

基于水位历时曲线的城镇化对区域水文过程影响分析

——以太湖流域河网水位变化为例

尹义星^{1,2,3}, 许有鹏³, 陈昌春⁴, 杨秀芹², 焦士兴⁵

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 南京信息工程大学 应用水文气象研究院, 江苏 南京 210044; 3. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210093; 4. 南京信息工程大学 遥感学院, 江苏 南京 210044; 5. 安阳师范学院 资源环境与旅游学院, 河南 安阳, 455002)

摘要:以太湖流域为例,采用水位历时曲线(LDC)的方法,探讨以城镇化为代表的下垫面变化条件下区域河网水位的变化规律。从各年代 LDC 曲线分析结果来看,20 世纪 80、90 年代是其坡度较高的年代。进一步将研究时间段分为 50—70 年代和 1980—2006 年,并选择其中平水年进行分析。结果表明,各站点 1980—2006 年的 LDC 曲线坡度均大于 50—70 年代,且后者的 LDC 曲线均位于前者上部。同时,2 个时段的水位变化量在高水位端更显著,而在低水位端变化量最小。研究区降水量与代表站点水位的趋势分析表明,平均水位的显著上升与降水变化趋势不一致。分析认为,上述结果主要是由于城镇化的影响,即下垫面条件变化造成水位历时曲线坡度增加,水位变化对降水的响应速度加快,且高水位的上升更显著。

关键词: 水位历时曲线; 城镇化; 水位; 太湖流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0091-04

中图分类号: P343

An Analysis of Effects of Urbanization on Regional Hydrological

Processes Based on Water Level Duration Curve

—A Case Study of Water Level Changes in the River Network of Taihu Lake Basin

YIN Yi-xing^{1,2,3}, XU You-peng³, CHEN Chang-chun⁴, YANG Xiu-qin², JIAO Shi-xing⁵

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Applied Hydrometeorological Research Institute, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China; 3. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China; 4. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China; 5. Department of Resource, Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang, He'nan 455002, China)

Abstract: This paper explores the water level changes of river networks under the changes of underlying surfaces represented by urbanization based on water level duration curve(LDC) method, taking the Taihu Lake basin as an example. According to the result from LDC analysis, the LDC slope of the 1980s and 1990s is steeper than the other decades. Then the study period is divided into two periods: 1950s—1970s and 1980s—2000s, and normal years are selected to make further investigation. Results indicate that the LDC slopes of all the gauges in the 1980s—2000s are steeper than those in the 1950s—1970s, and the LDCs of the former are also above those of the latter. What's more, the relative variations between the two periods are significant in the high water level end, and the variations are the least in the low water level end. Analyses of the precipitation and water level trend in the study area indicate that the significant increase of average water level is not consistent with the trend of precipitation. It is concluded that the above results are due to the influences of urbanization, i. e., changes of underlying surfaces cause the slope of LDC to increase, thus the changes of water levels respond more quickly to rainfall, and the high water levels increase more significantly as well.

Keywords: water level duration curve; urbanization; water level; Taihu Lake basin

收稿日期: 2012-01-03

修回日期: 2012-06-20

资助项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目“改善长江三角洲地区水系结构与河湖连通研究”,“长江三角洲地区城市化对洪涝孕灾环境的影响研究”(201201072, 200701024); 国家自然科学基金重点项目(40730635); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金项目(2011491111); 南京信息工程大学科研基金项目(20100406); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

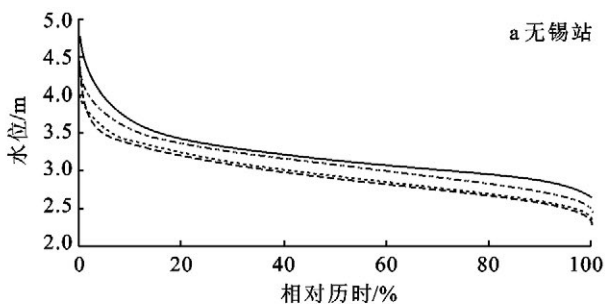
作者简介: 尹义星(1974—),男(汉族),安徽省和县人,博士,讲师,主要从事变化环境下的水文水资源、流域洪涝灾害、水文气象方面的研究。
E-mail: yinyx@nuist.edu.cn.

流量/水位历时曲线是依据时段内所出现的流量或水位值及其历时(或相对历时)绘制而成的,反映流量或水位序列统计特征的一种分布曲线。流量/水位历时曲线较直观地反映了整个记录时段流域径流/水位的变化特征,是流域日径流/水位累积分布函数的补充^[1],长期以来被用于综合反映流域的水文响应特征。Best 等^[2]指出流量历时曲线(flow duration curve, FDC)是反映不同土地利用情景下流量是如何变化的简便方法之一,David^[3]在一个缺测流域进行了 FDC 的区域化研究,研究发现显著的下垫面条件变化,如建造大坝等,对 FDC 具有明显的影响,因此,FDC 曲线可以用作流域土地利用变化等的一个指示性工具。

太湖流域是我国经济最发达的地区之一,城镇化率已达 73%,城镇化发展已经对区域水文过程造成了深刻的影响。在城镇化背景下,太湖流域下垫面和河网水系均发生了显著的变化。城镇化造成流域不透水面积大量增加,进而造成产水量增加、汇流加快,因此河网水位上升,汛期水位时常居高不下。城镇化的流域与一个类似的没有进入城镇化阶段的流域相比较,其流量/水位历时曲线的高流量/水位更高,反映其暴雨洪水条件变化;低流量/水位则更低,体现其基流情势。本文采用水位历时曲线(LDC, water level duration curve)方法对太湖流域核心区城镇化下的水位过程进行分析,以探求城镇化背景下的区域河网水位过程变化特征。

1 方法与数据

流量/水位历时曲线可以看作累积分布函数的互补函数的反函数,其可以表达为^[4]:



$$L_p = F^{-1}(q) \quad (1)$$

$$q = 1 - p \quad (2)$$

式中: L_p ——超过概率为 p (即第 p 个分位数)或相对历时为 p 的流量/水位; $F(q)$ ——相应的累积分布函数; $F^{-1}(q)$ —— $F(q)$ 的反函数。历时曲线的形状由降水特征、流域面积、流域自然地理特征等所决定^[5-6],其形状同时也受水资源管理和土地利用类型变化的影响^[7]。平缓的 LDC 曲线表明径流/水位变化幅度较小(对降水的响应较缓慢),而陡峭的 LDC 曲线则表明径流/水位变化幅度大(对降水的响应快)^[8]。该方法近年来被大量应用于度量气候变化和土地利用变化下的流量变化^[8-10]。

以位于太湖流域核心地区的武澄锡虞和阳澄淀泖 2 个水利分区为例,分析城镇化发展对河网水位变化的影响规律。采用数据为代表水位站点(无锡、常州、常熟、湘城)1954—2006 年的逐日水位资料,以及研究区 16 个均匀分布的雨量站点(常州、陈墅、青旻、无锡、江阴、张家港、望虞、常熟、浏河闸、平望、洞庭西山、苏州、望亭、吴淞、湘城和周巷)1954—2006 年逐日降水量数据。

2 结果与分析

2.1 不同年代水位历时曲线

图 1 为无锡和常熟站 20 世纪 60—90 年代的水位历时曲线,反映了各年代河网水位高低的基本特征:90 年代的曲线均位于其他年代之上,其次为 80 年代,再次为 60 年代,而 70 年代的水位历时曲线基本位于最下面。这样的水位历时曲线与研究区 60 年代以来的降水量特征是一致的:90 年代最高,80 年代次之,而 70 年代降水量最低^[11]。

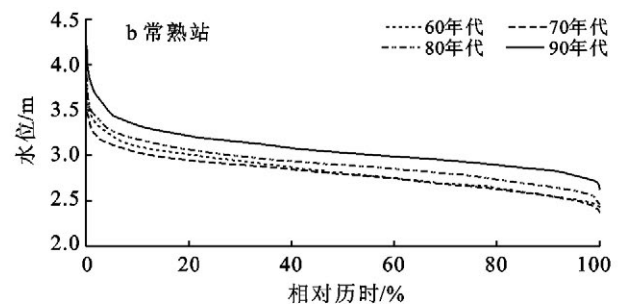


图 1 无锡和常熟站 20 世纪各年代水位历时曲线

图 2 以无锡、常州和常熟站为例,列出各年代水位历时曲线的特征值。其中 50 年代数据自 1954 年起,21 世纪数据截止于 2006 年(常州站截止于 2005 年)。一般地, L_{95} (相对历时 95% 的水位)可以反映水位的可靠性,而 L_{05} (相对历时 5% 的水位)可以作为

高水位的一个指标, L_{05} 和 L_{95} 一起可以反映历时曲线的坡度(坡度反映曲线的陡峻或平缓程度,曲线越陡峻,坡度越大),即水位对降水的响应特征^[12]。这里以 L_{50} (相对历时 50% 的水位)反映常水位, L_{05} , L_{01} 反映高水位, L_{95} , L_{99} 反映低水位。

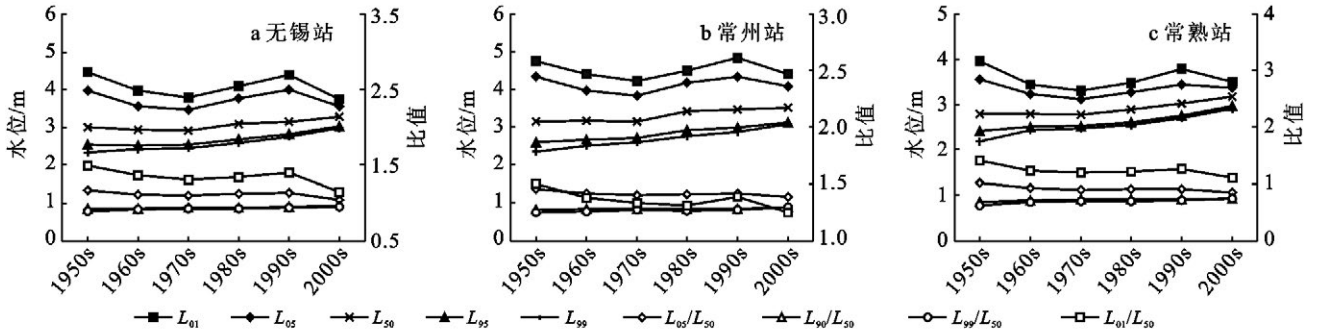


图 2 不同年代代表站点水位历时曲线的特征

图 2 显示,各年代的常水位变化趋势基本是上升的(70 年代略有下降),2000—2006 年最高;低水位在各年代的变化趋势几乎是始终上升的,且也是以 2000—2006 年为最高;高水位的变化趋势是:高一低一高一低,以 90 年代为最高(无锡和常熟 50 年代的 L_{01} 略高于 90 年代)。从 L_{05}/L_{50} 和 L_{95}/L_{50} (或 L_{01}/L_{50} 和 L_{99}/L_{50}) 的比值可以大致判断各年代历时曲线坡度的变化:若 L_{05}/L_{50} (或 L_{01}/L_{50}) 比值较高而 L_{95}/L_{50} (或 L_{99}/L_{50}) 的比值较低,则曲线就越陡峻,其坡度就较大。图 2 中,各站水位历时曲线的特征值从 1950—2006 年, L_{01}/L_{50} 和 L_{05}/L_{50} 比值先下降,至 80,90 年代上升,21 世纪初又下降;而 L_{99}/L_{50} 和 L_{95}/L_{50} 比值从 1950—2006 年基本为很弱的上升。因此初步认为 50,80,90 年代是水位历时曲线坡度较高的年代。

2.2 平水年水位历时曲线

为消除丰、平、枯水年之间的降水差异对分析结果可能造成的影响,下面仅采用平水年的数据进行分析。根据研究区 1954—2006 年各雨量站年降雨量资料,采用算术平均法计算全流域年平均面雨量。进一步进行频率分析,得到设计频率为 75% 和 25% 的面雨量,然后划分降水丰、平、枯水年(枯水年频率 $\geq 75\%$, 丰水年频率 $\leq 25\%$, $25\% <$ 平水年频率 $< 75\%$),从而将各站对应的日水位资料也划分为丰、

平、枯 3 个时期。具体划分结果为:丰水年包括 1954, 1956,1957,1960,1962,1975,1977,1985,1987,1989, 1991,1993,1999,2001,2002 年;平水年包括 1955, 1958,1959,1961,1963,1964,1965,1966,1970,1972, 1973,1974,1976,1980,1981,1983,1984,1986,1990, 1995,1996,1998,2000,2004,2005,2006 年;枯水年包括 1967,1968,1969,1971,1978,1979,1982,1992, 1994,1997,2003 年。

将研究时间段分为 20 世纪 50—70 年代和 1980—2006 年,分别选择其中的平水年(消除降水因素对曲线的影响)进行水位历时曲线的分析和比较,并进一步计算 1980—2006 年水位相对 20 世纪 50—70 年代的变化量。常熟、无锡和湘城站的结果见图 3。各站点 50—70 年代的 LDC 曲线坡度均小于 1980—2006 年(后一阶段的历时曲线,在高水位端比前一阶段更高,低水位则相差不大),因此在 1980—2006 年的水位变化对降水的响应更快;1980—2006 年 LDC 曲线均位于 20 世纪 50—70 年代的上部(即其水位总体上高于 50—70 年代)。同时,从 2 个时段的水位变化量来看,在高水位端变化量更显著,而在低水位端变化量最小。由于本文剔除了降水变化的影响,上述结果可以认为主要是城镇化的影响,即下垫面变化造成水位变化对降水响应加快,因此水位历时曲线坡度增加,且高水位的上升更显著。

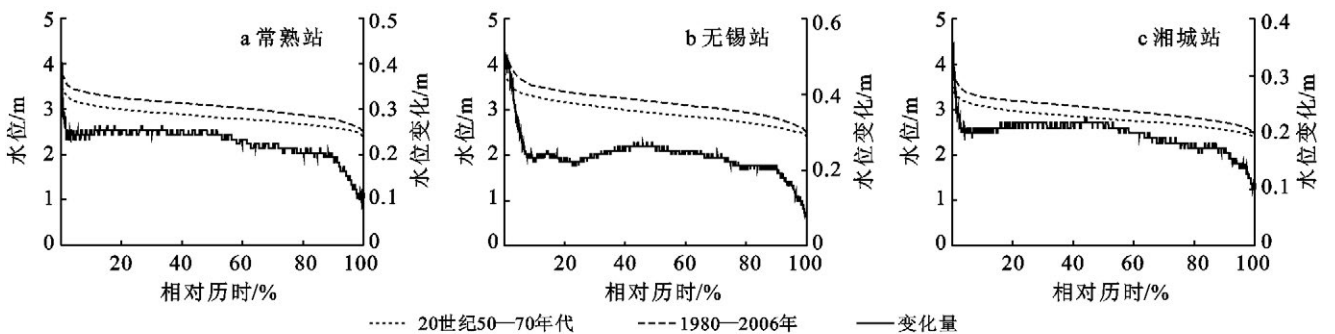


图 3 代表站点不同时期水位历时曲线对比

由对不同年代水位历时曲线的分析可知,50,80 和 90 年代是水位历时曲线坡度较高的年代,但没有消除

降水因素的影响,结合本节的结果综合来看,80 和 90 年代是水位历时曲线坡度较高的年代,反映下垫面在

城镇化影响下对降水的响应最为迅速。同时,在剔除降水变化影响的情况下,各站 1980—2006 年的 LDC 曲线坡度均大于 50—70 年代,证实了城镇化造成水位历时曲线坡度增加,且造成高水位端上升更显著。

2.3 降水和水位对比

进一步对比研究区降水和代表站(无锡和常熟站)水位的变化趋势,验证城镇化对水位上升的影响。采用参考文献[13]提出的改进 MK 检验方法,得到研究区历年面雨量的 Z 统计量为 -0.35 ,即存在微弱的下降,未达到显著性水平;而无锡站年平均水位的 Z 统计量为 3.21 ,常熟站为 3.24 ,上升趋势均达到了 0.01 显著性水平(2 站平均水位均进行了预置白处

理,具体方法见参考文献[13])。

由图 4 可进一步看到,研究区年降雨量 50 年代曾上升,此后下降,在 60 年代末、70 年代初下降达到 0.05 显著性水平,90 年代末年雨量略有上升,但远未达到显著性水平。无锡和常熟 2 站年平均水位在 50 年代至 60 年代初均上升,后有短暂下降,80 年代后大幅度上升,均远远超过 0.05 显著性水平。同时,从 UF 和 UB 曲线相交点可以看出,2 站平均水位序列均在 80 年代初发生了突变,而年雨量没有发生突变。因此,研究区水位变化在趋势与突变特征上与降水存在很大差异,城镇化为代表的人类活动应该是水位上升的重要因素。

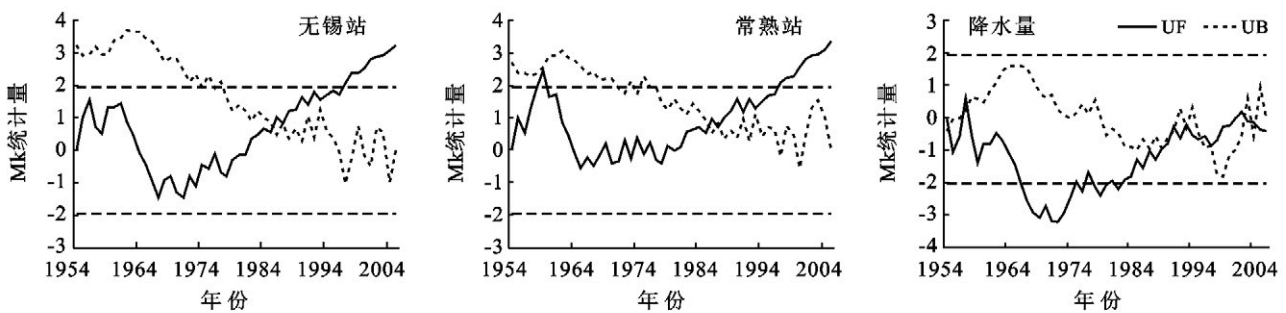


图 4 研究区年降水量和代表站年平均水位 MK 检验结果

3 结论

在观测数据足够丰富的情况下,流量/水位历时曲线可较充分地反映流量或水位的分布特征。该曲线可以反映城镇化下水位或流量的变化特征,也可以反映未来不同土地利用规划情景下,水位或流量是如何变化的。本文采用水位历时曲线的方法,探讨太湖流域以城镇化为代表的下垫面变化条件下的河网水位过程变化。从分析结果来看,80 和 90 年代是 LDC 曲线坡度较高的年代。同时,各站点 1980—2006 年的 LDC 曲线坡度均大于 50—70 年代,且 1980—2006 年 LDC 曲线均位于 50—70 年代的上部。此外,从 2 个时段的水位变化量来看,在高水位端变化量更显著,而在低水位端变化量最小。由于本文分析中剔除了降水变化的影响,上述结果可以认为主要是城镇化的影响,即下垫面变化造成水位变化对降水的响应速度加快,因而水位历时曲线坡度增加。同时,研究区降水和代表站水位的变化趋势对比也表明,水位上升与降水趋势不一致,城镇化是水位上升的重要因素。

需要说明的是,区域水文过程是众多因素交织作用下的综合结果,太湖流域内影响区域水文过程以及河网水位的人类活动十分广泛,除了影响最为普遍和深刻的城镇化因素以外,尚有水利工程、河网水系变

化、圩区建设、湖泊围垦、开采地下水等等。本文重点探讨的是以城镇化为代表的人类活动对河网水位过程的影响,但实际上区域河网水位受河网水系演变、水利工程的影响也较大,未来在进一步获取水利调度等方面资料的情况下,可以进行综合分析以提高分析的精度。

[参 考 文 献]

- [1] 穆兴民,高鹏,巴桑赤烈,等.应用流量历时曲线分析黄土高原水土保持措施对河川径流的影响[J].地球科学进展,2008,23(4):382-389.
- [2] Best A E, Zhang Lu, McMahon T A, et al. Development of a model for predicting the changes in flow duration curves due to altered land use conditions[C]//Post D A. MODSIM 2003 International Congress on Modelling and Simulation. Townsville, Australia, Canberra, MSSANZ, 2003:861-866.
- [3] David A P. A new method for estimating flow duration curves; An application to the Burdekin River Catchment, North Queensland, Australia[C]// Complexity and integrated resources management. iEMSs 2004 International Congress, Pahl-Wostl C, Schmidt S & Jakeman T(ed). International Environmental Modelling and Software Society, University of Osnabrück, Germany, 2004:1195-2000.

(下转第 258 页)

- [4] 杭州大学化学系分析化学教研室. 分析化学手册(第二分册): 化学分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 1982.
- [5] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [6] 孟蕾, 程积民, 杨晓梅. 黄土高原子午岭人工油松林碳储量与碳密度研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 133-137.
- [7] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 等. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J]. 北京林业大学学报, 2002(6): 96-100.
- [8] 魏文俊, 王兵, 李少宁. 江西省森林植被乔木层碳储量与碳密度研究[J]. 江西农业大学学报, 2007, 29(5): 767-772.
- [9] 魏文俊, 尤文忠, 张慧东, 等. 辽宁省落叶松人工林生物量碳库特征[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(6): 26-29.
- [10] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 966-975.
- [11] 黄从德, 张健. 退耕还林地在植被恢复初期碳储量及分配格局研究[J]. 水土保持学报, 2007(4): 130-133.
- [12] 贾宇平, 苏志珠, 段建南. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳空间变异[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 31-34.
- [13] 李忠武, 郭旺, 王晓燕, 等. 南方红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征及其与草本生物量的关系[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 867-874.
- [14] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 469-476.
- [15] 彭守璋, 赵传燕, 郑祥霖, 等. 祁连山青海云杉林生物量和碳储量空间分布特征[J]. 应用生态学报[J], 2011, 22(7): 1689-1694.
- [16] 杨万勤, 冯瑞芳. 中国西部 3 个亚高山森林土壤有机层和矿物质碳储量和生化特性[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4157-4165.
- [17] 田玉强, 欧阳华, 徐兴良, 等. 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 933-942.
- [18] 曹吉鑫, 孙向阳, 高程达, 等. 宁夏贺兰山三种植被下土壤有机碳密度的比较[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1641-1644.
- [19] 田连恕, 江源. 贺兰山的灰榆林与灰榆疏林草原[J]. 宁夏大学学报, 1992, 13(1): 63-70.
- [20] 王祖华, 刘红梅, 关庆伟, 等. 南京城市森林生态系统的碳储量和碳密度[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(4): 18-22.
- [21] 邓蕾, 上官周平. 秦岭宁陕县森林植被碳储量与碳密度特征[J]. 西北植物学报, 2011, 31(11): 2310-2320.

(上接第 94 页)

- [4] Shao Quanxi, Zhang Lu, Chen Yongqin, et al. A new method for modelling flow duration curves and predicting streamflow regimes under altered land-use conditions[J]. Hydrological Sciences Journal, 2009, 54(3): 606-622.
- [5] Vogel R M, Fennessey N M. Flow-duration curves: I. New interpretation and confidence intervals[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1994, 120(4): 485-504.
- [6] Vogel R M, Fennessey N M. Flow duration curves: II. A review of applications in water resources planning [J]. Water Resources Bulletin, 1995, 31(6): 1029-1039.
- [7] Smakhtin V U. Generation of natural daily flow time-series in regulated rivers using a non-linear spatial interpolation technique [J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1999, 15(4): 311-323.
- [8] Junaid A P. Evaluation of low flow estimation techniques for ungauged catchments[J]. Water and Environment Journal, 2007, 21(1): 41-46.
- [9] Brown A E, Zhang Lu, McMahon T A, et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation[J]. Journal of Hydrology, 2005, 310(1/4): 28-61.
- [10] Lane P N J, Best A E, Hickel K, et al. The response of afforestation on flow duration curves[J]. Journal of Hydrology, 2005, 310(1/4): 253-265.
- [11] 耿玉琴. 太湖流域降雨时空分布规律分析[J]. 海河水利, 2003(3): 33-35.
- [12] Sene K J, Marsh T J, Hachache A. An assessment of the difficulties in quantifying the surface water resources of Lebanon[J]. Hydrological Sciences Journal, 1999, 44(1): 79-96.
- [13] 尹义星, 许有鹏, 陈莹. 太湖流域典型区 50 年代以来极值水位时空变化研究[J]. 地理研究, 2011, 30(6): 1077-1088.