

华北平原 地下水环境演化

张宗祜 沈照理 薛禹群 任福弘
施德鸿 殷正宙 钟佐桢 孙星和

等著

地质出版社

华北平原

地下水环境现状



国家自然科学基金重点资助项目
(49232040)研究成果

华北平原地下水环境演化

张宗祜 沈照理 薛禹群 任福弘 施德鸿
殷正宙 钟佐棨 孙星和 汤鸣皋 谢春红
范鹏飞 郭永海 吴吉春 曾溅辉 孙继朝
张翠云 张永祥 刘文生 杨军耀 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

华北平原近半个世纪以来大规模、不合理的地下水开发利用,导致发生了一系列严重的地质生态环境问题。通过对地下水环境在自然因素和人类活动影响下的演化规律及其与外部环境相互作用的研究,模拟了地下水系统对外部环境变化的响应与反馈,预测了地下水环境未来演化趋势。本书为地下水环境演化研究提出了一套新的观点、方法与理论,为水文地质学科新领域的开拓作出了贡献,为全球变化研究提供信息,为地下水合理开发利用、保护环境提供了科学依据。

本书资料丰富,研究深入,包含了作者们长期以来在华北地区生产与科研实践中积累的知识和经验,具有重要的科学意义和生产实践的指导意义,可供从事水文地质、环境地质专业的科研、教学及有关部门人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

华北平原地下水环境演化/张宗祜等著. -北京:地质出版社,2000.2
ISBN 7-116-02928-1

I. 华… II. 张… III. 地下水资源-研究-华北平原 IV. P641.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 62997 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:江晓庆 白 铁 渠洁瑜

责任校对:关风云

*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:18.75 字数:450000

2000 年 2 月北京第一版·2000 年 2 月北京第一次印刷

印数:1—600 册 定价:52.00 元

ISBN 7-116-02928-1
P·2073

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

序 言

华北平原是我国重要经济发展区之一,不仅在农业上十分重要,而且首都北京以及天津、秦皇岛、石家庄、邯郸、济南、郑州等重要工业城市,都分布在这一地区,文化科教事业十分发达,成为我国政治、经济、文化的中心地带。其工业总产值约占全国总数的 $1/5$,粮食总产量约占全国产量的 $1/7$;人口密集,约占全国总人口的 $1/10$ 。因此这一地区在我国具有特殊重要的地位。

华北平原地处半干旱、半湿润气候带,由于受气候条件的限制,水资源相对较为紧缺,已成为国民经济发展的一个重要制约因素。特别是实行改革开放政策以来,工农业建设突飞猛进,城市人口剧增,城市规模持续扩大,对水资源的需求不断提高,供需矛盾也日益突出。华北平原水资源的一个主要特点,表现在地下水较为丰富,80%的降水入渗地下成为地下水,不论是农田灌溉或城市供水,地下水均占主要地位。自 60 年代以来,由于大力开发地下水,许多农田实现井、渠双保险,对抗旱保收、促进农业增产,发挥了重要作用。地下水作为城市主要供水水源,对促进工业生产和城市建设,也发挥了积极作用。

由于缺乏环境意识与科学管理,水资源无限制的大量开发利用,以及人类活动的各种不利影响,都会导致负面的结果。例如由于地下水超量开采形成的大面积地面沉降,使工农业生产均蒙受损失。城市地区不合理的污水排放,导致水污染问题日趋严重;不仅影响人体健康,而且使水资源的供需矛盾更趋尖锐化。沿海地区由于超量开采地下水,导致海水入侵,形成人为的地质灾害。大量工业废气的排放,一方面造成大气污染,另一方面形成酸雨,使水污染问题(包括土壤)更趋复杂化。由此可见,人类活动已成为现今影响地下水环境演化的主导力量。地下水既是人类社会和经济发展不可缺少的自然资源,同时又是地质作用和地质灾害的载体,如果不重视水资源的管理与保护,在人类活动不利影响下,必然导致生态环境恶化,并对经济发展造成严重的不利后果。

随着人类经济社会的发展,人类活动对地球环境的影响,已进入到一个全球化的新阶段。诸如温室效应引发的海平面上升;三废排放造成的大气与水体污染以及酸雨灾害;森林、植被的破坏,使水土流失和土地荒漠化现象日趋严重,洪、涝等各种自然灾害也日益加剧。其所造成的危害,不仅影响到本国的生存环境,而且也直接或间接对邻国造成威胁,成为威胁到全人类的全球性问题。

华北平原是我国水文地质研究程度最高的地区之一。早在 50 年代就开始在全区开展水文地质普查,是全国最早开展普查的地区之一;60 年代又结合抗旱打井,开展大规模的农田供水与盐土改良的水文地质勘查,并在上述工作的基础上,组织有关各省编制出版了黄淮海平原水文地质图系,对全区地下水资源作出初步评价。从 70 年代到 80 年代,我国开始走向改革开放的道路,国民经济蓬勃发展。为了加强战略性基础性工作,以满足国民经济日益发展的需要,地矿部门把黄淮海平原地下水资源与自然灾害的综合治理,作为重点研究项目,组织各省有计划的开展有关地下水资源评价、咸水改造利用、盐碱地改良、地下水人工调蓄,

以及第四纪地质和地貌等各项专题研究,取得一系列研究成果,并于 90 年代初在系统总结以上大量工作的基础上,完成专著《黄淮海平原水文地质综合评价》。

在此期间,各重要城市为了合理开发利用地下水,结合城市供水所出现的地下水过量开采问题、水质污染与水质恶化问题,以及其他各种水环境问题,分别开展了地下水资源与管理模型的研究。在济、徐、淮地区,还开展了岩溶水资源的专题研究。除此以外,水利、农业、城建、煤田、环保等部门,以及有关院校和中国科学院所属科研单位,也都在这一地区不同程度的开展了水资源的研究,完成大量区域性或专题性的调研报告。以上大量调研成果,为华北平原水资源的研究,提供了丰富的科学资料,对促进华北地区国民经济的发展,发挥了积极作用。

90 年代以来,为了进一步深入研究人类活动影响下的地下水环境演化,探讨地下水在全球变化中所居有的重要地位,并为华北平原的资源,环境和社会经济的可持续发展,提供科学依据,国家自然科学基金会确定立项,进一步开展“人类活动影响下华北平原地下水环境的演化与发展”的专题研究,作为重点资助项目。这一重大项目,在地矿部水文地质工程地质研究所张宗祜院士的主持下,组织国内各有关部门的专家,从 1993 年开始到 1996 年结束,前后经过四年时间的艰苦努力,已于最近完成最终报告《华北平原地下水环境演化》,即将由地质出版社出版。

全书共分 9 章,重点从理论上深化一步,分析研究华北平原第四纪以来地下水环境演化过程和基本规律。该报告以第四系孔隙地下水作为主要研究对象,并把华北平原的第四系地下水,作为一个统一的水循环系统,深入探讨了在人类活动影响下,该系统地下水动力场和地球化学环境的时空演化和演变规律。对华北平原分布较广的高氟地下水的地球化学特征,进行了深入研究。对沿海城市所出现的海水入侵问题,着重进行了入侵含水层数值模拟的研究。应用环境同位素测年方法,进行了第四系地下水年代学的研究。最后还对地下水资源的未来趋势,进行了预测研究。

根据上述内容,认为本报告具有以下特色:①提出超量开采地下水,对包气带盐份运移、积淀的影响,及增大对大气 CO_2 释放量的新认识;②揭示浅层及深层淡水,在天然状态下的时空演化特点,及其质量传输机制,以及人类活动影响下的水质演化过程;③通过实验模拟,论证高氟水灌区,水—土—植物系统中氟的迁移转化规律;④首次建立海水入侵过程中,同时考虑地下水密度变化和阳离子交换行为的三维数学模型;⑤区域流场由于人为作用影响,被局部、封闭的流场所分割。定量的分析了开采量与地下水降落漏斗和地面沉降发生的相互关系;⑥通过环境同位素年代学的研究,提出建立地下水断代剖面的构想,揭示地下水是气候,环境演化信息的良好载体;⑦应用遥感地理信息系统,分析研究自 70 年代以来的城镇变迁,及其对土地盐份变化的影响;⑧通过对京、津、唐地区和河北省八个城市,采用水均衡法所建立的地下水演化模型,提出了华北平原地下水演化已进入由量变到质变的新阶段。

综上所述,通过这项专题研究,对华北平原水资源存在的主要问题,从理论认识上,又提高到一个新的水平,不论是研究的深度或广度,均有所发展、有所创新,提出了不少新观点、新思路和新技术,对今后进一步开展工作,创造了有利条件。

根据对华北平原水资源开发利用现状的分析,尽管出现地下水过量开采和生态环境严重恶化等这样、那样的问题,但分析其原因,并非完全是由于水资源不足,而是很大程度上由于缺乏对水资源的科学知识,在思想上缺乏对水资源的管理意识、节水意识和环境意识而造

成的。只要在思想上、行动上依靠科技进步,加强对水资源的合理规划和科学管理,提高水资源的利用效率,防止浪费,建立高效节水农业和节水工业;树立和强化环境意识,坚决防止三废污染和一切人为作用对生态环境造成的破坏,那么到下世纪就有可能避免水资源危机的发生。

华北平原对水资源的开发利用,已积累许多重要经验,说明还有很大潜力尚待大力发掘。例如微咸水和海水资源的开发利用;加强和提高地表水库的调节功能,大力发展地下水;实行地表水地下水相互调剂、统一调度、联合开发;推广各种形式的地下水人工调蓄,如商邱经验;实行污水资源化,在矿山地区实行排、供结合;大力推广城市生活用水的各种节水措施,如建立分质供水的双重管道系统,等等。这些宝贵经验,如果能进一步加以发展,对缓解本地区水资源紧缺问题,将能发挥重要作用。

人类将跨入 21 世纪,如何合理调整人类的活动方式,促使经济发展与人口、资源、环境相协调,是实行可持续发展的先决条件和基本任务。国土资源部成立以来,正在组织开展全国新一轮的国土资源大调查,为国土规划和国土资源的合理开发利用与宏观管理,提供科学依据。本项研究课题的最终成果《华北平原地下水环境演化》的圆满完成,不仅为开展国土资源大调查创造了有利条件,同时也为下一世纪华北平原国民经济大发展,提供了重要的基础性科学资料。当此新著即将出版问世之际,我愿利用这一机会,向参加这项课题的全体同仁,表示衷心的祝贺!

中国科学院院士 陈梦熊

1999 年 9 月,北京

前 言

《华北平原地下水环境演化》是国家自然科学基金重点资助项目“人类活动影响下华北平原地下水环境的演化与发展”的成果总结,是研究华北平原第四系地下水系统在自然条件基础上叠加人类活动影响的地下水动力场和地下水水化学场演化与发展的综合性地学专著。自 1993 年开始,在以张宗祜院士(项目负责人)、沈照理教授和薛禹群教授组成的专家核心组的指导下,地质矿产部水文地质工程地质研究所、中国地质大学(北京)环境科学系和南京大学地球科学系经过四年合作研究,于 1996 年完成课题研究任务。1997 年 3 月由国家自然科学基金委员会地球科学部聘请章申院士、陈梦熊院士、李廷栋院士、刘昌明院士、哈承佑研究员、刘肇昌教授、陈静生教授、王秉忱研究员、承继成教授等组成验收组,对本项目进行结题验收。验收组认为:“本项目结题资料翔实,做了大量探索性工作,取得了较大的突破,研究成果从总体上达到了同类研究的国际先进水平,同意验收。”

华北平原在本项目中主要指黄河以北,西倚太行山、东临渤海的广大平原地区。行政区划上分属北京市、天津市和河北省,并涉及山东省、河南省的部分地域,面积约 13.9 万 km²。

本区属半干旱、半湿润带大陆性季风气候区,自然条件优越,气候适宜、交通便利,是我国政治、经济、文化和交通中心所在。区内地势平坦,土层深厚,有利于大农业的发展,是我国北方重要粮棉产地。研究区有着悠久的人类发展历史,同时随着近代经济活动的开展,城市规模不断扩大,人口高度集中,在自然原因和历史遗留的环境问题上,叠加了伴随现代经济发展的资源与环境问题。特别是水资源与水环境问题更为突出与危急,反过来这些问题又不同程度地影响和制约着我国经济的进一步发展。因此,人们不禁会提出,水环境,特别是地下水环境,在人类活动影响下究竟发生了什么变化,还会怎样发展等等关系国计民生的迫切问题。

华北平原地下水开采历史悠长,大规模的开发利用也有 40 余年的历史。长时期的开发利用实践和几度国家重点科技项目关于华北平原水问题研究的联合攻关,给进一步研究水资源和水环境问题奠定了坚实的基础,也为研究人类活动影响下的地下水演化创造了有利条件。

随着人类社会的发展,人类对地球环境的影响也进入了全球环境的时代。如全球增温、酸雨、土地退化、淡水资源匮乏等都是人类面临的一系列重大的全球环境问题。这些问题归根结底涉及地球各部分的相互作用,涉及岩石圈、大气圈、生物圈、水圈四大层圈的相互关系。因此,1988 年在中国科协领导下成立了 IGBP 中国国家委员会。在参加并组织实施以研究全球变化为目的的国际地圈生物圈计划(IGBP)时,我们开始认识到在把地下水作为研究对象研究的同时,更要把它作为环境的活跃因子给予重视。地下水作为水圈的重要组成部分,应该纳入到“全球一体化”的地球系统科学中去。也就是要更有意识地去描述水与地球系统相关的物理、化学、生物作用过程,了解生命支持系统的环境演化,研究发生在地球系统中的变化与人类活动的相互影响,增强人类对未来变化趋势的预测和应变能力。

上述立项思想得到国家自然科学基金委员会地球科学部的支持,并最终获得重点资助。参加本项目研究的是在华北平原有长期科研和教学实践的三个单位,在取得共识的总体目标下,视华北平原地下水为一个完整的区域水流循环系统,各参加单位可以不同的学术观点,从不同的方面,多角度地对华北平原地下水演化进行全方位的考察,在研究内容上互相补充,各具特色。因此总体说来,研究工作比较全面、深入。同时对一些尚有不同见解的科学问题,亦给予了充分反映。

本书在统一拟定的提纲下分工撰写:第一章第一、二、三节,施德鸿,第四节,任福弘;第二章,殷正宙、孙继朝;第三章,郭永海、沈照理、钟佐燊、汤鸣皋;第四章第一、二节,任福弘、刘文生,第三节,张翠云、刘文生,第四、五节,张翠云;第五章第一、二、三、四节,郭永海、沈照理、钟佐燊、汤鸣皋,第五节,薛禹群、吴吉春、谢春红、张永祥;第六章第一节,曾溅辉,第二、三节,杨军耀、钟佐燊、汤鸣皋;第七章,薛禹群、吴吉春、谢春红、张永祥;第八章,孙继朝、殷正宙;第九章第一节,任福弘,第二、三节,范鹏飞,第四节,孙星和。全书由施德鸿汇总统编,并撰写前言和结论部分,最后经张宗祜院士审阅定稿。

书中不当之处,敬请读者批评指正。我们希望本书的出版能为水文地质事业的发展贡献一份力量。

目 录

序 言

前 言

第一章 绪论	(1)
第一节 华北平原地下水环境演化研究的立题思考	(1)
一、为资源与环境可持续发展研究的需要	(1)
二、探讨地下水在全球变化研究中的贡献	(2)
三、研究人类活动影响下的地下水环境演化	(2)
四、为大陆水圈演化及其资源、环境研究打基础	(3)
第二节 华北平原地下水环境研究的内容	(4)
一、研究的观点	(4)
二、研究的内容	(5)
第三节 华北平原第四系地下水的形成与分布	(6)
一、第四系地下水形成的区域背景	(6)
二、华北平原第四系地下水的形成与分布	(6)
三、地下水资源量分布及其开发的基本特征	(8)
四、地下水的循环与转化特点及其对水资源环境的影响	(9)
第四节 华北平原地下水资源开发利用现状	(11)
第二章 第四系孔隙地下水循环系统	(14)
第一节 地下水循环系统的空间展布	(14)
第二节 地下水运动的整体属性及其分异	(15)
第三节 人类活动影响下地下水动力场的变异	(18)
一、区域地下水位及流场的变化	(18)
二、地下水位降落漏斗的发生发育	(19)
三、深层地下水开采的环境阈值	(25)
第四节 地下水动力环境演化的影响因素分析	(27)
一、含水层产水能力对地下水动力环境演化的控制	(27)
二、降水量及开采量对地下水动力环境演化的影响	(28)
三、人类活动对地下水环境的影响	(29)
第三章 地下水动力场的时空演化	(35)
第一节 第四系地下水循环系统	(35)
一、浅部地下水循环系统	(35)
二、深部地下水循环系统	(35)
第二节 地下水动力场的时空演化	(36)
一、浅部地下水循环系统动力场时空演化	(36)
二、深部地下水循环系统动力场时空演化	(40)
三、区域地下水位降落漏斗的形成和演化	(44)
第三节 开采条件下区域水动力场的变异	(47)

一、浅部地下水循环系统流场的变化	(47)
二、深部地下水循环系统流场的变异	(47)
第四节 影响地下水动力环境演化的因素分析	(48)
一、地下水系统内部因素对地下水动力环境演化的控制	(48)
二、地下水系统外部因素对地下水动力环境演化的影响	(57)
第四章 第四纪以来地下水地球化学环境演化的过程和规律	(61)
第一节 地下水地球化学环境概貌及水质演化特点	(61)
一、地下水地球化学系统	(61)
二、水质的时空演化特点	(63)
第二节 第四纪以来地下水地球化学环境的再塑	(67)
一、第四纪以来地下水地球化学环境	(67)
二、地下水水质演化阶段	(70)
三、咸水形成的几个问题讨论	(75)
第三节 人类活动与地下水水质演化	(77)
一、地下水水质演化时期	(78)
二、人类活动影响下地下水地球化学环境的演化	(80)
第四节 地下水地球化学演化模拟	(88)
一、天然条件下浅层水地球化学演化模拟	(89)
二、开采条件下深层水地球化学演化模拟	(94)
第五节 地下水水质演化预测	(99)
一、概率统计模型水质预测	(99)
二、均质自回归模型水质预测	(101)
第五章 地下水地球化学环境的演化及其模拟	(103)
第一节 地下水地球化学系统的形成	(103)
一、浅部地下水地球化学系统	(103)
二、深部地下水地球化学系统	(104)
第二节 地下水地球化学环境的时空演化	(108)
一、区域地下水地球化学环境面临的主要问题	(108)
二、城市地区地下水地球化学环境的演化	(120)
第三节 地下水环境演化的地球化学模拟	(126)
一、山前平原区水文地球化学演化路径的模拟	(127)
二、中部平原区水平方向咸淡水混合模拟	(133)
第四节 开采条件下咸水下移及其溶质运移模拟	(134)
一、咸水下移及其影响因素探讨	(134)
二、咸水下移的溶质运移模拟	(140)
第五节 越流含水层系统的地下水溶质运移模拟	(143)
第六章 高氟地下水氟元素地球化学研究	(149)
第一节 浅层地下水系统氟的地球化学模拟	(149)
一、典型研究区的自然背景条件及研究意义	(149)
二、浅层地下水中氟及其化学组分存在形式的定量研究	(150)
三、浅层地下水氟的质量平衡反应模型及其化学演变	(157)

第二节 深层高氟地下水氟的吸附研究及其吸附动力学模拟	(163)
一、氟吸附动力学研究	(164)
二、氟的等温吸附与吸附容量研究	(168)
三、土壤吸附能力影响因素分析	(173)
第三节 高氟地下水灌溉区水-土-植物系统氟的迁移转化	(178)
一、氟的存在形态	(178)
二、各形态氟含量的确定	(178)
三、交换性氟的测定方法研究	(179)
四、氟迁移转化的形态特征分析	(181)
五、氟迁移转化的动态特征分析	(184)
六、氟向植物体的迁移	(186)
七、深层高氟地下水灌溉区水-土-植物系统氟迁移转化规律	(187)
八、水-土-植物系统氟迁移转化的环境效应分析	(188)
第七章 海水入侵、咸水入侵含水层中地下水环境演化及其数值模拟	(191)
第一节 海水入侵、咸水入侵含水层的基本特征	(191)
一、区域地质背景	(191)
二、海水入侵含水层的特点	(192)
三、海水入侵过程中水动力和水化学现象与水-岩间阳离子交换	(195)
四、咸淡水界面类型及其发生发育规律	(199)
第二节 海水入侵含水层的数值模拟	(205)
一、潜水含水层的海水入侵三维数学模型	(205)
二、海水入侵含水层中交换阳离子运移行为数值模拟	(211)
第三节 卤水/咸水入侵含水层的数值模拟	(220)
一、卤水/咸水入侵含水层特点	(220)
二、卤水/咸水入侵的水文地球化学特征	(225)
三、卤水/咸水入侵含水层的数值模拟	(229)
第四节 结语	(230)
第八章 华北平原第四系地下水形成演化过程中的年代学及全球变化信息的提取	(232)
第一节 研究方法概述	(232)
一、地下水年龄、测定方法及存在问题	(233)
二、最常用的环境同位素测年方法	(234)
第二节 华北平原第四系地下水形成演化过程分析	(237)
一、华北平原第四系地下水系统结构特征	(237)
二、地下水氟含量与地下水的年龄分布特征	(237)
三、地下水 ^{14}C 和 ^{18}O 含量及年龄分布	(238)
第三节 几点认识	(241)
第九章 人类活动影响下地下水环境演化的发展趋势	(243)
第一节 华北平原地下水环境演化过程和特点	(243)
一、地下水环境的自然演化阶段	(243)
二、地下水环境的人为因素干扰阶段	(244)

第二节 地下水资源的未来趋势预测.....	(245)
一、地下水资源趋势预测模型.....	(245)
二、地下水资源趋势预测	(248)
第三节 地下水开发利用模式讨论——以石家庄地区为例.....	(251)
一、概况.....	(251)
二、水资源系统分析.....	(252)
三、地下水系统管理模型	(258)
第四节 土地盐碱化及城镇扩展趋势——遥感地理信息动态监测.....	(260)
一、遥感信息提取和动态监测方法.....	(260)
二、近 20 年来华北平原土地盐碱化及城镇占地趋势	(262)
结论.....	(265)
英文摘要.....	(268)
参考文献.....	(273)

CONTENTS

Preface

Chapter 1 Introduction	(1)
1.1 Thematic thoughts of the research on groundwater environment evolution in the North China Plain	(1)
1.1.1 Demand for the research on sustainable development of resource and environment	(1)
1.1.2 Discussing the contribution of groundwater to the research of global change	(2)
1.1.3 Researching into the groundwater evolution under the impact of human activities	(2)
1.1.4 Laying the foundation for the research on evolution, resource and environment of the continental hydrosphere	(3)
1.2 Contents of the research of groundwater environment in the North China Plain	(4)
1.2.1 Concepts of the research	(4)
1.2.2 Contents of the research	(5)
1.3 Formation and distribution of the Quaternary groundwater in the North China Plain	(6)
1.3.1 Regional background of the Quaternary groundwater formation	(6)
1.3.2 Formation and distribution of the Quaternary groundwater in the North China Plain	(6)
1.3.3 Basic characteristics of distribution and exploitation of the groundwater resource	(8)
1.3.4 Characteristics of circulation and transformation of the groundwater and their impact on the water resource environment	(9)
1.4 Present situation of exploitation and utilization of groundwater in the North China Plain	(11)
Chapter 2 Circulation system of the Quaternary pore groundwater	(14)
2.1 Spatial distribution of the groundwater circulation system	(14)
2.2 Whole property and variation of groundwater movement	(15)
2.3 Variation of the hydrodynamic field under impact of human activities	(18)
2.3.1 Variation of the level and flow field of the regional groundwater	(18)
2.3.2 Occurrence and development of depression cones of groundwater level	(19)
2.3.3 Critical value(or threshold value) of environment for deep groundwater exploitation	(25)
2.4 Influence factors of the dynamic environment evolution of groundwater	(27)
2.4.1 Dynamic environment evolution of groundwater controlled by water yielding capability of aquifer	(27)
2.4.2 Impact of precipitation and exploitation on the evolution of dynamic environment of groundwater	(28)

2.4.3	Influence of human activities to groundwater's environment	(29)
Chapter 3	Temporal-spatial evolution of dynamic field of groundwater	(35)
3.1	Circulation system of the Quaternary groundwater	(35)
3.1.1	Circulation system of shallow groundwater	(35)
3.1.2	Circulation system of deep groundwater	(35)
3.2	Temporal-spatial evolution of dynamic field of groundwater	(36)
3.2.1	Temporal-spatial evolution of circulation system of shallow groundwater	(36)
3.2.2	Temporal-spatial evolution of circulation system of deep groundwater	(40)
3.2.3	Formation and evolution of regional depression cones of groundwater level	(44)
3.3	Variation of regional hydrodynamic field under the condition of exploitation	(47)
3.3.1	Variation of flow field of circulation system of shallow groundwater	(47)
3.3.2	Variation of flow field of circulation system of deep groundwater	(47)
3.4	Analysis of the factors influencing the dynamic environment evolution of groundwater	(48)
3.4.1	Dynamic environment evolution of groundwater controlled by the internal factors of groundwater system	(48)
3.4.2	Impact of external factors of groundwater system on the dynamic environment evolution of groundwater	(57)
Chapter 4	Process and law of geochemical environment evolution of groundwater since the Quaternary	(61)
4.1	General picture of the geochemical environment and the characteristics of quality evolution of groundwater	(61)
4.1.1	Geochemical system of groundwater	(61)
4.1.2	Characteristics of temporal-spatial evolution of groundwater quality	(63)
4.2	Reconstruction of the geochemical environment of groundwater since the Quaternary	(67)
4.2.1	Geochemical environment of groundwater since the Quaternary	(67)
4.2.2	Stages of groundwater quality evolution	(70)
4.2.3	Discussion about several problems of saline water formation	(75)
4.3	Human activities and groundwater quality evolution	(77)
4.3.1	Periods of groundwater quality evolution	(78)
4.3.2	Evolution of geochemical environment of groundwater under the impact of human activities	(80)
4.4	Geochemical evolution simulation of groundwater	(88)
4.4.1	Geochemical evolution simulation of shallow groundwater under the natural condition	(89)
4.4.2	Geochemical evolution simulation of deep groundwater under the exploitation condition	(94)
4.5	Prediction of groundwater quality evolution	(99)
4.5.1	Quality prediction by means of the probability-statistics model	(99)

4.5.2	Quality prediction by means of the homogeneous self-regression model	(101)
Chapter 5 Evolution and simulation of geochemical environment of groundwater		
		(103)
5.1	Formation of geochemical system of groundwater	(103)
5.1.1	Geochemical system of shallow groundwater	(103)
5.1.2	Geochemical system of deep groundwater	(104)
5.2	Temporal-spatial evolution of geochemical environment of groundwater	(108)
5.2.1	Main problems faced by geochemical environment of regional groundwater	(108)
5.2.2	Evolution of geochemical environment of groundwater in urban area	(120)
5.3	Geochemical simulation of groundwater environment evolution	(126)
5.3.1	Simulation of hydro-geochemical evolution path in the piedmont plain	(127)
5.3.2	Simulation of mixing of saline water and fresh water in the horizontal direction in the central plain	(133)
5.4	Downward movement and solute migration simulation of saline water under the exploitation condition	(134)
5.4.1	Discussion about downward movement of saline water and its affecting factors	(134)
5.4.2	Solute migration simulation of downward movement of saline water	(140)
5.5	Solute migration simulation of groundwater in the leaky aquifer system	(143)
Chapter 6 Geochemical study of fluorine element in high-fluoride groundwater		
		(149)
6.1	Geochemical simulation of fluoride in shallow groundwater system	(149)
6.1.1	Natural background and study significance of the typical study area	(149)
6.1.2	Quantitative study of fluoride and its species in shallow groundwater	(150)
6.1.3	Mass-balance reaction model and chemical evolution of fluoride in shallow groundwater	(157)
6.2	Adsorption study and adsorption dynamics simulation of fluoride in deep high-fluoride groundwater	(163)
6.2.1	Adsorption dynamics study of fluoride	(164)
6.2.2	Study of isothermal adsorption and adsorption capability of fluoride	(168)
6.2.3	Analysis of the influence factors of soil adsorption capability	(173)
6.3	Migration and transformation of fluoride in water-soil-plant system in the high-fluoride groundwater irrigation area	(178)
6.3.1	Species of fluoride	(178)
6.3.2	Contents determination of different fluoride species	(178)
6.3.3	Study of the determination method of exchangeable fluoride	(179)
6.3.4	Analysis of the form characteristics of migration and transformation of fluoride	(181)
6.3.5	Analysis of the dynamic characteristics of migration and transformation of fluoride	(184)
6.3.6	Migration of fluoride towards the plant body	(186)
6.3.7	Migration and transformation law of fluoride in the water-soil-plant system in high-fluoride groundwater irrigation area	(187)

6.3.8	Environment effect analysis of migration and transformation of fluoride in the water-soil-plant system	(188)
Chapter 7 Groundwater environment evolution and its numerical simulation		
	in seawater or saline water intrusion aquifer	(191)
7.1	Basic characteristics of seawater or saline water intrusion aquifer	(191)
7.1.1	Regional geological background	(191)
7.1.2	Characteristics of seawater intrusion aquifer	(192)
7.1.3	Hydrodynamic and hydrogeochemical phenomena and cation exchange between water and rock during the seawater intrusion process	(195)
7.1.4	Types and law of occurrence and development of saline-fresh water interface	(199)
7.2	Numerical simulation of seawater intrusion aquifer	(205)
7.2.1	Three-dimensional mathematical model for sea water intrusion in water table aquifer	(205)
7.2.2	Numerical simulation of the migration behavior of exchangeable cation in seawater-intrusion aquifer	(211)
7.3	Numerical simulation of brine/saline water intrusion aquifer	(220)
7.3.1	Characteristics of brine/saline water intrusion aquifer	(220)
7.3.2	Hydrogeochemical characteristics of brine/saline water intrusion	(225)
7.3.3	Numerical simulation of brine/saline intrusion aquifer	(229)
7.4	Brief summary	(230)
Chapter 8 Chronology and the extraction of the global change information during the formation and evolution process of the Quaternary groundwater in the North China Plain		
	(232)	
8.1	Introduction of research method	(232)
8.1.1	Groundwater age, dating methods and their existed problems	(233)
8.1.2	The most common environment isotope dating methods in use	(234)
8.2	Analysis of the formation and evolution process of the Quaternary groundwater in the North China Plain	(237)
8.2.1	Structural characteristics of the Quaternary groundwater in the North China Plain	(237)
8.2.2	Tritium content and age distribution feature of groundwater	(237)
8.2.3	^{14}C and ^{18}O content and age distribution of groundwater	(238)
8.3	A few points	(241)
Chapter 9 Development trends of groundwater environment under the impact of human activities		
	(243)	
9.1	Evolution process and feature of groundwater environment in the North China Plain	(243)
9.1.1	Natural evolution stages of groundwater environment	(243)
9.1.2	Groundwater environment evolution stages under the disturbance of man-made factors	(244)
9.2	Trend prediction of groundwater resource	(245)