

北方典型盆地

同位素水文地质学方法应用

陈宗宇 齐继祥 张兆吉 等 著



科学出版社

www.sciencep.com

北方典型盆地同位素 水文地质学方法应用

陈宗宇 齐继祥 张兆吉 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对我国北方典型盆地地下水资源及相关环境问题,详细介绍了应用同位素水文地质学方法来研究地下水循环和更新等相关问题的最新成果。着重论述了含水层古气候档案、第四系地下水的循环演化特征及其对气候变化的响应、地下水的同位素年龄与资源属性、地下水系统的现代补给强度及更新能力、干旱区内陆盆地地下水的补给来源和补给机制以及盆地内部和盆地之间的地下水流动特征、地下水可持续性等相关方面的研究成果,为我国盆地地下水资源的可持续开发与管理提供科学依据。

本书可供水文水资源学、水文地质学、环境地质学、环境生态学、同位素地球化学等相关专业的高等院校师生、研究人员,以及从事水利、水源开发、生态和环境保护等部门的管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

北方典型盆地同位素水文地质学方法应用/陈宗宇等著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-027625-4

I. ①北… II. ①陈… III. ①盆地-同位素地质-水文地质-研究-中国 IV. ①P641

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 089936 号

责任编辑:王志欣 闫井夫 沈晓晶/责任校对:刘小梅

责任印制:赵 博/封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 6 月第一次印刷 印张: 29 1/2

印数: 1—1 000 字数: 581 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

**《北方典型盆地同位素水文地质学方法应用》
主要撰写人员**

组 长 陈宗宇

成 员 齐继祥 张兆吉 聂振龙

卫 文 王 莹 刘 君

前 言

我国北方地下水的开发利用保证了该区经济、社会的持续发展。近几十年来,由于气候变化和人为因素的干扰,水循环条件发生了明显变化,大规模超采地下水已造成区域地下水位持续下降,并衍生如地面沉降、水质恶化等诸多环境地质问题,其严重程度已引起国内外的广泛关注。为保障地下水资源的可持续开发和生态环境的良性循环,我们必须回答与区域地下水更新和可持续性相关的科学问题。同位素水文地质学为我们洞察和解决这些科学问题提供了独特的技术方法,它是随着现代核技术科学发展而形成的一门新兴学科,其主要特色是以参与水循环的同位素作为标记,从宏观和微观上阐明水文地质过程的机理。过去的40年里,在所有流域水文过程的研究中,同位素技术被广泛应用于研究水的起源、年龄和流动途径等,是近些年来研究水文循环较为先进而有效的方法。

本书是作者近十几年来承担的科研项目的成果总结,这些科研项目包括:国家自然科学基金项目“华北地下水中三万五千年来古水文-气候旋回研究”(批准号:49871079)、“从华北含水层中的古环境信息研究地下水循环和更新”(批准号:40472125)、“利用松嫩平原地下水环境示踪剂重建古补给和古温度”(批准号:40872153);国土资源部科技专项计划项目“西北典型内流盆地水循环规律与地下水资源形成演化模式”(项目编号:200010301);中国地质调查局地质调查项目“华北平原地下水资源可持续利用调查评价”(项目编号:1212010430351)、“松嫩平原地下水循环演化及更新能力研究”(项目编号:200310400035);973计划项目课题“深层含水层系统变异与地下水可更新能力演变机理”(项目编号:2010CB428803)。

本书旨在系统地总结同位素水文地质学方法在地下水研究方面的理论与实践,主要是以我国干旱半干旱区典型盆地或平原为研究实例,通过应用同位素水文地质学方法,探索与地下水可持续开发相关的地下水系统基本特征、地下水演变规律,评价地下水系统的更新能力,进而确定现行开采量的可持续性,从而为我国干旱半干旱区地下水资源的可持续开发与管理提供科学依据。本书内容不仅包含理论方法介绍,而且列举出不同类型区的研究实例。希望本书能够对我国水文地质学和同位素水文地质学的发展起到一定的促进作用。

本书共包含六章,每一章自成体系,代表了盆地或流域尺度的地下水同位素研究成果,各章集成起来构筑了我国北方大陆尺度盆地地下水的宏观规律。第1章绪论部分简单介绍了同位素水文地质学的历史和发展趋势,由陈宗宇执笔撰写。详细论述了同位素水文地质学方法在干旱半干旱区地下水调查中解决的主要水文地质问题及研究进展,指出目前同位素技术的应用侧重于多种元素同位素方

法和水文地球化学方法的联合使用,其应用的领域从地下水资源调查扩展到地下水资源开发管理,应用的空间尺度从局部地下水系统扩展到区域地下水系统的研究,并在此基础上,介绍了本书的研究背景和研究内容等。第2章论述环境同位素及其在水文地质应用中的基本原理,由陈宗宇执笔撰写。首先简单介绍常用的稳定同位素与放射性同位素的基本特征,重点介绍了大气降水氘和氢氧稳定同位素的应用原理;随后介绍常用的地下水同位素测年方法原理;最后介绍实际工作中地下水同位素采样方案的设计原则。第3章详细阐述华北平原第四系地下水同位素和其他环境示踪剂应用研究成果,由陈宗宇、张兆吉、齐继祥、卫文、刘君、王莹共同执笔撰写。内容包括含水层古气候档案、地下水的循环演化、地下水的同位素年龄、地下水系统的更新特征及地下水可持续性。第4章论述松嫩平原地下水补给模式和更新能力研究取得的成果,由陈宗宇执笔撰写。涉及地下水系统的补给和流动特征、地下水的同位素年龄、现代补给强度和更新能力等。第5章论述黑河流域地下水补给机制和流动模式研究成果。内容包括地下水和地表水之间转化过程与转化模式、盆地之间地下水水力联系、地下水的年龄和更新能力等,由陈宗宇、聂振龙共同执笔撰写。第6章简要总结中国北方盆地地下水同位素特征及其水文地质意义,提出地下水形成演化的三种不同补给机制,由陈宗宇、聂振龙共同执笔撰写。全部文稿由陈宇宇统编审稿,插图由刘君绘制。

本书参阅了有关部门和作者的研究成果,绝大部分引用成果以参考文献的形式给出,部分原始数据来自河北地质调查院、河南地质调查院、北京地质调查院、天津地质调查院、山东地质调查院和华北平原地下水可持续利用调查评价项目组,在此对这些部门表示感谢。

在工作实施过程中,费宇红研究员、陈京生副研究员、刘志刚高级工程师、孙晓明高级工程师、赵宗壮高级工程师、锥国忠高级工程师、刘立军高级工程师、郜洪强高级工程师、姜先桥工程师、谢振华高级工程师、邢国章工程师、王亚斌高级工程师、王家兵高级工程师、苗晋祥高级工程师、吴继臣高级工程师、杨丽芝高级工程师、赵海卿高级工程师、郭昂清高级工程师等给予了许多帮助,在此对上述诸位表示衷心感谢。

本书出版过程中还得到了科学出版社和中国地质科学院水文地质环境地质研究所的鼎力相助,在此一并表示感谢。

最后感谢国家重点基础研究发展计划项目(2010CB428803)、国家自然科学基金项目(49871079、40472125、40872153)、国土资源部科技专项计划项目(200010301)和中国地质调查局地质调查项目(1212010430351、200310400035)的支持与资助。

由于本书研究涉及多个学科的研究内容,加之作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请广大读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 环境同位素与同位素水文地质学	1
1.2 干旱半干旱区地下水调查中的同位素技术应用进展	3
1.3 本书成果的研究背景与主要内容	8
参考文献	11
第 2 章 同位素水文地质学基本原理	19
2.1 稳定同位素	20
2.2 放射性同位素	33
2.3 地下水同位素测年方法概述	37
2.3.1 地下水年龄及同位素测年	37
2.3.2 年轻地下水环境示踪剂测年	39
2.3.3 年老地下水 ^{14}C 测年	46
2.3.4 年老地下水 ^{36}Cl 测年	51
2.4 地下水同位素采样方案设计原则	52
2.4.1 同位素方法选择	52
2.4.2 采样点布设方法	53
参考文献	54
第 3 章 华北平原地下水循环演化与可持续性	58
3.1 问题的提出	58
3.2 研究区地质及水文地质条件	59
3.2.1 自然地理概况	59
3.2.2 水文地质条件概况	60
3.3 第四系地下水的同位素分布特征	65
3.3.1 区域地下水的同位素分布特征	65
3.3.2 地下水子系统同位素分布特征	75
3.4 华北平原地下水的年龄结构	108
3.4.1 石家庄—渤海剖面多种测年方法结果对比	108
3.4.2 华北平原地下水年龄结构及其分布特征	124
3.5 华北平原地下水古气候档案	148

3.5.1	含水层古气候档案的研究进展	148
3.5.2	含水层古气候档案研究方法	152
3.5.3	华北平原含水层中的氢氧稳定同位素古气候信息	156
3.5.4	华北平原地下水中的惰性气体古温度记录	163
3.6	更新世以来大尺度地下水循环演化特征	180
3.6.1	自然环境变化背景和水文循环特征	180
3.6.2	地下水形成演化规律与机制	182
3.7	华北平原地下水可持续性的环境示踪剂指示	187
3.7.1	潜水含水层的补给来源与补给强度	187
3.7.2	山前平原含水层脆弱性的同位素分析	204
3.7.3	深层地下水的补给机制	213
3.7.4	沿黄河地区黄河补给影响带	219
3.7.5	区域地下水流动模式与人为干扰	221
3.7.6	深层地下水的更新与资源属性	232
	参考文献	237
第4章	松嫩平原地下水补给模式及更新能力	246
4.1	研究背景	246
4.2	研究区概况	247
4.2.1	自然地理概况	247
4.2.2	地质条件概况	251
4.2.3	地下水系统	253
4.3	松嫩平原天然水同位素特征	264
4.3.1	同位素数据采集与测试	264
4.3.2	大气降水同位素特征	265
4.3.3	地表水同位素特征	271
4.3.4	地下水同位素特征	275
4.4	松嫩平原地下水的放射性同位素年龄	282
4.4.1	年轻地下水的平均滞留时间	282
4.4.2	年老地下水的放射性 ^{14}C 年龄解释	293
4.5	松嫩平原地下水补给来源的同位素解释	309
4.5.1	潜水补给来源与补给区	309
4.5.2	承压含水层地下水补给来源与补给区	320
4.6	松嫩平原地下水补给强度估算	326
4.6.1	基本方法	326
4.6.2	潜水含水层补给强度估算	327

4.6.3 承压含水层补给强度估算	330
4.7 松嫩平原地下水流动特征的同位素解释	331
4.7.1 地下水流动系统	331
4.7.2 浅层局部地下水流系统	332
4.7.3 区域地下水流系统	335
4.7.4 含水层系统之间的水力联系	335
4.7.5 松辽边界性质的同位素指示	341
4.7.6 嫩江与地下水补排关系的同位素证据	342
4.8 松嫩平原水文地质概念模式	343
4.8.1 补给来源与机制	343
4.8.2 地下水流动与边界特征	345
4.8.3 补给强度和地下水更新	345
参考文献	347
第5章 黑河流域地下水补给机制和流动模式	348
5.1 问题的提出	348
5.2 研究区地质及水文地质条件	349
5.2.1 自然地理概况	349
5.2.2 社会经济与用水状况	356
5.2.3 地质、构造概况	358
5.2.4 水文地质条件概况	358
5.2.5 区域水循环条件变化	368
5.3 黑河流域水化学和同位素分布特征	370
5.3.1 样品采集与测试	370
5.3.2 水化学分布特征	372
5.3.3 同位素分布特征	381
5.4 地下水的放射性同位素年龄	391
5.4.1 地下水氡年龄	391
5.4.2 地下水 ¹⁴ C年龄	394
5.5 地下水补给和流动模式同位素解释	397
5.5.1 地下水的补给	397
5.5.2 地下水的流动	413
5.5.3 地表水与地下水的相互转化	422
5.5.4 地下水流系统	437
5.5.5 地下水系统的更新性分析	444
参考文献	447

第6章 中国北方盆地地下水同位素特征及其水文地质意义	449
6.1 北方盆地地下水的基本特征	449
6.2 北方盆地地下水的同位素分布特征	450
6.3 北方盆地地下水同位素分层的古水文-气候解释	451
6.4 北方盆地地下水的补给机制与可持续开发利用	458
参考文献	460

第 1 章 绪 论

1.1 环境同位素与同位素水文地质学

同位素是指质子数相同而中子数不同的同一类原子的总称，它们在化学元素周期表中占有相同的位置。环境同位素是自然环境中天然产生的同位素，同一元素不同的同位素具有相近的化学性质而其质量不同。同位素分为稳定同位素和放射性同位素两种类型，稳定同位素不发生衰变，如 ^{18}O 、 ^2H 、 ^{13}C ；放射性同位素随时间发生自然衰变，通过释放出 α 和 β 粒子，形成新的核素，如 ^3H 、 ^{14}C 等。

同位素水文地质学（或称地下水同位素水文学）是利用环境同位素和其他环境示踪剂研究地下水及其相关问题的科学。它是随着核技术的发展，于 20 世纪 60 年代发展起来的一门新兴学科，是根据物质在更深一个结构层次上（原子核层次）的活动规律来研究和追踪物质世界的运动过程，从而把传统的物理和化学方法（分子和原子层次）延伸了一步。从这个意义上来说，同位素水文地质方法是传统水文地球化学的延伸。地下水中存在着多种环境同位素，不同条件下形成的地下水具有不同的同位素特征，这些特征记录了地下水起源和演化的历史，同位素水文地质学正是以参与水循环的这些环境同位素作为标记，从宏观和微观上阐明水文地质学的过程机理。

同位素水文地质学的研究最早可以追溯到 Urey (1947)、Arnold 和 Libby (1949)、Libby (1953) 的早期工作。在同位素水文地质学的发展过程中，有几个重要研究成果具有里程碑的意义，Grosse 等 (1951)、Begemann 和 Libby (1957)、Libby (1961) 首先测得天然水中的氚，并提出其在地下水研究中的应用前景；Münnich (1957) 将放射性 ^{14}C 测年引入地下水年龄的测定，并建立了地下水的 ^{14}C 测年方法；Craig (1961) 最早建立了全球大气降水的氢氧稳定同位素关系，即全球降水线，使氢氧稳定同位素在地下水起源和补给研究中得到广泛应用；随后 Dansgaard (1964) 建立了降水稳定同位素与年平均气温的关系，并根据 $\delta^{18}\text{O}$ -温度关系，获得了格陵兰世纪营冰芯的古气候记录 (Dansgaard et al., 1969)。这些工作奠定了同位素水文地质学的理论基础，使水文地质学研究从单一化学元素的应用转向同一元素同位素的应用，并建立应用同位素解决地下水问题的研究方法。

在同位素水文地质学的发展过程中，国际原子能机构 (IAEA) 起到了重要的推动作用。1958 年国际原子能机构建立后不久，就在维也纳建立了同位素水

文学部,开始推动和支持同位素技术的开发及其实际应用,定期组织召开学术会议,组织出版著作和论文集,建立全球降水同位素监测网,提供同位素标准物质,组织协调研究计划,支持发展中国家技术合作项目,开展与其他国际组织的合作,为学科的发展和导向起到了巨大作用。

在同位素水文地质学的应用中,稳定同位素一般作为恒定的示踪剂指示地下水起源、流动和蒸发效应,估算从一个相到另一相的物质转移,确定地下化学反应的程度,识别含水层的补给区等。放射性同位素一般用来了解地下水的年龄和更新性,如 ^3H 和 ^{14}C 的衰变可以用来确定地下水的“年龄”,或者是补给区到开采井的平均传输时间。除了指示水的起源和年龄外,环境同位素还可以用来了解地下水污染、水化学演化、补给过程和补给机制、水岩相互作用、咸水起源等。在地下水研究中,通常联合稳定同位素、放射性同位素以及水化学组分来研究地下水中的各种问题(Mook, 2001; Cook and Herczeg, 2000; Clark and Fritz, 1997)。

在20世纪50~60年代的早期发展阶段,科学家们侧重于利用由核工业产生的短寿命放射性同位素作为示踪剂来获得有关含水层的参数信息,如孔隙度、导水系数、储水系数等。大气核试验使得大气中氚含量在1953年和1962年及随后几年中急剧增加,造成一个全球性的大气降水氚含量的高峰,其最大含量出现在1962~1964年,从而开启了利用氚追踪地下水补给和流动的同位素水文地质学应用研究的新领域。

20世纪70年代开始,同位素技术开始应用于有关地下水起源、含水层特征、裂隙岩层中的地下水流动、干旱区地下水补给和古水、包气带补给、地下水和地表水相互作用等方面的调查研究,开展了除H、O、C同位素以外的其他环境同位素的应用及其作为示踪剂运动的理论与实验研究,这一时期末期,提出了利用核技术分析和预测地下水中污染质的迁移。80年代同位素技术已经广泛应用于地下水资源调查与评价,并且在地下水测年、干旱半干旱区地下水补给、降水-地表水-地下水关系、裂隙及岩溶含水层中的地下水特征、示踪试验数据解释的数学模型等方面取得了较大进展,同时开始了关于地下水惰性气体同位素的应用研究。

20世纪90年代以来,同位素水文地质学发展较快,同位素技术作为地下水开发管理的辅助手段得到了广泛应用,主要涉及地下水测年新方法、地下水动力学和地下水污染模拟方法、古地下水资源评价、包气带水盐运移示踪、古水文和古气候记录档案等方面。这一时期同位素技术主要应用于两个方面:一是通过改善对地下水流动系统的认识,完善地下水概念模型,辅助地下水资源管理;二是追踪地下水污染质的来源,识别其迁移转化特征。在应用同位素技术调查地下水污染方面,不仅传统同位素(^{18}O 、 ^2H 、 ^3H 、 ^{13}C 、 ^{14}C)得到广泛应用,而且 ^{34}S 、硫

酸盐中的 ^{18}O 、硝酸盐中的 ^{15}N 和 ^{18}O 以及有机单体同位素技术(CSIA)等也被引入地下水污染调查研究中。其中,硫酸盐中的 ^{18}O 被用来区分污染质来源和途径;农业区硝酸盐的 ^{15}N 和 ^{18}O 被用于区分化肥和废水的污染;单体有机物的稳定同位素 ^2H 、 ^{13}C 、 ^{37}Cl 联合应用可以追踪污染源和原位生物降解作用; ^{131}I 也被证实是确定水文地质特征和人工补给过程有效速度的示踪剂。

目前,同位素技术更侧重于区域地下水研究中的应用,同位素水文地质学方法已经成为一个解决地下水资源评价、开发和管理中所遇到的广泛水文地质问题的常规应用技术方法。

1.2 干旱半干旱区地下水调查中的同位素技术应用进展

干旱半干旱区水资源与生态环境问题是制约区域可持续发展的重要因素之一,人类活动和气候变化,尤其是极端气候事件的增加以及周期性的干旱,使人们更加关注水资源的可持续利用。在干旱半干旱区,地下水是重要的淡水资源之一,可持续开发和管理地下水资源要求准确地评价其分布、可利用性和脆弱性,这就需要了解地下水补给源和更新强度;了解含水层的水动力学以及深、浅含水层之间的水力联系;了解水文地质条件、地下水滞留时间、补给强度、蒸发强度以及地下水脆弱性等信息。在获取上述信息方面,同位素技术具有独特的优势,是地下水研究中最有效的方法之一(Kendall and McDonnell, 1998; Clark and Fritz, 1997),已被广泛应用于解决与地下水补给和滞留时间相关的水文地质与生态环境问题(Wood and Sanford, 1995; Nativ and Riggio, 1989; Gonfiantini, 1986; Fontes, 1980)。

过去40年,在干旱半干旱区地下水研究中,同位素技术提供了水的起源、年龄和流动途径等相关问题的信息,主要表现在三个方面(Phillips, 1995):①追踪地下水来源和不同空间尺度的地下水循环过程,包括识别地下水起源、确定补给源和补给区、估算补给和排泄强度、确定不同时空尺度的补给和排泄的循环模式、追踪水循环和溶解物质迁移的过程、确定不同水体的年龄和流动路径、评价地表水和地下水的混合作用和比例;②了解古水文学和水文气候变化,调查古水的分布及其变化,评估水资源的可利用性;③评价人类活动的影响和地下水咸化及对污染的脆弱性,包括识别特殊的污染源和污染过程、建立污染质传输模式和动力学过程、估算相关参数、识别和验证污染质传输模型、评价污染源及含水层对污染的脆弱性、指示地下水过量开采、评价地下水咸化或者地下水开采等。

1) 评价地下水补给和不同空间尺度的地下水循环

准确评价可利用的地下水资源是地下水可持续发展的基础,维持含水层系统

水量均衡、确定可采水量必须详细了解补给来源和补给过程,进而准确评价来自各种补给源的补给强度。通过直接测试来准确评价干旱区补给强度是相当困难的,而包气带示踪剂剖面分布是确定补给强度的有效方法,该方法最早由 Eriksson 和 Khunakasen (1969) 提出,Allison 和 Hughes (1978) 证明了用此方法估计包气带的补给是可能的。常用的示踪剂主要是核试验产生的 ^3H 和 ^{36}Cl 脉冲 (Scanlon, 1992; Scanlon et al., 1990)、天然水中的 ^{18}O 和 ^2H (Allison et al., 1994, 1984; Phillips, 1994) 以及土壤水中的 Cl^- (Edmunds and Gaye, 1994; Walker et al., 1991)。Edmunds 和 Gaye (1994) 曾详细阐述了在撒哈拉地区利用氯剖面估算补给强度的方法,提出了水化学氯和同位素技术为估算现代补给、调查补给历史最有效的方法。

地下水年龄是表征地下水循环和更新强度的重要指标。了解可更新与不可更新地下水资源的分布对地下水开发战略的制定是非常重要的,更新强度较大的年轻地下水一般赋存于浅层含水层中,滞留时间在几十年到几百年之间,对这些地下水测年,主要方法是利用 ^3H 及其衰变产物 ^3He 测定 (Solomon et al., 1993, 1992; Solomon and Sudicky, 1991; Schlosser et al., 1988; Poreda et al., 1988; Tolstikhin and Kamensky, 1969)。除此之外,环境示踪剂氟利昂 (CFC) 和 SF_6 的惰性特征使它们也成为地下水年龄的良好指示剂。

干旱半干旱区地下淡水多数是年龄很老的地下水,这些地下水被称为化石水或古水。由于对其分布和储量情况不十分清楚,很难评价其可利用性及其开采后的相关环境变化,而通过地下水同位素测年可以了解其分布和开采后的变化,制定合理的开发战略。在区域尺度地下水流系统中,地下水滞留时间长,常用的测年方法是地下水溶解无机碳 (DIC) 的放射性同位素 ^{14}C 测年法。在过去的 30 年中,该方法研究取得了许多进展,开发了校正地下碳反应的新数值方法,如 Plummer 等 (1991) 编制的 NETPATH 模型软件。除利用溶解无机碳 ^{14}C 测年之外,以 Murphy 等 (1992, 1989) 为代表的研究者测定了溶解有机碳 (DOC) 中的 ^{14}C ,并测定了 Middendorf 含水层中溶解有机碳和无机碳组分,详细分析了碳同位素存在的化学形式、生物活性之间的相互联系。除 ^{14}C 方法以外, ^{36}Cl 在地下水测年中的应用也越来越广泛。Dowgiallo 等 (1990) 在波兰利用 ^{36}Cl 研究了大型沉积盆地含水系统; Kaufman 等 (1990) 在东非 Magadi-Natron 盆地利用 ^{36}Cl 估算了断裂带咸水的滞留时间。Torgersen 等 (1991) 在澳大利亚一大型自流盆地的研究成果中提供了关于水流速率和古水文的新信息。Eggenkamp (1994) 在巴黎盆地和北海地区的深层水中获得了氯稳定同位素的比率,并结合其他同位素和地球化学示踪剂讨论了含水层中水的演化。

2) 古水文和水文气候变化

干旱区水资源对气候变化异常敏感,这些地区古水文学的研究有助于区别目

前补给和古补给的地下水,从而判断地下水资源是否被过量开采或采掘。首先研究并认识到包气带具有用于古气候重建潜力的是 Edmunds 和 Wright (1979),他们识别了包气带中短期水文-气候变化的同位素和化学记录;Cook 等 (1992)则提出了分析世纪尺度气候振荡的方法。对于古气候的重建,要求更长期的记录,这种记录可能在干旱半干旱区发现。在澳大利亚和美国,包气带中记录了过去 20 000 年的补给,并已经应用于古气候重建 (Stone, 1992),Phillips (1994)研究了美国西南部的包气带氯剖面,也得出了相同的结论,发现该区都显示氯含量在某一阶段剧增,以此推断美国西部气候 13 000~15 000 年前开始从冷湿向现代干旱条件转化。然而,各种证据显示,美国和澳大利亚沙漠区冰期的古气候情况大不相同,所以不同的结论可能反映了不同的地理条件。

大型盆地的承压含水层中的地下水,其滞留时间可能相当长,可以作为古气候记录档案 (Fontes et al., 1993)。Rozanski (1985)通过对欧洲地下水的同位素研究,证实了晚更新世向全新世转变时期的气候变化记录,把地下水的同位素组成特征与过去的大气循环联系起来。进入 20 世纪 90 年代以来,随着全球环境变化研究的深入,含水层古气候档案研究进展较大 (Stute et al. 1992; Siegel, 1991; Fontes et al., 1991; Stute and Déak, 1989)。1992 年 7 月,在美国的拉蒙特-多尔蒂地质研究所召开了一次关于含水层作为古气候档案潜力的学术讨论会,会议就应用同位素方法从地下水档案中提取过去 3 万年间气候变化信息问题进行了讨论,并提出了几种可能的指示剂和在该研究领域几个有前景的方向 (Fontes et al., 1993)。在此之后的研究取得了一些成果,识别出了不同地区地下水中的古气候信息 (Darling et al., 1997; Clark et al., 1997; Banner et al., 1996; Dutton, 1995)。1997 年在美国专门召开了一次会议,集中讨论的议题是同位素和化学示踪剂在地下水中的应用,指出综合示踪剂技术不仅可以用于古气候重建,而且还可以用于地下水测年和水资源管理 (Loosli et al., 1998),提出了水资源管理中的古气候辅助手段,主要应用的示踪剂有 H、O、C 的稳定同位素和惰性气体。

在古气候研究中人们感兴趣的另一个焦点是利用地下水中的惰性气体估算古气温 (Ballantine and Hall, 1999; Beyerle et al., 1998; Clark et al., 1998; Edmunds et al., 1998; Stute and Talma, 1998; Dennis et al., 1997; Stute et al., 1995a; Stute et al., 1995b; Stute and Déak, 1989; Heaton et al., 1986; Andrews and Lee, 1979)。Stute 和 Sonntag (1991)、Stute 和 Schlosser (1993)分别介绍了这种方法的基本原理,即依据溶解在水中的稀有气体通过物理方法估算古气温,该方法已经成功地应用于中纬度和亚热带、半干旱地区古气候重建 (Beyerle et al., 2003; Aeschbach-Hertig et al., 2002, 2000)。其中,Stute 和 Schlosser (1993)对全球地下水惰性气体研究结果进行了总结,发现在热带地区

(纬度小于 33°) 含水层惰性气体温度表明末次冰期平均冷 $(5.8 \pm 1.5)^{\circ}\text{C}$, 在纬度 $33^{\circ} \sim 51^{\circ}$ 的中纬度地区, 含水层惰性气体温度表明末次冰期平均冷 $(7.0 \pm 1.8)^{\circ}\text{C}$, 高纬度地区末次冰期通常是大陆冰盖, 影响和限制了地下水的补给, 因此, 研究者多侧重于中低纬度含水层的研究。

3) 人类活动影响和干旱区地下水脆弱性评价

人口增加和经济发展造成地下水过量开采, 会诱发一系列地质、生态环境问题, 如由于水位下降引起城市地面沉降以及相邻含水层的咸水入侵、点源和非点源的各种有机或无机污染等。在水资源调查中, 稳定和放射性环境同位素以及人工同位素被引入到污染调查领域来追踪污染质迁移 (Aravena et al., 1996) 迁移, 在地下水有机污染研究中, ^{13}C 和 ^{37}Cl 被用来确定全氯乙烯 (PCE)、三氯乙烯 (TCE) 和 1,1,1-三氯乙烷 (TCA) 的起源与转化 (Leenheer et al., 2001; Bloom et al., 2000; Hunkeler et al., 1999; Aravena et al., 1998)。在农灌区污染调查中, 硝酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 被用来确定硝酸盐来源 (Kendall and Aravena, 2000; Kendall, 1998); 通过联合同位素和化学分析确定溶解硫酸盐的不同起源 (Edmunds et al., 1995)。另外, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 和 ^{36}Cl 也被作为示踪剂确定潜水和承压含水层之间地下水的混合咸化等 (Gaye, 2001; Herczeg et al., 1996)。

我国地下水同位素研究始于 20 世纪 60 年代末 70 年代初, 其发展过程大致可分为两个阶段。90 年代以前主要是理论方法的引进与早期应用阶段, 涉及大气降水同位素组成特征、地下水补给和起源 (刘存富, 1990; 王瑞久和王怀颖, 1990; 张之淦等, 1990, 1987; 王怀颖和王瑞久, 1988; 王瑞久, 1985)、地热研究 (庞忠和, 1990a、1990b; 张锡根, 1990, 1988; 李桂如等, 1988)、地下水测年 (刘存富, 1990; 王东升等, 1989; 史慧馨等, 1988) 等。有关理论方法介绍的代表性著作包括: 公开出版的《同位素方法在水文地质中的应用》(张人权, 1983)、《核技术在水文地质中的应用指南》(李大通, 1990)、未公开出版的内部培训资料《同位素水文地质概论》(王恒纯, 1991)、《环境同位素水文地质学基础》(刘存富和王恒纯, 1984)、这些成果从不同的方面介绍了同位素的分析测试技术及其在水文地质研究中的应用, 将同位素水文地质学的理论与方法引入我国。与此同时, 在一些科研院所和高等院校建立了天然水同位素分析测试实验室, 开展了分析测试技术方法研究工作, 为我国同位素技术应用和发展奠定了基础。在大气降水同位素研究方面, 卫克勤等 (1980)、郑淑惠等 (1983)、于津生等 (1987) 首先开展了我国大气降水的氢氧稳定同位素和氡的研究, 建立了不同地区的大气降水线方程。1985 年, 我国与国际原子能机构合作, 开展中国大气降水的同位素监测研究工作。在地下水研究方面, 具有代表性的研究包括: 王瑞久 (1985)、王瑞久和王怀颖 (1990)、王怀颖和王瑞久 (1988) 利用氢氧稳定同位素和氡对太原西山和东山地下水的补给来源等水文地质问题的研究, 张之淦等

(1987)完成的石家庄至渤海湾同位素水文地质剖面的研究,刘存富(1990)等取得的河北平原地下水 ^{14}C 测年成果等。1988年,为推动我国同位素水文地质学方法的应用,召开了“全国同位素水文地质方法学术讨论会”,总结了我国同位素水文地质研究的进展,并提出了今后同位素水文地质工作的主要方向,开创了我国地下水研究的新领域。

20世纪90年代以来,是我国同位素水文地质学快速发展和取得较大进展的阶段。不仅H、O同位素得以在地下水中广泛应用,而且C、S、N同位素以及环境示踪剂 SF_6 、CFC和惰性气体在我国水文地质领域也得到了应用。在解决水文地质问题上,不仅仅局限于地下水的补给与起源,而且涉及追踪地下水的补给过程和机制、评估不同来源水的混合以及地表水与地下水相互作用、测定地下水的年龄、了解地下水污染和咸水起源等。1991年,地质出版社出版了王恒纯教授编著的《同位素水文地质概论》;1993年,第二次全国同位素水文地质学术讨论会召开,并出版了《中国同位素水文地质学之进展》。近十年来,新的同位素技术与方法不断得到应用,如地下水的各种环境示踪剂测年技术、惰性气体同位素技术、有机单体同位素分析测试技术、地下水硝酸盐的 ^{15}N 和 ^{18}O 方法等。2003年,万军伟等编著了《同位素水文学理论与实践》一书,系统地介绍了目前国内外同位素技术的最新进展和理论方法。

在我国西北干旱区水文地质研究中,李文鹏等(2006, 1995a, 1995b)根据格爾木地区、塔克拉玛干沙漠腹地和塔里木盆地地下水环境同位素的研究成果,揭示了地下水的起源、演化规律与补给机制,推断了补给时期古气候特征,提供了中国北方可对比的环境同位素剖面,为我国干旱区地下水同位素研究提供了范例。刘丹等(1997)根据氢氧同位素分析了塔里木河对下游浅层地下水的补给,证实了下游河水转化为地下水,并且在补给及流动过程中经历再次蒸发。郝爱兵等(2000)利用同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和总溶解性固体(TDS)的关系,研究了塔里木盆地中部塔克拉玛干沙漠咸水的盐分成因,估算出蒸发对盐分的贡献为30%,溶滤贡献为70%,咸水的咸化以溶滤作用为主。张之淦等(1990)利用天然核爆氙示踪方法对山西平定黄土地区包气带的水分运移和入渗补给强度进行了研究,发现核爆氙的峰值至1985年运移到5.6m深处,据此计算出水分运移速度为0.273m/a,降水年平均入渗补给量为52.6mm。Lin和Wei(2001)于1998年再次对该处包气带进行了环境同位素剖面研究,并且与张之淦等(1990)的结果进行对比,进一步证实水以活塞流运动为主,氙峰值在1998年位于10.5m深处,计算平均运动速度是0.30m/a,过去35年的年平均补给量是68mm。顾慰祖等(2002)对乌兰布和沙漠北部地区地下水中同位素(^{18}O 、D、 ^3H 、 ^{14}C)研究识别出两类承压水的3个补给源和潜水的3个补给源,根据同位素关系估算出各补给源的组成。苏小四和林学钰(2004, 2003)利用地下水的氢氧稳定同位素特