

刘书田, 窦森, 郑伟, 等. 基于配方施肥数据集的有机碳含量与温度和降水量相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1413-1420.
LIU Shu-tian, DOU Sen, ZHENG Wei, et al. temperatures based on soil testing and fertilizer recommendation data set[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1413-1420.

基于配方施肥数据集的有机碳含量与温度和降水量相关性研究

刘书田^{1,2}, 窦森^{1*}, 郑伟³, 曹忠林⁴, 侯彦林², 郑宏艳², 黄治平²

(1.吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 3.浙江省衢州市柯城区书院中学, 浙江 衢州 324000; 4.长春市九台区植物保护检疫站, 长春 130500)

摘要:采用全国测土配方施肥项目土壤基础养分数据集,研究了在全球气候变暖的大背景下年平均温度和年平均降水量对土壤有机碳含量的影响。按照年平均温度<5、5~10、10~15、15~20、>20℃以及年平均降水量0~200、200~400、400~600、600~800、800~1000、1000~1200、1200~1400、1400~1600 mm和>1600 mm等区间,分别研究了每个降水区间内自第二次土壤普查后近30年来年平均温度和年平均降水量对土壤有机碳影响的密切程度,结果表明:年平均温度低于10℃时,土壤有机碳含量与年平均温度的相关性比其与年平均降水量的相关性好,高于20℃时,土壤有机碳含量与年平均降水量和年平均温度的相关性都很差,但是偏相关结果表明,在10~20℃时,土壤有机碳含量虽然与年平均温度和年平均降水量都有显著的正相关,但其随着年平均温度升高而升高的事实是被随着年平均降水量增加而增加的事实所掩盖的;在年平均降水量0~200 mm的区间内,土壤有机碳与年平均降水量有显著的相关性,而与年平均温度的相关性很差,年平均降水量对土壤有机碳影响的密切程度较大,在200~400、400~600、600~800 mm的年平均降水量区间内,土壤有机碳与年平均温度的相关性要好于其与年平均降水量的相关性,年平均温度对土壤有机碳影响的密切程度较大,尤其在400~800 mm年降水量区间内的半湿润地区,土壤有机碳与年平均温度呈现极显著的相关关系,在年平均降水量大于800 mm后,年平均温度和平均降水量对土壤有机碳累积的影响并不明显。

关键词:测土配方施肥;土壤有机碳;年平均降水量;年平均温度

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)07-1413-08 doi:10.11654/jaes.2016.07.026

Correlation of organic carbon content and annual average precipitation and annual average temperatures based on soil testing and fertilizer recommendation data set

LIU Shu-tian^{1,2}, DOU Sen^{1*}, ZHENG Wei³, CAO Zhong-lin⁴, HOU Yan-lin², ZHENG Hong-yan², HUANG Zhi-ping²

(1.College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 3.Quzhou Shuyuan Middle School, Quzhou 324000, China; 4.The Plant Protection and Quarantine Station of Jiutai of Changchun, Changchun 130500, China)

Abstract: In this paper, based on the soil nutrient data set of the national soil testing and formula fertilization project, the effects of annual mean temperature and annual mean precipitation on soil organic carbon content were studied in the background of global warming. According to the annual average temperature of <5℃, 5~10℃, 10~15℃, 15~20℃, >20℃ and annual average precipitation 0~200 mm, 200~400 mm, 400~600 mm, 600~800 mm, 800~1000 mm, 1000~1200 mm, 1200~1400 mm, 1400~1600 mm and >1600 mm, the effects of the average temperature and the annual mean precipitation on soil organic carbon in the second soil survey in each precipitation range during the past 30 years were studied. The results show that: the annual average temperature was less than 10℃, greater than 20℃, the correlation between soil organic carbon content and annual average precipitation and annual average temperature was very poor. But partial correlation results show that in 10~20℃, soil organic carbon content although with annual mean temperature and annual mean precipitation have signifi-

收稿日期:2016-03-29

基金项目:吉林省重点科技攻关项目(2011CB100503NY);国家自然科学基金项目(41571231);中国农业科学院创新工程(2016-cxgc-hyl)

作者简介:刘书田(1982—),男,博士研究生,主要从事农业环境数据挖掘与信息化研究。E-mail:liushutian6952@126.com

*通信作者:窦森 E-mail:dousen1959@126.com

cant positive correlation, but increased with the increase of mean annual temperature, that was with the increase in average annual precipitation and increase the fact that covered it. In the range of annual average precipitation 0~200 mm, soil organic carbon had a significant correlation with annual average precipitation, but the average annual precipitation was very poor, the annual average precipitation plays a major role in driving, in the range of 200~400 mm, 400~600 mm and 600~800 mm, the correlation between soil organic carbon and annual average temperature was better than that of annual average precipitation, the annual average temperature plays a major role in driving, especially in the semi humid area of 400~800 mm, the annual average temperature of soil organic carbon was extremely significant, after the annual average precipitation is more than 800 mm, the cumulative effect of annual mean temperature and mean precipitation on soil organic carbon was not significant.

Keywords: data set of soil testing and fertilizer recommendation; soil organic carbon; annual average precipitation; annual average temperature

土壤碳库作为陆地主要碳库之一,对于气候变化具有重要的意义。土壤碳库是陆地碳库的重要组成部分,全球约有 1500 Gt 碳以有机质形态储存于地球土壤中,是陆地植被碳库(500~600 Gt)的 2~3 倍,是全球大气碳库(750 Gt)的 2 倍^[1]。但目前宏观尺度上关于土壤有机碳分布的主要影响因素及其控制过程仍了解很少,这制约着全球大气碳收支的准确评估,是出现未知碳汇、预测气候变化及其影响不确定性的主要原因。有学者认为,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水分^[2]。因此,气候因子与土壤有机碳储量之间相关性的研究可以辅助评价气候变化后土壤有机碳储量的长期变化趋势及其区域差异^[3]。已有的研究表明,土壤有机碳储量随降水的增加而增大,随温度的降低而增大^[4],其分布受气候、植被、地形等环境因素影响^[5],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^[6],但是在宏观尺度上研究土壤有机碳的分布规律时很多区域性的影响因素可以忽略不计。微生物是土壤有机质分解和转化的主要驱动力,在一定的温度范围内,温度越高土壤微生物活性就越强,土壤有机质分解就越快^[9]。在较高的温度下,土壤中的理化反应速度较快,微生物活性强且代谢旺盛,作物生长速度也较快;反之,在温度较低时,尽管作物生长可能较慢,但是由于土壤中的各种理化反应也较慢,微生物活性也相对较弱且代谢相对较差,有机质的分解和养分转化等也相对较慢,有机质和养分的含量则较高^[8]。

为了进一步揭示年平均温度和年平均降水量对土壤有机碳含量的影响,明确土壤有机碳分布的宏观主导因素,本文利用最新的全国测土配方施肥数据集的土壤有机碳数据,结合中国气象科学数据共享服务网的气象数据,深入分析了在全球气候变暖的大背

景下,土壤有机碳与年平均温度和年平均降水量的相关性,以期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 材料与方法

1.1 数据来源

本研究中所采用的数据来源于全国测土配方施肥项目《测土配方施肥土壤基础养分数据集(2005—2014)》^[7],主要包括省、地区、县的有机碳、全氮、有效磷、速效钾等指标。按照全国每个县(区)的土壤有机碳平均值作为该县(区)的有机碳含量值,同时将该县(区)行政中心点的 GPS 坐标点作为土壤有机碳含量的坐标点位。

本研究中所采用的气象数据主要包括年平均温度和年平均降水量,来源于《中国气象科学数据共享服务网》(<http://cdc.nmic.cn>)中国 756 个基本、基准地面气象观测站气候资料年值数据集,气候资料中的年平均温度和年平均降水量数据主要取 2000—2012 年的平均值,其气象数据以各县所对应的气象观测站的气象数据为代表。

1.2 数据分析

应用 Excel 2007 和 SPSS 15.0 等软件对上述县域内年平均温度、年平均降水量、有机碳含量进行相关性分析、主成分分析等数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 年平均温度对有机碳分布的影响

一般而言,在较高的温度下,土壤中的理化反应较快,微生物活性强且代谢旺盛,土壤动物活跃,作物生长速度也较快。因此,土壤有机质的分解和养分的转化也较快,土壤有机碳和养分含量相对较低^[8],反之,易于土壤有机碳的积累。由表 1 可知,5℃以下的样本中,年平均降水量和年平均温度对土壤有机碳均有

显著的相关性, R^2 分别为 0.173 2 和 0.382 7, 而且与年平均温度的相关性要高于与年平均降水量的相关性, 说明温度对这一区域土壤有机碳的累积影响密切程度较大; 5~10 °C 区间内, 年平均降水量和年平均温度也对土壤有机碳有显著的影响, 仍然是与年平均温度的相关性要高于与年平均降水量的相关性, 说明仍然是温度对土壤有机碳的累积影响密切程度较大; 但是在 10~15 °C 和 15~20 °C 区间内, 土壤有机碳与年平均降水量的相关性要好于其与年平均温度的相关性, 与年平均降水量显著相关, 而与年平均温度不相关。在这一区域内, 已经不是温度对土壤有机碳的影响密切程度较大, 取而代之的是降水量对其影响密切程度较大; 在 20 °C 以上, 土壤有机碳含量与年平均降水量和年平均温度的相关性都很差, 说明他们对土壤有机碳的累积影响并不明显。随着温度的升高, 各温度区域内土壤有机碳含量的标准差呈现逐渐降低的趋势。这可能是土壤有机碳对年平均温度较为敏感, 随着年平均温度的升高, 土壤有机碳对年平均温度的敏感性降低, 因此导致标准差减小。

图 1 显示的是土壤有机碳含量与年平均温度的相关关系。在年平均温度小于 10 °C 时, 与土壤有机碳含量相关方程为 $y=1.640 5x+23.757$, $R^2=0.399 8$, 显著相关, 土壤有机碳含量随着温度的降低而升高。土壤有机碳含量与年平均降水量的相关方程为 $y=0.011 2x+9.265 7$, $R^2=0.049 42$, 低度相关。这说明在年平均温度小于 10 °C 时, 年平均温度对土壤有机碳的累积影响密切程度较大。

由图 2 可知, 在年平均温度为 10~20 °C 时, 土壤有机碳含量与年平均温度和年平均降水量均呈现显著相关, 与年平均降水量的相关方程为 $y=0.007 9x+5.549 1$, $R^2=0.435 0$, 与年平均温度的相关方程为 $y=$

$1.091 6x-3.759 4$, $R^2=0.267 8$ 。由此可见, 在年平均温度为 10~20 °C 时年平均降水量和年平均温度对土壤有机碳的累积起基本相似的重要作用。但是究竟哪个因素对土壤有机碳的影响密切程度较大, 需要进一步研究。

当年平均温度大于 20 °C 时, 与年平均降水量的相关方程为 $y=0.001 7x+17.441$, $R^2=0.033 89$, 与年平均温度的相关方程为 $y=-0.507 9x+19.801$, $R^2=0.097 28$, 相关性都很差。由此可见, 在年平均温度大于 20 °C 时, 年平均温度和平均降水量对土壤有机碳的累积影响并不明显。

2.2 年平均降水量对有机碳分布的影响

降雨与土壤水分状况密切相关, 因此在很大程度上直接影响土壤湿度和通气性、土壤氧化还原等, 土壤水还参与土壤中矿物质风化、有机物的合成和分解等过程^[8], 所以降水量对土壤有机碳含量的影响是直

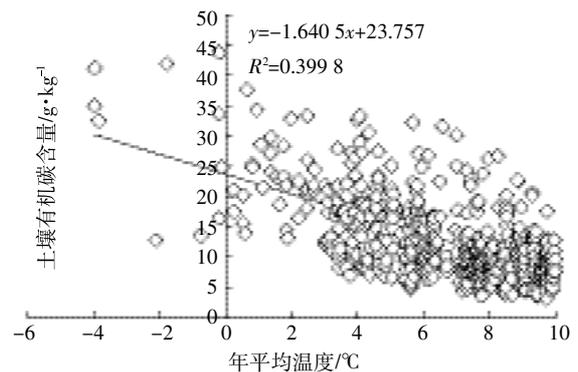


图 1 年平均温度小于 10 °C 时土壤有机碳含量与年平均温度的关系 ($n=581$)

Figure 1 The relationship between soil organic carbon content and annual average temperature at an average temperature of less than 10 °C ($n=581$)

表 1 不同年平均温度下土壤有机碳变化 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 1 Changes of soil organic carbon under different annual average temperature ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

温度范围	5 °C 以下	5~10 °C	10~15 °C	15~20 °C	20 °C 以上
样本数/个	157	424	705	858	204
与年平均降水量拟合方程	$y=0.033x+7.363 3$ $R^2=0.173 2$	$y=0.011 6x+5.766 0$ $R^2=0.181 4$	$y=0.009 7x+4.187 3$ $R^2=0.265 0$	$y=0.006 1x+8.014 6$ $R^2=0.214 6$	$y=-0.001 7x+17.441 0$ $R^2=0.033 9$
与年平均温度拟合方程	$y=-2.943 7x+27.181$ $R^2=0.382 7$	$y=-1.492 9x+22.175$ $R^2=0.250 3$	$y=-0.250 1x+13.532$ $R^2=0.007 0$	$y=0.943 8x+0.709 6$ $R^2=0.007 2$	$y=-0.063 4x+13.127$ $R^2=0.097 3$
有机碳平均值	15.86	10.82	10.33	15.53	14.68
最小值	2.93	2.09	1.95	2.41	1.97
最大值	43.80	38.38	34.27	32.56	25.32
标准差	8.13	5.27	4.71	4.37	3.41

接的。

按照年平均降水量 0~200、200~400、400~600、600~800、800~1000、1000~1200、1200~1400、1400~1600 mm 和 >1600 mm 将土壤有机碳分为 9 个区间, 进一步研究在不同的区间内土壤有机碳与年平均降水量和年平均温度的关系, 见表 2。在 0~200 mm 的地区, 土壤有机碳与年平均温度呈现低度相关, 但是与年平均降水量呈现显著相关 ($R^2=0.329 0$), 在此地区, 年平均降水量对有机碳的累积影响密切程度较大。在 200~400、400~600、600~800 mm 区间内土壤有机碳与温度呈正相关, 而与年平均降水量不相关, 在这三个区间内, 温度对土壤有机碳的累积影响密切程度较大, 而且在 400~600 mm 区间内, 土壤有机碳含量与年平均温度的相关性 $R^2=0.523 7$, 呈极显著关系, 年平均温度对土壤有机碳累积的贡献大。在 800~1000、1000~1200、1200~1400、1400~1600 mm 和 >1600 mm 的

年降水量的区间内, 土壤有机碳含量与年平均降水量和年平均温度均无相关性, 可见, 年平均降水量在 800 mm 以上, 年平均温度和平均降水量对土壤有机碳累积的影响并不明显。

按照年平均降水量(干旱区 0~200 mm、半干旱区 200~400 mm、半湿润区 400~800 mm 和湿润区大于 800 mm 的划分标准^[25]), 来讨论干旱区、半干旱区、半湿润区和湿润区土壤有机碳的主要影响因素, 结果分别见图 3、图 4、图 5。在年平均降水量 0~200 mm 的干旱地区, 土壤有机碳含量与年平均降水量的方程为 $y=0.022 3x+5.885 3$, $R^2=0.329 0$, 呈现显著相关, 与年平均温度的相关方程为 $y=-0.027 0x+11.387$, $R^2=0.076 6$, 干旱区内土壤有机碳的累积随着年平均降水量的增加而增加, 而与年平均温度不相关, 年平均降水量对土壤有机碳累积的影响程度明显高于年平均温度对土壤有机碳的影响程度。在年平均降水量 200~

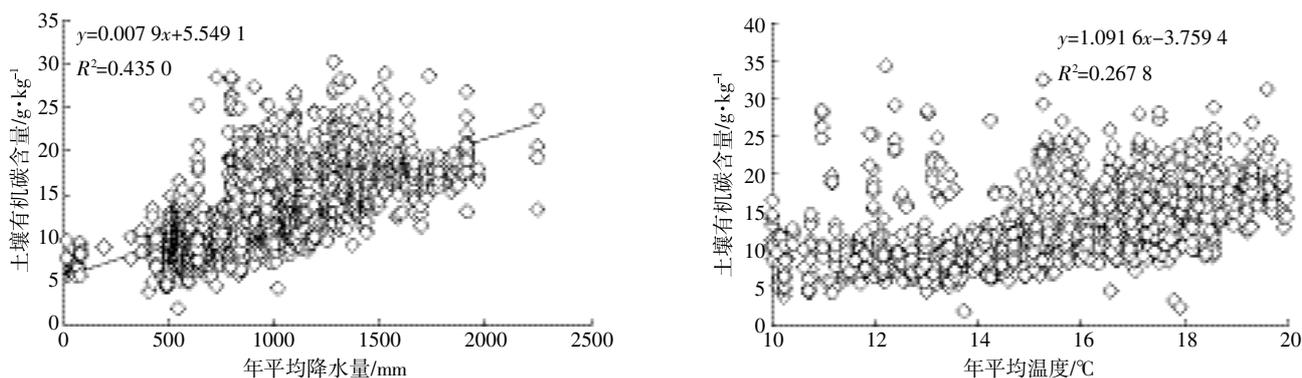


图 2 年平均温度 10~20 °C 时土壤有机碳含量与年平均降水量 ($n=1442$) 和年平均温度 ($n=1563$) 的关系
Figure 2 The relationship between soil organic carbon content and annual average precipitation ($n=1442$) and annual average temperature ($n=1563$) at an average temperature of 10~20 °C

表 2 不同年平均降水量下土壤有机碳变化 ($g \cdot kg^{-1}$)

Table 2 Changes of soil organic carbon under different annual average precipitation ($g \cdot kg^{-1}$)

降水量/mm	0~200	200~400	400~600	600~800	800~1000	1000~1200	1200~1400	1400~1600	>1600
样本数/个	89	203	579	315	263	248	209	211	233
与降水量拟合方程	$y=0.022 3x+5.885 3$ $R^2=0.329 0$	$y=0.001 6x+9.210 5$ $R^2=0.000 7$	$y=-0.004x+13.035$ $R^2=0.001 6$	$y=0.006 3x+8.201 5$ $R^2=0.003 7$	$y=-0.007 2x+20.028$ $R^2=0.006 6$	$y=0.001 3x+13.45$ $R^2=0.020 0$	$y=0.011 3x+2.025 7$ $R^2=0.018 9$	$y=0.011 8x-0.522 5$ $R^2=0.025 5$	$y=0.005 5x+9.081 8$ $R^2=0.031 6$
与年平均温度拟合方程	$y=-0.027 0x+11.387$ $R^2=0.076 6$	$y=-1.173 4x+17.982$ $R^2=0.279 6$	$y=0.108 5x^2-2.656 9x+25.104$ $R^2=0.523 7$	$y=0.091 9x^2-2.687 6x+30.283$ $R^2=0.314 4$	$y=-0.385 6x+19.493$ $R^2=0.042 4$	$y=-0.336 5x+23.537$ $R^2=0.024 0$	$y=-0.384 3x+21.607$ $R^2=0.033 1$	$y=-0.344 4x+23.543$ $R^2=0.024 5$	$y=0.109 9x+12.930$ $R^2=0.002 8$
有机碳平均值	8.68	10.10	10.98	12.57	13.6	14.91	16.78	17.12	16.12
最小值	5.32	3.15	1.95	2.09	3.36	3.67	4.61	2.41	1.97
最大值	17.77	43.80	41.26	38.38	33.31	32.56	30.24	28.86	28.60
标准差	2.41	5.59	5.25	6.33	5.19	4.82	4.14	3.44	3.54

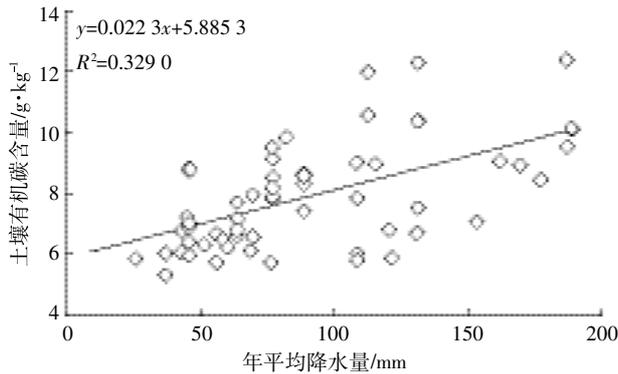


图3 年平均降水量在0~200 mm时土壤有机碳含量与年平均降水量的关系($n=89$)

Figure 3 The relationship between soil organic carbon content and annual average precipitation at annual average precipitation 0~200 mm($n=89$)

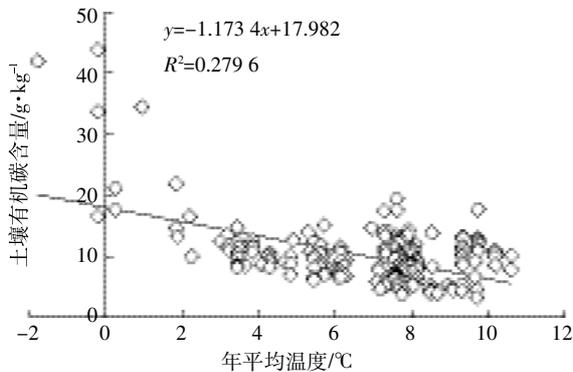


图4 年平均降水量在200~400 mm时土壤有机碳含量与年平均温度的关系($n=203$)

Figure 4 The relationship between soil organic carbon content and annual average temperature at annual average precipitation 200~400 mm($n=203$)

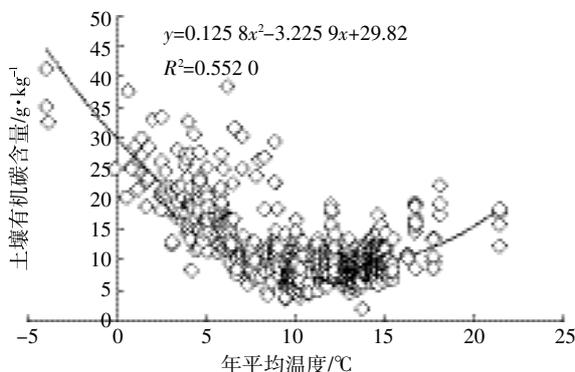


图5 年平均降水量在400~800 mm时土壤有机碳含量与年平均温度的关系($n=894$)

Figure 5 The relationship between soil organic carbon content and annual average temperature at annual average precipitation 400~800 mm($n=894$)

400 mm 的半干旱地区,土壤有机碳含量与年平均温度的方程为 $y=-1.1734x+17.982$, $R^2=0.2796$,与平均降水量的相关方程为 $y=0.0016x+9.2105$, $R^2=0.0007$,与年平均温度呈显著相关,与年平均降水量不相关,年平均温度开始对土壤有机碳的累积影响程度提高。在年平均降水量 400~800 mm 的半湿润地区,土壤有机碳含量与年平均降水量的方程为 $y=0.0066x+7.6676$, $R^2=0.0160$,年平均降水量仍然不是土壤有机碳累积的主要影响因素,而与年平均温度的相关方程为 $y=0.1258x^2-3.2259x+29.82$, $R^2=0.5520$,呈现极显著关系,半湿润地区年平均温度对土壤有机碳累积的影响程度明显高于年平均降水量对土壤有机碳累积的影响程度。在年平均降水量大于 800 mm 的湿润地区,年平均温度和年平均降水量对土壤有机碳累积的影响均不及其他因素。土壤有机碳含量与年平均降水量的方程为 $y=0.0025x+12.291$, $R^2=0.0368$,与年平均温度的相关方程为 $y=-0.0845x+17.038$, $R^2=0.0030$ 。

在不同年降水量的地区,年平均降水量和年平均温度发挥着不同的主导作用。当年平均温度为限制因子时,年平均温度对土壤有机碳的影响起主导作用,当年平均降水量为限制因子时,年平均降水量对土壤有机碳的影响起主导作用;当年平均温度和年平均降水量都不是限制因子时,它们共同影响土壤有机碳的分布,但是究竟哪个因素对土壤有机碳的影响密切程度较大,需要进一步的研究。

3 讨论

3.1 年平均温度与年平均降水量的相关性分析

在年平均温度小于 10 °C 时,土壤有机碳与年平均温度的相关系数 $R^2=0.3998$,与年平均降水量的 $R^2=0.0494$,在年平均温度为 10~20 °C 时,与年平均温度的 $R^2=0.2678$,与年平均降水量的 $R^2=0.4349$;年平均温度大于 20 °C 时,与年平均降水量的 $R^2=0.0339$,与年平均温度的 $R^2=0.0973$ 。由此可见,土壤有机碳含量在一定的范围内是随着年平均温度和年平均降水量变化的,尤其是在 10~20 °C 时年平均降水量对土壤有机碳的影响密切程度较大。

很多研究结果表明,土壤有机碳含量随着温度的变化而变化,在温度较低时,尽管作物生长可能较慢,但是由于土壤中的各种理化反应也较慢,微生物活性也相对较弱且代谢相对较差,有机质的分解和养分转化等也相应较慢,有机质和养分的含量也较高^[8]。气候因子在土壤有机碳的蓄积和输出过程中,起着重要的

作用。一方面,气候条件制约植被类型、影响植被的生产力;另一方面,微生物是其周转和分解的主要驱动力,气候通过土壤水分和温度等条件的变化直接影响微生物对有机碳的分解和转化速度^[10-11]。

本研究则认为,在温度低于 10℃时,土壤有机碳含量与年平均温度呈负相关,即随着年平均温度的降低而升高,而在年平均温度为 10~20℃时,土壤有机碳含量却与年平均温度正相关,即随着年平均温度的升高而升高,且年平均温度大于 20℃时,土壤有机碳含量又随着年平均温度的升高呈现降低趋势。由于在年平均温度 10~20℃时,土壤有机碳含量与年平均温度正相关,明显违背了一些前人研究土壤有机碳含量随着温度的升高而升高的常理^[12-14],本文作者对年平均温度和年平均降水量做了相关性分析。

由表 3 可知,在我国,年平均温度与年平均降水量呈显著的相关关系,相关系数 $R=0.7410$ 。这说明在年均温度为 10~20℃时,土壤有机碳含量与年平均温度表现出的正相关关系可能受到第三个变量即降水量的影响^[9],因此我们运用偏相关关系进行分析。

3.2 偏相关性分析

降水量和降水时间等作为一个重要的气候因素,也是影响土壤水分等情况的重要因素,也在很大程度上直接影响土壤湿度、通气性、土壤氧化还原状况等,并且在土壤的形成、肥力状况等方面发挥着重要、甚至是决定性的作用^[8]。土壤温度影响微生物对有机质的降解,一般来说在 0~35℃的范围内,微生物分解有机物的速率随着温度的升高而升高,温度每升高 10℃,土壤有机质最大分解速率提高 2~3 倍^[20]。有研究表明,随着温度的升高,土壤有机碳的矿化速率增大^[23-24],在 5~35℃的范围内,随培养温度升高水稻土

有机碳矿化速率和累积矿化量均升高,15、25℃和 35℃时土壤有机碳累积矿化量分别是 5℃时的 1.94、3.55、6.01 倍^[19]。

由表 4 可知,偏向分析结果显示,在年平均温度 10~20℃的范围内,土壤有机碳含量与年平均温度和年平均降水量的相关性与上文单一变量相关性分析结果较为一致,但是偏相关分析表明,土壤有机碳含量与年平均温度的偏相关系数为 0.1190,而与年平均降水量的偏相关系数为 0.4300,显著相关,故 10~20℃范围内的土壤有机碳含量与年平均温度的相关性是错误的,被年平均降水量的因素掩盖了,之所以出现正相关关系是因为年平均温度与年降水量具有显著的相关性^[9],偏相关系数为 0.741,导致土壤有机碳含量与年平均温度呈现正相关。

我国东部自东北到华南,平均降水量与年平均温度不断变化,大兴安岭地区土壤有机碳密度最高,黄土高原地区土壤有机碳密度最低,其次是华北地区,而这是由年平均降水量与年平均温度共同作用的结果^[21]。在我国的中纬度地区,土壤有机碳含量随着纬度增加,降水量和有机碳含量间相关系数明显增加,而在高纬度地区和低纬度地区,年平均降雨量与土壤有机碳含量有着截然相反的相关性,即降水量可能是影响土壤有机碳含量的重要因素之一,年平均气温 13~23℃地区,主要包括福建、江西、安徽和江苏的一部分,年平均温度对有机碳含量的影响甚微^[22]。这与本研究结果基本一致。

因此,年平均温度在 10~20℃范围内,土壤有机碳含量受到降水量因素的影响大于受年均温度的影响^[15]。这就是年平均温度在 10~20℃范围内,土壤有机碳含量不是随着温度的降低而升高,而是随着温度的升高而升高的原因,即年平均降水量起主导作用。

表 3 年平均降水量与年平均温度相关性分析

Table 3 Correlation analysis between annual average precipitation and annual average temperature

项目	降水量	温度	
降水量	Pearson 相关性	1	0.741**
	显著性(双尾)		0.000
	协方差	241 031.706	1 873.828
	样本数 n	2343	2343
温度	Pearson 相关性	0.741**	1
	显著性(双尾)	0.000	
	协方差	1 873.828	26.563
	样本数 n	2343	2351

注:**表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的。下同。

表 4 土壤有机碳含量与年平均温度和年平均降水量的偏相关系数

Table 4 The partial correlation coefficients between soil organic carbon with annual average precipitation and annual average temperature

项目	样本数	偏相关系数	
		年平均温度(控制变量为年平均降水量)	年平均降水量(控制变量为年平均温度)
所有样本	2337	-0.3320**	0.4070**
<10℃	571	-0.5670**	0.3980**
10~20℃	1562	0.1190**	0.4300**
>20℃	204	-0.1220	-0.0960**

而年平均温度大于 20 °C 的区域,因为年平均温度和年平均降水量充足,植被生物量大,同时土壤微生物活动剧烈,但是土壤有机碳的输入量小于输出量,年平均温度和年平均降水量对土壤有机碳的影响密切程度较小。总之,不能简单地用年平均温度和年平均降水量来考虑有机碳的分布情况,还应考虑可能受到其他因素的影响,如 pH、CEC、土壤质地、成土母质、耕作制度等因素的影响^[16-18]。

4 结论

(1)宏观尺度上,年平均气温和年平均降水量对中国年平均温度小于 20 °C 的区域的土壤有机碳分布有明显影响。

(2)在年平均温度小于 10 °C 时,土壤有机碳含量与年平均温度的相关性较好,土壤有机碳随年平均温度的降低而升高;10~20 °C 时,土壤有机碳含量虽然与年平均温度和年平均降水量都有显著的正相关,但年平均降水量对土壤有机碳分布的影响程度明显高于年平均温度;大于 20 °C 时,年降水量及年平均温度对土壤有机碳的影响不如其他因子的影响程度大。

(3)在年平均降水量 0~200 mm 的区间内,土壤有机碳与年平均降水量有显著的相关性;在 200~800 mm 的年降水量区间内,土壤有机碳与年平均温度的相关性好于其与年平均降水量的相关性,年平均温度的影响程度高于年平均降水量;大于 800 mm 的区域,年降雨量及年平均温度对土壤有机碳的影响不如其他因子的影响程度大。

参考文献:

- [1] Schesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil[J]. *Nature*, 1990, 348:232-234.
- [2] 周莉,李保国,周广胜,等.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, et al. Advance in controlling of soil organic carbon[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1):99-105.
- [3] 李海波,韩晓增,王风,等.不同土地利用下黑土密度分组中碳、氮的分配变化[J]. *土壤学报*, 2008, 45(1):112-119.
LI Hai-bo, HAN Xiao-zeng, WANG Feng, et al. Distribution of soil organic carbon and nitrogen in density fractions on black soil as affected by land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1):112-119.
- [4] 史学正,于东升.“全国土壤有机碳储量及其动态变化”专题进展报告[R]. 2004.
SHI Xue-zheng, YU Dong-sheng. "The soil organic carbon storage and its dynamic change in whole country" project progress report[R]. 2004.
- [5] 周涛,史培军,王绍强.气候变化及人类活动对中国土壤有机碳储量的影响[J]. *地理学报*, 2003, 58(5):727-734.
ZHOU Tao, SHI Pei-jun, WANG Shao-qiang. Impacts of climate change and human activities on soil carbon storage in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5):727-734.
- [6] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298:156-159.
- [7] 全国农业技术推广服务中心.测土配方施肥土壤基础养分数据集(2005—2014)[M].北京:中国农业出版社,2015.
National Agricultural Technology Extension Service Center. Soil testing and fertilizer recommendation soil basic nutrient dataset (2005—2014) [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2015.
- [8] 曾希柏,等.耕地质量培育技术与模式[M].北京:中国农业出版社,2014.
ZENG Xi-bai, et al. The technology and model of cultivation of cultivated land technology[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2014.
- [9] Brady N C, Well R R. The natural and properties of soils[M]. Eleventh Edition. London: Prentice Hall, 1996:105-108.
- [10] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*, 1991, 351(23):304-306.
- [11] 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, 83:320-327.
- [12] 曹启民,吴鹏飞,赵春梅.海南植胶区土壤有机质纬度分布特征及其气候影响因素[J]. *广东农业科学*, 2012(7):85-87.
CAO Qi-min, WU Peng-fei, ZHAO Chun-mei. Latitude distribution of soil organic matter and its influence of climate factors in rubber planting areas in Hainan Island[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012(7):85-87.
- [13] 张薇,王子芳,王辉,等.土壤水分和植物残体对紫色水稻土有机碳矿化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(6):1013-1019.
ZHANG Wei, WANG Zi-fang, WANG Hui, et al. Effects of soil moisture and plant residue on mineralization of organic carbon in purple paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6):1013-1019.
- [14] 张雷.有机物料、温度和土壤水分对黑土有机碳分解的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2004.
ZHANG Lei. Effects of organic materials, temperature and soil moisture on the decomposition of organic carbon in black soil[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2004.
- [15] 田久胜,田新会,卡召加,等.甘肃省玛曲县 1981—2010 年气候变化动态[J]. *草原与草坪*, 2015, 35(1):84-88.
TIAN Jiu-sheng, TIAN Xin-hui, KA Zhao-jia, et al. Climate dynamic in Maqu County from 1981 to 2010[J]. *Grassland and Turf*, 2015, 35(1):84-88.
- [16] 戴万宏,黄耀,武丽,等.中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5):851-858.
DAI Wan-hong, HUANG Yao, WU Li, et al. Relationship between soil organic matter content and acidity and alkalinity in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5):851-858.
- [17] 魏孝荣,邵明安.黄土高原小流域土壤 pH、阳离子交换量和有机质

- 分布特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2710-2715.
- WEI Xiao-rong, SHAO Ming-an. Distribution characteristics of soil pH, cation exchange capacity and organic matter in small watershed of the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11): 2710-2715.
- [18] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 77-87.
- [19] 葛序娟, 潘剑君, 邬建红, 等. 培养温度对水稻土有机碳矿化参数的影响研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 562-569.
- GE Xu-juan, PAN Jian-jun, WU Jian-hong, et al. Effects of incubation temperature on parameters of organic carbon mineralization in paddy soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3): 562-569.
- [20] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- HUANG Chang-yong, XU Jian-ming. *Soil science*[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2010.
- [21] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43.
- XIE Xian-li, SUN Bo, ZHOU Hui-zhen, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 35-43.
- [22] 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 等. 我国主要农耕地水稻土有机碳含量分布及影响因素研究[J]. 地学前缘, 2011, 18(6): 11-19.
- YU Tao, YANG Zhong-fang, HOU Qing-ye, et al. Distribution and influencing factors of paddy soil organic carbon content in China's major farming areas[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(6): 11-19.
- [23] 邬建红, 潘剑君, 葛序娟, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳矿化及其温度敏感性[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 130-135.
- WU Jian-hong, PAN Jian-jun, GE Xu-juan, et al. Variations of soil organic carbon mineralization and temperature sensitivity under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 130-135.
- [24] 林杉, 陈涛, 赵劲松, 等. 长期施肥的水稻土在不同培养温度下的有机碳矿化特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5)(网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13287/j.1001-9332.20140305.0016.html>).
- LIN Bin, CHEN Tao, ZHAO Jin-song, et al. Characteristics of soil organic carbon mineralization at different temperatures in paddy soils under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(5)(Web publishing address: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13287/j.1001-9332.20140305.0016.html>).
- [25] 朱炳海. 中国气候[M]. 北京: 科学出版社, 1962.
- ZHU Bing-hai. *The climate of China*[M]. Beijing: Science Press, 1962.