

干旱区地理

Arid Land Geography

ISSN 1000-6060, CN 65-1103/X

《干旱区地理》网络首发论文

题目: 极端气候影响下黄河中下游地区宜居水平时空变化
作者: 宁晓菊, 张立, 杨璐瑶, 毛齐正, 刘晓卓
收稿日期: 2025-07-14
网络首发日期: 2025-10-16
引用格式: 宁晓菊, 张立, 杨璐瑶, 毛齐正, 刘晓卓. 极端气候影响下黄河中下游地区宜居水平时空变化[J/OL]. 干旱区地理.
<https://link.cnki.net/urlid/65.1103.X.20251016.1416.003>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.12118/j.issn.1000—6060.2025.403

CSTR:32274.14.ALG2025403

极端气候影响下黄河中下游地区宜居水平时空变化

宁晓菊¹, 张立², 杨璐瑶³, 毛齐正¹, 刘晓卓¹

(1. 河南财经政法大学城乡规划学院, 河南 郑州 450046; 2. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 评估气候宜居水平、分析极端气候对宜居性的影响, 是改善城乡人居环境的关键。以黄河中下游地区为例, 根据 1990—2022 年 493 个气象站逐日观测数据, 通过气候适宜性因子揭示气候宜居水平的分布, 利用最大熵 (MaxEnt) 模型模拟极端气候对宜居性的影响。结果表明: (1) 黄河中下游地区气候宜居水平多年平均值呈南高北低、东高西低分布。33 a 来, 气候宜居水平的变化趋势在中游北部以不显著上升为主, 在中游南部及下游地区以微显著下降为主。(2) 中游北部夏季减湿、1 月升温及年适宜温度天数增加, 中游南部和下游地区夏季增温和冬季日照适宜性下降导致热不舒适上升, 分别是二者气候宜居水平变化的主因。(3) 极端高温、极端低温和极端降水对黄河中下游地区气候宜居性的影响均以中和高强度为主, 在空间上呈南高北低、东高西低分布。但极端降水影响强度的年际变幅最大, 极端低温次之, 极端高温最小。(4) 相对于中游北部, 中游南部和下游地区热浪天数、极端降水量和极端降水天数的发生频率较高, 霜冻天数和寒冷天数差值大是该区气候宜居性受极端气候影响高的主因。

关键词: 适宜性因子; 气候宜居水平; 极端气候; 影响强度; 时空变化; 黄河中下游

党的二十大报告明确指出, 改善城乡人居环境、建设宜居宜业的和美乡村、打造宜居韧性城市是推动城乡融合发展的关键。气候宜居性作为人居环境的核心本底资源, 决定着人居环境韧性提升路径, 影响人类的生计与健康福祉^[1-2]。城市作为区域发展的中心, 一直是气候宜居性研究的热点区。已有研究从气候禀赋、气候风险和气候生态环境等方面构建气候宜居性指标体系^[1,3], 评价城市气候宜居水平是传统气候宜居性研究的主要内容^[4]。考虑人体对气温、降水、风速和湿度等要素的感知, 构建多样化的气候舒适度指数, 进行城市气候舒适度评价^[5-6], 极大地丰富了城市气候宜居性研究。社区作为城市的基本单元, 分析社区居民的职业、年龄和性别等对城市冷、热和湿舒适等的感知^[7-8], 揭示城市建筑环境对微气候与社区宜居性的影响^[9], 是推动城市气候宜居性与人类健康福祉研究的关键点。

气候变化背景下, 区域性极端降水、高温热浪和干旱等频发, 加剧了各类生态系统的脆弱性, 降低了区域气候的宜居性^[10-11]。评价区域极端气候对宜居性的影响强度, 成为改善城乡人居环境的前提。由于极端气温与城市热岛效应容易复合产生一系列影响, 其对城市气候宜居性的影响引起了很多学者的关注。Alijani 等^[12]整合极端气候和热舒适构建新的城市气候宜居性评价方法; Shi 等^[13]耦合温度和湿度、干旱指数和湿度、干旱指数和风速等, 评估极端气候对城市宜居性的影响; 王旭等^[14]通过生理等效温度揭示我国城乡之间热舒适的梯度变化, 这些有力地推动了极端气候与宜居性研究的深入。然而, 更多的学者只是分析极端气候要素的发生频率、变化趋势和空间分布等^[15-16], 没有进一步揭示极端气候对宜居性的影响。此外, 相较于城市, 乡村地区基础设施较为落后, 产业结构较为单一, 面对极端气候冲击时更为脆弱^[17-18]。当前弱化对乡村的研究, 不利于揭示区域气候宜居性的演变规律, 难以明晰多样化的极端气候变动对宜居性的影响。

受气候变化的影响, 黄河中下游地区强降水的发生频率增加^[19-20], 最为突出的是 2021 年“7·20”河南特大暴雨和“10·5”山西暴雨, 高温热浪的频率和强度也在增加^[21-22]。虽然黄河中下游地区低温寒潮频次呈减少趋势, 但是低温寒潮强度显著增加, 且年际变化幅度明显增大^[23]。

收稿日期: 2025-07-14; **修订日期:** 2025-08-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32471662; 42576275); 河南省科技攻关 (252102110152, 232102110039); 河南省社会科学规划决策咨询项目 (2024JC017) 资助

作者简介: 宁晓菊 (1987-), 博士, 讲师, 主要从事气候变化与韧性研究. E-mail: nxj0655@163.com

显然，极端气候的变化给黄河中下游地区生态保护和高质量发展带来挑战，亟须综合评估各类极端气候对宜居性的影响。因而，本文以黄河中下游地区为例，在分析气候适宜性因子变化特征的基础上，计算气候宜居指数，评估气候宜居水平的分布特征及变化趋势，同时，构建极端高温、极端低温和极端降水影响气候宜居性的指标体系，模拟极端气候对宜居性的影响，以期为黄河中下游地区分区分级改善城乡人居环境、促进城乡融合发展提供有价值的参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

由于历史上黄河多次改道，黄河流域的范围尚未形成共识，学者们可根据研究对象自行界定^[15,24]。按照黄河上、中、下游划分节点，考虑内蒙古气候东西差异显著，兼顾黄河主要流经内蒙古中西部交接区的事实，并遵循地级市行政单元的完整性，选取内蒙古自治区的巴彦淖尔、包头、乌兰察布、呼和浩特和鄂尔多斯 5 市，以及陕西省、山西省、河南省与山东省的全域，作为本文的研究区。在气候上，黄河中下游地区多为温带季风气候，中游北部为温带大陆性气候，自南向北在热量上跨越了北亚热带、暖温带、中温带和北温带，自东南向西北在水分上跨越半湿润区和半干旱区。

1.2 数据来源

研究区 493 个气象观测站（图 1）1990—2022 年逐日气温、降水、日照、湿度和风速观测数据来源于中国科学院资源环境科学数据平台（<https://www.resdc.cn/data>）。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图 1 研究区 493 个气象站点分布

Fig. 1 Distribution of the 493 meteorological stations in the study area

1.3 极端气候对宜居性影响的指标体系构建

根据黄河中下游地区气候特征，参考国家标准《气候宜居指数》和《人居环境气候舒适度评价》^[25-26]，按照年际水热适宜性、夏季湿热适宜性和冬季光热适宜性选取气候适宜性指标因子，评估黄河中下游地区气候宜居水平，从极端高温、极端低温和极端降水 3 个方面构建用于模拟极端气候对宜居性影响的指标体系（表 1）。在计算指标因子时，本文根据中国气象局规定：“连续 3 d 日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 为一次热浪事件”，计算年热浪天数和热浪频次，通过气温、风速和日照时数计算风效指数^[26]。

表 1 气候宜居水平评估和极端气候对宜居性影响模拟指标体系

Tab. 1 Indicators system for assessing the level of climate livable and simulating the impact of extreme climate on livability

类别	类型	指标因子	含义	特征
气候宜居水平	年际水热适宜性	年平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	一年中日平均气温的平均值	区间
		年适宜温度天数/d	一年中日平均气温在 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ 的天数	正向
		年适宜降水天数/d	一年中日降水量在 $0.1\sim 10\text{ mm}$ 的天数	正向
		年适宜湿度天数/d	一年中日相对湿度在 $50\%\sim 80\%$ 的天数	正向
		降水季节均匀度	冬季降水量与夏季降水量的比值	正向
	夏季湿热适宜性	夏季平均气温日较差/ $^{\circ}\text{C}$	夏季日最高气温与日最低气温差值的平均值	正向
		夏季平均相对湿度/%	夏季空气相对湿度的平均值	反向
		7 月平均最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	7 月日最低气温的平均值	区间
	冬季光热	冬季日照总时数/h	11、12 月和次年 1 月日照时数的总和	正向

	适宜性	1月平均最高气温/°C	1月日最高气温的平均值	正向
极端气候影响	极端高温	年高温天数/d	一年中日最高气温≥35℃的天数	负向
		年热浪天数/d	一年中热浪事件的总天数	负向
		年热浪频次/次	一年中热浪事件发生的总次数	负向
	极端低温	年霜冻天数/d	一年中日最低气温≤0℃的天数	负向
		年寒冷天数/d	一年中风效指数<-400的天数	负向
		年极端降水量/mm	一年中日降水量≥50mm的降水量的和	负向
	极端降水	年极端降水天数/d	一年中日降水量≥50mm的天数	负向
		最大连续干日/d	一年中最长一次持续无降水日数	负向

1.4 研究方法

1.4.1 气候适宜性因子和气候宜居水平的趋势分析

为减弱气候因子年际波动的影响,对1990—2022年气候适宜性因子进行5a滑动平均后,逐站点构建气候适宜性因子的一元线性回归方程,根据方程斜率 a 和 F 显著性检验,分析气候适宜性因子的多年变化趋势。

利用熵权法对气候适宜性指标因子进行赋权,计算黄河中下游地区气候宜居指数,结合GIS技术分析黄河中下游地区气候宜居水平的空间分布。根据Sen斜率估计和Mann-Kendall显著性检验,揭示气候宜居水平的多年变化趋势及显著性。参考已有研究^[14],1990—2022年气候宜居指数的变化趋势的计算公式如下:

$$S_{CLI} = \text{median}\left(\frac{CLI_j - CLI_i}{j - i}\right) \quad (1)$$

式中: S_{CLI} 为气候宜居指数的变化趋势; i 和 j ($1990 \leq i < j \leq 2022$)为时间序数; CLI_i 、 CLI_j 为第 i 、 j 年对应的气候宜居指数。 $S_{CLI} > 0$,说明气候宜居水平上升; $S_{CLI} < 0$,说明气候宜居水平下降; $S_{CLI} = 0$,说明气候宜居水平无变化。

使用Mann-Kendall显著性检验法分析 S_{CLI} 的显著性,其检验统计量 S 的计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(CLI_j - CLI_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(CLI_j - CLI_i) = \begin{cases} 1, & CLI_j - CLI_i > 0 \\ 0, & CLI_j - CLI_i = 0 \\ -1, & CLI_j - CLI_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\text{Var}(S)$ 为方差; n 为气候宜居指数的总序列数; Z 为标准化后的检验统计量。

在此取 $\alpha=0.1$ 和 $\alpha=0.05$,即 $Z_{1-\alpha/2}=\pm 1.65$ 和 $Z_{1-\alpha/2}=\pm 1.96$ 评估 S_{CLI} 的变化趋势是否显著。当 $|Z| \leq 1.65$ 时,表明 S_{CLI} 的变化趋势不显著;当 $1.65 < |Z| \leq 1.96$ 时,表明在90%置信区间上 S_{CLI} 的变化趋势显著(简称微显著);当 $|Z| > 1.96$ 时,表明在95%置信区间上 S_{CLI} 的变化趋势显著。

1.4.2 基于最大熵(MaxEnt)模型的极端气候对宜居性影响模拟

MaxEnt模型采用物种出现的点数据和环境变量数据对物种生境适宜性进行评价,从符合条件的分布中选择熵最大的分布作为物种的最优分布^[27],可以有效应用于气候变化的影响研究。根据最大熵原理,物种的真实分布可以表示成研究区域 X 个站点集上的概率分布 π ,每一个站点 x 均有一个概率分布 $\pi(x)$, $\pi(x)$ 的最大值为1,最小值为0。影响物种分布的因子称之为环境变量 $f(x)$ 。MaxEnt模型在模拟物种分布时,假设任意一个站点 x ,物种的概率分布 $\pi(x)$ 的近似分布为 $\hat{\pi}(x)$, $\hat{\pi}$ 的熵定义为:

$$H(\hat{\pi}) = - \sum_{x \in X} \hat{\pi}(x) \ln \hat{\pi}(x) \quad (6)$$

式中： $H(\hat{\pi})$ 是最接近 X 个站点数的自然对数，属于非负值。

在此以气象站的位置数据作为点数据，以 1991—2020 年各极端气候要素每 5 年平均值作为环境变量数据，进行 MaxEnt 模型的模拟。结合气候宜居指数多年平均值的空间分布，评估极端气候对宜居水平的影响。根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）对气候事件发生概率的量化^[28]，按照 0.1、0.3 和 0.5 划分出微弱影响、低影响、中影响和高影响 4 种等级，分析极端气候对宜居水平的影响强度。

2 结果与分析

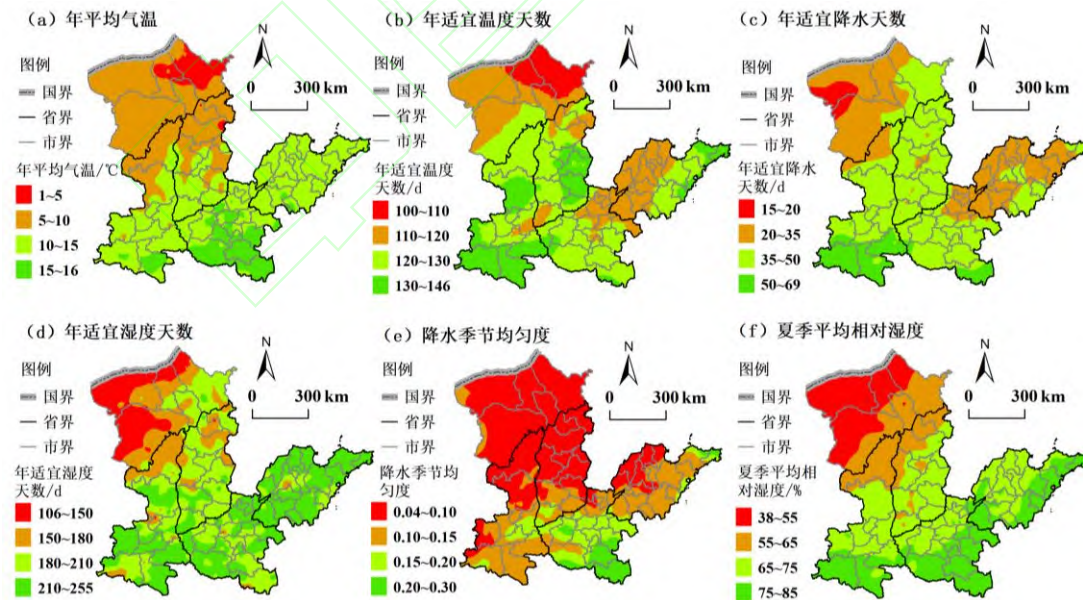
2.1 气候适宜性因子及宜居水平的时空分布

2.1.1 气候适宜性因子的分布

（1）年际水热适宜性

以年平均气温、年适宜温度天数分析热适宜性（图 2a~b、表 2）。1990—2022 年黄河中下游地区年平均气温呈南高北低分布，以年平均气温 10℃等温线为界，中游南部和下游地区多高于 10℃，中游北部多低于 10℃。年适宜温度天数在中游地区基本呈南高北低分布，南北差值达到 30 d 以上；年适宜温度天数在下游地区呈中间低、东西两端高分布，但下游地区年适宜温度天数为 130~146 d 的高值区分布面积远低于中游地区，并且不存在年适宜温度天数为 100~110 d 的低值区。按站点统计各因子的变化趋势，33 a 来，年平均气温和年适宜温度天数均以上升趋势为主，二者为显著上升的站点比例分别为 75.25% 和 61.06%。

以年适宜降水天数、年适宜湿度天数和降水季节均匀度分析水分适宜性（图 2c~e、表 2）。1990—2022 年除山东省西北部和河南省东北部外，黄河中下游地区年适宜降水天数基本呈南高北低分布。年适宜湿度天数和降水季节均匀度均呈南高北低分布：年适宜湿度天数低值区集中分布在内蒙古地区，高值区在陕西省中南部和河南省的分布较分散，在山东省的分布相对集中；降水季节均匀度在中游北部多低于 0.10，在河南省南部和山东省东端可以达到 0.20 以上。33 a 来，年适宜降水天数和降水季节均匀度多呈上升趋势，且二者呈显著上升的站点比例分别为 44.42% 和 41.38%；年适宜湿度天数多为下降趋势，且 44.22% 的站点呈显著下降趋势。



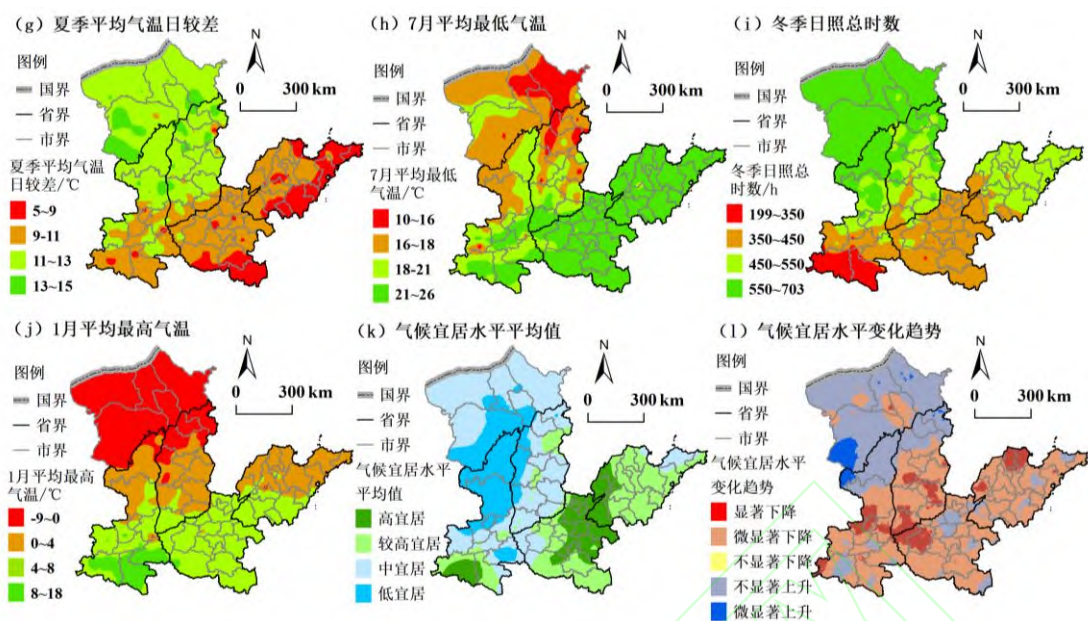


图2 1990—2022年黄河中下游地区气候适宜性因子、气候宜居水平平均值及变化趋势的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of climate suitability factors, average value and variation trend of climate livability levels in the middle and lower reaches of the Yellow River from 1990 to 2022

表2 水热适宜性因子变化趋势的站点数量及比例统计

Tab. 2 Statistics on the number and proportion of stations with varying trends in hydrothermal suitability factors

变化趋势	显著性	年平均气温		年适宜温度天数		年适宜降水天数		年适宜湿度天数		降水季节均匀度	
		站点数量	比例/%	站点数量	比例/%	站点数量	比例/%	站点数量	比例/%	站点数量	比例/%
上升	显著	371	75.25	301	61.06	219	44.42	107	21.7	204	41.38
	不显著	69	14.0	139	28.19	160	32.45	79	16.03	133	26.98
下降	显著	18	3.65	14	2.84	34	6.90	218	44.22	54	10.95
	不显著	35	7.10	39	7.91	80	16.23	89	18.05	102	20.69

注：在 $P=0.1$ 置信水平上统计站点的变化趋势是否显著。下同。

(2) 夏季湿热适宜性

以夏季平均相对湿度、夏季平均气温日较差和7月平均最低气温分析夏季湿热适宜性(图2f~h、表3)。1990—2022年,黄河中下游地区夏季平均相对湿度呈南高北低分布,自北向南夏季平均相对湿度值从低于55%逐渐增加到75%以上。夏季平均气温日较差和7月平均最低气温分别呈北高南低和南高北低分布,二者的空间分布格局均较为破碎。夏季平均气温日较差的高值区($>13^{\circ}\text{C}$)主要分散在中游中北部,7月平均最低气温的高值区主要集中在中游南部和下游地区。在变化趋势上,夏季平均相对湿度和夏季平均气温日较差均以下降趋势为主,分别有62.68%和40.57%的站点为显著下降。7月平均最低气温以上升趋势为主,并有65.72%的站点为显著上升。这表明黄河中下游多数地区夏季存在增温、减湿的趋势,夏季的湿热适宜性发生变化。

(3) 冬季光热适宜性

以冬季日照总时数、1月平均最高气温分析冬季光热适宜性(图2i~j、表3)。1990—2022年冬季日照总时数呈北高南低分布,最低值分布在陕西省南部($<350\text{h}$),次低值分布在河南省及山东省西部边界处($350\sim450\text{h}$),较高值分布在山东省中东部和山西省南部($450\sim550\text{h}$),中游中部和北部冬季日照总时数最高($>550\text{h}$)。1月平均最高气温自北向南依次增加,南北温差可达 20°C 以上。下游的山东省大部分地区和河南省1月平均最高气温分别介于 $0\sim4^{\circ}\text{C}$ 和

4~8℃之间。在变化趋势上，冬季日照总时数的变化趋势以下降为主，并有 69.37% 的站点为显著下降。虽然 1 月平均最高气温有 72.41% 的站点呈上升趋势，但是只有 27.38% 的站点为显著上升，其余 45.03% 为不显著上升。因此，虽然黄河中下游地区冬季热量适宜性有所增加，但是光照适宜性下降。

表 3 夏季湿热和冬季光热适宜性因子变化趋势的站点数量及比例统计

Tab. 3 Statistics on the number and proportion of stations with varying trends in summer heat-humidity and winter

light-thermal suitability factors											
变化趋势	显著性	夏季平均相对湿度		夏季平均气温日较差		7 月平均最低气温		冬季日照总时数		1 月平均最高气温	
		站点数量	比例 /%	站点数量	比例 /%	站点数量	比例 /%	站点数量	比例 /%	站点数量	比例 /%
上升	显著	48	9.74	102	20.69	324	65.72	34	6.90	135	27.38
	不显著	47	9.53	90	18.26	90	18.26	46	9.33	222	45.03
下降	显著	309	62.68	200	40.57	31	6.28	342	69.37	16	3.25
	不显著	89	18.05	101	20.49	48	9.74	71	14.40	120	24.34

2.1.2 气候宜居水平的分布及变化趋势

对逐年气候宜居指数求取平均值后，按照自然断裂点方法，分析 1990—2022 年黄河中下游地区气候宜居水平的分布（图 2k）。黄河中下游地区气候宜居水平平均值呈东高西低、南高北低分布。除陕西省南部外，中游地区多是中宜居和低宜居的分布区，下游地区基本是高宜居和较高宜居的分布区，整体上下游地区的气候宜居等级高于中游地区。比较气候宜居水平的多年趋势（图 2l），33 a 来黄河中下游地区气候宜居水平为下降与上升趋势的面积比例约为 6:4，分布面积最广的是微显著下降和不显著上升 2 种类型，二者占研究区的面积比例分别为 50.38% 和 36.94%，其次是显著下降型（9.20%），再次是微显著上升型（2.81%），不显著下降型分布面积最小（0.67%）。在空间上，中游中部和南部及下游地区气候宜居水平以微显著下降型为主，但也有少量显著下降型和不显著上升型的分布区，中游北部气候宜居水平以不显著上升型为主，也存在少量微显著下降型的分布区。

2.2 极端气候对宜居性的影响

2.2.1 极端高温、低温和降水对气候宜居性的影响

1991—2020 年，极端高温对黄河中下游地区气候宜居性的影响主要以中、高强度为主，高影响型主要分布在河南省，随年份向西、北、东 3 个方向延伸，扩大到山西省南部、陕西省南部和山东省西部。中影响型主要分布在中游中北部和下游的山东省东部。总体上高影响型和中影响型的分布面积此消彼长，前者分布面积比例在 28.59%~36.93% 间变动，后者在 62.52%~71.09% 间变动。2001—2005 年低影响型在内蒙古地区 5 市的分布面积达到最大（4.94%）。微弱型在整个黄河中下游地区的分布面积一直最小（图 3a~f、图 4）。比较各因子对气候宜居水平的影响差异，热浪天数的年际波动是极端高温对气候宜居水平影响强度变动的主因。

相对于极端高温，虽然极端低温对黄河中下游地区气候宜居性的影响也以中、高强度为主，但极端低温的高影响型和低影响型分布面积增加，中影响型分布面积减少。1991—2020 年，极端低温的高、中和低影响型的分布面积比例分别在 39.32%~47.08%、32.13%~50.49% 和 11.12%~19.17% 之间变动。在空间上，极端低温高影响型主要分布在中游南部和下游地区，中和低影响型主要分布在中游中部和北部。1991—2020 年极端低温高影响型的分布面积基本呈现先减少后增加的态势：极端低温增强时，高影响型分布面积可以自东向西从山东省贯穿到陕西省中南部；极端低温减弱时，高影响型主要集中在山东省和河南省，以极窄条带延伸到山西省南部和陕西省南部（图 3g~l、图 4）。

1991—2020 年极端降水对黄河中下游地区气候宜居性的影响仍以中、高强度为主，但是高影响型和中影响型的空间分布随年份变动最显著。山东省和河南省中东部属于极端降水高

影响型的稳定分布区：极端降水增加时，高影响型的分布面积会沿河南省向西北扩大，到达陕西省和山西省中北部，所占面积比例高达 47.09%；极端降水减少时，高影响型主要以斑块形式分布在中游地区，所占面积比例减小到 28.42%。极端降水量和极端降水天数的增加是河南省和山东省成为极端降水高影响型分布区的主要原因。最大连续干日和极端降水量变化幅度小是内蒙古地区多为极端降水低影响型和微弱型分布区的主因（图 3m~r、图 4）。

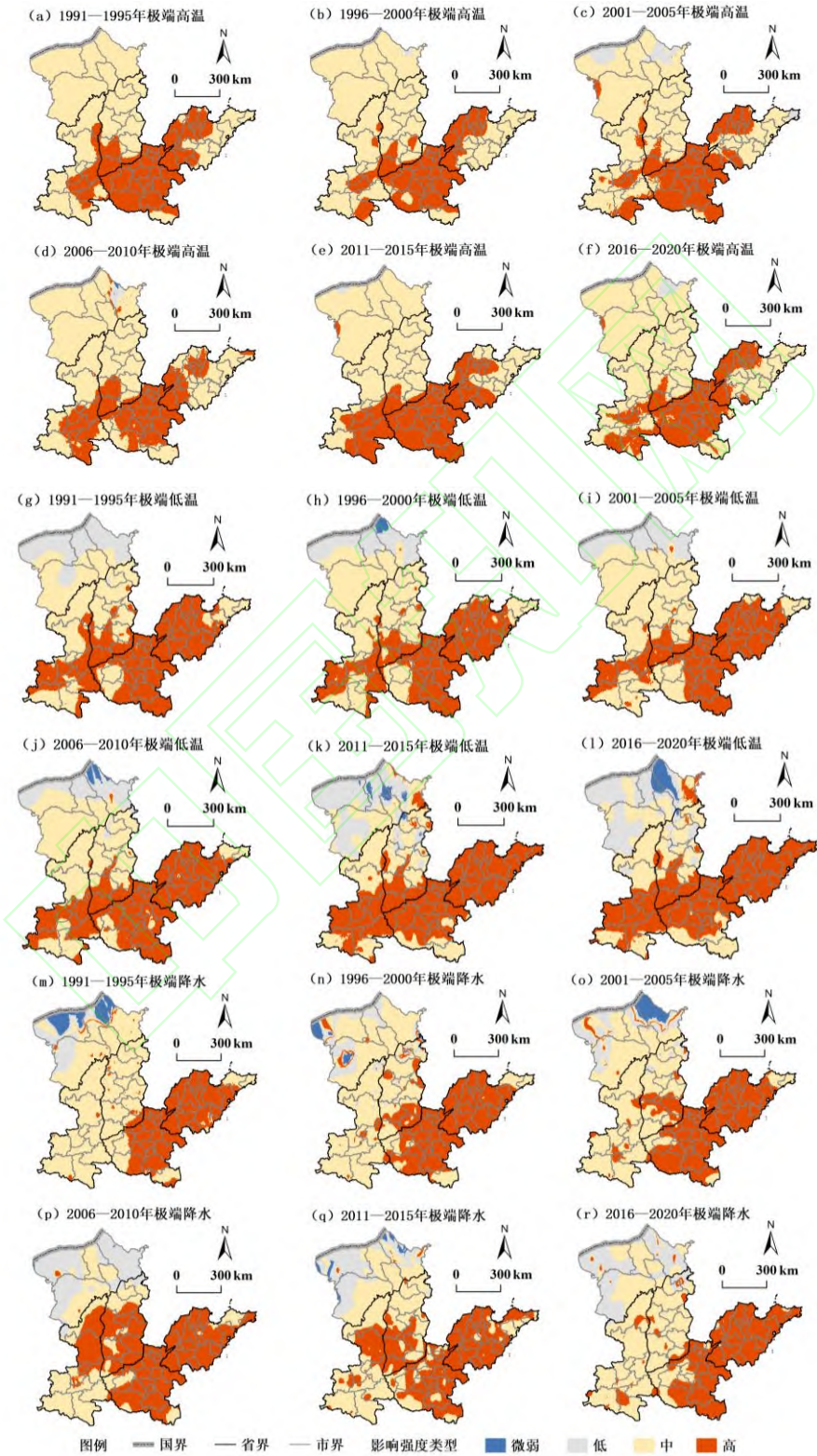


图 3 极端气候对宜居性影响强度的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of the impact intensity of extreme climate on livability

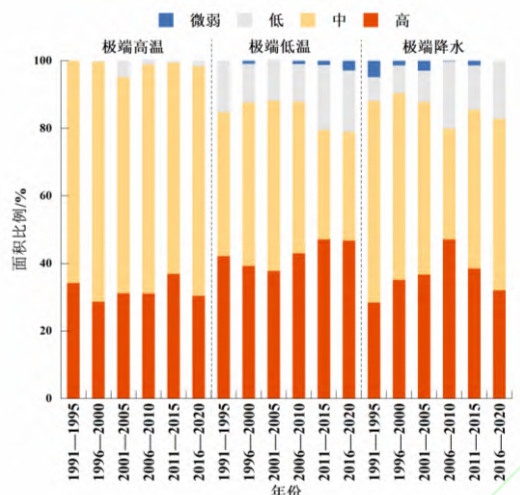


图4 极端气候对宜居性影响各类型的面积比例分布

Fig. 4 Distribution of area proportions for various types of extreme climate on livability

2.2.2 极端气候对宜居性的综合影响

将1991—2020年极端降水、极端高温和极端低温对气候宜居性的高影响型进行空间叠加，得到8种类型，以此分析极端气候对宜居性的综合影响（图5、表4）。1991—2020年极端降水、高温和低温高影响型主要分布在河南省中东部和山东省西北部，呈西南—东北走向，所占面积比例在18.40%~20.79%之间变动。极端高温和低温高影响型在河南省西部、山西省南部和陕西省南部的分布面积呈现先减小后增加的态势，所占面积比例从1991—1995年的9.32%缩小到1996—2000年的3.65%，之后逐渐增加到2016—2020年的12.00%。极端降水和高温高影响型主要位于河南省西部和西南部，分布面积占比相对较小，2001—2005年分布面积达到最大（3.77%）。极端降水和低温高影响型主要集中在山东省中东部，但2016—2020年不再受极端低温的高强度影响，变成了极端降水高影响型。相对于极端降水高影响型，极端高温高影响型和极端低温高影响型除2016—2020年无分布外，其余年份分布较稳定，二者在1991—2015年间面积比例的变动幅度分别在3.20%~4.53%和5.31%~7.89%之间。非高影响型主要分布在中游北部以及下游的山东半岛，总体呈现先缩小后增大的态势，1991—2020年所占面积比例在38.69%~55.99%之间变动。结合图4可知，黄河中游北部和山东半岛非高影响型也是极端高温、低温和降水三者均为中影响型的分布区。单一的极端高温、低温或降水高影响型，则是其余2个极端气候要素的中影响型。总之，极端降水、高温和低温三者均会对中游中部和北部的气候宜居性产生中强度影响，极端降水和高温会对中游南部一些地区的气候宜居性产生高强度影响；极端降水、高温和低温三者均会对下游多数地区的气候宜居性产生高强度的影响。相对于中游地区，下游地区的气候宜居性更易受极端气候的影响。

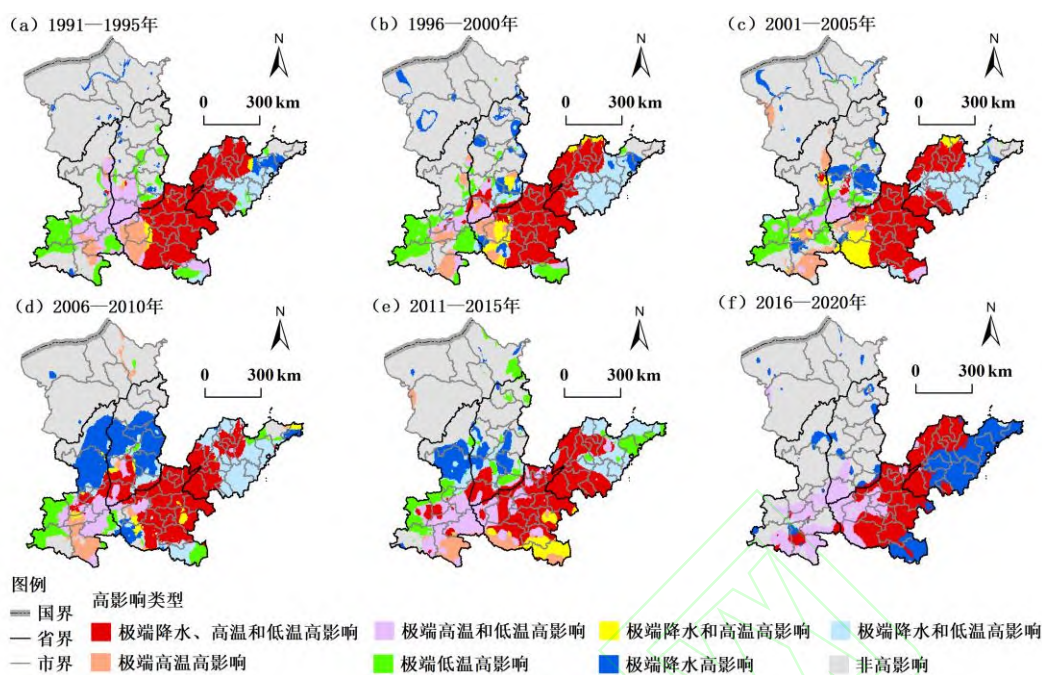


图 5 极端气候对宜居性高影响类型的空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of high-impact types of extreme climate on livability

表 4 极端气候对宜居性高影响类型的面积比例统计

Tab. 4 Statistics on the area proportions of high-impact types of extreme climate on livability /%

高影响类型	1991—1995 年	1996—2000 年	2001—2005 年	2006—2010 年	2011—2015 年	2016—2020 年
极端降水、高温和低温高影响	20.30	18.60	18.73	20.79	20.31	18.40
极端高温和低温高影响	9.32	3.65	4.12	5.71	10.16	12.00
极端降水和高温高影响	0.61	2.39	3.77	1.41	2.75	0.00
极端降水和低温高影响	5.15	9.19	8.93	11.19	8.80	0.00
极端高温高影响	3.78	3.95	4.53	3.20	3.36	0.00
极端低温高影响	7.22	7.89	5.93	5.31	7.37	0.00
极端降水高影响	2.22	4.91	5.23	13.70	6.28	13.61
非高影响	51.40	49.42	48.76	38.69	40.97	55.99

3 讨 论

本文从年际水热适宜性、夏季湿热适宜性和冬季光热适宜性三方面评估黄河中下游地区气候宜居水平的分布,探索极端高温、极端低温和极端降水对气候宜居性的影响。研究发现,黄河中游夏季平均相对湿度的下降趋势,与安彬等^[29]对黄土高原地区的分析一致;黄河中游多数地区气温类指标存在上升趋势,与刘盼等^[16]发现该地区存在增温趋势一致。不同季节的温湿组合、干湿组合和光湿组合^[2,10],改变着热舒适^[9,14],是影响气候宜居性变化的关键。相对于下游,中游多数地区夏季平均相对湿度和 7 月平均最低气温较低、夏季气温日较差高,是年适宜温度天数高的主因。多年来,中游北部气候宜居水平不显著上升主要归功于夏季减湿、1 月升温及年适宜温度天数的增加。根据谭凯炎等对中国主要城市气候舒适度的归类,中游南部和下游地区城市为冷冬夏热型^[30],夏季湿热适宜性因子是影响该区气候宜居性的关键。目前,中游南部和下游地区夏季增温带来热不舒适的增加,加之冬季日照适宜性的下降,导致气候宜居水平的微显著下降。

极端高温、极端低温和极端降水对黄河中游南部及下游地区气候宜居性的影响强度较高,但对中游中部和北部气候宜居性的影响强度相对较弱。主要原因在于:虽然中游和下游地区气温均增加^[16,21],不过中游地区受地理位置和高原、山地地貌影响,温度基数较低,高温和热

浪更易在下游地区出现。相应地,中游南部和下游地区年极端降水量和极端降水天数远多于中游中部和北部^[20]。此外,本文选取霜冻天数和寒冷天数表征极端低温,前者是基于日最低气温的单一值,后者是日平均气温、风速和日照时数的综合值。比较发现,二者数值在中游中部和北部相差不大,但是在中游南部和下游地区,霜冻天数远低于寒冷天数,使得中游南部和下游地区成为极端低温高影响区。综上,中游中部和北部气候宜居性受极端气候影响强度相对低,有利于提高气候舒适度,促进该地区的乡村振兴^[31]。中游南部和下游地区气候宜居性受极端气候的影响相对高,加之该区经济、人口、资源与环境关系复杂,矛盾日益突出^[24],如何基于人口分布开展差异化的气候宜居水平规划,动态布置气候预警,制定相关政策措施,加强公众防灾减灾科普教育,减轻气候灾害,成为提高城乡人居环境舒适度的关键。

4 结 论

(1) 1990—2022 年,除夏季平均气温日较差和冬季日照总时数外,黄河中下游地区水热适宜性、冬季热量适宜性和夏季湿热适宜性因子多呈南高北低分布。受其影响,黄河中下游地区气候宜居水平呈南高北低、东高西低的分布格局。

(2) 33 a 来,黄河中游北部气候宜居水平多呈不显著上升趋势,主要归功于夏季减湿、1 月升温及年适宜温度天数增加,中游南部及下游地区气候宜居水平多呈微显著下降趋势,夏季增温和冬季日照适宜性下降导致热不舒适上升是其主因。

(3) 多年来,极端降水对宜居性影响强度的年际变幅最大,其次是极端低温,最后是极端高温。它们对黄河中下游地区宜居性的影响均以中、高强度为主,在空间上极端气候中影响型主要分布在中游北部,高影响型主要分布在中游南部和下游地区。

(4) 相对于中游北部,中游南部和下游地区热浪天数、极端降水量和极端降水天数的发生频率更高,霜冻天数和寒冷天数相差大分别是极端高温、极端降水和极端低温对该区气候宜居性影响强度高的主因。

参考文献 (References)

- [1] Wang Y J, Chen Y, Hewitt C, et al. Climate services for addressing climate change: Indication of a climate livable city in China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 12(5): 744-751.
- [2] Vanos J, Guzman-Echavarria G, Baldwin J W, et al. A physiological approach for assessing human survivability and livability to heat in a changing climate[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 7653, doi: 10.1038/s41467-023-43121-5.
- [3] Chen W Z, Yi L, Wang J Y, et al. Evaluation of the livability of arid urban environments under global warming: A multi-parameter approach[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99: 104931, doi: 10.1016/j.scs.2023.104931.
- [4] 刘圆, 王业成, 袁绮菲, 等. 南京江北核心区气候环境宜居水平评价[J]. *环境工程*, 2017, 35(5): 145-148. [Liu Yuan, Wang Yecheng, Yuan Yifei, et al. Assessment of climatic and environmental livability in core areas of Nanjing Jiangbei New District[J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(5): 145-148.]
- [5] Zhang Y C, Xiao F, Mei H, et al. Comprehensive analysis of climate-related comfort in southern China: Climatology, trend, and interannual variations[J]. *Urban Climate*, 2022, 46: 101349, doi: 10.1016/j.uclim.2022.101349.
- [6] 贾妮娅·叶力肯, 侯建楠, 刘思博. 近 30 a 新疆地州市旅游气候舒适度时空特征分析[J]. *干旱区地理*, 2025, 48(2): 212-222. [Yerken Jianiya, Hou Jiannan, Liu Sibao. Spatio-temporal characterization of tourism climate comfort in Xinjiang prefectures and cities in the last 30 years[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(2): 212-222.]
- [7] Singh A, Chandra T, Mathur S, et al. Determination of outdoor thermal comfort thresholds for hot and semi-arid climates: A field study of residential neighborhoods in Jaipur City[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 115: 105817, doi: 10.1016/j.scs.2024.105817.
- [8] Elsayy A A, Ayad H M, Saadallah D. Assessing livability of residential streets-Case study: El-Attarin, Alexandria, Egypt[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2019, 58(2): 745-755.
- [9] 赵晓龙, 卞晴, 侯毓婧, 等. 寒地城市公园春季休闲体力活动水平与微气候热舒适关联研究[J]. *中国园林*, 2019, 35(4): 80-85. [Zhao Xiaolong, Bian Qing, Hou Yunjing, et al. A research on the correlation between physical activity performance and thermal comfortable of urban park in cold region[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2019, 35(4): 80-85.]
- [10] Mostafa S, Kashi H, Farrokhzadeh S, et al. Effects of extreme weather events and climate change on cities' livability[J]. *Cities*, 2024, 151: 105114, doi: 10.1016/j.cities.2024.105114.
- [11] Filho W L, Tuladhar L, Li C L, et al. Climate change and extremes: Implications on city livability and associated

- health risks across the globe[J]. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 2022, 15(1): 1-19.
- [12] Alijani S, Pourahmad A, Nejad H H, et al. A new approach of urban livability in Tehran: Thermal comfort as a primitive indicator. Case study, district 22[J]. *Urban Climate*, 2020, 33: 100656, doi: 10.1016/j.uclim.2020.100656.
- [13] Shi C C, Guo N L, Zeng L L, et al. How climate change is going to affect urban livability in China[J]. *Climate Services*, 2022, 26: 100284, doi: 10.1016/j.cliser.2022.100284.
- [14] 王旭, 付学成, 徐文甜, 等. 2000—2020 年中国城乡热舒适梯度特征及其驱动因素[J]. *地理学报*, 2024, 79(5): 1318-1336. [Wang Xu, Fu Xuecheng, Xu Wentian, et al. The signatures and drivers of thermal comfort across the urban-rural gradient in Chinese cities from 2000 to 2020[J]. *Acat Geographica Scinica*, 2024, 79(5): 1318-1336.]
- [15] 贺山峰, 陈超冰, 李铮, 等. 黄河中上游极端降水特征及其对区域气候变化的敏感性[J]. *资源科学*, 2024, 46(3): 524-537. [He Shanfeng, Chen Chaobing, Li Zheng, et al. Characteristics of extreme precipitation and its sensitivity to regional climate change in the upper and middle reaches of the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2024, 46(3): 524-537.]
- [16] 刘盼, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土高原极端气温变化特征及其与评价气温的相关性[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1975-1982. [Liu Pan, Zhao Xining, Gao Xiaodong, et al. Characteristics of extreme temperature variation in the Loess Plateau and its correlation with average temperature[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7): 1975-1982.]
- [17] Ghasemi K, Hamzenejad M, Meshkini A. The spatial analysis of the livability of 22 districts of Tehran metropolis using multi-criteria decision making approaches[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 38: 382-404.
- [18] Savari M, Moradi M. The effectiveness of drought adaptation strategies in explaining the livability of Iranian rural households[J]. *Habitat International*, 2022, 124: 102560, doi: 10.1016/j.habitatint.2022.102560.
- [19] Xiao C, Wu P L, Zhang L X, et al. Robust increase in extreme summer rainfall intensity during the past four decades observed in China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38506, doi: 10.1038/srep38506.
- [20] 于群, 孙越, 李建平, 等. 秋季黄河中下游降水主模态及 2021 年极端降水的气候背景[J]. *气象学报*, 2023, 81(4): 547-558. [Yu Qun, Sun Yue, Li Jianping, et al. The leading mode of autumn rainfall over the midlower reaches of the Yellow River and the climate background of extreme autumn rainfall in 2021[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2023, 81(4): 547-558.]
- [21] 黄晓军, 王博, 刘萌萌, 等. 中国城市高温特征及社会脆弱性评价[J]. *地理研究*, 2020, 39(7): 1534-1547. [Huang Xiaojun, Wang Bo, Liu Mengmeng, et al. Characteristics of urban extreme heat and assessment of social vulnerability in China[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(7): 1534-1547.]
- [22] Ma F, Yuan X, Li H. Characteristics and circulation patterns for wet and dry compound day-night heat waves in mid-eastern China[J]. *Global and Planetary Change*, 2022, 213: 103839, doi: 10.1016/j.gloplacha.2022.103839.
- [23] 王淼淼, 丁明虎, 吕俊梅, 等. 近 40 年中国冬季寒潮的气候特征及大气环流异常[J]. *应用气象学报*, 2024, 35(3): 298-310. [Wang Miaomiao, Ding Minghu, Lu Junmei, et al. Climatology of winter cold waves and associated atmospheric circulation anomalies in China during the last 40 years[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2024, 35(3): 298-310.]
- [24] Lu Y F, Li J, Song Z Q, et al. Evaluating sustainable development in the middle and lower reaches of the Yellow River Basin using multiple data sources[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 1-18.
- [25] GB/T 42072-2022. 中华人民共和国国家标准: 气候宜居指数[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. [GB/T 42072-2022. National standard of the People's Republic of China: Climate livability index[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.]
- [26] GB/T 27963-2011. 中华人民共和国国家标准: 人居环境舒适度评价[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. [GB/T 27963-2011. National standard of the People's Republic of China: Climatic suitability evaluating on human settlement[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.]
- [27] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3-4): 231-259.
- [28] IPCC Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 1-696.
- [29] 安彬, 肖薇薇, 刘宇峰, 等. 1955—2021 年黄土高原地区相对湿度时空演变规律[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(12): 1939-1950. [An Bin, Xiao Weiwei, Liu Yufeng, et al. Temporal and spatial evolution of relative humidity in the Loess Plateau during 1955—2021[J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(12): 1939-1950.]
- [30] 谭凯炎, 房世波, 俄有浩. 中国主要城市气候舒适度时空特征[J]. *气象与环境科学*, 2024, 47(3): 1-7. [Tan Kaiyan, Fang Shibo, E Youhao. Spatio-temporal features of climate comfortability in major cities of China[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2024, 47(3): 1-7.]

- [31] 薛东前, 王莎, 王佳宁, 等. 黄土高原乡村“人水土”系统协同与机制[J]. 资源科学, 2022, 44(9): 1809-1823. [Xue Dongqian, Wang Sha, Wang Jianing, et al. Coordination of human-water-land system and mechanism in rural areas of the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2022, 44(9): 1809-1823.]

Spatiotemporal variations of livability level under the impact of extreme climate in the middle and lower reaches of the Yellow River

NING Xiaoju¹, ZHANG Li², YANG Luyao³, MAO Qizheng¹, LIU Xiaozhuo¹

(1. School of Urban and Rural Planning, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, China; 2. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, Hubei, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Assessing the climate livability level and analyzing the impacts of extreme climates on livability are critical for improving human settlements environment in both urban and rural areas. Taking the middle and lower reaches of the Yellow River of China as the study area, this study reveals the spatial distribution of climate livability level based on climatic suitability factors, and then simulates the impacts of extreme climates on livability by the MaxEnt model. The analysis is supported by daily observational datasets from 493 meteorological stations between 1990 to 2022. The main findings are as follows: (1) The multi-year average of climate livability level in the Yellow River exhibited a pattern of higher values in the south and east, and lower values in the north and west. Over the 33 years, the variation trend of climate livability level was dominated by a non-significant upward trend in the northern part of middle reaches, while it was mainly characterized by a slightly significant downward trend in the southern part of middle reaches and lower reaches. (2) The main reasons for the variations in climate livability were the decreased summer humidity, higher January temperatures and increased suitable-temperature days in the northern part of middle reaches, as opposed to intensified summer warming and reduced sunshine suitability in winter in the southern part of middle reaches and lower reaches. (3) The impacts of extreme high temperature, extreme low temperature, and extreme precipitation on the climate livability were generally moderate to high in intensity, with a spatial distribution of higher impacts in the south and east and lower in the north and west. Furthermore, the interannual variability of impact intensity was greatest for extreme precipitation, followed by extreme low temperatures, and smallest for extreme high temperatures. (4) Compared to the northern part of middle reaches, the livability of the southern part of middle reaches and lower reaches was more affected by extreme climate due to the higher frequency of heatwave days, extreme precipitation amounts, and extreme precipitation days, as well as the large discrepancies between frost days and cold days.

Keywords: climate suitability factors; climate livability level; extreme climate; impact intensity; spatiotemporal variations; middle and lower reaches of the Yellow River