

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.004

同位素水文学研究综述

谭忠成¹, 陆宝宏¹, 汪集^{1,2}, 孙营营¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:综述了国内外同位素水文学研究的主要成果,认为同位素示踪方法在解决某些水文、水资源及环境地质问题方面优势比较明显,并且有助于从宏观和微观上阐明水循环过程中各相关要素的变化情况,揭示某些水文基本现象的内在规律.指出了同位素水文学研究当前存在的问题和今后的一些重点课题,并对同位素技术或方法在水文学中的应用前景进行了展望.

关键词:同位素水文学 同位素示踪技术 环境同位素 水文学

中图分类号: P343 P641.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)01-0016-07

同位素水文学是一门应用同位素理论与方法研究水文学问题的学科.从 20 世纪 50 年代末“isotope hydrology”术语的提出^[1],至今同位素水文学作为一门独立的学科已得到长足的发展,其研究及应用领域不断扩大.目前,同位素水文学理论已广泛应用于水文、水资源及环境地质等诸多领域,其研究方法也日臻完善.近 40 年来,环境同位素和人工同位素在水汽来源、降雨径流关系、干旱半干旱区的水资源评价、地表水与地下水的相互作用、地下水起源及测年、湖泊蒸发量及换水周期、水体污染物的来源、地热资源以及气候变化和人类活动对水循环的影响等研究领域的应用十分广泛.本文对国内外同位素水文学的研究进展进行了综述,同时指出了同位素水文学研究当前存在的问题和今后的一些重点课题,并对同位素技术或方法在水文学中的应用前景进行了展望.

1 研究进展

1.1 大气降水

大气降水中环境同位素问题的研究始于 20 世纪 50 年代,Dansgaard 等^[2-4]最先进行了天然水体中的氢氧稳定同位素组成的研究.英国从 1952 年、美国从 1958 年开始进行降水中的氡测验^[5].之后,国际原子能机构(IAEA)与世界气象组织(WMO)合作,建立了包括世界上大约 150 个气象台站在内的“全球大气降水同位素监测网”(GNIP)^[6].目前,在 GNIP 中的中国测站已有 30 个.GNIP 可以为研究全球尺度下降水中环境同位素的时空变化规律提供基本资料,并且通过环境同位素示踪水循环,可以为世界各地解决区域性水资源及水环境地质问题提供依据.

1.1.1 降水中的氢氧同位素关系

大气降水中的氢氧同位素组成呈线性关系,这一变化规律是由 Craig^[7]在研究北美地区大陆大气降水时发现的,其数学表达式为 $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$.该方程即为全球大气降水线(global meteoric water line, GMWL)方程,又称 Craig 方程.Craig 的这一发现,说明大气降水中的氢氧同位素组成是可以预测的.另外,GMWL 提供了关于推断地下水来源的依据,具有重要意义.Rozanski 等^[8]利用 GNIP 中的 219 个台站所测降水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的长系列平均值进行回归分析,并得出了更高精度的 GMWL.

GMWL 适用于全球尺度.实际上,由于气候和地理参数的变化,大气降水的同位素组成存在时空变化,因此各地区的大气降水线(local meteoric water line, LMWL)与 GMWL 也存在差异.GMWL 实际上是全球许多 LMWL 的平均值,LMWL 会受到地区气象因素的控制,这些地方气象因素会对大气降水线的斜率和氡盈余值

产生影响^[9]. 通过 LMWL 的分析,可以了解该地区的降水规律、水汽来源以及由二次混合和重蒸发过程所引起的变化.

1.1.2 降水中的同位素组成及分布

目前,对影响大气降水氢氧同位素组成的几个效应(如温度效应、高程效应和降水量效应等)的研究^[10-13]已较为深入. Dansgaard^[14]通过北大西洋沿岸资料的分析,发现大气降水的平均同位素组成与温度存在显著的正相关关系. 大气降水氢氧同位素组成与气候及地理因素之间存在直接关系,一系列以温度为基础的因素,影响着降水过程和大气水在当地降水线上的位置(与水蒸气团的运移路径、水蒸气团上升的地形特征及季节效应等有关)^[9].

1.2 降雨径流关系

1.2.1 河川径流组分划分方法

降雨径流是水文循环过程中极为重要的一个环节. 降雨径流研究的主要内容是 降雨量与直接径流量之间的关系 直接径流过程线或时程分配 ;净雨过程线或时程分配(即单位线) ;降雨频率与流量频率的关系^[15]. 直接径流划分是河川径流组分划分的基础,工程水文应用中常采用图解划分法,结果带有较大的经验性和任意性. 而根据地下和地表径流水化学成分进行流量过程线划分的方法也不可靠^[9]. 环境同位素示踪方法为河川径流组分划分提供了一种较为可靠的方法. 同位素方法划分河川径流组分的主要依据是流域地下水和给定的暴雨同位素组成的差异. Fritz 等^[16]应用稳定同位素定义了单个流域径流组成中的前期降水(pre-event water)和本次降水(event water)组分. Rodhe 等^[17-20]利用小流域研究了此类问题. Buttle^[21]对利用同位素划分水文过程线的方法进行了野外实际应用. 顾慰祖等^[22-24]利用环境同位素²H 和¹⁸O 对野外实验集水区进行了降雨径流关系研究,结果表明 地面径流并非完全源于本次降雨,其中往往有前期降水的成分 非饱和带壤中流和饱和地下水径流中必有前期降水的水量,与地面径流一样,次降雨过程存在时程变化 ;不同径流组成的流量过程,前期降水所占比重不同. 该研究结果与水文学传统意义上的降雨径流一一对应关系不符.

早期研究通常采用将河川径流划分为地表径流和地下水径流(基流)2 种组分的方法,即流量过程线的两组分划分法. Turner 等^[25-27]通过实验证明了环境同位素流量过程线两组分划分法的局限性及不合理性. 同位素流量过程线的三组分(地表径流、壤中流和地下水径流)划分法一般需要用 2 个参数和 3 个方程,故经常将水化学离子作为辅助示踪剂. 例如, Hinton 等^[27]用¹⁸O 和 SiO₂ 作为互补指示剂识别出了河川径流组成中的 3 种组分.

1.2.2 产流方式

顾慰祖^[24]通过水文实验与环境同位素²H 和¹⁸O 相结合的方法识别地表径流、壤中流和地下径流在内的 11 种产流方式,发现只有少数产流方式遵循或在某种条件下遵循达西(Darcy)定律,大部分产流方式不遵循达西(Darcy)定律并且涉及水流通过水气界面的特殊土壤水问题,难以用数学方式来表达.

1.3 湖泊

同位素方法在湖泊水文学中的应用主要表现在以下几个方面 冰均衡计算 浓度动力学调查 湖泊水平均滞留时间 湖泊沉积物 湖泊内的物质循环.

Fontes 等^[28]对阿尔及利亚撒哈拉地区极度干旱条件下季节性湖水蒸发过程中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 进行了测量,建立了水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值和剩余水比率 f 的指数关系式,并用外推法确定出了水的原始同位素组成. Mortimer^[29]指出了湖泊水文学研究中的主要问题,并认为可以用同位素方法来解决这些问题. 利用蒸发过程的同位素效应来研究具有较长平均滞留时间的湖泊水量平衡问题,只有在湖水均匀混合、并且由于蒸发作用使得湖水与补给水源相比已显著地富集重同位素的情况下才有可能. Gonfiantini^[30]提出了具有恒定体积的湖水的同位素质量平衡计算方法. Ingraham 等^[31]对干旱区尾间湖出现的平衡同位素富集问题进行了研究,发现该平衡是由入流、下渗、蒸发以及与大气的同位素交换所维持的. Gourcy^[32]认为,利用同位素技术来研究湖泊问题时需对以下 4 个要素进行调查:(a)湖泊水文、化学及同位素的平衡;(b)湖水动力学;(c)粒子及溶质动力学;(d)沉积动力学. 为了评估环境同位素技术在湖泊动力学及相关问题(如溶质动力学、沉积物堆积和地表水体污染的脆弱性)研究中的潜能,IAEA 于 1994 年提出了一个关于“湖泊动力学调查中的同位素技术”的协调研究计划(CRP).

1.4 地表水与地下水的相互作用

地表水和地下水之间的补排关系,一般是通过分析含水层的等势面与地表水水位的关系来确定的。但是,由于渗透性变化较大,很难依据水的实际迁移来解释它们的水位差异。尤其在工业化流域,突发的污染物泄漏使得与河水相连的含水层存在潜在污染,临海城市可能遭受到海水的入侵,此时,及时地了解水体实际迁移的信息对选择抽水站点(或取水口)和了解地下水可能遭受污染的程度极为重要。同位素方法的价值在于其为鉴别水体实际迁移提供了一种手段,为研究地表水与地下水相互转换关系及转换数量提供了一种较为便捷的途径。研究地表水与地下水相互作用时常用到的同位素有 ^{18}O 、 D 、 ^4He 和 ^{222}Rn 等。Maloszewski等^[33]认为,对研究区内的河流和井水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 进行定期测量,同时通过河流的季节变化来确定河流对供水井的相对贡献以及分析含水层的特征,是建立河流被污染情况下含水层污染物的传播时间和速度的水力扩散模型的基础。当河流污染情况确定时,根据扩散模型可以确定污染物到达出口断面的时间及其浓度。刘丹等^[34]应用环境同位素方法研究了塔里木河下游浅层地下水,发现塔里木河下游浅层地下水直接来源于塔里木河河水。钱云平等^[35]采用环境同位素与水化学分析相结合的方法研究了黑河流域地表水和地下水形成及转换规律,从而为黑河流域水资源的总体评价、黑河流域下游水利工程规划和水量调度提供了科学依据。

1.5 地下水的起源及测年

1.5.1 地下水起源

目前,同位素方法在地下水起源、补给源区所处海拔高度和各种补给源的相对比例等问题研究中的应用已相当普遍。地下水的同位素组成主要取决于地下水的来源,不同来源水的同位素组成的差异及同位素含量的时空变化是应用环境同位素方法解决地下水补给来源问题的基础。其中:空间变化的因素有高程效应、纬度效应、氡盈余、与地下水历史有关的分馏效应。时间变化的因素有季节性补给、近代(指1952年以来)补给和古地下水(指更新世冰川期补给的水)的鉴别。研究地下水起源时常用到的同位素有 ^{18}O 、 D 、 T 、 ^{13}C 和 ^{14}C 等。

地下水通常有2个或更多个起源,是化学特征截然不同、年龄不同的地下水成分的混合物。将水化学分析与同位素方法相结合,可以区分不同种类的地下水,建立地下水的混合平衡关系。由两三个成分组成的模型可作粗略估算之用。对数据进行时间序列分析时可采用更为复杂的模型^[36-37]。

1.5.2 地下水测年

在古水文学和水文地质学研究中,地下水平均滞留时间(即常说的地下水年龄)是一个非常重要的参数,可为含水层长期补给潜力的确定、地下水资源的合理开发及科学管理提供重要依据。目前,有很多同位素方法都可用来估算地下水平均滞留时间。氢氧稳定同位素的季节变化信息提供了一种简明的测年方法。在地下水补给过程中,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 所呈现的季节性变化幅度会变小,因而可根据变化幅度变小的程度来初步判定地下水平均滞留时间。地下水平均滞留时间的计算公式20世纪70年代就已提出,后来有不少学者对其进行了改进^[38]。Taylor等^[39]采用类似方法研究了新西兰Weimakariri河流域集水区对降水输入的响应,并得出了集水区水平均滞留时间约为1a的研究结果。

目前,实验室所采用的常规测年方法有2种,即 ^3H 法和 ^{14}C 法。 ^3H 的含量已成为定义现代地下水的依据,不含 ^3H 的地下水通常被认为是‘次现代’或古老的。用 ^3H 法测定地下水系统中水的年龄时,通常以大气降水中的同位素作为输入信号。由 ^3H 法确定的浅层地下水和裂隙泉水中的滞留时间大约不到150a^[40]。利用 ^{14}C 测定地下水年龄的方法是由德国学者Munnich于1957年提出的,后来不断地得到推广和改进。尽管有许多因素(如水岩相互作用和计算模型)会影响该测年方法的准确性,但该测年方法仍然是目前地下水测年中应用最广的方法。目前, ^{14}C 法地下水测年的有效范围大约为30000a。

1.6 包气带中土壤水分的运移

了解包气带中土壤水分的运移规律是进行包气带地下水水均衡计算的基础。20世纪60年代,国外^[41-42]开始利用同位素研究土壤水分的运移规律。其研究方法是:首先通过注射的人工 ^3H 同位素来标记某一水平面上的土壤水分,并假定土壤水不会从任何方向绕过标记层,在入渗雨水的作用下,示踪剂标记层向下作活塞运动。然后在不同时刻对不同深度的土壤水进行采样,并测定其中的 ^3H 放射性浓度。最后根据测定结果分析 ^3H 放射性浓度与深度的关系,研究观测期内标记层以上土壤水分的变化规律,并建立降水量与蒸发量之间的均衡关系。国外一些学者还通过野外实验进一步研究了示踪剂随土壤水迁移的形式以及由分子扩散引起的侧向混合对标记层示踪剂峰值弥散速度的影响,并发现毛细管作用力对包气带水流的影响极为显著。

20 世纪 70 年代末,国外开始使用一维多箱模型(multibox model)模拟土壤水分的运移过程,并通过相应的数值模型对示踪剂的迁移与弥散进行模拟计算^[43].该一维多箱模型,即等高度理论板(height equivalent theoretical plate, HETP)模型将包气带看作一系列土壤层,并假定每层内的土壤水已充分混合,用层的厚度来控制示踪剂运移过程中的纵向弥散.稳定和放射性同位素在包气带土壤水分运移研究方面也得到了应用.如 Baker 等^[44]用人工³H 水进行水分在非饱和砂砾石层内的运移与分布的喷洒实验研究时,发现非饱和带内的水分运移与分布受诸多因素的影响,比饱和带内的水分运移与分布复杂得多.

1.7 古洪水

设计洪水频率曲线的外延一直是水文学中有争议的问题.其主要问题在于洪水频率法需要更多更长的大洪水资料,而现有的实测洪水和历史调查洪水资料很难满足洪水频率法的需要.因此,单纯靠数学方法外延洪水频率曲线无疑会产生较大误差.同时,这种外延法缺乏物理基础,其计算成果很难让人信服.而将同位素方法用于古洪水研究时,可以将洪水资料的时间序列扩展至几千年.其基本思路为:首先利用第四纪年代学和水文学知识发掘出古洪水平流沉积物(包含有古洪水水位和发生年代的记录),测定其高程,再据此分析其水位,然后利用放射性同位素测年技术确定其发生的年代,最后确定洪水的量级和发生时间.20 世纪 80 年代中期,詹道江等^[45]将考古学中应用的同位素测年技术引入水文学领域,并将这种同位素测年技术成功地应用于淮河支流西淝河上的淮河响洪甸水库和天津岗南、黄壁庄水库的古洪水研究.20 世纪 90 年代,国内开始对长江三峡地区进行古洪水沉积物同位素测年分析,得出了多场古洪水发生的年代及相应的洪峰流量,使洪水的考证期大为延长,为三峡工程设计中的洪水计算提供了可靠的依据.

1.8 其他方面

同位素方法还在河道流量测量、泥沙运动、地热水起源及年龄、地热资源的补给量、喀斯特地区地下水流系统、冰川及融雪径流等方面的研究中得到了应用^[46-51].

2 存在问题

当前,同位素水文学研究存在的主要问题有:(a)许多与同位素方法相结合的研究还处于理论探索或试验阶段,缺乏必要的实践和技术指导.(b)大部分利用环境同位素示踪流域水循环的研究,主要是针对水文循环过程中的某一环节进行的,尚未将水文循环过程作为一个整体来进行系统研究.(c)研究区域大多为小流域,尺度太小,不利于进行受流域尺度显著影响的课题(如全球水循环和气候变化)的研究.涉及大流域同位素研究的项目,由于采样点和监测的项目都明显不足,数据分析难度较大.(d)尽管同位素方法已被看作水资源管理与评价的重要手段,但相应的评价标准和法规尚未建立,实践中不便于操作和推广.(e)定性研究居多,定量研究不够,尤其是基础理论方面的开拓性研究还有待进一步加强.

3 今后应重点研究的一些课题

a. 气候变化研究.人类活动产生的二氧化碳等温室气体向大气的排放量急剧增加,全球气候发生了显著变化,尤其是碳循环发生的变化更为显著.因此,应根据大气中稳定碳同位素的组成变化来研究全球的气候变化.

b. 同位素方法在无资料地区水文预报(prediction in ungauged basins, PUB)中的应用.如何解决 PUB 问题,一直是困惑水文学家的难题.2003 年 7 月,IAHS(国际水文科学协会)启动了一个名为 PUB 的国际水文计划,该计划准备用未来 10 年的时间,通过包括同位素方法及遥感技术在内的新理论与新方法的探索来开展 PUB 问题的研究.

c. 水域生态系统研究.应利用稳定同位素 C, N, S 等研究水域生态系统中生物资源的迁移变化及相互关系,确定消费者的食物来源以及食物网的结构和营养级,了解水域生态系统的动态变化及其受外界环境影响的程度.

d. 地表水及地下水污染研究.将同位素示踪技术与水化学分析方法相结合,可以推测水体中污染物的来源,掌握污染物随时间的迁移规律和转化途径,估计地下水对地表水污染的敏感性,从而可以达到对已发生的水污染事件进行技术仲裁、为城市供水水源地的选址及治污方案的制订提供依据等目的.

4 结 语

到目前为止,水文学中的一些发现仍停留在通过现有实测降雨径流资料分析得到的一些假定上.传统水文系统的‘黑箱’处理方法无法从成因上揭示水文过程的内在规律,借助于同位素示踪技术可以获得一些水文基本现象的真实规律.现存于水文学中的若干不同见解,很可能要依靠同位素水文学来‘正本清源’.而对于水文学理论中至今未知的若干领域,也可能要依靠同位素水文学才能有所发现^[52].

随着水文学、同位素方法及地球化学方法的不断发展,以及人类合理开发水资源和保护水环境、水生态要求的不断提高,同位素水文学将在多学科的交叉和渗透中拓展其研究领域,并在水文学的基础理论及定量化研究方面取得新的进展.

参考文献:

- [1] AGGARWAL P K, FROEHLICH K, GONFIANTINI R, et al. Isotope hydrology: a historical perspective from the IAEA [M]//AGGARWAL P K, GAT J R, FROEHLICH K F O. Isotopes in the water cycle: past, present and future of a developing science. Berlin: Springer, 2005 3-8.
- [2] DANSGAARD W. The abundance of ^{18}O in atmospheric water and water vapor[J]. Tellus, 1953, 5(4): 461-469.
- [3] EPSTEIN S, MAYEDA T K. Variations of the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratio in natural waters[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1953, 4: 213-220.
- [4] FRIEDMAN I. Deuterium content of natural waters and other substances[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1953, 4: 89-103.
- [5] GAT J R, GONFIANTINI R. Stable isotope hydrology: deuterium and oxygen-18 in the water cycle[R]. Vienna: IAEA, 1981: 103-139.
- [6] FROEHLICH K, GONFIANTINI R, AGGARWAL P. Isotope hydrology at IAEA: history and activities[R]. Vienna: IAHS, 2004: 125-132.
- [7] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133: 1702-1703.
- [8] ROZANSKI K, ARAGUA L, GONFIANTINI R. Isotopic patterns in modern global precipitation[M]//SWART P K, LOHMANN K C, MCKENZIE J, et al. Continental isotope indicators of climate. Washington, D. C.: American Geophysical Union Monograph, 1993: 1-36.
- [9] CLARK I D, FRITZ P. Environmental isotopes in hydrogeology[M]. New York: Lewis Publishers, 1997: 15-26.
- [10] GAT J R. Atmospheric water[M]//MOOK W G. Environmental isotopes in the hydrological cycle, principles and applications: volume II. Vienna: IAEA, 2001: 7-74.
- [11] YURTSEVER Y. Worldwide survey of stable isotopes in precipitation[R]. Vienna: IAEA, 1975: 1-40.
- [12] FRIEDMAN I, SMITH G I. Deuterium content of snow cores from Sierra Nevada area[J]. Science, 1970, 169: 467-470.
- [13] GAT J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrological cycle[J]. Annual Review of Earth and Planetary Science, 1996, 24: 225-262.
- [14] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 463-468.
- [15] SINGH V P. 水文系统降雨径流模拟[M]. 赵卫民, 戴东, 王玲, 等, 译. 郑州: 黄河水利出版社, 1999: 11-129.
- [16] FRITZ P, CHERRY J, WEYER K U, et al. Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions[C]//Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology. Vienna: IAEA, 1976: 111-130.
- [17] RODHE A. Groundwater contribution to stream flow in Swedish forested till soil as estimated by oxygen-18[M]//Isotope hydrology. Vienna: IAEA, 1984: 55-66.
- [18] TURNER J V, BRADD J M, WAITE T D. Conjunctive use of isotopic techniques to elucidate solute concentration and flow processes in dryland salinized catchments[C]//Isotope techniques in water resources development. Vienna: IAEA, 1992: 33-60.
- [19] CHO S H, MOON S H, LEE K S, et al. Hydrograph separation using ^{18}O tracer in a small catchment, Cheongdo [J]. Journal of the Geological Society of Korea, 2003, 39(4): 509-518.
- [20] HUTH A K, LEYDECKER A, SICHMAN J O, et al. A two-component hydrograph separation for three high-elevation catchments in the Sierra Nevada, California [J]. Hydrological Processes, 2004, 18: 1721-1733.
- [21] BUTTLE J M. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins [J]. Progress in Physical Geography, 1994, 18: 16-41.
- [22] 顾慰祖. 集水区降雨径流响应的环境同位素实验研究 [J]. 水科学进展, 1992, 3(4): 246-254.
- [23] GU Wei-zu. Unreasonableness of current two component isotope hydrograph separation for natural basins [C]//Isotopes in water resources

- management. Vienna : IAEA,1996 : 261-264.
- [24] 顾慰祖. 利用环境同位素及水文实验研究集水区产流方式[J]. 水利学报,1995(5) : 9-17.
- [25] TURNER J V, MACPHERSON D K. Mechanisms affecting streamflow and streamwater quality : an approach via stable isotope, hydrogeochemical and time series analysis[J]. Water Resources Research,1990,26 : 3005-3019.
- [26] MCDONNELL J J, BONELL M, STEWART M K, et al. Deuterium variations in storm rainfall : implications for stream hydrograph separations[J]. Water Resources Research,1990,26 : 455-458.
- [27] HINTON M J, SCHIFF S L, ENGLISH M C. Examining the contribution of glacial till water to storm runoff using two and three-component hydrograph separations[J]. Water Resources Research,1994,30 : 983-993.
- [28] FONTES J C, GONFIANTINI R. Comportement isotopique au cours de l'évaporation de deux bassins sahariens[J]. Earth and Planetary Science Letters,1967(7) : 325-329.
- [29] MORTIMER C H. Some central questions of lake dynamics[C]//Isotopes in lake studies. Vienna : IAEA,1979 : 1-19.
- [30] GONFIANTINI R. Environmental isotopes in lake studies [M]//FRITZ P, FONTES J C. Handbook of environmental isotope geochemistry,2 : the terrestrial environment. Amsterdam : Elsevier,1986 : 113-118.
- [31] INGRAHAM N L, CRISS R E. Effects of surface area and volume on the rate of isotopic exchange between water and water vapor[J]. Journal of Geophysical Research,1993,98 : 20547-20553.
- [32] GOURCY L. Use of isotope techniques in lake dynamics investigations[M]. Vienna : IAEA,2001 : 97-104.
- [33] MALOSZEWSKI P, MOSER H, STICHLER W, et al. Modelling of groundwater pollution by riverbank filtration using oxygen-18 data [M]//Groundwater monitoring and management. Dresden : IASH,1987 : 153-161.
- [34] 刘丹,刘世青,徐则民. 应用环境同位素方法研究塔里木河下游浅层地下水[J]. 成都理工学院学报,1997,24(3) : 89-95.
- [35] 钱云平,林学钰,秦大军,等. 应用同位素研究黑河下游额济纳盆地地下水[J]. 干旱区地理,2005,28(5) : 574-580.
- [36] ZUBER A. Mathematical models for the interpretation of environmental radioisotopes in groundwater systems[M]//FRITZ P, FONTES J C. Handbook of environmental isotope geochemistry. Amsterdam : Elsevier,1986 : 1-59.
- [37] MALOSZEWSKI P, ZUBER A. Principles and practice of calibration and validation of mathematical models for the interpretation of environmental tracer in aquifers[J]. Advances in Water Resources,1993,16 : 173-190.
- [38] BURGMAN J O, CALLES B, WESTMAN F. Conclusions from a ten year study of oxygen-18 in precipitation and runoff in Sweden[M]//Isotope techniques in water resources development. Vienna : IAEA,1987 : 579-590.
- [39] TAYLOR C B, WILSON D D, BROWN L J, et al. Sources and flow of North Canterbury Plains groundwater, New Zealand[J]. Journal of Hydrology,1989,106 : 311-340.
- [40] MEBUS G. Groundwater : saturated and unsaturated zone[M]//MOOK W G. Environmental isotopes in the hydrological cycle, principles and applications : volume IV. Vienna : IAEA,2001 : 95-99.
- [41] ZIMMERMANN U, MUNNICH K O, ROETHER W, et al. Tracers determine movement of soil moisture and evapotranspiration[J]. Science,1966,152 : 346-347.
- [42] BLUME H P, ZIMMERMANN U, MUNNICH K O. Tritium tagging of soil moisture : the water balance of forest soils[C]//Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Vienna : IAEA,1967 : 315-332.
- [43] DATTA P S, GUPTA S K, SHARMA S C. Simulation of water movement through vadose zone[C]//GUPTA S K, SHARMA P. Current trends in arid zone hydrology. New Delhi : Today & Tomorrow's Printers and Publishers,1979 : 93-101.
- [44] BAKER D, KLOTZ, D, SEILER K P. Dispersion and movement of water in the unsaturated zone of sands and gravels[M]//Stable and radioactive isotopes in the study of the unsaturated soil zone. Vienna : IAEA,1985 : 7-33.
- [45] 詹道江,谢悦波. 古洪水研究[M]. 北京 : 中国水利水电出版社,2001.
- [46] 张信宝,贺秀斌,王安邦,等. 川中丘陵区小流域泥沙来源的¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb 双同位素法研究[J]. 科学通报,2004,49(15) : 1537-1541.
- [47] 陈月红,刘孝盈,汪岗. 放射性同位素示踪在泥沙研究中的应用[J]. 水利水电技术,2003,34(5) : 4-6 : 63.
- [48] 汪集 ,熊亮萍,庞忠和. 中低温对流型地热系统[M]. 北京 : 科学出版社,1993 : 48-63.
- [49] 庞忠和,樊志成,汪集 . 漳州盆地水热系统氡同位素研究[J]. 地质科学,1990(4) : 385-393.
- [50] 赵永贵,蔡祖煌. 岩溶地下水系统的研究 以太原地区为例[M]. 北京 : 科学出版社,1991 : 158-210.
- [51] COOPER L W, OLSEN C R, SOLOMON D K, et al. Stable isotopes of oxygen and natural and fallout radionuclides used for tracing runoff during snowmelt in an arctic watershed[J]. Water Resources Research,1991,27 : 2171-2179.
- [52] 芮孝芳. 水文学的机遇及应着重研究的若干领域[J]. 中国水利,2004(7) : 22-24.

Isotope hydrology : progress and prospects

TAN Zhong-cheng¹, LU Bao-hong¹, WANG Ji-yang^{1, 2}, SUN Ying-ying¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract : The progress of isotope hydrology at home and abroad was reviewed. The isotopic tracer techniques were regarded to be of obvious superiority in solving problems concerning hydrology, water recourses and environmental geology, etc. It would help to illuminate variation of various hydrologic elements during water cycle process from both the macroscopic and microscopic viewpoints and to discover the inherent laws of some hydrological phenomena. The existing problems in researches on isotope hydrology at present as well as relative important topics in future were highlighted, and the prospects of the application of the isotope techniques or methods in hydrology were put forward.

Key words : isotope hydrology ; tracer technique ; environmental isotope ; hydrology

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63, CN32-1117/TV, ISSN1000-1980, 双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登河海大学在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

《河海大学学报(自然科学版)》创办于 1957 年,是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并获得中国高校精品科技期刊奖以及中国期刊方阵“双效期刊”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号。

《河海大学学报(自然科学版)》每逢单月出版,国内外公开发行,每期定价 12.00 元,全年 6 期共 72.00 元。读者可通过邮局订阅,也可直接向编辑部订阅。

编辑部地址 210098 南京市西康路 1 号《河海大学学报(自然科学版)》编辑部

电话/传真 025-83786343

E-mail xb@hhu.edu.cn

http://kkb.hhu.edu.cn/index_xb.htm