

刘学锋, 向亮, 于长文. 2010. 海河流域降水极值的时空演变特征 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 451–461. Liu Xuefeng, Xiang Liang, Yu Changwen. 2010. Characteristics of temporal and spatial variations of the precipitation extremes in the Haihe River basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 451–461.

海河流域降水极值的时空演变特征

刘学锋^{1,2} 向亮¹ 于长文¹

¹ 河北省气候中心, 石家庄 050021

² 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

摘要 利用海河流域 104 个测站逐日降水资料, 研究了海河流域过去 47 年中降水极值时空变化趋势, 从降水极值变化的角度解释了海河流域旱涝的演变特征。结果表明: 近 47 年来, 海河流域的降雨量、小雨日数、暴雨日数、湿涝事件、日最大降水量均表现出明显减少趋势, 干旱事件表现出显著增加趋势, 加剧了海河流域干旱化程度。海河流域降水极值空间变化趋势在大部分区域表现为干旱化倾向, 尤其是在海河流域东南部区域干旱化程度最为显著。降水的极值变化致使降水时空分布变得更加不均匀, 使得海河流域干旱事件发生频率和强度增加, 从而对流域内生态、环境和社会经济系统产生深远的影响。

关键词 海河流域 降水极值 时空变化 变化趋势

文章编号 1006-9585 (2010) 04-0451-11 **中图分类号** P463.3 **文献标识码** A

Characteristics of Temporal and Spatial Variations of the Precipitation Extremes in the Haihe River Basin

LIU Xuefeng^{1,2}, XIANG Liang¹, and YU Changwen¹

¹ Hebei Climate Center, Shijiazhuang 050021

² Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081

Abstract Based on 104 stations with complete daily precipitation records during 1961–2007, the trend of the temporal and spatial variations of the precipitation extremes in the Haihe River basin was investigated, and the causes of intensifying drought disasters and variation of flood disasters from the viewpoint of the change in precipitation extremes were analysed. The result shows that, in recent 47 years, there are obvious decreasing trends in the annual rainfall amount, light rain days, rainstorm days, severe wetness, and maximum daily precipitation, but a significant increasing trend in severe drought duration in the Haihe River basin. All of these are accompanied with intensifying drought disasters. The spatial variability of the precipitation extremes trends in most regions of the Haihe River basin shows a drying tendency, especially in the semi-arid southeastern region where the most significant trend can be found. The changes of spatial and temporal distribution of the precipitation extremes have become more asymmetric, which might be one of the main causes of the higher frequency and enhanced intensity of drought, and have far-reaching effects on the eco-environment and social-economic systems in the Haihe River basin.

收稿日期 2010-02-10 收到, 2010-05-30 收到修定稿

资助项目 国家科技支撑计划课题 2007BAD69B02、2007BAC29B02, 河北省科技厅重点基础研究项目 08966711D 以及水利部公益性行业科研专项 200801001

作者简介 刘学锋, 男, 1963 年出生, 高级工程师, 从事气候和气候变化研究。E-mail: lxfhbqhzx@sina.com

Key words Haihe River basin, precipitation extremes, temporal and spatial variation, change trend

1 引言

极端天气和气候事件频繁发生带来严重灾害。中国洪涝、干旱等气象灾害每年损失占整个自然灾害损失的 70% 左右, 直接经济损失占国民生产总值的 3%~6%。洪涝、干旱、暴雨、连阴雨、雪灾等灾害性天气不仅与降水量有关系, 还与降水日数有关。在以往的研究中, 对降水量变化趋势和特征有了较多的认识(刘学锋等, 2002; 赵平和周秀骥, 2006; 周连童和黄荣辉, 2006), 在干旱和洪涝研究中(宫德吉, 1997; 魏凤英, 2004; 阮新等, 2008), 一般以某地区季节降水量多少来分析旱涝情况, 降水量与干旱和洪涝发生存在一定关系。但降水日数多寡及间隔在一定程度上决定降水时空分布特征, 对于干旱和洪涝形成也有重要影响。例如, 水资源有效利用、农作物生长不仅与降水量多少有关, 还与不同强度降水日数出现频次有关。在降水量较少年份, 只要降水日数时空分布均匀, 对水资源利用和农业丰收仍然有好处。反之, 在降水量较多年份, 降水日数时空分布不均, 也会出现干旱或洪涝灾害, 对水资源利用、农业丰收产生影响。

在海河流域, 年降水量多少不能完全反映降水对社会经济的影响, 因为即使年降水量相差不多, 小雨和强降水事件出现频数不同, 干(湿)事件出现概率差别以及干(湿)期持续时间不同, 都会影响年景好坏, 产生的影响也不同。因此, 以逐日降水资料为基础, 选择一定降水极值指标分析研究降水频率和强度变化, 有助于更全面把握和了解降水变化规律和机理, 对区域气候预测和气候变化影响评估具有重要意义。

在极值气候变化研究方面, 已有一些研究报道。这些研究表明, 我国微量降水在空间上表现为一致减少趋势(钱维宏等, 2007)。东北地区小雨事件频次显著减少, 暴雨频次变化不大, 但强度增加(孙凤华等, 2006)。西北地区汛期极端降水发生频次和湿日数表现出增多趋势, 极端干期长度表现为变短趋势(张文等, 2007), 黄淮地区降水极值频率及极值降水平均持续时间都趋向于

减少(张永领等, 2003)。对海河流域或华北平原地区降水和极端降水变化研究表明, 近 50 年海河流域降水量明显减少(陈峪等, 2005; 翟盘茂等, 2007; 任国玉等, 2008), 各级别降水事件频率特别是小雨日数明显下降(王颖等, 2006; 翟盘茂等, 2007), 但较强降水事件强度减少没有总降水强度减少明显(翟盘茂等, 2007), 说明偏强降水事件强度有相对增加趋势。但是, 已有工作对海河流域干旱(湿涝)事件和日最大降水量变化及其影响研究较少, 对极端降水指数系统分析也比较缺乏。

本文利用海河流域逐日降水资料, 分析近 47 年中降水极值时空变化趋势, 从降雨量、小雨日数、暴雨日数、干旱(湿涝)事件等极端降水指数变化的角度, 系统解释海河流域旱涝演变特征, 有助于理解整个流域范围降水气候变化规律, 为评价气候变化对水资源的可能影响提供最新科学信息。

研究过程中, 因为各级降水日数(小雨、中雨、大雨、暴雨)对降水量贡献起着主导作用(王小玲和翟盘茂, 2008), 海河流域降水量变化相当程度上取决于暴雨量变化特征、降水日数与小雨日数减少密切相关, 最长连续无降水日数可以用作表征干旱指标(Frich et al., 2002)等原因, 所以选择小雨和暴雨日数、最长连续无降水日数做为研究对象, 同时选择了最长连续有降水日数、干旱(湿涝)事件、年日最大降水量等, 能在一定意义上反映干湿程度变化因子作为研究对象, 以分析海河流域降水极值变化总体特点。

2 资料和方法

2.1 研究资料 and 区域

资料来自海河流域区域内国家、省级气象站 1961~2007 年逐日降水资料。所选择的 104 个站资料均比较完整, 对个别缺测站资料进行了插补订正, 对各站年降水量资料序列进行了均一性检验, 发现非均一性问题存在, 但并不严重, 因此没有做均一化订正。海河流域研究区范围是根据海河流域水系及水资源评价导则分区原则确定

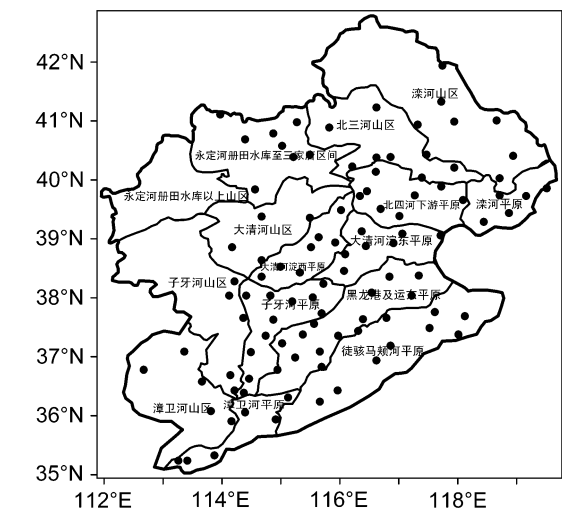


图1 海河流域站点分布
Fig.1 Location of the stations in the Haihe River basin

(图1)。

2.2 资料序列选择和定义

降水时空分布是否均匀，很大程度上取决于各级降水日数多寡、干（湿）事件强度、最长连续有（无）降水日数以及降水强度。因此在降水极值变化研究中构建了以下指数序列：年降水量、小雨（ $0.1 \leq \text{日降水量} < 10 \text{ mm}$ ）日数、暴雨（日降水量 $\geq 50 \text{ mm}$ ）日数、年度最长连续无降水日数、干旱事件（连续无雨日数不低于10 d的干事件）、年度最长连续有降水日数、湿涝事件（连续降雨日数不低于5 d的湿事件）、年最大日降水量。

2.3 分析方法

由于站点空间分布比较均匀，区域平均序列采用等权重平均方法。采用最小二乘法计算各降水极值序列变化趋势值。海河流域不同降水极值序列差异大，有些降水极值序列绝对变化趋势不明显，因此，在表示降水日数、降水极值序列趋势时均采用相对趋势，即降水极值距平序列占多年平均（1961~2007年）降水极值的百分比表示。

3 结果及其分析

3.1 年降水日数、小雨日数、暴雨日数时间变化
在分析海河流域极值序列变化前，首先考察

年降水及各等级降水比例状况（表1），海河流域区域平均年降水量、降水日数为538.1 mm、70.9 d，小雨日数占总降水日数78.7%，降水量占总降水量25.2%。暴雨在2.3%的降水日数内所产生的降水量是总降水量的22.1%。因此选用降水量、小雨日数、暴雨日数分析海河流域干旱和洪涝变化是有道理的。

表1 各等级降水的降水量和降水日数及其所占比例
Table 1 Rainfall amount and rainfall days of each grade events and their ratios to the total

	降水量		降雨日数	
	数值/mm	所占比例	数值/d	所占比例
小雨	132.6	25.2%	55.8	78.7%
中雨	149.8	28.1%	9.6	13.5%
大雨	133.3	24.6%	3.9	5.5%
暴雨	122.3	22.1%	1.6	2.3%
总量	538.1		70.9	

图2表明，总降水量、暴雨日数和小雨日数均呈明显减少趋势，减少速率分别为 $-4\% (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $-8.4\% (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $-2.6\% (10 \text{ a})^{-1}$ ，暴雨日数、小雨日数减少趋势通过了95%信度检验，总降水量通过了90%信度检验。

海河流域年降水量、暴雨日数、小雨日数具有明显年代际变化，其共同特征是20世纪60年代都属于明显偏多期，90年代中期以后均属于明显偏少期，其余时段虽有偏多和偏少阶段，但其变化幅度均没有超过60年代（偏多）和90年代后（偏少）的幅度，总体呈下降趋势。

3.2 最长连续无（有）降水日数、干（湿）事件、日最大降水量时间演变

降水量明显减少趋势是海河流域趋于干旱化的重要标志之一。降水日数是描述降水特征变化主要的统计量之一，小雨日数是衡量降水分配均匀与否的重要指标，与区域干旱化程度密切相关；暴雨是引起流域致涝的重要因子，暴雨日数增减对出现洪涝概率具有决定性作用。海河流域降水量、小雨日、暴雨日显著减少趋势必然会对其他降水极值变化特征产生一定影响。通过对最长连续无（有）降水日数、干（湿）事件、日最大降水量变化分析，进一步探究海河流域在降水量减少背景下，干旱和洪涝演变趋势。

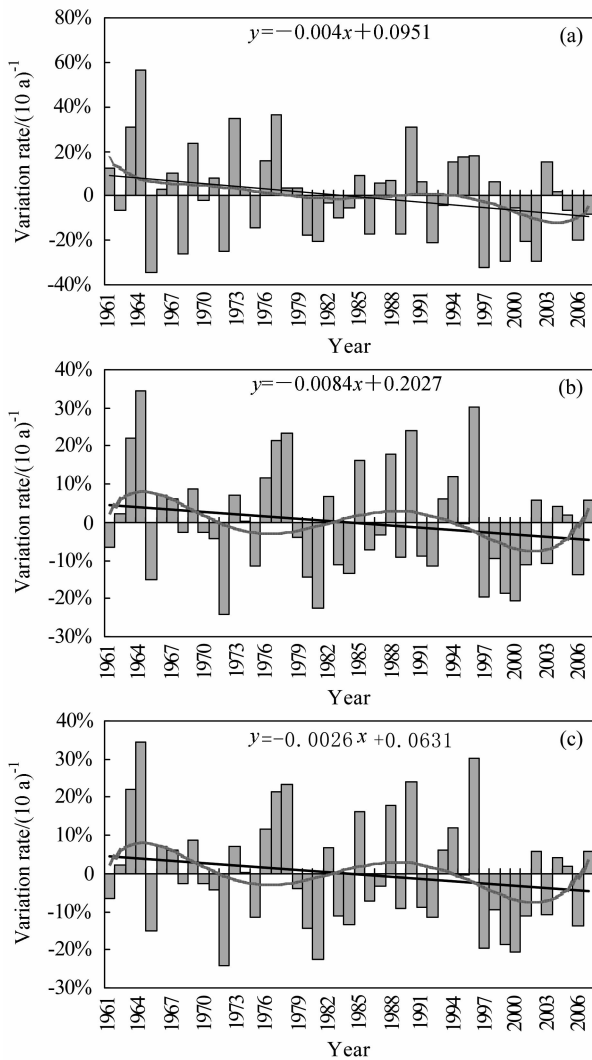


图2 海河流域 (a) 降雨量、(b) 暴雨日数和 (c) 小雨日数相对变率 (黑线为趋势线, 灰线为 6 阶多项式曲线)

Fig. 2 The relative variation rate of the (a) annual rainfall amount, (b) rainstorm days, and (c) light rain days in the Haihe River basin (black line denotes linear trend and grey line denotes the 6-order polynomial curve)

海河流域最长连续无降水日数多年平均值为 51.8 d, 变化趋势不明显, 气候变化速率为 $-0.8\% (10 \text{ a})^{-1}$, 即平均每 10 年减少 0.4 d (图 3a)。20 世纪 60~80 年代, 围绕均值上下波动, 变化不大, 但年际差异明显, 90 年代较平均值偏多, 与此时段小雨日偏少具有反位相变化关系 (图 2c), 进入 21 世纪又呈现偏少趋势。

海河流域干旱事件 1961~2007 年平均每年为 6.8 次, 其变化速率为 $4.3\% (10 \text{ a})^{-1}$, 呈显著增加趋势, 平均每 10 年增加 0.3 次, 通过了 95% 信

度检验, 表明海河流域由于降水特征变化造成的干旱压力在增加, 这可能是近年来干旱频发的重要原因。将干旱事件变化与降水量变化比较, 干旱事件发生频次最高 5 年依次为 2007、2006、1998、1977 和 1981 年, 而降水量最少 5 年依次为 1965、1997、2002、1999 和 1968 年, 有明显的不同; 干旱事件频次发生最少 5 年分别是 1973、1964、1976、1990 和 1961 年, 而降水最多的 5 年依次是 1964、1977、1973、1963 和 1990 年, 也有较大的差别。分析表明, 干旱事件增加与降水总量变化没有很好的对应关系, 有些年份如 1977 年降水量较多, 干旱事件发生频次也较多。因此, 降水量偏多 (少) 并不对应干旱发生频次减少 (增加), 在相同降水量年份, 可能会有不同程度干旱情况发生。进一步分析干旱事件频次与小雨日变化两者关系, 两者相关系数为 -0.5944 , 超过了 99% 的信度检验。从小雨日数 (图 2c) 与干旱事件年代际变化特征 (图 3c) 可以看出两者基本呈反位相变化, 即小雨日数偏多 (偏少) 位相对应干旱事件偏少 (偏多) 阶段。由此看出, 干旱事件增加与小雨日数减少有关, 小雨日数减少导致干旱事件增多, 从而导致干旱频率增加。

海河流域最长连续有降水日数平均值为 5.7 d, 变化速率为 $-2\% (10 \text{ a})^{-1}$, 呈现减少趋势, 但不明显, 平均每 10 年减少 0.1 d。其年代际变化特征明显, 60 年代属偏多阶段, 90 年代中期以后属偏少时期, 两时段偏多 (偏少) 位相与降水量变化相对应 (图 2a), 其幅度也最大。这说明最长连续有降水日数变化在一定程度上决定降水总量的变化。70 年代至 80 年代中期偏少, 80 年代中期至 90 年代中期偏多, 两者幅度均不大 (图 3b)。

海河流域湿涝事件 1961~2007 年平均每年为 1.3 次, 呈显著下降趋势, 速率为 $-8.3\% (10 \text{ a})^{-1}$, 平均每 10 年下降 0.1 次, 通过了 95% 信度检验。70 年代到 90 年代中期发生频次属于波动期, 年际差异明显, 60 年代处于偏多时期, 90 年代中期后属明显偏少期 (图 3d), 与相应时段降水量偏多 (少) 时段、最长连续有降水日数偏多 (少) 时段相对应。相关系数分别为 0.7436 和 0.9227, 湿涝事件发生与最长连续有降水日数关系密切, 其变化在一定程度上决定降水量多少。降水量与湿涝

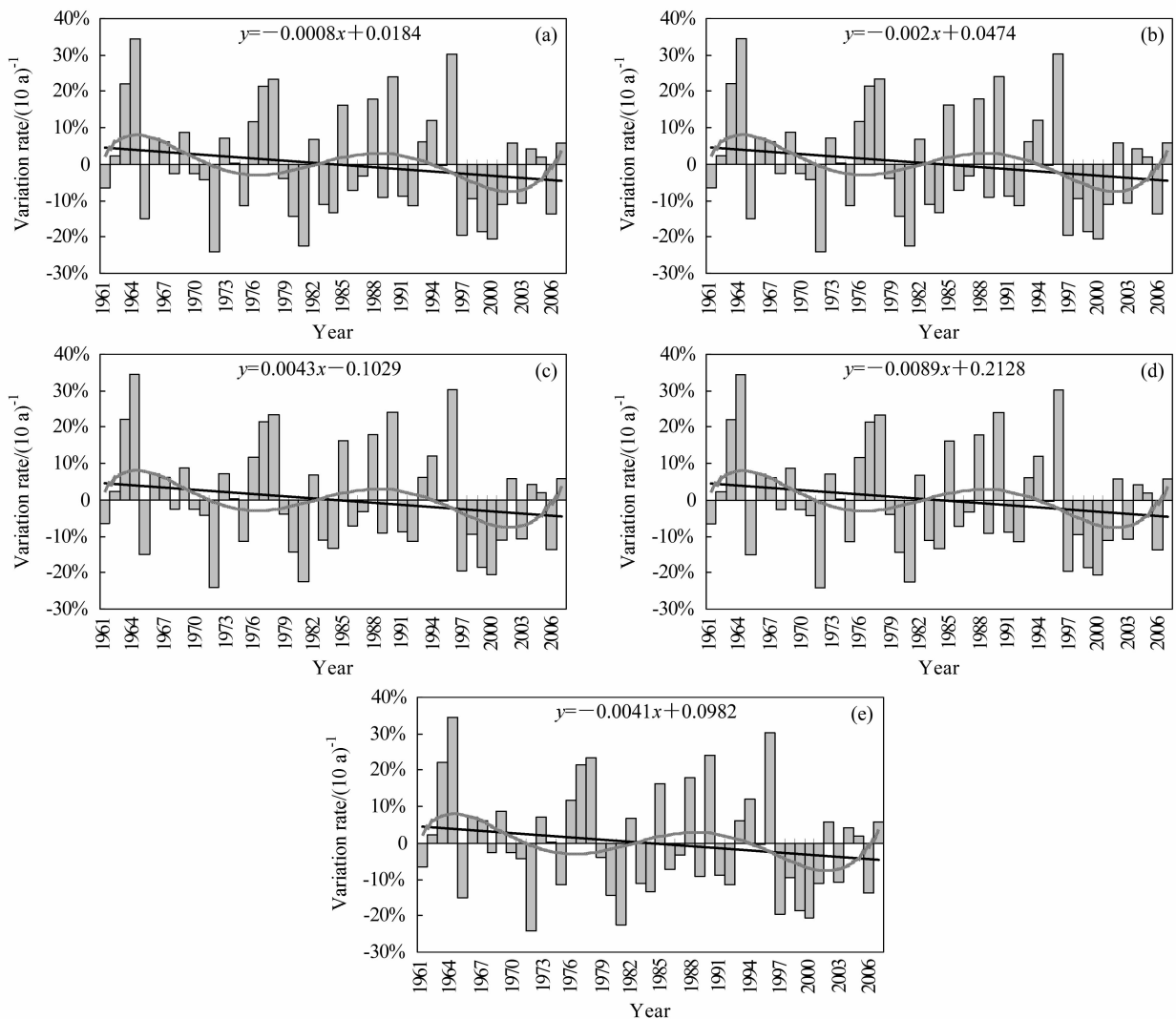


图3 海河流域 (a) 最长连续无降水日数、(b) 最长连续有降水日数、(c) 干旱事件、(d) 湿涝事件和 (e) 日最大降水量相对变率 (黑线为趋势线, 灰线为 6 阶多项式曲线)

Fig. 3 The relative variation rate of the (a) extreme drought spell length, (b) extreme moist spell length, (c) severe dryness, (d) severe wetness, and (e) annual maximum diurnal precipitation in the Haihe River basin (black line denotes linear trend and grey line denotes the 6-order polynomial curve)

事件呈减少趋势, 说明海河流域湿润程度减轻, 有变干发展趋势。

海河流域日最大降水量呈明显减少趋势, 其速率为 $-4.1\% (10\text{ a})^{-1}$, 通过 95% 信度检验, 平均每 10 年减少 3.1 mm。其年代际变化在 60 年代前期属于明显偏大期, “63·8” 特大洪涝事件发生在此阶段, 90 年代中期之后属明显偏小期, 而其余时段年际变化差异明显, 没有明显的年代际变化特征 (图 3e)。日最大降水量最大的是 1963 和 1996 年, 此两年分别出现了海河流域著名的 “63·8” 和 “96·8” 特大洪涝事件。日最大

降水量变化与暴雨日数变化关系紧密, 其相关系数为 0.7899, 说明海河流域致涝机会不仅与强降雨日数有关, 还与强降水强度密切相关。

海河流域干旱事件增多趋势与小雨日数减少趋势相对应以及降雨量变化趋势并不构成一一对应关系说明, 不仅降水量减少致使该区域趋向于干旱, 而且干旱事件增多趋势表明降水在时间分布上更加不均匀, 从而引起干旱事件发生频率和强度增加, 加剧了该区域干旱化程度; 湿涝事件显著减少、最长连续有降水日数减少是降水量减少的贡献因子, 表明近几十年湿润程度在减轻,

有变干发展的倾向。日最大降水量和暴雨日数呈明显减少趋势,说明在降水量减少背景下,强降水事件日数和强度也在减少,出现洪涝概率总体上减少。总之,海河流域近几十年来干旱化程度日益加剧,以干旱化为主导趋势,干旱出现概率要大于洪涝出现概率。

3.3 年降水量、小雨日数、暴雨日数空间变化特征

海河流域总体呈现干旱化倾向,但是否各区域均如此?哪个区域干旱化程度更大?因此,有必要对降水极值空间分布作深入研究。

海河流域降水量呈现由东南向西北递减分布(图 4a),西北区域在 500 mm 以下,东南部区域在 550 mm 以上。子牙河、大清河存在小于 500 mm 的低值中心;海河南系彰卫河区域和海河北系与滦河交界处各有一多雨中心,雨量在 600 mm 以上;降水量除滦河流域上游呈弱增加外,其余区域呈减少趋势,其中沿渤海湾区域呈现显著减少趋势(图 4b);降水量分布年代际变化从 20 世纪 60 年代至 21 世纪初具有两个特征,一是海河北系与滦河交界处多雨中心强度明显减弱、范围缩小。二是子牙河、大清河低值中心范围明显扩大。另外,彰卫河多雨中心 60~80 年代范围逐步缩小,90 年代后又逐步扩大(图略)。

海河流域小雨日数分布由东南向西北递增(图 5a),与降水量分布呈相反趋势。小雨日数表

现为大部分区域以减少为主导趋势,其中徒骇马颊河、子牙河、彰卫河部分区域以及环渤海湾区域减少显著,说明此区域降水事件发生更为集中(图 5c)。

海河流域暴雨日数分布呈东南向西北递减趋势,东南区域在 1.5 d 以上,西北区域 1 d 以下(图 5b),东南部发生洪涝概率大于西北部。暴雨日数表现为除滦河上游部分区域为增加趋势外,其余大部区域以减少为主,但没有通过检验,只有局部地区通过 95% 信度检验(图 5d)。

3.4 最长连续无(有)降水日数、干(湿)事件、日最大降水量空间变化

在最长连续无降水日数的空间分布上,海河南系与北系交界处存在一个高值中心,在 55 d 以上,依次分别向西北和东南递减(图 6a)。变化趋势在海河流域东南区域以增加为主,与小雨日数在此区域呈现显著减少趋势相对应,说明东南部区域干旱化程度在加剧;在西北部区域以减少趋势为主,但趋势在绝大部分区域不明显(图 7a)。

海河流域最长连续有降水日数由东南向西北依次递增,由环渤海区域平均每年 5 d 到西部和北部 7 d 以上(图 7b),与小雨日数分布相同、而与降水量分布相反。在西北部区域小雨事件较多而使得持续湿期较长;最长连续有降水日数在西部山区呈现增加趋势,与该区域最长连续无降水日数减少相对应,该区域干旱化程度得到一定的

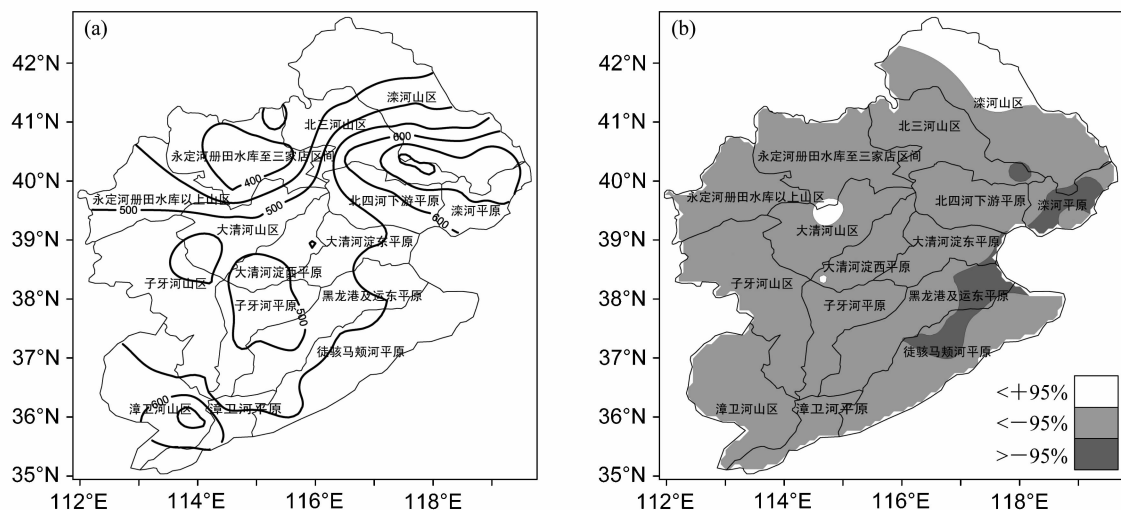


图 4 海河流域 (a) 降水量平均场和 (b) 趋势系数

Fig. 4 Spatial distribution of (a) average field and (b) trend coefficient of the rainfall amount in the Haihe River basin

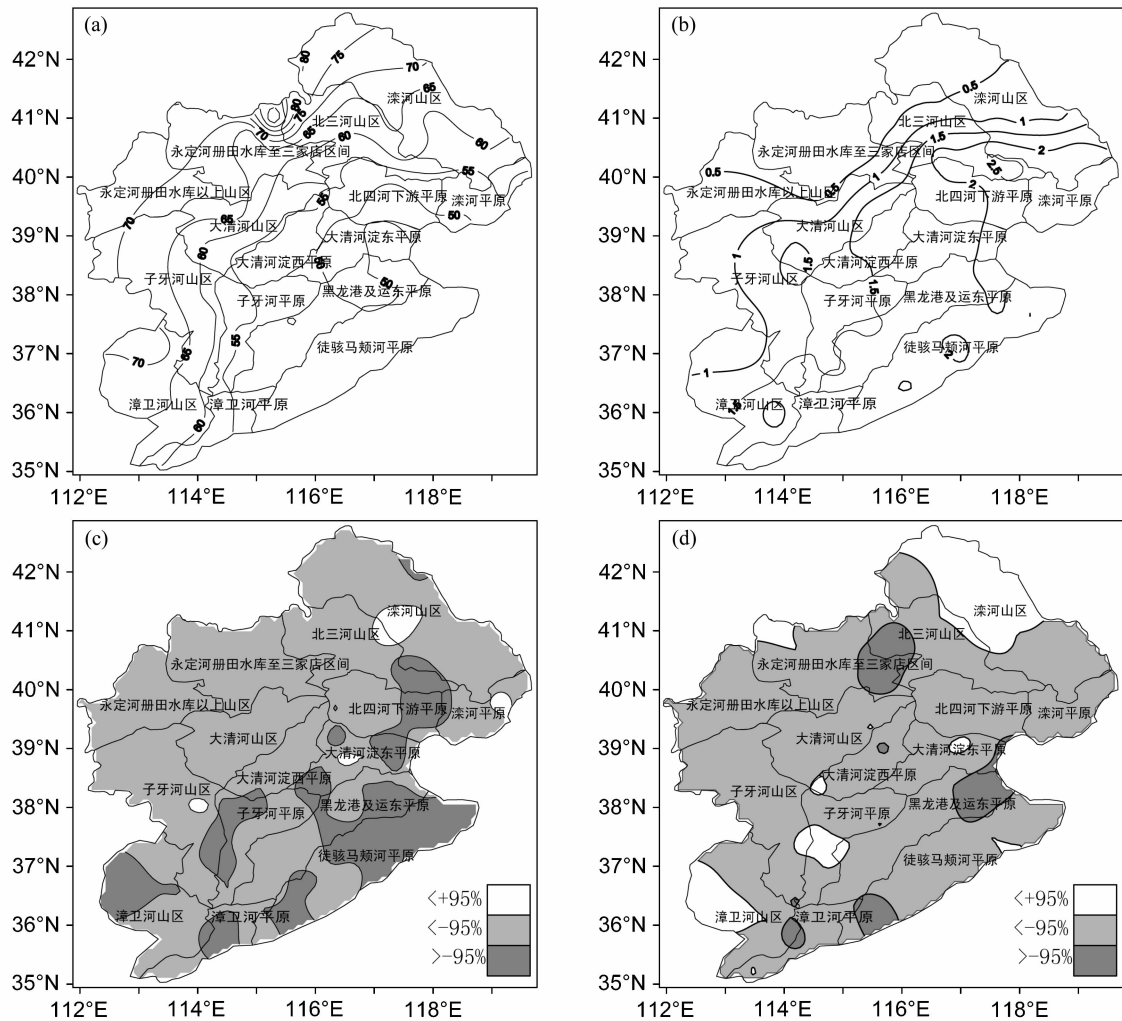


图5 海河流域 (a、c) 小雨日数、(b、d) 暴雨日数 (a、b) 平均场和 (c、d) 趋势系数场

Fig. 5 Spatial distribution of (a, b) average fields and (c, d) trend coefficient fields of (a, c) light rain days and (b, d) rainstorm days in the Haihe River basin

缓解。其余大部分区域以减少为主导趋势，局部区域减少趋势显著（图 7b）。

海河流域干旱事件分布与最长连续无降水日数分布类似，在海河南系与北系交界处有一高值中心，平均每年发生干旱次数在 8 次以上，由中心位置依次向东南和西北方向递减（图 7c）。大部分区域以增加趋势为主，其中海河流域东南部区域增加显著，与小雨日数在此区域显著减少及最长连续无降水日数增加相对应，该区域是海河流域干旱化加剧最主要的地区。其余大部地区也呈现增加趋势，但趋势并不明显（图 7c）。

湿涝事件分布呈现由东南向西北递增的趋势，环渤海湾区平均每年不足 1 次湿涝事件，海河流

域西北区域平均每年 2 次湿涝事件（图 7d），这种分布与小雨日数、最长连续有降水日数分布类似。湿涝事件除个别区域外海河流域表现为整体一致减少趋势（图 7d），海河流域整体呈现变干趋势。

日最大降水量分布由东南向西北减少，东南部大于 80 mm，西北部不足 40 mm（图 7e）。这种分布决定了东南部发生洪涝机会要大于西北部，著名的“63·8”和“96·8”洪涝事件均发生在海河流域东南部区域。其变化趋势除在海河流域西部、北部部分山区呈增长趋势外，其余大部区域呈减少趋势（图 7e），说明大部分区域发生洪涝的概率在减小。

海河流域降水量、暴雨日数、日最大降水量

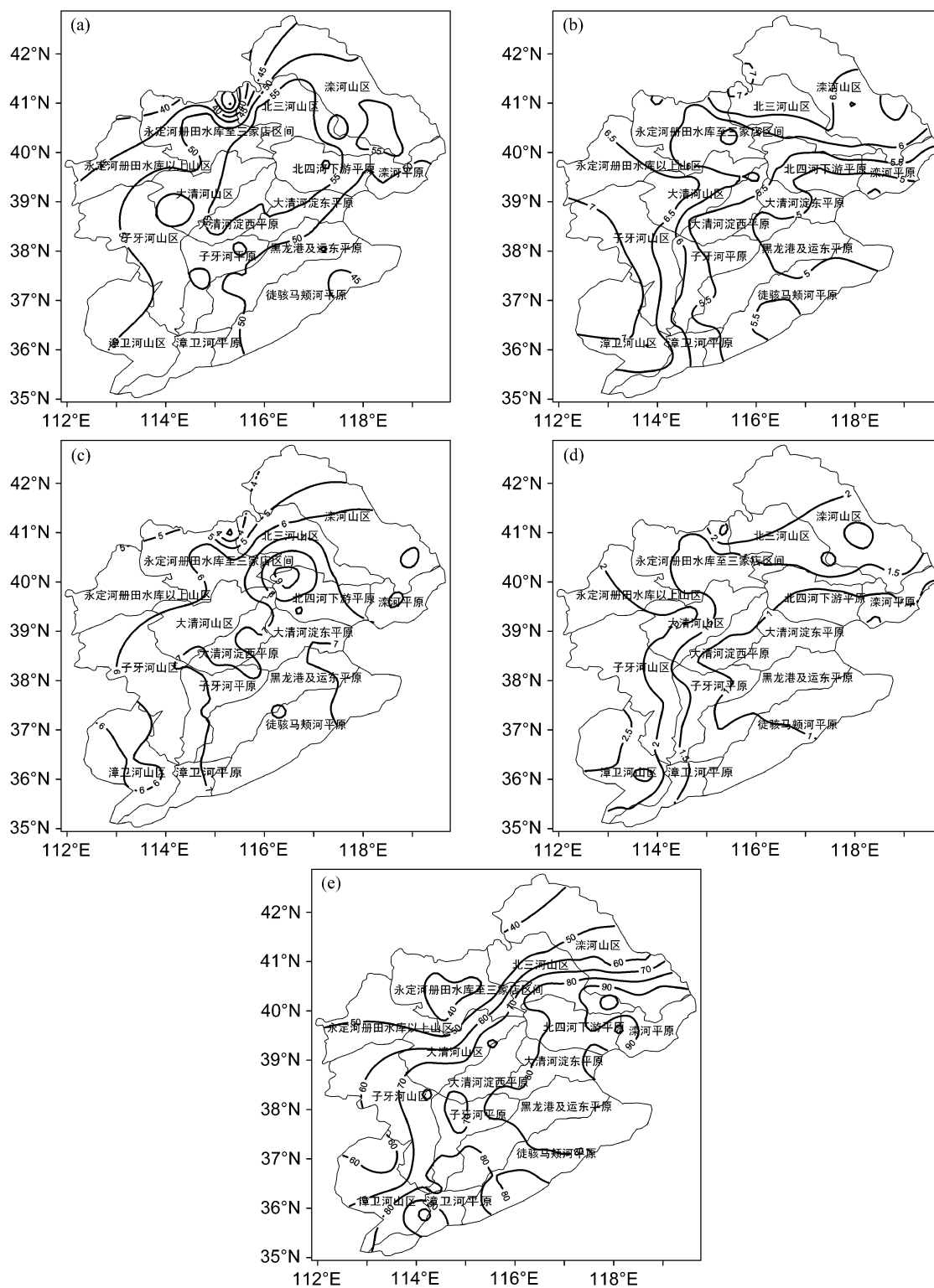


图6 海河流域各降水极值平均场: (a) 最长连续无降水日数; (b) 最长连续有降水日数; (c) 干旱事件; (d) 湿涝事件; (e) 日最大降水量

Fig. 6 Spatial distribution of average fields for the precipitation extremes in the Haihe River basin: (a) Extreme drought spell length; (b) extreme moist spell length; (c) severe dryness; (d) severe wetness; (e) maximum diurnal precipitation

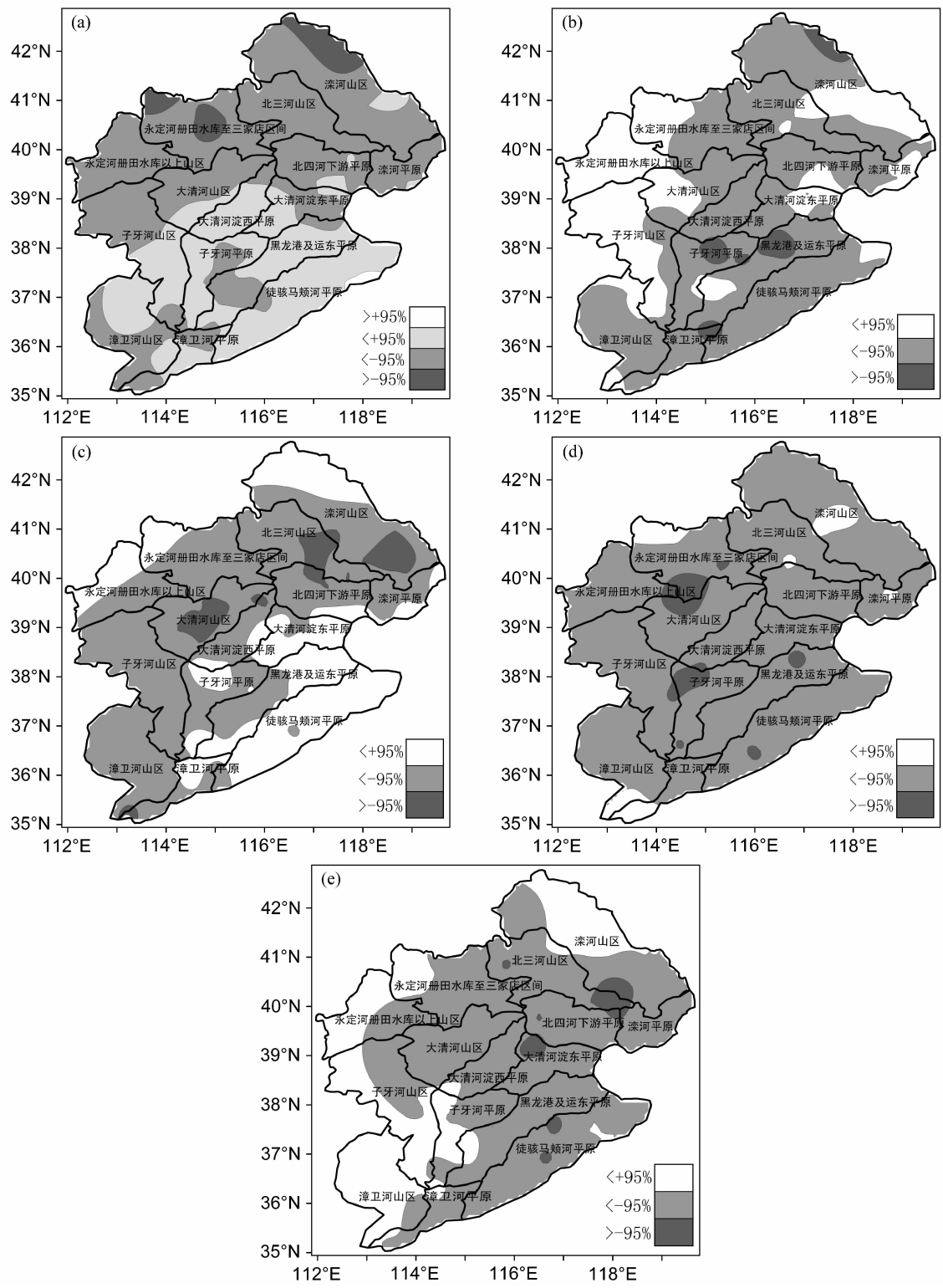


图 7 同图 6，但为趋势系数
Fig. 7 Same as Fig. 6, but for the trend coefficients

分布呈现自东南向西北递减的趋势；小雨日数、最长连续有降水日数、湿涝事件的分布自东南向西北递增；最长连续无降水日数、干旱事件高值中心位于海河南系与北系交界，并依次向东南和

西北递减。海河流域降水极值分布决定了其降水特有的特征,也决定了干旱和洪涝出现概率因所处区域不同而有差异。

海河流域各降水极值趋势分布中,降水量、小雨日数大部区域表现为减少趋势,干旱(湿涝)事件全区表现为整体增加(减少)趋势,表明大部区域干旱化日益加剧;最长连续无降水日数增加趋势、干旱事件显著增加区域与小雨日数显著减少区域相对应,主要在海河流域东南部区域,干旱化较其他地区加剧程度更甚;日最大降水量、暴雨日数大部区域呈现减少趋势,说明海河流域大部区域出现洪涝概率减小。

4 总结和讨论

本文应用海河流域最新资料,对多种降水极值指标时空变化特征进行了分析。得到以下结果:

(1) 流域降水减少不仅体现在降水量减少,同时也体现在降水时空不均匀分布方面。小雨日数明显减少伴随着干旱事件显著增多,以及湿涝事件显著减少和湿润持续时间的减少,使得降水在时间分布上更加不均匀,加剧了海河流域干旱化倾向。

(2) 除西北部部分区域外,近 50 年海河流域大部分区域呈现干旱化趋势,东南部干旱化最显著,小雨日数减少、干旱事件增多在此区域尤为显著,使得该区原本降水较为集中变得更为集中。

(3) 总体看来,近 50 年海河流域暴雨日数、日最大降水量呈显著减少趋势,表现出洪涝概率在减少。其平均场空间分布表现出海河流域由西北向东南出现洪涝概率增大的态势,而变化趋势空间分布却表现为除少部分区域外,大部分区域出现洪涝概率减小趋势。

(4) 海河流域是全国气候变暖最显著地区之一。但是,在气候变暖背景下,海河流域降水量趋于减少,降水时空分布变得更加不均匀,从而引起更多干旱事件发生。这将进一步恶化海河流域生态和环境,对社会和经济发展产生深远的影响。

参考文献 (References)

陈峪,高歌,任国玉,等. 2005. 中国十大流域近 40 多年降水量

- 时空变化特征 [J]. 自然资源学报, 20 (5): 637-642. Chen Yu, Gao Ge, Ren Guoyu, et al. 2005. Spatial and temporal variation of precipitation over ten major basins in China between 1956 and 2000 [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 20 (5): 637-642.
- Frich P, Alexander L N, Della Marta P, et al. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the Twentieth Century [J]. Climate Res., 19: 193-212.
- 宫德吉. 1997. 华北干旱和半干旱地区的水环境现状和水资源应用问题 [J]. 气候与环境研究, 2 (2): 193-198. Gong Deji. 1997. The present condition of water environment and some application problems of water resource in arid and semiarid area of North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2 (2): 193-198.
- 刘学锋, 赵黎明, 王颖. 2002. 京津冀区域春夏季降水的气候变化 [J]. 地理学与国土研究, 18 (1): 72-76. Liu Xuefeng, Zhao Liming, Wang Ying. 2002. The climatic variation of precipitation in Beijing Tianjin and Hebei in spring and summer [J]. Geography and Territorial Research (in Chinese), 18 (1): 72-76.
- 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮, 等. 2007. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述 [J]. 地球科学进展, 22 (7): 673-684. Qian Weihong, Fu Jiaolan, Zhang Weiwei, et al. 2007. Changes in mean climate and extremes climate in China during the last 40 years [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (7): 673-684.
- 任国玉, 姜彤, 李维京, 等. 2008. 气候变化对我国水资源情势影响的综合分析 [J]. 水科学进展, 19 (6): 772-779. Ren Guoyu, Jiang Tong, Li Weijing, et al. 2008. An integrated assessment of climate change impacts on China's water resources [J]. Advances in Water Science (in Chinese), 19 (6): 772-779.
- 阮新, 刘学锋, 李元华. 2008. 河北省近 40 年干旱变化特征分析 [J]. 干旱区资源与环境, 22 (1): 50-53. Ruan Xing, Liu Xuefeng, Li Yuanhua. 2008. Drought climate changes in Hebei Province during 1961-2000 [J]. Journal of Land Resources and Environment (in Chinese), 22 (1): 50-53.
- 孙风华, 吴志坚, 杨素英. 2006. 东北地区近 50 年来极端降水和干燥事件时空演变特征 [J]. 生态学报, 25 (7): 779-784. Sun Fenghua, Wu Zhijian, Yang Suying. 2006. Temporal and spatial variations of extreme precipitation and dryness events in northeast China in last 50 years [J]. Chinese Journal of Ecology (in Chinese), 25 (7): 779-784.
- 王颖, 施能, 顾骏强, 等. 2006. 中国雨日的气候变化 [J]. 大气科学, 30 (1): 162-169. Wang Ying, Shi Neng, Gu Junqiang, et al. 2006. Climatic variations of wet days in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 19 (6): 772-779.
- 王小玲, 翟盘茂. 2008. 1957~2004 年中国不同强度级别降水的变化趋势特征 [J]. 热带气象学报, 24 (5): 459-466. Wang

- Xiaoling, Zhai Panmao. 2008. Changes in China's precipitations in various categories during 1957-2004 [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 24 (5): 459-466.
- 魏凤英. 2004. 华北地区干旱强度的表征形式及其气候变异 [J]. *自然灾害学报*, 13 (2): 32-38. Wei Fengying. 2004. Characterization of drought strength in North China and its climatic variation [J]. *Journal of Natural Disasters* (in Chinese), 13 (2): 32-38.
- 翟盘茂, 王志伟, 邹旭恺. 2007. 全国及主要流域极端气候事件变化 [M] //任国玉. 气候变化与中国水资源. 北京: 气象出版社, 91-112. Zhai Panmao, Wang Zhiwei, Zhou Xukai. 2007. Variations of Extreme Climate Events over Major Basins in China [M] //Ren Guoyu. *Climate Change and China's Water Resources* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 91-112.
- 张文, 寿绍文, 杨金虎, 等. 2007. 近 45 a 来中国西北汛期降水极值的变化分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 21 (12): 126-132. Zhang Wen, Shou Shaowen, Yang Jinhu, et al. 2007. Analysis on change of precipitation extreme values in flood season over northwest China in recent 45 years [J]. *Journal of Land Resources and Environment* (in Chinese), 21 (12): 126-132.
- 张永领, 程炳岩, 丁裕国. 2003. 黄淮地区降水极值统计特征的研究 [J]. *南京气象学院学报*, 26 (1): 70-75. Zhang Yongling, Cheng Bingyan, Ding Yuguo. 2003. Statistical features of rainfall extremes in Huang-Huai area [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 26 (1): 70-75.
- 赵平, 周秀骥. 2006. 近 40 年我国东部降水持续时间和雨带移动年代际变化 [J]. *应用气象学报*, 17 (5): 548-556. Zhao Ping, Zhou Xiuji. 2006. Decadal variability of rainfall persistence time and rainbelt shift over eastern China in recent 40 years [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 17 (5): 548-556.
- 周连童, 黄荣辉. 2006. 华北地区降水、蒸发和降水蒸发差的时空变化特征 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 280-295. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2006. Characteristics of temporal and spatial variation of precipitation, evaporation and difference between precipitation and evaporation in North China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 11 (3): 280-295.