

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.09.017

张志高, 胡柱钰, 贾梦薇, 等. 基于 EOF 和 REOF 的河南省人体舒适度时空分布特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(9): 189-199.

基于 EOF 和 REOF 的河南省 人体舒适度时空分布特征

张志高¹, 胡柱钰¹, 贾梦薇¹, 赵怡博¹,
张基恒¹, 袁征², 李华勇¹, 于林松¹, 蔡茂堂³1. 安阳师范学院 资源环境与旅游学院, 河南 安阳 455000; 2. 安阳工学院 数学与信息科学学院, 河南 安阳 455000;
3. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081

摘要: 开展河南省气候舒适性评价可为区域气候资源评价和旅游资源开发等提供科学依据。基于 1960—2020 年河南省 17 个气象站点日平均气温、风速和相对湿度资料, 采用 Mann-Kendall 检验、经验正交函数 (Empirical Orthogonal Functions, EOF) 和旋转经验正交函数 (Rotated Empirical Orthogonal Functions, REOF) 分解等方法对河南省舒适度变化特征进行了分析。结果表明: 1960—2020 年河南省人体舒适度指数和舒适日数均值分别为 57.34、189.23 d, 分别以 0.37/10 a 和 2.42 d/10 a 的倾向率呈波动上升趋势。全省舒适日频率为 51.67%, 各季舒适日频率从大到小依次为: 秋季 (77.08%)、春季 (76.19%)、夏季 (50.68%)、冬季 (2.72%)。舒适日数于 2001 年发生突变, 突变后舒适日数较突变前增加 10.11 d。EOF 分析表明, 近 61 a 河南省舒适日数空间分布主要为全局型, 其方差贡献率达 79.09%, 为决定性模态, 反映了全省舒适日数空间变化的整体一致性。REOF 分析表明, 可将河南省舒适日数划分为 5 个气候分区, 各区舒适日数从大到小依次为: III 区 (201.69 d)、V 区 (188.92 d)、II 区 (187.99 d)、IV 区 (186.43 d)、I 区 (185.02 d)。河南省舒适度指数主要受平均气温的影响。

关键词: 人体舒适度; 时空特征; 旋转经验正交函数; 区划;

河南省

中图分类号: P463

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1673-9868(2025)09-0189-11



Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Human Comfort in Henan Province Based on EOF and REOF

ZHANG Zhigao¹, HU Zhuyu¹, JIA Mengwei¹,
ZHAO Yibo¹, ZHANG Jiheng¹, YUAN Zheng²,
LI Huayong¹, YU Linsong¹, CAI Maotang³

收稿日期: 2024-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272112); 河南省本科高校青年骨干教师培养计划(2023GGJS125); 河南省高等学校重点科研项目(25A170002); 安阳师范学院大学生创新创业训练项目(202510479134)。

作者简介: 张志高, 博士, 副教授, 主要从事气候变化研究。

通信作者: 蔡茂堂, 博士, 副研究员。

1. School of Resources Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang Henan 455000, China;
2. College of Mathematics and Information Science, Anyang Institute of Technology, Anyang Henan 455000, China;
3. Institute of Geomechanics, China Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Research on climate comfort evaluation in Henan Province is of great significance for regional climate resource evaluation and tourism resource development. Based on the daily average temperature, wind speed, and relative humidity data from 17 meteorological stations in Henan Province from 1960 to 2020, the spatial and temporal change characteristics of comfort of human body index in Henan Province by means of Mann-Kendall test, EOF and REOF decomposition were analyzed. The results showed that from 1960 to 2020, the average human comfort index and comfortable days in Henan Province was 57.34 and 189.23 days, respectively, showing a fluctuating upward trend with a tendency rate of 0.37/10 a and 2.42 d/10 a, respectively. The frequency of comfortable days was 51.67%, and the frequency of comfortable days in each season reduced as follows: autumn (77.08%), spring (76.19%), summer (50.68%), winter (2.72%). The number of comfortable days underwent an abrupt change in 2001, with an increase of 10.11 days compared to before the change. EOF analysis showed that the spatial distribution of comfortable days in Henan was mainly global in the past 61 years, with a variance contribution rate of 79.09%, which was a decisive mode reflecting the overall consistency of the spatial changes in comfort days throughout the province. The REOF expansion indicated that the number of comfortable days in Henan Province can be divided into five climate zones, with the number of comfortable days in each zone reducing the order of Zone III (201.69 days), Zone V (188.92 days), Zone II (187.99 days), Zone IV (186.43 days), Zone I (185.02 days). The comfort index in Henan Province was mainly influenced by the average temperature.

Key words: human body comfort; spatial-temporal variations; Rotated Empirical Orthogonal Functions; division; Henan Province

人体舒适度是以人类机体与近地大气之间的热交换为基础,用于表征人类无须借助消寒、避暑装备和设施,能保证正常行为进行的适宜气候条件的生物气象指标^[1-2]。气象条件是否舒适不仅影响人类身体健康和交通出行,在人居环境评价和旅游资源开发等方面也具有重要意义^[3-6]。国外的舒适度相关研究开展较早,20世纪20年代初,Houghton等^[7]以裸衣男子作为受试者,提出不同气温和风速条件下人体的热感指标,率先进行舒适度评价研究。后续研究者陆续提出风效指数^[8]、热气候指数^[9]、温湿指数^[10]、着衣指数^[11]等舒适度指数和模型开展相关评价研究。20世纪70年代以来,国内学者在前人研究基础上,通过引进新技术构建人体舒适度指数模型,对全国^[12-13]、各省份^[14-20]、高原地区^[21]及旅游城市^[22-25]等开展人体舒适度时空分布规律研究。然而,我国地域辽阔,地形地貌条件复杂,不同地区的人体舒适度存在一定差异,此外,目前相关研究较少涉及人体舒适度的空间区划。

河南省是中华文明的重要发祥地,具有较为丰富的文物古迹和人文景观,同时河南省横跨我国第二、三级地貌台阶,地处南北气候过渡带,形成了独特优美的自然风光。河南省旅游资源丰富,旅游市场开发潜力巨大,而目前对其气候舒适性评价的研究相对欠缺,一定程度上制约了其旅游资源的开发和旅游业的高质量发展。因此,本研究基于河南省17个气象站点的数据,运用舒适度指数计算分析其时空演变特征,探讨气温、风速和相对湿度等气象因子对人体舒适度的影响,运用经验正交函数(Empirical Orthogonal Functions, EOF)和旋转经验正交函数(Rotated Empirical Orthogonal Functions, REOF)分解等方法对河

南省舒适日数进行空间客观分型,厘清河南省不同分区舒适日数变化特征,以期为河南省各地旅游资源开发和旅游气象服务提供参考。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

河南省(31°23′—36°22′N, 110°21′—116°39′E),位于中国中东部,属北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候,同时还具有自东向西由平原向丘陵山地气候过渡的特征,气候温和,四季分明,年平均气温在 12~16 °C,年降水量 500~1 400 mm,年日照时数 1 740~2 310 h。

1.2 数据来源

河南省 17 个气象站点(图 1)1960—2020 年逐日气温、风速和相对湿度数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>)中国地面气候资料日值数据集。根据河南省的气象特点,四季划分为:3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季。

1.3 人体舒适度计算及等级划分

舒适度计算采用我国气象站台常用的,同时考虑了温度、湿度和风速的人体舒适度指数(Comfort Index of Human Body, CIHB)经验公式,计算公式为^[26]:

$$C_{\text{CIHB}} = (t \times 1.8 + 32) - 0.55 \times (1 - hu/100) \times (t \times 1.8 - 26) - 3.2 \times \sqrt{v}$$

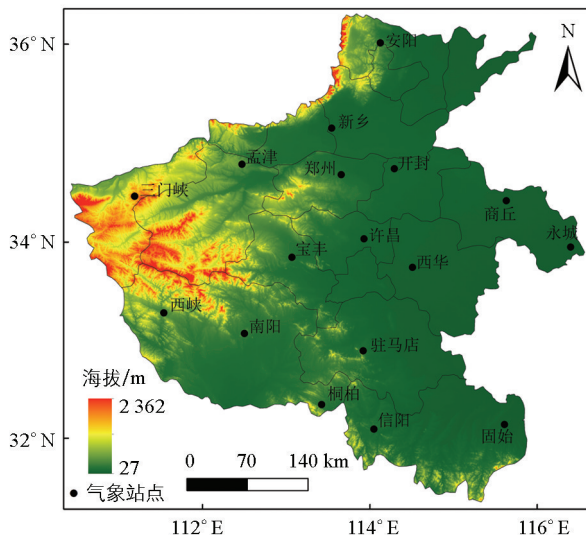
式中: C_{CIHB} 为人体舒适度指数; t 为平均温度(°C); hu 为相对湿度(%); v 为风速(m/s)。

我国气象局的统一标准将 CIHB 指数分为 9 个等级(表 1),其中,1—3 级为冷不舒适等级,4—6 级人体感觉舒适,为舒适等级,7—9 级为热不舒适等级,舒适日数为 4—6 级的天数。

表 1 人体舒适度指数等级划分

等级	舒适度指数	人的感受	级别
1	$C_{\text{CIHB}} \leq 25$	感觉很不舒服,容易冻伤,寒冷	冷不舒适
2	$25 < C_{\text{CIHB}} \leq 38$	大部分人感觉不舒服,冷	
3	$38 < C_{\text{CIHB}} \leq 50$	少部分人感觉不舒服,凉	
4	$50 < C_{\text{CIHB}} \leq 55$	大部分人感觉舒服,凉爽	舒适
5	$55 < C_{\text{CIHB}} \leq 70$	大部分人感觉很舒服,舒适	
6	$70 < C_{\text{CIHB}} \leq 75$	大部分人感觉舒服,暖和	
7	$75 < C_{\text{CIHB}} \leq 80$	少部分人感觉很不舒服,热	热不舒适
8	$80 < C_{\text{CIHB}} \leq 85$	大部分人感觉很不舒服,炎热	
9	$C_{\text{CIHB}} > 85$	感觉很不舒服,酷热	

此外,采用线性回归分析河南省舒适度指数和气候要素的时间变化特征;采用 Mann-Kendall 趋势检验法^[27]对序列趋势进行显著性检验;采用 EOF 和 REOF 分解法^[28]对河南省舒适日数空间变化特征进行分析。



审图号: GS(2024)0650 号

图 1 河南省位置及气象站点分布

2 结果与分析

2.1 河南省气候要素变化特征

1960—2020 年河南省年平均气温、风速和相对湿度变化如图 2 所示,由图 2a 可知,近 61 a 河南省年平均气温为 13.68~16.00 °C,多年均值为 14.84 °C,2019 年最高,1984 年最低。从变化趋势来看,近 61 a 来河南省年平均气温以 0.22 °C/10 a 的倾向率呈波动上升趋势。1960—1984 年河南省平均气温偏低,平均为 14.48 °C,1985 年后,平均气温为 15.09 °C,较之前上升 0.61 °C。1960—2020 年河南省年平均风速为 2.36 m/s(图 2b),1969 年最大为 3.17 m/s,2012 年最小为 1.72 m/s。近 61 a 河南省平均风速变化总体呈现下降趋势,倾向率为 $-0.17 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})/10 \text{ a}$,其中 1969—1989 年和 2004—2012 年河南省年平均风速下降趋势明显,风速逐渐减小,2012 年以来平均风速略有回升。

1960—2020 年河南省相对湿度为 62.93%~77.91%,平均为 68.93%,1964 年最高,2012 年最低。近 61 a 河南省相对湿度大致呈波动下降趋势,倾向率为 $-0.59\%/10 \text{ a}$ 。1960—1966 年河南省相对湿度波动较为剧烈,平均为 69.04%,1967—2003 年相对湿度较大,平均为 70.15%,2004 年以来相对湿度较小,平均为 66.24%。

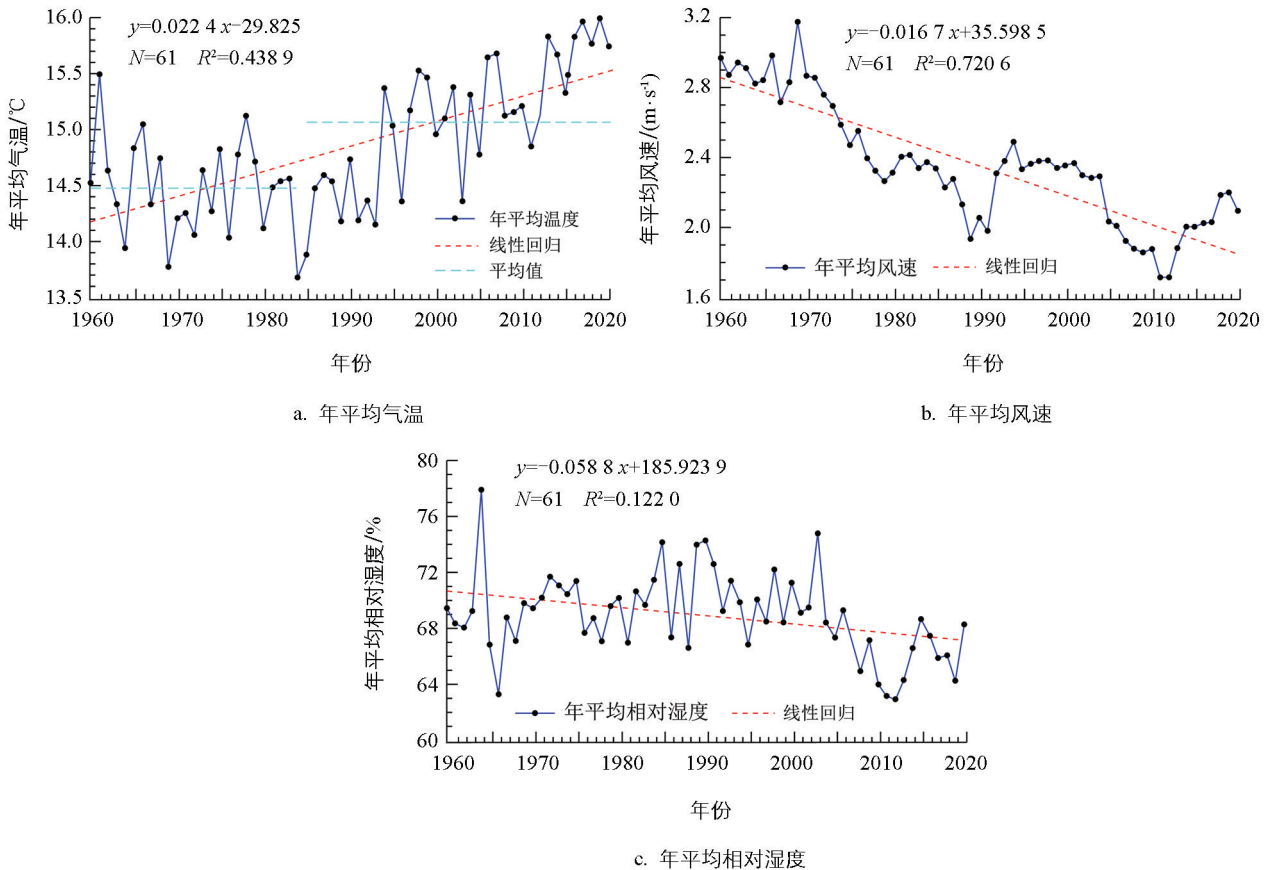


图 2 河南省 1960—2020 年平均气温、风速和相对湿度变化

2.2 河南省人体舒适度指数和舒适日数年际变化特征

1960—2020 年河南省人体舒适度指数和舒适日数如图 3 所示,由图 3a 可知,近 61 a 人体舒适度指数为 55.36~59.14,1969 年最小,2017 年最大,多年均值为 57.34。依据人体舒适度分级标准,河南省人体舒适度指数属于第 5 等级,即大部分人感觉很舒适。近 61 a 河南省舒适日数多年均值为 189.23 d,1967 年最少为 162.35 d,2008 年最多为 216.41 d。从变化趋势来看,近 61 a 河南省人体舒适度指数和舒适日数均呈波动上升趋势,倾向率分别为 0.37/10 a、2.42 d/10 a。

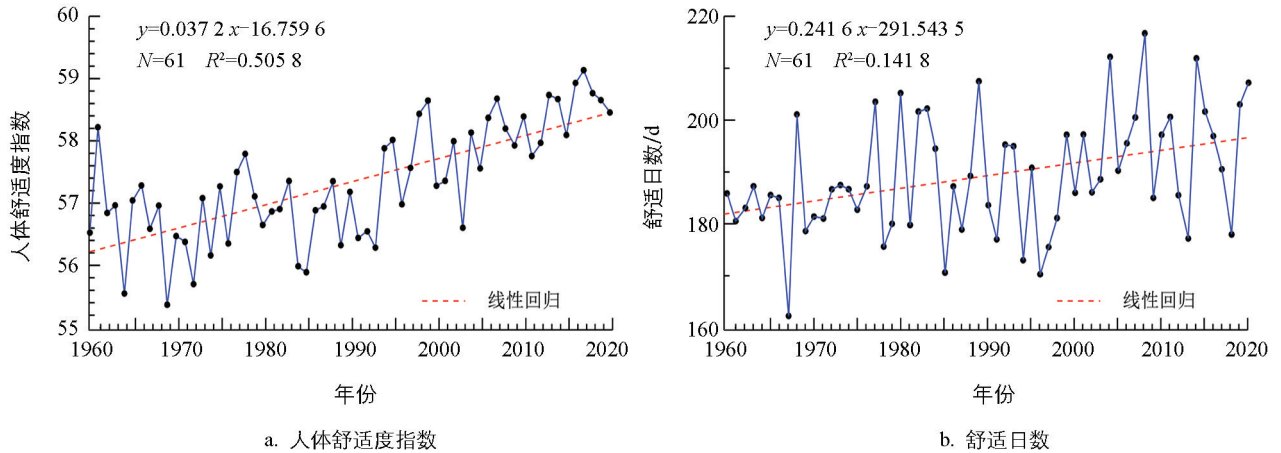


图 3 1960—2020 年河南省人体舒适度指数和舒适日数变化

2.3 河南省人体舒适日数四季变化特征

河南省人体舒适度指数和舒适日频率四季变化如图 4 所示, 河南省舒适度指数在夏季最高, 为 74.83, 之后依次为秋季(57.96)、春季(57.32)和冬季(38.93)。从舒适日频率来看, 近 61 a 全省年舒适日数平均为 189.23 d, 舒适日频率为 51.67%, 其中秋季和春季的舒适日频率相对较高, 分别为 77.08%、76.19%, 夏季为 50.68%, 冬季最低, 为 2.72%。

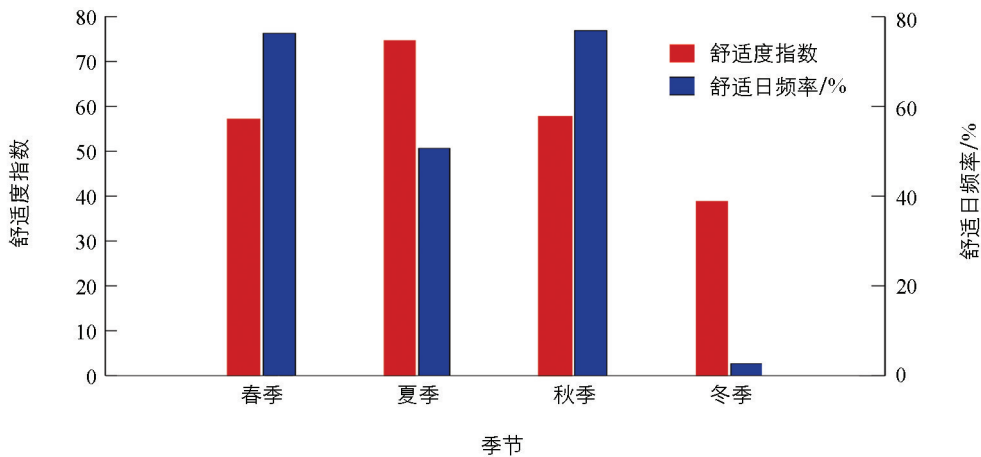


图 4 河南省人体舒适度指数和舒适日频率季节变化

2.4 河南省舒适日数突变特征

1960—2020 年河南省舒适日数 Mann-Kendall 突变检验曲线如图 5 所示, 近 61 a 来河南省舒适日数正序列 UF 曲线整体呈波动上升趋势, 反序列 UB 曲线呈下降趋势, 二者相交于 2001 年, 突变点在信度线内, 确定其突变点为 2001 年, 突变发生前河南省舒适日数平均为 185.92 d, 突变后为 196.03 d, 较突变前增加了 10.11 d。

2.5 河南省舒适日数空间变化特征

1960—2020 年河南省舒适日数空间分布情况如图 6 所示, 河南省舒适日数为 181.97~202.22 d, 大体呈自西向东依次递减趋势, 西部地区三门峡、孟津和西峡等站舒适日数在 198.40 d 以上, 中部地区许昌和驻马店等站为 184.92~188.64 d, 东部地区永城和商丘等站在 184.91 d 以下。

2.6 河南省人体舒适度指数对气象因子的响应

河南省舒适度指数与风速、相对湿度及平均气温的相关关系和回归系数如表 2 所示。由表 2 可知,

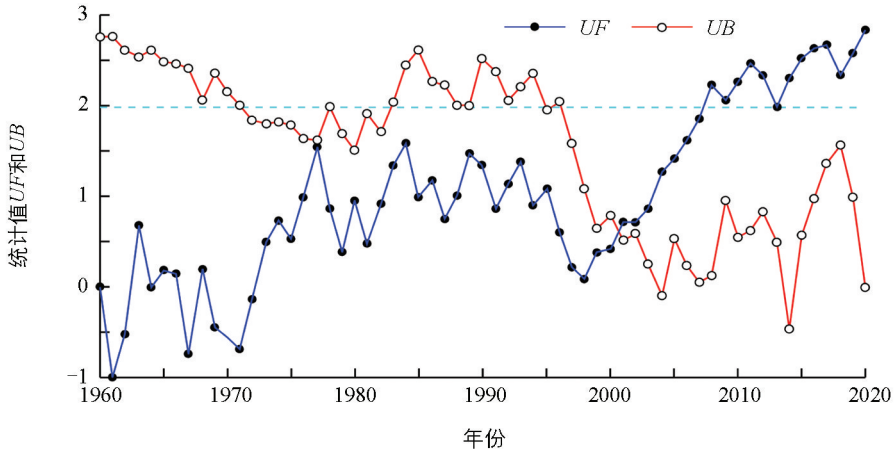
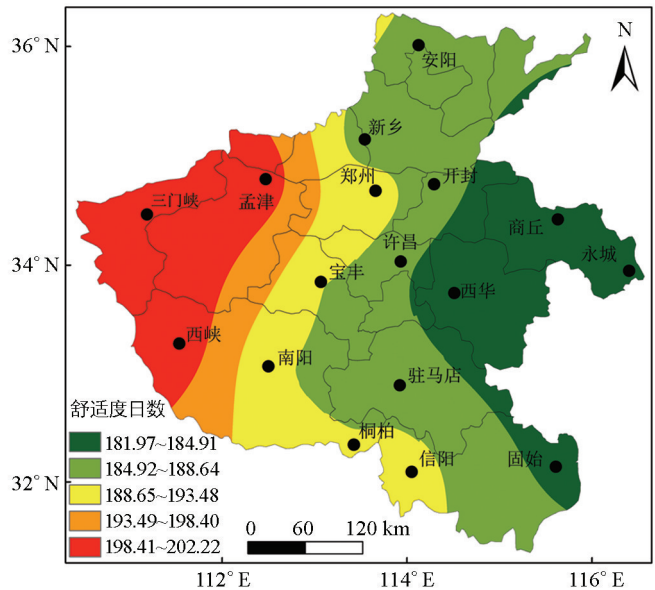


图 5 河南省舒适日数时间序列的 Mann-Kendall 检验曲线

舒适度指数与平均气温的相关系数为 0.962 ($p < 0.01$), 表现为正相关关系, 通过回归系数可以看出, 随着温度上升, 舒适度指数渐趋升高, 平均温度每上升 1°C , 舒适度指数提高 1.49。舒适度指数与风速、相对湿度的相关系数分别为 -0.562 ($p < 0.01$) 和 -0.598 ($p < 0.01$), 表现为负相关关系, 风速每提高 1 m/s , 舒适度指数下降 1.49, 相对湿度每上升 1% , 舒适度指数下降 0.19。综合来看, 在 3 个气象要素中, 平均气温与人体舒适度的相关系数最大, 说明河南省人体舒适度主要受平均气温的影响。



审图号: GS(2024)0650 号

图 6 河南省舒适日数空间分布

表 2 河南省人体舒适度指数与风速、相对湿度及平均气温的关系

因素	影响因子	舒适度指数
相关系数	风速	-0.562^{**}
	相对湿度	-0.598^{**}
	平均气温	0.962^{**}
回归系数	风速	-1.494^{*}
	相对湿度	-0.186^{*}
	平均气温	1.486^{*}

注: ** 表示相关性在 0.01 水平极有统计学意义, * 表示在 0.05 水平有统计学意义。

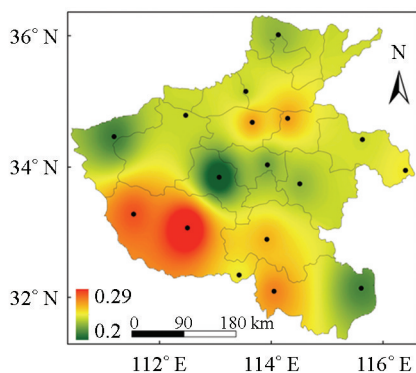
2.7 河南省舒适度日数的 EOF 分析

对河南省 17 个气象站点近 61 a 的舒适日数进行 EOF 分析, 前 4 个特征值及方差贡献率如表 3 所示。第 1 个模态方差贡献率为 79.09%, 远大于其他模态, 第 2 至第 4 个模态方差贡献率依次为 5.19%、2.90% 和 2.21%, 第 4 个模态之后的其他模态贡献率相对较小。前 4 个模态的累积方差贡献率达到了

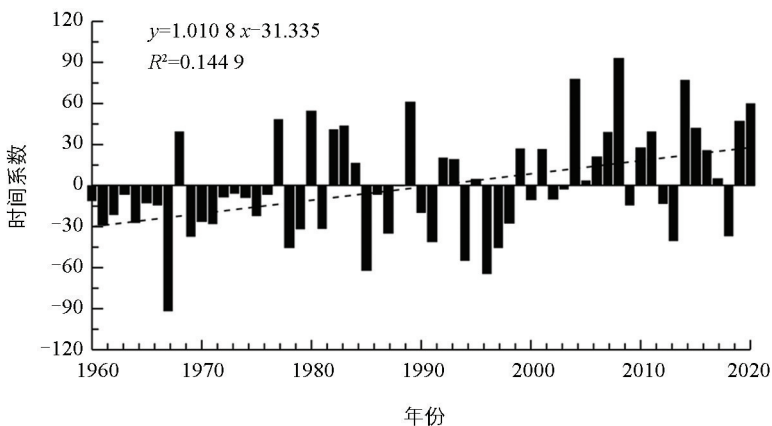
89.39%, 因此这 4 个特征值所对应的特征向量可以很好地解释 1960—2020 年河南省舒适度日数的分布类型。其 EOF 特征向量场分布及对应的时间系数如图 7 所示。

表 3 河南省舒适日数前 4 个模态的方差贡献率

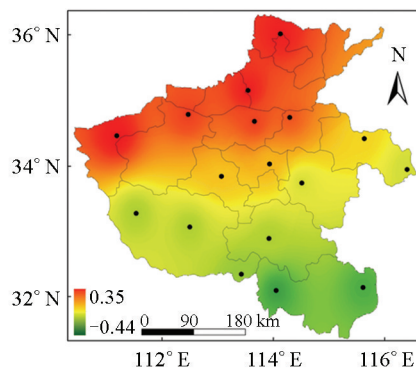
模态	特征根	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	2 186.07	79.09	79.09
2	143.45	5.19	84.28
3	80.20	2.90	87.18
4	61.20	2.21	89.39



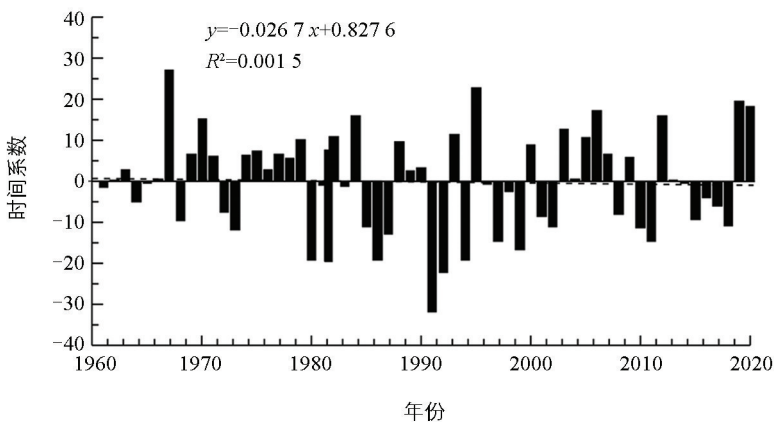
a. 第1模态空间分布



b. 第1模态时间系数



c. 第2模态空间分布



d. 第2模态时间系数

审图号: GS(2024)0650 号

图 7 河南省舒适日数 EOF 特征向量场分布及对应的时间系数

第 1 模态的方差贡献率为 79.09%, 为决定性模态, 可以表征河南省舒适日数空间分布的主要类型。全省第 1 模态特征向量表现出一致的正值(图 7a), 表明近 61 a 河南省舒适日数的变化趋势具有高度一致性, 河南省舒适日数受相似的天气系统和大气环流控制, 全省舒适日数一致偏多或偏少。河南省西南部和南部地区南阳、西峡、信阳等站载荷值较大, 为 0.26~0.29, 是舒适度日数变化最敏感区域。结合第 1 模态时间系数发现(图 7b), 其线性系数为 1.01, 表明近 61 a 河南省的舒适日数有所上升。近 61 a 中 1967、1985、1989、1996、2004、2008、2014 年的时间系数绝对值最大, 说明这 7 年的舒适度空间一致性分布最典型, 其中 1989、2004、2008、2014 年系数为正, 舒适日数偏多, 1967、1985、1996 年为负, 舒适日数偏少, 从时间系数的年代际变化来看, 21 世纪 00 年代、21 世纪 10 年代舒适日数明显偏多, 20 世纪 60、70、90 年代舒适日数偏少。

模态 2 方差贡献率为 5.19%，呈现出河南省舒适日数南部偏少而北部偏多的南—北相反型分布模式，体现了河南省南部舒适日数较少(多)时，北部就较多(少)的分布特征。正值中心位于新乡、安阳和三门峡等站，载荷值为 0.33~0.35；负值中心在河南省南部地区信阳、固始和桐柏等站，载荷值为 -0.44~-0.22(图 7c)。结合模态 2 的时间系数发现(图 7d)，1967、1995、2019 年的时间系数绝对值较大且为正值，为正位相代表年份，其间全省北部舒适日数偏多，南部地区偏少；1991、1992、1994 年的时间系数为负值，且绝对值较大，为负位相代表年份，其间全省南部舒适日数偏多，北部地区偏少。此外，河南省舒适度日数还存在着东—西相反型等分布模式(图略)。

2.8 河南省舒适日数的区划分析

河南省舒适日数的 EOF 分析表明，河南省舒适日数的空间格局既有全区一致的分布特征，也存在南—北相反型、东—西相反型等空间分布类型。为能更精确地描述河南省舒适日数的分布特征，在舒适日数 EOF 分析的基础上，对其前 5 个主分量(累计方差贡献率 91.41%)进行方差最大正交旋转，根据前 5 个旋转向量空间模态的高载荷空间分布，将河南省划分为 5 个气候分区。分区方法采用“最小分类值法”^[28]，相邻区域无重叠，结果如图 8 所示。

I 区涵盖郑州、开封、许昌等 6 个气象站点，主要包括河南省东部地区，载荷向量场高值中心在许昌、开封等站；II 区涵盖南阳、信阳和驻马店等 5 个站点，主要包括河南南部地区，载荷向量场高值中心在驻马店、南阳等站；III 区涵盖三门峡、孟津和西峡 3 个站点，主要分布在河南省西部地区，载荷向量场高值中心在孟津和西峡等站；IV 区涵盖安阳和新乡 2 个气象站点，主要分布在河南省北部地区，载荷向量场高值中心在安阳站；V 区涵盖宝丰 1 个站点，主要在河南省中部地区，载荷向量场高值中心在宝丰站。分区域计算各区舒适日数发现，I—V 区的平均舒适日数分别为 185.02、187.99、201.69、186.43、188.92 d，III 区最多，I 区最少。

2.9 河南省各分区舒适日数时间变化特征

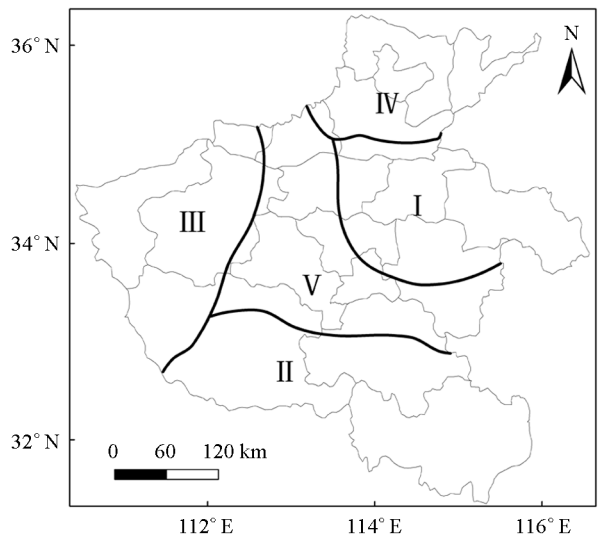
河南省各分区舒适日数时间变化如图 9 所示。近 61 a I 区舒适日数呈波动上升趋势(图 9a)，舒适日数整体在 20 世纪 60 年代和 70 年代偏少，以 1967 年最为明显，舒适日数最少，80 年代舒适日数有所增加，90 年代减少，21 世纪 00 年代以来舒适日数偏多，以 2004、2008、2014 年最为明显。

II 区舒适日数整体呈增加趋势(图 9b)，舒适日数整体在 20 世纪 60 年代和 70 年代偏少，以 1967 年最为明显，舒适日数最少，20 世纪 80 年代和 90 年代舒适日数有所增加，21 世纪以来舒适日数偏多。

III 区舒适日数整体呈增加趋势(图 9c)，1967、1981、1984、1991、1994、1996、2012、2018 年舒适日数出现明显的低谷，舒适日数较少，1968、1977、1990、1992、2020 年出现峰值，舒适日数偏多。

IV 区舒适日数整体呈增加趋势(图 9d)，20 世纪 60、70、90 年代舒适日数偏少，20 世纪 80 年代和 21 世纪以来舒适日数偏多。1978、1985、1998、2010 年舒适日数出现低谷，1976、1988、1996、2004、2014 年舒适日数出现峰值，舒适日数偏多。

V 区舒适日数呈小幅下降趋势(图 9e)，1960—1966 年舒适日数相对平稳，1966 年后，舒适日数波动较



审图号：GS(2024)0650 号

图 8 河南省舒适日数分区

大。1967、1978、1985、1996、2018 年 V 区舒适日数出现低谷, 其中 2018 年舒适日数最少, 1968、1981、1988、2008、2014 年舒适日数出现峰值, 其中 1968 年舒适日数最多。观察 V 区舒适日数时间系数发现, 正值年份为 26 a, 负值年份为 35 a, 说明近 61 a 来该区舒适日数整体偏少。

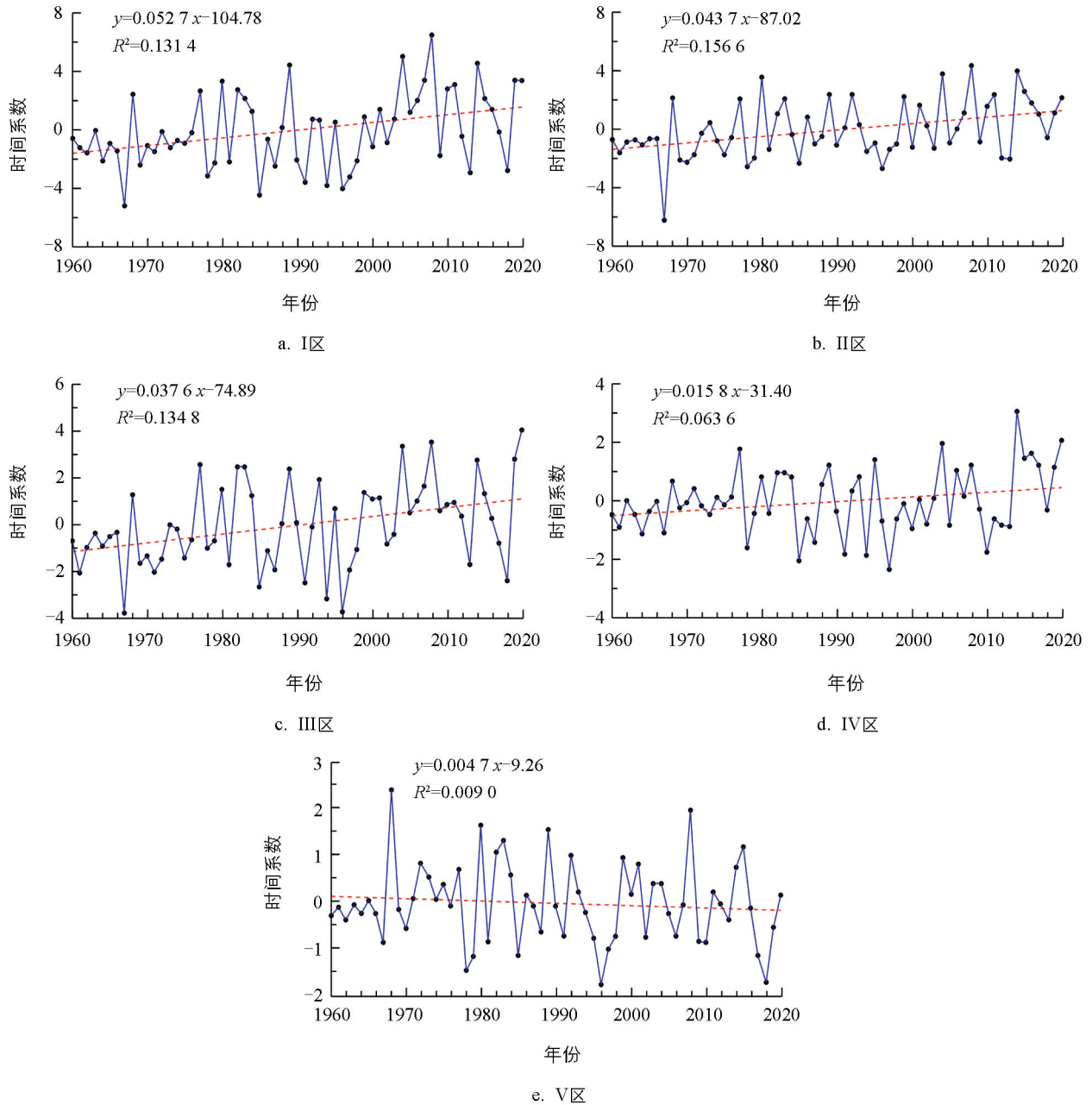


图 9 河南省各分区舒适日数时间系数

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 1960—2020 年河南省人体舒适度指数平均为 57.34, 并以 0.37/10 a 的倾向率呈波动上升趋势, 舒适日数平均为 189.23 d, 以 2.42 d/10 a 的倾向率呈波动上升趋势, Mann-Kendall 检验表明河南省舒适日数于 2001 年发生突变, 突变后舒适日数较突变前增加 10.11 d。全省舒适日频率为 51.67%, 各季舒适日频率从高到低依次为: 秋季(77.08%)、春季(76.19%)、夏季(50.68%)、冬季(2.72%)。

(2) 1960—2020 年河南省平均气温为 14.84 °C, 平均风速为 2.36 m/s, 平均相对湿度为

68.93%，近 61 a 来河南省年平均气温呈波动上升趋势，倾向率为 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，平均风速和相对湿度分别以 $-0.17\text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10\text{ a}$ 和 $-0.59\%/10\text{ a}$ 的倾向率呈波动下降趋势。河南省舒适度指数与平均气温呈正相关关系，相关系数达 0.962，与风速、相对湿度均呈负相关关系，舒适度指数主要受平均气温的影响。

(3) EOF 分析表明，近 61 a 河南省舒适日数空间分布主要为全局型，其方差贡献率达 79.09%，为决定性模态，显示河南省舒适日数空间变化的一致性，此外还存在着南—北相反型、东—西相反型等空间分布类型。

(4) 采用 REOF 方法对河南省舒适日数进行分析，可将河南省分为 5 个区域，各区舒适日数从多到少依次为：Ⅲ区(201.69 d)、Ⅴ区(188.92 d)、Ⅱ区(187.99 d)、Ⅳ区(186.43 d)、Ⅰ区(185.02 d)。

3.2 讨论

近 61 a 河南省人体舒适度指数和舒适日数分别以 $0.37/10\text{ a}$ 、 $2.42\text{ d}/10\text{ a}$ 的倾向率呈波动上升趋势，这与全球变暖背景下，我国陕西省^[26]、京津冀^[30]、东部地区^[31]和甘肃省^[16]等地区舒适度指数和日数增加趋势一致。相关分析表明，河南省舒适度指数与平均气温相关系数达 0.962，近 61 a 来河南省年平均气温以 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的倾向率呈波动上升趋势，这在一定程度上导致了全省舒适度指数和舒适日数的上升。

1960—2020 年河南省舒适日数于 2001 年发生了突变，突变后舒适日数增加了 10.11 d，这与 20 世纪 80、90 年代中国极端气候事件突变集中发生情况一致^[32]，20 世纪 80 年代中后期以来，全球气候状态发生转变^[33]，全球显著变暖，伴随区域气候要素的变化，区域舒适度指数和舒适日数发生了不同程度的变化。

近 61 a 河南省年舒适日数频率为 51.67%，各季舒适日数频率从高到低依次为：秋季(77.08%)、春季(76.19%)、夏季(50.68%)、冬季(2.72%)。这是由于河南位于我国中东部，属北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候，随着春季气温回升，人体舒适度也逐渐开始提升；夏季由于受到季风的影响，暖湿气流从海洋吹向陆地，雨水天气增多，叠加高温天气的影响，舒适日数相对减小；秋季受东南季风的影响逐渐减弱，气候相对比较温和，舒适日数逐渐增加；冬季时深受西北风的影响，气温较为寒冷，舒适日数最少。

基于 REOF 方法，河南省舒适日数分为 5 个区域，Ⅲ区舒适日数最长达 201.69 d，其他 4 个区域舒适日数差别不大，为 185.02~188.92 d，Ⅲ区主要包括三门峡、焦作大部分地区、洛阳大部分地区和南阳西北部，该区为典型的山地丘陵地区，一方面区域海拔相对较高，使得该区夏季温度相对较低，舒适日数相对较多。另一方面，该区森林覆盖率高，生态环境较好，也在一定程度上有利于气候舒适。

本研究利用 Mann-Kendall 检验、EOF 和 REOF 等方法对河南省人体舒适度时空特征进行了分析，未涉及舒适度变化对旅游业和健康等方面的影响，此外，降水和辐射等气候因素同样会影响人体舒适度，这些有待进一步研究。

参考文献：

- [1] ARABADZHYAN A, FIGINI P, GARCÍA C, et al. Climate Change, Coastal Tourism and Impact Chains—A Literature Review [J]. *Current Issues in Tourism*, 2021, 24(16): 2233-2268.
- [2] 金琪, 孟英杰. 1960—2016 年武汉城市圈人体舒适度变化特征 [J]. *气象与环境学报*, 2017, 33(6): 82-88.
- [3] 刘洛甫, 张伟. 城市湿地的小气候调节功能及其空间梯度效应 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(4): 133-142.
- [4] 李万玲, 郝鑫. 北半球人体不舒适天数归因分析及其未来预估 [J]. *大气科学学报*, 2023, 46(4): 561-574.
- [5] 朱妮娜, 曾刚, 史正燕, 等. 旅游气候舒适度的模型改进及时空演化 [J]. *旅游科学*, 2023, 37(4): 144-160.
- [6] 邓艺杰, 郅阳. 基于热舒适性和能源效率的花园艺术对城市小气候的影响与实证分析 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(11): 13-21.
- [7] HOUGHTON F C, YAGLOU C P. Determining Equal Comfort Lines [J]. *Journal of the American Society of Heating and Ventilating Engineers*, 1923(29): 165-176.

- [8] 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.
- [9] JENDRITZKY G, DE DEAR R, HAVENITH G. UTCI-Why Another Thermal Index? [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(3): 421-428.
- [10] OLIVER J E. *Climate and Man's Environment: An Introduction to Applied Climatology* [M]. New York: Jhon Wiley and Son's Inc, 1973.
- [11] DE FREITAS C R. Human Climates of Northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 1979, 13(1): 71-77.
- [12] 丛晓男, 王轶. 中国城市旅游气候舒适度及时空演变分析 [J]. *测绘科学*, 2015, 40(6): 84-91.
- [13] 李山, 孙美淑, 张伟佳, 等. 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.
- [14] 关靖云, 李东, 徐晓亮, 等. 近 40 年新疆旅游气候舒适期的时空格局及其演变研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(6): 185-197.
- [15] 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.
- [16] 于昕冉, 王乃昂. 近 60 a 甘肃省旅游气候舒适度变化分析 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(2): 143-150.
- [17] 郭广, 张静, 马守存, 等. 1961—2010 年青海省人体舒适度指数时空分布特征 [J]. *冰川冻土*, 2015, 37(3): 845-854.
- [18] 李树岩, 马志红, 许蓬蓬. 河南省人体舒适度气候指数分析 [J]. *气象与环境科学*, 2007, 30(4): 49-53.
- [19] 刘文平, 刘月丽, 安炜, 等. 山西省近 48 a 来人体舒适度变化分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(3): 92-95.
- [20] 于庚康, 徐敏, 于堃, 等. 近 30 年江苏人体舒适度指数变化特征分析 [J]. *气象*, 2011, 37(9): 1145-1150.
- [21] 石磊, 黄晓清, 尼玛吉, 等. 西藏自治区旅游气候适应性分析 [J]. *冰川冻土*, 2015, 37(5): 1412-1419.
- [22] 徐静, 卢宪梅, 刘志刚, 等. 1966—2018 年秦皇岛气候舒适度时空变化特征 [J]. *气象与环境学报*, 2020, 36(3): 80-86.
- [23] 曹伟宏, 何元庆, 李宗省, 等. 丽江旅游气候舒适度与年内客流量变化相关性分析 [J]. *地理科学*, 2012, 32(12): 1459-1464.
- [24] CHENG Q P, ZHONG F L. Evaluation of Tourism Climate Comfort in the Grand Shangri-La Region [J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(6): 1452-1469.
- [25] 马丽君, 孙根年, 李玲芬, 等. 海口旅游气候舒适度与客流量年内变化相关分析 [J]. *资源科学*, 2008, 30(11): 1754-1759.
- [26] 雷杨娜, 毛明策, 李明, 等. 1971—2018 年陕西省人体舒适度日数时空变化特征 [J]. *气象与环境学报*, 2022, 38(2): 89-96.
- [27] 魏凤英. *现代气候统计诊断与预测技术* [M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [28] 赵峰, 毕硕本, 李兴宇, 等. 基于 EOF 和 REOF 的 1470—1911 年黄河中下游地区旱涝空间分布特征分析 [J]. *干旱区地理*, 2019, 42(4): 799-809.
- [29] 蔡元刚, 吴婷婷, 张文千, 等. 基于 REOF 的四川省高温热浪时空分布特征分析 [J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(2): 201-208.
- [30] 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): 7567-7582.
- [31] 马丽君, 孙根年, 谢越法, 等. 50 年来东部典型城市旅游气候舒适度变化分析 [J]. *资源科学*, 2010, 32(10): 1963-1970.
- [32] 张大任, 郑静, 范军亮, 等. 近 60 年中国不同气候区极端温度事件的时空变化特征 [J]. *中国农业气象*, 2019, 40(7): 422-434.
- [33] REID P C, HARI R E, BEAUGRAND G, et al. Global Impacts of the 1980s Regime Shift [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 682-703.

