



盛广耀, 廖要明, 扈海波. 气候变化下雄安新区洪涝灾害的风险评估及适应措施[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(6): 40-52.
 [SHENG Guangyao, LIAO Yaoming, HU Haibo. Risk evaluation for flood waterlogging disasters in the Xiongan New Area under climate change [J]. China population, resources and environment, 2020, 30(6): 40-52.]

气候变化下雄安新区洪涝灾害的风险评估及适应措施

盛广耀¹ 廖要明² 扈海波³

(1. 中国社会科学院生态文明研究智库, 北京 100732; 2. 国家气候中心生态气候评估部, 北京 100081;
 3. 北京城市气象研究院城市气候与生态发展研究中心, 北京 100089)

摘要 洪涝灾害是雄安新区规划建设重点考虑的问题。特别是在气候变化的趋势下, 未来雄安新区是否会发生历史上曾多次出现的严重洪涝, 为社会各界所关注。本文通过整理地方历史文献中的洪涝灾害记录, 建立雄安新区1949—2018年洪涝灾害灾情数据集, 分析了过去70年洪涝灾害事件及其影响等级的时空变化特征。结合1960年以来的降水观测数据, 利用logit估计方法, 分析了不同时期各种影响因素对于洪涝灾害发生及灾害等级的边际效应, 评估了未来气候变化的极端降水增量情景下, 雄安新区内涝灾害事件及高等级洪涝发生的风险。研究发现: ①雄安新区最近70年有39年发生过洪涝灾害。但从时间变化特征看, 自20世纪80年代以后洪涝灾害的发生频率和灾情等级显著降低。从空间分布特征看, 发生频次最高的安新县平均2年发生1次, 最低的容城县平均10年发生1次。②日最大降水量(或连续最大降水量)、主汛期降水量是影响洪涝灾害发生的最重要降水指标。水利设施对控制洪涝灾害发生的效果显著, 地形因素的影响也十分明显。而因洪致灾是导致高等级洪涝灾害事件发生的决定性因素。③在现有水利设施条件下, 安新县遭受现50年一遇(177 mm)、雄县遭受100年一遇(208 mm)日最大降水时就可能发生内涝灾害, 起步区所在的容城县即使现日降水极值再增加30%, 也不大可能发生。④本地极端强降水不足以导致高等级洪涝灾害的发生。只有在发生洪水致灾的同时, 当日极端降水强度增加15%(300 mm)以上时, 有县域会发生2级及以上洪涝灾害; 当主汛期降水量达到355 mm以上时, 则可能有县域会发生3级及以上洪涝灾害。本文最后讨论了雄安新区应对洪涝灾害的建设适应措施。

关键词 雄安新区; 洪涝灾害; 风险评估; 历史文献

中图分类号 F062 文献标识码 A 文章编号 1002-2104(2020)06-0040-13 DOI: 10.12062/cpre.20200406

雄安新区建设是我国的“千年大计、国家大事”, 对于雄安新区可能存在严重洪涝灾害的风险一直为社会所关注。雄安新区位于河北省保定市境内, 完整包含雄县、安新、容城三县。从历史上看, 洪涝是雄安地区发生频率最高、社会经济损失最重的自然灾害。气候上, 雄安新区属暖温带季风型大陆性气候, 降水集中于夏秋两季。地形上, 雄安新区地处“九河下梢”, 属太行山麓平原向冲积平原的过渡带, 地势相对低洼, 易发生洪涝灾害。有历史记载以来, 雄安三县洪涝灾害频发。安新县有“十年九涝”之说, “自东汉以来, 见于文字记载的水灾多达300余次”^[1]; “明朝至民国期间(公元1368—1949年)洪涝灾173次”^[2]; 雄县“元世祖至元六年(1269年)至民国37年(1948年), 境内共发生特大涝灾56次, 平均12年一遇”^[3]; “自明朝成化六年(公元1325年)至中华人民共和国成立前的634年中, 经《海河流域历代灾害史料》记载的较大的水灾共115次, 平均每百年18.4次”^[4]; 容城县“据

历史资料记载, 1883—1982年的百年间, 大涝18次, 平均五六年一遇”^[5]。历史上洪涝灾害对雄安三县的破坏性大, 曾多次造成严重的经济损失, 危害民众生计和人民生活。例如, 明嘉靖三十二年(1553年), 安新县“大雨坏民田庐, 人畜死者无算, 大水穿新安北城流入十字街。翌年春大饥, 人相食; 夏秋大水”^[1]; 雄县“夏霖雨四十余日, 官舍民房损大半, 市可行船”, 次年“大饥, 孳者载道, 人相食”^[4]。洪涝灾害的影响是雄安新区建设过程中必须重点考虑和深入研究的问题, 尤其是在气候变化趋势下的这一问题。郝志新等^[6]利用历史文献重建了过去300年雄安新区洪涝年表及其时空分布特征。吴婕等^[7]使用RegCM4区域模式对21世纪中期雄安及其周边区域的气候变化情况进行了预估。现有文献定量评估气候变化下洪涝灾害风险及其影响程度的研究不多。温泉沛等^[8]采用灰色关联法、正态信息扩散法, 分别构建了基于受灾面积比重和成灾面积比重的暴雨洪涝灾害相对灾情指数及

收稿日期: 2020-02-06 修回日期: 2020-04-15

作者简介: 盛广耀, 研究员, 主要研究方向为城市与区域发展、城市可持续发展。E-mail: shengguangyao@163.com。

基金项目: 科技部国家重点研发计划资助课题“雄安新区气候变化风险评估及三生适应模式研究”(批准号: 2018YFA0606304)。

其风险估算模型,分析了东南地区气候变暖前后暴雨洪涝灾害的风险变化。吴绍洪等^[9]提出包括自然灾害的破坏力(或承险体损毁标准)、承险体的暴露度、灾害发生可能性或孕灾环境三个成分的自然灾害风险定量评估模型。胡恒智等^[10]介绍了国际上应用于洪涝风险领域的鲁棒决策、信息差距及适应对策路径3种稳健决策方法。Dottori等^[11]使用一个多模型框架,在假设目前的脆弱程度和未来适应措施不存在的情况下,分别估计了不同升温(1.5℃、2.0℃、3.0℃)情景下洪水灾害带来的人员伤亡损失、直接经济损失和随后的间接影响(福利损失)。张君枝等^[12]利用第五次耦合模式比较计划(CMIP5)提供的气候模式模拟结果,结合FloodArea洪水淹没模型,对全球升温1.5℃和2.0℃情景下北京市极端降水和淹没风险进行了分析。

本文拟通过雄安三县地方史料对1949—2018年洪涝灾害记载的整理,统计分析最近70年洪涝灾害事件及其影响等级在时间和空间上的变化特征;结合1960年以来雄安三县的降水资料,采用离散选择模型,估计洪涝灾害发生及其等级与各种影响因素之间的关系,评估气候变化的降水情景下洪涝灾害,特别是高等级洪涝灾害发生的风险;并简要探讨雄安新区的建设适应措施,以期为雄安新区的规划建设以及制定防洪减灾措施提供参考。

1 资料来源与分析方法

1.1 资料来源

本文主要使用文献资料整理的洪涝灾情数据和气象站点观测的降水量数据。文献资料包括雄安三县地方史料和调研收集的近年灾情资料,其中地方史料包括1949年后的两轮地方志,包括《安新县志》^[1]《安新县志:1978—2008》^[13]《雄县志》^[3]《雄县志:1990—2012》^[14]《容城县志》^[5]《容城县志:1990—2010》^[15]以及《安新县水利志》^[2]《雄县水利志》^[4]和《中国气象灾害大典·河北卷》^[16]等。根据这些文献资料对洪涝灾害的灾情记录,建立雄安地区1949—2018年洪涝灾害发生事件及其影响程度的年表数据集。降水量数据来自于国家气候中心的中国地面气候资料日值数据集。通过降水量日值数据分别得到洪涝灾害发生期间各降水量指标数据,如日最大降水量、连续最大降水量、月最大降水量、主汛期(7月10日—8月10日)降水量、七八月降水量和年降水量。

1.2 分析方法

1.2.1 洪涝灾害影响等级的确定方法

利用地方历史文献资料建立雄安地区洪涝灾害发生时间、类型及其影响程度的灾情数据集。首先,通过对文献资料的整理,按年代顺序梳理历次洪涝灾害发生事件及

灾情记录,形成1949—2018年雄安三县洪涝灾害年表。然后,依据各次洪涝灾害灾情记录的描述,区分洪涝灾害类型,提取受灾面积、成灾面积、倒塌房屋、死伤人口、受灾人口、经济损失等灾情数据,确定洪涝灾害的受灾情况,评估雄县、安新、容城三县历次洪涝灾害的影响程度,并以此划分等级。最后,确定雄安地区总体的洪涝灾害发生及其等级情况。在分析雄安地区发生情况时,只要其中一县某年发生洪涝灾害,则认为雄安地区当年发生了洪涝;在确定洪涝灾害影响等级时,如三县认定的某年洪涝灾害等级不一致,以三县中认定的最高等级为雄安地区该年的洪涝灾害等级。

洪涝灾害等级序列的确定,参考《洪涝灾情评估标准》(SL579-2012)划分为四个等级:特别重大洪涝灾害(4级)、重大洪涝灾害(3级)、较大洪涝灾害(2级)和一般洪涝灾害(1级)。由于历史文献只零星有倒塌房屋、死伤人口、受灾人口、经济损失等灾情数据,而农作物受灾面积或成灾面积则较为齐全,可以计算农作物受灾面积占当年耕地总面积比例。因此,本文主要以农作物受灾面积占当年耕地总面积比例为主要指标,辅之以其他洪涝灾害损失数据及具体描述,确定雄安三县历史年份洪涝灾害的灾情等级。农作物受灾面积占各县耕地面积比例的具体阈值区间为:>60%为4级特别重大、30%~60%为3级重大、15%~30%为2级较大、<15%为1级一般洪涝灾害(本研究忽略受灾面积很小的轻微灾害)。其中,如有成灾面积而无受灾面积的,按受灾面积大于等于成灾面积估算。此外,容城县1954、1955、1956年灾情缺少受灾面积和成灾面积,则根据洪涝灾害的具体描述予以估计。

1.2.2 洪涝灾害的风险评估方法

本文重点关注的是气候变化下不同降水量指标对雄安新区洪涝发生及其等级的影响。研究中的被解释变量分别为洪涝灾害是否发生和洪涝灾害等级,均为分类数据,故本文采用离散选择模型(或称定性反应模型)。首先,分别将不同降水量指标纳入模型进行单因素logit回归,通过计算洪涝灾害事件发生的预测准确度,找出导致洪涝发生最直接的降水量指标;其次,将表征水利设施和地形特征的变量纳入模型,对比分析各变量对洪涝灾害发生及其等级的影响差异和边际效应;最后,据此利用logit模型的后估计方法,评估气候变化降水增量情景下洪涝灾害尤其是高等级洪涝灾害的发生风险。

2 洪涝灾害等级的时空特征及影响因素

2.1 洪涝灾害等级的时间变化特征

按照洪涝灾害等级序列划分标准,将雄安三县1949—2018年发生的洪涝灾害逐年进行等级划分,然后确

定雄安新区总体的洪涝灾害等级(见图1)。

从总体发生特征来看,雄安新区70a中有39a发生过洪涝灾害,平均每1.8a发生1次。从洪涝灾害影响程度看,当年至少一县发生4级特大洪涝灾害10次,平均每7a发生1次,占年次数的25.6%;3级重大洪涝灾害发生7次,占年次数的18%;2级较大洪涝灾害和1级一般洪涝灾害各发生11次,各占28.2%。

从时间变化特征来看,雄安新区洪涝灾害发生频次和影响等级呈不断降低的趋势。按洪涝灾害发生频次分析,可以划分为1949—1981年和1982—2018年两个时段。

(1) 1949—1981年,洪涝灾害的发生频率高、影响等级大。这一时段雄安新区几乎年年有洪涝发生,33a中有30a发生洪涝灾害,仅1965、1971和1972年未发生洪涝灾害,平均每1.1a一遇。其中4级特大洪涝灾害均发生在这一时期,平均每3.3a一遇。

(2) 1982—2018年,洪涝灾害的发生频率和影响等级明显降低。这一时段37a中有9a发生过洪涝灾害,每4.1a一遇。其中,以1级一般灾害居多,占年洪涝灾害的44%;未发生4级特大洪涝。近20a来,雄安新区洪涝灾害的频率和等级则更低,1997—2010年连续14a未曾有一县发生等级洪涝灾害。

2.2 洪涝灾害等级的空间分布特征

从空间差异特征来看,在雄安新区三县中安新、雄县洪涝灾害发生频次高,容城洪涝灾害发生频次低。1949—2018年70a中,安新、雄县各发生洪涝灾害35次、29次;

安新发生频次高,平均每2a一遇;容城洪涝灾害明显较少,有记载的仅有7次,每10a一遇。同样分为1949—1981年和1982—2018年两个时段分析。

(1) 1949—1981年洪涝灾害发生频率高、灾情重。33年中安新、雄县分别发生洪涝灾害28次、24次,平均每1.18a、1.38a一遇,且4级特大洪涝灾害占比高,分别发生了6次、9次;容城发生洪涝灾害5次,均为3级和4级洪涝灾害。

(2) 1982—2018年洪涝灾害发生频率低、灾情普遍较轻。37年中安新、雄县分别发生洪涝灾害7次、5次,无4级特大洪涝灾害;容城仅发生洪涝灾害2次,且无3级和4级洪涝灾害。

2.3 洪涝灾害等级的类型特征

从洪涝灾害的类型看,雄安三县洪灾发生频次低于涝灾,但灾情等级高;洪灾、涝灾的发生有明显的时间差异。1949—2018年,雄县、安新、容城三县共发生71次县域洪涝灾害,其中洪灾29次、涝灾42次。洪灾发生所造成的灾情等级普遍较高,3级、4级特大洪灾分别发生8次、16次。从空间分布特征看,安新、雄县发生洪灾次数多但少于本县涝灾,容城洪灾次数少但多于本县涝灾。

从时间分布特征看,洪灾主要发生1965年以前。

(1) 1949—1964年三县共发生洪灾22次、涝灾12次,这一时间段洪灾占全部洪灾的76%,占此期间洪涝总数的64.7%。这一时期,由于水利设施脆弱,大清河水系诸河流遇上游洪水,河道乃至白洋淀水位猛涨,多导致堤防

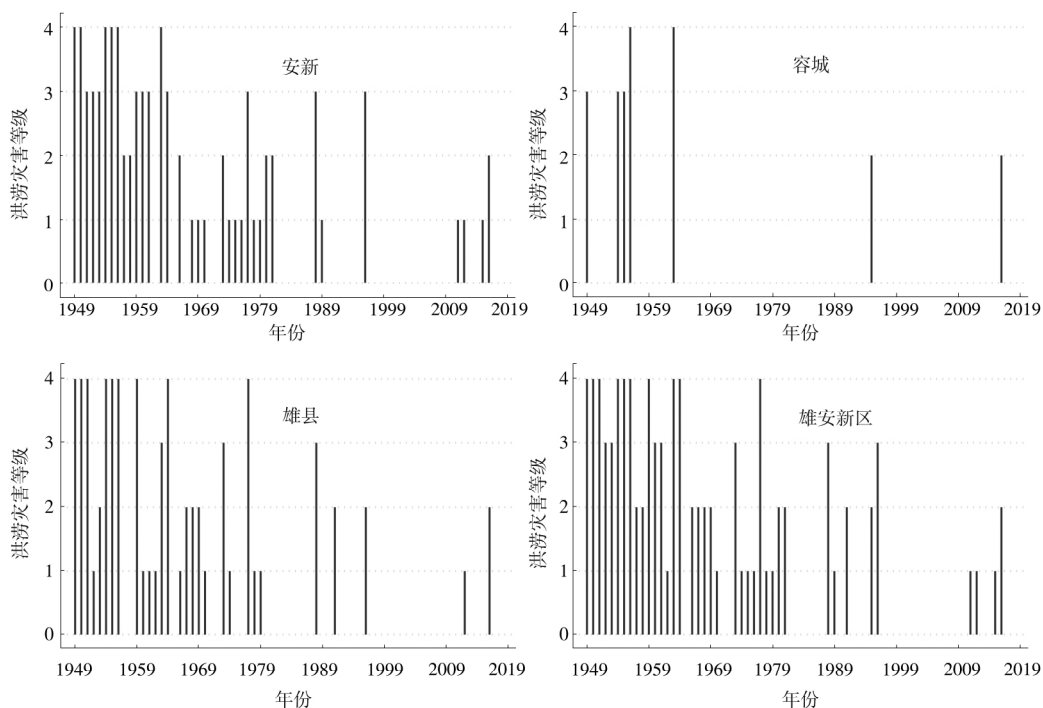


图1 1949—2018年雄安新区洪涝灾害等级序列变化

决口,呈现“遇洪必重”的灾情特点。其中,1949、1954、1955、1956和1963年三县同时发生堤防决口而造成特大洪涝灾害。1963年特大洪水后,在毛泽东同志“一定要根治海河”的号召下,大清水系进行了全面治理,此后雄安三县的洪水危害大为减轻。

(2) 1965—2018年洪涝灾害以涝灾为主,三县发生涝灾30次、洪灾仅7次。安新县1968、1988、1996和2012年因上游河流洪水入淀,导致淀区内农作物和水产养殖不同程度受灾。这一时期,即使遇大的洪水也很少发生堤防决口情况,仅有2次决口或溢洪、1次分洪的灾情记录。雄县1977年分洪道溢洪导致“44万亩积水,冲毁桥涵闸坝百余座,损坏机井505眼,倒塌房屋6416间”^[4];容城县1995年8月“萍河水位上涨,河道堵塞,堤防决口”^[15];1996年雄县分洪道分洪“致使分洪道内8万亩大秋作物绝收”^[14]。

2.4 影响洪涝灾害发生及程度的因素

雄安地区所属的气候类型和所处的地理环境决定了雄安三县是历史上洪涝灾害的多发区,而水利建设状况直接影响到灾害发生及其灾情的严重程度。

气象因素。雄安地区属暖温带季风型大陆性气候。自设立气象观测站点以来,三县混合平均年降水量仅为498.7 mm,但降水变率大,年极端最大降水量为941.7 mm(1988年安新),极端最小降水量为193.3 mm(1968年安新);而且降水主要集中于夏秋两季,6—9月降水量约占全年的80%,特别是七月下旬到八月上旬,易产生引发洪涝灾害的气象条件。

地形因素。雄安新区处在大清水系冲积扇上,属太行山麓平原向冲积平原的过渡带,总地势自西北向东南略有倾斜,西北较高,东南略低,地势平缓,多低洼地,易发生洪涝水患。其中,安新县地面自然坡度为1:2000,西半部最高海拔10 m,东半部最低海拔5.5 m;雄县地势坡度比一般为1:5000,海拔高度7~14 m;容城县自然纵坡千分之一左右,海拔标高7~19 m。三县平均海拔以容城最高,雄县次之,安新最低。以地形条件来看,洪涝灾害发生的风险安新最高、雄县次之、容城最低。

水利因素。雄安新区属海河流域,境内白洋淀为大清水系中游缓洪、滞沥的大型平原洼淀,承接大清河系南支潞龙河、唐河、府河、漕河、瀑河、萍河、孝义河及大清河北支白沟引河等八条河流的洪沥水,河道和淀周堤防的防洪能力对洪涝灾害的发生有很大的影响。历史上特大洪涝灾情均是由洪水使河道或淀周堤防决口所导致。自20世纪60年代中期大力开展水利工程建设以后,雄安三县再未发生特大洪涝灾害。可见防洪排涝设施的建设状况,在很大程度上决定了雄安新区洪涝灾害的发生及其灾情

等级。

流域因素。雄安新区洪涝灾害除受本地气象、地形和水利等因素影响外,还受到流域性上述诸因素的影响,特别是受到白洋淀上游诸条河流夏季洪水的威胁。除本地极端降水外,白洋淀上游地区的强降水经常导致雄安地区境内河流水位猛涨,从而大大增加雄安地区发生洪涝灾害的风险。其中1956、1963和1996年最为典型。“1956、1963年境内降雨量仅600 mm左右,大清河仍出现洪水猛涨,堤防溃决,造成大面积涝灾”^[3]。其主要致灾因素在于白洋淀上游地区极端降水情况的发生。随着水利工程的大规模建设,白洋淀上游九河上兴修了大大小小一百多座水库,总库容约36亿m³。雄安地区洪涝灾害自20世纪七八十年代后大为减轻一个重要原因,是上游水库在汛期起到了调蓄洪水的作用。

3 气候变化下雄安新区洪涝灾害风险评估

3.1 数据和描述性统计

本研究有两个被解释变量:洪涝灾害发生与否(*disaster*)和洪涝灾害影响等级(*grade*)。是否发生洪涝灾害变量(*disaster*)为二分类数据,某年某县发生了洪涝灾害为1,未发生为0。洪涝灾害等级变量(*grade*)为有序多分类数据,表示洪涝灾害的影响程度,某年某县未发生洪涝灾害为0,发生1级一般洪涝灾害(受灾面积比例<15%)为1,发生2级较大洪涝灾害(受灾面积15%~30%)为2,发生3级重大洪涝灾害(受灾面积30%~60%)为3,发生4级特大洪涝灾害(受灾面积>60%)为4。数据来自本研究所整理的雄安三县1949—2018年洪涝灾害灾情数据集。

本研究的核心解释变量为降水量。洪涝灾害的发生基本上是由降水所导致,只有当流域或者区域面雨量达到某一临界条件时才会出现^[17]。这其中既可能由短时间的强降水(如某日或某连续降水)所造成,本文选择年内日最大降水量(*maxday*)、连续最大降水量(*maxcont*)指标;也可能由一段时间内降水过多所造成,选择主汛期(7月10—8月10日)降水量(*period*)、月最大降水量(*maxmonth*)、7—8月降水量(*jul-aug*)和年降水量(*annual*)指标。由于雄安三县建立地面气象站时间不同,因此所获得的降水量数据起始年份并不一致。安新县降水量数据自1960年起,容城县自1968年起,雄县自1974年起。

洪涝灾害的发生及其等级与水利设施的建设状况有很大关系。1963年海河流域特大水灾发生后,河北省制定了治理海河的“两个十年”规划。第一个十年,即从1964年到1973年,工程重点放在中下游防洪河道和排沥骨干河道治理方面;第二个十年,即1974年到1983年,续建、新

建、扩建、加固大中型水库,提高防洪安全标准;扩建排渠,提高除涝标准^[18]。雄安三县的地方志也记载了具体的水利建设过程和标准。据此,本文以水利设施建设阶段的划分,设定表征水利设施状况变化的虚拟变量“水利设施水平”(facilities),即1964年以前为1,1964—1973年为2,1974—1983年为3,1984年以后为4。现阶段的水利设施水平为河道防洪标准10~20a一遇、除涝标准5~10a一遇。

此外,还有表征境内河流汛期洪水和三县地形特征的控制变量。从历史情况看,雄安新区洪涝灾害的发生及其等级不仅与本地降水情况有关,而且还与大清河水系上游地区降水所引起过境洪水有关,故选取虚拟变量“是否因洪致灾”(flood)。如果某次洪涝灾害主要由河流洪水泛滥所造成,则“是否因洪致灾”(flood)变量取值为1,否则为0。此变量用于考察洪水对洪涝灾害等级的影响。同时,洪涝灾害的发生与当地的地形地貌状况也有很大关系,故选择三县平均海拔高度(altitude)和地形坡度比(slope)表示区域的个体特征。表1报告了样本变量描述性统计特征。

3.2 模型设定与估计方法

采用概率估计和回归模型,利用历史洪涝灾情资料和相关气象数据评估研究区域的风险,是暴雨洪涝灾害风险分析的基本方法之一^[19]。洪涝灾害发生与否是一个二值反应变量,故采用二分类logit模型进行分析。模型设定如下:

$$\log \frac{P}{1-P} = \alpha_0 + \beta_1 \text{rain} + \beta_2 \text{facilities} + \beta_3 X_i \quad (1)$$

模型假定洪涝灾害发生与否的概率函数为“逻辑分布”的累积分布函数,则

$$P = P(\text{disaster} = 1) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 \text{rain} + \beta_2 \text{facilities} + \beta_3 X_i)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 \text{rain} + \beta_2 \text{facilities} + \beta_3 X_i)} \quad (2)$$

其中,P为雄安地区发生洪涝灾害的概率,P/(1-P)则表示洪涝灾害的发生比即洪涝灾害发生与不发生的概率之比;rain为日最大降水量、连续最大降水量、月最大降水量、主汛期降水量、七八月降水量、年降水量等各降水指标变量,facilities为防洪设施水平变量,X_i为表征个体特征的其他控制变量,如海拔高度、地形坡度比。

洪涝灾害影响等级属于等级分类变量(未发生为0、一般为1、较大为2、重大为3、特大为4),采用有序Logit模型进行分析。模型一般形式如下:

$$\log \frac{P(y_i \leq j)}{1 - P(y_i \leq j)} = \alpha_j - \beta x_i \quad (3)$$

通过有序logit模型能够计算出累计发生风险,即:

$$P(y_i \leq j | x_i) = \frac{\exp(\alpha_j - \beta x_i)}{1 + \exp(\alpha_j - \beta x_i)} \quad (4)$$

对特定的Y_i的预测为:

$$P(y_i = j | x_i) = \frac{\exp(\alpha_j - \beta x_i)}{1 + \exp(\alpha_j - \beta x_i)} - \frac{\exp(\alpha_{j-1} - \beta x_i)}{1 + \exp(\alpha_{j-1} - \beta x_i)} \quad (5)$$

出于简化表达形式的目的,式中用y代表被解释变量“洪涝灾害影响等级”,x_i代表各解释变量;p表示在x_i条件下的条件概率;α_j是模型的截距项,代表有j-1个取值的常数项,可视为基准累计发生风险;而β则是与x_i相对应的一组回归系数。有序logit模型将y变量的多个分类拆分成多个二分类logistic回归,在这些二分类logistic回归中,除截距项α_j外的系数β均相等。因此有序logit模型需满足比例优势假定,它也被称为比例优势模型。本文在不确定这一假定是否成立的情况下,同时为了能够更清楚分析高等级洪涝灾害的发生风险,将“洪涝灾害影响等级”变量的分类进行合并(即较高等级洪涝灾害为1、较低及未发生为0),直接将其转换成新的二分类logit模型进行分析。模型设定如下。

表1 变量的描述性统计特征

变量名称	单位 (取值)	观测数	均值	标准差	最小值	最大值
洪涝灾害发生与否	(0,1)	210	0.34	0.474	0	1
洪涝灾害影响等级	(0,1,2,3,4)	210	0.81	1.320	0	4
日最大降水量	10 mm	155	7.30	3.792	1.87	26.34
连续最大降水量	10 mm	155	9.82	5.017	2.66	30.67
主汛期降水量	10 mm	155	17.42	9.894	2.49	43.10
月最大降水量	10 mm	155	18.21	8.133	4.51	43.31
七八月降水量	10 mm	155	28.59	12.610	8.26	68.34
年降水量	10 mm	155	49.87	15.846	19.33	94.17
防洪设施水平	(1,2,3,4)	210	2.93	1.226	1	4
是否因洪致灾	(0,1)	210	0.14	0.346	0	1
海拔	m	210	10.42	2.149	7.75	13
地形坡度比	1/1 000	210	0.57	0.331	0.2	1



$$\log \frac{P}{1-P} = \alpha_0 + \beta_1 \text{rain} + \beta_2 \text{facilities} + \beta_3 \text{flood} \quad (6)$$

其中, 加入虚拟变量 flood, 即“是否因洪致灾”。

3.3 洪涝灾害事件发生的风险评估

将是否发生洪涝灾害作为被解释变量, 通过二分类 logit 模型评估雄安新区洪涝灾害发生的风险。

首先, 分别将不同降水量指标纳入模型进行单因素 logit 回归, 并计算洪涝灾害发生的预测准确度。按二分类 logit 预测的一般标准, 若发生概率的预测值 ≥ 0.5 , 则认为其预测结果事件发生; 反之, 则认为不发生。将预测值与样本数据实际值比较, 得到正确预测的准确度, 从而找出引发洪涝最直接的降水量指标。

由于洪水致灾并不完全取决于本地降水, 更多是由上游地区降水所引起河道洪水在本地泛滥所造成, 因此在分析过程对此进行了区分。单因素 logit 估计的结果显示(见表 2): 不同降水变量的单因素 logit 模型有较好的拟合优度, 各降水量变量在 1% 水平上显著, 且能较好的预测洪涝灾害事件发生与否的概率。强降水指标变量(日最大或连续最大降水量)对是否发生洪涝灾害的影响, 明显大于区间降水指标变量, 且预测准确度也高于区间降水量变量, 表明强降水是洪涝灾害发生最主要的原因。在强降水指标中, 日最大降水量的影响略大于连续最大降水量, 洪

涝灾害事件发生概率的预测准确度基本一致。在区间降水量指标中, 主汛期降水量的影响较大, 且模型的预测准确度相对较高。

对比全部样本与剔除洪灾样本的结果, 剔除洪灾样本的预测准确度均有所提高, 但模型拟合度、回归系数和平均边际效应均有所下降。这是因为本地降水, 一是会增加洪水致灾的概率和影响; 二是即使洪水未泛滥成灾, 但如果河道水位居高不下、区域内积水无法排出(俗称“关门涝”), 本地降水的影响必然会增加。

其后, 采用剔除洪灾后的样本, 纳入表征水利设施水平和表征个体特征的控制变量, 分析不同降水量指标对内涝灾害发生的影响程度。不同时间尺度的降水量指标存在很大的相关性, 特别是强降水指标之间(日最大降水量与连续最大降水量)、区间降水指标之间(主汛期降水量、月最大降水量、7—8 月降水量和年降水量)高度相关, 同时纳入模型中将产生多重共线性的问题。通过逐步回归分析后发现(见表 3): 日最大降水量和主汛期降水量、连续最大降水量和主汛期降水量两个变量组合, 经 VIF 检验不存在共线性问题, 模型的拟合度较好且洪涝灾害事件发生概率的预测准确度高; 两个模型对主汛期降水量、水利设施水平、海拔高度和地形坡度比的估计结果仅有很小的差异, 连续最大降水量对内涝灾害发生的影响略高于日最大降水量。

表 2 以各降水量指标为单因素的估计结果

项目	日最大 降水量	连续最大 降水量	主汛期 降水量	月最大 降水量	7~8 月 降水量	年 降水量
全部观测样本(155)						
回归系数	0.252 2*** (0.022 9)	0.222 9*** (0.054 7)	0.125 3*** (0.017 0)	0.126 0*** (0.025 7)	0.078 3*** (0.019 1)	0.047 9*** (0.011 3)
边际效应	0.036 6*** (0.011 6)	0.030 8*** (0.010 8)	0.016 6*** (0.004 5)	0.017 9** (0.007 1)	0.011 3** (0.004 9)	0.007 5** (0.003 1)
准 R ²	0.141 5	0.179 3	0.213 1	0.160 3	0.152 5	0.093 5
预测准确度	81.29%	81.94%	81.29%	79.35%	78.06%	77.42%
剔除洪灾样本(147)						
回归系数	0.226 6*** (0.014 5)	0.206 6*** (0.048 5)	0.124 1*** (0.031 2)	0.116 4*** (0.016 1)	0.075 2*** (0.023 1)	0.045 8*** (0.015 0)
边际效应	0.029 1*** (0.011 1)	0.025 8*** (0.010 9)	0.014 3*** (0.005 2)	0.015 5*** (0.007 8)	0.009 6*** (0.005 5)	0.006 3*** (0.003 8)
准 R ²	0.123 0	0.150 1	0.170 7	0.150 4	0.135 1	0.079 0
预测准确度	85.03%	85.03%	82.31%	82.31%	78.91%	80.95%

注: ***、** 分别表示在 1%、5% 水平上显著; 括号内为县域层面的聚类稳健标准误。

表3的估计结果显示:日最大降水量、连续最大降水量、主汛期降水量和水利设施水平以及个体地形因素变量均在1%水平上显著。其中,日最大降水量、连续最大降水量和主汛期降水量系数为正,表明这三个降水量指标直接影响洪涝灾害的发生;水利设施水平系数为负,表明洪涝灾害发生的概率随水利设施建设的不断推进而降低的;此外,海拔高度、地形坡度比系数为负,表明地形因素对洪涝灾害的发生有很大影响,地形高度越高、坡度比越大,发生洪涝灾害的风险越低。

由于日最大降水量是气象观测和研究最常用的降水量指标,本文以下主要以含日降水量的模型进行说明。回归系数不便于直接解释各变量变化对于洪涝灾害事件发生的相对风险,故将其转换为OR值(Odds Ratio,又称发生比、几率比)。在各自控制其他变量的情况下,日最大降水量、主汛期降水量每增加10mm,发生内涝灾害的概率分别是不发生内涝灾害的1.20倍($\text{Exp}^{0.1827} = 1.20$, $p < 0.01$)、1.10倍($\text{Exp}^{0.0994} = 1.10$, $p < 0.01$);而随着水利设施建设的不断推进,某一阶段内涝灾害发生的风险仅为之前的0.28倍($\text{Exp}^{-1.2563} = 0.28$, $p < 0.01$)。

由于地形因素的影响,雄安新区洪涝灾害发生概率具有明显的区域差异。通过对区域异质性的估计发现:安新发生内涝灾害的风险最高,雄县发生内涝灾害的概率为安新的0.49倍,容城仅为安新的0.02倍。

本文还对不同时间起点的样本数据进行了估计。除1960—2018年观测样本外,本文按照三县气象站建站时间差异,分别对1968—2018年和1974—2018年两个时间段样本组也进行了估计。不同样本组的模型估计结果,模型拟合度和预测准确度略有差异但变化不大;日最大降水量、连续最大降水量的影响逐步略增,主汛期降水量的影响逐步略减,而水利设施的作用不断增强。

进一步地,为了更明确地解释各变量的影响,计算各解释变量对于洪涝灾害事件发生的平均边际效应,即某一解释变量变动一个单位,洪涝灾害发生的平均概率如何变化。由1960—2018年剔除洪灾样本的估计结果可见(见表4):日最大降水量、主汛期降水量每增加10mm,发生洪涝灾害的平均预测概率将增加1.46、0.79个百分点;而随之水利设施建设阶段的不断推进,后一阶段发生洪涝灾害的平均预测概率将比之前减少10.03个百分点。从不同时间段样本组估计的平均边际效应看,日最大降水量、主汛期降水量的变化很小;但水利设施水平的变化明显,1974—2018年平均边际效应是1960—2018年的2倍多,表明水利设施防洪防涝的能力不断提升。此外,从个体分组的平均边际效应看,日最大降水量、主汛期降水量对安新县是否发生洪涝灾害的平均边际效应最大,对容城县的边际影响最低;同样,水利设施建设对降低安新县发生洪涝灾害风险的边际效果也最为明显。

表3 不同因素对雄安新区内涝灾害发生的影响估计

项目	(1) 1960—2018	(2) 1968—2018	(3) 1974—2018			
日最大降水量	0.182 7 *** (0.068 0)	0.196 0 *** (0.065 4)	0.284 5 *** (0.091 3)			
连续最大降水量	0.211 2 *** (0.059 7)	0.229 7 *** (0.051 6)	0.293 6 *** (0.048 3)			
主汛期降水量	0.099 4 *** (0.031 7)	0.073 8 *** (0.019 7)	0.094 4 ** (0.039 6)	0.065 5 ** (0.027 6)	0.095 0 (0.058 1)	0.061 9 (0.043 0)
水利设施水平	-1.256 3 *** (0.282 3)	-1.200 0 *** (0.270 4)	-1.806 2 *** (0.461 6)	-1.706 6 *** (0.508 4)	-3.306 8 *** (0.470 5)	-2.986 9 *** (0.602 6)
海拔高度	-0.512 5 *** (0.026 1)	-0.563 7 *** (0.045 9)	-0.587 7 *** (0.065 3)	-0.634 2 *** (0.070 4)	-0.601 5 *** (0.067 4)	-0.642 8 *** (0.061 7)
地形坡度比	-2.315 2 *** (0.262 1)	-2.238 4 *** (0.296 0)	-2.680 2 *** (0.338 3)	-2.594 1 *** (0.489 6)	-1.743 3 *** (0.158 6)	-1.777 3 *** (0.055 3)
常数项	5.373 3 *** (0.796 6)	5.311 3 *** (0.721 7)	8.254 5 *** (1.966 8)	7.957 7 *** (2.109 9)	12.835 0 *** (2.168 3)	11.836 2 *** (2.569 3)
观测样本数	147	147	140	140	129	129
准 R ²	0.448 2	0.460 9	0.445 3	0.456 3	0.499 0	0.498 6
预测准确度/%	89.12	90.48	91.43	90.71	91.47	91.47

注:***、**分别表示在1%、5%水平上显著;括号内为县域层面的聚类稳健标准误。



最后,利用 logit 模型的后估计方法,推测气候变化情景下雄安新区内涝灾害发生的可能性。国家气候中心课题组《雄安新区未来气候变化及气候风险评估报告》(2018) 预测的中等排放情景(RCP4.5)下未来气候变化情况:21 世纪近期(2026—2045 年),相对于 1986—2005 年雄安新区夏季平均降水增加值大都在 5%~10%,集合平均的雄安新区在 5.5%,年平均降水与夏季降水变化较为一致;RX5day(最大 5 日降水量)变化较小,增加 1.0%;R95P(大于基准期内 95% 分位点日降水量总和)变化值为 34.1%。吴婕等^[7]所进行的 RCP4.5(典型浓度路径)中等排放情景下气候变化模拟结果也得出:未来年平均降水将有所增加,21 世纪中期雄安的增加值为 8% 左右(±10%);冬季降水相对增加较多(25% 左右),其他季节增加值一般在 10% 以内;降水极端指数 RX1day(日最

大降水量)未来也将增加,且数值大于平均降水的增加,雄安增加值为 16% 左右(±16%)。综合两者比较一致的预测结果,可以大致推算本文所关心的三个降水量指标预测变化:日最大降水量增加约在 15%~30%,连续最大降水量基本不变(增加 1%),主汛期降水量增加约在 5%~10%。

不同时期水利设施状况与洪涝灾害发生密切相关,这里所关注的是现阶段水利设施水平下的可能性。基于 logit 模型和 1960—2018 年的观测样本,本文估计了随着日最大强降水量、主汛期降水量的变化,雄安新区发生涝灾的预测概率变化。由于洪涝灾害主要关心的是极端天气气候事件,表 5 主要汇报日最大降水增加 30%、主汛期降水量均值增加 10% 情景下内涝灾害发生的预测概率。

表 4 分组估计的平均边际效应

项目	1960—2018	1968—2018	1974—2018	安新	雄县	容城
日最大降水量	0.014 6*** (0.005 7)	0.014 7*** (0.005 7)	0.018 5*** (0.006 7)	0.023 4** (0.009 4)	0.018 9*** (0.007 1)	0.004 2*** (0.001 4)
主汛期降水量	0.007 9*** (0.001 9)	0.007 1*** (0.002 1)	0.006 2* (0.003 5)	0.012 7*** (0.002 7)	0.010 3*** (0.002 6)	0.002 3*** (0.000 7)
水利设施水平	-0.100 3*** (0.013 0)	-0.135 6*** (0.024 2)	-0.215 1*** (0.032 3)	-0.160 8*** (0.017 8)	-0.130 2*** (0.019 2)	-0.028 8*** (0.006 3)
观测样本数	147	140	129	147	147	147

注:***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 水平上显著;括号内为 Delta-method 估计标准误。

表 5 气候变化情景下内涝预期发生概率(现有水利设施条件)

重现期	10 a 一遇	20 a 一遇	30 a 一遇	50 a 一遇	100 a 一遇	样本极值
现在(主汛期降水量在均值处 174.2 mm):						
(降水量)	(117.8 mm)	(141.5 mm)	(157.0 mm)	(177.1 mm)	(208.0 mm)	(263.4 mm)
雄安	0.158 1***	0.215 3**	0.258 0**	0.317 9**	0.413 4**	0.568 0***
安新	0.289 8***	0.386 3***	0.455 2***	0.546 7***	0.679 7***	0.852 8***
雄县	0.166 5***	0.235 5**	0.290 2**	0.371 2**	0.509 4**	0.740 8***
容城	0.008 6*	0.013 2	0.017 5	0.025 1	0.043 3	0.110 7
主汛期降水量均值增加 10%(191.6 mm)、日最大降水增加 30%:						
(降水量)	(153.1 mm)	(184.0 mm)	(204.1 mm)	(230.2 mm)	(270.4 mm)	(342.4 mm)
雄安	0.274 2***	0.368 6***	0.430 3***	0.505 9***	0.607 3***	0.759 9***
安新	0.480 5***	0.619 3***	0.701 4***	0.791 0***	0.887 5***	0.967 1***
雄县	0.311 6**	0.443 2***	0.534 8**	0.649 4**	0.794 3***	0.935 0***
容城	0.019 3	0.033 5	0.047 7	0.074 7	0.144 0	0.385 4

注:①重现期 T 年一遇面雨量数据来自《雄安新区未来气候变化及气候风险评估报告》(2018),是将 1974—2017 年雄安新区三县气象站日降水量算术平均值作为其当日面降水量,采用 Gen. Extreme Value 函数拟合估计。②样本均值、极值降水量分别为 1960—2018 年三个气象站历年日最大降水量的平均值和最大值。③***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 水平上显著。

(1) 在现有水利设施条件下,当前即使日最大降水量达到100 a一遇(208.0 mm)雄安新区(均值状态)也不大可能发生涝灾;而如果日最大降水量达到有记录的最大值(263.4 mm),则可能会发生内涝灾害(预测概率均值大于0.5)。但分县来看,安新县遭受50 a一遇(177.1 mm)、雄县遭受100 a一遇(208.0 mm)的极端降水时可能发生内涝。

(2) 在水利设施条件不变、主汛期降水量均值增加10%的情况下,如果再遭受230 mm(相当于现50 a一遇日最大降水增加30%)以上极端降水时,雄安新区(均值状态)可能会发生内涝灾害。其中,安新遭受160 mm(相当于现20 a一遇日最大降水增加30%)、雄县遭受200 mm(相当于30 a一遇日最大降水增加30%)以上极端降水时就可能发生;容城即使降水极值再增加30%,也不大可能发生内涝灾害。

3.4 发生高等级洪涝灾害的风险评估

相较于是否发生洪涝灾害,我们更关心雄安新区发生高影响等级洪涝灾害事件的风险。对此,本文进一步地将洪涝灾害等级变量作为被解释变量,考察不同等级洪涝灾害事件的发生概率。此时,加入是否因洪致灾变量,以考察上游洪水对雄安新区洪涝灾害等级的影响。

有序多分类logit模型必须满足比例优势假定条件,而当洪涝灾害等级变量划分为5个等级分类时,经检验多数自变量不满足这一假定条件。本文采取以下三种方式合并洪涝灾害等级分类进行估计:一是将受灾面积大于30%的洪涝灾害等级合并(即2级及以上洪涝灾害合并分类为2、1级洪涝灾害为1、未发生为0),重新设定洪涝灾

害等级变量(grade1),经检验模型满足比例优势假定条件,可采用有序logit模型。二是将受灾面积是否大于15%作为分类标准(2级及以上洪涝灾害为1、以下为0),生成新的二分类洪涝灾害等级变量(grade2),采用二分类logit模型。三是将受灾面积是否大于30%作为分类标准(3级及以上洪涝灾害为1、以下为0),生成另一种洪涝灾害等级分类(grade3),也采用二分类logit模型。

为保证估计结果的稳健性,本文考虑了可能会因有限样本和稀有事件而存在的偏差问题。在按照等级划分的洪涝灾害中,较高等级洪涝灾害发生频次较低(2级以上占12.26%、3级以上占5.81%)。尽管并不十分少见,但在有限样本容量下,则可能放大有限样本偏差的影响。对此,本文采取两种方法解决有限样本和稀有事件偏差^[20]。方法一是使用King和Zeng针对稀有事件和有限样本提出的偏差修正估计logit模型^[21];方法二是使用非对称的补对数-对数模型,该模型使用极值分布,相较于逻辑分布的原点对称,事件发生概率趋于1的速度快于趋于0的速度,适用于二值因变量中一个结果相对于另一个结果很少的情况。

表6采用不同估计方法分别对三种洪涝灾害等级分类的被解释变量进行回归。从回归(5)~(10)的结果可以看出,不同方法得到的估计系数有所差异,补对数-对数、稀有事件偏差修正logit回归的标准误比普通logit回归有所下降,变量的显著性基本没变,模型均通过了1%水平上的显著性检验,因此能够得到稳健的结果。有序多分类logit回归(4)的总体预测准确度相对较低,二分类普通logit、稀有事件偏差修正logit、补对数-对数模型回归

表6 不同等级分类洪涝灾害事件发生的估计结果

项目	grade1	grade2: 2级及以上洪涝灾害为1			Grade3: 3级及以上洪涝灾害为1		
	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	有序 logit	普通 logit	稀有事件 logit	补对数-对数	普通 logit	稀有事件 logit	补对数-对数
日最大降水量	0.222 9*** (0.075 3)	0.326 0*** (0.112 4)	0.290 3*** (0.108 9)	0.252 3*** (0.087 8)	-0.015 5 (0.118 2)	0.024 6 (0.114 5)	0.010 5 (0.100 3)
主汛期降水量	0.090 8*** (0.032 0)	0.071 7 (0.060 1)	0.064 9 (0.058 2)	0.070 8* (0.041 0)	0.262 2*** (0.068 4)	0.182 5*** (0.066 3)	0.215 4*** (0.053 9)
水利设施水平	-1.211 8*** (0.299 1)	-1.233 5*** (0.392 2)	-1.107 4*** (0.380 0)	-1.029 5*** (0.283 0)	-1.918 0*** (0.733 5)	-1.369 4* (0.710 6)	-1.655 7*** (0.636 8)
是否因洪致灾	3.500 0*** (0.957 6)	3.415 5*** (1.175 3)	3.000 5*** (1.138 6)	2.733 8*** (0.694 8)	3.177 2** (1.587 8)	2.582 7* (1.538 1)	2.573 9** (1.197 0)
常数项		-2.879 4 (1.757 3)	-2.622 7 (1.702 4)	-2.943 4*** (1.100 4)	-4.170 7** (1.783 3)	-3.440 8** (1.727 5)	-3.949 2*** (1.519 1)
准 R ²	0.367 6	0.512 2			0.631 9		
预测准确度/%	84.52	94.19	93.54	92.90	96.13	96.77	96.77

注:***、**、* 分别表示在1%、5%、10%水平上显著;括号内为稳健标准误。



的总体预测准确度较高且相差不大。同时,考虑到结果的可理解性和可应用性,本文主要按二分类洪涝灾害等级模型的估计结果进行分析。

不论采取何种等级分类方式,因洪致灾都是导致高等级洪涝灾害事件发生的最主要原因。在控制其他变量的情况下,因洪致灾将使高等级洪涝灾害事件发生的风险急剧上升。具体以普通二分类 logit 的回归结果看,发生 2 级及以上洪涝灾害等级的概率是其之下的 30 倍 ($Exp^{3.4155} = 30.4$, $p < 0.01$),发生 3 级及以上洪涝灾害等级的概率是以下的 24 倍 ($Exp^{3.1772} = 30.4$, $p < 0.01$)。总之,因洪致灾是雄安新区发生高等级洪涝灾害的决定性因素。

日最大降水量、主汛期降水量对于不同方式划分的高等级洪涝灾害事件发生的影响有所差异。从有序多分类 logit 模型(4)的回归结果看,日最大降水量、主汛期降水量均对较高等级洪涝灾害的发生有显著性影响。从二分类模型(5)~(10)的回归结果看,具体到 2 级及以上、3 级及以上等级洪涝灾害有明显差异。日最大降水量对于 2 级及以上洪涝灾害事件的影响显著,但对于 3 级及以上较大洪涝灾害事件的影响不显著。主汛期降水量对于 2 级及以上较大洪涝灾害事件的影响不显著,但对于 3 级及以上较大洪涝灾害事件则显著。也就是说,除因上游洪水致灾外,日最大降水量不大可能导致 3 级及以上洪涝灾害的发生;但如果主汛期降水过多,则会增加 3 级重大和 4 级特大洪涝灾害的发生概率。

水利设施对于控制高等级洪涝灾害的发生具有很大作用。不管采取何种等级分类方式,水利设施变量均在 1% 水平上显著为负,显示随着水利设施建设的不断推进,较高的水利设施建设水平能有效降低高等级洪灾灾害的发生概率。模型(5)的估计结果显示:水利设施建设某一阶段发生 2 级及以上较大洪涝灾害事件的概率,仅为前一

阶段的 0.29 倍 ($Exp^{-1.2335} = 0.29$, $p < 0.01$)。模型(10)结果则表明:发生 3 级及以上较大洪涝灾害事件的概率,则会进一步降低到前一阶段的 0.15 倍 ($Exp^{-1.9180} = 0.15$, $p < 0.01$)。

进一步地,分别估计各解释变量对于 2 级及以上、3 级及以上洪涝灾害发生的边际影响。通过对模型(5)~(7)、(8)~(10)回归结果的综合研判,对于 2 级及以上洪涝灾害事件,普通 logit 模型优于另两个模型;对于 3 级及以上洪涝灾害事件,补对数-对数模型优于其他模型。尽管三个模型估计出来的边际效应相差不大,但为稳妥起见,本文利用普通 logit 模型(5)、补对数-对数模型(10)分别估计各解释变量对于 2 级及以上、3 级及以上洪涝灾害事件发生的平均边际效应(见表 7)。表 7 平均边际效应的估计结果显示如下。

(1) 对于 2 级较大及以上洪涝灾害,日最大降水量的边际影响较大;每增加 10 mm,发生 2 级及以上洪涝灾害等级的平均概率将增加 1.70%。

(2) 对于 3 级较大及以上洪涝灾害,主汛期降水量的边际影响较大;每增加 10 mm,发生 3 级及以上洪涝灾害等级的平均概率将增加 0.55%。

(3) 因洪致灾是导致影响较高等级洪涝灾害发生的重要原因,如果因河流上游来水造成洪水泛滥,发生 2 级及以上、3 级及以上等级洪涝灾害的平均概率将分别增加 17.87%、6.56%。

(4) 水利设施建设的作用也很明显,水利建设水平每一阶段的提高,发生 2 级及以上洪涝灾害的平均概率则降低 6.45%,发生 3 级及以上洪涝灾害的平均概率则降低 4.22%。

(5) 比较有否洪灾发生时的边际影响,在洪水致灾的情况下,日最大降水量、主汛期降水量、水利设施水平的边

表 7 发生较高等级洪涝灾害的平均边际效应

项目	普通 logit 估计: 2 级及以上洪涝灾害			补对数-对数估计: 3 级及以上洪涝灾害		
	总体	无洪灾	有洪灾	总体	无洪灾	有洪灾
日最大降水量	0.017 0*** (0.004 9)	0.016 0*** (0.004 6)	0.048 8** (0.020 6)	0.000 3 (0.002 5)	0.000 2 (0.002 2)	0.000 9 (0.008 2)
主汛期降水量	0.003 7 (0.003 0)	0.003 5 (0.002 9)	0.010 7 (0.006 8)	0.005 5*** (0.001 7)	0.004 8** (0.001 9)	0.017 6*** (0.003 8)
水利设施水平	-0.064 5*** (0.018 0)	-0.060 6*** (0.017 4)	-0.184 6** (0.075 0)	-0.042 2*** (0.014 7)	-0.037 0*** (0.011 7)	-0.135 6** (0.056 4)
是否因洪致灾	0.178 7*** (0.053 3)			0.065 6** (0.029 8)		

注:***、** 分别表示在 1%、5% 水平上显著;括号内为 Delta-method 估计标准误。

际效应均大幅提高,其中日最大降水量、主汛期降水量的平均边际效应较无洪灾的情形提高了3倍多。

最后,估计气候变化情景下雄安新区发生高等级洪涝灾害的可能性。同样依据国家气候中心课题组和吴婕等所做的在中等排放情景(RCP4.5)下,到21世纪中期降水量变化的预测结果。由于在现有水利条件下,较高等级洪涝灾害发生概率低,而我们所关心的是极端天气气候事件,表8仅汇报日最大降水量极值增加15%和30%、主汛期降水量增加10%的情景下,雄安新区发生较高等级洪涝灾害的预测概率。其中2级及以上洪涝灾害基于普通logit模型,3级及以上洪涝灾害基于补对数-对数模型。计算结果如下所示。

(1) 当日最大降水量达到有记录的历史极值时,即使发生洪水泛滥致灾的情况,现有水利设施也能有效控制灾害的范围,雄安新区三县也不大可能发生2级及以上洪涝灾害。但如果在气候变化的影响下,日极端降水强度增加15%(300 mm)以上,且同时叠加洪水泛滥成灾,则可能有县域会发生2级及以上洪涝灾害。

(2) 当主汛期降水量达到355 mm以上时,若叠加上游洪水导致洪、涝同时发生,就可能有县域会发生3级及以上洪涝灾害;如果达到历史记录极值,则几乎可以完全肯定雄安三县至少有一个县会发生3级及以上洪涝灾害。而只有当主汛期降水极值增加10%,总体平均和无洪灾情形下才可能发生3级及以上洪涝灾害,但从显著性检验和置信区间看可信度很差。

4 主要结论与讨论

4.1 主要结论

极端天气气候事件所引发的洪涝灾害是雄安新区建设需要重点考虑的气候灾害,特别是在全球变暖的大背景下,气候变化增量因素对该区域洪涝灾害的影响应当予以高度重视。本研究从地方史料入手,整理、分析了最近70 a 雄安三县洪涝灾害发生及其等级在时间和空间上的特征;结合1960年以来雄安三县的气象资料,采用logit方法

估计了各种因素对洪涝灾害发生及其影响程度的边际效应;据此评估了未来气候变化的降水情景下,雄安新区洪涝灾害事件及高等级洪涝发生的风险。

(1) 从雄安地区总体情况看,最近70 a有39 a至少有一县发生过洪涝灾害,其中4级特大洪涝灾害(至少一县受灾面积比例>60%)10次,3级重大洪涝灾害(受灾面积比例30%~60%)7次,2级较大洪涝灾害(受灾面积比例15%~30%)11次,1级一般洪涝灾害(受灾面积比例<15%)11次。从时间变化特征看,20世纪80年代初期以前,几乎年年有洪涝灾害发生;之后,洪涝灾害的发生频率和影响等级明显降低。从空间分布特征看,安新洪涝灾害发生频次高,平均2 a一遇;容城洪涝灾害明显较少,平均10 a一遇。从洪涝灾害的类型看,雄安三县71次县域洪涝灾害中有涝灾42次、洪灾29次,洪灾的灾情普遍较重,且多发生在1965年以前。

(2) 日最大降水量(或连续最大降水量)、主汛期降水量是影响洪涝灾害发生的最重要降水指标,日最大降水量、主汛期降水量每增加10 mm,发生洪涝灾害的平均预测概率将分别增加1.46、0.79个百分点。水利设施对控制洪涝灾害发生的效果明显,地形因素的作用也十分明显。按时间分组估计的平均边际效应,日最大降水量、主汛期降水量的变化很小;水利设施的阶段影响边际递增,1974—2018年比1960—2018年提高了2倍多。按县域个体分组的估计结果,日最大降水量、主汛期降水量对安新县是否发生洪涝灾害的边际效应最大,对容城县的影响最低;当然水利设施建设的效果也同样如此。

(3) 因洪致灾是导致高等级洪涝灾害事件发生的决定性因素。日最大降水量、主汛期降水量对高等级洪涝灾害事件发生的影响有明显差异。日最大降水量对于2级及以上较大洪涝灾害事件的影响显著,但不大可能导致3级及以上洪涝灾害的发生;主汛期降水量对于3级及以上较大洪涝灾害事件影响显著,如果汛期降水过多,会增加3级重大和4级特大洪涝灾害的发生概率。

(4) 依据已有研究对气候变化降水量的预测结果,估

表8 气候变化情景下高等洪涝灾害的预期发生概率(现有水利设施条件)

项目	2级及以上洪涝灾害			3级及以上洪涝灾害		
	日降水极值	增加15%	增加30%	主汛期降水	极值	增加10%
(降水量)	(263.4 mm)	(302.9 mm)	(342.4 mm)	(355 mm)	(431.0 mm)	(474.1 mm)
总体样本	0.086 8***	0.100 5***	0.116 3***	0.081 5	0.295 0	0.553 6
无洪灾发生	0.058 4***	0.070 9***	0.085 9*	0.056 4	0.258 0	0.530 0
有洪灾发生	0.451 2***	0.508 7***	0.566 8***	0.532 9*	0.979 8***	0.999 9***

注:***、**、* 分别表示在1%、5%、10%水平上显著。

计了极端情况下洪涝特别是高等级洪涝灾害发生的风险。在现有水利设施不变的情况下,安新县遭受 50 a 一遇(177 mm)、雄县遭受 100 a 一遇(208 mm)的日最大降水时,可能会发生内涝灾害;雄安新区起步区所在的容城县,即使日降水极值再增加 30%(342 mm),也不大可能发生内涝灾害。高等级洪涝灾害只有在叠加洪水泛滥致灾的情形下,日降水极值增加 15%(300 mm)以上,雄安三县中可能有县域会发生 2 级及以上洪涝灾害;主汛期降水量达到 355 mm 以上,可能有县域会发生 3 级及以上洪涝灾害。

4.2 对适应措施的讨论

基于本文的研究,对气候变化下雄安新区的建设适应措施提出如下建议。

(1) 从流域的层面规划和布局防洪体系建设。依据本文分析,因洪致灾是雄安新区发生高等级洪涝灾害的决定性因素。因此确保雄安新区不发生大的洪涝灾害,不能仅重视加大雄安新区的防洪排涝设施建设,还要考虑白洋淀上游防洪、拦蓄能力以及下游的排洪、蓄洪能力,加大流域性防洪设施建设。雄安新区的防洪建设标准应与上下游相匹配。

(2) 以顺应自然的思维谋划区域洪涝灾害的防治体系。根据历史统计,雄安地区洪涝发生频次最高、灾情最重的区域主要还是白洋淀区及周边,特别是在安新县(辖白洋淀 85% 面积)。应最大限度的减少对白洋淀的开发利用,加大白洋淀生态空间的治理和保护,恢复和提高其生态功能,充分发挥其天然的缓洪滞洪能力。同时在科学研究地理、水文因素的基础上,因地制宜地规划区域防洪排涝系统,使之能够适应原有的自然排水和滞蓄环境,则可大大减轻整个雄安地区洪涝灾害发生的风险。

(3) 按灾害风险等级分区确定内涝防治标准,适度提高安新等风险等级高区域的内涝防治标准。降水量对雄安三县是否发生洪涝灾害的边际影响有很大差异,日最大降水量、主汛期降水量对安新县的边际影响比容城县高 3~4 倍。在气候变化的极端降水情景下,安新县域范围发生洪涝灾害的风险等级远高于雄县和容城。因此,外围组团及其县域的内涝防治标准应根据洪涝灾害风险的评估结果确定,不宜采取统一的内涝防治标准。

(4) 以韧性城市建设,应对气候变化增量因素对于城市内涝的影响。城市内涝是未来雄安新区防治洪涝灾害的重点。除加强城市排水防涝设施的规划建设外,更应以低影响开发理念,营造合理的“三生空间”,将雄安新区起步区及外围组团的建设规划与土地利用规划、城市水系、园林绿地和道路系统规划相结合,最大限度减少对开发区

域原有水文特征和水循环路径的破坏,增强防控城市内涝的生态韧性,以较低的成本应对极端天气事件不确定性风险的冲击。

(编辑:于杰)

参考文献

- [1]安新县地方志编纂委员会. 安新县志[M]. 北京: 新华出版社,2000.
- [2]安新县水利志编纂委员会. 安新县水利志(未出版)[M]. 1995.
- [3]雄县县志编纂委员会. 雄县志[M]. 北京: 中国社会科学出版社,1992.
- [4]雄县水利志编纂委员会. 雄县水利志[M]. 北京: 中国社会科学出版社,1994.
- [5]容城县地方志编纂委员会. 容城县志[M]. 北京: 方志出版社,1999.
- [6]郝志新,熊丹阳,葛全胜. 过去 300 年雄安新区涝灾年表重建及特征分析[J]. 科学通报,2018,63: 2302-2310.
- [7]吴婕,高学杰,徐影. RegCM4 模式对雄安及周边区域气候变化的集合预估[J]. 大气科学,2018,42(3): 696-705.
- [8]温泉沛,周月华,霍治国,等. 气候变暖背景下东南地区暴雨洪涝灾害风险变化[J]. 生态学杂志,2017,36(2): 483-490.
- [9]吴绍洪,高江波,邓浩宇,等. 气候变化风险及其定量评估方法[J]. 地理科学进展,2018,37(1): 28-35.
- [10]胡恒智,顾婷婷,田展. 气候变化背景下的洪涝风险稳健决策方法评述[J]. 气候变化研究进展,2018,14(1): 77-85.
- [11]DOTTORI F, SZEWCZYK W, CISCAR J C, et al. Author correction: increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming[J]. Nature climate change, 2018.
- [12]张君枝,袁冯,王冀,等. 全球升温 1.5℃和 2.0℃背景下北京市暴雨洪涝淹没风险研究[J/OL]. 气候变化研究进展, 2019: 1-12. [2019-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5368.P.20191210.1025.002.html>.
- [13]安新县地方志编纂委员会编. 安新县志: 1978—2008[M]. 北京: 方志出版社,2017.
- [14]雄县县志编纂委员会. 雄县志: 1990—2012[M]. 石家庄: 河北人民出版社,2018.
- [15]容城县地方志编纂委员会. 容城县志: 1990—2010[M]. 北京: 九州出版社,2018.
- [16]《中国气象灾害大典》编委会编. 中国气象灾害大典·河北卷[M]. 北京: 气象出版社,2007.
- [17]周月华,彭涛,史瑞琴. 我国暴雨洪涝灾害风险评估研究进展[J]. 暴雨灾害,2019,38(5): 494-501.
- [18]冉世民. 根治海河“治水大军”用奋斗成就梦想[N]. 河北日报,2018-05-31(11).
- [19]黄崇福,郭君,艾福利,等. 洪涝灾害风险分析的基本范式及其应用[J]. 自然灾害学报,2013,22(4): 11-23.
- [20]陈强. 高级计量经济学及 Stata 应用[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社,2014: 180-182.
- [21]KING G, ZENG L. Logistic regression in rare events data [J]. Political analysis, 2001, 9(2): 137-163.

Risk evaluation for flood waterlogging disasters in the Xiongan New Area under climate change

SHENG Guang-yao¹ LIAO Yao-ming² HU Hai-bo³

(1. Thinktank for Eco-Civilization Studies , Chinese Academy of Social Sciences , Beijing 100732 , China;

2. Division of Ecological Climate Assessment , National Climate Center , Beijing 100081 , China;

3. Urban Climate and Ecology Development Research Center , Institute of Urban Meteorology , Beijing 100089 , China)

Abstract Flood waterlogging disasters are a major concern in the planning and construction of the Xiongan New Area , which has been attacked by several severe flood and waterlogging disasters in history. Therefore , it is a great issue of concern for the society especially under the circumstance of climate change. This article collected the local historical records for flood and waterlogging disasters and set up a data set of flood waterlogging disasters of the Xiongan New Area from 1949 to 2018. The flood waterlogging disaster events and their consequences along with the features of change in time and space during the past 70 years were further analyzed. Based on the rainfall observation data since 1960 and by means of logit estimation , the article analyzed the marginal effect of various influence factors on the occurrence of flood waterlogging disasters and the disaster grade. It also evaluated the risk of flood waterlogging disasters and high-grade disasters in the Xiongan New Area under extreme rainfall conditions in the future. The study found that: ①Xiongan New Area experienced flood waterlogging disasters in 39 of the past 70 years. However , from the time change perspective , the frequency and the disaster level of flood waterlogging disasters showed a significant drop since the 1980s. From the perspective of space distribution , Anxin County with the highest frequency was disaster-stricken once every two years , and Rongcheng County with the lowest frequency once every ten years. ②The daily maximum rainfall (or consecutive maximum rainfall) and the rainfall in the main flood period are the most important rainfall indicators affecting the occurrence of flood waterlogging disasters. Water conservancy facilities have significant effects on controlling the occurrence of flood waterlogging disasters , so do the topographical factors. And the flood-caused disaster is the decisive factor leading to the occurrence of severe flood waterlogging disasters. ③By virtue of current water conservancy facilities , Anxin County may face the waterlogging hazard when encountering the daily maximum rainfall of once-in-50-year (177mm) and Xiongan County of once-in-100-year (208mm) . Rongcheng County including the start-up area of the Xiongan New Area will not face any waterlogging hazard danger even when the extreme value of daily rainfall increases by 30% . ④Extreme local heavy rainfall is not severe enough to cause high-grade flood waterlogging disasters. High-grade disasters will only happen when flood and waterlogging happen simultaneously. When the daily extreme value of rainfall rises by 15% (300mm) or above , some counties will suffer from a flood waterlogging disaster of grade 2 and above; when the rainfall during the major flood period amounts to 355mm or above , some counties will possibly have a disaster of grade 3 and above. On the basis of such analysis , the article finally discussed relevant adaptation measures for flood waterlogging disasters in the Xiongan New Area.

Key words Xiongan New Area; flood waterlogging disaster; risk evaluation; historical document