

刘月丽,张冬峰,陈颖,等.基于 RegCM4 模式的华北区域未来洪涝灾害风险预估[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(6):111-118.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2023.06.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于 RegCM4 模式的华北区域未来 洪涝灾害风险预估

刘月丽,张冬峰*,陈颖,安伟

(山西省气候中心,山西 太原 030006)

摘要:基于区域气候模式 RegCM4 东亚地区 25 km 分辨率气候变化试验模拟结果,在分析华北区域基准期(1986—2005 年)洪涝灾害致灾危险度以及人口和 GDP 承灾体易损度基础上,建立区域灾害风险评估模型;应用建立的模型预估华北区域 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下近期(2020—2035 年)、中期(2046—2065 年)和远期(2080—2098 年)洪涝灾害风险的变化。结果表明:(1)RegCM4 对华北区域基准期洪涝灾害危险度评估指标 $R_{20\text{mm}}$ 和 $R_{5\text{day}}$ 模拟能力较好,基准期洪涝灾害风险Ⅲ级及以上的区域位于北京、天津、河北南部和东部以及山西南部等地。(2)RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,未来 3 个不同时期华北区域大部分地区 $R_{20\text{mm}}$ 和 $R_{5\text{day}}$ 、洪涝致灾危险度以及风险增加,RCP8.5 情景下增加更明显。风险等级Ⅲ级及以上范围在两种情景下均在中期最大。

关键词:风险预估;洪涝灾害;华北区域;RegCM4

中图分类号:P429

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)06-0111-08

我国是世界上洪涝灾害多发频发的国家之一。近年来,在温室气体排放和气候自然变率共同作用下,多地强降水事件明显增多^[1-4],造成的经济损失呈现快速上升趋势^[5]。进入 21 世纪以来,华北区域(包括京津冀、山西和内蒙古)降水出现明显的年代际转折^[6-7],全面进入多雨期,突破历史极值的极端强降水事件频繁发生,引起了国内外学者的关注。如 2021 年,北京、天津、河北和山西年降水量均为 1961 年以来最多^[8-9],年内多次出现极端强降水,引发严重洪涝灾害,直接危害社会经济。有研究表明,全球和区域尺度上,观测中所未见的极端降水事件未来发生几率可能更高^[10-11],21 世纪中期之后,中国东部将进入全面的多雨期,同时极端强降水事件也呈现

多发重发态势,其中华北区域最明显^[11-13],将给区域社会经济发展和人民生命安全带来巨大的威胁。科学预估华北区域未来洪涝灾害对人口和社会经济的风险,对区域防灾减灾以及气候变化应对和适应政策制定具有重要的意义,相关研究工作十分必要。

基于观测降水进行洪涝灾害风险分析和区划的研究很多,方法不断趋于成熟^[14-17]。随着对全球气候变暖背景下,未来强降水事件很可能更强更频繁的认识加深,预估未来洪涝灾害风险已成为学术界研究热点,相关研究多使用 CMIP5 和 CMIP6 全球模式气候变化输出结果开展^[18-22]。然而,受计算资源限制,目前全球模式长期气候变化试验水平分辨率较低,对极端降水事件模拟能力存在较大不足,不能满足区域以及更小尺度洪涝灾害风险预估研究需要。而区域气候模式是弥补全球模式分辨率不足的有力工具,其对极端降水事件的模拟明显优于全球模式,对未来气候变化的预估信号也更可靠^[23-26]。RegCM (Regional Climate Model) 系列模式是目前应用较为广泛的区域气候模式之一,在中国气候要素和极端

收稿日期:2023-04-13;修回日期:2023-07-05

基金项目:山西省气象局科学技术研究重点项目(SXKZDQH20226303)

作者简介:刘月丽(1975—),女,高级工程师,主要从事气候与气候变化研究。E-mail:climatelyl@126.com

通信作者:张冬峰(1969—),女,正高级工程师,主要从事气候、气候变化数值模拟和预测研究。E-mail:minczdf@hotmail.com

指数模拟以及未来变化方面应用广泛^[23-28],可作为区域未来灾害风险预估研究的工具。

采用国家气候中心完成的 RegCM4 东亚区域气候变化高分辨率 (25 km) 动力降尺度试验模拟结果,在检验模式对华北区域极端降水指数模拟能力的基础上,对区域洪涝灾害危险度进行分析,结合人口、社会经济变化以及地形高度资料,构建区域洪涝灾害风险评估模型;利用建立的模型,对 RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下华北区域未来极端降水指数、洪涝灾害危险度、承灾体易损度以及洪涝灾害风险变化进行预估,目的是为区域洪涝灾害风险防范提供科学支撑。

1 模式、数据与方法

1.1 模式介绍

研究使用的区域气候模式为国际理论物理中心 ICTP (Abdus Salam International Center for Theoretical Physics) 发展的区域气候模式 RegCM4.4 (简称“RegCM4”)^[29]。RegCM4 运行所需驱动场由英国气象局 Hadley 中心研制的全球环境地球系统模式 (Hadley Centre Global Environmental Model 2—Earth System, HadGEM2—ES)^[30] CMIP5 气候变化试验输出结果提供。HadGEM2—ES 大气模式水平分辨率为 N96 (1.6°×1.875°经纬度),垂直方向 38 层,海洋模式水平分辨率为 (1/3)°(热带)~1°,垂直方向为 40 层。试验保留 6 h 间隔模式输出结果,满足水平分辨率 25 km 动力降尺度数值试验的需要。

RegCM4 试验范围为联合区域气候降尺度试验 (Coordinated Regional climate Downscaling Experiment, CORDEX) 东亚第二阶段推荐区域^[31],覆盖整个中国及周边地区,模式垂直方向 18 层,顶层高度为 10 hPa。模式物理参数选用东亚模拟最佳组合参数^[27-28],并在其中引入中国高精度土地覆盖资料^[32]。

1.2 数据

洪涝致灾危险度指标的计算,应用 RegCM4 模式历史试验以及 RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景气候变化试验的日降水预估数据。检验模式对基准期致灾危险度指标的模拟能力,应用同期 CN05.1 观测数据^[33]。承灾体易损度指标,选用人口和国内生产总值 (GDP) 两个指标构建,未来时期采用 IPCC 发布的可持续发展 (SSP1) 共享社会经济路径数据^[34]。以 2020—2035 年、2046—2065 年和 2080—2098 年平均值分别代表未来近期、中期和远期。考虑到 SSP

共享社会经济路径数据制作方案中,以 2010 年为基准年,开展 2100 年前全球框架下 SSP 不同情景人口和 GDP 数据预估,因此本文承灾体分析中以 2010 年代表基准期。

1.3 方法

洪涝灾害风险评估模型综合分析致灾危险度指标和承灾体易损度指标^[18,35],采用二者相乘的评估方法建立。其中致灾危险度通过与洪涝灾害关系密切的极端降水指数确定,承灾体易损度考虑受洪涝灾害影响比较大的人口和 GDP 两方面。

1.3.1 致灾危险度

考虑到华北区域洪涝灾害和区域极端降水事件的频率、强度和持续时间的密切联系,这里致灾危险度指标使用研究时段内逐年日降水量>20 mm 的日数 ($R_{20\text{ mm}}$) 和逐年最大 5 日降水量 ($R_{5\text{ day}}$) 的多年均值来表征,同时引入表征孕灾环境的地形高度,来反映复杂地形下洪涝灾害的易发程度。在地势越低、地形变化越小的平坦地区越不利于洪水的排泄,容易形成洪灾,具体计算方法如下:

$$V_F = f_1 \times I_{20\text{ mm}} + f_2 \times I_{5\text{ day}} + f_3 \times I_E \quad (1)$$

式中: V_F 为致灾危险度指数; $I_{20\text{ mm}}$ 、 $I_{5\text{ day}}$ 和 I_E 分别为 $R_{20\text{ mm}}$ 、 $R_{5\text{ day}}$ 和地形高度归一化后的无量纲数值; f_1 、 f_2 和 f_3 为权重,通过层次分析法计算结合专家打分调整确定,分别为 0.4、0.5 和 0.1。对相加后结果标准化处理,即为致灾危险度指数 V_F ,划分为 5 个等级: 0~0.3 (I 级), 0.3~0.4 (II 级), 0.4~0.5 (III 级), 0.5~0.6 (IV 级), 0.6~1.0 (V 级)。

1.3.2 承灾体易损度

承灾体易损度计算公式如下:

$$V_G = w_1 \times D_{\text{POP}} + w_2 \times D_{\text{GDP}} \quad (2)$$

式中: V_G 为承灾体易损度; D_{POP} 和 D_{GDP} 分别为人口和 GDP 归一化后的无量纲数值; w_1 和 w_2 为权重,采用层次分析法计算结合专家打分确定,分别为 0.6 和 0.4。对结果进行标准化处理,得到承灾体易损度 V_G 。

1.3.3 洪涝灾害风险

洪涝灾害风险指数计算公式如下:

$$V = V_F \times V_G \quad (3)$$

式中: V 为洪涝灾害风险指数; V_F 和 V_G 分别为致灾危险度指数和承灾体易损度指数。对计算结果进行标准化处理,划分为 5 个等级: 0~0.02 (I 级), 0.02~0.05 (II 级), 0.05~0.1 (III 级), 0.1~0.2 (IV 级), 0.2~1.0 (V 级)。

2 基准期洪涝灾害风险评估

2.1 致灾危险度指标模拟能力检验

基准期,华北区域观测 $R_{20\text{ mm}}$ 整体由西北向东南逐渐增加(图 1a),内蒙古中西部大部分地区 $R_{20\text{ mm}} < 2\text{ d}$, $R_{20\text{ mm}} \geq 6\text{ d}$ 的区域主要集中在北京、天津、山西南部、河北东部和南部等人口密集区,河北秦皇岛和唐山一带 $R_{20\text{ mm}}$ 超过 8 d ,区域平均 $R_{20\text{ mm}}$ 为 2.4 d 。RegCM4 模拟 $R_{20\text{ mm}}$ (图 1b)空间分布和数值与观测基本一致,但模拟 $R_{20\text{ mm}} \geq 6\text{ d}$ 的区域山西南部和河北东南部较观测略大,区域平均值为 2.5 d 。

基准期观测 $R_{\leq 5\text{ day}}$ 的空间分布(图 1c)和 $R_{20\text{ mm}}$ 类似,数值上由西北向东南渐增,内蒙古数值较小,中西部大部分地区 $R_{\leq 5\text{ day}} < 60\text{ mm}$,西部部分地区 $< 40\text{ mm}$; $R_{\leq 5\text{ day}} \geq 100\text{ mm}$ 的区域主要集中在北京东南部、天津、河北南部和东部,区域平均 $R_{\leq 5\text{ day}}$ 为 53.9 mm 。RegCM4 模拟 $R_{\leq 5\text{ day}}$ (图 1d)空间分布和数值与观测基本吻合, $R_{\leq 5\text{ day}} \geq 100\text{ mm}$ 的范围较观测略偏大,区域平均值为 56.9 mm 。

2.2 承灾体指标分析

基准期,人口分布(图 1e)由西北向东南递增,内蒙古阿拉善盟是人口最稀疏区域,人口密集区域主要分布在区域东南部的北京、天津、河北中南部和山西中南部盆地,其中北京和天津人口数量级明显高于其他地区。GDP 数值分布(图 1f)由北向南递增,低值区位于内蒙古阿拉善盟,北京和天津为高值区,河北大部 and 山西南部为次高值区。

2.3 洪涝灾害风险评估

由华北区域洪涝灾害致灾危险度等级分布(图 2a)可以看出,致灾危险度等级由西北向东南增大。内蒙古大部、山西北部、河北西北部危险度较低,为 I 级;危险度 II 级主要分布于内蒙古东部以及山西中部等地;III 级及以上范围主要包括北京、天津、河北南部和东部以及山西中南部,占区域面积的 14.9% 。

图 2b 给出了基准期承灾体易损度分布,人口和 GDP 数值较小的内蒙古地区,易损度 < 0.02 ,北京、天津、河北大部和山西大部易损度在 0.02 以上,其中易损度 > 0.1 的范围集中在北京、天津、河北南部和山西中南部等地,北京和天津有 0.4 以上高值区出现。

将洪涝灾害致灾危险度和承灾体易损度的乘积标准化,得到华北区域洪涝灾害风险等级分布(图 2c)。基准期,内蒙古大部分地区、山西北部、河北北部洪涝灾害风险等级较低,大部分地区为 I 级;II 级范围较小,仅在山西中南部以及河北承德南部出现;III 级及以上地区占区域总面积的 9.0% ,包括北京、天津、河北南部和山西南部,IV 级及以上区域主要集中在北京、天津和河北南部,V 级主要分布在北京和天津,占区域总面积的 1.2% 。图 2c 给出的洪涝灾害风险等级空间分布与于琰等^[36]分析的 1984—2008 年中国洪涝灾害所造成的华北地区地均直接经济损失和受灾人口空间分布基本吻合,与文献^[37—39]

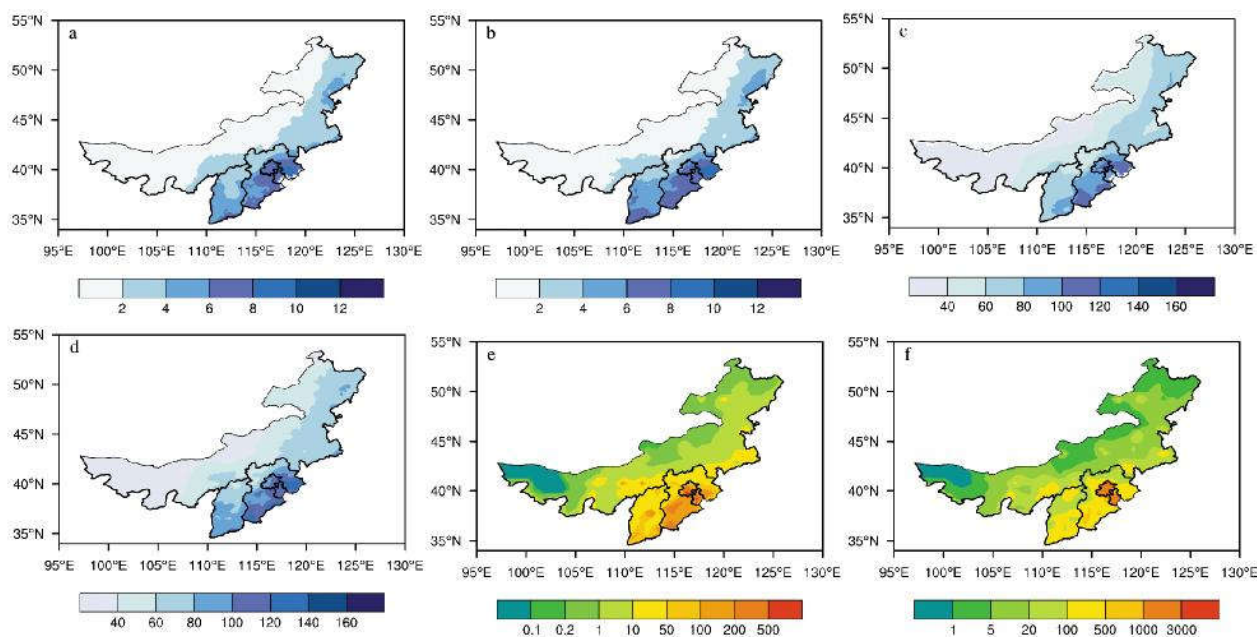


图 1 基准期(1986—2005) $R_{20\text{ mm}}$ 、 $R_{\leq 5\text{ day}}$ 、人口和 GDP 分布

(a 为观测 $R_{20\text{ mm}}$,单位:d;b 为模拟 $R_{20\text{ mm}}$;c 为观测 $R_{\leq 5\text{ day}}$,单位:mm;d 为模拟 $R_{\leq 5\text{ day}}$;e 为人口,单位:万人;f 为 GDP,单位:亿元)

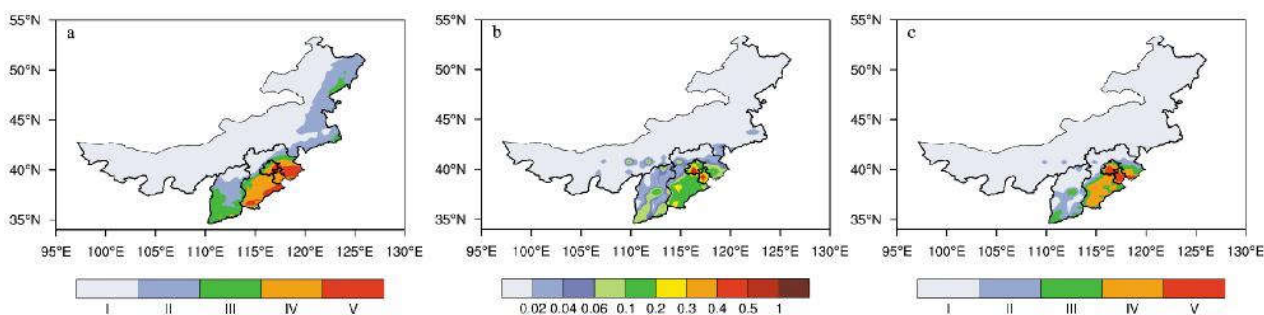


图2 基准期(1986—2005)洪涝灾害评估
(a 为致灾危险度等级, b 为承灾体易损度, c 为风险等级)

给出的华北不同行政区域尺度上洪涝灾害风险区划空间分布也基本一致。

3 未来洪涝灾害风险预估

3.1 致灾危险度指标

RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下, 21 世纪近期、中期和远期致灾危险度指标 $R_{20\text{mm}}$ 和 $R_{5\text{day}}$ 的空间分布特征与基准期基本一致, 高值区域集中在北京、天津、河北东部和南部、山西南部。本文对未来 3 个时期华北区域两种排放情景下 $R_{20\text{mm}}$ 和 $R_{5\text{day}}$ 与基准期的差值分布进行了分析。

RCP4.5 排放情景下, 未来 3 个时期内蒙古大部分地区 $R_{20\text{mm}}$ 变化较小, 在 $\pm 1\text{d}$ 之间, $R_{20\text{mm}}$ 增加的区域主要集中在京津冀和山西。近期, $R_{20\text{mm}}$ 增加 1d 以上的区域主要集中在北京、河北西部、山西东南部以及内蒙古与晋冀交界处, 高值中心位于保定、石家庄以及山西南部。中期, 除内蒙古东北部局部地区出现 $R_{20\text{mm}}$ 增加 1d 以上区域外, 其余地区的变化基本和近期一致, 增加中心位于河北中部, 增加 2d 以上。远期, 增加 1d 以上面积明显较近期缩小, 增加 2d 以上的地区呈零星分布状态。区域平均 $R_{20\text{mm}}$, 近期、中期和远期分别为 2.8 、 2.9 和 2.8d , 均较基准期 (2.5d) 增加, 中期增加最多 (表 1)。RCP8.5 排放情景下, 各时期 $R_{20\text{mm}}$ 变化空间分布特征基本与 RCP4.5 排放情景相似, 增加区域集中在华南北部, 但增加范围和数值较 RCP4.5 更大, 各时期增加 2d 以上的范围较 RCP4.5 扩张明显。区域平均 $R_{20\text{mm}}$, 未来 3 个时期随时间渐增, 分别为 2.8 、 3.2 和 3.3d (表 1)。

RCP4.5 排放情景下, 近期 $R_{5\text{day}}$ 在河北东部和南部以及内蒙古东部局部地区减小 10mm 左右, 在北京、天津、河北北部、山西和内蒙古中部增加 10mm 以上, 其中河北保定和石家庄、内蒙古呼和浩特和包头等地零散增加 30mm 以上。中期 $R_{5\text{day}}$ 增加 10mm 以上范围扩大, 其中增加 30mm 以上

区域扩张至北京、天津以及山西中东部等地, 北京、天津以及石家庄等地有 50mm 以上高值中心出现。远期 $R_{5\text{day}}$ 增加 10mm 以上范围较中期缩小, 高值中心位于河北西南部。区域平均 $R_{5\text{day}}$, 近期、中期和远期分别为 61.3 、 65.6 和 63.7mm , 均较基准期 (56.9mm) 增加, 中期增加最明显 (表 1)。RCP8.5 排放情景下, 各时期 $R_{5\text{day}}$ 变化空间分布特征与 RCP4.5 基本一致, 但增加的范围和数值更大, 尤其在远期, 区域大部分地区 $R_{5\text{day}}$ 增加 10mm 以上, 北京、河北、山西南部以及内蒙古中部和东北部等地, $R_{5\text{day}}$ 增加 30mm 以上。区域平均 $R_{5\text{day}}$, 近期、中期和远期分别为 62.1 、 67.6 和 72.7mm , 均较 RCP4.5 情景下的同期变化显著, 在远期达到最大 (表 1)。

表1 华北区域 $R_{20\text{mm}}$ 、 $R_{5\text{day}}$ 以及致灾危险度等级、易损度和风险等级面积占比

排放情景	时期	$R_{20\text{mm}}$ /d	$R_{5\text{day}}$ /mm	危险度 /%	易损度 /%	风险 /%
	基准期	2.5	56.9	14.9	7.0	9.0
RCP4.5	近期	2.8	61.3	19.1	8.4	10.6
	中期	2.9	65.6	22.1	8.9	11.0
	远期	2.8	63.7	20.3	8.3	9.7
RCP8.5	近期	2.8	62.1	20.2	8.4	10.8
	中期	3.2	67.6	26.0	8.9	11.2
	远期	3.3	72.7	27.7	8.3	10.1

注: 危险度和风险统计等级Ⅲ级及以上面积占比, 易损度统计指数 >0.1 以上面积占比。

3.2 致灾危险度

RCP4.5 情景下, 未来 3 个时期洪涝灾害致灾危险度等级空间分布特征 (图 3a、3c、3e) 与基准期 (图 2a) 相似, 致灾危险度等级由西北向东南递增。近期 (图 3a) 内蒙古大部分地区洪涝灾害危险度为 I 级,

Ⅱ级区域从内蒙古东部、河北北部到山西北部呈东北—西南向带状分布,Ⅲ级及以上区域集中在京津冀、山西中南部和内蒙古东部局部地区,其中,Ⅳ级及以上区域主要在北京、天津、河北南部和山西省境南端,Ⅴ级区域集中在北京、天津和河北部分地区。中期,Ⅴ级区域较近期扩大(图 3c)。远期,Ⅴ级区域收缩,主要位于北京、河北东部和南部局部地区(图 3e)。近期、中期和远期致灾危险度Ⅲ级及以上地区分别占区域面积的 19.1%、22.1%和 20.3%,中期范围最大(表 1),Ⅴ级面积也在中期最大,占比为 6.1%。

RCP8.5 情景下,近期、中期和远期洪涝灾害致灾危险度Ⅲ级及以上面积较 RCP4.5 情景下进一步增加,分别占区域面积的 20.2%、26.0%和 27.7%,远期范围最大(表 1)。值得注意的是,Ⅴ级范围和 RCP4.5 情景一致,在中期最大,面积比例为 7.7%。

3.3 承灾体易损度

SSP1 共享社会经济路径下,21 世纪华北区域

人口和 GDP 空间分布特征与基准期(图 1e、1f)基本一致。数值上,近期人口较基准期增加 0.1 亿,中期和远期人口较基准期减少,远期人口达到最少,较基准期减少 0.4 亿;而 GDP 呈持续增加趋势,近期、中期和远期分别较基准期增加了 9.7×10^4 、 1.9×10^5 和 2.4×10^5 亿元^[34]。

未来不同时期易损度(图 4)均较基准期(图 2b)略有增加,中期易损度 >0.1 的面积最大(表 1)。不同时期易损度高值区均集中在华北东南部,其中北京和天津易损度高于 0.4。

3.4 洪涝灾害风险

图 5 为 RCP4.5 和 RCP8.5 排放情景下华北区域未来 3 个时期洪涝灾害风险等级分布。RCP4.5 情景下,未来 3 个时期洪涝灾害风险等级分布和基准期(图 2c)基本一致,内蒙古大部、山西北部 and 河北北部为Ⅰ级风险区,山西中南部盆地周边地区以及河北张家口南部、承德南部等地为Ⅱ级风险区,Ⅲ

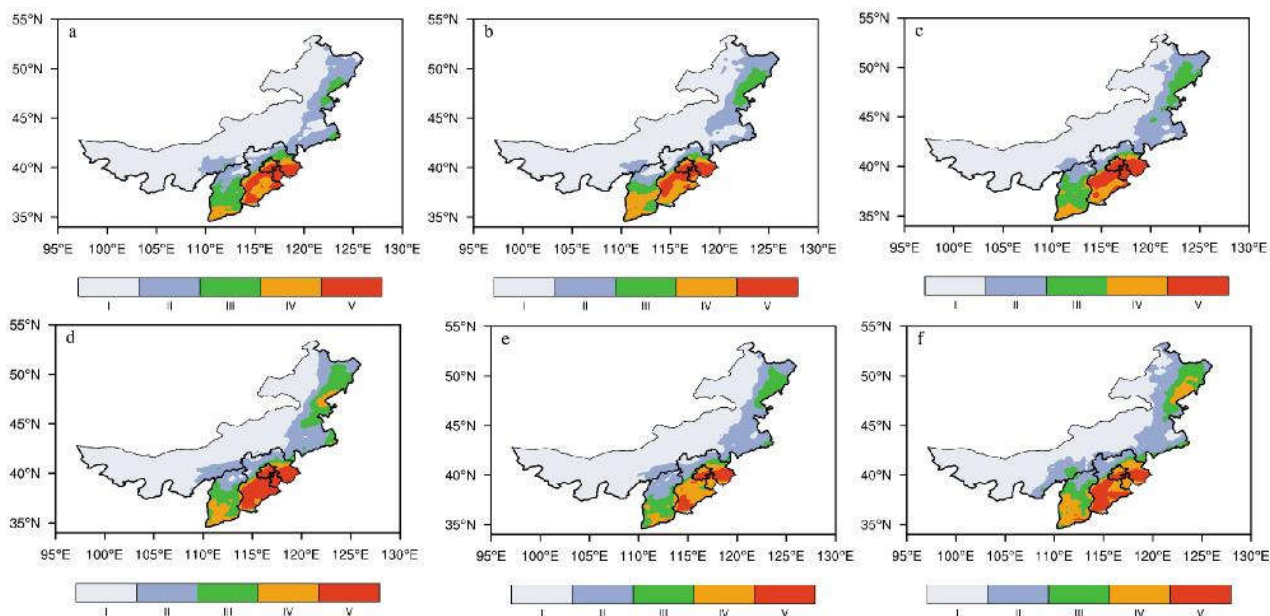


图 3 华北区域未来洪涝灾害致灾危险度等级分布

(a 为 RCP4.5 近期, b 为 RCP8.5 近期, c 为 RCP4.5 中期, d 为 RCP8.5 中期, e 为 RCP4.5 远期, f 为 RCP8.5 远期)

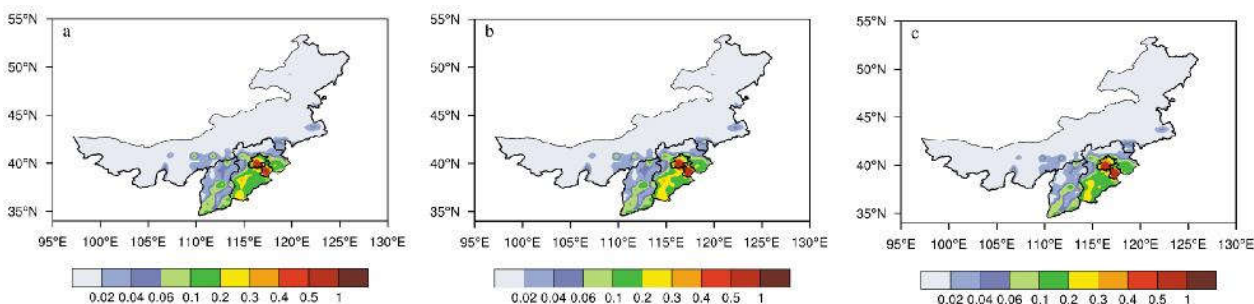


图 4 华北区域未来承灾体易损度分布

(a 为近期, b 为中期, c 为远期)

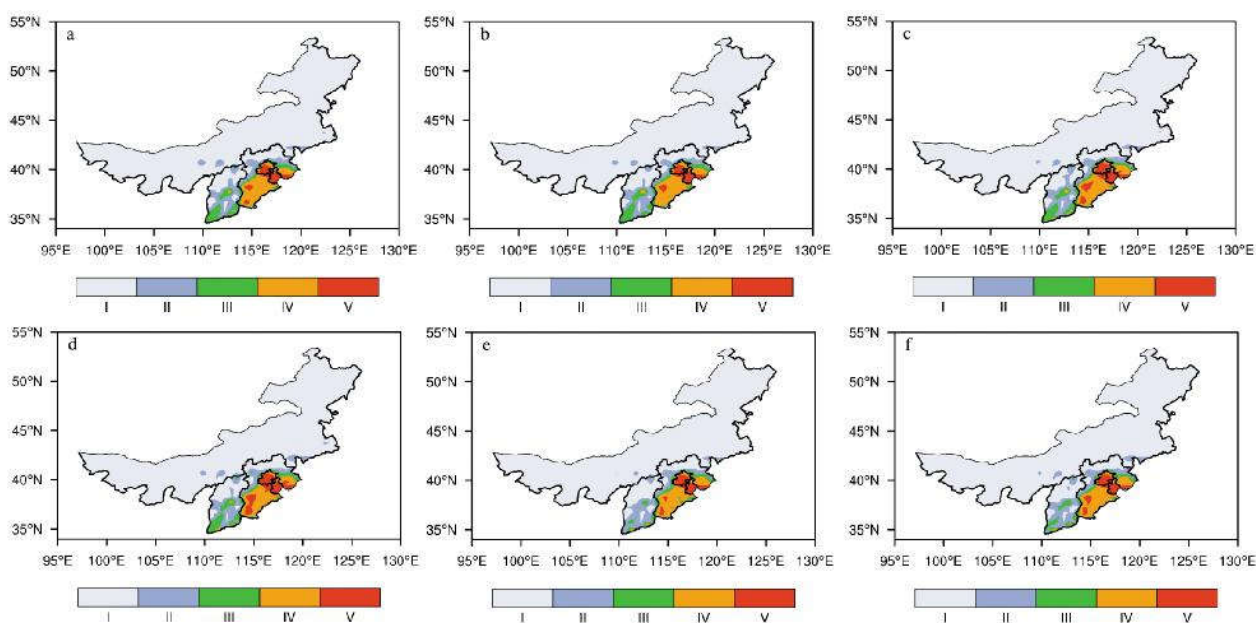


图5 华北区域未来洪涝灾害风险等级分布

(a 为 RCP4.5 近期, b 为 RCP8.5 近期, c 为 RCP4.5 中期, d 为 RCP8.5 中期, e 为 RCP4.5 远期, f 为 RCP8.5 远期)

级及以上区域主要集中在北京、天津、河北南部和山西中南部盆地等地,其中,Ⅳ级及以上区域位于北京、天津和河北南部,Ⅴ级风险地区,位于危险度等级较高、人口和GDP高值中心区的北京、天津和河北局部地区(图5a、5c、5e)。较之基准期,未来各个时期Ⅲ级及以上风险范围扩大,均大于基准期的9%,面积占比分别为10.6%、11.0%和9.7%,以中期最大(表1)。Ⅴ级风险范围也在中期达到最大,占区域面积的2.7%。RCP8.5情景下,近期、中期和远期Ⅲ级及以上风险范围均较同期RCP4.5情景进一步扩大(图5b、5d、5f),面积占比分别为10.8%、11.2%和10.1%(表1),中期Ⅴ级风险地区也增至区域面积的3.1%。

两种排放情景下,未来华北区域洪涝灾害Ⅲ级及以上风险等级面积均在中期达到最大,反映了致灾危险度和承灾体易损度的综合作用。

4 结论

本文在评估检验25 km分辨率区域气候模式RegCM4对华北区域基准期2个致灾危险度评估指标 $R_{20\text{mm}}$ 和 $R_{x5\text{day}}$ 模拟能力的基础上,分析了华北区域洪涝灾害的危险度,结合人口、GDP以及地形高度数据,建立风险评估模型;评估了华北区域洪涝灾害风险空间分布特征;对未来近期、中期和远期3个时期在RCP4.5和RCP8.5情景下的致灾危险度评估指标、洪涝灾害危险度和风险变化进行了预估。主

要结论如下:

(1)RegCM4对华北区域基准期致灾危险度评估指标 $R_{20\text{mm}}$ 和 $R_{x5\text{day}}$ 模拟较好,区域内致灾危险度评估指标高值区和承灾体(人口、GDP)高值区在空间分布上差异较小。总体上,基准期洪涝灾害危险性、承灾体易损度以及风险较高的区域均集中在北京、天津、河北南部和山西南部,其余地区洪涝灾害风险低于Ⅱ级。

(2)RCP4.5情景下,未来3个时期洪涝灾害危险度、承灾体易损度和灾害风险的高等级/值区域在空间分布上和基准期基本一致,但高等级/值区域范围有所增加。致灾危险度评估指标 $R_{20\text{mm}}$ 和 $R_{x5\text{day}}$ 、灾害危险度、承灾体易损度和风险等级的区域平均变化数值均表现为中期增加最大。

(3)RCP8.5情景下,致灾危险度评估指标、灾害危险度和风险等级空间分布变化和RCP4.5相似,但变化数值大于同期RCP4.5。需要指出的是,RCP8.5情景下,致灾危险度评估指标和灾害危险度在远期增加更大,但由于SSP1共享社会经济路径下未来承灾体易损度在中期最大,Ⅲ级及以上风险等级面积仍然以中期最大。

目前洪涝灾害评估方法众多,基于观测数据构建的模型可用数据较多且全面,因而评估模型较为完善。基于气候模式输出的灾害预估研究,模型建立中由于一些指标因子难以获得,模型相对简单,如本文以 $R_{20\text{mm}}$ 和 $R_{x5\text{day}}$ 两个极端降水指数作为致灾危

险度评估指标建立的评估模型,仅从日尺度考虑了极端降水事件的频率、强度和持续时间,未来模型有待进一步完善。另外,本文所进行的未来洪涝灾害预估分析只是一个模式的模拟结果,关注的也只是气候系统对温室气体的敏感程度,得到的预估结果存在一定的不确定性。未来有必要进行多种强迫下的多模式预估研究,以助于给出可信度较高的洪涝灾害预估结果,更好地为社会可持续发展提供科学依据。

参考文献:

- [1] CHEN H, SUN J. Contribution of human influence to increased daily precipitation extremes over China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(5): 2436–2444.
- [2] GAO L, HUANG J, CHEN X W, et al. Contributions of natural climate changes and human activities to the trend of extreme precipitation [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 205(6): 60–69.
- [3] SUN Q H, MIAO C Y. Extreme rainfall ($R_{30\text{ mm}}, R_{35\text{ day}}$) in Yangtze–Huai, China, in June–July 2016: the role of ENSO and anthropogenic climate change [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(1): S102–S106.
- [4] HAN T T, GUO X Y, ZHOU B T, et al. Recent changes in heavy precipitation events in Northern Central China and associated atmospheric circulation [J]. *Asia–Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2021, 57: 301–310.
- [5] 李莹, 赵珊珊. 2001—2020 年中国洪涝灾害损失与致灾危险性研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(2): 154–165.
- [6] 黄荣辉, 杜振彩. 全球变暖背景下中国旱涝气候灾害的演变特征及趋势 [J]. *自然杂志*, 2010, 32(4): 187–195.
- [7] 黄建平, 冉津江, 季明霞. 中国干旱半干旱区洪涝灾害的初步分析 [J]. *气象学报*, 2014, 72(6): 1096–1107.
- [8] 赵琳, 孙林海, 竺夏英, 等. 2021 年华北雨季气候特征及华北降水偏多成因初探 [J]. *气象与环境科学*, 2022, 45(2): 20–26.
- [9] GU W, CHEN L J, WANG Y G, et al. Extreme precipitation over northern China in autumn 2021 and joint contributions of tropical and mid–latitude factors [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2022, 13(6): 835–842.
- [10] WESTRA S, FOWLER H J, EVANS J P, et al. Future changes to the intensity and frequency of short–duration extreme rainfall [J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(3): 522–555.
- [11] 陈颖, 张冬峰, 王林, 等. RegCM4 对华北区域 21 世纪气候变化预估研究 [J]. *干旱气象*, 2022, 40(1): 1–10.
- [12] 孙颖, 丁一汇. 未来百年东亚夏季降水和季风预测的研究 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(11): 1487–1504.
- [13] 丁一汇, 司东, 柳艳菊, 等. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化 [J]. *大气科学*, 2018, 42(3): 533–558.
- [14] 张建忠. 河南重大暴雨灾害的孕灾风险研究 [J]. *气象与环境科学*, 2015, 38(3): 19–24.
- [15] 吴绍洪, 潘韬, 刘燕华, 等. 中国综合气候变化风险区划 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 3–17.
- [16] 张静, 保广裕, 周丹, 等. 基于回归模型的青藏铁路水害气象风险评估 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2018, 12(1): 53–60.
- [17] 王小亚, 马诺, 李海花, 等. 新疆南疆暴雨洪涝灾害风险区划 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2022, 16(4): 72–78.
- [18] 徐影, 张冰, 周波涛, 等. 基于 CMIP5 模式的中国地区未来洪涝灾害风险变化预估 [J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(4): 268–275.
- [19] 李柔珂, 李耀辉, 徐影. 未来中国地区的暴雨洪涝灾害风险预估 [J]. *干旱气象*, 2018, 36(3): 341–352.
- [20] 尹晓东, 董思言, 韩振宇, 等. 未来 50 a 长江三角洲地区干旱和洪涝灾害风险预估 [J]. *气象与环境学报*, 2018, 34(5): 66–75.
- [21] LU P, LI Z H. Ensemble flood risk assessment in the Yangtze River Economic Belt under CMIP6 SSP–RCP scenarios [J]. *Sustainability*, 2021, 13(21): 12097–12113.
- [22] 黄晓远, 李谢辉. 基于 CMIP6 的西南暴雨洪涝灾害风险未来预估 [J]. *应用气象学报*, 2022, 33(2): 231–243.
- [23] 张冬峰, 高学杰, 罗勇, 等. RegCM4.0 对一个全球模式 20 世纪气候变化试验的中国区域降尺度: 温室气体和自然变率的贡献 [J]. *科学通报*, 2015, 60(17): 1631–1642.
- [24] 张冬峰, 高学杰. 中国 21 世纪气候变化的 RegCM4 多模拟集合预估 [J]. *科学通报*, 2020, 65(23): 2516–2526.
- [25] 石英, 高学杰, GIORGI F, 等. 全球变暖背景下中国区域不同强度降水事件变化的高分辨率数值模拟 [J]. *气候变化研究进展*, 2009, 6(3): 164–169.
- [26] 徐集云, 石英, 高学杰, 等. RegCM3 对中国 21 世纪极端气候事件变化的高分辨率模拟 [J]. *科学通报*, 2013, 58(8): 724–733.
- [27] GAO X J, SHI Y, GIORGI F. Comparison of convective parameterizations in RegCM4 experiments over China with CLM as the land surface model [J]. *Atmospheric Ocean Science Letters*, 2016, 9(4): 246–254.
- [28] GAO X J, SHI Y, HAN Z Y, et al. Performance of RegCM4 over major river basins in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(4): 441–455.
- [29] GIORGI F, COPPOLA E, SOLMON F, et al. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains [J]. *Climate Research*, 2012, 52: 7–29.
- [30] MARTIN G M, BELLOUIN N, COLLINS W J, et al. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate

- configurations [J]. Geoscientific Model Development, 2011, 4: 723–757.
- [31] GIORGI F, JONES C, ASRAR G R, et al. Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework [J]. WMO Bull, 2009, 58 (3): 175–183.
- [32] 韩振宇, 高学杰, 石英, 等. 中国高精度土地覆盖数据在 RegCM4/CLM 模式中的引入及其对区域气候模拟影响的分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 857–866.
- [33] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102–1111.
- [34] 姜彤, 苏布达, 王艳君, 等. 共享社会经济路径(SSPs)人口和经济格点化数据集[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18 (3): 381–383.
- [35] 吴绍洪, 戴尔阜, 葛全胜, 等. 综合风险防范: 中国综合气候变化风险[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [36] 於琰, 徐影, 张永香. 近 25 a 中国暴雨及其引发的暴雨洪涝灾害影响的时空变化特征[J]. 暴雨灾害, 2018, 37 (1): 67–72.
- [37] 谭徐明, 张伟兵, 马建明, 等. 全国区域洪水风险评价与区划图绘制研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(1): 50–60.
- [38] 王光明, 刘连友, 胡子瑛. 京津冀都市圈网格尺度洪涝灾害风险评价研究[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 186–193.
- [39] 李乐乐, 钞锦龙, 赵德一, 等. 1957–2019 年山西省暴雨时空分布特征与暴雨灾害风险评估[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 689–699.

Projection of Flood Risk over North China Based on RegCM4 Regional Climate Model

LIU Yueli, ZHANG Dongfeng, CHEN Ying, AN Wei
(Shanxi Climate Center, Taiyuan 030006, China)

Abstract Based on the simulation results of the regional climate model RegCM4 with a 25 km resolution in East Asia, we established a regional disaster flood risk assessment model by analyzing climate disaster risk and vulnerability of population and GDP in north China during the base period (1986–2005). This model was utilized to predict changes in flood disaster risk for near-term (2020–2035), medium-term (2046–2065), and long-term (2080–2098) periods in north China under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The findings indicate that: (1) RegCM4 demonstrates good simulation ability for assessing flood hazard indexes such as $R_{20\text{ mm}}$ and $R_{\leq 5\text{ day}}$ during the base period in north China. Flood hazard risks at level III or above were observed primarily in Beijing, Tianjin, southern and eastern Hebei, as well as southern Shanxi. (2) Under both RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, there will be an increase in $R_{20\text{ mm}}$ and $R_{\leq 5\text{ day}}$ flood disaster risks across most areas of north China during the next three different time periods; this increase is more pronounced under the RCP8.5 scenario. Risk levels III or above are the highest during the medium term for both scenarios.

Key words risk projection; flood disaster; north China; RegCM4