

西安理工大学

硕士学位论文

黑河流域水资源优化配置研究

姓名：李小琴

申请学位级别：硕士

专业：工程

指导教师：黄强;李效栋

20050201

黑河流域水资源优化配置研究

学 科：

作者姓名：

导师姓名：

教授

答辩日期：

摘 要

黑河是中国第二大内陆河，长期以来，由于人口增长，经济发展，中游地区人类活动用水量增加，致使进入下游水量急剧减少，导致森林死亡、草场退化、沙漠化扩展，成为中国北方地区沙尘暴的主要沙源地之一。本文在分析了黑河流域水资源开发利用现状的基础上，指出了目前黑河流域水资源开发利用中存在的问题，综述了国内外水资源优化配置的研究进展，收集、整理并分析了大量黑河流域社会、经济、生态环境等与水资源优化配置相关的资料数据；对黑河流域水资源需求进行了分析和预测；建立了水资源优化配置模型，获得了水资源优化配置方案，对实现黑河流域水资源优化配置具有重要的参考价值。本文取得的主要研究成果如下：

(1)提出了黑河流域水资源优化配置的指导思想、原则和目标，结合流域水资源开发利用特点和目标生成了 2010 水平年五个水资源配置方案，为研究或实施黑河流域水资源优化配置方案奠定了基础。

(2)结合产业结构和农业种植结构调整及对灌区的节水改造，采用定额法对生活、生产、生态需水进行了预测，总需水量由现状的 42.01 亿 m^3 减少到 2010 年水平的 34.93 亿 m^3 ，减小了 16.9%，需水的负增长趋势是合理的，复合流域实情。

(3)考虑到黑河流域水资源短缺，需水大于水资源量的实情，建立了兼顾流域缺水均衡，以流域总缺水最小为目标的水资源优化配置模型

(LPM); 提出了应用遗传算法求解 LPM 模型具体步骤, 推导并给出了该算法有关公式和参数, 丰富了水资源优化配置方法。

(4) 采用长系列资料, 应用 LPM 模型, 进行大量运算获得了现状年和 2010 水平年的六个黑河流域水资源优化配置方案; 通过各方案在实现分配水权、生活、生产和生态用水的协调程度、供水保证率、水资源开发利用程度的分析比较, 以及水资源可持续承载能力的评价, 重点评价了发展系数、协调系数、公平系数和可持续发展系数, 得出了方案 5 为水资源最优方案。论文取得的成果对实现黑河流域水资源优化配置具有重要的指导意义。

关键词: 黑河流域; 水资源; 优化配置; 可持续利用; 承载力; 评价

Study on Optimized Allocation of Water Resource in Heihe Basin

Subject:Water Resources and Hydrology **Author:**

Adviser: **Professor** **Date:**

ABSTRACT

Heihe is the second biggest inland river in china. During a very long time, the downriver has a tendency of water lessening ,forest death, grassland degeneration and desert extending and thus make it become the head area of desertification of North China because of population explosion, economic development and the increased water demand of the middle reaches of Heihe basin. Based on the actuality of the water resource exploitation of Heihe basin, questions were brought forward, study of inside and outside of countries actualities on water resource optimized allocation were sum up and the social ,economic and entironmental data related to Heihe water resource optimized allocation were collected, cleared up and analysed. So the water demand of Heihe basin was analysed and forecasted. At the same time, the water resource optimized allocation modle was built and the related scheme was achieved which has important referenced worth in realizing water resource optimized allocation in Heihe basin. The main results are as following:

(1) The golden rules and objectives of water resource optimized allocation of Heihe basin were put forward, and then 5 schemes in 2010 level year were formed which established base to putting the scheme in practice.

(2) Linked to the saving rebuilt of industrial and agricultural growth structures, lives, production and entironmental demand were forecasted in the method of ration and the general water demand was lessened 16.9% from 42.01 hundred million steres now to 34.93 hundred million steres in 2010, which considered as reasonable and accorded with basin facts.

(3) LPM was built which embodied the objective of minimizing the general water lack of the basin. Material processes and related formula were put forward by Genetic Arithmetic which enriched water resource optimized allocation methods.

(4) Six schemes in the status year and 2010 level year were achieved by long series data and IPM after mass operation. After study on realizing harmony, water demand assuring ratio, the degree of water resource exploitation and utilization of distribute in water power, lives, production and environmental water demand through each scheme, and evaluating on sustained carrying capacity of water resource, coefficient on development ,harmony, sustainability were emphasesed and finally the fifth scheme was selected as the optimized scheme of water resources. Overall, the results gained in the paper have important guidance meaning in realizing water resource optimized allocation in Heihe basin.

Keywords: Heihe Basin; Water Resource;Optimized Allocation;Sustained Utilization;
Carrying Capacity;Evaluate

1 绪论

1.1 研究的目的和意义

实施西部大开发战略，加快西部地区发展，其中一个重要的制约因素是西部的水资源问题。“西部大开发，水利要先行”正在成为人们的共识。西部地区是我国长江、黄河、珠江等主要江河的发源地，是全国生态建设和环境保护的重点。西部的西北是我国最干旱的地区，生态环境极其脆弱。经过 2000 多年的开发利用，特别是新中国成立以来经济的快速发展，不少地方的水土资源已经过度开发、水资源短缺、水资源污染、生态环境恶化等问题已危及到西北地区社会、经济、生态环境系统。西部大开发，如何在保护和重建生态环境的条件下，使社会经济得到持续发展，对于西北地区来说是极大的挑战。

黑河是我国西北地区较大的内陆河，横跨山地、盆地和沙漠三大地貌类型区，水资源匮乏，用水矛盾尤其是经济建设与生态环境用水矛盾突出。黑河流域水资源总量 28.08 亿 m^3 ，考虑中下游河道和水库蒸发渗漏损失后，可供水资源量 20.8 亿 m^3 。现状生活和国民经济耗用水量 14.6 亿 m^3 ，已挤占了生态环境用水。

随着黑河流域内人口的增长、经济的发展和生活水平的提高，中下游之间用水矛盾日趋尖锐。从 60 年代初期开始，内蒙古自治区就提出黑河分水问题，中央有关部委也做了大量协调工作，但甘、蒙之间的分水问题一直未能真正落实。长期以来，黑河水资源缺乏统一管理，经济社会发展没有充分考虑水资源条件，上游高山峡谷水能资源丰富，但缺乏统一规划，开发利用力度不够；中游地区开荒、移民，发展灌溉农业用水挤占了下游生态用水；下游河流断流，湖泊萎缩或消失，生态环境恶化、水利工程缺乏统一规划，各自为政，无序开发，引水口门和平原水库过多，水量蒸发损失大；落后的灌溉方式和不合理的管理，更加剧了

水资源供需失衡，并且引发了一系列水事矛盾。甘肃省内部的用水矛盾也十分突出，每年 5~6 月“卡脖子”旱期间，中游地区县与县、乡与乡、村与村之间相互争水、抢水、破坏水利工程的水事纠纷和违法案件经常发生。自 1993 年至 1999 年，甘肃的张掖、临泽、高台三县（市）共发生水事纠纷 152 起，发生各类水事案件 123 起，其中多起是因抢水而破坏水利工程的恶性案件。

为遏制下游生态环境不断恶化趋势和解决突出的水事矛盾，1992 年国家计委批准了黑河干流分配方案，1997 年在 1992 方案的基础上，经国务院同意，水利部批准了不同来水年份黑河干流水量分配方案，但由于没有相应的管理机构和管理办法，也没有进行综合治理以确保水量分配方案的实施的工程措施，因此，国家批准的水量分配方案并未得到真正的落实，黑河下游生态环境继续恶化。1999 年中编办批准成立黑河流域管理局，2000 年黄委正式组建了黑河流域管理局，2001 年国务院批复了《黑河流域近期治理规划》，提出用三年时间实现国务院批准的黑河流域分水方案，尽快遏制生态环境恶化的趋势，黑河干流水量统一调度就是确保国务院批复的《黑河流域近期治理规划》的重要管理措施之一，是遏制黑河下游生态环境继续恶化、配合黑河流域近期治理目标的重要措施。因此，2000 年 6 月 19 日黑河流域管理局进驻张掖水量调度工作现场，正式启动干流水量统一调配工作。

黑河水资源问题的实质，是如何解决人与自然的的关系，使有限的水资源最大限度地满足流域经济、社会生活和生态环境协调发展的需要。因此，加强黑河流域以水资源合理配置为核心的统一管理，通过行政手段、经济手段、工程手段、科技手段、法律手段等有效协调区域之间用水问题，合理安排生产、生活和生态用水，促进水资源优化配置、高效利用，对于提高水资源承载能力，实现黑河水资源可持续利用，保护和改善流域及周边地区生态环境，推动西部地区经济社会的可持续发展，保障社会稳定，维护民族团结，巩固国防建设具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 国外研究现状及进展

水资源优化配置的研究始于 20 世纪 60 年代初期,1960 年科罗拉多^[3]的几所大学对计划需水量的估算及满足未来需水量的途径进行了研讨,体现了水资源优化配置的思想。1982 年 E.Romiji.M.Tamiga^[20]考虑了水的多功能性和多种利益的关系,强调决策者和决策分析者间的合作,建立了水资源量分配的多层次模型,体现了水资源配置问题的多目标和层次结构的特点。1987 年,Willis^[21]应用线性规划方法求解了一个地表水库与四个地下水含水单元构成的地表水、地下水联合运行管理问题,地下水运动用基本方程的有限差分式表达,目标为供水费用最小或当供水不足情况下缺水损失最小,同时用 SUMT 法求解了一个水库与地下水含水层的联合管理问题。

90 年代以后,由于水污染和水危机的加剧,传统的以供水量和经济效益最大为目标的水资源优化配置模式已不能满足需要,国外开始在水资源优化配置中注重水质约束、水资源环境效益以及水资源可持续利用研究。为此,国内外学者建立了一些管理决策模型,针对一些地区水资源量与质统一管理的特殊问题进行了研究。1922 年 Afzal, Javaid^[38]等针对 Pakistan 的某个地区的灌溉系统建立了线性规划模型,对不同水质的水量使用问题进行优化。在劣质地下水和有限运河水可供使用的条件下,模型能得到一定时期内最优的作物耕种面积和地下水开采量等成果,在一定程度上体现了水质水量统一优化配置的思想。1955 年, Watkins, David W.Jr^[39]介绍了一种伴随风险和不确定性的可持续水资源规划模型框架,建立了有代表性的水资源联合调度模型。此模型是一个两阶段扩展模型,第一阶段可得到投资决策变量,第二阶段可得到水资源运行决策变量,运用大系统的分解聚合算法求解最终的非线性混合整数规划模型 R.A.Fleming 和 R.M.Adams(1995)^[40]建立的地下水水质水

量管理模型，建模中考虑了水质迁移的滞后作用，并采取用水力梯度作为约束来控制污染扩散，目标仍然是经济效益最大，决策变量是地下水开采量；UpmanuLall 等（1995）^[41]建立的地表水地下水联合运用系统的多目标管理模型，模型中间地表水地下水的处理费用纳入管理目标；Ghossan R.Musharrafieh 和 RichardC.Peralta（1995）^[42]建立的灌溉系统水资源管理模型，该模型以土壤控制断面水势变幅最小为目标，控制灌溉水的盐分不致淋至地下水，采用模拟优化技术确定灌水定额。Wong，Hillel S.^[43]等（1997）提出支持地表水、地下水联合运用的多目标多阶段优化管理的原理和方法，在需水预测中考虑了当地地表水、地下水、外调水等多种水源的联合运用，并考虑了地下水恶化的防治措施，体现了水资源利用和水资源保护之间的关系；Shuval，Hillel S.^[44]指出，污水回用依赖于污水处理中心系统所服务的人口数，同时也依赖于涉及鼓励污水循环和重复利用的官方政策，指出污水回用对于保持干旱国家和地区的水资源可持续利用具有重要的意义。Carios Percia 和 Gideon Oron(1997)^[45]以经济效益最大为目标，建立了以色列南部 Eilat 地区的污水、地表水、地下水等多种水源的管理模型，模型中考虑了不同用水部门对水质的不同要求。Kumar，Arun^[46]等（1999）建立了污水排放模糊优化模型，提出流域水质管理经济上和技术上可行的方案。因该模型忽略了不同行业的排放量与污水处理水平不一致的问题，于是又进一步提出了一个所有污水排放非歧视性可替代方案，并由污水控制部门来组织实施。随着新优化算法的研究和完善，遗传算法（GA）、模拟退火算法（SA）等进化算法开始在水资源配置中应用^[47]。这些研究成果证明了新优化算法引入水资源优化配置研究的优越性和有效性，并在应用过程中使新优化算法得到了改进和完善。

1.2.2 国内研究现状

在国内，水资源优化配置研究是随着系统工程理论的发展、应用和

经济社会发展对水资源的需求特点变化而展开的。早在 1960 年, 邬沧普首次提出了年调节水库最优运用的 DP 模型, 在微观层次上提出了水资源优化配置的思想。尤其是自 80 年代初, 水资源优化配置问题在我国学术界已引起足够重视, 我国开展了水资源科学分配方面的研究和应用工作。特别是在水资源优化配置的基本概念、优化目标、基本平衡关系、需求管理、供水管理、水质管理、经济机制、决策机制几个主要模型的数学描述等方面, 均有新的研究成果, 经广泛应用取得了较大的经济和社会效益^[53]。

根据问题的特点、水资源优化配置范围、对象和规模的不同, 以下分灌区、区域、流域和跨流域水资源优化配置几个类型进行综述。

(1) 灌区水资源优化配置

由于灌区主要向农业供水, 水源和用水结构相对简单, 影响和制约因素相对较少, 如何实现灌区的有限水资源量的最大效益, 成为广大学者较早涉足的研究领域之一。曾赛星、李寿声^[54] (1986, 1989) 在对内蒙古河套灌区地表水地下水联合优化调度中, 采用动态规划方法确定各种作物的灌水定额及灌水次数; 针对江苏徐州地区欢口灌区的实际情况, 建立了一个既考虑灌溉排水、降低地下水位的要求, 又考虑多种水资源联合调度、联合管理的非线性规划模型, 已确定农作物最优种植模式及各种水源的供水比例。唐德善^[55] (1992) 以黄河中游某灌区为例, 运用递阶动态规划法, 确定水资源量在工业和农业之间的分配比例。贺北方^[56]等 (1995)、黄振平等^[57] (1995)、向丽^[58]等 (1999) 和马斌^[59]等 (2001) 对多库多目标最优控制运用的模型与方法、灌区渠系优化配水、大型灌区水资源优化分配模型、多水源引水灌区水资源调配模型及应用进行了研究。这些成果使水利工程单元的水量优化配置模型和方法不断丰富和完善, 促进了以有限水资源量实现最大效益的思想在水利工程管理中的应用。

(2) 区域水资源优化配置

区域水资源优化配置以行政区或经济区为研究对象。区域是经济社会活动中相对独立的基本管理单位，其经济社会发展具有明显的区域特征。随着经济社会的快速发展，以及多目标和大系统优化管理的日渐成熟，自 80 年代中期以来，区域水资源优化配置研究成为水资源学科研究的热点之一。由于区域水资源系统结构复杂，影响因素众多，各部门的用水矛盾突出，研究成果多以目标和大系统优化技术为主要研究手段，在可供水量和需水量确定的条件下，建立区域有限的水资源量在各分区和用水部门间的优化配置模型，求解模型得到水量优化配置方案。贺北方^[60、61]（1988）提出区域水资源优化分配问题，建立了大系统序列优化模型，采用大系统分解协调技术求解。以河南豫西地区为背景建立了区域可供水资源年优化分配的大系统逐级优化模型。该模型有两个子模型组成：第一个子模型是“区域可供水资源年优化分配与产业结构调整模型”，其宗旨是把区域可供水资源在各子区及用水部门间进行最优分配，并调整产业结构使之更趋合理；第二个子模型是“区域可供水量月优化调整模型”，它是在第一个优化模型的基础上，寻求子区内各水源工程向各用水户供水的逐月最优运行过程，并达到供需水量的最佳配置。该成果的特点是考虑了产业结构调整对水资源量配置的影响。吴泽宁^[62]（1989）等以经济区社会经济效果最大为目标，建立了经济区水资源优化分配的大系统多目标模型及其二阶分解协调模型，并用层次分析法间接考虑水资源配置的生态环境效果。以三门峡市为例对模型和方法进行了验证，得到了不同水平年不同保证率情况下的水资源量优化分配方案。翁文斌等^[63、64]（1995）将宏观经济、系统方法与区域水资源规划实践相结合，形成了基于宏观经济的水资源优化配置理论，并在这一理论指导下，提出了区域水资源配置的多目标宏观决策分析方法，采用模拟优化技术建模，在优化目标中考虑了环境目标（BOD 排放量最小），实现了水资源配置与区域经济系统的有机结合，体现了水质水量统一配置的思想，也是水资源优化配置研究思路上的一个突破。但该模型也存在以 BOD 排放量

最小作为水环境目标，不能保证水质(水环境)目标得到满足，未能充分体现水环境承载能力思想的不足。卢华友^[65]等(1997)、黄强^[66]等(1999)、邱林等^[67](1999)和辛玉琛^[68]等(2000)分别以义乌市、西安市、宁陵市和长春市水资源系统为对象，建立多水源、多目标水资源配置方案。吴险峰^[69]等探讨了北方缺水城市—枣庄在水库、地下水、回用水、外调水等复杂水源下的优化供水模型，从社会、经济、生态综合效益考虑，建立了水资源量优化配置模型。2002年中国水利水电科学研究院等单位联合完成的“九五”国家重点科技攻关项目“西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究”^[70、71]，建立了干旱区生态环境需水量计算方法，提出了与区域发展模式及生态环境保护准则相适用的生态环境需水量，在此基础上，提出了针对西北地区生态脆弱地区的水资源配置方案。采用了在水资源配置方案设置的基础上，生成水资源配置结果的研究思路，使水资源配置结果更符合区域的事迹。

(3) 流域水资源优化配置

流域是具有层次结构和整体功能的复合系统，由社会经济系统、生态环境系统、水资源系统构成，流域系统是最能体现水资源综合特性和功能的独立单元^[72]。国内在流域水资源优化配置方面也取得了可喜的成果，成果与区域水资源优化配置研究具有近似的特征。唐德善^[73](1994)应用多目标规划的思想，建立了黄河流域水资源多目标分析模型，提出了大系统多目标规划的求解方法。1996年由黄委会勘测规划设计研究院主持的“黄河流域水资源合理分配和优化调度研究”^[74]成果中，开发由数据库、模拟模型、优化模型等组成的决策支持系统，并初步研究了黄河干流多库水量联合调度模型。王成丽等^[75](1997)针对近年来黄河下游连年缺水、断流等现象，研究了黄河下游水资源量的优化分配问题。徐慧^[76]等(2000)为使大型水库群在大范围暴雨洪水期间综合效益达到最优，采用动态规划模型求解淮河流域大型水库群的水量联合优化调度问题。陈晓宏^[77]等(2002)以大系统分解协调理论作为技术支持，运用

逐步宽容约束法及递阶分析法，建立东江流域水资源优化调配的实用模型和方法，并对该流域特枯年水资源量进行优化配置和供需平衡分析。

1.3 研究的主要内容

本文在调查分析黑河流域水资源开发利用现状、水利工程供水现状、当前用水现状及水资源开发利用中存在问题的基础上，依据可持续发展观点，提出黑河流域规划目标，进行水资源需水预测分析，研究满足国民经济发展和生态环境保护要求的水资源合理配置方案，进而分析水资源承载能力。

主要研究内容如下：

(1)收集黑河流域自然地理及社会经济概况、水资源、水能资源蕴藏情况及利用情况和现有水利工程的建设现状和供水现状，并分析该流域水资源开发利用中存在的一些问题，指出了黑河流域水资源规划的必要性。

(2)依据水资源可持续发展的指导思想，提出黑河流域水资源配置目标。

(3)根据已收集的资料，对黑河流域社会经济发展指标和 2010 年水资源的需求量进行了预测，并对现状水平年需水结构及 2010 年水平年需水结构进行对比分析。

(4)建立黑河流域水资源优化配置数学模型。

(5)进行水资源优化配置方案成果分析及比较，并对各方案进行水资源可持续承载能力评价，最终选出最优方案。

(6)得出结论，对各项规划提出合理的对策和建议。

1.4 技术路线

黑河流域水资源规划内容很多，本文主要研究水资源优化配置、生态环境规划建设、梯级电站开发等，从而对流域水资源规划和建设提出科学合理的对策和建议。

本文研究采用的技术路线如图 1-1 所示。

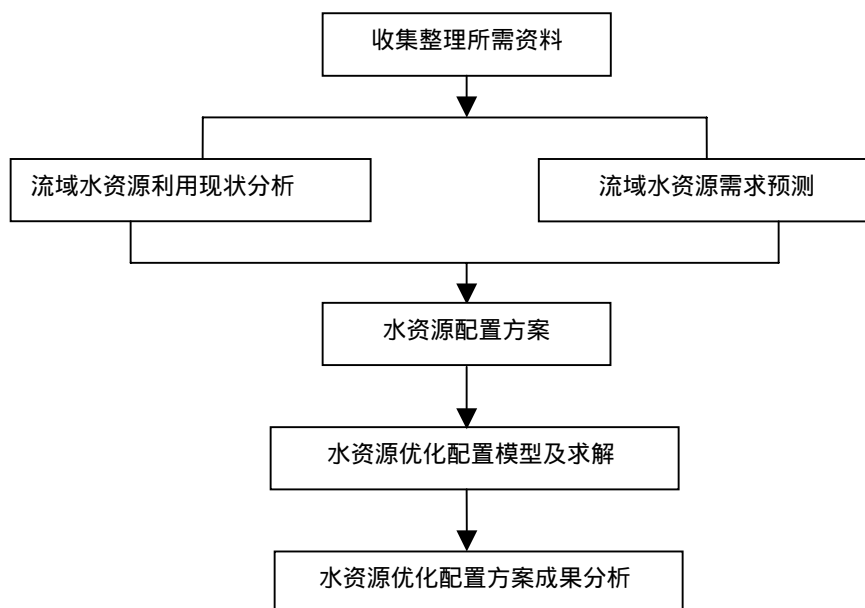


图 1-1 技术路线示意图

2 黑河流域水资源及其开发利用概况

2.1 流域概况

黑河是我国西北地区较大的内陆河,发源于祁连山中段,流域东起山丹县境内的大黄山,与石羊河流域接壤,西以嘉峪关境内的黑山为界,与疏勒河流域毗邻,北至中蒙边界,范围介于东经 $98^{\circ}0' \sim 102^{\circ}0'$ 北纬 $37^{\circ}05'0'' \sim 42^{\circ}40'0''$ 之间,涉及青海、甘肃、内蒙古三省(自治区),共 14 个(县、市、区、旗),以及我国重要的国防科研基地—东风场区。

黑河是我国第二大内陆河,发源于青藏高原北部祁连山北麓,流经青海、甘肃和内蒙古三省(区),干流全长约 821km,流域面积 14.29 万 km^2 。流域分为东、中、西三个子水系,其中西、中部子水系与干流已脱离水力联系。东部子水系—即干流水系流域面积 11.6 万 km^2 ,包括梨园河等 20 多条支流在内,通常所说的黑河流域即指东部子水系。黑河在祁连山出山口莺落峡以上为上游,河道两岸山高谷深,河床陡峻,气候阴湿寒冷,植被较好,多年平均气温不足 2°C ,年降水量 350mm,干流莺落峡断面多年平均河川径流 15.8 亿 m^3 。莺落峡至正义峡为中游冲积平原区,光热资源充足,自古以来就是重要的农业灌区,但干旱严重,年蒸发能力达 1410mm,年均降水量为 140mm,年际变化大,年内分配不均,主要集中在 6~9 月,占全年降水量的 72%。正义峡以下为黑河下游,属阿拉善高平原荒漠干旱区和极端干旱亚区,降水量极少,多年平均降水量为 47mm,年蒸发能力高达 2250mm,干旱指数最高达 82;下游河道自狼心山断面以下分为东河和西河,两河分别通向其尾间湖泊—东、西居沿海。

由于受气候和人类活动的影响,流域水资源与当地人口、经济社会发展 and 生态环境需要极不相称。据历史记载,黑河中游地区汉代仅 8~9 万人,灌溉面积约 7 万亩,到 2001 年,中游地区总人口增加到 121 万人,灌溉面积增加到 334 万亩,总人口和灌溉面积分别是建国初的 2.2 倍和

3.2 倍。伴随着中游地区人口的增长和经济的发展,用水量也迅速增长,致使进入下游的水量由建国初的 11.6 亿 m^3 减少到 90 年代后期的 7.3 亿 m^3 ,加之沿途灌区用水和河道水量损失等,实际进入下游额济纳绿洲下段的水量仅有 3~5 亿 m^3 。黑河下游额济纳绿洲是西北地区重要的生态屏障,进入绿洲水量的锐减直接造成了绿洲的退化、沙化,造成下游地区河道断流加剧,湖泊干涸,地下水位下降;1958~1980 年间,胡杨、沙枣、梭梭和怪柳等面积年均减少约 3.9 万亩;80 年代至 1994 年间,下游地区覆盖度大于 70%的林灌草地面积减少了约 78%,覆盖度介于 30~70%的湖盆低地沼泽草甸及 45 级草地减少了约 40%,覆盖度小于 30%的荒漠草地和戈壁沙漠面积却增加了 68%;土地沙化导致了沙尘暴危害加剧,1993 年 5 月 5 日,以阿拉善地区为重要沙源地的特大沙尘暴,致使农作物受灾 560 万亩。1987~2000 年间,黑河下游覆盖率减少了 28%,植被不仅在数量上减少,而且质量也在下降,其中以湿生植被、梭梭林退化最为严重,这与进入黑河下游的水量急剧减少是密切相关的,黑河下游植被的演替表现为显著的逆行演替特征,生态系统的生命支持能力逐渐下降,如果不加强黑河流域的综合治理和水量统一调度,黑河下游将进一步向荒漠化方向发展。2000 年我国北方发生 8 次沙尘暴天气,该地区即为重要沙源之一。

2.2 水资源概况

2.2.1 降水资源

由于受水气来源和地形的影响,黑河流域降水空间分布的规律表现为:一是全流域干旱少雨,平均降水量仅 108mm;二是降水的地区分布很不均匀,南部多,北部少;三是地区降水量的垂直分带性显著。全流域不同类型地区的降水量计算成果见表 2-1

表 2-1 黑河流域降水量表

分类	面积 (km ²) / %	降水深 (mm)	降水总量 (亿 m ³) / %
祁连山山区	14702/12.7	377	55.46/44.2
浅山区	7097/6.1	339	24.03/19.1
走廊平原区	8763/7.5	112	9.81/7.8
荒漠戈壁区	85531/73.7	43	36.38/28.9
合计	116093/100	108	125.68/100

2.2.2 冰川资源

黑河发源于祁连山区，降水较多，有一部分降水在低温条件下以冰雪等固体形式积累和储存起来，发育成现代冰川。该地区水资源存在的一种特殊形式，常以冰川融水为主，对径流的调节作用非常明显，有“天然固体水库”之称。在丰水低温年份可大量储存固体降水，而在枯水高温干旱年份，促进冰川强烈消融，与降水径流之间有着相互补充作用。因而使河流的年径流量比较稳定，有利于提高供水的保证程度。黑河流域在祁连山河源地区分布有大小冰川 428 条，冰川覆盖面积 11.3Km²，冰川储量约 27.55 亿 m³。黑河流域的现代冰川主要分布在托勒南山和托勒山。

2.2.3 地表水资源

黑河流域径流形成区产水支流众多，水文观测站网密度不足，故根据水文资料情况及形成河川径流的特点等，将产流区划分为有水文测站观测资料的河流、无观测资料的河流、浅山区和走廊平原区四种类型进行地表水资源量评价，其成果见表 2-2。

表 2-2 不同系列黑河流域多年平均地表水资源总量评价成果表 单位：亿 m³

系列	有测站河流	无测站河流	浅山区	出山口	走廊平原	合计
1956 年~1980 年	21.86	2.39	0.85	25.10		25.10
1956 年~1999 年	21.935	2.4458	0.7323	25.113	0.148	25.261

2.2.4 地下水资源、水资源总量

黑河流域地下水资源的可开采量为 6.72 亿 m^3 。其中民乐县为 0.53 亿 m^3 ，山丹县为 0.42 亿 m^3 ，甘州区为 2.00 亿 m^3 ，临泽县为 1.30 亿 m^3 ，高台县为 1.51 亿 m^3 ，金塔县为 0.15 亿 m^3 ，额济纳旗为 0.81 亿 m^3 。

综合地表水资源和地下水资源的评价成果，黑河流域出山口地表径流总量为 25.1131 亿 m^3 。不重复计算量包括山前侧向补给量和降水入渗补给量，山前侧向补给量为 2.647 亿 m^3 ，流域降水入渗补给量 0.0184 亿 m^3 ，因此黑河流域水资源总量为 28.85 亿 m^3 。

2.2.5 水资源可利用量

水资源的可利用量包括地表水资源可利用量和地下水资源可利用量，《全国水资源利用规划技术细则》（2002 年 9 月）给出地表水资源可利用量的定义为：是指在可预见的时期内统筹考虑生活、生产和生态环境用水，协调河道内和河道外用水的基础上，通过经济合理、技术可行的措施可供河道外一次性利用的最大水量（不包括回归水重复利用量）；地下水资源的可利用量为地下水的可开采量；则水资源可利用总量，可采取地表水资源可利用量与浅层地下水资源可开采量相加再扣除地表水资源可利用量与地下水资源可开采量两者之间重复计算量的方法估算。估算公式如下：

$$Q_{\text{总}} = Q_{\text{地表}} + Q_{\text{地下}} - Q_{\text{重}} \times Q_{\text{重}} = p(Q_{\text{渠}} + Q_{\text{田}}) \quad (2-1)$$

式中： $Q_{\text{总}}$ 为水资源可利用量（亿 m^3 ）； $Q_{\text{地表}}$ 为地表水资源可利用量（亿 m^3 ）； $Q_{\text{地下}}$ 为浅层地下水资源可开采量（亿 m^3 ）； $Q_{\text{重}}$ 为重复计算量（亿 m^3 ）； $Q_{\text{渠}}$ 为渠系渗漏补给量（亿 m^3 ）； $Q_{\text{田}}$ 为田间地表水灌溉入渗补给量（亿 m^3 ）； p 为可开采系数，是地下水资源可开采量与地下水资源量的比值。

根据黑河地表水和地下水多次转换、多次利用的特点，计算其水资源可利用量时应遵循以下原则：一是水资源的可利用量应是可供河道外

利用的最大消耗水量；二是应优先考虑生态环境的用水要求；三是必须遵循国务院关于黑河水资源的分配方案。根据以上原则，黑河流域的水资源可利用量可以用下式表示：

$$W_k = W_1 + W_2 + W_3$$

$$W_1 = (R + P_1 + Q_1) - R_2 - R_1 \quad (2-2)$$

式中： W_1 、 W_2 、 W_3 分别为黑河中游、鼎新灌区和东风场区的水资源可利用量（亿 m^3 ）； R 、 P_1 、 Q_1 分别为黑河出口径流量（亿 m^3 ）、走廊平原区降水补给量和山前侧向补给量（亿 m^3 ）； R_2 为正义峡断面的下泄量（亿 m^3 ）； R_1 为走廊平原区潜水蒸腾蒸发量（亿 m^3 ）。

按照上述计算公式，结合水资源评价的结果分析黑河水资源可利用量，其中正义峡下泄量采用国务院批复的黑河干流分水方案，即当莺落峡来水 15.8 亿 m^3 时，正义峡断面下泄量达到 9.5 亿 m^3 ，中游走廊平原区的潜水蒸腾蒸发量采用多年平均值为 3.11 亿 m^3 ，鼎新灌区和东风场区的水资源可利用量采用 0.9 亿 m^3 和 0.6 亿 m^3 。则：

$$W_1 = (R + P_1 + Q_1) - R_2 - R_1 = (25.3 + 0.52 + 1.32) - 9.50 - 3.11 = 14.36$$

$$W_2 = 0.9$$

$$W_3 = 0.6$$

水资源可利用总量为：

$$W_{k0} = W_1 + W_2 + W_3 = 14.36 + 0.9 + 0.6 = 15.86$$

通过上述分析，黑河流域水资源的可利用量为 15.86 亿 m^3 ，可供流域生态环境水量为 12.58 亿 m^3 ，水资源的可利用总量占流域水资源总量的 56% 左右。

2.3 水资源开发利用现状

2.3.1 水利工程建设现状

经过 2000 多年的垦殖开发，黑河流域的水利工程建设在建国初期已

有相当的规模。建国后，又先后兴建了一批山区蓄水工程和平原洼地水库、提水工程和机电井工程等，对当地工农业生产和促进区域经济发展起到了显著的作用。

(1) 蓄水工程

截止 1999 年底，黑河流域内有中小型水库 58 座（含平原水库 40 座），总库容 2.55 亿 m^3 ，兴利库容 2.21 亿 m^3 。其中，中型水库 8 座，总库容 1.52 亿 m^3 ，兴利库容 1.30 亿 m^3 ，已淤积库容 0.10 亿 m^3 ，小型水库 50 座，总库容 1.03 亿 m^3 。

黑河干流的平原水库最早出现于民国时期，为马尾湖水库。20 世纪 50 年代以来，由于干流缺乏骨干调蓄工程，每年 5 月～6 月河道来水不能满足灌溉需求，造成“卡脖子”旱。为缓解该时期的灌溉矛盾，在黑河干流两岸利用自然洼地相继修建了大量的平原水库。截止 1999 年底，能够正常运行的平原水库尚有 40 座，设计库容 1.12 亿 m^3 ，有效库容 0.79 亿 m^3 ，年实际蓄水量 1.52 亿 m^3 ，控制灌溉面积 46.28 万亩。

(2) 引水口工程

截止 1999 年底，在黑河干流（含梨园河）独立的取水口共有 66 处。其中，中游引水口 62 处，下游鼎新灌区 3 处，东风场区 1 处。设计引水能力 267.7 m^3/s 。其中，中游的设计引水能力为 227.7 m^3/s ，下游鼎新灌区的设计引水能力为 40 m^3/s 。

(3) 提水工程及机电井工程

据统计，1999 年张掖市共有提水工程 141 处，总有效灌溉面积 1.25 万亩。截止 1999 年底，黑河流域共有机电井 6689 眼，其中深井 962 眼；已配套机电井 4310 眼，其中电配井 3858 眼。1999 年提取地下水 4.01 亿 m^3 ，纯井灌面积达到 26.5 万亩。

(4) 灌区工程

据统计，1999 年黑河流域现状总有效灌溉面积为 397.40 万亩，其中农田灌溉面积为 309.00 万亩，林草灌溉面积为 88.40 万；当年实灌面积

412.80 万亩，其中农田实灌溉面积 325.41 万亩，林草实灌溉面积 87.39 万亩。流域内现有 30 万亩以上大型灌区 8 处，全部在甘肃境内，设计灌溉面积 274.90 万亩，有效灌溉面积 239.70 万亩，1999 年实灌面积 232.40 万亩。

黑河中游灌区根据其水源类型、地形地貌、水文地质条件分为沿山灌区、黑梨灌区、井泉灌区和河井泉混合灌区。沿山灌区的水源取自沿山的小河流，这些灌区依水源而形成单独的灌溉供水范围；黑梨灌区为直接引用黑河干流和梨园河水的灌区，这些灌区集中连片，黑河和梨园河两河互有联系；井泉灌区和河、井、泉混合灌区均与黑河、梨园河及黑梨灌区有着密切的水力联系，因此统计时将其合并到黑梨灌区。据统计，1999 年黑河中游甘州、临泽、高台三县（区）有效灌溉面积 228.66 万亩，实灌面积 223.43 万亩，其中沿山灌区有效灌溉面积 20.15 万亩，实灌面积 15.62 万亩；黑梨灌区有效灌溉面积 208.51 万亩，实灌面积 207.82 万亩。黑河流域灌溉面积分布见表 2-3。

表 2-3 黑河流域灌溉面积统计表

分区	分区 编号	设计灌 溉面积 (万亩)	有效灌溉面积（万亩）			实灌面积(万亩)		
			合计	农田	林草	合计	农田	林草
上游区	X ₁	17.23	8.76	6.06	2.70	7.64	4.94	2.70
中游区	X ₂	360.98	334.33	289.38	44.95	350.86	306.92	43.94
山前 灌区	X ₂₋₁	127.11	105.67	99.82	5.85	127.42	122.53	4.89
黑河 干流	X ₂₋₂	233.87	228.66	189.56	39.10	223.43	184.39	39.05
沿山 灌区	X ₂₋₃	24.17	20.15	17.73	2.42	15.62	13.05	2.57
黑梨 灌区	X ₂₋₄	209.70	208.51	171.83	36.68	207.82	171.34	36.48
下游区	X ₃	54.31	54.31	3.56	40.75	54.31	13.56	40.75
鼎新 灌区	X ₃₋₁	14.00	14.00	9.00	5.00	14.00	9.00	5.00
东风 场区	X ₃₋₂	5.31	5.31	2.46	2.85	5.31	2.46	2.85
额济 纳旗	X ₃₋₃	35.00	35.00	2.10	32.90	35.00	2.10	32.90
总计		432.52	397.40	309.00	88.40	412.80	325.41	87.39

(5) 节水工程

黑河流域节水灌溉发展起步较晚，直到 20 世纪 90 年代以来，流域内的喷灌、微灌、低压管灌等高新节水工程措施才有一定的发展。且主要集中在黑河中游地区。截止 1999 年底，流域内各类高效节水灌溉面积为 10.55 万亩，其中喷灌面积 1.20 万亩，微灌面积 0.33 万亩，低压管灌面积 9.02 万亩，占流域现状农田有效灌溉面积 309.0 万亩的 3.4%；黑河中游各类高效节水灌溉面积 9.50 万亩，占中游农田有效灌溉面积 289.38 万亩的 3.3%。

(6) 小水电工程

截止 1999 年底，黑河流域已建成小水电站共 22 座，装机容量 3.36 万 kw，设计年发电量 15028 万 kwh；在建水电站 2 座，装机容量 5.36 万 kw，设计年发电量 19166 万 kwh。

2.3.2 供水现状

据统计，1999 年黑河流域各类工程总供水量 32.41 亿 m^3 ，其中地表水供水量 27.77 亿 m^3 ，地下水供水量 4.64 亿 m^3 （含泉水），分别占总供水量的 85.7%和 14.3%。按工程类型分：蓄水工程供水 3.86 亿 m^3 ，占总供水量的 11.9%；引水工程供水 23.80 亿 m^3 ，占总供水量的 73.4%；提水工程供水 0.11 亿 m^3 ，占总供水量的 0.4%；机电井工程供水 4.01 亿 m^3 ，占总供水量的 12.4%；其他工程供水量 0.63 亿 m^3 ，主要为引用泉水，占总供水量的 1.9%。由此可见，引水工程是黑河流域的主要供水水源。从供水量的地区分布看，黑河中游区（ X_2 ）供水量 25.98 亿 m^3 ，占供水总量的 80.2%，黑河下游区（ X_3 ）供水量 6.03 亿 m^3 ，占供水总量的 18.6%；黑河上游区（ X_1 ）工程很少，供水量仅为 0.41 亿 m^3 ，占总供水量的 1.2%。由现状供水量的地区分布分析，现状黑河干流供水主要集中在中游的甘州、临泽、高台三县（区）。1999 年黑河流域各类工程供水量见表 2-4。

表 2-4 1999 年黑河流域各类工程供水量统计表

单位:万 m³

分区	分区编号	蓄水工程	引水工程	提水工程	机电井	泉水	合计
上游区	X ₁	11	2323	400	1280	61	4075
祁连县	X ₁₋₁		1160	400			1560
肃南县	X ₁₋₂	11	1163		1280	61	2515
中游区	X ₂	37376	189910	725	25495	6253	259759
山前灌区	X ₂₋₁	31660	11872	0	3620	0	47152
黑河干流	X ₂₋₂	5716	178038	725	21875	6253	212607
下游区	X ₃	1217	45733	0	13357	0	60307
鼎新灌区	X ₃₋₁	1217	13233	0	1600	0	16050
东风场区	X ₃₋₂	0	2100	0	9957	0	12057
额济纳旗	X ₃₋₃	0	30400	0	1800	0	32200
合计		38604	237966	1125	40132	6314	324141

2.3.3 用水现状

黑河流域现状主要用水部门为农田灌溉用水和工业、城市生活、农村人畜、林牧渔业用水及生态环境用水。现状各部门的用水量采用水利部门提供的水利年报进行统计,考虑到进入额济纳旗的 3.22 亿 m³ 水量,扣除当地国民经济用水后,全部按生态用水统计。据此统计,1999 年流域各部门总用水量 32.41 亿 m³,其中农田灌溉用水量为 25.12 亿 m³,生态环境用水量为 5.67 亿 m³,农田、生态环境用水占总用水量的 95.0%;工业用水量为 1.13 亿 m³,占 3.5%;城乡生活用水量为 0.496,占 1.5%。流域各部门用水情况见表 2-5;流域内各部门耗水量见表 2-6。

表 2-5 1999 年黑河流域各部门用水量表

单位:万 m³

分区	分区编号	农田灌溉	工业用水	城镇生活	农村生活	生态用水	合计
上游区	X ₁	2170	436	50	635	783	4074
祁连县	X ₁₋₁	959	175	26	400	0	1560
肃南县	X ₁₋₂	1211	261	24	235	783	2514
中游区	X ₂	233065	7953	916	2579	15247	259760
山前灌区	X ₂₋₁	42026	2587	191	979	1370	47153
黑河干流	X ₂₋₂	191039	5366	725	1600	13377	212060
下游区	X ₃	15932	2881	555	227	40712	60307
鼎新灌区	X ₃₋₁	8931	423	37	108	6551	16050
东风场区	X ₃₋₂	4695	2230	471	0	4661	12057
额济纳旗	X ₃₋₃	2306	228	47	119	29500	32200
合计		251167	11270	1521	3441	56742	324141

备注：林牧渔业用水包括在生态用水中

表 2-6 1999 年黑河流域各部门耗水量表

单位：万 m^3

分区	分区编号	农田灌溉	工业用水	城镇生活	农村生活	生态用水	合计
上游区	X_1	1731	210	23	635	625	3224
祁连县	X_{1-1}	765	84	12	400	0	1261
肃南县	X_{1-2}	966	126	11	235	625	1963
中游区	X_2	126826	3817	421	2579	7635	141278
山前灌区	X_{2-1}	39596	1241	88	979	1291	43195
黑河干流	X_{2-2}	87230	2576	333	1600	6344	98083
下游区	X_3	8550	1001	512	227	35372	45662
鼎新灌区	X_{3-1}	5146	212	18	108	3775	9259
东风场区	X_{3-2}	2113	712	471	0	2097	5393
额济纳旗	X_{3-3}	1292	114	23	119	29500	31048
合计		137108	5065	956	3441	43632	190202

备注：林牧渔业耗水包括在生态用水中

2.4 水资源开发利用中存在的问题

2.4.1 水资源供需失衡，经济用水挤占生态用水

解放以来黑河中游地区大规模垦荒种粮，灌溉面积由解放初期的 160 万亩 ~ 180 万亩增长到目前的 334 万亩，发展成每年出售 20 万 t ~ 30 万 t 粮食的商品粮基地。农业和国民经济其他部门用水的增长，挤占了中下游地区尤其是下游地区的生态用水，进入下游的水量由解放初期的 11.6 亿 m^3 减少到 90 年代的 7.7 亿 m^3 ，黑河下游狼心山断面的断流时间由 50 年代约 100d 延长至目前的 200d 左右，河道尾间干涸长度也在逐年增加。同时由于下游鼎新灌区灌溉用水量的增加、国防科研基地用水等因素的影响，实际进入额济纳旗的水量仅有 3 亿 m^3 ~ 5 亿 m^3 ，流域水资源利用失衡，生态用水被经济用水不断挤占。

由于入境水量不断减少，同时受其他因素的影响，下游阿拉善地区的额济纳旗绿洲湖泊干涸，地下水位下降，生态系统严重恶化；森林、草地生态系统退化严重；土地沙漠化和沙尘暴危害加剧，生态环境日趋恶化。

黑河尾间西居延海、东居延海水面面积 1958 年分别为 267 km^2 和

35.5km²，已先后于 1961 年和 1992 年干涸。60 年代以来，有 12 个大小湖泊、16 处泉眼、4 片沼泽地先后消失，370 多万亩的水域或湿地变为盐碱地或沙滩。沿河两岸及下游三角洲地区地下水位出现不同程度下降，水质矿化程度普遍提高到 2g/L ~ 3g/L。

下游三角洲地区的胡杨、沙枣和柽柳面积，1958 年 ~ 1982 年减少了 86 万亩，年均减少约 3.5 万亩，进入 80 年代以来，消减速度不断加快，1980 年 ~ 1994 年，胡杨、沙枣、柽柳面积减少了 288 万亩，年均减少约 21 万亩，其中胡杨林由 50 年代的 75 万亩锐减到 34 万亩。湖盆区的梭梭林也呈现残株斑点状的沙漠化景象。同时现存林木中成、幼林比例失调，病腐残林多，生存力极差。下游三角洲地区植被覆盖率大于 70% 的林灌草甸地，80 年代以来减少了约 78%，覆盖率介于 30% ~ 70% 的湖盆、低地盐生、沼泽草甸地以及产量较高的 4、5 级草地减少了约 40%；相反覆盖率小于 30% 的戈壁、沙漠面积却增加了 68%。草本植物种类大幅度减少，植物群落退化。

根据 TM 影象资料分析，从 20 世纪 60 年代到 80 年代，下游额济纳旗的戈壁、沙漠面积约增加了 462km²，平均每年增加 23.1km²；而 1987 年 ~ 1991 年，戈壁、沙漠化面积年均增加约 163km²。大片土地的沙漠化，使阿拉善地区沙尘暴肆虐，1993 年以来，连年发生沙尘暴。特别是 2000 年春季，发生 16 次强沙尘暴，并多次袭击西北、华北，甚至影响到华东地区，发生沙尘暴的频率已由历史上的数年一次，发展到年年发生，甚至一年发生数次。

2.4.2 水利工程建设布局不合理，水资源有效利用效率低

黑河流域缺乏控制性骨干调节工程，中游地区引水口门、平原水库过多，灌区配套程度不高，地下水开发利用程度低，流域水资源有效利用率低。

黑河径流年内分配与农时不适，5 月 ~ 6 月份灌溉高峰期的来水量仅

占年径流量的 20%，而同期灌溉需水量约占全年的 35%。由于缺乏控制性调节工程，来、用水过程极不协调，每年 5 月～6 月“卡脖子”旱严重，也不能向额济纳旗集中、连续输水。

为拦截河道泉水、抢洪灌溉和缓解“卡脖子”旱，中游地区形成了众多的引水口门和平原水库，目前黑河干流有各类引水口门 66 个，同岸口门相距最近的只有 400mm～500mm，年引水量最小的仅 50 万 m^3 ，由于密集的渠系布局加大了渠系输水的蒸发渗漏损失。目前黑河中下游有平原水库 40 座，总有效库容 7898 万 m^3 ，平均蓄水深度多在约 1m～2m，水库蒸发、渗漏损失量占总蓄水量的 30%～40%。

流域内灌区配套情况于水资源短缺程度不相适应。据 1999 年张掖市水利统计资料，黑河中游干流区及下游鼎新灌区干、支、斗渠完好衬砌率仅为 34%、35%、13%，灌区田间配套率仅为 50%左右，畦块面积多数在 0.5 亩～1.5 亩之间。据调查分析，甘肃省中下游地区现状渠系利用系数为 0.48～0.60，尚有 1/3 的灌区仅达到 0.44。

黑河中游地区两水转换频繁，部分地区地下水位埋深仅 2m～4m，开采用条件较好，但由于机电井的成井规模小、配套程度低，地下水开采不充分，潜水蒸发损失量每年高达 3 亿 m^3 左右，额济纳旗沿河地带及古日乃湖区地下水位埋深多在 3m 以内，可以发展局部井灌草库仑，但全旗的地下水利用甚少。

2.4.3 水事矛盾尖锐

黑河地处欧亚大陆腹地，降雨极少，蒸发强烈，水资源匮乏，水事纠纷由来已久，早在明末清初中下游用水矛盾已很突出。为消弭中游和下游上段之间的水事纠纷，清雍正四年（1726）年，驻甘巡抚年羹尧订立“均水制”，并籍强大的军事力量实施。

与解放初期相比，中游甘肃张掖市的总人口和灌溉面积分别较解放初期增加了 1.2 倍和 2.2 倍，下游内蒙古自治区额济纳旗的人口和牲畜

分别增加了 5.8 倍和 4.5 倍。目前人均、亩均水资源量分别为 2100m^3 和 690m^3 ，均低于全国水平。生活用水、生产用水、环境用水总量已超出当前工程条件下黑河水资源承载能力，中下游之间用水矛盾日趋尖锐。

甘肃省内部的用水矛盾也十分突出，每年 5 月～6 月份“卡脖子”旱期间，中游地区县与县、乡与乡、村与村之间相互争水、抢水、破坏水利工程的违法案件经常发生。仅 1996 年～1999 年的 7 年间，中游的甘州、临泽、高台三县（区）就发生水事纠纷 152 起，各类水事案件 123 起，其中 33 起是因抢水导致的破坏水利工程和伤人的恶性案件；1996 年～1999 年的四年间，发生了围堵政府事件 19 起，其中围堵县（区）政府 13 起，围堵政府 6 起；1999 年 5 月，有 1000 多人围堵了市政府办公区。

2.4.4 用水管理不够完善

目前黑河中下游地区用水计量、水费征收、取水计划及监督管理工作均不够完善，中、下游之间，中游地区的各县之间管理力度不一。在时间上，非灌溉季节的管理也较灌水高峰期松弛，大量无效用水发生在这一时段，造成水资源的浪费。

3 水资源优化配置的指导思想与目标

3.1 可持续发展概念

现代可持续发展的基本思想是基于人类对资源和生态环境的关注，以及对以往人地关系过程的反思而逐渐发展起来的。20 世纪 60、70 年代以来，随着“公害”的显现、资源和生态问题的蔓延，在全世界范围内开始了关于“增长的极限”的讨论。自此也就开始了现代人对于可持续发展问题的探索。

可持续发展涉及“发展”和“可持续性”两个概念。发展是核心、是根本，“发展是硬道理”；可持续是大原则，是发展在时空上的约束。对于发展和可持续性的研究国内、外已经做了大量的工作，但是第一次就可持续发展做明确系统阐述还是在 1987 年联合国环境与发展委员会（WECD）提交给联大的报告《我们共同的未来》（Our Common Future）中做出的。

现代的环境问题一旦出现，在对人类有意义的时间尺度上很难彻底消除。所以说，特定自然与社会系统的发展在带来正效应的同时，也不同程度带来了内部和外部的负效应。这些负效应不仅影响局部生态系统的生命支持能力，而且它们共同作用威胁着当代和后代人共同的地球生命支持系统。可持续性正是针对发展的负效应给人类福利需求带来的影响，从时间和空间尺度上做了限定。WECD 给出的可持续发展定义是：“既满足当代人的需要，又不对后代人满足其需求能力构成危害的发展。”该定义只是强调了可持续性对发展在时间尺度上的限定。Forman 从景观生态学（Landscape Ecology）的角度阐述了空间尺度对可持续发展概念的重要性。牛文元对 WECD 给出的可持续发展定义从空间尺度上做了补充，加上了“特定区域的需要不削弱其他区域满足其需求的能力”。因此，可持续发展的定义应该是：特定区域的需要不危害和削弱其他区域满足其需

求的能力，同时当代人的需要不对后代人满足其需求能力构成危害的发展。纵观对可持续发展的各种描述，其深刻内涵可归纳为如下几点：(1)“发展”是大前提。发展是人类永恒的主题，为了实现全球范围的可持续发展，应把发展经济、消除贫困作为首要条件。(2)“协调性”是核心。可持续发展概念是由于人与环境、资源间的矛盾引出的，因此，可持续发展的基本目标是人口、经济、社会、环境、资源的协调发展。(3)“公平性”是关键。可持续发展的关键问题是资源分配和福利分享，它追求在时间和空间上的公平分配，也就是代际公平和代内不同人群、不同区域和国家之间的公平。(4)“科学技术进步”是必要保证。科学技术是对人类历史起推动作用的主导力量，是第一生产力，它不断创造、发明和创新，提供新信息，再通过综合集成，形成人类财富的根本源泉之一“信息”的有效增值，同时，科学技术的不断进步可以有效地为可持续发展的综合决策提供依据和手段，促进可持续发展管理水平的提高，加深人类对自然规律的理解，开拓新的可利用的自然资源领域，提高资源综合利用效率和经济效益，提供保护自然和生态环境的有效手段。

综上所述，可持续发展实质上是人类对自身行为正、负两方面效应深刻反思后的理论总结。可持续发展是一种全局优化思想，其目的是寻求在可持续性的限度内实现资源在时、空维度上配置的最优化。

3.2 可持续发展原理与原则

可持续发展是一个内容十分丰富的发展概念，它包含一系列重要原理和原则，这些原理和原则实际上是实现可持续发展的具体要求。

3.2.1 可持续发展原理

(1)整体有序原理。整体有序原理认为，系统演变的目标在于功能的完善，而不仅仅是组分的增长，一切组分的增长都必须服从和服务于整体功能的需要，任何对整体功能无益的结构增长都是系统不允许的。

(2)循环再生原理。区域系统内部应该形成环网结构和生态工艺流程，

使每一组分既是下一组分的“源”，又是上一组分的“汇”。可持续发展要求在系统之内建立和完善这种循环再生机制，使物质在其中循环往复和充分利用，这样不仅可以提高资源的利用效率，而且还可以避免生态环境的破坏，使资源利用效率和环境效益同时实现。

(3)反馈平衡原理。区域系统的发展过程都受到某种(或某些)限制因子或负反馈机制的制约作用，也得到某种(或某些)利导因子或正反馈机制的促进作用。反馈平衡原理要求，在系统调控中，要特别注意限制因子和利导因子的动态，充分发挥和利用利导因子的积极作用，设法克服和削弱限制因子的消极作用，同时要注意反馈环的位置、时间和强度。

(4)自我调节原理。区域系统中，人们具有较强的自我调节和适应环境的能力，即人们能够根据环境的状况，抓住最适机会尽快发展并力求避免危险以获得最大保护的策略。

(5)层次阶跃原理。人们可以通过调整区域系统内部结构或科学技术等手段，摆脱旧的限制因子的约束，改善环境条件，提高资源利用率，扩大环境容量，使区域系统由前一个层次上升到一个新的更高的层次。

3.2.2 可持续发展原则

(1)公平性原则。所谓的公平性是指机会选择的平等性。这里的公平具有两层含义：一层是指世代之间的纵向公平性，另一层是指同代人之间的横向公平性。

(2)可持续性原则。可持续性是指系统受到某种干扰时能保持其生产率的能力。可持续发展要求人们根据可持续性的条件调整自己的生活方式，在可持续性的范围内确定自己的消耗标准，把资源视为财富，而不是把资源视为获得财富的手段。

(3)需求性原则。可持续发展坚持公平性和长期的可持续性，立足于人的需求而发展人，强调人的需求而不是市场商品，目的是向所有的人提供实现美好生活愿望的机会。

(4)高效性原则。不同于传统经济学，这里的高效性不仅是根据其经济

生产率来衡量,更重要的是根据人们的基本需求得到满足的程度来衡量,是人类整体发展的综合和整体的高效。

3.3 黑河流域水资源优化配置的指导思想和主要目标

3.3.1 黑河流域水资源优化配置的指导思想

国务院在对《黑河流域近期治理规划》的批复中明确要求,“为遏止黑河流域生态环境恶化的趋势,要以生态建设与环境为根本,以水资源的科学管理、合理配置、高效利用和有效保护为核心,上中下游统筹规划,工程措施和非工程措施相结合,生态效益与经济效益兼顾,协调生活、生产和生态用水,充分运用法律、行政、经济、科技、宣传、教育手段,进行综合治理的指导思想”。这一思想充分体现了可持续发展理念。对黑河流域水资源优化配置的研究应遵循国家关于西部大开发的战略思想,依据国家的有关方针政策,从国家和全局利益的高度着眼,以水资源的可持续利用促进当地经济社会可持续发展为目标,系统全面考虑流域较长时期的发展需求,调整产业结构和用水结构,进一步协调生活、生产和生态用水。以巩固近期治理已实现的国务院批复的黑河干流分水方案为重点,把水资源的合理配置、高效利用和有效保护摆在突出的位置,充分运用法律、行政、经济、科技、宣传、教育手段,进行综合治理;切实加强水资源统一管理,建立权威、高效、协调的流域管理体系;进一步开展节水改造,注重发挥水权、水市场和水价调整在水资源配置中的基础性作用,提高水的利用效率,建立中国北方地区节水型社会示范区;合理布局干流骨干工程,建立和完善黑河水量调度的工程体系;充分依靠生态的自我修复能力,辅之一定的人工措施,加快流域植被的恢复和生态环境系统的改善。逐步形成符合黑河流域特点的、完善的水资源统一管理和生态环境保护体系,实现流域人口、资源、环境与经济社会的协调发展。

3.3.2 黑河流域水资源优化配置目标

黑河流域生态系统恶化的问题是自然环境的变迁和不合理的人类活动长期积累的过程，要充分认识生态建设的紧迫性，采取综合措施、分布实施、逐步推进。当前，迫切需要解决的是黑河流域水资源优化配置问题，按前述的可持续发展指导思想，优化配置的具体目标如下：

(1) 2003 前水资源优化配置目标：

2003 年以前，建立和完善水资源统一管理和生态建设与环境保护体系，大力开展节约用水，调整经济结构和农业种植结构，合理安排生态用水，实现国务院批复的黑河干流分水方案，即当莺落峡多年平均来水 15.8 亿 m^3 时 正义峡下泄量 9.5 亿 m^3 ，全流域生态用水量达到 7.3 亿 m^3 ，使生态系统不再恶化，为 2003 年以后黑河流域的进一步治理奠定基础。上、中、下游具体实施目标为：上游的重点是加强水源涵养林保护和草地综合治理，遏制其生态环境恶化的趋势，实现涵养黑河水源的目标；中游加大灌区节水改造的力度，以引水口门的合并和渠系调整、渠系衬砌与建筑物改造、田间节水配套工程建设、废止部分平原水库和限制平原水库汛期蓄水、地下水开发利用、高新节水建设、退耕还林还草等措施为重点，达到节约水量 2.55 亿 m^3 的目的，以在 2003 年实现国务院审批的黑河干流分水方案为目标；下游额济纳旗居延三角洲地区的生态环境建设采取发展草料基地、丰育天然植被、发展人工绿洲灌溉等措施，合理高效利用水资源，以遏制下游生态环境恶化趋势为目标。

(2) 2004 ~ 2010 年水资源优化配置目标

2004 年 ~ 2010 年的规划目标要求与上游祁连山自然保护区、中游国家高效节水示范区、下游国家胡杨林自然保护区，以及国防科研试验基地的建设与发展保持协调一致。进一步加大中游灌区节水改造力度和调整经济结构，建设山区水库以替代平原水库，建设正义峡水库和内蒙古输水干渠，强化管理，科学配置水资源，在保证正义峡下泄水量不

变的情况下，使全流域生态用水量达到 9.9 亿 m^3 逐步增加进入居延三角洲地区的水量，同时加强上游天然林保护和中游防风固沙建设，使黑河下游生态系统恢复到 20 世纪 80 年代水平，初步建立和完善黑河水量调度的工程体系和非工程体系，形成符合流域特点的水资源统一管理和生态环境保护体系。

(3) 2010 年以后水资源优化配置目标

2010 年以后进一步采综合措施，通过跨流域调水，科学配置水资源，进一步完善黑河水量调度的工程体系和非工程体系，形成符合流域特点的完善的水资源统一管理和生态环境保护体系，使生态得到合理恢复，实现流域人口、资源、环境与经济社会的协调发展，流域从更高层面上步入良性循环，为区域社会经济的可持续发展提供更全面、更有力的支撑。

水资源优化配置总目标：以流域生态建设为根本，以水资源的可持续利用支撑社会、经济和生态环境的可持续发展。

4 黑河流域水资源需求分析及预测

4.1 社会经济发展指标预测

4.1.1 人口及城镇化水平

1999 年黑河流域总人口为 13983 万人，其中城镇人口 29.08 万人，城市化率为 208%。根据国家宏观人口控制计划和全国人口增长的总体趋势，结合黑河流域的实际，预测 2010 年水平黑河流域人口将达到 154.86 万人，其中城镇人口 55.44 万人，城市化率将达到 35.8%。

4.1.2 GDP 与工业产值预测

国内生产总值是反映一个国家或地区经济发展水平的重要指标。1999 年黑河流域的国内生产总值为 63.12 亿元（现价，不含东风场区，下同），人均 4514 元，比全国人均 6534 元低 2020 元，考虑流域内各省（自治区）的国民经济发展前景，规划 1999 年～2010 年年平均增长率为 7.5%，据此预测 2010 年水平流域国内生产总值为 139.4 亿元，人均 99970 元。

黑河流域未来国民经济的快速增长为工业发展提供了较好的发展空间，但同时又受到其他多种因素的制约。1999 年黑河流域工业总产值为 48.24 亿元，其中中游张掖市为 43.3 亿元，占全流域的 89.8%。张掖市作为传统的农业经济发达地区，以农产品为原料的轻工业优势相对明显。今后经济发展要不断调整产业结构，严格限制高耗水工业及污染严重工业的发展。根据地方统计年鉴分析，甘肃省 1978～1999 年工业总产值增长率为 9.51%，其中 90 年代为 13.1%。张掖市 1978 年～1999 年工业总产值增长率为 17.9%，90 年代为 29.6%。参考流域的地区经济发展规划，预测黑河流域 2010 年工业总产值达到 172.67 亿元。

4.1.3 牲畜发展预测

黑河流域现有大小牲畜 301.74 万头(只)。针对黑河流域水资源严重紧缺,下游生态环境不断恶化的状况,上游源流区和下游额济纳旗今后各水平年大小牲畜基本维持现状,不再安排发展;中游地区随着退耕还林还草实施后林草面积的增加,同时考虑调整产业结构和解决粮食转化问题,牲畜可以适度发展。牲畜数量的年增长率按照 0.5%考虑;东风场区考虑到场区特殊的植被条件,为保护场区生态环境、减少牲畜对天然林草的破坏,必须在场区实行禁牧、移民,规划考虑保留 1.0 万头(只),部分解决部队官兵的生活需求,保留牲畜实行舍饲、圈养。据此预测 2010 年水平流域大小牲畜总数将达到 310.35 万头(只)。

4.1.4 农业灌溉发展规模预测

黑河流域现有有效灌溉面积 366.40 万亩(不含下游额济纳旗天然林草灌溉面积 31 万亩),其中农田有效灌溉面积 309 万亩,人工林草有效灌溉面积 57.41 万亩。流域内农田灌溉面积主要集中在中游的甘肃省境内,农田灌溉面积为 302.50 万亩,林草灌溉面积主要分布在中下游地区。鉴于当前黑河流域生态用水被挤占较多,从尽快落实黑河干流水量分配方案、抢救下游濒危的生态系统及加强中游生态建设的迫切性出发,2010 年水平农业灌溉规模和人工林草灌溉规模在维持现状 366.40 万亩的基础上,根据生态建设和用水结构调整的需要,部分农田要实施退耕还林还草,同时适度发展高新节水灌溉。考虑到 2003 年正义峡已实现国务院的分水目标,2004 年~2010 年中游干流区不再安排退耕还林还草面积,考虑到中游山丹县、民乐县及甘州区等沿山灌区水资源短缺,供需矛盾突出,规划 2004 年~2010 年退耕还林还草 22 万亩;规划 2004 年~2010 年下游额济纳旗新增饲草料地面积 9 万亩。2010 年水平流域人工林草灌溉面积将达到 128.70 万亩。黑河流域现状低压管灌、喷微灌等高新技术

节水面积为 10.55 万亩, 2001 年 ~ 2003 年安排高新节水面积 51.65 万亩, 达到 62.20 万亩; 2004 年 ~ 2010 年, 继续适度发展高新节水灌溉, 新增高新节水灌溉面积 17.88 万亩, 到 2010 年, 流域高新节水灌溉面积达到 80.08 万亩。黑河流域农田、林草及高新节水灌溉面积见表 4-1。

表 4-1 黑河流域灌溉面积发展主要指标表

水平年	分区	分区编号	农田有效灌溉面积 (万亩)		人工林草灌溉面积 (万亩)
			达到	其中高新节水	
1999 年	上游区	X ₁	6.06	1.02	2.71
	中游区	X ₂	289.38	9.50	44.95
	山前灌区	X ₂₁	99.82	2.93	5.85
	黑河干流	X ₂₂	189.56	6.57	39.10
	干流灌区	X ₂₂₁	177.19	6.42	36.69
	沿山灌区	X ₂₂₂	12.37	0.15	2.41
	下游区	X ₃	13.56	0.03	9.75
	鼎新灌区	X ₃₁	9.00	0.03	5.00
	东风场区	X ₃₂	2.46	0	2.85
	额济纳旗	X ₃₃	2.10	0	1.90
	合计		309.0	10.55	57.41
2003 年	上游区	X ₁	6.06	1.52	2.71
	中游区	X ₂	259.38	57.68	74.95
	山前灌区	X ₂₁	99.82	2.93	5.85
	黑河干流	X ₂₂	159.56	54.75	69.10
	干流灌区	X ₂₂₁	147.19	54.60	66.69
	沿山灌区	X ₂₂₂	12.37	0.15	2.41
	下游区	X ₃	9.46	3.00	15.85
	鼎新灌区	X ₃₁	7.00	3.00	7.00
	东风场区	X ₃₂	2.46	0	2.85
	额济纳旗	X ₃₃	0	0	6.00
	合计		274.90	62.20	93.51
2010 年	上游区	X ₁	6.06	1.52	2.71
	中游区	X ₂	237.38	73.18	96.95
	山前灌区	X ₂₁	80.82	11.93	24.85
	黑河干流	X ₂₂	156.56	61.25	72.10
	干流灌区	X ₂₂₁	147.19	61.10	66.69
	沿山灌区	X ₂₂₂	9.37	0.15	5.41
	下游区	X ₃	8.10	5.38	29.04
	鼎新灌区	X ₃₁	7.00	4.70	7.00
	东风场区	X ₃₂	1.10	0.68	7.04
	额济纳旗	X ₃₃	0	0	15.00
	合计		251.54	80.08	128.70

注:表中 2010 年水平东风场区农田灌溉面积为菜田、果园及饲草料地灌溉面积

4.2 需水预测分类

根据《全国水资源利用总体规划技术细则》，结合黑河流域的实际情况，规划需水预测的用户分生活、生产和生态环境三大类。

生态环境需水分人工生态环境需水和天然生态环境需水。天然生态环境是指基本不受人工作用的生态系统，包括天然水域、天然植被、过渡带植被和荒区；人工生态环境是指由人工直接或间接作用维持的生态系统，包括人类用于放牧、水土保持和防风固沙等人工生态，以及人工河湖、水库、池塘等。在本次需水预测中，将天然河道、人工河湖和水库及池塘等作为整个生态系统的一个单元——水域来考虑，不再分人工和天然，仅计算区域所有水域的总水面蒸发量；天然生态系统所消耗的水量主要由降雨和地下水补给，天然生态环境需水是指天然生态系统扣除降雨补给之外的耗水量，即地下水补给，包括天然绿洲植被和过渡带植被需水和无植被覆盖条件下的潜水蒸发；人工生态系统所消耗的水量，除降雨外，主要由灌溉补给，人工生态环境需水是指扣除降雨外的系统耗水，包括用于放牧、水土保持和防风固沙等人工生态所需的灌溉水量。本次需水预测用水户的分类统计口径及层次结构如图 4-1，需水预测计算分类见表 4-2。

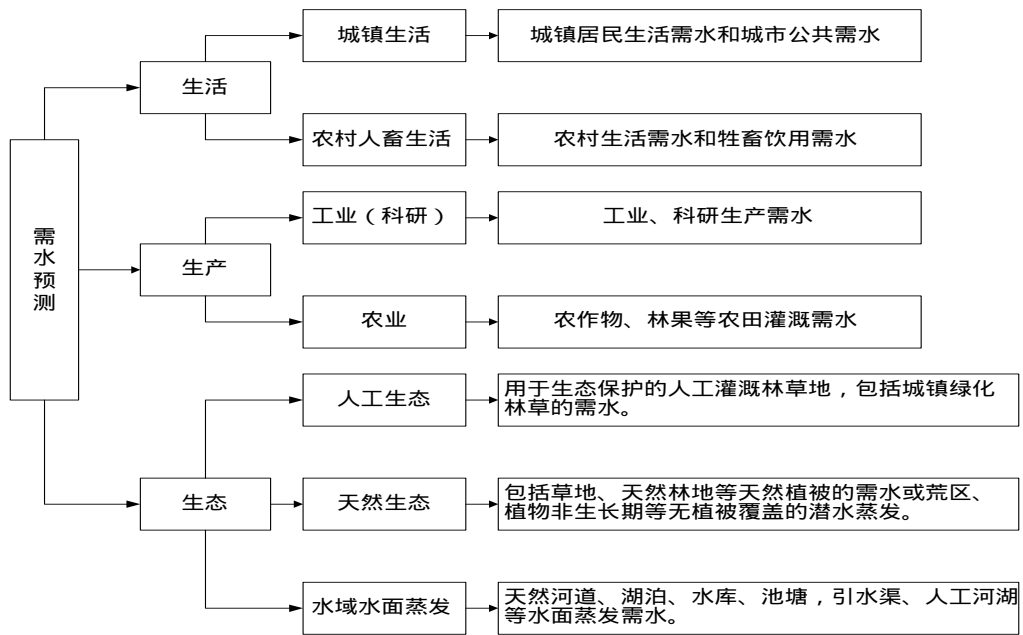


图 4-1 需水预测结构

表 4-2 需水预测分类表

分区	范围	需水类别	需水性质	需水分类
山 区	上游区	天然植被	天然生态需水	生态需水
		人工林草	人工生态需水	
		工业	经济需水	生产需水
		农业	经济需水	
		城镇及农村生活	生活需水	生活需水
平原绿洲区	中游及下游 鼎新灌区和东风场区	天然植被	天然生态需水	生态需水
		潜水蒸发	天然生态需水	
		河湖水面蒸发	天然生态需水	
		城市河湖绿地	人工生态需水	
		人工林草	人工生态需水	
		库区水面蒸发	人工生态需水	
		农业	经济需水	生产需水
		工业	经济需水	
		城镇生活	经济需水	生活需水
		农村生活	经济需水	
过渡带及 荒漠无流区	下游额济纳旗	天然植被	天然生态需水	生态需水
		工业	经济需水	生态需水
		城镇及农村生活	生活需水	生态需水

4.3 生活需水预测

生活需水一般按人均定额来预测，公式如下：

$$W_{sh,i} = P_i \times Q_{sh,i}, \quad i=1,2 \quad (4-1)$$

式中， i 为生活需水分类号， $i=1$ 表示城市生活， $i=2$ 表示农村人畜生活； $W_{sh,i}$ 为第 i 类生活需求； P_i 为第 i 类人口预测数； $Q_{sh,i}$ 为第 i 类人均生活需水定额。

4.3.1 城市生活需水

城市生活用水包括居民生活用水和公共设施用水。现状黑河流域城市生活用水量为 1521 万 m^3 ，平均用水定额约为 142L/人·天，其中公共设施用水量约占 25%~30%。预测 2010 年水平流域城市生活需水定额为 125142L/人·天 ~ 250142L/人·天；规划水平年东风场区用水定额 250142L/人·天，据此预测现状水平及 2010 年城市生活需水量分别为 0.152 亿 m^3 和 0.310 亿 m^3 。

4.3.2 农村生活需水

黑河流域现状农村生活用水定额约为 40L/人·天。预测 2010 年水平农村居民生活用水定额为 65 L/人·天；大小牲畜的需水定额为 15 L/头·天 ~ 35 L/头·天。据此预测现状水平和 2010 年水平农村人畜需水量分别为 0.368 亿 m^3 和 0.450 亿 m^3 。

4.4 生产需水预测

生产需水预测方法较多。本文对工业需水按定额法预测，即根据工业万元总产值所消耗水量的定额和工业总产值来预测，公式如下：

$$W_g = C_g \times K_g \quad (4-2)$$

式中： W_g 为工业需水量， C_g 为工业万元产值需水定额， K_g 为工业总产值。农业需水按定额法公式如下：

$$W_{Lj} = \eta_j \times K_{Lj} \times F_j \quad (4-3)$$

式中， j 为第 j 类作物， W_{Lj} 为第 j 类作物灌溉需水量； η_j 为灌溉水利用系数； F_j 为第 j 类作物灌溉面积。

4.4.1 工业需水

工业需水采用万元产值法预测。黑河流域现状工业万元产值用水量为 187m^3 。今后随着产业结构的调整和重复利用率提高，工业万元产值用水量会不断降低。预测 2010 年水平工业万元产值需水定额为 $105\text{m}^3 \sim 120\text{m}^3$ 。东风场区工业科研需水包括军事科研试验、电厂等生产用水，现状用水量为 396万m^3 ，依据场区现状情况预计今后不会有大的变化，规划水平年直接采用现状用水量直接采用现状用水量。据此预测现状水平和 2010 年水平工业需水量分别为 0.4亿m^3 和 1.52亿m^3 。

4.4.2 农业灌溉需水

(1) 灌溉设计保证率。根据《灌溉与排水工程设计规范》(GB50288—99) 规定，以旱作物为主的缺水地区，灌溉设计保证率取 $50\% \sim 75\%$ 。黑河中游灌区属干旱缺水地区。灌区设计保证率取 25% 。

(2) 灌溉水利用系数。据调查，黑河中游地区及下游鼎新灌区现状灌溉水利用系数为 $0.5 \sim 0.3$ 。2001 年～2003 年，黑河中游干流灌区完成干渠衬砌 $649.\text{km}$ 、支渠 789.7m 、斗渠 905.4m ，田间配套完成 141.5 亩。通过近期三年节水改造，灌溉水利用系数将提高 $5\% \sim 8\%$ ，达到 0.5 左右；2004 年～2010 年，对灌区进一步进行节水改造，到 2010 年，灌区灌溉水利用系数将达到 0.52 左右，管灌、喷微灌灌溉水利用系数分别为 0.80 、 0.85 。

(3) 灌溉定额。黑河中下游地区气候干旱，多年平均降水量仅 $55\text{mm} \sim 150\text{mm}$ ，蒸发量高达 1000mm 以上，农作物的生长完全靠灌溉来维持，可

以说没有灌溉就没有农业。采用“彭曼公式”、查《甘肃省冬春小麦需水量及作物潜在腾发量等值线图的研究》等方法，同时参照国家“九五”攻关项目《西北地区水资源合理分配和承载能力研究》有关不同植被需水量值（ET）研究成果，通过对小麦、玉米、秋杂、经济、人工生态等生育期需水量分析，并考虑作物生育期有效降水后，设计现状水平和 2010 年水平农作物及人工生态的灌溉定额（见表 4-3）。

(4)作物种植比例。根据对黑河中游各灌区现状的作物种植结构，今后应适当压缩水田和高耗水作物的种植比例，降低作物综合净灌溉定额。

(5)灌溉需水量。根据设计的灌溉定额、灌溉水利用系数及灌溉面积，按（4-3）式计算得各灌区现状水平和 2010 年水平黑河流域农田灌溉需水量分别为 27.10 亿 m^3 和 14.30 亿 m^3 。

表 4-3 黑河流域不同水平年作物灌溉制度表

分区	作物名称	现状水平 种植比例 (%)	2010 年水 平种植比 例 (%)	灌水时间 (日/月)		灌水 次数 (次)	作物净灌 溉定额 (m^2 /亩)
				生长期	泡田		
甘州	小麦	27	18	15/4~1/7	10/7~30/7	5	310~325
	玉米	14	8	15/5~20/9	1/10~11/10	6	370~385
	秋杂	9	4	20/5~1/9	10/9~30/9	4	250~340
	经济作物	26	55	10/4~25/8	1/10~10/11	5	305~325
	带田	21	15	6/5~25/9	1/10~10/11	8	490~510
	其它	2	0	15/5~15/9		14	470~700
	复种	12	8	1/8~25/9		3	180
	林草			10/3~20/10		4	210~240
临泽	小麦	18	15	21/4~1/7	1/10~10/11	5	335
	玉米	9	11	1/6~10/9	1/4~30/4	6	400
	秋杂	6	2	1/6~20/8	11/10~10/11	5	275
	经济作物	25	40	11/5~31/7	11/10~10/11	5	330
	带田	40	32	21/4~10/9	11/10~10/11	8	515
	其它	1	0	5/5~14/9		14	670
	复种	9	10	16/7~10/9		3	185
	林草			10/3~20/10		4	260~280

续表 4-3 黑河流域不同水平年作物灌溉制度表

分 区	作物名称	现状水平 种植比例 (%)	2010 年水 平种植比 例 (%)	灌水时间 (日/月)		灌水 次数 (次)	作物净灌 溉定额 (m^2 /亩)
				生长期	泡田		
高 台	小麦	21	14	11/4~30/6	21/7~31/8	5	310~335
	玉米	9	9	1/6~10/9	21/3~20/4	6	370~405
	秋杂	7	8	1/6~20/8	21/3~20/4	5	250~275
	经济作物	15	43	21/3~31/7	1/9~10/11	5	305~340
	带田	48	26	21/4~10/9	1/9~10/11	8	490~525
	其它	1	0	15/4~15/9		11	620
	复种	9	8	1/8~30/9		3	190
	林草			10/3~20/10		4	210~260
山 前 灌 区	小麦	58	47	1/5~31/7	1/9~31/10	4	310
	玉米	4	3	1/7~31/8	1/10~31/10	5	370
	秋杂	12	11	1/6~31/7	1/9~30/9	4	250
	经济作物	26	39	1/6~31/7	1/10~31/10	4	305
	林草			10/3~20/10		4	210
金 塔	小麦	12	10	25/4~11/7	20/10~10/11	6	370
	带田	18	14	25/4~17/9	20/10~10/11	8	560
	经济作物	63	63	10/6~16/8	20/10~10/11	5	340
	其它	6	0	10/5~30/8	20/10~10/11	8	560
	复种	23	7	21/7~8/10		3	190
	林草	100	100	1/3~19/10		3	300
东 风 场 区	小麦	85		25/4~11/7	20/10~10/11	18	1450
	玉米	15		10/5~17/9	20/10~10/11	18	1250
	饲草料		100	1/3~31/10		18	1280
	果树			1/3~31/10		20	800
	菜田			1/3~31/10		36	1480
	人工林草			1/3~31/10		20	880~1110

4.5 生态需水

生态需水分人工生态需水和天然生态需水两部分。

4.5.1 人工生态需水

人工生态是人类为防风、水土保持和放牧等种植的林草，其生长需水和农田一样，除天然降雨之外，主要靠灌溉补给。人工生态需水是指扣除降雨外的耗水系统，是用于放牧、水土保持和防风固沙等人工灌溉林草所需的灌溉需水量。因此，人工生态需水的计算方法同农田灌溉的计算方法。计算公式为：

$$W_{\text{人工生态}} = \frac{A_{\text{人工生态}} \times m_{\text{人工生态}}}{\eta_{\text{人工生态}}} \quad (4-4)$$

式中： $W_{\text{人工生态}}$ ——人工生态需水量（万 m^3 ）； $A_{\text{人工生态}}$ ——人工生态面积（万亩）； $m_{\text{人工生态}}$ ——人工生态灌溉定额（mm/亩）； $\eta_{\text{人工生态}}$ ——人工生态灌溉利用系数。

黑河流域现状人工生态灌溉面积为 57.41 万亩，其中黑河中游及下游鼎新灌区为 49.95 万亩。根据前述农业灌溉发展规模预测成果，2010 水平年黑河中游及下游鼎新灌区人工生态灌溉面积将达到 103.95 万亩；2010 年以前东风场区新增绿化草地 0.36 万亩，人工林 3.837 万亩，人工生态灌溉面积达到 7.04 万亩。

按（4-4）式计算，现状和 2010 年水平黑河流域人工生态的灌溉需水量分别为 4.10 亿 m^3 和 6.11 亿 m^3 。

4.5.2 天然生态需水预测

天然生态系统所耗水是指扣除降水补给后所消耗的地下水水量，主要由天然降水和地下水补给。由于黑河上游及中游山前灌区天然植被所耗的水量为不可控水量，不属天然生态系统需水量的计算范围，本文计算仅考虑黑河中游干流和下游区的天然生态系统的需水量，黑河中游干流区和下游区的天然生态系统主要由天然绿洲植被和过渡带植被生长耗水、天然水域水面蒸发以及潜水蒸发三部分。考虑到黑河中游干流和下游区天然生态的需水特性差异较大，基本资料积累也不尽相同，因此，可分为莺落峡至正义峡、正义峡至狼心山和狼心山以下三个河段，分别采用不同的计算方法进行天然生态需水量计算。各河段天然生态需水量的计算方法见表 4-4，计算成果见表 4-5。

表 4-4 天然生态需水量的计算表

水平年	分 区	分区 编号	人工生态需水 量(亿 m ³)	天然生态需水量 (亿 m ³)			
				小计	天然林草	潜水蒸发	水面蒸发
1999 年	上游区	X ₁	0.15	0.002	0	0	0
	中游区	X ₂	2.94	0.091	3.11	0.43	1.12
	山前灌区	X ₂₁	0.32	0.019	0.18	0.02	0.16
	黑河干流	X ₂₂	2.62	0.072	2.94	0.42	0.96
	干流灌区	X ₂₂₁	2.47	0.071	2.89	0.42	0.91
	沿山灌区	X ₂₂₂	0.15	0.001	0.05	0	0.05
	下游区	X ₃	1.01	0.059	6.24	0.42	1.16
	鼎新灌区	X ₃₁	0.36	0.004	1.54	0.27	0.89
	东风场区	X ₃₂	0.65	0.050	0.48	0.15	0.27
	额济纳旗	X ₃₃	0	0.005	4.22	0	0
合计			4.10	0.152	9.35	0.85	2.28
2010 年	上游区	X ₁	0.13	0.010	0	0	0
	中游区	X ₂	4.72	0.214	2.81	0.27	0.98
	山前灌区	X ₂₁	0.91	0.072	0.20	0.04	0.16
	黑河干流	X ₂₂	3.81	0.142	2.61	0.23	0.82
	干流灌区	X ₂₂₁	3.53	0.134	2.56	0.23	0.77
	沿山灌区	X ₂₂₂	0.28	0.008	0.05	0	0.05
	下游区	X ₃	1.26	0.086	9.43	0.42	1.57
	鼎新灌区	X ₃₁	0.48	0.013	1.45	0.27	0.80
	东风场区	X ₃₂	0.78	0.070	0.48	0.15	0.27
	额济纳旗	X ₃₃	0	0.003	7.50	0	0.50
合计			6.11	0.310	12.24	0.69	2.56

表 4-5 黑河流域生态需水量计算成果表

单位：亿 m³

河段	项目	计算方法	适用条件	计算 结果	采用值
莺落峡至正义峡	天然生态	耗水定额法	地下观测资料丰富，有足够多的观测井	1.56	1.56
	水面蒸发	水面蒸发量计算公式		0.98	0.98
	潜水蒸发	潜水蒸发量计算公式		0.27	0.27
大墩门至哨马营	天然生态	阿维里扬诺公式	地下水观测有限，观测井密度不够，植被资料详细	0.38	0.377
	水面蒸发	实测资料例比法		0.80	0.800
	潜水蒸发	潜水蒸发量计算公式		0.27	0.272
哨马营至狼心山	天然生态	阿维里扬诺公式	地下水观测资料丰富，植被资料详细	0.06	0.055
	水面蒸发	实测资料例比法		0.27	0.270
	潜水蒸发	潜水蒸发量计算公式		0.14	0.147
狼心山以下	天然生态	地下水变动需水量法	具有代表植被的地下水动态连续观测资料	7.94	
		实测水量法	具有连续的绿洲区来水总量观测资料	7.01	
		水分驱动模型法	植被资料调查详细，具有一定的植被蒸腾、潜水蒸发试验资料	7.64	
	水面蒸发	水面蒸发量计算公式	按照 1980 ~ 1992 年冬居延海常年水面面积 23.5km ² 计算	0.50	

4.6 需水总量及需水结构分析

4.6.1 需水总量

黑河流域现状及 2010 年三生水平需水总量分别为 42.01 亿 m^3 和 34.93 亿 m^3 ，见表 4 - 6。

表 4 - 6 流域不同水平年需水量

需水分类		1999 年		2010 年	
		需水量 (亿 m^3)	占总量%	需水量 (亿 m^3)	占总量%
生活		0.52	1.2	0.76	2.2
生产	农田	27.10	64.5	14.30	40.9
	工业	0.94	2.2	1.52	4.4
	小计	28.04	66.7	15.82	45.3
生态	人工生态	4.10	9.8	6.11	17.5
	天然生态	9.35	22.3	12.24	35.00
	小计	13.45	32.1	18.35	52.5
合计		42.01	100.00	34.93	100.00

4.6.2 结构分析

不同水平年需水预测结果表明 (图 4-2, 图 4-3), 黑河流域通过产业结构和农业种植结构调整及对灌区的节水改造, 总需水量由现状的 42.01 亿 m^3 减少到 2010 年水平的 34.93 亿 m^3 , 减小了 16.9%。分析需水量的结构组成, 生活需水量占总需水量的比例由现状水平的 1.2% 增加到 2010 年水平的 2.2%, 随着流域内人口的增加和人民生活水平的不断提高, 需水呈增长趋势是合理的; 由表 4-3 可知需水量占总需水量的比例由现状水平的 66.7% 减少到 2010 年水平的 45.3%, 其中农田灌溉需水量, 随着中游灌区的不断配套完善、高新节水面积的不断发展和农业种植结构的调整, 农田灌溉需水量由现状水平的 27.10 亿 m^3 减小到 2010 年水平的

14.30 亿 m^3 ,减少了 47.2% ,减少幅度较大 ;生态需水量由现状水平的 13.45 亿 m^3 增加到 2010 年水平的 18.35 亿 m^3 ,其中人工生态需水量增加了 2.01 亿 m^3 。

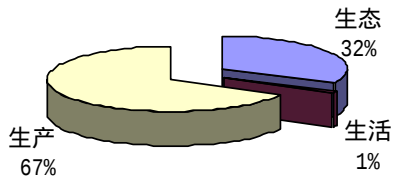


图 4 - 2 现状水平年需水结构图

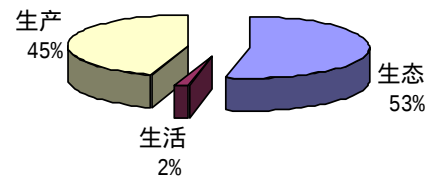


图 4 - 3 2010 年水平需水结构图

5 黑河流域水资源优化配置研究

5.1 水资源优化配置理论的关键问题

5.1.1 水资源优化配置的内涵

水资源优化配置泛指通过工程和非工程措施，改变了水资源的天然时空分布。本文研究的是利用非工程措施开源与节流并重，兼顾当前利益和长远利益；注重兴利与除弊的结合，协调好各地区及各用水部门之间的利益与矛盾，尽可能地提高区域整体的用水效率，以促进水资源的可持续开发利用和区域的可持续发展。利用系统科学方法、决策理论和先进的计算机技术，按前述目标统一调配水资源，实现水资源的优化配置。亦即运用系统工程理论方法，建立水资源的优化配置模型，以此制定水资源最优配置方案。

水资源优化配置的概念是在一定的社会经济条件及水资源问题出现的背景下提出的。随着人口增长社会经济发展，出现了有限水资源与不断增长的需水量之间的尖锐矛盾。水资源短缺已成为很多地区制约社会经济发展的主要因素。这就迫使人们寻找水资源的最佳分配，以实现有限水资源发挥最大效益的愿望。这正是开展水资源优化配置的前提条件和原动力。

5.1.2 黑河流域水资源优化配置问题

目前黑河流域一些地区，因大水漫灌导致地下水位不断上升，个别地区已产生土壤次生盐碱化，这样既破坏了当地的生态环境，又使下游地区因缺水而促使生态环境进一步恶化。

黑河全流域荒漠区面积从 70 年代的 49398km^2 发展到 90 年代的 62070km^2 ，其中，下游额济纳地区荒漠化面积增加了 8126km^2 。干旱区荒漠

化的主要表现为风沙、干旱和盐碱，荒漠化面积不断增加的主要成因是人类对水土资源的不合理的开发利用。上游的滥牧、滥樵和滥垦导致水土流失，中游地区的无序开荒导致用水增加和土地沙化，下游来水的减少和过牧导致大规模土地荒漠化和盐碱化。因此，节水技术的开展和有限水资源的合理配置成为黑河流域水资源规划的关键。黑河流域水资源优化配置的依据是“92”、“97”黑河干流水量分配方案、《黑河干流水量调度暂行办法》和《黑河干流省际用水水事协调约定》。

(1) “92”水量分配方案

所谓“92”黑河干流水量分配方案，是指1992年12月，国家计委以计国地【1992】2533号文“关于黑河干流（含梨园河）水利规划报告”的批复”，即，“在近期内，当莺落峡多年平均河川径流量为15.8亿 m^3 时，正义峡下泄水量9.5亿 m^3 ”其中分配给鼎新片毛水量0.9亿 m^3 ，东风水库0.6亿 m^3 。远期要采取多种节水措施，力争正义峡下泄10亿 m^3 。”

(2) “97”水量分配方案

所谓“97”黑河干流水量分配方案，是指1997年12月，经国务院审批，水利部转发的“关于实施《黑河干流水量分配方案》有关问题的函”（水政资【1997】496号），即：“在莺落峡多年平均来水15.8亿 m^3 时，分配正义峡下泄水量9.5亿 m^3 ；莺落峡25%保证率来水17.1亿 m^3 时，分配正义峡下泄水量10.9亿 m^3 。对于枯水年，其水量分配兼顾两省（自治区）的用水要求，也考虑甘肃省的节水力度，提出莺落峡75%保证率来水12.9亿 m^3 时，正义峡下泄水量6.3亿 m^3 。其他保证率来水时，分配正义峡下泄水量按以上保证率水量直线内插求得。”同时指出：“重大问题决策以后，由地方政府负责具体贯彻执行，并纳入行政首长负责制。”

国家虽然对黑河流域制定了“92”和“97”水量分配方案，但这两个方案均是对多年平均来水或特定频率来水制定的；同时，分水方案仅对黑河干流主要控制断面有效，如何保证这些断面的水量并没解决。因此，研究黑河流域水资源优化配置研究问题 是实现流域内各区水资源合

理分配，实施国家分水方案的科学支撑。

5.1.3 水资源优化配置的目标与原则

面向可持续发展的水资源优化配置的最终目标就是“保证区域可持续发展。”“可持续发展”是水资源优化配置非常基本的导则。若从量化的角度分析，目前有关专家提出三个量化准则，即“可承载”、“有效益”、“可持续”。

在进行水资源优化配置时，应遵循以下六条原则：

(1)可承载原则。可持续发展首先要求不允许破坏地球上生命支撑系统（如空气、水、土壤等），即处在可承载的最大限度之内。

(2)综合效益最大原则。可持续发展以保护自然环境为基础，以改善和提高生活质量为目标，与资源、环境的承载能力相协调，追求经济效益、社会效益、环境效益的综合效益最大。

(3)可持续性原则。通过水资源配置，以维持自然生态系统的更新能力和持续利用，实现水资源可持续利用。不仅考虑到当代人，而且顾及到后代人，体现可持续原则。

(4)水资源利用和水患防治相结合原则。在配置水资源的同时，也要注意现在和将来出现的水患治理相结合。

(5)水资源利用与水资源保护相结合原则。在水资源优化配置过程中，不但要考虑到水资源的保护问题，还应尽可能将废污水的排放减小到最低限度，以保持在水资源承载能力允许范围内。

(6)开源与节流并重原则。在建立水资源优化配置模型时，要兼顾考虑“开源”途径和“节流”途径。人们对“开源”比较重视，常常靠兴修水利工程措施和设施，开发新水源，来增加水源的供水能力。但是，在水资源相对贫乏、水资源利用率已很高的地区，增大水源供水能力已没有多大潜力，特别是在供水能力已经超过水资源可承载能力的地区，“开源”已经不可能。这就需靠节水技术方法，实施节水措施，提高

人们节水意识，建立节水型社会。

5.2 水资源配置方案的生成

黑河中游为传统的灌溉农业区，其配置的重点是系统全面地考虑较长时期的发展需要，调整产业结构和用水结构、进一步协调生活、生产和生态环境用水，其用水性以农业灌溉为主；下游地区以合理输水方式为重点，合理配置水资源、提高水资源的利用效率，遏制和恢复下游地区生态环境系统退化的趋势，其用水性质以生态用水为主。由于中下游河段的用水性质差异较大，研究的重点各有侧重，水资源配置区别不同河段进行研究。

结合黑河流域水需求与黑河上游山区骨干工程建设可能性，考虑上游山区水库的不同开发任务、分水方案的约束条件，共生成 5 个水资源配置方案，进行水资源优化配置研究。

方案 1 即无上游水库，正义峡下泄水量不受分水方案约束为方案集的下限；方案 5 考虑上游水库和正义峡同时存在，并受分水方案约束为方案集的上限，方案 1、方案 2、方案 3、方案 4、方案 5 共同组成了方案集的可行域。中游段可生成水资源配置分别为：

方案 1：无上游水库+不受分水方案约束；

方案 2：无上游水库+分水方案约束；

方案 3：上游水库+中游供水；

方案 4：上游水库+中游供水+分水方案约束；

方案 5：上游水库+正义峡水库+分水方案约束

5.3 水资源优化配置模型建立及求解

黑河流域水资源优化配置涉及的水源有地表水（包括降水）、地下水（包括泉水）；研究范围为全流域，划分为 14 个子区域；用户主要有生活用水、生产用水和生态用水；主要配水工程有上游水库，正义峡水库和各分水闸。优化配置的目的就是利用水

利工程，按照一定的配水目标和原则，把天然来水根据各分区用水户的特点和要求重新分配，使得流域水资源满足承载力的要求，使社会、经济可持续发展，同时修复或改善生态环境。

5.3.1 水资源优化配置的目标与目标函数

黑河流域水资源优化配置涉及目标众多，有经济目标，如产值、利润、国民生产总值和国内生产总值等；社会目标包括社会稳定、生活质量、就业率、文化教育等；环境目标包括水污染造成水环境质量损失最小，水环境效益最大等；生态目标包括维持现有生态系统平衡；修复或改善生态系统等。但上述目标需要资料、信息量大，同时多目标决策难度大，加之黑河水资源系统复杂，求解困难。因此，鉴于黑河流域的特点和主要矛盾，水资源短缺，供需矛盾大，生态环境脆弱，水资源系统复杂，本研究从实际出发，抓主要问题和矛盾，选取尽可能保证三生基本用水的前提下，使流域缺水量最小，同时尽可能使缺水在各区分布均匀，把缺水引起的损失减到最小。按本文提出的目标可建立如下黑河流域水资源优化配置的目标函数。

$$W_q = \text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J (W_y(t, m, j) - W_g(t, m, j)) / (T \cdot W_g(t, m, j)) \right\} \quad (5-1)$$

式中， t 为计算时段， $t=1, \dots, T$ ，以月为计算时段； j 为用水户编号； m 为按子区划分编号， $m=1, \dots, M$ ； W_q 为全流域多年平均缺少程度； $W_y(t, m, j)$ 为第 t 时段第 m 子区，第 j 用户的用水需求， $W_g(t, m, j)$ 为第 t 时段，第 m 子区，第 j 用户的供水量。

5.3.2 水资源优化配置的约束条件

(1) 供需平衡约束

$$W_g(t, m, j) = WB_g(t, m, j) + WD_g(m, j) \quad (5-2)$$

$$W(t, m, j) = WB(t, m, j) + WD(m, j) \quad (5-3)$$

式中： $WB_g(t, m, j)$ 为地表水供水量、 $WD_g(m, j)$ 为地下水供水量、 $W(t, m, j)$

为总水资源量、 $WB(t, m, j)$ 、 $WD(m, j)$ 为地表和地下水资源量。

(2) 地表水量平衡约束

$$WC(t, m, j) = WR(t, m, j) - WB_g(t, m, j) - \Delta W(t, m, j) \quad (5-4)$$

或

$$V(t+1) = V(t) + WR(t, n, j) - W_g(t, m, j) - \Delta W(t, m, j)$$

式中， $WC(t, m, j)$ 为区域出境水量； $WR(t, m, j)$ 为地表入境水量； $\Delta W(t, m, j)$ 为水量损失； $V(t+1)$ 为水库库容。

(3) 地下水量平衡约束

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{补}} - W_{\text{排}} &= \pm WD \\ W_{\text{补}} &= \beta WR \\ W_{\text{排}} &= W_{\text{蒸}} + W_{\text{泉}} + W_{\text{侧出}} + \sum_{j=1}^j WD_g(t, m, j) \\ \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J WD_g(t, m, j) &\leq WD_{\text{max}} \end{aligned} \right\} \quad (5-5)$$

式中 $W_{\text{补}}$ 为地下水补水量； $W_{\text{排}}$ 为地下水排泄量，包括蒸发量 $W_{\text{蒸}}$ 、泉水量 $W_{\text{泉}}$ 、地下水侧向流出量 $W_{\text{侧出}}$ ； WD_{max} 为地下水可开采量； β 为地表与地下水转换系数。

(4) 水库库容约束

$$V_{\min} \leq V(t) \leq V_{\max} \quad (5-6)$$

式中： $V_{\min}$ ， $V_{\max}$ 分别为水库允许最小、最大库容。

(5) 三生用水约束

$$W_{y\min}(m, j) \leq W_g(t, m, j) \leq W_{y\max}(m, j) \quad (5-7)$$

式中： j 为三生用水编号， $j=1$ 为生活， $j=2$ 为生产， $j=3$ 为人工生态； $W_{y\min}(m, j)$ 、 $W_{y\max}(m, j)$ 为三生用水下、上限值，其中上限为需水预测值，下限为

$$W_{y\min}(m, j) = \alpha_j W_{y\max}(m, j) \quad (5-8)$$

式中： α 为基本用水系数，其中 $\alpha_1=1$ ，表示生活用水必须保证， $\alpha_2=0.78$ 表示生产用水可以减少， $\alpha_3=0.8$ 表示生态用水应尽量保证。

5.3.3 水资源优化配置模型的遗传算法

本文建立的水资源优化配置模型中，由于目标函数是线性的，约束条件也是线形的，因此是一个变量个数巨大，约束条件复杂的线性规则模型（LPM）。该模型是非标准的 LPM，需要进行标准化后才能求解，而标准化工作量巨大。为此，本文选用遗传算法求解上述模型。

遗传算法（Genetic algorithms，简称 GA）是一种基于自然选择原理和自然遗传机制的全局自适应搜索算法，最早由美国 Holland 提出，起源于 20 世纪 60 年代，70 年代 De Jong 基于遗传算法的思想在计算机上进行了大量的纯数值函数优化计算实验；20 世纪 80 年代由 Goldberg 进行了归纳总结，形成了遗传算法的基本框架。遗传算法属于自适应概率搜索技术，其选择、交叉和变异等运算都以一种概率方式进行，因而增加了搜索的灵活性，具有广泛的应用价值。GA 在函数优化、组合优化、生产调度问题、自动控制、机器人学、图像处理、人工生命、遗传编程、机器学习等方面均具有重要的应用，取得广泛的应用成果。

5.3.3.1 遗传算法的求解步骤

遗传算法提供了一种求解复杂系统优化问题的通用框架，它不依赖于问题的领域和种类。对一个需要进行优化计算的实际应用问题，一般可按下述步骤来进行遗传算法求解：

(1) 确定决策变量及其各种约束条件，即确定出个体的表现型和问题的解空间。

(2) 建立优化模型，确定出目标函数的类型，是求目标函数的最大值还是求最小值，并确定目标函数的数学描述形式或量化方法。

(3) 确定表示可行的染色体编码方法，也即确定出个体的基因型及遗传算法的搜索空间。

(4) 确定解码方法，即确定出由个体基因型到个体表现型的对应关系或转换方法。

(5)确定个体适应度的量化评价方法，即确定出由目标函数值到个体适应度的转换规则。

(6)设计遗传算子，即确定出选择运算、交叉运算、变异运算等遗传算子的具体操作方法。

(7)确定遗传算法的有关运行参数，即确定出遗传算法的群体规模、最大迭代代数、选择算子、交叉算子、变异算子等参数。

5.3.3.2 水资源优化配置中的 GA 求解方法

a. 基因及染色体组成

在水资源优化配置中，基因变量可取分配给某个用户的水资源分配系数 $\delta(t, m, j)$ ，即

$$W_g(t, m, j) = \delta(t, m, j) \cdot W(t, m, j), \quad \delta(t, m, j) \in [0, 1] \quad (5-9)$$

式中， $W(t, m, j)$ 为水资源总量； $W_g(t, m, j)$ 为供水量。

染色体是由各个基因组成，由于计算时段为 T 个月，分配子区为 M 个，用户为 J 个，故每条染色体长度 $T \times M \times J$ 个。

b. 目标函数

在水资源优化配置中，根据(5-1)式选择 GA 的目标函数为：

$$f(x) = \text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J (W_y(t, m, j) - W_g(t, m, j)) \right\} \quad (5-10)$$

c. 适应度函数 $F(X)$

适应度函数表征个体的适应程度，适应度值为遗传算法中评估染色体的表现值，是繁衍下一代的重要指标。在进化过程中，适应度函数会影响整个进化过程，若适应度函数选择不当会引起解的早熟甚至无法收敛。本研究由于是求解目标函数 $F(X)$ 最小化问题，故适应度函数取为：

$$F(X) = \begin{cases} f(X) + C_{\min}, & \text{if } f(X) + C_{\min} \leq 0 \\ 0, & \text{if } f(X) + C_{\min} > 0 \end{cases} \quad (5-11)$$

式中， $C_{\min}$ 为一个适当地相对小的数。

d. 编码与解码规则

由于二进制编码具有编码、解码操作简单易行，交叉、变异等遗

传操作便于实现，符合最小字符集解码原则和便于利用模型定理算法进行理论分析等优点，故研究采用二进制编码方法。二进制编码使用的编码符号集是由二进制符号 0 和 1 所组成，其二进制符号串的长度与问题所要求的求解精度有关。假设某一参数的取值范围是 $[U_{\min}, U_{\max}]$ ，用长度为 l 的二进制编码符号串来表示该参数，则它总共能够产生 2^l 种不同的编码，其编码精度为：

$$\delta = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^l - 1} \quad (5-12)$$

如出力分配系数 $\delta_{i,l}$ ，其编码长度为 5，故编码精度为 $\delta = 1/(2^5 - 1) = 0.032$ ，根据不同的精度要求，可设置不同的基因编码长度。

假设某一个体的编码是 $b_l b_{l-1} \cdots b_2 b_1$ ，则对应的解码公式为：

$$x = U_{\min} + \left(\sum_{i=1}^l b_i \cdot 2^{i-l} \right) \cdot \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^l - 1} \quad (5-13)$$

e. 遗传算子

遗传算法所使用的遗传算子有选择算子、交叉算子和变异算子。

(1) 本研究中选择算子确定为比例选择算子，其具体执行过程是：

首先计算出群体中所有个体的适应度的总和。其次计算出每个个体的相对适应度的大小，它即为各个个体被遗传到下一代群体的概率。最后再使用模拟赌盘操作（即 0 到 1 之间的随机数）来确定各个个体被选中的次数。

(2) 为了使所生成的个体有更强的适应能力，可使用改进的遗传算法，改进之处在于交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 不是固定不变的，而是根据遗传过程中每两代之间解群质量的差异及每代内各子串的相似程度进行动态调整：

$$P_c = P_c^0 - a \times \exp(-\tau/\tau_{\max}) - b \times \exp(-u/u_{\max}) \quad (5-14)$$

$$P_m = P_m^0 - a' \times \exp(-\tau/\tau_{\max}) + b' \times \exp(-u/u_{\max}) \quad (5-15)$$

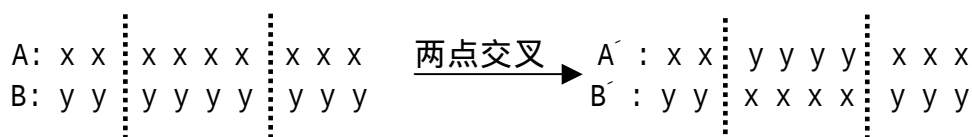
式中， a, b, a', b' 为常数； τ 为每代染色体最大最小适应值之差； u 为上下两代间平均适应值的差异； $\tau_{\max}$ ， $u_{\max}$ 分别为设定的最大差异值。经

过多次调试,本研究以上参数取值为: $a = 0.001$, $b = -0.005$, $a' = 0.0001$, $b' = 0.0002$, $\tau_{\max} = 10$, $u_{\max} = 10$ 。

交叉运算采用二点交叉法,具体操作如下:

- 在相互配对的两个个体编码串中随机设置两个交叉点;
- 交换两个个体在所设定的两个交叉点之间的部分染色体。

两点交叉的示例如下所示:



交叉点 1 交叉点 2

变异运算采用基本位变异法,具体操作为:

- 对个体的每一个基因座,以变异概率 p_m 制定其为变异点;
- 对每一个指定的变异点,对其基因值做取反运算,从而产生一个新的个体,即如指定的变异点基因值为 0,变异操作后其值为 1,反之亦然。

(3) 有关的运算参数

本研究中群体规模取为 100,最大迭代代数取为 1000。

5.4 水资源优化配置方案成果及分析

黑河流域水资源优化配置方案计算采用 1956 ~ 1999 黑河各支流和干流控制水文站地表径流长系列资料。地下水采用固定的可采量数值,把三生用水需求预测数值作为计算的约束条件(上限值),其中不考虑天然生态需水(需水预测值),应用本文提出的水资源优化配置模型计算的各方案结果,见表 5-1。

表 5-1

黑河流域水资源优化配置方案成果

单位:亿 m³

方 案	分 区	水资源量						重复利用量				蓄水量				供水量			缺 水 量
	分区	编码	地表 水资源	山前 侧补	降水 补给	小计	地表 入境	地下侧向 补给	泉水	小计	生活	生产		人工 生态	小计	地 表 水	地 下 水	小计	(17)
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	工业	农业	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	
现 状	上游区	X1	15.92			15.92					0.06	0.04	0.44	0.15	0.69	0.69		0.69	
	祁连县	X11	12.49			12.49					0.04	0.02	0.14	0.15	0.34	0.34		0.34	
	肃南县	X12	3.43			3.43					0.03	0.03	0.3		0.35	0.35		0.35	
	中游区	X2	8.91	1.32	0.52	10.75	15.68	0.08	8.56	24.32	0.37	0.8	25.01	2.94	29.12	21.09	3.09	24.2	-4.93
	山前灌区	X21	5.4	0.6	0.06	6.06		-1.32		-1.32	0.12	0.26	7.17	0.32	7.86	4.86	0.61	5.47	-2.39
	山丹县	X211	1.07	0.19	0.06	1.31		-0.15		-1.05	0.06	0.17	2.57	0.07	2.87	1.07	0.39	1.46	-1.41
	民乐县	X212	4.33	0.42		4.75		-1.16		-16	0.06	0.09	4.6	0.24	4.99	3.79	0.22	4.01	-0.98
	黑河流	X22	3.51	0.72	0.46	4.69	15.68	1.4	8.56	25.64	0.25	0.54	17.84	2.63	21.26	166.2	2.48	18.7	-2.54
	干流灌区	X221	2.44	0.23	0.46	3.13	15.68	2.13	8.56	26.37	0.24	0.54	16.87	2.47	20.12	15.83	2.47	18.3	-1.82
	泊山灌区	X222	1.07	0.49		1.56		-0.74		-0.74	0.01		0.97	0.15	1.14	0.4	0.02	0.42	-0.72
	下游区	X3		1.33	0.17	1.5	7.31	-0.16		15.7	0.09	0.1	1.64	1.01	2.83	1.19	1.34	2.52	-0.31
	鼎新灌区	X31			0.02	0.02	7.31	-0.45		6.86	0.02	0.04	0.95	0.36	1.37	0.9	0.16	1.06	-0.31
	东风场区	X32					4.79			4.79	0.05	0.04	0.47	0.65	1.21	0.21	1	1.21	0
	额济纳旗	X33		1.33	0.15	1.48	3.77	0.29		4.06	0.02	0.02	0.22		0.26	0.08	0.18	0.26	
	合计		24.83	2.65	0.69	28.16		-0.08	8.56	8.48	0.52	0.94	27.09	4.1	32.65	22.97	4.43	27.4	-5.25
方 案 1	上游区	X1	15.92			15.92					0.07	0.06	0.36	0.13	0.62	0.62		0.62	
	祁连县	X11	12.49			12.49					0.04	0.02	0.13	0.13	0.32	0.32		0.32	
	肃南县	X12	3.43			3.43					0.03	0.03	0.23		0.3	0.3		0.3	
	中游区	X2	8.91	1.32	0.52	10.75	15.71	-0.19	3.46	18.98	0.58	1.33	13.41	4.73	20.06	13.29	5.71	19	-1.06
	山前灌区	X21	5.4	0.6	0.06	5.06		-1.23		-1.23	0.2	0.41	4	0.92	5.53	4.41	0.95	5.36	-0.17
	山丹县	X211	1.07	0.19	0.06	1.31		-0.04		-0.04	0.09	0.26	0.99	0.4	1.75	1.07	0.53	1.6	-0.15
	民乐县	X212	4.33	0.42		4.75		-1.19		-1.19	0.11	0.15	3.01	0.51	3.78	3.34	0.42	3.76	-0.02

2 黑河流域水资源及其开发利用概况

续表 5-1

黑河流域水资源优化配置方案成果

单位:亿 m³

方 案	分 区		水资源量					重复利用量					蓄水量					供水量			缺 水 量
			地表 水资源	山前 侧补	降水 补给	小计	地表 入境	地下侧向 补给	泉水	小计	生活	生产		人工 生态	小计	地 表 水	地 下 水	小计			
												工业	农业								
	分 区	编 码	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)		
方 案 1	黑河干流	X22	3.51	0.72	0.46	4.69	15.71	1.04	3.46	20.21	0.38	0.93	9.41	3.82	14.53	8.88	4.76	13.64	-0.89		
	干流灌区	X221	2.44	0.23	0.46	3.13	15.71	2.04	3.46	21.21	0.36	0.93	8.77	3.53	13.59	8.57	4.74	13.3	-0.29		
	沿山灌区	X222	1.07	0.49		1.56		-1		-1	0.02		0.64	0.28	0.94	0.32	0.03	0.34	-0.6		
	下游区	X3		1.33	0.17	1.5	8.97	-0.16		20.3	0.1	0.13	0.53	1.26	2.02	1.5	0.52	2.02			
	鼎新灌区	X31			0.02	0.02	8.97	-0.45		8.52	0.02	0.06	0.43	0.48	0.99	0.9	0.09	0.99			
	东风场区	X32					6.23			6.23	0.07	0.04	0.1	0.78	0.99	0.6	0.39	0.99			
	额济纳旗	X33		1.33	0.15	1.48	5.26	0.29		5.55	0.01	0.03			0.04		0.04	0.04			
方 案 2	合 计		24.83	2.65	0.69	28.16		-0.35	3.46	3.11	0.75	1.52	14.31	6.13	22.7	15.41	6.23	21.64	-1.06		
	上游区	X1	15.92			15.92					0.07	0.06	0.36	0.13	0.62	0.62		0.62			
	祁连县	X11	12.49			12.49					0.04	0.02	0.13	0.13	0.32	0.32		0.32			
	肃南县	X12	3.43			3.43					0.03	0.03	0.23		0.3	0.3		0.3			
	中游区	X2	8.91	1.32	0.52	10.75	15.71	-0.18	3.4	18.93	0.58	1.33	13.41	4.73	20.06	12.64	5.71	18.35	-1.71		
	山前灌区	X21	5.4	0.6	0.06	6.06		-1.23		-1.23	0.2	0.41	4	0.92	5.53	4.41	0.95	5.36	-0.17		
	山丹县	X211	1.07	0.19	0.06	1.31		-0.04		-0.04	0.09	0.26	0.99	0.4	1.75	1.07	0.53	1.6	-0.15		
	民乐县	X212	4.33	0.42		4.75		-1.19		-1.19	0.11	0.15	3.01	0.51	3.78	3.34	0.42	3.76	-0.02		
	黑河干流	X22	3.51	0.72	0.46	4.69	15.71	1.05	3.4	20.16	0.38	0.93	9.41	3.82	14.53	8.23	4.76	12.99	-1.54		
	干流灌区	X221	2.44	0.23	0.46	3.13	15.71	2.05	3.4	21.16	0.36	0.93	8.77	3.53	13.59	7.91	4.74	12.65	-0.94		
	沿山灌区	X222	1.07	0.49		1.56		-1		-1	0.02		0.64	0.28	0.94	0.32	0.03	0.34	-0.6		
	下游区	X3		1.33	0.17	1.5	9.5	-0.16		21.88	0.1	0.13	0.53	1.26	2.02	1.5	0.52	2.02			
	鼎新灌区	X31			0.02	0.02	9.5	-0.45		9.05	0.02	0.06	0.43	0.48	0.99	0.9	0.09	0.99			
	东风场区	X32					6.76			6.76	0.07	0.04	0.1	0.78	0.99	0.6	0.39	0.99			
	额济纳旗	X33		1.33	0.15	1.48	5.79	0.29		6.08	0.01	0.03			0.04		0.04	0.04			

西安理工大学工程硕士学位论文

	合计		24.83	2.65	0.69	28.16		-0.34	3.4	3.06	0.75	1.52	14.31	6.13	22.7	14.76	6.23	20.99	-1.71
续表 5-1																			
方 案	分区		水资源量				重复利用量				蓄水量				供水量				单位:亿 m ³
	分区	编码	地表水资源	山前侧补	降水补给	小计	地表入境	地下侧向补给	泉水	小计	生活	生产		人工生态	小计	地表水	地下水	小计	缺水量
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	
方 案 3	上游区	X1	15.92			15.92					0.07	0.06	0.36	0.13	0.62	0.62		0.62	
	祁连县	X11	12.49			12.49					0.04	0.02	0.13	0.13	0.32	0.32		0.32	
	肃南县	X12	3.43			3.43					0.03	0.03	0.23		0.3	0.3		0.3	
	中游区	X2	8.91	1.32	0.52	10.75	15.61	-0.13	3.45	18.92	0.58	1.33	13.41	4.73	20.06	13.51	5.71	19.22	-0.84
	山前灌区	X21	5.4	0.6	0.06	6.06		-1.23		-1.23	0.2	0.41	4	0.92	5.53	4.41	0.95	5.36	-0.17
	山丹县	X211	1.07	0.19	0.06	1.31		-0.04		-0.04	0.09	0.26	0.99	0.4	1.75	1.07	0.53	1.6	-0.15
	民乐县	X212	4.33	0.42		4.75		-1.19		-1.19	0.11	0.15	3.01	0.51	3.78	3.34	0.42	3.76	-0.02
	黑河流	X22	3.51	0.72	0.46	4.69	15.61	1.1	3.45	20.15	0.38	0.93	9.41	3.82	14.53	9.1	4.76	13.86	-0.57
	干流灌区	X221	2.44	0.23	0.46	3.13	15.61	2.09	3.45	21.15	0.38	0.93	8.77	3.53	13.59	8.78	4.74	13.52	-0.07
	沿山灌区	X222	1.07	0.49		1.56		-1		-1	0.02		0.64	0.28	0.94	0.32	0.03	0.34	-0.60
	下游区	X3		1.33	0.17	1.5	8.63	-0.16		19.29	0.1	0.13	0.53	1.25	2.02	1.5	0.52	2.02	
	鼎新灌区	X31			0.02	0.02	8.63	-0.45		8.18	0.02	0.06	0.43	0.48	0.99	0.9	0.09	0.99	
	东风场区	X32					5.89			5.89	0.07	0.04	0.1	0.78	0.99	0.6	0.39	0.99	
方 案 4	额济纳旗	X33		1.33	0.15	1.48	4.92	0.29		5.21	0.01	0.03			0.04		0.04	0.04	
	合计		24.83	2.65	0.69	28.16		-0.29	3.45	3.15	0.75	1.52	14.31	6.13	22.7	15.63	5.23	21.86	-0.84
	上游区	X1	15.92			15.92					0.07	0.06	0.36	0.13	0.62	0.62		0.62	
	祁连县	X11	12.49			12.49					0.04	0.02	0.13	0.13	0.32	0.32		0.32	
	肃南县	X12	3.43			3.43					0.03	0.03	0.23		0.3	0.3		0.3	
	中游区	X2	8.91	1.32	0.52	10.75	15.61	-0.15	3.38	18.84	0.58	1.33	13.41	4.73	20.06	13.25	5.71	18.96	-1.10
	山前灌区	X21	5.4	0.6	0.06	5.06		-1.23		-1.23	0.2	0.41	4	0.92	5.53	4.41	0.95	5.36	-1.17
	山丹县	X211	1.07	0.19	0.06	1.31		-0.04		-0.04	0.09	0.26	0.99	0.4	1.75	1.07	0.53	1.6	-0.15
	民乐县	X212	4.33	0.42		4.75		-1.19		-1.19	0.11	0.15	3.01	0.51	3.78	3.34	0.42	3.76	-0.02

2 黑河流域水资源及其开发利用概况

续表 5-1

黑河流域水资源优化配置方案成果

黑河干流		X22	3.51	0.72	0.46	4.69	15.61	1.08	3.38	20.07	0.38	0.93	9.41	3.82	14.53	8.84	4.76	13.6	-0.93
单位:亿 m³																			
分区		水资源量					重复利用量					蓄水量					供水量		
		编码	地表 水资源	山前 侧补	降水 补给	小计	地表 入境	地下侧向 补给	泉水	小计	生活	生产		人工 生态	小计	地表 水	地 下 水	小计	缺 水 量
												工业	农业						
方 案 4	干流灌区	X221	2.44	0.23	0.46	3.13	15.61	2.08	3.38	21.07	0.36	0.93	8.77	0.94	13.59	8.53	4.74	13.27	-0.32
	沿山灌区	X222	1.07	0.49		1.56		-1.0		-1.0	0.02		0.64	0.28		0.31	0.03	0.33	-0.61
	下游区	X3		1.33	0.17	1.5	9.39	-0.15		21.55	0.1	0.13	0.53	1.26	2.02	1.5	0.52	2.02	
	鼎新灌区	X31			0.02	0.02	9.39	-0.45		8.94	0.02	0.06	0.43	0.48	0.99	0.9	0.09	0.99	
	东风场区	X32					6.65			5.65	0.07	0.04	0.1	0.78	0.99	0.6	0.39	0.99	
	额济纳旗	X33		1.33	0.15	1.48	5.68	0.29		5.97	0.01	0.03			0.04		0.04	0.04	
	合计		24.83	2.65	0.59	28.16		-0.31	3.36	3.07	0.75	1.52	14.31	6.13	22.7	15.37	6.23	21.6	-1.1
	上游区	X1	15.92			15.92					0.07	0.06	0.36	0.13	0.62	0.62		0.62	
	祁连县	X11	12.49			12.49					0.04	0.02	0.13	0.13	0.32	0.32		0.32	
	肃南县	X12	3.43			3.43					0.03	0.03	0.23		0.3	0.3		0.3	
方 案 5	中游区	X2	8.91	1.32	0.52	10.75	15.61	-0.15	3.38	18.84	0.58	1.33	13.41	4.73	20.06	13.25	5071	18.96	-1.1
	山前灌区	X21	5.4	0.6	0.06	6.06		-1.23		-1.23	0.2	0.41	4	0.92	5.53	4.41	0.95	5.36	-0.17
	山丹县	X211	1.07	0.19	0.06	1.31		-0.04		-0.04	0.09	0.28	0.99	0.4	1.75	1.07	0.53	1.6	-0.15
	民乐县	X212	4.33	0.42		4.75		-1.19		-1.19	0.11	0.15	3.01	0.51	3.78	3.34	0.42	3.76	-0.02
	黑河干流	X22	3.51	0.72	0.46	4.69	15.61	1.08	3.38	20.07	0.38	0.93	9.41	3.82	14.53	8.84	4.26	13.6	-0.93
	干流灌区	X221	2.44	0.23	0.46	3.13	15.61	208	3.38	21.07	0.36	0.93	8.77	3.53	13.59	8.53	4.74	13.27	-0.32
	沿山灌区	X222	1.07	0.49		1.56		-1		-1	0.02		0.64	0.28	0.94	0.31	0.03	0.33	-0.61
	下游区	X3		1.33	0.17	1.5	9.09	-0.16		21.27	0.1	0.13	0.53	1.26	2.02	1.5	0.52	2.02	
	鼎新灌区	X31			0.02	0.02	9.09	-0.45		8.64	0.02	0.08	0.43	0.48	0.99	0.9	0.09	0.99	
	东风场区	X32					6.66			6.56	0.07	0.04	0.1	0.78	0.99	0.6	0.39	0.99	
	额济纳旗	X33		1.33	0.15	1.48	5.59	0.29		5.98	0.01	0.03			0.04		0.04	0.04	

西安理工大学工程硕士学位论文

			24.83	2.65	0.69	28.16		-0.31	3.38	3.07	0.75	1.52	14.31	6.13	22.7	15.37	6.23	21.6	-1.1
合计																			

5.4.1 现状水平的水资源优化配置成果及分析

现状水平，黑河流域水资源总量为 28.16 亿 m^3 ，其中地表水资源量为 24.83 亿 m^3 ，山前侧补资源量 2.65 亿 m^3 ，降雨补给 0.69 亿 m^3 。现状黑河流域总需水量为 32.65 亿 m^3 ，(不含天然生态需水量，下同)，其中生活需水量 0.52 亿 m^3 ，工业需水量 0.94 亿 m^3 ，农业需水量 27.10 亿 m^3 ，人工生态需水量 4.10 亿 m^3 。

不控制正义峡断面下泄量情况，采用水资源优化配置模型进行现状水平水资源优化配置计算（见表 5-1），流域多年平均总供水量为 27.40 亿 m^3 ，其中地表水供水量 22.97 亿 m^3 ，地下水供水量 4.43 亿 m^3 ，多年平均总缺水量为 5.25 亿 m^3 ，缺水率为 16.1%。中游地区多年平均总供水量为 24.18 亿 m^3 ，其中地表水供水量 21.09 亿 m^3 ，地下水供水量 3.09 亿 m^3 ，缺水量为 4.93 亿 m^3 ，缺水分布为：中游农田和人工生态缺水 4.93 亿 m^3 ，鼎新灌区农田和人工生态缺水 0.31 亿 m^3 ，正义峡下泄量 7.31 亿 m^3 ；进入额济纳旗的地表径流量为 3.77 亿 m^3 。

5.4.2 2010 年水平水资源优化配置方案成果及分析

2010 年水平，黑河流域水资源总量为 28.16 亿 m^3 ，其中地表水资源量为 24.83 亿 m^3 ，山前侧向补给量为 2.65 亿 m^3 ，降雨入渗补给量为 0.69 亿 m^3 。流域总需水量为 22.70 亿 m^3 ，其中生活需水量为 0.76 亿 m^3 ，工业需水量为 1.52 亿 m^3 ，农田灌溉需水量为 14.31 亿 m^3 ，人工生态需水为 6.11 亿 m^3 。

方案 1，为无上游水库、正义峡下泄量不受分水方案约束，流域多年平均总供水量为 21.64 亿 m^3 ，其中地表水供水量 15.41 亿 m^3 ，地下水供水量 6.23 亿 m^3 ，多年平均总缺水量为 1.06 亿 m^3 ，缺水率为 4.7%，缺水全部集中在中游；正义峡下泄量为 8.97 亿 m^3 时，进入额济纳旗的地表径流量为 5.26 亿 m^3 。

方案 2, 为无上游水库、正义峡断面下泄量受分方案约束, 流域多年平均总供水量为 20.99 亿 m^3 , 其中地表水供水量 14.76 亿 m^3 , 地下水供水量为 6.23 亿 m^3 , 多年平均总缺水量为 1.71 亿 m^3 , 缺水率为 7.5%, 缺水全部集中在中游; 正义峡下泄量为 9.50 亿 m^3 时, 实现国务院分水方案; 进入额济纳旗的地表径流量为 5.79 亿 m^3 。

方案 3, 为有上游水库, 上游水库仅承担中游灌溉供水任务。流域多年平均总供水量为 21.86 亿 m^3 , 其中地表水供水量为 15.63 亿 m^3 , 地下水供水量 6.23 亿 m^3 , 多年平均总缺水量为 0.84 亿 m^3 , 缺水率为 3.7%, 缺水全部集中在中游; 正义峡下泄量为 8.63 亿 m^3 时, 进入额济纳旗的地表径流量为 4.92 亿 m^3 。

方案 4, 为有上游水库, 上游水库承担中游灌溉供水任务并采用 4 月、7 月、9 月向正义集中调水, 流域多年平均总供水量为 21.80 亿 m^3 , 其中地表水供水量 15.37 亿 m^3 , 地下水供水量 6.23 亿 m^3 , 多年平均总缺水量为 1.10 亿 m^3 , 缺水率为 4.8%, 缺水全部集中在中游; 正义峡下泄量为 9.39 亿 m^3 , 少于国务院分水方案 0.11 亿 m^3 , 主要是由于上游水库的库损, 影响到出山口水量少于 15.8 亿 m^3 的原因造成。进入额济纳旗的地表径流量 5.56 亿 m^3 。

方案 5, 正义峡以上水资源配置情况同方案 , 其主要区别体现在正义峡水库生效后, 增加了库损 0.3 亿 m^3 , 影响到正义峡下泄量减少到 9.09 亿 m^3 , 大墩门至狼心山河段采用河道输水方式, 进入额济纳旗的地表径流量为 5.69 亿 m^3 。

5.5 水资源优化配置方案比较

(1) 实现分配水权情况

1992 年国家计委在“关于《黑河干流(含梨园河)水利规划报告》的复函”(计国地【1992】2533 号)中对黑河水资源的分如下: 即在近期当莺落峡多年平均河川径流量为 15.8 亿 m^3 时, 正义峡下泄量 9.5 亿 m^3 ,

其中分配给“鼎新片”毛水量 0.9 亿 m^3 ，“东风场”毛水量 0.6 亿 m^3 。通过对各方案正义峡下泄量的分析。方案 1 和方案 3 难以实现分配水权，分别比分配水权少 0.53 亿 m^3 和 0.87 亿 m^3 ，方案 2、方案 4 和方案 5 可以实现分配水权，其中方案 5 比分配水权少 0.11 亿 m^3 是由于上游水库生效率增加库损 0.11 亿 m^3 ，相应莺落峡来水量小于 15.8 亿 m^3 的原因造成的；方案 4 比分配水权偏少 0.41 亿 m^3 ，主要是由于上游水库和正义峡水库生效率增加的库损造成的。

(2) 生活、生产和生态用水的协调程度

各方案在确保生活供水安全的情况下，对生产和生态用水进行了协调，生产和生态用水的协调主要体现在黑河中游地区农业内部的生产、生态用水的协调；黑河中下游生产和生态用水的协调。

对黑河中游农业内部而言，为保证经济发展和保护生态协调发展，通过节水改造、种植结构的调整 and 产业结构的调整，在以分配水权为总量控制的情况下，中游的用水结构得到了较大的调整。总体上表现为在分配水权控制的条件下，中游需水总量大幅度减少，重点减少了生产需水量中的农田灌溉需水量。各方案确保生活、生态供水安全，生产供水存在一定的差异，方案 5 和方案 4 的供水量基本相当，方案 1 和方案 3 供水量超出了中游分配的水权，生产供水量较大；方案 2 和方案 4 供水量以中游分配的水权为约束，生产供水量受到一定的限制，方案 2、方案 4 和方案 5 满足中下游生态用水要求的程度较为理想。

(3) 供水保证程度

在水资源缺乏的条件下，压缩不合理的水资源需求可以增加水资源的有效供给，提高水资源合理需求的满足程度。现状水平缺水 5.25 亿 m^3 ，缺水率为 16.1%；2010 年水平，方案 1 至方案 5 缺水量为 0.84 亿 m^3 至 1.71 亿 m^3 ，缺水率为 3.7% 至 7.5%。2010 年水平流域生活、生产、生态用水综合缺水率下降 8.6% 至 12.4%，有效提高了流域的供水保证程度，尤其是增加了流域生态供水的保证程度。

2010 年水平方案 1 和方案 3 没有按照分水线控制，中游缺水率较低是以牺牲下游生态供水安全为代价；方案 2 为无上游水库情况下控制正义峡下泄量方案，中游的缺水率为 7.5%，相对较高；方案 4 和方案 5 为有上游水库情况下切控制正义峡下泄量方案，由于有了上游水库的调蓄作用，中游的缺水率下降为 4.8%。

(4) 水资源开发利用程度

由于中游存在着地表水和地下水多次转化和重复利用的特点，在现状中游用水量较大的情况下，地表水源供水量较大，相应的地表水资源利用率也很高。现状黑河流域地表水资源开发利用超过了 100%，达到 107.4%。2010 年水平中游地表水源供水量有大幅度减小，进入下游的泉水量也有一定减少，各方案的平均地表水资源开发利用也降到 83.7%，方案 5 地表水资源开发利用率为 84.8%。现状和 2010 年水平地表水开发利用程度见表 5-2。

表 5-2 现状和规划水平年黑河流域地表水开发利用程度

项 目	1999 年	2010 年				
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
地表水资源量 (亿 m^3)	24.83	24.83	24.83	24.83	24.83	24.83
地表水源供应量 (亿 m^3)	26.66	20.67	20.55	20.55	21.04	21.05
地表水资源开发利用率 (%)	107.40	83.30	82.80	82.8	84.00	84.80

5.6 水资源可持续承载能力评价

(1) 水资源承载能力的内涵

资源承载力的研究起源于土地承载能力，它主要是“要探讨人口、粮食（食物）和资源（土地）之间的关系，其实质是研究人口消费与食物生产、人类需求与资源供给之间的平衡发展问题”。

水资源承载能力与土地承载能力以及其它矿产资源承载能力都是资源承载能力，但由于三者各自特点有许多异同之处，所以它们的承载能力内涵也应各具特点。土地资源并不因作用而消失，也可以通过补偿恢复因遭粮是用而劣化了的土地，这使得土地承载力的研究主要是探讨与

土地的自然再生能力相适应的人地关系问题；矿产资源则是通过百万年计的地质年代的综合地质作用而逐渐形成的，因而用一点就会少一点，所以矿产资源的承载力研究更多地是要探讨持续性发展下的承载力问题。水资源是有限度的可再生资源，如果利用合理，则会像土地资源一样，可以持续利用；如果使用不当，则会像矿产资源一样，用一点少一点，直至枯竭。这使得水资源承载能力的研究很具复杂性。水资源除了人类生活直接使用很少部分外，更多的是通过经济增长间接实现的，经济增长与人口增长是不成比例的，因而不能用人均占有水资源量来确定资源持续供养的人口数量，需要用更多指标进行衡量。因此水资源承载能力又是一个受众多因素影响的综合指标，其研究难度相对会更大些。

综上所述，水资源承载能力可表述为：某一地区的水资源，在一定社会历史和科学技术发展阶段，在不破坏社会和生态系统时，最大可承载的农业、工业、城市规模和人口的能力，是一个随着社会、经济、科学技术发展而变化的综合目标。简单地说，就是一定区域，一定时段，维系生态系统良性循环，水资源系统支撑社会经济发展的最大规模。

(2) 水资源承载力大小的影响因素

首先，水资源系统是水资源承载能力的主题，水资源系统的可利用水资源量决定其承载能力的大小。

其次，人类是水资源承载能力的客体，在很大程度上影响着水资源承载能力。例如，人类对水资源的利用率，是水资源承载力计算的关键指标；科技进步通过提高水资源利用率重复利用率污水处理率等可以提高水资源承载力；区域发展战略，对水资源的分配和利用有重要影响，从而影响水资源承载能力；管理体制和法制对水资源的利用和保护起积极作用还是消极作用，在很大程度上也会影响水资源承载能力。

(3) 水资源承载力评价

鉴于以上对水资源承载力内涵及影响因素的分析，我们对黑河流域水资源承载力评价从以下两方面进行。

a. 水资源支撑经济社会可持续发展评价

水资源可持续承载能力评价，重点评价发展系数、协调系数、公平系数和可持续发展系数。

可持续发展系数(S)：它作为综合指标，用以衡量水资源系统支撑整个社会可持续发展的综合水平与能力，由发展系数、协调系数、公平系数构成。

发展系数(S_1)：反映整个流域综合发展的持续状况及发展的强弱程度。

协调系数(S_2)：反映整个流域社会、经济、生态环境子系统与水资源的协调程度。

公平系数(S_3)：反映流域区域间的资源使用以及发展的公平程度。

针对上述五个水资源配置方案，利用水资源可持续承载力评价方法，计算各方案的有关系数（见表 5-3）。

表 5-3 2010 年各方案评价计算结果

代号	发展系数 S_1	协调系数 S_2	公平系数 S_3	可持续发展系数 S
方案 1	1.0366	0.9887	0.9973	1.0034
方案 2	1.0369	0.9784	0.9996	0.9984
方案 3	1.0365	0.9848	0.9944	1.0007
方案 4	1.0368	0.9898	0.9995	1.0044
方案 5	1.0367	0.9898	0.9996	1.0044

在上述评价计算结果中，各方案的发展系数基本比较接近，但总体上有分水约束方案的发展系数高于无分水约束方案的发展系数，方案 2、方案 4、方案 5 的发展系数分别为 1.0369、1.0368 和 1.0367，均高于方案 1 和方案 3 的发展系数 1.0366 和 1.0365；从协调系数方面分析，有上游水库承担中下游配水情况下，协调系数较高，方案 4 和方案 5 均实现了中、下游水资源的合理配置，协调系数均为 0.9898；从公平系数方面分析，有分水约束方案的公平系数基本相当，为 0.9995 ~ 0.9996，高于无分水约束方案的公平系数（0.9944 ~ 0.9973）。

根据可持续发展判据，五个方案的发展系数 S_1 均大于 1.0。公平系数 S_3 均大于 0.99。协调系数除方案 2 小于 0.98 外，其余方案均大于 0.98，

方案 2 的发展模式是不可持续的，不能接受的，其余各方案均为可持续发展的。

在发展系数、协调系数和公平系数基础上，计算五个方案的可持续发展系数，结果表明，有上游水库合理配置中、下游水资源方案，即方案 4 和方案 5 具有较高的可持续发展系数。

b. 水资源可持续承载能力评价

对上述满足水资源支撑社会可持续发展判据的方案，计算其水资源承载能力指标，列入表 5-4

表 5-4 2010 年黑河流域水资源承载能力指标

方案	人口 (万人)	人均 GDP (元/人)	天然林草面积 (km ²)	可持续发展系数 S_I
方案 1	144.6	9663	4937	1.0034
方案 3	144.6	9663	4937	1.0007
方案 4	144.6	9663	4937	1.0044
方案 5	144.6	9663	4937	1.0044

承载能力评价方案去除明显不合理方案和通过可持续发展评价两次筛选基础上得到的可持续方案。承载能力评价的四个方案人口承载量适宜、人均 GDP 规模适中。各方案实现额济纳旗绿洲生态恢复目标的可靠性差别，主要体现在方案 4 和方案 5 由于有上游水库合理配置中下游供水，加上非工程措施，能够有效保证黑河中下游分水方案的实施，实现下游生态供水目标的可靠性要高于方案 1 和方案 3。方案 5 由于有正义峡水库作用，可以更好地调配进入下游的水资源，提高水资源利用效率，有效增加进入额济纳旗的有效供水量，其实现下游生态供水目标的可靠性要高于方案 4。

5.7 水资源优化配置方案的综合比较及结论

综合不同方案对黑河流域上、中、下游水资源配置作用分析，通过种植结构调整和节水改造降低总体水量需求水平情况下，建设上中游骨干工程，并对干流关键河段实施以提高输水效率为重点的河道整治，建立和完善黑河调度管理的工程体系，为实现流域生态建设提供重要的工

程措施保障，在一定程度上解决现状黑河流域中下游水资源利用的主要问题。根据对上中下游不同水资源配置方案的比较分析，推荐水资源优化配置采用方案 5：“上游水库+正义峡水库+中游供水+分水方案约束方案”。推荐的方案具有以下作用：

(1)管理措施，提高了正义峡断面下泄水量的保证程度。

(2)进一步完善了黑河分水方案，对正义峡以下的鼎新、东风场两用户，提出了限量开采地下水的要求。

(3)灌溉高峰期水资源供需矛盾，中游灌溉缺水率达到较大幅度降低。

(4)替代平原水库，提高了中游及鼎新灌区的水资源利用效率。

(5)正义峡断面来水过程，适应了下游天然植被需水过程，对促进下游生态修复具有重要作用。

(6)为下游水量分配提供重要的工程措施保证，提高鼎新灌区和东风场区供水保证程度，确保进入额济纳旗的水量。

6 结论及建议

黑河是中国第二大内陆河，长期以来，由于人口增长，经济发展，中游地区人类活动用水量增加，致使进入下游水量急剧减少，导致森林死亡、草场退化、沙漠化扩展，成为中国北方地区沙尘暴的主要沙源地之一。为保护人类赖以生存的生态环境，国家决定加大黑河流域治理力度，实施流域水资源统一管理和优化配置。本文在分析了黑河流域水资源开发利用现状的基础上，指出了目前黑河流域水资源开发利用中存在的问题，综述了国内外水资源优化配置的研究进展，收集、整理并分析了大量黑河流域社会、经济、生态环境等与水资源优化配置相关的资料数据；对黑河流域水资源需求进行了分析和预测；建立了水资源优化配置模型，获得了水资源优化配置方案，取得了丰硕的研究成果，对实现黑河流域水资源优化配置具有重要的参考价值。

6.1 结论

(1) 经过对黑河流域采用 1956 年 ~ 1999 年系列进行分析得出，黑河流域地表水资源总量为 25.261 亿 m^3 ，与地表水不重复的地下水资源量为 3.179 亿 m^3 ，黑河流域水资源总量为 28.44 亿 m^3 。

(2) 提出了黑河流域水资源优化配置的指导思想、原则和目标，结合流域水资源开发利用特点和目标生成了 2010 水平年五个水资源配置方案，为研究或实施黑河流域水资源优化配置方案奠定了基础。

(3) 结合产业结构调整 and 农业种植结构调整及对灌区的节水改造，采用定额法对生活、生产、生态需水进行了预测，总需水量由现状的 42.01 亿 m^3 减少到 2010 年水平的 34.93 亿 m^3 ，减小了 16.9%，需水的负增长趋势是合理的，复合流域实情。

(4) 考虑到黑河流域水资源短缺，需水大于水资源量的实情，建立了

兼顾流域缺水均衡，以流域总缺水最小为目标的水资源优化配置模型（LPM）；提出了应用遗传算法求解 LPM 模型具体步骤，推导并给出了该算法有关公式和参数，丰富了水资源优化配置方法。

(5)采用长系列资料，应用 LPM 模型，进行大量运算获得了现状及 2010 水平年的六个黑河流域水资源优化配置方案；通过对各方案在实现分配水权、生活、生产和生态用水的协调程度、供水保证率、水资源开发利用程度的比较，以及水资源可持续承载能力的评价，重点综合评价了发展系数、协调系数、公平系数和可持续发展系数，推荐方案 5 为最优方案。论文取得的成果对实现黑河流域水资源优化配置具有重要的指导意义。

6.2 建议

黑河流域的生态环境建设和水资源的合理开发、科学配置和管理调度是一项长期的任务，应从行政措施、工程措施、经济措施、科学措施和法律措施进行综合治理。力争通过今后近 30 年的系统全面建设，将黑河流域建设成我国西北内陆河社会、经济和生态环境可持续发展的典范流域。为此，提出对策和建议如下：

(1)在巩固前期生态建设成果的基础上，不断改善流域整体的生态状况，使黑河生态建设处于不断改善、稳步提高的良性循环状态。当前建议尽快启动黑河流域近期治理后评估工作，为今后治理提供支持。

(2)有效运用行政、工程、经济、科技和法律等措施，进一步促进黑河水资源的科学管理、合理配置和高效利用。黑河综合治理的核心是水资源的科学管理、合理配置、高效利用。有效地运用行政、工程、经济、科技和法律等措施，将不断推进黑河流域水资源管理的现代化、信息化、法制化进程，实现流域水资源的可持续利用，促进流域水资源配置的科学管理。

(3)建立合理的水价形成机制，充分发挥经济手段在水资源配置和

管理中的作用。建立并完善黑河水市场，积极探索并建立黑河流域的水权交易机制。通过经济措施与其他措施相结合，促进流域水资源的优化配置和高效利用。

(4)不断改进和完善节水机制，加强宣传和政策引导，努力提高人们的节水意识，促进流域节水型社会成熟发展。

(5)逐步形成黑河水资源统一管理调度的工程体系。加快上游黄藏寺水库、中游正义峡水库的前期工作步伐，逐步开发建设黑河干流骨干工程。同时针对黑河干流关键河段，围绕以输水为目的进行整治。形成以黄藏寺水库为龙头，正义峡水库配合以及关键河段依靠输水堤约束的黑河水资源统一管理和调度的工程体系。

致 谢

在导师黄强教授和李效栋教授级高级工程师的悉心指导下经过一年的努力，终于完成了工程硕士论文的研究和撰写工作。从论文的选题到论文完成的每个环节，无不凝集着导师的心血。导师以其严谨的治学态度、渊博的学识、敏锐的洞察力和高尚的品德，时刻激励着学生。在论文完成之际学生深刻地体会到，没有导师的指导和关怀，没有导师的严格要求、热心鼓励和精心培养，学生不可能取得现在的成绩。在此，谨向导师黄强教授和李效栋教授级高级工程师表示诚挚的感谢和崇高的敬意！

在工程硕士的课程学习期间，得到了西安理工大学任课教师的大力支持和帮助。西安理工大学任课教师的严谨治学态度、精益求精的工作作风给我留下了深刻的印象。在学习期间获得的教益，一定会使我受益终身。这段美好的时光和经历将伴随我今后的学习、工作和生活。在此，谨向帮助过我和给我授课的马长富老师、李守义教授、陈尧隆教授、刘丰银副教授表示真挚的感谢。

感谢在我的学习和论文撰写过程中给予我极大帮助和支持的家人。

最后，再次表示感谢，感谢我的导师和所有帮助过我的人们。

李小琴

2005 年 2 月

参考文献

- [1] 高前兆, 李福兴, 等. 黑河流域水资源合理开发利用[M]. 兰州: 甘肃科学出版社, 1991
- [2] 潘启民, 王玲. 黑河流域水资源评价[R]. 1993, 3
- [3] 王玲, 潘启民. 黑河流域水资源开发利用现状及存在的问题研究[R], 1999, 3
- [4] 曹万金. 地下水资源计算与评价[M]. 水利电力出版社, 1985
- [5] 吴持恭. 水力学(上册)[M]. 人民教育出版社, 1979
- [6] 曲焕林. 中国干旱半干旱地区地下水资源评价[M]. 科学出版社, 2002
- [7] 杨诚芳. 地表水资源与水文分析[M]. 水利电力出版社, 1984
- [8] 陈家琪, 王浩. 水资源学概论[M]. 中国水利水电出版社, 2003
- [9] 陈雨孙. 地下水运动与资源评价[M]. 中国建筑工业出版社, 1986
- [10] 叶守泽. 水文水利计算[M]. 中国水利水电出版社, 1994
- [11] 张瑞, 吴林高. 地下水资源评价与管理[M]. 同济大学出版社, 1997
- [16] N. Brnus 著, 戴国瑞, 冯尚友译. 水资源科学分配[M]. 北京: 水利电力出版社
- [17] 朱庚申. 环境资源的量化模型及估算指标体系[J]. 中国人口资源与环境, 1995, 5(10): 38 ~ 41
- [18] 曹瑞钰, 顾国维. 水环境工程治理费用优化模型[J]. 同济大学学报, 1997, 25(5): 548 ~ 552
- [19] 任斌, 丰镇平. 改进遗传算法与粒子群优化算法及其对比分析[J]. 南京师范大学学报, 2002, 2(20): 14 ~ 20
- [20] Romijn E, Tamiga M. Multi-objective Optimal Allocation of Water resources[J]. J Water resources Planning and management, ASCE. 1982, 108(2): 217 ~ 229
- [21] Willis R, Yeh W. Groundwater system planning and management. New jersey Prentice Hall, 1987
- [22] Cockshott A R, Hartman B E. Improving the Fermentation Medium for

- Echinocandin Production Particle Swarm Optimization [J]. Process Biochemistry, 2001(17):469 ~ 486
- [23] 田贵全. 水环境容量资源的有偿使用探讨[J]. 山东环境, 1994(5):6 ~ 7
- [24] 谢晓锋, 张文俊, 阮俊等. 针对带约束非线性规划问题的遗传算法[J]. 计算机与应用, 2002, 21:64 ~ 67
- [25] 谢新民, 张海庆等. 水资源评价及可持续利用规划理论与实践[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2003
- [25] 吴泽宁, 张超, 王新玲等. 工程项目系统评价[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2002
- [26] 朱党生, 王超, 程晓冰. 水资源保护规划与技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2001
- [27] 刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状和供需发展趋势分析[M]. 北京:中国水利水电出版社. 2001
- [28] 陈志恺. 21 世纪中国水资源开发利用问题[J]. 中国工程科学, 2002, 2(3):7 ~ 11
- [29] 张云刚. 略论水资源配置中的几个问题. [J]. 甘肃水利水电技术. 2000(6):73 ~ 79
- [30] 左其亭, 陈曦. 面向可持续发展的水资源规划与管理[J]. 中国水利水电出版社. 2003
- [31] 靳贤福, 任志谋, 张琦. 水资源存在问题及其对策[J]. 甘肃农业. 2001(1):20 ~ 22
- [32] 冯尚友, 王先甲. 水资源可持续利用与管理导论[M]. 北京:科学出版社. 2000
- [33] 索丽生. 我国可持续发展水资源战略[J]. 学会月刊, 2001(11):15 ~ 16
- [34] 汪恕诚. 扎实搞好水资源管理工作, 促进经济社会可持续发展[J]. 节水灌溉, 2002(2):1 ~ 2
- [35] 李另跃, 甘泓. 试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J]. 水科学进展, 2000, 11(3):307 ~ 311
- [36] 姚冶君. 区域水资源承载能力的研究进展及其理论探析[J]. 水科学进展, 2002, 13(1):111 ~ 115
- [37] 邹友琴, 王凤生. 吉林省西部平原区域水资源承载力探讨[J]. 吉林地质, 2001, 21(3):29 ~ 32

- [38]Afzal,Javaid.&Noble,David H. Optimization model for alternative use of different quality irrigation waters[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 1992,118:218 ~ 228
- [39]Watkins,David W.Jr.Mckinney,Daene C.Robust.Optimization for incorporating risk and uncertainty in sustainable water resources planning[J].IAHS Publication (International Association of Hydrological Sciences).1995, 231, Jul 1-14:225 ~ 232
- [40]R.A. Fleming R.M.Adams.Regulating ground Water Pollution: Effects of Geophysical Response Assumptions on Economic Efficiency[J]. Water Resources Research,1995,31(4):712 ~ 721
- [41]Upmanu Lall.Yield Model for Screening Surface and Ground Water Development[J].Journal of Water Resources Planning and Management, 1995,201(3).155 ~ 163
- [42]Ghossen R. Masharrafieh, Richard C. Peralta. Optimizing Irrigation Management for Pollution Control and Sustainable crop Yield[J]. Water resources Research, 1995,31(4):760 ~ 767
- [43]Wong,Hugh S.Sun,Ne-zheng. Optimization of conjunctive use of surface water and groundwater with water quality constraints[A]. Proceedings of the Annual Water Resources Planning and Management Conference Apr 6-9[C] , Sponsored by: ASCE. 1997:408 ~ 413
- [44]Shuval, HillelS. Optimizing wastewater reuse:A sustainable water resource for arid countries International Water & Irrigation Review[J]. Internatinal Water & Irrigation Review, 1997,17 (2):32 ~ 35
- [45]Carios Perrcia , Gideon Oron. Optimal Operation of Regional System with Diverse Water Quality Source[J]. Journal of Water Resources Planning and Management.1997,203(5):230 ~ 237
- [46]Kumar,Arun.Minocha,Vijay K. Fuzzy optimization model for water quality

- management of a river system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management. 1999,205(3):179~180.
- [47] Rao Vemuri, V. & Cedeno, Walter. New genetic algorithm for multi-objective optimization in water resource management [A]. Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation Nov 29 –Dec 1[C], Sponsored by: IEEE 1995:495~500
- [48] 张顺联. 地下水资源计算与评价[M]. 水利电力出版社, 1985
- [49] 李世明. 河西走廊水资源合理利用与生态环境保护[M]. 黄河水利出版社, 2004
- [50] 张瑞, 吴林高. 地下水资源评价与管理[M]. 同济大学出版社, 1997
- [51] 叶守泽. 水文水利计算[M]. 中国水利水电出版社, 1994
- [52] 黄强. 水能利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998
- [53] 李雪萍. 国内外水资源优化配置研究概述[J]. 海河水利, 2002(5):13~15
- [54] 曾赛星, 李寿声. 灌溉水量分配大系统分解协调模型[J]. 河海大学学报, 1990(1):67~75
- [55] 唐德善. 大流域水资源多目标优化分配模型研究[J]. 河海大学学报, 1992(2):35~43
- [56] 贺北方, 丁大发, 马细霞. 多库多目标最优控制运用的模型与方法[J]. 水利学报, 1995(3):39~42
- [57] 黄振平, 华家鹏. 陈垓引黄灌区渠系优化配水的初步研究[J]. 山东水利科技, 1995(1):43~46
- [58] 向丽, 顾培亮. 大型灌区水资源优化分配模型研究[J]. 西北水资源与水工程, 1999, 10(1):1~8
- [59] 马斌, 解建仓等. 多水源引水灌区水资源调配模型及应用[J]. 水利学报, 2001, (9):59~63
- [60] 贺北方. 区域可供水资源优化分配的大系统优化模型[J]. 武汉水利电力学院学报, 1988(5):109~118
- [61] 贺北方. 区域可供水资源优化分配与产业结构调整[J]. 郑州工学院学

- 报, 1989(1): 11 ~ 15
- [62] 吴泽宁, 蒋水心, 贺北方等. 经济区水资源优化分配的大系统多目标分解协调模型[J]. 水能技术经济, 1989(1): 1 ~ 6
- [63] 蔡喜明, 翁文斌, 史慧斌. 基于宏观经济的区域水资源多目标集成系统[J]. 水科学进展, 1995, 6(2): 139 ~ 144
- [64] 翁文斌, 蔡喜明, 史慧斌等. 宏观. 经济区域水资源多目标决策分析方法与应用[J]. 水利学报, 1995(2): 1 ~ 11
- [65] 卢华友, 郭元裕等. 义乌市水资源系统分析协调决策模型研究[J]. 水利学报 1997(6): 40 ~ 47
- [66] 黄强, 王增发. 城市供水水源联合优化调度研究[J]. 水利学报, 1999(5): 57 ~ 62
- [67] 聂相田, 丘林, 朱普生等. 水资源可持续利用管理不确定性分析方法及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999
- [68] 辛玉琛, 张志君. 长春市城市水资源优化管理模型研究[J]. 东北水利水电, 2000(1): 15 ~ 17
- [69] 吴险峰, 王丽萍. 枣庄城市复杂多水源供水优化配置模型[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(1): 30 ~ 32, 62
- [70] 杨小柳, 刘戈利, 甘泓等. 新疆经济发展与水资源合理配置及承载能力研究[M]. 黄河水利出版社, 2003
- [71] 王浩, 秦大勇, 王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论[J]. 水利学报, 2002(8): 1 ~ 6
- [72] 唐得善. 黄河流域多目标优化配水模型[J]. 河海大学学报, 1994(1): 46 ~ 52
- [73] 薛松贵, 常秉炎. 黄河流域水资源合理分配和优化调度研究综述[J]. 人民黄河, 1996(8): 7 ~ 9
- [74] 王成丽, 阮本青, 李清杰. 黄河流域灌溉工程现状节水措施浅析[J]. 人民黄河, 1996(11): 41 ~ 44
- [75] 徐慧, 欣金彪. 淮河流域大型水库联合优化调度的动态规划模型[J]. 水文, 2000(1): 22 ~ 25

- [76]陈晓宏.东江流域水资源优化配置研究[J].中山大学学报,2000(1):52~57
- [77]邵东国.跨流域调水工程优化决策模型研究[J].武汉水利电力大学学报
1994(10):500~505
- [78]徐良辉.跨流域调水模拟模型的研究[J].东北水利水电,2001(6):1~4
- [79]樊红涛,汪华东.区域水环境风险容量的合理分配研究[J]环境工程,2002,12(6):50~54
- [80]左其亭,王中根.现代水文学[M].黄河水利出版社,2001
- [81]吴泽宁,蒋水心,贺北方等.经济区水资源优化分配的大系统多目标分解协调模型
[J].水能技术经济,1989(1):1~6