

# 长三角核心区碳收支平衡及其空间分异

孙 伟, 乌日汗

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**摘要:** 人类活动带来土地利用覆被变化以及能源消耗加大对区域碳排放的影响, 成为关系区域可持续发展的重要问题。本文在相关碳排放方法研究基础上, 采用物料衡算法计算人类呼吸和化石能源消耗的释碳量, 采用植被生物量法计算区域陆地生态系统的固碳量, 据此综合测度区域自身碳收支平衡能力, 并以长江三角洲核心区为例, 进一步研究了区域内部碳收支平衡能力的空间分异问题。研究表明, 1995 年以来随着人类活动强度的增加和陆地植被面积减少, 长三角核心区的碳收支不平衡性不断加剧, 依靠自身陆地生态系统已无法实现平衡, 特别是在沿沪宁线地区和中心城市尤为明显。研究结果可为制定产业转型、土地利用、节能减排等差别化区域政策提供依据。

**关 键 词:** 碳收支平衡; 空间分异; 陆地生态系统; 长三角核心区

**文章编号:** 1000-0585(2012)12-2220-09

## 1 引言

陆地生态系统作为人类生存和发展的基本载体, 在全球碳循环中扮演着“碳源”和“碳汇”的双重角色, 人类活动带来土地利用覆被变化以及能源消耗增加会在其中产生重要影响。由于各地区自然环境和社会经济条件差异, 其碳收支平衡能力也存在较大差异, 定量测度区域碳收支平衡及其内部空间分异状况, 已经成为碳排放和碳循环研究的重要科学问题<sup>[1~7]</sup>。

长江三角洲核心区包括上海市、江苏省的南京、苏州、无锡、常州、镇江、扬州、泰州、南通和浙江省的杭州、宁波、湖州、嘉兴、绍兴、舟山、台州等 16 个城市, 是我国城市化和工业化水平最高、人口最密集、土地开发强度最大以及能源消费巨大的区域。2010 年, 人口密度达到 716 人/km<sup>2</sup>, 开发强度已超过 15%。建设用地快速扩张和能源的大规模消费, 使长三角核心区成为我国人类活动碳排放的热点区, 过高的温室气体浓度不仅影响区域环境质量, 甚至可能改变局地气候<sup>[8]</sup>; 另一方面, 面对我国转变经济发展方式和节能减排的考核要求, 长三角核心区的碳减排任务十分艰巨, 迫切需要把握自身碳收支平衡能力及其内部空间差异。

目前关于碳排放的研究成果十分丰富, 包括碳足迹和碳循环的内涵、机制、评估方法、优化途径等诸多方面。从碳排放测度方法来看, 较多采用实测法、物料衡算法、模型法等。其中, 实测法通过现场燃烧设备进行有关参数的实际测量并进行碳平衡计算, 结果相对较准, 但费用过高; 物料衡算法即假定投入燃料和原料中的碳等于排放的碳; 模型法

收稿日期: 2012-06-15; 修订日期: 2012-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41130750)

作者简介: 孙伟 (1980-), 男, 辽宁彰武人, 博士, 主要从事城市发展与区域规划研究。

E-mail: wsun@niglas.ac.cn

根据客观经验确定某一碳排放过程的经验系数,进而计算出碳排放量<sup>[9~13]</sup>。除了总量估算外,还有学者应用因素分解估算方法对 13 个 IEA 国家的 9 个制造业部门的碳排放强度进行了分析,解释了 1990 年以来碳排放增长的主要原因<sup>[14]</sup>;基于投入产出方法和 LMDI 方法对中国以及台湾地区的产业碳排放及其结构分解进行了研究<sup>[15,16]</sup>。另一方面,将碳排放与碳吸收作为循环过程进行测度,基于生态类型净初级生产力(NPP)估算构建的 OBM、TEM 等碳循环评估模型等<sup>[17~19]</sup>,以及遥感驱动的碳循环动态过程的 CEVSA、BEPS 和 AVIM 模型等<sup>[20]</sup>,也有研究根据陆地生态系统结构和植物生产量的改变探讨碳循环变化过程<sup>[21~25]</sup>。

尽管生态系统调查数据有限和遥感观测数据存在不确定性,但关于陆地生态系统碳平衡定量化研究一直在不断深化,而关于区域内部碳收支平衡能力的空间差异研究则不多见。近期有研究探讨了城市尺度的碳收支问题,通过城市社会经济活动的排碳行为以及湿地、淡水、海洋、森林和农田 5 种自然生态系统的固碳功能,构建了城市碳收支平衡分析模型(UCOB)<sup>[20,26]</sup>,区域尺度局限于单一植被要素对碳收支平衡的作用研究<sup>[27]</sup>。为此,本文拟在相关研究基础上,利用长江三角洲核心区不同时相的遥感数据,探讨区域碳收支平衡变化过程及其空间分异,以期为合理利用土地资源、维护生态系统服务功能,促进区域转型和可持续发展提供科学依据。

## 2 研究方法

### 2.1 研究思路

陆地生态系统的碳收支平衡可以分为经济社会活动的释碳和自然生态系统的固碳两个过程。其中,经济社会活动引起的释碳过程主要考虑人类呼吸和化石能源消耗两个方面,自然生态系统主要考虑森林、草地和农田三种。释碳量计算主要依靠统计数据和已有文献的当量转化系数,自然生态系统的固碳量一般先根据遥感数据确定各类自然生态系统面积,再通过相关研究成果提取单位面积固碳系数进行计算。在区域碳总量平衡评估基础上,测度长三角核心区 16 个城市的碳收支状况,据此评估碳收支平衡的空间分异。与现有研究相比,本文将突出区域陆地生态系统格局变化对碳收支平衡能力的影响,并考察区域内部各城市的碳收支平衡能力,以期为制定差别化的节能减排政策提供参考。

### 2.2 数据与方法

人口和化石能源消费数据根据各城市 1996 年、1999~2009 年统计年鉴和 2009 年中国能源统计年鉴整理而得。土地利用数据主要采用 1995 年、2000 年、2007 年 TM 影像数据,分辨率为 30m,分类体系以《中国土地资源分类系统》<sup>[28]</sup>为基础结合研究需要适当修正(表 1)。

表 1 长三角土地利用数据分类体系

Tah 1 Classification system of land use data in Yangtze River Delta

一级类型	二级类型
耕地	水田、旱地
林地	有林地、灌木林地、疏林地、其他林地(未成林造林地、迹地、苗圃、园地)
草地	高覆盖度草地(覆盖度>50%)、中覆盖度草地(覆盖度 20%~50%)、低覆盖度草地(覆盖度 5%~20%)
建设用地	城镇用地、农村居民点、工矿交通用地
水域	河渠、湖泊、水库、坑塘
未利用地	滩涂、滩地、沼泽地、裸土地、裸岩石砾地、盐碱地

**2.2.1 人类活动释碳量计算方法** 从释碳角度而言,在人类活动中主要是化石能源燃烧和人类自身呼吸两个部分,其释碳量 ( $D_c$ ) 计算公式为<sup>[20]</sup>:

$$D_c = C_e + C_p \quad (1)$$

式中  $C_e$ 、 $C_p$  分别为化石燃料燃烧释碳量和人类呼吸释碳量。

化石燃烧:

化石能源燃烧释碳量 ( $C_e$ ) 包括煤、石油和天然气三部分,释碳量估计公式分别如下:

$$\text{煤燃烧释碳量} = \text{标准煤当量} \times \text{有效氧化系数} \times 0.73257 \quad (2)$$

$$\text{石油燃烧释碳量} = \text{标准煤当量} \times \text{有效氧化系数} \times 0.73257 \times 0.813 \quad (3)$$

$$\text{天然气燃烧释碳量} = \text{标准煤当量} \times \text{有效氧化系数} \times 0.73257 \times 0.561 \quad (4)$$

式中,有效氧化系数为 0.982,每吨标准煤含碳量为 0.73257 t,0.813 与 0.561 分别为在获得相同热能的情况下,石油与天然气释放  $\text{CO}_2$  是煤释放  $\text{CO}_2$  的倍数<sup>[29~31]</sup>。

人类呼吸:

研究数据表明<sup>[32,33]</sup>,1 个体重 75kg 的成人日呼出二氧化碳 0.90kg。据此计算,一个成人年呼出碳 0.0896t。则人类呼吸的释碳量估计公式如下:

$$\text{人类呼吸释碳量}(C_p) = \text{区域总人口} \times 0.0896 \quad (5)$$

**2.2.2 植被系统固碳量计算方法** 从固碳角度而言,植被系统是固碳重要的“汇”,本文应用植被生物量方法测算固碳能力,其固碳量 ( $S_c$ ) 计算公式为:

$$S_c = \alpha \sum_{i=1}^n A_i B_i \quad (6)$$

式中, $i$  为土地类型; $A_i$  为第  $i$  种土地类型面积; $B_i$  为第  $i$  种土地类型的净生产力; $\alpha$  为单位面积生物量固碳系数。各类用地净生产力和固碳系数根据相关研究推算确定<sup>[24,34,35]</sup> (表 2)。

表 2 长三角地区植被系统净生产力 (单位:  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )

Tah 2 Net production of vegetation system in Yangtze River Delta ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )

地区	林地			草地	耕地
	林分乔木层	灌木林	经济林		
上海	9.55	10.95	9.27	9.27	12.09
江苏	9.84	10.95	9.20	7.18	18.82
浙江	8.76	10.95	9.20	8.58	20.91

单位面积植被系统的碳固定量即净生产力乘以其含碳量,植物含碳量通常按 0.45 计算 (表 3)。

表 3 长三角地区单位面积植被系统固碳量 (单位:  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )

Tah 3 Carbon fixation of vegetation system in Yangtze River Delta ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )

地区	林地	草地	耕地
上海	13.39	13.50	13.01
江苏	4.17	3.23	3.86
浙江	5.44	8.47	9.41

### 3 结果分析

#### 3.1 土地利用变化

根据解译数据统计结果,长三角核心区 1995~2000 年耕地面积减少了  $8.59 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ;林地和草地也分别减少了  $1.36 \times 10^4 \text{ hm}^2$  和  $1.24 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ;建设用地中以农村居民

点面积的扩大最为显著,增加了  $4.32 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ; 河流湖泊面积减少了  $0.42 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 同时未利用地中的滩地、沼泽面积也在减少, 陆地植被系统覆盖面积不断萎缩。2000~2007 年, 耕地减少  $56.51 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 减少面积是前 5 年的 6.5 倍; 林地和草地分别减少了  $2.47 \times 10^4 \text{ hm}^2$  和  $4.57 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ; 河流湖泊面积也在不断减少, 建设用地面积大幅增加, 增量是 1995~2000 年的 7.5 倍。总体上, 长三角核心区土地利用变化特征是建设用地快速扩张, 耕地数量锐减, 同时具有重要生态服务价值的生态用地被蚕食或消失, 陆地生态系统结构发生巨大变化。这一趋势在沪宁、沪杭、杭甬沿线等地区表现得尤为明显 (图 1)。

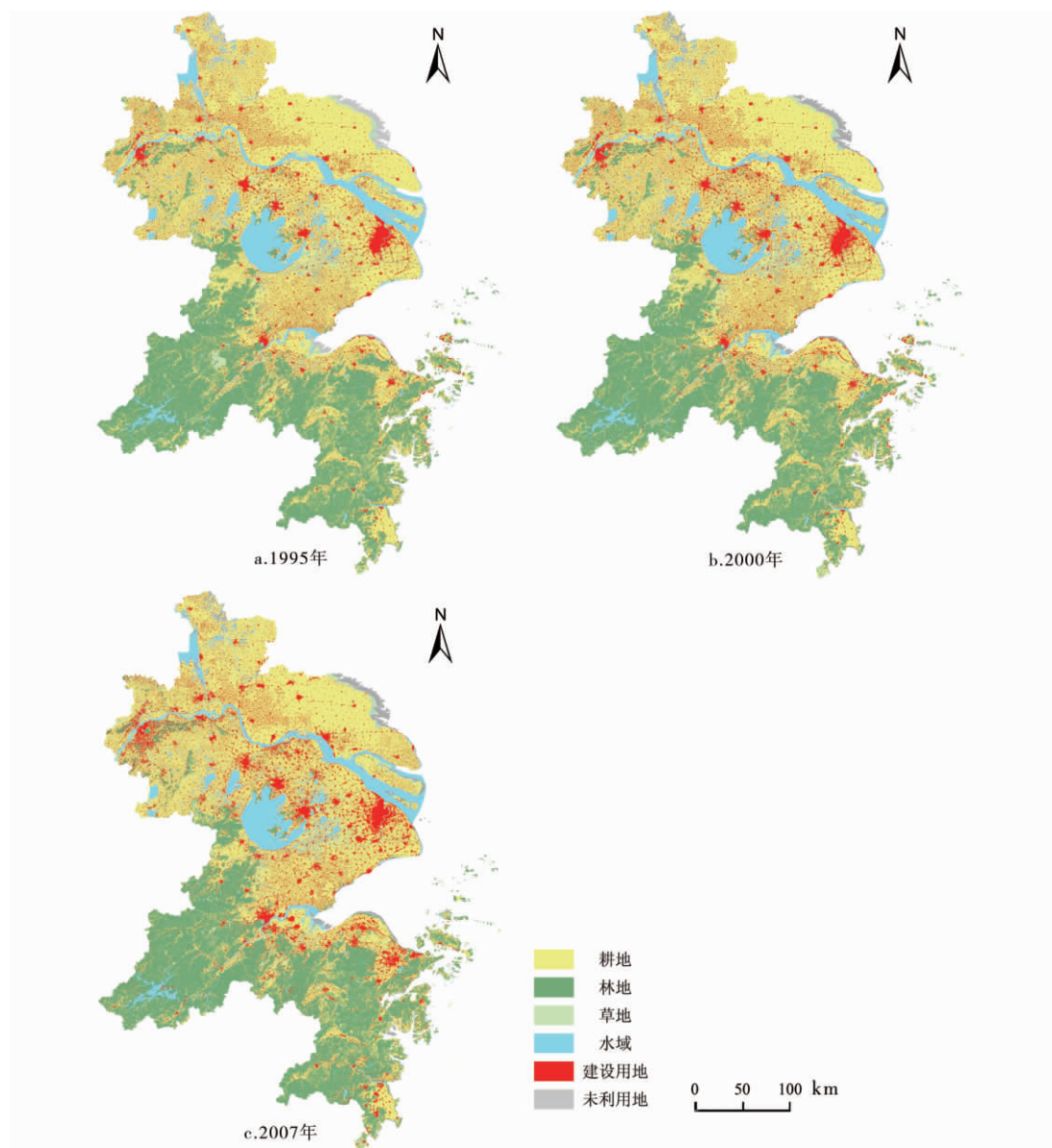


图 1 长三角地区 1995 年、2000 年、2007 年土地利用状况

Fig. 1 Land use of Yangtze River Delta in 1995, 2000 and 2007

### 3.2 人类活动释碳量

随着人口规模增大以及能源消费迅猛增长,长三角核心区人类活动的释碳量持续呈增加状态。释碳量由 1995 年的  $0.93 \times 10^8 \text{ t}$  增加至 2007 年的  $2.50 \times 10^8 \text{ t}$ 。其中煤炭燃烧释碳量最大,1995 年占释碳总量的 60.31%,2007 年占 66.21%。人类呼吸释碳量占比较小并呈下降趋势,1995 年占 7.62%,2007 年降到 3.50%。可见煤炭作为长三角地区主要能源为经济社会快速发展提供了有力支撑,但过高的能源消费量也是长三角核心地区碳排放规模急剧扩大的根源所在(表 4)。

### 3.3 植被系统固碳量

耕地与生态用地的减少导致区域固碳能力大幅减弱。根据土地利用数据与各类土地的固碳能力可知,1995 年植被系统固碳量为  $0.91 \times 10^8 \text{ t}$ ,2007 年减少至  $0.85 \times 10^8 \text{ t}$ ,区域依靠自身实现碳收支平衡的能力不断下降(表 5)。

表 5 长三角地区植被系统固碳量估计

Tah 5 Carbon fixation evaluation of vegetation system in Yangtze River Delta

地类	土地面积/ $10^4 \text{ hm}^2$			固碳量/ $10^4 \text{ t}$		
	1995	2000	2007	1995	2000	2007
耕地	575.17	566.58	510.07	4903.97	4836.56	4351.55
林地	316.45	315.09	312.61	4127.64	4109.80	4076.38
草地	15.68	14.44	9.87	58.21	53.25	36.74
总计	—	—	—	9089.81	8999.62	8464.67

### 3.4 碳收支平衡分析

根据固碳量和释碳量计算结果,1995 年长三角地区碳排放基本能够依靠自身平衡,到 2007 年依靠自身陆地生态系统碳收支平衡难以实现,而且碳收支不平衡的态势一直处于扩大趋势(表 6)。

表 4 长三角地区人类活动释碳量估计(单位:  $10^4 \text{ t}$ )

Tah 4 Carbon emissions caused by human activities in Yangtze River Delta ( $10^4 \text{ t}$ )

项目	释碳量		
	1995	2000	2007
煤炭燃烧	5605.98	7843.60	16529.30
石油燃烧	2980.66	4166.94	7187.02
天然气燃烧	0.92	14.10	374.48
人类呼吸	707.92	780.45	873.52
总计	9295.49	12805.09	24964.32

表 6 长三角地区碳收支平衡情况(单位:  $10^4 \text{ t}$ )

Tah 6 Carbon budget balance of Yangtze River Delta ( $10^4 \text{ t}$ )

年份	固碳量	释碳量	平衡系数
			(释碳量/固碳量)
1995	9089.81	9295.49	1.02
2000	8999.62	12805.09	1.42
2007	8464.67	24964.32	2.95

## 4 碳收支平衡的空间分异

由于长三角核心区各市产业结构、土地利用格局、能源消费结构、经济水平、技术条件、人口规模的不同,碳收支平衡存在明显的空间差异。

### 4.1 释碳量空间分析

通过比较各市释碳量可以看出,上海市释碳量最大,其后是宁波、南京、苏州、无锡等市,5 市的释碳量合计占长三角总释碳量的 70% 左右,其他 11 个市的释碳量合计约占 30%。1995~2007 年期间,各市的释碳量均在上升,并且各市之间的差距表现为扩大的趋势。增幅最大的宁波市,释碳量增长 2611.08 万 t;最小的舟山释碳量增长 38.27 万 t。

各市释碳的来源构成也有所差别。除了南京和宁波外,各城市释碳均以燃煤为主,燃

煤释碳量占总释碳量的 50% 以上, 南京和宁波以燃油为主, 占比也达到 50% 以上, 主要由于石化产业是南京和宁波的主导产业, 能源消费量占全市规模以上工业企业能源消费总量的比重分别达到 67.06% 和 55.36%。从各市释碳量构成变化来看, 1995~2007 年间, 绝大部分城市燃煤和天然气释碳比重明显上升, 燃油和人口呼吸释碳的比重下降。不同的是, 上海市燃煤释碳的比重在下降, 而燃油释碳比重上升, 这与上海优化能源消费结构、调整产业结构具有较大关系 (图 2)。

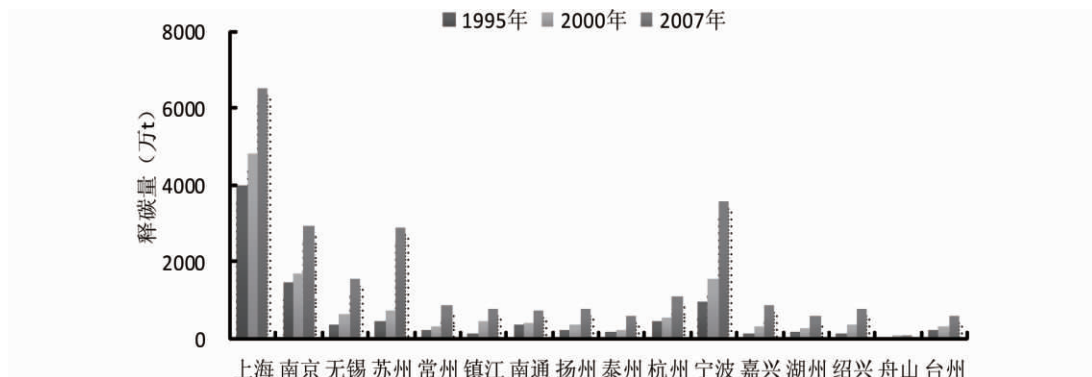


图 2 各城市 1995 年、2000 年和 2007 年释碳量

Fig 2 Carbon emissions of various cities in 1995, 2000 and 2007

#### 4.2 固碳量空间分析

各市固碳量比较来看, 杭州、台州、宁波、绍兴、湖州等市林地面积较大, 因此这些城市固碳量相对较高。1995~2007 年期间, 各市固碳量均呈下降趋势, 这与各市林地、草地和耕地不断被建设占用有直接关系。宁波、苏州、南京、上海等中心城市的固碳量下降尤为显著, 固碳量分别减少 100.99 万 t、91.73 万 t、64.43 万 t、46.72 万 t (图 3)。

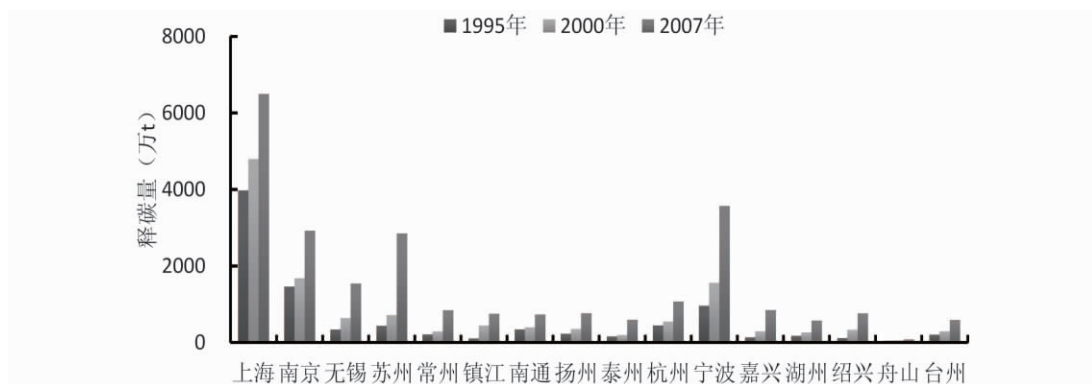


图 3 各城市 1995 年、2000 年和 2007 年固碳量

Fig 3 Carbon fixation of various cities in 1995, 2000 and 2007

#### 4.3 碳收支平衡空间分析

从各市碳收支平衡变化来看, 碳排放量大于固定量的城市数量在不断增加。1995 年仅有上海、南京、宁波、无锡、苏州等 5 个市, 其他城市能够依靠自身陆地生态系统实现

碳平衡且有盈余,2000 年镇江的释碳量超过固碳量,且各市的收支缺口呈持续上升趋势。到 2007 年除杭州、台州、绍兴、舟山等 4 个市,其他城市均无法依靠自身陆地生态系统实现碳收支平衡。

由上述分析可知,1995 以来长三角各市陆地生态系统的碳收支平衡能力日益下降,基本上都处于无法依靠自身陆地生态系统实现碳收支平衡的状态,究其原因主要是能源消费大幅增加、人口急剧增长,加之建设用地开发对林地、草地和耕地的过快占用。从空间分布看,沪宁沿线地区以及除杭州外的各中心城市是碳收支平衡能力较差的区域,江苏苏中地区和杭州、舟山、台州等地区相对较好(图 4)。

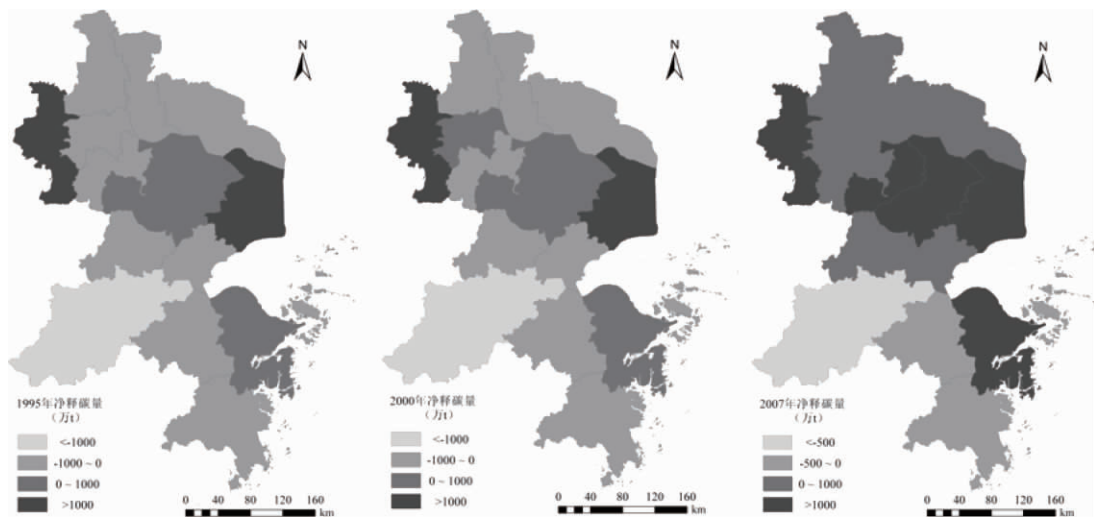


图 4 各城市 1995 年、2000 年和 2007 年碳收支平衡空间分异

Fig. 4 Spatial differentiation of carbon budget balance in various cities in 1995, 2000 and 2007

## 5 结论与讨论

本文得出以下结论:

(1) 人类活动是碳排放量增加的重要来源之一,一方面表现为人类自身呼吸和能源消耗的碳排放,另一方面表现为人类活动改变陆地生态系统表层结构,即土地利用覆被变化。综合运用物料衡算法和植被生物量法能够较好测度区域陆地生态系统的碳收支平衡水平,为更大范围的相关研究提供方法参考。

(2) 从长三角核心区 1995 年以来的释碳和固碳总量规模看,释碳量要明显大于固碳量,需要依靠外部更大的生态系统予以平衡。主要原因在于人口和化石能源消费量的增加,释碳量也在不断增加,而固碳能力却随着林地、草地和耕地面积的减少在不断下降,加剧了碳收支不平衡的状况。

(3) 从长三角核心区内部空间分异看,各中心城市以及沪宁沿线大部分区域的碳收支不平衡程度较高,杭州、台州、舟山以及苏中各城市相对较低。若要控制碳收支不平衡继续扩大的趋势,必须转变增长方式。首先是转变能源消费模式,逐步淘汰高消耗、高排放的一般加工制造业,通过技术创新、新能源开发等多种手段,尽可能减少煤、石油等高碳能源依赖和温室气体排放;其次,依靠产业向高端化升级,提高外来人口进入门槛,控制人口规模过快增长;第三是转变土地利用方式,需要不断提高土地节约集约利用水平,

按照主体功能区要求合理开发利用土地资源, 确保各类碳汇区用地不被占用, 并且通过技术创新, 提高土地的生物生产能力, 从而提高陆地生态系统固碳能力。

陆地生态系统的碳收支平衡研究存在明显的尺度性, 本文是基于长三角核心区封闭区域的假设, 没有考虑与外部更大空间范围陆地生态系统的碳循环关系。同时, 采用的是静态面板数据而非实际观测数据, 忽略了植被特别是森林年龄变化对其固碳能力的动态影响, 可能低估了总体的固碳水平。由于数据资料的限制, 研究未考虑陆地生态系统中土壤固碳的部分, 因此所得固碳量也比实际值要小, 这些都需要在未来研究中进一步拓展和深化。

### 参考文献:

- [1] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. 2007. 1~12.
- [2] 陈泮勤, 王效科, 王礼茂, 等. 中国陆地生态系统碳收支与增汇对策. 北京: 科学出版社, 2008. 1~12.
- [3] 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. 35~55.
- [4] 黄耀, 周广胜, 吴金水, 等. 中国陆地生态系统碳收支模型. 北京: 科学出版社, 2008. 1~5.
- [5] IPCC. Landuse, landuse change and forestry. In: Watson R T, Noble I R, Bolin B, *et al.* A Special Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [6] McGuire A D, Sitch S, Clein J S, *et al.* Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analyses of CO<sub>2</sub>, climate and land use effects with four process based ecosystem models. *Globe Biogeochem Cycle*, 2001, 15(1): 183~206.
- [7] 葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 等. 过去 300 年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究. *中国科学: D 辑*, 2008, 38(2): 197~210.
- [8] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, *et al.* IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan, 2006.
- [9] 张德英, 张丽霞. 碳源排碳量估算办法研究进展. *内蒙古林业科技*, 2005, (1): 20~23.
- [10] IPCC, OECD, IEA. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC, Bracknell, 1996. 21.
- [11] 齐中英. 描述 CO<sub>2</sub> 排放量的数学模型与影响因素的分解分析. *技术经济*, 1998, (3): 42~45.
- [12] 赵荣钦, 黄贤金. 基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹. *地理研究*, 2010, 29(9): 1639~1649.
- [13] 吴殿廷, 吴昊, 姜晔. 碳排放强度及其变化——基于截面数据定量分析的初步推断. *地理研究*, 2011, 30(4): 579~589.
- [14] Schipper L, Murtishaw S, Khrushch M, *et al.* Carbon emissions from manufacturing energy use in 13 IEA countries: Long term trends through 1995. *Energy Policy*, 2001, 29: 667~688.
- [15] Chang Y F, Lin S J. Structural decomposition of industrial CO<sub>2</sub> emission in Taiwan: An input — output approach. *Energy Policy*, 1998, 26(1): 5~12.
- [16] 刘红光, 刘卫东. 中国工业燃烧能源导致碳排放的因素分解. *地理科学进展*, 2009, 28(2): 285~292.
- [17] Leith H, Whirtaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. New York: Springer—Verlag, 1975. 237~263.
- [18] Esser G. Sensitivity of global carbon pools and fluxes to human and potential climatic impacts. *Tellus*, 1987, 39: 245~260.
- [19] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, *et al.* Potential net primary productivity in South America: Application of a global model. *Ecological Applications*, 1991, 1: 399~429.
- [20] 马巾英, 尹锴, 吝涛. 城市复合生态系统碳氧平衡分析——以沿海城市厦门为例. *环境科学学报*, 2011, 3(8): 1808~1816.
- [21] Eswaran H, Vandenberg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Journal of Soil Science Society of America*, 1993, 57: 192~194.
- [22] 钟华平, 樊江文, 于贵瑞, 等. 草地生态系统碳循环研究进展. *草地学报*, 2005, 13(13): 67~73.
- [23] 杨玉盛, 谢锦华, 盛浩, 等. 中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响. *地理学报*, 2007, 62(11): 1123~1131.



- [24] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16(5): 497~508.
- [25] 常瑞英, 刘国华, 傅伯杰. 区域尺度土壤固碳量估算方法评述. 地理研究, 2010, 29(9): 1616~1628.
- [26] Yin K, Zhao Q, Li X, *et al.* A new carbon and oxygen balance model based on ecological service of urban vegetation. Chinese Geographical Science, 2010, 20(2): 144~151.
- [27] 彭江颖. 珠江三角洲植被对区域碳氧平衡的作用. 中山大学学报: 自然科学版, 2003, 42(5): 105~108.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 土地利用现状分类(GB/T 21010—2007). 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [29] ORNL (Oak Ridge National Laboratory). Estimates of CO<sub>2</sub> emission from fossil fuel burning and cement manufacturing. ORNL/CDIAC—25. Carbon Dioxide Information Analysis Centre, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, 1990.
- [30] 王庚辰, 温玉璞. 温室气候浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [31] 赵敏, 张卫国, 俞立中. 上海市能源消费碳排放分析. 环境科学研究, 2009, 22(8): 984~989.
- [32] 张颖, 王群, 李边疆, 等. 应用碳氧平衡法测算生态用地需求量实证研究. 中国土地科学, 2007, 21(6): 23~28.
- [33] 钱杰. 大都市碳源碳汇研究——以上海市为例. 上海: 华东师范大学博士学位论文, 2004.
- [34] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491~498.
- [35] 鲁春霞, 谢高地, 肖玉, 等. 我国农田生态系统碳蓄积及其变化特征研究. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 35~37.

## Study on the balance of carbon budget and its spatial differentiation in Yangtze River Delta

SUN Wei, Wurihan

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The land use/cover change and energy consumption caused by human activities not only have affected the carbon emission process, but also is a hot topic in the regional sustainable development. Based on the research of carbon emission evaluation methods, this paper applied the two methods—one was material balance algorithm which was aimed to calculate carbon emissions caused by human respiratory and fossil energy consumption, and the other was vegetation biomass method to calculate carbon fixation of the regional terrestrial ecosystem—to comprehensively estimate regional carbon balance. Upon the above analysis, the paper studied the balance of carbon budget in the Yangtze River Delta and the spatial differentiation of the balance ability in this region. Since 1995, the carbon budget of core areas in the Yangtze River Delta has become increasingly unbalanced with the increase of human intervention and decline of land vegetation. Those processes emerged in the region along the Shanghai—Nanjing line and other core cities, indicating that the terrestrial ecosystem cannot keep a balance by depending on itself. Moreover, policy suggestions to improve the balance of carbon budget were provided from the perspective of industrial transformation, land use patterns, spatial governance, etc.

**Key words:** carbon budget balance; spatial differentiation; terrestrial ecological ecosystem; Yangtze River Delta