

Reanalysis of the Characteristics of Extreme Rainfall in the Yangtze River Basin during Recent 50 Years

Luyao Bai^{1,2}, Yanshu Rong¹

¹College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing Jiangsu

²PetroChina Pipeline R&D Center, Langfang Hebei

Email: bailuyao@petrochina.com.cn

Received: Jan. 13th, 2015; accepted: Jan. 27th, 2015; published: Feb. 4th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The Yangtze River basin is the most important hydropower base in China; however, drought and flood occurred frequently in this region recently. It is important to investigate extreme events for predicting and coping with the drought and flood disasters. On the basis of daily precipitation (1961-2010, 138 meteorological sites) for the Yangtze River basin, the temporal and spatial variation of 6 indices of extreme rainfall is analyzed. What's more, the nonlinear characteristics of 2 extreme rainfall frequency indices are analyzed by Logistic Regression Model. The results show that the spatial differences between the 6 indexes are obvious. The extreme values for the indices distribute in the transition zone from the Sichuan basin to the Qinghai-Tibet plateau and the middle to the lower reach areas of the Yangtze River basin, and the extreme maximum values distribute in several typical mountain stations. There is no obvious linear trend for the mean annual rainfall and extreme duration rainfall; however, the maximum 1-day rainfall and the total rainfall exceeding 90% threshold increase significantly. Nonlinear increasing trend of extreme frequency indices exists in the upstream and middle reaches of the Yangtze River, while it is not significant in the Sichuan basin and the downstream reaches. In a word, there are more extreme indices in districts with more extreme rainfall, contributing a lot to annual rainfall. This is the main reason of flood disaster.

Keywords

Extreme Rainfall, Temporal and Spatial Variation, Linear Trend, Nonlinear Trend, Logistic Regression Model, The Yangtze River Basin

*通讯作者。

作者简介: 白路遥(1986-), 男, 助理工程师, 主要从事油气管道地质灾害防护技术研究。

最近50年长江流域极端降水特征的再分析

白路遥^{1,2}, 荣艳淑¹

¹河海大学水文水资源学院, 江苏 南京

²中国石油管道科技研究中心, 河北 廊坊

Email: bailuyao@petrochina.com.cn

收稿日期: 2015年1月13日; 录用日期: 2015年1月27日; 发布日期: 2015年2月4日

摘要

长江流域是中国重要的水能基地, 水患灾害频繁, 研究该流域的极端降水事件的分布及变化特征, 对预测及应对旱涝灾害影响有重要意义。本文利用长江流域1961~2010年最近50年逐日降水量资料, 分析了4个极端降水量指标和2个极端降水频率指标的时空变化及趋势变化特征, 特别地利用Logistic回归模型, 分析了2个极端降水频率指标的非线性趋势特征。结果表明: 整个长江流域各种极端降水量指标的空间差异明显, 大值区分布在长江流域上游四川盆地向青藏高原的过渡区和中下游地区, 极端最大值分布在流域中几个典型的高山测站; 最大1日降水量和超90%阈值降水总量随时间有显著的线性增大现象, 但是区域平均年降水量和极端过程降水随时间没有明显的线性趋势; 长江上游和中游一带极端频率指标中存在显著非线性增大趋势, 四川盆地和下游地区极端频率的非线性趋势不明显。极端降水量大的区域, 极端指标出现频率也很高, 对年降水量贡献很大, 是产生洪涝灾害的重要原因。

关键词

极端降水, 时空变化, 线性趋势, 非线性趋势, Logistic回归模型, 长江流域

1. 引言

在全球气候变暖的背景下, 世界各地的气候均发生了不同程度的变化, 高温热浪、强降水等极端气候事件变得频繁和强烈[1]。气候变暖使大气持水能力增加[2], 水分循环变化[3] [4], 未来极端事件的强度有明显增大的趋势[1] [5]-[7], 极端降水研究成为热点问题。

长江流域是中国重要的水能产地, 同时水患灾害频繁, 历史上的洪涝灾害都是由极端降水事件造成的[8]。例如, 1954年是长江全流域典型的重大洪涝灾害年, 该年4月份长江流域便提前进入汛期, 受到多次暴雨、大暴雨袭击后, 上游宜昌站出现了 $66,800 \text{ m}^3/\text{s}$ 最大洪峰流量, 受灾人口达 1890 万, 淹死 3.4 万人, 淹没良田 $3.17 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 损失数十亿元人民币[9]。1998年7~8月份, 经历了8次持续大到暴雨过程后, 长江中下游干流从沙市至螺山、武穴至九江共计 359 km 的河段水位超过了历史最高水位。尽管1998年洪涝灾害程度略小于1954年, 但是, 洪涝灾害造成的经济损失却高达 2600 亿元人民币[10] [11]。因此, 全面详细地分析长江流域极端降水事件的特征及时空分布规律, 提高对极端降水的认识和预测水平, 对今后洪涝灾害的预测及防灾减灾都有重要意义。

近年来, 对长江流域的年和季节降水量、第95%和第99%极端降水阈值、第95%和99%极端降水总量、超第95%和第99%极端降水阈值的天数、极端降水强度、连续5日降水量、暴雨日数和暴雨量、降水日数和平均降水强度、以及强降水间隔时间的变化都进行了详细的讨论[3] [12] [13]。研究表明, 长江

流域夏季降水量有增加的趋势[14], 不同等级降水有不同的变化特征, 其中小雨和中雨出现次数有减少趋势, 而夏季暴雨量和暴雨日数明显增多[15], 同时, 年平均降水强度有微弱增强, 降水日数有微弱减小, 但是, 超第 95% 和第 99% 极端降水阈值的天数和极端降水强度有显著增大。各项指标都存在突变现象, 极端降水强度和极端降水量突变时间基本在 1980 年代中期[13], 而降水日数突变时间大约出现在 1970 年代中后期[15]。伴随着气候变暖, 中下游地区极端降水增加更为明显[12]-[16], 未来长江流域日降水量和年降水量的强度也将有所增强[17] [18], 发生 1954、1998 年那种强度的洪水过程可能更多。

降水极端性体现在多个方面, 造成重大灾害的常常是持续的极端降水过程, 这种持续性反映在日降水过程中, 就是指每天都有强降水出现并持续多日, 而这正是洪涝灾害预测的关键点。前期的研究工作曾对连续 5 天最大降水量做过分析[13], 但这是不全面的。本文针对这个问题, 选择了能够强调极端持续性特征的指标, 包括极端过程降水量和强降水过程次数, 讨论长江流域的极端降水问题, 同时, 以世界气象组织确定的第 90% 分位数降水量为极端降水标准, 探讨超阈值总量和超阈值次数, 还结合年降水量和最大 1 日降水量, 从时间变化和空间分布上, 详细讨论了长江流域的极端降水问题。另外, 本文还使用了 Logistic 回归方法, 分析极端降水频率的趋势变化特征。籍此对长江流域极端降水问题有更多和更广泛的认识。

2. 资料及研究方法

2.1. 资料说明

本文所用的资料来自于国家气象信息中心, 考虑到一些站点的缺测天数以及台站迁移等影响, 选择了长江流域 1961~2010 年的 138 个无缺测、无站点迁移站点的逐日降水量数据。在数据处理过程中, 对原始资料进行了质量检查, 最大限度提高资料的可靠性。长江流域气象站点分布见图 1。

本文使用了 6 个极端降水指标, 包括年降水量、最大 1 日降水量、超 90% 阈值日降水量、极端过程降水量、超 90% 阈值降水量日数和强降水过程次数。前 4 个是关于极端降水量的指标, 后两个是关于极端降水频率的指标。表 1 给出了它们的定义, 其中需要特别说明的是两个指标, 其一是极端过程降水量, 该指标是从一年中日降水量 ≥ 1 mm 的连续降水过程中挑选出来的过程降水量的最大值; 其二是强降水过程次数, 该指标是一年中挑选出日降水量 ≥ 25 mm 的连续降水过程的总次数, 这样的连续降水过程可能是两天, 也可能是多日。

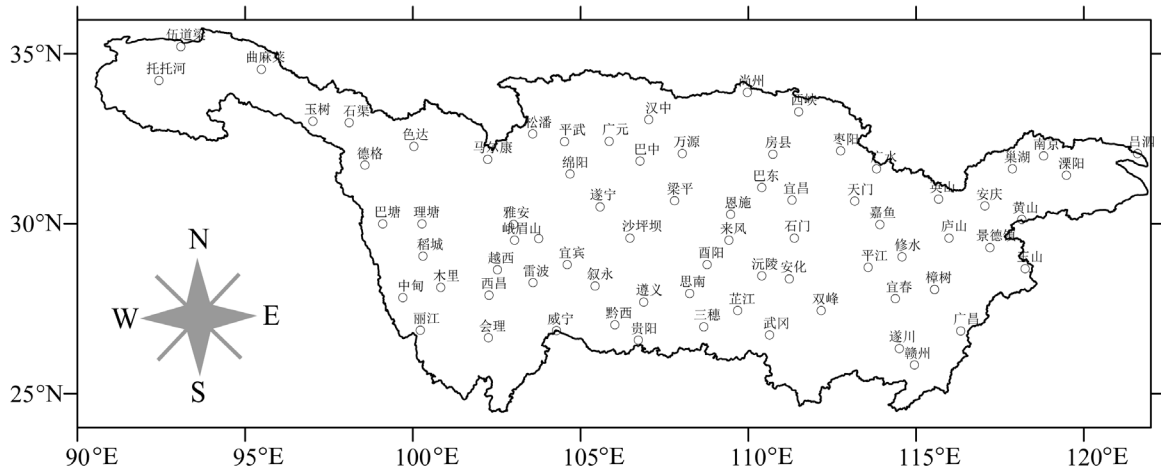


Figure 1. The distribution of meteorological stations in the Yangtze River Basin
图 1. 长江流域气象站点的空间分布

Table 1. The definition of extreme precipitation index
表 1. 极端降水指标定义

序号	指标名称	定义	单位
1	年降水量	年内逐日降水量之和	mm
2	最大 1 日降水量	年内日降水量的最大值	mm
3	超 90% 阈值降水量	年内日降水量 > 90% 分位值的总降水量	mm
4	极端过程降水量	年内连续日降水量 ≥ 1 mm 的最大过程降水量	mm
5	超 90% 阈值降水日数	年内日降水量 > 90% 分位值的降水日数	day
6	强降水过程次数	年内连续日降水量 ≥ 25 mm 降水过程的次数	次

2.2. 研究方法

2.2.1. 线性趋势估计

利用一元线性回归模型, $y = a + bt$, 建立因变量 y 与自变量 t 的一元线性回归模型, 计算回归系数 b , 并以此作为因变量 y 随时间 t 的线性变化趋势。将线性趋势值放大 10 倍, 得到的便是因变量 y 随时间 t 每 10 年的线性趋势变化值[19]。最后, 用因变量 y 与时间 t 的相关系数来检验趋势值的显著性, 即相关系数达到统计显著性水平 0.05 时, 便可认为该线性趋势值是显著的。

2.2.2. 非线性趋势估计

本文对极端事件频率的趋势用 Logistic 回归模型估计[20]。Logistic 回归模型首先定义某事件发生概率 P_i , 则 $\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right)$ 为事件发生概率与不发生概率之比, 并称之为优势比(Odds)。将优势比的自然对数用多元回归方程来描述, 则

$$\ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_m x_m \quad (1)$$

其中, x_1, x_2, \dots, x_m 为影响事件概率 P_i 变化的自变量, β_0 和 β_m 分别为回归截距和回归系数。事件发生概率的 Logistic 回归模型的一般形式可表示为

$$\text{logit}P = \ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_m x_m \quad (2)$$

作反对数变换, 可以得到

$$\frac{P}{1-P} = e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_m x_m} \quad (3)$$

式(3)为优势比的表达式。如果比较事件 x_i 与 $x_i + 1$ 的优势比, 可以用两个事件的优势相除, 便可得到优势比率(Odds Ratio, 简称为 OR), 其表达式为

$$\text{OR} = \frac{\frac{P(x_1)}{1-P(x_1)}}{\frac{P(x_1+1)}{1-P(x_1+1)}} \quad (4)$$

则

$$\ln(\text{OR}) = \ln\left(\frac{P(x_1)}{1-P(x_1)}\right) - \ln\left(\frac{P(x_1+1)}{1-P(x_1+1)}\right) \quad (5)$$

如果式(3)右侧是一元回归方程, 并将其代入式(5), 式(5)可简化为

$$\ln(\text{OR}) = \beta_1 \quad (6)$$

再做反对数变换, 可以得到

$$\text{OR} = e^{\beta_1} \quad (7)$$

由式(7)可知, OR 是一个与时间序列长度有关的指数函数, $\text{OR} > 1$, 表示时间频率有增加的趋势, $\text{OR} < 1$, 表示事件频率有减小的趋势。趋势显著性检验可用 β_1 与 β_1 的标准误差之比作为统计量进行 χ^2 检验。

Logistic 回归模型为概率型非线性回归模型, 该方法不仅广泛应用于疾病与影响因素的研究中, 也被应用于概率降水及地质灾害的概率预报[21]-[23]。由于本文选择的 2 个极端事件频率指标是典型的两分类变量, 即事件发生或不发生, 它们与时间的关系是典型的非线性关系, 事件概率回归模型不能拟合这种非线性关系, 而 Logistic 回归模型恰恰可以进行非线性估算, 这是本文选择 Logistic 回归模型对 2 类极端频率指标估计趋势的原因。此外, Logistic 回归对极端事件频率趋势的估计有良好的效果, 容易检测到极端气候事件频率微弱的变化趋势[24]。

3. 结果分析

3.1. 极端降水指标时间变化特征分析

为了研究整个长江流域的极端性特征, 对每个极端指标在整个流域取算术平均值, 得到了流域平均指标的时间序列, 图 2 给出了 6 个区域平均极端指标的时间序列变化图, 图中的粗实线是三次样条函数变化曲线, 用以分析各指标时间序列的年代际变化特征。

图 2(a)是区域平均年降水量的时间序列图, 其中虚线和长短线是降水量均值加 1 倍和 2 倍标准差线, 是年降水量相比于多年平均值偏多和极端多的标志。由该图可知, 长江流域年降水量的变化范围为 900~1300 mm, 多年平均降水量约为 1114 mm, 其中最大值出现在 1998 年, 最小值出现在 1978 年, 约为 935 mm, 极差约 350 mm。从区域平均降水量看, 仅有 1998 年降水量达到了 2 倍标准差水平, 是降水量极端多年份, 该年长江流域发生了全流域的特大洪水灾害。有 10 个年份区域平均降水量达到并超过 1 倍标准差, 属于降水量偏多年份, 它们分别是 1970、1973、1975、1980、1983、1989、1998、1999、2002、和 2010 年, 在这 10 年中, 1983 年的降水量也异常偏多, 接近 2 倍标准差水平, 该年多雨程度仅次于 1998 年。由图 2(a)的三次样条曲线可以看出, 在 1980 年代以前, 三次样条曲线在平均值附近波动, 而 1980 年代以后, 三次样条曲线振幅显著增强。表明了长江流域年降水量有 20 年左右的年代际变化周期, 而且年代际波动的强度有随时间增大的特征。用一元回归拟合年降水量, 可以发现, 年降水量的线性趋势达到了 $-0.9 \text{ mm}/10\text{a}$, 存在微弱的下降趋势, 但是没有通过统计显著性检验。因此, 长江流域区域平均年降水量无明显的变化趋势。

图 2(b)是流域平均最大 1 日降水量的时间序列图, 可以看到, 流域平均最大 1 日降水量约为 83.5 mm, 其中最大值出现在 1998 年, 达到了 102.2 mm, 最小值出现在 1976 年, 达到了 70.4 mm。从三次样条曲线可以看出, 最大 1 日降水量存在 30 年左右的年代际变化周期, 在 1960~1990 年期间, 该指标有减小现象, 在 1990 年以后, 有增大现象。该指标的线性趋势达到了 $1.2 \text{ mm}/10\text{a}$, 通过了 0.1 的统计显著性检验。因此, 流域平均最大 1 日降水量具有线性增加的趋势。

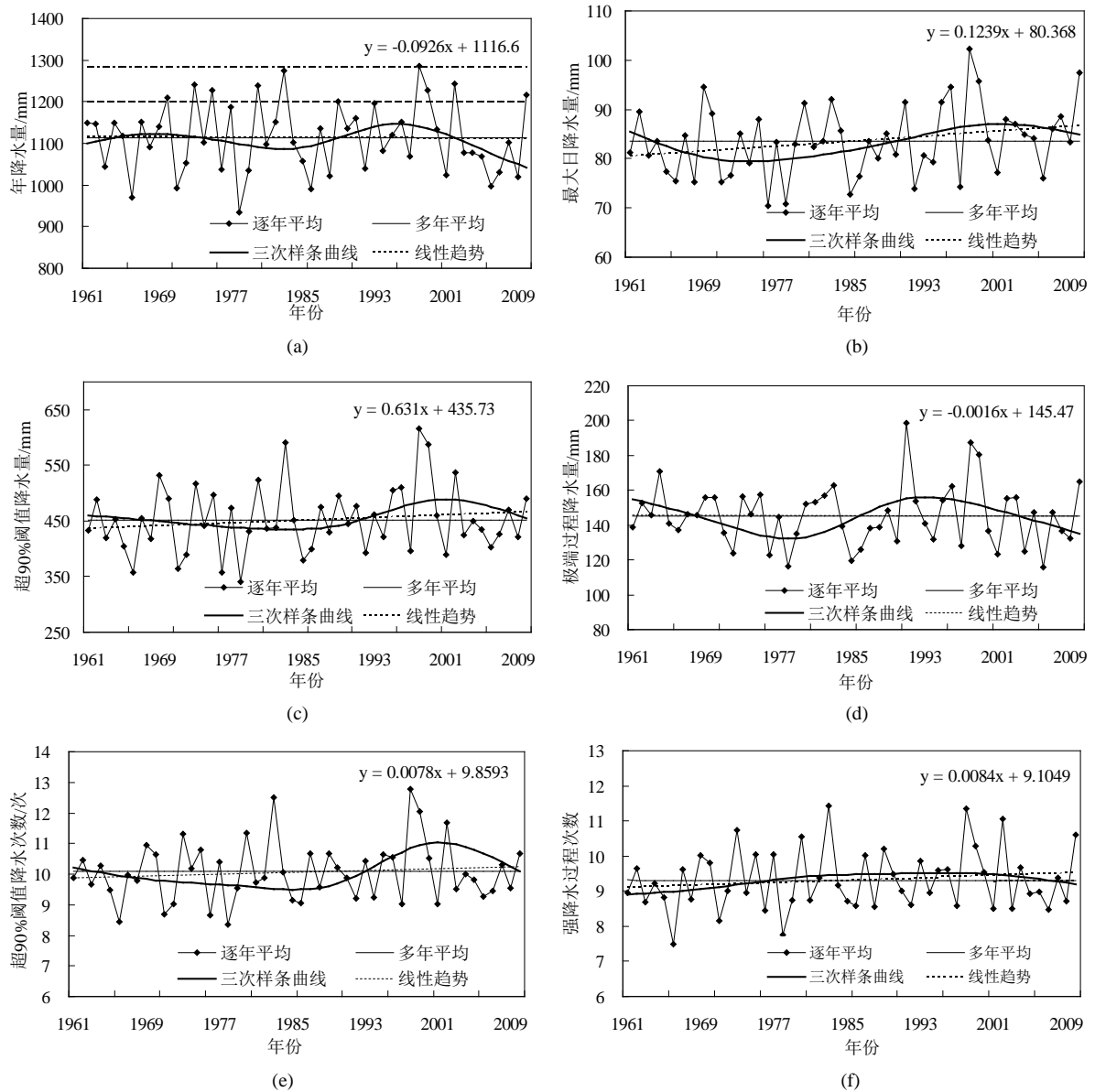


Figure 2. The annual variability of extreme indexes of the Yangtze River Basin. (a) Annual precipitation (mm); (b) Maximum amount of daily precipitation (mm); (c) R95p (mm); (d) Extreme process precipitation (mm); (e) Annual count of days when R1d above 90th percentile (day); (f) Times of heavy precipitation processes (times)

图 2. 长江流域极端指标的年际变化。(a) 年降水量(mm); (b) 最大 1 日降水量(mm); (c) 超 90% 阈值降水量(mm); (d) 极端过程降水量(mm); (e) 超 90% 阈值降水日数(day); (f) 强降水过程降水次数(times)

超 90% 阈值降水量围绕均值波动变化明显(见图 2(c)), 其中多年平均值约为 450 mm, 约占多年平均降水量的 40%, 最大值也出现在 1998 年, 达到了 615.5 mm, 最小值出现在 1978 年, 仅为 340.3 mm, 二者相差约为 270 mm。由线性趋势线可以看出, 超 90% 阈值降水量呈现增加的趋势, 气候倾向率达到 6.3 mm/10a, 但是仍未达到统计显著性水平, 因此无明显趋势变化。同时, 根据三次样条曲线可以看出, 1990 年代前, 降水量大多位于均值以下, 而 1990 年至今, 降水量呈现增加的趋势。

多年平均极端过程降水量约为 145 mm, 年际变化明显(见图 2(d))。最大值出现在 1991 年, 约为 200 mm, 平均持续降水日数达到了 8.1 天, 最小值出现在 2006 年, 约为 116 mm, 平均持续降水日数仅为 6.7

天。根据三次样条曲线可以看出, 极端过程降水量依次呈现出减小、增加、减小的过程。与其它极端降水指数不同, 近 50 年来, 极端过程降水量几乎没有趋势变化。

由图 2(e)可见, 多年平均超 90% 阈值降水次数约为 10.1 次, 其中最大值仍出现在 1998 年, 达到了 12.8 次, 最小值出现在 1978 年, 仅为 8.3 次。在三次样条曲线中显示, 1990 年代以前, 超 90% 阈值降水次数总体低于平均值, 而 1990 年代以后, 该指标整体高于平均值。因此, 近 20 年该指标出现频率较高, 但根据线性趋势可以看出, 从 50 年的尺度看, 这种增加的趋势并不明显。

多年平均强降水过程次数约为 9.3 次(见图 2(f)), 平均每次持续时间约为 1.15 天, 其中最大值发生在 1983 年, 约为 11.4 次, 而最小值发生在 1966 年, 不足 7.5 次。因此, 不同年份强降水过程次数差异明显。从三次样条曲线中看到, 在 1980 年代前该项指标呈现增加的趋势, 而 1980 年至今有微弱的下降趋势, 显示出它的变化周期大约在 30 年左右。从线性趋势中可以看出, 强降水过程次数整体呈现增加的趋势, 气候倾向率达到了 0.08 次/10a, 但是, 未通过统计显著性检验。因此, 该指标的增加趋势并不明显。

3.2. 极端降水指标空间分布特征分析

由于长江流域降水特征的空间差异很大, 为了了解各个站点不同指标的平均强度和极端强度, 对各个站点的极端指标取多年平均值, 得到平均指标的空间分布, 从每个站点各降水指标的时间序列中挑选出最大值, 得到各个指标的极端最大值分布, 并由图 3 给出平均指标的极端指标的空间分布图。

图 3(a)和图 3(a1)分别是多年平均和极端年降水量的空间分布, 可以看出, 长江流域年降水量空间差异显著, 呈现出从源头到东部沿海逐渐增大的特征, 变化范围为 280~2300 mm, 长江流域中下游的年降水量普遍高于源区 8 倍以上。最小值位于长江源区伍道梁站, 多年平均年降水量仅为 285.8 mm, 最大值位于安徽黄山站, 达到了 2306.5 mm。极端年降水量仍呈现出由内陆向沿海地区逐渐增加的分布特征, 长江源区极端年降水量最小, 仅有 500 mm 左右, 中下游地区极端值可达到 3000 mm 左右, 其中流域极端最大年降水量仍位于安徽黄山站, 达到了 3325.4 mm, 约为该站多年平均降水量的 1.4 倍; 最小值位于长江源区伍道梁站, 为 429.4 mm, 是该站多年平均值的 1.5 倍。统计表明, 流域内共有 34 个(占区域总站数的 25%)站点, 极端年降水量超过了 2000 mm, 这些站点主要位于四川盆地到青藏高原的过度地区以及流域下游地区, 特别是几个高山站, 包括庐山、峨眉山、黄山等站点, 无论是平均值还是极端值均比其周围测站大, 表明地形对降水的影响是显著的。

图 3(b)和图 3(b1)分别为多年平均和极端最大 1 日降水量的空间分布, 可以看出, 平均最大 1 日降水量仍具有内陆向沿海逐渐增大的特征, 变化范围约为 20~140 mm, 最小值位于长江源区伍道梁站, 仅为 20.8 mm; 最大值有两个中心, 分别位于四川峨眉山站和江西庐山站, 达到了 142.1 mm 和 140.4 mm 的强度, 这两个最大值中心也与地形有关, 它们都是高山站, 前者的海拔高度达到了 3074 m, 后者达到了 1165 m, 地形的强迫导致降水量较大。极端最大 1 日降水量变化范围约为 30~400 mm, 最小值仍位于长江源的伍道梁站, 仅为 37.1 mm, 表明该站从未出现过达到暴雨的日降水量; 最大值有多个中心, 其中最强的中心位于江西省广昌站, 极端最大 1 日降水量达到了 393.8 mm。统计分析表明, 研究区域内共有 83 个(大约 60%)站点极端最大 1 日降水量达到了 100~250 mm, 属于大暴雨量级, 30 个(大约 22%)站点极端超过 250 mm 以上, 达到了特大暴雨量级。因此, 除源区外, 长江流域大部分地区极端日降水量均能达到大暴雨量级, 危害极大。

图 3(c)和图 3(c1)为多年平均和极端超 90% 阈值降水总量的空间分布。第 90% 降水阈值是每个站点的 1961~2010 年的逐日降水量(≥ 1.0 mm)按升序排列后取的第 90% 分位值, 超 90% 阈值降水量是指每年超过该分位值降水量的总和。长江流域第 90% 降水阈值的空间变化范围约为 6~30 mm, 多年平均值可达到 80~1000 mm, 该指标占总降水量的比例约在 30%~50% 之间, 其中, 有 57.25% 的站点这一比值达到了 40%

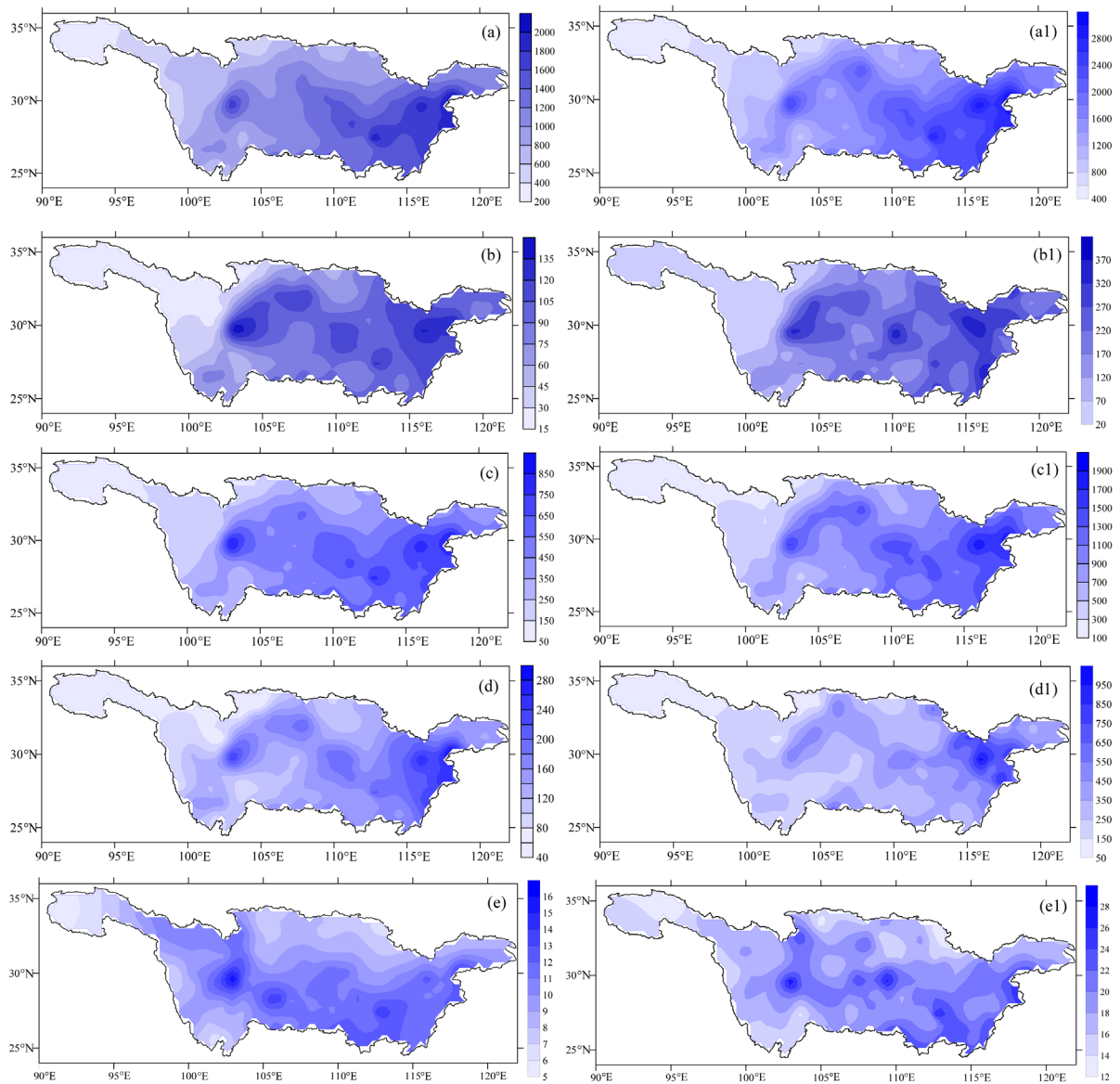


Figure 3. The spatial distribution of average and extreme indexes. (a) Average annual precipitation (mm); (a1) Extreme annual precipitation (mm); (b) Average maximum amount of daily precipitation (mm); (b1) Extreme maximum amount of daily precipitation (mm); (c) Average R95p (mm); (c1) Extreme R95p (mm); (d) Average extreme process precipitation (mm); (d1) Maximum extreme process precipitation (mm); (e) Average annual count of days when R1d above 90th percentile (day); (e1) Extreme annual count of days when R1d above 90th percentile (day); (f) Average times of heavy precipitation processes (times); (f1) Extreme times of heavy precipitation processes (times)

图 3. 平均和极端降水指标的空间分布。(a) 平均年降水量(mm);(a1) 极端年降水量(mm);(b) 平均最大 1 日降水量(mm); (b1) 极端最大 1 日降水量(mm); (c) 平均超第 90% 阈值降水总量(mm); (c1) 极端超第 90% 阈值降水总量(mm); (d) 平均极端过程降水量(mm); (d1) 最大极端过程降水量(mm); (e) 平均超 90% 阈值降水量日数(day); (e1) 极端超 90% 阈值降水量日数(day); (f) 平均强降水过程次数(次); (f1) 极端强降水过程次数(次)

以上，特别是四川盆地的乐山和雅安站甚至达到了 50% 以上。平均超 90% 阈值降水总量的空间分布(图 3(c))中有多个最大值中心，其中上游的最大值中心，位于峨眉山和雅安一带；中下游有多个中心，以安徽黄山站为最大，达到了 961.8 mm，占该站平均年降水量的 41.7%。最小值位于长江源区的托托河站，达到了 85.5 mm，占年降水量的 30%。极端超 90% 阈值降水总量(见图 3(c1))的变化范围约为 200~2000 mm，

比平均指标大 2 倍以上。该图中仍存在多个极值中心,其中,以江西省庐山站最大,达到了 1940.5 mm,约占该年平均年降水量的 64%。最小值出现在长江源区的曲麻莱站,仅为 198.2 mm,约占该年平均降水量的 36%。统计结果表明,共有 109 个(占区域总站数的 79%)站点极端超 90% 阈值降水总量对平均年降水量的贡献超过了 50%,甚至一些站点,如四川绵阳站达到了 73.3%。因此,长江流域每年极端降水量的比例相当高,对该流域的危害也相当大。

图 3(d)和图 3(d1)分别为平均和极端最大过程降水量的空间分布。从图 3(d)可以看出,该指标的空间变化范围达到了 40~330 mm,长江上、中 and 下游都有数值较大的区域,其中,上游的最大值中心在四川省雅安一带,达到了 239.2 mm,下游在安徽省黄山站,达到了 325.3 mm。最小值仍是在长江源区,仅为 44.1 mm。极端最大过程降水量的空间变化范围约为 50~1000 mm。尽管该指标有多个大值中心,但是下游大值中心最强,位于江西省庐山站,达到了 1051.0 mm,是该站平均过程降水量的 3.9 倍以上,庐山站的这次极端降水过程持续了 9 天,平均降水强度达到了 116.7 mm/d。而极端过程降水量的最小值位于长江源区伍道梁站,仅为 89.2 mm,但是,降水日数却持续了 12 天,平均降水强度仅为 8 mm/d。因此,长江流域极端过程降水量空间差异也十分明显。

图 3(e)、图 3(e1)、图 3(f)和图 3(f1)分别是平均和极端超 90% 阈值降水日数,以及平均和极端强降水过程次数的空间分布。与前面涉及的极端降水指标不同,超 90% 阈值降水日数和强降水过程次数反映的是极端降水出现频率的变化。

在平均超 90% 阈值降水日数的空间分布图中(见图 3(e)),分布特征有明显变化,长江流域的南部指标数值偏大,北部数值偏小;由西向东,源区平均 8 天左右,长江中下游平均在 10 天以上。在极端超 90% 阈值降水量的日数图中(见图 3(e1)),大值中心更为凌乱。大约有 70% 的站点极端超 90% 阈值降水日数达到了 15 天以上,这些站点大致分布在四川盆地西部地形较高地区和长江流域中下游,特别是四川省峨眉山站极端超 90% 阈值降水日数达到了 29 天;长江源区发生频率较低,特别是源区伍道梁和曲麻莱站仅为 13 天。

强降水过程是指连续逐日降水量均达到或超过大雨(≥ 25 mm)量级的降水过程,因此,该指标强调的是持续降水时间发生的频数,该指标比起超 90% 阈值降水量日数指标更能反映极端降水频率的强度。从图 3(f)中可以看到,该指标在长江源区发生的次数不足 1 次;在中下游地区,该指标的数值可达 10 次以上;在四川省和云南省境内,该指标的平均次数可达 5 次以上。极端强降水过程次数的空间差异也很明显(见图 3(f1)),呈现出由西北向东南逐渐增加的特征,变化范围约为 2~33 次。最小值位于长江源区,极值中心位于四川盆地和流域下游。统计发现,共有 43 个站点(占总站数的 31%)极端强降水过程次数达到了 20 次以上,超过多年平均发生次数的 1.5 倍以上,其中最大值位于安徽省黄山站,达到了 33 次,该次过程发生在 1999 年 6 月 24 日至 7 月 1 日,持续日数达到了 8 天,过程降水量达到了 813.5 mm,平均降水强度超过了 100 mm/d。对于长江源区而言,尽管日降水量小,年降水量少,但是仍有连续日降水量达到甚至超过 25 mm 的极端状况。

3.3. 极端降水指标趋势变化特征分析

为了进一步了解长江流域极端降水的变化,本文对极端降水指标(包括年降水量、最大 1 日降水量、超 90% 阈值降水量和极端过程降水量)用一元回归模型进行了线性趋势分析,对极端降水频率指标(包括超 90% 阈值降水日数和强降水过程次数)用优势比率进行了非线性趋势分析。

3.3.1. 线性趋势分析

图 4 给出了 4 个极端降水量指标线性趋势的空间分布,趋势数值的大小用颜色深浅区别,在图的右侧用灰度等级标出,图中向下三角形为趋势减小,向上三角形为趋势增加,实心三角为通过显著性水平

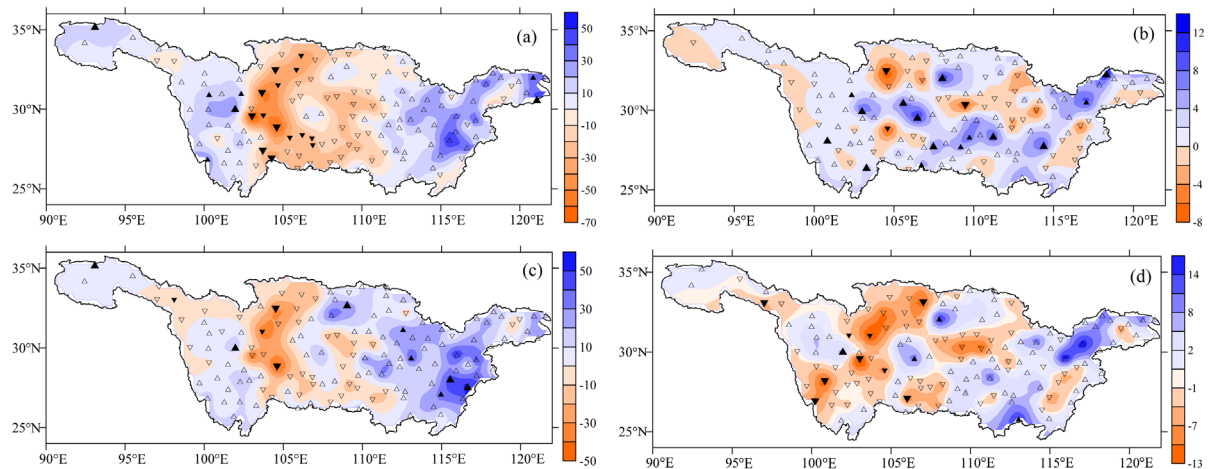


Figure 4. The spatial distribution of the linear trend of extreme indexes. (a) Annual precipitation (mm); (b) Maximum amount of daily precipitation (mm); (c) R95p (mm); (d) Extreme process precipitation (mm)

图 4. 极端降水量指标线性趋势的空间分布(mm/10a)。(a) 年降水量；(b) 最大 1 日降水量；(c) 超 90% 阈值降水量；(d) 极端过程降水量

检验的站点。由图 4(a)可见，从四川盆地到长江中游以负趋势为主，减少的强度大约每 10 年 $-5\sim-60$ mm，减小强度最大的地区在峨眉山，达到了每 10 年减少 84 mm；减少站点的数量约占总站数的 46%，通过统计显著性 0.1 以上水平检验的站点有 14 个，主要集中在四川盆地一带。年降水量增加的地区主要分布在长江源区到四川盆地之间的区域和下游地区，源区附近年降水量大约每 10 年增加 5~20 mm，下游增加的强度达到了每 10 年 30~50 mm，增大最显著的地区是江西省樟树站，达到了每 10 年增加 53 mm。统计表明，趋势增加的站点数量约占总站数的 54%，但达到 0.1 以上统计显著性水平的站点只有 7 个。因此，整个长江流域年降水量趋势变化差异也是明显的。

最大 1 日降水量的趋势空间分布特征见图 4(b)，长江流域中有 89 个站点表现为增加的趋势，约占总站数的 65%，达到 0.05 显著性水的站点共计 15 个；趋势显著减小的站点仅为 3 个，其余站点无明显增加或减小的趋势。因此，流域最大 1 日降水量整体呈现增加的趋势，其中，增加趋势最大的站点位于安徽巢湖，达到了每 10 年增加 13.5 mm 的强度。

由图 4(c)可以看到，有 93 个站点超 90% 阈值降水总量指标呈现出升高的趋势，这些站点主要分布在下游、四川省南部和云南省北部以及源区附近，约占总站数的 67%，其中有 8 个站点达到了 0.1 以上的统计显著性水平；该指标增大最显著的站点是江西省庐山站，达到了每 10 年增加 56 mm 的强度。流域上游大部地区表现为减小的趋势，趋势减小的站点数量占总站数的 33%，其中减小最显著的是湖北宜宾站，达到了每 10 年减小 52 mm 的强度。从区域平均角度看，超 90% 阈值降水总量指标整体呈现增加的趋势。

在极端过程降水量线性趋势的空间分布中(见图 4(d))，趋势增加与减少的区域相间分布，其中，该指标增加最显著的地方出现在下游的江西省庐山站，达到了每 10 年增加 18.7 mm 的强度；该指标减小最显著的地方出现在上游的四川省峨眉山站，达到了每 10 年减少 18.5 mm 的强度。而趋势增加与减小的比例各约 50%，达到趋势统计显著性增加的站点仅有 4 个，达到统计显著性减小的站点有 9 个。从区域平均角度分析，该指标无明显变化趋势。

3.3.2. 非线性趋势分析

图 5(a)和图 5(b)分别给出了超 90% 阈值降水日数和强降水过程次数非线性趋势(即优势比率)的空间分

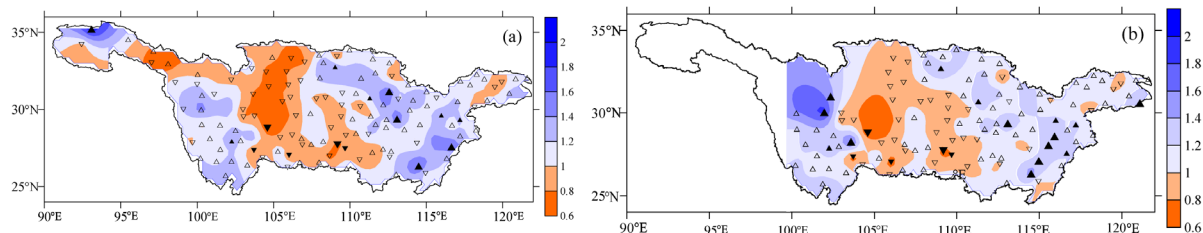


Figure 5. The spatial distribution of the nonlinear trend of extreme indexes. (a) Annual count of days when R1d above 90th percentile (day/10a); (b) Times of heavy precipitation processes (times)

图 5. 极端降水频率指标非线性趋势的空间分布。(a) 超 90% 阈值降水日数(天/10a); (b) 强降水过程降水次数(次/10a)

布，其中橘色区域为优势比小于 1，代表趋势减小；蓝色区域为优势比大于 1，代表趋势增加，其它说明与图 4 一致。

有图 5(a)可以看出，优势比率小于 1 的区域大致分布在长江流域的上游，主要集中在四川盆地一带，这是超 90% 阈值降水日数存在减小趋势的地方；在优势比率大于 1 的区域内，大值区集中在源区、云贵高原和下游，表明这里的超 90% 阈值降水日数明显增多，其中源区最大值位于伍道梁站，优势比率达到了 1.98，下游最大值位于黄山至庐山一带，优势比率也达到了 1.5 以上。在趋势增加的区域中，有 9 个站点达到了统计显著性 0.05 水平的检验，而趋势减小的区域中，没有达到统计显著性的站点。

在图 5(b)中可以看到，四川盆地是优势比率明显偏小的地区，其余 60% 的地区优势比率都大于 1，这里是强降水过程次数逐渐升高的区域，其中最大优势比率出现在四川盆地向青藏高原的过度地区，最大值达到了 1.5 倍以上。在趋势增加的区域中，也有 9 个站点达到了统计显著性 0.05 水平的检验，在趋势减小的区域中，没有达到统计显著性的站点。

因此，超 90% 阈值降水日数和降水过程次数这两个频率指标趋势明显增加的区域主在上游和中游，在四川盆地和下游区域变化不明显。

4. 结论

本文通过对长江流域 138 个气象站点最近 50 年的 6 个极端降水指标的分析，主要得出如下结论。

1) 长江流域 6 个极端降水指标都有显著的时空变化特征。6 个区域平均极端降水指标有明显的年际和年代际变化特征，年代际变化周期基本在 20 年以上。在空间分布上，长江流域极端降水指标都呈现由源区向沿海地区逐渐增多的分布特征，空间差异十分明显，就多年平均年降水量而言，长江源区与中下游地区相差 8 倍以上，其它极端指标中，源区与中下游的站点也相差很大。强降水过程次数指标，在长江源区平均不足 1 次，长江上游平均在 5~10 次，其它地区大约在 10~20 次，而极端强过程降水次数可高达 25~33 次。各指标的极值中心主要位于四川盆地向青藏高原的过渡地区以及流域的中下游地区，并集中在高山观测站附近。

2) 长江流域极端降水量的强度很大。极端最大年降水量是多年平均年降水量的 1.2~1.7 倍；极端最大 1 日降水量是平均最大 1 日降水量的 1.5~2.5 倍；超 90% 阈值降水总量是该指标平均值的 1.5~2.0 倍；极端过程降水量是平均值 1.5~3.0 倍，长江源区一些站点甚至达到 8.0~10.0 倍。极端降水频率也很高，通常平均超 90% 阈值降水量日数可达到 8~10 天，有些年份中，极端超 90% 阈值降水量日数可达到 15~30 天；

3) 极端降水量对年降水总量的贡献也很大。平均超 90% 阈值降水总量可对多年平均年降水量贡献 30%~50%，某些年份，极端超 90% 阈值降水总量可为当年降水总量贡献 50%~70%。平均强降水过程总量对多年平均年降水量的贡献差异较大，长江源及源区向四川盆地的过渡区在 10% 以内，流域其它地区

贡献率大约在 25%~55%，而极端强过程降水总量对当年降水总量的贡献更是高达 60%~70%。

4) 许多站点的极端降水量指标和极端降水频率指标都存在趋势变化。对于区域平均年降水量而言，整体呈现波动变化，未出现显著的变化趋势，但四川盆地西部边缘至长江源区以及流域下游大部分地区表现为线性升高的趋势，四川盆地多个站点呈现显著线性减小的趋势。区域平均最大 1 日降水量呈现显著线性升高的趋势，其中沿江一带地区站点升高趋势较为明显。区域平均超 90% 阈值降水总量和强过程降水量没有明显线性趋势，但是，在个别站点仍存在明显线性增加趋势。对于极端降水频率指标的趋势检测中，能够在四川盆地附近检测出非线性下降趋势，在源区和中下游区域检测出非线性上升趋势，其中有些站点增加趋势明显。

基金项目

国家自然科学基金重点项目(41030636); 国家自然科学基金项目(41371050)资助。

参考文献 (References)

- [1] SOLOMON, S., QIN, D. H., MANNING, M., et al. Climate change 2007: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] MIN, S.-K., ZHANG, X. B., ZWIERS, F. W., et al. Signal detectability in extreme precipitation changes assessed from twentieth century climate simulations. *Climate Dynamics*, 2009, 32(1): 95-111.
- [3] 张文君, 谭桂容. 全球变暖形势下中国陆表水分的变化[J]. *大气科学学报*, 2012, 35(5): 550-563.
ZHANG Wenjun, TAN Guirong. Simulated changes of land surface water associated with global warming over China. *Transaction of Atmospheric Science*, 2012, 35(5): 550-563. (in Chinese)
- [4] 姜彤, 施雅风. 全球变暖、长江水灾与可能损失[J]. *地球科学进展*. 2003, 18(2): 277-284.
JIANG Tong, SHI Yafeng. Global climatic warming, the Yangtze floods and potential loss. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(2): 277-284. (in Chinese)
- [5] 王冰冰, 荣艳淑, 白路遥. 长江源区和黄河源区降水量变化分析[J]. *水资源保护*, 2013, 29(6): 6-12.
WANG Bingbing, RONG Yanshu and BAI Luyao. Analysis of precipitation variation in source regions of Yangtze River and Yellow River. *Water Resources Protection*, 2013, 29(6): 6-12. (in Chinese)
- [6] 陆志刚, 张旭晖, 霍金兰, 等. 1960-2008 年淮河流域极端降水演变特征[J]. *气象科学*, 2011, 31(增刊): 74-80.
LU Zhiming, ZHANG Xuhui, HUO Jinlan, et al. The evolution characteristics of the extreme precipitation in Huaihe river basin during 1960-2008. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, 31(S1): 74-80. (in Chinese)
- [7] 潘敖大, 范苏丹, 陈海山. 江苏省近 45 a 极端气候的变化特征[J]. *气象科学*, 2010, 30(1): 87-92.
PAN Aoda, FAN Sudan and CHEN Haishan. Characteristic of extreme climate change over Jiangsu Province in the last 45 a. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2010, 30(1): 87-92. (in Chinese)
- [8] 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件[J]. *大气科学*, 2003, 27(6): 1018-1030.
ZHANG Qingyun, TAO Shiyan and ZHANG Shunli. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over East Asian during summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(6): 1018-1030. (in Chinese)
- [9] 施雅风, 姜彤, 苏布达, 等. 1840 年以来长江大洪水演变与气候变化关系初探[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(4): 289-297.
SHI Yafeng, JIANG Tong, SU Buda, et al. Preliminary analysis on the relation between the evolution of heavy floods in the Yangtze River catchment and the climate changes since 1840. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(4): 289-297. (in Chinese)
- [10] 黄荣辉, 徐予红, 王鹏飞. 1998 年夏季长江流域特大洪涝特征及其成因探讨[J]. *气候与环境研究*, 1998, 3: 300-313.
HUANG Ronghui, XU Yuhong and WANG Pengfei. The features of the catastrophic flood over the Changjiang River Basin during the summer of 1998 and cause exploration. *Climatic and Environmental Research*, 1998, 3: 300-313. (in Chinese)
- [11] 刘志雨, 郑文. 1998 年长江洪水初步分析[J]. *水文*, 1998, S1: 104-106.
LIU Zhiyu, ZHENG Wen. Preliminary analysis of the Yangtze River flood in 1998. *Hydrology*, 1998, S1: 104-106. (in Chinese)
- [12] ZHANG, Q., XU, C. Y., ZHANG, Z. X., CHEN, Y. D., LIU, C. L. and LIN, H. Spatial and temporal variability of pre-

- precipitation maxima during 1960-2005 in the Yangtze River basin and possible association with large-scale circulation. *Journal of Hydrology*, 2008, 353(3-4): 215-227.
- [13] 王冀, 江志红, 严明良, 张金玲. 1960-2005 年长江中下游极端降水指数变化特征分析[J]. *气象科学*, 2008, 28(4): 384-388.
WANG Ji, JIANG Zhihong, YAN Mingliang and ZHANG Jinling. Trends of extreme precipitation indices in the mid-lower Yangtze River valley of China during 1960-2005. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2008, 28(4): 384-388. (in Chinese)
- [14] 梅伟, 杨修群. 我国长江中下游地区降水变化趋势分析[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(6): 577-589.
MEI Wei, YANG Xiuqun. Trends of precipitation variations in the mid-lower Yangtze River Valley of China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2005, 41(6): 577-589. (in Chinese)
- [15] 苏布达, 姜彤, 任国玉, 陈正洪. 长江流域 1960-2004 年极端强降水时空变化趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 9-14.
SU Buda, JIANG Tong, REN Guoyu and CHEN Zhenghong. Observed trends of precipitation extremes in the Yangtze River Basin during 1960 to 2004. *Advances in Climate Change*, 2006, 2(1): 9-14. (in Chinese)
- [16] XU, Y., XU, C. H., GAO, X. J. and LUO, Y. Projected changes in temperature and precipitation extremes over the Yangtze River Basin of China in the 21st century. *Quaternary International*, 2009, 208(1-2): 44-52.
- [17] XU, C. H., LUO, Y. and XU, Y. Projected changes of precipitation extremes in river basins over China. *Quaternary International*, 2011, 244(2): 149-158.
- [18] 荣艳淑, 张行南, 姜海燕, 白路遥. 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, ZANG Xingnan, JIANG Haiyan and BAI Luyao. Pan evaporation change and its impact on water cycle over the upper reach of the Yangtze River. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(9): 2889-2897. (in Chinese)
- [19] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
WEI Fengying. *Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology*. Beijing: China Meteorological Press, 2008. (in Chinese)
- [20] 王济川, 郭志刚. Logistic 回归模型——方法与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
WANG Jichuan, GUO Zhigang. *Logistic regression model—Methods and applications*. Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese)
- [21] 纪玲玲, 王昌雨, 张志华. Logistic 回归及其在概率降水预报中的应用[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2003, 4(5): 92-94.
JI Lingling, WANG Changyu and ZHANG Zhihua. Logistic regression and its application for probability forecast of precipitation. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2003, 4(5): 92-94. (in Chinese)
- [22] 徐晶, 张国平, 张芳华, 齐丹. 基于 Logistic 回归的区域地质灾害综合气象预警模型[J]. *气象*, 2007, 33(12): 3-8.
XU Jing, ZHANG Guoping, ZHANG Fanghua and QI Dan. Regional integrated meteorological forecasting and warning model for geological hazards based on Logistic Regression. *Meteorological Monthly*, 2007, 33(12): 3-8. (in Chinese)
- [23] 方苗, 张金龙, 徐瑱. 基于 GIS 和 Logistic 回归模型的兰州市滑坡灾害敏感性区划研究[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(6): 845-854.
FANG Miao, ZHANG Jinlong and XU Zhen. Landslide susceptibility zoning study in Lanzhou City based on GIS and logistic regression model. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(6): 845-854. (in Chinese)
- [24] FREI, C., SCHAR, C. Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the alpine region. *Journal of Climate*, 2001, 14(7): 1568-1584.