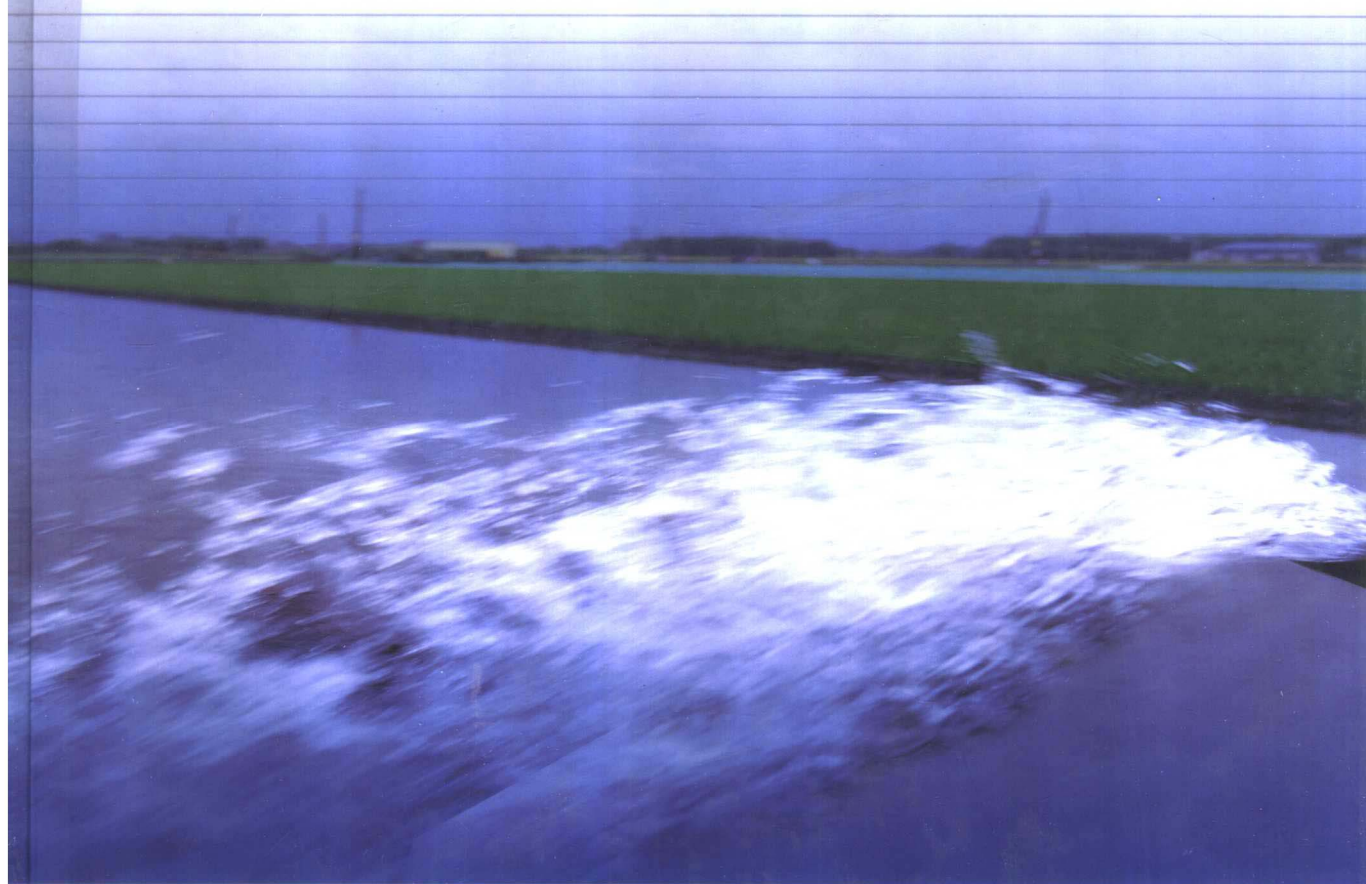


西北内陆黑河流域水循环 与地下水形成演化模式

张光辉 刘少玉 谢悦波 等 著



地质出版社

国土资源部西北专项重点项目研究成果

西北内陆黑河流域水循环 与地下水形成演化模式

张光辉 刘少玉 谢悦波 陈宗宇 张翠云
武毅 武强 聂振龙 申建梅 许广明 著
程旭学 郭建强 王金哲 王昭 张志忠

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

该书以西北内陆黑河流域为例,针对西北内陆典型区黑河流域水循环过程和地下水形成的基础科学问题及生态环境脆弱性成因机制,应用流域尺度水循环、资源-环境可持续发展和地下水系统理论及人地耦合有关科学思想,采用区域构造控水、系统水文学、同位素水文学、古水文与古地理学等相关研究方法,以及 RS-GPS-GIS 信息处理、Eh4 探测和地表水-地下水耦合数字模拟与可视化技术,在大量野外科学研究基础上,揭示了西北内陆盆地平原区地下水系统的补给、径流、更新及排泄在时(不同时期、不同阶段)空(不同地段和空间)变化特征、过程和模式,突出了地下水形成、更新同水文循环系统的关联性及整体的统一性、区域特征和一般规律性;阐明了黑河流域地下水演化与气候变化、人类活动影响和构造控制作用之间关系,突出了平原地下水形成、更新与演化的自然属性,充分体现了小时间尺度上人类活动影响的干扰性,突破了传统水文地质学研究传统思维,引进了现代地球科学系统理念,将研究视野拓展至地球表层系统之范畴,水-土-环境-生态相互作用演变规律作为研究的关键科学问题。该书还论证了研究成果的区域代表性,总结出适用西北内陆其它地区地下水循环演化研究的理论与研究思路,提出了实现西北内陆地区流域尺度水资源与环境可持续发展战略对策。

该书是国内首部多学科交叉、多部门合作和集成现代先进理论与技术为一体的水循环和地下水演化的科研成果,其研究方法、科学思路和技术路线都富有开拓性,对于科研创新、区域经济发展规划和基础调查等方面都具有现实指导意义,还可作为水文、水利、资源、土地、地质环境和生态环境领域大学教师和研究生的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

西北内陆黑河流域水循环与地下水形成演化模式/张
光辉等著. —北京:地质出版社, 2005.2

ISBN 7-116-04215-6

I. 西... II. 张... III. ①黑河—流域—水循环—
研究—西北地区 ②黑河—流域—地下水—研究—西北地
区 IV. P344.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 096332 号

组稿编辑:王大军

责任编辑:邢瑞玲 白 铁

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324579 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm^{1/16}

印 张: 26

字 数: 630 千字

印 数: 1—800 册

版 次: 2005 年 2 月北京第一版·第一次印刷

定 价: 80.00 元

ISBN 7-116-04215-6/P·2513

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

项目属性:国土资源部科技专项计划重点项目

项目编号:200010301

项目名称: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

项目负责人:张光辉

课题负责:课题1 张光辉、谢悦波; 课题2 郭建强、武毅、贾贵义
课题3 陈宗宇、聂振龙; 课题4 刘少玉、程旭学
课题5 张翠云; 课题6 武强、许广明

主要参加者:杨达源、朱建俊、张建新、张荷生、申建梅、程旭学、杨桂新、王金哲、王昭、曹建廷、赫明林、张志忠、赵建忠、伦国星、王璇、李文俊、路紫、马登国、刘新春、张致英、吴建民、魏学勇、董东林、徐家明、贾艳琨、彭玉荣、刘广联、严明疆

承担单位:中国地质科学院水文地质环境地质研究所

参加单位:河海大学、中国地质调查局水文地质工程地质技术方法研究所、甘肃省水文地质工程地质勘察院、南京大学、中国矿业大学(北京)、石家庄经济学院

策划与主编:张光辉、刘少玉、谢悦波、陈宗宇、张翠云、聂振龙、武毅、武强

参加编写者:张光辉、谢悦波、郭建强、陈宗宇、刘少玉、张翠云、武强、聂振龙、申建梅、武毅、许广明、王金哲、程旭学、吴建民、张志忠

起止时间:2000年10月至2004年9月

完成单位:中国地质科学院水文地质环境地质研究所、河海大学等

完成时间:2004年9月

序

面向新世纪,国家做出了西部大开发的重点战略决策,水资源可持续利用成为其中重大问题之一。如何支撑西北地区大发展,“水”是重要方面。西北地区降雨稀少,水土流失严重,荒漠化不断扩展,生态环境恶化日趋严重,这都与“水”有着密切关系。因此,西北地区能否抓住西部大开发的契机,实现可持续发展,与对“水”本质的认识程度紧密相关。

西北地区究竟缺不缺水?属于什么性质的缺水?如何解决西北地区长期以来存在的水资源利用问题?这是摆在我们面前紧迫的重大现实问题。

一、西北地区地广人稀,水资源分布极不均匀

西北地区包括新疆、青海、甘肃、宁夏全境和陕西秦岭以北的关中、陕北地区以及内蒙古西部的阿拉善盟、伊克昭盟、乌海和河套平原等地区,面积 $348.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全国面积的 35% 左右。据 1997 年统计,全区人口 8582.9×10^4 人,占当年全国总人口的 6.9%。该地区土地资源和矿产资源极为丰富,可利用土地约 $8667 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 现有耕地 $1206 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 其中灌溉面积达 $620 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 人均耕地 0.14 hm^2 。

西北地区地处干旱、半干旱地带,且多为内流盆地,水资源时空分布极不均匀,由此造成生态环境极为脆弱。西北各内流盆地分别构成各自独立的水循环系统,决定了水资源的分布和地表水与地下水多次转化的循环特点。西北地区水资源总量为 $2025.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 地下水开采程度为 39.6%。其中地表水资源多年平均径流总量为 $1809.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 地下水天然资源量(补给量)为 $1034.6 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。内陆地区地下水资源量为 $528.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 地下水开采资源为 $389.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。总的来看,无论地表水还是地下水开发利用程度都不高,但是水资源分布不均匀,存在流域性开发利用和调配不合理问题,有些地区已经严重缺水。

西北地区地广人稀,水资源分布极不均匀,有限的水资源大多分布于几个大型内流盆地,而在分布广阔的黄土高原、沙漠地区水资源严重短缺,不仅影响了生态环境,而且还制约了土地资源的有效利用。

二、水资源形成与演化过程复杂,急需再认识

长期以来,由于对西北地区水资源形成和演化自然规律认识不足,特别是对内陆地区“河流-地下水”系统补给和更新演变机制认识不足,限制了对水土资源的可持续开发利用。因此,西北内陆地区水循环与地下水形成演化研究是提高西北水土资源可持续利用能力的重要保障,是西北开发建设中战略性科学问题。

西北内陆地区水资源的形成和演化是一个复杂的自然与人为作用复合系统,固态(冰雪)、气态(大气水)和液态(降水、入渗水)水在山区、山前带、盆地(绿洲与沙漠)以及地表、地下浅部、地下深部三维空间之中或其间运动和转化,构成不同尺度的水循环

系统, 并与生态环境、土地环境和人文环境密切相关, 决定着水资源时空变化规律和地下水更新性, 以及与地下水相关的环境质量状况。对其客观认识, 需要不断深化和再认识的过程。

三、专项计划与项目目标

自 2000 年 10 月至 2004 年 9 月历时 4 年时间, 国土资源部组织精干科技队伍实施了“西北地区水资源与可持续利用”科技专项计划。其总体目标: 查明西北地区典型内陆盆地的冰雪融水、大气降水、地表水、土壤水和地下水演化及水循环规律, 建立西北典型内陆盆地水循环演化模式; 围绕西北地区社会经济发展及生态建设的需要, 探索与国土资源合理开发利用和保护有关的水资源可持续利用对策, 为不断增强国土资源的可持续发展能力, 促进人与自然的和谐、文明发展服务。

该专项计划在部署上, 先从河西走廊黑河流域入手, 通过对典型区水资源和流域水循环规律的野外调查和研究, 包括对山区冰雪融水、大气降水、地表水、土壤水和地下水演化过程的研究。在取得一定成果基础上, 通过项目的滚动运行, 适时拓展研究范围, 建立和发展西北内陆地区水循环演化模式, 构建西北地区水、土资源可持续利用和生态环境建设的科技支撑体系, 为西部大开发与可持续发展战略实施服务。

在 2000~2003 年(一期)内, 该专项计划共启动三个项目和两个技术支撑课题。

项目 1: 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

该项目立足于河西走廊黑河流域, 从中尺度区域空间出发, 把研究区的山区冰雪融水、大气降水、地表水、土壤水和地下水看作统一的、相互联系和相互转化的水循环系统, 研究它们彼此之间水量转化(水分通量变化)规律, 揭示西北典型区水资源形成和演化过程中时(不同时期、不同阶段)空(不同地段和空间)变化规律, 建立西北典型内流盆地地下水循环演化模式。

项目 2: 西北典型内流盆地地下水资源开发对生态环境影响的研究

通过研究河西走廊典型绿洲区在地下水开发过程中土地资源和生态系统的正、负环境效应, 揭示绿洲生态环境退化机制, 查明绿洲保护与地下水合理开采之间关系, 建立绿洲保护带的水、土、生态关系模式及评价指标体系, 提出适合于保护绿洲的水、水资源开发与生态协调发展模式及其相关理论体系。

项目 3: 西北典型内流盆地水资源调控与水资源优化利用模式

研究在人类活动影响下西北内流盆地河流-地下水系统水循环与盐分迁移的模式, 以及其与水资源开发方式、开发强度之间关系, 提出适宜西北内陆典型流域的水资源可持续利用模式和控制下游区域地下水位持续下降的对策, 以及针对土壤次生盐渍化和土地沙化的治理方案, 包括水、土资源合理利用与生态环境协调发展的规划建议。

项目 4: 已经启动的课题

课题 1: 典型内流盆地大气降水同位素监测网: 在重点研究区设立大气降水监测站网, 通过监测和分析, 查明大气降水氕、氘和氧-18 的背景值, 建立相关数据库, 揭示大气降水同位素浓度场的分布规律和环境效应。

课题 2: 黑河流域水、土地资源合理配置与生态整治模式研究: 在该专项计划有关项目的研究基础上, 从水、土地、生态环境和社会经济之间关系出发, 以水、土资源整体合

理配置为核心，以改善脆弱的生态环境和促进流域社会经济持续发展为目标，研究水资源和生态约束下土地利用结构优化和生态整治模式及对策。

四、本项目定位与状况

本项成果是该专项计划的第一个项目的最终成果报告，属于重点基础研究项目，侧重流域尺度的水循环演化规律和平原区地下水形成与演化模式研究。在项目中，设立了6个课题，分别由中国地质科学院水文地质环境地质研究所、河海大学、中国地质调查局水文地质工程地质技术方法研究所、南京大学、中国矿业大学（北京）、石家庄经济学院和甘肃省水文地质工程地质勘察院等单位完成。先后有百余人参加本项目工作，其中博士生导师5人，教授和研究员11人，博士后6人，博士15人，副教授或副研究员27人。

在过去的研究过程中，得到了国土资源部科技司有关领导的支持，包括野外调查、阶段进展研讨和重要问题解决等；得到了由张宗祜、沈照理、哈承佑和邱心飞教授等组成的专家组的具体指导，他们亲临黑河流域现场指导和教学，奠定了本项目完成的重要基础；得到了甘肃省水文地质工程地质勘察院各级领导的大力支持，从资料提供，到车辆和人员的技术力量保障以及水土样品的原地测试分析，确保了本项目野外工作得以顺利推进。同时，还得到了中国地质调查局、中国地质科学院水文地质环境地质研究所和河海大学等单位的大力支持。感谢郑香林等老专家对本成果的系统审阅和修改建议。

值此项目最终成果报告完成之际，对曾支持和帮助本项目的专家、领导和同事们，致以诚挚的谢意。

项目负责人：张光辉

2004年11月

前 言

一、任务来源、背景与研究意义

(一) 任务来源

“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,是根据国土资源部 2000 年科技专项计划“西北地区水资源与可持续利用实施方案”立项,由国土资源部国际合作与科技司组织充分论证,2000 年 8 月经网上申报和北京竞聘答辩,2000 年 9 月正式批准启动,项目编号 200010301,起止时间 2000 年 10 月至 2004 年 9 月,历时 4 年时间,有 7 个单位、近百人参加该项目的野外调查和科学研究工作。

(二) 研究区选择依据

本项目选择黑河流域作为重点研究区,首先考虑地质、地貌和水文地质造就的流域水循环条件具有西北内陆典型特征。黑河流域地处干旱、半干旱地带,为内流盆地,水资源时空分布极不均匀,下游区域生态环境极为脆弱,是相对独立的流域水循环系统,具有地表水与地下水之间多次转化、循环的特点。

黑河流域水资源的形成和演化同西北内陆其他盆地一样,是一个复杂的自然-人为作用复合系统。由冰雪融水、大气降水、地表水、土壤水和地下水组成的水循环系统,其演化决定着各分区(子系统)的水资源数量和质量与时空变化状况。某一个系统发生变化,必然导致另一个系统响应而发生反馈变化,具有显著的脆弱性。

另一个特点是,中、下游区域生态环境对浅层地下水埋藏状况具有依赖性。地下水水位埋深过大,地表植被衰亡和土地沙化;地下水水位埋深过浅,土地盐碱化和生态环境退化。这使得中、下游区域生态环境通过陆地水文过程演变与流域水循环之间建立了密切的互动关系,以致随着流域水循环条件的劣变导致生态环境不断退化。

第三个特点,黑河流域处于我国三大区域水文循环交汇地带。以 99.5°E 经线为界,东区(黑河干流流域)受季风影响更为强烈,而西区(讨赖河流域)受季风影响较弱,以致东区地表径流或平原区地下水以降水补给为主(降水补给占 52%,地下水 38%,融水 10%),西区以冰雪融水、山区基岩裂隙水补给为主(基岩裂隙水补给占 53%,冰川融水占 30%,降水占 17%)。

上述条件,奠定了本项研究成果的区域代表性基础。

二、目标与任务

(一) 目标

本项目的总体目标:立足于西北内陆地区黑河流域,通过研究水循环演化过程中各子系统之间水量转化机制,揭示黑河流域水循环系统结构变化与区域水文循环之间关系;以及大规模开发利用水资源前后区域地下水形成和演化规律;查明不同典型分区地下水补给

演化模式、径流演化模式和排泄演化模式；以及其与相邻子系统之间水量转化模式，进而建立以地下水为核心的、与区域水循环相联系的黑河流域地下水演化模式，为水、土资源合理规划和开发利用提供科学依据。

具体目标：

1) 揭示黑河流域地下水补给、径流、排泄的时（不同时期、不同阶段）空（不同地段和空间）变化特征、过程和模式。该项研究是在前人工作基础上，突出水资源形成及其与水循环系统的关联性、区域特征和一般规律性。

2) 查明流域地下水系统演化与气候变化、人类活动影响和构造控制作用之间关系。这一研究突出区域地下水资源形成和演化的自然属性，充分体现小时间尺度上人类活动影响对流域水系统的干扰性。突破传统水文地质学研究思维，引进现代水文水资源学的系统理念，拓展研究视野。

3) 建立以地下水为核心的、与区域水循环相联系的黑河流域地下水演化模式，包括水量转化模式、补给演化模式、径流演化模式和排泄演化模式，以及子系统之间水力联系。该项成果在充分借鉴边缘学科相关成果的基础上，体现系统性、层次性和独创性特点，模型描述实现量化。

4) 提出能较为广泛反映西北内陆地区地下水演化的一般规律。总结出适用西北内陆其他地区水资源形成和演化规律研究的理论技术方法或较系统的研究思路，为西北其他内陆地区开展区域水循环演化基础研究提供可借鉴的成果。

(二) 任务

根据项目合同书的要求，本项目主要任务包括：

1) 研究不同水文循环（干旱、冷暖）条件下山区至平原区不同地带地表水与地下水之间转化关系；

2) 揭示不同典型地段大气降水、冰川融水、地表水和地下水之间水量转化机制及其变化的周期性规律；

3) 研究黑河流域地下水形成、分布和演化与构造之间关系；

4) 建立黑河流域地下水循环演化模式。

三、关键问题、研究内容与课题设置

(一) 关键问题

本项目的关键科学问题：

1) 黑河流域水资源演化规律及其与区域水文循环周期性变化之间关系。研究黑河流域由冰雪融水、地表水和地下水组成的总水资源演化规律，以及其对区域气候（降水量、气温）变化的响应机制。

2) 黑河流域内降水、冰雪融水、地表水和地下水之间水量转化模式。突出平原区水量转化的结构（指来自降水、冰川融水和地下水的补给比例）变化规律研究。

3) 地质构造对区域地下水形成、分布和演化的控制作用。从盆地岩相古地理和地质构造对地下水形成、分布和演化的控制作用出发，研究其作用规律。

4) 人类活动对区域水循环演化影响效应。重点研究拦蓄、引用地表水和开采地下水对黑河流域水循环的影响规律。

5) 额济纳盆地地下水浅咸深淡的成因与机制。从水循环和质量均衡角度出发, 研究额济纳盆地浅层(约 40 m 深度之上) 地下咸水与深层地下淡水的形成机制。

6) 基岩山区与山前平原地下水水力联系研究。从探讨山区与平原之间地下水水力联系特征出发, 包括技术方法研究, 开展探索性工作。

(二) 研究内容

- 1) 区域水循环演化周期性与特征, 以及地下水形成、演化与区域水文循环之间关系;
- 2) 地质构造对黑河流域地下水形成、分布和演化的控制规律;
- 3) 黑河流域总水资源量变化与区域水文循环演化之间关系;
- 4) 黑河流域水循环各子系统之间水量转化模式及其结构变化规律;
- 5) 人类活动对区域地下水演化影响效应;
- 6) 黑河流域地下水演化模式及其区域代表性。

(三) 课题设置

本项目设立 6 个课题:

课题 1, 区域水文循环演化过程及其周期性研究。研究内容: ①黑河流域水循环演化与水资源形成研究分区; ②区域水文循环演化周期性及其变化特征; ③研究区总水资源量变化与区域水文循环之间关系。

课题 2, 构造对区域地下水演化控制机制及地下水系统划分。研究内容: ①构造对黑河流域地下水形成、分布和演化的控制规律; ②构造控制地下水的补给、径流和排泄水文过程的作用机制; ③区域地下水演化与岩相古地理之间的关系; ④基岩山区与平原之间地下水水力联系及其技术研究方法的探讨; ⑤建立构造控制流域地下水演化的模式。

课题 3, 黑河流域降水-融水-地下水-地表水系统之间水力联系研究。研究内容: ①黑河流域总水资源量变化与区域水文循环演化之间关系; ②大气降水、冰川融水、地下水、地表水之间水力转化规律; ③中晚全新世以来黑河流域地下水的主要补给期和特征值; ④建立现代区域地下水补给演化模式和径流演化模式。

课题 4, 黑河流域水循环子系统之间水量转化模式及其结构变化规律。研究内容: ①黑河流域及其不同分区大气降水、冰川融水、地表水和地下水之间水量转化规律; ②不同气候条件下地表水和地下水补给结构的变化规律; ③探查额济纳旗盆地地下水浅咸深淡的水循环机制。

课题 5, 人类活动对区域水循环演化影响效应研究。研究内容: ①拦蓄、引用地表水对黑河流域水循环各子系统之间水量转化的影响机制和效应; ②开采地下水对黑河流域水循环演化的影响规律; ③土地利用对黑河流域水循环各子系统之间水量转化的影响作用; ④人类活动对黑河流域水循环各子系统之间水量转化影响的模式。

课题 6, 黑河流域水循环演化模式及其区域代表性分析。研究内容: ①建立以地下水为核心的黑河流域水循环演化模式, 包括模型系统所需的指标体系、信息库、数据库和管理系统, 具有动态可视化特点; ②预测研究区地下水资源演化趋势及其资源、环境效应; ③研究流域地下水循环演化模式的区域代表性。

四、研究方法与技术思路

本项目立足于优势人才队伍、先进创新理论、综合现代技术和典型研究区选择的集

成,在河西走廊黑河流域以地下水资源形成、分布及水循环演化的先进理论为指导,采用先进的试(实)验、监测、探测、观测和分析技术的集成作为基本手段,充分借鉴以往研究成果,揭示西北地区地下水形成和演化规律。同时对不同循环条件下地下水资源数量、质量和时空分布的变化进行研究,建立黑河流域地下水循环演化模式。

(一) 研究分区与总体思路

选择黑河流域作为重点研究区,以黑河干流串联的祁连山冰雪区、张掖盆地和额济纳盆地作为重点研究剖面,自南至北,划分为山区大气降水-冰川融水-地下水-地表水系统、张掖盆地大气降水-地表水-地下水系统、额济纳盆地大气降水-地表水-地下水系统3个3级分区,分别确定其研究问题、目标和研究内容,由项目集成,切实加深区域水循环规律的研究程度,促进对西北地区水循环总体规律的认识。

(二) 研究方案与工作部署原则

1) 充分利用已有成果和资料。不同时期、不同部门曾在河西走廊开展了大量的区域地质和水文地质普查、勘探、试验及专题研究工作,积累了较为丰富的基础资料。充分利用工作区内已有的地质、水文地质和环境地质成果,全面收集和利用气象、水文、地质、水利、农业、林业及其科研部门的资料,是本项目工作布置的基本原则。

2) 按流域、系统或单元布置工作。黑河流域水循环系统,在纵向上由祁连山子系统、张掖子系统、额济纳子系统和酒泉子系统等组成,垂向上由大气降水子系统、冰川融水子系统、地表水子系统、包气带子系统、浅层地下水子系统和深层地下水子系统,以及生态水子系统组成。因此,工作的重点是查清流域水循环系统演化规律和各子系统之间的水力联系,实施野外调查、采样和实验研究。

3) 突出重点。根据本项目的研究目标和任务,以黑河干流为主线,选择关键点或地带,综合考虑流域水循环各子系统之间相互作用的影响,突出区域(流域)水循环演化规律研究。研究重点包括3个方面,分别是黑河干流流域水循环与地下水形成演化规律研究;人类活动对黑河流域水循环演化的影响机制研究和黑河流域地下水循环演化模式研究。

4) 充分利用同位素、“3S”等新技术和方法。“3S”技术的应用:借助RS技术提供的区域水文环境演化的信息,了解土壤环境、水环境和绿洲植被分布和变化规律。利用GPS技术,展开野外调查工作。利用GIS数据和图形采集、存储及其强大的空间分析功能,剖析水循环演化特征和各子系统之间关系,以及其与地下水开发利用和地表水拦蓄引用之间关系。同位素、物探技术应用:①在研究典型剖面上或古湖淀、洼地或包气带厚度较大的地区,建立垂向研究剖面和研究点,重点采用H、D、T、 ^{14}C 和 ^{13}C 等同位素测年技术和古水文学理论,揭示大气降水入渗补给地下水演化时间序列特征及补给强度变化规律;识别地下水主要补给期;研究百年尺度大气降水入渗补给地下水的周期性及其与区域水文循环演化之间关联性。②采用综合物探技术与方法,解释水循环系统界面之间水力关系,研究构造对区域地下水演化的控制作用规律。

(三) 研究方法

1) 区域水循环演化周期性与流域地下水主要补给期研究。应用古水文学与同位素水文地质学等理论及其技术方法。其中包括:①历史文献资料利用方法,有今昔对比法、绝对值法、相对值法、旱涝等级法;②地质记录利用方法;③孢粉信息利用方法,有指示

法、概率法和多变量法等；④地下水同位素信息利用方法。应用随机过程统计和时间序列分析等理论方法，包括功率谱周期性分析，进行不同时空尺度的演化过程和演变周期性规律研究，确定中晚全新世以来研究区地下水的主要补给期。

2) 流域内降水、冰川融水、地表水和地下水之间水量转化机制和模式研究。应用冰川水文学、同位素冰川学、同位素水文学等理论与技术方法，主要应用 ^{14}C 、 ^2H 、 ^{18}O 、 ^3H 和 ^{13}C 测试技术。

3) 构造对区域地下水形成、分布和演化控制作用与模式研究。应用现代物探测试技术与环境同位素示踪技术相结合，以及水循环演化和陆地同位素水文学、地下水同位素水文学理论开展本项研究工作，同时探讨山区与平原之间地下水水力联系问题及其技术研究方法。

4) 人类活动对区域水文循环演化影响效应研究。采用区域调查与水文动态相关分析，以及水量均衡、水盐均衡模拟分析，结合必要的点实验，研究人类活动对水循环系统演化的作用机制。

5) 额济纳盆地地下水浅咸深淡机制研究。在十字剖面取样的基础上，应用环境水文地球化学理论和地下水同位素水文学理论，以及包气带水、盐均衡等理论，包括采用必要的物探新技术，研究额济纳盆地不同时期的地下水循环机制，特别要考虑到新构造运动和地质构造的作用。

6) 黑河流域水循环演化模式及其区域代表性分析研究。应用区域水循环理论、系统理论和层次分析方法，借鉴前人相关成果，包括原地矿部重点项目“区域地下水演化过程及其与相邻层圈之间相互作用”研究成果——“中国大陆区域水循环动力学数值模拟系统”等新的研究方法和技术，将山区、南部盆地和北部盆地的水循环中各子系统耦合，有机组成黑河流域水循环演化模式系统，采用国家或国土资源部的有关标准，建立信息库和分析系统。

五、成果编写与集成

本项目的最终成果是在各个课题成果报告基础上，根据项目负责人编写、项目组充分讨论通过的大纲，历时8个月统编、充实和深化，完成了项目报告讨论稿。然后，经过2个月时间的充分讨论、专家咨询、推敲斧正和补充完善，形成送审稿。

张光辉研究员承担了项目任务设计和成果大纲编制，成果报告统编、充实和深化，以及第一章、第三章、第八章、前言和结论及其他章节部分内容的编写工作，并完成项目成果的终审、修改和定稿；郭建强、武毅研究员完成了第二章主要内容；陈宗宇研究员、聂振龙博士提交了第四章和第八章部分成果；刘少玉研究员编写了第一、五、六章主体和提交了第七、八章的部分成果；张翠云研究员编写了第七章和提交了第一章部分成果；武强教授完成了第九章主体内容，许广明教授编写了第九章第七节内容；谢悦波、杨达源、曹建廷和张建新教授等参加了第一课题研究和相关成果编写；贾贵义、程旭学总工程师等参加了第二、三、四课题研究工作；王金哲、王昭助理研究员承担了项目协调和管理；吴建民和严明疆博士承担了报告的初校和二校工作，为报告的编排和版面质量提高做出了贡献；贾艳琨、彭玉荣和徐家明等同志为项目的数据取得和质量保障做出了重要的贡献。参加野外工作的有朱建俊、张荷生、杨桂新、赫明林、张志忠、赵建忠、申建梅等数十位同志，为

本项目的完成都做出了贡献。

本成果是立足地球表层系统各层圈相互作用和流域尺度水循环演化规律的探索研究，许多方面需要站在学科前沿上通过大量野外工作获得原始创新素材，并在实验结果、一般认识和一般规律性成果基础上，再通过进一步的深化和再认识，升华为理性认识。在这个复杂的实践——认识——创新——再实践——再认识的过程中，我们的认识难免存在局限，欢迎指正。

目 录

序

前 言

第一章 概论	(1)
第一节 自然地理	(1)
第二节 气候与水文	(3)
第三节 社会经济与水资源利用状况	(10)
第四节 地质特征	(11)
第五节 研究概况	(22)
第六节 国内外研究现状与趋势	(27)
第二章 地下水循环系统	(35)
第一节 理念与划分原则	(35)
第二节 地下水系统界定	(40)
第三节 构造控水机制	(47)
第四节 系统分区与结构特征	(53)
第五节 几个问题探讨	(74)
第六节 小结	(77)
第三章 区域地下水循环演化规律	(79)
第一节 区域环境演化背景	(79)
第二节 区域气候与水文环境演化	(86)
第三节 陆地水文过程变化	(96)
第四节 水循环条件变化	(106)
第五节 小结	(111)
第四章 地下水循环演化同位素水文学研究	(113)
第一节 基本原理与研究方法	(113)
第二节 样品采集与测试	(116)
第三节 水化学特征及其演化	(118)
第四节 水循环系统同位素特征	(131)
第五节 地下水形成过程与机制	(141)
第六节 小结	(160)
第五章 地下水资源形成与分布规律	(162)
第一节 理念与研究方法	(162)
第二节 地下水资源模型计算	(172)
第三节 地下水资源形成与变化特征	(179)
第四节 地下水资源分区评价	(186)
第五节 不同气候条件下地下水与地表水转化特征	(196)

第六节	现状不同水平年水资源可利用量	(204)
第七节	小结	(205)
第六章	额济纳盆地地下水形成机制	(207)
第一节	自然条件	(207)
第二节	地下水系统结构特征	(212)
第三节	水化学分布规律	(214)
第四节	地下水同位素分布特征	(220)
第五节	地下水浅咸深淡成因探讨	(232)
第六节	生态与地质环境演变	(237)
第七节	小结	(246)
第七章	人类活动对水循环演化影响	(248)
第一节	人类活动影响的演变特征与量化评价	(248)
第二节	水文背景条件变化	(254)
第三节	水资源开发利用与地下水变化	(260)
第四节	人类活动对地下水补给影响	(265)
第五节	人类活动对水循环变化影响综合分析	(268)
第六节	人类活动对地下水质量影响	(275)
第七节	人类活动对张掖市地下水 NO_3^- 影响	(279)
第八节	小结	(289)
第八章	黑河流域地下水循环模式	(291)
第一节	水循环系统空间结构模式	(291)
第二节	质点运移转化模式	(293)
第三节	地下水形成与演化模式	(306)
第四节	水量转化均衡模式	(320)
第五节	小结	(322)
第九章	地下水循环演化模拟及区域代表性分析	(325)
第一节	研究现状与技术思路	(325)
第二节	地表水流-地下水流耦合模型建立	(327)
第三节	水循环演化模拟标识特征与关键技术	(329)
第四节	中游区地下水流数值模拟	(333)
第五节	下游区地表水流-地下水流耦合模拟	(343)
第六节	水循环演化模式可视化系统	(353)
第七节	黑河流域水循环演化模式区域代表性分析	(357)
第八节	小结	(372)
第十章	结论、对策与建议	(374)
第一节	主要进展与结论	(375)
第二节	对策与建议	(383)
参考文献		(387)

第一章 概 论

第一节 自然地理

黑河流域位于甘肃省西部的河西走廊中部和内蒙古阿盟额济纳旗(图 1-1),南以祁连山为界,北与蒙古人民共和国接壤,东西分别与石羊河流域和疏勒河流域相邻,东西长 400 余千米,南北达 800 多千米,地理坐标为 $37^{\circ}45'N \sim 42^{\circ}40'N$ 、 $97^{\circ}05'E \sim 102^{\circ}00'E$ 。黑河流域面积为 $14.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中平原区面积 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,近 60% 的区域为基岩山地、戈壁及沙漠覆盖区。区内现有灌溉面积(含林草地) $31 \times 10^4 \text{ hm}^2$,旱作耕地 $6.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

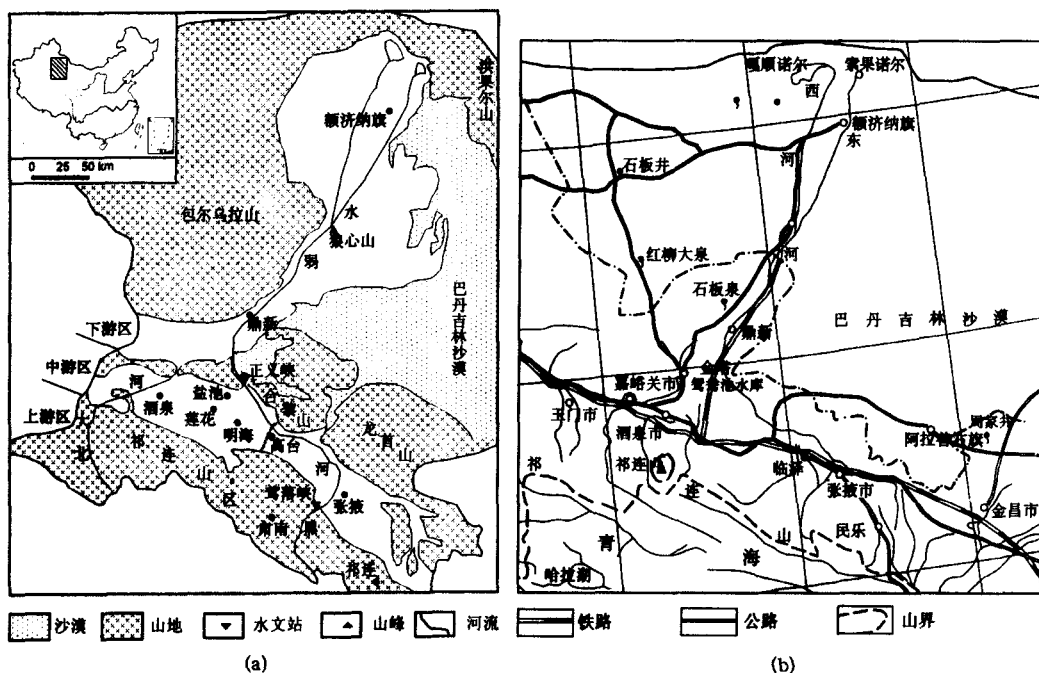


图 1-1 黑河流域位置示意图
(a) 研究区略图; (b) 交通位置示意图

黑河流域南部的祁连山区,山势陡峻,西高东低,由南向北倾斜,沟谷切割剧烈,海拔多在 3000~5000 m。祁连山主峰位于酒泉市南,海拔为 5564 m。在 3000 m 左右的山区,生长有森林。在 4000 m 以上山区,常年积雪,其中在 4500 m 以上山区现代冰川比较发育。祁连山山区气候寒冷,降水量较大,是河西走廊第四纪沉积物的物源区和地表水与

地下水的补给源区。

在黑河流域的中部，自西向东分布有黑山、金塔南山（酒泉北山）、合黎山、龙首山等，上述山地称之为中部山地，山体较窄，海拔 1500~2500 m，多为低山地形。惟独龙首山的主峰（青龙山）海拔 3600 m，呈中高山地形。

在祁连山与中部山地之间是走廊平原，又称南部盆地，海拔 1300~1700 m，南高北低；在中部山地以北是北部盆地。中部山地和北部平原地势较低，相对高程较小，山体多为宽广平坦的低残山，呈波状起伏，物理风化和风蚀作用强烈，表面布满碎石，平原上主要分布的是河流相、湖泊相沉积物。

走廊平原及中部山地以北平原，被横穿平原的基底隆起带和断裂带分割为若干个构造盆地。其中南部盆地自西向东，主要有酒泉西盆地、酒泉东盆地、张掖盆地和民乐-大马营盆地等；北部盆地自南向北，主要有金塔-花海子盆地和额济纳盆地。

黑河是我国第二大内陆河，发源于祁连山北麓，接受高山峻岭的冰雪融水、降水和基岩裂隙水补给，流经青海省的祁连县，经甘肃省的肃南、山丹、民乐、张掖、临泽、高台、金塔县（市）和内蒙古自治区的额济纳旗，干流全长 821 km。

黑河流域自然景观，如图 1-2 所示。根据区域地貌差异，将黑河流域划分为上、中、下游 3 部分。黑河出山口莺落峡以上为上游区，河道两岸山高谷深，河床陡峻，气候阴湿寒冷，植被较好，年降水量为 200~600 mm，是黑河流域平原区地表水和地下水的主要补给源区。莺落峡至正义峡为中游区，两岸地势平坦，光热资源充足，年降水量 50~200 mm，人工绿洲面积较大，是主要耗水区，部分地区地下水浅埋和土地盐碱化比较严重。正义峡以下为下游区，除河流沿岸和居延三角洲外，大部为荒漠戈壁，年降水量一般小于 50 mm，最小年份仅 17 mm，气候异常干燥，风沙灾害频发，是严重的缺水区和生态环境

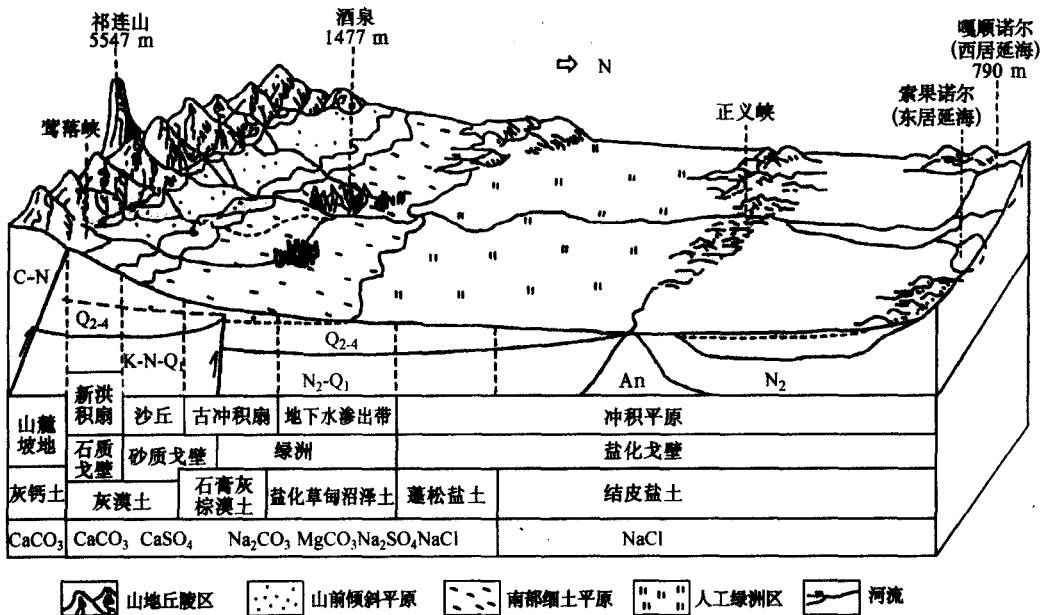


图 1-2 黑河流域祁连山—居延海自然景观及地质剖面图
(参考《中国自然地理图集》编绘, 2000)