

武汉市第四系含水层地下水有机污染敏感性研究

王焰新¹, 李义连¹, 付素蓉², 蔡鹤生¹, Broder Merkel³, Dana Ihm³

(1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 深圳市勘察测绘院, 广东深圳 518028;

3. Department of Geology, Technical University Bergakademie Freiberg, 09599 Freiberg, Germany)

摘要: 在详细调查武汉市水文地质条件和地下水污染现状的基础上, 获得了高精度的武汉市水环境中微量有机污染物的组成数据。所检测出的有机组分达 30 余种, 以苯及相关苯系物为主, 污染程度较高的地下水主要分布在人口密集区和工业、商业区。应用改进的 *DRASTIC* 模型——地下水污染敏感性评价模型, 在 GIS 平台上, 编制了武汉市区地下水污染敏感性分区图。根据其评价结果, 建议集中对那些敏感性相对较高的区域采取有效的环保措施, 开发利用时应作出风险评价。

关键词: 地下水; 污染; 环境; 敏感性; GIS。

中图分类号: X143; P641

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)05-0616-05

作者简介: 王焰新(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 1984 年本科毕业于南京大学地质系, 1990 年博士研究生毕业于中国地质大学, 主要从事水文地质和环境工程教学和研究工作。

E-mail: yx.wang@cug.edu.cn

地下水污染敏感性分析及其制图是目前及将来一段时期国际水文地质和环境科学研究的热点和前沿课题, 是地下水污染防治的基础。因此各国学者都在积极探索地下水污染敏感性分析与制图的有效方法, 欧美发达国家在地下水污染敏感性分析与制图领域的研究起步较早, GIS 技术已开始用于地下水污染敏感性分区^[1~7]。中国在此领域的研究刚刚起步, 缺乏系统深入的工作。已有监测资料表明, 中国大多数城市的地下水已受到不同程度的污染, 但污染的形成与分布规律还不十分清楚。中国水文地质条件有其地域特色, 有别于国外的水文地质条件, 照搬国外的评价指标是不行的。但中国目前还没有一套适合中国城市水文地质条件的地下水污染敏感性分级评判指标体系, 有关地下水中有有机污染物的监测资料很少, GIS 技术也还未在地下水污染敏感性分区方面得到广泛应用。

武汉市水资源十分丰富, 但在传统的经济增长模式下, 水资源保护未得到足够重视, 城市污水处理设施的建设滞后于城市发展。武汉市工矿企业众多,

城镇人口密集, 工业废水和生活废水排放量大, 随着经济建设和乡镇企业的发展, 废水排放量日趋增大, 有毒有害物质成分多。工业废水主要来源于化工、造纸、纺织、机械加工、冶炼等行业。主要污染物有 COD、BOD、挥发酚、氰、三氮和 Pb、Cr、Hg 等。工业废水排放处理率达 70%~80%, 达到排放标准, 采用一级、二级处理方式。由于排水设施不够, 区内废水多排向河流(即长江、汉江、府河、滢水河等)及湖泊(东西湖、沙湖、东湖等), 废水排放对地表水体和地下水造成了不同程度的污染。同时, 污水灌溉和农药施用对土壤和地下水有一定的影响。随着城市的快速发展, 科学保护、合理开发利用地下水资源将越来越重要。

本次研究在详细调查武汉市水文地质条件和地下水污染现状的基础上, 获得了一套高精度的武汉市水环境中微量有机污染物的组成数据。并在 GIS 平台上, 运用我们提出的 *DRAMIC* 指标, 编制了武汉市区地下水污染敏感性分区图。

1. 水样采集与分析方法

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2000 年 4 月采集第四纪含水层地下水样 32

收稿日期: 2002-07-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 49832005); 教育部

优秀青年教师教学科研奖励计划; 德国 DFG、DAAD 基金; 武汉市科技攻关项目。

件,2000年9月重复采集第四纪含水层地下水样23件。取样时,现场测试pH值、水温、电导率和 HCO_3^- 质量浓度,原水样用0.45 μm 滤纸过滤后供离子色谱测定水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 质量浓度,加1:1 HNO_3 供AAS和ICP-MS测定水中金属组分质量浓度。为了测定水中微量有机污染物,使用包括WS100水管和干燥器的Bruker Daltonik GmbH吹扫捕集系统,吹扫水样体积为 (100 ± 0.2) mL,在3.5 min的吹扫捕集循环中将释放的有机物吸附至Tenax管中。Tenax管使用前需加热2~3次,然后用锡箔纸包裹。Tenax管使用后又用锡箔纸包裹。有机污染物的分析使用Bruker Daltonik GC-MS。

2 地下水有机污染现状及成因

本次研究涉及的有机物主要针对挥发性的有机物,所检测出的有机组分达30余种,其中以苯及其相关苯系物为主。众所周知,苯和其他芳香烃的卤代物、其他取代物在工业上具有广泛用途。这些化合物的毒性很大,会对环境和人体产生严重的影响。

在地下水中苯的质量浓度检出限变化于0.21~13 $\mu\text{g/L}$ 之间,平均值为3.92 $\mu\text{g/L}$ 。其中武昌区均较低,在检出限以下;汉口区变化于0.21~13 $\mu\text{g/L}$ 之间;汉阳区变化于0.21~8.5 $\mu\text{g/L}$ 间;东西湖区变化于4.2 $\mu\text{g/L}$ 左右。

乙苯与苯非常类似,其质量浓度检出限变化于0.14~19 $\mu\text{g/L}$ 之间,平均值为9.0 $\mu\text{g/L}$ 。除武昌区较低外,汉口区主要以13 $\mu\text{g/L}$ 为主,汉阳区以13~19 $\mu\text{g/L}$ 为主,东西湖区为6.5~9.5 $\mu\text{g/L}$ 。汉口区、汉江区地下水污染程度明显高于其他区域。

甲苯的质量浓度变化于7.6~17 $\mu\text{g/L}$ 之间,平均13.08 $\mu\text{g/L}$ 。其中武昌区主要质量浓度为9.7 $\mu\text{g/L}$ 左右,汉口区主要为14~17 $\mu\text{g/L}$,汉阳区为15~16 $\mu\text{g/L}$ 左右,东西湖区为7.6~7.9 $\mu\text{g/L}$,反映出甲苯在汉口区、汉阳区的污染程度最高。但地下水总体水平超过了5 $\mu\text{g/L}$ 。

二甲苯包括间二甲苯、邻二甲苯、对二甲苯。由于测试分离问题,仅对间二甲苯和邻二甲苯进行讨论。间二甲苯检出限变化于0.29~25 $\mu\text{g/L}$,平均15.75 $\mu\text{g/L}$,其中武昌区主要为17 $\mu\text{g/L}$,汉口区主要为12~25 $\mu\text{g/L}$,汉阳区为12~24 $\mu\text{g/L}$,东西湖区为12 $\mu\text{g/L}$ 。邻二甲苯与间二甲苯十分相似,其变化较大,质量浓度位于0.16~20 $\mu\text{g/L}$ 之间,除武昌

区能与间二甲苯分离测试外,汉口区、汉阳区以20 $\mu\text{g/L}$ 为主,东西湖区为10 $\mu\text{g/L}$ 。

此次检出的三甲苯和四甲苯有:1,2,3-三甲苯、1,2,4-三甲苯、1,3,5-三甲苯、1,2,3,5-四甲苯、1,2,3,4-四甲苯、1,2,4,5-四甲苯。三甲苯、四甲苯在大多数水样中均低于检出限。但个别水样却有异常高质量浓度。如汉口区三甲苯个别达29 $\mu\text{g/L}$,四甲苯最高达866 $\mu\text{g/L}$,而汉阳区和东西湖区则要低得多,如三甲苯在汉阳区最高达20 $\mu\text{g/L}$,在东西湖区达11 $\mu\text{g/L}$,四甲苯在汉阳区最高达42 $\mu\text{g/L}$,在东西湖区达36 $\mu\text{g/L}$ 。

三氯乙烯主要在汉口区地下水中出现,大部分高于9.5 $\mu\text{g/L}$,其他地区均低。四氯乙烯总体均较低,但在汉口区、汉阳区仍有高质量浓度值。二氯丙醛、溴氯甲烷、四氯乙烷在大多数地下水样中质量浓度均接近或低于检出限,但也有变化,如1,2-二氯丙醛在汉口一水样中高达172 $\mu\text{g/L}$,1,1,2,2-四氯乙烷在汉口及东西湖各有一水样高达97 $\mu\text{g/L}$ 。总体看来这些化合物的质量浓度均较低。苯乙烯在地下水样中检出限变化于0.33~25 $\mu\text{g/L}$ 之间,平均值为17.53 $\mu\text{g/L}$,高于地表水体中的质量浓度。在武昌区地下水中质量浓度主要为16 $\mu\text{g/L}$,汉口区地下水中质量浓度主要为22~25 $\mu\text{g/L}$,汉阳区地下水中质量浓度主要为17~23 $\mu\text{g/L}$,东西湖区地下水中质量浓度主要为11~12 $\mu\text{g/L}$ 。苯乙炔质量浓度变化于0.85~25 $\mu\text{g/L}$ 之间,平均为9.5 $\mu\text{g/L}$ 。苯乙炔在汉口区与汉阳区地下水中明显较高,且普遍;而苯乙炔虽与苯乙烯变化总体相似,但在汉口区与汉阳区均有一部分水样明显较低。苯甲醛在地下水样中变化于3.3~421 $\mu\text{g/L}$ 之间,平均值为91.98 $\mu\text{g/L}$ 。其高质量浓度主要在汉口区,主要变化于190~412 $\mu\text{g/L}$ 之间。此外,汉阳区有部分稍高质量浓度,但显著小于汉口区,如最高为190 $\mu\text{g/L}$ 。萘变化于1.6~165 $\mu\text{g/L}$ 之间,平均值为61.2 $\mu\text{g/L}$ 。

因此,地下水中有有机物分析结果表明,污染程度较高的主要是汉口区与汉阳区的部分地下水,东西湖区稍低。质量浓度较高的污染物包括苯、乙苯、甲苯、间二甲苯、苯乙烯、苯甲醛、萘和蒽等。

第四系含水层中地下水的有机污染与工业活动密切相关,可能与其废水排放或废水泄漏有关。这些水井有部分并不长期使用,在有泄漏的情况下,再加上其中微生物质量浓度明显低于地表水体,使其分解量可能小于其泄漏量,于是有机物可累积,使其有

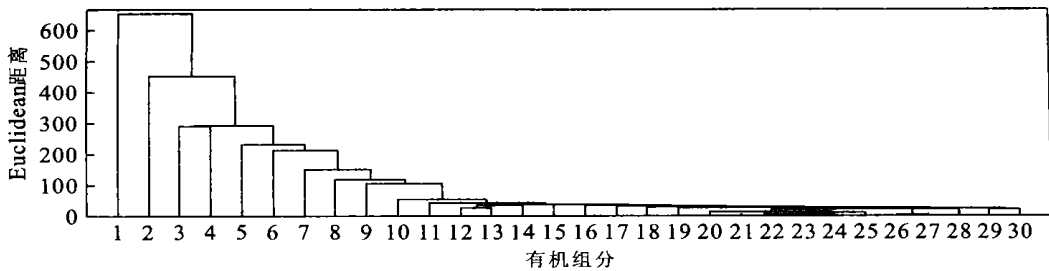


图 1 武汉市地下水中有机组分聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis results of organic contaminants in groundwaters from Wuhan

1. 1, 2, 3, 4-四甲苯; 2. 苯甲醛; 3. 萘; 4. 对二甲苯; 5. 邻二甲苯; 6. 1, 2, 3, 5-四甲苯; 7. 1, 2-二氯丙醛; 8. 1, 2, 4, 5-四甲苯; 9. 1, 1, 2, 2, 四氯乙烷; 10. 萘烯; 11. 1, 3-二乙基苯; 12. 苯乙烯; 13. 间二甲苯; 14. 甲苯; 15. 乙苯; 16. 4-乙基甲苯; 17. 1, 2, 4-三甲苯; 18. 五甲苯; 19. 四氯乙烯; 20. 氯苯; 21. 间二氯苯; 22. 1, 4-二氯苯; 23. 溴氯甲烷; 24. 氯仿; 25. 1, 3, 5-三甲苯; 26. 1, 2-二乙基苯; 27. 1, 4-二乙基苯; 28. 1, 2, 3-三甲苯; 29. 三氯乙烯; 30. 苯

机物质量浓度高于地表水体。

地下水有机物聚类分析(图 1)结果表明, 含氯有机化合物相关性较好, 如氯仿、溴氯甲烷、1, 4-二氯苯、间二氯苯和氯苯, 这些化合物与橡胶、塑料、染料、机动车燃料等工业及用途有关; 苯、三氯乙烯、1, 2, 3-三甲苯、1, 4-二乙基苯、1, 2-二乙基苯、1, 3, 5-三甲苯、氯仿、溴氯甲烷、1, 4-二氯苯、间二氯苯、氯苯、四氯乙烯、五甲苯、1, 2, 4-三甲苯、4-乙基甲苯、乙苯、甲苯、间二甲苯、苯乙烯、1, 3-二乙基苯、萘烯等有机物相关性较大, 为主要污染组分, 且其成因可能相似, 而其他组分, 如苯甲醛、萘, 虽然质量浓度较高, 但其成因应属另一类。

3 地下水有机污染敏感性分区

针对国际通用的地下水污染敏感性模型 *DRASTIC* 的不足, 我们曾经提出改进的 *DRAMIC* 模型, 并讨论了各评价参数的权重和评分情况^[8]。 *DRAMIC* 地下水污染敏感性指标由下式确定:

$$DRAMIC = 5D + 3R + 4A + 2M + 5I + 1C.$$

式中: D 为地下水埋深; R 为含水层的净补给; A 为含水层岩性; M 为含水层厚度; I 为包气带的影响; C 为污染物的影响。

根据武汉市水文地质特性、含水层的富水性和地下水开采情况, 本文选取武汉市市区第四系含水层, 用 *DRAMIC* 体系进行评价。采用地理信息系统 *MAPGIS* 编制了与 *DRAMIC* 参数有关的 6 项水文地质图件, 在此基础上对研究区域的 6 项 *DRAMIC* 参数进行了评分, 并用 *MAPGIS* 绘制了 6 项参数评分图, 以及地下水 *DRAMIC* 污染敏感性分区图。下

面简要介绍分析评价的过程及其结果:

(1) 地下水埋深 (D)。因为评价区的含水层为第四系承压含水层, 因此地下水埋深指的是地表到含水层顶板的距离。本次在研究区域内收集了 54 个水井所在含水层的顶板埋深, 并输入数据库。大部分平原地区的地下水埋深为 10~30 m, 在长江、汉江阶地的埋深比后缘要薄, 评分也就要高一些。

(2) 补给 (R)。补给量越大, 地下水污染的潜势就越大。根据研究区域内大气降雨入渗系数及降雨量, 并考虑菜田灌溉水回渗、地表河流的补给, 大部分区域的年均净补给量为 80~280 mm, 评分值为 3~7。

(3) 含水层介质 (A)。研究区域内含水层介质主要为砂、砂砾石、细砂、粉细砂, 评分多为 5~8。含水层的单井涌水量(统一口径、统一降深)在一定程度上反映节理、裂隙和溶洞的发育程度, 据此对含水介质进行评分。

(4) 含水层厚度 (M)。含水层厚度反映了地下水本身稀释能力的强弱。根据现有的各含水层厚度和各井单井涌水量大小得出含水层厚度评分。

(5) 包气带介质的影响 (I)。由于研究区内地下水皆属承压水, 根据 *DRAMIC* 体系, 包气带的影响 (I) 一项在评价区的得分皆为 5 (权重为 5, 评分为 1)。

(6) 污染物特征 (C)。由于含水层对不同污染物的敏感性不同, 本文针对武汉市地下水中苯、乙苯、甲苯、二甲苯大量检出的情况, 分析了苯系物自身特征及第四系含水层对苯系物的敏感性。苯系物的物理化学特征是比较复杂的。Wilson^[9] 通过土柱实验认为, 甲苯不易降解, 大多数芳香族化合物在自然状态下是不易降解的, 但一些典型的简单化合物降解相对容易, 并与其可溶性大小有关。由于在缺氧的条

件下,细菌利用 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、铁、锰作为氧化剂而使有机质氧化,其结果是地下水的还原水平加强,细菌消耗有机质, NO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度降低,铁、锰、 HCO_3^- 浓度增加, pH 值降低. 因此这些苯系物具有一定的降解能力. 在美国环境保护署(EPA)公布的 129 种主要有机污染物中,这几种苯系物属于可净化类. 武汉市地下水铁、锰、 HCO_3^- 的浓度是较高的. 因此笔者认为苯系物在本区属于较稳定型. 然后根据各区的环境地质条件,确定苯系物是否容易渗入含水层. 沿江一带包气带的厚度比阶地后缘薄,且与地表水水力联系密切,污染物容易迁移到含水层中,因此评分相对要高. 在包气带厚度相近时,粘土、有机质质量浓度低的地区比粘土、有机质质量浓度高的地区评分相对要高,因为这些地区发生吸附、降解反应相对不易. 包气带导水系数小的地方,渗流与有害物质运移较慢,吸附、降解过程更易进行,有效阻滞着有害物质渗入地下水,因此敏感性相对较小. 据此,武汉市第四系地下水污染物特征的最后得分分别为 3, 4, 5.

得出 6 张单指标的分区及得分图后,把 6 张图叠加在一张图上,去掉一些过分细小的区域,得出敏感性分区图,各区域的综合得分为 6 项指标的加权值. 据此得出武汉市地下水污染敏感性分区图(图 2). 一旦确定了 DRAMIC 敏感性得分,就可确定哪些区域的地下水相对易被污染. 具有较高敏感性得分的区域,其地下水就易被污染. 根据 DRAMIC 指标评价结果,武汉市第四系承压水的污染敏感性评分介于 57~95,沿江地带、汉口主城区、武钢东部的敏感性相对较高. 把武汉市第四系地下水污染敏感性分区图与区内地下水微量有害组分质量浓度,特别是苯系物质量浓度分布进行对比,结果发现,污染物质量浓度明显受地下水污染敏感性的影响和控制. 其他有害组分,如砷、苯乙烯等的质量浓度在敏感性较高的地区也相对较高. 目前污染较严重的地方多出现在地下水污染敏感性相对较高的地带,而在敏感性相对较低的地区,检出的污染物要少得多. 这些都说明基于 MAPGIS 所获得的武汉市地下水 DRAMIC 污染敏感性分区图与目前武汉市污染现状拟合得较好. 尽管 DRAMIC 指标提供的仅是相对概念,而不是绝对的,污染敏感性评分也不能反映某一区域的地下水是否已被污染,但是 DRAMIC 污染敏感性分区图给出的武汉市市区第四系地下水污染敏感性大小数值,对于城市建设规划具有直接

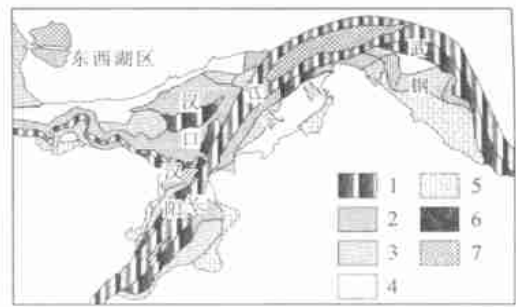


图 2 武汉市第四系地下水污染敏感性分区示意图

Fig. 2 Sketch map of vulnerability of groundwater in Quaternary aquifers to contamination at Wuhan

1. 敏感性高 90~95; 2. 敏感性较高 82~89; 3. 敏感性中等 74~81;
4. 敏感性较低 66~73; 5. 敏感性低 57~65; 6. 地表水; 7. 无资料区

的指导作用. 可根据其评价结果,集中对那些敏感性相对较高的区域采取有效的环保措施,开发利用时必须作出风险评价.

4 结论与建议

(1)武汉市第四系含水层中地下水有机物分析结果表明,污染程度较高的地下水主要分布在汉口区与汉阳区,东西湖区稍低. 质量浓度较高的污染物包括苯、乙苯、甲苯、间二甲苯、苯乙烯、苯甲醛、萘和蒽等. 这些有机污染与工业活动密切相关,可能与其废水排放或废水泄漏有关. 地下水有机物聚类分析结果表明,含氯有机化合物相关性较好,这些化合物与橡胶、塑料、染料、机动车燃料等工业及用途有关;苯、三氯乙烯、1, 2, 3-三甲苯、1, 4-二乙基苯、1, 2-二乙基苯、1, 3, 5-三甲苯、氯仿、溴氯甲烷、1, 4-二氯苯、间二氯苯、氯苯、四氯乙烯、五甲苯、1, 2, 4-三甲苯、4-乙基甲苯、乙苯、甲苯、间二甲苯、苯乙烯、1, 3-二乙基苯、萘等有机物相关性较大,为主要污染组分,且其成因可能相似. 而其他组分,如苯甲醛、蒽,虽其质量浓度较高,但其成因应属另一类. 此评价结果可为保护地下水资源、合理开发利用地下水资源,以缓解武汉市面临的“水质型”缺水状况提供重要的科学依据,并对武汉市政府制定地下水资源的环境保护与管理措施具有现实的指导意义.

(2)根据 DRAMIC 指标评价结果,沿江地带、汉口主城区、武钢东部的敏感性相对较高. 把武汉市第四系地下水污染敏感性分区图与区内地下水微量有害组分质量浓度,特别是苯系物质量浓度分布进

行对比, 结果发现, 污染物质量浓度明显受地下水污染敏感性的影响和控制. 目前污染较严重的地方多出现在地下水污染敏感性相对较高的地带, 而在敏感性相对较低的地区, 检出的污染物要少得多. 这些都说明基于 MAPGIS 所获得的武汉市地下水 DRAMIC 污染敏感性分区图与目前武汉市污染现状拟合得较好. 这一研究成果为武汉市地下水资源开发、管理和保护及城市建设和环境规划, 为将来制定中国统一的城市地下水环境保护措施与法规, 实施中国城市可持续发展战略, 提供了重要的基础性资料和科学决策依据.

参考文献:

- [1] Aller L T, Foster S S D. DRASTIC: standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydro-geologic settings [M]. [s.l.]: Office of Research Development, US EPA, 1985.
- [2] Ray I A, Odell P W. Diversity: a new method for evaluating sensitivity of groundwater to contamination [J]. *Environmental Geology*, 1993, 22: 344—352.
- [3] James W M. GIS-based groundwater pollution hazard assessment: a critical review of the DRASTIC model [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1994, 60(9): 618—627.
- [4] Rosebaum M S, Nowbuth M D. Aquifer vulnerability assessment through the use of GIS technology [A]. In: Marinos K, ed. *Engineering geology and the environment* [C]. Rotterdam: Balkema, 1997. 1475—1477.
- [5] Evans B M, Myers M L. A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 3: 242—245.
- [6] Stournaras G, Valadaki K, Plessas S. Geological environmental data processing using GIS in areas proposed for urban development Argolis, Greece [J]. *Engineering Geology and the Environment*, 1997, (C): 1499—1504.
- [7] Hirata R C A. Groundwater pollution risk and vulnerability map of the state of Sao paulo, Brazil [J]. *Water and Science Technology*, 1991.
- [8] 付素蓉, 王焰新, 蔡鹤生, 等. 城市地下水污染敏感性分析[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2000, 25(5): 477—481.
- FU S R, WANG Y X, CAI H S, et al. Vulnerability to contamination of groundwater in urban regions [J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(5): 477—481.
- [9] Wilson J T. Transport and fate of selected organic pollutants in a sandy soil [J]. *Environment and Quality*, 1981, (10): 501—506.

Vulnerability of Groundwater in Quaternary Aquifers to Organic Contaminants: A Case Study in Wuhan City, China

WANG Yan-xin¹, LI Yi-lian¹, FU Su-rong², CAI He-sheng¹, Broder Merkel³, Dana Ihm³

(1. *Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *Shenzhen Investigation and Survey Institute, Shenzhen 518028, China*; 3. *Department of Geology, Technical University Bergakademie Freiberg, 09599 Freiberg, Germany*)

Abstract: High resolution data about trace organic contaminant concentrations in aquatic environment of Wuhan were obtained in this study, on the basis of detailed hydrogeological and groundwater contamination investigations. More than 30 organic contaminants have been detected, in which benzene hydrocarbons are the most widespread. The seriously contaminated groundwater comes from densely populated, industrial and commercial areas. Applying the DRAMIC model proposed by the authors as an improved version of the widely-used DRASTIC model to the assessment of the vulnerability of groundwater to contamination in urban areas, the authors draw a GIS-based vulnerability map of Wuhan city. Finally, the authors propose some suggestions about environmental protection and risk management for highly vulnerable regions in line with the assessment results thus made in this paper.

Key words: groundwater; contamination; environment; vulnerability; geographic information system.