

黑河流域陆地水循环模式及其 对人类活动的响应研究

赵 静 万 力 王旭升 著

地 质 出 版 社

黑河流域陆地水循环模式及其 对人类活动的响应研究

赵 静 万 力 王旭升 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书从黑河流域上游、中游、下游的特点出发,旨在通过模型设计和数值模拟分别阐述上游、中游、下游的水循环模式及其对人类活动的响应;以“黑河”这条内陆河的水量平衡为主线,将分区特征鲜明的上游、中游、下游串联起来,为全流域水资源的合理配置和生态安全提供科学依据。针对观测资料缺乏的上游山区,通过对各子流域水文相似性的研究,揭示山区流域水文过程的基本特征,为明确和评价中下游全部的水资源条件奠定基础;根据不同需求,通过模型设计及数值模拟阐述中游张掖盆地地表水、土壤水、地下水、生态水之间的相互转化及人类活动的施加对水资源循环路径和循环通量的改变,正确定量认识黑河流域的水循环机理及水资源转化规律;通过建立三维数值模型,探讨下游地区水资源条件变化与植被生态的关系,为面向生态的水资源合理配置提供数据支持;基于中、下游模型结果,深入分析和定量评价人类活动对黑河流域中下游水循环过程的影响。

本书可为从事内陆河水资源研究、地下水数值模拟的水文地质工作者提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

黑河流域陆地水循环模式及其对人类活动的响应研究/
赵静等著. —北京:地质出版社, 2017. 4

ISBN 978-7-116-09581-6

I. ①黑… II. ①赵… III. ①黑河-流域-陆地-水
循环-研究 IV. ①P339

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第069158号

责任编辑:田野

责任校对:张冬

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京市海淀区学院路31号,100083

电 话:(010) 66554528(邮购部);(010) 66554631(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554686

印 刷:北京地大彩印有限公司

开 本:787 mm × 1092 mm $\frac{1}{16}$

印 张:7

字 数:170千字

版 次:2017年4月北京第1版

印 次:2017年4月北京第1次印刷

定 价:42.00元

书 号:ISBN 978-7-116-09581-6

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

我国西北干旱区分布大量内陆河，黑河就是其中的第二大内陆河。黑河流域是西北地区灌溉农业大规模开发最早的流域，在干旱区形成演变和水土资源开发利用方面具有代表性。长期的灌溉农业发展使得人类活动成为黑河流域中下游水文过程的关键驱动力，也引发了上下游用水矛盾和严峻的生态环境问题。为治理黑河流域，1997 年国家成立了黑河流域管理局，2001 年启动实施《黑河干流水量分配方案》，有效遏制了黑河流域下游生态环境的恶化趋势。黑河流域社会经济的可持续发展，需要从全流域角度认识水文过程和水资源的形成转化，为水资源的合理开发利用提供科学依据。作为地球表层系统的“原子”单元，流域是由水资源系统、生态系统与社会经济系统协同构成的、具有层次结构和整体功能的复杂系统，包含“水-土-气-生-人”各要素之间的密切相互作用。2010 年国家自然科学基金委员会启动了“黑河流域生态-水文过程集成研究”重大研究计划，推动黑河流域成为内陆河流域复杂系统行为的集成研究基地。

本书作者长期参与黑河流域陆地水文过程和水资源评价研究，在内陆河流域水循环机理和模拟研究方面取得了可喜的成果。本书的主要特色是从黑河流域上、中、下游的不同特点出发，采用水量平衡模型和数值模拟方法分别阐述了上游山区盆地、中游绿洲灌区和下游荒漠区的水循环模式及其对人类活动的响应，为算清黑河流域水账提供了新的依据，也为评估人类活动对中下游地表水和地下水的影响提供了很好的视角。其中，在山区流域水文相似性、张掖盆地地表水-地下水转化和额济纳旗盆地区域地下水位变化数值模拟等环节，提出了一些具体而有趣的科学问题和独特的研究方法，对其他同类研究具有借鉴意义。如果在下一步研究中充分利用 2010 年以来黑河流域计划获取的新数据，相信能够得到更加出色的结果。

综上所述，本书为西北内陆河流域集成研究添砖加瓦做出了重要的贡献，在此新著即将出版之际，向各位作者表示衷心的祝贺！希望作者能够把研究工作坚持下去，再接再厉，更上一层楼！

中国科学院院士



2017 年 1 月 15 日

前 言

水循环是全球尺度最基本的物质循环之一，控制和影响着地球上的水资源分布和环境变化。我国西北地区深处欧亚大陆腹地，气候干旱，水汽年总输入量与年总输出量接近相等，而水汽年净输入量极小，出境河川径流稀少，无论是水文外循环还是水文内循环都相对较弱。受地形地貌和气候条件的影响，我国西北干旱区水资源分布于若干相对独立的内陆河流域，其中降水产流主要发生在山区，蒸散耗水则主要发生在平原，水分通过径流的水平运动由山区输送到平原，形成了山区产水、平原耗水的独特水循环特征。水资源稀缺导致内陆河流域的生态环境极为脆弱，而近半个世纪以来人口增加和社会经济发展形成了人类史无前例的对内陆河流域水循环系统的改造，导致水资源在人类与自然之间的分配严重失衡，引发了众多的生态环境问题。水文循环和水量平衡要素如何发生时空变化和相互转化关系、水文循环与生态环境之间如何相互作用、如何响应和反馈人类活动，是解决内陆河流域资源、人口与环境矛盾的关键科学问题。

黑河流域作为我国西北地区典型的内陆河流域，以其特殊的寒区水文过程、复杂的陆地水文循环过程、省际水事矛盾、脆弱的生态环境等诸多科学与热点问题受到广泛关注。其水资源形成于上游祁连山区，开发利用于中游张掖绿洲，耗散于下游额济纳盆地，陆地水循环过程具有鲜明的分区特征。由于大规模的、长时期的水资源开发，黑河流域已经成为人类干预再造地表水、土壤水和地下水的综合试验场，形成了自然—人工复合型的水循环系统。本书从黑河流域上游、中游、下游的特点出发，通过模型设计和数值模拟分别探讨了上、中、下游的水循环模式及其对人类活动的响应，其中涉及的问题和研究方法对黑河流域水资源的科学利用及生态环境保护具有重要理论和现实意义。

本书共七章。第一章对黑河流域的气候、水文、水资源开发利用及存在问题进行了概述；第二章介绍了内陆河流域水循环特征的研究现状；第三章阐述了黑河流域上游山区的产流过程，并基于水文相似性对莺落峡出山径流进行了推测；第四章在定性分析黑河干流中游绿洲区地表水、地下水相互转化特征的基础上，提出张掖盆地年水均衡模型、基于地下水观测的高崖断面月径流模型及张掖盆地月水均衡模型，详细刻画了张掖盆地地表水—地下水相互转化的各个环节；第五章在分析黑河下游地质、水文地质条件的基础上，结合黑河调水方案，采用 Visual Modflow 4.0 建

立黑河下游盆地地下水模型,模拟分析了调水前后生态耗水区的变化;第六章根据中、下游模型结果,深入分析了人类活动对黑河流域中下游水循环过程的影响;第七章是本书的主要结论,并对今后研究进行了展望。

本研究得到了华北水利水电大学高层次人才科研启动项目“黑河流域陆地水循环模式及其对人类活动的响应研究”(40127)、国家自然科学基金面上项目“小流域尺度上包气带水分运动参数与地质雷达信号耦合过程研究”(41372260)的资助,也得到了中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新工程项目“黑河流域交叉集成研究的模型开发和模拟环境建设”的部分资助,特此感谢。

中国科学院院士、内陆河流域集成研究的推动者程国栋先生在百忙之中为本书作序,笔者十分感激!本书也得到了中国水利水电科学研究院水环境研究所杜强教授、中国地质大学(北京)水资源与环境学院陈鸿汉教授、金晓媚教授、周训教授、蒋小伟教授等专家的悉心指导和宝贵建议,拓宽了作者的研究思路。中国地质大学(北京)水资源与环境学院曹文炳教授提供了黑河下游地区的部分图件与资料。谨此表示诚挚感谢。

目 录

序

前言

绪论	1
第1章 黑河流域概况	3
1.1 气候与水文	4
1.2 人口与土地利用	4
1.3 水资源及其开发利用	6
1.4 存在的问题	8
1.5 新时期的黑河管理模式——黑河调水	8
第2章 内陆河流域水循环模式研究方法	11
2.1 内陆河流域水循环特征的研究现状	11
2.2 黑河流域科学计划	16
2.3 黑河流域陆地水循环的整体模式	17
第3章 黑河上游山区降水产流过程及其模拟	18
3.1 研究区概况	18
3.2 降水-径流特征与水文相似性	19
3.3 黑河干流月径流过程模拟	25
3.4 小结	32
第4章 黑河干流中游绿洲区水分转化及其模拟	33
4.1 研究区概况	33
4.2 张掖盆地年水均衡模型	38
4.3 基于地下水观测的高崖断面月径流模型	44
4.4 厚层包气带对地下水补给的影响	49
4.5 张掖盆地月水均衡模型	57
4.6 小结	63
第5章 黑河下游荒漠区蒸散耗水及其生态意义	65
5.1 研究现状	65

5.2	黑河下游盆地地下水模型·····	69
5.3	生态耗水区对正义峡流量的敏感性分析·····	73
5.4	巴丹吉林沙漠地下水侧向补给的生态意义·····	75
5.5	小结·····	77
第6章	人类活动对黑河流域中下游水循环过程的影响·····	79
6.1	历史回顾·····	79
6.2	农业灌溉对地表水和地下水的影响·····	82
6.3	黑河调水效果评价·····	84
6.4	小结·····	89
第7章	主要结论与展望·····	91
7.1	主要结论·····	91
7.2	展望·····	93
参考文献	·····	95

绪 论

黑河流域作为我国西北地区典型的内陆河流域,以其特殊的寒区水文过程、复杂的陆地水文循环过程、省际水事矛盾、脆弱的生态环境等诸多热点问题受到国内外众多学者的关注和研究。黑河流域水资源的补给区主要为上游山区,出山口河流径流量基本上反映了流域水资源的总量;这部分水量汇入中、下游盆地,控制着人类赖以生存的绿洲分布和规模,形成内陆河独特的以水为纽带的“冰雪/冻土-山区植被-山前绿洲-尾间荒漠”多源自然景观以及相伴而生的生态系统。加之大规模的、长时期的人类活动,人类因素已经渗入到水文循环的各个环节及过程,增强了内陆河流域水循环变化的特殊性及其生态环境的敏感性。水资源与人类生存需求、生态环境和社会经济关系的协调和可持续发展日趋提上日程,在这样的大背景下,深刻理解水文循环中相互联系和依存的各种过程极为迫切。

山区水文过程及其与之有关的各种相互作用和反馈机制控制着内陆河流域可利用的水资源量、植被分布、生物地球化学通量,涉及随空间强烈变化的分布式降雨、蒸散、冰雪融水、永久性冻土、寒区植被、人类活动等各种水文要素。目前,对黑河流域的研究主要集中在黑河干流,上游山区众多子流域的水文行为由于缺乏观测资料而鲜有研究。对其他子流域展开研究是对上游山区水文过程研究的有益补充。由于黑河流域中下游盆地的水资源主要来自祁连山区的地表水,对子流域的研究也对全面评价祁连山区的侧向径流总量、对水资源条件的认识和管理都具有重要意义。

中、下游地区,最主要的水文机制不是降水-产流过程,而是径流的人工控制以及灌溉-蒸散过程。特别对于黑河流域这样典型的内陆河,其下游水量的季节分配完全受中游农事活动的影响。针对中游地区地下水系统开发了诸多数值模型,但是能很好解释中游地区地表水-地下水-土壤水“三水”转换和强调人类活动影响的模型还有待研究。此外,在前人的研究中,大多定性的描述人类活动对水循环过程的影响。在“黑河调水”新形势下,人类行为对黑河天然河道的干预和影响更加强烈,由此而产生的一系列连锁反应值得深入探讨。能否提出一种简单模型,既能体现中游地区陆地水循环特征又能定量强调人类活动对其的影响是一个挑战。

内陆河的尾间地区大都是生态环境极为脆弱的地区,水资源多寡对于中游地区是发展问题,而对于下游地区则变成生存问题。地下水位的高低决定着植被的生长状况与演

替，而地下水则主要接受黑河河水的补给，构成了河流－地下水－植被相互反馈、相互制约的生态链条。自 2000 年开始的生态调水工程是人类活动对黑河干流的又一次强烈干预，势必引起中、下游地区地下水数量和时空分布的变化，进而影响植被生态。综合评价调水前后黑河下游生态耗水区的变化，是回答新时期如何合理配置黑河流域水资源及如何保护下游生态环境问题的关键。

本书在对黑河上游、中游和下游水文循环特征定性分析的基础上，通过模型设计（自我研发模型及数值模拟手段）分别阐述黑河流域上、中、下游的水循环模式，阐明人类活动的干扰作用，为黑河流域合理利用水资源提供科学依据。

绪 论

黑河流域作为我国西北地区典型的内陆河流域,以其特殊的寒区水文过程、复杂的陆地水文循环过程、省际水事矛盾、脆弱的生态环境等诸多热点问题受到国内外众多学者的关注和研究。黑河流域水资源的补给区主要为上游山区,出山口河流径流量基本上反映了流域水资源的总量;这部分水量汇入中、下游盆地,控制着人类赖以生存的绿洲分布和规模,形成内陆河独特的以水为纽带的“冰雪/冻土-山区植被-山前绿洲-尾间荒漠”多源自然景观以及相伴而生的生态系统。加之大规模的、长时期的人类活动,人类因素已经渗入到水文循环的各个环节及过程,增强了内陆河流域水循环变化的特殊性及其生态环境的敏感性。水资源与人类生存需求、生态环境和社会经济关系的协调和可持续发展日趋提上日程,在这样的大背景下,深刻理解水文循环中相互联系和依存的各种过程极为迫切。

山区水文过程及其与之有关的各种相互作用和反馈机制控制着内陆河流域可利用的水资源量、植被分布、生物地球化学通量,涉及随空间强烈变化的分布式降雨、蒸散、冰雪融水、永久性冻土、寒区植被、人类活动等各种水文要素。目前,对黑河流域的研究主要集中在黑河干流,上游山区众多子流域的水文行为由于缺乏观测资料而鲜有研究。对其他子流域展开研究是对上游山区水文过程研究的有益补充。由于黑河流域中下游盆地的水资源主要来自祁连山区的地表水,对子流域的研究也对全面评价祁连山区的侧向径流总量、对水资源条件的认识和管理都具有重要意义。

中、下游地区,最主要的水文机制不是降水-产流过程,而是径流的人工控制以及灌溉-蒸散过程。特别对于黑河流域这样典型的内陆河,其下游水量的季节分配完全受中游农事活动的影响。针对中游地区地下水系统开发了诸多数值模型,但是能很好解释中游地区地表水-地下水-土壤水“三水”转换和强调人类活动影响的模型还有待研究。此外,在前人的研究中,大多定性的描述人类活动对水循环过程的影响。在“黑河调水”新形势下,人类行为对黑河天然河道的干预和影响更加强烈,由此而产生的一系列连锁反应值得深入探讨。能否提出一种简单模型,既能体现中游地区陆地水循环特征又能定量强调人类活动对其的影响是一个挑战。

内陆河的尾间地区大都是生态环境极为脆弱的地区,水资源多寡对于中游地区是发展问题,而对于下游地区则变成生存问题。地下水位的高低决定着植被的生长状况与演

1.1 气候与水文

黑河流域位于欧亚大陆中部, 远离海洋, 周围高山环绕, 流域气候主要受中高纬度的西风带环流控制和极地冷气团影响, 气候干燥, 降水稀少而集中, 多大风, 日照充足, 太阳辐射强烈, 昼夜温差大。黑河流域气候具有明显的东西差异和南北差异。上游祁连山区, 降水量由东向西递减, 雪线高度由东向西逐渐升高, 多年平均年降水量大于350 mm, 年平均蒸发量为800~1200 mm, 气候冷凉。在上游山区, 降水量的海拔效应显著, 海拔每升高100 m, 降水量增加15.5~16.4 mm。中游走廊平原降水量由东部的250 mm向西部递减为50 mm以下, 蒸发量则由东向西递增, 自2000 mm以下增至4000 mm以上, 年平均气温2.8~7.6℃。下游额济纳平原深居内陆腹地, 是典型的大陆性气候, 具降水少、蒸发强烈, 温差大, 风大沙多, 日照时间长等特点。根据额济纳旗气象站1957~1995年资料统计, 年平均降水量仅为42 mm, 年平均蒸发强度3755 mm, 年平均气温为8.04℃。

黑河流域有发源于祁连山的大小山溪河流39条, 其中具有供水意义的河流35条, 集水面积在100 km²以上的有18条, 多年平均地表径流量超过1000×10⁴ m³的有24条。黑河水系中水量较为丰富, 年径流量在1×10⁸ m³以上的河流有7条。根据近代地表水、地下水的水力联系, 按归宿不同, 黑河流域地表水系可分为3个相对独立的子水系, 即东部子水系、中部子水系和西部子水系。东部子水系由黑河干流及诸多小河流组成, 黑河干流的上游分为东、西两岔, 东岔八宝河自东向西流, 西岔野牛沟自西向东流, 两河在黄藏寺汇合后折向北流, 由莺落峡出山进入中游张掖地区。进入下游额济纳旗境内后, 分为东、西两支流, 分别注入东、西居延海; 中部子水系由马营河、丰乐河等河流组成, 归宿于肃南明花—高台盐池; 西部子水系为酒泉洪水坝河—讨赖河水系, 归宿为金塔盆地。各子水系之间现已基本失去地表水力联系。黑河流域多年平均地表水资源量为37.28×10⁸ m³, 均为祁连山区产水量。其中东部子水系多年平均出山径流量24.75×10⁸ m³, 包括干流莺落峡出山径流量15.8×10⁸ m³, 梨园河出山径流量2.37×10⁸ m³, 其他沿山支流6.58×10⁸ m³; 讨赖河多年平均流量为6.38×10⁸ m³。

1.2 人口与土地利用

黑河流域全区现有人口184.05×10⁴人(张光辉等, 2005), 其中3.6%的人口分布于上游山区, 人口密度在2人/km²以下; 88.2%分布于中游平原区, 人口密度超过

100 人/km²；下游金塔地区占 7.3%，人口密度 7.04 人/km²；额济纳地区仅为 0.9%，人口密度与上游山区相当。总体来看，流域内人口密度比较低，但是分布极不均匀。非农业人口所占的比重较小，从事农牧业的人口占 80% 左右。土地利用地域性强，并且利用类型多样，具有鲜明的“以水定地，无灌溉即无农业”之特点（高前兆等，1991），土地利用结构详见表 1.1。

表 1.1 黑河流域土地利用结构

类型	上游		中游		下游	
	面积/10 ⁴ km ²	比例/%	面积/10 ⁴ km ²	比例/%	面积/10 ⁴ km ²	比例%
高山	0.72	72	—	—	—	—
河流台地	0.69	27	—	—	—	—
绿洲丘陵	0.08	1	—	—	—	—
绿洲	—	—	0.61	24	0.48	6
滩地	—	—	0.74	29	—	—
低山丘陵	—	—	0.41	16	—	—
戈壁沙漠	—	—	0.79	31	7.56	94
合计	1.49	100	2.56	100	8.04	100

（据刘兴年，2002）

黑河流域的耕地面积一直处于变化之中。1978 年农村经济体制改革以来，耕地面积的变化划出了一条明显的“U”形曲线（图 1.2）。从图 1.2 可以看出，黑河流域 20 世纪 80 年代初有一个扩大耕地面积的阶段；在 80 年代末，耕地面积下降到最低点。

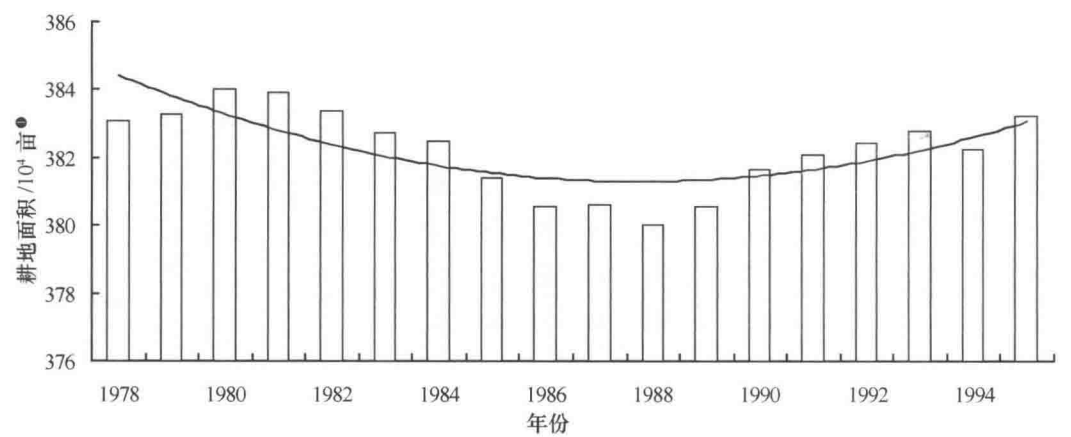


图 1.2 黑河流域耕地发展态势图

① 1 亩 = 666. 6 m²。

1.3 水资源及其开发利用

1.3.1 水资源特征

(1) 河川径流形成、利用、消失分区明显

河川径流可划分为径流形成区、径流利用区和径流消失区。上游祁连山区降水较多,又有冰川融水补给,下垫面为石质山区且植被良好,是黑河径流形成区。中游河西走廊和下游阿拉善高原南部,降水少而蒸发强烈,下垫面是深厚的第四系沉积层,成为良好的地下贮水场所,一般强度的降水均耗散于蒸发,偶尔一次强度较大的降水,也下渗补给地下水,基本上不产流。中游地区农田水利发达,渠系密布,大规模的引用河水浇灌农田,河川径流沿程减少,属于径流利用区。最下游河流尾间附近,地下径流和余留的河川径流以土壤潜水层蒸发和流入居延海水面蒸发的形式,为尾间地区生态所消耗,属于径流消失区(程国栋等,2009;朱庆平等,2003)。

(2) 河川径流以降水补给为主

河川径流的补给来源有大气降水、冰雪融水和地下水等。大气降水是径流的主要补给来源,占河水总量的55%;其次为地下水和冰雪融水,分别占到35%和10%左右(胡兴林,2003;杨明金等,2009;张明明,2007)。

(3) 河川径流年际变化不大

由于河川径流受冰川补给的影响,径流年际变化相对不大,干流莺落峡站多年平均径流量 $15.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,最大年径流量 $23.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ (1989年),最小年径流量 $11.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ (1973年),年径流的最大值与最小值之比为2.1,年径流变差系数 C_v 值为0.15左右。黑河径流多年变化相对稳定,对水资源利用有利。

(4) 径流年内分配集中

河川径流年内分配不均匀。10月~翌年2月,为径流枯水期,莺落峡站该时期径流量占年径流量的17.4%;从3月开始,随着气温的升高,冰川融化和河川积雪融化,径流逐渐增加,至5月出现春汛期,3~5月经流量占年径流量的14.8%;6~9月是降雨最多的季节,而且冰川融水也多,其径流量占年径流量的67.8%,其中7~8月份径流量占年径流量的41.6%(张明明,2007;高前兆等,1991)。

(5) 中游地表水-地下水转换频繁

地表水和地下水多次转化和重复利用,是内陆河最为独特的水文现象(周兴智等,1990;Lan Yong-chao et al.,2002)。河流出山后,流入山前冲积扇,一部分被引入灌溉渠系和供水系统,消耗于农、林业的灌溉以及人畜饮用、工业用水,其余则沿河床下泄,并沿途渗入地下,补给地下水。被引灌的河水,除作物吸收蒸腾、渠系

和田间蒸发外，相当一部分下渗补给地下水，地下水以远比地面平缓的水力坡度向前运动，在细土平原一带出露成为泉水，或者再向前回归河流，或者再被引灌，连同打井抽取的地下水，再进行一次地表、地下水转化。在中游非灌溉引水期的12月~翌年3月，由于前期灌溉水回归河道，正义峡断面的径流量较莺落峡断面大 $2.5 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。水资源多次转换并被多次重复利用的同时，也增加了无效消耗的次数和数量。

1.3.2 水资源开发利用现状

黑河流域产流的祁连山区人烟稀少，山内无大的引水工程，人类活动大都集中在浅山地带，山区总用水量仅为 $0.774 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，约占总径流量的2%。总体上，在上游山区，水资源利用程度低，人类活动对河川径流的数量及时程分配影响甚微（潘启民等，1999）。

发源于祁连山区的大小河流，出山后进入中游河西走廊平原。这些河流出山后即被水库拦蓄或纳入渠系，灌溉农田，只有汛期才有部分河水流入平原地带。各河流及部分小河沟均在出山口的有利地段修筑水库或塘坝（丁宏伟等，1998；刘兴春等，1997，1998；贾贵义等，1997，1998），不同时期中游地区水库建设情况详见表1.2。1987年，黑河干流中游地区草滩庄引水枢纽工程建成以前，黑河沿岸一直沿袭传统的人工引水方法，即在河岸边开引水口，建坝拦河水上岸，灌溉农田。中游204 km的河道就有60多个引水口，引水方式粗放、调控不足；草滩庄水利枢纽建成后，虽然结束了黑河无坝引水和人工引水的历史，但是中游地区一直没有一个科学合理的水量分配方案。中游各地区之间用水矛盾仍然存在，特别是在“黑河调水”的形势下，这种矛盾进一步加剧。近几年来，位于甘州区、临泽县下游的高台县由于调水和上游两县的截引长期处于黑河调水期间有水不能引用、调水结束后又无水可用的两难境地。据统计，1998~2002年期间黑河干流中游段平均引水量为 $12.69 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，占到黑河干流出山口径流（多年平均为 $15.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ）的80%。为了满足中游地区的社会经济发展，地下水开采量也呈逐年增加的趋势。据丁宏伟（2001）研究资料，黑河干流中游地区的地下水开采量由1980年的 $0.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加至1999年的 $2.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表 1.2 黑河流域中游地区水库建设情况

年份	1949	1954	1958	1963	1968	1973	1978	1985	1995 *
蓄水量/ 10^4 m^3	1798	2549	6519	18950	20186	27885	33524	36044	38815
水库/座	2	10	33	43	54	78	93	95	98

注：“*”表示全流域。 (据杨向辉等，2003)

中游出口正义峡下泄的地表水量是维系下游地区社会经济发展和生态平衡的唯一水源。由于中游地区大规模的引用河水,导致正义峡下泄水量逐年减少,下游地区面临严峻的水资源和环境压力。下游额济纳旗林草灌溉方式原始、粗放,水量浪费严重。目前草原灌溉仍旧沿袭原始的“高埂深水,大面积淹灌”的粗放灌溉方式(肖生春等,2004)。

从用水结构看,农业是用水主体,用水量占到总用水量的95%,其次是工业;从用水来源看,主要以利用地表水为主,地下水为辅。

1.4 存在的问题

中游地区不适度的水土资源开发,偏好经济收益最大化,带来了一系列的生态环境问题,主要体现在以下几个方面:

1) 水系变迁、内陆湖终端退缩干涸。黑河流域东、中、西子水系原本是完整的水系,伴随着各河流引水工程的修建,自20世纪50年代之后,中、西子水系已不再有支流注入黑河干流,使得黑河流域完整的水系支离破碎,形成了新的水土植被平衡区。中游耗水量的增加,直接导致下游来水量急剧减少,在每年农业需水高峰期的5~6月份,正义峡断面基本断流,终端湖西、东居延海相继于1961、1992年干涸。

2) 中游区域地下水位下降、水质性缺水。由于中游河水引用的增加、渠系利用率的提高以及地下水开采强度的增大,导致地下水补给总量减少,地下水位下降、泉流量衰减;灌区潜水平埋藏浅,水位稳定,长期蒸发积盐,水质变差;工业废水与农药化肥的使用,导致地表水和地下水污染程度加重。

3) 下游大量生态用水被挤占,天然林地、草场退化,土地沙漠化加剧;众多被废弃的天然河道成为绿洲内部沙源,沙尘暴频发。

4) 水资源利用效率低,水资源浪费严重;地区间水资源调控不足,“争水”“抢水”等水事矛盾时有发生。

1.5 新时期的黑河管理模式——黑河调水

为遏制下游生态环境不断恶化及解决突出的水事矛盾,国家决定对黑河流域水资源实施统一管理和调度,1999年批复成立水利部黄河水利委员会黑河流域管理局。经过多次对黑河现场查勘、调查研究,于2000年3月,黑河流域管理局起草了《黑河干流水量调度管理暂行办法》《黑河干流省际用水水事协调公约》和《黑河干流1999~2000

年度实时水量调度方案》3 个文件（郝庆凡等，2001；乔西现等，2007），针对黑河全流域水土资源适度有效开发利用与合理分布的综合性调控举措，“黑河分水计划”自此拉开序幕，即俗称“黑河调水”。

自 2000 年开始，黑河干流开始实施全流域调水。调水采用的主要形式是分期“全线闭口，集中下泄”（徐广杰等，2001；李启森等，2004；王启朝等，2008；魏智等，2009），即调水期间，黑河中游干流沿线上的各引水口关闭，禁止引水。调水期的选择则根据莺落峡来水情势及中游张掖、临泽和高台三县（市）典型灌区的用水过程线提出“全线闭口，集中下泄”的适宜时段，既能满足中游灌区用水同时又能保证下游生态输水量。实施调水后，2002 年 7 月 17 日 17 时，黑河水首次通过人工调度到达东居延海；2003 年 9 月 24 日 16 时 28 分，黑河水首次通过人工调度进入干涸 43 年的西居延海，黑河干流实现全线贯通。至 2011 年，正义峡累计向下游输水 $120.91 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占莺落峡来水总量（ $210.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ ）的 57.5%，实现了东居延海自 2004 年 8 月以来连续不干涸的历史性突破，最大水域面积达 45 km^2 （柳小龙等，2012）。2004~2012 年，东居延海周边的沙地、戈壁面积有所减少，东居延海湿地面积整体呈增加趋势，湿地地下水埋深下降趋势得到明显遏制，并以平均 0.19 m/a 的速度回升（齐雪艳等，2013；刘咏梅等，2013）。

黑河调水的实质是减少中游的用水量。在用水份额减少的情况下，中游的张掖市通过灌区节水改造、水资源合理调配、作物结构调整、土地利用结构优化等措施（李启森等，2004；宋先松等，2004；张勃等，2004；王启朝等，2008），确保中游农业持续发展的同时为下游生态恢复做出了巨大贡献。黑河调水与节水改造实施后，随着地表水补给量的减少，中游地区地下水位处于持续下降过程（马文斌等，2007；魏智等，2009；陈军峰等，2012），下降幅度自南部山前向北部细土平原逐步递减；同时引起泉水资源的大幅度削减，致使主要有泉水组成进入下游的地表水量逐年减少。在强烈的蒸发浓缩作用下，地表水及浅层地下水均表现出随流程增加而水质盐化的现象（丁宏伟等，2002；马国霞等，2006）。在水资源受限情况下，中游地区的土地利用格局也随之变化（王德彬，2012；苏龙强，2014），土地利用整体变化速度加快。

黑河调水后一些新的问题和矛盾突显，主要体现在以下几个方面：

1) 分水指标偏高，中游用水指标偏低，用水矛盾增加（柳小龙等，2012）。为满足用水需求，不得不以增提地下水量来弥补（盖迎春等，2014），加剧地下水位下降的同时，致使部分靠地下水表层潜水维系的生态林出现枯死，生态环境受到威胁。

2) 现行分水曲线存在技术缺陷（张谦，2011；柳小龙等，2012）。分水曲线要求莺落峡来水量增加，下泄量也增加，但下泄增加百分比远大于来水增加百分