

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.006

长江流域径流对气候变化响应的定量分析

荣艳淑¹, 魏佳¹, 陈虎², 徐征光¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江西省上饶水文局, 江西 上饶 334000)

摘要:以长江流域 1961—2010 年的降水、气温、相对湿度和日照时数作为基本气候要素, 分析大通径流量与气候要素的相关关系, 并对径流量对长江流域气候变化的响应进行了分析。结果表明: 大通径流量对长江中下游区域的气候变化很敏感, 径流量对降水量的响应最强烈, 径流量对相对湿度、气温和日照时数的响应仅为对降水量响应的 1/2、1/4 和 1/39; 当气候要素耦合且同向变化时, 径流量对任何单一气候要素变化的响应都小于对多要素耦合变化响应程度; 但是, 当气候要素耦合且反向变化时, 径流量对任何单一气候要素变化的响应都大于对多要素耦合变化响应程度, 耦合的气候要素越多, 这种效应越显著。

关键词:径流量; 气候要素; 耦合变化; 长江流域

中图分类号: P339 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2015)06-0040-05

Quantitative analysis on the response of runoff to climate change in Yangtze River Basin

RONG Yanshu¹, WEI Jia¹, CHEN Hu², XU Zhengguang¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Hydrological Bureau of Shangrao, Shangrao 334000, China)

Abstract: Taking precipitation, temperature, relative humidity and sunshine duration in Yangtze River Basin during the year of 1961–2010 as the basic climatic elements, the relationship between the runoff and the climatic elements and the response of runoff to climate change were analyzed. The results indicate that the runoff is very sensitive to the climate change in the middle and lower reaches of Yangtze River Basin, where the precipitation is the key factor affecting runoff changes and its effect magnitude on the runoff is approximately 2 times, 4 times and 39 times as much as that values of relative humidity, air temperature and sunshine duration. The results also reveal that the response of runoff to the single climatic element variation is less than to the multi-elements coupling changes, when these elements increase or decrease in the same direction. However, when some elements increase while others decrease, the response of runoff to the single climatic element is higher than the multi-elements coupling changes. This respond is significant with the more elements coupling changes together.

Key words: runoff; climatic elements; coupling changes; Yangtze River Basin

气候变化导致河川径流发生显著变化。研究表明, 伴随全球气候变化, 世界许多河川径流量都出现了减少现象, 在欧洲北部和东部径流明显减少^[1], 美国自 20 世纪 90 年代以来径流量持续减少^[2-3], 我国长江流域下游大通流量显著减少^[4]。与此同时, 世界上只有部分地区径流量有增加趋势^[1,5]。

在影响径流的气候因素中, 降水无疑排在第一位。研究表明, 降水量每增加 10%, 在美国, 河流径

流量将增加 1.59 倍^[6]; 在澳大利亚, 河流径流量将增加 25%^[7]; 在我国淮河流域, 径流量将增加 27%^[8]。因此, 在降水量减少的地区, 那里的径流量基本呈减少趋势。特别是在我国长江中下游地区, 伴随梅雨期降水量的显著减少, 汛期径流量下降非常显著^[9-11], 其降水量对大通径流影响的方差贡献可高达 61.9%^[4]。

目前全球气候变化仍以变暖为主要特征^[12], 有

基金项目: 国家自然科学基金(41371050, 51420105014)

作者简介: 荣艳淑(1961—), 女, 教授, 博士, 主要从事水文气象和气候变化研究。E-mail: ysrn@hhu.edu.cn

研究^[13-14]表明,气候变暖会增大水汽含量,并引起干燥地区更加干燥,而湿润地区更加湿润,同时大陆地区径流量增多。然而,变暖使地面蒸发加强^[15-16],导致地面水资源变成水汽,最后进入大气,使径流减少^[17-18]。

因此,不同地区气候因素的影响差异显著,量化气候变化的影响至关重要。为此,本文选择长江流域为研究区域,分析整个流域气候因子与下游大通径流的相关关系及其气候变化对径流的影响,定量分析长江下游径流与流域气候变化的响应关系和气候变化下径流的可能变化强度。

1 数据与方法

1.1 数据

选取了长江流域内 138 个气象站的降水、气温、相对湿度和日照时数作为基本气候要素,其中降水、日照时数、相对湿度和气温均来自于国家气象中心整理的 1961—2010 年数据,气温和相对湿度均使用的是月或年的平均值,降水量和日照时数使用的是合计值。

径流量是长江大通站的流量。长江大通站位于长江干流下游水系,集水面积约为 170 万 km²,是长江下游地区水情监测的重要测站。另外,该站也是东海的海洋潮汐所能到达长江流域的上界,为了规避潮汐对流量的影响,通常使用该站的水文数据作为长江流域的代表站数据。大通径流数据来自于长江流域水文年鉴和长江水文局。径流使用的是月平均值,起止时间为 1961—2010 年。

长江流域控制范围及气象站的分布见图 1,其中,黑点代表气象站位置,汉字为气象站站名,五星标记代表大通水文站的位置。

1.2 方法

使用相关分析法讨论流域气候要素与下游大通站流量的关系,用多元线性回归模型分析径流对气

候要素变化的响应。

多元线性回归模型可表示为

$$y = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i x_i \quad (1)$$

式中: y 为流量; x_i 为气候要素,其中 x_1 为降水量, x_2 为相对湿度, x_3 为气温, x_4 为日照时数; B_0 和 B_i 分别为回归常数和回归系数,可用最小二乘法估计。

用每个气候要素的方差贡献来估算气候因子对径流的影响程度,最后,通过控制一个或几个气候要素的变化值,探讨径流对气候变化的响应程度。

2 结果与讨论

2.1 径流与气候要素关系分析

图 2 是长江流域气候要素与大通流量的相关系数分布图,图中的五星仍表示大通站的位置,灰色为统计显著性的区域。从图 2(a)中可以看到,长江流域的年平均气温 T 与流量 R 之间以负相关为主,其中,中上游存在部分显著的负相关系数,其他地区相关系数都没有达到统计显著性水平。这种现象表明,长江流域气候变暖显著^[20],但是,气温变暖对径流的直接影响较小。

年降水量与大通流量呈正相关关系(图 2(b)),其中,在长江流域中下游地区,正相关系数全部达到 0.05 统计显著性水平以上,特别是在大通站周围的区域,相关系数的统计显著性水平达到了 0.001 以上。因此,长江流域的中下游降水量与大通站流量的关系最为密切。

年总日照时数 S 与流量的关系都呈现负相关关系,从上游到下游的沿江一带,负相关性达到了 0.05 统计显著性水平以上(图 2(c))。在大通站附近的相关系数仅达到了 0.1 统计显著性水平。因此,日照时数对大通流量的影响更多的来自于全流域日照条件的变化。

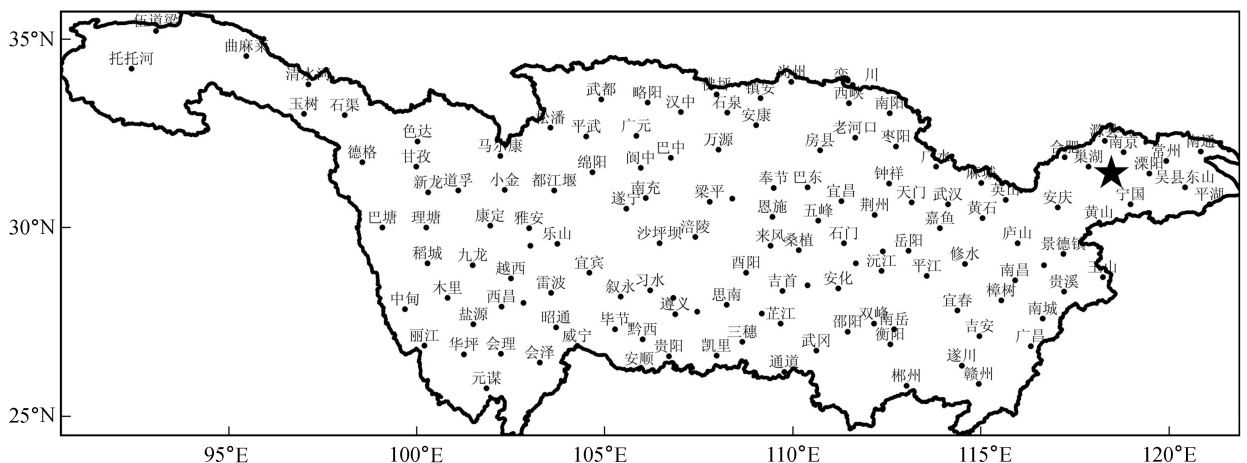


图 1 长江流域控制范围气象站分布

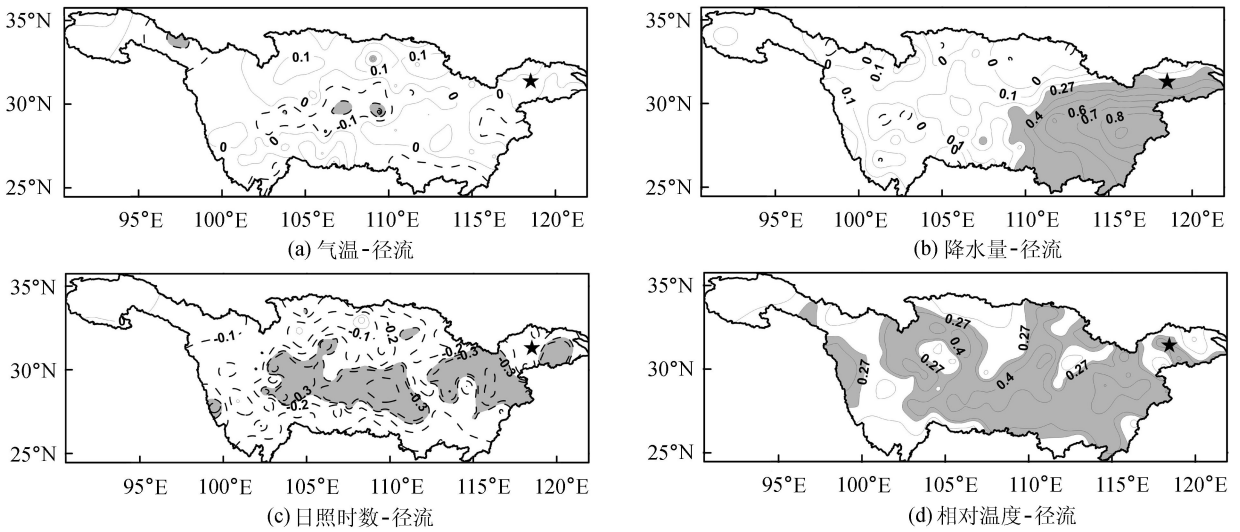


图2 长江流域气候要素与径流相关系数空间分布

年平均相对湿度 H 对流量的影响非常大,它们之间的正相关系数基本都具有统计显著性(图2(d))。这种现象表明,长江流域大气湿度条件很好时,对应流量也处于较大时期。

2.2 长江下游径流对气候要素变化的响应

2.2.1 区域气候要素的变化特征

根据上述相关分析可以知道,大通站流量受长江中下游气候要素影响最大,特别是降水与径流的相关系数在 110°E 以东都具有信度 0.05 以上的统计显著性水平,其余要素在这个区域也有很好的反映,因此,选择长江流域 110°E 以东的气象站点,计算长江中下游区域气候要素的平均值,构建显著影响大通流量的区域气候要素。表1给出了近50年来长江流域 110°E 以东区域气候要素的基本变化特征。

表1 长江流域 110°E 以东区域气候要素变化特征

气候要素	P/mm	$T/^{\circ}\text{C}$	$H/\%$	S/h
区域平均值	1339.22	14.12	77.62	1764.16
X_{\max}	302.50	1.59	4.77	380.92
X_{\min}	-370.29	-0.70	-7.69	-240.46
平均每年的变化趋势	1.27	0.02	-0.13	-6.37
平均每50年的变化趋势	63.55	0.75	-6.60	-318.50

由表1可见,长江中下游区域年平均降水量有微弱的增加趋势,平均每年增加 1.3 mm,每50年增长 63.55 mm;年平均气温呈显著增加的趋势,平均每年增长 0.02°C ,每50年增长 0.75°C ;年平均相对湿度和年平均日照时数均呈下降趋势,其中,相对湿度平均每年下降 0.13%,每50年下降 6.6%;日照时数平均每年下降 6.37 h,平均每50年下降 318.50 h。另外,每个气候要素的极值(包括极端最大 T_{\max} 与极端最小 T_{\min})与均值差异很明显,其中,气温和相对湿度的极值与平均值的差值相当于平均值的 $\pm 10\%$ 左右,日照时数和降水量的极值与均值的差值

大约在 $\pm 20\%$ 以上。因此,这一区域的气候要素平均变化幅度在 $10\% \sim 20\%$ 左右。

2.2.2 气候要素对大通流量的影响

以区域平均降水量 x_1 、区域平均相对湿度 x_2 、区域平均气温 x_3 和区域平均日照时数 x_4 为因变量,以大通站流量为自变量 y_R ,建立多元回归方程,用最小二乘法估计回归系数,可得到:

$$y_R = 0.7786x_1 + 0.1406x_2 + 0.0588x_3 + 0.0132x_4 - 0.0008 \quad (2)$$

回归方程的复相关系数达到 0.824, F 值也通过了信度检验,表明式(2)对大通流量的拟合效果较好。

计算结果表明,降水量对径流的方差贡献最高,为 95.8%,对径流的影响占绝对优势,这也说明了长江流域下游径流与降水关系密切的特点。其他气候要素中,相对湿度的方差贡献为 3.3%,气温和日照时数分别为 0.8% 和 0.1%,表明相对湿度、气温和日照时数对径流的影响依次减小。

2.2.3 流量对气候要素变化的响应

利用多元回归分析,可以定量评估大通流量对气候要素变化的响应程度。在下面的分析中,构建了两类气候要素变化类型:①每个气候要素单独变化类型;②多要素同时变化,形成要素耦合变化类型。表2和表3分别是这两种变化类型下,大通流量的响应结果,其中流量已折算成相对变化率。

表2是单个气候要素变化时,大通径流的相对变化。在表2中,单气候要素的变化又设计了两种形式:①4个气候要素均按 5% 的水平变化的形式(表2第2—5列),其目的是为了比较同一变化水平下,气候要素对径流影响的差异;②根据表1中气候要素的变化特征,构建了4个气候要素同时变化的形式(见表2第6—11列)。在第2个变化形式中,将气候要素的耦合变化划分了几个等级,其中,

表2 大通流量随气候要素的变化

气候要素变化量	$P(\pm 5\%)$	$T(\pm 5\%)$	$H(\pm 5\%)$	$S(\pm 5\%)$	$(P\pm 20)/$ mm	$(P\pm 50)/$ mm	$(P\pm 100)/$ mm	$(T\pm 0.50)/$ ℃	$(H\pm 0.50)/$ %	$(S\pm 100)/$ h
流量变化率(%)	± 4.34	± 1.10	± 2.20	± 0.11	± 1.30	± 3.24	± 6.49	± 0.78	± 1.70	± 0.13

表3 气候要素耦合变化下大通流量的相对变化

气候要素耦合条件	径流变化率/%	气候要素耦合条件	径流变化率/%
$P+20\text{ mm}, T+0.5^\circ\text{C}$	2.08	$P+20\text{ mm}, H+3\%, T+0.5^\circ\text{C}, S+100\text{ h}$	3.91
$P+50\text{ mm}, T+0.5^\circ\text{C}$	4.02	$P+50\text{ mm}, H+3\%, T+0.5^\circ\text{C}, S+100\text{ h}$	5.85
$P+100\text{ mm}, T+0.5^\circ\text{C}$	7.27	$P+100\text{ mm}, H+3\%, T+0.5^\circ\text{C}, S+100\text{ h}$	9.09
$P-20\text{ mm}, T+0.5^\circ\text{C}$	-0.52	$P-20\text{ mm}, H+3\%, T+0.5^\circ\text{C}, S+100\text{ h}$	1.31
$P-50\text{ mm}, T+0.5^\circ\text{C}$	-2.46	$P-50\text{ mm}, H+3\%, T+0.5^\circ\text{C}, S+100\text{ h}$	-0.63
$P-100\text{ mm}, T+0.5^\circ\text{C}$	-5.70	$P-100\text{ mm}, H+3\%, T+0.5^\circ\text{C}, S+100\text{ h}$	-3.88
$P+20\text{ mm}, T-0.5^\circ\text{C}$	0.52	$P+20\text{ mm}, H-3\%, T+0.5^\circ\text{C}, S-100\text{ h}$	0.25
$P+50\text{ mm}, T-0.5^\circ\text{C}$	2.46	$P+50\text{ mm}, H-3\%, T+0.5^\circ\text{C}, S-100\text{ h}$	2.20
$P+100\text{ mm}, T-0.5^\circ\text{C}$	5.70	$P+100\text{ mm}, RH-3\%, T+0.5^\circ\text{C}, S-100\text{ h}$	5.44
$P-20\text{ mm}, T-0.5^\circ\text{C}$	-2.08	$P-20\text{ mm}, H-3\%, T+0.5^\circ\text{C}, S-100\text{ h}$	-2.34
$P-50\text{ mm}, T-0.5^\circ\text{C}$	-4.02	$P-50\text{ mm}, H-3\%, T+0.5^\circ\text{C}, S-100\text{ h}$	-4.29
$P-100\text{ mm}, T-0.5^\circ\text{C}$	-7.27	$P-100\text{ mm}, H-3\%, T+0.5^\circ\text{C}, S-100\text{ h}$	-7.53

对降水量设计了3个变化水平,分别是 $\pm 20\text{ mm}$ 、 $\pm 50\text{ mm}$ 和 $\pm 100\text{ mm}$,相当于降水变化了 $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 3.7\%$ 和 $\pm 7.5\%$ 。其他要素只设计了一种变化,它们分别是年平均气温的变化为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,相当于气温变化 $\pm 3.5\%$;年平均相对湿度的变化为 $\pm 3\%$;年平均日照时数的变化为 $\pm 100\text{ h}$,相当于日照时数变化 $\pm 5.7\%$ 。对于气温、相对湿度和日照时数设计的变化值都取在真实数据变化的中间水平。

由表2可见,当气候要素变化程度相同时,流量对其的响应各不相同。在4个气候要素中,流量对降水量的响应最为显著,当降水量变化增加5%时,流量变化率为4.34%,相当于流量可增加 $1\,222.3\text{ m}^3/\text{s}$;相对湿度变化5%时,流量可变化2.2%,它的影响力约为降水作用的1/2;气温变化5%时,可引起流量变化1.1%,是降水作用的1/4;日照时数变化5%时,可引起流量变化0.11%,可见日照时数的影响力最小,它对流量的影响仅为降水作用的1/39。

表3是多气候要素变化时,大通径流的相对变化。表3中第1列是仅考虑降水和气温的耦合变化的条件,第3列是考虑4要素同时耦合变化的条件,符号“+”和“-”分别表示增加和减少。鉴于相对湿度和日照时数均以减少为主,在第3列4要素的耦合变化中,在气温增加的基础上,同时考虑了相对湿度和日照时数同增和同减的条件,再辅以降水量增加或减少的条件,计算流量的相对变化量。

由表3可以看到,仅考虑降水量和气温耦合变化时,降水量与气温同向或反向变化,对流量的影响是不同的。在降水量与气温同增(或同减)时,降水量由 $\pm 20\text{ mm}$ 变化到 $\pm 100\text{ mm}$,流量增量可发生大约3.49倍的变化。在降水量和气温反向变化,即气温

增加(或减小),同时降水量减少(或增多)时,降水量由 $\pm 20\text{ mm}$ 变化到 $\pm 100\text{ mm}$,流量增量可发生大约10.96倍的变化。这种现象同样说明降水量变化对大通流量影响显著,但是,降水量与气温反向变化,会加大降水量的作用。

当耦合的气候要素增多时,流量的变化又有不同。在气温增加 0.5°C ,相对湿度增加3%和日照时数增大100h的条件下,当降水量由20mm增加到100mm时,流量增量可发生大约2.32倍的变化;而降水量减少20mm时,流量仍有增大现象,这不同于气温与降水量耦合时,降水量减少仍引起的流量增加,这是由于相对湿度增大在起作用;但是,当降水量继续减少时,流量开始转为减小变化。

由于长江流域目前的主要气候变化是气温显著增加,降水量微弱增加,相对湿度和日照时数减少,在这种条件下,当气温、相对湿度和日照时数按 $+0.5^\circ\text{C}$ 、 -3% 和 -100 h 条件变化,降水量由20mm增加到100mm时,流量增量可发生大约21.76倍的变化,这种情况是各组气候变化效应中最显著的一组数据;而降水量由 -20 mm 减少到 -100 mm 时,流量减少量只有3.2倍的变化。

因此,尽管用线性方程估计气候要素对流量的影响,但是,气候要素的耦合变化可导致流量产生非线性变化,气候要素变化幅度越大,流量变化越显著;气候要素耦合的数量不同,引起流量的变化程度也不同。

3 结论

a. 长江流域气候变化可显著影响径流。相关分析的结果表明,长江流域中下游降水量与大通站

流量的关系最为密切,正相关系数全部在 0.05 统计显著性水平以上。长江流域的相对湿度与流量之间的正相关系数基本都具有统计显著性。日照时数对大通流量的影响更多的来自于全流域日照条件的变化。气温与流量的相关性很小,几乎没有达到统计显著性的相关系数。

b. 多元线性回归表明,降水量、相对湿度、气温和日照时数对大通径流的方差贡献分别达到了 95.8%、3.3%、0.8% 和 0.1%,因此,降水量对大通径流的影响具有绝对优势。利用回归模型估算气候要素对大通径流的影响时,降水量对径流的影响分别是相对湿度、气温和日照时数的 2 倍、4 倍和 39 倍。

c. 气候要素耦合变化形式不同时,对大通径流的影响程度不同。当气候要素耦合且同向变化时,流量对任何单一气候要素变化的响应都小于对多要素耦合变化响应程度;但是,当气候要素耦合且反向变化时,流量对任何单一气候要素变化的响应都大于对多要素耦合变化响应程度。耦合的气候要素越多,这种效应越显著

参考文献:

[1] STAHL K, HISDAL H, HANNAFORD J, et al. Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14 (12): 2367-2382.

[2] KRAKAUER N Y, FUNG I. Mapping and attribution of change in streamflow in the coterminous United States [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, 12 (4): 1111-1120.

[3] WANG D B, HEJAZI M. Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47 (9): W00J12.

[4] 荣艳淑, 刘晓延. 长江大通水文站流量减少及其原因分析 [J]. *水资源研究*, 2014, 3 (4): 326-336. (RONG Yanshu, LIU Xiaoyan. The decrease of the flow and its cause at Datong Hydrological Station of the Yangtze River [J]. *Water Resources Research*, 2014, 3 (4): 326-336. (in Chinese))

[5] MIN S K, ZHANG X B, ZWIERS F. Human-induced arctic moistening [J]. *Science*, 2008, 320 (5875): 518-520.

[6] MANTUA N, TOHVER I, HAMLET A. Climate change impacts on streamflow extremes and summertime stream temperature and their possible consequences for freshwater salmon habitat in Washington State [J]. *Climatic Change*, 2010, 102 (1/2): 187-223.

[7] JONES R N, FRANCIS H S C, WALTER C B, et al. Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models [J]. *Advance in Water Resources*, 2006, 29 (10): 1419-1429.

[8] 王芩如, 薛联青, 王思琪, 等. 气候变化条件下洪泽湖以上流域水资源演变趋势 [J]. *水资源保护*, 2015, 31 (3): 57-62. (WANG Lingru, XUE Lianqing, WANG Siqi, et al. Evolutionary tendency of water resources in the basin above Hongze Lake under the condition of climate change [J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31 (3): 57-62. (in Chinese))

[9] 林承坤, 吴小根. 长江径流量特性及其重要意义的研究 [J]. *自然杂志*, 1999, 21 (4): 200-205. (LI Chengkun, WU Xiaogen. A study on characteristics of runoff amount and its important significance at the Yangtze [J]. *Chinese Journal of Nature*, 21 (4): 200-205. (in Chinese))

[10] 方娟娟, 李义天, 孙昭华, 等. 长江大通站径流量变化特征分析 [J]. *水电能源科学*, 2011, 29 (5): 9-12. (FANG Juanjuan, LI Yitian, SUN Zhaohua, et al. Analysis of runoff change characteristics at Datong Station of Yangtze River [J]. *Water Resources and Power*, 2011, 29 (5): 9-12. (in Chinese))

[11] WANG P, HE S. The basic character on process of runoff and sediment discharge at Datong station of the Changjiang River I [J]. *Analysis on Runoff Process*, 2004, 2004 (2): 72-80.

[12] WORKING GROUP I of IPCC. Climate change 2013: the physical science basis, summary for policymakers [R]. Stockholm: IPCC, 2013.

[13] TRENBERTH K. Changes in precipitation with climate change [J]. *Climate Research*, 2011, 47 (1): 123-138.

[14] LABAT D, GODDERIS Y, PROBST J L, et al. Evidence for global runoff increase related to climate warming [J]. *Advance in Water Resources*, 2004, 27 (6): 631-642.

[15] 杨甫乐, 荣艳淑, 杨甫光. 四川盆地蒸发皿蒸发量变化趋势及影响因子分析 [J]. *水资源保护*, 2014, 30 (3): 38-45. (YANG Fule, RONG Yanshu, YANG Fuguang. Analysis of trends and the cause of change of the pan evaporation in the Sichuan Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30 (3): 38-45. (in Chinese))

[16] 荣艳淑, 张行南, 姜海燕, 等. 长江上游区域蒸发皿蒸发量变化及其对水分循环的影响 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55 (9): 2889-2897. (RONG Yanshu, ZHANG Xingnan, JIANG Haiyan, et al. Pan evaporation change and its impact on water cycle over the upper reach of the Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Geophysic*, 2012, 55 (9): 2889-2897. (in Chinese))

[17] VANO J A, DAS T, LETTENMAIER D P. Hydrologic sensitivities of Colorado River runoff to changes in precipitation and temperature [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13 (3): 932-949.

[18] VICENTE-SERRANO S M, L' OPEZ-MORENO J I. Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the standardized precipitation index in a mountainous Mediterranean Basin [J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2005, 9 (5): 523-533. (收稿日期: 2015-09-01 编辑: 徐娟)