

地下水污染预警研究进展

郭永丽¹, 姜光辉¹, 郭芳¹, 滕彦国²

(1. 国土资源部岩溶动力学重点实验室/中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004;

2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要:分析了地下水脆弱性、地下水污染风险和地下水污染预警三者之间层层递进的关系;在归纳总结国内外地下水脆弱性和地下水污染风险评价理论和方法的基础上,综述国内外相关地下水污染预警的大量研究成果,基于地下水污染预警等级划分方法,整体上将地下水污染预警方法概括为基于设定临界值的地下水污染预警和基于既定标准的地下水污染预警两大类。最后阐述地下水污染预警研究在地下水资源可持续发展中的重要意义,并指出地下水污染预警的评价方法和理论研究应进一步考虑多学科交叉、与先进技术的耦合以及资料的精确度等问题。

关键词:地下水污染预警;地下水脆弱性;地下水污染风险性;等级划分

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2015)06-0011-08

随着社会经济的发展,人类活动对地下水污染的威胁越来越明显^[1],由于地下水系统本身的隐蔽性,地下水污染治理和修复工程不宜开展、难度大、且耗资高等,并带来很多难以解决的后续问题;因此,预防和防止地下水污染已成为目前国土部、水利部和环保部所研究的重点^[2-3]。目前,在地下水污染领域研究较为普遍的有地下水脆弱性和地下水污染风险,主要是针对地下水系统本身抵抗污染的能力和潜在污染源作用下地下水被污染的可能性。随着地下水脆弱性和地下水污染风险评价的理论和方法的不断完善和推进,地下水污染的恶化现状、恶化趋势、及负向演化方面也不断开展起来,即地下水污染预警;地下水污染预警的研究在地下水资源的可持续利用、保护和管理中具有很重要的指导意义^[4-5]。

预警与评价、预测密切相关,预警所具备的特点是深刻性、集中性和动态性,关注的是恶化的负向演化及其导致的质变,重点是对人为活动所造成恶化的警示^[6]。据 Grasso 和 Singh、Alfieri 等的研究可知,目前对于地质灾害(地震、滑坡等)、自然灾害(暴雨、洪水、干旱等)和人类健康方面的预警研究相对较成熟^[7-9]。国内外关于地下水污染预警与人类健康、生态环境等方面研究

较少,故本文在阐述地下水污染评价(脆弱性)和预测(风险)的基础上,结合“预警”的特点,进一步明确地下水污染预警的涵义和地下水污染预警方法;并针对地下水污染预警研究中的相关理论和技术的完善,资料的有限性等问题,指出地下水污染预警的发展方向。

1 地下水污染预警的涵义

地下水污染预警必须建立在地下水污染评价(脆弱性)和预测(风险)的基础之上,故地下水污染预警研究与地下水脆弱性、地下水污染风险评价密切相关,但也有区别(图1)。地下水脆弱性评价的是地下水防污性能,地下水污染风险预测的是地下水污染的可能性,地下水污染预警是对地下水污染程度的级别进行预测、划定;地下水脆弱性和地下水污染风险评价的对象是原生环境或次生环境,地下水污染预警重点是次生环境;地下水污染预警相对地下水脆弱性和地下水污染风险而言,侧重的是地下水水质负向演化的时空特征,结果是多维动态的;且地下水污染预警理论和方法尚处于探讨阶段。

地下水污染预警是指在自然和人为作用下对地下水环境的影响,分析、评价和预测该影响的时空变化过

收稿日期:2014-11-03

基金项目:气候变化对岩溶地区蒸散作用及水文过程的影响(200237111009);环保公益性行业科研基金重大项目(201009009)

作者简介:郭永丽(1989-),女,河南太康人,硕士,实习研究员,主要从事地下水污染防治工作。E-mail: gylguo@karst.ac.cn

通讯作者:姜光辉(1977-),男,江苏徐州人,博士,副研究员,主要从事岩溶水文学研究。E-mail: ghjiang@karst.ac.cn

程, 针对这种随时间和空间的变化过程提出对应的级别, 为地下水资源管理提供切实可靠的理论和技术支撑。地下水污染预警研究是在分析其各种影响因素的情况下, 这些影响因素可归结为地下水脆弱性、地下水潜在污染源、地下水功能和地下水水质时空变化趋势, 综合这些评价因子(影响因素), 基于某种数量(计算)关系确定出最终的预警等级, 划分出警戒区(图 1)。

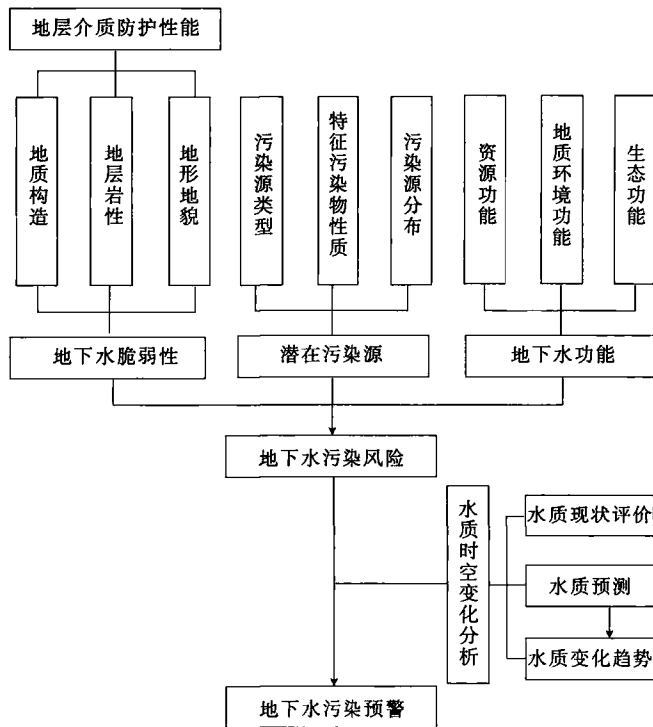


图 1 地下水脆弱性、地下水污染风险和地下水污染预警三者关系图
Fig.1 The correlation among groundwater vulnerability, risk assessment of groundwater pollution and early warning of groundwater pollution

2 地下水污染预警研究进展

研究地下水污染预警理论和探讨地下水污染预警评价方法之前, 对地下水脆弱性和地下水污染风险评价的理论和方法进行归纳总结是非常重要的部分; 本文首先整理分析地下水脆弱性和污染风险评价理论和方法; 基于此, 阐述基于地下水污染评价和预测的地下水污染预警等级划分的研究。

2.1 地下水脆弱性和污染风险评价方法

本文针对地下水污染研究的不断推进, 考虑的因素也越来越多, 地下水污染研究方法变得越来越复杂, 将地下水脆弱性和地下水污染风险评价方法归纳为指标迭加法、过程模拟法、不确定性方法和综合方法。指

标迭加法是基于 ARCGIS 空间分析平台的栅格图形进行的, 主要针对区域地下水污染防控, 以定性或半定量评价方法为主, 适用于区域或流域尺度; 过程模拟法需构建水流和溶质运移模型, 预警过程严谨, 精确性高, 主要针对特定污染源或突发环境事故对地下水水源地的影响, 以定量评价方法为主, 适用于重点地区; 基于不确定性理论的地下水污染研究是针对基础资料的随机性或相关概念的模糊性采用合适的方法进行不确定性分析进而获取较合理的结果; 综合方法是综合不同方法的优势解决实际问题, 是针对实际情况采取适用于研究区的方法进行实际应用。

2.1.1 指标迭加法

指标迭加法就是选取几类具有代表性的指标来表征地下水脆弱性或地下水污染风险的影响因素, 基于某种准则对这些评价指标分级赋值, 利用某些方法(层次分析法等)对这些评价指标的相对重要性进行赋值(权重值), 基于计算机平台(GIS 等)对这些评价指标进行加权迭加获得地下水脆弱性/地下水污染风险综合指数值, 并基于某种分类方法(等间距分类等)对该综合指数值进行重分类分级; 指标迭加法适用性强, 操作简单, 但代表性指标的分级赋值和权重赋值受主观影响因素较大^[9]。通过对国内外文献调研, 根据处理所选指标进行地下水脆弱性和地下水污染风险评价的方式不同, 归结为三类, 具体过程和参考文献详见表 1。

表 1 基于指标迭加法的地下水脆弱性和地下水污染风险评价统计表

Table 1 The statistics of the groundwater vulnerability and risk assessment of groundwater pollution based on the overlay index method

类型	调研文献	方法缺点
①	Zaporozec 将地下水价值等级划分结果和地下水脆弱性等级划分结果基于 ARCGIS 进行迭加, 获得地下水保护紧迫性等级划分图; 再将地下水保护紧迫性等级划分图与潜在污染源负荷等级划分图基于 ARCGIS 进行迭加, 最后获得地下水污染风险评价等级划分图 ^[10] 。	Neukum 和 Azzam、Frind 等将迭加方法归纳为以下几个缺点: 评价时是评价因子的线性迭加, 但是有些研究表明评价结果和评价因子之间并非存在线性关系; 评价因子级别的划分具有很大的主观性; 评价因子级别先离散, 后又迭加, 极有可能导致附加误差 ^[11-12] 。
②	Capri 等将硝酸盐污染物潜在危害图 (potential hazard of nitrate pollution) 与地下水脆弱性图相结合构成地下水硝酸盐潜在污染风险图 ^[13] 。	
③	李志萍将地下水污染风险评价认为是地下水遭受污染的可能性与其损害性的结合 ^[14] 。	

2.1.2 过程模拟法

过程模拟法首先是在详细分析模拟区水文地质条件、潜在污染源的属性等资料的... 建立包气带/饱和带水流模型和污染物迁移转化模型模拟预测污染物在地下水系统中的迁移转化特征...

地质条件和大量的水位、水质的监测数据^[9,15]。针对过程模拟的地下水污染评价的实现形式的不同,将其归纳总结成包气带过程模拟、饱和带过程模拟和地下水系统过程模拟三种形式...

表2 过程模拟研究方法及模型统计表 Table2 The statistics of the methods and models of process simulation

Table with 2 columns: 类型 (Type) and 模拟方法/模型 (Simulation Method/Model). Rows include 包气带 (Unsaturated zone), 饱和带 (Saturated zone), and 地下水系统 (Groundwater system).

表3 过程模拟方法的应用统计表 Table3 The statistics of the process simulation application

Table with 3 columns: 类型 (Type), 调研文献 (Survey Literature), and 适用情况 (Applicable Situation). Rows include 包气带垂向一维模型 (Unsaturated zone vertical 1D model), 反演技术 (Inverse technology), 框架结构 (Framework structure), 地表水-地下水系统 (Surface water-groundwater system), 复杂耦合模型 (Complex coupling model), and 过程模拟指标 (Process simulation indicators).

2.1.3 不确定性方法

地下水脆弱性和污染风险评价过程涉及到随机性和模糊性两大不确定性问题^[28];基于不确定性的地下水污染评价,也就是指将不确定性的相关理论引入到地下水污染评价领域内,如 Monte Carlo 方法(解决水

文地质参数的随机性问题)、可靠性方法、模糊语言(解决主观判断造成的不确定性)、隶属度函数(解决数据的不精确性)、综合的随机-模糊模型等,使地下水污染评价结果更可靠、更合理、更具有实际价值和现实意义。目前,解决地下水污染研究领域内的不确定性仍是

值得深入探讨和研究的课题^[29]。近年来,不确定性理论和技术在地下水污染评价领域研究中也逐渐被广大地下水相关工作者所关注,并将其应用于实际案例中,本论文通过对国内外文献调研,将不确定性理论应用到地下水污染评价中的实例进行归纳总结,详见表4。

2.1.4 综合方法

综合分析上述的地下水污染评价相关的各种方法,均具有自身评价方法的优势和缺点,不同的评价方法适用于不同的研究区或对象;在实际案例分析时,根据现实的复杂情况,选取适当方法或将不同的评价方法相结合,以获取案例区地下水污染评价结果的最佳效果。综合方法是在考虑研究区自身特征的基础上,将不同的地下水污染评价方法联系起来,取长补短,使得更适宜于所研究地区的地下水污染评价;或者将不同的地下水污染评价方法对比,分析出适合研究区最佳的评价方法。通过对大量调研国内外相关文献,将基于综合方法的地下水污染评价类型归纳总结为多方法耦合、归纳概化、集中参数模型和多软件耦合四类,详细状况见表5。

2.2 地下水污染预警等级划分

地下水污染预警是地下水脆弱性、地下水污染风险评价的深入推进,且与其相关的研究较少。通过国内外文献调研,参考地下水脆弱性和地下水污染风险评价分级分类方法的情况下,按照地下水污染预警等级划分方面将地下水污染预警方法主要归纳为基于设定临界值的地下水污染预警和基于既定标准的地下水污染预警两大类;此外,也有基于研究/计算方法和实际情况进行地下水污染预警等级划分的其它方法。其中,基于设定临界值的地下水污染预警针对性较强,适用于特定事件的分析;而基于既定标准的地下水污染预警具有普遍性且适用性较强,适用于解决区域或流域上的相关问题。

2.2.1 基于设定临界值的预警研究

基于设定的临界值的地下水污染预警就是利用设定的所研究污染物浓度不同等级的临界值、设定的污染物浓度的临界值和风险临界值的耦合、或者在设定的污染物浓度临界值乘以不同的系数等方法进行警戒线划分,划定方法有实验法、系统化方法、专家确定法和经验总结法。根据临界值划分警戒区进行地下水污

表4 基于不确定性理论的地下水污染评价统计表

Table4 The statistics of the groundwater pollution assessment based on uncertainty

类型	调研文献
水文地质参数的随机性	Peña-haro 等基于框架结构,并考虑水文地质参数——水力传导系数的随机性,构建地下水硝酸盐(农业活动引起的)污染的随机优化模型 ^[29] 。
污染风险分级的模糊性	Anning 等基于随机森林分类法(Random Forest Classifier)进行美国西南盆地地下水中硝酸盐和砷污染物浓度的预测研究 ^[31] 。
随机性和模糊性	Li、王丽萍和梁婕等基于评价参数的随机性和评价标准的模糊性,构建模糊-随机评价模型,进行水污染评价研究 ^[32-33] 。
多种不确定性问题	Tartakovsky 对水文地质研究领域中存在的不确定性分析进行了归纳总结,并对多种不确定性理论、方法和技术的应用进行了讨论 ^[34] 。

表5 综合方法评价地下水污染的归纳表

Table5 The summary of the groundwater pollution assessment based on the synthetic method

类型	调研文献
多方法耦合	Andrade 和 Stigter 基于多变量、确定性和随机方法进行浅层地下水水质时空监测数据分析,评价含水层系统中硝酸盐危害和农药的污染程度和风险 ^[35] 。
归纳概化	姚文锋和郭晓静等均将地下水固有脆弱性评价概化为污染物在包气带中的迁移转化特征的过程模拟预测 ^[36-37] 。
集中参数模型	Hajhamad 和 Almasri 基于集中参数模型进行含水层系统中硝酸盐污染风险评价,并对该模型的相关参数进行敏感性分析(相对敏感性系数 V_R) ^[38] 。
多软件耦合	Yu 等基于 Hydrus-1D 软件(过程模拟方法)和 GIS(指标系统方法)进行黄河山东段脆弱性评价 ^[39] 。Jamin 等基于 GIS、GMS(MODFLOW 和 MT3D 模块)和 SEQ-ESO 指标系统进行地下水污染风险评价 ^[40] 。

染预警研究,简单明了,关键在于相关临界值的设定方面。在水质相关预警中,研究者根据很多依据进行所研究区域的预警等级划分,通过国内外文献调研,将基于水质变化速率、地下水污染风险和水质状况、相应标准与实际相结合和分级方法设定临界值的预警等级划分进行归纳总结,详见表6。

2.2.2 基于相关标准的预警研究

基于既定标准的地下水污染预警就是利用已有的饮用水水质标准、地下水水质标准、或者官方设定的当地标准进行警戒线划分的方法。该方法优点在于利用制定的相关标准进行地下水污染预警等级划分,依据性强,争议小,可利用性强;但是相应标准在局部地区上应用可能存在一定的问题。通过对国内外文献调研,

将地下水水质标准、饮用水水质标准和制定的人类健康风险标准应用到预警等级划分中进行归纳总结,详见表7。

2.2.3 其它方法

多数地下水预警研究采用了上述两种方法,不同研究区具有其自身的特征,有些学者们还探索了其它方法,在分析研究地下水水质的基础上进行地下水污染预警研究。吕连宏等在进行预警研究时,将水环境污染事故造成的损失与《国家突发环境事故应急预案》相结合概化成综合指数值进行警情划分^[60]。Welch 等利用四分位距进行密西西比地区 1994~2004 年浅层地下水水质进行评价^[61]。Warner 和 Arnold 以地下水中硝酸盐浓度背景值为基准来研究影响井中硝酸盐浓度变化的因素^[62]。

表6 基于设定临界值的预警等级划分应用归纳表
Table6 The summary of the early warning grading application based on the setting threshold

类型	调研文献
水质变化速率	洪梅等把地下水水质变化速率(5年为基准)作为预警分级指标,设定5个临界值(0、0.1、0.2、0.3、0.4),研究地下水水质预警 ^[41] 。
地下水污染风险和水质状况	张伟红基于计算机编程平台,将地下水污染风险与地下水水质及其变化趋势结合起来设定警戒线 ^[42] 。Milnes 基于污染物浓度和风险的临界值,与研究区实际特征组合成6种形式,并划定极低、低、中高和高4个级别 ^[43] 。
相应标准与实际相结合	朱平将国际标准、国家标准、区域标准和水资源监测指标相结合,利用多种方法确定预警警戒线,进行区域水资源预警状态划分 ^[44] 。白利平将地下水水质标准和地下水水质实际状况相结合,将地下水中六价铬污染物的预警警戒线划分为0、0.05、0.1、0.5和1,划定地下水水质预警级别 ^[45] 。Greco等在降雨诱发滑坡预警系统研究中,根据所规定的降雨量临界值的0.75倍和1倍设定为警戒和报警两个预警级别 ^[46] 。
分级方法	Teubner等基于Tukey箱线图方法设定临界值,进行德国河流和湖泊的污染评价 ^[47] 。Huang等将统计分析法、相关性分析与硝酸盐和深度之间的关系相结合,进行山东省地下水中硝酸盐空间分布特征的研究 ^[48] 。Mendizabal等基于趋势分析、趋势逆转和变化指数对荷兰地区地下水水体水文地球化学进行分级 ^[49] 。

表7 基于相关标准的预警等级划分归纳表
Table7 The summary of the early warning grading application based on the established criteria

类型	调研文献
国家地下水水质标准(地表水标准)	谢洪波基于地下水水质标准进行地下水污染预警等级划分 ^[50] 。任宗仲基于地表水水质标准,进行地表水水体的水质级别划分 ^[51] 。袁啸基于地表水环境质量和水环境功能区划定义的水质级别进行湘江水质预警研究 ^[52] 。Naddeo等根据意大利标准将单种污染组别划分为5个等级,并定义出PLM和EBI指数,利用获取系列数据的Min、25%percentile、Median、75%percentile和Max进行河流水质评价 ^[53] 。
饮用水水质标准	Nguyen等基于越南当地饮用水水质标准进行健康风险评价 ^[54] 。Bonton等以当地饮用水水质标准为基础分析抽水井捕获区内地下水水质及其变化 ^[55] 。韩晓刚将《生活饮用水卫生标准》和《饮用水水源保护区划分技术规范》结合进行地下水源地保护区划分 ^[56] 。Rosli等是基于国家水质标准和物理化学特征进行萨拉卡河水质的分析和等级划分 ^[57] 。
饮用水和地下水水质标准	Du等基于饮用水水质标准(WHO)和中国地下水水质标准中硝酸盐的标准值,将饮用水中硝酸盐浓度值划分为5个级别分析其优劣性 ^[58] 。
人体健康风险值	Douagui等根据世界卫生组织(WHO)基于人体健康影响设定饮用水标准值分析阿比让地区第四系地下水硝酸盐污染风险水平 ^[59] 。

3 地下水污染预警展望

随着地下水脆弱性和地下水污染风险研究的深入,逐渐开展了地下水污染预警领域的研究。地下水污染预警结果可为地下水资源管理提供科学指导,体现在①通过地下水污染预警分析识别出主控因素,明确地下水资源管理的主要方向;②地下水污染预警分区可为优化地下水水位和水质监测网提供理论依据;③地下水污染预警结果可为预防地下水污染奠定理论基础,并有助于建立地下水污染防控和治理的基本原则;④通过数值模拟的地下水污染预警结果可为人类健康风险评价和生态风险评价提供基础资料。

通过对比分析地下水污染预警与地下水脆弱性、地下水污染风险评价的理论和评价方法,可知后者研究相对较成熟,前者仍需进一步完善和探索。本文在进一步明确地下水污染预警的涵义和地下水污染预警方法时,也意识到在以后的地下水污染预警研究中需要注意以下几点:

(1)地下水污染预警理论尚处于探索阶段,多学科的交叉渗透有助于地下水污染预警理论的完善,如系统理论、环境科学、物理化学等的交互应用;

(2)地下水污染预警研究过程有待进一步完善,需与先进技术相结合,不仅有助于实现地下水污染预警结果的表达,也有利于地下水污染预警结果应用到实际中,如计算机技术、3S技术等;

(3)针对地下水污染预警研究中资料的有限性牵涉的地下水污染预警结果的精确性问题,明确基础资料来源,同时考虑资料的充分性和预警过程中的各种不确定性问题,有助于提高预警结果的精度;

(4)地下水污染预警结果尚未得到充分利用,其在优化地下水水位和水质监测网、地下水污染防控和地下水资源管理中起到理论指导作用,合理应用其评价结果将有助于实现地下水资源的可持续发展。

参考文献:

- [1] 林学钰,廖资生,赵勇胜,等. 现代水文地质学[M]. 北京:地质出版社,2005. (LIN Xueyu, LIAO Zisheng, ZHAO Yongsheng, et al. Modern Hydrogeology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [2] 卢耀如. 建设生态文明保护地下水资源促进可持续开发利用[J]. 地球学报,2014,35(2):129-130. (LU Yaoru. Build ecological civilization and protect groundwater resources to promote sustainable development and utilization[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014,35(2):129-130. (in Chinese))
- [3] 郭永丽,张文静,滕彦国. 基于 MAROS 平台的地下水污染监测网优化设计[J]. 水文,2013,33(4):45-54. (GUO Yongli, ZHANG Wenjing, TENG Yanguo. Optimization design of groundwater pollution monitoring network based on MAROS platform [J]. Journal of China Hydrology, 2013,33(4):45-54. (in Chinese))
- [4] 王凯军,曹剑峰,徐蕾,等. 地下水资源管理预警系统的建立及应用研究—以长春城区为例[J]. 水科学进展,2005,16(2):238-243. (WANG Kaijun, CAO Jianfeng, XU Lei, et al. Establishment and application of early warning system in groundwater resource management in the urban area of Changchun [J]. Advances in Water Science, 2005,16(2):238-243. (in Chinese))
- [5] 白利平,王业耀,郭永丽,等. 基于风险管理的区域地下水污染预警方法研究[J]. 环境科学,2014,35(8):2903-2910. (BAI Liping, WANG Yeyao, GUO Yongli, et al. Research of early-warning method for regional groundwater pollution based on risk management [J]. Environmental Science, 2014,35(8):2903-2910. (in Chinese))
- [6] 陈国阶,何锦峰. 生态环境预警的理论和方法探讨[J]. 重庆环境科学,1999,21(4):8-11. (CHEN Guojie, HE Jinfeng. An approach on the theory and methodology of ecological and environmental warning[J]. Journal of Chongqing Environmental Science, 1999,21(4):8-11. (in Chinese))
- [7] GRASSO V F, SINGH A. Global Environmental Alert Service (GEAS) [J]. Advances in Space Research, 2008,41:1836-1852.
- [8] ALFIERI L, SALAMON P, PAPPENBERGER F, et al. Operational early warning systems for water-related hazards in Europe [J]. Environmental Science and Policy, 2012,21:35-49.
- [9] 滕彦国,苏洁,翟远征,等. 地下水污染风险评价的叠置指数法研究综述[J]. 地球科学进展,2012,27(10):1140-1147. (TENG Yanguo, SU Jie, ZHAI Yuanzheng, et al. A review on the overlay and index method for groundwater pollution risk assessment [J]. Advances in Earth Science, 2012,27(10):1140-1147. (in Chinese))
- [10] ZAPOROZEC A. Groundwater Contamination Inventory—A Methodological Guide [M]. IHP-VI, UNESCO, 2002.
- [11] NEUKUM C, AZZAM R. Quantitative assessment of intrinsic groundwater vulnerability to contamination using numerical simulations[J]. Science of the Total Environment, 2009,408(2):245-254.
- [12] FRIND E O, MOLSON J W, RUDOLPH D L. Well vulnerability: a quantitative approach for source water protection [J]. Ground Water, 2006,44(5):732-742.
- [13] CAPRI E, CIVITA M, CORNIELLO A, et al. Assessment of nitrate contamination risk: the Italian experience [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2009,102:71-86.
- [14] 李志萍,谢振华,林健. 地下水污染风险评价指标体系及方法探讨[J]. 黑龙江水专学报,2010,37(3):115-117. (LI Zhiping, XIE Zhenhua, LIN Jian. A discussion of groundwater pollution risk assessment index system and methods[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering, 2010,37(3):115-117. (in Chinese))
- [15] 郇环,王金生,滕彦国,等. 基于过程模拟的地下水脆弱性评价研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报,2013,32(1):121-126. (HUAN Huan, WANG Jinsheng, TENG Yanguo, et al. Progress in

- groundwater vulnerability based on process simulation[J]. *Bullet in Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013,32(1):121-126. (in Chinese)
- [16] BOESTEN J J T I, van der Linden A M A. Modeling the influence of sorption and transformation on pesticide leaching and persistence[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1991,20:425-435.
- [17] LARSBO M, JARVIS N. MACRO5.0 A Model of Water Flow and Solute Transport in Macroporous Soil[M]. Technical Description. Emergo, Department of Soil Sciences, Division of Environmental Physics, SLU, 2003.
- [18] LOUGUE K, ABRAMS R H, DAVIS S N, et al. A case study simulation of DBCP groundwater contamination in Fresno county, California: 2. transport in the saturated subsurface[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998,29:137-163.
- [19] LOAGUE K, LLOYDI D, NGUYEN A, et al. A case study simulation of DBCP groundwater contamination in Fresno county, California: 1. leaching through the unsaturated subsurface [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998,29:109-136.
- [20] STENEMO F, JORGENSEN P R, JARVIS N. Linking a one-dimensional pesticide fate model to a three-dimensional groundwater model to simulate pollution risks of shallow and deep groundwater underlying fractured till[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2005,79:89-106.
- [21] ZERU A, SCHÄFER G. Analysis of ground water contamination using concentration - time series recorded during an integral pumping test: bias introduced by strong concentration gradients within the plume[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2005,81:106-124.
- [22] MOHAMMAD N. KALUARACHCHI A J J. Modeling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2007,343:211-229.
- [23] SMITH J W N, SURRIDGE B W J, HAXTON T H, et al. Pollutant attenuation at the groundwater-surface water interface: A classification scheme and statistical analysis using national-scale nitrate data[J]. *Journal of Hydrology*, 2009,369:392-402.
- [24] AYVAZ M T. A linked simulation-optimization model for solving the unknown groundwater pollution source identification problems[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2010,117:46-59.
- [25] URSULA S, MCKNIGHT M F. A system dynamics model for the screening-level long-term assessment of human health risks at contaminated sites[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2012,1-16.
- [26] NEUKUM C, AZZAM R. Quantitative assessment of intrinsic groundwater vulnerability to contamination using numerical simulations[J]. *Science of the Total Environment*, 2009,408(2):245-254.
- [27] 郇环. 松花江吉林段地下水脆弱性评价研究[D]. 北京师范大学, 2012.(HUAN Huan. Groundwater Vulnerability Assessment in Jilin Section of Songhua River[D]. Beijing Normal University, 2012. (in Chinese))
- [28] 杜朝阳, 钟华平. 地下水系统风险分析研究进展 [J]. *水科学进展*, 2011,22(3):437-444. (DU Chaoyang, ZHONG Huaping. Advances in risk analysis of groundwater system[J]. *Advances in Water Science*, 2011,22(3):437-444. (in Chinese))
- [29] 于勇, 翟远征, 郭永丽, 等. 基于不确定性的地下水污染风险评价研究进展[J]. *水文地质工程地质*, 2013,40(1):115-123. (YU Yong, ZHAI Yuanzheng, GUO Yongli, et al. Risk assessment of groundwater pollution based on uncertainty[J]. 2013,40(1):115-123. (in Chinese))
- [30] PEÑA-HARO S, PULIDO-VELAZQUEZ M, LLOPIS-ALBERT C. Stochastic hydro-economic modeling for optimal management of agricultural groundwater nitrate pollution under hydraulic conductivity uncertainty[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2011,26:999-1008.
- [31] ANNING D W, PAUL A P, MCKINNEY T S, et al. Predicted nitrate and arsenic concentrations in basin-fill aquifers of the southwestern United States[R]. Scientific Investigations Report 2012 - 5065. National Water-Quality Assessment Program. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2012.
- [32] LI J B, GORDON H, ZENG G M, et al. An integrated fuzzy-stochastic modeling approach for risk assessment of groundwater contamination[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007,82:173-188.
- [33] 王丽萍, 周晓蔚, 李继清. 饮用水源污染风险评价的模糊-随机模型研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008,48(9):69-72. (WANG Liping, ZHOU Xiaowei, LI Jiqing. Integrated fuzzy-stochastic modeling approach for risk assessment of drinking water resources contamination[J]. *Tsinghua University (Science and Technology)*, 2008,48(9):69-72. (in Chinese))
- [34] TARTAKOVSKY D M. Assessment and management of risk in subsurface hydrology: A review and perspective [J]. *Advances in Water Resources*, 2013,51:247-260.
- [35] ANDRADE A I A S S, STICTER T Y. Multi-method assessment of nitrate and pesticide contamination in shallow alluvial groundwater as a function of hydrogeological setting and land use [J]. *Agricultural Water Management*, 2009,96:1751-1765.
- [36] 姚文锋. 基于过程模拟的地下水脆弱性研究 [D]. 清华大学, 2007. (YAO Wenfeng. Study on Groundwater Vulnerability Based on Process Simulation [D]. Tsinghua University, 2007. (in Chinese))
- [37] 郭晓静. 基于数值模拟的地下水脆弱性研究—以新疆焉耆县为例[D]. 中国地质大学(武汉), 2011. (GUO Xiaojing. Groundwater Vulnerability Assessment Based on Numerical Simulation—A Case Study of Yanqi Conty in Xinjiang [D]. China University of Geosciences (Wuhan), 2011. (in Chinese))
- [38] HAJHAMAD I, ALMASRI M N. Assessment of nitrate contamination of groundwater using lumped-parameter models[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2009,24:1073-1087.
- [39] YU C, YAO Y Y, HAYES G, et al. Quantitative assessment of groundwater vulnerability using index system and transport

- simulation, Huangshuihe catchment, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010,408:6108–6116.
- [40] JAMIN P, CHISALA F D B, POPESCU P O I C, C. et al. A regional flux-based risk assessment approach for multiple contaminated sites on groundwater bodies [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2012,127:65–75.
- [41] 洪梅,赵勇胜,张博. 地下水水质预警信息系统研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2002,32(4):364–368,377. (HONG Mei, ZHAO Yongsheng, ZHANG Bo. The research on groundwater quality early warning system [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2002,10(4):364–368,377. (in Chinese))
- [42] 张伟红. 地下水污染预警研究 [D]. 吉林大学, 2007. (ZHANG Weihong. Study on the Early Warning of Groundwater Pollution[D]. Jilin University, 2007. (in Chinese))
- [43] MILNES E. Process-based groundwater salinisation risk assessment methodology: Application to the Akrotiri aquifer (Southern Cyprus)[J]. *Journal of Hydrology*, 2011,399:29–47.
- [44] 朱平. 区域水资源预警方法研究[D]. 扬州大学, 2007. (ZHU Ping. Method Research on the Early Warning of Region Water Resources[D]. Yangzhou University, 2007. (in Chinese))
- [45] 白利平,王业耀,王金生,等. 基于数值模型的地下水污染预警方法研究[J]. *中国地质*, 2011,38(6):1652–1659. (BAI Liping, WANG Yeyao, WANG Jinsheng, et al. A study of the groundwater pollution early-warning method based on numerical model [J]. *Geology in China*, 2011,38(6):1652–1659. (in Chinese))
- [46] GRECO Y R, GIORGIO M, CAPPARELLI G, et al. Early warning of rainfall-induced landslides based on empirical mobility function predictor[J]. *Engineering Geology*, 2013,153:68–79.
- [47] TEUBNER D, M?LLER P, PAULUS M. Derivation of dynamic reference values for the classification of contaminant concentrations in bream (*Abramis brama*) of German rivers and lakes using data of the environmental specimen bank [J]. *Ecological Indicators*, 2013,25:162–165.
- [48] HUANG J X, XU J Y, LIU X Q, et al. Spatial distribution pattern analysis of groundwater nitrate nitrogen pollution in Shandong intensive farming regions of China using neural network method[J]. *Mathematical and Computer Modeling*, 2011,54:995–1004.
- [49] MENDIZABAL I, BAGGELAAR P K, STUYFZAND P J. Hydrochemical trends for public supply well fields in the Netherlands (1898 - 2008), natural backgrounds and upscaling to groundwater bodies[J]. *Journal of Hydrology*, 2012,279–292.
- [50] 谢洪波. 焦作市地下水质量综合评价及污染预警研究 [D]. 长安大学, 2008. (XIE Hongbo. Study on Synthetic Appraise of Groundwater Quality and Pollution Warning-forecast in Jiaozuo[D]. Changan University, 2008. (in Chinese))
- [51] 任宗仲. 信江流域水源地水污染预警预报研究 [D]. 南昌大学, 2010. (REN Zongzhong. Research on Early Warning Prediction of Water Pollution in Xinjiang River Water Source [D]. Nanchang University, 2010. (in Chinese))
- [52] 袁啸. 湘江水利枢纽工程对湘江(长沙段)水质影响与预警研究[D]. 湖南农业大学, 2012.(YUAN Xiao. The Study on the Water Quality Influence and Pre-alarm of the Changsha Hydropower Project for Xiangjiang River in Changsha [D]. Hunan Agricultural University, 2012. (in Chinese))
- [53] NADDEO V, SCANNAPIECO D, ZARRA T, et al. River water quality assessment: Implementation of non-parametric tests for sampling frequency optimization[J]. *Land Use Policy*, 2013,30:197–205.
- [54] NGUYEN V A, BANG S, VIET P H, KIM K W. Contamination of groundwater and risk assessment for arsenic exposure in Ha Nam province, Vietnam[J]. *Environment International*, 2009,35:466–472.
- [55] BONTON A, ROULEAU A, BOUCHARD C, et al. Assessment of groundwater quality and its variations in the capture zone of a pumping well in an agricultural area [J]. *Agricultural Water Management*, 2010,97:824–834.
- [56] 韩晓刚. 城市水源水质风险评价及应急处理方法研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2011. (HAN Xiaogang. Assessment of Water Quality Risk and Study on Emergent Treatment Method [D]. Xi'an University of Architecture Technology, 2011. (in Chinese))
- [57] ROSLI N A, ZAWAWI M H Z, BUSTAMI R A. Salak River water quality identification and classification according to physico-chemical characteristics[J]. *Procedia Engineering*, 2012,50:69–77.
- [58] DU L F, ZHAO T K, ZHANG C J, et al. Investigations on nitrate pollution of soil, groundwater and vegetable from three typical farmlands in Beijing region, China [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011,10(3):423–430.
- [59] DOUACUI A G, KOUAME I K, KOFFI K, GOULA A T B, et al. Assessment of the bacteriological quality and nitrate pollution risk of Quaternary groundwater in the southern part of Abidjan district (Côte d'Ivoire)[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2012,6: 227–238.
- [60] 吕连宏,罗宏,路超君. 沿江化工园突发水污染事故预警指标体系研究[J]. *工业安全与环保*, 2011,37(1):30–32. (LV Lianhong, LU Hong, LU Chaojun. Research on early warning system for sudden water pollution accident in chemical industry park along the Yangtze River [J]. *Industrial safety and environmental protection*, 2011,37(1):30–32. (in Chinese))
- [61] WELCH H L, KINGSBURY J A, TOLLETT R W, et al. Quality of Shallow Groundwater and drinking water in the Mississippi embayment –Texas coastal uplands aquifer system and the Mississippi River valley alluvial aquifer, south-central United States, 1994–2004 [R]. National Water-Quality Assessment Program, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2009.
- [62] WARNER K L, ARNOLD T L. Relations that affect the probability and predication of nitrate concentration in private wells in the glacial aquifer system in the United States[R]. National Water-quality assessment program, U.S. Geological survey, Reston, Virginia, 2010.

- exploratory data analysis [J]. IEEE Trans on Computer, 1974,23 (9):881-890.
- [28] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法—人工鱼群算法[D]. 杭州: 浙江大学, 2003. (LI Xiaolei. A New Intelligent Optimization Method of Artificial Fish Swarm Algorithm [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese))
- [29] 汪丽娜, 陈晓宏, 李粤安. 投影寻踪和人工鱼群算法的洪水分类[J]. 人民长江, 2008,39(24):34-37. (WANG Lina, CHEN Xiaohong, LI Yuean. Flood classification of projection pursuit and artificial fish swarm algorithm [J]. Yangtze River, 2008,39(24):34-37. (in Chinese))
- [30] 丁红, 刘东, 李陶. 基于改进人工鱼群算法的三江平原投影寻踪旱情评价[J]. 农业工程学报, 2010,26(12):84-88. (DING Hong, LIU Dong, LI Tao. Projection pursuit model for evaluating drought based on improved artificial fish swarm algorithm of Sanjiang plain [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26 (12):84-88. (in Chinese))

Evaluation Method for Sustainable Water Resources Utilization in Foshan

KUANG Yuanhua^{1,2}, WANG Lina³, HU Jianwen⁴, CHEN Xiaohong^{1,5}, LIU Bingjun^{1,5}

(1. Center of Water Resource and Environment Research, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Foshan Water Authorities, Foshan 528000, China; 3. School of Geograph, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 4. Hydrology Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510150, China; 5. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou 510275, China)

Abstract: According to the water resource conditions and social environment background of Foshan City, this paper selected 10 indexes from 4 aspects, i.e. the present situation of water resources condition, the comprehensive benefits of water resources, water resources utilization efficiency and sustainable utilization of water resources. The research focused on the evaluation of sustainable water resources utilization in Foshan by projection pursuit model and artificial fish swarm algorithm. Research results show that the evaluation result accords with the actual situation of water resources in Foshan City. This paper put forward the corresponding opinion to relieve future water resources pressure.

Key words: water resources; sustainable; index; method

(上接第 18 页)

Research Overview of Early Warning of Groundwater Pollution

GUO Yongli¹, JIANG Guanghui¹, GUO Fang¹, TENG Yanguo²

(1. Karst Dynamics Laboratory /Institute of Karst Geology, CAGS, MLR, Guilin 541004, China;
2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: With the further study on groundwater pollution, research about early warning of groundwater has begun. This paper described the progressive correlation among groundwater vulnerability, risk assessment of groundwater pollution and early warning of groundwater pollution. The classification methods of early warning of groundwater pollution can be summarized into two categories, i.e. methods of early warning of groundwater pollution based on the setting threshold and the established criteria, on the basis of summarizing the research theory and methods of groundwater vulnerability and risk assessment of groundwater at home and abroad. In the end, this paper pointed out that the significance of early warning of groundwater pollution in the sustainable development of groundwater resource, and the research method and theoretical study of early warning of groundwater pollution should be improved in crossing of multidisciplinary, coupling the advanced technology, and the accuracy of data.

Key words: early warning of groundwater pollution; vulnerability of groundwater; risk of groundwater pollution; classification