

黄河流域水资源可持续利用多目标规划模型研究

彭少明^{1,2}, 黄 强¹, 张新海², 杨立彬²

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要 为了保障黄河流域水资源的健康可持续利用,在系统地研究了黄河流域水资源变化规律、预测流域社会经济发展状况的基础上,构建了黄河流域水资源利用的多目标规划模型,并探讨了多目标规划的水资源配置规则及优化配置的方法.通过研究提高黄河流域水资源承载水平的调控手段,提出了 21 世纪黄河流域水资源再生性科学对策和水资源可持续利用模式,指出水资源与经济的协调发展是解决人水矛盾的根本途径.

关键词 黄河流域 水资源 多目标 可再生性 协调

中图分类号 TV213 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2007)02-0153-06

1 黄河流域水资源供需状况

1.1 黄河流域水资源研究综述

黄河水少沙多,水资源问题十分突出.多年来,在黄河流域水资源的开发利用和科学调配方面,相继开展了一系列的规划和研究.如 1954 年完成的《黄河综合利用规划技术经济报告》,评价了黄河天然径流并制定了干流骨干工程的规划布局;1986 年黄河水利委员会完成的《黄河水资源利用》,系统地评价了黄河流域水资源及其开发利用现状,首次提出了我国大江大河水资源省际分配方案(“87 黄河分水方案”);1996 年,国家“八五”科技攻关项目“黄河流域水资源合理分配和优化调度研究”对黄河干流多库水量联合调度模型^[1]进行了研究.随着经济的快速发展,用水量不断增加,加之人类活动对下垫面的影响,黄河流域水资源紧缺形势日益严峻,因此,在 1998 年和 2001 年分别进行了“黄河流域水资源经济模型研究”^[2]和国家“九五”攻关项目“黄河流域水资源优化调度和合理配置”^[3]研究等.而国家重点基础研究发展规划“973”项目“黄河流域水资源演变的多维临界调控模式”课题^[4],则系统地研究了多目标、多层次、多过程、群决策框架下的水资源多维临界调控问题.

本文通过对黄河流域水资源多目标开发利用方式分析及模型的研究,探讨了流域水资源可持续利用的模式,以期黄河流域水资源的再生性维持提供一套可行的策略.

1.2 黄河水资源量及其演变规律

黄河流域 1956~2000 年 45 a 系列平均降水量 447 mm,黄河花园口断面多年平均天然径流量 532.8 亿 m³,较 1919~1975 年 56 a 系列评价的平均天然径流量 559.2 亿 m³ 少 26.4 亿 m³ [5],^①黄河各主要水文站天然径流量变化见表 1.

近 20 年来,由于气候变化和人类活动对下垫面条件的影响,黄河流域水资源情势发生了变化,黄河中游尤其显著,水资源量明显减少.比较

表 1 黄河各主要水文站天然径流量变化

Table 1 Variation of natural runoff
at main hydrological stations on Yellow River 亿 m³

年份	贵德	兰州	河口镇	三门峡	花园口	利津
1956~1979	207.3	335.0	335.5	494.1	543.9	551.0
1980~2000	204.8	322.4	326.2	463.2	510.3	512.0
1956~2000	207.2	329.9	331.7	482.7	532.8	537.8
1919~1975	202.8	322.6	312.6	498.4	559.2	580.0

1980~2000 年和 1956~1979 年 2 个时段水文系列,黄河流域平均降水总量减少了 7.2%,而天然径流量和水

收稿日期 2006-04-15
基金项目 国家“973”重点基础研究发展规划资助项目(G1999043608) 陕西省重点实验室资助项目(02JS37)
作者简介 彭少明(1973—),男,河南信阳人,博士研究生,主要从事水文水资源研究.
^① 黄河勘测规划设计有限公司.黄河流域水资源综合规划.2005.

资源总量分别减少了 18.1% 和 12.4% .引起黄河水资源量明显减少的原因一是降水偏枯,二是流域下垫面条件变化导致降雨径流关系变化:(a)人类活动改变了流域下垫面条件,导致入渗、径流、蒸发等水平衡要素发生一定的变化,造成径流减少.(b)水土保持生态建设改变了当地的下垫面条件,造成同样降水条件下产流量有所减少,如中游的龙门 1998 年和 1963 年降水量都在 432 mm 左右,但其产流量分别是 48.7 亿 m³ 和 60.1 亿 m³,1998 年产流量较 1963 年减少了 19% .

1.3 流域生态状况及其需水

黄河流域生态环境脆弱,呈现持续恶化趋势.上游天然草场分布辽阔,是我国的主要牧区之一.由于过度放牧以及草场严重超载,天然草场退化十分严重.据遥感资料分析,黄河源区的草原、草场每年以 12% ~ 20% 的速度在沙化.中游黄土高原地区由于不合理的开发利用加速了水土流失,是我国乃至世界上水土流失最严重的地区.近年来,进入河口地区的水量不断减少,河口地区新生陆地蚀退加剧,水污染严重,湿地和生物多样性受到威胁,滨海区生态环境日趋恶化.为了遏制流域生态环境系统进一步退化、维持黄河的正常功能,必须提供一定的生态水量,确保环境生态系统得到良性维持、逐步修复.根据前期研究结论^{[6],①},黄河流域生态环境低限需水量(包括水土保持用水量、非汛期生态基流、汛期输沙水量等)多年平均不得小于 210 亿 m³.

1.4 流域经济社会发展状况及其需水预测

21 世纪前 30 年是黄河流域经济社会发展的重要时期,经济发展保持快速增长的势头,并带动产业结构进一步调整.据预测,2030 年流域人口将达到 1.31 亿,经济增长率为 4.5% ~ 7.2%^{②,③}.按照这一发展趋势,对流域经济社会需水进行预测.流域经济社会指标及需水预测结果见表 2.

表 2 黄河流域经济社会状况及需水量

Table 2 Current situation of economy and society and volume of water demand of Yellow River Basin

水平年	生活		第一产业		第二产业		第三产业	
	人口/ 万人	需水量/ 亿 m ³	产值/ 亿元	需水量/ 亿 m ³	产值/ 亿元	需水量/ 亿 m ³	产值/ 亿元	需水量/ 亿 m ³
2000(现状)	10970	24.17	870.50	389.37	3022.67	63.90	2323.25	3.58
2010	12001	32.78	1456.34	371.60	7904.60	92.52	5830.64	6.38
2020	12676	41.43	2372.86	371.48	16818.49	114.03	12753.20	9.46
2030	13102	49.94	3624.13	371.66	31332.71	130.26	25367.46	13.06

注:表中不含黄河流域外供水范围的需水量.

随着流域人口的快速增长以及经济的高速发展,流域经济发展水平与现有水资源量间存在着尖锐的矛盾,供需形势十分严峻,必须研究新的水资源配置和可持续利用模式,并采取措施加以调控.

2 多目标优化模型

2.1 模型的建立

黄河流域水资源利用涉及防洪减灾、生态环境和水资源利用等,是典型的多目标决策问题.其多目标函数建立如下:

$$\max f(x) = f(S(x), E(x), B(x)) \tag{1}$$

a. 社会目标 $S(x)$: 主要涉及保证防洪和防凌安全、民族区域经济社会发展以及保障生活用水及粮食安全等.

b. 生态环境目标 $E(x)$: 提供必要的生态环境用水,维持河流正常功能、流域生态系统平衡,保证水环境达标.

c. 经济目标 $B(x)$: 通过合理调度,优化径流时空分布过程,使供水的效益最大化,并保证地区间及不同需水部门的水量合理分配.

$$\max B(w) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \{ \theta(i,t) - C(i,t) \} Q_p(i,t) \Delta T(t) \tag{2}$$

① 刘晓燕. 黄河河流生命需水量. 黄河网, 2003-12-23.
② 国家发展改革委员会宏观经济研究院. 黄河流域及邻近地区国民经济发展格局研究. 2005.
③ 黄河勘测规划设计有限公司. 黄河流域水资源利用现状及展望. 2002.

式中： $B(w)$ ——供水效益； $Q_P(i,t)$ —— i 节点 t 时段供水量； $C(i,t)$ —— i 节点 t 时段供水边际投入； $\theta(i,t)$ —— i 节点 t 时段供水的边际收益； t ——计算总时段， $t = 1, 2, \cdots, T$ 。

2.2 约束条件

a. 宏观经济产值结构关系约束：

$$Y_{i\min} \leq (I - a) Q_{P_i} \leq Y_{i\max} \tag{3}$$

式中： $Y_{i\min}, Y_{i\max}$ —— i 产业发展的上下限约束，如农业低限应为维护区域粮食安全； a ——生产技术系数矩阵。

b. 环境容量约束：

$$\sum_{i=1}^n b_i \leq B_0 \tag{4}$$

式中 B_0 为污水排放量限制指标。

c. 节点水量平衡约束：

$$Q_C(i,t) = Q_C(i-1,t) + Q_R(i,t) - Q_G(i,t) - Q_L(i,t) \tag{5}$$

式中第 i 节点出流 $Q_C(i,t)$ 应等于上一节点 $i-1$ 出流 $Q_C(i-1,t)$ 与区间来水 $Q_R(i,t)$ 之和，扣除区间实际供水 $Q_G(i,t)$ 及区间水量损失 $Q_L(i,t)$ 。

d. 水库安全约束：

$$V_{\min}(m,t) \leq V(m,t) \leq V_{\max}(m,t) \tag{6}$$

式中： $V_{\min}(m,t)$ —— m 水库死库容； $V_{\max}(m,t)$ —— m 水库当月最大库容。

e. 防凌安全约束：

$$Q_{F\min}(m,t) \leq Q_{R_C}(m,t) \leq Q_{F\max}(m,t) \tag{7}$$

式中 $Q_{F\min}(m,t), Q_{F\max}(m,t)$ 分别为河段防凌时段允许通过的最小、最大流量。式(7)主要针对兰州、花园口特殊河段而言。

f. 出库流量约束：

$$Q_{R_{C\min}}(m,t) \leq Q_{R_C}(m,t) \leq Q_{R_{C\max}}(m,t) \tag{8}$$

式中 m 水库 t 时段最小允许出库流量 $Q_{R_{C\min}}(m,t)$ 的确定与水库最小需供水量、防凌要求以及生态要求有关。最大允许出库流量 $Q_{R_{C\max}}(m,t)$ 的确定与最大过机流量、防凌要求有关。

g. 河道内生态需水约束，主要有断面最小流量约束、年最小过水量约束：

$$Q_{\min}(t) \leq Q(t) \tag{9}$$

h. 地下水开采限制及其平衡约束。开采量不超过允许值，维持地下水平衡：

$$Q_D(i,t) \leq kQ_K(i,t) \tag{10}$$

式中： $Q_D(i,t)$ ——地下水开采量； k ——地下水开采弹性系数，大于 1 则允许地下水超采； $Q_K(i,t)$ 地下水可开采量。浅层地下水的补给途径是通过降水入渗、河道及渠道渗漏、田间灌溉入渗来实现的，应控制地下水长系列的采补平衡。

i. 污水排放量污水约束及其回用量：

$$C(t) = b_i(t) x_i(t) \tag{11}$$

$$w(t) = \beta C(t) \tag{12}$$

式中： $C(t)$ ——污水排放量； $b_i(t)$ ——用水产污比例； $w(t)$ ——污水回用量； β ——污水回用率； $x_i(t)$ ——用水量。

j. 变量非负约束。

3 多目标优化模型求解

3.1 规则

黄河流域水资源多目标优化利用问题涉及多目标、多水源协调，需要建立优化规则确定优化方向，通过水源及工程的联合调度，力求达到损失最小、总福利最大的水资源配置目标。

- a. 需水宽浅式破坏原则. 当来水不足水资源系统就不能实现供需平衡时,应按照宽浅式破坏原则,尽量均匀分配缺水量,防止个别地区、个别行业、个别时段集中缺水.
- b. 供水公平性原则. 供水公平性主要体现在地区之间、行业之间的供水,要充分考虑各地区的人口、社会、经济、资源、环境和工程等多种因素以及少数民族聚居区的发展问题.
- c. 水源的供水次序. 各种水源供水次序的合理确定对于保证配置结果的优越性具有很重要的作用. 根据各种水资源的演变特点和水资源管理需要,拟定各种水源的优先利用次序 地表产水、处理后的污水、可开采的地下水、地表水水库蓄水、跨流域的外调水.

3.2 流程

多目标优化模型分为经济社会发展、生态环境、水资源 3 个相互关联、相互制约的子模块. 经济社会发展模块涉及流域经济发展目标、流域经济政策产业结构及其规模,水资源模块是以一定质和一定量的形式并以特定方式存在的水量,生态环境模块则是对水资源模块和经济社会发展模块相互作用的响应. 在 3 个子模块不能实现自身协调的情况下,需要借助调控手段,如治污、新增工程、开源、节水、优化产业结构等. 多目标决策流程如图 1 所示. 在施加调控手段时,仍需回到模型中考虑模块之间相互作用的约束条件. 如开源的可调水量约束 $0 \leq D \leq D_{\max}$,节水能力约束 $0 \leq J \leq J_{\max}$,再生水回用水量约束 $0 \leq R \leq R_{\max}$. 而水资源系统采用了多水源(地表水、地下水、外调水及污水处理回用水)、多工程(蓄水工程、引水工程、提水工程、污水处理工程等)、多水传输系统(包括地表水传输系统、外调水传输系统、弃水污水传输系统等)的系统网络描述法.

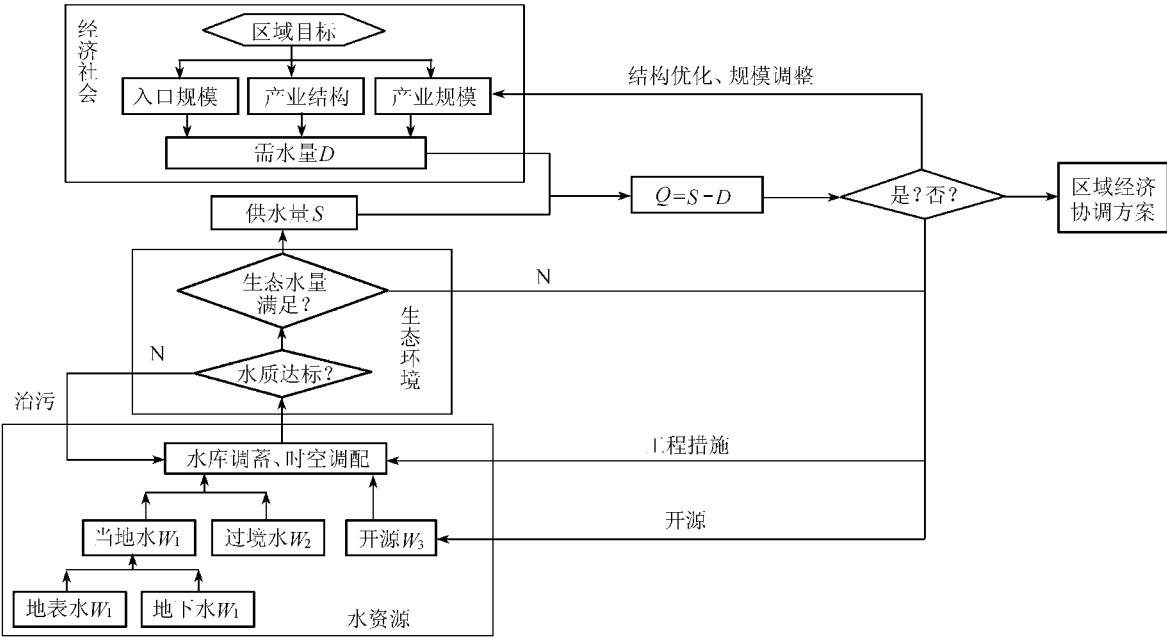


图 1 黄河流域水资源利用多目标决策流程

Fig.1 Flow chart of multi-objective decision-making for water resources utilization of Yellow River Basin

3.3 模型求解方法

多目标规划的对象是水资源这一开放的复杂巨系统. 由于水资源系统的主动性、不确定性等因素,以及水资源利用的多目标、多层次等特点,传统的求解方式常常遇到维数灾^[4]. 多目标优化模型中的社会目标 $S(x)$ 难以极大化,因此可考虑将其转化为防洪、防凌、工程安全和均衡发展等具体的约束(即约束条件(a)~(f)). 而生态环境目标 $E(x)$,低限需求可通过约束条件得到满足,生态环境效益可以折算为货币收益,增加流域总效益,在式(3)中体现. 通过转换可将式(1)的多目标复合成式(3)的单目标求解,即将多目标优化转化为流域总收益最大化问题. 但由于地区单元、部门较多,不易直接求解,只能借助经济学一般均衡求解原理^[7],对式(3)求拉格朗日极值:

$$\theta(i,t) - C(i,t) = \lambda$$

(13)

式中, λ 为常数. 均衡结果满足式(13),每一单位水资源被分配到整个区域中边际收益最大的分区、部门,最终使每一单位水资源的配置在不同地区得到边际净收益相同,进而在流域实现帕累托最优. 改变水量在不同

部门、不同区域的分配已经不能使流域的社会福利获得改善,流域经济效益和社会福利实现了最大化.由于边际收益递减规律的存在,收益函数呈凹性,因此按照最小费用最大流的方法可以寻找最优解^[3].

4 模型结果及分析

根据流域的自然条件、资源分布、人口状况、经济发展状况等进行节点划分,使得同一节点具有相对均质物质性或者物质流、能量流、信息流联系的紧密性^[8].按照这一原则并结合黄河流域的 4 级区套地市将黄河流域划分为 242 个节点,在此基础上进行行政区的统计汇总以便于宏观决策.水库是水资源调控的重要单元,通过蓄放可改变水资源的时间分布.为提高计算的精确度,将每一水库分为 11 个蓄水层,供水时每层作为一个供水单元参与水源分配,而蓄水时则作为用户参与分水竞争.河口镇是连接流域上游与中下游的关键节点,承担中下游补水、满足供水和输沙需水的重任.利津则是黄河入海的控制断面,作为黄河输沙水量及生态基流的载体.

黄河流域 2000 年(现状年)、2010 年、2020 年、2030 水平年水资源利用情况(不施加调控手段)利用情况见表 3.

由表 3 可见,2030 年水平流域水资源调控初始平衡,流域国民经济缺水水量达 106.23 亿 m³,流域地表耗水量为 324.58 亿 m³,流域缺水率为 16.7%,生态环境需水量仅得到低限满足,人水关系极不和谐.

模型按照水资源 3 次平衡的思想,应用所建立的多目标决策模型,进行了长系列模拟,分别进行立足于现状开发利用模式、基于保持现有调水工程规模不变并充分考虑节水、治污和挖潜等条件以及考虑新增调水的水资源供需平衡分析.充分考虑地表水与地下水之间的相互转化和补偿关系、各计算单元不同时段地下水可开采量约束,实现地表水(包括外调水)与地下水的统一配置与联合调度,以保障地表水与地下水的联合高效利用.利用南水北调工程解决黄河的资源性缺水问题,利用黄河流域现有工程并考虑新增的古贤、大柳树等调蓄水库构建流域水沙调控体系,通过增加黄河干流水库的调节能力改善流域水资源时空分布,在满足汛期输沙需求的基础上对流域主要水库实施联合调度,提高输沙减淤效果,减少无效水量入海,并将灾害水转化为资源水,实现洪水的资源化.合理安排流域经济规模和产业结构并灵活地调整,进行污水资源化处理以改善流域生态环境.通过流域水资源的“三次平衡”,最后得到流域水资源优化配置方案,见表 4 及表 5.

表 4 各水平年调控手段的组合
Table 4 Combination of control measures
for each level year

水平年	节水率/%	治污量/亿 t	洪水利用量/亿 m ³	开源量/亿 m ³	产业调整收益/亿元	引提调蓄量/亿 m ³
2000	5	3	5	0	20	3
2010	3	9	5	20	35	10
2020	2	15	5	58	68	40
2030	0	20	5	100	102	90

表 3 各水平年水资源配置的初始平衡
Table 3 Initial equilibrium in water resources
allocation for each level year 亿 m³

水平年	需水量	供水量	缺水水量	地表耗水量	排污水量	生态水量
2000	560.56	519.89	40.67	323.43	42.37	211.37
2010	576.29	518.83	57.46	323.84	45.89	210.96
2020	614.87	526.76	88.11	324.35	49.46	210.45
2030	637.98	531.75	106.23	324.58	53.67	210.22

表 5 各水平年水资源配置的调控平衡
Table 5 Regulation control equilibrium in
water resources allocation for each level year 亿 m³

水平年	需水量	供水量	缺水水量	地表耗水量	排污量	生态水量
2000	537.90	528.28	9.62	322.72	35.13	212.08
2010	562.37	550.39	11.98	342.66	32.69	212.14
2020	605.16	589.90	15.26	376.01	28.52	216.79
2030	637.98	624.45	13.53	409.24	24.78	225.56

5 结 语

黄河流域水资源十分紧张,当地水资源不能满足需求,供需缺口较大,带来了一系列水资源统一规划和联合调度问题:(a)流域是否需要目标、规模以及结构的调整?(b)是否需要跨流域调水?何时、何地需要?(c)是否需要增加调蓄工程?(d)节水和污水治理力度多大比较合理?(e)哪些措施组合的方案比较合理?水资源多目标优化模型通过多种调控的组合,增加了流域供水能力,优化了流域产业结构,减少了污水排放,全面提高了流域水资源的承载水平.结果表明,近期节水是解决水问题的主要途径.节水方式包括:产业结构的调整、水资源利用水平的提高.但从长期来看,水资源与经济的协调发展、有效的调控手段、跨流域

调水补济黄河、增加黄河的可供水量是解决人水矛盾的根本途径.

参考文献：

[1] 常炳炎,薛松贵,张会言.黄河流域水资源合理分配和优化调度研究[M].郑州:黄河水利出版社,2002.
[2] 黄委会勘测规划设计院.黄河流域经济模型研究[M].郑州:黄河水利出版社,1998.
[3] 薛松贵,侯传河,王煜.黄河三门峡以下非汛期水量实时分配研究[M].郑州:黄河水利出版社,2006.
[4] 刘昌明,陈效国.黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究进展[M].郑州:黄河水利出版社,2002.
[5] 席家治.黄河水资源[M].郑州:黄河水利出版社,1996.
[6] 黄河水利委员会.黄河的重大问题及其对策[M].北京:水利水电出版社,1999.
[7] MAKINDE-ODUSOLA B A,MARINO M A. Optimal control of ground water by the feedback method of control[J]. Water Resour Res, 1989,25 :1341-1352.
[8] HAIMES Y Y,HALL W A. Sensitivity responsibility stability and irreversibility as multiple objectives in civil systems[J]. Adv Water Resources,1997,1(2) :71-81.

Multi-objective planning model for water resources
sustainable utilization of Yellow River Basin

PENG Shao-ming^{1,2}, HUANG Qiang¹, ZHANG Xin-hai², YANG Li-bin²

(1. Institute of Water Resources and Hydraulic Power, Xi 'an University of Technology, Xi 'an 710048, China ;
2. Yellow River Engineering Consult Co. , Ltd. , Zhengzhou 450003, China)

Abstract : A multi-objective planning model for water resources sustainable utilization of the Yellow River was constructed , and the law and method for optimal allocation of water resources were discussed based on a systemic study of the regularity of variation of the Yellow River water resources and prediction of social and economic development of the river basin. By research on the regulation and control measures for improving the bearing capacity of the Yellow River water resources , scientific measures for the renewability of water resources and the mode for water resources sustainable utilization in the 21st century were proposed. Finally, it is pointed out that the harmonious development of water resources and economy is a fundamental way to settle the contradiction between human and water resources.

Key words : Yellow River Basin ; water resources ; multi-objective ; renewability ; harmony