

# 吉林省耕层土壤有机碳储量及影响因素

于沙沙<sup>1</sup>, 窦森<sup>1\*</sup>, 黄健<sup>2</sup>, 杨靖民<sup>1</sup>, 石瑛<sup>3</sup>, 郑海辉<sup>4</sup>

(1.吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2.吉林省土壤肥料总站, 长春 130118; 3.长春市绿园区环境监测站, 长春 130062; 4.梅河口市农业技术推广总站, 吉林 梅河口 135000)

**摘要:** 为了了解最易受人类活动影响的耕地表层土壤有机碳库对土壤碳库变化及土壤固碳的潜力,以吉林省为研究区域,基于吉林省土肥站提供的2010年耕地地力评价数据(5742个耕地表层土壤采样点数据)以及1:500 000土壤图等用于分析的基础图件资料,结合ArcGIS技术及统计分析软件SPSS,分析计算了研究区耕地表层土壤有机碳密度、储量及其空间分布特征,并且对吉林省耕地表层土壤有机碳与影响因素之间的关系进行研究。结果表明:吉林省耕地表层有机碳平均密度为 $3.95 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,土壤有机碳总储量约为 $0.206 \text{ Pg}$ ;吉林省东部、中部和西部三大自然地理区域的耕地表层有机碳平均密度分别为 $4.94$ 、 $3.66 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $3.22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,自东向西有递减的趋势。各土壤类型中,暗棕壤、白浆土、黑土、黑钙土、草甸土5种土壤类型的耕地表层有机碳储量约占耕地表层土壤有机碳总储量的75.37%,高于其他土壤类型。土壤有机碳含量与年积温呈不显著负相关关系,与年降雨量、土壤阳离子交换量呈显著正相关关系,与pH呈显著负相关关系,在对土壤有机碳进行空间预测和碳库估算时,需要考虑以上四个重要因子。总之,吉林省耕地表层土壤有机碳密度具有高度的空间变异性,整体上呈现自东向西逐渐减小的趋势,年降雨量、年积温、土壤pH及CEC与耕地表层土壤有机碳含量密切相关。

**关键词:** 吉林省;耕地表层;土壤有机碳密度;有机碳储量;空间分布;影响因子

**中图分类号:** S153.6    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-2043(2014)10-1973-08    **doi:**10.11654/jaes.2014.10.014

## Organic Carbon Storage of Cultivated Topsoils and Its Influencing Factors in Jilin Province

YU Sha-sha<sup>1</sup>, DOU Sen<sup>1\*</sup>, HUANG Jian<sup>2</sup>, YANG Jing-min<sup>1</sup>, SHI Ying<sup>3</sup>, ZHENG Hai-hui<sup>4</sup>

(1.Faculty of Natural Resource and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2.Jilin Soil and Fertilizer Station, Changchun 130118, China; 3.Environmental Monitoring Station of Changchun City, Luyuan District, Changchun 130062, China; 4.Meihekou City Terminus of Agro-technical Popularization, Meihekou 135000, China)

**Abstract:** Soil carbon pool is a major component of terrestrial carbon storage. Organic carbon in cultivated topsoils is most vulnerable to human activities. Here we calculated soil organic carbon density and storage in cultivated topsoils (0~20 cm) and their spatial distribution in Jilin Province using 2010 cultivated soil fertility evaluation data and 1:500 000 soil map and combining ARCGIS and SPSS analysis. Correlation analysis between soil organic carbon content and temperature, annual precipitation, soil pH and CEC was also performed. Average organic carbon density and total organic carbon storage of cultivated topsoils in Jilin Province was  $3.95 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  and about  $2.06 \times 10^{11} \text{ kg}$ , respectively. Soil organic carbon density showed a decreasing trend from east ( $4.94 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) to west ( $3.22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Soil organic carbon content had no significant correlation with annual temperature, but was significantly positively correlated with annual precipitation and soil cation exchange capacity. A significantly negative correlation was found between soil organic carbon and soil pH. Soil organic carbon storage of dark-brown earths, albic soils, black soils, chernozem and meadow soils accounted for 75.37% of the total topsoil organic carbon pool in this region. The present results indicate that the annual precipitation, pH and CEC are main factors influencing topsoil organic carbon content.

**Keywords:** Jilin Province; cultivated topsoil; soil organic carbon density; organic carbon storage; spatial distribution; factor

收稿日期:2014-03-13

基金项目:科技部行业公益性项目(201111015-3)

作者简介:于沙沙(1988—),女,硕士研究生,从事土壤生物化学与土地管理研究。E-mail:yushasha8320808@126.com

\*通信作者:窦森 E-mail:dousen@tom.com

全球土壤有机碳贮量约为 1500 Pg<sup>[1]</sup>(1 Pg=10<sup>15</sup> g),是大气碳库的 2 倍,亦是陆地碳库的主要组成部分。因此,土壤碳库小幅度的变化就可能对大气中碳的浓度造成影响<sup>[1-4]</sup>。近年来,我国学者利用第一次和第二次土壤普查数据对全国尺度的土壤有机碳展开了研究,并估算了全国范围内 1 m 深度的土壤有机碳总储量<sup>[5-8]</sup>,研究表明,土壤有机碳储量有降低的趋势。东北平原是我国重要的粮食生产基地,其土壤有机碳总储量约为 12.68 Pg<sup>[11]</sup>,占全国土壤有机碳库储量(50 Pg)<sup>[7]</sup>的 25.36%,然而其土地面积仅为全国土地面积的 12.94%,因此通过对东北地区土壤有机碳的研究为土壤肥力、土壤质量、土壤健康的评价及农业生态系统的科学管理提供依据,具有重要意义。目前,对我国东北地区土壤有机碳储量的研究已经积累了一定的研究成果<sup>[9-13]</sup>,但多集中在整个东北地区大尺度范围,使用的数据大部分是第二次土壤普查数据,对东北地区省域尺度的土壤有机碳储量的研究尚不多见。本文使用吉林省 2010 年耕地地力评价数据,对耕层土壤有机碳库密度、储量及其影响因子进行研究,为吉林省土壤肥力、土壤质量、土壤健康的评价及科学管理农业生态系统提供依据,对改善土壤环境、提高粮食产量、促进经济持续稳定发展具有重要的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

吉林省地处东北地区的中部,地理坐标介于东经

121°38'~131°19'、北纬 40°52'~46°18'之间,全省总面积为 1874×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,耕地总面积为 536×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>。吉林省属于温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同期,从东南向西北由湿润气候过渡到半湿润气候再到半干旱气候。全省气温、降水、温度、风以及气象灾害等都有明显的季节变化和地域差异。年平均气温为 2~6℃,年平均降水量为 400~600 mm。全省地势东南高,西北低,由东南向西北倾斜。地貌类型主要由火山地貌、侵蚀剥蚀地貌、冲洪积地貌和冲积平原地貌构成。火山地貌占吉林省总面积的 8.6%,流水地貌占 83.5%,湖成地貌占 2.6%,风沙地貌占 5.2%。土壤类型主要有白浆土、草甸土、棕壤、砂土、灰化土、黑土、黑钙土等。

### 1.2 数据来源

本研究所用资料来源于 2010 年吉林省耕地地力评价数据。吉林省共有 19 个土类<sup>[14]</sup>,其中棕色针叶林土、火山灰土、山地草甸土和石质土 4 个土类多为非耕地,因此本研究选取其余 15 个土类的耕地,按照均匀性和代表性进行布点,采样深度为 0~20 cm,共选取有效样点 5742 个,样点分布见图 1。土壤有机碳(SOC)、pH、阳离子交换量(CEC)用常规方法测定<sup>[15]</sup>。土壤容重( $\gamma$ )采用 Song 等<sup>[6]</sup>方法计算:

$$\gamma = 1.3770e^{-0.0048 \text{SOC}}$$

粒径>2 mm 砾石含量根据《吉林土壤》<sup>[14]</sup>及《中国土壤》<sup>[16]</sup>进行估算。年积温、年降雨数据来自于中国气象科学数据共享服务网的《中国地面气候标准值年值

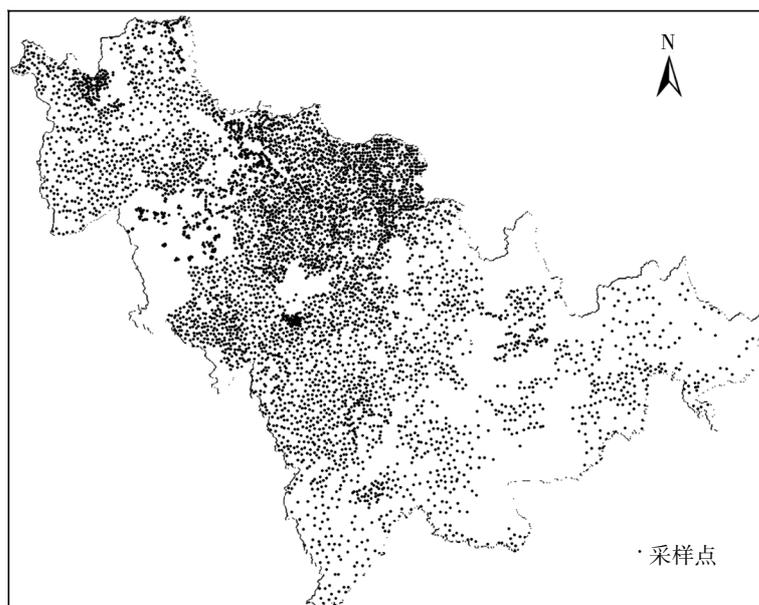


图 1 吉林省土壤采样点的空间分布

Figure 1 Spatial distribution of soil sampling locations in Jilin Province

数据集》。

### 1.3 土壤有机碳密度估算方法

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量,由于排除了面积因素的影响而以土体体积为基础来计算,土壤有机碳密度已成为评价和衡量土壤中有机碳储量的一个极其重要的指标。土壤有机碳密度  $SOCD_D$  的计算公式如下<sup>[17-19]</sup>:

$$SOCD_D = C_i D_i E_i (1 - G_i) / 100$$

式中: $SOCD_D$  代表厚度为  $D$  的土层中土壤有机碳密度,  $kg \cdot m^{-2}$ ;  $C_i$  为第  $i$  层土壤有机碳含量,  $g \cdot kg^{-1}$ ;  $D_i$  为第  $i$  层土壤容重,  $g \cdot cm^{-3}$ ;  $E_i$  为第  $i$  层土层厚度,  $cm$ ;  $G_i$  为大于  $2 mm$  的石砾所占的体积百分比, %。

### 1.4 土壤有机碳储量估算方法

本研究中土壤有机碳储量的估算采用土壤类型法,即按土类的平均有机碳密度与其面积的乘积之和求得。国内外常用这种方法进行土壤有机碳储量的估算研究<sup>[20-25]</sup>,因此可以形成统一的估算体系,方便对土壤有机碳储量的汇总和进行对比分析。计算公式为:

$$C(\text{sum}) = \rho_i \times A_i$$

式中: $C(\text{sum})$  为第  $i$  类土壤类型的土壤有机碳储量;  $\rho_i$  为第  $i$  类土壤类型的有机碳密度;  $A_i$  为第  $i$  类土壤类型的面积。

### 1.5 统计方法

利用 Microsoft Excel 2003 及 SPSS 17.0 软件进行

数据处理,采用回归分析研究年平均降雨量、年积温、pH 及 CEC 对土壤有机碳含量的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吉林省耕地表层不同土壤类型有机碳密度及其空间分布特征

#### 2.1.1 有机碳密度

本研究以土类为单位,分析不同土壤类型耕地表层有机碳密度的差异和土壤有机碳储量分布特征,各种土壤类型耕地表层的有机碳密度、储量及面积分布如表 1 所示,不同土壤类型耕地表层的土壤有机碳密度差异较大。暗棕壤、沼泽土和泥炭土的土壤有机碳密度较大,分别为  $5.17$ 、 $6.03$ 、 $8.40 kg \cdot m^{-2}$ ;白浆土、水稻土、粗骨土、碱土的土壤有机碳密度次之,介于  $4 \sim 5 kg \cdot m^{-2}$  之间;栗钙土的土壤有机碳密度最低,为  $2.80 kg \cdot m^{-2}$ 。从耕地分布面积来看,黑钙土、黑土、草甸土的分布面积最大,分别占耕地总面积的  $26.95\%$ 、 $15.52\%$  和  $14.45\%$ ;分布面积最小的土壤类型为盐土,所占不足总面积的  $0.1\%$ 。从储量上来说,黑钙土耕地表层的碳储量位居第一,为  $4.65 \times 10^{10} kg$ ,占总储量的  $22.57\%$ ;黑土、暗棕壤和草甸土的碳储量紧随其后,分别为  $2.98 \times 10^{10}$ 、 $2.95 \times 10^{10}$ 、 $2.80 \times 10^{10} kg$ ,占总储量的百分比分别为  $14.45\%$ 、 $14.33\%$  和  $13.57\%$ ;有机碳储量最小的土壤类型是盐土,仅为  $4.20 \times 10^7 kg$ ,这与其分布面积小有很大关系。吉林省耕地表层土壤有机碳总

表 1 吉林省耕地表层土壤有机碳密度和储量

Table 1 Soil organic carbon(SOC) density and storage in Jilin Province

土壤类型 Soil types	样点数 Number of samples	有机碳密度 C density/ $kg \cdot m^{-2}$	耕地面积 Area/ $\times 10^7 m^2$	占总面积百分比/ %	有机碳储量 SOC storage/ $\times 10^7 kg$	占总储量百分比/ %
暗棕壤 Dark-brown earths	920	5.17	571.237	10.66	2 953.295	14.33
棕壤 Brown earths	18	3.87	8.906	0.17	34.466	0.17
白浆土 Albic soils	765	4.28	503.217	9.39	2 153.769	10.45
黑土 Black soils	727	3.58	831.914	15.52	2 978.252	14.45
黑钙土 Chernozem	1272	3.22	1 444.654	26.95	4 651.786	22.57
栗钙土 Castanozems	92	2.80	59.720	1.11	167.216	0.81
盐土 Solonchaks	22	3.63	1.161	0.02	4.214	0.02
碱土 Solonetz	77	4.34	25.985	0.48	112.775	0.55
草甸土 Meadow soils	756	3.61	774.621	14.45	2 796.382	13.57
新积土 Alluvial soils	380	3.92	376.007	7.01	1 473.947	7.15
沼泽土 Bog soils	48	6.03	20.511	0.38	123.681	0.60
泥炭土 Peat soils	12	8.40	21.259	0.40	178.576	0.87
风沙土 Aeolian soils	411	3.43	381.228	7.11	1 307.612	6.34
粗骨土 Skeletal soils	2	4.67	5.152	0.10	24.060	0.12
水稻土 Paddy soils	240	4.94	334.848	6.25	1 654.149	8.02
合计	5742	3.95	5 360.420	100.00	20 614.181	100.00

储量为  $2.06 \times 10^{11}$  kg。

### 2.1.2 有机碳密度空间分布特征

利用 ArcGIS 中地统计分析的克里金插值法,对吉林省各采样点耕地表层的土壤有机碳密度进行空间插值分析,得到吉林省耕地表层土壤有机碳密度分布图(图 2)。

受自然条件和经济条件的影响,省内农业的地区差异明显,由东向西,分别形成了东部山区以农林业为主,中部以农业为主和西部以农牧业为主的农业格局。东部山区包括白山市、吉林市、辽源市、通化市及延边朝鲜族自治州;中部丘陵地区包括长春市和四平市;西部平原区包括松原市和白城市<sup>[26]</sup>。由图 2 可见,吉林省耕地主要分布在中部和西部地区,东部地区分布相对较少,耕地表层土壤有机碳密度具有高度的空间变异性。中部耕地表层土壤有机碳密度主要集中在  $2 \sim 6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  之间;东部耕地表层土壤有机碳密度主要集中在  $4 \sim 8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  之间;西部松原及白城地区耕地表层土壤有机碳密度大都在  $0 \sim 4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  之间。土壤有机碳密度较小 ( $< 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 的区域主要分布在白城市和松原市境内,主要是由于西部地区盐碱化严重所造成的。吉林省耕地表层土壤有机碳密度总体上呈现由东向西逐渐减小的趋势。

### 2.2 土壤有机碳含量与气候因素及土壤性质的关系

影响土壤有机碳含量的因素很多,最为重要的影响因素为气候、土壤属性和人为活动<sup>[27]</sup>,本文主要研究了年积温、年降雨、pH 和 CEC 含量对吉林省耕地土壤表层有机碳含量的影响。由于采样点数目较

多,以 5742 个采样点作散点图,各因素与土壤有机碳含量之间的关系并不明显(图 3A、图 4A、图 5A、图 6A),考虑从吉林省 9 个行政地区来分析气候因素(年积温和年降雨)对土壤有机碳含量的影响,从土壤类型来分析 pH 对土壤有机碳含量的影响及 CEC 与土壤有机碳含量的关系。

#### 2.2.1 年积温对土壤有机碳含量的影响

通过分析吉林省 9 个行政地区年积温对土壤有机碳含量的影响,从图 3B 可以看出,研究区耕地表层土壤有机碳含量与年积温呈不显著负相关( $R = -0.571, n = 9$ ),说明温度不是影响吉林省土壤有机碳分布的控制性因素,可能与温度对土壤有机碳含量的影响较为复杂有关。大量研究表明,温度对植物的净初级生产力及土壤中有机碳的分解都会产生影响<sup>[28]</sup>。温度对土壤有机碳含量的影响主要体现在两个方面:一方面温度条件会对植被的生产力及分布产生影响,改变土壤中植物残体的归还量,从而影响土壤有机碳的输入源;另一方面,温度会对土壤微生物的活性和数量产生影响,进而影响微生物对有机碳的分解和转化<sup>[22,29]</sup>。而植物的净初级生产力及土壤有机碳的分解,二者对温度的相对敏感性在很大程度上决定温度影响下的土壤有机碳含量<sup>[30-31]</sup>。

#### 2.2.2 年平均降雨量对土壤有机碳含量的影响

通过分析吉林省 9 个行政地区年平均降雨量对土壤有机碳含量的影响,从图 4B 可以看出,研究区耕地表层土壤有机碳含量与年平均降雨量呈显著正相关( $R = 0.766, n = 9$ ),表明随着年平均降雨量的增多,

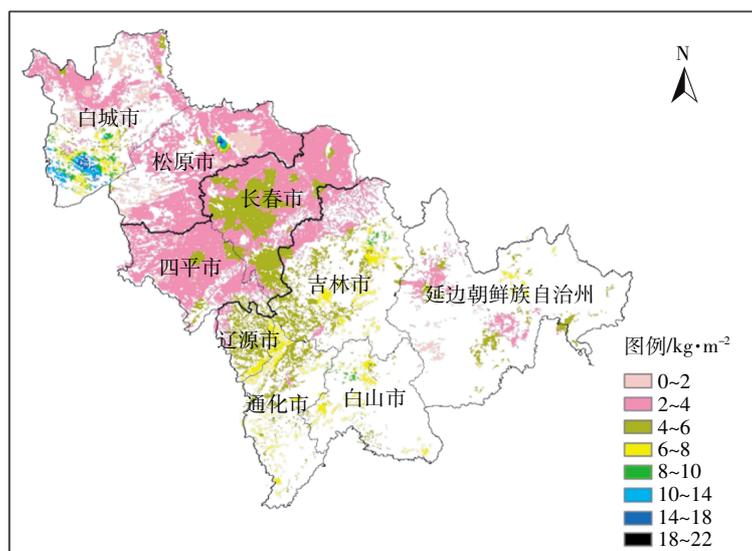
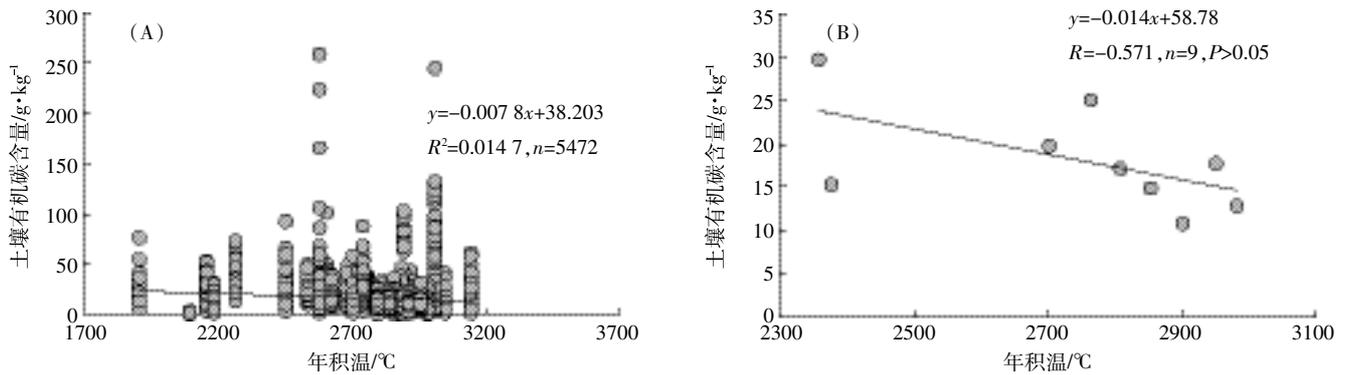


图 2 吉林省耕地表层土壤有机碳密度空间分布

Figure 2 Spatial distribution of organic carbon density in cultivated topsoils in Jilin Province



(A)吉林省 5742 个土壤采样点的土壤有机碳含量与年积温的关系

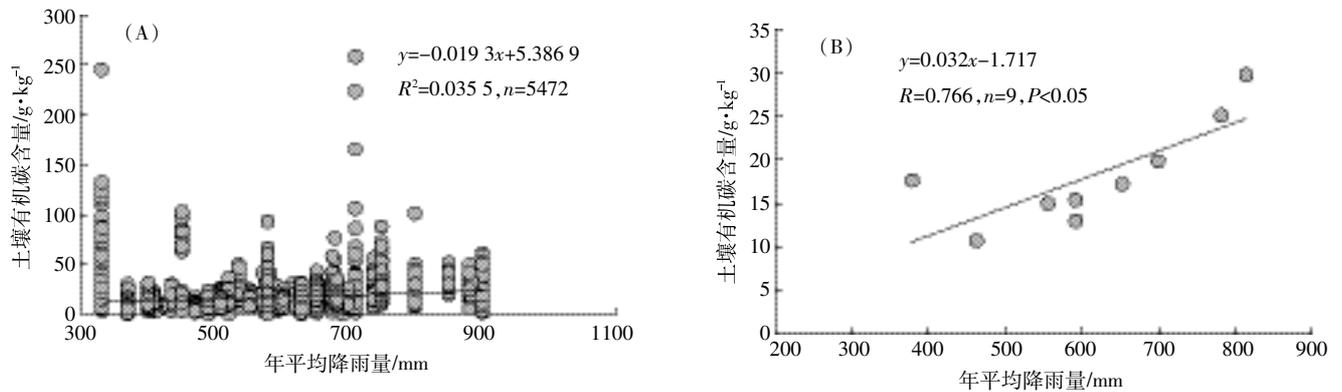
(B)吉林省 9 个行政区域的平均土壤有机碳含量与年积温的关系

A: Relationship between soil organic carbon content and annual accumulated temperature by 5742 soil sampling locations in Jilin Province

B: Relationship between soil organic carbon content and annual accumulated temperature by 9 administrative regions in Jilin Province

图 3 土壤有机碳含量与年积温的关系

Figure 3 Relationship between soil organic carbon content and annual accumulated temperature



(A)吉林省 5742 个土壤采样点的土壤有机碳含量与年平均降雨量的关系

(B)吉林省 9 个行政区域的平均土壤有机碳含量与年平均降雨量的关系

A: Relationship between soil organic carbon content and annual precipitation by 5742 soil sampling locations in Jilin Province

B: Relationship between soil organic carbon content and annual precipitation by 9 administrative regions in Jilin Province

图 4 土壤有机碳含量与年平均降雨量的关系

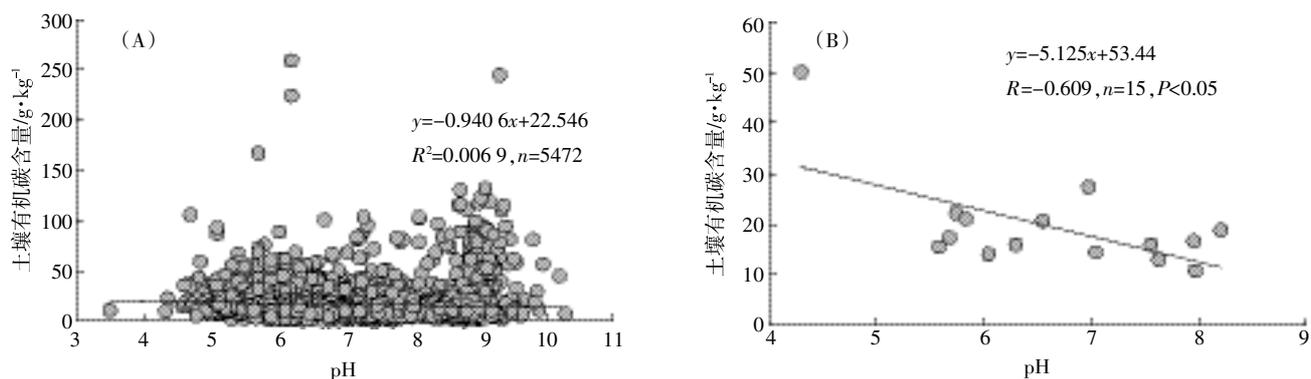
Figure 4 Relationship between soil organic carbon content and annual precipitation

土壤有机碳含量也相应增加。土壤水分可以通过影响土壤的通透性来影响土壤有机碳的含量:降水增多,土壤的通透性较差,土壤中的固有有机碳不易矿化,外源有机残体在水分充足的作用下易于降解成小分子有机物质,保存于土壤中,从而增加土壤中有机碳的含量;水分不足,则土壤的孔隙度大,土壤中的有机物质矿化分解,不易于土壤有机碳的积累<sup>[32-33]</sup>。此外,降水还会通过影响植物的净初级生产力影响土壤有机碳库的输入,降水增加可能提高光合作用速率以及水分利用和养分利用效率,进而提高植物的生产力,增加土壤有机碳库的输入,也可能提高植物呼吸速率从而降低土壤有机碳库的输入<sup>[32]</sup>。受降雨量的影响,

吉林省土壤有机碳积累量大于分解量,总体上土壤有机碳含量随降雨量增多而增加。

### 2.2.3 pH 值对土壤有机碳含量的影响

通过分析吉林省 15 个土壤类型的平均 pH 值对土壤有机碳含量的影响,从图 5B 可以看出,研究区耕地表层土壤有机碳含量与土壤 pH 呈显著负相关( $R = -0.609, n = 15$ ),表明随着 pH 值的升高,土壤有机碳含量相应减少。pH 对土壤有机碳含量的影响主要体现在 pH 对微生物生命活动的影响,pH 过高(>8.5)或者过低(<5.5)对大部分微生物都不适宜,会抑制其活动,从而使有机碳分解的速率下降,土壤中有机碳的含量相应升高<sup>[32,34-37]</sup>。土壤 pH 大部分集中



(A) 吉林省 5742 个土壤采样点的土壤有机碳含量与 pH 的关系

(B) 吉林省 15 个土壤类型的平均土壤有机碳含量与 pH 的关系

A: Relationship between soil organic carbon content and pH by 5742 soil sampling locations of Jilin Province

B: Relationship between soil organic carbon content and pH by 15 administrative regions of Jilin Province

图 5 土壤有机碳含量与 pH 的关系

Figure 5 Relationship between soil organic carbon content and soil pH

在 5.5~8.5 之间, 有机碳含量随着 pH 的增大呈现减少的趋势。

#### 2.2.4 土壤 CEC 与土壤有机碳含量的关系

通过分析吉林省 15 个土壤类型平均 CEC 与土壤有机碳含量的关系, 从图 6B 可以看出, 研究区耕地表层土壤有机碳含量与 CEC 呈显著正相关 ( $R=0.602$ ,  $n=15$ )。土壤有机质与土壤矿质部分结合时会导致表面电荷的变化, 从而影响土壤 CEC。通常情况下土壤有机质与土壤矿质部分复合会有交换点的损耗且常伴随其他土壤性质的变化, 但是土壤有机质比土壤矿质部分的 CEC 要大得多, 在绝大多数情况下, 土壤有机质的交换量虽不能百分之百转化为土壤 CEC, 但仍

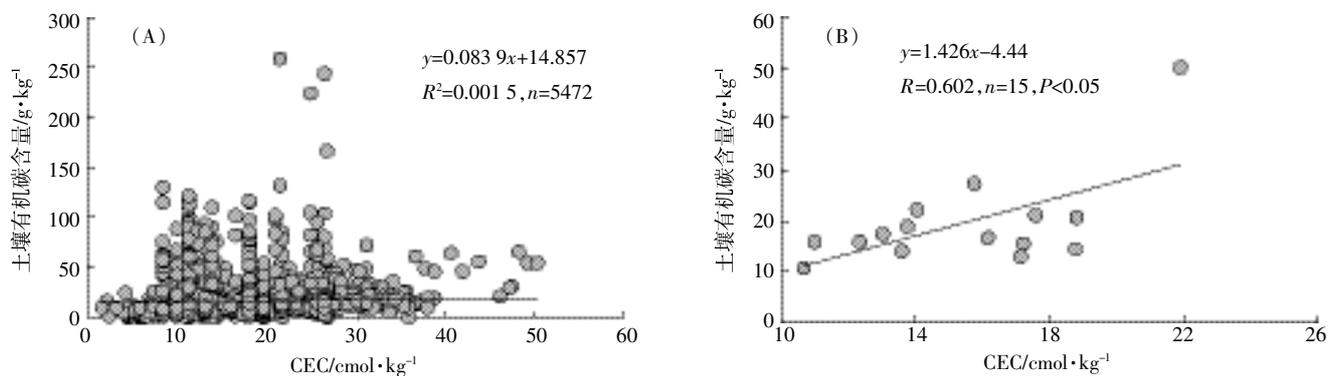
可使土壤 CEC 有所增加, 土壤有机碳含量与 CEC 呈显著正相关关系<sup>[38-39]</sup>。

### 3 结论

(1) 吉林省耕地表层 (0~20 cm) 土壤有机碳储量为 0.206 Pg, 主要分布在暗棕壤、白浆土、黑土、黑钙土和草甸土 5 种土壤类型。

(2) 吉林省耕地表层土壤有机碳密度具有高度的空间变异性, 整体上呈现出自东向西逐渐减小的趋势。

(3) 年降雨量、年积温、pH 均是影响吉林省耕地表层土壤有机碳含量的因素, 其中年降雨量和 pH 是



(A) 吉林省 5742 个土壤采样点的土壤有机碳含量与 CEC 的关系

(B) 吉林省 15 个土壤类型的平均土壤有机碳含量与 CEC 的关系

A: Relationship between soil organic carbon content and CEC by 5742 soil sampling locations in Jilin Province

B: Relationship between soil organic carbon content and CEC by 15 administrative regions in Jilin Province

图 6 土壤有机碳含量与土壤阳离子交换量的关系

Figure 6 Relationship between soil organic carbon content and CEC

吉林省耕层土壤有机碳含量的控制因子,CEC与吉林省耕层土壤有机碳含量有密切关系。在进行土壤有机碳空间预测和碳库估算时,需要考虑这些因子,在农业利用及固碳减排措施的选择上需要关注耕层土壤有机碳储量及分布。

#### 参考文献:

- [1] Eswarran H E, van Den Berg E V, Reich P. Organic carbon in soils of the world[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1993, 57(1):192-194.
- [2] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *Eur J Soil Sci*, 1996, 47(2):151-163.
- [3] Schleisinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils[J]. *Nature*, 1990, 348(6):232-234.
- [4] 田娜. 基于GIS的区域果园土壤有机碳库变化研究:以永春县为例[D]. 福州:福建农林大学, 2011.  
TIAN Na. Soil organic carbon dynamics in regional orchards based on GIS: A case study of Yongchun County[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.
- [5] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5):533-544.  
WANG Shao-qiang, ZHOU Cheng-hu, LI Ke-rang, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China[J]. *Acta Geographical Sinica*, 2000, 55(5):533-544.
- [6] Song G H, Li L Q, Pan G X, et al. Topsoil organic storage of China and its loss by cultivation[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 74(1):47-62.
- [7] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J]. *科技通报*, 1999, 15(5):330-332.  
PAN Gen-xing. Study on carbon reservoir in soils of China[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5):330-332.
- [8] 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 基于1:100万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(12):2279-2283.  
YU Dong-sheng, SHI Xue-zheng, SUN Wei-xia, et al. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1:1 000 000 soil database[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12):2279-2283.
- [9] 黄耀, 孙文娟. 近20年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J]. *科学通报*, 2006, 51(7):750-763.  
HUANG Yao, SUN Wen-juan. Topsoil organic carbon content of Chinese farmland in recent 20 years[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7):750-763.
- [10] 邱建军, 王立刚, 唐华俊, 等. 黑土土壤质量演变初探 V. 东北主要黑土区表层土壤有机碳密度分布及碳库估算[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(8):1166-1171.  
QIU Jian-jun, WANG Li-gang, TANG Hua-jun, et al. Study on the simulation of soil organic carbon storage in arable lands in northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(8):1166-1171.
- [11] 孙维侠, 史学正, 于东升, 等. 我国东北地区土壤有机碳密度和储量的估算研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2):298-301.  
SUN Wei-xia, SHI Xue-zheng, YU Dong-sheng, et al. Estimation of soil organic carbon density and storage of Northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2):298-301.
- [12] 方华军, 杨学明, 张晓平. 东北黑土有机碳储量及其对大气CO<sub>2</sub>的贡献[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3):9-12.  
FANG Hua-jun, YANG Xue-ming, ZHANG Xiao-ping. Organic carbon stock of black soils in Northeast China and its contribution to atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3):9-12.
- [13] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 东北黑土有机碳的分布及其损失量研究[J]. *土壤通报*, 2008, 39(3):533-538.  
LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, YANG Xue-ming, et al. Distribution of soil organic carbon and its loss in black soils in Northeast China[J]. *Chinese Journal and Soil Science*, 2008, 39(3):533-538.
- [14] 吉林省土壤肥料总站. 吉林土壤[M]. 北京:中国农业出版社, 1998.  
Jilin Soil and Fertilizer Station. Jilin soil[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1998.
- [15] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 1999.  
Soil Science Society of China. The analysis method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 1999.
- [16] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M]. 二版. 北京:科学出版社, 1990.  
XIONG Yi, LI Qing-kui. Chinese soil[M]. The second edition. Beijing: Science Press, 1990.
- [17] 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 Cheng-jun, SHI Xue-zheng, YU Dong-sheng, et al. Main factor controlling SOC spatial distribution at the province scale as affected by soil type and land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3):425-432.
- [18] Kumar S, Lai R, Liu D, et al. Estimating the spatial distribution of organic carbon density for the soils of Ohio, USA[J]. *J Geogr Sci*, 2013, 23(2):280-296.
- [19] 刘静宇, 孟静静, 黄少鹏. 吉林省靖宇县表层土壤有机碳储量及其分布规律分析 [C]. 中国环境科学学会学术年会论文集, 2011: 1542-1545.  
LIU Jing-yu, MENG Jing-jing, HUANG Shao-peng. Topsoil organic carbon reserves and distribution of Jingyu county in Jilin Province[C]. Chinese Environmental Science Symposium, 2011: 1542-1545.
- [20] Morisada K, Ono K, Kanomata H. Organic carbon stock in forest soils in Japan[J]. *Geoderma*, 2004, 119(1-2):21-32.
- [21] Kern J S. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous united states[J]. *Soil Sci Soc AMJ*, 1994, 58(2):439-455.
- [22] Epstein H E, Burke I C, Lauenroth W K. Regional patterns of decomposition and primary production rates in the U.S. Great Plains[J]. *Ecology*, 2002, 83(2):320-327.
- [23] 姜小三, 潘剑军, 李学林. 江苏表层土壤有机碳密度和储量估算和空间分布分析[J]. *土壤通报*, 2005, 36(4):501-503.  
JIANG Xiao-san, PAN Jian-jun, LI Xue-lin. Organic carbon density and storage in topsoil of Jiangsu and spatial analysis[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4):501-503.
- [24] 黄雪夏, 倪九派, 高明, 等. 重庆市土壤有机碳库的估算及其空间

- 分布特征[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1):53-58.
- HUANG Xue-xia, NI Jiu-pai, GAO Ming, et al. Estimating soil organic carbon pool of Chongqing Area and its spatial distribution[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):53-58.
- [25] 吴彦军, 汪景宽, 李双异, 等. 黑土土壤质量演变初探 V. 东北主要黑土区表层土壤有机碳密度分布及碳库估算[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(4):535-539.
- WU Yan-jun, WANG Jing-kuan, LI Shuang-yi, et al. Preliminary studies on fertility revolution of black soil: V. Organic carbon density and storage in topsoil of northeast main black soil area and spatial analysis[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2007, 38(4):535-539.
- [26] 何艳芬, 张 柏, 马超群. 吉林省耕地动态变化及其对粮食生产的影响[J]. 资源科学, 2004, 26(4):119-125.
- HE Yan-fen, ZHANG Bo, MA Chao-qun. Dynamic change of cultivated land and its impact on grain production in Jilin Province[J]. *Resources Science*, 2004, 26(4):119-125.
- [27] 姜 勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2007, 26(2):278-285.
- JIANG Yong, ZHUANG Qiu-li, LIANG Wen-ju. Soil organic carbon pool and its affecting factors in farm land ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(2):278-285.
- [28] 刘 伟, 程积民, 高 阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 土壤学报, 2012, 49(1):68-76.
- LIU Wei, CHENG Ji-min, GAO Yang, et al. Distribution of soil organic carbon in grassland on losses plateau and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1):68-76.
- [29] 金 峰, 杨 浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. 土壤, 2000(1):11-17.
- JIN Feng, YANG Hao, ZHAO Qi-guo. Advances in the study of soil organic carbon storage and its effecting factors[J]. *Soils*, 2000(1):11-17.
- [30] Melillo J M. Global climate change and terrestrial net primary production[J]. *Nature*, 1993, 363(13):234-240.
- [31] 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.
- [32] 许信旺, 潘根兴, 曹志红, 等. 安徽省土壤有机碳空间差异及影响因素[J]. 地理研究, 2007, 26(6):1077-1086.
- XU Xin-wang, PAN Gen-xing, CAO Zhi-hong, et al. A study on the influence of soil organic carbon density and its spatial distribution in Anhui Province of China[J]. *Geographical Research*, 2007, 26(6):1077-1086.
- [33] 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 Bao-guo, ZHOU Guang-sheng. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1):99-105.
- [34] 祖元刚, 李 冉, 王文杰, 等. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J]. 生态学报, 2011, 31(18):5207-5216.
- ZU Yuan-gang, LI Ran, WANG Wei-jie, et al. Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in Northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18):5207-5216.
- [35] 朱雪竹, 黄 耀, 杨新中. 模拟酸雨对不同土壤有机碳和作物秸秆分解的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2):480-484.
- ZHU Xue-zhu, HUANG Yao, YANG Xin-zhong. Effects of simulated acid rain on decomposition of soil organic carbon crop straw[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2):480-484.
- [36] 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.
- LIU Jing-shuang, YANG Ji-song, YU Jun-bao, et al. Study on vertical distribution of soil organic carbon in Wetlands Sanjiang Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3):5-8.
- [37] 李 忠, 孙 波, 林心熊. 我国东部土壤有机碳的密度及转化的控制因素[J]. 地理科学, 2001, 21(4):301-307.
- LI Zhong, SUN Bo, LIN Xin-xiong. Density of soil organic carbon and the factors controlling its turnover in East China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(4):301-307.
- [38] 蔡祖聪, 马毅杰. 土壤有机质与土壤阳离子交换量的关系[J]. 土壤学进展, 1988, 16(3):10-15.
- CAI Zu-cong, MA Yi-jie. Relationship between soil organic matter and soil cation exchange capacity[J]. *Process in Soil Science*, 1988, 16(3):10-15.
- [39] 赵之重. 青海省土壤阳离子交换量与有机质和机械组成关系的研究[J]. 青海农林科技, 2004(4):4-6.
- ZHAO Zhi-zhong. Study on relationship between organic matter, soil fractions and CEC in Qinghai Province[J]. *Qinghai Forestry Science and technology*, 2004(4):4-6.