

基于 COP 方法的肥城盆地岩溶水脆弱性评价

刘海娇^{1,2}, 范明元^{1,2}, 张保祥^{1,2}, 仕玉治^{1,2}, 杨小凤^{1,2}, 张吉圣³, 刘冬梅³

(1. 山东省水利科学研究院, 济南 250014; 2. 山东省水资源与水环境重点实验室, 济南 250014; 3. 肥城市水资源办公室, 山东 肥城 271600)

摘要: 作为肥城盆地内最主要的供水水源和唯一的饮用水水源, 岩溶水有力地支撑了区内经济社会的快速发展。在对研究区地形地貌、水文地质情况等深入分析的基础上, 采用 COP 方法建立了岩溶水脆弱性评价模型。评价结果表明, 奥陶系、寒武系石灰岩出露地区以及康王河上游、潮泉水库上游段区域, 岩溶水的脆弱性等级较高, 其他地区较低。评价结果可为研究区岩溶水保护和土地利用规划提供参考。

关键词: 岩溶水; COP 方法; 脆弱性评价; 肥城盆地

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0538-05

Vulnerability assessment of karst water in Feicheng Basin based on COP method

LIU Hai jiao^{1,2}, FAN Ming yuan^{1,2}, ZHANG Bao xiang^{1,2}, SHI Yu zhi^{1,2},

YANG Xiao feng^{1,2}, ZHANG Ji sheng³, LIU Dong mei³

(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Ji nan 250014, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment, Ji nan 250014, China;

3. Water Resources Department of Feicheng City, Feicheng 271600, China)

Abstract: As the main water supply source and the only drinking water source in the Feicheng Basin, karst groundwater effectively supports the rapid development of economy and society. Based on the analysis of topography, geomorphology, and hydrogeological conditions in the study area, COP method was used to develop the vulnerability assessment model of karst groundwater. Results showed that the vulnerability degree is high in the bare Ordovician and Cambrian limestone region, the upstream of Kangwang River, and Chaoquanhe Reservoir. The evaluation results can provide references for the karst groundwater protection and land use planning in the study area.

Key words: Karst groundwater; COP method; vulnerability assessment; Feicheng Basin

地下水是人类赖以生存的水资源的重要组成部分,是构成并影响生态环境的重要因素,然而随着社会经济的加速发展和人口的不断膨胀,特别是污染物排放增加等,地下水污染状况日益严重。岩溶区由于独特的地质环境,地下水更容易受到污染,因此开展岩溶区的地下水脆弱性研究,对于岩溶水的保护和可持续利用具有重要意义。

国内外现有的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^[2],不同方法各有侧重点。虽然 DRASTIC 模型是目前国内外应用最为广泛地下水脆弱性评价模型,但是欧洲模型^[3]更适合岩溶地区。本文以山东肥城盆地为研究区,基于地理信息系统

(MAPGIS)和欧洲模型中的 COP 方法,对肥城盆地岩溶水脆弱性进行研究,划出盆地内的污染敏感带,为解决肥城盆地岩溶水开发利用和环境脆弱性等问题提供参考。

1 研究区概况

肥城盆地位于鲁中南山区、泰山西麓,是以肥城市北部平原及其周边山体为主体形成的独立地质构造单元,其北部、东南部、西部均以山体分水岭为边界,南部以康汇河入大汶河为出口,区域面积 1 260 km²。考虑到地质构造对岩溶水力联系的影响,本研究区范围将东南部边界适当扩大至山体变质岩与石灰岩分界线,扩大之后的区域面积达到

收稿日期: 2014-06-05 修回日期: 2015-04-02 网络出版时间: 2015-05-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150514.0849.009.html>

基金项目: 水利部公益性行业专项经费项目(201201114); 水利部“948”计划项目(201227); 科技部国际合作与交流项目(2007DFB70200); 山东省级水利科研及技术推广项目(SDSLKY201318; SDSLKY201204)

作者简介: 刘海娇(1982-),女,山东潍坊人,工程师,主要从事水资源及水环境方面的研究。E-mail: liuhaijiao2005@163.com

通讯作者: 张保祥(1966-),男,山东寿光人,研究员,博士,主要从事地下水资源开发与水环境保护研究。E-mail: baoliang.zh@126.com

1 408 8 km²。

研究区四面环山,山体为花岗岩片麻岩和石灰岩组成的低山丘陵,海拔在 250~ 660 m 之间,整体上东北高、西南低;中部分布着以龙山为代表的奥陶系灰岩丘陵,海拔在 60~ 200 m 间不等。研究区属北温带大陆性季风气候区,多年平均降雨 654.6 mm(1956 年- 2000 年),降水较为丰富但年际变化大、时空分布不均。区内各河流属黄河流域大汶河水系,主要有康王河和汇河。康王河自东向西横卧盆地中间,汇河自西部贯穿南北,两河在石横镇交汇形成康汇河后出境并注入大汶河。

肥城盆地属华北型沉降构造,区内变质岩基底上沉积了浅海相、海陆交互及陆相地层,有前震旦系泰山群、寒武系、奥陶系、石炭系、二迭系、第四系等,研究区地质图见图 1。肥城盆地是一个完整的水文地质单元,具有独立的补给与排泄系统。含水岩组主要有:第四系孔隙水含水岩组,主要分布于盆地底部,靠大气降水和北部东北部山区的风化裂隙水补给;石炭系灰岩及岩溶裂隙水含水岩组,石炭系有 5-6 层灰岩,其中以第四层、第五层较厚而稳定,由于裂隙影响,奥陶系灰岩裂隙岩溶水与第四、三灰岩裂隙岩溶水发生了水力联系;寒武系和奥陶系岩溶裂隙水含水岩组,可分为分布在盆地东部、南部、西北部、西部的中低山、丘陵的裸露半裸露的寒武、奥陶系岩溶裂隙亚组和隐伏在第四系之下的寒武、奥陶系岩溶裂隙亚组,前者为补给区,后者为径流区,隐伏的寒武、奥陶系灰岩与第四系地层被黏土层相隔,没有直接水力联系;前震旦系泰山群花岗岩片麻岩裂隙水含水岩组,在肥城盆地东北部及北部出露,含水层主要是风化壳及构造裂隙。

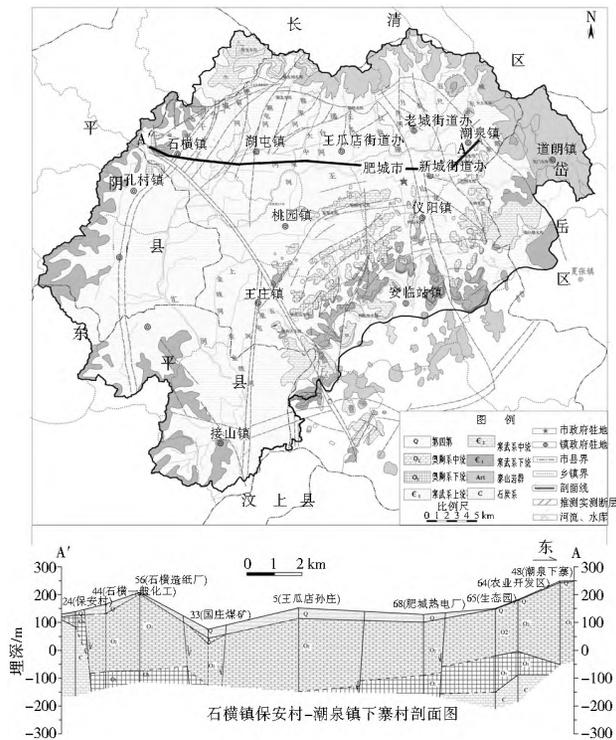


图 1 研究区地质图

Fig.1 The geological map of the study area

目前,岩溶水是肥城盆地范围内最主要的供水水源和唯一的饮用水水源。然而,随着人类活动的加剧,特别是岩溶水持续开采、污染物排放增加等,使岩溶水面临诸多威胁,主

要表现在两个方面。

(1) 水位呈逐年下降趋势,局部形成了地下漏斗区。例如,新城区自来水公司水源井所在区域岩溶水位在 1983 年时为 58 m,到 2011 年已降为 40 m 左右,下降了 18 m;2003 年水位最低时仅为 20 m 左右,此后虽有所回升,但不能改变总体下降的趋势。位于盆地的中下游王庄镇白屯村西的监测井水位自 20 世纪 80 年代初持续下降至 2003 年达到最低点,后得到回升至 2012 年稳定在 38 m 左右,较 1980 年的 58 m 仍下降了 20 m,表明盆地上游岩溶水开采已引起盆地整体水位的下降。

(2) 直接补给区内点源和面源污染增加,岩溶水污染风险不断上升。例如,位于擒马岭的一处自备井自 2000 年以来,Cl⁻ 和 NO₃⁻ 浓度值都呈不断上升趋势,其中 Cl⁻ 浓度值由 2000 年 12.8 mg/L 增长到 2011 年的 21.3 mg/L,而 NO₃⁻ 浓度值同期也由 3.99 mg/L 增长到 8.87 mg/L。肥城市自来水公司 7 号井 SO₄²⁻ 和 TDS(溶解性总固体)浓度也呈上升趋势,从 1999 年至 2008 年,SO₄²⁻ 浓度值由 42.3 mg/L 增长至 91.3 mg/L,增长了 115%;TDS 浓度值由 280 mg/L 增长至 502 mg/L,增长了 79%。

2 岩溶水脆弱性评价方法及指标

2.1 评价方法

本文在对研究区水文地质资料收集和野外调查的基础上,基于地理信息系统(MAPGIS),采用欧洲模型中的 COP 方法进行岩溶水脆弱性评价。欧洲模型基于起源-路径-目标模型^[13],应用于地下水资源与来源的保护。其中,“起源”用来描述地下水潜在污染物释放的位置,“路径”是污染源从污染释放点流到所要保护的目标的途径,“目标”是被保护的地下水^[14]。

COP 评价方法中,C 因子评价区域径流条件,O 因子评价覆盖层的保护能力,P 因子评价降水情况。每个因子又考虑很多亚因子,并为其赋值,利用 GIS 技术进行空间分区和叠加分析,最终得到脆弱性指数,做出岩溶水脆弱性分布图。

2.2 评价指标

(1) O 因子。

O 因子反映包气带的保护能力。欧洲模型^[15]建议将包气带细分为表层土、次表层土、非卡斯特岩石和非饱和带的石灰岩 4 层^[16]。本文根据研究区地层的特征及钻孔资料将包气带概化为两层:土壤层和岩层。O 因子相关评价要素根据文献^[17]和研究区实际情况确定。

O 因子保护能力的计算公式为:

$$Layr\ index = \sum(Ly \times m) \quad (1)$$

$$OL = Layr\ index \times Cn \quad (2)$$

$$O = Os + OL \quad (3)$$

式中:m 为各个岩层的厚度;Ly 为岩性和裂隙赋值量化值;Cn 为额外保护力量化值;Layer index 为岩层的保护能力指数;Os 为土壤层的保护能力,OL 为岩层的保护能力。

Os 的取值由土壤层的质地和厚度决定。研究区土壤质地大部分为壤土,其余为砂土^[18]。本研究中以第四系的厚度代表土壤层厚度,本文将土壤层厚度分为大于 1 m、0.5~

1 m、0.2~0.5 m、小于 0.2 m 四个等级,黏土、粉土对应于不同厚度的土壤层保护能力量化值分别为 5、3、1、0,壤土、砂土对应于不同厚度的土壤层保护能力量化值分别为 5、2、0、0。

OL 通过岩性和裂隙、各层厚度和含水层性质进行量化。欧洲模型将包气带岩性分为 13 类,本文根据研究区地质情况,选取分布最多的 5 种岩性进行 L_y 评价:灰岩由于容易被水侵蚀因此认为其保护能力最弱, L_y 值为 1;裂隙发育的碳酸盐岩, L_y 值 3;有裂隙的变质泥岩、火成岩, L_y 值 400;粉砂岩 L_y 值 1 200;黏土岩的保护能力相对较高, L_y 值 1 500。

各岩层的岩性赋值(L_y)与其厚度的乘积即为包气带岩层的保护能力指数(Layer index),将包气带岩层保护能力指数分为 5 个范围^[17],包气带岩层保护能力指数与各岩层厚度有关,岩层越厚则保护能力越强,反之越弱^[16]。

根据含水层是否承压,综合考虑岩溶水是否受到额外保护(C_n),将含水层分成 3 类^[17],无隔水顶板保护的岩溶水岩层对其的保护能力最弱,有保护顶板的岩溶水岩层对其的保护能力最强。最后得出包气带岩层的保护能力(OL)。

按照公式(3)评价的 O 因子保护能力,分数越高覆盖层保护能力越高;反之,覆盖层保护能力越低。O 因子保护能力量化值见表 1^[17]。

表 1 O 因子保护能力量化

Tab. 1 Quantitative level of protective capability of O factor

O score	保护能力
1	很低
2	低
(2~ 4]	中
(4~ 8]	高
(8~ 15]	极端

(2) C 因子(径流条件)。

C 因子是 O 因子的校正系数,代表发生集中入渗的机率和该区域的覆盖层保护能力的降低的情况^[9]。C 因子根据径流条件分为消水洞流域范围内和其他区域两种情况。本文参考文献[13]~[17]并根据研究区实际确定:第一种情况考虑渗漏河道的距离(d_s)和坡度-植被情况(S_v) 2 个指标,计算式为 $C = d_s \times S_v$;第二种情况考虑地表岩溶特征和坡度-植被情况 2 个指标,计算式为 $C = sf \times S_v$ 。

距离渗漏河道越近, d_s 指标赋值越小,反映 C 因子保护能力越低。本文分三个等级赋值:距离渗漏河道小于等于 10 m 时, d_s 值为 0;距离渗漏河道距离 10~100 m 时, d_s 值为 0.5;距离渗漏河道距离大于等于 100 m 时, d_s 值为 0.75。盆地内渗漏河道为康王河上游(即石坞水库到龙山水库下游段)和潮泉河水库上游段,在流域范围内按距离分区。

植被有无及其密度都会影响到入渗和径流过程,而坡度对径流的产生有积极的影响,因此本文采用 4 种坡度尺度和植被^[17]组合分渗漏河道汇水区(S_{v1})和其它区域来评价植被-坡度情况(S_{v2})。

根据岩石的裸露以及岩溶发育程度对地表岩溶形态特征进行赋值(sf)^[12],一般裸露的碳酸盐岩分布区域赋值较低,不透水的非岩溶化区域赋值较高。

C 因子的取值范围在 0~1 之间,并将保护能力退化情

况划分为 5 类(表 2)^[17],其中保护能力退化情况“极端”,表示由于落水洞的出现导致覆盖层保护能力下降;等级为“很低”表示距离地下河或落水洞很远或只发生地表径流。

表 2 C score 量化等级

Tab. 2 Quantitative level of C score

C score	保护能力退化
[0~ 0.2]	极端
(0.2~ 0.4]	高
(0.4~ 0.6]	中
(0.6~ 0.8]	低
(0.8~ 1]	很低

(3) P 因子。

P 因子反映的是降水情况对于岩溶水脆弱性的影响。本文根据研究区实际情况,选择极端降雨事件次数(r_d)和达到平均降水量天数(s_e)两个参数反映降雨对脆弱性的影响^[17]。极端降雨事件是 24 h 降雨量在 80 mm 以上的暴雨和大暴雨,平均降雨量是 24 h 降雨量在 20~80 mm^[9]。

P 因子计算公式为 $Pscore = r_d \times s_e$,其结果可以量化为五个等级(表 3)^[17]。保护能力退化情况“极端”,表示污染物通过降水对岩溶水的产生的影响较大;等级为“很低”,表示污染物通过降水对岩溶水的产生的影响较小。

表 3 P score 等级量化表

Tab. 3 Quantitative level of P score

P score	保护能力退化
[0.36~ 0.5]	极端
(0.5~ 0.6]	高
(0.6~ 0.7]	中
(0.7~ 0.8]	低
(0.8~ 1]	很低

(4) 岩溶水脆弱性评价。

在上述评价的基础上,岩溶水脆弱性指标值可以通过叠加 C、O、P 三个因子得到, $Resource\ score = O\ score \times C\ score \times P\ score$,按照欧洲法将岩溶水脆弱情况划分为 5 个等级(表 4)^[17]。

表 4 脆弱性等级划分

Tab. 4 Quantitative level of resource vulnerability

Resource score	Resource index	脆弱性等级
[0~ 0.5]	1	极端
(0.5~ 1]	2	高
(1~ 2]	3	中
(2~ 4]	4	低
(4~ 15]	5	很低

3 评价结果及分析

3.1 脆弱性指标值计算

(1) O 因子评价结果。

按照式(1)~式(3)评价研究区 O 因子的保护能力,根据表 1 对保护能力进行分级,见图 2。

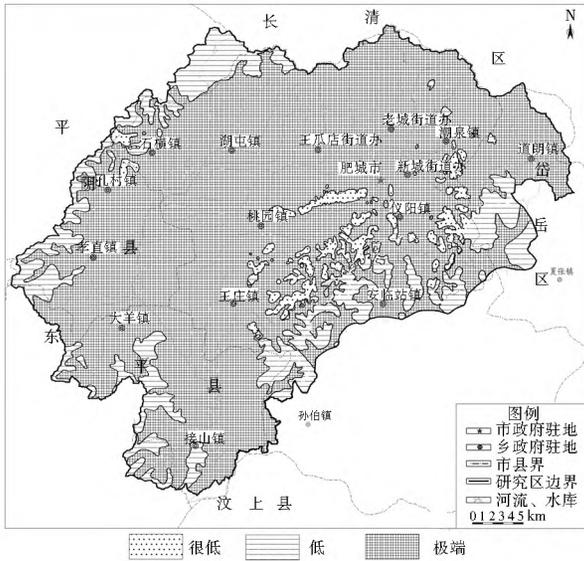


图2 O因子保护能力分级

Fig. 2 Classification map of protective capability of O factor

从图2可以看出,盆地东南部和西北部石灰岩山区覆盖层保护能力较低,其他地方覆盖层保护能力很高。保护能力较低的地区为碳酸盐岩出露,而被第四系土层覆盖的区域覆盖层保护能力很高。

(2) C因子评价结果。

根据C因子计算公式,得到研究区C因子保护能力退化评价图(图3)。从径流角度看,全区域的岩溶水脆弱性均为低等级以上,在有渗漏河道和奥陶系灰岩出露的区域脆弱性呈最大化。



图3 C因子保护能力退化评价

Fig. 3 Degeneration assessment map of protective capability of C factor

(3) P因子评价结果。

通过对研究区各雨量站控制区域的研究,研究区内P因子没有太大的差异,20~80 mm/d降雨量每年平均天数为7.1~9.2, >80 mm/d降雨量每年平均天数为0.5~0.9,故 $r_d = 1, s_c = 1, P\ score = 1$,因此从降水的影响分析,研究区岩溶水的脆弱性很低。

(4) 岩溶水脆弱性(COP)计算结果。

通过MAPGIS叠加C因子图、O因子图和P因子图,形成研究区岩溶水脆弱性评价图,见图4。

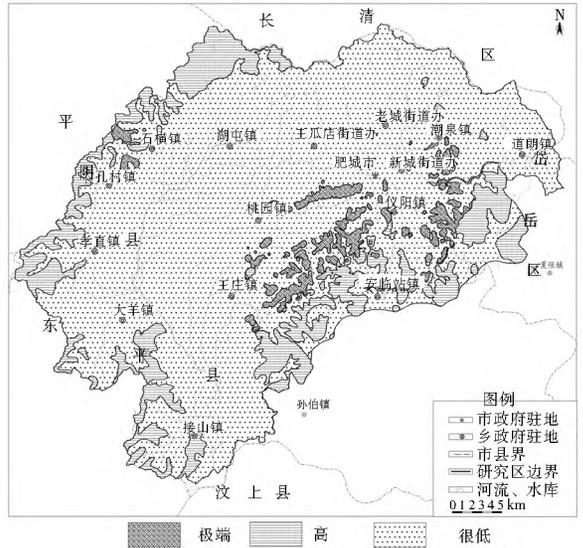


图4 研究区岩溶水脆弱性评价结果

Fig. 4 Vulnerability assessment map of karst groundwater

研究区岩溶水脆弱性不同分级的统计结果见5。

表5 岩溶水脆弱性不同分级的统计结果

Tab. 5 Statistical results of karst groundwater vulnerability

脆弱性	分区面积/km ²	占总面积比例(%)
极端	61.8	4.4
高	221.1	15.7
中	0	0
低	0	0
很低	1 126.1	79.9

3.2 结果分析

(1) 研究区大部分区域岩溶水脆弱性级别为“很低”,占总面积的79.9%;脆弱性级别为“极端”和“高”的地区分别占总面积的4.4%和15.7%。

(2) 岩溶水脆弱性级别高的区域主要是奥陶系和寒武系石灰岩出露地区,岩溶裂隙比较发育,也是盆地岩溶水的直接补给区。另外,在康王河上游(石坞水库到龙山水库下游段)和潮泉河水库上游段,由于河床渗漏严重,地表水及近河地带污染物容易进入地下,因此岩溶水的脆弱性级别也很高。

(3) 脆弱性“很低”的区域都有较厚的第四系土层覆盖,且隐伏的奥陶系灰岩与第四系地层之间被一层稳定的、厚度较大的黏土层隔离,因而对隐伏的灰岩起到很强的保护作用。

4 结语

本文从起源-路径-目标着手,考虑研究区的径流条件、保护层的保护能力、降水情况等,采用欧洲模型中的COP方法建立岩溶水脆弱性评价模型,对研究区的岩溶水脆弱性进行了评价。结果显示,研究区岩溶水脆弱性级别高的区域主要分布奥陶系、寒武系灰岩出露地区以及康王河上游和潮泉河水库上游段区域。对于岩溶水脆弱性等级极端和高的地区,应加强保护和管理,划定水源保护区,最大程度的减少对岩溶水的污染,实现研究区岩溶水可持续利用和生态文明的进一步发展。

参考文献(References):

- [1] Doerflinger N J, Eannin P Y, Zwahlen F. Water vulnerability assessment in karst environments a new method of defining protection areas using a multi attribute approach and GIS tools [J]. *Environmental Geology*, 1999, 39(2): 165-176.
- [2] 张保祥. 黄水河流域地下水脆弱性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. (in Chinese))
- [3] J M Vas, B Andreo, M J Perles, et al. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate(karstic) aquifers: the COP method Application in two pilot sites in Southern Spain[J]. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14: 912-925.
- [4] 孙才志, 潘俊. 地下水脆弱性的概念、评价方法与研究前景[J]. *水科学进展*, 1999, 10(4): 444-449. (SUN Cai zhi, PAN Jun. Concept and assessment of groundwater vulnerability and its future prospect[J]. *Advances in Water Science*, 1999, 10(4): 444-449. (in Chinese))
- [5] 王国利, 周惠成, 杨庆. 基于 DRASTIC 的地下水易污染性多目标模糊模式识别模型[J]. *水科学进展*, 2000, 11(2): 174-179. (WANG Guoli, ZHOU Hui cheng, YANG Qing. Study on multi objective fuzzy pattern recognition model of groundwater vulnerability based on DRASTIC [J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(2): 174-179. (in Chinese))
- [6] 姜志群, 朱元牲. 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, ZHU Yuan sheng. Evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC for Daqinghe Basin[J]. *Journal of Hohai University*, 2001, 29(2): 100-103. (in Chinese))
- [7] 李剑颖. 官厅水库流域水资源脆弱性评价研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2007. (LI Jianying. Study on vulnerability assessment of water resources of Guanting Reservoir Basin[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2007.)
- [8] 张昕, 蒋晓东, 张龙. 地下水脆弱性评价方法与研究进展[J]. *地质与资源*, 2010, 19(3): 253-258. (ZHANG Xing, JIANG Xiaodong, ZHANG Long. Methods and research progress of groundwater vulnerability assessment [J]. *Geology and Resources*, 2010, 19(3): 253-258. (in Chinese))
- [9] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价[J]. *水土保持通报*, 2002, 22(2): 41-44. (LIU Lur liu. Concept and quantitative assessment of vulnerability of water resource [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(2): 41-44. (in Chinese))
- [10] 高赞东. 基于 GIS 的济南岩溶泉域地下水含水层脆弱性评价[D]. 北京: 中国地质大学, 2007. (GAO Zan dong. GIS-based vulnerability assessment for Jinan karst spring basin groundwater aquifer [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007. (in Chinese))
- [11] 刘海娇, 仕玉治, 范明元, 等. 基于 GIS 的黄河三角洲水资源脆弱性评价[J]. *水资源保护*, 2012, 28(1): 34-37. (LIU Hai jiao, SHI Yuzhi, FAN Ming yuan, et al. Water resources vulnerability assessment in Yellow River Delta based on GIS [J]. *Water Resources Protection*, 2012, 28(1): 34-37. (in Chinese))
- [12] 张强. 岩溶区地下水脆弱性风险性评价以重庆市青木关岩溶槽谷为例[D]. 重庆: 西南大学, 2009. (ZHANG Qiang. Vulnerability and contamination risk assessment of karst groundwater Qing Muguan karst valley of Chongqing as an example [D]. Chongqing: Southwest University, 2009. (in Chinese))
- [13] Nico Goldscheider. Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany[J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, 13(4): 555-564.
- [14] 赵玉国. 基于 GIS 的岩溶地下水脆弱性评价 - 以重庆市老龙洞地下河流域为例[D]. 重庆: 西南大学, 2011. (ZHAO Yugu. Vulnerability assessment of karst groundwater base on GIS A case study of Laolongdong underground river basin, Chongqing [D]. Chongqing: Southwest University, 2011. (in Chinese))
- [15] zwahlen F. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate(Karst) Aquifers[M]. *European Approach COST Action 620, Final Report*, 2003: 163-171.
- [16] 邢立亭, 吕华, 高赞东, 等. 岩溶含水层脆弱性评价的 COP 法及其应用[J]. *有色金属*, 2009, 61(3): 139-142. (XING Liting, LV Hua, GAO Zan dong, et al. Evaluation of groundwater vulnerability in karst areas using COP method [J]. *Nonferrous Metals*, 2009, 61(3): 139-142. (in Chinese))
- [17] Nata a Ravbar, Nico Goldscheider. Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia [J]. *Acta carsologica*, 2007, 36(3): 397-411.
- [18] 山东省土壤肥料工作站. 山东土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994. (Soil and fertilizer station of Shandong province. Soil of Shandong Province [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1994. (in Chinese))
- [13] 李新, 陈国栋, 卢玲. 空间插值方法比较[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3): 260-265 (LI Xin, CHEN Guodong, LU Ling. Comparison of spatial interpolation methods [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(3): 260-265 (in Chinese))
- [14] 王贵作, 任立良, 王斌. 基于栅格的分布式流域水文模型的构建与应用[J]. *水电能源科学*, 2008, 26(6): 17-20 (WANG Guizuo, REN Liliang, WANG Bin. Grid based distributed watershed hydrological modelling and its application in cold and arid regions [J]. *Water Resources and Power*, 2008, 26(6): 17-20 (in Chinese))
- [15] 左其亭, 王中根. 现代水文学[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 2-3 (ZU O Qiting, WANG Zhong gen. *Modern hydrology* [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2002: 2-3 (in Chinese))
- [16] ZHANG Sheng tang, Storm water utilization as an environmental friendly method to alleviate urban water resources crisis: Taking Qingdao as an example, *IEEE*, 2011, 1722-1725.

(上接第 533 页)