

中国省级区域碳源汇空间格局研究

鲁丰先^{1,2,3}, 张 艳^{1,4}, 秦耀辰¹, 陈真玲², 王光辉³

(1. 河南大学环境与规划学院 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004;

2. 中原经济区“三化”协调发展河南省协同创新中心, 郑州 450046;

3. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190; 4. 南阳师范学院环境科学与旅游学院, 南阳 473061)

摘 要:中国已经成为全球碳排放总量最大的国家,且由于正处在快速工业化和城市化的关键时期,与之伴随的继续增加的碳排放越来越受到国际关注,对碳减排的压力亦日益增加。碳减排需要从减少碳源和增加碳汇两个方面同时推进。本文利用中国森林资源清查数据和相关统计数据,结合排放系数法、森林碳汇蓄积量法和草地固碳速率法,比较全面的估算了省级尺度区域的能源消耗碳排放、森林碳汇、草地碳汇和耕地碳汇,分析了中国碳排放总量、人均碳排放、地均碳排放、能源强度的区域差异,以及碳汇和碳盈余的空间格局特征:①从省级区域单元看,碳排放总量列前三名的是山东、山西和河北,较低的省区为宁夏、青海和海南;人均碳排放较高的为内蒙古、山西和宁夏,较低的省区为江西、海南和广西;地均碳排放最高的为上海,最低的省区为青海;碳排放强度最低的省区包括北京、广东、上海、浙江等。②从全国来看,森林碳汇占总碳汇的52.85%,云南和黑龙江森林碳汇优势显著;草地碳汇占总碳汇的38.51%,主要集中在内蒙古、青海和新疆等省区;耕地碳汇占总碳汇的8.63%,主要集中在黑龙江、吉林、河南和辽宁等省区。今后,东部地区应当转变发展方式,通过科技创新,提高能源利用效率;中部地区要抓住绿色发展机遇,推动低碳产业跨越发展;东北地区的黑龙江碳汇能力较强,可积极参与国际碳交易;西部地区应加强管理,加速技术改进,提高能源利用效率,并加强生态环境建设,增强碳汇能力。

关 键 词:省级区域;碳源;碳汇;空间格局;中国

doi: 10.11820/dlkxjz.2013.12.004

1 引言

“碳汇”与“碳源”这两个相对的概念源于《京都议定书》。碳源(Carbon Source)是指向大气中释放碳的过程、活动或机制。自然界中碳源主要是海洋、土壤、岩石与生物体;另外,工业生产、生活等都会产生CO₂等温室气体,也是主要的碳排放源。这些碳中的一部分累积在大气圈中,引起温室气体浓度升高,打破了大气圈原有的热平衡,影响了全球气候变化。碳汇(Carbon Sink)是指通过植树造林、森林管理、植被恢复等措施,利用植物的光合作用吸收大气中的CO₂,并将其固定在植被或土壤中,从而减少温室气体在大气中浓度的过程、活动或机制。要降低大气中的CO₂浓度,可以从减少碳源和增加碳汇两个方面同时着手。

估算碳排放量常用3类方法:①根据能源消费量、国内生产总值、人口数进行估算(Johan et al, 2002);②IPCC的参考方法,以能源表观消费量、能源的热量转换系数、碳氧化系数、碳排放因子为基础对CO₂排放量进行评估(IPCC, 2006);③IPCC推荐的部门方法,以能源的碳排放强度和能源消费量为基础对碳排放量进行评估。舒娱琴(2012)采用IPCC的部门方法和8大类能源类别,对中国各省区的碳排放量进行计算,分析了各省区的碳排放时空差异,提出各省区减排策略应该有所不同;刘竹等(2011)讨论了城市能源消费碳排放核算方法并分析了存在的问题。

碳汇包括海洋碳汇和陆地碳汇,海洋碳汇相对比较稳定,对陆地碳汇的计算是研究重点。相关成果集中在森林碳汇(董方晓, 2010; 尹少华等, 2013;

收稿日期:2013-04;修订日期:2013-11.

基金项目:国家自然科学基金项目(41171438);国家重大科学研究计划项目(2012CB955804);教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(10JJDZONGHE015);河南省教育厅人文社科项目(2012-JD-010)。

作者简介:鲁丰先(1974-),博士后,副教授,主要从事区域可持续发展研究。E-mail: lfxhenu@126.com

尹晓芬等, 2012)、草地碳汇(Fang et al, 2010; 高添等, 2012; 李剑萍等, 2013; 任继周等, 2011; 王军邦等, 2012)、农业碳汇(谢淑娟等, 2012)领域。

目前,中国尚没有碳排放量的直接监测数据,已有研究案例多集中在省级区域的碳排放和碳汇计算方面,缺乏对在全国尺度上系统计算碳排放和碳汇的研究。考虑到中国森林普查数据5年更新一次,最近一次更新在2008年,本文据此对2008年各省区的碳源、碳汇及碳盈余进行估算,探讨中国碳源碳汇的空间格局状况,以期对中国碳排放调控的区域政策提供参考。

2 碳源与碳汇核算方法

2.1 碳源核算

能源部门通常是温室气体排放的重要部门,中国能源活动的碳排放量占碳排放总量的90%以上,本文采用排放系数法,只对能源活动的碳排放进行估算。其思路是,将各种能源消费实物量乘以其对应发热值,换算为各类能源热值,再分别乘以对应的缺省碳含量,即得到各类能源消费的碳排放量(IPCC, 2006)。

$$Y_n = \sum_{i=0}^6 y_i^n = \sum_{i=0}^6 (W_i^n \times H_i \times C_i)$$
 (1)

式中: Y_n 、 y_i^n 分别表示 n 地区的能源消费碳排放总量和该地区第 i 种能源碳排放量; W_i^n 为能源消费量; H_i 为能源 i 的平均低位发热值; C_i 为能源 i 的缺省碳含量。

选取2008年中国30个省级区域(香港、澳门、台湾和西藏缺少数据,不在相关计算和分析范围内)煤炭、燃料油、汽油、煤油、柴油、天然气等6种主要能源消耗量,相关数据来自《中国能源统计年鉴2009》;能源的缺省碳含量数据来自《2006年IPCC

国家温室气体清单指南》。

2.2 碳汇核算

2.2.1 森林碳汇

森林碳汇是指森林植物通过光合作用将大气中的CO₂吸收并固定在植被与土壤当中,从而减少大气中CO₂浓度的过程。森林碳汇估算主要有样地清查法、通量观测法、模型模拟法、遥感估算法等。本文采用样地清查法中的蓄积量法(赵林等, 2008),该方法以森林蓄积量数据为基础,对森林主要树种进行抽样调查,计算森林中主要树种的平均容量,根据总蓄积量推算生物量,得到森林碳汇量,具有直接、明确、技术简单等优点,适用于估算大尺度森林生物碳汇。

将森林资源清查资料统计中的森林蓄积量资料根据林木密度、树干与总生物量的比例、林木碳含量转变成森林植物碳储量(式2),然后将两次碳储量的差值算成森林植物的年碳库增量。

$$C_{pool} = V \times D / R \times C_a$$
 (2)

式中: C_{pool} 、 V 、 D 、 R 和 C_a 分别是森林植物碳储量、森林蓄积量、林木密度、树干占总生物量的比例和林木碳含量(取0.5)。中国森林资源清查时间间隔为5年,分别依据第六次(2003)和第七次(2008)全国森林清查数据(分别来自《中国统计年鉴2006》和《中国统计年鉴2010》)估算森林碳储量,则碳储量的增量即为5年的森林净碳汇,用年份相除得到年均森林净碳汇。

本文以省级区域为单元,将全国分为4个气候带,森林植被分区和省区的划分依据各省区气候差异和典型地带性植被差异确定;林木密度和树干占生物量的比例是基于各气候带主要林木的木材物理性质测定和主要林分生物量的调查资料(表1)。

2.2.2 草地碳汇

中国草地生态系统碳储量远低于森林,森林植

表1 中国各森林植被带碳汇估算参数

Tab.1 Evaluation parameters of carbon sink of different forest vegetations in China

森林植被带	林木密度 /(Mg/m ³)	树干占总生物 量的比例/%	气候带	省市区
寒温带温带	0.47	56.7	寒温带温带	黑龙江、辽宁、吉林、内蒙古、新疆
暖温带	0.45	50.0	暖温带	山西、陕西、天津、北京、甘肃、河北、青海、宁夏、山东、河南
亚热带	0.47	54.8	亚热带	江西、福建、湖南、浙江、安徽、湖北、上海、江苏、西藏、四川、重庆、贵州、云南、广东、广西
热带	0.60	58.1	热带	海南

注:相关数据参考中国发展战略学研究会《中国碳平衡交易框架研究报告》(2008),表2~4同。

被在长期积累过程中形成了较高的生物量和凋落物,而草地受到长期过度放牧、开垦和人为活动干扰,植被循环转换较快,地表凋落物的积累量较少,草地逆向演替较快,碳源作用明显。但随着退耕还林、还草工程的实施,草地土壤的固碳量在增加,草地在生态系统碳平衡中依然发挥着显著的碳库作用。由于草地概念界定、面积统计、方法选择、观测数据指标体系等不确定因素影响,当前关于草地碳储量的估算结果差异较大。本文根据草地面积和单位面积固碳速率来估算2008年中国各省区草地生态系统固碳能力,计算公式如下:

$$CSP=CSR\times A \tag{3}$$

式中: CSP 为土壤年固碳量($t\cdot a^{-1}$); CSR 为单位面积草地的固碳速率($t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$),即土壤有机碳年变化量的差值; A 为草地面积,数据来自国家统计局网站2009年环境统计数据。

依据气候、地形、草地植被特征,将中国草地划分为典型草地、荒漠草地和高寒草地3种类型,各类草地的固碳速率和分布的省级区域如表2所示。

2.2.3 耕地碳汇

陆地生态系统中的耕地因其高产出而有较高的碳汇,但耕地产出的粮食都被消耗,秸秆的一部分也被燃烧,其中固定的碳又被排放,因此这部分碳汇往往被抵消。本文主要考虑农作物秸秆还田被土壤固定的碳。农田土壤的固碳能力因受到作物种类、气候、土壤性质和种植制度等多种因素的影响而有较大差异,为此,本文基于农业分区来区

分这些因素对固碳能力的影响:东北旱作一熟区(I)、北方旱作两熟区(II)、东南部水田两熟三熟区(III)和西北旱作两熟区(IV)(表3)。

秸秆还田量首先是以各种作物的产量,乘以相应作物的秸秆籽粒比(表4)得到秸秆资源量,然后乘以秸秆还田率0.5,秸秆还田固碳的计算见式4, $I\sim IV$ 区的系数 A 分别取170.320、58.068、16.796和0.505,系数 B 分别选取803.46、20.688、-15.917和231.73。

$$CCR_F=A\times R+B \tag{4}$$

式中: CCR_F 为农田土壤固碳速率($t\cdot a^{-1}$); R 为当年秸秆还田量($t\cdot a^{-1}$); A 和 B 为系数。

本文计算了水稻、小麦、玉米、大豆、花生、油菜籽、芝麻、薯类和糖料等9类作物的秸秆还田固碳量。作物产量数据来自《中国统计年鉴2009》。

3 结果与分析

3.1 碳源碳汇核算结果

根据上文方法,核算各省区的碳源碳汇结果见表5。①2008年中国能源消耗碳排放总量为79.24亿t,其中煤炭的CO₂排放占总量的86.81%,这是中国以煤炭为主的能源结构造成的。②2008年中国森林碳汇总量为4.04亿t,省区之间的绝对量差异较大:西南部的云南、广西等省区以及东北的黑龙江省森林碳汇量较高,碳汇量最高的前5个省区年碳汇量1.84亿t,占全国森林碳汇的45.46%;碳汇较低的10个省份年碳汇总量为0.23亿t,仅占全国总量的5.67%。③2008年中国草地碳汇总量为2.94亿t,省区之间差异同样很大:草地碳汇量超过1000万t的有内蒙古、青海、新疆、四川和甘肃等5个省区,碳汇量合计2.72亿t,占全国草地碳汇量的92.32%。④2008年全国秸秆还田碳汇总量为6596万t,远低于森林和草地的碳汇贡献,其中东北三省合计为3230万t,占全国的49%。⑤中国2008年的

表2 中国草地类型及固碳速率

Tab. 2 Carbon sequestration rates of different grassland types in China		
草地类型	固碳速率 / $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$	包括省级区域
典型草地	0.472	内蒙古及中国东部和南部各省区
荒漠草地	0.276	宁夏、甘肃和新疆
高寒草地	0.472	青海和西藏

表3 中国农业区划及分布

Tab.3 Agricultural regionalization and distribution in China	
分区	省市区
东北旱作一熟区(I)	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古东北部
北方旱作两熟区(II)	北京、天津、河北、山西、内蒙古(I区以外的地区)、河南、山东
东南部水田两熟三熟区(III)	上海、福建、江西、浙江、安徽、江苏、湖北、湖南、四川、云南、贵州、重庆、广东、广西、海南
西北旱作两熟区(IV)	陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、西藏

表4 中国主要作物籽粒秸秆比

Tab. 4 Proportion of grain and straw of main crops in China

作物名称	籽粒秸秆比	作物名称	籽粒秸秆比
水稻	1:0.9	油菜籽	1:1.5
小麦	1:1.1	芝麻	1:2.2
玉米	1:1.2	薯类	1:0.5
大豆	1:1.6	糖料	1:1.0
花生	1:0.8		

碳汇总量约为7.64亿t CO₂,内蒙古和青海的碳汇量最多,合计占总量的27.83%。

3.2 碳源碳汇空间分布格局

3.2.1 碳源空间分布格局

图1a为能源碳排放省区分布图,图中可以看出,排放量最高的前6个省区空间分布在空间上相临近,分别为山东、山西、河北、河南、内蒙古和江苏,这6个省区年CO₂排放都在4.85亿t以上,排放

表5 2008年中国各省区分类别碳源碳汇估算

Tab.5 Estimation of provincial carbon source and carbon sink in China in 2008

省区	能源消费碳排放 /10 ⁴ t CO ₂	碳汇/10 ⁴ t CO ₂				碳盈余/10 ⁴ t CO ₂
		森林	草地	耕地	合计	
北京	9843.76	65.30	0.35	15.27	80.92	-9762.84
天津	10275.35	19.32	0.17	17.62	37.11	-10238.24
河北	53133.52	615.17	138.28	352.43	1105.88	-52027.64
山西	60770.41	476.43	113.88	123.75	714.06	-60056.35
内蒙古	49430.72	2300.01	11354.73	516.03	14170.77	-35259.95
辽宁	36958.85	835.92	60.40	639.92	1536.24	-35422.61
吉林	19029.05	840.93	180.68	1021.73	2043.34	-16985.71
黑龙江	26215.56	4438.31	382.13	1568.08	6388.52	-19827.04
上海	17863.10	21.29	0.00	3.38	24.67	-17838.43
江苏	48588.85	382.55	0.17	101.75	484.47	-48104.38
浙江	32416.41	1788.52	0.00	25.92	1814.44	-30601.97
安徽	25000.65	1064.04	4.85	105.36	1174.25	-23826.40
福建	16373.46	1282.73	0.52	19.98	1303.23	-15070.23
江西	12141.69	2209.02	0.69	59.53	2269.24	-9872.45
山东	78504.90	1035.17	5.88	517.38	1558.43	-76946.47
河南	52400.84	1495.39	2.42	662.19	2160.00	-50240.84
湖北	25718.46	1740.90	7.61	78.44	1826.95	-23891.51
湖南	23210.93	2632.87	18.00	86.26	2737.13	-20473.80
广东	40173.11	571.64	4.67	72.32	648.63	-39524.48
广西	11479.28	3269.91	123.92	294.22	3688.05	-7791.23
海南	2318.51	29.94	3.29	20.95	54.18	-2264.33
重庆	13140.46	909.08	41.02	33.60	983.70	-12156.76
四川	27548.47	3153.89	2372.92	105.27	5632.08	-21916.39
贵州	21292.05	1953.61	276.56	38.87	2269.04	-19023.01
云南	18385.51	4858.96	135.34	107.40	5101.70	-13283.81
陕西	21665.37	1004.77	530.28	2.02	1537.07	-20128.30
甘肃	10634.51	613.64	1276.44	1.63	1891.71	-8742.80
青海	3522.37	106.60	6982.72	0.98	7090.30	3567.93
宁夏	9436.79	32.77	229.12	1.16	263.05	-9173.74
新疆	14914.60	626.38	5172.74	2.23	5801.35	-9113.25
全国	792387.54	40375.06	29419.78	6595.67	76390.51	-715997.03

量合计34.28亿t,占全国的43.27%;而排放较少的9个省份总排放量8.28亿t,仅占全国的10.45%。

从能源消耗人均CO₂排放(图1b)看,全国平均能源消耗人均CO₂排放为6.07 t,人均排放量最高的为内蒙古、山西和宁夏(分别为20.48 t、17.82 t和15.28 t),是今后减排任务较重的省份;这3个省区空间上相邻,其中内蒙古和山西同时也是排放总量较高的区域,宁夏排放总量较少的原因在于其人口较少。

地均CO₂排放(图1c)最高的是上海,达28713 t/km²;第二梯队的包括天津、北京、山东、江苏,排放强度都在4700 t/km²以上;而排放强度较低的19个省份都在2200 t/km²以下。从空间分布来看,地均排放强度高的区域集中在沿海和煤炭大省,空间差异极为悬殊,最高的上海达到最低的青海的557倍。在推进低碳经济过程中,高排放区域应当对低排放区域进行碳补偿。

单位GDP的CO₂排放量即碳排放强度是能源

利用效率和经济发展水平的综合反映。从图1d可见,碳排放强度从东南沿海向内陆有逐步提高的趋势。万元GDP CO₂排放强度较低的9个省区,从低到高依次是北京、广东、上海、浙江、福建、海南、广西、江苏、江西,主要分布在长三角—东南沿海—珠三角一带;碳排放强度较高的4个省区,从高到低依次是山西、宁夏、贵州和内蒙古。节能减排,要从提高能源利用效率入手,中西部地区减排潜力巨大。

3.2.2 碳汇空间分布格局

将各省区森林、草地和耕地碳汇加和,得到总的碳汇(图2a)。碳汇最高的省区是西藏和内蒙古,分别为1.71亿t和1.41亿t,其次是青海、黑龙江、新疆、四川、云南和广西,碳汇较高的省区基本分布在中国西部、西南和东北区域;而东部和中部区域,碳汇总体较低,特别是上海和海南两省市年碳汇量合计不足100万t,说明这些地区林地面积过小,植被固碳基础薄弱。

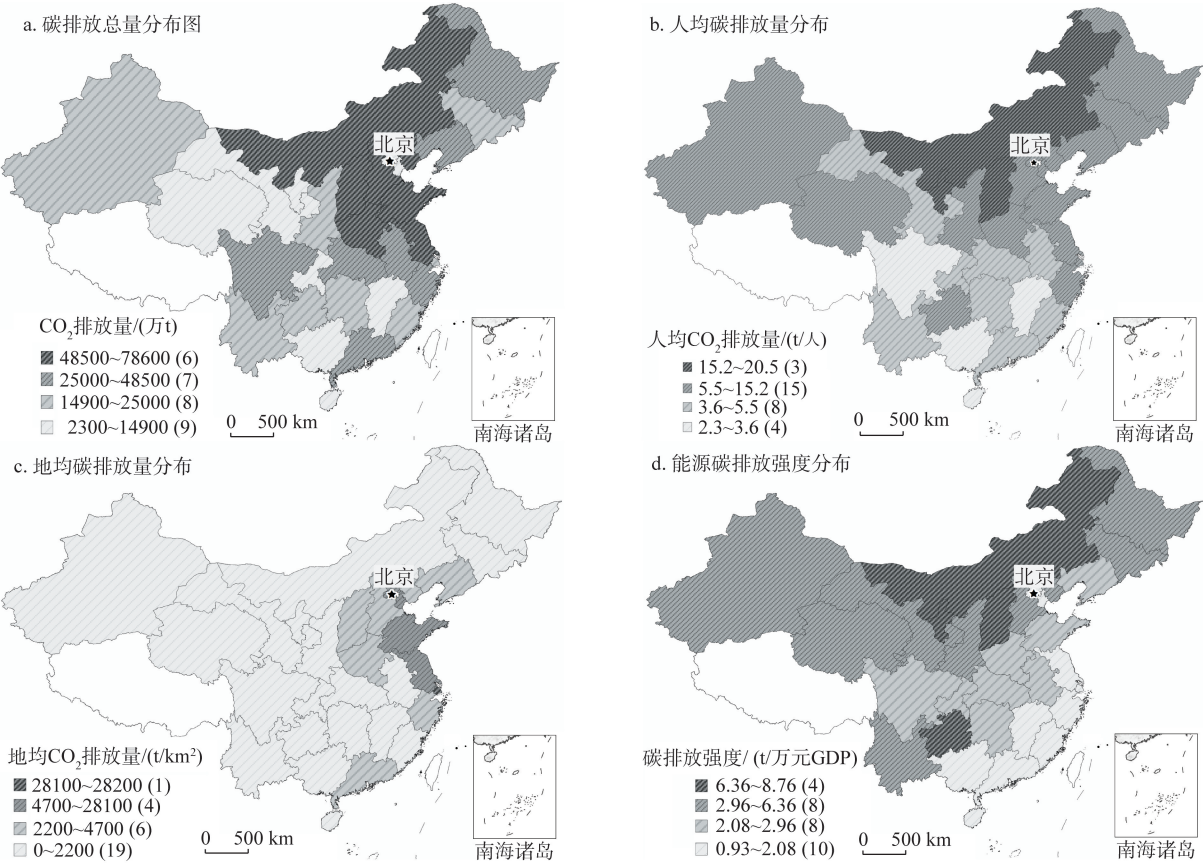


图1 2008年中国各省区CO₂排放分布

Fig.1 Distribution of provincial CO₂ emissions in China in 2008

图 2b 为各省区人均碳汇分布,较高的省区多数人口总量较少;人均碳汇和总碳汇的空间差异格局相似。青海的人均碳汇较高,为 12.79 t,其他多数省区的人均碳汇都在 0.6 t 以下。全国人均年碳汇为 0.59 t,远低于人均碳源 6.07 t。

3.2.3 省区碳盈余空间分布格局

将各省区的人均碳源碳汇量进行加和,得到人均碳盈余分布(图 3a),可见除西藏因缺少碳源数据而无法得到盈余值之外,仅有青海一省有盈余,而其他所有省区都是碳赤字区。其中,山西、宁夏和内蒙古的人均碳赤字最高,其次为环渤海一带区域,但不包括京津区域。

参照人均碳盈余计算地均碳盈余分布(图 3b),可见环渤海和东南沿海省份地均碳赤字较高,最高的上海地均碳赤字高达 2.81 万 t。

3.2.4 区域碳盈余空间分布格局

为从宏观上对中国四大经济区域的碳源/汇情况进行比较,将各省区的碳源/汇计算结果汇总到对应的 4 个区域(图 4~图 6)。

如图 4 所示,就人均碳排放来说,4 个区域差异不大,东北和东部地区稍高于全国平均水平,而中西部地区则稍低于全国平均水平;人均碳汇量则差别较大,西部地区明显较高,其次是东北地区,而中部、特别是东部地区人均碳汇较小。人均碳盈余均为负值,表明各区总体上都面临着较大的碳压力,其空间差异与人均碳排放相似。

图 5 为四大区域的地均指标比较。地均碳排放的区域差异较大,东部地区最高,为 3356 t/km²;西部地区最低,为 293 t/km²。东部地区地均碳排放是全国平均水平(825 t/km²)的 4 倍,更是西部地区

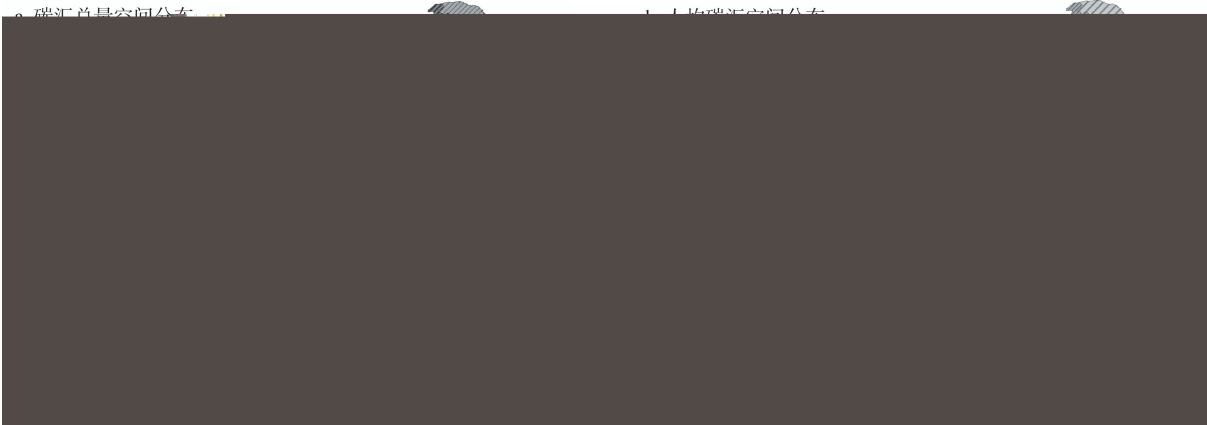


图 2 2008 年中国各省区碳汇空间分布
Fig.2 Distribution of provincial CO₂ sink in China in 2008

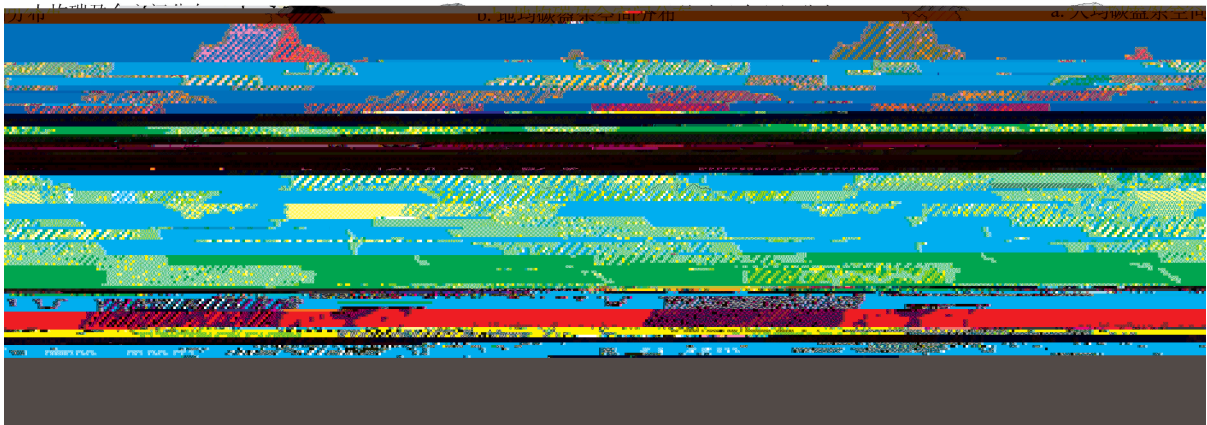


图 3 2008 年中国各省区碳盈余空间分布
Fig.3 Distribution of provincial CO₂ surplus in China in 2008

的10倍以上。中部的地均碳排放也高达1939 t/km²,东北地区(1044 t/km²)也高于全国平均水平。西部地区的地均碳排放较低,是由于其土地面积广阔,且总的碳排放量相对较低。从地均碳汇来看,全国平均为97 t/km²,各地区差异不明显,最高的偏离平均值约30%。相对于碳排放,地均碳汇的绝对量较低,对各区域碳赤字空间差异作用不明显,因此各区域的地均碳赤字空间格局与地均碳排放空间格局相似。

如图6所示,全国平均碳排放强度为2.42 t/万元GDP,各区域碳排放强度从小到大依次为东部、东北、中部、西部,中部、西部和东北地区的碳排放强度都高于全国平均,且远高于东部地区。

3.3 区域减排战略布局

综上所述,就碳排放总量来说,中国东部地区较高,能源消耗量较大,另外,中部能源大省的碳排放量也较高;就人均碳排放量来说,整个北方地区均较高;就地均碳排放量来说,东部沿海区域显著偏高;就碳排放强度来说,则东部地区较低,而中西部偏高。碳汇空间格局与碳源显著不同,西部地区碳汇较高,而中、东部地区碳汇较低,人均碳汇的这种空间分布特征更为明显。

基于以上结果,在推动低碳技术创新,减少碳排放,发展绿色经济的进程中,中国四大区域应有各自的侧重点和战略方向。

(1) 东部地区碳排放强度全国最低,说明其能源利用效率较高,但与发达国家相比,则还有较大差距;另外,由于经济基数较大,碳排放总量较高,单位面积产生的碳排放量远远高于全国平均水平。在今后发展中,东部地区应当转变发展方式,通过科技创新改进技术,进一步提高能源利用效率;由于东部地区碳汇能力较弱,一方面应加强绿化造林工作;另外更应从资金、技术方面对碳汇能力较强的中西部地区进行帮助和补偿。

(2) 中部地区正在崛起之中,碳排放总量和强度均较高。未来在绿色经济建设中,要注意减少碳源,提升能源利用效率;同时,要抓住机遇,直接与国际先进技术实现对接,不走东部以环境为代价发展经济的老路,用技术推动低碳产业链建设,实现跨越发展。

(3) 东北地区能源结构中煤炭的比重高于全国平均水平,人均能源碳排放强度在四大区域中最

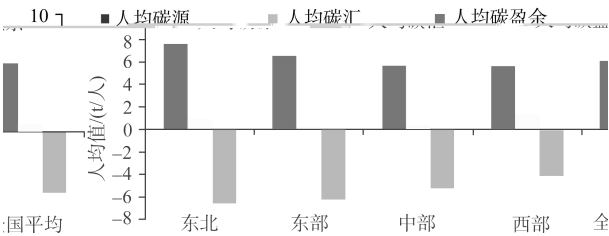


图4 2008年中国四大经济区域人均碳源/汇/盈余比较
Fig.4 Comparison of per capita CO₂ emissions, sink and surplus in the four main economic areas of China in 2008

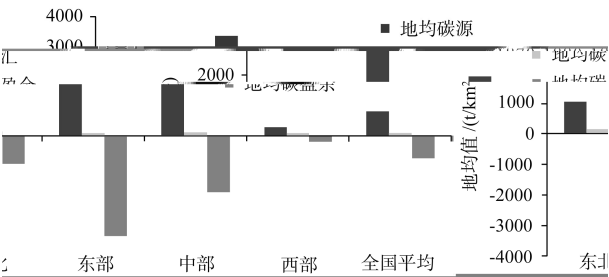


图5 中国四大经济区域地均碳源/汇/盈余比较
Fig.5 Comparison of CO₂ emissions, sink and surplus per unit area in the four main economic areas of China in 2008

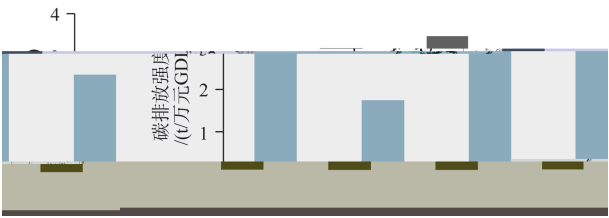


图6 2008年中国四大经济区域碳排放强度比较
Fig.6 Comparison of energy intensity of the four main economic areas of China in 2008

高。今后应从调整能源结构,开发新能源,实现资源枯竭型城市产业转型等方面入手,实现节能减排和低碳发展;另外,东北地区特别是黑龙江省的碳汇能力较强,未来可进一步挖掘森林碳汇能力,并参与到国际碳交易之中。

(4) 西部地区地域广阔,人口密度较小,使得其地均碳排放、人均碳排放都是最低;但是,西部地区总体资源开发比较粗放,能源利用效率偏低,单位GDP的碳排放量全国最高。因此,未来西部地区的发展中应当首先加强管理,大力采用新技术和新工艺,不断提高资源特别是能源的利用效率。辽阔的西部地区也是中国最重要的碳汇区,为此要进一步加强生态环境建设,切实保持碳汇能力。

4 结论

基于对中国能源消费碳排放、森林碳汇、草地碳汇和耕地碳汇的定量估算,本文在省级尺度上分析了中国碳源、碳汇的空间分布格局;并结合四大经济区域的划分,讨论了碳源、碳汇、碳盈余的区域差异,指出了不同区域在低碳发展中的侧重点和战略方向。

中国地域辽阔,碳源碳汇的分布格局在不同空间尺度上会呈现出不同的特征;同一区域内的碳源碳汇,也因受到多方面的因素影响,在随时间变化的规律上会有所差异;本文只是对碳源、碳汇在省级尺度上的空间差异进行了初步估算,所采用的计算方法、要素选择和参数赋值方面,还有进一步讨论、校正的余地,更加深入的时空变化规律的探讨,也有待今后的研究。

参考文献(References)

- Dong F X. 2010. Analysis of estimation forest carbon sequestration in China: A case study of forest resources in Liaoning Province. *Forestry Economics*, (9): 54-57. [董方晓. 2010. 对我国森林碳汇量的估算与分析: 以辽宁省森林资源为例. *林业经济*, (9): 54-57.]
- Fang J Y, Yang Y H, Ma W H, et al. 2010. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. *Science China Life Sciences*, 53(7): 757-765.
- Gao T, Xu B, Yang X C, et al. 2012. Review of researches on biomass carbon stock in grassland ecosystem of Qinghai-Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 31(12): 1724-1731. [高添, 徐斌, 杨秀春, 等. 2012. 青藏高原草地生态系统生物量碳库研究进展. *地理科学进展*, 31(12): 1724-1731.]
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Kanagawa, Japan: Institute for Global Environmental Strategies.
- Johan A, Delphine F, Koen S. 2002. A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals. *Energy Policy*, 30(9): 727-736.
- Li J P, Zhang X Y, Chen X G, et al. 2013. The preliminary estimation of the grassland carbon in Ningxia from 1990 to 2010. *Ningxia Engineering Technology*, 12(2): 97-100. [李剑萍, 张学艺, 陈晓光, 等. 2013. 宁夏近 20a 草地碳汇的初步估算. *宁夏工程技术*, 12(2): 97-100.]
- Liu Z, Geng Y, Xue B, et al. 2011. A calculation method of CO₂ emission from urban energy consumption. *Resources Science*, 33(7): 1325-1330. [刘竹, 耿涌, 薛冰, 等. 2011. 城市能源消费碳排放核算方法. *资源科学*, 33(7): 1325-1330.]
- Ren J Z, Liang T G, Lin H L, et al. 2011. Study on Grassland's responses to global climate change and its carbon sequestration potentials. *Acta Prataculturae Sinica*, 20(2): 1-22. [任继周, 梁天刚, 林慧龙, 等. 2011. 草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜能研究. *草地学报*, 20(2): 1-22.]
- Shu Y Q. 2012. Spatiotemporal characteristics of carbon emissions from energy consumption in China. *Acta Ecologica Sinica*, 32(16): 4950-4960. [舒娱琴. 2012. 中国能源消费碳排放的时空特征. *生态学报*, 32(16): 4950-4960.]
- Wang J B, Huang M, Lin X H. 2012. Review on carbon budget of the grassland ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau. *Progress in Geography*, 31(1): 123-128. [王军邦, 黄玫, 林小惠. 2012. 青藏高原草地生态系统碳收支研究进展. *地理科学进展*, 31(1): 123-128.]
- Xie S J, Kuang Y Q, Huang N S. 2012. Main paths and policy proposals for the development of carbon-sinking agriculture in China. *China Population, Resources and Environment*, 20(12): 46-51. [谢淑娟, 匡耀求, 黄宁生. 2012. 中国发展碳汇农业的主要路径与政策建议. *中国人口·资源与环境*, 20(12): 46-51.]
- Yin S H, Zhou W P. 2013. Estimation and evaluation of Hunan forest carbon sinks. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 33(7): 136-139. [尹少华, 周文朋. 2013. 湖南省森林碳汇估算与评价. *中南林业科技大学学报*, 33(7): 136-139.]
- Yin X F, Wang H, Wang X M. 2012. Current status of forest carbon sinks in Guizhou Province and their increasing potential. *Earth and Environment*, 40(2): 266-230. [尹晓芬, 王灏, 王晓鸣. 2012. 贵州森林碳汇现状及增汇潜力分析. *地球与环境*, 40(2): 266-230.]
- Zhao L, Yin M F, Chen X F, et al. 2008. Summary of the research methods of forest carbon sink accounting. *Journal of Northwest Forestry University*, 23(1): 59-63. [赵林, 殷鸣放, 陈晓非, 等. 2008. 森林碳汇研究的计量方法及研究现状综述. *西北林学院学报*, 23(1): 59-63.]

Spatial patterns of provincial carbon source and sink in China

LU Fengxian^{1,2,3}, ZHANG Yan^{1,4}, QIN Yaochen¹, CHEN Zhenling², WANG Guanghui³

(1. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle & Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Henan Collaborative Innovation Center for Coordinating Industrialization, Urbanization and Agriculture Modernization in Central Economic Zone, Zhengzhou 450046, China;

3. Institute of Policy and Management, CAS, Beijing 100190, China;

4. College of Environment Science and Tourism, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

Abstract: China has become the biggest country of carbon emissions, and the size and scale of industrialization and urbanization are unprecedented. The pressure of carbon reduction is increasing day by day with the increasing carbon emissions which have caused more and more international concerns. Carbon reduction should be made possible by both reducing carbon source and increasing carbon sink at the same time. Policies of low carbon development should be different to the regions with obviously different existing carbon source and carbon sink. In this paper, by collecting the data from the forest inventory and some related statistical yearbooks, and by applying the methods of discharge coefficient, stand volume, and carbon sequestration rate in forest and grassland ecosystems at region scale, we made an overall estimation of carbon emissions from energy consumption, and carbon sinks from forest, grassland and arable land at the provincial scale. Then, the regional differences of total carbon emissions, carbon emissions per capita, carbon emissions per unit area, and energy intensity in China are analyzed, and spatial pattern of carbon sink and carbon surplus are discussed. As to the overall carbon emissions at the provincial scale, the carbon emission in Shandong, Shanxi and Hebei is relatively high; the carbon emission in Ningxia, Qinghai and Hainan is relatively low. As to the per capita carbon emission, Inner Mongolia, Shanxi and Ningxia have the largest per capita carbon emission; Jiangxi, Hainan and Guangxi have the lowest. As to the carbon emission per square kilometer, Shanghai has the largest; Qinghai has the lowest. Besides, the provinces with relatively low carbon intensity are Beijing, Guangdong, Shanghai, and Zhejiang, etc. Nationwide, the percentage of forest carbon sink is 53%, and the percentage in Yunnan and Heilongjiang is relatively high. The percentage of grassland carbon sink is 38.51%, mainly concentrated in Inner Mongolia, Qinghai and Xinjiang province. The carbon sinks from arable land focus on the carbon in the process of Maize straw returning to the field, which account for 8.63% of the total carbon sink. The results show that the carbon sinks from arable land in Heilongjiang, Jilin, Henan and Liaoning are higher than the ones in other provinces. Combining the feature of carbon source and carbon sinks of the four economic zones, the key issues in low-carbon development are pointed out. In the future, eastern region should change the development mode and improve energy efficiency through technological innovations. Central region should seize the green development opportunity to promote the low-carbon industry to achieve leapfrog development. Northeast region has high carbon sinks and can actively participate in international carbon trading. By strengthening management, western region should accelerate the technological improvements to improve energy efficiency and the ecological environment, and to enhance the capacity of carbon sinks.

Key words: provincial regions; carbon source; carbon sink; spatial pattern; China