

曹永强, 路洁. 辽宁省气候舒适度变化及未来趋势预测[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(3): 32-42.

CAO Yongqiang, LU Jie. Climate comfort change and future trend forecast in Liaoning Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(3): 32-42.

辽宁省气候舒适度变化及未来趋势预测

曹永强, 路洁

(辽宁师范大学 地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘要: 气候舒适度是人居环境建设的重要依据, 研究其历史演变规律及未来变化趋势对人与环境协调发展至关重要。基于辽宁省 23 个典型气象站点 1967—2018 年逐日气象资料, 利用线性倾向及通径分析等方法分析各等级舒适日数的时空分布格局及其演变特征, 并探究其影响因素, 在此基础上预估了未来气候变化对气候舒适度的影响程度。结果表明: (1) 辽宁省全年舒适和热不舒适日数分别以 3.22 d/10 a 和 0.32 d/10 a 的速率上升, 冷不舒适日数以 -3.54 d/10 a 的速率下降; (2) 各等级舒适日数分布及变化趋势都具有空间异质性, 沈阳市人口对气候舒适响应最强, 朝阳市最弱; (3) 舒适和冷不舒适日数变化的主要影响因素是气温和风速, 湿度只有在温度高时对热不舒适日数影响明显; (4) 在未来气候变化情景下辽宁省气候舒适日数表现为先增加达到最舒适环境, 而后随着气温的升高而减少。

关键词: 气候舒适度; 时空演变; 未来气候; 舒适福利; 辽宁省

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.03.004

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: K903

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)03-0032-11



Climate comfort change and future trend forecast in Liaoning Province

CAO Yongqiang, LU Jie

(School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: Climate comfort is an important basis for the construction of human settlements. Research on its historical evolution and future trends is crucial to the coordinated development of humans and the environment. Based on daily meteorological data from 23 typical meteorological stations in Liaoning Province from 1967 to 2018, the spatial and temporal distribution patterns and evolution characteristics of comfortable days of various grades are analyzed by using linear trend and path analysis methods, and the influencing factors are explored. Estimated the impact of future climate change on climate comfort. The results show that: (1) The number of comfortable and thermal uncomfortable days in Liaoning Province increases at a rate of 3.22 d/10 a and 0.32 d/10 a, and the number of cold and uncomfortable days decreases at a rate of -3.54 d/10 a; (2) Both the distribution of comfort days and the trend of change of each level are spatially heterogeneous. The population of Shenyang has the strongest response to climate comfort and the weakest in Chaoyang. (3) The main influencing factors for the change of comfort and cold and uncomfortable days are temperature and wind speed. When the temperature is high, the effect on the number of thermal discomfort days is obvious. (4) Under the future climate change scenario, the climate comfort day in Liaoning Province will increase first to reach the most comfortable environment, and then decrease with the increase of temperature.

Keywords: climate comfort; time and space evolution; future climate; comfort welfare; Liaoning Province

收稿日期: 2020-06-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51779114); 2020年辽宁省重点研发计划(2020JH2/10200043)

作者简介: 曹永强(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

0 引言

随着社会发展,人类对居住环境及生活质量的要求不断提高,气候作为影响人居环境适宜程度的主要因子,对人类行为活动具有重要指向作用。气候舒适度是从气象学角度评价不同天气条件下人体冷热舒适程度的生物气象指标^[1],其意义在于可以科学指导人们旅游出行以及根据气象变化适当改变行为活动,以更好地适应环境^[2]。人体舒适度指数是基于主要指标气温及辅助指标湿度和风速等气象因子综合作用下的较为常用的表征气候舒适度的方法^[3],能较好反映多数人群的身体感受。因此,运用气候舒适度指数及分级标准进行气候舒适度研究具有重要实践意义。

目前,国内外学者对气候舒适度展开了广泛研究。国外针对气候舒适度的研究始于20世纪40年代,BRUNT^[4]首先建立了气候与人体舒适度之间的关系,阐明了各气候因子对人体舒适度的影响,使气候舒适度这一课题逐渐受到重视;TERJUNGU、OLIVER等^[5-6]学者提出了气候舒适度的评价模型,使气候舒适度展开了广泛的研究工作,其中包括温湿指数、舒适指数和和风效指数等。20世纪90年代以来,我国学者展开了众多气候舒适度评价的研究,主要集中于三个方面:一是人体舒适度评价指标的建立,例如李山等^[7]提出了运用季节锚点法制定的具有普适性的舒适度分级标准,给出了针对中国区域的“暑—热—暖—温—凉—冷—寒”7级体感划分标准;二是研究不同尺度范围舒适度的时空演变规律,曹永强等^[8-9]分析了辽宁省不同等级舒适日数的季尺度演变特征,结果表明辽宁省舒适程度夏季>秋季>春季>冬季;唐亚平等^[10]使用旋转经验正交分解法(EOF),将辽宁分成4个气候舒适区,并分析了各区域气候舒适度的空间分布特征和变化趋势;此外是在舒适度延伸的应用方面的研究,包括各旅游区舒适月份人体舒适度特征等方面,例如余志康^[11]对40°N以北城市夏季气候舒适度及消夏旅游潜力进行了分析,结果表明我国最适宜消夏旅游地区主要分布在高纬地区的中东部,以东北三省最具竞争力。

许多学者对辽宁省气候舒适度做了相关研究,但总体来说,这些研究大多集中于人体舒适度的时空演变特征分析及区划,对气候变化下人口分布对辽宁省舒适度响应的研究存在一定空白,且对其影响因素及未来气候舒适时期时间长短的预测也相对较少。因此,本文在学习前人研究成果的基础上,选取辽宁省

1967—2018年气象站点观测资料,基于气候舒适度指数及统一舒适度评价标准,统计分析辽宁省52 a来各等级舒适逐日累计日数,运用通径分析方法探讨其影响因素,在此基础上预估了未来气候变化对气候舒适度的影响,该研究结果可为辽宁省可持续发展及提升人居适宜性方面提供一定参考。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

辽宁省位于东北平原南部,南临黄、渤二海,全省陆地总面积14.8万km²,占全国陆地总面积的1.5%。属温带大陆性季风气候区,境内雨热同期,日照丰富,积温较高,冬长夏暖,春秋季节短,年平均气温在7~11℃之间,四季分明,降水适中,年降水量在600~1100mm之间,部分地区常年多风,尤以春秋两季更为强盛,年平均风速为1.5~5.2m/s。辽宁省地形复杂,地貌类型多样,由山地、丘陵、平原构成,受地形影响省内区域气候各异,是我国重要的避暑胜地和风景旅游区。辽宁省人口集中,城市集聚,据统计,2018年末其常住人口达4359.3万人^[12]。

1.2 数据来源

本文气象数据源于中国气象数据网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),为保证数据的指标完整性、时间连续性和空间代表性,剔除数据不完整站点,选用1967—2018年辽宁省23个站点的平均温度、相对湿度、风速等气象指标日数据,对于缺测日数据采用线性回归模型进行插补,辽宁省气象站点分布如图1所示。各市面积和人口数据源于辽宁省统计局(<http://www.ln.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/rkpcgb/>),选取目前最新的四普(1990年)、五普(2000年)和六普(2010年)辽宁省各地级市人口数据。未来气候变化情景数据选用21世纪前期、中期、末期RCP2.6和RCP8.5排放情景下的气温资料,各模式信息参考<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>,随后敖雪基于21个CMIP5(耦合模式比较计划第五阶段)气候模式模拟结果,经等权重算术平均得到多模式集合资料(分辨率1°×1°),并双线性插值到东北地区气象站点上,将其预估结果与基准年比较后得到中国东北地区不同气候情景下未来100年的气候变化情况,具体数据见文献[13]。

1.3 研究方法

1.3.1 舒适度指数法

目前,国内外提出了很多气候舒适度评价模

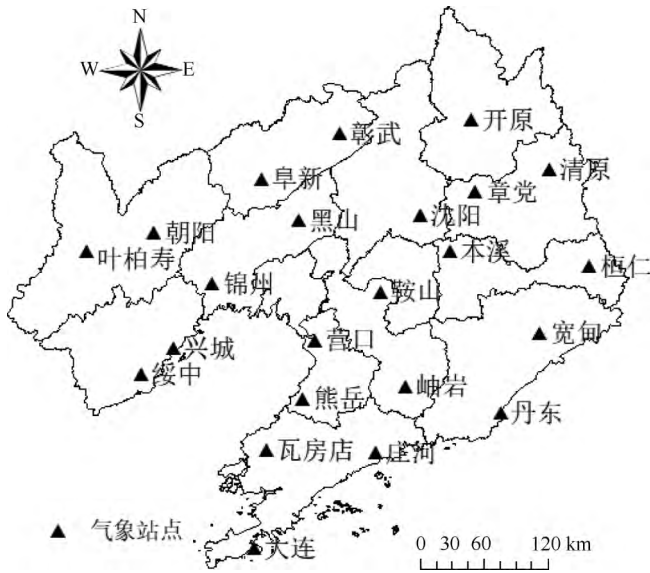


图1 辽宁省23个气象站点空间分布
Fig.1 Spatial distribution of 23 meteorological stations in Liaoning Province

型^[14], 本文综合考虑了影响气候舒适度的多种气象指标, 结合辽宁省既沿海湿度大又靠近冬季风源地风速大的气候特征, 采用应用相对广泛的 KSSD 经验模型^[9], 计算公式为

$$I = 1.8T + 32 - 0.55(1 - H_R/100) \times (1.8T - 26) - 3.2\sqrt{V} \quad (1)$$

式中, T 为温度($^{\circ}\text{C}$); H_R 为湿度(%); V 为风速(m/s)。

本文根据辽宁省气候特点, 参考前人研究成果将舒适度指数进行分级^[9], 等级划分情况如表1所列。

表1 辽宁省舒适度等级划分

Table 1 Classification of comfort levels in Liaoning Province

感觉类别	级别	人体感觉	舒适度指数
冷不舒适	1	极度寒冷, 裸露皮肤冻伤	$I < 0$
	2	很寒冷, 人体感觉极不舒适	$0 \leq I < 25$
	3	寒冷, 人体感觉不舒适	$25 \leq I < 38$
	4	很凉, 大多数人感觉不舒适	$38 \leq I < 50$
舒适	5	凉, 大多数人感觉较舒适	$50 \leq I < 58$
	6	温暖, 人体感觉舒适	$58 \leq I < 70$
	7	暖, 大多数人感觉较舒适	$70 \leq I < 75$
热不舒适	8	热, 大多数人感觉不舒适	$75 \leq I < 80$
	9	炎热, 人体感觉不舒适	$80 \leq I < 85$
	10	极热, 人体感觉极不舒适	$85 \leq I < 88$
	11	酷热, 有中暑的高可能性	$I \geq 88$

此外, 在进行各等级气候舒适度分析统计时, 采用数理统计方法包括线性倾向法、Mann-Kendall 突变检验、累计距平^[15]等, 在空间分析上采用反距离权重插值法。在影响因素方面采用途径分析方法^[16]。

1.3.2 气候舒适期福利指标

气候舒适福利是基于各气象站点舒适期(不舒适期)数据和人口普查数据计算出来的, 主要反映人口分布与气候变化的关系^[17], 计算方式为

$$L^{(P)} = \sum_i (L_i \cdot P_i / P) \quad (2)$$

$$L^{(A)} = \sum_i (L_i \cdot A_i / A) \quad (3)$$

$$I^{(C)} = L^{(P)} / L^{(A)} \quad (4)$$

式中, $L^{(P)}$ 为人均福利值(d); L_i 为 i 站点的气候舒适日数(d); P_i 为 i 站点所在地级市人口数(人); P 为全省人口数(人); $L^{(A)}$ 为自然本底值(d); A_i 为 i 站点所在地级市面积(m^2); A 为全省总面积(m^2), $I^{(C)}$ 为趋适指数。

气候舒适期计算得到的人均福利越大, 说明人均享受的气候舒适福利越大; 趋适指数反映人口对气候的响应机制, 趋适指数越大, 说明人口对气候的响应越强烈, 若大于1, 说明人口向气候舒适地区集聚, 若小于1, 说明人口向舒适期少的地方集聚, 不同地区气候舒适期长短的差异导致人口分布迁移呈现不同的响应机制。

1.3.3 途径分析

途径分析可以估算某一因子对因变量的直接影响, 也可以估算某一因子通过其他因子对因变量的间接影响^[16]。具体公式如下。

若有 n 个自变量(x_1, x_2, \dots, x_n) 和因变量 y 间存在相关性, 线性回归方程为

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (5)$$

基于自变量和各因变量间相关系数 r_{xy} 及自变量间相关系数 $r_{x_i x_j}$, 对式(5)进行数学变换得到矩阵方程

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{x_1 x_2} & \dots & r_{x_1 x_n} \\ r_{x_2 x_1} & 1 & \dots & r_{x_2 x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{x_n x_1} & r_{x_n x_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{y x_1} \\ p_{y x_2} \\ \vdots \\ p_{y x_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{x_1 y} \\ r_{x_2 y} \\ \vdots \\ r_{x_n y} \end{bmatrix} \quad (6)$$

解方程(6)即可求出途径系数 $p_{y x_i}$, 表示自变量 x_i 对因变量 y 的直接途径系数, 即 x_i 对 y 直接作用效应; $r_{x_i x_j} p_{y x_j}$ 为自变量 x_i 通过 x_j 对因变量 y 的间接途径系数, 即 x_i 通过 x_j 对 y 的间接作用效应。

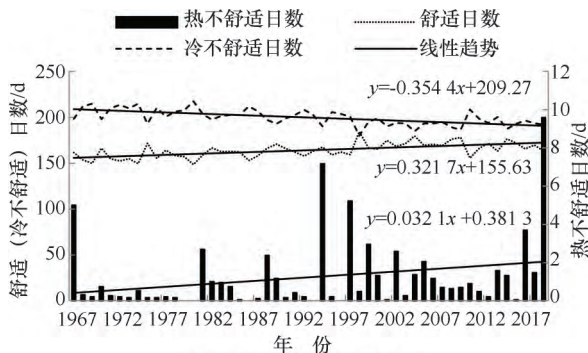
2 结果与分析

2.1 辽宁省气候舒适度时空变化

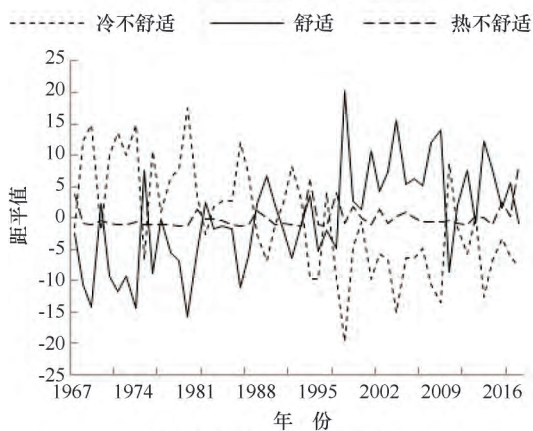
2.1.1 辽宁省气候舒适度时间变化特征

为分析辽宁省年均气候(不)舒适日数的长期变

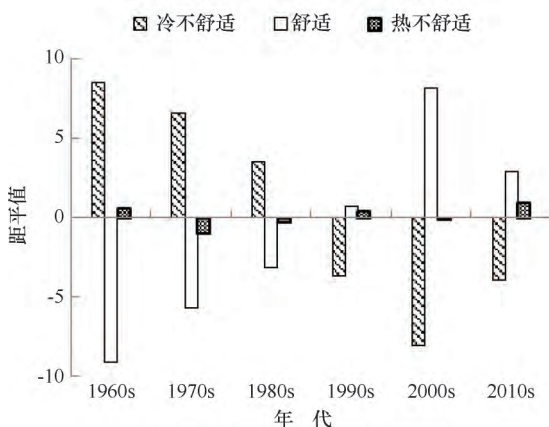
化, 根据辽宁省 1967—2018 年逐日气象资料, 计算逐日气候舒适度指数, 经表 1 定义每日舒适度级别, 并通过统计得到辽宁省不同等级舒适日数多年平均值, 并以气候(不)舒适日数平均值为常年值, 探讨辽宁省近 52 a 的气候(不)舒适期年序列变化趋势及距平变化特征。由图 2(a) 和 2(b) 可以看出, 1967 年以来, 辽宁省气候舒适日数距平值呈明显上升趋势, 其变化速率为 3.22 d/10 a ($p < 0.05$)。年均气候舒适日数距平在 1998 年前多为负值, 之后多为正值, 舒



(a) 各等级舒适日数变化趋势



(b) 各等级舒适日数距平值年际变化



(c) 各等级舒适日数距平值年代变化

图 2 辽宁省气候舒适度时间变化特征

Fig. 2 Temporal variation characteristics of climate comfort in Liaoning Province

适日数在 1967—2018 年间虽然出现多次短暂下降趋势, 但总趋势是上升的, 说明 52 a 来辽宁省气候状况逐渐向好的方向发展, 人体舒适感越来越强。

从热、冷不舒适日数时间变化曲线中可以看出, 1967 年以来, 辽宁省热不舒适日数呈显著上升趋势 ($p < 0.05$), 其变化速率为 3.21 d/10 a, 冷不舒适日数呈明显下降趋势 ($p < 0.05$), 其变化速率为 -3.54 d/10 a。年均气候热不舒适日数距平在 1993 年前多为负值, 之后多为正值, 年均气候冷不舒适日数距平在 1996 年前多为正值, 之后多为负值。这是由于全球气候变暖, 平均气温上升明显, 使辽宁省热不舒适日数逐年增加, 冷不舒适日数逐年减少。

从年代际变化也可以看到(见图 2(c)), 20 世纪 80 年代末是辽宁省各等级舒适日数出现明显变化的时段, 舒适日数由明显的负距平变为正距平, 冷不舒适日数也由原来的正距平变为负距平, 热不舒适日数各年代在零值附近波动变化, 2010 s 增加最多, 达到了 0.91 d, 这是由于近年相较 1960 s 气候变化明显, 同时也印证了近年来全球气候变暖的事实。

为进一步判断年均气候舒适日数演变趋势的持续性变化及突变时间, 对辽宁省年均气候舒适日数进行 Mann-Kendall 突变检验(见图 3), 由图 3 可以看出, 尽管气候舒适日数的累计距平均为负值, 1967 年以来, 辽宁省年均气候舒适日数经历了一次显著波动, 从 52 a 的平均值来看, 从 1960 年代至 1980 年代末, 年均气候舒适日数表现为持续减少趋势, 而在 1997 年之后开始呈增长趋势且至今未减; 从 UF 曲线和 UB 曲线的交点可以看出气候舒适日数于 1988 年发生突变, 这种现象与 1987 年发生的气温突变(升高)有关^[18], 说明在一定区间内气温和舒适日数呈正相关。

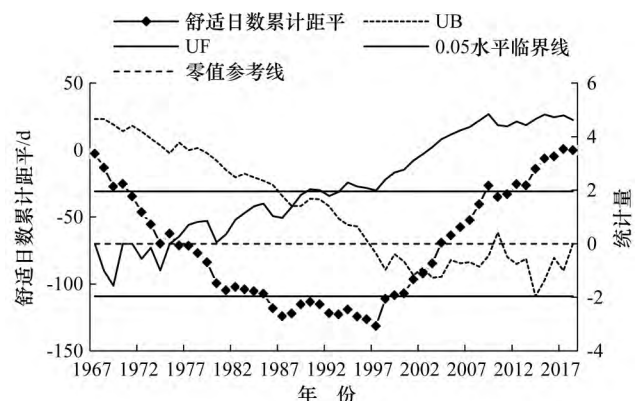


图 3 气候舒适期累计距平和 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 3 Cumulative anomalies and Mann-Kendall mutation test during climate comfort period

2.1.2 辽宁省气候舒适度空间分布及演变特征

统计辽宁省各站点多年平均气候(不)舒适日数,并用反距离权重插值法进行空间插值,得到年均气候舒适期(冷、热不舒适期)空间分布图(见图4)。图4(a)表明辽宁省年均气候舒适日数大致由辽东半岛和西南沿海向东北递减,全省气候舒适日数均高于

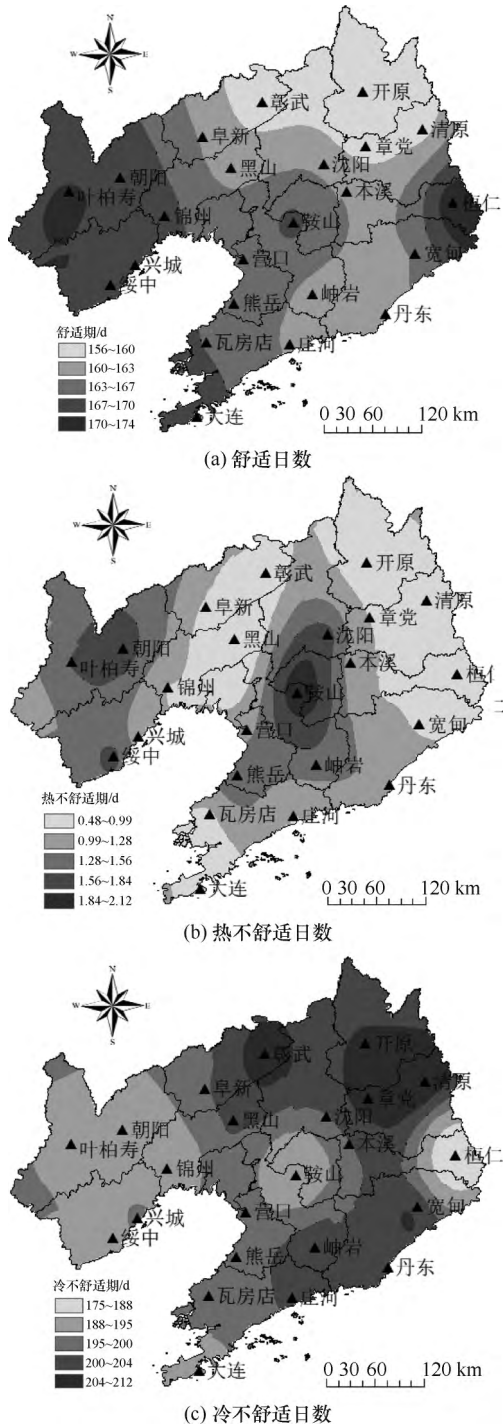


图4 1967—2018年辽宁省气候舒适度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of climate comfort in Liaoning Province from 1967 to 2018

151 d,这是由于辽西依山,辽东靠海,使辽宁省具有海洋性气候特点,气候湿润温差小,舒适期长^[19]。西部地区舒适期优于东部,但其经济相对落后,在以后的发展过程中应重点发挥自身气候优势,树立生态绿色发展观,做好产业规划,如在农业方面可提高农作物经济效益,发展生态农业,积极探索不同于沿海城市的旅游特色等,转变经济发展方式,实现又好又快发展。

由图4(b)可以看出年均热不舒适日数大致由辽宁省东北向西北和南部递增,全省气候热不舒适日数介于0.71~2.13 d,其中热不舒适期较大值主要位于辽西地区以及辽中的鞍山地区,年均热不舒适日数大约为2 d以上,这是由于西北部位于内陆,受大陆干燥冷气团控制,夏季炎热降水少,鞍山则是由于人口密集,受城市热岛效应影响;图4(c)为冷不舒适日数空间分布图,可以看出冷不舒适日数由东北向西北和辽东半岛方向递减,与舒适日数空间分布相反,全省冷不舒适日数均达到了187 d以上,这是由于辽东北地区相较于其他地区纬度较高,冬季寒冷漫长。

为了分析1967—2018年辽宁省气候(不)舒适期的分布格局及空间演变规律,统计辽宁省各站点多年平均气候(不)舒适日数线性倾向率,绘制年均(不)舒适期空间分布图(见图5)。从图5(a)和5(b)可以看出气候舒适日数和热不舒适日数的增加在全省具有普遍性,除少数站点外线性倾向率均为正值,舒适日数以辽东南和辽中增加趋势最为显著,其中鞍山、锦州线性倾向分别达到了6.36 d/10 a、5.31 d/10 a,而热不舒适日数在辽中和辽南增加趋势最为显著。图5(c)为冷不舒适日数线性倾向率分布,从图中可以看出,冷不舒适日数的减少在全省具有普遍性,辽宁省各站点气候舒适日数的线性倾向率全为负值,说明全省冷不舒适日数都处于减少趋势,其中辽中鞍山以及大连、开原减少趋势最为显著。

2.1.3 辽宁省人口对气候舒适度的响应

人口流动是一种随着社会经济变化并因众多因素交织而产生的社会行为^[20],其中气候舒适度也是影响人口的迁移和流动的重要因素,因此基于四普(1980—1990年)、五普(1990—2000年)、六普(2000—2010年)各地级市人口数据及相应时间段内各地级市所有站点气候舒适日数平均值,探讨了气候变化下人口分布对辽宁省舒适度的响应。

气候舒适福利是气候福利的一种类型,综合考虑了气候与人口的空间分布状况,是气候变化人文响应

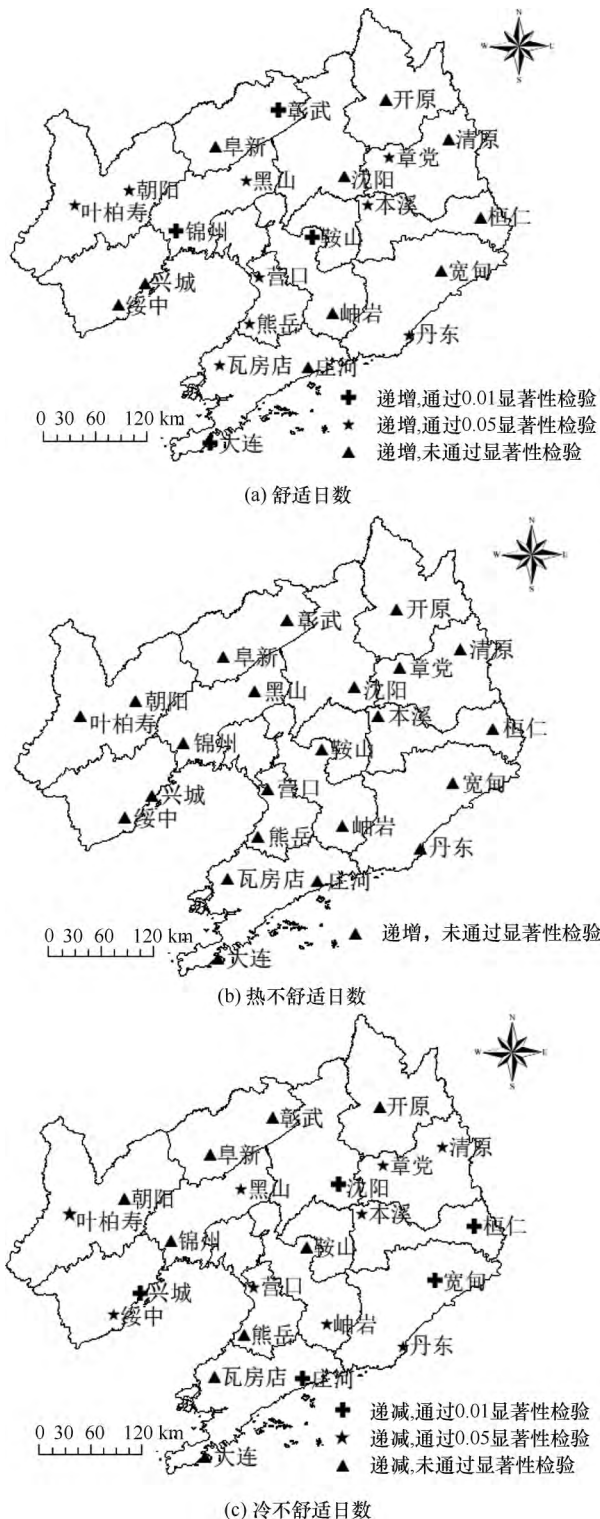


图5 1967—2018年辽宁省舒适日数线性趋势

Fig. 5 Linear trend of comfortable days in Liaoning Province from 1967 to 2018

的典型表征。自然本底值、人均福利值分别为某站点十年气候舒适期与站点面积权重、人口权重的乘积^[17]。对辽宁省的自然本底值和人均福利值进行地级市的计算,并根据人均福利值与自然本底值的比

值计算其趋适指数,趋适指数若为正,说明人口向气候舒适的地方聚集,若为负则正好相反,绝对值越大说明人口迁移对气候响应越强烈,从表2中可以看出,全省趋适指数都为正,人口都向气候舒适的地方迁移,沈阳市趋适指数最大,说明沈阳市人口对气候舒适的响应较别的地级市大,气候舒适期长的地方更有吸引力,其次为大连市,大连市是典型的气候舒适地区,近年来人口迁移越来越频繁,且随着时间变化,其趋适指数越来越大,说明两市对气候的响应越来越强,此外,营口市和盘锦市人口对气候的响应情况与其类似。对气候舒适响应最小的城市为朝阳市,人口向舒适度低的地方流动,且随着时间变化,趋适指数越来越低,这是因为人口迁移除受气候的影响外,还与经济社会发展、工作机会等因素有关。抚顺市、阜新市、铁岭市同朝阳市情况类似。辽西地区气候最舒适但经济发展最为落后,朝阳市表现最为明显。

2.2 气候舒适度影响因素分析

由于风速、温度、湿度与各等级舒适日数呈现相关关系,且三个因子之间也相互影响,因此统计1967—2018年间每年各等级舒适日数和相应气候要素数据,采用通径分析的方法定量分析影响气候舒适期长短的因素。结果表明(见表3)舒适(冷不舒适)日数与风速的相关系数为 $-0.69(0.68)$ 、与温度的相关系数为 $0.70(-0.77)$ 、与湿度的相关系数为 $-0.10(0.22)$,风速和气温均通过信度0.01的检验,表明温度与气候舒适(冷不舒适)日数呈明显正(负)相关,风速和湿度对气候舒适(冷不舒适)日数呈负(正)相关,其中气温和风速是影响舒适(冷不舒适)日数的重要指标,相对湿度的相关系数较小,表明其影响舒适(冷不舒适)日数变化的作用不大。从直接通径系数可知,气温对舒适(冷不舒适)日数的直接影响最大,两者直接通径系数为 $0.45(-0.54)$,呈显著正(负)相关,其次是风速,两者直接通径系数为 $-0.42(0.35)$,呈负(正)相关^[19],相对湿度对舒适(冷不舒适)日数的直接通径系数较小,但通过风速和气温的间接通径系数较大,说明相对湿度是通过风速和气温与舒适(冷不舒适)日数呈负相关的。

对辽宁省气候舒适日数进行Mann-Kendall检验时发现(见图3),其气候舒适日数突变年份发生于1988年,根据任学慧^[18]研究发现风速虽然未通过突变检验,但对风速的统计资料中可以发现,风速在1980年后逐渐减少,这与舒适日数的突变时段进行了交互验证,两者是一一对应的,综上分析可以

表2 辽宁省各市气候舒适福利指数

Table 2 Climate comfort and welfare index of Liaoning Province

地级市	自然本底值/d			人均福利值/d			趋适指数		
	四 普	五 普	六 普	四 普	五 普	六 普	四 普	五 普	六 普
沈阳市	14.21	14.06	14.88	24.07	27.75	33.07	1.69	1.97	2.22
大连市	14.74	14.68	15.52	21.98	23.19	27.85	1.49	1.58	1.79
鞍山市	10.27	10.50	11.04	11.85	14.42	15.44	1.15	1.37	1.40
抚顺市	11.46	11.82	12.33	8.59	8.41	7.94	0.75	0.71	0.64
本溪市	9.77	9.97	10.34	6.76	6.60	7.46	0.69	0.66	0.72
丹东市	16.49	16.63	17.08	11.49	9.27	9.74	0.69	0.56	0.57
锦州市	11.33	11.62	11.99	12.16	12.34	12.93	1.07	1.06	1.08
营口市	6.02	6.11	6.28	8.90	9.22	9.99	1.48	1.51	1.59
阜新市	11.31	11.13	11.58	7.50	7.15	7.16	0.66	0.64	0.62
辽阳市	5.33	5.38	5.65	7.28	7.25	7.86	1.37	1.35	1.39
盘锦市	4.52	4.62	4.79	4.40	5.06	5.80	0.97	1.10	1.21
铁岭市	13.53	13.83	14.65	14.03	10.65	10.87	1.04	0.77	0.74
朝阳市	24.46	23.08	23.78	14.72	13.29	13.02	0.60	0.58	0.55
葫芦岛市	11.28	11.10	12.19	10.24	9.76	10.90	0.91	0.88	0.89

表3 辽宁省1967—2018年气候舒适(冷不舒适)期与气象因子的相关和途径系数

Table 3 Correlation and path coefficient of climate comfort (cold and uncomfortable) period from 1967 to 2018 in Liaoning Province and meteorological factors

影响因子	与舒适(冷不舒适)日数的相关系数	与舒适(冷不舒适)日数的直接途径	与舒适(冷不舒适)日数的间接途径		
			风 速	气 温	湿 度
风 速	-0.69 ^{**} (0.68 ^{**})	-0.42 ^{**} (0.35 ^{**})	—	-0.27 [*] (-0.19)	0(0.02)
气 温	0.70 ^{**} (-0.77 ^{**})	0.45 ^{**} (-0.54 ^{**})	0.25(-0.40 ^{**})	—	0(-0.12)
湿 度	-0.10(0.22)	0.0007(0.10)	-0.24 [*] (0.11)	-0.08(-0.35 ^{**})	—

注: * 和 ** 分别代表通过 0.05 和 0.01 显著性水平检验

看出,辽宁省舒适日数在 20 世纪 80 年代增多的一部分原因是温度升高,风速减小。

热不舒适日数的影响因素与前两者略有不同,如表 4 所列,热不舒适日数与风速的相关系数为 -0.11、与温度的相关系数为 0.31、与湿度的相关系数为 -0.43,表明风速和湿度与热不舒适日数呈负相关,温度与热不舒适日数呈显著正相关,其中气温和湿度是影响热不舒适日数的重要指标且湿度相关性更强。途径系数与相关系数所得结论相似,其中风速的直接途径系数和间接途径系数都很小,说明风速与热不舒适日数的相关性很弱。

综上,相对湿度是影响热不舒适日数的重要因子,并通过其他因子对舒适日数和冷不舒适日数起作用,与郑有飞^[21]研究结果一致,这是由于相对湿度主要是通过汗液蒸发影响人体舒适度的,汗液蒸发在不同温度条件下差别很大,温度较低时,体表不存在汗液蒸发,因此相对湿度对人体舒适度影响较小,夏季高温,当相对湿度超过临界值后就会对人体舒适度产生影响,且温度越高其临界值越小,因此在夏季高温高湿的环境下,人体感觉不舒适。

表4 辽宁省1967—2018年热不舒适期与气象因子的相关和途径系数

Table 4 Correlation and path coefficient of thermal discomfort period and meteorological factors in Liaoning Province from 1967 to 2018

影响因子	与热不舒适日数的相关系数	与热不舒适日数的直接途径	与热不舒适日数的间接途径		
			风 速	气 温	湿 度
风 速	-0.11	0.08	—	-0.19	0.11
气 温	0.31 ^{**}	0.29 ^{**}	-0.40 ^{**}	—	-0.12
湿 度	-0.43 ^{**}	-0.38 [*]	0.11	-0.35 ^{**}	—

注: * 和 ** 分别代表通过 0.05 和 0.01 显著性水平检验

2.3 RCP2.6 和 RCP8.5 排放情景下气候舒适度未来时空变化预估

IPCC 第五次评估报告^[22]预测了 21 世纪四种排放情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5)下的气温值,本文选取低排放情景 RCP2.6 和持续排放情景 RCP8.5 分析辽宁省在 20 世纪前期(2035 年)、中期(2065 年)、后期(2100 年)三个典型年份的气候舒适日数,不同情景下气候变化如表 5 所列,均源于文

献[13]。

表5 东北地区年平均气温相对变化的预估结果

Table 5 Estimated results of relative changes in annual average temperature in the Northeast

年份	RCP 情景	温度变化/℃
2035 年	2.6	1.08
	8.5	1.22
2065 年	2.6	1.47
	8.5	2.93
2100 年	2.6	1.38
	8.5	5.39

根据对东北地区未来天气变化的预测,以及上文相关分析得出的气温是影响气候舒适日数的主要因子,因此选取气温因子来分析辽宁省20世纪前期(2035年)、中期(2065年)、后期(2100年)三个典型年份在RCP2.6和RCP8.5两种排放情景下气候舒适日数的变化特征(见表6),将基准年(2005年)与未来气候变化下的气候舒适日数进行比较,绘制出气候舒适日数增减的空间分布图(见图6)。从表6可以看出两种排放情景下气候舒适日数的分布规律具有相似性。总体来说,气候舒适日数在未来气候情景三个时期与前50年平均气候舒适日数(164.15 d)相比呈现增加的特征,但2065年的增加率达到最高,两种情景下分别达到6.21%和4.65%,到2100年增加率有所下降。

表6 辽宁省舒适日数未来变化平均值

Table 6 Average changes of comfortable days in Liaoning Province in the future

排放情景	年份		
	2035	2065	2100
RCP2.6	173.48	174.35	173.78
RCP8.5	173.96	171.78	158.04

RCP2.6和RCP8.5气候变化情景下的气候舒适日数变化的空间分布如图6所示,可以看出气候舒适度的变化在辽宁省表现出明显的空间异质性:

(1) RCP2.6情景下:气候舒适日数呈减少的区域在主要位于黑山、章党部分地区,这是因为风速和相对湿度的变化抵消了温度升高所带来的影响,其他地区都呈现增加的特征,舒适日数平均增加2.91 d,高值区位于辽宁省西部,黑山和锦州舒适日数增加量分别都达到24 d和14 d;到2065年,大部分地区都呈现增加的特征,平均增加3.41 d,与2035年相比增长率变高,且除叶柏寿和开原等地区持续增加外,高值区有所扩大,绥中一带舒适日数增加量了9 d。到2100年,随着温度的持续升

高,增加范围有所扩大,平均增加4.81 d,相比2035年增加率变低。

(2) RCP8.5情景下:辽宁省在2035年大部分地区舒适日数有所上升,距平变化主要集中于0~12 d,平均增加1.23 d,其高值区位于阜新、黑山、绥中等地;到2030年舒适日数范围有所扩大,除绥中地区有明显减少外,朝阳、叶柏寿、锦州及其周围地区舒适日数都有不同程度的增加,总体而言,辽宁省平均增加了3.27 d,增加率相比2035年有所上升;到2100年,随着温度的升高,辽宁省大部分地区舒适日数都呈现减少特征,减少范围集中于0~25 d,仅有绥中、黑山的小部分地区有所增加,总体来说辽宁省舒适日数平均减少12.45 d,这是由于温度过高打破最适环境,舒适日数减少。

总的来说,随着全球气候变暖,辽宁省气候舒适日数先增加达到最舒适环境,随后气候舒适程度会由于气温的进一步升高而下降,破坏当前最舒适的环境。这与任学慧^[18]等的研究结果相一致。因此未来辽宁省政府应该抑制工业泛滥,减少有害气体的排放,落实资源回收,公民环保减碳,协助降低对林地的砍伐,抑制二氧化碳和温室气体进入大气,进而控制气候变暖。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 时间上,舒适日数和热不舒适日数分别以3.22 d/10 a和0.32 d/10 a的速率上升,冷不舒适日数以-3.54 d/10 a速率下降,舒适日数于1988年发生突变,由负距平变为正距平,说明52 a来辽宁省气候状况逐渐向好的方向发展,人体舒适感越来越强。

(2) 空间上,全省气候舒适(热不舒适)日数都处于增加趋势,其中舒适日数辽东南和辽中增加趋势最为显著,热不舒适日数在辽中和辽南增加趋势最为显著。冷不舒适日数都处于减少趋势,其中辽中鞍山以及大连、开原减少趋势最为显著。沈阳市人口对气候舒适响应最强,朝阳市最弱。

(3) 从气候舒适度影响因素看,气温是舒适和冷不舒适日数变化的主要因素,风速次之,湿度只有在温度高时对热不舒适影响明显。

(4) 从未来气候变化情景下辽宁省的气候舒适度来看,时间上,辽宁省气候舒适日数先增加达到最舒适环境,随后气候舒适程度由于气温的进一步升高而下降,破坏当前最舒适环境;空间上在RCP2.6情

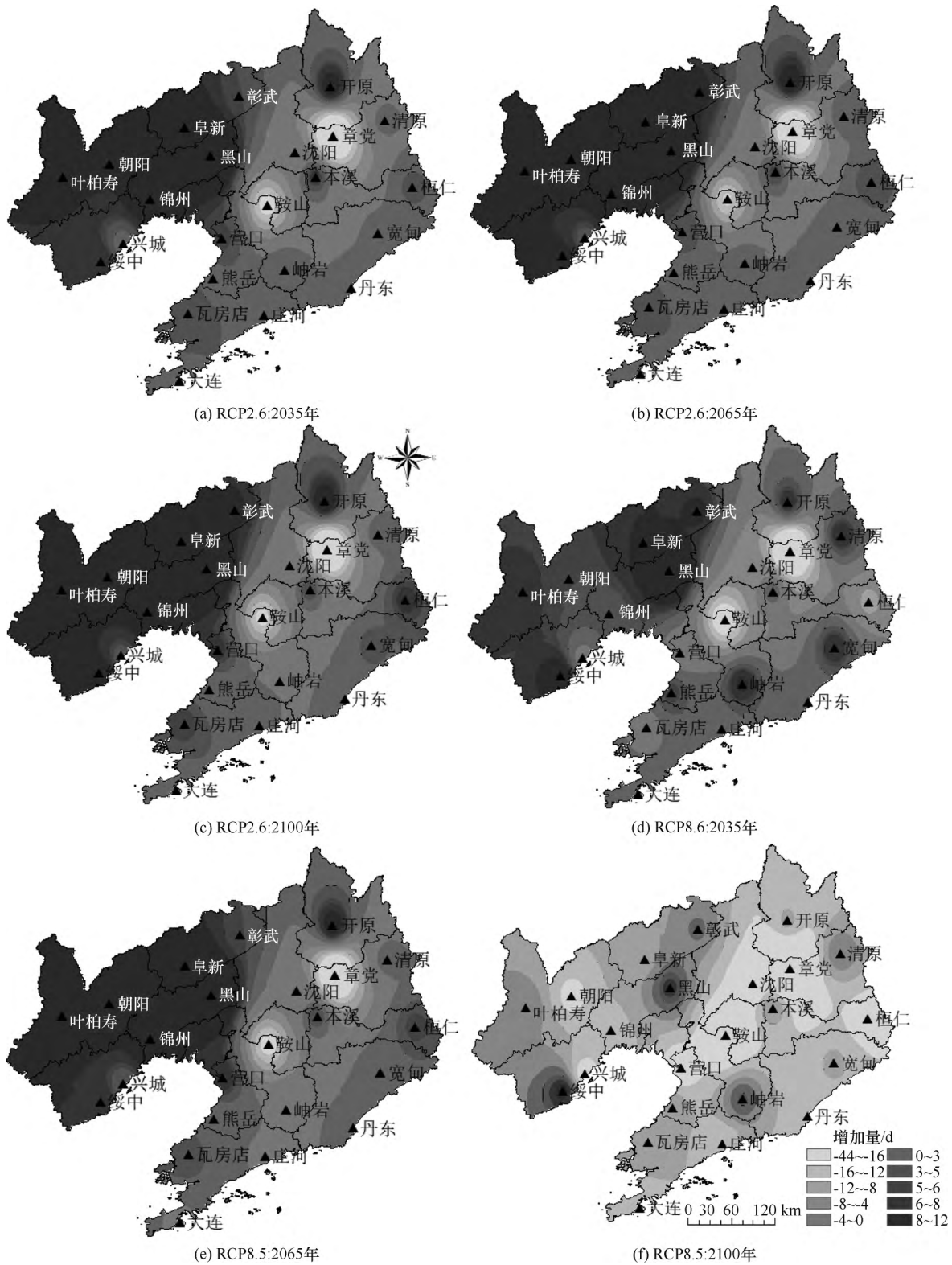


图6 未来气候变化情境下气候舒适期增减日数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the number of days in the climate comfort period under future climate change scenarios

景下, 全省大部分地区未来三个时期的气候舒适日数都处于增加趋势, 在 RCP8.5 情境下, 大部分地区先增加, 20 世纪后期全省都处于下降趋势。

3.2 讨论

本文基于气候舒适度指数及统一舒适度评价标准, 统计分析了辽宁省 52 a 来各等级舒适累计日数,

运用通径分析方法探讨其影响因素,在此基础上预估了未来气候变化对气候舒适度的影响。针对气候舒适度指标,本文采用的 KSSD 经验公式是我国气象站广泛使用且比较流行的,该指数综合考虑气温、湿度和风速的影响,既可反映沿海地区湿度大的特点,又兼顾远离海洋地区温度较高的气候特征,相较其他公式更适用于沿海地区,因此该结果更为可靠;针对气候舒适度的影响因素,除在文中提到的气候因子外,还与地形地貌、空气质量、不同人群体感差异等多种因素有关,今后应该在其基础上考虑多种原因,并从应用角度出发,将气候舒适度与流行病学等学科结合,更好指导人类活动;此外,2018年辽宁省政府提出深入推进“五大区域发展战略”,统筹发力,扬长补短。人类作为经济发展的重要驱动力之一,在推动区域实现高质量发展过程中必然伴随着人才竞争和人口流动,气候舒适度空间变化是否会影响人口流动方向有待进一步的考察,辽西北虽经济落后,但气候最为舒适,因此可考虑引导人口分布,既可平衡沈阳等城市人口压力,又可带来促进经济发展的人才资源,还能充分利用气候优势发展特色农业、旅游等,这些都可成为未来深入研究的方向。

参考文献(References):

- [1] 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):1-16.
CAO Yun, SUN Yinglong, WU Menxin. Regional spatiotemporal characteristics analysis of Beijing-Tianjin-Hebei climate comfort in the past 50 years[J]. Journal of Ecology, 2019, 39(20): 1-16.
- [2] 封志明,唐焰,杨艳昭,等.基于GIS的中国人居住环境指数模型的建立与应用[J].地理学报,2008,63(12):1327-1336.
FENG Zhiming, TANG Yan, YANG Yanzhao, et al. Establishment and application of GIS-based human settlement environment index model in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(12): 1327-1336.
- [3] 李山,孙美淑.中国大陆1961—2010年间气候舒适期的空间格局及其演变[J].地理研究,2016,35(11):2053-2070.
LI Shan, SUN Meishu. The spatial pattern and evolution of the climate comfort period in Mainland China from 1961 to 2010 [J]. Geographical Research, 2016, 35(11): 2053-2070.
- [4] BRUNT D. Climate and human comfort [J]. Nature, 1945, 155 (3941): 559-564.
- [5] TERJUNG W H. Physiologic climates of the conterminous United States: A bioclimatic classification based on man [J]. Annals of the Association of American Geographers, 1966, 56(1): 141-179.
- [6] OLIVER J E. Climate and man's environment: an introduction to applied climatology [M]. New York: Jhon Wiley & Son's slns, 1993.
- [7] 蔚丹丹,李山.气候舒适度的体感分级:季节锚点法与中国案例[J].自然资源学报,2019,34(8):1633-1653.
WEI Dandan, LI Shan. Somatosensory grading of climate comfort: seasonal anchor point method and Chinese case [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1633-1653.
- [8] 曹永强,郭明,乌日娜.50年来辽宁省不同等级舒适日数演变及空间区划分析[J].水利水运工程学报,2017(5):23-29.
CAO Yongqiang, GUO Ming, WU Rina. The evolution of the number of comfortable days at different levels in Liaoning Province and the analysis of their spatial division in the past 50 years [J]. Journal of Water Resources and Water Transport Engineering, 2017 (5): 23-29.
- [9] 曹永强,高璐,王学风.近30年辽宁省夏季人体舒适度区域特征分析[J].地理科学,2016,36(8):1205-1211.
CAO Yongqiang, GAO Lu, WANG Xuefeng. Regional characteristics analysis of summer human comfort in Liaoning Province in the past 30 years [J]. Geography, 2016, 36(8): 1205-1211.
- [10] 唐亚平,张凯,李忠娴,等.基于REOF方法的辽宁气候舒适度区划特征分析[J].环境科学与技术,2011,34(2):120-124.
TANG Yaping, ZHANG Kai, LI Zhongxian, et al. Analysis of Liaoning climate comfort zoning characteristics based on REOF method [J]. Environmental Science and Technology, 2011, 34(2): 120-124.
- [11] 余志康,孙根年.40°N以北城市夏季气候舒适度及消夏旅游潜力分析[J].自然资源学报,2015,30(2):327-339.
YU Zhikang, SUN Gennian. Analysis of summer climate comfort and summer tourism potential in cities north of 40°N [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(2): 327-339.
- [12] 张馨艺,赵诣,王晓美,等.近55年辽宁省人居环境气候舒适度分析[J].国土与自然资源研究,2019(4):50-55.
ZHANG Xinyi, ZHAO Yi, WANG Xiaomei, et al. Analysis on the climate comfort of human settlements in Liaoning Province in the last 55 Years [J]. Land and Natural Resources Research, 2019 (4): 50-55.
- [13] 敖雪,翟晴飞.东北地区气候变化CMIP5模式预估[J].气象科技,2017,45(2):298-312.
AO Xue, ZHAI Qingfei. Forecast of climate change CMIP5 model in Northeast China [J]. Meteorological Science and Technology, 2017, 45(2): 298-312.
- [14] 孙美淑,李山.气候舒适度评价的经验模型:回顾与展望[J].旅游学刊,2015(12):19-34.
SUN Meishu, LI Shan. The empirical model of climate comfort assessment: review and prospect. [J]. Tourism Journal, 2015 (12): 19-34.
- [15] 何风华,李明辉.Excel在通径分析中的应用[J].中国卫生统计,2005,22(5):331-332.
HE Fenghua, LI Minghui. Application of excel in path analysis [J]. China Health Statistics, 2005, 22(5): 331-332.
- [16] 魏凤英.现代气候统计与诊断技术(第2版)[M].北京:气象出版社,2007.
WEI Fengying. Modern climate statistics and diagnosis technology (second edition) [M]. Beijing: Meteorological Press, 2007.

- [17] 张伟佳. 中国大陆气候舒适期福利的空间格局及其演变[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
ZHANG Weijia. The spatial pattern and evolution of welfare in the climate comfort period in mainland China [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.
- [18] 任学慧, 李颖, 王健. 近 60 a 北方沿海城市人居环境气候舒适性评价: 以辽宁省为例[J]. 自然资源学报, 2013, 28(5): 812-821.
REN Xuehui, LI Ying, WANG Jian. Climate comfort evaluation of human settlement environment in northern coastal cities in the past 60 years: taking Liaoning Province as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(5): 812-821.
- [19] 唐亚平, 张凯, 李忠娴, 等. 基于 REOF 方法的辽宁气候舒适度区域特征分析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(2): 120-124.
TANG Yaping, ZHANG Kai, LI Zhongxian, et al. Regional characteristics analysis of climate comfort in Liaoning based on REOF method[J]. Environmental Science and Technology, 2011, 34(2): 120-124.
- [20] 王泽宇. 辽宁省际人口流动对经济增长的影响研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2019.
WANG Zeyu. Research on the influence of interprovincial population migration on economic growth in Liaoning [D]. Shenyang: Liaoning University, 2019.
- [21] 郑有飞, 余永江, 谈建国. 气象参数对人体舒适度的影响研究[J]. 气象科技, 2007, 35(6): 827-831.
ZHENG Youfei, YU Yongjiang, TAN Jianguo. Research on the influence of meteorological parameters on human comfort [J]. Meteorological Science and Technology, 2007, 35(6): 827-831.
- [22] IPCC. Climate change 2014: impact, adaptation, and vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

(责任编辑 康健)