

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0095

陈鑫,刘艳丽,刁艳芳,等. CRU 高分辨率格点降水资料在海河流域的适用性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(5): 910-920. CHEN X, LIU Y L, DIAO Y F, et al. Applicability of CRU high-resolution grid precipitation data in Haihe River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5): 910-920. (in Chinese)

CRU 高分辨率格点降水资料在海河流域的适用性

陈鑫^{1,2}, 刘艳丽^{1,3,4}, 刁艳芳⁵, 王国庆^{1,3,4}, 关铁生^{1,3,4}, 金君良^{1,3,4},

鲍振鑫^{1,3,4}, 刘翠善^{1,3,4}, 贺瑞敏^{1,3,4}

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098;

4. 水利部应对气候变化研究中心, 南京 210029; 5. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 利用海河流域及其子流域漳河流域的实测站点资料, 采用皮尔逊相关系数、均方根误差、平均绝对误差以及相对偏差作为评价指标, 对 CRU (climate research unit) 数据降水产品的月尺度降水数据在海河与漳河流域的适用性进行评估分析, 结果表明: CRU 数据在海河子流域漳河流域的适用性好于整个海河流域, 各项评价结果均达到预期期望; 突变性与周期性规律检验结果与以往基于实测数据分析结果相符; 从相关系数角度来看, 应用于 2 个流域的 CRU 数据在 1990 年之前整体表现良好, 但在 1990 年后海河流域的相关系数显著下降。综上 CRU 数据可应用于海河流域与漳河流域的气候变化背景下水文过程模拟与分析, 但应用于海河流域实测站点数据的还原时, 应充分考虑其年际表现不一的问题。

关键词: 降水产品; 适用性; CRU; 海河流域; 漳河流域; 高分辨率格点

中图分类号: P333 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



降水是自然界中存在的一种基本而重要的气象现象, 也是水文循环中的重要环节^[1]。在气候变化与人类活动加剧的大前提下, 全球范围的降水呈现出明显的区域性变化特征^[2], 并进而对自然环境与人类社会的发展产生了一定的影响。因此, 研究区域降水的变化及其规律, 不仅能促进对气候变化与人类活动下区域水循环改变机理的认识, 而且对区域水资源保护、生态建设以及经济绿色可持续发展有着重要的意义。但气候变化下水文循环的研究需要超长系列的降水资料, 现有观测数据往往只有几十年, 系列长度不足是气候变化相关研究的主要障碍之一。

对于区域降水变化规律的研究, 遥感降水产品

是实测资料的有益补充与替代^[3]。CRU (climate research unit) 数据是英国东英吉利大学气候研究中心产出的降雨资料, 以全球气象站点观测数据为基础进行构建, 具有时间序列长 (1901—2017 年), 空间分辨率较高 ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) 等特点。自 CRU 数据集被开发出以来, 已有诸多学者将其广泛应用于检测全球气候系统变化, 开发与分析仪器观测数据, 了解大气、海洋与冰层之间的相互作用以及量化和减少模拟气候变化过程中的不确定性。如: 王敏等^[4]利用 CRU 数据对天津市降水空间分布进行了描述; 张蓓等^[5]利用 CRU 与 CMIP5 数据分析多模式集合平均降水的偏差特征, 并对其进行系统的分析与修正; 黄浠等^[6]验证了 CRU、GLDAS (global

收稿日期: 2020-11-15 修回日期: 2021-07-12 网络出版时间: 2021-07-19

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210716.1712.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1508104); 国家自然科学基金项目 (51679145; 91747103; 51779146), 山东省重点研发计划项目 (2019GSF11104S)

作者简介: 陈鑫 (1994—), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事变化环境下水文模拟研究。E-mail: qwas1477@163.com

通信作者: 刘艳丽 (1981—), 女, 河南泌阳人, 博士, 正高级工程师, 主要从事气候变化对水文水资源的影响研究。E-mail: ylliu@nhri.cn

land data assimilation system)以及中国地面降水网格数据在雅鲁藏布江流域的适用性,并从不同的时间尺度分析了每种降水产品的特点。但由于其采用的数据站点的数量与质量不同,因此在不同区域,CRU 数据的表现效果也并不相同。大量的研究^[7-14]已经表明,利用遥感降水产品数据研究区域降水变化之前应首先评价其在该地区的适用性。

海河流域作为我国东部重要的经济、政治以及文化中心之一,水系众多,河网密布,具有重要的战略意义与研究价值,自 21 世纪以来,已有诸多学者对降水产品在该流域的适用性展开研究,并取得了较多的研究成果:魏志明等^[15]对 TRMM(tropical rainfall measuring mission)与 GPM(global precipitation measurement mission)降水数据在海河流域的精度进行对比研究,并认为 GPM 在海河流域月尺度的高空间分辨率水文分析有良好的前景;徐姝等^[16]分析了 2012—2015 年 ECMWF(European centre for medium weather forecasts)数据在海河流域的适用性,并针对海河流域的气象特点对其进行了改进;杨鹏等^[17]基于 ADAS-WRF(ARPS data analysis system-weather research and forecast)中尺度数值预报模式较好地模拟出海河流域降水的分布以及量级。从以上学者的研究结论来看,尽管海河流域的资料已经较为丰富,但大部分学者研究的时间范围多在 1960 年以后,这主要是我国覆盖的气象站点起始时间较晚的原因。因此,研究更长时间尺度的气象数据在海河流域的适用性,不仅可以解决资料不足的问题,还可以对海河流域百年气候变化进行研究。

利用实测站点资料,从不同角度评估 CRU 数据在海河流域及其子流域漳河流域的适用性,并利用 CRU 数据对两流域的降雨序列变化特点进行评估,以期为以后两流域气候变化研究中降水资料的选取提供相应的科学依据。

1 研究区概况

为研究 CRU 资料在不同尺度研究区域的适用性,分别选择海河流域以及其子流域漳河上游流域作为研究对象,研究范围见图 1。海河流域位于 112°E~120°E,35°N~43°N,面积约 31.82 万 km²,地势西北高东南低。海河流域属于温带东亚季风气候区,流域年平均相对湿度为 50%~70%,年平均降水量为 539 mm,年平均路面蒸发量为 470 mm。海河流域降水受到地形气候等因素的影响,在时间和空间上均呈现出显著的特征:从年际变化来看,20

世纪 60 年代至 20 世纪末,海河流域降水持续下降,到 21 世纪初略微呈现出上升趋势;从空间分布来看,总体趋势为由太行山、燕山山前迎风区,分别向西北和东南侧减少。由于流域所在位置覆盖京津冀地区,人口密集,大中型城市众多,因此其具有较高的政治与经济地位。同时在全国各大流域中,海河流域的人均以及亩均水资源量最低^[18]。漳河上游流域位于海河流域西南部分,属于海河流域的南部水系,约占海河流域面积的 6%。流域年平均降水量为 568.6 mm,其中汛期降水量较多,约占全年的 75%,6—9 月降水以暴雨居多,但持续时间较短。降水年际变化较大,最大年份为 1963 年,最小年份为 1957 年。受气候变化影响,漳河流域年降水量呈减少趋势,年平均递减率为 1.67 mm。流域内以山区地貌为主,地形落差高达 2 000 m 以上^[19],水系分为东西两大支流,分别为清漳河与浊漳河。由于漳河上游自 20 世纪 60 年代以来开展了以“引漳入林”为代表的大范围引水工程的修建,受人类影响的特点显著,其径流相对于天然径流也发生了变化^[20]。

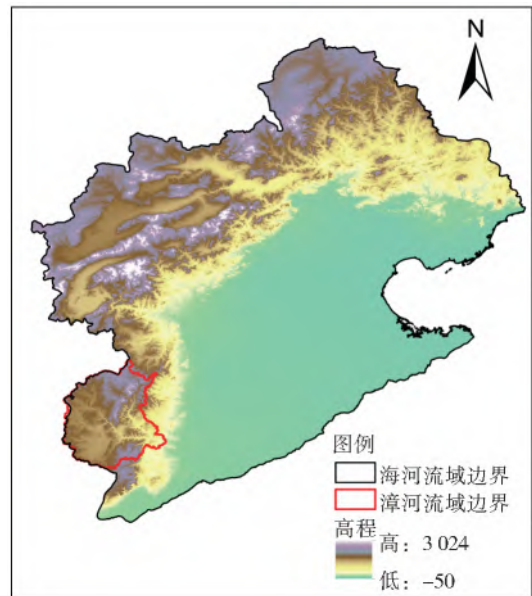


图 1 海河流域及漳河流域地理位置分布
Fig. 1 Geographical distribution map of Haihe River basin and Zhanghe River basin

2 资料与方法

2.1 资料分析

CRU TS4.02 版本由东英吉利大学气候研究室提供,其时间跨度为 1901—2017 年,时间尺度为月,空间尺度为 0.5°。该产品涵盖 1901—2017 年云层覆盖百分比、最高/最低气温、潜在蒸发蒸腾、降水量、昼夜温度范围、平均温度、降雨天数以及蒸汽压。

本文选择其中的降水序列作为主要研究对象。

为对 CRU 数据进行系统的分析,选择海河流域以及漳河流域的相关站点降水数据进行研究。其中,海河流域降水数据来源于中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn/>),漳河上游流域站点数据来源于地面气象站点资料。为方便进行统一对比分析,所有数据的时间范围为 1963—2005 年。

2.2 研究方法

对于降水产品的评估一般采用定量参数评估的方法,其评估依据为我国气象卫星定量产品质量评价指标^[21]。为对其系统评价,本文选择的评价指标为皮尔逊相关系数(R)、均方根误差(E_{RMS})、平均绝对误差(E_{MA})、相对偏差(E_{BIAS})。其中:相关系数 R 用来评价两种数据之间的线性吻合程度, R 值越大,两者的线性拟合程度越高; E_{BIAS} 用来表示降水数据产品与实测数据的偏离程度; E_{RMS} 用来评估降水产品误差的整体水平^[22]; E_{MA} 是所有单个观测值与算术平均值的偏差的绝对值的平均,可以避免误差相互抵消的问题,准确反映产品精度^[23]。各个评价指标的公式为

$$R = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

$$E_{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)}{\sum_{i=1}^n X_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (3)$$

$$E_{MA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - Y_i| \quad (4)$$

式中: X_i 为站点观测降水值; Y_i 为降水产品的估计值; i 为月份; \bar{X} 与 \bar{Y} 分别表示降水产品与站点观测降水的均值; n 为评估的总月份。

3 结果与分析

3.1 海河流域整体精度评价

3.1.1 降水的年内分配

对 CRU 数据计算得到的面雨量与海河流域站点实测计算得到的面雨量进行多年平均降水年内分布对比分析,其结果显示两组数据在年内分配的表现存在一定的差异。从月均降水量来说:1—7 月 CRU 数据总体高于站点数据;8—12 月 CRU 降水数据低于站点数据。从各个月份的绝对降雨误差来看:平均误差为 20.89 mm,最大误差为 62.39 mm,

出现在 9 月;最小误差为 0.28 mm,出现在 1 月。从相对误差的角度来看:最大为 73%,出现在 4 月;最小为 8%,出现在 1 月。因此,从年内降水分配的角度来看,CRU 数据在海河流域的表现并不理想,部分月份存在较大的误差。

3.1.2 流域面雨量精度评价

对比分析海河流域 CRU 数据与实测站点计算的面雨量,并计算其相应的评价指标,其中站点选取海河流域内的 42 个长系列站点,最终评价结果见表 1。其结果显示 CRU 数据与实测站点数据表现为强相关($0.6 \leq R \leq 0.8$),均方根误差为 55%,平均绝对误差为 39.46 mm,相对偏差为 24.67 mm。同时对两组数据每 10 年进行 1 次分割,并分别计算其相应的评价指标,其结果显示,CRU 数据的表现呈现出逐渐下降的趋势,并在 1992 年后出现了较为明显的变化,说明 CRU 数据在 1992 年后的数据质量出现了较为明显的下降。从评价指标来看,CRU 数据在海河流域的整体表现一般,虽然两序列在数值分析角度上存在一定的一致性,但后续用于水文计算与序列分析时则需充分考虑其不确定性。

表 1 CRU 数据与实测站点计算面雨量的精度比较

Tab. 1 Comparison of the accuracy of the calculated area rainfall between the CRU data and the measured site

时间	R	$E_{BIAS}/\%$	$E_{RMS}/(\text{mm} \cdot \text{月}^{-1})$	$E_{MA}/(\text{mm} \cdot \text{月}^{-1})$
全系列(1963—2005 年)	0.71	55.01	39.46	24.67
1963—1972 年	0.92	29.29	23.06	13.71
1973—1982 年	0.79	47.63	35.82	22.14
1983—1992 年	0.61	49.69	41.87	27.62
1993—2005 年	0.49	77.46	49.03	32.78

3.1.3 流域站点精度评价

为评价 CRU 数据在海河流域气象站点的表现情况,选择海河流域 6 个站点,站点数据为月尺度数据,时间范围为 1963—2005 年,利用反距离插值法(inverse distance weighted)对 CRU 数据进行插值,生成指定坐标点的数据,并与实测站点进行对比分析,其结果见表 2,同时对各站的年内降水进行对比分析。从各个站点的相关系数来看,CRU 数据在安阳站与天津站表现为中等相关($0.4 \leq R \leq 0.6$),在其余 4 个站点表现出强相关($0.6 \leq R \leq 0.8$),从其余各项指标来说,CRU 数据在大同站与多伦站的表现较好,各个偏差系数均与其他四站有着明显的差别。从多年平均降水误差的角度来看:最大误差值出现在北京站,为 81.26 mm;最小误差值出现在安阳站,为 13.54 mm;6 个站点的平均误差

为 33.76 mm。从各站点的结果来看,CRU 数据误差整体呈现出自北向南,自东向西逐渐减小的趋势。从年内降水分配的角度来看,6 个站点的 9 月份均存在较大误差,其中北京站误差最大,为 96.13 mm。

表 2 海河流域站点评价指标结果

Tab. 2 Evaluation index results of stations in the Haihe River basin

站点名称	R	$E_{BIAS}/\%$	$E_{RMS}/(mm \cdot 月^{-1})$	$E_{MA}/(mm \cdot 月^{-1})$
河南安阳	0.53	76.14	62.204	36.147
河北保定	0.66	72.48	54.264	30.662
北京	0.64	76.96	57.041	31.964
山西大同	0.67	59.68	31.661	20.061
内蒙古多伦县	0.62	67.06	34.537	20.857
天津	0.57	75.67	59.806	33.279

3.2 漳河观台以上流域精度评价

3.2.1 降水的年内分配

对两组数据计算的面雨量所得到的漳河流域多年平均降水年内分布进行对比,结果见图 2。可以看到,两组数据计算的结果并无太大的差异,各月份计算的累计降水量均较为接近。从 CRU 与实测站点的相对误差角度进行分析:各月份中相对误差最大为 21%,发生在 12 月;最小为 0.2%,发生在 9 月;平均误差为 8.7%。从各月份的绝对降雨量插值来讲:最大差值发生在 7 月,为 4.26 mm;最小差值发生在 1 月,为 0.61 mm。总体来看,CRU 数据降水年内分布与实测站点降水年内分布差别不大。

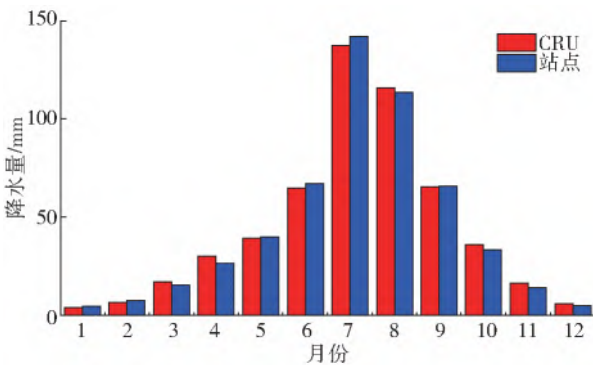


图 2 漳河流域年内降水分布对比^[1]

Fig. 2 Comparison of annual precipitation distribution in the Zhanghe River basin

3.2.2 流域面雨量精度评价指标

对比分析漳河流域 CRU 数据与实测站点计算的面雨量,并计算其相应的评价指标,其结果显示 CRU 降水数据与实测站点数据表现出强相关,其中相关系数 R 为 0.96,相对偏差 E_{BIAS} 为 14.93%,均方根误差 E_{RMS} 为 14.92 mm,平均绝对误差 E_{MA} 为 7.94%。从各项评价指标的结果来看,CRU 数据在漳

河流域的表现较好。从年降水总量的角度来说,CRU 数据计算的漳河流域多年平均降水为 539.02 mm,地面站点计算的多年平均降水为 534.46 mm,两者仅相差 4.56 mm,比率为 0.85%,且对比其他学者^[24-25]在漳河流域的研究结论,CRU 数据得到的结果是具有较高的可信度的。

3.2.3 流域站点精度评价

为从不同角度反应 CRU 数据在漳河流域的适用性,以漳河流域内 4 个雨量站作为研究对象,利用反距离插值将 CRU 数据插值到相应站点位置,并对其精度评价,结果见表 3。综合 4 种评价指标的结果来看,石栈道站拥有最高的相关系数,最小的相对偏差,最小的均方根误差以及最小的平均绝对误差,表现最好,而天桥段站表现最差。从整体来看,4 个站点的相关系数均大于 0.8,为强相关,其余各个误差系数均在可接受范围内^[26-29]。

表 3 漳河流域站点月尺度评价指标结果

Tab. 3 Evaluation index results of stations in the Haihe River basin

站点名称	R	$E_{BIAS}/\%$	$E_{RMS}/(mm \cdot 月^{-1})$	$E_{MA}/(mm \cdot 月^{-1})$
漳泽水库	0.91	27.06	22.24	12.09
石栈道	0.93	24.46	20.35	11.08
天桥断	0.88	31.59	32.17	15.04
刘家庄	0.90	32.39	30.15	15.38

对站点的降水年内分配进行分析,结果见图 3,可以看出,CRU 数据在各个站点的降雨年内分配均表现良好,基本趋势与实测站点保持一致。从 CRU 数据与实测站点的相对误差角度进行分析:刘家庄站最大误差值出现在 8 月,为 20.51 mm,最小误差值出现在 1 月,为 1.08 mm,多年平均降水误差为 28.34 mm,误差率为 4.9%;石栈道站最大误差值出现在 7 月,为 9.11 mm,最小误差值出现在 1 月,为 0.30 mm,多年平均降水误差为 22.31 mm,误差率为 4.1%;天桥断站最大误差值出现在 7 月,为 19.31 mm,最小误差值出现在 1 月,为 0.23 mm,多年平均降水误差为 14.32 mm,误差率为 2.5%;漳泽水库站最大误差值出现在 8 月,为 4.05 mm,最小误差值出现在 2 月,为 0.14 mm,多年平均降水误差为 9.20 mm,误差率为 1.7%。从降水年内分布的角度来讲,CRU 数据在漳泽水库站效果最好,其余 3 站也相对较好。

考虑到 CRU 数据仅有 7 个格点在漳河流域范围内,若数据格点密度更高,则各个站点的误差将会进一步缩小。从流域面雨量,降水年内分布以及站点数据的角度进行分析,CRU 数据在漳河流域的适用性较好,可作为该流域的数据研究基础。

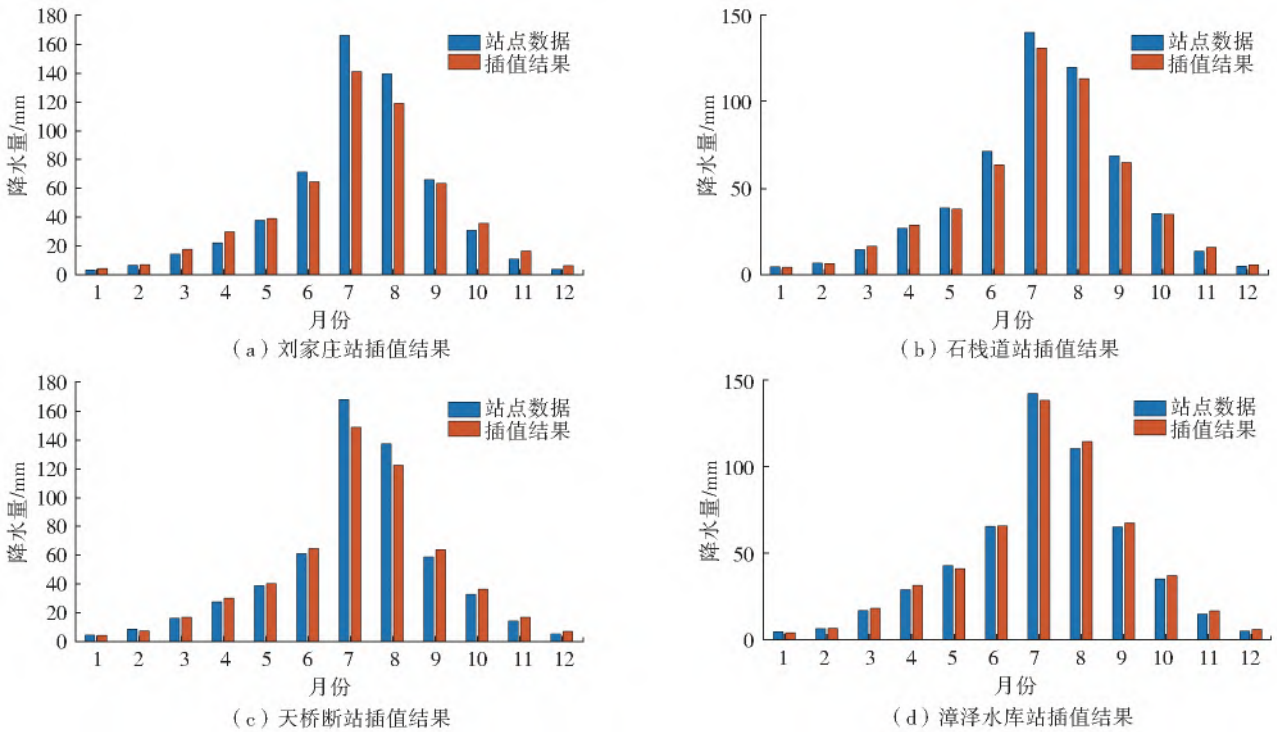


图 3 漳河流域站点插值对比

Fig. 3 Comparison of annual station precipitation distribution in the Haihe River basin

3.3 基于 CRU 数据集的流域降水突变点及周期分析

利用 CRU 数据对两流域 1901—2017 全年降水突变点分别进行 M-K 突变分析与 Pettitt 突变分析,其结果见图 4、5。综合两种突变检验分析结果可知,海河流域降水时间序列变异点分别为 1979 和

1996 年,漳河流域降水时间序列变异点在 1977 年。对两流域 CRU 降水序列的 M-K 检验结果进行分析可知,两流域百年降水序列均呈现出先上升后下降的趋势,但变化并不明显,趋势与突变检验结果与其他学者^[30-31]的结论基本相符。

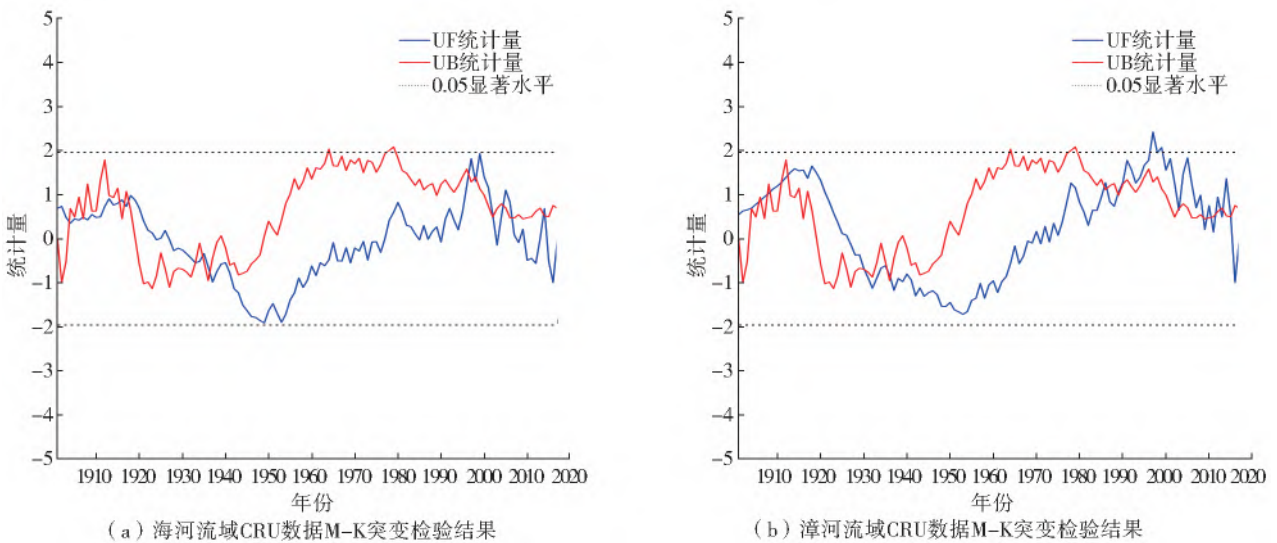


图 4 2 个流域 M-K 突变检验结果

Fig. 4 Test results of M-K mutation in two basins

为分析 2 个流域年际降水序列的周期性变化,对 2 个流域 CRU 数据 1901—2017 年降水序列标准化处理后进行小波分析,结果见图 6。海河流域的降水序列存在 2 个主周期,分别为 15 a、

40 a;漳河流域降水序列存在 3 个主周期,分别为 10 a、40 a 和 50 a。2 个流域降水序列的周期性具有一定的相似性,但漳河流域的周期变化更为频繁。

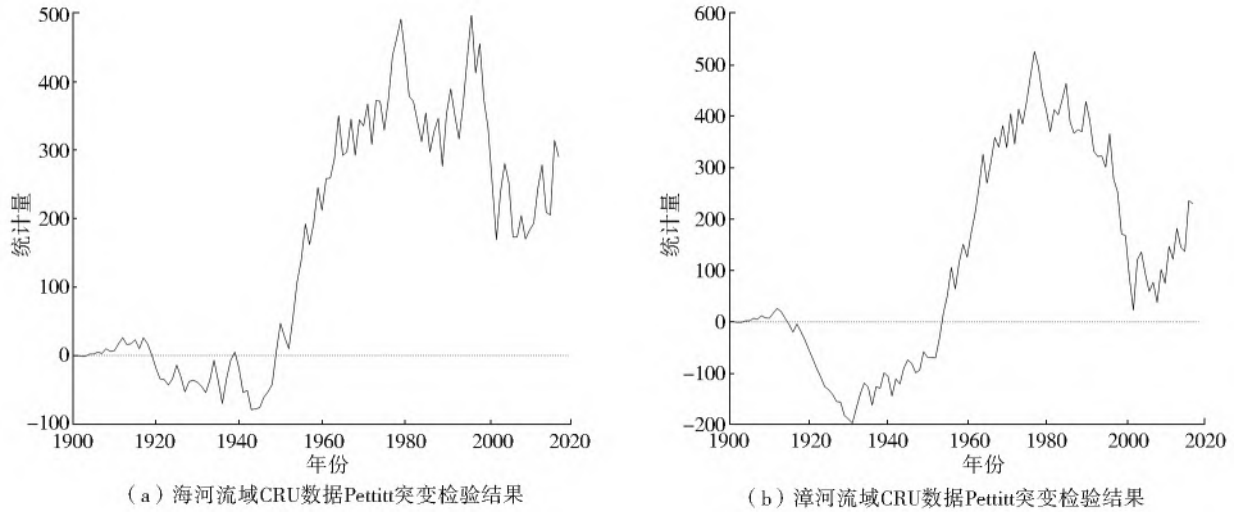


图 5 2 个流域 Pettitt 突变检验结果

Fig. 5 Test results of Pettitt mutation in two basins

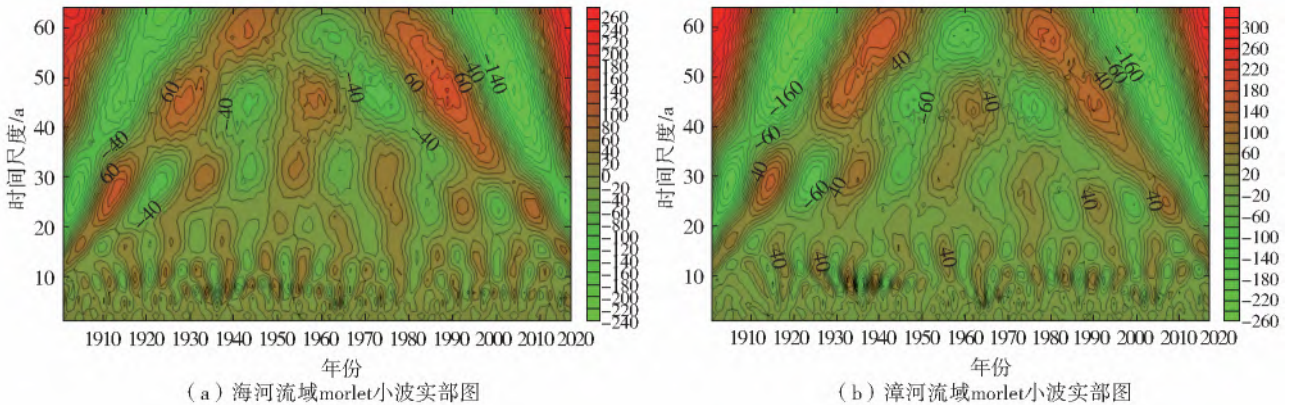


图 6 2 个流域小波变换实部图

Fig. 6 Morlet wavelet transform image of two basins

4 讨论

为系统研究 CRU 数据在海河流域产生的差异,利用克里金插值方法对两组数据进行计算,分别得到其多年平均面雨量分布,结果见图 7。可以看出,两者的降水变化趋势大体相同,自东南向西北递减。但对于海河流域的不同区域,CRU 数据的表现呈现出不同的特点:CRU 数据在海河流域西部表现较好,多年平均面雨量分布与实际情况较为接近,但在东部,尤其是东北部,两者的面雨量分布存在明显的差异。这可能与选择的实测站点分布不均有关。在漳河流域,文中使用的实测站点数目较多,流域站点密度远大于海河流域的站点密度,而 CRU 数据是采用有限的地面站点生成 0.5° 网格数据,存在 CRU 数据使用的站点与本文使用站点相同的可能性,使得漳河流域的评价效果较好。因此,从站点密度与 CRU 格点密度的角度来讲,海河流域的 CRU 格点密度与漳河流域接近,但 2 个流域的站点密度相差过大,站点密度的差距可能是影响 2 个流域评

价结果的因素之一。同时通过观察 CRU 数据与实测站点数据的面雨量分布可以看出,CRU 数据没有体现出太行山脉对暖湿气流的阻挡作用,其降水变化并没有较好地体现出地形对于气候的影响,更多是体现出海河流域降水自东南向西北递减的总体特征,这可能与其数据制作时的站点与数据集的选择有关。

为分析 CRU 数据在不同时间段的表现效果,将 CRU 数据以 10 年作为一个间隔进行逐段分析,发现 1990 年后 CRU 数据与实测站点结果的绝对误差最为显著。将 CRU 数据以 1990 年作为时间间隔,对其进行分割处理,并分别计算 2 个流域 CRU 数据结果其与实测数据的相关系数后发现:对于海河流域的站点面雨量与 CRU 数据计算得到的面雨量,两者的相关性从强相关变化至中等相关,在部分测站的插值结果中亦出现此现象;而漳河流域在分割点前后均表现出强相关。通过其他学者^[32-34]的研究可知,CRU 在全球的观测站点总数从 1901—1980 年是逐年增加的,但之后站点数量便开

始减少,这可能是该数据 1990 年以后在海河流域表现较差的原因。且通过 2 组数据的空间分布可以发现:漳河流域的平均降雨量在 2 组数据下的误差较

小,整体表现良好;海河流域在 1990 年之前的数据表现良好,结合实测站点资料可用来研究近百年来气候变化对海河流域的影响。

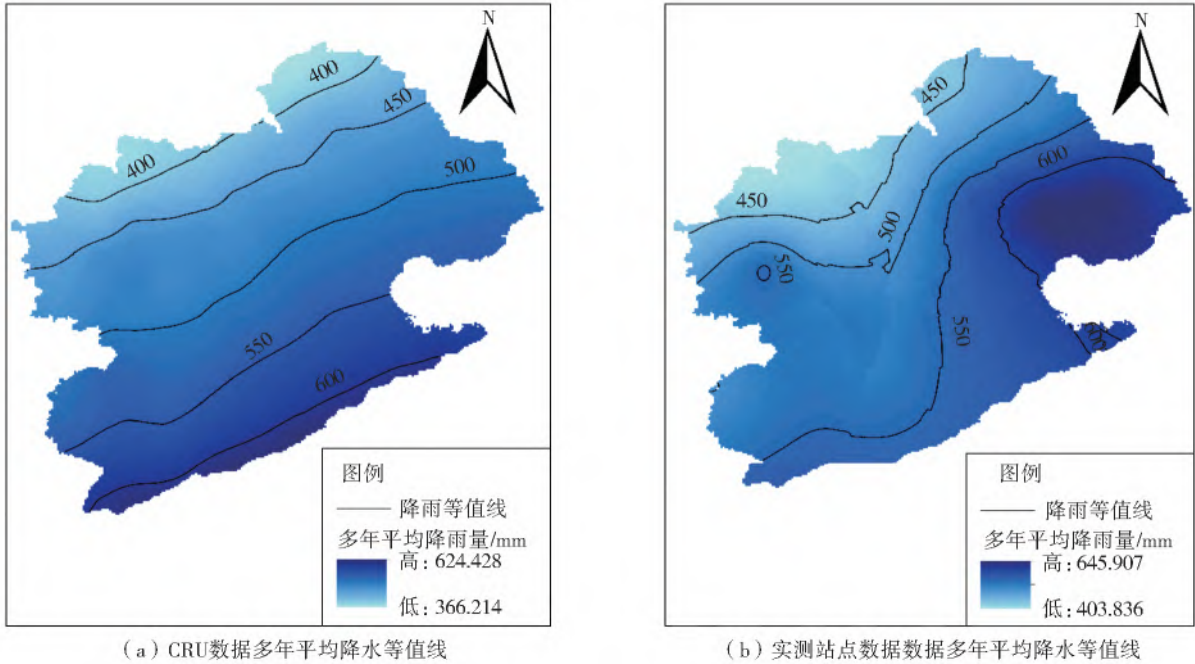


图 7 CRU 数据与实测站点数据多年平均降水等值线对比

Fig. 7 Comparison of multi-year average precipitation contours between CRU data and measured site data

为对比 CRU 格点数据与目前其他相同分辨率的格点数据,同时避免气候态导致的结果偏差,以达到彻底的对比分析目的,选择了中国气象数据网发布的中国地面降水月值 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据集,该数据集采用中国 2 000 多个实测站点制作而成,有着与 CRU 数据相同的空间分辨率,但其覆盖时间为 1961 年之后,且只包含中国区域的降水数据。将两组数据采用与第 3.1.2 节中同样的指标进行分析,结果见表 4。可以看出,两者在海河流域的降水数据有较高的相关性,且各项误差指标均比实测站点的表现好。

表 4 CRU 数据与气象数据网面雨量的精度比较

Tab. 4 Accuracy comparison of surface rainfall between CRU data and China surface precipitation grid data set

时间	R	$E_{BIAS}/\%$	$E_{RMS}/$ ($\text{mm} \cdot \text{月}^{-1}$)	$E_{MA}/$ ($\text{mm} \cdot \text{月}^{-1}$)
全系列(1963—2005 年)	0.99	0.07	10.15	3.26
1963—1972 年	0.98	0.07	6.37	3.57
1973—1982 年	0.99	0.07	4.70	3.31
1983—1992 年	0.99	0.07	5.95	3.34
1993—2005 年	0.99	0.08	7.01	2.79

对比两流域 CRU 站点插值结果可以发现:CRU 数据在海河流域站点的表现相对较差,而在漳河流域站点的表现较好,其原因除站点密度的差异外,由于漳河流域的覆盖面积远小于海河流域覆盖

面积,因此流域内的降水变化与差异较小,CRU 的格点能够较好地反映流域的降雨状态;而海河流域由于覆盖面积大,且 CRU 数据选择的站点数目有限,同时在站点的插值结果上会存在一定的误差,因此对于海河流域选择的站点,其评价指标结果较漳河流域要低。

结合讨论部分的结果可以看出,CRU 数据在海河流域及其子流域的总体表现是比较好的,但由于本文选择的 2 个流域的站点密度差异,数据处理方法以及数据本身存在的误差,2 个流域面雨量的评价结果有一定的差异。同时由于数据为 0.5° 的网格数据,因此在海河流域受到本身数据制作时站点数量的限制以及网格覆盖面积等因素的影响,对于还原站点实测数据有一定的局限性。尤其在 1990 年后,其还原的站点数据质量会存在一定的误差,在今后使用时应注意考量。

综上,站点密度差异、地面站点选择、网格覆盖面积以及地面站点的插值方法可能是导致两流域表现存在差异的主要原因。

5 结 论

以 1963—2005 年海河流域与漳河流域雨量站点数据作为评判依据,从 2 个流域整体以及站点的角度从季节、年内以及年际的角度分析了 CRU 数

据在海河流域的适用性,其结果:

(1)海河流域作为我国东部重要的经济、政治以及文化中心之一,水系众多,河网密布,具有重要的战略意义与研究价值,其子流域漳河流域在降水的周期性与突变型上与海河流域有着较高的相似性,但部分特征仍存在着一定的差异。研究验证了 CRU 数据在两流域的适用性,评价了 CRU 数据在面雨量与站点上的表现,并分析了 CRU 数据在两流域上的表现差异,为之后研究新中国成立前两流域的降水变化提供相应的理论支撑。

(2)CRU 数据在描述海河与漳河流域的面雨量时均表现良好,但在插值至流域站点时,漳河流域的效果相对较好,这与数据网格的覆盖面积、站点的选择以及插值的方法均有一定的关系。从年内、年际以及站点的角度来看,CRU 数据对漳河流域降水序列的描述更为准确。

(3)CRU 数据在与实测站点计算的面雨量进行比较时,其在 1990 年后对海河流域的描述产生了明显的变化,面雨量相关系数由 0.81 下降至 0.51,但漳河流域变化并不显著。但在与已发布的 0.5° 网格降雨数据集比较时此现象消失,且在漳河流域此变化并不显著。结合其他学者研究可以判定,CRU 数据在漳河流域的整体表现较好,但在海河流域由于受到本身数据制作时站点数量的限制以及网格覆盖面积等因素的影响,对于还原站点实测数据有着一定的局限性。尤其在 1990 年后,其还原的数据质量出现一定程度的下降。

(4)通过对 CRU 数据进行突变性以及周期性的检验可以发现,海河流域降水序列的突变点分别在 1979 年和 1996 年,漳河流域降水序列的突变点在 1977 年,与其他学者研究结论相近,说明 CRU 数据可以较为准确地反应 2 个流域降水序列变化的特点。

(5)CRU 数据在 1990 年之前与地面雨量站保持较高的相关性,这将有效地延长 1960 年观测站点以前的数据系列长度至 1901 年,使得资料系列有百年尺度以上,这对于气候变化相关研究具有重要意义。

综上,CRU 数据能够较好地反应海河流域及其子流域的降雨变化特征,且相较于海河流域,CRU 数据在其子流域漳河流域的表现更为可靠。但由于 CRU 数据的全球观测站点变化,在利用其研究以及还原站点实测数据时,尤其是 1990 年后的气象数据时应充分考虑还原的方法以及数据本身的不确定性。

参考文献(References):

- [1] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004. (RUI X F. Principles of hydrology [M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))
- [2] TRENBERTH K E, DAI A G, VAN D S G, et al. Global warming and changes in drought[J]. Nature Climate Change, 2014, 4: 17-22. DOI: 10. 1038/nclimate2067.
- [3] 刘洁, 夏军, 邹磊, 等. 多卫星遥感降水数据在塔里木河流域的适用性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 1-8. (LIU J, XIA J, ZOU L, et al. Applicability analysis of multi-satellite remote sensing precipitation data in Tarim River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 1-8. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0117.
- [4] 王敏, 任建玲, 易笑园, 等. 1901—2016 年天津地区降水的多尺度特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 154-159. (WANG M, REN J L, YI X Y, et al. Characteristics of multiple scales of precipitation from 1901 to 2016 in the region of Tianjin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 154-159. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2020. 05. 022.
- [5] 张蓓, 戴新刚, 杨阳. 21 世纪前期中国降水预估及其订正[J]. 大气科学, 2019, 43(6): 1385-1398. (ZHANG B, DAI X G, YANG Y. Projection of China precipitation and its bias correction for the early 21st century[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(6): 1385-1398. (in Chinese)) DOI: 10. 3878/j. issn. 1006-9895. 1902. 18221.
- [6] 黄滢, 王中根, 桑燕芳, 等. 雅鲁藏布江流域不同源降水数据质量对比研究[J]. 地理科学进展, 2016, 35(3): 339-348. (HUANG X, WANG Z G, SANG Y F, et al. Precision of data in three precipitation datasets of the Yarlung Zangbo River basin[J]. Progress in Geography, 2016, 35(3): 339-348. (in Chinese)) DOI: 10. 18306/dlkxjz. 2016. 03. 008.
- [7] 吴倩鑫, 马思煜, 张智华, 等. 五种降水产品在疏勒河上游山区和中下游月尺度降水的适用性对比研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 470-482. (WU Q X, MA S Y, ZHANG Z H, et al. Evaluation on the performance of five precipitation datasets of monthly precipitation in the upper reaches, middle and lower reaches of Shule River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(2): 470-482. (in Chinese)) DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2019. 0022.
- [8] 郝振纯, 童凯, 张磊磊, 等. TRMM 降水资料在青藏高

- 原的适用性分析[J]. 水文, 2011, 31(5): 1-23. (HAO Z C, TONG K, ZHANG L L, et al. Applicability analysis of TRMM precipitation estimates in Tibetan Plateau [J]. Hydrology, 2011, 31(5): 1-23. (in Chinese)). DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2011.05.004.
- [9] 王玉丹, 陈浩, 刘璨然, 等. ITPCAS 和 CMORPH 两种遥感降水产品在陕西地区的适用性[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 579-588. (WANG Y D, CHEN H, LIU C R, et al. Applicability of ITPCAS and CMORPH precipitation datasets over Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 579-588. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2018.03.10.
- [10] WANG L, CHEN R, SONG Y Y, et al. Precipitation-altitude relationships on different timescales and at different precipitation magnitudes in the Qilian Mountains[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 134(3/4): 875-884. DOI: 10.1007/s00704-017-2316-1.
- [11] WANG G F, ZHANG P Y, LIANG L W, et al. Evaluation of precipitation from CMORPH, GPCP-2, TRMM 3B43, GPCC, and ITPCAS with ground-based measurements in the Qinling-Daba Mountains, China [J]. PLoS ONE, 2017, 12(10): e0185147. DOI: 10.1371/journal.pone.0185147.
- [12] 程志刚, 王俊锋, 宾昕, 等. TRMM 3B42 降水产品在秦巴山区的适用性研究[J]. 水文, 2019, 39(6): 46-51. (CHENG Z G, WANG J F, BIN X, et al. Applicability of TRMM 3B42 precipitation product in Qin-Ba Mountainous area[J]. Hydrology, 2019, 39(6): 46-51. (in Chinese)) DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20180283.
- [13] TAN M, LSANTO H. Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia [J]. Atmospheric Research, 2018, 202 (APR.): 63-76. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.11.006.
- [14] MAGGIONI V, MASSARI C. On the performance of satellite precipitation products in riverine flood modeling: A review[J]. Journal of Hydrology, 2018, 558: 214-224. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.039
- [15] 魏志明, 岳官印, 李家, 等. GPM 与 TRMM 降水数据在海河流域的精度对比研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 171-176. (WEI Z M, YUE G Y, LI J, et al. Comparison study on accuracies of precipitation data using GPM and TRMM product in Haihe River basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 171-176. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.026.
- [16] 徐姝, 熊明明, 王颖, 等. 改进的 ECMWF 集合预报融合产品在海河流域的检验与分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(4): 41-46. (XU Z, XIONG M M, WANG Y, et al. Verification and analysis of improved ECMWF ensemble forecast fusing product in Haihe River basin[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2018, 41(4): 41-46. (in Chinese)) DOI: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2018.04.006.
- [17] 杨鹏, 周波, 马金一. ADAS-WRF 中尺度数值降水预报在海河流域洪水预报中的应用及分析[J]. 海河水利, 2013(3): 33-37. (YANG P, ZHOU B, MA J Y. Application and analysis of ADAS-WRF mesoscale numerical precipitation forecast in Haihe River basin flood Forecasting[J]. Haihe Water Resources, 2013(3): 33-37. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2013.03.013.
- [18] 贺瑞敏, 张建云, 鲍振鑫, 等. 海河流域河川径流对气候变化的响应机理[J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 1-9. (HE R M, ZHANG J Y, BAO Z X, et al. Response of runoff to climate change in the Haihe River basin[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(1): 1-9. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.01.001.
- [19] 武海霞, 李清雪, 孙玉壮, 等. 子流域划分在时间尺度上对年径流、泥沙及营养物的影响: 以漳河上游流域为例[J]. 中国农村水利水电, 2017(12): 131-135, 144. (WU H X, LI Q X, SUN Y Z, et al. The effect of sub-watershed partitioning on flow, sediment and nutrient predictions at the time scale: A case study in the Zhanghe Upstream[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(12): 131-135, 144 (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2017.12.026.
- [20] 陈鑫, 刘艳丽, 刁艳芳, 等. 基于 SWAT 模型对气候变化与人类活动影响下径流变化的量化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 9-18. (CHEN X, LIU Y L, DIAO Y F, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff in Haihe River basin with SWAT model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 9-18. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0079.
- [21] 师春香, 刘瑞霞, 张艳, 等. 气象卫星定量产品质量评价指标和评估报告要求[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 2-3. (SHI C X, LIU R X, ZHANG Y, et al. Quality evaluation index and report requirements of

- meteorological satellite quantitative products [M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 2011; 2-3. (in Chinese)
- [22] MOU T, AB I, ZHENG D, et al. Evaluation of six high-resolution satellite and ground-based precipitation products over Malaysia[J]. Remote Sensing, 2015, 7(2): 1504-1528. DOI: 10. 3390/rs70201504.
- [23] 贾俊平, 何晓群, 金勇. 统计学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2009. (JIA J P, HE X Q, JIN Y. Statistics [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2009. (in Chinese))
- [24] 王金凤, 武桃丽. 漳河上游径流变化特征及其归因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(10): 165-171. (WANG J F, WU T L. Analysis on runoff variation characteristics and its attribution in the upper reaches of Zhanghe River basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(10): 165-171. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2019. 303
- [25] 高玉芳, 吴雨晴, 彭涛, 等. 基于不同降水产品的 WRF-Hydro 模式径流模拟: 以漳河流域为例[J]. 热带气象学报, 2020, 36(3): 299-306. (GAO Y F, WU Y Q, PENG T, et al. Application of WRF-Hydro for runoff simulation based on different rainfall products: Taking Zhanghe River basin as an example[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2020, 36(3): 299-306. (in Chinese)) DOI: 10. 16032/j. issn. 1004-4965. 2020. 028.
- [26] 沈艳, 潘畅, 宇婧婧, 等. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估[J]. 大气科学学报, 2013, 36(1): 37-46. (SHEN Y, PAN Y, YU J J, et al. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2013, 36(1): 37-46. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-7097. 2013. 01. 005.
- [27] 宇婧婧, 沈艳, 潘畅, 等. 中国区域逐日融合降水数据集与国际降水产品的对比评估[J]. 气象学报, 2015, 73(2): 394-410. (YU J J, SHEN Y, PAN Y, et al. Comparative assessment between the daily merged precipitation dataset over China and the world's popular counterparts[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(2): 394-410. (in Chinese)) DOI: 10. 11676/qxxb2015. 033.
- [28] 郝春洋, 贾仰文, 龚家国, 等. 海河流域近 50 年气候变化特征及规律分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(1): 39-43, 51. (HAO C P, JIA Y W, GONG J G, et al. Analysis on characteristics and rules of climate change of Haihe River basin in recent 50 years[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010, 8(1): 39-43, 51. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-3031. 2010. 01. 007.
- [29] 王永财, 孙艳玲, 张静, 等. 近 51 年海河流域气候变化特征分析[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2014, 34(4): 58-63. (WANG Y C, SUN Y L, ZHANG J, et al. Climate change characteristics of Haihe River Basin in recent 51 years[J]. Journal of Tianjin Normal University(Natural Science Edition), 2014, 34(4): 58-63. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-1114. 2014. 04. 014.
- [30] 万思成, 张建云, 王国庆, 等. 漳河上游径流变化特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 7-11, 18. (WAN S C, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. Characteristics of runoff variation in upper Zhanghe River watershed[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(6): 7-11, 18. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2015. 06. 02.
- [31] 鲍振鑫, 张建云, 王国庆, 等. 不同水文序列突变检测方法在漳河观台站径流分析中的对比研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(5): 47-52. (BAO Z X, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. Comparison of the breakpoint of hydrological series detected by multiple methodologies at the Guantai hydrologic station in the Zhang River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(5): 47-52. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2020. 05. 010.
- [32] 王丹, 王爱慧. 1901—2013 年 GPCC 和 CRU 降水资料在中国大陆的适用性评估[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(4): 446-462. (WANG D, WANG A H. Applicability assessment of GPCC and CRU precipitation products in China during 1901 to 2013[J]. Climatic and Environmental Research, 2017, 22(4): 446-462. (in Chinese)) DOI: 10. 3878/j. issn. 1006-9585. 2016. 16122.
- [33] NEW M, HULME M, JONES P. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part ii: Development of 1901-1996 monthly grids of terrestrial surface Climate[J]. Journal of Climate, 2000, 12(13): 829-856. DOI: 10. 1175/1520-0442(1999)0122. 0. CO.
- [34] 张东, 宋献方, 张应华, 等. 基于 CRU 格点数据集的近百年渭河流域降水变化[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(2): 142-148. (ZHANG D, SONG X F, ZHANG Y H, et al. Variation characteristics of precipita-

tion over Weihe River basin based on CRU Grid Dataset during last 100 years[J]. Journal of Arid Land Resources

and Environment, 2018, 32(2): 142-148. (in Chinese)
DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2018. 061.

Applicability of CRU high-resolution grid precipitation data in Haihe River basin

CHEN Xin^{1,2}, LIU Yanli^{1,3,4}, DIAO Yanfang⁵, WANG Guoqing^{1,3,4}, GUAN Tiesheng^{1,3,4},
JIN Junliang^{1,3,4}, BAO Zhenxin^{1,3,4}, LIU Cuishan^{1,3,4}, HE Ruimin^{1,3,4}

- (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Yangtze Institute for Conservation & Development, Nanjing 210098, China;
4. Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China;
5. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: Under the premise of climate change and the intensification of human activities, precipitation on a global scale shows obvious regional changes, has a certain impact on the natural environment and the development of human society. Therefore, studying the changes and laws of regional precipitation can not only promote the understanding of regional water cycle changes, but also have important significance for regional water resources protection, ecological construction, and sustainable and healthy economic development. The study of the hydrological cycle under climate change requires a long series of precipitation data, and the insufficient length of the existing data series is one of the main obstacles to climate change-related research.

CRU applicability in the Haihe River basin (HRB) was analyzed from the perspectives of areal rainfall and site rainfall. To evaluate its system, the selected evaluation index is Pearson correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and bias.

The applicability of CRU data in the Zhanghe River subbasin of the HRB is better than that of the entire HRB, and the evaluation results have reached the expected expectations. The mutation and periodicity test results are consistent with the previous analysis results based on the measured data. The difference in station density of the two river basins, the data processing method, and the error in the data itself make the evaluation results of the area rainfall of the two basins have a certain difference. Simultaneously, because CRU is 0.5° grid data, the HRB is affected by factors such as the limitation of the number of stations and the grid coverage area when the data is produced, which has certain limitations for restoring the measured data of the stations. Especially after 1990, there will be certain errors in the quality of the restored site data, which should be considered when using it in the future.

CRU data can better reflect the rainfall change characteristics of the HRB and its sub-basins, and compared to the HRB, CRU data in its subbasin of Zhanghe basin is more reliable. However, due to changes in the global observation sites of CRU data, the method of restoration and the uncertainty of the data itself should be fully considered when using the CRU data to research and restore the measured data at the site, especially after 1990.

Key words: precipitation product; applicability; CRU; Haihe River basin; Zhanghe River basin; high-resolution grid