

DOI: 10.5846/stxb201804180889

贾玉秋,唐立娜.中国城市空间形态的环境效应.生态学报,2019,39(8): - .

Jia Y Q, Tang L N.Environmental effects of the urban spatial form of Chinese cities.Acta Ecologica Sinica,2019,39(8): - .

## 中国城市空间形态的环境效应

贾玉秋<sup>1,2</sup>,唐立娜<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室,厦门 361021

2 中国科学院大学,北京 100049

**摘要:**中国城市需要更为紧凑的空间形态,但是城市空间紧凑性的环境效应并不十分清晰。采集城市管网设施指标、城市道路、交通设施指标、生态协同指标等建立环境因子指标集,选择标准化紧凑度指数 NCI、标准化离散度指数 NDIS、最大斑块面积指数 LPI、景观形状指数 LSI、平均形状指数 SHAPE\_MEAN、周长-面积分形维数 PAFRAC 等形态指标,运用统计分析的方法探索中国 146 座城市的空间形态的单因子环境效应、综合环境效应及环境效应的差异性。研究表明:(1)人均城市道路面积、供水管密度、排水管密度、万人拥有公交车辆、万人拥有出租车辆、人均公园绿地面积等环境因子与城市空间形态密切相关。城市紧凑度越高,城市管网系统密度越低,公共交通设施越少,人均公园绿地面积越少。城市形状越复杂,城市管网系统密度越高,公共交通投入越大,人均公园绿地面积越大。(2)综合环境因子与 LSI 呈中等强度的正相关( $r=0.43, P<0.01$ )。城市空间形状越复杂,城市资源环境相关设施总体投入越多。(3)在不同的紧凑及形状复杂性水平下,万人拥有公交车辆、万人拥有出租车辆、供水管道密度及综合环境因子的显著性差异再次表明城市越紧凑,交通越发达;城市形状越复杂,环境投入越多。本文研究证明了城市空间形态越紧凑、资源越是节约,紧凑型城市空间形态能够用于中国城市建设。

**关键词:**紧凑城市;城市空间形态;单因子环境效应;综合环境效应

## Environmental effects of the urban spatial form of Chinese cities

JIA Yuqiu<sup>1,2</sup>, TANG Lina<sup>1,\*</sup>

1 Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

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

**Abstract:** The environmental effect of the urban spatial compactness of Chinese cities is unclear. In this study, indices of urban pipe network facilities, urban road and traffic facilities, and ecological synergy were established. Morphological indices of normalized compactness index (NCI), normalized dispersion index (NDIS), largest patch area index (LPI), landscape shape index (LSI), mean shape index (SHAPE\_MEAN), and perimeter-area fractal dimension (PAFRAC) were used to statistically analyze the single factor environmental effects, comprehensive environmental effect, and difference in environmental effects of the urban spatial form of 146 cities. The results showed that (1) the per capita urban road area, density of water supply pipe, density of drainage pipe, bus vehicles of 10,000 people, taxis of 10,000 people, and per capita park green area were closely related to the urban spatial form. A higher urban compactness was associated with a lower density of the urban pipe network, fewer public transport facilities, and lower per capita park area. A more complex urban form was associated with a higher density of the urban pipe network system, greater investment of public transport, and larger per capita park area. (2) The comprehensive environmental factor was positively correlated with LSI ( $r=0.43, P<0.01$ ). A more complex urban spatial shape was associated with a greater investment in urban resources and environment-related facilities. (3) The significant difference between bus vehicles of 10,000 people, taxis of 10,000 people, density of

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(41471137);国家自然科学基金重点项目(71533003)

**收稿日期:**2018-04-18; **网络出版日期:**2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lntang@ iue.ac.cn

water supply pipe, and comprehensive environmental factor at different levels of compactness and shape-complexity again showed that a more compact city showed greater development of traffic, a more complex city, and greater environmental investment. These results support the more compact urban form and higher economic resources. The compact urban spatial form can be applied to urban construction in China.

**Key Words:** compact city; urban spatial form; single factor environmental effect; comprehensive environmental effect

1981—2016年,中国城镇人口增长率是180%,建成区面积增长率是630%,城市扩张系数(城市建成区面积增加值与城市人口增加值的比率)高达3.5,远高于国际上普遍认可的1.12的合理水平<sup>[1]</sup>。快速的郊区化一方面导致城市职住空间明显错位,通勤时间越来越长,交通问题越来越严重<sup>[2]</sup>。另一方面,城市规模的扩张和人口的增多造成资源需求的扩张,产出的负外部环境污染物集中排放超过城市生态环境承载力,影响城市居民的健康,同时环境感受及社会体验变差<sup>[3-6]</sup>。紧凑的城市形态是权衡持续的人口增长和资源消耗对全球生态系统服务需求增加的利益冲突的最好方案<sup>[7]</sup>。中国城市发展应强化低效用地的二次开发,发展更为紧凑的城市形态<sup>[8]</sup>。城市景观的生态环境效应研究已发展为城市生态学的重要课题,基于生态学原理的已有研究表明过于紧凑的城市形态将会产生热岛效应<sup>[9-10]</sup>;导致植被面积和生物多样性减少<sup>[11]</sup>;降低河流、湖泊水质<sup>[12]</sup>。这些研究对紧凑城市、生态城市理论的完善起到了重要作用,但是区域尺度下城市紧凑形态的可行性、城市功能实现的资源配置、生态环境效应的研究还不够充分,尤其中国城市对于紧凑的空间形态及良好生态环境具有十分迫切的发展需求<sup>[13]</sup>。

城市环境绩效评价通常具有较为全面的指标体系,包含环境健康、环境保护、可持续的资源利用、环境管理等多个方面<sup>[14]</sup>。大尺度的城市紧凑度与城市资源环境的关系研究依赖环境指标数据的可得性和准确性,指标体系的建立尤为困难,通常只是城市环境绩效评价指标中的一部分。已有研究表明城市紧凑度与城市生态效率、资源效率呈正相关,提高城市空间形态紧凑度能够改善城市资源的配置和利用水平,促进城市物质代谢和循环效率,实现有序管理<sup>[15-17]</sup>。不仅研究所选的环境指标存在差别,指标定义的内涵范围也存在较大差异。Chen等采用的城市环境指标包括了设施可达性、基础设施效率、公共交通、资源能源消费、空气污染等环境外部性指标评价中国城市发展的环境成本和收益<sup>[1]</sup>。黄永斌等构建的城市紧凑度综合指标体系包含了生态环境协同的类别,生态协同指标包括人均公共绿地面积、建成区绿化覆盖率、污水处理厂集中处理率、生活垃圾无害化处理率等<sup>[15]</sup>。祖佳嬉和叶长盛同样将城市资源效率作为城市紧凑度评价的一部分,包含了人均日用水量、用水普及率、燃气普及率、教育设施密度、医疗设施密度、排水管网密度、建成区绿化覆盖率、人均公共绿地面积等具体指标<sup>[18]</sup>。因此,城市空间形态紧凑性的环境效应的指标选择、环境效应的定量关系均还需要更多的研究。本研究选择景观形状、紧凑度、离散度等多个指标度量中国城市的空间形态,综合前人研究选择有代表性的环境因子建立环境效应因子数据库,用以分析中国146座主要城市空间形态紧凑性的环境效应,以期对中国城市空间发展方式有所启示。

## 1 数据与方法

### 1.1 城市样本

截止2015年,在中国全部656个城市当中,市辖区常住人口超过100万的城市有146座,总人口为35530万人,占有城市市辖区人口合计的80%(2015年《中国城市统计年鉴》)。4/5的城市人口集中在1/5的城市中,这些城市是中国社会经济迅速发展的辉煌表现,同时也是中国城市化与生态环境矛盾集中爆发的区域。146座城市从空间上覆盖了全国的七大经济区,东北地区9座,华北地区12座,华东地区55座,华南地区23座,华中地区20座,西北地区9座,西南地区18座。其中4个直辖市,5个计划单列市,26个省会城市及111座地级市。研究这些城市的空间形态能够代表中国城市化的整体现状。

## 1.2 环境因子指标集

研究建立的环境因子指标集主要数据来源于 2015 年《中国城市统计年鉴》、《中国城市建设统计年鉴》(表 1)。城市管网涉及到城市的能源供应、网络通讯、排污泄洪等功能,是城市空间形态密切联系的要素,研究选择供水管密度、排水管密度两个指标代表城市管网设施。城市交通系统构成了不同的开放与围合空间,与交通走廊一起影响城市格局的形成、演变,是城市发展所依托的重要骨架<sup>[19]</sup>。路网的连通性影响公共交通、步行、自行车、小汽车等不同出行模式的选择、平均出行距离的长短以及就业、购物的可达性,研究选择人均道路面积、路网密度代表路网连通性。公共交通工具具有载量大,运送效率高,能源消耗低,运输成本低等优点。城市公共交通运营系统受到城市发达程度及地理条件的限制,其中,公共汽车是最为普遍的交通工具,出租汽车是满足不同出行要求的重要辅助工具。研究选择万人拥有公交车辆(取整)、万人拥有出租车数(取整)、公交系统效率等指标代表城市公共交通因子。城市生态协同因子是通过对各种污染源进行综合治理,加强环境保护,改善生态环境水平的重要组成。研究选择人均公园绿地面积、建成区绿化覆盖率、生活垃圾处理率、污水处理率作为城市生态协同因子。

表 1 城市环境因子指标集合

Table 1 Indexes of urban environment

指标大类 Category of indices	具体指标 Concrete index	单位 Unit	指标说明 Introduction of indicator
城市管网设施因子 Urban pipe network facilities	X1:供水管道密度	km/km <sup>2</sup>	供水管道长度/建成区面积
	X2:排水管道密度	km/km <sup>2</sup>	排水管道长度/建成区面积
城市道路、公共交通因子 Urban road and traffic facilities	X3:人均道路面积	m <sup>2</sup> /人	道路面积/城区人口
	X4:路网密度	km/km <sup>2</sup>	道路长度/建成区面积
	X5:万人拥有公交车辆	台/万人	公交营运台数/城区人口
	X6:万人拥有出租车辆	台/万人	出租车台数/城区人口
生态协同因子 Ecological synergy	X7:公交系统效率	万人/台	公交客运量/公交营运台数
	X8:人均公园绿地面积	m <sup>2</sup> /人	公园绿地面积/城区人口
	X9:建成区绿化覆盖率	%	绿化覆盖面积/建成区面积
	X10:生活垃圾处理率	%	生活垃圾处理量/生活垃圾清运量
	X11:污水处理率	%	污水处理量/污水排放量

## 1.3 综合环境因子

单因子环境效应分析从具体指标反映城市空间形态的环境效应,但很难从总体上了解紧凑形态的环境响应。因此,根据单因子环境效应分析,选择与空间形态指标具有较强相关性的指标构建城市环境综合指数  $E$ 。对各个指标用熵值法建立权重,熵值法能够消除人为因素对权重设定的影响,计算过程如下:(1)构建  $m$  个城市、 $n$  项评价指标的原始指标数据矩阵  $(a_{ij})_{m \times n}$  ( $0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n$ );(2)对原始矩阵进行标准化处理,消除不统一的量纲,  $a'_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_j)}{\max(a_j) - \min(a_j)}$ ; (3)计算第  $j$  项指标的熵值  $e_j$ ,  $e_j = -\mu \sum_{i=1}^m (b_{ij} \times \ln b_{ij})$ , 式中,  $\mu = 1/\ln m$ ,  $b_{ij} = a'_{ij} / \sum_{i=1}^m a'_{ij}$ ,  $e_j$  值介于 0 与 1 之间;(4)计算评价指标  $j$  的权重,  $w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j)$ ; (5)城市环境综合指数  $E_j = \sum_i (w_j \times b_{ij})$ 。

## 1.4 空间形态指标

对 146 座城市空间形态的紧凑聚集性、形状复杂性进行度量,研究通过文献分析选择标准化紧凑度指数 NCI、标准化离散度指数 NDIS、最大斑块面积指数 LPI、景观形状指数 LSI、平均形状指数 SHAPE\_MN、景观水平的周长-面积分形维数 PAFRAC 等 6 个指标。NCI 利用引力模型衡量城市斑块的紧凑性,不受城市规模的影响,利于城市间的比较<sup>[20]</sup>;NDIS 以城市斑块的距离为参数测度城市离散性,便于计量城市空间形态的轴向

合理性,空间尺度对 NDIS 值影响较小,城市具有唯一 NDIS 值<sup>[21]</sup>;LPI 通过最大斑块在城市所有斑块中的面积比重指示景观破碎化的程度<sup>[22]</sup>;LSI 是景观水平的形状指数,利用形状复杂度考察聚集性<sup>[22]</sup>;SHAPE\_MN 以斑块尺度的平均形状指数表示形状复杂性<sup>[23]</sup>;PAFRAC 利用周长和面积的分形维数反映斑块形状的复杂度<sup>[23]</sup>。用于形态度量的城市建设用地栅格数据从 Landsat 8 OLI 遥感影像中提取,以 2015 年为基准年。NCI、NDIS 指标的计算采用 Matlab10.0 编程实现,其他指标在 Fragstats4.2 程序包中运算。

### 1.5 统计分析

城市空间形态的环境效应采用统计学的方法进行分析,在 SPSS20.0 软件中实现。首先,通过 Pearson 相关系数  $r$  寻找与城市空间形态具有显著性相关的环境因子。其次,对 146 座城市的主要形态指标进行聚类分析,将具有相似紧凑性和形状复杂性特征的城市划分到同一类别,各分为 3 类。最后,将不同形态特征下的环境因子进行单因素方差分析及比较均值分析,总结城市空间形态的环境效应差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境单因子描述性分析

供水管道密度极小值是菏泽市的 2.94,极大值是常州市的 42.68。排水管道密度极小值是自贡市的 0.35,极大值是无锡市的 39.35。全国城市供水管道密度高于排水管道密度,城市间的供水管道设施差异比排水管道大。北方城市相比南方城市,供排水管道密度均偏低;经济发达、区位等级高的城市普遍拥有较高的供排水管道密度。从全国水平来看,中国具有非常发达的城市路网,各个城市间的差异相当大(表 2)。在人口集中的一些城市,路网设施的修建跟不上人口涌入的速度,如北京市、上海市、广州市、郑州市等人口总量大、密度大的城市,人均道路面积不及全国均值,分别为 7.62、4.27、9.01、7.14,相应的路网密度分别是 5.78、5.0、6.03、4.13。对于城市的公共交通指标,93%的城市公交车数量少于出租车,全国万人拥有公交车辆均值为 14 辆,

表 2 城市环境因子的统计指标

Table 2 Statistics of urban environment indexes

具体指标 Concrete index	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
供水管道密度 Density of water supply pipe	2.94 (菏泽市)	42.68 (常州市)	13.08	6.81	52.10
排水管道密度 Density of drainage pipe	0.35 (自贡市)	39.35 (无锡市)	10.03	4.92	49.10
人均城市道路面积 Per capita urban road area	2.80 (巴中市)	46.04 (亳州市)	17.59	7.02	39.90
路网密度 Density of road network	1.48 (达州市)	21.54 (珠海市)	7.12	2.75	38.60
万人拥有公交车辆 Bus vehicles of 10,000 people	2 (潮州市)	77 (临沂市)	14	9	64.29
万人拥有出租车辆 Taxis of 10,000 people	4 (临沂市)	56 (大庆市)	26	12	46.15
公交系统效率 Efficiency of bus vehicles	0.07 (齐齐哈尔市)	32.97 (遂宁市)	14.52	6.22	42.80
人均公园绿地面积 Per capita park green area	6.93 (商丘市)	26.08 (威海市)	13.75	3.71	27.00
建成区绿化覆盖率 Green coverage rate in built-up area	22.89 (贵港市)	58.11 (珠海市)	40.34	4.64	11.50
生活垃圾处理率 Processing rate of household garbage	68.38 (齐齐哈尔市)	100	98.44	4.23	4.30
污水处理率 Processing rate of waste water	48.84 (达州市)	99.65 (合肥市)	92.02	6.22	6.76

万人拥有出租车均值为 25 辆。北京市与上海市、广州市相比,公交车、出租车数量都较少,但是公交系统的运行效率高,表明北京市对公交系统的依赖更强。中国城市人均公园绿地面积均值是 13.75,极大值是威海市的 26.08,极小值是商丘市的 6.93。建成区绿化覆盖率极大值为珠海市的 58.11,极小值为贵港市的 22.89。生活垃圾处理率变异系数最低,中国大部分城市已经实现了 100% 的垃圾处理。污水处理是阻止水污染进入城市生态循环的关键,仍有城市缺乏相应的技术和管理,污水处理率偏低。

## 2.2 空间形态指标与环境单因子相关性

形态指标与城市环境因子的相关关系可知(表 3),NCI 与供水管密度呈负相关,Pearson 相关系数  $r = -0.27$ ,即城市的紧凑度越高,供水管密度越低;NCI 与万人拥有出租车辆呈正相关, $r = 0.25$ ,城市紧凑度越高,出租车数量越多。NDIS 与万人拥有公交车辆呈负相关, $r = -0.23$ ,表示城市离散度越高,公交车数量越少。LPI 与供水管密度的负相关说明城市最大斑块面积越大,城市越集聚,供水管道密度越低,这与 NCI 的指示规律一致。城市的形状指数 LSI 与供水管道密度、排水管道密度、万人拥有公交车辆都有显著的正相关,表明斑块形状越复杂,城市管网、交通等基础设施投入越多。斑块水平的 SHAPE\_MEAN 与各项指标均不具有相关性,说明斑块水平的形状复杂性并不影响城市环境因子,而城市的总体空间形态与基础设施投入联系更为密切。PAFRAC 与人均城市道路面积、供水管密度、排水管密度具有正相关,与出租车数量负相关。说明城市斑块形状越复杂,人均道路面积越多,供排水管的投入越多;城市建设用地斑块形状越复杂越不利于出租汽车的发展,将会更加依赖公共交通去实现交通福利。路网密度、公交系统效率与空间形态指数不具有统计学意义上的相关。NCI、LSI、SHAPE\_MEAN、PAFRAC 与生态协同因子均不具有相关性。NDIS 与人均公园绿地面积正相关, $r = 0.17$ ,城市越离散,人均公园绿地面积越大。LPI 与人均公园绿地面积负相关, $r = -0.27$ ,城市最大斑块面积越大城市越集聚,人均公园绿地面积越少。

表 3 形态指标与城市环境单因子的 Pearson 相关系数

Table 3 The Pearson correlation coefficients between morphological indices and single urban environmental factor

形态指标 Morphological indices	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
NCI	-0.27**	-0.04	0.02	0.01	0.11	0.25**	-0.04	-0.09	0.06	-0.06	0.10
NDIS	0.01	-0.10	0.12	-0.01	-0.23**	-0.12	0.05	0.17*	-0.05	-0.04	-0.14
LPI	-0.22**	-0.05	-0.15	-0.05	-0.04	0.14	0.09	-0.27**	-0.06	-0.03	0.02
LSI	0.49**	0.38**	-0.10	0.07	0.33**	0.09	-0.10	0.11	0.14	0.07	0.12
SHAPE_MEAN	0.08	0.09	0.14	0.10	-0.08	-0.15	0.02	0.07	0.05	-0.02	-0.11
PAFRAC	0.25**	0.22**	0.17*	0.15	-0.07	-0.30**	0.02	0.10	-0.02	0.11	-0.01

\*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; NCI: 标准化紧凑度指数, normalized compactness index; NDIS: 标准化离散度指数, normalized dispersion index; LPI: 最大斑块面积指数, largest patch area index; LSI: 景观形状指数, landscape shape index; PAFRAC: 周长-面积分形维数, perimeter-area fractal dimension; SHAPE\_MN: 平均形状指数, mean shape index

## 2.3 空间形态指标与综合环境因子相关性

研究选择与空间形态指标存在显著相关性的环境单因子建立综合环境因子,各指标权重如下:人均城市道路面积权重占 12%,供水管密度占 19%,排水管密度占 18%,万人拥有公交车辆占 25%,万人拥有出租车辆占 20%,人均公园绿地面积占 6%。综合环境因子得分最高的是佛山市的 31.11,揭阳市最低 6.23,均值  $15.5 \pm 4.37$  (SE)。综合环境因子得分与 NCI、LPI、SHAPE\_MN、PAFRAC 均不相关(表 4),与 NDIS 呈较弱的负相关,也就是说城市空间越离散,综合环境因子得分越高;与 LSI 呈中等强度的正相关,Pearson 相关系数  $r$  达到 0.43,说明城市空间形状越复杂,综合环境因子得分越高,城市环境相关设施投入越大(图 1)。

## 2.4 环境效应差异

虽然 LPI 能够从一定程度上代表城市空间形态的聚集性,但是受到遥感解译精度的影响较为严重,在斑块不连通的情况下,LPI 值偏低。因此,对城市空间形态紧凑性选择 NCI、NDIS 两个指标进行聚类分析。

SHAPE\_MN 是指斑块程度的形状复杂性,证明与环境因子不相关。因此对城市景观的形状复杂性用 LSI、PAFRAC 进行聚类分析,各分为 3 类(图 2)。紧凑聚类的类型 1 代表 NCI 低、NDIS 高的不紧凑类型,包含了 37 座城市;类型 2 代表 NCI 及 NDIS 中等紧凑的类型,包含 64 座城市;类型 3 代表 NCI 高、NDIS 低的相对紧凑类型,包含 45 座城市。紧凑的城市中包含了最多的省会城市和直辖市,说明城市越发达越有可能更紧凑;不紧凑的类型 1 中更多的是山地和沿海城市;类型 2 包含了少量省会城市及多数平原城市。形状复杂性聚类中类型 1 形状相对复杂,包含了 18 座城市;类型 2 形状相对简单,包含了 33 座城市;类型 3 形状中等复杂,包含了 95 座城市。146 座城市的总体情况是,大部分城市的形状相对简单,只有极少数的城市形状比较复杂。省会城市等经济发达、规模较大的城市在 3 种类别中都有出现。

表 4 形态指标与综合环境因子的 Pearson 相关系数

Table 4 The Pearson correlation coefficients between morphological indices and comprehensive environmental factor

	NCI	NDIS	LPI	LSI	SHAPE_MN	PAFRAC
综合环境因子 Comprehensive environmental factor	0.11	-0.17*	-0.06	0.43**	-0.06	-0.05

\*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

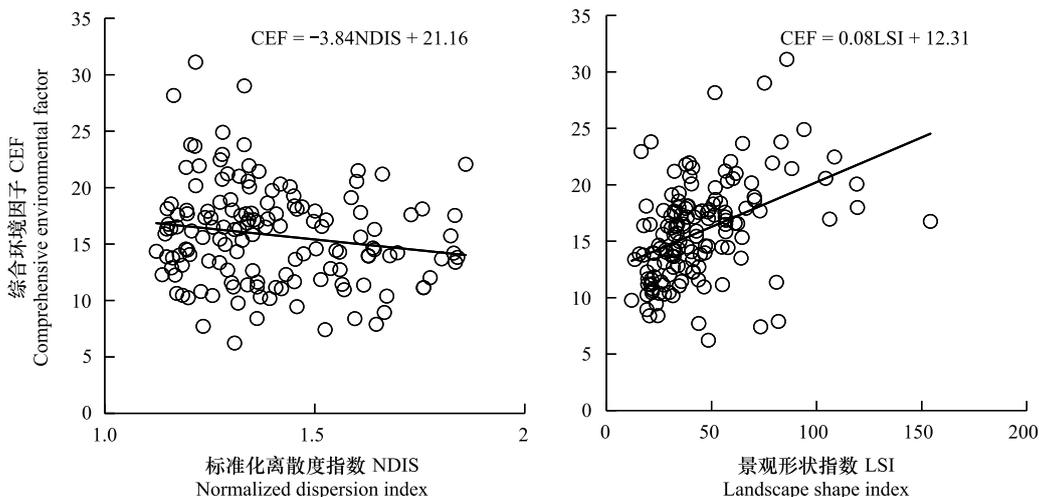


图 1 形态指标与综合环境因子的回归模型

Fig.1 Regression model of morphological index and comprehensive environmental factor

对城市紧凑度聚类及形状复杂性聚类的单因素方差分析及比较均值表明:3 种紧凑水平下,万人拥有公交车辆、万人拥有出租车辆及综合环境因子具有显著性差异(图 3)。从类型 1 到类型 3,万人拥有公交车辆分别是 11、14、16 辆;万人拥有出租车辆分别是 22、24、29;综合环境因子分别是 14.32、15.98、16.77,数值较为接近。由于综合环境因子中交通指标的权重较大,因此,城市紧凑度越高,公共交通越发达。3 种形状复杂度类别下,供水管密度、万人拥有出租车辆、综合环境因子差异显著(图 3)。从类型 1 到类型 3,供水管密度分别是 20.16、11.07、12.44;出租车辆分别是 25、33、22;综合环境因子分别是 19.27、16.48、14.91。城市形状越复杂,供水管道的密度也就越大。形状指数越简单,出租车的数量就越多。出租车的数量与人口密度、用地功能布局密切联系,它能够代表城市出行方式的人为选择和市场经济适应过程,所以形状简单的城市越有利于经营性交通工具的发展。形状相对复杂的类型 1 城市综合环境投入最大,形状中等复杂和形状简单的城市综合环境投入较为接近。

### 3 讨论

本文研究对城市空间形态的环境效应进行分析,所选形态指标不受城市规模及经济发展的影响。因此,

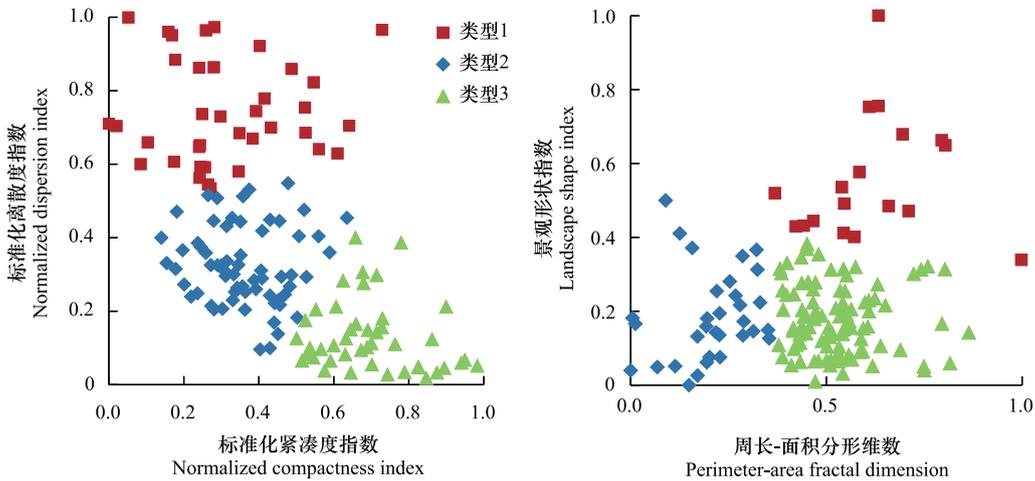


图 2 城市紧凑聚类与形状复杂性聚类

Fig.2 Urban compact clustering and shape-complexity clustering

类型 1:Type 1;类型 2:Type 2;类型 3:Type 3

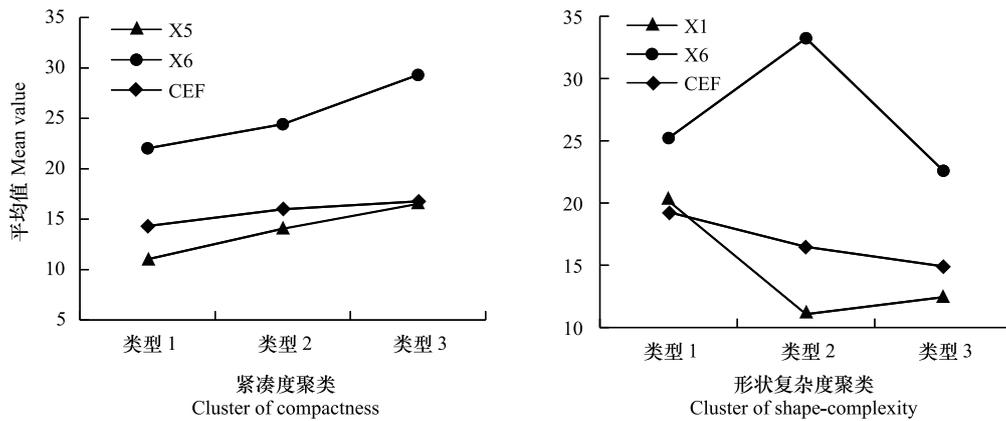


图 3 紧凑度聚类和形状复杂性聚类的环境因子均值

Fig.3 The mean value of environmental factors in clusters of compactness and shape-complexity

并未发现城市空间紧凑性和形状复杂性存在较为显著的东西差异、区位差异及规模差异。城市形态紧凑及形状简单是较为可持续的城市形态,那么 146 座城市中同时处于紧凑度聚类类型 3 及形状复杂性聚类类型 2 的城市包含:鞍山市、包头市、保定市、大同市、商丘市、石家庄市、天津市、乌鲁木齐市、西安市、长春市、郑州市、东莞市、福州市。这些城市以北方平原城市为主,突出反映了地形对城市空间形态的影响;其余城市在紧凑性或者形状复杂性方面存在不同程度的形态缺陷,需要根据城市现状进行一定的形态调整。

环境因子指标集的建立来源于对统计年鉴数据的整理,研究结果依赖统计年鉴数据的准确性。通过 0.05 显著性检验的情况下,空间形态指标与环境因子的相关系数  $r$  的绝对值小于 0.5,在有些情形下可以认定为弱相关甚至是不相关<sup>[22]</sup>。即使不存在数值上的相关性,也并不代表两种事物之间绝对不相关。空间形态指标与环境因子的相关系数  $r$  虽然值偏小,在城市间统计数据口径不完全统一的情况下是可以接受的。马丽和金凤君曾认为中国城市的紧凑度与人口规模、经济规模、人均资源消耗及污水排放均不存在密切联系<sup>[24]</sup>。而在本文研究中,存在 6 个与紧凑度密切相关的资源消耗、环境污染产生的过程性因子。对与形态指标不存在相关性的公交系统效率分析可知,因为城市发达程度及区位条件存在差别,公交车在城市中是否为主导型运载工具并不统一。城市地铁、私人汽车、电动车等其他交通方式对城市出行起到了决定性的分流,公交系统效率只能部分表示城市的公共系统效率,因此该指标未存在相关性具有一定的合理性。建成区绿化覆盖率、生活

垃圾处理率、污水处理率等因子是对环境要素在不同维度的占比进行计算而非平均分配,因此没有直接关联。以建成区面积、城区人口为基数求取基础设施分配的密度和数量,间接表明空间形态与人口、面积的相关性。城市管网、公共交通与城市的形态联系最紧密,当城市布局较为紧凑时,有利于实现管网、道路网的连通,公交车的最短路径规划及数量的合理配置。城市不紧凑、形状复杂的情况下,人口低密度区的公交可达性较差,最终影响城市的可持续发展。另外,城市空间形态越紧凑人均公园绿地面积越少表明了紧凑城市的一部分负面环境效应,城市中绿地生态系统的缺乏有可能存在城市内涝、热岛效应等生态风险。

#### 4 结论

从土地利用的角度讲,城市越紧凑土地资源越是节约。我们对紧凑状态下可能产生的环境效应一直不够清晰,也就无从掌握紧凑城市建设的具体方案。本文采集了城市管网设施、城市道路、交通设施、生态协同等指标建立环境因子指标集,选择 NCI、NDIS、LPI、LSI、SHAPE\_MEAN、PAFRAC 等形态指标从宏观尺度上考察城市空间形态的环境效应。城市空间形态指标与单因子环境效应的关系表明,NCI 与供水管密度负相关,与万人拥有出租车辆正相关;NDIS 与万人拥有公交车辆负相关,与人均公园绿地面积正相关;LPI 与供水管密度负相关,与人均公园绿地面积负相关。城市的形状指数 LSI 与供水管道密度、排水管道密度、万人拥有公交车辆显著性正相关;PAFRAC 与人均城市道路面积、供水管密度、排水管密度具有正相关,与万人拥有出租车数量负相关。总体而言,城市紧凑度越高,城市管网密度越低,万人拥有公交车数量越少、出租车数量越多,人均公园绿地面积越少。城市形状越复杂,城市管网密度越高,万人拥有公交车数量越多、出租车数量越少,人均公园绿地面积越大。城市空间形态的综合环境因子效应分析同样证明,城市空间形状越复杂,综合环境因子得分越高,城市资源环境相关设施总体投入越多。城市形态紧凑及形状简单的城市包含鞍山市、包头市、保定市、大同市、商丘市、石家庄市、天津市、乌鲁木齐市、西安市、长春市、郑州市、东莞市、福州市。本文研究为城市紧凑性建设提供了密切相关的具体环境因子,佐证了城市空间形态越紧凑资源越是节约,但存在一定的生态风险的一般结论。中国城市化在呈现加速、集群发展的同时,城市化过程的资源与生态环境效应也会出现较强的空间差异。如何用紧凑城市理论指导建设每个城市,需要结合城市空间结构的异质性进行多尺度研究。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Chen H Y, Jia B S, Lau S S Y. Sustainable urban form for Chinese compact cities: challenges of a rapid urbanized economy. *Habitat International*, 2008, 32(1): 28-40.
- [ 2 ] Shen Y, Kwan M P, Chai Y W. Investigating commuting flexibility with GPS data and 3D geovisualization: a case study of Beijing, China. *Journal of Transport Geography*, 2013, 32: 1-11.
- [ 3 ] Chen R J, Zhang Y H, Yang C X, Zhao Z H, Xu X H, Kan H D. Acute effect of ambient air pollution on stroke mortality in the China air pollution and health effects study. *Stroke*, 2013, 44(4): 954-960.
- [ 4 ] Li M N, Zhang L L. Haze in China: current and future challenges. *Environmental Pollution*, 2014, 189: 85-86.
- [ 5 ] Guan W J, Zheng X Y, Chung K F, Zhong N S. Impact of air pollution on the burden of chronic respiratory diseases in China: time for urgent action. *The Lancet*, 2016, 388(10054): 1939-1951.
- [ 6 ] Maji K J, Dikshit A K, Arora M, Deshpande A. Estimating premature mortality attributable to PM<sub>2.5</sub> exposure and benefit of air pollution control policies in China for 2020. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 683-693.
- [ 7 ] Setälä H, Bardgett R D, Birkhofer K, Brady M, Byrne L, De Ruiter P C, De Vries F T, Gardi C, Hedlund K, Hemerik K, Hotes S, Liiri M, Mortimer S R, Pavao-Zuckerman M, Pouyat R, Tsiafouli M, Van Der Putten W H. Urban and agricultural soils: conflicts and trade-offs in the optimization of ecosystem services. *Urban Ecosystems*, 2014, 17(1): 239-253.
- [ 8 ] 龙惟定, 白玮, 梁浩, 范蕊, 张改景. 低碳城市的城市形态和能源愿景. *建筑科学*, 2010, 26(2): 13-18, 23-23.
- [ 9 ] Dong W H, Liu Z, Zhang L J, Tang Q H, Liao H, Li X E. Assessing heat health risk for sustainability in Beijing's urban heat island. *Sustainability*, 2014, 6(10): 7334-7357.
- [ 10 ] Ma W J, Zeng W L, Zhou M G, Wang L J, Rutherford S, Lin H L, Liu T, Zhang Y H, Xiao J P, Zhang Y W, Wang X F, Gu X, Chu C. The

- short-term effect of heat waves on mortality and its modifiers in China: an analysis from 66 communities. *Environment International*, 2015, 75: 103-109.
- [11] He C Y, Liu Z F, Tian J, Ma Q. Urban expansion dynamics and natural habitat loss in China: a multiscale landscape perspective. *Global Change Biology*, 2014, 20(9): 2886-2902.
- [12] Bu H M, Meng W, Zhang Y, Wan J. Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China. *Ecological Indicators*, 2014, 41: 187-197.
- [13] 岳宜宝. 紧凑城市的可持续性 with 评价方法评述. *国际城市规划*, 2009, 24(6): 95-101.
- [14] Zuo X, Hua H, Dong Z F, Hao C X. Environmental performance index at the provincial level for China 2006-2011. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 48-56.
- [15] 黄永斌, 董锁成, 白永平, 李俊, 毛琦梁. 中国地级以上城市紧凑度时空演变特征研究. *地理科学*, 2014, 34(5): 531-538.
- [16] 刘勇. 城市形态与城市物质代谢效率的相关性分析. *城市发展研究*, 2010, 17(6): 27-31.
- [17] Liu Y, Song Y, Arp H P. Examination of the relationship between urban form and urban eco-efficiency in China. *Habitat International*, 2012, 36(1): 171-177.
- [18] 祖佳嬉, 叶长盛. 江西省城市紧凑度综合测度与分析. *东华理工大学学报: 社会科学版*, 2013, 32(3): 338-344.
- [19] 李海峰. 城市形态、交通模式和居民出行方式研究. 南京: 东南大学, 2006.
- [20] 赵景柱, 宋瑜, 石龙宇, 唐立娜. 城市空间形态紧凑度模型构建方法研究. *生态学报*, 2011, 31(21): 6338-6343.
- [21] 贾玉秋, 唐立娜, 桂柳鸣. 城市空间形态离散度指数 NDIS 构建与应用. *生态学报*, 2018, 38(20): 7269-7275.
- [22] 布仁仓, 胡远满, 常禹, 李秀珍, 贺红土. 景观指数之间的相关分析. *生态学报*, 2005, 25(10): 2764-2775.
- [23] 邬建国. *景观生态学: 格局、过程、尺度与等级 (第二版)*. 高等教育出版社, 2007.
- [24] 马丽, 金凤君. 中国城市化发展的紧凑度评价分析. *地理科学进展*, 2011, 30(8): 1014-1020.