

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2010.06.003

岩溶含水层脆弱性评价方法探讨

彭 稳^{1,2}, 裴建国²

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055; 2. 中国地质科学院 国土资源部岩溶地质研究所岩溶动力学重点实验室 广西 桂林 541004)

摘要 阐述岩溶地下水脆弱性的概念和岩溶含水层的特殊性, 介绍几种有代表性的岩溶含水层脆弱性评价方法, 认为 DRASTIC 模型是目前应用最广泛的, 但该模型没有单独考虑岩溶含水层的特殊性; EPIK 法是第 1 个专门针对岩溶含水层的方法, 用于水资源保护区划分, 但评价体系和权重系统不太完善; 越南模式是一种极端简化的方法, 在数据较少的地区有一定的借鉴意义; Slovenia 模式为最新方法, 是迄今为止对岩溶含水层脆弱性指标诠释最为详细的方法, 但需要更多的实践检验。目前岩溶含水层脆弱性评价在机理研究、权重分配、数据获取、结果验证、定量研究和方法选取等方面仍面临着挑战, 也是今后的发展趋势和研究方向。

关键词 岩溶含水层; 脆弱性; 评价方法; 地下水保护

中图分类号: P641.8 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2010)06-0009-07

Study on vulnerability assessment of karst aquifer

PENG Wen^{1,2}, PEI Jian-guo²

(1. China Railway Engineering Consultants Group, Beijing 100055, China; 2. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources, Guilin 541004, China)

Abstract: The vulnerability and distinctiveness of karst aquifers are explained, and several typical approaches of groundwater vulnerability assessment are introduced. It is pointed out that the DRASTIC approach is the most popularly used method, even though the particularity of the karst aquifer is not considered. The EPIK approach is the first method specially for karst aquifers that has been applied to demarcate the protection area of the water resources, but the appraisal and the weighting system are not faultless. The Vietnam mode is an extremely simple approach worth considering in areas lacking data. The Slovenia approach is the latest and gives the most detailed annotation of karst aquifer vulnerability indexes, but more practical verification is still needed. However, research on the mechanics, weighting assignment, data acquisition, verification of results, quantification assessment, and approach selection is still facing challenges, which are also the development trends for the future.

Key words: karst aquifer; vulnerability; assessment approach; groundwater protection

我国西南岩溶区土层普遍较薄, 存在地表地下双层结构, 污染物更容易通过薄弱的上覆层和落水洞进入含水层。与其他非岩溶含水层相比, 岩溶含水层保护面临的挑战更加巨大。由袁道先^[1]院士承担的“西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究”调查结果显示: 西南岩溶区水环境问题呈现污染源多样化, 污染由点向面发展, 有机污染与无机污染并存等特点, 西南岩溶区 3 066 条地下河面临城市生活、工业以及农业多重污染的挑战, 正受到变

为排污下水道的威胁。如何合理有效地开发和保护岩溶地下水已经成为我国目前一个亟待解决的问题。地下水脆弱性评价正是管理和保护含水层、预防地下水污染的重要手段。美国、意大利、瑞士等国家已将其有效运用到水源地保护和流域地下水资源的综合管理工作中, 并发挥了巨大的作用^[2-3]。然而, 目前国内的含水层脆弱性评价研究主要集中于非岩溶区, 对于中国西南地区岩溶含水层的脆弱性评价研究还非常薄弱, 尚处于起步阶段^[4-5]。笔者就

地下水脆弱性的概念、岩溶含水层的特殊性进行了讨论,介绍和对比了几种代表性的岩溶含水层脆弱性评价方法,并探讨了脆弱性评价过程中存在的问题和面临的挑战,为我国西南岩溶含水层脆弱性评价研究提供理论支持。

1 地下水的脆弱性

“地下水脆弱性”(groundwater vulnerability)这一术语由法国人 Margat 于 1968 年首次提出。最初的地下水脆弱性概念是基于一种假设,即自然环境能提供一些天然的保护,来减缓人类活动对地下水的影 响,尤其是阻碍污染物进入地下环境^[6]。当被污染的水流渗透到地下,通过土壤和非饱和带等上覆层时,能得到一定程度的自然净化,而污染物质的降解程度决定了地下水污染的相对可能性。这种降解能力是土壤-空气-岩石-地下水系统中众多物理、化学和生物作用的综合体现,而水文地质条件和污染物的运移途径是最重要的影响因素。

1.1 地下水脆弱性的概念

由于影响因素的复杂性和研究水平的局限性,水文地质学家们根据各国的实际情况,从不同角度对地下水脆弱性内涵进行了不同的诠释。纵观 40 多年不断深入的研究,地下水脆弱性的内涵不断丰富。总体上可以分为 3 个阶段:

第 1 阶段从 1968 年 Margat 提出“地下水脆弱性”到 1987 年。这一时期对地下水脆弱性的理解和考虑主要从水文地质内在因素(如表层沉积物的厚度、渗透性,地下水位埋深,地下水平均流速等)出发。如 Albinet 和 Margat 认为地下水脆弱性是在自然条件下,污染源从地表渗透、扩散到地下水面的可能性。Vrba 则认为地下水脆弱性是影响污染物进入含水层的地表、地下条件的复杂性。Foster 和 Hirate 指出地下水的脆弱性是含水层上覆的土壤和包气带自然属性的函数。这一时期的观点普遍认为地下水脆弱性是水文地质系统的一种自然属性,与人类活动及外界因素无关^[7]。

第 2 阶段从 1987 年至 2000 年。在 1987 年荷兰举行的“土壤与地下水脆弱性国际会议”上,“地下水脆弱性”的定义有了新的突破,学者们开始考虑人类活动和污染源等外部因素对地下水脆弱性的影响。如 Foster 认为地下水污染是由含水层本身的脆弱性与人类活动产生的污染负荷造成的。Palmquist 则认为地下水脆弱性是人类活动或污染源施加给地下水的一种危险性度量^[8]。1993 年美国国家科学研究委员会给予地下水脆弱性如下定义^[9]:地下水脆弱性是污染物质到达含水层系统某一特定位置的

倾向性与可能性。地下水脆弱性是一个相对的、无量纲的、不可测量的属性量。同时委员会将地下水脆弱性分为:固有脆弱性和特殊脆弱性,前者不考虑人类活动和污染源,只考虑水文地质内部因素的脆弱性;后者为地下水对某一特定污染源(或污染群体)或人类活动的脆弱性。后来一些学者认为“污染的脆弱性”与“自然的保护”具有相反的意思。

第 3 阶段(21 世纪以来)随着地下水脆弱性评价研究的深化,越来越多的学者开始考虑地下水污染的风险性研究。由欧盟执行的 COST 620 计划^[10]“岩溶含水层保护的脆弱性与风险性填图”建立了较完整的岩溶地下水脆弱性概念框架与评价基本原则(图 1)指出地下水污染风险是含水层污染脆弱性与人类活动造成的污染负荷之间相互作用的结果,脆弱性评价将是风险性评价的前提和基础。地下水污染风险评价,不仅要考虑人类活动产生的污染负荷的影响以及含水层系统抵御污染的能力,还要考虑地下水系统的预期损害性(即地下水价值功能的变化)以及污染物的类型和污染的辐射能力(污染的传递速度)等。将脆弱性和风险性评价成果应用于水源地保护和土地利用规划之中,指导人类的土地利用活动,是地下水脆弱性研究的一个新的方向。

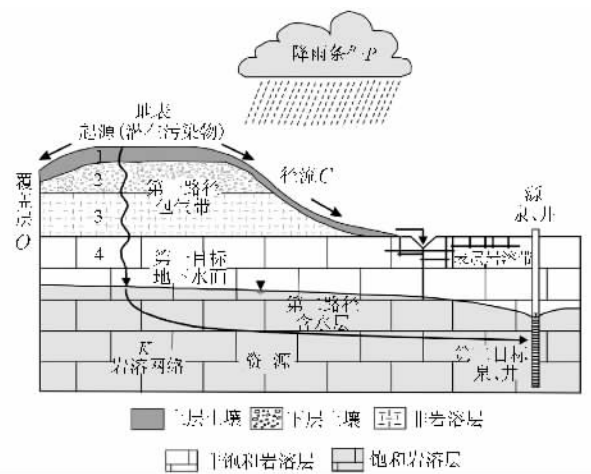


图 1 岩溶含水层脆弱性评价概念模型(COST Action 620)

目前,国内外大多数学者倾向于美国国家科学研究委员会于 1993 年提出的将地下水脆弱性分为 2 类的主张:①地下水固有脆弱性,即不考虑人类活动和污染源而只考虑水文地质内部因素的脆弱性;②地下水特殊脆弱性,即考虑地下水对某一特定污染源和人类活动的脆弱性。

1.2 岩溶含水层的特殊性

地下水脆弱性的概念适用于各类含水层(孔隙、裂隙、岩溶含水层等)。然而,岩溶含水层对环境具有特殊的敏感性和脆弱性,这也使得对岩溶含水层的保护具有更大的挑战。

从水文地质的角度而言,岩溶含水层与非岩溶含水层最显著的差别在于岩溶含水介质(碳酸盐岩)具有高度的可溶性。碳酸盐岩的溶蚀取决于岩石的化学组分、次级孔隙度、水的物理化学性质和水量等因素^[11]。可溶岩的化学溶蚀留下的成土物质极少,以致土壤先天贫瘠,稍有水土流失即留下一片石海(石漠化),降低上覆层的天然保护功能^[12]。同时,碳酸盐岩化学溶蚀以及岩溶化过程加强了含水介质的非均质性和各相异性,形成了独特的岩溶含水层系统二元结构,如补给来源的二元特性(外源水和内源水)入渗途径的二元特性(扩散流和汇流)地下径流以及排泄方式的二元特性(管道和裂隙)等^[13]。

污染物既可以经过上覆土壤层面状扩散补给地下水含水层,也可以通过落水洞、天窗等岩溶形态直接集中汇流注入含水层或地下河,这就意味着大量污染物可能直接进入管道系统,而不会出现孔隙含水层内所发生的污染物的有效衰减,因而具有特殊的脆弱性^[14]。表层岩溶带作为地表强烈岩溶化过程的产物,既是地下水的储存场所,也是运移场所;既可以增加系统的自然保护功能,也可以加强系统的脆弱性。并且岩溶含水层具有孔隙、裂隙、管道3重介质,污染物可以通过岩溶管道快速运移,在短时间内到达很远的地方,也可以在孔隙和裂隙中存储很长一段时间^[15]。由于岩溶系统非常快和非常慢的水流可能同时存在,污染物的滞留时间也有很大的差别。管道可以快速运移污染物,孔隙和裂隙则可以吸附污染物,从而达到自净和降解污染物的目的。另外,岩溶含水系统对水文事件(暴雨、干旱等)能够有快速强烈的响应,如水位的暴涨暴落、水化学的快速变化等^[16]。岩溶流域一般汇水面积大,水力联系较长,每个流域都有自己独特的水文地质特征,分水岭难以确定,流域边界在短时间内也可能发生变化^[17],并且在很多岩溶地区不具有连续的地下水位。

2 岩溶含水层脆弱性评价方法

如何进行有效合理的岩溶含水层脆弱性评价已是当今岩溶研究工作的一个热点。1987年美国环境保护署提出 DRASTIC 评价模型,大多集中于孔隙和裂隙含水层的脆弱性评价研究,同时也有一些学者尝试着将其应用于岩溶含水层中,但是结果不甚理想^[18]。1998年 Doerfliger 等^[19]提出了第1种专门适用于岩溶含水层的评价方法——EPIK 法。随着欧洲 COST 65 和 COST620 的实施,一种全新的岩溶含水层脆弱性评价方法——“欧洲模式”诞生了,但其更多的是一种评价理念,各国科学家结合本国的实际情况,发展出如 PI、COP、VULK、LEA 等具体方

法,开始了岩溶含水层脆弱性评价的新纪元。以下以岩溶含水层脆弱性评价研究发展历程为主线,介绍几种有代表性的岩溶含水层脆弱性评价方法,并就其评价指标、适用条件和存在问题进行一些探讨。

2.1 DRASTIC 模型

DRASTIC 模型是由美国水井协会(NWWA)和美国环境保护局(EPA)于1987年合作开发,适用于宏观尺度大范围区域的地下水脆弱性评价方法。它基于4个主要的假定^[6]:①污染物存在于地表;②污染物通过降雨渗入地下;③污染物随水迁移;④研究区面积不小于0.4 km²。DRASTIC 提供了2组权重系列:一组适用于一般条件;另一组则专门为强烈的农业活动区设计,也称为农药 DRASTIC 指数,是一种“特定污染物脆弱性评价”方法。

$$I = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

式中: I 为评价综合指数; D_r 、 D_w 分别为地下水埋深分级及其权重; R_r 、 R_w 分别为净补给量分级及其权重; A_r 、 A_w 分别为含水层岩性分级及其权重; S_r 、 S_w 分别为土壤类型分级及其权重; T_r 、 T_w 分别为地形坡度分级及其权重; I_r 、 I_w 分别为包气带介质类型分级及其权重; C_r 、 C_w 分别为导水系数分级及其权重。

计算所得 DRASTIC 指数值越大,则地下水面临污染的相对风险也越高。标准 DRASTIC 法的指标值范围为23~230(所有污染物),26~260(农药类)。一般 DRASTIC 指标值在50~200之间。

DRASTIC 模型是目前应用最广泛的评价模型之一,该方法在美国获得成功应用并积累了丰富的经验。1991年 Lobo-Ferreira 博士将其引入欧共体国家,作为欧共体各国地下水脆弱性评价的统一标准。然而, DRASTIC 方法属于经验性方法,它综合了40多位水文地质学专家的经验,其评价模型是线性的,确切地说对于复杂的含水层而言,该方法缺乏理论上的严谨性,并且针对特殊要求不够灵活(如岩溶含水层)。许多变量都进入最终的数据(脆弱性指标),关键的地下水系统脆弱性参数被其他不重要的参数冲淡。DRASTIC 模型中7项参数的权重值是一成不变的,然而实际上,在不同的地区地质条件不同,7个参数的权重也会发生变化。因此许多研究者根据实际情况提出了改进的 DRASTIC 模型,一般是增加或减少一些参数。许多学者也尝试将 DRASTIC 模型应用于岩溶含水层脆弱性评价中,但是效果却不理想^[18]。主要是因为 DRASTIC 模型并没有考虑岩溶含水层的特殊性,如岩溶含水系统的“二元”特性以及落水洞、天窗、漏斗等岩溶形态对地下水脆弱性的影响。DRASTIC 模型没有提供专门的工具来处理岩溶含水层的特殊情况。

2.2 EPIK 法

由于 DRASTIC 模型的局限性,欧洲学者试图开发出适合于岩溶区的评价模型。Doerfliger 等^[19]在 1997 年提出了第 1 种专门适用于岩溶含水层脆弱性评价的 EPIK 法。EPIK 法首先应用于瑞士阿尔卑斯岩溶山区,选用的因子包括表层岩溶带(I_E)保护层(I_P)、岩溶管道发育程度(I_K)和入渗条件(I_1)。其中参数 I_E 主要考虑降雨或冰雪融水在表层岩溶带中的存储和运移特征,参数 I_P 主要刻画地表到地下水位之间覆盖层(土壤层、非岩溶层以及包气带等)的保护特性,参数 I_1 主要区分面状扩散入渗区和集中入渗区,而地形坡度和土地利用情况是其最重要的 2 个二级因子,参数 I_K 代表的是含水层中岩溶网络的发育程度。EPIK 法是一种多属性加权的计算方法,其最终结果 F 值范围为 9~34,数值越大,反映该区域受保护程度越高,即脆弱性等级越低。最后,根据计算结果划分 4 个不同的脆弱性等级,用来建立水源地保护区。

$$F = \alpha I_E + \beta I_P + \gamma I_1 + \sigma I_K$$

其中 α 、 β 、 γ 、 σ 为权重系数。

EPIK 法是第 1 个专门针对岩溶含水层开发的脆弱性评价体系,也是第 1 个把“落水洞集中入渗”作为参数来考虑的方法, I_E 、 I_P 、 I_K 3 个参数都是岩溶地区的特有属性。该方法操作简单,已应用于瑞士数个农业污染问题频发地区,取得了较好的效果,现已被纳入瑞士环境保护法,用来划分水源地保护区。然而,它仅适用于小流域水源地脆弱性评价,并且没有考虑内源水和外源水的补给以及包气带厚度对含水层脆弱性的影响。但是,EPIK 法所考虑的参数以及评价模式对以后岩溶含水层脆弱性评价体系的发展产生了很深远的影响。

2.3 欧洲模式

欧洲学者通过 COST65 和 COST620 2 个项目近 10 年的努力,希望提出一种可以应用于不同水文地质条件、不同经济情况、不同科研水平的欧洲标准。欧洲模式是基于源—路径—目标的概念模型(图 2)发展起来的。在欧洲模式中,地下水对污染物的脆弱性分为固有脆弱性和特殊脆弱性。固有脆弱性考虑的是区域的水文地质特征,不考虑污染物的影响;特殊脆弱性不仅考虑水文地质特征,而且还考虑水文地质特征与污染物的相互作用。两类脆弱性评价都可以用于含水层和水源地的保护。

欧洲模型的地下水固有脆弱性概念模型评价考虑 4 个因子:覆盖层(O)、径流特征(C)、降雨条件(P)和岩溶发育程度(K)。其中 O 、 C 、 K 因子描述的是岩溶系统自身特征, P 因子是外来压力对岩溶地下水系统的影响^[20](图 2)。研究含水层资源的保

护时,只考虑 O 、 C 、 P 因子,而进行源的评价时则还需考虑 K 因子。覆盖层(O)包括从地表到地下含水层之间的部分,一般分为表层土、下层土、非岩溶层和非饱和岩溶带 4 部分,表层土和下层土壤的厚度、孔隙度和渗透性对含水层脆弱性有直接的影响。 O 因子是最重要的因子,它表征的是地下水的天然保护层属性。然而,在岩溶地区,降雨通常是通过落水洞等点状补给方式直接补给含水层,这时 C 因子的作用就很大。地形坡度、上层土壤性质、植被以及形成集中流的地质特征(如竖井、高渗漏区域等)对 C 因子都有影响。 P 因子涉及降雨量、降雨频率、降雨持续时间等,间接影响着污染物的入渗率、渗漏和地下水流以及污染物的运移特征。源的脆弱性评价还需考虑饱水带的水平路径, K 因子刻画了岩溶管道的水力特征^[3,12]。

欧洲模式是一种概念性的模型,各国研究者在具体应用时,采纳的因素不尽相同,方法各异^[21-22]。如 PI 法、COP 法、LEA 法、Time-input 法、VULK 法等。欧洲模式还提出了污染源危险性评价和污染风险性评价,与脆弱性评价成果结合起来进行含水层保护和土地利用规划。可以说欧洲模式在岩溶含水层脆弱性评价研究中具有里程碑式意义,它继承和发扬了 EPIK 方法的思路,形成了一套较完整的概念模型和评价理念,为最新发展的评价方法如越南模式和 Slovenia 模式等提供了强有力的理论支撑和参考。

2.4 越南模式

越南模式也称作“二元法”,由 Nguyet 等^[23]于 2006 年提出,是基于欧洲模式发展出来的一种特别简化的评价模式,只考虑覆盖层(O)因子和径流特征(C)因子,两因子的含义与欧洲模式中阐述的一致。该方法将径流过程划分为 3 种类型:①以内源水补给为主的高渗透性岩层区的直接入渗和渗流;②有外源水补给即侧向地表径流存在下的低渗透性岩层区发生的经常性地表径流,最终通过点状或入渗带集中补给岩溶含水层;③中间过渡类型。该方法认为,渗透率相对较低的碎屑岩、落水洞等点状入渗点及地表溪流等集中入渗带存在与否,将直接影响 C 因子产生的脆弱性。越南模式是一种极端简化的方法,它甚至没有考虑植被和土地利用情况对地下水脆弱性的影响。同时,该方法也认为地表的岩溶形态(如溶痕、溶沟)并不能直接反映其脆弱性,因为即使在地表被土壤覆盖而没有任何岩溶特征的情况下,污染物也可能快速地通过薄的土壤层和包气带而抵达含水层。

越南模式是针对越南热带气候条件下岩溶山区而开发出来的评价模式,其要求的数据量相对较少,在发展中国家以及缺乏数据的地区具有很好的借鉴

法,它适用于所有含水层,但同时也专门为岩溶含水层提供了工具,对今后的研究具有很好的参考价值。

3 岩溶含水层脆弱性评价指标探讨

根据起源—路径—目标模型,定量评价地下水固有脆弱性一般从3方面考虑:①潜在污染物质从源到目标的运移时间;②潜在污染物的物理衰减,如物理弥散、稀释以及双重介质的影响等;③潜在污染物到达目标点的量。但地下水脆弱性只具有相对的性质,它无法测量,无维,无量纲,评价结果的精确度取决于代表性的评价指标以及可靠数据的数量。不同的脆弱性评价体系采用的评价指标不同,表1为不同岩溶地下水脆弱性评价方法所考虑的因素指标比较。

表1 岩溶含水层不同固有脆弱性评价方法考虑因素比较

参数	考虑因素	DRASTIC 模型	EPIK 法	PI 法	越南 模式	Slovenia 模式
上覆层	上层土壤厚度	+	+	+	+	+
	上层土壤结构	+	-	+	-	+
	上层土壤构造	+	-	+	-	+
	下层土壤渗透性	+	+	+	+	+
	下层土壤厚度	+	+	+	+	+
	包气带深度	+	-	+	-	+
	岩层断裂	-	-	+	-	+
	表层岩溶带发育情况/地貌特征	-	+	+	-	+
	含水层封闭情况(承压或非承压)	-	-	+	-	+
	入渗条件	汇流	-	+	+	+
地形坡度		+	+	+	-	+
土地利用/植被覆盖		-	+	+	-	+
补给来源	内源补给	+	+	+	+	+
	外源补给	-	+	+	+	+
岩溶网络	活跃的岩溶网络	-	+	-	-	+
	源的水文特征	-	+	-	-	+
	示踪实验解释	-	+	-	-	+
源的脆弱性	时间变化性	-	-	-	-	+
	源的脆弱性	-	+	-	-	+
	资源的脆弱性	+	-	+	+	+

注: + 表示该因子被采用; - 表示该因子不被采用。

通过比较可以看到,由于一个地区往往同时存在几种类型的水,如岩溶含水层上有裂隙含水层。而且,适用于一般类型含水层的评价方法更易于被土地利用规划者和决策者接受。目前一些有效的岩溶地下水脆弱性评价方法都适用于一般含水层,同时提供专门的工具来处理岩溶含水层的特殊情况。

DRASTIC模型是目前应用最广泛的方法,但其完全没有单独考虑岩溶含水层的特殊性;EPIK法是第1个专门针对岩溶含水层的方法,被用于水资源保护区划分,但其考虑的指标以及评价体系和权重系统不太完善。越南模式考虑的指标最少,是一种极端简化的方法,在数据较少的地区仍有一定的借鉴

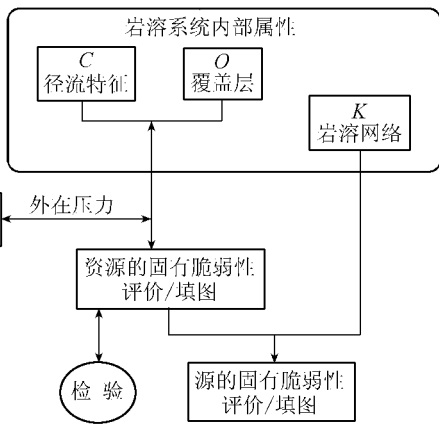


图2 岩溶地下水固有脆弱性评价的欧洲模式

意义。但是要具体情况具体分析,实事求是,灵活应用。该方法仍然需要更多的实践验证。

2.5 Slovenia 模式

2005—2007年 Ravbar 等^[24]在斯洛文尼亚的一个泉域进行脆弱性和风险性评价研究,于欧洲模式之后提出岩溶含水层脆弱性评价的 Slovenia 模式,代表了岩溶地下水脆弱性评价的最新研究进展。

Slovenia 模式考虑了覆盖层(O)、径流特征(C)、降雨条件(P)和岩溶发育程度(K)4个因子,其概念和评价体系与欧洲模式相同,但是同时也做出了很多创新性的改进。如:考虑了落水洞的活跃性。它指出由于地下水位的强烈波动,有些落水洞只在某些特定水文事件下(如暴雨、洪涝等)下才会成为污染物进入含水层的通道,而在平时并不跟含水层发生直接的联系,在脆弱性评价中应分别考虑。同时,将降雨事件细分为:常规降雨事件(20~80 mm/d)和极端降雨事件(>80 mm/d)2类,来细化不同降雨条件下的脆弱性。在源的保护中,Slovenia 模式还对K因子进行了详细的刻画,它认为K因子不能只考虑岩溶化程度,更重要的是要描述地下水流的水动力特征以及与需要保护的泉或井的联系。该方法考虑到高水位时期和低水位时期含水层的流域范围是不同的,根据对泉或井补给频率的不同(常年补给或偶尔补给),将流域划分为内在区、过渡区和外在区,不同的区域对于岩溶地下水的脆弱性影响不同,同时进一步强调了污染物在水中的运移时间以及示踪实验回收率在脆弱性评价体系中的重要性。该模式还整合考虑了地表水体和伏流与岩溶含水层积极的水力联系所带来的脆弱性。不足的是,该方法没有在高水位时期检验其准确性^[24]。

Slovenia 模式将脆弱性评价结果与灾害评价、水资源重要性评价进行整合,提出了一套较为完善的风险性评价体系,将脆弱性评价结果更好地应用于岩溶含水层水资源保护和土地利用管理中。总体来说,Slovenia 模式是目前最新,也是考虑因素最全面的方

意义,且需要更多的实践检验;Slovenia 模式为最新的方法,其考虑的指标最为全面,评价体系最为完整,是目前为止对岩溶地区含水层脆弱性指标最详细的诠释,但需要更多实践的检验。

然而,要建立一个包含所有因素的模型来评价地下水脆弱性是相当困难的,一方面因为有些参数很难取得,尤其在岩溶区;另一方面因为参数过多,它们之间的关系也错综复杂,难以突出重点,所有这些往往会影响到模型的有效运行,得不出满意的结果,有时甚至会得出荒谬的结论。这就要求在脆弱性评价时具体问题具体分析。

4 面临的挑战和发展趋势

4.1 机理研究

岩溶含水层脆弱性评价是建立在评价体系基础上的,而评价体系的正确与否取决于对机理研究的程度。由于岩溶含水层的特殊脆弱性,岩溶地下水在不同岩溶地区的运动机理并不完全清楚,特别是各种污染物在岩溶含水层中的运移规律以及物理化学变化机理更是模糊,这严重限制了脆弱性评价尤其是特殊脆弱性评价的发展。

4.2 权重分配

不同水文地质条件下的岩溶含水层脆弱性不同,影响因素也不尽相同。将所有的影响因子全部考虑显然不现实,也无法突出重点。而有些指标为定性指标,有些为定量指标,两者之间关系错综复杂^[25]。对于特定的情况,如何选取合适的评价参数,尽量避免参数赋值上人为因素的干扰,是今后地下水脆弱性评价中需要解决的问题。有学者提出,通过模糊数学中的隶属函数来描述非确定性参数及其指标分级界限的方法来减少人为干扰,有一定的参考价值。

4.3 数据获取

岩溶含水层脆弱性评价是基于充分掌握水文地质条件的基础上进行的。而岩溶系统高度的非均质性和各向异性,使得野外获取相关的水文地质参数变得非常困难。如上覆土壤层厚度、表层岩溶带发育情况、岩溶含水层渗透系数等参数,并且在通常情况下野外数据的内插法和外推法在岩溶区容易遇到更多的问题。如何运用有限的手段(物探、示踪、钻孔等)来真实有效地反映实际情况,是脆弱性评价要面临的很具体的问题。

4.4 结果验证

已有研究表明:对于同一个研究点,不同的评价方法所得结果并不相同,甚至有时候会出现相反的结果。验证方法应从地下水脆弱性的概念出发且独

立于评价(填图)过程,但至今为止没有一个公认的检验方法。各国专家纷纷提出:采用水文过程曲线、水化学曲线、微生物分析、示踪实验、水均衡、类比分析和数值模拟等手段来进行验证,得到的结果各异^[26]。示踪实验由于可以模拟确切的物质在含水层中的运移情况而被广泛运用,但是示踪剂种类、投放方式等因素也会影响最终结果^[15]。如何选取和应用有效的方法来验证脆弱性评价结果是今后研究的重点。

4.5 定量研究

现存的绝大多数评价方法均为定性方法或半定量方法。Kralik 等^[27]在 2003 年提出的“时间输入法”将水流从地表到地下的运移时间和降雨补给输入量作为评价指标,采用运移时间和补给量的实际值来评价岩溶山区的含水层脆弱性。定量评价方法的好处在于评价结果的可靠性更易于验证,评估过程更加清楚,同时也能更加有效地避免人为因素的影响。如何发展出更完善的定量评价方法是难点,更是挑战。

4.6 水量评价

现在水资源管理正在实现地表水和地下水统一管理,含水层的脆弱性评价也应朝这个方向发展,才能与水资源管理接轨,发挥它的最大功效。相对于水质的脆弱性,岩溶地下水量的时空变化带来的脆弱性也是十分重要的。随着过量开采地下水所产生的一系列地下水环境负面效应问题的发生,这一矛盾将越来越突出。水质和水量是岩溶水资源不可分割的两方面,水量评价耦合水质评价将是今后应研究的一个重要方面。

4.7 方法的选取

从评价方法来看,国内外研究方法可分为 2 大类:美国的 DRASTIC 模型以及欧洲的欧洲模式。DRASTIC 模型作为现在应用最广泛的评价方法,已经非常成熟,并且我国开展的地下水脆弱性评价研究多是按 DRASTIC 模型的思路。欧洲方法是现在国际上最新、也是最全面的适用于岩溶区的脆弱性评价理念,在欧洲发达地区已经有很多成功的经验,但主要集中于大陆性气候和高山气候以及地中海气候下的岩溶地区。中国西南亚热带湿润温暖的气候条件下的岩溶含水层具有特殊性,目前没有合适有效的方法能够评价其脆弱性和风险性。如何找到适用于中国西南岩溶含水层的脆弱性和风险性评价方法是对西南岩溶工作者的重大挑战。

参考文献:

[1]袁道先.西南岩溶区地下水环境告急[N].科学时报,

- 2009-2-19(1).
- [2] 白利平,王业耀.地下水脆弱性评价研究综述[J].工程勘察 2009(4) :43-48.
- [3] BAKALOWICZ M. Karst groundwater : a challenge for new resources[J]. Hydrogeol J 2005 ,13(1) :148-160.
- [4] 章程,蒋勇军, MICHÈLE L, 等.岩溶地下水脆弱性评价“二元法”及其在重庆金佛山的应用[J].中国岩溶 2007 , 26(4) 334-340.
- [5] 邹胜章,张文慧,梁彬,等.西南岩溶区表层岩溶带水脆弱性评价指标体系的探讨[J].地学前缘 2005 ,12(特刊) :152-158.
- [6] US Environmental Protection Agency. DRASTIC : a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting[R]. Oklahoma : EPA ,1985.
- [7] International Association of Hydrogeologists. Guidebook on mapping groundwater vulnerability[R]. Hannover :IAH ,1994.
- [8] USNRC. Groundwater Vulnerability Assessment [M]. Washington D C : National Academy Press ,1993.
- [9] 李大秋,邓春凯,刘新华,等.地下水脆弱性评价方法研究[J].环境保护科学 2007 33(5) :64-67.
- [10] European Commission. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate aquifers : final report COST action 620 [R]. Brussels :EC 2004.
- [11] WHITE W B. Geomorphology and hydrology of karst terrains [M]. New York : Oxford University Press ,1988 464-465.
- [12] 袁道先,中国岩溶学[M].北京:地质出版社,1993 :1.
- [13] FORD D C , WILLIAMS P W. Karst geomorphology and hydrology[M]. London : Chapman and Hall ,1989 601.
- [14] WILLIAMS P W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology[J]. Journal of hydrology ,1983 61 :45-67.
- [15] BENISCHKE R ,GOLDSCHIEDER N ,SMART C. Methods in karst hydrogeology[M]. London : International Contributions to Hydrogeology 2007.
- [16] 章程,袁道先,李强,等.典型表层岩溶动力系统的环 境敏感性研究[J].水文地质工程地质 2005(1) :78-80.
- [17] CUCCHI F ,FORTI P ,ZINI L. The vulnerability of complex karst hydrostructures : problems and perspectives[J]. Geofisica International 2004 43(4) :533-540.
- [18] GOGU R C ,HALLET V ,DASSARGUES A. Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques ,application to the Ne 'blon river basin (Belgium) [J]. Environ Geol ,2003 ,44 (8) 881-892.
- [19] DOERFLIGER N , JEANNIN 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(EPIK method) [J]. Environ Geol 1999 ,33(2) : 165-176.
- [20] DALY D ,DASSARGUES A ,DREW D et al. Main concepts of the European approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping[J]. Hydrogeol J 2002 ,10 :340-345.
- [21] GOLDSCHIEDER N ,KLUTE M ,STURM S ,et al. The PI method : a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers[J]. Angew Geol 2000 46(3) :157-166.
- [22] RAVBAR N ,GOLDSCHIEDER N. Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment[J]. Hydrogeol J 2009 ,17 :725-733.
- [23] NGUYET V T M , GOLDSCHIEDER N. A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk ,and its first application in a tropical karst area ,Vietnam[J]. Hydrogeol J 2006 ,14 :1666-1675.
- [24] RAVBAR N. Vulnerability and risk mapping for the protection of karst waters in Slovenia : application to the catchment of the Podstenjšek springs[D]. Slovenia : University of Nova Gorica , 2007.
- [25] GOGU R C ,DASSARGUES A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods[J]. Environ Geol ,2000 ,39(6) : 549-559.
- [26] NEUKUM C ,HÖTZL H ,HIMMELSBACH T. Validation of vulnerability mapping methods by field investigations and numerical modeling[J]. Hydrogeol J 2008 ,16(4) 641-658.
- [27] KRALIK M ,KEIMEL T. Time-input an innovative groundwater vulnerability assessment scheme : application to an alpine test site[J]. Environ Geol 2003 44(6) 679-686.
- (收稿日期 2009-12-15 编辑 徐 娟)
- +++++
- (上接第 4 页)
- [10] 粟晓玲,康绍忠,魏晓妹,等.气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J].西北农林科技大学学报, 2007 35(2) :153-159.
- [11] 王国庆,张建云,贺瑞敏.环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J].水科学进展,2006,17(6) :853-858.
- [12] ZHANG Lu ,DAWES W R ,WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research 2001 37 :701-708.
- [13] VIVEK K A. The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff[J]. Journal of Hydrology , 2002 265 :164-177.
- [14] LI Li-juan ,ZHANG Lu ,WANG Hao et al. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding river basin in China[J]. Hydrological Processes , 2007 21 :3485-3491.
- [15] MA Zhen-ma ,KANG Shao-zhong ,ZHANG Lu ,et al. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China [J]. Journal of Hydrology 2008 352 :239-249.
- (收稿日期 2010-03-10 编辑 徐 娟)