

干旱区水资源合理配置模式与计算方法

王 浩¹, 秦大庸¹, 郭孟卓², 王建华¹

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044; 2 水利部水资源司, 北京 100761)

摘要: 提出了西北内陆干旱区水资源合理配置的模式与计算方法。针对生态环境脆弱的干旱区水资源利用特点, 基于水资源二元演化理论与方法, 保持水土平衡、水量平衡和水盐平衡, 以空间配置、时间配置、用水配置、水源配置、管理配置为基本模式; 从实际情况出发, 以水定发展指标, 提高水土资源的匹配效率, 以流域为单元合理安排生态环境用水与经济发展用水, 在此基础上建立了干旱区水资源合理配置模型。定量计算表明: 其 809 亿 m^3 的径流性水资源中, 直接留给天然生态的水量有 302 亿 m^3 , 加上 126 亿 m^3 回归水的间接支持, 可供生态系统消耗的水资源达 428 亿 m^3 , 相对于 385 亿 m^3 的现状生态需水, 除黑河和石羊河流域外, 生态系统的需水基本上能得到满足。

关键词: 水资源; 合理配置; 模式; 计算方法; 干旱区

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2004)06-0689-06

随着干旱区经济系统的有效运营和人口的快速增长, 对水资源的消耗越来越多, 经济活动所依赖的生态环境基础, 不仅质量日下, 并仍在遭到严重破坏, 在这种严峻的态势面前, 寻求合理的水资源利用方式或合理的组合与配置方式, 显然有其紧迫性和必要性^[1, 2]。基于二元模式的水资源合理配置理论认为, 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、生态环境系统和水资源系统组成。天然水循环支撑着生态环境系统, 通过水资源开发利用在天然水循环的大框架内形成了人工侧支水循环, 与天然水循环共同支撑着社会经济系统的发展, 并由此形成了流域水资源演化的二元结构^[3]。天然水循环和人工侧支水循环此消彼涨, 干旱区天然生态和人工生态此退彼进, 加速了流域水循环的演变, 也引起了生态环境系统的相应变化。在干旱区等生态环境脆弱地区, 生态需水所占比例较大, 其需水的刚性也较大, 从而增加了生态用水和经济用水的统筹配置问题。这就要求在决策服务对象上, 将单纯考虑社会经济系统, 拓展为同时考虑社会经济和生态环境系统; 在决策目标上, 将单纯经济效益最大, 拓展为经济效益与生态效益之和最大。在合理配置问题涉及的生态系统方面, 不仅要包括人工生态系统, 而且要包括天然生态系统^[4]。本文的目的是在水资源二元演化理论与方法的基础上, 针对内陆干旱区的实际问题, 提出内陆干旱区水资源合理配置模式和具体方案。

1 西北干旱区水资源合理配置模式

西北内陆干旱区水资源的基本特点: ① 干旱少雨、生态脆弱, 没有灌溉就没有农业, 没有工程供水系统就谈不上发展; ② 水土矛盾突出、地区分布不均衡, 如新疆西北部 50% 国土面积上分布了 93% 的新疆水资源; ③ 水热同步、内陆河受冰川补给比例较大, 年际径流量变化不大; ④ 径流年内分布不均匀、调节代价高, 春季缺水严重, 大面积干旱问题迫切需要加大对出山口径流的调节能力; ⑤ 生态需水刚性大、水资源可利用量相对较少, 生态需水一般占水资源总量的 1/3 以上; ⑥ 地表水地下水转化频繁、下游对中上游的水资

收稿日期: 2003 08 19; 修订日期: 2004 01 17

基金项目: “十五”国家重大科技攻关计划资助项目 (2001BA610A-02)

作者简介: 王 浩(1953-), 男, 北京人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源规划等研究。

E-mail: wanghao@iwhr.com

源开发利用方式极为敏感。这些特点决定了干旱区水资源在开发利用方面的问题、配置原则和基本配置模式。

(1) 干旱区水资源合理配置原则 对干旱缺水导致的生态脆弱地区,其水资源合理配置的基本原则是要保持水土平衡、水量平衡和水盐平衡。水土平衡,是从实际情况出发,以水定发展指标,以水定土地开发规模,提高水土资源的匹配效率;防止水资源过度开发造成不可逆转的生态环境恶化,防止在水资源不足情况下土地过度开发造成的荒漠化面积蔓延。水量平衡,是以流域为单元合理安排生态环境用水与经济发展用水,在经济发展用水中合理安排上下游用水和工农业用水以防止效益搬家,在农业灌溉用水中合理安排种植业与林牧业用水以支持生态型农业发展。水盐平衡,是坚持灌排结合防止盐分在灌区的不断积累,坚持地表水-地下水联合利用,通过水盐联调防止盐分在土壤耕作层的积累并减少无效蒸发,坚持上游地区部分实现就地旱排,以防止灌区高含盐回归水对下游灌区的侵害。

(2) 干旱区水资源配置模式 干旱地区水资源配置模式,表现在空间配置、时间配置、用水配置、水源配置、管理配置 5 个方面。水资源的空间配置主要解决水土资源严重不匹配的问题,使生产力布局更趋合理。流域内通过强化管理调整上下游用水关系,为增加下游供水进行河道整治及现有工程挖潜改造。流域间进行跨流域调水,提高大范围内水-经济-生态的协调程度。水资源的时间配置重点解决防治区春季天然来水过少,与灌溉农业的用水需求严重不相适应的问题。通过山区水库建设增加对径流的调蓄能力,替代平原水库减少库面蒸发,同时利用山区水库的廉价电能为农村经济发展和地下水利用提供动力,综合解决西北突出的春旱缺水问题。用水配置重点解决经济建设用水挤占生态环境用水,以及经济发展用水中城市用水挤占农牧业用水的问题。以流域为单元对经济用水和生态用水统一配置,在保障生产发展的同时维持和改善生态环境,解决西北地区生态环境脆弱的问题。水源配置重点解决西北地区地表水利用过多而地下水开发程度低、潜水蒸发量大而造成水资源浪费的问题。对地表水和地下水统一配置,缓解次生盐渍化并减少潜水无效蒸发。配合水土保持建设,修建一批小型蓄水工程和微型集水设施,加大雨水资源的直接利用。结合小城镇建设,修建适合西北特点的污水处理设施,加大劣质水的再生利用程度。水资源管理重点解决重开源轻节流、重工程建设轻管理的外延用水方式问题。采用多种管理措施促进水资源的需求管理,以大型灌区改造为突破口狠抓农牧业节水,加大配套挖潜改造的力度。综合运用法律、经济和行政手段提高用水效率。但在配置过程中必须坚持侧重生态的宏观配置与以经济为主的市场配置相结合的协调配置方式。

2 生态脆弱地区水资源合理配置计算流程

在生态脆弱地区进行水资源合理配置的基本思路,仍然是围绕供给和需求两个方面来进行。但无论在供给还是在需求方面,和其他地区的水资源配置有诸多不同。

2.1 干旱区水资源生态经济系统供需平衡流程

在水资源供给方面,主要有两点显著不同:首先,生态脆弱地区的可利用水资源量不再是常量,水分条件变化会驱动生态系统发生演替;变化后的地表植被会改变原有的产汇流条件,从而反过来又影响水资源系统本身。因此,和一般地区不同,生态脆弱地区的可利用水资源量既是生态系统变化的驱动因子,又是生态系统演变的函数,需要有水资源系统演变模型加入,在多个不同模型之间进行迭代求解;其次,生态脆弱地区的生态需水比例大、刚性强,不仅要配置经济用水,而且要考虑生态用水,并在二者之间进行合理分配^[5]。

在水资源需求方面,也有两点显著不同:①水资源作为承载主体,不仅要承载社会经济系统的发展,还要承载生态环境系统的良好生存状态。生态脆弱地区的状态状况对人类活动极为敏感,水分条件变化会迅速反映在生态组成与层圈结构变化上^[6]。这一变化引起两方面的问题,一是其水文效应,系统的产汇流条件会有所变化;二是其环境效应,环境容量的显著变化会影响到社会经济的可持续发展。上述联系使得不能单独考虑经济用水需求或生态用水需求,二者必须统筹考虑;②需要考虑经济系统和生态系统内部结构变化引起的水资源需求变化。对经济系统而言,各项产品中都含有制造该产品所需要耗用的水资源,由于生态脆弱地区的水资

源是短线资源，因此产业结构调整引起的需水量变化，产品调入调出引起的需水量变化均不能忽视。对生态系统而言，水分条件的变化将直接影响到植被群落的演替，进而影响到生态系统的“正常”需水阈值(图 1)。

2.2 干旱区水资源合理配置模拟过程

根据水资源合理配置问题的决策特点，在西北水资源攻关研究中建立了相应的多层次、多目标、群决策求解方法。对流域水资源、社会经济和生态环境 3 个系统分别用数学模型加以描述和模拟，再用总体模型进行综合集成与优化。模型体系见图 2。

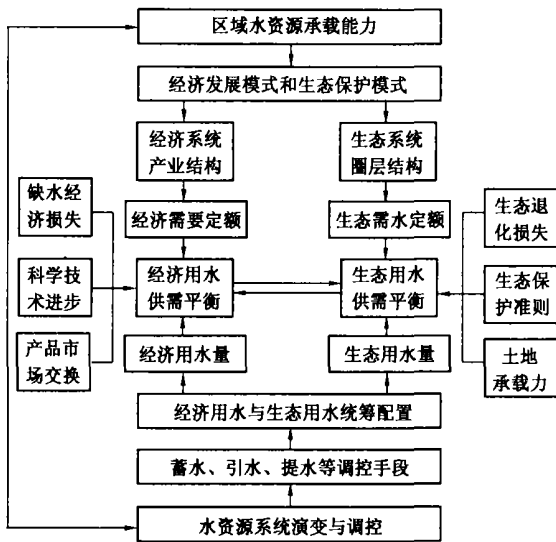


图 1 干旱区水资源生态经济系统供需平衡计算流程

Fig.1 Flow chart of calculation of water resources supply-demand balance in ecological-economic system in arid zone

以流域水资源二元演化模型描述天然循环和人工侧支循环之间此消彼涨的相互作用和“四水”转化关系。以宏观经济模型描述产业部门之间的投入-产出关系，地区之间的调入-调出关系，以及年度之间的积累-消费关系。以生态需水模型描述伴随水循环演变的水与生态系统的相互作用过程。以多层次、多目标、群决策模型作为总体模型描述合理配置问题的各主要方面。通过总体模型与分系统模型的信息反馈，实现优化与模拟的结合，实现群决策过程中各决策主体间的交流，将决策风险和利益冲突减至最小。

3 生态需水与国民经济需水配置方案

3.1 现状生态需水

全西北干旱区山区生态需水量 1084 亿 m³，全部为有效降水的利用量。这些水量对涵养山区植被起了至关重要的作用，保证了山区植被和水资源的有效调蓄。

全西北干旱区平原总生态需水量 579 亿 m³，由降水和径流两部分组成。过渡带生态需水以降水为主，天然绿洲生态需水以径流为主，人工绿洲的生态需水几乎完全依靠径流。现状生态条件下，平原(过渡带和绿洲)生态的径流性生态需水量为 385.4 亿 m³，其中天然生态需水量为 276.5 亿 m³，人工生态需水量为 51.1 亿 m³。其中以新疆的生态需水最多，尤其是南疆的生态需水规模较大，必须高度重视水资源合理配置与高效利用。如表 1 所示。

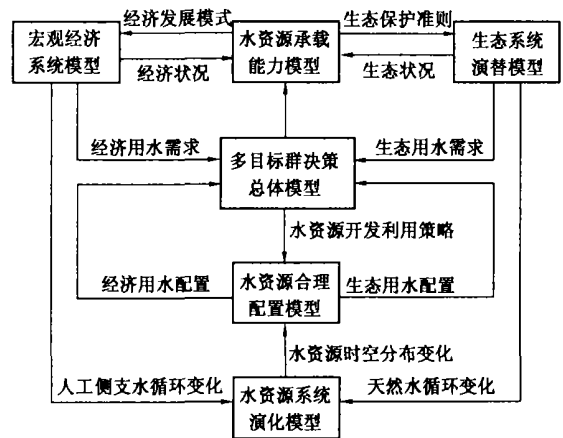


图 2 干旱区水资源合理配置模型体系示意图

Fig.2 Model system of rational water resources allocation in arid zone

表 1 西北内陆干旱区生态需水量计算成果

 10^8m^3

Table 1 Calculation result of ecological water demand in inland arid zone in Northwest China

地 区	山区生态 有效降水量	平原生态		过渡带生态		天然绿洲生态		人工绿洲生态	
		总量	径流量	总量	径流量	总量	径流量	总量	径流量
新疆	779.4	483.3	318.0	161.1	48.0	272.7	225.0	49.5	45.0
北疆	331.8	212.2	105.6	92.9	15.0	106.8	80.8	12.5	9.8
东疆	55.1	14.0	10.9	4.6	2.2	8.0	7.3	1.4	1.4
南疆	392.5	257.1	201.5	63.6	30.8	157.9	136.9	35.6	33.8
河西走廊	176.9	48.4	28.4	19.6	4.2	22.8	18.9	6.0	5.3
疏勒河	68.1	10.9	8.0	4.9	2.3	5.0	4.7	1.0	1.0
黑河	65.1	25.0	15.5	8.9	1.7	12.5	10.5	3.6	3.3
石羊河	43.7	12.5	4.9	5.8	0.2	5.3	3.7	1.4	1.0
柴达木盆地	127.6	47.3	39.0	11.3	5.6	35.2	32.6	0.8	0.8
内陆合计	1083.9	579.0	385.4	192.0	57.8	330.7	276.5	56.3	51.1

从地区分布上看,越是干旱的地区生态需水中径流的比例越大,说明生态与经济的用水竞争越是激烈,水资源合理配置的任务越艰巨。从生态本底条件较好的 I 类(基本稳定型)地区北疆、石羊河流域,经过 II 类(相对稳定型)的南疆与黑河流域,到 III 类(不稳定型)的东疆、疏勒河、柴达木盆地,径流占生态需水的比例非常有规律地逐步提高。表明对 3 个不同类型的地区,水资源国民经济可利用量的比例有明显区别,应该有所区别地控制水资源开发利用程度。

3.2 水平衡分析与实际生态耗水

现状生态耗水是制定西北地区水资源合理配置的重要基础,更是生态需水预测的主要根据。现状生态-经济水资源平衡是计算生态耗水的第一次平衡,通过平衡分析生态可能利用量与生态需水的关系,对生态可能利用量进行二次平衡分析,进一步确定生态耗水的组成和水资源利用效率。

分析结果表明,在现状经济用水水平和管理条件下,内陆河区共有 809 亿 m^3 的径流性水资源可用于经济或生态。其中,有 517 亿 m^3 国民经济引水量(有 126 亿 m^3 为退水量),总的经济用水的耗水率达 0.76。直接留给天然生态的水量为 302 亿 m^3 ,加上回归水的间接支持,可供生态系统消耗的水资源达 428 亿 m^3 。从生态需水的角度看,西北干旱区生态系统的需水基本上能得到满足,但黑河流域与石羊河流域不能得到满足(表 2)。

表 2 西北内陆干旱区现状水平衡分析计算成果

 10^8m^3

Table 2 Result of water balance analysis for inland arid zone in Northwest China in base year

地 区	总径流量	出流量	入流量	难利用量	可利用 总水量	引水量	退水量	直接生 态用水量	生态可 利用量	生态需水量
新疆	857.0	239.6	88.1	25.2	680.3	435.5	110.3	244.8	355.1	316.1
北疆	430.0	227.5	26.1		228.6	165.2	41.4	63.4	104.8	104.7
东疆	27.4				27.4	19.1	3.9	8.3	12.2	10.9
南疆	399.6	12.1	62.0	25.2	424.3	251.2	65.0	173.1	238.1	200.5
河西走廊	81.9				81.9	74.0	13.6	17.4	31.0	28.0
疏勒河	22.8				22.8	12.8	4.1	10.0	14.1	8.0
黑河	41.6				41.6	34.2	7.0	7.4	14.4	15.4
石羊河	17.5				17.5	27.0	2.5	0.0	2.5	4.6
柴达木盆地	46.8				46.8	7.1	2.5	39.7	42.2	35.9
内陆合计	985.7	239.6	88.1	25.2	809.0	516.6	126.4	301.9	428.3	380.0

* 石羊河反复引水,水资源取用率达 155%,因此耗水分析以水资源量 17.5 亿 m^3 为基础。

3.3 2020 年生态需水与国民经济需水

按照上述预测原则和方法,首先进行 2020 年国民经济用水与回归后的情景分析,计算生态可能用水量,列于表 3。

表3 2020年西北内陆干旱区生态经济水平衡分析

 10^8m^3

Table 3 Water balance Analysis for ecological economic uses of inland arid area in Northwest China in 2020

地区	可利用总水量	引水量	回归水量	直接生态用水量	生态可利用量	现状生态需水量
新疆	742.3	504.4	100.3	237.9	338.2	316.0
北疆	290.6	232.0	47.4	58.6	106.0	105.6
东疆	27.4	20.6	4.1	6.8	10.9	10.9
南疆	424.3	251.8	48.8	172.5	221.3	201.5
河西走廊	85.0	79.7	15.4	12.2	27.5	28.0
疏勒河	22.8	19.0	5.4	3.8	9.2	8.0
黑河	41.6	33.2	6.7	8.4	15.0	15.5
石羊河	20.6	27.5	3.3	0.0	3.3	4.9
柴达木盆地	46.8	9.3	3.7	37.5	41.2	39.0
内陆合计	874.1	593.4	119.4	287.6	406.9	385.4

在2020年国民经济需水与供水平衡的基础上,考虑水分变化对生态圈层结构变化在3个方面的影响:①社会经济发展模式,这在国民经济发展预测方案中体现出来,包括水资源工程建设;②改变水资源利用方式,提高水资源利用效率、改进灌溉方式等;③生态保护、建设措施,如按生态环境保护目标建立生态保护区、实行流域整治和生态抢救工程等。在预测分析中将这些因素进行分离,并考虑相互联系,采用情景分析和水量平衡分析方法,以期对生态结构变化进行合理判断和计算。2020年生态需水预测见表4。

表4 2020年西北内陆干旱区生态需水预测

 10^8m^3

Table 4 Projected ecological water demand of inland arid zone in Northwest China in 2020

地区	总需水量	经济需水量	生态总需水量	人工生态需水量	天然生态需水量	盐碱地耗水量
新疆	742.3	404.1	322.3	27.4	294.9	15.9
北疆	290.6	184.6	106.0	11.0	95.0	
东疆	27.4	16.5	10.9	1.4	9.5	
南疆	424.3	203.0	205.5	15.0	190.5	15.9
河西走廊	85.0	57.5	26.3	5.4	20.9	1.2
疏勒河	22.8	13.6	8.0	1.1	6.9	1.2
黑河	41.6	26.6	15.0	3.3	11.7	
石羊河	20.6	17.3	3.3	1.0	2.3	
柴达木盆地	46.8	5.6	35.9	0.9	35.0	5.3
内陆合计	874.1	467.2	384.5	33.7	350.8	22.4

4 结 论

(1) 对干旱缺水的生态脆弱地区,其水资源合理配置的基本原则是要保持水土平衡、水量平衡和水盐平衡。从实际情况出发,以水定发展指标,提高水土资源的匹配效率,以流域为单元合理安排生态环境用水与经济发展用水;

(2) 干旱区水资源合理配置的基本模式包括空间配置、时间配置、用水配置、水源配置和管理配置,在配置过程中必须坚持侧重生态的宏观配置与以经济为主的市场配置相结合的协调配置方式;

(3) 西北内陆干旱区809亿 m^3 的径流性水资源中,有517亿 m^3 国民经济引水量,其中126亿 m^3 为退水,直接留给天然生态的水量为302亿 m^3 ,加上回归水的间接支持,可供生态系统消耗的水资源量达428亿 m^3 ,相对于385亿 m^3 的现状生态需水,除黑河流域和石羊河流域外,西北内陆干旱区生态系统的需水基本上能得到满足,通过采取各种措施,到2020年生态用水的情况还会稍有改善。

参考文献:

- [1] 刘昌明,傅国斌,李丽娟.西部水资源与生态环境建设[J].矿物岩石地球化学学报,2002,21(1):5-9.
[2] 冯尚友.水资源持续利用与管理导论[M].北京:科学出版社,2000.

- [3] 王 浩, 陈敏建, 秦大庸, 等. 西北地区水资源合理配置与承载能力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [4] 冯尚友, 刘国全, 梅亚东. 水资源生态经济复合系统及其持续发展[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(6): 624-629.
- [5] 毛晓辉. 塔里木河水资源利用合理配置研究[A]. 塔里木河中下游实地踏勘报告[C]. 北京: 中国统计出版社, 2000.
- [6] 宋郁东, 樊自立, 雷志栋, 等. 中国塔里木河水资源与生态问题研究[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000.

Mode and calculation method for rational water resources allocation in arid zone^{*}

WANG Hao¹, QIN Da-yong¹, GUO Meng-zhuo², WANG Jiar-hua¹

(1. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

2. Department of Water Resources, Ministry of Water Resources, Beijing 100761, China)

Abstract: In accordance with the characteristics of water resources utilization in arid zone where a fragile ecological system exists and on the basis of theory and method of dual water resources evolution, a mode and calculation method of rational water resources allocation for the inland arid zone in the Northwest China is formulated, which can maintain the water land equilibrium, the water quantity balance and the water-salt equilibrium, consider the allocation in space, time, uses, water sources and management, determines the development index by available water resources on the basis of actual situation, and rationally allocate water resources to ecological use and economical use in the unit of a river basin. The quantitative calculation indicates that among the runoff water resources of $809 \times 10^8 \text{ m}^3$, the water quantity directly allocated to the natural ecological system is $302 \times 10^8 \text{ m}^3$. Plus the returning water of $126 \times 10^8 \text{ m}^3$, the quantity of water which can supply the ecological system amounts to $428 \times 10^8 \text{ m}^3$, and the actual ecological water demand is $385 \times 10^8 \text{ m}^3$, so the water demand of the ecological system can be satisfied on the whole except the Heihe river basin and the Shiyanghe river basin.

Key words: water resources; rational allocation; mode; calculation method; arid zone

* The project is supported by a Key Scientific Research Programme in the 10th Five year plan of China(No. 2001BA610A-02).