

# 黑河流域浅层地下水防污性能评价

李克祖<sup>1</sup>, 王金哲<sup>2</sup>, 刘学全<sup>2</sup>, 宋淑红<sup>2</sup>, 孟令群<sup>2</sup> (1. 甘肃省地矿局水文地质工程地质勘察院, 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室, 甘肃张掖 734000; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061)

**摘要** [目的] 确定黑河流域不同地区浅层地下水的防污性能状况, 对不同区位的地下水污染防治情况给出建议。[方法] 采用 DRASTIC 模型, 选择地下水埋深、包气带综合岩性、含水层岩性、地下水净补给量、水力传导系数和地形梯度 6 个评价因子, 构建区域浅层地下水防污性能评价指标体系, 进行黑河流域平原区浅层地下水系统防污性能评价。[结果] 浅层地下水防污性能差和较差区占平原区面积的 52.2%, 主要分布在山前倾斜平原和沿河道地带; 防污性能好和较好区占平原区面积的 17.4%, 主要分布在各盆地的中部区域; 防污性能中等区占平原区面积的 30.4%, 分布在评价区的剩余地区。[结论] 黑河流域的整体防污性能较差, 尤其南部山前平原和河道带。

**关键词** 黑河流域; 浅层地下水; 防污性能; 评价分区

**中图分类号** S181 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)13-0061-04

## Evaluation of Anti-fouling Performance of Shallow Groundwater in Heihe River Basin

LI Ke-zu<sup>1</sup>, WANG Jin-zhe<sup>2</sup>, LIU Xue-quan<sup>2</sup> et al (1. Institute of Hydrogeology and Engineering Geology of Gansu Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources in Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061)

**Abstract** [Objective] The research aimed to determine the status of anti-fouling performance of shallow groundwater in different regions of the Heihe River Basin, and give advice on groundwater pollution protection in different locations. [Method] Using DRASTIC model, choosing six evaluation factors such as groundwater depth, lithological characters of vadose zone and aquifer, net recharge, hydraulic conductivity and topography, an evaluation index system for regional shallow groundwater anti-fouling performance was built, in order to evaluate the anti-fouling performance of the shallow groundwater system in the plain area of Heihe River Basin. [Result] Around 52.2% of the plain groundwater basin was under low or moderately low vulnerable zones which were dominant and mainly located in the piedmont area or along the river channel. About 17.4% of the total study area was under moderately high or high vulnerable zones, these areas were mainly in the central place of Heihe River Basin. 30.4% of the plain groundwater basin was under the moderate vulnerable zones which distribute in the remaining regions. [Conclusion] The overall shallow groundwater vulnerability is poor in Heihe River Basin, especially the southern plains and river zones.

**Key words** Heihe River Basin; Shallow aquifer; Anti-fouling performance; Assessment and zoning

目前, 地下水污染已成为整个社会关注的问题, “水污染防治行动计划”的发布, 更使其成为热点<sup>[1]</sup>。对于地表覆盖种类、规模相同污染源的地点, 地下水受污染的程度不尽相同, 这与当地的水文地质条件、地形地貌和气候等影响因子有关, 涉及的问题即为地下水防污性能。地下水防污性能方面的研究在国内开展已久, 根据国家和地方政府需求, 科研工作者在多个区域和城市开展了地下水防污性能的评价工作, 并取得了相关成果。崔秀凌等<sup>[2]</sup>对银川市地下水防污性能进行研究, 并对地下水的防污性能进行评价和分区; 刘春华等<sup>[3]</sup>筛选合适的评价指标, 采用创新的设置指数方法, 对鲁北平原的区域地下水系统防污性能进行评价方法探讨和验证; 杨利国等<sup>[4]</sup>对洛阳盆地地下水防污性能进行评价, 并进行了等级分区; 苗晋杰等<sup>[5]</sup>对我国不同区域地质环境地下水防污性能进行了综合评价, 分析了地下水防污性能分布特征及形成原因。

依托当地丰富的矿产资源和优良的地理环境, 黑河流域冶炼、选矿、化工和农产品加工等一系列厂矿企业在西部大开发的进程中大规模兴起, “三废”排放量也大幅度增加, 加大了地下水污染的风险。在这种背景下, 查明黑河流域浅层地下水防污性能状况, 对地下水污染防治尤为重要。笔者依托国土资源部地质调查项目, 开展黑河流域浅层地下水防污

性能进行评价, 编制了防污性能分布图, 并将防污性能分区和潜在污染源类型分布状况进行空间区位的对应分析, 阐明相应区域浅层地下水可能会遭受污染的风险, 为当地土地利用规划、地下水污染监测网布设和水资源合理开发利用提供资料。

## 1 资料与方法

**1.1 研究区概况** 黑河流域是西北干旱区典型的内陆河流域, 流域面积 14.29 万 km<sup>2</sup>。区内地下水主要依赖祁连山区出山地表径流补给, 包括冰川雪融水、降水和基岩裂隙水补给<sup>[6-8]</sup>。前人研究成果显示, 祁连山山前平原浅层地下水 70%~80% 来自山区地表径流补给, 下游段细土平原 65%~90% 的地表水由山前平原地下水通过溢出带泉水排泄形成<sup>[9-11]</sup>。黑河流域地下水在流动过程中的特点是与地表水多次转换, 这种特征极易造成地下水污染风险性的加大。

黑河流域地形地貌上分为三部分, 一为上游的祁连山区; 二为中游走廊平原, 由大马营盆地、张掖盆地、酒泉东盆地和酒泉西盆地组成, 统称南部盆地; 三为下游地区, 由金塔—花海盆地和额济纳盆地组成, 称为北部盆地<sup>[12]</sup>。

水文地质方面, 流域南部和北部山区的地下水类型包括基岩裂隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水和松散岩类孔隙水, 中游和下游平原区为松散岩类孔隙水。南部山区地下水矿化度一般小于 0.5 g/L, 含水层富水性 100~1 000 m<sup>3</sup>/d, 局部地段大于 1 000 m<sup>3</sup>/d<sup>[13]</sup>。南部盆地的南部为祁连山前洪积扇群和与毗邻的细土平原, 含水层为单一巨厚砂卵砾石构成, 渗透系数 100~400 m/d, 单井涌水量 3 000~5 000 m<sup>3</sup>/d, 地下

**基金项目** 国家地质调查项目 (12120114056301); 国家科技研发计划课题 (2017YFC0406106)。

**作者简介** 李克祖 (1965—), 男, 甘肃张掖人, 高级工程师, 从事地下水演化及利用研究。

**收稿日期** 2018-01-19; **修回日期** 2018-03-12

水矿化度小于 1 g/L。向北至细土平原北部,含水层渐变为双层或多层,由砂砾石、中粗砂构成,为潜水-承压水系统,含水层厚度 50~100 m,渗透系数 10~80 m/d,单井涌水量 1 000~3 000 m<sup>3</sup>/d。北部盆地含水层为多层,由中粗砂和中细砂构成,为潜水-承压水系统,含水层厚度 30~80 m,渗透系数 5~50 m<sup>3</sup>/d,单井涌水量一般为 1 000~2 000 m<sup>3</sup>/d,地下水矿化度 1~3 g/L。

**1.2 评价方法** 鉴于 DRASTIC 评价方法在我国多个区域和城市地下水防污性能研究中取得的较好评价效果<sup>[14]</sup>,在中国地质调查局组织开展的首轮“全国地下水污染调查评价”技术规范要求中被推荐使用,此次评价即采用 DRASTIC 评价方法。根据工作区地质、水文地质条件、地形地貌等条件,选取浅层地下水埋深(D)、净补给量(R)、含水层介质(A)、地形坡度(T)、包气带介质(I)和水力传导系数(C)6个

指标作为此次评价工作的评价指标。根据对地下水污染可能影响的相对重要程度,对不同指标赋予权重,D、R、A、T、I、C的权重值分别为5、4、3、1、5、3。根据综合指数评价结果,评价等级划分为好、较好、中等、差和较差5级。

**1.3 评价指标** 6个指标中浅层地下水埋深为野外实测数据,净补给量、含水层介质、地形坡度、包气带介质和水力传导系数指标数据源自于甘肃省地矿局水文地质工程地质勘察院的“河西走廊地下水勘查”项目成果。每个指标数据可被细化为不同的数据范围,并给出评分值量化地下水污染的可能性,定量分析地下水防污性能的强弱。与评价等级相对应,每个评价指标分为5级,浅层地下水埋深、含水层岩性和包气带岩性分级及评分值赋值情况时,参考 DRASTIC 方法;地形坡度、净补给量和水力传导系数分级及评分值赋值时,主要参评工作区的实际数据状况。各评价指标的评分值见表1。

表1 地下水防污性能评价评分值

Table 1 Evaluation score values of groundwater anti-fouling performance

序号 No.	浅层地下水埋深 Shallow ground-water depth		含水层岩性 Aquifer lithology		包气带岩性 Gas-bearing zone lithology		地形梯度 Terrain gradient		净补给量模数 Net replenishment modulus		水力传导系数 Hydraulic conductivity	
	范围 Range m	评分 Score	范围 Range m	评分 Score	范围 Range m	评分 Score	范围 Range m	评分 Score	范围 Range m	评分 Score	范围 Range m	评分 Score
1	≤1.5	10	砂卵砾石	10	砂卵砾石、碎石	10	1~2	3	≥50	10	3 000~2 000	10
2	>1.5~4.6	9	砂夹砾石	8	粗中砂	8	1~3	7	>50~30	8	2 000~1 000	8
3	>4.6~12.1	7	粗砂	6	粉细砂	6	3~6	8	>30~20	6	1 000~800	6
4	>12.1~15.2	5	中细砂	4	亚砂土	4	3~10	9	>20~10	4	800~500	4
5	>25.2	3	粉细砂	2	亚粘土或粘土	2	10~30	10	<10	2	≤500	2

**1.3.1 浅层地下水埋深。**埋深越大,污染物与包气带介质的接触时间越长,污染物所经历的各种反应越充分,衰减越显著,其防污性能越好,反之则相反。浅层地下水埋深是地下水防污性能评价中重点考虑的指标。南部盆地的山前戈壁地带地下水埋深总趋势表现为自南向北地下水水位埋深渐浅。北部盆地的金塔-花海盆地潜水水位埋深5~10 m,额济纳盆地潜水水位埋深南深北浅,南部为10~30 m,北部3~5 m,沿河地带1~3 m,古日乃湖区地下水水位埋深0~3 m。

**1.3.2 净补给量。**净补给量是指施加在地表并且入渗至含水层总的水量。补给水是淋滤、传输固体和液体污染物的主要载体,入渗水越多,由补给水带给含水层的污染物越多。河西走廊地区地下水补给来源有多项,包括降水凝结水入渗、沟谷潜流、河水入渗、渠水入渗、田间入渗、雨洪散流流入和侧向流入,其中河水入渗和渠水入渗是地下水补给的最主要来源,补给量分别为 $10.4829 \times 10^8$ 和 $9.9151 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/a,在地下水的补给组成中所占比率分别为29.15%和27.57%,远大于该地区降水和凝结水入渗量总和 $2.2003 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/a。因此,在此次河西走廊地区地下水防污性能评价指标筛选中,净补给量不只考虑降水入渗,还考虑了沟谷潜流、河水入渗、渠水入渗、田间入渗、雨洪散流流入和侧向流入。

**1.3.3 含水层介质。**含水层介质既控制污染物渗流的途径

和渗流长度,也控制污染物衰减作用、可利用的时间及污染物与含水层介质接触的有效面积。一般,含水层中介质颗粒越大或孔隙越多,渗透性越好,污染物的衰减能力越低,防污性能越差。在黑河流域,从南向北含水层岩性的纵横变化很大,总的规律是自山前至盆地内部含水层颗粒渐细。南部盆地,由砂砾卵石、砂砾石渐变为含砾中粗砂、中细砂;北部盆地,由砂砾石、粗砂或中砂渐变为粉砂或粉细砂,黑河尾间居延海则以粉砂、含泥粉细砂与粘土互层为主。黑河及主要支流河道含水层岩性以砂砾石、含泥砂砾卵石为主。

**1.3.4 地形梯度。**地形梯度有助于控制污染物是产生地表径流还是深入地下。地形坡度大,地表径流大,入渗小,地下水受污染的可能性也小。黑河流域由南部祁连山向北部逐渐倾斜,山前为陡倾斜冲洪积平原,地形梯度10%~30%,大者40%~50%;往南为缓倾斜冲积平原,地形梯度为3%~6%;在中游走廊平原区有冲积平原,地形梯度3%~10%。下游尾间处为冲湖积平原,地面平坦,地形梯度1%~3%,靠近沙漠处的古日乃湖-居延海湖积平原,地形梯度1.0%~1.2%。

**1.3.5 包气带介质。**包气带介质的岩性对防污性能的影响主要表现在其颗粒的粗细和裂隙发育程度上。如颗粒越细或裂隙越不发育,污染物迁移越慢,吸附容量大,污染物经历的各种反应充分,故其防污性能好,反之则相反。黑河流域

中游区的南部和北部山前戈壁带包气带岩性以泥质砂砾石和砂砾石为主,两侧往中部过渡为砂和亚砂土占据主体,尤其张掖盆地、酒泉西盆地和酒泉东盆地中部。下游区包气带岩性为砂砾石的区域占大部分,东南部的古日乃湖积地区以亚黏土或黏土为主。黑河沿线两侧阶地包气带岩性几乎全部为亚砂土。

**1.3.6 水力梯度。**在一定的水力梯度下水力传导系数控制着地下水的流速,同时也控制着污染物离开污染源产地的速度。水力传导系数越高,防污性能越差。黑河流域中游区南部祁连山前冲洪积平原地形陡斜,水力传导系数较大,大部分区域大于  $1\ 000\text{ cm/s}$ ,过渡到中部细土平原区后以  $500\sim 1\ 000\text{ cm/s}$  为主。下游区水力传导系数以小于  $500\text{ cm/s}$  的区域占主体,西部马鬃山前和南部地下水由鼎新盆地流向古日乃湖区的部分地段水力传导较大,为  $800\sim 1\ 000\text{ cm/s}$ 。

## 2 结果与分析

**2.1 浅层地下水防污性能评价结果** 在此仅选取平原区为评价区,山区未做评价,评价区面积  $5.75\text{ 万 km}^2$ ,黑河流域浅层地下水天然防污性能评价结果空间分布状况见图 1。根据评价不同等级分区面积的统计结果,防污性能好和较好地区分布面积  $0.99\text{ 万 km}^2$ ,占评价区总面积的  $17.4\%$ ;防污性能中等地区分布面积  $1.75\text{ 万 km}^2$ ,占评价区总面积的  $30.4\%$ ;防污性能差和较差地区分布面积  $3.01\text{ 万 km}^2$ ,占评价区总面积的  $52.2\%$ 。

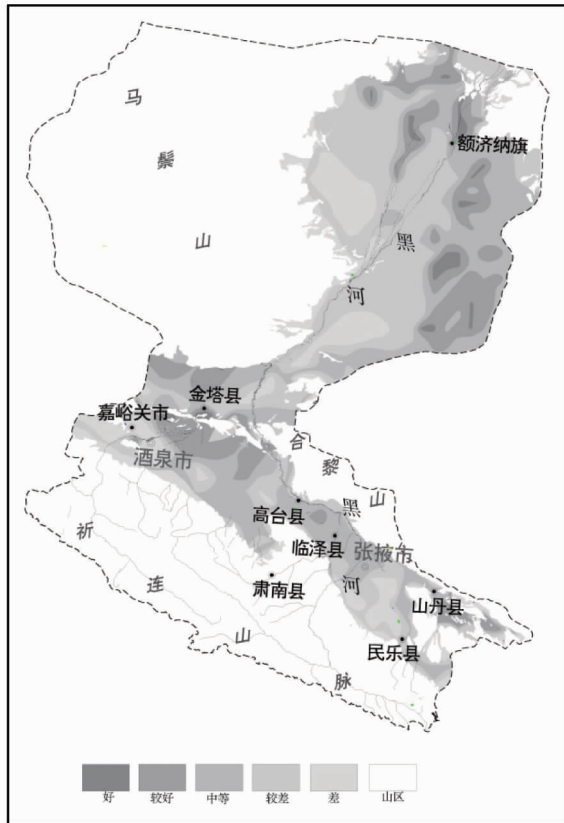


图 1 浅层地下水防污性能评价分布

Fig. 1 Anti-fouling performance evaluation distribution of shallow groundwater

**2.1.1 防污性能差和较差地区。**防污性能差和较差地区占平原区总面积的  $52.2\%$ ,分布有 2 个特征:一是主要分布在南部、北部山前戈壁冲洪积平原地带,二为河道沿线。

山前戈壁冲洪积平原地带包气带岩性和含水层岩性以泥质砂砾石和砂砾石为主,颗粒粗大,易于污染物的渗透下移;地下水补给模数大于  $30\text{ 万 m}^3/(a \cdot \text{km}^2)$ ,水力传导系数大于  $1\ 000\text{ cm/s}$ ,为携带大量的污染物进入地下水中提供水量和动力,增大污染物进入地下水的可能性和扩散速度。虽然山前地下水埋深较大,减弱污染物进入地下水的可能性,地形梯度较大,可使污染物能够较快离开,但多数指标偏向于增大地下水污染的可能性,为地下水防污性能较差的主要原因。

河道带浅层地下水埋深以小于  $10\text{ m}$  为主,包气带岩性在中游地区为砂砾石和砂,下游地区为砂;地下水补给模数较大,基本以大于  $20\text{ 万 m}^3/(a \cdot \text{km}^2)$  为主;水力传导系数大于  $800\text{ cm/s}$ 。上述因素都易于污染物进入地下水,造成该区域地下水防污性能差和较差。

**2.1.2 防污性能中等地区。**防污性能中等地区占平原区面积  $30.4\%$ ,主要分布在中游地区的中部和下游地区的东部。包气带岩性以亚砂土为主,颗粒较细,对污染物的滞留有益,减小污染物到达地下水中的总量;浅层地下水埋深条件变化范围较大,一般为  $2\sim 40\text{ m}$ ,下游地区主要为  $1\sim 7\text{ m}$ ;地下水补给模数变化较大,为  $10\text{ 万}\sim 50\text{ 万 m}^3/(a \cdot \text{km}^2)$ ;综合评价结果为防污性能中等。

**2.1.3 防污性能好和较好地区。**防污性能好和较好地区分布面积占平原区总面积的  $17.4\%$ ,主要分布在下游地区东部的小部分区域,呈斑块状分布,在中游地区东部零星分布。包气带岩性主要为亚砂土或亚黏土,颗粒较细;地下水天然补给模数小于  $10\text{ 万 m}^3/(a \cdot \text{km}^2)$ ,水量贫乏,提供携带污染物下移的水量较少;浅层地下水埋深变化较大,介于  $1\sim 30\text{ m}$ ,大部分地区埋深大于  $10\text{ m}$ 。水力传导系数以小于  $1\ 000\text{ cm/s}$  为主,使得地下水中污染物运移和扩散的动力较弱。

**2.2 污染源空间特征** 野外调查发现,工作区内工业、农业和生活各种类型的潜在污染源有一定的空间分布特征,这种分布特征结合所在区位的防污性能等级,对浅层地下水质量是否会产生影响或影响情况如何,下面进行讨论并在城市建设、农业开发等方面给出一些建议。

**2.2.1 山前戈壁带潜在污染源的影响。**由于绿洲区土地资源稀缺,城市的垃圾填埋场、工业园区和一些工厂被建在南部和北部的山前荒漠化戈壁带(图 2)。张掖市、山丹县、高台县城区的垃圾填埋场位于北山山前戈壁带,占地面积分别为  $1.80\text{ 万}$ 、 $1.00\text{ 万}$ 和  $0.48\text{ 万 km}^2$ ,垃圾类型多种,包括生活、医疗和建筑垃圾等。酒泉和嘉峪关市的工业园区位于南部山前戈壁带,张掖市、山丹和高台三市的工业园区分布在北部山前平原,园区内为各市县的支柱产业,会产生一定量的废水和废物。化工厂和选矿厂也有分布,如南部祁连山前生产铬盐和含铬合金的化工企业,年产量铬盐  $50\text{ kt/a}$ ,且建厂时间长。除此之外,近年来开始开发荒地开发建设生态农业

园区和蔬菜园区,农药和化肥在此地段的使用也不可避免。

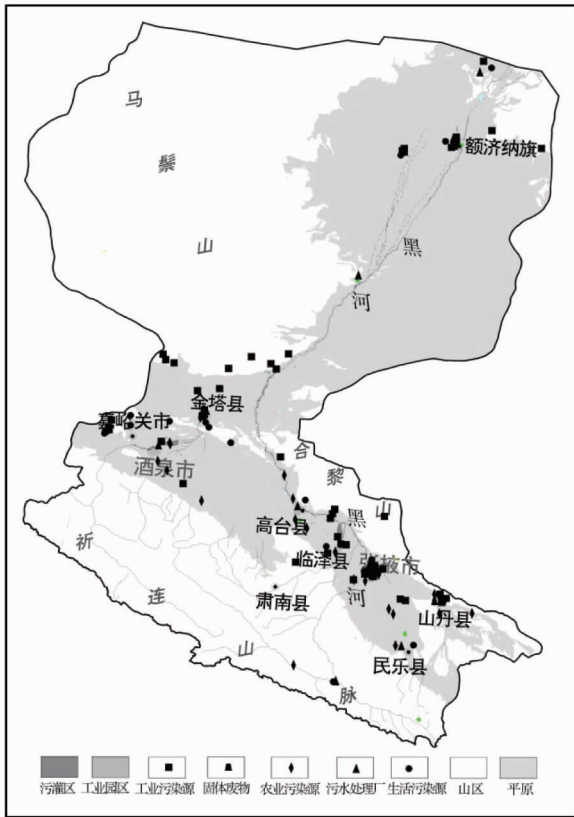


图2 污染源分布

Fig.2 Distribution of pollution sources

南、北部山前冲洪积平原的防污性能评价等级为“差”,浅层地下水极易受到污染。该区污染类型多,且多为重要潜在污染源,垃圾填埋场各种废品产生的滤液、工业园区内的废水、化工企业排出的废水和混合农药化肥渗入地下的农业灌溉水混合多种有害物质,对浅层地下水造成很大威胁。两方面因素叠加,山前冲洪积地带浅层地下水受到污染的风险更大。

戈壁带山前冲洪积平原为黑河流域地下水径流区的上段,同时为流入绿洲前流经的地段,为保证绿洲区内多个城市集中供水水源地和乡镇分散式饮用水井的安全,以及农业、牧区的用水保障,山前地带应保持天然状态,限制建立新的工业用地、垃圾填埋场以及农业开发。

**2.2.2 黑河中游中、下段绿洲区污染源的影响。**黑河中游中、下段绿洲区为城市及农业区分布地带,由于地理位置的优势,农业以种植玉米和瓜果为主,农业模式为化学农业,农药和化肥的使用量近年来有增无减,已造成土壤中重金属的富集<sup>[15]</sup>。2014年化肥使用折纯量18.6万t,农药总用量0.5万t。溶有化肥和农药的灌溉水通过淋滤作用进入土壤和地下水中,成为面状污染源。畜牧业方面,大牲畜存栏量95万头,猪121万头,羊626万头,仅张掖市建成养殖小区390个,养殖规模大,大量堆放的粪便成为点状污染源。

污水处理厂为重点污染源场地,被各市环保部门重点监控。区内张掖、酒泉、嘉峪关、山丹、民乐和临泽市污水处

理厂都建在地下水流向的下游区(图2),汇集了城区的生活污水和工业废水,最终被引入农田进行灌溉或排入生态林。根据实验室数据,污水中COD、 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{NO}_3^-$ 最大含量分别为19.1、29.0和256.1 mg/L,超Ⅲ类水标准(地下水质量标准GB/T)的倍数分别为6.4、58.0和57.8倍。处理不完全的污水从河道进入农田,浅层地下水的污染方式由线状变为面状。

黑河中游区浅层地下水防污性能以“中等”和“较好”为主,抗污染能力较强,但应注意的是该区污染种类多样,潜在面域污染广,尤其污水处理厂废水中含有较多的有害菌群、氨氮和重金属,地下水受到污染后危害性很难估量,而集中在城区及周边的加油站等石油化工类潜在污染源一旦泄露会造成不宜修复的有机物污染。

该区人口集中,重要水源地和分散式供水井分布于此,同时为重要的玉米种植产地和牧区,地下水的安全尤为重要。应严格控制污水的达标排放,养殖小区标准化管理,加油站安全管理。

**2.2.3 黑河下游区污染源的影响。**黑河下游区额济纳盆地地广人稀,主要为荒漠化牧场。西部马鬃山矿产资源丰富,工业以多种金属冶炼和特种矿业加工为主,集中在赛汉陶来和策克口岸工业园区(图2)。区内90%的人口集聚在额济纳旗,污水处理厂为氧化塘处理方式,垃圾填埋场的垃圾随意堆置。

工业园区、污水处理厂和垃圾填埋场主要分布在西部山前平原和北部戈壁地带,所在区域的地下水防污性能“较差”,浅层地下水易受到污染。沿地下水方向距污水处理厂500 m处的大口井水质数据显示,溶解性总固体含量4762 mg/L,超Ⅲ类水标准4.76倍,且六价铬、汞有害成分都有检出,说明污水处理厂附近的浅层地下水已受到污染。

荒漠化牧场面积占据额济纳盆地的大部,据牧场人畜共用单源井的水质分析结果,23%样品检出有机物,包括苯并芘、1,2-二氯苯和1-2二氯乙烷,且其中的26%苯并芘中度污染,推测与当地普遍使用汽油泵抽水方式有关。区域内普遍存在的点状污染对环境、牧民身体健康和牧区养殖有较大的危害,建议更换抽水工具,可考虑利用太阳能作为抽水动力。

### 3 结论与讨论

采用DRASTIC评价方法,选取地下水埋深、含水层岩性、包气带岩性、净补给量、水力传导系数和地形梯度6个评价指标,对黑河流域浅层地下水防污性能进行评价,评价结果显示,黑河流域浅层地下水的防污性能以差和较差级为主导,分布面积占评价区总面积的52.2%,主要分布在南部、北部山前地带以及沿河道带;其次为中等级,占30.4%,主要分布在中游地区部分区域、下游区东部和北部区域;好和较好级分布面积较小,占17.4%,主要分布在各盆地中部区域。

综合考虑区内工业、农业和生活污染源的空间分布状况,在山前戈壁带的冲洪积平原不再建立新的工矿企业和垃圾填埋场。

(下转第103页)

叶金花 SSR-PCR 反应的最优反应体系:1.50 mmol/L  $Mg^{2+}$ 、0.150 mmol/L dNTPs、0.45  $\mu\text{mol/L}$  引物、2.00 U *Taq* DNA 聚合酶、15 ng 模板 DNA、2  $\mu\text{L}$   $10\times$  PCR buffer,用 ddH<sub>2</sub>O 补齐至 20  $\mu\text{L}$ ,最佳退火温度 53.4  $^{\circ}\text{C}$ 。此反应体系可用于玉叶金花属植物的 SSR 引物开发、物种分类鉴定、遗传多样性和种群遗传结构分析等方面的研究。

### 参考文献

- [1] DAVIS A P, GOVAERTS R, BRIDSON D M, et al. A global assessment of distribution, diversity, endemism, and taxonomic effort in the Rubiaceae [J]. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 2009, 96(1): 68-78.
- [2] ALEJANDRO G D, RAZAFIMANDIMBISON S G, LIEDE-SCHUMANN S. Polyphyly of *Mussaenda* inferred from its and trnT-F data and its implication for generic limits in Mussaendeae (Rubiaceae) [J]. *American journal of botany*, 2005, 92(3): 544-557.
- [3] CHEN T, TAYLOR C M. *Mussaenda* [M]// WU Z Y, RAVEN P H, HONG D Y, et al. *Flora of China*. Beijing and St. Louis: Science Press, & Missouri Botanical Garden Press, 2010: 231-242.
- [4] 邱少松, 邵志芳, 赵厚本, 等. 美丽的热带观花植物——粉萼花 [J]. *广东园林*, 2006, 28(4): 41-42.
- [5] 张颖, 李嘉, 姜平川. 玉叶金花化学成分研究 [J]. *中药新药与临床药理*, 2013, 24(3): 278-281.
- [6] 唐德智. 玉叶金花研究进展 [J]. *解放军药理学学报*, 2016, 32(2): 170-173.
- [7] 罗冉, 吴委林, 张场, 等. SSR 分子标记在作物遗传育种中的应用 [J]. *基因组学与应用生物学*, 2010, 29(1): 137-143.
- [8] 张新叶, 宋丛文, 张亚东, 等. 杨树 EST-SSR 标记的开发 [J]. *林业科学*, 2009, 45(9): 53-59.
- [9] KALIA R K, RAI M K, KALIA S, et al. Microsatellite markers: An overview of the recent progress in plants [J]. *Euphytica*, 2011, 177(3): 309-334.
- [10] QIU L J, YANG C, TIAN B, et al. Exploiting EST databases for the devel-

- opment and characterization of EST-SSR markers in castor bean (*Ricinus communis* L.) [J]. *BMC Plant Biology*, 2010, 10(1): 1-10.
- [11] 王小兰, 虞文根, 周玉萍, 等. 玉叶金花 (*Mussaenda pubescens*) SSR 引物的快速开发 [J]. *广州大学学报 (自然科学版)*, 2007, 6(1): 50-52.
- [12] DUAN T T, GONG W, ZHANG D X. Development of microsatellite markers from *Mussaenda pubescens* (Rubiaceae) [J]. *American journal of botany*, 2012, 99(11): 437-439.
- [13] DUAN T T, ZHANG D X. Fourteen additional microsatellite markers for *Mussaenda pubescens* and cross-species amplification [J]. *Journal of genetics*, 2014, 93(2): 44-47.
- [14] DOYLE J J, DOYLE J L. A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue [J]. *Phytochemical Bull*, 1987, 19(1): 11-15.
- [15] LUO Z L, DUAN T T, YUAN S, et al. Identification of natural hybrids by SSR markers in *Mussaenda* [J]. *BioProtocol*, 2016, 6(13): 1-7.
- [16] 王玲玲, 陈东亮, 黄丛林, 等. SSR 分子标记技术在植物研究中的应用 [J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(36): 123-126, 130.
- [17] 杨水云, 李续娥, 吴明宇, 等. 正交实验法在 PCR 反应条件优化中的应用 [J]. *生物数学学报*, 2005, 20(2): 202-206.
- [18] 贾新平, 孙晓波, 梁丽建, 等. 绣球 SSR-PCR 反应体系的建立与优化 [J]. *华北农学报*, 2016, 31(4): 68-73.
- [19] YANG T T, MU L Q, WANG J. Optimizing SSR-PCR system of *Panax ginseng* by orthogonal design [J]. *Journal of forestry research*, 2007, 18(1): 31-34.
- [20] 糜亚男, 张水寒, 蔡媛, 等. 杜仲 SSR-PCR 反应体系的优化 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2015, 21(2): 1-6.
- [21] 胡小利, 马庆, 包海柱, 等. 食用向日葵 SSR-PCR 反应体系的优化 [J]. *华北农学报*, 2015, 30(2): 161-165.
- [22] 周丽霞. 椰子 SSR-PCR 反应体系的优化 [J]. *江西农业学报*, 2017, 29(4): 36-39.
- [23] 湛欣, 鲁好君, 赵帅, 等. 红椿 SSR-PCR 体系建立和多态性引物筛选 [J]. *林业科学研究*, 2016, 29(4): 565-570.
- [24] 赵雅楠, 王颖, 张杰东. 绿豆 SSR-PCR 反应体系的建立与优化 [J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(8): 23-26.

(上接第 64 页)

圾处理场,不再开发生态园区,保持其天然状态;黑河中游区的中段和下段控制化肥和农药的施用量,污水处理厂达标排放;黑河下游区密切注意污水处理厂污水处理状况,可考虑更换牧区开采并现状使用的汽油泵抽水为太阳能抽水。

### 参考文献

- [1] 刘兆鑫, 崔英山, 毛郁, 等. 成都平原浅层地下水天然防污性能评价 [J]. *四川地质学报*, 2016, 36(3): 440-443.
- [2] 崔秀凌, 李庚阳. 银川市地下水防污性能研究 [J]. *农业科学研究*, 2013, 34(3): 14-18.
- [3] 刘春华, 张光辉, 王威, 等. 区域地下水系统防污性能评价方法探讨与验证:以鲁北平原为例 [J]. *地球学报*, 2014, 35(2): 217-222.
- [4] 杨利国, 王现国, 钱建立. 洛阳盆地地下水防污性能评价 [J]. *地下水*, 2016, 38(4): 117-118.
- [5] 苗晋杰, 梁合成, 张莺, 等. 我国不同区域地质环境城市地下水防污性能分布特征分析 [J]. *安全与环境工程*, 2012, 19(2): 48-53, 65.
- [6] 蓝永超, 康尔泗, 张济世, 等. 黑河流域水资源开发利用现状存在问题分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(6): 34-39.

- [7] 张光辉, 聂振龙, 王金哲, 等. 黑河流域水循环过程中地下水同位素特征及补给效应 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(5): 511-519.
- [8] 刘芬, 王水献, 蓝永超, 等. 黑河流域张掖盆地地表水-地下水系统同位素特征及转化关系 [J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(2): 92-96.
- [9] 武选民, 史生胜, 黎志恒, 等. 西北黑河下游额济纳盆地地下水系统研究(下) [J]. *水文地质工程地质*, 2003, 29(2): 30-33.
- [10] 张光辉, 聂振龙, 刘少玉, 等. 黑河流域走廊平原地下水补给源组成及其变化 [J]. *水科学进展*, 2005, 16(5): 673-678.
- [11] 聂振龙, 陈宗宇, 申建梅, 等. 应用环境同位素方法研究黑河源区水文循环特征 [J]. *地理与地理信息科学*, 2005, 21(1): 104-108.
- [12] 阮云峰, 赵良菊, 姚治君, 等. 黑河流域地下水导电率空间特征及影响因素研究 [J]. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, 2016, 52(3): 289-296.
- [13] 张光辉, 刘少玉, 谢悦波, 等. 西北内陆黑河流域水循环与地下水形成演化模式 [M]. 北京: 地质出版社, 2005: 14.
- [14] 钟佐桑. 地下水防污性能评价方法探讨 [J]. *地学前缘*, 2005, 12(S1): 3-13.
- [15] 蒲瑞丰, 康尔泗, 艾贤高, 等. 黑河流域农业土壤重金属人为污染的富集因子分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(5): 108-111.

## 科技论文写作规范——缩略语

采用国际上惯用的缩略语。如名词术语 DNA(脱氧核糖核酸)、RNA(核糖核酸)、ATP(三磷酸腺苷)、ABA(脱落酸)、ADP(二磷酸腺苷)、CK(对照)、CV(变异系数)、CMS(细胞质雄性不育性)、IAA(吲哚乙酸)、LD(致死剂量)、NAR(净同化率)、PMC(花粉母细胞)、LAI(叶面积指数)、LSD(最小显著差)、RGR(相对增长率)、单位名缩略语 IRRI(国际水稻研究所)、FAO(联合国粮农组织)等。对于文中有些需要临时写成缩写的词(如表及图中由于篇幅关系以及文中经常出现的词而写起来又很长时),则可取各主要词首字母写成缩写,但需在第一次出现处写出全称,表及图中则用注解形式在下方注明,以便读者理解。