

长江河口典型湿地碳库动态研究方法

葛振鸣^{1,2,*}, 周 晓², 王开运³, Seppo Kellomäki², 巩晋楠³

(1. 华东师范大学 生命科学院 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200062;

2. Faculty of Forest Sciences, University of Joensuu, FIN-80101, Joensuu, Finland;

3. 华东师范大学 资源与环境科学学院 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200062)

摘要:湿地生态系统在维持碳平衡和全球气候调节中起着重要作用。长江河口湿地生态系统是国际公认的生态过程敏感区, 选择长江河口典型湿地——崇明东滩作为长期碳循环观测和实验模拟的研究对象, 针对长江河口湿地生态系统碳库动态研究具体的科学问题, 从“土壤-植被-大气”连续体 (SPAC) 碳流过程监测、涡度相关法碳通量监测、植物生长控制实验 (开顶式气候室, OTC)、“湿地碳循环-气候变化”生态过程模型构建、多方数据源校正等方面, 总结了全球气候变化条件下长江河口湿地碳库动态的研究方法。旨在了解长江河口湿地生态系统碳库动态特征, 探寻湿地碳平衡的主导控制因子, 评估中国东部沿海湿地碳库对全球气候变化的响应。进而为提出长江河口湿地碳储备功能的保育策略提供理论依据。

关键词:气候变化; 长江河口; 湿地碳库; SPAC; 涡度相关; OTC; 过程模型

Research methodology on carbon pool dynamics in the typical wetland of Yangtze River estuary

GE Zhenming^{1,2,*}, ZHOU Xiao², WANG Kaiyun³, Seppo Kellomäki², GONG Jinnan³

1 Shanghai Key Laboratory of Urbanization and Ecological Restoration, School of Life Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China

2 Faculty of Forest Sciences, University of Joensuu FIN-80101, Joensuu, Finland

3 Shanghai Key Laboratory of Urbanization and Ecological Restoration, School of Resources and Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract: Wetlands play an important role in carbon balance of nature and global climate regulation. In China, the huge area of wetlands in Yangtze River estuary is internationally recognized as the eco-sensitive zone. Of this region, taking Chongming Dongtan wetland, which is the typical ecosystem of Yangtze River estuary, as the representative site for the long-term research on carbon pool and the establishment of experiment station. Based on the objective of estimation of the interrelationship and response mechanism between dynamic carbon pool and climate change, we brought forward and set up the research methodology and experimental facilities focusing on carbon process through “Soil-Plant-Atmosphere” continuum, stand carbon/water/energy flux (by eddy-covariance monitoring), environment-controlled experiments on vegetation growth (by open top chambers), application of process-based model on the effects of climate change on wetland carbon cycle (by validation and re-test with multi-resource dataset). Accordingly, the purpose of this work are (1) to understand the spatial and temporal characteristics of carbon pool dynamics in the estuarial wetland of Yangtze River; (2) to investigate the key factors influencing the fluctuation of carbon balance in the wetland; (3) to evaluate the responses of carbon pools in Yangtze River estuary to climate change, further, to provide the suggestions on conservation and management strategies of carbon pools in the east coast of China.

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划资助项目 (No. 2006BAC01A14); 芬兰杰出教授计划资助项目 (FiDiPro Programme); 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室开放基金资助项目 (2007, 2008)

收稿日期: 2008-12-18; 修订日期: 2009-06-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zmge@bio.ecnu.edu.cn

Key Words: climate change; yangtze River estuary; carbon pool in wetland; SPAC; eddy covariance; OTC; process-based model

全球变化最突出表现是气候变暖,其主要原因是由人类活动影响下的生物圈碳循环过程改变,大气 CO_2 和 CH_4 等温室气体浓度升高所引起的^[1],由此并引发了一系列严重的生态灾害问题,这使得陆地生态系统碳循环倍受关注,尤其对于碳库动态研究最为成熟^[2-3]。目前,我国对于区域生态系统碳库动态研究多集中在森林、草地和农田等,而针对湿地生态系统的工作稍有滞后^[4-7]。

湿地是四大陆地生态系统之一,全世界约有湿地 5.30 亿 hm^2 ,虽然只有地球表面积的 6%,但全球湿地的碳储量却占陆地生物圈碳素总量的 30% 左右,相比于农业生态系统、温带森林生态系统以及热带雨林生态系统储量都要高^[8]。我国湿地面积约 3848 万 hm^2 ,约占全球世界湿地面积的 7%,居世界第 4 位、亚洲第 1 位^[9],对全球碳平衡有重要贡献。然而,世界范围内持续的气候变暖将对陆地生态系统的结构和功能产生巨大的影响。IPCC 第四次综合评估报告指出,未来 50—100a 间,地球表面 CO_2 浓度将升高约 1 倍,平均温度可能升高 1.6—6.4 $^{\circ}\text{C}$ ^[10-11]。湿地生态系统的碳过程是生态系统产量的基础,也直接影响大气温室气体浓度。因此,对湿地碳库动态(碳收支)和通量的研究是理解湿地生态系统对气候变化响应最基础和最重要的议题之一^[12-14]。

全球河口湿地分布很广,具有很高的固碳能力(约为 42.6 $\text{Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$)^[15],对大气温室效应的抑制作用十分明显(碳汇)。但湿地生态系统在一定时期和条件下,由于微生物作用释放大量 CO_2 、 CH_4 ,从而转化为“碳源”^[16-18]。

长江河口湿地是中国沿海地区最为典型的湿地生态系统类型之一,拥有丰富的河口淤涨型湿地资源。世界自然基金会(WWF)在其发表的“生态区(eco-region)2000”计划中将长江河口与东海形成的“T”型结合部列为具有国际重要意义的生态敏感区^[19]。近年来虽开展了一些非连续性样点的碳库评估^[20-21],但为了充分表明长江河口湿地对区域碳平衡的重要作用,提出低碳损失的湿地管理与可持续利用措施,则必须建立长期有效的碳库动态监测平台,进而研究湿地生态系统碳素循环特征及其对气候变化的响应。

目前,国内外相关研究成果和先进的研究方法层出不穷^[22-26],但如何根据区域的立地条件和研究目标,集成相应的方案组合是首先要解决的问题。由此,以长江河口典型湿地-崇明东滩为研究对象,本文将探讨长江口湿地生态系统碳固定和持有能力、长江口湿地和近海水体交换对近岸海域生态系统初级生产力的影响、长江口湿地碳库动态对气候变化的响应。具体将从“土壤-植被-大气”连续体(SPAC)碳流过程监测、涡度相关法碳通量监测、开顶式气候室(OTC)条件控制实验、“湿地碳循环-气候变化”生态过程模型构建、多方数据源验证等方面,初步总结了气候变化下长江河口湿地碳库动态的研究方法。

1 “土壤-植被-大气”碳流过程与影响因素监测

1.1 长江口湿地碳库监测研究站

长江口湿地碳库监测研究站定址于区域内典型河口湿地—崇明东滩原生芦苇湿地,建立了湿地生态系统碳循环观测和实验模拟研究站(N 31°31'15", E 121°56'45") (图 1)。需解决的问题是长江河口典型芦苇湿地生态系统 SPAC 碳流过程与碳储量动态(季节和年际间),以及相应的环境影响因素。崇明东滩区域面积 326.1 km^2 ,地势低平,坡度 0.02%—0.05%,年平均潮差 2.43—3.08 m,土壤盐度 0.3%—0.6%,属亚热带季风气候,四季分明,年平均气温 15—16 $^{\circ}\text{C}$,有效积温 5100 $^{\circ}\text{C}$,年降水量 900—1050 mm,无霜期 240 d 左右。

2.2 SPAC 碳流过程

生态系统碳流过程及其对气候变化响应的研究在广度上要突出时空尺度,在深度上要探求“土壤-植被-大气”连续体(SPAC)相互作用机理并建立相关模型^[27-29]。目前,湿地研究较多集中在水/热通量的循环机理^[30-31]。本研究将定量检测生态系统碳交换过程与环境因子(气候、水文、微生物等)相互作用(图 2)。鉴于河口湿地的水文变化的丰富性,还将考虑潮差和地下水位变化引起的溶解性碳(DOC、DIC)流失,从而确定生

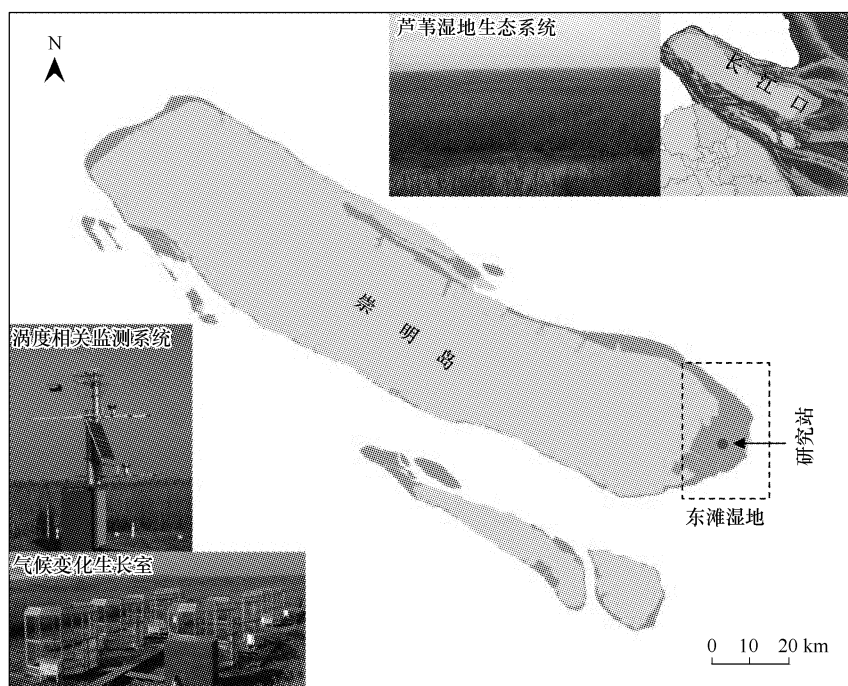


图1 崇明东滩湿地生态系统碳库动态监测站点

Fig.1 The study site of dynamic carbon inspect in Chongming Dongtan wetland

态系统碳平衡的地带性变化规律和影响因子。

2.2.1 湿地植被碳固定监测

植被是生态系统碳固定的基础。崇明东滩湿地的建群种是芦苇等1年生草本植物^[32],为了植被群落的固碳能力,使用光合作用仪定时测定目标样本的光合速率,并根据植物生长特征、群体冠层特征、生物量分配(地上和地下)、碳密度折算成固碳能力^[33-34]。

2.2.2 土壤储碳能力及系统碳素排放监测

土壤是陆地生态系统碳收支核心,是其中最大的有机碳储存库^[35-37]。土壤作为“碳源”或“碳汇”的变化取决于土壤碳的输入输出量和土壤碳驻留时间,其核心是土壤有机碳(SOC)的转化动态和平衡过程^[38]。长江口湿地颗粒有机碳(POC)含量主要来自陆源物质与当地芦苇等植被^[39],因此,崇明东滩湿地土壤储碳能力主要借予定期测定植被死亡根系有机碳含量、凋落物有机碳归还量和可溶性碳流失量(退潮期监测)。在定期测定潮水携带溶解性有机碳的同时,引用水务、海岸部门的源数据,估算出长期的碳损失量。

湿地生态系统碳素排放主要考虑植被、土壤呼吸排放出的 CO_2 与 CH_4 (透明箱-气象色谱法)^[25-26],为方便计算,研究中将 CH_4 摩尔浓度换算成 CO_2 。由于芦苇高度的关系,测定碳排放时将开顶式植被生长室(OTC,下文将详细叙述)盖顶后用作透明箱进行采样与分析。同时,使用气体交换仪测定土壤呼吸速率,从而获得差值为植被地上部分的总呼吸通量^[40]。

2.2.3 湿地碳库动态影响因素监测

气象条件、湿地植被、土壤条件、水文状况以及营养输入都会对湿地碳库动态产生相应的影响。根据长江河口立地条件^[41-42]、生态系统特征^[43]和外源影响^[44],需要监测的湿地生态系统碳库动态主要影响因子列于表1。所列数据部分由常规调查方法获得,其他由当地气象站和水文站提供。

3 碳通量涡度相关法监测

目前,涡动相关法被国内外认为是测定 CO_2 、水热通量的最可靠方法,用此方法解决了均匀下垫面假设下生态系统的 CO_2 、水热通量的计算^[45-46]。针对崇明东滩湿地生态系统平坦均匀的地势地貌和植被群落(以芦

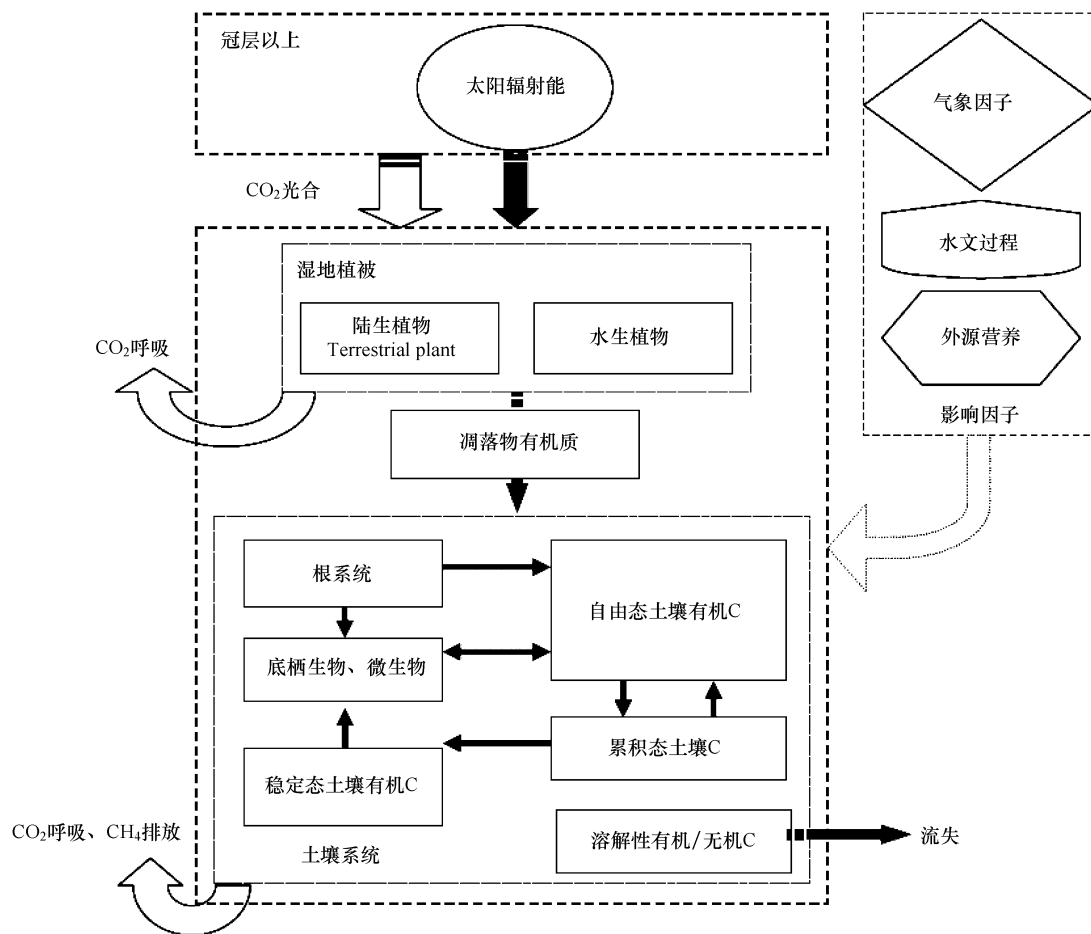


图2 湿地生态系统“土壤-植被-大气”连续体碳流过程示意
Fig.2 The schematic diagram of carbon process through “Soil-Plant-Atmosphere” continuum in wetland ecosystem

苇、海三棱藨草/藨草等草本群落为主), 非常适合使用涡度相法统进行稳定、长期的动态监测, 以校正 SPAC 碳流过程的测定。

表 1 崇明东滩湿地生态系统碳库动态主要影响因子
Table 1 The factors influencing the carbon pool in Chongming Dongtan wetland

类型 Type	监测因子 Measurement factors
大气 Climate	气温、气压、辐射、日照时数、空气湿度
水文 Hydrology	降雨量、引潮量、退潮量、地下水位、覆水时间、盐度、基本水质与营养物质
冠层结构 Canopy structure	盖度、密度、叶面积指数、茎直径和高度
土壤 Soil	pH、容重、孔隙度、盐度、含水量、田间持水量、全氮、全磷、全钾、碱解 N、速效 P、速效 K
底栖生物 Soil fauna	底栖动物和优势微生物群落指标
凋谢物 Litter	碳还原率
人为干扰 Human disturbance	收割与还原量

崇明东滩湿地研究站(地点同上)安装了开路式涡度相关(OPEC)通量监测系统,测定生态系统“碳-热-水”通量的连续变化。系统架设在微气象观测塔上,离地面 5 m 高度(芦苇植被层上 2 m 左右,图 1),自动连续测量 CO₂、显热/潜热、水汽通量及其环境参数。系统中 WindMaster 三维超声风速仪(Gill,UK)测量水平与垂直风速和温度瞬时脉动量,LI-7500 红外 CO₂/H₂O 分析仪(Licor,USA)测量 CO₂ 湿度和的瞬时脉动量,Delta-T 空气温湿度计(UK)测量该高度空气温度和湿度,Delta-T 净辐射仪(UK)测量向上、向下短波辐射与向

上、向下长波辐射。数据采集器 DT85 (Australia) 自动连续采集数据并存储在计算机中。采样频率为 10 Hz, 记录 10 min 平均值。同时, 使用 Vaisala 雨量计 (Finland) 测定雨量、Delta-T 土壤温度监测系统 (UK) 测定 0—5 cm 和 30 cm 深度土壤温度。

评价长期涡度相关测定的精度时, 考虑到湍流单点取样的随机特性以及通量贡献区变化的随机误差、完全系统误差 (如校正误差)、选择性系统误差 (如传感器下方夜间空气泄流) 和取样误差 (如仪器故障和极端天气条件造成的数据缺失), 测量数据均需经过必要的校准^[47-49]。为弥补 CH₄ 监测项的缺失, 采用便携式气体交换仪定期测定 CH₄ 排放量作为补充。

4 开顶式气候变化生长室模拟

大气 CO₂ 浓度和温度升高是全球气候变化最显著的表现, 世界各国纷纷开展了一系列针对生态系统与全球气候变化相互响应的研究。这些研究主要应用的技术手段包括模拟实验、模式分析、情景分析和耦合分析等, 其中模拟实验是一种有效地研究陆地植物生态系统对全球气候变化响应和适应的工具之一^[50]。目前, 比较成熟的系统模拟实验有: 开顶式生长室系统 (Open-top chamber, OTC)、封顶式生长室系统 (Enclosed-top chambers, ETC)、自由 CO₂ 气体施肥实验 (Free-air CO₂ enrichment, FACE)、控制环境实验 (Controlled environment, CE) 和枝袋实验等^[51-55]。然而, 针对所要解决的科学问题或研究目的, 每一种研究技术都有其自身的优缺点和特定的适用区域^[56]。

OTC 一般为圆柱形顶端开敞, 气体由鼓风机自下方进入, 接触植物后由顶端开口溢出。此设计基本上可使箱内物理环境包括光线、温度、湿度、降雨等接近于天然, 可研究各种环境条件变化对生态系统的影响。崇明东滩湿地研究站使用的即为开顶式生长室系统 (图 1) (地点同上), 主要用以研究温度和大气 CO₂ 浓度升高对植被、土壤碳库动态的影响。本开顶式气室将空间扩大, 气室内的生长环境基本接近自然状态, 植物的实验生理响应较小, 适合较大面积样方的芦苇自然生长。

以国内外设计和使用现状为参考^[57-59], 崇明东滩湿地研究站的 8 套独立、自控和开顶的生长室 (OTC) 由下部近似圆柱体和上部内陷的挡板两部分构成 (图 3), 其主体骨架为不锈钢矩管和圆管。上、下部均由 11 个面构成 (宽 1.0 m、高 3.0 m), 墙面使用 0.8 cm 的氟化玻璃 (透光率 > 70%), 保持气室基部气密性, 防止气体散失。顶部使用 1.0 cm 的阳光板, 板向内倾斜约 45°, 以减少气体交换的干扰。室内与温度控制系统连接, 室外与 CO₂ 气体输出钢瓶连接。生长室底面积约 12.5 m², 内部总体积约 37.5 m³。

本 OTC 气室控制系统具有条件控制和数据采集双重功能 (图 3), 可以直接控制 CO₂ 释放、制冷、加热等设备的工作, 也可直接或多线路记录与采集数据, 与控制计算机进行通讯。该系统由北京前景惠邦温室控制技术有限公司开发, 主要功能如下: (1) 监控室外内 CO₂ 浓度、温/湿度等参数。可通过远程操作实现各控制设

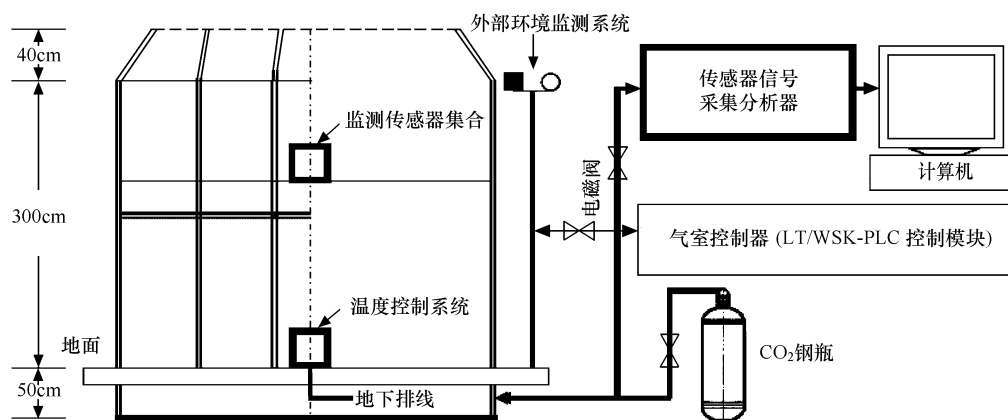


图 3 OTC 气室立面概述图、条件控制与数据传输

Fig. 3 The key framework and control system of OTC (open top chamber)

备的开启和关闭,并实时记录设备状态;(2)对所要控制的气候参数进行设定,以满足自动控制要求;(3)将系统采集到的数据以 Excel 表格保存或以实时曲线的方式显示。(4)可显示出各测量参数的日、月、季、年参数变化曲线,根据该曲线可合理的设置系统参数值;(5)可对历史曲线、报表进行查询等操作。

本次使用的计算机监控实现 OTC 气室模拟气体、温度自动控制系统的优化模式,实现了对气室内 CO₂ 和温/湿度气候因子的远程控制,适用于长期的控制实验研究。

气候室内外的环境因子监测包括光合有效辐射(*PAR*)、CO₂ 浓度 *c*(CO₂)、空气温度(*T_a*)、空气相对湿度(*RH*)、土壤温度(*T_s*)和土壤体积含水量(*S_w*)。所用传感器的详细情况和布置位置见表 2。

表 2 生长室内传感器与布置位置概况
Table 2 Details of the instructions for measuring microclimate variations and location in

测定指标 Measurement index	型号与产地 Type and made	精度 Precision	位置 Location
光合有效辐射 <i>PAR</i> /%	Vaisala, Finland	±2	地面以上 2.5 m
Photosynthetic active radiation			2.5 m over-ground
CO ₂ 浓度 <i>c</i> (CO ₂)/%		±1	地面以上 2.0 m
CO ₂ concentration			2.0 m over-ground
空气温度 <i>T_a</i> /℃	Delta-T, UK	±0.1	地面以上 2.0 m
Air temperature		0—50 <i>RH</i> , ±1 50—100 <i>RH</i> , ±1.4	2.0 m over-ground
空气湿度 <i>RH</i> /%			地面以上 2.0 m
Air humidity			2.0 m over-ground
土壤温度 <i>T_s</i> /℃		±0.1	土壤深度 0—5 cm, 30 cm
Soil temperature			0—5 cm, 30 cm under soil
土壤水分 Soil moisture <i>S_w</i> /%		±1	

5 基于生态过程的河口湿地碳循环模型

了解敏感生态系统对气候变化的反应,提高对气候变化条件下生态系统响应的预测能力,通过生态系统模型模拟是目前较为适用的研究方法^[60]。国际上湿地生态系统预测模型研究的时间较森林、海洋生态系统晚,模型架构也多参照和利用其他类似系统与影响因子函数^[61-64]。

基于河口湿地生态系统能量流动与物质循环的特殊性,较多动态预测模型框架以多组分复合结构构建,如 Van der Peij^[60, 63]提出的河口湿地 C、N、P 流复合模型,Zhang 等和 Cui 等^[62, 64]在 DNDC 的基础上发展了湿地碳、氮循环模型(Wetland-DNDC)。近年来国内在湿地碳循环模型也开展了部分工作,张文菊等^[65-66]通过湿地生态系统“土壤-植被”有机碳分解和转化动力学研究,基于 POC 和 DOC 与外界系统之间的碳交换过程,在吴金水等^[67-68]和刘守龙等^[69]建立的农田生态系统碳循环计算机模拟模型(SCNC)的基础上,完成了湿地碳循环模拟模型。该湿地碳循环模型包括有湿地植被碳固定子模型和湿地沉积物碳周转子模型两部分。此外,基于生态系统植被生理生态对于气候变化的响应也有成熟的研究成果^[70-71]。

针对长江河口湿地生态系统碳库研究,所需解决的问题是如何在气候变化影响下构建自然湿地多过程、多驱动因子的碳循环预测模型。因此,基于上述一系列碳过程和生长控制基础研究与实验,测定、筛选(敏感性分析)湿地碳库的影响因子,结合已有成熟模型的解构和重组,构建基于“气候-水文-植物生理生态-土壤”生态过程的长江河口湿地碳循环模拟预测模型(图 4)。

6 多方数据源验证

通过崇明东滩湿地研究站所开展的 SPAC 碳流过程监测、涡度相关法碳通量监测、气候室条件控制实验、生态过程模型构建等研究工作,可获得碳储量与其动态的多方数据源(multi-resource dataset)。如何运用监测、实验数据作为模型构建的依据,并对模型输出结果进行验证和优化,使所获数据和结论更具科学性和可比性是需要解决的关键问题。因此,根据崇明东滩湿地研究站对碳素循环研究的专一目标,可建立“监测-实验-模型”的多方数据源复合校正体系(图 5)。即通过计算各研究方法所获得的净初级生产力(*NPP*)、净生态系统生产力(*NEP*)和净生物群系生产力(*NBP*)作为指标进行相互验证。*NPP* 为湿地植被蓄积量(*GS*)、生物量

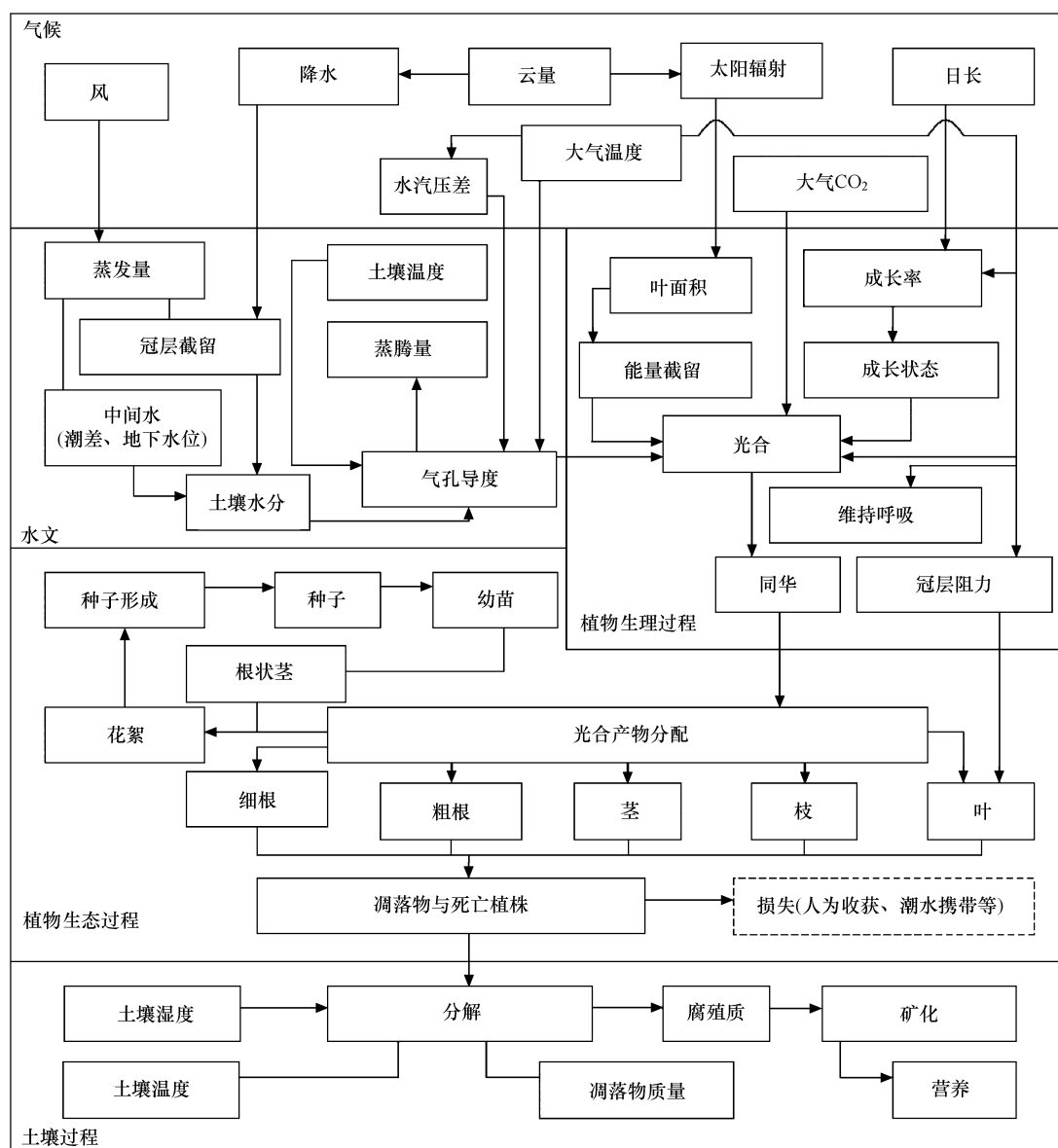


图4 基于生态过程的长江河口湿地碳循环模型初步框架(修改自[70])

Fig.4 Preliminary ecological process-based model of carbon cycles in Yangtze River estuary (Modified from [70])

增长量(ΔB)、凋落物产量(L)和自然损失量(M)之和。 NEP 为 NPP 减去异养呼吸(R_h)之值。 NBP 为 NEP 减去碳损失量(F)^[72]:

$$NPP = GS + \Delta B + (-L) + (-M)$$

$$NEP = NPP - R_h$$

$$NBP = NEP - F$$

NBP 通常的概念是指 NEP 中减去各类自然和人为干扰(如火灾、病虫害、动物啃食、森林间伐以及农林产品收获)等非生物呼吸消耗所剩下的部分。有研究表明,长江口的潮水在经过河口湿地后,水体中陆源有机碳的含量会明显增高^[73],因此,针对河口湿地潮水动态特征,本研究还将考虑植被凋落物中被水体带走所造成的碳损失,并记录于 NBP 的估算,得出湿地碳持有能力。

7 总结

湿地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,在维护区域能量与物质平衡方面具有重要作用^[76]。关

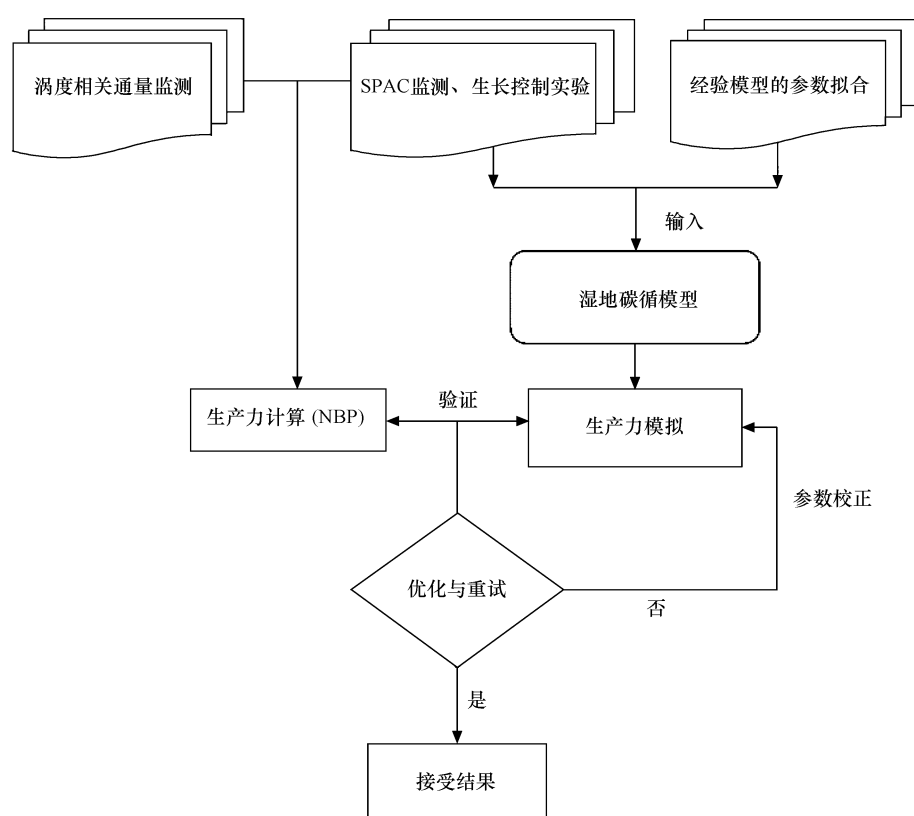


图5 碳库动态多方数据源校正流程

Fig. 5 The scheme of how to validate the multi-resource dataset on dynamic carbon pool

于湿地生态系统碳素循环的研究,国内外已积累了大量的实践经验,但其大多是在泥碳湿地开展。而对于河口湿地,特别是河口地区特殊潮汐特征所决定的间歇性淹水条件下的植被生长量、碳通量、土壤呼吸状况以及生物/非生物影响研究还有待强化。

湿地植被具有很高的生产力。有研究显示,芦苇湿地净同化的碳仅有 15% 左右释放到大气中去^[22],我国三江平原湿地植物的年固碳能力为 $0.80\text{—}1.20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[74],在植被生长和演替过程中,湿地碳储量也不断变化^[35]。而由于湿地生态系统的脆弱性特征,各类型气候要素变化(如温度、 CO_2 浓度升高,大气氮和硫沉降,太阳辐射增强等)对湿地生态系统过程有着更加强烈和复杂的影响。因此,崇明湿地生态系统碳循环观测和实验模拟研究站将植被系统作为碳循环过程中的主体部分,重点研究气候变化下,环境因子如何影响湿地生态系统光合与分解作用的平衡过程;随着气温和大气 CO_2 的升高,光合适应、呼吸强度的变化及程度。同时,河口湿地水文和土壤条件有其特殊性。湿地生态系统中的碳素固定和流动与水文过程、水位消长、土壤特性等因素有关。水动态控制了湿地氧化还原条件,水位变化(潮水、地下水等)显著控制着植被的生理生态过程。土壤条件(颗粒沉积物、有机质积累、底栖生物丰度等)决定了植被地下碳库的变化,土壤中氮矿化和硝化速率也会影响温室气体的释放速率^[75]。因此,长江河口湿地碳库动态的研究将综合考虑以上各方面环境条件变化的影响。

另一方面,长江口是我国经济开发强度较大的地区,湿地和原生植被群落不断被围垦利用,一些不合理的开发导致了湿地面积锐减,湿地功能和结构退化^[76],尤其是降低了湿地生态系统的固碳能力,使其储藏的有机碳大量降解释放。这很可能会使其由“碳汇”向“碳源”漂移。因此,急需建立长期有效的碳库动态监测平台,进而研究湿地生态系统碳素循环特征及其对人为干扰和气候变化的响应。

综上所述,本工作选取长江河口典型湿地—崇明东滩作为长期碳循环观测和实验模拟的研究对象,依托

已具备的 SPAC 测定设备、涡度相关碳通量系统和气候控制性生长室系统,开展河口湿地储碳潜力与碳库动态的监测,并构建基于生态过程的河口湿地碳循环模拟预测模型。通过多方数据源的相互验证与模型优化,了解长江河口湿地生态系统碳库动态特征,探寻湿地碳平衡的主导控制因子,评估中国东部沿海湿地碳库对全球气候变化的响应。进而为湿地碳储备功能的保育策略提供科学依据。

References:.

- [1] IPCC, 2001. Climate change 2001. The scientific basis//Houghton JT, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson CA. eds. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York; Cambridge University Press, NY, USA.
- [2] Yu G R, Li H T, Wang S Q. Global change, carbon cycle and storage in terrestrial ecosystem. Beijing: China Meteorological Press, 2003.
- [3] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Change in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292: 2320-2322.
- [4] Fang J Y, Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(9): 967-973.
- [5] Zhao J F, Yan X D, Jia G S. Simulating the responses of forest net primary productivity and carbon budget to climate change in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 92-102.
- [6] Wu Q B, Wang X K, Duan X N, Deng L B, Lu F, Ouyang Z Y, Feng Z W. Carbon sequestration and its potential by forest ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 517-524.
- [7] Han B, Wang X K, Lu F, Duan X N, Ouyang Z Y. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 612-619.
- [8] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298: 156-159.
- [9] Matthews E, Fung I. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochemical Cycles*, 1987, 1(1): 61-86.
- [10] IPCC. Climate change 2007. The Physical Science Basis//Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [11] IPCC. Climate Change and Water 2008//Bates B C, Kundzewicz Z W, Wu S, Palutikof J P, eds. IPCC Technical Paper VI. IPCC Secretariat, Geneva.
- [12] Huang Y. Study on Carbon Budget in Terrestrial and Marginal Sea Ecosystems of China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2002, 17(2): 104-107.
- [13] Keeling C D, Whorf T P. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network// trends: A compendium of data on global change. Carbon dioxide information analysis center. Oak ridge national laboratory, US department of energy, Oak Ridge, Tenn, USA. 2004.
- [14] Burkett V, Kusler J. Climate changes: potential impacts and interactions in wetlands of the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36(2): 313-320.
- [15] Choi Y, Wang Y. Dynamics of carbon sequestration in a coastal wetland using radiocarbon measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18, doi: 10.1029/2004GB002261.
- [16] Bubier JL, Moore T. An ecological perspective on methane emissions from northern wetlands. *Tree*, 1994, 9: 460-464.
- [17] Cicerone R J, Oremland R S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane, *Global Biogeochemical Cycles*, 1988, 2(4): 299-327.
- [18] Bartlett K B, Harriss R C. Review and assessment of methane emissions from wetlands. *Chemosphere*, 1993, 26: 261-320.
- [19] Maffi L, Oviedo G, Larsen P B. Indigenous and traditional peoples of the world and eco-region conservation: An integrated approach to conserving the world's biological and cultural diversity. Switzerland: WWF Research Report No. 145, 2000.
- [20] Yang H X, Wang D Q, Chen Z L, Xu S Y. Elementary research on green-house gas emissions in Chongming east intertidal flat of the Changjiang Estuary. *Marine Environmental Science*, 2006, 25(4): 20-23.
- [21] Mei X Y, Zhang X F. Carbon storage and carbon fixation during the succession of natural vegetation in wetland ecosystem on east beach of Chongming island. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 933-936.
- [22] Brix H, Sorrell B K, Lorenzen B. Are Phragmites-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases? *Aquatic Botany*, 2001, 69(2/4): 313-324.
- [23] Kasimir K C, Klemetsson L, Martikainen P, Silvola J, Oenema O. Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. *Soil Use and Management*, 1997, 13: 1-6.

- [24] Trumbore S. Age of soil organic matter and soil respiration: radiocarbon constraints on belowground C dynamics. *Ecological Application*, 2000, 10 (2): 399-411.
- [25] Zhao Y L, Tong C L, Wu J S, Zhou W J. Estimation of CO₂ fluxes from rice paddies based on transparent chamber measurement. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2005, 26(6): 8-14.
- [26] Zou J W, Jiao Y, Wang Y S, Huang Y. GC-based technique for determination of CO₂, CH₄ and N₂O emissions from paddy fields. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, 25 (4): 45-48.
- [27] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon sequestration and land-use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345-360.
- [28] Robert K D, Jack K W, Paul E S. Conservation and sequestration of carbon: the potential of forest and agroforest management practices. *Global Environment Change*, 1993, 3(2): 159-173.
- [29] WCSS Symposium 10, 11. Research to enhance carbon sequestration in soil & Microbial process and populations in submerged soil. Abstracts of 17th World Congress of Soil Science. Volume 1. Bangkok, Thailand, 2002: 300-328.
- [30] Liu L M, Qi H, Luo X L, Zhang X. Coordination effect between vapor water loss through plant stomata and liquid water supply in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC): A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 2067-2073.
- [31] Zhu S J, Ding Y F, Xue T Q. Moisture movement literature on summarizing SPAC system and agri-forestry. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(1): 49-53.
- [32] Ge Z M, Wang T H, Shi W Y, Zhao P. Secondary succession characteristics of vegetations on reclaimed land inside Chongming wetland seawall. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1677-1681.
- [33] Kang H N, Ma Q Y, Yuan J Z. Estimation of carbon sink function of forests in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(3): 230-234.
- [34] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologia Sinica*, 2000, 24(5): 518-552.
- [35] Eswaran H, Van den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 192-194.
- [36] Janzen H H. Carbon cycling in earth systems-a soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104: 399-417.
- [37] Scholes R J, Noble I N. Storing carbon on land. *Science*, 2001, 294: 1012-1013.
- [38] Trumbore S. Age of soil organic matter and soil respiration: radiocarbon constraints on belowground C dynamics. *Ecological Application*, 2000, 10 (2): 399-411.
- [39] Chen Q Q, Zhou J Z, Meng Y, Hu K L, Gu J H. The cumulative effect of organic carbon of salt marsh evolution in Yangtze Delta Beach. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(5): 614-623.
- [40] Su Y H, Feng Q, Zhu G F, Si J H, Chang Z Q. Progress in Research on Soil Respiration. *Journal of Desert Research*, 2008, 1: 57-65.
- [41] Yang O, Liu C Z. Analysis on sediment transport patterns and sediment sources of north branch of Changjiang estuary. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 2: 79-84.
- [42] Yang S L, Zhao Q Y, Igor M B. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze River and the influences of human activities. *Journal of Hydrology*, 2002, 263: 56-71.
- [43] Ge Z M, Wang T H, Wang K Y, Wang X M. The ecological characteristics of the coastal wetland of Yangtze River estuary and the conservation strategy on the key wetland species. Beijing: Science Press, 2008.
- [44] Shen Z L, Liu Q, Zhang S M, Miao H, Zhang P. The dominant controlling factors of high content inorganic N in the Changjiang River and its mouth. *Oecologia Etlimnologia Sinica*, 2001, 32(5): 465-473.
- [45] Yu G R, Sun X M. Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [46] Wen X F, Yu G R, Sun X M. Uncertainties in long-term studies of net ecosystem CO₂ exchange with the atmosphere based on eddy covariance technique. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 658-663.
- [47] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, Daube B C, Wofsy S C. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 1996, 2: 169-182.
- [48] Moncrieff J B, Malhi Y, Leuning R. The propagation of errors in long-term measurement of land-atmosphere fluxes of carbon and water. *Global Change Biology*, 1996, 2: 231-240.
- [49] Norris T, Wilkinson D, Lockwood A, Belay A, Colls J J, Bailey B J. Performance of a controlled-ventilation open-top chamber for climate change research. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78: 239-257.
- [50] Wang K Y, Kellomäki S, Laitinen K. Acclimation of photosynthetic parameters in Scots pine after three years exposure to elevated temperature and CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 82: 195-217.
- [51] Yang J Y, Yang W Q, Wang K Y, Sun J P. Woody plants response to interaction between elevated CO₂ and increased temperature. *Acta Phytocologia Sinica*, 2003, 27 (3): 304-310.

- [52] Wang K Y, Kellomäki S. Effects of elevated CO₂ and soil nitrogen supply on chlorophyll fluorescence and gas exchange in Scots pine, based on a branch-in bag experiment. *New Phytology*, 1997, 136: 277-286.
- [53] Paul G J. European forest and global change: The likely impacts of rising CO₂ and temperature. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [54] Zhang Y B, Wang K Y, Qiao Y Z. Enclosed-top chambers system for investigating responses of plant growth process to global climate change under high frigid conditions in southwestern China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2007, 13(5): 601-608.
- [55] Monique C, Laure H. Elevated atmospheric CO₂ in open top chambers increases net nitrification and potential denitrification. *Global Change Biology*, 2002, 8: 590-598.
- [56] Heagle A S, Body D E, Heck W W. An open-top chamber to assess the impact of air pollution on plants. *Journal of Environmental Quality*, 1973, 2: 2031-2039.
- [57] Ruan Y N, Chen Z J, Chen W, He X Y, Su D Y, Zhang Y. Optimal design and characteristics estimation of OTC- I open top chamber. *Journal of Liaoning Technical University*, 2006, 25(s1): 220-222.
- [58] Mao L X, Sun Y L, Yan X D. Modeling of carbon cycling in terrestrial ecosystem: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2189-2195.
- [59] Post W M, King A M, Wullschlegel S D. Soil organic matter models and global estimates of soil organic carbon. In: Powlson D S (Eds.) *Evaluation of Soil Organic Matter Models*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- [60] Van Der Peij M J, Verhoeven J T A. Carbon, nitrogen and phosphorus cycling in river marginal wetlands; A model examination of landscape geochemical flows. *Biogeochemistry*, 2000, 50(1): 45-71.
- [61] Trettin CC, Song B, Jurgensen MF, Li C. Existing soil carbon models do not apply to forested wetlands. Technical Report. NC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, 2001.
- [62] Zhang Y, Li CS, Trettin CC, Li H, Sun G. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1-17.
- [63] Van der Peij M J, Verhoeven J T A. A model of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics and their interactions in river marginal wetlands. *Ecological Modelling*, 1999, 118: 95-130.
- [64] Cui J B, Li C S, Trettin C C. Analyzing the ecosystem carbon and hydrologic characteristics of forested wetland using a biogeochemical process model. *Global Change Biology*, 2005, 11: 278-289.
- [65] Zhang W J, Tong C L, Wu J S, Xu M G, Song C C. Simulating and predicting of carbon cycling in typical wetland ecosystems. *Environmental Science*, 2007, 28(9): 1905-1911.
- [66] Zhang W J, Tong C L, Zhao S W, Wu J S. Carbon cycling and model ing in wetland ecosystem. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(6): 1049-1055.
- [67] Wu J S, Liu S L, Tong C L. Principles in modeling the turnover of soil organic matter using computer simulation. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 768-774.
- [68] Wu J S, Tong C L, Liu S L. Responses of soil organic carbon to global climate changes in cultivated soils in the subtropical and the Loess Plateau Regions. *Advance in Earth Science*, 2004, 19(1): 131-137.
- [69] Liu S L, Tong C L, Wu J S, Liu Z Y, Jiang P. Simulation of Changes of Soil Organic Carbon in Paddy Soils: SCNC Model Validation. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1228-1233.
- [70] Kellomäki S, Väisänen H. Modelling the dynamics of forest ecosystem for climate change studies in the boreal conditions. *Ecological Modelling*, 1997, 97: 121-140.
- [71] Elemer Briceno-Elizondo E, Garcia-Gonzalo J, Peltola H, Kellomäki S. Carbon stocks and timber yield in two boreal forest ecosystems under current and changing climatic conditions subjected to varying management regimes. *Environmental Science & Policy*, 2006, 9: 237-252.
- [72] Fang J Y, Ke J H, Tang Z R, Chen P A. Implications and estimations of four terrestrial productivity parameters. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(4): 414-419.
- [73] Wu J, Zhang J, Zhang Z F, Ren J L, Cao J P. Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope of suspended particulate matter in the Changjiang River. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5): 546-552.
- [74] Aselmann I, Crutzen P J. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions. *Journal of Atmosphere Chemistry*, 8: 307-358.
- [75] Song C C. Advance in research on carbon cycling in wetlands. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(5): 622-628.
- [76] Xie Y M. *Shanghai Wetlands*. Shanghai: Science & Technology Press, 2004.

参考文献:

- [2] 于贵瑞, 李海涛, 王绍强. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003.

- [4] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
- [5] 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 东北森林净第一性生产力与碳收支对气候变化的响应. 生态学报, 2008, 28(1): 92-102.
- [6] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 邓立斌, 逯非, 欧阳志云, 冯宗炜. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 517-524.
- [7] 韩冰, 王效科, 逯非, 段晓男, 欧阳志云. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 612-619.
- [12] 黄耀. 中国陆地和近海生态系统碳收支研究. 中国科学院院刊, 2002, 17(2): 104-107.
- [20] 杨红霞, 王东启, 陈振楼, 许世远. 长江口崇明东滩潮间带温室气体排放初步研究. 海洋环境科学, 2006, 25(4): 20-23.
- [21] 梅雪英, 张修峰. 崇明东滩湿地自然植被演替过程中储碳、固碳功能变化研究. 应用生态学报, 2007, 18(4): 933-936.
- [25] 朱咏莉, 童成立, 吴金水, 周卫军. 透明箱法监测稻田生态系统 CO_2 通量的研究. 环境科学, 2005, 26(6): 8-14.
- [26] 邹建文, 焦燕, 王跃思, 黄耀. 稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放通量测定方法研究. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 45-48.
- [30] 刘利民, 齐华, 罗新兰, 张旋. 植物气孔气态失水与 SPAC 系统液态供水的相互调节作用研究进展. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2067-2073.
- [31] 朱首军, 丁艳芳, 薛泰谦. 土壤-植物-大气 (SPAC) 系统和农林复合系统水分运动研究综述. 水土保持研究, 2000, 7(1): 49-53.
- [32] 葛振鸣, 王天厚, 施文彧, 赵平. 崇明东滩围垦堤内植被快速次生演替特征. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1677-1681.
- [33] 康惠宁, 马钦彦, 袁嘉祖. 中国森林 C 汇功能基本估计. 应用生态学报, 1996, 7(3): 230-234.
- [34] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-552.
- [39] 陈庆强, 周菊珍, 孟翊, 胡克林, 顾靖华. 长江口盐沼滩面演化的有机碳累积效应. 自然科学进展, 2007, 17(5): 614-623.
- [40] 苏永红, 冯起, 朱高峰, 司建华, 常宗强. 土壤呼吸与测定方法研究进展. 中国沙漠, 2008, 1: 57-65.
- [41] 杨鸥, 刘苍宇. 长江口北支沉积物粒径趋势及泥沙来源研究. 水利学报, 2002, 2: 79-84.
- [43] 葛振鸣, 王天厚, 王开运, 王小明. 长江口滨海湿地生态系统特征及关键群落的保育. 北京: 科学出版社, 2008.
- [44] 沈志良, 刘群, 张淑美, 苗辉, 张平. 长江和长江口高含量无机氮的主要控制因素. 海洋与湖沼, 2001, 32(5): 465-473.
- [45] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [46] 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏. 基于涡度相关技术估算植被/大气间净 CO_2 交换量中的不确定性. 地球科学进展, 2004, 19(4): 658-663.
- [51] 杨金艳, 杨万勤, 王开运, 孙建平. CO_2 浓度升高与温度、干旱相互作用对植物生理生态过程的影响. 植物生态学报, 2003, 27(3): 304-310.
- [54] 张远彬, 王开运, 乔云周. 研究高寒区植物生长过程对气候变化响应的封顶式生长室系统. 应用与环境生物学报, 2007, 13(5): 601-608.
- [57] 阮亚男, 陈振举, 陈玮, 何兴元, 苏道岩, 张粤. OTC-I 型开顶式气室优化设计与性能分析. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(s1): 220-222.
- [58] 毛留喜, 孙艳玲, 延晓冬. 陆地生态系统碳循环模型研究概述. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2189-2195.
- [65] 张文菊, 童成立, 吴金水, 徐明岗, 宋长春. 典型湿地生态系统碳循环模拟与预测. 环境科学, 2007, 28(9): 1905-1911.
- [66] 张文菊, 童成立, 赵世伟, 吴金水. 湿地碳循环过程与计算机模拟研究. 西北植物学报, 2003, 23(6): 1049-1055.
- [67] 吴金水, 刘守龙, 童成立. 土壤有机质周转计算机模拟原理. 土壤学报, 2003, 40(5): 768-774.
- [68] 吴金水, 童成立, 刘守龙. 亚热带和黄土地高原地耕作土壤有机碳对全球气候变化的响应. 地球科学进展, 2004, 19(1): 131-137.
- [69] 刘守龙, 童成立, 吴金水, 刘子勇, 蒋平. 稻田土壤有机碳变化的模拟: SCNC 模型检验. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1228-1233.
- [72] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 陈安平. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系. 植物生态学报, 2001, 25(4): 414-419.
- [73] 吴莹, 张经, 张再峰, 任景玲, 曹建平. 长江悬浮颗粒物中稳定碳、氮同位素的季节分布. 海洋与湖沼, 2002, 33(5): 546-552.
- [75] 宋长春. 湿地生态系统碳循环研究进展. 地理科学, 2003, 23(5): 622-628.
- [76] 谢一民. 上海湿地. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.