



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.003

梁忠民, 季俊杰, 卜慧, 等. 水汽风速放大计算可能最大暴雨方法[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 14-17, 24. LIANG Zhong min, JI Jur jie, BU Hui, et al. Study on moisture and wind maximization for probable maximum precipitation estimation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 14-17, 24. (in Chinese)

# 水汽风速放大计算可能最大暴雨方法

梁忠民<sup>1,2</sup>, 季俊杰<sup>1,3</sup>, 卜慧<sup>1</sup>, 刘甜<sup>1</sup>, 杨靖<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 水安全与水科学协同创新中心, 南京 210098; 3. 江苏省水利厅, 南京 210029)

**摘要:** 我国可能最大暴雨(PMP)计算中,通常采用两种放大方法,即水汽效率放大和水汽风速放大,但一般认为水汽风速放大成果不稳定,结果往往偏大,所以通常只作参考,最后基本上都选取水汽效率的放大结果作为最终的设计成果。借鉴港口工程设计中“风玫瑰图”概念,对传统水汽风速放大方法进行改进,即先根据研究区域常风向对实测风速资料进行风向分组,对每组风向的典型暴雨进行放大,再从中选取最大值作为水汽风速的放大成果,为PMP计算提供了一种新的思路。以湖北省咸宁核电厂为例进行了应用研究,并与水汽效率放大方法和传统水汽风速放大方法结果进行了比较,提供了更为合理的分析成果。

**关键词:** 可能最大暴雨 PMP; 水汽风速放大; 水汽效率放大; 风玫瑰图

**中图分类号:** P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0014-04

## Study on moisture and wind maximization for probable maximum precipitation estimation

LIANG Zhong min<sup>1,2</sup>, JI Jur jie<sup>1,3</sup>, BU Hui<sup>1</sup>, LIU Tian<sup>1</sup>, YANG Jing<sup>1</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. National Collaborative Innovation Center of Water Safety and Water Science, Nanjing 210098, China;

3. Department of Water Resources of Jiangsu Province, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Generally, moisture and efficiency factor maximization or moisture and wind maximization are two approaches used to estimate the probable maximum precipitation (PMP) in China. But only the value obtained from the moisture and efficiency factor maximization is used as the PMP estimation in most cases, because the moisture and wind maximization approach regularly overestimates and therefore is usually taken as reference only. This paper presents a modified moisture and wind maximization method based on the "Wind Rose Diagram" applied in port engineering. First, measured wind speed and direction data are grouped according to the direction of prevailing wind in the studied area. Then, the high efficiency storm in each group of wind direction is maximized. Finally, the maximum value among all groups is chosen to be the final result of moisture and wind maximization, that is PMP value. The new approach was tested on the Xianning nuclear power plant in Hubei Province, and generated a more reasonable PMP value compared with the traditional approaches.

**Key words:** probable maximum precipitation (PMP); moisture and wind maximization; moisture and efficiency factor maximization; Wind Rose Diagram

可能最大暴雨/洪水(PMP/PMF)作为重要水库大坝的防洪设计标准,在世界范围内开展了大量

的研究与应用<sup>[1]</sup>。1973年,世界气象组织(WMO)正式出版了可能最大降水估算手册<sup>[2]</sup>,随后分别于

收稿日期: 2016-06-17 修回日期: 2016-10-12 网络出版时间: 2017-01-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170103.2038.003.html>

基金项目: 国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项(2016YFC0402707; 2016YFC0402709)

Fund: The National Key Research and Development Program of China(2016YFC0402707; 2016YFC0402709)

作者简介: 梁忠民(1962-),男,辽宁凤城人,教授,博导,主要从事水文水资源方面研究。E-mail: zmliang@hhu.edu.cn

1986年和2009年对手册进行了修订完善<sup>[34]</sup>。我国开展PMP/PMF的研究始于20世纪50年代,“75·8”河南特大暴雨后,我国加快了PMP/PMF的研究和应用工作,其中,理论研究成果以詹道江和邹进上编著的《可能最大暴雨与洪水》<sup>[5]</sup>、王安安编著的《可能最大暴雨和洪水计算原理与方法》<sup>[6]</sup>最具代表性。目前,PMP/PMF已作为我国水利水电工程防洪设计的最高校核标准<sup>[7]</sup>,也是核电工程洪水的设防标准<sup>[8]</sup>。

近年来,国外学者在PMP的计算方法上取得了一些新进展。Chara等利用区域气候模式MM5模拟历史极端暴雨,并通过调整模型的初始及边界条件实现暴雨放大以推求PMP<sup>[9]</sup>;Ishida等采用MM5模式与相对湿度最大化相结合的途径,计算了北加利福尼亚三个小流域的PMP<sup>[10]</sup>;Beauchamp等采用加拿大区域气候模式CGCM计算了流域的可降水量<sup>[11]</sup>。

目前我国工程实际中的PMP计算方法包括水汽效率放大和水汽风速放大两类。相较而言,水汽效率放大法推求的PMP结果相对稳定,而水汽风速放大推求PMP,由于风速的日变化较大,最大风速与最小风速的比值通常也较大,往往导致根据最大比值进行典型暴雨放大估算PMP的计算结果也偏大<sup>[12-13]</sup>。所以,很多实际工程中都以水汽效率放大方法的结果为主,水汽风速放大方法结果通常仅作参考,限制了该方法的应用。水汽风速放大法结果偏大的原因,除了风速的日变化较大外,还由于该方法取所有方向上最大与最小风速的比值进行典型暴雨放大之故,而这种做法与一个地区实际的风向特点也不甚相符。本文借鉴海洋工程水文计算中“风玫瑰图”的概念<sup>[14]</sup>,先将一个地区的水汽风速资料按照常风向分为若干个主要的水汽入流方向,在每个方向上分别进行水汽风速的极大化及典型放大,再取所有方向数值中的最大值(即外包值)作为PMP的估算结果。以湖北咸宁核电厂PMP的估算为例进行了应用研究,通过与其它方法的对比分析,表明本文方法是合理可行的。

## 1 水汽风速放大推求PMP方法

### 1.1 传统的水汽风速放大方法

水汽风速放大方法分为按水汽 $W$ 和风速 $V$ 分别放大后再相乘,以及水汽入流指标(水汽与风速乘积 $VW$ )放大两种,但其基本假设是相同的,即认为降水 $P$ 与 $V$ 及 $W$ 具有正相关关系<sup>[5]</sup>,该方法的主

要步骤如下。

(1) 选取水汽入流方向,计算代表层风速。先根据流域气象条件规定水汽入流的大致方向,选取各气象站暴雨当天及前两天(具体选取时段视情况而定)的风向风速,合成每一天0h和12h两个时刻的风速,最后挑选出三天中合成风速最大且风向合理的风速作为典型暴雨的代表层风速 $V_d$ 。

(2) 计算代表性可降水量。选取水汽入流方向上的露点代表站暴雨当天及前两天(具体选取时段视情况而定)的露点资料,计算地面持续12h最大露点,并按饱和假绝热线化算到1000hPa,各站取平均即为代表露点,按此露点和流域平均高程推求典型暴雨可降水量 $W_d$ 。

(3) 水汽风速或水汽输送率放大推求PMP。水汽风速放大的极大化指标为 $V_m W_m$ ,水汽输送率放大的极大化指标为 $(VW)_m$ ,放大公式如下:

$$X_m = (V_m/V_d)(W_m/W_d)X_d = K_v K_w X_d \quad (\text{水汽风速放大}) \quad (1)$$

$$\text{或 } X_m = (VW)_m/(VW)_d X_d = K_{vw} X_d \quad (\text{水汽输送率放大}) \quad (2)$$

式中: $V_m$ 及 $V_d$ 为可能最大风速及典型暴雨的风速(m/s); $W_m$ 及 $W_d$ 为最大可降水量及典型暴雨可降水量(mm); $K_v$ 及 $K_w$ 为风速放大倍比及水汽放大倍比; $K_{vw}$ 为水汽输送率放大倍比。

### 1.2 改进的水汽风速放大方法

本文根据海岸工程中“风玫瑰图”的概念,提出一种改进的水汽风速放大计算PMP的思路。“风玫瑰图”也叫“风向频率玫瑰图”,它是根据某一地区多年平均统计的各个风向出现的频率,并按一定比例绘制,通常分为8个方向或16个方向,见图1。

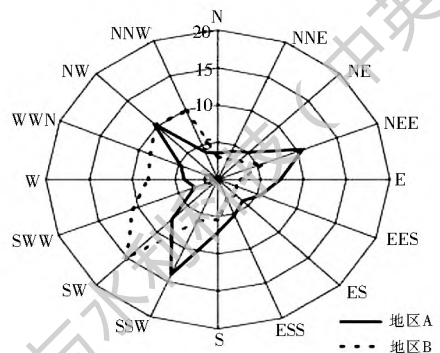


图1 风玫瑰图示意图

Fig. 1 Sketch map of the Wind Rose Diagram

现行的水汽风速放大推求PMP方法中,在利用公式(1)或(2)时,是由可能最大风速与所有方向上代表层风速中的最小风速相比,作为放大倍比,所以这个比值往往会很大,导致计算的

PMP 偏大。本文借鉴风玫瑰图概念, 提出先将实测场次暴雨按常风向进行分组, 划分成若干个水汽入流方向, 再在每个方向上分别选取极大化指标  $V_m W_m$  或  $(VW)_m$  进行放大, 最后再取各方向的外包值作为 PMP 的结果。由于实测场次暴雨资料中最大风速与最小风速出现在一个方向的概率较小, 使得计算的放大倍比不至于过大, 可以避免推算 PMP 结果过大现象。

## 2 应用实例

### 2.1 流域基本情况

#### (1) 基本情况。

咸宁核电厂位于湖北省咸宁市通山县大畈镇境内大坑村、官塘村附近的“狮子岩”, 坐落在富水水库中部北岸之滨。厂址位于富水流域, 富水为长江中游下段南岸一级支流, 流域地势西南高东北低。

#### (2) 暴雨及水汽来源。

研究区的暴雨一般多为涡切变暴雨, 也有冷锋和台风暴雨, 暴雨影响系统基本分为三类: 一是盛夏台风在副热带高压南缘西行影响湖北省, 二是低涡沿副高北缘的切变线东移造成暴雨, 三是蒙古槽由贝加尔湖带来北路冷空气结合低层低涡沿副高外围形成暴雨带。

据暴雨天气分析, 咸宁地区水汽来源及输送的形式主要包括: ① 西南季风。初夏时节, 槽前西南气流送来孟加拉湾的暖湿空气, 大暴雨常发生在鄂东和江汉平原东部; ② 东南水汽。盛夏, 由于东风带系统活动频繁, 水汽多来自东海, 暴雨区集中在鄂西; ③ 形成于东海或南海的台风裹挟大量水汽从我国东南沿海登陆, 一路向西北深入内陆到达核电厂所在区域, 并在地形作用下形成大暴雨。

因此, 可将研究区的水汽入流方向大致分为东南、南和西南三个方向, 见图 2。

### 2.2 资料选用

#### (1) 历年最大 24 h 雨量资料。

本次选取了选择暴雨资料完整、代表性较好、离厂址最近的官塘站作为控制站, 官塘站建站时间为 1973 年, 其附近的阳辛站(距官塘约 13 km)的建站年份比官塘站略早(但资料间断)。根据《水利水电工程设计洪水规范》(SL 44-2006), 当雨量站相距较近时, 可直接将邻站资料移用于设计站。因此, 将 1961 年-1972 年阳辛站资料移用于官塘站, 最终得到 1961 年-2013 年共 53 年的历年最大 24 h 雨量资料系列。设计流域雨量站位置及水系见图 3。

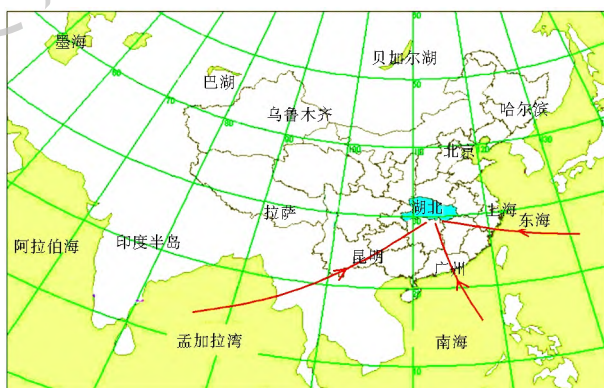


图 2 湖北省水汽入流方向示意图

Fig. 2 Sketch map of vapor inflow direction in Hubei Province

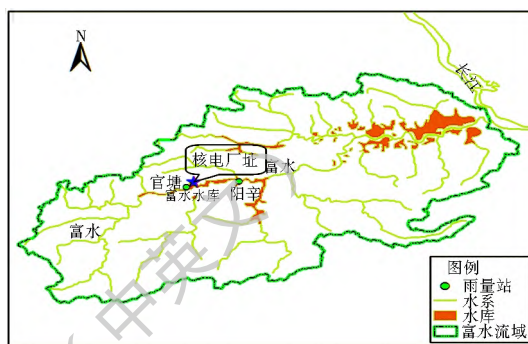


图 3 雨量站位置及流域水系

Fig. 3 Map of rainfall gauges and river network of the basin

#### (2) 气象资料。

高空气象站选取衢州、南昌、赣州、长沙和贵阳 5 个站, 选定项目包括 1961 年-2013 年的风向风速资料及 1961 年-1980 年的高空露点资料, 因核电厂厂址周围露点平均高程约为 85 m, 因此选取 850 hPa 高空的风向风速作为代表层资料。其中, 东南方向上的高空气象代表站是衢州站和南昌站, 正南方向上是南昌站和赣州站, 西南方向上是长沙站和贵阳站, 高空气象站分布见图 4。地面露点站选南昌、修水、宜春、岳阳和长沙 5 个站, 选定项目为 1980 年-2013 年的地面露点, 其中, 东南方向上的代表站是南昌站, 正南方向上是修水站和宜春站, 西南方向上是岳阳站和长沙站, 地面露点站分布见图 5。

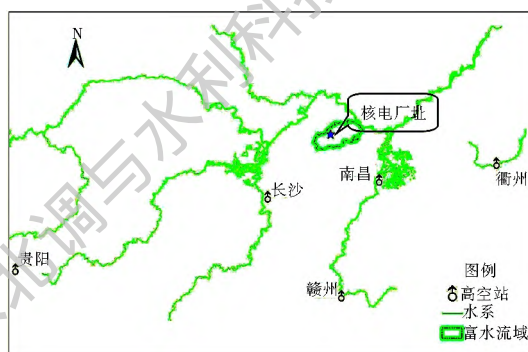


图 4 厂址流域高空气象站分布

Fig. 4 Map of upper air meteorological stations in the basin

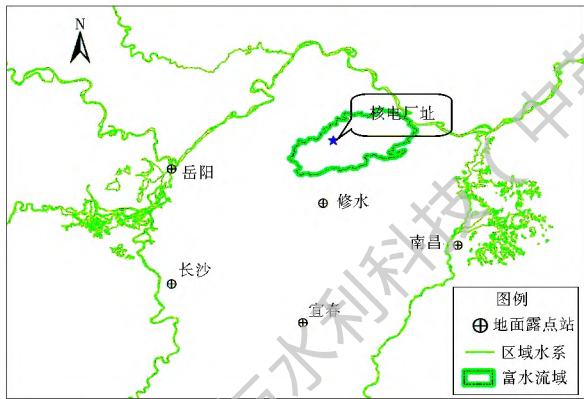


图5 厂址流域地面露点站分布

Fig. 5 Map of ground dew point stations in the basin

## 2.3 水汽风速放大推求 PMP

(1) 代表露点和最大可降水计算。

计算持续 12 h 最大露点, 按饱和假绝热化算到 1 000 hPa, 在水汽入流方向上各站取平均, 即为各场降雨的代表露点。由于露点比较稳定, 一般在 30 年以上记录中的持续最大露点所相应的水汽含量就接近 PMP 时的水汽含量。所选择的地面气象站南昌、修水、宜春、岳阳、长沙均具有 30 年以上的地面露点资料, 从各站历年 1000 hPa 露点资料中选取持续 12 h 最大  $T_{dm}$ , 南昌站为 28.1 °C、修水站为 26.6 °C、宜春站为 27.2 °C、岳阳站为 27.9 °C、长沙站为 27.8 °C, 均小于本流域的水汽源地西太平洋的海洋表面水温。考虑工程安全, 故可能最大露点取六站的最大值  $T_{dm} = 28.1$  °C, 按此露点计算出咸宁核电厂厂址周围露点平均高程 85 m 至 12 000 m 高空的可降水 101.7 mm, 即为最大可降水  $W_m$ 。

(2) 代表层风速及水汽风速放大推求 PMP。

根据前述分析, 咸宁核电厂所在地区的水汽入流共分为东南、正南和西南三个方向, 在每个方向上分别逐年确定年最大 24 h 暴雨当天、前 2 d 共 72 h, 0 时和 12 时的合成风速, 再从多年风速系列中选取最大值作为该方向的历史最大风速。由于本次的资料系列较长(53 年), 可以将历史最大风速近似作为该方向上的可能最大风速。据此, 可以求得各水汽入流方向上的可能最大风速。

分别选取极大化指标  $V_m W_m$  和  $(VW)_m$ , 按传统水汽风速放大方法和本文的改进方法推求咸宁核电厂可能最大 24 h 暴雨, 计算结果见表 1。

结果表明, 改进的水汽风速或水汽输送率放大方法计算的 PMP 比传统方法的结果降低较多。根据频率分析结果, 咸宁核电厂址 24 h 万年一遇设计暴雨为 505.5 mm, 本文改进方法推求的可能最大 24 h 暴雨为 576.7 mm, 其与万年一遇的比值为

1.14, 该比值与我国大部分地区 PMP 与万年一遇比值介于 1.1~1.2 的认识较为一致; 而根据水汽效率放大方法推求的 24 h PMP 成果为 391 mm, 小于万年一遇设计值。因此, 建议采用改进的水汽输送率放大计算的 PMP 结果作为当地暴雨放大法的 PMP 成果, 即 24 h PMP 为 576.7 mm。当然, 咸宁核电厂址最终 PMP 值还需结合移置暴雨放大后综合确定。

表 1 水汽风速放大方法推求 24 h PMP 结果

Tab. 1 Results of 24h PMP estimated by moisture and wind maximization method

放大方法	传统水汽风速放大方法	改进的水汽风速放大方法 (按水汽入流方向)		
极大化指标	$V_m W_m$	$(VW)_m$	$V_m W_m$	$(VW)_m$
可能最大 24 h 暴雨 PMP/mm	1 035	721.9	823.6	576.7

## 3 结论

本文借鉴“风玫瑰图”的概念, 对可能最大降水 PMP 计算中的水汽风速放大方法进行改进。先根据暴雨天气系统形成机制, 确定研究区的主要水汽入流方向, 并对实测场次暴雨资料进行水汽入流方向分组; 在每个水汽入流方向上, 分别确定水汽风速放大指标  $V_m W_m$  或  $(VW)_m$ , 再取各方向上的最大值以推求 PMP。由于是先在各水汽入流上进行极大化然后再取外包, 所以改进方法可避免目前水汽风速方法结果往往偏大的问题。在湖北咸宁核电厂的应用表明, 本文方法推求的结果与目前相应方法相比, 更具合理性。

采用水汽风速放大推求 PMP, 其前提条件是降水量与风速或水汽输送率应具有正相关关系, 但在实际工作中这种正相关达到多大时才能使用水汽风速方法, 尚无定论, 需要对相关问题进行深入研究, 以提高 PMP 计算的可靠性。

### 参考文献(References):

- [1] 王国安. 国内外 PMP/PMF 的发展和实践[J]. 水文, 2004, 24(5): 59, 47. (WANG Guo an. Worldwide development and practice of PMP/PMF[J]. Journal of China Hydrology, 2004, 24(5): 59, 47. (in Chinese))
- [2] World Meteorological Organization (WMO). Manual for estimation of probable maximum precipitation[M]. Geneva. No. 332, 1973.
- [3] World Meteorological Organization (WMO). Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation[M]. 2nd Edition, Geneva. No. 332, 1986.

(下转第 24 页)

- nal of Nature, 2016, 03: 167-176. (in Chinese))
- [10] 吴绍洪, 罗勇, 王浩, 等. 中国气候变化影响与适应: 态势和展望[J]. 科学通报, 2016(10): 1042-1054. (WU Shaohong, LUO Yong, WANG Hao, et al. Climate change impacts and adaptation in China: current situation and future prospect[J]. Chinese Science Bulletin, 2016(10): 1042-1054. (in Chinese))
- [11] Herrera Pantoja M, Hiscock K M. Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi arid region of central Mexico[J]. Environmental Science & Policy, 2015, (54): 81-89.
- [12] 左其亭, 毛翠翠. 人水关系的和谐论研究[J], 中国科学院院刊, 2012, 27(4): 469-477. (ZUO Qiting, MAO Cuicui. Research on the harmony theory method of human water relationship[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(4): 469-477. (in Chinese))
- [13] 左其亭, 赵衡, 马军霞. 水资源与经济社会和谐平衡研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 785-792. (ZUO Qiting, ZHAO Heng, MA Junxia. Study on harmony equilibrium between water resources and economic society development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 785-792.
- [14] 左其亭, 李可任. 最严格水资源管理制度理论体系探讨[J], 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 13-18. (ZUO Qiting, LI Keran. Discussion on theoretical system of the strictest water resources management system[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 13-18.
- [15] 左其亭. 水生态文明建设几个关键问题探讨[J], 中国水利, 2013, (4): 1-3, 6. (ZUO Qiting. Discussions on key issues of water ecological civilization construction[J]. China Water Resources, 2013, (4): 1-3, 6. (in Chinese))
- [16] 崔国韬, 左其亭, 窦明. 国内外河湖水系连通发展沿革与影响分析[J], 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 73-76. (CUI Guotao, ZUO Qiting, DOU Ming. Development evolution and influences of the interconnected river system network at home and abroad [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 73-76.
- [17] 左其亭, 崔国韬. 河湖水系连通理论体系框架研究[J], 水电能源科学, 2012, 30(1): 1-5. (ZUO Qiting, CUI Guotao. Study on theoretical system and framework of interconnected river system network [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(1): 1-5. (in Chinese))

(上接第 17 页)

- [4] World Meteorological Organization (WMO). Manual for estimation of probable maximum precipitation[M]. Geneva. No. 1045, 2009.
- [5] 詹道江, 邹进上. 可能最大暴雨与洪水[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (ZHAN Daojiang, ZOU Jinshang. Probable maximum precipitation and flood[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983. (in Chinese))
- [6] 王国安. 可能最大暴雨和洪水计算原理和方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 郑州: 黄河水利出版社, 1999. (WANG Guoan. Principles and methods of PMP/PMF calculations[M]. Beijing: China Water & Power Press, Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 1999. (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国水利部.《防洪标准》GB50201-94[M]. 北京: 中国计划出版社, 1994. (The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Flood control standard GB50201-94 [M]. Beijing: China Planning Press, 1994. (in Chinese))
- [8] 国家核安全局. 滨河核电厂厂址设计基准洪水的确定 HAD101/08, 核安全导则汇编 (上册) [M]. 北京: 中国法制出版社, 2000. (National Nuclear Safety Administration. The design basis flood Determination of Riverside Nuclear Power Plant site HAD101/08, Nuclear Safety Guide compilation (Vol 1)[M]. Beijing: China Legal Publishing House, 2000. (in Chinese))
- [9] N Ohara, M L Kavvas, S Kure, et al. Physically based estimation of maximum precipitation over American river watershed [J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2011, 16(4): 351-361.
- [10] K Isida, M L Kavvas, S Jiang, et al. Physically Based Estimation of Maximum Precipitation over Three Watersheds in Northern California: Relative Humidity Maximization Method [J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2015, 10. 1061/(ASCE)HE. 1943-5584. 0001175, 04014052.
- [11] J Beauchamp, R Leconte, M Trudel, et al. Estimation of the summer-fall PMP and PMF of a northern watershed under a changed climate [J]. Water Resources Research. 2013, 49(6): 3852-3862.
- [12] 华家鹏, 杨辉, 王达雨, 等. 江坪河水电站可能最大暴雨研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004(5): 523-525. (HUA Jiapeng, YANG Hui, WANG Danyu, et al. Study on probable maximum storm at Jiangping River hydropower station [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004(5): 523-525. (in Chinese))
- [13] 梁忠民, 钟平安, 华家鹏. 水文水利计算 (第 2 版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (LIANG Zhongmin, ZHONG Pinnan, Hua Jiapeng. Hydrological design and water conservancy calculation (Second Edition) [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008. (in Chinese))
- [14] 邱大洪. 工程水文学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999. (QIU Dahong. Engineering Hydrology [M]. Beijing: China Communications Press, 1999. (in Chinese))