

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

海河流域地下水年龄测定与 水文地质过程分析

秦大军 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目



国家出版基金项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

海河流域地下水年龄测定与 水文地质过程分析

秦大军 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书内容包括海河流域社会经济、森林植被、地表水演变与气候变化,以及固态水调控机制、地表水与地下水关系、地下水可更新能力、水资源可持续利用等内容。通过应用地下水年代学揭示地下水的补径排条件,确定降水-地表水-地下水转换关系、第四系水与岩溶水关系,开展泉域边界圈定,岩溶水系统划分,以及更新能力分析和判别,进而合理认识水资源形成和演变。本书以笔者近几年内完成的北京地下水、济南岩溶水同位素水文地质资料成果为基础,结合海河流域水资源利用和环境变化撰写而成,力图揭示海河流域水资源短缺、自然环境退化等问题的控制机理。

本书可供水资源与环境行业管理、设计、科研、教学等部门读者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

海河流域地下水年龄与水文地质过程分析 / 秦大军著. —北京: 科学出版社, 2015. 8

(海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-045571-0

I. 海… II. 秦… III. 同位素年代学-应用-海河-流域-地下水-水文地质调查-研究 IV. P641.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 207511 号

责任编辑: 李 敏 吕彩霞 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 王 浩

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

*

2016 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 19 插页: 2

字数: 800 000

定价: 160.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

国家自然科学基金项目 (41172215)

山东省水利厅、山东省财政厅水生态文明试点科技支撑计划

北京岩溶水资源勘查评价工程项目 (BJYRS-ZT-07)

资助

中国科学院页岩气与地质工程重点实验室

总 序

流域水循环是水资源形成、演化的客观基础，也是水环境与生态系统演化的主导驱动因子。水资源问题不论其表现形式如何，都可以归结为流域水循环分项过程或其伴生过程演变导致的失衡问题；为解决水资源问题开展的各类水事活动，本质上均是针对流域“自然-社会”二元水循环分项或其伴生过程实施的基于目标导向的人工调控行为。现代环境下，受人类活动和气候变化的综合作用与影响，流域水循环朝着更加剧烈和复杂的方向演变，致使许多国家和地区面临着更加突出的水短缺、水污染和生态退化问题。揭示变化环境下的流域水循环演变机理并发现演变规律，寻找以水资源高效利用为核心的水循环多维均衡调控路径，是解决复杂水资源问题的科学基础，也是当前水文、水资源领域重大的前沿基础科学命题。

受人口规模、经济社会发展压力和水资源本底条件的影响，中国是世界上水循环演变最剧烈、水资源问题最突出的国家之一，其中又以海河流域最为严重和典型。海河流域人均径流性水资源居全国十大一级流域之末，流域内人口稠密、生产发达，经济社会需水模数居全国前列，流域水资源衰减问题十分突出，不同行业用水竞争激烈，环境容量与排污量矛盾尖锐，水资源短缺、水环境污染和水生态退化问题极其严重。为建立人类活动干扰下的流域水循环演化基础认知模式，揭示流域水循环及其伴生过程演变机理与规律，从而为流域治水和生态环境保护实践提供基础科技支撑，2006年科学技术部批准设立了国家重点基础研究发展计划（973计划）项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”（编号：2006CB403400）。项目下设8个课题，力图建立起人类活动密集缺水流域二元水循环演化的基础理论，认知流域水循环及其伴生的水化学、水生态过程演化的机理，构建流域水循环及其伴生过程的综合模型系统，揭示流域水资源、水生态与水环境演变的客观规律，继而在科学评价流域资源利用效率的基础上，提出城市和农业水资源高效利用与流域水循环整体调控的标准与模式，为强人类活动严重缺水流域的水循环演变认知与调控奠定科学基础，增强中国缺水地区水安全保障的基础科学支持能力。

通过5年的联合攻关，项目取得了6方面的主要成果：一是揭示了强人类活动影响下的流域水循环与水资源演变机理；二是辨析了与水循环伴生的流域水化学与生态过程演化

的原理和驱动机制；三是创新形成了流域“自然-社会”二元水循环及其伴生过程的综合模拟与预测技术；四是发现了变化环境下的海河流域水资源与生态环境演化规律；五是明晰了海河流域多尺度城市与农业高效用水的机理与路径；六是构建了海河流域水循环多维临界整体调控理论、阈值与模式。项目在2010年顺利通过科学技术部的验收，且在同批验收的资源环境领域973计划项目中位居前列。目前该项目的部分成果已获得了多项省部级科技进步一等奖。总体来看，在项目实施过程中和项目完成后的近一年时间内，许多成果已经在国家和地方重大治水实践中得到了很好的应用，为流域水资源管理与生态环境治理提供了基础支撑，所蕴藏的生态环境和经济社会效益开始逐步显露；同时项目的实施在促进中国水循环模拟与调控基础研究的发展以及提升中国水科学研究的国际地位等方面也发挥了重要的作用和积极的影响。

本项目部分研究成果已通过科技论文的形式进行了一定程度的传播，为将项目研究成果进行全面、系统和集中展示，项目专家组决定以各个课题为单元，将取得的主要成果集结成为丛书，陆续出版，以更好地实现研究成果和科学知识的社会共享，同时也期望能够得到来自各方的指正和交流。

最后特别要说的是，本项目从设立到实施，得到了科学技术部、水利部等有关部门以及众多不同领域专家的悉心关怀和大力支持，项目所取得的每一点进展、每一项成果与之都是密不可分的，借此机会向给予我们诸多帮助的部门和专家表达最诚挚的感谢。

是为序。

海河973计划项目首席科学家
流域水循环模拟与调控国家重点实验室主任
中国工程院院士



2011年10月10日

序

海河流域是世界上人类活动对自然环境改造强度最大的地区之一，面临干旱、土壤沙化、生态水文环境退化、供水安全等问题。区域性大范围地下水降落漏斗，面积达数千，甚至上万平方公里，表明过量开采区地下水自然恢复难度之大。近几十年来，过量开采地下水，使流域水资源量明显下降，水质和生态水文退化问题更加显著，其影响程度或已超出了自然因素引起的气候和环境变化范围。剖析海河流域水资源演化过程对揭示和理解流域水循环规律，以及其与全球气候环境变化的关系具有重要意义。

陆地水循环研究常将水汽由海向陆地输入过程作为水循环起点，并主导陆地水文过程。气候变化、人类活动、生态环境、水文过程等因素之间相互作用、相互联系，或者相互扰动的分析，多数是从气候因子（温度/湿度）演变为主线。重建温度/湿度变化过程，反演古气候变化模式，推演水资源量、生态环境变化时，需要考虑其他多种因素的影响，尤其是陆地水文环境对大气温度/湿度变化的作用。该项研究对在全球气候变化背景下的水资源演化进行了深入探索，利用海河流域人口数量、森林植被、河系、湖泊演化作为分析变量，结合末次冰期以来全球气候变化研究成果，分析了变化气候环境下水循环及其时空演变，首次提出了物候水文学概念、末次冰期以来陆地水资源耗散结构体系、固态水与降水耦合调控气候水文过程机理，并重新厘定了自然环境演化和人类活动对区域环境和水资源的影响和作用。这项工作强化了气候变化与陆地水文过程的密切关联，有助于提高变化气候条件下水资源量演变模式和预测的可靠性。

地下水已成为全球多数地区的主要供水水源，一方面储藏量大，易开发和利用；另一方面，却面临因连续过量开采储藏量下降的问题。20 世纪 70 年代，国际上提出了地下水资源可持续利用概念，由于缺乏定量刻画手段，地下水可持续利用概念的描述多数是定性的。该书基于地下水年龄测试结果，重新划分了地下水可更新能力类型，并给出了新的影响地下水可持续利用的控因素。作者建立和采用了国际上新的地下水测年方法，提出了地下水年代学理论架构，这对促进水文地质学和地下水动力学的发展有重要意义，为地下水资源评价和可持续利用管理提供了新的思路和方法。

基于上述核心内容，作者首先分析了海河流域自然环境变化，以及在人类活动影响下

水资源环境的响应；分析了海河流域平原区地下水年龄及水文地质过程；给出了北京地下水和济南岩溶水地下水年龄测定和分析结果，并对这两个研究区内长期未解决的一些科学问题进行专门研究和讨论，给出了一些新的资料和认识；针对地下水过量开采引发的水循环路径和水流场变化，分析了地下水资源可持续利用问题。该书的突出特点是系统地利用了 CFCs、 ^3H 、 ^{14}C 三种测年方法确定地下水年龄，避免了过去单一方法的不确定性，利用地下水 CFCs 测年方法能够更可靠地刻画和揭示出地下水补给、径流、排泄等水文地质过程及其变化。

书中重点介绍了地下水年代学的理论和方法，尤其是地下水 CFCs 示踪和定年技术和理论，着重论述了孔隙和裂隙岩溶含水层结构、地下水年龄，地下水系统补给，地下水资源可持续性利用概念和控制因素，丰富了陆地水循环规律的研究内容。

该书的出版发行，有益于推动水文地质学、地下水动力学的发展，加强气候与水资源和生态水文过程领域的研究，为应对变化气候条件下的水资源和环境变化将起到积极作用。

是为序。

中国科学院院士
大陆动力学国家重点实验室主任



2015 年 3 月 20 日

前 言

海河流域地下水资源保证了该区经济、社会近几十年持续、高速发展。然而地下水超量开采，加速了环境和生态的退变。这种环境退变表明该区水资源量已不足维持以大规模自然资源消耗为代价的经济、社会发展模式。在自然条件下，地下水为水循环过程的末稍，也可成为水循环过程的起点。地表水与地下水多次转换过程延长了水在陆地上的滞留时间，相对增加了可利用水资源量，高效发挥了其生态水文作用。因此，在 4000 年前，海河流域的森林覆盖率可达 60% 以上，河流、湖泊、湿地广布，自成体系。人类活动沿河流向周边扩散，砍伐森林、开垦土地、兴修水利工程等活动改变着原始自然风貌和相互依赖的自然生态环境体系。回溯海河流域的森林植被、水系变迁，气温、降水、流量等变化，可以看出人类活动加速了自然体系的退变。从水文过程而言，在人类活动的影响下，地下水则成为水循环过程的末稍，难以发挥起点的作用。地下水转换为地表水过程的中断，导致水向下游的运移路径变短，水在陆地滞留时间变短，水资源重复次数下降，其有效利用量成倍减少。我们新获得的研究资料和结果表明，即使是可更新的地下水系统，如果没有足够的补给源，或者因补给源消失，补给条件改变，而难以实现补给。在补给量有限，或者补给源减少消失时，可更新的地下水系统与不可更新的地下水系统的可持续利用能力差别变小，地下水的过量开采都会导致地下水资源减少，甚至枯竭。

水（土地）资源是当前备受瞩目的全球性热点问题（Mehta et al. , 2012; Edelman et al. , 2013; Franco et al. , 2013; Bridge, 2014; Joy et al. , 2014）。在全球淡水资源中，冰盖和冰川占世界淡水总量的 86%，地下水占 13.5%，湖水、土壤水、河水、水库水和大气水占 0.5%（Jones, 1997）。地下水资源量是地表水资源量的 25 倍，但是地下水补给量仅占河水总流量的 10%（Oki and Kanae, 2006）。地下水占陆地水资源量的 68%。世界上数以百万计的城乡居民以地下水为生，地下水利用带给人们许多福利，同时由于过量开采地下水，也造成许多负面问题，如地下水水位下降、地表水系消失、生态环境退化等。地下水是不可见的水文循环的地下部分，维持着湿地和河水基流（Kløve et al. , 2011）。地下水中长期过量开采带来的问题比过量利用地表水更严重。遇丰水年时，地表水可一次性得到回补，而地下水亏损后需要很长时间（数年至几十年）才有可能恢复，有的甚至无法恢复（Gleeson et al. , 2010; Aeschbach-Hertig and Gleeson,

2012)。由于地下水资源的复杂性、不可或缺性，常规管理和限制措施难以取得理想效果。

水资源短缺是全球性的问题，而地下水是许多地区唯一水源。近几十年来，大规模地下水灌溉已在全世界范围内普及，如在南亚、中东、地中海周边、中国、北美洲、撒哈拉以南非洲和南美洲（Scott and Shah, 2004; Aeschbach-Hertig and Gleeson, 2012），超过75%的灌溉用水为地下水（Nolan, 1997; Bouchard, 1992）。在沙特阿拉伯等干旱区，生活、工业、农业及其他用水全部为地下水（Kobus, 2000）。在非洲北部、中亚和南亚、中国、美国和澳大利亚等地地下水开发利用程度很高（Konikow and Kendy, 2005）。在全球许多地区，地下水是主要饮用水源，比如在荷兰占66%（牛健南, 1995），在德国占72%，在法国占65%，在瑞士占84%，在澳大利亚占90%以上（Abduirahman, 1997）。在美国50%的城市人口和90%的农村人口饮用地下水。随着城市化、城市规模的扩大、超大城市地下水利用量占比快速增加，如墨西哥城、曼谷、洛杉矶等城市的地下水利用导致地下水水位下降，城市、工业与农业之间用水冲突和矛盾（Molle and Berkoff, 2009）。一个新的情况是，城市用水与农业用水量占比正在发生转换，在一些地区的大（特大）型城市供水量正在赶超农业用水量。城市用水往往具有经费优势和优先权，但却忽视对含水层的回补和其他用户的补偿。

我国不仅面临水资源量的不足，而且还有因水质变差造成的可利用水资源量下降。2013年我国水资源总量为 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，人均水资源占有量为 2065 m^3 ，为世界人均水资源占有量的1/4，是全世界人均水资源占比最低的13个国家之一。据中国地质调查局《中国地下水资源与环境调查成果报告》，我国地下淡水资源天然补给量每年约8840亿 m^3 ，为全国水资源总量的1/3。地下淡水可开采量为3530亿 m^3/a ，目前我国地下淡水开采量超过1000亿 m^3/a ，并以25亿 m^3/a 递增。全国有400个城市开采地下水，北方地区地下水开采率为52%，华北和西北分别为72%和66%。地下水是内蒙古呼和浩特市唯一供水水源（孙彭力和王慧君, 1995）。在我国超过7亿人口饮用地下水（孙景云, 1996）。国家环境保护部《2010年中国环境状况公报》表明，2010年全国182个城市地下水水质监测点4110个，水质在较好级以上的监测点共1759个，占总数的43%，水质劣于较差级的监测点有2351个，占总数的57%。东北、华北与西北地区的城市地下水水质问题突出。中国地质环境监测院在195个城市的地下水监测结果表明，97%的城市地下水受到不同程度污染，40%的城市地下水污染趋势加重。北方17个省会城市中有16个地下水污染趋势加重。南方14个省会城市中有3个地下水污染趋势加重。我国地下水污染由城市到农村、由浅层到深层、由点到面的扩展，并呈加重趋势。另外，需要引起重视的问题是，我国华北、东北、长江中下游等地区，土地和水资源过量利用，还导致环境衰退，出现干旱化、沙化趋势。经济扩张范围逐渐由下游地区向中游、上游地区延伸，形成全流域和跨流域的水土资源利用。中上游地区水资源利用程度与下游地区相比，还处于相

对较低水平,水资源利用引起的生态环境问题,还未受到应有的重视。

地下水资源可持续利用受到广泛关注。自 20 世纪 90 年代以来,在全球范围内设立了许多针对盆地地下水系统研究的重大项目。不同的大型盆地地下水补给方式不同,既有现代水补给的强循环地下水系统,也有早期补给的弱循环地下水系统。地下水补给一方面取决于水文地质条件,另一方面与降水量、地表水丰富程度有关。地下水系统环境条件变化,也可引起地下水更新速率的变化。例如,排泄量增加时,会改变地下水系统的径流方向和速度。为合理地获取和利用地下水资源,当前建立了如下原则,对可更新地下水系统,则可适当超量开采,因为其可快速恢复;对不可更新的地下水系统,则应限制开采。然而,在为满足需要的情况下,不同类型地下水系统都不同程度地被过量开采。地下水可更新能力概念的提出,并没有改变地下水资源过量利用的状况。相反,为了多开采地下水,却成为一个不易反驳的理由,因为地下水可更新与不可更新是一个定性的概念,是相对的。地下水储存量的变化,导致地下水补径排条件的转变。传统的地下水资源评价方法未能准确地揭示和刻画地下水补径排过程,以给出合理评价结果。

当今人类发展面临全球环境变化和地下水资源可持续利用两大难题。二者之间又有密切的相互联系,全球环境变化影响地下水资源的可持续利用,反之,地下水资源量的变化,对全球环境又有直接影响。在现阶段及以后的时期内,社会发展仍将依赖地下水资源,生态水文环境恢复,河道生态系统重建等都需考虑地下水的作用。这就需要深刻认识地下水资源的属性,地下水在整个水循环过程中的作用以及不同类型和形式水之间转换和滞留时间(水的年龄)。地下水运动规律研究不仅有益地下水资源合理利用和管理,而且对全球环境变化机理的研究具有重要意义。环境同位素水文学及地下水年代学是地下水运动规律研究的重要理论和基础。利用环境同位素方法已获取 3 万年以来地下水中的气候变化信息(Fontes et al., 1993),同位素示踪剂可用于地下水测年和水资源管理(Loosli et al., 1998)。深入地理解地下水年代学方法和理论,并密切结合研究区水文地质条件进行综合分析,才可能获得合理的解释。地下水年代学的研究推动其在水文地质学领域中更广泛的应用和发展。

本书重点针对海河流域地下水过量开采引发的地下水运移路径和水流场变化,对地下水可持续利用问题进行深入研究。应用水文地质学、环境同位素水文学和地下水年代学的理论和方法,尤其是地下水 CFCs 示踪和定年技术和理论,研究海河流域地下水年龄,地下水循环和更新过程等相关问题,着重论述了孔隙和裂隙岩溶含水层结构、地下水演化,地下水系统的补给能力,分析地下水可持续性,以及对气候变化的响应。

书中内容包括了作者十多年来的部分研究工作,其中涉及的科研项目包括:陕西关中盆地浅层地下水化学和 CFCs 年龄研究(40372115, 2006. 1—2008. 12); 0~50 年尺度地下水 CFCs 测年方法及应用研究(40572148); 地下水溶解气特征与循环条件变化的响

应研究 (41172215, 2012.1—2016.12); 海河流域典型区地下水循环规律研究 (2006CB403401); 济南市长孝、西郊水源地地下水和趵突泉的水力联系研究 (济南市水利局 2011.1—2012.5); 北京岩溶水资源勘查评价工程项目: 同位素测试专题 (BJYRS-ZT-07, 2012—2013)。参加野外工作的有滕朝霞、邬亮、李宇、辛宝东、王晓红、赵占锋、欧璐、李宝学等, 郭艺协助绘制了部分图件。

秦大军

2015年3月10日于北京

目 录

总序
序
前言

第 1 章 海河流域气候和水文变化	1
1.1 研究背景	1
1.2 自然地理概况	1
1.2.1 地理位置	1
1.2.2 气象条件	2
1.2.3 地形地貌	3
1.3 海河流域水资源量和调控方式	4
1.3.1 地表水资源状况	4
1.3.2 地下水资源状况	5
1.3.3 水资源调控方式	7
1.4 海河流域水文环境变化：物候水文学分析方法	11
1.4.1 人口和环境变化	11
1.4.2 森林面积变化	13
1.4.3 海河流域河流水系及河水流量变化	16
1.4.4 海河流域湖泊湿地及变化	19
1.4.5 新生代以来气候变化	22
1.4.6 极地冰冻圈环境变化	27
1.4.7 海河流域 5000 年以来的气候变化	34
1.5 流域水资源调控机制及其阶段性	41
1.5.1 冰川融水调控区域水和生态	42
1.5.2 源区基流产出类型	43
1.6 流域水资源耗散结构体系	44
1.6.1 冰冻圈消退与陆地水储集量下降	45
1.6.2 气候变暖促源区水排泄	45
1.6.3 垦殖水利促水排泄	46

1.7 固态水和降水耦合调控气候及水文过程机理	48
1.7.1 我国季风气候特征	48
1.7.2 气候变化的双重控制机理	49
1.8 本章小结	51
第2章 地下水测年原理和方法	53
2.1 地下水年龄定义	53
2.2 地下水测年方法分类	55
2.2.1 “事件”标记方法	55
2.2.2 人工示踪方法	55
2.2.3 浓度型示踪剂——CFCs 和 SF ₆	56
2.2.4 放射性同位素测年方法	56
2.3 地下水 CFCs、 ³ H 和 ¹⁴ C 测年方法和原理	61
2.3.1 CFCs 示踪和测年方法	61
2.3.2 ³ H 测年方法	71
2.3.3 ¹⁴ C 测年方法	71
2.4 环境示踪剂（CFCs 等）的应用	73
2.4.1 确定降水入渗速率	73
2.4.2 地下水流速估算	73
2.4.3 含水层之间发生越流的识别	74
2.4.4 农灌水入渗范围识别	74
2.4.5 河水与地下水关系识别	75
2.4.6 水库坝基渗漏、地下水流场变化识别	75
2.4.7 地下水脆弱性评价	75
2.5 本章小结	76
第3章 海河流域平原区地下水年龄及水文地质过程	77
3.1 海河流域地下水补给条件	77
3.1.1 降雨、地形-地貌特征	77
3.1.2 区域地质	79
3.1.3 含水层特征	80
3.1.4 海河流域地下水水位及变化	83
3.2 海河流域平原区第四系地下水年龄	85
3.2.1 地下水年龄及其分带性	85
3.2.2 冲洪积扇区地下水年龄	86

3.2.3 中部平原区地下水年龄	87
3.2.4 滨河平原区地下水年龄	90
3.3 海河流域地下水年龄结构和补给方式	91
3.3.1 海河流域地下水年龄结构	91
3.3.2 开采影响地下水年龄结构	91
3.3.3 地下水补给源调整	93
3.4 海河流域平原区第四系地下水形成和演化	94
3.4.1 海河流域第四纪地质特征	94
3.4.2 海河流域平原区第四系地下水来源	95
3.4.3 海河流域平原区地下水可更新属性	96
3.5 海河流域平原区地下水咸化机理	98
3.5.1 中部平原区含水层咸化	98
3.5.2 滨海地带淡水咸化	99
3.6 本章小结	103
第4章 北京地下水年龄与补径排条件	105
4.1 研究背景	105
4.2 气候和水文条件	105
4.2.1 气候条件	105
4.2.2 地表径流	106
4.3 地下水资源量及开发利用状况	106
4.3.1 地下水资源量变化	106
4.3.2 超采区	107
4.3.3 地下水位变化	108
4.3.4 地面沉降	109
4.4 第四系含水层特征	110
4.4.1 含水层分组	111
4.4.2 含水层结构	112
4.5 第四系孔隙水年龄	113
4.5.1 浅层地下水年龄	113
4.5.2 深层地下水年龄	114
4.5.3 北京平原区第四系地下水年龄结构	115
4.5.4 第四系地下水可更新属性	116
4.6 北京岩溶水年龄及补径排条件	117
4.6.1 研究背景	117

4.6.2	北京岩溶区地质背景	117
4.6.3	西山岩溶水补径排条件和循环规律	119
4.6.4	顺义-平谷岩溶水补径排条件和循环规律	128
4.6.5	大兴-通州岩溶水补径排条件和循环规律	133
4.7	北京永定河河水与西山岩溶水关系	136
4.7.1	河水流量变化	136
4.7.2	永定河水渗漏段	137
4.7.3	河水在岩溶水中的分布	138
4.7.4	永定河对西山岩溶水补给的影响	138
4.8	岩溶水水文地质单元圈定	140
4.8.1	岩溶水水文地质单元和边界	140
4.8.2	北京岩溶水水文地质单元划分	142
4.8.3	北京岩溶水水文地质单元的特点	146
4.9	本章小结	148
第5章	济南岩溶水年龄与城区泉群泉域圈定	150
5.1	研究背景	150
5.1.1	主要问题	150
5.1.2	济南泉群及断流情况	151
5.1.3	保泉措施和效果	152
5.1.4	已有泉域划分方案	153
5.1.5	工作方法和内容	155
5.2	自然地理和气象条件	155
5.2.1	自然地理	155
5.2.2	气象和水文	157
5.3	地质条件	159
5.3.1	地层	160
5.3.2	构造	162
5.3.3	岩浆岩	164
5.4	水文地质条件	165
5.4.1	含水层类型	165
5.4.2	泉的类型和分布	167
5.5	水化学特征	169
5.5.1	岩溶水化学特征	169
5.5.2	四大泉的水化学特征	170

5.5.3 水岩作用	171
5.6 岩溶水 CFCs 组成和分布	177
5.6.1 地下水 CFCs 测试结果	177
5.6.2 岩溶水 CFCs 组分的分布特征与水流场识别	179
5.7 岩溶发育的水文地质条件	184
5.7.1 构造及导水性	185
5.7.2 寒武系—奥陶系灰岩岩溶作用	194
5.7.3 溶洞展布特征对地下水水流通道形成和水流方向的控制	196
5.8 降水量、岩溶水位和泉流量之间的关系	202
5.8.1 降水量	202
5.8.2 河水与泉群流量	203
5.8.3 城区供水量分配	204
5.8.4 泉水位和流量对降水的响应时间	206
5.8.5 降水量和泉群涌水量之间的关系	206
5.8.6 城区岩溶水位与泉群流量的关系	208
5.8.7 岩溶水开采量与泉群流量的关系	209
5.8.8 地下水循环条件的变化	211
5.8.9 泉群涌水量动态变化及影响因素	212
5.9 泉域边界和岩溶水水文地质单元划分	213
5.9.1 边界类型和划分原则	213
5.9.2 泉域边界	213
5.9.3 岩溶水文地质单元划分	216
5.9.4 泉域边界圈定的若干问题	217
5.9.5 典型水源地和城区泉群的水力联系	219
5.10 岩溶水资源量综合评估	219
5.10.1 岩溶水补给量估算	220
5.10.2 岩溶水可利用量估算	227
5.10.3 泉水断流和恢复机理	230
5.11 本章小结	231
第6章 地下水补给和资源可持续利用	233
6.1 地下水补给源和补给过程	233
6.1.1 补给源和补给方式	233
6.1.2 地下水补给过程	234
6.2 地下水补给速率估算方法	235