

文章编号: 1001-0920(2007)07-0808-05

基于风险指标的干旱期水资源系统运行优化分析

方红远

(扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 根据干旱期水资源系统运行性能分析特征,建立了基于供水可靠性最大、供水破坏恢复能力最强以及单一时段破坏深度最小等风险指标,同时考虑了城市和农业供水优先权问题的多目标混合整数规划模型.在实例研究中,运用多目标决策法中的协调规划原理,通过评价任一目标点与理想点的欧氏距离,获得多目标问题的最佳权衡解.计算结果表明,该多目标混合整数规划模型对解决需要考虑供水优先权的干旱期水库运行策略优化问题是可行而有效的.

关键词: 水资源系统; 干旱期; 供水优先权; 多目标决策; 优化分析

中图分类号: TV213 **文献标识码:** A

Water resources system operation optimization analysis during drought based on risk index

FANG Hong-yuan

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China. E-mail: hyfang4936@yahoo.com.cn)

Abstract: According to the characteristic of water resources system operation performance analysis during drought, a multi-objective mixed integer programming model is established, which is based on the principle that the reliability and resilience are maximized, and the vulnerability of reservoir water supply is minimized. Meanwhile, the priority among urban water supply, agricultural water supply and so on is considered. In the study of a real system operation, the satisfying trade-off solution of multi-objective decision model is obtained by evaluating the Euclidian distance between some actual objective point and the ideal point. Computing results show the feasibility and effectiveness of practical application of the multi-objective mixed integer programming model on the reservoir operation policy analysis that considering the priority of several water supply types during drought periods.

Key words: Water resources system; Drought periods; Water supply priority; Multiobjective decision making; Optimization analysis

1 引言

国内外多年的水利工程建设和运行管理经验表明,干旱缺水对区域城乡生活、社会经济部门正常生产及其发展以及生态环境演变等影响巨大,所造成的经济损失极为严重^[1,2].在以水库为主要供水水源的水资源系统中,干旱期是指入库径流量不能满足确定的系统内用户对目标供水需求的时期.由于干旱期缺水损失的经济价值估算往往比较困难,计算这种损失不仅要鉴别水资源在社会经济生产中的用途,而且要考虑不同用户的使用效率.为了能够对缺水损失程度加以度量,目前在水资源规划与管理研究中,常借助一些易于评价的物理指标来描述.

文献[3]提出了用于描述干旱期水库运行性能的 3 个指标,即供水可靠性、破坏恢复能力和供水破坏深度(也称易损性),并认为这 3 个指标可构成表达水库供水风险的特征体系.供水可靠性一般可定义为在水库运行分析期内供水状态处于正常情况(即供水不发生破坏)的概率或频率.通常由供水不破坏时段数除以水库运行分析期总时段数计算得到.供水破坏恢复能力可定义为在一定运行期内水库供水从破坏状态恢复到某种可接受状态的概率.文献[3]将供水破坏恢复能力定义为:当面临时段处于供水破坏状态时,供水系统从破坏状态恢复到正常状态的条件概率.考虑可操作性,供水破坏恢复能

收稿日期: 2006-04-16; 修回日期: 2006-07-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50479030); 江苏省高校自然科学基金项目(04KJB570170).

作者简介: 方红远(1963—),男,江苏溧水人,教授,博士,从事水资源规划与管理等研究.

力一般也可定义为在一定运行期内水库供水从破坏状态恢复到正常供水状态的平均频率. 显然, 供水破坏恢复能力的内涵中包含着一旦供水破坏发生, 系统如何快速地从失事状态恢复到正常状态这一概念. 在实际风险分析中, 供水破坏恢复能力常常用系统处于供水破坏状态的时间长短来衡量, 即处于供水破坏状态的连续时段数越少, 则表示破坏恢复能力越强; 否则, 供水破坏恢复能力越弱. 因此, 设水资源系统运行分析期内共有 m 个缺水时期, 各缺水时期的长度分别为 $T_{F_1}, T_{F_2}, \dots, T_{F_m}$. 若令

$$T_{\max} = \max\{T_{F_1}, T_{F_2}, \dots, T_{F_m}\}, \quad (1)$$

则 T_{\max} 越大, 表示供水破坏恢复能力越弱; 而 T_{\max} 越小, 则破坏恢复能力越强. 该表示法概念直观, 可操作性较强, 能反映指标所表达的内涵.

供水系统易损性常可用单一时段破坏深度表达. 单一时段破坏深度一般可定义为水库运行分析期内最大单一时段的缺水量与所有时段总需水量 (D_t) 之比. 干旱期供水破坏是不可避免的, 缺水可能同时存在于若干个时段内, 单一时段破坏深度可用来衡量缺水的严重性. 对于一定的水库运行分析期, 总需水量是确定的, 所以单一时段破坏深度可简单地表示为

$$D_{\max} = \max\{d_1, d_2, \dots, d_n\}, \quad (2)$$

式中 d_1, d_2, \dots, d_n 分别为各时段的缺供水量.

2 干旱期水库运行性能分析的混合规划模型

混合规划模型可在用于水库规划设计和运行调度研究的线性规划模型的基础上, 再将反映干旱期水库运行性能特征的供水可靠性、供水破坏恢复能力及单一时段破坏深度 3 个指标纳入模型而构建. 由于要度量供水可靠性和供水破坏恢复能力, 模型中必须引入 0-1 型整数变量. 对于供水水库的运行问题, 可以建立供水可靠性最大、供水破坏恢复能力最强以及单一时段破坏深度最小的多目标规划模型.

2.1 约束条件

2.1.1 水量平衡约束

$$V_t = V_{t-1} + I_t - R_t - O_t - E_t, \quad t = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

式中: V_{t-1}, V_t 分别为第 t 时段初、末水库的有效蓄水量; I_t 为第 t 时段水库入库径流量 (已知量); R_t 为第 t 时段水库放水量; O_t 为第 t 时段水库弃泄水量; E_t 为第 t 时段水库的蒸发渗漏损失, 按第 t 时段水库平均有效蓄水量的线性函数计算; t 为时段变量; n 为水库运行分析期长度 (已知量).

2.1.2 水库库容约束

$$V_t \leq C, \quad t = 0, 1, \dots, n. \quad (4)$$

式中: C 为水库的总有效库容 (已知量); V_0, V_n 分别为水库运行的起始蓄水量和结束蓄水量. 考虑连续干旱年这种严重情况发生时的水库运行调度, 以及库区水生态环境维护等问题, 一般可要求

$$V_n - V_0 = 0. \quad (5)$$

2.1.3 水库放水量与下游需水量关系约束

$$R_t + L_{1t} + L_{2t} = D_t = D_{1t} + D_{2t}, \quad t = 1, 2, \dots, n; \quad (6)$$

$$h_t = R_t / D_{1t}, \quad t = 1, 2, \dots, n; \quad (7)$$

$$L_{1t} - (1 - h_t) \times D_{1t} = 0, \quad t = 1, 2, \dots, n; \quad (8)$$

$$L_{2t} - a_t \times D_{2t} = 0, \quad t = 1, 2, \dots, n; \quad (9)$$

$$h_t + a_t = 1, \quad t = 1, 2, \dots, n; \quad (10)$$

$$L_{1t} + L_{2t} \leq D_{\max}, \quad t = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

式中: D_t 为第 t 时段的总目标需水量, 一般由城市生活和工业需水量 D_{1t} 以及农业需水量 D_{2t} (均为已知量) 构成, 本文设定城市供水具有优先权; L_{1t} 为第 t 时段城市生活和工业缺水水量 (与目标需水量的离差); L_{2t} 为第 t 时段农业缺水水量; D_{\max} 为水库运行分析期内最大单一时段缺水水量; h_t 为城市生活和工业供水状态的指示变量, 为 0-1 型变量, 取值为 0 时表示供水破坏, 取值为 1 时表示正常供水; a_t 为水库供水状态的指示变量, 也为 0-1 型变量, 取值为 1 时表示供水破坏, 取值为 0 时表示正常供水.

约束 (7) ~ (10) 的涵义是: 当第 t 时段水库放水量小于城市生活和工业需水量 D_{1t} 时, h_t 取值为 0, 此时表明城市生活和工业供水存在缺水. 约束 (9) 和 (10) 限定了此时农业供水也必定有缺水; 反之, 当时段放水量大于城市生活和工业需水量 D_{1t} 时, h_t 取值为 1, 表明城市生活和工业供水不存在缺水, 此时农业供水可能缺水, 也可能不缺水; 如果时段还存在缺水, 则只能是农业缺水 (即 $L_{1t} = 0, L_{2t} > 0$ 的情形可能存在). 约束 (11) 限定了 D_{\max} 为时段最大缺水水量.

2.1.4 考虑水库弃泄水量问题约束

$$b_t = V_t / C, \quad t = 1, 2, \dots, n; \quad (12)$$

$$O_t - b_t \times M = 0, \quad t = 1, 2, \dots, n. \quad (13)$$

式中: b_t 为水库弃泄水状态指示数, 为 0-1 型变量, 取值为 1 时表示水库有弃水, 取值为 0 时表示水库不弃水; M 为一很大正数. 约束 (12) 和 (13) 的作用是: 当第 t 时段末有效蓄水量 V_t 超过 C 时, b_t 取值为 1, 此时水库可能有弃泄水量; 否则, b_t 取值为 0, O_t 只能为 0.

2.1.5 任意时段内缺水与水库弃水事件不可同时发生约束

$$a_t + b_t = 1, t = 1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

该式的主要作用是防止任意时段内缺水和弃水同时存在这种不合理现象的发生. 对任一时段而言, 只要农业供水存在缺水(更不用说城市供水发生短缺), 该时段即可作为缺水时段. 所以式(14)中只需以 a_t 表达缺水状态即可. 下述缺水时段数约束与此同理.

2.1.6 缺水时段数约束

$$\sum_{t=1}^n a_t \leq p; \quad (15)$$

$$\sum_{t=k}^{k+N} a_t \leq N, k = 1, 2, \dots, n - N. \quad (16)$$

式中: k 为所考虑连续缺水段的起始时段数; N 为允许的最大连续缺水时段数(已知量); p 为供水可靠性指标, 用允许的总缺水时段数表示. 式(15)为水库运行期内总缺水时段数限制约束, 式(16)为供水破坏连续时段数不得超过预定值的限制约束.

2.1.7 模型变量约束

混合规划模型中的变量包括任意变量 $V_t, R_t, O_t, L_{1t}, L_{2t}$ 和 D_{\max} , 它们具有非负性约束; 整型变量 p, h_t, a_t 和 b_t 为非负整数, 且 h_t, a_t, b_t 为 0-1 型变量.

2.2 目标函数

根据供水可靠性、破坏恢复能力和供水破坏深度这 3 个表达供水水库运行风险特征体系的指标, 可构成供水可靠性最大、供水破坏恢复能力最强以及单一时段破坏深度最小的多目标规划问题. 由水库运行调度的实际经验知, 供水破坏恢复能力一般可理解为当供水处于破坏状态时, 水库是否有能力在较短时间内恢复到正常状态. 这一指标可通过限制供水破坏连续时段数加以实现, 约束条件(16)已反映了该指标, 故目标函数中可不再考虑.

综上所述, 经过对几种不同形式的目标函数表达式合理性的比较分析, 这里建立的混合规划模型的目标函数可表达为供水可靠性最大以及单一时段供水破坏深度最小, 即

$$\min \{ p, D_{\max} \}. \quad (17)$$

3 实例研究

某水库供水区流域集水面积为 $4\,210 \text{ km}^2$, 水库总库容 $14.05 \times 10^8 \text{ m}^3$, 兴利库容 $5.03 \times 10^8 \text{ m}^3$, 死库容 $0.52 \times 10^8 \text{ m}^3$, 是目前该省最大的具有灌溉、城市生活和工业供水、防洪、发电、养殖等综合功能的大()型水库. 该水库所在地区春秋两季干燥少雨, 经常出现春旱和秋旱, 降水量年内分布也很不均匀, 枯季少雨, 汛期降雨集中, 6~9月降水量占年降水量的 72.4%, 经常形成连续时间较长的春旱、夏

涝、秋后又旱的局面, 对区域社会经济发展造成较大影响.

在 1964~1999 年入库径流历史资料中, 通过综合分析来水频率为 70%~85% 的入库径流年过程, 选择对运行调度较不利的一个长 16 个月的枯水段入库径流过程作为干旱期水文输入资料. 在需水过程中, 城市供水一般相对较均匀, 而农业灌溉供水大多集中在作物(以水稻和旱秋作物为主)种植期和生长期(5~10月), 但由于考虑农业多种经营要求, 其他各月也应计算一部分农业需水. 鉴于该地区干旱期特征, 现选择相应 75% 的需水过程作为水库地区目标需水量. 入库径流量和目标需水量过程如图 1 所示.

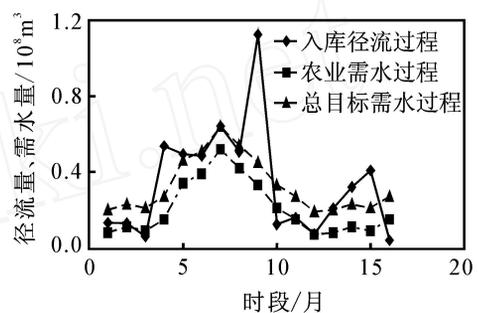


图1 入库径流量和目标需水量过程线

以年作为水库运行分析周期, 且计算时段取月, 则 $n = 16$. 在充分研究该地区作物种植结构的需水要求、灌溉制度以及可行的灌溉节水措施后, 选择允许的最大连续缺水时段数 $N = 3$. 根据水库实际运行管理经验及相关统计资料估算, 模型中水库各时段蒸发渗漏损失量按时段平均有效蓄水量的 20% 计算. 考虑水库调度运行分析周期始、末应急需水和生态环境需水要求, 可令起始蓄水量 $S_0 = 0.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ (水库蓄水量均以死库容以上有效蓄水量表示).

对于式(17)给出的多目标问题, 一般可通过赋予供水可靠性目标 p 以权系数 w_1 , 单一时段供水破坏深度目标 D_{\max} 以权系数 w_2 , 且令 $w_1 + w_2 = 1$, 采用权重法处理^[4,6]. 因为式(15)实际表达的是系统供水可靠性约束要求, 故本文根据供水可靠性特征采取事先设定不同的 p , 然后求解各相应的模型. 图 2 显示了 $p = 3 \sim 12$ (相当于供水保证率为 81.3%~25%) 时, 最大单一时段缺水 D_{\max} 随 p 的变化特征. 图 2 也可理解为该多目标决策问题在目标空间内的非劣解集图. 计算过程表明, 当 p 取值 6 或以上时, 模型结果为: 分析期内总缺水时段数和最大单一时段缺水 D_{\max} 保持在 6(月) 和 $0.087\,671 \times 10^8 \text{ m}^3$ 不变. 显然该特征是由前述入库径流量和目标需水量两个过程的内在规律所决定的.

由于目标函数中有追求 D_{\max} 最小的成分, 在模

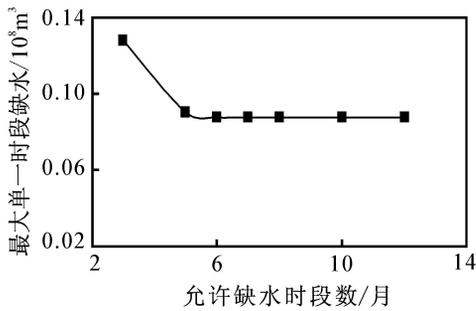


图 2 最大单一时段缺水 D_{max} 随 p 变化关系

型计算中发现,一般随着 p 的增大, D_{max} 呈不断减小趋势,且在保持运行分析内总缺水量相对稳定的情况下,存在缺水的各时段的缺水量比较均匀. 这种均匀性避免了缺水量在时段分配上的过于悬殊,有助于经济社会干旱期应急供水措施的稳定实施,消除区域社会经济生产各部门对干旱影响的承受能力的波动性. D_{max} 随着 p 的增大而减小这一事实还表明,当过分要求较少的缺水时段数(即追求较高的供水可靠性)时,单一时段供水破坏深度势必增大,从降低水库供水风险以及供水区域社会经济发展受影响程度的角度看,这并不可取.

模型计算结果以及图 2 均表明,当 $p \geq 6$ 时,最大单一时段缺水 D_{max} 随着 p 的增大而单调减小,同时相应于各 p 值时的总缺水量 $L_{1t} + L_{2t}$ 几乎不变,但其缺水量的时程分配过程各不相同. 由此可见,目标 D_{max} 与 p 改善方向不一致,是相互矛盾的,而这正反映了多目标决策问题的典型特征. 针对式(3) ~ (17) 所定义的模型计算结果,本文根据多目标决策中的协调规划法,通过评价任一目标点与理想点的距离 z , 获得该问题的最佳权衡解. 计算公式如下:

$$z = \left\{ \sum_{k=1}^K w_k \frac{[f_k^*(X) - f_k(X^i)]^m}{[f_k^*(X) - f_k(X)]^m} \right\}^{1/m} \quad (18)$$

式中: z 为第 i 个目标点与理想点的距离; $f_k^*(X)$ 和 $f_k(X)$ 为第 k 个目标的最佳值和最差值; $f_k(X^i)$ 为第 i 个解对应的第 k 个目标值; w_k 为第 k 个目标的权重; m 为正数,本文取 $m = 2$.

本文选择的评价目标分别为最大单一时段缺水 D_{max} , 分析期内总缺水时段数 p , 城市缺水量 L_{1t} , 以及农业缺水量 L_{2t} . 考虑干旱期供水系统的供水特征以及城市供水的重要性,现赋予评价目标 D_{max} 和 L_{1t} 权系数为 0.35 和 0.35, 而 p 和 L_{2t} 权系数分别为 0.15 和 0.15. 根据理想点涵义,4 个评价目标的最佳值均应取 0. 显然,评价目标 D_{max} 的最差值取最大时段需水量 $0.64 \times 10^8 \text{ m}^3$, p 的最差值取 16, L_{1t} 的最差值取城市供水总需水量 $1.92 \times 10^8 \text{ m}^3$, L_{2t} 的最差值取农业供水总需水量 $3.29 \times 10^8 \text{ m}^3$.

干旱期存在若干时段缺水是不可避免的,如前

所述,过分要求较少的缺水时段数(较大的供水保证率)势必会使单一时段供水破坏深度增大. 因此,根据本文实例的具体特征,这里只在 $p = 3, 4, 5$ 和 6 共 4 种目标点的评价基础上选择该多目标决策问题的最佳权衡解. 根据计算,最佳权衡解可选择 $p = 5$ (月), $D_{max} = 0.090513 \times 10^8 \text{ m}^3$, $L_{1t} = 0.000513 \times 10^8 \text{ m}^3$, $L_{2t} = 0.399487 \times 10^8 \text{ m}^3$, 最小目标距离 $z = 0.1545$. 图 3 和图 4 分别为相应最佳权衡解时的水库运行策略以及水库运行分析期内缺水量的最佳时程分配过程.

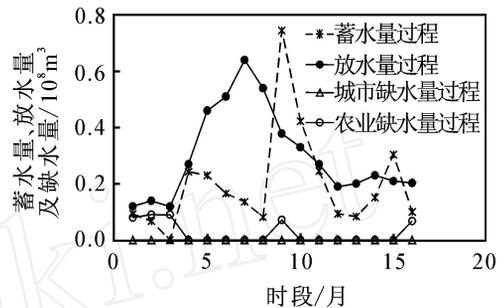


图 3 相应最佳权衡解的水库运行策略

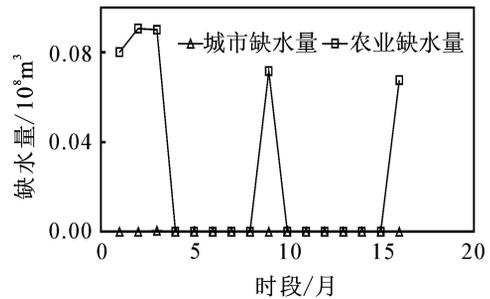


图 4 缺水量的最佳时程分配过程

4 结 语

干旱期供水系统的运行管理是水资源规划和管理中的重要问题之一,供水工程的有效运用对缓解区域干旱缺水及其造成的灾害具有关键作用. 国内外许多研究成果及水资源系统运行管理实践表明,供水系统范围内极少数时段的较大缺水量,对区域社会经济系统及生态环境系统会产生极大的破坏深度^[7];而连续若干个时段仅具有较小或轻微的缺水量,其破坏程度将会大大减轻,甚至当单一时段供水破坏深度处在一个恰当的范围内时,只要干旱期应急供水预案完善和社会经济用水管理措施实施有效,这种干旱灾害影响会明显减小. 虽然干旱期实施限制供水策略不是目的而是一种手段,但当区域供水系统范围内的水源条件极缺乏时,对社会经济系统及生态环境系统采取恰当的限制供水方案,对于减轻整个区域的供水风险以及干旱影响具有较大的现实意义.

本文阐述的干旱期水库运行性能指标,以及相应的可操作性强的实用计算表达式,在目前的水资

源规划和管理中较为常用. 文中提出的多目标混合整数规划模型,其特征是其基于供水可靠性最大、供水破坏恢复能力最强以及单一时段破坏深度最小等目标,同时可考虑城市供水和农业供水的优先权. 实例分析过程以及计算结果表明,运用多目标决策理论中的协调规划法,通过评价任一目标点与理想点的欧氏距离,获得多目标问题的最佳权衡解,对解决该类需要考虑供水优先权的干旱期水库运行策略优化问题较为有效.

参考文献(References)

- [1] 钱正英,张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[M]. 北京:中国水利电力出版社, 2001.
(Qian Zheng-ying, Zhang Guang-dou. Integrated report on China sustainable water resources development strategy [M]. Beijing: China Water Power Press, 2001.)
- [2] 水利部南京水文水资源研究所,中国水利水电科学研究院水资源研究所. 21世纪中国水供求[M]. 北京:中国水利电力出版社, 1999.
(Nanjing Institute of Hydrology and Water Resources (NIHR), China Institute of Hydraulic and Water Resources(IWHR). China water supply and demand in 21 century [M]. Beijing: China Water Power Press, 1999.)
- [3] Hashimoto T, Stedinger J R, Loucks D P. Reliability, resilience and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation [J]. Water Resources Research, 1982, 18(1): 489-498.
- [4] Loucks D P, Stedinger J R, Haith D A. Water resources systems planning and analysis [M]. New Jersey: Prentice-hall, 1981.
- [5] 冯尚友. 水资源系统工程[M]. 武汉:湖北科学技术出版社, 1991.
(Feng Shang-you. Water resources system engineering [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1991.)
- [6] 钱颂迪. 运筹学[M]. 北京:清华大学出版社, 1990.
(Qian Song-di. Operation research [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990.)
- [7] Shih J S, ReVelle C S. Water supply operations during drought: Continuous hedging rule [J]. J Water Resources Planning and Management, 1994, 120: 613-629.

(上接第 807 页)

参考文献(References)

- [1] 李尔涛,唐寿飞,胡思继. 一个物流网络的双层规划模型[J]. 系统工程学报, 2004, 19(1): 8-13.
(Li Er-tao, Tang Shou-fei, Hu Si-ji. Bilevel programming model for logistics network [J]. J of Systems Engineering, 2004, 19(1): 8-13.)
- [2] 赵晓煜,汪定伟. 供应链中二级分销网络的优化设计模型[J]. 管理科学学报, 2001, 4(4): 22-26.
(Zhao Xiao-yu, Wang Ding-wei. Optimization model for bilevel distribution network design in supply chain management[J]. J of Management Sciences in China, 2001, 4(4): 22-26.)
- [3] Ganeshan R. Managing supply chain inventories: A multiple retailer, one warehouse, multiple supplier model[J]. Int J Production Economics, 1999, 59(1-3): 341-354.
- [4] Matthieu C, Van der Heijden. Multi-echelon inventory control in divergent systems with shipping frequencies [J]. European J of Operational Research, 1999, 116(2): 331-351.
- [5] Chan L M A, Simchi-levi D. Probabilistic analysis and algorithms for three-level distribution systems [J]. Management Science, 1998, 44(1): 1562-1576.
- [6] Chen F, Samroengraja R. A staggered ordering policy for one-warehouse, multi-retailer systems[J]. Operation Research, 2000, 48(2): 281-293.
- [7] Graves S C. A multi-echelon inventory model with fixed replenishment intervals[J]. Management Science, 1996, 42(1): 1-18.
- [8] Axsater S, Zhang W. A joint replenishment policy for multi-echelon inventory control [J]. Int J Production Economics, 1999, 59(1-3): 243-250.
- [9] McGavin E J, Schwarz L B, Wand J E. Two-interval inventory-allocation policies in a one-warehouse, N-identical-retailer distribution systems [J]. Management Science, 1993, 39(9): 1092-1107.
- [10] Jorgensen S, Kort P M, Zaccour G. Production, inventory and pricing under cost and demand learning effects[J]. European J of Operational Research, 1999, 117(2): 392-395.