

文章编号: 1007-7588(2013)06-1268-09

长江上游降水变化及其对径流的影响

冯亚文^{1,2}, 任国玉¹, 刘志雨³, 吴吉东⁴, 张雷¹

(1. 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 水利部水利信息中心, 北京 100053);

4. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875

摘要: 利用长江上游地区 60 个国家基本、基准站 1960 年-2009 年的月降水量资料和干流区屏山、寸滩和宜昌 3 个水文控制站同期径流资料, 分区域对长江上游地区的降水量、径流量变化趋势以及降水量和径流量的相关性进行了分析。主要结论如下: ①年降水量呈上升和下降趋势的气象站点空间分布相对集中, 分别分布在屏山站以上流域和屏山站以下流域; 屏山站以下流域和整个长江上游地区年降水量近 50 年呈现下降趋势, 屏山站以下流域秋季降水量的显著减少是长江上游年降水量减少的主要原因; ②整个长江上游月降水量趋势从 1 月-7 月以上升趋势为主逐渐转变到 8 月-12 月以下降趋势为主, 且月降水量变化趋势空间分布有从 3 月份至 9 月份由屏山站以下流域开始逐渐向长江源头过渡的趋势, 到 9 月份整个长江上游基本呈减少趋势; ③与降水量变化趋势基本一致, 屏山站以下流域寸滩和宜昌站年径流下降趋势显著的主要原因是 5 月-11 月径流的减少, 且秋季下降显著, 而屏山站春、夏、冬和年径流呈上升趋势, 且春季和冬季上升趋势很显著; ④整个上游地区面雨量与径流量具有很好的相关性, 同期面雨量与径流量在月、季和年尺度上相关性都较显著。屏山以上流域隔月相关比同期相关性强。

关键词: 长江上游; 降水; 径流; 趋势; 面雨量; 气候变化

1 引言

长江上游流域, 地形复杂, 环境条件多样, 不同地区降水差异相对较大。未来南水北调西线工程将从通天河、雅砻江、大渡河调水, 这将改变长江流域宜宾以上的来水情况; 三峡大坝竣工后, 上游降水和径流的变化对其蓄水量和工程效益也有重要影响。了解长江上游区域降水和径流的变化趋势以及降水量对径流量的影响, 对于三江源地区生态和环境建设、三峡大坝年度和季节性蓄水的调度和未来南水北调西线工程的建设与管理等, 均具有重要现实意义^[1-3]。

前人对长江流域的降水和径流变化已做了许多研究。如: 任国玉等^[4]利用 1951 年-1996 年地面气象记录资料计算我国全年和季节降水量长期变化趋势特征指数, 结果表明我国长江中下游地区年和夏季降水量呈现明显增加趋势; 姜彤等^[5]研究发

现 1961 年-2000 年整个长江流域夏季降水显著增加; 沈浒英等^[6]分析长江流域降水径流的年代际变化, 结果表明 1951 年-2001 年长江流域夏季降水有更加集中的趋势; Zhang 等^[7]研究发现近 50 年嘉陵江干流和乌江流域 9 月降水显著减少; Wang 等^[8]认为 1958 年-2008 年长江流域降水的减少是寸滩、宜昌、汉口、大通站径流量减少的主要原因; 王艳君等^[9]研究发现 1961 年-2000 年长江上游年和冬季降水显著增加。这些研究多侧重于整个流域年、季尺度降水和径流变化的分析, 对上游单站月时间尺度的降水量和径流量变化分析以及把两者结合起来的研究较少。本文侧重于长江上游 60 个气象站的月降水量时空变化趋势分析, 进而计算月、季和年度流域面雨量, 并分析降水量对径流量变化的影响, 以为长江流域的水量调度、水资源保护、规划与管理提供科学依据。

收稿日期: 2013-01-08; 修订日期: 2013-02-02

基金项目: 国家公益性行业专项(编号: GYHY201206012); 973 项目(编号: 2010CB428400)。

作者简介: 冯亚文, 女, 甘肃会宁人, 硕士, 从事水文气象研究。E-mail: yawenf@163.com

2013年6月

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

采用长江上游60个国家基本气象站和基准气候站观测资料。在这些站点中,大部分记录开始于20世纪60年代,为保证所有气象站点资料长度一致,统一采用1960年-2009年的月降水观测记录。中国气象局国家气象信息中心对资料进行了质量控制。部分站点个别月份存在缺测,由于上游站点分布较稀疏,再加上地形起伏相对较大,临近站点之间观测数据相关程度不高,采用临近站点资料进行空间插值并不理想,因此对个别月份缺测数据(占0.1%)的处理,均选用前后两年该月降水的平均值来插补,年降水数据则由月降水累加所得,以保证降水序列的完整和连续性。

水文资料选取长江上游屏山、寸滩和宜昌3个干流控制站1960年-2009年的月径流数据,资料来源于水利部水文信息中心。研究区及气象、水文站点分布见图1。

2.2 研究方法

线性倾向估计和Mann-Kendall秩次相关法是趋势分析最常用的方法^[10-13],另外,还有累积距平、滑动平均、二次平滑、三次样条函数及小波分析等趋势分析方法^[14],而线性倾向估计以其简洁易操作

特点在国内水文气象趋势分析中多被采用^[4,6,9,10,12]。

本文中降水量和径流量的趋势分析采用线性倾向估计法。若用 y_i 表示样本量为 n 的某一变量,用 x_i 表示 y_i 所对应的时间,建立 x_i 与 y_i 之间的一元线性回归方程^[14]:

$$y_i = ax_i + b, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中 a 为回归系数; b 为回归常数; $a \times 10$ 称为气候变化速率或变化速率,即每10 a 气象要素的趋势变化值,其值为正或负的绝对值大小即表示 y_i 随 x_i 上升或下降的快慢。变量 y 与时间 x 之间的相关系数 r 计算公式如下^[14]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (2)$$

式中 n 为时间序号; \bar{y} 和 \bar{x} 分别为变量 y 和时间 x 的均值; r 为正(负)时,表示变量在该时间段内有线性增加(减少)的趋势; r 可称为趋势系数,给定显著性水平 α ,若 $|r| > r_\alpha$,认为 y 的变化趋势是显著的。在 $n=50$ 的条件下,当 $|r|$ 的值不小于0.231、0.273和0.354时,表示变量 y 的线性趋势通过了信度为0.10、0.05和0.01的显著性检验,分别表示趋势变化较显著、显著和很显著。流域面雨量采用泰森多边形

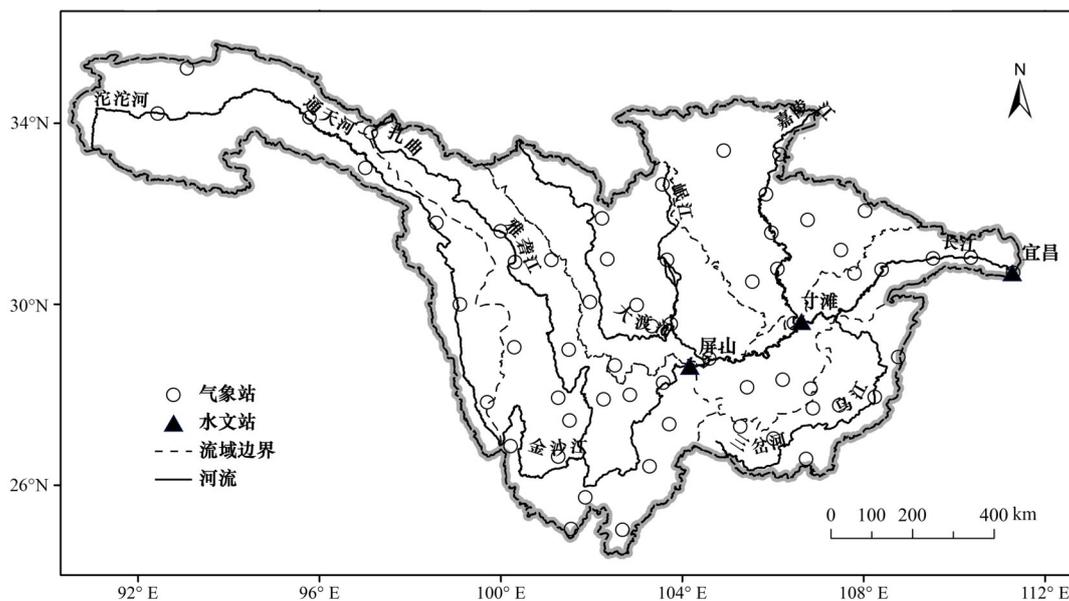


图1 研究区及其水文、气象站点分布

Fig.1 The study area and hydro-meteorological stations

形方法计算^[15]:首先求得各测站的面积权重系数,然后用各测站雨量与该测站面积权重系数相乘后累加得到整个流域的面雨量 p :

$$p = f_1 p_1 + f_2 p_2 + \dots + f_n p_n \quad (3)$$

式中 p 为流域面雨量; f_1, f_2, \dots, f_n 分别为各测站的面积权重系数; p_1, p_2, \dots, p_n 分别为各测站同时期降雨量。

3 降水趋势分析

3.1 年降水量趋势空间分布特征

长江上游 60 个气象站近 50 年 (1960 年-2009 年) 年降水量趋势变化空间分布如图 2 所示。年降水量呈上升趋势的气象站有 31 个, 主要分布在江源地区、金沙江以及雅砻江流域, 即屏山水文站控制流域基本表现为上升趋势, 其中上升趋势较显著的是江源地区的伍道梁站以及川西高原的康定站和小金站。具有下降趋势的气象站有 29 个, 主要分布在屏山站以下流域 (本文指屏山至宜昌段), 其中宜宾、都江堰、峨眉山、乐山、昭通、略阳、广元和遵义 8 个气象站降水下降趋势较显著, 宜宾、都江堰、峨眉山、乐山和昭通站的年降水下降幅度都超过 $-20\text{mm}/10\text{a}$, 形成一个降水量趋势性下降中心。

总体来说, 长江上游年降水量下降和上升的区域分布都比较集中, 即屏山水文站以上流域和以下

流域降水变化趋势基本相反, 这两个区域分别对应于竺可桢中国气候区划中的西藏类和云南高原类气候类型^[16], 分别主要受高原大陆性气候和海洋性过渡气候的影响。这种趋势可能会导致局部地区洪涝或干旱发生的频率增加, 但整个长江上游流域降水变化趋势具有升降互补性, 可能在很大程度上平抑了三峡大坝以上流域面雨量长期趋势性变化。因此, 以下分析面雨量变化时将长江上游划分为屏山站以上流域、屏山站以下流域以及整个上游流域分别进行讨论。

3.2 年、季面雨量变化趋势

长江上游流域年、季雨量趋势系数和趋势变化速率见表 1。

屏山站以上流域: 年面雨量呈上升趋势, 变化速率为 $7.37\text{mm}/10\text{a}$, 但上升趋势不显著; 春、夏和冬季三季面雨量均表现出上升趋势, 变化速率分别为 $5.01\text{mm}/10\text{a}$ 、 $2.06\text{mm}/10\text{a}$ 和 $0.85\text{mm}/10\text{a}$, 其中, 春季降水增加趋势很显著, 冬季降水增加趋势显著; 而秋季面雨量呈不显著下降趋势; 说明冬季和春季降水增加是屏山站以上流域年降水增加的主要原因。

屏山站以下: 年面雨量下降趋势显著, 变化速率为 $-15.63\text{mm}/10\text{a}$; 除冬季面雨量呈上升趋势外, 其它 3 个季节降水均表现出下降趋势, 其中秋季面雨量减少趋势很显著, 变化速率达 $-10.19\text{mm}/10\text{a}$,

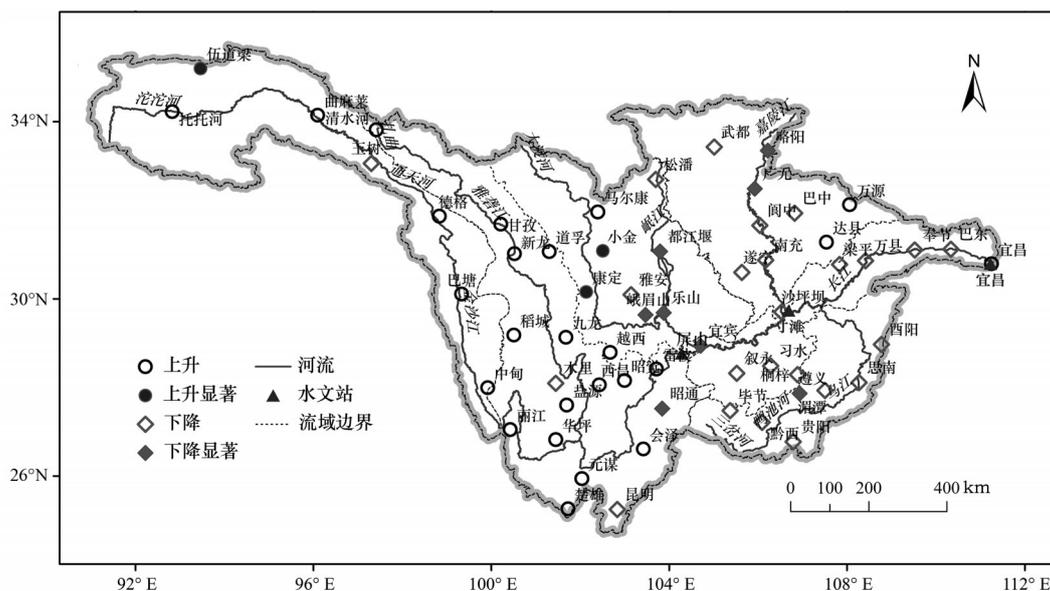


图 2 1960 年-2009 年长江上游年降水量变化趋势空间分布 ($P < 0.1$)

Fig.2 Annual precipitation trends in the upper Yangtze River from 1960 to 2009

表1 1960年-2009年长江上游年、季节面雨量趋势系数及变化速率
Table 1 Seasonal and annual areal rainfall trends coefficient and change rate
in the upper Yangtze River from 1960 to 2009

	屏山站以上		屏山站以下		长江上游	
	趋势系数	变化速率 (mm/10a)	趋势系数	变化速率 (mm/10a)	趋势系数	变化速率 (mm/10a)
年	0.227	7.37	-0.318**	-15.63	-0.152	-4.69
春	0.381***	5.01	-0.092	-1.44	0.040	0.61
夏	0.074	2.06	-0.047	-1.75	0.030	0.98
秋	-0.045	-0.58	-0.430***	-10.19	-0.430***	-7.08
冬	0.291**	0.85	0.129	0.59	0.190	0.79

注: *、**和***分别表示通过0.10、0.05和0.01的显著性检验。

说明秋季降水减少是年降水量下降的主要原因。

整个长江上游:年面雨量呈不显著下降趋势,这与文献[17]研究发现长江上游年降水量有降低趋势的研究结果一致;春、夏和冬季三季面雨量均表现出弱的上升趋势,但是变化不显著;秋季面雨量呈很显著下降趋势,变化速率为-7.08mm/10a;整个上游地区四季面雨量趋势变化与屏山站以上流域一致,且长江上游秋季面雨量变化趋势与年面雨量趋势相同,说明近50年来秋季降水,特别是屏山站以下流域秋季降水量减少是长江上游年降水量下降的主要原因。这与文献[18]认为长江流域大多数站点秋季面雨量呈显著下降趋势的研究结果一致。

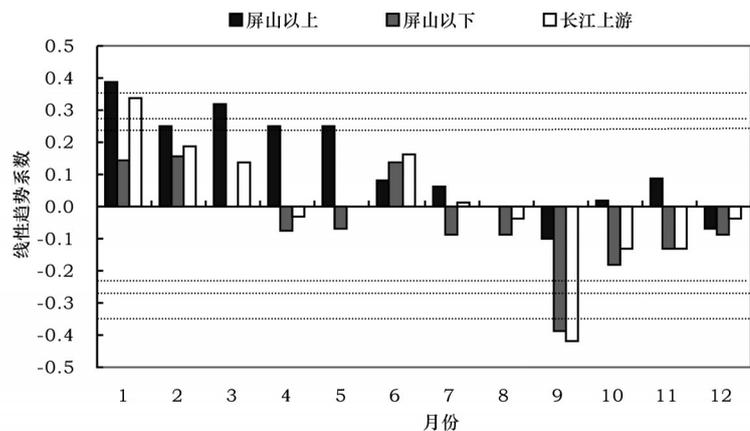
3.3 月面雨量变化趋势

屏山站以上流域、屏山站以下流域和整个上游地区各月面雨量变化速率列于表2,趋势系数见图3。

屏山站以上流域:除了9月和12月份面雨量呈不显著下降趋势外,其余10个月面雨量呈增加趋势,且1月-5月份上升趋势较显著,其中1月和3月份面雨量上升趋势显著,3月-6月份的面雨量变化速率都在1mm/10a以上,5月份达到2.77mm/10a。

屏山站以下流域:1月、2月和6月份面雨量呈不显著上升趋势,其中6月份变化速率为1.99mm/10a,3月份无明显变化趋势;其余8个月均为下降趋势,其中9月份下降趋势很显著,变化速率达到-7.87mm/10a。

长江上游:1月-7月份,除了4月份表现出微弱的下降趋势外,其余6个月均呈上升趋势,其中1月上升趋势显著,变化速率为0.60mm/10a;8月-12月份,连续5个月表现为下降趋势,其中9月份下降趋



(虚线分别表示 $\alpha=0.10$ 、 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 的显著性水平临界值,图6、图7、图8同)

图3 1960年-2009年长江上游各月面雨量趋势系数

Fig.3 Trend coefficients of monthly mean areal rainfall in the upper Yangtze River from 1960 to 2009

表2 长江上游各月面雨量变化速率

	Table 2 Monthly mean areal rainfall change rate in the upper Yangtze River (mm/10a)											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
屏山以上	0.56	0.4	1.19	1.06	2.77	1.13	0.90	0.04	-0.99	0.13	0.28	-0.11
屏山以下	0.29	0.50	0.00	-0.64	-0.81	1.99	-1.83	-1.91	-7.87	-1.61	-0.72	-0.21
长江上游	0.60	0.53	0.59	-0.24	0.26	0.18	0.11	-0.93	-5.51	-0.97	-0.58	-0.34

势很显著,变化速率为 $-5.51\text{mm}/10\text{a}$ 。

综合分析看出,屏山站以上流域、屏山站以下流域和整个上游地区面雨量在1月、2月、6月、9月和12月等5个月份趋势变化一致,1月、2月和6月均为上升趋势,9月和12月都为下降趋势;屏山站以上流域和整个上游地区在4月、8月、10月和11月份趋势变化不一致;屏山以下和整个上游地区在3月,5月和7月变化趋势不一致。整个上游地区呈上升趋势的月数与呈下降趋势的月数相等,但由于降水的季节分配不均,主要集中在夏秋季节,故整个上游地区年降水仍然为不显著下降趋势。其中对秋季降水量减少贡献最大的是9月降水量明显减少,对冬季降水量增加贡献最大的则是1月降水量的增加。

为对比月降水量上升或下降台站数的变化,图4给出了长江上游月降水量具有不同变化趋势与通过显著性检验的气象站数量百分比。从降水量呈上升趋势的气象站来看,1月-8月整个上游地区以上升趋势的气象站个数占优势,其中1月-3月平均在80%以上,4月-8月5个月都在50%以上;上升显著的气象站以1月和5月最多,约占参与统计气象站总数的20%。9月-12月以下降趋势的气象站占

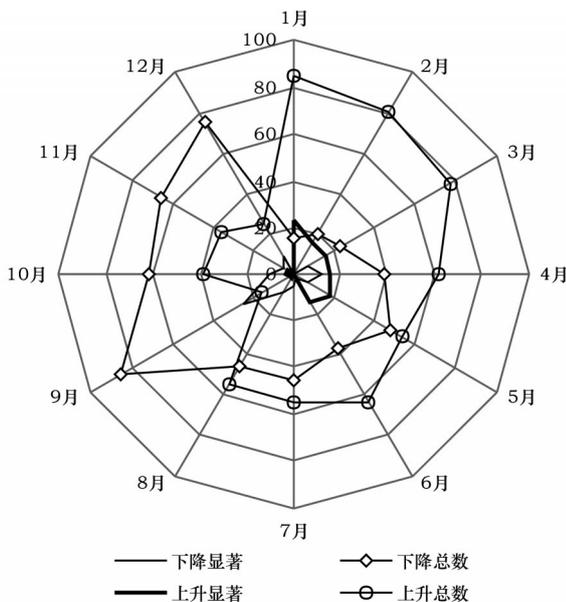


图4 1960年-2009年长江上游月降水量具有不同变化趋势与通过显著性检验($P<0.1$)的气象站数量百分比(%)

Fig.4 Percentages of stations with monthly precipitation experiencing varied trends in the upper Yangtze River from 1960 to 2009(%)

优势,下降趋势站点占60%以上,下降显著的气象站以9月最多,为参与统计气象站总数的25%。

为进一步分析各月降水趋势的空间分布特征,图5给出了长江上游各月降水量变化趋势空间分布情况。

1月-2月:整个上游地区绝大多数气象站表现为上升趋势,只有个别气象站表现为下降趋势,其中1月份具有下降趋势的气象站主要分布在嘉陵江上游以及下游偏西地区和沱江下游地区,上升趋势较显著的站点主要位于干流区及右岸;2月份呈下降趋势的站点主要在沱江流域西部,上升趋势显著的站点主要位于整个上游地区偏北部。

3月-4月:具有上升趋势的站点集中分布在屏山站以上地区和沱江流域,且上升趋势显著的站点主要分布在金沙江和雅砻江流域;4月份呈下降趋势的站点主要集中在嘉陵江流域和乌江流域,而3月份乌江流域为上升趋势。

5月-7月:呈现上升趋势的站点5月份主要分布在宜宾以上地区,6月份主要位于干流区、右岸流域和嘉陵江流域,7月份则分布比较凌乱,只有乌江全流域为上升趋势。

8月-12月:8月份上升趋势和下降趋势的站点分布亦较凌乱;9月份除了宜宾以上地区极少数台站(9个)出现上升趋势外,其余地区均为下降趋势;10月和11月具有上升趋势的站点仍然集中分布在宜宾以上地区,站点个数比9月份有所增加;12月份有15个气象站表现出上升趋势,但均未通过显著性检验,主要分布在江源地区和嘉陵江流域的偏东部地区。

4 径流趋势分析

4.1 年、季径流趋势

年径流序列受人类活动和气候变化等因素的影响,亦可表现出相应的随时间变化特征。这里对长江上游干流屏山、寸滩和宜昌三水文站的年、季径流序列进行趋势变化分析(表3),并检验其统计显著性。

从表3可以看出,屏山站除秋季表现出下降趋势外,其余季节都呈上升趋势,且冬季和春季径流上升趋势很显著,年径流也呈上升的趋势,但上升趋势不显著。寸滩站年径流下降趋势较显著,春、

2013年6月

夏和秋三季表现为下降趋势,其中秋季下降趋势显著,冬季为很显著上升趋势。宜昌站年径流呈较显著下降趋势,这与文献[19]、[20]研究发现长江上游径流量趋于减少的结论相似;春、冬季为上升趋势,夏、秋季为下降趋势,其中秋季下降趋势很显著,冬季上升趋势显著。可见,近50年长江上游径流的减少主要是由于屏山站以下流域秋季径流量减少所致,这也与上文屏山站以下流域1960年-2009年期间面雨量的年、季趋势变化基本一致。

4.2 月径流趋势

长江上游三水文站各月径流量变化趋势分析结果见图6。可以看出:屏山站近50年12个月中6月、8月、9月和10月表现为不显著下降趋势外,其余月份为上升趋势,其中1月-4月的径流增加趋势很显著,5月径流增加趋势显著。寸滩站5月-11月表现为下降趋势,其中9月、11月下降趋势较显著,

表3 长江上游干流水文站年和季节径流趋势系数

Table 3 Seasonal runoff trend coefficients in the upper Yangtze River

站名	春季	夏季	秋季	冬季	年
屏山	0.549***	0.014	-0.044	0.492***	0.076
寸滩	-0.020	-0.141	-0.356**	0.478***	-0.271*
宜昌	0.073	-0.083	-0.434***	0.333**	-0.264*

注:同表1。

10月下降趋势很显著,1月-4月、12月为上升趋势,其中1月-3月上升趋势很显著。宜昌站除12月外,其余月份径流量变化趋势同寸滩站一致,但显著性有所差异。近50年整个长江上游地区三个水文站1月-4月份径流量均表现出增加的趋势,6月、8月、9月、10月径流量均表现出减少的趋势,5月、7月、11月屏山站流量变化趋势与寸滩和宜昌站相反,12月屏山站和寸滩站呈上升趋势,而宜昌站为下降趋势,但上升和下降趋势均不显著。

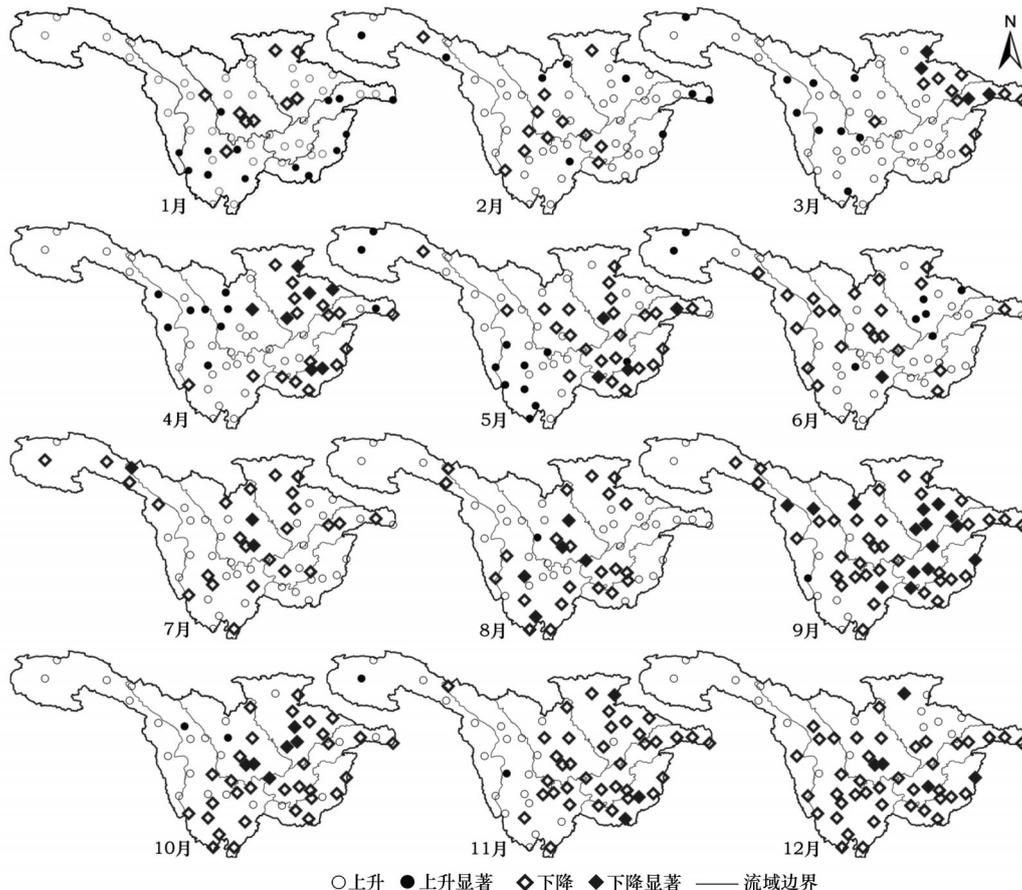


图5 1960年-2009年长江上游月降水量变化趋势分布($P < 0.1$)

Fig.5 Monthly precipitation trends by meteorological stations in the upper Yangtze River from 1960 to 2009

5 面雨量与径流量相关性分析

长江上游径流补给来源分为冰雪融水和大气降水两种,但以大气降水为主。选取长江上游50年的径流、降水数据,对屏山以上流域面雨量与屏山站径流量、整个上游面雨量和宜昌站径流量分别做年、季和月相关性分析,同期和延时1个月相关性分析结果见图7,同期年和季节相关性分析结果见图8。

从屏山站以上流域面雨量与同期屏山站径流量的相关性看,12个月中5月-10月相关性显著,其中5月-8月和10月份相关性很显著,9月份相关性显著,2月和11月表现为负相关;四季面雨量和同期径流量除冬季表现为负相关外,春、夏和秋三季的正相关性都很显著;年面雨量和径流量相关性也很显著。

整个上游面雨量和同期宜昌站径流量有很好的正相关性。从月份来看,1月和12月为显著相关,2月为较显著相关,其余各月都表现为很显著相关;季、年面雨量与同期径流量亦具有很好的正相关性,除冬季为较显著外,其余都表现为很显著。因此,长江上游流域多雨年与丰水年、少雨年与枯水年对应关系很好。这也说明,长江上游地区径流量年际变化主要取决于流域降水,人类活动的影响仍十分微弱。

由于长江上游流域面积大、流程长,径流对降水的响应可能具有滞后性,故对当月面雨量与下月径流量的相关性也做了分析。结果表明:屏山站以上流域,2月-6月、8月-9月、11月8个月延时相关性比同期相关性强;整个上游地区1月-3月、9月-10月和12月共6个月的延时相关性比同期相关性强,最高的延时相关出现在2月、3月和8月,但6月的降水对7月径流的影响相对比较弱。陈正洪等^[21]也指出长江上游6月降水与7月宜昌站径

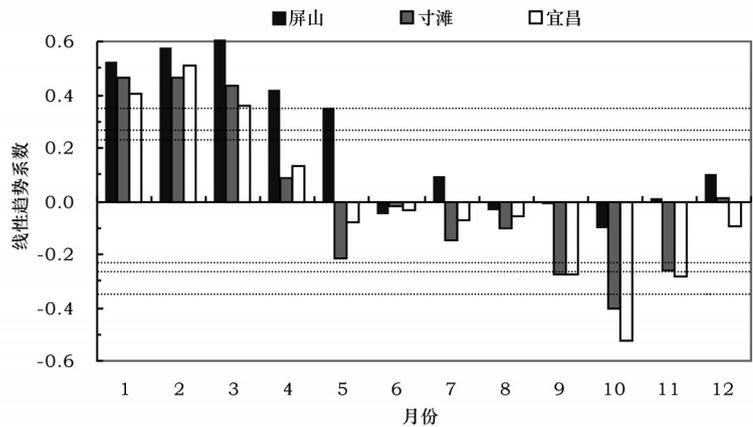


图6 长江上游三水文站月径流量线性趋势系数
Fig.6 Monthly runoff linear trends coefficient in three hydrological stations of the upper Yangtze River

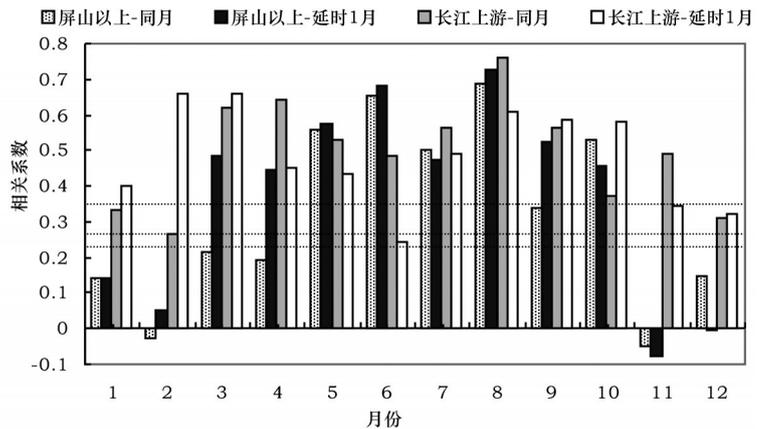


图7 1960年-2009年长江上游面雨量与径流量同期和延时1月相关系数
Fig.7 Correlation coefficients between areal rainfall and runoff at different hydro stations from 1960 to 2009

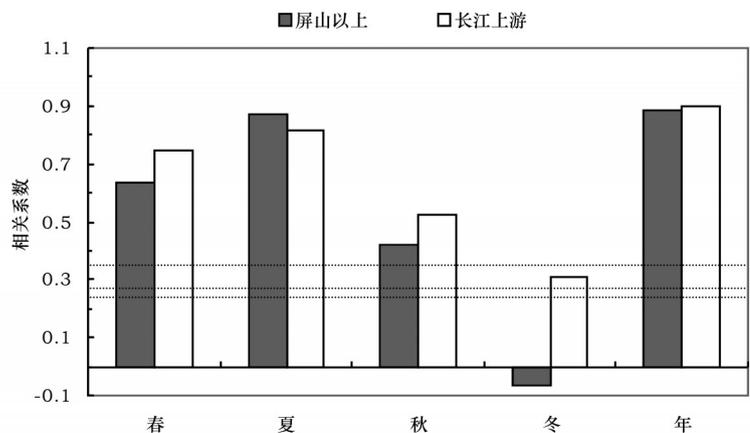


图8 1960年-2009年长江上游季节和年面雨量与径流量相关系数
Fig.8 Correlation coefficients between areal rainfall and runoff at different hydro stations from 1960 to 2009

2013年6月

流关系较弱。造成这一现象的原因可能与上游冰雪融水贡献增大、屏山站以下到宜昌流程短等因素有关。

6 结论与讨论

利用长江上游60个气象站的降水资料和3个水文站的径流资料,对长江上游地区降水和径流变化趋势及相关性进行了分析,得出以下结论:

(1)整个长江上游地区年降水量近50年呈现下降趋势,秋季降水的显著减少是年降水减少的主要原因,特别是9月份降水下降趋势极显著,对整个上游地区降水量的下降起关键作用;同时,年降水量上升和下降的气象站点空间分布相对集中,分别分布在屏山站以上流域和屏山站以下流域,屏山站以下降水量的减少对整个长江上游地区年降水量下降的贡献最大。

(2)从月降水量变化趋势来看,整个长江上游地区1月-8月以上升为主,9月-12月以下降趋势为主,而且从1月-12月,降水从以上升趋势为主逐渐转变,并在9月转为以下降趋势为主,持续至12月份,到1月再转为上升趋势。从月降水趋势的空间分布来看,屏山站以上流域大部分气象站点多数月份表现出上升的趋势,其中1月-5月上升趋势较显著;而屏山站以下流域和整个上游地区月降水趋势基本一致,8月-12月表现为下降趋势,9月份月降水量下降趋势很显著;同时从3月-9月,月降水趋势空间变化有从屏山站以下流域向长江源头逐渐过渡,到9月整个长江上游基本呈减少趋势的变化规律。

(3)不同区域径流量趋势变化不一致。从年径流来看,寸滩站和宜昌站下降趋势较显著,而屏山站呈不显著上升趋势;屏山站春、夏和冬三季径流量均呈上升趋势,且春季和冬季上升趋势很显著,而寸滩站春、夏和秋三季表现为下降趋势,且秋季下降趋势很显著。从月径流来看,屏山站与寸滩、宜昌站表现不一致,屏山站12个月中除了6月、8月-10月表现为下降趋势,其余月份均为上升趋势,而寸滩、宜昌站5月-11月呈下降趋势。

(4)整个上游地区面雨量与径流量具有很好的相关性。屏山以上流域有8个月延时1个月相关比同期相关性强;整个上游地区同期面雨量与径流量

有很好正相关性,12个月的同期面雨量与径流量相关性都较显著;季、年面雨量与径流量亦具有很好的正相关性,除冬季外其余季节都表现为很显著。

本文仅仅研究了长江上游降水和径流的相互关系,未考虑气温、蒸发、人类活动等其它因素对径流的影响,而径流变化是气候变化因素与人类活动对下垫面的改造共同作用的结果。因此,今后在分析降水、径流演变规律时,还应全面考虑气候条件、流域下垫面改变和人类活动等因素的综合影响。但是,本文分析表明,目前引起长江上游地区径流年际和趋势变化的主要因子仍然是降水。了解降水量年际和趋势变化的规律和原因,对于长江上游径流和洪水监测、预测,并进而对三峡大坝等重大水利工程的运行、管理具有一定实际意义。

参考文献(References):

- [1] 秦大河. 中国气候与环境演变(上卷)[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [2] 辛文. 三峡工程与长江上游经济社会发展研究[M]. 成都:西南财经大学出版社, 2000.
- [3] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [4] 任国玉, 吴虹, 陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征[J]. 应用气象学报, 2000, 11(3): 322-329.
- [5] 姜彤, 苏布达, 王艳君, 等. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(2): 65-68.
- [6] 沈浒英. 长江流域降水径流的年代际变化分析[J]. 湖泊科学, 2003, 15(S1): 90-96.
- [7] Zhang Nan, Xia Ziqiang, Zhang Shaofeng, et al. Temporal and spatial characteristics of precipitation and droughts in the upper reaches of the Yangtze river basin (China) in recent five decades [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2012, 14(1): 22-235.
- [8] Wang Yan, Ding Yongjian, Ye BaiSheng, et al. Contributions of climate and human activities to changes in runoff of the Yellow and Yangtze rivers from 1950 to 2008[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, doi: 10.1007/s11430-012-4505-1.
- [9] 王艳君, 姜彤, 施雅风. 长江上游流域1961-2000年气候及径流变化趋势[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 709-714.
- [10] Gemmer M., Becker S., Jiang T. Observed monthly precipitation trends in China 1951-2002[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 77: 39-45.
- [11] Guo Jing, Chen Hua, Xu Chong-Yu, et al. Prediction of variability of precipitation in the Yangtze River Basin under the climate change conditions based on automated statistical downscaling[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, 26

- (2):157-176.
- [12] Su B. D., Jiang T., Jin W. B. Recent trends in observed temperature and precipitation extremes in the Yangtze River basin, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, 83: 139-151.
- [13] Yao Cai, Yang Song, Qian Weihong, et al. Regional summer precipitation events in Asia and their changes in the past decades [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113, D17107, doi: 10.1029/2007JD009603.
- [14] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [15] 徐晶, 林建, 姚学祥, 等. 七大江河流域面雨量计算方法及应用 [J]. 气象, 2001, 27(11): 13-16.
- [16] 刘明光. 中国自然地理图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1998.
- [17] 孙甲岚, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 长江流域上游气温、降水及径流变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5): 1-5.
- [18] 任国玉, 陈正洪, 杨宏青. 长江流域近50年降水变化及其对干流洪水的影响[J]. 湖泊科学, 2003, 15(S1): 49-55.
- [19] 王顺久. 长江上游川江段气温、降水及径流变化趋势分析[J]. 资源科学, 2009, 31(7): 1142-1149.
- [20] 王渺林, 易瑜. 长江上游径流变化趋势分析[J]. 人民长江, 2009, 40(19): 68-69.
- [21] 陈正洪, 杨洪清, 任国玉, 等. 长江流域面雨量变化趋势及对干流流量影响[J]. 人民长江, 2005, 36(1): 22-23.

Rainfall and Runoff Trends in the Upper Yangtze River

FENG Yawen^{1,2}, REN Guoyu¹, LIU Zhiyu³, WU Jidong⁴, ZHANG Lei¹

(1. Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Hydrological Information Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China;

4. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Spatiotemporal monthly rainfall-runoff analysis is the foundation of water regulation, water resource protection and management, and drought and flood hazard prediction. Previous studies of the Yangtze River have mainly focused on the whole river basin and seasonal or yearly rainfall and runoff analysis. Here, rainfall records from 60 national basic and reference stations, and hydrological data from three control stations of the upper Yangtze River were used to analyze rainfall and runoff characteristics across the upper Yangtze River. First, the spatial distribution of weather stations with upward and downward trends for precipitation were comparatively concentrated. Weather stations with an upward trend were located in the Sichuan Basin above the Pingshan Hydro station (PA region), while weather stations with a downward trend were mainly located in the rest of the upper Yangtze River (PR region). Annual precipitation in the upper Yangtze River has declined in the last 50 years. Second, monthly precipitation trends show that more than half of weather stations experienced upward trends in eight months (Jan-Aug). The spatial distribution of monthly rainfall shows a transition from the PA region to PR region between Mar-Sep. Runoff shows a similar trend to rainfall and an indistinctively upward trend in Pingshan station, and a downward trend in Cuntan and Yichang stations. The decrease in runoff in the PR region from May-Nov is the main reason for the runoff drop seen at the Cuntan and Yichang stations. Runoff in the PA region shows an upward trend in all seasons except autumn, especially in spring and winter. A good correlation was found between area rainfall and runoff in the upper Yangtze River.

Key words: Upper Yangtze River; Areal rainfall; Runoff; Trend; Precipitation; Climate change