

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	《环境科学》征稿简则(4303)
信息(4506, 4678, 4741)	

吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价

白凡^{1,2,3}, 周金龙^{1,2,3*}, 周殷竹⁴, 韩双宝⁴, 孙英^{1,2,3}

(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; 4. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051)

摘要: 地下水污染风险评价是地下水污染防治的有效工具, 评价体系主要包括地下水污染源荷载评价、地下水脆弱性评价和地下水功能价值评价这3个部分。以吐鲁番南盆地平原区为例, 利用调查数据和土地利用数据划分点源污染和面源污染, 进行地下水污染源荷载评价; 选取经典的 DRASTIC 模型进行地下水脆弱性评价; 从水质和水量的角度进行地下水功能价值评价。利用 GIS 平台将3个评价结果加权叠加, 生成地下水污染风险区划图。结果表明, 研究区地下水污染风险整体较低。高风险和较高风险区域面积占研究区总面积的 15.5%, 主要分布在研究区的 L1、L2 和 L3 处。L1 主要受到高污染源荷载和高地下水脆弱性的影响; L2 主要是由高地下水功能价值和以生活为主的面源污染共同作用的结果; 以农业生产为主的面源污染和较高的地下水功能价值是 L3 区域地下水污染风险偏高的主要原因。地下水污染风险评价结果对决策者划定地下水污染防治区具有重要参考。

关键词: 地下水污染风险; 污染源荷载; 脆弱性; 功能价值; 吐鲁番南盆地

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4325-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202210014

Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin

BAI Fan^{1,2,3}, ZHOU Jin-long^{1,2,3*}, ZHOU Yin-zhu⁴, HAN Shuang-bao⁴, SUN Ying^{1,2,3}

(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 Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China; 4. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, China)

Abstract: Groundwater contamination risk assessment is an effective tool for groundwater pollution prevention and control. The evaluation system mainly includes three parts: groundwater contamination source load assessment, groundwater vulnerability assessment, and groundwater function value evaluation. Taking the plain area of southern Turpan Basin as an example, based on the survey data and land use data, point source pollution and non-point source pollution were divided to evaluate the load of groundwater pollution sources, the classical DRASTIC model was selected to evaluate the vulnerability of groundwater, and the functional value of groundwater was evaluated from the point of view of water quality and quantity. The three factors were weighted and superimposed via GIS platform to generate the risk zoning map of groundwater contamination. The results showed that the overall risk of groundwater contamination in the study area was low. The area of high-risk and relatively high-risk areas accounted for 15.5% of the total study area, which were mainly distributed in L1, L2, and L3 of the study area. L1 was mainly affected by high pollution source load and high groundwater vulnerability. L2 was mainly the result of the joint action of high groundwater function value and domestic non-point source pollution. Non-point source pollution dominated by agricultural activities and high functional value of groundwater were the main reasons for the high risk of groundwater pollution in the L3 area. The results of the groundwater contamination risk assessment serve as an important reference for decision-makers to delineate the prevention and control area of groundwater pollution.

Key words: groundwater pollution risk; pollution source load; vulnerability; functional value; south Turpan Basin

地下水污染是城市化进程中普遍存在的问题^[1]。当地下水受到污染时, 将不可避免地影响人类的生存环境、危及人类健康和生态环境安全^[2,3]。由于地下水系统的复杂性, 决定了地下水一旦受到污染将难以修复^[4,5]。2021年10月国务院颁布了第一部国家层面的地下水专项法规《地下水管理条例》, 条例指出要根据本行政区域内地下水污染防治需要, 划定地下水污染防治重点区^[6,7]。因此, 为了科学有效的防治地下水污染, 开展地下水污染风险评价具有重要现实意义。

地下水污染风险评价的概念是基于“来源-途径-目标”模型, “来源”指与源头危害相关的污染因子和污染物荷载的识别, “途径”与含水层固有的脆

弱性有关, “目标”与污染事件产生的后果有关^[8,9]。经过国内外学者的不断研究, 地下水污染风险评价通常由地下水污染源荷载评价、地下水脆弱性评价和地下水功能价值评价这3个部分组成^[10~13]。地下水污染源荷载指污染源对地下水产生的影响程度, 取决于污染源的位置、类型以及污染物迁移转化规律等, 受到人类活动的影响较大, 在已有的地下水污染风险评价案例中基本都将“污染源荷载”的权重确定的最高^[14~16]。地下水脆弱性评价又称“地下水防

收稿日期: 2022-10-03; 修订日期: 2022-11-03

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk1000)

作者简介: 白凡(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为干旱区地下水资源评价与保护, E-mail: 89304394@qq.com

* 通信作者, E-mail: zjzhoujl@163.com

污性能评价”,指在一定的地质和水文地质条件下,地下水天然抵御污染的能力,体现的是自然属性,目前国内外地下水脆弱性评价普遍使用的是 1987 年由美国保护署(USEPA)提出的 DRASTIC 模型,如:北京市朝阳区^[17]、天山北坡经济带东段^[18]、上海市金山区^[19]、下辽河平原^[20]、宁夏卫宁平原^[21]和贝宁的南部盆地^[22]等都是采用 DRASTIC 模型或改进 DRASTIC 模型来评价区域地下水脆弱性的.地下水功能是指地下水质量和数量在时间和空间上的变化,对生态环境和人类社会的影响,地下水功能类型主要包括资源功能、生态功能和地质环境功能^[23,24].

吐鲁番盆地地处亚欧大陆腹地,自然条件独特,优越的光热条件和特殊的气候特征,使这里盛产葡萄、哈密瓜等特色经济农作物,是名副其实的“瓜果之乡”^[25].同时吐鲁番盆地矿产资源丰富,是我国重要的能源产业基地.根据最近一次(2019 年)公布的《新疆水资源公报》显示,吐鲁番市地下水供水量为 $6.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总供水量的 49.6%,地下水是当地水资源的重要组成^[26].前人在吐鲁番地区有关地下水方面的研究多集中于地下水水化学特征^[27,28]、地

下水水质评价^[29,30]和地下水资源量方面^[31,32],少数地下水功能性及污染方面的研究,对于地下水污染风险评价来说缺乏系统性和全面性.本文以吐鲁番南盆地平原区为研究区,综合污染源荷载、地下水脆弱性和地下水功能价值这 3 个要素,首次对研究区进行地下水污染风险评价,评价结果对水行政部门划定地下水污染防治区具有实用意义.

1 研究区概况

吐鲁番市位于新疆维吾尔自治区(新疆)的中部偏东,属于天山南麓的山间盆地,盆地东邻哈密市,南与巴音郭楞蒙古自治州接壤,北与乌鲁木齐市、昌吉回族自治州毗邻^[33].吐鲁番市下辖高昌区、托克逊县和鄯善县.中部隆起的盐山和火焰山将盆地分为北盆地和南盆地两个地质单元,呈现出“三山夹两盆”的地貌格局^[34].本研究区位于南盆地,地理坐标介于东经 $88^\circ 10' \sim 90^\circ 00'$,北纬 $42^\circ 10' \sim 43^\circ 00'$,总体地势四周高、中间低,地理位置如图 1 所示.研究区属大陆性暖温带荒漠气候,年均气温 13.95°C ,年降水量为 16 mm,蒸发量高达 3 000 mm.

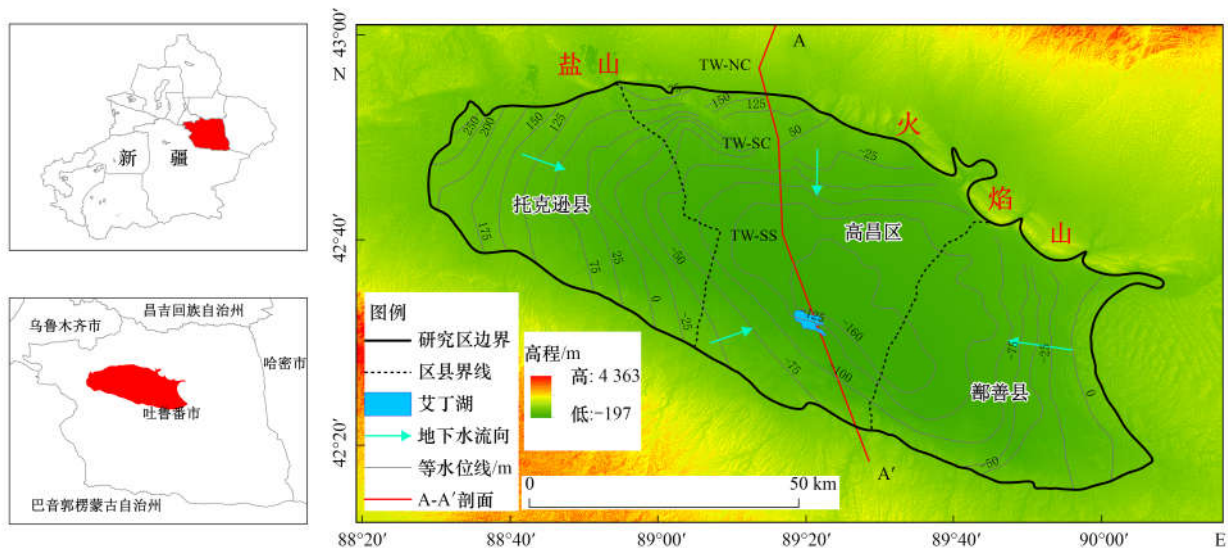
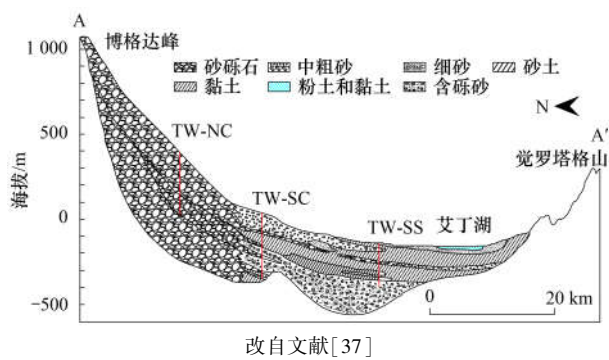


图 1 研究区地理位置与地下水流场

Fig. 1 Geographical location and groundwater flow field of the study area

研究区地下水类型以第四系孔隙水为主^[29].第四系基底埋深一般在 200 ~ 500 m,最大为 600 m,基底埋深西部大于东部,北部大于南部.研究区三面环山,从山前到盆地中心艾丁湖,地层岩性由卵砾石逐渐过渡到粗砂、中砂、细砂、粉土和黏土等(图 2).南盆地单一结构潜水含水层,水量丰富区(单井涌水量 $1\,000 \sim 5\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)主要分布在喀拉乌成山东侧的阿拉沟沟谷、觉罗塔格山北侧的沟谷地区及南盆地山前冲洪积平原的大部分地区,水量中等区

(单井涌水量 $100 \sim 1\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)呈片状和条带状分布于南盆地山前冲洪积平原的局部地区,多层结构潜水-承压水区主要分布在盐山和火焰山南部的伊拉湖乡至托克逊县城一线,并向东一直延伸到鄯善县的吐峪沟-鲁克沁-达浪坎-迪坎乡一带^[35].托克逊县西部及南部山前区域以侧向补给为主,南部平原区以火焰山北侧地下水流经构造缺口补给为主,并以艾丁湖为中心汇集.地下水径流方向与地形坡度方向基本相同,四周向盆地中心艾丁湖方向径流.



改自文献[37]
图2 水文地质剖面
Fig. 2 Hydrogeological profile

研究区地下水排泄方式主要为潜水蒸发、人工开采和泉水排泄^[36]。

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

本次评价所需的数据来源和处理方法如表1所示。

为了方便因子评分和后续的加权叠加,使用ArcGIS 软件中的渔网工具将研究区划分成5 842个1 km × 1 km的正方形网格,以网格为评价单元利

表1 数据来源与处理方法

Table 1 Data sources and processing method			
评价类型	数据名称	数据来源	处理
地下水污染源荷载评价 (PI)	点源污染 P	新疆维吾尔自治区生态环境厅	缓冲区分析
	面源污染 NP	中国科学院资源环境科学与数据中心(土地利用数据)	重分类
	地下水埋深 D	第三次新疆自然资源综合考察项目(水位数据)	克里金插值
地下水脆弱性评价 (DI)	净补给量 R	第三次新疆地下水资源调查与评价报告(地下水补给模数)	矢量化
	含水层介质类型 A	新疆水文地质矢量图	裁剪
	土壤介质类型 S	世界土壤数据库(HWSD)	重分类
	地形坡度 T	地理空间数据云(DEM 数据)	坡度分析
	包气带介质类型 I	第三次新疆地下水资源调查与评价报告	矢量化
	含水层渗透系数 C	新疆水文地质矢量图	裁剪
地下水功能性价值评价 (VI)	地下水水质 Q	第三次新疆自然资源综合考察项目(水质数据)	克里金插值
	地下水富水性 W	新疆地下水富水性图	矢量化

用空间连接工具将各因子的评分情况赋予网格。

2.2 评价方法

2.2.1 地下水污染风险评价

地下水污染风险评价包括地下水污染源荷载评价、地下水脆弱性评价和地下水功能价值评价这3个部分。在考虑研究区的实际情况,遵循全面性和独立性原则的基础上,选取了以下具有代表性的因子^[38],如图3所示。

将地下水污染荷载 (PI)、地下水脆弱性 (DI) 和地下水功能价值 (VI) 按如下公式叠加,得到地下水污染风险指数 RI,公式如下:

$$RI = PI \times DI \times VI \tag{1}$$

式中,PI、DI 和 VI 分别表示地下水污染源荷载指数、地下水脆弱性指数和地下水功能价值指数;RI 表示地下水污染风险指数,RI 值越大,表明地下水污染风险越高。

RI、PI、DI 和 VI 均采用自然间断分类,分为“低”、“较低”、“中等”、“较高”和“高”这5个等级。

地下水污染源荷载评价因子采用专家打分法来确定权重。考虑到点源污染多为矿产、危险废物处理企业和垃圾填埋场等,污染荷载高,但整体分布面积较小。面源污染多为施用化肥的农田和居民用地等,污染荷载相对较低,但整体的分布面积较大。综

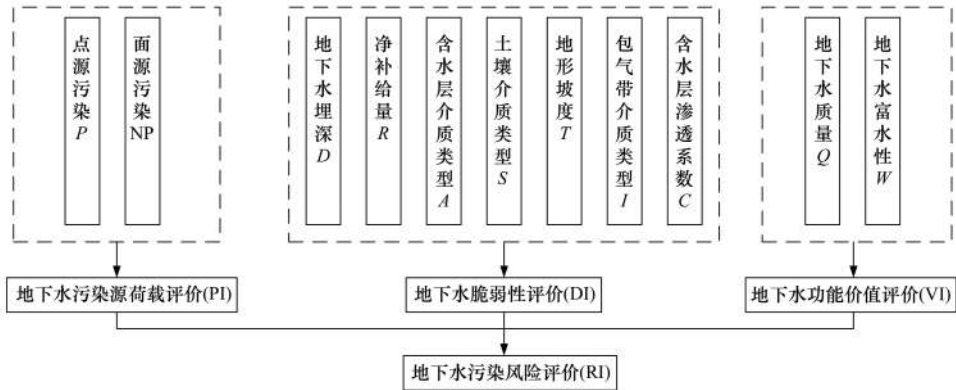


图3 地下水污染风险评价模型框架

Fig. 3 Framework of groundwater contamination risk assessment model

合考虑将点源污染和面源污染的权重分别确定为 0.600 和 0.400; 地下水脆弱性评价因子权重参考《地下水脆弱性评价技术要求》^[39] 中的推荐值, 将权重归一化, 结果如表 2 所示; 《地下水污染防治区划

分工作指南》^[40] 中的地下水功能价值等于地下水水质和富水性评分值的乘积, 未单独对地下水水质和富水性赋权, 本次评价与《地下水污染防治区划分工作指南》保持一致。

表 2 各评价因子权重¹⁾
Table 2 Weights of each evaluation factor

污染源荷载 (PI)		地下水脆弱性 (DI)							地下水功能价值 (VI)	
P	NP	D	R	A	S	T	I	C	Q	W
0.600	0.400	0.217	0.174	0.131	0.087	0.043	0.217	0.131	—	—

1) “—”表示未赋权重

2.2.2 地下水污染源荷载评价

地下水污染源可分为点源污染和面源污染. 点源污染包括工业污染、畜牧养殖及加油站和垃圾填埋场等潜在污染; 面源污染包括农业污染和生活污染. 通过收集的调查资料来确定点源污染; 通过土地利用类型来确定旱地、农村用地、城镇用地和特殊用地等面源污染^[41]. 地下水污染源荷载计算公式如下:

$$PI = P_r \cdot P_w + NP_r \cdot NP_w \quad (2)$$

式中, P 和 NP 分别表示点源污染和面源污染; r 表示因子评分, w 表示权重. PI 表示地下水污染源荷载指数, PI 值越大, 表明污染程度越高.

参考《地下水污染防治区划分工作指南》^[40] 将点源污染分为矿业、危险废物处理企业、加油站、垃圾填埋场和养殖场这 5 类, 空间分布如图 4(a) 所示. 参考《土地利用现状分类》^[42] 将研究区

土地利用类型划分为旱地、农村用地、城镇用地和特殊用地, 将 4 类面源污染以外的土地利用类型划分为未污染区域, 赋值 0 分, 空间分布如图 4(b) 所示. 具体的分类、评分和缓冲区半径值如表 3 所示.

表 3 地下水污染源荷载分类标准¹⁾
Table 3 Classification standards of groundwater contamination source loads

面源污染 (NP)		点源污染 (P)		
类型	评分	类型	评分	缓冲区半径/km
—	—	矿业	9	1.5
特殊用地	8	危险废物处理企业	8	1
—	—	加油站	7	1.5
旱地	6	垃圾填埋场	6	2
—	—	养殖场	5	1
农村用地	4	—	—	—
城镇用地	3	—	—	—

1) “—”表示因子未划分该类型和评分

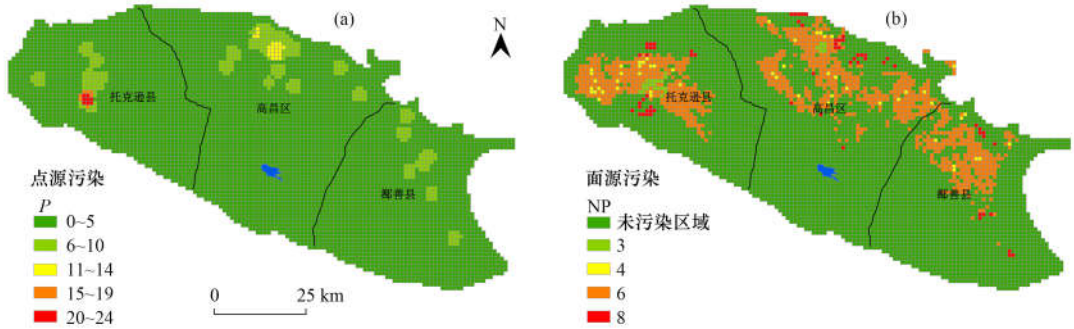


图 4 点源污染与面源污染等级分区

Fig. 4 Classification of point and non-point source pollution levels

2.2.3 地下水脆弱性评价

1968 年法国人 Margat^[43] 首次提出“地下水脆弱性”这一概念. 地下水脆弱性是指地下水环境对自然条件变化和人类活动影响的敏感程度, 它反映了地下水环境的自我防护能力^[44]. 常见的地下水脆弱性评价方法有迭置指数法、模糊数学综合评价法和过程数值模拟法^[45]. 其中 DRASTIC 模型是国内外广泛使用的一种地下水脆弱性评价方法, 模型由

7 个主要影响因素作为评价因子^[46]. 本次采用多年平均地下水补给模数来表征净补给量这一参数, 其余参数保持不变. 模型计算公式如下:

$$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (3)$$

式中, D 、 R 、 A 、 S 、 T 、 I 和 C 分别表示地下水埋深、净补给量、含水层介质类型、土壤介质类型、地形坡度、包气带介质类型和含水层渗透系数; r 表示

因子评分, w 表示权重. DI 表示地下水脆弱性指数, DI 值越大, 表明地下水脆弱性越高.

参考《地下水脆弱性评价技术要求》的分类标准, 将 DRASTIC 模型中的地下水埋深 D 、净补

给量 R 、含水层介质类型 A 、土壤介质类型 S 、地形坡度 T 、包气带介质类型 I 和含水层渗透系数 C 按表 4 进行分类和评分, 空间分布情况如图 5 所示.

表 4 DRASTIC 模型评价因子分类标准¹⁾

Table 4 Classification standard of evaluation factors of DRASTIC model							
地下水埋深 (D)/m	净补给量(R) $\times 10^4$ / $m^3 \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$	含水层介质 类型(A)	土壤介质 类型(S)	地形坡度 (T)/(°)	包气带介质 类型(I)	含水层渗透系数 (C)/ $m \cdot d^{-1}$	评分
<3	—	卵砾石	—	—	砂砾石	—	10
3~5	—	—	棕漠土	<2	—	6~12	9
5~10	—	砂砾石	—	—	—	—	8
10~30	5~10	—	荒漠风沙土	2~10	粉细砂	3.14~6	7
—	—	—	—	—	—	—	6
30~50	<5	粗砂	盐化潮土	10~15	粉土	—	5
—	—	中砂	—	—	—	0.2~3.14	4
—	—	细砂	沼泽盐土	15~30	—	—	3
50~100	—	砂土	—	—	—	—	2
>100	—	粉土和黏土	灌淤土	>30	—	0.01~0.2	1

1) “—”表示因子未划分该类型和评分

2.2.4 地下水功能价值评价

从水质和水量两个方面衡量地下水的功能价值. 水质好的地下水使用量大, 价值较高; 水质差的地下水利用有限, 甚至无法利用, 价值较低^[47]. 地下水水质参考《地下水质量标准》进行分类^[48]. 地下水水量采用地下水富水性来表征. 计算公式如下:

$$VI = Q_r \times W_r \quad (4)$$

式中, Q 和 W 分别表示地下水水质和地下水富水性; r 表示因子评分. VI 表示地下水功能价值指数, VI 值越大, 表明地下水功能价值越高.

参考《地下水质量标准》^[48] 将研究区地下水水质分为可饮用、适当可饮用和不宜直接饮用这 3 类, 空间分布如图 6(a) 所示; 将地下水富水性按单井涌水量大小分为 >1 000、100~1 000、10~100 和 <10 $m^3 \cdot d^{-1}$ 这 4 类, 空间分布如图 6(b) 所示. 具体的分类和评分情况如表 5 所示.

表 5 地下水功能价值分类标准¹⁾

Table 5 Classification standard of groundwater function value		
地下水水质(Q)	地下水富水性(W)/ $m^3 \cdot d^{-1}$	评分
可饮用	—	5
适当可饮用	>1 000	4
—	100~1 000	3
不宜直接饮用	10~100	2
—	<10	1

1) “—”表示因子未划分该类型和评分

3 结果与讨论

图 7 根据公式(1)~(4)加权叠加形成. “十三五”以来新疆高度重视环境保护工作, 不断推进水、土壤污染防治工作, 2016~2020 年《新疆维吾尔自

治区生态环境公报》显示(图 8), 废水主要污染物排放量逐年减少^[49]. 由表 6 和图 7(a) 可以看出研究区地下水污染源荷载整体较低, 高污染荷载和较高污染荷载地区面积仅占研究区总面积的 0.7%, 主要集中在托克逊县南部和高昌区的东部区域; 由表 6 和图 7(b) 可知研究区地下水脆弱性相对较高, 高脆弱性和较高脆弱性区域面积分别占研究区总面积的 19.6% 和 24.1%, 主要分布在托克逊县和高昌区的中部和北部地区, 地下水脆弱性偏高的主要原因是该区域地下水埋深较小, 污染物运移距离短, 难以被稀释, 并且该区域包气带介质以粉细砂为主, 渗透性较好、吸附能力较差; 如图 7(c) 和表 6 可知研究区地下水功能价值整体较高, 高价值和较高价值区域面积占比分别为 30.0% 和 40.8%, 吐鲁番市在 2018~2022 年新疆城市水环境质量排名中均位列第一, 并且由 2019 年《新疆水资源公报》显示, 吐鲁番市地下水供水量占总供水量的 49.6%, 地下水是当地生产生活的重要供给, 从质量和数量上说明研究区地下水具有较高的功能价值.

由图 7(d) 和表 6 可以看出研究区地下水污染风险整体较低. 高污染风险区和较高风险区面积占研究区总面积的 15.5%, 高风险区和较高风险区主要分布在 3 处. 第一处风险区(L1) 主要位于托克逊县境内的郭勒布依乡至托克逊镇一带, 该区域在以工业生产为主的点源污染和以农业生产为主的面源污染的双重作用下, 使得污染源荷载偏高, 加之该地区地下水埋深相对较浅, 地下水天然防护能力较差, 地下水脆弱性较高, 高污染源荷载和高地下水脆弱性是该地区地下水污染风险偏高的主要原因; 第二

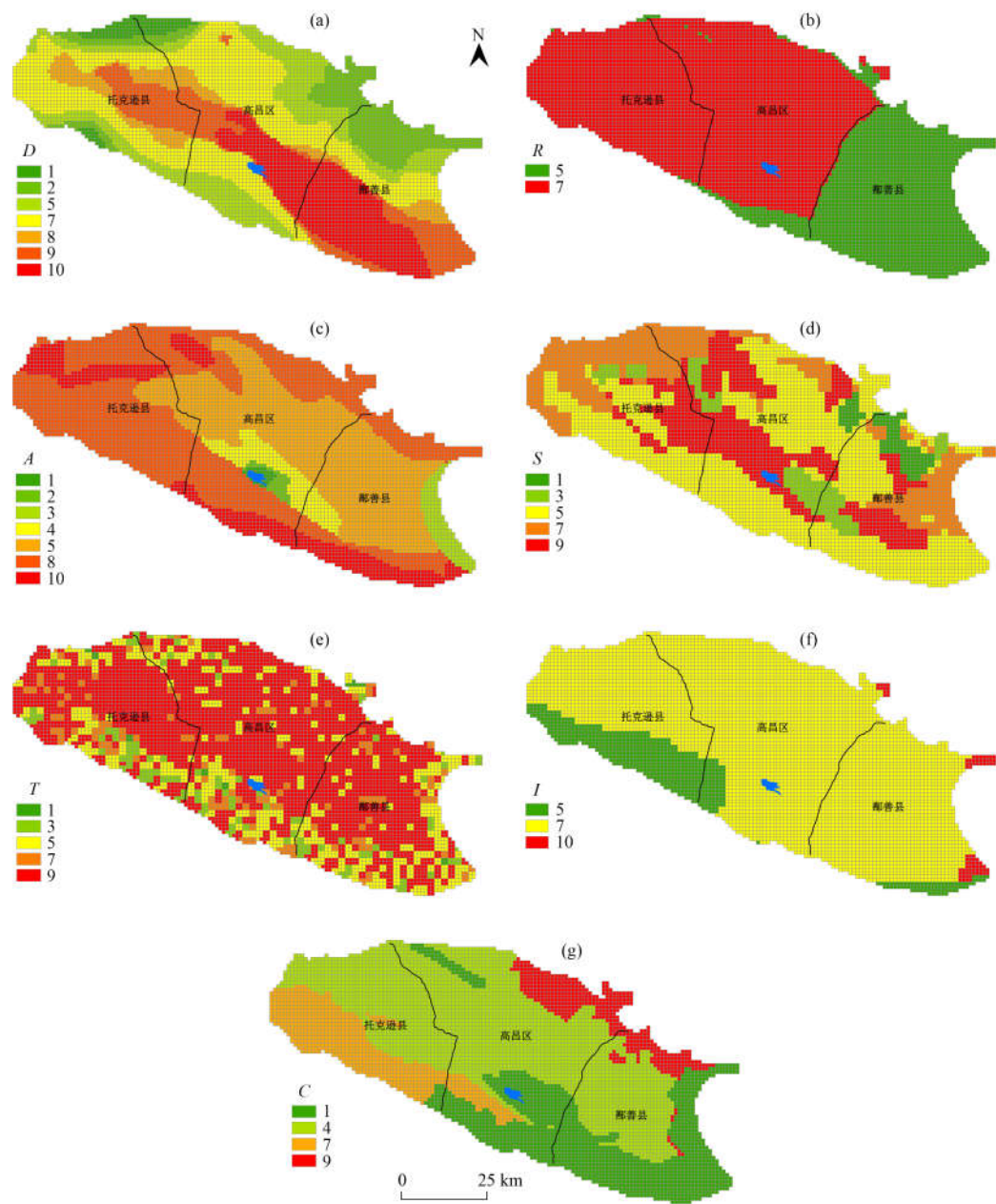


图5 DRASTIC 模型各评价因子等级分区

Fig. 5 Grade division of each evaluation factor of DRASTIC model

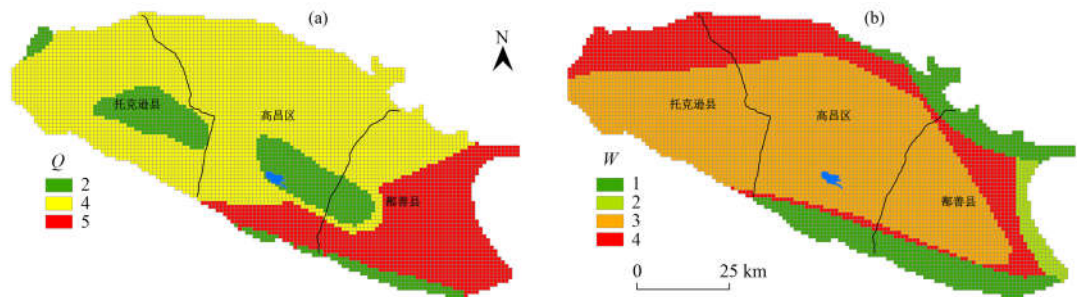


图6 地下水质量与富水性等级分区

Fig. 6 Classification of groundwater quality and water abundance

处风险区(I2)主要位于高昌区的葡萄乡、亚尔乡和高昌街道,该区域是吐鲁番的社会经济发展的核

心区域,高人口密度引发的生活污染,增加了该区域的污染源荷载,又因为该区域地下水功能价值高,叠

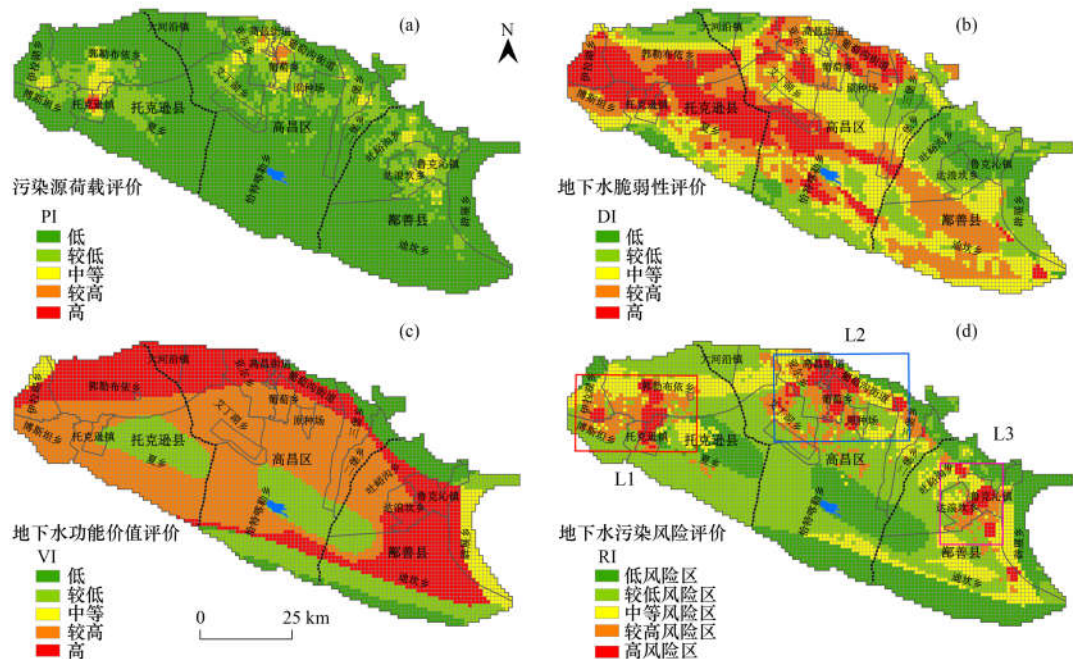


图7 评价结果分区
Fig. 7 Evaluation result partition map

表6 评价结果统计

Table 6 Statistics of evaluation results

评价结果	地下水污染源荷载		地下水脆弱性		地下水功能价值		地下水污染风险	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
低	4 553	77.9	481	8.2	422	7.2	1 520	26.0
较低	913	15.6	1 254	21.5	1 101	18.8	2 370	40.6
中等	338	5.8	1 556	26.6	187	3.2	1 046	17.9
较高	28	0.5	1 405	24.1	2 381	40.8	586	10.0
高	10	0.2	1 146	19.6	1 751	30.0	320	5.5
合计	5 842	100.0	5842	100.0	5 842	100.0	5 842	100.0

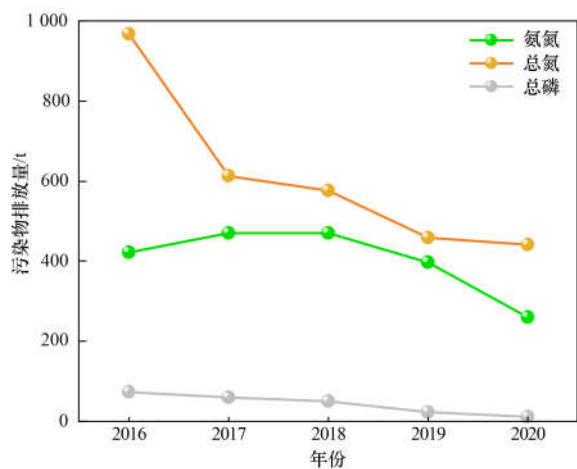


图8 新疆 2016 ~ 2020 年废水主要污染物排放量
Fig. 8 Discharge of major wastewater pollutants
in Xinjiang from 2016 to 2020

加作用下使得该区域地下水污染风险较高;第三处风险区(L3)主要分布在鄯善县境内的鲁克沁镇和达浪坎乡,高地下水功能价值和以农业活动为主的面源污染是该区域地下水污染风险偏高的主要原

因,地下水功能价值像一个放大镜来凸显地下水受到污染的后果.

4 结论

(1)研究区地下水污染风险整体偏低.低风险区、较低风险区和中风险区面积占研究区总面积的84.5%;高风险区和较高风险区面积仅占研究区总面积的15.5%,高风险区和较高风险区主要分布在研究区的L1、L2和L3处.

(2)L1主要分布在托克逊县境内的郭勒布依乡至托克逊镇一带,该区域地下水污染风险偏高的主要原因是工业和农业生产活动使得地下水污染荷载偏高,并且地下水埋深相对较浅,天然防护能力较差.

(3)L2主要位于高昌区的葡萄乡、亚尔乡和高昌街道,该区域是吐鲁番市社会经济发展的核心,人口密度大、人类活动聚集增加了污染荷载,又因为该区域的地下水水质和水量都具有很高的开采价值,双重作用下使得地下水污染风险偏高.

(4)L3 主要分布在鄯善县境内的鲁克沁镇和达浪坎乡,高地下水功能价值和以农业活动为主的污染荷载是该区域地下水污染风险偏高的主要原因。

参考文献:

- [1] Wang J J, He J T, Chen H H. Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **432**: 216-226.
- [2] 张兆吉, 费宇红, 张凤娥, 等. 区域地下水污染调查评价技术方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [3] 罗兰. 我国地下水污染现状与防治对策研究[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2008, **8**(2): 72-75.
Luo L. Research on groundwater pollution and its prevention-control policy in China [J]. *Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition)*, 2008, **8**(2): 72-75.
- [4] 侯德义. 我国工业场地地下水污染防治十大科技难题[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(9): 2015-2025.
Hou D Y. Ten grand challenges for groundwater pollution prevention and remediation at contaminated sites in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(9): 2015-2025.
- [5] 陈雳华, 张弛, 郑凌云, 等. 基于 GMS 软件的河谷盆地型工业园区地下水污染控制模拟[J]. *环境污染与防治*, 2022, **44**(8): 1025-1029.
Chen L H, Zhang C, Zheng L Y, *et al.* Simulation of groundwater pollution control in a valley-basin industrial park based on GMS [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022, **44**(8): 1025-1029.
- [6] 王潇, 马宝强, 汤超, 等. 甘肃省地下水污染防治工作进展与对策建议[J]. *地下水*, 2022, **44**(4): 30-33.
Wang X, Ma B Q, Tang C, *et al.* Progress and countermeasures of groundwater pollution prevention and control in Gansu Province [J]. *Ground Water*, 2022, **44**(4): 30-33.
- [7] 杨萌, 翁仕龙, 潘怡然, 等. 地下水污染修复技术研究进展[J]. *环境科学与管理*, 2022, **47**(4): 118-122.
Yang M, Weng S L, Pan Y R, *et al.* Research progress on remediation technologies of groundwater pollution [J]. *Environmental Science and Management*, 2022, **47**(4): 118-122.
- [8] Zwahlen F. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers[M]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [9] Nobre R C M, Filho O C R, Mansur W J, *et al.* Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, **94**(3-4): 277-292.
- [10] 孙才志, 陈相涛, 陈雪姣, 等. 地下水污染风险评价研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2015, **35**(5): 152-161.
Sun C Z, Chen X T, Chen X J, *et al.* Recent advances in groundwater contamination risk assessment [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, **35**(5): 152-161.
- [11] Zhao Y S, Zhang J W, Chen Z, *et al.* Groundwater contamination risk assessment based on intrinsic vulnerability, pollution source assessment, and groundwater function zoning [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2019, **25**(7): 1907-1923.
- [12] Zhang J J, Zhai Y Z, Xue P W, *et al.* A GIS-based LVF model for semiquantitative assessment of groundwater pollution risk: a case study in Shenyang, NE China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2017, **23**(2): 276-298.
- [13] Huan H, Zhang B T, Kong H M, *et al.* Comprehensive assessment of groundwater pollution risk based on HVF model: a case study in Jilin City of northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 1518-1530.
- [14] 郭高轩, 李宇, 许亮, 等. 北京平原区第四系地下水污染风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 562-568.
Guo G X, Li Y, Xu L, *et al.* Risk assessment of quaternary groundwater contamination in Beijing plain [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 562-568.
- [15] Martínez-Bastida J J, Arauzo M, Valladolid M. Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution [J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, **18**(3): 681-698.
- [16] Nixdorf E, Sun Y Y, Lin M, *et al.* Development and application of a novel method for regional assessment of groundwater contamination risk in the Songhua River basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **605-606**: 598-609.
- [17] 刘宇, 兰双双, 张永祥, 等. 基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4236-4244.
Liu Y, Lan S S, Zhang Y X, *et al.* Spatio-temporal evolution of groundwater vulnerability based on spatial autocorrelation [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4236-4244.
- [18] 王涛, 徐明. 天山北坡经济带东段浅层地下水固有脆弱性评价[J]. *水资源保护*, 2017, **33**(1): 41-45.
Wang T, Xu M. Vulnerability assessment of shallow groundwater in eastern section of northern Tianshan mountain economic belt [J]. *Water Resources Protection*, 2017, **33**(1): 41-45.
- [19] 吴建强, 王敏, 黄沈发, 等. 平原河网区地下水污染风险评价体系及其应用[J]. *水资源保护*, 2019, **35**(4): 55-62.
Wu J Q, Wang M, Huang S F, *et al.* Risk assessment system of groundwater pollution in plain river network area and its application [J]. *Water Resources Protection*, 2019, **35**(4): 55-62.
- [20] 孙才志, 奚旭, 董璐. 基于 ArcGIS 的下辽河平原地下水脆弱性评价及空间结构分析[J]. *生态学报*, 2015, **35**(20): 6635-6646.
Sun C Z, Xi X, Dong L. An ArcGIS-based analysis of groundwater spatial structure and groundwater vulnerability in the lower reaches of the Liaohe River plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(20): 6635-6646.
- [21] Li X Y, Gao Y Y, Qian H, *et al.* Groundwater vulnerability and contamination risk assessment of the Weining Plain, using a modified DRASTIC model and quantized pollution loading method [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, **10**(21), doi: 10.1007/s12517-017-3255-y.
- [22] Agossou A, Yang J S. Comparative study of groundwater vulnerability to contamination assessment methods applied to the southern coastal sedimentary basin of Benin [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021, **35**, doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100803.
- [23] 唐蕴, 王研, 唐克旺. 吐鲁番市浅层地下水功能区划分[J]. *水资源保护*, 2017, **33**(2): 16-21, 78.
Tang Y, Wang Y, Tang K W. Functional division of shallow groundwater in Turpan city [J]. *Water Resources Protection*, 2017, **33**(2): 16-21, 78.
- [24] 袁月, 唐蕴. 吐鲁番市地下水功能评价[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2020, **18**(4): 284-294.
Yuan Y, Tang Y. Evaluation of groundwater function in Turpan city [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and*

- Hydropower Research, 2020, **18**(4): 284-294.
- [25] 满保德. 新疆吐鲁番地区葡萄产业发展对策研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2017.
- Man D B. Study on the development countermeasures of grape industry in Turpan prefecture, Xinjiang[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017.
- [26] 新疆维吾尔自治区水利厅. 2019 年新疆水资源公报[EB/OL]. <http://slt.xinjiang.gov.cn/slt/szygh/202203/14f291c909b945219903be01369d0191.shtml>, 2022-03-22.
- [27] 刘亮, 褚宏宽, 刘振荣. 吐鲁番盆地地下水水化学特征及其演化规律[J]. 中国水运, 2015, **15**(1): 187-188.
- [28] 竹娜, 胡伏生, 张强, 等. 吐鲁番盆地地下水化学分析[J]. 地下水, 2015, **37**(5): 25-28, 32.
- Zhu N, Hu F S, Zhang Q, et al. Groundwater chemical analysis of the Turpan basin[J]. Ground Water, 2015, **37**(5): 25-28, 32.
- [29] 杨广焱, 李巧, 周金龙. 新疆吐鲁番地区地下水质量与污染评价[J]. 节水灌溉, 2014, (2): 29-32.
- Yang G Y, Li Q, Zhou J L. Assessment of groundwater quality and pollution in Turpan region of Xinjiang[J]. Water Saving Irrigation, 2014, (2): 29-32.
- [30] 白凡, 周金龙, 曾妍妍. 吐鲁番盆地平原区地下水水化学特征及水质评价[J]. 干旱区研究, 2022, **39**(2): 419-428.
- Bai F, Zhou J L, Zeng Y Y. Hydrochemical characteristics and quality of groundwater in the plains of the Turpan Basin[J]. Arid Zone Research, 2022, **39**(2): 419-428.
- [31] 陈鲁, 王艳伟, 刘娟, 等. 基于 GIS 的吐鲁番盆地地下水资源量模拟预测[J]. 干旱区研究, 2017, **34**(4): 727-732.
- Chen L, Wang Y W, Liu J, et al. GIS-based simulation and prediction of groundwater resources in the Turpan basin[J]. Arid Zone Research, 2017, **34**(4): 727-732.
- [32] 阿不都沙拉木·加拉力丁, 师芸宏. 吐鲁番地区地下水资源状况分析[J]. 中国农村水利水电, 2015, (11): 55-58, 64.
- Abdisalam J, Shi Y H. Research on the groundwater resources condition at Turpan region[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015, (11): 55-58, 64.
- [33] 胡腾腾, 吴彬. 吐鲁番市地下水埋深及水位时空变化规律研究[J]. 节水灌溉, 2016, (4): 69-74.
- Hu T T, Wu B. Study on the temporal and spatial variation of groundwater depth and water level in Turpan city[J]. Water Saving Irrigation, 2016, (4): 69-74.
- [34] 郭琳, 郭健, 吴彬. 吐鲁番盆地生态环境现状及有效保护分析[J]. 地下水, 2013, **35**(4): 51-53.
- Guo L, Guo J, Wu B. Study on current situation and protection of ecological environment in Turpan basin[J]. Ground Water, 2013, **35**(4): 51-53.
- [35] 吴豪. 吐鲁番盆地地下水水化学演化特征研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018.
- Wu H. Study on the groundwater chemical evolution in Turpan basin[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2018.
- [36] 商佐. 吐鲁番盆地地下水动态特征及控制性水位分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Shang Z. Analysis of groundwater dynamic characteristics and controlling water level in Turpan basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [37] 陈鲁. 吐鲁番盆地区域水文地质条件及地下水循环研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- Chen L. The study of regional hydrogeological conditions and groundwater circulation in Turpan basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [38] 周金龙. 内陆干旱区地下水脆弱性评价方法及其应用研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2010.
- [39] 中国地质调查局. 地下水脆弱性评价技术要求 (GWI-D3) [EB/OL]. <https://www.docin.com/p-1313502098.html>, 2004-11-01.
- [40] 中华人民共和国生态环境部. 地下水污染防治区划分工作指南(试行)[EB/OL]. <https://jz.docin.com/p-1949560809.html>, 2014-10-01.
- [41] 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.
- [42] GB/T 21010-2017, 土地利用现状分类[S].
- [43] Margat J. Groundwater vulnerability to contamination[M]. Orleans: BRGM, 1968.
- [44] 吴泽华. 改进 DRASTIC 模型在平潭岛地下水脆弱性评价中的应用[J]. 水利科技, 2021, (1): 1-4.
- Wu Z H. Application of improved DRASTIC model to groundwater vulnerability assessment of Pingtan island[J]. Hydraulic Science and Technology, 2021, (1): 1-4.
- [45] 唐学芳, 吴勇, 陈晶, 等. 基于 DRASTIC-GIS 模型的成都典型区域地下水脆弱性评价[J]. 环境监测管理与技术, 2020, **32**(6): 28-32.
- Tang X F, Wu Y, Chen J, et al. DRASTIC-GIS model for assessing groundwater vulnerability in typical area of Chengdu[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2020, **32**(6): 28-32.
- [46] Aller L. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings[R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 1987.
- [47] 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.
- [48] GB/T 14848-2017, 地下水质量标准[S].
- [49] 新疆维吾尔自治区生态环境厅. 新疆维吾尔自治区生态环境公报[EB/OL]. <http://sthjt.xinjiang.gov.cn/xjepd/hjzl/hjzl.shtml>, 2020-06-05.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter ...	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil ...	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvo-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)