

海河流域 1961 年—2010 年极端气温与降水变化趋势分析

王刚, 严登华, 张冬冬, 刘少华

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 以海河流域 30 个气象基准站 1956 年—2010 年气温和降水日值资料为基础, 选取 12 个表征极端气候变化指标, 分析了该流域极端气温与降水的变化趋势。结果表明: 海河流域极端高温的强度、频度和持续时间均有较强的增加趋势; 极端低温的强度、频度显著降低, 反映出流域整体增温的气候变化背景; 流域短历时极端降水强度有增大趋势, 年极端降水的发生频次降低, 连续湿日表现出一定的减少趋势, 而连续干日在近几十年来有一定的增加趋势, 区域呈现弱干化趋势。从年代际变化特征看, 20 世纪 90 年代以来, 年极端高温事件和短历时强降水事件发生趋于频繁, 而长持续性降水事件的降水量减少。海河流域整体的暖干趋势以及降水集中的趋势, 将对农业生产、水资源开发利用造成不利影响, 同时, 短历时极端强降水事件的增加可能加剧局地的山洪灾害和城市内涝的风险。

关键词: 极端气温; 极端降水; 趋势分析; 海河流域; 气候变化

中图分类号: P467; P426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0001-06

Trend Analysis of Variations in Extreme Precipitation and Temperature in the Hai River Basin from 1961 to 2010

WANG Gang, YAN Deng-hua, ZHANG Dong-dong, LIU Shaohua

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China;

2. Water Resources Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on the daily data of precipitation and temperature of 30 basic meteorological stations in the Hai River Basin from 1956 to 2010, 12 indices characterizing the extreme climate change were selected to analyze the variation trends of extreme precipitation and temperature in the Hai River Basin. The results showed that (1) the intensity, frequency, and duration of extreme high temperature increase while the intensity and frequency of extreme low temperature decrease significantly in the Hai River Basin, which can reflect the overall increasing temperature trend in the basin; (2) the intensity of short time extreme precipitation increases while the frequency of heavy precipitation decreases. The duration of consecutive wet days decreases, while the duration of consecutive dry days increases in recent decades, which suggests that the basin becomes a little dry; and (3) the frequencies of annual extreme high temperature and short time extreme precipitation increase since 1990s, while the frequency of long time precipitation decreases. The trend of warm and dry conditions and short time precipitation can have negative impacts on the agricultural production and water resources development in the Hai River Basin. Meanwhile, the increasing of short time extreme precipitation may exacerbate the risk of local flood disaster in the mountainous area as well as urban waterlogging.

Key words: extreme temperature; extreme precipitation; trend analysis; Hai River Basin; climate change

1 研究背景

随着气候变化影响的深入, 天气系统和水循环系统的稳定性进一步降低, 极端气候水文事件在全球范围内呈现广发频发态势^[1]。相对平均气候变化情景, 极端事件对经济社会

发展、人民生活以及生态环境造成的影响更为严重^[2,3]。一般认为气候变化主要包括气温和降水特性的改变。气温是决定蒸散发的重要因子, 作物生长季气温升高对农业生产影响较大, 尤其是在作物关键生长期发生极端气温事件, 将会导致作物严重减产^[4]。全球增温背景下水文循环加快, 极

收稿日期: 2013-10-22 修回日期: 2013-12-02 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01004.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“气候变化对旱涝灾害的影响及风险评估”(2010CB951102); 国家自然科学基金面上项目(51279207)

作者简介: 王刚(1985-), 男, 河南平顶山人, 博士研究生, 主要从事气候变化下水资源综合应对研究。E-mail: hanhebest@163.com

端降水事件频发,增大了水源供水的随机性,将导致水资源配置与调度的难度加大,可利用水资源量减少。因此,从气候变化应对、灾害风险管理、水资源规划利用等角度分析极端气温、降水的变化趋势,受到国内外学者的广泛关注^[3,5-8]。

海河流域是我国重要的粮食生产基地,集中了全国近 10% 的人口,也是我国七大流域中水资源最为紧缺、水资源供需矛盾最为突出的流域;同时,海河流域又是我国华北地区气候变化最为显著的区域之一。有关海河流域气温和降水变化研究的文献较多^[9-10],但极端气候变化的研究相对较少,现有研究^[11-12]多选择单一要素指标,较难以全面反映区域极端气候变化特征。为此,本文选取 12 个指标因子,以长系列气温和降水日值资料为基础,从多角度分析极端气温与降水的长期变化趋势,以期更好地了解流域极端气候变化特征,为海河流域农业干旱风险评价、水资源规划管理等提供借鉴。

2 数据与方法

2.1 资料选取与处理

本文所使用的逐日最高、最低气温资料和逐日降水资料来自中国地面气候资料日值数据集,由中国气象局国家气象信息中心提供。数据集在发布前经过严格的质量评估,气温与降水要素资料的可疑率不超过 1/1 000。综合考虑站点的系列长度、资料完整性与均一性,对站点进行了初步的筛选,剔除部分因迁站导致资料不连续的站点,最终选用 30 个基准基本站,资料长度从 1961 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日。气象站点在流域的分布情况见图 1。

对于极个别站点存在的资料缺失现象(原数据系列中用 32766 或 32744 表示),通过与该站临近的、相关性较高的其它站点补齐。由于趋势性分析受资料均一性和一致性影响

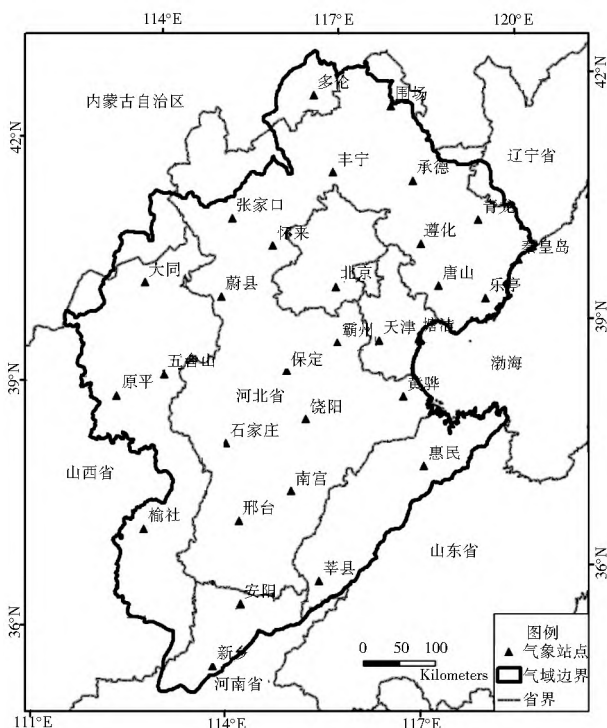


图 1 气象站点在流域中的分布

Fig. 1 Location of meteorological stations in the Hai River Basin

较大,除了站点明显迁移以外,还受观测技术、人为操作等因素影响^[13],所以采用 MW 检验方法^[14]对每个站点长系列资料进行均一性检验,结果表明 30 个站点全部通过检验,符合使用要求。

2.2 指标选取

本文选取气候变化检测、监测和指标专家组 (Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices, ET CCDMI) 推荐、并在国内外极端气温和降水变化研究中广泛应用的 12 个指标^[5,15],进行海河流域极端气温与极端降水的变化趋势分析。其中,极端气温指标有年极端最高与最低气温、年热日及年冷夜的发生频次、年暖时段与冷时段等;极端降水指标包括年最大 1 日降水量、年最大 5 日降水量、年强降水日数、年极强降水日数、年最大连续干日天数、年最大连续湿日天数等 6 个指标。这些指标用于表征研究区的极端气温与降水的强度、频度及持续时间等方面的变化。各指标的符号、名称、定义及单位见表 1。

表 1 本文选取的极端气温与降水指标的说明

Table 1 The selected indices characterizing the extreme temperature and precipitation in the study

指标 ID	指标名称	定义
TX _x	年极端最高气温 (°C)	每年的日最高气温的最大值
TN _n	年极端最低气温 (°C)	每年的日最低气温的最小值
TXf ₉₀	年热日的发生频次 (%)	每年的日最高气温超过 1961-1990 年 90 分位值的总天数所占的比例
TNf ₁₀	年冷夜的发生频次 (%)	每年的日最低气温低于 1961-1990 年 10 分位值的总天数所占的比例
WSDI	年暖时段/d	每年的连续出现至少 6 日的日最高气温超过 1961-1990 年 90 分位值的总天数
CSDI	年冷时段/d	每年的连续出现至少 6 日的日最低气温低于 1961-1990 年 10 分位值的总天数
RX1day	年最大 1 日降水量/mm	每年的日降水量的最大值
RX5day	年最大 5 日降水量/mm	每年的连续 5 日降水量的最大值
R10 mm	年强降水日数/d	每年的日降水量超过 10 mm 的总天数
R20 mm	年极强降水日数/d	每年的日降水量超过 20 mm 的总天数
CDD	连续干日/d	每年的连续出现日降雨量 < 1 mm 的天数的最大值
CWD	连续湿日/d	每年的连续出现日降雨量 ≥ 1 mm 的天数的最大值

2.3 分析方法

由于站点分布较为均匀,在获取单个站点各项指标的基础上,采用算术平均的方法获取整个海河流域的指标序列。采用简单线性回归的方法,对各气象要素年序列的变化趋势及程度进行分析,即:

$$y(t) = at + b \quad (1)$$

式中: y 为分析对象; t 为时间因子; a 、 b 为待定系数。

变化趋势及程度取决于一次方程的斜率 a : 当 $a > 0$ 时, 表示增加(上升)趋势; $a < 0$ 时, 表示减少(下降)趋势; a 绝对值越大, 变化程度越显著。 $a \times 10$ 称为序列的变化倾向率。本文用 t 检验进行变化趋势显著性检验, 并在分析过程中分别统计各年代际的指标因子, 用以反映序列的年代际变化特征。

3 结果与讨论

3.1 极端气温变化特征

3.1.1 年极端最高温与最低温变化

海河流域年极端最高气温和年极端最低气温的变化趋势及其年代际变化特征分析结果见图 2。可以看出, 年极端最高气温序列整体上呈现不显著的上升趋势, 显著性未达到 90% 的置信水平($\alpha = 0.1$), 变化倾向率为 $0.17 \text{ }^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$; 年极端最低气温整体在 $\alpha = 0.01$ 水平上呈现显著的上升趋势, 变化倾向率为 $0.74 \text{ }^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$ 。

进一步从年代际变化特征看, 年极端最高气温呈现先下降后上升的趋势。20 世纪 70、80 年代年极端最高气温平均值基本相当, 约为 $35.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 且为研究序列的最低值, 比 60 年代减少约 $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$; 90 年代年极端最高气温回升, 平均值与 60 年代的基本持平; 21 世纪以来年极端最高气温保持在较高水平, 平均为 $37.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 2010 年极端最高气温达到 $38.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 为分析序列的最大值。另一方面, 年极端最低气温呈现阶梯型递增趋势, 20 世纪 60 年代 TX_x 平均值最低约为 $-20.2 \text{ }^\circ\text{C}$; 90 年代达到研究序列的最高值为 $-16.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 较 60 年代上升 $3.6 \text{ }^\circ\text{C}$; 21 世纪以来年极端最低气温波动较大, 个别年份也经历极端低温事件(如 2001 年、2010 年), 但总体上仍超过 20 世纪 90 年代以前的水平, 平均值为 $-17.61 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

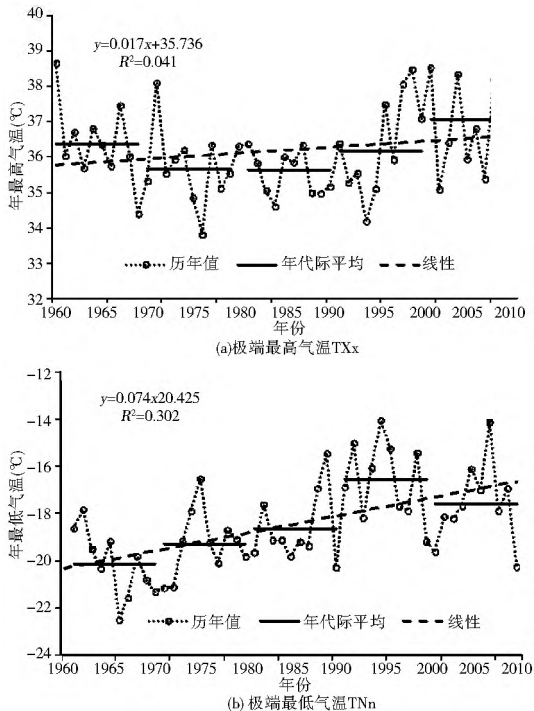


图 2 海河流域 1961 年- 2010 年极端最高气温与最低气温的变化趋势

Fig. 2 Variation trends of annual extreme (a) high temperature and (b) low temperature in the Hai River Basin from 1961 to 2010

3.1.2 热日和冷夜的变化

图 3 为海河流域年热日和冷夜发生频次的变化趋势。可以看出, 年热日呈现显著的增加趋势, 而年冷夜呈现显著的减少趋势, 两者显著性均通过 99% 的置信水平($\alpha = 0.01$)。年热日和年冷夜的变化倾向率分别为 $1.98\%/(10 \text{ a})$ 和 $-1.65\%/(10 \text{ a})$ 。

从年代际变化特征看, 20 世纪 70、80 年代热日发生频次比 60 年代略有下降, 约为 9.6%; 20 世纪 90 年代热日发生频次开始迅速上升; 21 世纪以来, 热日发生频次稳定在较高水平, 平均值达到 17.8%, 为 20 世纪 70、80 年代的 1.8 倍。而年冷夜发生频次呈现阶梯型减少趋势, 20 世纪 60 年代冷夜发生频次最高, 平均为 11.8%; 20 世纪 90 年代冷夜发生频次已经降低为 5.6%, 不及 60 年代的一半; 21 世纪以来冷夜发生频次较 20 世纪 90 年代没有明显的变化, 平均约 5.4%。

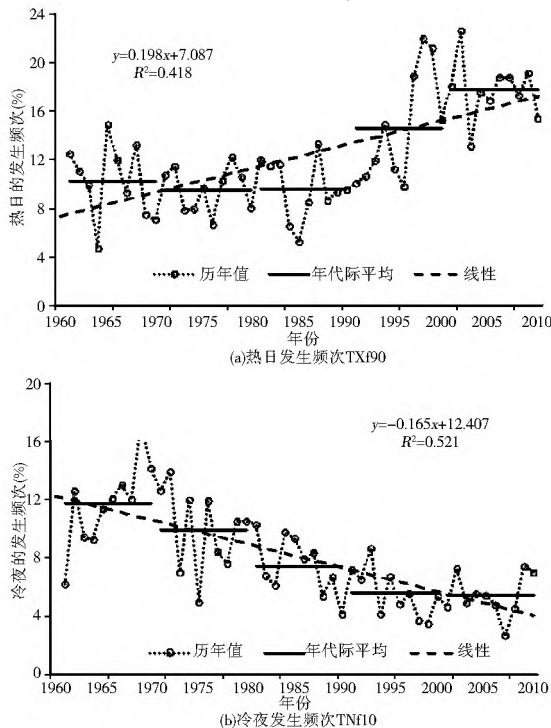


图 3 海河流域 1961 年- 2010 年热日和冷夜发生频次的变化趋势

Fig. 3 Variation trends of the frequency of (a) hot days and (b) cold nights in the Hai River Basin from 1961 to 2010

3.1.3 暖、冷时段的变化

图 4 为海河流域年暖时段和冷时段的变化趋势。暖时段序列整体在 $\alpha = 0.01$ 水平上呈现显著增加趋势, 变化倾向率为 $1.89 \text{ d}/(10 \text{ a})$ 。冷时段序列整体上有了一定的减少趋势, 但趋势不显著, 变化倾向率约为 $0.22 \text{ d}/(10 \text{ a})$ 。

从年代际变化特征看, 暖时段在 20 世纪 60-80 年代变化不大, 年平均暖时段长度从 60 年代的 1.9 d 小幅度增加到 80 年代的 2.3 d; 20 世纪 90 年代以来, 暖时段有较大程度增加, 研究时段内年均暖时段最长的几年均出现在这一时期, 20 世纪 90 年代与 21 世纪前 10 年的年均暖时段分别为 6.5 d 和 9.3 d。冷时段长度在 20 世纪 60 年代平均为 2.1 d, 为研究时段最大值; 20 世纪 70 年代以来, 冷时段无明显趋势性变化, 平均约为 1.0 d, 整体上连续出现冷夜的概率较低,

但也有个别年份(如 1985 年、1993 年、2009 年)发生较长时间连续冷夜的情况。

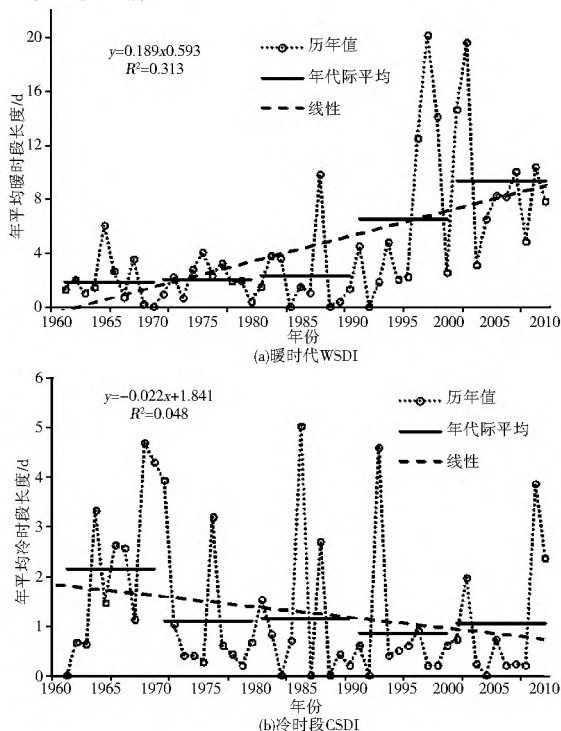


图 4 海河流域年均暖时段和冷时段的变化趋势

Fig. 4 Variation trends of annual average of (a) warm spells and (b) cold spells in the Hai River Basin from 1961 to 2010

气候变化对区域农业生产可能产生积极的或不利的影 响,这取决于区域实际状况(种植结构、作物类型、水资源状况、节水水平等)^[16]。已有研究表明,在我国区域气温升高对灌溉农业有利,而不利于雨养农业的发展^[17]。文献[18]和[19]的研究结果也表明,气温升高会导致小麦、玉米等旱作物一定程度上的减产。据文献[20],在相对气温升高 1℃、降水量增加 3% 时,农业用水将增加 2.7%;气温每升高 1℃,工业的冷却用水将增加 1%~2%,生活用水量增加 1%。海河流域所在的华北平原是我国小麦、玉米的主产区,生产了全国半数以上的小麦和 1/3 的玉米。鉴于流域水资源本底状况较差,区域性的、持续性的极端高温事件增加,必然会加剧水资源对农业生产的制约作用,并对区域经济社会发展构成不利影响。

3.2 极端降水变化特征

3.2.1 年极端降水量变化

海河流域年最大 1 日降水量和最大 5 日降水量的变化趋势及其年代际变化特征见图 5。可以发现,年最大 1 日降水量序列整体呈现显著的增加趋势,年最大 5 日降水量序列呈现显著的减少趋势。两者均通过了 99% 置信水平,变化倾向率分别为 3.26 mm/(10 a) 和 -7.67 mm/(10 a)。

从年代际变化特征看,年最大 1 日降水量总体上表现出阶梯型的增加趋势,20 世纪 60 年代的 RX1day 最小,为 61.9 mm;70 年代连续出现极端强降水的年份,RX1day 平均达到 69.1 mm;80 年代平均 RX1day 为 67.9 mm,较 70 年代有所下降,90 年代以来,年最大 1 日降水量虽有较大程度的变异性,但总体上超过其它年代,后两个年代平均 RX1day 分别为 73.6

mm 和 76.6 mm。年最大 5 日降水量呈现阶梯型的减少趋势,20 世纪 60 年代平均 RX5day 最大,其中 1963 年达到 186.9 mm,为研究时序最大值;70-90 年代,最大 5 日降水量逐步减少,但减幅不大,约为 -4%;21 世纪以来,最大 5 日降水量大幅减少,平均 RX5day 较 20 世纪 90 年代减少 18.2%。

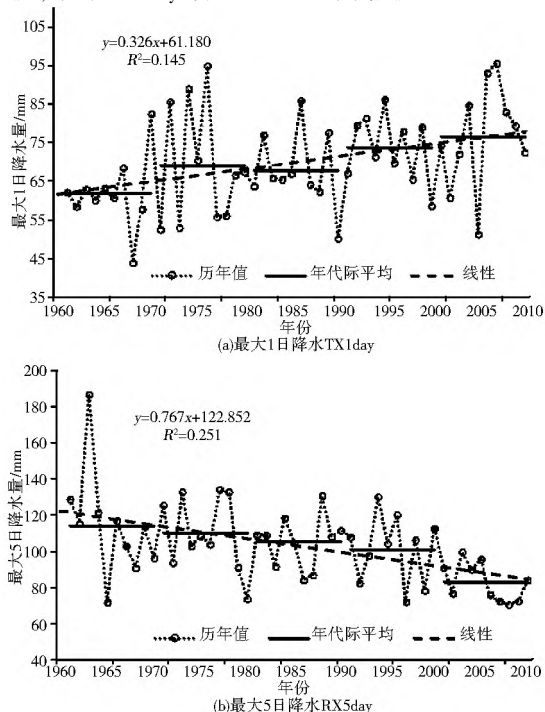


图 5 海河流域年最大 1 日降水量和最大 5 日降水量的变化趋势

Fig. 5 Variation trends of the the maximum (a) 1 day precipitation amount and (b) 5 day precipitation amount in the Hai River Basin from 1961 to 2010

3.2.2 年极端降水天数变化

图 6 为海河流域每年强降水天数和极强降水天数的变化趋势,图中显示:年 R10 mm 和 R20 mm 序列均呈现不显著的减少趋势,未通过 90% 置信水平的显著性检验,减少倾向率分别为 -0.31 d/(10 a) 和 -0.23 d/(10 a)。

从年代际变化看,日降雨量大于 10 mm 和 20 mm 的天数均呈现阶梯型逐步减少趋势,但对于 R10 mm 序列而言,各年代之间变化幅度很小,从 20 世纪 60 年代的 15.5 d 减少到 21 世纪初的 14.2 d。而对于 R20 mm 序列,20 世纪 60、70 年代 R20 mm 几乎无变化;80 年代 R20 mm 出现一次比较明显的减少现象,平均较 70 年代减少 8.5%;之后 R20 mm 的减少趋势缓慢,几无大的变化。

3.2.3 年干、湿时段变化

图 7 海河流域每年最大连续湿日和最大连续干日的变化趋势。最大连续湿日序列整体上呈现一定减少趋势,但显著性未达到 90% 置信水平。最大连续干日序列的减少趋势整体上更为不明显。

从年代际变化特征看,最大连续湿日呈现阶梯型逐步减少趋势,但年代际之间减少幅度不大,20 世纪 60 年代 CWD 的平均值为 4.3 d,21 世纪前 10 年减少为 3.9 d;最大连续干日呈现先减少后增加的趋势,20 世纪 60 年代 CDD 最大,平均为 48.3 d,70 年代减少为 44.9 d,之后逐步增加到 90 年代

的 46.9 d, 21 世纪初又略有下降。

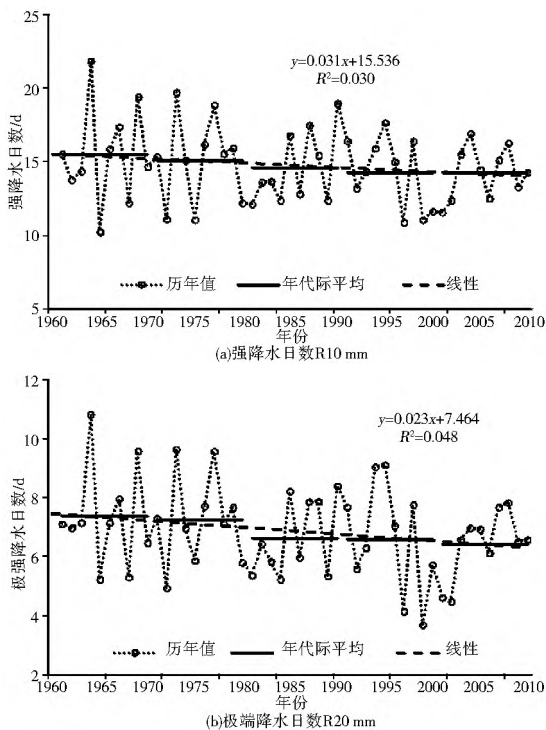


图 6 海河流域年强降水日数和极强降水日数的变化趋势

Fig. 6 Variation trends of the number of (a) heavy precipitation days and (b) very heavy precipitation days in the Hai River Basin from 1961 to 2010

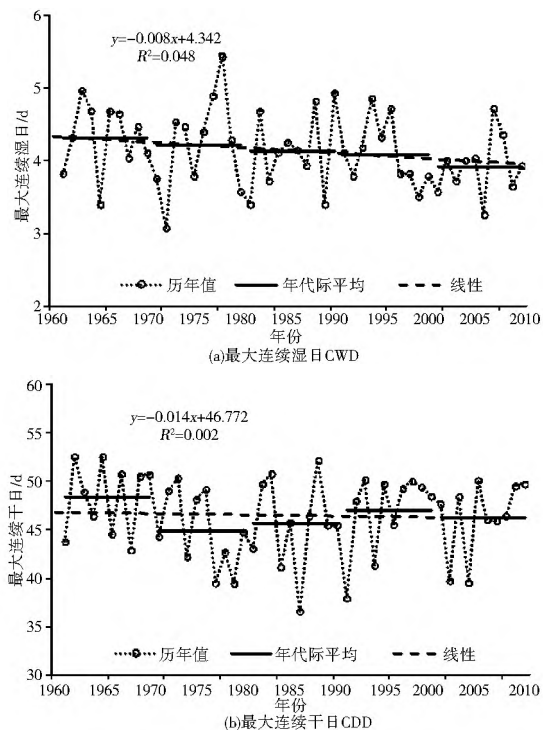


图 7 海河流域年最大连续湿日和最大连续干日的变化趋势

Fig. 7 Variation trends of the maximum number of (a) consecutive wet days and (b) consecutive dry days in the Hai River Basin from 1961 to 2010

对比年最大 1 日降水量和最大 5 日降水量的变化特征,可以看出海河流域短历时降水事件的降水量有显著的增加趋势,而长持续性降水事件的降水量有显著减少趋势。殷水

清等^[21]与李建等^[22]的研究结果均表明,在近地表气温升高的同时,对流层中上层气温下降,从而加剧大气底层和高层间的热力差异,可能降低局地大气静力稳定度,易于激发对流活动,导致对流性短时极端降水增加,因此海河流域年最大 1 日降水量呈现显著增加趋势,与流域底层大气在全球变暖的气候背景下显著升温有关。另据 Yu 等人^[23]的研究结果,近几十年来我国北方地区东亚夏季风有较显著的减弱趋势,使到达我国华北地区(包括海河流域)的水汽减少,不易达到发生持续性降水所需的水汽条件,因此,海河流域最大 5 日降水量的显著减少可能与东亚夏季风的减弱有关。由此可以推断,短历时强降水受局地气候影响较大,而较长历时强降水则受大尺度天气系统控制,但持续性降水事件的物理机制还有待深入研究。

进一步分析海河流域极端降水变化特征,发现 1961 年-2010 年降水量序列也呈现显著的减少趋势(95% 显著水平)(图 8),变化倾向率约为 -18 mm/(10 a),这与流域年极端降水天数变化及干湿时段变化总体趋势一致。由于海河流域的地缘位置和气候特征,降水是地表径流性水资源的主要来源。在总降水量减少的情况下,短历时极端降水的比重相对增加,这对地表水资源有效利用是不利的。但由于长持续性降水事件减少,加之海河流域较为完善的地表水利工程体系和由于长期超采地下水形成的深厚包气带的强大调节能力,因此短历时极端降水事件不会对流域层面的防洪安全形成较大影响,但可能加剧局地山洪灾害和城市内涝风险。

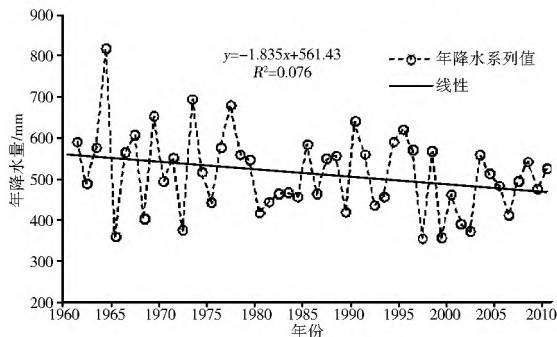


图 8 海河流域 1961 年- 2010 年降水量的变化趋势

Fig. 8 Variation trend of annual total precipitation in the Hai River Basin from 1961 to 2010

4 结论

本文以海河流域 30 个气象基准站近 50 年序列逐日最高、最低气温和逐日降水资料为基础,选取 ETCCDMI 推荐使用的 12 个表征极端气候变化指标,分析了海河流域极端气温与降水的变化趋势,主要结论如下。

(1) 极端高温的强度、频度和持续时间均有较强的增加趋势;极端低温的强度、频度显著降低。极端高温和极端低温的长期变化特征,反映出流域整体增温的气候变化背景,并且极端低温增幅明显高于极端高温,对平均气温上升的贡献较大。

(2) 短历时极端降水强度有增大趋势,而长历时极端降水强度有显著减少趋势。年强降水天数呈现一定的减少趋

势,极端降水的发生频次降低;年最大连续湿日呈现一定减少趋势,但不显著,最大连续干日整体变化不显著,但近几十年来有一定的增加趋势。干、湿时段变化可在一定程度上反映流域干旱风险加剧的态势。

(3)从极端气温与降水的年代际变化特征看,20世纪90年代以来的增温趋势尤为显著,也是极端高温事件频发多发的时期,年极端最高气温、年热日的发生频次以及年暖时段等极端气温指标较其它年代均有大幅的变化。同时,年短历时极端降水量在同期有较明显的增加趋势,主要与地表气温的上升有关,而长持续性降水事件的降水量减少可能与我国北方地区东亚夏季风减弱有关,但其影响机理还有待深入研究。

(4)海河流域整体的暖干趋势,对农业生产影响较大。在降水总量减少的情况下,短历时强降水量有较明显的增加趋势,将不利于水资源的有效利用,并可能会在一定程度上增加山区洪水灾害和城市内涝的风险。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge University Press, 2007.
- [2] Salinger M J, Griffiths G M. Trends in New Zealand Daily Temperature and Rainfall Extremes[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(12): 1437-1452.
- [3] Hündecha Y, Brossy A. Trends in Daily Precipitation and Temperature Extremes Across Western Germany in the Second Half of the 20th Century[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(9): 1189-1202.
- [4] Gornall J, Betts R, Burke E, et al. Implications of Climate Change for Agricultural Productivity in the Early Twenty-first Century[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 2010, 365(1554): 2973-2989.
- [5] Klein Tank A M G, Peterson T C, Quadir D A, et al. Changes in Daily Temperature and Precipitation Extremes in Central and South Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 2006, 111(D16105). doi: 10.1029/2005JD006316
- [6] Xu X, Du Y G, Tang J P, et al. Variations of Temperature and Precipitation Extremes in Recent Two Decades over China[J]. Atmospheric Research, 2011, 101(1): 143-154.
- [7] 李占杰, 鱼京善, 信达. 1951年-2010年贵阳市气温变化特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(5): 31-35. (LI Zhanjie, YU Jingshan, XIN Da. Characteristic Analysis of Temperature in Guiyang from 1951 to 2010[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(5): 31-35. (in Chinese))
- [8] 郑永路, 钟平安, 万新宇, 等. 淮河流域主汛期极端降水时空特征变异分析[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 13-17. (ZHENG Yonglu, ZHONG Pingan, WAN Xin Yu, et al. Analysis of Spatial and Temporal Variations of Extreme Precipitation in Huaihe River Basin during the Main Flood Season[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 13-17. (in Chinese))
- [9] 袁再健, 沈彦俊, 褚英敏, 等. 海河流域近40年来降水和气温变化趋势及其空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 24-26. (YUAN Zaijian, SHEN Yanjun, CHU Yingmin, et al. Variations and Distribution of Temperature and Precipitation of Haihe River Basin in Recent 40 Years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(3): 24-26. (in Chinese))
- [10] 王利娜, 朱厚华, 鲁帆, 等. 海河流域近50年降水量时空变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 242-246. (WANG Lina, ZHU Houhua, LU Fan, et al. Characteristics of Temporal and Spatial Variation of Precipitation in Haihe River Basin during Recent 50 Years[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2): 242-246. (in Chinese))
- [11] 刘学锋, 任国玉, 范增禄, 等. 海河流域近47年极端强降水时空变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8): 85-90. (LIU Xuefeng, REN Guoyu, FAN Zenglu, et al. Trends of Precipitation Extremes in the Haihe River Basin during 1961-2007[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(8): 85-90. (in Chinese))
- [12] 徐丽梅, 郭英, 刘敏, 等. 1957年至2008年海河流域气温变化趋势和突变分析[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 995-1001. (XU Limei, GUO Ying, LIU Min, et al. Analysis of Temperature Trends and Change Points in the Haihe River Basin over the Last 50 Years[J]. Resources Science, 2011, 33(5): 995-1001. (in Chinese))
- [13] Dos Santos C A C, Neale C M U, Rao T V R, et al. Trends in Indices for Extremes in Daily Temperature and Precipitation over Utah, USA [J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(12): 1813-1822.
- [14] Yue S, Wang C Y. Power of the Mann-Whitney Test for Detecting a Shift in Median or Mean of Hydro-meteorological Data[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2002, 16(4): 307-323.
- [15] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 2006, 111(D05109). doi: 10.1029/2005JD006290.
- [16] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The Impacts of Climate Change on Water Resources and Agriculture in China [J]. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.
- [17] Wang J, Mendelsohn R, Dinar A, et al. The Impact of Climate Change on China's Agriculture [J]. Agricultural Economics, 2009, 40(3): 323-337.
- [18] Tao F, Yokozawa M, Liu J, et al. Climate-crop Yield Relationships at Provincial Scales in China and the Impacts of Recent Climate Trends [J]. Climate Research, 2008, 38(1): 83-94.
- [19] You L, Rosegrant M W, Wood S, et al. Impact of Growing Season Temperature on Wheat Productivity in China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6): 1009-1014.
- [20] 张建云. 气候变化与中国水安全 [J]. 闽江学刊, 2010, 2(4): 15-19. (ZHANG Jianyun. Climate Change and China's Water Security [J]. Yuejiang Academic Journal, 2010, 2(4): 15-19. (in Chinese))

(下转第11页)

- 社, 1995. (National Bureau of Statistics of China, Ministry of Civil Affairs. Report of the Damage Caused by Disaster in China[M]. Beijing: China Statistics Press, 1995. (in Chinese))
- [3] 新中国五十年统计资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999. (Comprehensive Statistical Data and Materials on 50 Years of New China[M]. Beijing: China Statistics Press, 1999. (in Chinese))
- [4] 成福云. 干旱灾害对 21 世纪初我国农业发展的影响探讨[J]. 水利发展研究, 2002, 10(2): 31-33. (CHENG Fuyun. Investigate the Effects of Drought on China's Agricultural Development in the Early 21st Century[J]. Water Resources Development Research, 2002, 10(2): 31-33. (in Chinese))
- [5] 郝芳华, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型—理论方法与应用[M]. 北京: 中国科学环境出版社, 2006. (HAO Fanghua, CHENG Hongguang, YANG Shengtian. Nonpoint Source Pollution Model[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006. (in Chinese))
- [6] R Jayakrishnan, R Srinivasan, C Santhi, et al. Advances in the Application of the SWAT Model for Water Resources Management[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3): 749-762.
- [7] J G Arnold, R Srinivasan, R S Muttiah, et al. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development[J]. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [8] Chanasyk D S, Mafumo E, Willms W. Quantification and Simulation of Surface Runoff from Fescue Grassland Watersheds[J]. Agricultural Water Management, 2003, 59: 137-153.
- [9] F Bouraoui, S Benabdallah, A Jrad, et al. Application of the SWAT Model on the Medjerda River Basin (Tunisia)[J]. Physics and Chemistry of Earth, 2005, 30: 497-507.
- [10] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. SWAT 模型研究应用进展[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 31-351. (PANG Jing-peng, XU Zong-xue, LIU Chang-ming. SWAT Model Application: State of the Art Review[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(3): 31-351. (in Chinese))
- [11] S L Neitsch, J G Arnold, J R Kiniry, et al. Soil and Water Assessment Tool theoretical document version. <http://swat.tamu.edu/documentation/>, 2005.
- [12] 袁军营, 苏保林, 李卉, 等. 基于 SWAT 模型的柴河水库流域径流模拟研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 361-365. (YUAN Junying, SU Baolin, LI Hui, et al. Runoff Simulation in Chaihe Reservoir Catchment Based on Swat Model[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2010, 46(3): 361-365. (in Chinese))
- [13] SL 424 2008, 旱情等级标准[S]. (SL 424 2008, Standard of Classification for Drought Severity[S]. (in Chinese))
- [14] 王战平. 灞河流域水文特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5): 176-179. (WANG Zhanping. Hydrologic Characteristics Analysis in Bahe River Basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(5): 176-179. (in Chinese))
- [15] Karim C Abbaspour. SWAT-CUP4: SWAT Calibration and Uncertainty Programs- A User Manual. <http://www.eawag.ch/forschung/siam/software/swat/index>, 2013.
- [16] 薛晨. 基于 SWAT 模型的产流产沙模拟与模型参数不确定性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2011. (XUE Chen. SWAT-aided Surface Runoff and Sediment Yield Modeling and Parameter Uncertainty Analysis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011. (in Chinese))
- [17] 西安市地方志办公室. 西安年鉴 2002[M]. 西安: 西安出版社, 2002. (Local Records Office in Xi'an. Xi'an Yearbook 2002[M]. Xi'an: Xi'an Publishing House, 2002. (in Chinese))
- [18] 西安市地方志办公室. 西安年鉴 2003[M]. 西安: 西安出版社, 2003. (Local Records Office in Xi'an. Xi'an Yearbook 2003[M]. Xi'an: Xi'an Publishing House, 2003. (in Chinese))
- [19] 西安市地方志办公室. 西安年鉴 2004[M]. 西安: 西安出版社, 2004. (Local Records Office in Xi'an. Xi'an Yearbook 2004[M]. Xi'an: Xi'an Publishing House, 2004. (in Chinese))

(上接第 6 页)

- [21] 殷水清, 高歌, 李维京, 等. 1961-2004 年海河流域夏季逐时降水变化趋势[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(2): 256-266. (YIN Shuqing, GAO Ge, LI Weijing, et al. Long-term Precipitation Change by Hourly Data in Haihe River Basin during 1961-2004[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 42(2): 256-266. (in Chinese))
- [22] 李建, 宇如聪, 王建捷. 北京市夏季降水的日变化特征[J]. 科学通报, 2008, 53(7): 829-832. (LI Jian, YU Rucong, WANG Jianjie. Study on the Daily Change Characteristics of Summer Precipitation in Beijing City[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(7): 829-832. (in Chinese))
- [23] Yu R, Wang B, Zhou T. Tropospheric Cooling and Summer Monsoon Weakening Trend over East Asia[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(22): L22212.