

典型湿地生态系统碳循环模拟与预测

张文菊^{1, 2}, 童成立², 吴金水^{2*}, 徐明岗¹, 宋长春³

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所 农业生态重点实验室, 长沙 410125; 3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

摘要:以植物生理生态特性和有机碳周转动力学原理为基础, 利用室内模拟培养试验结果率定了温度、积水强度、冻融交替对湿地有机碳分解矿化的影响参数, 建立了典型湿地生态系统碳循环模拟模型. 利用实地观测的数据对模型进行了检验, 对模型的灵敏性进行了分析, 同时利用该模型进行了情景预测. 结果表明, 所建模型能较好地模拟中温带(三江平原)和亚热带(洞庭湖)湿地生态系统的碳通量和碳累积特征, 沉积物呼吸的模拟值与实测值呈极显著相关关系($p < 0.01$); 三江平原常年积水沼泽有机碳密度约为 $80 \times 10^9 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2}$, 洞庭湖湿地碳密度约为 $20 \times 10^9 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2}$; 三江平原常年积水沼泽和季节性积水沼泽每年碳的净固定速率分别为 $104 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $76 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$; 该模型对温度和大气 CO_2 浓度变化反应敏感. 在既定的水文条件下, 大气 CO_2 浓度升高和增温可能会使湿地生态系统的碳交换变得更为活跃; 在 CO_2 浓度倍增和增温小于 2.5°C 的气候变化情景时, 系统净初级生产力(NPP)和积累的有机碳密度增加, 系统仍为大气 CO_2 汇, 但气候变暖的进一步加剧并不利于湿地有机碳的积累, 由于 CO_2 施肥效应和温度升高增加的系统 NPP 补偿不了因温度升高导致的沉积物呼吸速率加快而损失的碳, 季节性积水沼泽生态系统积累的有机碳甚至出现明显的下降趋势.

关键词: 湿地生态系统; 碳循环; 模拟模型; 预测

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)09-1905-07

Simulating and Predicting of Carbon Cycling in Typical Wetland Ecosystems

ZHANG Wen-ju^{1, 2}, TONG Cheng-li², WU Jin-shui², XU Ming-gang¹, SONG Chang-chun³

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecology, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China)

Abstract: A model was developed based on the theories of physiological ecology and turnover dynamics of organic carbon in wetland ecosystem. It aimed to illustrate the process and characteristics of carbon cycling and its potential changes under climate change scenarios in wetland ecosystems. The key environmental parameters to determine the effects of temperature, water-logging, and freeze-thaw were gained from the results of incubation experiments. Effects of CO_2 fertilizing on the carbon sequestration and plant cover on organic carbon mineralization were also taken into account in this model. It was verified by the conventional observed meteorologic data in temperate and subtropical wetland ecosystems. Sensitivity analysis and prediction under climate change scenarios by this model were also discussed. There were significant correlations between the simulated and observed values of sediment respiration in temperate wetlands in Northeast China. It was estimated that the annual net carbon sequestration rate was about $104 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ in permanently water-logged wetland ecosystems and $76 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ in the seasonally water logged ones in temperate northeast China. The simulated value of the accumulated organic carbon density was within the changing range of the investigated data. The model was sensitive to the change of parameters of CO_2 concentration and temperature. The potential changes in carbon cycling characteristics were also predicted under assumed climate change scenarios of A1B and A1FI. It indicated that the exchange of carbon between the atmosphere and the wetland ecosystem became more active under climate change scenario of warming and increased CO_2 concentration assuming no changing of hydrological condition. The net primary production (NPP) and the organic carbon density in temperate wetland ecosystems would increase under the scenario of doubled CO_2 concentration and less than 2.5°C increment of temperature. In this case wetland ecosystem would act as a net carbon sink of the atmosphere. However, it had no advantage to the carbon sequestration and accumulation in wetland ecosystems under the more warming scenarios. Under these more warming scenarios, the amount of increased NPP resulted from CO_2 fertilizing and warming could not compensate the carbon loss from the accelerated respiration caused by warming. The organic carbon accumulated in seasonally water-logged wetland even would decrease under the assumed scenarios.

Key words: wetland ecosystem; carbon cycling; simulating model; prediction

湿地作为四大陆地生态系统之一, 在过去5 000 ~ 10 000 a内一直被认为是大气 CO_2 的重要“碳汇”^[1], 在陆地及全球碳循环中起着重要作用, 而且与全球气候变化有着直接而紧密的联系, 并表现出较高的敏感性^[2]. 因此, 了解湿地生态系统碳循环过

收稿日期: 2006-11-07; 修订日期: 2007-03-16

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412503); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-14); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD05B09)

作者简介: 张文菊(1978~), 女, 博士, 主要研究方向为土壤与环境生态, E-mail: zhwenju@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jswu@isa.ac.cn

程及其对未来气候变化的响应具有重要的科学和实践意义。

模型一直是人们研究有机碳长期变化的重要手段^[1]。20 世纪 70 年代后,国际上一些学者开始着手湿地碳循环模型的建立与研究工作。许多研究者在北半球泥炭地开展了大量有关泥炭积累动态、分布与分解模型方面的研究^[3, 4]。鉴于模型模拟尺度与模拟精度之间的平衡^[5],大多数的湿地碳循环动力学模型主要侧重于系统物质生产力^[6]、有机质与养分积累状况及其影响因素^[7, 8]和温室气体排放^[9]等某些方面的过程描述。目前,我国一些学者在湿地植物生长动态模拟的统计模型与泥炭积累动力学模型方面也进行了一些探讨^[10-12]。区域尺度上生态系统生产力的估算模型与养分动力学模型的集成已在研究整个生态系统的碳循环过程中发挥出越来越大的作用。本研究基于植物生理生态特征和有机碳的周转动力学原理,建立了一个将系统物质生产力估算、有机碳积累与温室气体排放 3 部分结合起来的湿地生态系统碳循环模拟模型,以期为整个湿地生态系统碳循环研究及湿地碳“源”、“汇”功能评价及湿地保护与恢复、重建等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 模型简介

湿地碳循环主要包括 2 个基本过程:①植物通过绿色叶片的光合作用固定大气 CO₂ 并形成总初级生产力,此过程主要受太阳辐射、气温、水分和养分供应等因子的驱动。此过程中植物需要消耗部分光合产物为其自身生命活动提供能量,同时释放 CO₂。②植物死亡后其残体在微生物作用下分解转化,一部分形成转化成颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)和简单的可溶性有机碳(dissolved organic C, DOC),在水介质中经过微生物作用或直接氧化为 CO₂(HCO₃⁻),一部分形成泥炭,逐年堆积。上层泥炭以及仍未完全分解的植物残体,继续参与以上分解转化。此过程是个复杂的生物地球化学过程,受植物残体本身性质、气候条件和周围诸多环境因素的影响。另外,对于开放或半开放的湿地系统,POC 和 DOC 是外界与系统之间碳交换的 2 个重要形态,它们在湿地系统的碳收支中也具有重要意义。根据以上 2 个基本过程,本研究将模型分为 2 个子模型,下面简要介绍模型的基本构建过程。

(1)植被碳固定子模型 由 3 个模块组成,即:①光合作用和呼吸作用,②干物质积累,③同化物分

配。模拟时段为植被生长开始到生长结束,模拟步长为天(d)。此子模型参数确定、各器官生物量模拟与验证已在文献[13]中详细阐述。

(2)湿地碳周转子模型 该子模型主要以 SCNC 模型^[14, 15]为基础发展而来。如图 1 所示,颗粒有机碳和可溶性有机碳是开放或半开放湿地系统与外界之间通过水体进行碳交换的 2 个重要组分,在湿地有机碳的输出和输入过程起着重要作用,这也是湿地生态系统与其他非开放生态系统之间的重要区别之一。

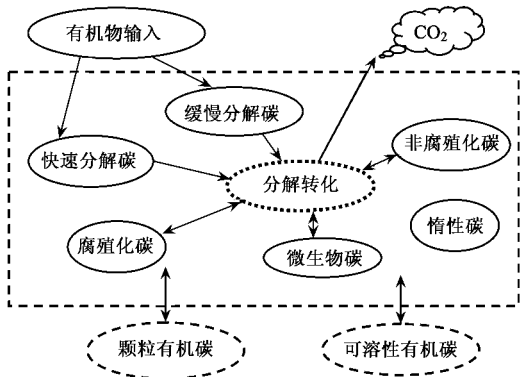


图 1 湿地有机碳分解转化流程

Fig. 1 Turnover flowchart of organic C in wetland ecosystem

通常认为有机碳的分解转化遵循热力学第一定律方程式:

$$Y_t = Y_0 e^{-Akt} \tag{1}$$

式中, Y_0 为土壤某一单元的有机碳初始量, Y_t 为经过 t 时间的分解后 Y_0 在土壤中的残留量, k 是该单元有机碳分解速率常数,不同组分有机物的分解速率常数均采用标准参数。 A 为 k 值的校正系数。土壤的温度(A_T)、湿度(A_M)、植被覆盖(A_P)、质地(A_C)和冻融(A_F)等状况都会影响有机碳的分解速率,在模型中用各组分有机碳分解速度常数的校正系数 A 来表达上述环境因子的影响:

$$A = A_T \times A_M \times A_C \times A_P \times A_F \tag{2}$$

该子模型的部分环境因子校正参数通过室内模拟培养试验结果获得。常年积水沼泽和季节性积水沼泽湿地有机碳分解矿化受水分影响机制存在显著差异^[16]。常年积水沼泽沉积物中有机碳的分解矿化受积水条件的强烈限制矿化率仅为其适宜条件下的 22%,季节性积水湿地有机碳分解矿化不受积水条件的限制,在过湿或积水条件下仍保持与适宜条件下相当的分解速率,二者水分校正系数分别取 0.22 和 1.0。依据杨钙仁等^[17]的试验结果,温度函数 A_T 用下式表达(其中 T_s 为校正后的沉积物温度):

$$A_T = Q_{10} \times \frac{(T_s - 25)}{10} \quad (3)$$

式中 Q_{10} 为温度系数(温度每升高 10℃, 呼吸速率变化的倍数). 杨钙仁等^[17] 的研究表明自然条件下冻融交替过程对湿地有机碳矿化基本无影响, 本研究 A_f 取 1.0. 湿地为人为干扰活动较小的自然生态系统, 植被覆盖对有机碳的分解转化有影响, 本研究采用 Jenkinson 等^[18] 的校正系数, 在植物生长季节取 0.6, 其他状态(非植物生长季节)取 1.0. 粘粒含量对外源有机碳的矿化具有一定影响^[19], 模型中将粘粒含量与有机碳组分单元中的惰性碳联系起来. 在较长的时间尺度内非极端 pH 值并不构成有机碳分解速度的重要影响因子^[14], 本模型不予以考虑. 本模型假定水文条件恒定, 水分状况不受系统外水文波动过程的影响.

1.2 模型驱动因子

气象数据: 输入气象数据为气象站常规的监

测数据, 包括逐日的气温、太阳辐射、降水等. 在没有进行太阳辐射观测值的区域, 则采用日照时数观测结果模拟计算^[20].

其他条件包括大气 CO₂ 浓度、经纬度、湿地类型、水分状况等.

1.3 资料来源

模拟地点包括中温带三江平原的常年积水泥炭沼泽和季节性积水的沼泽化草甸(47°35'N, 133°17'E, 三江站), 亚热带的洞庭湖芦苇滩地和湖草滩地(29°13'N, 112°37'E). 模型模拟所需的气象数据来源于国家气象站(表 1). 三江平原生物量和呼吸观测数据来源于中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站. 生物量测定采用收割法, 在植物生长期内, 每 10 d 在研究区域随机选取 3 个样方(40 cm × 40 cm) 收获植物地上当年生植株, 烘干称重^[21]; 土壤呼吸 CO₂-C 采用静态箱-气相色谱法测定^[22], 每周观测 2 次, 每次 3 个重复. 有机碳密度数据为本研究

表 1 典型湿地生态系统碳循环模拟
Table 1 Modeling of C cycling in natural wetland ecosystems

研究区域	湿地类型	数值类型	净初级生产力 NPP /g•(m ² •a) ⁻¹	净排放 NE /g•(m ² •a) ⁻¹	净交换 ²⁾ NEE /g•(m ² •a) ⁻¹	储存有机碳 OCD × 10 ⁹ /g•km ⁻²
中温带 三江平原	泥炭沼泽 (常年积水)	模拟值	279.8	532.62	104.0	80.1
		实测值	—	418.6(±140.4) ¹⁾	—	82.8(±22.3)
	沼泽化草甸 (季节积水)	模拟值	307.2	701.6	76.54	15.5
		实测值	—	519.6(±173.2) ¹⁾	—	17.1(±2.7)
亚热带洞庭湖	湖草滩地	模拟值	706.53	2 213.5	389.0	20.8
		实测值	—	—	—	20.3
	芦苇滩地	模拟值	925.2	2 865.2	620.3	17.0
		实测值	—	—	—	19.8±4.2

1) 数据来源于中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站; 2) 生态系统净交换方向向下为正值

调查结果, 具体调查和分析方法见文献[23, 24].

2 结果与讨论

2.1 模型验证

湿地植被碳固定直接决定系统的有机物投入量, 三江平原湿地植被主要为多年生的苔草和小叶章, 地上和地下生物量均较大, 每年植株开始枯落后, 养分向下转移至根系, 为来年植物萌芽储备养分, 因而年际间地上生物量与地下生物量季节动态呈现相反的变化趋势, 即先减少后增加^[25]. 本研究以平衡模型求得地下生物量的平衡值作为每年小叶章地下生物量的现存量, 每年地下凋落物量假定与年地下生物量的增加量基本相当. 系统有机物的总投入量为全部的地上枯落物和当年增加的地下生物

量之和.

2.1.1 湿地生态系统碳呼吸通量模拟值与实测值比较

常年积水与季节性积水沼泽 2003 ~ 2004 年沉积物呼吸的模拟值与实测值之间具有良好的一致性(图 2), 二者呈极显著的相关关系(图 3). 当年的枯落物投入系统中, 与原位沉积物一起参与微生物驱动下的分解转化. 湿地生态系统沉积物呼吸年动态呈单峰变化趋势, 峰值出现在气温较高的 7、8 月份. 对于季节性积水沼泽, 5、6 月份呼吸的实测值高于其模拟值(图 2). 可能的原因是由于水的比热较大, 冬季到来时表层冻结, 但其下部降温较慢, 仍有部分的微生物存在一定的活性, 因而其活动产生的 CO₂ 存于冰中、冰下, 来年春末夏初冰融化后释放出来,

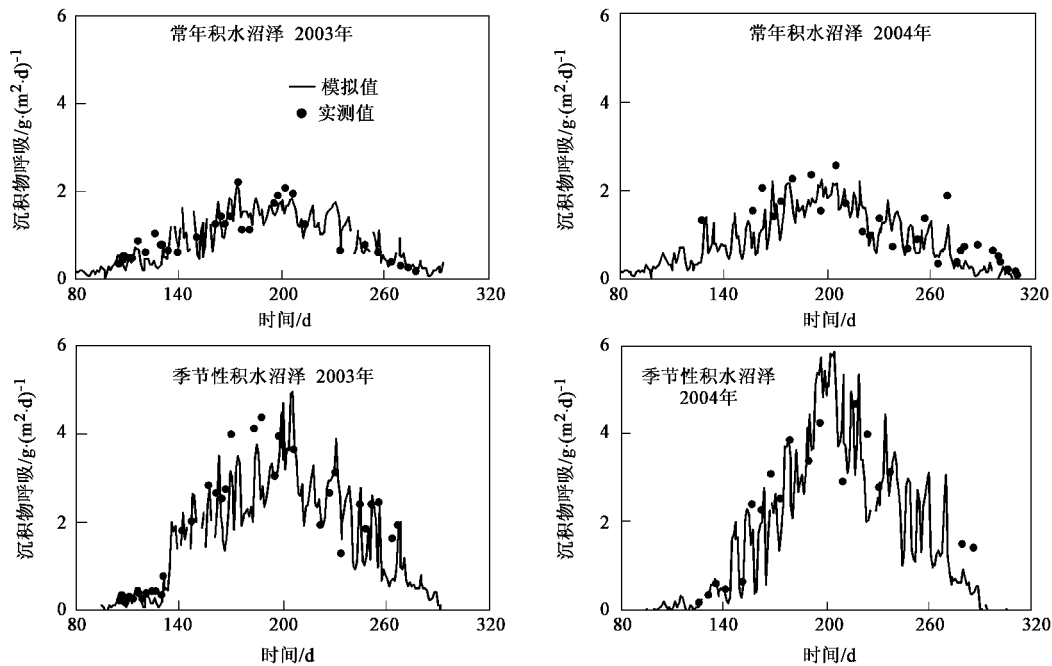


图 2 中温带三江平原湿地沉积物呼吸动态模拟

Fig.2 Simulating sediment respiration in two typical wetlands in temperate Sanjiang Plain

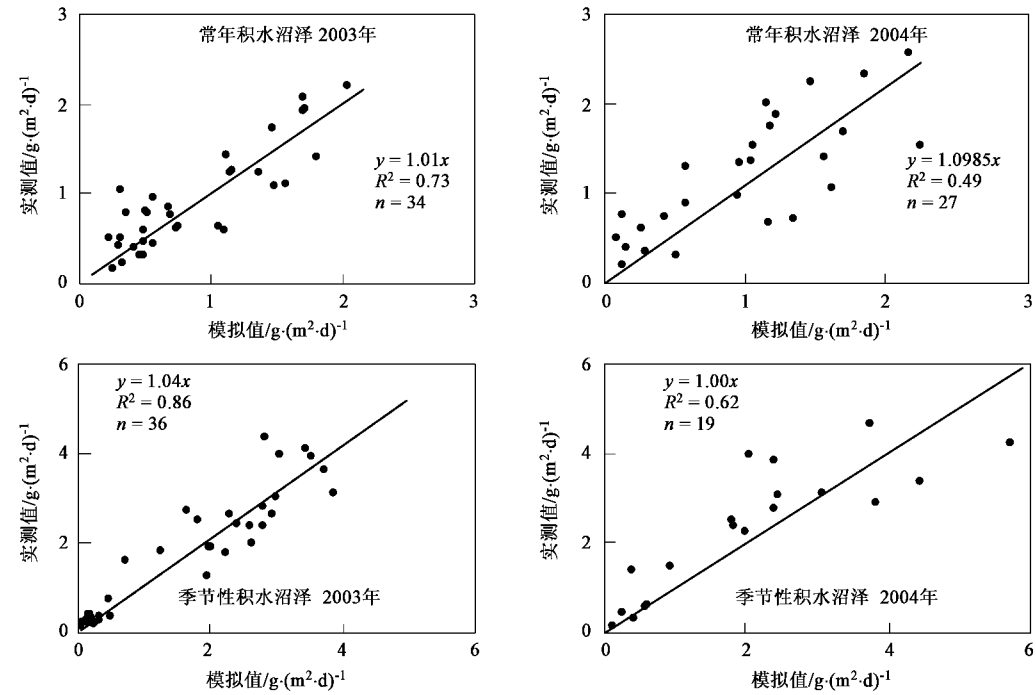


图 3 中温带三江平原自然湿地沉积物呼吸模拟值与实测值之间的关系

Fig.3 Correlation between simulated and observed value of sediment respiration in two typical wetlands in Sanjiang Plain

致使这一融化时期 CO_2 量的急剧增加.

2.1.1.2 湿地碳积累模拟值与实测值比较

中温带常年积水和季节性积水沼泽沉积物积累有机碳的模拟值与实测值,均在实际的调查范围之内

(表 2).其中中温带常年积水沼泽单位面积碳储量较高,达 $80 \times 10^9 \text{ g/km}^2$,相当于季节性积水沼泽的 5 倍左右.而亚热带地区洞庭湖湿地单位面积有机碳储量与同一区域稻田基本相当^[23],约为 $20 \times 10^9 \text{ g/km}^2$.

表 2 湿地碳循环模型灵敏性分析/%
Table 2 Sensitivity analysis of organic C cycling model in wetland ecosystem/%

变量	湿地类型	变化范围	变化的比例		
			NPP	NEE	OCD
辐射	常年积水沼泽	- 10	- 0.007	- 0.010	- 0.003
		- 25	- 0.007	0.000	- 0.008
		10	0.007	0.010	0.002
		25	0.007	0.010	0.005
	季节性积水沼泽	- 10	0.007	0.048	- 0.002
		- 25	0.000	0.032	- 0.007
		10	0.004	0.016	0.002
		25	0.011	0.048	0.004
温度	常年积水沼泽	- 10	- 37.1	- 26.8	- 34.1
		- 25	- 14.5	- 93.9	145.1
		10	16.0	12.9	2.5
		25	23.8	13.1	- 8.6
	季节性积水沼泽	- 10	- 25.7	- 9.5	- 12.6
		- 25	- 6.9	- 180.4	224.1
		10	11.3	3.7	- 6.5
		25	15.8	- 2.2	- 20.1
CO ₂ 浓度	常年积水沼泽	- 10	- 8.8	- 4.8	- 11.9
		- 25	- 27.9	- 15.9	- 37.5
		10	7.4	4.4	10.0
		25	16.7	11.3	21.8
	季节性积水沼泽	- 10	- 7.7	- 3.3	- 9.5
		- 25	- 22.5	- 6.6	- 29.0
		10	6.7	2.9	8.3
		25	15.4	5.2	19.0

2.1.3 湿地生态系统碳交换

根据模型模拟的各分量输出值,可以获得整个生态系统的碳循环特征(表 1).中温带常年积水沼泽生态系统年净初级生产力(以 C 计)约为 280 g/m².年净排放 CO₂ 约 533 g/m²,与观测结果相近^[22].常年积水沼泽每年可净固定约 104 g•m⁻²,是大气 CO₂ 的净碳“汇”.季节性积水沼泽的年净初级生产力(NPP)略高于常年积水沼泽,但其沉积物呼吸受积水影响的程度相对较小,年净排放(NE)明显高于常年积水沼泽,达 702 g/(m²•a),因而每年净固定的碳仅为常年积水沼泽的 73%,约 76 g/(m²•a)(表 1).

洞庭湖湖草滩地和芦苇滩地每年年植被净初级生产力分别达 706 g/(m²•a)和 925.2 g/(m²•a),地上生物量与以往研究基本一致^[26].较高的平均气温促进土壤呼吸加速,呼吸通量也明显高于三江平原(表 1),尽管整个生态系统的碳排放相当于三江平原的 4 倍以上,模拟生态系统的净交换仍为正值,表现在植物生长初期的碳固定(表 1).

洞庭湖滩地的净初级生产力和净交换很高,但实际积累的土壤有机碳较少.主要是由于洞庭湖滩地存在强烈的人为干扰活动.湖草滩地秋季作为鱼

草刈割现象普遍,而芦苇作为重要的造纸原料,是当地重要产业.因此,整个系统碳的净固定较高,但大部分被人为输出系统,只有部分地下死亡根系和凋落物参与系统的物质循环,土壤积累部分较少(表 1).土壤剖面有机碳蓄积量模拟值与实测值较为接近.由于可获得的资料有限,对其他区域湿地的模拟和应用有待进一步检验.

2.2 模型灵敏度分析

通过改变模型的基本变量——辐射、气温和大气 CO₂ 浓度(± 10%和 ± 25%)来进行模型的灵敏性分析(表 2).结果表明,模型状态变量净初级生产力(NPP)、净交换(NEE)和积累有机碳密度(organic carbon density, OCD)对光辐射变化的反应不敏感,但对大气 CO₂ 浓度变化反应敏感,随其浓度同消长.常年积水沼泽积累的有机碳密度对增温的反应呈现先增加后下降的变化趋势,而季节性积水沼泽生态系统积累有机碳密度对温度的变化反应更为敏感,随温度增加而下降.

2.3 情景预测

根据 IPCC 预测的未来几个情景中人口、经济、科技和全球化均水平较高,环境恶化较慢(A1B)与

环境恶化较快(A1FI)的 2 个未来预测情景(表 3),并以每 20 a 为时间间隔,利用建立的模型预测可能发生的气候变化对中温带自然湿地生态系统碳循环的影响.

表 3 未来全球气候变化的 2 个情景^[27]

年份	A1B		A1FI	
	CO ₂ 浓度/ $\times 10^{-6}$	增温/ $^{\circ}\text{C}$	CO ₂ 浓度/ $\times 10^{-6}$	增温/ $^{\circ}\text{C}$
1970~1990	325~353	0.33	325~353	0.33
2000	369	0.16	369	0.16
2020	420	0.52	417	0.55
2040	491	1.26	504	1.27
2060	572	1.97	638	2.5
2080	649	2.56	799	3.64
2100	717	2.95	970	4.49

无论在 A1B 情景还是 A1FI 情景下,中温带三江平原的常年积水和季节性积水沼泽湿地生态系统 NPP、NE 和 NEE 均随 CO₂ 浓度的增加和温度的升高而增加(图 4).OCD 对增温和 CO₂ 浓度变化反应更为敏感;OCD 在 CO₂ 浓度倍增,增温低于约 2.5 $^{\circ}\text{C}$ 前,呈现增加趋势.但是由于植物光合作用对高 CO₂ 浓度存在适应性^[28],随着大气 CO₂ 浓度和气温的继续增高,由 CO₂ 浓度增加引起的光合速率及 NPP 的增加减缓,而呼吸仍呈现继续增加的趋势,因而出现系

统 NPP 增加与升温引起呼吸的增加量基本相当,甚至 NPP 的增强量补偿不了由温度升高导致的沉积物呼吸损失的碳,生态系统蓄积的有机碳出现减少的现象(图 4).对于季节性积水沼泽生态系统,这一下降趋势表现得尤为明显,整个生态系统的净交换 NEE 在 2 个预测情景下呈现下降趋势.由此可见,在大气 CO₂ 浓度增加、气候变暖的情景下,我国中温带湿地生态系统与大气间的碳交换变得更为活跃,但积累的有机碳并非能持续增加,当大气 CO₂ 浓度倍增,增温超过 2.5 $^{\circ}\text{C}$ 后,气候变暖的加剧很可能造成湿地已积累有机碳的大量损失,使其成为大气的巨大“碳源”,加剧气候变化的趋势.

由以上模型模拟和预测结果来看,尽管模拟结果与实测值之间具有良好的一致性,但模型的模拟精度仍较粗,特别是对于生态系统呼吸通量的模拟.沉积物呼吸不仅受环境因子如温度、湿度、降水、风力、风向等气象因子及天气状况的影响,还受到有机质 C/N、植被类型、生物量、叶面积指数、植被凋落物等生物因子、人类活动等方面的影响^[29, 30].本模型主要侧重环境因子如大气 CO₂ 浓度、温度(包括冻融过程)、水分、植被覆盖等因子对植被碳固定和沉积物有机碳分解矿化的影响.在情景预测方面,模型考虑了未来气候变化的温度升高和 CO₂ 浓度增加对湿地生

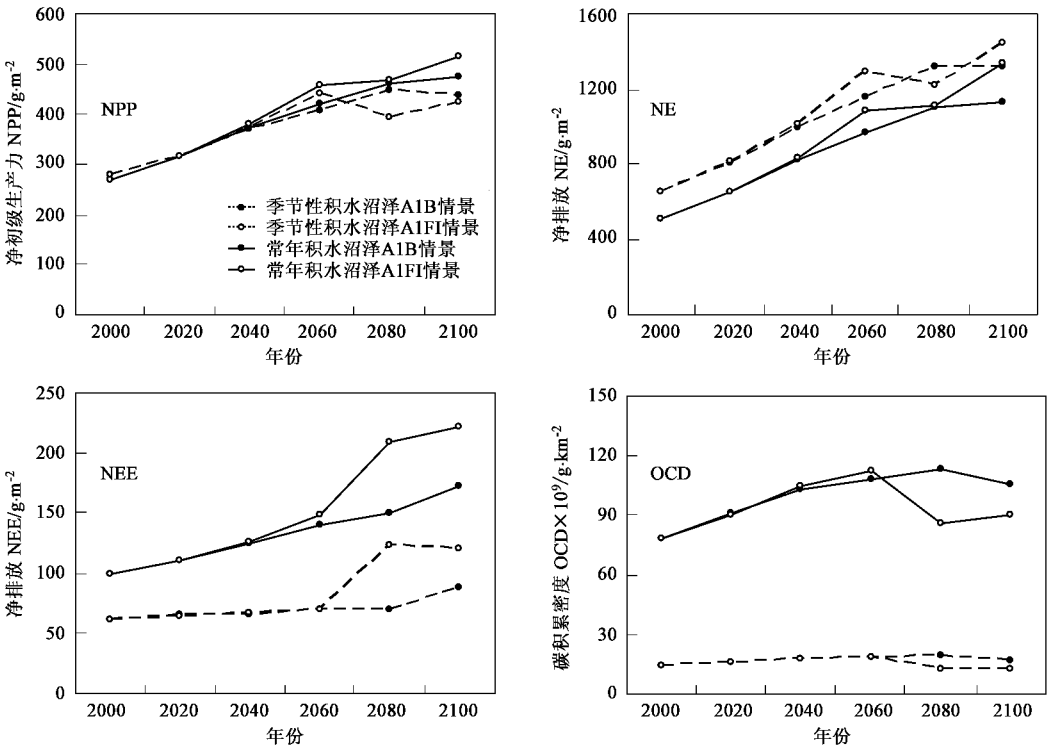


图 4 中温带典型湿地生态系统碳循环特征情景预测

Fig.4 Prediction of characteristics of C cycling in temperate wetland ecosystems

态系统碳循环过程的影响,没有考虑包括辐射和降水的变化以及由此带来的气候带的迁移、植被群落演替、以及水文过程变化等其他方面,因此,将生态系统碳循环模型与水文过程模型、气候变化预测模型集成,将在客观、定量描述气候变化对湿地生态系统碳循环过程的影响方面有广阔的应用前景。

3 结论

(1)利用构建的模型模拟了典型湿地生态系统沉积物的呼吸通量和系统的碳积累。所建模型能较好地模拟我国典型湿地生态系统呼吸通量和有机碳的积累特征,模拟值与实测值之间均具有良好的一致性。呼吸通量的动态模拟值与实测值之间均具有极显著的线性相关关系;有机碳积累的模拟值均在实测值的变异范围之内。当前条件下,三江平原典型湿地生态系统为大气 CO_2 的净碳汇,常年积水沼泽和季节性积水沼泽每年的碳汇功能分别约为 104 g/m^2 和 76 g/m^2 。

(2)在既定的水文条件下,模型对温度和大气 CO_2 浓度变化反应敏感,温度升高促进系统 NPP 增加,但积累有机碳对温度变化的反应则较为复杂。在 CO_2 浓度升高和气候变暖的情景下,常年积水沼泽生态系统与大气之间的碳交换变得更为活跃;在 CO_2 倍增和温度升高大约 2.5°C 的情景下,生态系统的碳积累量增加,但随着 CO_2 浓度和气温继续的升高,并不利于湿地有机碳的积累,季节性积水沼泽积累的有机碳甚至出现负增长。

参考文献:

- [1] Frolking S N, Roulet T, Moore T R, *et al.* Modeling Northern Peatland decomposition and Peat accumulation [J]. *Ecosystems*, 2001, **4**: 479 ~ 498.
- [2] 孙广友. 中国湿地科学的进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2000, **15**(6): 666 ~ 672.
- [3] Yu Z, Campbell I D, Vitt D H, *et al.* Modelling long-term peatland dynamics. I. Concepts, review, and proposed design [J]. *Ecological Modelling*, 2001, **145**: 197 ~ 210.
- [4] Yu Z, Turetsky M R, Campbell I D, *et al.* Modelling long-term peatland dynamics. II. Processes and rates as inferred from litter and peat-core data [J]. *Ecological Modelling*, 2001, **14**: 159 ~ 173.
- [5] Costanza R, Sklar F H. Articulation, accuracy and effectiveness of mathematical models: a review of freshwater wetland applications [J]. *Ecological Modelling*, 1985, **27**: 45 ~ 68.
- [6] Sturtevant B R. A model of wetland vegetation dynamics in simulated beaver impoundments [J]. *Ecological Modelling*, 1998, **112**: 195 ~ 225.
- [7] Chen R, Twilley R R. A simulation model of organic matter and nutrient accumulation in mangrove wetland soils [J]. *Biogeochemistry*, 1999, **44**: 93 ~ 118.
- [8] Van der P M J, Verhoeven J T A. Carbon, nitrogen and phosphorus cycling in river marginal wetlands: a model examination of landscape geochemical flows [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **50**: 45 ~ 71.
- [9] Cao M, Marshall S, Gregson K. Global carbon exchange and methane emissions from natural wetlands: application of a process-based model [J]. *J Geophys Res*, 1996, **101**: 399 ~ 414.
- [10] 马克平, 张悦, 周瑞昌. 三江平原小叶章草地上生物量组成结构与季节性动态的研究[J]. *中国草地*, 1993, (2): 27 ~ 31.
- [11] 何池全. 三江平原毛果苔草湿地生物过程——I. 种群地上生物量的增长规律[J]. *中国草地*, 2001, **23**(4): 11 ~ 16.
- [12] 孟宪民. 湿地碳积累模型与参数估计[A]. 见: 陈宜瑜主编, *中国湿地研究*[C]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995. 73 ~ 78.
- [13] 张文菊, 童成立, 刘守龙, 等. 三江平原湿地小叶章生产力模拟模型[J]. *植物生态学报*, 2006, **30**(5): 844 ~ 851.
- [14] 吴金水, 刘守龙, 童成立. 土壤有机质周转与预测计算机模型建模原理[J]. *土壤学报*, 2003, **40**(5): 768 ~ 774.
- [15] 吴金水, 童成立, 刘守龙. 亚热带和黄土高原区耕作土壤有机碳对全球气候变化的响应[J]. *地球科学进展*, 2004, **19**(1): 131 ~ 137.
- [16] 张文菊, 童成立, 杨钙仁, 等. 水分对湿地沉积物有机碳矿化的影响[J]. *生态学报*, 2005, **25**(2): 249 ~ 253.
- [17] 杨钙仁, 张文菊, 童成立, 等. 温度对湿地沉积物有机矿化的影响[J]. *生态学报*, 2005, **25**(2): 243 ~ 248.
- [18] Jenkinson D S, Hart P B S, Rayner J H, *et al.* Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments at Rothamsted [J]. *INTECOL Bulletin*, 1987, **15**: 1 ~ 8.
- [19] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(6): 709 ~ 714.
- [20] 童成立, 张文菊, 汤阳, 等. 逐日太阳辐射的模拟计算[J]. *中国农业气象*, 2005, **26**(3): 165 ~ 169.
- [21] 张丽华, 宋长春, 王德宣. 氮输入对沼泽湿地碳平衡的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(7): 1257 ~ 1263.
- [22] 宋长春, 阎百兴, 王跃思, 等. 三江平原沼泽湿地 CO_2 和 CH_4 通量和影响因素[J]. *科学通报*, 2003, **48**(23): 2473 ~ 2477.
- [23] 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.
- [24] 张文菊, 彭佩钦, 童成立, 等. 洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征[J]. *环境科学*, 2005, **26**(3): 56 ~ 60.
- [25] 马克平, 周瑞昌, 郭亚胜. 小叶章草甸地下生物量形成规律研究[J]. *草业科学*, 1992, **9**(2): 24 ~ 28, 33.
- [26] 童潜明. 洞庭湖近现代演化与湿地生态系统演替[J]. *国土资源导刊*, 2004, **1**(1): 38 ~ 44.
- [27] IPCC. Climate change: The Scientific Basis [R]. Cambridge University Press, 2001. 800 ~ 826.
- [28] Yu Q, Liu Y, Liu J. Simulation of leaf photosynthesis of winter wheat on Tibetan Plateau and in North China Plain [J]. *Ecological Modeling*, 2002, **155**: 205 ~ 216.
- [29] 宋长春, 杨文燕, 徐小锋, 等. 沼泽湿地生态系统土壤 CO_2 和 CH_4 排放动态及影响因素[J]. *环境科学*, 2004, **25**(4): 1 ~ 6.
- [30] Griffis T J, Rouse W R, Waddington J M. Interannual variability of net ecosystem CO_2 exchange at a subarctic fen [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2000, **14**: 1109 ~ 1121.