

水资源开发利用条件下的流域水循环研究

刘文琨¹, 裴源生¹, 赵 勇², 肖伟华^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038; 2. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 针对高强度水资源开发利用条件下流域水循环研究存在的问题, 从认知、试验、理论、方法四个层次探讨了适应水资源开发利用条件的流域水循环的研究方法, 构建了一个以水资源配置模型与水循环模型耦合为核心, 以流域供需水分析和流域生态、环境、经济综合评价为响应的多目标调控模型。利用该模型, 对黄河流域水资源进行了合理配置计算。结果表明, 现状条件下黄河流域缺水严重; 而在未来情境下缺水将更加严重, 大力节水能够较大程度缓解缺水状况。

关键词: 自然-人工复合水循环; WACM 模型; 水资源配置; 水循环模型; 黄河流域

中图分类号: TV211 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0044-06

Research of Watershed Water Cycle under the Conditions of Development and Utilization of Water Resources

LIU Wen kun¹, PEI Yuan sheng¹, ZHAO Yong², XIAO Wei hua^{1,2}

(1. Water Resources Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2 State Key Laboratory of Simulation and Regulation of River Basin Water Cycle, Beijing 100038, China)

Abstract: The paper expounded the problems on the watershed water cycle research under the conditions of intensive development and utilization of water resources. On the basis of these problems, the paper discussed the research methods of watershed water cycle to cope with the development and utilization of water resources from four aspects, including the perception, experiment, theory, and method. A multi objective model was developed based on the coupling of water resources allocation model and water cycle model, and it took the watershed water supply and demand analysis and the comprehensive evaluation of watershed ecology, environment, and economy as the responses. The model was used to perform reasonable water resources allocation in the Yellow River Basin. The results suggested that under the Yellow River suffers a serious water shortage under the current conditions, and water shortage can become more serious in future. Therefore, water saving can alleviate the serious water shortage problem.

Key words: Natural-artificial composite water cycle; WACM model; water resources allocation; water cycle model; The Yellow River Basin

1 研究背景

变化环境是指由人类活动和自然过程相互交织的系统驱动所引起的一系列陆地、大气与水循环的变化^[1]。随着人类活动和气候变化, 人工因素对自然水循环系统的干扰愈来愈烈, 特别是高强度的水资源开发利用, 如人类的取水、用水、耗水、排水、调水等行为, 对整个水循环过程产生了巨大的影响^[2]。

经过几十年的发展和研究, 学者们对于流域水文循环的研究越来越深入和细致, 特别是从 20 世纪 90 年代开始涌现的分布式流域水文模型, 如 MIKE-SHE 模型^[3]、VIC 模型

等^[4], 使得研究者可使其与气候模型(GCM“全球气候模式”)结合, 开展气候条件变化下的流域水循环研究^[5,6]。但是, 这类研究重心放在气候变化对于水循环的影响研究方面, 而在重点考虑人类活动影响条件下, 特别是高强度水资源开发利用条件下的流域水循环研究方面, 仍存在着诸多不足和问题。

(1) 取用水量与耗水总量关系不清楚。取用水量易于观测和计量, 方便管理, 但无法反应水的资源消耗本质; 而耗水总量能体现水资源的真正资源消耗量, 但难以核算和管理。取用水量与耗水总量关系密切, 但缺乏成熟明确的量化表达式, 仅凭经验来估算耗排水量, 不够科学合理。同时, 耗水总量管理方法在管理中缺失, 致使取水量管理与耗水管

收稿日期: 2010-12-28 修回日期: 2013-01-04 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1132.028.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010C0CB951102); 国家自然科学基金资助项目(51009150)

作者简介: 刘文琨(1987-), 男, 湖北汉川人, 在读博士, 主要从事水资源配置与水循环模型研究。E-mail: M osoney@ qq. com

通讯作者: 裴源生(1948-), 男, 山西灵石人, 教授级高级工程师, 从事水资源高效利用和合理配置研究。E-mail: peiysh@ iw hr. com

理不相协调,取水许可方法受到限制。

(2) 地表、地下水总量与耗水总量关系不清楚。水循环过程中,地表水和地下水转化频繁,地表水与地下水之间的转化关系还未能清晰量化。如水管实践中往往将从河道或湖泊附近的取水井抽取的水量归为地下水统计,而实际中水是从河道渗透来的河水,其水源的归类还存在争议。因而地表地下水总量与耗水总量的关系难以确定。同时,地下水资源的调控中,仅仅从人工地下水取用量的角度研究,人工取用地下水与地下水位的联系尚无考虑,且潜水和承压水也未能区分,由此更加难以确定其耗水关系。

(3) 当地水、外调水用水总量与耗水总量关系不清楚。外调水与当地水往往通过共同的取水设施向用水户供水,在没有明晰当地用水与耗水之间的关系之前,难以确定当地水、外调水用水总量与耗水总量之间的定量关系和转化规律,给总量控制的管理带来不便。

(4) 地表水与地下水、当地水与外调水之间循环转化关系不清楚。外调水在输送及使用的过程中都可能与当地地表、地下水产生水量转化,同时当地地表水和地下水之间也在不断的转化。对于上述转化过程,其转化的具体路径、时空分布、变化特征都很难进行定量的描述,各种水源之间的循环转化关系不清楚。

(5) 水循环过程中的供-用-耗-排-补-转化关系不清楚。以往常用“供-用-耗-排”来描述供用水的循环转化过程,这种提法主要是从地表水系统出发总结出来的;如果从整个水资源系统来看该提法则不够全面,应该修改为“供-用-耗-排-补-转化”,考虑水的回补与转化过程才更能够反映供用水之后整个水资源系统的变化过程,或者说水循环的变化过程。目前还很难给出水循环过程中供-用-耗-排-补-转化之间的定量关系。

(6) 水资源高效利用条件下水的供-用-耗-排-补-转化关系变化。在水资源高效利用条件下,采用节水措施或者节水工艺,取水量减小,输水过程、用水过程也随之发生变化,则必然引起水资源的耗、排、补及转化过程发生改变,但目前还很难对这一过程展开有效的量化研究。

本文将“自然-人工”复合作用下的流域水循环机理和模型为基础,对水资源开发利用条件下的流域水循环过程展开研究,提出一种基于水资源配置的流域水循环研究方法,并以黄河流域为例进行实践应用。

2 流域水循环研究的科学方法

流域自然-人工复合水循环理论^[7]是解决高强度水资源开发利用条件下水循环问题的基础核心。对于上述存在问题,按照科学认知、现场实验、理论探究、解决方法四个步骤,形成一个从水循环机理认知到水循环观测实验,再到流域区域自然-人工复合水循环理论研究,最后利用水资源分配与循环转化模拟模型^[8](Water Allocation and Cycle Model, 即 WACM) 进行模拟计算。

2.1 水循环机理的科学认知

流域水循环的客观存在是水循环研究的现实基础。在自然-人工复合作用下的流域水循环及其伴生过程中(如图

1), 水资源配置的结果控制着人工水循环过程, 而水资源配置对应的缺水问题实际上是水的自然过程与人工过程演变失衡的结果, 两者相互关联, 相互作用。在目前的水循环过程中, 由于受到变化环境中气候因素、下垫面因素变化, 特别是人类活动影响下, 流域水循环理论系统已呈现出新的规律和特点, 因此不能再仅以单纯的自然水循环系统和人工水循环系统说明流域的水分演变过程和“四水”转化规律^[9], 而应研究人工和自然综合因素作用下的自然-人工复合水循环系统, 这既适应社会经济的发展, 又满足生态建设的需求。

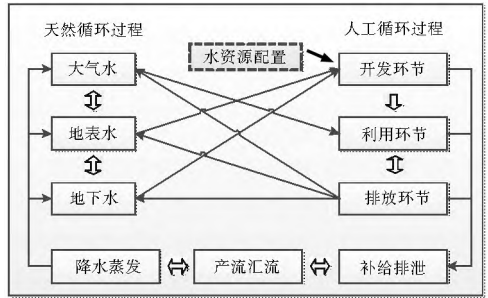


图1 自然-人工复合水循环理论框图

Fig. 1 The theoretical diagram of natural-artificial composite water cycle

变化中的人工水循环系统和自然水循环系统可以看成是自然界存在的水循环系统的两个方面, 它们互为对立统一, 相互影响, 相互作用。人工水循环的各个环节已经深深嵌入和作用于自然水循环的各个过程(图1)。在高强度水资源开发利用条件下, 人类对流域水循环的干扰, 打破了原有自然水循环系统的运动规律, 原有的水循环系统由单一的受自然主导的循环过程转变成受自然和人工共同影响、共同作用的新的水循环系统, 原先的以“四水”转化为基本特征的自然水循环变为自然主循环和人工侧支循环动态联系的复合水循环系统。其中自然主循环主要针对降水坡面产流和河道汇流而言, 包括降水、入渗、产流、汇流和蒸发等环节, 人工侧支水循环则主要是指人工取水所形成的以“取水-输水-用水-排水-回归”为基本环节的循环圈, 自然主循环和人工侧支水循环二者之间存在紧密的水力联系, 循环通量此消彼长。结合分布式水循环模型研究, 在流域水循环单元内, 单元内部水量转换关系见图2。

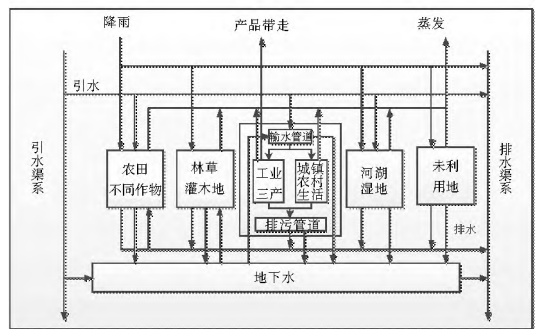


图2 平原区强烈人类影响流域水循环单元水量转化关系

Fig. 2 The relationship diagram of unit water transformation of the watershed cycle under intensive anthropogenic effects in the plain area

在大规模人类活动干扰下, 流域水循环系统整体表现出三大效应^[10]: 一是循环尺度变化, 主要表现为流域大循环减

弱,局地小循环增强;二是水循环输出方式变化,主要表现为水平径流输出减弱,垂向蒸散发输出增强;三是降水的转化配比发生了变化,具体表现为区域径流性水资源减少,而有效利用的水分增加。在人类活动干扰强烈的地区,这种效应影响越来越大,在某些方面甚至超过了自然作用力的影响。

2.2 流域水循环观测试验

在进行流域自然-人工复合水循环的机理研究时,需要注意到,由于气候变化和人类活动影响,气象因素和流域下垫面条件较之历史均有所改变,如土壤包气带变厚、地下水位下降、农田种植结构改变、退耕还林等因素,会直接导致一些水循环参数的改变,从而导致流域水循环过程的特征发生改变^[1]。所以,需要在流域尺度、灌区尺度和田间尺度进行观测试验,对相应的参数和机理进行重新测定和研究。

当前,水循环观测实验可主要围绕以下几个方面和层次进行:作物蒸散量;农田产流规律;厚包气带水分运移规律;地下水补排关系变化规律;水循环要素变化对农业、水文干旱的影响;作物需水量和灌溉量变化等。

2.3 水资源开发利用条件下的流域水循环研究方法

高强度水资源开发利用条件下的流域水循环研究应是一个以水资源配置模型与水循环模型耦合为核心,结合流域供需水分析和流域生态、环境、经济综合评价的多目标调控模型,其方法思路框架见图 3。其关键要素如下。

(1) 水资源供需平衡计算。供需水可以随着经济社会和生态系统的响应而发生相应变化,是一个动态变化过程。供、需水计算中,不仅需考虑流域经济社会发展带来的供用水结构调整,还需人工生态和天然生态修复过程的需水动态差异以及不同水资源配置方案下的生态需水动态变化。

(2) 水资源配置模型与水循环模型耦合。这样可以实现信息的反馈与交互,一方面将配水信息分解输入到水循环模型当中,使配置的水循环效应被模拟和认知,同时配置方案可在全口径供需平衡指标下相互灵活转换,有效拓展传统集总式配置模型的功效。

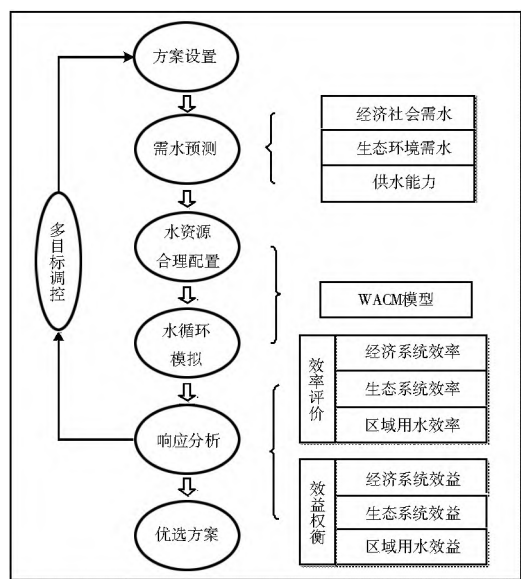


图 3 流域水循环研究方法思路框架

Fig. 3 The theoretical diagram of research methods of watershed water cycle

WACM 模型是由水资源合理配置、水循环模拟和水环境模拟模块组成的^[8]。水循环和水环境模拟模型动态提供水资源配置需要的参数,并在水资源配置过程中,实时模拟广义水资源配置过程中流域水循环和水环境的响应状况,实现流域水量-水环境-水循环过程的动态配置与模拟。模型结构见图 4。模型能分析流域大气水、地表水、土壤水和地下水相互转化的过程与关系,模拟区域或流域水循环转化规律,研究不同人类干扰情况下区域或流域水循环响应状态和水文生态效应。并同时考虑山区与平原区水循环过程的差异,将天然河网与灌排渠系工程结合起来,对流域人工-自然复合水循环过程做分布式模拟。

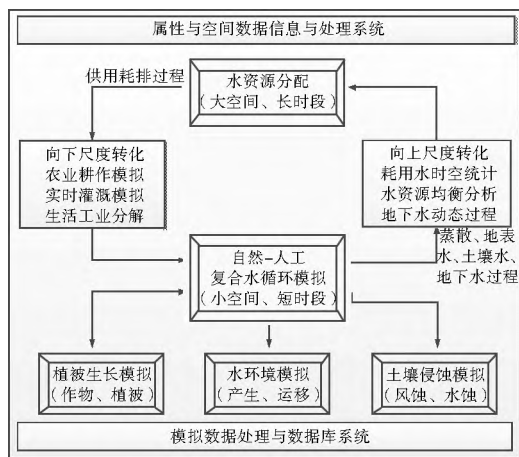


图 4 WACM 模型框架

Fig. 3 The framework of WACM model

(3) 流域水循环的响应分析。以生态稳定响应和经济效益响应为广义水资源配置方案的合理性检验标准,可以及时反馈和调整广义水资源合理配置方案,保证广义水资源配置的合理性。

(4) 多目标调控。通过模型将配水对象扩展到降水和土壤水、配水范围拓展到天然生态系统,并进行生态空间优化决策和微观配水,通过不同优化目标,综合分析和评价各个水资源配置方案的差异,给出不同方案的天然-人工系统水资源供需态势。

3 黄河流域水循环研究实例

3.1 黄河流域水资源现状

黄河流域水资源贫乏,属资源性缺水地区。黄河水资源不仅具有年际变化大、年内分配集中、空间分布不均等我国北方河流的共性,同时还具有水少沙多、水沙异源、水沙关系不协调等特性。

根据黄河 973 评价结果^[12],1956 年-2000 年系列,多年平均地表水资源量 499 亿 m³,不重复地下水资源量 112 亿 m³,水资源总量为 610 亿 m³。但随着流域需水量的增加,以及黄河天然河川径流量的减少,加上承担向流域外供水任务,黄河水资源供需矛盾将异常严重^[13]。同时在变化环境下,特别是水资源开发利用等人类活动的影响,黄河流域的水循环特征也出现明显变化^[14-15]。

3.2 基于 WACM 模型的流域水循环研究

根据黄河流域行政区划和水系分布,并考虑主要断面控

制要求和工程情况,将流域的实际水资源系统概化为由节点和有向线段构成的网络,节点包括重要水库、计算单元和河

道交汇点等。按照三级区套地省的划分原则,将黄河流域划分为 54 个计算单元,构建形成水资源系统网络图,见图 5。

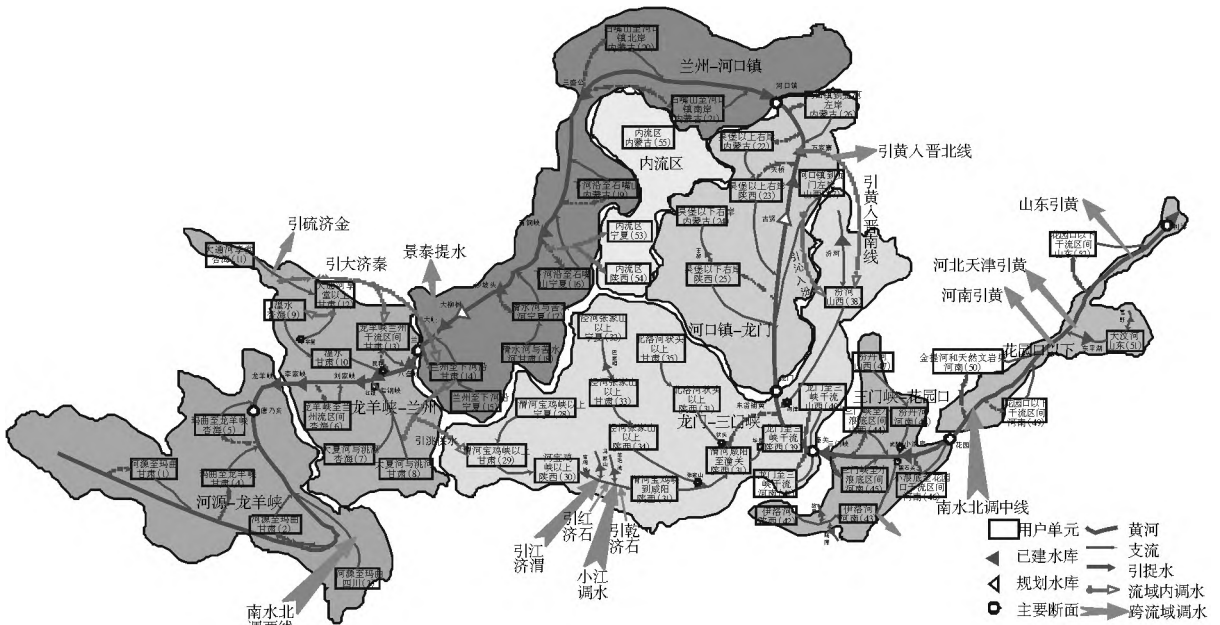


图 5 黄河流域水资源系统网络图

Fig. 5 The water resources system network in the Yellow River Basin

利用 1956 年- 2000 年 45 年系列的水资源量的逐月数据,按照一定的供水顺序和计算原则,在考虑黄河流域地表供水工程和地下水开采量的情况下,结合流域经济和社会发展,对黄河流域采用适应水资源开发利用条件的流域水循环计算方法对黄河流域进行水资源配置计算,流域水量平衡结果见图 6。

通过模拟计算得到,黄河流域多年平均需水量为 494 亿 m³, 多年平均供水量 403 亿 m³, 缺水为 93 亿 m³, 全流域河道外缺水率为 18.7%, 多年平均入海水量为 205 亿 m³。现状多年平均黄河流域水资源消耗量为 397.2 亿 m³。黄河流域缺水十分严重, 缺水主要集中在农林牧灌溉、部分工业用水、河道内和河道外生态, 缺水分布主要在兰州至河口镇和龙门至三门峡两个二级区, 缺水量占黄河流域缺水量的 70.9%。缺水比较严重地区主要分布在青海的湟水流域、宁夏、汾河流域、渭河流域和内流区, 缺水率都在 20% 以上。现

状水平年(多年平均)二级区套省的配置结果见表 1。

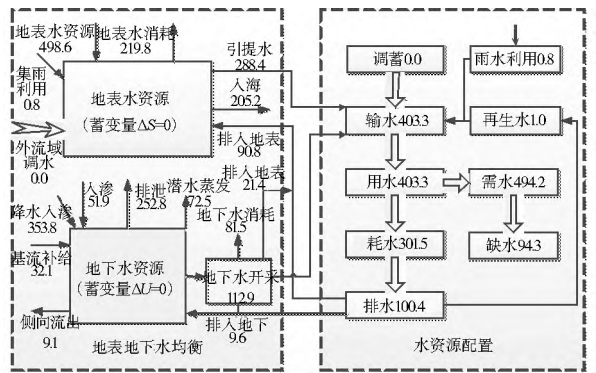


图 6 黄河流域水量平衡(亿 m³)

Fig. 6 The water balance diagram in the Yellow River Basin(10⁸m³)

表 1 黄河流域现状水平年配置结果

Table 1 The allocation results of water resources in the Yellow River Basin in the current level years

二级区省(区)	流域内 需水量	流域内供水量				流域内 缺水	流域内缺 水率(%)	流域外 供水量	地表耗 水量	地下水 耗水量	总耗水量
		地表水	地下水	其他	合计						
龙羊峡以上	3.2	3.0	0.1	0.0	3.1	0.1	4.4	0.00	2.4	2.4	
龙羊峡至兰州	45.6	34.4	4.8	0.1	39.3	6.3	13.9	0.0	26.8	29.1	
兰州至河口镇	207.5	147.9	18.9	0.5	167.3	40.3	19.2	1.3	101.3	116.8	
河口镇至龙门	20.9	10.8	4.5	0.1	15.3	5.6	26.8	0.0	8.7	12.0	
龙门至三门峡	128.7	57.1	46.5	0.8	104.4	24.3	18.9	0.0	48.6	83.3	
三门峡至花园口	34.3	16.3	11.9	0.1	28.3	6.0	17.5	10.0	13.4	31.8	
花园口以下	47.8	17.9	23.0	0.2	41.1	6.7	14.0	84.6	17.5	118.2	
内流区	6.1	1.2	3.2	0.0	4.3	1.7	28.6	0.0	1.0	3.6	
黄河流域	494.2	288.4	112.9	1.8	403.1	91.1	18.4	95.9	219.8	397.2	

在模拟计算中,考虑不同水平年流域新增水利工程和跨流域调水工程对水资源配置与水循环影响。其中干流骨干蓄

水工程有: 古贤水利枢纽(按 2020 年生效考虑), 黑山峡河段工程(按 2030 年生效考虑)。引提水工程有: 引大济湟、引洮

供水等引水工程以及宁夏扶贫扬黄灌溉工程、东雷抽黄二期工程等提水工程。2020 年,考虑向黄河流域调水的工程有:南水北调东线工程、引红济石、引乾济石、引汉济渭。南水北调东线工程向山东供水 0.17 亿 m^3 ,引红济石、引乾济石、引汉济渭向黄河分别调水 0.90 亿 m^3 、0.47 亿 m^3 、15.00 亿 m^3 。2030 年,考虑向黄河流域调水的工程有:南水北调东线工程、引红

济石、引乾济石、引汉济渭和南水北调西线一期工程。南水北调东线调入山东 1.26 亿 m^3 ,引乾济石调水量 0.47 亿 m^3 ,引红济石调水量 0.90 亿 m^3 ,引汉济渭和南水北调西线一期工程调水规模目前尚在研究中,调水量分别按 15.00 亿 m^3 、80.00 亿 m^3 考虑,总计调入黄河水量为 97.63 亿 m^3 。其中 2030 年有引汉济渭有西线工程黄河流域多年平均配置结果见表 2。

表 2 2030 年有引汉济渭有西线工程配置结果

Table 2 The allocation results of water resources in the western route of water transfer project from Yangtze to Yellow River in 2030

二级区省(区)	流域内 需水量	流域内供水量				流域内 缺水量	流域内缺 水率(%)	流域外 供水量	地表耗 水量	地下水 耗水量	总耗水量
		地表水	地下水	其他	合计						
龙羊峡以上	5.5	5.2	0.1	0.1	5.4	0.1	1.7	0.0	4.9	0.1	4.9
龙羊峡至兰州	60.5	51.3	5.5	2.7	59.5	1.0	1.7	0.4	43.6	3.9	47.9
兰州至河口镇	228.2	181.3	22.4	4.7	208.5	19.7	8.6	5.3	128.1	16.1	149.7
河口镇至龙门	21.3	13.5	4.5	0.8	18.8	2.5	11.9	5.6	12.6	3.2	21.4
龙门至三门峡	164.0	83.7	50.8	8.3	142.7	21.2	13.0	0.0	73.2	36.4	109.6
三门峡至花园口	44.4	16.3	12.6	2.4	31.3	13.1	29.5	10.0	14.9	9.1	33.9
花园口以下	53.9	19.1	23.7	1.4	44.2	9.7	18.0	75.1	18.1	17.0	110.2
内流区	6.6	1.1	3.2	0.0	4.3	2.3	35.0	0.0	1.0	2.3	3.3
黄河流域	584.4	371.5	122.8	21.5	515.8	68.6	11.7	96.7	296.2	88.0	481.0

另外,根据未来情景的模拟计算结果,得出如下结论。

(1) 相对现状,缺水将更加严重。

若不考虑流域内节水,黄河流域 2020 和 2030 水平年需水量分别是 598.7 亿 m^3 和 654.2 亿 m^3 。在没有外调水措施的情景下,2020 和 2030 水平年缺水量将分别达到 169 亿 m^3 和 230 亿 m^3 ,缺水率将分别为 28% 和 35%。

若仅考虑黄河流域内部节水挖潜,2020 和 2030 水平年需水量分别为 534 亿 m^3 和 560 亿 m^3 ,缺水量将分别将达到 104 亿 m^3 和 136 亿 m^3 ,缺水率将分别为 20% 和 24%。

(2) 流域内大力节水,能够较大程度缓解缺水状况。

在考虑流域内节水条件下,2020 年黄河流域可消耗水资源量为 420.5 亿 m^3 ,多年平均水资源消耗量为 414.7 亿 m^3 ,还有 5.8 亿 m^3 水资源消耗潜力。2030 年黄河流域可消耗水资源量为 417.7 亿 m^3 ,多年平均水资源消耗量为 415.9 亿 m^3 ,流域内部水资源开发利用潜力基本用尽。

由黄河流域的实践案例可见,本文提出的水资源开发利用条件下的基于流域自然-人工复合水循环理论的解决方案,对于解决流域实际水资源问题有较为明显的帮助。

4 结语

(1) 在人类强干扰地区,对自然-人工复合水循环机理的科学认识和精细模拟,是研究水资源开发利用条件下流域水循环问题的基础。精细地模拟人工用水分配过程,能反映社会水循环规律;而模拟人工与自然水分循环过程,可得到耗用水量以及相互关系;最后针对人工水分调整后,对生态、环境、经济等影响的评价和分析,能有效的反应出流域水循环和水资源开发利用的响应关系。

(2) WACM 模型在黄河流域的实践应用,是一次以自然-人工复合水循环机理为基础而进行的耗水总量控制的成功尝试,为今后水资源开发利用条件下流域水循环的研

究提供了新的技术支撑和研究方法。

参考文献(References):

- [1] 王浩,严登华,贾仰文,等.现代水文学水资源学科体系及研究前沿和热点问题[J].水科学进展,2010,21(4):479-489.(WANG Hao, YAN Denghua, JIA Yangwen, et al. Subject System of Modern Hydrology and Water Resources and Research Frontiers and Hot Issues[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 479-489. (in Chinese))
- [2] 翁白沙,严登华.变化环境下中国干旱综合应对措施探讨[J].资源科学,2010,32(2):309-316.(WENG Baisha, YAN Denghua. Integrated Strategies for Dealing with Droughts in Changing Environment in China[J]. Resources Science, 2010, 32(2): 309-316. (in Chinese))
- [3] Zheng, C. MIKE-SHE: Software for Integrated Surface Water/Ground Water Modeling[J]. Ground Water, 2008, 36(6): 797.
- [4] Xie Zhenghui, Su Fengge, Liang Xu, et al. Applications of a Surface Runoff Model with Horton and Durne Runoff for VIC[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 2(2): 165-172.
- [5] Anji Seth, Sara A. Rauscher, Suzana J. Camargo, et al. RegCM3 Regional Climatologies for South America Using Reanalysis and ECHAM Global Model Driving Fields[J]. Climate Dynamics, 2007, 28: 461-480.
- [6] M. B. Sylla, A. T. Gaye, J. S. Pal, et al. High resolution Simulations of West African Climate Using Regional Climate Model (RegCM3) with Different Lateral Boundary Conditions[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 98: 293-314.
- [7] 裴源生,赵勇,陆垂裕,等.经济生态系统广义水资源配置[M].郑州:黄河水利出版社,2006.(PEI Yuan sheng, ZHAO Yong, LU Chuiyu, et al. The Economic and Ecological System of Generalized Water Resources Allocation [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2006. (in Chinese))
- [8] 马欢.人类活动影响下海河流域典型区水循环变化分析[D].北

- 京:清华大学,2011.(MA Huan. Hydrological Changes in Typical Catchments of the Hai River Basin under the Influence of Human Activity [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese))
- [9] 贾仰文,王浩,倪广恒. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.(JIA Yang wen, WANG Hao, NI Guangheng. Distributed Hydrologic Model Theory and Practice[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2005. (in Chinese))
- [10] 裴源生,赵勇,张金萍. 广义水资源合理配置研究[I]—理论[J]. 水利学报,2007,38(1): F7. (PEI Yuan sheng, ZHAO Yong, ZHANG Jin ping. Study on Rational Deployment of Generalized Water Resources I—theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1): F7. (in Chinese))
- [11] 赵勇,陆垂裕,肖伟华. 广义水资源合理配置研究(II)—模型[J]. 水利学报. 2007, 38(2): 163-170. (ZHAO Yong, LU Chuiyu, XIAO Weihua. Study on Rational Deployment of Generalized Water Resources II—model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(2): 163-170. (in Chinese))
- [12] 中国水利水电科学研究院. 国家重点基础研究发展规划项目“黄河流域水资源演化模型与可再生性维持机理研究”第二课题“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”(G1999043602)[R]. 北京:中国水利水电科学研究院,2004. (China Institute of Water Resources and Hydropower Research. The Second Topic "The Yellow River Water Resources Evolution Rules and Binary Evolution Model" of "973" Plan "the Yellow River Water Resources Evolution Model and Reproducibility Maintaining Mechanism Research" (G1999043602) [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004. (in Chinese))
- [13] 刘昌明,郑红星. 黄河流域水循环要素变化趋势分析[J]. 自然资源学报,2003,18(2): 129-135. (LIU Chang ming, ZHENG Hongxing. Trend Analysis of Hydrological Components in the Yellow River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 129-135. (in Chinese))
- [14] 刘昌明. 黄河流域水循环演变若干问题的研究[J]. 水科学进展,2004,15(5): 608-615. (LIU Chang ming. Study of Some Problems in Water Cycle Changes of the Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5): 608-615. (in Chinese))
- [15] 王浩,贾仰文,王建华,等. 人类活动影响下的黄河流域水资源演化规律初探[J]. 自然资源学报,2005,20(1): 157-162. (WANG Hao, JIA Yang-wen, WANG Jian-hua, et al. Evolutionary Laws of the Yellow River Basin's Water Resources under the Impact of Human Activities [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(1): 157-162. (in Chinese))

(上接第16页)

- [34] Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K. C., et al. Hydrological Modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical Model Formulation and Bayesian Inference [J]. Journal of Hydrology, 2007, 340(3-4): 167-182.
- [35] Zhang, X. S., Srinivasan, R., Debele, B., et al. Runoff Simulation of the Headwaters of the Yellow River Using the SWAT Model with Three Snowmelt Algorithms [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(1): 48-61.
- [36] Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., et al. Assessing the Impact of Climate Change on Water Resources in Iran [J]. Water Resources Research, 2009, 45: W10434, DOI: 10.1029/2008WR007615.
- [37] Xu, Z. X., Zhao, F. F., Li, J. Y. Response of Streamflow to Climate Change in the Headwater Catchment of the Yellow River Basin [J]. Quaternary International, 2009, 208(1-2): 62-75.
- [38] Zuo D. P., Xu Z. X., Yang H., et al. Spatiotemporal Variations and Abrupt Changes of Potential Evapotranspiration and Its Sensitivity to Key Meteorological Variables in the Wei River Basin, China [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(8): 1149-1160.
- [39] 徐宗学,左德鹏. 渭河流域蓝水绿水资源量多尺度综合评价[C]. 第二届全国水资源合理配置与优化调度技术交流研讨会,西安:2012. (XU Zong-xue, ZUO De-peng. Assessment on Blue and Green Water Resources at Different Scales in the Wei River Basin [C]. The 2nd Symposium on National Water Resources Rational Allocation and Optimal Scheduling Technology, Xi'an: 2012. (in Chinese))