

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2012.06.004

# 基于水功能区的水量调控模型研究

魏 娜<sup>1,2</sup>, 游进军<sup>2</sup>, 解建仓<sup>1,2</sup>, 贾仰文<sup>2</sup>, 牛存稳<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048;

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

**摘要:**以水量水质的联合调控为目标, 分析水功能区与水量调控模拟计算单元之间的水量转换关系, 改进了基于规则的水资源配置模型, 提出水功能区与水资源分区计算单元之间的水量排放计算关系, 模拟计算出水功能区在不同用水条件下的水量过程。结合水功能区水质目标的要求, 进一步分析不同水量调控方案下的水功能区纳污能力, 为实现水量水质联合模拟和调控奠定计算基础。将模型应用于嫩江流域, 结果表明该模型具有灵活性和普遍适用性。

**关键词:**水量水质联合调控; 计算单元; 水功能区; 纳污能力

中图分类号: TV213.4 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2012)06-0019-05

## A water quantity regulation model based on water functional zone

WEI Na<sup>1,2</sup>, YOU Jin-jun<sup>2</sup>, XIE Jian-cang<sup>1,2</sup>, JIA Yang-wen<sup>2</sup>, NIU Cun-wen<sup>2</sup>

(1. Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** A rule-based water allocation model was improved with hydraulic relation of water functional zones and calculation units of a sub-basin based on analysis of objectives of joint regulation of water quantity and quality. Runoff of the water functional zones under different water utilization conditions were simulated according to the relation. According to the water quality requirements of water functional zones, the pollutant carrying capacity of the water functional zones in different water quantity regulating schedules was calculated, which provides a basis for realizing joint simulation and regulation of water quantity and quality. The model was verified to be flexible and applicable through its application to the Nenjiang River.

**Key words:** joint regulation of water quantity and quality; calculation unit; water functional zone; pollutant carrying capacity

水资源是人类生存和经济社会发展的物质基础, 水量、水质是水资源的二重属性, 水资源短缺与水质恶化严重制约了我国经济社会的可持续发展。不同种类用水对水量和水质的要求不同, 需要结合水质的要求对水量进行合理分配, 因此水量水质联合调控就显得尤为重要。目前关于水量水质联合调控的研究有两种: 一种是基于水量水质联合模拟的

简化扩展, 将微观层面的水质模拟与宏观层面的水量配置相结合; 另一种是提出了水量水质联合调控的目标, 在水资源分配过程中考虑水质的影响, 但分配方法仍以水量配置为主<sup>[1]</sup>。

可以看出, 现有的研究对于水量调控和水质模拟结合得不够紧密, 没有顾及人工-天然水循环系统之间的动态关系, 一方面不能充分考虑水量变化条

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07207-006); 国家自然科学基金(50939006, 51021006, 50879091)

作者简介: 魏娜(1987—), 女, 硕士研究生, 研究方向为区域经济与水资源管理。E-mail: 844787598@qq.com

件的影响,另一方面不能较好地结合河流水质功能目标。考虑现有的技术方法在上述两个方面的不足,现有水功能区定义中比较全面完整地界定了河流水系的水质功能目标。本研究在对水循环和供用水模拟的水量配置模型的基础上,建立水量调控模拟计算单元与水功能区之间的水量交换关系,为水量和污染负荷双重平衡进行交互式的模拟分析建立水量基础,尝试开展基于水功能区的水量水质联合模拟和调控。

## 1 水量水质联合调控的研究现状

国外对水质问题关注得比较早,对水量、水质一体化的调控研究和实践探索开展得也比较早。Loftis 等<sup>[2]</sup>研究了综合考虑水量水质目标下的湖泊水资源调度方法,Mehrez 等<sup>[3]</sup>对区域多水源、多水质供给进行了研究,Cai 等<sup>[4]</sup>分析了水量分配和灌溉引起的盐碱化问题。在国内,针对生态环境恶化、用水矛盾尖锐和水质型缺水严重等问题,水量水质联合调控逐渐成为当前水资源领域的研究热点。徐贵泉等<sup>[5]</sup>建立适应性较强的河网水量水质统一模型——Hwqnow 模型,提出了调水改善水环境的措施,并应用于上海浦东新区河网水环境调水方案中。王好芳等<sup>[6]</sup>建立了基于量与质的多目标水资源配置模型,该模型同时考虑了水量水质因素,解决了当前水资源短缺和竞争性用水等问题,但还缺乏基于宏观机理对水量水质过程的模拟与水污染控制的系统措施分析。吴泽宁等<sup>[7]</sup>提出了基于生态经济学的区域水量水质配置模型。付意成等<sup>[8]</sup>建立了在时空上合理调配水资源的水量水质联合调控模型,该模型将水环境承载能力作为一种资源与水量进行统一协调,提出利用 GAMS 软件进行水量水质联合调控的多目标动态耦合方法。

目前,对流域的水量水质进行联合调控的技术应用研究较少,且主要研究以水质为约束目标进行水量分配调控,缺乏对河流水质目标的考虑以及对水量与水质动态关系的分析。2002 年《中国水功能区划》正式在全国范围内实施。2004 年水利部水资源司出台了《水功能区划分技术规范》,明确了各江河湖库的水域功能及功能顺序,为水域的开发利用和保护管理提供了科学依据。由于对水功能区河流水质目标给出了比较规范的定义,本研究结合水功能区的水质标准控制要求,以水量模拟模型为基础,根据流域计算单元与水功能区之间的水量关系,建立可以分析水功能区断面水量过程的流域水量调控模拟模型,通过不同的水量调控方案和水功能区的水质目标要求,分析计算不同水量调控方案下的水

体纳污能力,对用水变化、径流变化和水功能区纳污能力之间的动态关系进行分析,为实现水量水质的联合模拟和调控奠定基础。

## 2 基于水功能区的水量模拟

### 2.1 总体思路

按照水量水质联合调控的要求,采用基于规则的水资源配置模型(简称 ROWAS 模型)进行水量调控<sup>[9]</sup>。水量模拟调控模型对用水和河道水量的调度过程进行模拟,分析不同用水和调度方案对水量平衡过程的影响。该模型需要对现状和未来的水资源供需量进行模拟计算,通过协调河道外生活用水、生产用水和生态用水与河道内生态用水、发电用水以及航运用水等,提出流域水资源在不同区域、同区域水资源在不同地区和行业的合理配置方案。通过改进基于规则的水资源配置模型,建立计算单元与水功能区之间的关系,给出不同用水和工程调度情景下各区域的废污水排放状况和水功能区断面河道水量变化过程,并通过纳污能力分析模型对比动态水量条件下的水功能区的纳污能力,从而起到通过水量调控达到水质目标的作用。

### 2.2 计算单元与水功能区间的关系

基于规则的水资源配置模型是通过设置供用水计算单元和节点来进行水量平衡计算。为了配合水功能区的纳污能力计算,采用水资源分区嵌套行政区作为计算单元的方法。计算单元是系统模拟的中心环节,水资源供、用、耗、排的分析都是在计算单元内部完成的。节点包含工程节点和控制节点两类。工程节点指在系统图上单列的蓄引提工程,这类工程在模拟计算中单独参与计算,它可以对受水单元或者其他工程供水,同时也可以按照工程运行目标对发电航运、生态环境等河道内用水需求进行水量调控。控制节点指有水量或水质控制要求的河道或渠道断面,它具有与工程节点相同的各种水力关系,但一般不具备调蓄能力。将计算单元、主要工程节点、控制节点以及供用耗排水等系统元素,采用概化的“点”、“线”元素表达,绘制描述流域水量关系的水资源系统网络节点图,以反应流域水循环与水资源供用耗排的过程,并以此作为模拟计算的基础。

为了实现水资源配置模型与水功能区的有效结合,将水功能区作为水量配置模型中的控制节点按照流域的上下游关系插入到水资源系统网络节点图中。水功能区上下段节点可以作为水量配置模型中的计算节点,用水以及工程调控作用会影响水功能区节点的流量过程,在一定程度上决定了水功能区纳污能力的大小,可起到通过水量调控达到水质目

标的作用。

计算单元和水功能区是按照区域和河道进行划分的,两者之间有相互交叉的关系。分析水量水质之间的联合调控,需要在计算单元与水功能区之间建立对应关系(图1);每个计算单元都包含若干个水功能区,以确保单元地表径流能够汇入对应的水功能区;为确保系统水量转移的完备性,每个水功能区也对应存在具有排水关系的计算单元,从而使单元用水后的废污水及退水能够排入相应的水功能区。这两层关系构成了针对水功能区的水量过程和污染负荷排放过程,这两种水量排放关系分别采用水资源配置模型中的本地径流排放渠道和未处理污水排放渠道表示。确定每个计算单元所涉及的水功能区的汇流面积比例,将该比例作为本地径流排放渠道的分水参数。考虑用水中心和排污口的分布,要确定计算单元对水功能区节点的未处理污水排放渠道的分水参数。

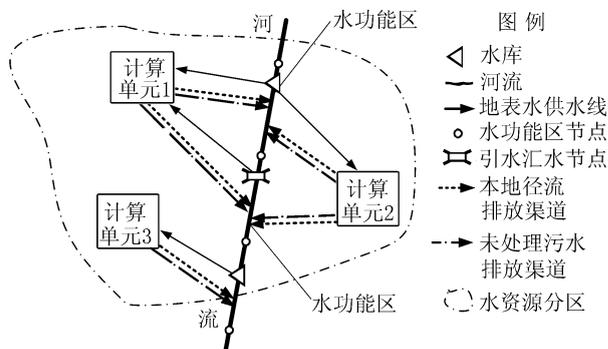


图1 计算单元与水功能区关系示意

改进后的水资源配置模型将本地径流的排放路径由之前的排入下游计算单元、下游节点和水汇改为排入计算单元所对应的水功能区;将未处理污水的排放路径由之前的排入下游节点和水汇改为排入计算单元所对应的水功能区。通过模型的改进,可以较为准确地分析出水功能区节点的地表径流量变化过程和功能区的废污水排放量。

### 2.3 纳污能力计算

水功能区的纳污能力指在水域使用功能不受破坏的条件下,水功能区接纳污染物的最大数量,即在一定设计水量条件下,满足水功能区水环境质量标准要求的污染物最大允许负荷量。水功能区纳污能力的大小与水功能区范围的大小、水环境要素的特性和水体净化能力、污染物的理化性质等有关。污染物最大允许负荷量的计算是制定污染物排放总量控制方案的依据。

保护区和保留区的水质目标原则上是维持现状水质,其纳污能力就是其现状污染物入河量。而缓冲区纳污能力分为两种情况处理:对水质较好、用水

矛盾不突出的缓冲区,可采用其现状污染物入河量为其纳污能力;对水质较差或存在用水矛盾的缓冲区,其纳污能力按开发利用区纳污能力的计算方法来计算。对开发利用区纳污能力的计算,需根据各二级水功能区的水文设计条件、水质目标和模型参数,按水量水质模型计算求得。根据《全国水资源综合规划地表水资源保护补充技术细则》要求,宽深比不大的中小型河流可以采用一维水质模型计算其纳污能力<sup>[10]</sup>。水功能区纳污能力的计算公式为

$$M = 31.5(\rho_s - \rho_0 \exp(-kL/u)) \exp(kx/u) Q_r \quad (1)$$

式中: $M$ 为水功能区纳污能力,t/a; $\rho_s$ 为水功能区下断面水质目标控制因子的质量浓度,mg/L; $\rho_0$ 为水功能区上断面水质目标控制因子的质量浓度,mg/L; $k$ 为污染物综合衰减系数,1/s; $L$ 为水功能区长度,m; $x$ 为排污口下游断面距离水功能区下断面的纵向距离,m; $u$ 为设计流量下的平均流速,m/s; $Q_r$ 为设计流量,m<sup>3</sup>/s。

设计流量 $Q_r$ 的确定,是根据《全国水资源综合规划水资源保护规划技术细则》的要求,采用长系列枯水期(12月、1月、2月、3月)75%的保证率流量作为设计流量,而对于集中式饮用水源区,采用95%的保证率最枯月平均流量作为设计流量。

根据水功能区纳污能力计算公式,可得到不同水平年各水功能区的纳污能力,将其作为污染控制指标。关于水功能区达标的水量调控方案,一方面可以通过对重点地市的城镇生活用水和生产用水进行削减并调整用水结构来实现;另一方面通过主要控制工程的调控作用影响河道水量变化过程,如蓄水工程可以控制用水的引水和下泄过程,具有最大的控制效应,引、提水工程通过水量取用减少河道径流量,跨流域调水工程可以增加流域内的水循环通量,具有综合性的影响。通过对水利工程的调控加大枯季下泄水量,提高枯季河道的纳污能力,对比动态水量条件下水功能区的入河排污量和纳污能力,可形成水量调控方案。

## 3 实例分析

### 3.1 模型构建

为验证模型的可行性,选取嫩江流域进行实例分析。嫩江是松花江流域的3大水系之一,位于黑龙江省中西部,介于北纬46°26'~51°41',东经119°30'~127°54'之间,发源于大兴安岭伊勒呼里山中段南侧,于吉林省三岔河处与第二松花江汇合后注入松花江干流,全长1370 km,流域面积29.7万km<sup>2</sup>,其较大的支流有霍林河、洮儿河、蛟流河等。根据1956—2000

年45 a水文系列计算,嫩江流域水资源总量为367.7亿 m<sup>3</sup>,其中地表水资源量293.8亿 m<sup>3</sup>。

嫩江流域共分为尼尔基以上、尼尔基至江桥、江桥以下3个水资源三级区和18个水资源四级区。按照水资源分区和行政区的嵌套关系,在嫩江流域共划分出水资源四级区套地市的基本计算单元47个。流域内一级水功能区105个,其中,保护区34个,保留区21个,开发利用区32个,缓冲区18个。一级水功能区中的32个开发利用区又划分为58个二级水功能区。嫩江流域水资源分区及水功能区以及系统网络节点图见图2和图3。



图2 嫩江流域水资源分区与水功能区

通过径流汇流面积以及排污口分布情况,可确定本地径流排放渠道和未处理污水渠道的分水参数。嫩江流域部分计算单元与水功能区地表汇流及废污水排放关系见表1。

表1 计算单元与水功能区地表汇流及废污水排放关系

计算单元	对应水功能区	径流排放渠道分水参数	未处理污水排放渠道分水参数
尼塔区 间齐市	北部引嫩农业用水、工业用水区	0.39	0.45
	嫩江甘南县保留区	0.07	0.04
	嫩江黑蒙缓冲区2	0.27	0.21
	嫩江富裕县过渡区	0.05	0.04
	嫩江富裕县农业用水区	0.19	0.21
	嫩江富裕县排污控制区	0.03	0.05
江白区 间齐市	嫩江泰来县农业用水区、渔业用水区	0.16	0.16
	嫩江泰来县保留区	0.70	0.59
	嫩江黑吉缓冲区	0.14	0.25

### 3.2 水量模拟调控方案

水量模拟调控模型以2005年为现状年,以

表2 嫩江流域水量供需平衡结果

方案	水平年	方案编号	总需水量	总供水							合计 缺水	其中农业 缺水
				城镇生活	农村生活	工业	农业	城镇生态	农村生态	合计		
基本方案	2005	B05	118.34	3.11	2.08	22.62	81.69	0.45	1.42	111.37	6.97	3.72
	2020	B20	199.11	6.09	2.19	32.57	139.75	0.87	4.74	186.21	12.90	4.73
节水方案	2020	W20	181.71	5.58	2.00	30.15	130.74	0.79	4.98	174.25	7.46	1.10

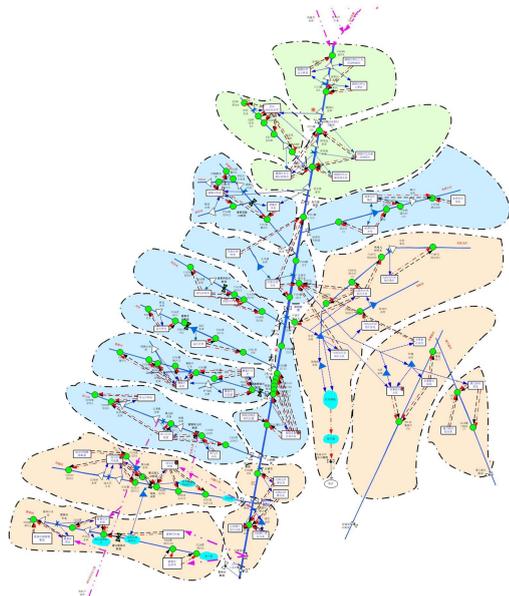


图3 嫩江流域系统网络节点

2020年为规划水平年。经济社会发展、产业结构调整、用水效率提高、节水力度加大、生态环境保护目标变化等诸多因素,导致经济社会对水的需求可能有较大的差异,因此,用基本方案(一般节水模式)和节水方案(强化节水模式)2套方案来预测嫩江流域不同水平年的需水量过程,并结合流域未来供水工程的规划建设,确定流域水量供需平衡结果,见表2。

由表2可以看出,在基本方案需水条件下,2020年嫩江流域的缺水为12.9亿 m<sup>3</sup>,缺水率达6.5%左右。采用节水方案后,2020年缺水降低至7.46亿 m<sup>3</sup>,缺水率达4.1%左右。由此可见,采用节水方案后,嫩江流域的缺水情况有所缓解,但仍存在一定程度的水资源供需压力,需要增强水量综合调控。

### 3.3 纳污能力的计算

本次纳污能力的计算选取1956—2000年共45 a的长系列资料。依据水量配置模型中建立的水功能区和计算单元之间的水量排放关系,输出各水功能区在不同水量调度方案下的长系列断面水量过程,选择嫩江流域的两个主要控制断面(尼尔基、江

表3 嫩江流域典型水功能区流量特征值

m<sup>3</sup>/s

断面/工程	对应水功能区	B05			B20			W20		
		年平均流量	年最小流量	90%频率年流量	年平均流量	年最小流量	90%频率年流量	年平均流量	年最小流量	90%频率年流量
尼尔基	嫩江黑蒙缓冲区2	312	70	162	309	63	155	333	91	214
江桥	嫩江黑吉缓冲区	611	140	267	450	66	167	472	93	206
毕拉河口	毕拉河鄂伦春农业用水区	89	13	32	45	7	19	48	16	26
音河	音河甘南县农业用水、饮用水源区	18	6	11	12	2	10	14	6	12

桥)及部分支流上的蓄水工程(毕拉河口、音河)所对应的水功能区作为典型水功能区进行分析。嫩江流域典型水功能区基本方案(B05、B20)和节水方案(W20)的流量特征值及90%频率枯季月流量过程分别见表3和表4。

表4 嫩江流域典型水功能区90%枯季月流量过程

m<sup>3</sup>/s

断面/工程	对应水功能区	方案	流量			
			1月	2月	3月	12月
尼尔基	嫩江黑蒙缓冲区2	B05	8	5	6	5
		B20	6	5	4	6
		W20	32	30	23	48
江桥	嫩江黑吉缓冲区	B05	33	31	26	48
		B20	11	21	13	7
		W20	25	30	27	37
毕拉河口	毕拉河鄂伦春农业用水区	B05	6	11	18	8
		B20	2	5	11	3
		W20	4	9	14	5
音河	音河甘南县农业用水、饮用水源区	B05	1	2	2	3
		B20	0	1	2	1
		W20	2	3	2	3

由表3可以看出,采用节水方案后,典型水功能区的年平均流量、年最小流量和90%频率年流量均有所提升,且年最小流量提升幅度大于年平均流量的提升幅度。由表4可以看出,未来用水量增加后,90%频率枯季月流量较现状均有所减少,但是由于节水方案在河道外用水减少的同时也调整了流域主要控制工程下泄流量的控制调度方式,对尼尔基以下具有较大河道外引水量的控制断面的枯季水量有较大的提升作用。

流域典型水功能区COD和NH<sub>3</sub>-N的纳污能力计算结果见表5。基本方案和节水方案中2020年COD、NH<sub>3</sub>-N纳污能力增幅分别为1.84万t/a和

0.12万t/a,可见,不同的水量调控方案中,采取节水减排的同时,通过主要控制工程的调控作用,可使得问题比较严重的枯季河道纳污能力和河道水质得到较大改善。

## 4 结论

对基于规则的水资源配置模型进行改进,使之与水功能区目标相结合,建立用水变化、径流变化和水功能区纳污能力之间的动态分析关系,为实现水量水质联合模拟和调控奠定计算基础,使水量调控和水质模拟结合得更加紧密。

a. 通过建立计算单元与水功能区之间的天然径流和废污水排放,动态地衔接了水量调控和水功能区纳污能力之间的关系,起到了通过水量调控达到水质目标的作用。

b. 改进后的水量模拟调控模型不同于以往缺乏对河流水质目标的考虑以及对水量与水质的动态关系分析,为水量和污染负荷双重平衡进行交互式的模拟分析奠定了水量基础。

c. 通过整体节水措施、重点区域用水结构调整和主要控制工程调控作用,形成源头节水减排、水量合理分配、工程调配的水量调控方案。

d. 模型构建具有灵活性,只需要对模型中的节点和渠道做适当的调整,就可将水功能区与水量配置模型结合起来,操作简单,对水功能区划的流域具有普遍适用性。

## 参考文献:

[1] 游进军,薛小妮,牛存稳.水量水质联合调控思路与研究进展[J].水利水电技术,2010,41(11):7-10.

表5 嫩江流域典型水功能区纳污能力计算

t/a

水功能区	B05 纳污能力		B20 纳污能力		W20 纳污能力	
	COD	NH <sub>3</sub> -N	COD	NH <sub>3</sub> -N	COD	NH <sub>3</sub> -N
嫩江黑蒙缓冲区2	3701.79	294.48	2462.20	195.87	2983.00	237.31
嫩江黑吉缓冲区	12941.04	1032.96	11290.22	901.27	11799.36	941.91
毕拉河鄂伦春农业用水区	1331.54	102.25	88.22	6.78	92.96	7.14
音河甘南县农业用水、饮用水源区	119.54	15.54	8.93	1.20	47.99	6.26
流域合计	699571.38	49576.05	528373.43	38180.37	547746.63	39390.40

(下转第28页)

表7 年总需水量计算值与参考值对比

年型	参考值/亿 m <sup>3</sup>	计算值/亿 m <sup>3</sup>	相对误差/%
P=95%	228.23	222.82	-2.37
P=75%	178.53	183.25	2.64
P=50%	161.43	172.06	6.58

当前江苏农业水资源存在的主要问题包括资源型缺水、水质型缺水和季节性干旱3个方面<sup>[10]</sup>。限于文章内容,本文只分析资源型缺水量。参考相关资料,经1956—2000年长系列供需平衡调节计算,南水北调东线一期工程实施后,2020规划水平年江苏省受水区缺水总量较现状有较大幅度下降,P=95%年型缺水率为8.74%,缺水量为20.58亿m<sup>3</sup>;P=75%年型缺水率为0.24%,缺水量为0.47亿m<sup>3</sup>;P=50%年型缺水率为0.15%,缺水量为0.28亿m<sup>3</sup>。可见南水北调东线一期工程实施后该区域水资源保障能力较强。

水资源利用率低、浪费严重是缺水原因之一,灌溉水源30%以上耗费在各级渠道上,建议加强渠道防渗化,提高输水的有效利用率<sup>[11]</sup>;部分地区缺水量较大是取水口门规模太小造成的,建议进行工程改造,加大取水口的规模或者数量;前期所概化的河道的河宽和河长等也可能会影响缺水量。

## 5 结语

本文以南水北调东线一期工程即将全线通水为契机,结合江苏省南水北调水量配置,建立江苏省南水北调受水区的产流模型和需水模型,计算3种年型下受水区的产流量和需水量,简要进行供需平衡分析。采用2020规划水平年的用水户数据,计算2020水平年受水区在P=50%、P=75%和P=95%3种年型下的缺水量分别为0.28亿m<sup>3</sup>、0.47亿m<sup>3</sup>

和20.58亿m<sup>3</sup>,相关部门可以参考受水区缺水量进行水资源调度。本文研究内容根据江苏省南水北调水量配置研究而来,有许多需要加深研究的地方。随着经济的发展等,受水区的下垫面情况会发生变化,比如路面的硬质化率增加等将影响产汇流过程的模拟;非农需水(如生活需水等)会随着季节的变化而发生变化,其需水过程是一个波动过程等问题,是需要进一步研究的地方。

## 参考文献:

- [1] 冯旭松. 南水北调工程与节水型社会建设[J]. 水利经济, 2008, 26(6): 13-16.
  - [2] 李增福. 江苏省南水北调受水区水文模型研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
  - [3] 赵人俊. 降雨径流流域模型简述[J]. 人民黄河, 1983(2): 40-43.
  - [4] 江苏省水文水资源勘测局. 江苏省水资源调查评价[R]. 南京: 江苏省水文水资源勘测局, 2006.
  - [5] 江苏省水利厅. 江苏省水资源综合规划[R]. 南京: 江苏省水利厅, 2002—2011.
  - [6] 江苏省水利厅. 江苏省农作物灌溉试验资料整编与分析[R]. 南京: 江苏省水利厅, 1991.
  - [7] 林刚毅, 罗上, 石亚东, 等. 基于土壤非饱和状态下对水稻田产流模型的改进及验证[J]. 节水灌溉, 2011(10): 33-41.
  - [8] 王船海, 王娟, 程文辉, 等. 平原区产汇流模拟[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(6): 627-632.
  - [9] 宋兰兰, 陆桂华. 生态环境需水研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(3): 57-61.
  - [10] 王绪奎, 赵勤瑞, 陈光亚. 江苏省节水农业发展的思路与对策[J]. 水资源保护, 2007, 23(2): 22-24.
  - [11] 吴玉柏, 常本春, 王亦斌. 江苏省农业节水问题研究[J]. 水资源保护, 2002(2): 53-70.
- (收稿日期: 2012-04-18 编辑: 徐娟)
- 
- (上接第23页)
- [2] LOFTIS B, LABADIE J W, FONTANE D G. Optimal operation of a system of lakes for quality and quantity [C]//Computer Applications in Water Resources. New York: ASCW, 1989: 693-702.
  - [3] MEHREZ A, PERCIA C, ORON G. Optimal operation of a multi-resource and multi-quality regional water system [J]. Water Resources Research, 1992, 28(5): 1199-1206.
  - [4] CAI Xi-ming, MCKINNEY D C, LASDON L S. Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129(1): 4-17.
  - [5] 徐贵泉, 宋德蕃, 黄土力, 等. 感潮河网水量水质模型及其数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 1996, 4(1): 94-105.
  - [6] 王好芳, 董增川. 基于量与质的多目标水资源配置模型[J]. 人民黄河, 2004, 26(6): 14-15.
  - [7] 吴泽宁, 索丽生, 曹茜. 基于生态经济学的区域水质水量统一优化配置模型[J]. 灌溉排水报, 2007, 26(2): 1-6.
  - [8] 付意成, 魏传江, 王瑞年, 等. 水量水质联合调控模型及其应用[J]. 水电能源科学, 2009, 27(2): 31-35.
  - [9] 游进军, 甘泓, 王浩, 等. 基于规则的水资源系统模拟[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1043-1056.
  - [10] 水利部水利水电规划设计总院. 全国水资源综合规划技术要求培训讲稿[EB/OL]. [2009-10-07]. <http://bbs.instrument.com.cn/shhtml/20091007/2144782/>.
- (收稿日期: 2011-09-26 编辑: 彭桃英)