

# 气候变化情景下中国东部地区未来气候舒适度变化预测

金安琪 张昂 赵昕奕<sup>†</sup>

北京大学城市与环境学院, 教育部地表分析与模拟重点实验室, 北京 100871;

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: sh-zhao@urban.pku.edu.cn

**摘要** 选取中国东部691个数据记录较完整的站点, 统计各站点1971—2010年间每年每季的热日、冷日和舒适日天数, 利用温湿指数(THI), 评价中国东部季风区近40年的舒适度变化, 并结合未来情景下气象数据的比较和分析, 展望21世纪末中国东部地区的舒适度变化趋势。结果表明, 1971—2010年间, 中国东部季风区在一定程度上变暖, 东北和华南的气候敏感度高于其他地区, 沿海的气候敏感度高于内陆, 东北地区对气候变化的响应程度较高。

**关键词** 气候变化; 气候舒适度; 温湿指数(THI); 未来气候情景

## Estimation of Climate Comfort in Eastern China in the Context of Climate Change

JIN Anqi, ZHANG Ang, ZHAO Xinyi<sup>†</sup>

Laboratory for Earth Surface Processes (MOE), The College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871; <sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: sh-zhao@urban.pku.edu.cn

**Abstract** 691 sites with complete statistics in eastern China are selected, of which the hot days, cold days and comfortable days of each year from 1971 to 2010 are added up. The Temperature-Humidity Index (THI) is calculated to evaluate the changes in climate comfort of the monsoon region in eastern China for recent 40 years. The trend of climate comfort change at the end of the 21st century is predicted through the comparison and analysis of the future scenario meteorological data. The results show that between 1971 and 2010, the monsoon region in eastern China is warming to some extent. The climate sensitivity of northeast and south China is higher than that of other regions. The climate sensitivity of coastal area is higher than that of inland, and the northeast region has a higher response to the climate change.

**Key words** climate change; climate comfort; temperature-humidity index (THI); climate in the future

气候舒适度是反映人们无需借助任何消寒或避暑措施就能正常进行生理过程的气候状况的指数。气候是否宜人, 是根据一定条件下皮肤的温度、出汗量、热感和人体机能调节所必须承受的负荷确定, 主要受太阳辐射、最高(低)气温、相对湿度和风速等因素影响<sup>[1]</sup>。

在全球变暖的背景下, 评价气候变化对人类社会的影响时, 用舒适度作为评价指标, 比用温度和

湿度等气象指标具有更确切的意义。有研究预测21世纪的气温(air temperature, AT)以及体感温度(apparent temperature, AR), 结果表明, 在2005年以前, AR的上升速度比AT大0.04℃/10a, 在RCP4.5和RCP8.5两种情景下, 两者的差距分别提升至0.06℃/10a和0.17℃/10a<sup>[2]</sup>。在中低纬区域, 用AT指标进行评价, 夏季(热)不舒适日的增量与冬季舒适日的增量达到平衡; 用AR指标进行评价, 夏季

(热)不舒适日的增量则大于冬季舒适日的增量<sup>[2]</sup>。这项研究表明,舒适度指数能反映气象指标无法反映的气候变暖对人类社会的影响。因此,对于全球气候增暖,研究的对象不仅是温度,还有与气候舒适度相关的热应力(heat stress),即人体承受的净热负荷。在气候变暖背景下,极端热应力可能超出人体机能调节所能承受的范畴,危害人体健康。认识极端热、冷应力的时空变化,对于气候变化影响的评估、事件应对能力的提升及适应性策略的制定具有重要科学意义<sup>[3]</sup>。

自20世纪60年代以来,已出现很多气候舒适度评价的方案和指标,评价方法也经历从“主观感受评估”到“模型构建”的变化。对气候舒适度最经典的研究是1968年由田野调查得出的一个主观派生的舒适系统,将温湿指数叠加在二维温湿图上,再综合日间和夜间两个分级值,得到日舒适度分类<sup>[4]</sup>。此后,研究者将人的主观感受或生理反应纳入经验统计模型,构建一系列衡量指标,例如有效温度(effective temperature, ET)、温湿指数(temperature-humidity index, THI)以及风寒指数(wind chill index, WCI)等。然而,这些指标的经验性质仍导致其应用的时空局限性。20世纪60年代后,发展出一批基于两节点人体热交换模型的机理模型指标,其中具代表性的有体感温度(perceived temperature, PT)、标准有效温度(standard effective temperature, SET)和生理等效温度(physiological equivalent temperature, PET)等。近几年出现的通用热气候指数(universal thermal climate index, UTCI)综合了多节点人体热调节模型和自适应穿衣模型,是当前考虑因素最全面、最具普适性的人体热、冷应力指标<sup>[3]</sup>。

气候舒适度评价用途广泛。一方面,可以研究地区间气候变化的差异以及人体对气候的敏感性。例如,利用舒适指数得出气候舒适日概率,从而得到某个城市的旅游舒适期及其变化趋势<sup>[5]</sup>;通过特定地区的田野调查来校正舒适度指数,评价该地区人群对气候的敏感性<sup>[6]</sup>。另一方面,可以指导人类社会的生产生活。例如,探究气候指标与土地利用类型的关系<sup>[7]</sup>;在全球气候变化和城市化的背景下,通过研究气候舒适度区域的分布及变化趋势,进行气象服务和旅游规划<sup>[8]</sup>。

在人体生理气候指数中,THI应用较广泛。THI用温度计的干球、湿球、露点温度和相对湿度表示。有学者将THI用于研究我国南方体感温度分布

的气候学特征,绘制1,4,7和10月的THI等值线<sup>[9]</sup>。THI还应用于旅游业和农业等领域,例如研究北京地区气候舒适度的变化,用于评价适宜旅游的时间<sup>[1]</sup>。

对我国大尺度范围内气候舒适度的变化,已经有一些研究。吴佳等<sup>[10]</sup>基于高分辨率格点化逐日观测资料CN05.1(一套包括多种气候要素、高水平分辨率的日尺度格点化数据),引入更多气象台站的观测资料,除原有的日平均气温、最高气温、最低气温及降水量外,还增加日平均蒸发量、相对湿度和风速3个变量,用考虑了气温、湿度和风速影响的有效温度ET作为热感受指标,研究全国的舒适度变化,结果表明,随着全球变暖,有效温度升高,中国平均冷日和寒冷日以3.5 d/10a的速度减少,热日和炎热日以0.7 d/10a的速度增加,华南地区增幅最大。赵晓妮等<sup>[11]</sup>报道,目前全国平均舒适日数呈增加趋势,增幅为1.3 d/10a,但东部很多地区出现减少趋势,特别是夏季,整个东部地区的舒适日数都明显减少,减幅最大可以达到2 d/10a;全国夏季平均舒适日数从20世纪60年代的25天增加到近10年的29天,东部地区夏季舒适日数则由20世纪60年代的26天减少为近10年的22天。预计未来随着气候的进一步变暖,上述变化趋势将进一步加剧。

本文尝试利用THI指标评价中国东部季风区近40年的舒适度变化,并结合RCP4.5和RCP8.5两种未来情景下的预测气象数据,展望21世纪末中国东部地区的舒适度变化趋势。

## 1 研究区域及数据来源

本文研究的区域为中国东部地区,包括黑龙江、吉林、辽宁、河北、河南、山东、江苏、安徽、浙江、江西、湖北、湖南、福建和广东14个省级行政区以及北京、天津和上海3个直辖市。由于数据可获得性原因,本文研究区域未包括港、澳、台和南海诸岛。

选择这个区域进行研究的原因如下。首先,该区域的气候特征具有一致性,大部分为中国东部受季风影响强烈、气候变化活跃的地区,对气候舒适度的变化可能更敏感;随着辐射量的变化,该区域从南到北又呈现差异性,便于对气候进行分区对比。其次,该区域近几十年来受人类活动干扰较大,舒适度研究更具现实意义。最后,中国东部的气象

资料种类与数量较多,连续性与准确性较好。

气象数据来自国家级地面气象站(站点分布见图1)基本气象要素日值数据集(V3.0)。本文利用的数据时间范围为1971—2010年,气温数据采用日均温,湿度数据采用日平均相对湿度。经初步连续性检验,初筛标准为站点迁移直线距离小于3000 m,海拔变化小于50 m,海拔低于500 m,数据无连续3年及以上的缺失。最终,共得到691个站点的有效数据。数据集中,数据的缺失值用空值替代。为便于统计舒适日数,舍弃闰年2月29日的数据。

未来情景的气象数据资料来自区域协同降尺度试验(coordinated regional downscaling experiment, CORDEX)项目的东亚地区项目组(<https://cordex-ea.climate.go.kr/>)。CORDEX是将全球气候模式与区域气候模式耦合来预测区域未来气候变化情景的计划,其输入数据源为全球模式比较计划CMIP5的试验结果,在未来气候的预测中提供RCP4.5和RCP8.5两种典型浓度路径的未来情景气象数据。其中,RCP4.5为较低端情景(到2100年,温室气体浓度对应的辐射强迫为 $4.5 \text{ W/m}^2$ ),RCP8.5则为较高端情景。本文使用的区域气候模式为HadGEM3-RA,空

间分辨率为 $0.44^\circ$ ,详细信息见表1。

## 2 研究方法

### 2.1 温湿指数(THI)的计算和统计分析

THI通过温度与湿度的组合反映人体与周围环境的热量交换,是一个表征人类气候感受的指标<sup>[1]</sup>,因其计算简便、应用的气候范围大而被较多地使用。THI分为9个等级(表2),计算公式<sup>[1,5]</sup>如下:

$$\text{THI} = (1.8t + 32) - 0.55(1 - f)(1.8t - 26),$$

其中, $t$ 为摄氏温度, $f$ 为相对湿度。

使用历史实测气象数据,计算每个站点的THI并分级。按3—5月、6—8月、9—11月和12月一次年2月4个季节,每个季节分THI赋值为1,5和9的3种情况(夏季不统计“冷-不舒适”,冬季不统计“热-不舒适”),将一个时段内某种舒适度对应的天数记为一个指数,之后的研究就围绕这3个指数展开。统计这3个指数40年的年际变化。将各季节3个指数对年份做线性回归,得到该季节3种舒适指数的回归系数,其中数据缺失的年份用前后两年天数的平均值近似地替代。回归系数 $\times 10$ 即为气候倾向率( $d/10a$ )。

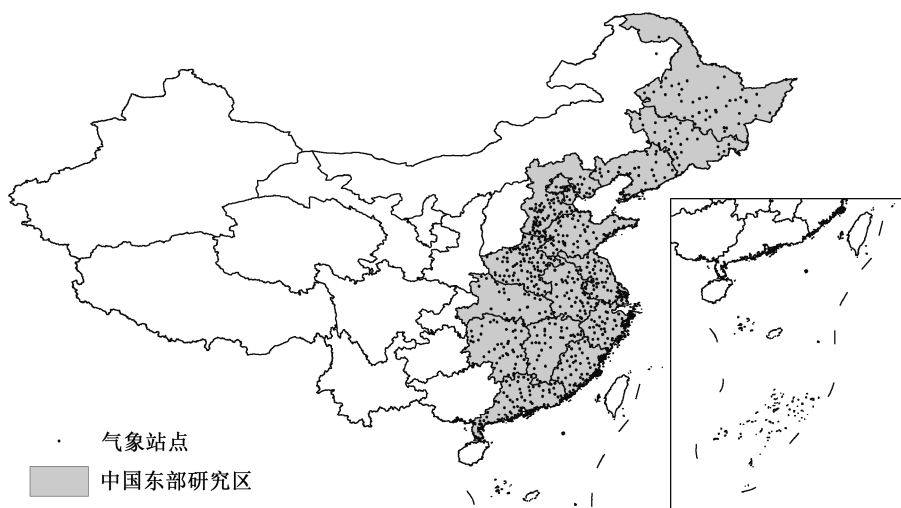


图1 研究区及气象站点分布  
Fig. 1 Study area and distribution of meteorological stations

表1 区域气候模式基本信息  
Table 1 Basic information of the regional climate model

区域气候模式	全球气候模式	历史数据集	未来情景数据		每年天数
			RCP4.5	RCP8.5	
HadGEM-RA	HadGEM2-AO	1996—2005年	2071—2100年	2071—2100年	360

说明: 根据来自 <https://cordex-ea.climate.go.kr/> 的信息整理。

表2 温湿指数的分级标准<sup>[1,5]</sup>  
Table 2 Grade standard of THI<sup>[1,5]</sup>

赋值	THI	人体感觉	舒适感
1	<40	极冷	极不舒适
2	40~45	寒冷	不舒适
3	45~55	偏冷	较不舒适
4	55~60	清凉	舒适
5	60~65	凉	非常舒适
6	65~70	暖	舒适
7	70~75	偏热	较舒适
8	75~80	闷热	不舒适
9	>80	极闷热	极不舒适

## 2.2 对21世纪末气候舒适度变化的预测

将21世纪末30年的预测数据与1996—2005年的模式数据做平均,计算HadGEM3-RA气候模式下各季节3种THI指数的天数变化 $\Delta$ 。其中,模式数据仅提供饱和水汽压和比湿的预测数据,相对湿度 $f$ 的计算公式为

$$f = \frac{p}{\left(\frac{0.622}{s} + 0.378\right) \times 6.1078e^{\frac{17.2694(T-273.16)}{T-35.86}}}$$

其中, $p$ 为饱和水汽压(Pa), $e$ 为当前水汽压(Pa), $s$ 为比湿, $T$ 为热力学温标(K)。

将实测数据用Kriging方法插值到格点上,插值后每种指数的实测天数加上变化量 $\Delta$ ,即为预测的21世纪末舒适度。用 $\Delta$ 除以实测数据,得到舒适天数的变化率(%),用于反映不同地区对气候变化响应的强度。在计算舒适天数的变化率时,实测天数插值后为负值的格点天数记为0;处理后天数为0的站点,天数变化率在图例上记为“无数据”。

## 3 1971—2010年中国东部地区舒适指数变化趋势

### 3.1 3个指数的多年平均值和季节状态

图2显示1971—2010年间平均每年THI赋值为1,5和9的天数占总天数的比例,图3分季节地显示3个指数的比例。根据THI的频数分布,参照史培军等<sup>[12]</sup>提出的中国气候变化区划(简称区划),本研究区域的分区如下:1)东北三省,为区划中“I东北—华北暖干趋势带”的I1和I2部分;2)京津冀和山东,为区划中的I3部分;3)江苏、安徽以及河南东南部,为区划中“II华东—华中温暖趋势带”的II1部分;4)湖南东部、江西北部、浙江以及福建北部,对应区划的II2部分;5)广东、福建南部、江西南部以及湖南南部,对应区划中的II3部分;6)河南、湖北、湖南三省的西部,属于区划中“III西南—华南干暖趋势带”。在每个气候带中,全年THI的概率分布相近。无论从全年还是分季节看,研究区内THI的纬度分异都较明显,从北向南热日增多,冷日减少。特别地,东南沿海地区全年平均舒适日最多,占比达14%以上;华北地区舒适日最少,占比在9%以下。

### 3.2 3个指数40年变化的气候倾向率

图4显示1971—2010年40年间各季节3个指数变化的趋势度分布。

春季,冷日仅在26°—30°N之间有所增加,其他地区减少,从南向北减少趋势变得明显。舒适日在东北呈增多趋势,在华北呈减少趋势,华北以南变化不显著。在长江以南,热日有所增加,增加程度向南递增;长江沿岸热日有减少趋势。

夏季,除华北THI赋值为5的舒适日数有所增

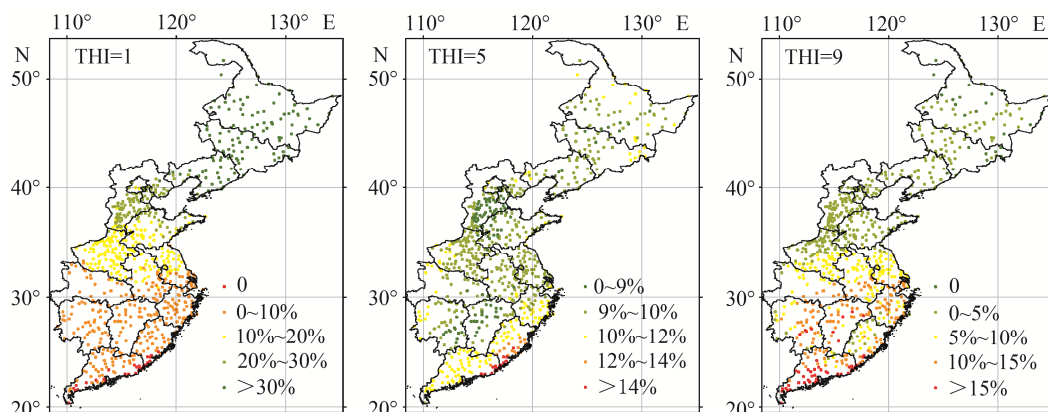


图2 研究区全年THI频数分布(1971—2010年)

Fig. 2 Annual THI frequency distribution in the study area (1971—2010)

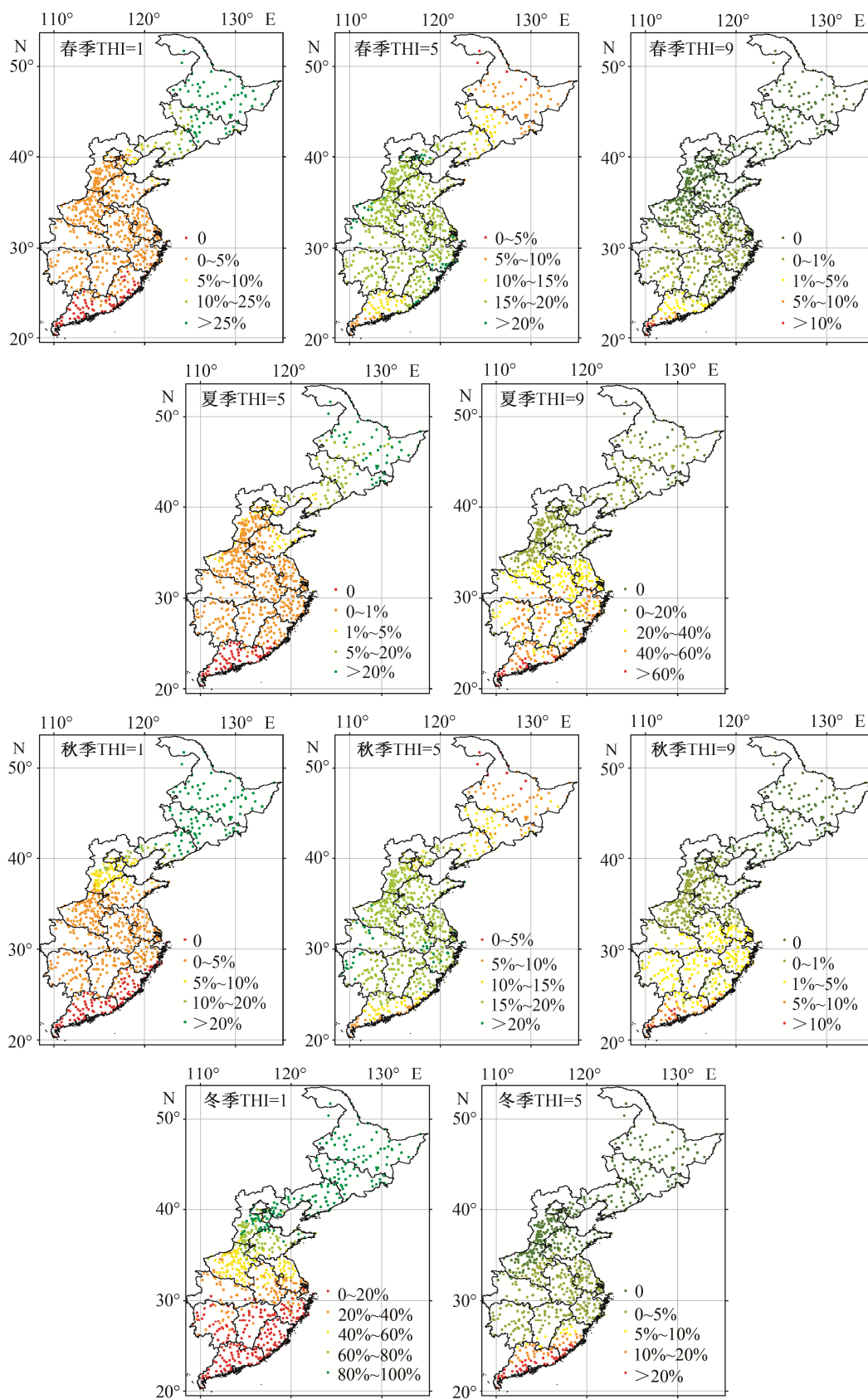


图3 研究区各季节THI频数分布(1971—2010年)

Fig. 3 Probability of THI distribution in each season in the study area (1971-2010)

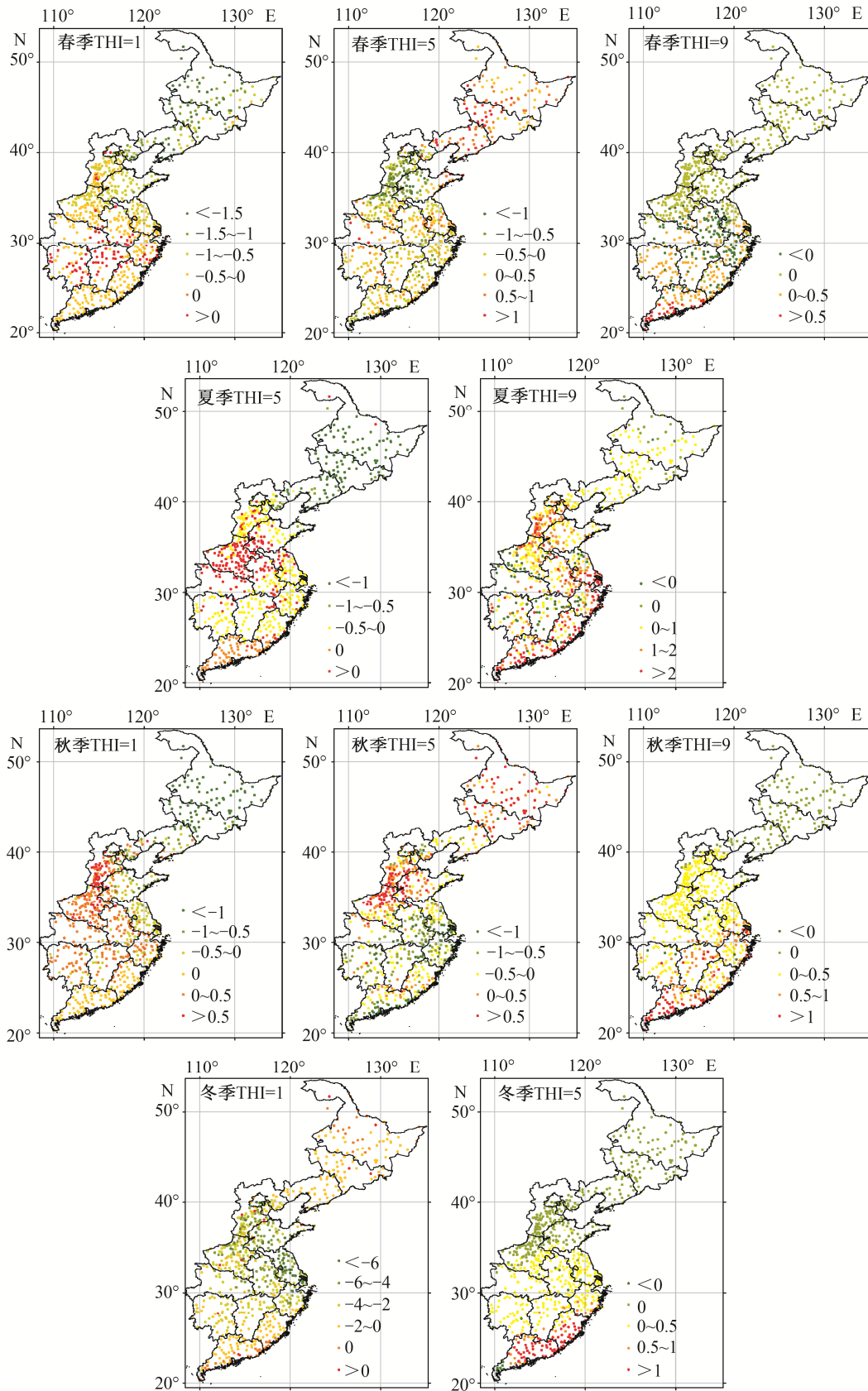


图 4 研究区各季节 THI 倾向率(d/10a)分布(1971—2010年)

Fig. 4 Climate tendency rate of THI (d/10a) distribution in each season in the study area (1971-2010)

加外,其他地区舒适日数几乎都有所减少,减少程度从南向北递增。东南沿海地区和河北省南部热日数增加最显著,湖北、湖南和江西地区热日数增加不明显,部分地区有减少趋势。

秋季,气候倾向率有明显的纬度分异。东北地区冷日减少率和舒适日增长率均最大。华北地区(尤其是河南与河北交界地区)冷日和舒适日有 $>0.5$  d/10a 的增长,热日略有增加。长江沿岸,冷日和热日均有小幅的增加;舒适日明显减少,倾向率达 $-2$  d/10a。华南地区舒适日减少,热日增加显著。总体上,华南和东北秋季有变暖趋势,其他地区则有极端天气情况增加的趋势,冷日和热日均增多。

冬季,研究区总体上冷日减少,其中江苏省及华北平原的减少幅度较显著,大部分站点气候倾向率达 $-6$  d/10a。华北平原及以北舒适日数不变,以南舒适日增加,趋势度也随之增加,华南沿海舒适日增加幅度最大,达 $1$  d/10a 以上。

## 4 未来中国东部地区舒适度的可能变化

### 4.1 研究区 2071—2100 年气温的可能变化

在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下,计算 21 世纪末的 30 年与 1996—2005 年模式数据的年均温差值,用以大致判断未来的温度变化。如图 5 所示,研究区在两种情景下年均温都有所上升,且升温幅度有明显的纬度分异,东北地区升温幅度最大,华北北部和长江中下游平原次之。

### 4.2 气候变化对研究区舒适指数的影响

图 6 和 7 显示 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下各季节 3 个 THI 指数的变化率在研究区的分布。

春季,除华南个别格点冷日增加外,研究区整

体上冷日减少,减少率向北降低,南至华南以南、北至华北的地区减少率都较大,达 80% 以上,冷日几乎消失。东北地区舒适日增加,增幅向北增大,东北以南舒适日减少。除华北和东北外,热日都有所增加,长江中下游平原增幅最大,达 300% 以上。

夏季,除山东省北部外,研究区舒适日呈减少趋势,东部沿海、湖南和湖北西部、华北北部至辽宁的减少率最大。研究区热日增加,增幅从南向北增大,华北和东北的热日数均增加 3 倍以上。

秋季,研究区内冷日减少,热日增加,舒适日仅东北有所增加,其余地区减少。冷日减少率从南向北递减,东北地区冷日减少率较小。热日增加率从南向北递增,华北地区增幅最大,达到 3 倍以上。

冬季,研究区内冷日减少,舒适日增加。从南向北,冷日减少率降低,黄河以南冷日的减少率大于 50%,黄河以北冷日的减少率则小于 50%。舒适日增加率上升,从图 7 可以看出, RCP8.5 情景下舒适日数的增加有明显的纬度分异,华南冬季舒适日增加率低于 50%,长江以北则增加 300% 以上。

### 4.3 研究区未来气候舒适度预测

在计算得到实测数据与模式数据差值的基础上,预测 21 世纪末气候舒适度,图 8 和 9 分别表示 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下 3 个指数在 21 世纪末的预测分布格局。春季和秋季,河北省北部以及河南、湖南和湖北三省的西部的舒适度比较高。夏季和冬季,高舒适度地区分别北移和南移。对于 THI 赋值为 1 和 9 的两个指数,预测的舒适度分布基本上符合纬度分异规律,从南向北冷日增多,热日减少。特别地,在湖北、湖南和江西三省交界处存在一定的辐射向分异,尤其在秋季,该三省交界地区冷日

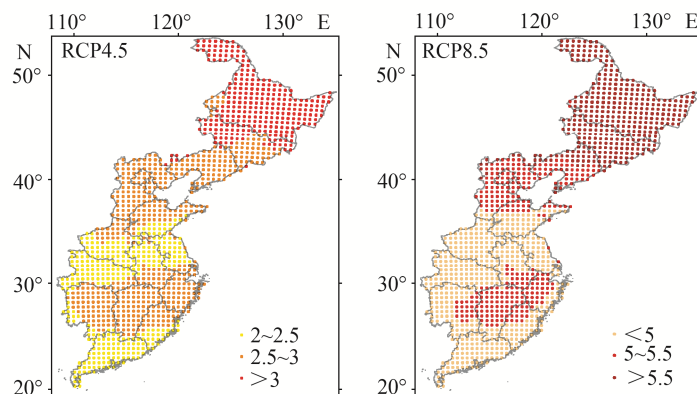


图 5 在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下未来与历史的年均温差值(°C)

Fig. 5 Difference of the annual average temperature (°C) between RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

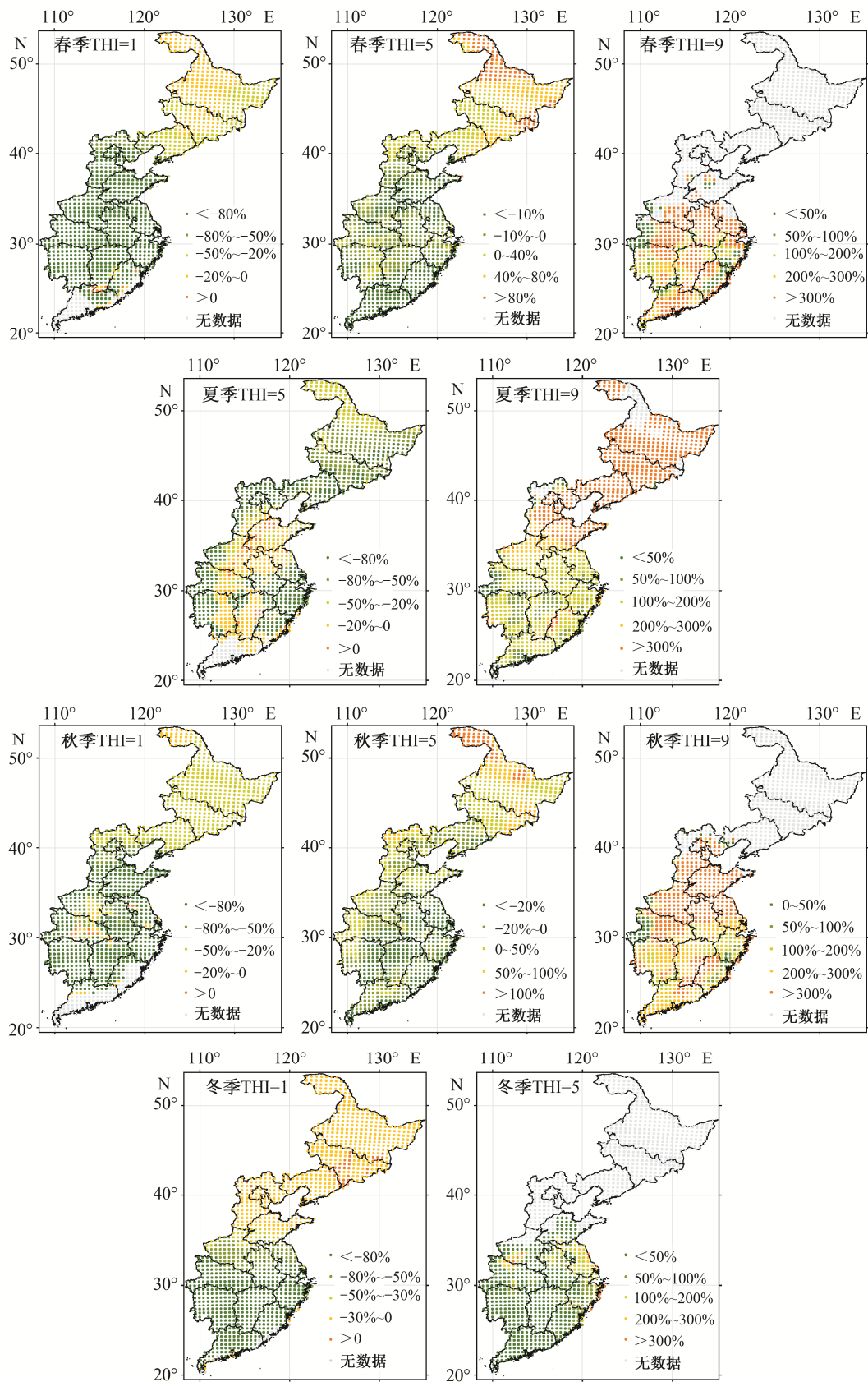


图6 RCP4.5情景下3个THI指数的变化率

Fig. 6 Rate of change of the three THI indexes under RCP4.5 scenario

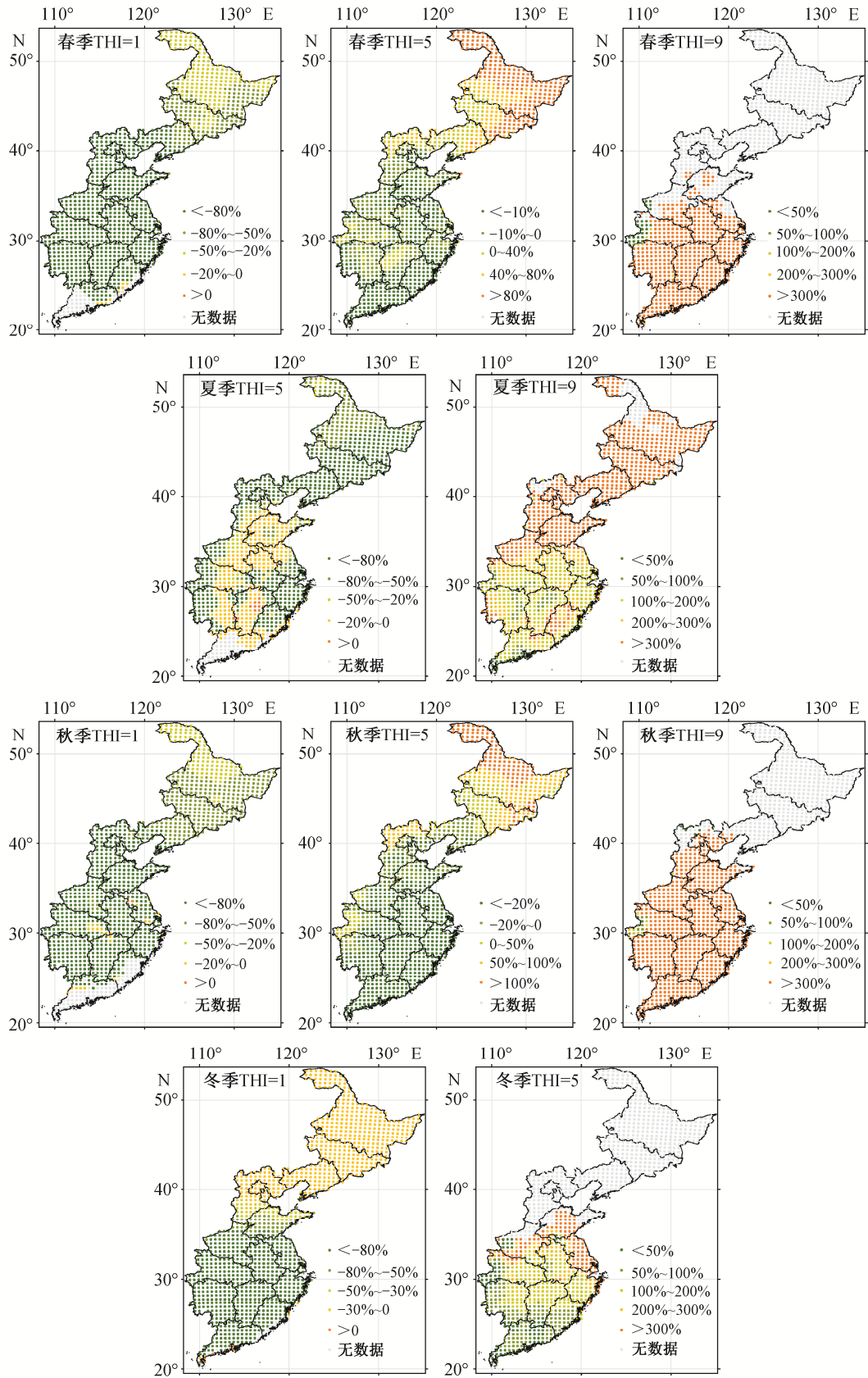


图7 RCP8.5情景下3个THI指数的变化率

Fig. 7 The rate of change of the three THI indexes under RCP8.5 scenario

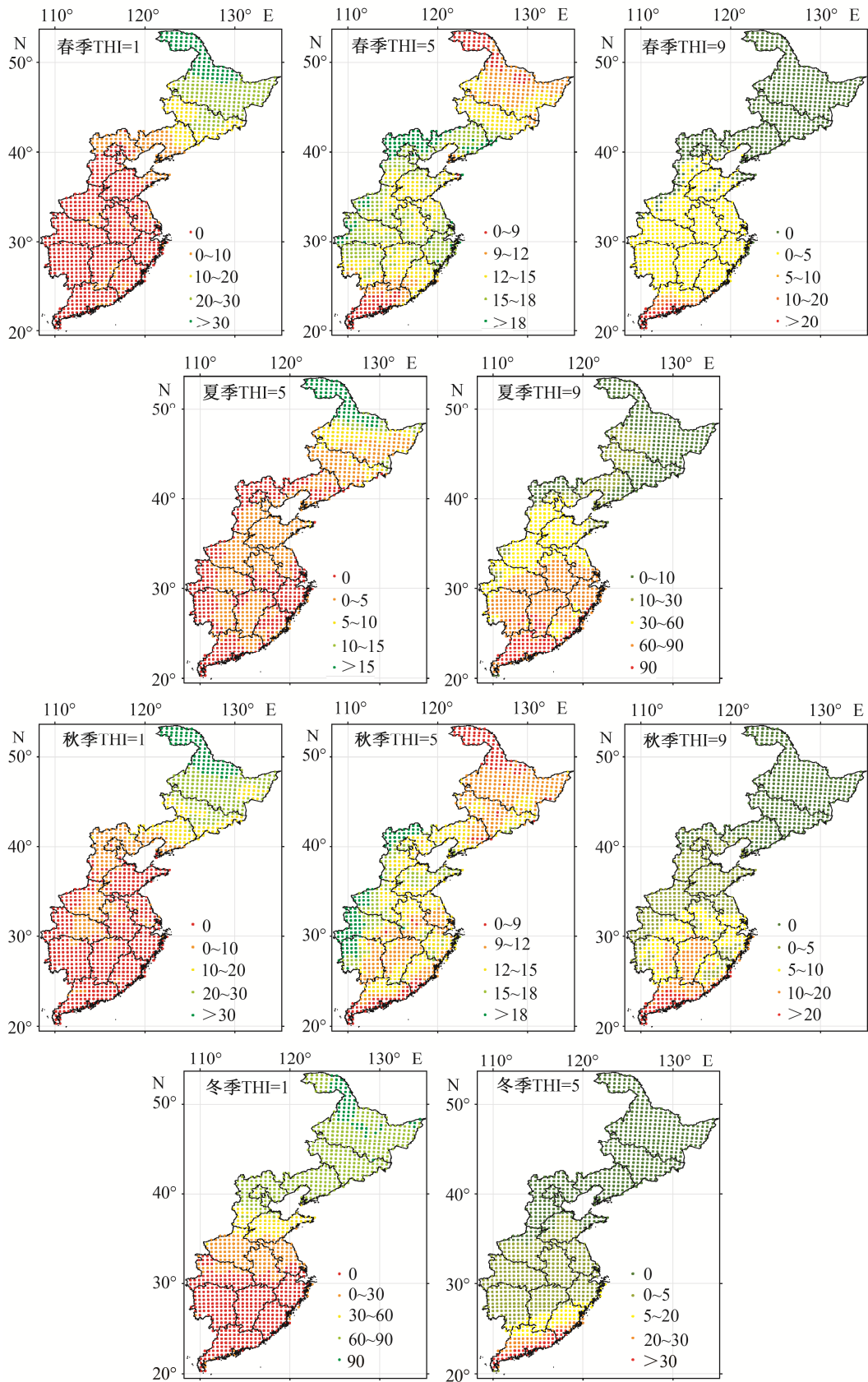


图 8 RCP4.5 情景下各季节 3 个 THI 指数对应的天数

Fig. 8 Number of days corresponding to the three THI indexes of each season under RCP4.5 scenario

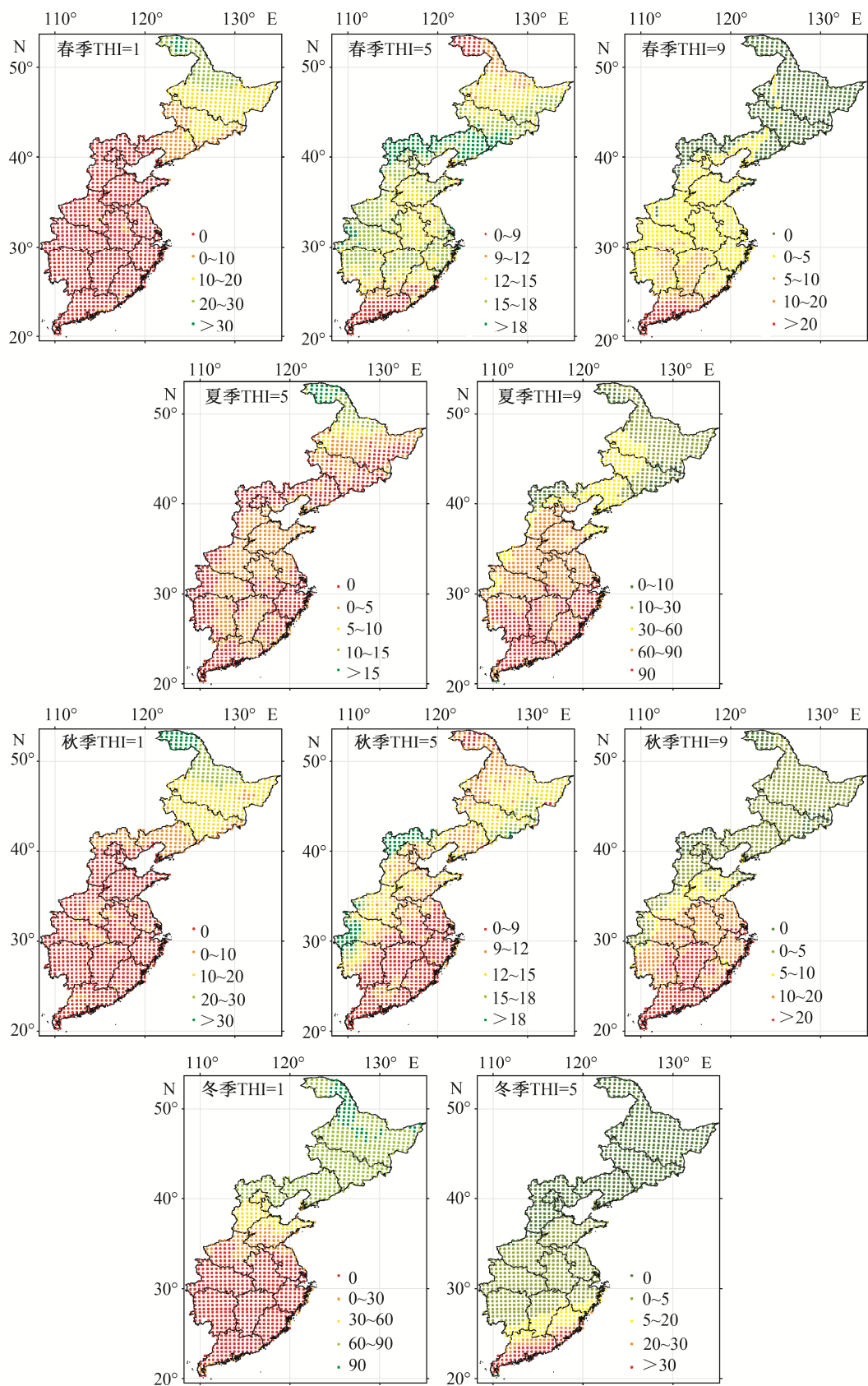


图9 RCP8.5 情景下各季节 3 个 THI 指数对应的天数

Fig. 9 Number of days corresponding to the three THI indexes of each season under RCP8.5 scenario

和热日都明显多于周边地区,且具有极端气温的日数向周边递减。

## 5 讨论与结论

### 5.1 讨论

对过去40年气候变化的观测表明,东北和华南是对气候变化较敏感的地区。东北地区表现为春、秋、冬三季冷日减少,舒适日增多;夏季热日增多,舒适日减少。华南地区表现为全年热日数均有所增加,且增加率几乎都大于其他地区。

对东北地区气候敏感性的研究表明:一方面,该地区呈现明显的升温趋势,如黑龙江省在1961—2008年间增温幅度为1.71℃(通过 $\alpha=0.01$ 的统计检验),并以冬春增温幅度为最大<sup>[13]</sup>;另一方面,该地区近40年来干燥指数以0.06/10a的幅度增加,气温升高和降水减少是其干燥程度加剧的主要原因<sup>[14]</sup>。

吴浩等<sup>[14]</sup>对全国614个站点进行气候变化综合指数(climate change index, CCI)的计算,得到的结果也支持东北和华南的气候敏感性。其中,中国江南和西南东部CCI指数最小,说明这些区域对气候变化不敏感;江淮和黄淮地区的CCI指数次小;华南地区的CCI指数为中等;华北和东北地区的CCI指数最大,极端气候事件频发。

同纬度地区,由于沿海地区受季风及台风带来的强降水影响,CCI指数相对偏大,对气候的敏感程度高于内陆<sup>[14]</sup>。未来情景下,中纬度地区普遍增温,但由于降水量变化的差异,气候舒适度及其变化从东向西经度分异明显。史培军等<sup>[12]</sup>指出,1961—2010年,东南沿海地区降水量上升速率最大,长江中下游平原降水量波动增强幅度最大,二级阶梯(除西北地区外)降水量呈快速下降趋势。这种趋势可能延续到未来,对未来的气候舒适度产生影响。

### 5.2 结论

1) 中国东部季风区近40年来存在一定程度的变暖现象,在舒适度上表现为春、秋、冬三季冷日减少,春、夏、秋三季热日增多;在气候敏感度方面表现为东北和华南地区高于其他纬度地区,沿海地区高于内陆。气候敏感度高的地区,舒适指数变化趋势更显著。

2) 在RCP4.5和RCP8.5两种情景下,研究区整体上呈现变暖的趋势。在纬度分异方面,北方对气候变化的响应程度大于南方,东北地区延续气候敏感度较高、气候变暖幅度较大的趋势。湖北、湖南、江西三省交界处的气候变化程度与周边地区有

差异,表现为夏季和秋季热日增加率比周边地区小,秋季冷日和热日比周边地区略多。

## 参考文献

- [1] 马丽君,孙根年,马彦如,等. 50年来北京旅游气候舒适度变化分析. 干旱区资源与环境, 2011, 25(10): 161-166
- [2] Li J F, Chen Y D, Gan T Y, et al. Elevated increases in human-perceived temperature under climate warming. Nature Climate Change, 2018, 8: 43-47
- [3] 孔钦钦,葛全胜,郑景云. 中国极端通用热气候指数的时空变化. 地理研究, 2017, 36(6): 1171-1182
- [4] Terjung W H. World patterns of the distribution of the monthly comfort index. Int J Biometeor, 1968, 12(2): 119-151
- [5] 罗生洲,巨克英,罗延年,等. 1954—2011年西宁旅游舒适期时间变化分析. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1153-2011
- [6] Krüger E, Rossi F, Drach P. Calibration of the physiological equivalent temperature index for three different climatic regions. Int J Biometeorol, 2017, doi: 10.1007/s00484-017-1310-8
- [7] Méndez-Lázaro P, Muller-Karger F E, Otis D, et al. A heat vulnerability index to improve urban public health management in San Juan, Puerto Rico. Int J Biometeorol, 2017, doi: 10.1007/s00484-017-1319-z
- [8] 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. 地理科学, 2016, 36(8): 1205-1211
- [9] 王德瀚. 我国南方体感温度(温湿指数)分布的气候学特征. 热带地理, 1986, 6(1): 38-44
- [10] 吴佳,高学杰,韩振宇,等. 基于有效温度指数的云南舒适度变化分析. 地球科学进展, 2017, 32(2): 174-186
- [11] 赵晓妮,吴佳,高学杰. 感知中国近年来正在变化的气候舒适度:冷日减少 热日增加 舒适日微微增多. 中国气象报, 2017年5月5日第003版
- [12] 史培军,孙劭,汪明,等. 中国气候变化区划(1961—2010年). 中国科学:地球科学, 2014, 44(10): 2294-2306
- [13] 郝成元,赵伟,赵同谦. 全球气候变化背景下中国敏感区区域响应比较. 地域研究与开发, 2011, 30(3): 56-61
- [14] 吴浩,侯威,钱忠华,等. 基于气候变化综合指数的中国近50年来气候变化敏感性研究. 物理学报, 2012, 61(14): 49205-1-149205-10