

DOI: 10.20103/j.stxb.202206271828

林梦婧, 石龙宇, 陈丁楷, 和思楠. 区域综合生态风险评价框架——以雄安新区为例. 生态学报, 2023, 43(18): 7566-7584.

Lin M J, Shi L Y, Chen D K, He S N. A regional ecological risk assessment framework: case study of Xiong'an New Area. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7566-7584.

# 区域综合生态风险评价框架 ——以雄安新区为例

林梦婧<sup>1,2</sup>, 石龙宇<sup>1</sup>, 陈丁楷<sup>1,\*</sup>, 和思楠<sup>1,2</sup>

1 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 构建区域生态风险评价框架有助于清晰地识别、评估、模拟、预测与管理区域生态风险, 进而为区域生态安全网络构建和生态安全格局保障提供支撑。雄安新区的建设, 使该区域面临巨大的土地利用变化, 对区域生态系统的结构和功能产生不可忽视的影响, 洪涝和干旱灾害对雄安新区及其周边区域生态系统具有显著的威胁。以雄安新区为例, 构建包含暴露-响应关系、人为源和自然源相结合的区域综合生态风险评价框架, 分别对城市化和气候变化背景下的雄安新区土地利用变化、洪涝灾害、干旱灾害三类胁迫引起的区域生态风险进行了评价和预测, 确定其生态风险空间分布特征及变化趋势。结果表明: (1) 从时间序列上来看, 由于气候变化导致洪涝、干旱等自然灾害的影响, 加上雄安新区的土地利用变化, 雄安新区的生态风险在 2025 年后有所上升, 但有序的规划和良好的地类配置使得雄安新区起步区在 2025 年后生态风险程度下降; (2) 从空间上看, 雄安新区风险高值区主要集中在白洋淀区以西和以南, 以及新区东北部部分区域。最后, 从土地利用管理、洪涝和干旱灾害预防等角度提出了生态风险防控对策: (1) 雄安新区应坚持对土地利用的合理规划和严格管理, 切实防止土地的无序利用, 密切关注景观生态风险程度较高地区的土地利用变化趋势, 必要时进行土地整理工作; (2) 雄安新区未来应主要关注常规洪水造成的生态风险, 加固新安北堤, 构建起步区洪涝灾害安全区域, 并充分利用湿地实现蓄滞洪水和排涝功能; (3) 雄安新区应重点关注北部区域干旱灾害生态风险防治工作, 同时尽量保证白洋淀及周边河流水体的水位, 保持湿地生态系统健康。

**关键词:** 生态风险评价框架; 雄安新区; 景观生态风险; 灾害生态风险; 区域生态风险

## A regional ecological risk assessment framework: case study of Xiong'an New Area

LIN Mengjing<sup>1,2</sup>, SHI Longyu<sup>1</sup>, CHEN Dingkai<sup>1,\*</sup>, HE Sinan<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Building a regional ecological risk assessment framework helps to clearly identify, evaluate, simulate, predict and manage regional ecological risks, and then provide support for the construction of regional ecological security networks and the protection of ecological security patterns. The construction of Xiong'an New Area has caused the area to face huge land use changes, which has a non-negligible impact on the structure and function of the regional ecosystem. Floods and droughts have a significant threat to the ecological system of Xiong'an New Area and its surrounding areas. Taking Xiong'an New Area as an example, a regional comprehensive ecological risk assessment framework including exposure-response relationship, anthropogenic and natural sources is constructed, and the land use change, flood disaster, drought in Xiong'an

**基金项目:** 福建省自然科学基金项目(2022J01508); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA23030201)

**收稿日期:** 2022-06-27; **网络出版日期:** 2023-05-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dkchen@iue.ac.cn

an New Area under the background of urbanization and climate change respectively The regional ecological risks caused by the three types of disaster stresses were evaluated and predicted, and the spatial distribution characteristics and changing trends of the ecological risks were determined. The results show that: (1) From the perspective of time series, due to the impact of natural disasters such as floods and droughts caused by climate change, coupled with land use changes in Xiong'an New Area, the ecological risk of Xiong'an New Area will increase after 2025, but orderly planning and good land allocation will reduce the ecological risk level of the starting area of Xiong'an New Area after 2025; (2) From a spatial perspective, the high-risk areas of Xiong'an New Area are mainly concentrated in the west and south of Baiyangdian Lake, and some areas in the northeast of the new area. Finally, ecological risk prevention and control countermeasures are put forward from the perspectives of land use management, flood and drought disaster prevention: (1) Xiong'an New Area should adhere to reasonable planning and strict management of land use, effectively prevent disorderly use of land, and pay close attention to land use change trends in areas with a high degree of landscape ecological risk and carry out land consolidation when necessary; (2) Xiong'an New Area should focus on the ecological risks caused by conventional floods in the future, strengthen the Xin'an North Embankment, build a safe area for flood disasters in the starting area, and make full use of the wetland to realize the functions of flood storage and drainage; (3) Xiong'an New Area should focus on the prevention and control of drought disaster ecological risks in the northern area, and at the same time try to ensure the water level of Baiyangdian Lake and surrounding rivers to maintain the health of the wetland ecosystem.

**Key Words:** ecological risk assessment framework; Xiong'an New Area; landscape ecological risk; hazard ecological risk; regional ecological risk

生态风险是指某种实体或行为对生态系统或其组分产生负面生态效应的可能性<sup>[1-2]</sup>,传统的生态风险评价大多针对单一风险源对特定研究区域内一类<sup>[3-6]</sup>或几类<sup>[7]</sup>代表性风险受体的负面生态效应开展研究。与单一风险源的生态风险问题相比,区域性问题可能由多因素造成<sup>[8]</sup>,因此,有别于单一风险源的生态风险评价,区域生态风险评价方法强调综合性与空间异质性<sup>[9-12]</sup>,其结果往往是相对风险程度的空间分布<sup>[10]</sup>。随着城市化进程的推进,区域生态环境问题日益突出,开展区域生态风险评价,明确区域生态风险空间分布特征和发展趋势,识别关键生态风险类别及其影响区域,是生态安全格局构建和保障的重要前提。

由于生态风险评价的时空尺度逐渐扩大,区域生态系统中各具体要素也亟需实现完整评估<sup>[10, 13]</sup>。因此,生态风险评价需要系统性更强的研究方案,相对于传统生态风险评价方法,区域生态风险评价框架构建了一套规范的评价内容<sup>[14]</sup>,为有效指导风险评价提供了依据。自 20 世纪 80 年代以来,许多国家构建了生态风险评价框架,其中,最常用的框架是美国国家研究委员会根据人类健康风险评价框架<sup>[15]</sup>构建的 USEPA 框架 (United States Environmental Protection Agency, USEPA),它由计划、问题形成、分析、风险表征和风险管理组成<sup>[2]</sup>;同时,许多国家和地区也制定了适应当地的生态风险评价框架<sup>[16]</sup>;一些研究提出了生态风险分级评估程序 (PETAR)、相对风险模型 (RRM) 和湿地生态风险评价方法等<sup>[2, 9, 11, 17-19]</sup>用于评估生态风险。

国内学者对于生态风险评价框架研究起步较晚,目前主要是对于岛屿生态风险<sup>[20-21]</sup>、城市生态风险<sup>[1]</sup>等进行生态风险评价框架构建,全球各区域在面临人类活动造成的压力的同时,自然灾害频率不断增长,人类活动和自然灾害都是区域生态风险的主要风险源,在人为风险源方面,土地利用<sup>[22]</sup>、空间占用<sup>[1]</sup>、景观生态风险<sup>[13, 23-25]</sup>评价较多,在自然风险源方面,大都关注在重金属沉积物、毒理学指标、内涝灾害<sup>[26]</sup>、水质风险评价<sup>[27-28]</sup>等。对于整体生态风险评价,蒙古军<sup>[29]</sup>等建立了区域生态风险概念模型,并从综合风险概率及生态脆弱度指标构建了生态风险评价指标体系;Tang<sup>[1]</sup>等构建了城市生态风险评价框架;康鹏<sup>[30]</sup>等系统梳理了生态系统服务在生态风险评价中的应用并分析了评估过程中生态风险表征方法;Ni<sup>[31]</sup>等利用多云增强模糊支持向量机建立了基于混合模型的生态风险评估框架;Lu<sup>[32]</sup>等结合马尔可夫、等效因子评价模型和地理信息系统方法等,提出了整合生态系统价值和不确定性的区域生态风险评估框架并以湖北省为例进行计算;

Wang<sup>[33]</sup>将生产功能指数、生活功能指数和生态功能指数纳入区域生态风险评价研究中,结合生态环境脆弱性指标形成区域生态风险评价框架。生态风险综合评价是从区域全方位考虑生态环境和可持续发展的关系,通过对全区域的生态分析,了解区域目前的生态状况、存在的生态风险及其程度,最终使城市获得更好的生态规划。本文基于暴露-响应关系,融合灾害风险评价框架,提出一个全新的区域生态风险评价框架并结合雄安新区进行案例研究。

2017年4月1日,中共中央、国务院决定设立雄安新区,雄安新区的设立对调整优化京津冀城市布局 and 空间结构具有重大现实意义和深远历史意义<sup>[34-35]</sup>。但是雄安新区环境较为敏感,生态环境脆弱<sup>[36]</sup>,随着雄安新区的建设,新区未来仍将发生巨大的变化,该区域面临着愈发严峻的生态环境形势<sup>[37]</sup>。目前,对雄安新区生态风险的研究主要集中在有机污染物、重金属等污染物排放以及水资源消耗胁迫下的生态风险<sup>[38-40]</sup>,一部分涉及雄安新区区域生态风险评价的研究属于简单的灾害风险图层的空间叠加<sup>[41]</sup>,缺乏从暴露-响应关系角度对区域风险进行评价的研究,也缺乏综合人为源和自然源对其生态风险进行综合评价。

因此,本文基于多源数据,构建包含暴露-响应关系、人为源和自然源相结合的区域综合生态风险评价框架,并以雄安新区为例,针对其土地利用变化、洪涝灾害、干旱灾害胁迫下的生态风险,结合景观生态风险和灾害生态风险评价方法,对包含人为源和自然源在内的雄安新区区域生态风险进行全面评价并提出防控对策,以期对雄安新区风险应对有所帮助,对雄安新区生态安全格局构建提供依据,助力雄安新区建设成为较高生态风险抵御能力的新型城市。

## 1 研究框架构建

### 1.1 基本框架

生态风险评价需要遵循一个程序性框架指导风险评价、展现评价构建的过程并提供评价结果的质量保证。USEPA 生态风险评价框架运用十分广泛,它具有一定的灵活性,理论上包含所有替代框架的特性(图1),因此本文在 USEPA 框架的基础上,参考 Tang<sup>[1]</sup>等提出的生态风险评价框架,综合不同文献资料,构建了一个包括自然源和人为源的生态风险评价综合框架,指标选取参考包括生态风险评价、生态健康评价、生态质量评价、生态安全评价等内容,借鉴了灾害生态风险评价的相关定义,参考了相关文献并进行修改。

### 1.2 综合生态风险评价框架

区域生态系统较为复杂,存在较大不确定性和空间异质性<sup>[42]</sup>。区域生态风险具有多风险源、多受体、多胁迫、多评价终点的特征。风险源往往是正常的生活生产活动或自然现象,可包括人为源和自然源;胁迫是由各风险源产生的可造成负面生态效应的物理、化学或生物实体及过程,城市化过程中人为源产生的胁迫可包括由于人口增长、产业发展、建设用地扩张等风险源引起的各类污染物排放、自然用地减少、景观格局变化等,自然源的胁迫主要包括台风、地震、洪涝、干旱、高温等;风险受体即风险的承担者,即暴露在胁迫下的个体、种群、群落或生态系统。

对研究对象区域开展区域生态风险评价之时,在问题形成阶段应该对该区域的各风险组分进行初步辨识,筛选主要风险源和受体,分析其主要的暴露途径,构建概念模型,形成评价方法。其中,暴露分析是指对胁迫

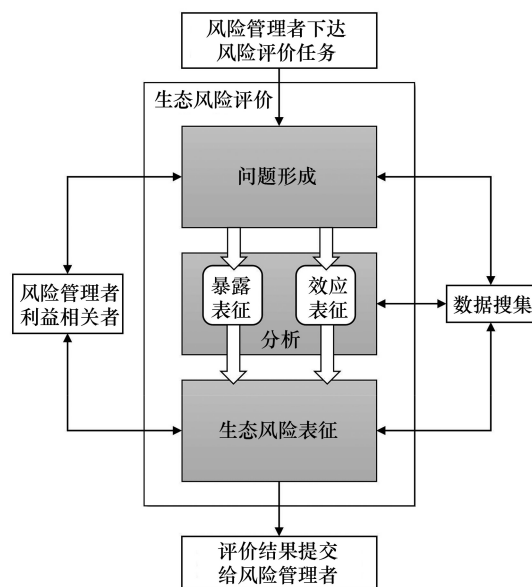


图1 USEPA 生态风险评价基本框架

Fig.1 USEPA basic framework for ecological risk assessment

USEPA: 美国国家环境保护局 United States Environmental Protection Agency



和受体时空分布过程的分析,例如暴露的频率、持续时间等;效应分析过程包括效应度量、生态反应分析和胁迫-反应概述,效应表征的最终结果,是要得到暴露程度与受体反应之间的关系,即“暴露-反应关系”;风险表征阶段包括风险评估和风险描述,风险评估是指将暴露表征得到的结果应用到暴露-反应关系模型,并根据生态效应估计风险程度或风险等级,以及分析相关不确定性的过程,风险描述是指将生态风险评价结果提交给风险管理者,并为其描述和说明评价结果具体意义的过程。

图2为主要生态风险类型及其各组分之间的关系,生态风险评价框架的构建,参考了部分生态安全的指标选取,根据生态风险评价的相关研究进行进一步探究。许多学者根据不同的方法进行风险源的划分,本文依据大众较为熟知或是研究过的人为风险源和自然风险源<sup>[43-44]</sup>进行划分,其中人为源的胁迫从不透水面增多<sup>[45]</sup>、自然用地减少<sup>[46]</sup>、景观生态格局改变<sup>[13, 23, 47]</sup>、污染物排放<sup>[39, 48-60]</sup>、资源消耗<sup>[61]</sup>、空间占用、路网变化<sup>[62-63]</sup>、能源开发<sup>[64-72]</sup>等角度划分<sup>[1, 73]</sup>,自然源的胁迫从水环境生态风险<sup>[74-79]</sup>、陆地环境生态风险<sup>[80-86]</sup>以及气候中的生态风险<sup>[78, 79, 87-94]</sup>进行划分,自然源风险主要指短期灾害,对于长期影响造成的结果,本文学者认为属于自然生态系统演化,因此不做考虑。由于“胁迫”是对“受体”产生作用,即“受体”暴露于“胁迫”之下,因此不直接将“胁迫”和“评价终点指标”直接连接,而是用大箭头直接连接。

评价终点即暴露于胁迫下的生态实体的某种属性,该属性可以反应生态实体的受损程度,选取准则主要包括五个方面:政策目标与社会价值、生态学关联、易感性、操作可定义性、合适的尺度<sup>[95]</sup>。生态系统服务是在一定时空内,生态系统单元实体结构和过程作用所能提供的生态功能与服务<sup>[96-97]</sup>,支撑着人类生存和社会发展<sup>[73]</sup>。因而实体可解释为生态过程,属性则是单元实体相对应功能和服务,相对于五大准则,生态系统服务中人类健康、人类福祉对应到准则中的政策目标与社会价值,生态系统服务易受到外界环境影响符合生态学关联和易感性等准则;在生态系统、景观等不同尺度生态系统服务已有较完善的评价指标和方法,符合操作可定义性和合适的尺度准则。因此,以上分析表明,生态系统服务相关特点与评价终点选取准则具有很高的契合度。总的来说,将生态系统服务引入生态风险评价中符合评价终点的条件,是理想的评价终点<sup>[30]</sup>。为了定量表征评价终点,同时设置了评价终点指标,评价终点指标内容主要参考以往学者选取指标,将不同文献的信息进行集成,为了从多侧面反映一个生态系统服务,一个评价终点对应多个评价终点指标。

## 2 研究方法

本研究以雄安新区为例,基于本研究提出区域综合生态风险评价框架,从问题分析的角度,对雄安新区生态风险类别进行初步辨识,确定雄安新区发展的关键生态风险类别,根据几个关键风险类别构建概念模型,建立了相应的指标体系,提出了暴露表征、效应表征和生态风险表征方法,对雄安新区区域生态风险进行了评价。

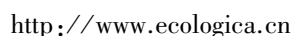
### 2.1 研究区概况

雄安新区地处京津冀腹地,规划范围包含原河北省保定市的雄县、安新县和容城县3个县及周边部分区域,土地规划总面积1770 km<sup>2</sup>。该区距北京、天津、保定三城市的距离仅为数十至百余公里,具有明显的区位优势。区内地势平坦,土壤肥沃,地表覆盖以农田为主,现有森林面积为199 km<sup>2</sup>,且分布零散,森林覆盖率11.3%,湿地335 km<sup>2</sup><sup>[98]</sup>,耕地占总面积的55%以上,境内分布有华北平原最大的湖泊——白洋淀。区域内居民点数量多,镇村混杂,总人口约113万人。近年来,由于人类活动,雄安新区生态环境受损,生态风险逐渐变高<sup>[99]</sup>。根据《河北雄安新区起步区控制性规划》,雄安新区起步区规划建设用地约100 km<sup>2</sup>,非建设用地约98 km<sup>2</sup>,其规划范围西依萍河、北靠荣乌高速、东接白沟引河、南临白洋淀<sup>[99]</sup>,计划到2022年对外骨干交通路网基本建成,到2025年对外交通、防洪水利等重大基础设施建成并投入使用,到2035年基本建成高质量高水平的社会主义现代化城市主城区,现代化基础设施系统完备。研究区地理位置如图3。

### 2.2 关键生态风险类别辨识

#### (1) 雄安新区关键生态风险初步识别





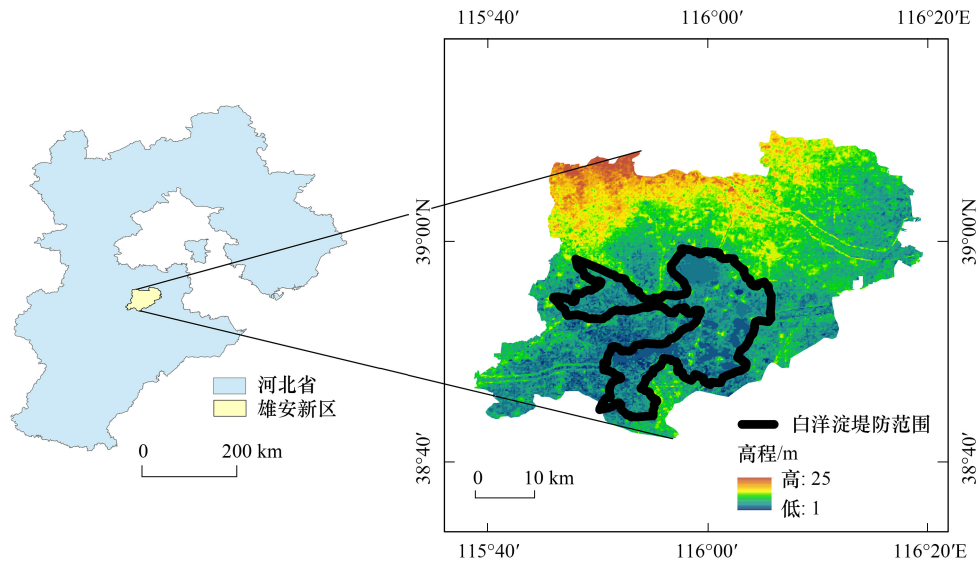


图3 研究区地理位置概况

Fig.3 Geographical location of the study area

DEM: 数字高程模型 Digital Elevation Model

雄安新区地处海河流域大清河中游,西北高东南略低,为缓倾平原,地形开阔,水系密集,地势低洼,夏季降水集中,上游山区洪水源短流急、预见期短,历史上洪涝灾害频发。郝志新<sup>[100]</sup>等 2018 年分析雄安新区 1715—2016 年洪涝灾害程度的年表发现,在过去 300 年间,雄安地区共发生洪涝灾害 139 次,平均 2 到 3 年发生 1 次。除了对人民生命财产安全造成危害,洪涝灾害对生态系统具有显著的威胁。尽管雄安新区范围内近些年随着降水量逐渐减少,涝灾发生次数明显降低,但根据历史上洪涝灾害发生的经验,雄安新区范围内洪涝灾害的危害程度仍然较大,雄安新区建设是千年大计,以史为鉴,洪涝灾害仍是该区域未来规划设计中需要考虑的重要生态风险胁迫之一。

目前,雄安新区范围内的土地利用受人类活动影响程度大,雄安新区本身及配套交通设施建设,尤其是雄安新区起步区的建设,使该区域面临巨大的土地利用变化,人类活动将极大地改变该区域的景观格局,从而在空间上对区域生态系统的结构和功能产生不可忽视的影响,有必要对该区域进行景观生态风险评价,从而评估人为源产生的区域生态风险。此外,洪涝和干旱灾害对雄安新区及其周边区域生态系统具有显著的威胁,其余自然源灾害的影响少见报道。

由此可见,雄安新区发展建设过程中的关键生态风险在于其城市化进程中的土地利用变化引起的区域生态系统的景观生态风险,此外还包括自然源产生的洪涝和干旱胁迫下的生态风险。

### 2.3 概念模型

USEPA 中提出的效应表征的结果,是要得到暴露程度与受体反应之间的关系,在区域尺度上,暴露和影响要在生境、受体上进行评估。由于区域生态系统结构、过程、功能的复杂度高,其在土地利用、洪涝、干旱等胁迫综合作用下的暴露-响应关系难以厘清,从可行性的角度出发,本文采用叠加法将土地利用、洪涝、干旱胁迫下区域生态系统的负面生态效应所产生的生态风险进行综合,参照图 2 的综合生态风险评价框架,根据雄安新区的真实情况,分别选取构造 3 类胁迫下的生态风险评价子系统,在此基础上叠加得到雄安新区区域综合生态风险评价内容,其中生态风险分析与表征如图 4。

具体而言,洪涝灾害生态风险从洪水水位、DEM 模型和土地利用出发,由洪水水位和 DEM 得出淹没深度,综合土地利用数据得出其负面生态效应,其中,权重由洪涝灾害重现期决定;干旱灾害负面生态效应由干旱灾害暴露程度和干旱脆弱度指数计算得出,用到的数据主要有干旱等级和频率、DEM 模型和土地利用数

据;景观生态风险程度由景观干扰度指数和景观脆弱度指数计算得出。

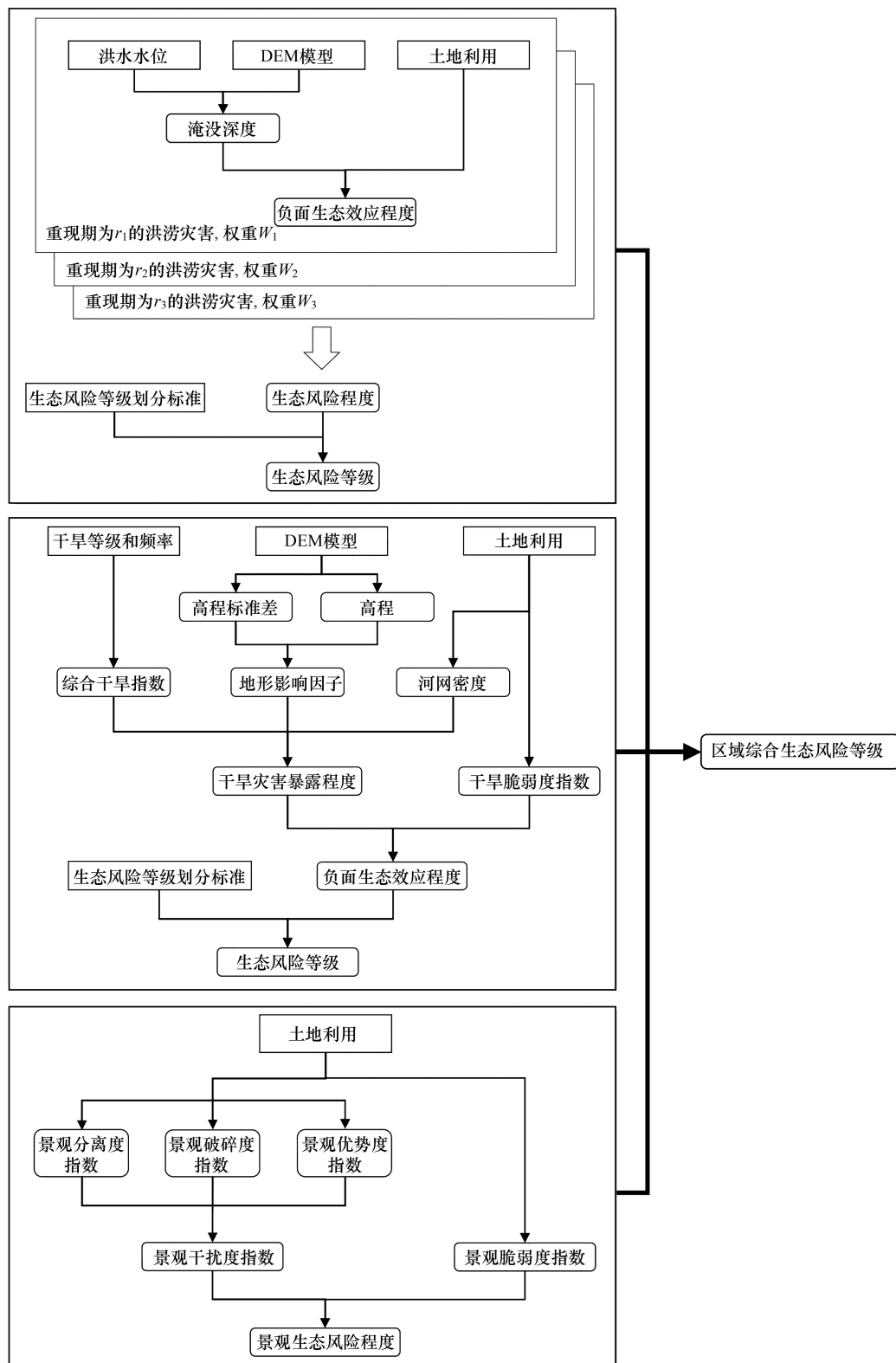


图4 雄安新区区域综合生态风险分析与表征

Fig.4 Analysis and characterization of regional comprehensive ecological risk in Xiong'an New Area



2.4 研究数据

本文研究的雄安新区区域生态风险主要来源于土地利用变化、洪涝灾害、干旱灾害 3 类胁迫,采用的数据主要是与这 3 类胁迫相关的土地利用、地形、气象、水文等数据,具体数据类别及其来源见表 1。

表 1 数据来源  
Table 1 Data Resources

| 数据名称 Data Name                                                                                                                                               | 数据来源 Data Resources                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 雄安新区土地利用现状图,雄安新区土地利用规划预测图(图 5,图 6)<br>Land use status map of Xiong'an New Area, land use planning and forecast map of Xiong'an New Area (Figure 5, Figure 6) | 河北省国土资源厅提供的 2014 年土地利用数据以及《河北雄安新区起步区控制性规划》中的土地利用预测图                                              |
| 雄安新区历年逐日降水量数据<br>Daily precipitation data of Xiong'an New Area over the years                                                                                | 中国气象局发布的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集 ( <a href="http://www.cma.gov.cn/">http://www.cma.gov.cn/</a> )    |
| 雄安新区现状的不同重现期洪水水位及未来的洪水水位数据<br>Flood water levels in different return periods of the current Xiong'an New Area and future flood water level data              | 《雄安新区规划编制进展汇报》提供的历史统计数据 and ARIMA 模型预测                                                           |
| 白洋淀逐日水位数据<br>Baiyangdian lake daily water level data                                                                                                         | 雄安新区安新县水文监测站逐日监测数据                                                                               |
| 雄安新区数字高程模型数据<br>Xiong'an New Area District Digital Elevation Model Data                                                                                      | ASTER GDEM V2 全球数字高程数据( <a href="https://www.gscloud.cn/">https://www.gscloud.cn/</a> )          |
| 雄安新区历年逐月降雨量、日照时数日均值、气温均值数据<br>Monthly rainfall, daily average sunshine hours, and average temperature data of Xiong'an New Area over the years               | 中国气象局发布的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集 (V3.0) <a href="http://www.cma.gov.cn/">http://www.cma.gov.cn/</a> |

ARIMA 模型:回归积分滑动平均模型 Auto regressive integrated moving average model

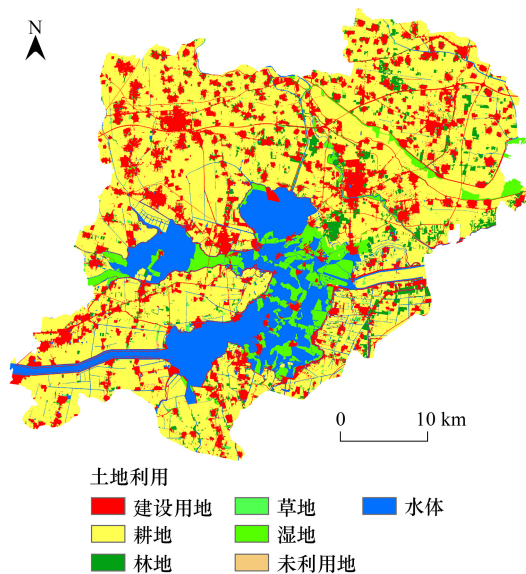


图 5 雄安新区土地利用现状图(2014 年)

Fig.5 Current land use status of Xiong'an New Area

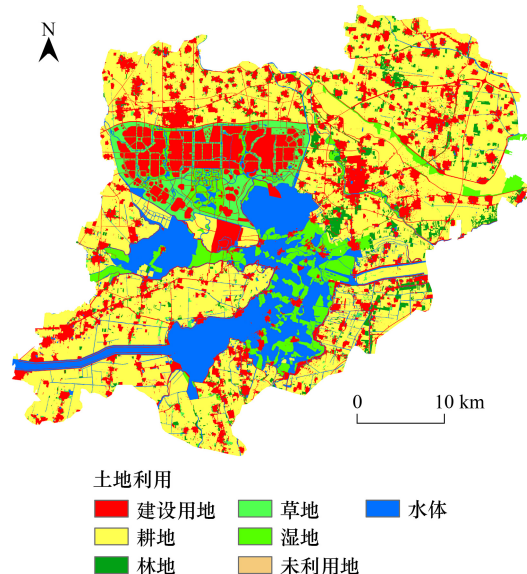


图 6 雄安新区土地利用预测图(《河北雄安新区起步区控制性规划》2025 年及其之后)

Fig.6 Predicted land use status of Xiong'an New Area

2.5 分析方法

基于风险比较的区域生态风险评价能够为决策者提供一个了解区域内生态风险空间分布的全局视角。在本研究过程中,鉴于洪涝生态风险与干旱生态风险的暴露过程、反应效应都不一致,针对不同胁迫分别进行灾害生态风险评价,在此基础上根据效应进行风险综合是比较合适的手段。同时,基于景观指数的生态风险评价能够从土地利用变化引起的景观格局改变反映人类活动对区域生态系统的影响。在区域层面的三个生

态风险评价综合,可以反应人类活动和气候变化等综合作用下的雄安新区生态风险的空间分布特征,为雄安新区后续规划、建设提供全局生态风险的视角。

## 2.6 土地利用胁迫下的景观生态风险评价子系统

本研究基于景观生态学的方法,将景观格局指数用于暴露表征和生态效应表征,最终获得景观生态风险等级的空间分布。

使用景观干扰度指数表征土地利用变化胁迫下的暴露程度,通过景观破碎度指数、景观分离度指数、景观优势度指数计算景观干扰度指数。为研究空间异质性,将研究区域划分为若干网格。对于网格  $i$ ,其景观干扰度指数  $E_i$  的计算方法来源于参考文献<sup>[101]</sup>,具体计算公式如下:

$$Ex_i = aCn_i + bSn_i + cDn_i \quad (1)$$

式中, $Cn_i$ 为景观破碎度归一化指数, $Sn_i$ 为景观分离度归一化指数, $Dn_i$ 为景观优势度归一化指数。参考已有研究成果<sup>[101]</sup>,将其权重  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别设置为 0.5、0.3 和 0.2。

使用景观脆弱度指数表征土地利用胁迫下的负面生态效应强度。景观脆弱度指数体现了各种景观类型保持其当前的结构和功能的内部能力,反映了各景观类型生态系统在受到外界干扰时的易损程度。本研究中,针对研究区景观类型的实际情况,借鉴他人的研究成果,将不同景观类型的脆弱性等级划分为 7 个等级,然后按照每种景观类型的脆弱性等级进行归一化处理,获得景观脆弱度系数<sup>[101]</sup>,负面生态效应程度计算方式如下:

$$E_i = Ex_i \times \sum_{j=0}^n (V_j \times P_{ij}) \quad (2)$$

式中, $E_i$ 表示第  $i$  个网格单元的负面生态效应程度值; $Ex_i$ 表示第  $i$  个网格单元的景观干扰度指数; $V_j$ 表示第  $j$  个景观类型的景观脆弱度系数, $P_{ij}$ 表示第  $i$  个网格单元中第  $j$  个景观类型的占比。

对负面生态效应程度进行归一化处理,得到生态风险程度值,其具体公式为:

$$R_i = \frac{E_i - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (3)$$

式中, $R_i$ 表示第  $i$  个网格单元的风险程度值; $E_i$ 表示第  $i$  个网格单元的负面生态效应值; $E_{\max}$ 表示所有  $E_i$  中的最大值; $E_{\min}$ 表示所有  $E_i$  中的最小值。式中的  $E_{\max}$  和  $E_{\min}$  分别统计所有时间阶段所有地理单元的  $E_i$  中的最大值和最小值,从而除了统一时间阶段内地理单元的风险程度比较以外,还可以实现不同时间阶段的风险程度比较。

## 2.7 洪涝灾害胁迫下的区域生态风险评价子系统

根据洪涝灾害胁迫下的区域生态风险评价子系统框架模型,将研究区域划分成若干空间单元,针对指定重现期的洪涝灾害,以空间单元为单位进行暴露分析和效应分析。由不同重现期洪水水位和 DEM 模型结合得到淹没深度,再结合不同淹没深度和土地利用类型对应的负面效应程度值计算负面生态效应程度,最终综合不同重现期的负面生态效应程度值计算风险程度值。

### (1) 洪水水位预测

计算雄安新区逐年极端气候指标与洪峰水位相关关系,其中极端气候指标选择每年 7、8 月份间与降水相关的 9 个指标,分别是日降水强度(SDII),年降水量(PRCPTOT),日最大降水量(RX1day),连续 5 日最大降水量(RX5day),强降水量(R95p),极强降水量(R99p),日降水量  $\geq 10$  mm 日数(R10),日降水量  $\geq 20$  mm 日数(R20),日降水量  $\geq 50$  mm 日数(R50)。选择其中相关系数最大的指标(记为指标 ECI)预测洪峰水位。对选定的极端气候指标和洪峰水位数据做回归,得到回归方程:

$$H = aP + bH \quad (4)$$

式中, $H$  表示历年洪峰水位,单位 m; $P$  表示历年 7、8 两个月份的 ECI 指标值; $a$ 、 $b$  为系数。

构建 ARIMA 模型。使用 ARIMA 模型对 1955—2020 年 7、8 月份的 ECI 指标值进行拟合。ARIMA 模型预测 2025 年、2035 年 ECI 指标值分别为  $ECI_{2025}$ 、 $ECI_{2035}$ 。从残差分布角度预测 2025 年和 2035 年不同概率下

的 ECI 值,从而预测不同概率下的水位,带入公式,可计算出雄安新区 2025 年和 2035 年两个时期的十年一遇、二十年一遇和百年一遇的洪水水位预测值。

$$H_{ar} = a(ECI_a + ER_r) + b \quad (5)$$

式中,  $H_{ar}$  表示第  $a$  年的重现期为  $r$  的洪水水位预测值,单位  $m$ ;  $ECI_a$  表示第  $a$  年 7、8 两个月份的 ECI 指标模拟值;  $ER_r$  表示重现期为  $r$  的 ECI 指标残差值;  $a$ 、 $b$  为系数。

### (2) 淹没深度计算

通过预测或统计历史洪涝灾害数据,得到不同重现期的洪水水位  $H_{ar}$ 。针对每一个时期单独进行生态风险分析,结合该时期不同重现期的洪水水位  $H_r$  和数字高程模型 DEM 的高程数据  $A$ ,得到淹没深度:

$$D_{ri} = H_r - A_i \quad (6)$$

式中,  $D_{ri}$  表示第  $i$  个地理单元重现期为  $r$  的洪水淹没深度;  $H_r$  表示重现期为  $r$  的洪水水位;  $A_i$  表示第  $i$  个地理单元的高程。

$D_{ri}$  表征区域地理单元  $i$  在重现期为  $r$  的洪涝灾害下的暴露分布情况。

### (3) 效应分析

暴雨洪涝灾害负面生态效应取决于淹没深度以及受淹没区域的土地利用类型。具体表征函数<sup>[102]</sup>为

$$E_{ir} = f(L_i, D_{ir}) \quad (7)$$

式中,  $E_{ir}$  表示第  $i$  个地理单元在重现期为  $r$  的洪水灾害胁迫下的生态效应强度;  $D_{ri}$  表示第  $i$  个地理单元重现期为  $r$  的洪水淹没深度;  $L_i$  表示第  $i$  个地理单元的土地利用类型。

### (4) 洪涝灾害风险程度计算

不同土地利用类型暴雨洪涝灾害表征函数参考文献得出,根据不同重现期洪水发生频率,确定不同重现期洪水生态效应的风险权重  $W_r$ ,具体计算方法如下:

$$W_r = F_r / \sum_{r=1}^n F_r \quad (8)$$

式中,  $W_r$  表示重现期为  $r$  的洪涝灾害的风险权重;  $F_r$  表示重现期为  $r$  的洪涝灾害发生的频率。

综合生态效应计算方式如下:

$$E_i = \sum_{r=1}^n W_r \times E_{ir} \quad (9)$$

式中,  $E_i$  表示第  $i$  个地理单元的综合生态效应值;  $E_{ir}$  表示第  $i$  个地理单元在重现期为  $r$  的洪水灾害胁迫下的生态效应强度;  $W_r$  表示重现期为  $r$  的洪涝灾害的风险权重。

采用公式(3)对负面生态效应程度进行归一化处理,得到生态风险程度值。

## 2.8 干旱灾害胁迫下的区域生态风险评价子系统

目前大部分干旱灾害风险评价工作以干旱等级或干旱指数作为灾害因子,或进一步地,以计算干旱指数的指标作为暴露因子,以人口、经济、土地利用等指标作为敏感度因子。干旱灾害负面生态效应取决于干旱胁迫下的脆弱度和暴露程度,对于干旱灾害胁迫下的负面生态效应程度进行归一化处理获得风险程度值。本研究中,在综合生态风险评价框架下,将前述的几个干旱灾害风险评价指标用于暴露表征和效应表征,最终计算生态风险程度,确定生态风险等级。

### (1) 干旱等级预测

采用国家标准《气象干旱等级 (GB/T 20481—2017)》中推荐的标准化降水蒸散指数 (Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 计算方法计算雄安新区 1955—2020 年年尺度的 SPEI 值。其中潜在蒸散量 PET 根据 Thornthwaite 方程计算。将雄安新区气象干旱等级划分为特旱、重旱、中旱、轻旱、无旱 5 个等级的干旱类型,根据 SPEI 值赋予其干旱指数,用于计算综合干旱指数,具体等级划分标准及干旱指数如表 2 所示。统计雄安新区 1955—2020 年干旱等级的频率,判断雄安新区现状各干旱等级发生的概率。另外,根据 1955 年—2020 年旱情年际转换关系,构建马尔科夫转移矩阵。根据 2020 年雄安新区旱情现状和马尔科夫转移矩阵,预测未来 15 年雄安新区旱情。

表 2 干旱等级及其对应的干旱指数

Table 2 Draught levels and their corresponding draught indices

| 干旱等级<br>Draught level | 类型<br>Type | SPEI                           | 干旱指数<br>Draught index | 干旱等级<br>Draught level | 类型<br>Type | SPEI                           | 干旱指数<br>Draught index |
|-----------------------|------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1                     | 无旱         | $-0.5 < \text{SPEI}$           | 0                     | 4                     | 重旱         | $-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$ | 1.5                   |
| 2                     | 轻旱         | $-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$ | 0.5                   | 5                     | 特旱         | $\text{SPEI} \leq -2.0$        | 2                     |
| 3                     | 中旱         | $-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$ | 1                     |                       |            |                                |                       |

SPEI: 标准化降水蒸散指数 Standardized precipitation evapotranspiration index

利用特定时期(现状或预测的时间点)的各干旱等级对应的干旱指数及其发生概率,计算其综合干旱指数,具体计算公式如下:

$$H = \sum_{l=1}^5 H_l \times P_l \tag{10}$$

式中, $H$  为综合干旱等级, $H_l$  为第  $l$  个干旱等级的干旱指数, $P_l$  为第  $l$  个干旱等级发生的概率。

(2) 地形影响因子计算

使用数字高程模型 DEM 的高程数据计算地形影响因子。地形影响因子由高程标准差和高程两个参数决定。地形影响因子计算方法如下:

$$T_i = f(S_i, A_i) \tag{11}$$

式中, $T_i$  表示第  $i$  个地理单元的地形影响因子; $S_i$  表示第  $i$  个地理单元的高程标准差; $A_i$  表示第  $i$  个地理单元的高程。

(3) 干旱灾害暴露表征

影响干旱灾害胁迫下的暴露程度的因素除了干旱等级本身和地形影响因子,还包括河网密度。河网密度采用地理单元点位周边 1 km 半径范围内的水体面积占总面积比例表示。根据文献分析结果,确定河网密度和地形影响因子对暴露程度影响的权重比例为 1:2,且河网密度对于干旱灾害暴露程度的影响是负向的,由此得到干旱灾害胁迫下的暴露表征函数如下:

$$D_i = H \times \left[ \frac{2}{3} \times (1 - W_i) + \frac{1}{3} \times T_i \right] \tag{12}$$

式中, $D_i$  表示第  $i$  个地理单元的暴露程度; $W_i$  表示第  $i$  个地理单元的河网密度; $T_i$  表示第  $i$  个地理单元的地形影响因子。

(4) 效应分析

干旱灾害负面生态效应取决于干旱胁迫下的脆弱度和暴露程度。具体表征函数为:

$$E_i = V_i \times D_i \tag{13}$$

式中, $E_i$  表示第  $i$  个地理单元的负面生态效应强度; $D_i$  表示第  $i$  个地理单元暴露程度; $V_i$  表示第  $i$  个地理单元在干旱胁迫下的脆弱度,干旱灾害胁迫下的脆弱度与土地利用类型有关,具体关系见表 3。脆弱度指数是对各土地利用类型在干旱胁迫下的脆弱程度的相对描述。本文采用的脆弱度指数来源于文献<sup>[103]</sup>,经过归一化处理使数值分布在[0.1,0.9]区间。

表 3 不同土地利用类型干旱脆弱度指数<sup>[103]</sup>

Table 3 Draught vulnerability indices of different land use types

| 土地利用类型<br>Land use type | 建设用地<br>Building land | 耕地<br>Cultivated land | 林地<br>Forest | 草地<br>Grass | 湿地<br>Wetland | 未利用地<br>Bareland | 水体<br>Water |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|-------------|---------------|------------------|-------------|
| 脆弱度 Vulnerability index | 0.10                  | 0.90                  | 0.49         | 0.29        | 0.11          | 0.24             | 0.16        |

脆弱度指数是对各土地利用类型在干旱胁迫下的脆弱程度的相对描述。采用公式(3)对负面生态效应程度进行归一化处理,得到生态风险程度值。



## 2.9 区域生态风险综合评价

假设自然源和人为源胁迫的生态风险具有同等重要程度,同时认为自然源内部的洪涝和干旱风险重要程度相近,则分别赋予雄安新区土地利用变化、洪涝灾害、干旱灾害胁迫下的生态风险权重 0.5、0.25、0.25。由于三类生态风险表征过程中的风险程度值已进行过归一化处理,因此直接使用三类生态风险评价的生态风险程度值计算区域生态风险综合生态风险程度值:

$$R_{\text{synthetic}} = 0.5R_{\text{landscape}} + 0.25R_{\text{flood}} + 0.25R_{\text{drought}} \quad (14)$$

式中,  $R_{\text{synthetic}}$  表示区域生态风险综合生态风险程度值;  $R_{\text{landscape}}$  表示土地利用胁迫下的景观生态风险程度值;  $R_{\text{flood}}$  表示洪涝灾害胁迫下的区域生态风险程度值;  $R_{\text{drought}}$  表示干旱灾害胁迫下的区域生态风险程度值。

## 3 结果分析

### 3.1 土地利用变化胁迫下的雄安新区景观生态风险评价和预测结果

根据本文作者陈丁楷等<sup>[101]</sup>的前期工作,已得到土地利用变化胁迫下的雄安新区景观生态风险评价和预测结果(图 7)以及各土地利用类型的景观生态学指数统计结果(图 8)。通过该研究成果发现:1) 目前景观干扰度指数高值区主要分布在雄安新区西北部、环白洋淀西侧以及雄安新区东部,景观脆弱度指数的高值区主要分布在白洋淀淀区,低值区主要集中在容城县、安新县、雄县主要的居民聚居点,景观生态风险程度较高的区域主要集中在白洋淀西侧入淀口、西南部淀区、北部的烧车淀以及雄安新区东部部分区域;2) 预测在雄安新区起步区建设完成之后,其耕地和未利用地的景观破碎度指数和景观分离度指数将会有所增加,未来雄安新区西北部的景观生态风险程度将转变为低风险,高风险地区分布在起步区与白洋淀交界区域一带,中高风险区域仍然集中在白洋淀西南部和雄安新区东部两个区域;3) 总体上,起步区建设完成之后,雄安新区景观破碎度指数、景观分离度指数、景观优势度指数将分别下降 4.68%、3.64% 和 5.22%,由此导致雄安新区总体景观干扰度下降 4.48%,同时,预测得到的雄安新区未来景观脆弱度也将比现状下降 2.01%,综合景观干扰度和景观脆弱度指数情况,雄安新区总体景观生态风险将下降 6.40%。

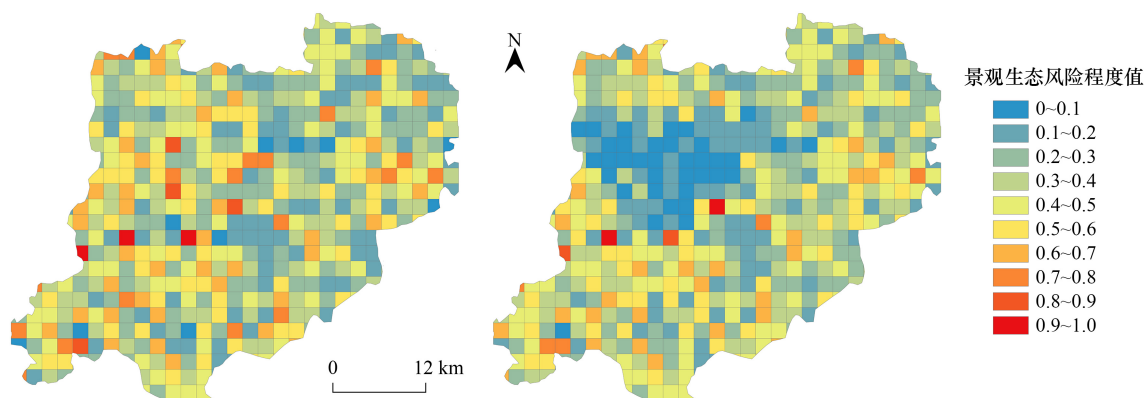


图 7 雄安新区景观生态风险分布现状及预测<sup>[101]</sup>

Fig.7 Current and predicted landscape ecological risk distribution of Xiong'an New Area

### 3.2 洪涝灾害胁迫下的雄安新区生态风险评价和预测结果

首先根据 1955—2020 年雄安新区逐日降雨量数据与白洋淀逐日水位数据计算得到雄安新区逐年极端气候指标与洪峰水位相关关系。使用 ARIMA 模型预测得到 2025 年 7、8 月份 PRCPTOT 指标数据 217 mm, 2035 年为 195 mm。90%、95% 和 99% 累积概率下对应的残差值分别是 220 mm、282 mm、297 mm。最终得到雄安新区现状、2025 年、2035 年不同重现期洪水水位如表 4 所示。

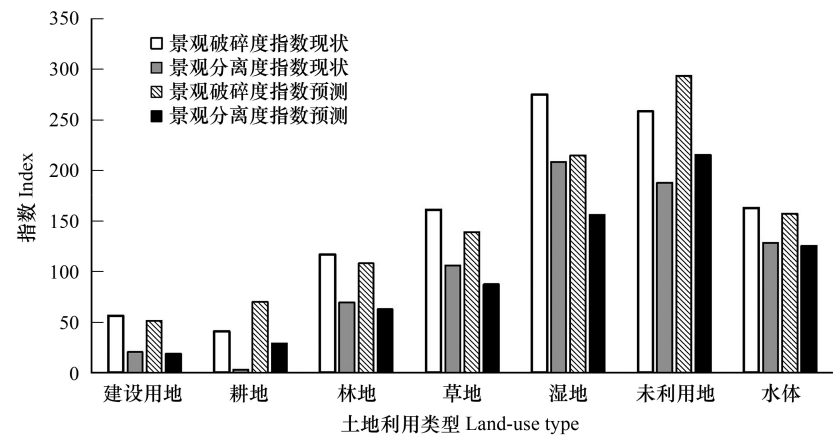


图 8 雄安新区不同土地利用类型景观指数<sup>[101]</sup>

Fig.8 Landscape ecology indexes of different land-use types in Xiong'an New Area

表 4 雄安新区现状和预测的洪水水位

Table 3 Current and predicted flood depths of Xiong'an New Area

| 评价时期<br>Time         | 十年一遇洪水水位<br>10-year flood depth/m | 二十年一遇洪水水位<br>20-year flood depth/m | 百年一遇洪水水位<br>100-year flood depth/m |
|----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 现状 Current situation | 8.37                              | 9.08                               | 10.56                              |
| 2025 年 The year 2025 | 9.17                              | 9.60                               | 10.39                              |
| 2035 年 The year 2035 | 9.02                              | 9.44                               | 10.23                              |

洪涝灾害胁迫下的雄安新区现状与预测的生态风险评价结果如图 9 所示。从不同重现期洪水水位预测结果来看,雄安新区未来小概率的极端洪涝灾害可能造成损失将下降,而较高概率的一般洪涝灾害可能造成的损失反而会有所上升,负面生态效应正负变化趋势综合影响下,雄安新区洪涝灾害胁迫下的生态风险在 2025 年相比现状总体呈现上升趋势。从空间分布上看,雄安新区北部基本没有洪涝灾害生态风险,主要生态风险分布区域在南部除白洋淀等水域之外的其余空间,以及雄安新区东部地势较低洼的地区。雄安新区起步区在 2025 年后,洪涝灾害造成的总体生态风险呈上升趋势,主要风险区域在起步区中部、南部和东部偏南部,但是起步区中部偏南地区有一块区域的生态风险将会有所下降,该地块属于起步区规划的湿地区域,由于湿地和水体在洪涝灾害下的脆弱性较低,因此该地块未来属于洪涝灾害生态风险低值区域。

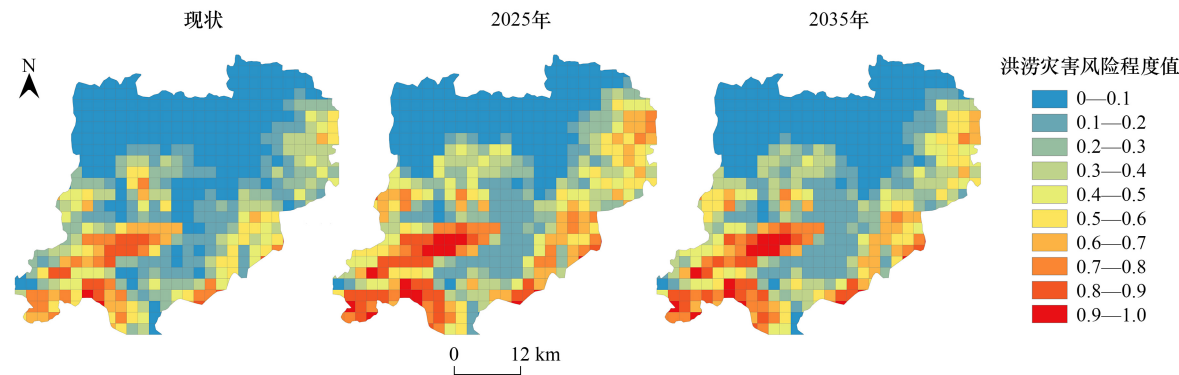


图 9 雄安新区洪涝灾害胁迫下的生态风险分布现状及预测

Fig.9 Current and predicted ecological risk distribution of Xiong'an New Area under the stress of flood hazard

### 3.3 干旱灾害胁迫下的雄安新区生态风险评价和预测结果

根据 SPEI 指数统计的雄安新区 1955—2020 年历史干旱频率如表 5 所示。

表 5 雄安新区 1955—2020 年历史干旱频率  
Table 5 Drought frequency of Xiong'an New Area in 1955—2020

| 旱情 Drought degree | 特旱<br>Excessive<br>drought | 重旱<br>Heavy<br>drought | 中旱<br>Medium<br>drought | 轻旱<br>Light<br>drought | 正常<br>Normal | 轻涝<br>Light<br>flood | 中涝<br>Medium<br>flood | 重涝<br>Heavy<br>flood | 特涝<br>Excessive<br>flood |
|-------------------|----------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|
| 频率 Frequency      | 0.0164                     | 0.0505                 | 0.1301                  | 0.1629                 | 0.3093       | 0.1237               | 0.1376                | 0.0556               | 0.0139                   |

根据雄安新区 1955—2020 年 SPEI 指数年际间转换关系构建马尔科夫转移矩阵并预测未来 15 年旱情,可以发现现状的旱情程度值为 0.3201,到 2025 年降低为 0.2965,到 2035 年保持在 0.2969。

干旱灾害胁迫下的雄安新区现状与预测的生态风险评价结果如图 10 所示。根据预测,2025 年和 2035 年旱情指数相比现状有所下降,推测雄安新区 2025 年后的干旱灾害胁迫下的生态风险总体有所下降。从空间分布上可以看到,干旱灾害胁迫下的生态风险呈北高南低的大致分布趋势,具体地,由于起步区规划范围内大量耕地、未利用地将转变成建设用地、湿地、水域,因此 2025 年后起步区范围内的干旱生态风险将明显下降。

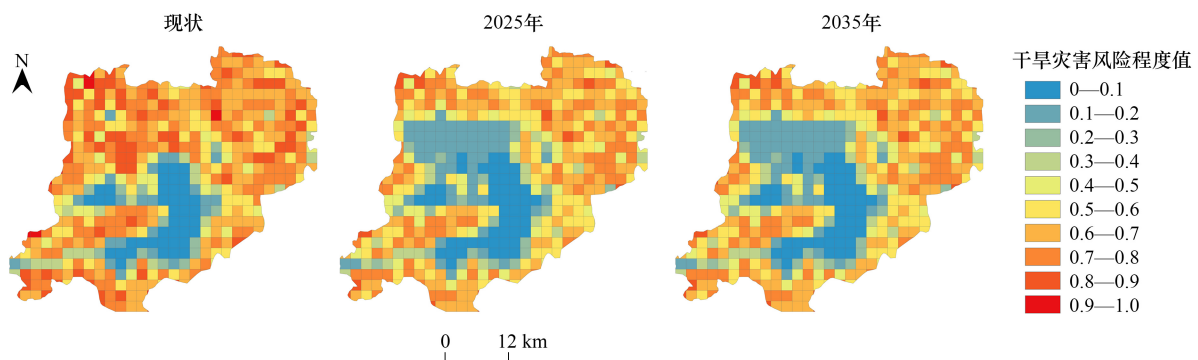


图 10 雄安新区干旱灾害胁迫下的生态风险分布现状及预测

Fig.10 Current and predicted ecological risk distribution of Xiong'an New Area under the stress of drought hazard

### 3.4 雄安新区区域生态风险综合评价与预测结果

雄安新区的区域生态风险综合评价结果如图 11 所示。现状的生态风险主要分布在白洋淀周边区域,尤其是白洋淀西边,白洋淀水域是风险低值区。预测 2025 年后,在雄安新区起步区范围内,尽管洪涝灾害胁迫下的生态风险程度有所上升,但是由于景观生态风险及干旱灾害胁迫下的生态风险都有所下降,该区域的生态风险将大幅降低,与白洋淀水域一起成为雄安新区的风险低值区,其余风险程度总体上升,高值区分布与现状基本一致。在计算景观生态风险的预测结果时,由于数据来自于《河北雄安新区起步区控制性规划》,仅能够预测规划实施后的结果,根据《河北雄安新区起步区控制性规划》,认为 2025—2035 年土地利用类型持续完善的状况下,基本形式保持不变,在计算综合生态风险时,景观生态风险结果运用 2025 年及其之后的图叠加两期的自然源生态风险进行预测,2035 年后雄安新区西南部和东北部的风险高值区的风险程度相对 2025 年会有一定程度的下降。

由于气候变化影响下的洪涝、干旱灾害的胁迫作用,雄安新区的总体生态风险程度在 2025 年之后有所上升,但是有序的规划和良好的地类配置,使得雄安新区起步区范围区域在 2025 年后生态风险程度大幅下降,说明雄安新区建设区域的规划能够有效地抵御综合生态风险。空间上,雄安新区主要的风险高值区位于白洋淀区以西和以南,以及雄安新区东北部部分区域,是雄安新区生态风险防控过程中需要重点关注的区域。

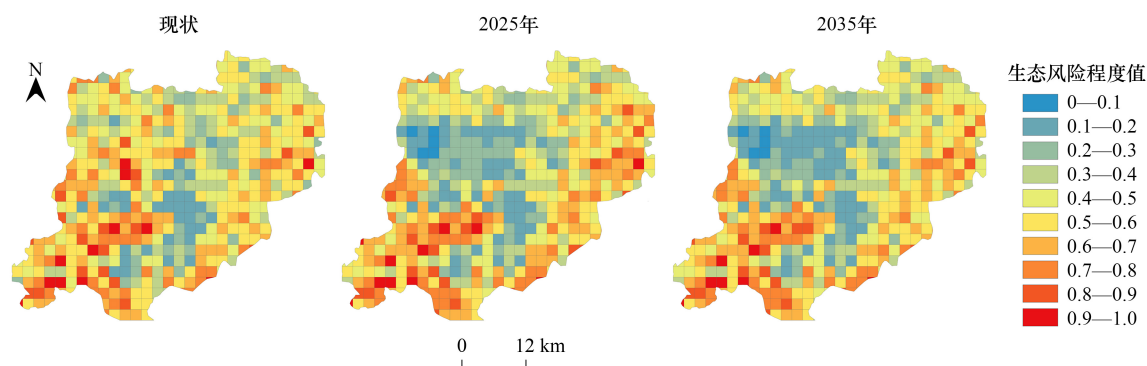


图 11 雄安新区区域生态风险分布现状及预测

Fig.11 Current and predicted regional ecological risk distribution of Xiong'an New Area

#### 4 讨论

在以往的研究中,较少有学者综合整理包含人为-自然风险源的生态风险评价框架,本文采用的综合生态风险评价框架是基于暴露-响应关系模型构建的,其中对于暴露的响应部分主要考虑了不同土地利用暴露在不同类型胁迫之下的敏感度或脆弱度,这在洪涝、干旱等自然灾害胁迫下的生态风险评价工作中,同时反映了自然灾害胁迫和人为活动对生态风险的作用,相对于此前雄安新区区域风险评价中采用的灾害风险图层叠加的方式,考虑的影响因素更全面。

本文主要考虑的胁迫类别是土地利用变化、洪涝和干旱灾害,未直接体现大气、水体、土壤环境污染的胁迫,这是由于环境污染属于人类活动释放的胁迫范畴,已内含于景观生态风险评价过程中景观干扰度指数中,除此之外,本文考虑的胁迫类别均是对雄安新区区域生态风险具有较高影响的因子,能够代表其主要的风险来源。

本文的评价结果显示出了明显的时空异质性,能够有效地判别出关键风险区及其变化趋势。对于 2025 年和 2035 年的区域生态风险主要是基于对胁迫的预测的基础上进行的风险预测,所采用模型的准确度将直接影响到风险预测的准确度。对于未来降水的预测及干旱等级的预测,尚未考虑未来不同气候变化情景(例如 RCPs 情景和 SSPs 情景等)下的降水变化,可能会影响预测结果的准确性。

#### 5 结论与对策

本研究在前人研究的基础上提出了一个综合生态风险评价框架,通过本文研究证明其具有综合全面性,结合景观生态风险、灾害风险评价方法,构建了雄安新区区域生态风险评价模型,开展了土地利用变化、洪涝灾害、干旱灾害胁迫下的雄安新区区域生态风险评价。评价结果表明由于气候变化影响下的洪涝、干旱灾害的胁迫作用,雄安新区的总体生态风险程度在 2025 年之后有所上升,但是有序的规划和良好的地类配置,使得雄安新区起步区范围区域在 2025 年后生态风险程度大幅下降,说明雄安新区建设区域的规划能够有效地抵御区域综合生态风险。空间上,雄安新区主要的风险高值区位于白洋淀淀区以西和以南,以及雄安新区东北部部分区域,是雄安新区生态风险防控过程中需要重点关注的区域。

基于以上内容,提出几点对策:

1) 为防控在土地利用变化胁迫下的区域生态风险,雄安新区应坚持对土地利用的合理规划和严格管理,切实防止土地的无序利用,同时应密切关注白洋淀西侧一带及雄安新区东部区域等景观生态风险程度较高地区的土地利用变化趋势,必要时进行土地整理工作,提高生态风险抵御能力;

2) 为防控洪涝灾害胁迫下的区域生态风险,雄安新区未来应主要关注常规洪水造成的生态风险,尤其要



注意容城县和安新县交界、雄县偏西北部一带新增的洪涝生态风险较高的区域,此外应充分加固新安北堤,构建起步区洪涝灾害安全区域,并充分利用湿地实现蓄滞洪水和排涝功能;

3) 为防控干旱灾害胁迫下的区域生态风险,雄安新区应重点关注北部区域干旱灾害生态风险防治工作,同时应尽量保证白洋淀及周边河流水体的水位,保持湿地生态系统健康,避免湿地和水体退化成草地或甚至裸地,导致生态风险程度的上升。

#### 参考文献(References):

- [1] Tang L N, Wang L, Li Q Y, Zhao J Z. A framework designation for the assessment of urban ecological risks. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2018, 25(5): 387-395.
- [2] US Environmental Protection Agency. *Guidelines for Ecological Risk Assessment*. Washington(DC):US Environmental Protection Agency, 1998: 1-3.
- [3] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 马国飞. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价. *地理学报*, 2017, 72(9): 1680-1694.
- [4] 丁婷婷, 李强, 杜士林, 刘亚峰, 张亚辉, 张瑾, 王一喆, 何连生. 沙颍河流域水环境重金属污染特征及生态风险评价. *环境化学*, 2019, 38(10): 2386-2401.
- [5] 裴国霞, 张琦, 李汗青, 高丽惠, 王晶. 黄河包头段冻融期水体中 PAHs 的生态风险评价. *干旱区研究*, 2018, 35(1): 20-26.
- [6] 范博, 王晓南, 黄云, 李霁, 高祥云, 李雯雯, 刘征涛. 我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价. *环境科学*, 2019, 40(5): 2101-2114.
- [7] Shi Y J, Xu X B, Li Q F, Zhang M, Li J, Lu Y L, Liang R Y, Zheng X Q, Shao X Q. Integrated regional ecological risk assessment of multiple metals in the soils: a case in the region around the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 288-297.
- [8] 段飞舟, 任景明. 区域生态风险评价及其在战略环评中的应用. *环境工程技术学报*, 2011, 1(1): 72-74.
- [9] Landis W G, Wiegiers J A. Design considerations and a suggested approach for regional and comparative ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1997, 3(3): 287-297.
- [10] Landis W G, Wiegiers J K. Ten years of the relative risk model and regional scale ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*, 2007, 13(1): 25-38.
- [11] Xu X G, Lin H P, Fu Z Y. Probe into the method of regional ecological risk assessment—a case study of wetland in the Yellow River Delta in China. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70(3): 253-262.
- [12] Xu X G, Xu L F, Yan L, Ma L Y, Lu Y L. Integrated regional ecological risk assessment of multi-ecosystems under multi-disasters: a case study of China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 747-758.
- [13] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 张甜, 魏海. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价. *地理学报*, 2015, 70(7): 1052-1067.
- [14] 龙涛, 邓绍坡, 吴运金, 祝欣, 林玉锁, 周军英. 生态风险评价框架进展研究. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(6): 822-830.
- [15] NRC(National Research Council). *Risk assessment in the federal government: managing the process*. Washington, D.C.: National Academy Press, 1983.
- [16] Power M, McCarty L S. Trends in the development of ecological risk assessment and management frameworks. *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*, 2002, 8(1): 7-18.
- [17] Moraes R, Molander S. A procedure for ecological tiered assessment of risks (PETAR). *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*, 2004, 10(2): 349-371.
- [18] Wang H. Regional assessment of ecological risk caused by human activities on wetlands in the Muleng-Xingkai Plain of China using a pressure-capital-vulnerability-response model. *Wetlands Ecology and Management*, 2022, 30(1): 111-126.
- [19] Puleo S. US environmental protection agency. EPA/630/R-92/001. 1992; Washington DC.
- [20] 杨娟, 蔡永立, 李静, 龚云丽, 王亮. 崇明岛生态风险源分析及其防范对策研究. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(5): 615-619.
- [21] 胡添虹, 蔡永立, 李武陵. 崇明生态岛建设生态类指标体系筛选研究. *安徽农业科学*, 2011, 39(2): 885-888.
- [22] Liang Y, Song W. Integrating potential ecosystem services losses into ecological risk assessment of land use changes: a case study on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Environmental Management*, 2022, 318: 115607.
- [23] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 宗敏丽, 胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(4): 664-677.
- [24] Luo F H, Liu Y X, Peng J, Wu J S. Assessing urban landscape ecological risk through an adaptive cycle framework. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 180: 125-134.

- [25] Chen X D, Yang Z P, Wang T, Han F. Landscape ecological risk and ecological security pattern construction in world natural heritage sites: a case study of Bayinbuluke, Xinjiang, China. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*, 2022, 11(6): 328.
- [26] Zeng J J, Huang G R. Set pair analysis for Karst waterlogging risk assessment based on AHP and entropy weight. *Hydrology Research*, 2018, 49(4): 1143-1155.
- [27] Zhong C H, Yang Q C, Liang J, Ma H Y. Fuzzy comprehensive evaluation with AHP and entropy methods and health risk assessment of groundwater in Yinchuan Basin, northwest China. *Environmental Research*, 2022, 204: 111956.
- [28] Tong K, Yang C. Water environment risk assessment model based on information entropy and stochastic fuzzy theory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 191: 012110.
- [29] 蒙古军, 赵春红, 刘明达. 基于土地利用变化的区域生态安全评价——以鄂尔多斯市为例. *自然资源学报*, 2011, 26(4): 578-590.
- [30] 康鹏, 陈卫平, 王美娥. 基于生态系统服务的生态风险评价研究进展. *生态学报*, 2016, 36(5): 1192-1203.
- [31] Ni Lingling, Wang Dong, Singh Vijay, Wu Jianfeng, Wang Yuankun, Tao Yuwei, Liu Jiufu, Zou Ying, He Ruimin. A hybrid model-based framework for estimating ecological risk. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225: 1230-1240.
- [32] Xing L, Hu M S, Wang Y. Integrating ecosystem services value and uncertainty into regional ecological risk assessment: a case study of Hubei Province, Central China. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140126.
- [33] Wang H. Regional ecological risk assessment with respect to human disturbance in the Poyang Lake region (PYLR) using production-living-ecology analysis. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2021, 49(2): 449-460.
- [34] 匡文慧, 杨天荣, 颜凤芹. 河北雄安新区建设的区域地表基底特征与生态管控. *地理学报*, 2017, 72(6): 947-959.
- [35] 孟广文, 金凤君, 李国平, 曾刚. 雄安新区: 地理学面临的机遇与挑战. *地理研究*, 2017, 36(6): 1003-1013.
- [36] 卢慧婷, 严岩, 赵春黎, 吴钢. 雄安新区多尺度生态安全格局构建框架. *生态学报*, 2020, 40(20): 7105-7112.
- [37] 孔锋, 王品, 吕丽莉. 全球气候变化背景下雄安新区建设水资源安全风险与治理对策. *水利发展研究*, 2018, 18(2): 12-14, 39.
- [38] 郭志娟, 周亚龙, 王乔林, 王成文, 宋云涛, 刘飞, 杨峥, 孔牧. 雄安新区土壤重金属污染特征及健康风险. *中国环境科学*, 2021, 41(1): 431-441.
- [39] 张素荣, 王昌宇, 刘继红, 邢怡, 刘庆学, 杨俊泉, 贺福清. 雄安新区西南部土壤重金属污染特征及生态风险评价. *地学前缘*, 2021, 28(4): 238-249.
- [40] 赵雪, 郑一, 付彩霞, 裴文慧, 王文科, 段磊, 赵婷. 雄安新区水环境中对羟基苯甲酸酯含量及风险. *中国环境科学*, 2021, 41(4): 1893-1899.
- [41] 彭羽, 尚佳欣, 张扬, 鲁妍, 苏亚丽, 张妹, 刘坤容, 钟汝江. 基于生态风险评价的城市空间布局研究——以雄安地区为例. *中央民族大学学报: 自然科学版*, 2021, 30(3): 19-24, 80.
- [42] 陈春丽, 吕永龙, 王铁宇, 史雅娟, 胡文友, 李静, 张翔, 耿静. 区域生态风险评价的关键问题与展望. *生态学报*, 2010, 30(3): 808-816.
- [43] 孙立强, 田卫, 俞穆清, 马广庆, 顾斌, 徐宁. 石门口门水库饮用水水源地生态风险评价. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 211-214.
- [44] 王慧芳, 饶恩明, 肖焱, 严岩, 卢慧婷, 朱捷缘. 基于多风险源胁迫的西南地区生态风险评价. *生态学报*, 2018, 38(24): 8992-9000.
- [45] Hou Y, Ding W H, Liu C F, Li K, Cui H T, Liu B Y, Chen W P. Influences of impervious surfaces on ecological risks and controlling strategies in rapidly urbanizing regions. *Science of the Total Environment*, 2022, 825: 153823.
- [46] Xie H L, Wen J M, Chen Q R, Wu Q. Evaluating the landscape ecological risk based on GIS: a case-study in the Poyang Lake region of China. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(9): 2762-2774.
- [47] Zhang W, Chang W J, Zhu Z C, Hui Z. Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change. *Applied Geography*, 2020, 117: 102174.
- [48] 张起源, 秦颖君, 刘香华, 周雯, 刘谓承, 赵建刚. 广东红树林沉积物有毒金属分布及生态风险评价. *生态环境学报*, 2020, 29(1): 183-191.
- [49] Beaumelle L, Della Vedova C, Beaugelin-Seiller K, Garnier-Laplace J, Gilbin R. Ecological risk assessment of mixtures of radiological and chemical stressors: methodology to implement an msPAF approach. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 1421-1432.
- [50] Wang Z J, Zhang Y J, Wang L, Li X, Zhou X H, Li X Y, Yan M P, Lu Q M, Tang Z H, Zhang G, Wang D L. Characteristics and risk assessments of mercury pollution levels at domestic garbage collection points distributed within the main urban areas of Changchun city. *Toxics*, 2021, 9(11): 309.
- [51] Punniyakotti J, Ponnusamy V. Environmental radiation and potential ecological risk levels in the intertidal zone of southern region of Tamil Nadu coast (HBRA), India. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 127: 377-386.
- [52] 郝庆丽, 任卓非, 刘刚, 王立雄, 于娟, 郁泽君. 光和噪声污染胁迫下城市生态斑块鸟类风险评价. *生态学报*, 2022, 42(6): 2186-2201.
- [53] 湛天丽, 黄阳, 滕应, 何腾兵, 石维, 候长林, 骆永明, 赵其国. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析. *土壤通报*, 2017, 48(2): 474-480.

- [54] Langdon K A, Chandra A, Bowles K, Symons A, Pablo F, Osborne K. A preliminary ecological and human health risk assessment for organic contaminants in composted municipal solid waste generated in New South Wales, Australia. *Waste Management*, 2019, 100: 199-207.
- [55] Luo X S, Bing H J, Luo Z X, Wang Y J, Jin L. Impacts of atmospheric particulate matter pollution on environmental biogeochemistry of trace metals in soil-plant system: a review. *Environmental Pollution*, 2019, 255: 113138.
- [56] Majed N, Islam M A S. Contaminant discharge from outfalls and subsequent aquatic ecological risks in the river systems in Dhaka city: extent of waste load contribution in pollution. *Frontiers in Public Health*, 2022, 10: 880399.
- [57] Wang L C, Xing L Q, Wu X K, Sun J, Kong M. Spatiotemporal variations and risk assessment of ambient air  $O_3$ ,  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  in a coastal city of China. *Ecotoxicology*: London, England, 2021, 30(7): 1333-1342.
- [58] 何佳, 时迪, 王贝贝, 冯承莲, 苏海磊, 王颖, 秦宁. 10 种典型重金属在八大流域的生态风险及水质标准评价. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 2970-2982.
- [59] 刘昔, 王智, 王学雷, 李珍, 杨超, 厉恩华, 位慧敏. 我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价. *环境科学*, 2019, 40(5): 2094-2100.
- [60] Dvinskikh S. The influence of thermal pollution on oxygen regime and hydrobiology/GEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings", " 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2017, Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems. *Stef92 Technology*, 2017; 17(No.3 Part2): 693-701.
- [61] Han Y, Zhang S F, Lv A F, Zeng H P. Risk assessment of the water resources carrying capacity: a case study in North China. *Journal of the American Water Resources Association*, 2022.
- [62] Yang X Y, Wang L, Wu T, Qiu Q Y. Ecological risk assessment based on road network development analysis of Xiamen city, China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2018, 25: 458-467.
- [63] Lin Y Y, Hu X S, Zheng X X, Hou X Y, Zhang Z X, Zhou X N, Qiu R Z, Lin J G. Spatial variations in the relationships between road network and landscape ecological risks in the highest forest coverage region of China. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 392-403.
- [64] Hammar L, Wikström A, Molander S. Assessing ecological risks of offshore wind power on Kattegat cod. *Renewable Energy*, 2014, 66: 414-424.
- [65] Chang M, Dou X Y, Tang L L, Xu H Z. Risk assessment of multi-disaster in Mining Area of Guizhou, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 78: 103128.
- [66] Pandey B, Agrawal M, Singh S. Ecological risk assessment of soil contamination by trace elements around coal mining area. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(1): 159-168.
- [67] Mikhailov V G, Koryakov A G, Mikhailov G S. Ecological risk management in coal mining and processing. *Journal of Mining Science*, 2015, 51(5): 930-936.
- [68] Brittingham M C, Maloney K O, Farag A M, Harper D D, Bowen Z H. Ecological risks of shale oil and gas development to wildlife, aquatic resources and their habitats. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(19): 11034-11047.
- [69] Dylan H A, Anthony L, Eric L. Dynamic land use implications of rapidly expanding and evolving wind power deployment. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(4): 044064.
- [70] Zhang K, Zheng W B, Liao Z Y, Xie H P, Zhou C T, Chen S G, Zhu J B. Risk assessment of ground collapse along tunnels in Karst terrain by using an improved extension evaluation method. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2022, 129: 104669.
- [71] Qiu Q Y, Zhao F Q, Qian Y. Ecological risk assessment based on freshwater consumption dynamic analysis of Xiamen City, China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2018, 25(5): 431-438.
- [72] 靳昊, 陈彦好, 周宗青, 成帅, 孙子正, 商成顺, 王超. 基于属性识别理论的金属矿山采空区塌陷灾害风险评估. *金属矿山*, 2021(3): 184-190.
- [73] 任景明. 区域开发生态风险评价理论与方法研究. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [74] Wheeler H, Evans E. Land use, water management and future flood risk. *Land Use Policy*, 2009, 26: S251-S264.
- [75] McCarthy J J, Change I P O C. Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2001
- [76] 张会, 李铖, 程炯, 吴志峰, 吴艳艳. 基于“H-E-V”框架的城市洪涝风险评估研究进展. *地理科学进展*, 2019, 38(2): 175-190.
- [77] Sofia G, Roder G, Dalla Fontana G, Tarolli P. Flood dynamics in urbanised landscapes: 100 years of climate and humans' interaction. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-12.
- [78] 吴绍洪, 潘韬, 刘燕华, 邓浩宇, 焦珂伟, 陆晴, 冯爱青, 岳溪柳, 尹云鹤, 赵东升, 高江波. 中国综合气候变化风险区划. *地理学报*, 2017, 72(1): 3-17.
- [79] 汪疆玮, 蒙古军. 漓江流域干旱与洪涝灾害生态风险评价与管理. *热带地理*, 2014, 34(3): 366-373.

- [80] 倪晓娇, 南颖, 朱卫红, 崔允秀, 刘国明, 刘辰, 姚阔. 基于多灾种自然灾害风险的长白山地区生态安全综合评价. 地理研究, 2014, 33(7): 1348-1360.
- [81] Arrogante-Funes P, Bruzón A G, Arrogante-Funes F, Ramos-Bernal R N, Vázquez-Jiménez R. Integration of vulnerability and hazard factors for landslide risk assessment. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(22): 11987.
- [82] Reyes-Hardy M P, Aguilera Barraza F, Sepúlveda Birke J P, Esquivel Cáceres A, Inostroza Pizarro M. GIS-based volcanic hazards, vulnerability and risks assessment of the Guallatiri Volcano, Arica y Parinacota Region, Chile. Journal of South American Earth Sciences, 2021, 109: 103262.
- [83] Yu H M, Yang W J, Zhao B, Chen Z Q, Zhou B, Nie G J, Luo H. Eruption sequences and characteristics of Weizhou Island volcano, Guangxi Province, south of China. Frontiers in Earth Science, 2021: 966.
- [84] Kamranzad F, Memarian H, Zare M. Earthquake risk assessment for Tehran, Iran. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(7): 430.
- [85] 王慧芳, 林子雁, 肖焱, 卢慧婷, 章文, 詹云军, 严岩. 基于生态系统服务潜在损失的滑坡灾害生态风险评价. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3553-3562.
- [86] Tsang H H, Daniell J E, Wenzel F, Wilson J L. A universal approach for evaluating earthquake safety level based on societal fatality risk. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020, 18(1): 273-296.
- [87] Li Q, Chen L T, Yan Z T, Xu Y J. Exploration of Copula models use in risk assessment for freezing and snow events; a case study in Southern China. Sustainability, 2022, 14(5): 2568.
- [88] 乔雪梅, 刘普幸. 中国北方地区寒潮时空特征及其成因分析. 冰川冻土, 2020, 42(2): 357-367.
- [89] 张强, 姚玉璧, 王莺, 王素萍, 王劲松, 杨金虎, 王静, 李忆平, 尚军林, 李文举. 中国南方干旱灾害风险特征及其防控对策. 生态学报, 2017, 37(21): 7206-7218.
- [90] 萨仁其其格. 鄂尔多斯市生态灾害风险评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2011.
- [91] 史莲梅, 李斌, 李圆圆, 孔令文, 刘卫平. 新疆冰雹灾害经济损失评估及风险区划研究. 冰川冻土, 2017, 39(2): 299-307.
- [92] 汪保录, 王红梅, 于彩虹, 李惠茹, 吕世海, 张晗. 内蒙特大沙尘暴重金属暴露及风险评价研究. 现代预防医学, 2017, 44(21): 3866-3870.
- [93] 张悦, 李珊珊, 陈灏, 杨崧, 陈峰. 广东省台风灾害风险综合评估. 热带气象学报, 2017, 33(2): 281-288.
- [94] 李倩, 俞海洋, 李婷, 龙爽, 邵威, 王瑛, 许映军. 京津冀地区台风危险性评估——基于 Gumbel 分布的分析. 地理科学进展, 2018, 37(7): 933-945.
- [95] Suter G W. Ecological risk assessment in the United States environmental protection agency: a historical overview. Integrated Environmental Assessment and Management, 2008, 4(3): 285-289.
- [96] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展. 生态学报, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [97] Kontogianni A, Luck G W, Skourtos M. Valuing ecosystem services on the basis of service-providing units: a potential approach to address the 'endpoint problem' and improve stated preference methods. Ecological Economics, 2010, 69(7): 1479-1487.
- [98] 徐涵秋, 施婷婷, 王美雅, 林中立. 雄安新区地表覆盖变化及其新区规划的生态响应预测. 生态学报, 2017, 37(19): 6289-6301.
- [99] 杨萌, 廖振珍, 石龙宇. 雄安新区多尺度生态基础设施规划. 生态学报, 2020, 40(20): 7123-7131.
- [100] 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. 科学通报, 2018, 63(22): 2302-2310.
- [101] 陈丁楷, 石龙宇. 基于土地利用变化的雄安新区景观生态风险评价与预测. 生态经济, 2021, 37(11): 224-229.
- [102] 彭建, 魏海, 武文欢, 刘焱序, 王仰麟. 基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估——以深圳市茅洲河流域为例. 生态学报, 2018, 38(11): 3741-3755.
- [103] 梁如心, 李娟, 张维江, 褚金楠. 基于 GIS 的宁夏六盘山地区干旱风险分析. 人民黄河, 2020, 42(1): 48-52.