

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062)	
《环境科学》征稿简则(3116)	
信息(3164, 3259, 3572)	

叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价

闫志云^{1,2,3}, 曾妍妍^{1,2,3*}, 周金龙^{1,2,3}, 孙英^{1,2,3}, 马常莲^{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)

摘要: 地下水污染风险评价是管理地下水资源和预防地下水污染的有效方法, 采用 DRSTIW 模型对叶尔羌河流域平原区地下水脆弱性进行评价; 采用因子分析对污染源解析量化, 进行地下水污染负荷评价; 采用兼顾开采价值和原位价值来估算地下水功能价值. 采用熵权法和层次分析法确定综合权重, 基于 ArcGIS 加权叠加功能生成地下水污染风险图. 结果表明, 研究区地下水脆弱性整体较高, 地下水污染负荷和地下水功能价值整体较低, 地下水污染风险整体偏低, 高污染风险和较高污染风险区占研究区总面积的 20.7%, 主要分布在莎车县、泽普县、麦盖提县、图木舒克市和巴楚县西部等区域, 含水层渗透能力强、地下水径流条件弱、地下水补给量模数大、植被覆盖率低和水岩相互作用强等自然条件加之频繁的人类活动如农业化肥的施用和工业、生活污水的排放等使得这些区域地下水污染风险较高. 地下水污染风险评价为地下水监测网络的优化和地下水污染防治提供有力的数据支撑.

关键词: 地下水; 污染风险; 脆弱性; 污染负荷; 功能价值

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3237-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202207245

Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin

YAN Zhi-yun^{1,2,3}, ZENG Yan-yan^{1,2,3*}, ZHOU Jin-long^{1,2,3}, SUN Ying^{1,2,3}, MA Chang-lian^{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 Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: Groundwater pollution risk assessment is an effective method to manage groundwater resources and prevent groundwater pollution. The DRSTIW model was used to evaluate the groundwater vulnerability in a plain area of the Yarkant River Basin, and factor analysis was used to identify pollution sources for pollution loading evaluation. The functional value of groundwater was estimated by considering both the mining value and the in-situ value. The entropy weight method and the analytic hierarchy process (AHP) were used to determine the comprehensive weight, and a groundwater pollution risk map was generated based on the overlay function of ArcGIS software. The results showed that the natural geological factors such as large groundwater recharge modulus, wide recharge sources, strong permeability of soil surface and unsaturated zone, and shallow groundwater depth facilitated pollutant migration and enrichment, resulting in a higher overall groundwater vulnerability. Very high vulnerability and high vulnerability areas were mainly distributed in Zepu County, Shache County, Maigaiti County, Tumushuke City, and the eastern part of Bachu County. The pollution loading of groundwater was generally low, the main pollution sources were point source pollution caused by water-rock interaction, non-point source pollution caused by pesticides and fertilizers, and point source pollution caused by industry and life. The overall functional value of groundwater was low because of human economic activities, fine water quality, and good habitat quality. Groundwater pollution risk was generally low, and very high and high pollution risk areas accounted for 20.7% of the study area, mainly distributed in Shache County, Zepu County, Maigaiti County, Tumushuke City, and the western part of Bachu County. Natural conditions such as strong aquifer permeability, weak groundwater runoff conditions, large groundwater recharge modulus, low vegetation coverage, and strong water-rock interaction, coupled with frequent human activities such as application of agricultural fertilizers and discharge of industrial and domestic sewage, made the groundwater pollution risk higher in these areas. Groundwater pollution risk assessment provided strong data support for the optimization of the groundwater monitoring network and the prevention of groundwater pollution.

Key words: groundwater; pollution risk; vulnerability; pollution loading; groundwater function value

地下水是维持生态平衡和日常供水的重要资源,特别是在干旱和半干旱地区^[1],然而,许多地区面临严重的地下水污染问题,地下水污染增加了对生态环境和人类健康的风险,制约了社会经济的可持续发展,因此,进行地下水污染风险评价是预防地下水污染的前提.地下水污染风险的定义为含水层本质脆弱性和由于人类活动对其造成污染达到不可接受水平的可能性^[2].一般认为地下水污染风险取决于地下水的脆弱性、污染源危害和地下水功能价值^[3].目前国内外地下水脆弱性评价广泛采用 1985 年美国环境保护署 (USEPA) 建立的 DRASTIC 模型^[4].DRASTIC 模型选取对地下水脆弱性影响较大的地下水埋深 (D)、净补给量 (R)、含水层介质

(A)、土壤介质 (S)、地形坡度 (T)、包气带影响 (I) 和水力传导系数 (C) 这 7 个水文地质因子,对每个因子赋予评分,通过附加权重计算脆弱性指数.在实际应用中,许多学者在 DRASTIC 模型的基础上,根据研究区具体水文地质条件和数据的可得性对因子做出改变, Wu 等^[5]根据与综合污染指数 (NI) 的相关性,选取了适宜中国北方再生水灌区的 5 个因子改进了 DRASTIC 模型进行地下水脆弱性评

收稿日期: 2022-07-26; 修订日期: 2022-09-02

基金项目: 新疆水利工程安全与水灾害防治自治区重点实验室 2021 年开放课题项目 (ZDSYS-JS-2021-10); 国家自然科学基金基金项目 (42067035)

作者简介: 闫志云 (1995 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水水质评价及地下水污染评价, E-mail: dl259119257@163.com

* 通信作者, E-mail: 644257818@qq.com

价. 随着社会经济的发展, 城市化、工业和农业等人类活动对地下水环境的污染不容小觑, 通过对地下水潜在污染源的识别, 进行污染负荷评价, 可以提高地下水污染风险评价的准确性. 地下水污染源的识别取决于污染物类型及其毒性、流动性和降解性^[6], 因此可以通过量化特征污染物来评估污染源的有害性^[7,8]. 主成分分析(PCA)和因子分析(FA)常用来量化识别污染源类型, 进而开展地下水污染负荷评价^[9,10]. 地下水功能价值的变化可以表征地下水系统发生污染风险的损害, 基于含水层富水性和地下水质量来量化地下水功能价值^[11], 另外人口密度、人均 GDP 和土地利用等的变化都会影响地下水污染程度^[12]. 因此, 利用多指标综合评价, 可以提高地下水污染风险评价的准确性.

新疆叶尔羌河流域以农业为主导产业, 是全国第四大灌区, 灌溉面积约为 $5 \times 10^5 \text{ hm}^2$. 由于岩石溶滤和蒸发浓缩作用等自然因素的影响使得地下水中盐类离子积聚富集, 加之农药化肥大面积地施用和工业、生活污水的排放等人为因素的影响^[13], 使该区域地下水面临污染的风险. 近年来, 有学者在叶尔羌河流域开展了较多地下水方面的研究工作, 主要包括地下水质量评价^[14]、地下水化学特征及形成过程^[13,15]和地下水埋深变化特征^[16]等, 而对地下水污染源识别和地下水污染风险评价的研究有待进一

步深入. 本文以叶尔羌河流域平原区为研究区, 根据水文地质特征、污染源分布特征和地下水功能价值的变化, 利用地理信息系统(GIS)加权叠加进行地下水污染风险评价, 以期为合理开发利用地下水资源、预防地下水污染和建立环境监测站点提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

叶尔羌河流域位于新疆塔里木盆地的西南边缘, 地理位置介于 $74^\circ 30' \sim 80^\circ 50' \text{ E}$, $34^\circ 50' \sim 40^\circ 30' \text{ N}$, 该区属典型的温带大陆性干旱气候, 年降水量小于 140 mm , 年蒸发量大于 $2\,300 \text{ mm}$ ^[17]. 流域以河流出口为界分为南部山区和北部平原区两大单元, 山区出露地层主要为古近-新近系, 岩性主要为变质岩、石灰岩、砂岩和泥岩等组成^[18]; 平原区主要由第四系松散层堆积物组成, 从位于叶城县南部的冲洪积倾斜平原到流域北部的冲积平原区, 含水层岩性由卵砾石和砂砾石逐渐过渡为中粗砂、细砂和粉砂等, 含水层渗透性变差, 水动力条件变差^[19]. 研究区含水层主要为第四系松散岩类孔隙水, 地下水补给主要来自河流、渠道和水库田间灌溉水的入渗补给, 蒸发和泉排是该区域的主要排泄方式. 地下水流向与河流流向一致, 即自西南向东北流动(图1)^[20].

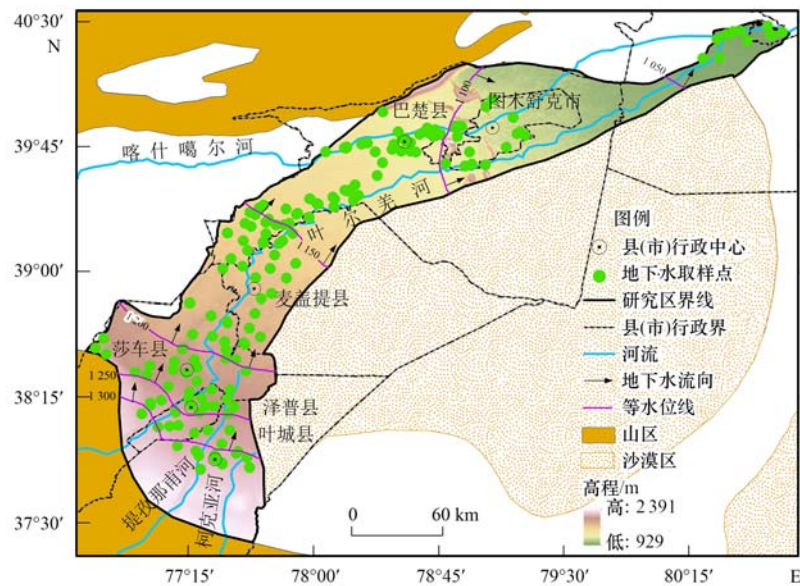


图1 地下水取样点空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of groundwater sampling sites

1.2 研究方法

1.2.1 地下水脆弱性评价

研究区地下水补给主要来源于灌溉和渠系补给, 大气降水补给相对较弱, 故采用地下水净补给模

数代替净补给量; 富水性(单井涌水量)的大小与含水层介质、厚度和渗透系数等因子有关^[21], 本研究在 DRASTIC 模型的基础上进行改进, 采用 DRSTIW 模型对地下水脆弱性进行评价, 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 表示权重。

1.2.2 地下水污染负荷评价

地下水污染负荷评价可以量化污染物在迁移的过程中对地下水的潜在损害^[22]。地下水污染物一般来自两个来源:点源和面源,农田灌溉下渗是典型的面源污染,工业排放、垃圾填埋、矿产勘探等都属于点源污染^[23]。如果其中任何一种发生在具有高渗透性的含水层中或周围,则很可能发生严重污染^[24]。本研究采用因子分析对污染源进行解析,将因子分析中的各个因子得分进行分级并评分,依据式(2)计算地下水污染负荷指数(PI):

$$PI = L_r L_w + A_r A_w + C_r C_w \quad (2)$$

式中,PI表示地下水污染负荷指数; L 、 A 和 C 分别表示水岩相互作用的点源污染、农药化肥的面源污染和工业、生活的点源污染等污染因子。

1.2.3 地下水功能价值评价

地下水功能价值一般由“开采价值”和“原位价值”两个方面来表征^[11]。开采价值可以用地下水的使用价值及其产生经济效益来衡量,包括各种人类活动所需要的地下水;原位价值可以用地下水的生态价值和调节价值来衡量,包括优化水质、维持生态平衡等^[25]。夜间灯光遥感是能够探测夜间微光的光学遥感技术,夜间灯光遥感数据已经被众多研究证明与国民生产总值(GDP)和人口密度等社会经济指标具有较强的相关性^[26,27]。生境质量可指示生态环境好坏,是人类与自然、其他种群和谐、可持续发展的基础,生境质量越好,区域生物多样性越高,生态系统越稳定^[28]。基于土地利用数据,采用InVEST模型中的生境质量模块(habitat quality)定量评估叶尔羌河流域平原区生境质量水平。水质指数法(WQI)被广泛应用于地下水质量评价^[29],依据《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中的Ⅲ类水限值,选用研究区地下水中超标率较高的 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、TDS、TH、 NH_4^+ 、Fe和Mn等8项水质指标用于地下水质量评价。采用夜间灯光遥感数据、生境质量和地下水质量类别来表征地下水功能价值,地下水功能价值量(FI)由式(3)计算:

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

式中,FI表示地下水功能价值量, H 、 E 和 Q 分别表示夜间灯光遥感数据、生境质量和地下水质量

类别。

1.2.4 地下水污染风险评价

地下水污染风险评价可为有关部门管理地下水资源提供依据。它可以由地下水的脆弱性、不同污染源的污染负荷和地下水的功能价值来表征。因此,利用基于DRSTIW模型的地下水脆弱性图、地下水污染负荷图和地下水功能价值图,叠加生成地下水污染风险图,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、地下水污染负荷指数和地下水功能价值量。

本研究首先将地下水脆弱性图、地下水污染负荷图以及地下水功能价值图网格化处理后得到各自评分图,然后通过各因子加权叠加得到地下水污染风险图。具体处理过程如下:①将研究区剖分为 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 的网格,共3134个网格,以每个网格为单元,将各因子评分赋予网格;②分别按式(1)~(4)加权叠加,可得到地下水脆弱性指数、污染负荷指数、地下水功能价值量和地下水污染风险指数;③利用ArcGIS中Nature break分类方法将各个图件分为“高”“较高”“中等”“较低”和“低”这5个等级。

1.3 数据来源

依据《地下水环境监测技术规范》(HJ/T 164-2004)于2016~2020年共采集191组地下水水样(图1),水样均采自潜水含水层,并检测33项水质指标;地下水埋深(D)数据由现场测量得到,地下水埋深为 $1.1 \sim 59.6\text{ m}$;地下水净补给量模数(R)基于降水入渗、农业灌溉和渠道渗漏等补给来源计算;土壤介质(S)数据来源于世界土壤数据库(HWSD);地形坡度(T)数据来源于地理空间数据云的DEM数据;包气带岩性(I)和富水性(W)等资料来源于钻孔数据和新疆水文地质图集;污染场地信息由实地调查和新疆维吾尔自治区生态环境厅官网(<http://sthjt.xinjiang.gov.cn>)获得;夜间灯光遥感数据NPP-VIIRS来源于美国国家海洋与大气管理局官网(<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/>);土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心网站(<https://www.resdc.cn>);其余各项社会经济数据来自新疆统计年鉴和喀什统计年鉴等。

2 结果与分析

2.1 地下水脆弱性评价

参考中国地质调查局发布的《地下水脆弱性评价技术要求》(GWI-D 3)和《地下水污染防治区划分工作指南(2019)》,并结合研究区水文地质条件

对地下水埋深(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)等因子进行赋分,DRSTIW 模型的分类标准见表 1.

表 1 DRSTIW 模型 6 个因子的分类标准¹⁾

Table 1 Classification criteria for the six factors of the DRSTIW model											
D/m		$R \times 10^4 / m^3 \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$		S		$T/(^{\circ})$		I		$W/m^3 \cdot d^{-1}$	
范围	赋分	范围	赋分	范围	赋分	范围	赋分	范围	赋分	范围	赋分
>30	1	<5	1	黏土	1	>18	1	—	—	<100	1
26.7~30	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22.9~26.7	3	5~10	3	粉质黏土	3	11~18	3	—	—	—	—
15.2~22.9	4	—	—	—	—	—	—	亚砂土	4	100~1 000	4
12.1~15.2	5	10~15	5	壤土	5	—	—	—	—	—	—
9.1~12.1	6	—	—	—	—	7~11	6	—	—	—	—
6.8~9.1	7	15~20	7	砂质壤土	7	—	—	粉细砂	7	—	—
4.6~6.8	8	—	—	—	—	4~7	8	—	—	1 000~5 000	8
2~4.6	9	—	—	—	—	2~4	9	—	—	—	—
<2	10	20~30	10	砂土	10	<2	10	砂砾石	10	—	—

1) “—”表示因子未划分该范围和赋分

因子权重的适宜性也会影响地下水脆弱性评价的结果,利用主观权重(层次分析法)和客观权重(熵权法)取平均值的方法确定综合权重,既避免了人为因素过多的干扰,又能体现指标间的相关性,能更好地反映评价结果^[30],各因子的综合权重见表 2.

表 2 各因子综合权重

因子	地下水脆弱性(VI)						地下水污染负荷(PI)			地下水功能价值(FI)		
	D	R	S	T	I	W	L	A	C	H	E	Q
层次分析法	0.292	0.183	0.171	0.096	0.151	0.107	0.528	0.331	0.141	0.175	0.580	0.245
熵权法	0.104	0.263	0.145	0.132	0.189	0.167	0.376	0.436	0.188	0.257	0.222	0.521
综合权重	0.198	0.223	0.158	0.114	0.170	0.137	0.452	0.383	0.165	0.216	0.401	0.383

DRSTIW 模型中各评价因子的分级如图 2 所示,将 DRSTIW 模型中的各个因子的得分和权重叠加,得到地下水脆弱性评价结果(图 3 和表 3).高脆弱性区和较高脆弱性区占比分别为 26.9% 和 34.8%,主要分布在泽普县、莎车县、麦盖提县、图木舒克市和巴楚县的东部等区域,这主要是由于这些区域土壤表层和包气带岩性以砂质壤土和粉细砂为主,渗透性相对较好,污染物越易于下渗到含水

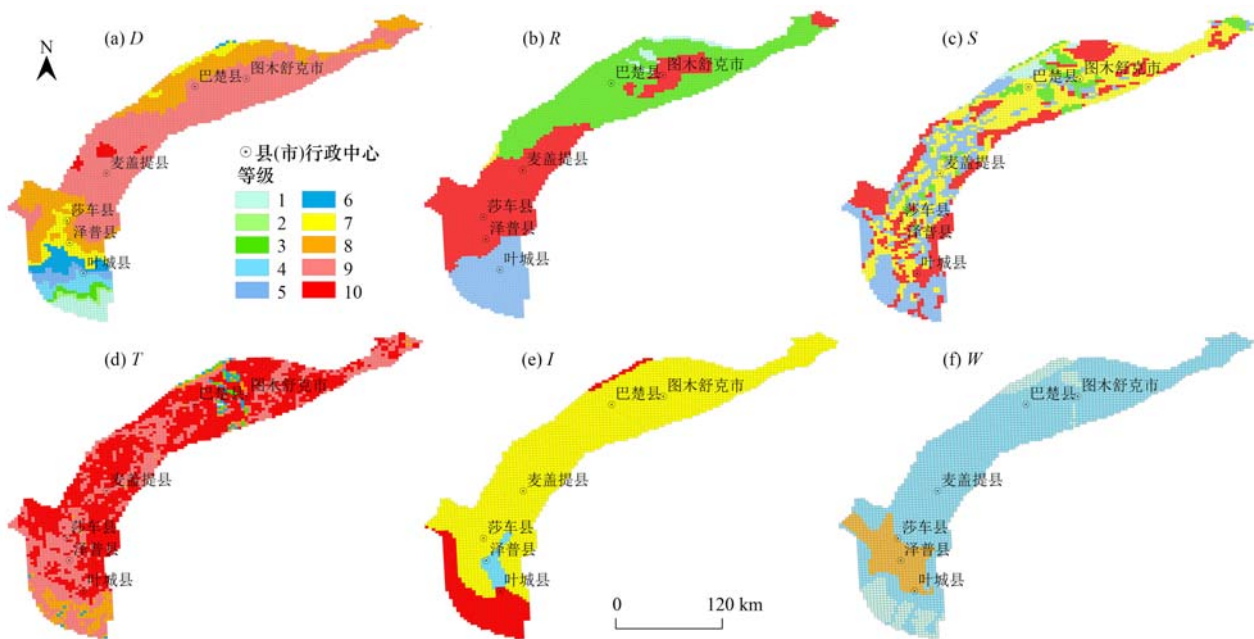


图 2 DRSTIW 模型各因子等级
Fig. 2 Factor levels of DRSTIW model

层,除此之外,该区域地下水埋深相对较小,地下水埋深的大小决定了污染物在到达含水层之前的迁移距离,埋深越小,污染物越易于迁移到含水层中^[31].中等脆弱性区占比 27.8%,主要分布在巴楚县西部和叶城县北部.较低脆弱性区和低脆弱性区占比分别为 8.6%和 1.9%,主要分布在巴楚县北部和叶城县南部,叶城县南部由于地下水埋深较大,水量较贫乏,污染物不易从地表进入含水层中,衰减时间越长,脆弱性越低^[32];另外该区域坡度相比于下游较大,污染物易于迁移至下游;巴楚县北部含水层单井涌水量较小,水量存储少,渗透性小;地下水净补给模数小,脆弱性较低;土壤表层以黏土和粉质黏土为主,这些低渗透性介质通过有效吸附和减缓污染物的渗漏,达到了降低污染的目的^[33].综上所述,

研究区地下水脆弱性整体较高.

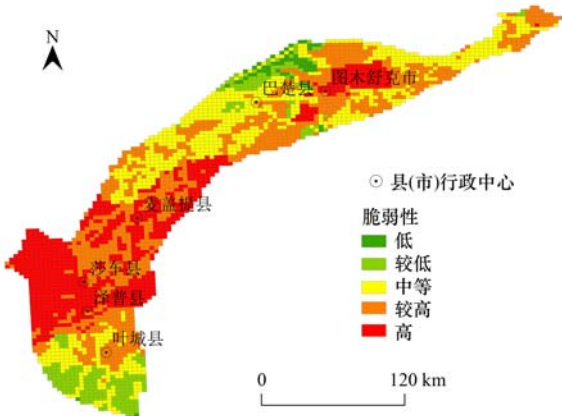


图3 基于 DRSTIW 模型的地下水脆弱性空间分布
Fig. 3 Groundwater vulnerability spatial distribution based on the DRSTIW model

表3 地下水脆弱性、地下水污染负荷、地下水功能价值、地下水污染风险评价结果¹⁾

评价结果	地下水脆弱性		地下水污染负荷		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	531	1.9	5 256	18.6	12 105	42.9	9 612	34.1
较低	2 421	8.6	8 730	31.0	6 705	23.8	7 650	27.1
中等	7 848	27.8	6 435	22.8	6 903	24.5	5 103	18.1
较高	9 819	34.8	5 544	19.7	2 043	7.2	4 608	16.3
高	7 587	26.9	2 241	7.9	450	1.6	1 233	4.4
合计	28 206	100.0	28 206	100.0	28 206	100.0	28 206	100.0

1) 面积是以每个网格为单位进行统计

2.2 污染负荷评价

主成分分析(PCA)和因子分析(FA)等多元统计方法,是通过样本间的相关性强弱,对样本进行分类^[34].本研究采用因子分析,以地下水化学变量作为原始变量,将地下水中特征污染物的信息进行集中和提取,有效地降低数据集的维数并识别污染源.选取地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、TDS、TH、NO₃⁻、NO₂⁻、HN₄⁺、Cd、Cu和Zn这13项指标进行因子分析,各指标特征值见表4.对各指标进行KMO和Bartlett检验后,KMO值为0.716>0.5,宜做因子分析.共提取特征值大于1的3个因子并利用最大方差法计算旋转因子载荷(图4),因子载荷>0.75、0.50~0.75和0.30~0.50分别被定义为“强”“中”和“弱”相关^[35].

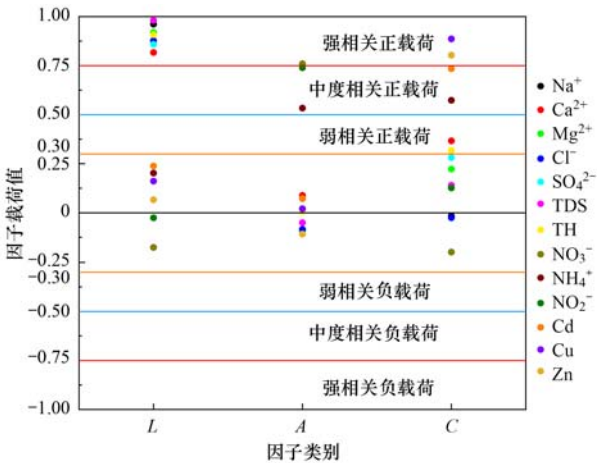


图4 13个指标经最大方差法旋转后的因子载荷
Fig. 4 Factor loadings for 13 indexes rotated by maximum variance method

表4 地下水化学指标统计¹⁾

指标	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TDS	TH	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	Cu	Zn	Cd
最小值	28.60	53.90	17.30	36.95	97.91	366.70	1.53	—	—	—	—	—	—
最大值	9 223.37	1 104.62	645.63	9 223.37	8 956.97	78 380.65	5 416.21	49.41	4.98	6.07	1.05	1.18	0.01
均值	723.66	287.71	154.02	967.75	1 221.61	3 578.11	1 149.83	4.72	0.07	0.46	0.02	0.02	0.01

1) “—”表示指标未检出;各指标单位为mg·L⁻¹

L 因子载荷较高的指标为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、TDS 和 TH,研究区第四系松散岩类沉积物为地下水水化学组分溶滤、迁移和富集提供了良好的条件,在水岩相互作用下,促进了蒸发盐岩和钙镁矿物的溶解, Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子含量增加,进而形成高 TDS 和高 TH 地下水^[36].因此,*L* 因子命名为水岩相互作用的点源污染.

A 因子载荷较高的指标为 NO_3^- 、 NO_2^- 和 NH_4^+ ,化肥和农药的大规模使用促进了农作物的生长,但只有部分氮肥可被植物吸收^[37],化肥以及农作物残渣中残留的含氮物,在硝化细菌的作用下转化为了硝态氮,其不易被土壤胶体吸附,部分滞留于土壤或通过灌溉排水和地表径流下渗到地下水中^[38],另外,研究区地下水处于还原-亚还原环境(20.8%水样的氧化还原电位 $E_h < 70 \text{ mV}$)^[39],反硝化作用也会将部分 NO_3^- 转化为 NO_2^- ^[40].因此,*A* 因子命名为农药化肥的面源污染.

C 因子载荷较高的指标为 Cd、Zn、Cu 和 NH_4^+ ,一些工厂企业在生产过程中会排放大量废水,这些工业废水排放到地表经过包气带渗漏到含水层中,造成地下水体污染,或是排放于河流,河流补给其周边的地下水,致使地下水受到污染^[41].生活垃圾填埋场的防渗层破损渗漏,经过大气降雨淋滤, NH_4^+ 等污染物渗入地下水中,因此,*C* 因子命名为工业和生活的点源污染.

采用 SPSS 软件计算地下水水样各个污染因子的得分,其得分高低反映了因子对各水样的影响程度,其值越大,表明该因子对该水样污染的贡献越大^[10].使用 ArcGIS 中克里金插值方法绘制各污染因子的空间分布(图 5),各污染因子的权重和赋分分别见表 2 和表 5,将各因子的得分和权重按式(2)计算得出地下水污染负荷指数,不同污染源的组合导致研究区不同区域的污染程度不同.由图 6 和表 3 可知,高污染负荷区和较高污染负荷区占比分别为 7.9% 和 19.7%,主要分布在巴楚县和图木舒克市,随着矿物的溶解,大量离子沿地下水流向富集于该区域,另外,农药化肥的使用也是该地区污染严重的重要原因,根据《新疆维吾尔自治区统计年鉴(2020)》,巴楚县化肥折算为 $6.2 \times 10^4 \text{ t}$,铵态氮肥大面积的使用会导致地下水中“三氮”含量升高.中等污染负荷区占比 22.8%,主要分布在巴楚县北部和麦盖提县南部,该区域农业化肥和工业废水污染较轻.叶城县、莎车县和泽普县为较低污染负荷区和低污染负荷区,该区域占比分别为 31.0% 和 18.6%,虽然该区域工厂、垃圾填埋场等污染场地相对较多,但大多都是点源污染,污染范围不大,且工业污染因子贡献率较少,致使工业污染较弱,且该区域水岩相互作用较弱,地下水埋深相对较大,盐类离子经土壤表层、包气带进入含水层中,部分离子滞留在土壤和包气带,减少含水层中的离子入渗量,故该区域污染负荷较低.

表 5 污染负荷各因子的范围和赋分

Table 5 Range and score of each factor of pollution loading

<i>L</i>		<i>A</i>		<i>C</i>	
范围	赋分	范围	赋分	范围	赋分
≤ -0.601	1	≤ -0.958	1	≤ -0.415	1
$-0.601 \sim -0.425$	2	$-0.958 \sim -0.204$	2	$-0.415 \sim -0.102$	2
$-0.425 \sim -0.412$	3	$-0.204 \sim 0.876$	3	$-0.102 \sim 0.218$	3
> 0.412	4	> 0.876	4	> 0.218	4

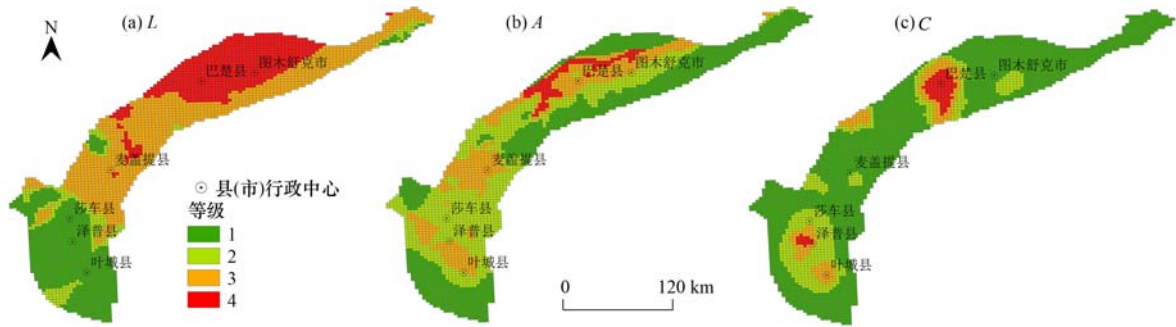


图 5 各污染因子空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of each pollution factor

2.3 地下水功能价值评价

本研究采用 2020 年度夜间灯光遥感数据作为

开采价值的评价指标,用生境质量和地下水质量类别作为原位价值的评价指标,将夜间灯光遥感数据

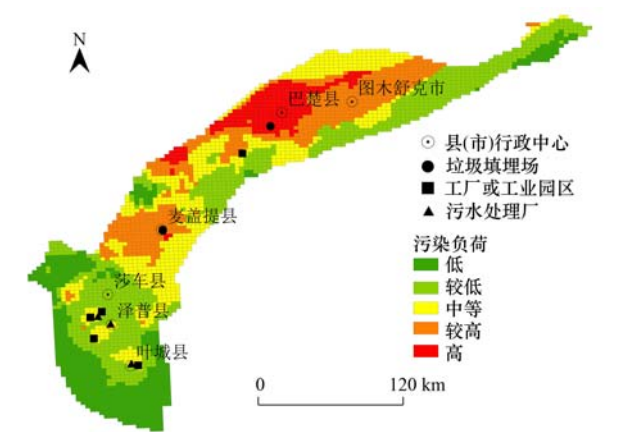


图 6 污染负荷空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of pollution loading

(*H*)、生境质量(*E*)和地下水质量类别(*Q*)按表 6 分级,各因子的权重见表 2.

表 6 地下水功能价值各因子的范围和赋分

<i>H</i>		<i>E</i>		<i>Q</i>	
范围	等级	范围	等级	范围	等级
0 ~ 2. 225	1	0 ~ 0. 2	1	V	1
2. 225 ~ 11. 286	2	0. 2 ~ 0. 4	2	IV	2
11. 286 ~ 31. 701	3	0. 4 ~ 0. 6	3	III	3
31. 701 ~ 64. 163	4	0. 6 ~ 0. 8	4	II	4
64. 163 ~ 129. 21	5	0. 8 ~ 1. 0	5	I	5

地下水功能价值各个因子的分级见图 7,将每个因子的得分和权重利用 GIS 叠加得出地下水功能价值评价结果(图 8 和表 3),地下水功能价值整体

从西南向东北有降低趋势,其中高价值和较高价值区域占比分别为 1. 6% 和 7. 2%,分布较为零散,主要分布在叶城县北部、莎车县和泽普县等区域,主要是人类经济活动聚集、水质优良和生境质量较好造成的. 夜光数据可以很好地表征人口密度的大小和人均 GDP 的多少,人口密集和人均 GDP 上升可以反映出经济活动较剧烈,生活和生产等活动对地下水的需求量越大,地下水开发价值越大^[12];高价值和较高价值区域水质较好,主要以 I 和 II 类水为主,水质越好,原位价值越高^[42];较高生境质量导致该区域地下水功能价值相对较高,高生境质量区域的土地利用类型以草地和林地为主,自然生态环境稳定且受人类活动干扰较小,保证了水源涵养性和生物多样性,生境退化程度低,生境质量较好^[43]. 中等价值区域占比为 24. 5%,主要分布在叶城县南部和莎车县西部等区域,该区域水质相对较好,生境质量较差,经济活动较少. 较低价值和低价值区域占比分别为 23. 8% 和 42. 9%,主要分布在巴楚县和麦盖提县等区域,低生境质量区域的地类以城镇建设用地和未利用地为主,城镇化建设使生态环境遭到不同程度的破坏,另外,未利用地多为沙地、裸地,其植被覆盖率较低,造成生境破碎,生境质量相对较差^[44];低价值和较低价值区域水质较差,主要以 IV 和 V 类水为主,较差的径流条件和日益频繁的人类活动导致水质劣化,从而降低地下水功能价值.

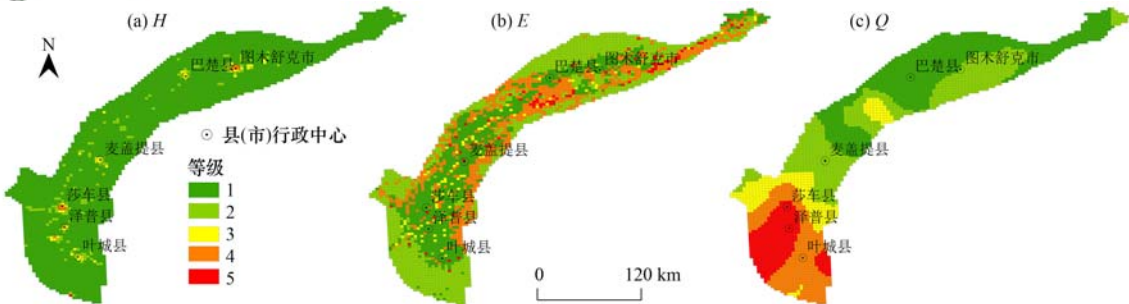


图 7 地下水功能价值各因子等级

Fig. 7 Factor levels of groundwater function value

2. 4 地下水污染风险评价

将地下水脆弱性图(图 3)、地下水污染负荷图(图 6)和地下水功能价值图(图 8)进行叠加,得到研究区域地下水污染风险评价结果(图 9 和表 3),“高”“较高”“中等”“较低”和“低”地下水污染风险区分别占研究区的 4. 4%、16. 3%、18. 1%、27. 1% 和 34. 1%. 地下水高污染风险区和较高污染风险区主要分布在莎车县、泽普县、麦盖提县、图木舒克市和巴楚县西部,其中莎车县、泽普县和麦盖提县从土壤表层到含水层之间渗透性较好,且地

下水补给模数较高,补给来源广泛,地下水易遭受污染,加之较高的原位价值(水质较好)和开采价值(经济效益高)增加了该区域的污染风险;图木舒克市和巴楚县西部,水动力条件较差,污染物易于富集. 耕地面积的增加和城镇化扩张,致使农药化肥残留物和城市污水污染地下水,加重了污染负荷^[45]. 地下水中等污染风险区分布较为零散. 地下水低污染风险区和较低污染风险区主要分布在叶城县南部和巴楚县北部,叶城县南部地下水埋深较大,不易污染;坡度较大,污染物易迁移,不易造成污染,致使脆弱性较低;巴

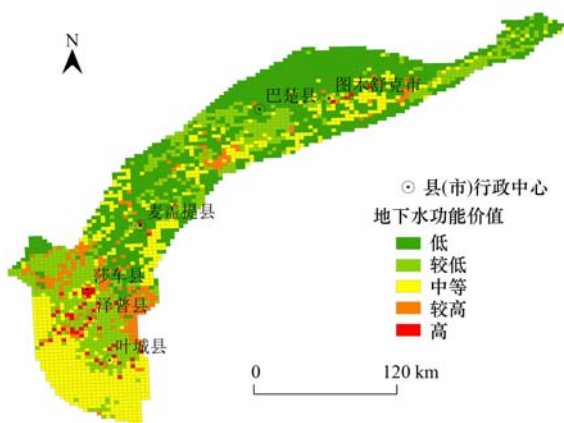


图8 地下水功能价值空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of groundwater function value

楚县北部植被覆盖率低,多为沙地、裸地,生境质量低,地下水功能价值较低;远离城镇,受到农业和工业影响较小,地下水污染负荷较低。

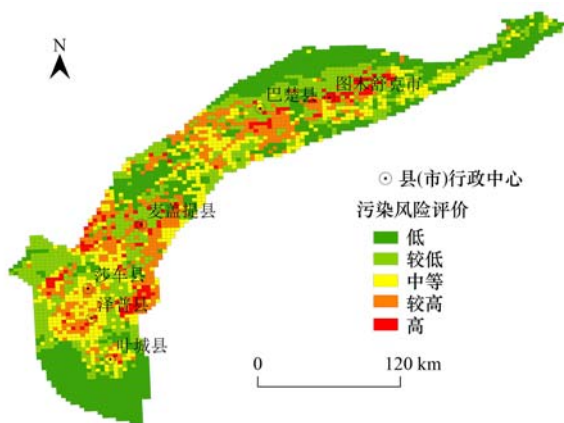


图9 地下水污染风险空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of groundwater pollution risk

3 讨论

研究区处于干旱区,大气降水补给地下水相对较弱,故采用地下水净补给模数代替净补给量;富水性的大小与含水层介质、厚度和渗透系数等因子有关,故采用富水性代替含水层介质和水力传导系数,因此,采用改进的 DRASTIC 模型——DRSTIW 模型,能更加适宜研究区的地下水脆弱性评价。水岩相互作用的点源污染、农药化肥面源污染和工业、生活的点源污染是研究区的主要污染源,这与张杰^[14]认为溶滤-迁移等自然因素和废水排放等人为因素是导致叶尔羌河流域地下水水质劣化的主要原因一致。地下水污染风险空间分布结合地下水脆弱性、地下水污染负荷和地下水功能价值评价结果,可反映污染物通过含水层进入地下水的难易程度^[46]。地下水污染风险图在“高”和“较高”区域的划分上与地下水脆弱性图、地下水污染负荷图表现出明显的相似性,但和地下水功能价值图的划分略

有差异,说明不同的评价指标会导致不同的地下水污染风险评价结果^[47]。地下水功能价值的内容比较复杂,本文仅从水质和生态环境考虑其原位价值,从经济效益考虑其开采价值,王红娜等^[48]从水源地保护划分和水量等方面来体现地下水功能价值,因此在以后的研究中应多角度对地下水功能价值进行评价。另外,各评价指标的评分和权重不同对结果也有较大影响,分级效果的好与差不仅依赖于数据的分布特征,还依赖于分级方法,偏度过大或过小的数据,用不同的分级方法,所表现的效果是截然不同的^[49],权重的大小决定了评价指标在评价结果中的贡献程度,随着权重由低到高,其对评价结果的影响也由小到大,评价体系的权重值对评价结果起到了关键作用。在人类活动密集区,随着人类活动的变化,地下水污染负荷可能会随着时间的推移而发生变化。因此,有必要在一定时间间隔后更新地下水污染风险图^[50],以帮助决策者和管理者确定风险最高的区域,及时有效地解决研究区地下水污染问题。

4 结论

(1)研究区地下水脆弱性整体较高,高脆弱性区和较高脆弱性区主要分布在泽普县、莎车县、麦盖提县、图木舒克市和巴楚县的东部等区域,地下水补给模数大、土壤表层和包气带渗透能力强和地下水埋深较浅等原因使地下水脆弱性相对较高。

(2)研究区地下水污染负荷整体相对较低,水岩相互作用的点源污染、农药化肥的面源污染、工业和生活的点源污染是研究区主要的污染源。高污染负荷区和较高污染负荷区主要分布在巴楚县和图木舒克市。

(3)研究区地下水功能价值整体较低,地下水功能价值从西南向东北有降低趋势。高功能价值区主要分布在叶城县北部、莎车县和泽普县等区域,其主要原因是人类经济活动聚集、水质优良和生境质量较好。

(4)研究区地下水污染风险整体较低,以低污染风险区和较低污染风险区为主,在莎车县、泽普县、麦盖提县、图木舒克市以及巴楚县西部一带地下水污染风险较高,这与含水层渗透性、水动力条件、污染源的排放和生态环境等密切相关。污染风险与人类活动密切相关,及时更新地下水污染风险图有助于防治地下水污染,同时,研究结果为研究区地下水资源保护与规划奠定了重要的理论基础。

参考文献:

- [1] Li P Y, Tian R, Xue C Y, et al. Progress, opportunities, and key fields for groundwater quality research under the impacts of human activities in China with a special focus on western China

- [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24** (15): 13224-13234.
- [2] 李小牛, 周长松, 周孝德, 等. 污灌区浅层地下水污染风险评价研究[J]. *水利学报*, 2014, **45**(3): 326-334, 342.
- Li X N, Zhou C S, Zhou X D, *et al.* Study on risk assessment of groundwater pollution in sewage irrigation area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, **45**(3): 326-334, 342.
- [3] 陆燕, 何江涛, 王俊杰, 等. 北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3117-3123.
- Lu Y, He J T, Wang J J, *et al.* Uncertainty analysis of groundwater protection and control zoning in Beijing Plain[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3117-3123.
- [4] Aller L, Bennett T, Lehr J, *et al.* DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings[R]. Washington: U. S. EPA, 1987.
- [5] Wu W Y, Liao R K, Hu Y Q, *et al.* Quantitative assessment of groundwater pollution risk in reclaimed water irrigation areas of northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114173.
- [6] 张佳文, 张伟红, 陈震, 等. 北京密怀顺地区地下水污染风险评价方法探究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(7): 2876-2883.
- Zhang J W, Zhang W H, Chen Z, *et al.* Study on risk assessment method of groundwater pollution in Beijing Mi-Huai-Shun area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **38**(7): 2876-2883.
- [7] 王俊杰, 何江涛, 陆燕, 等. 地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 771-776.
- Wang J J, He J T, Lu Y, *et al.* Quantitative method of representative contaminants in groundwater pollution risk assessment[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 771-776.
- [8] 赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 等. 地下水污染风险评价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.
- [9] Zuo R, Meng L, Wang B, *et al.* Pollution risk assessment based on source apportionment in a groundwater resource area, NE China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2018, **24**(5): 1197-1215.
- [10] Qin R G, Wu Y Q, Xu Z G, *et al.* Assessing the impact of natural and anthropogenic activities on groundwater quality in coastal alluvial aquifers of the lower Liaohe River Plain, NE China[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, **31**: 142-158.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 张杰, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆叶尔羌河流域平原区浅层地下水咸化空间分布及成因[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(23): 126-134.
- Zhang J, Zhou J L, Nai W H, *et al.* Spatial distribution and cause of salinization of shallow groundwater in plain terrain of the Yarkant River Basin, Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(23): 126-134.
- [14] 张杰. 叶尔羌河流域平原区地下水水质演化及其形成机理研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- Zhang J. Evolution of groundwater quality and its formation mechanism in plain area of Yarkant River Basin[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.
- [15] 林丽, 曾妍妍, 周金龙, 等. 新疆叶尔羌河流域浅层地下水化学特征及形成机制[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, **34**(6): 146-152.
- Lin L, Zeng Y Y, Zhou J L, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in the Yarkant River Basin, Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, **34**(6): 146-152.
- [16] 白宜斐, 王弋, 陈亚宁, 等. 叶尔羌河流域灌区地下水埋深变化及影响因素分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, **30**(6): 242-249.
- Bai Y F, Wang Y, Chen Y N, *et al.* Variation of groundwater depth and its influencing factors in the irrigated area of the Yarkant River Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, **30**(6): 242-249.
- [17] 张广朋, 徐海量, 杜清, 等. 近 20a 叶尔羌河流域生态服务价值对土地利用/覆被变化的响应[J]. *干旱区研究*, 2016, **33**(6): 1303-1310.
- Zhang G P, Xu H L, Du Q, *et al.* Response of ecosystem service value to land use/cover change in the Yarkant River Basin in recent 20 years[J]. *Arid Zone Research*, 2016, **33**(6): 1303-1310.
- [18] 冯加远. 叶尔羌河流域水土环境演变影响因素分析及其防控对策研究[D]. 西安: 西北大学, 2016.
- Feng J Y. The Yarkant River Basin soil and water environment evolution factors and prevention strategies[D]. Xi'an: Northwest University, 2016.
- [19] Zhang J, Zhou J L, Zhou Y Z, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and groundwater quality assessment in the plain area of Yarkant River Basin in Xinjiang, P. R. China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(24): 31704-31716.
- [20] 刘斌, 门国发, 王占和, 等. 塔里木盆地地下水勘查[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [21] 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): 3308.
- [22] 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.
- [23] Amiri V, Kamrani S, Ahmad A, *et al.* Groundwater quality evaluation using Shannon information theory and human health risk assessment in Yazd province, central plateau of Iran[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(1): 1108-1130.
- [24] Teng Y G, Zuo R, Xiong Y N, *et al.* Risk assessment framework for nitrate contamination in groundwater for regional management [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **697**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134102.
- [25] 滕彦国, 苏洁, 翟远征, 等. 地下水污染风险评价的迭置指数法研究综述[J]. *地球科学进展*, 2012, **27**(10): 1140-1147.
- Teng Y G, Su J, Zhai Y Z, *et al.* A review on the overlay and index method for groundwater pollution risk assessment [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, **27**(10): 1140-1147.
- [26] 陈世莉, 陈浩辉, 李郁. 夜间灯光数据在不同尺度对社会经

- 济活动的预测[J]. 地理科学, 2020, **40**(9): 1476-1483.
- Chen S L, Chen H H, Li X. The ability of nighttime imagery in monitoring economic activity in different scales [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, **40**(9): 1476-1483.
- [27] 余柏漠, 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.
- [28] 杨文仙, 李石华, 彭双云, 等. 顾及地形起伏的 InVEST 模型的生物多样性重要区识别——以云南省为例[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(12): 4339-4348.
- Yang W X, Li S H, Peng S Y, *et al.* Identification of important biodiversity areas by InVEST model considering topographic relief: a case study of Yunnan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(12): 4339-4348.
- [29] Xiao J, Wang L Q, Deng L, *et al.* Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 2004-2012.
- [30] Zhang Q X, Li P Y, Lyu Q F, *et al.* Groundwater contamination risk assessment using a modified DRATIC model and pollution loading: a case study in the Guanzhong Basin of China[J]. *Chemosphere*, 2022, **291**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132695.
- [31] Bera A, Mukhopadhyay B P, Chowdhury P, *et al.* Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in Nangasai River Basin, India with special emphasis on agricultural contamination [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **214**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112085.
- [32] Neshat A, Pradhan B, Dadras M. Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, **86**: 74-86.
- [33] Shrestha S, Semkuyu D J, Pandey V P. Assessment of groundwater vulnerability and risk to pollution in Kathmandu Valley, Nepal[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **556**: 23-35.
- [34] 王珺瑜, 王家乐, 靳孟贵. 济南泉域岩溶水水化学特征及其成因[J]. 地球科学, 2017, **42**(5): 821-831.
- Wang J Y, Wang J L, Jin M G. Hydrochemical characteristics and formation causes of karst water in Jinan Spring Catchment [J]. *Earth Science*, 2017, **42**(5): 821-831.
- [35] Liu C W, Wu M Z. Geochemical, mineralogical and statistical characteristics of arsenic in groundwater of the Lanyang Plain, Taiwan[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **577**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.123975.
- [36] 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区地下水化学演变特征及形成机制[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4011-4020.
- Cui J Q, Li X Y, Shi H B, *et al.* Chemical evolution and formation mechanism of groundwater in Hetao Irrigation Area[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4011-4020.
- [37] 袁宏颖, 杨树青, 张万锋, 等. 河套灌区浅层地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 时空变化及驱动因素[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1898-1907.
- Yuan H Y, Yang S Q, Zhang W F, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics and driving factors of nitrogen of shallow groundwater in Hetao irrigation district [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1898-1907.
- [38] 赵卫东, 赵芦, 龚建师, 等. 宿州矿区浅层地下水污染评价及源解析[J]. 地学前缘, 2021, **28**(5): 1-14.
- Zhao W D, Zhao L, Gong J S, *et al.* Pollution assessment and source apportionment of shallow groundwater in Suzhou mining area, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, **28**(5): 1-14.
- [39] Li J X, Wang Y X, Guo W, *et al.* Iodine mobilization in groundwater system at Datong basin, China: evidence from hydrochemistry and fluorescence characteristics [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 738-745.
- [40] 郭卉, 虞敏达, 何小松, 等. 南方典型农田区浅层地下水污染特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4680-4689.
- Guo H, Yu M D, He X S, *et al.* Pollution characteristics analysis in shallow groundwater of typical farmland area, Southern China[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4680-4689.
- [41] 刘博, 肖长来, 梁秀娟, 等. 吉林市城区浅层地下水污染源识别及空间分布[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 457-464.
- Liu B, Xiao C L, Liang X J, *et al.* Identification of shallow groundwater pollution factors and spatial distribution in the urban areas of Jilin City[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 457-464.
- [42] 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.
- [43] 康满萍, 赵成章, 白雪. 苏打湖湿地土壤全盐含量空间异质性及影响因素[J]. 生态学报, 2021, **41**(6): 2282-2291.
- Kang M P, Zhao C Z, Bai X. Spatial heterogeneity and influencing factors of total soil salinity in Sugan Lake wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(6): 2282-2291.
- [44] 许宝荣, 刘一川, 董莹, 等. 基于 InVEST 模型的兰州地区生境质量评价[J]. 中国沙漠, 2021, **41**(5): 120-129.
- Xu B R, Liu Y C, Dong Y, *et al.* Evaluation of habitat quality in Lanzhou Region based on InVEST model [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, **41**(5): 120-129.
- [45] 李绍飞, 陈伏龙, 余萍, 等. 平原区浅层地下水污染风险评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, **51**(12): 1035-1040, 1049.
- Li S F, Chen F L, Yu P, *et al.* Shallow groundwater pollution risk evaluation in plain areas[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2018, **51**(12): 1035-1040, 1049.
- [46] Fadlilmawla A A, Fayad M, El-Gamily H, *et al.* A land surface zoning approach based on three-component risk criteria for groundwater quality protection [J]. *Water Resources Management*, 2011, **25**(6): 1677-1697.
- [47] 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.
- [48] 王红娜, 何江涛, 马文洁, 等. 两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 186-193.
- Wang H N, He J T, Ma W J, *et al.* Comparative analysis of two different methods for risk assessment of groundwater pollution: a case study in Beijing Plain [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 186-193.
- [49] Li H J, Yu X P, Zhang W J, *et al.* Risk assessment of groundwater organic pollution using hazard, intrinsic vulnerability, and groundwater value, Suzhou City in China[J]. *Exposure and Health*, 2018, **10**(2): 99-115.
- [50] 杨彦, 于云江, 王宗庆, 等. 区域地下水污染风险评价方法研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 653-661.
- Yang Y, Yu Y J, Wang Z Q, *et al.* Study on the risk assessment method of regional groundwater pollution [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 653-661.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wen, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)