

Analytical Dynamic Water Index Modeling for Dispatch Operations of Multi-Sources Water

Debo Liu¹, Chengchunzi Li¹, Dehu Cheng², Xi Cheng², Yiwen Cheng²

¹Henan Water & Hydropower Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou Henan

²Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Transfer Middle Route Project, Beijing

Email: debo_liu@sina.com

Received: Feb. 19th, 2019; accepted: Apr. 1st, 2019; published: Apr. 17th, 2019

Abstract

Due to the alternating effects and influences of multiple sources recirculation and flow cross-mixing, multi-source water, multi-user communication, multi-input and separate water transfer system operation is the process of the amount of water, water quality mixing and water quality evolution. The water source composition of different nodes and the extraction targets and the dynamic water quality index need to quantify. An analytical dynamic water index model is developed for multi-source water delivery system in this study. The model takes the main stream, the import and export, storage projects as the research scope, the real time composition of water and the change of quality along the path as the research object. Taking the Henan section of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project as an example, the application model is used to obtain the results of the water source flow composition and water quality factors of each node and branch of the main canal. It provides technical support for the realization of predictive pre-adjustment or statistical accounting, improving the management level of dispatch operations.

Keywords

Multisource Water, Dispatch Operation, Dynamic Water Index, Analytical Modeling, Predictive Pre-Adjustment

多水源联合调度动态水指标解析模型研究

刘德波¹, 李程纯子¹, 程德虎², 程曦², 程伊文²

¹河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州

²南水北调中线干线工程建设管理局, 北京

Email: debo_liu@sina.com

收稿日期: 2019年2月19日; 录用日期: 2019年4月1日; 发布日期: 2019年4月17日

作者简介: 刘德波(1963-), 男, 教授级高级工程师, 学士, 主要从事水文水资源, 水利工程规划、调度管理。

文章引用: 刘德波, 李程纯子, 程德虎, 程曦, 程伊文. 多水源联合调度动态水指标解析模型研究[J]. 水资源研究, 2019, 8(2): 177-184. DOI: 10.12677/jwrr.2019.82021

摘要

由于不同水源汇入及分出等的交替作用与影响,多水源、多用户联通构成的多元汇入和分出的输调水系统运行是水量、水质混合及时空演变的过程,为量化不同节点及引出目标的水源构成和水质指标时变状态,研究建立了多元输调水系统动态水指标解析模型。模型以输水系统干网和各汇入、分出口及调蓄工程为研究范围,以沿程实时水量组成、水质因子为研究对象,提出系统多元动态水量与水质指标解析计算方法。以南水北调中线总干渠河南段为示例,应用模型得到干渠各节点、分出口的各水源水量构成、水质因子等指标成果,经分析可为制定科学合理的调度方案、实现预报预调或水量统计核算提供技术支撑,从而提高多水源联合调度的管理水平。

关键词

多水源, 联合调度, 动态水指标, 解析模型, 预报预调

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济社会发展和人民生活水平的提高,对水资源质量、保证程度的要求越来越高,生活、生产、生态用水安全和环境改善的需求也日益增强。然而不同区域水资源时空分布不均,一些地区水资源[1][2]供需矛盾突出,总量不够、水质不满足要求,或过程不匹配等,成为制约社会发展的主要因素。为实现空间均衡、人水和谐、健康持续发展,改善供求关系,提高供水保障,通过水系联通[3]、多水源联合调度进行水源调配是未来解决用水安全问题、提高抗风险能力的有效途径。

对于多水源、多用户联通构成的多元汇入和分出的输调水系统,各水源输入的水量,或可调入过程是有时空差异的,表现在输入水量、水质不同和过程不同步等方面。系统的需求可以是常态的、也可能是应急的,输出水量用途可能是生活、生产或生态等,以及不同的组合情况。在系统边界约束下,系统的运行就是多元汇入、演变分出的过程。如南水北调中线工程,总干渠输水线路长,极端情况下可能会出现输水中断[4][5],为保障供水安全、平稳,沿线已建水库、调蓄工程联通总干渠供水,即构成多水源、多用户输调水系统。系统调度方案选择、效果评价、调度的有效性、用户的满足程度、水源分配及水价机制等,是需要解决的重要问题。

Hamalainen 等,提出多水源调度需要有水量和水质综合分析作为前提[6]。张静等以供水调度系统成本最小为目标构建了地表水源、地下水源、外来水源联合调度模型[7]。章燕喃等以北京市典型年供水安全和弃水量最小为目标,建立了多水源联合调度模型[8]。潘莉等也对北京市多水源水量调度模型进行了研究[9]。蒋任飞等建立了南水北调中线调水多目标供水水量分配优化模型[10]。宋健峰和殷建军提出了南水北调供水断面水价成本折算分摊法[11]。彭辉等建立了岗南、黄壁庄、王快和西洋水库向南水北调中线应急供水联合调度预报模型[12]。目前,大多数文献对于多水源输调水系统的研究,主要是针对一定区域水资源条件,从水源、需求两方面进行的配置模型研究,假定水源条件分析得到典型供水过程,或是针对单水源多用户供水系统的研究。总体上是设置需求,研究供水方案,是基于统计分析、典型计算提出可能性配置成果。而针对多水源多用户跨区域调

水系统的不同水源与各用户之间动态水量分配关系、水质指标演变的研究较少。

本文以跨区域水系干网及各汇入、分出口及调蓄工程为研究范围,以沿程实时水量组成、水质变化为研究对象,建立多元输调水系统动态水指标解析模型,关注各水源与各用户之间的关系,对系统各节点、各用户水质、水量演变进行量化。解决了多水源多用户之间的水量分配问题,明确各用水目标的需求满足程度、水源水量构成及调度的具体效果,为调度方案的分析论证、调整优化、实现预知预调或统计核算提供技术支撑,从而提高工程调度运行的管理水平。

2. 多水源联合调度动态水指标解析模型

多元输调水系统一般有输入、输出两类因子组成,随着不同节点、不同量级水体的汇入、引(输)出,水指标沿程随时间变化,干流不同节点及各引出口水源水量构成、水质不同。按照输入、输出的工程属性不同,可划分为纯输入、纯输出、既可输入又可输出的调蓄工程等类型,根据系统组成情况,可划分单元进行研究,单元输调水系统可概化为图1所示结构示意图。

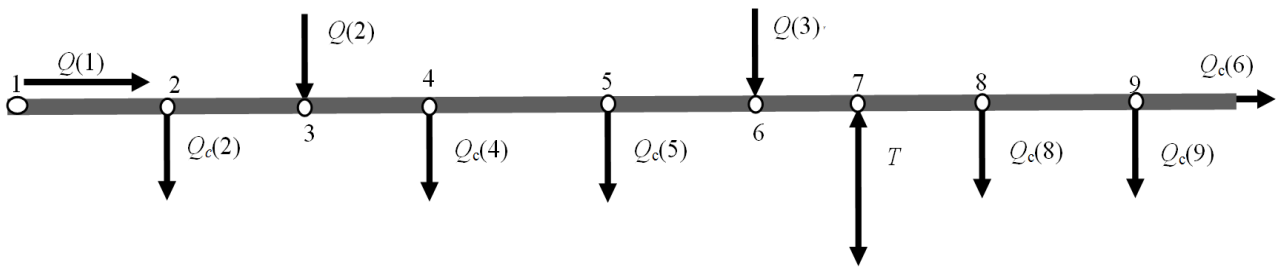


Figure 1. Schematic diagram of generalized structure of water conveyance system

图1. 输水系统概化结构示意图

图中1~9为输入、输出节点, $Q(i)$ 为第*i*个输入单元的流量, $Q_c(j)$ 为沿程*j*节点的引出流量。T表示调蓄水库连接。以典型断面或关键节点为计算目标,考虑水流能够充分自然混合,则沿程水量、水质指标主要计算公式如下:

$$Q_u(j, t + dt(j)) = \sum_{i=1}^{j-1} Q(i, j-1, t) \quad (1)$$

$$Q_d(j, t + dt(j)) = Q_u(j, t + dt(j)) - Q_c(j, t) \quad (2)$$

$$Q_c(j, t) = Q_u(j, t), \text{ 当 } Q_{pl}(j, t) < Q_u(j, t) \quad (3)$$

$$Q_c(j, t) = Q_u(j, t), \text{ 当 } Q_{pl}(j, t) \geq Q_u(j, t) \quad (4)$$

$$Q_c(i, j, t + dt(j)) = Q(i, j-1, t) \cdot Q_c(j, t) / Q_u(j, t) \quad (5)$$

$$S_u(i, t + dt(j), k) = \frac{\sum S(i, t, k) \cdot Q(i, j-1, t)}{Q_u(j, t + dt(j))} \quad (6)$$

式中: i 为输入单元; j 为沿程节点或断面; t 为时段(h); dt 为时段差(h), k 为水质指标类别; $S(i, t, k)$ 为*t*时刻第*i*个输入单元水质指标; $Q_u(j, t)$ 为*t*时刻节点*j*上游干流流量(m^3/s); $Q_d(j, t)$ 为*t*时刻节点*j*下游干流流量(m^3/s); $Q_c(j, t)$ 为*t*时刻在节点*j*处引出流量(m^3/s); $Q_{pl}(j, t)$ 为*t*时刻节点*j*处计划引出流量(m^3/s); $Q_c(i, j, t)$ 为*t*时刻在节点*j*处引出的第*i*个输入单元的流量(m^3/s); $Q(i, j, t)$ 为*t*时刻在节点*j*处第*i*个输入单元的流量(m^3/s); $S_u(i, t, k)$ 为*t*时刻节点*j*处第*i*个输入单元水质指标。

对于调蓄工程，其调度方式一般有两种类型：一是可以人工控制的，二是自由进出的。前者为可控制调节，即引出、输入水量皆可控制大小；自由进出的调蓄工程是干流水位高于调蓄水库水位时引出，反之则为干流补水。引出、输入流量计算如下：

1) 可控制调节型

按干流的流量 $Q(j)$ 判别，可设定上边界 $Q_1(j)$ 、下边界 $Q_2(j)$ 条件，且 $Q_1(j) \geq Q_2(j)$ 。当 $Q(j) > Q_1(j)$ 时，引出；当 $Q(j) < Q_2(j)$ 时，输入；假定引出及输入能力分别为 $Q_{引限}(j)$ 、 $Q_{补限}(j)$ ，则：

$$Q_{引出}(j) = (Q(j) - Q_1(j)) \cdot K_c(j), \text{ 按比例引出, 且 } Q_{引出}(j) \leq Q_{引限}(j) \quad (7)$$

$$Q_{输入}(j) = (Q_2(j) - Q(j)) \cdot K_b(j), \text{ 按比例输入, 且 } Q_{输入}(j) \leq Q_{补限}(j) \quad (6)$$

调度时可以调节 $Q_1(j)$ 、 $Q_2(j)$ 、 $K_c(j)$ 、 $K_b(j)$ 等参数，通过设置以上边界条件满足系统整体运行要求。

2) 自由调节型

自由调节与上、下游水位有关，由水位高的一边向水位低的一边供水。

$$Q_{引出}(j) = f_1(H_{干}(j), H_{库}(j)); \quad Q_{输入}(j) = f_2(H_{干}(j), H_{库}(j)) \quad (9)$$

式中： $Q_{引出}(j)$ 、 $Q_{输入}(j)$ 分别为调蓄水库连接节点 j 处的引出、输入流量； $H_{干}(j)$ 、 $H_{库}(j)$ 分别为节点 j 处干流和调蓄水库的水位。以上未考虑水体与边界之间水量、水质交换，蒸发、渗漏、降雨、水质挥发性等影响。

3. 案例模拟

3.1. 解析模拟示例

以南水北调中线总干渠河南段为示例，除引调丹江水外，考虑沿线周边水库作为供水水源，构建多水源多用户的多元耦合演变系统动态水指标解析模型，第一个输入水源为 $Q(1)$ ，假设流量为 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ；第一个引出目标为 $Q_c(2)$ ，计划引出流量为 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ；第二个输入水源为 $Q(2)$ ，流量为 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ；第二个引出目标为 $Q_c(4)$ ，引出流量为 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ，节点(断面)1、2、3、4间水流传播时间分别为6、12、9小时。解析模型动态水指标计算主要参数摘录如表1，计算成果如表2、表3所示。

Table 1. Calculation index of typical water conveyance models

表 1. 典型输水模型计算参数

j	间隔距离(km)	属性	传播时间 t (h)	$Q(i)$ (m^3/s)	$Q_c(j)$ (m^3/s)	控制条件
1	20	控入	5	2		流量
2	30	控出	6		0.5	流量
3	80	控入	12	1		流量
4	60	控出	9		1	流量
5	50	控出	8			流量
6	70	调蓄	11			流量
7	40	控出	7			流量
8	90	控出	15			流量
9	15	控出	4			流量
10	110	分流	18			分水比例

Table 2. The results of water index (1)
表 2. 水指标计算成果(一)

时间(t)	Q(1)下游水指标			Q _c (2)引水指标			Q _c (2)下游水指标		
	Q(1)流量	PH	溶解氧(mg/L)	Q _c (2)流量	PH	溶解氧(mg/L)	Q _c (2)流量	PH	溶解氧(mg/L)
1	2	7	16	0	0	0	0	0	0
2	2	7	16	0	0	0	0	0	0
3	2	7	16	0	0	0	0	0	0
4	2	7	16	0	0	0	0	0	0
5	2	7	16	0	0	0	0	0	0
6	2	7	16	0	0	0	0	0	0
7	2	7	16	0.5	7	16	1.5	7	16
8	2	7	16	0.5	7	16	1.5	7	16
9	2	7	16	0.5	7	16	1.5	7	16
10	2	7	16	0.5	7	16	1.5	7	16
11	2	7	16	0.5	7	16	1.5	7	16
12	2	7	16	0.5	7	16	1.5	7	16
...

Table 3. The results of water index (2)
表 3. 水指标计算成果(二)

时间(t)	Q(2)下游水指标				Q _c (4)引水指标				Q _c (4)下游水指标			
	Q(1)流量	Q(2)流量	PH	溶解氧(mg/L)	Q(1)流量	Q(2)流量	PH	溶解氧(mg/L)	Q(1)流量	Q(2)流量	PH	溶解氧(mg/L)
1	0	1	7.5	15	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	7.5	15	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	7.5	15	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	7.5	15	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1	7.5	15	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	7.5	15	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	7.5	15	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	1	7.5	15	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	7.5	15	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1	7.5	15	0	1	7.5	15	0	0	0	0
11	0	1	7.5	15	0	1	7.5	15	0	0	0	0
12	0	1	7.5	15	0	1	7.5	15	0	0	0	0
13	0	1	7.5	15	0	1	7.5	15	0	0	0	0
14	0	1	7.5	15	0	1	7.5	15	0	0	0	0
15	0	1	7.5	15	0	1	7.5	15	0	0	0	0
16	0	1	7.5	15	0	1	7.5	15	0	0	0	0

Continued

17	0	1	7.5	15	0	1	7.5	15	0	0	0	0
18	0	1	7.5	15	0	1	7.5	15	0	0	0	0
19	1.5	1	7.2	15.6	0	1	7.5	15	0	0	0	0
20	1.5	1	7.2	15.6	0	1	7.5	15	0	0	0	0
21	1.5	1	7.2	15.6	0	1	7.5	15	0	0	0	0
22	1.5	1	7.2	15.6	0	1	7.5	15	0	0	0	0
23	1.5	1	7.2	15.6	0	1	7.5	15	0	0	0	0
24	1.5	1	7.2	15.6	0	1	7.5	15	0	0	0	0
25	1.5	1	7.2	15.6	0	1	7.5	15	0	0	0	0
26	1.5	1	7.2	15.6	0	1	7.5	15	0	0	0	0
27	1.5	1	7.2	15.6	0	1	7.5	15	0	0	0	0
28	1.5	1	7.2	15.6	0.6	0.4	7.2	15.6	0.9	0.6	7.2	15.6
29	1.5	1	7.2	15.6	0.6	0.4	7.2	15.6	0.9	0.6	7.2	15.6
30	1.5	1	7.2	15.6	0.6	0.4	7.2	15.6	0.9	0.6	7.2	15.6
...

3.2. 计算结果及分析

考虑输调水系统结构、影响因素，根据水源数据和边界参数，采用本文研究模型进行计算，得到各节点(断面)干渠上、下游及分出口的各水源流量构成、水质因子变化等成果，对各节点(断面)指标进行分析是合理正确的。以下仅列出水源和节点流量、pH 值、溶解氧等指标，部分成果摘入表 1、表 2，选取断面 4 实际引出 $Q_c(4)$ 的各水源构成及水质、引出 $Q_c(4)$ 后干渠下游水指标随时间变化成果，如图 2、图 3 所示。

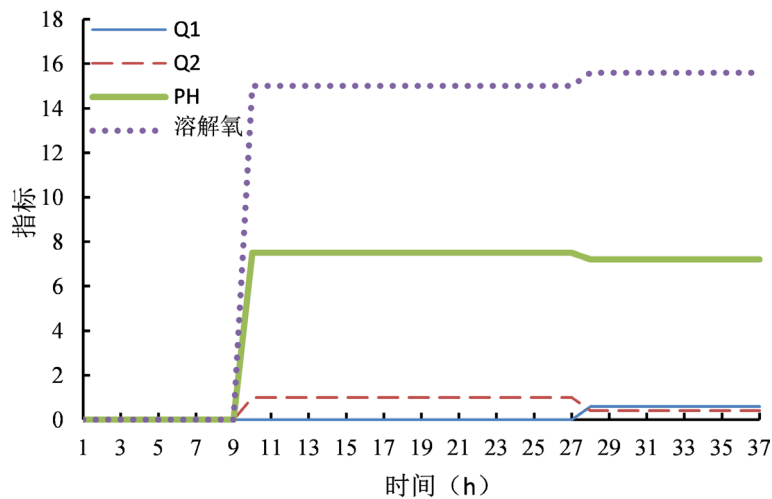


Figure 2. The real time water index of $Q_c(4)$
 图 2. $Q_c(4)$ 实际引出水指标

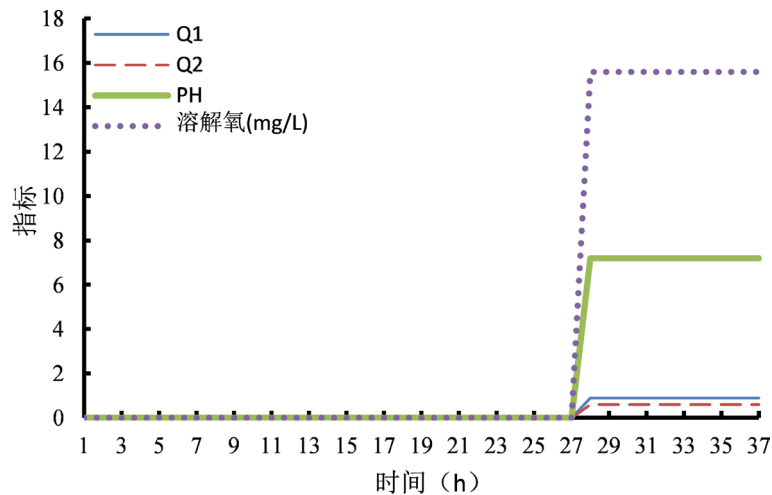


Figure 3. The downstream water index of Section 4

图3. 断面4下游水指标

4. 结语

本文对多水源多用户输调水系统, 构建了多水源动态水量、水质指标解析模型, 通过解析计算, 得到节点及用户不同水源水量构成、水质的时变状态。以南水北调中线联通沿线已建水库、纯调蓄工程构成的多水源输调水系统为例进行模拟验证。模型解决了多水源输水干渠、生态河道、综合利用河网水系等多水源多用户输调水系统水量分配、水价分担计算等问题, 为进行水量和水质指标预测、调度效果评价、方案优化及调度管理提供技术支撑。

长距离输水及干流调节作用明显时, 模型可加入相关变量及参数, 考虑更多的影响因素。

参考文献

- [1] 王熹, 王湛, 杨文涛, 等. 中国水资源现状及其未来发展方向展望[J]. 环境工程, 2014, 32(7): 1-5.
WANG Xi, WANG Zhan, YANG Wentao, et al. Shortage of water resources in China and countermeasures. Environmental Engineering, 2014, 32(7): 1-5. (in Chinese)
- [2] 贾学秀, 严岩, 朱春雁, 等. 区域水资源压力分析评价方法综述[J]. 自然资源学报, 2016, 10(31): 1783-1791.
JIA Xuexiu, YAN Yan, ZHU Chunyan, et al. Approaches for regional water resources stress assessment: A review. Journal of Natural Resources, 2016, 10(31): 1783-1791. (in Chinese)
- [3] 窦明, 靳梦, 张彦, 等. 基于城市水功能需求的水系连通指标阈值研究[J]. 水利学报, 2015, 9(46): 1089-1096.
DOU Ming, JIN Meng, ZHANG Yan, et al. Research on the threshold of interconnected river system network's indexes based on demand of the city's water function. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 9(46): 1089-1096. (in Chinese)
- [4] 南水北调工程设计管理中心. 南水北调中线调蓄工程[R]. 2016.
Design Management Center for South-to-North Water Transfer Project. Regulation and storage projects in the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project. 2016. (in Chinese)
- [5] 金旻, 徐岩, 王彤彤. 南水北调中线水资源调度复杂性对策研究[J]. 中国水利, 2013(20): 4-8.
JIN Yang, XU Yan, WANG Tongtong. Complexity and countermeasure study on water allocation of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project. China Water Resources, 2013(20): 4-8. (in Chinese)
- [6] Hamalainen, K.E., Marttunen, M., et al. Evaluating a framework for multi-stakeholder decision support in water resources management. Group Decision and Negotiation, 2001, 10(4): 331-353.
- [7] 张静, 黄国和, 刘焯, 等. 不确定条件下的多水源联合供水调度模型[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 160-165.
ZHANG Jing, HUANG Guohe, LIU Ye, et al. Dispatch model for combined water supply of multiple sources under the conditions of uncertainty. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 160-165. (in Chinese)
- [8] 章燕喃, 田富强, 胡宏昌, 等. 南水北调来水条件下北京市多水源联合调度模型研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 844-849.

- ZHANG Yannan, TIAN Fuqiang, HU Hongchang, et al. Joint operation model of multiple water sources in Beijing. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(7): 844-849. (in Chinese)
- [9] 潘丽, 曹楠, 李玉仙, 等. 北京多水源水量调度模型研究[J]. *资源与产业*, 2015, 17(6): 62-66.
PAN Li, CAO Nan, LI Yuxian, et al. Water volume dispatching model of Beijing's diverse water sources. *Resources & Industries*, 2015, 17(6): 62-66. (in Chinese)
- [10] 蒋任飞, 董延军, 梁籍. 中线南水北调水量分配模式研究[J]. *人民黄河*, 2007, 29(10): 49-50.
JIANG Renfei, DONG Yanjun, LIANG Ji. Study on model of water resources allocation in the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project. *Yellow River*, 2007, 29(10): 49-50. (in Chinese)
- [11] 宋健峰, 殷建军. 断面水量分摊法及其在南水北调供水成本分摊中的应用[J]. *水利学报*, 2009, 40(9): 1135-1139.
SONG Jianfeng, YIN Jianjun. Water supply cost sharing method based on sectional water volume and its application to South-to-North Water Transfer Project. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(9): 1135-1139. (in Chinese)
- [12] 彭辉, 贾仰文, 牛存稳. 南水北调中线京石段应急供水水库入流预报研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(1): 8-10, 21.
PENG Hui, JIA Yangwen, NIU Cunwen. Inflow forecast research of to Beijing Shijiazhuang emergent water supply reservoirs in the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, 7(1): 8-10, 21. (in Chinese)