

华北平原地下水脆弱性评价

孟素花 费宇红 张兆吉 钱 永 李亚松

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050803)

摘要:针对华北平原地域广阔,地貌和水文地质条件复杂、地下水开发利用程度高,地下水位埋深、包气带和含水层岩性差异性大等特点,基于大量钻孔和地下水位监测资料,厘定了包气带岩性和地下水位埋深变化对脆弱性评价影响,进而建立适宜华北平原的 DRITC 评价指标体系,并应用于华北平原地下水脆弱性评价。评价中,根据华北平原水文地质条件,划分 4 评价分区,剖分 2 km×2 km 单元 34 253 个,采用地下水位埋深、净补给量、包气带岩性、含水层累积厚度和渗透系数 5 个因子作为评价指标,求得地下水脆弱性综合指数及脆弱性分布图。结果表明,华北平原山前冲洪积扇和古黄河冲洪积平原的现代黄河影响带地下水脆弱性高或较高。野外采样 7 472 组地下水有机污染测试分析结果佐证,脆弱性高或较高区有机污染检出项数多,其他地区较少,由此验证评价结果的客观性。

关键词:华北平原;地下水脆弱性;指标体系;改进;客观性

中图分类号:P641.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2011)06-1607-07

华北平原地下水由于超量开采,已形成了串珠状的地下水位降落漏斗、包气带厚度增大、地面沉降等问题。同时,生产、生活废水的不合理排放,以及农药、化肥的大量施用,使得该地区的地下水污染加剧。因此,开展华北平原地下水脆弱性的研究具有重要意义。

1 研究背景及分区

华北平原位于中国东部,东临渤海,西抵太行山,北起燕山,南至黄河。包括北京市、天津市和河北省的全部平原及河南省和山东省的黄河以北平原,面积 13.92 万 km²。

华北平原地下含水组主要由第四纪松散沉积物组成,可划分为 4 个区(图 1),即山前冲洪积平原、中部冲积湖积平原、东部冲积海积平原和古黄河冲洪积平原。各含水组自上而下分为 4 个含水组,本研究涉及的是上部的第 I 和 II 含水组,即浅层地下水^[1]。该层

地下水主要接受大气降水和地表水入渗补给,排泄以人工开采为主。

第 I 含水组底界面埋深一般小于 50 m。山前平原冲洪积扇由扇顶至扇间和扇前,含水层厚度渐减,岩性颗粒变细,透水性及导水性变差,地下水补给条件也变差;中部和古黄河平原,古河道带区为条带状含水层,含水层厚度、透水性、导水性均比河间带大;东部冲积海积平原含水层多上覆粘土或砂质粘土,降水入渗补给条件差,由于蒸发强烈和海侵作用的影响,地下水矿化度高,为咸水体。

第 II 含水层组底界面埋深为 120~210 m,在山前平原和古黄河平原的河南地区,与第 I 含水层组水力联系较好,透水性及导水性均比第 I 含水层组强;中部和古黄河平原,含水层透水性及导水性相比山前明显减弱,海河以南,含水层上部为咸水体,下部为淡水体;东部冲积海积平原,以海河为界分为南北两区,北区较南区含水层厚度大、岩性粒度粗、富

收稿日期:2011-03-29;改回日期:2011-07-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2010CB428801-1,2010CB428804-1)及中国地质调查局国土资源大调查项目(1212010634600)资助。

作者简介:孟素花,女,1987 年生,研究实习员,研究方向为水资源与水环境;E-mail:suhameng@163.com。

通讯作者:费宇红,女,1960 年生,研究员,研究方向为水文水资源。

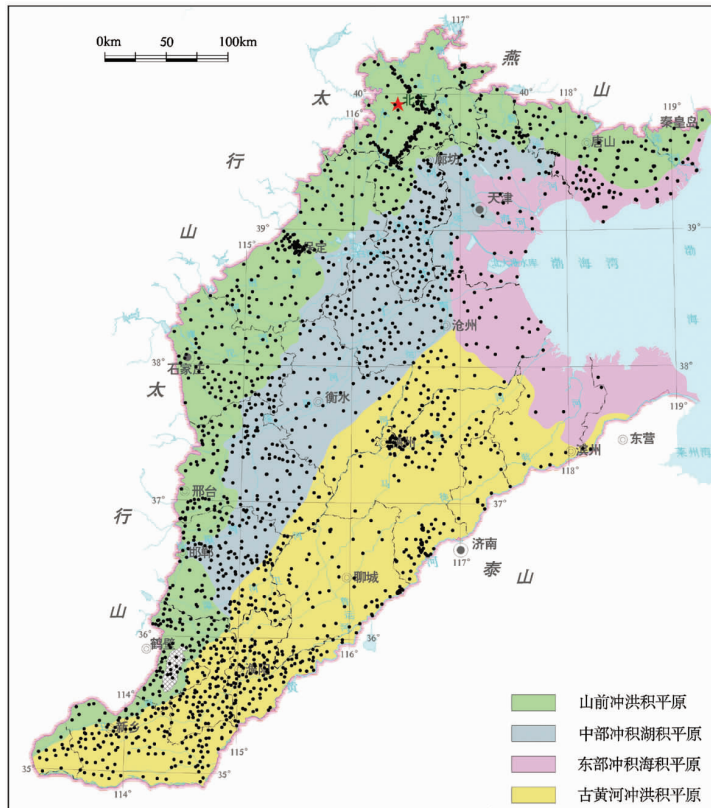


图 1 地下水脆弱性权重分区及钻孔分布图

Fig.1 Weight partitions of groundwater vulnerability and drilling locations

水性和导水性好,南区上部咸水体自北向南逐渐加厚,大港以南全为咸水体^[2]。

2 地下水脆弱性评价

2.1 模型构建

地下水脆弱性评价方法主要有迭置指数法、过程数学模拟法、统计方法和模糊数学方法等。其中迭置指数法简单、应用广泛^[3]。

DRASTIC 方法是迭置指数法中一种标准化的被普遍采用的方法^[4],是美国环境保护局(USEPA)和美国水井协会(NWWA)综合了 40 多位水文地质学专家的经验,于 1985 年合作开发的^[5]。该方法适用于大面积(小比例尺)的浅层地下水脆弱性评价^[6]。其应用的关键是指标选取是否合理。它主要考虑了影响地下水脆弱性的地下水位埋深、入渗补给量、含水层岩性、包气带厚度以及岩性、地形坡度、包气带的影响和含水层渗透性等因素。根据每个影响因子对地下水脆弱性影响的相对重要程度给予一个合理的权重,构成权重评判体系;根据每个影响因子的变化范围或其内在属性划分为若干的范围,进而构建评

分评价体系。各影响因子评分的加权和为地下水脆弱性综合指数。综合指数越大,相应区域的地下水脆弱性越高,越容易遭受污染^[7]。

将 DRASTIC 模型直接应用到华北平原地下水脆弱性评价中,难以获得高质量评价结果。严明疆等^[8]根据 DRASTIC 模型,去除地形和土壤 2 个指标,将地下水开采强度和其他 5 个指标作为评价指标,对石家庄市进行了地下水脆弱性评价。本研究根据 2 800 个钻孔资料和水文地质条件,厘定了包气带岩性和地下水位埋深变化对脆弱性评价影响,选取地下水位埋深、包气带综合岩性、含水层累积厚度、渗透系数、净补给量 5 个因子作为评价指标,采用如下模型:

$$D_r W_d + R_r W_r + I_r W_i + T_r W_t + C_r W_c = DRITC \quad (1)$$

式中: D 、 R 、 I 、 T 、 C 分别为地下水位埋深、净补给量、包气带综合岩性、含水层累积厚度和渗透系数, r 为评价指标评分等级, W 表示评价指标的权重, $DRITC$ 为脆弱性综合指数。综合评价指数越大,地下水脆弱性越高。

2.2 指标意义及分级划分

本次研究将各指标的评分划分为 10 个等级(表

表 1 各评价指标范围及其评分

Table 1 Ranges and ratings for DRITC factors

评分	地下水位埋深 /m	净补给量 /mm	含水层累积厚度 /m	渗透系数 /(m·d ⁻¹)
1	>35	0~51	120~100	0~5
2	30~35	51~71	100~80	5~10
3	25~30	71~92	80~70	10~15
4	20~25	92~117	70~60	15~20
5	15~20	117~148	60~50	20~30
6	10~15	148~178	50~40	30~40
7	7~10	178~216	40~30	40~60
8	4~7	216~235	30~20	60~80
9	2~4	235~254	20~10	80~100
10	0~2	>254	10~0	>100

1)。评分值越大,表示地下水脆弱性越高。

针对华北平原地下水资源长期大规模开采并引发地下水位下降等日趋严重的环境地质问题,中国地质调查局下达了“华北平原地下水可持续利用前景”和“华北平原地下水可持续利用调查评价”,项目成果集结成专著《华北平原地下水可持续利用调查评价》。地下水位埋深、净补给量和渗透系数,均采用上述项目的监测数据。包气带综合岩性和含水层累积厚度由钻孔资料获取。

(1)地下水位埋深:主要决定污染物到达含水层的时间以及污染物在到达含水层前与周围物质接触发生各种反应的时间,深度越大,发生反应的时间越长,污染物衰减的机会就越多,同时污染物被氧化的几率越大,地下水脆弱性越低。

(2)净补给量:是污染物进入地下水的载体和动力,补给量越大,能够溶解并进入地下水的污染物就越多,地下水受污染的可能性就越大,地下水脆弱性就越高。包括降雨入渗量、灌溉回归量和河流补给量。

(3)包气带岩性:岩性颗粒越粗,入渗系数越大,地下水补给量越多,从而可能带入地下水的污染物越多,地下水脆弱性越高。由于区域地下水位下降,包气带厚度增大,为准确识别包气带对地下水脆弱性的影响,本次研究采用厚度加权法对包气带岩性进行评分。方法是,收集区内 2 800 个水文地质钻孔(图 1),采用 VB 编程逐个钻孔逐层计算,公式如下:

$$A = \frac{\sum A_i H_i}{\sum H_i} \quad (2)$$

式中:A 为岩性加权平均评分值,A_i 为计算层段内不同岩层的评分(表 2),H_i 为计算层段内各岩层厚度,计算层段为地面到地下水位部分。

(4)含水层累积厚度反映了地下水储水空间的大小,厚度越大,可以储存的地下水越大,地下水稀释能力增强,地下水脆弱性就越低;与包气带综合岩性相同,利用已收集的水文地质钻孔采用 VB 编程计算含水层累积厚度,公式为:

$$H = \sum H_i \quad (3)$$

式中:H 为含水层组内砂、卵石、砾石层累积厚度,H_i 为计算层段内各砂卵砾岩层厚度,计算层段为地下水位至第 II 含水岩组底。

(5)渗透系数:主要影响地下水流动速度,渗透系数越大,污染物的传播速度越快,地下水脆弱性越高。

2.3 权重确定

根据本研究划分的分区,采用层次分析法确定山前冲洪积平原、中部冲积湖积平原、东部冲积海积平原和古黄河冲洪积平原的权重,如表 3 所示。CR=-0.003,说明判断矩阵具有较好的一致性。权重越大,对地下水脆弱性影响越大。

3 脆弱性评价及结果分析

应用上述改进的地下水脆弱性评价指标体系,采用 2 km×2 km 正方形剖分单元(共计 34 253 个),由式(1)计算求得每个剖分单元的综合指数,然后利用 MapGIS 编绘地下水脆弱性分区图,如图 2 所示。

本研究将华北平原地下水脆弱性划分为 5 个等级,分别为脆弱性低、脆弱性较低、脆弱性中等、脆弱性较高和脆弱性高。从图 2 可以看出,华北平原地下水脆弱性以“中等脆弱性”、“较低脆弱性”和“较高脆弱性”为主,“低脆弱性”和“高脆弱性”所占比例较小。

表 2 包气带岩性评分

Table 2 Ranges and ratings for vadose zone media

岩性	粘土	粉质粘土	粉土	细粉砂	粉砂	细砂	中砂	粗砂	卵石砾石
评分	0	2.5	4	5.5	7	8	9	9.5	10

表 3 各权重分区评价指标权重
 Table 3 Weight of evaluation factors in different partitions

	埋深	包气带 综合岩性	渗透 系数	净补 给量	含水层 累积厚度
山前冲洪积平原	0.23	0.31	0.13	0.23	0.1
中部冲积湖积平原	0.28	0.34	0.1	0.21	0.07
东部冲积海积平原	0.30	0.32	0.1	0.21	0.07
古黄河冲洪积平原	0.31	0.34	0.1	0.17	0.08

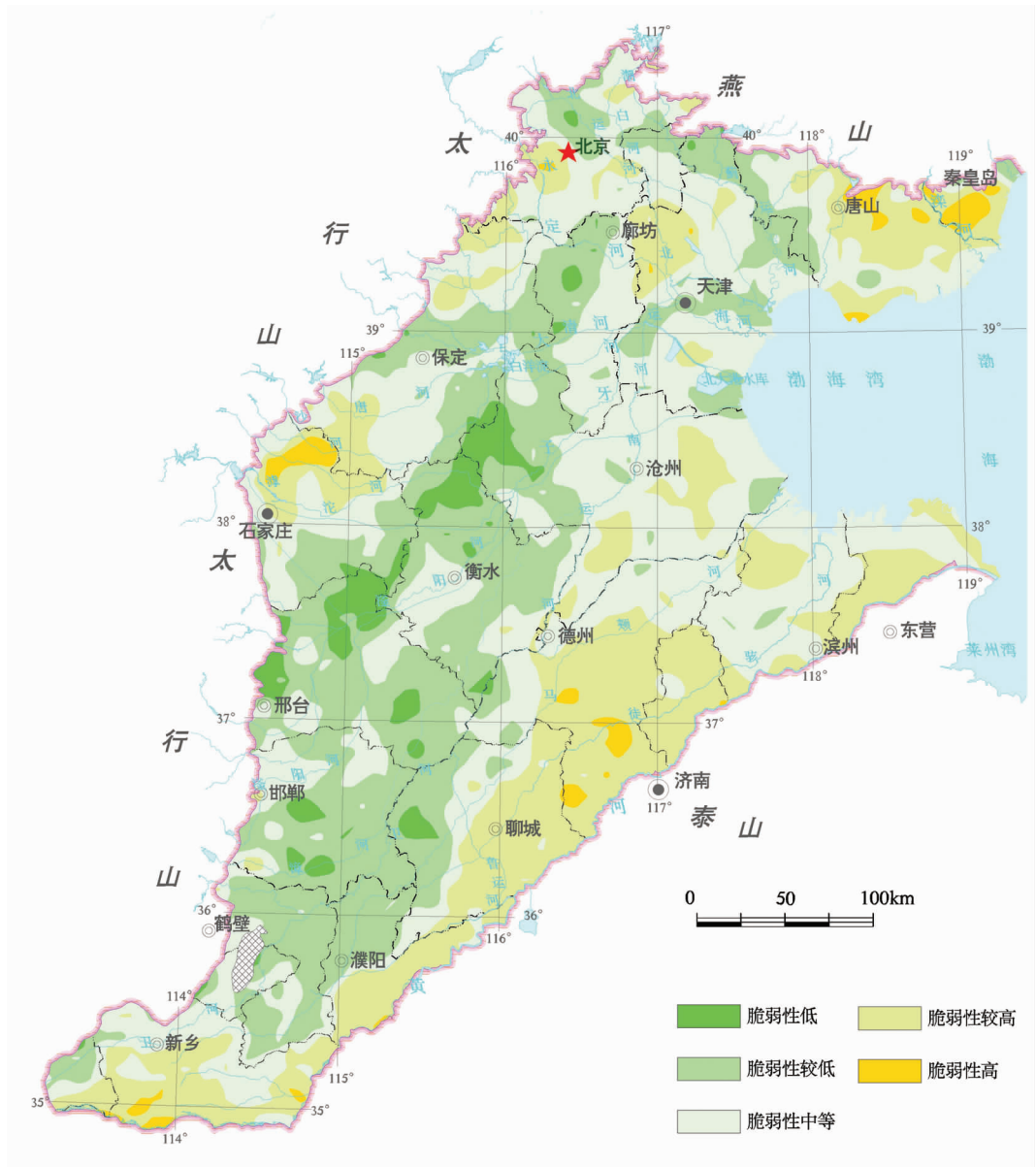


图 2 华北平原地下水脆弱性分布图
 Fig.2 Groundwater vulnerability in North China plain

在山前冲洪积平原,5 个级别脆弱性区均有分布,以中等和较低脆弱性为主,所占面积比分别为 42.68%和 32.63%。脆弱性高区和较高区面积占总面积的 21.96%,主要分布在滹沱河冲洪积扇以北。指标特征为:地下水位埋深相对较浅,为 7~30 m;包气带岩性呈现卵砾石-粗砂-中砂-细砂-细粉砂-粉砂的分布规律;含水层累积厚度多为 0~50 m。低脆弱性区面积占 2.74%,地下水位埋深大(20~50 m),包气带综合岩性为粉质粘土。

在中部冲积湖积平原,地下水脆弱性为中等、较低和低,所占面积比例分别为:41.00%、48.56%、10.44%。指标分布特征为:包气带综合岩性主要为粉土和粉质粘土;渗透系数为 5 m/d,净补给量多在 90~150 mm。总体看,中部冲积湖积平原东部地区脆弱性比西部偏高,原因是东部地下水位埋深浅(0~10 m),含水层累积厚度偏薄(0~30 m)。在地下水位埋深偏大(30~45 m)的地区为低脆弱性。

在东部冲积海积平原,地下水脆弱性为较高、中等和较低,所占面积比例分别为:23.84%、63.97%、12.19%。指标分布特征为:地下水位埋深多为 0~4 m;含水层累积厚度为 0~50 m;包气带综合岩性主要为粘土、粉土和粉质粘土,部分地区岩性为细砂;渗透系数除滦河流域较大外,其余地区为 5 m/d。在砂层累积厚度偏薄、岩性颗粒偏粗的地区分布较高脆弱性。

在古黄河冲洪积平原,5 个级别脆弱性区均有分布,以较高和中等脆弱性为主,面积比例分别为 41.17%和 33.42%。脆弱性高及较高面积占总面积的

42.98%,主要分布在现代黄河补给区,地下水位埋深为 0~7 m,净补给量均大于 150 mm。低脆弱性面积占 0.98%,指标特征是:地下水位埋深较大(15~25 m);包气带综合岩性为粉土、粉质粘土或粘土;含水层累积厚度为 60~70 m;渗透系数为 5 m/d。

4 评价结果验证

由于有机污染物毒性强,对人体危害极大,目前世界上许多国家都对水土环境的污染调查与治理投入了大量的财力^[9]。2005 年开始,中国地质调查局启动了全国地下水污染调查评价项目,区域性有机污染物调查是本次地下水污染调查的重点^[10]。检出率是评价地下水有机污染的重要指标,它与研究区水文地质条件、人类活动(污染源)及本身淋溶迁移性有关^[11]。有机组分检出项数是各有机组分检出率的叠加反映,而地下水脆弱性是根据研究区水文地质条件得到的,不考虑污染源分布及有机组分本身性质,有机组分检出项数与地下水脆弱性应该有一定的相关关系。应用“华北平原地下水污染调查评价”项目 2006—2009 年采取的 7 472 组水样测试数据,将水样点有机组分检出项数与地下水脆弱性区做统计分析如表 4,将按面积权重归一化后的百分比进行比较分析。由表可见,随着检出项数增加,分布在低、较低和中等脆弱性的水样点百分比呈渐减趋势,而分布在较高、高脆弱性的水样点百分比呈逐增趋势。检出项目≥5 时,分布在较高、高脆弱性的样点百分比之和为 77.48%,而低、较低脆弱性区的百分比之和为 6.44%。由此表明,本研究地下水脆弱性评

表 4 有机组分检出项数与脆弱性区分布统计
Table 4 Statistics of number of organic components detected and groundwater vulnerability

脆弱性级别 检出项数	低		较低		中等		较高		高	
	样数	归一后百分比/%	样数	归一后百分比/%	样数	归一后百分比/%	样数	归一后百分比/%	样数	归一后百分比/%
1	16	6.85	339	17.19	611	22.13	495	33.32	23	20.51
2	4	4.94	96	14.04	184	19.22	199	38.64	9	23.15
3	3	12.91	28	14.26	58	21.10	50	33.81	2	17.92
4	0	0	15	9.13	40	17.38	38	30.69	4	42.80
≥5	0	0	14	6.44	49	16.08	74	45.15	4	32.33
总检出项	23	6.01	492	15.21	942	20.80	856	35.14	42	22.84

价结果符合实际情况。

5 结 论

本文参照 DRASTIC 模型的思路,根据研究区实际情况,选取地下水位埋深、净补给量、包气带岩性、含水层累积厚度和渗透系数为评价指标,建立评分体系和权重体系,在 MapGIS 平台下编制了地下水脆弱性分布图。其中包气带岩性和含水层累积厚度是由 2 800 个水文地质钻孔资料,应用 VB 编程计算得出,能更准确地反映巨厚包气带和含水层对脆弱性的影响。

脆弱性评价结果表明,地下水脆弱性低的地区多分布在地下水位埋深较大的地区,也是人类活动强烈的地区,生产、生活废水的不合理排放使巨厚包气带中可能含有大量污染物,是这些区域地下水不容忽视的潜在污染源。因此,对于地下水位埋深较大的地区应提高地下水污染防治的预警,地下水位恢复得不可太快。地下水脆弱性高及较高地区分布在山前平原冲洪积扇地带、古黄河冲洪积平原的现代黄河补给区,多是地下水资源丰富、人类活动较强的地区。

将近期采集的 7 472 组地下水有机污染样品的测试结果与区域地下水脆弱性评价结果进行统计分析,发现检出项数多的水样点多趋于分布在脆弱性偏高的地区,这验证了脆弱性评价结果的客观性,也说明地下水有机污染在脆弱性偏高地区相对严重,是必须采取有效防护措施的地区。

参考文献 (References):

- [1] 张兆吉, 雒国中, 王昭, 等. 华北平原地下水资源可持续利用研究[J]. 资源科学, 2009, 31(3):355-360.
Zhang Zhaoji, Luo Guozhong, Wang Zhao, et al. Study on sustainable utilization of groundwater in North China plain [J]. Resources Science, 2009, 31 (3):355-360 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京:地质出版社, 2009:1-41,300-305.
Zhang Zhaoji, Fei Yuhong, Chen Zongyu, et al. Investigation and Evaluation on Groundwater Sustained Development in North China Plain [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2009:1-41, 300-305(in Chinese).
- [3] Antonakos A K, Lambrakis N J. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates,

- based on the drastic model,an example from NE Korinthia, Greece [J]. Journal of Hydrology, 2007, 333:288-304.
- [4] 王宏伟, 刘萍, 吴美琼. 基于地下水脆弱性评价方法的综述 [J]. 黑龙江水利科技, 2007, 35(3):43-45.
Wang Hongwei, Liu Ping, Wu Meiqiong. Review of the evaluation methods of groundwater vulnerability [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2007, 35(3):43-45(in Chinese with English abstract).
 - [5] 姜志群. 地下水污染敏感性评价中 DRASTIC 法的应用 [J]. 河海大学学报, 2001, 29(2):100-103.
Jiang Zhiquan. Evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC for Daqinghe basin [J]. Journal of Hohai University, 2001,29(2):100-103(in Chinese with English abstract).
 - [6] 贺新春, 邵东国, 陈南祥, 等. 几种评价地下水环境脆弱性方法之比较[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(3):17-24.
He Xinchun, Shao Dongguo, Chen Nanxiang, et al. Research on methods of groundwater vulnerability evaluation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22 (3):17-24(in Chinese with English abstract).
 - [7] 雷静, 张思聪. 唐山市平原区地下水脆弱性评价研究 [J]. 环境科学学报, 2003, 23(1):94-99.
Lei Jing, Zhang Sicong. Study on the groundwater vulnerability assessment in Tangshan plain area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(1):94-99(in Chinese with English abstract).
 - [8] 严明疆, 张光辉, 徐卫东. 石家庄市地下水脆弱性评价[J]. 西北地质, 2005, 38(3):105-110.
Yan Mingjiang, Zhang Guanghui, Xu Weidong. Assessment on groundwater vulnerability in Shijiazhuang[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(3):105-110(in Chinese with English abstract).
 - [9] 王昭, 石建省, 张兆吉, 等. 建议纳入地下水调查指标体系的有机污染物——基于迁移性和致病风险的分析 [J]. 中国地质, 2009, 36(5):1175-1178.
Wang Zhao, Shi Jiansheng, Zhang Zhaoji, et al. Mobility and pathogenic risks of some organic compounds in groundwater and soils[J]. Geology in China, 2009, 36(5):1175-1178(in Chinese with English abstract).
 - [10] 文冬光, 林良俊, 孙继朝, 等. 区域性地下水有机污染调查与评价方法[J]. 中国地质, 2008, 35(5):814-819.
Wen Dongguang, Lin Liangjun, Sun Jichao, et al. Approach to investigation and assessment of organic contaminants in regional groundwater [J]. Geology in China, 2008, 35 (5):814-819 (in Chinese with English abstract).
 - [11] 王昭, 石建省, 张兆吉, 等. 华北平原地下水有机物淋溶迁移性及其污染风险评价[J]. 水利学报, 2009, 40(7):830-837.
Wang Zhao, Shi Jiansheng, Zhang Zhaoji, et al. Leachability and pollution risk assessment of organic contaminants in groundwater in the North China Plain [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7):830-837(in Chinese with English abstract).

Groundwater vulnerability assessment of North China Plain

MENG Su-hua, FEI Yu-hong, ZHANG Zhao-ji, QIAN Yong, LI Ya-song

(*Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050803, Hebei, China*)

Abstract: In the light of the characteristics of North China plain such as vast area, complex landform and hydrogeological conditions, high degree of groundwater exploitation, remarkable differences in buried depth of groundwater, aerated zone and aquifer lithology and on the basis of large quantities of drilling and groundwater level monitoring data, the authors redefined the influence of changes of aerated zone lithology and groundwater level depth on the groundwater vulnerability assessment, and established the DRITC evaluating indicator system suitable for North China plain and applied it to groundwater vulnerability evaluation. According to the hydrogeological conditions, the North China plain was divided into 4 appraisal districts and 34253 units of 2×2 km². Groundwater level depth, net recharge, aerated zone lithology, aquifer accumulated thickness and hydraulic conductivity were taken as evaluation indexes, and then groundwater vulnerability composite index and distribution map were obtained. The results indicate that the groundwater vulnerabilities of piedmont alluvial-proluvial fan and Yellow River affected zone in old Yellow River alluvial-proluvial plain are high or very high. The test results of 7472 groups of groundwater organic pollution samples show that detected number of components is more in high or very high vulnerability areas and less in other areas, which validates the objectivity of the evaluation results.

Key words: North China plain; groundwater vulnerability; indexes system; improvement; objectivity

About the first author: MENG Su-hua, female, born in 1987, master, mainly engages in the study of water resources and environment; E-mail: suhuameng@163.com.

About the corresponding author: FEI Yu-hong, female, born in 1960, senior researcher, mainly engages in the study of hydrology and water resources.