

北方流域水资源 优化配置与水生态保护

徐征和 孔珂 李来祥 等著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

北方流域水资源 优化配置与水生态保护

徐征和 孔珂 李来祥 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要针对北方地区流域水生态保护与资源高效利用问题,在调查收集国内外研究现状和发展趋势的基础上,综合运用了水资源学、环境科学、经济管理学等多学科知识,在理论和实践两方面开展研究。本书首先进行了基于环境同位素的流域水循环规律研究,其次利用当前先进的“3S”技术,探究建立基于 SWAT 的流域分布式生态水文模型,进行流域水文生态模拟,为科学调度流域水资源、实施区域可持续管理提供理论依据,最后总结分析了流域水生态保护理论与技术,不仅为实施流域水资源的安全利用与水生态保护提供技术支撑,而且还为实现流域社会经济可持续发展提供了理论基础。

本书可供水文、水资源、生态环境等各相关领域的科研人员参考,也可作为大专院校相关专业高年级学生和硕士、博士研究生的教学参考书,还可作为各级水利部门人员日常工作的指导书。

图书在版编目(CIP)数据

北方流域水资源优化配置与水生态保护 / 徐征和等
著. — 北京:中国水利水电出版社, 2013. 10
ISBN 978-7-5170-1409-6

I. ①北… II. ①徐… III. ①流域—水资源—资源配置—研究—中国②流域环境—水环境—生态环境—环境保护—研究—中国 IV. ①TV213.4②X321.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第271742号

书 名	北方流域水资源优化配置与水生态保护
作 者	徐征和 孔珂 李来祥 等著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 18.25印张 347千字
版 次	2013年10月第1版 2013年10月第1次印刷
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

当前我国北方地区存在水资源紧缺、水资源过度开发、水环境恶化和水质污染加剧等主要问题。伴随着流域（区域）经济社会的持续高速发展，我国的水资源供需矛盾突出，尤其在我国北方流域（区域）水资源短缺和水质性缺水，已成为制约经济可持续发展和影响人民群众健康安全的重要因素。

山东省是我国北方更具代表性的一个区域。山东省是人口逾 9000 万的经济大省，人均水资源量不到全国人均水资源量的 1/6，水资源紧缺问题已成为经济社会可持续发展的主要制约因素之一。为适应社会发展需求，缓解水资源供需矛盾，山东省水库水的“农转非”非常严重，水库“农转非”迫使流域的水资源管理有新的改变，面对新形势，流域的水资源配置需要进一步优化。同时，由于水库源流区与周围自然状况不断变化和社会发展等原因，流域（区域）水环境也存在许多问题，需深入探究流域（区域）间大气降水、地表水、地下水、土壤水之间的转化关系，耦合源流区的生态过程和水文过程，为流域生态保护提供依据。源流区水资源开发利用工程的不断增多，加之区域水文气象、生态植被等原因，使得多数水库蓄集水资源量较 20 世纪六七十年代有较大的变化，并有逐渐减少的趋势。水资源量日趋减少，水库的水环境容量也相应变小，因此需采用相关的水质风险评价模式进行水库水质风险评价；据此探讨构建卧虎山水库水生态维护方案，以保障水库水资源的安全可靠利用。

正因为如此，作者近十余年来一直在进行流域（区域）水源保护与资源高效利用问题的研究，承担了水体污染控制与治理的科技重大专项、山东省科技攻关计划、济南市科技攻关计划等项目。在调查收集国内外研究现状和发展趋势的基础上，采取理论与实

践应用分析相结合，微观判断与宏观分析相结合的路线，综合运用了水资源学、环境科学、经济管理学等多学科知识，在理论和实践两方面开展系列研究，初步建立了北方地区小流域水资源优化配置与水生态保护的技术体系。

本书正是以作者在济南大学多年来的实践经验和研究成果为基础，并吸收了山东省近年来在流域水资源优化利用与水生态保护方面的新成果而写成的。全书既注重实用性，又兼顾理论性，既注意总结传统水资源管理技术的新提升，又提炼吸收了流域水资源优化利用与水生态保护的新技术，内容较为丰富。

本书由济南大学、济南市水利局、济南市卧虎山水库管理处、济南市锦绣川水库管理处等单位的人员共同编写。全书共分十一章：第一章由徐征和、杨姗姗、张升东执笔；第二章由李向富、朱红莲、苗淑娟执笔；第三章由王永森、张升东执笔；第四章由徐征和、朱红莲、苗淑娟执笔；第五章由李来祥、苗淑娟、杨同春执笔；第六章由孔珂、刘行刚、孙清明、张升东执笔；第七章由徐征和、李福杰、杜丙福执笔；第八章由徐征和、李来祥、张神铭、吕威执笔；第九章由贾冠昕、孔珂、徐征和执笔；第十章由徐征和、杜敏、王珊执笔；第十一章由徐征和执笔。全书由徐征和修改定稿。

本书的编撰和出版，得到了水利部公益性专项项目(201201115)、山东省重大水利科研及技术推广项目“锦绣川水库水质评价及风险管理研究与示范”和济南大学出版基金等的支持和资助。

由于作者水平有限，书中有不妥之处，诚请读者批评指正。

著 者

2013年8月

于泉城济南

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 北方流域(区域)水资源优化配置与水生态保护的研究背景	1
第二节 国内外相关研究的现状	2
第二章 研究区概况	21
第一节 主要研究区地理位置	21
第二节 研究区域典型水库概况	22
第三节 卧虎山水库上游源流区概况	23
第四节 卧虎山水库水质概况	26
第三章 基于环境同位素的流域水循环规律	27
第一节 研究目的及意义	28
第二节 自然地理与气候环境	30
第三节 采样点位置	33
第四节 取样及实验分析过程	34
第五节 锦绣川流域大气降水中环境同位素的分布特征	35
第六节 北方流域内河水中环境同位素的分布特征	43
第七节 锦绣川流域的水循环规律	52
第四章 北方流域生态水文耦合模拟	60
第一节 生态水文耦合研究的内容及思路	60
第二节 卧虎山流域数字高程模型的建立	61
第三节 分布式水文模型的构建	71
第五章 卧虎山流域产汇流研究	92
第一节 产汇流理论与降雨资料的处理	92
第二节 SWAT 的产流模拟及主要参数	94
第三节 参数的率定方法及结果	95
第四节 SWAT 的产流模拟与分析	96
第五节 卧虎山水库流域典型降雨的入库径流模拟	98

第六章 北方流域水资源优化配置	104
第一节 基于初始水权分配的卧虎山流域水资源优化配置	104
第二节 黄水河流域水资源地表水地下水的联合调控	115
第七章 水库水质分析与风险评价	142
第一节 卧虎山水库的水质分析与风险评价	143
第二节 鹊山水库的水质与风险识别模式	166
第八章 水库水流水质耦合模拟与分析	181
第一节 卧虎山水库生态岛对水流水质影响的预测	182
第二节 鹊山水库水流水质的模拟与分析	196
第九章 水库水质监测与预警系统	232
第一节 鹊山水库安全的综合评价与预警	232
第二节 卧虎山水库安全的综合评价与预警	249
第三节 水库水流水质的实时监测系统	250
第十章 卧虎山水库水生态保护技术	256
第一节 卧虎山水库水生态管理存在的问题及其分析	256
第二节 水库水生态保护的原则	259
第三节 卧虎山水库水生态修复的技术措施	260
第四节 卧虎山水库水生态管理的措施及相应控制技术	262
第五节 卧虎山水库水生态保护的综合效应评估	271
第六节 对水生态政策的一些建议	279
第十一章 结语	280
参考文献	282

第一章 绪 论

第一节 北方流域（区域）水资源优化配置与水生态保护的研究背景

随着社会经济的持续高速发展，由于城市人口增长过快，水资源的匮乏，工农业生活污染物排放量增加，水资源保护、管理和水污染防治相对滞后等原因，导致我国水资源供需矛盾突出，尤其在我国北方水资源短缺和水质性缺水，已成为制约我国经济可持续发展和影响人民群众健康安全的重要因素。

山东省是我国北方更具代表性的一个区域。山东省是人口逾 9000 万的经济大省，人均水资源量仅为全国人均水资源量的 1/6，水资源紧缺问题已成为经济社会可持续发展的主要制约因素之一。为适应社会发展需求，缓解水资源供需矛盾，近年来，由于不同典型区流域的源流区与周围自然状况和社会发展的原因，流域水环境也存在许多问题。源流区水资源开发利用工程的不断增加，加之区域水文气象、生态植被等原因，使得流域水资源量分布较 20 世纪六七十年代有较大的变化，并有逐渐减少的趋势。水资源量日趋减少，流域的水环境容量也相应变小。这对流域水资源的供应产生了巨大的不利影响，严重威胁了流域居民的用水安全，制约了经济社会的发展。

水资源可持续利用是水资源综合开发、利用、保护、防治和管理一体化的最合理利用方式，其意义是在维持水的持续性和生态系统整体性的条件下，支持人口、资源、环境和经济的协调发展。流域（区域）的水资源可持续利用已经成为我国国情的重要组成部分之一，公众提高水患意识，努力保护我们的水资源，已经刻不容缓。

因此，急需对相关流域（区域）的水安全问题进行研究，提出系列技术体系，为流域水资源优化利用与水生态保护提供技术支撑，同时也可为我国北方地区流域水资源优化利用及水生态保护工作提供一定的理论依据。本书以济南市为例，以环境同位素中的氢氧稳定同位素来研究流域内的水循环过程，利用当前先进的“3S”技术，建立基于 SWAT 的卧虎山流域分布式生态水文模型，进行流域水文生态模拟，分析计算集中水源地新形势下水资源量情况；根据流域（区域）的社会经济及生态用水需求，建立多层次多目标性的模糊优选



模型对流域(区域)水权初始分配进行了研究,对流域的水资源进行优化配置,探讨流域(区域)水生态维护系统,研究水源地风险预测与预警模式,形成流域(区域)水资源优化利用与水生态保护的工程和运行管理技术体系,以改善流域(区域)的水环境状况;建立流域(区域)水资源优化利用与水生态效应评价体系,为实施流域(区域)水资源的安全利用、高质量供水提供技术支撑,为实现流域(区域)饮用水安全保障和社会经济可持续发展打好基础。其结论可为我国北方流域水资源优化利用与水生态保护工作提供一定的实践参考。

总之,本书对我国北方典型流域(区域)水资源优化利用与水生态保护工作进行了系统而全面的研究与分析,对我国制定流域水资源优化利用与水生态保护对策有重要的理论与现实意义。

第二节 国内外相关研究的现状

一、水文模型

流域水文模型是借助计算机技术和系统理论的发展而发展的,自20世纪60—70年代起涌现了大量的流域水文模型,并广泛应用。David M Hannah 和 Angela M Gurnell 通过建立一种线性水库径流模型对冰川水文系统进行径流研究。Eve Devonec 等应用 land-surface 水文模型研究中纬度地区环境的变化引起的水文气象的变化范围。L. Breuer 等通过建立集成水文模型(LUCHEM)研究了土地利用类型的不同引起的水文通量的变化。Alan L Flint 等在美国 Yucca 山脉建立了水文概念模型,证明其在非饱和区的适应性。S. M Brooks 在新西兰霍克湾构建的二维耦合的土壤水文边坡稳定性模型推断出水文条件对边坡稳定性的影响受制于土壤侵蚀和再沉积的程度。Juan B. Valdés 等通过建立水文模型评估不同的气候变化对美国亚利桑那州东南部的半干旱流域的水文影响。Ming-ko Woo 在亚北极加拿大地区构建了 SLURP 水文模型,分析了水文模型参数在资料短缺地区之间的转移。从模型结构看,水文模型分为集总式和分布式两种,分布式水文模型是基于物理过程的,更具有机理性,在流域水资源管理中也更具有优势。SWAT 模型是集中了水文预报和管理两方面的综合管理模型。

SWAT 模型的开发始于20世纪70年代,经过不断的扩充和完善,目前形成了基于 Arcgis 和 Arcview 的两个版本,二者之间没有本质的区别。SWAT 模型在流域水量平衡、农药输移、泥沙产量、非点源污染等方面有广泛的应用。代俊峰等利用 SWAT 构建了岩溶灌区分布式水文模型,为西南岩



溶灌区水文特性及其对变化环境的响应等研究提供了工具和手段。郑捷等考虑平原灌区灌溉渠道、排水沟和河道等人工干扰对 SWAT 模型进行了改进, 研究结果表明该模型适用于汾河灌区的水量平衡模拟。J. Schuol 利用 SWAT 与自行开发的 dGEN 算法, 模拟了西非的逐日气象数据。Taesoo 利用 SWAT 研究了美国得克萨斯州 Galveston 湾和 Matagorda 湾的水量平衡, 成功估算了两条海湾的入流量。

同其他水文模型一样, SWAT 模型需要较多的基础数据, 数据的丰富程度和准确性对模型的运行结果有很大的影响。Mengistu 利用美国农业部土壤数据和美国国家土壤地理数据库分析了不同分辨率的土壤资料对 SWAT 模拟精度的影响, 指出其对流域尺度和预设精度的相关性。郝芳华系统研究了 DEM 分辨率、降雨不均匀性、子流域划分尺度以及径流曲线数、蒸发系数、管理因子、侵蚀系数等因素对 SWAT 模拟结果准确性的影响, 得出 1:10 万的 DEM 能满足模拟精度要求以及雨量站分布模式同雨量站数量具有同等影响等结论。Segond 将雷达数据用于 SWAT 降雨数据的插补, 对英国 Lee 流域洪水流量进行了数值估计; Meiyun Yu 同样将雷达数据与雨量站观测数据相结合用于雨量站稀少的干旱地区, 证明了雷达数据虽不如直接观测的数据精确但是也是一条可行途径。

为提高模型的效率和准确性, 其他先进的方法和模型也与 SWAT 结合使用。陈强将 PSO 优化方法引入 SWAT, 构建了新的 SWAT 模型参数自动率定模块, 通过实例研究发现该方法率定精度较高, 收敛速度快, 可以使模型自动率定效率提高 7 倍。Il-Moon Chung 将 SWAT 与 MODFLOW 相结合, 建立了多库调蓄模型, 更真实地反映了土壤含水层中水分运移的延迟, 并将模型用于 Mihocheon 流域的地下水恢复速率问题。Yiping Wu 等将 SWAT 重新编译成动态链接库, 与柔性模型环境 (FME) 相结合, 用于 SWAT 模型的参数识别、模型率定及不确定性分析, 该模式有可视化和可扩充性的显著优点。Mehmet 对比了 SWAT 与人工神经网络的径流预测效果, 结果表明 SWAT 的平均误差较小, 而 ANN 对洪峰的预测较准确。Xuesong Zhan 将遗传算法和贝叶斯模型用于 SWAT 模型的参数率定和不确定性分析, 通过美国 Little 流域和中国黄河源流区的应用证明了该方法的有效性。

与流域水文响应的相互作用及其对地表水资源动态变化、水土流失与洪水灾害等方面的影响是国际性研究课题, SWAT 模型是研究流域 LUCC 水文效应的有力工具, 其基本研究方法是利用遥感 (RS) 和地理信息系统 (GIS) 获取并整理 LUCC 信息, 然后利用分布式水文模型模拟 LUCC 下的水文过程, 分析其结果。Qi Yang 等利用 SWAT 研究了梯田分流系统对流域产水量和产沙量的影响, 发现产水量减少 20%, 产沙量减少 56%。Luke 分析了肯尼亚



Nyand 和流域土地覆盖时空变化的水文响应,发现随着耕地逐步代替森林,流域下渗减少了 6%~15%;在国内,相关研究有:赖格英等探讨了鄱阳湖的主要水源区梅江流域人类活动对径流的影响;王艳君等研究了秦淮河流域城市化土地利用对水文过程的影响;欧春平等研究发现海河流域人类活动的影响总体上是流域蒸发量在增加,而地表与地下径流和土壤水量在减少,等等。这些研究都取得了不错的效果,证明了该方法在我国的适用性。

二、基于环境同位素的流域水循环研究

自从物理学家发现原子核的质子和中子以来,学者就开始了稳定同位素的研究。稳定同位素主要是指无法可测放射性的原子的核内质子数相同但中子数不同的一类核元素。稳定同位素是自然水体的重要组成部分,将同位素以不同的比值分配到两种物质或物相中的同位素分馏现象,发生在自然界水循环中的每一个环节,而且对环境的变化非常敏感。水循环过程中的一个重要环节即降水,降水以及水汽源区的初始状态与降水中稳定同位素的丰度形成的气象条件存在密切联系。大气降水中稳定同位素氘(^2H)和氧 18(^{18}O)随着气候的变化也会因空间、时间的变化而变化。故降水中稳定同位素可以作为水汽源的自然示踪或者利用稳定同位素的变化来反演大气过程,并且能在一定程度上很好的反映天气、气候以及区域性特征。同位素地球化学中最基本的重要规律之一就是大气降水中氢氧同位素分布规律,它不仅仅是通过稳定同位素来研究岩石、矿物以及矿床形成条件的重要背景值,还是研究古气候、海洋学、冰川学、湖泊学、沼泽学、大气物理等其他地学领域的重要资料。此外,我国已经在某些方面取得一系列研究成果,如稳定同位素在冰芯、树轮、湖泊沉积以及石笋中的古气候恢复、水资源调查等。

国外较早的观测和研究了降水中的稳定同位素,开始于 20 世纪 50 年代初。自然界水循环的一个重要环节即大气降水,研究大气降水中的环境同位素组成是研究全球及局地水循环必须的前提。1961 开始,国际原子能机构(IAEA)和世界气象组织(WMO)为了在全球范围内调查环境同位素,故在全球范围内启动了降水中同位素观测计划(the Global Network of Isotopes in Precipitation,简称 GNIP),自 1961 年至今,在世界各地共设立了 144 个台站,每个月对降水中的氢氧同位素组成进行系统收集并分析,并对降水中的稳定同位素成分进行了连续监测,到目前为止,关于降水中稳定同位素的监测网站已建立 550 多个。然而为全球降水循环模型提供基本数据这一研究在我国尚未系统进行。

我国对水循环过程中稳定同位素的研究起步相对较晚,开始于 1966 年的珠穆朗玛峰科学考察,在 1983 年以前,我国只有香港一个站点在全球降水同



位素监测网 (GNIP) 中。随后才陆续开始在和田、齐齐哈尔、石家庄、银川、拉萨、天津、长沙、昆明、南京、贵阳、海口、福州、桂林、广州、西安等城市建立了长期观测站,并着手进行水样收集以及降水中稳定同位素的研究工作。到目前为止,其中有 10 多个监测站已被纳入 IAEA 全球观测网,但是从绝对数目上来说,仍然不能满足科研的需求。我国于 2004 年对照 GNIP,并借鉴国外已经成功建立国家大气降水同位素观测网络的经验,且以中国的生态系统研究网络 (Chinese Ecosystem Research Network, 简称 CERN) 各个野外台站作为依托,开始建立起中国大气降水同位素网络 (Chinese Network Isotopes in Precipitation, 简称 CHNIP),并系统地对 δD 和 $\delta^{18}O$ 进行观测。我国学者基于这些数据对降水中同位素进行了丰富的研究,并对我国大气降水中稳定同位素的分布规律进行了总结以及对部分地区进行了较为详细的讨论和分析。

(一) 环境同位素在全球降水中的研究

雨滴凝结时的温度和降水的水汽来源往往控制降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的组成,主要表现为降水同位素组成受自然地理因素、气象因素影响而有所差别。Dansgaard 的研究 (北大西洋沿岸的温带和寒带) 指出温度与大气降水中的 δD 和 $\delta^{18}O$ 存在着正相关关系,姚檀栋在我国国内西北地区研究过程中,也得到同样的结论,这主要是由于 δD 和 $\delta^{18}O$ 的分馏效应受温度的直接影响。Salati 与 Ingraham 等对沿海地区大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的研究,分析得出降水中 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值随海岸线的距离而发生变化,越靠近海岸线同位素的值越高,即 δD 和 $\delta^{18}O$ 的值具有明显的大陆效应,这主要是因为海洋水汽蒸发在向大陆移动过程中,重同位素优先分离,故剩余的水汽则越来越贫化重同位素。大气降水的 δ 值随着高度的增加而降低,即具有高度效应,这是因为随着高度的不同,温度因而也不同,进而导致了同位素分馏系数的变化,且该效应随地形和气候条件的不同而不同,各地差异明显。 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值高度效应的存在,使得利用降水同位素研究地下水和大气降水的转化和补给高程成为可能。大气降水环境中同位素的变化与温度密切相关,因此降水过程受温度作用的影响,水汽在水循环过程中发生一定程度的同位素分馏作用,必然导致同位素随降水量而变化。研究发现,大气降水中约 68% 的全球蒸发量起源于热带海洋,水汽的极向运移和不断降水引起了大气中环境同位素 δD 和 $\delta^{18}O$ 不断受温度效应、降水量效应的影响。海拔高程的变化对 δD 和 $\delta^{18}O$ 的值也有一定的影响,研究发现,高程每增加 100.00m,同位素值降低 1‰,即同位素的高程效应。在时间尺度上同位素的值也有明显的变化特征,尤其是在季节尺度上,同位素的变化规律尤为明显,即 δD 和 $\delta^{18}O$ 季节效应明显。研究不同因素对 δD 和 $\delta^{18}O$ 的影响,对于研究区域水循环规律具有重要的意义。



(二) 我国降水中影响 $\delta^{18}\text{O}$ 的因素

根据早期 Dansgaard 的研究, 得出影响降水中同位素组成的因素主要有以下方面: ①水汽源的情况。主要是水汽来源的差异, 即蒸发源地的不同, 或是蒸发源地天气状况的季节变化。因为全球水汽主要来自于海洋蒸发, 蒸发源地的海表温度、盐度和风速等是影响水汽同位素组成的主要因素。②温度效应。降水同位素 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度呈正相关关系, 即温度越高, 大气降水中 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐富集, 同位素的值逐渐变大, 我们常用这一规律来复原不同地区, 尤其是西北内陆区域温度变化。③大陆效应。水汽蒸发主要来自海洋, 降水中 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值随海岸线的距离而发生变化, 越靠近海岸线同位素的值越高。④高度效应。高程每增加 100.00m, 同位素值降低 1‰, 即同位素的高程效应。⑤纬度效应。水汽循环可以表示为首先在热带海洋蒸发, 然后从低纬度向高纬度地区进行输送, 使降水中同位素随纬度的增加而减小。⑥雨量效应。因为重同位素优先冷凝, 降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与纬度的效应呈负相关关系, 随着纬度的增加, 降水中 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐减小。在上述降水中 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分析中, ③~⑤温度的变化贯穿于整个同位素研究中, 主要原因为全球水循环包括海洋表面蒸发和水汽输送以及冷凝, 会沿着水汽的传输路径, 离海岸越远, 故纬度、高度越高且温度越低, 此时温度对降水中同位素的影响起了主要作用。总结起来说, 降水中同位素的变化主要取决于降水量、温度以及距离水汽源的水平和垂直距离。此外, 还受陆地水汽循环、大气环流和雨滴的大小等因素的影响, 这些均造成降水中同位素分布的复杂性与多变性。

我国大部地区均属于季风气候, 由于大尺度水汽输送场的分布和水汽收支状况受季风环流的影响和制约, 故对季风区的降水产生影响, 同时它又是水汽输送的主要载体, 故它直接控制着降水特征的季节分配特征和空间分布格局, 进而使纬度效应、温度效应受到抑制, 从而使我国降水事件中的气象条件的变化更为复杂, 在季风气候条件下的同位素行为肯定有其独特的过程和方式。这使得进行季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究显得较为重要。卫克勤等和 Yamanaka 等研究了中国东部降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 受季风活动的影响, 发现其具有明显的降水量效应。庞洪喜等总结出季风降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 还与 ENSO 和太阳黑子有关联, 之后进一步分析得出季风区风场中的高空风速与降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 存在显著的正相关关系, 并利用稳定同位素瑞利分馏模型, 提出了一种确定季风水汽来源的新方法。

总的来讲, 影响大气降水中氢氧同位素组成的主要因素有两个: 一是区域气候的环境背景, 也就是该降水气团的来源、性质, 还有水汽从产生到输送阶段再到发生降水事件的整个过程中氢氧同位素发生的所有变化; 二是局部的地理因素, 主要包括降水时的各气象要素 (如湿度、气温和风速等), 还有当地的纬度、海拔等, 这些要素相互作用并综合影响降水中稳定同位素的时空



变化。

再结合我国学者总结的分布规律,对我国大气降水中稳定同位素组成进行的研究,可以用来揭示我国大气降水的水汽来源与水汽循环方式的形成,并探讨 ENSO、季风活动等一些气候事件对我国降水中稳定同位素组成的时空分布的影响,进而可以用来分析区域间的差异。

(三) 我国降水中大气水线和过量氘的研究

在全球范围内,水循环蒸发、凝结过程中出现的同位素分馏,导致大气降水的氢氧同位素组成呈线性相关关系,这一规律一般可以用 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ 这一数学方程进行表示,称之为全球大气降水方程,也就是 Craig 方程。

在此方程里,斜率反映了同位素的分馏类型,即如果斜率为 8,则说明降水形成于同位素平衡分馏;如果不是 8,则说明降水产生于同位素非平衡分馏。然而实际情况下,各地大气水线的斜率会出现不同程度的偏离 8,这主要是由于在自然条件下从水汽源区到雨滴降落,影响稳定同位素分馏的各因子之间存在一定的差异。因此,我国学者对中国的大气水线进行了大量研究,郑淑蕙等较早地提出了我国的降水线方程,即 $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 8.2$,随后关于我国各地大气水线的报道大量涌现。一般而言,在干旱和半干旱地区由于降水较少且蒸发强烈,且在雨滴降落过程中因不平衡蒸发引起的同位素分馏会使方程斜率较低。湿度越小且温度越高,大气水线的斜率也随之越小,同时截距值也会随着偏离的程度而减小。然而,东部季风区的斜率和截距较为接近,这反映了在此地区具有相似的水汽来源和气候条件。此外,还可以看出,越接近沿海我国降水线方程与全球大气水线越接近,这也许表明全球大气水线方程在一定程度上反映了海洋性气候的降水中氢、氧同位素的特征。

Dansgaard 通过大气水线对过量氘进行了定义: $d = \delta D - 8\delta^{18}O$,水汽源区的相对湿度、海温和风速等气象条件是影响降水中过量氘的主要因素, d 值主要是反映形成降水过程的气团同位素,此外它含有形成暖湿气团源区蒸发过程性质的重要信息,包括蒸发过程的平衡或不平衡状态以及蒸发速率等,故过量氘是示踪水汽源区的一个重要参数。在关于利用 d 对我国不同区域水汽来源进行调查方面有较多研究,卫克勤等利用过量氘对我国季风区进行研究,进一步证实了冬、夏季风期间降水云团有着不同的来源。Tian Lide 等对青藏高原南部、北部降水中 d 的变化特征进行研究分析,结果印证了青藏高原季风区与非季风区的重要分界线是唐古拉山,此外还得出喜马拉雅山中段并非只受单一因素西南季风的影响,其中西风输送也占重要部分。庞洪喜等考虑到降水中 d 和水汽源区相对湿度的关系,其认为新德里季风水汽的主要来源为西阿拉伯海。近段时间,章新平等通过 d 对西南地区降水的研究,发现制约 d 季节性变化的重要因素为气团性质。



(四) 稳定同位素在水环境领域的研究应用

从 20 世纪 60 年代开始, 稳定性同位素技术作为一门分支学科开始定型并逐步发展起来, 由于该项技术适用范围比较广泛, 故很快被应用于矿床学、水文学、地质工程研究领域, 并且稳定性同位素可以用来指示物质的来源或成因, 进而使这项技术成为有机地球化学研究中的一项重要分析测试技术和研究手段。稳定性同位素示踪作用是相对于放射性同位素的示踪作用而言的, 其虽然不能释放射线, 但是可以利用它和普通相应同位素的质量差, 并通过气相层析仪、质谱仪、核磁共振等高端质量分析仪器来测定。尽管它的应用范围不如放射性同位素应用广泛, 但是稳定性同位素的分馏效应却使不同元素的同位素在自然界中各种生物地球化学过程中的丰度产生了变化, 进而造成不同物质或同一物质内部的不同部分的同位素的分布不均匀。故通过研究稳定性同位素, 使其运用到地圈和生物圈的各个领域。由于同位素质量的差异是引起同位素效应的根本原因, 所以同位素效应随着质量差的增大而越来越显著。目前, 在地球化学和生态学研究中的应用的稳定性同位素主要为轻元素, 例如 C、H、O、N、S 等。

目前来看, 虽然稳定性同位素技术在各环境介质尤其是水环境中, 国内外的应用研究已经相当广泛, 但在其他领域的研究也不容忽视。在我国, 稳定性同位素技术对来源分析的影响, 以及稳定性同位素技术在污染物溯源与示踪中识别大气多环芳烃来源方面作出了很大的贡献。此外, 随着稳定同位素技术的不断更新发展, 该技术已经逐渐扩展到地球以外的研究领域, 一些研究者利用激光两极管感应器对火星大气层中二氧化碳、水以及它们的同位素进行监测, 来确定二氧化碳和水汽的迁移转化以及边缘大气层的性质, 其应用前景极为广泛。同位素示踪技术在解决众多水文地质问题上得到广泛应用且技术比较成熟, 得到国内、国际的认可, 如地下水运动、地下水年龄以及补给问题。稳定性同位素法在判断地下水的补给来源、地下水与地表水之间的联系以及确定各种污染源在地下水中混合比例方面的应用都比较成熟, 所以, 在寻找地下水污染源方面有着广阔的应用前景。可以应用环境同位素方法来研究地下水演化规律, 并对地下水 ^{18}O 和 D 之间的关系进行分析, 进而对地下水的补给来源进行判断等, 可以用地下水及其潜在补给源的氮同位素来识别和确定地下水硝酸盐的污染程度; 文东光等曾借鉴大量同位素资料对人类活动和不同区域的含水层系统中的地下水资源属性的影响进行了分析, 指出研究区域地下水资源属性, 环境同位素是最直接有效的方法; 此外, 李思亮等以喀斯特城市地下水位作为主要研究对象, 利用稳定性同位素技术对贵阳雨水中的 C、N 沉降过程以及贵阳遵义等地的地下水中的 C、N 同位素地球化学进行了初步的探究。



(五) 环境同位素在水文水资源领域的应用

由于分馏作用, 稳定同位素具有在不同物相间或不同物质间存在分布不均匀的现象, 而且不同来源的水分氢氧同位素组成存在区别, 故可以利用水中同位素含量的差异来研究水分的来源。降水中的同位素组成以及其地下循环过程决定了地下水的同位素组成。地下水中的同位素组成如若经同位素交换, 则与补给水一致, 然而, 一旦与周围岩石发生水岩交换反应, 则地下水中的同位素组成便会发生变化。Clayton 研究了伊利诺斯、海湾地区、阿尔伯达和密执安区域水岩交换效应, 通过采集水样的氢氧同位素, 他发现这些卤水主要源自更新世时期的降水, 是一种大气降水来源并非是海水的衍生物。Craig 研究了红海中部裂谷的卤水来源, 他发现卤水的同位素组成在红海的海水同位素组成线上, 同时解决了该卤水的来源问题。在国内, 魏玉梅等基于环境同位素理论, 研究了环境同位素在保定红旗苗圃水源地勘探中的应用, 并通过建立相应的数学物理模型, 对保定市地区的地下水补给组成和运动规律进行了研究。通过此研究, 识别了该地区浅层地下水的两种来源, 并得知这两种来源在丰枯季节各自所占比例。蔡明刚等对厦门岛沿岸地区的地下水氢、氧稳定同位素组成进行了测定, 同时, 对地下水、大气降水及海水的 $\delta D \sim \delta^{18}O$ 方程进行数理分析, 结果表明厦门沿海浅层地下水的主要来源为大气降水, 并利用稳定同位素质量平衡模型对 9810 号台风所导致的降水对地下水的贡献进行了估算。程汝楠研究了禹城地区的水分循环, 通过采集地表水样、地下水样、雨水样发现降水、地下水、河水中的 δD 值存在明显差异。地下水中的 δD 值在地下 20mm 附近发生突变, 这说明上下两部分的地下水来源不同, 且以 20mm 为界。上层的地下水中的 δD 值与地表水和现代降水相近, 大气降水和河水为上层地下水的主要补给来源; 20mm 以下的地下水部分, 其 δD 值含量明显低于河水和当地现代大气降水, 但是, 其空间变化相对比较稳定。

如今, 随着社会经济的快速发展, 我国面临的水资源问题也越来越突出, 环境同位素技术的应用将为水文学的研究作出很大贡献, 其必将在水文水资源问题上发挥重要作用。我国同位素技术在水文水资源领域的应用已经取得了相当的成果, 但是由于同位素水文学是一门新兴学科, 故目前参与研究的人和投入的研究资金都比较少, 特别是在同位素实验研究方面, 由于仪器设备以及资金方面条件的限制, 导致研究还很欠缺。今后, 应该在以下几个方面进行加强: ①充分利用现有的设备和资金, 对同位素进行实验基础研究, 用质谱仪对室内外采集的样品进行同位素分析; ②加强进行各种水转化规律的研究, 水文循环中的大气降雨、土壤水、蒸发水以及地下水之间的转化规律尤其复杂, 可以将水文循环过程作为一个统一的整体利用同位素技术示踪技术对其展开研究; ③对不同水文条件以及不同自然地理条件的实验流域分别进行采样分析,



分析得出不同流域产流机制的差异并对具有普遍意义的规律进行总结；④进行地下水补给来源的研究，对缺水地区承压含水补给源以及地下水超采情况，利用同位素技术对其展开研究，同时为合理开发利用地下水资源并缓解水资源紧缺问题提供科学依据。

三、流域水资源合理配置

水资源合理配置是实现水资源公平、可持续利用的有效调控措施之一。国内外对于水资源配置的研究主要集中在三方面：机制与模式、理论与方法、实践与评价。目前，国际上的流域水资源配置所依赖的内在机制大致包括4类，即以边际成本价格进行水资源配置、以行政管理手段进行公共（行政）水资源配置、以水市场运行机制进行水资源配置和以用户进行水资源配置，因此现行国内外水资源配置模式主要包括四种，即市场配置、行政配置、用户参与式配置以及综合配置模式。国内目前的水资源配置模式仍主要以行政指令配置为主，部分地区出现了市场配置和用户参与式配置。下面就国内外水资源合理配置方法进行综述。

（一）国外研究现状

以水资源系统分析为手段、水资源优化配置为目的的各类研究工作，源于20世纪40年代Masse提出的水库优化调度问题。最早综述水资源的开发、利用和保护问题的著作是美国总统水资源政策委员会1950年的报告。1955年，哈佛大学开始制定一个水资源大纲，并于1962年出版了《水资源系统分析》一书，将系统分析引入水资源规划，开始了流域水资源配置模型研究。H. Marks 1971年提出的水资源系统线性决策规则成为数学模型方法描述水资源系统问题的先导。1972年，Buras著述的《水资源科学分配》一书根据20世纪50—60年代兴起的系统分析理论在水资源开发利用中的应用经验，重点阐述数学规划理论及其计算手段在水资源系统设计和运行调度中的应用方法、分析步骤等，系统地研究水资源分配理论与方法。1974年，J. L. Cohon和D. H. Marks对水资源多目标问题进行了研究。随着计算机的应用和优化技术的发展，流域水资源优化配置水平不断得到提高，美国麻省理工学院（MIT）于1979年完成了阿根廷河Rio Colorad流域的水资源开发规划，以模拟模型技术对流域水量的利用进行了研究，提出了多目标规划理论、水资源规划的数学模型方法，并加以应用。1983年，D. P. Sheer经过长时间努力利用优化和模拟相结合技术建立了华盛顿特区城市配水系统。20世纪90年代由联合国出版的《亚太水资源利用与管理手册》（Guidebook to Water Resources, Use and Management in Asia and the Pacific）中包括了区域水资源配置方法。20世纪90年代中期以后，流域水资源配置模型出现了新的趋势。一方面，基因算法