

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.05.004

同位素水文学的若干回顾与展望

汪集旻¹, 陈建生¹, 陆宝宏¹, 童海滨², 谭忠成¹, 孙莹莹¹, 林统³, 王永森⁴

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河南大学环境与规划学院, 河南 开封 475004;
3. 温州市水文站, 浙江 温州 325000; 4. 济南大学资源与环境学院, 山东 济南 250022)

摘要: 从降水径流、非饱和带水分运移、地下水来源及年龄测定、古洪水研究等方面回顾了同位素水文学研究的现状, 认为同位素示踪技术可以从更微观的角度研究径流形成、流域汇流过程中的水分转换关系等; 概述了河海大学近年来在同位素水文学研究方面的相关进展, 指出其研究主要包括同位素水文数学模型、平原区同位素径流组分划分试验、同位素在地下水中的应用、“引江济太”水量分配、流域氮源示踪等方面。在综述同位素水文学研究进展基础上, 对当前同位素水文学研究存在的问题进行了分析, 并对同位素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; 降水径流; 土壤水; 地下水年龄; 古洪水; 综述

中图分类号: TV314 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)05-0406-08

Review and prospect of isotope hydrology

WANG Jiyang¹, CHEN Jiansheng¹, LU Baohong¹, TONG Haibin²,
TAN Zhongcheng¹, SUN Yingying¹, LIN Tong³, WANG Yongsen⁴

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China;
3. Wenzhou Hydrological Station, Wenzhou 325000, China;
4. College of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: A systematic review was conducted of isotope hydrology, focusing on the relationship between precipitation and runoff, soil moisture movement in the unsaturated zone, and source identification and age determination of groundwater, as well as paleoflooding. It was found that isotope hydrology can describe the microscopic processes of water transformation during runoff formation and watershed flow concentration. The current research progress of isotope hydrology at Hohai University is summarized, including isotope hydrology mathematical models, experiments on partitioning of isotope runoff components in plain areas, application of isotopes in groundwater, water quantity distribution during the water diversion from the Yangtze River to Taihu Lake, and tracking of nitrogen sources in a watershed. Based on the review, present limitations of research on isotope hydrology are analyzed, and prospective future directions of research on application of isotope techniques in hydrology are described.

Key words: isotope hydrology; rainfall runoff; soil water; groundwater age; paleoflood; review

近年来, 针对水文过程的试验研究正朝着宏观更宏、微观更微的方向发展。从这个角度看, 同位素水文示踪技术使得科学工作者对水文学的研究从传统的分子层面深入到了更微观的原子核层面。同位素水文学研究主要包括两方面: 理论上, 它阐明了水文循环过程中与水文要素变化相联系的同位素分馏机理及放射性核素衰变原理; 应用上, 它研究水分的运动轨迹、演变过程, 也即指示水的踪迹、测定水的“年龄”, 为研究径

收稿日期: 2015-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(51309077)

作者简介: 汪集旻(1935—), 男, 江苏吴江人, 中国科学院院士, 研究员, 博士, 主要从事地热学研究。E-mail: jywlpx@mail.iggcas.ac.cn

通信作者: 谭忠成(1980—), 讲师。E-mail: tzc300@126.com

流形成、流域汇流过程中的水分转换关系提供了一定的理论依据。同位素水文示踪方法可以在一定程度上突破传统水文学测量方法的局限性,扩展水文学研究的理论和方法。目前,同位素水文学已有了较为系统的理论体系,已经成为水文学的一个重要分支,是一门正在蓬勃发展中的年轻学科,具有广阔的研究前景。从20世纪70年代开始,我国开展了同位素水文学研究,取得了令人瞩目的成果。最近十几年来,河海大学在同位素水文学研究方面也取得了一些进展。Aggarwal等^[1-6]对同位素水文学研究的历史、现状、主要进展等进行过评述,本文将重点放在河海大学近年来的同位素水文学研究进展和展望部分。

1 同位素水文学研究简要回顾

水中的同位素被称为水的“指纹”,具有很强的标识作用,通过对水中多种同位素的测量与校核分析,并结合地球化学与地球物理参数,理论上可以定性甚至定量地判断地表水与地下水的补给、径流、排泄等水文过程,在水文学的研究中有其独到之处。

1.1 降水径流

20世纪50年代,在国际原子能机构(IAEA)和平利用核技术的倡导下,英国、美国等率先开始进行大气降水中的环境同位素研究^[7],之后,IAEA与国际气象组织(WMO)合作,组建了“全球大气降水同位素监测网络(GNIP)”,旨在研究全球范围内各生态系统中降水环境同位素的时空变化规律,为了解各生态系统的气候变化规律、气候效应及预测未来气候变化提供科学依据。2002年,IAEA与联合国教科文组织(UNESCO)合作,在全球42条大江大河(包括我国长江)建立了“大江大河水同位素监测网(GNIR)”,旨在研究大江大河水、碳、氮的分布特征及循环规律,探寻气候变化及土地利用变化的响应机理。通过对GNIP提供的大量同位素数据进行拟合,得出呈线性关系的全球大气降水线(GMWL),GMWL说明大气降水中的氢氧同位素组成具有某种程度的可预测性。相对于GMWL,地区性的大气降水线(LMWL)在国内的应用则较为普遍,通过分析LMWL可以研究一个地区的降水规律、水汽来源以及由二次蒸发过程带来的影响。

降水径流是水文循环过程中极为重要的一环,主要研究降水量、径流量及其时程分配问题。工程水文对径流组分的直接划分一般采用图解法,划分结果因人而异,带有一定的任意性。环境同位素示踪方法为径流组分划分提供了一种具有物理基础的理论,上较为可靠的方法,早期研究一般将河川径流划分为地表径流和地下径流两组分,后来扩展到三组分(地表径流、壤中流、地下径流)甚至多组分^[8-9]。顾慰祖^[10-11]、谭忠成^[12]探讨了多组分划分方法的适应性和局限性,并通过同位素水文示踪试验,对降雨径流的一一对应关系进行了验证,得到了一些与传统水文认识上不尽相同的结论^[13]。这些结论激发了水文学者回过头来重新认识降雨径流的一一对应关系,重新审视现有的产汇流模式。

1.2 非饱和带水分运移

大气降水、地表水、土壤水、地下水之间的转化关系被称为“四水转化”,壤中流是“四水转化”研究中的薄弱环节,目前传统水文手段尚不足以对此环节建立实用性较强的“白箱”模型。20世纪60年代,国外开始尝试利用同位素示踪方法来揭示土壤水分运移规律^[14-15]。同位素示踪方法研究土壤水分的运动分为人工示踪与天然示踪2种类型。

人工示踪方法:通过向土壤某一层位注射人工氚,并假定示踪剂在入渗水的作用下向下做活塞运动,根据测定各时刻不同层位土壤水的氚放射性活度,分析氚放射性活度与深度之间的关系,研究观测期内标记层以上土壤水分运动规律及降水量与蒸发量之间的均衡关系。20世纪70年代末,国外开始使用一维多箱模型(multibox model)模拟土壤水的运动过程,并计算示踪剂的迁移与弥散速率^[16]。在非饱和带土壤水分运移方面也有类似研究,如Baker等^[17]用人工氚研究非饱和砂砾石层内的水分运移与分布时,发现非饱和带内的水分运移与分布受诸多因素影响,比饱和带复杂得多。

天然示踪方法:选择天然同位素作为示踪剂,例如,利用核试验期间降水中的高氚值作为示踪元素,通过分层采集土壤样品,测定土壤中氚的含量,氚含量峰值位置应该与“核试验”相对应,从而确定出降水在土壤水中的运动速率^[18]。降水中的氘氧同位素及各种离子也可以用来判断黄土高原区的降水入渗补给深度^[19]。

1.3 地下水来源及年龄测定

环境或人工同位素在研究地下水补给源来源、地表水与地下水相互作用及转换数量方面有其独到之处,

目前在地下水领域已被广泛应用。常用到的同位素有 ^{18}O 、 ^2H 、 ^3H 、 ^{13}C 、 ^{14}C 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 ^{222}Rn 等。Maloszewski等^[20]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,可构建相应的水力扩散模型来研究被河流污染的含水层中污染物的传播时间和速率。陈建生等^[21]通过分析河西走廊地区的降水与地下水的同位素组成,认为该地区地下水的主要补给源不是当地降水,地下水或许存在着一种外源补给方式。

在水文地质学研究中,地下水“年龄”(平均滞留时间)是一个很重要的参数,可为含水层长期补给潜力的确定、地下水资源开发利用方案的制定提供重要依据。目前,用来估算地下水“年龄”的同位素方法有很多种,其中,较为简易的一种测年方法是利用氢氧稳定同位素的季节变化信息来确定地下水“年龄”。因为在地下水的补给过程中,降水中 $\delta_{18\text{O}}$ 和 δ_{D} 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“年龄”。计算地下水“年龄”的方法早在20世纪70年代已被提出,后来这些方法得到逐步改进和完善^[22]。Taylor等^[23]采用类似方法研究了新西兰Weimakariri河流域对降水输入的响应,发现该流域水的平均滞留时间约为1 a。研究地下水起源时常用到的同位素还有T、 ^{13}C 、 ^{14}C 、 ^4He 、 ^{36}Cl 等,人工合成的高分子化合物CFCs(氟利昂)也被用来测定地下水的年龄^[24]。同位素测年的方法很多,不过涉及测年方法的应用与解释仍存在着一些问题。

1.4 古洪水及其他方面

早期进行设计洪水计算时,通常会遇到实测大洪水资料不足的问题,而以往会通过查阅文献、实地走访调查等方式来获取更多的历史大洪水资料,这种方式获取的资料,其准确性无法保证。为了使设计洪水频率法的计算结果更加可靠,人们将考古学中的同位素测年方法用于古洪水研究,从而使得历史大洪水资料的时间序列大为扩展。20世纪80年代中期,詹道江等^[25]将同位素测年技术成功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,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依据。

同位素示踪方法还应用于地热水起源及测年、地热资源补给、流量测量、泥沙运动、冰川及融雪径流、喀斯特区地下水等方面^[26-31]。

2 同位素水文模型及应用

以下简要介绍笔者近年来在河海大学从事的与同位素水文学相关的一些研究工作。

2.1 同位素水文数学模型

童海滨等^[32]利用数学物理方法尤其是微元分析法及其相应的解析求解法对同位素水文中的确定性数学模型做了初步的整理工作,并在流场、同位素浓度场和数学物理方法三者相结合的领域做了一些探索。

在稳定同位素水文的确定性数学模型方面,利用瑞利分馏原理,把蒸发过程中剩余水体中D和 ^{18}O 的同位素比值展开为蒸发度的函数,推导并证明了蒸发线并非直线,而属于幂函数型曲线^[32,6]。随后王永森等^[33]在降水线的研究中也发现类似问题,并给出了传统直线型关系式和幂函数型关系式间的换算关系。结合关于河流水动力学的圣维南方程组及地下水运动的达西定律,亦可推导出河水和地下水在流动条件下的D和 ^{18}O 关系式,这对习惯于利用“端元模型”建立线性方程组来研究水源组成的传统思路来说,算是一个从静态描述到动态分析的扩展。

在放射性同位素水文的确定性数学模型方面,基于水的“年龄”、质量守恒原理以及放射性衰变原理,推导了湖泊水中放射性同位素浓度变化与当前湖水体积、入湖流量、出湖流量之间的关系,以及湖泊放射性同位素浓度场与“年龄”输运方程之间的关系,从而使得直接依据放射性同位素浓度的变化数据来计算湖水年龄的变化成为可能^[34]。在地下水领域,同样可以得到上述诸种关系,特别地下水系统中不同半衰期的放射性同位素浓度之间的关系,可为同位素数据的校核带来便利,同时基于地下水同位素浓度场与水体“年龄”的关系式,可以直接从地下水中放射性同位素浓度分布数据直接得出地下水的年龄分布^[32]。

传统上,对于水文学中遇到的新问题,在没有现成理论成果的前提下,先基于大量资料采用统计学方法和基于经验主义的“曲线拟合”法,建立有关的“经验公式”,就成为了一种较为可行的方法,例如基于大量实测降水同位素数据的“降水线”^[35];除采用统计学方法之外,向其他学科借用一些公式或模型,则为另一种途径,例如,有些关于传输时间的集总参数模型,就借用了一些来自化学工程领域的公式^[36-40]。然而上述两

者,即便在某几个例子中能拟合出很好的结果,并不能证明其具有普遍适用性,何况在仅有的某些成功例子中,有些还存在“过拟合”的嫌疑,泛化能力始终是某些“经验公式”或“拿来主义”的硬伤。牛顿在提到自然“哲学”中的推理规则时说“寻求自然事物的原因,不得超出真实和足以解释其现象者”^[41]。目前,在瑞利分馏原理、放射性衰变原理、质量守恒原理等已经经过无数次验证的前提下,对同位素领域某些模型的建立可以不再使用“经验公式”和“拿来主义”的思路,完全可以依照确定性数学模型的建模思路,合理概化,运用有关已经广为证明的原理,基于微元分析方法,建立相关的常微分、偏微分方程模型^[42-44],再辅以一定的数值求解程序,通过针对性的试验或野外测验数据加以验证。

2.2 平原区同位素径流组划分分试验

谭忠成等^[12]通过对淮北平原区五道沟水文实验流域的径流组分进行同位素示踪试验研究发现,现行的同位素径流组划分模型存在一定的局限性,如果流域降水径流的实际情况不能很好地切合模型应满足的前提条件,其划分结果可能不理想,甚至于有悖常理,难以让人信服。谭忠成等^[45]针对影响同位素径流划分模型计算结果的几个敏感输入项进行了深入分析并提出了可行的改进方法。

谭忠成^[12]将引起同位素径流组划分模型计算结果不确定性的因素归结为两类:统计不确定性及模型不确定性;通过数学方法推导得出两组分及三组分径流划分模型结果的不确定度表达式,并对两组分径流划分模型进行参数的灵敏度分析,发现前期降水与本次降水的差异越大,模型结果的不确定度越小。运用 Monte Carlo 随机模拟的方法进行模拟计算,根据频率计算的结果对两组分径流划分模型的不确定性进行了评定,发现通过不确定性分析得到的结果更具有参考性,在工程水文的应用中能提供更好的决策支持。

2.3 同位素在地下水中的应用

2.3.1 地下水维系沙山景观

阿拉善及其周边地区的沙漠中普遍存在湖泊与沙山,尤其是巴丹吉林沙漠,因其腹地沙山高大、湖泊众多而备受关注。沙漠群腹地分布着数百个湖泊,其中不乏淡水湖和常年涌水的自流井,关于沙漠湖泊水来源问题一直是国内外学者关注和研究的热点。通过对沙丘中根管化石的碳、氧、锶同位素分析得出,地下水维系了巴丹吉林沙漠的沙山与湖泊景观,沙山至少在4000多年以来没有大幅移动过,沙山的成因不但与风的作用有关,而且还与地下水补给深度和补给量有关,地下水的涌水量决定着高大沙山的高度^[46-51]。

2.3.2 放射性同位素确定水文地质参数

放射性同位素示踪法是利用放射性核素作为示踪剂对研究对象进行标记的微量分析方法,该方法是研究地下水运动的有效手段之一。应用放射性同位素测定地下水运动多利用测井,通过测定测井内水流动态进而判断地下水的运动和含水层地质参数。

林统等^[52]结合大量现场试验,对综合示踪方法做了较深入的研究。发现现有研究中存在测量仪器落后、理论模型脱离工程实际等问题,严重影响了测量参数的可靠性,进而影响了综合示踪法对渗漏通道位置的判断。基于以上问题,对现场试验、理论模型以及现场测试系统研发等作了相关研究。首先在大量野外试验的基础上,针对现有研究中对于地下水流速、流向等参数测量中的不足,提出了新的理论模型,并利用工程实例验证了模型的合理性。其次,在现有示踪技术的基础上,引入坝体填筑材料的渗透系数作为示踪参数,并提出了测量含水层渗透系数的冲击试验法。针对现有冲击试验法研究中的不足,将示踪技术与冲击试验技术相结合,建立了适用性更强的理论模型,并通过野外试验验证了模型的合理性。

2.4 “引江济太”水量分配

伴随着“引江济太”由试验调水走向常年调水工程,太湖流域水资源配置和水环境将会发生彻底改变。由于“引江济太”工程区水系错综复杂,水文站网稀疏,因此凭借传统水文学或计算水力学方法评估“引江济太”工程对水资源分配的影响,只能带来冗繁的计算及较大误差。为此,陆宝宏等^[53-54]基于同位素示踪技术,将太湖通过太浦河泄水对下游受水区的水量分配影响作为研究目标,应用随机过程理论及方法,构建适用于平原河网感潮河流地区的随机模型;在太浦河段调水试验期间的应用实例表明:该模型可以比较精确地模拟河流中同位素浓度沿程的变化特点,可以用于求解水量沿程分配及受水区受水比例,为流域调水试验的效果分析提供更为科学有效的信息。

2.5 流域氮源示踪

氮的同位素分馏可以引起自然界含氮物质 δ_{15N} 的显著差异,而对于特定过程的同位素分馏是可知的,因

此在氮循环过程中氮同位素的改变可以预测。通过同位素组分及分馏系数,可对氮来源的同位素信号进行重建。此外氧同位素的使用有助于认识复杂的转化过程,因此综合2种元素的同位素组成可全面辨析氮的来源及转化。

陆宝宏等^[55]将硝酸盐潜在来源的同位素范围表作为滁州花山流域氮源划分的参考,归纳试验流域不同氮源输入量的同位素特征,通过构建贝叶斯同位素混合模型、采用蒙特卡洛-马尔科夫过程拟合同位素混合过程,计算了5种氮源(大气氮沉降、地下水氮含量、粪肥生活污水氮含量、土壤有机质氮素和化肥氮)对不同于流域地表水氮素输出的贡献率。

3 同位素水文学研究中存在的问题

当前,越来越多的水文学者开始关注同位素示踪方法在水文领域的应用,直接或间接地推动了同位素水文学向前发展,但现阶段与同位素方法相关的流域水文研究仍存在一些不容忽视的问题:(a)部分研究方案过于粗糙,尚未完成理论上的论证或模型试验阶段,就已进行现场试验,导致研究结果与预期差距很大;(b)大部分同位素示踪试验针对水文循环过程中的某一环节或者若干水文要素进行,研究尺度较小,缺乏整体性和系统性;(c)一些试验设计的采样周期较短且频次低,时间上的连续性不足,对于那些需要多年连续观测资料来进行同位素水文研究的情况,大都通过移用邻近区域或者随机模拟生成的方式获取数据;(d)部分研究者同位素基础理论准备不足,过于依赖数学模型来定量化处理数据,既不重视对试验过程的推敲,也不重视对同位素数据多解性问题的探讨,得出很多似是而非的结论;(e)对同位素方法在解决水文学问题方面的重要性和优越性还没有充分的认识,这些因素在一定程度上制约了该学科的发展。

4 展 望

一直以来,水文学中的一些定律大都基于现有实测降雨径流资料分析得到的猜测或推理。在以往对水文系统的研究方法中,“黑箱(black box)”研究方法(系统理论分析法)最为常见。一方面是由于水文过程的诸多环节很难直接观测到,用经典的数学物理方法来研究面临着重重障碍;另一方面是由于实际研究中所采用的由输入到输出的研究模式,恰恰吻合了“黑箱”方法的基本要旨。但是,这种只考虑实测数据而不关心水文机理的研究方法很难从成因上揭示水文过程的真实规律。水文学家芮孝芳^[56]认为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仍为未知的若干领域,也可能要依靠同位素水文学才能有所发现。

参考文献:

- [1] AGGARWAL P K, GAT J R, FROEHLICH K F, et al. Isotopes in the water cycle: past, present and future of a developing science[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2005.
- [2] 汪集旸. 同位素水文学与水资源、水环境[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2002, 27(5): 532-533. (WANG Jiyang. Isotope hydrology and water resources plus hydro-environment[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(5): 532-533. (in Chinese))
- [3] 庞忠和. 同位素水文学领域的国际科研合作与发展援助[J]. 水文地质工程地, 2004(2): 114-116. (PANG Zhonghe. International cooperation and development assistance of isotope hydrology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004(2): 114-116. (in Chinese))
- [4] FROEHLICH K, GONFIANTINI R, AGGARWAL P. Isotope hydrology at IAEA: history and activities [R]. Vienna: IAHS, 2004.
- [5] 谭忠成, 陆宝宏, 汪集旸, 等. 同位素水文学研究综述[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 16-22. (TAN Zhongcheng, LU Baohong, WANG Jiyang, et al. Isotope hydrology: progress and prospects[J]. Journal of Hohai University: Natual Sciences, 2009, 37(1): 16-22. (in Chinese))
- [6] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [7] GAT J R, GONFIANTINI R. Stable isotope hydrology: deuterium and oxygen-18 in the water cycle [M]. Vienna: IAEA, 1981.
- [8] 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.

- [9] 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. (GU Weizu. Experimental research on catchment runoff responses traced by environmental isotopes[J]. Advances in Water Science, 1992, 3(4): 246-254. (in Chinese))
- [10] 顾慰祖. 论流量过程线划分的环境同位素方法[J]. 水科学进展, 1996, 7(2): 105-111. (Gu Weizu. On the hydrograph separation traced by environmental isotopes[J]. Advances in Water Science, 1996, 7(2): 105-111. (in Chinese))
- [11] GU Weizu. Unreasonableness of current two component isotope hydrograph separation for natural basins[C]//IAEZ. Isotopes in water resources management. Vienna: IAEA, 1996.
- [12] 谭忠成. 淮北平原区河川径流组分划分的同位素水文实验研究[D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [13] 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, 26(5): 9-17. (GU Weizu. Various patterns of basin runoff generation identified by hydrological experiment and water tracing using environmental isotopes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 26(5): 9-17. (in Chinese))
- [14] ZIMMERMANN U, MUNNICH K O, ROETHER W, et al. Tracers determine movement of soil moisture and evapotranspiration [J]. Science, 1966, 152: 346-347.
- [15] BLUME H P, ZIMMERMANN U, MUNNICH K O. Tritium tagging of soil moisture: the water balance of forest soils [C]// IAEA. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Vienna: IAEA, 1967.
- [16] 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, 1979.
- [17] BAKER D, KLOTZ D, SEILER K P. Dispersion and movement of water in the unsaturated zone of sands and gravels [C]// IAEA. Stable and radioactive isotopes in the study of the unsaturated soil zone. Vienna: IAEA, 1985.
- [18] 张之淦, 刘芳珍, 张洪平, 等. 应用环境氚研究黄土包气带水分运移及入渗补给量[J]. 水文地质工程地质, 1990(3): 5-7. (ZHANG Zhigan, LIU Fangzhen, ZHANG Hongping, et al. Study of water movement and recharge rate of rainfall infiltration in aeration zone of loess by measuring natural tritium[J]. Hydrology and Engineering Geology, 1990(3): 5-7. (in Chinese))
- [19] CHEN Jiansheng, LIU Xiaoyan, WANG Chiyeun, et al. Isotopic constraints on the origin of groundwater in the Ordos Basin of northern China[J]. Environ Earth Sciences, 2012, 66(2): 505-517.
- [20] MALOSZEWSKI P, MOSER H, STICHLER W, et al. Modeling of groundwater pollution by riverbank filtration using oxygen-18 data[M]. Dresden: IASH, 1987.
- [21] 陈建生, 王庆庆. 北方干旱区地下水补给源问题讨论[J]. 水资源保护, 2012, 28(3): 1-8. (CHEN Jiansheng, WANG Qingqing. A discussion of groundwater recharge sources in arid areas of North China[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(3): 1-8. (in Chinese))
- [22] BURGMAN J O, CALLES B, WESTMAN F. Conclusions from a ten year study of oxygen-18 in precipitation and runoff in Sweden [M]. Vienna: IAEA, 1987.
- [23] 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.
- [24] MOOK W G. Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle, Principles and Applications[M]. Vienna: IAEA, 2001.
- [25] 詹道江, 谢跃波. 古洪水研究 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.
- [26] ZHANG Xinbao, HE Xiubin, WEN Anbang, et al. Sediment source identification by using ^{137}Cs and ^{210}Pb radionuclides in a small catchment of the Hilly Sichuan Basin, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(18): 1953-1957.
- [27] 庞忠和. 新疆水循环变化机理与水资源调蓄[J]. 第四纪研究, 2014(5): 907-917, 906. (PANG Zhonghe. Mechanism of water cycle changes and implications on water resources regulation Xinjiang uygur autonomous region[J]. Quaternary Sciences, 2014(5): 907-917, 906. (in Chinese))
- [28] 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012(32): 25-31. (WANG Jiyang, HU Shengbiao, PANG Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science and Technology Review, 2012(32): 25-31. (in Chinese))
- [29] 杨吉龙, 韩冬梅, 苏小四, 等. 环境同位素特征对滨海岩溶地区海水入侵过程的指示意义[J]. 地球科学进展, 2012(12): 1344-1352. (YANG Jilong, HAN Dongmei, SU Xiaosi, et al. Environmental tracers as indicators of seawater intrusion processes in the coastal karst area[J]. Advances in Earth Science, 2012(12): 1344-1352. (in Chinese))
- [30] 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.
- [31] 陈建生, 董海洲, 陈亮. 采用环境同位素方法研究北江大堤石角段基岩渗漏通道 [J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 57-61.

- (CHEN Jiansheng, DONG Haizhou, CHEN Liang. Application of environment isotope method to study on the leakage passage in foundation of Beijing Dyke Shijiao section. *Advances in Earth Science*, 2003, 14(1): 57-61. (in Chinese))
- [32] 童海滨. 同位素浓度场-流场耦合微分方程模型[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [33] 王永森, 陈建生, 汪集旻, 等. 降水过程中氢氧稳定同位素理论关系研究[J]. *水科学进展*, 2009, 20(2): 204-208. (WANG Yongsen, CHEN Jiansheng, WANG Jiyang, et al. Theoretical research on the relationship between deuterium and oxygen-18 in precipitation[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 20(2): 204-208. (in Chinese))
- [34] 童海滨, 陈建生. 湖泊水体年龄与水体中放射性同位素浓度关系浅析[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(6): 647-650. TONG Haibin, CHEN Jiansheng. Relationship between age of lake water and concentration of radioactive isotopes in water body[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2007, 35(6): 647-650. (in Chinese))
- [35] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133: 1702-1703.
- [36] DANCKWERTS P V. Continuous flow systems; distribution of residence times[J]. *Chemical Engineering Science*, 1953, 2(1): 1-13.
- [37] ERIKSSON E. The possible use of tritium for estimating groundwater storage[J]. *Tellus*, 1958, 10(4): 472-478.
- [38] MALOSZEWSKI P, ZUBER A. Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers: 1. models and their applicability[J]. *Journal of Hydrology*, 1982, 57(3/4): 207-231.
- [39] HAAS C N, JOFFE J, HEATH M S, et al. Continuous flow residence time distribution function characterization[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, 123(2): 107-114.
- [40] LEVESPIEL O. Chemical reaction engineering[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [41] 艾萨克·牛顿. 自然哲学之数学原理[M]. 王克迪, 译. 西安: 陕西人民出版社, 2000.
- [42] 童海滨, 付旭东, 陈建生. 地下水同位素浓度场流场耦合的平板模型[J]. *重庆大学学报*, 2013(1): 145-150. (TONG Haibin, FU Xudong, CHEN Jiansheng. A panel model of isotope concentration-flow coupled field in groundwater systems[J]. *Journal of Chongqing University*, 2013(1): 145-150. (in Chinese))
- [43] 童海滨, 陈建生, 汪集旻. 河道水体中氢氧稳定同位素组成的微分方程模型[J]. *水科学进展*, 2007, 18(4): 552-557. (TONG Haibin, CHEN Jiansheng, WANG Jiyang. Differential equation model for river water with hydrogen and oxygen's stable isotope composition[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(4): 552-557. (in Chinese))
- [44] 童海滨, 王新建, 陈建生, 等. 考虑稳定同位素浓度垂向变化的蒸发分馏模型[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(6): 677-681. (TONG Haibin, WANG Xinjian, CHEN Jiansheng, et al. Fraction model under evaporation considering vertical difference of stable isotopic concentration[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2010, 38(6): 677-681. (in Chinese))
- [45] 谭忠成, 陆宝宏, 汪集旻, 等. 五道沟径流试验场降雨径流中的氢氧稳定同位素特征分析[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(6): 34-38. (TAN Zhongcheng, LU Baohong, WANG Jiyang, et al. Characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes of precipitation and runoff in Wudaogou Hydrological Experimental Catchment[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2009, 37(6): 34-38. (in Chinese))
- [46] CHEN Jiansheng, LI Ling, WANG Jiyang, et al. Groundwater maintains dune landscape[J]. *Nature*, 432: 459-460.
- [47] CHEN Jiansheng, ZHAO Xia, SHENG Xuefen, et al. Formation mechanisms of megadunes and lakes in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(24): 3026-3034.
- [48] CHEN Jiansheng, ZHAO Xia, FAN Zhechao, et al. Isotope method for confined groundwater recharge of the lower reaches of the Heihe River, Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(4): 668-673.
- [49] 顾慰祖, 陈建生, 汪集旻, 等. 巴丹吉林高大沙山表层孔隙水现象的疑义[J]. *水科学进展*, 2004, 15(6): 695-699, 2004. (GU Weizu, CHEN Jiansheng, WANG Jiyang, et al. Challenge from the appearance of vadose water within the surface layer of megadunes, Badain-jaran dune desert, Inner Mongolia, *Advances in Water Science*, 2004, 15(6): 695-699, 2004. (in Chinese))
- [50] 陈建生, 汪集旻, 赵霞, 等. 用同位素方法研究额济纳盆地承压含水层地下水的补给[J]. *地质论评*, 2004, 50(6): 649-658. (CHEN Jiansheng, WANG Jiyang, ZHAO Xia, et al. Study of groundwater supply of confined aquifers in Ejin Basin based on isotopic methods[J]. *Geological Review*, 2004, 50(6): 649-658. (in Chinese))
- [51] 陈建生, 赵霞, 汪集旻, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊钙华与根状结核的发现对研究湖泊水补给的意义[J]. *中国岩溶*, 2004, 23(4): 277-282. (CHEN Jiansheng, ZHAO Xia, WANG Jiyang, et al. Meaning of the discovery of lacustrine tufa and root-shaped nodule in Badain jaran desert for the study on lake recharge[J]. *Carologica Sinica*, 2004, 23(4): 277-282. (in Chinese))
- [52] 林统. 单井冲击与综合示踪方法探测堤坝隐患的理论与实践[D]. 南京: 河海大学, 2010.

- [53] 陆宝宏,孙营营,马乐军,等.利用同位素质量守恒原理估算太湖河网受水量[J].河海大学学报:自然科学版,2009,37(6):645-649. (LU Baohong, SUN Yingying, MA Lejun, et al. Estimation of water amount in river network of Taihu Lake based on isotopic mass conservation[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences, 2009, 37(6): 645-649. (in Chinese))
- [54] 孙营营,陆宝宏,杨洪林,等.同位素方法在太浦河调水试验中的应用[J].水利学报,2007,38(增刊1):470-474. (SUN Yingying, LU Baohong, YANG Honglin, et al. On isotope hydrology method during the experiment of diverting water from Taipu River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(Sup 1): 470-474. (in Chinese))
- [55] 陆宝宏,王建群.基于水文实验流域的污染物迁移转化规律研究[R].南京:河海大学水文水资源学院,2015.
- [56] 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. (RUI Xiaofang. Opportunities and the important study fields for hydrology[J]. China Water Resources, 2004(7): 22-24. (in Chinese))

· 简讯 ·

中国水利学会 2015 学术年会将于 10 月 26—28 日在河海大学召开

2015 年 10 月 26—28 日,由中国水利学会主办,河海大学、南京水利科学研究院、江苏省水利学会承办的中国水利学会 2015 学术年会将在河海大学召开。本次会议的主题是水安全与水科技。会议将邀请中华人民共和国水利部、中国科学院、中国工程院等单位的院士、知名专家,主要围绕防洪安全、供水安全以及水与粮食安全、经济安全、生态安全、国家安全等方面作大会特邀报告。会议还将设置以下分会场:中国原水论坛分会场、跨流域调水分会场、地下水分会会场、疏浚与泥处理利用分会场、国际分会场。

各分会会场的主要议题如下:(a)中国原水论坛分会会场的主要议题为原水保护与饮水安全,水资源保护与水生态修复,水资源开发利用与管理,水文化研究与传播;(b)跨流域调水分会场的主要议题为跨流域调水工程运行调度理论,跨流域调水工程运行调度关键技术,跨流域调水工程运行调度方案制定与实施,跨流域调水工程运行调度实践经验;(c)地下水分会会场的主要议题为地下水环境安全与对策(地下水环境安全现状、地下水污染理论、地下水污染数值仿真与物理模拟技术、地下水污染安全监测新技术、地下水污染修复),地下水资源理论与技术创新(地下水资源理论新趋向、地下水监测新技术、地下水科学中的同位素技术、地下水资源计算新理论方法、地下水资源评价与管理),地下水超采治理技术创新(地下水超采评估、地下水超采治理技术、地下水超采治理评估);(d)疏浚与泥处理利用分会会场的主要议题为河湖健康中的底泥污染及对策,河湖疏浚清淤技术与实践,淤泥处理技术与管理,淤泥资源化利用技术,其他水环境治理与生态修复的技术与应用实例;(e)国际分会会场的主要议题为气候变化与水安全,变化环境下的水文演变,变化环境下水科学的理论与实践,变化环境下的用水安全及水源保障,变化环境下的用水安全及水灾害应对,变化环境下的水能资源利用,变化环境下的大范围水资源优化配置及调度,变化环境下的水生态环境保护。

(本刊编辑部供稿)