

国内外大城市的城市森林时空变化对比研究

段倩雯^{1,2}, 谈明洪^{1,3*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院大学国际学院, 北京 100190)

摘要:城市森林在减弱噪声、净化空气、调节城市气温等方面具有十分重要的作用。中国城市正处于快速发展阶段,对国内外大城市的城市森林现状及其时空变化进行对比分析可为中国城市森林的建设提供理论借鉴。跨区域城市森林对比研究的主要困难在于城市区域定义的差异导致不同城市之间可比性差。论文利用强度梯度法,基于夜间灯光影像及GlobeLand30地表覆盖产品,提取12个国内外大城市2000年和2010年的城市森林数据,探究其时空变化。结果表明,从现有城市森林量看,城市森林覆盖率及人均城市森林面积在发达国家城市中普遍偏高,而在亚洲发展中国家城市中非常低,例如纽约的人均城市森林面积高达316.5 m²,而上海、新德里和雅加达则低于2 m²。从时间变化看,2000—2010年城市森林面积增长率在发达国家城市中均小于70%,而在大部分发展中国家城市超过了100%。城市森林增加的最主要来源是城市面积扩张,减少的主要原因是转为硬化地面和城市草地。按照基于缓冲区分析得到的城市森林空间分布格局,这些城市可以分为3类:中心城区高、周边城区低(北京、首尔),中心城区低、周边城区高(广州、东京、圣保罗等),整个城区均低(上海、新德里、雅加达)。最后,基于对比结果为中国城市森林未来的发展提供了建议。

关键词:城市森林;时空变化;夜间灯光强度梯度;国内外大城市

21世纪以来,全球范围内城市化进程显著加快^[1-2]。1950—2018年,世界城市人口从7.5亿增长到42.0亿,预计到2050年,城市人口将再增加25.0亿,其中中国预计增加2.6亿^[3]。快速城市化带来了生物多样性减少^[4-5]、空气质量恶化^[6]、热岛效应^[7]等诸多城市问题,城市森林提供的生态系统服务可以有效缓解上述问题^[8-9]。城市森林定义为城市区域内的森林,包括公园森林和城郊森林^[8-10]。它们通过拦截空气中的颗粒物质和吸收气体化合物减轻空气污染^[11-12],通过固碳作用缓解温室效应^[13-14],调节城市气温^[15],减弱噪声^[16];为城市中的一些动物提供了庇护所,缓解了城市生态系统中生物多样性的流失^[17];并对居民的心理健康、社会凝聚力等具有积极影响^[18-19]。因此,2018年世界森林日的主题定为“森林与可持续城市”^[9]。中国自2004年起也开展

了“国家森林城市”的评选工作^[20]。保护并增加城市森林,以改善城市生态环境,提高城市居民的福祉^[9]已经成为全世界城市发展的共识。

目前,数据调查统计,遥感解译与无人机拍摄等方法均被用来获取城市森林的覆被信息。Nowak等^[21]整理了美国58个城市的城市森林布局,这些数据多来自航片判读;吴泽民等^[22]、Canetti等^[23]分别使用TM影像和SPOT 5高分辨率影像与实地调查结合,绘制了中国合肥市和巴西某城市的城市土地利用现状,观察城市森林覆被情况;Kulhavy等^[24]使用无人机技术,获取并评估城市区域树木的状况。目前的研究中,基于空间数据的城市森林分析大多针对单个城市,对不同国家城市的对比研究较为缺乏,主要是因为世界范围内对城市区域的定义不同^[25]。例如在美国,城市多以功能地域和实体地域进行划

收稿日期:2019-03-11;修订日期:2019-04-13。

基金项目:国家自然科学基金项目(41771116)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41771116.]

第一作者简介:段倩雯(1994—),女,山西太原人,硕士生,主要从事土地利用与土地变化研究。E-mail: qwduan2013@163.com

*通信作者简介:谈明洪(1970—),男,江苏涟水人,研究员,博士生导师,主要从事土地利用变化、城市用地增长及其效应研究。E-mail: tanmh@igsrr.ac.cn

引用格式:段倩雯,谈明洪. 国内外大城市的城市森林时空变化对比研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(3): 410-419. [Duan Qianwen, Tan Ming-hong. Temporal and spatial changes of urban forests in major cities in China and abroad. Progress in Geography, 2020, 39(3): 410-419.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.03.006

分,而中国以往的城市研究及相关统计资料多基于城市的行政地域^[25]。划定城市范围是有效评估城市森林的重要基础^[26]。为了解决这一问题,本文基于 Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System (DMSP/OLS)夜间灯光影像,使用强度梯度法提取城市区域,该方法可以快速直接地绘制城市区域^[27-29],增强了不同城市的可比性。

尽管中国学界和管理部门已经认识到城市森林的重要性,但是在城市森林领域的相关研究主要集中在城市森林概念的引入^[30-33]、生态功能^[14,34-36]、树种类型^[37-38]及景观评价^[39]等,城市森林的时空变化特征及国内外城市森林差异比较的研究尚显不足。在“国家森林城市”评选工作积极开展的背景下,了解中国大城市的城市森林现状,并与国外大城市进行对比,可为提高中国城市森林提供理论借鉴。

本文基于 DMSP/OLS 夜间灯光影像数据和国家地理信息中心开发的 30 m 分辨率的 GlobeLand 30 地表覆被数据集,重点关注以下几个问题:① 利用夜间灯光影像和强度梯度法确定城市范围,进而提取城市森林;② 比较国内外大城市的城市森林时空变化;③ 为中国城市森林未来的发展提供借鉴。

1 数据及方法

1.1 数据

1.1.1 城市森林

提取城市森林需要的数据包括 2000、2010 年 2 期的 DMSP/OLS 夜间灯光影像及 GlobeLand30 地表覆被数据产品。

DMSP/OLS 夜间灯光影像数据下载自美国国家地球物理数据中心(NGDC)网站(<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html>),由国防气象卫星计划(DMSP)F18 获得。影像排除了日照、月光和云的影响,空间分辨率为 1 km,几乎覆盖了地球存在人类活动的所有区域。每个像素用 0~63 的数字编号(DN 值)表示,代表平均灯光强度^[40]。

森林覆被数据来自 GlobeLand30 地表覆被产品,下载自中国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn/commres.do?method=globeIndex>)。这是中国科学技术部发布的 30 m 空间分辨率的全球土地利用数据。其森林的定义为:乔木覆盖且植被盖度大于 30% 的土地^[41]。经过验证,GlobeLand30

的总体分类精度大于 80%,2010 年森林的精度达到 89.0%^[41-42]。

基于上述数据,本文将城市森林定义为城市区域内乔木覆盖且植被盖度大于 30% 的土地利用类型。

1.1.2 研究对象

参考 2017 年度发布的 Demographia World Urban Areas 报告中统计的世界城市建成区排行榜^[43],结合各国的地理位置,选择中国的北京、上海、广州以及国外的 9 个城市:东京、首尔、新德里、雅加达、圣保罗、拉各斯、纽约、伦敦、莫斯科作为研究对象(图 1),这些城市几乎在各大洲均有分布,既有发达国家城市,又包括发展中国家城市。

1.1.3 人口数据

基于本文提取的城市区域,使用美国国家航空航天局(NASA)经济社会数据和应用中心(SEDAC)发布的第 4 版世界人口格网数据集(gridded population of the world, version 4),提取 2000 年和 2010 年的城市人口。该数据下载自 <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4>,空间分辨率为 30 弧秒,是来自人口和住房普查的全球国家人口网络数据产品^[44]。

1.2 方法

1.2.1 城市森林提取

本文使用强度梯度法,基于 DMSP/OLS 夜间灯光影像数据提取城市区域^[45]。强度梯度(IG)被定义为在相应空间范围内从某点到其邻近区域夜间灯光强度的最大变化率,且 $\arctan(IG)$ 被定义为坡度。具体步骤为:① 提取坡度 $> 89.85^\circ$ 的区域作为城区边界;② 提取 DN 值 > 30 的区域为城市中心,弥补有些城区边界不闭合,在转为 polygon 时可能会丢失的问题^[45]。两者融合为本文所需的城市区域。该方法基于以下假设:城市与其周边地区的夜间灯光强度(NTLI)值有巨大差异,故在城市的边缘,存在一个灯光强度值急剧变化的区域(图 1)。

将城市区域作为掩膜,使用 ArcGIS 的提取工具,从 GlobeLand30 中得到城市森林(图 2)。

1.2.2 相关指标

参考土地利用变化相关的指数方法^[46],核算各城市 2000 年城市区域(即原城区,图 1 中 A 区域),2000—2010 年新增城市区域(图 1 中 B 区域),及 2010 年城市区域(图 1 中 A+B 区域)的城市森林面积及其变化。

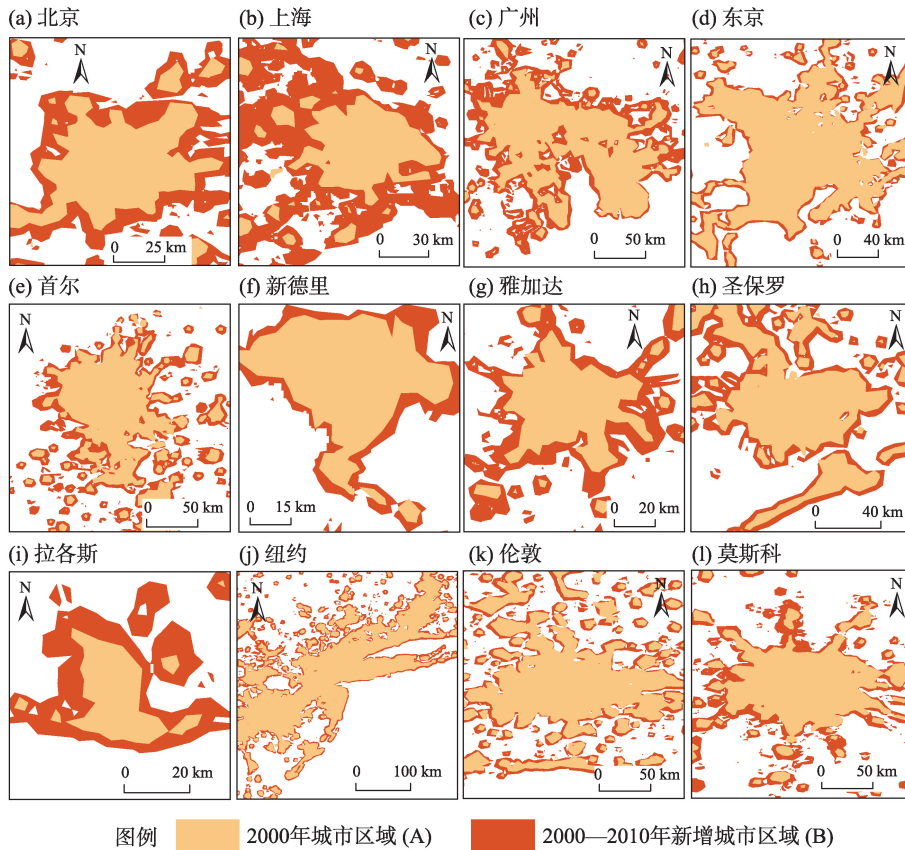


图1 12个城市的城市区域
Fig.1 Urban areas of the studied cities

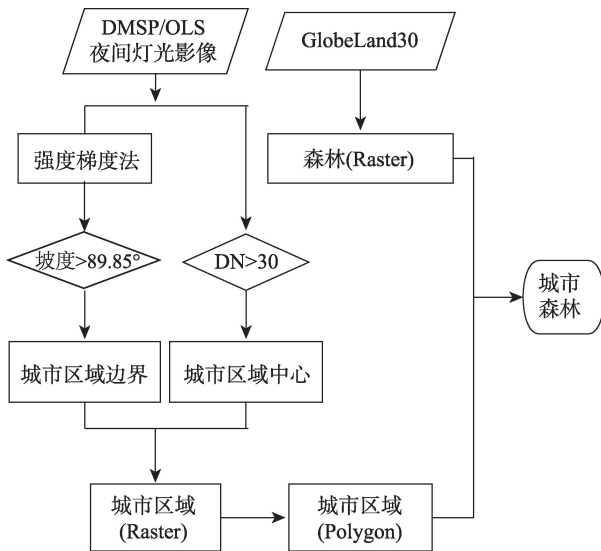


图2 提取城市森林的技术路线
Fig.2 Technical routes for extracting urban forests

城市森林覆盖率 f 为:

$$f = \frac{S_{uf}}{S_u} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S_u 为城市区域面积, S_{uf} 为城市森林面积。

2000—2010年城市森林面积增长率 r (以下统称为增长率)为:

$$r = \frac{S_{uf(A+B)} - S_{uf(A)}}{S_{uf(A)}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $S_{uf(A)}$ 为2000年城市森林面积, $S_{uf(A+B)}$ 为2010年城市森林面积。

城市森林的总变化面积 SC 为:

$$SC = S_{uf(A+)} - S_{uf(A-)} + S_{uf(B)} \quad (3)$$

式中: $S_{uf(A+)}$ 为原城区城市森林增加的面积, $S_{uf(A-)}$ 为原城区城市森林减少的面积, $S_{uf(B)}$ 为2000—2010年新增城市区域内的城市森林面积。

新增城市区域内城市森林面积占城市森林总变化面积的比例 t (以下统称为城市扩张增比)为:

$$t = \frac{S_{uf(B)}}{SC} \times 100\% \quad (4)$$

1.2.3 缓冲区分析

为探究各城区内城市森林的空间分布变化,以城市区域的几何中心点为圆心,以2010年城区半径的五等分分别在每个城市内做5个缓冲区,如图3所示。

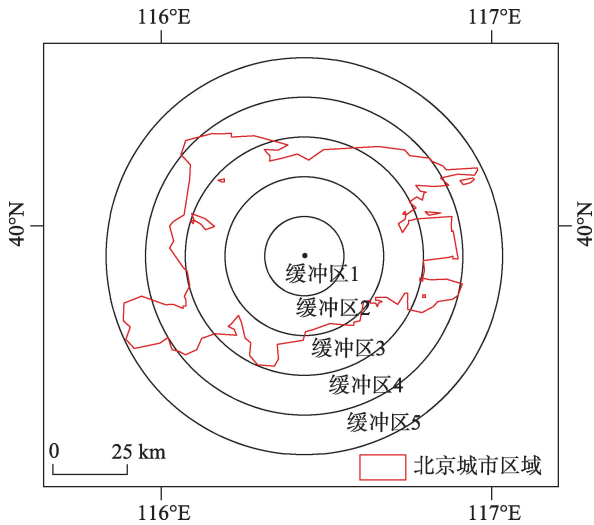


图3 缓冲区分析示意图(以北京为例)

Fig.3 Schematic diagram of buffer analysis (taking Beijing as an example)

2 城市森林的时空变化

2.1 数量变化

图4和表1显示,2010年城市森林覆盖率低于10.0%的均为亚洲发展中国家城市,其中上海、新德里和雅加达城市森林覆盖率极低,不到1.0%。城市

森林增长率与城市的发展情况有关。2000—2010年,增长率大于100%的城市有:北京、上海、新德里、圣保罗和拉各斯,为发展中国家城市。增长率低于70%的城市有:纽约、雅加达、伦敦、东京和首尔,除雅加达外,为发达国家城市。

新增城市区域内城市森林面积占城市森林总变化面积的比例在所有城市中均大于50%,其中最低的是圣保罗,为67.7%;最高的是上海,为138.8%。城市扩张将城市区域外围的森林纳入城市范围内,使城市森林覆盖提高。北京、广州、圣保罗、拉各斯和伦敦的城市扩张增比小于100%,原城区内城市森林面积净增加。上海、纽约等剩余7个城市的城市扩张增比大于100%,新增城区内的城市森林弥补了原城区内城市森林的减少,使其呈现出总体增加的趋势。

图5显示,广州、莫斯科、首尔和纽约的人均城市森林面积均超过50 m²。其中,纽约在2000年和2010年的人均城市森林面积均最大,在2010年高达316.5 m²。最低的是上海、新德里和雅加达,人均城市森林面积均不足2 m²。另外,北京的人均城市森林面积也偏低,仅为17.8 m²。

谭纵波^[47]的研究结果显示,为维持城市中二氧

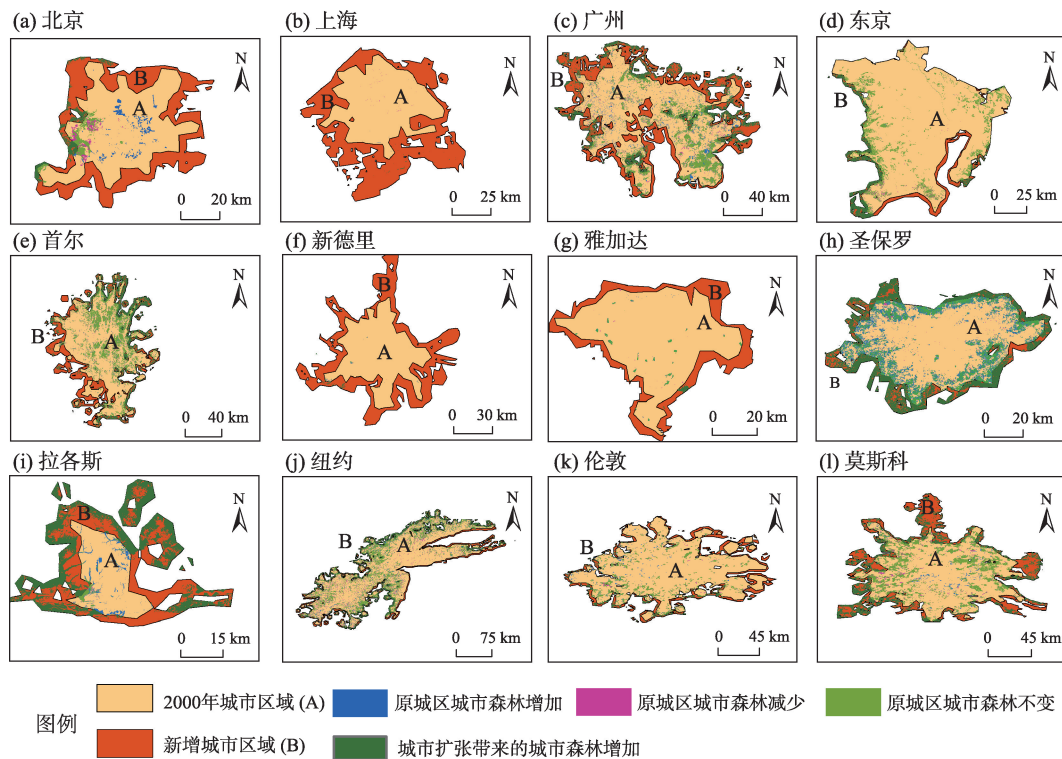


图4 各城市2000—2010年城市森林变化

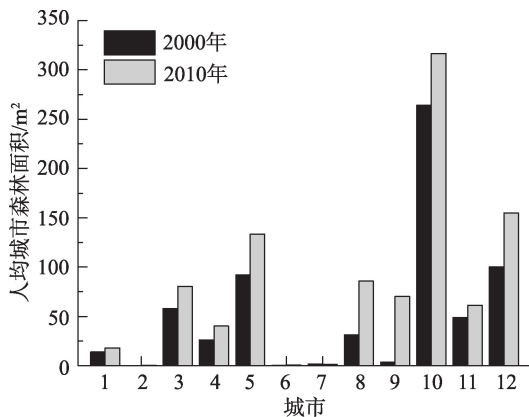
Fig.4 Changes of urban forests from 2000 to 2010

表1 各城市的城市森林覆盖率及面积变化

Tab.1 Changes of urban forest coverage and areas

城市	城市森林覆盖率/%		城市森林面积/km ²			变化指数		
	2000年	2010年	A区		B区	SC/km ²	r/%	t/%
			增加	减少	增加			
北京	6.0	7.0	79.0	44.5	120.7	155.3	104.1	77.7
上海	0.1	0.1	1.1	2.4	4.6	3.3	137.6	138.8
广州	19.5	23.3	460.0	284.1	1837.8	2013.8	94.6	91.3
东京	9.8	13.6	10.7	46.3	405.7	370.0	57.2	109.6
首尔	26.4	29.6	132.6	134.5	1232.8	1230.9	65.0	100.2
新德里	0.2	0.3	1.5	1.6	9.8	9.8	248.9	100.5
雅加达	1.1	1.0	2.9	4.2	9.3	8.0	31.5	116.7
圣保罗	17.6	40.1	379.0	27.3	737.0	1088.7	201.0	67.7
拉各斯	3.2	35.7	39.3	2.0	586.0	623.4	3658.0	94.0
纽约	29.6	30.2	757.4	1190.2	2133.9	1701.1	25.5	125.4
伦敦	8.9	10.5	104.5	54.3	194.1	244.3	40.5	79.4
莫斯科	24.2	29.2	93.6	128.2	1091.2	1056.6	85.2	103.3

注: A区指2000年城市区域(原城区), B区指2000—2010年新增城市区域, SC为城市森林总变化面积, r 为增长率, t 为城市扩张增比。



注: 1、2……12分别为北京、上海、广州、东京、首尔、新德里、雅加达、圣保罗、拉各斯、纽约、伦敦和莫斯科。

图5 2000、2010年各城市的人均城市森林面积

Fig.5 Per capita urban forest areas in 2000 and 2010

化碳和氧气的平衡至少需要人均30 m²的城市森林面积。2010年,北京、上海、新德里和雅加达这4个亚洲发展中国家城市的人均城市森林面积远未达到这个数值。

2.2 类型变化

12个城市中,原城区内减少的城市森林的主要去向为硬化地面和城市草地(表2)。城市人口的迅速增加产生了更多硬化地面的需求,挤占了城市森林的空间^[48]。Fuller等^[48]的研究显示,城市绿地随着城市人口密度的增加而下降。城市森林转为城市草地反映了在城市建设中,由于草地个体小、生长速度快,可以在短时间内达到较好的观赏效果^[49],因此更倾向于增加城市草地以提高城市绿地指标,

忽视了城市森林对城市生态环境不可替代的作用。根据王洪俊^[34]的研究结果,草坪增加空气负离子的效果不明显,而针阔混交林和人工阔叶林可以有效地改善空气质量。Armson等^[50]的研究结果显示,城市草地对城市气温变化几乎没有影响,而城市森林可以使其下降5~7℃,并且拥有遮蔽效果。增加的城市森林面积主要来自城市耕地,与人为造林活动有关。

2.3 空间变化

图6显示了除城市森林覆盖率极低的上海、新德里和雅加达外,其余9个城市基于缓冲区分析的城市森林空间变化。12个城市的城市森林空间分布大致可以分为以下3类:

(1) 研究中的大部分城市(广州、东京、圣保罗、拉各斯、纽约、伦敦和莫斯科)由中心城区向外,城市森林比例显著增加。增速最快的是东京和圣保罗,其城市中心与周边地区的城市森林覆盖率差异最大。在这2个城市的中心点附近,城市森林覆盖率不足2.0%,而在城市边缘地区,东京的城市森林覆盖率为14.6%,圣保罗达到40.1%。

(2) 北京和首尔的城市森林覆盖率在中心城区高,周边城区相对较低。北京的城市森林覆盖率在中心城区(距城市中心点11 km的区域内)最高,在第二个缓冲区(距城市中心点23 km的区域内)骤降,之后呈现微弱的上升趋势,但在城区最外围仍旧低于中心区。首尔的城市森林覆盖率由中心城区向外,一直呈现下降趋势。这2个城市在早期的

表2 原城区内城市森林的最大转出与转入
Tab.2 Maximum transfer of urban forests in the original urban areas

城市	最大转出			最大转入		
	地类	面积/km ²	占原城区减少比例/%	地类	面积/km ²	占原城区增加比例/%
北京	硬化地面	43.2	97.2	城市耕地	68.1	86.2
上海	硬化地面	1.8	73.5	城市耕地	1.0	92.5
广州	城市草地	122.6	43.2	城市草地	158.0	34.3
东京	城市耕地	9.4	87.9	城市灌木	28.0	62.0
首尔	城市草地	66.2	49.2	城市耕地	64.8	48.9
德里	城市草地	1.5	91.7	城市草地	1.4	93.9
雅加达	水体	1.3	29.9	城市耕地	0.9	46.1
圣保罗	硬化地面	13.0	47.5	城市灌木	183.9	48.5
拉各斯	城市灌木	1.2	59.6	城市草地	16.1	40.9
纽约	硬化地面	561.7	47.2	硬化地面	317.4	41.9
伦敦	城市耕地	35.7	65.7	城市耕地	66.2	63.4
莫斯科	硬化地面	70.6	55.0	城市耕地	50.6	54.0

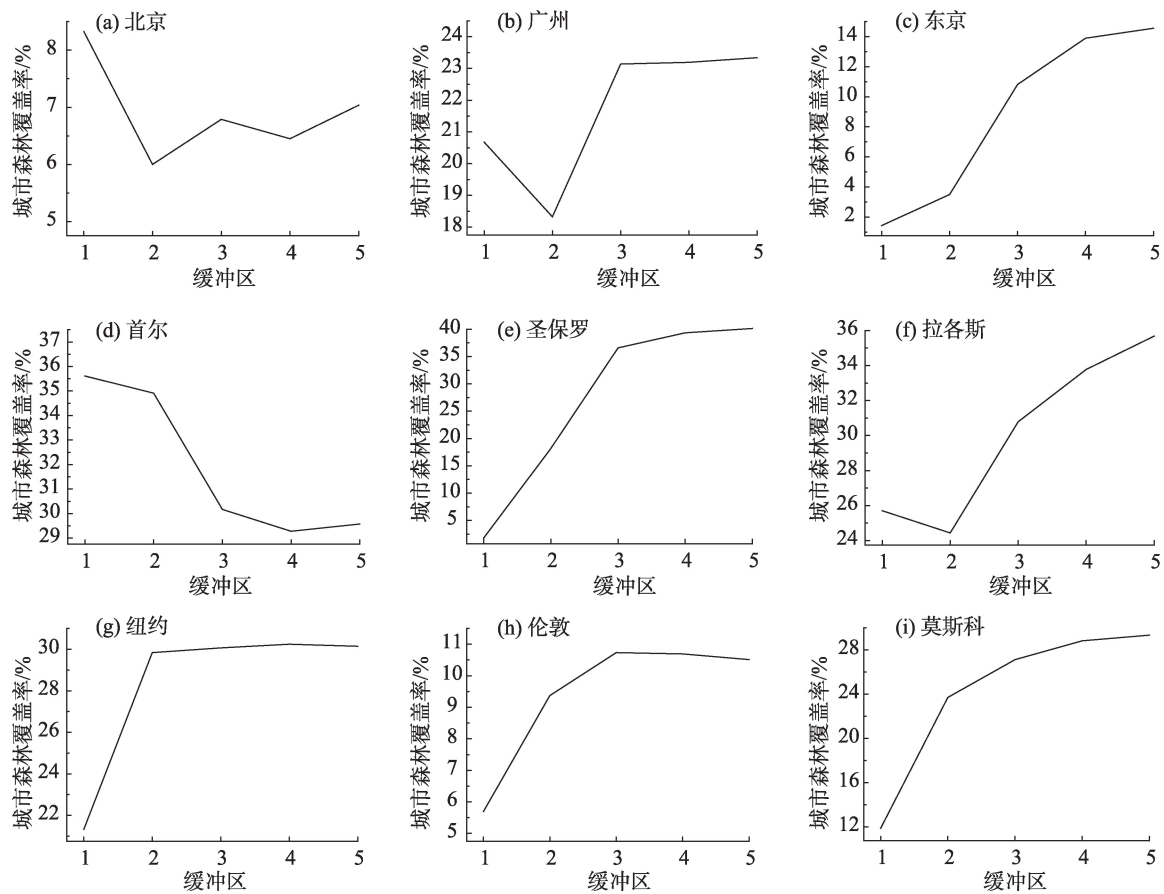


图6 2010年各城市的内部城市森林空间变化

Fig. 6 Spatial changes of urban forests within each city in 2010

规划中,注重城市森林的保护与增加,然而随着城市的扩张与发展,在新城区建设中没有对城市森林予以重视。

(3) 上海、新德里和雅加达在整个城区内城市森林覆盖率极低。

3 讨论及启示

基于国内外城市森林的对比结果,可为中国未来城市森林建设提供几点启示。

(1) 国内城市森林覆盖率偏低,城市森林建设

亟需重视。2010年,北京和上海的城市森林覆盖率分别为7.0%和0.1%,人均城市森林面积分别为17.8 m²和0.3 m²,与国外大城市还有明显差距。许多研究证明,城市森林覆盖率与气候因素呈显著相关^[21,51]。根据柯本气候分类法,北京与首尔同属于冷温带气候,上海与纽约同属于温暖带气候^[52],而首尔和纽约的城市森林覆盖率均高于30%,前者的人均城市森林面积为133.4 m²,是北京的7.5倍,后者高达316.5 m²,是上海的1000多倍。北京和上海应注意与发达城市间人均城市森林面积的差距。园林绿化局、自然资源和规划局等相关机构需要积极推进城市内部森林的建设和保护工作,并为城市森林的建设提供充足的土地和资金。

(2) 制定城市规划时,注意城市森林建设。北京中心城区的城市森林覆盖率高于周边地区。从图4a看到早期北京城市区域内,硬化地面与城市森林相互融合。而在后期扩张的城市区域中,绿色斑块变得稀缺起来。国外许多城市在现代城市规划中,都注意对城市森林的保留和增加,由城市中心向外,城市森林比例有显著增加的趋势。在中国城市中这种趋势并不明显。当前,中国依旧处在城市高速发展过程中,有关规划部门在制定城市发展中长期规划时,应该将城市森林覆盖率作为一项指标,保证新扩张城区的城市森林面积,合理规划绿地结构。此外,本文结果显示同一城市内部不同缓冲区森林空间分布差异也很明显,因此有关机构在拟定城市绿化计划前要充分调查与研究,加强科学研究,把握城市内部的林地数量与空间分布格局,针对性地提高现有城市森林较少区域的城市森林覆盖率。

(3) 控制现有城区中城市森林的流失。由于城市扩张,本文研究的12个城市的城市森林总面积均呈增长趋势,但部分城市原城区内城市森林为负增长,被占用为硬化地面和草地。在中国未来的城市森林建设中需要协调好硬化地面和城市森林的关系,园林绿化局等相关机构可以细化对于违法损坏或占用城市森林的处理办法,制定城市绿化的保护与管理政策,阻止已有城市森林的破坏。

尽管中国土地数量紧缺,但城市是人口高度集中的场所,不能在城市扩展中忽视城市生态环境和城市居民对城市森林的需求^[53]。建设“国家森林城市”的背景下,各城市的管理部门应继续落实相应的职责,做好城市森林的建设、管理、维护工作。

本文的城市森林定义与一些研究中把城市森林定义为城市区域内所有类型的植被不同^[51]。许多学者的研究证明草地对生态环境影响有限^[50]。另外,该数据集也有许多局限性。首先,土地覆被数据集的空间分辨率为30 m,许多街道树木和新生的森林无法识别,可能低估了城市森林面积。其次,二维遥感图像中无法获取树木高度、树冠深度等信息,因此本文仅从城市森林数量上进行分析,不包括城市森林质量的评估。由于现阶段对中国城市森林数量认识有限且缺乏与国外城市的对比,本文仅基于可比性较强的数据呈现了这些差异,为提高中国城市森林覆盖率提供了理论依据。

另外,本文仅从时空变化特征的角度研究国内外城市森林的差异,这种差异的驱动因素还需要深入探索。城市森林是当前世界城市发展的需求,关系到居民的福祉。基于生态服务功能的中国城市森林质量评价会在今后的工作中进一步研究。

4 结论

本文基于夜间灯光影像和强度梯度法提取城市范围,结合GlobeLand30地表覆被产品,提取国内外的城市森林数据,增强了不同国家城市森林覆盖率的可比性。通过分析12个国内外大城市的城市森林时空变化与差异,为中国城市森林的发展和规划提供借鉴。主要结论包括:

(1) 从城市森林覆盖面积看,发达国家城市的城市森林覆盖率普遍较高,发展中国家城市较低。一些亚洲发展中国家城市仅约为1%。

(2) 人均城市森林面积的差异也非常显著。纽约人均城市森林面积高达316.5 m²,而上海、新德里和雅加达则低于2 m²。

(3) 从城市森林面积变化看,2000—2010年,本文所选的12个城市中,发达国家城市的城市森林增长率均小于70%,而大部分发展中国家城市则超过100%。城市森林增加的主要来源是城市面积的扩张,而流失的主要去向为硬化地面和草地。

(4) 从城市森林覆盖率的时空变化看,这些城市可以分为3类:中心城区高、周边城区低(北京、首尔),中心城区低、周边城区高(广州、东京、圣保罗、拉各斯、纽约、伦敦、莫斯科),整个城区均低(上海、新德里、雅加达)。

参考文献(References)

- [1] Kuchelmeister G. Trees for the urban millennium: Urban forestry update [J]. *Unasylva*, 2000, 51: 49-55.
- [2] Adams S, Klobodu E K M. Urbanization, democracy, bureaucratic quality, and environmental degradation [J]. *Journal of Policy Modeling*, 2017, 39(6): 1035-1051.
- [3] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World population prospects: The 2018 revision, key facts [R]. New York, USA: United Nations, 2018.
- [4] Guetté A, Gaüzère P, Devictor V, et al. Measuring the synanthropy of species and communities to monitor the effects of urbanization on biodiversity [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 79(1): 139-154.
- [5] Xu X, Xie Y, Qi K, et al. Detecting the response of bird communities and biodiversity to habitat loss and fragmentation due to urbanization [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 1561-1576.
- [6] Lin B, Zhu J. Changes in urban air quality during urbanization in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 188: 312-321.
- [7] 季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究 [J]. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 69-77. [Ji Chongping, Liu Weidong, Xuan Chunyi. Impact of urban growth on the heat island in Beijing. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(1): 69-77.]
- [8] FAO. COFO side event on "Urban forests for sustainable cities" [R]. Rome, Italy: FAO, 2016.
- [9] Endreny T A. Strategically growing the urban forest will improve our world [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1). doi: 10.1038/s41467-018-03622-0.
- [10] Salbitano F, Borelli S, Conigliaro M, et al. Guidelines on urban and peri-urban forestry [M]. Rome, Italy: FAO, 2016: 2.
- [11] Yang J, McBride J, Zhou J, et al. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2005, 3(2): 65-78.
- [12] Nowak D J, Hirabayashi S, Doyle M, et al. Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 29: 40-48.
- [13] McPherson G. Urban tree planting and greenhouse gas reductions [J]. *Arborist News*, 2007, 16: 32-34.
- [14] Zhang D, Zheng H F, Ren Z B, et al. Effects of forest type and urbanization on carbon storage of urban forests in Changchun, Northeast China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(2): 147-158.
- [15] Greene C S, Millward A A. Getting closure: The role of urban forest canopy density in moderating summer surface temperatures in a large city [J]. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(1): 141-156.
- [16] Samara T, Tsitsoni T. The effects of vegetation on reducing traffic noise from a city ring road [J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2011, 59(1): 68-74.
- [17] Alvey A A. Promoting and preserving biodiversity in the urban forest [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 5(4): 195-201.
- [18] Annerstedt M, Ostergren P O, Bjork J, et al. Green qualities in the neighborhood and mental health-results from a longitudinal cohort study in southern Sweden [J]. *BMC Public Health*, 2012, 12(1): 12. doi: 10.1186/1471-2458-12-337.
- [19] Nesbitt L, Hotte N, Barron S, et al. The social and economic value of cultural ecosystem services provided by urban forests in North America: A review and suggestions for future research [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 25: 103-111.
- [20] 国家林业局. 国家森林城市评价指标 [J]. *中国城市林业*, 2007, 5(3): 7-8. [The State Forestry Administration of the People's Republic of China. Evaluation index of national forest city. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2007, 5(3): 7-8.]
- [21] Nowak D J, Rowntree R A, McPherson E G, et al. Measuring and analyzing urban tree cover [J]. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 36(1): 49-57.
- [22] 吴泽民, 吴文友, 高健, 等. 合肥市城区城市森林景观格局分析 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2117-2122. [Wu Zemin, Wu Wenyu, Gao Jian, et al. Analysis of urban forest landscape pattern in Hefei. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12): 2117-2122.]
- [23] Canetti A, Garrastazu M C, Mattos Patricia Póvoa de, et al. Understanding multi-temporal urban forest cover using high resolution images [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 29: 106-112.
- [24] Kulhavy D L, Unger D R, Hung I K, et al. Comparison of AR. Drone quadricopter video and the visual CTLA method for urban tree hazard rating [J]. *Journal of Forestry*, 2016, 114(5): 517-523.
- [25] 周一星, 史育龙. 建立中国城市的实体地域概念 [J]. *地理学报*, 1995, 50(4): 289-301. [Zhou Yixing, Shi Yulong. Toward establishing the concept of physical urban area in China. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(4): 289-301.]
- [26] Dwyer J F, Nowak D J, Noble M H, et al. Connecting people with ecosystems in the 21st century an assessment of our nation's urban forests [R]. Portland, USA: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2000: 483.
- [27] Cao X, Chen J, Imura H, et al. A SVM-based method to extract urban areas from DMSP-OLS and SPOT VGT data [J].

- Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10): 2205-2209.
- [28] 王翠平, 王豪伟, 李春明, 等. 基于DMSP/OLS影像的我国主要城市群空间扩张特征分析 [J]. 生态学报, 2012, 32(3): 942-954. [Wang Cuiping, Wang Haowei, Li Chunming, et al. Analysis of the spatial expansion characteristics of major urban agglomerations in China using DMSP/OLS images. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 942-954.]
- [29] Pandey B, Joshi P K, Seto K C. Monitoring urbanization dynamics in India using DMSP/OLS night time lights and SPOT-VGT data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 49-61.
- [30] 朱文泉, 何兴元, 陈玮. 城市森林研究进展 [J]. 生态学杂志, 2001, 20(5): 55-59. [Zhu Wenquan, He Xingyuan, Chen Wei. Advances in urban forest. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(5): 55-59.]
- [31] 李锋, 刘旭升, 王如松. 城市森林研究进展与发展战略 [J]. 生态学杂志, 2003, 22(4): 55-59. [Li Feng, Liu Xusheng, Wang Rusong. Advances in urban forest and its development strategies research. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(4): 55-59.]
- [32] 刘常富, 李海梅, 何兴元, 等. 城市森林概念探析 [J]. 生态学杂志, 2003, 22(5): 146-149. [Liu Changfu, Li Haimei, He Xingyuan, et al. Concept discussion and analysis of urban forest. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(5): 146-149.]
- [33] 王成, 蔡春菊, 陶康华. 城市森林的概念、范围及其研究 [J]. 世界林业研究, 2004, 17(2): 23-27. [Wang Cheng, Cai Chunju, Tao Kanghua. The concept, range and research area of urban forest. *World Forestry Research*, 2004, 17(2): 23-27.]
- [34] 王洪俊. 城市森林结构对空气负离子水平的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(5): 96-98. [Wang Hongjun. Effects of structure of urban forestry on aero-anion concentration. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2004, 28(5): 96-98.]
- [35] 陈辉, 古琳, 黎燕琼, 等. 成都市城市森林格局与热岛效应的关系 [J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4865-4874. [Chen Hui, Gu Lin, Li Yanqiong, et al. Analysis on relations between the pattern of urban forests and heat island effect in Chengdu. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4865-4874.]
- [36] Liu C, Li X. Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2012, 11(2): 121-128.
- [37] 胡志斌, 何兴元, 陈玮, 等. 沈阳市城市森林结构与效益分析 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2108-2112. [Hu Zhibin, He Xingyuan, Chen Wei, et al. Structure and ecological benefits of urban forest in Shenyang build-up area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12): 2108-2112.]
- [38] 朱文泉, 何兴元, 陈玮, 等. 城市森林结构的量化研究: 以沈阳树木园森林群落为例 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2090-2094. [Zhu Wenquan, He Xingyuan, Chen Wei, et al. Quantitative analysis of urban forest structure: A case study on Shenyang arboretum. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12): 2090-2094.]
- [39] 赵清, 郑国强, 黄巧华. 南京城市森林景观格局特征与空间结构优化 [J]. 地理学报, 2007, 62(8): 870-878. [Zhao Qing, Zheng Guoqiang, Huang Qiaohua. Characteristics of urban forest landscape pattern and optimization of urban forest spatial structure: A case study of Nanjing City. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(8): 870-878.]
- [40] Xiang W L, Tan M H. Changes in light pollution and the causing factors in China's protected areas, 1992-2012 [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10). doi: 10.3390/rs9101026.
- [41] Chen J, Cao X, Peng S, et al. Analysis and applications of globeland30: A review [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(8). doi: 10.3390/ijgi6080230.
- [42] 陈军, 陈晋, 廖安平, 等. 全球30 m地表覆盖遥感制图的总体技术 [J]. 测绘学报, 2014, 43(6): 551-557. [Chen Jun, Chen Jin, Liao Anping, et al. Concepts and key techniques for 30 m global land cover mapping. *Acta Geodae-tica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(6): 551-557.]
- [43] Demographia. Demographia world urban areas: 13th annual edition (2017) [Z/OL]. http://demographia.com/media_rls_2017.pdf. 2017.
- [44] Center for International Earth Science Information Network, Columbia University. Gridded population of the world, version 4 (GPWv4): Population count, revision 10 [R]. New York, USA: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), 2017.
- [45] Tan M H. An intensity gradient/vegetation fractional coverage approach to mapping urban areas from DMSP/OLS nighttime light data [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(1): 95-103.
- [46] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论 [J]. 地理学报, 2003, 58(5): 643-650. [Zhu Huiyi, Li Xiubin. Discussion on the index method of regional land use change. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 643-650.]
- [47] 谭纵波. 城市规划 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 303. [Tan Zongbo. *Urban planning*. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2016: 303.]
- [48] Fuller R A, Gaston K J. The scaling of green space coverage in European cities [J]. *Biology Letters*, 2009, 5(3): 352-355.
- [49] 张玲慧, 夏宜平. 地被植物在园林中的应用及研究现状 [J]. 中国园林, 2003(9): 58-61. [Zhang Linghui, Xia Yiping. The application and studied of ground cover plants

- in landscape architecture. *Chinese Landscape Architecture*, 2003(9): 58-61.]
- [50] Armson D, Stringer P, Ennos A R. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2012, 11(3): 245-255.
- [51] Chen W Y, Wang D T. Urban forest development in china: Natural endowment or socioeconomic product? [J]. *Cities*, 2013, 35: 62-68.
- [52] 朱耿睿, 李育. 基于柯本气候分类的1961—2013年我国气候区类型及变化 [J]. *干旱区地理*, 2015, 38(6): 1121-1132. [Zhu Gengrui, Li Yu. Types and changes of Chinese climate zones from 1961 to 2013 based on Köppen climate classification. *Arid Land Geography*, 2015, 38(6): 1121-1132.]
- [53] 李业锦, 张文忠, 田山川, 等. 宜居城市的理论基础和评价研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2008, 27(3): 101-109. [Li Yejin, Zhang Wenzhong, Tian Shanchuan, et al. Review of the theories and methods of livable city. *Progress in Geography*, 2008, 27(3): 101-109.]

Temporal and spatial changes of urban forests in major cities in China and abroad

DUAN Qianwen^{1,2}, TAN Minghong^{1,3*}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. International College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Increasing urbanization is a global phenomenon that has led to numerous urban problems, including noise, deteriorating air quality, and reduced biodiversity. Urban forests are able to effectively alleviate these problems through their ecosystem services. Therefore, in 2018, the theme of the World Forest Day is "Forests and Sustainable Cities"; and China has started the assessment of "National Forest Cities" since 2004. Under this background, examining the distributions of urban forests in major Chinese cities and then comparing them with large foreign cities could help understand the current situation of Chinese urban forests and provide theoretical references for their management. The main difficulty in cross-regional urban forest research is that differences in urban definitions lead to poor comparability between cities. This study used the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) / Operational Linescan System (OLS) nighttime lighting image and the GlobeLand30 surface cover product to extract urban forest data of 12 major international cities (Beijing, Shanghai, Guangzhou, Tokyo, Seoul, New Delhi, Jakarta, Sao Paulo, Lagos, New York, London, and Moscow) in 2000 and 2010 based on the intensity gradient method and using ArcGIS tools, and examined their spatial and temporal changes. The results show that among the 12 cities, from the perspective of existing urban forests, urban forest coverage and per capita urban forest area are generally high in developed cities, while in Asian developing cities they are low. From the perspective of temporal change, the urban forest growth rate of cities in developed countries is mostly less than 70%, while in most cities of developing countries, it is more than 100% during 2000–2010. The major source of the increase is the expansion of urban area, while the decrease is mainly due to the conversion to artificial surface and urban lawn. According to the spatial distribution of urban forest coverage based on buffer analysis, these cities can be divided into three categories: low in the central area and high in the surrounding areas (Beijing and Seoul); low in the surrounding areas and high in the central area (Guangzhou, Tokyo, Sao Paulo, and so on); and low in the whole urban area (Shanghai, New Delhi, and Jakarta). Finally, based on the results of comparison, recommendations for the future development of urban forests in China are provided.

Keywords: urban forests; temporal and spatial changes; intensity gradient of nighttime lighting; major cities in China and abroad