DOI: 10.5846/stxb201809141988

贾海霞,李佳,欧延升,赵云飞,史常明,汪霞.新疆焉耆盆地绿洲区农田土壤有机碳储量动态模拟研究.生态学报,2019,39(14): - . Jia H X, Li J, Ou Y S, Zhao Y F, Shi C M, Wang X.Dynamic simulation of soil organic carbon storage in farmland of the Yanqi Basin Oasis area, in Xinjiang Province .Acta Ecologica Sinica,2019,39(14): - .

新疆焉耆盆地绿洲区农田土壤有机碳储量动态模拟 研究

贾海霞1,李 佳1,欧延升1,赵云飞1,史常明1,汪 霞1,2,*

1 兰州大学资源环境学院,兰州 730000
 2 兰州大学西部环境教育部重点实验室,兰州 730000

摘要:本文以焉耆盆地绿洲区丝路重镇——焉耆回族自治县长期定位监测的数据为基础,实地采集 800 个土样进行土壤有机碳 (SOC)实验室测试,进行点位模拟校验模型,并拓展到区域模拟,采用 BCCC-CSM1.1 m 气候模式,研究农田土壤有机碳密度分 布特征及有机碳储量空间分布格局,为气候变化条件下,绿洲区耕地 SOC 储量和 SOC 密度变化提供数据支持。结果表明:(1) DNDC 模型能够较好地模拟研究区农田的 SOC 及其动态变化,相关系数大于 0.96,模拟值与观测值的均方根误差(RMSE)在 0.48%—13.08%之间,模拟值与实测值显著相关。(2)点位模拟不同处理间 SOC 变化显示,不同土壤质地土壤有机碳含量差异 明显,5 年来 SOC 增长趋势表现为粉砂质壤土>壤土>砂质壤土。(3) 2017 年焉耆县农田表层土壤有机碳总储量为 0.44 Tg C, 在未来 30 年里,在相应农业措施下,研究区农田 0—20cm 土层 SOC 密度和储量呈显著增加趋势,单位面积碳增量增幅为-7— 29%;新增固碳量 3.708×10⁸ t—1.978×10⁹ t,增幅为-5%—48%,呈现出"碳汇"趋势,这对恢复农田 SOC 的平衡和绿洲农业的可 持续发展至关重要。

关键词:土壤有机碳;DNDC模型;土壤有机碳储量;农田土壤;焉耆盆地;土壤质地

Dynamic simulation of soil organic carbon storage in farmland of the Yanqi Basin Oasis area, in Xinjiang Province

JIA Haixia¹, LI Jia¹, OU Yansheng¹, ZHAO Yunfei¹, SHI Changming¹, WANG Xia^{1,2,*} 1 College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China 2 MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou730000, China

Abstract: Based on the long-term monitoring data of Yanqi Basin, which is an important county along the Silk Road, 800 soil samples were collected during our study from the selected area to conduct soil organic carbon (SOC) determinations in the laboratory. By using the BCCC-CSM1.1 climate model from the Coupled Model Intercom parison Project Phase 5 (CMIP5), we expanded our work to research the change in the spatial distribution of the soil organic carbon density and organic carbon storage in the oasis area under climate change conditions. The results showed that: (1) The DNDC model better simulated the SOC content and dynamic change in the study area, the correlation coefficient was greater than 0.96, and the root mean square error (RMSE) between simulated and observed values was between 0.48% and 13.08%. The analog value was significantly correlated with the measured value. (2) The SOC content among different soils was significantly different. The growth trend of SOC content over the past five years was in the order silty loam > loam > sandy loam. (3) In 2017, the total SOC storage in the farmland of Yanqi County was 0.44 Tg C. In simulations of 30 years in the

基金项目:国家自然科学基金(41572332);甘肃省重点研发计划(17YF1FA131);科技基础资源调查专项(2017FY100900)资助

收稿日期:2018-09-14; 网络出版日期:2019-00-00

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wangxia@lzu.edu.cn

future, under the corresponding agricultural measures, the SOC density in the 0-20 cm soil layer in the study area exhibited a significant increasing trend. The SOC content per unit area was increased by -7%-29% and the new carbon fixation amount was $3.708 \times 10^8 t-1.978 \times 10^9 t$, which could obtain an increase of -5-48%. The unified management of farmland in the oasis areas will have an important impact on the effects of SOC fixation.

Key Words: soil organic carbon; DNDC model; soil organic carbon density; farmland soil; Yanqi basin

近年来,随着温室效应的加剧,全球变暖、冰川融化和降水增多已成为不可逆转的趋势。随着气候的变 化,对陆地生态系统产生了极其深远的影响^[1]。陆地生态系统碳循环是全球碳循环的重要组成部分,土壤碳 库的微小变化可能导致大气 CO₂浓度较大的波动,从而影响全球气候变化^[2]。尽管土壤碳库容量十分可观, 但在全球陆地生态系统碳库中,农业土壤碳是最活跃和最重要的土壤有机碳库,一方面,农田土壤对全球土壤 碳循环平衡起着重要作用,受人为强烈干扰会产生快速变化且短时间可调节;另一方面,土壤有机碳(SOC)具 有协调土壤养分、水分等功能,是土壤肥力的核心,它也是农作物高产、稳定的物质基础之一,也影响着 CO₂的 排放,与气候变化直接相关^[3]。农田土壤碳固存与碳循环研究不仅关系到我国农业应对气候变化的能力建 设,而且与我国未来粮食安全和整个农业体系的可持续发展有关^[4]。目前,国内外许多学者在农田土壤有机 碳储量方面进行了研究。张琳等应用 DNDC 模型和 Arc GIS 对垫江县未来 30 年的农田有机碳进行了模 拟^[5]。张珍明等对喀斯特小流域土壤有机碳储量及估算方法进行研究^[6]。而在关于有机碳储量的估算方法 上,一直存在很大争议,就目前而言,模型的应用解决未来 SOC 演变的模拟和预测难题。DNDC 模型是描述 农业生态系统中碳和氮生物地球化学过程的计算机模拟模型^[7],已被广泛的应用于农业土壤肥力与温室气 体排放的预测研究中。

焉耆回族自治县是干旱区典型绿洲盆地—焉耆盆地的中央城市,是一个传统的农业区,但是耕地面积只占到全县总面积的35%。作为连接丝绸之路经济带和中巴经济走廊的关键节点和重要驿站,其区位优势相当明显^[8]。为充分发挥这一地缘优势,焉耆县面临着进一步拓展和完善农副产品、农业生产资料和增加农田有机碳的多重压力,以此来提升县域经济的总体水平。鉴于此,本文以焉耆回族自治县2013—2017 年定位实验观测的数据为基础,通过点位模拟校验模型,利用2015 年焉耆土壤类型和土地利用方式数据,并选用 IPCC AR5 报告中的 BCCC-CSM1.1 m 气候模式,相应秸秆还田和化肥配施,开展2017—2047 年该县农田土壤有机碳储量和有机碳密度的模拟,通过分析未来30 年焉耆县农田表层土壤有机碳密度和有机碳储量的变化特征,为未来气候变化下,增加农田土壤有机碳以及农田土壤管理提供数据支持和科学依据。

1 研究区域自然概况

焉耆回族自治县地处天山南麓焉耆盆地腹心地带,经纬度在 85°15 00"—86°43′57",40°21′32"—42° 16′00"之间,焉耆县总面积 1780 km²,现有耕地面积 532 km²。焉耆回族自治县位于北半球中纬度温带地区, 为典型的中温带干旱荒漠气候,又别具盆地夏季聚热,冬季冷潮的气候特征;地势西北高,东南低;年日照时数 4440.1 h,年平均降水量为 74.4 mm,年均气温 8.2 ℃,年平均无霜冻期 176 天,适宜辣椒、番茄、玉米,小麦等作 物生长。县域内土壤为农耕土壤,主要类型是潮土、灌耕土、草甸土、棕漠土、沼泽土、盐土、风沙土。研究区作 为古丝绸之路的重镇以及以出口农贸产品为主要经济收入的县域,在"一带一路"规划下,是新疆绿洲经济发 展的核心示范区之一^[9],农耕土壤的质量直接影响着焉耆县经济的提升,因此焉耆县是研究丝绸之路经济带 土壤有机碳循环的典型区域。

2 材料与方法

2.1 试验设计

2.1.1 定位试验设计

点位定点实验设置在焉耆回族自治县,包括包尔海乡、查汗采开乡、北大渠乡三个乡,初始土壤质地为粉 砂质壤土、壤土、砂质壤土,土壤类型为湿潮土。试验开始于2013年,共有9个处理(如表1所示),每块试验 田的面积为 $2500 \text{ m}^2(50 \text{ m} \times 50 \text{ m})$,其中选取的农作物均为当地的主要经济作物。

		17	able i Exp	ernnentar u	esign							
类别	处理 Treatment											
Category	FF	FL	FY	RF	RL	RY	SF	SL	SY			
种植作物 Crop type	番茄	辣椒	玉米	番茄	辣椒	玉米	番茄	辣椒	玉米			
土壤质地 Soil texture	粉砂质 壤土	粉砂质 壤土	粉砂质 壤土	壤土	壤土	壤土	砂质 壤土	砂质 壤土	砂质 壤土			
种植日期 Planting date	4月上旬	4月中旬	4月上旬	4月上旬	4月中旬	4月上旬	4月上旬	4月中旬	4月上旬			
收获日期 Harvest date	7月中旬	7月下旬	10月上旬	7月中旬	7月下旬	10月上旬	7月中旬	7月下旬	10月上旬			
施肥 Fertilization	尿素、 二胺	尿素 、 二胺 、钾肥	尿素、 二胺	尿素、 二胺	尿素、二 胺、钾肥	尿素、 二胺	尿素、 二胺	尿素、 二胺、钾肥	尿素、 二胺			
秸秆还田比例 Straw return ratio	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%			
初始有机碳含量 Initial SOC content/(g/kg)	11.89	2.51	13.69	8.65	2.5	10.84	11.05	2.72	15.72			

表1 试验处理描述 Experimental design Tabla 1

FF,粉砂质壤土下种植番茄;FL,粉砂质壤土下种植辣椒;FY,粉砂质壤土下种植玉米;RF,壤土下种植番茄;RL,壤土下种植辣椒;RY,壤土 下种植玉米;SF,砂质壤土下种植番茄;SL,砂质壤土下种植辣椒;SY,砂质壤土下种植玉米

2.1.2 样品采集

点位样品采集:在2013—2017年每年7月和12月,按照"S"型采样法,在每个处理中采集耕层(0—20 cm) 土壤样品,按照0-10和10-20 cm 分层取样,每个取样点采取15个样品混匀;混合土壤采用四分法,取 1 kg 左右的土样放入样品袋。每个采样点需记录本底信息,并测定含水率、容重、土壤机械组成、全盐量、有机 质、pH 值等指标。

区域样品采集:2017年在每个乡(镇)按照面积比 例在农田土壤上均匀布点,采集方法同定点试验样品采 集方法,累积采取样品800个(如图1所示)。

2.2 样品处理及测定分析

野外采集的土壤样品经风干处理后研磨,制备试验 测定所需样品。土壤有机碳用重铬酸钾-硫酸氧化法 测定^[10]。利用遥感数据验证和现场追踪对各类土壤分 布面积进行统计分析:采用环刀法自上而下分层测定土 壤容重;利用电位测定法测定土壤 pH;土壤粒度由激光 粒度仪测定[11]。

2.3 数据获取

①气象数据:2013—2017 年气象数据包括每日最 低气温、每日最高气温、降水量(来源于国家气象数据 共享网(http://data.cma.cn));2018—2047年的逐日气 图1 焉耆县 2017年农田土壤采样点分布及土地利用空间分布图 象数据采用第五次耦合模式比较计划(CMIP5)里面的 Fig.1 Distribution of soil sampling points in Yanqi county in 2017 BCCC-CSM1.1m 气候模式,然后整理成模型所输入文件 的格式,即日最高气温、日最低气温和日平均降水量。



②土壤数据

点位土壤数据:2013—2017年土壤数据包括容重、质地、土壤有机质及酸碱度等数据,来自于定位实验实测。作物及田间管理数据来自于5年以来的田间管理措施记载,主要有犁地方式、施肥、灌溉、秸秆还田比例和除草。

区域土壤数据:2017 年采集土壤样品的 800 个土壤数据,占总数据的 50%,其余数据来源于焉耆县 2017 年统计年鉴,土壤按土属分类,全县农田土壤共有 7 种土类。

③作物数据:来源于焉耆县统计年鉴数据,点位定点数据。

④遥感数据:中国土壤类型空间分布数据(1 km 分辨率),2015 年土地利用方式(30 m 分辨率),来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)。

2.4 DNDC 模型参数设置

DNDC(脱氮分解)模型是由美国 New Hampshire 大学李长生教授于 1992 年建立,以模拟农业生态系统中 碳氮循环为目的的生物地球化学模型^[12]。该模型在很多地方都本地化验证,但是土壤碳、氮循环过程比较复 杂,具有较强的时空差异性,又因为新疆属于干旱区,具有迥异的气候特点,依靠 DNDC 模型进行相关模拟时, 参数调整成为必然。本文基于点位模拟,实测值为依据校准模型参数(如表 2),对模型的已有作物的默认参 数进行修改,如粘土比例、孔隙度、萎焉点、田间持水量、表土之下 SOC 含量降低速率等。首先设置模型中土 壤和作物生理参数,然后将所需气象、土壤及田间管理等参数输入模型,并运行比较模型模拟的各种点位下的 SOC 动态变化与定点监测测定结果的拟合度,并且还需多次调整 DNDC 模型中的部分参数,以使模型模拟结 果与田间实测值拟合程度达到最佳。

用 DNDC 模型实施点位和区域模拟,须事先获取区域所有格点所需输入数据,将其存储于特定 GIS 和通 用数据库中^[13]。GIS 数据包括 7 个文件,主要是地理位置、气象数据、土壤特性、作物种类、农田管理。气象数 据库包含焉耆县气象站的日最高、日最低气温和日降雨;作物数据库包括各类作物的生理及物候学参数, DNDC 从区域数据库中读取所有的信息。为了保证模型运转得到的数据的精确性,可以把一个区域划分为许 多个格点,本文以 2015 年土地利用方式数据库,此数据库是目前我国精度较高的土地利用遥感监测数据产 品,它是以 Landsat TM/ETM/OLI 遥感影像为主要数据源,经过影像融合、几何校正、图像增强与拼接等处理 后,通过人机交互目视解译的方法,将全国土地利用类型划分为 6 个一级类、25 个二级类、以及部分三级分类 的土地利用数据产品。运用 Arc GIS 划分出焉耆县的农田土壤图斑^[14]。然后利用焉耆县乡镇边界数据,将农 田图斑和乡镇边界叠加,以一个乡镇里面的一种土壤类型为模拟单元,如果土壤类型不连续则为另一个模拟 单元,总共划分出 40 个模拟单元。然后利用克立金插值提取每一个格点中的各属性值的均值,以此来代表这 个格点的数值,然后进行各格点的区域模拟。

rable 2 - Elecandeed values of some parameters of DADC model										
		默认值 Defaults	8	观测值 Observations						
参数 Parameter	粉砂质壤土 Silt loam	壤土 loam	砂质壤土 Sandy loam	粉砂质壤土 Silt loam	壤土 loam	砂质壤土 Sandy loam				
粘土比例 Clay fraction	0.14	0.19	0.09	0.12	0.078	0.083				
孔隙度 Porosity	0.485	0.451	0.435	0.479	0.459	0.421				
表层土之下 SOC 含量降低速率 SOC decrease rate below top soil		0.5			0.37					
萎焉点 Wilting point	0.2	0.22	0.15	0.25	0.28	0.19				
田间持水量 Field capacity	0.4	0.49	0.32	0.43	0.5	0.36				

表 2 DNDC 模型本地化参数值 Table 2 Localized values of some parameters of DNDC model

2.5 DNDC 模型验证

采用均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)和模型效率(ME)来评价此模型的精度,其公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2}{n}}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |P_i - O_i|}{n}$$

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})}$$
(1)

式中, O_i 是观测值, P_i 是预测值,n是观测值的总数,i是当前观测值。

均方根误差(RMSE)是用来衡量模拟值同实测值之间的一致性,一般参考为:RMSE<10%,表明模拟值与 实测值一致性非常好;10%—20%为较好;20%—30%表明模拟效果一般;>30%则表明模拟值与实测值偏差较 大,模拟效果较差。平均绝对误差(MAE)能更好的反映预测值误差的实际情况。模型效率(ME)将绝对误差 的平方和与观测值之间的差值的平方和及其平均值进行比较,ME 为 0—1 时,值越大,模拟值与实测值之间 的关联度越大;当 ME<0 时,模拟值与实测值之间极度不相关^[15]。

2.6 数据处理与方法

2.6.1 土壤有机碳储量计算

本文的模拟单元共有40个,即格点数。其中0—10 cm,10—20 cm 的 SOC 含量在 DNDC 区域模拟结果中 得到。

$$S_s = \sum_{i}^{n} S_i \times (C_i + D_i)$$
⁽²⁾

式中,S_s为土壤有机碳储量(kg);S_i为第 i 个格点的种植系统面积(hm²);n 为总格点数;C_i为第 i 个格点 0—10 cm 土壤 SOC 含量(kg C/hm²);D_i为第 i 个格点 10—20 cm 土壤 SOC 含量(kg C/hm²)。

2.6.2 土壤有机碳密度计算

土壤有机碳密度通常是指单位面积单位深度土体中土壤有机碳储量,是表征土壤质量及陆地生态系统对 全球变化贡献大小和衡量土壤中有机碳储量的重要指标^[19]。

$$S_d = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i \times (C_i + D_i)}{\sum_{i=1}^{n} S_i}$$
(3)

式中, S_d 为土壤有机碳密度(kg C/hm²); S_i 为第_i个格点的种植系统面积(hm²);n 为总格点数; C_i 为第 i 个格点 0—10 cm 土壤 SOC 含量(kg C/hm²); D_i 为第 i 个格点 10—20 cm 土壤 SOC 含量(kg C/hm²)。 2.6.3 数据统计与空间分析

本文运用 Arc GIS 10.2 软件对数据进行空间处理与分析,包括图斑叠加、掩膜提取、面积统计、制图。数据分析在 SPSS 19.0 中进行,相关图表的制作在 Microsoft Excel 2013、Origin 8.0 中完成。

3 结果与分析

3.1 DNDC 模型验证

点位模拟中主要选择土壤有机碳含量为验证指标。对9个处理进行长期稳定观测和土壤理化性质分析。 DNDC模拟运行得到的SOC与实际观测值对比分析来验证DNDC模型在本地的准确性。如图2所示,根据实际观测的数据,在耕作措施施加50%的秸秆还田和配施化肥后,土壤有机碳含量都得到了提高。利用统计学方法对各个处理的有机碳含量的模拟值与观测值进行了分析,结果如表3所示,在9个处理中,FL处理的相关系数最高,达到了0.9950,RMSE达到了0.38%,模型效率为0.98,模拟效果最好。RF处理的相关性达到了 0.969,模型效率为0.83,模拟效果最差。总体而言,9个处理相关系数都接近于1,RMSE都在10%以下,模型 效率都接近于1,由此说明DNDC模型在焉耆县适用性很好,可以进行点位DNDC的模拟,同时区域模拟所应 用的气象数据和点位模拟的气象数据相同,农田管理、施肥、灌溉、土地利用类型等大致相同,所以从长期试验 站的点位模拟对DNDC模型校验,拓展到区域农田进行相关模拟预测是可行的。



图 2 土壤有机恢实测值与模拟值的相差	关性	相	的	值的	拟	模打	与	佰	I测	炭ゞ	机	有材	壤	±	2	冬
---------------------	----	---	---	----	---	----	---	---	----	----	---	----	---	---	---	---

Fig.2 Correlation between measured values of soil organic carbon and simulated values

Table 3 Model accuracy evaluation results												
类别	处理 Treatment											
Category	RF	RL	FY	FF	SL	RY	SF	FL	SY			
RMSE	0.0465	0.0076	0.0313	0.0412	0.0048	0.0272	0.0422	0.0038	0.0385			
MAE	0.1056	0.0244	0.1308	0.0732	0.0148	0.0732	0.0900	0.0200	0.1208			
相关系数 r	0.969	0.975	0.985	0.976	0.980	0.987	0.976	0.995	0.969			
模型效率 ME	0.9031	0.9243	0.9645	0.8375	0.9342	0.9345	0.8816	0.9809	0.9197			

表 3 模型精度评价的结果 ble 3 Model accuracy evaluation resu

3.2 秸秆还田和化肥施用对土壤有机碳的影响

本研究从点位到区域模拟都施加了 50%的秸秆还田措施,配施当前的化肥用量。每种处理土壤有机碳 含量都增加了一定的比例。在农田尺度上,实地监测的 9 个处理,有机碳含量均呈现逐年增加,5 年后的土壤 有机碳含量比原来增长 102%—106%。在县域尺度上,模型中施加 50%的秸秆还田,在特定气候模式下,30 年后,农田土壤碳储量增加 109%—148%,这说明 50%的秸秆还田可以促进土壤有机碳含量的增长。

3.3 不同土壤质地的有机碳含量差异

点位定点实验中,如图 3 所示,为三种不同农作物在 3 种不同土壤质地下,2013 年的土壤碳含量及 2017

年相比 2013 年增加的百分比。从图中可以明显看出,每一种处理有机碳含量都得到了提升,其中在不同作物 之间,碳含量的提升均表现为:粉砂质壤土>壤土>砂质壤土;其中粉砂质壤土和玉米的组合有机碳含量增加 的最多,相比初始的碳含量增加了 106%,砂质壤土和辣椒的组合碳含量增加最少,增加了 102%。然后比较 这三种土壤质地的粘土含量,根据实测结果,粘土含量表现为:粉砂质壤土>壤土>砂质壤土;这是因为它们的 粘土含量不一致,粘土含量越高,碳分解速率越慢,越有利于有机碳的积累。粘土含量越低,碳分解速率越快, 土壤有机碳积累的越慢。







(1) 柱状图为 2013 年各处理下的初始土壤有机碳含量, 折线图为 2017 年各处理下有机碳含量相比 2013 年增加的百分比

3.4 农田土壤有机碳密度和碳储量及其分布特征

土壤有机碳的周转过程非常缓慢,选取 2017 年的气象数据,未来 29 年的气象数据选取 IPCC AR5 报告中的 BCCC-CSM1.1 m 模式下的气温和降水的未来预测结果,其中大气二氧化碳浓度每年进行调整,选取目前正常增加速率 1.9 ppm/a^[20],秸秆还田比例选取点位模拟中的比例 0.5,化肥用量和点位模拟中的相同,选取当前耕作下的化肥用量,其它每年相同。图 4 为 2017—2047 年焉耆县农田表层土壤有机碳储量和土壤有机碳密度的空间变化分布图,可以看出 2017—2047 年焉耆回族自治县农田 0—20 cm 土层 SOC 密度和储量呈现显著的增加趋势。其中 30 年后的土壤碳储量相比 2017 年增加了 109%—148%,新增加的固碳量是 3.708×10⁸ t—1.978×10⁹ t;有机碳密度 2047 年相比 2017 年增长了 23%—53%,有机碳密度变化为 1025—11440 kg C/hm²。

在空间分布上,有机碳密度和有机碳储量也呈现明显的差异。如图 4,2017—2047 年,SOC 密度变化范围为 8200—12000 kg C/hm²的面积最大,集中分布在焉耆东北部和焉耆中部且自东北向西北依次减小;其次,SOC 密度变化范围为 15000—25000 kg C/hm²的占比最小,集中分布在焉耆南部,且自南向西北方向依次减小。

在不同的土壤类型之间有机碳密度与储量呈现明显的差异。表4为2017年焉耆县各土壤类型下的有机碳密度和有机碳储量,可以看出,2017年潮土的面积最大,占耕地面积的60%,受人为扰动较多,其碳储量在所有土类中最多,2017年农田土壤中潮土SOC储量为831092t,占2017年总碳储量的64%,平均有机碳密度为24516kg C/hm²;表5所示为2047年焉耆县各土壤类型下的有机碳密度和有机碳储量,2047年潮土有机碳

密度相比 2017 年增长 121%—142%;单位面积有机碳含量比原来增长 130%—156%,是所有土类中增幅最大的。其中 2017 年 SOC 密度最高的是沼泽土,平均有机碳密度为 25424 kg C/hm²,2047 年沼泽土有机碳密度 增幅为 45%。这是因为沼泽土壤是一种低洼土壤,长期积水并长出高湿植物,它的表面层积聚了大量有机物,分解程度低^[22]。单位面积碳增量最少的是盐土,增幅为 9.9%。有机碳密度依次增幅由大到小为:沼泽 土、潮土、草甸土、灌漠土、棕漠土、盐土,依次上升了 45%、40%、30%、25%、10%、9.9%。

Table 4Organic carbon storage of different Soils in Yanqi County in 2017(0-20 cm)										
类别			土	类 Soil type ⁽¹⁾						
Category	СТ	CDT	GMT	ΥT	ZMT	ZZT	SZT			
面积 Area/ hm ²	34000	3300	2600	3500	9400	2500	400			
面积所占比例 Area ratio/%	74.25	7.17	5.60	7.60	20.44	5.40	0.71			
平均土壤有机质含量 Average soil organic content(g/kg)	13.88	11.09	10.32	9.51	9.79	14.57	4.18			
表层(0—20cm)有机碳密度 0—20cm organic carbon density(kgC/hm ²)	24516	22153	21345	17451	19542	25424	13260			
碳储量 Soil organic carbon storage/10 ⁶ kg	83.1	23.4	4.9093	6.2823	10.7481	1.0170	0.536			
碳储量所占比例 Soil organic carbon storage ratio/%	64.19	18.07	3.79	4.85	8.3	0.78	0.02			

表 4 焉耆县 2017 年不同土类的有机碳储量(0—20 cm)

表 5 焉耆县 2047 年不同土类的有机碳储量(0-20 cm) Table 5 Organic carbon storage of different Soils in Yanqi County in 2047 (0-20 cm)

类别	土类 Soil type ⁽¹⁾										
Category	СТ	CDT	GMT	ΥT	ZMT	ZZT	SZT				
面积 Area/ hm ²	34000	3300	2600	3500	9400	2500	400				
面积所占比例 Area ratio/%	74.25	7.17	5.60	7.60	20.44	5.40	0.71				
平均土壤有机质含量 Average soil organic content/(g/kg)	19.32	15.62	13.26	14.23	12.32	19.65	6.32				
表层(0—20cm)有机碳密度 0—20cm organic carbon density/(kgC/hm ²)	34322	28798	26681.25	19196	21496.2	36864.8	16235.1				
碳储量 Soil organic carbon storage/10 ⁶ kg	120.49	32.76	5.8421	7.2246	12.3603	1.5051	0.586				
碳储量所占比例 Soil organic carbon storage ratio/%	66.65	9.99	2.10	2.68	4.59	0.43	0.011				

(1)CT,潮土 Fluvo-aquic siols;CDT,草甸土 Meadow soils;GMT,灌漠土 Irrigated desert soil;YT,盐土 Solonchaks;ZMT,棕漠土 Gray desert soil; ZZT,沼泽土 Bog soils;SZT,石质土 Litho soils

3.5 农田土壤有机碳密度与环境关系

山地—绿洲—荒漠生态系统土壤发育和植被生长及其分布格局主要受到水热条件的影响^[23]。图 5 为焉 耆县采样点土壤湿度与土壤有机碳密度的关系。图 6 为焉耆县采样点年平均气温与土壤有机碳密度的关系。 表明土壤湿度与土壤有机碳密度呈正相关的对数函数关系(*P*<0.01),年平均温度与土壤有机碳密度呈现负 相关的线性函数关系(*P*<0.01)。这种特征与我国西部干旱区热量、水分分布特征是一致的^[25]。

4 讨论

土壤有机碳的变化是一个复杂而又漫长的过程,影响有机碳转变的因子很多,包括气温、降雨、CO₂浓度、 土壤 pH、土壤质地等。在 IPCC AR5 报告中的 BCCC-CSM1.1 m 气候模式下,相应的农田管理措施下,焉耆县 农田土壤有机碳储量和有机碳密度呈现显著增加趋势,2017 年 0—20 cm 土壤平均有机碳密度为 20527 kg C/ hm²,这低于西部区域平均值^[25],30 年后的表层(0—20 cm)有机碳密度为 31967 kg C/hm²,接近于西部区域 平均值,这说明耕作管理措施对焉耆县有机碳含量影响显著。焉耆县属于绿洲干旱区,气候、生态类型多样;



图 4 2017—2047 年农田土壤有机碳(SOC)密度(a)和储量(b)绝对变化值的空间分布格局

Fig.4 Spatial patterns of absolute change of soil organic carbon (SOC) density (a) and storage (b) in 2017 and 2047





地势西北高,东南低;土壤种类较多,导致了不同土壤类型下土壤有机碳密度差异较大。潮土的面积最大,占 耕地面积的 60%,受人为扰动较多,其碳储量在所有土类中最多,2047 年潮土有机碳密度相比 2017 年增长 121%—142%;单位面积有机碳含量比原来增长 130%—156%,是所有土类中增幅最大的。这与潮土是我国 主要的农业土壤类型,分布于主要的粮食和蔬菜生产区有关。2017 年 SOC 密度最高的是沼泽土,平均有机碳 密度为 25424 kg C/hm²,2047 年沼泽土有机碳密度增幅为 4%—59%。这是因为沼泽土壤是一种低洼土壤, 长期积水并长出高湿植物,它的表面层积聚了大量有机物,分解程度低^[22]。单位面积碳增量最少的是盐土, 增幅为-7%—10%,这与这种土壤类型它本身含水溶性盐类较多有关。

作为土壤最基本的物理性质之一,土壤质地对包括通透性、养分含量在内的各种土壤性状均有重要影响^[26]。土壤质地是影响有机质分解矿化的重要土壤物理性质之一^[27]。土壤黏粒可抑制有机质被微生物分解,减少微生物细胞代谢死亡,保持土壤有机质和微生物量的稳定。稳定的有机黏粒复合体在黏粒含量高的 土壤中是形成稳定有机质的主要原因^[28]。李忠佩等认为,有机质与黏粒结合可增强其物理稳定性和抵抗微 生物分解的能力,黏粒含量高的土壤,其孔隙度较小,通气状况不良,导致有机质分解速率较低^[29]。此外,土 壤黏粒也可通过黏粒胶体吸附及形成土壤有机无机复合体实现对有机碳的物理保护,质地越黏重,其有机碳 的分解速率就越小^[30]。本文在点位下探究土壤质地对该县主要农作物下土壤有机碳的影响,得出不同土壤 质地下有机碳5年来的积累趋势是粘土含量越高,有机碳累积的越多的结论,这和李忠佩的研究结果一致。

其次探究了年平均气温、土壤湿度和土壤有机碳密度的关系,表明土壤湿度与土壤有机碳密度呈对数函数系系(P<0.01),年平均温度与土壤有机碳密度呈线性函数关系(P<0.01)。这种特征与我国西部干旱区热量、水分分布特征是一致的;在提高土壤有机碳含量方面,王立刚已经得出实行秸秆还田或提高作物生物产量还田及免耕等耕作措施将有效提高 SOC 含量,提高土壤的可持续利用率^[31]。张凡等得出将作物秸秆还田率从目前的 15%提高到 50%或 90%会使陕西农田土壤从大气 CO₂源转变为汇,每年分别增加土壤有机碳库储量 0.7 Tg C 或 2.1 Tg C^[32],在本文中也得出 50%的秸秆还田可以有效提高 SOC 含量,使其增长为原来的 2%—49%。由于焉耆县年降雨量低于陕西省年均降雨量,年平均温度低于陕西省,气候方面存在差别,所以 农田土壤有机碳含量增加幅度低于陕西省。由此说明,秸秆还田在当前的化肥施用下,随着时间的推移会使得焉耆的农田土壤有机碳含量得到提升。

到目前为止,土壤有机碳库也存在较大的争议^[2]。土壤碳库空间分布异质性强烈,土壤实测调查在取样时,存在着诸多差异^[33]。本文通过多年的定点试验率定模型的参数,使得 DNDC 模型本地化,又将模拟的最小单元划分为乡(镇)里面的同一土类,这在一定程度上减小了空间异质性。但是人工绿洲在不断地扩张,未来的耕地面积会随着变化;再加之有可能出现的极端天气现象等,会使得农田土壤有机碳储量发生变化。除此,本文仅对焉耆县在未来气候模式下,相应农田管理措施下的农田表层土壤有机碳密度和储量变化进行了研究,还需进一步引入多模式耦合气候模式,因此,在往后的研究中,有待进一步深入研究。

5 结论

本文模拟研究得出,在相应农业措施实施下,在 IPCC AR5 报告中的 BCCC-CSM1.1 m 气候模式下,焉耆 县农田 0—20cm 土层 SOC 密度和储量呈现显著的增加趋势,呈现出"碳汇"趋势。土壤有机碳储量从 2017 年 的 0.44 Tg C 增加到 2047 年的 0.61 Tg C,单位面积碳增量是 2550 kg C/hm²,这说明完善农田统一管理对未来 SOC 的固定具有重要影响。

焉耆回族自治县土壤类型众多,研究结果表明不同土壤类型之间的土壤有机碳密度差异较大,最大土壤 有机碳密度与最小有机碳密度之间的差距是 10365 kg C/hm²,这说明土壤类型的转变对 SOC 的影响深刻,未 来应该加强不同土壤类型的管理。

参考文献(References):

- [1] 周文强,孙丽,臧淑英,刘晨,张玉兰,薄欣,阎炳和,张远. 气候变化对松嫩平原西部土壤有机碳及作物产量的影响研究. 环境与发展, 2017, 29(2): 31-36.
- [2] Hobley E U, Baldock J, Wilson B. Environmental and human influences on organic carbon fractions down the soil profile. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 223: 152-166.
- [3] Loveland P, Webb J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. Soil and Tillage Research, 2003, 70(1): 1-18.
- [4] 王立刚,邱建军,马永良,王迎春.应用 DNDC 模型分析施肥与翻耕方式对土壤有机碳含量的长期影响.中国农业大学学报,2004,9 (6):15-19.
- [5] 张琳, 邵景安. 未来 30 年川东平行岭谷区县域农田 SOC 动态模拟. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1848-1857.
- [6] 张珍明,周运超,田潇,黄先飞.喀斯特小流域土壤有机碳空间异质性及储量估算方法.生态学报,2017,37(22):7647-7659.
- [7] 张钊, 辛晓平. 生物地球化学模型 DNDC 的研究进展与碳动态模拟应用. 草地学报, 2017, 25(3): 445-452.
- [8] 曾秀芹.关于新疆焉耆回族自治县葡萄产业化发展的几点思考.劳动保障世界,2018,(15):57-58.
- [9] 阿吉古丽・马木提,麦麦提吐尔逊・艾则孜,艾尼瓦尔・买买提.新疆焉耆县耕地土壤重金属的空间分布及来源解析.环境监测管理与 技术,2018,30(3):12-16.
- [10] 蒋武毅, 邵歆, 赵勇, 金叶舟, 吴波. 微波加热样品-重铬酸钾氧化法测定土壤有机质. 浙江农业科学, 2012, (9): 1312-1312, 1314-1314.

- [11] 刘雪梅,黄元仿.应用激光粒度仪分析土壤机械组成的实验研究.土壤通报,2005,36(4):579-582.
- [12] 李长生. 生物地球化学的概念与方法——DNDC 模型的发展. 第四纪研究, 2001, 21(2): 89-99.
- [13] Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2. Model applications. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D9): 9777-9783.
- [14] 王德营,姚艳敏,司海青,唐鹏钦.黑土有机碳变化的 DNDC 模拟预测. 中国生态农业学报, 2014, 22(3): 277-283.
- [15] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [16] Abdalla M, Kumar S, Jones M, Burke J, Williams M. Testing DNDC model for simulating soil respiration and assessing the effects of climate change on the CO₂ gas flux from Irish agriculture. Global and Planetary Change, 2011, 78(3/4): 106-115.
- [17] de la Fuente M, Linares R, Baeza P, Miranda C, Lissarrague J R. Comparison of different methods of grapevine yield prediction in the time window between fruitset and veraison. Oeno One, 2015, 49(1): 27-35.
- [18] Zhang Y J, Wu X D, Wang S P, Niu H S. The simulation of the vine biomass at different planting ages in Ningxia vineyards using DNDC model. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(4): 281-287.
- [19] 曾宏达, 徐涵秋, 刘智才, 黄向华, 肖苏麟. 快速城市化地区住宅用地表层土壤有机碳的变异性及其影响因素——以福州南台岛为例. 生态学报, 2018, 38(4): 1427-1435.
- [20] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press, 2007
- [21] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press, 2013
- [22] 王蓥燕, 卢圣鄂, 陈小敏, 李跃飞, 辜运富. 若尔盖高原湿地泥炭沼泽土亚硝酸盐还原酶(nirK)反硝化细菌群落结构分析. 生态学报, 2017, 37(19): 6607-6615.
- [23] 张杰,潘晓玲. 天山北麓山地-绿洲-荒漠生态系统净初级生产力空间分布格局及其季节变化. 干旱区地理, 2010, 33(1): 78-86.
- [24] 孙洪波,王让会,杨桂山.中亚干旱区山地-绿洲-荒漠系统及其气候特征——以中国新疆北部和东哈萨克斯坦为例.干旱区资源与环境, 2007,21(10):6-11.
- [25] 张杰,李敏, 敖子强, 邓觅, 杨春燕, 吴永明. 中国西部干旱区土壤有机碳储量估算. 干旱区资源与环境, 2018, 32(9): 132-137.
- [26] 李金全,李兆磊,江国福,程浩,方长明.中国农田耕层土壤有机碳现状及控制因素.复旦学报:自然科学版,2016,55(2):247-256, 266-266.
- [27] 孙中林,吴金水,葛体达,唐国勇,童成立.土壤质地和水分对水稻土有机碳矿化的影响.环境科学,2009,30(1):214-220.
- [28] Müller T, Hoper H. Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: consequences for model applications. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(6): 877-888.
- [29] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云, 尹瑞龄, 施亚琴. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析. 土壤学报, 2003, 40(3): 344-352.
- [30] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.
- [31] 王立刚,李虎,邱建军,唐华俊,LiCS.田间管理措施对土壤有机碳含量影响的模拟研究.中国土壤与肥料,2010,(6):29-37.
- [32] 张凡,李长生,王政.耕作措施对陕西耕作土壤碳储量的影响模拟. 第四纪研究, 2006, 26(6): 1021-1028.
- [33] Yang R, Su Y Z, Wang M, Wang T, Yang X, Fan G P, Wu T C. Spatial pattern of soil organic carbon in desert grasslands of the diluvial-alluvial plains of northern Qilian Mountains. Journal of Arid Land, 2014, 6(2): 136-144.