

DOI: 10.20103/j.stxb.202209282753

贺桂珍, 于名召. 2022 年冬奥会崇礼赛区多重压力下生态风险评价. 生态学报, 2023, 43(17): 7072-7082.

He G Z, Yu M Z. Multiple stressors ecological risk assessment in Chongli, a host site of the 2022 Winter Olympics. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(17): 7072-7082.

2022 年冬奥会崇礼赛区多重压力下生态风险评价

贺桂珍^{1, 2, *}, 于名召¹

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:冬奥会这类重大体育赛事对举办城市的经济转型、城市功能升级、竞争力提升等方面具有助推效应, 而其带来的生态影响也不容小觑。近年随着赛事规模的不断扩大和户外场馆的建设, 冬奥会导致的生态风险愈加突出。然而, 对于规模大、历时长的冬奥会复杂生态风险目前还缺乏定量评价方法。研究旨在探讨一种区域生态风险评价方法, 即相对风险模型, 并基于地理信息系统 (GIS) 定量评价冬奥会赛前准备阶段多重压力下的生态风险。选择 2022 年冬奥会崇礼赛区为案例区, 构建压力-生境-终点三大要素组成的相对风险模型, 将整个崇礼划为 6 个风险分区, 辨识了冬奥会赛前阶段包括各种人类生产、建设活动和自然因素的 11 类压力 (威胁)、6 类生境和 4 个评价终点, 并确定了压力和生境的分级标准。压力分级评价结果显示, 道路和交通活动的得分最高, 得分最低的是火灾。生境相对等级评价表明, 河流栖息地的得分最高, 得分最低的是湿地与景区滑雪场。从不同生态终点得分看, 生物多样性的风险最高, 娱乐休闲风险最低。总体区域风险评价表明, VI 区四台嘴冬奥场馆核心区的风险得分最高, 而风险最低的为 III 区, 包括石嘴子乡和驿马图乡。最后, 对相对风险评价的不确定性进行分析, 并讨论其优缺点。总之, 尽管存在不确定性, 相对方法模型仍被认为是评估和优先考虑多个资产的多重压力风险的稳健方法, 也是决策者确定管理行动优先级的有用筛选工具。研究证明了相对风险模型方法评估 2022 年冬奥会主办地风险的可行性, 研究结果明确了崇礼区恢复工作的重点区域和压力, 对冬奥会的可持续管理和地方发展具有重要参考价值。

关键词:冬奥会; 相对风险模型; 多重威胁; 生态风险评价; 分级标准; 崇礼区

Multiple stressors ecological risk assessment in Chongli, a host site of the 2022 Winter Olympics

HE Guizhen^{1, 2, *}, YU Mingzhao¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

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

Abstract: Mega sporting events, such as Winter Olympics, have a boosting role for the economic transformation, functional upgrading, and competitiveness improvement of the host cities. The ecological and environmental impacts of mega sporting events are commanding increasing attention. The ecological risk issue is particularly acute with regard to the increasing tournament scale and outdoor venues construction of the Winter Olympics. However, the ecological risks of the Winter Olympic events are difficult to assess quantitatively, being complex and often occurring over extended periods. This paper aims to provide one such approach, relative risk model (RRM), for quantitatively ecological risk assessment connected with human activities and the natural factors. It provides steps of the RRM and a case application of the method in Chongli

基金项目:国家自然科学基金项目 (41877529, U21A2041, 32201435); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目 (SKLURE2022-2-2)

收稿日期:2022-09-28; **网络出版日期:**2023-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gzhe@rcees.ac.cn

District, one of host sites of the 24th Winter Olympics in February, 2022. We applied the RRM model to identify the potential stressors from the preparation activities of 2022 Winter Olympic Games. The risks of ecological impacts to assessment endpoints were calculated and ranked by quantitatively determining the interactions of the stressors and habitats as defined in the conceptual model. The critical sets of conclusions were drawn from the assessment. Firstly, the conceptual model of RRM was established including 11 threats, 6 habitats, and 4 ecological assessment endpoints across 6 sub-regions. The ranking criteria were defined by literature review, field investigation, and discussion with local stakeholders. Secondly, the risk assessment was conducted. The most significant stressor was traffic and road/highway construction, while the least threat was fire. The most vulnerable habitat was river course for benthic macroinvertebrates and fish, and the least vulnerable habitats were wetland and ski resort in Chongli. The most significantly affected endpoint was biodiversity, but the least one was recreation function. The highest risk zone was VI region in core area of the 2022 Winter Olympics. Thirdly, the uncertainties associated with both scales of assessment were considerable. The advantages and disadvantages of the RRM were discussed. Despite the uncertainties, the RRM was found to be a robust method for assessing and prioritizing the risks of multiple threats to multiple assets and a useful screening tool for decision-makers in prioritizing management actions. This risk assessment demonstrates the feasibility of using the RRM for assessing risks in a host site of 2022 Winter Olympic Games. The results suggested areas and stressors for restoration efforts in Chongli District, which are valuable for sustainable management of Winter Olympics and local development.

Key Words: Winter Olympics; relative risk model; multiple threats; ecological risk assessment; ranking criteria; Chongli District

冬季奥林匹克运动会(简称冬奥会)作为全世界瞩目的重大体育赛事,不仅对举办城市的经济转型、社会发展、城市功能升级、竞争力提升、环境改善等方面具有促进作用,而且也会导致当地的生态变化和环境污染等,这些有利和不利的影 响已在过去的盐湖城、温哥华、索契等历届冬奥会举办城市有所体现^[1-6]。自 1994 年挪威利勒哈默尔冬奥会开始,环境和可持续性水平成为评价奥运会成功与否的重要标准^[7]。2017 年 1 月,国际奥委会发布《可持续发展战略》,成为推动奥林匹克运动会和奥林匹克运动环境可持续发展的一个战略路线图^[8]。2015 年北京-张家口联合获得第 24 届冬奥会主办权,提出“绿色、共享、开放、廉洁”的办奥理念,这是践行国际奥委会《奥林匹克 2020 议程》和《可持续发展战略》的重要赛事,也是展示中国环境可持续发展进程的重要窗口。此后,北京和张家口拉开了比赛场馆大规模规划和建设的历程,举办城市的空间结构、布局、景观和地貌发生了巨大变化,特别是崇礼,已经从一个名不见经传的小城发展为承担国际冰雪赛事的冰雪小镇^[9]。

2022 年冬奥会赛事对土地利用变化的影响及生态风险是落实“绿色”理念以及赛后城市可持续发展的重要议题。随着基础设施和户外场馆的建设,学者对其导致的生态和环境影响愈加关注,如地质变化、土地利用、景观格局、林分类型、土壤水文、公众认知、环境治理等^[10-17]。但对冬奥会生态风险的研究较少,对于规模大、历时长的冬奥会复杂生态风险目前还缺乏定量评价方法^[18]。区域生态风险评价就是在区域尺度上对复杂环境背景下的多个源、多个压力对多个评价终点造成的生态影响进行风险评价,目前已成为区域环境管理研究中的一个热点问题。国外学者自 1990 年代以来开发了不同的区域生态评价方法^[19],为了克服传统生态风险评价的确定,Landis 团队开发了相对风险模型(RRM)^[20],因其对输入数据的要求低、成本低、评价透明,输出结果不但可以有助于确定管理行动优先事项,而且可以直接用于风险沟通,目前已广泛应用于北美、南美、澳大利亚等多个国家和地区的淡水、海洋、陆地环境的区域生态风险评价,最终的评价目标是对环境管理和决策进行服务^[21-24]。我国学者也将 RRM 应用在土地规划和利用、流域、地下水、喀斯特山地、矿区等的风险评价^[25-29]。本文旨在将相对方法模型应用于崇礼赛区,定量评价冬奥会土地利用变化的生态风险,以期为冬奥会场馆运营、赛后可持续利用和城市可持续管理提供科学参考。

1 研究数据和方法

1.1 研究区概况

本文研究区崇礼是河北省张家口市下辖区,位于北纬 40°47′至 41°17′、东经 114°47′至 115°34′,距北京约 220 km,总面积约 2334 km²。崇礼区地貌属坝上坝下过渡型山区,境内多半为山地,部分为丘陵及低山,海拔 814—2174 m,垂直落差 1300 m。崇礼冬季平均气温零下 12 ℃,从 10 月中下旬开始降雪,雪期可持续近 6 个月,全年积雪在 1.5 m 左右^[30],崇礼区与冬奥会举办区域评估标准要求相符合:区域平均温度不低于零下 18 ℃,降雪期持续 4 个月以上,雪上项目的垂直落差不得少于 800 m。同时,崇礼区同北京赛区仅 1 h 的车程等,这些得天独厚的优势让崇礼成为 2022 年冬奥会雪上项目的主赛区。在崇礼区有冬奥会的四大竞赛场馆,分别是利用现有场馆改造的云顶滑雪公园和位于古杨树场馆群的国家跳台滑雪中心(雪如意)、国家越野滑雪中心和国家冬季两项中心。根据 2020 年总体规划,崇礼区已安排了 5.36 km² 专门用于奥运赛事核心赛区建设,新增了建设用地 16.38 km²。

1.2 研究数据来源

本研究使用到的数据主要包括土地利用、气象、水利、农业、环境和社会经济等多源数据。其中,气象站点的年平均降雨量等气象数据来自国家气象科学数据中心,水利、农业、环境数据通过走访地方水务局、农业农村局、生态环境局等获取。社会经济统计数据来自崇礼区 2015—2020 年国民经济和社会发展统计公报。土地利用数据来自 2015 年和 2020 年分辨率为 30 m 的 Landsat 遥感影像数据,根据《土地利用现状分类 GB/T 21010—2007》,将研究区划分为林地、草地、耕地、建设用地、未利用地和水域 6 类。结合野外实地勘察和人机交互解译方法进行信息核对,最后结合野外调查情况形成解译结果,得出崇礼区土地利用类型、面积上的变化。将崇礼区土地划分不同区域,使用 RRM 模型进行生态风险评价,辨识并评价土地利用类型、面积的变化可能产生的不同类型的生态风险并量化,利用 ArcMap 10.2 软件作为辅助工具来制图。

1.3 相对风险评价模型和评价步骤

自 1997 年正式提出 RRM 模型,区域生态风险评价的三个要素扩展为:源(威胁或压力)、生境和影响,通常表现为压力组与受体组。之所以称相对,是由于评价应用相对概率进行分级的过程,分成低、中、高三类风险。目前相对风险评价过程通常为 4 个阶段 10 个步骤^[20,31—32](图 1)。

问题确定阶段包括 3 个环节,首先列出研究区生态环境管理目标及优先关注事项,主要通过文献分析和实地走访获取背景状况、各种活动及其环境危害,确定关注的重要事项(以评价终点来表示),评价终点包括生态资产及其属性两个要素。其次,利用现有的报告和政府等利益相关方的输入,辨识与管理目标相关的潜在风险源、压力和生境。第三步建立概念模型,是对不同源、

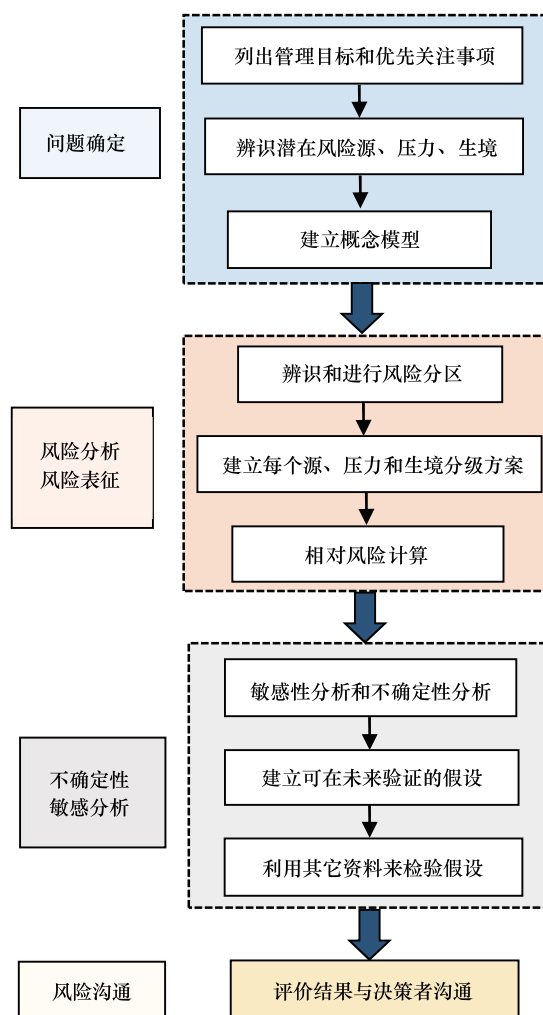


图 1 相对风险模型的评价步骤^[31]

Fig.1 Flowchart of the Risk Relative Model methodology

压力、生境和终点的各种路径关系加以说明,并回答如下问题:A.风险源释放或产生压力吗? B.压力产生并持续作用于生境吗? C.评价终点利用生境类型吗? D.压力对评价终点产生有害影响? 对任一给定路径,如果上述 4 个问题的答案是肯定的,该路径是完整的,影响概率大于 0。概念模型通常利用图和表格形式展示源-压力-生境之间以及生境-终点之间的相互作用,一般可参考已有管理机构或研究报告和成果,并结合利益相关方的意见,以确定概念模型中所有参数。

风险分析和表征是 RRM 的关键部分,主要包括 3 个步骤。首先进行风险分区,通常用地理信息系统 (GIS) 软件根据次级流域边界、土地利用类型、风险源位置、河流/湖泊等特征、重点关注的生态资产所在的单元确定。其次确定分级方案,风险源分级根据它们在区域中的出现情况进行界定,生境的分级主要根据其面积大小。RRM 各要素之间的联系可用三种暴露-效应筛选类型来反映:源-压力-生境暴露辨识、终点-生境暴露辨识、压力-终点效应辨识。暴露和效应辨识是确定风险要素-风险源、生境和评价终点影响之间联系的权重因子的过程。权重 0、0.5、1 分别表示从风险源到生境(暴露)或从生境到终点(效应)的概念模型模拟路径是否完整。0 表示不完整路径,1 代表完整路径,0.5 可代表两种情景,一表示路径完整,但发生概率很小,二表示影响是间接的。计算相对风险是综合暴露和效应分级数据估算风险的过程,也称为风险表征。每个路径通过分级和权重组成的方程式来表示(表 1)。相对生态风险评价比较风险分区的风险源和生境,估计风险是无量纲值,用来显示对评价终点影响概率最大的位置。在 RRM 方法中,所有分级转化成一个分数系统。首先,每个分区源分级、生境分级、源-压力-生境暴露权重相乘计算生境暴露;其次,生境暴露权重乘以压力-终点-效应权重得到风险值;最后,每个风险分区,每个生境,每个终点风险,每个风险源贡献累加得到总风险值。当某个路径不存在,风险值自动赋值为 0。

表 1 相对分级和风险的计算

Table 1 Ranking and calculating the relative risk

分类 Categories	计算公式 Calculation equations	符号意义 Parameter explanations	结果解释 Result explanations
压力分级 Stressor rank	$\text{Sum } R_{\text{stressor}} = \sum_i \text{Stressor}_j$	Sum R_{stressor} 压力相对分级之和 i 风险分区 1, 2, 3…… j 压力,如土壤侵蚀	对某个生境和评价终点潜在影响最大的压力
生境分级 Habitat rank	$\text{Sum } R_{\text{habitat}} = \sum_i \text{Habitat}_k$	Sum R_{habitat} 生境相对分级之和 k 生境类型,如河流等	风险区内潜在影响最大的生境
生态终点风险 Ecological endpoint risk	$\text{Risk}_{\text{endpoint}} = \sum_i \text{Stressor} \times \text{Habitat}$	$\text{Risk}_{\text{endpoint}}$ 单个终点的相对风险	风险区内评价终点的相对生态风险
每个风险分区风险 Each zone risk	$\text{Risk}_{\text{zone}} = \sum_{l=1,2,\dots,x} R_{\text{stressor}} \times R_{\text{habitat}}$	$\text{Risk}_{\text{zone}}$ 各风险分区的相对生态风险 l 对所有压力和生境的完整暴露途径 x 压力/生境组合的数量	不同风险分区的风险相对值比较,相对风险越大,潜在不利影响越大
压力源的总风险值 Risk score of stressors	$\text{Risk Score}_{\text{stressor}} = \sum_{j=1,2,\dots,n} S_{ij} \times H_{ik} \times W_{jk}$	$\text{Risk Score}_{\text{stressor}}$ 压力源的总相对风险 S_{ij} 风险分区内源的分级 H_{ik} 风险分区内生境的分级 W_{jk} 暴露或效应筛选确立的权重因子	研究区来自不同风险压力源的潜在风险
生境总风险值 Risk score of habitats	$\text{Risk Score}_{\text{habitat}} = \sum_{k=1,2,\dots,n} S_{ij} \times H_{ik} \times W_{jk}$	$\text{Risk Score}_{\text{habitat}}$ 生境的总相对风险 其它同上	研究区发生在不同生境的相对风险
研究区总相对风险 Risk score of study area	$\text{Risk Score} = S_{ij} \times H_{ik} \times W_{jk}$	Risk Score 总相对风险值 其它同上	研究区总的相对风险

第三个阶段包括 3 个步骤。不确定性和敏感性分析针对评价过程存在不确定性问题,如数据缺乏、数据质量较差、压力和传输路径误读、重要风险源和压力遗漏、时空格局辨识和组合不当以及模型假设错误,常用的是蒙特卡罗方法,敏感性评估主要包括单要素分析、暴露途径分析和随机成分分析。接下来建立可在未来调查中验证的假设并进行检验这两步是密不可分的。RRM 方法是一种半定量方法,通过风险计算的结果可形成将来实验室测定数据和野外调查验证的假设,而且评价结果还可以跟其他管理和研究机构的结果相比

较,以验证 RRM 评价结果的准确性,进一步验证假设。

最后阶段是相对风险评价结果和决策者沟通,可为多个管理机构讨论有关风险提供了一个有效的框架。评价结果及其不确定性和敏感性应与决策者进行沟通,并报告所依据的假设,作为未来采取管理措施、行动和确定研究重点的重要参考。

2 崇礼区多重压力下生态风险评价案例

2.1 评价问题确定和概念模型

2.1.1 研究区、管理目标及优先事项确定。

根据 2022 年冬奥会的申报报告、当地的规划和实际情况,选择崇礼作为评价区,管理目标是维持当地赛区的生态系统稳定和环境质量,以利于冬奥会成功进行。通过查阅不同来源的文献资料和报告了解研究区的背景状况,走访当地生态环境局、水利局等管理人员,并跟当地居民交谈,综合分析各方信息和意见了解他们关注的重要事项,确定水、土地利用和植被保护为关注的问题。本研究中风险分区以行政区划界线划分。崇礼区辖 1 个街道,1 个镇、8 个乡共划分为 6 个风险区域。I 区为清三营乡、狮子沟乡和白旗乡,II 区为石窑子乡和红旗营乡,III 区为石嘴子乡和驿马图乡,IV 区为高家营镇,V 区西湾子镇为崇礼区政府所在城区,VI 区四台嘴乡为 2022 年冬奥会核心区。

2.1.2 建立概念模型,辨识潜在压力(威胁)、生境和终点。

根据 RRM 模型的基本框架和当地的实际状况,构建针对崇礼的生态风险评价模型(图 2),用以描述压力/威胁、生境和终点之间的原因-影响路径。研究区压力主要来自人为和非人为活动,人为压力包括农业、工业、商业活动、奥运场馆和交通等基础设施建设活动,非人为压力涉及降雨/降雪、火灾、土壤侵蚀,它们既有各

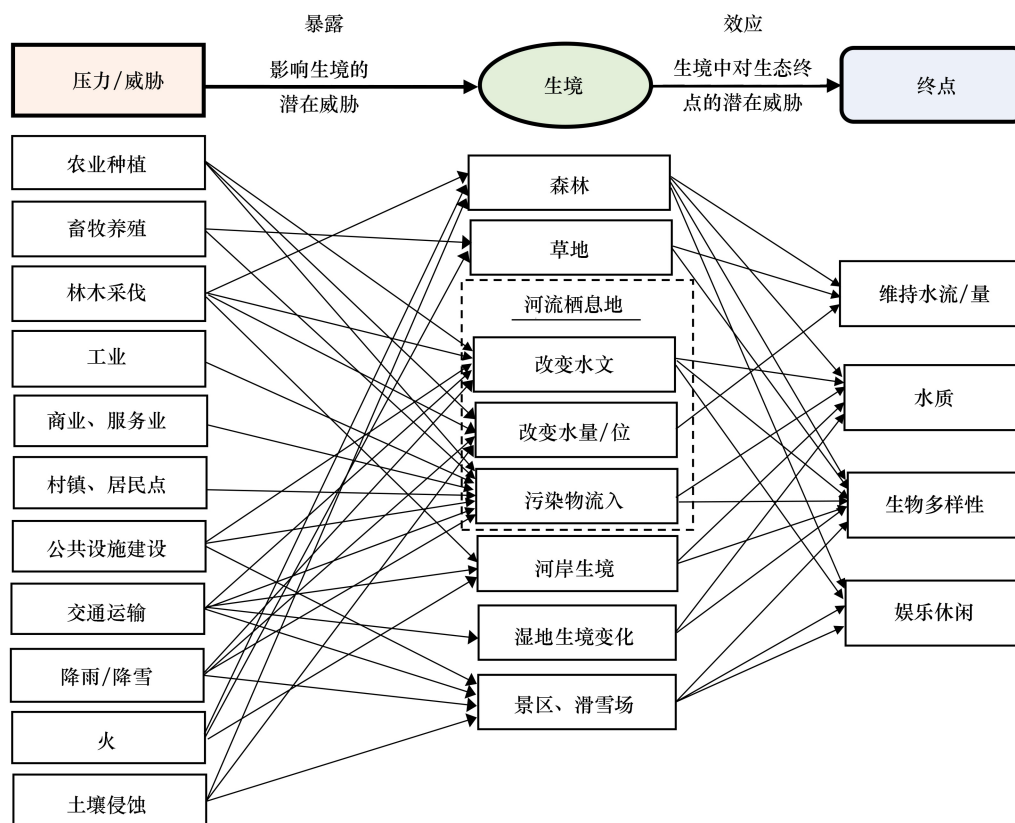


图 2 崇礼区生态风险评价的概念模型

Fig.2 Conceptual model describing the ecological risk for Chongli District

自的影响,也有相互作用。本文选择的生境与景观、河流直接相关,空间数据易于获取,通过遥感图像解译和 GIS 分析统计确定研究区内生境的类型、面积及分布范围,结合实地调研,确定生境类型:森林、草原、河流、河岸、湿地及景区-滑雪场。评价终点是在总结分析研究区前人研究工作的基础上,走访崇礼环境局、水利局,并实地调查冬奥会场馆建设区选择的,生态终点是当地的水量、水质、生物多样性和娱乐休闲。

2.2 生态风险评价

2.2.1 风险评价分级标准

根据压力和栖息地对选定终点产生显著影响的潜力确定风险排序的标准(表 2),压力和生境分级标准共 4 级,0 为无影响,2 为低影响,4 为中等影响,6 为高影响,主要根据统计数据、GIS 数据、文献研究和走访调查得出。暴露-效应的路径根据是否完整,分别赋值 0,0.5 和 1,分别代表无路径、部分可能的路径和完整的路径。不同压力衡量标准根据实际情况调整,可以是数量,也可以是比例,如农业、森林采伐采用面积的比例,而工业、商业活动主要根据企业的数量确定。

表 2 压力和生境的分类及分级标准

Table 2 Criteria for stressors and habitats ranks in Chongli District

模型参数 Model-parameter	分类 Category	分级标准 Ranking criteria	定性描述 Description	级别 Rank	分级数值范围 Value range
压力 Stressors	农业种植	耕地面积的比例/%	零	0	0
			低	2	1%—6%
			中	4	7%—10%
			高	6	11%—20%
	畜牧养殖	养殖牲畜的存栏量/只	零	0	0
			低	2	1—10000
			中	4	10001—50000
			高	6	>50000
	森林采伐	森林采伐的强度/% 采伐面积/森林面积×100%	零	0	0
			低	2	1%—10%,天然林,不常采伐,
			中	4	11%—25%,适当木材砍伐,
			高	6	26%—50%,采伐区,
	工业	企业数/个	零	0	0
			低	2	1—10
			中	4	11—40
			高	6	>40
	商业和服务业	商业服务业数/个	零	0	0
			低	2	1—100
			中	4	101—200
			高	6	>200
	村镇、居民点	村镇、居民点面积比例/%	零	0	0
			低	2	0.1%—0.5%
			中	4	0.6%—1.0%
			高	6	1.1%—5%
	公共基础设施建设	建设面积比例/%	零	0	0
			低	2	0.01%—0.05%
			中	4	0.06%—0.10%
			高	6	0.11%—0.30%
	道路和交通	道路里程/km	零	0	0
			低	2	1—100
			中	4	101—250

续表

模型参数 Model-parameter	分类 Category	分级标准 Ranking criteria	定性描述 Description	级别 Rank	分级数值范围 Value range
生境 Habitats	降雨量/降雪	年均降雨量/mm	高	6	251—500
			零	0	0
			低	2	1—200
			中	4	201—500
	火	森林火灾受害率/% 受害森林面积/森林总面积×100%	高	6	>500
			零	0	0
			低	2	0.1%—1%, 低风险, 严重后果
			中	4	1.1%—5%, 中风险, 严重后果
	土壤侵蚀	植被覆盖类型	高	6	5%以上, 高风险, 严重后果
			低	2	草原
			中	4	森林
			高	6	农作物
		土壤坡度	零	0	<1 度
			低	2	2—15 度
			中	4	16—25 度
			高	6	>25 度
	森林、草原、河岸、湿地	生境面积/风险分区总面积/%	零	0	0
			低	2	1%—14%
			中	4	15%—35%
			高	6	35%—50%
	河流栖息地	水文分区内河流长度/研究区内 河流总长度/%	零	0	0
			低	2	1%—10%
			中	4	11%—25%
			高	6	26%—40%
		地下水位 年际变化率/%	零	0	0
			低	2	0.1%—0.5%
			中	4	0.6%—2.5%
			高	6	2.6%—5.0%
		污染物流入 排放总量(m ³ /d)	零	0	0
			低	2	1—100
			中	4	100—200
			高	6	>200
	风景区和滑雪场栖息地	公共绿地所占的比例/%	零	0	0
			低	2	0.1%—0.5%
			中	4	0.6%—2.5%
			高	6	2.6%—5.0%

2.2.2 风险计算和表征

相对生态风险评价比较 6 个风险分区的压力和栖息地,并确定一个风险区域的影响机会是否大于另一个风险区域,风险表征用于将建立的完整暴露途径与为每个风险区域选择的终点进行排序。根据表 2 的分级标准,将崇礼不同风险分区的压力、生境进行分级,等级是无单位值,也称为比较风险估计,表示对有价值的终点影响概率最大的位置。结果显示 I 区各种压力的分级差别较大,II 区和 III 区的分级水平类似,V 区和 VI 区的压力分级水平相似。各分区所有压力的相对等级总和来看(图 3),VI 区四台嘴乡 2022 年冬奥会核心区的分值最高为 52 分,其次是 V 区西湾子镇,得分最低的是 II 区和 III 区,为 28。每个压力的相对等级总和来看,道路和交通活动的得分最高,为 26,其次为公共基础设施建设,得分最低的是火。

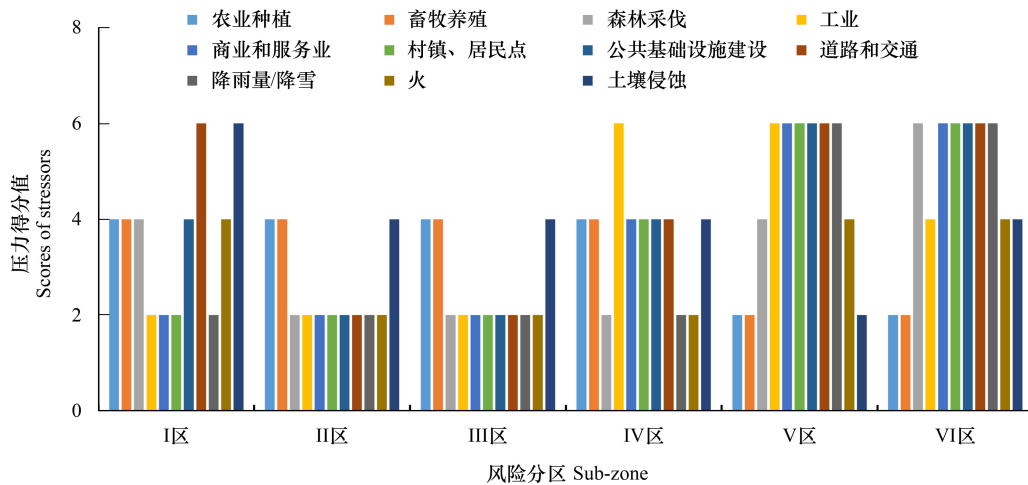


图3 崇礼区不同分区的压力分级评价得分

Fig.3 Ranking scores for stressors of each sub-zone in Chongli District

崇礼各风险分区生境的评价显示(表3),各分区所有生境类型的相对等级总和得分最高的是VI区2022年冬奥会核心区,分值最高为30分,得分最低的是III区和IV区。每个生境类型的相对等级总和来看,河流栖息地的得分最高,其次为森林,得分最低的是湿地与景区滑雪场。

表3 崇礼区不同分区的生境评价得分

Table 3 Ranking scores for habitats of each sub-zone in Chongli District

生境类型 Habitat types	I 区 Zone I	II 区 Zone II	III 区 Zone III	IV 区 Zone IV	V 区 Zone V	VI 区 Zone VI	生境总得分 Total score by habitat
森林 Forest	4	4	4	4	2	6	24
草原 Grassland	4	4	4	4	2	4	22
河流栖息地 River habitat	6	6	4	4	4	6	30
河岸 Riparian	4	2	2	2	4	4	18
湿地 Wetland	2	2	2	2	2	4	14
风景区和滑雪场 Scenic spot & ski resort	4	0	0	0	4	6	14
分区总分 Total score by sub-zone	24	18	16	16	18	30	122

根据压力和生境分级得分,并根据影响路径计算风险。从整个区域的不同生态终点得分看,生物多样性的风险最高,为2224,其次为维持水流及水量,风险得分2104,水质风险得分为1862,娱乐休闲风险最低仅得分1728(图4)。风险总得分在6个区域差别较大,从654至2330不等。从空间上看,VI区四台嘴乡冬奥场馆核心区的风险得分最高,为2330,其次为清三营乡、狮子沟乡和白旗乡,得分为1608,而风险分数最低的为III区,包括石嘴子乡和驿马图乡,仅为654分。风险分布的规律与冬奥会场馆分布及滑雪场分布基本一致,根据规划,张家口崇礼赛区有竞赛场馆4个,云顶滑雪公园对部分原有雪道进行改造,其余3个场馆都是新建,冬奥会期间将进行2个大项(滑雪和冬季两项)的比赛,冬残奥会期间将进行3个大项(残奥单板滑雪、残奥越野滑雪、残奥冬季两项)的比赛,同时新建张家口冬奥村/冬残奥村,而赛区交通网络完善和相关基础设施建设等都导致比赛场馆集中的四台嘴乡无论是单项生态风险还是总风险都居于最高值。

2.3 不确定性分析和模型应用

对风险评估结果进行了定性和定量不确定性分析。不确定性来自两个方面,一是概念模型的不确定性,二是数据的不确定性。概念模型构建是生态风险评价的关键环节,关键参数缺失或不准确都会导致风险的误

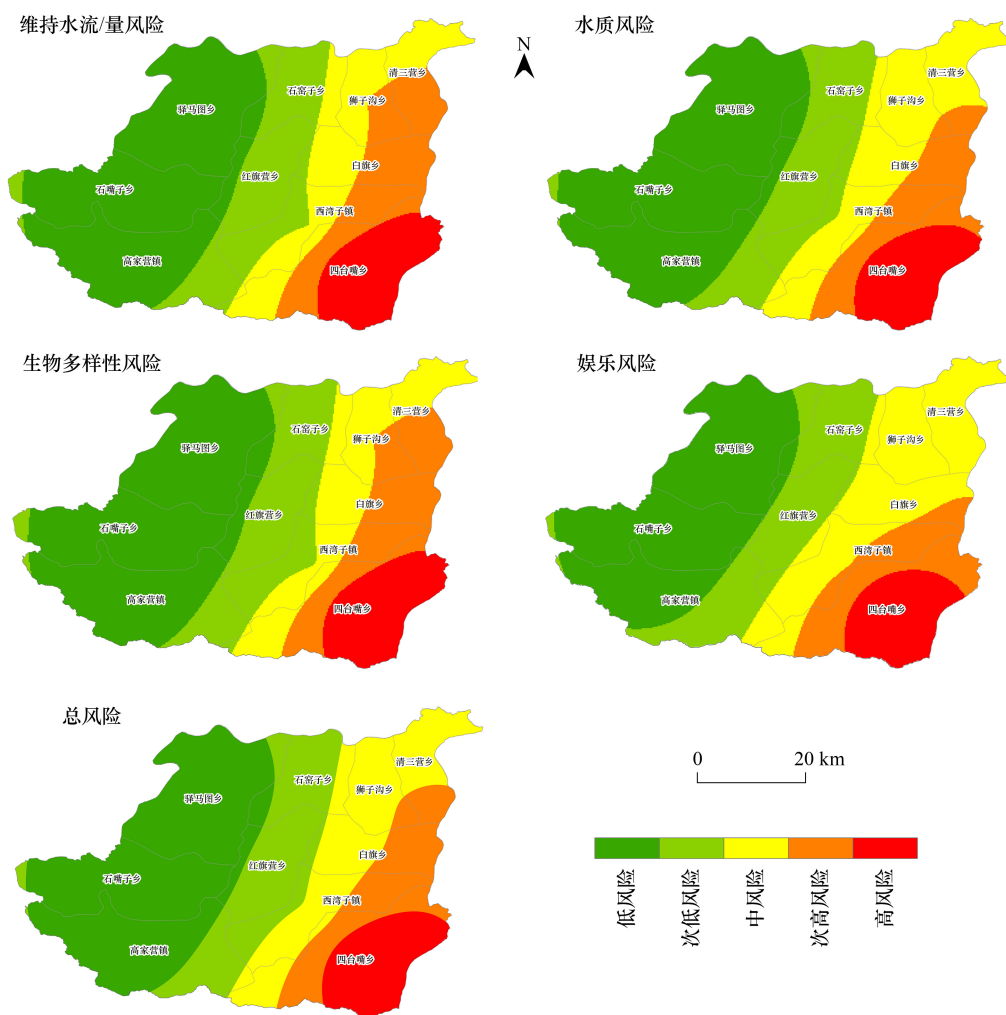


图4 崇礼区不同分区生态终点风险及总风险分布

Fig.4 Spatial distribution of the ecological endpoints risks and total risk for risk sub-zones in Chongli District

读,最重要的不确定性源于缺乏关于当地生态系统如何运行的知识,忽略了压力源及威胁,影响路径与事实不符或错误,未能识别和关联时间和空间参数,模型过于简化等。当应用空间数据时,监测点位的数据扩展应用到区域水平的风险评价时,参数的空间异质性、通过分析进行错误传播、空间数据的集聚无法完全解决都会导致风险评价结果的不确定性。此外,评价中没有考虑到从污染源进入环境的化学品的毒性效应(如来自农业的农药和来自城市的多环芳烃),多种来源污染物的累积毒性影响未进行建模,这可能导致对污染物流入等级的低估。

本文探索了模型灵敏度,进行了三次敏感性评估,以测试模型的不确定性:暴露途径分析和随机成分分析。暴露途径分析表明结果差异很大,在评估河岸栖息地时,排除畜牧养殖导致总风险等级降低3%至5%,然而,没有导致任何等级聚集到不同的风险类别中。将风景区、滑雪场栖息地中受影响的水质、生物多样性的评估终点包括在内,导致总风险增加5%至16%。当所有终点都被认为是完整路径时,等级保持不变。随机成分分析通过为每个风险区域的压力源和栖息地分配随机数来评估模型偏差。从20个模拟中可以得出结论,随机值产生随机结果,运行中没有显示任何模式。

模型应用方面,将本研究结果与前人的研究进行分析,发现RRM在其应用中是稳健和灵活的。就本研究而言,通过走访不同的利益相关者并实地调查构建模型,并确定评估终点,评价结果对冬奥会这项巨型工程的生态风险预防有一定参考价值。

3 结论和讨论

在区域尺度上进行生态风险评价的一个关键挑战是将多种威胁及其对大面积多个生态资产的影响途径纳入其中。本研究综述了相对风险评价过程,阐述问题确定、风险分析和表征、不确定性分析、风险沟通 4 个阶段并进一步划分为 10 个步骤,特别对确定分级方案、风险的计算环节详细描述。以此为基础,针对冬奥会大型赛事举办地构建了风险评价概念模型,考虑来自人类活动和自然两方面的多重压力/威胁,辨识潜在的 11 类压力(威胁)、6 类生境和 4 个评价终点,确定了压力和生境的 4 级分级标准。评价结果显示 I 区各种压力的分级差别较大,各分区所有压力的相对等级总和来看,VI 区四台嘴乡 2022 年冬奥会核心区的分值最高,得分最低的是 II 区和 III 区。每个压力的相对等级总和来看,道路和交通活动的得分最高,得分最低的是火。各分区所有生境类型的相对等级总和得分最高的是 2022 年冬奥会核心区 VI 区,得分最低的是 III 区和 IV 区。每个生境类型的相对等级总和来看,河流栖息地的得分最高,得分最低的是湿地与景区滑雪场。压力、生境对风险终点的总体评价表明,VI 区四台嘴乡冬奥场馆核心区的风险得分最高,其次为清三营乡、狮子沟乡和白旗乡,而风险最低的为 III 区,包括石嘴子乡和驿马图乡。从整个区域的不同生态终点得分看,生物多样性的风险最高,其次为维持水流及水量,娱乐休闲风险最低。研究定量测度了冬奥会赛前阶段崇礼赛区的生态风险,不仅辨识了风险来源,而且分析了多种威胁对于生境和终点的影响,分析了不同生态风险的空间分布格局,这对管理部门减缓生态影响,降低生态风险提供了依据,也对未来赛后冬奥会遗产的保护和管理具有重要的参考价值。

相对风险评价模型的优点值得关注。首先,RRM 为风险评估提供了一个强有力的框架,特别是在区域范围内,既考虑了风险的来源及威胁类型,也兼顾压力-生境-终点的传递路径,可以进行大尺度的风险分析。该方法的一个主要优势是能够绘制相对风险图,来自不同背景的利益相关者很容易理解这些地图,从而促进他们之间的沟通。其次,以 RRM 评估结果为基础的风险管理框架的灵活性。随着更多风险来源、压力/威胁信息的可得性及使用条件不可避免地随时间变化,评估指标和路径可以随时更新。其他优势包括 RRM 过程生成关于威胁和资产之间因果关系的可测试假设的能力,以及获取模型和参数不确定性的能力。

当然,RRM 也有局限性。首先,使用栖息地面积作为暴露于压力/威胁的度量可能会低估相对较小栖息地面积区域的风险。评估中通常假设栖息地面积较大的风险区域排名较高,表明对终点有较大影响,但情况可能并非如此,因此,如果除栖息地范围、位置和质量外,还有更多可用数据,则应采用栖息地的替代排名方案。其次,虽然生态预测和管理策略对模型结构的不确定性敏感,但除了模型参数的可变性之外,实践中通常忽略了对替代概念模型结构影响的系统分析。另外,虽然将空间数据整合到模型中是 RRM 方法的一个关键优势,但使用空间数据时也存在一些风险,即使进行了数据验证,仍然存在导致模型输出不确定性的问题。一般空间数据通常是基于数据创建者的主观解释,因此空间数据可能不能代表威胁和栖息地的真实性质,而获取的空间数据可能不是最新的,也不能充分代表当前的威胁,如本研究表明,如果没有特定压力/威胁的可用空间数据,则只能选择可能的指标和数据。

总之,区域风险评价适用于各种情况,国外学者关注流域、海岸线、土地利用等^[21—24,32—33],我国目前已在流域、地下水、喀斯特山地、矿区等的风险评价中应用 RRM^[25—29,34],前人研究证明在优先考虑生态压力和终点的风险方面 RRM 是有效和高效的。考虑到 RRM 的灵活性和稳健性,适用范围可以更广,未来可应用在具有多重人类和自然压力情况下的多种应用场景。此外,地理信息系统以及水生和陆地建模方面的显著进步使区域风险评估能够提高对复杂系统的理解和可视化水平。未来,面对由多个复杂交互作用组成的系统,将这些交互作用完全集成到评估设计中,会对管理者的区域管理决策提供更大的参考价值。

参考文献(References):

- [1] Chalkley B, Essex S. Urban development through hosting international events: a history of the Olympic Games. *Planning Perspectives*, 1999, 14 (4): 369-394.

- [2] 贺桂珍, 张衢, 吕永龙. 冬奥会对举办城市生态环境的影响研究进展. 生态学报, 2020, 40(4): 1129-1139.
- [3] Baade R A, Baumann R, Matheson V. Slippery slope? Assessing the economic impact of the 2002 Winter Olympic Games in Salt Lake City, Utah. *Region et Developpement*, 2010, 31: 81-92.
- [4] Gaudette M, Roult R, Lefebvre S. Winter Olympic Games, cities, and tourism: a systematic literature review in this domain. *Journal of Sport & Tourism*, 2017, 21(4): 287-313.
- [5] He G Z, Yeerkenbieke G, Baninla Y. Public participation and information disclosure for environmental sustainability of 2022 Winter Olympics. *Sustainability*, 2020, 12(18): 7712.
- [6] Prudnikova N. Environmental Problems and unintended consequences of the Winter Olympic Games: a case study of Sochi 2014. *Journal of Policy Research in Tourism, Leisure and Events*, 2012, 4(2): 211-214.
- [7] Paquette J, Stevens J, Mallen C. The interpretation of environmental sustainability by the International Olympic Committee and Organizing Committees of the Olympic Games from 1994 to 2008. *Sport in Society*, 2011, 14(3): 355-369.
- [8] International Olympic Committee (IOC). Sustainability Strategy. Lausanne: IOC, 2017.
- [9] 张铭琦, 梅笑寒, 庞凌波, 张利. 张家口赛区: 服务地方长期发展的雪上赛区规划设计. 建筑学报, 2021, (7): 134-141.
- [10] Song S, Zhang S, Wang T Y, Meng J, Zhou Y Q, Zhang H. Balancing conservation and development in Winter Olympic construction: evidence from a multi-scale ecological suitability assessment. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 14083.
- [11] 赵永真, 顾福计, 冀广, 刘彦章. 冬奥会交通走廊矿山地质环境治理思路探讨——以三道营铁矿有限公司铁矿为例. 城市地质, 2016, 11(2): 26-29.
- [12] 钟良子, 杨新兵, 温亚飞, 丁杰, 马俊杰. 张家口市崇礼区景观格局分析. 林业与生态科学, 2019, 34(3): 241-248.
- [13] 刘孟竹, 张红娟, 裴宏伟. 基于主成分分析的崇礼区土地利用变化及驱动力分析. 河北建筑工程学院学报, 2020, 38(2): 70-75.
- [14] 温亚飞, 杨新兵, 胡静霞, 钟良子, 朱辰光, 马俊杰. 2022 年冬奥会崇礼赛区主要林分类型空间结构特征分析. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2017, 38(1): 29-35.
- [15] 郭建军, 王佳欢, 胡静霞, 杨新兵. 2022 年冬奥会崇礼赛区针叶林枯落物及土壤水文效应. 中国水土保持科学, 2021, 19(4): 44-50.
- [16] 袁园媛, 徐开娟. 基于居民认知视角对北京冬奥会环境影响的研究. 体育科研, 2020, 41(5): 38-45, 63-63.
- [17] 樊炳有. 传承与创新: 冬奥会生态环境治理的北京经验. 国家治理, 2022, (4): 58-61.
- [18] 钟良子, 马俊杰, 张慧卿, 吕发, 张晨星, 丁杰, 杨新兵. 张家口市崇礼区景观生态风险评价. 河北农业大学学报, 2019, 42(6): 30-37.
- [19] Graham R L, Hunsaker C T, O'Neill R V, Jackson B L. Ecological risk assessment at the regional scale. *Ecological Applications*, 1991, 1(2): 196-206.
- [20] Landis W G, Wiegiers J A. Design considerations and a suggested approach for regional and comparative ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*, 1997, 3(3): 287-297.
- [21] Landis W G, Wiegiers J K. Ten years of the relative risk model and regional scale ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2007, 13(1): 25-38.
- [22] Bartolo R E, van Dam R A, Bayliss P. Regional ecological risk assessment for Australia's tropical rivers: application of the Relative Risk Model. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2012, 18(1): 16-46.
- [23] Anderson S M, Landis W G. A pilot application of regional scale risk assessment to the forestry management of the Upper Grande Ronde watershed, Oregon. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2012, 18(4): 705-732.
- [24] Ayre K K, Landis W G. A Bayesian approach to landscape ecological risk assessment applied to the upper Grande Ronde Watershed, Oregon. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2012, 18(5): 946-970.
- [25] 熊勤犁, 肖洋, 史雅娟, 吕永龙, 肖强, 欧阳志云. 长江上游重庆段流域生态风险评价——基于 RRM 模型. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(11): 141-146.
- [26] 刘晓, 苏维词, 王铮, 黄一民, 邓吉祥. 基于 RRM 模型的三峡库区重庆开县消落区土地利用生态风险评价. 环境科学学报, 2012, 32(1): 248-256.
- [27] 王祺, 蒙古军, 孙宁. 基于 RRM 模型和不确定性分析的喀斯特地区生态风险管理——贵阳市案例研究. 山地学报, 2016, 34(4): 476-484.
- [28] 李仙波, 左锐, 滕彦国, 王金生, 王朕. 基于 RRM 模型的化工企业对下辽河平原区域地下水环境风险评价. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(5): 580-585.
- [29] 徐阳, 陈勇, 周皓, 曾向阳, 周俊哲, 刘艳中, 冯博. 基于相对风险模型的大冶市典型矿区生态风险评价. 矿业研究与开发, 2021, 41(12): 188-194.
- [30] 肖王星, 效存德, 郭晓寅, 马丽娟. 北京-张家口地区冬春季积雪特征分析. 冰川冻土, 2016, 38(3): 584-595.
- [31] Landis W G. Regional Scale Ecological Risk Assessment: Using the Relative Risk Model. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [32] Obery A M, Landis W G. A regional multiple stressor risk assessment of the Codorus Creek Watershed applying the Relative Risk Model. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2002, 8(2): 405-428.
- [33] Bayliss P, van Dam R A, Bartolo R E. Quantitative ecological risk assessment of the Magela Creek floodplain in Kakadu national park, Australia: comparing point source risks from the ranger uranium mine to diffuse landscape-scale risks. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2012, 18(1): 115-151.
- [34] 赵源, 黄成敏. 基于 RRM 的市级土地利用总体规划生态风险评价. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1102-1109.