

内陆河流域水污染风险分区安全评价

——以黑河流域为例

靳春玲, 李战江, 贡力, 蔡惠春, 田亮

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: [目的] 对内陆河流域开展水污染风险分区评估, 分析内陆河流域水污染风险分布特征, 为内陆河其他流域及全国其他流域水污染风险的评估提供参考。[方法] 以2021年黑河流域环境统计数据、DEM数据、水质监测断面数据和基础地理数据等为数据基础, 以1 km×1 km网格为基本单元, 利用GIS空间分析精细化、可视化表征水污染风险程度和分布情况, 采用环境风险场评估法对黑河流域开展水污染风险分区评估, 分析该流域水污染风险分区分级分布特征。[结果] 黑河流域只有极少区域处于高风险水平; 污染严重水系主要集中在中下游区域, 包括洪水河、讨赖河水系以及山丹瓷窑口到高台黑大板河、黑河干流、梨园河等多条河流, 准确识别出了黑河流域水污染高风险“热点”区段19个, 污染严重部分主要分布于水系周边的风险源以及沿河公路、跨河桥梁与水系的伴行段重叠交叉区域。整个黑河流域的水污染风险处于低风险水平, 在可控范围之内。[结论] 该评价指标体系能够从多维度、多空间来表征内陆河流域水污染风险的主要问题, 帮助完善内陆河流域水污染风险评价指标体系, 提升流域全过程风险管理水平。

关键词: 内陆河流域; 水污染; 风险分区; 安全评价; 黑河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0113-09

中图分类号: X52

文献参数: 靳春玲, 李战江, 贡力, 等. 内陆河流域水污染风险分区安全评价[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 113-121. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.013; Jin Chunling, Li Zhanjiang, Gong Li, et al. Safety evaluation of water pollution risk zoning in inland river basins [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 113-121.

Safety Evaluation of Water Pollution Risk Zoning in Inland River Basins

—Taking Heihe River Basin as an Example

Jin Chunling, Li Zhanjiang, Gong Li, Cai Huichun, Tian Liang

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: [Objective] The distribution characteristics of water pollution risk in inland river basins were analyzed. A regional assessment was conducted to provide theoretical support and reference for the study of water pollution risks and incidents in inland river basins. [Methods] Geographic information system (GIS) spatial analysis was used to refine and visualize the degree and distribution of water pollution risk based on environmental statistical data, digital elevation model (DEM) data, water quality monitoring section data, and basic geographic data of the Heihe River basin in 2021, and a 1 km × 1 km grid as the basic unit. The environmental risk field was used to assess the water pollution risk in the Heihe River basin and to analyze the distribution characteristics of water pollution risk zoning. [Results] Only a few areas in the Heihe River basin were at high-risk levels. Severely polluted water systems were mainly concentrated in the middle and lower reaches of the river, including Hongshui River, Taolai River system, and many rivers such as the Heidaban River from Shandan Ciyakou to the Gaotai, main stream of Heihe River, and Liyuan River. Nineteen high-risk “hot spots” in the Heihe River basin have been accurately identified. Severe pollution was mainly distributed in the risk sources around the water system and in the overlapping areas of roads along the river, bridges across the river, and companion sections of the water system. The risk of water pollution in

收稿日期: 2024-05-16

修回日期: 2024-07-09

资助项目: 国家自然科学基金项目“西北内陆河突发水污染预警—溯源—调控技术研究”(72261024); 甘肃省科技计划项目(23ZDFA002)

第一作者: 靳春玲(1976—), 女(汉族), 黑龙江省齐齐哈尔市人, 硕士, 教授, 主要从事水安全及水利工程项目管理研究。Email: jinchunling@mail.lzjtu.cn.

通信作者: 李战江(1999—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 硕士研究生, 研究方向为水环境安全评价。Email: 2984698560@qq.com.

the entire Heihe River basin was low and within a manageable range. [Conclusion] This evaluation index system can characterize the main problems of water pollution risk in inland river basins from multi-dimensional and multi-spatial perspectives to improve the evaluation index system of water pollution risk in these basins and the level of risk management in the entire river basin.

Keywords: inland river basin; water pollution; risk zoning; safety evaluation; Heihe River basin

随着内陆河流域两岸人口数量、工业企业的持续增加以及水土资源开发利用强度的不断增大,突发环境事件频发。中国突发环境事件近年来数量总体呈缓慢下降态势,但区域性、布局性、结构性环境事件呈高发频发态势^[1],造成部分河流断流,加剧了流域水资源量的短缺,出现了诸如水质受到约束、水生态退化、水环境纳污能力逐渐接近上限、局部河段水质污染加重等环境问题,使得流域水生态系统健康受到严重威胁^[2-3]。西北地区河流水系分布复杂,仅甘肃省分布有内陆河、黄河、长江 3 大流域 10 个水系^[4],但是针对内陆河流域的全过程风险管理措施以及应急救援能力等方面还存在不足,如对沿河工业企业的规模信息、历史污染事件情况统计不全面以及突发事件发生后采取的应对机制尚不完善等问题。实施分区分级评价是流域水污染安全评价的重要方向,结合评估流域内自然环境与社会环境的结构功能特点,对评估流域进行功能区划。通过风险分区分级评价,系统识别出水污染高风险区域,对流域水污染风险实施分区分级预防与治理有重要意义^[5-8]。针对区域水污染风险分区评估的研究方向,已有学者做了探索性的相关研究^[9-16]。如黄蕾等^[16]、张晓娇等^[17]、齐鹏等^[18]应用指数法做了相关研究。其方法主要是对识别出的风险指标量化分析,综合评价风险等级。周夏飞等^[9,11]、Cao Guozhi 等^[11]运用网格环境风险场评估法对区域水污染风险分区评估进行了研究。网格环境风险场评估将评估区域划分为若干个单元网格,在每个单元网格内考虑影响该单元环境质量的各种污染源和风险因素,并对其进行综合量化评价。

综上所述,分区分级评价是水污染风险评价的重要研究方向,开展区域风险分区研究是很有必要的,开展内陆河风险分区研究更加有利于提升内陆河突发水污染事件应急防控水平和安全评价能力^[19-20]。但对内陆河流域水污染风险分区的研究较少。因此,本文针对内陆河流域作为水污染风险评价的薄弱,以 2021 年为基准数据,以黑河流域为研究对象,采用环境风险场评估法对内陆河流域开展水污染风险分区评估,分析内陆河流域水污染风险分布特征,以期为内陆河其他流域及全国其他流域水污染风险的评估提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黑河流域是中国西北地区第二大内陆河流域^[21]。从发源地到居延海全长 821 km,可分为东、中、西 3 个子水系,横跨 3 种不同的自然环境单元,流域面积约 $1.429 \times 10^5 \text{ km}^2$,位于河西走廊中部,是河西走廊最大的一条内陆河水系。上游为祁连山区,是径流形成区,径流年内分配不均匀,年际变化较大,但变幅比单一降水补给型小。中游地势平坦,为径流利用区,下游为开阔盆地,为径流消耗区。黑河流域气候主要受中高纬度的西风带环流控制和极地冷气团影响,气候干燥,降水稀少而集中,多大风,日照充足,太阳辐射强烈,昼夜温差大,常年干旱少雨、植被脆弱、水资源蒸发量巨大。具有径流量小、水环境封闭、自净能力差等特点^[2],有发生水污染的潜在风险。

1.2 研究步骤及风险表征

基于环境风险场评估方法,结合具体研究内容,本研究主要分为以下 4 个步骤。首先按风险类别计算出风险源分数,依次赋值到单元网格中,再计算出每个网格数值,最后结合 ArcGIS 相应的工具模块得出子流域风险等级和河道 500 m 缓冲区风险安全等级。①通过对黑河流域的相关调查研究,统计、整理已获得的水文、气象、地理等资料,结合水污染发生的机理特征及流域概况,从多维度、多空间识别风险因素,揭示风险源与风险受体之间的关系;②基于科学性、整体性、代表性、数据可获得性和可操作性等指标体系构建原则,构建黑河流域水污染风险分区安全评价指标体系,并明确各风险指标的评价标准。对已构建好的风险安全评价体系中的各风险源按照其风险所属类别计算赋值并确定权重,将风险源分数按照单元网格坐标进行赋值;③为了便于流域风险管理,基于流域 DEM 数据对黑河流域利用 ArcGIS 软件 Create Fishnet 和 Hydrology 工具集中的一些具体工具来进行网格划分和子流域提取,再采用风险计算公式计算每个单元网格风险数值。利用空间插值计算方式,具体在 ArcGIS 中选择反距离插值,进行黑河流域整体范围的插值计算,在网格化评估结果的基础上叠加子流域,得到流域水污染风险安全评估的初

始结果;④基于初始风险评估结果,运用 ArcGIS 软件中 ArcToolbox 工具箱,利用分析功能中的缓冲区功能做河道 500 m 缓冲区,以上述同样的方式进行缓冲区插值计算,对整个流域和水系周边缓冲区进行综合风险评估,划分黑河流域水污染风险安全评价等级。

1.3 研究区数据来源

通过前期基础资料、历史数据统计和后期调查,确定黑河流域主要污染风险源的类型。其中在本研究调查中移动源通过各种类型的公路及桥梁来表征,在移动源风险因素中主要考虑沿河公路和跨河桥梁与周边水系的交叉重叠区域、沿水系的公路里程数和通车跨河桥梁数。而线源风险是指输油气管线,主要考虑输油气管线穿越流域支流、敏感保护区等的影响。为了准确描述黑河流域水污染风险分布特征,结合黑河流域概况,本研究所使用的流域 DEM 数据、基础地理数据等主要来自地理空间数据云官网、国家地理基础信息中心;风险源及其分布、水资源分布、河流水系、历史污染事件等数据主要来自甘肃省突发事件风险源调查评估报告及 2021 年《甘肃水土保持公报》《甘肃水利年鉴》《甘肃水资源公报》《甘肃省环境状况公报》,还有一些数据来自相关科研文献资料和历史查勘数据。

1.4 评价指标体系的构架

结合流域的不确定性、敏感性、易损性及黑河流域具体情况,多角度分析流域风险源和风险受体之间的关系,主要从风险源、风险受体、风险控制机制 3 方面因素来表征指标^[22]。因此,本研究以黑河流域水污染风险作为目标层,以风险源强度(S)、风险受体脆弱性(V)、风险防控与应急能力(M)3 个作为准则层,以固定风险源、历史污染事件情况、废水排放去向、敏感保护区、暴露人口数量、应急物资储备情况和应急人员数量、公共应急救援水平等 32 个指标作为指标层构建黑河流域水污染风险安全评价指标体系。黑河流域水污染风险评价指标体系具体如表 1 所示。

风险源强度(S)指标主要考虑沿河危险企业数、历史污染事件情况、废水排放去向、工业企业危险化学品及危险废物运输情况、沿河公路数、过河桥梁数。具体可分为固定风险源危险度(S_1)、企业距河远近(S_2)、历史污染事件情况(S_3)、废水排放去向(S_4)、入河排污口的数量及其排放量(S_5)、固定垃圾集中处理厂(S_6)、湿法尾矿库风险(S_7)、风险源与最近水系高程差(S_8)、危险物质储量(S_9)、沿河公路路数(S_{10})、跨河桥梁数(S_{11})、道路与水系交叉点的桥长

情况(S_{12})、道路年运输危化品转移运输量(S_{13})、道路穿敏感保护区的情况(S_{14})、道路与水系交叉点的围栏设置(S_{15})、输油管线是否穿过河流(S_{16})、输油管线穿越敏感地保护区情况(S_{17})共 17 个指标。

流域风险受体主要包括重点水系、水库、饮用水水源地保护区和下游的居民点等。因此,环境风险受体脆弱性(V)指标具体包括水系级别(V_1)、暴露人口数量(V_2)、敏感保护区(V_3)、水质类别(V_4)、人均 GDP 水平(V_5)、水生生态风险(V_6)、水资源开发利用率(V_7)共 7 个指标。

流域发生突发水环境污染事件后,其污染扩散性和严重程度主要受该范围内环境风险防范与应急能力制约,如流域内污染物拦截、稀释、处置能力。风险防控与应急能力(M)指标主要包括应急物资储备情况(M_1)、应急人员数量(M_2)、专业应急救援水平(M_3)、闸坝设施情况(M_4)、在线视频检测情况(M_5)、输油线穿越风险受体处,应急物资(M_6)、输油线穿越风险受体处,应急人员(M_7)、拦截设施情况(M_8)共 8 个指标。

1.5 风险指标量化及权重确定

在建立评价指标体系后要有相应的评价标准来度量评价指标的优劣。基于《行政区域突发环境事件风险评估推荐办法》^[23]等国家管理部门颁发的国家技术标准和规范,结合所收集的环境评估文献资料、相关历史资料及专家咨询意见^[24-25],对评价指标进行规范化、定量化处理。具体评价指标量化说明及权重详见表 1。

1.6 黑河流域水污染风险评估

1.6.1 风险指数计算 风险指数的变化在空间上与风险源强度、风险源受体呈正相关关系,与风险控制机制呈负相关关系^[24]。如评估区域内沿河危险企业数越多、危险物储量越多,危险企业距离水系越近等,则相应的风险源强度也就越高;评估区域内敏感保护区、暴露人口数量越多,其风险受体脆弱性也相应越强,同时反映出风险应急处理机制的欠缺性,也就是相应流域风险值越高。在风险指标规范化处理过程中,对风险源强度和风险受体正向处理,对风险防控机制逆向处理。在百分化处理的过程中,根据数据的离散程度,利用极差法处理,计算公式为:

$$x = \frac{x_i - x_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中: x 指标百分化处理后的指标数值; x_i 为指标在 i 网格中的实际数值; x_{\max} 为指标在所有网格实际数值中的最大值; x_{\min} 为指标在所有网格实际数值中的最小值。

表 1 流域风险指标体系说明、量化方法及指标权重

Table 1 Description, quantification method and index weights of river basin risk indicator system

准则层	准则层		指标说明	量化方法	指标权重
	类别	指标			
风险源强度 (S)	固定源	固定风险源危险度 S_1	根据企业风险评估报告和应急预案判定其水污染风险等级	特大 100, 重大 75, 较大 50, 一般 25, 无 0	0.10
		企业距河远近 S_2 /km	将固定源分布在 ArcGis, 利用测距功能测出其与最近水系的距离	≤ 1 , (1,3], (3,5], (5,10] 和 > 10 , 分别赋值 100, 75, 50, 25, 0	0.10
		历史污染事件情况 S_3	根据重大水污染事件报告办法中重大水污染事件的定义, 对近 30 年发生水污染时间情况分等赋值	引发特别重大、重大、较大、一般等级水污染事件次数超过 1 次分别赋值 100, 75, 50, 10	0.10
		废水排放去向 S_4	根据企业突发事件风险评估指南, 对废水排向进行分类划分	直接排放、进入下水道、进入污水处理厂、不产生废水分别赋值 100, 75, 50, 0	0.10
		入河排污口的数量及其排放量 S_5	根据现场调查识别结果, 判断网格内有无排污口, 若存在排污口, 则进行量化	无排污口为 0, 若有则按照极差法百分化进行量化	0.10
		固定垃圾集中处理厂 S_6	根据现场调查识别结果, 判断网格内有无干法尾矿库、医疗废物等固体废物处理厂	二类以上干法尾矿库赋值 50, 医疗废物处理厂赋值 25, 没有为 0	0.10
		湿法尾矿库风险 S_7	根据现场调查识别结果, 判断网格内有无湿法尾矿库, 并判明其级别	二类以上赋值 100, 没有则为 0	0.10
		风险源与最近水系高程差 S_8	根据数字高程模型计算得到风险源与其最近水系高程差	采用百分化赋值给网格内的风险源, 若高程差出现负值则赋值 0	0.15
		危险物质储量 S_9	根据重大危险源辨识方法, 计算危险化学品数量来表征危险物质储量	按照危险物质储量等级赋值, I, II, III, IV 级分别赋值 100, 75, 50, 10	0.15
移动源	移动源	沿河公路路数 S_{10} /km	按照沿河公路里程数分级赋值	≥ 20 , [10,20), [5,10), [0,5) 分别赋值 100, 75, 50, 10	0.15
		跨河桥梁数 S_{11} (座)	统计网格内实际通车跨河桥梁数	≥ 10 , [5,9], [2,4], 1 分别赋值 100, 75, 50, 10	0.15
		道路与水系交叉点的桥长情况 S_{12}	根据现场调查资料, 获取网格内有长流水桥和桥长大于 30 m 的无水桥段	桥长小于 30 m 的赋值 50, 桥长大于 30 m 的赋值 100, 没有赋值 0	0.15
		道路年运输危化品转移运输量 S_{13}	利用各行政区域交通局提供的年危险废物运输量, 结合危险废物运输道路, 计算单位长度道路运输危险废物的数量, 再乘以网格内道路的长度	百分化处理	0.15
风险源强度 (S)	移动源	道路穿过敏感保护区的情况 S_{14}	对穿过不同级别的自然保护区、水源地保护区道路分别赋值	国家级、省级、市(县)级、无分别赋值 100, 75, 50, 10	0.20
		道路与水系交叉点的围栏设置情况 S_{15}	根据现场调查识别结果, 不同的防撞栏材质赋值	下方无水泥基础的石栏、铁栏、下方有水泥基础的石栏、水泥墙分别赋值 100, 75, 50, 10	0.20
		线源	输油管线是否穿过河流 S_{16}	结合矢量数据及现场调研结果, 对输油管线与水系是否有交叉点进行判断, 并赋值	穿过河流赋值 100, 没有为 0
输油管线穿越敏感地保护区情况 S_{17}	对穿过不同级别的自然保护区、水源地保护区道路分别赋值		国家级、省级、市(县)级、无分别赋值 100, 75, 50, 10	0.50	
风险受体脆弱 (V)	—	水系级别 V_1	根据官方水系分布图转换为矢量数据, 提取水系, 判断网格内穿过的水系级别, 分别赋值	干流、一级、二级、三级及以下、无水系分别赋值 100, 75, 50, 25, 0	0.10
		暴露人口数量 V_2 (万人)	参考国家突发环境事件应急预案, 根据有可能受到水污染事故的危害人群	> 50 , (10,50], (1,10], ≤ 1 分别赋值 100, 75, 50, 10	0.20
		敏感保护区 V_3	对穿过不同级别的自然保护区、水源地保护区道路分别赋值	国家级、省级、市(县)级、无分别赋值 100, 75, 50, 10	0.20
		水质类别 V_4	根据网格内的水体功能区分别赋值	I, II, III, IV, V 类, 无水体分别赋值 100, 80, 60, 40, 20, 0	0.15
		人均 GDP 水平 V_5 (万元/人)	流域内 GDP 总值除以人口数量	≥ 10 , (10,5], (5,3], < 3 分别赋值 100, 75, 50, 10	0.05
		水生生态风险 V_6	水生生态受到污染后, 对水生生物物种的影响	国家重点保护、国家特有、重要水产原种、其他具有较高经济价值分别赋值 100, 75, 50, 10	0.10
		水资源开发利用率 V_7	根据水资源开发利用程度	利用率为 60%, 40%, 20%, 10% 分别赋值 100, 75, 50, 10	0.20

续表 1 (Continued table 1)

准则层	准则层		指标说明	量化方法	指标权重
	类别	指标			
风险 防控 与 应急 能力 (M)	固定源	应急物资储备情况 M_1	根据现场调查情况及风险评估报告,确定应急物资储备情况	能满足要求的应急物资赋值 100,不能满足要求的按照实际应急物资储备量占要求储备物资的百分比百分化处理	0.30
		应急人员数量 M_2	根据环境风险评估报告,确定应急人员数量	$\leq 3, (3,5], (5,16]$ 和 >16 ,分别赋值 100,75,50,10	0.35
		专业应急救援水平 M_3	根据现场调查情况,判断当地政府有无突发事件应急预案	若有赋值 0,无赋值 100	0.35
	移动源	闸坝设施情况 M_4	根据各行政区提供的水利资料,判断网格内的闸坝情况	若设施完好并使用赋值 0,若无赋值 100	0.50
		在线视频监控情况 M_5	根据现场调查资料,判断风险源及附近生产、储存场所有无监控设备	无、生产储存有、部分污染源、均有分别赋值 100,75,50,10	0.50
	线源	输油管线风险受体处是否有应急物资 M_6	根据现场调查资料,判断网格内输油管线穿过风险受体处是否有应急物资	无应急物资赋值 100,有赋值 0	0.30
		输气管线风险受体处,应急人员数量 M_7	根据环境风险评估报告,确定应急人数数量	$\leq 3, (3,5], (5,16]$ 和 >16 ,分别赋值 100,75,50,10	0.30
		拦截设施情况 M_8	根据现场调查及线源应急预案,判断网格内拦截坝和控制堰的数量及使用情况	若设施完好并使用赋值 0,若无赋值 100	0.40

注:表格中风险源强度(S)、风险受体脆弱(V)、风险防控与应急能力(M)3个准则层均为百分制;固定源、移动源、线源指标比例为20%、70%和10%;评价因子值($S_i/V_i/M_i$)=量化分值×指标权重×指标比例(其中: S_i 为网格*i*的风险源强度评价因子、 V_i 为网格*i*的风险受体脆弱评价因子值、 M_i 为网格*i*的风险防控与应急能力评价因子值,*i*为网格序号);“—”指由于风险受体脆弱(V)类型较少,故再没有细化二级指标。

风险源强度(S)指标数值以算术加和方式计算

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_{17} \quad (2)$$

风险受体脆弱性(V)指标数值以算术加和方式计算

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_7 \quad (3)$$

风险防控与应急能力(M)指标数值逆向处理

$$M = 100 - (M_1 + M_2 + \dots + M_8) \quad (4)$$

将上述经过数据化、标准化处理后的每个单元网格风险源强度、风险受体和风险控制机制的数值代入公式(5),开方计算单元网格水污染风险指标数值。黑河流域单元网格水污染风险综合指标数值计算公式为:

$$R_i = \sqrt[3]{S_i V_i M_i} \quad (5)$$

式中: R_i 为单元网格*i*的水污染风险指数。

1.6.2 黑河流域水污染风险安全等级划分 根据《行政区域突发环境事件风险评估推荐方法》^[23]和相关研究^[14,25-29]以及每个单元网格风险指标综合数值*R*,将黑河流域水污染风险安全评价等级划分为3个等级,具体为:高风险($R > 120$)、中风险($60 < R \leq 120$)和低风险($R \leq 60$)。

2 结果与分析

2.1 子流域提取及流域网格化

基于流域水污染网格化评估方法,结合黑河流域具体概况以及矢量数据^[30-31],应用 ArcGIS 软件中 Spatial Analyst 工具进行填洼处理、制作流向和流量

数据、平滑处理^[32]等水文特征分析,提取黑河水系子流域。运用 ArcGIS 软件中的渔网工具将黑河流域划分为 1 km×1 km 的单元网格,并对划分的每个单元网格依次进行编号。提取的子流域、缓冲区、网格化结果如图 1 所示。

2.2 流域环境风险评估

根据评价指标计算步骤,得出流域风险指数,按照网格坐标位置赋值相应的风险指数,再通过空间插值计算中的反距离插值到整个流域范围,得到网格化风险分布图和 IDW 图(如图 2 所示)。根据图 2a 黑河流域网格化(1 km×1 km)水污染风险评估结果可知,黑河流域只有少部分区域处于中风险水平,极少部分区域处于高风险水平,整体而言,黑河流域水污染风险处于低风险水平,因此,整个黑河流域的水污染风险是具有可控性的。其中,高、中风险区域主要集中在流域中下游区域,高风险区域集中分布于水系周边及与沿河交通运输线交叉重叠区域。

利用 ArcGIS 水文分析和缓冲功能,将图 2 中的网格化水污染风险等级与图 1 中提取的水系子流域和河道缓冲区进行叠加,以得出子流域与缓冲区水污染风险等级的分布特征(图 3)。根据图 3a 黑河流域的子流域水污染风险分布特征可知,风险区域的主要分布位置与流域地理位置吻合度较高。揭示黑河流域重点改善高危险性风险源,其原因主要是沿河危险企业数、入河排污口、企业废水排放去向、敏感保护区等水系周边的各种风险源对流域的安全性影响更大。

基于上述流域水污染风险分级分布信息,在后续对流域水污染风险全过程管理中,将风险重点防控范围放在沿河工业企业以及沿河交通运输线与水系交叉处等水系周边区域。根据图 3b 黑河流域河道 500 m 缓

冲区水污染风险评估结果,最终确定黑河流域水污染风险分布情况。对主要高风险区域的具体位置和分布特征有了准确定位,有利于风险识别、评估、控制和监测,提高流域水污染风险管理水平。

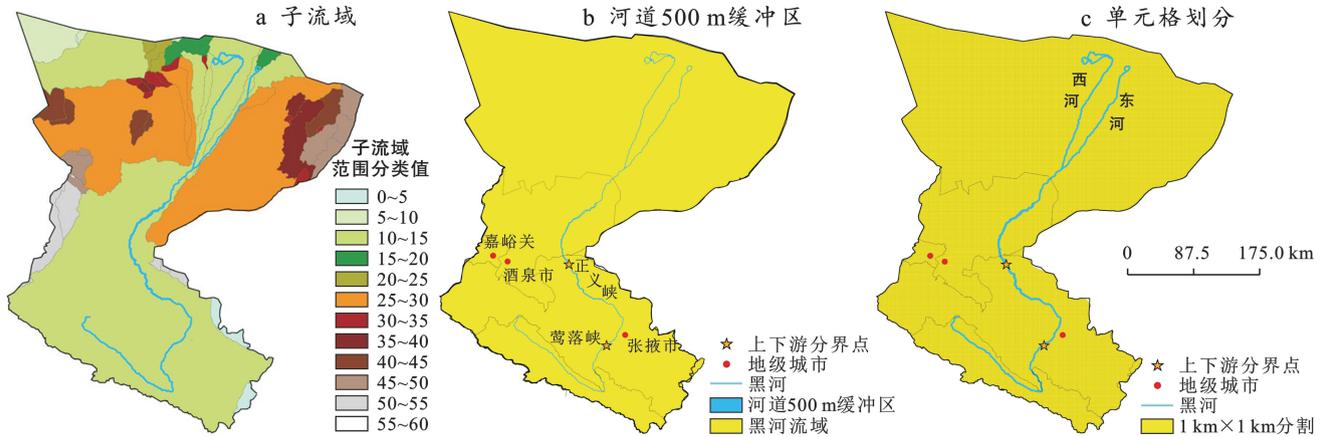


图 1 黑河流域子流域提取及网格划分

Fig.1 Sub-basin extraction and grid delineation of Heihe River basin

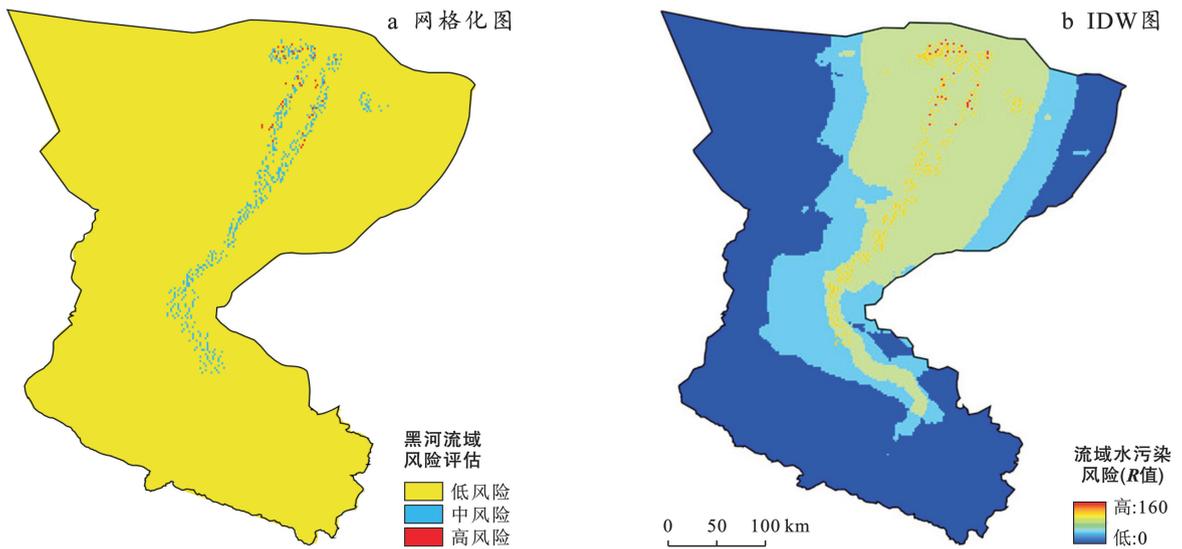


图 2 黑河流域网格化水污染风险分布

Fig.2 Distribution of grid based water pollution risks in Heihe River basin

3 结论

(1) 内陆河流域水污染风险安全评价指标体系以黑河流域水污染风险作为目标层,以风险源强度(S)、风险受体脆弱性(V)、风险防控与应急能力(M)作为 3 个准则层,指标层具体涵盖了 32 个评价指标。提出“风险识别—流域控制区—流域”的水污染风险分区评估方法。

(2) 以黑河流域为例,对建立的黑河流域风险安全评价体系进行运用,得到黑河流域的水污染风险分级分布特征。总体而言,该评价方法在具体评价过程

中具有涉及的不确定因素少、可操作性强等特点,可信度较高。可为管理者对内陆河流域水污染的预防和应急调控提供理论支撑和技术借鉴,从而保障流域内生态可持续发展及祁连山脉生态安全。

(3) 黑河流域少部分区域处于中风险水平,极少部分区域处于高风险水平,整体处于低风险水平。水污染高风险区主要是由沿河危险企业、入河排污口、企业废水排放去向、敏感保护区及沿河交通运输线等水系周边的风险源引起的,在未来的流域建设管理中应该着重加强这些方面。

其中,污染严重水系主要包括洪水河、讨赖河水

系和东部子水系多条河流。准确识别出了黑河流域水污染高风险“热点”区段共 19 个,主要分布于水系

周边的风险源以及沿河公路、跨河桥梁与水系的伴行段重叠交叉区域。

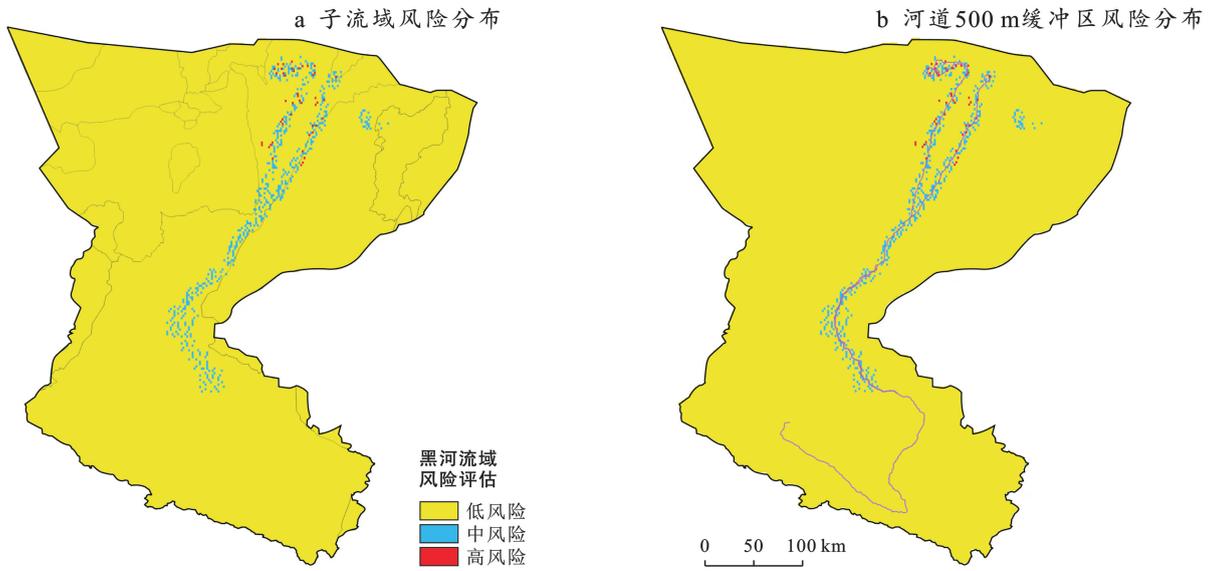


图 3 黑河流域水污染风险分布

Fig.3 Distribution of water pollution risks in Heihe River basin

参考文献 (References)

- [1] 焦涛,刘萌斐,赵永刚.区域突发环境风险评估与管理:以泰州医药高新区为例[J].环境科技,2016,29(5):68-72.
Jiao Tao, Liu Mengfei, Zhao Yonggang. Case study on regional acute environmental risk assessment and management of Taizhou medical hi-tech & new zone [J]. Environmental Science and Technology, 2016, 29(5): 68-72.
- [2] 周一,靳春玲,贡力,等.内陆河流域突发水污染安全评价:以黑河流域张掖段为例[J].水利水电技术(中英文),2023,54(5):126-135.
Zhou Yi, Jin Chunling, Gong Li, et al. Safety assessment of sudden water pollution in inland river basin: A case study of Heihe River basin in Zhangye Section [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(5): 126-135.
- [3] 李晓婧,白艳萍,李萌,等.河西走廊水资源变化与生态环境时空关联分析[J].水土保持通报,2019,39(2):275-280.
Li Xiaojing, Bai Yanping, Li Meng, et al. Analysis on spatiotemporal correlation between water resource change and ecological environment in Hexi Corridor [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 275-280.
- [4] 刘宗平.甘肃省地表水功能区划:2012—2030年[M].甘肃兰州:甘肃人民出版社,2013.
Liu Zongping. Functional Zoning of Surface Water in Gansu Province: 2012—2030 [M]. Lanzhou, Gansu: Gansu People's Publishing House, 2013.
- [5] 李春晖,田雨桐,赵彦伟,等.突发水污染风险评价与应急对策研究进展[J].农业环境科学学报,2020,39(06):1161-1167.
Li Chunhui, Tian Yutong, Zhao Yanwei, et al. Research progress on risk assessment and emergency countermeasures of sudden water pollution [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6): 1161-1167.
- [6] 王飞儿,郑思远,杨泓蕊,等.基于生态系统服务的浙江省水生态环境分区分类管控[J].生态学报,2022,42(2):539-548.
Wang Feier, Zheng Siyuan, Yang Hongrui, et al. Regionalization and classification of water eco-environment in Zhejiang Province based on ecosystem service [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 539-548.
- [7] 武力,刘慧莹,向超,等.基于 SWAT 的流域水环境控制单元划分及管控策略[J].人民长江,2022,53(10):14-21.
Wu Li, Liu Huiying, Xiang Chao, et al. Division and control strategy of watershed water environment control unit based on SWAT model [J]. Yangtze River, 2022, 53(10): 14-21.
- [8] 翁巧然,吕旭波,孙明东,等.基于控制单元划分的大辽河流域污染物空间分布及来源解析[J].环境工程技术学报,2023,13(1):171-179.
Weng Qiaoran, Lü Xubo, Sun Mingdong, et al. Spatial distribution and source analysis of pollutants in Daliao River basin based on control unit division [J]. Journal of

- Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 171-179.
- [9] 周夏飞, 於方, 刘琦, 等. 东江流域突发水污染风险分区研究[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4813-4822.
Zhou Xiafei, Yu Fang, Liu Qi, et al. Risk zoning of sudden water pollution in Dongjiang River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4813-4822.
- [10] Cao Guozhi, Gao Yue, Wang Jinnan, et al. Spatially resolved risk assessment of environmental incidents in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 219: 856-864.
- [11] 周夏飞, 曹国志, 於方, 等. 长江经济带突发水污染风险分区研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(1): 334-342.
Zhou Xiafei, Cao Guozhi, Yu Fang, et al. Risk zoning of acute water pollution in the Yangtze River Economic Belt [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(1): 334-342.
- [12] Albanese S, De Vivo B, Lima A, et al. Prioritising environmental risk at the regional scale by a GIS aided technique: The Zambian Copperbelt Province case study [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 144: 433-442.
- [13] Zabeo A, Pizzol L, Agostini P, et al. Regional risk assessment for contaminated sites: Part 1. Vulnerability assessment by multicriteria decision analysis [J]. Environment International, 2011, 37(8): 1295-1306.
- [14] 邢永健, 王旭, 可欣, 等. 基于风险场的区域突发性环境风险评价方法研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(04): 1268-1274.
Xing Yongjian, Wang Xu, Ke Xing, et al. Method of regional acute environmental risk assessment based on risk field [J]. China Environmental Science, 2016, 36(4): 1268-1274.
- [15] 曹兴, 薛丽洋, 王亚变, 等. 渭河流域甘肃段突发水污染风险评估[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(3): 123-128.
Cao Xing, Xue Liyang, Wang Yabian, et al. Risk assessment of sudden water pollution for Weihe River basin in Gansu Province [J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2022, 58(3): 123-128.
- [16] 黄蕾, 黄雨佳, 刘朋辉, 等. 区域综合环境风险评价方法体系研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(12): 5468-5474.
Huang Lei, Huang Yujia, Liu Penghui, et al. Research on regional comprehensive environmental risk assessment method system [J]. China Environmental Science, 2020, 40(12): 5468-5474.
- [17] 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 等. 辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4553-4561.
Zhang Xiaojiao, Bai Yangwei, Zhang Yuan, et al. Occurrence, distribution, and ecological risk of antibiotics in surface water in the Liaohe River basin, China [J]. Environmental Science, 2017, 38(11): 4553-4561.
- [18] 齐鹏, 余树全, 张超, 等. 城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估: 以永康市为例[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4486-4493.
Qi Peng, Yu Shuquan, Zhang Chao, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in urban surface water sediments from Yongkang [J]. Environmental Science, 2015, 36(12): 4486-4493.
- [19] 余姚果, 赵子昂, 陈喆, 等. 突发水污染事件风险分析: 以引江济淮工程(河南段)为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 291-298.
Yu Yaoguo, Zhao Ziang, Chen Zhe, et al. Risk of sudden water pollution incidents: A case study of the Yangtze-to-Huaihe River water diversion project (Henan section) [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 291-298.
- [20] 崔文祥, 靳春玲, 贡力, 等. 基于物元可拓模型的黄河兰州段突发水污染安全评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 166-172.
Cui Wenxiang, Jin Chunling, Gong Li, et al. Safety assessment of sudden water pollution in Lanzhou section of Yellow River based on matter-element extension model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 166-172.
- [21] 杜可心, 张福平, 冯起, 等. 黑河流域生态系统服务的地形梯度效应及生态分区[J]. 中国沙漠, 2023, 43(2): 139-149.
Du Kexin, Zhang Fuping, Feng Qi, et al. Topographic gradient effects and ecological zoning of ecosystem services in the Heihe River basin [J]. Desert China, 2023, 43(2): 139-149.
- [22] 贡力, 田洁, 靳春玲, 等. 基于 ERG 需求模型的幸福河综合评价[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 25-33.
Gong Li, Tian Jie, Jin Chunling, et al. Comprehensive evaluation of Happy River based on ERG demand model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 25-33.
- [23] 环境保护部办公厅. 关于印发《行政区域突发环境事件风险评估推荐办法》的通知[EB/OL]. 北京: 生态环境部, 2018.
General Office of the Ministry of Environmental Protection. Notice on the Issuance of Recommended Meas-

- ures for Risk Assessment of Environmental Emergencies in Administrative Areas [EB/OL]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2018.
- [24] 薛丽洋,赵浦秋,乔飞杨,等.甘肃省内陆河流域环境风险评估方法探究[J].安全与环境学报,2022,22(04):2280-2289.
- Xue Liyang, Zhao Puqiu, Qiao Feiyang, et al. Exploration of environmental risk assessment methods for inland river basins in Gansu Province [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(04): 2280-2289.
- [25] 刘晓冉,康俊,王颖,等.基于GIS和FloodArea水动力模型的重庆市山洪灾害风险区划[J].水土保持通报,2019,39(2):206-211.
- Liu Xiaoran, Kang Jun, Wang Ying, et al. Risk regionalization of torrential flood disaster in Chongqing City based on GIS and FloodArea model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 206-211.
- [26] 肖瑶,黄岁樑,孔凡青,等.基于水功能区控制单元的流域突发性水污染事件风险评价区划及其应用[J].灾害学,2018,33(3):222-228.
- Xiao Yao, Huang Suiliang, Kong Fanqing, et al. Risk assessment zoning and application of watershed sudden water pollution events based on water function area control unit [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 222-228.
- [27] 王亚变,刘佳,王金相.甘肃省黄河流域环境风险现状分析及评估研究[J].西北师范大学学报(自然科学版),2020,56(6):124-130.
- Wang Yabian, Liu Jia, Wang Jinxiang. Analysis and evaluation of environmental risk in Yellow River basin of Gansu Province [J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2020, 56(6): 124-130.
- [28] 石济开,邵超峰,鞠美庭.石油化工企业环境风险分级评价指标体系研究[J].安全与环境学报,2015,15(2):324-330.
- Shi Jikai, Shao Chaofeng, Ju Meiting. On the evaluation index system of the environmental risk for the petrochemical industry [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(2): 324-330.
- [29] 朱惇,徐芸,贾海燕,等.三峡库区江段潜在水环境污染风险评价研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(1):180-190.
- Zhu Dun, Xu Yun, Jia Haiyan, et al. Assessment of potential water pollution risk in Three Gorges Reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(1): 180-190.
- [30] 刘凡,孙继朝,张英,等.地下水污染风险评价研究综述[J].南水北调与水利科技,2014,12(3):127-132.
- Liu Fan, Sun Jichao, Zhang Ying, et al. Review of groundwater pollution risk assessment [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(3): 127-132.
- [31] 匡佳丽,唐德善.基于熵权模糊综合模型的水污染风险评价:以鄱阳湖流域为例[J].人民长江,2021,52(9):32-37.
- Kuang Jiali, Tang Deshan. Risk assessment of water pollution by Fussy Comprehensive Evaluation Model based on entropy weight method: Case of Poyang Lake basin [J]. Yangtze River, 2021, 52(9): 32-37.
- [32] 岳俊奎.水污染环境风险分区综合评价研究[J].绿色科技,2018,20(14):92-93.
- Yue Junkui. Study on comprehensive evaluation of environmental risk zoning of water pollution [J]. Journal of Green Science and Technology, 2018, 20(14): 92-93.