

DOI: 10.5846/stxb201611272421

夏楚瑜, 李艳, 叶艳妹, 史舟, 刘婧鸣, 李效顺. 基于生态网络效用的城市碳代谢空间分析——以杭州为例. 生态学报, 2018, 38(1): 73-85.

Xia C Y, Li Y, Ye Y M, Shi Z, Liu J M, Li X S. Analyzing urban carbon metabolism based on ecological network utility: a case study of Hangzhou City. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 73-85.

## 基于生态网络效用的城市碳代谢空间分析 ——以杭州为例

夏楚瑜<sup>1</sup>, 李 艳<sup>1,\*</sup>, 叶艳妹<sup>1</sup>, 史 舟<sup>2</sup>, 刘婧鸣<sup>3</sup>, 李效顺<sup>4</sup>

1 浙江大学土地科学与不动产研究所, 杭州 310058

2 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 杭州 310058

3 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074

4 中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室, 徐州 221116

**摘要:**城市碳排放占全球碳排放总量的 78%, 通过模拟生物代谢来剖析城市碳代谢机理从而控制城市碳排放是缓解全球气候变暖危机的关键。为研究杭州城市化过程中土地利用变化对城市碳代谢的综合作用, 以 4 个时间段(1995—2000, 2000—2005, 2005—2010, 2010—2015)为例, 建立了一个“碳流”模型来分析城市生态系统中自然和人工分室在城市碳代谢正负“碳流”产生中的作用, 之后利用生态网络效用方法分析“碳流”产生的生态关系及其空间分布, 同时利用互惠指数 M 综合评价土地利用变化对城市碳代谢的综合作用。结果显示(1)净“碳流”在研究期间持续呈现负值且在 2000—2005 年间达到峰值, 负“碳流”主要源自耕地与工业用地之间的转换, 正“碳流”主要源自工业用地与城市用地之间的转换。(2)1995—2000 年互惠指数(M)呈现先增加后减少再增加的变化趋势, M 平均值小于 1, 说明土地利用变化对城市碳代谢的综合作用是消极的。(3)竞争关系集聚在高负碳代谢密度分室, 互惠共生关系主要集聚在高正碳代谢密度分室。(4)从 1995—2000 至 2010—2015, 以每 5 年为时间间隔, 生态关系分布空间变化如下: 掠夺限制生态关系呈现向西北、西南和南部方向蔓延—西北方向移动—东南方向移动的变化趋势, 竞争生态关系呈现东南方向移动—南部和西北部方向蔓延—零星分布的变化趋势, 互惠共生生态关系呈现向东南方向移动—暂时不存在—零星分布的变化趋势。研究结果为低碳城市发展提供了理论依据。

**关键词:**城市碳代谢; 碳流; 生态网络效用; 生态关系; 空间分布

## Analyzing urban carbon metabolism based on ecological network utility: a case study of Hangzhou City

XIA Chuyu<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1,\*</sup>, YE Yanmei<sup>1</sup>, SHI Zhou<sup>2</sup>, LIU Jingming<sup>3</sup>, LI Xiaoshun<sup>4</sup>

1 School of Public Affairs, Institute of Land Science and Property Management, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2 Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

3 School of Public Administrations, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4 Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

**Abstract:** Seventy-eight percent of the total global carbon dioxide emissions come from urban areas, which consume 70% of global energy. Land-use and cover changes contributes one-third of the urban carbon emissions. Thus, understanding the mechanism of urban carbon metabolism through simulating process of biological metabolism could help to control carbon emissions in urban areas; this is the key to mitigating the crisis of global warming. As part of the goal of reducing carbon

**基金项目:**国家重点研发计划重点专项(2016YFD0201200); 浙江省教育厅重点项目(Z201121260); 国家自然科学基金(71473249); 江苏省社科基金重点项目(15EYA002)

**收稿日期:**2016-11-27; **网络出版日期:**2017-09-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyan522@zju.edu.cn

emissions, the goal of this study was to understand how land use changes during urbanization influenced carbon metabolism. This study used Hangzhou as an example, and developed a spatially explicit model of carbon transfer between components of an urban system, and then used the ecological network utility analysis to explore the structure and function of the network, and determine effects of ecological relationships among components that resulted from carbon flows, their spatial distribution, and their changes over four time periods (1995—2000, 2000—2005, 2005—2010, 2010—2015), and finally used the mutualism index (M) to judge whether land use changes had positive effects on urban carbon metabolism. The results showed that: (1) Based on the empirical coefficient model, the carbon metabolism was determined; the net carbon flow continued to have negative effects during the study period and reached a peak in the period of 2000—2005, which indicated a serious imbalance in the urban carbon metabolism. The negative carbon flow mainly came from the transition between cultivated land and industrial land, and the positive carbon flow was mainly from the transition between industrial land and urban land; (2) During the period 1995—2015, the mutualism index (M), which indicated synergistic effects among components in the urban carbon metabolism, increased at first, then exhibited a downward trend, and finally began to grow again. In addition, the average value of M was less than 1, indicating that the comprehensive effect of land use change on the urban carbon metabolism was negative; (3) Competitive and mutualistic relationships were distributed differently among components of the urban carbon metabolism; the competitive relationships accumulated in negative metabolism components with high carbon emission density, such as industrial land and highway and railway, whereas the mutualistic relationships accumulated in positive metabolism components of high carbon sequestration density, such as forest land; (4) Based on the ecological network utility analysis, the study indicated that the change in the spatial distribution of ecological relationships resulted from carbon flow between components of urban carbon metabolism. For 1995—2000 and 2010—2015 (at intervals of five years), the trends of the three ecological relationships were as follows: the exploitation relationship exhibited changes spreading northwest, southwest, and south, moving towards to the northwest and the southeast; the competitive relationship exhibited trends moving towards the southeast and spreading to the south and northwest in a scattered distribution. The mutualistic relationship exhibited a trend moving to the southeast with a non-scattered distribution. Our research results provide a theoretical basis to plan adjustments to the city's land use structure to achieve the goal of a low carbon city.

**Key Words:** urban carbon metabolism; carbon flow; ecological network utility analysis; ecological relationship; spatial distribution

城市化迅速推进对全球环境产生巨大影响,其中城市碳排放占全球碳排放总量的 78%<sup>[1]</sup>,城市扩张引起的土地利用变化是城市碳排放的重要来源,所以控制城市碳排放是缓解全球气候变暖危机的关键。

城市代谢是一个资源消费和废弃物产生的过程,包括城市资源和废弃物的流通、排放、处理和利用过程<sup>[2]</sup>。量化追踪城市生态系统的物质和能量流可以解剖城市代谢机理从而提高城市代谢效率<sup>[3]</sup>。随着气候变化越来越受到全球关注,很多学者把这个概念运用到城市碳代谢的研究中:Kennedy 等关注交通能耗和电力消费引起的城市向大气的碳排放量<sup>[4-5]</sup>;Ye 等通过研究家庭住宅能耗碳排放为城市“节能减排”提供了建议<sup>[6]</sup>;Gurney 等量化街道尺度的大气与土地利用之间的碳交换来建立了一个有效的碳检测系统<sup>[7]</sup>;Ou 等人通过面板数据模型定量研究了城市形态如何影响城市碳排放<sup>[8]</sup>;Wu 等人以中国为例通过 U-Kaya 模型分析了发展中国家的碳排放内在规律<sup>[9]</sup>。解决城市碳代谢紊乱的根本途径是通过模拟生物代谢来剖析城市碳代谢机理。生态网络模型能够定量确定网络中生态流向和强度,有利于探索城市系统结构的优化路径;刘耕源等基于生态热力学流核算方法构建城市代谢网络模型,有效揭示了网络结构中复杂的生态关系<sup>[10]</sup>;张妍等利用生态网络效用分析方法分析了城市能源代谢<sup>[11]</sup>、水代谢<sup>[12]</sup>、氮代谢<sup>[13]</sup>系统,深刻揭示了城市发展过程中物质能量交换演变规律。

以往的研究很少全面考虑城市碳代谢的各个分室,有些着重自然分室而有些侧重社会经济分室,同时大部分研究关注城市部门如工业、农业、制造业等之间的“碳流”交换,很少考虑到城市土地利用变化所带来的“碳流”的空间变化,然而这些“碳流”空间流向对掌握城市化过程中城市碳代谢的内部机理有很重要意义,是城市碳代谢的重要组成部分。本文以杭州4个时间段(1995—2000,2000—2005,2005—2010,2010—2015)为例,通过构建显性“碳流”模型和生态网络分析方法来评价城市化过程中土地利用变化对城市碳代谢的作用,评价依据包括显性“碳流”模型的净“碳流”和生态网络分析方法的互惠系数(M)两部分,前者体现土地利用变化所带来的“碳流”对城市碳代谢的直接作用,后者体现土地利用变化所带来的“碳流”通过生态网络各个分室之间相互作用形成的积分综合作用(integral interaction)。研究结果可为杭州城市低碳发展空间调整提供科学指导和理论依据,为如何通过土地利用规划或城市规划对城市碳代谢提供指导意见。

## 1 研究区和数据来源

### 1.1 研究区

杭州作为浙江省省会,位于长三角腹地(图1),是中国东南地区最发达的城市之一。改革开放以来,杭州市经济发展迅速,人均GDP从1995年的4614元上升到2015年的112600元,在中国35个主要城市中排名第八。

相关文献表明,近20年来杭州市空间外延式增长迅猛<sup>[14]</sup>,大量自然生态用地被开发为住宅用地、工业用地和道路等,引起很多环境问题,包括城区生境质量下降、生态系统服务功能降低、城区温室效应剧增等等,所以研究城市土地利用变化带来的环境生态效应非常有意义。

### 1.2 数据来源

土地利用类型数据来自1995,2000,2005,2010,2015的TM遥感影像监督分类的解译结果。每幅遥感图像都经过图像裁剪、大气校正、几何校正的预处理。

公路与铁路数据利用历年杭州市交通图在ArcGIS 9.3软件中矢量化,在天地图·浙江(<http://www.zjditu.cn/>)以及同期航片对比的基础上进行修改,确定6种土地利用分类结果:林地、耕地、水域与湿地(包括湿地、湖泊和河流)、城市用地、公路与铁路、工业用地。经分类精度检验,kappa系数均达到85%以上。

## 2 核算方法与模型构建

### 2.1 城市“碳流”核算

本文核算城市碳代谢自然分室和人工分室的主要“碳源”和“碳汇”:林地分室、水域与湿地分室(包括湿地、湖泊和河流)、耕地分室、城市用地分室、公路与铁路分室和工业用地分室。

城市“碳汇”计算公式如下:

$$V_s = \sum kS \quad (1)$$

式中, $S$ 是土地利用类型面积, $k$ 是“碳汇”吸收系数,见表1。

本文计算的碳排放仅仅考虑各个地类的直接碳排放,不考虑各个地类生产生活中的间接碳排放,比如工业用地分室的碳排放仅考虑工业过程中直接能源消耗碳排放,不考虑水泥等原料生产过程的碳排放。这是因为一种物质往往生产地与消耗地不同,而本文研究对象精确到各个地类,为了避免双重计算不再考虑间接碳排放。所以本文的城市“碳源”主要包括耕地分室的农业生产过程直接碳排放和牲畜直接碳排放;城市用地

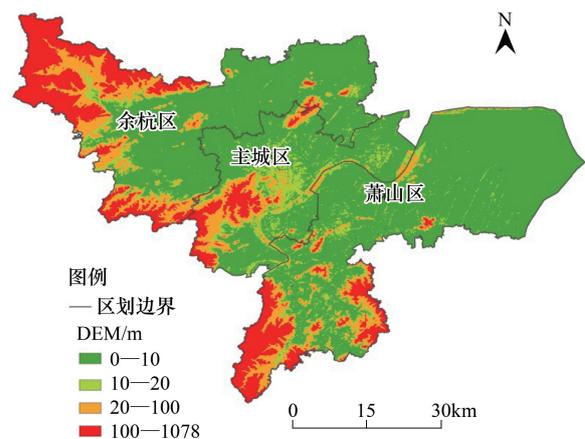


图1 研究区位置图

Fig.1 Study area

分室的居民生活直接碳排放;公路与铁路分室的交通碳排放以及工业用地分室的工业生产直接碳排放。其

表1 分室碳汇系数

Table 1 Carbon sequestration coefficient of components

土地利用类型 Land use type	系数 Coefficient	单位 Unit	来源 Source
耕地 Cultivated land	0.0007	kgC m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	陈泮勤等 <sup>[15]</sup>
林地 Forest	0.0657	kgC m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	方精云等 <sup>[16-17]</sup>
水域与湿地 Water and wetland	0.0402	kgC m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	段晓男等 <sup>[18]</sup>
湿地 Wetland	0.0567	kgC m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	Walsh <sup>[19]</sup>
河流 River	0.0250	kgC m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	Walsh <sup>[19]</sup>
湖泊 Lake	0.0390	kgC m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	Meybeck <sup>[20]</sup>

中,公路与铁路分室的交通碳排放参考林剑艺等<sup>[21]</sup>对厦门城市能源利用碳足迹分析时对交通部门的处理,公路与铁路分室的交通碳排放包括境内碳排放和跨界运输碳排放两个部分。在处理跨界运输客车、货车和铁路的碳排放责任分配时,基于数据可获取性原则,假设从杭州出发和到达杭州的车辆行驶里程 VMT (Vehicle-Miles of Travel) 大致相等,因此只考虑杭州始发的长途客车、货车和铁路的柴油、汽油燃烧的碳排放。由于客运、货运、铁运和水运在地级市层面缺少单独能源消耗数据,本文参考前人研究成果和统计公报数据进行计算,虽然不同年份系数会有一些变化,但是由于数据获取所限制再加上本文研究的是研究区的相对变化,所以影响并不是很大。另外对于航空碳排放,虽然起飞和降落时有部分航空碳排放直接作用于机场用地上,但是航空大部分燃料是消耗在飞行过程中并不直接作用于机场用地,所以航空碳排放这一部分不予考虑。具体计算公式如下:

$$V_u = \sum E_i f_i + K_1 P \quad (2)$$

$$V_i = \sum E_i f_i \quad (3)$$

$$V_c = V_A + V_L + V_R = K_2 M + K_3 S_i + K_4 D + K_5 R + K_6 P_i + K_7 C_a \quad (4)$$

$$V_{RR} = V_{in} + V_{out} = K_{11} M_p + K_{12} M_B + K_{13} M_T + K_{14} M_m + T_i F_i \quad (5)$$

$$V_w = T_w F_3 \quad (6)$$

式中, $V_u$ 是城市用地碳排放; $V_i$ 是工业用地碳排放; $V_c$ 是耕地碳排放( $V_A$ 表示农业活动碳排放; $V_L$ 表示牲畜代谢碳排放; $V_R$ 表示水稻呼吸碳排放); $V_{RR}$ 是公路与铁路碳排放( $V_{in}$ 是境内交通排放, $V_{out}$ 是跨界运输碳排放); $V_w$ 是内河运输交通碳排放,由于水运单独发生到水域上,所以这一部分交通碳排放需要单独核算。 $E_i$ 是居民生活能耗总量(标准煤); $P$ 是城市非农人口; $E_i$ 是工业能耗总量(标准煤); $f_i$ 是各种能源的碳排放系数; $M$ 是农机总量; $S_i$ 是灌溉面积; $D$ 是农业柴油消耗; $R$ 是全年水稻总量; $P_i$ 和  $C_a$ 分别是全年猪和牛的饲养量; $M_p$ ,  $M_B$ ,  $M_T$ 和  $M_m$ 分别是私家车、公交车、出租车和摩托车的运行公里。公交车、出租车的运行公里来自《中国交通运输统计年鉴》;根据估算,中国私人汽车年均行驶 1.5 万 km/辆,摩托车年均行驶 4000km/辆<sup>[22]</sup>;  $T_i$ 表示第  $i$  种跨界运输(水运单独核算)的交通量,来自《杭州统计年鉴》,  $F_i$ 为该种运输的碳排放系数系数; $T_w$ 是港口始发吞吐量,来自《中国交通运输统计年鉴》。所有  $k$  和  $F$  值见表 2。

碳代谢密度  $\Delta W$  计算公式如下:

$$\Delta W = W_i - W_j = \frac{V_i}{S_i} - \frac{V_j}{S_j} \quad (6)$$

$$f_{ij} = \Delta W \times \Delta S \quad (7)$$

式中, $i$  和  $j$  表示分室, $f_{ij}$ 表示从  $i$  流向  $j$  的“碳流”, $W_i$ 代表  $i$  分室的净“碳流”密度, $W_j$ 代表  $j$  分室的净“碳流”密度, $V_i$ 代表  $i$  分室的净“碳流”, $V_j$ 代表  $j$  分室的净“碳流”, $S_i$ 和  $S_j$ 分别代表分室  $i$  和  $j$  的面积; $\Delta S$  代表土地利用转移面积。如果  $\Delta W > 0$ ,说明“碳汇”增加,这是一个正“碳流”,有助于城市碳代谢平衡;如果  $\Delta W < 0$ ,说明“碳汇”减少或者碳排放增加,这种负“碳流”会加重城市碳代谢紊乱。

表 2 分室碳排系数

Table 2 Carbon emission coefficient of components

类型 Item	系数 Coefficient	式中代号 Type code	类型 Item	系数 Coefficient
原煤 Raw coal	0.7559	$K_1$	人类呼吸 Human breath/( $\text{kg a}^{-1}\text{人}^{-1}$ )	79.0
洗煤 Washed coal	0.7559	$K_2$	农用机械 Agricultural machinery/( $\text{kg/kW}$ )	0.18
焦炭焦 Coke	0.8550	$K_3$	灌溉灌 Irrigation/( $\text{kg/hm}^2$ )	266.48
汽油 Gasoline	0.5538	$K_4$	农用柴油 Agricultural diesel/( $\text{kg/kg}$ )	0.5927
煤油 Kerosene	0.5714	$K_5$	早稻 Early rice/( $\text{g/m}^2$ )	14.37
			晚稻 Late rice/( $\text{g/m}^2$ )	34.5
柴油 Diesel oil	0.5921	$K_6$	猪呼吸 Breath of pig/( $\text{kg a}^{-1}\text{h}^{-1}$ )	82.0
燃料油 Fuel oil	0.6185		猪排泄 Excretion of pig/( $\text{kg a}^{-1}\text{h}^{-1}$ )	3.5
液化石油气 Liquefied petroleum gas	0.5042	$K_7$	牛呼吸 Breath of cattle/( $\text{kg a}^{-1}\text{h}^{-1}$ )	796.0
			牛排泄 Excretion of cattle/( $\text{kg a}^{-1}\text{h}^{-1}$ )	1.0
天然气 Natural gas	0.4483		跨界排放 Transboundary emission	
其他石油制品 Other petroleum products	0.5857	$F_1$	公路客货运 Passenger transport and freight transport of Highway/( $\text{kg t}^{-1}\text{km}^{-1}$ )	0.0556
境内排放 Domestic emissions		$F_2$	铁路客货运 Passenger and freight transport of railway/( $\text{kg t}^{-1}\text{km}^{-1}$ )	0.0217
私人汽车 Private car/( $\text{kg}/100\text{km}$ )	22.3	$K_{11}$	内河客货运 Passenger and freight transport of river/( $\text{t}/10\text{万 t}$ )	5.6t
摩托车 Motorcycle/( $\text{kg}/100\text{km}$ )	6.7	$K_{12}$	$\text{CO}_2$ 与碳转换系数 0.27	
公交车 Bus/( $\text{kg}/100\text{km}$ )	88.1	$K_{13}$	$\text{CH}_4$ 与碳转化系数 0.75	
出租车 Taxi/( $\text{kg}/100\text{km}$ )	28.3	$K_{14}$		

$K_n$ :第  $n$  个境内类型的碳排放系数, Domestic carbon emission coefficient K of n factor;  $F_n$ :第  $n$  个跨界类型的碳排放系数, Transboundary emission carbon emission coefficient K of n factor; 能源碳排放系数、动物和人类代谢碳排系数来自文献<sup>[23-25]</sup>; 水稻呼吸和农业生产碳排放系数来自文献<sup>[26]</sup>; 道路各种车辆运输和铁路运输碳排系数来自文献<sup>[27-28]</sup>, 水路运输碳排放系数来自文献<sup>[29-30]</sup>

## 2.2 生态网络效用分析方法及生态关系判定

Finn<sup>[31]</sup>和 Patten 等<sup>[32]</sup>首次提出了生态网络分析方法,生态网络通过模拟生物网络的分室和路径来定量描述生态系统不同分室之间物质能量流动。分室是生态系统中的功能单位,路径是分室之间物质能量传递的道路。利用生态网络效用分析方法能够定量分析城市碳代谢中网络中的两个分室在整体网络作用下互相作用过程和强度。但这个方法有一定的局限性,只能分析静态的系统(输入=输出),但是现实中更多的是动态开放系统。而后, Finn<sup>[33]</sup>通过提出平衡变量  $x_k$  的概念扩展了生态网络分析方法的应用范围。积极平衡变量  $x_{k+}$  代表一个从系统移动能量池的损失(系统能量增加),消极平衡变量  $x_{k-}$  代表一个从系统移动能量池的获取(系统能量减少)。Zhang 等人<sup>[24]</sup>在研究北京城市碳循环时把  $x_k$  定义为城市  $k$  分室的碳储量变化。所有分室都可能从环境中得到碳储存,也会排放碳到环境:以林地向城市用地转移了  $\Delta s$  面积为例,林地流出  $\Delta s W_{林}$  的碳储存,城市用地也增加  $\Delta s W_{城}$  的碳排放。 $T_k$  等于所有流入或者流出  $k$  的流减去或者加上  $x_k$ 。如果  $x_k < 0$ ,  $T_k$  等于所有流入  $k$  的流减去  $x_k$ ; 如果  $x_k > 0$ ,  $T_k$  等于所有流出  $k$  的流加上  $x_k$ 。根据质量守恒定律,总流入等于总流出。具体公式如下:

$$\begin{aligned} T_{in} &= \sum f_{kj} + \sum z_k - \sum (x_{k-}) \\ T_{out} &= \sum f_{ik} + \sum z_k - \sum (x_{k+}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $f_{kj}$  和  $f_{ik}$  分别代表  $j$  流向  $k$  的“碳流”和  $k$  流向  $i$  的“碳流”。 $x_{k-}$  代表碳汇减少或者碳排增加,  $x_{k+}$  代表碳汇

增加或者碳排减少。

有效利用矩阵( $D$ )可以反映各“碳流”的直接作用, $d_{ij}$ 表示各分室间“碳流”的有效利用率,根据  $D$  可以得到无量纲的整体效用矩阵  $U=(u_{ij})^{[34]}$ ,具体计算公式如下

$$d_{ij} = (f_{ij} - f_{ji})/T_i \tag{9}$$

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{f_{jj} - f_{jj}}{T_j} & \frac{f_{ji} - f_{ij}}{T_j} \\ \frac{f_{ij} - f_{ji}}{T_i} & \frac{f_{ii} - f_{ii}}{T_i} \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$U = (u_{ij}) = D^0 + D^1 + D^2 + \dots + D^m = (I - D)^{-1} \tag{11}$$

式中, $D$  的上标表示“碳流”交换的分室个数,单位矩阵  $I$  表示各分室流量产生的自我反馈。

通过整体效用矩阵( $U$ )可以得到生态网络中分室之间的积分作用(integral interaction)方式<sup>[35]</sup>,积分作用能够有效解释两个分室在整体网络作用下的综合作用。比如即使两个分室之间没有直接作用,但是它们在第三个分室作用下会产生一个隐藏的生态关系:如图 2,虽然 2 与 3 之间没有直接的作用,但都从 1 获取能量,所以它们存在一个间接的竞争作用。利用整体效用矩阵( $U$ )研究城市代谢能更好掌握各个分室的积分综合作用关系。表 3 总结了整体效用矩阵( $U$ )所有可能存在的生态关系。

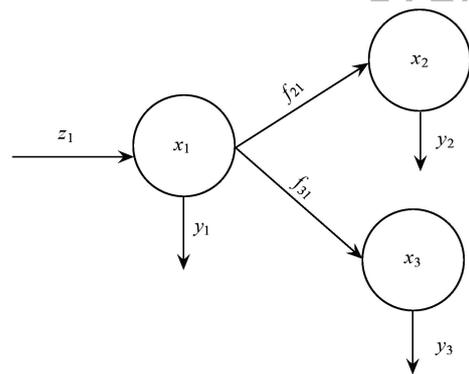


图 2 间接竞争生态示意图

Fig.2 Indirect competitive ecology

$x_1$ :分室 1, Component  $x_1$ ;  $x_2$ :分室 2, Component  $x_2$ ;  $x_3$ :分室 3, Component  $x_3$ ;  $y_1$ :输出 1, Output  $y_1$ ;  $y_2$ :输出 2, Output  $y_2$ ;  $y_3$ :输出 3, Output  $y_3$ ;  $z_1$ :输入 1;  $f_{21}$ : Flow from 1 to 2, 自分室 1 分室 2 的流;  $f_{31}$ : Flow from 1 to 3, 自分室 1 分室 3 的流

虽然在理论上 有 9 种生态关系,常见的只有 4 种(掠夺、限制、互惠共生、竞争):掠夺和限制关系说明一个分室利用了另一个分室,在这个作用中一个分室得到了效用转移而另一个分室损失了效用;竞争关系说明两个分室之间相互竞争导致两者都损失了效用;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效用<sup>[36]</sup>。

表 3 生态关系分类

Table 3 The relationships between components of the network

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

“+”代表积极;“-”代表消极;“0”代表中立

其实掠夺关系和限制关系的实质是相同的,所以把这两种关系合并为单独一类,统称为掠夺限制关系。掠夺限制生态关系在城市化过程中最常见,比如城市扩张在增加城市用地的同时减少了农用地,这就是一种典型的掠夺限制关系的表现。竞争关系和互惠共生关系是在整个网络积分综合作用下产生的,并不能通过直接流产生,但却真实反映在流的相对大小下各个分室之间的关系。

我们利用互惠指数( $M$ )<sup>[12]</sup>来量化各个分室之间生态关系,当  $M$  大于 1 说明土地利用变化对城市代谢的作用是积极的, $M$  越大说明土地利用变化对城市代谢积极作用越强烈。由公式 8 可知,竞争关系与互惠共生关系对互惠指数( $M$ )的影响非常大,所以掌握竞争关系和互惠共生关系在城市碳代谢各个分室之间分布规律

意义尤其重大。

$$“M = N_+ / N_-” \quad (12)$$

“式中,  $N_+$  和  $N_-$  表示矩阵  $U$  中的正负“碳流”个数<sup>[24]</sup>。”

### 3 结果与讨论

#### 3.1 “碳流”变化分析

图 3 描述城市代谢各个分室的净碳代谢密度变化。1995—2015 期间林地、水域与湿地两个分室为正碳代谢分室,其他分室都为负碳代谢分室。正碳代谢分室中,由于内河吞吐量的迅速增长,水域与湿地净碳代谢值密度下降了 87.25%,但仍保持正值。虽然耕地有碳汇的功能,由于其耕作生产过程排放大量碳,所以成为碳源的一部分。工业用地在负碳代谢分室中占主导地位,1995—2005 期间代谢密度减少了 52.56%之后持续上升,2015 比 1995 年上升了 37.75%。城市用地、公路与铁路分室是负碳代谢的重要分室,2015 碳代谢密度分别是 1995 年的 1.67 和 4.11 倍。

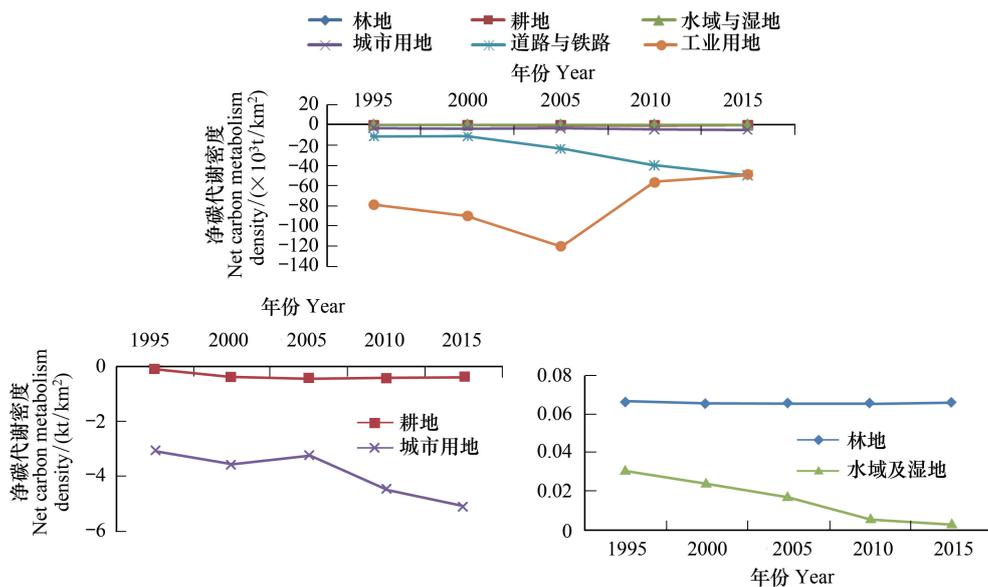


图 3 城市分室净碳代谢密度变化图

Fig.3 Changes of net carbon metabolism

根据土地利用变化矩阵可以得到不同时期的土地利用变化带来的“碳流”分布:从 1995—2000 到 2000—2005 净“碳流”减少了 28.12%,2005 之后逐渐增加(表 4),但这 4 个时期杭州城市净“碳流”一直保持负值状况,正“碳流”远远小于负“碳流”,说明 1995—2015 研究期间杭州土地利用变化对城市碳代谢产生消极作用,碳代谢极其不平衡。与张妍等人<sup>[37]</sup>研究结果相比,杭州净“碳流”在研究期内一直是负值,说明城市碳代谢从 1995—2015 一直是失衡紊乱状态,而北京净“碳流”在 1995—2000 期间为正。这是因为张妍等人的研究将农村土地划分为一个单独分室,存在大量交通和工业用地流向农村土地的正“碳流”。与作为直辖市的北京不同,杭州农村土地能耗数据难以单独获取,所以忽略了这一分室。由于南北冬天供暖方式的差异,南方农村相对能耗较少,农村土地碳排放比较低,所以忽略这一分室并不影响本文对杭州城市碳代谢的研究。

1995—2000,2000—2005 和 2005—2010 这 3 个研究期,负“碳流”主要来自于耕地→工业用地(C→I)和耕地→城市用地(C→U),分别占总负“碳流”的 60.77%和 12.98%。2010—2015 时期,耕地→公路与铁路(C→R)对负“碳流”的贡献也不可忽视,占总负“碳流”的 28.42%,这说明公路与铁路高碳排放逐渐成为阻碍城市碳代谢平衡的重要分室。这是因为一方面随着私家车价格下降逐渐使得私家车在居民生活中普及,增加了道路交通的碳排放,另一方面住房市场化机制和城市更新带来的工业郊区化使得杭州就业人口的职住分离水

平有所上升,通勤距离增加。根据开发区统计资料,2011年在开发区内工作的通勤人口是在开发区内居住的通勤人口的1.3倍<sup>[38]</sup>,通勤人数的增加给城市碳代谢带来不小的压力。

1995—2000和2000—2005正“碳流”基本来自于工业用地→城市用地(I→U)。杭州工业郊区化在1995—2000主要表现在西湖风景区周边污染企业外迁和由于城区高密度建设和高地价引起工业用地主动调整。2000—2005期间的工业郊区化主要来自工业园区的兴起,以杭州经济技术开发区(下沙)、杭州高新技术开发区、江东工业园区和临平工业园区为代表的优惠政策吸引城区大量工业企业外迁。2005—2010年正“碳流”量明显降低,主要是因为杭州工业布局形成一定格局,搬迁现象逐渐减少,正“碳流”主要来自城市用地→耕地(U→C)和城市用地→湿地(U→W)。一方面国土资源部2009依据“15号令”对土地执法监察中发现的问题进行问责,严重打击了土地违法占用耕地现象,另一方面西溪湿地和湘湖湿地的保护工程建设提高了杭州局部“碳汇”,带来部分正“碳流”。2010—2015年正“碳流”非常微弱,主要是因为城市已经发展到一定水平,土地利用变化趋于稳定。该阶段正“碳流”主要来自城市用地→林地(U→F),林地保护日益受到重视,林地作为城市重要“碳汇”提高了城市碳代谢能力。

表4 “碳流”交换表

Table 4 Exchange of carbon flow

交换值 Value/( $\times 10^6$ kgC/a)	1995—2000		2000—2005		2005—2010		2010—2015	
	交换量 Transitions	方向 Direction	交换量 Transitions	方向 Direction	交换量 Transitions	方向 Direction	交换量 Transitions	方向 Direction
负碳流 Harmful carbon flow	-862.24	-	-1559.34	-	-1163.08	-	-279.98	-
正碳流 Beneficial carbon flow	6.18	+	460.78	+	120.45	+	9.33	+
净碳流 Net carbon flow	-856.06	-	-1098.56	-	-1042.63	-	-270.66	-
H1(F, C)	—	—	-14.04	F→C	-4.40	F→C	-0.56	F→C
H2(F, U)	-9.18	F→U	-53.97	F→U	-31.43	F→U	-3.12	F→U
H3(F, R)	-2.82	F→R	-2.46	F→R	-14.44	F→R	-1.92	F→R
H4(F, I)	-50.86	F→I	-96.22	F→I	-21.52	F→I	-8.43	F→I
H5(C, U)	-187.66	C→U	-134.32	C→U	-124.44	C→U	-55.21	C→U
H6(C, R)	-52.30	C→R	-30.60	C→R	-63.51	C→R	-79.59	C→R
H7(C, I)	-379.77	C→I	-1118.88	C→I	-734.26	C→I	-115.82	C→I
H8(W, C)	-7.09	W→C	-2.35	W→C	-6.26	W→C	-0.42	W→C
H9(W, U)	-24.80	W→U	-17.54	W→U	-20.58	W→U	-3.50	W→U
H10(W, R)	-11.27	W→R	-1.39	W→R	-8.64	W→R	-0.37	W→R
H10(W, I)	-61.50	W→I	-78.02	W→I	-17.15	W→I	-0.63	W→I
H10(U, R)	-4.79	U→R	-9.54	U→R	-116.45	U→R	-10.41	U→R
H12(U, I)	-70.20	U→I	—	—	—	—	—	—
B1(C, F)	0.05	C→F	9.67	C→F	5.87	C→F	1.13	C→F
B2(C, W)	—	—	—	—	0.59	C→W	0.00	C→W
B3(U, F)	0.06	U→F	16.96	U→F	18.81	U→F	4.09	U→F
B4(U, C)	0.24	U→C	67.08	U→C	32.17	U→C	1.93	U→C
B5(U, W)	0.02	U→W	1.64	U→W	1.80	U→W	0.01	U→W
B7(I, F)	—	—	17.44	I→F	2.36	I→F	0.15	I→F
B8(I, C)	—	—	33.13	I→C	8.39	I→C	0.80	I→C
B9(I, W)	—	—	8.69	I→W	—	—	—	—
B10(I, U)	5.81	—	306.18	I→U	50.46	I→U	1.22	I→U

F:林地, Forest; C:耕地, Cultivated land; W:水域与湿地(包括湿地、河流和湖泊), Water and wetland; U:城市用地, Urban land; R:公路与铁路, Road and railway; I:工业用地, Industrial land; “-”代表负碳流方向; “+”代表正碳流方向; “—”代表两分室无交换状态; “ $H_n$ ”代表第 $n$ 个负碳流; “ $B_n$ ”代表第 $n$ 个正碳流

### 3.2 “碳流”生态关系空间分布

杭州各个分室之间碳代谢的生态关系主要分为:掠夺限制、互惠共生和竞争关系。图 4 表示了互惠指数 (M) 在整个研究期的变化:1995—2005 上升了 12.58%,2005—2010 下降了 21.42%,2010—2015 增加了 60%。整个研究期的 M 平均值为 0.63<1,说明土地利用变化对城市碳代谢综合作用是消极的。互惠指数 M 的变化与净“碳流”值的变化并不完全相同,这一点与 Zhang 等人对北京城市碳代谢的研究结果相似。这是因为互惠指数 M 体现“碳流”综合作用对城市碳代谢的结果,很多没有直接作用的分室之间通过流的间接作用产生相对生态关系,而净“碳流”值仅仅体现了土地利用变化所带来的直接“碳流”作用,所以互惠指数 M 对于城市代谢平衡评价更有意义。图 4 表示了研究期间 3 种主要类型生态关系比例的改变,总体来看竞争关系一直占主导地位:1995—2000 期间,竞争关系占了 66.67%,掠夺限制关系占了 20%,互惠共生关系仅占了 13.33%;2000—2005 期间竞争关系下降到 60%,而掠夺限制关系上升 26.67%;2005—2010 期间仅存在竞争关系和掠夺限制关系,其中掠夺限制关系上升到 40%;2010—2015 再次出现互惠共生关系,虽然仅仅占了 20%,但由于其替代了一部分竞争关系,使得竞争关系下降,对于整个系统效用增加起非常重要的作用。

互惠指数 M 的变化与净“碳流”值变化并不完全相同,这是因为自然生态系统中的互惠共生关系是很明显的,比如耕地和草地可以建立互惠共生关系,耕地可以给草地提供养分而草地可以增加耕地生物多样性。而本文所研究对象城市碳代谢是一个人类活动主导的生态系统,直接“碳流”无法带来互惠共生关系,互惠共生关系是两个分室在系统所有“流”的作用下产生的综合作用。本文 M(0.67)平均值小于 Zhang 等人<sup>[24]</sup>对北京的研究(1.73),这主要是因为张妍等人对自然分室的划分更为细致,考虑到了不同林地、草地之间的转换,而互惠共生关系往往发生在一些高“碳汇”功能分室之间。

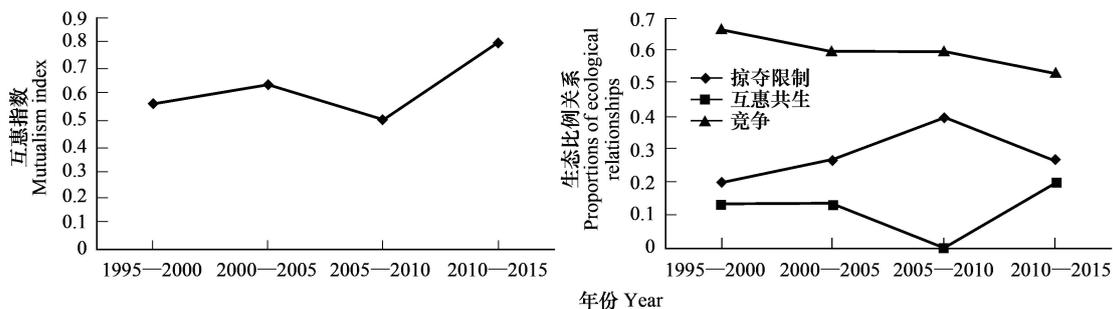


图 4 互惠指数和生态关系比例变化

Fig.4 The changes in the mutualism index (M) and the proportions of ecological relationships

根据表 5 和表 6 所示,竞争关系主要存在于高负碳代谢分室,其中工业用地分室、公路与铁路分室占主导地位,分别占竞争关系的 23.94%和 22.53%,这说明在系统作用下,高负碳代谢分室与其他分室存在强烈的碳储量竞争,影响城市代谢系统平衡。由于公路与铁路和工业用地的布局会严重影响人口、产业等城市化发展的关键要素的流动,所以城市规划中工业用地和交通路网的合理配置非常重要。掠夺限制关系虽然没有明显集聚现象,但是可以发现城市用地分室是非常重要的掠夺分室,这说明改变城市扩张方式、注重城市内涵式发展对提高城市碳代谢能力有重大意义。互惠共生关系主要存在于正碳代谢分室,集中集聚在林地分室(占了 42.83%),而水域与湿地分室虽然也是正碳代谢分室却仅占 21.42%,这是因为由于水运交通碳排放的存在致使该分室的净碳汇功能相对较弱。其中值得注意的是虽然耕地和城市用地是负碳代谢分室,但是也分别占互惠共生关系的 21.42%和 14.28%。这是因为系统有“1+1>2”的整体特性,虽然直接“碳流”不可能带来互惠共生关系,但是其他分室对耕地和城市用地的掠夺量达到一定程度时会使这两分室碳排放相对减少。

1995—2015 年期间杭州碳代谢生态关系空间分布和变化如图 5 所示。白色区间表示没有土地利用变化转移,1995—2000 年期间到 2000—2005 期间白色区间减少,2010—2015 以后白色区间逐渐增加,说明 2010 年以后杭州土地利用格局逐渐稳定,土地利用带来的“碳流”也减少,其生态关系分布也随之减少。

表 5 杭州生态关系变化表(a;1995—2000;b;2000—2005;c;2005—2010;d;2010—2015)

Table 5 Change of ecological relationship of Hangzhou (a;1995—2000;b;2000—2005;c;2005—2010;d;2010—2015)

a	F	C	W	U	T	I	b	F	C	W	U	T	I
F		+	+	-	-	-	F		+	+	+	-	+
C	+		-	-	-	-	C	-		-	+	+	-
W	+	+		-	+	+	W	+	-		-	-	-
U	-	-	-		-	-	U	+	-	-		-	-
T	-	-	-	-		-	T	-	-	-	-		-
I	-	-	-	-	-		I	-	-	-	-	-	
c	F	C	W	U	T	I	d	F	C	W	U	T	I
F		+	-	+	-	+	F		+	+	+	+	-
C	-		+	-	-	-	C	+		+	+	-	-
W	-	-		+	-	-	W	-	+		+	-	-
U	-	-	-		+	-	U	+	-	-		-	-
T	-	-	-	-		-	T	-	-	-	-		-
I	-	-	-	-	-		I	-	-	-	-	-	

红色: 掠夺; 蓝色: 限制; 黄色: 竞争; 绿色: 互惠。

表 6 生态关系分布表

Table 6 Distribution of ecological relationships

土地利用类型 Landuse type	林地 Forest	耕地 Cultivated land	水域与湿地 Water and wetland	城市用地 Urban land	公路与铁路 Road and railway	工业用地 Industrial land
竞争关系 Competition relationships	7	10	9	12	16	17
掠夺限制 Exploitation and control relationships	7	7	8	6	4	3
互惠共生 Mutualism relationships	6	3	3	2	0	0

1995—2000年,杭州生态关系以竞争关系为主,空间上主要分布在主城区东北部和北部、余杭区的东部和萧山区的西南部,这是因为竞争关系中耕地和工业用地、城市用地的转换面积最大。1996年下沙、九堡划入杭州市区加快了主城区东部的基础设施的建设和人口、产业的转移。萧山和余杭承受上海辐射,又靠近主城区交通便利,是上海产业转移的入驻地的首选,且乡镇企业发展迅速但大多规模小,为了节约成本在农村选址,侵占大量耕地。萧山东北部的掠夺竞争关系主要来自于人为围垦使得大量滩涂被城市用地、耕地等代替,使得碳循环向负方向进行。互惠共生关系空间分布极少,仅在余杭区西北和东部山区零星分布。

2000—2005年,掠夺限制关系在空间上的分布明显大量增加这主要是由于耕地与城市用地的空间转换。掠夺限制在各个区都有广泛分布,在余杭和萧山区分布尤其多,这可归因于2001年萧山和余杭撤市并区,加快了这两个区域城市化速度。主城的掠夺限制关系集中在西南和东南部,萧山的掠夺限制关系集中在东部、南部,余杭的掠夺限制关系集中在西部。另外萧山南部和余杭西部的大面积掠夺限制关系主要存在于林地和耕地之间,主要是因为早期的耕地“占补平衡”更加偏重于数量平衡,补充耕地很大程度上来自于林地,造成生态系统“碳汇”能力下降。竞争关系主要集中在主城区中部和萧山区的西部、东北部,主城区竞争关系的空间分布主要来自工业用地与城市用地的转换,而萧山区的主要来自耕地与工业用地之间。2001年中国加入世贸组织之后贸易壁垒逐渐打破,吸引了大量外资。同时地方政府为了招商引资为目的竞相压低工业用地价格,造成工业用地扩张,而萧山区西部近郊耕地相对比较平整,交通区位又便利,成为了工业用地侵占的首选。

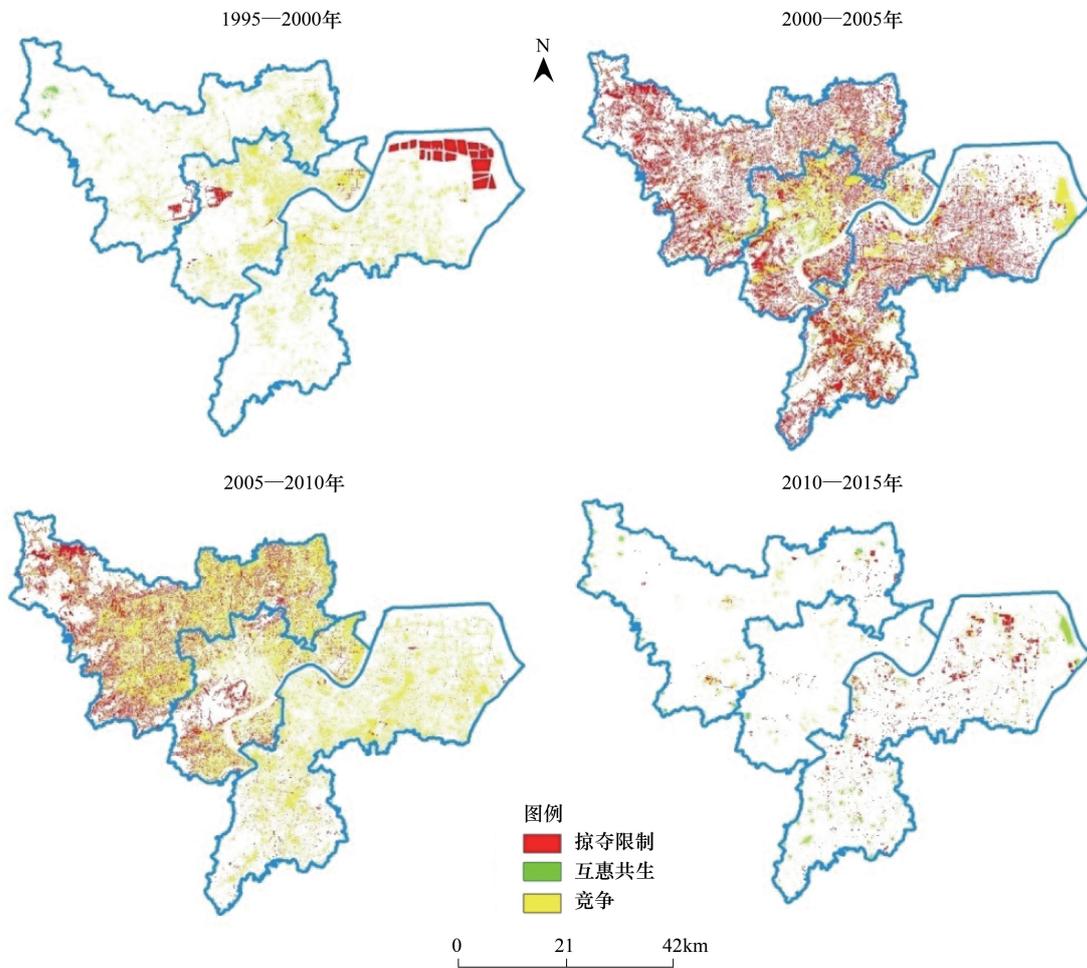


图5 杭州生态关系空间分布变化

Fig.5 Spatial distribution of the ecological relationships of Hangzhou

互惠共生关系在空间上零星分布在主城区西湖周边,这与西湖风景区的开发与保护使得林地与城市用地和水域与湿地分室互相转换有关。

2005—2010,竞争关系大量增加,再次在空间上占据主导地位,且主要分布在主城东部、萧山的东北部和余杭的靠近主城的南部区域,掠夺限制关系主要集中于余杭区的西部,此时期不存在互惠共生关系。空间上竞争关系主要来自耕地和工业用地之间,主要是周边较发达城市产业升级(如上海、苏州),部分高能耗、高污染工业外迁至萧山和余杭这两个区域。耕地与林地之间的转换占掠夺限制关系空间分布的主导地位,由于“退耕还林”、“公益林”保护等国家多个政策的支持,余杭西部山区“碳汇”得到极大保护。

2010—2015,碳代谢基本趋于平稳,3种生态关系在主城区零星分布,掠夺限制关系主要分布在萧山东北部和余杭东部,其他两种生态关系没有明显集聚现象。一方面主城区城市扩张到一定程度可以被侵占的自然资源也达到的极限,另一方面在新型城镇化政策引导下,经济相对发达的主城区的城市发展开始从“量”提升到“质”的转变,注重城市纵向内涵式发展。

综上所述,1995—2000到2000—2005期间:掠夺限制生态关系向西北、西南和南部蔓延但不呈现集聚,竞争生态关系向东南方向移动,互惠共生生态关系向东南方向移动。2000—2005到2005—2010期间,掠夺限制生态关系向西北方向移动,竞争生态关系向南部和西北部蔓延,互惠共生关系暂时不存在;2005—2010到2010—2015期间,掠夺限制生态关系向东南方向移动,竞争关系互惠共生关系零星分布。

#### 4 结论与建议

本文首先构建了一个显性空间“碳流”模型来分析杭州 1995—2015 的城市化进程中土地利用变化带来的直接“碳流”流向以及变化,再利用生态网络效用分析方法来评价城市“碳流”引起的分室之间生态关系及其空间分布变化。基于以上研究,本文得到以下结论:

(1) 1995—2015 期间,净“碳流”持续呈现负值且在 2000—2005 期间达到峰值,说明城市化背景下土地利用变化加剧了杭州城市碳代谢紊乱。负“碳流”主要源自耕地与工业用地之间的转换,正“碳流”的主要源自工业用地与城市用地之间的转换。

(2) 互惠指数(M)在 1995—2005,2000—2010 和 2010—2015 年期间分别呈现先增加,后减少和再增加的趋势。整个研究期间竞争关系始终占主导地位,互惠共生关系在 3 种主要生态关系中所占比例最低,M 平均值小于 1,说明土地利用变化对城市碳循环的综合作用是消极的。

(3) 竞争关系集聚在高负碳代谢密度分室,其中工业用地分室、公路与铁路分室占主导地位;互惠共生关系主要集聚在高正碳代谢密度分室的林地分室中;掠夺限制关系没有明显集聚现象,其中城市用地分室是重要的掠夺分室。

(4) 从 1995—2000 至 2010—2015 年,以每 5 年为时间间隔,生态关系分布空间变化如下:掠夺限制生态关系呈现向西北、西南和南部蔓延—西北方向移动—东南方向移动的变化趋势,竞争生态关系呈现东南方向移动—南部和西北部蔓延—零星分布的变化趋势,互惠共生生态关系呈现向东南方向移动—暂时不存在—零星分布的变化趋势。

根据以上研究结果,本文为杭州低碳城市建设提出以下二点建议:

(1) 由于负“碳流”主要来自其他分室向工业用地分室的转换,所以降低工业用地的碳排放密度和合理供给工业用地是关键。杭州政府应该一方面加快产业升级,逐步淘汰高耗能、高排放工业企业,利用政策扶持新能源企业,另一方面严格审批工业园区用地。

(2) 竞争关系集聚在工业用地分室和公路与铁路分室,研究期间总体来看竞争关系主要集中在杭州东部区域,所以杭州在未来城市规划中要注意这两个分室在各个区域的合理布局 and 分配,特别在东部地区规划中应该着重考虑生态用地(如湿地、林地)的保护以及工业用地的合理供给。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [ 2 ] Wolman A. The metabolism of cities. *Scientific American*, 1965, 213: 179-190.
- [ 3 ] Zhang Y. Urban metabolism: a review of research methodologies. *Environmental Pollution*, 2013, 178: 463-473.
- [ 4 ] Kennedy C, Steinberger J, Gasson B, Hansen Y, Hillman T, Havrůnek M, Pataki D, Phdungsilp A, Ramaswami A, Mendez G V. Methodology for inventorying greenhouse gas emissions from global cities. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 4828-4837.
- [ 5 ] Kennedy C, Pincetl S, Bunje P. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8/9): 1965-1973.
- [ 6 ] Ye H, Wang K, Zhao X F, Chen F, Li X Q, Pan L Y. Relationship between construction characteristics and carbon emissions from urban household operational energy usage. *Energy and Buildings*, 2011, 43(1): 147-152.
- [ 7 ] Gurney K R, Razlivanov I, Song Y, Zhou Y Y, Benes B, Abdul-Massih M. Quantification of fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions on the building/street scale for a large U.S. city. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(21): 12194-12202.
- [ 8 ] Ou J P, Liu X P, Li X, Chen Y M. Quantifying the relationship between urban forms and carbon emissions using panel data analysis. *Landscape Ecology*, 2013, 28(10): 1889-1907.
- [ 9 ] Wu Y Z, Shen J H, Zhang X L, Skitmore M, Lu W. The impact of urbanization on carbon emissions in developing countries: a Chinese study based on the U-Kaya method. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135: 589-603.
- [ 10 ] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 徐琳瑜, 张妍. 基于生态网络的城市代谢结构模拟研究——以大连市为例. *生态学报*, 2013, 33(18):

- 5926-5934.
- [11] 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.
- [12] 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. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(20): 4702-4711.
- [13] Zhang Y, Lu H J, Fath B D, Zheng H M. Modelling urban nitrogen metabolic processes based on ecological network analysis: a case of study in Beijing, China. *Ecological Modelling*, 2016, 337: 29-38.
- [14] 张琳琳, 岳文泽, 范蓓蕾. 中国大城市蔓延的测度研究——以杭州市为例. *地理科学*, 2014, 34(4): 394-400.
- [15] 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). 北京: 科学出版社, 2008.
- [16] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(6): 804-812.
- [17] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [18] 段晓男, 王效科, 逯非, 欧阳志云. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28(2): 463-469.
- [19] Walsh J J. Importance of continental margins in the marine biogeochemical cycling of carbon and nitrogen. *Nature*, 1991, 350(6313): 53-55.
- [20] Meybeck M. Riverine transport of atmospheric carbon: sources, global typology and budget. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, 70(1): 443-463.
- [21] 林剑艺, 孟凡鑫, 崔胜辉, 于洋, 赵胜男. 城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例. *生态学报*, 2012, 32(12): 3782-3794.
- [22] 贾顺平, 毛保华, 刘爽, 孙启鹏. 中国交通运输能源消耗水平测算与分析. *交通运输系统工程与信息*, 2010, 10(1): 22-27.
- [23] 匡耀求, 欧阳婷萍, 邹毅, 刘宇, 李超, 王德辉. 广东省碳源碳汇现状评估及增加碳汇潜力分析. *中国人口资源与环境*, 2010, 20(12): 56-61.
- [24] Zhang Y, Xia L L, Fath B D, Yang Z F, Yin X N, Su M R, Liu G Y, Li Y X. Development of a spatially explicit network model of urban metabolism and analysis of the distribution of ecological relationships: case study of Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 4304-4317.
- [25] Solomon S. IPCC (2007): *Climate Change the Physical Science Basis*. Boulder: American Geophysical Union, 2007.
- [26] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(7): 21-27.
- [27] 张清, 陶小马, 杨鹏. 特大型城市客运交通碳排放与减排对策研究. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(1): 35-42.
- [28] 解天荣, 王静. 交通运输业碳排放量比较研究. *综合运输*, 2011, (8): 20-24.
- [29] 彭传圣. 港口生产能耗和排放计算问题研究. *港口装卸*, 2011, (6): 25-30.
- [30] 王剑. 港口生产综合能耗分析与能源弹性系数测算. *港口科技*, 2006, (11): 6-8.
- [31] Finn J T. Measures of ecosystem structure and function derived from analysis of flows. *Journal of theoretical Biology*, 1976, 56(2): 363-380.
- [32] Patten B C, Bosserman R W, Finn J T, Cale W G. Propagation of cause in ecosystems//Patten B C, ed. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*. New York: Academic Press, 1976, 4: 457-579.
- [33] Finn J T. Flow analysis of models of the hubbard brook ecosystem. *Ecology*, 1980, 61(3): 562-571.
- [34] Fath B D, Patten B C. Network synergism: emergence of positive relations in ecological systems. *Ecological Modelling*, 1998, 107(2/3): 127-143.
- [35] Fath B D. Network mutualism: positive community-level relations in ecosystems. *Ecological Modelling*, 2007, 208(1): 56-67.
- [36] Zhang Y, Li S S, Fath B D, Yang Z F, Yang N J. Analysis of an urban energy metabolic system: comparison of simple and complex model results. *Ecological Modelling*, 2011, 223(1): 14-19.
- [37] Zhang Y, Xia L, Xiang W N. Analyzing spatial patterns of urban carbon metabolism: a case study in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 130: 184-200.
- [38] 饶传坤, 陈巍. 向新城转型背景下的城市开发区空间发展研究——以杭州经济技术开发区为例. *城市规划*, 2015, 39(4): 43-52.