DOI: 10.5846/stxb201302100259

吴文佳,蒋金亮,高全洲,蒋海兵.2001—2009 年中国碳排放与碳足迹时空格局.生态学报,2014,34(22):6722-6733. Wu W J, Jiang J L, Gao Q Z, Jiang H B.Spatiotemporal patterns of carbon emission and carbon footprint in China during 2001—2009. Acta Ecologica Sinica,2014,34(2):6722-6733.

2001—2009年中国碳排放与碳足迹时空格局

吴文佳1,蒋金亮2,高全洲3,蒋海兵4,*

(1. 北京大学城市与环境学院,北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京 100871;

2. 南京大学地理与海洋科学学院,南京 210093;

3. 中山大学地理科学与规划学院, 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275;

4. 盐城师范学院城市与资源环境学院,盐城 224051)

摘要:碳排放引发的全球变暖给自然环境及人类社会都带来了显著影响,而碳足迹可以衡量自然生态系统对人类活动碳排放的 响应。为研究自然-社会二元系统碳动态,基于 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)数据和统计资料计算 2001—2009 年中国陆地植被净初级生产力、能源消费碳排放、碳足迹和碳赤字;在 GIS (Geographic Information System)技术支持 下,运用空间自相关分析方法讨论其时空格局;据此划分生态经济区。结果表明:(1)2001—2009 年全国植被净初级生产力 (Net Primary Production, NPP)平均值为 3.32 Pg C/a(1 Pg = 10¹⁵ g),呈西南地区>东南沿海>华中、华东地区>东北、华北地区> 西北地区的空间格局;(2)2001—2009 年全国能源消费碳排放逐年增加,年均增长率 16.7%,多年平均值 2.53 Pg C/a,呈东部> 中部>西部的空间格局;(3)2001—2009 年全国碳足迹逐年增加,年均增长率 14.7%,多年平均值 6.98×10⁶ km²;具有正碳赤字 (即碳源)的省份为山西、环渤海地区各省、长三角地区各省、广东;相邻省份碳赤字的相对大小由于互相影响而改变;(4)全国 分为中东部、南部、北部、西部四个生态经济大区。研究结果直观揭示了中国碳排放和碳足迹的时空动态,为实现自然-社会二 元系统的可持续发展提供科学依据。

关键词:自然-社会二元系统;MODIS;碳排放;碳足迹;空间自相关;生态经济区划

Spatiotemporal patterns of carbon emission and carbon footprint in China during 2001—2009

WU Wenjia¹, JIANG Jinliang², GAO Quanzhou³, JIANG Haibing^{4, *}

- 1 College of Urban Environmental Sciences, and Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China
- 2 School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China
- 3 Geography and Planning School, and Guangdong Provincial Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
- 4 School of Urban and Resource Environment, Yancheng Teachers University, Yancheng 224051, China

Abstract: Increasing carbon emission, which has been recognized as one major reason for enhanced global warming, is influenced by complex interactions between natural and anthropogenic processes. The terrestrial ecosystem has been reported as a carbon sink during recent decades; However, this carbon sink has been largely offset by the carbon emission from human activities such as land use change and fossil fuel consumption. An accurate quantification of the carbon fluxes in natural ecosystems in response to human activities is of critical importance for global change study. Using a carbon footprint

收稿日期:2013-02-10; 网络出版日期:2014-03-17

基金项目:国家自然科学基金青年项目(41301108);南京大学研究生科研创新基金项目(2013CL07);江苏研究生创新计划(CXLX13_033)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jianghb@igsnrr.ac.cn

model, this study characterized the spatiotemporal carbon patterns in the coupled system of nature-society. Specifically, we firstly calculated the net primary productivity (NPP), carbon emission from energy consumption, carbon footprint, and carbon deficit in China during 2001-2009 based on MODIS and statistical data; Then we applied spatial auto-correlation analysis method to quantify spatiotemporal patterns of carbon emission and carbon footprint; Furthermore, we made an ecoeconomic regionalization of China based on the carbon deficit variation. Four conclusions can be drawn as follows. (1) The mean NPP was 3.32 Pg C/a during 2001-2009 in China (1 Pg = 1015 g), with small annual variations and obvious spatial heterogeneities, ranking as the southwestern > the southeastern coastal region > the central and the eastern > the northeastern and the northern > the northwestern parts of China. (2) The carbon emission from energy consumption in China increased from 1.52 Pg C/a (2001) to 3.53 Pg C/a (2009) with an annual rate of 16.7% and an average value of 2.53 Pg C/a. Geographically, carbon emission decreased from east to west. (3) Carbon footprint in China increased from 4.46×10⁶ $\mathrm{km}^{2}(2001)$ to $9.69 \times 10^{6} \mathrm{km}^{2}(2009)$ with an annual rate of 14.7% and an average value of $6.98 \times 10^{6} \mathrm{km}^{2}$. Positive carbon deficit was found in Shanxi, Bohai Economic Zone, Yangtze River Delta and Guangdong, while negative carbon deficit existed in most provinces of the central and the western China. On the national scale, carbon deficit showed a significantly positive spatial autocorrelation; On the regional scale, however, the eastern China had a high-high clustering, the western China had a low-low clustering, and the northern China had a high-low distribution; Carbon deficit of adjacent provinces influenced each other, suggesting that interprovincial and interregional cooperation could contribute to a positive diffusion effect from the "hotspot" of carbon deficit to the surroundings. (4) China can be divided into four eco-economic zones based on spatiotemporal patterns and local spatial auto-correlation of carbon deficit. The first was the central-eastern region, which was in urgent need of low-carbon development mode considering its rapid economic development and limited availability for ecological resources. The second was the southern region, which had experienced fast economic development in past decades and a provincial cooperation is needed to strengthen the positive ecological effect diffusion in future. The third was the northern region, having unbalanced eco-economic development, where were required resources complementation among different provinces. The fourth was the western region with slow but accelerated economic development, which should stabilize ecological benefits and improve the economic effectiveness. Overall, our integrated modeling framework presented a spatial statistic method for assessing carbon uptake/ release patterns and dynamics in the coupled system of nature-society over large areas, which may help integrate biophysical and socioeconomic processes for sustainable development in different regions.

Key Words: the coupled system of nature-society; MODIS; carbon emission; carbon footprint; spatial autocorrelation; ecological economic regionalization

21世纪以来,全球气候变化问题受到广泛关注, 碳排放被认为是引起全球变暖的主导因素^[1-2]。一 方面,陆地生态系统具有碳源/汇双重作用,对全球 碳平衡贡献巨大,了解不同生态系统内部植被、土壤 碳动态是碳循环研究的重要组成部分^[3-7];另一方 面,随着 2005 年《京都议定书》的生效和 2009 年哥 本哈根全球气候大会的召开,削减化石燃料碳排放 成为全球共识,社会经济系统中的人为碳排放研究 渐成热点^[8-10]。然而,基于以上两方面开展自然-社 会二元系统分析才能更好地了解自然和人为因素综 合作用下的碳动态以及自然生态系统对社会经济活 动的反馈能力^[11]。

由生态足迹引申而来的碳足迹概念能够直观衡 量自然系统对人类活动碳排放的响应^[12],自提出以 来已在家庭住户^[13]、大都市区^[14]的碳足迹估算和模 型比较^[15]等方面取得了一定进展;国内学者对于不 同土地利用类型^[16]、不同产业^[17-18]的碳足迹以及全 国尺度上的碳足迹时空格局^[19-20]也做出了探索。这 些研究为开展碳动态的进一步研究奠定了基础,但 目前对于中国自然-社会二元系统的碳排放和碳足 迹格局分析仍处于起步阶段,主要薄弱点在于:一是 时空格局仅限于定性描述,尚未应用空间统计分析 方法^[19];二是土地利用变化和植被碳汇多来源于统 计数据和经验数据^[16,21-22],口径不一且难以体现异 质性。本文首次采用分辨率高、来源稳定、实时性强的 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 数据,引入空间自相关方法,评估 2001—2009 年中 国碳排放和碳足迹时空动态,并把研究结果应用到 生态经济区划中,旨在构建全国尺度上碳动态研究 的空间统计方法,并为优化各区域的生态效益和经 济效益提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 研究区域

本文参考 1961 年国家计委设置的华北、东北、 华东、中南、西南、西北六大经济协作区方案,加上 港、澳、台,将全国分为七大区域。其中,藏、港、澳、 台的能源数据缺失,不作讨论。

1.2 数据及预处理

1.2.1 数据来源及精度

(1)遥感数据

本文土地利用和植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)数据分别来自 NASA (National Aeronautics and Space Administration,美国 国家航空航天局)网站(https://lpdaac.usgs.gov/ products/modis_products_table)提供的 MODIS 产品 MCD12Q1 和 MOD17A3。MCD12Q1 空间分辨率为 500 m,采用监督决策树分类的方法处理年度的 Terra 和 Aqua 卫星观测所得数据;本文仅需据其提取土地 总面积信息。MOD17A3 空间分辨率为1 km,时间分 辨率为 1a,由参考 BIOME-BGC (Biome-Biogeochemical Cycles)模型与光能利用率模型建立 的 NPP 估算模型处理 Terra 卫星数据得到。较之传 统的回归模型,BIOME-BGC 模型是从植被机理出发 建立的过程模型,使用了更多的参数和更精密的估 算方法以提高精度^[23-24]。近年来, MOD17A3 已对全 球多种植被类型进行了验证[25-27],在我国也已被用 来监测青藏高原地区^[28]、南水北调东线地区^[29]、陕 西省[30]的植被生长状况以及广东省水稻生物质 能[23]、东北地区植被农田的时空特征[30-31]等;其精 度能够满足全国尺度上的 NPP 分析。

(2)统计数据

目前以化石能源为代表的传统能源是产生碳排

放的主导因素^[16],故本文选取煤炭、原油、汽油、煤 油、柴油、燃料油、天然气、电力8类能源为社会经济 系统碳排放的核算指标。2001—2009年各省各类能 源消费数据来自《中国能源统计年鉴》。

(3)辅助数据

主要来自国家基础地理信息中心提供的《1:400 万中国省级政区图》。

1.2.2 数据预处理

为构建与研究区实际地理基础一致的 MODIS 时间序列数据集,使用 MRT (MODIS Reprojection Tool)批处理软件和 AreGIS9.3 提取 2001—2009 年 土地利用和 NPP 数据集。MCD12Q1 产品包含 5 个 土地覆盖分类方案不同的数据集,本文根据 Land Cover Type1 数据集,即 IGBP (International Geosphere-Biosphere Program)分类方案计算各省土地总面积; MOD17A3 产品包含 3 个数据集,本文提取其 Gridded 1 km Annual Net Productivity 数据集获取各 省逐年 NPP 数据(图1)。



图 1 数据预处理流程图 Fig.1 The flow diagram of data preprocessing

1.3 计量模型

1.3.1 自然生态系统碳动态

随着植物生长及其生物量增加,CO₂通过植被光 合作用进入自然生态系统并储存起来。本文以 NPP 作为自然生态系统碳动态的衡量指标。NPP 是指绿 色植物在单位时间单位面积上扣除自氧呼吸后的有 机干物质生产量^[32],反映了植物固定和转化光合产 物的效率,是判定生态系统碳汇、调节生态过程的主 要因子和表示碳吸收的常用指标^[33],已在生态系统 碳循环研究中得到广泛应用^[34-35]。

1.3.2 社会经济系统碳排放

构建基于能源消费的社会经济系统碳排放计量 模型(式1)。

$$CE_{ii} = \sum_{j}^{n} E_{iji} \cdot cv_{j} \cdot \delta_{j} \cdot 10^{-12}$$
(1)

式中, CE_{ii} 为 i 区域 t 年能源消费碳排放总量(Pg C/ a), E_{iji} 为 i 区域 t 年第 j 种能源消费总量(kg 或 kW · h), cv_j 为第 j 种能源折算标准煤的参考系数(表 1), δ_j 为第 j 种能源的碳排放系数, 取自相关文献平 均值(表 2)。

Table 1 Standard coal coefficient of main energy								
能源类型 Type of energy	标准煤折算系数 Standard coal coefficient	能源类型 Type of energy	标准煤折算系数 Standard coal coefficient					
焦炭 Coal/ (kg ce/kg)	0.9714	柴油 Diesel/ (kg ce/kg)	1.4571					
原油 Oil/ (kg ce/kg)	1.4286	燃料油 Fuel oil/ (kg ce/kg)	1.4286					
汽油 Petrol/ (kg ce/kg)	1.4714	天然气 Natural gas/ (kg ce/m ³)	1.2143					
煤油 Kerosene/ (kg ce/kg)	1.4714							

表1 各类能源折算标准煤的参考系	数
------------------	---

	表 2 碳排放转换系数表 Table 2 Carbon emission conversion coefficient of main energy									
序号 ID	煤炭 Coal⁄ (kg C/kg)	石油 Petroleum⁄ (kg C/kg)	天然气 Natural gas/ (kg C/kg)	电力 Electricity/ (kg C kW ⁻¹ h ⁻¹)	数据来源 Data sources	参考文献 References				
1	0.76	0.50	0.45	—	IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)	[36]				
2	0.75	0.59	0.45	—	IEA(International Energy Agency)	[37]				
3	0.73	0.58	0.44	—	GEF(Global Environmental Facility)					
4	0.72	0.58	0.41	—	ADB(Asian Development Bank)					
5	0.70	0.58	0.40	—	ORNL(Oak Ridge National Laboratory)	[38]				
6	0.76	0.48	0.39	0.27	DOE/EIA(Department of Energy/ Energy Information Administration)	[39]				
7	0.68	0.57	0.45	0.29	日本能源经济研究所					
8	0.75	0.54	0.41	0.36	中国工程院					
9	0.73	0.58	0.44	0.29	国家环保局温室气体控制项目					
10	0.66	0.58	0.41	0.28	国家科委气候变化项目					
11	0.75	0.59	0.45	0.25	国家科委北京项目					
12	0.65	0.58	0.44	—	国家发改委能源研究所	[40]				
13	0.72	0.54	0.40	—	国家计委能源所能源与环境研究室	[41]				
平均 Mean				0.29						

1.3.3 碳足迹

根据环球足迹网络(Global Financial Network, GFN)的定义,碳足迹是通过光合作用吸收由化石燃 料燃烧所产生的 CO₂所需要的生产性土地(植被)面 积^[42],用以测度人类能源消费碳排放对生态空间的 占用情况。当区域生态容量不足以吸收由化石燃料 燃烧所产生的 CO₂时产生碳赤字($\Delta CF_{\mu} > 0$),区域发 展处于不可持续状态;反之为碳盈余。本文基于对 自然生态系统和社会经济系统碳动态的分别测算, 参考生态足迹的计算方法^[9]构建碳足迹计量模型 (式2,式3):

$$CF_{ii} = (CE_{ii} / \text{NPP}_{r}) \times 10^{9}$$
$$= CE_{ii} / (\text{NPP}_{ii} / S_{ii} \times 10^{9}) \times 10^{9}$$
$$= (CE_{ii} / \text{NPP}_{ii}) \times S_{ii}$$
(2)

$$\Delta CF_{ii} = CF_{ii} - S_{ii} \tag{3}$$

式中, *NPP*, 为区域综合 NPP(g C m⁻² a⁻¹), *CF*_{*i*}为*i* 区域*t*年的碳足迹(km²), *CE*_{*i*}为*i*区域*t*年能源消费 碳排放总量(Pg C/a), *S*_{*i*}为*i*区域*t*年的土地总面积 (km²), NPP_{*i*}为*i*区域*t*年的总净初级生产力 (Pg C/a)。

1.4 空间统计分析方法

空间统计分析方法充分利用属性数据的空间特性,弥补传统计量模型在空间分析和数值相关分析 上顾此失彼的缺陷。在 GIS(Geographic Information System)环境下对碳动态进行空间统计分析,可以更 形象深刻地揭示其时空格局。本文运用了空间统计 分析方法中的空间自相关分析模型。根据地理学第 一定律,任何事物都相关,但相近的事物关联更紧 密。空间自相关分析就是基于这一定律,假设研究 区中所有值都是非独立的,相互之间存在相关性。 正空间自相关是指邻近区域的属性具有相似的趋势 和取值,负空间自相关是指邻近区域的属性具有相

1.4.1 空间权重矩阵

空间权重矩阵用以定量界定区域单元之间的邻接关系,本文采用简单的二进制邻接矩阵(式4),在 Geoda095i软件中以 queen 标准创建邻接性权重 文件。

鉴于海南和广东、福建和中国台湾联系密切,故 对生成的权重文件进行微调,改成海南和广东相邻 接、福建和中国台湾相邻接。

1.4.2 全局空间自相关

全局空间自相关用以判断现象整体空间聚集性的存在与否及聚集程度的大小。Moran's I 是度量全局空间自相关的常用指标之一:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} W_{ij} \times C_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} W_{ij} \times S^{2}}$$
(5)

$$\overline{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_i \tag{6}$$

$$S^{2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (X_{i} - \overline{X})^{2}$$
(7)

$$C_{ij} = (X_i - \overline{X}) (X_j - \overline{X})$$
(8)

式中, X_i , X_j 分别为i,j空间单元的属性值, \bar{X} , S^2 分别 为属性值在n个单元中的期望和方差, W_i 为空间邻 接矩阵, C_i ,为属性相似矩阵。Moran's I的取值在-1—1之间,其中-1表示极强的负空间自相关,1表示 极强的正空间自相关,0表示不存在空间自相关。 构造Z统计量对空间自相关进行显著性检验 (式9):

$$Z(d) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{Var(I)}}$$
(9)

式中,*E*(*I*)、*Var*(*I*)分别为*I*的期望和方差。一般当 |*Z*|>1.96时,差异显著,即在 95%的概率下存在空 间自相关。在 Geoda095i 软件中可以计算 Moran's *I* 值,评估全局空间自相关性。

1.4.3 局域空间自相关

局域空间自相关能够反映局部的空间差异程度,推算出高、低值的聚集范围。LISA(Local Indicators of Spatial Association)是分析局域空间自相关的常用方法:

$$I_{i} = \sum_{j=1}^{n} W_{ij}(X_{i} - \bar{X}) (X_{j} - \bar{X})$$
(10)

各字母含义及检验统计量同上。

在 Geoda095i 软件中绘制 Moran 散点图,其横坐标为各区域单元标准化处理后的属性值,纵坐标为标准化处理后的空间邻接矩阵所决定的相邻单元的属性值的平均值。散点图的4个象限表达了某一区域和其周围区域的局域空间联系,一、三象限为正空间自相关,二、四象限为负空间自相关。

2 结果与分析

2.1 自然生态系统碳动态的时空格局

2001—2009 年全国 NPP 年平均值变动范围在 341—371 g C m⁻² a⁻¹之间,多年平均值为 362 g C m⁻² a⁻¹;全国年总 NPP 值在 3.13—3.40 Pg C/a 之 间,多年平均值约为 3.32 Pg C/a,总体波动不大 (图 2)。

研究时段内全国多年平均 NPP 值的空间分布 呈西南地区>东南沿海>华中、华东地区>东北、华北 地区>西北地区的格局(图 3);其中海南最大(905 g C m⁻² a⁻¹),新疆最小(143 g C m⁻² a⁻¹)。NPP 自南 向北随纬度增加而递减,淮河以北地区自东向西随 经度减小而递减,淮河以南地区随经度递变趋势不 明显。这种空间格局的形成主要与地带性植被类型 有关,而水热条件是植被生长的决定因素。自南向 北随温度降低依次分布热带阔叶林、亚热带常绿阔 叶落叶林、亚热带热带针叶林、温带落叶阔叶林, NPP 依次减小。北部地区自东向西随水分减小依次 分布湿润温带森林、内蒙古草原、干草原, NPP 逐渐 减小。另外,城市化进程增加了不透水表面比例,减 少了自然植被覆盖,因而气候特征相当的地区 NPP 也会因城市化程度不同而有所差异,比如北京、天津 的 NPP 值小于河北。

2.2 社会经济系统碳排放的时空格局

2001—2009 年全国年总能源消费碳排放量呈逐 年增加趋势(图 2),由 1.52 Pg C/a(2001 年)增加到 3.53 Pg C/a(2009 年),年均增长率为 16.6%,多年平 均值为 2.53 Pg C/a。碳排放总量前 5a 增速大于后 5a,说明研究时段内就全国范围而言碳排放增加趋 势已开始变缓。

研究时段内全国平均单位面积能源消费碳排放 量呈现东部>中部>西部的空间分异(图3);其中上 海最大(1.17×10⁴ g C m⁻² a⁻¹),青海最小(14 g C m⁻² a⁻¹)。能源消费碳排放与当地经济发展需求密切相关,以上海为中心的长三角经济圈和以北京、天津为中心的环渤海经济圈单位面积碳排放量最高;新疆、青海、甘肃等发展较慢的西北省份单位面积碳排放量最低。







图 3 2001—2009 年自然-社会二元系统平均碳收支空间格局 Fig.3 Spatial patterns of the "nature-society" dualistic carbon fluxes in China during 2001—2009

2.3 碳足迹、碳赤字的时空格局

2.3.1 碳足迹、碳赤字的时间格局

2001—2009年全国碳足迹、碳赤字均呈逐年增加趋势(图4),碳足迹由4.46×10⁶km²(2001年)增加到9.69×10⁶km²(2009年),年均增长率为14.7%, 多年平均值为6.98×10⁶km;碳赤字由-4.73×10⁶km²(2001年)增加到5.01×10⁵km²(2009年),多年平均 值为-2.20×10⁶km²,自 2009 年开始出现正碳赤字。 碳足迹、碳赤字后 5a 增速小于前 5a,说明许多地区 已开始采取碳增汇或碳减排措施控制自然-社会二 元系统的碳排放增加。

2.3.2 碳足迹、碳赤字的空间格局

2001—2009 年全国平均碳赤字(图 5)以产煤大 省山西省最大(5.03×10⁵km²),其次为重化工-资本 密集型的环渤海地区、高科技-知识密集型的长三角 地区、轻纺-劳动密集型的珠三角地区;而中西部地 区以及东部的福建、江西、吉林、黑龙江等省具有碳 盈余,新疆碳盈余最大(1.16×10⁶ km²)。2001年,具 有正碳赤字的省份集中在山西、河北、辽宁、山东、河 南、江苏,中西部地区存在大量碳盈余;2005年,碳赤 字在环渤海经济圈、长三角经济圈、珠三角经济圈明 显加剧;2009年,环渤海地区各省碳赤字进一步增 加,中西部地区的吉林、重庆、陕西也开始出现正碳 赤字。研究时段内具有碳赤字的省份逐年增多,说 明越来越多的省份生态用地无法满足消纳碳排放的 需求;总体来看,华东、华北、中南地区的碳赤字增加 较快,说明这些地区生态用地被占用带来的碳汇减 少快于能源结构调整带来的碳源减少。



图 4 2001—2009 年全国碳足迹、碳赤字时间分布图 Fig.4 Temporal patterns of carbon footprint and carbon deficit in China from 2001 to 2009



Fig.5 Spatial patterns of carbon footprint and carbon deficit in China during 2001-2009

(1)Moran 指数

从全国范围来看,各年份 Moran 指数的统计量 相当显著(图 6),表明碳赤字在全国范围内存在显

^{2.3.3} 碳赤字的空间自相关分析

著的正空间自相关,存在相似值的空间集聚。从不 同区域来看,西北、华东地区碳赤字的 Moran 指数为 正且较显著,其中经济发展迅速而生态用地紧缺的 华东地区表现为明显的高值集聚,经济发展较慢而 生态用地充裕的西北地区则为低值集聚。华北地区 碳赤字的 Moran 指数为负且较显著,存在负空间自 相关,碳赤字表现为明显的高低间隔分布,区内各省 经济效益和生态效益参差不齐。中南、东北、西南地 区的 Moran 指数趋于 0,空间自相关性很弱,碳赤字 大致呈随机分布。



图 6 2001—2009 年全国及各区域碳赤字的 Moran 指数时间分 布图

Fig.6 Temporal patterns of Moran's *I* in China and different regions during 2001–2009

(2) Moran 散点图和 LISA 分析

在 Geoda095i 软件中绘制主要年份全国碳赤字 的 Moran 散点图(图 7)。图中 4 个象限表达了某一 区域和其周围区域的局域空间联系。第一象限 HH (High, High)表示该区域和周围属性值均较高;第二 象限 LH(Low, High)表示该区域属性值明显低于周 围;第三象限 LL(Low, Low) 表示该区域和周围属性 值均较低;第四象限 HL(High,Low)表示该区域属性 值明显高于周围。观察各象限包含省区的变化,可 以看出 2001—2009 年碳赤字空间格局的演变过程 包括如下几类:(1)HH→LH,即碳赤字相对于周边 减小,如海南自1999年提出建设生态省战略以来, 生态旅游、绿色农业等产业逐渐兴起,生态效益和经 济效益得到了综合提升,碳赤字比周边省份减小迅 速^[44];(2)HH→HL,即碳赤字相对于周边增加,如广 东,近10年来珠三角地区的快速密集城市化导致该 省自然资源压力明显高于周边^[45];(3)LH→LL,如 湖南,开始时相对于周边省份具有较低的碳赤字,随 着省际联系的加强,在生态保护方面对周边省份起 到了示范和带动作用,使得周边省份的碳赤字也减 小,积极的生态效应向周边扩散;(4)HL→LL,如重 庆,开始时相对周边省份具有较高的碳赤字,随着整 个西部地区生态用地的合理规划,周边各省积极的 生态效应向该省扩散;(5)HL→HH,如山西、辽宁、 吉林、陕西,开始时相对于周边省份具有较高的碳赤 字,随着跨省经济协作的加强,能源消费碳排放在更 大范围内迅速增加,消极的生态效应向周边扩散。

2.4 基于碳动态的中国生态经济区划

生态经济区划是以自然-社会二元复合系统为 对象,以生态-经济耦合理论为基础,根据自然生态 因素和社会经济因素的特点及其内在联系所构成的 空间组合形式的相似性和差异性,总结生态经济功 能的地域分异规律,划分融合生态和经济要素的地 域单元,并明确不同单元在区域开发中承担的主要 功能[46]。与2001年傅伯杰等提出的划分3个大区 (东部湿润、半湿润生态大区,西北干旱、半干旱生态 大区,青藏高原高寒生态大区)的中国生态区划方 案[47]以及 2012 年谢高地等提出的划分 4 个生态大 区(东北部湿润半湿润生态大区,北部干旱半干旱生 态大区,南部湿润生态大区和青藏高原生态大区)的 中国生态区划方案^[48]不同,本文不只依据气候、地 貌、植被特征,而是兼顾了自然和人为因素,根据 2001-2009 年全国碳赤字的空间格局(图 5) 和局域 空间自相关性(图7),把碳赤字时空动态较一致的 省区合并,划分4个大区(图8)。

(1)中、东部地区

位于长江以北、太行山以东,包括北京、天津、河 北、上海、江苏、浙江、安徽山东、河南、湖北。该区跨 越中温带、暖温带、北亚热带3个气候带,水热资源 没有长江以南地区优越,NPP较小。长三角、环渤海 两大经济圈以及依托"中部崛起"战略而迅速发展起 来的中原城市群经济发展速度快,急剧增加的能源 消费催生了大量碳排放,碳赤字严重。研究时段内, 区内各省的碳赤字表现出明显的高值集聚。为了在 发展经济的同时兼顾生态效益,该区未来应加强省 际协作,调整能源结构,共同打造低碳发展模式;并 保护好有限的生态用地,改善植被覆盖状况,延缓碳 赤字的进一步增大。



图 7 2001—2009 年全国碳赤字 Moran 散点图及对应省份分布

Fig.7 Moran scatterplot of carbon deficit and provinces corresponding to it during 2001-2009

散点图横坐标为相应年份碳赤字标准化值,纵坐标为相邻单元碳赤字标准化均值;象限图四象限分别表示"高-高(HH)"、"低-高(LH)"、 "低-低(LL)"、"高-低(HL)"

(2)南部地区

位于长江以南、雪峰山以东,包括福建、江西、湖 南、广东、海南、中国香港、中国澳门、中国台湾。该 区跨越中亚热带、南亚热带、热带三个气候带,水热 资源丰富,NPP大。研究时段内,区内各省碳赤字的 空间集聚不明显,湖南、海南等省生态效益较高,广 东等省生态效益较低。未来应充分利用优良的自然 条件,合理处理经济发展和生态保护之间的关系;并 强化省际联系,尤其是碳赤字较高和较低的省份之 间的互补,促进低碳发展模式扩散和资源合理利用。

(3)北部地区

位于祁连山以东,包括山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、陕西、宁夏。该区域跨越寒温带、中温带两个气候带,水热条件较差,NPP 较低。未来应加强 省际合作和互补,充分利用内蒙古、黑龙江两省丰富 的草地、林地资源,缓解山西、辽宁等经济发展较快 省份的碳赤字,发挥不同省份的比较优势和带动 作用。



图 8 基于碳赤字空间自相关性的中国生态经济区划 Fig.8 Eco-economy regionalization in China based on spatial autocorrelation of carbon deficit

(4) 西部地区

位于贺兰山—六盘山—大巴山—线以西,包括 重庆、四川、贵州、云南、西藏、甘肃、青海、新疆。气 候带跨度较大,包括温带、亚热带、高原气候区。除 西南小部分地区外,NPP 较小,但生态用地相当丰 富。目前该区经济发展相对落后。未来应在保护好 生态用地的同时,加快经济发展和区域协作,尤其注 重在大区域内对生态用地的跨省合理规划和利用, 从而在一定程度上缓解重庆、四川等发展相对较快 的省份的碳赤字。另外还应减少或消灭沙尘源,恢 复与再建干旱区绿色植被与荒漠植被。

3 结论

(1)自然生态系统碳动态的时空格局:2001—2009年全国 NPP 多年平均值约为3.32 Pg C/a,时间 上总体波动不大,空间上呈西南地区>东南沿海>华 中、华东地区>东北、华北地区>西北地区的格局。

(2)社会经济系统碳排放的时空格局:2001—2009年全国能源消费碳排放量逐年增加,年平均增长率为16.7%,多年平均值为2.53 Pg C/a;呈东部>中部>西部的空间格局。

(3)自然-社会二元系统碳足迹和碳赤字的时空 格局:碳足迹是自然-社会二元系统中能源结构、产 业结构、土地利用结构的综合反映。2001—2009 年 全国平均碳足迹为 6.98×10⁶ km²;碳足迹、碳赤字均 逐年增加,碳足迹年均增长率为14.7%,自2009年开 始出现正碳赤字。从研究时段平均状况来看,具有 正碳赤字的省份为山西、环渤海地区各省、长三角地 区各省、广东;具有碳盈余的省份多集中在中西部地 区。碳赤字在全国范围内存在显著的正空间自相 关;华东、西北、华北地区分别表现为高值集聚、低值 集聚、高低间隔分布,其他区域空间自相关性较弱。 相邻省份碳赤字的相对大小由于互相影响而改变, 因此通过加强区域联系能使高值聚集区的"谷点"向 周边扩散积极生态效应,或使低值聚集区的"峰点" 受周边积极生态效应的影响而改善生态状况,从而 优化整体生态效益。

(4)全国分为中东部、南部、北部、西部4个生态 经济大区。其中,中东部地区经济发展快而生态用 地相对不足,急需探索低碳发展模式;南部地区经济 发展逐渐加快且自然条件优越,加强省际合作有助 于积极生态效应的扩散;北部地区发展不均衡且自 然条件较差,应加强省际互补和资源合理保护与利 用;西部地区发展较慢而生态用地相对充裕,应在稳 定生态效益的同时提高经济效益。较之以往的生态 区划方案,本文对生态大区的划分综合考虑了自然 生态系统对社会经济系统的响应,更有利于揭示各 区资源环境和人类活动之间的耦合关系,为实现自 然-社会二元系统的可持续发展提供科学依据。然 而,根据本文目前的数据条件仅能作出省域尺度上 的大区划分,对于中小尺度的生态地区、生态区的划 分仍是需要继续研究的内容。

致谢:感谢北京大学城市与环境学院赵淑清研究员, 周德成、曾振中博士,以及住房和城乡建设部城乡规 划管理中心胡毅博士对本研究的帮助。

References :

- IPCC. Climate change 2007: the physical science basis // Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L, eds. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Fang J Y, Zhu J L, Wang S P, Yue C, Shen H H. Global warming, human-induced carbon emission, and their uncertainties. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2011, 54(10): 1458-1468.
- [3] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexier M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest

ecosystems. Science, 1994, 263(5144): 185-190.

- [4] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [5] Houghton R A. Counting terrestrial sources and sinks of carbon. Climatic Change, 2001, 48(4): 525-534.
- [6] Li K R, Wang S Q, Cao M K. Vegetation and soil carbon storage in China. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2004, 47(1): 49-57.
- Ge Q S, Dai J H, He F N, Pan Y, Wang M M. Land use changes and their relations with carbon cycles over the past 300 a in China. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2008, 51(6): 871-884.
- [8] Soytas U, Sari R, Ewing B T. Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States. Ecological Economics, 2007, 62(3-4): 482-489.
- [9] Xie H Y, Chen X S, Lin K R, Hu A Y. The ecological footprint analysis of fossil energy and electricity. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1729-1735.
- [10] Zhu Y B, Wang Z, Pang L, Wang L J, Zhou X P. Simulation on China's economy and prediction on energy consumption and carbon emission under optimal growth path. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(8): 935-944.
- [11] Zhao R Q, Huang X J. Carbon cycle of urban system: characteristics, mechanism and theoretical framework. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 358-366.
- [12] Wackernagel M, Ress W E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- Druckman A, Jackson T. The carbon footprint of UK households 1990- 2004: A socio-economically disaggregated, quasi-multiregional input-output model. Ecological Economics, 2009, 68 (7): 2066-2077.
- Sovacool B K, Brown M A. Twelve metropolitan carbon footprints: A preliminary comparative global assessment. Energy Policy, 2010, 38(9); 4856-4869.
- [15] Kenny T, Gray N F. Comparative performance of six carbon footprint models for use in Ireland. Environmental Impact Assessment Review, 2009, 29(1): 1-6.
- [16] Zhao R Q, Huang X J. Carbon emission and carbon footprint of different land use types based on energy consumption of Jiangsu province. Geographical Research, 2010, 29(9): 1639-1649.
- [17] Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y. Research on carbon emission intensity and carbon footprint of different industrial spaces in China. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(9): 1048-1057.
- [18] Fan J, Li P X, Liang Y T. Framework of financial consumption oriented research on carbon footprints. Advances in Earth Science, 2010, 25(1): 61-68.
- [19] Chuai X W, Lai L, Huang X J, Zhao R Q, Wang W J, Chen Z G. Temporospatial changes of carbon footprint based on energy consumption in China. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(1): 110-124.
- [20] Shi M J, Wang Y, Zhang Z Y, Zhou X. Regional carbon footprint and interregional transfer of carbon emissions in China. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(10): 1327-1338.
- [21] Li Y, Huang X J, Zhen F. Effects of land use patterns on carbon emission in Jiangsu province. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(S2): 102-107.

- [22] Lan J C, Fu W L, Yuan B, Zhang T, Peng J T. Analysis of land use patterns on carbon emission and carbon footprint in Chongqing city. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26 (1): 146-155.
- [23] Zhang X H, Li X, Shi X, Liu K. Estimation of paddy biomass energy in Guangdong province. Remote Sensing Informatioin, 2007(1): 26-29, 21-21.
- [24] Li D K, Fan J Z, Wang J. Variation characteristics of vegetation net primary productivity in Shaanxi Province based on MOD17A3. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(12): 2776-2782.
- [25] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, Gower S T, Running S W, Zhao M S, Costa M H, Kirschbaum A A, Ham J M, Saleska S R, Ahl D E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. Remote Sensing of Environment, 2006, 102 (3-4): 282-292.
- [26] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, Gower S T, Zhao M S, Running S W, Wofsy S C, Urbanski S, Dunn A L, Munger J W. Scaling Gross Primary Production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of MODIS GPP product validation. Remote Sensing of Environment, 2003, 88 (3): 256-270.
- [27] Gebremichael M, Barros A P. Evaluation of MODIS gross primary productivity (GPP) in tropical monsoon regions. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(2): 150-166.
- [28] Guo X Y, He Y, Shen Y P, Feng D. Analysis of the terrestrial NPP based on the MODIS in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers from 2000 to 2004. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 512-518.
- [29] He Y, Dong W J, Guo X Y, Cao L J, Feng D. Terrestrial NPP variation in the region of the South-North Water Diversion Project (east route). Advances in Climate Change Research, 2006, 2 (5): 246-249.
- [30] Zhu F, Liu Z M, Wang Z M, Song K S. Temporal-spatial characteristics and factors influencing crop NPP across Northeastern China. Resouces Science, 2010, 32 (11): 2079-2084.
- [31] Guo Z X, Wang Z M, Zhang B, Liu D W, Yang G, Song K S, Li F. Analysis of temporal-spatial characteristics and factors influencing vegetation NPP in Northeast China from 2000 to 2006. Resource Science, 2008, 30(8); 1226-1235.
- [32] Fang J Y, Ke J H, Tang Z Y, Chen A P. Implications and estimations of four terrestrial productivity parameters. Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25(4): 414-419.
- [33] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. Science, 281(5374): 237-240.
- [34] Venetoulis J, Talberth J. Refining the ecological footprint. Environment, Development and Sustainability, 2008, 10 (4): 441-469.
- [35] Fang K, Shen W B, Dong D M. Modification and predication of energy ecological footprint: A case study of Jilin Province. Geographical Research, 2011, 30(10): 1835-1846.
- [36] Zhou J H. The Research on the Cointegration and Causality between Land Use Change and Carbon Budget in Changsha City [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2011.
- [37] Wang X N. Study on Estimation Method of Carbon Emission to Energy Carbon Sources in China [D]. Beijing: Beijing Forest University, 2006.

- [38] ORNL. Estimates of CO₂ Emissions from Fossil Fuel Burning and Cement Manufacturing. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1990.
- [39] Wang G, Feng X. CO₂ emission reduction through energy integration. Chemical Industry and Engineering Progress, 2006, 25(12): 1467-1470.
- [40] Energy Research Institute of NDRC. Study on the sustainable energy development and carbon emission scenarios analysis in China. 2003.
- [41] Gao S T, Zhang H Q, Yang L R, Wang Q L. Forecast method and countermeasures for greenhouse gases in China. Research of Environmental Sciences, 1994, 7(6): 56-59.
- [42] Global Footprint Network. GFN Ecological Footprint: Glossary. Oakland, CA, USA, 2007 [2013-08- 13]. http://www. footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/carbon_footprint/.
- [43] Meng B, Wang J F, Zhang W Z, Liu X H. Evaluation of regional disparity in China based on spatial analysis. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(4): 393-400.
- [44] Ouyang Z Y, Wang R S, Zheng H, Lin S K. Ecological culture in Hainan ecological construction. China Population, Resources and Environment, 2002, 12(4): 72-74.
- [45] Wang S G, Zhou Y Z. Integrated frame research for resources & environment in megalopolises and regional sustainable development: case study on pearl river delta. China Population, Resources and Environment, 2002, 12(3): 54-59.
- [46] Group of Ecological-Zonation, Research Centre of Ecology. On the principle of Ecological-economic zonation (Draft). Acta Ecologica Sinica, 1983, 3(2): 102-102.
- [47] Fu B J, Liu G H, Chen L D, Ma K M, Li J R. Scheme of ecological regionalization in China. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(1): 1-6.
- [48] Xie G D, Zhang C S, Zhang L B, Su D, Cao S Y, Leng Y F, Xiao Y. China's county-scale ecological regionalization. Journal of Natural Resources, 2012, 27(1): 154-162.

参考文献:

- [2] 方精云,朱江玲,王少鹏,岳超,沈海花.全球变暖、碳排放及不确定性.中国科学(D辑:地球科学),2011,41(10): 1385-1395.
- [6] 李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳贮量.中国科学 (D辑:地球科学),2003,33(1):72-80.
- [7] 葛全胜,戴君虎,何凡能,潘嫄,王梦麦.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:地球科 学),2008,38(2):197-210.
- [9] 谢鸿宇,陈贤生,林凯荣,胡安焱.基于碳循环的化石能源及 电力生态足迹.生态学报,2008,28(4):1729-1735.
- [10] 朱永彬,王铮,庞丽,王丽娟,邹秀萍.基于经济模拟的中国 能源消费与碳排放高峰预测.地理学报,2009,64(8): 935-944.
- [11] 赵荣钦,黄贤金.城市系统碳循环:特征、机理与理论框架.生态学报,2013,33(2):358-366.
- [16] 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.
- [17] 赵荣钦,黄贤金,钟太洋.中国不同产业空间的碳排放强度与 碳足迹分析. 地理学报, 2010, 65(9): 1048-1057.

- [18] 樊杰,李平星,梁育填. 个人终端消费导向的碳足迹研究框架——支撑我国环境外交的碳排放研究新思路. 地球科学进展, 2010, 25(1): 61-68.
- [20] 石敏俊, 王妍, 张卓颖, 周新. 中国各省区碳足迹与碳排放空间转移. 地理学报, 2012, 67(10); 1327-1338.
- [21] 李颖,黄贤金,甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放 效应分析. 农业工程学报, 2008, 24(S2): 102-107.
- [22] 蓝家程,傅瓦利,袁波,张婷,彭景涛.重庆市不同土地利用 碳排放及碳足迹分析.水土保持学报,2012,26(1):146-155.
- [23] 张晓浩,黎夏,施迅,刘凯.广东省水稻生物质能的估算.遥 感信息,2007(1):26-29,21-21.
- [24] 李登科, 范建忠, 王娟. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变 化特征. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2776-2782.
- [28] 郭晓寅,何勇,沈永平,冯丁.基于 MODIS 资料的 2000-2004 年江河源区陆地植被净初级生产力分析.冰川冻土,2006,28 (4):512-518.
- [29] 何勇,董文杰,郭晓寅,曹丽娟,冯丁.我国南水北调东线地
 区陆地植被 NPP 变化特征. 气候变化研究进展, 2006, 2(5): 246-249.
- [30] 朱锋,刘志明,王宗明,宋开山.东北地区农田净初级生产力时空特征及其影响因素分析.资源科学,2010,32(11): 2079-2084.
- [31] 国志兴, 王宗明, 张柏, 刘殿伟, 杨桄, 宋开山, 李方. 2000 年—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析. 资源科学, 2008, 30(8): 1226-1235.
- [32] 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.
- [35] 方恺, 沈万斌, 董德明. 能源足迹核算的改进与预测——以吉林省为例. 地理研究, 2011, 30(10): 1835-1846.
- [36] 周军辉. 长沙市土地利用变化与碳收支协整性及因果关系研究[D]. 长沙:湖南师范大学, 2011.
- [37] 王雪娜. 我国能源类碳源排碳量估算办法研究 [D]. 北京:北京林业大学, 2006.
- [39] 汪刚, 冯霄. 基于能量集成的 CO₂减排量的确定. 化工进展, 2006, 25(12): 1467-1470.
- [40] 国家发展和改革委员会能源研究所.中国可持续发展能源暨 碳排放情景分析.北京:国家发展和改革委员会能源研究 所,2003.
- [41] 高树婷,张慧琴,杨礼荣,王秋玲.我国温室气体排放量估测 初探.环境科学研究,1994,7(6):56-59.
- [43] 孟斌,王劲峰,张文忠,刘旭华.基于空间分析方法的中国区 域差异研究.地理科学,2005,25(4):393-400.
- [44] 欧阳志云,王如松,郑华,林顺坤.海南生态文化建设探讨.
 中国人口・资源与环境,2002,12(4):72-74.
- [45] 王树功,周永章.大城市群(圈)资源环境一体化与区域可持 续发展研究——以珠江三角洲城市群为例.中国人口・资源 与环境,2002,12(3):54-59.
- [46] 生态学研究中心生态区划组. 生态经济区划原则(讨论稿). 生态学报, 1983, 3(2): 102-102.
- [47] 傅伯杰,刘国华,陈利顶,马克明,李俊然.中国生态区划方案.生态学报,2001,21(1):1-6.
- [48] 谢高地,张昌顺,张林波,苏德,曹淑艳,冷允法,肖玉.保 持县域边界完整性的中国生态区划方案.自然资源学报, 2012,27(1):154-162.