

# 长江流域近 50 年降水变化及其对干流洪水的影响\*

任国玉<sup>1</sup> 陈正洪<sup>2</sup> 杨宏青<sup>2</sup>

(1: 中国气象局国家气候中心, 北京 100081; 2: 武汉城市气象工程技术中心, 武汉 430074)

**提 要** 根据我国长江流域气象观测站近 42 年的资料, 分析了整个流域年和季节平均面雨量、暴雨日数和暴雨量的变化特征, 以及降水对流域径流和洪水的影响. 长江流域年和夏季平均面雨量存在明显的年际和年代变化特征, 也表现出比较显著的趋势变化特点. 大部分测站年平均面雨量呈增加趋势, 夏季和冬季平均面雨量的增加趋势尤其明显; 秋季平均面雨量呈显著下降趋势. 同时, 年和夏季暴雨日数和暴雨量也在较大范围内呈显著增加趋势. 长江流域的降水对干流平均流量具有重要影响. 1973 年、1983 年和 1998 年的洪水主要是由明显高于平均的流域面雨量引起的; 长江下游平均流量变化趋势也同流域年平均面雨量、夏季平均面雨量变化趋势基本一致, 特别是 70 年代末以来, 下游平均流量和流域面雨量的上升趋势更加明显, 并同时 1998 年达到最高值. 长江流域大的丰水年一般对应 El Nino 年或 El Nino 次年, 表明 El Nino 对长江较大洪水可能具有一定影响.

**关键词** 长江流域 降水 面雨量 暴雨日数 气候变化 洪水事件

**分类号** P426.61<sup>4</sup>

长江流域是我国人口和经济发展的轴心. 长江的洪水是中华民族的心腹之患, 对国家可持续发展构成严重威胁. 长江的洪水是诸多自然和人为因素共同作用的结果, 气候变率和变化是其中的关键因子之一<sup>[1-3]</sup>. 研究气候变化、特别是降水变化及其对长江洪水形成的影响, 对于了解洪水历史演变规律和成因、科学地监测和预测洪水过程、以及有效地减轻洪水灾害造成的损失, 具有重要现实意义.

本文从分析器测时期降水量和暴雨频率演化规律入手, 探讨长江流域过去 50 年气候变化特征、可能原因及其对洪水的影响. 分析表明, 长江流域过去 50 年的降水发生了比较明显的年代到多年代尺度变化. 尽管目前还不能对这一变化的成因给出明确的回答, 但它已经对流域内长期洪水事件强度和演化趋势造成了显著影响, 值得给予更多的关注.

## 1 面雨量和暴雨日数、暴雨量变化

降水资料来自国家气象中心气象资料室, 包括长江流域内共 138 站的日和月平均降水量. 这些台站多数属于国家基准站和基本站, 少量为一般观测站. 为保证资料连续性和质量, 剔除了部分缺漏测严重的测站, 最终选用了 109 个气象站. 采用泰森多边形方法计算长江流

\* “十五” 国家科技攻关项目“全球环境变化对策与支撑技术研究 (2001BA611B)” 01 课题“全球与中国气候变化的检测和预测 (2001BA611B-01)” 和“全国水资源综合规划” 专题研究项目“气候变化对我国水资源情势影响的综合分析” 联合资助. 2003-07-08 收稿; 2003-11-25 收修改稿. 任国玉, 男, 1958 年生, 博士, 研究员, email: gyren@homeway.com.cn.

域的面雨量<sup>[4]</sup>,即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面雨量.1960-2001年降水变化趋势分析采用一元线性回归方法,获得各测站降水量和暴雨日数、暴雨量倾向率和趋势系数<sup>[5]</sup>.暴雨是指日降水量 $\geq 50\text{mm}$ 的降水事件,暴雨日数是指一年内出现暴雨天数,暴雨量则是指一年内所有暴雨日数降水量的总和.在109个测站中,有8个测站没有测到暴雨,它们全部分布在长江上游的四川西北部.因此,参加暴雨日数和暴雨量趋势统计的实际台站数是101个.径流量资料分别采用长江中游和下游控制站汉口和大通水文站的逐年平均流量资料,并按文献<sup>[5]</sup>方法计算了1960-2001年平均径流量趋势系数.此外,本文对季节的划分采用气象季节定义,即冬季为12-2月,春季为3-5月,夏季为6-8月,秋季为9-11月.

### 1.1 季节与年际、年代际面雨量变化

长江流域的42年年平均面雨量为1112 mm,但季节和年际的变化非常明显(图1和图2).夏季是流域内一年中降水最多的季节,平均达497 mm,占全年45%.春季、秋季和冬季平均面雨量分别为300 mm、229 mm和86 mm,分别占全年的27%、21%和8%.夏季平均面雨量与春、秋季平均面雨量的和相近,比冬季平均面雨量高出近5倍.年平均面雨量的变化在很大程度上取决于夏季的降水.夏季也是长江流域最主要的洪水易发季节.

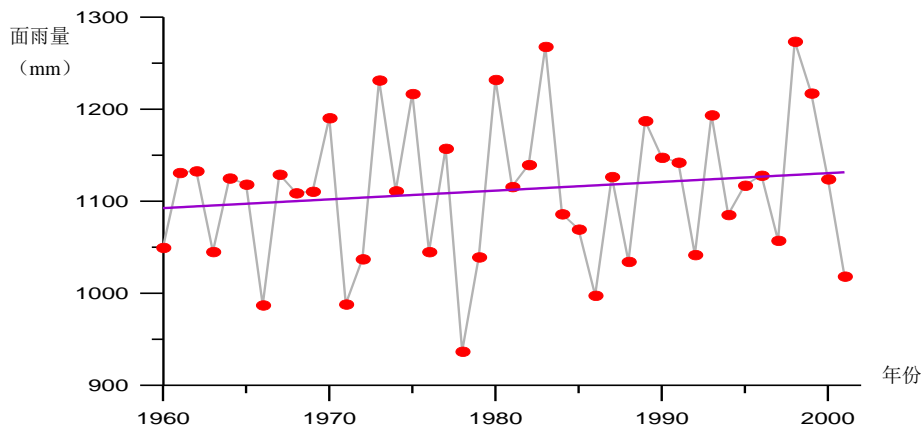


图1 长江流域年平均面雨量 (mm) 变化 (1960-2001年)

Fig.1 Change in annual mean area-rainfall in the Yangtze Basin, 1960-2001

在近42年中,年平均面雨量最少的年份是1978年,只有937 mm;最多年份是1998年,高达1274 mm.整个流域最多雨与最少雨年的平均面雨量差为337 mm.42年内其它多雨年份还有:1983年1268 mm、1980年1232 mm、1973年1231 mm、1999年1218 mm和1975年1217 mm.因此,1999年是1960年以来的第五个多雨年.42年内其它少雨年份还有:1966年987 mm、1971年988 mm、1986年997 mm和2001年1018 mm.夏季平均面雨量最少的两年是1972年和1978年,最多的两年是1998年和1980年.

年平均面雨量展现出一定年代际变化特征.如60年代年际变率比较小,表现为多数年份面雨量非常接近于多年平均值,个别年份雨量偏少;70年代初到80年代中,流域年平均面雨量出现了大幅度的年际波动;80年代中至90年代中,年平均面雨量年际波动幅度再次减小,但少雨年份多于多雨年份;进入90年代中后期以来,长江流域的年降水量变率

似乎又进入了大起大落阶段. 夏季平均面雨量的年代际变化特点与年平均面雨量相似.

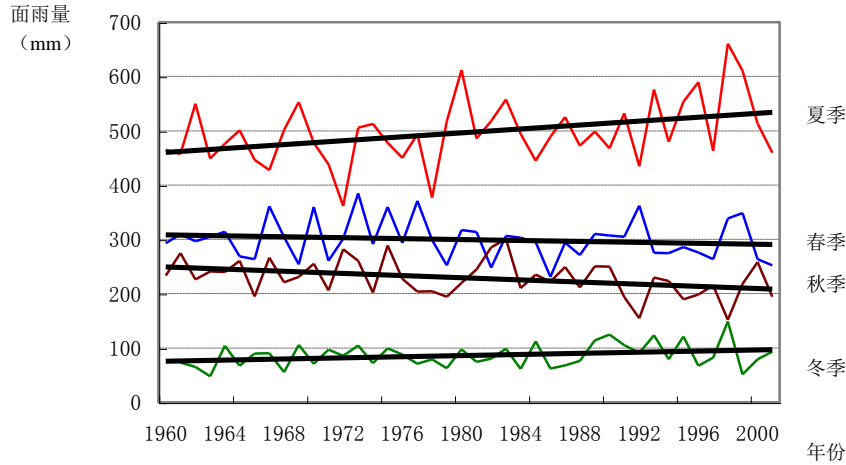


图 2 长江流域四季平均面雨量 (mm) 变化 (1960-2001 年)

Fig.2 Change in seasonal mean area-rainfall in the Yangtze Basin, 1960-2001

### 1.2 面雨量长期变化趋势

从 1960-2001 年的变化趋势看, 流域年平均面降水量呈增加趋势, 但没有通过统计显著性检验 (图 1 和表 1). 造成这一现象的原因在于, 在同一时期长江上游多数地区降水变化呈减少趋势, 与中下游变化方向相反, 致使整个流域平均面雨量上升趋势不是很显著. 但是, 从 80 年代中至 90 年代末, 长江流域年平均面雨量呈明显上升趋势. 同时, 从 42 年内各个季节的变化看, 作为汛期的夏季的平均面雨量增加是非常明显的, 增加近 100 mm; 冬季也呈比较显著的增多, 但秋季平均面雨量出现了显著减少趋势. 实际上, 长江流域是我国中东部更大范围秋雨衰减区的组成部分之一<sup>[5]</sup>. 流域春季平均面雨量有所下降, 但没有通过显著性检验.

表 1 长江流域年及四季平均面雨量的变化趋势

Tab.1 Tendencities of annual and seasonal mean area-rainfall in the Yangtze Basin

时段	春	夏	秋	冬	年
趋势系数	-0.14	0.37**	-0.36**	0.28*	0.15

\*、\*\* 分别表示通过 0.1、0.05 的信度检验

进一步分析发现, 夏季平均面雨量增加主要是因为 6-7 月降水量的显著上升引起的, 冬季平均面雨量的增加则主要由 1 月降水量的显著增多引起, 而秋季的减少主要发生在 9 月份. 因此, 在分析时期内, 年平均面雨量、特别是夏季平均面雨量增加与长江流域中下游地区的梅雨期增长或梅雨量增多有密切关系.

### 1.3 暴雨日数和暴雨量变化

图 3 给出长江流域暴雨日数的趋势系数分布情况. 可见, 自从 1960 年以来, 流域内大部分地区暴雨日数呈增加趋势, 中下游地区增加趋势更为明显. 鄱阳湖流域暴雨日数增加最显著. 暴雨日数减少的台站主要出现在四川盆地、汉江中上游和湘江上游等地, 但绝大多数

台站的减少都没有通过显著性检验. 暴雨量的变化趋势与暴雨日数非常相似.

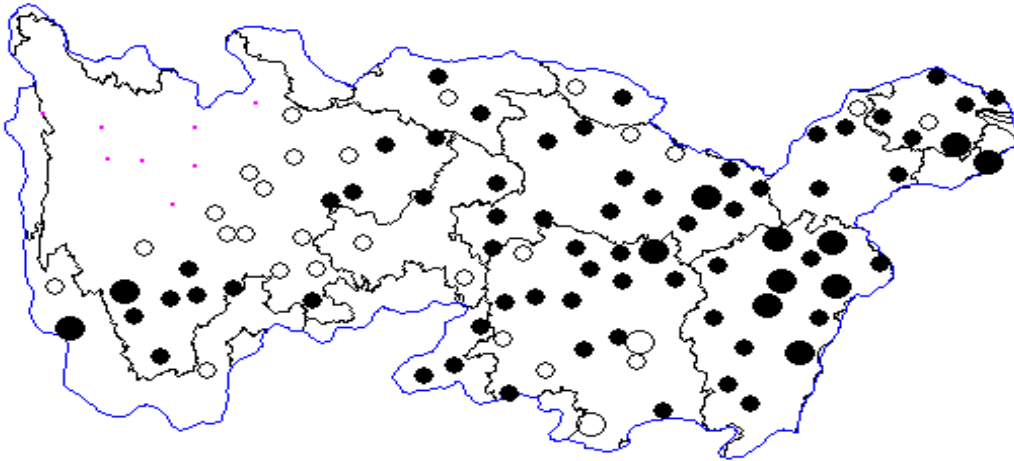


图3 长江流域暴雨日数的趋势系数(实心圆圈: 正趋势; 空心圆圈: 负趋势; 较大圆圈: 通过 0.05 信度检验; 小点: 表示没有任何暴雨发生地)

Fig.3 Tendencies of days with heavy rainfall in the Yangtze Basin (1960-2001). Solid circle: positive; Open circle: negative; Larger circle: significant at 0.05 level; Pink point: place without heavy rainfall

我们也分析了流域内年降水量和季节平均降水量的时间趋势, 发现在暴雨日数、暴雨量趋于增加的地区, 年和夏季的平均降水量一般也是上升的; 而在暴雨日数、暴雨量趋于减少的地区, 年和夏季的平均降水量一般也是下降的. 这说明, 长江中下游多数地区雨量的增加主要是由当地夏季暴雨频率增多引起.

## 2 降水变化对洪水的影响

自然状况下, 当蒸散发量一定时, 流域内的流量取决于流域的平均面雨量. 比较长江流域年平均面雨量与大通水文站年平均流量(图4)历年变化表明, 二者存在很好的关系, 相关系数达到 0.91, 显著性水平在 0.01 以上. 主要的丰水年和枯水年在流域年平均面雨量曲线上都可以找到对应关系. 1973 年、1983 年和 1998 年的洪水, 也是流域年平均面雨量变化曲线上的三个最大值年份; 1964 年是一个比较明显的丰水年, 但当年流域平均面雨量并不很多, 这可能和 60 年代初多数年份面雨量都高于多年平均值有关. 另一方面, 主要枯水年流量与平均面雨量的对应关系同样很好, 如 1972 年、1978 年和 1986 年大通年平均流量是近 40 多年中最低的, 这几年或其前一、二年的流域平均面雨量值一般也是很低的, 其中 1978 年的面雨量是 1960 年以来最低的. 由于中游汉口站同下游大通站的年平均流量变化非常一致, 因此流域年平均面雨量与汉口站年平均流量之间的关系也很显著, 相关系数 0.84, 比与大通流量的相关系数略低. 这是可以预期的, 因为流域面雨量变化应该与河口附近的控制站流量变化更相似.

从长期趋势看, 流域年平均面雨量、夏季平均面雨量和大通站年平均流量均呈上升趋势, 趋势系数分别为 0.15、0.37 和 0.24, 其中后二者分别通过了 0.05 和 0.1 的显著性检验. 流域年平均面雨量的趋势系数略低, 但自从 60 年代初以来, 主要丰水年和枯水年的年

平均流量一般均出现升高趋势, 这和大通站流量的变化情形很相似. 70 年代末、特别是 80 年代中期以来, 流域年平均面雨量和 大通站年平均流量的上升趋势都很明显, 二者又都在 1998 年达到近 40 多年来的最高值. 因此, 1998 年的特大洪水不仅与当年的过量降水有关, 也同其前 10 余年流域面雨量和流量缓慢增加所产生的累积效应有密切联系. 另外, 长江中下游多数地区暴雨日数和暴雨量的变化趋势与平均降水量相似, 也呈比较明显的上升趋势, 更是近十几年长江中下游干流河道险象丛生的直接诱因.

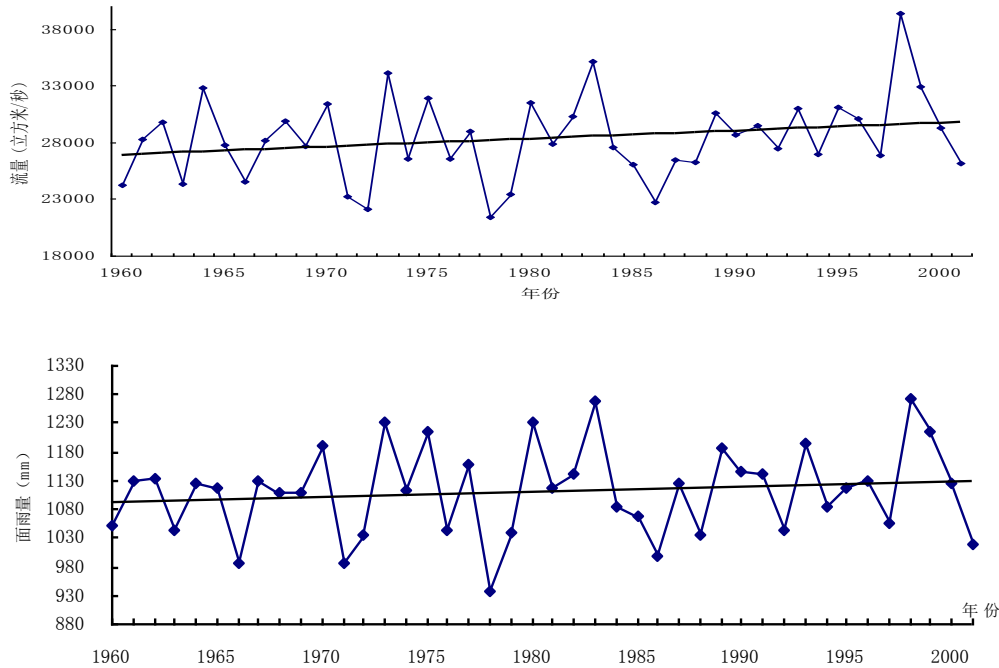


图 4 大通水文站年平均流量与长江流域年平均面雨量历年变化

Fig.4 Changes in annual mean discharge of Datong Station and annual mean area-rainfall of the river basin (1960-2001)

### 3 水情变化的可能原因

长江流域降水变化的原因还需要进一步研究. 全流域夏季和年平均面雨量的年际变化同热带东太平洋海表温度或 *SOI* (南方涛动指数) 关系不好, 但近 40 年多年来它们的趋势变化比较相似. 自 20 世纪 70 年代末以来, ENSO 事件有变得更频繁、强烈的趋势<sup>[6]</sup>, 同期的长江流域夏季和年平均面雨量也有增加趋势. 有趣的是, 在过去的 40 多年内, 尽管长江流域的枯水期与 La Nina 事件对应关系比较差, 大的丰水季节却一般都对应 El Nino 事件的后期或结束阶段, 或者在 El Nino 次年. 这和近年的研究结果是一致的<sup>[7-9]</sup>. 长江流域最多水的三年 (1973 年、1983 年和 1998 年) 夏季, 均处于较强 El Nino 事件的结束期, 其中 1983 年和 1998 年的 El Nino 是过去 100 多年中最强的, 后者也是过去至少 100 年内全球地表和对流层温度最高的一年. 这种对应关系对于预测长江流域特丰水年有一定意义, 但其随时间的稳定性及其物理机制还需要进一步研究.

各主要流域的平均面雨量变化与可能由人为引起的全球或区域气候变化的关系也是

人们关注的问题<sup>[6,10]</sup>。根据气候变化检测分析结果,过去 50 年全球地表平均气温的增暖可能主要是由大气中 CO<sub>2</sub> 浓度增加引起的<sup>[6]</sup>,我国近 50 年的增温可能也与此有关<sup>[11]</sup>。最近的气候模式模拟表明,在大气中 CO<sub>2</sub> 浓度增加的情况下,我国长江流域降水量和降水强度将增加,其中增加最明显的季节可能是冬季和夏季<sup>[12]</sup>。这一结果与本文和前人根据观测资料分析得到的过去 40-50 年长江流域年降水量、特别是夏季和冬季降水增加的结论基本一致,有助于支持长江流域降水可能至少部分地响应了全球气候变化的推断。但是,目前气候模式对区域降水变化模拟结果的可靠性还比较低,其他的气候模式给出了不同的模拟结果。将来更先进和成熟模式的模拟分析对于识别区域降水变化的自然和人为原因是关键的。近年也有研究认为,我国 90 年代以来南涝北旱降水分布型的产生与人为排放的气溶胶特别是黑碳气溶胶有关<sup>[13]</sup>,这些推论同样需要进一步的证据支持。

## 4 结论

(1) 近 40 多年来(1960-2001 年)长江流域多年平均面雨量为 1112 mm;夏季平均 497 mm,占全年 45%;春季、秋季和冬季分别为 300 mm、229 mm 和 86 mm,分别占全年的 27%、21%和 8%。年和夏季平均面雨量存在明显的年际和年代变化特征。

(2) 在 1960-2001 年的 42 年中,长江流域年平均面雨量呈增加趋势,但不显著;夏季和冬季平均面雨量呈显著增加趋势;春季和秋季平均面雨量呈下降趋势,但只有秋季的下降通过了 0.05 信度检验。

(3) 在 42 年里,长江流域在较大范围内年暴雨日数和暴雨量呈增加趋势,其中有 10% 的测站暴雨日数的增加是显著的;夏季暴雨日数和暴雨量呈增加趋势的测站明显增多,约占全部测站数量的 20%。暴雨日数和暴雨量同平均降水量的趋势变化一般是一致的。

(4) 长江流域年平均面雨量与大通站年平均流量之间存在显著的相关关系;1973 年、1983 年和 1998 年的洪水主要是由明显高于平均的流域面雨量引起的;1972 年、1978 年和 1986 年的枯水也同当年或前年的流域面雨量低值对应。

(5) 近 40 多年来,流域年平均面雨量、夏季平均面雨量以及中下游地区暴雨日数和大通站年平均流量的趋势变化是一致的,主要丰、枯水年的年平均流量一般分别呈升高趋势;70 年代末以来,流域平均面雨量、中下游地区暴雨日数同大通站流量的上升趋势更加明显,并同时于 1998 年达到最高值。1998 年的特大洪水有其直接而深厚的气候背景。

(6) 长江流域大的丰水年汛期一般对应 El Nino 事件的结束阶段或 El Nino 次年,表明 El Nino 对较大洪水可能具有一定影响;70 年代末以来的面雨量和洪水频率增加也可能与 El Nino 的低频变化有联系;人为引起的气候变化似乎在长江流域降水上留下了印痕,但目前距离可靠地识别区域降水变化的人为原因还有很多工作要做。

## 参 考 文 献

- 1 叶笃正,黄荣辉. 黄河长江流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科学技术出版社, 1996:1-53, 366-371
- 2 黄朝迎. 长江流域旱涝及其对经济的影响. 叶笃正,黄荣辉主编. 旱涝气候研究进展. 北京: 气象出版社, 1990:33-36
- 3 姜彤,施雅风. 全球变暖、长江水灾与可能损失. 地球科学进展, 2003, 18 (2): 277-284
- 4 徐晶,林建,姚学祥等. 七大江河流域面雨量计算方法及应用. 气象, 2001, 27 (11):13-16
- 5 任国玉,吴虹,陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征. 应用气象学报, 2000, 11 (3): 322330

- 6 Houghton J T, Ding Y H, et al. eds. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge: Cambridge Univ Press, 2001: 896
- 7 中国气象局国家气候中心. 98 中国大洪水与气候异常. 北京: 气象出版社, 1998: 32-85
- 8 赵振国. 厄尔尼诺现象对北半球大气环流和中国降水的影响. *大气科学*, 1996, 20 (4): 422-428
- 9 陈兴芳, 赵振国. 中国汛期降水研究及应用. 北京: 气象出版社, 2000: 21-64
- 10 刘晓东, 安芷生, 方建刚等. 全球气候变暖条件下黄河流域降水的可能变化. *地理科学*, 2002, 22 (5): 513-519
- 11 Ohmura A, M Wild. Is the Hydrological Cycle Accelerating? *Science*, 2002, 298 (5597): 1345-1346
- 12 Gao X J, Zhao Z C, Ding Y H, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. *Advance in Atmosphere Sciences*, 2001, 6: 224-230
- 13 Menon S, J Hansen L, Nazarenko Y Luo. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, 297 (5590): 2250-2253

## Changes in Rainfall and Flood Frequency in the Yangtze Basin: 1960-2001

REN Guoyu<sup>1</sup>, CHEN Zhenghong<sup>2</sup> & YANG Hongqing<sup>2</sup>

(1: National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, P.R. China;

2: Wuhan Center of Urban Meteorology technology, Wuhan 430074, P.R. China)

### Abstract

A data set of more than 100 stations was used to analyze the annual to multi-decadal changes in precipitation in the Yangtze Basin for the last 42 years (1960-2001). A comparison between the rainfall changes and discharge at Datong Station was made to investigate into the influence of climate variability on floods in the river basin. In the last 42 years, the annual, summer and winter area-averaged precipitation for the basin increased, with the summer and winter increases being statistically significant. Marked increases could be seen for most stations, especially for summer and winter seasons. Autumn, however, witnessed significant decrease in the area precipitation. Meanwhile, days with heavy rain and heavy rainfall for year and summer season also increased for most stations in the middle and lower reaches of the river, and the increase for summer is significant for more stations. Good relationship between the area rainfall and runoff of Datong Station could be found, indicating an overwhelming influence of precipitation on the river discharge and floods. The three largest floods (1973, 1983 and 1998) all occurred in the exact years with the highest area rainfall for the period analyzed. The up-going tendencies of the Datong discharge and area rainfall for the last 42 years are similarly significant, especially for summertime and for the last 20 years or so. Both of them reached to the highest values in 1998 when the severest flood of the period led to a huge loss in property and lives. It is interesting that the major floods of the river well correspond to the ENSO events in the eastern tropical Pacific.

**Keywords:** Precipitation, area rainfall, heavy rain, flood, climate change, Yangtze River basin