

# 傍河区域地下水脆弱性研究 ——以第二松花江流域为例

冶雪艳, 尤传誉, 杜新强, 王丽雪

吉林大学环境与资源学院; 吉林大学水资源与环境研究所, 长春 130021

**摘要** 地下水脆弱性研究是合理开发利用和保护地下水的基础, 它一直是国际水文地质研究的热点问题之一。以第二松花江流域地下水为研究对象, 分别采用DRASTIC方法和GOD方法对地下水环境脆弱性进行评价, 并利用实测铬含量对评价结果进行验证对比。研究表明: DRASTIC模型对第二松花江流域地下水环境脆弱性的评价较为合适, 评价结果更能真实地反映研究区地下水脆弱情况; 第二松花江流域傍河区域的地下水环境较为脆弱, 容易受到污染, 故在布设水源地开采井时应尽量避开地下水高脆弱区, 做到合理有效地开发利用地下水资源。

**关键词** 地下水; 脆弱性; DRASTIC模型; GOD模型

**中图分类号** P345

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.17.008

## Groundwater vulnerability to contamination near the river: A case study of the second Songhua River

YE Xueyan, YOU Chuanyu, DU Xinqiang, WANG Lixue

College of Environment and Resources, Jilin University; Institute of Water Resources and Environment, Jilin University, Changchun 130021, China

**Abstract** The groundwater vulnerability is a basic issue for the groundwater to be protected and used reasonably, so it is one of the hot topics in the hydrogeology field. The DRASTIC method and the GOD method are used to assess the groundwater vulnerability of the second Songhua River basin, and then the assessment is evaluated by using the measured values of Cr. The results show that the DRASTIC method is better, and it could reflect realistically the vulnerability of the researched area. The groundwater environment near a river is vulnerable and easy to be polluted. In order to take advantage of the groundwater resources effectively, the well of the water source should be constructed far away from the high-risk areas.

**Keywords** groundwater; vulnerability; DRASTIC model; GOD model

近年来社会经济的迅速发展以及城市化的不断扩大, 人们对水资源的需求量随之增大<sup>[1-3]</sup>。由于工农业污染物的肆意排放, 造成大部分地表水体的严重污染, 因此傍河开采地下水的形式应运而生。傍河区域地下水源具有富水性强、埋藏浅、水量稳定、水质优良、易集中开采和便于管理等优点而受到人们的青睐<sup>[4-6]</sup>。地下水由于所处环境的特殊性, 使地下水污染具有不易发觉、治理困难、一旦受到破坏难以修复的

特点。为了有效地保护地下水免受污染, 必须采取以防为主的原则, 明确地下水易受污染的区域, 因此确定区域地下水的脆弱性十分必要<sup>[7]</sup>。

地下水脆弱性的定义至今没有统一的论述, 目前被普遍接受的是1993年美国国家科学研究委员会提出的定义: 地下水脆弱性是污染物到达最上层含水层之上某特定位置的倾向性与可能性<sup>[8]</sup>。地下水脆弱性评价是目前国际水文地质研

收稿日期: 2015-05-22; 修回日期: 2015-08-11

基金项目: 国家水污染控制与治理重大专项(2014ZX07201010)

作者简介: 冶雪艳, 副教授, 研究方向为地下水资源评价及地下水人工回灌, 电子信箱: yexy@jlu.edu.cn; 尤传誉(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为水资源管理与评价, 电子信箱: youchuanyu0716@163.com

引用格式: 冶雪艳, 尤传誉, 杜新强, 等. 傍河区域地下水脆弱性研究——以第二松花江流域为例[J]. 科技导报, 2015, 33(17): 78-83.

研究的热点和前沿课题,研究方法也多种多样<sup>[9,10]</sup>。现有评价方法大致可分为选置指数法、过程数学模拟法、统计学法和模糊数学法4类,针对于研究区不同特征,需要选择不同的方法进行评价,目前应用较为广泛的有选置指数法中的DRASTIC模型、GOD模型以及根据实际条件不同而改进的模型等<sup>[11]</sup>。中国对地下水脆弱性评价的起步较晚,但发展迅速,如陈玉茹等<sup>[12]</sup>、袁建飞等<sup>[13]</sup>应用GOD模型对不同区域浅层孔隙水的脆弱性进行了探究评价;杨维等<sup>[14]</sup>、杨贵芳等<sup>[15]</sup>利用DRASTIC和AHP模型对城市地下水脆弱性进行了评价;由于部分研究区的数据有限,孟宪萌等<sup>[16]</sup>、李绍飞等<sup>[17]</sup>采用熵权、层次分析、模糊数学等方法结合不同研究区的条件对DRASTIC模型加以改进,使模型更加完善、结果更加合理。

由于地下水所处的水文地质条件不同,因此在选取脆弱性评价方法时受到了多种条件的制约。本文针对第二松花江流域地下水,拟采用DRASTIC方法和GOD方法,分别对区域地下水的脆弱性进行评价,并利用实测的铬离子含量进行验证,对评价结果进行比较研究,以期选择适宜该区域的脆弱性评价模型,为今后该区域的地下水资源合理开发利用提供科学的理论依据。

## 1 研究方法

### 1.1 DRASTIC方法

DRASTIC模型<sup>[18]</sup>是由美国水井协会(NWWA)和美国环保局(EPA)于1987年联合开发的,该方法可以定量地分析影

响和控制污染物运动的主要水文地质因素<sup>[19]</sup>。

DRASTIC模型主要选取了7个评价指标,分别为:含水层埋深( $D$ )、含水层净补给量( $R$ )、含水层岩性( $A$ )、土壤类型( $S$ )、地形坡度( $T$ )、不饱和介质影响( $I$ )、含水层水力传导系数( $C$ )。

DRASTIC模型的计算公式为

$$D_i = \sum_{j=1}^7 (W_j \cdot R_j) \quad (1)$$

式中, $D_i$ 为DRASTIC指数, $W_j$ 为因子 $j$ 的权重, $R_j$ 为因子 $j$ 的评分。

各评价指标的权重及评分范围见表1~表3。

表1 DRASTIC方法评级指标权重  
Table 1 Weights of indices of DRASTIC method

评价指标	权重
含水层埋深	5
净补给量	4
含水层岩性	3
土壤类型	2
地形坡度	1
不饱和介质影响	5
水力传导系数	3

表2 数值指标的分级范围与评分

Table 2 Grades and quotas of numerical indices

含水层埋深/m	评分	净补给量/(mm·a <sup>-1</sup> )	评分	水力传导系数/(m·d <sup>-1</sup> )	评分	地形坡度/%	评分
0~1.5	10	>254	10	>81.5	10	0~2	10
1.5~4.6	9	213~254	9	40.7~81.5	8	2~6	9
4.6~9.1	7	150~213	7	28.5~40.7	6	6~12	5
9.1~15.2	5	100~150	5	12.2~28.5	4	12~18	3
15.2~22.9	3	75~100	3	4.1~12.2	2	>18	1
22.9~30.5	2	51~75	2	0~4.1	1		
≥30.5	1	0~51	1				

表3 类型指标的分级与评分

Table 3 Grades and quotas of typical indices

含水层岩性	评分	土壤类型	评分	不饱和介质影响	评分
块状页岩	1~3	薄层或无砾	10	承压层	1
变质岩、火成岩	2~5	砂	9	粉砂、黏土、页岩	2~6
冰渍岩	4~6	泥浆	8	含粉砂、黏土的砂砾	4~8
层状砂岩、灰岩	5~9	胀缩或凝聚性黏土	7	层状灰岩、砂岩、页岩	4~8
块状砂岩、灰岩、砂砾岩	4~9	亚黏土	3~6	砂砾	6~9
玄武岩	2~10	垃圾	2	玄武岩	9
岩溶灰岩	9~10	非胀缩非凝聚黏土	1	岩溶灰岩	10

其中,含水层埋深决定污染物到达含水层之前所要经历的路程以及与周围介质接触的时间,并且决定了污染物与土壤孔隙水中的氧接触致使其氧化的机会;净补给量影响着地面或土壤中的污染物可通过补给水垂直传输至含水层并在含水层中运移的速度;含水层岩性决定了地下水流的速度,并影响了污染物吸附、扩散、弥散等作用;土壤类型影响着污染物通过补给量渗入地表及垂直向包气带运移的过程;坡度影响着携带污染物的水流在地表的停滞时间,即入渗补给量;不饱和介质决定了起到自净作用的物理、化学、生物作用的形成条件,同时控制着地表水入渗路径的长度和渗流途径;水力传导系数控制着地下水的流动速率和污染物进入含水层后的迁移速率。

将评价指标的评分值根据其各自权重值进行叠加,最终得到地下水脆弱性评价指数即DRASTIC指数,并以此划分地下水脆弱性等级。

## 1.2 GOD方法

GOD模型<sup>[20]</sup>是一种快速评价含水层污染脆弱性的经验分类系统,属于设置指数法中参数系统法下的标定系统(RS)方法。

GOD模型易污性指标的计算公式为

$$P_{GOD} = G \cdot O \cdot D \quad (2)$$

式中, $G$ 为地下水类型, $O$ 为盖层岩性, $D$ 为地下水埋深。

各评价指标的评分范围见表4。

表4 GOD方法指标评分体系  
Table 4 Scoring system of GOD method

地下水类型	评分	盖层岩性	评分	地下水埋深/m	评分
无含水层	0	残余土壤	0.4	>100	0.4
溢流区地下水	0.1	冲积淤泥与黄土	0.5	50~100	0.5
承压水	0.2	风化砂	0.6	20~50	0.6
半承压水	0.3	冲积的冰水砂与砾石	0.7	10~20	0.7
半潜水 (有覆盖层)	0.5	塌积砾石	0.8	5~10	0.8
潜水	1.0			2~5	0.9
				<2	1.0

其中,地下水类型反映地下水的埋藏特点;盖层岩性指含水层上覆地层的岩性特征,主要控制着污染物的渗流途径、渗流长度以及在运移过程中经历的各种反应;地下水埋深是指地表至潜水位深度,一般来说,地下水埋藏越深,污染物到达含水层所需要的时间越长,则污染物在迁移过程中衰减的机会越多,地下水受到污染的可能性越小。

该模型考虑了3个因子( $G$ 、 $O$ 、 $D$ ),各因子赋予权重值,评分范围为0~1.0。 $P_{GOD}$ 值越大,表示地下水越容易被污染。

当 $P_{GOD}$ 为最大值1.0时,表示含水层最为脆弱,最容易被污染。

## 1.3 验证方法

通过对脆弱性模型进行验证可以有效地分析模型的准确性,提高模型的精度。对脆弱性结果进行验证的方法很多<sup>[21]</sup>,考虑到研究区内存在大量造纸、冶金等工矿企业,排放的废水含有大量的铬,是地下水的主要污染源之一<sup>[22]</sup>,故本次验证采用地下水中铬的含量作为验证指标。

## 2 研究区概况

### 2.1 自然地理条件

研究区位于吉林省境内,总面积为17530 km<sup>2</sup>,区内水系发达(图1),包括第二松花江干流丰满水库至松原前郭汇入松花江段、饮马河石头口门水库下游段以及伊通河新立城水库下游段,其中饮马河为第二松花江主要的支流。区内河流主要处在河谷平原,并将台地分割为多个呈波状起伏的河间地块。地形起伏较小,坡度不大。

研究区地处温带季风气候区,大陆性气候特点十分明显。降水的时空分布不均匀,多年平均降水量为400~700 mm,降水量年内分布不均,主要集中在7—9月,降水量占全年降水量的70%~80%。

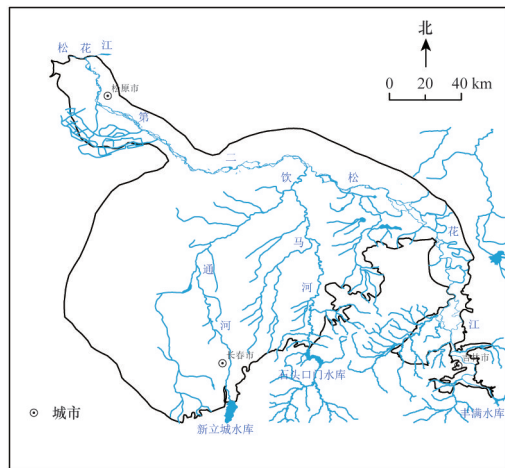


图1 研究区概况

Fig. 1 Outline of the study area

### 2.2 水文地质条件

研究区内的地下水以浅层地下水(潜水)为主,其上部覆盖有第四系沉积物,主要以亚黏土为主,粒径分布较为均匀,下部以白垩系粗粒碎屑岩、粉砂岩和泥岩为主。含水层埋藏深度较浅,厚度在沿江地区较厚,富水性在全区分布不均,最大处单井涌水量可达8000 m<sup>3</sup>/d,局部地区存在隔水顶板为泥岩的承压含水层以及充水断层。

区内地下水主要以大气降水补给为主,在开采量较大区域会接受河流的侧向补给。排泄形式主要以人工开采为主,蒸发微弱。地下水化学类型主要以重碳酸钙钠型水为主,在

吉林市丰满水库附近存在较小范围的重碳酸硫酸钙镁钠型水,在伊通河汇入饮马河处具有重碳酸氯化物钙镁型水。地下水的矿化度在0.1~0.5 g/L,在伊通河汇入饮马河处存在>1.0 g/L的微咸水。

### 3 结果与讨论

地下水脆弱性指标加权评分过程是通过GIS的空间叠加功能实现的,应用GIS软件的此项功能提高了评价效率。

### 3.1 DRASTIC 模型评价结果

通过数据整理,给出7个指标的评分分区,本文以土壤介质类型(S)的划分为例进行介绍。土壤介质是包气带顶部具有肥力并能生长植物的疏松物质层。依据表3将研究区的土壤介质分为黄土状亚黏土、亚黏土、亚砂土和砂4种类型,4种土壤类型的评分分别为4、5、6和8,得到如图2(d)所示的评分图。其他指标的处理过程与其类似,在此不再赘述,仅将各项指标评分列于图2。

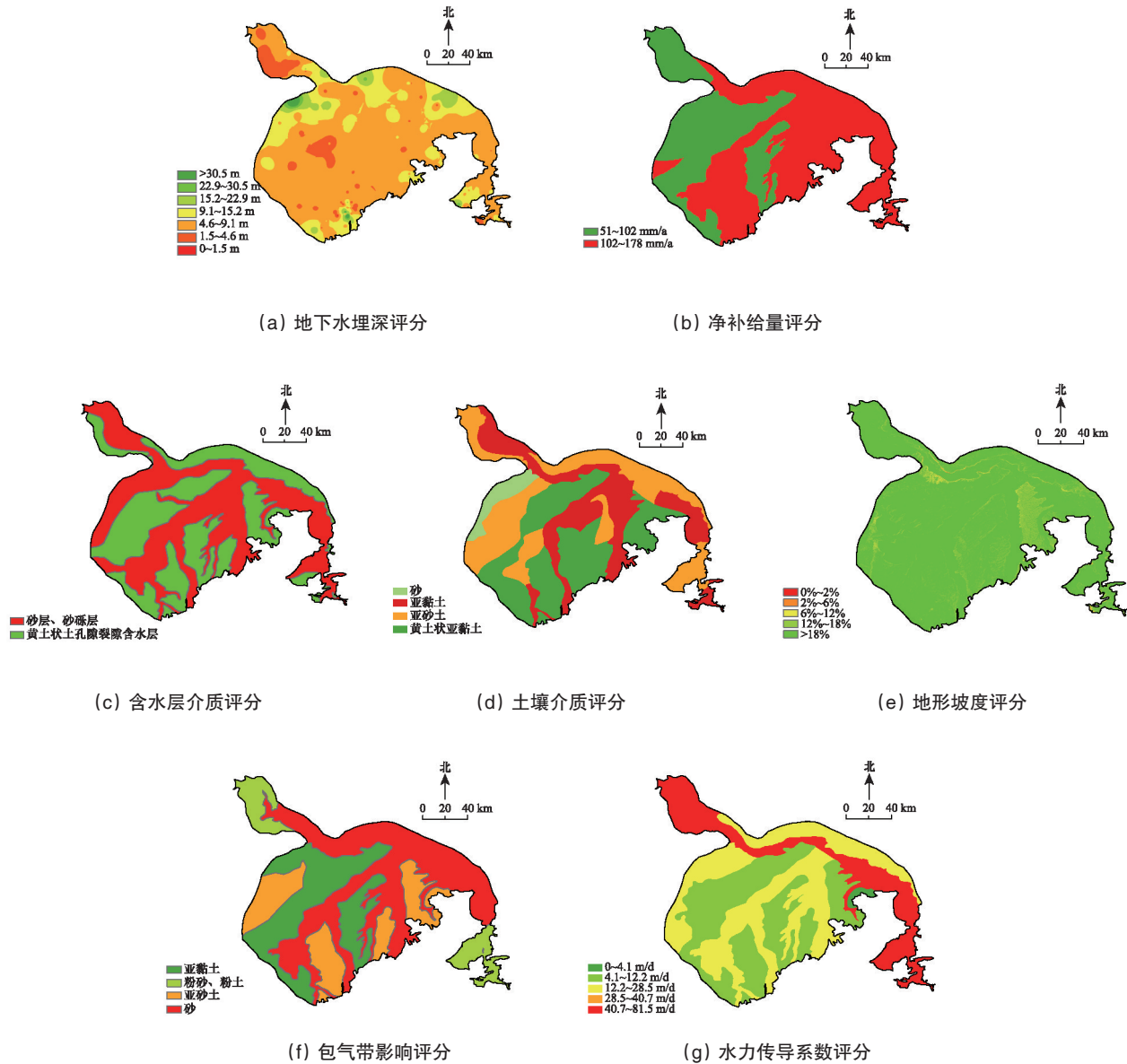


图2 DRASTIC 模型指标评分  
Fig. 2 DRASTIC rating map of the study area

通过GIS软件将7个评价指标的权重和评分相乘后叠加,得到了如图3所示的研究区地下水的脆弱性分区,按照脆弱程度共分为5个区域。

由图3可以看出,研究区内地下水脆弱性呈条带状分布,

傍河区域的地下水脆弱性较低,根据统计,该区域所占比例可达全区总面积的43.65%,即比较容易受到污染;在远离河流的区域地下水脆弱性较高,受到外来污染物污染的风险较低。

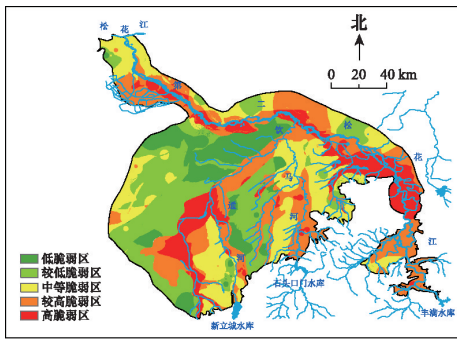


图3 DRASTIC模型傍河区域地下水脆弱性分区  
Fig. 3 Sketch of vulnerability of DRASTIC model near the river

### 3.2 GOD模型评价结果

GOD模型各指标的评分分区过程与DRASTIC模型指标类似,评分取值见表4,图4为采用GOD模型获得的地下水类型、盖层岩性和地下水埋深3个指标的评分图。

利用GIS软件对各项指标进行叠乘处理,根据最终的指标值 $P_{GOD}$ ,得到了第二松花江流域地下水脆弱性分区图,如图5所示研究区按照易污程度共分为5个区域。

根据图5可以看出,应用GOD模型评价得出的脆弱性结果,中等易污区所占比例最大,根据统计结果该区达全区总面积的51.50%;高易污区和极高易污区仅占研究区的11.16%,在沿江傍河地带居多。

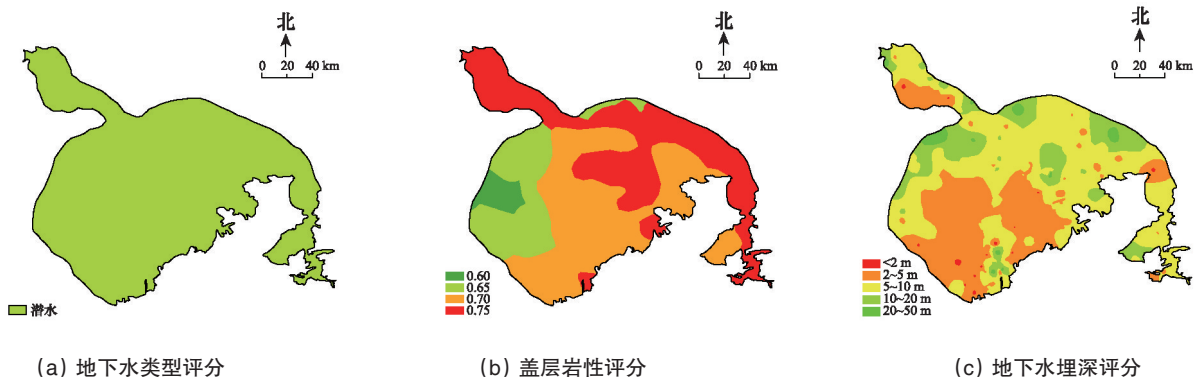


图4 GOD模型指标评分  
Fig. 4 GOD rating map of the study area

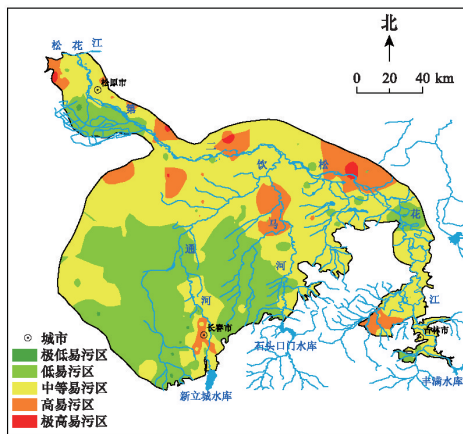
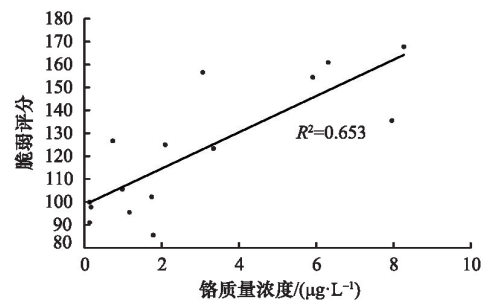


图5 GOD模型傍河区域地下水脆弱性分区  
Fig. 5 Sketch of vulnerability of GOD model near the river

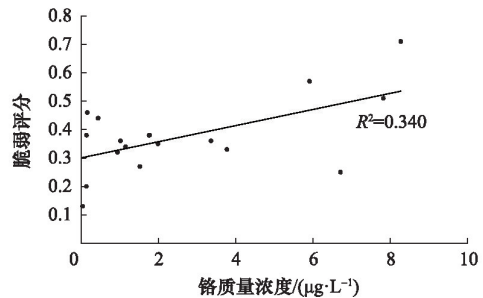
### 3.3 验证结果

铬在地下水中的含量一般较低,但由于研究区工业废水的污染,使其在部分地段的含量剧增<sup>[21]</sup>。根据铬质量浓度实测值,分别与DRASTIC模型及GOD模型评分结果进行相关性检验,验证结果如图6所示。

通过图6可以看出,铬实测分布值和DRASTIC模拟评价结果吻合较好,而与GOD模型的结果拟合较差。



(a) DRASTIC模型



(b) GOD模型

图6 模型验证结果

Fig. 6 Verified results of model

采用两种模型对研究区进行地下水脆弱性评价,结果整体趋势上较为一致,即在傍河区域的地下水环境相对于全区

而言较为脆弱,比较容易受到污染,这是由傍河区域包气带及含水层透水性好、含水层厚度大、埋藏浅等特点造成的。

然而,通过利用铬含量实测对2种模型结果进行验证发现,两种模型在局部区域仍存在一定差异,DRASTIC模型更加具体、精度更高。在沿河地带的脆弱性呈明显的条带状分布,主要是由于模型中考虑了地形坡度和净补给量因素的影响。在沿河区域,由于地下水的开采,会造成河水补给地下水的情况,降水造成水流对含水介质及污染物的冲刷;且河流两岸大多处在河谷平原,地形坡度较为平缓,污染物不易扩散。因此DRASTIC模型的评价结果更为细化,能够真实合理地反映傍河区域地下水环境脆弱性的特点。

#### 4 结论

1) 第二松花江流域傍河地段地下水环境较为脆弱,容易受到污染,这是由傍河区域地下水所处的含水层厚度大、埋深浅、透水性好等因素造成的。

2) 通过DRASTIC方法与GOD方法对比可知,DRASTIC方法考虑的因素更多,评价结果更加具体,在数据充足的情况下,能够更好地反映研究区地下水脆弱的真实状态。

3) 傍河区域地下水作为生活及工农业用水的重要水源,在布设傍河水源地时应尽量避开地下水高脆弱性区域,减少因不合理规划而造成的地下水污染问题。

#### 参考文献(References)

- [1] 林学钰, 廖资生, 石钦周. 黄河下游傍河开采地下水研究——以郑州一开封间黄河段为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2003, 33(4): 495-502.  
Lin Xueyu, Liao Zisheng, Shi Qingzhou. Study on groundwater exploitation in riverside along lower reaches of the Yellow River: A case study of Zhengzhou-Kaifeng section[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2003, 33(4): 495-502.
- [2] 赵良仕, 孙才志, 郑德凤. 中国省际水资源利用效率与空间溢出效应测度[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 121-133.  
Zhao Liangshi, Sun Caizhi, Zheng Defeng. Water resource utilization efficiency and its spatial spillover effects measure in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 121-133.
- [3] 王浩, 严登华, 贾仰文, 等. 现代水文水资源学科体系及研究前沿和热点问题[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 479-489.  
Wang Hao, Yan Denghua, Jia Yangwen, et al. Subject system of modern hydrology and water resources and research frontiers and hot issues[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 479-489.
- [4] 刘佩贵, 束龙仓. 傍河水源地地下水水流数值模拟的不确定性[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(4): 639-643.  
Liu Peigui, Su Longcang. Uncertainty on numerical simulation of groundwater flow in the riverside well field[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(4): 639-643.
- [5] 刘国东, 丁晶. 傍河水源地地下水资源评价方法述评[J]. 水科学进展, 1998, 9(3): 289-295.  
Liu Guodong, Ding Jing. Discussion on the evaluation methods of groundwater resource in the water applying field nearby a river[J]. Advances in Water Science, 1998, 9(3): 289-295.
- [6] Hlaln C M, Clotilde B. Biogeochemical processes during the infiltration of river water into an alluvial aquifer[J]. Environmental Science Technology, 1993, 27(4): 661-666.
- [7] 楚文海, 刘奇, 李江, 等. 基于GIS应用DRASTIC模型评价贵阳市地下水污染风险[J]. 地下水, 2007, 29(1): 88-90.  
Chu Wenhai, Liu Qi, Li Jiang, et al. Assessing groundwater contamination risk in Guiyang City by using DRASTIC model based on GIS[J]. Groundwater, 2007, 29(1): 88-90.
- [8] El Naqa Ali. Aquifer vulnerability assessment using the DRASTIC model at Russeifa landfill, northeast Jordan[J]. Environmental Geology, 2004, 47(1): 51-62.
- [9] Al-Adam R A N, Foster I D L, Baban S M J. Groundwater vulnerability and risk mapping for the basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, remote sensing and DRASTIC[J]. Applied Geography, 2003, 23(4): 303-324.
- [10] Thapinta A, Hudak P E. Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand[J]. Environment International, 2003, 29(1): 87-93.
- [11] 张保祥. 黄水河流域地下水脆弱性评价与水源保护区划分研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.  
Zhang Baoxiang. Groundwater vulnerability assessment and wellhead protection area delineation in Huangshuihe River Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.
- [12] 陈玉茹, 马传明. 商丘市浅层地下水易污性评价[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(1): 41-44.  
Chen Yuru, Ma Chuanming. Shallow groundwater vulnerability assessment in Shangqiu City[J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(1): 41-44.
- [13] 袁建飞, 郭清海. 湖北省钟祥市汉江河谷平原区浅层孔隙水的脆弱性评价[J]. 地质科技情报, 2009, 28(4): 112-116.  
Yuan Jianfei, Guo Qinghai. Vulnerability assessment of shallow quaternary groundwater from the Hanjiang River valley plain, Zhongxiang City, Central Hubei Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(4): 112-116.
- [14] 杨维, 王虎, 李宝兰, 等. 应用DRASTIC, AHP对地下水脆弱性的评价比较[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2007, 23(3): 489-492.  
Yang Wei, Wang Hu, Li Baolan, et al. The research into the comparison of two groundwater vulnerable models[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science Edition, 2007, 23(3): 489-492.
- [15] 杨贵芳, 姜月华, 李云. 基于DRASTIC模型的城市地下水脆弱性评价综述[J]. 地下水, 2012, 34(1): 5-8.  
Yang Guifang, Jiang Yuehua, Li Yun. Review on urban groundwater vulnerability assessment by using DRASTIC model[J]. Groundwater, 2012, 34(1): 5-8.
- [16] 孟宪萌, 束龙仓, 卢耀如. 基于熵权的改进DRASTIC模型在地下水脆弱性评价中的应用[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 94-99.  
Meng Xianmeng, Su Longcang, Lu Yaoru. Modified DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment based on entropy weight[J]. Shuili Xuebao, 2007, 38(1): 94-99.
- [17] 李绍飞, 王勇, 毛慧慧, 等. 一种改进的DRASTIC模型及其在地下水脆弱性评价中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(9): 68-75.  
Li Shaofei, Wang Yong, Mao Huihui, et al. A modified DRASTIC model and its application on assessment of groundwater vulnerability [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2010, 40(9): 68-75.
- [18] Samira A, Sayed F M, Jahangir A K, et al. Conditioning DRASTIC model to simulate nitrate pollution case study: Hamadan - Bahar Plain [J]. Environment Earth Science, 2011, 63(6): 1155-1167.
- [19] Aller L, Bennet T, Lehr J H. A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological setting[M]. Oklahoma: US EPA, 1987.
- [20] 中国地调局水文地质工程地质技术方法研究所. 地下水脆弱性编图指南[R]. 北京: 中国地质调查局, 2003.  
Institute of Hydrogeology and Engineering Geology Techniques, China Geological Survey. Mapping of groundwater vulnerability[R]. Beijing: China Geological Survey, 2003.
- [21] Javadi S, Kavehkar N, Mousavizadeh M H, et al. Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrate measurements in agricultural areas[J]. Agricultural Scientist Technology, 2013, 13: 239-249.
- [22] 周振国, 徐魁安. 地下水饮用水除铬研究[J]. 水处理技术, 1989, 15(6): 359-365.  
Zhou Zhenguo, Xu Kuian. Removed of chromium from the groundwater as drinking water[J]. Technology of Water Treatment, 1989, 15(6): 359-365.

(责任编辑 王媛媛)