

第1章 综述

1.1 黄河水资源利用与管理的主要问题

1.1.1 水资源总量不足,供需矛盾突出

黄河流域多年平均河川天然径流量 534.8 亿 m^3 (1956 ~ 2000 年系列), 仅占全国河川径流量的 2%, 人均年径流量 473 m^3 , 仅为全国人均年径流量的 23%, 却承担着全国 15% 的耕地面积和 12% 的人口的供水任务, 同时还有向流域外部分地区远距离调水的任务。黄河又是世界上泥沙最多的河流, 有限的水资源还必须承担一般清水河流所没有的输沙任务, 使可用于经济社会发展的水量进一步减少。

随着经济社会的发展, 黄河流域及相关地区耗水量持续增加, 水资源供需矛盾日益突出。不断扩大的供水范围和持续增长的供水要求, 使水少沙多的黄河难以承受。黄河流域供水量由 1980 年的 446 亿 m^3 增加到目前的 512 亿 m^3 ; 受人类活动和气候变化的双重影响, 20 世纪 90 年代黄河平均天然径流量减少为 437 亿 m^3 , 利津断面实测水量仅为 119 亿 m^3 , 实际消耗径流量已达 318 亿 m^3 , 占天然径流量的 73%, 已超过其承载能力。根据《黄河流域水资源综合规划(2010 年)》成果, 未来 20 年黄河水资源将进一步减少, 而水资源需求还将不断增加, 2020 年和 2030 年黄河流域缺水量将分别达到 75 亿 m^3 和 104 亿 m^3 , 缺水率分别为 15% 和 19%, 水资源短缺将成为黄河流域经济社会发展面临的最大挑战之一。

20 世纪 70 年代以来, 随着黄河流域经济的发展和用水量的增加, 加上降水偏少等因素, 黄河入海水量大幅度减少, 河流生态环境用水被挤占。据 1991 ~ 2000 年统计, 黄河平均天然径流量 437.00 亿 m^3 , 利津断面下泄水量 119.17 亿 m^3 。按黄河流域多年平均利津断面应下泄水量 220 亿 m^3 , 按照丰增枯减的原则计算, 1991 ~ 2000 年平均利津断面下泄水量应达到 179.77 亿 m^3 , 黄河河流生态环境用水被挤占 60.60 亿 m^3 , 在多年平均来水情况下, 生态环境用水被挤占 26 亿 m^3 。河道内生态环境用水被大量挤占导致黄河断流频繁。1972 ~ 1999 年的 28 年间, 黄河下游 22 年出现断流。最下游的利津水文站累计断流 82 次、1 070 d。尤其是进入 20 世纪 90 年代后, 几乎年年断流, 断流最严重的 1997 年, 断流时间长达 226 d, 断流河段达到开封。同时, 河道内生态水量不足, 也导致出现河道淤积、“二级悬河”加剧、水环境恶化等一系列问题。1999 年开始黄河水量调度以来, 虽然黄河下游没有出现断流, 但这是在严格控制上中游用水的情况下取得的, 且不少时段黄河下游最小流量也只有十几立方米每秒, 远没有达到功能性不断流的要求。

1.1.2 纳污量超出水环境承载能力, 水污染形势严峻

黄河流域匮乏的水资源条件决定了极为有限的水体纳污能力, 水环境易被人为污染。

随着流域经济社会和城市化的快速发展,黄河流域废污水排放量翻了一番,由 20 世纪 80 年代初的 21.7 亿 t 增加到 2010 年的 43.6 亿 t。大量未经任何处理或有效处理的工业废水和城市污水直接排入河道,造成流域内 23% 的河长水质劣于 V 类,将近一半的河长达不到水功能要求。

黄河水域纳污能力分布与流域经济社会发展布局不协调,水功能区超载严重。受流域经济社会布局、沿河地形条件等影响,黄河流域污染物入河相对集中,与流域纳污能力分布不匹配,主要纳污河段以约 20% 的纳污能力承载了全流域约 90% 的入河污染负荷,尤其是城市河段、水功能区超载严重,造成了河流污染。黄河流域接纳入河污染物的水功能区 274 个,占流域水功能区总数的 46.2%,其 COD、氨氮纳污能力分别为 73.91 万 t、3.42 万 t,占流域总量的 60% 左右。其中,污染物入河量大于水域纳污能力的超载水功能区 197 个,是流域入河污染物控制的重点,COD、氨氮纳污能力分别为 25.45 万 t、1.03 万 t,仅占流域总量的 20.3%、17.7%,现状 COD、氨氮的入河量分别为 93.16 万 t、8.66 万 t,是纳污能力的 3.7 倍和 8.4 倍。

黄河流域工业产业结构不合理,高耗水、重污染和清洁生产水平低下的工业企业在流域广为分布,工业废水超标排放严重;城市生活污水处理率低于全国平均水平;污染物排放集中,局部水域污染物入河量严重超过纳污能力;饮用水安全受到威胁;农业面源污染基本没有得到控制。水环境的低承载能力和流域高污染负荷,以及低水平的污染治理手段与控制技术,造成了黄河流域日趋严重的水污染问题,省际间的水污染矛盾日益突出,流域水污染形势十分严峻。

1.1.3 水资源管理尚不能满足现代流域管理的需要

多年来,黄河流域水资源管理取得了一定成就,实施了黄河可供水量的分配。1987 年国务院以国办发〔1987〕61 号文批准了南水北调生效前的《黄河可供水量分配方案》(简称“87 分水方案”),规定了各省(区)的分配水量;编制完成的《黄河可供水量年度分配及干流水量调度方案》,于 1998 年经国务院批准由国家计委和水利部联合颁布实施,为黄河水资源的管理和调度奠定了基础,1999 年开始实施全河干流的水量统一调度。2006 年国务院颁布《黄河水量调度条例》,进一步确立了黄河水量调度的法律依据。同时,取水许可、建设项目水资源论证、水权转换试点等多项工作都卓有成效。所有这些,对促进水资源的一体化管理的发展都具有十分重要的意义,但与黄河水资源短缺、水环境持续恶化的形势和水资源调度管理的复杂性相比,当前水资源管理的方法和手段尚不能满足现代流域管理的需要。

缺少水质水量一体化适用、有效的工具系统,不能同步开展水质水量的综合管理决策的效果模拟与分析。水资源是水质和水量的统一体,长期以来黄河水资源管理注重水量管理和调度,先后建立了黄河水量调度系统、数字黄河、下游枯水调度等模型和软件系统;但对于水质的调度和管理考虑较少,忽视了水质的同步调度,水质模型开发缺失,一体化的模型系统尚待形成,不能满足流域水质水量统一管理要求。

缺乏落实最严格水资源管理制度的指标体系,过程管理的指标缺失,不能指导流域严格、精细管理。当前黄河主要实施的是省(区)、地市分配水量与取水许可制度,黄河水量

调度执行的“87 分水方案”分配的是全河耗水总量指标,不利于水量调度过程的取水控制,总量控制及定额管理相结合的水量管理技术体系尚不完善;以定额管理为基础的节约用水行为规范尚未实行,不利于实施用水监测和效率控制;缺乏流域细化的污染物入河控制方案,入河污染物控制缺乏依据,以水功能区为单元的地表水水质管理制度还未建立,而对于污染物入河控制也仅限于事后的评价,缺乏可用于科学指导控制河段、排污口许可的污染物总量和过程。

随着经济社会的迅速发展,流域水资源管理将面临更加复杂的形势,诸多方面急需进一步提高和完善。

1.2 水质水量一体化研究进展

1.2.1 研究进展

水资源是符合一定水质要求的水量,水资源中的水量和水质具有统一性。但在以往的水资源管理和调度决策中,通常只考虑了水量的分配而忽视了水质要求,对水量进行了优化配置而未考虑水污染因素的影响,这违背了水量和水质不可分离的特性,因此配置方案不能满足流域用水户的水质水量需求。而水污染物的总量控制,是在假定不同频率设计流量的基础上进行污染物最大允许排放量和削减量的计算,缺乏对水量过程的优化,也没有明确提出排放过程的控制方案。以往的水质水量配置研究,缺乏一体化的模型工具,通常是将水质作为约束条件,满足特定断面下泄水量或者流量要求,水质水量缺乏直接耦合,水质模拟具有滞后性。因此,需要通过有效的模型方法来集成水量和水质变量,解决水质水量的一体化配置与调度问题。

水质水量一体化配置与调度是一个高维复杂的巨系统,水量配置方面需要考虑水量演进及工程运用,水量配置涉及经济社会效益与生态环境效益平衡问题,水质配置方面需要分析污染物迁移、转化的水环境效果。随着水量短缺和水环境持续恶化问题的凸显,水质水量联合调控是当今国内外用于改善水环境研究的前沿和热点之一。

较早期的水资源优化配置研究通常强调水量的配置,将水环境等作为约束条件。优化模型的目标函数可以有以下几种:满足所有用水户需水目标,最小的费用,最佳的生态经济净效益。约束条件主要分为4类:水文约束条件,主要有河流水量平衡约束、水库水量平衡约束、节点水量上下限约束;物理约束条件,有储水、抽水和配水能力等物理工程条件限制;水资源管理制度约束条件,有用水权约束和生态、生活、生产用水优先性约束;水质约束条件,其中的水质模型可以是一、二、三维的恒定或非恒定流模型。

早在20世纪80年代国外就开始了水质水量研究。1983年,澳大利亚昆士兰、新南威尔士及维多利亚等州联合开展IQQM模型的研发,开始了水质水量一体化调度的尝试。DHI也着手开发了MIKE系列,可以系统地开展洪水演进、水环境演算等工作。1989年,Loftis等使用水资源模拟模型和优化模型研究了综合考虑水质水量目标下的湖泊水资源调控方法。1996年,Willey等在考虑洪水控制、水电、河道内流量和水质控制等目标下,利用水质模型(HEC-5Q)分析水库水量调度对下游水质的影响。1998年,Pingry等在科罗

拉多流域建立了水质水量联合调控决策支持系统,研究了水资源配置规划和水污染处理规划平衡问题。同年, Hayes 等为更好地满足水库下游水质目标,结合水质水量和发电的优化调控模型,分析了 Cumberland 流域水库调控规则。Azevedo 等利用了网络流优化模拟模型 MODSIM 与水质模型 QUAL2E,考虑了模型参数的时空变量不确定性和资料的缺乏,建立水质水量集成评价指标,采用多准则评价法来获得流域水资源配置的满意方案。2008 年, Se Woong 等在 Geum River 流域模拟分析了不同水库下泄流量情况下对下游水质的影响,并利用实际监测水质数据对模型进行了验证。2010 年, Javier 等在西班牙 Manzanares 河流建立了水质支撑系统,重点分析了上游 ElPardo 水库及下游几座污水处理厂对水质的影响程度,提出改善水生态环境的方法。

2000 年以后,国内才开始研发水质水量一体化模型并应用于主要河流的水质水量调配研究,并取得了一些进展。2005 年,张俐针对有机物和重金属污染特征,采用 GIS 技术的支持,分别建立了一维水质模型和二维水质模型,并将水量模型和水质耦合起来进行西江广东段的水质预警预报。李大勇等利用感潮河网水量和水质数学模型,对调水方案实施后主要监测断面的水质进行预测,分析了各个监测断面调水后的水质变化趋势,提出综合整治张家港地区水环境的最佳方案;尹明万等研究了多水源、多工程、多传输系统的复杂水资源系统的生活、生产和生态需水配置模型,在约束条件中考虑了河道水质和生态需水水质要求。2007 年,栾震宇利用调整水闸调度方式研究其在改善淮河流域水环境中的作用,分析了不同水闸调度方式对污染迁移的影响。2009 年,付意成等构建了松花江流域以水功能区水质为目标的水质水量联合调控模型,以水量调节为基础,通过计算流域内的纳污能力,来确定污染负荷削减量,满足水功能区水质要求。同年,董增川等建立了太湖流域水质水量模拟与调度的耦合模型,分析了不同调水方案对常规水质指标的影响;刘玉年等针对淮河中游的特点,建立了一个能适应水系密布、河网交错、水库闸坝众多、相互制约等复杂水流条件和防污调度要求的一、二维水质水量耦合的非恒定流模型,预测和评价各种调度方案的改善水质效果。2010 年,左其亭等重新全面分析了闸坝的水质水量作用规律,考虑了闸坝扰动导致河流底泥变化引起的水质变化。2010 年,尤进军通过分析水质水量调配的需求,总结了水质水量联合调控目标和思路。2012 年,孙少晨针对寒区污染物迁移转化规律,建立数学模型研究了冰期松花江流域的水质水量一体化调控的方案。

水质水量集成模型求解通常采用大系统分解协调、分步优化的方法,大致思路是将高维复杂的问题分解、分步解决,求解技术是通过建立水质水量变量的优化模型并对它逐步求解来实现的,通过确定目标或约束条件与水质水量变量之间的函数关系,水质水量耦合变量可能出现在目标函数或约束条件中。

第一种方法,先固定水质,求水量,即先根据研究区污染物排放和处理水平,确定最终进入水体的污染物量,根据不同的污染物处理水平来确定所需的不同等级的生态环境需水量。

第二种方法,先固定水量,求水质,即首先假定水质满足水体使用用途的前提下,保证水体具有一定流速和流量,并满足不同等级生物栖息地要求的需水量,然后将水量作为外部变量输入水质模型中,求得为满足水质控制目标所必需的污染物总量控制,保证水体水质满足其生态功能需求。通过以上两种方法寻求最优的水质水量协调解。

1.2.2 存在的主要问题

纵观国内外水质水量一体化研究成果取得了长足进步和十分丰硕的成果,解决了水资源配置过程中的质量分离问题,为水资源系统决策提供了有力的技术支撑,但从模型和方法研究方面看仍存在以下几个方面的不足:

(1) 研究多侧重于同步模拟,缺少优化思想。研究通常是将水量结果输入水质模型中考察分配结果是否满足流域时空水质目标,采取从提高污染物的去除水平到增加约束条件的方法来重新求解水量模型。没有实现真正意义上的实时反馈修正的功能,因此只能解决水质水量配置层面的问题,而不能指导水质水量一体化配置。

(2) 对水库群联合调控研究不够深入,缺少系统的思想。研究多针对单一水库或闸坝系统调度对水质水量的影响,没有深入水库群联合调度下水质水量一体化的调配问题。水库群联合调度问题极为复杂,不但可实现水量的优化配置而且可提高水环境承载能力,因此水库群优化调度对于河流水质水量一体化调配具有重要意义。

(3) 模型多针对具体河流,缺少通用性系统。研究多针对具体河流进行概化,边界条件设置相对固定,不灵活,应用具有局限性,缺少通用性的模型软件系统。

1.3 模型引进的需求分析

受气候变化和人类活动双重影响,黄河径流衰减显著,加之经济社会发展对水资源需求及污染物排放量的不断增加,黄河正面临水资源短缺、水环境恶化等问题交织的严峻局面,急需从战略层面系统研究水质水量一体化管理模型和方法,基于水资源和水环境承载能力优化河流水量过程、改善水环境。在以往的黄河水资源管理决策中,往往只考虑了水量的分配而忽视了水质要求,违背了水量和水质不可分离的特性,因此决策方案不能满足不同用水户及水功能区对水质的要求,需要通过有效的模型方法来集成水量和水质变量为一体化的决策提供支撑。

为解决日益尖锐的黄河流域水资源供需矛盾,科学合理地分配有限的黄河水资源,2002年,黄河水利委员会(简称黄委)以水量实时调度为核心开发了黄河水量调度系统,实现了黄河水量调度的现代化、信息化。针对非汛期小流量问题,开发了枯水调度模型,为枯水防断流提供了重要工具。目前,黄河水量调度主要考虑的是取水总量控制,对水质因素考虑较少,没有明确提出污染物控制要求。黄委此前开发了大量水量调度和管理数学模型,与国内众多的水量调度模型一样仅是将水质问题作为约束条件进行概化,尚未建立起水质水量一体化模型,因此缺乏指导水质水量一体化管理和调度的有效方法和手段,影响了统一管理和调度效果。对于当前黄河水资源面临水质水量的双重压力,黄河现有水量调度手段已不能满足解决黄河水资源问题的要求。

黄河水资源供需矛盾十分突出、水环境问题突出,为了有效地管理流域水资源,不仅要满足各种用水户的需水量要求,合理调配水资源,还要关注水中的各种成分是否满足使用要求和循环利用要求,因此当前黄河流域水资源管理要求在流域时空维上有效分配水资源的量和质。作为水质水量一体化配置与调度方案的技术支持和决策支持工具,高效

的模型可以为水质水量的配置与调度提供情景分析和决策支持,从而为方案的制订和决策提供科学依据。

当前国内水质水量一体化模型尚处于起步阶段,未形成成熟的模型系统。国际通用的水资源统一管理模型有 AQUATOR、IQQM、SWAT、REALM、WEAP、MIKE BASIN 和 River Ware 等 7 个,从技术标准和非技术标准层面分析,模型各自的特点和性能有所差别。

模型评估标准,模型评估通常采用技术标准与非技术标准相结合进行考核。技术标准主要考虑模型的功能和性能、模型的复杂性、数据要求。非技术的标准包括优化灵活的界面、运行模型所需要的技术水平、支撑配置与调度的能力、模型购买和维护的成本、技术支撑的实用性。国际通用的水资源管理模型性能比较见表 1-1。

表 1-1 国际通用的水资源管理模型性能比较

模型名称	IQQM	AQUATOR	MIKE BASIN	REALM	River Ware	SWAT	WEAP
开发国家	澳大利亚	英国	丹麦	澳大利亚	美国	美国	美国
模拟类型	以规则为基础	以规则为基础	以规则为基础 或优化模型	优化模型	以规则为基础 或优化模型	以规则为基础	优化模型
功能与性能	适当	适当	好	适当	适当	适应性不强	适当
地表水和地下水联合运用	是	是	综合性	是	是	综合性	是
水质模拟	是	否	需要典型模块	有限	有限	综合性	是
详细的灌溉用水需求模拟	是	否	需要典型模块	否	否	是	是
河流演进	是	否	是	否	是	是	否
模拟步长	灵活(月、日)	日	灵活(月、日)	灵活(月、日)	灵活(月、日)	日	灵活(月、日)
GIS 界面	是	否	综合性	否	否	是	是
数据要求	高	中、高	高	中	高	非常高	中
模型复杂性	高	中、高	高	中、高	高	非常高	中
模型灵活性	好	好	好	好	好	好	好
用户友好/ 运用灵活性	灵活	一般	一般	一般	一般	一般	灵活

从技术角度分析,国际通用的 7 个模型基本都可以运用于黄河水资源的配置与调度管理,模型的选择通过取决于应用的目的,IQQM 模型(后升级更名为 Source)运用网络线性程序,通过确定优先序和费用相结合,运用优化方式,模拟河流系统的运作。模型系统集成成了水量、水质、灌溉模型实现多目标宏观决策和工程实时调度管理,具有模拟和优化功能,模型具有面向对象、视窗界面、灵活易用等优点,符合黄河水资源的水质水量一体化配置与调度、干流与支流的统一配置与调度、地表水地下水一体化管理的需求。

IQQM 模型研发是主要针对澳大利亚墨累-达令河流域水质水量问题开展的,墨累-达令河与黄河相比具有许多相似之处,具有对比研究的基础:①流经干旱半干旱地区,水资源短缺、供需矛盾突出;②生态环境脆弱,水环境问题凸显;③流域地跨多个行政区,水量分配和水量协调调度问题由来已久。相比墨累-达令河流域而言,黄河流域的突出特征是:①水资源分配时空更加不均、产水主要在上游,年内年际变化大,汛期水量所占

比重大;②水沙关系不协调、河流含沙量大、输沙水量需求大;③沿黄排污多,点源污染严重,因此黄河面临更深层次的水质和水量问题。引入 IQQM 一方面可作为黄河水质水量一体化配置和调度的工具,另一方面可借鉴墨累-达令河在控制污染协调水量方面的管理理念和经验。

模型的引入和改进可使得黄河流域大范围的时空尺度,多水源水质的高维、多变量的战略性水质水量一体化决策成为可能,通过对水质水量模型进行适当本土化改进,可实现水质水量优化决策的可视化和自动化。

1.4 研究的技术路线

根据项目研究目标和任务,采用野外调查、室内分析、模拟与集成相结合的方式,按照“基础整备—规律分析—模型构建—方案研究—成果评估”的整体技术路线开展研究,拟定研究的技术路线见图 1-1。

1.4.1 基础整备

通过现场调查与资料收集整理模型所需的水文气象、经济社会、污染物排放量和入河量、生态环境、水资源利用、水量调度等方面的基础数据。

1.4.2 规律分析

分析兰州至河口镇河段降水、径流、污染物及水力特征作为模型的基础输入和便捷条件。分析降水径流及其演变趋势、产流产污特征,分析河段取水与退水变化、排水排污规律以及污染物入河变化,分析黄河上游主要水库历史调度特点,分析河段的主要水力学特征。

1.4.3 模型构建

研究 IQQM 模型各模块的结构和功能,分析模型应用于黄河上游的适用性和局限性,对模型的水质模拟、灌溉决策等相关模块开展适应性的修改;根据 IQQM 建模思路,按照径流、取水、退水、排水及重要断面的水力联系,绘制黄河上游河段物理概化的节点图,通过模型耦合建立黄河兰州—河口镇河段水质水量一体化配置和调度模型;根据黄河兰州至河口镇河段水量演进、水质模拟的关键指标,确定模型主要参数开展率定,采用 2000 ~ 2007 年实测水质水量监测数据对模型水量和水质参数进行率定,利用 2008 ~ 2010 年实测数据进行模型适应性和可靠性的验证。

1.4.4 方案研究

分析黄河流域水资源管理现状及存在的问题,根据黄河流域水资源开发利用和保护的需要设置不同情境;选择黄河干流兰州—河口镇河段水质水量观测资料齐全的 1956 ~ 2000 年系列,开展水质水量一体化配置的方案研究;选择系列中的典型年份开展模型水质水量一体化的实时调度方案研究。开展未来不同情景下黄河上游水质水量一体化的年度配置方案模拟,并通过方案实施的效果评价比选,提出黄河上游水质水量一体化配置方

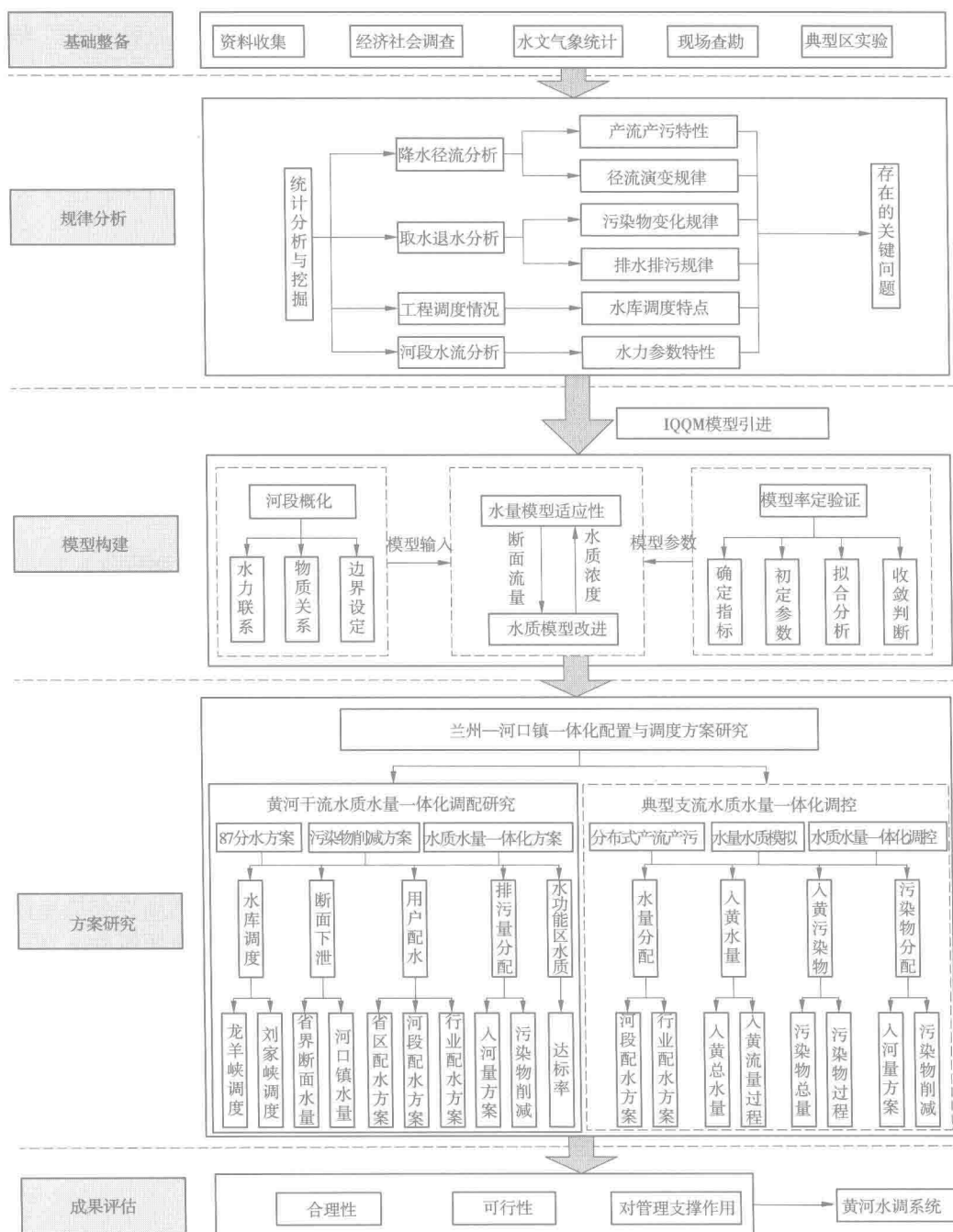


图 1-1 基于 IQQM 模型的黄河水质水量一体化配置和调度研究技术路线

案;根据黄河水质水量调度的需求,将水质水量一体化配置方案,断面水量、水库调度、水功能区划水质、用户配水、污染物排放分配,水质水量配置方案进行细化到以周为时间步长,提出细化的水量调度和污染物控制方案。

以兰州—河口镇区间祖厉河为典型支流,开展模型的径流、用水、排水及主要水环境指标等进行参数估值,开展从产流、产污模拟,到水质水量双控制的实现,实现流域一体化配置与调度。

1.4.5 成果评估

从断面水量、水库调度、水功能区水质、用户配水、污染物排放分配等方面分析水质水量一体化配置与调度方案的合理性、可行性,并结合模型应用论证系统嵌入黄河水调系统的可行性。

第2章 河段概况

黄河兰州—河口镇河段属于黄河上游,河长 1 342.9 km,涉及甘肃省、宁夏回族自治区和内蒙古自治区,流域面积 16.36 万 km^2 ,位于我国西北干旱半干旱地区。兰州—河口镇区间能源、矿产、土地资源丰富,沿黄河分布着一些重要城市、工业基地和主要灌区,是甘肃、宁夏、内蒙古等省(区)经济开发的重点地区,对于国家能源开发、粮食生产和环境保护具有十分重要的战略意义。黄河兰州—河口镇河段年均产水量不足 20 亿 m^3 ,而用水量接近 180 亿 m^3 ,占黄河流域总用水量的 40% 以上,是黄河水量的主要消耗区;主要污染物入河量占全河的 30% 以上,废污水排放量大且集中,是黄河流域水资源和水环境问题最突出的区域之一。

2.1 自然概况

2.1.1 地形地貌

黄河兰州—河口镇区间位于黄河流域第二级阶梯,包括黄河河套平原和鄂尔多斯高原。黄河河套平原西起贺兰山、大青山,东到呼和浩特、和林格尔,南达鄂尔多斯高原,北抵狼山、大青山,长约 750 km,最宽处达 50 km 以上,海拔一般在 1 000 ~ 1 200 m,是黄河的冲积平原,分为宁夏河套平原和内蒙古河套平原。鄂尔多斯高原西、北、东被黄河河湾怀抱,东南部以古长城为界和陕北黄土高原相接,地势从西北向东南微倾,起伏和缓,海拔一般为 1 300 ~ 1 500 m,最高点桌子山海拔 2 149 m。

2.1.2 河流水系

黄河兰州—河口镇区间流域面积大于 1 000 km^2 的河流有 26 条,其中流域面积大于 10 000 km^2 的支流有祖厉河、清水河和大黑河,其他河流大都为季节性河流,产水比较少。祖厉河位于甘肃省境内,流域面积 10 653 km^2 ,多年平均天然径流量为 1.53 亿 m^3 ,其中汛期 7 ~ 10 月径流量为 0.92 亿 m^3 ,占河流年径流量的 60%。清水河流经甘肃省和宁夏回族自治区,流域面积 14 481 km^2 ,多年平均天然径流量为 2.02 亿 m^3 ;大黑河位于内蒙古自治区境内,流域面积 17 673 km^2 ,多年平均径流量为 1.08 亿 m^3 。

2.1.3 气候特征

黄河兰州—河口镇区间,气候干燥、降水量少,多沙漠干旱草原,是黄河流域最干旱的地区,多年平均降水量 261.7 mm,降水量总的趋势是由东南向西北递减,内蒙古的河套地区是黄河流域降水最小的地区,多年平均降水量在 150 mm 左右,内蒙古杭锦后旗、临河一带多年平均降水量则在 150 mm 以下,为黄河流域低值区。

兰州—河口镇区间蒸发量由东南向西北递增,多年平均水面蒸发量 1 360 mm,河套地区最大水面蒸发量达到 2 000 mm。全年最小月蒸发量一般出现在 1 月或 12 月,最大月蒸发量出现在 5~7 月,5~7 月各月蒸发量占年总量的 15% 左右。

2.1.4 矿产资源

兰州—河口镇河段煤炭资源丰富,具有资源雄厚、分布集中、品种齐全、煤质优良、埋藏浅、易开发等特点。兰州—河口镇河段目前有宁夏宁东和内蒙古鄂尔多斯能源基地。宁东能源基地是国家规划建设 13 个亿吨级大型煤炭基地之一,位于银川市黄河以东,煤炭远景预测储量 1 390 多亿 t,探明地质储量约 270 多亿 t,占宁夏煤炭探明总储量的 88.6%,是宁夏回族自治区近期重化工基地的重点开发建设区域。鄂尔多斯市是我国煤炭主要资源地和生产基地,境内拥有准格尔、东胜和桌子山三大煤田。目前,全市煤炭已探明储量为 1 496 亿 t,预测远景储量 10 000 亿 t,其中探明储量约占全国的 16.67%,约占内蒙古自治区的 50%。

兰州—河口镇河段矿产资源丰富,主要金属矿产有铁、铜、铅锌等,非金属矿产有黄铁矿、芒硝、耐火黏土、石墨等。兰州—河口镇河段有灵武—同心—石嘴山区和内蒙古河套地区资源集中区,形成了各具特色和不同规模的生产基地,进行集约化开采利用。

2.1.5 土地资源

兰州—河口镇河段土地面积 16.3 万 km²。区内地势平坦,土地肥沃,引水方便,灌溉历史悠久,耕地约占总土地面积的 50% 以上,是宁蒙两区乃至全国的重要粮食基地,素有“黄河百害,唯富一套”之美称。宁蒙河套灌区主要由宁夏境内的青铜峡灌区、卫宁灌区和内蒙古境内的河套灌区组成。灌区土地总面积 1.73 万 km²,其中宁夏灌区总面积 0.61 万 km²,内蒙古灌区总面积 1.12 万 km²。

2.2 水资源条件

2.2.1 水资源量

兰州—河口镇河段水量主要来自于兰州以上,根据黄河流域水资源调查评价成果,兰州断面 1956~2000 年多年平均天然径流量 329.9 亿 m³,占黄河多年平均天然径流量的 62%。兰州—河口镇河段地处干旱、半干旱地区,降水少,蒸发大,产流少,河段内汇入的主要河流为祖厉河、清水河和苦水河,区间产水量 17.7 亿 m³,扣除干流河道蒸发渗漏损失,河口镇断面多年平均天然径流量为 331.8 亿 m³。

根据《黄河流域水资源综合规划(2010 年)》,兰州—河口镇区间(含内流区)年平均地下水资源量为 46.2 亿 m³,地下水可开采量为 38.5 亿 m³,地下水与地表水不重复量 22.7 亿 m³。综合以上,兰州—河口镇区间河川天然径流量为 1.9 亿 m³,地下水与地表水不重复量 22.7 亿 m³,水资源总量 24.6 亿 m³。

2.2.2 地表水天然水化学

黄河流域的地表水大多为重碳酸盐类,矿化度在地区分布上差异较大,低矿化度、中矿化度、较高矿化度和高矿化度水的分布面积,分别占流域总面积的 10.4%、41.9%、27.4% 和 20.3%。兰州以下的清水河、苦水河等支流为高矿化度区域,兰州以下干流河段为中矿化度区域。

2.3 工程概况

2.3.1 河段梯级工程

黄河兰州—河口镇干流河段的来水主要受上游龙羊峡和刘家峡等大型水电工程的影响。黄河河口镇以上干流河段规划 26 座梯级工程,其中兰州以上规划 14 座梯级水电站,已建 12 座梯级水电站,包括龙羊峡、拉西瓦、刘家峡等大型水电站工程;兰州以下—河口镇区间规划 12 座梯级工程,目前已建、在建 10 座梯级水电站工程,该河段的梯级工程调节能力较小。黄河龙羊峡—河口镇河段干流梯级工程主要技术经济指标见表 2-1。

表 2-1 黄河龙羊峡—河口镇河段干流梯级工程主要技术经济指标

序号	工程名称	建设地点	控制面积 (万 km ²)	正常 蓄水位 (m)	总库容 (亿 m ³)	有效库容 (亿 m ³)	最大水头 (m)	装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kWh)
1	• 龙羊峡	青海 共和	13.1	2 600	247.0	193.5	148.5	1 280	59.4
2	• 拉西瓦	青海 贵德	13.2	2 452	10.1	1.5	220	4 200	102.2
3	• 尼那	青海 贵德	13.2	2 235.5	0.3	0.1	18.1	160	7.6
4	山坪	青海 贵德	13.3	2 219.5	1.2	0.1	15.5	160	6.6
5	• 李家峡	青海 尖扎	13.7	2 180	16.5	0.6	135.6	2 000	60.6
6	• 直岗拉卡	青海 尖扎	13.7	2 050	0.2	—	17.5	192	7.6
7	• 康扬	青海 尖扎	13.7	2 033	0.2	0.1	22.5	283.5	9.9
8	• 公伯峡	青海 循化	14.4	2 005	5.5	0.8	106.6	1 500	51.4
9	• 苏只	青海 循化	14.5	1 900	0.3	0.1	20.7	225	8.8
10	• 黄丰	青海 循化	14.5	1 880.5	0.7	0.1	19.1	225	8.7
11	• 积石峡	青海 循化	14.7	1 856	2.4	0.4	73	1 020	33.6
12	大河家	青海 甘肃	14.7	1 783	0.1	—	20.5	120	4.7
13	• 炳灵	甘肃 积石山	14.8	1 748	0.5	0.1	25.7	240	9.7
14	• 刘家峡	甘肃 永靖	18.2	1 735	57.0	35	114	1 690	60.5
15	• 盐锅峡	甘肃 兰州	18.3	1 619	2.2	0.1	39.5	472	22.4
16	• 八盘峡	甘肃 兰州	21.5	1 578	0.5	0.1	19.6	252	11.0
17	河口	甘肃 兰州	22	1 558	0.1	—	6.8	74	3.9

续表 2-1

序号	工程名称	建设地点	控制面积 (万 km ²)	正常 蓄水位 (m)	总库容 (亿 m ³)	有效库容 (亿 m ³)	最大水头 (m)	装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kWh)
18	• 柴家峡	甘肃 兰州	22.1	1 550.5	0.2	—	10	96	4.9
19	• 小峡	甘肃 兰州	22.5	1 499	0.4	0.1	18.6	230	9.6
20	• 大峡	甘肃 兰州	22.8	1 480	0.9	0.6	31.4	324.5	15.9
21	• 乌金峡	甘肃 靖远	22.9	1 436	0.2	0.1	13.4	140	6.8
22	黑山峡	宁夏 中卫	25.2	1 380	114.8	57.6	137	2 000	74.2
23	• 沙坡头	宁夏 中卫	25.4	1 240.5	0.3	0.1	11	120.3	6.1
24	• 青铜峡	宁夏 青铜峡	27.5	1 156	0.4	0.1	23.5	324	13.7
25	• 海勃湾	内蒙古 乌海	31.2	1 076	4.9	1.5	9.9	90	3.6
26	• 三盛公	内蒙古 磴口	31.4	1 055	0.8	0.2	8.6		
合计					467.7	292.9		17 418.3	603.4

注: • 为已建、在建工程。

龙羊峡水库具有调节库容 193.5 亿 m³, 可以对黄河水量进行多年调节, 补充枯水年全河水量的不足, 实现年际间水资源的合理配置。刘家峡水库对水量进行年内调节, 拦蓄黄河汛期水量以补充枯水期水量的不足, 提高沿黄两岸的供水保证率, 增加上游梯级水电基地的发电效益。

根据龙羊峡和刘家峡两水库建成后的 1998 年 7 月 ~ 2010 年 6 月系列, 从水资源年内分配来看, 龙刘水库汛期 (7 ~ 10 月) 多年平均蓄水量为 54.0 亿 m³, 最大蓄水量达 120.6 亿 m³ (2005 年), 非汛期 (11 月 ~ 次年 6 月) 补水量多年平均为 44.7 亿 m³, 最大补水量达 64.4 亿 m³ (2005 ~ 2006 年); 从水资源年际配置来看, 两水库年最大蓄水量达 56.3 亿 m³ (2005 ~ 2006 年), 年最大增供水量为 39.0 亿 m³ (2002 ~ 2003 年); 2000 ~ 2003 年连续三个年度黄河来水特枯, 龙羊峡水库合计跨年度补水 75.2 亿 m³, 对特枯水年黄河不断流、保障生活和基本的生产用水起到了关键作用。由此看出, 两水库的建设在黄河水量的统一调度和合理配置中发挥了重要作用。

2.3.2 龙羊峡水库

龙羊峡水库位于黄河上游青海省共和县和贵南县交界的龙羊峡峡谷进口段, 距西宁市 147 km, 是一座具有多年调节性能的大型综合利用枢纽工程。龙羊峡水库坝址以上控制流域面积 13.1 万 km², 占黄河流域总面积的 16.5%, 多年平均流量 659 m³/s。龙羊峡水库大坝按千年一遇洪水标准设计, 设计洪水洪峰流量 7 040 m³/s; 按可能最大洪水校核, 校核洪水洪峰流量为 10 500 m³/s。多年平均入库悬移质输沙量为 2 490 万 t, 多年平均含沙量为 1.15 kg/m³。

龙羊峡水库设计正常蓄水位 2 600 m, 相应库容 247 亿 m³; 死水位 2 530 m, 相应库容 53.5 亿 m³; 汛限制水位 2 594 m, 设计洪水位 2 602.25 m, 校核洪水位 2 607 m, 总库容

274.19 亿 m^3 ; 水库调节库容 193.5 亿 m^3 , 库容系数 0.94, 具有多年调节性能。工程以发电为主, 目前与刘家峡水库联合运行承担青海、甘肃、宁夏、内蒙古河段的灌溉、防洪、防凌和供水等综合利用任务, 在黄河中下游水库严重缺水时, 还承担向中下游补水的任务。

龙羊峡水电站装机容量 1 280 MW, 保证出力 589.8 MW, 多年平均发电量 59.4 亿 kWh, 是西北电网调峰、调频和事故备用的主力电厂。通过和刘家峡水库及梯级水电站群联合补偿调节运行, 在发电、防洪、防凌、灌溉供水等方面取得了显著的经济效益。龙羊峡水库于 1979 年 12 月截流, 1986 年 10 月下闸蓄水, 1987 年 1、2 号机组发电。

2.3.3 刘家峡水库

刘家峡水电站位于甘肃省永靖县境内黄河干流上, 距兰州市 100 km。水库坝址位于洮河汇入口下游约 1.5 km 处。坝址以上控制流域面积 18.2 万 km^2 , 多年平均流量 885 m^3/s 。水库设计洪水(千年一遇)洪峰流量为 8 860 m^3/s ; 校核洪水(万年一遇)洪峰流量为 10 800 m^3/s 。刘家峡水库入库水量主要来自黄河干流贵德与洮河李家村以上河段, 入库沙量主要来自贵德和李家村以下的干支流区间。多年平均年输沙量 8 700 万 t(1947 ~ 1963 年), 多年平均含沙量 3.31 kg/m^3 。

刘家峡水库正常蓄水位为 1 735 m, 死水位 1 696 m, 正常蓄水位以下库容 57 亿 m^3 , 有效库容 35 亿 m^3 。电站原设计装机容量 1 225 MW, 后扩机增容后装机容量 1 690 MW, 年发电量 60.5 亿 kWh。刘家峡水库以发电为主, 还承担水库以下黄河干流甘肃、宁夏和内蒙古河段的防洪、防凌、灌溉和供水任务。

刘家峡水库于 1958 年 9 月开工建设, 1969 年 3 月第一台机组发电, 1974 年年底全部建成。

2.4 经济社会

2.4.1 人口和城镇化

兰州—河口镇区间地跨甘肃、宁夏和内蒙古三省(区), 分布有兰州、银川、包头、鄂尔多斯和呼和浩特等大中城市。2010 年区域总人口 1 737.26 万人, 占黄河流域总人口的 15.0%, 甘肃、宁夏、内蒙古人口分别为 410.96 万人、539.36 万人和 786.94 万人; 其中城镇人口 1 053.15 万人, 城镇化率为 60.6%; 人口密度为 106.2 人/ km^2 。

2.4.2 经济指标

截至 2010 年年底, 兰州—河口镇区间国内生产总值当年价为 7 843.76 亿元, 占黄河流域 GDP 的 21.8%, 人均 GDP 为 45 150 元, 比黄河流域人均 GDP 高 45.1% 左右。

2.4.2.1 农业灌溉面积

兰州—河口镇区间的内蒙古高原, 是我国主要的畜牧业基地; 宁蒙河套平原是我国主要的农业生产基地。现状农田有效灌溉面积为 2 476.9 万亩(1 亩 = 1/15 hm^2), 占黄河流域总有效灌溉面积的 31%, 甘肃、宁夏和内蒙古灌溉面积分别为 302.02 万亩、635.28 万亩和 1 539.62 万亩。农村人口人均农田有效灌溉面积 3.6 亩。现状农田实灌面积

2 170.1 万亩。

2.4.2.2 工业增加值

黄河兰州—河口镇区间分布有以兰州为中心的能源和水电、石化、有色金属和特色农产品加工产业基地,宁东能源基地,包头钢铁加工基地,内蒙古稀土加工基地,以及以鄂尔多斯盆地为重点的能源化工基地,是黄河流域经济社会较发达的地区,是国家重要能源、战略资源接续地和产业集聚区。据统计,2010 年区域工业增加值 3 251.55 亿元,占黄河流域的 19.3%,甘肃、宁夏和内蒙古区域工业增加值分别为 226.25 亿元、595.35 亿元和 2 429.95 亿元。

2.5 供用耗水现状

黄河兰州—河口镇河段降水量极少,当地水资源十分贫乏,农业灌溉和社会经济的生存与发展主要依赖黄河供水。根据国务院批准的《黄河可供水量分配方案》(国办发〔1987〕61 号),在南水北调工程生效前,正常来水年份甘肃、宁夏和内蒙古三省(区)分配耗用黄河水量 129.0 亿 m^3 ,占全河可供水量的 34.9%。河段用水主要集中在 5~7 月,占全年用水量的 65% 以上。由于灌溉用水比较集中,因此在 5~7 月经常出现灌溉用水无法满足的问题,灌溉经常会挤占生态用水,黄河干流河口镇断面流量经常小于生态流量。

2.5.1 现状供水量

2010 年黄河流域总供水量为 512.05 亿 m^3 (含跨流域调出的地表水量),其中地表水供水量 384.84 亿 m^3 ,地下水供水量 127.21 亿 m^3 。在黄河流域各分区供水量中,兰州—河口镇河段供水量最多,为 182.88 亿 m^3 ,占黄河流域总供水量的 35.7%。

2010 年兰州—河口镇河段供水量为 182.88 亿 m^3 ,其中地表水供水量 155.99 亿 m^3 ,占河段总供水量的 85.3%;地下水供水量 26.89 亿 m^3 ,占河段总供水量的 14.7%,可见兰州—河口镇河段供水以地表水为主,对黄河水依赖程度高。2006 年以来兰州—河口镇河段供水情况见表 2-2。

表 2-2 2006 年以来兰州—河口镇河段供水量 (单位:亿 m^3)

年份	地表水	地下水	合计
2006	159.27	26.02	185.29
2007	150.77	26.10	176.87
2008	150.82	26.60	177.42
2009	156.82	27.98	184.80
2010	155.99	26.89	182.88
均值	154.73	26.72	181.45

从表 2-2 可以看出,2006 年以来兰州—河口镇河段平均供水量为 181.45 亿 m^3 ,其中地表水供水量为 154.73 亿 m^3 ,地下水供水量为 26.72 亿 m^3 。近 5 年来地下水供水量变化不大,为 26 亿~28 亿 m^3 ;受上游来水影响,地表水年供水量为 151 亿~159 亿 m^3 。

2.5.2 现状用水量

2010 年兰州—河口镇河段总用水量为 182.88 亿 m^3 , 占黄河总用水量的 35.7%。在河段总用水量中农田灌溉用水量最大, 农田灌溉用水量为 146.07 亿 m^3 , 占河段总用水量的 79.9%; 林牧渔畜用水量为 10.23 亿 m^3 , 占河段总用水量的 5.6%; 工业用水量为 15.47 亿 m^3 , 占河段总用水量的 8.5%; 城镇公共用水量为 1.61 亿 m^3 , 占河段总用水量的 0.9%; 居民生活用水量为 4.72 亿 m^3 , 占河段总用水量的 2.6%; 生态环境用水量 4.78 亿 m^3 , 占河段总用水量的 2.6%。

2006 年以来兰州—河口镇河段平均用水量为 181.45 亿 m^3 , 其中农田灌溉用水量最大, 为 143.45 亿 m^3 , 占总用水量的 79.1%; 工业用水量次之, 为 15.89 亿 m^3 , 占总用水量的 8.8%; 林牧渔畜用水量为 13.56 亿 m^3 , 占总用水量的 7.5%; 其余为城镇公共、居民生活及生态环境用水量, 合计为 8.55 亿 m^3 , 占总用水量的 4.7%。

在地表水用水量中, 农田灌溉用水量最大, 为 130.27 亿 m^3 , 占地表水用水量的 84.2%; 其次为林牧渔畜用水量, 为 10.84 亿 m^3 , 占地表水用水量的 7.0%; 工业用水量 9.04 亿 m^3 , 占地表水用水量的 5.8%。

2006 年以来兰州—河口镇河段用水量见表 2-3。

表 2-3 2006 年以来兰州—河口镇河段用水量 (单位: 亿 m^3)

年份	项目	农田灌溉	林牧渔畜	工业	城镇公共	居民生活	生态环境	合计
2006	总供水	145.52	15.37	16.43	2.05	4.54	1.38	185.29
	其中地表水	132.84	12.66	9.66	1.10	1.97	1.04	159.27
2007	总供水	139.41	15.37	15.22	2.05	3.37	1.45	176.87
	其中地表水	126.58	12.47	8.66	1.00	0.86	1.20	150.77
2008	总供水	139.62	13.95	15.71	2.02	4.27	1.85	177.42
	其中地表水	126.91	11.88	7.66	1.00	1.67	1.70	150.82
2009	总供水	146.64	12.88	16.60	1.88	4.54	2.26	184.80
	其中地表水	132.37	9.97	10.10	0.60	1.76	2.02	156.82
2010	总供水	146.07	10.23	15.47	1.61	4.72	4.78	182.88
	其中地表水	132.66	7.24	9.08	0.71	1.85	4.45	155.99
均值	总供水	143.45	13.56	15.89	1.92	4.29	2.34	181.45
	其中地表水	130.27	10.84	9.04	0.88	1.62	2.08	154.73

2.5.3 现状耗水量

2010 年兰州—河口镇河段总耗水量为 122.49 亿 m^3 , 其中地表水耗水量为 103.54 亿 m^3 , 地下水耗水量为 18.95 亿 m^3 。在总耗水量中, 农田灌溉耗水量最大, 为 94.80 亿 m^3 , 占总耗水量的比例为 77.4%; 工业耗水量次之, 为 10.35 亿 m^3 , 占总耗水量的比例为 8.4%。

2006年以来兰州—河口镇河段平均耗水量为123.16亿 m^3 ,其中地表水耗水量为104.02亿 m^3 ,地下水耗水量为19.14亿 m^3 。分行业耗水量中,农田灌溉耗水量最大,为95.73亿 m^3 ,占总耗水量的比例为77.7%;林牧渔畜耗水量次之,为11.53亿 m^3 ,占总耗水量的比例为9.4%;工业耗水量为9.74亿 m^3 ,占总耗水量的比例为7.9%;其余为城镇公共、居民生活及生态环境耗水量6.15亿 m^3 ,占总用水量的5.0%。

在地表水耗水量中,农田灌溉耗水量最大,为84.67亿 m^3 ,占地表水耗水量的81.4%;其次为林牧渔畜耗水量,为9.25亿 m^3 ,占地表水耗水量的8.9%;工业耗水量6.11亿 m^3 ,占地表水耗水量的5.9%。

2006年以来兰州—河口镇河段耗水量见表2-4。

表2-4 2006年以来兰州—河口镇河段耗水量 (单位:亿 m^3)

年份	项目	农田灌溉	林牧渔畜	工业	城镇公共	居民生活	生态环境	合计
2006	总耗水	96.73	13.09	9.16	1.46	3.03	1.27	124.74
	其中地表水	85.63	10.73	5.77	0.99	1.69	1.01	105.82
2007	总耗水	95.81	13.17	8.34	1.29	1.84	1.22	121.67
	其中地表水	84.59	10.64	4.87	0.73	0.53	1.04	102.40
2008	总耗水	93.11	12.10	9.82	1.32	2.72	1.63	120.70
	其中地表水	82.44	10.36	5.42	0.78	1.33	1.54	101.87
2009	总耗水	98.22	10.79	11.02	1.12	3.00	2.03	126.18
	其中地表水	86.66	8.43	7.57	0.42	1.51	1.87	106.46
2010	总耗水	94.80	8.50	10.35	0.99	3.31	4.54	122.49
	其中地表水	84.07	6.11	6.89	0.52	1.66	4.29	103.54
均值	总耗水	95.73	11.53	9.74	1.24	2.78	2.14	123.16
	其中地表水	84.67	9.25	6.11	0.69	1.34	1.95	104.02

2.6 水环境状况

2.6.1 水功能区划

根据《全国重要江河湖泊水功能区划》(国函[2011]167号,2011年12月28日国务院批复),兰州—河口镇河段共划分有21个一级水功能区,其中保护区4个,保留区2个,开发利用区11个,缓冲区4个,见表2-5。

根据黄河流域重要江河湖泊二级水功能区划,在兰州—河口镇河段共划分有28个二级水功能区,其中饮用水源区5个、工业用水区1个(共3个,与饮用水源区重复2个)、农业用水区10个(共11个,与饮用水源区重复1个)、景观娱乐用水区1个、过渡区5个、排污控制区6个,详见表2-6。