河南省碳源碳汇的时空变化研究

王 喜[1,2],鲁丰先[1,2*],秦耀辰[1,2],孙艳芳[1]

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

摘 要:碳源、碳汇是影响低碳发展的重要因素,由其形成的碳盈亏是区域低碳经济发展战略及政策制定的重要依据。本文基于能源消耗数据、主要工业产品产量,参考IPCC的碳排放标准,结合其他相关研究,计算了河南省能源消耗及水泥、钢铁、合成氨生产过程中产生的碳排放;在对研究区遥感影像处理的基础上,通过归一化植被指数(NDVI),将河南省的碳汇分为耕地、林地和草地,根据各种植被的碳排放和碳吸收系数,计算了河南省的碳汇及其变化,并对碳盈亏及其空间变化进行分析。结果表明:①研究期内,河南省碳排放及人均碳排放呈上升趋势,碳排放总量及人均碳排放年均分别增长11.22%和10.72%,而且空间差异明显,豫西、豫北、豫中地区人均碳排放相对较高,而豫南、豫东南地区则相对较低。②能源消耗是河南省的主要碳源,其碳排放量呈逐年增加趋势,但所占比重在不断下降;水泥、钢铁是除能源消耗外的另一种主要的排放源,其碳排放量及所占比重则呈逐年上升趋势。③河南省碳汇主要以林地和耕地为主,草地所占比重很小;全省碳汇呈减少趋势,2005-2013年期间减少了7.40%(47.05万t),年均减少5.88万t。④河南省总体上呈现碳亏状态,研究期内碳亏呈增长趋势,且碳亏的地区数量也在增加,总的来看,豫南、豫东南、豫西地区处于碳盈或弱碳亏状态,豫中及豫北地区处于较严重的碳亏状态。⑤河南省应通过改善能源结构、调整产业结构、优化用地布局等措施,减少碳源,增加碳汇,通过区域碳补偿或生态补偿等手段鼓励碳盈地区减源增汇,为低碳发展创造良好的外部环境。

关 键 词:碳源;碳汇;碳盈亏;时空变化;河南省

1 引言

化石燃料燃烧、森林砍伐、草原过度放牧等导致大气中碳含量增加,进而引发全球气候变暖、灾害频繁发生等一系列环境问题,已越来越受到国际社会的关注,降低碳排放、发展低碳经济已成为世界各国的主要目标。已有研究表明,能源消耗、产业结构、土地利用等影响区域的碳源、碳汇状况,碳减排的区域分解、低碳经济发展、碳汇的增加等都要根据区域的碳排放总量、碳汇基础、碳盈亏状况等进行综合确定(Yi et al, 2011; 王金南等, 2011)。国外学者对温室气体排放的研究发现,土地利用变化对碳排放量和发展低碳经济的影响是通过对陆地生态系统碳循环的变化而实现的,土地利用方式变化相应地引起碳源、碳汇的变化(Houghton et al, 1999);Glaeser等(2010)对美国不同区域间碳排放量的研究认为,碳排放与土地利用规划之间存在一定的关系,城市新区的碳排放要低于老城区,合理的城市规划有助于降低碳排放;Sharma等(2007)和Kumar等(2010)的研究表明,大量森林转换为耕地是碳汇减小的主要原因;而Gitz等(2004)对6种土地利用方式转变的研究认为,林地和草地转变为耕

收稿日期:2015-12;**修订日期**:2016-07。

基金项目:国家自然科学基金项目(41171438);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB955804) [**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No.41171438; National Basic Research Program of China (973 Program), No.2012CB955804]。

作者简介:王喜(1973-),男,河南巩义人,博士,副教授,主要从事区域模型与信息系统、低碳经济等相关的教学和科研工作,E-mail: wangxi@henu.edu.cn。

通讯作者:鲁丰先(1974-),河南邓州人,博士后,副教授,主要从事区域可持续发展等方面研究,E-mail: lfxhenu@126.com。

引用格式:王喜, 鲁丰先, 秦耀辰, 等. 2016. 河南省碳源碳汇的时空变化研究[J]. 地理科学进展, 35(8): 941-951. [Wang X, Lu F X, Qin Y C, et al. 2016. Spatial and temporal changes of carbon sources and sinks in Henan Province[J]. Progress in Geography, 35(8): 941-951.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.08.003

地将导致土壤中CO_2含量增加。中国学者对碳源、碳汇的测算及其与土地利用的关系也展开了深入的研究。如赵荣钦等(2010)通过对土地利用的碳排放与碳足迹的研究,认为化石能源消费是造成碳排放量快速增加的主要原因;方精云等(2007)通过对遥感信息数据的提取应用,基于1981-2000年中国陆地植被的碳汇量与发展状况进行分析,并预测未来陆地植被碳汇发展的趋势;鲁丰先等(2013)根据能源消耗数据及植被分布,对中国省级区域的碳源碳汇的空间格局进行分析;葛全胜等(2008)对陆地生态系统碳汇量的研究,发现土地利用方式的转变也对陆地生态系统的碳排放有着重要的作用;还有其他学者,测算了不同土地利用方式的碳汇变化特征(李颖等, 2008; 秦耀辰等, 2014; 孙艳芳, 2015)。

总的来看,众多研究已经表明,土地利用通过影响碳源、碳汇进而影响碳排放总量,化石能源的使用、工业生产是主要的排放源,不同区域各种碳源、碳汇的时空变化差异很大,只有在明确了区域的碳源、碳汇及其差异的前提下,才能客观地确定区域的碳盈亏,并有针对性地制定区域低碳发展战略和调控措施。中国学者对碳源、碳汇的研究多集中在省级及以上尺度的区域上,而缺乏在更小的地市级尺度区域的研究。中国地域广阔,省级区域一般较大,多数省级区域横跨多种地形、地貌单元,经济发展水平、资源禀赋、产业结构、土地利用差异明显,导致区域内的碳源、碳汇的空间差异显著。产业结构的调整、碳减排目标的分解、碳汇的增加、碳补偿(或生态补偿)等政策的实施,最终均需要在可操作性较强、差异相对较小的地市级尺度区域上实现。河南省在地形地貌、经济发展水平、产业结构、资源禀赋、以及能源组合等方面在全国具有一定的代表性,本文在梳理国内外相关研究的基础上,基于能源消耗数据、主要工业产品数量、遥感数据,测算并分析河南省各地市2005-2013年各种碳源、碳汇,估算碳盈亏并对其时空变化进行分析,以期为河南省低碳发展战略的制定和调控对策的实施提供理论依据。

2 方法与数据

2.1 碳源、碳汇测算方法

2.1.1 碳源

能源消耗、工业生产、农业生产等可以产生碳,本文中,农业生产产生的碳源与碳汇一起考虑,在此仅考虑能源消耗、工业生产产生的碳排放。相关研究表明,这2种碳排放占全球人工总碳源量的78%左右(Schimel et al, 1995)。

(1) 能源碳源

能源种类很多,但作为碳源,本文的能源消耗主要是指原煤、原油及其制品、天然气等碳基能源,具体计算时采用煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气8类能源产品的消费量。目前,碳基能源消耗的碳排放计算方法主要有3种(Albrecht et al, 2002),根据数据的可得性,本文采用IPCC提供的参考模型(Eggleston et al, 2006),该方法在燃料分类上更为细致具体,比较适用于目前能源统计体系尚不完善的国内城市碳排放核算。具体公式为:

$$C=\sum_i(EC_i\times NCV_i\times CEF_i\times OCF_i) \tag{1}$$

式中:C为能源消耗产生的碳排放;EC_i为第i种能源的消耗量;NCV_i为第i种能源的净发热值;CEF_i为第i种能源的碳排放因子;OCF_i为第i种能源的氧化碳因子。需要说明的是,本文的碳是指碳的含量,乘以转换系数(44/12),即可得到CO_2排放量。根据《中国能源统计年鉴》中关于各种能源参考系数以及中国城市温室气体清单综合确定能源净发热量、氧化碳因子和碳排放因子等参数,具体见表1。

(2) 工业生产碳源

根据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中可能产生碳排放的工业产品,结合河南省近10年的工业产品产量,确定导致河南省碳排放增长的重要工业碳源,包括钢铁、水泥和合成氨的生产。

①水泥生产工艺过程中CO_2排放。IPCC推荐了较精确的水泥生产中CO_2排放量的计算方法,但

表1 主要能源的净发热值、碳排放因子、碳氧化因子

Tab.1 Net heat value, carbon emission coefficient, and oxidation coefficient of primary energy

	煤炭	焦炭	汽油	煤油	柴油	燃料油	液化石油气	天然气
净发热值/(TJ/kt)	20.93	28.47	43.12	44.10	42.71	41.87	47.47	38.90
碳排放因子/(t/TJ)	26.80	29.41	18.90	19.60	20.17	21.09	17.20	15.32
氧化碳因子/%	91.50	92.80	98.00	98.60	98.20	98.50	98.50	99.00

该方法需要有较详细的熟料比例及来源，而河南省的水泥生产数据统计中，并没有具体的熟料进口、出口等数据，在此无法采用该方法计算。国内学者对20世纪90年代中国水泥生产的碳排放因子进行了研究，研究得到的结果差异不大，在此本文采用朱松丽(2000)的研究结果，即水泥生产的CO_2排放因子为0.365，乘以水泥产量，即可得到CO_2排放量。

②钢铁工艺过程中CO_2排放。因为钢材生产方式的不同，单位钢产量产生的CO_2量差异也很大，根据式(2)对钢铁工艺过程中产生温室气体的量进行计算(Eggleston et al, 2006)。

$$E_{CO_2} = BOF \times EF_{BOF} + EAF \times EF_{EAF} + OHF \times EF_{OHF} \quad (2)$$

式中：E_{CO_2}代表钢铁生产的CO_2排放量；BOF代表碱性氧气转炉工艺生产的钢材量；EAF表示电弧炉工艺生产的钢材量；OHF代表平炉工艺生产的钢材量；EF_{BOF}、EF_{EAF}、EF_{OHF}分别代表碱性氧气转炉、电弧炉、平炉3种工艺的CO_2排放因子，取值采用IPCC推荐的缺省值，具体数值见表2。计算时根据河南省各种工艺的钢铁产量取其加权平均值。

③合成氨生产工艺过程中CO_2排放。现代大型合成氨生产都是以天然气为原料。胡坤等(2009)计算以天然气为原料进行合成氨生产时，CO_2排放系数为1.46。合成氨生产工艺过程中CO_2排放量(Y_{CO_2})计算式为：

$$Y_{CO_2} = P \times 1.46 \quad (3)$$

式中：P为合成氨的产量。

2.1.2 碳汇

对碳汇量的计算采取对主要碳汇来源的3种植被碳汇进行分别计算，即依据式(4)计算森林、耕地、草地碳吸收量，公式为：

$$C_a = \sum L_i = \sum S_i \times D_i \quad (4)$$

式中：C_a为总碳汇；L_i为研究目标第i种土地利用方式的碳汇；S_i为第i种土地利用方式的面积；D_i为第i种土地利用方式碳收支系数。

根据何勇等(2006)的研究，耕地碳汇系数为0.734 kg·C/m²，由于耕地既是碳源又是碳汇，本文取耕地净碳汇系数代入运算，其碳排放系数为0.042 kg·C/m²，则净碳汇系数取0.692 kg·C/m²。根据方精云等(2007)的研究，林地碳汇系数取值5.77 kg·C/m²，草地取值0.021 kg·C/m²。

表2　钢铁生产工艺过程中CO_2排放因子

Tab.2　CO_2 emission coefficient in steel manufacturing process

炼钢方法	CO_2排放因子/(tCO_2/t钢)
碱性氧气转炉(BOF)	1.46
电弧炉(EAF)	0.08
平炉(OHF)	1.72

注：全世界钢生产大约有63%在BOF中生产，大约33%在EAF中生产，剩余的4%在OHF中生产。

2.2 数据来源与处理

2.2.1 研究时段

研究时段的选择对研究结果及其意义至关重要，需要考虑河南省经济社会发展阶段特征、数据的可得性等因素。首先，河南省从2002年底开始实施退耕还林还草政策，至2004年全面展开，因此选择2005年作为起始年份有利于把握刚退耕还林时的碳汇状况；其次，中国于2008年出台了4万亿元的刺激经济发展计划，加大了能源的利用量及对水泥、钢铁等主要工业品的需求，也加快了农用地(碳汇)向建设用地(碳源)的转换。基于以上原因结合数据的可获取性，本文选取2005-2013年作为研究时段，该时段包含了“十一五”规划的全部时间和“十二五”规划的前3年，可以较准确反映退耕还林政策、国家3万亿投资计划等对河南省碳源、碳汇的影响。

2.2.2 数据来源

本文的主要数据包括各种能源消费、主要工业产品产量、土地利用数据等。其中，各种能源消耗数据主要来自《中国能源统计年鉴》(2005-2014年)、河南统计年鉴(2005-2014年)、河南年鉴(2005-2014年)。水泥、钢铁、合成氨等工业产品的产量主要来自河南统计年鉴(2005-2014年)及河南省各地市的统计年鉴。土地利用数据主要来源于遥感影像，根据研究需要及数据的可得性，选取2005、2009和2013年三年6-10月的影像，影像数据主要是来自研究区的Landset5、Landset7、Lansat8的TM、ETM、OLI影像的近红外、红光和绿光波段(每个时期15景影像)，经处理、解译后得到土地利用数据；同时，在影像解译过程中，使用研究区域的土地利用现状图进行辅助解译及解译精度的验证。

2.2.3 数据处理

本文各种能源数据、工业产品数据仅涉及数量变化等，不需要作太多的分析和处理，因此下文主要是遥感影像的处理与分析。

由于获取的原始影像坐标系为WGS84，投影坐标为横轴墨卡托投影，并且已经过几何校正，因此只需进行图像增强及大气校正处理，并在此基础上进行植被信息提取。进行图像增强处理的目的是突出显示遥感影像中的有用信息，扩大不同地物影像特征之间的差别，本文采用对比度的线性变换达到这一目的；大气校正的目的是为了减少大气对太阳辐射及地物反射的影响。

经过增强及大气校正后，即可进行植被信息的提取。目前，植被信息的提取多通过计算植被指数进行，较常用的植被指数有比值植被指数、归一化植被指数、差值植被指数和正交植被指数，本文采用归一化植被指数，其计算公式为：

$$NDVI=\frac{IR-R}{IR+R} \tag{5}$$

式中：$NDVI$为归一化植被指数；IR为遥感影像中的近红外波段的反射值；R为红光波段的反射值。$NDVI$值越大，植被覆盖度越大；同时，$NDVI$能在一定程度上消除云、大气、太阳高度角、地形以及卫星观测角等因素影响。根据$NDVI$，通过反复对比、测试，通过掩膜处理，将影像上的植被与非植被区分开来。对于植被，再采用监督分类的方法将其分为耕地、林地、草地。受篇幅所限，具体过程在此不再赘述。

3 河南省碳源碳汇的测算结果及其时空变化

3.1 碳源

3.1.1 测算结果

根据上文确定的碳源种类，收集了河南省各地市的能源消耗，水泥、钢铁及合成氨生产数据，计算了各地市碳排放总量以及人均碳排放量，具体结果见图1-4。从图1中可以看出，河南省的碳排放以能源消耗产生的碳排放为主，2005、2013年分别占碳

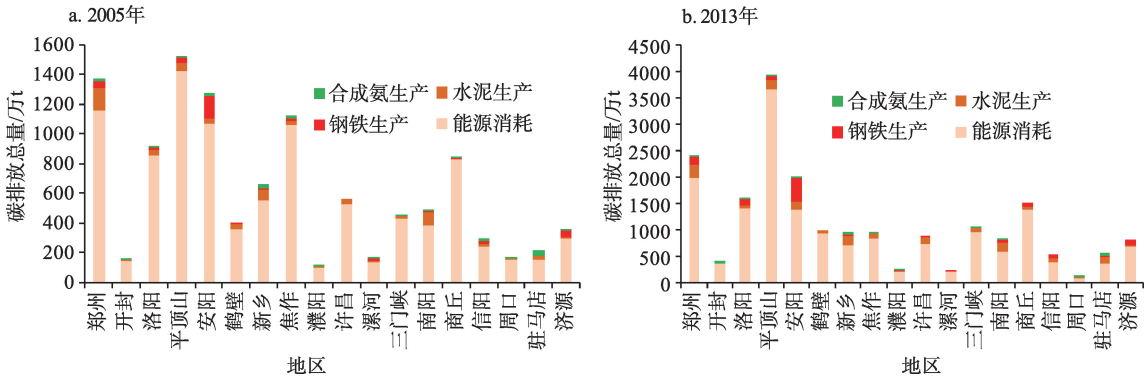

图1 2005(a)、2013年(b)河南省碳排放总量及其构成

Fig.1 Carbon emissions and composition in Henan Province in 2005 (a) and 2013 (b)

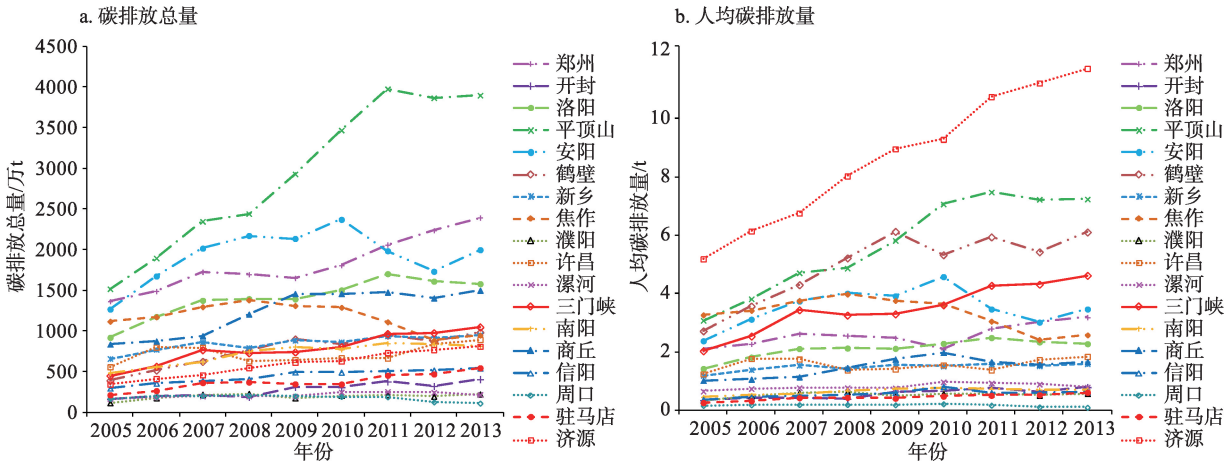

图2 2005-2013年河南省碳排放总量(a)及人均碳排放(b)的变化

Fig.2 Changes of total carbon emissions and per capita carbon emissions in Henan Province, 2005-2013

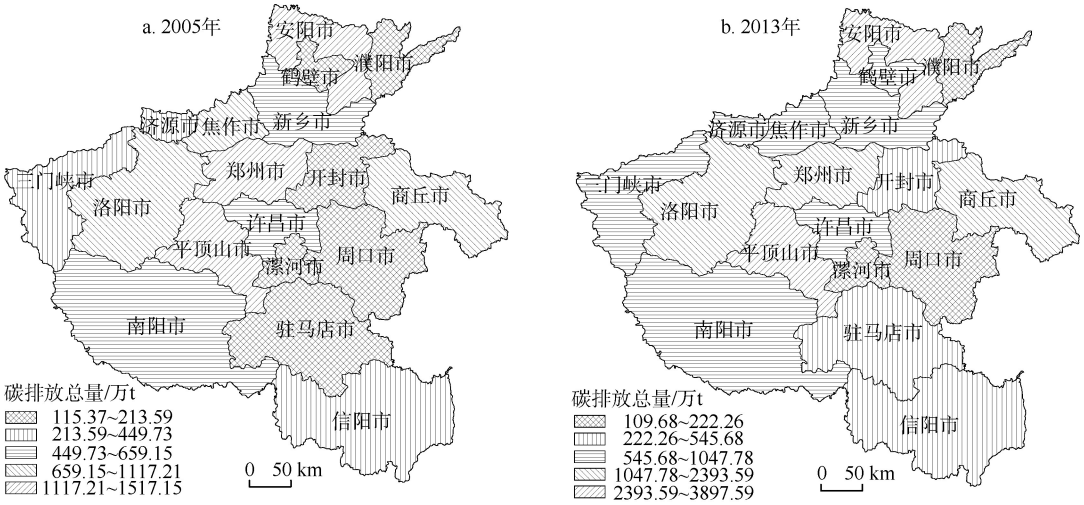

图3　2005(a)、2013年(b)河南省碳排放总量的空间格局

Fig.3　Carbon emission patterns of Henan Province in 2005 (a) and 2013 (b)

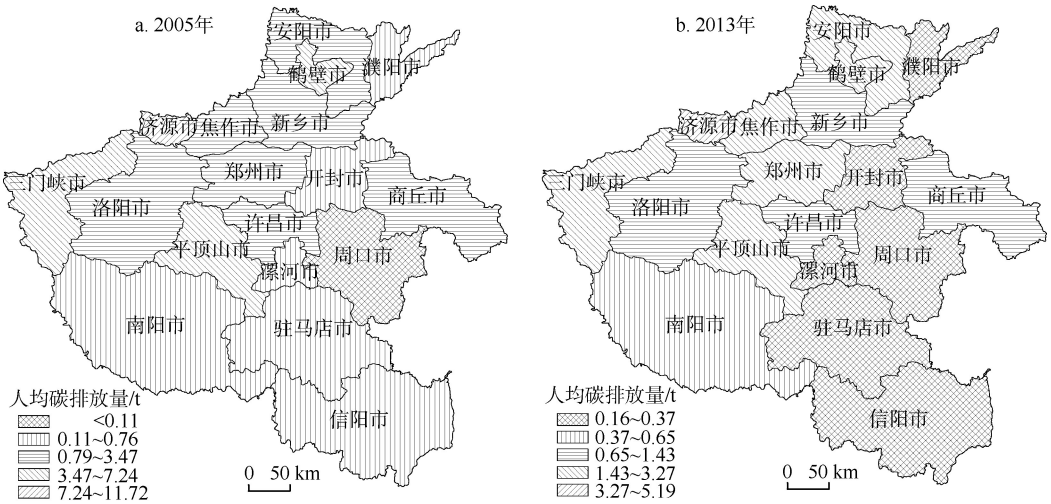

图4　2005(a)、2013年(b)河南省人均碳排放总量的空间格局

Fig.4　Per capita emission patterns of Henan Province in 2005 (a) and 2013 (b)

排放总量的89.18%、84.65%；其次为水泥生产和钢铁生产，其中水泥生产引起的碳排放分别占总量的5.61%、8.43%，钢铁生产的碳排放分别占总量的3.36%、5.93%；合成氨生产引起的碳排放所占比重不大。不同地区各种碳源构成差异较大，与区域的资源组合及能源结构有关。从时间上看，能源消耗引起的碳排放量呈上升趋势，但所占的比重在逐年降低；而水泥和钢铁生产的碳排放量及所占比重均逐年上升，水泥及钢铁生产与城镇化和工业化紧密相关，也在一定程度上说明了工业化及城镇化是引起碳排放增长的重要驱动因素之一。

3.1.2 时空变化

从图2可以看出，河南省的碳排放总量及人均碳排放量总体上呈持续上升趋势，但各地区的变化趋势差异较大。研究期内，河南省碳排放总量年均增长11.22%，人均碳排放量年均增长10.72%。从不同地区来看，增长速度较快的地区主要有平顶山、驻马店、开封、鹤壁等，碳排放总量的年均增速分别为12.52%、12.44%、12.29%、12.23%，人均碳排放的年均增速分别为11.28%、11.25%、11.11%、10.65%；周口市、焦作市的碳排放总量及人均碳排放量均有不同程度的降低，其中周口市分别降低了5.22%和5.71%，焦作市分别降低了2.06%和2.92%。碳排放减少的原因主要与地区的能源消耗减少及高碳排行业的产品产量下降有关。

从地区分布来看(图3-4)，碳排放总量较高的地

区主要分布在河南省的中部、西部、北部及东部的商丘地区，由于受区域大小、人口规模等因素的影响，空间分布规律不甚明显，总的来看，基本呈现北高南低、西高东低的趋势；人均碳排放量较高的主要有平顶山、三门峡、济源、鹤壁等地区，人均碳排放量较低的地区主要有信阳、驻马店、周口、开封等地区，与河南省的能源分布、产业结构布局基本吻合，即西部、北部地区蕴有较丰富的煤炭资源，部分地区水泥、钢铁产量较高。

3.2 碳汇

3.2.1 测算结果

根据碳汇的来源，收集了河南省2005年和2013年的TM或OLI影像数据，利用ENVI影像处理软件，根据上文提到的处理过程及处理方法，对研究区的遥感影像进行处理，应用监督分类法中的最大似然法进行植被分类，结果见图5。为检验分类结果，采用影像分类精度和地物面积精度2种方法进行验证。影像分类精度采用实地验证与遥感影像目视判读相结合，从研究区的影像中随机选取部分图斑，并建立混合矩阵对分类精度进行评价，结果见表3。从表3中可以看出，耕地、林地、草地的分类精度分别达到83.64%、89.62%和85.90%，总体精度为86.81%，Kappa系数为0.7862，基本符合精度要求。同时，将遥感影像解译的耕地面积与河南省统计年鉴中2005、2009和2013年的耕地面积进行比较，误差分别为9.58%、4.56%、6.81%。根据2种方法验证的结果，本文认为遥感影像解译结果可靠，可以用于测算碳汇量。根据前文确定的各种植被类型的碳汇计算方法，确定河南省各地市的碳汇量。采用jenks最佳自然断裂法对河南省各地市的碳汇进行分级(以下其他分解方法与此相同)，该方法根据数据自身具有的“断点”进行分级，能够使分级结果达到“类内差异最小，类间差异最大”的分类要求。分级结果见图6-7。

3.2.2 时空变化

从图5可以看出，河南省的碳汇主要以林地为主，其次为耕地，而草地的碳汇几乎可以忽略不计(所占碳汇的比例<0.01%)。2005年，河南省林地和耕地碳汇分别为4724.39万t和1660.00万t，分别占碳汇总量的73.99%和26.01%；2013年，林地和耕地碳汇分别为4905.88万t和1431.73万t，分别占碳汇总量的77.41%和22.59%。

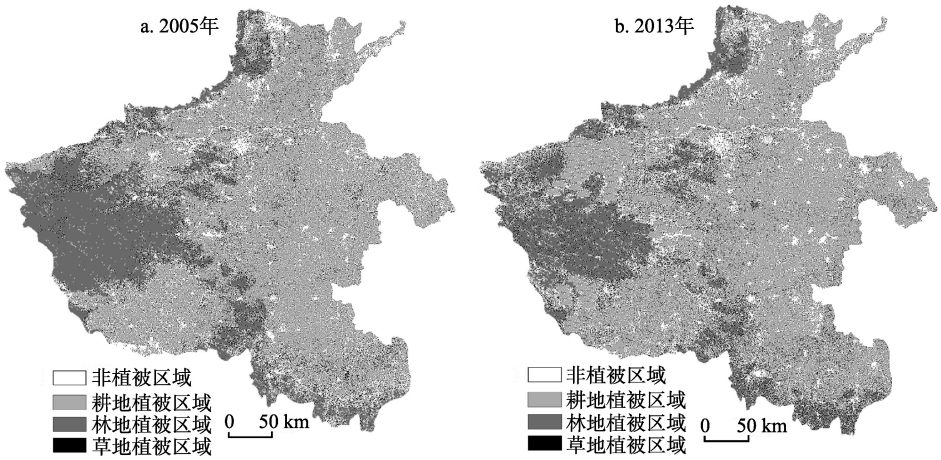

图5 2005(a)、2013年(b)河南省土地利用/植被覆盖图

Fig.5 Land use/land cover of Henan Province in 2005 (a) and 2013 (b)

表3 最大似然法分类精度评价

Tab.3 Accuracy evaluation for maximum likelihood classification

	耕地	林地	草地	总和	精度/%
耕地	1104	176	40	1320	83.64
林地	168	1520	8	1696	89.62
草地	40	48	536	624	85.90
总和	1312	1744	584	3640	86.81
总体精度：86.81%；Kappa=0.7862					

注：表中数字为各地类的像元个数。

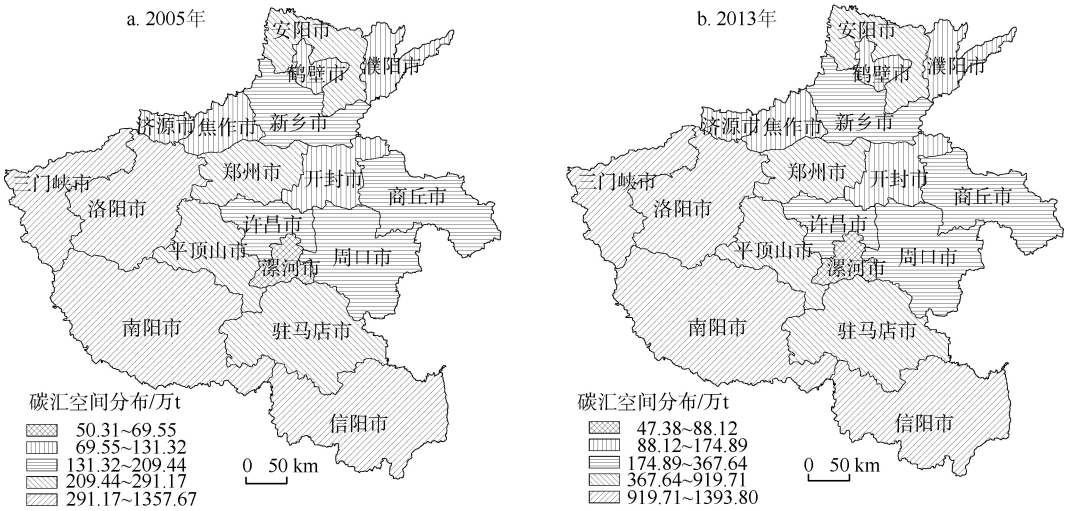

图6　2005(a)、2013年(b)河南省碳汇空间分布

Fig.6　Spatial distribution of carbon sinks in Henan Province in 2005 (a) and 2013 (b)

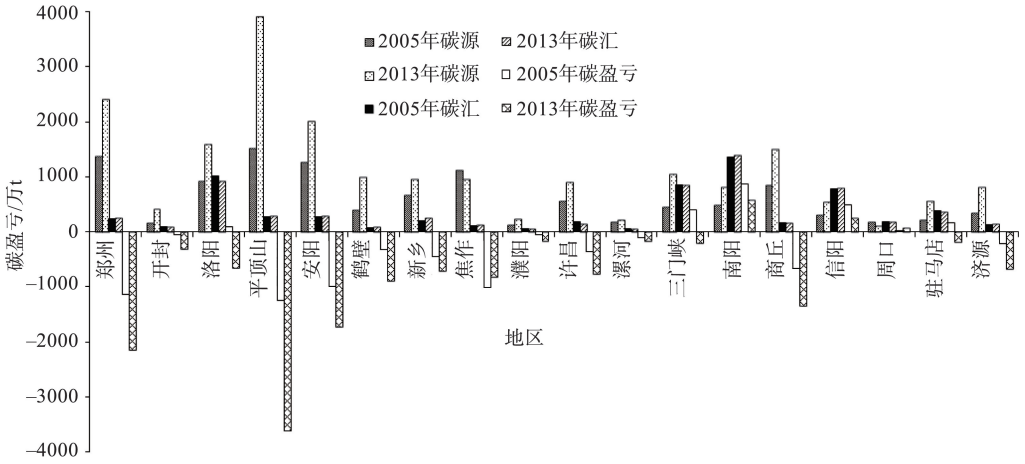

图7　2005、2013年河南省各地区碳源、碳汇及碳盈亏变化

Fig.7　Carbon sources, sinks, and surplus and deficit of cities in Henan Province in 2005 and 2013

从时间变化上看(图6-7)，与2005年相比，2013年河南省的总碳汇减少了7.40%(47.05万t)，年均减少5.88万t，其中：耕地碳汇减少了228.68万t，林地碳汇增加了181.49万t，草地碳汇增加了0.14万t。分析其原因，一方面是由于在研究期内经济社会发展，城镇和产业园区建设占用大量耕地，导致耕地碳汇减少；另一方面，随着河南省植树造林、退耕还林、退耕还园等政策的实施，山区植树造林或坡度较大区域的部分耕地转变为林地或园地，导致虽然耕地碳汇较少，但林地碳汇增加。但总体来看，碳汇仍呈现出减少的趋势。

从空间上看，各地区碳汇的构成及变化不尽相同。豫东、豫中平原地区的碳汇主要以耕地为主，而豫西北、豫西、豫南的山地及深山丘陵地区的碳汇主要以林地为主。从空间变化上看，河南省大部分地区的耕地碳汇在减少，而多数地区林地碳汇增加，特别是南阳、平顶山、信阳等山区面积较大的地区，林地碳汇增加较多，主要是因为近几年山区退耕还林、种植结构改变(果园或经济林增加)而导致的林地面积增加；而在平原地区、经济发展较快的地区的林地碳汇则有所减少，与平原区地势平坦、土地利用以耕地为主、非农建设占用有较大关系。作为河南省经济社会发展最快的郑州市的碳汇在研究期内有所增加，主要与郑州周边地区开展生态

城市建设、生态廊道建设、丘陵区退耕还林等因素导致林地面积增加有关。

3.2.3 空间转化

为深入表征碳汇的空间变化，本文利用土地利用转移矩阵反映研究期内区域各地类之间相互转化的动态过程信息，以二维表的形式表达出来，它不但包括静态的即一定区域某时间点的各地类面积数据，而且含有更为丰富的期初各地类转出面积和期末各地类转入面积等信息。在ENVI中利用Change Detection功能对2005及2013期的两幅土地利用图进行转换矩阵的分析，得到河南省2005-2013年土地利用转移矩阵(表4)。

由表4可以看出，耕地转化为林地和其他用地(主要是建设用地、水域等)的面积最大，分别为4131.17 km²和8976.10 km²，说明研究期内建设占用是耕地碳汇减少的重要原因之一；同时，退耕还林、种植结构调整等也是耕地碳汇减少、林地碳汇增加的原因之一。此外，研究期内，非农建设占用林地较多，致使部分林地碳汇转化为其他用地。从空间上看，耕地、林地碳汇转化为其他非碳汇用地，主要发生在城镇周边、开发区集中的区域；而耕地转化为林地则主要发生在豫西、豫南的山地丘陵区，这与退耕还林、种植结构调整有关。

表4 2005-2013年河南省土地利用转移矩阵/km²

Tab.4 Land use transition matrix of Henan Province, 2005-2013/km²

	耕地	林地	草地	其他	合计
耕地	73462.23	4131.17	1092.74	8976.10	87662.24
林地	1669.45	25367.57	470.32	2514.83	30022.26
草地	351.26	1517.58	466.43	633.26	2968.51
其他	380.15	157.82	939.37	44704.87	46182.25
合计	75863.09	31174.14	2968.97	56829.06	166835.15

3.3 碳盈亏的时空变化

除区域碳源、碳汇外，碳盈亏也是反映区域碳排放与碳吸收的重要指标。碳盈亏是指碳汇与碳源的差异情况，碳汇大于碳源称为碳盈，区域对外表现为碳汇；碳汇小于碳源称为碳亏，区域对外表现为碳源。根据碳源、碳汇数据，计算了河南省各地区的碳盈亏情况，具体见图7-8。经分析可知，河南省总体上处于碳亏状态，即碳排放大于碳吸收。从时间上看，碳亏呈不断增大的趋势，从2005年的碳亏4644.77万t增加到2013年的13520.56万t，增长了191.09%，年均增长36.39%。从空间上看，处于碳亏的地区也逐渐增多，2005年处于碳盈状态的区域主要位于豫(东)南的南阳、信阳、驻马店、周口及豫西地区的三门峡、洛阳，而到了2013年，碳盈地区迅速减少，仅有豫(东)南的南阳、信阳、周口；豫中的平顶山、郑州及豫北的焦作、安阳碳亏最为严重，与这些区域较大的碳排放关系密切；南阳、信阳碳盈最多，与这些地区较大面积的植被覆盖有关。碳盈亏的变化与区域经济社会的发展密切相关。为进一步分析碳盈亏的变化及其时空分布，本文对河南省18个地市的单位面积碳盈亏与第二产业比重

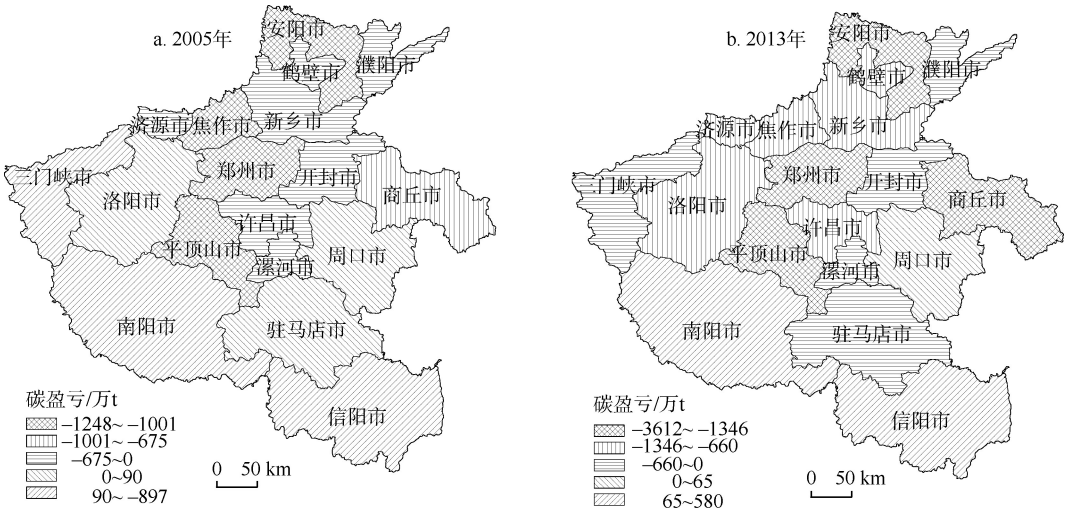

图8 2005(a)、2013年(b)河南省碳盈亏空间分布图

Fig.8 Spatial distribution for carbon surplus and deficit of Henan Province in 2005 (a) and 2013 (b)

和城镇化水平进行了相关性分析。经计算，单位面积碳盈亏与第二产业比重和城镇化水平之间的相关系数分别为−0.4765和−0.4973，通过0.05显著水平检验($r_{0.05}(18-2)=0.468$)，说明工业化及城镇化对区域碳亏具有显著影响。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文基于能源消耗数据、主要工业产品产量，参考IPCC的碳排放标准，计算了河南省能源消耗及工业生产过程中的碳排放；通过遥感影像，结合归一化植被指数(NDVI)，计算了河南省的碳汇及其变化，并对河南省的碳盈亏及其空间变化进行分析。得到以下结论：

(1) 河南省碳排放量呈逐渐上升的趋势，其中能源消耗是主要的碳源，其排放量呈逐年增加趋势，所占比重在不断下降，但空间差异明显。

(2) 河南省碳汇主要以林地和耕地为主，草地所占比重很小；随着非农建设占用等原因，耕地的碳汇面积呈减少趋势，受中国退耕还林、农业内部结构调整等因素的影响，研究期内部分耕地碳汇转换为林地碳汇，在一定程度上减缓了总碳汇的减少速度。

(3) 河南省总体上处于碳亏状态，2005-2013年碳亏呈增长趋势，且碳亏的地区数量也在增加，总的来看，豫南、豫西南、豫东南、豫西地区呈现碳盈或弱碳亏状态，豫中及豫北地区处于较严重的碳亏状态。

(4) 从计算结果来看，开展生态城市建设等工作有助于增加碳汇，对于降低快速城市化地区的碳亏具有一定的积极作用。

4.2 讨论

相关研究表明，中国将在2030年前后碳排放达到峰值(杜强等, 2012)，各地区应该根据当地实际情况，采取切实有效的措施，应对由此造成的各种社会经济和环境问题。河南省整体呈现碳亏状态，距离低碳经济发展的要求还相差较远。为此，一是应从改善能源结构入手，大力发展清洁能源和低碳能源，降低煤炭等传统能源的比重；二是调整优化产业结构，降低水泥、钢铁及有色冶金、化工等传统高能耗、高排放产业所占的比重，植树造林，减缓或抑制碳亏逐渐扩大的态势；三是作为碳盈的豫西、豫南地区是河南省经济发展相对落后的地区，而碳亏较严重的豫中、豫北地区经济发展基础相对较好，因此应通过区域碳补偿或生态补偿等手段，鼓励碳盈地区减源增汇，发展低碳经济，为区域碳减排目标的实现和低碳发展战略的实施创造条件。

本文仍有需进一步改进与提高之处。首先，本文采用遥感影像，通过归一化植被指数及监督分类法来确定碳汇类型与非碳汇区域，该方法受经验影响较大，主观性较强，分类结果的精度难以保证，今后拟结合高分辨率遥感影像，采用三级土地利用分类体系，探讨遥感影像像元的亮度值与碳源、碳汇的关系，以便更精确地研究碳源、碳汇及其时空变化；其次在《京都议定书》中，碳源包括CO_2、CH_4、N_2O、HFCS、PFCS、SF_6，本文只考虑了CO_2，没有考虑其他碳源；再次，各种能源碳排放、主要工业产品生产过程中的碳排放均使用固定的系数不甚合理，今后应根据能源的类型及质量、工业产品生产工艺等进行适当修正，使其更符合河南省实际情况，也可为其他区域类似研究提供参考。

参考文献(References)

杜强, 陈乔, 陆宁. 2012. 基于改进 IPAT 模型的中国未来碳排放预测[J]. 环境科学学报, 32(9): 2294-2302. [Du Q, Chen Q, Lu N. 2012. Forecast of China's carbon emissions based on modified IPAT model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(9): 2294-2302.]

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: 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: Earth Sciences, 50(9): 1314-1350.]

葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 等. 2008. 过去300年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究[J]. 中国科学: 地球科学, 38(2): 197-210. [Ge Q S, Dai J H, He F N, et al. 2008. Land use changes and their relations with carbon cycles over the past 300a in China[J]. Science in China: Earth Sciences, 51(6): 871-884.]

何勇, 姜允迪, 丹利, 等. 2006. 中国气候、陆地生态系统碳循环研究[M]. 北京: 气象出版社. [He Y, Jiang Y D, Dan L, et al. 2006. Zhongguo qihou, ludi shengtai xitong tanxunhuan yanjiu[M]. Beijing, China: China Meteorological Press.]

胡琨, 王辉, 刘玉凤. 2009. 以天然气为原料合成氨生产二氧化碳排放量的计算[J]. 河北化工, 32(11): 47-49. [Hu K,

Wang H, Liu Y F. 2009. The calculation of emissions of carbondioxide for the ammonia production of natural gas as raw material[J]. Hebei Chemical Engineering and Industry, 32(11): 47-49.]

李颖, 黄贤金, 甄峰. 2008. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 24(S2): 102-107. [Li Y, Huang X J, Zhen F. 2008. Effects of land use patterns on carbon emission in Jiangsu Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 24(S2): 102-107.]

鲁丰先, 张艳, 秦耀辰, 等. 2013. 中国省级区域碳源汇空间格局研究[J]. 地理科学进展, 32(12): 1751-1759. [Lu F X, Zhang Y, Qin Y C, et al. 2013. Spatial patterns of provincial carbon source and sink in China[J]. Progress in Geography, 32(12): 1751-1759.]

秦耀辰, 荣培君, 杨群涛, 等. 2014. 城市化对碳排放影响研究进展[J]. 地理科学进展, 33(11): 1526-1534. [Qin Y C, Rong P J, Yang Q T, et al. 2014. Research progress of impact of urbanization on carbon emissions[J]. Progress in Geography, 33(11): 1526-1534.]

孙艳芳. 2015. 河南省碳源碳汇时空变化研究[D]. 开封: 河南大学. [Sun Y F. 2015. A study on temporal and spatial evolution of carbon source and sink in Henan Province[D]. Kaifeng, China: Henan University.]

王金南, 蔡博峰, 曹东, 等. 2011. 中国CO_2排放总量控制区域分解方案研究[J]. 环境科学学报, 31(4): 680-685. [Wang J N, Cai B F, Cao D, et al. 2011. Scenario study on regional allocation of CO_2 emissions allowance in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(4): 680-685.]

赵荣钦, 黄贤金. 2010. 基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹[J]. 地理研究, 29(9): 1639-1649. [Zhao R Q, Huang X J. 2010. Carbon emission and carbon footprint of different land use types based on energy consumption of Jiangsu Province[J]. Geographical Research, 29(9): 1639-1649.]

朱松丽. 2000. 水泥行业的温室气体排放及减排措施浅析[J]. 中国能源, (7): 25-28. [Zhu S L. 2000. Greenhouse emission for cement industry and its reduction counter measure[J]. Energy of China, (7): 25-28.]

Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, 等. 2006. 2006年IPCC国家温室气体清单指南[R]. 叶山, 日本: 全球环境战略研究所. [Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006. 2006nian IPCC guojia wenshi qiti qingdan zhinan[R]. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies.]

Albrecht J, François D, Schoors K. 2002. A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals[J]. Energy Policy, 30(9): 727-736.

Gitz V, Ciais P. 2004. Future expansion of agriculture and pasture acts to amplify atmospheric CO_2 levels in response to fossil- fuel and land- use change emissions[J]. Climatic Change, 67(2-3): 161-184.

Glaeser E L, Kahn M E. 2010. The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development[J]. Journal of Urban Economics, 67(3): 404-418.

Houghton R A, Hackler J, Lawrence K T. 1999. The U.S. carbon budget: Contributions from land- use change[J]. Science, 285: 574-578.

Kumar J I N, Patel K, Kumar R N, et al. 2010. An assessment of carbon stock for various land use system in Aravally mountains, western India[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 15(8): 811-824.

Schimel D, Enting I G, Heimann M, et al. 1995. CO_2 and the carbon cycle[M]//IPCC. Climate change 1994: Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios. Cambridge, UK: Cambridge University Press: 35-71.

Sharma P, Rai S C. 2007. Carbon sequestration with land-use cover change in a Himalayan watershed[J]. Geoderma, 139 (3-4): 371-378.

Yi W J, Zou L L, Guo J, et al. 2011. How can China reach its CO_2 intensity reduction targets by 2020? A regional allocation based on equity and development[J]. Energy Policy, 39: 2407-2415.

Spatial and temporal changes of carbon sources and sinks in Henan Province

WANG Xi[1,2], LU Fengxian[1,2*], QIN Yaochen[1,2], SUN Yanfang[1]

(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, Henan, China; 2. Henan Collaborative Innovation Center for Coordinating Industrialization, Urbanization and Agriculture Modernization in Central Economic Zone, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Carbon sources and sinks are key factors for low-carbon development. Carbon surplus and deficit caused by carbon sources and sinks is the basis for formulating low-carbon development strategy and policy. Based on energy consumption data, output of key industrial products, and the IPCC standard of carbon emissions, and using the results of other research, carbon sources from energy consumption and the productive process of cement, steel, and synthetic ammonia are calculated for Henan Province. On the basis of remote sensing image analysis, carbon sinks are divided into arable land, forest, and grassland. According to the carbon emission coefficient and carbon absorption coefficient and the amount of carbon sources and sinks , the spatial and temporal variation of carbon surplus and deficit are calculated and analyzed. Through the research, we reached the following conclusion: (1) Carbon emissions and per capita carbon emission in Henan Province showed a rising trend from 2005 to 2013, and the average annual growth rates were 11.22% and 10.72%, respectively. The spatial variation was also clear. Per capita carbon emissions for the western, northern, and central areas of Henan Province were relatively high, but were relatively low in the southern and southeastern areas. (2) Energy consumption was the key carbon source in Henan Province. Carbon emissions from energy consumption showed a gradually rising trend, but its share in total carbon emissions was decreasing. Cement and steel productions were another important source of carbon emissions. The related carbon emissions and share in total carbon emissions showed a gradually increasing trend. The emissions and share of ammonia production were relatively low. (3) Carbon sinks in Henan Province are mainly composed of arable land and forest, and the proportion of grassland is very low. Carbon sinks in Henan Province decreased from 6384.83 million tons to 6337.78 million tons from 2005 to 2013, with an average annual reduction rate of 5.88 million tons. This was primarily due to nonagricultural construction that converted part of the arable land and forest land into built-up areas. (4) Overall Henan Province was in a carbon deficit state. From 2005 to 2013, both the size of carbon deficit and the number of areas with carbon deficit status were increasing. The southeastern and western regions of Henan Province were in a carbon surplus or low deficit state, while other regions were in a carbon deficit state. (5) To facilitate low-carbon development, improving energy structure, adjusting industrial structure, and optimizing land use to reduce carbon sources and add carbon sinks should be promoted in Henan Province.

Key words: carbon source; carbon sink; carbon surplus and deficit; spatiotemporal change; Henan Province