

“三生”空间格局演化“碳流”分析 ——以唐山市为例

林刚¹, 江东^{1,2}, 付晶莹^{1,2*}, 曹成龙³, 李祥³, 李增⁴, 黄诗棋³

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

4. 广东工业大学环境生态工程研究院, 广州 510006

摘要 生产空间、生活空间和生态空间(“三生”空间)碳代谢分析研究,对实现区域“三生”空间要素整合和结构优化具有重要的科学意义。以唐山市为例,通过构建显性“碳流”模型和生态网络效用分析方法,量化跟踪、评估了2010—2015年唐山市“三生”空间碳要素的流动过程、途径及其影响。结果显示:2010—2015年,唐山“三生”空间格局演变造成了区域碳排放量的增加,净“碳流”为负值;其中,消极“碳流”主要由于生态空间向生产空间的转变;而积极的“碳流”主要来自生产空间向生态空间的转变。唐山市“三生”用地类型在碳代谢系统中的生态关系主要以限制掠夺关系为主,其中以生活空间城镇用地以及生态空间未利用土地占主导。

关键词 “三生”空间;碳代谢;生态网络效用;低碳发展

改革开放40年以来,中国政治、经济等各领域取得了长足发展和巨大进步。然而,国土空间结构失衡、自然资源利用过度、生态环境破坏严重等问题也在城镇化及工业化的进程中逐渐显现出来^[1]。生产空间、生活空间和生态空间(简称“三生”空间)利用过程中的冲突日益加强,直接影响中国生态文

明建设及可持续发展大局^[2]。如何缓解“三生”空间冲突,寻求低碳高效的资源综合利用、协调发展模式,是区域可持续发展的必然要求与途径。然而目前看,针对“三生”空间的研究多集中在“三生”功能的体系分类^[3-5]、“三生”功能识别^[6-7]和“三生”功能协调评价^[8-9],虽有少数研究围绕“三生”空间优化

收稿日期:2019-11-30;修回日期:2020-03-28

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19040300);国家自然科学基金项目(41971250);教育部人文社会科学研究一般项目(20YJCZH087);资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金项目

作者简介:林刚,讲师,研究方向为能源与资源代谢,电子信箱:lingang@cumt.edu.cn;付晶莹(通信作者),副研究员,研究方向为资源环境可持续发展,电子信箱:fujy@igsrr.ac.cn

引用格式:林刚,江东,付晶莹,等.“三生”空间格局演化“碳流”分析——以唐山市为例[J].科技导报,2020,38(11):107-114;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.11.012

问题展开,但仍存在一些不足,如“三生”空间作为复杂巨系统,缺少从系统论的角度描述其功能协同与空间优化方法;同时,现有研究往往忽视了“三生”空间内部要素复杂流动过程,也较少对其子系统间的要素协同作用关系进行分析,难以实现真正意义上的模拟与优化^[2]。

“碳”既是生物体和主要能源的物质基础,也是人类各种社会经济活动的排放和代谢产物,是区域水、土、能等资源的耦合开发利用的重要体现形式^[10]。区域“三生”系统十分复杂,且具有较大的空间异质性,“三生”空间协同演化不仅会改变自然碳循环过程,而且通过改变人类活动能源消耗影响区域系统碳代谢效率,不同自然和社会地域、不同产业均会具有不同的资源组合关系和碳代谢效率。“碳”作为区域经济社会和生产过程的关键要素,不仅可以统筹考虑区域“三生”空间各种资源的利用以及组合关系,还可以引导和倒逼区域“三生”空间优化升级。因此,开展“三生”空间碳代谢分析研究,对于实现区域“三生”空间协同优化具有重要的科学意义。

“代谢”源于生物体新陈代谢过程,随后衍生用于城市代谢研究,为理解城市可持续发展提供了有效工具与手段^[11]。如不同物质的城市代谢过程长期备受关注,研究者从城市碳代谢视角分别围绕氮^[12-13]、磷^[14]等单一要素或者水系统^[15]、能源系统^[16]在城市中的代谢过程进行研究。近年来,随着城市气候变化问题关注度的提高,城市碳代谢相关研究也逐步展开。以城市碳代谢基本框架为指导,学者开始定量追踪碳元素在城市系统中的流动过程、途径及其环境影响。例如,夏楚瑜等^[17]以杭州为例,通过构建“碳流”模型和生态网络分析方法深入探究了土地利用变化对城市系统碳流转的影响,研究成果对城市低碳发展空间规划制定提供了有效指导和新视角。其中,生态网络模型因为具有可定量确定复杂网络中生态流向和强度,有助于确定结构的优化路径的优势,也广泛用于城市代谢的研究中^[13, 18]。“三生”空间作为国土空间格局优化的主体,成为了新时期空间规划体系构建、国土空间开发保护制度完善和各级主体功能区规划落实的重

要基础。

但目前面向“三生”空间碳代谢的研究仍显不足。鉴于此,以“碳流”模型和生态网络分析方法为手段,探究区域“三生”空间演进过程对碳代谢的影响,将有利于探索“三生”空间统筹优化途径。本研究以唐山市为例,通过构建显性“碳流”模型和生态网络分析方法系统评价“三生”空间演进过程中对碳代谢的作用,量化跟踪和评估“三生”空间格局演化对碳元素流转的影响,以期对唐山市低碳转型升级调整提供科学依据,同时为探索区域“三生”空间统筹优化方法提供理论指导。

1 研究区和数据来源

1.1 研究区概况

河北省唐山市位于华北平原东北部,南邻渤海,北依燕山,毗邻京津。随着京津冀一体化工作推进,唐山市的经济社会发展面临前所未有的机遇,国际知名度、区域竞争力和重要辐射作用显著提升^[19]。然而,近年来,随着经济总量的不断增长,城市“三生”空间利用结构向单一经济效益目标倾斜,经济运行质量和效益总体仍然偏低,对生态环境造成较大的影响,如化解过剩产能、大气污染防治和生态建设任务艰巨。因此,为有效提高京津冀生态环境保护与生态文明建设水平,破解经济强省美丽河北建设过程中的“三生”共赢问题,深入探讨唐山“三生”空间演化进程中的生态环境效应具有重要实践价值。

1.2 数据来源

以2010年和2015年为例,进行唐山市“三生”空间演化“碳流”分析。研究采用的“三生”空间分类体系,以土地的生产、生活和生态的多功能性等为指导^[4],同时综合考虑“三生”用地“碳源”和“碳汇”功能以及数据可获取性,确定生态空间(森林用地、草地、水源涵养用地以及城市绿地、未利用地),生产空间(农业用地、工矿用地、交通用地),生活空间(城镇用地、农村居民用地)3个一级类,9个二级类。其中,土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心;交通用地数据以唐山市历史时期

交通图进行矢量化,并综合 OpenStreetMap 数据获得。

2 研究方法

2.1 “三生”空间“碳流”核算

“三生”空间碳代谢核算主要依据其用地功能性原则(“碳源”和“碳汇”):生态空间主要考虑其“碳汇”功能,生产空间和生活空间则主要是“碳源”,其中,生产空间农业用地也兼具“碳汇”功能。

1) 生态空间“碳汇”计算公式为

$$E_m = k_m \cdot S_m \tag{1}$$

式中, E_m 为生态用地类型 m 的“碳汇”量; S_m 为生态用地类型 m 的占地面积; k_m 为生态用地类型 m 的“碳汇”系数。

本研究选取“碳汇”系数综合考虑唐山市或河北省情况,并参考前人研究经验确定。森林用地和草地“碳汇”系数参考方精云等^[20],水源涵养以及绿地“碳汇”系数参考张文菊等^[21]、段晓男等^[22],农业用地“碳汇”系数参考陈泮勤等^[23],未利用土地“碳汇”系数参考赖力^[24]。

2) 生产空间和生活空间碳排放的核算方法。农业用地碳排放主要来自于农业生产活动中农业投入,包括化肥施用、农业机械、农膜使用、农业灌溉,其碳排放量计算公式为

$$E_A = C \cdot k_C + M \cdot k_M + W \cdot k_W + F \cdot k_F + G \cdot k_G \tag{2}$$

$$M = S \cdot D \tag{3}$$

式中, E_A 为农业用地碳排放总量; C 为化肥施用折纯量; M 为农业用地种植面积; W 为农业机械总动力; F 为农膜使用量; G 为农业用地灌溉面积; k 为该种农业活动的碳排放系数; S 为农业用地面积; D 为复种指数。其中,化肥排放系数(0.8956 kg/kg)参考美国橡树岭实验室研究成果;农业机械排放系数(0.00018 tC/kW)参考 West^[25];农膜排放系数(5.18 kg/kg)参考南京农业大学农业资源与生态环境研究所研究成果;农业种植排放系数(0.01647 tC/hm²)和农业灌溉排放(0.26648 tC/hm²)系数参考王格等^[26]。

对于生产空间和生活空间其他用地类型碳排

放仅考虑各个用地类型的直接能源消耗碳排放,不考虑各个用地类型生产生活中的间接碳排放。因此,工矿用地、交通用地、城镇用地以及农村居民用地通过计算该用地利用过程中承载生产与生活功能而消耗各种能源的碳排放量进行估算。本文采用联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)推荐的方法,根据燃料的燃烧量以及特定国家的排放因子进行估算,主要计算能源燃烧(固定源燃烧和移动源燃烧)引起的 CO₂ 排放量。各部门能源碳排放测算公式如下

$$G = E \cdot EI \cdot EF = \sum_u \sum_v C_{u,v} \cdot NCV \cdot CEC_{u,v} \cdot COF \cdot \frac{44}{12} \tag{4}$$

式中, G 表示能源活动 CO₂ 排放量,单位 t; E 表示部门经济活动水平(部门增加值); EI 表示部门能源强度,单位 tce/元; EF 表示能源碳排放因子; $C_{u,v}$ 表示能源消耗量,以 GB/T2589—2016 附录 A 中的折标煤; NCV 表示燃料低位发热量,单位 TJ/Gg; $CEC_{u,v}$ 表示燃料含碳量,单位 tC/TJ; COF 表示碳氧化因子(表 1); u 表示排放量; v 表示能源种类; $\frac{44}{12}$ 表示

表1 河北省二氧化碳排放因子本地化计算

能源产品	平均低位 发热量 /(kJ·kg ⁻¹)	单位热 值含碳量 /(GJ·T ⁻¹)	碳氧 化率 /%	有效碳 排放因子 /(tCO ₂ · tce ⁻¹)
原煤	20908	26.37	0.94	2.67
洗精煤	26344	25.41	0.94	2.56
其他洗煤	8363	25.41	0.94	2.57
型煤	26608	33.56	0.94	5.13
焦炭	28435	29.42	0.93	2.94
焦炉煤气	16726	13.58	0.98	1.33
高炉煤气	16308	13.58	0.98	0.62
转炉煤气	16308	13.58	0.98	0.15
其他煤气	5227	12.20	0.98	0.06
其他焦化产品	28435	29.50	0.93	2.20
原油	41816	20.08	0.98	2.11
汽油	43070	18.90	0.98	1.99
煤油	43070	19.60	0.98	2.06
柴油	42652	20.20	0.98	2.12
燃料油	41816	21.10	0.98	2.22
LPG	50179	17.20	0.98	1.81
炼厂干气	45998	18.20	0.98	1.91
天然气	32238	15.30	0.99	0.13
其他石油制品	41916	20.00	0.98	2.15
生物质能	16726	20.50	0.98	1.31

CO₂和C的分子量比率。

为了更准确描述唐山市“三生”空间的碳代谢能力,碳代谢密度核算方法参考夏楚瑜等^[17]研究方法,将每一种“三生”用地类型单位时间单位面积的碳排放或者碳吸收能力定义为其碳代谢密度 W ,而“三生”用地类型变化前后两个类型之间的碳代谢密度的差异与它们之间发生转化的面积的乘积定义为“碳流” f 。

ΔW 以及 f 的计算公式如下

$$\Delta W = W_j - W_i = \frac{V_j}{S_j} - \frac{V_i}{S_i} \tag{5}$$

$$f_{ij} = \Delta W \cdot \Delta S \tag{6}$$

其中, i 和 j 分别表示不同的“三生”用地类型, f_{ij} 表示从用地类型 j 流向用地类型 i 的“碳流”, W_j 和 W_i 分别表示“三生”用地类型 j 和 i 的净“碳流”密度, V_j 和 V_i 分别表示“三生”用地类型 j 和 i 的净“碳流”, S_j 和 S_i 分别表示“三生”用地类型 j 和 i 的面积, ΔS 表示“三生”用地类型 j 向 i 转移的面积。

如果 $\Delta W > 0$,说明碳汇增加,这是一个积极的“碳流”,有助于区域“三生”系统碳代谢平衡;如果 $\Delta W < 0$,说明碳汇减少或者碳排放增加,这种消极“碳流”会加重区域“三生”系统碳代谢紊乱。

2.2 生态网络效用分析方法及生态关系判定

研究采用有效利用矩阵 D 可以反映各“碳流”的直接作用,并通过公式(7)计算整体效用矩阵 U 可以得到生态网络中分室之间的综合作用方式,能够有效解释生态网络2个分室在整体网络作用下的综合作用

$$U = (u_{ij}) = D^0 + D^1 + D^2 + \dots + D^m = (I - D)^{-1} \tag{7}$$

式中, D 的上标表示参与“碳流”交换的“三生”用地类型的个数,矩阵 I 为单位矩阵,表示各种“三生”用地类型在“三生”系统的“碳流”交换过程中的自我反馈作用^[12, 27]。

生态网络关系理论存在9种(表2),但常见的生态关系往往只有4种,即掠夺关系、竞争关系、互惠共生关系以及限制关系。掠夺和限制关系的实质是相同的,两者都是表示在系统作用中,一个分室夺取了另一个分室的能量,以至于一个分室获得能量而另一个分室损失了能量;竞争关系是指两个

分室从同一个分室获取能量时,两个分室表现出来的关系为相互竞争;互惠共生关系则是说明两个分室在互相作用过程中都增加了能量。

表2 生态关系分类

矩阵符号	积极(+)	中立(0)	消极(-)
积极(+)	(+,+)互惠共生	(+,0)共栖	(+,-)掠夺
中立(0)	(0,+)共生	(0,0)中立	(0,-)偏害
消极(-)	(-,+)限制	(-,0)主导	(-,-)竞争

为了更具体更准确地描述“三生”用地类型的转化对整个区域系统发展的影响,用互惠指数 H 对其进行量化^[15]

$$H = N_+ / N_- \tag{8}$$

式中, N_+ 代表矩阵 U 中大于0的“碳流”的个数, N_- 代表矩阵 U 中小于0的“碳流”的个数。

当 H 大于1时,说明“三生”系统演化区域代谢的作用是积极的, H 越大“三生”系统演化对区域代谢积极作用越强烈。

3 结果与分析

3.1 “三生”空间“碳流”变化分析

通过唐山市2010年到2015年的土地利用转移矩阵,可以得到这一期间“三生”用地类型流入或者流出的“碳流”,如表3所示。

表3 2010—2015年唐山市“三生”用地“碳流”交换

交换方向	交换量 /(tC·a ⁻¹)	交换方向	交换量 /(tC·a ⁻¹)
F→G	-386.31	C→U	-59715.01
F→W	-45.16	C→R	-71958.78
F→C	-3391.56	I→F	225086.83
F→I	-284163.87	I→G	169931.37
F→T	-36828.39	I→W	211289.56
F→U	-3050.57	I→UN	16240.89
G→F	261.26	I→C	664469.36
G→W	20.31	I→T	2520170.02
G→C	-3431.63	I→U	1364744.33
G→T	-85572.06	I→R	15901.18
G→U	-123.17	T→F	68443.58
G→R	-1198.37	T→G	70255.99
W→F	17.12	T→W	20772.15

表3 2010—2015年唐山市“三生”用地
“碳流”交换(续)

交换方向	交换量 $/(tC \cdot a^{-1})$	交换方向	交换量 $/(tC \cdot a^{-1})$
W→UN	-1.26	T→UN	11549.88
W→C	-1913.99	T→C	18063.29
W→I	-210192	T→I	-2554739.2
W→T	-32687.25	T→U	-349167.29
W→U	-4852.95	T→R	-82531.11
UN→W	211.22	U→C	9897.44
UN→C	-2789.87	U→T	148147.29
UN→I	-124069.3	U→R	107.72
UN→T	-39477.23	R→F	144.65
UN→R	-69.26	R→W	69.92
C→F	2774.82	R→UN	878.57
C→G	2549.59	R→C	35526.14
C→W	9531.82	R→I	-32496.84
C→UN	1948.62	R→T	102113.29
C→T	-251126.38	R→U	-53.86
C→I	-1748946.1	净“碳流”	-293860.56
消极“碳流”	-5984978.77	积极“碳流”	5691118.21
E→P	-1803903.14	E→L	-7195.66
P→E	1714636.44	P→L	941055.77
L→E	1364.35	L→P	-542057.62

注:F:森林用地;G:草地;W:水源涵养用地以及绿地;UN:未利用土地;C:农业用地;I:工矿用地;T:交通用地;U:城镇用地;R:农村居民点用地;E:生态空间;P:生产空间;L:生活空间。

从表3可以看出,唐山市2010年到2015年的净“碳流”为负值,说明“三生”用地变化对碳代谢产生了消极作用,“三生”空间的演变造成了区域总体碳排放量的增加。其中,唐山市消极的“碳流”主要是由生态空间和生活空间向生产空间的工矿用地转换产生的,约占82.78%,说明工矿用地的高碳排放密度成为了影响唐山市碳代谢平衡的重要因素,工业发展和矿山开采活动的加剧增加了唐山市的碳排放量。另外,积极“碳流”主要来自工矿用地向其他用地类型的转换,占了积极“碳流”的91.16%。说明唐山市近年来的废弃矿山治理工作成效显著,如南湖公园、开滦国家矿山公园等,这些举措大大降低唐山市“三生”空间的碳排放量,增加了“碳汇”能力。总之,“三生”空间格局演化带来的

消极“碳流”主要源于生态空间向生产空间的转变,占消极“碳流”的76.66%,具有“碳汇”功能的生态空间转变为高碳排放型用地类型,导致城市碳排放量的增加。而积极“碳流”主要来自生产空间向生态空间的转变,占积极“碳流”的64.54%左右,这说明唐山市资源型城市转型进程中,注重加强生态环境治理工程实施,如废弃矿山用地的治理和恢复等,并取得了一定成效,促进了区域“三生”系统碳代谢平衡。

3.2 “碳流”生态关系分析

唐山市“三生”空间的碳代谢系统中各种用地类型之间的生态关系主要表现为:限制关系、竞争关系、互惠共生关系以及竞争关系。通过对矩阵 U 的分析可以得到互惠指数 H 的值为 $0.93 < 1$,说明“三生”空间格局演化对区域整体的碳代谢平衡的综合作用是消极的。由于互惠指数 H 不仅考虑发生转换的“三生”用地类型之间的“碳流”作用,还考虑了没有直接参与转换的“三生”用地类型之间的关系,所以互惠指数 H 相对于净“碳流”来说对“三生”系统碳代谢平衡的评价更有意义。

由唐山市生态关系变化表(表4)以及生态关系分布表(表5)可以看出,唐山市“三生”用地类型在碳代谢系统中的生态关系主要以限制掠夺关系为主,其中以生活空间城镇用地以及生态空间未利用土地占主导,分别占限制掠夺关系中的16.67%和19.44%,这说明城市建设用地扩张以及未利用地开发会对区域碳代谢平衡具有重要意义。因此,唐山市在其转型过程中,要正确规划和引导未利用地的开发与管理,推动城乡、区域协调发展。竞争关系在“三生”用地类型之间的分布比较平均,但是总体来说竞争关系占整个生态关系的33.33%,而互惠共生关系仅占16.67%,这说明“三生”空间在碳代谢方面的关系并不和谐。因此,加强“三生”空间内部用地类型的合理配置,才能有效促进区域碳代谢平衡。从“三生”空间整体层面上看,生态系统的限制掠夺关系占的比重最大,占整个系统的22.22%,这是由于工业化和城镇化发展导致生态空间被生活空间和生产空间挤占造成的,使得生态空间转变为高碳排放生产空间或生活空间,严重影

响了区域碳代谢平衡。另外,唐山市生态空间和生产空间之间也存在着较多的竞争关系,说明两种空间各自与其他空间之间存在着强烈的碳储量之争,也成为了制约区域碳代谢系统平衡的重要因素。

表4 2010—2015年唐山市“碳流”生态关系变化

	F	G	W	UN	C	I	T	U	R
F		-	+	+	-	-	+	+	-
G	-		-	-	-	+	-	-	+
W	+	-		+	+	-	+	+	-
UN	-	+	-		-	+	-	-	+
C	+	-	+	+		-	+	+	-
I	-	+	-	-	-		-	-	+
T	-	-	-	-	-	+		-	+
U	-	+	-	+	-	+	-		-
R	-	-	-	-	+	+	+	-	

掠夺

限制

竞争

互惠共生

注:F:森林用地;G:草地;W:水源涵养用地以及绿地;UN:未利用土地;C:农业用地;I:工矿用地;T:交通用地;U:城镇用地;R:农村居民点用地。

表5 生态关系分布

“三生”用地类型	F	G	W	UN	C	I	T	U	R	E	P	L
竞争关系	3	4	3	1	2	3	3	2	3	11	8	5
限制掠夺关系	3	3	3	7	4	3	4	6	3	16	11	9
互惠共生关系	2	1	2	0	2	2	1	0	2	5	5	2

4 结论

通过构建“碳流”模型,分析了“三生”空间格局演化带来的直接“碳流”流向以及变化,同时采用生态网络效用分析方法评价了唐山市“碳流”引起的分室之间生态关系及其变化,主要结论如下。

1) 2010—2015年,唐山净“碳流”为负值,“三生”空间格局演变造成区域碳排放量增加;其中消极“碳流”主要由于生态空间向生产空间的转变,占据消极“碳流”的76.66%;而积极的“碳流”主要来自生产空间向生态空间的转变,占据了积极“碳流”的64.54%左右,说明唐山市资源转型升级进程中,取得了一定成效,注重生态环境治理,加强矿山生态修复,促进了区域“三生”系统碳代谢的平衡。

2) 唐山市“三生”用地类型在碳代谢系统中的

生态关系主要以限制掠夺关系为主,其中以生活空间城镇用地以及生态空间未利用土地占主导,分别占限制掠夺关系中的16.67%和19.44%,说明唐山在城镇化进程与经济发展过程中,“三生”空间冲突会加强,生态空间的挤占会影响区域碳代谢平衡。

对“三生”空间碳代谢展开分析研究,将有助于实现区域“三生”空间要素整合与协同优化。以唐山市为例,本文通过构建显性“碳流”模型和生态网络分析方法,定量追踪了唐山市“三生”空间格局演化过程中的“碳流”流向、变化及其环境影响。但仍存在一定的局限性,如有关“三生”空间碳代谢核算体系需要进一步加强;另外,由于缺少高分辨率空间数据支持,“三生”空间“碳流”的生态关系空间分布变化研究有待强化。

参考文献(References)

[1] 廖霄梅. 新型城镇化建设与产业结构优化协调发展的机制、问题及对策[J]. 生态经济, 2018, 34(6): 111-116.

[2] 黄金川, 林浩曦, 漆潇潇. 面向国土空间优化的三生空间研究进展[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 378-391.

[3] 程婷, 赵荣, 梁勇. 国土“三生”空间分类及其功能评价[J]. 遥感信息, 2018, 33(2): 114-121.

[4] 张红旗, 许尔琪, 朱会义. 中国“三生用地”分类及其空间格局[J]. 资源科学, 2015, 37(7): 1332-1338.

[5] Liao G T, He P, Gao X S, et al. The production-living-ecological land classification system and its characteristics in the Hilly Area of Sichuan Province, southwest China based on identification of the main functions[J]. Sustainability, 2019, 11(6): 1600.

[6] 李欣, 方斌, 殷如梦, 等. 江苏省县域“三生”功能时空变化及协同/权衡关系[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2363-2377.

[7] Cai E X, Jing Y, Liu Y L, et al. Spatial-temporal patterns and driving forces of ecological-living-production land in Hubei Province, central China[J]. Sustainability, 2018, 10(1): 66.

[8] 徐磊, 董捷, 陈恩. 基于“三生”功能的长江中游城市群国土空间利用协调特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 257-263.

[9] 单薇, 金晓斌, 冉娜, 等. 江苏省土地利用“生产-生活-生态”功能变化与耦合特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1541-1551.

- [10] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水—土—能—碳”耦合作用机制分析[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1613–1628.
- [11] Abel W. The Metabolism of cities[J]. Scientific American, 1965, 213(3): 178–190.
- [12] Forkes J. Nitrogen balance for the urban food metabolism of Toronto, Canada[J]. Resources Conservation & Recycling, 2007, 52(1): 74–94.
- [13] Zhang Y, Lu H J, Fath B D, et al., Modelling urban nitrogen metabolic processes based on ecological network analysis: A case of study in Beijing, China[J]. Ecological Modelling, 2016(337): 29–38.
- [14] 黎斯思, 袁增伟, 毕军, 等. 城市食物生产与消费系统磷代谢研究[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 603–608.
- [15] Zhang Y, Yang Z F, Fath B D. Ecological network analysis of an urban water metabolic system: Model development, and a case study for Beijing[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(20): 4702–4711.
- [16] Chen B, Chen Z M, Zhou Y, et al. Emergy as embodied energy based assessment for local sustainability of a constructed wetland in Beijing[J]. Communications in Non-linear Science & Numerical Simulation, 2009, 14(2): 622–635.
- [17] 夏楚瑜, 李艳, 叶艳妹, 等. 基于生态网络效用的城市碳代谢空间分析——以杭州为例[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 73–85.
- [18] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, et al. Urban energy flow processes in the Beijing–Tianjin–Hebei (Jing–Jin–Ji) urban agglomeration: Combining multi–regional input–output tables with ecological network analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 114: 243–256.
- [19] 刘晓春. 唐山市与京津冀合作发展的战略思路与重点[J]. 唐山师范学院学报, 2008(1): 74–76.
- [20] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007(6): 804–812.
- [21] 张文菊, 童成立, 吴金水, 等. 典型湿地生态系统碳循环模拟与预测[J]. 环境科学, 2007(9): 1905–1911.
- [22] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008(2): 463–469.
- [23] 陈泮勤, 王效科, 王礼茂. 中国陆地生态系统碳收支与增汇对策(精)[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [24] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学地理与海洋科学学院, 2010.
- [25] West T O, Marland G. Asynthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture comparing tillage practices in the United States[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2002, 91(1): 217–232.
- [26] 王格, 董会忠, 张慧. 基于ArcGIS和SD的山东省碳排放演化格局及低碳经济发展战略仿真[J]. 科技管理研究, 2017, 37(1): 249–256.
- [27] Fath B D, Patten B C. Network synergism: Emergence of positive relations in ecological systems[J]. Ecological Modelling, 1998, 107(3): 127–143.

Carbon flow analysis for production–living–ecological space : A case study of Tangshan, China

LIN Gang¹, JIANG Dong^{1,2}, FU Jingying^{1,2*}, CAO Chenglong³, LI Xiang³, LI Zeng⁴, HUANG Shiqi³

1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China
4. Environmental Ecology and Engineering Research Institute, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Abstract It is of great importance to study the carbon metabolism of the production–living–ecological space (PLES) for the integration of various elements and the structural adjustment in PLES. Taking Tangshan city as an example, this paper tracks and evaluates the carbon flow in the PLES from 2010 to 2015. It is indicated that the net carbon flow of the PLES in Tangshan is negative from 2010 to 2015, and the evolution of the PLES increases the carbon emission. The negative carbon flow is caused by the transformation from the Ecological Space to the Production Space while the positive carbon flow is due to the reverse transformation between the Ecological Space and the Production Space. In addition, the ecological relation of the carbon metabolism in Tangshan is mainly to limit the predatory relation, with the urban and the unutilized lands as the main part.

Keywords production–living–ecological space; carbon metabolism; ecological network utility; low carbon development ●



(责任编辑 傅雪)