

# 区域二元碳收支的理论方法研究进展

赵荣钦<sup>1</sup>, 刘 英<sup>2</sup>, 丁明磊<sup>1</sup>, 张战平<sup>1</sup>, 黄贤金<sup>3</sup>, 秦耀辰<sup>4</sup>

(1. 华北水利水电大学资源与环境学院, 郑州 450045; 2. 郑州航空工业管理学院土木建筑工程学院, 郑州 450046;  
3. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093; 4. 河南大学环境与规划学院, 河南 开封 475001)

**摘 要:**在全球变化和低碳发展的背景下,区域“自然—社会”二元碳收支成为地理学、环境科学、生态学、经济学及管理学等多学科交叉的研究热点。区域二元碳收支不仅为气候变化背景下“自然—社会”耦合的碳循环压力评估提供了理论基础,而且对推动区域低碳发展和协同减排也具有重要的实践价值。本文从区域系统的角度,提出了区域“自然—社会”二元碳收支的内涵、特征和理论框架;探讨了区域人类活动对二元碳收支的影响机制,阐述了区域不同空间尺度碳收支之间的内在关系;从碳排放、碳吸收、碳流通及碳平衡等角度对当前区域碳收支研究的主要方法特点和应用领域进行了总结和对比;从全球、国家、省级、城市、城区、县域及社区、典型产业及人类活动等不同尺度对近年来区域二元碳收支的国内外研究进行了总结和评述;最后提出了区域碳收支综合研究的重点方向:区域二元碳收支的集成模拟研究,区域碳收支的空间分异规律研究,基于区域碳收支核算的区域横向碳补偿研究,区域碳收支与区域资源环境效应的关系和区域碳收支的综合调控研究。

**关键词:**碳吸收;碳排放;碳收支;区域;研究进展

## 1 引言

在全球变化和低碳发展的背景下,区域碳循环和碳收支成为地理学、环境科学、生态学及经济学等多学科交叉的研究热点。近年来,区域碳收支研究的重要特征之一是突破了以往单一关注自然生态系统的局限,而将研究视角扩大到区域社会经济活动领域,逐渐开展了区域“自然—社会”二元碳收支的研究。例如:结合人类能源活动(Liu et al, 2015)、土地利用(Houghton et al, 2012)、产业发展(Zhao et al, 2011)及城市化过程(Zhang C, Tian H Q, Chen G S et al, 2012)而开展的区域碳收支(Marchi et al, 2012)、碳平衡(Houghton, 2007)及碳流通(Chen et al, 2012; Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y et al, 2014)等的研究逐渐增多。通过二元碳收支研究,不仅从整体上了解区域人类活动的碳排放强

度、格局和过程,而且可以揭示区域碳吸收状况和生态系统的承载能力,因此,区域二元碳收支为气候变化背景下“自然—社会”耦合的碳循环压力评估提供了新的理论视角。其实质是通过碳源/汇的对比分析,了解区域碳平衡状况及碳循环的效率和压力,为区域低碳、公平和协调发展提供决策依据。但总体而言,当前国内外对于区域“自然—社会”二元碳收支理论框架和方法的研究还较为欠缺,因此,亟需建立不同尺度的区域碳收支核算的理论框架及方法体系,为区域温室气体核算和低碳发展策略的制定提供有力的数据支撑和基础信息库。

从区域低碳发展和协同减排的角度而言,一方面,区域二元碳收支研究切合了当前应对气候变化的科学要求,为不同区域开发强度的定量评估提供了重要手段,这对建立在差别化评价基础上的区域公平发展策略的制定具有重要的实践指导;另一方

收稿日期:2015-12;修订日期:2016-04。

基金项目:国家自然科学基金项目(41301633);河南省教育厅人文社会科学研究项目(2015-GH-088) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41301633; Humanity and Social Science Project of the Education Department of Henan Province, No.2015-GH-088]。

作者简介:赵荣钦(1978-),男,河南孟津人,博士,副教授,主要从事土地利用与碳循环研究,E-mail: zhaorq234@163.com。

引用格式:赵荣钦,刘英,丁明磊,等. 2016. 区域二元碳收支的理论方法研究进展[J]. 地理科学进展, 35(5): 554-568. [Zhao R Q, Liu Y, Ding M L, et al. 2016. Theory, methods, and research progresses of regional carbon budget[J]. Progress in Geography, 35(5): 554-568.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.05.003

面,国际或地区贸易中存在着“碳泄露”问题,以往的碳排放大多是基于“生产者”角度进行核算(余群芝等, 2014),而基于“生产者”和“消费者”共同责任的碳排放核算,更有利于划分区域之间的碳排放责任。区域二元碳收支研究通过对“自然”和“社会”不同途径的碳收支核算,为碳排放责任的划分和“碳泄露”的识别提供了重要依据。近年来,中国区域发展不均衡的现象日益突出,区域二元碳收支核算有助于揭示不同区域的碳平衡状况,划分“碳泄露”的地区责任,为区域横向碳交易提供重要的数据支撑,这也成为未来建立全国统一的碳交易市场的重要依据,有助于推动区域协调发展。因此,区域碳收支不仅是制定应对气候变化的碳减排策略的基础,也是地方政府开展应对气候变化的减缓和适应能力建设的重要依托。

总体而言,区域二元碳收支不仅具有学科集成的优势和理论价值,而且被赋予了特殊的政治内涵。开展区域二元碳收支研究不仅有助于推动区域碳循环理论体系的进一步完善,而且对于区域温室气体清单核算、碳管理策略的制定、碳排放责任的划分、区域低碳公平发展及协同减排也具有重要的实践价值。区域二元碳收支研究也将成为跨越自然和社会学科的区域发展评估的重要工具之一。

## 2 区域“自然—社会”二元碳收支的特征、理论框架和空间尺度分析

### 2.1 内涵和特征

区域“自然—社会”二元碳收支(以下简称“二元碳收支”)是指特定时段内(一般为一年)一定区域范围的所有自然和人为活动所导致的碳收入(碳吸收或输入)和支出(碳排放或输出)的对比关系和平衡状况。其主要特征为:

- (1) 区域二元碳收支包括不同的方式和过程。既包括自然过程的碳吸收和排放,也包括人为过程的碳输入和输出,既有垂直过程也有水平过程;
- (2) 区域碳收支的强度和规模受制于人类经济社会活动方式。不同的人类活动方式下的自然过程和人为活动的碳收支强度具有较大差异(表1);
- (3) 区域碳收支具有较大的空间异质性。区域收支的强度、范围和速率取决于区域社会发展模式和水平、区域城镇体系、土地利用强度、产业类型、经济结构、能源结构以及能源使用效率等社会

表1 主要人类活动方式碳收支强度的对比  
Tab.1 Carbon budget of main anthropogenic activities

人类活动方式		碳收入强度		碳支出强度	
		自然过程	人为活动	自然过程	人为活动
产业活动	第一产业	强	弱	弱	中
	第二产业	无	无	无	强
	第三产业	无	无	无	中
土地利用	人类耕作活动	强	弱	弱	中
	土地开发、占用与建设	无	无	中	强
	土地修复和整治	强	中	弱	弱
	生态保护与植树造林	强	强	弱	无
生产过程	资源能源开采	无	无	中	强
	能源利用与消费	无	无	无	强
	废弃物排放	无	无	无	强

因素;

(4) 区域碳收支不同环节的生命周期不同。比如,能源、食物、木材等含碳物质输入到系统之后的消费周期不同,其再次形成CO<sub>2</sub>被释放的时间尺度也不同。因此在区域碳管减排策略的制定中,对不同途径的碳收支应采用不同的策略并各有侧重;

(5) 区域系统的结构、功能和格局对区域碳收支具有重要影响。区域是一个高度开放的系统,与外界有着巨大的碳交换,其碳循环过程涉及到区域之外的广大空间。一般而言,经济越发达的区域,其碳收支的影响“腹地”就越大,其影响的空间范围主要取决于区域资源需求量、能源消费量、碳代谢通量和交通运输方式等。

### 2.2 理论框架

碳是连接自然和人类社会的关键元素之一,碳元素及其化合物与生物生命活动、人类生产活动密切相关。区域二元碳收支研究不仅要分别了解自然和社会过程中碳收支状况,更要分析自然和社会系统之间的碳流通过程及机制。随着人类活动强度的不断增强,区域人类活动对自然碳收支过程的影响也不断加深。人类活动对区域碳收支的影响,一方面表现在改变了区域内外的碳流通的方式、方向和规模,使原本自然过程的碳及其化合物以各种形式参与到人类社会经济活动中;另一方面,通过人类消耗(特别是化石能源消费)造成了大量的碳转移、碳排放和碳废弃,对自然碳循环过程造成了严重的干扰(图1)(赵荣钦, 黄贤金, 2013)。因此,探索人类活动对碳收支的影响,并评估其对自然碳循环过程的压力成为区域二元碳收支研究的核心。

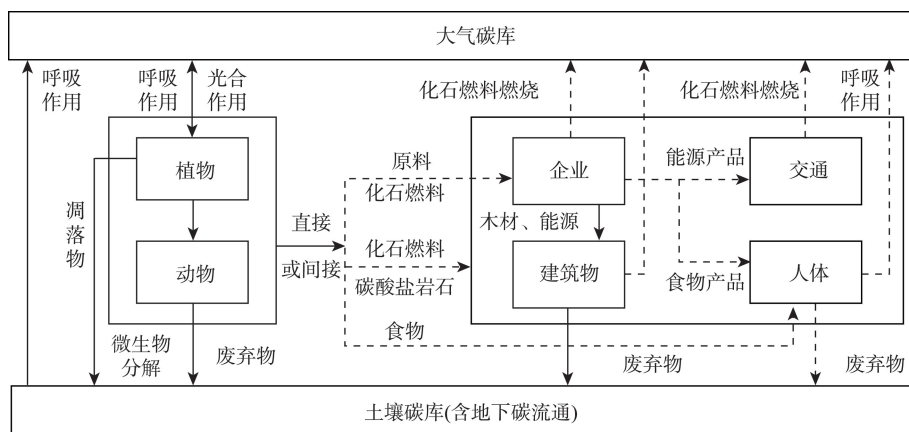


图1 区域二元碳收支的理论框架(赵荣钦, 黄贤金, 2013)

Fig.1 Regional natural-social system carbon budget (Zhao R Q, Huang X J, 2013)

总体而言,区域碳收支可分为3个不同的环节:即垂直碳收支、水平碳收支和内部碳流通(赵荣钦等, 2014)。其中,垂直碳收支是指区域生态系统光合作用的碳吸收和区域各种途径的自然和人为碳释放;水平碳收支是指区域与外界之间各种能源、含碳产品、原料和废弃物等的输入和输出;内部碳流通是指区域内部子系统之间的碳元素以各种能源、产品、食物、原料及废弃物等形式的流通(图1)。而水平碳收支和垂直碳收支的主要区别在于:一方面碳流通方向的不同;另一方面碳流通的形式和载体也有所差别,水平碳收支主要以碳水化合物形式进行流通,而垂直碳收支主要以 $\text{CO}_2$ 的形式进行流通(图2)。

### 2.3 区域人类活动对二元碳收支的影响机制

人类活动的不同方式和强度在很大程度上决定了区域碳收支的格局和强度。就区域系统而言,人类活动主要包括产业活动、土地利用、资源开发与利用及废弃物排放等过程,这几种人类活动方式对碳收支的影响差异较大(图3):①产业活动是重要的碳排放源。一方面从区域内外获得大量的原材料、能源和资源用于生产过程的消耗,另一方面也将大量的产品和电力输送到人类生活系统中,同时产生了大量的碳排放;②土地利用通过直接或间接作用对区域碳收支造成影响。一方面通过人类的耕作、采伐、土地平整等活动影响自然生态系统的碳收支,另一方面也通过土地建设和占用带来额外的人类活动的能源消耗和碳排放。与此同时,也将土地产品输送到区域内外供消费使用;③资源开发与利用过程将自然界的能源、水资源和各种矿产资料以原材料和生物必需品的形式输送到区域产业

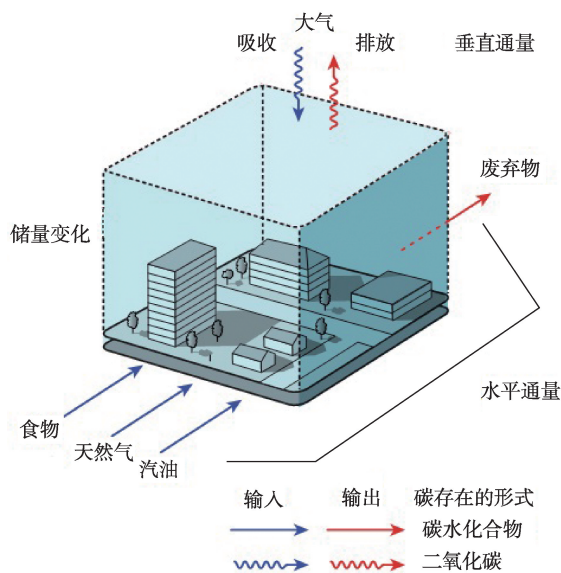


图2 区域碳收支过程概念框架(Christen et al, 2010)

Fig.2 Conceptual model of regional carbon budget (Christen et al, 2010)

系统和人类生活系统中,同时带来了大量的废弃物排放;④废弃物排放系统可以看作是区域内部容纳各种废弃碳原料、食物废弃物等的场所。通过生产活动、资源开发与人类生活消费把大量废弃物输出到系统自然界中(部分输出到系统之外),同时一部分作为生物肥料和发电原料的形式重新进入区域碳循环中。因此,应该从人类活动入手分析区域碳收支的影响机制,并甄别区域碳收支过程的关键环节,以采取恰当的区域碳管理策略,这也是区域碳收支研究的关键内容之一。

### 2.4 区域二元碳收支的空间尺度及其相互关系

从不同尺度开展区域二元碳收支研究的侧重



点和研究视角应有所不同。碳收支可从微观到宏观的不同角度开展(图4):①微观层面的碳收支主要以某种“产品生产过程”和“人类活动方式”为研究对象。对产品的碳收支研究重点探索产品生产全生命周期过程中的碳足迹,从而在产品微观角度评估生产过程对环境的影响程度;对某种人类活动的碳收支进行研究的目的是揭示各种人类活动(如产业活动、土地利用、资源开发等)的碳排放效应,分析人类活动对自然生态系统碳收支的影响,并根据碳平衡结果综合评估人类某种活动的环境影响。②中观层面主要是针对县域、城市或省级层面的研究。重在通过不同尺度碳收支核算,探索碳收

支格局和过程,以寻求区域碳管理对策和低碳发展模式。主要包括:a)区域碳收支清单核算。即建立区域层面的碳吸收/排放清单;b)区域碳补偿机制研究。即从空间角度探讨区域横向碳补偿的策略;c)区域碳收支格局分析。即区域碳收支强度分析与碳平衡分区研究;d)区域碳足迹研究。即区域碳吸收对碳排放的补偿效果;e)区域低碳发展模式。③宏观层面主要是开展国家和全球层面的碳收支与碳平衡研究。基于国际碳减排的国际谈判的政治和科技需求,通过开展国别碳收支研究,以寻求应对气候变化的国家发展战略,并寻求减排、减缓和适应对策。

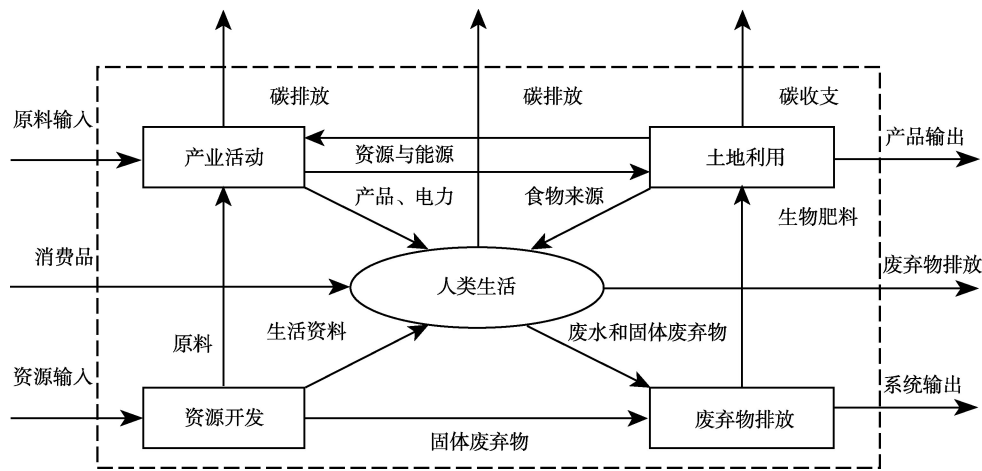


图3 不同人类活动方式对区域碳收支的影响机制

Fig.3 Influencing mechanism of anthropogenic activities on regional carbon budget

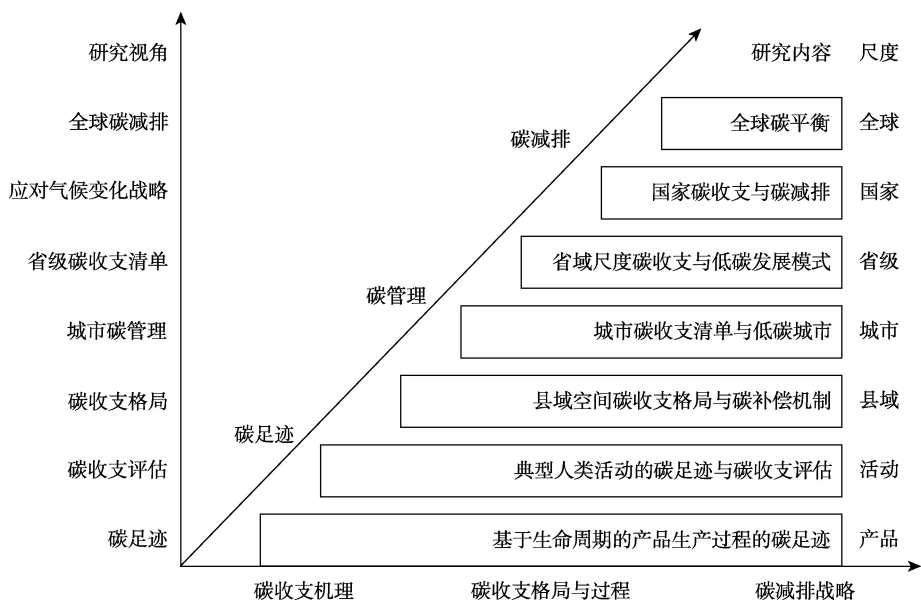


图4 不同尺度区域碳收支研究的内在关系

Fig.4 Relationship between regional carbon budget studies at different spatial scales

以上3个层次的研究从微观到宏观依次侧重于“碳收支机理”“碳收支格局与过程”“碳减排策略”等不同的方面。最终目标为能建立跨越不同空间尺度的碳收支核算模型,并通过碳收支机理和过程的研究,寻求在区域层面可操作性的碳管理模式和碳减排策略。

### 3 区域二元碳收支的研究方法体系

区域二元碳收支涉及碳排放、碳吸收、碳流通及碳平衡分析等方面,本文对主要方法进行总结和归纳,并对其应用范围和特点进行对比分析(表2)。

#### 3.1 区域碳排放核算方法

国内外区域碳排放核算方法主要有实测法、温室气体清单法、碳排放监测方法、物料衡算法和生

命周期分析等。这几种碳排放核算方法具有各自的适用领域和特点。实测法主要用于企业碳排放监测和能源活动碳排放的核算;排放监测法主要用于对自然生态系统碳排放的监测和核算;物料衡算法主要用于工业生产过程;生命周期分析主要适用于对企业产品生产、人类某项活动(如建设活动或土地利用)的碳排放的核算;温室气体清单法适用面较广,可应用于社会生产各部门。目前,碳排放核算多采用温室气体清单和生命周期分析方法,前者主要应用于宏观、中观尺度(如国家、省或地市),后者主要应用于微观层面(如产品或某项活动)。

#### 3.2 区域碳吸收核算方法

区域碳吸收核算方法主要有清查法、产量估算法、模型模拟法和遥感估测方法等。清查法主要用于植被碳储量的计算;产量估算法主要用于农作物

表2 区域碳收支研究方法对比  
Tab.2 Methods for regional carbon budget study

类别	方法	适用范围	特点	文献
碳排放 研究方法	温室气体清单法	社会生产的各部门	计算简便、实用	IPCC, 2006
	实测法	企业排放、能源活动	精确、测量要求高	郝千婷等, 2011
	排放监测法	自然生态系统、土壤系统或水体	原位观测、精确,成本较高(如涡度相关法和箱法)	Baldocchi, 2003; Frank et al, 2002
	物料衡算法	工业生产过程	需有完备基础数据记录、结果可靠	秦耀辰, 2013
	生命周期分析法	产品生产、企业活动等微观层面	计算详尽、完整,关注生产链能源消耗的碳排放(包括直接和间接排放)	郝千婷等, 2011
碳吸收 研究方法	样地清查法	陆地自然植被碳蓄积	核心是研究植被、枯落物或土壤等的碳储量,适用于小尺度的研究	方精云等, 2007
	产量估算法	农田生态系统碳蓄积	利用作物产量的统计数据和碳吸收率进行估算,方法简便,较为准确	方精云等, 2007
	模型模拟法	植被的碳蓄积和净生产力	微观和宏观相结合的研究	朱文泉等, 2007
	遥感估测方法	森林和草地的碳蓄积	大尺度但具有一定的误差	张璐等, 2015
碳流通 研究方法	投入产出分析	国民经济不同部门的碳流通与转移	投入产出表的空间尺度局限于国家和省域尺度,无法应用到小尺度空间范围	Zhang M Y, Huang X J, 2012; 唐志鹏等, 2014
	隐含碳分析	区域、城乡或产业之间的隐含碳流通	主要用于区域贸易、产品生产、商品服务等隐含碳排放研究,不适用直接碳排放研究	石敏俊等, 2012; Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y et al, 2014
	生态系统分室模型	区域(自然或社会)子系统之间的碳流通	将区域系统模块化,但容易忽略部分碳流的核算	戈峰, 2007
	系统动力学	经济社会系统内部的碳流通	常用于对能源经济系统碳排放的动态模拟仿真,系统复杂,不确定	揣小伟, 2013
碳平衡 分析方法	物质代谢分析	区域社会经济系统与外界的碳流通和交换	从物质流平衡的角度从固态物质层面分析区域的碳流通	黄贤金等, 2009
	碳平衡指标方法	区域碳平衡状况的单一要素评价	计算简便、直观,易于区域之间的对比分析	叶笃正等, 1992; 赵荣钦, 2012
	碳氧平衡分析法	区域整体碳平衡状况评价	从气体循环的角度开展,没有考虑系统内含碳固态物质的输入、输出、转化、废弃等环节	马巾英等, 2011

碳吸收的核算;模型模拟法多用于对植被和土壤碳储量的模拟;遥感估测方法则主要用于对大面积植被(特别是草地)的碳储量的估算。需要说明的是,目前对城市植被的研究较少,国内部分学者借鉴清查法(王祖华等, 2011)和生物量法(管东生等, 1998)对城市绿化植被的碳储量进行了研究,其他不少学者则仅仅是采用相关研究结果的参数进行城市植被碳储量的估算。由于城市植被又分为城市树木和草地,其生物量及固碳能力具有较大差异,因此,对城市植被的碳吸收的研究还需要进一步加强。

### 3.3 区域碳流通研究方法

区域碳流通研究方法主要有投入产出分析、隐含碳分析、生态系统分室模型、系统动力学和物质代谢分析等。其中,投入产出分析主要适用于宏观尺度(国家或省级层面)贸易或不同产业部门的碳转移;隐含碳分析主要用于对区域贸易、产品生产及商品服务等隐含碳排放的研究;生态系统分室模型是借鉴生态学的理论,基于社会生产不同部门开展碳流通研究,重点是突出碳代谢与周转效率的研究;物质代谢分析主要是基于区域物质流平衡的角度来开展含碳物质的输入和输出分析,与物料衡算法较为接近;而系统动力学则重点模拟能源经济系统内的碳排放动态。目前,区域碳流通研究主要集中在城市或省级层面,其中投入产出分析是最常用的方法。

### 3.4 区域碳平衡研究方法

区域碳平衡研究主要有两种:一是碳平衡指标法。比如采用区域碳补偿率、碳足迹(赵荣钦, 2012)、碳流通率和碳周转率(叶笃正等, 1992)等指标分析区域的碳收支平衡状况;二是区域碳氧平衡理论(马巾英等, 2011)。通过综合分析区域自然和社会经济系统的各种耗氧排碳或固碳释氧功能,分析区域系统的碳氧平衡状况和生态压力。碳氧平衡理论对分析区域碳平衡状况以及评估区域植被的生态功能均有一定的意义。

## 4 区域二元碳收支研究进展

近年来,国内外学者从不同空间尺度开展了区域二元碳收支研究,这不仅为区域碳收支理论框架的构建提供了大量案例参考,也为区域碳减排策略的制定和低碳发展模式的选择提供了数据支撑和实践指导。

### 4.1 全球尺度的二元碳收支研究

全球尺度的研究主要包括以下几个方面:①全球二元碳收支核算。如全球碳计划和二氧化碳信息分析中心(Carbon Dioxide Information Analysis Center, CDIAC)等都对全球碳收支进行较为详尽的核算(Le Quéré et al, 2013, Carbon Dioxide Information Analysis Center, 2014),其中重点考虑了化石燃料燃烧、水泥生产、土地利用变化及森林砍伐等人类活动的碳排放的核算及其对碳平衡的影响;②人类活动对全球碳收支的影响。20世纪70年代以来,人类活动与全球碳收支的关系(Broecker et al, 1979)受到国际学术界的关注。研究发现:人类工业化过程的化石燃料燃烧严重干扰了全球的碳平衡状况(Falkowski et al, 2000);另外,土地利用也被认为是影响全球碳平衡的重要因素(Houghton, 1999),土地利用/覆被变化导致的净碳排放占到1990-2010年全球人类活动碳排放的12.5%(Houghton et al, 2012);③全球碳收支变化的机制及对气候变化的影响预测。全球碳收支平衡研究的核心是了解碳源/碳汇的形成机制,并对未来大气CO<sub>2</sub>浓度及气候变化的速率进行精确预测(Houghton, 2007)。全球碳收支的变化受自然和社会经济等多因素的影响,为探索碳收支的影响机制,国内外学者开展了全球碳失汇(the missing sinks)的研究(Houghton et al, 1998),并认为最有可能存在于北半球中高纬度的陆地生态系统中(方精云等, 2001)。在碳收支对气候变化的影响方面,IPCC及一些国际组织基于全球碳收支状况及其变化特征的预测,提出了“2度”阈值的概念,在客观上有利于推动全球气候变化和碳减排国际谈判的深入,并赋予碳收支研究更多的政治和社会内涵(IPCC, 2014)。总体而言,全球尺度的二元碳收支研究重点关注地球系统碳收支平衡动态及其驱动机制,并探索其对气候变化和地球环境的影响与反馈,目的是了解全球环境变化的可能趋势,并为碳减排的国际谈判提供指导。这成为近年来全球气候变化和地球系统研究的重点领域之一。

### 4.2 国家层面的二元碳收支研究

该类研究主要包括:

(1) 国家碳排放清单核算。IPCC在1996年和2006年分别提出了国家温室气体清单指南及修订版,并于2012年研制了温室气体清单核算软件,成为世界各国开展碳收支核算的重要依据,并在国际



上得到较广泛的应用。比如国际上对美国(Houghton et al, 1999)、中国(Wang et al, 2005)、印度(Paul et al, 2004)和巴西(Machado et al, 2001)等国的碳收支开展了研究。但国内外对IPCC的核算方法也存在争议,Liu等(2015)研究认为,由于碳排放因子的差异,中国的碳排放被高估了14%。国家碳排放清单核算是开展气候变化谈判的重要依据,因此,如何在碳排放清单核算的基础上,进行碳减排的国家责任划分是当前的一个重要研究内容。

(2) 国家碳收支的影响机制研究。早期对国家碳收支影响机制的研究主要是从生态管理和土地利用的角度开展的,侧重于探讨人类活动引致的环境变化对碳收支的影响机制。研究发现,19世纪80年代,美国土地管理所带来的碳汇抵消了美国化石燃料碳排放的10%~30%(Houghton et al, 1999);在中国,森林砍伐会带来大量的碳排放(Houghton et al, 2003),而植树造林是增加碳汇的重要措施(Fang et al, 2001);Turner等(1997)以前苏联、美国 and 巴西等国家的净碳通量为例,重点从土地覆盖变化、森林采伐、土壤有机质积累等角度对国家级地面碳收支的因素进行了分析。近年来,一些学者尝试将国家碳收支与社会活动、能源消费、产业发展等相结合,从人类经济活动的视角进一步开展碳收支的影响机制的探讨。比如:部分学者从碳收支核算及其因素分解(孙建卫等, 2010)、碳收支的土地利用优化(赖力等, 2011)、产业活动的碳足迹(赵荣钦等, 2010)及碳收支的空间格局演变(蒋金亮等, 2014)等角度分析了国家尺度碳收支的影响因素和发展趋势,为国家层面开展“自然”和“社会”二元碳收支的综合研究提供了新的视角,有助于从人类经济社会系统运行的角度进一步分析二元碳收支的变化规律。

#### 4.3 省级层面的二元碳收支研究

省级层面二元碳收支研究可以归结为3个方面:①省区碳收支核算及时空特征分析。省区碳收支核算是省域空间碳排放效率和压力评估的重要途径。国内学者对长三角地区(孙伟等, 2012)、江苏省(赵荣钦, 黄贤金, 高珊等, 2013)、安徽省(孙秀丽, 2010)及广东省(肖慧娟等, 2006; 匡耀求等, 2010; 黄潮清, 2013)等省级尺度的二元碳收支进行了核算,并分析了其时空特征和影响机制。研究发现:随着快速城市化和工业化进程,人类活动强度的增加和陆地植被面积减少,区域碳收支不平衡性不断加剧(孙伟等, 2012),这使区域面临重大的碳循环压力。

其中,城市化是区域碳收支格局改变的直接推动力(肖慧娟等, 2006),而工业和交通能源消费的大幅增长是改变区域碳平衡的重要因素(赵荣钦, 黄贤金, 高珊等, 2013),②省区二元碳循环模拟。基于区域自然和经济系统的内在关系和流通机制,Marchi等(2012)建立了省级尺度碳循环模拟的框架,并对意大利Siena省自然和人为系统不同模块之间的碳流通进行了模拟与分析,这为省级尺度上碳收支模拟提供了重要的理论和方法参考;③省区间的碳流通与碳转移研究。一些学者基于网络碳排放流方法(Kang et al, 2012)和投入产出分析(姚亮等, 2010; 石敏俊等, 2012)对中国不同区域之间的碳转移和隐含碳流通进行了研究。研究发现:能源和产品的流通导致了大量的区域之间的碳转移和隐含碳流通,这不仅改变了省区之间的碳排放格局,也改变省区之间碳排放与经济发展之间的关系,其中东北区域、京津区域、南部沿海区域、西北区域和西南区域对区域经济拉动作用总量大于其承接其他区域拉动作用的总量(姚亮等, 2010)。由此可以看出,省域层面的二元碳收支研究与国家层面不同,其核心内容是碳收支空间格局、碳循环模拟和碳流通机理研究,为开展区域之间的碳流通及其效率研究提供了很好的方法和思路借鉴,在理论和实践上进一步丰富了区域二元碳收支的研究体系,为指导区域碳减排和低碳发展的实践提供了重要参考。

#### 4.4 城市层面的二元碳收支研究

城市层面碳收支包括以下几个方面:

(1) 城市碳收支模拟。城市碳收支模拟不仅涉及自然过程,更重要的是要将自然与社会碳收支过程相结合,建立涵盖人为碳储量与碳通量过程的综合模型(Pataki et al, 2006; Churkina, 2008)。如:Churkina等(2010)对美国人类聚落区的自然和人为碳储量进行了核算,发现城市建筑物碳储量仅次于土壤,可见人类活动对城市层面的碳收支平衡也具有重要影响。另外,植被的碳汇功能可在一定程度上平衡城市的碳收支状况(Escobedo et al, 2010),例如:美国奥克兰(Oakland)(Nowak, 1993)、凤凰城(Phoenix)(Koerner et al, 2002)、韩国春川(Chuncheon)、江陵(Kangleung)和首尔(Seoul)(Jo, 2002)及中国杭州(Zhao et al, 2010)等城市案例研究表明:城市植被的碳吸收对城市产业及能源活动的碳排放具有一定的补偿效果,其补偿率可达18.57%(Zhao et al, 2010)。近年来,国内学者也开展了城市碳收

支核算框架(钱杰, 2004; 王海鲲等, 2011; 蔡博峰, 2014)、城市碳平衡(马巾英等, 2011; 赵荣钦, 黄贤金, 彭补拙, 2012)及城市植被的碳补偿(Zhao et al, 2010)等的研究, 初步构建了城市碳收支模拟的理论和方法, 为城市碳排放因子的获取与城市碳平衡研究提供了重要参考。

(2) 城市碳收支及其变化的影响因素分析。城市碳收支受多种因素影响, 比如, Svirejeva-Hopkins等(2008)基于人口增长的视角, 提出了基于人口密度空间分布的双参数“T分布”模型, 基于区域和世界碳排放和城市碳输出的动态对城市化进行了情景预测, 并对城市年碳平衡进行了估算; Zhao等对南京市碳足迹和碳循环压力进行了分析, 探讨了不同土地利用方式的碳储量与碳通量, 并从土地利用的角度分析了影响碳排放变化的因素(赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋等, 2012; Zhao R Q, Huang X J, Liu Y, et al, 2014; Zhao et al, 2015); 张善峰等(2015)分析了土地利用变化与城市碳收支空间分异的关系, 并认为杭州市及各区的固碳损失主要是由于耕地向建设用地转化造成的; 钱杰(2004)和赵敏(2010)基于城市碳收支核算模型, 对上海市碳源碳汇结构的变化进行了分析, 并探讨了能源利用与产业活动等对城市碳收支的驱动作用; Hao等(2015)对广元市的碳收支进行了模拟, 并分析了地震灾害及重建对区域碳收支的影响。以上研究表明: 自然环境条件、人口增长、能源消费、土地利用和产业结构等是城市碳收支变化的主要原因。

(3) 城市碳流通与碳代谢研究。国外一些学者从城市整体层面开展了城市碳流通和碳代谢的研究。例如: Bullock等(2011)对墨西哥城市系统的碳流通和碳平衡进行了分析; Warren-Rhodes等(2001)对香港的城市代谢趋势进行了分析; Zhao等通过研究城市与外部系统、城市内部子系统之间的碳流通以及城乡之间的隐含碳流通过程, 对南京市城市碳流通进行了分析和测算, 构建了南京市城市系统碳流通图(Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y et al, 2014)。另外, 城市碳流通也可以从不同产业部门、能源消费过程和土地利用等不同角度开展。如: Chen等(2012)通过城市碳代谢的网络分析方法, 对城市不同部门的碳代谢和转移过程进行了探讨; 谢士晨等(2009)构建了上海市能源消费碳流通图, 分析了不同能源类型、产业部门和能源加工转换与损失等过程的碳流通; Svirejeva-Hopkins等(2006)基于

城市土地利用的划分对土地利用变化的碳动态过程进行了模拟, 并分析了城市变化与碳通量的关系。总体而言, 不同尺度区域碳流通研究的侧重点不同, 省级层面的研究主要侧重于区域之间的碳流通, 而城市层面侧重于通过子系统之间的碳流及代谢效率、隐含碳等分析城市内部的碳流通过程。

#### 4.5 城区、县域或社区层面的二元碳收支研究

区域碳收支研究也可以在城区、县域或社区层面展开。比如: Christen等(2010)运用城市代谢的理论, 将遥感数据、LiDAR数据、统计数据等相结合, 通过对植被土壤、建筑物、废弃物、食物和人体、道路交通运输等5个模块的碳储量和碳通量的叠加整合分析, 对温哥华 Sunset 社区的碳收支进行了模拟, 并将计算结果落实到50米栅格的社区空间, 该研究构建了较为系统的城市社区层面碳代谢研究的方法; 汤洁等(2009)提出了基于县域碳平衡的土地利用结构优化的方法; 赵荣钦等(2014)对中原经济区县域空间的碳收支进行了核算, 并在不同区域碳收支强度和碳平衡分区的基础上, 提出了中原经济区主体功能区优化的思路, 这为基于低碳的县域空间公平发展提供了参考借鉴; 基于社区尺度, 何华(2010)采用生命周期评价方法对华南居住区绿地碳汇功能开展了研究; 胡玥昕等(2014)基于系统动力学的角度, 构建了校园碳收支测算的模型, 并以浙江农林大学为例进行了实证。以上研究进一步丰富了区域碳收支的案例研究, 其中, 基于城区尺度或县域尺度研究, 为区域规划、城市规划布局 and 县域空间的公平发展提供了较好的思路借鉴; 而社区层面的碳收支研究, 为居住区低碳管理和节能减排提供了技术和数据支撑。

#### 4.6 典型人类活动的二元碳收支或碳足迹研究

近年来, 碳收支也被应用于典型产业、开发项目及人类活动的评估中, 一些学者针对土地利用(或农业耕作活动)(游和远等, 2010; 余德贵等, 2011; 王渊刚等, 2014)、旅游开发(周年兴等, 2013; Sung et al, 2015)、大型水电项目(Zhang et al, 2015)等开展了碳收支的核算和评估研究。如赵荣钦(2012)和余德贵等(2011)提出了基于碳排放约束的土地利用结构优化模型, 对指导地方土地规划的实践起到了积极作用; 谭梦等(2011)探讨了土地整理对农田土壤碳含量的影响, 为汇碳的土地整理技术和模式提供了参考; 曹淑艳等(2010)对中国不同产业间的直接和间接碳足迹流进行了分析, 探讨了不



同产业直接和间接碳足迹的差异,为产业低碳管理、产业结构优化提供了借鉴;王渊刚等(2014)基于Bookkeeping模型,对新疆耕地变化对区域碳平衡的影响进行了分析,研究发现:耕地转移、土地开垦及水土开发活动是影响区域碳收支的重要因素;蒋冬梅等(2015)对中国耕作非农化活动的碳收支及其空间差异进行了研究,为中国低碳农业发展提供了参考。以上案例从不同的角度开展了典型产业和人类活动的碳收支的应用研究,进一步拓展碳收支研究的微观领域。另外,碳收支和碳足迹也用于评估企业活动或产品的隐含碳排放。例如,一些学者开展了针对家庭(Fan et al, 2012)、产品生产(Adom et al, 2012; Wells et al, 2012)或某种人类活动(Filimonau et al, 2011; Chang et al, 2012)的碳足迹研究,其中对产品碳足迹的研究最多,主要是采用生命周期评价方法开展某种产品全生命周期的碳排放的核算(Zhao R Q, Huang X J, Liu Y et al, 2014),为定量评估某种产品的环境影响提供了重要的方法。在国外,碳足迹研究还应用于商品的碳标识(Gadema et al, 2011),为低碳产品的宣传和普及起到了重要的推动作用。

总体而言,区域二元碳收支是一个高度复杂的系统过程,不仅包含垂直碳收支和水平碳收支、自然碳收支与人为碳收支,还包括区域外部的碳交换及内部的碳流通与碳代谢过程。区域碳收支研究既可以基于不同空间尺度进行,也可以从产业活动、土地利用及典型人类活动的角度入手。区域碳收支研究的核心是从自然和社会2个角度构建区域碳收支的估算模型,一方面需要各种自然和社会经济数据开展碳收支和碳平衡核算,建立区域碳收支的基础数据库;另一方面也需要开展区域碳收支影响机制的跨学科研究(Churkina, 2008),这样才能更深入地了解区域碳收支的过程和机制。

## 5 总结与展望

### 5.1 研究总结

随着碳循环研究的深入和国际碳减排谈判的推动,近年来区域碳收支研究出现了一些新的变化。主要表现在:

(1) 区域碳收支研究内容从单纯的自然过程转向自然和人为过程的结合。以往的碳收支研究主要集中在陆地生态系统领域,重点是借助遥感、实

验观测和过程模拟等手段对区域陆地生态系统的碳储量与碳通量进行研究,并探讨其碳汇功能和碳平衡的时空分布状况。近年来碳收支进一步延伸到对社会系统碳输入和输出过程的核算和模拟,将能源消费、土地利用及产业活动等纳入进来,并力图建立不同空间尺度的“自然—社会”二元碳收支模拟模型,从整体上阐明人类活动对区域碳收支的影响,以寻求应对全球气候变化的减缓和适应对策。

(2) 区域碳收支研究尺度从侧重于宏观研究延伸到微观和宏观2个层面的研究。前期研究主要是从区域尺度上开展生态系统碳收支的研究,一是基于资源清查的植被碳储量研究,二是基于碳通量观测的微观和宏观层面的结合研究。近年来,区域社会系统碳收支则涉及到多个研究尺度,从国家、省区、城市到城区和社区,也有些学者开展了企业和家庭碳收支和碳代谢的研究,推动了碳收支研究向多尺度应用领域拓展。

(3) 碳收支研究从理论和模拟研究开始转向社会应用领域。前期研究更多是理论研究和实验模拟,通过阐明生态系统的碳收支状况和碳汇功能的时空变化,为国家应对气候变化提供数据支撑。近年来,区域碳收支研究开始与社会问题相结合,并有了新的应用前景和实践价值。一是将碳收支核算与国家或区域碳排放权分配相结合,为国家碳减排配额分配和区域碳交易提供数据支撑;二是将碳收支作为区域生态压力评估的方法应用于规划实践中,如城市总体规划、产业发展规划及土地利用规划等,为区域经济社会发展与规划提供实践指导;三是将碳收支研究与社会导向和个人行为相结合,通过碳收支评估引导个人消费行为和低碳观念,从而在社会低碳转型中起到积极作用。

### 5.2 研究展望

总体而言,已有研究从不同空间尺度开展了区域碳收支和碳平衡研究,对于二元碳收支理论体系的构建起到了重要的推动作用。但未来在以下方面还需要进一步加强:

(1) 区域二元碳收支的集成模拟研究。今后在区域碳收支研究领域,要努力构建完整的区域碳收支集成研究体系,该体系应综合涵盖区域自然和社会碳收支过程,水平和垂直碳收支过程,区域内外的碳转移和碳流通过程,区域产业发展的碳代谢过程等。将区域作为一个人工生态系统,构建涵盖各

种过程、不同尺度、各种活动行为过程的综合碳收支模型,并分析碳收支不同环节的驱动机理。

(2) 区域碳收支的空间分异规律研究。区域内部具有较大的空间异质性。因此,应加强区域碳收支空间分异规律的研究,探讨区域内部城乡之间、不同城市之间和城市内部的碳收支特征及其影响机制,从而进一步深入探索区域尺度上人类活动对碳收支的不同影响。

(3) 基于区域碳收支核算的区域横向碳补偿研究。在区域二元碳收支综合集成模拟的基础上,将区域碳收支与国家主体功能区规划相结合,基于碳排放强度约束目标构建不同碳收支类型区的开发模式和策略;基于碳收支的核算结果,尝试开展区域横向碳补偿的试点示范,以碳为纽带推动区域内部公平和均衡发展,为建立全国统一的碳交易市场提供地区间配额分配的依据。

(4) 区域碳收支与区域资源环境效应的关系。“碳”是区域社会的关键要素之一,与诸多资源、能源类型的开发、输送和使用等过程密切相关。因此,在全球变化背景下,应该进一步探索碳收支与资源开发的耦合作用机制,比如:区域“水—土—能—碳”耦合循环的效率和机制,各种能源资源开发利用活动中的碳收支效应,土地利用、整理和复垦等活动的碳排放效应等。从而将碳收支作为衡量和评价人类活动对自然环境影响程度的重要工具,进一步拓展碳收支的应用领域。

(5) 区域碳收支的综合调控研究。人类社会是一个复杂的系统工程,区域碳收支受人类活动强度、生产效率、运输效率、城镇格局及政策因素等多方面影响。因此,基于区域系统的角度,如何考虑从区域能量流和物质流的规模和方式、资源开发模式、产业结构、土地低碳优化、城镇形态等多方面构建区域碳收支的调控体系,并开展面向低碳的区域碳收支调控的试点研究,建立基于碳排放约束的区域综合开发模式和方案,是一个值得今后研究的重大问题,也需要具有多学科交叉的视角和诸多科学家的共同努力。

## 参考文献(References)

- 蔡博峰. 2014. 城市温室气体清单核心问题研究[M]. 北京: 化学工业出版社. [Cai B F. 2014. Study on key issues of city carbon emission inventory[M]. Beijing, China: Chemical Industrial Press.]
- 曹淑艳, 谢高地. 2010. 中国产业部门碳足迹追踪分析[J].

资源科学, 32(11): 2046-2052. [Cao S Y, Xie G D. 2010. Tracking analysis of carbon footprint flow of China's industrial sectors[J]. Resources Science, 32(11): 2046-2052.]

揣小伟. 2013. 沿海地区土地利用变化的碳效应及土地调控研究: 以江苏沿海为例[D]. 南京: 南京大学. [Chuai X W. 2013. Carbon effect caused by land use changes and its land use control in coastal regions: The case study of coastal region in Jiangsu Province[D]. Nanjing, China: Nanjing University.]

方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 2007. 1981-2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37(6): 804-812. [Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. 2007. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 50(9): 1341-1350.]

方精云, 朴世龙, 赵淑清. 2001. CO<sub>2</sub> 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇[J]. 植物生态学报, 25(5): 594-602. [Fang J Y, Piao S L, Zhao S Q. 2001. The carbon sink: The role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the Northern Hemisphere[J]. Acta Phytocologica Sinica, 25(5): 594-602.]

戈峰. 2007. 现代生态学[M]. 北京: 科学出版社. [Ge F. 2007. Xiandai shengtaixue[M]. Beijing, China: Science Press.]

管东生, 陈玉娟, 黄芬芳. 1998. 广州城市绿地系统碳的贮存、分布及其在碳氧平衡中的作用[J]. 中国环境科学, 18(5): 437-441. [Guan D S, Chen Y J, Huang F F. 1998. The storage and distribution of carbon in urban vegetation and its roles in balance of carbon and oxygen in Guangzhou[J]. China Environmental Science, 18(5): 437-441.]

郝千婷, 黄明祥, 包刚. 2011. 碳排放核算方法概述与比较研究[J]. 中国环境管理, (4): 51-55. [Hao Q T, Huang M X, Bao G. 2011. Study on carbon emission calculation methods overview and its comparison[J]. Chinese Journal of Environmental Management, (4): 51-55.]

何华. 2010. 华南居住区绿地碳汇作用研究及其在全生命周期碳收支评价中的应用[D]. 重庆: 重庆大学. [He H. 2010. Research on green space carbon sink of residential area in South China and its application in carbon budget of residential area for whole life circle[D]. Chongqing, China: Chongqing University.]

胡玥昕, 江洪, 王颖. 2014. 基于系统动力学的校园碳收支测算模型及应用[J]. 浙江农林大学学报, 31(6): 850-859. [Hu Y X, Jiang H, Wang Y. 2014. System dynamics modeling for carbon budget at a university campus[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 31(6): 850-859.]

黄潮清. 2013. 广东省陆域碳收支时空格局研究[D]. 南昌: 江

- 西师范大学. [Huang C Q. 2013. Evolvement of spatial-temporal pattern of terrestrial carbon budget in Guangdong Province[D]. Nanchang, China: Jiangxi Normal University.]
- 黄贤金, 葛扬, 叶堂林, 等. 2009. 循环经济学[M]. 南京: 东南大学出版社. [Huang X J, Ge Y, Ye T L, et al. 2009. Xunhuan jingjixue[M]. Nanjing, China: Southeast University Press.]
- 蒋冬梅, 李效顺, 曲福田, 等. 2015. 中国耕地非农化趋势及其对碳收支影响的模拟[J]. 农业工程学报, 31(17): 1-9. [Jiang D M, Li X S, Qu F T, et al. 2015. Simulation of cultivated land conversion trend and its effect on carbon budget in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31(17): 1-9.]
- 蒋金亮, 徐建刚, 吴文佳, 等. 2014. 中国人一地碳源汇系统空间格局演变及其特征分析[J]. 自然资源学报, 29(5): 757-768. [Jiang J L, Xu J G, Wu W J, et al. 2014. Patterns and dynamics of China's human-nature carbon source-sink system[J]. Journal of Natural Resources, 29(5): 757-768.]
- 匡耀求, 欧阳婷萍, 邹毅, 等. 2010. 广东省碳源碳汇现状评估及增加碳汇潜力分析[J]. 中国人口·资源与环境, 20(12): 56-61. [Kuang Y Q, Ouyang T P, Zou Y, et al. 2010. Present situation of carbon source and sink and potential for increase of carbon sink in Guangdong Province[J]. China Population, Resources and Environment, 20(12): 56-61.]
- 赖力, 黄贤金. 2011. 中国土地利用的碳排放效应研究[M]. 南京: 南京大学出版社. [Lai L, Huang X J. 2011. Carbon emission effect of land use in China[M]. Nanjing, China: Nanjing University Press.]
- 马巾英, 尹锴, 吝涛. 2011. 城市复合生态系统碳氧平衡分析: 以沿海城市厦门为例[J]. 环境科学学报, 31(8): 1808-1816. [Ma J Y, Yin K, Lin T. 2011. Analysis of the carbon and oxygen balance of a complex urban ecosystem: A case study in the coastal city of Xiamen[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(8): 1808-1816.]
- 钱杰. 2004. 大都市碳源碳汇研究: 以上海市为例[D]. 上海: 华东师范大学. [Qian J. 2004. Research on metropolis carbon sources and sinks: A case study of Shanghai City [D]. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 秦耀辰. 2013. 低碳城市研究的模型与方法[M]. 北京: 科学出版社. [Qin Y C. 2013. Studies on low-carbon city models and methods[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 余群芝, 贾净雪. 2014. 中国对外贸易隐含碳排放核算及责任分配研究: 基于“消费者和生产者共同负责”原则[J]. 中南民族大学学报: 人文社会科学版, 34(6): 132-137. [She Q Z, Jiang J X. 2014. Zhongguo duiwai maoyi yinhan tanpaifang hesuan ji zeren fenpei yanjiu: Jiyu "xiaofeizhe he shengchanzhe gongtong fuze" yuanze[J]. Journal of South-Central University for Nationalities: Humanities and Social Sciences, 34(6): 132-137.]
- 石敏俊, 王妍, 张卓颖, 等. 2012. 中国各省区碳足迹与碳排放空间转移[J]. 地理学报, 67(10): 1327-1338. [Shi M J, Wang Y, Zhang Z Y, et al. 2012. Regional carbon footprint and interregional transfer of carbon emissions in China[J]. Acta Geographica Sinica, 67(10): 1327-1338.]
- 孙建卫, 赵荣钦, 黄贤金, 等. 2010. 1995-2005年中国碳排放核算及其因素分解研究[J]. 自然资源学报, 25(8): 1284-1295. [Sun J W, Zhao R Q, Huang X J, et al. 2010. Research on carbon emission estimation and factor decomposition of China from 1995 to 2005[J]. Journal of Natural Resources, 25(8): 1284-1295.]
- 孙伟, 乌日汗. 2012. 长三角核心区碳收支平衡及其空间分异[J]. 地理研究, 31(12): 2220-2228. [Sun W, Wurihan. 2012. Study on the balance of carbon budget and its spatial differentiation in Yangtze River Delta[J]. Geographical Research, 31(12): 2220-2228.]
- 孙秀丽. 2010. 安徽省“自然—经济”复合系统碳收支估算及其特征研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学. [Sun X L. 2010. The estimation of the complex system of nature and economy carbon budget in Anhui Province and study on the feature[D]. Wuhu, China: Anhui Normal University.]
- 谭梦, 黄贤金, 钟太洋, 等. 2011. 土地整理对农田土壤碳含量的影响[J]. 农业工程学报, 27(8): 324-329. [Tan M, Huang X J, Zhong T Y, et al. 2011. Impacts of land consolidation on soil organic carbon content[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 27(8): 324-329.]
- 汤洁, 毛子龙, 王晨野, 等. 2009. 基于碳平衡的区域土地利用结构优化: 以吉林省通榆县为例[J]. 资源科学, 31(1): 130-135. [Tang J, Mao Z L, Wang C Y, et al. 2009. Regional land use structure optimization based on carbon balance: A case study in Tongyu County, Jilin Province [J]. Resources Science, 31(1): 130-135.]
- 唐志鹏, 刘卫东, 公丕萍. 2014. 出口对中国区域碳排放影响的空间效应测度: 基于1997-2007年区域间投入产出表的实证分析[J]. 地理学报, 69(10): 1403-1413. [Tang Z P, Liu W D, Gong P P. 2014. Measuring of Chinese regional carbon emission spatial effects induced by exports based on Chinese multi-regional input-output table during 1997-2007[J]. Acta Geographica Sinica, 69(10): 1403-



- 1413.]
- 王海鲲, 张荣荣, 毕军. 2011. 中国城市碳排放核算研究: 以无锡市为例[J]. 中国环境科学, 31(6): 1029-1038. [Wang H K, Zhang R R, Bi J. 2011. Carbon accounting for Chinese cities: A case of Wuxi City[J]. China Environmental Science, 31(6): 1029-1038.]
- 王渊刚, 罗格平, 赵树斌, 等. 2014. 新疆耕地变化对区域碳平衡的影响[J]. 地理学报, 69(1): 110-120. [Wang Y G, Luo G P, Zhao S B, et al. 2014. Effects of arable land change on regional carbon balance in Xinjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 69(1): 110-120.]
- 王祖华, 刘红梅, 关庆伟, 等. 2011. 南京城市森林生态系统的碳储量和碳密度[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 35(4): 18-22. [Wang Z H, Liu H M, Guan Q W, et al. 2011. Carbon storage and density of urban forest ecosystems in Nanjing[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 35(4): 18-22.]
- 肖慧娟, 匡耀求, 黄宁生, 等. 2006. 工业化高速发展时期广州市的碳收支变化初步研究[J]. 生态环境, 15(6): 1209-1215. [Xiao H J, Kuang Y Q, Huang N S, et al. 2006. Variation of the carbon budget in Guangzhou during its rapid industrialization course[J]. Ecology and Environment, 15(6): 1209-1215.]
- 谢士晨, 陈长虹, 李莉, 等. 2009. 上海市能源消费CO<sub>2</sub>排放清单与碳流图[J]. 中国环境科学, 29(11): 1215-1220. [Xie S C, Chen C H, Li L, et al. 2009. The energy related carbon dioxide emission inventory and carbon flow chart in Shanghai City[J]. China Environmental Science, 29(11): 1215-1220.]
- 姚亮, 刘晶茹. 2010. 中国八大区域间碳排放转移研究[J]. 中国人口·资源与环境, 20(12): 16-19. [Yao L, Liu J R. 2010. Transfer of carbon emissions between China's eight major regions[J]. China Population, Resources and Environment, 20(12): 16-19.]
- 叶笃正, 陈泮勤. 1992. 中国的全球变化预研究: 第二部分分报告[M]. 北京: 地震出版社. [Ye D Z, Chen P Q. 1992. Study on prediction of global change in China: The second part[M]. Beijing, China: Earthquake Press.]
- 游和远, 吴次芳. 2010. 土地利用的碳排放效率及其低碳优化: 基于能源消耗的视角[J]. 自然资源学报, 25(11): 1875-1886. [You H Y, Wu C F. 2010. Carbon emission efficiency and low carbon optimization of land use: Based on the perspective of energy consumption[J]. Journal of Natural Resources, 25(11): 1875-1886.]
- 余德贵, 吴群. 2011. 基于碳排放约束的土地利用结构优化模型研究及其应用[J]. 长江流域资源与环境, 20(8): 911-917. [Yu D G, Wu Q. 2011. Application of the model of land used structure optimization based on low-carbon limited[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 20(8): 911-917.]
- 张璐, 王静, 施润和. 2015. 2000-2010年东北三省碳源汇时空动态遥感研究[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, (4): 164-173. [Zhang L, Wang J, Shi R H. 2015. Temporal-spatial variations of carbon sink/source in Northeast China from 2000 to 2010[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, (4): 164-173.]
- 张善峰, 宋彦, 李昌峰, 等. 2015. 杭州市土地覆被变化与碳收支空间分异测度[J]. 城市问题, (6): 46-53. [Zhang S F, Song Y, Li C F, et al. 2015. Land cover change and the spatial differentiation of carbon budget in Hangzhou[J]. Urban Problems, (6): 46-53.]
- 赵敏. 2010. 上海碳源碳汇结构变化及其驱动机制研究[D]. 上海: 华东师范大学. [Zhao M. 2010. Structural changes and driving mechanism of carbon sources and sinks in Shanghai[D]. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 赵荣钦. 2012. 城市系统碳循环及土地调控研究[M]. 南京: 南京大学出版社. [Zhao R Q. 2012. Carbon cycle of urban system and its regulation through land use control [M]. Nanjing, China: Nanjing University Press.]
- 赵荣钦, 黄贤金. 2013. 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架[J]. 生态学报, 33(2): 358-366. [Zhao R Q, Huang X J. 2013. Carbon cycle of urban system: Characteristics, mechanism and theoretical framework[J]. Acta Ecologica Sinica, 33(2): 358-366.]
- 赵荣钦, 黄贤金, 高珊, 等. 2013. 江苏省碳排放清单测算及减排潜力分析[J]. 地域研究与开发, 32(2): 109-115. [Zhao R Q, Huang X J, Gao S, et al. 2013. Regional carbon emission inventory estimation and reduction potential analysis in Jiangsu Province[J]. Areal Research and Development, 32(2): 109-115.]
- 赵荣钦, 黄贤金, 彭补拙. 2012. 南京城市系统碳循环与碳平衡分析[J]. 地理学报, 67(6): 758-770. [Zhao R Q, Huang X J, Peng B Z. 2012. Research on carbon cycle and carbon balance of Nanjing urban system[J]. Acta Geographica Sinica, 67(6): 758-770.]
- 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 2010. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析[J]. 地理学报, 65(9): 1048-1057. [Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y. 2010. Research on carbon emission intensity and carbon footprint of different industrial spaces in China[J]. Acta Geographica Sinica, 65(9): 1048-1057.]

- 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋, 等. 2012. 南京市不同土地利用方式的碳储量与碳通量[J]. 水土保持学报, 26(6): 164-170. [Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y, et al. 2012. Carbon storage and fluxes of different land use types in Nanjing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 26(6): 164-170.]
- 赵荣钦, 张帅, 黄贤金, 等. 2014. 中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J]. 地理学报, 69(10): 1425-1437. [Zhao R Q, Zhang S, Huang X J, et al. 2014. Spatial variation of carbon budget and carbon balance zoning of Central Plains Economic Region at county-level[J]. Acta Geographica Sinica, 69(10): 1425-1437.]
- 周年兴, 黄震方, 梁艳艳. 2013. 庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡[J]. 生态学报, 33(13): 4134-4145. [Zhou N X, Huang Z F, Liang Y Y. 2013. Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: A Mount Lushan case study [J]. Acta Ecologica Sinica, 33(13): 4134-4145.]
- 朱文泉, 潘耀忠, 阳小琼, 等. 2007. 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析[J]. 科学通报, 52(21): 2535-2541. [Zhu W Q, Pan Y Z, Yang X Q, et al. 2007. Impact of climate change on net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation[J]. Chinese Science Bulletin, 52(23): 3253-3260.]
- Turner D P, Winjum J K, Kolchugina T P, 等. 1997. 国家级地面碳收支的生物与人类因素剖析[J]. AMBIO: 人类环境杂志, 26(4): 216-222. [Turner D P, Winjum J K, Kolchugina T P, et al. 1997. Analysis of biological and human factors of national terrestrial carbon budget[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 26(4): 216-222.]
- Adom F, Maes A, Workman C, et al. 2012. Regional carbon footprint analysis of dairy feeds for milk production in the USA[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 17(5): 520-534.
- Baldocchi D D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future[J]. Global Change Biology, 9(4): 479-492.
- Broecker W S, Takahashi T, Simpson H J, et al. 1979. Fate of fossil fuel carbon dioxide and the global carbon budget [J]. Science, 206: 409-418.
- Bullock S H, Escoto-Rodríguez M, Smith S V, et al. 2011. Carbon flux of an urban system in México[J]. Journal of Industrial Ecology, 15(4): 512-526.
- Carbon Dioxide Information Analysis Center. 2014. Land-use and ecosystems[EB/OL]. 2014-08-08[2015-11-01] [http://cdiac.ornl.gov/land\\_use.html](http://cdiac.ornl.gov/land_use.html).
- Chang N B, Qi C, Yang Y J. 2012. Optimal expansion of a drinking water infrastructure system with respect to carbon footprint, cost-effectiveness and water demand[J]. Journal of Environmental Management, 110: 194-206.
- Chen S Q, Chen B. 2012. Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions: A case study of Vienna, Austria[J]. Environmental Science & Technology, 46(8): 4498-4506.
- Christen A, Coops N, Kellett R, et al. 2010. A LiDAR-based urban metabolism approach to neighbourhood scale energy and carbon emissions modelling[R]. Vancouver, Canada: University of British Columbia.
- Churkina G. 2008. Modeling the carbon cycle of urban systems [J]. Ecological Modelling, 216(2): 107-113.
- Churkina G, Brown D G, Keoleian G. 2010. Carbon stored in human settlements: The conterminous United States[J]. Global Change Biology, 16(1): 135-143.
- Escobedo F, Varela S, Zhao M, et al. 2010. Analyzing the efficacy of subtropical urban forests in offsetting carbon emissions from cities[J]. Environmental Science & Policy, 13(5): 362-372.
- Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. 2000. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system [J]. Science, 290: 291-296.
- Fan J, Guo X M, Marinova D, et al. 2012. Embedded carbon footprint of Chinese urban households: Structure and changes[J]. Journal of Cleaner Production, 33: 50-59.
- Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 292: 2320-2322.
- Filimonau V, Dickinson J, Robbins D, et al. 2011. Reviewing the carbon footprint analysis of hotels: Life Cycle Energy Analysis (LCEA) as a holistic method for carbon impact appraisal of tourist accommodation[J]. Journal of Cleaner Production, 19(17-18): 1917-1930.
- Frank A B, Liebig M A, Hanson J D. 2002. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 34(9): 1235-1241.
- Gadema Z, Oglethorpe D. 2011. The use and usefulness of carbon labelling food: A policy perspective from a survey of UK supermarket shoppers[J]. Food Policy, 36(6): 815-822.
- Hao Y, Su M R, Zhang L X, et al. 2015. Integrated accounting of urban carbon cycle in Guangyuan, a mountainous city of China: The impacts of earthquake and reconstruction [J]. Journal of Cleaner Production, 103: 231-240.

- Houghton R A. 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990[J]. *Tellus B*, 51(2): 298-313.
- Houghton R A. 2007. Balancing the global carbon budget[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35(1): 313-347.
- Houghton R A, Davidson E A, Woodwell G M. 1998. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(1): 25-34.
- Houghton R A, Hackler J L. 2003. Sources and sinks of carbon from land-use change in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2): 1034.
- Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. 1999. The U.S. carbon budget: Contributions from land-use change[J]. *Science*, 285: 574-578.
- Houghton R A, House J I, Pongratz J, et al. 2012. Carbon emissions from land use and land-cover change[J]. *Biogeosciences*, 9(12): 5125-5142.
- IPCC. 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Washington: IPCC.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: Synthesis report: Summary for policymakers[R]. Washington: IPCC.
- Jo H K. 2002. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea[J]. *Journal of Environmental Management*, 64(2): 115-126.
- Kang C Q, Zhou T R, Chen Q X, et al. 2012. Carbon emission flow in networks[J]. *Scientific Reports*, 2: 479.
- Koerner B, Klopatek J. 2002. Anthropogenic and natural CO<sub>2</sub> emission sources in an arid urban environment[J]. *Environmental Pollution*, 116(S1): S45-S51.
- Le Quéré C, Andres R J, Boden T, et al. 2013. The global carbon budget 1959-2011[J]. *Earth System Science Data*, 5(1): 165-185.
- Liu Z, Guan D B, Wei W, et al. 2015. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. *Nature*, 524: 335-338.
- Machado G, Schaeffer R, Worrell E. 2001. Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil: An input-output approach[J]. *Ecological Economics*, 39(3): 409-424.
- Marchi M, Jørgensen S E, Pulselli F M, et al. 2012. Modelling the carbon cycle of Siena Province (Tuscany, central Italy) [J]. *Ecological Modelling*, 225: 40-60.
- Nowak D J. 1993. Atmospheric carbon reduction by urban trees[J]. *Journal of Environmental Management*, 37(3): 207-217.
- Pataki D E, Alig R J, Fung A S, et al. 2006. Urban ecosystems and the North American carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 12(11): 2092-2102.
- Paul S, Bhattacharya R N. 2004. CO<sub>2</sub> emission from energy use in India: A decomposition analysis[J]. *Energy Policy*, 32(5): 585-593.
- Sung C Y, Cho W, Hong S H. 2015. Estimating the annual carbon budget of a weekend tourist resort in a temperate secondary forest in Korea[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(2): 413-419.
- Svirejeva-Hopkins A, Schellnhuber H J. 2006. Modelling carbon dynamics from urban land conversion: Fundamental model of city in relation to a local carbon cycle[J]. *Carbon Balance and Management*, 1: 8.
- Svirejeva-Hopkins A, Schellnhuber H J. 2008. Urban expansion and its contribution to the regional carbon emissions: Using the model based on the population density distribution[J]. *Ecological Modelling*, 216(2): 208-216.
- Wang C, Chen J N, Zou J. 2005. Decomposition of energy-related CO<sub>2</sub> emission in China: 1957-2000[J]. *Energy*, 30(1): 73-83.
- Warren-Rhodes K, Koenig A. 2001. Escalating trends in the urban metabolism of Hong Kong: 1971-1997[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 30(7): 429-438.
- Wells J R, Boucher J F, Laurent A B, et al. 2012. Carbon footprint assessment of a paperback book: Can planned integration of deinked market pulp be detrimental to climate [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 16(2): 212-222.
- Zhang C, Tian H Q, Chen G S, et al. 2012. Impacts of urbanization on carbon balance in terrestrial ecosystems of the Southern United States[J]. *Environmental Pollution*, 164: 89-101.
- Zhang J, Xu L Y. 2015. Embodied carbon budget accounting system for calculating carbon footprint of large hydro-power project[J]. *Journal of Cleaner Production*, 96: 444-451.
- Zhang M Y, Huang X J. 2012. Effects of industrial restructuring on carbon reduction: An analysis of Jiangsu Province, China[J]. *Energy*, 44(1): 515-526.
- Zhao M, Kong Z H, Escobedo F J, et al. 2010. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 91(4): 807-813.
- Zhao R Q, Huang X J, Liu Y, et al. 2014. Urban carbon footprint and carbon cycle pressure: The case study of Nan-



- jing[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 24(1): 159-176.
- Zhao R Q, Huang X J, Liu Y, et al. 2015. Carbon emission of regional land use and its decomposition analysis: Case study of Nanjing City, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 25(2): 198-212.
- Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y, et al. 2011. Carbon footprint of different industrial spaces based on energy consumption in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 21(2): 285-300.
- Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y, et al. 2014. Carbon flow of urban system and its policy implications: The case of Nanjing[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33: 589-601.

## Theory, methods, and research progresses of regional carbon budget

ZHAO Rongqin<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>2</sup>, DING Minglei<sup>1</sup>, ZHANG Zhanping<sup>1</sup>,  
HUANG Xianjin<sup>3</sup>, QIN Yaochen<sup>4</sup>

(1. School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. College of Civil Construction Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450046, China; 3. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 4. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China)

**Abstract:** Under the background of global change and low-carbon development, regional natural-social system carbon budget became a hot multi-disciplinary research field in geographical, ecological, environmental, economic, and management sciences. Regional natural-social system carbon budget studies will not only offer important methods for evaluating the impact of human activities on the environment and provide theoretical basis for carbon cycle pressure assessment of the coupled natural-social system, but also has great significance for regional low-carbon development and collaborative emission reduction. Based on a regional system perspective, this article first defined regional natural-social system carbon budget, analyzed its characteristics, and presented a conceptual model of the system. Then the impacting mechanism of regional anthropogenic activities on the dualistic carbon budget of the natural-social system was discussed, and the relationship between regional natural-social system carbon budget studies at different spatial levels was analyzed. The research progress of regional natural-social system carbon budget at different spatial levels including the global, national, provincial, city, urban district and county, neighborhood, and typical industrial sector and human activity levels was summarized. Finally, the trends of regional natural-social system carbon budget research were put forward: integrated modeling and spatial differentiation of regional carbon budget, inter-regional carbon compensation, the relationship between regional carbon budget and resources and environment effects, and the comprehensive regulation and control of regional natural-social system carbon budget.

**Key words:** carbon absorption; carbon emission; carbon budget; region; research progress