

DOI: 10.5846/stxb201811292596

邱莎,曹飞飞,唐明方,邓红兵.能源对北京市城市碳循环的影响.生态学报,2019,39(18): - .

Qiu S, Cao F f, Tang M F, Deng H B. Impact of energy on the urban carbon cycle of Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): - .

## 能源对北京市城市碳循环的影响

邱莎<sup>1,2</sup>, 曹飞飞<sup>1,2</sup>, 唐明方<sup>1,\*</sup>, 邓红兵<sup>1</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**研究城市碳循环过程并阐明能源对碳循环的影响,可为城市节能减排政策的制定和实施提供参考依据。本研究基于城市碳循环模型核算了 2005—2014 年北京市的碳储量和碳通量,并通过能源碳效应指数来探讨能源对城市碳循环的影响。结果表明人为碳储量是北京市总碳储量增加的主要驱动力。北京市的碳输入主要来自水平方向,表明北京市的发展在很大程度上依赖于外部环境的物质供给;北京市的碳输出主要是能源消耗产生的垂直碳输出。能源活动相关的碳通量占北京市总碳通量的比重,即能源碳效应,在 2006 年高达 79.46%,而后开始呈波动下降的趋势。能源对北京市碳循环影响最大的是垂直输出方向,其次是水平输入方向,因此低碳城市建设需要加强对垂直碳通量和水平碳通量的调节和管理,尤其是与能源活动相关的碳通量,与此同时,保护自然植被和增加生态用地对提高城市碳减排能力也至关重要。

**关键词:**碳循环;碳储量;碳通量;能源碳效应;北京市

## Impact of energy on the urban carbon cycle of Beijing

QIU Sha<sup>1,2</sup>, CAO Feifei<sup>1,2</sup>, TANG Mingfang<sup>1,\*</sup>, DENG Hongbing<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Studying the carbon process and clarifying the impact of energy on the carbon cycle, can provide a reference for the formulation and implementation of carbon emission reduction policies, especially in urban areas. In this study, we estimated the carbon storage and flux in Beijing from 2005 to 2014 based on the urban carbon cycle model and analysed the impact of energy on the urban carbon cycle using the energy carbon effect index. The results showed that the artificial carbon storage was the main driving force for the increase in the total carbon storage in Beijing. Horizontal input was the main carbon input in Beijing indicating that the development of Beijing strongly depended on the materials supplied from external environment. Vertical output was the main carbon output in Beijing in the form of energy consumption. The carbon flux related to energy activities accounted for the total carbon flux in Beijing, namely the carbon effect of energy, was as high as 79.46% in 2006, then the ratio began to show a trend of fluctuating decline. The greatest impact of energy on Beijing's carbon cycle was from a vertical output direction, followed by a horizontal input direction. Therefore, strengthening the regulation and management of vertical carbon flux and horizontal carbon flux would be needed for city construction to lower carbon emissions. At the same time, it is important for Beijing to protect natural vegetation and increase ecological land area to enhance the city's carbon emission reduction capacity.

**Key Words:** carbon cycle; carbon storage; carbon flux; energy carbon effect index; Beijing

基金项目:国家自然科学基金(41501602)

收稿日期:2018-11-29; 网络出版日期:2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mftang@rcees.ac.cn

城市土地面积仅占全球陆地总面积的0.5%左右,但全球终端能源消耗产生的CO<sub>2</sub>排放量75%发生在城市<sup>[1-2]</sup>。城市的物质代谢不同于自然生态系统,人类活动在其代谢过程中扮演了重要角色<sup>[3]</sup>。城市尺度碳循环会影响更大尺度的碳过程,世界正处于大规模的城市化浪潮中,快速城市化将导致人类活动在区域和全球碳循环中的作用变得越来越重要<sup>[4]</sup>。

人类活动是城市碳循环的重要驱动力,尤其是能源活动,极大地干扰了城市原有的碳过程<sup>[5]</sup>。早期对碳循环的研究主要集中在区域或全球尺度,主要研究对象是自然生态系统<sup>[6]</sup>。而后有研究认识到,城市地区在全球碳循环中是不可忽视的,随着城市面积的不断增长,城市地区将变得越来越重要<sup>[7]</sup>。学者们主要从城市能源使用<sup>[8]</sup>和能源相关的碳排放<sup>[9]</sup>、城市能源代谢<sup>[10]</sup>、城市能源转型<sup>[11]</sup>和城市能源流动过程<sup>[12]</sup>等方面对城市能源进行研究。此外,一些学者利用城市碳固存和碳排放的相对规模比来评估城市化化石燃料使用造成的碳不平衡<sup>[13-14]</sup>,在此基础上有学者建立碳不平衡指数和外部依赖性指数来对城市碳代谢进行分析<sup>[15]</sup>。以上研究为量化能源活动在城市碳循环中的作用提供了很好的借鉴,但大多侧重于垂直方向的碳流通,或者仅关注城市能源,用指标量化能源活动在城市系统碳循环中的重要性有待进一步加强。人类活动碳效应指数是用来衡量人类活动对城市碳循环的影响程度<sup>[16]</sup>,其中能源活动对城市碳循环影响最直接也最剧烈,研究能源碳效应可为城市节能减排政策的制定和实施提供参考依据。

北京是中国的首都,也是中国的政治,文化,国际交流和科技创新中心。北京经历了快速的城市化进程,过去十年经济蓬勃发展,人口从2005年的1538万增长到2014年的2152万,其国内生产总值从2005年的696.95亿元增加到2014年的2133.08亿元。研究基于核算框架体系,借鉴已有的碳排放系数,探索北京市2005—2014年间碳循环特征。通过分析与能源活动相关的碳通量与总碳通量的比值,用能源碳效应指标从不同方向量化能源对城市碳循环的影响程度。

## 1 研究方法和数据来源

### 1.1 城市碳循环构成

能源碳效应是指城市碳循环过程中与能源活动相关的碳通量占总碳通量的比值,用来衡量能源活动对城市碳循环的影响程度。建立一个分析城市碳循环特征的整体核算框架是分析能源碳效应的基础,城市碳循环模型<sup>[17,18]</sup>需要包括生物物理(biophysical)和人类相关的碳通量及碳储量<sup>[3]</sup>,具体的构成见表1。

表1 城市系统碳储量和碳通量构成  
Table 1 Main carbon storage and carbon flux of urban system

类别 Items	城市碳储量 Carbon storage of urban system	城市碳通量 Carbon storage of urban system	
		碳输入通量 Carbon input flux	碳输出通量 Carbon output flux
自然 Natural	森林、草地、土壤、水体	植被光合作用、农作物生长期内碳吸收、水体碳吸收	植被及土壤呼吸作用、水域挥发、人类及动物呼吸
人工 Artificial	建筑物、城市绿地、家具和图书、人类和动物	食物、能源、建筑木材、家具和图书	能源消耗,工业生产,稻田甲烷碳排放,畜牧业,秸秆燃烧,固体废物处理和废水处理、能源产品和食品

城市碳储量以各种形式储存在城市内,包括自然碳库和人工碳库<sup>[18]</sup>。通常,自然碳库包括土壤,森林,草地和水体,人工碳库包括建筑物,城市绿地,家具和图书,人类和动物。其中建筑物碳库主要核算以房屋木结构和房屋装修两种形式储存在建筑物中的木材碳储量。

城市碳通量表示通过人为和自然方式,单位时间(包括垂直和水平方向)进出城市系统的碳输入和输出量<sup>[18]</sup>。城市系统的碳输入分为垂直和水平方向。垂直碳输入通量包括植被光合作用、农作物生长期内和水体吸收的碳量,植被碳吸收主要为森林,草地和城市绿地。水平碳输入主要运输载体有食物,能源,建筑材料,家具和图书。

城市碳输出通量也分为垂直输出和水平输出。垂直碳输出主要包括通过能源消耗,工业生产,稻田甲烷碳排放,畜牧业,人类及动物呼吸,植被呼吸,土壤呼吸,水域挥发,秸秆燃烧,固体废物处理和废水处理的碳排放。其中畜牧业包括动物肠道发酵、粪便碳排放。水平碳输出包括储存在能源产品和食品中的碳。

## 1.2 能源碳效应指数

人类活动碳效应指数是衡量人类活动对城市碳循环影响程度的指标<sup>[16]</sup>。

$$C_{\text{hum}} = (CH_{\text{hum}} + CV_{\text{hum}}) / Ct \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $C_{\text{hum}}$  是人类活动碳效应指数,  $CH_{\text{hum}}$  是人类活动引起的水平碳通量,  $CV_{\text{hum}}$  是人类活动引起的垂直碳通量,  $Ct$  是总碳通量, 包括输入和输出通量。

通过类比人类活动碳效应指数, 使用四个指标来分析能源对城市碳循环的总压力和各个方向压力, 指数如下:

(1) 能源碳效应指数是衡量能源活动对城市碳循环影响程度的指标。

$$C_{\text{energy}} = (CH_{\text{energy}} + CV_{\text{energy}}) / Ct \times 100\% \quad (2)$$

式中  $C_{\text{energy}}$  是能源碳效应指数,  $CH_{\text{energy}}$  是以能源为载体的水平碳通量,  $CV_{\text{energy}}$  是能源消耗引起的垂直碳通量,  $Ct$  是总碳通量。

(2) 能源消耗碳排放效应指数是衡量能源消耗对城市碳循环影响程度的指标, 又称能源垂直输出碳效应指数。

$$C_{v\text{-energy}} = CV_{\text{energy}} / Ct \times 100\% \quad (3)$$

$C_{v\text{-energy}}$  是能源消耗碳排放效应指数,  $CV_{\text{energy}}$  是能源消耗产生的碳排放量,  $Ct$  是总碳通量。

(3) 能源水平输入碳效应指数是衡量以能源形式水平碳输入对城市碳循环的影响程度的指标。

$$C_{i\text{-energy}} = CI_{\text{energy}} / Ct \times 100\% \quad (4)$$

$C_{i\text{-energy}}$  是能源输入碳效应指数,  $CI_{\text{energy}}$  是以能源形式的水平碳输入,  $Ct$  是总碳通量。

(4) 能源水平输出碳效应指数是衡量以能源形式的水平碳输出对城市碳循环的影响程度的指标。

$$C_{o\text{-energy}} = CO_{\text{energy}} / Ct \times 100\% \quad (5)$$

$C_{o\text{-energy}}$  是能源水平输出碳效应指数,  $CO_{\text{energy}}$  是以能源为载体的水平碳输出,  $Ct$  是总碳通量。

## 1.3 数据来源

本研究主要依照赵荣钦等人集成的城市碳储量和碳通量的核算方法体系<sup>[18]</sup>, 其中核算城市碳循环过程中所涉及的碳排放与碳吸收过程所采用的方法主要参考 IPCC 国家温室气体清单排放核算提供的经验系数法 (<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>), 研究中用到的活动水平数据来源于统计年鉴、文献和统计局网站<sup>[19-23]</sup>。碳排放和碳吸收系数尽量选取北京当地因子<sup>[24-28]</sup>, 如没有, 则采用华北地区<sup>[29]</sup>或是中国的平均值<sup>[16,30-40]</sup>代替。

## 2 结果分析

### 2.1 北京市城市系统碳循环分析

#### 2.1.1 北京市城市系统碳储量分析

北京市碳储量总量从 2005 年的 190.95 Tg C (Tg = 10<sup>12</sup>g) 逐渐增加到 2014 年的 203.75 Tg C, 平均年增长 1.28 Tg C (表 2)。

2005 年, 自然碳储量占北京市总碳储量的 94%, 在 2014 年下降到 90% (图 1)。然而, 自然碳储量仍然是北京市碳储量的主要组成部分。在研究期间, 自然碳库中土壤是最大的碳库, 占 86%—88%, 植被是第二大碳库, 占 12%—14% (表 2)。从 2005 年到 2014 年, 土壤碳储量下降了 0.49%, 自然植被碳储量在此期间增加了 21.12%。

北京市的人为碳储量从 2005 年的 11.28 Tg C 增加到 2014 年的 20.34 Tg C (表 2)。在研究期间, 存储在建筑物, 城市绿地, 家具和图书, 人类和动物中的碳逐渐增加。人为碳储量增加主要是由于建筑物和城市绿地

碳储量的增加(图 1)。北京市的建筑碳储量从 2005 年的 8.63 Tg C 增加到 2014 年的 16.25 Tg C,北京城市绿地储存的碳从 1.25 Tg C 增加到 2.58 Tg C(表 2)。在研究期间,人为碳库中在建筑物、城市绿地、家具和书籍以及人类和动物中储存的碳的比例分别为 77%—81%,11%—13%,6%—10%和 1%—2%(表 2)。

表 2 2005—2014 年北京市城市碳储量主要核算项目/( $10^{-2}$  Tg)

Table 2 Main items of the urban carbon storage in Beijing from 2005 to 2014

年份 Year	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
总碳储量 Sum of carbon storage	19095	19234	19352	19479	19636	19766	19896	20021	20212	20375
自然碳储量 Natural carbon pool	17967	18001	18035	18052	18080	18105	18133	18201	18276	18341
自然植被碳储量 Carbon stored in natural vegetation	2187	2211	2247	2264	2380	2406	2432	2495	2585	2649
土壤碳储量 Carbon stored in soil	15752	15763	15760	15757	15673	15671	15672	15672	15673	15675
水体碳储量 Carbon stored in water bodies	28	27	28	31	27	28	29	34	18	17
人为碳储量 Artificial carbon pool	1128	1233	1317	1427	1556	1661	1763	1820	1936	2034
城市绿地碳储量 Carbon stored in urban green space	125	146	149	151	198	201	204	210	215	258
人类和动物碳储量 Carbon stored in humans and animals	25	25	25	26	27	28	28	29	29	30
建筑物碳储量 Carbon stored in buildings	863	948	1026	1132	1213	1313	1412	1461	1571	1625
家具和图书碳储量 Carbon stored in furniture & books	115	116	117	118	118	119	119	120	121	121

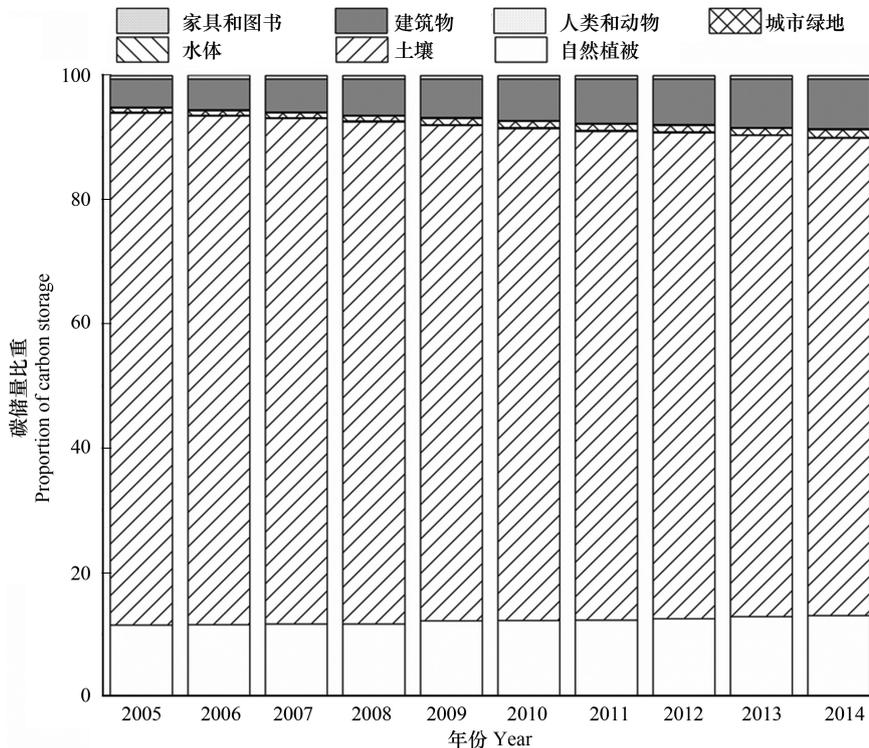


图 1 2005—2014 年北京市碳储量比重变化

Fig.1 Change in proportion of carbon storage in Beijing from 2005 to 2014

### 2.1.2 北京市城市系统碳输入通量分析

总碳输入在研究期间上下小幅度波动。波动主要受水平碳输入的影响,而垂直碳输入在研究期间保持稳定(表 3)。

表 3 2005—2014 年北京市城市碳输入主要核算项目/( $10^{-2}$  Tg)

Table 3 Main items of the urban carbon input flux in Beijing from 2005 to 2014

年份 Year	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
总碳输出 Sum of carbon output flux	7679	8215	8070	7592	7954	7712	7136	7300	6731	6879
垂直碳输出通量 Vertical carbon output flux	6897	6899	7188	6819	7039	6874	6372	6461	6062	6283
能源消耗碳排放 Carbon emitted from energy consumption	5850	5832	6096	5823	5967	5785	5422	5502	5086	5291
工业碳排放 Carbon emitted from industry	303	319	321	208	244	251	101	91	82	71
农业碳排放 Carbon emitted from agriculture	52	39	44	45	45	42	43	43	42	39
呼吸碳排放 Carbon emitted from respiration	665	679	694	705	739	753	763	782	806	831
水体碳排放 Carbon emitted from water bodies	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
固体废弃物处理碳排放 Carbon emitted from solid waste disposal	21	24	26	31	37	35	35	35	38	42
废水处理碳排放 Carbon emitted from waste water	6	6	7	7	7	8	8	8	8	9
水平碳输出通量 Horizontal carbon output flux	782	1316	882	773	915	838	764	839	669	596
食品碳输出 Carbon output through food	15	39	16	19	21	16	16	16	15	9
能源碳输出 Carbon output through energy	767	1277	866	754	894	822	748	823	654	587

水平碳输入占碳输入总量的 69%—74%, 是总碳输入通量变化的主要原因(图 2)。来自能源, 食品和木制品的碳输入分别占总碳输入的 65%—70%, 2%—4% 和 1%—2%。

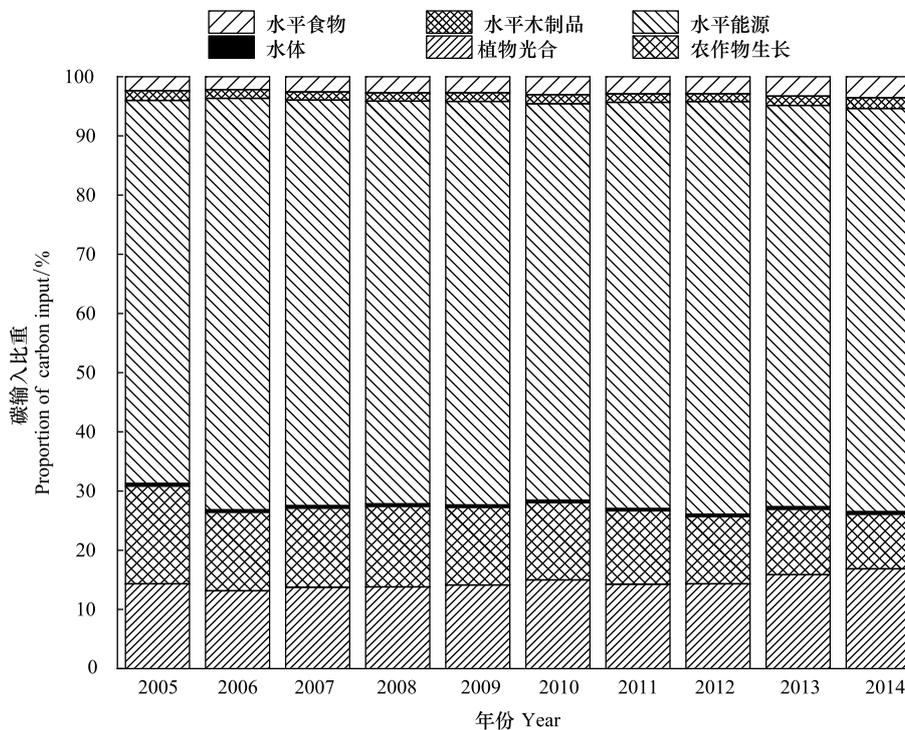


图 2 2005—2014 年北京市不同方向碳输入变化

Fig.2 Change in various carbon inputs in Beijing from 2005 to 2014

关于垂直碳输入,水体和作物生长期吸收的碳分别占总碳输入的 13%—17%,0.38-0.44%和 9%—17% (图 2)。作物生长期吸收的碳从 2005 年的 8.7 Tg C 降至 2014 年的 5.1 Tg C,除了 2008 年和 2011 年的增加,作物生长季吸收的碳在所有其他年份都有所减少,尤其是在 2010 年之后(表 3)。植被和作物光合作用吸收的碳每年增加,从 2005 年的 7.55 Tg C 增加到 2014 年的 9.33 Tg C,增加了 23.58%(表 3)。耕地面积从 2005 年的 233400.90 公顷减少到 2014 年的 219948.76 公顷,导致作物生长期碳吸收能力下降。虽然绿地的碳吸收能力随着城市绿化覆盖率的提高而提高,但研究期间北京的垂直碳输入普遍下降。

### 2.1.3 北京市城市系统碳输出通量分析

研究期间内北京市的总碳储量呈波动降低的趋势,主要受垂直碳排放量的影响。除了 2006 年突然增加外,水平碳输出保持稳定,这是由于以能源为载体的碳输出增加造成的。

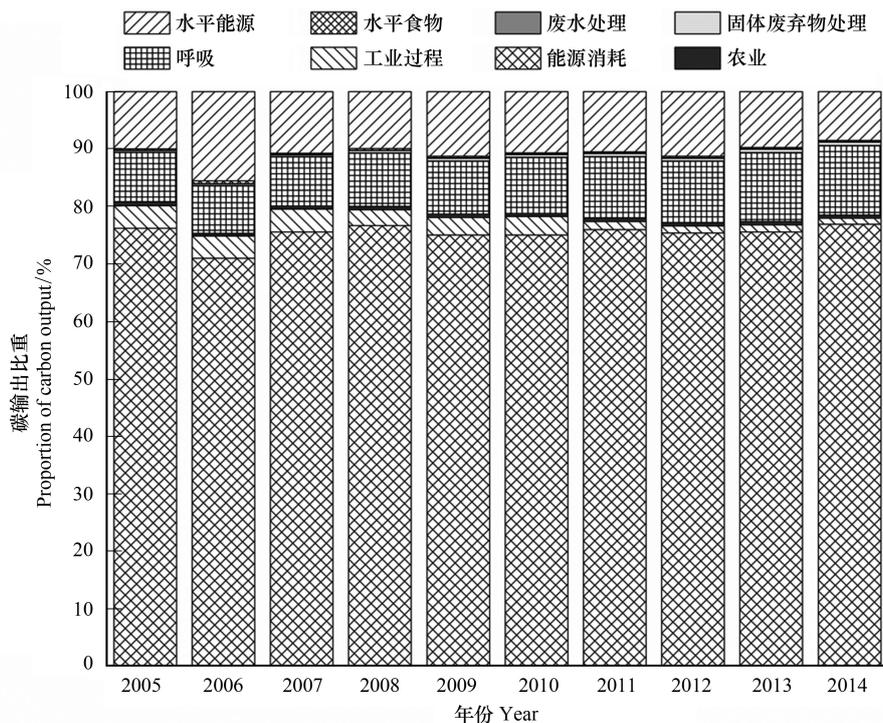


图 3 2005—2014 年北京市不同方向碳输出变化

Fig.3 Change in various carbon outputs in Beijing from 2005 to 2014

研究期间内垂直碳输出在碳输出通量的变化中起着重要作用,占总排放量的 84%—91%(图 3)。垂直碳排放量下降 9%,从 2005 年的 68.97 Tg C 降至 2014 年的 62.83 Tg C(表 4)。垂直碳排放量的下降主要是由于能源消耗和工业生产过程中碳排放的减少所致。就垂直碳排放而言,能源消耗、呼吸和工业排放的碳比例分别为 84%—85%,10%—13%和 1%—5%(表 4)。垂直碳排放主要由人类活动引起,例如化石能源使用,工业生产和人类呼吸。

就水平碳输出而言,本研究仅考虑食物和能量输出。以能源为载体的碳输出是主要成分,占水平碳排放总量的 97%—98%(表 4)。受国家能源和经济政策影响,能源碳输出总体呈波动下降趋势。

### 2.1.4 北京市城市系统碳净流量分析

就城市与外部环境的碳交换而言,研究期间的碳输出量大于碳输入量(图 4),这使得北京成为碳排放源。2008 年和 2011 年净流量变化明显,分别比上年增加 20.89%和 43.52%,主要原因是碳排放量的减少(图 4)。

### 2.2 北京市城市系统能源碳效应分析

在研究期间内,2006 年的人类活动碳效应指数最高,达到 84.90%(图 5),这表明北京碳流通的高度人工化。2006 年以后,影响程度总体呈下降趋势,没有随着人口的增加而上升。2006 年能源碳效应指数最高,达到

79.46%(图5)。能源相关的碳流通是城市碳通量中最重要的组成部分。能源对城市碳循环的影响从2006年到2014年出现波动性下降(图5),这表明能源对城市碳循环的影响并未随着经济增长而增加。

表4 2005—2014年北京市城市碳输出主要核算项目/( $10^{-2}$  Tg)

Table 4 Main items of the urban carbon output flux in Beijing from 2005 to 2014

年份 Year	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
总碳输入 Sum of carbon input flux	5270	5858	5691	5710	5858	5582	5933	6064	5668	5534
垂直碳输入通量 Vertical carbon input flux	1648	1571	1566	1589	1620	1588	1604	1581	1550	1467
植被光合作用碳吸收 Carbon absorbed during photosynthesis	755	770	782	789	828	837	846	869	899	933
农作物生长期内碳吸收 Carbon absorbed during the crop growth period	870	778	761	777	769	728	735	689	628	511
水体碳吸收 Carbon absorbed by water bodies	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
水平碳输入通量 Horizontal carbon input flux	3622	4287	4125	4121	4238	3994	4329	4483	4118	4067
能源碳输入 Carbon input from energy	3411	4073	3900	3885	3993	3739	4072	4228	3843	3770
建筑物碳输入 Carbon input from building materials	70	63	58	58	64	59	61	56	60	75
家具和图书碳输入 Carbon input from furniture and books	16	23	20	22	22	26	24	24	29	25
食物碳输入 Carbon input from food	125	128	147	156	159	170	172	175	186	197

垂直输出能源碳效应高于水平输出能源碳效应,说明能源对北京市碳循环影响最大的是垂直碳输出,其次是水平碳输入(图6)。水平输入能源碳效应在2005年到2011年间缓慢增加,2011年以后呈缓慢下降趋势,表明能源的水平输入对城市碳循环的影响先逐渐增加后缓慢下降。垂直输出能源碳效应在2007年到2011年间下降明显,2011年以后下降放缓并开始回升(图6)。水平输出能源碳效应在2006年后呈波动下降趋势。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 北京市碳循环特征

北京市的碳储量总量从2005年到2014年缓慢增长,北京市碳储量的主要组成是自然碳储量,但自然碳储量所占比重在不断下降。通过对比郝岩等人对广元城市碳循环研究,发现广元自然碳储量比例高于北京<sup>[17]</sup>,表明当城市具有较高的城市化程度时,人类对城市自然环境的干扰会产生更大的影响。人为碳储量是总碳储量增加的主要驱动力。根据目前的趋势和过去十年的推断,到2030年,北京市人为碳储量的比例将增加到总碳储量的18.12%。为了城市的可持续发展,我们应该更加关注城市化程度高的地区不断增加的人为碳储量的处置。

不同城市间主要的碳输入方式有差异,北京市对外部环境的依赖性较大。北京市的碳输入主要来自水平输入,以能源为载体的碳输入占水平碳输入的比例最高。而广元市主要是垂直碳输入,2006—2012年广元市的垂直碳输入占总碳输入的比例为91%—97%<sup>[17]</sup>。此外,2006年至2012年,北京的横向碳输入量是广元的

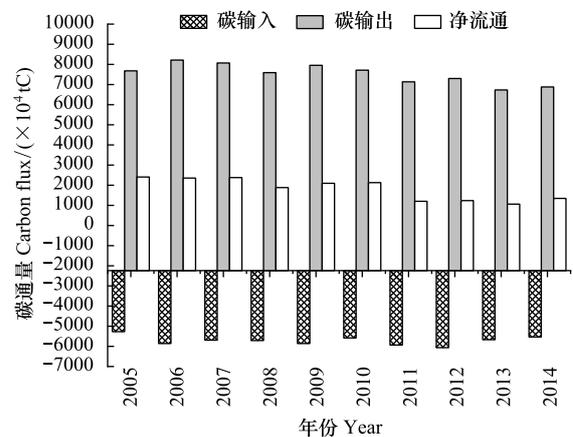


图4 2005—2014年北京市碳输入、输出和净通量变化

Fig.4 Change in carbon input, output and net flux in Beijing from 2005 to 2014

36—129 倍。从 1990 到 2004 年北京市对外部资源的依赖增加了 16%, 尽管是波动的<sup>[41]</sup>。从 1995 年到 2015 年北京市对外部环境的依赖波动较大, 但增加了将近 4 倍<sup>[15]</sup>。表明北京的发展在物质方面强烈依赖于外部环境, 北京需要加强能源和食品供应管理。此外, 在研究期间, 北京的垂直碳输入普遍下降, 主要原因是耕地减少导致作物生长期间碳吸收能力下降。

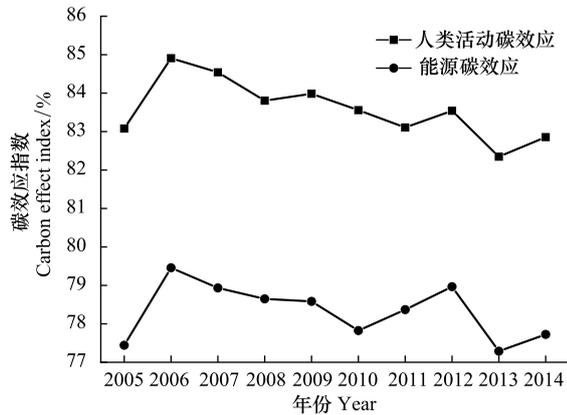


图 5 人类活动和能源活动对城市碳循环的影响程度

Fig.5 The impact extent of human activities and energy on the urban carbon cycle

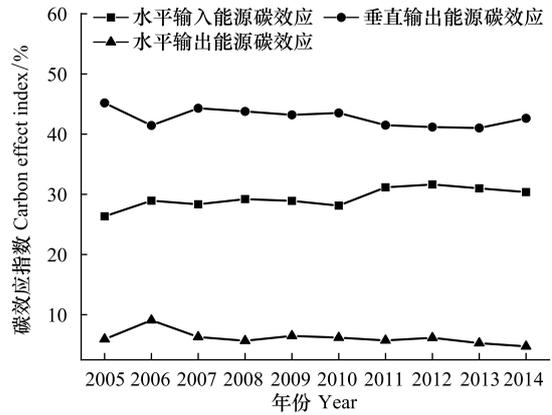


图 6 各方向能源活动对城市碳循环的影响程度

Fig.6 The impact extent of directional energy on the urban carbon cycle

北京市的总碳输出量普遍下降, 北京市的碳输出量主要是垂直碳输出, 其碳输出的主要形式是能源消耗。不同于北京, 广元市碳输出的主要形式是人类呼吸碳排放, 在 2006—2012 年广元市呼吸产生的碳输出占碳输出总量的 45%—54%<sup>[17]</sup>。北京市的碳不平衡程度是 1995 年至 2010 年中国平均水平的两倍<sup>[15]</sup>。北京市 2014 年的城市绿化覆盖率达 47.40%<sup>[19]</sup>, 为了降低城市碳不平衡程度, 北京市应该保护自然植被, 尽可能增加生态用地面积, 增加碳吸收。与 2005 年相比, 2014 年北京垂直碳排放量减少了 9%, 这主要是由于能源消耗和工业生产过程中碳排放的减少。从 2006 年到 2012 年, 广元市的垂直碳排放量增加了 28.16%, 这主要是由于能源消耗和工业生产过程中碳排放的增加。导致广元与北京垂直碳排放差异的因素可能是工业化程度、城市化程度、地理位置和自然禀赋的不同。

在本研究中, 受数据所限, 部分碳核算项(植被、建筑材料、家具、图书等的碳储量、植被光合碳吸收、废弃物碳排放)所用参数是基于华北地区或者全国平均值进行的, 对核算结果会有一定的影响。如核算植被碳库所用的参数是基于全国平均值, 有研究发现中国北方城市的植被碳库占总碳库的比重为 4.9%<sup>[32]</sup>, 而本研究中植被碳库占 13.09%, 这个结果与北京作为首都植被覆盖率高的实际情况相符。建筑物碳库只核算了木材, 水体碳储量核算所使用的参数年代较早, 而且部分面积较小的水体没有统计在内, 所以它们的计算值可能低于真实值。

### 3.2 能源碳效应指数

北京市能源碳效应指数在 2006 年高达到 79.46%, 然后表现出波动下降。李娟等人的研究表明能源消耗是北京市 1995—2015 年碳代谢变化的主要驱动力<sup>[15]</sup>。从不同方向来分析能源碳效应指数, 能源对北京碳循环影响最大的是垂直输出, 其次是水平碳输入。有研究表明 2000—2015 年北京市资源和能源的消耗导致对环境压力加大, 资源和能源大部分依赖于外部输入, 在北京市行政边界内开采获取的量相对较少<sup>[42]</sup>。

垂直输出能源碳效应在 2007 年到 2011 年间下降明显, 2011 年以后下降放缓并开始稍有回升, 这表明在奥运会举办前后实施的与能源相关的碳排放监管措施发挥了作用, 如首钢集团搬迁等, 然而实现垂直能源碳效应的持续下降需要继续加强碳管理。北京市在 2007 年至 2015 年间进入了一个新的能源使用阶段, 北京的经济增长率仍然很快, 而直接能源消耗量则在下降<sup>[15]</sup>。相比之下, 能源消耗垂直碳排放量对广元的影响自

2008 年以来已经从 7.29% 增加到 13.46%<sup>[17]</sup>。城市资源禀赋、发展阶段和发展水平的差异导致能源对其影响程度差异较大。水平输入能源碳效应在 2005 年到 2011 年间缓慢增加,2011 年以后呈缓慢下降趋势,表明城市对外部能源输入的依赖程度呈先逐渐增加后缓慢下降的趋势。

#### 4 结论和政策建议

北京市碳储量的主要组成是自然碳储量,人为碳储量是总碳储量增加的主要驱动力。不同城市主要的碳输入方式不同,北京市的发展在很大程度上依赖于外部环境供给,特别是能源的投入,需要加强清洁能源的开发和利用,尽可能保护自然植被和增加生态用地面积增加城市碳吸收。北京市的总碳输出量普遍下降,北京市的碳输出量主要是垂直碳输出,其主要形式是能源消耗。参数的选择使得碳储量和碳通量核算具有一定的不确定性。北京市能源碳效应在 2006 年以后出现逐渐下降的趋势,根据城市资源禀赋、发展阶段和发展水平的不同,能源对不同城市的影响程度不同。能源活动对北京碳循环的最大影响是垂直输出,其次是水平碳输入,低碳城市建设需要加强对垂直碳通量和水平碳通量的调节和管理。

**致谢:**感谢本课题组王辰星、沈园、毛舒欣、李嘉珣和李涛对本研究工作的帮助。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Schneider A, Friedl M A, Potere D. A new map of global urban extent from MODIS satellite data. *Environmental Research Letters*, 2009, 4 (4): 044003.
- [ 2 ] Seto K C, Dhakal S, Bigio A, Blanco H, Delgado G C, Dewar D, Huang L, Inaba A, Kansal A, Lwasa S, McMahon J, Müller D B, Murakami J, Nagendra H, Ramaswami A. Human settlements, infrastructure and spatial planning//Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2014.
- [ 3 ] Churkina G. Modeling the carbon cycle of urban systems. *Ecological Modelling*, 2008, 216(2): 107-113.
- [ 4 ] Churkina G. The role of urbanization in the global carbon cycle. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2016, 3: 144.
- [ 5 ] Le Quéré C, Moriarty R, Andrew R M, Peters G P, Ciais P, Friedlingstein P, Jones S D, Sitch S, Tans P, Armeth A, Boden T A, Bopp L, Bozec Y, Canadell J G, Chini L P, Chevallier F, Cosca C E, Harris I, Hoppema M, Houghton R A, House J I, Jain A K, Johannessen T, Kato E, Keeling R F, Kitidis V, Klein Goldewijk K, Koven C, Landa C S, Landschützer P, Lenton A, Lima I D, Marland G, Mathis J T, Metz N, Nojiri Y, Olsen A, Ono T, Peng S, Peters W, Pfeil B, Poulter B, Raupach M R, Regnier P, Rödenbeck C, Saito S, Salisbury J E, Schuster U, Schwinger J, Séférian R, Segschneider J, Steinhoff T, Stocker B D, Sutton A J, Takahashi T, Tilbrook B, van der Werf G R, Viovy N, Wang Y P, Wanninkhof R, Wiltshire A, Zeng N. Global carbon budget 2014. *Earth System Science Data*, 2015, 7(1): 47-85.
- [ 6 ] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(6682): 249-252.
- [ 7 ] Pataki D E, Alig R J, Fung A S, Golubiewski N E, Kennedy C A, McPherson E G, Nowak D J, Pouyat R V, Lankao P R. Urban ecosystems and the North American carbon cycle. *Global Change Biology*, 2006, 12(11): 2092-2102.
- [ 8 ] Dhakal S. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4208-4219.
- [ 9 ] Fan F Y, Lei Y L. Factor analysis of energy-related carbon emissions: a case study of Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: S277-S283.
- [ 10 ] Hu G W, Mu X Z. Analysis of urban energy metabolic system: An ecological network framework and a case study for Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 958-969.
- [ 11 ] Zhang P P, Zhang L X, Tian X, Hao Y, Wang C B. Urban energy transition in china: Insights from trends, socioeconomic drivers, and environmental impacts of Beijing. *Energy Policy*, 2018, 117: 173-183.
- [ 12 ] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, Li Y X, Liu G Y, Su M R, Yin X N. Urban energy flow processes in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration: Combining multi-regional input-output tables with ecological network analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114: 243-256.
- [ 13 ] Zhao M, Kong Z H, Escobedo F J, Gao J. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(4): 807-813.
- [ 14 ] Liu C F, Li X M. Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2012, 11(2):

121-128.

- [15] Li J, Zhang Y, Liu N Y, Fath B D, Hao Y. Flow analysis of the carbon metabolic processes in Beijing using carbon imbalance and external dependence indices. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 201: 295-307.
- [16] 赵荣钦. 城市系统碳循环及土地调控研究. 南京: 南京大学出版社, 2012.
- [17] Hao Y, Su M R, Zhang L X, Cai Y P, Yang Z F. Integrated accounting of urban carbon cycle in Guangyuan, a mountainous city of China: The impacts of earthquake and reconstruction. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 231-240.
- [18] 赵荣钦, 黄贤金, 彭补拙. 南京城市系统碳循环与碳平衡分析. *地理学报*, 2012, 67(6): 758-770.
- [19] 北京市统计局. 北京统计年鉴 2006-2015. 北京: 中国统计出版社, 2006-2015.
- [20] 北京市水务局. 北京市水资源公报 2006-2015. 北京: 北京市水利局, 2006-2015.
- [21] 程剑刚. 网络 RTK 技术联合数字测深仪在湖泊库容测量中的应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [22] 国家统计局. 中国能源统计年鉴 2006-2015. 北京: 中国统计出版社, 2007-2015.
- [23] 国家统计局网站. [2018-03-07]. <http://data.stats.gov.cn/>.
- [24] 赵春. 北京市作物秸秆利用现状及可持续发展研究. *农学学报*, 2015, 5(2): 42-46.
- [25] 张瑞. 北京近郊耕地土壤性质空间变异性研究及肥力综合评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [26] 张心昱, 陈利顶, 傅伯杰, 李琪, 齐鑫, 马岩. 不同农业土地利用方式和管理对土壤有机碳的影响——以北京市延庆盆地为例. *生态学报*, 2006, 26(10): 3198-3204.
- [27] 朱丽平. 北京五种人工林生态系统生物量和碳密度研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [28] 王迪生. 基于生物量计测的北京城区园林绿地净碳储量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [29] 国家发展改革委气候司. 省级温室气体清单编制指南(试行). 北京: 国家发展改革委气候司, 2011.
- [30] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Cambridge: IPCC, 2006.
- [31] 蔡亚庆, 仇焕广, 徐志刚. 中国各区域秸秆资源可能源化利用的潜力分析. *自然资源学报*, 2011, 26(10): 1637-1646.
- [32] Zhao S Q, Zhu C, Zhou D C, Huang D, Werner J. Organic carbon storage in China's urban areas. *PLoS One*, 2013, 8(8): e71975.
- [33] 许乃政, 张桃林, 王兴祥, 刘红樱. 城市化进程中的土壤有机碳库演变趋势分析. *土壤通报*, 2011, 42(3): 659-663.
- [34] 叶笃正. 中国的全球变化预研究(第二部分). 北京: 地震出版社, 1992.
- [35] 刘爱民, 李飞, 廖俊国. 中国森林资源及木材供需平衡研究. *资源科学*, 2000, 22(6): 9-13.
- [36] 刘江. 中国资源利用战略研究. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [37] 白彦锋, 姜春前, 张守攻. 中国木质林产品碳储量及其减排潜力. *生态学报*, 2009, 29(1): 399-405.
- [38] Liu Z, Guan D B, Wei W, Davis S J, Ciais P, Bai J, Peng S S, Zhang Q, Hubacek K, Marland G, Andres R J, Crawford-Brown D, Lin J T, Zhao H Y, Hong C P, Boden T A, Feng K S, Peters G P, Xi F M, Liu J G, Li Y, Zhao Y, Zeng N, He K B. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in china. *Nature*, 2015, 524(7565): 335-338.
- [39] 蔡博峰. 城市温室气体清单研究. *气候变化研究进展*, 2011, 7(1): 23-28.
- [40] 王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [41] Zhang Y, Li J, Fath B D, Zheng H M, Xia L L. Analysis of urban carbon metabolic processes and a description of sectoral characteristics: A case study of Beijing. *Ecological Modelling*, 2015, 316: 144-154.
- [42] Li Y X, Zhang Y, Yu X Y. Urban weight and its driving forces: A case study of Beijing. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 590-601.