

Classified Flood Operation Scheme for Ankang Reservoir*

Yanqing Li¹, Shenglian Guo¹, Yanlai Zhou¹, Qihua Luo²

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

²River Water Conservancy Development Center Co., Ltd., Beijing

Email: liyanqing@whu.edu.cn

Received: Jun. 9th, 2013; revised: Jun. 28th, 2013; accepted: Jul. 8th, 2013

Abstract: Taking Ankang reservoir as an example, this paper analyzed annual runoff variation and distribution as well as regional composition of inflows for Ankang reservoir. The projection pursuit method was applied to classified flood events and operation schemes of Ankang reservoir were proposed. It is shown that classified flood operation scheme can generate more hydropower by raising reservoir water level during flood rising periods and draw down water level to flood control limiting water level during flood recession periods in order to prepare storage for next coming flood without reducing original flood prevention standards. The proposed scheme is based on the rainfall and runoff forecasting information and different reference schemes, which can provide scientific support for decision making in various types of practical operation.

Keywords: Flood Classification; Operation Scheme; Projection Pursuit; Ankang Reservoir

安康水库分类洪水调控方案研究*

李妍清¹, 郭生练¹, 周研来¹, 罗启华²

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

²江河水利开发中心有限责任公司, 北京

Email: liyanqing@whu.edu.cn

收稿日期: 2013年6月9日; 修回日期: 2013年6月28日; 录用日期: 2013年7月8日

摘要: 本文以安康水库为例, 通过对入库洪水的年际、年内变化和地区组成规律进行分析, 运用投影寻踪法进行洪水分类, 制定了分类洪水调控方案。在不降低原设计防洪标准的前提下, 分类洪水调控方案与常规调度方案相比, 在涨水阶段可有效地抬高水库发电水头以增加发电量, 在退水阶段可提前把库水位降低至汛限水位以迎接下一场洪水的来临; 根据安康水库的水雨情预报信息, 灵活的选择调度参照方案, 为应对各种类型暴雨洪水的防洪调度提供技术支撑和决策参考。

关键词: 洪水分类; 调控方案; 投影寻踪; 安康水库

1. 引言

根据洪水强度的大小, 一般把洪水分为特大洪水、大洪水、中等洪水和小洪水等不同等级。准确可靠的洪水分类是洪水资源化调控和洪水灾害评估的

*基金项目: 水利部行业科技专项(201001002)资助。

作者简介: 李妍清(1989-), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生, 从事水文分析计算及水资源研究。

重要依据。但由于洪水强度受诸多因素影响, 具有较强的随机性和模糊性, 因此对历史洪水过程进行分类, 寻找同类型洪水的模糊特征和规律, 以消除不确定性因素的影响, 具有重要的意义^[1]。针对每一类天气系统产生的暴雨洪水典型, 设计出相应的防洪调度规则, 进行防洪分类调度^[2], 可为同类型防洪调度提

供技术支持。

目前常用的判断洪水类别的指标主要有入库流量、库水位、历时洪量等, 这些指标都有相应的适应条件与优缺点, 这些方法在实际调度中不一定总是有效; 因洪水过程的不确定性, 采用常用的一两个判断指标在实际调度中难免有些不太客观, 也不尽合理。这样, 综合考虑多指标的影响对于准确地判断洪水大小及其类型, 洪水大小的准确判断和分类对于建立更合理的洪水调度规则和评估洪水灾害危险的大小, 都具有非常重要的作用。

由于受流域天气过程、下垫面演变和人类活动等因素的综合作用, 影响洪水分类的因素繁多且复杂, 综合考虑多指标的洪水分类方法是目前洪水分类研究的主要趋势。近年来在洪水分类研究中引入了投影寻踪法^[3-7]、主成分分析法^[8]、集对分析法^[9]、以及两种或三种方法的耦合模型^[10,11]。这些方法直接由历史洪水样本数据驱动得到洪水的自然分类结果, 综合考虑了洪水的多指标多因素, 在一定程度上克服了传统方法的不足。目前洪水分类最主要的一种方法是投影寻踪法。它既能作探索性分析, 又能作确定性分析, 具有稳健性好、抗干扰性强和准确度高等优点。用投影寻踪模型进行洪水分类的基本思想是把高维数据, 通过某种组合投影到低维子空间上, 对于投影得到的构形, 采用投影指标函数来描述投影以暴露分类排序结构的可能性大小, 寻找出使投影指标函数达到最优的投影值。

本文以安康水库为例, 通过入库洪水年际、年内变化规律分析, 采用投影寻踪法进行洪水分类, 再此基础上制定安康分类洪水调控方案, 以应对实际调度中可能发生的各种类型暴雨洪水的防洪安全与洪水资源利用问题。

2. 基于投影寻踪的洪水分类

运用投影寻踪的理论, 使用基于遗传编码的加速遗传算法(RAGA)^[12], 考虑多指标, 对洪水进行分类。主要包括4个步骤:

第一步, 指标的归一化处理。

设各指标值的样本集为

$\{x^*(i, j) | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p\}$, 其中: $x^*(i, j)$ 为第 i 个样本的第 j 个指标值; n, p 分别为样本容量和

指标数目。

为消除各指标值的量纲差异和统一各指标值的变化范围, 采用下式进行极值归一化处理

$$x(i, j) = [x^*(i, j) - x_{\min}(j)] / [x_{\max}(j) - x_{\min}(j)] \quad (1)$$

式中: $x_{\min}(j), x_{\max}(j)$ 分别为第 j 个指标值的最小值和最大值。

第二步, 构造投影指标函数。投影寻踪方法就是把 p 维数据 $\{x(i, j) | j=1, 2, \dots, p\}$ 综合成

$a = (a(1), a(2), \dots, a(p))$ 为投影方向的一维投影值。

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(j) \times x(i, j) \quad (2)$$

式中: a 为单位长度向量。

然后根据 $\{z(i) | i=1, 2, \dots, n\}$ 的一维散布图进行分类。

在综合投影值时, 要求投影值 $z(i)$ 的散布特征应为: 局部投影点尽可能密集, 最好凝聚成若干个点团; 而在整体上投影点团间尽可能散开, 基于此, 投影指标函数可构造为

$$Q(a) = S_z D_z \quad (3)$$

式中: S_z 为投影值的标准差, D_z 为投影值的局部密度。

$$S_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z(i) - E_z)^2 / (n-1)} \quad (4)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) u(R - r_{ij}) \quad (5)$$

式中: E_z 为 $\{z(i) | i=1, 2, \dots, n\}$ 的均值; R 为求局部密度的窗口半径, 一般取值 $R = 0.1S_z$; $r_{ij} = |z(i) - z(j)|$, 为点间距离, r_{ij} 愈大, 密度愈小; $u(R - r_{ij})$ 为单位阶跃函数, 当 $R \geq r_{ij}$ 时, 函数值为 1, 当 $R < r_{ij}$ 时, 函数值为 0。

第三步, 优化投影指标函数。当各指标值的样本集给定时, 投影指标函数 $Q(a)$ 只随投影方向 a 的变化而变化。不同的投影方向反映不同的数据结构特征, 最佳投影方向就是最大可能暴露高维数据某类特征结构的投影方向。可通过求解投影指标函数最大化问题来估计最佳投影方向, 即

$$\begin{cases} \text{Max } Q(a) = S_z D_z \\ \text{s.t. } a^2(j) = 1 \end{cases} \quad (6)$$

这是一个以 $\{a(j) \ j=1,2,\dots,p\}$ 为优化变量的复杂非线性优化问题,用常规优化方法处理较困难,可以采用加速遗传算法等来求解最优解。

第四步,评判分析。根据第三步所得的最佳投影方向并求出相应的 $z(i)$ 值,根据一维散点图就可进行洪水分类。

3. 实例研究

安康水库位于汉江干流上游陕西省安康市境内,是一座以发电为主,兼有航运、防洪、养殖、旅游等综合效益的大型水利枢纽工程。坝址火石岩位于安康市城西 18 km 处,上游距石泉水电站 170 km,下游距湖北丹江口水库 260 km,多年平均径流量 192 亿 m^3 ,控制流域集水面积 35,700 km^2 。安康设计的防洪调度方式没有考虑预报信息,而以实际水库水位或入库流量作为改变水库下泄流量的判断标准,因水位信息滞后,往往贻误了泄流的最佳时机。

3.1. 安康入库洪水规律分析

1) 气候特征

汉江流域处于东亚副热带季风区,其降水主要来源于东南和西南两股暖湿气流。形成降水的暖湿气流主要来源于孟加拉湾和西太平洋,由于季风气候的控制,降水在年内分配很不均匀。春暖干燥;冬季基本受西北气流的控制,降水很少;秋季受副高、青藏高原、欧亚槽、西南低压及对流性天气等影响,水汽通过成都平原翻过米仓山、大巴山进入本流域形成大的降水,所以清凉湿润并多连阴雨。汉江上游流域气候温和,雨量充沛,多年平均降雨量为 800 mm 左右,水资源相对丰富,多年平均径流量 260 亿 m^3 ,占陕西全省年总径流量的 60%。安康水库入库洪水的峰差比大,洪峰大小交错发生,洪水具有频发的一面也有突发的一面,给洪水资源调控带来较大的困难,高峰值会对水库防洪造成很大威胁,低峰值不利于电站发电。

2) 年际变化

安康水库在 1935~2011 年期间共发生 108 场洪水,其中洪峰流量大于 10,000 m^3/s 的洪水 75 场,占总数的 69.4%;一年发生两次 10,000 m^3/s 以上的洪水有 8 年,发生三次及以上的有 7 年。1983 年发生了 3 次洪

峰流量大于 15,000 m^3/s 的洪水。从洪水发生年际变化规律分析,安康水库洪水多发期分别为 1955~1958 年、1962~1965 年、1973~1975 年、1978~1985 年、1989~1993 年;少发期分别为 1941~1945 年、1969~1972 年、1996~1997 年。

3) 季节性变化

安康较大洪水全部发生在夏、秋两季,最早出现在 5 月下旬,最迟发生在 10 月上旬,跨度为 6 个月,其中 7~9 月发生的洪水次数占总洪水次数的 76%;8 月上旬至中旬前发生洪水的频次百分率仅为 15%,这期间可以蓄存一定的水量以应对电网的调峰之用;7 月、8 月下旬至 9 月中旬和 10 月上旬期间,发生洪水的概率为 85%,应以防汛为主。

4) 洪水地区组成和洪水形态规律分析

安康洪水可分为上游型洪水,区间型洪水和全流域型洪水,其中 7 月份洪水以区间型和全流域型洪水居多,8 月份以发生上游型洪水为主,9~10 月份为区间型洪水居多。对安康水库洪水形态特性进行分析,总的来说,安康洪水峰型尖瘦,一次洪水过程一般为 5~7 天,洪水来势凶猛,具有陡涨陡落的山溪性河流特点。但不同时间发生的洪水又具有不同的洪水过程形态,7~8 月份多为尖瘦型洪水,洪水来势凶猛,陡涨陡落,峰值大,汇流快,此类洪水是防洪重点;9~10 月份洪水峰形较矮胖,洪水缓涨缓落,一般多呈复合型洪峰,洪水历时较长,对水库蓄水有利。

3.2. 洪水分类

采用投影寻踪法对洪水分类,根据最佳投影方向并求出相应的投影值,确定洪水强度的大小。一般来说,投影值越大,表示洪水强度越大,根据投影值一维散点图就可进行分类。采用安康水库(1956~2011 年)年最大洪水样本,选取洪峰流量、最大 1 d 洪量、最大 3 d 洪量、最大 7 d 洪量和洪水历时 5 个指标,运用投影寻踪法综合考虑安康水库历史洪水样本的量级。计算得到的最优投影方向向量为:(0.2086, 0.4435, 0.5393, 0.0486, 0.6831)。该最优投影方向向量反映了影响洪水强度的 5 个指标由强到弱依次为:洪水历时、最大 3 d 洪量、最大 1 d 洪量、洪峰流量、最大 7 d 洪量。

根据洪水综合指标投影值可确定洪水分类标准

^[9], 计算综合指标投影值的平均值 $\bar{X} = 0.98$, 建议洪水分类标准: $(1.6\bar{X}, +\infty)$ 为大洪水, $(1.2\bar{X}, 1.6\bar{X}]$ 为较大洪水, $(0.8\bar{X}, 1.2\bar{X}]$ 为中等洪水, $(0.4\bar{X}, 0.8\bar{X}]$ 为小洪水, $(0, 0.4\bar{X}]$ 为特小洪水。由此得到各场次洪水综合指标投影值的散点图如图 1 所示。图 1 将所选的 56 场历史洪水大致分为五类, 即 1983 年、1960 年、2011 年、1975 年、2010 年、2005 年属于一类, 投影值最大, 可以认为是大洪水; 1964 年、1958 年、1984 年、2003 年、1974 年和 1968 年属于同一类型, 可认为是较大洪水; 1982、1965、1963、1989、1978、1981、1957、1956、1980、1987、1973、1979、1985、2000、1998、2007 年, 可以认为是中等洪水; 1961、1962、1967 年等 12 场属于同一类型洪水, 属于小洪水; 其他 12 个年份的投影值最小, 可以认为是同一类型的特小洪水。

3.3. 分类洪水调控方案

在对安康水库历史洪水进行数理统计分析的基础上, 结合实时水情监测系统中长期、短期洪水预报技术, 初步拟定安康水库分类洪水调度方案如下:

1) 针对丰、平、枯水年采取不同的洪水调度措施。

中长期水文气象预报, 是对安康水库对丰、枯水年采取不同调控措施的依据。在丰水年, 水库应适当保持较低水位运行, 以降低水库的防洪风险; 在枯水年, 可以适当抬高水库的运行水位, 以增加水库的发电效益; 在平水年, 则根据水情监测和洪水预报系统

进行常规调度。

2) 根据季节性变化规律, 结合短期预报, 分期控制水位。

8 月初至 8 月中旬发生洪水的概率仅为 15%, 因此 7 月下旬可以蓄存适当的水量以应对电网的调峰之用。7 月全月、8 月下旬至 9 月中旬和 10 月上旬期间, 发生洪水的概率在 85% 以上, 这些时间应以防汛为主, 4 月、5 月和 10 月下旬以后发生洪水的几率很小, 水库以蓄水为主。根据季节性变化规律, 结合短期水文气象预报, 分期控制水库运行水位既能保证防洪安全, 又能更好地利用洪水资源。

3) 洪水分类识别, 进行参照管理。

根据洪水分类, 综合考虑洪峰、最大 1 日、3 日、7 日洪量和洪水历时 5 个指标, 1960 年、1975 年、1983 年、2005 年、2010 年、2011 年属于同一类型的大水年份。现以 1983 年主汛期 6 月 21 日~7 月 31 日^[13]发生的场次洪水调度为例, 分析该类大洪水的常规调度和预报调度方案。从图 2 可知, 无论是常规调度方案还是预报调度方案, 其调洪最高水位均为 330.0 m, 均未超过 100 年一遇设计洪水位 330.0 m。在不降低防洪标准的前提下, 预报调度方案在涨水阶段(第 26 时段至 42 时段)可有效地抬高的发电水头以增加发电量, 在退水阶段(第 43 时段至 56 时段)提前把库水位降低至汛限水位以迎接下一场洪水的来临。实时调度过程, 可根据水雨情预报信息, 灵活的选择调度参照方案。

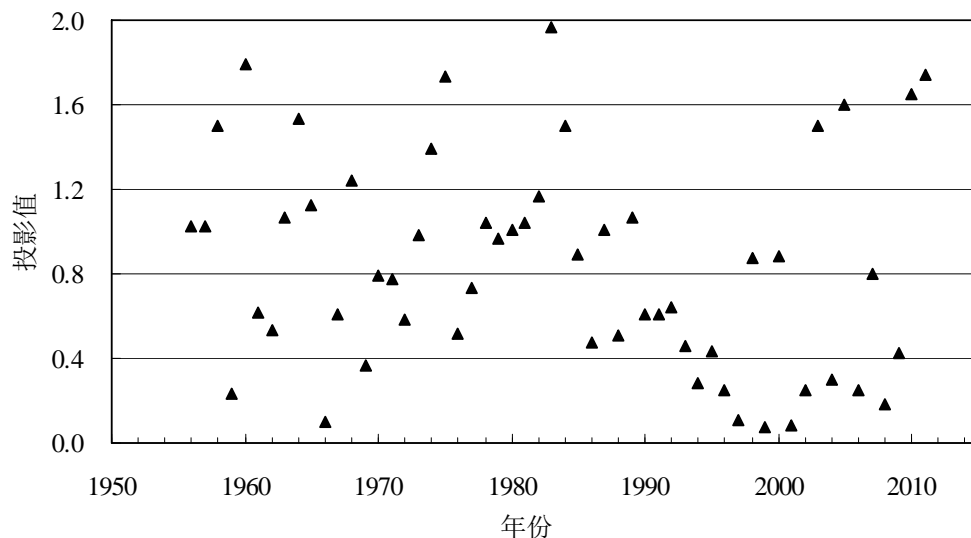


Figure 1. The scatter plots of flood comprehensive index projection value during 1956 to 2011
图 1. 安康水库 1956~2011 年洪水综合指标投影值散点图

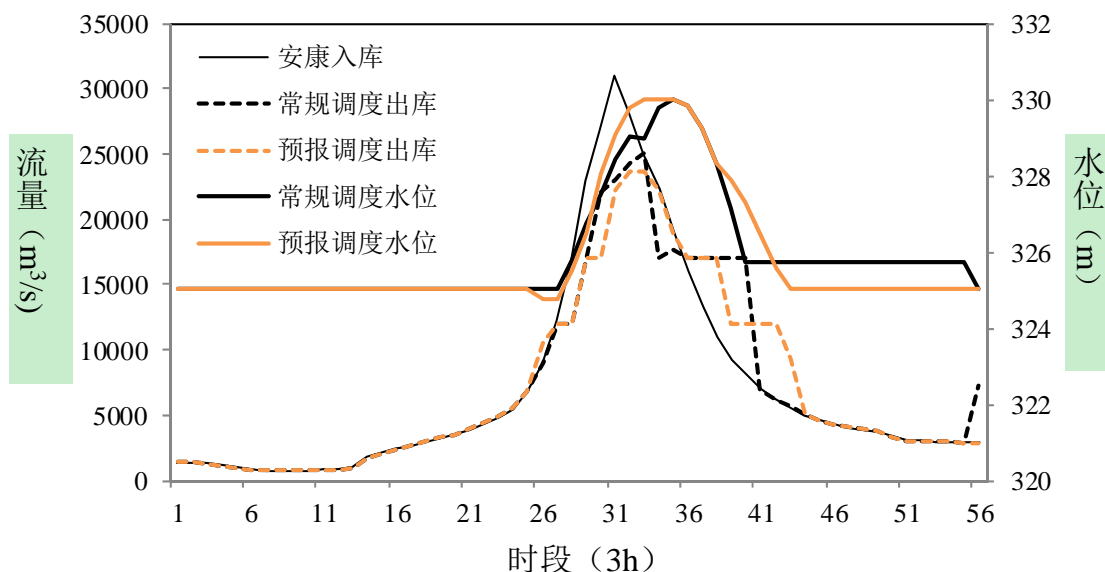


Figure 2. Operation process for large flood event of Ankang reservoir in 1983

图2. 安康水库1983年实测大洪水调度过程

4. 结论

传统方法对洪水分类仅考虑了洪水的单一指标,往往是洪峰流量或者历时洪量,与传统方法相比,投影寻踪法综合考虑多指标对洪水进行分类,能全面权衡洪水各要素对水库调洪结果的影响。本文以安康水库为例,对其入库洪水的时空分布规律进行分析,运用投影寻踪法对场次洪水进行分类,拟定了分类洪水调控方案,主要研究结论如下:

1) 提出洪水归类管理的措施:针对丰、平、枯水年采取不同的洪水调度措施;根据季节性变化规律,结合短期预报,分期控制水位。

2) 洪水分类识别,通过借鉴以往历史洪水的调控经验,给出了常规调度方案和预报调度方案,可为同类型洪水调度提供技术参照。

参考文献 (References)

- [1] 张灵, 陈晓宏, 翁毅等. 人工免疫算法在洪水分类中的应用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(5): 110-113.
ZHANG Ling, CHEN Xiaohong, WENG Yi, et al. Application of artificial immune network in flood classification. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(5): 110-113. (in Chinese)
- [2] 王本德, 张静. 水库防洪分类调度方式设计探讨[J]. 水力发电学报, 2008, 27(5): 16-22.
WANG Bende, ZHANG Jing. Discussion on classified dispatching mode of reservoir flood control. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(5): 16-22. (in Chinese)
- [3] FRIEDMAN, J. H., TURKEY, J. W. A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis. IEEE Transactions on Com-

- puter, 1974, C-23(9): 89-94.
- [4] JIN, J. L., WANG, Z. Z. and DING, J. Flood classification model based on projection pursuit. Research Basins and Hydrological Planning. Amsterdam: A. A. Balkema Publishers, 2004: 177-179.
- [5] 康爱卿, 邱林, 张亭. 基于投影寻踪的洪水分类和识别方法研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2009, 4(30): 6-8.
KANG Aiqing, QIU Lin and ZHANG Ting. Research of classification and recognition about flood based on the projection pursuit. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2009, 4(30): 6-8. (in Chinese)
- [6] 董前进, 王先甲, 艾学山等. 基于投影寻踪和粒子群优化算法的洪水分类研究[J]. 水文, 2007, 27(4): 10-14.
DONG Qianjin, WANG Xianjia, AI Xueshan, et al. Study on flood classification based on project pursuit and particle swarm optimization algorithm. Journal of China Hydrology, 2007, 27(4): 10-14. (in Chinese)
- [7] 汪丽娜, 陈晓宏, 李粤安等. 混合蛙跳算法和投影寻踪模型的洪水分类研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(2): 62-64.
WANG Lina, CHEN Xiaohong, LI Yuean, et al. Study on flood classification based on Shuffled frog leaping algorithm and projection pursuit model. Water Resources and Power, 2009, 27(2): 62-64. (in Chinese)
- [8] 刘玉邦, 梁川. 基于天气成因和主成分投影分析的暴雨洪水分级研究[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 98-104.
LIU Yubang, LIANG Chuan. Storm flooding grade based on cause and principal component projection analysis. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(1): 98-104. (in Chinese)
- [9] 王文圣, 李跃清, 秦宁生. 基于集对分析的洪水分类研究[J]. 高原山地气象研究, 2009, 29(1): 51-54.
WANG Wensheng, LI Yueqing and QIN Ningsheng. Study on flood classification based on set pair analysis. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2009, 29(1): 51-54. (in Chinese)
- [10] 任明磊, 王本德. 基于模糊聚类和BP神经网络的流域洪水分类预报研究[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(1): 121-127.
REN Minglei, WANG Bende. Research on classified flood forecast based on fuzzy clustering and BP neural networks. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(1): 121-127. (in Chinese)
- [11] WANG, S. J., ZHANG, X. L., YANG, Z. F., et al. Projection pursuit cluster model based on genetic algorithm and its application in Karstic water pollution evaluation. International Jour-

- nal of Environment and Pollution, 2006, 28(34): 253-260.
- [12] 金菊良, 杨晓华, 丁晶. 基于实数编码的加速遗传算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2000, 32(4): 20-24.
JIN Juliang, YANG Xiaohua and DING Jing. Real coding based acceleration genetic algorithm. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2000, 32(4): 20-24. (in Chinese)
- [13] 李妍清, 郭生练, 周研来等. 汉江安康水库流域汛期分期研究[J]. 水资源研究, 2013, 2(1): 64-69.
LI Yanqing, GUO Shenglian, ZHOU Yanlai, et al. Identification of flood seasonality for the Ankang reservoir basin. Journal of Water Resources Research, 2013, 2(1): 64-69. (in Chinese)