

姜光辉. 融合生态学和提升岩溶水数值模拟技术的国际前沿研究[J]. 中国岩溶, 2016, 35(1): 1-4.
DOI:10.11932/karst2016y01

融合生态学和提升岩溶水数值模拟技术的国际前沿研究

姜光辉

(中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室
/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004)

摘 要:岩溶水由于其脆弱性和非均质性被认为是水文地质领域的重点研究方向。2015 年 6 月在英国伯明翰大学举办的岩溶水国际会议吸引了世界上 100 多位长期从事岩溶水研究的学者参加,会议从岩溶地质、岩溶水模拟、特殊生态系统、岩溶环境以及水文地质技术方法五个方面进行研讨,提出了很多新认识。例如利用岩溶水模拟进行管道位置的预测;发展分布式混合水流模型已经成为岩溶水模拟的主流;开展岩溶含水层地下生物多样性的调查;注重岩溶环境的评价、科普和保护衔接等。未来岩溶水研究的动向具有以下特征:(1)岩溶水研究范畴将扩大到生态学领域;(2)岩溶水模拟的精度将得到显著提高;(3)与人类健康有关的岩溶环境得到更多的关注。为此建议中国地质调查项目跟上国际岩溶水研究的形势,提高地质调查成果的科技含量,尽快实现模型化,增强服务社会的功能。

关键词:岩溶水;碳酸盐岩;岩溶环境;地下水生态;地质调查

中图分类号:P641

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2016)01-0001-04

0 引 言

岩溶水由于其脆弱性和非均质性被认为是水文地质领域的重点研究方向。2015 年 6 月在英国伯明翰大学举行的岩溶水国际研讨会,是近七年来国际水文地质学家协会岩溶专业委员会(IAH KC)举办的以岩溶水文地质为主题的国际学术活动之一。会议由伯明翰大学地理与地球环境学院的 John Gunn 和 Ian Fairchild 组织。会议的五个主题分别是^[1]:

主题 1:地层、构造和岩性对岩溶水的影响。共有 10 个口头报告,主题报告来自于瑞士洞穴和岩溶研究所的 Pierre-Yves Jeannin 博士。主题 2:岩溶水的模拟。有口头报告 16 个,主题报告来自于德国弗赖堡大学地球与环境科学研究所的 Andreas Hartmann 博士。主题 3:岩溶水与生态系统。共有口头报告 6 个,主题报告来自于 Christian Griebler 教授,德国慕尼黑的地下水生态研究所。主题 4:人类活动

和岩溶水的相互作用。共有口头报告 16 个,主题报告来自于德国卡尔斯鲁厄技术学院的 Nico Goldscheider 教授。主题 5:同位素和示踪技术的应用。共有口头报告 4 个。

1 岩溶水研究的热点与主题

1.1 地层、构造和岩性对岩溶水的影响

岩溶发育与地质的关系是岩溶水文地质经典研究内容之一。利用地质分析的方法,可以确定含水层和隔水层,判断补给区、径流区和排泄区等。中国南方岩溶水文地质调查,运用该方法发现了 3 000 多条地下河,并通过地质推测和访问确定这些地下河的位置。还有没有更好的方法使地下河调查的成果更加确切?瑞士的 Pierre-Yves Jeannin 博士对这个问题的解决做了尝试。他利用自己擅长的数值模拟的手段来预测地下岩溶管道的位置,取得了很好的效果。

基金项目:国家自然科学基金(41172231、41472239);广西自然科学基金(2013GXNSFDA019024);中国地质调查项目(1212011121166);国家文物局(2011-735)

作者简介:姜光辉(1977-),博士,副研究员。主要从事岩溶水文地质研究。E-mail: bmnxz@126.com。

收稿日期:2015-10-21

Jeannin 博士所构建的模型充分利用了地层、岩性和构造等地质信息,加上含水层的边界条件和一些水文数据,其预测结果与实际测量有很好的一致性。

岩溶水在包气带中的运动与地质构造之间同样存在着密切的关系。Palmer A. N. 教授的研究显示,在美国猛犸洞地区包气带径流多沿着层面运动,其运动方向与地表分水岭和地下水分水岭的关系不大。在岩层厚度较大的时候,垂向的裂隙经常改变地下径流的方向。研究包气带径流可以在洞穴中进行,通过洞穴测绘标记出洞穴内包气带水流的部位,研究包气带水流出露条件与地质构造的关系,能够对区域包气带水流的特征形成合理的认识。也可以通过示踪试验寻找包气带径流的方向。Palmer 关于包气带径流的研究对于中国南方岩溶地区开展表层岩溶带的调查具有启发性,为预测山坡地下径流的流向提供了一个可能方法。

国外学者还注重从洞穴形态分析中寻找形成洞穴的水动力条件,为水文地质的研究提供信息。洞穴形态学分析如何反映其形成时的径流条件,表 1 列举了三个例子(表 1)。

表 1 洞穴形态和对应的径流条件
Table 1 Morphology of cave and its corresponding flow

作者	水文地质条件	洞穴形态特征
Mydroie J. E.	海岸含水层排泄边界的淡水透镜体	侧面边缘洞穴,具有明显的三维特征,洞穴形态和岩性的关系不显著
Auler A. S.	水力梯度和地下水流速很低,带来洞穴被沉积物充填的现象	洞穴共生和后期改造现象
Klimchouk A.	上升水流	洞穴溶痕和垂直与水平洞道的组合

1.2 岩溶水的模拟

岩溶水的模拟研究在国际上有很大的进展,是本次会议的重要主题之一。尽管众多关于岩溶水模拟的研究具有不同的方向和特色,但同时也具有几个重要的共同特征。为了应对岩溶水模拟遇到的多重介质和多种径流的问题,需要从不同空间尺度过程的结合入手,充分借鉴其他类型模型的方法,提高模型的复杂程度,使其能够充分利用多种试验和观测数据,提高模拟的精度。而且模型的应用是其发展的基础,充分发挥模型在预测气候变化对水资源的影响以及管理人类活动方面的功能,才能为其发展提供动力(图 1)。

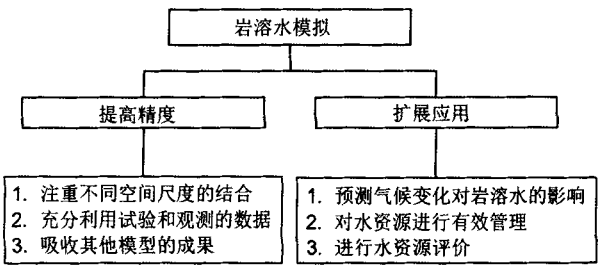


图 1 国际岩溶水模拟研究的形势
Fig. 1 Research tendency of karst water modeling

岩溶水模拟研究是岩溶水文地质研究定量化和取得进步的重要途径,是岩溶水科学研究水平的重要标志。而构建和完善分布式岩溶水模型则是岩溶水模拟研究的方向。尽管利用 MODFLOW 等广受欢迎的商业化模式软件在岩溶水模拟领域已经取得的成果得到了一定程度的认可,但是也不乏质疑,特别是在预测地下水流向和流速方面,即使是在水位或泉流量吻合很好的情况下出现严重错误,因此提高模型的精度成为普遍的追求目标。

提高岩溶水模型的应用则是促进岩溶水模拟研究的动力。国际上已有的研究实例证明,岩溶水模型至少在以下三个方向具有很大的应用潜力,分别是针对当前气候变化的影响做出科学的评估、对岩溶水资源进行有效的管理,防止水质污染、海水入侵和其他环境问题的发生,以及协助开展特殊水文地质条件下的水资源评价,比如坑道疏水。而评估气候变化的影响更加具有挑战性。

国际上提出解决岩溶水多重介质及不均匀运动的方案,即分布式混合水流模型。美国地质调查局发布的,以 MODFLOW 为基础的管道流模块 CFP^[2],尽管在国际上有越来越多的应用,但该方案也存在不完善之处。从本次会议发布的成果来看,现有分布式的混合水流模型在包气带问题和参数估计以及模型的精度方面仍有很大的提升空间。本次会议在这方面的进展可以为模型的改进提供参考。比如多尺度的模拟使得水流过程描述更加清晰,并有助于充分利用数据;抽水试验的结果在模型的帮助下得到充分的解释;而示踪试验和水化学监测数据的利用显著提高了模型的确定性。在其他领域例如溶质运移、水文模型和传统地下水范围内的模拟技术被应用到岩溶水模拟。

除了分布式模型取得了进展之外,本次会议还展示了集总式和黑箱模型的成果。对比分布式模型与其他模型,可以发现未来分布式模型的以下特征和功能将得到加强。

- (1)能够体现管道的位置和作用;

- (2)能够反映降雨集中补给的机制;
- (3)能够逐步克服参数的不确定性;
- (4)能够反映不同介质及其之间动态的水流过程;
- (5)能够充分利用水文地质试验来降低模型的不确定性。

1.3 岩溶含水层的生态

地下生态系统的研究有两种视角,区别在于偏重于生态系统还是偏重于水文地质?生态学的观点以生命体为中心,认识生活在地下的生物类型和生物生命活动和分布对环境的适应或反应。水文地质学研究往往借助生态系统的研究来认识与水质有关的生物地球化学作用,以及水流的来源。不仅于此,与地下水关联的碳循环则关系到地下微生物群落的组成以及水环境的变化,是认识人们普遍关心的环境变化问题的基础。所以地下生态系统的研究尽管有所偏重,也是统一的。

地下生态系统的研究存在下列关注度高的问题:

- (1)地下生物如何反映水动力条件和营养源的变化?
- (2)地下生态系统的栖息地怎么分类?
- (3)地下生态系统的生物多样性如何?
- (4)地下生态系统的研究手段怎么提升?

特别值得关注的是,英国地质调查局开展的岩溶含水层无脊椎动物的调查提供了创新的方向。调查结果显示,在岩溶不甚发育的年轻的白垩纪含水层无脊椎动物的存在度非常广泛。调查所采用的钻孔闭路电视技术,为英国公司自主研发,集合了钻孔环境的录像、测速、采样等多种功能,是创新产品。

来自意大利亚桂拉大学的 Galassi 教授展示其利用桡足类动物示踪岩溶泉径流来源的研究。桡足类动物属于在地下水环境中广泛分布的动物类群,而且检测方法简单,常用于指示地下水环境,预计在岩溶水的研究中会有广泛的应用前景。

1.4 人类活动与岩溶水的相互作用

国际上一种岩溶环境整体论的观点正在被广泛接受(图 2)。认识到岩溶地区各种资源的重要性和岩溶环境的脆弱性,整体地看问题的方式更加能够显示岩溶环境变化的整体性和显示足够的空间和时间尺度。岩溶环境包括水、土壤、岩石和生活在其中的生物等要素。如何将环境要素之间的联系和环境整体显示出来的功能表达出来,岩溶泉的监测是一个重要的手段。来自西班牙和德国的两个报告分别介绍了岩溶泉电导率在降雨补给时的变化,反映污染物通过快速补给路径影响水质。然而另外一个重要问题如果没有解决将会使对岩溶环境的保护无从开展,那

就是岩溶水的边界和路径,即岩溶水的补给、径流和排泄条件。

岩溶地区受到关注的环境问题包括:与农业活动有关的岩溶水面源污染、采矿活动的影响、突发性点源污染、海水入侵、干旱等。农业活动造成的岩溶水中硝酸盐污染在世界范围内具有普遍性。爱尔兰学者开展不同农作技术对减少地下水硝酸盐污染的贡献,提出了农业活动减少面源污染的技术对策,为政策制定提供了具有实用价值的参考。同样是来自爱尔兰的学者研究了农业活动地区磷元素的特殊脆弱性。磷元素在地表具有很强的吸附性,不仅仅是土壤,岩石对其也具有一定的吸附能力。通过磷元素的高分辨率监测,发现磷元素在含水层中的运移大部分通过裂隙介质。

能够认识到岩溶环境的脆弱性,全面评估各种类型人类活动的影响,采取一定的措施,并通过模型预先评价措施的效果,这些是解决问题的必要方式。自从欧洲和美国开展地下水的脆弱性和污染风险性评价方法以来,脆弱性和风险性评价和编图就成为含水层管理的主要参考依据。这些建立在对含水层防污性能和污染物特殊运移行为基础上的评价成果还需要不断地通过不同的方式和途径传送到决策者和民众,转化为政策和行动。

能够被广泛接受的成果表达方式有数据库、研究报告和图件,在这个过程中存在问题,比如在编图的时候如何表示埋藏型岩溶和重叠含水层,岩溶发育程度怎么区分。本次会议有不少尝试,例如通过标记所有地表能够见到的岩溶现象表示岩溶发育程度等。



图 2 岩溶环境研究的整体论模式

Fig. 2 A holistic perspective of karst environment research

2 岩溶水研究的趋势

未来岩溶水的研究具有如下趋势:

- (1)研究范畴扩展。地下生态系统的多样性和功能得到更多的研究。地表和地下生态系统的联系得

到充分的认识,联系地表和地下的碳循环研究将成为热点。

(2)岩溶水的模拟精度得到提高。特别是在区域尺度上,模型将为预测和评价气候变化对水资源的影响提供帮助。

(3)与人类健康有关的岩溶环境得到更多的重视。岩溶水脆弱性评价将在模型运用的帮助下向前推进,成为岩溶地区国土资源管理的手段。

联系到中国岩溶地质研究的实际,未来岩溶地区的国土资源调查和研究的领域将逐步深入到地表以下的空间,更多的利用更加直接的手段,例如录像、洞穴潜水、监测和原位试验,来探索一个有机的世界。气候变化将成为国土资源调查的主题,气候变化引起的干旱、洪水和地质灾害将成为国土资源管理的主要挑战,而地质调查将通过调整工作内容和更新手段来为制定岩溶地区应对气候变化的策略服务。中国的岩溶地质研究还将继续关注人类健康和环境的关系,通过完善监管措施来确保国土安全。

3 结论与建议

在国际岩溶水研究的发展和驱动的影响下,中国的岩溶科学研究将会取得一些重要的成果。例如中国正在开展的碳循环研究将从宏观尺度走向流

域尺度甚至是小生境尺度。与地质作用相关的碳循环与生物作用的联系会得到重点关注。中国正在开展的水文地质调查将为政府应对全球气候变化和遏制环境恶化发挥显著的作用。但是实现上述目标的前提是岩溶研究和调查工作尽快实现模型化,不能停留在地质描述阶段。

国际上对岩溶水模型的探索成为岩溶水文地质研究领域创新的主流。中国的岩溶地质研究立足于自主创新,构建适合于中国岩溶特色的岩溶水模型。结合现阶段模型在水资源评价上的应用需求,根据地质勘察的精度和数据库质量,重点发展实用性强的水均衡模型和非线性黑箱模型。发挥地质调查的优势,提高岩溶水系统边界条件确定的准确度和流量测量计算的精确度,建立地下河流量的数据库,评价在气候变化条件下的水资源潜力前景,并构建表层岩溶带水资源的评价方法,为石漠化治理提供依据。

参考文献

- [1] Water Sciences Research at University of Brimingham. International conference on Groundwater in karst[EB/OL]. [2015-10-05]. <http://www.birmingham.ac.uk/generic/kgatb/index.aspx>
- [2] Shoemaker W B, Kuniansky E L, Birk S, and Swain E D. 2008, Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005: U. S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chapter A24, 50p.

The research progress and developing tendency of karst water

JIANG Guang-hui

(Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics/International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract International conference on groundwater in karst was held in the Birmingham University, June 2015. Hundreds of scholars around the world took part in it and presented their newest studies. As the hosts, University of Birmingham and British Geological Survey showed their new progress on karst research in UK. It is believed that the important presentations in the conference may be representative for the development of karst hydrogeology in the future. Five topics were involved in the conference, including lithological, structural & stratigraphical influence on karst groundwater, karst groundwater system modeling, ecological system of karst groundwater, human-karst groundwater interaction, as well as technologies for karst groundwater exploration. According to the presentations, new knowledge emerged one after another. For example, a new modeling method was tried to predict the position of main flow paths in a karst massif. The distributed hybrid model was discussed widely for karst water. An invertebrate ecology of Chalk groundwater was identified by the support from BGS, which set a good example for further study in this topic. A holistic perspective of karst environment was noted. In the future, research on ecosystem in karst environment will be noticeable. The accuracy of modeling prediction will be enhanced obviously. Karst environmental problems, which were closely related to human life, will be solved gradually. The current projects arranged by Chinese Geological Survey should follow the new trend appearing in the conference and obtain more functions of predicting and optimal management to serve the society actively.

Key words karst water, carbonates, karst environment, groundwater ecology, geological survey

(编辑 张玲)