京津冀城市扩张对植被和地表城市热岛的影响

赵安周[1,2],裴 韬[2*],曹 森[3],张安兵[1],范倩倩[1],王金杰[1] (1.河北工程大学矿业与测绘工程学院,河北 邯郸 056038；2.中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101；3.深圳大学,自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室,广东 深圳 518060)

摘要：基于 MODIS-LST、EVI 以及土地利用/覆盖数据,分析了 2000~2015 年京津冀 13 个城市生长季及不同季节城市扩张对植被(ΔEVI)和地表城市热岛影响的时间变化趋势以及二者之间的关系,结果表明,京津冀 13 个城市主城区生长季及不同季节的城市扩张对植被均存在消极影响(ΔEVI<0),对夏季植被的影响最大(ΔEVI=-0.131);白天和夜间的地表城市热岛强度(SUHII)最大值均出现在夏季,分别为 2.594℃和 1.859℃;不同季节的ΔEVI 均值呈现显著下降趋势,其速率分别为-0.0038,-0.0033,-0.0045 和-0.0018/a (*P*<0.01);生长季、春季和夏季白天SUHII均呈显著增加趋势,速率分别为0.076,0.093和0.106℃/a (*P*<0.01),不同季节夜间SUHII均呈显著增加的趋势,其增加速率分别为0.05,0.055,0.049,0.054和0.046℃/a;京津冀13个城市主城区的ΔEVI均值和SUHII均值呈显著负相关(*P*<0.01),其相关系数介于-0.959~-0.592之间;白天SUHII与ΔEVI的相关性最高为生长季(*r*=-0.959),夜间SUHII与ΔEVI的相关性最高为春季(*r*=-0.936).

关键词：地表城市热岛强度；植被；城市化；趋势变化；京津冀

中图分类号：X57 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2020)04-1825-09

Impacts of urbanization on vegetation growth and surface urban heat island intensity in the Beijing-Tianjin-Hebei. ZHAO An-zhou[1,2], PEI Tao[2*], CAO Sen[3], ZHANG An-bing[1], FAN Qian-qian[1], WANG Jin-jie[1] (1.School of Mining and Geomatics, Hebei Universityof Engineering, Handan 056038, China；2.State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China；3.Key Laboratory for Geo-Environmental Monitoring of Great Bay Area, Ministry of Natural Resources, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China). *China Environmental Science*, 2020,40(4)：1825~1833

Abstract：Based on the MODIS land surface temperature (LST) product, Enhanced Vegetation Index (EVI) product and land cover data, the impacts of urbanization on seasonal variations of vegetation growth (ΔEVI) and surface urban heat island intensity (SUHII) during 2000~2015 for thirteen major cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region were analyzed. The results are as follows: urbanization has negative impacts on vegetation growth (ΔEVI<0) in all seasons for the thirteen major cities, and the lowest ΔEVI (−0.131) was found in summer. The highest daytime and nighttime SUHII were also found in summer, and the values was 2.594℃ and 1.859℃, respectively. The average ΔEVI decreased during 2000~2015 with an rate of −0.0038/a, −0.0033/a, −0.0045/a, and −0.0018/a (*P*<0.01) for the growing season, spring, summer, and autumn, respectively (*P* < 0.01). The daytime SUHII from 2000 to 2015 exhibited significant linear increase with a rate of 0.076, 0.093, and 0.106℃/a for growing season, spring and summer, respectively (*P*<0.01). The nighttime SUHII from 2000 to 2015 also exhibited significant linear increase with a rate of 0.05, 0.055, 0.049, 0.054, and 0.046℃/a for growing season, spring, summer, autumn and winter, respectively (*P*<0.01). The ΔEVI had significant negative correlations with all-time SUHII for all the thirteen cities in the Beijing, Tianjin and Hebei region (*P*<0.01), ranging from −0.959to −0.592. The maximum correlation coefficient between the daytime SUHII and ΔEVI was found in the growing season (−0.959), and the maximum correlation coefficient between nighttime SUHII and ΔEVI was found in the spring (−0.936).

Key words：surface urban heat island intensity；vegetation；urbanization；change trend；Beijing-Tianjin-Hebei region

城市化是推动地区社会经济发展的重要举措,是中国实现现代化的必由之路[1].进入 21 世纪以来,中国城镇化水平取得了显著的进步,极大的促进了地区社会经济的发展[2].建设用地的扩张是城市化快速发展的主要标志之一,据统计,2000~2010 年期间中国城乡建设用地面积增加了 $1.61\times10^4 km^2$[3-4].随着大量的植被转换为沥青、水泥等人工建设不透水地面,使得草地、林地等绿地面积大量减少,必然会导致地表热容量增加、吸热率和蒸散发减少,引发

收稿日期：2019-09-20

基金项目：国家自然科学基金重大资助项目(41590845);教育部人文社会科学研究青年基金资助项目(18YJCZH257);河北省普通高等学校青年拔尖人才计划资助项目(BJ2018043);河北省自然科学基金青年资助项目(D2017402159);资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金资助项目

* 责任作者, 研究员, peit@lreis.ac.cn

城市热岛效应(UHI)、植被破坏等一系列生态环境问题[5-9],进而阻碍城市的可持续发展以及公众的正常生活和健康[10-11].因此分析城市扩张对植被及其地表热岛强度的影响对地区社会经济发展具有重要的意义[12-13].

随着遥感技术的发展,利用遥感数据分析城市化进程对植被及其地表城市热岛效应的影响受到了国内外学者的广泛关注.在分析城市化对植被影响方面,归一化植被指数(NDVI)、增强植被指数(EVI)、净初级生产力(NPP)、总初级生产力(GPP)等常用来表征城市化对地表植被的影响状况,如 Zhou 等[5]、裴凤松等[14]、王静等[2]分别利用 MODIS(中分辨率成像光谱仪)的 EVI、NDVI 和 NPP 数据分析了城市扩张对植被的影响,认为城市扩张对植被均存在负面影响.在分析城市热岛效应方面,地表温度数据(LST)常用来分析城市地表热岛强度(SUHII).诸多学者的研究表明城市扩张会显著增强城市地表热岛强度,但是其变化在昼夜和季节上存在显著不同[15].

京津冀城市群作为中国五个特大城市群之一,其城市化进程不断加快.据统计,京津冀的城市化率已由 1980 年的 19.63%增加到 2015 年的 58.28%[16].虽然已有研究对京津冀城市化对生态环境的影响进行了研究,但多是基于统计数据或单一遥感数据产品,且以京津冀某个城市为主[17],针对京津冀城市扩张对植被及地表城市热岛影响的长时间变化趋势研究相对较少,分析植被退化与地表城市热岛关系的研究相对不足.针对以上问题,本研究以京津冀 13 个城市的主城区为例,基于气象数据、土地利用/覆盖数据及其 MODIS 遥感影像数据,分析城市扩张对植被及地表城市热岛效应影响的时间变化趋势,揭示植被变化及其城市热岛强度之间的相互关系,为京津冀协同发展背景下城市绿地建设和城市空间规划提供参考.

1 数据和方法

1.1 研究区概况

京津冀位于华北平原北部,介于 36°05′~42°37′N,113°27′~119°50′E 之间,东临渤海,北依燕山和太行山脉,包括北京、天津两个直辖市以及河北省的 11 个地级市(张家口、承德、秦皇岛、唐山、廊坊、保定、衡水、沧州、石家庄、邢台和邯郸),总面积达 21.38 万 km^2,常住人口约 1.19 亿,2018 年地区生产总值突破 8.5 万亿元,是中国北方经济社会发展水平最高的地区之一(图 1).地貌类型多样,以平原和山地为主,气候类型为温带半湿润半干旱大陆性气候,春季干旱多大风,夏季高温多降水,冬季寒冷干燥少降水[18].随着京津冀城市群协同发展战略的实施,该地区的城市化水平快速提高,同时也产生了诸如城市热岛效应、植被退化等生态环境问题.

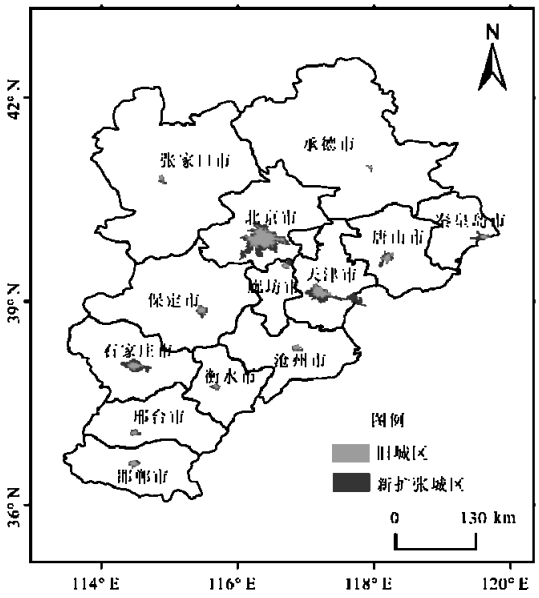


图 1 京津冀区位

Fig.1 Location of the study area of theBeijing-Tianjin-Hebei area

1.2 数据来源及处理

土地利用/覆盖数据选取了 2000 年和 2015 年 2 期,来自于中国科学院资源环境数据云平台(http://www.resdc.cn/),该数据以 30m 分辨率的 Landsat TM/ ETM\OLI 以及 GF-2 遥感影像为主要数据源,通过人工目视解译生成,包含 6 个大类以及 25 个二级分类,其总体精度分别达到 93%和 90%以上[19].本研究选取京津冀 13 个城市主城区的城镇用地代表该地区城市化的进程和强度.

植被指数产品选用 MOD13A2-EVI 数据,该数据来源于美国国家航空航天局(NASA)的数据信息服务中心(https://e4ftl01.cr.usgs.gov/),其空间分辨率为 1km×1km,时间分辨率为 16d,时间跨度为 2000~2015 年,该数据产品已经过太阳辐射矫正,大气矫正和气溶胶、水、云等处理,最大限度地减少了大气和

土壤反射率的影响,相比于 NDVI 数据,该数据减小了大气及其土壤背景值的影响,更加适合分析城镇等植被稀疏地区的植被变化[20].MOD17A2-GPP 数据来源同 EVI 数据相同,该数据是基于光能利用率模型估算得到的,其空间分辨率为 1km×1km,时间分辨率为 8d,时间跨度为 2000~2015 年,该数据已在全球和区域植被变化、生物量估算和碳循环等研究中得到了验证和广泛的应用[21].在数据处理过程中,采用 MRT(MODIS 重投影工具)对原始的 MODIS-EVI 和 GPP 数据进行格式和投影转换,同时采用最大合成法(MVC)将 16d 的 EVI 数据合成月数据集[9].

MODIS-LST 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn),该数据是由 MODLT1T 产品经过合成计算得到,空间分辨率为 1km×1km,时间跨度为 2000~2015 年,包含白天和夜间地表温度数据,目前已被广泛应用在城市热岛的研究中[6,15].2000~2015 年京津冀 24 个气象站点的月平均气温数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/).同时本文进一步定义 4~10 月、3~5 月、6~8 月、9~11 月和 12~2 月分别代表生长季、春季、夏季、秋季和冬季,将生长季及各个季节内各月份 EVI/LST 求均值,分别代表生长季及不同季节的植被覆盖或地表温度状况.

1.3　研究方法

1.3.1　城镇和乡村区域的提取　首先借助 ArcGIS10.5 将 2000 年和 2015 年土地利用/覆盖数据中的城镇用地和水体转换为矢量数据.2015 年的城镇用地信息不仅包括旧城区(2000 年的城镇用地),而且包括由于城市扩张形成的新城区(2000~2015 年城市扩张的区域),利用该数据可以分析旧城区(2000 年的城市区域)和新扩张城区(2000 年以后城市扩张区域)对植被及其地表城市热岛效应影响的变化趋势以及二者之间的关系[6,22-23].基于以上步骤提取出京津冀 13 个城市的旧城区和新扩张城区.同时在 13 个城市的新扩张城区周围建立 20 和 25km 的缓冲区,将 20~25km 之间的缓冲区域去除水体和其他城镇定义为乡村,选择该区域为乡村主要是由于城市化产生的城市热岛等影响往往比城市实际面积大[24-25].

1.3.2　ΔEVI 和 SUHII 的计算　城市扩张对植被的影响可表示为[7]:

$$\Delta EVI = EVI_{urban} - EVI_{rural} \tag{1}$$

式中:ΔEVI 表示城市扩张对植被的影响;EVI_{urban} 和 EVI_{rural} 分别代表京津冀 13 个市的生长季或不同季节城市和乡村的 EVI 均值.

城市扩张对地表城市热岛效应的影响可表示为[7]:

$$SUHII = LST_{urban} - LST_{rural} \tag{2}$$

式中:SUHII 表示地表城市热岛强度;LST_{urban} 和 LST_{rural} 分别代表京津冀 13 个市的生长季和不同季节城市和乡村的白天或夜间的 LST 均值.

为比较 2000~2015 年ΔEVI 和 SUHII 在相同地区的变化,本文选取 2015 年的土地利用/覆盖数据来计算 2000~2015 年期间京津冀各城市 Δ EVI 和 SUHII 的值.同时本文将 2000 年提取的城镇用地定义为旧城区,2015 年与 2000 年城镇用地的差值定义为新扩张城区.

1.3.3　趋势分析　采用一元线性回归拟合 2000~2015 年京津冀不同季节ΔEVI 和 SUHII 的变化趋势,同时采用 F 检验对其变化趋势的显著性进行分析,计算公式为[26]:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} i \times b_i - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} b_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i \right)^2} \tag{3}$$

式中:slope 为 ΔEVI 和 SUHII 的变化趋势;n 为时间序列;b_i 为第 i 年生长季或不同季节的 ΔEVI 或 SUHII 值.当 slope>0 时,表示 ΔEVI 或 SUHII 呈上升的趋势,当 slope<0 时,表示 ΔEVI 或 SUHII 呈下降的趋势.

1.3.4　相关分析　利用 Pearson 方法计算ΔEVI 和 SUHII 的相关性,计算公式为[26]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n} (y - \bar{y})^2}} \tag{4}$$

式中:r 为相关系数;x 和 y 分别为 2000~2015 年ΔEVI 和 SUHII 的值;$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示ΔEVI 和 SUHII 的均值;n 为样本数目.

2　结果分析

2.1　京津冀城市扩张对植被和城市热岛的影响

从表 1 可以看出,几乎所有城市的 Δ EVI 值均为负值,生长季 13 个城市的ΔEVI 均值为-0.095,其最大

差异出在秦皇岛(−0.135),最小差异出现在沧州(−0.054).就不同季节来看,ΔEVI 的值存在显著的不同,夏季ΔEVI 的变化最大(−0.131),其次为秋季(−0.077).以上分析表明城市扩张对生长季及不同季节的植被均存在消极的影响.快速的城市化进程将城市周边的绿色植被转换为不透水地面,使得植被覆盖降低.由于京津冀 EVI 值在夏季最高,使得夏季ΔEVI 的变化最大.这与 Yao 等[7]在研究长江流域城市扩张对植被的影响也得出的结论类似.

表 2 可以看出,除冬季白天 SUHII 外,其他情况下的 SUHII 均为正值.就白天的 SUHII 值来看,夏季 SUHII 的均值最大(2.594℃),冬季的 SUHII 均值最小(0.118℃),最大值出现在夏季的北京(4.499℃),最小值出现在冬季的唐山(−0.803℃).就夜间 SUHII 的值来看,生长季、春季、夏季、秋季和冬季的均值分别为 1.802,1.855,1.859,1.729 和 1.821℃,最高值出现在夏季的张家口(3.572℃),最低值出现在冬季的承德(0.511℃).总体来看,城市扩张加剧京津冀的地表城市热岛效应.夏季白天和夜间 SUHII 的值大于冬季,主要是受植被活动的影响.相比于人工建筑等不透水地面,植被覆盖高的区域由于蒸散发的作用较强通常具有较低的显热通量和较高的潜热通量,使得其温度较人工建筑等不透水地面低.这与 Zhou 等[5]的研究结果类似.

表 1 2000~2015 年京津冀 13 个城市不同季节 ΔEVI 均值

Table 1 The mean value of seasonal ΔEVI at the 13cities in the Beijing−Tianjin−Hebei region from 2000 to 2015

城市名称	生长季	春季	夏季	秋季
保定	−0.102	−0.049	−0.134	−0.098
北京	−0.101	−0.071	−0.129	−0.106
承德	−0.099	−0.066	−0.13	−0.064
沧州	−0.054	−0.003	−0.093	−0.078
邯郸	−0.112	−0.09	−0.139	−0.082
衡水	−0.116	−0.058	−0.163	−0.088
廊坊	−0.058	−0.026	−0.087	−0.118
秦皇岛	−0.135	−0.096	−0.172	−0.074
石家庄	−0.081	−0.062	−0.098	−0.089
天津	−0.128	−0.036	−0.192	−0.047
唐山	−0.105	−0.024	−0.169	−0.049
邢台	−0.079	−0.063	−0.095	−0.079
张家口	−0.062	−0.031	−0.101	−0.022
均值	−0.095	−0.052	−0.131	−0.077

表 2 2000~2015 年京津冀 13 个城市不同季节的 SUHII 均值

Table 2 The mean value of seasonal SUHII at the 13cities in the Beijing−Tianjin−Hebei region from 2000 to 2015

城市名称	生长季 SUHII(℃)		春季 SUHII(℃)		夏季 SUHII(℃)		秋季 SUHII(℃)		冬季 SUHII(℃)	
	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间
保定	1.853	1.569	0.776	1.689	2.473	1.519	1.158	1.515	−0.228	1.708
北京	3.683	2.270	2.785	2.197	4.499	2.513	2.388	1.651	1.165	1.523
承德	1.904	1.257	1.225	1.228	2.739	1.491	0.773	0.600	0.385	0.511
沧州	0.357	1.575	2.221	1.867	1.192	1.336	0.46	1.912	−0.34	2.604
邯郸	1.999	1.820	1.962	1.847	2.263	1.755	1.245	1.845	−0.206	1.970
衡水	1.418	1.616	0.808	1.856	1.896	2.393	0.425	1.856	−0.293	1.425
廊坊	1.131	1.491	0.234	1.569	1.753	1.395	0.47	1.455	−0.201	1.595
秦皇岛	2.186	1.123	1.000	0.711	3.006	1.395	1.559	1.122	0.977	1.171
石家庄	1.945	1.718	1.483	1.793	2.345	1.781	1.277	1.553	−0.006	1.489
天津	2.037	2.103	0.45	2.101	2.915	1.867	1.955	2.577	−0.397	2.815
唐山	2.277	1.846	1.186	2.066	3.387	1.586	1.548	1.996	−0.803	2.353
邢台	1.700	1.606	1.083	1.725	2.061	1.560	0.936	1.460	−0.305	1.409
张家口	2.666	3.438	2.418	3.473	3.194	3.572	1.992	2.932	1.785	3.101
均值	1.935	1.802	1.356	1.855	2.594	1.859	1.245	1.729	0.118	1.821

2.2 京津冀ΔEVI 变化趋势分析

从图 2 中可以看出,生长季及不同季节的ΔEVI 均值呈现显著下降趋势,其下降速率分别为−0.0038,−0.0033,−0.0045 和 −0.0018/a(P<0.01). 从不同城市ΔEVI 的变化趋势来看,生长季及不同季节呈显著下降趋势的城市数量分别为 11,10,10,6 和 7 个(图 3).夏季ΔEVI 的下降趋势最为显著,下降趋势最大的城市为秦皇岛(−0.0097)(P<0.05),最小的城市为天津(−0.0007) (P>0.05)(图 3).同时为进一步分析城市化对植被的影响,本文计算了旧城区生长季ΔEVI 的变化趋势(表 3),总体来看,13 个城市中 6 个城市的ΔEVI 呈显著下降的趋势,其 13 个城市平均ΔEVI 呈显著减少的趋势(−0.0016)(P<0.01),变化幅度低于新扩张城区的ΔEVI(−0.0038) (P<0.01)以及呈减小趋势的城市数量(11 个),表明旧城区的ΔEVI 变化小于新扩张城区,进一步证实了城市扩张对植被存在消极的影响.旧城

区ΔEVI 的变化小于新扩张城区主要是由于旧城区一般为城市核心区,相比于新扩张的城区更加注重植被等绿地空间的建设.这与 Zhou 等[5]在研究中国 32 个城市的发展对植被的影响得出的结论类似.

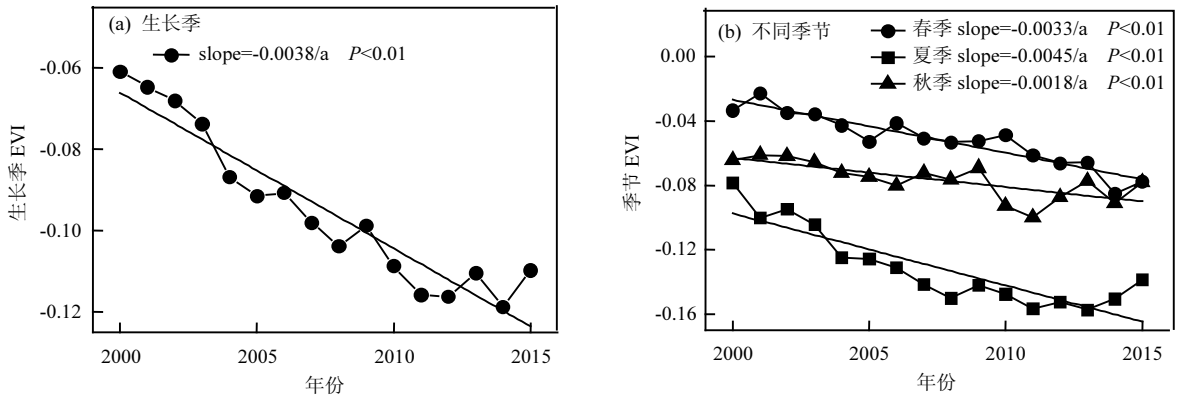


图 2　2000~2015 年京津冀 13 个城市 ΔEVI 均值的季节变化趋势

Fig.2　The temporal trends of seasonal ΔEVI at the 13 cities in the Beijing−Tianjin−Hebei region during 2000~2015

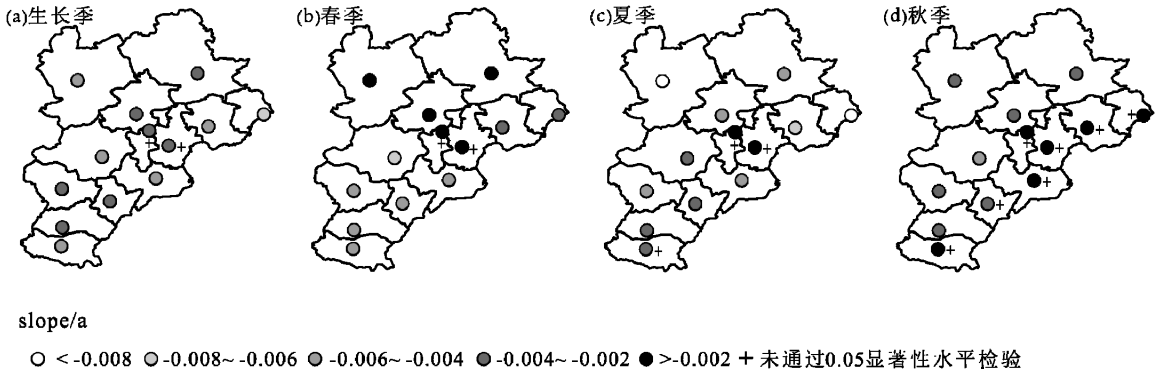


图 3　2000~2015 年京津冀 13 个城市 ΔEVI 季节变化趋势

Fig.3　Temporal trends of seasonal ΔEVI at 13cities inthe Beijing−Tianjin−Hebei region during 2000~2015

表 3　2000~2015 年京津冀 13 个城市旧城区 ΔEVI 和 SUHII 变化趋势

Table 3　Temporal trends of ΔEVI and SUHII in old urban regions (the urban regions in 2000) at 13 cities in the Beijing−Tianjin−Hebei region during 2000~2015

城市名称	生长季 ΔEVI	生长季白天 SUHII	生长季夜间 SUHII
保定	−0.0017*	0.0589**	0.0324**
北京	−0.0005	0.0421	0.0307*
承德	−0.0031**	−0.0168	0.0155
沧州	−0.0011	0.0988**	0.0128
邯郸	−0.0014	−0.039*	0.0373*
衡水	−0.0039**	0.0544	0.0407**
廊坊	−0.0013	0.047	0.0258*
秦皇岛	−0.0022**	0.0936**	0.0221*
石家庄	−0.0007	−0.063**	0.0191
天津	−0.0008	0.0798*	−0.0094
唐山	−0.0002	0.0083	0.0092
邢台	−0.0024**	−0.0232	0.049**
张家口	−0.0043**	0.0037	0.0315
均值	−0.0016**	0.0265	0.0244**

注:**和*表示0.01和0.05显著性水平.

2.3　京津冀 SUHII 变化趋势分析

图 4a 和 4b 表明白天 SUHII 在生长季、春季和夏季均呈显著增加趋势,其增加速率分别为 0.076, 0.093 和 0.106℃/a(P<0.01),夏季的增加速率高于生长季和春季,秋季和冬季的白天 SUHII 的变化均未通过 0.05 显著性水平检验.图 4c 和 4d 表明夜间 SUHII 在不同季节均呈显著增加的趋势,其增加速率分别为 0.05,0.055,0.049,0.054 和 0.046℃/a,春季和秋季的夜间 SUHII 增加速率最快.不同季节增温不一致表明,城市化进程导致的地表城市热岛效应在不同季节存在差异.

从图 5 可以看出,几乎所有城市的 SUHII 值均在生长季、春、夏和秋季呈现增加趋势.就白天 SUHII 的时间变化趋势来看,在生长季和四季呈显著增加(P<0.05)的城市分别有11,10,10,4和0个.夏季的SUHII增加趋势最为显著(0.106℃/a),最大值出现在天津(0.235℃/a),最小值出现在廊坊(0.03℃/a).夜间 SUHII

的值在生长季及不同季节呈显著增加趋势的城市分别有 12,11,12,11 和 8 个,其数量尤其在秋季和冬季远多于白天.具体来看,春季的 SUHII 增加趋势最为显著(0.055℃/a),最大值出现在邯郸(0.089℃/a),最小值出现在天津(0.002℃/a).通过与旧城区生长季SUHII的时间变化趋势对比可以发现,无论是在白天还是夜间,新扩张城区 SUHII 值的增加趋势均远高于旧城区(0.0796VS 0.0265 和 0.05VS 0.0244).以上分析表明京津冀冬季低温城乡差异的提升比冬季高温城乡差异的提升,更能展示城市冬季热岛效应的变化.

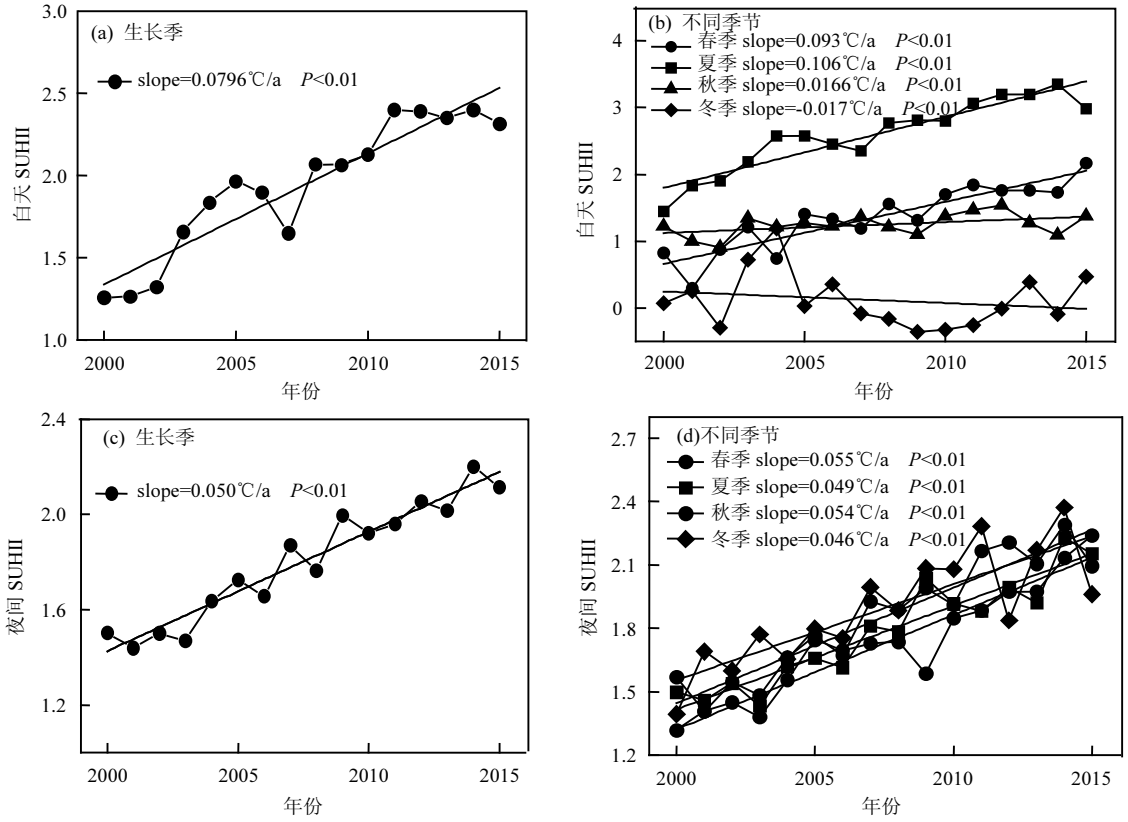


图 4 2000~2015 年京津冀 13 个城市白天和夜间 SUHII 均值的季节变化趋势

Fig.4 The temporal trends of seasonal daytime and nighttime SUHII in the Beijing−Tianjin−Hebei region during 2000~2015

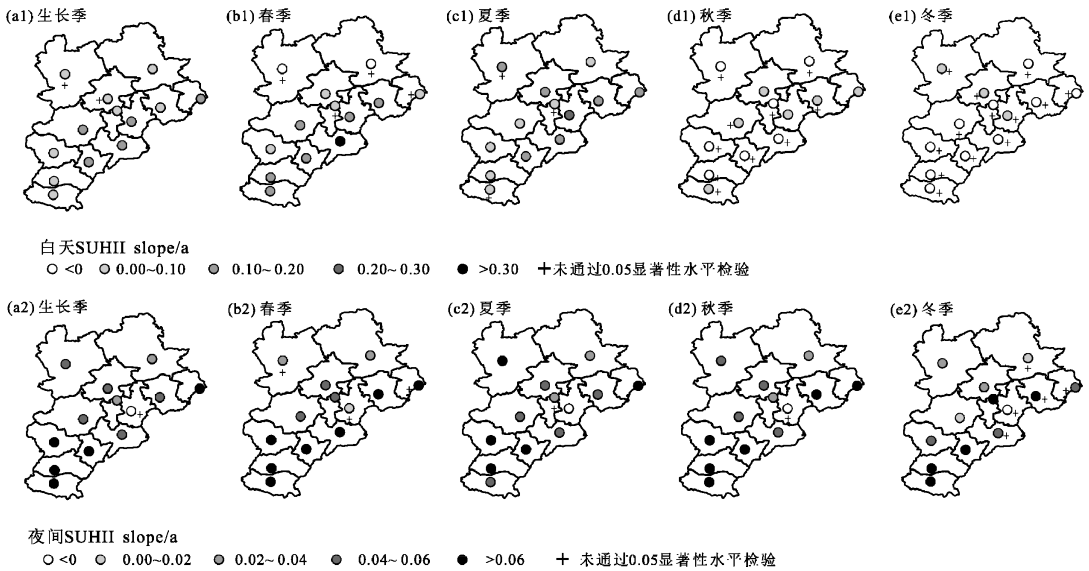


图 5 2000~2015 年京津冀 13 个城市白天和夜间 SUHII 的季节变化趋势

Fig.5 Temporal trends of seasonal daytime and nighttime SUHII at 13 cities inthe Beijing−Tianjin−Hebei region during 2000~2015

2.4　京津冀 Δ EVI 和 SUHII 的相关性

表 4 可以看出 13 个城市 ΔEVI 的均值和 SUHII 均值均呈显著负相关(P<0.01).在夏季,所有城市的白天 SUHII 与 ΔEVI 的相关性均通过了 0.05 显著性水平检验,其中 10 个城市通过了 0.01 显著性水平检验,相关性最高的城市为沧州(−0.921),最低的城市为天津(−0.545);在生长季,有 10 个城市的 SUHII 与ΔEVI 的相关性均通过了 0.05 显著性水平检验,其相关最高的城市为保定(−0.937),最低的城市为张家口(−0.466).生长季及不同季节的夜间 SUHII 与ΔEVI 相关性分别为−0.9333、−0.936、−0.792 和−0.743,在生长季,12 个城市的夜间 SUHII 与ΔEVI 的相关性通过了 0.05 显著性水平检验,其中相关性最高的城市为北京(−0.939),最低的城市为天津(−0.394);在秋季,仅有 5 个城市的相关性通过了 0.05 显著性水平检验.ΔEVI 和 SUHII 呈显著负相关性表明城市地表热岛强度随着ΔEVI 的减小而加剧,主要是由于植被的蒸发作用可以降低温度进而减弱城市地表热岛强度,这与 Zhou 等[5]和 Peng 等[23]的研究结果类似.

表 4　2000~2015 年京津冀 13 个城市不同季节 SUHII 和ΔEVI 的相关系数

Table 4　Correlation coefficient between ΔEVI and SUHII at 13 cities of Beijing−Tianjin−Hebei region during 2000~2015

名称	生长季		春季		夏季		秋季	
	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间
保定	−0.937**	−0.882**	−0.906**	−0.866**	−0.731**	−0.529*	−0.549*	−0.521*
北京	−0.869**	−0.939**	−0.141	−0.067	−0.839**	−0.834**	−0.731**	−0.594*
承德	−0.244	−0.806**	0.336	−0.542*	−0.664**	−0.619*	−0.064	−0.487
沧州	−0.97**	−0.623**	−0.655**	−0.812**	−0.921**	−0.433	−0.398	−0.056
邯郸	−0.69**	−0.792**	−0.769**	−0.828**	−0.642**	−0.334	−0.21	−0.193
衡水	−0.812**	−0.875**	−0.877**	−0.613*	−0.679**	−0.266	−0.244	−0.331
廊坊	−0.713**	−0.603*	−0.686**	−0.426	−0.602*	−0.762**	−0.568*	0.161
秦皇岛	−0.791**	−0.878**	−0.167	−0.541*	−0.883**	−0.721**	−0.177	−0.556*
石家庄	−0.789**	−0.912**	−0.652**	−0.751**	−0.792**	−0.842**	−0.306	−0.597*
天津	−0.48	−0.394	−0.195	−0.216	−0.545*	0.343	−0.124	−0.138
唐山	−0.83**	−0.825**	−0.768**	−0.891**	−0.719**	−0.508	0.654**	0.099
邢台	−0.71**	−0.88**	−0.638**	−0.689**	−0.601*	−0.698**	0.059	−0.695**
张家口	−0.466	−0.649**	0.531*	−0.589*	−0.765**	−0.723**	0.326	−0.15
均值	−0.959**	−0.933**	−0.862**	−0.936**	−0.933**	−0.792**	−0.592*	−0.743**

注:**和*表示0.01和0.05显著性水平.

3　讨论

本文分析了 2000~2015 年京津冀 13 个城市主城区城市化进程对植被和地表城市热岛的影响,研究发现除冬季白天外,SUHII 在其他季节均为正值,表明城市扩张会加剧城市热岛效应,究其主要原因是由于城市在发展过程中,大量的耕地、林地、草地等自然植被类型转换为不透水地面,使得植被面积减少,植被蒸腾作用减弱,地表潜热通量减少,进而引起地表温度升高[27].夏季 Δ EVI 的变化最大(−0.131),导致其 SUHII 值最高(2.594 和 1.859),进一步表明植被的减少会使得地表温度升高.以上研究成果与已有的研究基本一致[7,15].

从时间变化趋势来看,2000~2015 年京津冀 13 个城市的 Δ EVI 均值呈显著下降趋势(图 2),表明城市扩张对植被的影响日益严重.随着城市化进程的加快,京津冀城城市用地面积已由 1980 年的 1934.83km^2 增加到 2015 年的 7509.63km^2,大量的耕地、林地等转化为建设用地等不透水地面必将引起城市热岛效应和植被破坏等生态环境问题,因此在城市开发过程中应重视对生态环境的保护[28-30].从季节变化来看,夏季ΔEVI 值下降趋势最为显著(slope=0.0045/a,P<0.01),主要是由于夏季的植被生长最为旺盛,其 EVI 值最高,使得ΔEVI 的变化较大[7].与旧城区相比(−0.0016),其新扩张城区的 Δ EVI 值下降更为明显(−0.0038),进一步表明城市扩张会引发植被破坏,使得城市周边的 EVI 值下降.除冬季白天 SUHII 外,其他所有季节的 SUHII 均呈现显著上升的趋势,主要是由于城市扩张使得林地、草地、农田等自然植被减少,进而使得地表城市热岛强度加

剧.从季节变化来看,夏季 SUHII 的增加趋势最为显著(slope=0.106℃,P<0.01),主要是由于植被生长状况最好,其ΔEVI的下降最为显著,使得夏季SUHII的增加趋势最为显著.同时已有研究表明植被、温度的变化会影响城市热岛效应[7,15].本文研究表明2000~2015年京津冀乡村地区的温度和GPP变化均不显著,表明非城区气象和植被条件基本平稳(图 6),进一步证实了研究结果的可靠性.

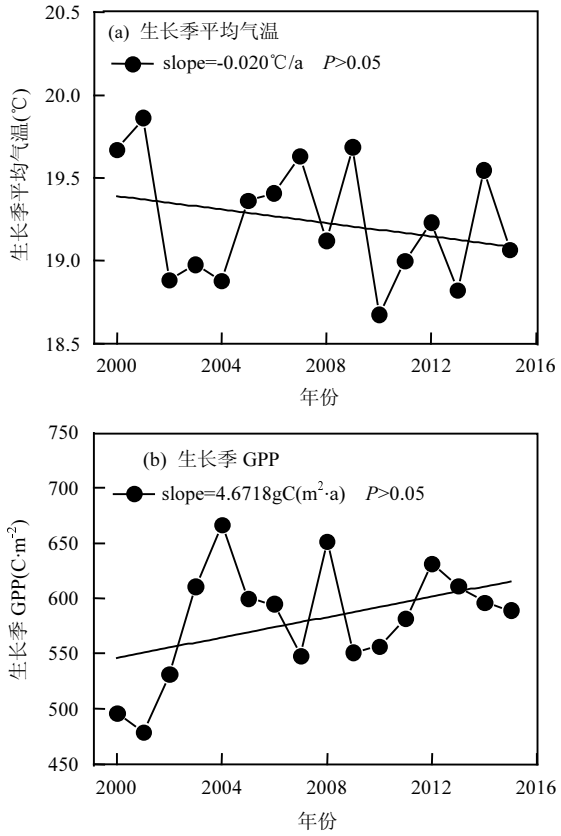


图 6 2000~2015 年京津冀乡村地区生长季气温和 GPP 的变化趋势

Fig.6 The temporal trends of growing season temperature and GPP in the Beijing−Tianjin−Hebei region during 2000~2015

4 结论

4.1 京津冀 13 个城市不同季节的ΔEVI 值均为负值,夏季的ΔEVI 值最小(−0.131);夏季白天的 SUHII 均值最大(2.594℃),最大值出现在夏季的北京(4.499℃),最小值出现在冬季的唐山(−0.803℃);夏季夜间的 SUHII 均值最大(1.859℃),最高值出现在夏季的张家口(3.572℃),最低值出现在冬季的承德(0.511℃).

4.2 不同季节的ΔEVI 均值呈现显著下降趋势,夏季ΔEVI均值的下降趋势最为显著.从不同城市ΔEVI的时间变化趋势来看,生长季及不同季节呈显著下降趋势的城市数量分别为 11,10,10 和 6 个.

4.3 白天 SUHII 在生长季、春季和夏季均呈现显著增加的趋势(P<0.01),其中夏季的增加趋势最为显著(slope=0.106℃/a,P<0.01),秋季和冬季的变化趋势未通过 0.05 显著性水平检验;从夜间 SUHII 的变化趋势来看,SUHII 在不同季节均呈显著增加的趋势,其中春季增加速率最为显著(slope=0.55℃/a,P<0.01).

4.4 除冬季白天外,京津冀 13 个城市的ΔEVI 均值和 SUHII 均值均呈显著负相关(P<0.01).白天 SUHII 与ΔEVI 的最高相关性出现在生长季(r=−0.959,P<0.01),夜间SUHII与ΔEVI的最高相关性出现在春季(r=−0.936,P<0.01).

参考文献:

[1] 朱 诚,姜逢清,吴 立,等.对全球变化背景下长三角地区城镇化发展科学问题的思考 [J]. 地理学报, 2017,72(4):633−645.
Zhu C, Jiang F Q, Wu L, et al. On the problems of urbanization in the Yangtze River Delta under the background of global change [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(4):633−645.

[2] 王 静,周伟奇,许开鹏,等.京津冀地区城市化对植被覆盖度及景观格局的影响 [J]. 生态学报, 2017,37(21):7019−7029.
Wang J, Zhou W Q, Xu K P, et al. Spatiotemporal pattern of vegetation cover and its relationship with urbanization in Beijing−Tianjin−Hebei megaregion from 2000 to 2010 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21):7019−7029.

[3] 陈 军,陈利军,李 然,等.基于 GlobeLand30 的全球城乡建设用地空间分布与变化统计分析 [J]. 测绘学报, 2015,44(11):1181−1188.
Chen J, Chen L J, Li R, et al. Spatial distribution and ten years change of global built−up areas derived from GlobeLand30 [J]. Acta Geodaeticaet Cartographica Sinica, 2015,44(11):1181−1188.

[4] 李书娟,曾 辉.快速城市化地区建设用地沿城市化梯度的扩张特征—以南昌地区为例 [J]. 生态学报, 2004,24(1):55−62.
Li S J, Zeng H. The expanding characteristics study of built−up land use along the urbanization gradient in quickly urbanized area:a case study of Nanchang area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004,24(1):55−62.

[5] Zhou D C, Zhao S Q, Liu S G, et al. Spatiotemporal trends of terrestrial vegetation activity along the urban development intensity gradient in China's 32 major cities [J]. Science of the Total Environment, 2014,488:136−145.

[6] Yao R, Wang L C, Huang X, et al. Greening in rural areas increases the surface urban heat island intensity [J]. Geophysical Research Letters, 2019,46(4):2204−2212.

[7] Yao R, Wang L C, Gui X, et al. Urbanization effects on vegetation and surface urban heat islands in China's Yangtze River Basin [J]. Remote

Sensing, 2017,9(6):540.

[8] 雷金睿,陈宗铸,吴庭天,等.1989~2015 年海口城市热环境与景观格局的时空演变及其相互关系 [J]. 中国环境科学, 2019,39(4):1734-1743.
Lei J R, Chen Z Z, WU T T, et al. Spatio-temporal evolution and interrelationship between thermal environment and landscape patterns of Haikou City, 1989~2015 [J]. China Environmental Sciencece, 2019, 39(4):1734-1743.

[9] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.2000~2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因 [J]. 中国环境科学, 2016,36(5):1568-1578.
Zhao A Z, Liu X F, Zhu X F, et al. Spatiotemporal analyses and associated driving forces of vegetation coverage change in the Loess Plateau [J]. China Environmental Science, 2016,36(5):1568-1578.

[10] Åström D O, Åström C, Rekker K, et al. High summer temperatures and mortality in Estonia [J]. PloS one, 2016,11(5):e0155045.

[11] 黄群芳,陆玉麒.北京地区城市热岛强度长期变化特征及气候学影响机制 [J]. 地理科学, 2018,38(10):1715-1723.
Huang Q F, Lu Y Q. Long-term trend of urban heat island intensity and climatological affecting mechanism in Bejing city [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018,38(10):1715-1723.

[12] 宋世雄,刘志锋,何春阳,等.城市扩展过程对自然生境影响评价的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2018,33(10):1094-1104.
Song S X, Liu Z F, He C Y, et al. Research progress on assessing the impacts of urban expansion on natural habitats [J]. Advances in Earth Science, 2018,33(10):1094-1104.

[13] 王桂林,杨　昆,杨　扬.京津冀地区不透水表面扩张对 $PM_{2.5}$ 污染的影响研究 [J]. 中国环境科学, 2017,37(7):2470-2481.
Wang G L, Yang K, Yang Y. The spatio-temporal variation of $PM_{2.5}$ pollution and the its correlation with the impervious surface expansion [J]. China Environmental Science, 2017,37(7):2470-2481.

[14] 裴凤松,黎　夏,刘小平,等.城市扩张驱动下植被净第一性生产力动态模拟研究—以广东省为例 [J]. 地球信息科学学报, 2015,17(4):469-477.
Pei F S, Li X, Liu X P, et al. Dynamic simulation of urban expansion and their effects on net primary productivity: A Scenario Analysis of Guangdong Province in China [J]. Journal of Geo-Information Science, 2015,17(4):469-477.

[15] 陈彬辉,冯　瑶,袁建国,等.基于MODIS地表温度的京津冀地区城市热岛时空差异研究 [J]. 北京大学学报:自然科学版, 2016,52(6):1134-1140.
Chen B H, Feng Y, Yuan J G, et al. Spatiotemporal difference of urban heat island in Jing-Jin-Ji area based on MODIS land surface temperature [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016,52(6):1134-1140.

[16] 李孝永,匡文慧.京津冀 1980~2015 年城市土地利用变化时空轨迹及未来情景模拟 [J]. 经济地理, 2019,39(3):187-194.
Li X Y, Kuang W H. Spatio-temporal trajectories of urban land use change during 1980~2015 and future scenario simulation in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Economic Geography, 2019, 39(3):187-194.

[17] 崔学刚,方创琳,张　蔷.京津冀城市群环境规制强度与城镇化质量的协调性分析 [J]. 自然资源学报, 2018,33(4):563-575.
Cui X G, Fang C L, Zhang Q. Coordination between environmental regulation intensity and urbanization quality:case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(4):563-575.

[18] 王海军,张　彬,刘耀林,等.基于重心-GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析 [J]. 地理学报, 2018,73(6):92-108.
Wang H J, Zhang B, Lin Y L, et al. Multi-dimensional analysis of urban expansion patterns and their driving forces based on the center of gravity-GTWR model: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(6):92-108.

[19] 刘纪远,宁　佳,匡文慧,等.2010~2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征 [J]. 地理学报, 2018,73(5):789-802.
Liu J Y, Ning J, Kuang W H, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010~2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(5):789-802.

[20] Dallimer M, Tang Z, Bibby P R, et al. Temporal changes in greenspace in a highly urbanized region [J]. Biology Letters, 2011,7(5):763-766.

[21] Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, et al. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set [J]. Remote sensing of Environment, 2005,95(2):164-176.

[22] Yao R, Cao J, Wang L C, et al. Urbanization effects on vegetation cover in major African cities during 2001~2017 [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019,75: 44-53.

[23] Peng J, Ma J, Liu Q Y, et al. Spatial-temporal change of land surface temperature across 285 cities in China: An urban-rural contrast perspective [J]. Science of the Total Environment, 2018,635:487-497.

[24] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. The footprint of urban climates on vegetation phenology [J]. Geophysical Research Letters, 2004,31(12):L12209.

[25] Zhou D C, Zhao S Q, Zhang L X, et al. The footprint of urban heat island effect in China [J]. Scientific Reports, 2015,5:11160.

[26] 徐建华.现代地理学中的数学方法(第 2 版) [D]. 北京:高等教育出版社, 2002.
Xu J H. Mathematics Methods in Modern Geography (2nd ed) [D]. Beijing: Higher Education Press, 2002.

[27] Wang C Y, Myint S, Wang Z H, et al. Spatio-temporal modeling of the urban heat island in the Phoenix metropolitan area: Land use change implications [J]. Remote Sensing, 2016,8(3):185.

[28] He C Y, Liu Z F, Xu M, et al. Urban expansion brought stress to food security in China: Evidence from decreased cropland net primary productivity [J]. Science of the Total Environment, 2017,576:660-670.

[29] 钱敏蕾,徐艺扬,李　响,等.上海市城市化进程中热环境响应的空间评价 [J]. 中国环境科学, 2015,35(2):624-633.
QianM L, Xu Y Y, Li X, et al. An assessment of spatial thermal environmental response to rapid urbanization of Shanghai [J]. China Environmental Science, 2015,35(2):624-633.

[30] Du Y Y, Sun T S, Peng J, et al. Direct and spillover effects of urbanization on $PM_{2.5}$ concentrations in China's top three urban agglomerations [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,190:72-83.

作者简介：赵安周(1985-),男,河北邯郸人,副教授,博士,主要从事植被对干旱的响应等方面的研究.发表论文 30 余篇.