

# 中国不同强度降水时空变化特征

胡宜昌

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

**摘要:** 利用中国气象台站1961—2006年的逐日观测降水资料, 选取百分位数阈值将有效降水分为小雨、中雨、大雨和极端降水, 并结合微量降水事件, 采用线性回归分析和概率分布拟合的方法, 研究了中国降水的时空变化特征。研究表明: 1961—2006年中国年降水量在东北地区南部、黄河下游、黄土高原及长江上游这一接近直角分布的地带一致减少, 且降水量减少区的范围随着降水强度的增加而缩小; 黄土高原和长江上游总降水量的减少与中雨量的显著减少密切相关; 长江中下游、东南地区及100°E以西地区降水量一致增加, 长江中下游、东南地区总降水量的增加主要由大雨量、极端降水量的增加所造成, 100°E以西地区中雨量、大雨量和极端降水量都以增加为主。除新疆西部个别台站外, 年总降水频次一致表现为显著的减少趋势; 年有效降水频次在西北地区显著增加, 而在100°E以东地区一致减少, 西部地区的增加由中雨、大雨和极端降水频次的增加共同决定, 且中雨频次的贡献最大, 东部地区的减少主要表现在小雨和中雨频次显著减少。微量降水事件普遍减少, 冬季减少比例最大、夏季减少比例最小, 北方地区的减少比例明显大于南方, 这与平均气温变化幅度的季节以及空间差异都非常相似。整体而言, 中国区域平均的小雨量显著减少, 大雨量和极端降水量有所增加; 小雨和中雨频次减少, 而大雨和极端降水频次增加。

**关键词:** 降水, 极值, Gamma函数, GEV分布

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.03.009

## Changes in Precipitation with Different Intensities in China

Hu Yichang

(CMA Training Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** Using daily observations of precipitation for the period 1961—2006 in China, we chose the percentile based thresholds to define precipitation events with different intensities in this study. There is light rain, moderate rain, heavy rain and extreme rain. The characteristics of these effective precipitation events are analyzed in conjunction with trace rain events ( $<0.1\text{mm/d}$ ). During 1961—2006, the annual precipitation decreased in southern Northeast China, the lower valley of the Yellow River, the Loess Plateau, and the upper valley of the Yangtze River, the areas with decreasing trends shrank as precipitation intensity increased, the decreasing of the total precipitation in Loess Plateau and the upper valley of the Yangtze River is closely related to significantly decreasing moderate rain; The annual precipitation generally increased in the middle and lower valleys of the Yangtze River, Southeast China and the area to the west of 100°E, which was mainly induced by the increasing heavy rain and extreme rain in the first two areas, and also by the increasing moderate rain in the third area. The annual total precipitation events generally decreased except at a few stations in Xinjiang; the annual effective precipitation events increased significantly in Northwest China while they generally decreased to the east of 100°E, the frequencies of moderate rain, heavy rain and extreme rain all increased in Northwest China with the largest increase for moderate rain events, while the decrease of light rain and moderate rain events dominated to the east of 100°E. The trace rain events generally decreased. The largest decreasing proportion occurred in winter and the lowest in summer. The decreasing proportion was obviously larger in northern China than in southern China, which is consistent with the distribution of temperature variation in China. For China as a whole, the precipitation significantly decreased for light rain while it increased for heavy rain and extreme rain; the occurrence decreased for light rain and moderate rain while it increased for heavy rain and extreme rain.

**Keywords:** precipitation extreme, Gamma function, GEV distribution

### 1 引言

极端降水往往对洪涝灾害有直接影响, 研究对其关注由来已久。早期最典型的当属暴雨研究, 不少研究对致洪暴雨的物理机理做过详细探讨, 但大多基于

个例分析, 从天气学的角度研究暴雨的发生发展, 仅有个别研究从气候学角度分析过暴雨的分布特征<sup>[1]</sup>, 针对极端降水年际或年代际变化特征的研究也相对较少。

近年来, 由于旱涝事件频繁发生及社会对灾害性事件关注度逐渐提高, 不少研究开始关注极端降水的变化趋势, 探讨全球变暖背景下极端降水的可

收稿日期: 2011年12月13日; 修回日期: 2012年2月15日  
作者: 胡宜昌(1982—), Email: huyichang@cma.gov.cn

能变化。刘小宁<sup>[2]</sup>研究指出,除华北地区外,20世纪80—90年代中期中国东部暴雨频次明显上升,强度增大;另有研究发现<sup>[3,4]</sup>,中国地区极端降水在东北南部向西南方向延伸至长江上游的区域减少,而在新疆和东南地区增加;鲍名等<sup>[5]</sup>研究中国夏季暴雨的年代际变化,发现长江流域暴雨频次在20世纪70年代末和80年代末分别出现了不同程度的增加,华北暴雨自20世纪80年代以来一直偏少;综合不同研究结论<sup>[6-11]</sup>发现,不同强度降水发生频次的变化特征存在差异,其对应的机理也可能不同,这为极端降水研究增添了新的内涵。

从分析资料来看,不少研究开始注重对逐时降水资料的分析,已有研究利用逐时降水资料分析了极端降水的变化特征。Brooks等<sup>[12]</sup>通过分析美国3h及以下时间尺度强降水的气候态特征,发现强降水事件的时间演变与观测的洪涝事件非常相似,表明逐时降水数据有助于定义洪涝威胁。Kanae等<sup>[13]</sup>利用1890—1999年逐时降水观测资料分析东京地区的极端降水变化特征,发现20世纪90年代是逐时强降水频次和强度都相当强的时期,但20世纪40年代前后更强,百年尺度来看,当前强降水的频次和强度并非史无前例。利用1980—2002年逐时降水资料,Roy<sup>[14]</sup>研究发现印度极端降水事件的变化趋势存在较大的时空差异,夏季以正趋势为主,冬季趋势较弱。Zhang等<sup>[15]</sup>利用1961—2000年逐时降水资料,探讨短持续性降水事件和强降水事件的标准,指出20mm/h比50mm/h更适合定义中国东部的强降水事件;对于极端降水的日变化,不同地区最大频次的出现时间存在差异,各自对应的物理过程不同;1961—2000年,逐时极端降水在中国东部大部分地区都增加,但华北地区明显减少,夜间增加区范围比白天的大,夜间和白天对应的变化趋势的空间分布相似。

Frei等<sup>[16]</sup>研究指出,时间序列变化趋势显著与否的检测概率与事件发生频率、时间序列长度和趋势大小有关,事件发生频率越低,检测到其存在显著性趋势的概率越小。Goswami等<sup>[17]</sup>研究印度极端降水变化特征时发现,当空间范围小于800km×800km时,很难检测到区域平均的强降水事件频次存在显著的变化趋势,因为样本数太少(相当于事件发生频率太低)使得降水的年际变率较大。中国降水量空间差异很大,年降水量从东南沿海地区约2000mm到西北内陆地区50mm以下,以绝对降水量来定义降水事件将使得同一降水事件的发生概率空间差异很大,致使不同地区检测到该降水事件变化趋势显著与否的可能性也

明显不同<sup>[16,18]</sup>,这是以往研究普遍忽视的问题。

政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告<sup>[19]</sup>根据概率密度函数,将发生概率低于10%的事件定义为极端天气气候事件。与气温不同,降水量因存在下边界(即降水量 $\geq 0$ ),研究往往只关注发生概率低于10%的强降水事件,而大多忽视了发生概率低于10%的“极端弱降水”的变化,当然这也与强降水的灾害性影响有关。本文利用百分位数阈值将有效降水( $\geq 0.1\text{mm}$ )分为不同等级,先计算第10和第90百分位数(10th, 90th),小于10th的定义为小雨,大于90th的定义为大雨,中间部分定义为中雨,此外将发生概率低于5%的强降水定义为极端降水,然后分析不同强度降水量及降水频次的时空变化特征,并探讨其与总降水变化之间的关系。

## 2 资料和方法

本文所用降水资料为国家气象信息中心提供的730个气象台站的逐日观测降水,研究选取1961—2006年无缺测记录的552个台站的降水序列。利用线性矩法(L-moments)<sup>[20-22]</sup>对降水量作广义极值(GEV)分布拟合,并结合Gamma函数的拟合结果分析极端降水变化特征;降水时间序列的变化趋势利用最小二乘法计算,并同基于Kendall's tau的趋势估计和显著性检验方法的分析结果作了对比(图略)。

## 3 结果分析

### 3.1 线性趋势

如图1a所示,东北南部、黄河下游、黄土高原及长江上游这一接近直角分布的地带降水量一致减少;长江中下游、东南地区及100°E以西地区降水量一致增加,其中新疆北部增加比例最大;110°E以东地区的降水量大致表现为“南增北减”的分布特征,其中南北两个不同区域(20°—31°N和34°—41°N)的平均年降水量序列存在显著的负相关关系。有效降水频次在新疆地区显著增加(图1b),而在100°E以东地区几乎一致减少,其中降水量减少区对应的有效降水频次表现为显著减少的特征,长江中下游及其以南地区有效降水频次减少和降水量增加表明该地区平均降水强度增大。100°E以西地区中雨量、大雨量和极端降水量都以增加为主,而100°E以东地区降水量的变化趋势空间差异较大,降水量减少区的范围随降水强度增大而逐渐缩小。黄土高原和长江上游总降水量的减少与中雨量的显著减少密切相关,长江中下游、东南地区总降水量的增加主要由大雨量、极端降水量的增加所造成。

除新疆西部之外，总降水频次一致表现为显著的减少趋势（图2a），北方地区的减少比例大于南方地区。微量降水频次减少（图2b），长江以北地区减少最显著，而其中又以干旱/半干旱区（除新疆个别台站以外）的减少比例最大。Qian等<sup>[7]</sup>指出微量降水频次的减少可能由全球变暖引起的水汽抬升凝结高度升高所造成，而Qian等<sup>[8]</sup>研究发现中国小雨频次的减少与大气中气溶胶浓度的变化有关，当然，两者所针对的降水强度有所不同。中雨频次在新疆地区显著增加（图2d），而在西南地区和黄河中下游地区显著减少。对比不同强度降水频次的变化趋势发现，东部地区有效降水频次的减少主要表现在小雨和中雨频次显著减少，西部地区有效降水频次的增加则由中雨、大

雨和极端降水频次的增加所共同决定，且中雨频次的贡献最大。长江中下游及其以南地区小雨、中雨频次的显著减少及大雨、极端降水频次的增加对应该区域降水平均强度的增大。

华北地区总降水量减少（图1a），有效降水频次也显著减少（图1b），其中小雨和中雨频次显著减少，部分台站的大雨和极端降水频次也显著减少（图2）。龚道溢等<sup>[11]</sup>通过对华北地区连续无雨日的分析，发现该地区严重干燥事件显著增加。长江上游不同强度降水的频次和降水量都有所减少，另外，20世纪90年代之前的降温趋势近年来也发生逆转<sup>[23]</sup>，仅从降水 and 气温变化来看，近十多年来该地区气候呈变干趋势。长江中下游及其以南地区年降水量增加，且

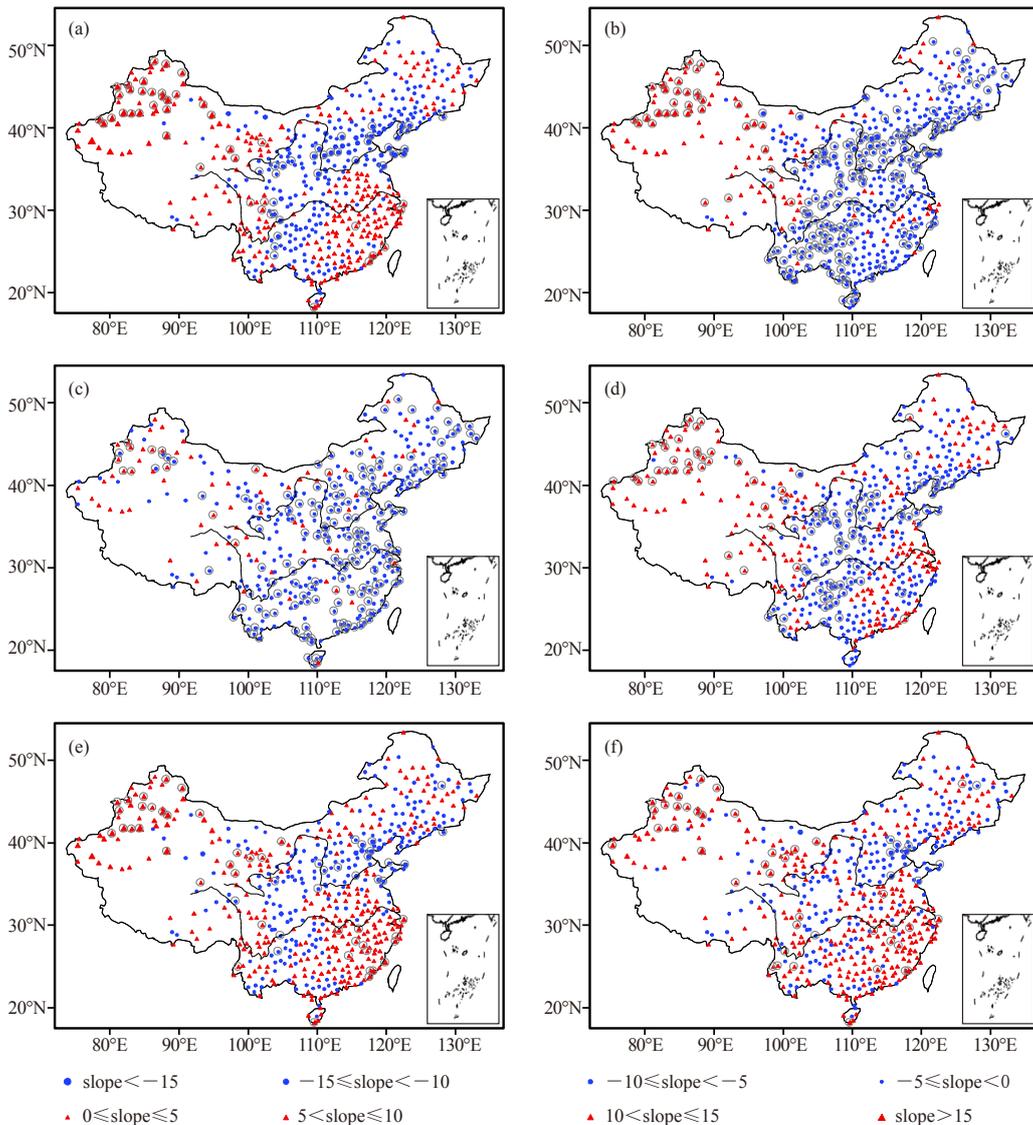


图1 年降水变化趋势 (slope)， “○” 表示趋势达到0.05的显著性水平 (后同)  
slope为降水量 (或频次) 变化趋势与对应台站1961—1990年多年平均年降水量 (或频次) 的比值 (单位: %/10a)  
(a) 总降水量, (b) 有效降水频次, (c) 小雨量, (d) 中雨量, (e) 大雨量, (f) 极端降水量

主要由大雨和极端降水频次的增加所致，反映出该地区洪涝灾害可能增多。新疆地区除微量降水频次显著减少外，中雨、大雨和极端降水频次都以显著增加为主，降水量也显著增加，对应该地区变湿的趋势。

对于季节降水量变化（图3），西北地区各季节都以增加趋势为主，100°E以东地区降水量变化趋势在空间上差异较大。冬季，除环渤海地区和西南地区个别台站外，降水量几乎一致增加，西北地区、东北北部和长江中下游降水量增加趋势显著。春季，长江流域及华中地区降水量减少，青藏高原东部和西南地区西部降水量显著增加。夏季，110°E以东地区的降水量变化趋势表现为南涝北旱的分布特征，黄河以南降水量增加，以北降水量减少；虽然华北地区降水量的减少与东亚夏季风指数<sup>[24, 25]</sup>的年代际减弱趋势一

致，但两者对应的年际变化时间序列并无显著相关，东亚季风指数与夏季降水的显著相关主要集中在长江流域（图略）。秋季，100°E以东地区降水量以减少为主，其中黄河中上游、长江上游和长江下游地区减少显著。根据中国降水时节特征划分雨季（4—9月）和旱季（10月—次年3月），雨季和旱季降水量变化趋势的空间分布（图3e和f）与年降水量的（图1a）相似，100°E以西地区以增加为主，而100°E以东地区空间上差异较大。旱季，黄河中游降水量减少比例最大；雨季，环渤海地区降水量减少比例最大，该地区年降水量的减少主要由雨季降水量减少所决定。

对于不同季节的降水频次变化（图4），冬季，华南地区有效降水频次减少（图4a），而对应的降水量却增加（图3a），通过分析不同强度降水的变化发

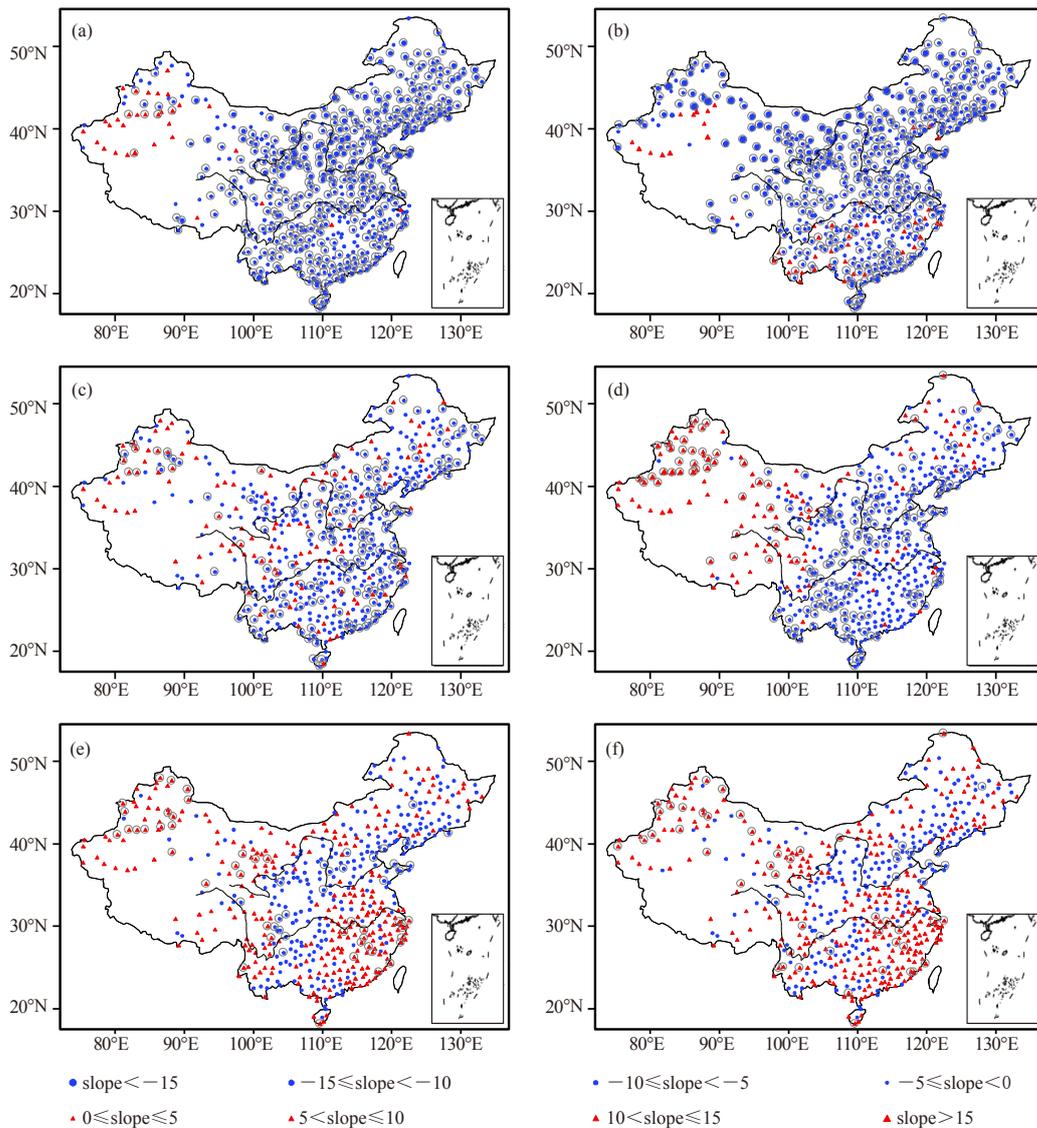


图2 年降水频次的变化趋势（单位：%/10a）

(a) 总降水，(b) 微量降水，(c) 小雨，(d) 中雨，(e) 大雨，(f) 极端降水

现, 该地区有效降水频次的减少主要为小雨和中雨频次显著减少, 而降水量的增加则由大雨、极端降水频次的增加造成 (图略); 春季, 华北地区很多台站的有效降水频次减少 (图4b) 而降水量增加 (图3b), 意味着平均降水强度在增大, 其对应着小雨、中雨频次的降低和大雨、极端降水频次的升高 (图略); 夏季, 西南地区小雨和中雨频次显著减少 (图略) 致使有效降水频次也显著减少 (图4c), 然而降水量并无显著变化 (图3c), 因为小雨量和中雨量显著减少的同时, 部分台站大雨量、极端降水量却有所增加 (图略); 秋季, 有效降水频次与降水量的变化趋势基本一致, 东部地区降水频次比降水量的减少趋势更显著。旱季和雨季长江中下游及其以南地区有效降水频

次 (图4e和f) 与降水量 (图3e和f) 的变化趋势大致相反, 该地区有效降水频次的减少由小雨和中雨频次的显著减少所决定, 降水量增加则由大雨、极端降水频次增加造成 (图略)。整体而言, 有效降水频次的变化多由小雨和中雨频次的变化所决定, 而降水量的变化在不少地区则由大雨量或极端降水量的变化所决定。

对于微量降水频次的变化 (图5), 整体而言, 各季节一致表现为减少趋势, 特别是长江以北地区。微量降水频次冬季的减少比例最大, 夏季的减少比例最小, 而且北方地区的减少比例明显大于南方, 这种时空分布特征与平均气温变化趋势所对应的季节差异及空间差异都非常一致<sup>[19]</sup>, 表明全球变暖与微量降水

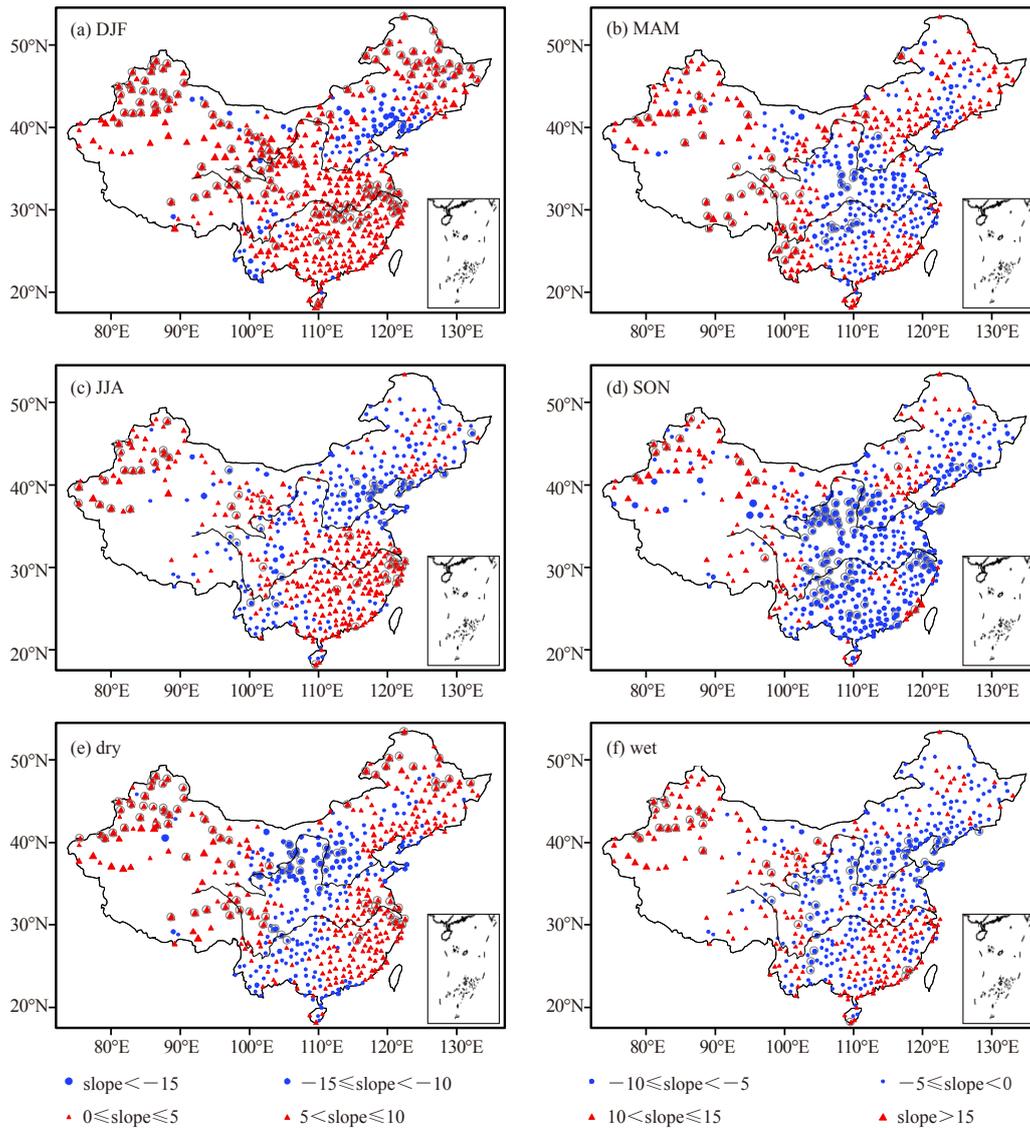


图3 不同季节总降水量变化趋势百分比 (单位: %/10a)

(a) DJF-冬季; (b) MAM-春季; (c) JJA-夏季;  
(d) SON-秋季; (e) dry-旱季, 10月一次年3月; (f) wet-雨季, 4—9月

频次减少可能存在密切关系<sup>[7]</sup>。

对于中国区域平均降水量(表1),除冬季以外,各季节的小雨量都显著减少;中雨量除冬季显著增加、秋季显著减少外,其他季节并无显著变化;除秋季以外,其他季节的大雨量和极端降水量都有所增加,冬季的变化趋势显著。对比不同季节的变化,秋季各强度降水量及总降水量一致减少;冬季降水量变化趋势最显著,除小雨量减少外,其他强度降水量(包括总降水量)都显著增加。整体而言,中国区域平均的小雨量显著减少,而大雨量和极端降水量有所增加。

为了对不同强度降水事件的频次和强度的变化特征也有所了解,本文进一步分析了中国区域平均的不同强度降水事件频次的变化趋势。各季节的微量降水

事件频次都显著减少,不同强度有效降水事件频次的变化趋势(表2)与对应降水量的变化趋势(表1)基本一致,即两者同时减少或增加;除秋季外,总降水频次和总降水量变化趋势完全相反,总降水频次显著减少而降水量增加;除冬季外,有效降水频次也一致减少,其表明平均降水强度增大。整体而言,中国区域平均的小雨、中雨频次减少,而大雨、极端降水频次增加。

### 3.2 概率分布特征

针对线性趋势的分析表明,整体而言,中国强降水事件增多。如果从概率分布的角度考虑,其发生概率是否也表现出一致的变化?为此,以下内容进一步分析了降水的概率分布特征及其变化。

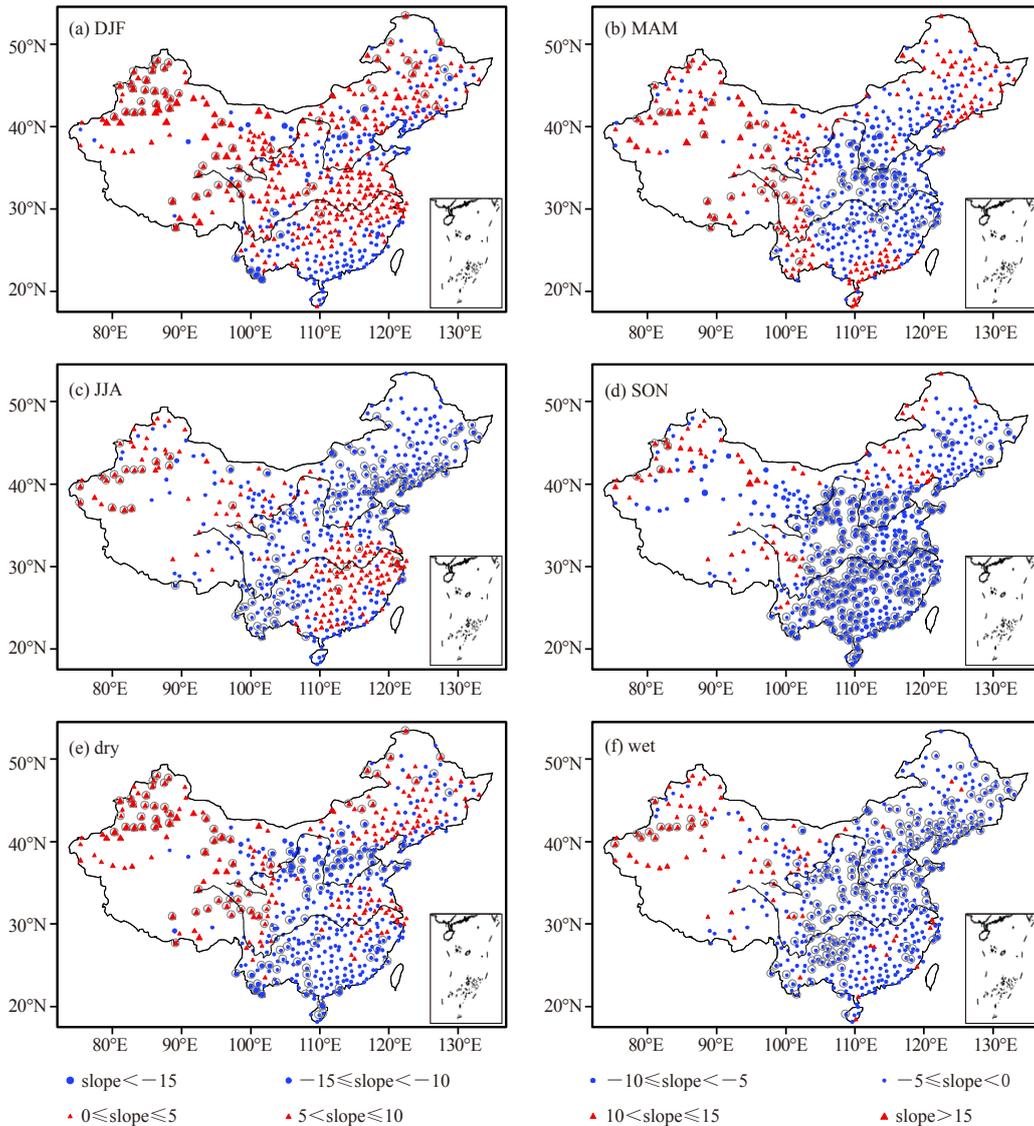


图4 不同季节的降水频次变化(单位:%/10a)

(a) DJF-冬季; (b) MAM-春季; (c) JJA-夏季; (d) SON-秋季; (e) dry-旱季, 10月-次年3月; (f) wet-雨季, 4-9月

逐日降水量近似服从Gamma分布<sup>[26]</sup>, 根据Gamma函数的概率分布特征, 其形状参数(以下简称形参)越大, 对应的极端强降水事件发生概率也越大。将各台站的逐日降水量时间序列分为1961—1983年和1984—2006年两个时段分别作Gamma分布拟合, 通过分析不同强度降水量变化趋势与前后两个时段形参之间差值的空间相关系数, 发现中雨量对应的空间相关系数很小(-0.08), 而大雨量、极端降水量对应的空间相关显著, 相关系数分别为0.36, 0.42, 表明对不同强度降水事件而言, Gamma函数形参的年代际差异能更好地反映强降水量的变化趋势。对比前后不同时段形参之间的差异(图略), 发现后期降水拟合所对应的形参普遍增大, 这从概率分布的角度表明强降

水事件的发生频次增加。

利用线性矩法(L-moments)对1961—1983年和1984—2006年两个时段的年最大日降水量分别作GEV分布拟合, 在此基础上以暴雨(日降水量 $\geq 50\text{mm}$ )为例, 分析其发生概率的变化。考虑到样本数不同、样本数太少等问题可能给概率分布拟合结果所造成的影响, 这里对每年分别取3和4个样本作分析, 相当于拟合过程中分别有69和92个样本数, 两者的结果基本一致。基于每年取4个样本数的结果。发现整体而言中国暴雨的发生概率从东南向西北逐渐减小(图略), 与总降水量的空间分布特征相似; 对比不同时段(1984—2006年相对于1961—1983年), 发现长江中下游、西南地区西部和东北大部分地区暴雨的发生

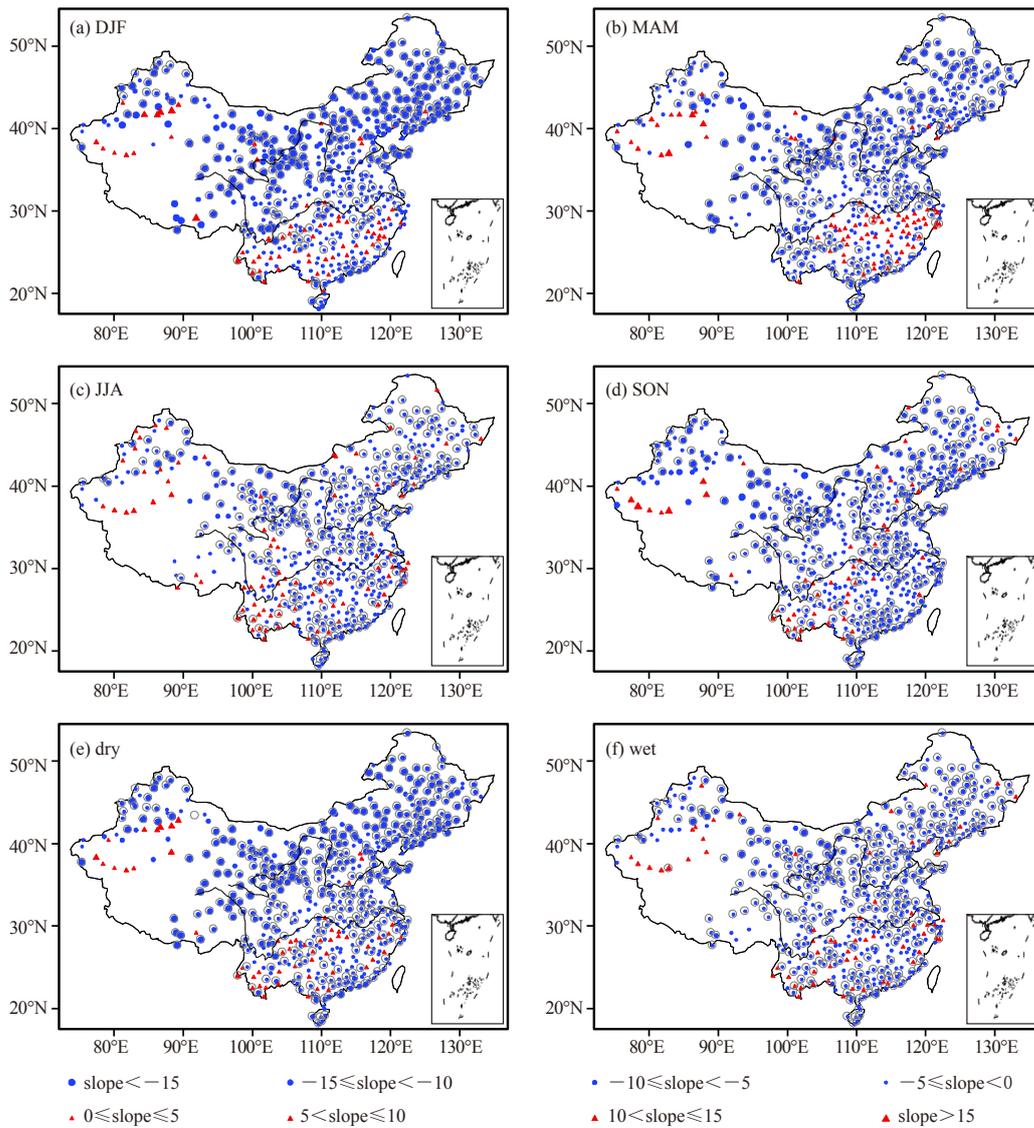


图5 不同季节的微量降水频次变化(单位: %/10a)

(a) DJF-冬季; (b) MAM-春季; (c) JJA-夏季; (d) SON-秋季; (e) dry-旱季, 10月—次年3月; (f) wet-雨季, 4—9月

表1 中国区域平均的不同强度降水量标准化序列的变化趋势

	DJF	MAM	JJA	SON	ANN	dry	wet
小雨	-0.021n	-0.031y	-0.069y	-0.083y	-0.095y	-0.050y	-0.091y
中雨	0.089y	0.006n	-0.004n	-0.073y	-0.013n	0.046n	-0.041n
大雨	0.116y	0.041n	0.033n	-0.029n	0.029n	0.042n	0.028n
极端降水	0.102y	0.037n	0.028n	-0.018n	0.031n	0.032n	0.024n
总降水	0.135y	0.034n	0.024n	-0.056y	0.020n	0.052n	0.004n

注: y (n) 表示趋势达到 (未达到) 0.05的显著性水平

概率增大, 华北南部、西南地区东部暴雨的发生概率有所减小, 该空间分布特征与前面关于强降水线性变化趋势的结论一致。

#### 4 结论

本文从线性趋势和概率分布两个不同方面分析了1961—2006年中国不同强度降水的时空变化特征。主要结论如下:

(1) 1961—2006年, 中国东北地区南部、黄河下游、黄土高原及长江上游这一接近直角分布的地带年总降水量一致减少, 而其他地区年总降水量增加; 降水量减少区的范围随着降水强度的增加而逐渐缩小, 总降水量与极端降水量相反的变化趋势主要出现在总降水量减少的地区。中国区域平均的小雨量显著减少, 而大雨量和极端降水量有所增加, 冬季降水量增加比例最显著。

(2) 除新疆西部个别台站外, 年总降水频次一致表现为显著的减少趋势; 年有效降水频次在西北地区显著增加, 在100°E以东地区一致减少, 在总降水量减少的地区年有效降水频次显著减少。整体而言, 中国区域平均的小雨和中雨频次减少, 而大雨、极端降水频次增加。

(3) 大部分地区微量降水事件显著减少, 特别是在长江以北地区。通过对比微量降水事件频次变化趋势的时空差异, 发现其冬季减少比例最大, 夏季减少比例最小, 北方地区的减少比例明显大于南方, 这与平均气温变化幅度的季节以及空间差异都非常相似。

#### 参考文献

[1] Tao S Y, Ding Y H. Observational evidence of the influence of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1981, 62(1): 23-30.

[2] 刘小宁. 我国暴雨极端事件的气候变化特征. *灾害学*, 1999, 14(1): 54-59.

[3] Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate*, 2005, 18(7): 1096-1108.

[4] Qian W, Lin X. Regional trends in recent precipitation indices in China. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2005, 90: 193-207.

[5] 鲍名, 黄荣辉. 近40年我国暴雨的年代际变化特征. *大气科学*, 2006, 30(6): 1057-1067.

[6] Fu J L, Qian W H, Lin Y, et al. Trends in graded precipitation in China from 1961 to 2000. *Advances In Atmospheric Sciences*, 2008,

表2 中国区域平均的不同强度降水事件频次标准化序列的变化趋势

	DJF	MAM	JJA	SON	ANN	dry	wet
微量降水	-0.213y	-0.210y	-0.167y	-0.197y	-0.312y	-0.268y	-0.236y
小雨	-0.021n	-0.027y	-0.069y	-0.083y	-0.093y	-0.048y	-0.088y
中雨	0.056n	-0.006n	-0.049n	-0.118y	-0.058y	0.007n	-0.089y
大雨	0.118y	0.039n	0.032n	-0.033n	0.024n	0.049y	0.026n
极端降水	0.106y	0.035n	0.026n	-0.016n	0.032n	0.036n	0.022n
有效降水	0.066n	-0.006n	-0.062y	-0.134y	-0.077y	-0.001n	-0.101y
总降水	-0.100y	-0.149y	-0.171y	-0.232y	-0.276y	-0.188y	-0.244y

25(2): 267-278.

[7] Qian W, Fu J, Yan Z. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961—2005. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L11705.

[8] Qian Y, Gong D Y, Fan J W, et al. Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and modeling. *J Geophys Res*, 2009, 114: D00K02.

[9] 王小玲, 翟盘茂. 1957—2004年中国不同强度级别降水的变化趋势特征. *热带气象学报*, 2008, 24(5): 459-466.

[10] 严中伟, 杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局. *气候与环境研究*, 2000, 5(3): 267-272.

[11] 龚道溢, 韩晖. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析. *地理学报*, 2004, 59: 230-238.

[12] Brooks H, Stensrud D. Climatology of heavy rain events in the United States from hourly precipitation observations. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(4): 1194-1201.

[13] Kanae S, Oki T, Kashida A. Changes in hourly heavy precipitation at Tokyo from 1890 to 1999. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(1): 241-247.

[14] Roy S. A spatial analysis of extreme hourly precipitation patterns in India. *International Journal of Climatology*, 2008, 29(3): 345-355.

[15] Zhang H, Zhai P. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over eastern China in the warm season. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(5): 1177-1183.

[16] Frei C, Schär 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.

[17] Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment. *Science*, 2006, 314: 1442-1445.

[18] Klein Tank A M G, Können G P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe. *Journal of Climate*, 2003, 16(22): 3665-3680.

[19] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[20] Diebolt J, Guillou A, Naveau P, et al. Improving probability-weighted moment methods for the GEV distribution. *Statistical Journal*, 2008, 6(1): 33-50.

[21] Hosking J R M, Wallis J R, Wood E F. Estimation of the generalised extreme-value distribution by the method of probability weighted moments. *Institute of Hydrology*, 1984, 89: 22.

[22] Vogel R M, Fennessey N M. L-moment diagrams should replace product-moment diagrams. *Water Resources Research*, 1993, 29(6): 1745-1752.

[23] 任国玉, 徐铭志, 初子莹, 等. 近54年中国地面气温变化. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 717-727.

[24] 李建平, 曾庆存. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系. *气候与环境研究*, 2005, 10(3): 351-365.

[25] 黄刚, 严中伟. 东亚夏季风环流异常指数及其年际变化. *科学通报*, 1999, 44(2): 421-424.

[26] Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R, et al. Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 243-283.