

陈莎莎,钱海燕,周杨明,等.鄱阳湖季节性淹水湿地土壤有机碳动态模拟与预测[J].江西师范大学学报(自然科学版),2022,46(5):542-550.

CHEN Shasha, QIAN Haiyan, ZHOU Yangming, et al. The dynamic simulation and prediction of soil organic carbon in seasonally flooded wetlands in Poyang Lake [J]. Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science) 2022, 46(5) : 542-550.

文章编号:1000-5862(2022)05-0542-09

鄱阳湖季节性淹水湿地土壤有机碳动态模拟与预测

陈莎莎¹,钱海燕^{1*},周杨明²,王 妮³,谢冬明⁴

(1. 东华理工大学地球科学学院,江西 南昌 330013;2. 江西师范大学地理与环境学院,江西 南昌 330022;

3. 江西省工程咨询中心有限公司,江西 南昌 330036;4. 江西科技师范大学旅游学院,江西 南昌 330038)

摘要: 该文以鄱阳湖国家级湿地自然保护区的泗洲头、常湖池以及蚌湖季节性淹水湿地为研究对象,选择典型湿地植被芦苇(*Phragmites australis*)、苔草(*Carex spp*)和南荻(*Triarrhena lutarioriparia*),基于DNDC模型模拟和预测不同湿地植被下表层(0~20 cm)土壤有机碳含量(m_{SOC})动态变化,估算土壤碳储量和CO₂的年排放量。结果表明:DNDC模型能够准确模拟研究区不同典型植被下的 m_{SOC} 动态变化 $\delta_{RSME} < 30\%$, $R^2 > 0.9$ 。敏感性分析显示:影响 m_{SOC} 动态变化的敏感因素是初始土壤有机碳和黏粒含量。常湖池、蚌湖和泗洲头土壤平均有机碳密度分别为36.71、17.12和11.47 t·hm⁻²,土壤碳储量分别为8 738、66 090和21 174 t,常湖池具有较大的碳储量。苔草、南荻和芦苇平均土壤碳密度分别为21.96、21.86、15.98 t·hm⁻²,土壤碳储量分别为933 928、62 933、166 458 t,苔草固碳能力巨大。基于DNDC模型模拟预测表明:在未来120年内研究区不同植被类型土壤有机碳含量将呈稳定下降趋势。

关键词: 有机碳;DNDC;模型模拟

中图分类号: S 154.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2022.05.15

0 引言

湿地土壤长期处于淹水或水分过饱和状态,具有较高的生产力和氧化还原能力,使其成为碳的主要活跃场所,是陆地生态系统重要的碳库之一^[1-2]。碳循环是全球三大核心研究问题之一,湿地作为陆地碳循环的重要组成部分,既能通过植物的光合作用吸收CO₂,又能在物质循环过程中释放CO₂^[3]。湿地土壤碳库对气候变化较为敏感,即使有机碳库发生微小变化,也会对全球碳循环产生重大影响^[4-5]。然而,受水文、植被和土壤综合作用的影响,不同湿地生态系统碳动态变化具有明显差异,如杭州湾典型植被下的土壤有机碳含量为3.87~6.78 g·kg⁻¹^[6],闽江口湿地土壤有机碳含量沿水文梯度表现为低淹水频率(41.61±0.2) g·kg⁻¹>中淹水频率(19.56±0.15) g·kg⁻¹>高淹水频率(15.86±

0.06) g·kg⁻¹^[7]。三江平原的泥炭沼泽湿地土壤有机碳含量和有机碳密度分别为187~389 g·kg⁻¹和49~94 kg·m⁻³^[8]。因此湿地土壤碳动态演变规律及其对区域环境变化的响应一直是湿地研究的热点。

湿地土壤有机碳动态变化通常采用直接观测和过程模型等方法。直接观测需要耗费大量的人力、物力、财力,观测区域及时间极为有限,而利用模型上升到区域范围的研究形式可以较好地避免这一缺陷^[9]。利用生物地球化学模型模拟和预测碳动态变化是重要的研究手段和强有力的工具,其中DNDC、Roth C及Century模型最为广泛。DNDC模型因简洁的输入界面、简单的参数输入和较为准确的模拟结果而受到国内外学者的广泛应用,可实现由点位到区位的模拟。DNDC模型最初是用来模拟和预测在农田生态系统中温室气体的排放,经过长期的研发改进,广泛应用于草地^[10]、森林^[11]等生态系统中,

收稿日期:2022-05-22

基金项目:国家自然科学基金(41561105),江西省自然科学基金(20212BAB203002),东华理工大学博士科研启动基金(DHBK201909838)和江西省重点研发计划课题(20181BBG70037)资助项目。

通信作者:钱海燕(1977—),女,江苏南通人,副研究员,博士,主要从事土壤生态学研究。E-mail:hyqian@163.com

并取得了较好的模拟效果. DNDC 模型也为湿地生态系统碳动态变化研究提供了一种新的研究手段. 如熊汉锋等^[12]利用 DNDC 模型模拟和估算了在梁子湖湿地生态系统中的土壤-水-植被系统之间 CO_2 等变化情况. Cui Jianbo 等^[13]将修改后的 WetLand-DNDC 模型与 MIKE SHE 联系起来,模拟地下水位波动对森林湿地温室气体排放的影响. 此外, DNDC 量化了水位和温度对湿地生态系统土壤碳动态的影响,并扩大时空模拟,为湿地植被土壤固碳能力和湿地温室气体减排提供重要的数据参考.

鄱阳湖是中国最大淡水湖泊,也是国际重要湿地之一,具有丰水期和枯水期交替出现的独特的水文节律^[14]. 剧烈的水文波动以及由此引起的植被变化必然会引起湿地碳动态的极大变化^[15],这使得鄱阳湖湿地土壤碳动态具有不确定性. 目前,鄱阳湖湿地土壤碳动态观测普遍采用直接观测法,而应用生物地球化学模型模拟湿地土壤碳动态鲜有报道. 因此,本研究借助 DNDC 模型,模拟鄱阳湖季节性淹水湿地不同植被群落下土壤碳动态变化,探讨湿地类型和植被类型对湿地土壤碳动态的影响,对评估鄱阳湖湿地固碳潜力、开展湿地生态系统健康评价和助推政府实现“双碳”目标承诺等具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 DNDC 模型简介

DNDC 模型又被称为“反硝化-分解模型”,共有 6 个子模型,由 2 大部分组成:第 1 部分主要包括土壤气候、农作物生长以及土壤有机质分解 3 个子模型;第 2 部分是由硝化、反硝化以及发酵作用组成^[16]. 第 1 部分的作用是由生物驱动因子(气候、土壤以及植被等)模拟土壤环境条件(土壤温度、水分、氧化还原电位等);第 2 部分的作用是在模拟的土壤环境条件下预测微生物对 C 和 N 的转化速率,计算在化学反应过程中产生的 CO_2 等温室气体的排放量. 上述 6 个模型之间相互传递信息,实现对现实条件下植被-土壤之间化学反应的预测模拟.

1.2 研究区概况

试验点位于以吴城镇为中心的鄱阳湖国家自然保护区,分别选择常湖池、泗洲头和蚌湖. 鄱阳湖(24°29'14"~30°04'41", 113°34'36"~118°28'58")是中国最大的淡水湖,热量充足,雨水充沛,年平均气温为 17.0°~17.8°,并受到长江和五河(赣江、修水、抚河、饶河、信江)来水的影响,拥有发育成多样

的湿生植被群落. 这些群落由湖岸向湖心依次分布着芦苇(*Phragmites australis*)、南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)和苔草(*Carex spp.*). 泗洲头位于洲滩前沿,为开放水域,是鄱阳湖的聚水区域,也是受鄱阳湖水位影响最大的区域之一. 蚌湖和常湖池同属蝶形湖泊,在枯水期时水位受人影响控制. 其中蚌湖为半控湖,枯水期水位受鄱阳湖水位变化的影响;常湖池为人工控湖,丰水期与鄱阳湖相连,枯水期与其分开.

1.3 基本参数的输入与获取

气象数据包括日最高气温、日最低气温、日降水量等,采用鄱阳湖星子站的数据.

土壤数据包括质地类型、土壤容重、pH 值、初始有机碳含量等,来源于采样点实测数据.

农作物管理数据包括植被类型、总生物量等. 鉴于湿地的特殊性,在农作物管理子模块中选用水文参数,采用星子站(吴淞高程)的水位数据来定义湿地的淹水情况.

1.4 模型验证和敏感性计算

模型验证采用均方根误差(δ_{RSME})、线性拟合分析等方法,检验构建模型的可适性. δ_{RSME} 值越小,模拟结果越准确. 一般情况下, $\delta_{\text{RSME}} < 10\%$ 表明模型模拟的准确性非常高, $10\% \leq \delta_{\text{RSME}} < 20\%$ 表明模拟效果为较好, $20\% \leq \delta_{\text{RSME}} \leq 30\%$ 表明模拟效果较为一般,而 $\delta_{\text{RSME}} > 30\%$ 表明模拟值与实测值之间的偏差很大,模型的模拟效果不理想^[17]. δ_{RSME} 计算公式为

$$\delta_{\text{RSME}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2 / n},$$

其中 P_i 为第 i 个模拟值, Q_i 为第 i 个观测值, n 为观测或模拟的次数.

将模型中能够显著影响模型结果的因子进行计算模拟和模型敏感性分析. 采用敏感性指数作为此次测试的主要指标. 敏感性指数计算公式^[18]为

$$S_{I_i} = (\Delta O / O) / (\Delta F_i / F_i),$$

其中 S_{I_i} 为对应的第 i 个参数的敏感性指数, ΔO 为最大和最小模拟值的差值, O 为输入参数对应的模拟结果的均值, ΔF_i 为第 i 个输入参数的最大值和最小值的差值, F_i 则为第 i 个输入参数的均值. S_{I_i} 越大表明输入参数对于模拟值的影响越大. 本研究分别选取初始有机碳含量、黏粒含量、pH 值、容重以及叶茎中的碳氮比进行计算.

1.5 碳储量、碳排放的估算以及碳含量长期变化的预测方法

不同植被类型下土壤碳储量(S_{OCR})与土壤碳

密度($S_{\text{OCD}} \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、土壤面积($S \text{ hm}^2$)有关. 土壤碳储量计算公式为 $S_{\text{OCR}} = S_{\text{OCD}} S$.

根据鄱阳湖第 2 次科学考察的秋冬鄱阳湖不同

植被类型覆盖面积^[19]和 2021 年 12 月 9 日遥感解译的蚌湖、常湖池和泗洲头湿地面积数据,进行不同湿地类型以及鄱阳湖植被土壤碳储量的估算(见表 1).

表 1 湿地类型和植被类型下的土壤面积 hm^2

分布及覆盖面积	研究区湿地面积			鄱阳湖植被覆盖面积		
	蚌湖	常湖池	泗洲头	芦苇	南荻	苔草
面积	6 432.69	396.71	3 076.71	10 417.48	2 865.44	42 726.60

基于鄱阳湖星子站 40 年(1951—1990 年)气象数据资料,利用 DNDC 模型模拟 120 年(1951—2070 年)不同植被下土壤有机碳含量(m_{SOC})的变化趋势.进行 3 轮重复,耕作管理措施假设每年相同.

基于 DNDC 模型模拟 CO_2 含量数据,计算不同植被类型下土壤 CO_2 年排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$).

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳动态模拟和碳储量估算

2.1.1 土壤有机碳含量和有机碳密度的模拟 结果显示:研究区不同植被类型的表层(0~20 cm)土

壤有机碳含量(m_{SOC})均表现为模拟值高于实测值,但相差很小(见图 1)相差最小为 $0.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相差最大为 $0.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ m_{SOC} 的变幅为 $0.96 \sim 27.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 有机碳密度(S_{OCD})的模拟均值和实测均值相差不大, S_{OCD} 实测均值的范围为 $2.99 \sim 47.33 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 模拟均值范围为 $5.14 \sim 42.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 相差最小为 $0.82 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 相差最大为 $12.90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (见图 2) 这表明 DNDC 模型能够适用于湿地有机碳含量和有机碳密度的模拟.

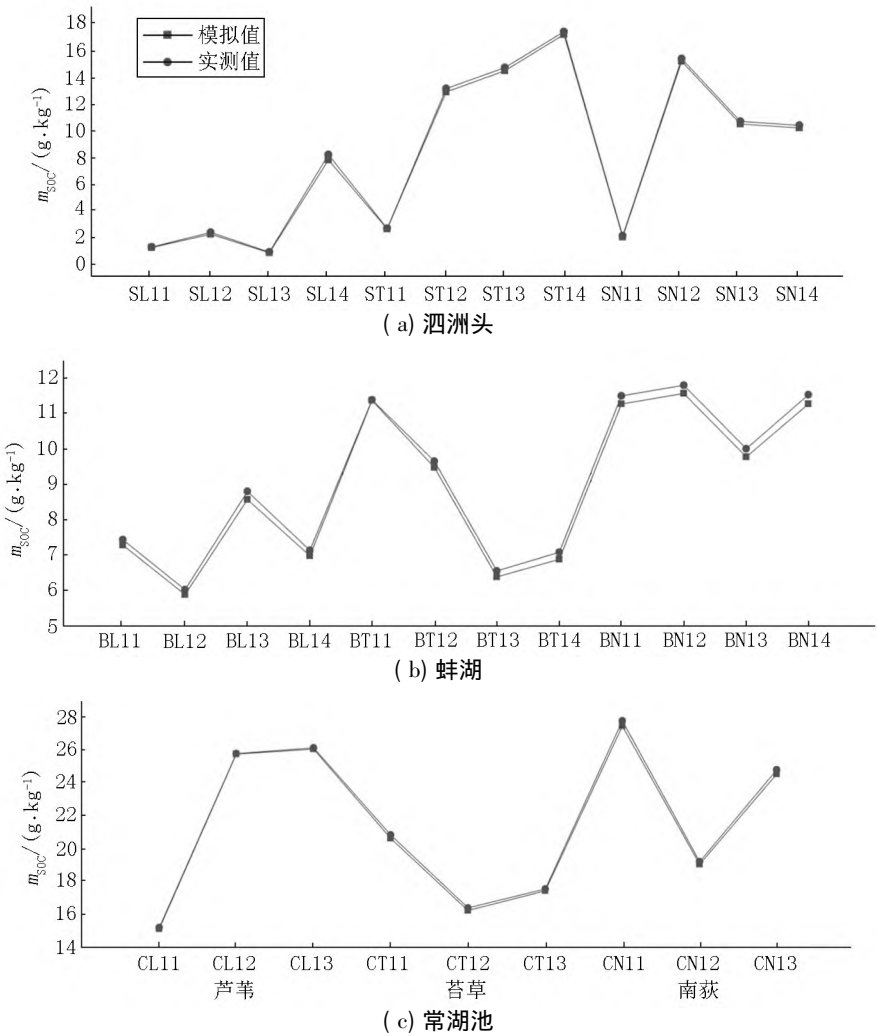


图 1 研究区不同植被类型的表层土壤有机碳含量的模拟值与实测值对比

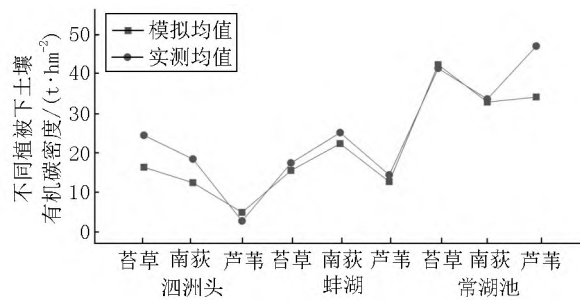


图 2 不同植被类型的表层土壤有机碳密度的模拟均值与实测均值对比

2.1.2 土壤碳储量估算 不同湿地类型平均土壤碳密度(S_{OCD})和土壤碳储量(S_{OCR})模拟范围分别为 $11.47 \sim 36.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8\,738 \sim 66\,090 \text{ t}$ (见表 2)。不同湿地类型平均土壤碳密度表现为常湖池($36.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>蚌湖($17.12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>泗洲头($11.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。土壤碳储量表现为蚌湖($66\,090 \text{ t}$)>泗洲头($21\,174 \text{ t}$)>常湖池($8\,738 \text{ t}$)。泗洲头地区的平均 S_{OCD} 比蚌湖地区的少 $5.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,且 2 个地区的 S_{OCR} 相差 $44\,916 \text{ t}$ 。其中常湖池的 S_{OCD} 和 S_{OCR} 变化最大。

植被土壤 S_{OCR} 和 S_{OCD} 表明(见表 3):平均 S_{OCD} 在不同植被群丛下从大到小依次表现为苔草($21.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>南荻($21.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>芦苇($15.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。 S_{OCR} 为苔草($933\,928 \text{ t}$)>芦苇($166\,458 \text{ t}$)>南荻($62\,933 \text{ t}$)。南荻群丛和苔草群丛下的平均 S_{OCD} 相差不大,但高于芦苇群丛下的平均 S_{OCD} 。

表 2 基于 DNDC 模型模拟不同植被类型下土壤碳储量

湿地类型	洲滩面积/ hm^2	平均土壤碳密度/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	总碳储量/ t
蚌湖	3 463.69	17.12	66 090
常湖池	396.71	36.71	8 738
泗洲头	3 076.71	11.47	21 174

表 5 敏感性参数的设置

影响因子	参数	地点和植被	本底值	测试值($\pm 20\%$)		敏感指数
				+20%	-20%	
土壤因子	容重/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	常湖池南荻	0.69	0.83	0.55	1.00
		泗洲头芦苇	1.15	1.38	0.92	
		蚌湖苔草	1.32	1.58	1.06	
	初始有机碳含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	常湖池南荻	24.85	29.82	19.88	1.11
		泗洲头芦苇	0.96	1.15	0.77	
		蚌湖苔草	7.10	8.82	5.68	
	pH 值	常湖池南荻	5.10	6.12	4.08	1.02
		泗洲头芦苇	5.02	6.02	4.02	
		蚌湖苔草	5.40	6.48	4.32	
	黏粒含量	常湖池南荻	0.45	0.54	0.36	0.02
		泗洲头芦苇	0.03	0.04	0.02	
		蚌湖苔草	0.25	0.30	0.20	
田间管理	叶茎中的 C/N 比	常湖池南荻	40.69	48.83	35.55	0.01
		泗洲头芦苇	51.97	62.36	41.58	
		蚌湖苔草	17.48	20.91	13.98	

表 3 鄱阳湖秋冬湿地面积及典型湿地植被土壤碳储量估算

植被类型	面积/ hm^2	平均土壤碳密度/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	总碳储量/ t
芦苇	10 417.48	15.98	166 458
南荻	2 865.44	21.86	62 933
苔草	42 726.60	21.96	933 928

2.2 模型的验证

蚌湖、常湖池、泗洲头地区的 m_{SOC} 和 S_{OCD} 的实测值和模拟值之间的线性回归显著相关,模拟值和实测值拟合度较高(见图 3)。模拟结果说明:DNDC 模型适合于鄱阳湖湿地土壤有机碳含量的模拟。采用均方根误差(δ_{RMSE})来衡量 2 者之间的一致性(见表 4),常湖池的苔草的 $\delta_{\text{RMSE}} < 10\%$,准确性极高,其他不同湿地-植被类型下 δ_{RMSE} 均不超过 30%,模拟效果均较理想,这表明 DNDC 模型模拟是可行的。

表 4 运用 δ_{RMSE} 得到的模拟值与实测值的拟合情况 %

植被类型	蚌湖	常湖池	泗洲头
芦苇	11.74	21.66	20.66
苔草	15.90	7.30	16.51
南荻	23.78	16.93	26.06

2.3 敏感性指数计算

敏感性指数表明(见表 5):影响 m_{SOC} (0~20 cm)较大的是初始有机碳含量,敏感指数在 1.00 左右;模型本身默认的黏粒含量的敏感性指数分别为 0.02、0.01 以及 0.02,敏感性影响较小,但都成正相关关系;pH 值和农作物管理中叶茎的碳氮比对有机碳含量的敏感性不发生变化。综上所述:模型的敏感因子是土壤初始有机碳含量和黏粒含量。

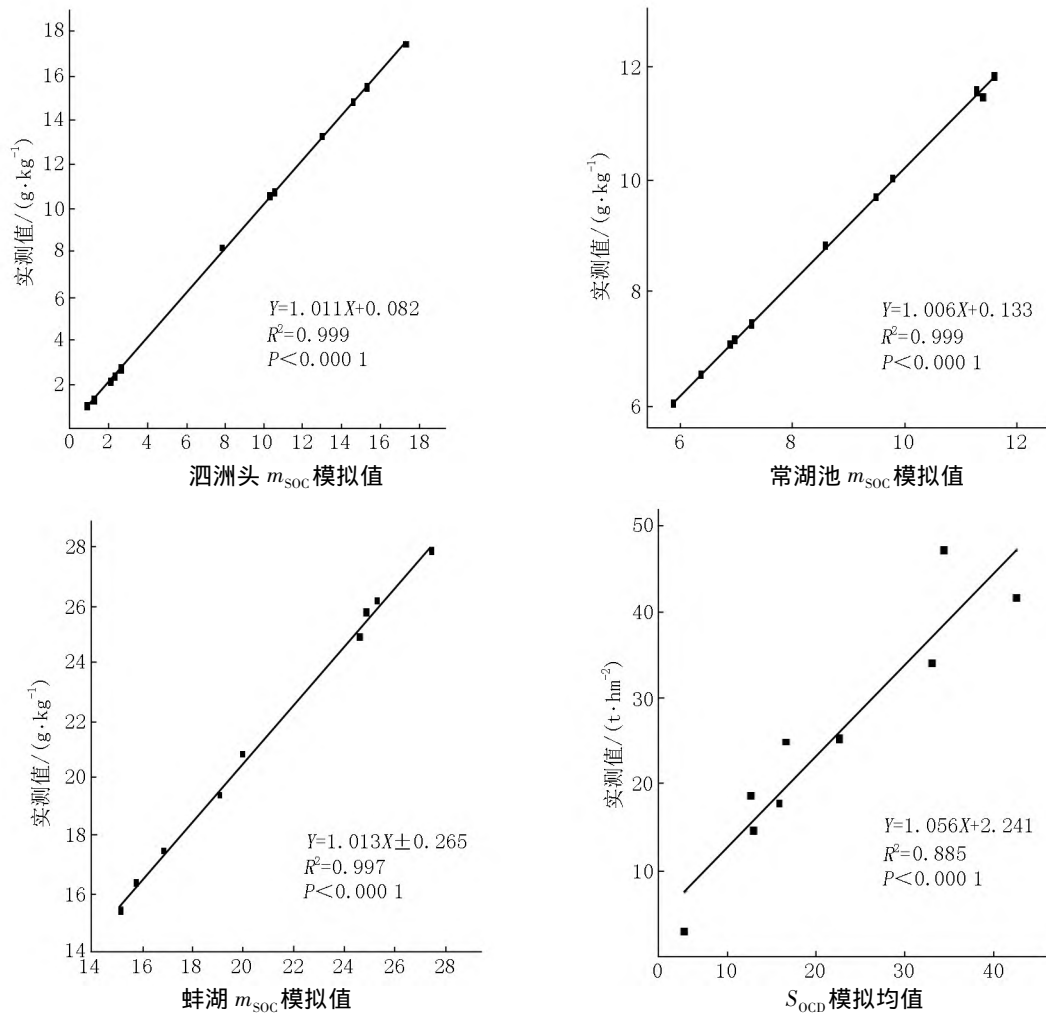


图3 鄱阳湖湿地土壤有机碳和有机碳密度模拟值和实测值之间的线性关系

2.4 土壤 CO_2 年排放量估算和有机碳含量预测

不同湿地-植被类型下土壤 CO_2 年排放量范围为 $87.05 \sim 710.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (见图4)。其中,蚌湖以南荻群丛土壤 CO_2 年排放量为最大,其值为 $710.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其次是芦苇群丛,其值为 $489.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,苔草群丛最低($397.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$);泗洲头苔草、南荻和芦苇土壤 CO_2 年排放量类似,它们分别为 430.04 、 440.63 、 $454.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;常湖池南荻和苔草群丛土壤 CO_2 年排放量类似,它们分别为 512.10 和 $512.29 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,芦苇群丛土壤 CO_2 年排放量最小($87.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。3个研究区芦苇、苔草以及南荻群丛土壤 CO_2 的年均排放量分别为 448.21 、 333.66 、 $207.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。蚌湖、常湖池和泗洲头累计土壤 CO_2 年排放量分别为 1597.6 、 1111.4 、 $1324.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

预测显示(见图5):苔草、南荻和芦苇群丛下的表层($0 \sim 20 \text{ cm}$) m_{SOC} 总体趋势表现为前期快速下

降,后期缓慢下降并趋于稳定。总体上,泗洲头的苔草、南荻以及芦苇群丛下的 m_{SOC} 分别由1951年的 13.0 、 10.6 、 $2.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到2070年的 7.7 、 6.2 和 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,较1951年分别下降了 40.8% 、 41.5% 、 34.5% ;常湖池地区3种植被群丛下的 m_{SOC} 也分别由1951年的 16.3 、 19.1 、 $25.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 10.1 、 11.7 、 $20.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别下降 38.0% 、 38.7% 、 19.4% ;蚌湖植被群丛下的 m_{SOC} 也分别由1951年的 9.5 、 9.8 、 $5.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 5.6 、 5.8 、 $3.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别下降了 41.1% 、 40.8% 、 40.7% 。预测表明鄱阳湖湿地表层土壤有机碳含量处于平缓下降趋势。

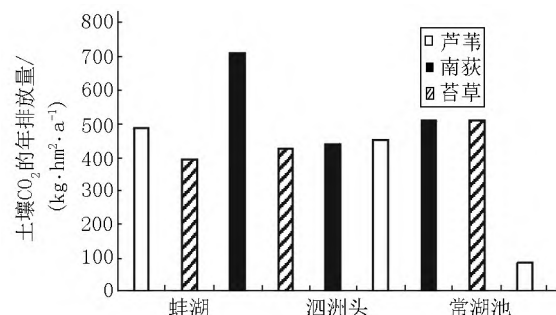


图4 不同湿地-植被类型下的土壤 CO_2 的年排放量模拟

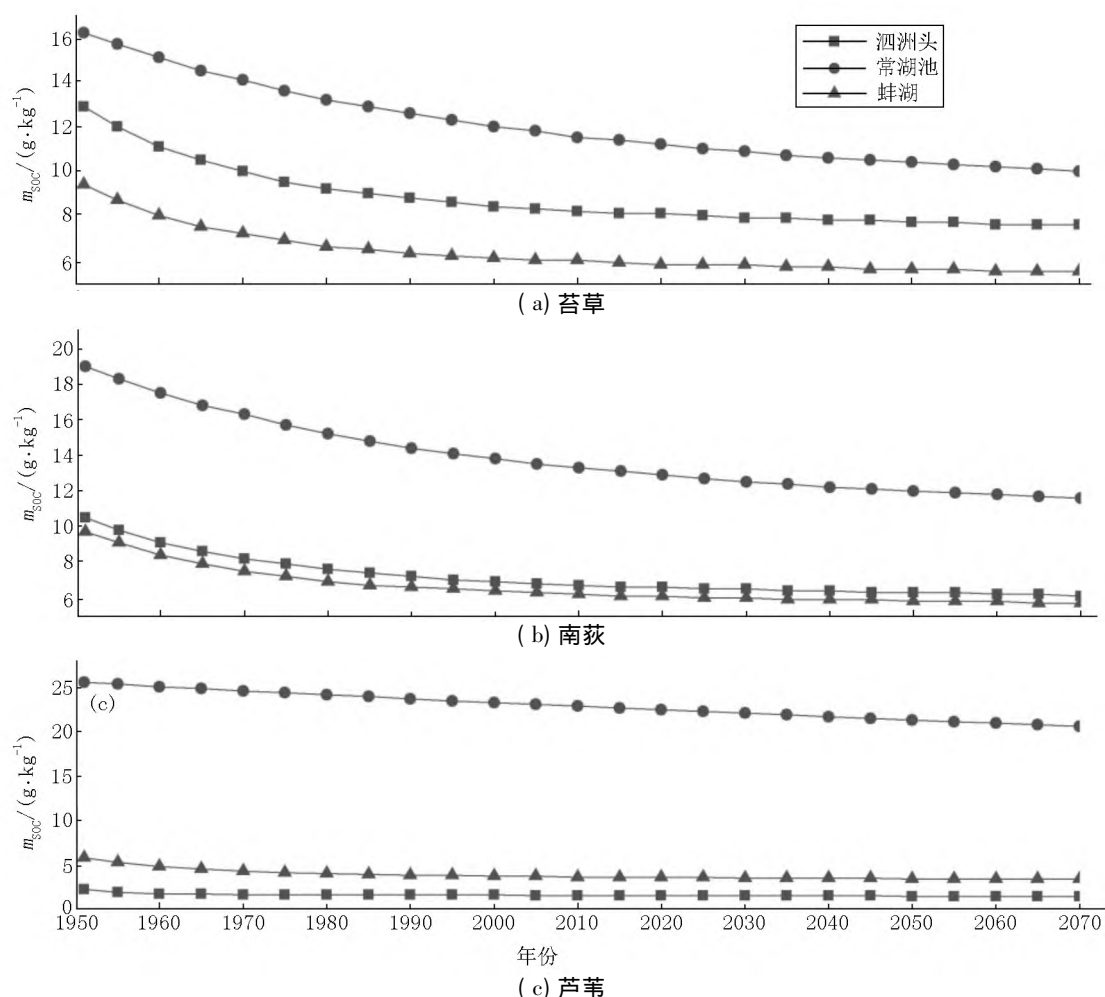


图5 研究区不同植被类型在表层有机碳含量的变化模拟(1951—2070)

3 讨论

3.1 湿地类型对土壤固碳能力的影响

在本研究区中不同季节性淹水湿地-植被类型下土壤有机碳含量变幅为 $0.96 \sim 27.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远低于高寒地区的若尔盖湿地(最低 $260 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和川西高原泥炭沼泽湿地($186.01 \sim 330.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[20-21]。这表明鄱阳湖季节性淹水湿地土壤有机碳含量较其他湿地类型有较大的差异,这有可能是由研究区的区域环境条件所致的。研究表明:由于不同气候带下土壤有机碳含量及其组分受到气温和降水的影响,所以它们均表现为北方 > 南方^[22-23]。温度和降水通过影响植物生长、土壤微生物活性和好氧厌氧状态,从而影响土壤有机碳的矿化和分解,进而影响土壤有机碳的输入和输出^[24]。北方如若尔盖等地区气候寒冷,土壤微生物活动微弱,植物残体在土壤中分解缓慢,腐殖质累积作用明显,土壤有机碳含量较高^[25]。鄱阳湖地处南方属于亚热带地区,土壤有机质矿化作用较强,这导致土壤有机碳含量

较低。同时,鄱阳湖水位的季节性急剧变化,使湿地土壤长期处于干湿交替的环境中,而干湿交替的环境有利于有机碳的淋溶和破碎化^[26],加速了湿地土壤有机碳的流失。另外,不同区域湿地土壤的发育程度对湿地土壤有机碳含量具有重要影响。鄱阳湖湿地处于稳定发育阶段,并形成了一定程度的储碳层和淀积层。参照三江平原湿地沉积物储碳层和淀积层的划分标准^[27-28]以 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 有机碳作为划分^[29],发现鄱阳湖不同湿地类型下的土壤的储碳层和淀积层存在明显的分层现象,且相差较大,这导致鄱阳湖碳含量变幅较大。而若尔盖和川西高寒湿地则具备发育成熟的沼泽,其沼泽面积和泥炭含量丰富^[30]。

土壤有机碳密度是碳储量估算的重要参数,也是各种生态系统有机碳储量特征的重要指标^[8]。在本研究中,不同湿地-植被类型土壤平均碳密度表现为常湖池($36.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 蚌湖($17.12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 泗洲头($11.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),且不同湿地类型土壤有机碳含量和有机碳密度的变化趋势基本一致。这与其他研究得出的结论一致^[8]。湿地类型在一定程度上会影响土壤碳含量和碳密度。泗洲头是开放式水域,

洲滩土壤淹水时间短、水位起伏频率大,人为干扰大,植被净初级生产力不高和植被凋落物分解速率低,导致土壤碳积累较少;蚌湖和常湖池同属碟形湖泊,相对封闭,洲滩土壤淹水时间较长、水位比较稳定,土壤表层环境不利于土壤微生物分解有机质,有利于土壤碳的积累^[31],导致其碳密度高于泗洲头。鄱阳湖越冬候鸟生境主要以枯水条件下的蝶形湖为中心^[32]。相较于蚌湖的半控湖,完全控湖的常湖池水位更加稳定,更有利于碳的积累。适宜的洲滩环境,使常湖池成为迁徙水鸟取食和排泄的主要栖息地。鸟粪的添加不仅加速枯枝落叶的分解进程,而且还可以向土壤提供额外的营养物质^[33],从而使常湖池碳密度高于其他研究区。

在本研究中不同湿地类型的分布面积对于碳储量的估算具有重要影响。总碳储量表现为蚌湖(66 090 t) > 泗洲头(21 174 t) > 常湖池(8 738 t)。常湖池碳密度最高但碳储量最小与分布的洲滩面积有直接关系。根据现有资料可知蚌湖和泗洲头的洲滩面积(6 432.69 hm²和33 076.71 hm²)远远高于常湖池地区(396.00 hm²),直接导致常湖池碳储量低于其他2个地区,这表明土壤碳储量受到洲滩面积影响。

3.2 植被类型对土壤固碳能力的影响

湿地特殊的水文条件和植被群落决定了湿地具有丰富的有机碳含量^[34]。有研究表明:洲滩地上生物量越高,其浅层土壤有机碳含量就越高。这意味着洲滩浅层土壤有机碳含量主要受地上生物量的影响^[35]。研究中苔草平均碳密度最高(21.96 t·hm⁻²),其次是南荻(21.86 t·hm⁻²)和芦苇(15.98 t·hm⁻²)。苔草是鄱阳湖地区的优势物种,群落密度高,常与多种苔草混生长在一起,根系发达,其地上生物量丰富,有机碳的输入量高,导致其碳密度较高。这与其他研究结果一致^[36]。

不同湿地植物类型受到环境影响,其生长发育过程也会有所不同,导致植物的生物量和固碳功能出现内部差异^[37-38]。不同植被下土壤有机碳蓄积量往往不同。吴琴等^[39]研究认为鄱阳湖优势植物群落土壤碳储量含量表现为苔草 > 芦苇 > 南荻。类似地,本研究也发现不同植被群丛土壤的碳储量表现为苔草最高(933 928 t),其次是芦苇(166 458 t)和南荻(62 933 t)。在鄱阳湖季节性水位的波动下,植被群落对环境条件十分敏感,由于不同植被自身的耐受性不同,所以植被会对环境做出一定的适应性反应^[40]。苔草群落通过发达的根状茎可以耐受较深的水淹,使得苔草群落在鄱阳湖洲滩不同高程中均有广阔的分布,而芦苇、南荻等群落随着水位梯度的增加,群落的光合作用受限,其生长必然遭受到抑制;

此外,芦苇、南荻等群落的分布也会随水位梯度增加而向高程区域迁移,这使得其在洲滩区域中分布较少^[41]。洲滩面积表现为苔草(42 726.60 hm²) > 芦苇(10 417.48 hm²) > 南荻(2 865.44 hm²)。苔草群丛平均土壤碳密度和南荻的相差不大(分别为21.86和21.96 t·hm⁻²),但洲滩面积较大,导致苔草群丛土壤碳储量高于其他2种植被群丛,这表明鄱阳湖湿地苔草群落相较于其他植被土壤具有较强的固碳能力。

3.3 植被类型对土壤 CO₂ 排放的影响

不同的植被类型由于含碳量的不同,其植物凋落后进入土壤产生有机碳量也不同,从而经过微生物分解后产生的 CO₂ 排放也不尽相同^[42]。本次采样时间为冬季,植物进入枯萎期,其生理代谢活动减慢,由植物呼吸产生的 CO₂ 减少,此时气温的降低又会减弱土壤微生物的活性^[43]。因此 CO₂ 的排放主要是土壤根系呼吸和微生物呼吸。研究表明植物发达的根系和通气组织是温室气体排放与外界传输的媒介。植物茎秆通过向下的对流传输将氧气输送到根系,从而改变根系区域的氧环境。许运凯等^[44]对芦苇湿地的研究表明:相比叶片,茎秆传输能力较大,其原因是茎秆中具有较多的孔径通道,便于气体运输。在研究区中,不同植被下土壤 CO₂ 年均排放量表现为芦苇最高(448.21 kg·hm⁻²·a⁻¹),其次是苔草(333.66 kg·hm⁻²·a⁻¹)和南荻(207.89 kg·hm⁻²·a⁻¹)。芦苇根状茎十分发达,多分支和通气根。在通气条件下,能够刺激微生物的活性,同时将氧气输送到植物根系,形成好氧环境,促进有机碳分解速率^[45],加速土壤呼吸。水分含量过多会造成植株根际处于缺氧状态,其生理化过程受阻,光合速率下降,气体交换受到抑制^[46]。南荻分布靠近湖心处,受水位影响较大,植物根际呼吸作用受阻,也可通过影响植被的生理特性,间接影响 CO₂ 的排放。而植物的呼吸速率与植被地上生物量有直接关系。苔草植株低矮,叶片较短,地上生物量短缺,光合作用的产物进入到土壤有限,其产生的根系分泌物也较少,尤其在冬季植物枯死,光合作用消失,导致 CO₂ 的排放量最少。但本文针对不同植被下土壤 CO₂ 的年均排放没有考虑到不同湿地类型之间存在空间差异性,只是将不同地区相同植被类型下 CO₂ 进行的简单的计算,因此对 CO₂ 的估算排放具有一定的误差。

4 结论

1) 研究区不同植被类型表层(0~20 cm)土壤有机碳含量的变幅为0.96~27.83 g·kg⁻¹。有机碳密度实测均值的范围为2.99~47.33 t·hm⁻²。模拟

均值范围为 $5.14 \sim 42.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。模型验证均表明有较好的模拟效果,这表明 DNDC 模型能够适用于湿地有机碳含量和有机碳密度的模拟。

2) 不同湿地类型下碳密度表现为常湖池 > 蚌湖 > 泗洲头,分别为 36.71 、 17.12 和 $11.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,总碳储量表现为蚌湖 > 泗洲头 > 常湖池,分别为 $66\ 090$ 、 $21\ 174$ 和 $8\ 738 \text{ t}$; 不同湿地-植被类型土壤碳密度表现为苔草 > 南荻 > 芦苇,分别为 21.96 、 21.86 和 $15.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。土壤碳储量为苔草 > 芦苇 > 南荻,分别为 $933\ 928$ 、 $166\ 458$ 、 $62\ 933 \text{ t}$ 。

3) 不同植被类型土壤 CO_2 年排放量范围为 $87.05 \sim 710.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,研究区 CO_2 的年均排放量为芦苇 > 苔草 > 南荻,它们分别为 448.21 、 333.66 、 $207.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。累计土壤 CO_2 年排放量范围为 $1\ 111.4 \sim 1\ 597.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。本研究主要是在研究区内进行点位模拟和估算,下一步将结合地面数据和遥感数据,利用 DNDC 模型推动模型点位尺度外推,进行鄱阳湖区域土壤有机碳动态变化模拟,评估鄱阳湖湿地土壤固碳效应。

5 参考文献

- [1] FROLKING S, ROULET N T, MOORE T R, et al. Modeling northern peatland decomposition and peat accumulation [J]. *Ecosystems* 2001, 4(5): 479-498.
- [2] 李文华. 中国当代生态学研究: 全球变化生态学卷 [M]. 北京: 科学出版社 2013.
- [3] 许芹, 吴海明, 陈建, 等. 湿地温室气体排放影响因素研究进展 [J]. *湿地科学与管理* 2013, 9(3): 61-64.
- [4] ISE T, DUNN A L, WOFSY S C, et al. High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback [J]. *Nature Geoscience* 2008, 1(11): 763-766.
- [5] TANG Huajun, QIU Jianjun, WANG Ligang, et al. Modeling soil organic carbon storage and its dynamics in croplands of China [J]. *Agricultural Sciences in China* 2010, 9(5): 704-712.
- [6] 张文敏, 吴明, 王蒙, 等. 杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征 [J]. *土壤学报* 2014, 51(6): 1351-1360.
- [7] 高灯州, 曾从盛, 章文龙, 等. 闽江口湿地土壤有机碳及其活性组分沿水文梯度分布特征 [J]. *水土保持学报* 2014, 28(6): 216-221, 227.
- [8] 张文菊, 吴金水, 童成立, 等. 三江平原湿地沉积有机碳密度和碳储量变异分析 [J]. *自然资源学报* 2005, 20(4): 537-544.
- [9] 帅艳菊. 湖北省主要稻作模式温室气体排放模拟研究 [D]. 武汉: 华中农业大学 2021.
- [10] 王多斌, 籍常婷, 林慧龙. 基于 DNDC 模型的高寒草甸土壤有机碳含量动态研究 [J]. *草业学报* 2019, 28(12): 197-204.
- [11] 王小国, 朱波, 高美荣, 等. 川中丘陵区桉柏混交林地土壤 CO_2 释放与 Forest-DNDC 模型模拟 [J]. *北京林业大学学报* 2008, 30(2): 27-32.
- [12] 熊汉锋, 陈治平, 黄世宽, 等. 梁子湖湿地农田碳氮循环的模拟研究 [J]. *农业环境科学学报* 2006, 25(增刊): 533-536.
- [13] CUI Jianbo, LI Changsheng, SUN Ge, et al. Linkage of MIKE SHE to Wetland-DNDC for carbon budgeting and anaerobic biogeochemistry simulation [J]. *Biogeochemistry* 2005, 72(2): 147-167.
- [14] 戴雪, 万荣荣, 杨桂山, 等. 鄱阳湖水文节律变化及其与江湖水量交换的关系 [J]. *地理科学* 2014, 34(12): 1488-1496.
- [15] 刘胜, 陈宇炜. 退水期鄱阳湖藦草 (*Carex cinerascens*) 和藜蒿 (*Artemisia selengensis*) 洲滩湿地 CO_2 通量变化及其影响因子 [J]. *湖泊科学* 2017, 29(6): 1412-1420.
- [16] 巴特尔·巴克, 彭镇华, 张旭东, 等. 生物地球化学循环模型 DNDC 及其应用 [J]. *土壤通报* 2007, 38(6): 1208-1212.
- [17] 王德营, 姚艳敏, 司海青, 等. 黑土有机碳变化的 DNDC 模拟预测 [J]. *中国生态农业学报* 2014, 22(3): 277-283.
- [18] 朱相成, 白若琦. 基于 DNDC 模型稻田甲烷排放影响因子的敏感性分析 [J]. *浙江农业科学* 2020, 61(3): 577-580, 583.
- [19] 戴星照, 胡振鹏. 鄱阳湖资源与环境研究 [M]. 北京: 科学出版社 2019.
- [20] 王文波, 白冰, 张鹏骞, 等. 若尔盖湿地土壤有机碳含量和密度的分布特征 [J]. *生态学杂志* 2021, 40(11): 3523-3530.
- [21] 陈良帅, 黄新亚, 薛丹, 等. 川西高原泥炭沼泽土壤有机碳分布特征及其影响因素 [J]. *应用与环境生物学报* 2022, 28(2): 267-275.
- [22] 陈锦盈. 中国几个气候带不同生态系统土壤有机碳分解动态及其通用模型探索 [D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [23] 章晓芳. 我国东部不同气候带下土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [24] 王瑞. 模拟增温和降水变化对高寒草甸土壤和植被碳、氮的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学 2016.
- [25] 张威, 高小红, 冯玲, 等. 三江源区土壤有机碳空间分布及影响因素分析: 以玉树县为例 [J]. *环境科学与技术* 2014, 37(4): 42-47.
- [26] MOORE T R, BUBIER J L, BLEZSKI L. Litter decomposition in temperate peatland ecosystems: the effect of substrate and site [J]. *Ecosystems* 2007, 10(6): 949-963.
- [27] 张文菊, 吴金水, 肖和艾, 等. 三江平原典型湿地剖面有机碳分布特征与积累现状 [J]. *地球科学进展* 2004, 19(4): 558-563.
- [28] 童成立, 张文菊, 王洪庆, 等. 三江平原湿地沉积物有机碳与水分的关系 [J]. *环境科学* 2005, 26(6): 38-42.
- [29] 高俊琴, 雷光春, 李丽, 等. 若尔盖高原三种湿地土壤有机碳分布特征 [J]. *湿地科学* 2010, 8(4): 327-330.
- [30] 田应兵, 熊明彪, 熊晓山, 等. 若尔盖高原湿地土壤-植

- 物系统有机碳的分布与流动 [J]. 植物生态学报, 2003 27(4): 490-495.
- [31] 钱海燕, 周杨明, 谢冬明, 等. 鄱阳湖季节性积水湿地表层土壤碳氮高程梯度分布特征及其影响因素 [J]. 江西农业大学学报, 2021 43(5): 1199-1210.
- [32] 夏少霞, 于秀波, 刘宇, 等. 鄱阳湖湿地现状问题与未来趋势 [J]. 长江流域资源与环境, 2016 25(7): 1103-1111.
- [33] 张全军, 张广帅, 万松贤, 等. 鄱阳湖植食越冬候鸟粪便对洲滩湿地藁草枯落物分解过程及碳、氮、磷释放的影响 [J]. 湖泊科学, 2019 31(3): 814-824.
- [34] CHAMBERS L G, OSBORNE T Z, REDDY K R. Effect of salinity-altering pulsing events on soil organic carbon loss along an intertidal wetland gradient: a laboratory experiment [J]. Biogeochemistry, 2013 115(1/2/3): 363-383.
- [35] 谢冬明, 温丽, 易青, 等. 基于景观尺度下的鄱阳湖湿地浅层土有机碳的空间特征 [J]. 生态科学, 2020, 39(1): 101-109.
- [36] 葛刚, 赵安娜, 钟义勇, 等. 鄱阳湖洲滩优势植物种群的分布格局 [J]. 湿地科学, 2011 9(1): 19-25.
- [37] LIU Yuhong, WANG Lixin, LIU Huaming, et al. Comparison of carbon sequestration ability and effect of elevation in fenced wetland plant communities of the Xilin River floodplains: a model case study [J]. River Research and Application, 2015 31(7): 858-866.
- [38] LOU Yanjing, PAN Yanwen, GAO Chuanyu, et al. Response of plant height, species richness and aboveground biomass to flooding gradient along vegetation zones in floodplain wetlands, Northeast China [J]. PLoS One, 2016 11(4): e0153972.
- [39] 吴琴, 尧波, 幸瑞新, 等. 鄱阳湖典型湿地土壤有机碳分布及影响因子 [J]. 生态学杂志, 2012 31(2): 313-318.
- [40] 李雅, 于秀波, 刘宇, 等. 湿地植物功能性状对水文过程的响应研究进展 [J]. 生态学杂志, 2018 37(3): 952-959.
- [41] 胡佳. 鄱阳湖湿地优势植物群落生物量及碳储量研究 [D]. 南昌: 江西师范大学, 2018.
- [42] 马雪莹. 辽河三角洲滨海湿地 CO₂ 和 CH₄ 释放通量及其影响因素研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2015.
- [43] 宋长春, 王毅勇. 湿地生态系统土壤温度对气温的响应特征及对 CO₂ 排放的影响 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 625-629.
- [44] 许运凯, 王东启, 任名成, 等. 芦苇植株对湿地温室气体排放的影响及其日变化特征 [J]. 地球与环境, 2018, 46(3): 267-273.
- [45] 张丽华, 宋长春, 王德宣, 等. 沼泽湿地生态系统呼吸与温度、氮素及植物生长的相互关系 [J]. 环境科学, 2007 28(1): 1-8.
- [46] LANG Ying, WANG Ming, ZHANG Guangcan, et al. Experimental and simulated light responses of photosynthesis in leaves of three tree species under different soil water conditions [J]. Photosynthetica, 2013 51(3): 370-378.

The Dynamic Simulation and Prediction of Soil Organic Carbon in Seasonally Flooded Wetlands in Poyang Lake

CHEN Shasha¹, QIAN Haiyan^{1*}, ZHOU Yangming², WANG Wei³, XIE Dongming⁴

(1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang Jiangxi 330013, China;

2. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022, China;

3. Jiangxi Engineering Consulting Center Company Limited, Nanchang Jiangxi 330036, China;

4. School of Tourism, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang Jiangxi 330038, China)

Abstract: Taking the seasonally flooded wetlands of Sizhoutou, Changhuchi and Banghu in Poyang Lake National Wetland Nature Reserve as the research objects, the typical wetland vegetation *Phragmites australis*, *Carex spp* and *Triarrhena lutarioriparia* are selected. Based on the DNDC model, the dynamic changes of soil organic carbon (m_{SOC}) under the different wetland vegetation (0—20 cm) are simulated and predicted, and the soil carbon storage and annual CO₂ emissions are estimated. The results show that the DNDC model can accurately simulate the dynamic changes of m_{SOC} under different typical vegetation in the study area, with $\delta_{RMSE} < 30\%$ and $R^2 > 0.9$. Sensitivity analysis shows that the sensitive factors affecting the dynamic change of m_{SOC} are the initial soil organic carbon and clay content of the topsoil. The average soil organic carbon density of Changhuchi, Banghu and Sizhoutou are 36.71, 17.12 and 11.47 t · hm⁻², respectively, and the soil carbon storage are 8 738, 66 090 and 21 174 t, respectively. Changhuchi has a larger carbon storage. The average soil carbon densities of *C. spp*, *T. lutarioriparia* and *P. australis* are 21.96, 21.86 and 15.98 t · hm⁻², respectively, and the soil carbon storage are 933 928, 62 933 and 166 458 t, respectively. *C. spp* has a huge carbon sequestration capacity. Based on the DNDC model simulation prediction, it is found that the soil organic carbon content of different vegetation types in the study area will show a steady downward trend in the next 120 years.

Key words: organic carbon; DNDC; model simulation

(责任编辑: 曾剑锋)