

京津冀地区城市发展对人居环境自然舒适度的影响评估*

白钰弘¹⁾ 秦欣雅²⁾ 赵祥^{1)†} 孙中平³⁾

(1)北京师范大学遥感科学国家重点实验室,
北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心,北京师范大学地理科学学部,北京;
2)北京师范大学人工智能学院,北京; 3)生态环境部卫星环境应用中心,北京)

摘要 基于多源遥感数据,使用主成分分析法构建了城市自然环境舒适度综合评价模型,并以京津冀城市群为例,评估了2000、2010、2020年这3个时间点在该区域城市发展背景下人居环境自然舒适度的变化状况.研究结果表明:1)京津冀地区的城市人居综合舒适度总体上呈现逐渐改善的趋势,且城市中心到城市外围舒适度也在改善,增幅约10%;2)2020年比2000年区县尺度的舒适度也在逐年变好,高舒适度区县数量增加近1倍;3)典型城市的舒适度变化与整体变化趋势大体一致,但由于城市职能和规模等因素的影响,改善速度存在差异.本文研究结果对于促进城市的可持续发展具有一定参考意义和实际应用价值.

关键词 京津冀;人居环境;自然舒适度;城市发展;影响因素

中图分类号 X821

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2023056

0 引言

我国城市发展使城市聚居人口快速增长,导致城市面临着紧张的生活和交通压力^[1].同时,城市地区高层楼宇逐渐增多,改变了原有地-气间的物质能量交换过程^[2],对局地气候、植被生长等产生影响,使城市中的人居环境发生变化.人居环境是人类赖以生存的土地,是与人类各种生活、活动密切相关的地表空间^[3].不同的人居环境会对人体产生不同的生理影响^[4],人类在不同环境中感觉的适宜程度有所差异^[5].在全国经济增长模式从规模扩张向创新驱动转变的大背景下,城乡居民生活品质显著提升,人居环境自然舒适度成为吸引人才的重要因素之一^[6].因此,研究人居环境自然舒适度具有重要的意义.

人居环境自然舒适度研究经历了定性和定量两个阶段,其中定性研究主要聚焦于宜居城市的评价体系相关理论^[7],而随着宜居度评价体系的发展和3S技术的进步,逐渐出现了定量研究^[8].近年来,相关研究领域不断拓展,包括对人居环境系统的分类和分层^[9],利用遥感、地理信息系统^[10]等技术手段从栅格尺度对区域人居环境自然适宜性进行评价.表1总结了针

对我国现有自然舒适度研究评价指标.从表中可以看出,常见的综合研究指标主要考虑地形、生态、水文、土地覆盖、气候、交通等因子.

表1 中国各地区舒适度研究指标

研究区	研究指标
中国 ^[11]	地形条件、气候条件、水文条件、土地覆被
陕西 ^[12]	地表起伏度、地被指数、温湿指数、水文指数
长春 ^[13]	生态环境、便利性、舒适性、健康性、安全性
石羊河流域 ^[14]	坡度坡向、地形、植被、水文、气候、交通
阿勒泰地区 ^[15]	温湿指数、着衣指数、风效指数
黔中地区 ^[16]	地形、土地、植被、气候、水文、石漠化
三亚、北京 ^[17]	城市绿度、热度、灰度、湿度、亮度、透明度
关中平原 ^[18]	气候水文、地被、夜间灯光、空气质量、交通

然而,当前研究仍然存在2方面的问题:1)从空间尺度来看,当前研究大多基于全国范围或个别城市,对于城市群的研究相对较少.随着现代城际交通网络的建立,更广泛的地域被紧密联系在一起,传统的单一城市人居环境研究已经不能满足现代区域发展的需要.因此,探讨城市群人居环境的发展过程、

* 国家重点研发计划资助项目(2021YFB3901105);遥感科学国家重点实验室、北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心开放课题(OF202205)

† 通信作者:赵祥(1971—),男,博士,教授.研究方向:资源环境遥感. E-mail: zhaoxiang@bnu.edu.cn

收稿日期:2023-04-07

趋势以及城市群内部的协调程度具有重要的理论和现实意义^[18]。2)从时间尺度上来看,目前对城市综合舒适度的研究往往基于一个时间节点,长时间序列对比研究仍存在一定的空缺,即缺少结合城市发展的不同阶段,比较城市综合舒适度的变化情况的相关研究。

基于以上问题,本研究选取人口密度、景观生态风险、PM_{2.5}质量浓度、植被叶面积指数(LAI)以及温湿指数这5个方面作为评估指标,建立了一个评估城市人居环境自然舒适度的模型。这些指标综合考虑了自然环境对人类在该区域内生存和活动的影响,可以从自然生态舒适角度评估该区域的人居自然环境舒适度。通过这个评估模型,可以更加全面地了解城市自然环境对人类健康和生活的影 响,为城市规划和环境保护提供重要的参考依据。

1 研究区概况

京津冀地区是中国东北亚地区环渤海地带的经济中心,地理位置为111°30′~119°50′E,34°16′~41°36′N。区域包含北京、天津2个直辖市和河北省11个市,是华北最大规模的城市群,也是我国最重要的政治、文化中心和北方最大、发展程度最高的经济核心区。因此,该区域的城市发展进程较快^[19],是衡量城市发展对人居环境舒适度影响的理想研究区。

为研究城市化与自然舒适度的关系,本研究选定了核心区、拓展区I和II共3个区域,分别处于城市化进程的不同阶段。核心区是2000年的城市建成区,这个区域处于城市化进程的相对成熟阶段,基础设施和市政建设已经比较完善,城市化进程也相对稳定;拓展区I是2000—2010年的城市扩展区域,这个区域处于城市化进程的加速阶段,城市化规模和速度都在加强,基础设施建设和市政建设等正在齐头并进的阶段;拓展区II是2010—2020年的城市扩展区域,这个区域处于城市化进程的高速阶段,城市化规模和速度都在高速增长,基础设施建设和市政建设等正在迅速推进的阶段。因此,通过评估3个区域间人居环境舒适度的差异,可以初步反映不同城市化发展阶段对自然舒适度的差异影响。

图1展示了京津冀地区自2000—2020年的土地利用情况和城市扩张情况。其中,核心区面积为2 940 km²,拓展区I的面积为2 184 km²,拓展区II的面积为2 089 km²。随着城市的发展变化,城市的人居自然环境舒适度也会发生相应的变化。尤其是在城市扩张变化的区域,往往会涉及大规模的土地利用变化和建设活动^[20],这些变化对原有的自然环境和生态系

统造成了较大的影响,进而使得人居自然环境舒适度变化明显地显现出来。因此,本文对核心区、拓展区I和II的人居自然环境差异进行了深入探究,为促进城市的可持续发展提供一定的参考意义和实际应用价值。

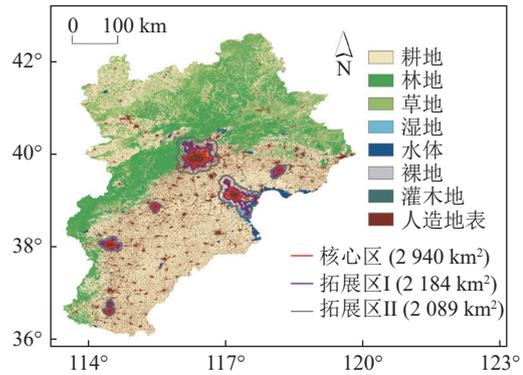


图1 研究区概况

2 数据和方法

2.1 数据 本文所使用的基础数据有土地利用、人口密度、LAI、温度、湿度、PM_{2.5}质量浓度、建成区范围变化等数据。

1)土地利用数据。GlobeLand30是我国自主研发的全球地表覆盖数据(<http://globeland30.org>),分辨率为30 m,目前可供下载使用的有2000、2010、2020年3个时间点的数据。共包括耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川和永久积雪10个一级类型。

2)人口密度数据。World Pop(<https://hub.worldpop.org>)中包含2000—2020年的全球范围人口栅格数据,可以提供1 km分辨率的人口密度数据。

3)叶面积指数数据。GLASS的LAI数据(<http://www.glass.umd.edu>)是基于多源遥感数据和地面实测数据,反演得到的长时间序列、高精度的全球地表遥感产品。选取2000—2020年H26V04、H27V04、H26V05、H27V05四景250 m分辨率的、第49—361天每隔21天的数据的均值作为当年的LAI数据。

4)温度和湿度数据。数据源为美国国家气候数据中心(<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/Isd-lite/>)的公开FTP服务器,网站中包含2000—2020年间中国的地面气象数据,本文选取京津冀地区2000、2010、2020年6—8月的月平均1 km温度和湿度数据。

5)PM_{2.5}质量浓度数据。圣路易斯华盛顿大学大气成分分析组(<https://sites.wustl.edu/acag/datasets/surface-pm2-5/>)提供的2000—2020年逐月的PM_{2.5}栅格数据,数据分辨率为0.01°×0.01°,数据格式为.nc格式。本文

使用 2000—2020 年的数据。

6) 建成区范围变化数据。建成区范围数据来源于国家青藏高原科学数据中心, 选取了空间分辨率为 1 km 的中国和全球城市建成区时空动态数据集 (<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/3100de5c-ac8d-4091-9bbf-6a02de100c88/>)。本文使用“中国城市建成区数据集(1992—2020)V1.0”中的 2000、2010、2020 年数据, 并裁剪至京津冀区域用于后续研究。

2.2 研究方法 采用图 2 所示的研究方法: 1) 收集并处理 2000—2020 年京津冀地区的人口密度、夏季温湿指数、LAI、土地利用数据和 PM_{2.5} 数据; 2) 将这些数据分别转化为人口拥挤度、夏季舒适度、城市绿化度、景观生态风险和环境污染度 5 个评价指标, 以得到单因子舒适度评估模型。接着使用主成分分析法将几种单因素舒适度综合起来构建城市人居环境综合评价模型; 3) 利用构建好的模型分析了城市扩张过程中的舒适度变化情况、各个区县舒适度的变化情况以及典型城市的综合舒适度变化情况。

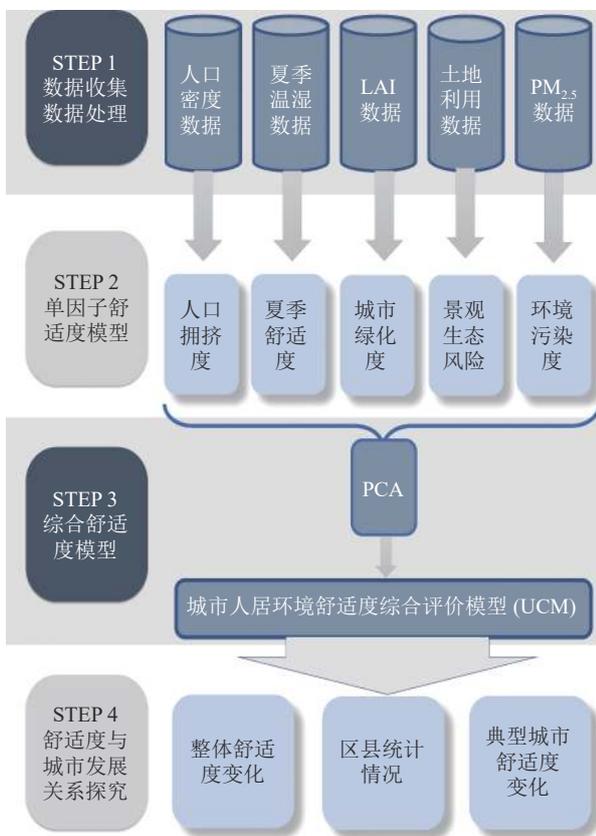


图 2 研究流程

2.2.1 单因子舒适度模型构建 利用原始数据, 通过进一步处理, 得到人口拥挤度、夏季舒适度、城市绿化度、景观安全指数、空气污染度这 5 个单因子舒适度指标(单因子舒适度指标与舒适度之间的关系见表 2), 用于后续城市人居环境舒适度综合评价

表 2 单因子舒适度说明表

数据	舒适度指标	与舒适度的对应关系
人口密度	人口舒适度	数值越高, 人口越疏散, 越舒适
夏季温湿	夏季舒适度	数值越高, 夏季感受越湿润, 越舒适
土地利用	景观安全指数	数值越高, 风险越小, 越舒适
LAI	绿化舒适度	数值越高, 绿化越好, 越舒适
PM _{2.5} 数据	空气舒适度	数值越小, 空气污染越小, 越舒适

模型的建立。

1) 人口舒适度。根据张立杰等^[21]的研究, 人口密度与人体舒适度具有明显的相关关系, 相对密集的地区人为热排放相对较多, 夏季容易导致高温炎热, 增加了炎热程度, 因此可以认为人口密度越高的地区越不舒适。从原始数据中裁剪京津冀地区数据, 归一化并取反, 变为数值越高越舒适后, 作为人口舒适度衡量指标。

2) 夏季舒适度。利用处理好的温度和湿度数据, 使用温湿指数的计算公式, 使用 ArcGIS 的栅格计算器得到 1 km 分辨率的温湿指数数据。温湿指数的计算式^[22]为

$$I_{TH} = t - 0.55(1 - H_R)(t - 14.5),$$

式中: I_{TH} 为温湿指数; t 为摄氏温度(°C); H_R 表示相对湿度(%). 当夏季的 $I_{TH} < 21.1$ 时, 几乎无人有不舒适感; 随着 I_{TH} 的增加, 越来越多的人会感到不舒适; $I_{TH} > 26.7$ 时, 几乎没有人感到舒适^[22]。本文利用温湿指数对夏季舒适度进行评估, 将其归一化并取反, 作为夏季舒适度。

3) 绿化舒适度。增加城市绿色基础设施可以减缓城市化对人居环境舒适度带来的负面影响^[23]。得到 LAI 数据, 为保证数据的统一, 将其重采样成 1 km 分辨率的数据, 进行归一化得到城市绿化度的衡量指标。

4) 景观安全指数。景观安全指数在景观生态风险指数的基础上计算得到, 景观生态风险的计算流程和杨旭等^[24]在重庆市江津区的研究一致, 首先根据面积损失函数计算研究区的最佳粒度, 再利用土地利用数据计算最佳粒度下的景观损失度指数、干扰度指数、脆弱度指数, 得到景观生态风险指数。将计算得到的景观生态风险指数归一化并取反, 得到景观安全指数。

5) 空气舒适度。近年来, 秋冬季节黄淮、华北地区经常受到雾霾天气的困扰, 给城市居民的出行、健康和舒适度带来了一定的影响。为此, 城市管理者也

采取了一定的对策减缓负面影响^[25]。本研究将原始数据转化成 tif 格式, 裁剪得到京津冀区域, 计算年平均值, 重采样得到 1 km 数据, 归一化后取反作为空气污染度的衡量指标。

2.2.2 城市人居环境舒适度综合评价模型 本文在构建城市人居环境舒适度综合评价模型时, 采用主成分分析法将 5 种单因子舒适度降为一维, 作为综合舒适度。主成分分析法^[26]是一种多变量分析方法, 通过线性变换将数据降到低维空间, 并保留数据的主要信息。通过对协方差矩阵进行特征值分解来获取数据的主成分, 实现数据降维。使用主成分分析降维可以减少冗余信息, 更好地理解数据结构和特征, 为后续建模和分析提供更好的基础。

2.2.3 舒适度变化的显著性检验 经过计算各区域各年舒适度的单因子和综合差异后, 为了检验这些差异是否显著, 本文采用了配对样本 t 检验。该检验方法用于比较同一组个体在 2 个不同时间点或 2 个不同条件下的得分差异是否显著。样本必须成对出现, 即每个个体都有 2 个时间点或 2 个条件下的数据。通过计算样本均值、样本标准差和样本大小, 可以得到 t 值, 进而检验得分是否存在显著差异。显著性水平选择为 0.05, 当 $P < 0.05$ 时定义为有显著差异, 当 $P < 0.01$ 时定义为存在极显著差异。

2.2.4 舒适度与城市发展的关系探究

1) 区县统计情况。以区县为单位, 将综合舒适度得到的结果按表格显示地区统计, 得到各个区县的均值, 以 2000 年为基准, 按照自然断点法将均值分为低舒适区、较低舒适区、中舒适区、较高舒适区、高舒适区 5 类, 并进一步分析不同时间不同区县综合舒适度的差异。

自然断点法是一种将连续数据转化为离散数据的方法, 可以将评估结果进行分级, 使得评估结果更加直观和易于理解。其原理是将数据分成不同的组, 使得同一组内的数据相似性最大, 且外部组与组之间的差异性最大。这样就实现了将连续数据分为若干个不同的组别, 从而将连续数据转化为离散数据。本研究在结果的展示方面, 通过自然断点法将评估结果分为 5 个级别, 可以更好地反映不同区域之间舒适度水平差异。

2) 典型城市舒适度的变化。为了探究典型城市舒适度的变化特征, 对京津冀地区主要城市(北京、唐山、保定、天津、石家庄、邯郸)进行统计, 得到这些城市在 2000、2010 和 2020 年 3 个时期的核心区、拓展区 I 和 II 各个单因子及综合舒适度的归一化均值, 并进一步分析 6 个城市整体舒适度的变化情况。

3 结果

3.1 单因子舒适度 构建单因子舒适度模型, 统计得到 3 期的核心区、拓展区 I、拓展区 II 的各个单因子均值, 进一步分析 2000—2020 年这 20 年以来京津冀地区单因子舒适度的变化情况, 并对这种变化做了显著性检验, 单因子舒适度的空间分布以及统计情况如图 3 所示。

通过进一步分析可以得到以下结论:

1) 从绿化舒适度角度看, 北部山地地区和沿岸地区的叶面积覆盖度较高, 而城市的叶面积覆盖率较低。2000—2020 年, 城市绿化舒适度逐年显著提高。在空间上, 2000、2010、2020 年绿化舒适度从大到小依次符合拓展区 II、拓展区 I、城市核心区的规律。

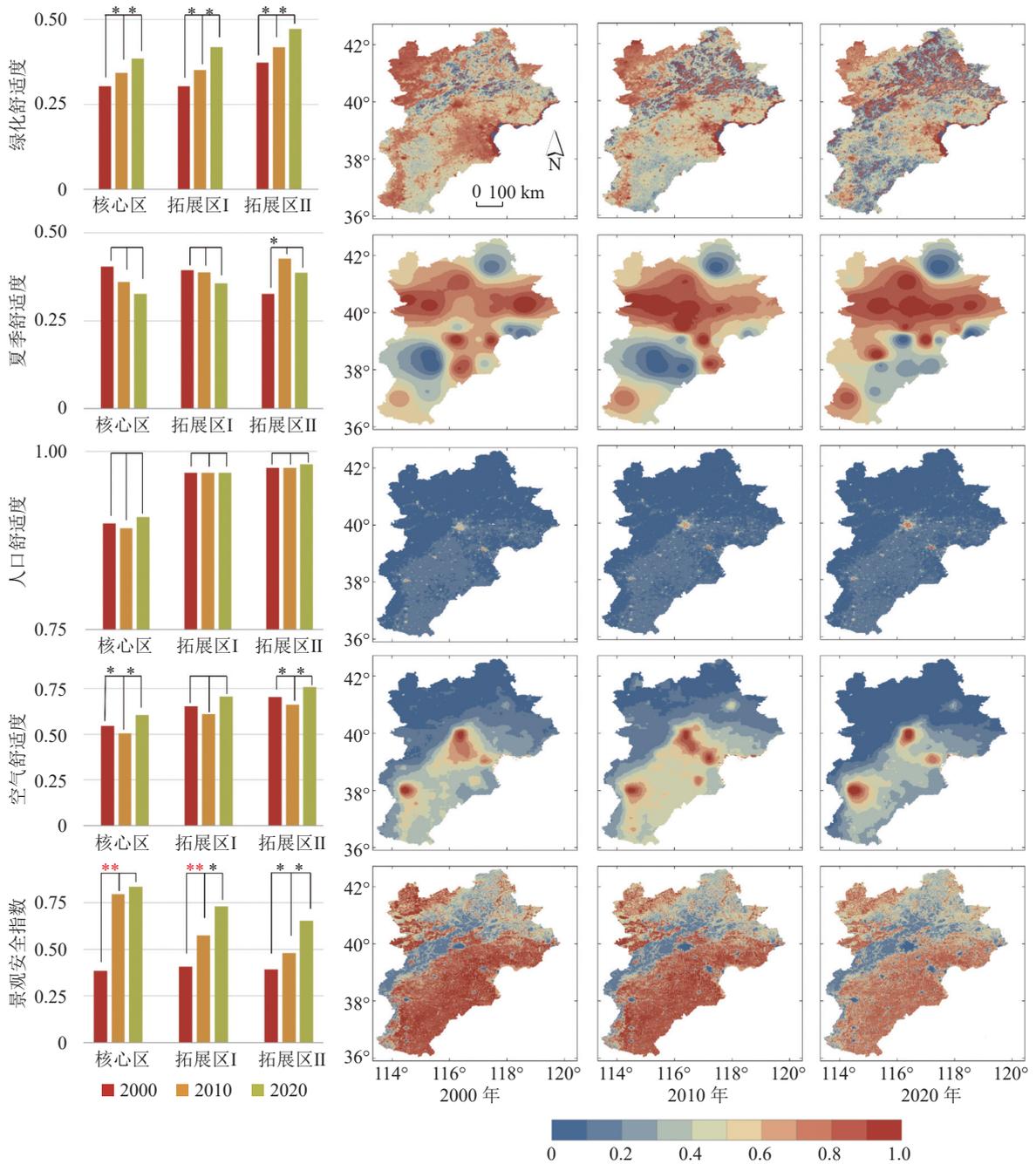
2) 从景观安全指数看, 平原地区的景观生态较脆弱, 城市地区较安全; 而湖泊地区和沿海地区的景观安全指数较低, 表明当地景观生态更加脆弱。从时间上看, 2000—2020 年, 景观生态安全指数显著增加, 表明城市景观生态风险正在缓解。空间变化上, 城市核心区的景观生态安全指数高于城市扩展区, 表明城市郊区的景观生态风险更大。

3) 从人口舒适度来看, 在空间分布上, 人口较多分布于平原地区以及河流流域; 城市人口较多, 农村人口分布较为稀疏。在时间变化上, 2000—2020 年人口舒适度呈现先小幅下降再增加的趋势, 即人口先小幅增加后减少, 但这种变化不显著。在空间变化上, 人口从核心区到拓展区 I 到拓展区 II, 人口逐渐减少, 舒适度提高。

4) 从空气清洁度来看, 在空间分布上, 北部山区的空气清洁度最好, 平原地区次之, 城市区域空气清洁度最差。在时间变化上, 空气清洁度始终呈现先恶化再改善的趋势。在空间变化上, 从核心区到扩展区, 空气清洁度逐渐提升。

5) 就夏季舒适度而言, 从空间分布上看, 平原地区的夏季舒适度较高, 而山地地区和部分城区的夏季舒适度较低。夏季舒适度只在 2000—2010 年的拓展区 II 区域有显著增加趋势, 其他时间舒适度变化都不显著。

3.2 城市人居环境舒适度综合评价模型 选用主成分分析法作为构建城市人居环境舒适度综合评价模型的构建方法, 结果见图 4。统计京津冀地区 2000、2010 和 2020 年 3 个时期的核心区、拓展区 I 和拓展区 II 的综合舒适度均值, 并在图 4 中展示结果。初步分析综合舒适度的时间和空间变化特征, 可知: 在时间变化上, 无论是核心区还是拓展区, 随着时



注: *代表有显著差异, 0.01 < P < 0.05; **代表极显著差异, P < 0.01.

图3 各单因子舒适度分布及统计情况示意

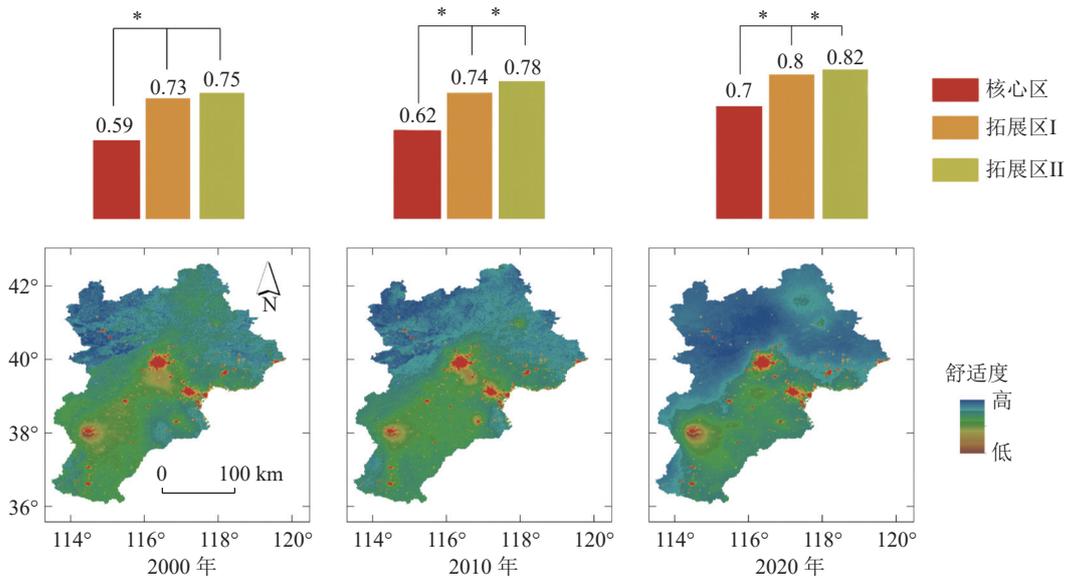
间的推移, 综合舒适度都越来越好, 从 2000—2020 年, 核心区、拓展区 I、拓展区 II 的综合舒适度均值分别增加了 18.5%、9.0%、9.8%; 在空间变化上, 从核心区到拓展区, 整体舒适度逐渐提高, 其中 2000 年核心区-拓展区 I-拓展区 II 综合舒适度均值比例为 1 : 1.232 : 1.269; 2010 年核心区-拓展区 I-拓展区 II 综合舒适度均值比例为 1 : 1.198 : 1.258; 2020 年核心区-拓展区 I-拓展区 II 综合舒适度均值比例为 1 : 1.134 : 1.176.

3.3 综合舒适度与城市发展的关系 行政地域因其

空间边界的相对稳定性, 更加便于城市管理和城市统计工作的开展^[27]. 为更好地了解不同地区的舒适度水平, 将舒适度评估结果从行政地域视角进行统计.

3.3.1 区县统计情况 将综合舒适度按照区县进行统计并按照自然段点法分类得到结果如图 5 所示, 统计各个类别中区县的数量如图 6 所示.

从综合舒适度区县分布情况的统计结果来看, 低舒适度区县与较低舒适度区县的数量逐渐减少. 其中: 相较于 2000 年, 2020 年低舒适度区县减少了 29.4%, 较低舒适度区县减少了 81.6%, 高舒适度区县



注: *代表有显著差异, $P < 0.05$.

图 4 城市人居自然环境舒适度综合评价模型结果

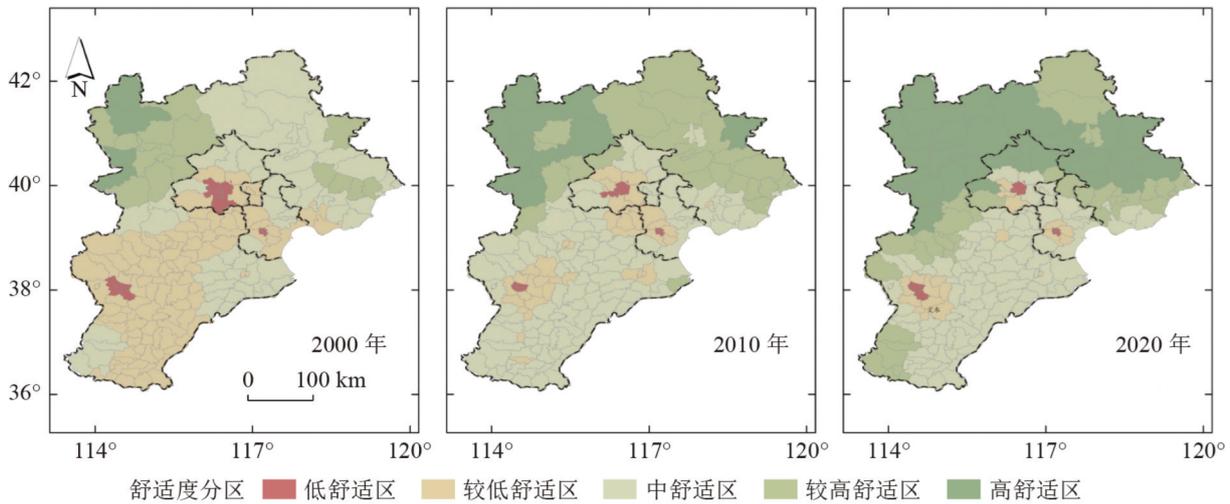


图 5 综合舒适度区县分布情况

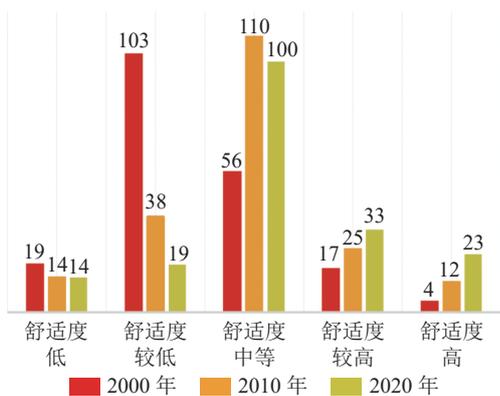


图 6 各类别舒适度区县数量统计

与较高舒适度区县数量逐年增加,其中 2020 年比 2000 年高舒适度区县增加了 4 倍多,较高舒适度区县增加了近 1 倍.这与上一步中得到的京津冀地区的整体综合舒适度逐年提高的趋势一致.在空间维度上,

低舒适度区县主要分布在比较发达的城市,而高舒适度区县则主要分布在山区或不发达的城市.

出现这种现象的原因可能是:比较发达的城市通常有更多的人口和更多的工业、交通等活动,这些活动会导致环境质量的下降,从而降低舒适度;而山区或不发达的城市相对来说环境质量更好,自然资源更丰富,因此舒适度也更高.

3.3.2 典型城市舒适度的变化 统计京津冀地区典型城市综合舒适度的变化,结果见图 7 和表 3.经分析,北京、唐山、保定、邯郸的舒适度变化趋势与京津冀整体一致.时间上,综合舒适度递增;空间上,从核心区到拓展区,整体舒适度逐渐升高.天津和石家庄在空间上也遵循整体趋势,但在时间上呈现先恶化后改善的趋势.天津、石家庄与其他城市的规律存在差异的原因可能是 2 座城市规模较大,发展较慢,基

基础设施和建筑物质量提高需要更长时间,但政府对规划和管理的投入却不足,因此舒适度趋势与其他几个城市不同,在一定时间段内可能会先恶化再改善。

不同城市的舒适度之间存在明显差异.具体而言,北京和石家庄的舒适度较低,保定和天津适中,唐山和邯郸的舒适度较高.这些城市在政治、经济和文化等方面的职能不同^[28],因此其城市指标之间存在较大差异,从而导致了舒适度的不同表现.此外,城市规模也是一个可能的影响因素.城市规模大,通常面临

着更多的环境问题,对舒适度有一定的负面影响,因此,我们需要综合考虑不同城市的职能和规模等级等因素,才能更好地解释城市舒适度的差异。

总之,通过统计京津冀地区典型城市综合舒适度的变化可以看出,各城市的舒适度变化与京津冀地区整体趋势基本一致.然而,仍有少数城市与整体趋势有差异,同时,不同城市的舒适度数值也不同,反映了城市之间的差异.这提醒城市管理者要因地制宜,根据实际情况制定相应的城市规划。

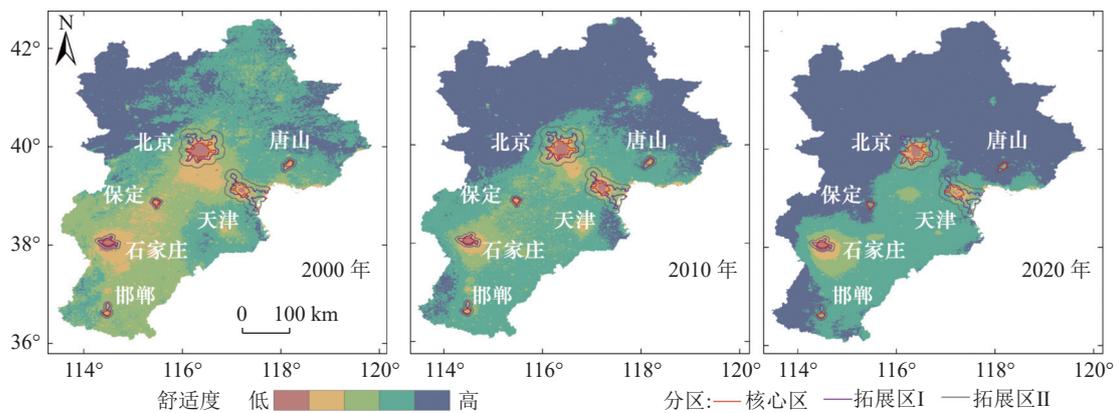


图7 京津冀地区典型城市舒适度年际变化情况

表3 京津冀地区典型城市统计

研究区	2000年			2010年			2020年		
	核心区	扩展区I	扩展区II	核心区	扩展区I	扩展区II	核心区	扩展区I	扩展区II
北京	0.453	0.673	0.757	0.527	0.716	0.792	0.579	0.763	0.863
唐山	0.726	0.804	0.829	0.764	0.835	0.861	0.851	0.888	0.900
保定	0.619	0.707	0.735	0.690	0.764	0.798	0.832	0.865	0.879
天津	0.616	0.757	0.779	0.513	0.735	0.787	0.679	0.786	0.837
石家庄	0.297	0.478	0.560	0.447	0.593	0.661	0.444	0.563	0.628
邯郸	0.685	0.751	0.779	0.704	0.775	0.812	0.807	0.846	0.865

4 讨论

本文采用人口密度、景观生态风险、PM_{2.5}质量浓度、LAI指数以及温湿指数等5个指标,通过主成分分析法构建城市人居环境自然舒适度评价模型.结果表明:京津冀地区的自然舒适度发生了较多改变,城市绿化改善主要归功于政府采取的一系列绿色城市政策和措施^[29];郊区景观类型的多样化导致景观生态风险增加,使景观安全指数变小^[30];城市的进一步发展可能会限制人口的增加,从而影响人口舒适度^[31].城市污染气体排放管控政策降低了空气污染^[32];城市夏季舒适度的变化与全球气候变化密切相关^[33].相对而言,绿化舒适度是影响城市整体舒适度的主要控制因素,可通过合理的建筑设计和绿化措施^[34]、平衡区

域发展^[35]等方案,提高人居环境自然舒适度。

相比以往的研究^[36-38],本文针对京津冀地区的舒适度进行了更为全面深入的分析.以往的研究主要从气候方面评估整个京津冀地区^[38]、区县尺度^[37]以及典型城市^[36]的舒适度,而本文则针对研究区整体自然生态尺度,分析了不同城市化进程阶段下京津冀地区的自然舒适度情况.此外,本文还从整体、县级和典型城市3个不同尺度进行了具体分析,以更好地了解城市人居环境舒适度的空间分布和变化趋势,也更加全面地认识京津冀地区的自然舒适度状况,合理评估城市的环境质量和生态效益。

当然,本研究仍然有一些不足之处.在指标的选取方面,所使用的评估要素主要聚焦于生态方面.相较于社会和经济等其他因素,生态因素往往更容易通

过遥感和地理信息系统等技术手段进行测量和分析^[39]。然而,在城市化进程中,城市规划、建筑设计^[40]、交通和噪声等多种因素也会对城市居民的生活质量产生影响。城市居民对自然环境舒适度的需求和偏好各不相同,这种心理舒适度主要基于主观感受^[41],与本研究的城市地区的自然舒适度存在区别。

5 结论

本文以京津冀地区为例,综合考虑人口舒适度、夏季舒适度、绿化舒适度、景观安全指数和空气清洁度等 5 个舒适度综合评价因子,构建了人居环境质量综合指数。据此分析了 2000—2020 年京津冀地区人居环境自然舒适度的时空分异规律,探究了 20 年间城市的建成区的发展变化对人居自然舒适度的影响,得到以下结论:

1)在时间变化上,2000—2020 年,核心区、拓展区 I、拓展区 II 的综合舒适度均值分别增加了 18.5%、9.0%、9.8%。主要原因是绿化舒适度显著变好、景观生态安全指数显著增加、空气清洁度有所改善;

2)在空间变化上,从核心区到拓展区,绿化舒适度逐步增大、景观安全指数逐步降低、人口舒适度逐渐增大、空气清洁度逐渐提升、夏季舒适度逐步增大,这些因素共同作用于综合舒适度,使得从核心区到扩展区,综合舒适度逐渐升高;

3)就区县统计情况而言,高舒适度区县与较高舒适度区县数量逐年增加,其中 2020 年比 2000 年高舒适度区县增加了约 4 倍,较高舒适度区县增加了约 1 倍;典型城市的舒适度变化与京津冀地区整体变化趋势大体一致,但仍有个别城市与整体变化趋势有差别。

6 参考文献

[1] 陈华疆. 城市园林绿地微气候效应及其对人体舒适度影响研究[J]. *城市建筑*, 2021(14): 170

[2] 赖鑫, 卢超, 李磊, 等. 深圳不同发展程度地区的舒适度特征分析[J]. *热带气象学报*, 2020, 36(2): 180

[3] 徐立强. 基于GIS的人居环境气候舒适度评价[J]. *农业灾害研究*, 2022, 12(8): 155

[4] 贾海源, 陆登荣. 甘肃省人体舒适度地域分布特征研究[J]. *干旱气象*, 2010, 28(4): 449

[5] 陈华忠, 陈力, 李泓明, 等. 玉环市人居环境气候舒适度评价及特征分析[J]. *绿色科技*, 2022, 24(18): 42

[6] 郝庆, 单菁菁, 邓玲. 面向国土空间规划的人居环境自然适宜性评价[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(5): 86

[7] 张文忠. 宜居城市的内涵及评价指标体系探讨[J]. *城市规划学刊*, 2007(3): 30

[8] WARNI E, ZAINUDDIN Z, AMPERIENTO M F. Smart

city application: community survey system of urban comfort level[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 875(1): 012042

[9] 吴良镛. 人居环境科学导论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001

[10] 杨文海, 陈炜, 景博. 固原市人居环境气候舒适度分析[J]. *陕西气象*, 2023(1): 62

[11] 封志明, 唐焰, 杨艳昭, 等. 基于GIS的中国人人居环境指数模型的建立与应用[J]. *地理学报*, 2008, 63(12): 1327

[12] 郝慧梅, 任志远. 基于栅格数据的陕西省人居环境自然适宜性测评[J]. *地理学报*, 2009, 64(4): 498

[13] 付博. 基于GIS和遥感的长春市宜居性环境评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011

[14] 魏伟, 石培基, 冯海春, 等. 干旱内陆河流域人居环境适宜性评价: 以石羊河流域为例[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(11): 1940

[15] 曹开军, 杨兆萍, 孟现勇, 等. 基于栅格尺度的阿勒泰地区旅游气候舒适度评价[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(5): 1420

[16] 李威, 赵卫权, 苏维词. 基于GIS技术的黔中地区人居环境自然适宜性评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(5): 1082

[17] 郑晨. 基于遥感的城市人居环境适宜性综合评价研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2019

[18] 魏献花, 白永平, 车磊, 等. 基于栅格的关中平原城市群人居环境质量综合评价[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(5): 1176

[19] 王雨枫. 京津冀区域人口与经济时空演变分析[J]. *经济问题探索*, 2022(11): 90

[20] 王奕璇. 兰州新区城市扩张及土地利用变化时空特征研究[D]. 兰州: 西北师范大学

[21] 张立杰, 张丽, 李磊, 等. 2011年深圳人体舒适度空间分布特征及影响因子分析[J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(6): 134

[22] 王远飞, 沈愈. 上海市夏季温湿效应与人体舒适度[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1998(3): 60

[23] XI C, DING J W, WANG J Q, et al. Nature-based solution of greenery configuration design by comprehensive benefit evaluation of microclimate environment and carbon sequestration[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 270: 112264

[24] 杨植, 信桂新, 蒋好雨, 等. 基于最佳尺度的景观生态风险时空变化研究: 以重庆市江津区为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(5): 576

[25] CHEN B, WANG X P, CHEN J Q, et al. Forestry strategies against PM_{2.5} pollution in Beijing[J]. *The Forestry Chronicle*, 2015, 91(3): 233

[26] SHLENS J. A tutorial on principal component analysis[J]. arXiv preprint arXiv, 2014, 1404.1100: 1–12

[27] 徐智邦, 焦利民, 王玉. 1988—2018年中国城市实体地域与行政地域用地扩张对比[J]. *地理学报*, 2022, 77(10): 2514

[28] 曾春水, 林明水, 伍世代, 等. 京津冀城市群城市职能演

- 变与高质量发展关系研究[J]. 生态经济, 2022, 38(7): 107
- [29] 陈向国. 绿色、智慧为宗旨聚焦京津冀智慧供热发展: “2021绿色城市与智慧供热技术创新大会”成功召开[J]. 节能与环保, 2021(5): 18
- [30] 郭力嘉, 刘瑞民, 门聪, 等. 城市扩张背景下京津冀地区景观格局演变及生态风险变化评价研究[C]//中国环境科学学会科学技术年会论文集. 合肥: 2018
- [31] CHEN Y Q, SUN Z Y, CAI L W. Population flow mechanism study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from industrial space supply perspective[J]. *Sustainability*, 2021, 13(17): 9949
- [32] 王迪, 韩立建, 李世玉, 等. 城市群空气污染综合评估范式与应用: 以京津冀城市群PM_{2.5}污染为例[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4278
- [33] ZHANG S, HUANG G, QI Y J, et al. Impact of urbanization on summer rainfall in Beijing-Tianjin-Hebei metropolis under different climate backgrounds[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 133(3): 1093
- [34] 何宝杰, 尹名强. 应对城市高温的国际总体行动、策略与指南[J]. *国际城市规划*, 2022, 340: 14
- [35] HUANG J L, TANG Z, LIU D F, et al. Ecological response to urban development in a changing socio-economic and climate context: policy implications for balancing regional development and habitat conservation[J]. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104772
- [36] 曹云, 孙应龙, 吴门新. 近50年京津冀气候舒适度的区域时空特征分析[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7567
- [37] 张林林, 陈铁喜. 1989—2018年京津冀地区人体舒适度的变化特征[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2021, 41(4): 53
- [38] HUANG J W, SHEN S, ZHAO M, et al. Assessment of summer regional outdoor heat stress and regional comfort in the Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration over the last 40 years[J]. *GeoHealth*, 2023, 7(1): e2022GH000725
- [39] 杜婷. 北京市环境舒适度度量及环保对策研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006
- [40] 徐志华, 冯武军, 张映冰, 等. 高层楼群近地风环境对人居生态的影响以及利用景观建筑设计措施缓解[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(增刊): 127
- [41] 王晨. 基于心理舒适偏好的旧城区城市肌理优化标准与策略研究: 以大城市居住区为例[D]. 天津: 天津大学, 2020

Impact of urban development on natural comfort of human living environment in Beijing-Tianjin-Hebei region

BAI Yuhong¹⁾ QIN Xinya²⁾ ZHAO Xiang¹⁾ SUN Zhongping³⁾

(1) State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Faculty of Geographical Science, Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing, China;

2) School of Artificial Intelligence, Beijing Normal University, Beijing;

3) Satellite Application Center for Ecology and Environment, MEE, Beijing, China)

Abstract Multi-source remote sensing data were used to construct a comprehensive evaluation model for natural environment comfort of urban living, with principal component analysis. This model was applied to the Beijing-Tianjin-Hebei region, to evaluate changes in natural environment comfort in 2000, 2010 and 2020, under the background of urban development. The overall comfort level of urban residents in the region improved gradually, starting from the city center to the city periphery, with an average increase of about 10%. Compared with 2000, the comfort level in 2020 improved, the total number of high-comfort districts and counties nearly doubled in 2020. Changes in comfort level in typical cities are generally consistent with the overall trend, but differences are noted in the speed of improvements.

Keywords Beijing-Tianjin-Hebei; residential environment; natural comfort; urban development; influence factor

【责任编辑: 刘先勤】