

DOI: 10.5846/stxb201509101872

谢文瑄, 黄庆旭, 何春阳. 山东半岛城市扩展模式与生态足迹的关系. 生态学报, 2017, 37(3): - .

Xie W X, Huang Q X, He C Y. A study on urban expansion modes and regional ecological footprints in the Shandong Peninsula Urban Agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): - .

## 山东半岛城市扩展模式与生态足迹的关系

谢文瑄<sup>1, 2</sup>, 黄庆旭<sup>1</sup>, 何春阳<sup>1, \*</sup>

1 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学 民政部—教育部 减灾与应急管理研究院, 北京 100875

**摘要:**理解城市扩展模式与生态足迹动态之间的关系是区域可持续性研究的重要内容,对实现城市可持续发展具有重要指导意义。然而,目前对这二者关系探索的实证研究较少。以山东半岛城市群为例,掌握其 2000—2010 年的城市扩展模式与生态足迹动态特征,并探索二者之间的关系。采用景观扩展指数和生态足迹模型对研究区的城市扩展模式和生态足迹动态进行计算。在此基础上,将该区 44 个县划分为 4 种类型,用相关分析法对城市扩展模式和生态足迹动态的关系进行探索。结果表明,2000—2010 年山东半岛城市群的城市用地面积增量增加了  $1.2 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,增幅为 19.4%。44 个县均体现出边缘型扩展面积最大,生态赤字增加的特点,平均赤字增量为  $1.26 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。垦利等 27 个县的外延式扩展面积与生态赤字增加量存在较显著的正相关关系,在济阳等 17 个县中,二者未呈现出相关关系。建议垦利、淄博和青岛等地区在未来城市发展中,控制飞地型和边缘型扩展面积总量,发展清洁能源,遏制化石能源足迹的增长趋势。

**关键词:**城市扩展模式;生态足迹;城市形态;山东半岛城市群

## A study on urban expansion modes and regional ecological footprints in the Shandong Peninsula Urban Agglomeration

XIE Wenxuan<sup>1, 2</sup>, HUANG Qingxu<sup>1</sup>, HE Chunyang<sup>1, \*</sup>

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** Understanding the relationship between urban expansion modes and regional ecological footprints is an important objective in regional sustainability research, and can provide crucial guidance for achieving urban sustainable development. However, empirical research on the relationship between urban expansion modes and ecological footprints is limited. Taking the Shandong Peninsula Urban Agglomeration as an example, the goals of the present study are to examine the characteristics of urban expansion modes and ecological footprint dynamics from 2000 to 2010, and to analyze the relationship between them. We quantified the urban expansion modes and ecological footprint dynamics using the landscape expansion index and ecological footprint model. Then, we divided the 44 counties in the study area into 4 types, and analyzed the relationship between urban expansion modes and ecological footprint dynamics among them using a correlation analysis. The results showed that urban land area of the Shandong Peninsula Urban Agglomeration increased by  $1.2 \times 10^5 \text{ hm}^2$  (19.4%), and the average ecological deficit increased by  $1.26 \text{ hm}^2$  per capita from 2000 to 2010. In all 44 counties, the area of edge-expansion growth was the largest and the ecological deficit increased. There was a significant positive correlation between epitaxial expansion areas and the ecological deficit increment in 27 counties, such as Kenli. However,

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项经费课题(201411014-2-1)

收稿日期:2015-09-10; 网络出版日期:2016-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hcy@bnu.edu.cn

17 counties did not show significant correlations. In the future, for sustainable development in this region, controlling the area of outlying and edge-expansion growth, utilizing new clean energy, and limiting the fossil fuel footprints in several counties, such as Kenli, Zibo, and Qingdao, should be the focus.

**Key Words:** urban expansion modes; ecological footprints; urban form; Shandong Peninsula Urban Agglomeration

生态足迹是指能够持续生产某人口群体消费的所有资源和吸纳他们产生的废弃物所需要的生物生产性土地的总面积<sup>[1-2]</sup>。生态足迹最早由生态经济学家 Rees<sup>[3]</sup>于 1992 年提出,其动态变化与区域社会经济发展密切相关,是衡量人类对自然资源利用程度以及可持续发展状况的重要方法<sup>[4-5]</sup>。城市扩展作为城市化最直接的表现之一,是指由于土地利用方式的改变,导致空间上城市规模的扩大,使得非城市用地转化成为城市用地的过程<sup>[6-8]</sup>。城市扩展会影响城市的生态足迹,一方面居民消费水平提高、消费模式和生活方式改变,致使资源消耗量急剧增加<sup>[9-10]</sup>。另一方面,耕地、林地和草地等生物生产性土地被城市用地占用,生态系统提供服务的能力降低<sup>[11-12]</sup>。这两方面共同导致城市生态足迹的增加,该过程会对区域生态系统安全和可持续性造成巨大威胁。

城市扩展模式是体现城市扩展时空特征的重要方面,也是影响城市形态的重要因素,主要分为飞地型、边缘型和内填型三类。飞地型和边缘型均属外延式扩展模式,可使城市形态趋于松散化、破碎化,而内填型扩展模式则能使城市形态相对紧凑<sup>[13-18]</sup>。城市形态会通过碳排放量对生态足迹造成影响。例如, Kareiva 等<sup>[19]</sup>的研究发现形态松散的城市人均资源利用量要高于形态紧凑的城市。Muñiz 等<sup>[20]</sup>在巴塞罗那大都市区的研究表明松散的城市形态会导致居民平均交通距离的增加,从而引起能源消耗量和 CO<sub>2</sub>排放量的增加,致使生态足迹增加更大。Holden<sup>[21]</sup>在挪威的研究也发现居住密度大的城镇生态足迹更小、可持续性更高。此外, Creutzig 等<sup>[22]</sup>和 Ou 等<sup>[23]</sup>的研究均表明聚合和连续的城市扩展模式与紧凑的城市形态有助于控制能源消耗的增加趋势,增加城市发展的可持续性。

明确城市扩展模式与生态足迹动态之间的关系,是区域可持续性研究的重要内容,对实现城市可持续发展具有重要指导意义。然而,目前相关研究多关注城市形态与资源消耗量或 CO<sub>2</sub>排放量之间的关系<sup>[19,22-23]</sup>,较缺乏城市扩展模式与生态足迹关系的实证研究。

山东半岛城市群作为我国北方重要的经济发展区域,不仅在山东省国民经济发展过程中发挥着极其重要的作用,而且在我国区域经济发展格局中的地位也十分重要<sup>[24]</sup>。随着人口激增和城市扩展,其脆弱问题日益凸显,面临着生态环境急剧恶化的危机,如生态环境萎缩、水环境失调和土地资源破坏严重等<sup>[25-26]</sup>。近几十年,该城市群经历了快速的城市扩展过程,研究表明从 1999 到 2010 年,城市人口增长 248.8 万人,年均增长率为 1.6%。城市土地增加 888.6hm<sup>2</sup>,年均增长率达 7.8%<sup>[27]</sup>。同时,该区生态系统安全性脆弱,据《中国生态足迹报告 2012》显示,山东省 2009 年生态足迹为 1.9 hm<sup>2</sup>/人,高于全国平均水平,且呈现较严重的生态赤字<sup>[28]</sup>。

鉴于此,本文以地表覆盖数据为基础,以人口普查数据、统计数据和 GIS 数据为辅助,对山东半岛城市群 44 个县 2000—2010 年的城市扩展模式和生态足迹动态进行了对比分析。目的在于认识和理解区域城市扩展模式及其生态足迹动态的特征及其关系,并为山东半岛城市群城市空间格局优化和区域可持续发展提供参考依据。

## 1 研究区和数据

### 1.1 研究区

山东半岛是我国的三大半岛之一,北部与辽东半岛隔渤海海峡相望,东部与韩国隔黄海相望。是我国北方大陆伸向西太平洋的最前缘,是亚欧大陆的重要桥头堡,属暖温带亚湿润季风气候<sup>[29]</sup>。山东半岛城市群

(图 1)包括济南、青岛、烟台、淄博、威海、潍坊、东营和日照 8 个地级市所辖的 44 个县(市辖区、县级市),其土地总面积为 7.09 万  $\text{km}^2$ ,2010 年年末总人口约为 3998.5 万<sup>[30]</sup>。该城市群地理区位优势明显,是山东省经济发展水平最高、潜力最大、活力最强的区域<sup>[24]</sup>。

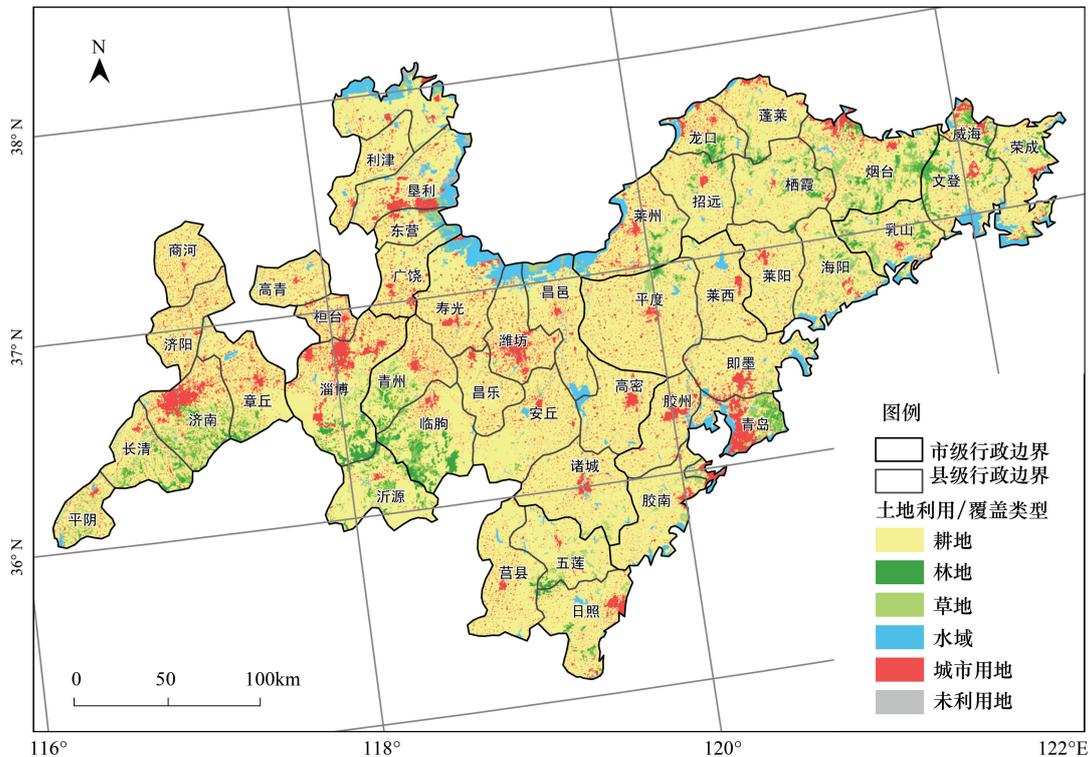


图 1 山东半岛城市群 2010 年土地利用/覆盖图

Fig.1 Land use/cover of Shandong Peninsula Urban Agglomeration in 2010

## 1.2 数据

本文使用到的数据共有 4 类。第一类是 2000 年和 2010 年的全球地表覆盖数据,该数据由国家测绘地理信息局发布(<http://www.globallandcover.com/GLC30Download/index.aspx>),空间分辨率为 30m,我们使用该套数据计算生态承载力,并用该数据中地类代码为 80 的人造覆盖(主要包括城镇用地、道路和工矿用地等<sup>[31]</sup>)数据计算城市扩展模式。第二类是 2001 年和 2011 年的统计数据,主要来自于《山东统计年鉴》以及各地级市的统计年鉴,部分数据来自于《中国统计年鉴》、《国际统计年鉴》以及联合国粮农组织(FAO)统计资料。第三类是 2000 年和 2010 年的人口普查数据,数据从《中国 2000 年人口普查资料》和《中国 2010 年人口普查资料》<sup>[32-33]</sup>两本书中摘录获得。第四类是 GIS 辅助数据,由国家测绘地理信息局发布,包括 1:400 万的省级行政边界和县级行政边界数据(<http://ngcc.sbsm.gov.cn>)。

## 2 方法

### 2.1 评估城市扩展模式

Liu 等<sup>[16]</sup>提出的景观扩展指数(Landscape Expansion Index, *LEI*)(公式 1)是目前国内较为系统地介绍城市扩展模式定量识别的方法之一,能够在微观斑块尺度较精确地识别出飞地型、边缘型和内填型三种模式<sup>[34]</sup>。飞地型是指新增斑块与原有斑块处于分离状态,二者没有直接接触;边缘型是指新增斑块沿着原有斑块的边缘继续扩展;内填型是指新增斑块发生在被原有斑块包围的区域,填充原有斑块<sup>[16,18,35]</sup>。该指数已应用于东莞<sup>[16]</sup>和长江三角洲<sup>[35]</sup>等地区的城市扩展模式研究。基于此,本文采用该指数对山东半岛城市群的城市扩展模式进行定量分析。

$$LEI = \frac{A_0}{A_0 + A_e} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $LEI$  是关于新增城市斑块类型的指数;  $A_0$  是指新增城市斑块的缓冲区与已有城市斑块的交集;  $A_e$  是指该缓冲区与非城市斑块的交集。当  $LEI=0$  时, 新增城市斑块为飞地型;  $0 < LEI \leq 50$  时, 为边缘型;  $50 < LEI \leq 100$  时, 为内填型。Liu 等的研究表明, 缓冲区距离应当小于等于遥感影像的空间分辨率, 该距离越小  $LEI$  值越稳定。参考已有研究<sup>[16]</sup>, 本文缓冲区距离设置为 1m。

## 2.2 计算生态足迹动态

近年来, 生态足迹理论及其相关问题已成为可持续发展领域的研究热点之一。生态足迹因其计算简单, 结果直观形象, 得到了广泛应用, 目前已有 20 多个国家利用该方法计算了各类可持续发展和承载力问题<sup>[36]</sup>。

该理论自提出后, 其计算方法不断被改进, 主要有传统的 Wachernagel and Rees 法、投入产出法、时间序列法和真实土地面积法等<sup>[37]</sup>。虽然这些方法各具特色, 但应用最广泛的仍然是 Wachernagel 等<sup>[1]</sup>的基本核算模型。因此, 本文采用该方法建立生态足迹核算账户模型(表 1), 估算在一定人口和经济规模条件下, 维持资源消费和废弃物吸纳所必需的生物生产性地域空间<sup>[1, 38]</sup>。参考已有研究<sup>[4, 39-43]</sup>, 我们考虑 6 种生物生产性土地类型, 对生态足迹进行核算(公式 2—4)。

表 1 生态足迹核算账户

Table 1 The ecological footprint accounting accounts

生物生产性土地类型 Biologically productive land types	生态足迹 Ecological footprint		土地利用类型 Land use types	生态承载力 Ecological capacity
	消费项目 Consumption items	均衡因子 Equivalence factor		产量因子 Yield factor
耕地 Cropland	粮食、豆类及豆产品、猪肉、禽肉、蛋类、蔬菜、干鲜瓜果	2.8	耕地	1.13
林地 Woodland	木材产品	1.1	林地	1.13
草地 Grassland	牛肉、羊肉、奶及奶制品	0.5	草地	1.93
水域 Water area	水产品类	0.2	水域	1.93
城市用地 Urban land	建成区	2.8	城市用地	1.13
化石能源用地 Fossil energy land	原煤、原油、汽油、柴油、煤油、燃料油、液化石油气、天然气	1.1	CO <sub>2</sub> 吸收	0

$$EF = \sum_{j=1}^6 \left( r_j \times \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{p_i} \right) \quad (2)$$

$$EC = (1 - 12\%) \sum_{j=1}^6 (a_j \times r_j \times y_j) \quad (3)$$

$$D = EF - EC \quad (4)$$

式中,  $EF$  为人均生态足迹( $\text{hm}^2/\text{人}$ );  $EC$  为人均生态承载力( $\text{hm}^2/\text{人}$ );  $D$  表示资源利用状况;  $i$  为消费项目的类型, 共有  $n$  类;  $c_i$  为第  $i$  种消费项目的人均消费量( $\text{kg}/\text{人}$ );  $p_i$  为第  $i$  种消费项目的年平均产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $j$  为生物生产性土地类型;  $a_j$  为某种生物生产性土地类型的实际人均面积( $\text{hm}^2/\text{人}$ );  $r_j$  和  $y_j$  分别为对应生物生产性土地类型的均衡因子和产量因子。

均衡因子<sup>[38]</sup>是某类生物生产性土地的单位面积生物产量与具有世界平均生产力的生物生产性土地的单位面积生产量之比。该因子可使不同类型的生物生产性土地的计算结果统一、可比。产量因子<sup>[38]</sup>是某地区或某国家的某类生物生产性土地的平均生产力与世界同类土地平均生产力的比值。该因子可使不同地区的计算结果可比。为简化计算过程, 本文引用谢高地等<sup>[4]</sup>使用过的均衡因子和刘承某等<sup>[44]</sup>研究中的产量因子(表 1), 且不考虑其在时间尺度上的变化。

在生态承载力计算中, 应扣除 12% 用于生物多样性保护<sup>[39]</sup>。若  $D > 0$ , 该地区属于生态赤字, 表明人类

的需求已经超过了自然的供给能力;反之,该地区属于生态盈余,表明人类活动产生的负荷还在自然生态的承受范围之内。

### 2.3 分析城市扩展模式与生态足迹动态的关系

本文采用四象限分类法和相关分析法对城市扩展模式与生态足迹动态之间的关系进行初步探索。我们以外延式扩展面积的区域均值和生态赤字/盈余的增加量/减少量的区域均值为两则划分标准建立分类体系,将山东半岛城市群的 44 个县分为 4 类 (I 至 IV)。基于该分类结果,用 Pearson 相关分析方法对不同类型县的城市扩展模式和生态足迹动态之间的关系进行分析,初步探索二者之间的关系。

## 3 结果

### 3.1 城市扩展模式

2000—2010 年,山东半岛城市群城市用地面积从 2000 年的  $6.3 \times 10^5 \text{hm}^2$  增加到 2010 年的  $7.5 \times 10^5 \text{hm}^2$ ,增加了 19.4%,2010 年的面积约为 2000 年的 1.2 倍。在新增城市斑块中,边缘型扩展面积最大,占据着绝对的主导地位,内填型扩展面积次之,飞地型扩展面积最小,三种类型面积占总新增城市斑块面积的比例分别为 71.9%、14.3% 和 13.8% (图 2)。

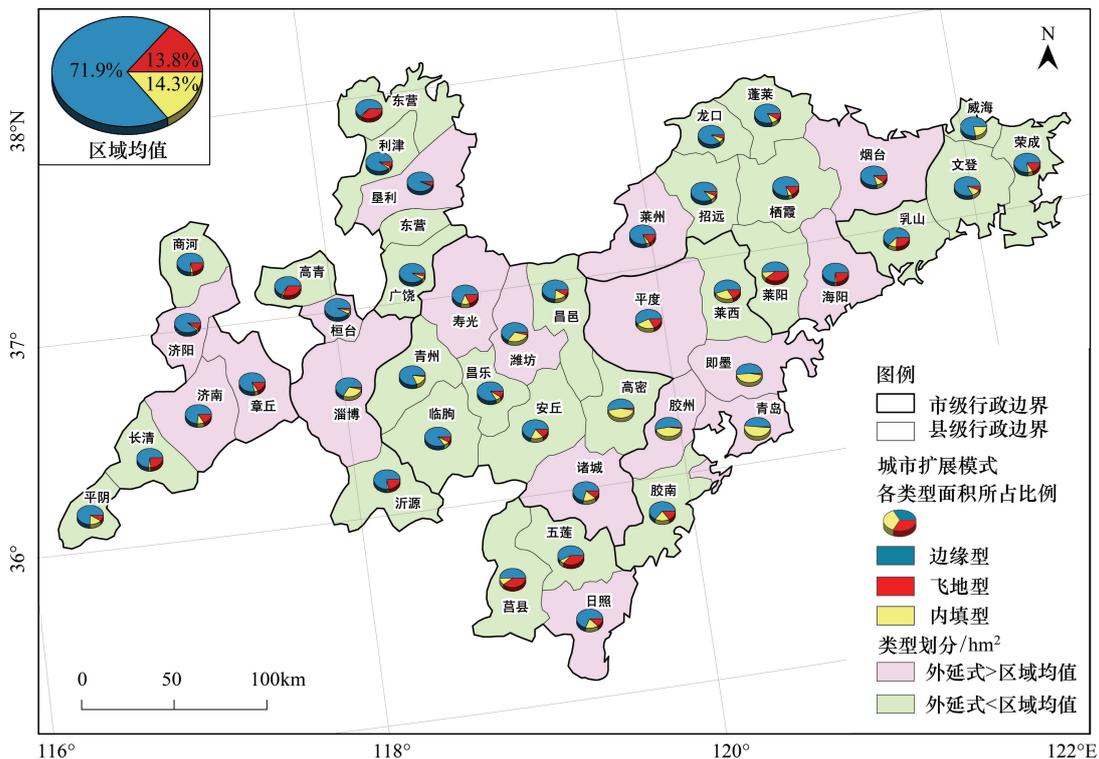


图 2 山东半岛城市群 2000—2010 年城市扩展模式

Fig.2 Urban expansion modes of Shandong Peninsula Urban Agglomeration from 2000 to 2010

城市群的 44 个县均体现出边缘型扩展面积占主导的特点(图 2)。边缘型扩展面积所占比例最大的是垦利,其面积占该县总新增城市斑块面积的 93.4%,青岛最少,边缘型面积所占该县总新增面积的 48.1%,两者相差近一倍。内填型扩展最多的是即墨,其面积占该县总新增城市斑块面积的 45.5%,而垦利的内填型最少,仅有 1.4%。莒县飞地型扩展最多,其面积占该县总新增城市面积的 39.5%,与之相反,威海几乎没有飞地型扩展。

不同扩展模式面积所占比例具有空间聚集性(图 2)。首先,高密-即墨-青岛一带的内填型扩展面积所占比例较大,均约占其所在县扩展总量的一半。胶州和高密的内填型扩展所占比例为 44.5% 和 45.6%,均高

于区域均值 14.3%。其次,长清-章丘-高青一带的飞地型扩展面积所占比例较大,高青、长清和济南的飞地型扩展分别为 32.1%、23.8%和 16.1%,均高于区域均值 13.8%。最后,6 个地级市(除威海和日照)与其周边县的外延式扩展面积高于区域均值,例如济南-章丘、淄博-桓台和青岛-即墨。

### 3.2 生态足迹动态

2000—2010 年,山东半岛城市群地区的生态赤字呈增加趋势,44 个县的平均生态足迹从 1.38  $\text{hm}^2/\text{人}$  增加到 2.64  $\text{hm}^2/\text{人}$ ,平均生态赤字从 1.16  $\text{hm}^2/\text{人}$  增加到 2.42  $\text{hm}^2/\text{人}$ ,赤字增加了 1.26  $\text{hm}^2/\text{人}$ 。增大的生态赤字说明,人类的生产生活强度已超过了生态系统的承载能力,生态系统已处于人类过度开发利用的压力之下。

10 年内,城市群中生态赤字增加量高于区域均值的县共有 14 个,其中生态赤字增加量最大的是广饶,增量高达 5.66  $\text{hm}^2/\text{人}$ 。赤字增量排在前 4 位的是东营市辖区以及其所辖的广饶、垦利和利津三个县,远高于区域均值。在低于区域均值的 30 个县中,生态赤字增加量最小的是莱州,仅为 0.02  $\text{hm}^2/\text{人}$ 。(图 3)。

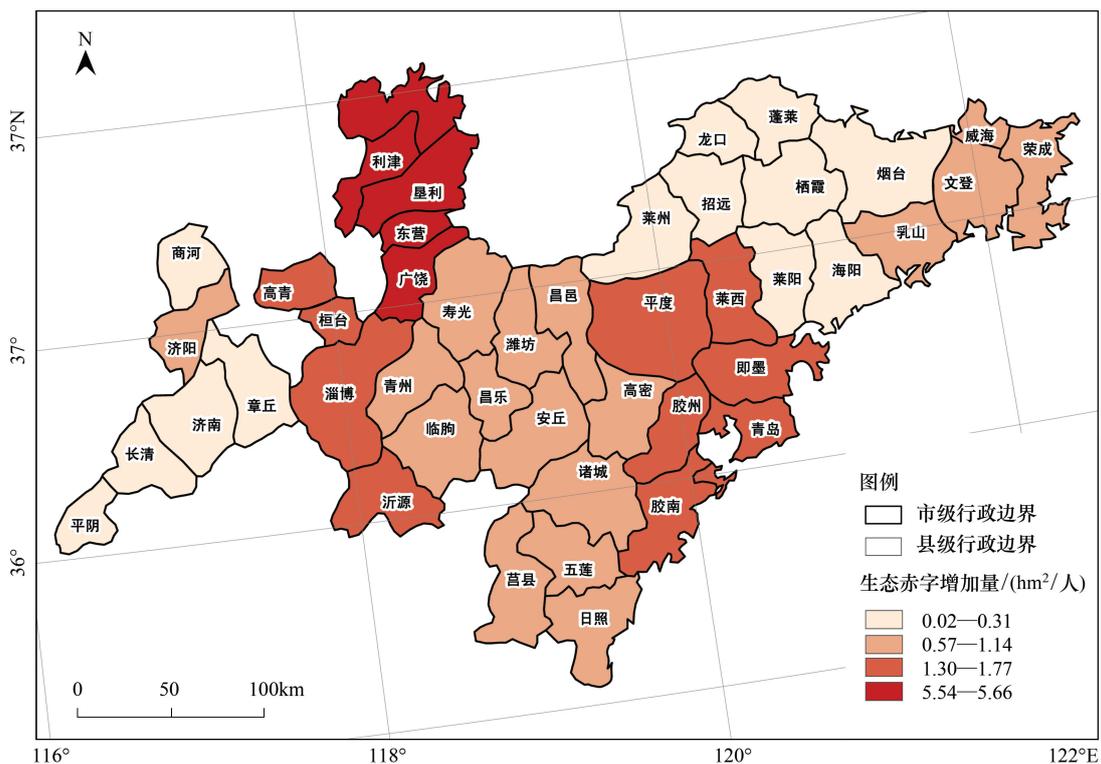


图 3 山东半岛城市群 2000—2010 年生态赤字增加量

Fig.3 Increase in ecological deficit of Shandong Peninsula Urban Agglomeration from 2000 to 2010

依据生态赤字增加量,采用 K-means 聚类算法将山东半岛城市群中的 44 个县分为 4 类。其中,两类的生态赤字增加量高于区域均值 1.26  $\text{hm}^2/\text{人}$ ,另外两类低于区域均值。

2000—2010 年,人均生态赤字增量较大的县主要集中在东营-淄博-沂源和莱西-青岛-胶南一带,且这些城市周边的县生态赤字增加量也较大(图 3)。例如,青岛的生态赤字增量为 1.77  $\text{hm}^2/\text{人}$ ,其以北的即墨、以西的胶州和胶南的人均生态赤字增量分别为 1.48  $\text{hm}^2$ 、1.47  $\text{hm}^2$ 和 1.43  $\text{hm}^2$ 。同样,淄博的生态赤字量为 1.67  $\text{hm}^2/\text{人}$ ,其以南的沂源和以北的桓台,人均生态赤字增加量分别为 1.72  $\text{hm}^2$ 和 1.58  $\text{hm}^2$ ,均高于区域均值 1.26  $\text{hm}^2$ 。

### 3.3 城市扩展模式与生态足迹动态的关系

在垦利等 27 个县(I 型和 III 型)里,外延式扩展面积与生态赤字增加量存在较显著的正相关关系。二者相关系数为 0.74,并通过了 0.01 水平的显著性检验(图 4)。可见外延式扩展面积较大的县,城市形态相对松散,生态赤字增加量更大,该结果与已有研究结果<sup>[19-23]</sup>基本一致。其中,垦利的外延式扩展面积大,其生态赤

字增加量最高,为  $5.59\text{hm}^2/\text{人}$ ,反之,平阴的外延式扩展面积小,其生态赤字增加量仅为  $0.30\text{hm}^2/\text{人}$ 。

而在济阳等 17 个县(Ⅱ型和Ⅳ型)中,外延式扩展面积与生态赤字增加量之间未呈现出明显的相关关系。二者相关系数虽为  $-0.43$ ,但并未通过显著性检验(图 4)。城市扩展模式并不是影响这 17 个县生态赤字增加的主要因素。例如,利津的生态赤字增加量是高青的 3.3 倍,而外延式扩展面积差别甚微。又如济南比海阳的外延式扩展面积大  $3537\text{hm}^2$ ,但生态赤字增加量却相差无几。

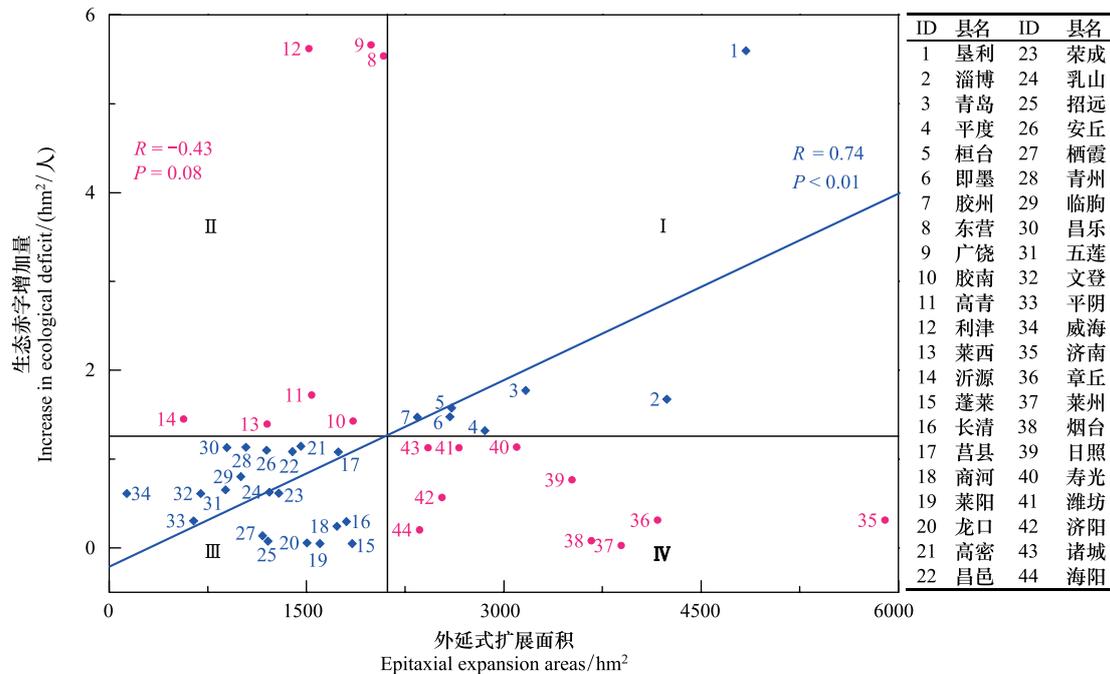


图 4 基于城市扩展模式与生态赤字增加量的县分类

Fig.4 Classification of counties based on urban expansion modes and increase in ecological deficit

$R$  为 Pearson 相关系数,  $P$  为显著性水平

城市扩展模式在一定程度上可解释一部分县的生态赤字增加,而在另一部分县中,并没有良好体现。这是由于生态足迹动态是众多因素综合驱动的结果,除城市扩展模式外,还存在其它社会经济因素,如 GDP、三次产业对 GDP 贡献率、人口增长率、居民消费水平和政策干预等。因此,其它因素可能是影响Ⅱ和Ⅳ型县生态足迹动态的主要因子。

## 4 讨论

### 4.1 化石能源足迹是城市扩展模式影响生态足迹动态的主要因素

从生态足迹的组成结构来看,2010 年城市群 44 个县的平均化石能源足迹所占比例为 67.3%,是生态足迹最主要的组分。2000—2010 年,该区域化石能源足迹增长了 3.4 倍,生态足迹从生态承载力的 7.3 倍增加到 14.5 倍,而承载力变化微小,致使生态赤字增加。可见生态足迹组分中化石能源足迹的大幅增长是生态赤字增加的主要原因。

外延式扩展面积与化石能源足迹增加量存在较显著的正相关关系。在 27 个样本中,二者相关系数为 0.76,并通过了 0.01 水平的显著性检验(图 5)。在城市扩展过程中,若边缘型和飞地型两种外延式扩展面积大,城市形态趋向于送伞花,则会带来较高的能源消耗量。诸如煤炭、天然气和石油等能源的消耗都会向自然环境排放  $\text{CO}_2$ ,这需要相应的化石能源用地来“吸收” $\text{CO}_2$ <sup>[41]</sup>,也就造成了大量的化石能源足迹,继而引发生态赤字的加剧。

我们可通过控制化石能源足迹的增加趋势,提高城市发展的可持续性。在城市扩展过程中,Ⅲ型和Ⅳ型

县的生态赤字量增加较小,城市发展可持续性相对较高。Ⅱ型县虽然生态赤字增加量较大,但其外延式扩展面积较少,城市用地扩展相对集约。而Ⅰ型县的外延式扩展面积和生态赤字增加量均高于区域均值,城市形态趋向于松散化,区域可持续性发展面临压力较大。因此,我们需要对垦利、淄博和青岛等7个外延式扩展面积与生态赤字增加量均高于区域均值的地区给予更多关注,应控制其化石能源消耗量的增加趋势,遏制化石能源足迹的增长趋势。

#### 4.2 规划政策启示

山东半岛城市群目前正处于快速发展的阶段,2000至2010年该区域城市用地面积增加了 $1.2 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。但由于其资源承载能力不强,土地开发利用效率不高,利用方式较为粗放,生态环境保护压力大<sup>[45]</sup>。10年间生态赤字加剧,人均增量为 $1.26 \text{ hm}^2$ ,可持续发展状况堪忧。

《山东省新型城镇化规划(2014—2020年)》中指出“要严格划定城镇建设用地规模边界和扩展边界、禁止建设区,强化对城乡用地规模、布局和形态的管控”。

同时强调,应促进城市清洁能源供应设施建设,推进绿色、循环、低碳发展,引导居民自觉减少能源和资源使用。基于此,我们建议一方面对外延式扩展面积高于区域均值的17个县要恪守集约用地制度,适当控制飞地型和边缘型扩展面积,保证城市向紧凑型形态发展。另一方面,对生态赤字增量高于区域均值的14个县应大力推广使用太阳能等清洁能源,控制化石能源使用量,遏制化石能源足迹的增加趋势,维护区域生态安全,推进城市可持续发展。

#### 4.3 不足与展望

本文在城市扩展模式和生态足迹的计算与分析中存在一些不足。第一,景观扩展指数计算中的缓冲区设置值会影响城市扩展模式类型的划分。第二,未对生态足迹计算参数进行本地化,研究使用的是“全球公顷”单位的均衡因子和“省公顷”单位的产量因子<sup>[41]</sup>,无法精确反映各县的真实生产状况和发展特征。第三,最小研究单元为县,由于受到统计数据的限制,部分县的相关统计数据使用的是其所在市的均值,未能较好体现地区之间的差异性。第四,由于样本数量和可获取数据有限,本文并未深入分析城市扩展模式影响生态足迹动态的更深层次的原因,也未能深入分析其它可能影响生态足迹动态的因素。

在未来的研究工作中,一方面,我们可以在优化生态足迹计算方法的基础上,增加研究样本数量,从公共交通、市政设施和能源消耗等方面入手,深入分析城市扩展模式影响生态足迹的内在原因。另一方面,也可以通过主成分分析和多元回归分析方法对影响或限制生态足迹动态的社会经济因素展开系统、全面的研究,揭示出普适性规律。

## 5 结论

山东半岛城市群2000—2010年城市用地面积增加了 $1.2 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,增幅为19.4%。在快速的城市扩展过程中,44个县均呈现出边缘型扩展面积最大、生态赤字增加的特点。人均赤字增加量为 $1.26 \text{ hm}^2$ ,区域可持续发展面临着较大威胁。

外延式扩展面积与生态赤字增加量之间存在较显著正相关关系,同时化石能源足迹的急剧增加是造成生

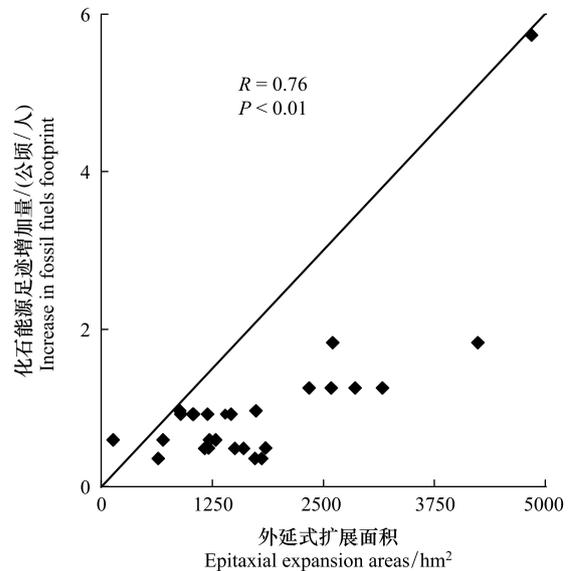


图5 外延式扩展面积与化石能源足迹增加量的相关系数

Fig.5 Correlation between epitaxial expansion areas and increase in fossil fuels footprint

图中27个样本点是山东半岛城市Ⅰ型和Ⅲ型县;R为Pearson相关系数,P为显著性水平

态赤字增加的主要原因,该特征在垦利、蓬莱等 27 个县中得到了较好体现。因此,在未来城市发展中,有必要控制外延式扩展总量,并且采取能够有效遏制化石能源足迹增长趋势的措施,努力实现区域的可持续发展。特别是垦利、淄博和青岛等 7 个外延式扩展面积和生态赤字增加量均高于区域均值的县,需要我们给予更多的关注。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Wackernagel M, Rees W E, Testemale P. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [ 2 ] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Linares A C, Falfán I S L, García J M, Guerrero A I S, Guerrero M G S. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375-390.
- [ 3 ] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [ 4 ] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁, 郑度. 中国的生态空间占用研究. *资源科学*, 2001, 23(6): 20-23.
- [ 5 ] 王文国, 何明雄, 潘科, 祝其丽, 周芸, 樊毅, 胡启春. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析. *自然资源学报*, 2011, 26(9): 1555-1565.
- [ 6 ] 何春阳, 史培军. *景观城市化与土地系统模拟*. 北京: 科学出版社, 2009.
- [ 7 ] Bai X M, Chen J, Shi P J. Landscape urbanization and economic growth in China: positive feedbacks and sustainability dilemmas. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(1): 132-139.
- [ 8 ] 徐新良, 赵美艳, 闵稀碧. 城市扩展研究的主要进展与展望. *生态科学*, 2014, 33(3): 619-624.
- [ 9 ] 张俊军, 许学强, 魏清泉. 国外城市可持续发展研究. *地理研究*, 1999, 18(2): 207-213.
- [ 10 ] 刘耀彬. 江西省城市化进程中资源消耗特征及响应分析. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(6): 50-53.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 方创琳, 鲍超, 乔标. *城市化过程与生态环境效应*. 北京: 科学出版社, 2008.
- [ 13 ] Wilson E H, Hurd J D, Civco D L, Prisloe M P, Arnold C. Development of a geospatial model to quantify, describe and map urban growth. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 275-285.
- [ 14 ] Berling-Wolff S, Wu J G. Modeling urban landscape dynamics: a case study in Phoenix, USA. *Urban Ecosystems*, 2004, 7(3): 215-240.
- [ 15 ] Xu C, Liu M S, Zhang C, An S Q, Yu W, Chen J M. The spatiotemporal dynamics of rapid urban growth in the Nanjing metropolitan region of China. *Landscape Ecology*, 2007, 22(6): 925-937.
- [ 16 ] Liu X P, Li X, Chen Y M, Tan Z Z, Li S Y, Ai B. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*, 2010, 25(5): 671-682.
- [ 17 ] 刘桂林, 张落成, 张倩. 苏南地区建设用地扩展类型及景观格局分析. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(10): 1375-1382.
- [ 18 ] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 秦雁, 李少英, 陈明辉. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用. *地理学报*, 2009, 64(12): 1430-1438.
- [ 19 ] Kareiva P, Watts S, McDonald R, Boucher T. Domesticated nature: shaping landscapes and ecosystems for human welfare. *Science*, 2007, 316(5833): 1866-1869.
- [ 20 ] Muñiz I, Galindo A. Urban form and the ecological footprint of commuting. The case of Barcelona. *Ecological Economics*, 2005, 55(4): 499-514.
- [ 21 ] Holden E. Ecological footprints and sustainable urban form. *Journal of Housing and the Built Environment*, 2004, 19(1): 91-109.
- [ 22 ] Creutzig F, Baiocchi G, Bierkandt R, Pichler P P, Seto K C. Global typology of urban energy use and potentials for an urbanization mitigation wedge. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2015, 112(20): 6283-6288.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] 刘兆德, 陈素青. *山东半岛城市群可持续发展研究*. 北京: 科学出版社, 2010.
- [ 25 ] 盖文启. 我国沿海地区城市群可持续发展问题探析——以山东半岛城市群为例. *地理科学*, 2000, 20(3): 274-278.
- [ 26 ] 韩传峰, 刘惠敏, 陈建业. 山东半岛城市群生态系统安全评价. *自然灾害学报*, 2005, 14(5): 49-54.
- [ 27 ] 郭施宏, 王富喜, 高明. 山东半岛人口城市化与土地城市化时空耦合协调关系研究. *经济地理*, 2014, 34(3): 72-78.
- [ 28 ] 世界自然基金会, 中国科学院地理科学与资源研究所, 全球足迹网路、中国科学院动物研究所、伦敦动物学会. *中国生态足迹报告 2012: 消费、生产与可持续发展*. 北京: 世界自然基金会(瑞士)北京代表处, 2012.
- [ 29 ] 许学工, 彭慧芳, 徐勤政. 海岸带快速城市化的土地资源冲突与协调——以山东半岛为例. *北京大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(4):

527-533.

- [30] 山东省统计局. 山东统计年鉴 2011. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [31] Chen J, Chen J, Liao A P, Cao X, Chen L J, Chen X H, He C Y, Han G, Peng S, Lu M, Zhang W W, Tong X H, Mills J. Global land cover mapping at 30 m resolution: a POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 103: 7-27.
- [32] 国务院人口普查办公室, 国家统计局人口统计司, 社会科技统计司. 中国 2000 年人口普查资料. 北京: 中国统计出版社, 2002.
- [33] 国务院人口普查办公室, 国家统计局人口和就业统计司. 中国 2010 年人口普查资料. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [34] 高金龙, 陈江龙, 袁丰, 魏也华, 陈雯. 南京市建设用地扩张模式、功能演化与机理. *地理研究*, 2014, 33(10): 1892-1907.
- [35] Li C, Li J X, Wu J G. Quantifying the speed, growth modes, and landscape pattern changes of urbanization: a hierarchical patch dynamics approach. *Landscape Ecology*, 2013, 28(10): 1875-1888.
- [36] 刘森, 胡远满, 李月辉, 常禹, 张薇. 生态足迹方法及研究进展. *生态学杂志*, 2006, 25(3): 334-339.
- [37] 李宏. 生态足迹理论及其应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [38] 王治国, 樊华, 孙保平, 朱党生. 基于生态足迹理论的陕北生态环境可持续发展研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [39] Wackernagel M, Lewan L, Hansson C B. Evaluating the use of natural capital with the ecological footprint: applications in Sweden and subregions. *Ambio*, 1999, 28(7): 604-612.
- [40] 张志强, 徐中民, 程国栋, 陈东景. 中国西部 12 省(区市)的生态足迹. *地理学报*, 2001, 56(5): 599-610.
- [41] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态足迹计算与分析——以广州为例. *地理研究*, 2003, 22(5): 654-662.
- [42] Wang P, Wang X J. Spatiotemporal change of ecological footprint and sustainability analysis for Yangtze Delta Region. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(5): 859-868.
- [43] 安宝晟, 程国栋. 西藏生态足迹与承载力动态分析. *生态学报*, 2014, 34(4): 1002-1009.
- [44] 刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 592-597.
- [45] 山东省城镇化工作领导小组办公室. 山东省新型城镇化规划(2014-2020 年). 济南: 中共山东省委, 2014.