

DOI: 10.11766/trxb201607270373

制图尺度对CO₂浓度升高情景下旱地土壤有机碳模拟的影响*

黄琳斌^{1, 2} 张黎明^{1, 2†} 龙 军¹ 于东升³ 史学正³ 陈翰阅¹
范协裕¹ 邢世和^{1, 2}

(1 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

(2 国家菌草工程技术研究中心(福建农林大学), 福州 350002)

(3 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要 基于土壤数据库的动态模型预测未来二氧化碳(CO₂)浓度升高下农田有机碳变化是实施农业固碳的基础,但目前基于不同制图尺度土壤数据库对旱地有机碳模拟结果的影响尚不清晰,一定程度上增加了农业管理措施制定的风险性。基于此,选择江苏北部(简称“苏北地区”)3.90 × 10⁶ hm²旱地为例,运用生物地球化学过程模型(Denitrification and Decomposition, DNDC)模拟未来CO₂浓度升高下该地区1:5万、1:25万、1:50万、1:100万、1:400万、和1:1 000万制图尺度的土壤有机碳变化。结果表明:2010—2039年间CO₂浓度在目前正常增加速率(1.9 ppm a⁻¹)的基础上提高0.5倍、1倍和2倍,苏北旱地数据最详细的1:5万尺度年均固碳速率分别为357 kg hm⁻²、360 kg hm⁻²和365 kg hm⁻²。但进一步从其他制图尺度来看,由于使用的土壤数据库不同导致有机碳模拟结果差异很大。以1:5万尺度年均固碳速率为基准,3种CO₂浓度情景处理下1:25万~1:1 000万尺度的模拟误差分别在0.89%~60.55%、0.81%~60.71%和0.15%~61.02%之间,这说明未来CO₂浓度升高的大背景下我国旱地土壤有机碳模拟中选择适宜的制图尺度非常重要。

关键词 土壤有机碳; 苏北旱地; 制图尺度; DNDC模型

中图分类号 S15 **文献标识码** A

过去半个多世纪气候变化引起的温室效应已成为全人类均要面临的严峻挑战^[1]。据估算,全球大气中二氧化碳(CO₂)浓度已从1750年的280 mg kg⁻¹上升至2011年的391 mg kg⁻¹,超出了工业化时代前的40%,且每年以约1.9 ppm的速率持续增加^[2-3]。如何通过多种途径减缓全球气候变化影响目前已成为各国政府关注的热点。很多研究表明,农田土壤有机碳库受到强烈人为干扰并可在短时间内调节,它的固碳效应被认为是延

缓全球气候变化的重要举措^[4]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第四次报告中也指出,全球农业每年的减排潜力可达5 500~6 000 Mt CO₂当量^[2]。我国的旱地占农田土壤总面积的70%以上,其固碳潜力约为18 g kg⁻¹,而目前大于18 g kg⁻¹的耕地仅占12%^[5]。因此,在未来CO₂浓度升高的大背景下明确旱地土壤有机碳动态变化对于制定我国温室气体减排政策具有重要意义。

* 福建省2011计划(K80ND8002)、福建省自然科学基金项目(2015J01154)和福建省高校杰出青年科研人才计划基金(JA13093)共同资助 Supported by the Collaborative Innovation for Juncao Ecology Industry (No. K80ND8002), the National Science Foundation of Fujian Province, China (No.2015J01154), and the Distinguished Young Scholars Foundation of the Higher Education Institutions of Fujian Province, China (No.JA13093)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fjaulmzhang@163.com

作者简介: 黄琳斌(1991—),女,福建莆田人,硕士研究生,主要从事土壤碳循环与GIS研究。E-mail: barbie1327@foxmail.com

收稿日期: 2016-07-27; 收到修改稿日期: 2016-09-08; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-09-20

由于碳循环过程及各碳库之间的碳通量和反馈机制复杂性,利用结合有土壤数据库的动态模型被认为是研究大区域农田生态系统碳循环有效手段^[6]。国外,Cerri等^[7]应用集成Century、RothC、IPCC方法的GEFSOC模型和1:500万 SOTER土壤数据库模拟了巴西亚马逊流域2000年和2030年的土壤有机碳变化。Mondini等^[8]利用1:100万土壤图和RothC模型研究了意大利农业土壤2001—2100年的有机碳变化。Karunaratne等^[9]利用1:25万土壤-土地利用数据库和RothC模型模拟了流域尺度的土壤有机碳组分。国内,Tang等^[10]和Zhang等^[11]利用中国1:1400万土壤数据库和DNDC模型,模拟了全国和黄土高原农田土壤有机碳变化及储量。Yu等^[12]应用1:100万土壤数据库和Agro-C模型,模拟了中国农田2011—2050年不同农业管理措施下的碳汇潜力。Xu等^[13]基于1:100万、1:400万和1:1400万土壤数据库和DNDC模型,评估了不同制图尺度土壤数据库对我国水稻土有机碳演变模拟的影响。Ma等^[14]基于世界土壤数据库(HWSD,中国境内为1:100万尺度)和EPIC模型评估了我国若尔盖高原湿地1980—2010年的有机碳储量变化。

但是从以上研究也可以看出,由于受基础土壤数据库建立不易的限制,目前我国旱地土壤有机碳区域模拟中大多使用的是单一尺度土壤数据库,而考虑不同制图尺度土壤数据库对模拟结果影响的研究较少。很多研究表明,地表信息在时间和空间上的分辨率均有很大的跨度,在某一尺度上观察到的性质、总结出来的原理和规律,在另一尺度上可

能仍然有效,可能有相似性,也可能需要修改,尺度问题是对地观测首先遇到的挑战^[15-16]。未来CO₂浓度升高下,选择合适的制图尺度进行大区域或全国农业管理措施制定是旱地土壤固碳减排的基础,但不同学者在选择制图土壤数据库时往往根据实际获取数据的难易程度和工作量大小,而并未考虑同一个地区使用大、中、小不同制图尺度土壤数据库造成的模拟误差,这有可能制定出并不符合当地实际情况的农业管理措施。基于此,本研究选择属于黄淮海平原一部分的江苏北部(简称“苏北地区”)390多万hm²旱地作为研究区,运用模拟生物地球化学过程较为成熟的生物地球化学过程模型(Denitrification and Decomposition, DNDC)模型,模拟该地区2010—2039年间不同CO₂浓度升高情境下1:5万、1:25万、1:50万、1:100万、1:400万和1:1000万6种大、中、小系列制图比例尺下的土壤有机碳变化,并基于目前区域尺度数据最详细的1:5万数据库模拟值量化其他制图尺度的模拟误差,结果可为未来CO₂浓度升高下我国旱地有机碳模拟中选择适宜的制图尺度和量化各个制图尺度模拟结果的不确定性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省北部(116°21′~120°54′E, 32°43′~35°7′N),辖徐州、连云港、宿迁、淮安和盐城5个地级市,总面积达5.23×10⁴ km²(图1)。气候类型为暖温带和亚热带的季风性气候,

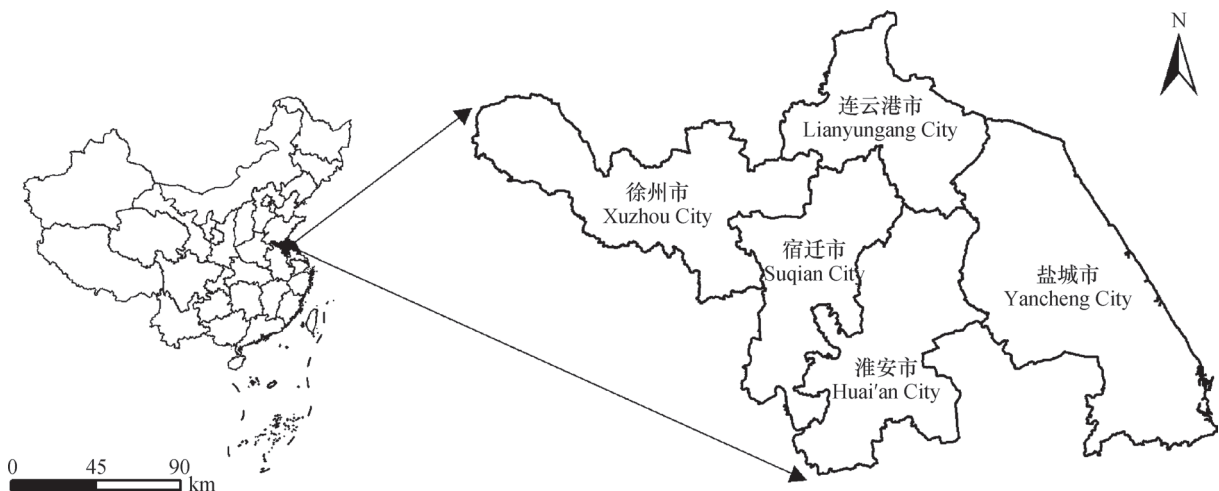


图1 江苏省北部地理位置分布

Fig. 1 Geographical location of the study area

全年平均日照时数2 000~2 600 h, 年平均气温13~16℃, 年降雨量800~1 200 mm, 无霜期220 d左右。该地区地势以平原为主, 80%耕地的土地利用类型为旱地, 面积达到 $3.90 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[17]。土壤类型主要有潮土、盐土、砂姜黑土、棕壤和褐土, 分别占该地区旱地总面积的53%、24%、8.8%、7.9%和6.1%, 与黄淮海平原主要土壤类型的比例基本一致^[5]。成土母质为黄泛冲积物、河海相沉积物、湖相沉积物、下黄土和其他各河流冲积物。

1.2 DNDC模型简介

DNDC模型是由美国New Hampshire大学李长生教授于1992年建立、以日为单位描述农业生态系统碳和氮生物地球化学过程的计算机模拟模型^[18-19]。该模型分为两个部分: ① 包含土壤气候、农作物生长、有机质分解3个子模型, 其作用是根据输入的气象、土壤、植被、土地利用和管理等数据来预测植物—土壤系统的诸环境因子的动态变化; ② 包含硝化、脱氮和发酵等3个子模型, 这部分的作用是由土壤环境因子来预测微生物对碳和氮的各种转化速率。目前, DNDC模型在我国农业、草地和森林等多个领域用于计算土壤固碳效应和温室气体排放, 尤其在农业上Xu等^[20]利用全国不同地区12个长期监测点的野外实测数据进行了验证, 结果表明, 该模型具有较高的可信度。

本研究中利用农业部在苏北地区铜山县设置的小麦和玉米轮作旱地监测点9年实测数据对模型进行了验证。该长期试验点的土壤类型为苏北地区广泛分布的潮土, 具有一定代表性。结果表明, 研究区实测值与模拟值的误差百分率为4.34%; 平均绝对预测误差(MAE)和均方根预测误差(RMSE)分别为 0.53 g kg^{-1} 和 0.89 g kg^{-1} , 说明DNDC模型可以适用于苏北旱地土壤有机碳的模拟。更多模型验证的讨论可参阅文献[21]。

1.3 数据基础

土壤数据包括苏北旱地1:5万~1:1 000万6个数据库, 这些制图尺度基本包含了我国目前在县级、地级市、省级和国家级同类研究中使用的全部比例尺。其中, 数据最详细的1:5万尺度来自江苏省盐城、宿迁、连云港、徐州、淮安5个地级市29个县(市)第二次土壤普查资料, 其他5个尺度图件分别来自各地级市、省级和全国的土壤图。对所有图件在地理信息系统软件中使用双标准纬线等积圆锥投影, 经过数字化形成6个尺度土壤空间数

据库, 各个制图尺度的基本制图单元均采用中国土壤发生分类系统(Genetic Soil Classification of China, GSCC)(表1), 在1:5万尺度下共有11个土类、31个亚类、113个土属和486个土种。土壤剖面属性数据与6个制图尺度空间图斑的连接采用Shi等^[22]提出的“PKB”(Pedological Knowledge Based method, PKB)法。每一图斑均有土壤初始有机碳、黏粒、容重及pH等理化性质。

模型所需的农业数据主要包括各个县(市)作物产量、种植面积、播种期、收获期等种植制度和轮作作物生理参数, 以及氮肥、农家肥和农业人口数据, 这部分数据来自于2009年江苏省出版的统计年鉴资料。气象资料主要来自位于苏北地区7个国家气象站1980—2009年的逐日最高和最低气温、日照时数和降水量数据。在模型模拟中, 不同制图尺度下每个县除土壤属性外, 其他农业管理和气象因子均保持不变。

1.4 不同气候因子的情景设置

在本研究中, 以1980—2009年气象数据和2009年农田管理资料为基础, 分别设置1:5万~1:1 000万6个制图尺度土壤数据库2010—2039年CO₂在正常增加速率上分别提高0.5倍、1倍和2倍等3个情景。根据IPCC第四次报告, 目前的CO₂浓度已达到379 ppm, 1995—2005年的CO₂年增长速率为1.9 ppm^[2]。以此为依据, 保证温度和降水不变的情况下, 本研究在DNDC模型中设置以上3个未来CO₂浓度梯度变化情景。

1.5 统计方法及差异性分析

不同土壤类型、地级市及县(市)面积加权年均有机碳积累速率(dSOC, $\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)和有机碳变化总量(TSOC, Tg C)的计算公式如下:

$$\text{APS} = \sum_{i=1}^n \text{APS}_i \quad (1)$$

$$\text{AMSC} = \sum_{f=1}^h \text{AMSC}_f \quad (2)$$

$$\text{TSOC} = \sum_{i=1}^n (\text{APS}_i \times \text{AMSC}_i) \quad (3)$$

$\text{dSOC} (\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}) = \text{TSOC} / \text{APS} / 30$ (4)
式中, APS为研究区旱地土壤总面积(hm^2), APS_i表示土壤数据库中每个旱地图斑面积, hm^2 ; AMSC_f为每一图斑年均土壤有机碳变化量($\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$); AMSC_i为每个图斑年均土壤有机碳从2010—2039

表1 苏北地区1:5万~1:1 000万6个制图比例尺土壤图基本特征

Table 1 Characteristics of the soil maps different in scale from 1:50 000~1:10 000 000

制图尺度 Mapping scale	图件来源 Source of soil maps	土壤属性 Soil property	剖面数 Number of soil profiles	图斑数量 Number of polygons	制图单元 Basic mapping unit
1:50 000	江苏省各县级土壤普查办公室(1982) County Soil Survey Office in Jiangsu Province (1982)	县土种志 Soil Series of County	983	17 024	土种 Soil species
1:250 000	江苏省土壤普查办公室, 农业出版社(1990) Soil Survey Office of Jiangsu Province, Agriculture Press (1990)	地级市土种志 Soil Series of District	209	3 950	土属 Soil genus
1:500 000	江苏省土壤普查办公室, 农业出版社(1990) Soil Survey Office of Jiangsu Province, Agriculture Press (1990)	省级土种志 Soil Series of Province	64	1 411	土属 Soil genus
1:1 000 000	全国二次土壤普查办公室, 中国地图出版社(1995) The Second Soil Survey Office of China, Sinomaps Press (1995)	中国土种志 Soil Series of China	21	685	土属 Soil genus
1:4 000 000	中国科学院南京土壤研究所编制, 中国地图出版社(1978) Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Sinomaps Press (1978)	中国土种志 Soil Series of China	21	65	亚类 Soil subgroup
1:10 000 000	中国科学院南京土壤研究所编制, 科学出版社(1988) Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Science Press (1988)	中国土种志 Soil Series of China	21	26	亚类 Soil subgroup

年总变化量 ($\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); n 表示图斑编号; h 为2010—2039年模拟年份 ($h=1, 2, 3, \dots, 30$)。

为了更好地说明不同比例尺土壤数据库对旱地土壤有机碳模拟的影响, 本研究一方面对苏北旱地年均固碳速率与初始输入土壤属性进行逐步回归分析, 另一方面用相对偏差(%)绝对值来表示不同制图尺度(除1:5万尺度)模拟的固碳速率和固碳总量误差大小^[23]:

$$y = | (x_s - x_0) / x_0 \times 100 |$$

式中, y 为相对偏差(%); x_s 为1:25万、1:50万、1:100万、1:400万和1:1 000万尺度计算的固碳速率($\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)和固碳总量(Tg); x_0 为土壤数据最为详尽的1:5万尺度计算的固碳速率($\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)和固碳总量(Tg)。

2 结果与讨论

2.1 CO₂浓度升高情景下不同制图尺度的固碳速率和总量

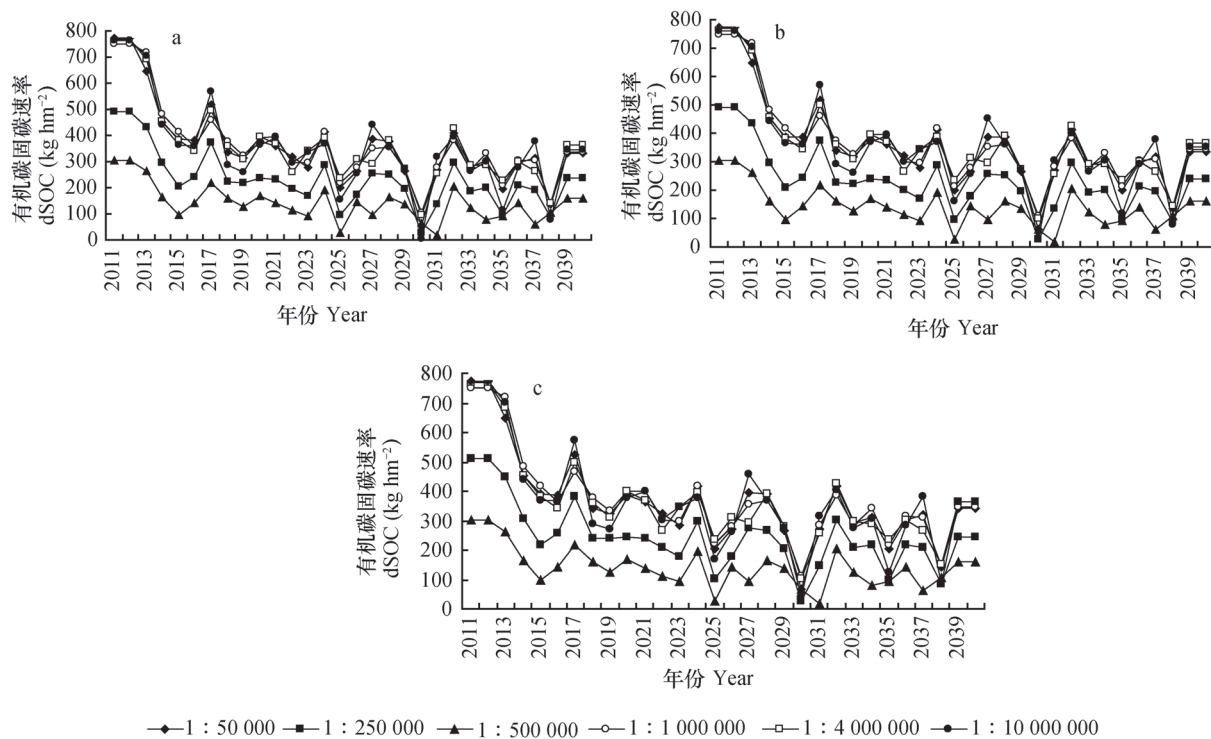
苏北地区在数据最详细的1:5万尺度下的旱

地统计面积为 $3.90 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 约占全国旱地总面积的3.70%^[21]。从图2可以看出, 2010—2039年该地区旱地土壤有机碳随着CO₂浓度的升高普遍呈增加趋势。1:5万尺度下, CO₂浓度在正常增加(1.9 ppm a^{-1})基础上提高0.5倍、1倍、2倍的固碳速率分别为357、360和365 $\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$, 固碳总量(0~50 cm)分别为42.08、42.38和42.93 Tg。从面积统计来看, 在3种CO₂浓度处理下固碳速率小于0、0~100、100~200、200~300、300~400和大于400 $\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 的分别占苏北旱地总面积的0.06%、0.21%、1.71%、12.41%~16.87%、51.56%~53.07%和28.09%~30.60%, 说明未来CO₂浓度升高下有利于该地区固碳, 这也与很多学者的研究结果相一致^[24]。这一方面是因为CO₂浓度升高可促进植物的光合作用, 使碳水化合物被代谢吸收, 植物根系活性增强, 增强土壤固碳能力^[24]; 另一方面是由于当前农业管理措施下苏北旱地年均氮肥和有机肥施用量分别达到492 kg hm^{-2} 和17.27 kg hm^{-2} ^[5]。有研究表明, 大量施用化肥和有机肥能提高植物的生产力和作物秸秆还田量,

进而增加有机物质向土壤输送^[25]。

但是从图2也可以看出,随着制图尺度的变化苏北旱地土壤有机碳模拟结果差异很大。以数据最详细的1:5万尺度模拟值为基准,CO₂浓度在正常增加速率基础上提高0.5倍、1倍和2倍下1:25万~1:1000万尺度年均固碳速率模拟误差分别在0.89%~60.54%、0.81%~60.71%和0.15%~61.02%之间,固碳总量模拟误差分别在0.60%~59.22%、0.37%~59.39%和0.02%~59.71%之间,这主要与各个制图尺度下模型输入的初始土壤属性差异有关。有研究表明在区域特定的管理条件下,土壤属性空间异质性是造成有机碳模拟不确定性的最主要来源^[26]。从表2可以看出,不同制图尺度下初始土壤有机碳和黏粒与年均固碳速率之间均存在极显著相关,3种CO₂浓度处理下前者对各个尺度年均固碳速率的变异解释度分别在4.9%~50.2%、5.0%~48.8%和3.8%~46.5%之间,后者在11.0%~30.0%、18.7%~29.4%和3.3%~28.3%之间;而容重和pH对不同尺度下的年均固碳速率变异解释度相对较低且不稳定。一般认为,初始土壤有机碳值越高,经

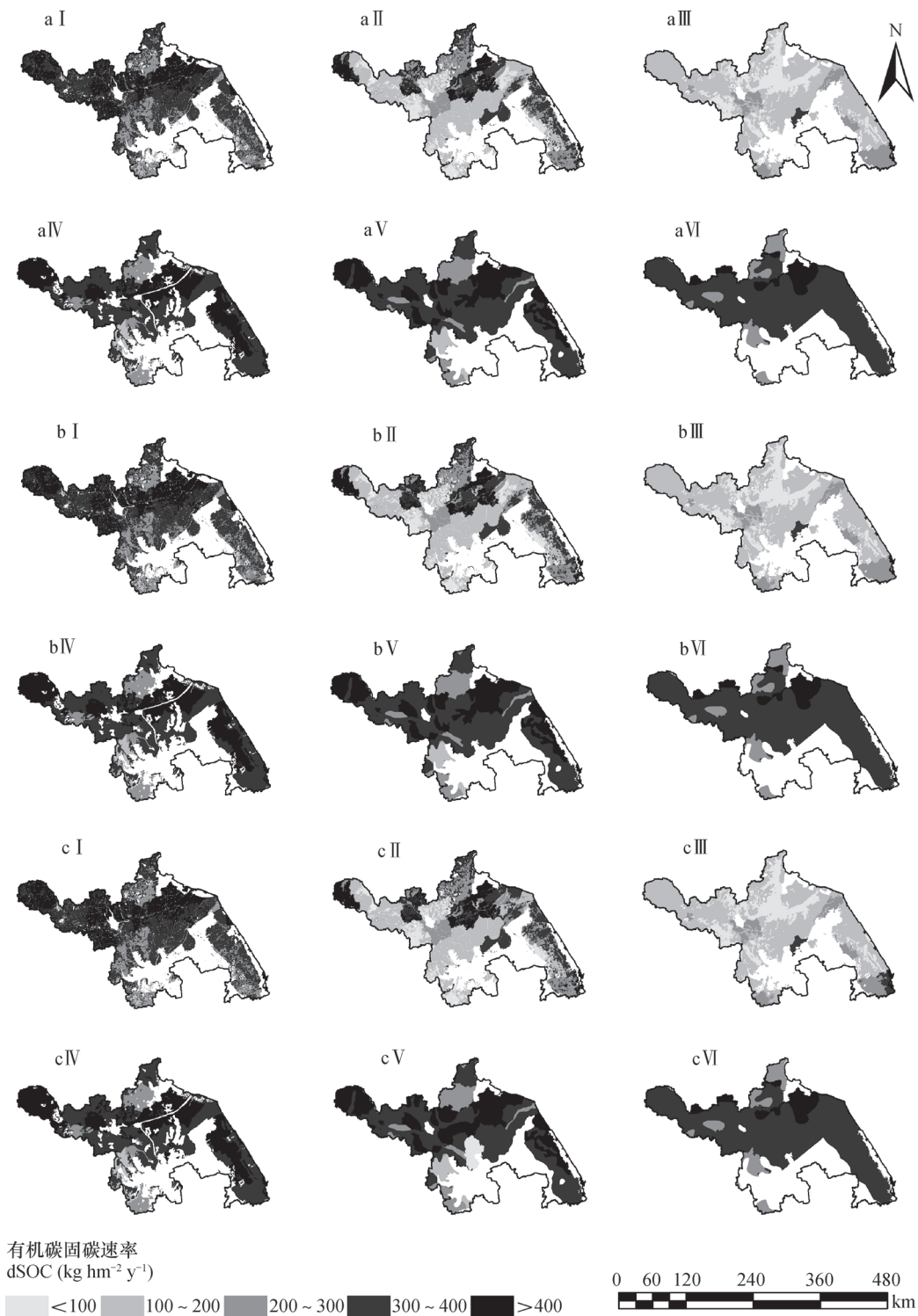
一系列农田管理措施后有机碳下降越快;反之,初始土壤有机碳值越低,则下降越慢^[27]。此外,土壤黏粒也可通过黏粒胶体吸附及形成土壤有机无机复合体实现对有机碳的物理保护,质地越黏重,其有机碳的分解速率就越小^[28]。据统计,苏北旱地1:5万尺度具有相对较低的初始土壤有机碳(6.00 g kg⁻¹)和较高的黏粒含量(28.0%),导致其2010—2039年间在3种CO₂浓度情境处理下的多年平均固碳速率在357~365 kg hm⁻²之间。1:100万和1:400万尺度尽管初始土壤有机碳是所有尺度中最高的,分别达到6.85 g kg⁻¹和6.91 g kg⁻¹,但黏粒含量也是最高的,分别为32%和30%,导致这2种尺度在3种CO₂浓度处理下的年均固碳速率也超过360 kg hm⁻²。1:1000万尺度在3种CO₂浓度处理下的年均固碳速率也较大,均超过350 kg hm⁻²,主要原因是该尺度尽管黏粒含量只有23.4%,但初始土壤有机碳也是所有制图尺度中最低的,为4.64 g kg⁻¹。从二者的平衡来看,苏北地区1:1000万尺度下初始土壤有机碳的“碳汇”效应远大于黏粒含量的“碳源”效应。相对而言,1:25万和1:50万尺度下不同CO₂浓度处理的年均固碳速



注: a, b, c分别为CO₂在正常增加速率基础上提高0.5倍、1倍和2倍
Note: a, b and c stands for atmospheric CO₂ concentration increasing rate at 1.5, 2.0, and 3.0 times the normal rate

图2 不同CO₂浓度升高情景下6个制图尺度的土壤有机碳年度变化

Fig. 2 Predicted average annual carbon sequestration rate relative to scale of the map used and scenario



注：a, b, c 分别为CO₂在正常增加速率上提高0.5倍、1倍和2倍；I 1 : 50 000；II 1 : 250 000；III 1 : 500 000；IV 1 : 1 000 000；V 1 : 4 000 000；VI 1 : 10 000 000 Note : a, b and c stands for atmospheric CO₂ concentration increasing rate, respectively, 1.5, 2.0, and 3.0 times the normal rate；I 1 : 50 000；II 1 : 250 000；III 1 : 500 000；IV 1 : 1 000 000；V 1 : 4 000 000；VI 1 : 10 000 000

图3 不同CO₂浓度增加情景下6个制图尺度的土壤有机碳年变化空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of average annual carbon sequestration rate of the upland soil relative to scale of the map used and scenario

表2 CO₂浓度升高情景下不同制图尺度苏北旱地初始土壤属性与年均固碳速率的逐步回归分析

Table 2 Initial soil properties of the uplands in North Jiangsu and stepwise regression analysis of average annual SOC sequestration rate relative to scale of the map used and scenario

制图尺度 Mapping scale	模拟单元 Number of simulation unit	CO ₂ 正常增加速率上提高0.5倍 CO ₂ concentration increased at a rate 1.5 times the normal one				R^2_{adj}
		ΔR^2				
		初始有机碳 Initial SOC (g kg ⁻¹)	黏粒 Clay (%)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	pH	
1 : 50 000	17 024	0.287***	0.300***	0.035***	0.012***	0.634
1 : 250 000	5 170	0.117***	0.194***	0.002***	0.026***	0.339
1 : 500 000	2 119	0.459***	0.200***	0.041***	0.046***	0.746
1 : 1 000 000	1 229	0.125***	0.189***	0.056***	0.061***	0.431
1 : 4 000 000	224	0.049***	0.125***	0.015*	0.040**	0.229
1 : 10 000 000	86	0.502***	0.110***	0.022*	0.031*	0.665
制图尺度 Mapping scale	模拟单元 Number of simulation unit	CO ₂ 在正常增加速率上提高1倍 CO ₂ concentration increased at a rate 2 times the normal one				R^2_{adj}
		ΔR^2				
		初始有机碳 Initial SOC (g kg ⁻¹)	黏粒 Clay (%)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	pH	
1 : 50 000	17 024	0.286***	0.294***	0.036***	0.013***	0.629
1 : 250 000	5 170	0.113***	0.191***	0.002***	0.025***	0.331
1 : 500 000	2 119	0.458***	0.200***	0.041***	0.047***	0.746
1 : 1 000 000	1 229	0.119***	0.187***	0.054***	0.060***	0.420
1 : 4 000 000	224	0.050***	0.117***	0.014*	0.038**	0.219
1 : 10 000 000	86	0.488***	0.114***	0.022*	0.030*	0.654
制图尺度 Mapping scale	模拟单元 Number of simulation unit	CO ₂ 在正常增加速率上提高2倍 CO ₂ concentration increased at a rate 3 times the normal one				R^2_{adj}
		ΔR^2				
		初始有机碳 Initial SOC (g kg ⁻¹)	黏粒 Clay (%)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	pH	
1 : 50 000	17 024	0.285***	0.283***	0.038***	0.015***	0.621
1 : 250 000	5 170	0.105***	0.189***	0.003***	0.014***	0.311
1 : 500 000	2 119	0.457***	0.198***	0.041***	0.046***	0.742
1 : 1 000 000	1 229	0.109***	0.184***	0.051***	0.057***	0.401
1 : 4 000 000	224	0.038**	0.033**	—	0.020*	0.091
1 : 10 000 000	86	0.465***	0.115***	0.025*	0.028*	0.633

注：*，**和***分别表示 $p < 0.05$ ，0.01和0.001水平上显著相关； ΔR^2 和 R^2_{adj} 分别表示变异解释度和调整后的变异解释度
 Note: *, **, and *** Significant at 0.05, 0.01, and 0.001 correlation level respectively; ΔR^2 and R^2_{adj} significant degree of variant explain and adjusted degree of variants explain respectively

率均较低, 分别在232 ~ 244 kg hm⁻²和141 ~ 142 kg hm⁻²之间, 这一方面是因为2种尺度的黏粒含量相对较低, 分别为22.9%和25.3%, 另一方面是由于他们的容重相对较高, 分别达到1.32 g cm⁻³和1.30 g cm⁻³。有研究表明, 土壤有机碳积累量与容重成反比, 有机碳含量越大土壤容重则越小^[21]。

总体而言, 苏北旱地有机碳研究中所选择的土壤图比例尺差异能够导致未来CO₂浓度升高背景下有机碳模拟结果的极大不确定性, 因为大比例尺土壤图中分布面积大、范围广的土壤类型可能是小比例尺土壤图制图单元中的主要组分, 而分布面积小的土壤类型在制图尺度降低的图斑概化过程中则可能被删除或归并到其他土壤类型^[29]。很多研究表明, 随着土壤图比例尺减小而导致的图斑概化会对整个区域估算的有机碳、黏粒和容重等生物地球化学模型比较敏感的土壤属性产生影响, 进而造成不同制图尺度下同一地区的有机碳模拟结果差异很大^[23]。

2.2 CO₂浓度升高情景下不同制图尺度各土类的固碳速率和总量

潮土为苏北地区最主要的旱地土壤类型, 在数据最详细的1:5万制图尺度下达到206.8 × 10⁴ hm², 占整个地区旱地总面积的52.67%。从表3可以看出, 未来不同CO₂浓度处理下潮土在各个尺度的年均固碳速率差异也比较大。1:5万尺度下, CO₂在正常增加速率上提高0.5倍、1倍、2倍的固碳速率分别为375、378和383 kg hm⁻² a⁻¹, 固碳总量分别为23.27、23.44和23.74 Tg, 均占整个地区固碳总量的55%左右。1:25万尺度下, 3种CO₂处理的相应年均固碳速率明显低于1:5万, 其值介于224 ~ 236 kg hm⁻² a⁻¹之间, 主要原因是该尺度下的黏粒含量为19.8%, 是所有尺度中最小的, 而容重为1.32 g cm⁻³, 二者皆不利于土壤固碳。1:50万尺度3种CO₂浓度处理下潮土的年均固碳速率是所有制图尺度中最小的, 介于144 ~ 145 kg hm⁻² a⁻¹之间, 这主要与该尺度下较高的初始有机碳(6.90 g kg⁻¹)和较低的黏粒含量(27.85 g kg⁻¹)有关。其他3个尺度在不同CO₂浓度处理下的年均固碳速率与1:5万尺度相差不大, 一般在352 ~ 385 kg hm⁻² a⁻¹之间。

盐土、砂姜黑土、棕壤、褐土和紫色土在1:5万尺度下分别占苏北旱地总面积的24.31%、8.13%、7.31%、5.64%和0.27%, 在该尺度下这4

种土类的年均固碳速率差异不大, 介于326 ~ 379 kg hm⁻² a⁻¹之间。但随着制图尺度的变化, 褐土、紫色土和砂姜黑土受影响比较大, 以1:5万尺度年均固碳速率为基准, 这3个土类的相对误差分别在14.2% ~ 61.4%、47.7% ~ 78.4%和8.6% ~ 88.7%之间。褐土1:50万 ~ 1:100万尺度下年均固碳速率明显小于1:5万尺度, 主要是因为这3个尺度下容重和初始有机碳分别高于1.50 g cm⁻³和6.70 g kg⁻¹, 较高的初始有机碳和容重均不利于农田固碳。紫色土在1:25万和1:50万尺度下的年均固碳速率明显小于1:5万尺度, 主要是由于前两者的初始有机碳明显高于后者。据统计, 该土类在1:5万尺度下的初始有机碳为4.25 g kg⁻¹, 而在1:25万和1:50万尺度下分别为6.50 g cm⁻³和7.93 g kg⁻¹。

石灰土和石质土在1:5万尺度下分别占苏北旱地总面积的1.48%和0.18%。随着制图尺度的变化, 这2个土类的年均固碳速率与1:5万尺度相差比较大, 各个尺度下的相对误差分别在3.95% ~ 326.86%和4.27% ~ 87.20%之间。石质土在1:25万尺度下年均固碳速率远小于1:5万尺度是因为前者的初始有机碳为9.16 g kg⁻¹, 黏粒含量为38.1%, 而后者这两个土壤属性值分别为11.66 g kg⁻¹和18.6%。有研究表明, 初始有机碳含量越低, 则越有利于后期土壤有机碳的积累; 而黏粒含量越高, 则越有利于保护土壤团聚体和提高土壤固碳速率^[27-28]。在1:100万 ~ 1:400万3个尺度下石质土的年均固碳速率高于1:5万, 主要与这3个尺度下较低的初始有机碳(7.37 g kg⁻¹)和较高的黏粒(46.3%)均有利于土壤固碳有关^[27-28]。

总之, 不同制图尺度下苏北旱地各土类的年均固碳速率差异主要取决于图斑概化后的土壤属性(如初始有机碳、黏粒含量和容重等), 而该固碳总量则受到年均固碳速率和概化前后面积的双重影响(表3)^[23, 29]。一般而言, 随着制图尺度的降低, 部分高级别(如1:5万)尺度的土类面积将发生概化现象, 转化为相邻土类, 这一方面会导致各个土类的面积发生变化, 以及图斑数的增加或减少; 另一方面也会使每个图斑中所包含的土壤属性值发生变化, 从而造成有机碳模拟的很大不确定性。从本研究来看, 年均固碳速率受制图尺度影响最大的是石灰土、石质土、紫色土和砂姜黑土, 这4种土类在不同尺度下的相对误差分别介于3.95% ~ 326.86%、4.27% ~ 87.20%、

表3 CO₂浓度升高情景下不同制图尺度各土壤类型的固碳速率和固碳总量Table 3 Average annual carbon sequestration rate (kg hm⁻² a⁻¹) and total carbon sequestration (Tg) relative to soil type, scale of the map used and scenario

CO ₂ 浓度增 加速率 CO ₂ concentration increase rate	土壤类 型 Soil type	1 : 50 000		1 : 250 000		1 : 500 000		1 : 1 000 000		1 : 4 000 000		1 : 10 000 000	
		速率 dSOC	总量 Total amount	速率 dSOC	总量 Total amount	速率 dSOC	总量 Total amount	速率 dSOC	总量 Total amount	速率 dSOC	总量 Total amount	速率 dSOC	总量 Total amount
a	潮土 ^①	375	23.27	224	16.82	144	10.51	378	29.76	370	29.57	352	27.02
	盐土 ^②	348	9.96	338	5.99	165	3.49	372	3.84	415	6.07	370	12.80
	褐土 ^③	347	2.31	166	0.53	136	1.18	297	2.42	287	1.07	276	1.63
	棕壤 ^④	326	2.80	208	2.59	175	12.02	338	2.45	300	2.53	250	0.36
	石灰土 ^⑤	175	3.7 × 10 ⁻²	-397	-8.02 × 10 ⁻²	184	3.47 × 10 ⁻²	273	0.06	376	0.47	—	—
	石质土 ^⑥	211	0.36	27	4.39 × 10 ⁻²	199	0.36	293	0.52	292	0.001	—	—
	紫色土 ^⑦	371	0.12	194	6.14 × 10 ⁻²	81	2.42 × 10 ⁻²	—	—	—	—	—	—
	砂浆黑土 ^⑧	335	3.21	199	1.93	38	0.36	306	2.50	305	4.24	—	—
b	潮土 ^①	378	23.44	226	16.98	144	10.54	380	29.95	372	29.76	356	27.88
	盐土 ^②	351	10.04	341	6.04	165	3.50	375	3.86	417	6.10	373	12.91
	褐土 ^③	349	2.32	166	0.53	136	1.18	299	2.44	289	1.08	277	1.64
	棕壤 ^④	327	2.81	209	2.60	176	1.21	339	2.46	301	2.54	250	0.36
	石灰土 ^⑤	176	0.04	-397	-8.01 × 10 ⁻²	184	3.48 × 10 ⁻²	273	0.07	377	0.48	—	—
	石质土 ^⑥	211	0.36	28	4.44 × 10 ⁻²	202	0.36	293	0.52	292	0.01	—	—
	紫色土 ^⑦	374	0.19	194	6.16 × 10 ⁻²	81	2.43 × 10 ⁻²	—	—	—	—	—	—
	砂浆黑土 ^⑧	337	3.23	200	1.9	38	0.37	308	2.53	307	4.27	—	—
c	潮土 ^①	383	23.74	236	17.71	145	10.59	385	30.32	273	29.80	361	27.70
	盐土 ^②	357	23.74	366	6.49	166	3.51	380	3.92	421	6.16	380	13.17
	褐土 ^③	352	10.20	167	0.53	136	1.19	302	2.46	295	1.11	281	2.57
	棕壤 ^④	330	2.34	210	2.61	176	1.21	341	2.48	303	2.56	252	0.37
	石灰土 ^⑤	177	0.04	-395	-7.98 × 10 ⁻²	184	3.48 × 10 ⁻²	274	0.07	379	0.48	—	—
	石质土 ^⑥	212	0.36	29	4.59 × 10 ⁻²	203	0.36	294	0.51	293	0.01	—	—
	紫色土 ^⑦	379	0.12	195	6.19 × 10 ⁻²	82	2.46 × 10 ⁻²	—	—	—	—	—	—
	砂浆黑土 ^⑧	341	3.26	202	1.97	39	0.36	311	2.55	311	4.33	—	—

注：a, b, c分别为CO₂浓度在正常增加速率上提高0.5倍、1倍和2倍情景 a, b and c stands for atmospheric CO₂ concentration increase rate 1.5, 2.0, and 3.0, respectively, times the normal rate ①Fluvo-aquic soil, ②Saline soil, ③Cinnamon soil, ④Brown soil, ⑤Limestone soil, ⑥Lithosol, ⑦Purplish soil, ⑧Lime concretion black soil

47.7% ~ 78.4%和8.6% ~ 88.7%之间；而固碳总量受制图尺度影响最大的是石灰土、石质土和紫色土，这3种土类在各个尺度的相对误差分别介于6.22% ~ 316.76%、0 ~ 99.72%、48.41% ~ 87.21%之间。因此，今后在苏北旱地土壤有机碳研究中一方面定量化不同制图尺度对各个土壤类型造成的模拟误差大小，另一方面对于不同土壤类型选择适宜的模拟尺度是十分重要的。

2.3 CO₂浓度升高情景下不同制图尺度各行政区的年均固碳速率和总量

从表4可以看出，不同CO₂浓度变化情景下苏北地区各地级市固碳速率和总量差异很大。在1 : 5万尺度下，地处西北部的徐州固碳速率和总量最大，3种CO₂处理下的固碳速率介于397 ~ 407 kg hm⁻² a⁻¹之间，固碳总量介于12.78 ~ 13.10 Tg之间，占整个地区固碳总量的30%左右；而中南部淮安的固碳

表4 CO₂浓度升高情景下不同制图尺度各行政区的固碳速率和固碳总量Table 4 Average annual carbon sequestration rate ($\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) and total carbon sequestration (Tg) relative to region, scale of the map used and scenario

CO ₂ 浓度增加 速率 CO ₂ concentration increase rate	数据 来源 Source of date	1 : 50 000		1 : 250 000		1 : 500 000		1 : 1 000 000		1 : 4 000 000		1 : 10 000 000	
		速率 dSOC	总量 Total amount	速率 dSOC	总量 Total amount	速率 dSOC	总量 Total amount	速率 dSOC	总量 Total amount	速率 dSOC	总量 Total amount	速率 dSOC	总量 Total amount
a	淮安 ^①	321	4.95	157	2.38	182	2.63	343	4.16	339	4.99	334	4.12
	连云港 ^②	371	6.81	342	6.47	105	2.01	360	6.04	364	7.18	349	6.86
	宿迁 ^③	346	7.99	224	5.16	117	2.73	325	6.79	328	7.62	338	6.68
	徐州 ^④	397	12.78	199	6.52	129	4.24	370	11.63	378	12.61	367	12.44
	盐城 ^⑤	334	9.56	242	7.36	174	5.55	387	12.96	375	11.58	354	11.84
b	淮安 ^①	322	4.97	157	2.39	183	2.65	344	4.18	341	5.01	337	4.15
	连云港 ^②	372	6.84	344	6.51	106	2.01	361	6.06	366	7.21	352	6.91
	宿迁 ^③	348	8.04	225	5.2	117	2.73	327	6.83	330	7.67	341	6.73
	徐州 ^④	401	12.9	201	6.61	129	4.25	374	11.75	381	12.72	368	10.63
	盐城 ^⑤	336	9.64	273	8.3	175	5.57	394	13.2	364	11.85	357	11.95
c	淮安 ^①	325	5.01	159	2.41	184	2.66	346	4.21	343	5.04	341	4.20
	连云港 ^②	375	6.89	348	6.57	106.5	2.03	363	6.10	368	7.26	356	6.98
	宿迁 ^③	352	8.12	228	5.26	117	2.75	330	6.90	334	7.77	346	6.82
	徐州 ^④	407	13.1	203	6.66	130	4.27	380	11.95	388	12.94	378	12.73
	盐城 ^⑤	336	9.64	273	8.3	175	5.57	394	13.2	364	11.85	357	11.95

注：a, b, c分别为CO₂浓度在正常增加速率上提高0.5倍、1倍和2倍 a, b and c stands for atmospheric CO₂ concentration increase rate 1.5, 2.0, and 3.0 times, respectively, the normal rate ①Huai'an, ②Lianyungang, ③Suqian, ④Xuzhou, ⑤Yancheng

速率和总量则最小, 3种CO₂处理下的年均固碳速率介于321~325 $\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 之间, 固碳总量介于4.95~5.01 Tg之间, 占整个地区固碳总量的12%左右。连云港、宿迁和盐城3个地级市在不同CO₂浓度处理下的年均固碳速率分别介于371~375、346~352和334~342 $\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 之间, 而固碳总量分别在6.81~6.89 Tg、7.99~8.12 Tg和9.56~9.80 Tg之间。

徐州的固碳速率明显高于淮安, 一方面是因为该地区的初始有机碳含量较低, 仅为5.5 g kg^{-1} , 而氮肥和有机肥投入量却较高, 分别达到615和17.44 $\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$; 而淮安的初始有机碳含量虽然也较低, 为5.7 g kg^{-1} , 但氮肥和有机肥投入量分别仅为365和15.44 $\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。此外, 徐州处于暖温带半湿润季风气候区, 降雨较少, 多年平均为903 mm; 而淮安处于暖温带向亚热带的过渡性气候区, 降雨较多, 多年平均达到1 052 mm^[5]。有

研究表明, 高的降雨量会使土壤中氮淋失至水体或者更深土层, 造成作物减产和生物量降低, 进而减少有机物质向土壤碳库的输入^[30]。

随着制图尺度的变化, DNDC模型模拟的苏北地区各地级市固碳速率和总量差异也很大。受制图尺度影响最大的是连云港, 以1:5万尺度模拟值为基准, CO₂浓度在正常增加速率基础上提高0.5倍、1倍和2倍3种情景处理下1:25万~1:1 000万尺度年均固碳速率的模拟误差分别在1.89%~71.70%、1.61%~71.50%和1.87%~71.60%之间, 固碳总量的模拟误差分别在0.73%~70.48%、1.02%~70.61%和1.31%~70.54%之间。相对而言, 受制图尺度影响最小的是淮安, 3种CO₂处理下1:25万~1:1 000万尺度年均固碳速率的模拟误差分别在4.05%~51.09%、4.66%~51.24%和6.25%~47.92%之间, 固碳总量的模拟误差分别在

0.81%~51.92%、0.80%~51.91%和0.60~51.90%之间。其他3个地级市在不同CO₂处理下各个制图尺度固碳速率的模拟误差一般在0.7%~68%之间,而固碳总量的模拟误差在1.2%~67%之间。

总体上看,不同制图比例尺土壤数据库模拟的苏北旱地各地级市固碳速率和总量差异很大,这主要与制图尺度降低图斑概化后的土壤属性变化有关。因此,在今后苏北旱地固碳减排政策制定中,一方面根据本研究中各个地级市的误差大小,选择合适的制图尺度;另一方面为降低模拟结果的不确定性,今后整个区域建立更为精确的土壤数据库也是非常必要的。

2.4 不确定性分析

在运用生物地球化学模型进行土壤有机碳模拟时无法避免的存在一定不确定性^[31]。虽然本研究中运用了能充分体现土壤属性空间异质性的“图斑”作为最小模拟单元,改进了DNDC模型的执行,但是由于其他输入资料可获取的限制性,模拟结果依然存在一定不确定性。第一,农田管理会对有机碳的变化产生很大影响,但是本研究中逐年氮肥施用量、灌溉、秸秆还田率、牲畜头数和农业人口等农业资料均以目前使用最为广泛的“县”为最小控制单元,一定程度上忽略了“县内”的异质性。第二,气象数据作为重要参数对模型具有驱动作用,而在本次研究中以1980—2009年气象数据代替未来2010—2039年进行有机碳的变化模拟,并未充分考虑将来气候变化和极端气候条件出现对于土壤有机碳的影响。第三,随着苏北地区经济的发展,苏北旱地未来30 a的土地利用方式会发生很大的变化,而这些改变无法在本次模拟中输入。此外,本研究中主要考虑了冬小麦和玉米两种农作物,然而研究区内还种植有其他小面积的作物。因此,在今后的研究中收集多期遥感数据,以获取更详细的土地利用现状图驱动模型非常重要。

3 结 论

旱地占我国农田总面积的70%以上,明确不同制图尺度土壤数据库对未来CO₂浓度升高下该土地利用类型有机碳模拟的影响对于制定我国农田温室气体“固碳减排”政策具有重要意义。从本研究来看,2010—2039年间CO₂浓度在正常增加速率(1.9 ppm a⁻¹)的基础上提高0.5倍、1倍、2倍下,属于

黄淮海平原一部分的苏北旱地在目前区域尺度数据最详细的1:5万下固碳速率分别为357、360和365 kg hm⁻² a⁻¹,固碳总量分别为42.08、42.38和42.93 Tg。但进一步从其他制图尺度结果来看,各个制图尺度土壤数据库图斑概化后的面积和土壤属性差异对同一地区有机碳模拟产生很大影响,未来CO₂浓度升高下我国旱地有机碳模拟中选择适宜的制图尺度是非常重要的。目前,1:100万制图尺度广泛应用于全国碳储量估算和碳平衡模拟,从本研究的结果来看,未来CO₂浓度升高下该尺度在整个区域、各个土类和地级市的固碳速率模拟差异与数据最详细的1:5万尺度模拟结果差异相对较小,这一方面证明了该尺度在中国土壤有机碳研究中使用的可靠性,另一方面也说明了苏北地区在缺乏1:5万尺度的情况下,可用1:100万尺度模拟固碳速率和总量。

参 考 文 献

- [1] 张凡,李长生.气候变化影响的黄土高原农业土壤有机碳与碳排放.第四纪研究,2010,30(3):566—572
Zhang F, Li C S. The effect of climate on soil organic carbon and carbon emissions for agro-ecosystems of loess plateau (In Chinese). Quaternary Sciences, 2010, 30(3): 566—572
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: Synthesis report. Summary for policymakers. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press, 2007
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: Synthesis report. Summary for policymakers. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press, 2013
- [4] 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.地球科学进展,2015,30(8):940—951
Pan G X, Lu H F, Li L Q, et al. Soil carbon sequestration with bioactivity: A new emerging frontier for sustainable soil management (In Chinese). Advances in Earth Science, 2015, 30(8): 940—951
- [5] 王光翔,张黎明,李晓迪,等.基于高精度土壤数据库的苏北旱地固碳速率和潜力研究.生态环境学报,2016,25(3):422—423
Wang G X, Zhang L M, Li X D, et al. Study of soil organic carbon sequestration rate and potential of upland in northern Jiangsu Province based on high-resolution soil database (In Chinese). Ecology and Environment

- Sciences, 2016, 25 (3): 422—423
- [6] 刘昱, 陈敏鹏, 陈吉宁. 农田生态系统碳循环模型研究进展和展望. 农业工程学报, 2015, 31 (3): 1—9
Liu Y, Chen M P, Chen J N. Progress and perspectives in studies on agro-ecosystem carbon cycle model (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (3): 1—9
- [7] Cerri C E P, Easter M, Paustian K, et al. Predicted soil organic carbon stocks and changed in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2007, 122: 58—72
- [8] Mondini C, Coleman K, Whitmore A P, et al. Spatially explicit modeling of changes in soil organic C in agricultural soils in Italy, 2001—2100: Potential for compost amendment. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012, 153: 24—32
- [9] Karunaratne S B, Bishop T F A, Baldock J A, et al. Catchment scale mapping of measure able soil organic carbon fractions. Geoderma, 2014, 219/220: 14—23
- [10] Tang H J, Qiu J J, Ranst E V, et al. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model. Geoderma, 2006, 134: 200—206
- [11] Zhang F, Li C S, Wang Z, et al. Modeling impacts of management on farmland soil carbon dynamics along a climate gradient in Northwest China during 1981—2000. Ecological Modelling, 2015, 312: 1—10
- [12] Yu Y Q, Huang Y, Zhang W. Projected changes in soil organic carbon stocks of China's croplands under different agricultural managements, 2011—2050. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2013, 178: 109—120
- [13] Xu S X, Zhao Y C, Shi X Z, et al. Map scale effects of soil databases on modeling organic carbon dynamics for paddy soils of China. Catena, 2013, 104: 67—76
- [14] Ma K, Liu J G, Balkovič J, et al. Changes in soil organic carbon stocks of wetlands on China's Zoige plateau from 1980 to 2010. Ecological Modelling, 2016, 327: 18—28
- [15] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. 地理学报, 2014, 69 (8): 1052—1059
Fu B J. The integrated studies of geography: Coupling of patterns and processes (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2014, 69 (8): 1052—1059
- [16] 赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析. 土壤学报, 2013, 50 (1): 1—11
Zhao M S, Zhang G L, Wang D C, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xu-Huai alluvial plain (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (1): 1—11
- [17] 杨艳丽, 史学正, 王果, 等. 江苏北部土壤属性空间分异及其影响因素研究. 土壤通报, 2009, 40 (3): 465—470
Yang Y L, Shi X Z, Wang G, et al. Spatial heterogeneity of soil properties and their affecting factors in the northern Jiangsu Province (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40 (3): 465—470
- [18] Li C S, Frohking S, Frohking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I. Model structure and sensitivity. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 9759—9776
- [19] Li C S, Frohking S, Frohking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: II. Model applications. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 9777—9783
- [20] Xu S X, Shi X Z, Zhao Y C, et al. Spatially explicit simulation of soil organic carbon dynamics in China's paddy soils. Catena, 2012, 92: 113—121
- [21] Zhang L M, Zhuang Q L, Li X D, et al. Carbon sequestration in the uplands of Eastern China: An analysis with high-resolution model simulations. Soil and Tillage Research, 2016, 158: 165—176
- [22] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, et al. Cross-reference system for translating between genetic soil classification of China and Soil Taxonomy. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70: 78—83
- [23] Zhang L M, Zhuang Q L, Zhao Q Y, et al. Uncertainty of organic carbon dynamics in Tai-Lake paddy soils of China depends on the scale of soil maps. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 222: 13—22
- [24] 陈春梅, 谢祖彬, 朱建国. 大气CO₂浓度升高对土壤碳库的影响. 中国生态农业学报, 2008, 16 (1): 217—222
Chen C M, Xie Z B, Zhu J G. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on soil carbon (In Chinese). Chinese Journal of Eco-agriculture, 2008, 16 (1): 217—222
- [25] Brar B S, Singh K, Dheri G S, et al. Carbon sequestration and soil carbon pools in a rice-wheat cropping system: Effect of long-term use of inorganic fertilizers and organic manure. Soil and Tillage Research, 2013, 128: 30—36
- [26] Pathak H, Li C S, Wassmann H. Greenhouse gas emissions from Indian rice fields: Calibration and upscaling using the DNDC model. Biogeoscience, 2005, 2: 113—123
- [27] Zhao G, Bryan B, King D, et al. Impact of agricultural management practices on soil organic carbon: Simulation of Australian wheat systems. Global Change

- Biology, 2013, 19: 1585—1597
- [28] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms for soil organic matter: Implications for C saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 141: 155—176
- [29] 李晓迪, 王淑民, 张黎明, 等. 土壤数据源和制图比例尺对旱地土壤有机碳储量估算的影响. *土壤学报*, 2016, 53 (1) : 58—71
Li X D, Wang S M, Zhang L M, et al. Impacts of source of soil data and scale of mapping on assessment of organic carbon storage in upland soil (In Chinese) . *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (1) : 58—71
- [30] Peinetti H R, Menezes R S C, Tiessen H, et al. Simulating plant productivity under different organic fertilization practices in a maize/native pasture rotation system in semi-arid NE Brazil. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 62 (2) : 204—222
- [31] Li H, Qiu J J, Wang L G, et al. Advance in a terrestrial biogeochemical model—DNDC model. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (2) : 91—96

Effects of Mapping Scale on Simulation of Soil Organic Carbon in Upland in the Scenario of Elevated CO₂

HUANG Linbin^{1, 2} ZHANG Liming^{1, 2†} LONG Jun¹ YU Dongsheng³ SHI Xuezheng³ CHEN Hanyue¹
FAN Xieyu¹ XING Shihe^{1, 2}

(1 College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

(2 National Engineering Reserch Center of Juncao (Fujian Agriculture and Favestry University), Fuzhou 350002, China)

(3 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China)

Abstract 【Objective】 Agro-ecosystem models have been extensively used to predict changes in soil organic carbon (SOC) in farmland in the scenario of elevated CO₂ in future. However, currently most of the studies rely on maps of only one or certain one scale, and little has been done on influence of map scales on prediction of SOC dynamics in the scenario of elevated CO₂. China has a total of 140 million hm² of farmlands, consisting of 110 M hm² of uplands and 30 M hm² of paddy fields. As upland soil is enormous in area and high in carbon storage, it plays an important role in sequestering carbon and mitigating climate change. Owing to the complexity of carbon turnover processes and dynamic response of carbon to environmental conditions, recent years have seen progresses in using process-based models to simulate historic patterns and future trends of SOC variation in agricultural systems. The DeNitrification-DeComposition (DNDC) model based on human activity data, land use, soil parameters, daily temperatures, and precipitation is used to describe biogeochemical processes of C and N recycling in the terrestrial ecosystem. Currently it has been extensively used to explain mechanisms of carbon turnover as affected by the complex interactions among soil management, crops, and climate. 【Method】 Based on the uplands in North Jiangsu, China, the 1980—2009 meteorological data and 2009 farmland management data of the region, soil databases of six different mapping scales, i.e., 1 : 50 000, 1 : 250 000, 1 : 500 000, 1 : 1 000 000, 1 : 4 000 000, and 1 : 10 000 000, and 3 different scenarios set for the period of 2010—2039 with atmospheric CO₂ elevation rate being 1.5, 2.0 and 3.0 times, respectively, the normal rate (1.9 ppm a⁻¹), this study used the DNDC model to predict carbon sequestration rate and potential as affected by CO₂ elevation rate in the region with the data of the most detailed 1 : 50 000 map and quantify the uncertainties of using the soil databases different in mapping scale to simulate SOC dynamics in the upland-crop ecosystem. 【Result】 Results show that based on the 1 : 50 000 map and in the scenario of the atmospheric CO₂ concentration rising at a rate 1.5, 2.0, and 3.0 times the normal rate, the average annual SOC sequestration rate in the topsoil (0 ~ 50 cm)

layer of the upland of North Jiangsu during the period of 2011—2039 was predicted to be 357, 360, and 365 kg hm⁻² a⁻¹, respectively, and the total SOC sequestration was 42.08、42.38 and 42.93 Tg C, respectively. However, the prediction varied sharply with scale of the map used. When the average annual C sequestration rate predicted based on the 1 : 50 000 map was used as baseline, the use of the other maps would generated deviations ranging from 0.89% to 58.09%, 0.81% to 60.13% and 0.88% to 58.92%, in terms of average annual C sequestration rate and from 0.60 to 59.22%, 0.37 to 59.39% and 0.02 to 59.71% in terms of total C sequestration, respectively, in the three scenarios. 【Conclusion】 It could be concluded that the effect of scale of the map used on prediction of SOC in the scenarios of elevated CO₂ is significant. In general, heterogeneity of soil properties in a region would often lead to variation of the prediction of SOC, which is mainly attributed to the disappearance of some soil types and spatial distortion when the map of small scales is polygonized. It is, therefore, essential for studies in future to use soil maps of large scales for data in quantifying regional SOC dynamics.

Key words Soil organic carbon; Upland of North Jiangsu; Mapping scale; DNDC (Denitrification and Decomposition) model

(责任编辑：檀满枝)