

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧复合污染气象影响评估 ..... 杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)

“2+26”城市 PM<sub>2.5</sub> 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析 ..... 吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)

武汉军运会前后大气 PM<sub>2.5</sub> 化学组分和来源 ..... 刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)

2016~2020年邯郸市冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与来源解析 ..... 牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)

渭南市冬季 PM<sub>2.5</sub> 化学组成及来源解析 ..... 郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)

长三角城郊冬季 PM<sub>2.5</sub> 中铵盐的形成过程及来源解析 ..... 项妍琨, 曹芳, 张雯淇, 范美益, 章炎麟 (6486)

上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析 ..... 杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)

吕梁市 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估 ..... 车玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)

广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响 ..... 吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)

南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征 ..... 陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)

京津冀地区“煤改电”对 PM<sub>2.5</sub> 污染的健康效益评估 ..... 张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)

基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析 ..... 孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)

聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)

基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析 ..... 张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)

中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素 ..... 欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)

基于无人机的城市大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展 ..... 曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)

京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析 ..... 郝永佩, 宋晓伟, 朱晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)

中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估 ..... 魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)

钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估 ..... 宋晓聪, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)

珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素 ..... 胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)

东莞市低碳路径下加速电气化对 CO<sub>2</sub> 和污染物协同减排影响 ..... 吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)

县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系 ..... 刘贤赵, 李阳 (6664)

城市草坪温室气体排放特征及影响因素 ..... 陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)

双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应 ..... 刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)

中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估 ..... 赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)

黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险 ..... 彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳锋, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)

黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价 ..... 王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)

土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响 ..... 温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)

内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价 ..... 王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)

锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系 ..... 孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷杰 (6754)

西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素 ..... 艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)

巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价 ..... 刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)

亚硫酸氢盐强化微量 Fe<sup>2+</sup> 活化过二硫酸盐降解扑热息痛 ..... 莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)

污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星 ..... 郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)

NaHCO<sub>3</sub> 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附 ..... 魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)

竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其锂离子吸附性能 ..... 王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)

西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析 ..... 赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)

生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析 ..... 孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)

农田土壤碳循环过程及其量化方法 ..... 孙昭安, 朱彪 (6857)

生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响 ..... 牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霖, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)

喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征 ..... 蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)

中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估 ..... 陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)

基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析 ..... 赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)

某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析 ..... 张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)

重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析 ..... 张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)

高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征 ..... 陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)

有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响 ..... 邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)

有机肥处理对旱地土壤细菌群落及玉米生产力的影响 ..... 林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)

微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响 ..... 段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)

设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响 ..... 赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)

3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系 ..... 李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)

河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构 ..... 刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)

玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析 ..... 汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)

外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染 ..... 王楷, 王丽, 王一钰, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)

1 株肠杆菌与硫酸联合施用对水稻积累镉的影响 ..... 张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)

《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录 ..... (7045)

《环境科学》征订启事(6507) 《环境科学》征稿简则(6620) 信息(6743, 6846, 6856)

# 巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价

刘钰<sup>1,2,3</sup>, 曾妍妍<sup>1,2,3\*</sup>, 周金龙<sup>1,2,3</sup>, 闫志云<sup>1,2,3</sup>, 白凡<sup>1,2,3</sup>

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 开展地下水污染风险评价研究是地下水污染防控的重要环节。以巴里坤-伊吾盆地平原区地下水为研究对象, 构建 DRSTIW 模型进行地下水脆弱性评价; 根据污染场地调查资料和土地利用类型划分点源和面源污染, 进行地下水污染荷载评价; 考虑地下水的原生价值、经济价值和生态价值进行地下水功能价值评价; 利用 ArcGIS 的地图代数功能生成地下水污染风险评价图, 采用 ROC 曲线验证地下水污染风险评价结果, 通过计算  $G$  指数得到地下水污染风险空间冷热点分布, 结合重心和标准差椭圆对热点变动情况进行定量分析。结果表明, 研究区地下水污染风险整体较低, 高污染风险区和较高污染风险区仅占研究区总面积的 6.8%, 主要位于伊吾县的淖毛湖镇、盐池镇, 巴里坤县的奎苏镇、石人子乡、花园乡和兵团红山农场, 该区域内地下水埋深较浅, 土壤表层和包气带介质透水性能较强, 吸附能力较差, 加之污染源分布较集中, 使得污染物易于迁移富集, 在地下水高脆弱性和高污染荷载的双重作用下导致局部区域地下水污染风险升高。受人类活动影响, 地下水污染风险在空间上存在一定的集聚现象, 整体表现为由西北向东南演变的趋势。地下水污染风险评价结果为划分地下水污染防治区提供重要参考。

**关键词:** 地下水; 脆弱性; 污染荷载; 功能价值; 污染风险

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6778-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202301085

## Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin

LIU Yu<sup>1,2,3</sup>, ZENG Yan-yan<sup>1,2,3\*</sup>, ZHOU Jin-long<sup>1,2,3</sup>, YAN Zhi-yun<sup>1,2,3</sup>, BAI Fan<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** Groundwater pollution risk assessment is an important part of groundwater pollution prevention and control. Taking groundwater in the plain area of Barkol-Yiwu Basin as the research object, the DRSTIW model was constructed to evaluate groundwater vulnerability. According to the survey data of contaminated sites and land use types, point source and non-point source pollutions were classified, and the groundwater pollution load was evaluated. The primary value, economic value, and ecological value of groundwater were considered to evaluate the functional value of groundwater. The groundwater pollution risk assessment map was generated by using the map algebra function of ArcGIS software. The ROC curve was used to verify the risk assessment results of groundwater pollution. The spatial distribution of cold and hot spots of groundwater pollution risk was obtained by calculating the  $G$  index, and the change in hot spots was quantitatively analyzed by combining the center of gravity and standard deviation ellipse. The results showed that the groundwater vulnerability was generally low. The gentle terrain slope, shallow groundwater depth, and strong aquifer permeability made it easy for pollutants to enter the aquifer, resulting in high groundwater vulnerability in the northwest of Santanghu Town, the southeast of Dahongliuxia Township, and Kuisu Town in Barkol County. The groundwater pollution load and groundwater functional value were generally low, whereas the point source and non-point source pollution caused by industrial and agricultural production and life would increase the groundwater pollution load in local areas, and the human economic activities and habitat quality levels would affect the distribution of high groundwater function value areas. Groundwater pollution risk was generally low; very high and high pollution risk areas only accounted for 6.8% of the study area, mainly distributed in Naomaohu Town and Yanchi Town of Yiwu County, Kuisu Town, Shirenzi Township, Huayuan Township of Barkol County, and Hongshan Farm of Corps. The shallow groundwater depth, strong permeability of soil surface and vadose zone media, poor adsorption capacity, and concentrated distribution of pollution sources made it easy for pollutants to migrate and enrich in these areas. Under the dual influence of high vulnerability and high pollution load of groundwater, the risk of groundwater pollution in local areas increased. Affected by human activities, there was a certain spatial agglomeration of groundwater pollution risk, and the overall trend was from northwest to southeast. The results of groundwater pollution risk assessment provided a scientific reference for the division of groundwater pollution prevention and control areas.

**Key words:** groundwater; vulnerability; pollution load; functional value; pollution risk

随着西部大开发战略的深入,我国西北地区经济快速发展对水资源的需求日益增加<sup>[1]</sup>,地下水资源作为西北干旱半干旱地区维持人类经济社会发展和生态环境稳定的重要因素<sup>[2]</sup>,不合理地开发利用地下水资源会引发部分地区地下水资源量短缺、水质污染和生态系统失衡等问题<sup>[3,4]</sup>。地下水污染风险评价大多是建立在地下水脆弱性评价的基础上,叠加地下水污染荷载评价和地下水功能价值评价得到的<sup>[5]</sup>。“地下水脆弱性”这一概念由法国水文地质

学家 Margat 于 1968 年首次提出<sup>[6]</sup>,指地下水对人类活动和自然条件变化的敏感性,反映地下水环境的恢复能力。学者们采用各种方法来评估地下水脆弱性,如 EPIK 模型<sup>[7]</sup>、DRASTIC 模型<sup>[8]</sup>、PI 模

收稿日期: 2023-01-12; 修订日期: 2023-03-06

基金项目: 国家科技基础资源调查专项(2021xjkk1000); 新疆水利工程安全与水灾害防治自治区重点实验室开放课题项目(ZDSYS-JS-2021-10)

作者简介: 刘钰(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为地下水水质与污染风险评价, E-mail: 1126066146@qq.com

\* 通信作者, E-mail: 644257818@qq.com

型<sup>[9]</sup>、决策随机森林法<sup>[10]</sup>和模糊聚类法<sup>[11]</sup>等,其中由美国环保署(USEPA)提出的 DRASTIC 模型在国际上得到广泛应用<sup>[12]</sup>.对地下水潜在污染源进行识别,能较好地反映地下水的污染状况<sup>[13]</sup>,土地利用类型经常被用来代表人类活动造成的地下水污染荷载,但地下水污染荷载不能仅用土地利用类型来表示<sup>[14]</sup>,Zhang 等<sup>[15]</sup>在土地利用类型的基础上,对潜在污染源特征进行量化,主要包括污染物毒性、污染物释放可能性和潜在污染物释放量,实现对关中盆地的地下水污染荷载评价.在考虑地下水污染事件发生可能性的同时,也应注重污染风险受体——地下水的灾害损失研究,因此地下水功能价值的变化也被纳入地下水污染风险评价中,以提供关于地下水保护紧迫性的信息<sup>[16]</sup>.

巴里坤-伊吾盆地(以下简称巴伊盆地)位于我国新疆东部,区内矿产资源丰富,煤化工、光伏风能和石油等能源产业发展迅速,对水资源的需求日益增大<sup>[17]</sup>.地下水作为该地区工农业生产和生活的主要水源,污染问题愈加严重,地下水环境问题成为制约当地经济社会发展和生态系统平衡的重要因素.近年来,前人虽已对巴伊盆地地下水资源量<sup>[18]</sup>、地下水质量评价<sup>[19]</sup>、地下水埋深变化特征<sup>[20]</sup>和地下水水化学特征及形成原因<sup>[21]</sup>等方面进行了研究,但未见对巴伊盆地平原区地下水污染风险评价的研究.本文综合考虑地下水含水层脆弱性、代表人类活动危害的地下水污染荷载和地下水污染后造成不良后果的地下水功能价值这 3 个要素,首次开展巴

伊盆地平原区地下水污染风险评价研究,以期对研究区地下水资源保护和当地有关部门划定地下水污染防治重点区域提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

巴伊盆地地处新疆东部,地理坐标介于  $91^{\circ}19'30''\text{E} \sim 96^{\circ}23'00''\text{E}$ 、 $42^{\circ}30'00''\text{N} \sim 45^{\circ}20'30''\text{N}$  之间,行政区划隶属哈密市的巴里坤哈萨克自治县和伊吾县,平原区面积约  $25\,785\text{ km}^2$ .区内属大陆性中温带干旱气候,气温差异明显,冬季严寒,夏季凉爽,山区多年平均降水量  $500\text{ mm}$  左右,平原区多年平均降水量  $40\text{ mm}$  左右;山区多年平均蒸发量在  $1\,100\text{ mm}$  左右,干旱指数  $3 \sim 5$ ,平原区多年平均蒸发量在  $2\,300\text{ mm}$  左右,干旱指数  $> 50$ .总体地势西低东高、北低南高,平均海拔约为  $1\,700\text{ m}$ <sup>[22]</sup>.从地质角度来看,地形特征为“三山夹两盆”,区内盆地与山地之间以深大断裂构成分界线,形成不同的地貌单元.盆地中心为平坦的洪积平原和湖积平原,在盆地边缘的山前地带则形成大面积的洪积倾斜平原和冲积扇,而在山地由于河流携带大量物质补给盆地,盆地为山区侵蚀物质提供堆积场所,形成侵蚀剥蚀区.含水层岩性由洪积、冲积形成的砂砾石、细砂和泥质沉积物组成,透水性强,区内主要分布松散岩类孔隙水、基岩裂隙水和上覆第四系潜水下伏裂隙空隙层间水(图 1),本次地下水取样点均分布在松散岩类孔隙水含水层,埋深为  $0 \sim 72.52\text{ m}$ .地下

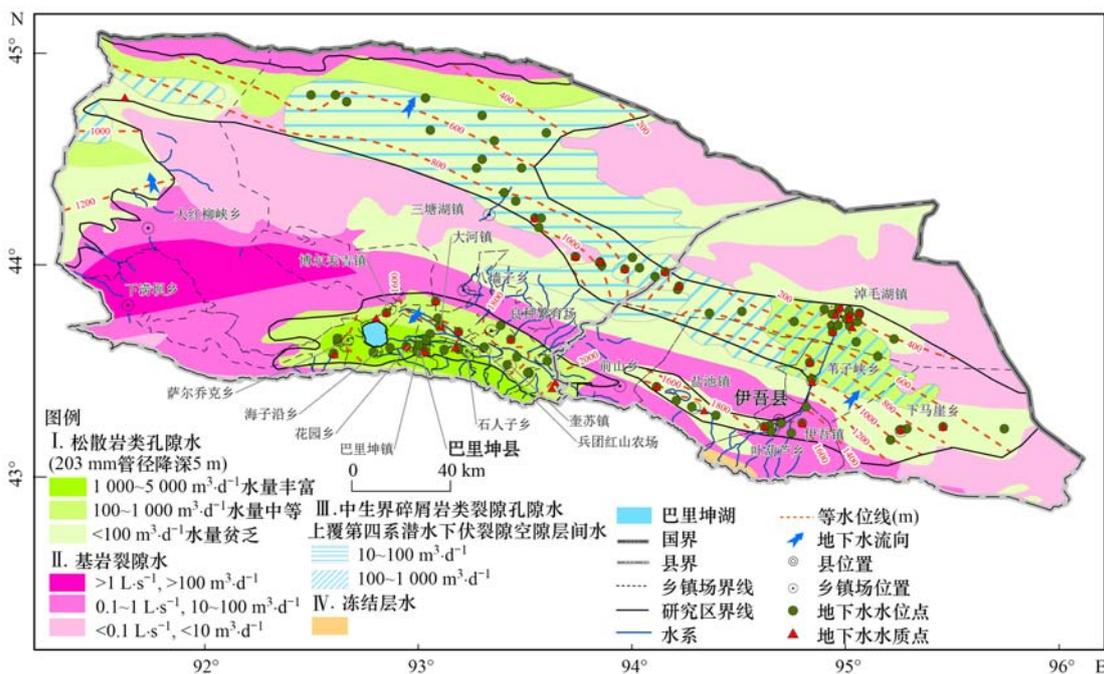


图 1 区域水文地质和地下水取样点分布示意

Fig. 1 Regional hydrogeological and spatial distribution of groundwater sampling sites

水的补给主要来自侧向流入、河道入渗和渠系渗透等,排泄以机井开采、潜水蒸发和坎儿井溢出为主<sup>[23]</sup>.

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 地下水脆弱性评价

地下水脆弱性由复杂且相互关联的多因素共同影响,不同含水层的水文地质特征会造成地下水脆弱性存在差异<sup>[24]</sup>.结合巴伊盆地平原区水文地质特征和相关数据获取情况,本研究在 DRASTIC 模型基础上进行改进.研究区属于典型的内陆干旱区,大气降水补给相对较少,且计算所需数据不易获取,故可采用地下水净补给量模数代替净补给量.因富水性(单井涌水量)的大小与导水率、含水层压力和含水层厚度等参数有关<sup>[25]</sup>,故可采用富水性( $W$ )代替传统模型中的含水层介质类型( $A$ )和渗透系数( $S$ ).综合考虑污染物进入地下水含水层的水动力条件和介质属性,选择地下水埋深( $D$ )、地下水净补给量模数( $R$ )、地形坡度( $T$ )和富水性( $W$ )等4个水动力条件指标,土壤介质( $S$ )和包气带岩性( $I$ )这2个介质属性指标构建地下水脆弱性评价体系<sup>[26]</sup>.地下水脆弱性指数( $VI$ )由式(1)计算:

$$VI = D_r D_w + R_r R_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + W_r W_w \quad (1)$$

式中, $VI$ 表示地下水脆弱性指数, $D$ 、 $R$ 、 $S$ 、 $T$ 、 $I$ 和 $W$ 分别表示地下水埋深、地下水净补给量模数、土壤介质、地形坡度、包气带岩性和富水性; $r$ 表示指标评分; $w$ 表示指标权重.

### 1.2.2 地下水污染荷载评价

地下水污染荷载评价可定量表征人类生产活动对地下水环境产生的危害程度<sup>[27]</sup>.除工农业和生活产生的污染物通过地表径流、土壤侵蚀和农田排水等形式造成的面源污染<sup>[28]</sup>,许多污染事件还以点源形式发生,如矿产勘探、工业排放、危险废物堆积、垃圾填埋场和石油泄漏等<sup>[29]</sup>,此外还存在一定的线源污染,如排污河、沟渠和地表水体中的交通运输等,但由于其本身是受点源污染或面源污染而形成的,即控制了点源污染或面源污染,也就控制了线源污染<sup>[30]</sup>,故在地下水污染荷载评价中不考虑地下水的线源污染,仅考虑工农业生产和生活造成的点源和面源污染.通过搜集的污染场地调查资料确定点源污染;根据土地利用类型划分特殊用地、耕地和城镇用地等面源污染<sup>[31]</sup>.地下水污染荷载指数( $PI$ )由式(2)计算:

$$PI = A_r A_w + P_r P_w \quad (2)$$

式中, $PI$ 表示地下水污染荷载指数, $A$ 和 $P$ 分别表示点源污染和面源污染.

### 1.2.3 地下水功能价值评价

地下水功能价值是对污染后果的衡量,以往的地下水功能价值评价多选取水质和水量指标进行研究,弱化了地下水资源的经济价值和生态价值<sup>[32]</sup>.本研究采用地下水质量类别、夜间灯光指数和生境质量来表征地下水功能价值,依据《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中Ⅲ类水限值,选取研究区地下水中存在超标的 $SO_4^{2-}$ 、 $Na^+$ 、 $F^-$ 、TDS、 $I^-$ 、TH、 $Cl^-$ 、耗氧量和 $NH_4^+$ 等9项水质指标,运用改进内梅罗指数法进行地下水质量评价<sup>[33]</sup>.夜间稳定的亮光绝大多数来自于城市区域的人造光源,夜间灯光指数数据可直观地反映人类社会经济活动的差异<sup>[34,35]</sup>,国内外学者也已证实夜间灯光指数数据作为国民生产总值(GDP)和人口密度等社会经济发展指标的代替变量的可行性<sup>[36,37]</sup>,因此选取夜间灯光指数数据作为地下水经济价值的评价指标<sup>[38]</sup>.归一化植被指数(NDVI)被认为是揭示植被生长状态和植被覆盖动态变化的最佳指示因子<sup>[39]</sup>,选择生长季(6~10月)NDVI的均值表征植被覆盖<sup>[40]</sup>,对InVEST生境质量模块中各土地覆盖类型的生境适宜度进行修正,以此定量评估巴伊盆地平原区的生境质量水平.地下水功能价值量( $FI$ )由式(3)计算:

$$FI = Q_r Q_w + H_r H_w + E_r E_w \quad (3)$$

式中, $FI$ 表示地下水功能价值量, $Q$ 、 $H$ 和 $E$ 分别表示地下水质量类别、夜间灯光指数和生境质量.

### 1.2.4 地下水污染风险评价

地下水污染风险是地下水含水层受到污染的概率和污染后产生不良后果的叠加,地下水污染概率由地下水脆弱性评价和地下水污染荷载评价来表征,地下水污染不良后果由地下水功能价值评价来完成.以“源-径-受体”概念为思路,构建地下水污染风险评价体系<sup>[41]</sup>.利用基于DRSTIW模型的地下水脆弱性图、地下水污染荷载图和地下水功能价值图,叠加生成地下水污染风险分布图,通过ArcGIS中Nature break分类方法划分地下水污染风险等级.地下水污染风险指数( $R$ )由式(4)计算:

$$R = VI \times PI \times FI \quad (4)$$

式中, $R$ 、 $VI$ 、 $PI$ 和 $FI$ 分别表示地下水污染风险指数、地下水脆弱性指数、地下水污染荷载指数和地下水功能价值量.

### 1.2.5 空间冷热点及变动分析

(1) $G$ 指数 空间冷热点探测是全局聚集性检验方法之一,能很好地反映某一区域与邻近区域单元属性值的关联程度<sup>[42]</sup>.为了探查研究区地下水污染风险高低值要素在空间发生聚类的位置,计算地

下水污染风险的  $G$  指数,分析地下水污染风险冷热点区域的空间集聚特征<sup>[43]</sup>,  $G$  和  $Z$  值分别由式(5)和式(6)计算:

$$G_i(d) = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}(d)x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (5)$$

$$Z[G_i(d)] = \frac{G_i(d) - E[G_i(d)]}{\sqrt{\text{Var}[G_i(d)]}} \quad (6)$$

式中,  $G_i(d)$  表示  $G$  指数;  $n$  表示空间单元的数量;  $x_j$  表示空间单元  $j$  的属性值,  $E[G_i(d)]$  和  $\text{Var}[G_i(d)]$  分别表示数学期望和方差;  $W_{ij}$  表示空间权重矩阵. 若  $Z[G_i(d)]$  值为正且值相对较高, 则高值空间聚类较紧密, 即热点区; 反之, 若  $Z[G_i(d)]$  值为负且值相对较低, 则低值空间聚类较紧密, 即冷点区.

(2) 热点重心及标准差椭圆 空间重心和标准差椭圆常被应用于社会经济空间格局、城市规划和土地利用类型变化等研究, 能反映地理事物和现象的空间分布整体特征. 本研究以地下水污染风险空间热点分布为研究对象, 运用 ArcGIS 的度量地理分布功能, 得到地下水污染风险热点区的重心和标准差椭圆, 分析地下水污染风险空间热点的变动特征.

重心移动能反映空间热点的转移情况<sup>[44]</sup>, 标准差椭圆长半轴反映空间热点的分布方向, 短半轴反映空间热点的分布范围, 长轴和垂直方向的旋转角度的变动能定量分析热点变化的方向大小<sup>[45]</sup>, 热点重心(标准差椭圆中心)由式(7)计算:

$$M(x, y) = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times s_i \times x_i}{\sum_{i=1}^n w_i \times s_i}, \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times s_i \times y_i}{\sum_{i=1}^n w_i \times s_i} \right] \quad (7)$$

式中,  $M(x, y)$  表示热点重心坐标,  $n$  表示区域划分的格网数量,  $w_i$  表示第  $i$  个格网的地下水污染风险指数,  $s_i$  表示第  $i$  个格网的面积.

### 1.3 数据来源

2022 年 7 ~ 8 月进行野外调查取样与测试, 获得巴伊盆地平原区 95 组地下水水位测量数据和 34 组地下水水质检测数据(图 1). 地下水水样的采集、保存和送样严格按照《区域地下水污染调查评价规范》(DZ/T 0288-2015) 中规定的要求执行. 本研究所需数据来源见表 1.

表 1 数据来源  
Table 1 Data sources

评价类型	数据名称	数据来源
地下水脆弱性评价(VI)	地下水埋深( $D$ )	野外现场测量(2022 年 95 组地下水水位测量数据)
	地下水净补给量模数( $R$ )	第三次新疆地下水资源调查与评价项目
	土壤介质( $S$ )	世界土壤数据库[HWSD(比例尺 1:1 000 000)]
	地形坡度( $T$ )	地理空间数据云(2022 年 SRTMDEM 90M 数据)
	包气带岩性( $I$ ) 富水性( $W$ )	新疆水文地质图集(比例尺 1:5 500 000)
地下水污染荷载评价(PI)	点源污染( $A$ )	新疆维吾尔自治区生态环境厅官网(2022 年巴伊盆地污染场地信息)
	面源污染( $P$ )	中国科学院资源环境科学与数据中心网(2020 年土地利用类型 1 km 栅格数据)
地下水功能价值评价(FI)	地下水质量类别( $Q$ )	野外取样与测试(2022 年 34 组地下水水质检测数据)
	夜间灯光指数( $H$ )	美国国家海洋与大气管理局官网(2021 年 NPP-VIIRS 卫星夜光遥感影像数据)
	生境质量( $E$ )	中国科学院资源环境科学与数据中心[2019 年生长季 1 km 植被指数(NDVI)]

为方便后续加权叠加和计算面积, 对研究区进行合理的网格剖分, 将研究区剖分为  $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$  的网格, 共 2 865 个网格, 以每个网格为单元, 将各指标评分赋予网格, 通过对指标图层的加权叠加, 将得到的地下水脆弱性指数、地下水污染荷载指数、地下水功能价值和地下水污染风险指数作为单元格中心值进行分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 权重确定

权重反映各评价指标对评价体系的影响程度, 指标权重合理赋值直接决定评价结果的精度<sup>[46]</sup>. 本研究采用主观权重(AHP 法)和客观权重(熵权法)取均值来确定各指标综合权重, 既在一定程度上改

善主观赋权的随机性, 又体现数据本身的离散程度<sup>[47]</sup>, 以此确定相对合理的指标权重, 各评价指标的综合权重见表 2.

### 2.2 地下水脆弱性评价

地下水埋深( $D$ )、地下水净补给量模数( $R$ )、土壤介质( $S$ )、地形坡度( $T$ )、包气带岩性( $I$ )和富水性( $W$ )这 6 项指标的范围划分和赋分在参考《地下水脆弱性评价技术要求》(GWI-D3)的基础上, 根据研究区的水文地质特征和专家经验综合确定. DRSTIW 模型各指标的范围和赋分见表 3, 各指标评分等级如图 2.

利用 ArcGIS 地图代数功能将 DRSTIW 模型中的各指标评分加权叠加, 得到地下水脆弱性评价结果(图 3 和表 4). 高脆弱性区、较高脆弱性区、中等

表 2 各指标综合权重<sup>1)</sup>

Table 2 Comprehensive weights of each index

指标	地下水脆弱性						地下水污染荷载		地下水功能价值		
	<i>D</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>I</i>	<i>W</i>	<i>A</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
AHP 法	0.381	0.064	0.101	0.042	0.252	0.160	0.667	0.333	0.297	0.164	0.539
熵权法	0.292	0.067	0.355	0.032	0.041	0.213	0.441	0.559	0.350	0.453	0.197
综合权重	0.337	0.066	0.228	0.037	0.146	0.186	0.554	0.446	0.323	0.309	0.368

1) AHP 法通过一致性检验, CR = 0.024 < 0.1

表 3 DRSTIW 模型各指标的范围和赋分<sup>1)</sup>

Table 3 Range and assignment for each index of the DRSTIW model

赋分	<i>D</i> /m	$R \times 10^4 / m^3 \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$	<i>S</i>	<i>T</i> /(°)	<i>I</i>	<i>W</i> /m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>
1	>60	<5	—	>30	—	—
2	50~60	—	黏土	20~30	—	<100
3	40~50	—	—	—	亚黏土	—
4	30~40	—	黏壤土	10~20	—	—
5	20~30	—	粉砂黏土	—	—	100~1 000
6	10~20	20~30	粉砂壤土	6~10	粉细砂	—
7	6~10	—	砂黏壤土	—	—	—
8	4~6	—	砂壤土	4~6	亚砂土	1 000~5 000
9	2~4	—	壤砂土	2~4	—	—
10	<2	>50	砂土	<2	砂砾石	—

1) “—”表示指标未划分该范围和赋分

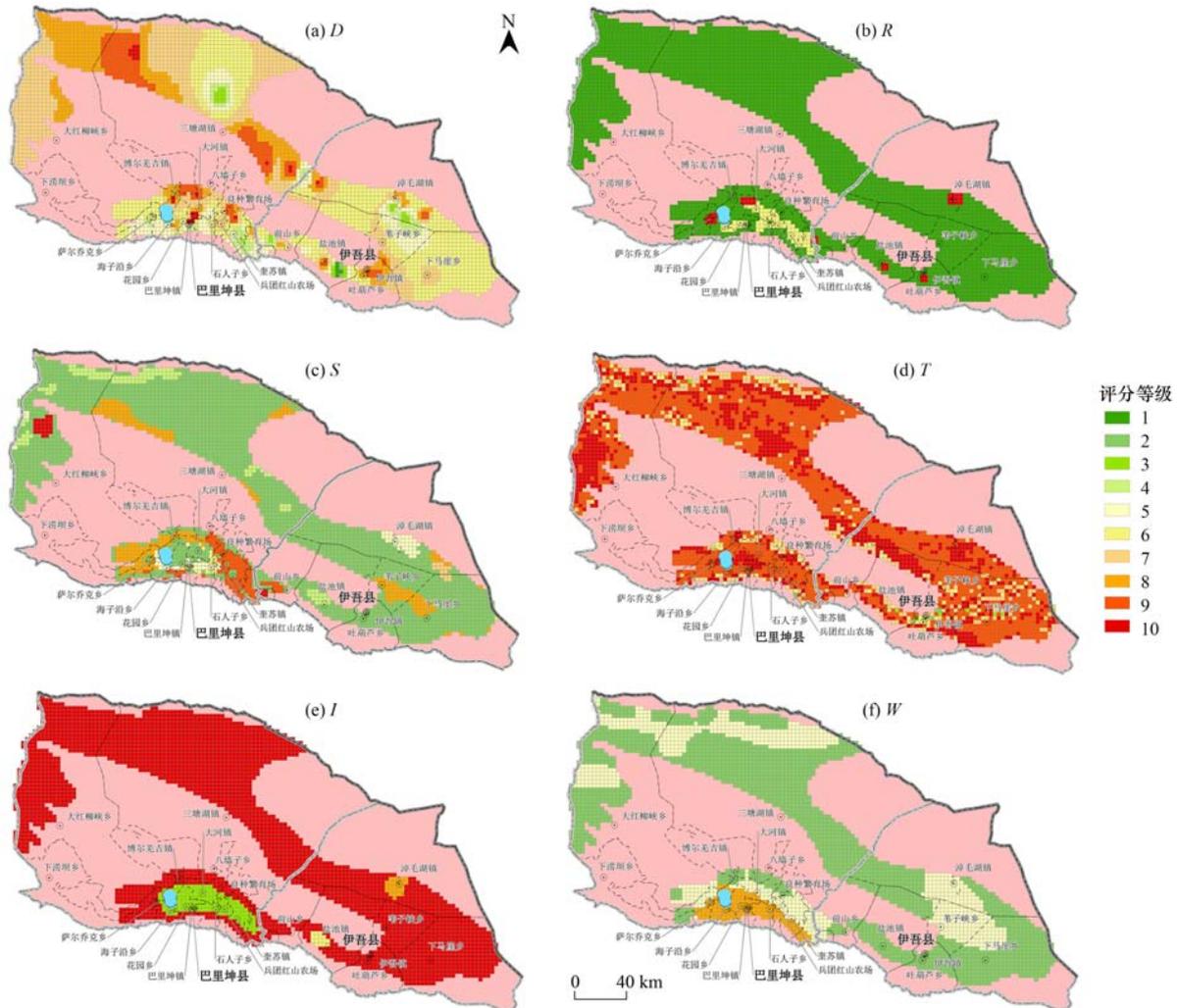


图 2 DRSTIW 模型各指标评分等级

Fig. 2 Grade for each index of the DRSTIW model

脆弱性区、较低脆弱性区和低脆弱性区占比分别为 5.5%、10.7%、18.4%、39.3% 和 26.1%，表明研究区地下水脆弱性整体较低。低脆弱性区和较低脆弱性区主要分布在伊吾县的淖毛湖镇西部、下马崖乡东部、盐池镇和巴里坤县的三塘湖镇北部、花园乡北部，主要是由于地下水净补给量模数小，随补给水携带的污染物质相对较少，且土壤表层以黏土为主，介质渗透能力弱，能通过有效吸附减缓污染物渗漏，地下水遭受污染潜力也就越小，造成地下水脆弱性低。中等脆弱区主要分布在伊吾县的淖毛湖镇东南部、伊吾镇和巴里坤县的大红柳峡乡北部、三塘湖镇北部、大河镇等区域，区域内富水性相对较好，岩石的透水性较强，污染物易下渗到含水层，地下水脆弱性升高。较高脆弱性区和高脆弱性区主要分布在巴里坤县的三塘湖镇西北部、大红柳峡乡东南部和奎苏镇等区域，这些区域地下水净补给量

模数大，地形坡度平缓，地下水埋深较浅，泉点大多分布于此，污染物进入含水层的迁移距离短，且土壤表层和包气带介质渗透性能较强，为污染物进入含水层提供良好介质条件，造成地下水脆弱性较高。

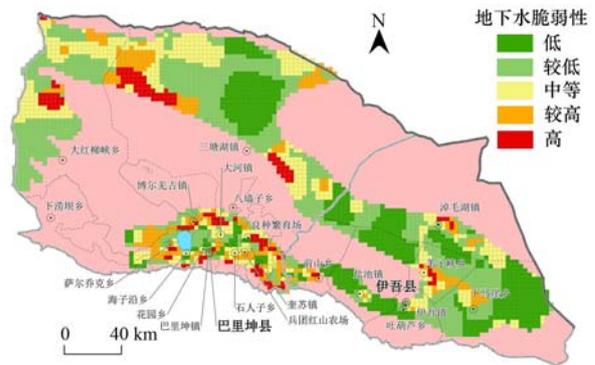


图3 基于 DRSTIW 模型的地下水脆弱性空间分布

Fig. 3 Groundwater vulnerability spatial distribution based on the DRSTIW model

表4 地下水脆弱性、地下水污染荷载、地下水功能价值和地下水污染风险评价结果<sup>1)</sup>

Table 4 Groundwater vulnerability, groundwater pollution load, groundwater functional value, and groundwater pollution risk assessment results

评价结果	地下水脆弱性		地下水污染荷载		地下水功能价值		地下水污染风险	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%						
低	6 741	26.1	15 363	59.6	11 133	43.2	15 390	59.7
较低	10 125	39.3	5 715	22.2	10 206	39.6	6 714	26.0
中等	4 743	18.4	2 583	10.0	2 727	10.6	1 944	7.5
较高	2 745	10.7	1 674	6.5	990	3.8	1 287	5.0
高	1 431	5.5	450	1.7	729	2.8	450	1.8
合计	25 785	100.0	25 785	100.0	25 785	100.0	25 785	100.0

1) 面积是以每个网格为单位进行统计

### 2.3 地下水污染荷载评价

参考《地下水污染防治区划分指南(2019)》将点源污染分为矿区、工业园区、危险废物处理企业、垃圾填埋场、污水处理厂、养殖场和加油站等7类,点源污染未分布区域划分为未受污染区域,赋值为0分。参考《土地利用现状分类》(GB/T 21010-2017)将土地利用类型划分为特殊用地、耕地、农村用地、城镇用地、草地、林地和未利用地等面源污染。巴里坤县和伊吾县的耕地和其他农用地面积大于建设用地,且农业用水量远大于工业和生活用水量(《新疆统计年鉴(2021)》),故耕地和农村用地较城镇用地被污染的概率相对较高,耕地和农村用地赋分高于城镇用地;考虑到巴伊盆地有养殖业分布在草地范围,存在面源污染风险,故草地赋值为3分;未利用地由于人类活动干扰性较小,对地下水污染造成的风险较低,故未利用地赋值为1分。地下水污染荷载各指标范围和赋分见表5,各指标评分等级如图4。

将点源污染和面源污染评分加权叠加,得到地下水污染荷载评价结果(图5和表4)。高污染荷载

表5 地下水污染荷载各指标范围和赋分<sup>1)</sup>

Table 5 Range and assignment for each index of groundwater pollution load

点源污染(A)		面源污染(P)	
范围	赋分	范围	赋分
矿区	9	特殊用地	9
工业园区	8	耕地	8
危险废物处理企业	7	—	—
垃圾填埋场	6	农村用地	6
污水处理厂	5	城镇用地	5
养殖场	4	—	—
加油站	3	草地	3
—	—	林地	2
—	—	未利用土地	1

1) “—”表示指标未划分该范围和赋分

区、较高污染荷载区、中等污染荷载区、较低污染荷载区和低污染荷载区占比分别为 1.7%、6.5%、10.0%、22.2% 和 59.6%，以较低污染荷载区和低污染荷载区为主，表明研究区地下水整体受污染程度较轻。较低污染荷载区和低污染荷载区主要分布在伊吾县的淖毛湖镇西部、下马崖乡、盐池镇西部、前山乡和巴里坤县的三塘湖镇北部、大红柳峡

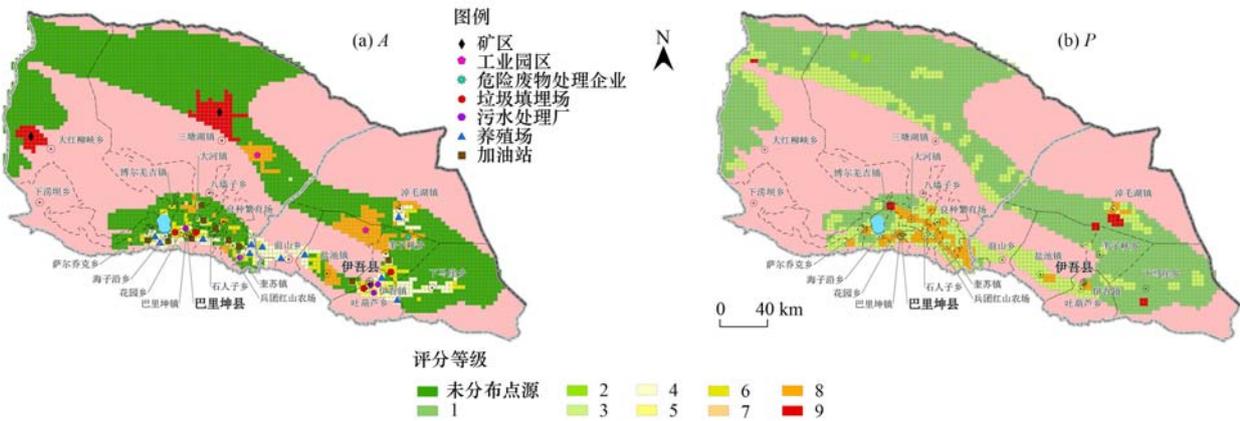


图 4 地下水污染荷载各指标评分等级

Fig. 4 Grade for each index of groundwater pollution load

乡北部和东南部、花园乡,区域内土地利用类型多为未利用地,点源污染大多也未分布于此,受人类活动影响较小,且其周围多分布草地,天然草地具有涵养水分和改良土壤的作用,地下水受污染程度较轻.中等污染荷载区主要分布在伊吾县的淖毛湖镇西南部、苇子峡乡北部和巴里坤县的三塘湖镇东南部、奎苏镇北部、萨尔乔克乡,主要受土地利用类型多为草地且分布有养殖业,区内存在农业活动产生的点源和面源污染的影响.高污染荷载区和较高污染荷载区主要分布在伊吾县的淖毛湖镇、吐葫芦乡、盐池镇东南部;巴里坤县的三塘湖镇、石人子乡、奎苏镇、大河镇和兵团红山农场、良种繁育场,研究区的矿业、工业园区、垃圾填埋场、加油站和养殖场多集中分布于这些区域,工农业和生活污染源产生和排放的污染物造成地下水中 TDS、TH、F<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等超标,在点源和面源污染的双重作用下,地下水污染荷载较高,即地下水受污染程度较高.

2.4 地下水功能价值评价

本研究选取地下水质量类别(Q)、夜间灯光指

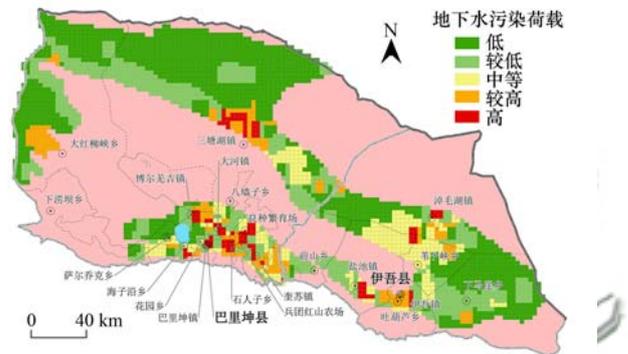


图 5 地下水污染荷载空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of groundwater pollution load

数数据(H)和生境质量(E)分别作为地下水原生价值、经济价值和生态价值的评价指标.运用改进的内梅罗指数法对研究区地下水进行质量评价,地下水质量越好,表明地下水的原生价值越高;利用 ArcGIS 对夜间灯光指数影像进行处理,数据值越大,表明地下水的经济价值越高;InVEST 模型输出的生境质量分布,得分越高,生境质量越高,表明地下水的生态价值越高.地下水功能价值各指标的范围和赋分见表 6,各指标的评分等级如图 6.

表 6 地下水功能价值各指标的范围和赋分

Table 6 Range and assignment for each index of groundwater function value

地下水质量类别(Q)		夜间灯光指数(H)		生境质量(E)	
范围	赋分	范围	赋分	范围	赋分
V	1	0~4.297	1	0~0.1	1
IV	2	4.297~16.567	2	0.1~0.2	2
III	3	16.567~37.837	3	0.2~0.4	3
II	4	37.837~72.169	4	0.4~0.6	4
I	5	72.169~175.08	5	0.6~0.81	5

将地下水质量类别、夜间灯光指数数据和生境质量评分图加权叠加,得到地下水功能价值评价结果(图 7 和表 4).高价值区、较高价值区、中等价值区、较低价值区和低价值区占比分别为 2.8%、3.8%、10.6%、39.6% 和 43.2%,以较低价值区和

低价值区为主,表明研究区地下水功能价值整体较低.低价值区和较低价值区主要分布在巴伊盆地西北部和东南部,区域内土地利用类型多为戈壁和裸岩石质地,植被覆盖率低,生境质量水平低,且人类经济活动不聚集于此,地下水生态价值和经济价值

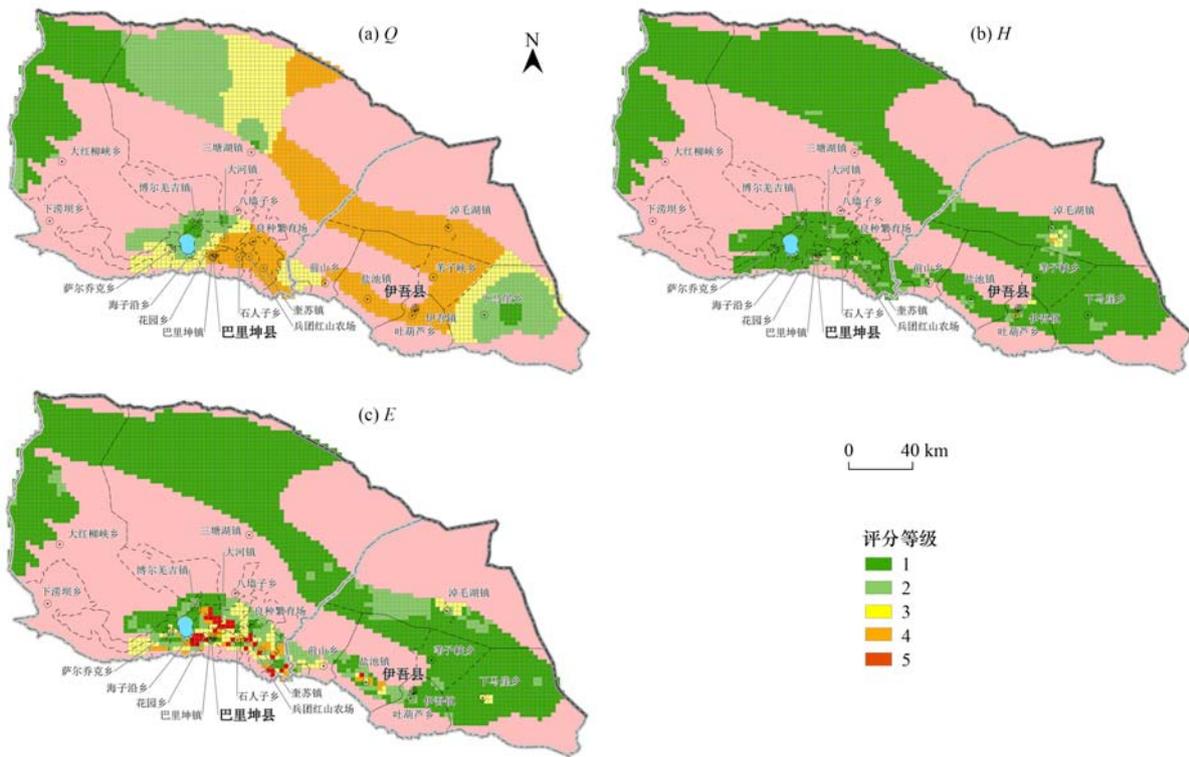


图 6 地下水功能价值各指标评分等级

Fig. 6 Grade for each index of groundwater function value

低,造成地下水功能价值较低.中等价值区主要分布在伊吾县的前山乡、淖毛湖镇西部和巴里坤县的奎苏镇、花园乡北部、萨尔乔克乡,这些区域生境质量较好,但由于养殖场、垃圾填埋场分布和人类经济活动干扰,导致地下水质量较差,地下水功能价值降低.高价值区和较高价值区主要分布在伊吾县的淖毛湖镇、吐葫芦乡、盐池镇和巴里坤县的大河镇、石人子乡和巴里坤镇,主要是受土地利用开发程度和人类经济活动影响,造成地下水经济价值较高,且区域内的生境质量也较好,地下水生态价值较高,从而地下水功能价值升高.

研究区地下水污染风险评价结果(图 8 和表 4).高污染风险区、较高污染风险区、中等污染风险区、较低污染风险区和低污染风险区占比分别为 1.8%、5.0%、7.5%、26.0% 和 59.7%,以较低污染风险区和低污染风险区为主,表明研究区地下水污染风险较低.高污染风险区和较高污染风险区主要位于伊吾县的淖毛湖镇、盐池镇,巴里坤县的奎苏镇、石人子乡、花园乡和兵团红山农场,区域内地下水埋深较浅,土壤表层和包气带介质透水性能较强,吸附能力较差,加之污染源分布较集中,使得污染物易于迁移富集,在地下水高脆弱性和高污染荷载的双重影响下导致局部区域地下水污染风险升高.中等污染风险区分布在伊吾县的淖毛湖镇南部、苇子峡乡、伊吾镇和巴里坤县的大河镇、萨尔乔克乡、奎苏镇北部,这些区域由于存在工农业和生活产生的点源和面源污染,使得地下水污染荷载加重,但地下水经济价值较高和生境质量较好,从而降低了地下水污染风险.低污染风险区和较低污染风险区主要位于巴伊盆地的西北部 and 东南部,主要是地下水净补给量模数小,含水层渗透能力较弱,补给水携带进入含水层的污染物质相对较少,且土地利用开发程度不高,污染源分布较少,地下水受污染程度较低,加之远离城镇,受农业和工业影响较小,地下水质量较好,地下水的原生价值较高,导致地下水污染风险较低.

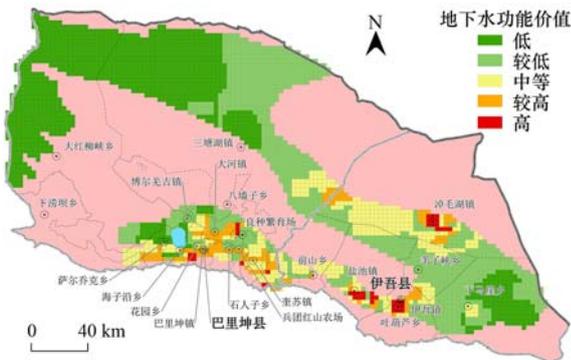


图 7 地下水功能价值空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of groundwater function value

2.5 地下水污染风险评价

将地下水脆弱性图(图 3)、地下水污染荷载图(图 5)和地下水功能价值图(图 7)进行叠加,得到

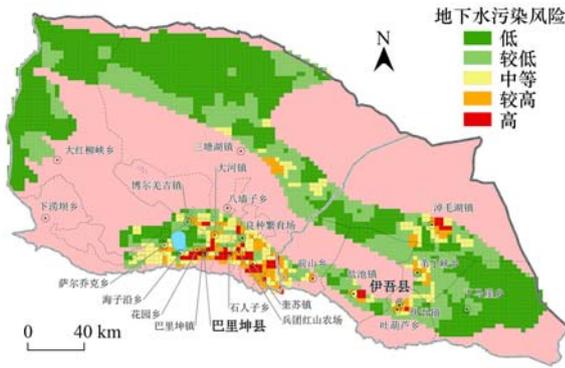


图 8 地下水污染风险空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of groundwater pollution risk

### 2.6 评价结果合理性验证

地下水污染风险可能受到几种污染物的共同影响,仅使用一项水质指标对评价结果进行验证被认为是不可靠的<sup>[48]</sup>.选取研究区地下水中超标率较高的  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{F}^-$ 、TDS、 $\text{I}^-$  和 TH 等 6 项水质指标,采用 ROC (receiver operating characteristic) 曲线计算曲线下方面积 (area under curve, AUC) 对地下水污染风险评价结果进行验证. ROC 曲线已被有效用于验证地下水脆弱性模型的可靠性<sup>[49,50]</sup>,该曲线是以不同界值点时的敏感度为纵坐标、1-特异性为横坐标绘制的真阳性率和假阳性率曲线,曲线上每个点代表一个分类器, X 轴 1-特异性 (假阳性率) 表示分类器错误分类地下水污染风险等级的概率, Y 轴敏感度 (真阳性率) 表示分类器正确分类地下水污染风险等级的概率. AUC 通过描述预定义事件的正确发生或不发生的能力来表征验证系统的质量,分类标准为:差 (AUC 为 0.5 ~ 0.6)、一般 (AUC 为 0.6 ~ 0.7)、好 (AUC 为 0.7 ~ 0.8)、很好 (AUC 为 0.8 ~ 0.9) 和优 (AUC 为 0.9 ~ 1.0)<sup>[51]</sup>,即 X 轴越接近 0, Y 轴越接近 1.0,使得 AUC 越接近 1.0, ROC 曲线验证准确率越高. 验证结果显示, ROC 曲线均在对角线以上,且各指标 AUC 均大于 0.7,表明地下水污染风险指数与相关水质指标之间具有较好的相关性,地下水污染风险评价结果具有一定的可靠性 (图 9).

### 2.7 地下水污染风险空间热点识别与分析

地下水污染风险的形成过程是人类活动对地下水系统施加压力的集中体现,受自然条件的限制人类活动在空间上存在一定的集聚现象,从而导致地下水污染风险在空间上存在聚类现象. 运用 ArcGIS 的空间统计分析功能得到巴伊盆地平原区地下水污染风险的 G 指数,分析其冷热点在空间上的分布状况,应用标准差椭圆工具衡量地下水污染风险热点的主导方向、空间形态和总体分布范围.

研究区地下水污染风险冷热点分布状况、重心

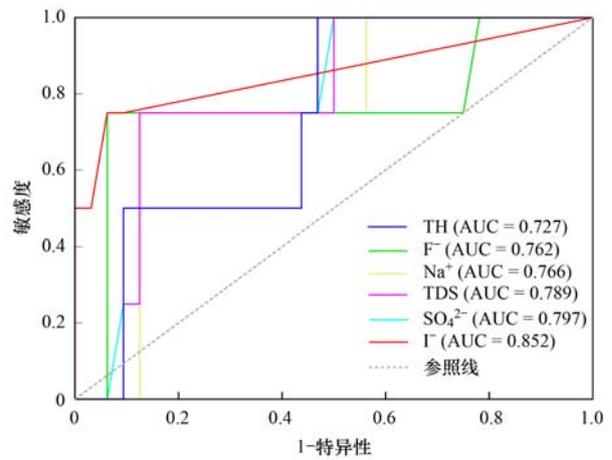


图 9 ROC 曲线验证结果

Fig. 9 ROC curve verification results

和标准差椭圆分布 (图 10), 标准差椭圆以重心为中心 ( $93.59^\circ\text{E}$ ,  $43.96^\circ\text{N}$ ), 整体沿西北向东南方向展布, 转角为北偏西  $118.32^\circ$ , 这表明巴伊盆地平原区地下水污染风险有由西北向东南演变的趋势. 巴伊盆地平原区地下水污染风险热点和次热点区主要分布在伊吾县的淖毛湖镇、盐池镇、伊吾镇、苇子峡乡, 巴里坤县的奎苏镇、石人子乡、大河镇、花园乡、萨尔乔克乡和兵团红山农场, 以上区域人口密度相对较大, 社会经济活动活跃, 土地利用开发程度高, 人类活动对地下水干扰较强, 不合理的生产生活产生的大量污染物质, 对地下水环境构成威胁, 使得地下水污染风险高值突出. 冷点和次冷点区主要分布在伊吾县的下马崖乡和巴里坤县的大红柳峡乡北部、三塘湖镇北部、八墙子乡东部, 冷点和次冷点区分布范围广, 区域内多为戈壁、裸岩石质地和草地, 少有人类活动集聚, 地下水受污染的可能性相对较小. 温点区分布较为零散, 说明此类区域地下水污染风险不存在明显的空间聚类现象.

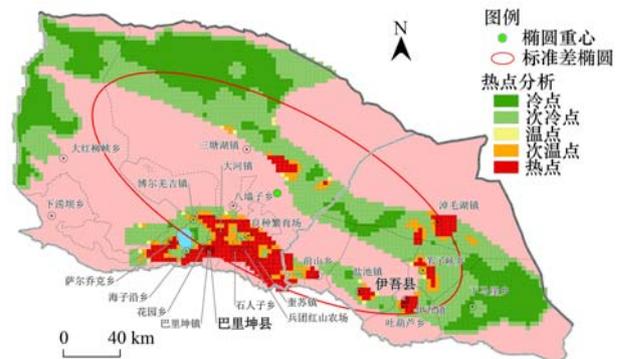


图 10 地下水污染风险空间热点分布

Fig. 10 Spatial hotspot distribution of groundwater pollution risk

## 3 讨论

本研究结合巴伊盆地平原区的水文地质特征和指标数据的可得性, 构建适用于研究区的地下水脆弱

弱性评价模型(DRSTIW 模型),并采用主客观相结合的赋权方法确定各指标的综合权重,进一步优化了地下水脆弱性评价结果.巴里坤县的三塘湖西北部和大红柳峡乡东南部地下水脆弱性较高,但该区域地下水污染源分布较少,地下水的污染风险程度较低,说明较高的地下水脆弱性并不表明该区域具有相应的地下水污染风险程度,这取决于地下水脆弱性和地下水污染荷载的共同作用.地下水外界污染源种类和危险度的识别主要从定性和定量这 2 个角度入手,本研究将土地利用类型划分为 7 类,再叠加潜在污染源中特征污染物的类型和污染源缓冲半径进行定性和定量相结合的地下水污染荷载评价.在今后的研究中,可通过广泛的室外调查和监测来获取丰富的污染源信息,建立污染物迁移和污染源强度矩阵来划分外界污染等级.地下水遭受污染后产生的不良后果由地下水功能价值评价来完成,进行地下水功能价值评价方法较多,本研究从地下水原生价值、经济价值和生态价值等 3 个不同角度选取衡量地下水功能价值的指标进行评价.地下水功能价值评价既考虑地下水污染问题,又反映保护地下水资源的迫切性,具有更全面的特点,在相同污染风险条件下,地下水功能价值越高,越迫切需要有效的保护措施,因此伊吾县的淖毛湖镇、吐葫芦乡、盐池镇和巴里坤县的大河镇、石人子乡、巴里坤镇等区域应重点关注,实施严格的地下水保护条例,以减缓地下水环境的进一步恶化.

地下水污染风险评价完成后对其评价结果的可靠性进行验证有一定的必要性,目前水质状况通常用于验证地下水污染风险评价的可靠性,在以往的研究中,大多数仅选取一项水质指标来验证地下水污染风险评价结果,在本研究中,考虑到污染物是由不同污染源产生的,如矿产勘探、农业灌溉和生活污水等,因此不能仅用一项水质指标进行验证.伊吾县的淖毛湖镇、盐池镇,巴里坤县的奎苏镇、石人子乡和兵团红山农场的地下水污染风险程度较高,这些区域的地下水水样均为 IV 类水,主要伴有  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{F}^-$ 、TDS、 $\text{I}^-$  和 TH 等超标.空间冷热点分析结果显示,人类活动集聚区与地下水污染风险热点区表现出明显的相似性,表明人类活动增加了地下水被污染的可能性.根据《新疆统计年鉴(2021)》可知巴里坤县和伊吾县第二产业生产值分别占地区生产总值的 55.6% 和 76.4%,巴里坤县和伊吾县人民政府官网 2022 年公开的政府工作报告中提出要极力推进经济产业集聚区和工业园区建设,这预测着地下水污染事件发生的可能性较高.污染事件的危害性与治理的复杂性对当地地下水的利

用和保护提出了新的要求,当地政府需要进一步加强地下水资源的有效管理和科学配置,减少或避免在高污染风险地区建立产业园区,对巴伊盆地平原区高地下水脆弱性、高地下水污染荷载和高地下水功能价值区域,应重点进行污染防控,避免“三高”区域出现.

#### 4 结论

(1) 研究区地下水脆弱性整体较低,巴里坤县的三塘湖镇西北部、大红柳峡乡东南部和奎苏镇等区域地下水脆弱性较高,这些区域地形坡度平缓,地下水埋深较浅,含水层介质渗透能力强,污染物易于进入含水层且迁移距离短,造成地下水脆弱性较高.

(2) 研究区地下水污染荷载整体较低,伊吾县的淖毛湖镇、吐葫芦乡、盐池镇东南部,巴里坤县的三塘湖镇、石人子乡、奎苏镇、大山镇和兵团红山农场、良种繁育场等区域地下水污染荷载较高,主要是受到了点源和面源污染的双重影响.

(3) 研究区地下水功能价值整体较低,伊吾县的淖毛湖镇、吐葫芦乡、盐池镇和巴里坤县的大河镇、石人子乡、巴里坤镇等区域地下水功能价值较高,主要是受人类经济活动和生境质量水平的影响,造成地下水经济价值和生态价值较高.

(4) 研究区地下水污染风险整体较低,高和较高污染风险区仅占研究区总面积的 6.8%,主要位于伊吾县的淖毛湖镇、盐池镇,巴里坤县的奎苏镇、石人子乡、花园乡和兵团红山农场,在地下水高脆弱性和高污染荷载的双重影响下导致地下水污染风险升高.受人类活动影响,地下水污染风险在空间上存在一定的集聚现象,整体表现为由西北向东南演变的趋势.

#### 参考文献:

- [1] Wei M J, Wu J H, Li W Q, *et al.* Groundwater geochemistry and its impacts on groundwater arsenic enrichment, variation, and health risks in Yongning County, Yinchuan Plain of northwest China[J]. *Exposure and Health*, 2022, **14**(2): 219-238.
- [2] 袁媛, 郑艳. 国内外水资源脆弱性研究进展与展望[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, **36**(7): 116-125.  
Yuan Y, Zheng Y. Progress and future prospects of water resources vulnerability at home and abroad[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, **36**(7): 116-125.
- [3] Amiri V, Li P Y, Bhattacharya P, *et al.* Mercury pollution in the coastal Urmia aquifer in northwestern Iran: potential sources, mobility, and toxicity[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(14): 17546-17562.
- [4] 刘春燕, 于开宁, 张英, 等. 西宁市浅层地下水化学特征及形成机制[J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3228-3236.  
Liu C Y, Yu K N, Zhang Y, *et al.* Characteristics and driving mechanisms of shallow groundwater chemistry in Xining City[J].

- Environmental Science, 2023, **44**(6): 3228-3236.
- [ 5 ] 赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 等. 地下水污染风险评估中污染源荷载量化方法的对比分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2754-2762.
- Zhao P, He J T, Wang M L, *et al.* Comparison and analysis of the quantitative methods for pollutant sources load in groundwater contamination risk assessment [ J ]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2754-2762.
- [ 6 ] 李星. 山西运城盆地地下水污染风险研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- Li X. Study on the risk of groundwater pollution in Yuncheng Basin, Shanxi Province [ D ]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2018.
- [ 7 ] Momejian N, Abou Najm M, Alameddine I, *et al.* Can groundwater vulnerability models assess seawater intrusion? [ J ]. Environmental Impact Assessment Review, 2019, **75**: 13-26.
- [ 8 ] Liu M J, Xiao C L, Liang X J. Assessment of groundwater vulnerability based on the modified DRASTIC model: a case study in Baicheng City, China [ J ]. Environmental Earth Sciences, 2022, **81**(8), doi: 10.1007/s12665-022-10350-8.
- [ 9 ] Goyal D, Haritash A K, Singh S K. A comprehensive review of groundwater vulnerability assessment using index-based, modelling, and coupling methods[J]. Journal of Environmental Management, 2021, **296**, doi: 10.1016/j.jenvman. 2021. 113161.
- [ 10 ] Lahjouj A, El Hmaidi A, Bouhafa K, *et al.* Mapping specific groundwater vulnerability to nitrate using random forest: case of Sais basin, Morocco [ J ]. Modeling Earth Systems and Environment, 2020, **6**(3): 1451-1466.
- [ 11 ] Javadi S, Shahdany S M H, Neshat A, *et al.* Multi-parameter risk mapping of Qazvin aquifer by classic and fuzzy clustering techniques[J]. Geocarto International, 2022, **37**(4): 1160-1182.
- [ 12 ] Hu X J, Ma C M, Qi H H, *et al.* Groundwater vulnerability assessment using the GALDIT model and the improved DRASTIC model: a case in Weibei Plain, China [ J ]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(32): 32524-32539.
- [ 13 ] Güler C, Kurt M A, Korkut R N. Assessment of groundwater vulnerability to nonpoint source pollution in a Mediterranean coastal zone (Mersin, Turkey) under conflicting land use practices[J]. Ocean & Coastal Management, 2013, **71**: 141-152.
- [ 14 ] Li P Y, Wu J H. Drinking water quality and public health[J]. Exposure and Health, 2019, **11**(2): 73-79.
- [ 15 ] Zhang Q X, Li P Y, Lyu Q, *et al.* Groundwater contamination risk assessment using a modified DRATICL model and pollution loading: a case study in the Guanzhong Basin of China [ J ]. Chemosphere, 2022, **291**, doi: 10.1016/j.chemosphere. 2021. 132695.
- [ 16 ] Li X Y, Wu H, Qian H. Groundwater contamination risk assessment using intrinsic vulnerability, pollution loading and groundwater value: a case study in Yinchuan plain, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(36): 45591-45604.
- [ 17 ] 栾凤娇, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆巴里坤-伊吾盆地平原区地下水质量评价及分析[J]. 新疆农业大学学报, 2016, **39**(3): 253-258.
- Luan F J, Zhou J L, Jia R L, *et al.* Analysis and evaluation of groundwater quality in the plain areas of Barkol-Yiwu Basin, Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2016, **39**(3): 253-258.
- [ 18 ] 陈孜, 张明江, 段扬, 等. 哈密盆地绿洲带地下水数值模拟及资源评价[J]. 干旱区资源与环境, 2016, **30**(7): 186-191.
- Chen Z, Zhang M J, Duan Y, *et al.* The numerical simulation of groundwater and the evaluation of groundwater resources for the Oasis in Hami Basin [ J ]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, **30**(7): 186-191.
- [ 19 ] 倪剑. 新疆哈密盆地区域地下水质量评价[J]. 地下水, 2017, **39**(6): 52-54.
- [ 20 ] 郑昊安, 吴彬, 李绅. 近 20a 来哈密盆地地下水埋深变化趋势[J]. 人民黄河, 2013, **35**(12): 73-76.
- Zheng H A, Wu B, Li S. Groundwater change tendency in Hami Basin in the past 20 years [ J ]. Yellow River, 2013, **35**(12): 73-76.
- [ 21 ] 丁启振, 周金龙, 曾妍妍, 等. 基于多元统计方法的新疆巴里坤盆地地下水水化学特征及其影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, **32**(5): 78-83, 91.
- Ding Q Z, Zhou J L, Zeng Y Y, *et al.* Analysis of hydrochemical characteristics and influencing factors of groundwater in the Balikun Basin of Xinjiang based on multivariate statistical method [ J ]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, **32**(5): 78-83, 91.
- [ 22 ] 张彦军. 巴伊盆地地表水资源评价[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- Zhang Y J. The surface water resources assessment in Barkul and Yiwu Basin [ D ]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013.
- [ 23 ] 栾凤娇, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J]. 环境化学, 2017, **36**(2): 380-389.
- Luan F J, Zhou J L, Jia R L, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-Yiwu Basin, Xinjiang [ J ]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(2): 380-389.
- [ 24 ] 奚旭, 孙才志, 吴彤, 等. 下辽河平原地下水脆弱性的时空演变[J]. 生态学报, 2016, **36**(10): 3074-3083.
- Xi X, Sun C Z, Wu T, *et al.* Spatial-temporal evolution of groundwater vulnerability in the lower reaches of the Liaohe River Plain [ J ]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(10): 3074-3083.
- [ 25 ] Yu S, Ding H H, Zeng Y F. Evaluating water-yield property of karst aquifer based on the AHP and CV [ J ]. Scientific Reports, 2022, **12**(1), doi: 10.1038/s41598-022-07244-x.
- [ 26 ] 陈钰颀, 李妍颖, 叶忠, 等. 基于改进 DRASTIC 模型的冲洪积扇地下水脆弱性评价[J]. 环境科学与技术, 2021, **44**(12): 194-202.
- Chen Y D, Li Y Y, Ye Z, *et al.* Groundwater vulnerability assessment in Alluvial-Prouvial Fan Area Based on the improved DRASTIC model [ J ]. Environmental Science & Technology, 2021, **44**(12): 194-202.
- [ 27 ] Zhao X N, Wang D Q, Xu H L, *et al.* Groundwater pollution risk assessment based on groundwater vulnerability and pollution load on an isolated island [ J ]. Chemosphere, 2022, **289**, doi: 10.1016/j.chemosphere. 2021. 133134.
- [ 28 ] 肖宇婷, 姚婧, 湛书, 等. 沱江流域总氮面源污染负荷时空演变[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3773-3784.
- Xiao Y T, Yao J, Chen S, *et al.* Temporal and spatial evolution of non-point source pollution load of total nitrogen in Tuojiang River Basin [ J ]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3773-3784.
- [ 29 ] 白凡, 周金龙, 周殷竹, 等. 吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(8): 4325-4333.

- Bai F, Zhou J L, Zhou Y Z, *et al.* Assessment of groundwater contamination risk in the plain area of southern Turpan Basin [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(8): 4325-4333.
- [30] 刘长礼, 王秀艳, 吕敦玉, 等. 中国南方岩溶地下水污染源污染风险评价及防控对策[J]. *地球学报*, 2017, **38**(6): 910-918.
- Liu C L, Wang X Y, Lü D Y, *et al.* Risk assessment and control countermeasures of southern China's karst groundwater areal source pollution[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, **38**(6): 910-918.
- [31] Wu H, Chen J, Qian H. A modified DRASTIC model for assessing contamination risk of groundwater in the northern suburb of Yinchuan, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(6), doi: 10.1007/s12665-015-5094-z.
- [32] 陈相涛. 下辽河平原浅层地下水污染风险评价及空间热点分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2016.
- Chen X T. Evaluation and hotspots analysis of shallow groundwater contamination risk in the lower reach of the Liaohe River Plain[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2016.
- [33] 耿艺成. 西咸新区沣东新城地下水污染风险研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- Geng Y C. Study on the risk of groundwater pollution in Fengdong New City, Xixian New Area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [34] 余柏菡, 王丛笑, 宫文康, 等. 夜间灯光遥感与城市问题研究: 数据、方法、应用和展望[J]. *遥感学报*, 2021, **25**(1): 342-364.
- Yu B L, Wang C X, Gong W K, *et al.* Nighttime light remote sensing and urban studies: data, methods, applications, and prospects[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, **25**(1): 342-364.
- [35] Levin N, Zhang Q L. A global analysis of factors controlling VIIRS nighttime light levels from densely populated areas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **190**: 366-382.
- [36] Elyidge C D, Cirzano P, Pettit D R, *et al.* The Nightsat mission concept[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, **28**(12): 2645-2670.
- [37] 崔百胜, 李家琪. 长三角地区经济差异动态变化以及空间溢出效应——基于夜间灯光数据[J]. *经济地理*, 2022, **42**(10): 10-18.
- Cui B S, Li J Q. Dynamic evolution and spatial spillover effects of regional economic disparity in the Yangtze river delta: based on the night light data [J]. *Economic Geography*, 2022, **42**(10): 10-18.
- [38] 闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 等. 叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价[J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3237-3246.
- Yan Z Y, Zeng Y Y, Zhou J L, *et al.* Groundwater pollution risk assessment in plain area of the Yarkant River Basin [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(6): 3237-3246.
- [39] 潘耀, 尹鹤, 侯文娟, 等. 基于土地利用及植被覆盖变化的黄河源区生境质量时空变化特征[J]. *生态学报*, 2022, **42**(19): 7978-7988.
- Pan Y, Yin Y H, Hou W J, *et al.* Spatiotemporal variation of habitat quality in the source region of the Yellow river based on land use and vegetation cover changes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(19): 7978-7988.
- [40] 税燕萍, 卢慧婷, 王慧芳, 等. 基于土地覆盖和 NDVI 变化的拉萨河流域生境质量评估[J]. *生态学报*, 2018, **38**(24): 8946-8954.
- Shui Y P, Lu H T, Wang H F, *et al.* Assessment of habitat quality on the basis of land cover and NDVI changes in Lhasa River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(24): 8946-8954.
- [41] 李妍颖. 北京东北部平原区地下水污染风险评估研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- Li Y Y. Study on risk assessment of groundwater pollution in plain area of northeast Beijing [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [42] 赵筱青, 石小倩, 李馥豪, 等. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J]. *地理学报*, 2022, **77**(3): 736-756.
- Zhao X Q, Shi X Q, Li Y H, *et al.* Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the karst mountainous areas of southeastern Yunnan [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, **77**(3): 736-756.
- [43] 孙晓晨, 焦菊英, 王红雷, 等. 河湟谷地 1980-2020 年土地利用变化及其冷热点分布[J]. *水土保持通报*, 2022, **42**(1): 327-334.
- Sun X C, Jiao J Y, Wang H L, *et al.* Land use changes and cold-hot spot distribution in Hehuang Valley from 1980 to 2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, **42**(1): 327-334.
- [44] 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 等. 2015~2019 年河南省 PM<sub>2.5</sub> 时空特征与驱动因素分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1697-1705.
- Ge Q X, Liu Y, Yang H, *et al.* Analysis on spatial-temporal characteristics and driving factors of PM<sub>2.5</sub> in Henan Province from 2015 to 2019[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1697-1705.
- [45] 白冰, 赵作权, 张佩. 中国南北区域经济空间融合发展的趋势与布局[J]. *经济地理*, 2021, **41**(2): 1-10.
- Bai B, Zhao Z Q, Zhang P. Trends and layout of economic integration between North and South China [J]. *Economic Geography*, 2021, **41**(2): 1-10.
- [46] 沈时, 王栋, 王远坤, 等. 水资源承载力综合评价的组合权重-MNCM 法[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2021, **57**(5): 887-895.
- Shen S, Wang D, Wang Y K, *et al.* Combined weight-MNCM evaluation method for water resources carrying capacity [J]. *Journal of Nanjing University(Natural Science)*, 2021, **57**(5): 887-895.
- [47] Yesilnacar E, Topal T. Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region(Turkey) [J]. *Engineering Geology*, 2005, **79**(3-4): 251-266.
- [48] Hamza S M, Ahsan A, Imteaz M A, *et al.* Accomplishment and subjectivity of GIS-based DRASTIC groundwater vulnerability assessment method: a review[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(7): 3063-3076.
- [49] Mogaji K A, Lim H S. Development of a GIS-based catastrophe theory model (modified DRASTIC model) for groundwater vulnerability assessment [J]. *Earth Science Informatics*, 2017, **10**(3): 339-356.
- [50] Torkashvand M, Neshat A, Javadi S, *et al.* DRASTIC framework improvement using Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) and combination of Genetic Algorithm and Entropy [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(34): 46704-46724.
- [51] Yu H, Wu Q, Zeng Y F, *et al.* Integrated variable weight model and improved DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment in a shallow porous aquifer[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, **608**, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2022.127538.

## CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM <sub>2.5</sub> and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in "2+26" Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM <sub>2.5</sub> Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM <sub>2.5</sub> in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM <sub>2.5</sub> Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM <sub>2.5</sub> , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM <sub>2.5</sub> Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO <sub>2</sub> Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO <sub>2</sub> and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe <sup>2+</sup> -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO <sub>3</sub> -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)