

文章编号: 1001-4098(2005) 05-0001-06

南水北调水资源供应链中牛鞭效应的随机控制^{*}

朱 九 龙, 王 慧 敏

(河海大学 应用管理科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 牛鞭效应是南水北调水资源供应链信息管理中的一个重要参数。在对南水北调水资源供应链结构设计分析的基础上, 采用随机控制理论方法, 建立水资源供应链的动态库存模型和“牛鞭效应”的定量描述, 设计以订货水量作为控制变量的牛鞭效应随机控制算法。
关键词: 南水北调; 水资源供应链; 牛鞭效应; 随机控制
中图分类号: TV212 **文献标识码:** A

1 引 言

牛鞭效应是一般企业供应链中普遍存在的需求波动增强现象, 它是指产品终端用户的需求波动信息在从下游往上传递的过程中发生的逐级放大现象。由于牛鞭效应的存在会对供应链的成本和利润有较大的影响, 因此, 国内外许多学者对该种现象从各个角度进行了深入的研究, 并且得出了一系列的研究成果。综合这些研究成果, 主要是集中在以下几个方面: (1) 牛鞭效应的存在性^[1]; (2) 牛鞭效应产生的原因^[2,3]; (3) 牛鞭效应的控制对策^[4-6]; (4) 牛鞭效应的定量化研究^[7,8]。所谓牛鞭效应的随机控制问题, 是指在供应链中如何采取一种控制策略或方法, 使得牛鞭效应达到最小, 从而降低供应链的成本。关于这一问题的研究目前在国内外还不多见, 尤其是关于水资源供应链中牛鞭效应的研究在国内外几乎是空白。

南水北调工程是从长江下、中、上游分别向北方调水, 形成南水北调东、中、西三条调水线路, 与长江、淮河、黄河和海河相互连接, 形成南水北调“四横三纵”的总体格局。南水北调东线工程现在已经开工建设, 工程建成后将形成连接长江、淮河、黄河、海河的水资源大系统, 该水资源系统是一个多流域、多水源、多目标的复杂水资源大系统, 涉及五个省市和众多用水部门的利益^[9]。在文献[10]、文献[11]中, 作者首次将供应链管理理念运用到南水北调水资源配置与调度中, 认为南水北调东线水资源系统是通过上、下游子系统连接, 形成供需网链状结构的供应链。在该

供应链中, 同样存在物流(水流)、资金流、信息流、知识流。而且, 当该供应链的末端用户需求量发生波动时, 这种波动信息在向上游节点地区和节点湖泊传递的过程中, 会逐级发生扭曲放大的现象, 从而导致该供应链中“牛鞭效应”的发生。“牛鞭效应”的存在可能会使得该调水系统的上游输出水量大于甚至是远大于下游用户的需求量, 从而造成水资源的浪费和工程运行成本的增加, 难以实现工程水资源的优化配置目标。因此, 寻求一定的控制策略或方法来控制或抑制牛鞭效应现象的发生在南水北调水资源供应链的信息管理中具有举足轻重的作用。

本文以南水北调东线一期工程作为研究对象, 在对该供应链结构设计和文献[1]、文献[12]、文献[16]的基础上, 结合南水北调东线一期工程水资源供应链(以下简称“南水北调水资源供应链”)的具体实际情况, 运用随机控制理论和方法, 研究和探讨如何对该供应链中的牛鞭效应进行优化控制和抑制, 达到弱化水资源供应链中牛鞭效应的目的。

2 南水北调水资源供应链结构的设计

本文研究的南水北调东线一期工程是从扬州市的江都抽引长江水, 然后利用京杭大运河及与其平行的河道逐级提水北送, 并连接起调蓄作用的洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖等大型湖泊与水库, 向山东、北京、天津等省市送水, 其具体的线路可以参见《南水北调总体规划》。在一

^{*} 收稿日期: 2004-10-30; 修订日期: 2005-03-04
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50379009); 国家社会科学基金资助项目(03BJY037); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20030294008)
作者简介: 朱九龙(1976-), 男, 江西临川人, 河海大学商学院博士研究生; 王慧敏(1963-), 女, 山西人, 河海大学商学院教授, 博士生导师。

©1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

期工程线路上涉及到的城市和地区很多,受益的用水户更是不计其数,因此在供应链的设计中不可能将所有地区和用水户都用节点来表示,所以为了使得设计的供应链结构不失一般性,又能很好地反映出该工程的基本状况,本文利用拓扑概化模型的思想,对工程线路进行概化,然后采取供应链的网格图形设计方法,从工程水流通道建设的角度出发,以调水线路上的各大调蓄湖泊作为节点,设计出

南水北调东线水资源供应链的主链结构,如图 1 所示。由于南水北调东线水资源供应链的产品——水资源不但要供给该供应链的末端用户,而且还要供给沿线的各个地区和用户,所以对于南水北调东线水资源供应链的主链结构上的每一个节点湖泊来说,该节点湖泊周围还存在一个网状的供水系统,即存在一个子供应链,具体结构如图 2 所示。

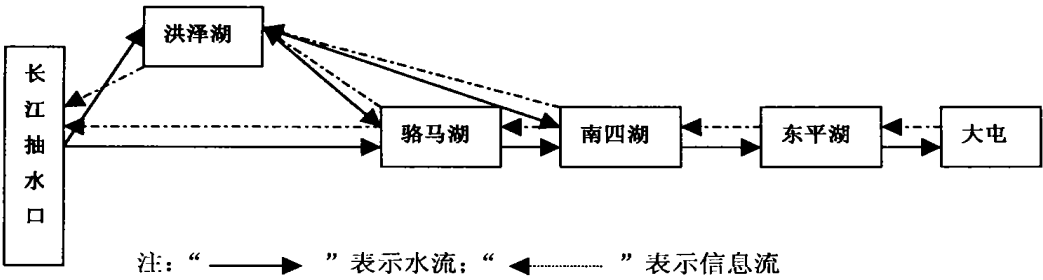


图 1 南水北调东线一期工程供应链主链结构图

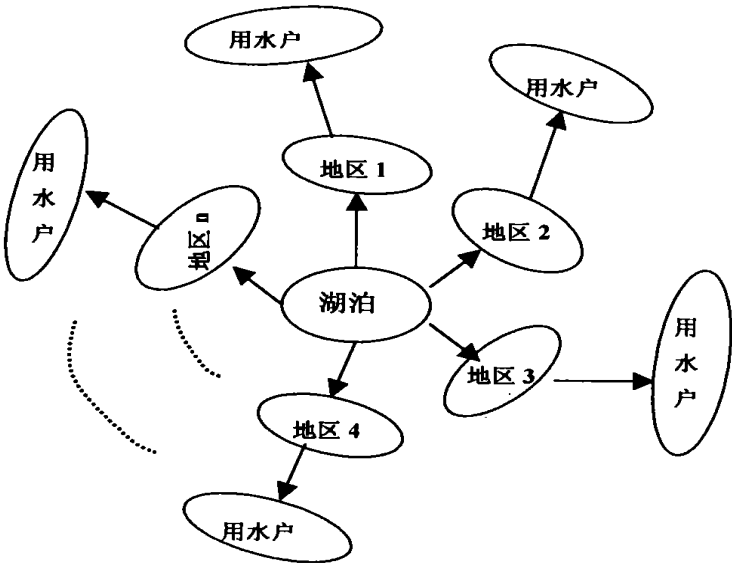


图 2 各外节点湖泊周围的供应链子链结构图

3 南水北调水资源供应链模型与“牛鞭效应”定量描述

从上文对南水北调水资源供应链结构的设计可以看出,在南水北调水资源供应链的结构中有主链和子链之分,所以在南水北调水资源供应链中牛鞭效应也可以看成是由主链上各个湖泊之间信息传播的牛鞭效应和各个节点湖泊周围的子链的牛鞭效应两部分组成。在某种程度上,整条供应链的牛鞭效应可以认为是上述两部分牛鞭效应的叠加,对于主链牛鞭效应的产生及其叠加方法我们将另文讨论,本文具体研究某个节点湖泊周围的子链牛鞭效

应,同时,由于主链和子链牛鞭效应的产生机制相同,所以本文研究的结论也适用于主链牛鞭效应的控制。

3.1 系统模型的建立

由南水北调水资源供应链的子供应链的结构图(如图 2)可以看出,在该供应链结构中,我们可以将节点湖泊看成是一般供应链中的核心企业,即产品制造商。而周围的诸多需水地区或城市则可以看成是水资源分销中心,各个具体的用水户就相当于消费者。综上所述,该供应链其实就是一个单一产品、多分销中心的网状供应链结构。

为了方便供应链系统模型的设计,我们在此作出以下几点假设:

(1) 各地区或城市管辖范围内的所有用水户的需水量的来源可以分为工程来水和当地自有水量(包括当地的地表径流、地下水及降水)。

(2) 所有用水户的工程来水仅来自于当地区域的南水北调引水工程, 即不出现工程引水的交叉现象。

(3) 为了选择数量恰当的水资源分销中心和方便用水户用水量的统计, 本文水资源分销中心的划分以县级单位作为标准, 其他地区的用水均属于用水户的用水。

(4) 各个节点地区或湖泊的水量库存管理策略均采用 (S, s) 。

(5) 一般来说, 需求扰动可以分为白色噪声和有色噪声两种, 本文只研究白色噪声扰动。

根据以上假设, 基于文献[1]、[12]提出的单个和多个分销中心结构的供应链库存模型, 本文在此以水量库存作为研究目标, 建立了南水北调水资源供应链的库存标称模型, 即

$$q_{it+1}^s = q_t^s + Eu_t^s - ld_t$$

(1)

其中, q_t^s 为 t 时刻水资源分销地区向上游节点湖泊发出需水信息时的水资源库存量; u_t^s 为水资源分销地区向上游节点湖泊提出的预计需水量; d_t 为用水户用水量的期望值; E 为控制系数单位矩阵; l 是将用水户用水量的 n 维期望值 d_t 集结转换为分销地区的数量的转换矩阵, 是系数全为 1 的 $m \times n$ 维矩阵, 即

$$l = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix}_{m \times n}$$

(2)

当供应链末端用水户的用水量受到不确定性扰动 v_t 时, 该扰动信息向供应链上游的节点地区或节点湖泊传递时, 会呈现不断放大失真现象, 从而形成牛鞭效应。具体的过程如图 3 所示。

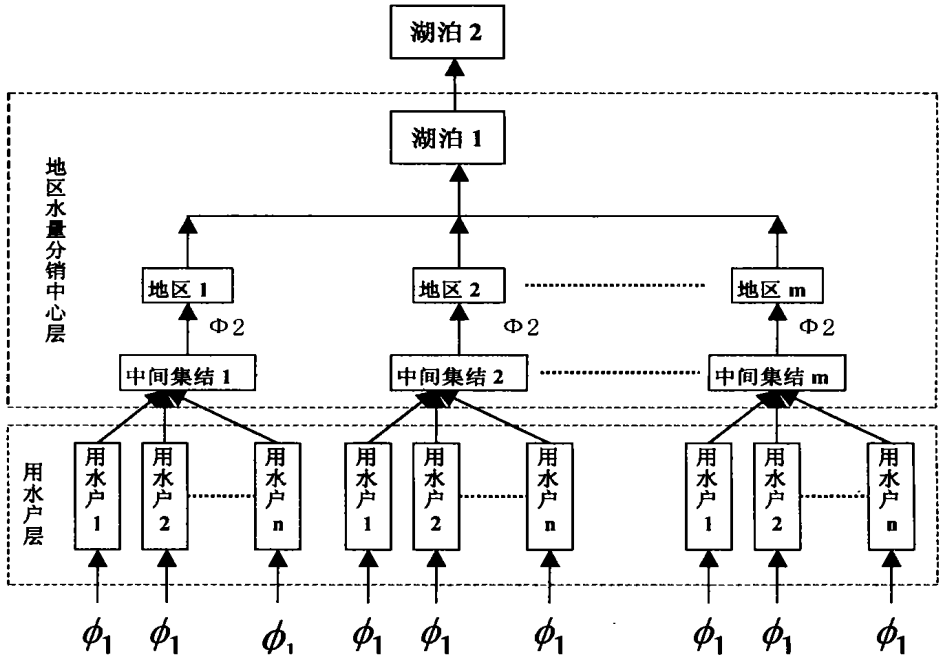


图 3 南水北调水资源供应链系统模型
(注: $\Phi_1 = d_t + v_t$; $\Phi_2 = l\Phi_1$; 湖泊是指供应链主链中的节点湖泊。)

此时供应链的库存动态系统变为

$$q_{it+1}^f = q_t^f + u_t^f - l(d_t + v_t)$$

(3)

且该系统的量测方程为

$$z_{it+1} = A_{it+1}q_{it+1}^f + w_t$$

(4)

其中, w_t 为量测噪声; v_t 为系统的动态噪声; A_{it+1} 是

全为 1 的系数矩阵, 且 $\begin{pmatrix} v_t \\ w_t \end{pmatrix}$ 为 $m+n$ 维局部正则的正

交随机序列(即为白噪声), 并记 $\begin{pmatrix} v_t \\ w_t \end{pmatrix}$ 的协方差为 R , 且

$$R \left(\begin{pmatrix} v_t \\ w_t \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} v_t & U_t \\ U_t^* & w_t \end{pmatrix}, t = N_i;$$

并约定当 $t = 0$ 时, 总认

定 q, z 的值为 0。

此时, 供应链库存水量和节点湖泊的输出水量偏差分

别为

$$q_t = q_t^f - q_t^s \quad (5)$$

$$u_t = u_t^f - u_t^s \quad (6)$$

且整个水资源供应链的偏差系统为

$$q_{t+1} = q_t + u_t - l(v_t + w_t) \quad (7)$$

3.2 牛鞭效应的定量描述

本文利用偏差量来对供应链的牛鞭效应进行量化描述。从前文分析可以看出, 本文研究的南水北调水资源供应链其实相当于一个多分销中心的单一产品的网状供应链。该供应链的牛鞭效应其实是末端用水户的水量需求波动, 引起前端节点湖泊波动的增强过程, 本文基于文献[1]、[12]、[13]、[14]、[15]的研究结论, 采用该供应链前端节点湖泊库存对末端水量需求波动之比来描述牛鞭效应, 可以得到以下牛鞭效应的计算模型:

$$r = \frac{q_t^T \begin{pmatrix} M_t & L_t \\ L_t^* & N_t \end{pmatrix} q_t + u_t^T u_t}{\begin{pmatrix} v_t \\ w_t \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} M_t & L_t \\ L_t^* & N_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_t \\ w_t \end{pmatrix}} \quad (8)$$

其中, $\begin{pmatrix} M_t & L_t \\ L_t^* & N_t \end{pmatrix} O(t \times N_t)$ 是 Hermite 半正定矩阵。这样, 南水北调水资源供应链的牛鞭效应就可以用一般参数 r 来描述, r 的值越大, 则供应链中的牛鞭效应越强, 信息失真度就越大, 反之, r 的值越小, 则供应链中的牛鞭效应越弱, 信息的失真度就越小。

4 水资源供应链牛鞭效应的随机控制

4.1 随机控制原理

根据随机系统的最优控制策略可以知道, 一个合理的控制策略应该是: 在 t 给出的控制度量只基于到 t 为止的系统的量测值 z_t , 而不依赖于系统的未来量测值。在本项研究中, 对于供应链系统的偏差系统式(7), 牛鞭效应参数 r 描述了供应链末端用水户的水量需求波动引起前端节点湖泊库存水量波动的过程。在此, 本项研究运用容许线性控制策略, 讨论如何选取一个适当的 u_t 使牛鞭效应 r 尽量减弱, 即在外界随机扰动的环境条件下, 如何选取控制变量 u_t 使水资源供应链偏差系统式(7)的值最小, 将该系统的牛鞭效应降到最低程度。

由任一白噪声系统的损失加权矩阵公式可以得到本文研究问题的实质是选取适当的 u_t 使得 J 最小, 即

$$\min_{u_t} J = E \left\{ \sum_{t=1}^{N-1} \left[q_t^T \begin{pmatrix} M_t & L_t \\ L_t^* & N_t \end{pmatrix} q_t + u_t^T u_t \right] + q_N^T \begin{pmatrix} M_N & L_N \\ L_N^* & N_N \end{pmatrix} q_N \right\} \quad (9)$$

从供应链管理理论可以知道, 上式表明了如何选取水资源分销中心地区的水资源的订货量 u_t , 使得水资源分销中心

上游节点湖泊的库存水量的偏差最小, 亦即在外界需水量随机扰动的情况下, 使得牛鞭效应尽可能地减少。

4.2 随机控制策略的算法

供应链系统(7)、(9)所描述的牛鞭效应随机控制问题的现代 SCM 的意义是很明确的, 即如何在水资源需求信息扰动存在不确定性的情况下, 考虑 SCM 策略, 以便使得式(5)、(6)的值最小, 即: $q_t \rightarrow 0, u_t \rightarrow 0$ 。

根据随机控制过程的相关理论可以知道, 线性高斯问题可以采用分离原理, 即将反馈控制和状态估计分开处理。卡尔曼滤波器的状态估计可以作为二次型控制中的反馈状态。对于系统(7)、(9)是一个典型的二次线性高斯问题。根据文献[12]~[17]可以得到以下结论:

$$u_t = -F_t q_{|t-1} \quad (10)$$

其中, $q_{|t-1}$ 是利用数据 z_t 对状态 q_t 的估计。反馈控制增益函数为

$$F_t = [I + B^T P_{t+1} B]^{-1} B^T P_{t+1} \quad (11)$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} E & 0 \\ -l^T & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$P_t = P_{|t-1} - (P_{|t-1} H_t^* + U_t) R(\epsilon) - (H_t P_{|t-1} + U_t^*) \quad (13)$$

且

$$\epsilon_t = z_t - H_t q_{|t-1} - E w_t \quad (14)$$

$$R(\epsilon) = H_t P_{|t-1} H_t^* + H_t U_t + U_t^* H_t^* + W_t \quad (15)$$

卡尔曼滤波器中的状态最优估计 $q_{|t-1}$ 由下式递推

$$q_{|t-1} = q_{|t-1} + B_t u_t + G_t [z_t - q_{|t-1}] \quad (16)$$

卡尔曼滤波器的增益由下式可以计算出:

$$\begin{cases} G_k = S_{k|k-1} [R_2 + S_{k|k-1}]^{-1} \\ S_{k+1|k} = S_{k|k-1} + R_1 + S_{k|k-1} [R_2 + S_{k|k-1}]^{-1} S_{k|k-1} \\ S_{1|0} = R_0 \end{cases} \quad (17)$$

其中, R_0 是随机变量 q_1 的方差。

所以, 南水北调水资源供应链实际系统的库存量和分销地区的水量需求(订水量)为

$$q_t^f = q_t + q_t^s \quad (18)$$

$$u_t^f = u_t + u_t^s \quad (19)$$

其中, 水资源库存状态 q_t^s 可以根据南水北调工程总体规划给出标称设定, 水量需求(订水量)则可以根据用水户的用水历史数据给出其标称设定。

5 系统仿真实验

从图1可以看出, 在南水北调水资源供应链上存在五大水量调蓄湖泊, 考虑到资料收集的全面性和仿真的目的, 本文选择东平湖周围存在的网状供应子链作为仿

真对象。在该供应链中存在着 20 多个水量分销中心, 但是由于有些水量分销地区的数据难以得到, 所以本项研究选取了其中 12 个作为研究对象。根据 2000 年颁布的“用水户分类新口径”, 本文将所有的用水户“新口径中”的二级分类标准分成生活用水、第一产业用水、第二产业用水、第三产业用水、河道内生态环境用水、河道外生态环境用水等 6 种, 即供应链有 $n=6$ 个顾客(群), $m=12$ 个分销中心。

假设库存水量的初始偏差量为

$$(q_1)^T = \begin{pmatrix} 4.51 & 3.21 & 3.12 & 4.02 & 2.08 & 5.81 \\ 3.65 & 1.36 & 4.20 & 2.23 & 2.08 & 1.8 \end{pmatrix}$$

其方差为

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 \\ 0.05 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \end{pmatrix}$$

对于东平湖地区的供应链系统用水量的不确定性扰动 v_t 取其是正态随机变量, 即 $v_t \sim N(0, \sigma_v^2)$, 且 $\sigma_v^2 = 0.0025$ 。该水资源供应链中用水户用水量集结矩阵 l 是 12×3 维系数全为 1 的矩阵。

当对有限时间范围内的牛鞭效应进行考虑时, 本文假定 $t=20$, 然后利用 MATLAB 软件在以上的环境条件下进行仿真实验, 得出结果如图 4 所示。

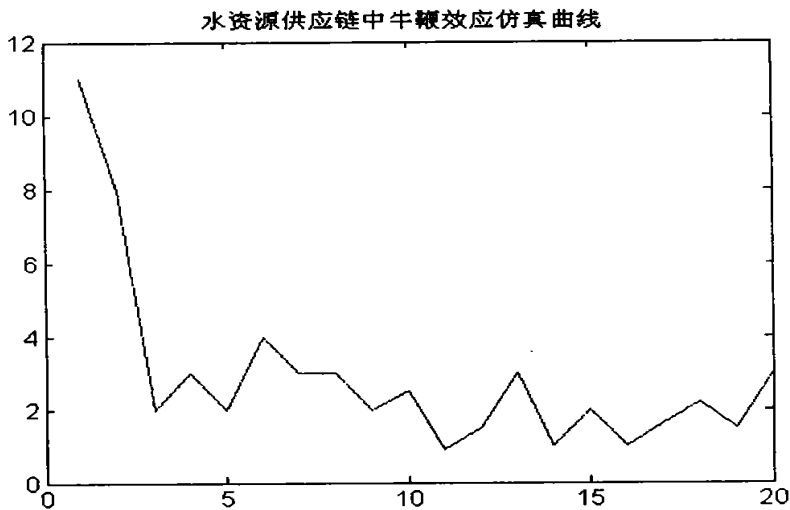


图 4 南水北调资源供应链中牛鞭效应参数的变化曲线

由仿真实验结果可以看出, 运用随机控制算法可以使得南水北调水资源供应链中的牛鞭效应参数 r 降低, 即减弱了由于末端用水户用水需求的扰动而导致前端节点湖泊需水信息增大的效应。

6 结论及展望

本文在文献[1]、[12]提出的多分销中心模型, 针对南水北调水资源供应链的实际情况, 应用随机控制理论与方法, 研究了在南水北调水资源供应链末端的用水户的水量需求发生随机波动的条件下, 如何对该供应链系统中的水资源需求量(即订水量)加以控制从而抑制该供应链中的牛鞭效应。

参考文献:

[1] Stermann J D, Braun S N. Production smoothing evidence from physical product data[J]. J Political Economy, 1991, 99(3): 558~581.

[2] Lee H, Padmanabhan V, Whang S. The bullwhip effect in supply chains[J]. Sloan Management Review, 1997, 38: 93~102.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

- [3] Carlsson C, Fuller R. Reducing the bullwhip effect by means of intelligent [Z]. Soft Computing Method, Hawaii International Conference on System Sciences, 2001, (34): 1 ~ 10.
- [4] 邵晓峰, 季建华, 黄培清. 供应链中的牛鞭效应分析 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2001, (4): 119 ~ 123.
- [5] 马新安, 张列平, 田澎. 长鞭效应的实质与弱化措施 [J]. 中国管理科学, 2000, (8): 61 ~ 68.
- [6] 卢震, 黄小原, 吴红招. 供应链牛鞭效应的随机控制 [J]. 信息与控制, 2003, (1): 36 ~ 39.
- [7] Chen F, Drezner Z, Ryan J, et al. The bullwhip effect: management insights on the impact of forecasting and information an variability in a supply chain [A]. Tayur S, Ganeshan R, Magazine M. Quantitative models for supply chain management [C]. Boston Kluwer Academic Publishers, 2000: 417 ~ 440.
- [8] Richard M. Quantifying the bullwhip effect in supply chain [J]. Journal of Operation Management, 1997, 15: 89 ~ 100.
- [9] 刘国纬. 关于中国南水北调的思考 [J]. 水科学进展, 2000, (3): 346 ~ 350.
- [10] 王慧敏, 朱九龙等. 基于供应链管理的南水北调水资源配置与调度 [J]. 海河水利, 2000, (3): 5 ~ 10.
- [11] 王慧敏等. 基于供应链的南水北调东线水资源配置与调度的可行性研究综述 [J]. 水利经济, 2004, (3): 2 ~ 4.
- [12] 王静, 卢震, 黄小原, 张伟. 电子商务环境网络营销系统牛鞭效应的 H 控制 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2003, (3): 296 ~ 298.
- [13] Todmo G. Worst case design in the time do main: the maximum principle and the stand H problem [J]. Mathematics of Control, Signals and system, 1990, 3(3): 301 ~ 324.
- [14] Yaesh I, Shaked V. Minimum H norm regulation of linear discrete time systems and its relation to linear quadratic discrete game [J]. IEEE Trams, automatic Control, 1990, 35(9): 1061 ~ 1064.
- [15] 奥斯特隆姆著. 潘裕焕译. 随机控制理论导论 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [16] 达庆利, 张钦, 沈厚才. 供应链中牛鞭效应问题研究 [J]. 管理科学学报, 2003, (3): 86 ~ 93.
- [17] 张炳根, 赵玉芝. 随机微分方程 [Z]. 南京: 河海大学, 2003.

Stochastic Control of Bullwhip Effect in SCM of Water Resource of South-to-North Water Transfer

ZHU Jiu-long, WANG Hui-min

(Applied Management Science Institute, Hehai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Bullwhip effect is an important parameter in the information management in SCM of Water Resource of South-to-North Water Transfer. On the base of the analysis of the structure of the supply chain (SP) of water resource, the dynamic inventory model of supply chain of water resource of south-to-north water transfer is set up with applying stochastic control principle, and the bullwhip effect is restrained by taking the order of water as control variable.

Key words: South-to-north Water Transfer; SCM of Water Resource; Bullwhip Effects; Stochastic Control