

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.02.011

# 2013 年以来海河流域降水增多成因剖析

王庆明<sup>1,2</sup>, 张 越<sup>3</sup>, 邓皓东<sup>1</sup>, 谭伟丽<sup>1</sup>, 陈 康<sup>4</sup>, 赵 勇<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 水利部京津冀水安全保障重点实验室, 北京 100048;  
3. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 4. 山东省水利勘测设计院有限公司, 山东 济南 250013)

**摘要:** 为探究 21 世纪 10 年代以来海河流域年降水量增多的原因, 基于实测降水、旱涝等级以及再分析资料等多源数据, 利用小波分析、水汽平衡、WRF 模型(Weather Research and Forecast Model)数值模拟等方法, 分析了海河流域降水丰枯周期特征、外来水汽收支变化以及外调水对降水的影响。结果表明: 海河流域存在 33 a 的降水周期, 最新一轮周期的丰水段从 2013 年开始, 年降水量较上一轮周期枯水段(1997—2012 年)增多 80.0 mm; 2013—2022 年较 1997—2012 年夏季西北通道、东南通道和西南通道水汽输入分别增加 0.35、0.29 和 0.26 kg/(m·s), 导致年降水量增加 76.7 mm, 占降水增量的 95.9%; 2015—2022 年南水北调中线一期工程输入水量导致流域年降水量增加 3.3 mm, 占降水增量的 4.1%。本研究对掌握海河流域降水演变规律、保障流域长期水资源安全具有重要意义。

**关键词:** 降水增多; 水汽收支; 周期性; 外调水; 海河流域

**中图分类号:** TV122

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-6791(2025)02-0296-11

海河流域地处京畿要地, 既是人口最密集、经济最发达的区域之一, 也是水资源紧缺、水生态退化及资源环境支撑力与发展矛盾最尖锐的区域<sup>[1]</sup>。自 20 世纪 90 年代中期开始海河流域遭遇连续十几年的干旱<sup>[2-3]</sup>, 爆发了严重的水资源供给危机, 不得不超采地下水、挤占河湖水, 引发了一系列生态问题<sup>[4-6]</sup>。21 世纪 10 年代以来海河流域降水显著增多<sup>[7]</sup>, 加上南水北调中线一期工程通水, 地下水位出现回升, 河湖水面开始复苏, 极大地缓解了流域缺水情势, 但已有研究对降水增多的具体特征, 如周期性、降水增多的水汽来源等还没有清晰的认识, 影响了流域水资源管理决策制定和重大水利工程的规划布局。尽管降水的周期性分析方法相对成熟, 但选用的时间序列长度不同, 得到的周期性结果也不完全一致, 通常认为海河流域降水存在 10~15 a、25~30 a、60~65 a 等不同周期<sup>[8-10]</sup>。由于中国大范围标准化的气象站网数据始于 1956 年, 降水监测时间序列较短, 识别出的周期是否准确还存在疑问, 故有必要从更长的时间序列进行分析<sup>[11]</sup>。在特定的周期内降水来源主要有 2 类: 一部分是外来水汽, 受大气环流影响<sup>[12-15]</sup>, 海河流域外来水汽主要来自中高纬度西风带的西北水汽(下称西北通道水汽)、孟加拉湾的西南水汽(下称西南通道水汽)以及中国南海和西太平洋的东南水汽(下称东南通道水汽), 3 个通道的水汽变化是影响海河流域降水的主要因素<sup>[16-17]</sup>, 究竟哪个通道水汽变化是最新周期丰水段的主导因素还不明确。另一部分是本地蒸发水汽, 也称降水再循环, 主要受下垫面变化影响<sup>[18-20]</sup>, 2014 年底南水北调中线一期工程通水, 截至 2024 年底累计为海河流域输水达到 530 亿 m<sup>3</sup>, 是影响本地蒸发水汽变化的最主要因素。目前有研究根据规划的调水量评估外调水对降水的影响, 但基于实际调水量和用水区域的研究较少, 外调水的真实影响缺乏准确的评估。

本文基于重构的 1477—2022 年降水序列分析海河流域的周期性规律, 确定最新一轮周期丰水段的开始

收稿日期: 2025-01-17; 网络出版日期: 2025-04-16

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20250416.1603.007>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52025093; 52394231)

作者简介: 王庆明(1987—), 男, 河北邯郸人, 高级工程师, 博士, 主要从事水循环演变解析研究。

E-mail: wangqm@iwhr.com

通信作者: 赵勇, E-mail: zhaoyong@iwhr.com

时间,分析3个通道外来水汽变化规律和外调水对本地蒸发水汽的定量影响,探究海河流域降水增多的原因,研究结果对深入认知海河流域降水演变机制具有重要意义。

## 1 研究区域

海河流域东临渤海、西倚太行(图1),总面积为32.06万km<sup>2</sup>,其中,西部和北部为山区,面积为18.94万km<sup>2</sup>,约占60%;东部和东南部为平原区,面积为12.84万km<sup>2</sup>,约占40%。海河流域属于温带半湿润、半干旱大陆性季风气候区,冬季盛行北风和西北风,夏季多东南风。按1956—2022年降水系列,全流域多年平均降水量为541.7mm,降水时空分布呈明显的地带性、季节性和年际差异,其中山区多年平均降水量为527.4mm,平原区为556.3mm,汛期(6—9月)降水占年降水总量的70%~85%,春季(3—5月)降水占年降水总量的10%。夏季暴雨集中,冬春雨雪稀少,具有春旱、秋涝、晚秋又旱的特点。流域年平均气温为1.5~14.0℃,年平均相对湿度为50%~70%,平均日照时数为2500~3000h,平均水面蒸发量为1100.6mm。

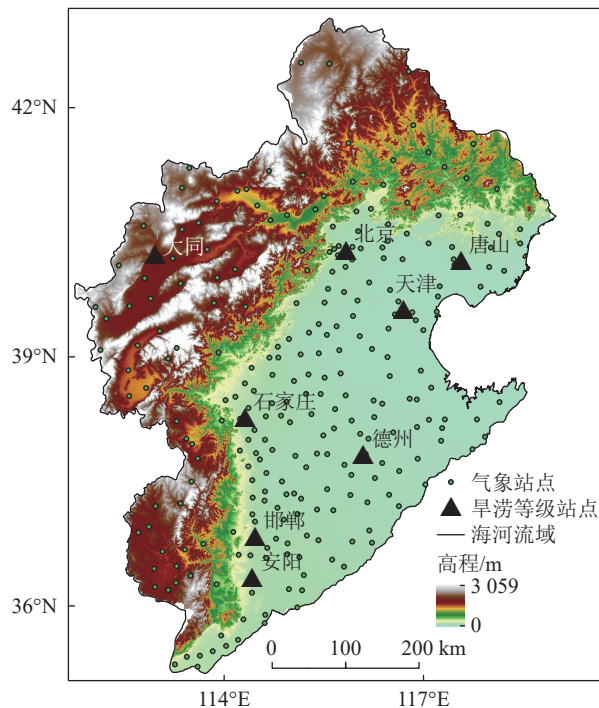


图1 海河流域概况

Fig. 1 Haihe River basin overview

## 2 数据来源和研究方法

### 2.1 数据来源

1956—2022年逐日降水数据来自流域内256个气象站,由国家气象科学数据中心提供(<http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/>)。用于重构1477—2022年降水序列的旱涝等级来自《中国近五百年旱涝分布图集》及其续补资料,包含中国120个代表站点1477—2000年共524a旱涝等级序列资料<sup>[13]</sup>,其中涉及海河流域的站点有8个,分别为北京、天津、石家庄、唐山、邯郸、德州、安阳和大同。用于计算水汽通量的比湿、风速等气象数据来源于欧洲中期天气预报中心提供的ERA5再分析数据集(<https://cds.climate.copernicus.eu/>),该数据集覆盖本次研究的1997—2022年时间段,空间分辨率为0.25°×0.25°,包括从300到1000hpa(300、400、500、600、700、850、925、1000hpa)的8个气压层,从地表向上延伸到大气层顶部。此外,各地市外调水量、耗水系数等数据来自于《中国水资源公报》和《中国南水北调工程建设年鉴》。

### 2.2 研究方法

(1)外来水汽收支。使用欧拉法<sup>[21-22]</sup>分析海河流域大气水汽输送情况(范围为34°N—43°N,111°E—120°E),流域东边界、西边界、南边界和北边界水汽通量分别为式(1)—式(4):

$$Q_E(t) = \int_{\phi_1}^{\phi_2} Q_u(\lambda_1, y_i, t) \quad (1)$$

$$Q_W(t) = \int_{\phi_1}^{\phi_2} Q_u(\lambda_2, y_i, t) \quad (2)$$

$$Q_S(t) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_v(x_i, \phi_1, t) \quad (3)$$

$$Q_N(t) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_v(x_i, \phi_2, t) \quad (4)$$

式中： $Q_E(t)$ 、 $Q_W(t)$ 、 $Q_S(t)$ 、 $Q_N(t)$ 分别为东、西、南和北边界处的水汽通量， $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ； $Q_u$ 、 $Q_v$ 分别为纬向和经向水汽输送通量， $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ； $x_i$ 、 $y_i$ 、 $t$ 分别为网格点的经度、纬度和时间； $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 分别为各边界对应的经度和纬度。

流域的纬向水汽净收支定义为西边界和东边界水汽通量之和，经向水汽净收支定义为南边界和北边界水汽通量之和，水汽通量输送正方向为从西向东和从南向北。流域水汽通量净收支由经向和纬向水汽通量的总和决定，正值表示水汽的净输入，负值表示水汽的净输出。其水汽通量净收支( $Q_T(t)$ )计算如下：

$$Q_T(t) = Q_W(t) + Q_E(t) + Q_S(t) + Q_N(t) \quad (5)$$

(2)外调水对流域降水影响模拟。采用 WRF 模型 (Weather Research and Forecast Model)<sup>[23-24]</sup> 模拟外调水对流域降水的影响，WRF 模型是由美国国家大气研究中心、美国国家海洋和大气管理局等多家科研机构开发的中尺度气候模拟系统，广泛应用于气候研究、天气预报、水文研究等多个领域。模拟区域范围包含海河流域，模拟区域中心点为(39°N, 116°E)，时间步长为 90 s，水平分辨率为 30 km，模拟初始与侧边界条件使用 ERA5 再分析数据集，WRF 模型提供大量的参数化方案，主要包括云微物理过程方案、积云对流方案、辐射传输方案、边界层方案及陆面过程方案等。在参数化方案比选过程中，选择对降水和温度影响较大的参数化方案，并形成参数化方案组合，基于气象站点实测数据开展参数化方案遴选试验，最终较优的参数化方案结果为 WSM5 微物理过程方案、Grell-Devenyi 积云方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、YSU 边界层方案和 Noah-MP 陆面过程方案，后续试验也选用该套组合方案。采用 2015—2022 年实际的水汽输入与下垫面条件，通过 WRF 模型模拟有无外调水对降水和降水再循环率<sup>[25]</sup>的影响。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 海河流域降水丰枯周期识别

针对海河流域降水周期性特征识别，一般认为时间序列越长，识别出的周期越稳定。根据团队前期工作，基于长短期记忆网络算法 (LSTM)，结合历史旱涝等级记录、站点监测数据等，重建了海河流域 1477—2022 年 (以下简称过去 546 a) 的降水序列，经 Morlet 小波分析发现海河流域第 1 主周期为 33 a<sup>[26]</sup>。过去 546 a 海河流域共经历了 16 个完整周期以及最新正在发展的 1 个周期，如图 2(a) 所示，周期内丰水段平均持续 15.87 a，枯水段平均持续 16.18 a，最新一轮周期以 2013 年为起点，截止到 2022 年丰水段已经持续了 10 a 时间。从流域雨量站监测数据上看，1956—2022 年海河流域多年平均降水量为 541.7 mm，大致跨越 2.5 个周期，第 1 个周期的丰水段 (1956—1963 年) 年平均降水量为 658.2 mm，枯水段 (1964—1980 年) 年平均降水量为 542.3 mm；第 2 个周期的丰水段 (1981—1996 年) 年平均降水量为 519.3 mm，枯水段 (1997—2012 年) 年平均降水量为 488.6 mm；最新一轮周期仍在持续的丰水段 (2013—2022 年) 海河流域年平均降水量为 568.6 mm (图 2(b))，较上一个周期枯水段增加 80.0 mm，增多 16%，其中春、夏、秋、冬 4 个季节降水量分别增加了 4.8、71.4、3.2 和 0.6 mm (图 2(c))。

基于过去 546 a 降水序列按照频率对降水进行定量划分，25% 频率对应年降水量为 577.3 mm，50% 频率对应年降水量为 519.1 mm，75% 频率对应年降水量为 460.2 mm，95% 频率对应年降水量为 373.4 mm。从历史周期性规律上看，当前海河流域确实处于丰水段，2013—2022 年的年平均降水量接近 25% 频率年降水量，在过去的 16 个周期丰水段中排列第 6；而上一个枯水段 (1997—2012 年) 的年平均降水量接近 75% 频率年降水量，在 16 个周期枯水段中排列第 2，两者强烈对比直观感受到当前时期降水的丰沛。后文以最新一轮周期

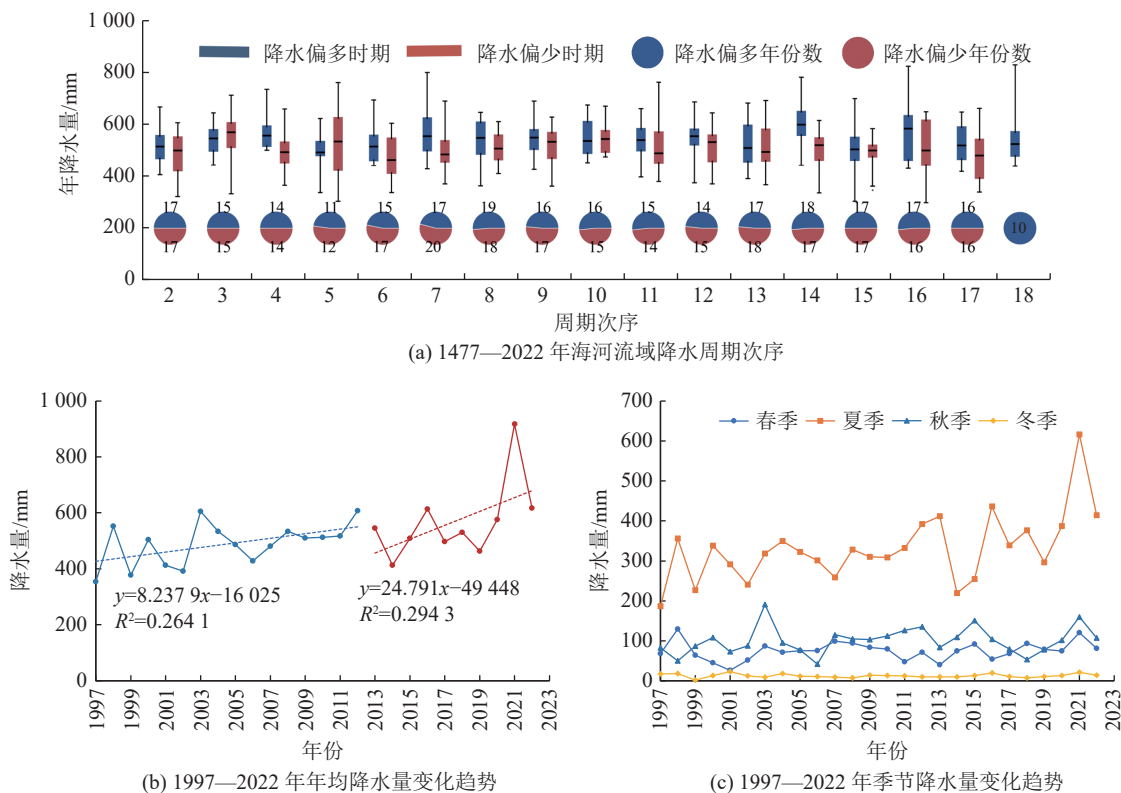


图2 海河流域历史降水周期性及近期演变趋势

Fig. 2 Historical periodicity and recent evolution trend of precipitation in Haihe River basin

当前的丰水段(2013—2022 年)与上一周期的枯水段(1997—2012 年)对比, 从外来大气水汽收支、本地降水再循环 2 个方面探讨海河流域近期降水增多的原因。

3.2 外来大气水汽收支变化

外部输送的大气水汽是形成降水的主要来源之一, 如图 3 所示, 西北通道水汽来源于全年盛行西风, 将来自中高纬度的水汽经内陆地区输送至海洋(太平洋), 该通道流经区域内水汽通量基本在 8 kg/(m·s)左右; 西南水汽通道将来自孟加拉湾的水汽经长江流域输送至海河流域, 到达海河流域时水汽通量值多为 8~12 kg/(m·s); 在夏季通常会有东南水汽通道从中国南海、西太平洋地区携带水汽输送至流域内部, 该通道进入海河流域的水汽通量一般会超过 12 kg/(m·s), 导致流域降水多集中在夏季(图 3(c),  $U$ 、 $V$  分别为纬向、经向风速)。基于 ERA5 数据绘制海河流域四季的风向频率玫瑰图, 如图 4 所示, 海河流域各季节主导风向是西北和西南风, 其中夏季出现东南风, 这与四季整层水汽通量矢量场方向一致。

在海河流域的 4 个边界中, 北、南、西边界为水汽流入边界, 东边界为水汽流出边界, 如图 5(a) ( $s$  为趋势线斜率)和表 1 所示, 2013—2022 年较 1997—2012 年, 北边界水汽通量增加了 0.62 kg/(m·s)、南边界水汽通量增加了 0.44 kg/(m·s)、西边界水汽通量增加了 0.55 kg/(m·s), 合计水汽流入量增加 1.61 kg/(m·s), 东边界水汽流出通量增加 0.69 kg/(m·s)。从水汽净收支来看, 1997—2012 年海河流域平均年净收支为 13.08 kg/(m·s), 2013—2022 年平均年净收支为 14.00 kg/(m·s), 后一时段较前一时段平均年净收支增加 0.92 kg/(m·s), 其中, 春季水汽净收支减少 0.18 kg/(m·s), 夏季水汽净收支增加 0.90 kg/(m·s), 秋季水汽净收支增加 0.21 kg/(m·s), 冬季水汽净收支减少 0.01 kg/(m·s)(图 5(b)), 因此夏季水汽净收支增加最多是导致降水增多的主要原因之一。

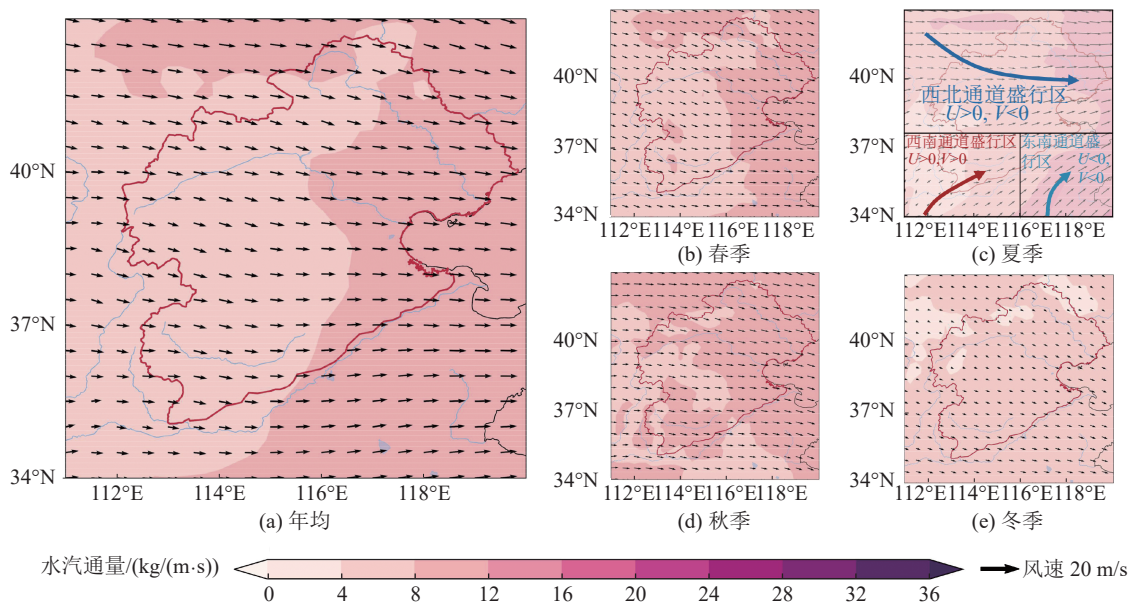


图 3 1997—2022 年平均和四季的整层水汽输送矢量场  
Fig. 3 1997—2022 mean and seasonal integrated water vapor flux

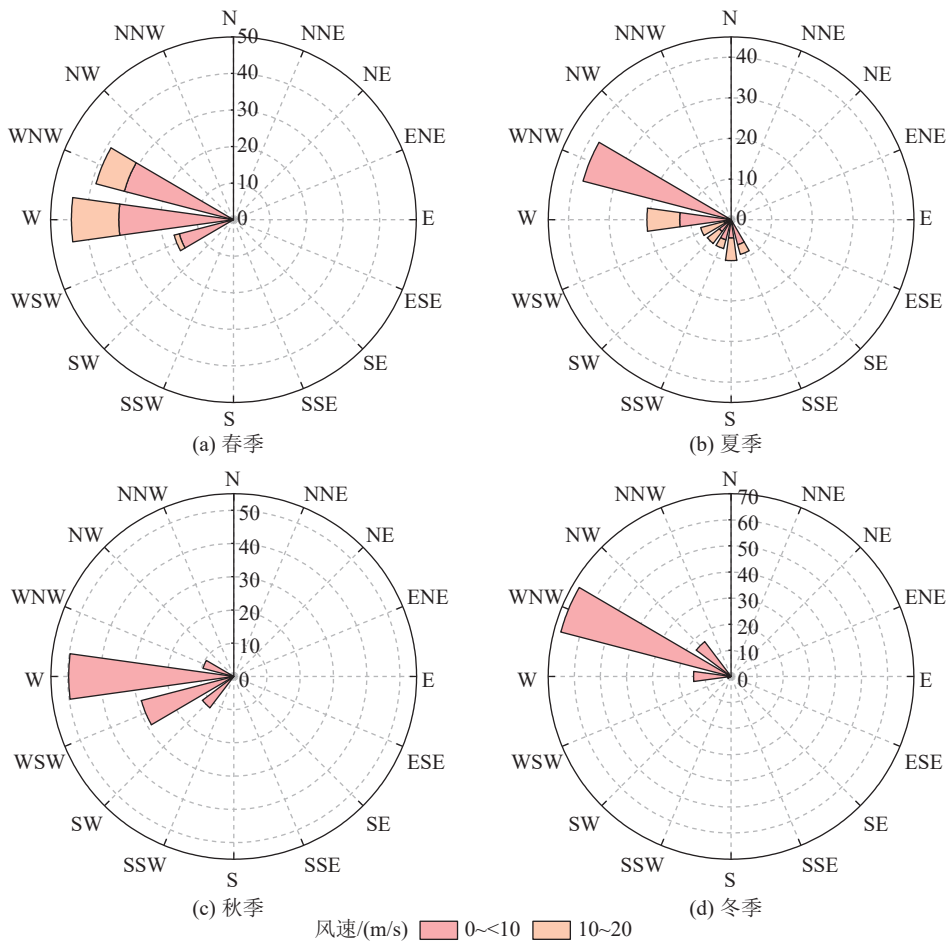


图 4 1997—2022 年海河流域四季的整层风向频率玫瑰图(单位: %)

Fig. 4 Wind frequency rose diagram of the whole layer wind direction in the four seasons of the Haihe River basin during 1997—2022

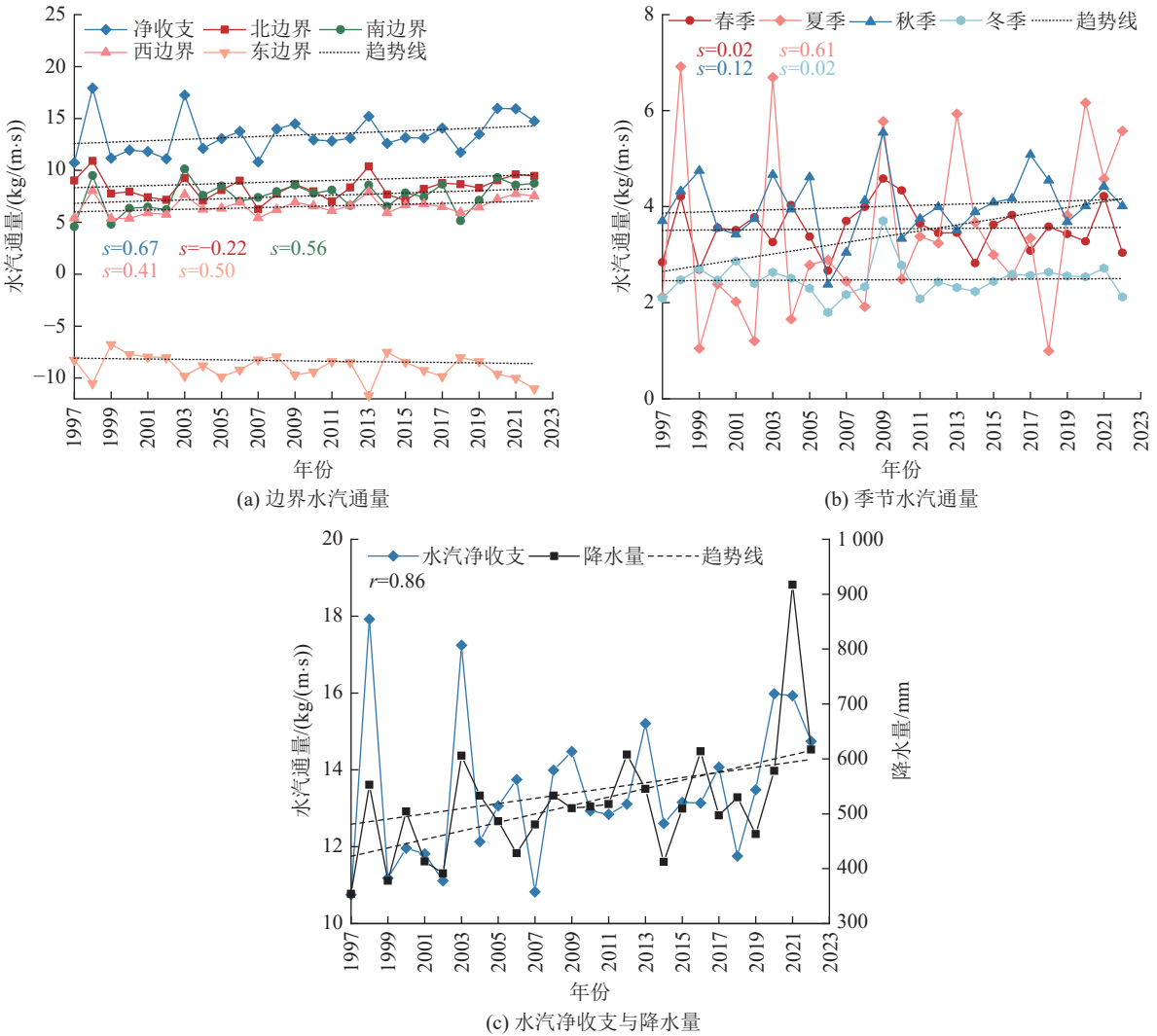


图5 海河流域各边界通量、季节净通量以及降水量年际变化

Fig. 5 Boundary fluxes, seasonal net fluxes and their interannual changes in relation to precipitation in Haihe River basin

表1 不同时段各边界水汽通量及净收支均值

Table 1 Mean water vapor flux and net budget at each boundary during different time periods 单位: kg/(m·s)

| 时段         | 北边界  | 南边界  | 西边界  | 东边界    | 净收支   |
|------------|------|------|------|--------|-------|
| 1997—2012年 | 8.11 | 7.35 | 6.31 | − 8.69 | 13.08 |
| 2013—2022年 | 8.73 | 7.79 | 6.86 | − 9.38 | 14.00 |

2013—2022年较1997—2012年,流域夏季北、南、西3个边界水汽流入量分别增加了0.42、0.44、0.51 kg/(m·s),东边界流出量增加0.47 kg/(m·s)。根据流域夏季多年平均风向,识别出西北水汽通道(37.5°N以北)、西南水汽通道(116°E以西)和东南水汽通道盛行区范围(116°E以东),对比3个通道2013—2022年和1997—2012年2个时段的水汽通量结果显示,西北水汽通道净收支增加0.35 kg/(m·s),西南水汽通道净收支增加0.26 kg/(m·s),东南水汽通道净收支增加0.29 kg/(m·s)。水汽净收支是影响同期年降水量的主要因素,如图5(c)所示,1997—2022年水汽净收支与同期实测降水量相关性系数( $r$ )达到0.86,各年变化趋势基本一致,因此,3个通道夏季水汽流入增多是导致海河流域降水增多的主要原因。

3.3 外调水对降水的影响

外调水的输入增加了流域蒸发量，蒸发的水汽在高空冷却凝结，一部分会再次转化为降水返回地表，也是影响海河流域降水的原因之一。自 2014 年 12 月 12 日南水北调中线一期工程正式通水，截至到 2022 年底已累计为海河流域输水 420 亿  $\text{m}^3$ 。基于 WRF 模型，按照南水北调工程实际调水量，对 2015—2022 年间有无调水情景的海河流域降水量、蒸发量等气候要素进行模拟，利用流域内气象站点数据和模拟结果进行对比验证，如图 6(a) 所示，从模拟期 2015—2022 年逐月降水量站点观测值和模拟值对比来看，模型除了在 6—7 月模拟偏大外，其余月份降水量模拟效果较好，均方根误差为 18.9 mm/a，年均降水量相对误差为 8.14%。从空间分布来看，如图 6(b) 和图 6(c) 所示，流域降水量模拟值与站点观测值整体一致，都呈现自西北向东南递增的分布趋势，两者的空间相关系数达到 0.85。

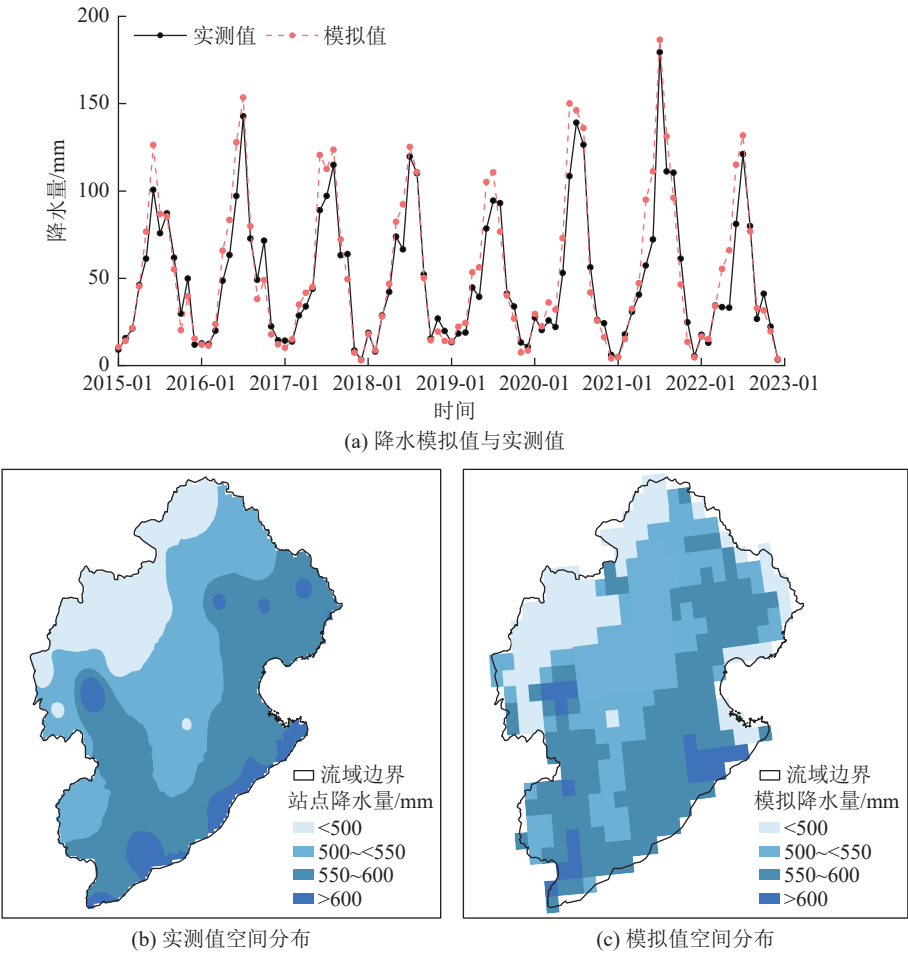


图 6 多年平均降水的站点实测值与模拟值年际与空间对比

Fig. 6 Multi-year average precipitation: interannual and spatial comparison between observed and simulated values at stations

将 2015—2022 年有无调水情景的模拟结果，计入 2013—2022 年时段，与 1997—2012 年时段对比，调水导致流域年均蒸发量增加了 12.0 mm，年均降水量增加 3.3 mm，约占丰水段降水增量的 4.1%，调水前流域年均降水再循环率为 6.55%，调水后流域年均降水再循环率为 6.86%，增长了 0.31%。同期模拟出的 1997—2012 年大气水汽净收支均值为 13.43  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ，2013—2022 年大气水汽净收支为 14.03  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ，与 ERA5 数据计算出的水汽净收支接近，相关系数为 0.9，水汽净收支增加导致后一时段较前一时段降水量增

加 76.7 mm, 约占丰水段降水增量的 95.9%。

从季节上看(表 2), 调水导致海河流域春季、夏季降水量分别增加 1.10、2.06 mm, 对各自季节降水增加的贡献分别为 23.0% 和 2.9%, 尽管夏季降水量增加最多, 但由于夏季降水量大, 增加的比例相对较低; 春季降水总量较小, 降水量增加虽然不是最多, 但增加的比例最高。秋、冬季节, 调水导致降水量分别增加了 0.14 mm 和 0.01 mm, 对各自季节降水增加的贡献分别为 4.33% 和 1.67%。尽管南水北调中线一期在不同季节调水量差异不大, 但秋、冬季降水增加较少是因为秋、冬季节东南通道水汽输送减弱, 主要是东边界水汽通量减少, 高层大气相对干燥, 即便调水导致低层水汽含量增多, 但空气垂直对流活动受限, 降水转化率较低, 无法形成降水, 所以降水量并未显著增加。

表 2 2015—2022 年降水量增量和降水再循环率趋势

Table 2 Precipitation increment and precipitation cycling rate trends during 2015—2022

| 季节 | 降水增加量/mm | 调水导致降水量变化/mm | 调水导致降水再循环率变化/% |
|----|----------|--------------|----------------|
| 春季 | 4.78     | 1.10         | 0.74           |
| 夏季 | 71.39    | 2.06         | 0.38           |
| 秋季 | 3.23     | 0.14         | 0.09           |
| 冬季 | 0.60     | 0.01         | 0.32           |

从空间上看(图 7), 调水带来的增雨效应主要表现在流域外调水量较多的北京、天津等地区, 年降水量平均增加超过 10.2 mm。此外, 在海河流域西北部也出现了一个降水增加的区域, 主要是因为外调水产生的水汽受季风影响, 从中东部平原区输送至西北山前地带被太行山-燕山阻挡, 输送的水汽抬升冷却后形成地形雨。降水再循环率增加范围主要集中在流域中部地区, 增加 0.4% 左右, 尤其北京、天津、廊坊等地区增加范围在 0.4%~0.8% 之间。

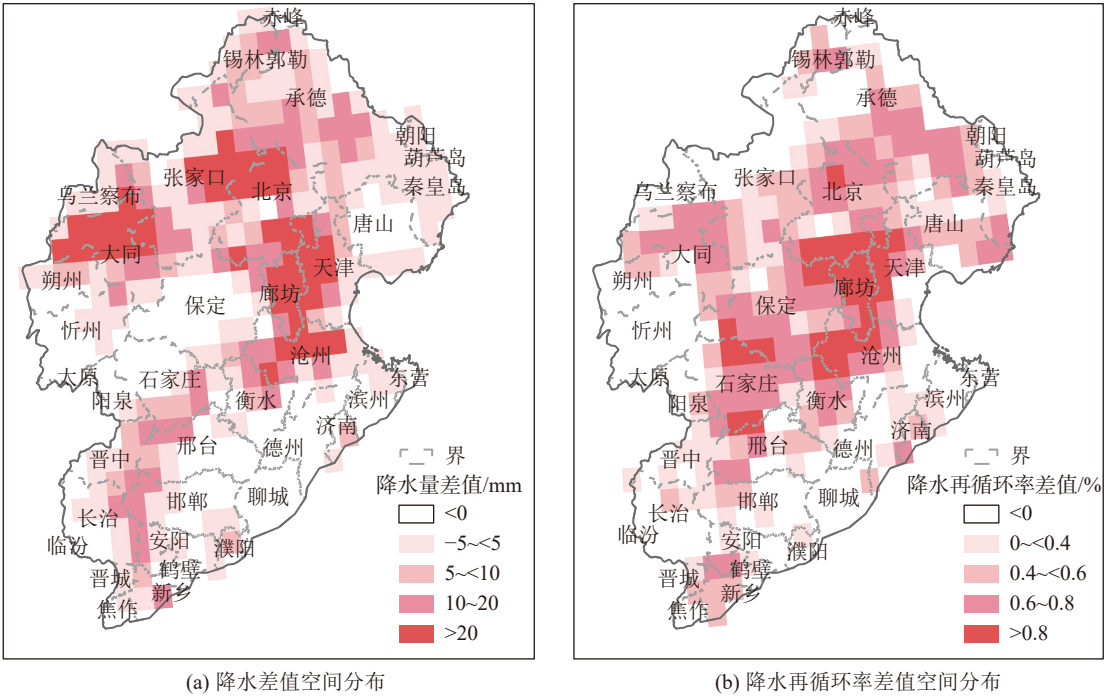


图 7 调水前后海河流域受水区降水差值和降水再循环率差值的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of differences in precipitation and precipitation recycling rate in the water receiving areas of the Haihe River basin before and after water transfer

## 4 结 论

(1) 根据重构的 1477—2022 年降水序列分析, 发现海河流域存在 33 a 的主周期, 最新一轮周期丰水段始于 2013 年, 上一轮周期枯水段为 1997—2022 年, 2013—2022 年降水量较 1977—2022 年增多 16%。

(2) 海河流域外来水汽主要来自西北、西南和东南 3 个方向水汽通道, 2013—2022 年较 1997—2012 年, 夏季西北通道水汽输入增加  $0.35 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ , 东南通道水汽输入增加  $0.29 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ , 西南通道水汽输入增加  $0.26 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ , 3 个通道夏季水汽输入增加是导致流域降水增多的主要原因。

(3) 南水北调中线一期工程调水导致海河流域年均蒸发量增加 12.0 mm, 年均降水量增加 3.3 mm, 约占最新周期丰水段降水增量的 4.1%; 大气水汽收支增加导致流域年降水量增加 76.7 mm, 约占最新周期丰水段降水增量的 95.9%。

本研究只考虑了外来大气水汽收支和外调水对流域降水的影响, 未考虑流域内部农田灌溉、植被修复等因素导致蒸散发的变化, 对结果有一定的影响, 但相对外调水, 这些因素的影响较小, 将在未来更精细化的分析中进一步考虑。

## 参考文献:

- [1] 赵勇, 王庆明, 王浩, 等. 京津冀地区水安全挑战与应对战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 8-18. (ZHAO Y, WANG Q M, WANG H, et al. Water security in Beijing-Tianjin-Hebei region: challenges and strategies[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 8-18. (in Chinese))
- [2] 周根富, 解文静. 海河流域近 20 年气象干旱和水资源形势研究[J]. 自然资源情报, 2022(2): 28-32. (ZHOU G F, XIE W J. Study on meteorological drought and water resource situation in Haihe River basin in the last 20 years[J]. *Natural Resources Information*, 2022(2): 28-32. (in Chinese))
- [3] 关不了, 姜珊, 赵勇, 等. 海河流域干旱时空演变及其与气候因子的关系[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 59-68. (GUAN B L, JIANG S, ZHAO Y, et al. Spatial and temporal evolution of drought and its relationship with climate factors in the Haihe River basin[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 59-68. (in Chinese))
- [4] 王庆明, 赵勇, 王浩, 等. 海河流域地表水资源衰减归因与规律[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(5): 1573-1587. (WANG Q M, ZHAO Y, WANG H, et al. Surface water resource attenuation attribution and patterns in Hai River basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 54(5): 1573-1587. (in Chinese))
- [5] 朱婷婷, 侯立安, 童银栋, 等. 面向 2035 年的海河流域水安全保障战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 26-33. (ZHU T T, HOU L A, TONG Y D, et al. Strategy for assuring water security in the Haihe River basin by 2035[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 26-33. (in Chinese))
- [6] 赵勇, 陆垂裕, 何鑫, 等. 华北地区地下水超采治理十问: 地下水, 河湖复苏下的涌动[J]. 中国水利, 2023(4): 19-25. (ZHAO Y, LU C Y, HE X, et al. Ten questions regarding groundwater overexploitation in North China: how can groundwater boost recovery of rivers and lakes[J]. *China Water Resources*, 2023(4): 19-25. (in Chinese))
- [7] 陈宏, 杨洋, 张楠, 等. 2010—2019 年海河流域暖季极端小时降水特征分析[J]. 气象与环境科学, 2024, 47(4): 23-31. (CHEN H, YANG Y, ZHANG N, et al. Analysis on characteristics of extreme hourly precipitation in warm season in the Haihe River basin from 2010 to 2019[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2024, 47(4): 23-31. (in Chinese))
- [8] WANG Z G, LUO Y Z, LIU C M, et al. Spatial and temporal variations of precipitation in Haihe River basin, China: six decades of measurements[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(18): 2916-2923.
- [9] 苏万磊. 基于小波分析的海河流域降水周期及趋势分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2020, 3(6): 73-75. (SU W L. Analysis on precipitation cycle and trend in Haihe River basin based on wavelet analysis[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2020, 3(6): 73-75. (in Chinese))
- [10] 任国玉, 王涛, 郭军, 等. 海河流域近现代降水量变化若干特征[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 103-111. (REN G Y, WANG T, GUO J, et al. Characteristics of precipitation variations in Haihe River basin in modern times[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(5): 103-111. (in Chinese))

- [11] 陈宏, 张庆, 孙密娜, 等. 多尺度模式对海河流域地区副高系统影响性降水预报的性能评估 [J]. 气象科学, 2024, 44(4): 783-792. (CHEN H, ZHANG Q, SUN M N, et al. Evaluation of multi-scale model forecasts for subtropical high edge-type precipitation in the Haihe River basin[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2024, 44(4): 783-792. (in Chinese))
- [12] 丁一汇, 柳艳菊, 宋亚芳. 东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响 [J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 629-643. (DING Y H, LIU Y J, SONG Y F. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 629-643. (in Chinese))
- [13] 刘艳丽, 华悦, 周惠成, 等. 1470 年以来中国东部季风区降水变化规律及趋势预估 [J]. 水科学进展, 2022, 33(1): 1-14. (LIU Y L, HUA Y, ZHOU H C, et al. Precipitation variation and trend projection in the eastern monsoon region of China since 1470[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(1): 1-14. (in Chinese))
- [14] 吴高鹏, 赵强, 王璇, 等. 海河流域 1961—2020 年极端气候变化及其与大气环流关系 [J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(3): 100-110. (WU G P, ZHAO Q, WANG X, et al. Extreme climate change and its relationship with atmospheric circulation in the Haihe River basin from 1961 to 2020[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35(3): 100-110. (in Chinese))
- [15] 王婷, 李双双, 延军平, 等. 基于 ENSO 发展过程的中国夏季降水时空变化特征 [J]. 自然资源学报, 2022, 37(3): 803-815. (WANG T, LI S S, YAN J P, et al. Spatio-temporal variation of summer precipitation in China based on ENSO development process[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 803-815. (in Chinese))
- [16] 朱玲, 柳艳香, 左洪超, 等. 海河流域水汽输送及其变化特征分析 [J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(3): 184-188. (ZHU L, LIU Y X, ZUO H C, et al. Water vapor transport characteristics over the Haihe River basin[J]. Advances in Climate Change Research, 2011, 7(3): 184-188. (in Chinese))
- [17] 何丽烨, 程善俊, 马宁, 等. 海河流域夏季降水关键区季内演变及其环流配置的定量化分析 [J]. 地理学报, 2020, 75(1): 41-52. (HE L Y, CHENG S J, MA N, et al. Intraseasonal evolution of the key areas of precipitation in the Haihe River basin and quantitative analysis of its associated atmospheric circulation during summer[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(1): 41-52. (in Chinese))
- [18] DENG H D, WANG Q M, ZHAO Y, et al. Effect of water vapor transport and budget on precipitation in the Yangtze-Huang-Huai-Hai River basin[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 53: 101787.
- [19] WANG X X, CHENG Y M, LIU L, et al. Improved understanding of how irrigated area expansion enhances precipitation recycling by land-atmosphere coupling[J]. Agricultural Water Management, 2024, 299: 108904.
- [20] 桂云鹏, 赵勇, 杨明祥, 等. 大规模灌溉对海河流域气候影响模拟研究 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(3): 138-146. (GUI Y P, ZHAO Y, YANG M X, et al. Simulation of climate effect of large-scale irrigation in Haihe River basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(3): 138-146. (in Chinese))
- [21] 姚秀萍, 黄逸飞, 包晓红, 等. “23·7”华北极端强降水特征和水汽条件研究 [J]. 气象学报, 2024, 82(5): 585-599. (YAO X P, HUANG Y F, BAO X H, et al. Characteristics of the July 2023 extreme rainfall in North China and its water vapor supply[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2024, 82(5): 585-599. (in Chinese))
- [22] 孙博, 王会军, 周波涛, 等. 中国水汽输送年际和年代际变化研究进展 [J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 644-653. (SUN B, WANG H J, ZHOU B T, et al. A review on the interannual and interdecadal variations of water vapor transport over China during past decades[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 644-653. (in Chinese))
- [23] 孙明坤, 刘志雨, 姚成, 等. WRF/Grid-XAJ 双向耦合系统构建及其暴雨洪水模拟应用 [J]. 水科学进展, 2024, 35(5): 752-762. (SUN M K, LIU Z Y, YAO C, et al. Building of WRF/Grid-XAJ two-way coupling system and its application in rainstorm and flood simulation[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(5): 752-762. (in Chinese))
- [24] LI X Y, ZOU L, XIA J, et al. Response of blue-green water to climate and vegetation changes in the water source region of China's South-North water Diversion Project[J]. Journal of Hydrology, 2024, 634: 131061.
- [25] 叶立娟, 王文, 胡彦君, 等. 青藏高原水汽来源及其对降水变化的贡献 [J]. 水科学进展, 2024, 35(6): 890-899. (YE L J, WANG W, HU Y J, et al. Water vapor sources and their contributions to precipitation change in the Tibetan Plateau[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(6): 890-899. (in Chinese))
- [26] 谭伟丽, 赵勇, 王庆明, 等. 海河流域 500 年尺度降水周期性分析与预测 [J/OL]. 水利学报, 2025(Online) (TAN W L, ZHAO Y, WANG Q M, et al. Analysis of 500-year precipitation periodicity and prediction in Haihe River basin [J/OL]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025 (Online). (in Chinese))

## Analysis of the causes behind increased precipitation in the Haihe River basin since 2013\*

WANG Qingming<sup>1,2</sup>, ZHANG Yue<sup>3</sup>, DENG Haodong<sup>1</sup>, TAN Weili<sup>1</sup>, CHEN Kang<sup>4</sup>, ZHAO Yong<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 2. *Key Laboratory of Water Safety for Beijing-Tianjin-Hebei Region of Ministry of Water Resources, Beijing 100048, China*; 3. *General Institute of Water Conservancy and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China*; 4. *Shandong Water Conservancy Survey and Design Institute Co., LTD., Jinan 250013, China*)

**Abstract:** To explore the reasons for the increase in annual precipitation in the Haihe River basin since the 2010s, this study uses multi-source data including measured precipitation, drought/flood severity levels, and reanalysis datasets. Through methods such as wavelet analysis, water vapor balance calculations, and WRF numerical simulations, the study examines the periodic characteristics of precipitation, changes in external water vapor transport, and the impact of diverted water on precipitation. Results show that the Haihe River basin has a 33-year period of precipitation, with the most recent wet phase beginning in 2013. During this phase, annual precipitation increased by 80.0 mm compared to the previous dry phase (1997—2012). From 2013 to 2022, summer water vapor transport through the northwest, southeast, and southwest channels increased by 0.35, 0.29, and 0.26 kg/(m·s) respectively, leading to a total annual precipitation increase of 76.7 mm, accounting for 95.9% of the total increase. Additionally, from 2015 to 2022, the first phase of the South-to-North Water Diversion Project's Middle Route added an estimated 3.3 mm to the annual precipitation, accounting for 4.1% of the increase. This research is of significant importance for understanding the evolution of precipitation in the Haihe River basin and ensuring the long-term security of regional water resources.

**Key words:** precipitation increases; water vapor budget; periodicity; water transfer from external basins; Haihe River basin

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52025093; No. 52394231).