

# 水质水量联合调度研究进展及展望

彭卓越<sup>1</sup>, 张丽丽<sup>2</sup>, 殷峻暹<sup>2</sup>, 王浩<sup>2</sup>

(1. 东华大学, 上海 200051; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

**摘要:** 水质水量联合调度是在我国水资源极度短缺和水污染状况严峻的条件下提出的重要课题。本文对水质水量联合调度的内涵进行了评述, 回顾了国内外相关的研究进展和研究现状, 在此基础上总结了现阶段研究存在的一些问题及其发展趋势。

**关键词:** 水质水量; 联合调度; 水资源

中图分类号: TV68; TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2015)04-0006-05

## Advance and prospect of study on joint regulation of water quality and quantity

PENG Zhuoyue<sup>1</sup>, ZHANG Lili<sup>2</sup>, YIN Junxian<sup>2</sup>, WANG Hao<sup>2</sup>

(1. Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The joint regulation is an important study subject proposed under the situation of the extreme shortage of water resources and severe status of water pollution in China; of which the connotation is commented herein, while the relevant study advances and status at home and abroad are reviewed. On the basis of this, some problems in this study at present and its developing trend are summarized as well.

**Key words:** water quality and water quantity; joint regulation; water resources

随着社会经济的发展, 人口、资源和环境面临的矛盾日益突出, 水资源保护和合理利用的可持续理念已成为 21 世纪水资源规划和管理的目标和追求。1977 年联合国教科文组织将水资源定义为“可能利用或有可能被利用的水源, 这个水源应具有足够的数量和可用的质量, 并能在某一地点为满足某种用途而可被利用。”<sup>[1]</sup> 也就是说, 水资源表现在一定的时间空间内具有满足某种用途(功能)的可利用的水资源的数量和质量<sup>[2]</sup>。1996 年, 联合国教科文组织国际水文计划工作组将可持续水资源管理定义为“支撑从现在到未来社会及其福利而不破坏他们赖以生存的水文循环及生态系统完整性的水的管理与使用”。水资源严重缺乏成为限制经济社会可持续发展的主要因素之一, 由此提出加强水资源的管理调控是提高水资源利用效率的重要方向。

2005 年的第四届环境模拟和污染控制研究学术研讨会上, 明确指出水质水量的联合配置和调度是水资源优化配置的研究方向。在当前形势下, 国内对水质水量联合配置及水质性缺水的研究还比较少, 考虑

配置过程中的水质影响目前主要体现在分质供水的思想上, 即以水质作为约束条件来进行水资源的优化配置。

## 1 水质水量联合调度的定义

### 1.1 水质水量联合调度的必要性

水资源调度是水资源管理不可或缺的一部分, 是水资源管理决策实现的具体手段, 是落实江河流域水量分配并配置到具体用户的管理过程。由于水污染和水生态退化问题日益严重, 以改善水质和维持环境流量改善河湖生态的水质水量联合调度成为水资源调度的重要组成。从水务一体化管理的发展趋势来看, 未来水量调和水污染控制的主要决策的重要支撑将是水质水量联合调度<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2014-08-27

基金项目: 国家“十二五”水体污染控制与治理专项(2012ZX007205-005)。

作者简介: 彭卓越(1990—), 女, 江苏盐城人, 博士研究生。

水质和水量是水资源的二重属性,两者相互影响不可分割。不同功能的用水对水质水量的要求也不尽相同,需要结合水质的不同要求对水量进行合理分配<sup>[4]</sup>。水资源数量上不足很大程度是由于水资源得不到科学配置和合理利用;随着社会生活水平和工业化程度的提高,水质问题逐渐成为水资源不足的重要原因,近年来接二连三发生的水污染事件严重影响了水资源数量上的供给<sup>[5-6]</sup>。传统的水资源优化配置方式通常只看重水量的配置,忽略了水质的重要地位,从而降低了水资源的利用效率。根据我国可持续发展的战略,水质水量应当同时参与优化配置,充分实现水资源的高质高用、低质低用。通过水质水量联合调度,可以实现水资源充分利用与环境保护的双重目标。

## 1.2 水质水量联合调度的定义

在2002年水利部水利水电规划设计总院发布的《全国水资源综合规划报告技术大纲》中指出:水质—水量联合优化配置是指在流域或特定的区域范围内,遵循公平、高效和可持续利用的原则,以水资源可持续利用和经济社会可持续发展为目标,通过各种工程和非工程措施,考虑市场经济规律和资源配置准则,通过合理抑制需求、有效增加供水等手段和措施,对多种可利用水源和水环境容量在区域间和各用水部门间进行合理调配,实现有限水资源的经济、社会和生态环境综合效益最大<sup>[7]</sup>。2013年,钱玲等人认为所谓的水质水量联合调度是指按照流域水资源综合管理的理念,以防洪安全保证为前提,以流域水生态功能目标需求为导向,依托各种水利工程或非水利工程调度措施,优化调整径流的时空分配特征,从而实现水资源经济、社会和生态环境综合效益最大化的一种水资源开发利用模式<sup>[3]</sup>。

水质水量联合调度是实现社会经济与生态环境协调发展的有力举措,是当今国内外水科学研究的前沿和热点之一<sup>[8]</sup>。通过改变现有或拟建水利工程的调度运行方式,发挥水利工程兴利避害的优势,充分利用各种可利用的水资源,来增加生产、生活的可利用水量,兼顾改善河道水质,用以实现水生态、水环境和水景观的修复、改善和保护,确保水资源的可持续利用,保障社会经济的可持续发展<sup>[9]</sup>。

## 2 水质水量联合调度的国内外进展

### 2.1 国外研究进展

国外对于水质水量联合调度的研究进行得比较

早,起初都是以水量为主的水资源优化配置成果。最初源于Masse在20世纪40年代提出的水库优化调度问题,随后在50年代中期创立了系统工程,并且在水库(群)优化调度问题中得到了广泛应用<sup>[10]</sup>。1960年在美国科罗拉多州,几所学校一起讨论了计划需水量的估算和满足未来用水需求的方式,体现了初步的水资源优化调度的思想<sup>[11]</sup>。

#### 2.1.1 水质水量联合调度模型研究

水质水量的联合模拟是水质水量联合调度的技术基础,现已成为水资源领域研究的重点。20世纪70年代以后,随着数学规划和模拟技术在水资源领域的发展与应用,水资源优化调度的研究步伐不断加快,在水量调度的基础上,越来越多的研究将水质加入对水量调度的分析中。1985年,Loftis等人基于水资源模拟和优化模型的方法探究了湖泊的水质水量优化运行<sup>[12]</sup>。90年代以来,因为水污染和水危机的日益加剧,传统的以水量最大和经济效益最大为目标的水资源优化调度模式已不能满足社会的需要,国外开始注重水质约束、环境效益和水资源可持续利用的研究<sup>[13]</sup>。90年代初,在美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)的Jeff Arnold博士主持下吸取了CREAMS/GLEAMS/EPIC/SWRRB等模型的优点,将SWRRB和ROTO整合为一个新的模型,即SWAT。它可以为变化环境下的水质水量联合评价、流域水资源综合规划管理等提供必要的科学支撑<sup>[14-15]</sup>。1992年,Afzal Javaid等人针对Pakistan的某个区域的灌溉系统建立了线性规划模型,优化了不同水质的水量使用问题。模型可分析在有限运河水和劣质地下水可使用的情况下,一定时期内最优的作物耕种面积和地下水的开采量等等,在一定程度上反应了水质水量联合优化调度的思想<sup>[16]</sup>。1996年,Willey等人在考虑防洪、水力发电、河道内流量和水的质的前提下,介绍了水质模型(HEC-5Q)的数学模型<sup>[17]</sup>。2004年,Mohammad Karamouz等在综合考虑了水质、地下水的回流和供水系统的规划的前提下,建立了研究区域的灌溉系统地表水和地下水资源动态规划模型<sup>[18]</sup>。2010年,Hayes等人集成了水质水量和发电的优化调度模型,将水质模型集成到一个最佳的控制算法,通过操作,可以评估水质,探讨了在Cumberland流域中水库的日调度规则<sup>[19]</sup>。

#### 2.1.2 水质水量联合管理

20世纪80年代后期以来,由于水质水量研究中统一管理理论研究的不断深入和新技术的不断出现,水资源水质水量联合管理的方法研究也有了较大发

展<sup>[20]</sup>,特别是决策支持技术、模拟优化的模型技术和资源价值的定量方法等给水资源水质水量管理方法的研究带来了更多的生机<sup>[21-22]</sup>。1992年,Luiten、JPA和Groot S在基于模拟地表水水质水量模型的基础上,进行了荷兰的地表水管理政策的研究<sup>[23]</sup>。1995年,RAFleming和RMAAdams在综合考虑了水质运移的滞后作用和水力梯度的约束来控制污染扩散的基础上,建立了以经济效益最大为目标的地下水水质水量管理模型<sup>[24]</sup>。2000年,Azevedo等在水资源管理的决策系统中加入了水质水量的因素,将水量模型(MODSIM)和水质模型(QUAL2E-UNCAS)联合模拟,并应用于巴西Piracicaba河流域的水资源管理<sup>[25]</sup>。2001年,Campbell等利用水量模型(MODSIM)和水质模型(HEC-5Q)耦合模型研究了Klamath河流域水资源管理方案决策,来提高夏季和秋季的水质<sup>[26]</sup>。2009年,Vink S对Bowen盆地进行研究发现了水质与水量的管理存在脱节的现象,而水质问题作为环境问题日益明显,由此水质水量问题必须作为一个综合系统进行管理<sup>[27]</sup>。2014年,Salla等采用AQUATOOL决策系统,将水量模型(SIMGES)和水质模型(GESCAL)集成建模,将其应用于巴西Araguari河流域的综合管理<sup>[28]</sup>。

## 2.2 国内研究进展

在国内,“水质水量联合调度”的概念出现较晚。在以往的水资源调度或优化配置中,大多将水质作为调度或配置因素之一纳入到模型中。本节根据水资源优化调度或配置范围、对象和规模不同,分为灌区、区域、流域、跨流域的水质水量联合调度。

### 2.2.1 灌区水质水量联合调度

灌区的主要目的是向农业供水,水源和用水系统相对比较单一,影响和制约因素也比较小,因此关于灌区水质水量联合调度的研究比较少。1999年,李考真提出了水质水量联合调度的观点,研究出既满足供水量又使水质达标的实时演算方法,并以蓄水灌溉为主要功能的徒骇河聊城段为例<sup>[29]</sup>。2004年,赵丹等人针对干旱半干旱地区日益严重的水资源短缺和十分脆弱的生态环境问题,建立了节水和面向生态的灌区水资源优化配置序列模型系统,得到了最大限度利用资源的南阳渠灌区水资源优化配置方案<sup>[30]</sup>。

### 2.2.2 区域水质水量联合调度

区域水质水量联合调度是将区域水资源循环转化为一个整体,供、用、耗、排水四个过程相互适应。

通过对区域之间、用水目标之间、用水部门之间的水量和水质环境容量的合理调配,实现水资源开发利用和区域经济社会发展与生态环境保护的相互协调<sup>[31]</sup>。区域水资源各部门用水矛盾突出,系统结构复杂,影响因素众多<sup>[32]</sup>。2003年,张文鸽在分析水资源系统构成及其特点的基础上,建立了区域水质—水量联合优化配置模型,探讨了基于MATLAB优化工具箱的模型求解方法,同时研究了区域需水量预测的应用,并且对濮阳市水质水量联合优化配置进行了案例研究<sup>[31]</sup>。2004年吴泽宁等人将水质水量进行耦合建立了区域水质水量统一优化配置方案的生成模型,采用了粒子群优化算法研究了模型的求解方法,并且建立了水资源配置方案利用确定性和不确定性评价模型<sup>[33]</sup>。2008年,陈龙建立了区域河流多资源水量水质联合优化调度的基本框架,以景观河系统为研究对象,分别建立了单一河道的水量水质模型和河流系统的水量水质联合优化调度模型<sup>[34]</sup>。2012年,吴启凡以某河道及其水资源的实际情况为依据,设计了水质水量联合调度的基本模型,结果表明该模型能为水质水量联合调度具体方案的设计、改善河流生态环境带来技术保障<sup>[35]</sup>。

### 2.2.3 流域水质水量联合调度

流域水质水量联合调度的研究对象是整个江河流域,流域是具有层次结构和整体功能的复合系统,是最能体现水资源综合特性和功能的独立单元<sup>[36]</sup>。1996年,徐贵泉等人克服前人研究河网水质模型的缺陷,结合河网地区水污染的特点,并基于非稳态的水量、水质变化规律,尤其是水体随时空变化可能处于好氧、缺氧、厌氧等复杂条件,提出了适应性较强的感潮河网水量、水质相统一的模型——Hwqnow模型<sup>[37]</sup>。2009年,刘玉年等人针对淮河水系密布、河网交错、水库闸坝众多等特点,提出了一、二维水量水质耦合的非恒定流模型,对淮河中游的1999年和2004年联防实测数据对模型进行率定和检验的结果表明,该模型能准确客观地描述淮河中游洪水、污染物的运动规律,对各种调度方案的改善水质效果进行预测和评价<sup>[38]</sup>。2004年,王森林等人通过水量平衡和污染物质的质量平衡原理,建立了单元系统水量和水质模型,定量出水功能区划水质目标、单元系统的最大取用的临界流量,以及流域多河段系统的水资源的推广<sup>[39]</sup>。2007年,牛存稳等人在耦合分布式水文模型(WEP-L)、半分布式土壤侵蚀与泥沙输移模型和污染物迁移转化模型的基础上,建立了流域水质水量综合模拟模型<sup>[40]</sup>。

### 2.2.4 跨流域水质水量联合调度

我国水资源时空分布差异很大,在部分水资源紧缺而人口集中、经济发展迅速的地区,为了缓解用水矛盾,纷纷提出了跨流域调水项目。跨流域水资源系统由各独立流域水资源子系统组成,是自然界水资源系统中独立性较强的子系统。具有分布范围广、流经地区多、结构复杂、影响因素众多等特点<sup>[41]</sup>。1997年,卢华友建立了基于多维动态规划和模拟技术相结合的大系统分解协调实时调度模型,以南水北调中线工程为背景进行了实例验算,将实时优化调度与常规调度成果比较发现,实时调度求得的调水量均大于常规调度的调水量,体现了水质水量联合调度的思想<sup>[42]</sup>。2003年,王宏江分析建立了四种情况下跨流域调水河渠引输水系统水环境质量的模糊优化模型,并以引滦入津跨流域调水系统为例,进行了具体的应用研究<sup>[43]</sup>。2008年,张晨提出了长距离调水工程水质安全的基本概念,将河道水质模型、湖泊(水库)水质模型和水质评价模型联合起来,建立了调水工程水质安全模型<sup>[44]</sup>。

## 3 水质水量联合调度研究展望及存在问题

纵观水质水量联合调度研究历史,在各国水文水资源学家、学者的努力之下,水质水量联合调度在理论、方法和模型等方面均取得了长足的进步,很多研究成果相继问世。在研究对象的空间规模上,由最初的灌区、水库等工程控制单元水量的优化配置研究,拓展到不同规模的区域、流域和跨流域水量优化配置研究<sup>[30]</sup>;在时间尺度上由单一水期调度向汛期、非汛期联合调度发展;在空间尺度上由干流调度向全流域调度发展。水质水量联合调度研究存在的问题及建议如下:

(1) 水质水量联合调度研究工作多偏重于水量方面的分配,对调度过程中水质的变化、水量与水质间的相互影响作用等方面考虑不足<sup>[45]</sup>,现有的水质水量联合调控实践主要以减污和环境流量的控制应用为主,或以水质为约束目标进行水量分配调控研究为主,即水质水量的模拟存在机理上的分离<sup>[46]</sup>,导致水资源不能高效利用,并且这些研究多数只针对一种或两种水质指标,没有考虑多种水质指标,对联合调度结果的合理性造成影响。

(2) 水资源水质水量联合调度研究经常侧重于“时间序列”(当代和后代、人类未来)方面的认识,而对“空间分布”上的认识却较少涉及<sup>[47]</sup>,例如环境的不平衡格局、区域资源的随机分布、发达与落后地

区的经济状况等等。对于我国大部分河流水域,都同时具有时间和空间上的分配不均。

(3) 水质水量联合调度偏于注重工程措施的作用,经常忽略了非工程措施的影响力。由于水质和水量的相关调控措施多种多样,不同侧重的措施之间具有同向和异向的影响作用,同时对生态系统也具有不同的影响,应当建立对调控方案有效性的评估体制。

(4) 由于现有模型的局限性,使得水资源利用效率偏低、配置效益不高、用水浪费等现象难以避免,应当加大理论与实际的联系,引进求解迅速的模型,便于决策者参与,加强数学模型在实际运用中的适应性。

(5) 水质水量联合调度的研究在我国北方水资源极度匮乏的流域或区域开展得比较多,重点解决河流断流、湿地退化、区域盐碱化、海水倒灌、沙漠化等极度水资源危机问题。然而近年来南方丰水地区的水资源、水环境问题日益严重,尤其是水污染事件频发,亟待在我国南方开展水质水量联合调度研究。

### 参考文献:

- [1] Whittemore R C, Beebe J. EPA'S Basins Model: Good Science or Serendipitous Modeling[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(3): 493-499.
- [2] 仕玉治,侯召成,祝雪萍. 水资源数量与质量联合评价研究综述[C]//变化环境下的水资源响应与可持续利用,2009 学术年会论文集,2009.
- [3] 钱玲,刘媛,晁建颖. 我国水质水量联合调度研究现状和发展趋势[J]. 环境科学与技术,2013(1).
- [4] 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): 7-9.
- [5] 夏军. 区域水环境及生态环境质量评价:多级关联评估理论与应用[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1999.
- [6] 夏军,王渺林,王中根,等. 针对水功能区划水质目标的可用水资源量联合评估方法[J]. 自然资源学报,2005,20(5): 752-760.
- [7] 水利部水利水电规划设计总局. 全国水资源综合规划报告技术大纲[R]. 北京:水利部水利水电规划设计院,2002.
- [8] 王浩,王建华,秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 水科学进展,2004,15(1): 123-128.
- [9] 董增川,卞戈亚,王船海,等. 基于数值模拟的区域水量水质联合调度研究[J]. 水科学进展,2009,20(2): 184-189.
- [10] 畅建霞,黄强,王义民,等. 黄河流域水库群多目标运行控制协同方法研究[J]. 中国科学: E 辑,2004,34(A01): 175-184.
- [11] Bmus N. 水资源科学分配[M]. 戴国瑞,汽尚友,等译. 北京:水利电力出版社,1983.

- [12] 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. ASCE, 1985: 693-702.
- [13] 方红远, 王浩, 甘泓. 水资源合理配置及其水量调控模式 [J]. 水利发展研究, 2003(6): 2.
- [14] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理, 结构及应用研究 [J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-861.
- [15] 刘昌明, 郑红星, 王中根, 等. 流域水循环分布式模拟 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [16] Afzal Javaid, Noble, David H. Optimization model for alternative use of different quality irrigation waters [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1992, 118(2): 218-228.
- [17] Willey R G, Smith D J, Jr J H D. Modeling water-resource systems for water-quality management [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1996, 122(3): 171-179.
- [18] Mohammad Karamouz, Reza Kerachian, Banafsheh Zahraie. Monthly water resources and irrigation planning: case study of conjunctive use of surface and ground water resources [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(5): 391-402.
- [19] Hayes D F, Labadie J W, Sanders T G, et al. Enhancing water quality in hydropower system operations [J]. Water Resources Research, 1998, 34(3): 471-483.
- [20] 万育生, 张继群, 姜广斌. 我国水资源管理制度的研究 [J]. 中国水利, 2005(7): 16-20.
- [21] Antle J M, Capallo S M. Physical and economic model integration for measurement of environmental impacts of agriculture chemical use [J]. Agric Resour Econ, 1991, 20(3): 62-68.
- [22] Bay M B. A modeling method for evaluating water quality policies in non-serial river system [J]. Water Resources Bulletin, 1997, 33(6): 1141-1151.
- [23] Luiten JPA, Groot S. Modeling quantity and quality of surface waters in the Netherlands: policy analysis of water management for the Netherlands [J]. European Water Management, 1992(2): 23-33.
- [24] Fleming R A, Adams R M. Regulating ground water pollution: effects of geophysical response assumptions on economic efficiency [J]. Water Resources Research, 1995, 31(4): 712-721.
- [25] Azevedo L G T, Gates T K, Fontane D G, et al. Integration of water quantity and quality in strategic river basin planning [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2000, 126(2): 85-97.
- [26] Campbell S G, Hanna R B, Flug M, et al. Modeling Klamath River system operations for quantity and quality [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2001, 127(5): 284-294.
- [27] Vink S, Moran C J, Golding S D, et al. Understanding mine site water and salt dynamics to support integrated water quality and quantity management [J]. Mining Technology, 2009, 118(3-4): 185-192.
- [28] Salla M R, Paredes-Arquiola. Integrated modeling of water quantity and quality in the Aragari River basin, Brazil [J]. Latin American Journal of Aquatic Research, 2014, 42(1): 224-244.
- [29] 李考真, 任淑梅. 地表水水质水量联合调度研究: 以徒骇河聊城段为例 [J]. 聊城师院学报: 自然科学版, 1999, 12(2): 72-76.
- [30] 赵丹, 邵东国, 刘丙军. 灌区水资源优化配置方法及应用 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 69-73.
- [31] 张文鸽. 区域水质水量联合优化配置研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2003.
- [32] 张晨光. 区域水环境资源优化配置研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2001.
- [33] 吴泽宁, 索丽生. 水资源优化配置研究进展 [J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 1-5.
- [34] 陈龙. 景观河多水源水量水质优化调度研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [35] 吴启凡. 水量水质联合调度模型在生态城市河流中的运用 [J]. 黑龙江水利科技, 2012(9): 33-34.
- [36] 王浩, 秦大庸, 王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论 [J]. 水利学报, 2002(8): 1-6.
- [37] 徐贵泉, 宋德蕃, 黄士力, 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.
- [38] 刘玉年, 施勇, 程绪水, 等. 淮河中游水量水质联合调度模型研究 [J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 177-183.
- [39] 王渺林, 蒲菽洪, 傅华. 从水质水量联合角度评价鉴江流域可用水量 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(1): 144-147.
- [40] 牛存稳, 贾仰文, 王浩, 等. 黄河流域水量水质综合模拟与评价 [J]. 人民黄河, 2008, 29(11): 58-60.
- [41] 吴泽宁, 丁大发. 跨流域水资源系统自优化模拟规划模型 [J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(2): 78-83.
- [42] 卢华友, 沈佩君, 邵东国, 等. 跨流域调水工程实时优化调度模型研究 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1997(5): 11-15.
- [43] 王宏江. 跨流域调水系统水资源综合管理研究 [D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [44] 张晨. 长距离调水工程水质安全研究与应用 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [45] 梁云. 北京市南水北调应急供水水质水量联合调控方案研究 [D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [46] 严军, 许琳娟, 白洪炉, 等. 水资源水质水量联合调控研究进展 [J]. 水电能源科学, 2013(5): 7.
- [47] 李玉河. 水资源水质水量优化配置研究进展 [J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(3): 103-105.

(责任编辑 陈小敏)

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告