精度较高。由于冲积平原区土壤属性在垂直方向上的变化非常复杂,当水平方向的取样间距远大于垂直方向的取样间距时,与传统的克里格法相比,反距离加权法(Inverse distance weighting, IDW)更能准确地描述土壤属性的空间分布特征,采用三维反距离加权法进行区域 SOCD 三维空间分布的估值,其中权重系数采用 Shepards 方法计算<sup>[14-15]</sup>,公式为

$$V(x, y, z) = \sum_{i=1}^n w_i v_i(x_i, y_i, z_i) \quad (2)$$

其中

$$w_i = \frac{\left(\frac{D-h_i}{Dh_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D-h_i}{Dh_i}\right)^2} \quad (3)$$

$$h_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \quad (4)$$

式中  $V$ ——待估点的属性值,对应坐标为  $(x, y, z)$

$v_i$ ——已知观测点的属性值,对应坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$

$w_i$ ——对应已知点的权重系数

$h_i$ ——未知点到已知点的距离

$D$ ——参与计算的  $n$  个已知点到未知点距离的最大值

### 1.2.3 地理加权回归

地理加权回归模型是由地理学家 FORTHERINGHAM 等提出的一种新的空间局部回归方法<sup>[16-17]</sup>,其模型的一般形式为

$$y(u) = \beta_0(u) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u)x_k(u) + \varepsilon(u) \quad (5)$$

式中  $y(u)$ ——在位置  $u$  的因变量值

$x_k(u)$ ——位置  $u$  的第  $k$  个协变量的值

$\beta_0(u)$ ——截距项

$\beta_k(u)$ ——第  $k$  个协变量的回归系数

$p$ ——协变量的个数

$\varepsilon(u)$ ——位置  $u$  的随机误差项

### 1.2.4 数据分析

采用 SPSS 20.0 软件完成数据的常规统计、方差分析等。数据三维插值在 GMS 10.3 软件中进行(具体操作过程可进一步参照文献[18]),由于  $x, y$  跨度较大,而垂直方向( $z$ )范围较小,为获得最佳的可视化效果,在成图时,将垂直方向均放大 1 000 000 倍。影响因素的贡献率借助于 Canoco 5 线性模型的冗余分析(Redundancy analysis, RDA),影响因素的地理加权回归分析采用 ArcGIS 10.5 软件的地统计学模块(Geostatistical analyst)。

## 2 结果与分析

### 2.1 SOCD 描述性统计特征

采用 SPSS 20.0 软件,对各层 SOCD 进行了统计分析,其中 Levine's 方差齐次性检验表明 4 组(层次) SOCD 数据均满足方差齐性,故两两比较采用最小显著性差异方法(Least-significant difference, LSD)。

由表 1 可看出,在 0~40 cm 深度的 SOCD 中,最大值为 18.54 kg/m<sup>2</sup>,最小值为 1.22 kg/m<sup>2</sup>,平均值为 5.86 kg/m<sup>2</sup>,通过各层 SOCD 可以看出,随着土

壤深度的逐渐增加,研究区 SOCD 均值逐渐减少,最大值为  $5.54 \text{ kg/m}^2$ ,最小值仅为  $0.09 \text{ kg/m}^2$ ,自上而下 4 层 SOCD 变化范围分别为  $(1.76 \pm 0.74) \text{ kg/m}^2$ ,  $(1.60 \pm 0.85) \text{ kg/m}^2$ ,  $(1.22 \pm 0.76) \text{ kg/m}^2$ ,  $(1.02 \pm 0.67) \text{ kg/m}^2$ ,不同层次土壤之间均存在显

著性差异。自上而下 4 个土层 SOCD 变异系数分别为 42.30%、52.94%、61.95%、65.98%,按照一般的对变异系数的评价<sup>[19]</sup>,研究区 4 个土层 SOCD 均呈中等空间变异,变异系数越小,变异程度越小,因此上层 SOCD 变异程度小于下层。

表 1 不同土层 SOCD 描述性统计特征

Tab. 1 Descriptive statistical characteristics of soil organic carbon density in different soil layers

土层深度/cm	N	最大值/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )	最小值/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )	均值 $\pm$ 标准差/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )	变异系数/%
0~10	402	5.54	0.39	$(1.76 \pm 0.74)^a$	42.30
10~20	402	5.20	0.31	$(1.60 \pm 0.85)^b$	52.94
20~30	402	4.43	0.15	$(1.22 \pm 0.76)^c$	61.95
30~40	402	3.79	0.09	$(1.02 \pm 0.67)^d$	65.98
0~40	402	18.54	1.22	$5.86 \pm 2.78$	49.73

注:同列不同小写字母表示显著性差异( $P < 0.05$ ),N 为采样点个数,下同。

## 2.2 SOCD 空间分布特征

### 2.2.1 SOCD 空间三维模拟

基于旱作区 SOCD,对 0~40 cm 土层的 SOCD 进行三维空间模拟,x、y 方向分别为 500 个栅格,z 方向为 4 个栅格。因实际研究范围边界不是标准网格型,故插值后先将边界外的值去掉。

由图 2a 可以看出,0~40 cm 各层深度的旱作区 SOCD 整体呈东北高、西南低趋势,均值为  $1.47 \text{ kg/m}^2$ ,最高为  $5.54 \text{ kg/m}^2$ 、最低为  $0.09 \text{ kg/m}^2$ 。其中东北旱作区 SOCD 平均值为  $1.90 \text{ kg/m}^2$ ,黄淮海旱作区为  $1.14 \text{ kg/m}^2$ 。在辽宁省西部和黄淮海平原的大部分旱作区,20~40 cm 深度的 SOCD 明显小于 0~20 cm 深度的 SOCD。

将图 2a 中 0~40 cm 的三维模拟图分层显示,可以看出:在 0~10 cm 土层中,东北旱作区 SOCD

平均值为  $1.99 \text{ kg/m}^2$ ,黄淮海旱作区为  $1.64 \text{ kg/m}^2$ ,是东北旱作区的 82%;在 10~20 cm 土层中,东北旱作区 SOCD 平均值为  $2.18 \text{ kg/m}^2$ ,黄淮海旱作区为  $1.31 \text{ kg/m}^2$ ,是东北旱作区的 60%;在 20~30 cm 土层中,东北旱作区 SOCD 平均值为  $1.84 \text{ kg/m}^2$ ,黄淮海旱作区为  $0.91 \text{ kg/m}^2$ ,是东北旱作区的 49%;在 30~40 cm 土层中,东北旱作区 SOCD 平均值为  $1.60 \text{ kg/m}^2$ ,黄淮海旱作区为  $0.72 \text{ kg/m}^2$ ,是东北旱作区的 45%。随着土层深度的增加,东北旱作区的 SOCD 变化较小,都处于相对较高的水平,而黄淮海旱作区的 SOCD 下降明显,30~40 cm 深度的 SOCD 普遍低于  $1 \text{ kg/m}^2$ 。

### 2.2.2 SOCD 在各土壤类型的分布特征

土壤类型是土壤有机碳空间分布的一个相关因子,在全球和国家尺度的土壤有机碳研究中,多以土

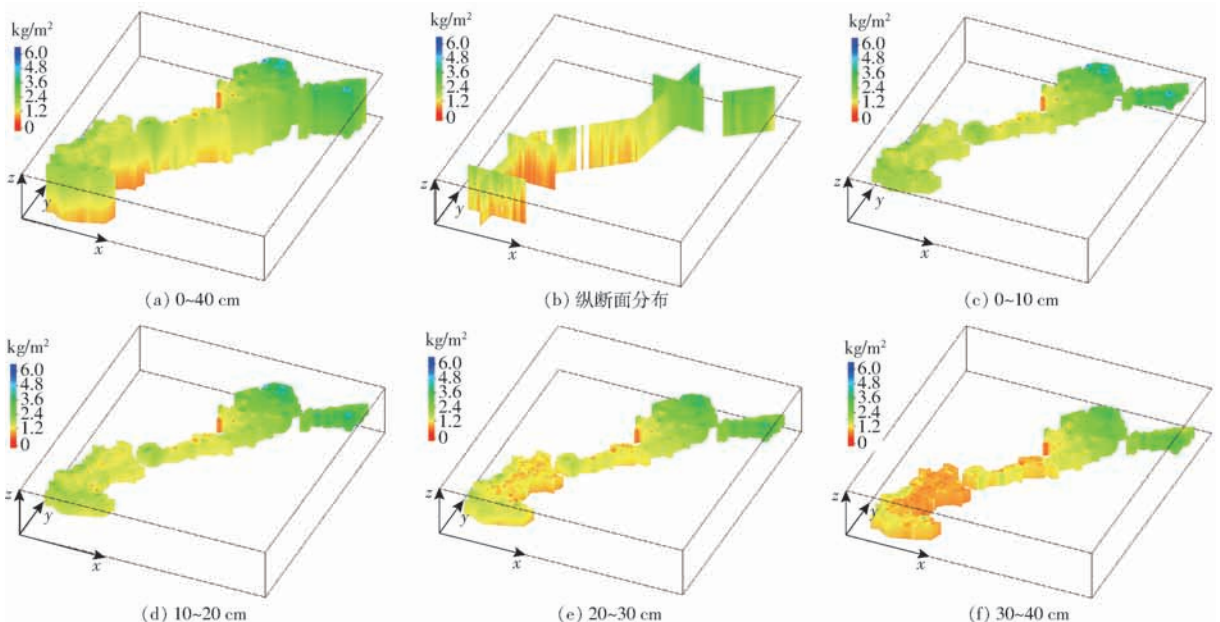


图 2 旱作区 SOCD 三维空间模拟及各层分布

Fig. 2 Three-dimensional spatial simulation and distribution of soil organic carbon density in dry farming region

壤类型的图斑作为土壤有机碳的基本空间分布单元并结合一定深度的土壤剖面进行碳库估算<sup>[20]</sup>。本文根据每个采样点的土壤类型,计算了每个采样点各层 SOCD。

从表 2 可看出,不同土壤类型的 SOCD 差别较大。在主要的 7 个土壤类型中,0 ~ 40 cm 深度的 SOCD 平均值为 5.86 kg/m<sup>2</sup>,其中草甸土的 SOCD 最大,为 9.69 kg/m<sup>2</sup>,其次为黑土、黑钙土、砂姜黑土、褐土和棕壤,潮土的 SOCD 最低,仅为 4.15 kg/m<sup>2</sup>。在 0 ~ 10 cm 土层中,草甸土 SOCD 最大,为 2.62 kg/m<sup>2</sup>,其次为黑土、砂姜黑土、褐土、黑钙土和潮土,棕壤的 SOCD 最低,仅为 1.30 kg/m<sup>2</sup>;在 10 ~ 20 cm 土层中,草甸土的 SOCD 最大,为 2.83 kg/m<sup>2</sup>,其次为黑土、

黑钙土、砂姜黑土、褐土和棕壤,潮土的 SOCD 最低,仅为 1.17 kg/m<sup>2</sup>;在 20 ~ 30 cm 土层中,草甸土的 SOCD 最大,为 2.27 kg/m<sup>2</sup>,其次为黑土、黑钙土、砂姜黑土、褐土和棕壤,潮土的 SOCD 最低,仅为 0.82 kg/m<sup>2</sup>;在 30 ~ 40 cm 土层中,草甸土的 SOCD 最大,为 1.97 kg/m<sup>2</sup>,其次为黑土、黑钙土、砂姜黑土、棕壤和褐土,潮土 SOCD 最低,仅为 0.68 kg/m<sup>2</sup>。除黑土和草甸土在 0 ~ 10 cm 至 10 ~ 20 cm 的 SOCD 增加外,其余各土壤类型的 SOCD 均随着土壤深度的增加而降低。从 0 ~ 20 cm SOCD 占 0 ~ 40 cm 的百分比来看,平均值为 59.71%,其中砂姜黑土占比最高,为 64.47%,其次为潮土、褐土、草甸土、棕壤和黑钙土,黑土的占比最低,仅为 54.53%。

表 2 主要土壤类型各层的 SOCD 分布

Tab.2 Soil organic carbon density distribution of major soil types in each layer

土壤类型	N	SOCD/(kg·m <sup>-2</sup> )				0 ~ 20 cm 占比/%
		0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm	
潮土	182	(1.47 ± 0.47) <sup>c</sup>	(1.17 ± 0.44) <sup>d</sup>	(0.82 ± 0.39) <sup>d</sup>	(0.68 ± 0.33) <sup>d</sup>	(4.15 ± 1.34) <sup>d</sup> 63.37
褐土	58	(1.91 ± 0.79) <sup>b</sup>	(1.53 ± 0.73) <sup>c</sup>	(1.12 ± 0.65) <sup>c</sup>	(0.84 ± 0.49) <sup>c</sup>	(5.39 ± 2.41) <sup>c</sup> 62.74
砂姜黑土	36	(1.97 ± 0.57) <sup>b</sup>	(1.64 ± 0.44) <sup>c</sup>	(1.13 ± 0.34) <sup>c</sup>	(0.92 ± 0.25) <sup>c</sup>	(5.66 ± 1.31) <sup>c</sup> 64.47
黑土	35	(2.34 ± 0.84) <sup>a</sup>	(2.54 ± 0.86) <sup>a</sup>	(2.17 ± 0.75) <sup>a</sup>	(1.93 ± 0.70) <sup>a</sup>	(8.98 ± 2.81) <sup>a</sup> 54.53
黑钙土	33	(1.74 ± 0.69) <sup>b</sup>	(2.08 ± 0.86) <sup>b</sup>	(1.75 ± 0.72) <sup>b</sup>	(1.56 ± 0.70) <sup>b</sup>	(7.14 ± 2.79) <sup>b</sup> 54.72
草甸土	23	(2.62 ± 1.16) <sup>a</sup>	(2.83 ± 1.21) <sup>a</sup>	(2.27 ± 0.98) <sup>a</sup>	(1.97 ± 0.90) <sup>a</sup>	(9.69 ± 4.05) <sup>a</sup> 56.74
棕壤	13	(1.30 ± 0.41) <sup>c</sup>	(1.20 ± 0.50) <sup>d</sup>	(1.10 ± 0.45) <sup>d</sup>	(0.86 ± 0.36) <sup>cd</sup>	(4.48 ± 1.34) <sup>cd</sup> 55.32
平均		1.76	1.60	1.22	1.02	5.86 59.71

2.3 SOCD 的影响因素

2.3.1 影响因素的驱动力分析

已有研究表明气候(温度、降水)和土壤黏粒含量在土壤有机碳含量的分布过程中起着重要的作用<sup>[3-4]</sup>,由于土壤类型本身包含着成土过程中的气候、成土母质等因素,所以在此不单独做分析。通过方差分解分析来探究气候(年平均气温、年降水量)和黏粒含量对 SOCD 的影响程度,结果如图 3 所示。

气候与黏粒含量对 0 ~ 40 cm 深度 SOCD 的总解释度达到 49.9%,其中气候的解释度最高(25.6%)。在不同土层中可看出,气候与黏粒含量对 0 ~ 10 cm 深度的 SOCD 解释度最小,仅为 26.3%,但是黏粒含量对该层 SOCD 解释度最高,达到 13.2%。随着土层深度的增加,气候和黏粒含量对 SOCD 的解释度呈增大的趋势,其中气候因素的解释度不断增大,而黏粒含量的解释度一直在降低。

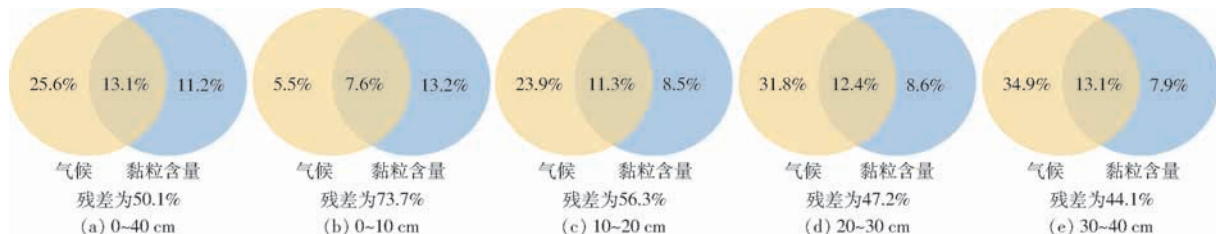


图 3 不同因素对 SOCD 的方差分解分析

Fig.3 Variance decomposition analyses of soil organic carbon density on different factors

2.3.2 基于地理加权回归的空间相关性分析

为研究各指标对 SOCD 的影响程度,采用地理加权回归的方法,研究年平均气温、年降水量、黏粒含量对不同空间各层 SOCD 的影响程度。地理加权回归方法针对每一个坐标位置点都有相对应的参

数,获得不同地理位置上各影响因子的影响程度,可以更加准确地分析 SOCD 与其各影响因子之间的内在联系<sup>[21]</sup>。

由图 4 可以看出,各指标对应的地理加权局部回归系数的空间分布,结果显示:年平均气温与

SOCD 呈负相关性,在 0 ~ 40 cm 深度的土壤中回归系数较高,整体范围在 -0.92 ~ -0.05 之间,平均值为 -0.39。在空间上可以看出,黑龙江省东北部的三江平原旱作区回归系数最高,范围在 -0.92 ~ -0.63 之间,黑龙江省中部、吉林省、辽宁省其次,华北旱作区的回归系数较低,大于 -0.50。在各深度土层中,10 ~ 20 cm 深度的回归系数相对较高。在不同区域,不同深度土层中,年降水量与 SOCD 的

回归系数呈东北旱作区高,黄淮海旱作区低的趋势,但都低于 0.01,相关性很低。黏粒含量与 SOCD 呈正相关性,整体范围在 0.16 ~ 0.49 之间,平均值为 0.38,在 0 ~ 40 cm 深度的土壤中回归系数平均值与气温相当,但是变化范围较小,回归系数在空间上分布与气温相似,在各深度土层中,0 ~ 30 cm 深度的各土层之间回归系数差别不大,30 ~ 40 cm 深度的回归系数小于 0.05。

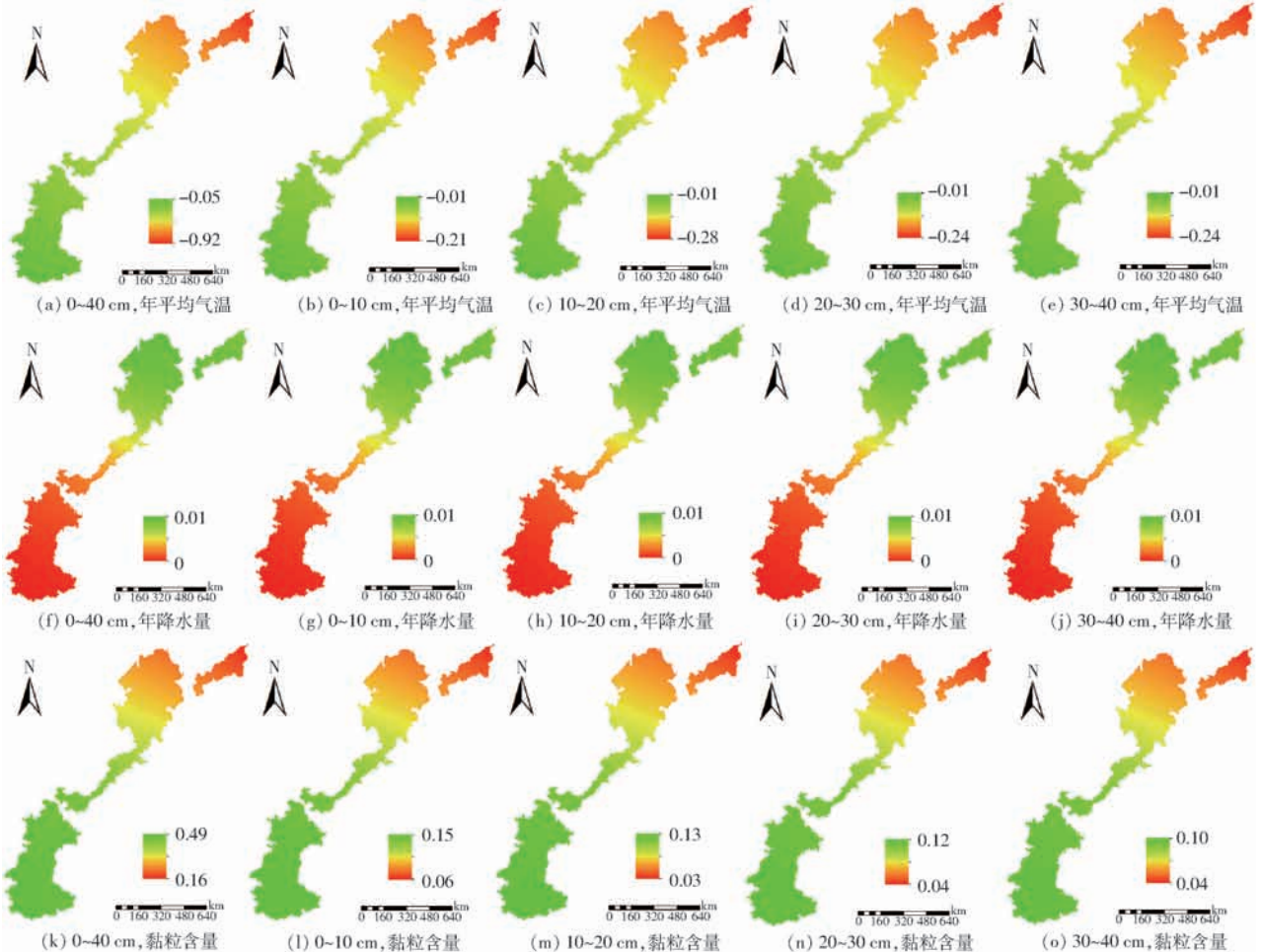


图4 SOCD 与年平均气温、年降水量和黏粒含量回归系数的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of relationship between soil organic carbon density and temperature, precipitation and clay content

### 3 讨论

SOCD 随着土壤深度的增加而降低,这是因为土体的表层部分人类活动和动植物活动较为频繁,特别是近年来,随着有机肥的增施,SOCD 相对较高<sup>[22-23]</sup>。0 ~ 40 cm 深度的旱作区 SOCD 呈东北高、西南低的趋势,随着土层深度的增加,东北旱作区的 SOCD 变化较小,都处于相对较高的水平,而黄淮海旱作区的 SOCD 下降明显,这主要是因为东北旱作区温度较低,有机碳矿化速率较慢,利于有机碳的积累,并且黑龙江旱作区黑土层较厚,所以 0 ~ 40 cm 垂直方向上 SOCD 下降不明显(表 1)。研究区上层

SOCD 变异程度小于下层,这可能是由于研究区域范围较大,南北气候差别较大,人为耕作施肥差别更大,下层 SOCD 更容易受气候的影响,而上层土壤更容易受到人为耕作施肥的影响。不同类型土壤的 SOCD 差别较大,这是因为不同土壤类型的土壤成土环境不同<sup>[24]</sup>,旱作区从北向南,主要土壤类型依次为黑土、草甸土、黑钙土、棕壤、褐土、潮土、砂姜黑土,年平均气温逐渐升高,有机碳输出大于输入。

气候与黏粒含量对 0 ~ 40 cm 深度 SOCD 的总解释度达到 49.9%,其中气候的解释度最高(25.6%)。说明气候是旱作区 SOCD 的主要影响因素,这也与 SINGH 等<sup>[4]</sup>研究结果相同。随着土层

深度的增加,气候和黏粒含量对 SOCD 的解释度呈增大趋势,其中气候因素的解释度不断增大,而黏粒含量的解释度一直在减小。这可能是因为土壤表层 SOCD 更容易受到人为耕作和施肥因素的影响,而深层土壤受人为因素影响较少,所以随着土层深度的增加气候因素的解释度越来越大。

年平均气温与 SOCD 呈负相关性,这主要是因为气温可导致土壤有机碳的释放量发生变动<sup>[25]</sup>,随着纬度的升高,年平均气温降低,植物生长较为缓慢,微生物活性也相对较低,有机碳的输入大于输出。随着纬度的降低,年平均气温升高,植物生长较为旺盛,微生物活性也相对较强,有机碳的输入量较大,但是微生物对有机碳的分解量远大于其输入量,微生物是土壤有机碳分解和转化的主要驱动力,在一定的温度范围内,土壤微生物活性随着气温的提高而升高,土壤有机碳分解就越快,因此,在一定范围内,土壤有机碳含量与年平均气温呈显著负相关,年积温越高,土壤有机碳含量越低<sup>[26-27]</sup>。在空间上黑龙江东北部回归系数最高,黑龙江中部、吉林、辽宁其次,华北旱作区的回归系数较低,这是因为东北旱作区比较寒冷,气温的增加对微生物的活性影响较大。在不同区域,不同深度土层中,降水量与 SOCD 的系数都低于 0.01,这可能是由于旱作区的整体降水量都在 300 ~ 900 mm 之间,年降水量适中,因此年降水量不是旱作区 SOCD 的主要影响因素。黏粒含量与 SOCD 呈正相关性,这是因为当土

壤黏粒含量高时,土壤质地重,通气性差,土壤含水率也较高,好气微生物的活动在一定程度上受到抑制,致使有机质分解缓慢,容易积累;而轻质地土壤,保蓄力弱,养分流失量大,土体内常常是气多水少,微生物对有机质分解很旺盛,有机质不易积累<sup>[5-28]</sup>。

## 4 结论

(1)旱作区 2017 年 SOCD 在空间上从南到北不断增加,其中黑龙江东北部 SOCD 最大。就 40 cm 深度的 SOCD 而言,草甸土的 SOCD 最大,潮土最低。随着土层深度的增加,SOCD 不断下降,其中东北旱作区南部、黄淮海旱作区下降最为明显。

(2)气候是旱作区 SOCD 的主要影响因素。随着土层深度的增加,气候和黏粒含量对 SOCD 的解释度呈增大的趋势,其中气候因素的解释度不断增大,而黏粒含量的解释度一直在减小。

(3)年平均气温与 SOCD 呈负相关性,在空间上可以看出,黑龙江东北部旱作区回归系数最高,黑龙江中部、吉林、辽宁其次,华北旱作区的回归系数较低。在各深度土层中,10 ~ 20 cm 深度的回归系数相对较低。在不同区域,不同深度土层中,年降水量与 SOCD 的回归系数都低于 0.01,相关性很小。黏粒含量与 SOCD 呈正相关性,在 0 ~ 40 cm 深度的土壤中回归系数平均值与气温相当,但是变化范围较小,在空间上回归系数分布与气温相似。

## 参 考 文 献

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623 - 1627.
- [2] 潘根兴,陆海飞,李恋卿,等. 土壤碳固定与生物活性:面向可持续土壤管理的新前沿[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(8): 940 - 951.  
PAN Genxing, LU Haifei, LI Lianqing, et al. Soil carbon sequestration with bioactivity: a new emerging frontier for sustainable soil management[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(8): 940 - 951. (in Chinese)
- [3] 孙维侠,史学正,于东升,等. 基于 1:100 万土壤空间数据库的有机碳储量估算研究:以中国东北三省为例[J]. *地理科学*, 2004, 24(5): 568 - 572.  
SUN Weixia, SHI Xuezheng, YU Dongsheng, et al. Estimation of soil organic carbon storage based on 1:1 000 000 soil database of China: a case in Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(5): 568 - 572. (in Chinese)
- [4] SINGH S K, SINGH A K, SHARMA B K, et al. Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan, India[J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(3): 408 - 421.
- [5] BREJDA J J, MAUSBACH M J, GOEBEL D L. Estimating surface soil organic carbon content at a regional scale using the national resource inventory[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(3): 842 - 849.
- [6] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(5870): 156 - 159.
- [7] 张源沛,胡克林,李保国,等. 银川平原土壤盐分及盐渍土的空间分布格局[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 19 - 24.  
ZHANG Yuanpei, HU Kelin, LI Baoguo, et al. Spatial distribution pattern of soil salinity and saline soil in Yinchuan plain of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(7): 19 - 24. (in Chinese)
- [8] BIONDINI M. A three-dimensional spatial model for plant competition in an heterogeneous soil environment[J]. *Ecological Modelling*, 2001, 166(1): 187 - 189.
- [9] 张世文,宁汇荣,高会议,等. 基于各向异性的区域土壤有机碳三维模拟与空间特征分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 115 - 124.  
ZHANG Shiwen, NING Huirong, GAO Huiyi, et al. Three-dimensional simulation and spatial characteristics of soil organic carbon based on anisotropy in region[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(16): 115 - 124. (in Chinese)

- [10] 覃文忠,王建华,刘妙龙. 地理加权回归分析空间数据的空间非平稳性[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2005, 28(4): 476-479.  
QIN Wenzhong, WANG Jianmei, LIU Miaolong. Spatial nonstationarity of geographically weighted regression analysis of spatial data[J]. Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 2005, 28(4): 476-479. (in Chinese)
- [11] 许泉,芮雯奕,何航,等. 不同利用方式下中国农田土壤有机碳密度特征及区域差异[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2505-2510.  
XU Quan, RUI Wenyi, HE Hang, et al. Characteristics and regional differences of soil organic carbon density in farmland under different land use patterns in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(12): 2505-2510. (in Chinese)
- [12] MEIRVENNE M V, MAES K, HOFMAN G. Three-dimensional variability of soil nitrate-nitrogen in an agricultural field[J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, 37(3): 147-153.
- [13] 吴亚坤,刘广明,杨劲松,等. 基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 100-106.  
WU Yakun, LIU Guangming, YANG Jingsong, et al. Interpreting method of regional soil salinity 3D distribution based on inverse distance weighting[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 100-106. (in Chinese)
- [14] HE Y, HU K L, CHEN D L, et al. Three dimensional spatial distribution modeling of soil texture under agricultural systems using a sequence indicator simulation algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(1): 24-31.
- [15] 云安萍,鞠正山,胡克林,等. 基于距离反比法的土壤盐分三维空间插值研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 148-156. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20151221&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151221&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.10001298.2015.12.021.  
YUN Anping, JU Zhengshan, HU Kelin, et al. Three-dimensional spatial interpolation of soil salinity based on inverse distance weighting method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 148-156. (in Chinese)
- [16] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM S, CHARLTON M. Geographically weighted regression[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1998, 47(3): 431-443.
- [17] 覃文忠. 地理加权回归基本理论与应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
QIN Wenzhong. The basic theoretics and application research on geographically weighted regression[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [18] 吴立新,史文中,CHRISTOPHER G. 3D GIS与3D GMS中的空间构模技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(1): 5-11.  
WU Lixin, SHI Wenzhong, CHRISTOPHER G. Spatial modeling technologies for 3D GIS and 3D GMS[J]. Geography and Geo-Information Science, 2003, 19(1): 5-11. (in Chinese)
- [19] ZHANG Shiwen, SHEN Chongyang, CHEN Xiaoyang, et al. Spatial interpolation of soil texture using compositional Kriging and regression Kriging with consideration of the characteristics of compositional data and environment variables[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(9): 1673-1683.
- [20] YU D S, SHI X Z, WANG H J, et al. Regional patterns of soil organic carbon stocks in China[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(3): 680-689.
- [21] 郭含茹. 基于地理加权回归的区域森林碳储量估计[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.  
GUO Hanru. Geographically weighted regression based estimation of regional forest carbon storage[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2015. (in Chinese)
- [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 Li, LI Baoguo, ZHOU Guangsheng. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1): 99-105. (in Chinese)
- [23] GHOSH A, BHATTACHARYYA R, MEENA M C, et al. Long-term fertilization effects on soil organic carbon sequestration in an inceptisol[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 177: 134-144.
- [24] 苏永中,赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 19-27.  
SU Yongzhong, ZHAO Halin. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(3): 19-27. (in Chinese)
- [25] JENKINSON D S, ADAMS D E, WILD A. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming[J]. Nature, 1991, 351(6324): 304-306.
- [26] GANUZA A, ALMENDROS G. Organic carbon storage in soils of the Basque Country (Spain): the effect of climate, vegetation type and edaphic variables[J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, 37(3): 154-162.
- [27] 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 Mingsong, ZHANG Ganlin, LI Decheng, et al. Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 5058-5066. (in Chinese)
- [28] 刘书田. 中国农田土壤有机碳时空分布规律及影响因素研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.  
LIU Shutian. The rule of temporal and spatial distribution of soil organic carbon of cropland and its influencing factors in China[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016. (in Chinese)