

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200331

# 宁夏三河源地区 2000~2017 年水循环关键要素时空变化分析

曹 易<sup>1,2,3</sup>, 张 珂<sup>1,2,3,4</sup>, 李致家<sup>2</sup>, 张维江<sup>5</sup>, 张 菁<sup>1,3</sup>

(1.河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;2.河海大学 长江保护与绿色发展研究院,江苏 南京 210098;3.河海大学 水文水资源学院,江苏 南京 210098;4.中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室,江苏 南京 210098;5.宁夏大学 土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021)

**摘 要:**探究我国西北典型内陆流域的水循环关键要素变化规律,对于预测气候变化下的水资源变化具有重要价值。基于水文实测资料和 MODIS 系列卫星遥感数据,采用线性趋势分析与频率统计分析方法,定量分析宁夏三河源地区 2000~2017 年降水、实际蒸散发、径流等水循环关键要素的时空格局与变化特征。结果表明:研究区自 2000 年以来年实际蒸散量和降水量空间上均呈现出自东南向西北逐渐减小的分布特征,与气候条件分布情况一致;仅 18% 的区域呈现出降水量显著增加趋势( $P < 0.05$ ),而 79% 的区域呈现了实际蒸散发值显著增加趋势 ( $P < 0.05$ );2000 年以来主要河流的径流量低于多年平均值,年型以平水年和枯水年居多。研究区水循环关键要素中降水量同径流量与实际蒸散发量之和存在不平衡,导致近年来流域储水量出现一定亏缺。

**关键词:**水循环;时空变化;MODIS;地表水资源

中图分类号:P339

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2021)03-0088-07

## 0 引言

水循环是联系地球系统中大气圈-生物圈-地圈的纽带,不仅与陆地表层系统中各种自然地理要素的时空分布有关,而且与气候变化、城市化进程等有着高度关联性<sup>[1-3]</sup>。流域尺度上的水循环包括降雨、径流、蒸散发等过程;其中,实际蒸散发(Actual Evapotranspiration, AET)是地表水分循环的重要组成部分,也是陆面生态过程的关键参数。遥感技术以像元为基础,能够监测和反演出空间上的蒸腾量变化,克服了传统的蒸散发观测以点代面的缺陷,客观上能够减少误差<sup>[4]</sup>。国内外学者根据高质量的卫星和地面观测数据,研发出了一些全球蒸散发遥感产品<sup>[5-9]</sup>,并将其进行比较,做出了全面的评估和检验<sup>[10-11]</sup>。其中,NASA 的 MODIS 全球蒸散发产品 MOD16 属陆面蒸散发数据集,在全球得到了较为广泛的应用。贺添等<sup>[12]</sup>进行了

MOD16 产品在整个中国区域的精度评估和应用研究,流域尺度的精度验证结果表明,MOD16 产品对于辽河、海河、黄河和淮河流域的模拟精度较高;叶红等<sup>[13]</sup>以 MOD16 产品的地表蒸散发数据为基础,研究了 2000~2014 年黄河源区 AET 时空变化特征。结合水文和气象资料,采用基于流域水量平衡的方法,是探究水循环关键要素变化特征的有效途径。

我国西北干旱半干旱地区约占全国陆地的 30%,生态系统相当脆弱,对气候变化较为敏感。在社会经济发展和气候变化的双重挑战下,我国西北内陆区域水资源供需矛盾日益尖锐,部分黄土丘陵处于沙漠化的威胁之中。因此,十分有必要利用星地多源数据对西北典型内陆流域进行水循环关键要素变化特征的分析,获取其近期变化规律,以预测未来水资源变化情况。本文以黄河流域宁夏三河源地区作为研究区域,分析 2000~2017 年降水、蒸散发、径流等水循环关

收稿日期:2020-08-24

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划(2018BEG02010);国家自然科学基金资助项目(51879067);江苏省杰出青年基金(BK20180022)

作者简介:曹易(1997—),女,湖北黄石人,硕士研究生,主要研究方向为水文遥感。E-mail:yi\_cao@hhu.edu.cn

通信作者:张珂(1979—),男,湖北利川人,教授,博士生导师,主要研究方向为水文水资源。E-mail: kzhang@hhu.edu.cn

键要素的时空格局和变化特征,可为该地区的可持续发展、经济社会发展规划、水资源合理利用、开发和保护提供科学依据。

## 1 研究区概况及数据资料

### 1.1 研究区概况

宁夏三河源地区地处宁夏南部山区(简称“宁南山区”),深居我国西北内陆,属黄河流域干旱和半干旱地区,沟壑纵横,河系较为发育,是葫芦河、泾河、清水河的发源地,故该地区被称为宁夏“三河源”地区。研究区总面积约为  $6.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,位于  $105^\circ 02' \text{ E} \sim 108^\circ 55' \text{ E}$  和  $34^\circ 35' \text{ N} \sim 37^\circ 44' \text{ N}$  之间,地势西高东低、南高北低(见图 1),西部贯穿六盘山脉,西南部紧邻秦岭山脉,主要地貌类型为黄土丘陵、土石低山、河谷平原;三河源地区年平均气温  $4 \sim 10^\circ \text{ C}$ ,年平均降水量为  $180 \sim 700 \text{ mm}$ ,当地水资源较为匮乏,干旱缺水是基本区情,水资源调控能力不足。

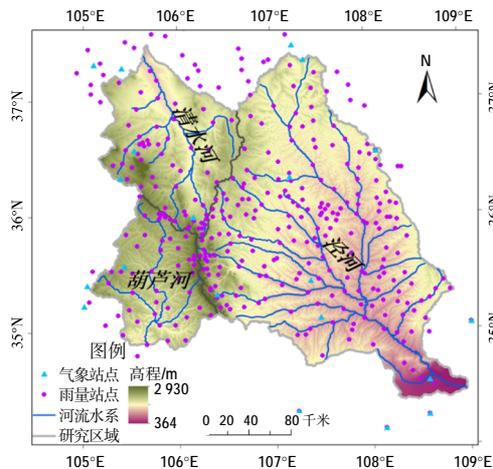


图 1 宁夏三河源地区地理位置及站点分布

Fig.1 Location and gauging station distribution of the Three River Source Region in Ningxia

### 1.2 数据来源与处理

本研究所采用数据大致分为卫星遥感数据、水文气象观测资料等,其中,卫星遥感数据选择美国航空航天局(NASA)MODIS-MOD16系列的8天合成数据产品作为实际蒸散发计算的参考数据,根据研究区地理位置和范围,获取MOD16产品2000~2017年全球正弦曲线投影SIN系统中轨道编号为h26v05的数据,并进行投影转换和重采样等预处理工作。筛选MOD16数据中的有效值,并逐栅格计算,乘以比例因子以还原真实值。降水和实测径流等水文资料从水利部水文局

刊印的黄河流域水文年鉴上摘录,选取研究区内及周边共367个雨量站的逐日降水观测资料,以及三个主要流域出口水文站的逐月平均流量实测数据,并进行整编计算和质量控制。按照下垫面条件和气候特征的相似性原则,对观测站点的实测序列进行适当插补延长,还原河川径流序列,保证资料的完整性良好。

## 2 研究方法

### 2.1 降水量空间插值方法

根据地表雨量站观测资料,由站点数据推求连续范围内的降水空间分布规律。采用空间插值方法生成宁夏三河源地区  $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$  空间分辨率的降水量空间分布栅格数据,为避免单一插值方法的缺陷,插值方法采用克里金插值法(Kriging Interpolation)、协同克里金插值法(Co-Kriging Interpolation)、反距离权重法(IDW—Inverse Distance Weighted)进行对比和评估,最终选择协同克里金插值法插值获取研究区域的栅格雨量。协同克里金插值法考虑到研究区域内高程信息变化对降水量的空间分布影响,在克里金插值方法的基础上,假设数据变化呈正态分布,通过对数据的空间分析,根据无偏估计和最小方差来确定加权系数<sup>[14]</sup>,考虑到了空间相关性的问题<sup>[15-16]</sup>,协同克里金插值法的表达式如下:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) + \lambda [y(x_0) - m_y + m_z] \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2)$$

式中:  $Z(x_0)$  为待插值点的估计值;  $Z(x_i)$  为第  $i$  个站点的实测值;  $n$  为参与计算的实测站点个数;  $y(x_0)$  为  $x_0$  处的高程;  $m_y$ 、 $m_z$  为高程和降雨量的全局平均值;  $\lambda_i$  和  $\lambda$  为相应权重系数。研究区域内的第二类信息(高程)连续可知且变化平稳,在协同克里金插值方法中选择球函数模型为基本变异函数模型,采用与计算点临近的12个观测站点的数据进行插值。

### 2.2 趋势分析

不同年份、不同地区的水文变量在空间分布上不同,年际变化趋势也不相同。为描述降水和实际蒸散发的年际变化规律,反映序列整体的上升或下降趋势,分别使用均值法和线性趋势估计法度量研究区域三个子流域每个栅格单元自2000年以来的水循环要素空间差异与变化趋势:

$$\bar{V}_{ij} = \sum_{t=p}^q V_{ij}^t / (q-p+1) \quad (3)$$

$$K = \frac{\sum_{t=p}^q t V_{ij}^t - \frac{1}{q-p+1} \left( \sum_{t=p}^q t \right) \left( \sum_{t=p}^q V_{ij}^t \right)}{\sum_{t=p}^q t^2 - \frac{1}{q-p+1} \left( \sum_{t=p}^q t \right)^2} \quad (4)$$

式中:  $t$  为年份 (取值为  $p \sim q$ );  $V_{ij}^t$  为栅格数据中  $t$  年对应第  $i$  行、第  $j$  列像元的变量值;  $K$  为趋势线斜率, 也称趋势值, 即把降雨或蒸散发等变量看作是时间的一元线性函数, 逐像元计算所得时序内的变量值线性拟合的系数。  $K > 0$  表明对应变量随时间的推移, 呈现出增加的趋势,  $K < 0$  表示变量随时间增长呈现出减小趋势, 其绝对值越大, 表示该像元内变量值随时间增加或减少得越快。如果回归方程的相关系数通过 0.05、0.01 的显著性水平检验 ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ), 则可判断在相应显著性水平下水文变量年际变化存在显著的趋势。

### 2.3 统计与频率分析

选用的三个水文站为流域出口控制站点, 桃园站对应泾河流域、泉眼山站对应清水河流域、秦安站对应葫芦河流域。分别选用三个站点的长系列水文资料, 对其进行可靠性、一致性、代表性的“三性”审查; 采用分别处理法, 对径流资料进行排序和经验频率计算, 考虑丰水年 ( $P \leq 12.5\%$ )、偏丰年 ( $12.5\% < P \leq 37.5\%$ )、平水年 ( $37.5\% < P \leq 62.5\%$ )、偏枯年 ( $62.5\% < P \leq 87.5\%$ )、枯水年 ( $P > 87.5\%$ ), 并对代表站年径流系列年型出现的频次进行统计。使用水文比拟法和建立相关关系, 对桃园站的实测径流系列资料进行插补展延, 再进行排序和年径流频率分析计算, 并使用皮尔逊 III 型曲线进行适线, 计算五种对应年型频率的设计年径流量。统计参数采用矩法估计初步估算, 年径流频率分析采用数学期望公式计算, 其统计参数采用均值、变差系数  $C_v$  和偏态系数  $C_s$  表示<sup>[7]</sup>。频率曲线线型采用皮尔逊 III 型, 以适线法调整确定。

## 3 结果分析

### 3.1 多年平均降水量时空分布特征

基于三种不同的空间插值方法, 将站点降水量插值后得到空间分辨率相同的多年平均降雨量栅格数据 (见图 2)。由结果可知, 多年平均降水量与高程具有相关性, 随着高程的增加, 降水量有增加的趋势 (见图 2b), 这与 Hevesi 等人的研究结果相符<sup>[18-19]</sup>。考虑到宁夏三河源地区内地形起伏变化较大, 高程差异可达

2 500m, 其对降水的影响不可忽略; 而反距离权重法产生的较明显的高值异常点易影响后续分析计算 (见图 2c), 综合插值结果的连续性和精确性, 本研究选择了引入高程信息作为第二类影响因素的协同克里金插值法 (见图 2b), 将计算结果制作出多年平均降水等值线图 (见图 2d), 作为反映研究区域空间降水分布情况的依据。

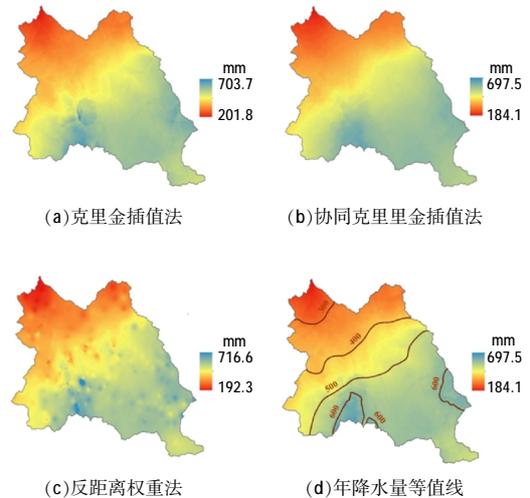


图2 不同空间插值方法计算的多年平均降水量结果对比  
Fig.2 Comparison of spatially interpolated multiyear average precipitation results using different spatial interpolation methods

采用不同插值方法得到的研究区多年平均降水量的空间分布规律大致相同, 呈现出明显的自东南向西北逐渐减小的空间分布特征。2000~2017 年间西北部清水河下游区域多年平均降水量最小, 为 300mm 以下; 泾河流域西部和宁夏泾源六盘山附近年均降水量最大, 为 600~700mm。其中, 300mm 降水量等值线大致沿六盘山余脉南华山北部至宁夏罗山西北部分布, 此地帯位于研究区清水河下游地区, 地形以黄土丘陵为主, 气候较为干旱。多年平均降水量大于 600mm 的区域多为海拔较高的山区, 森林覆盖率可达 50% 以上。

研究区各季节平均降水量分布情况 (见图 3) 可知宁夏三河源地区降水主要分布在夏季; 冬季降水较为稀少, 总体偏于干旱; 就年内降水量而言, 夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季; 各季节降水空间分布特点是东南部偏多、西北部偏少。趋势值计算和显著性检验结果 (见图 4) 显示, 2000~2017 年, 宁夏三河源地区 18% 的区域在 0.05 的显著性水平下 ( $P < 0.05$ ) 呈现出降水量增加的趋势, 主要分布在宁夏清水河中下游以及葫芦河上游; 同时, 该地区 36% 的区域在 0.05 的显著性水平下 ( $P <$

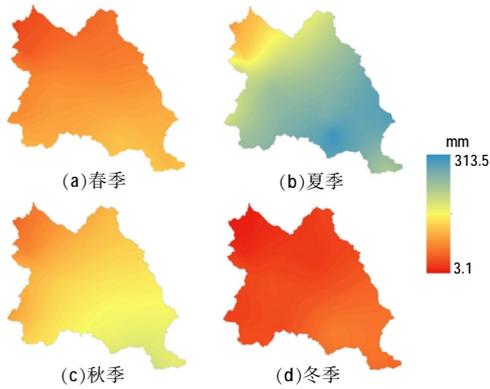


图3 研究区多年平均季节降水量空间分布

Fig.3 Multiyear average seasonal precipitation values in the study area

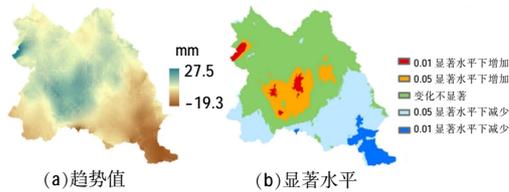


图4 研究区年降水量 2000~2017 年时间变化趋势

Fig.4 Trend of annual precipitation in the study area from 2000 to 2017

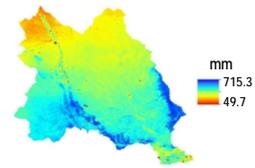
0.05)呈现出降水量减少的趋势,主要位于泾河下游平原地区。高海拔山区多年平均降水量在 400~600mm 波动,而降水量年际增长的趋势最为明显;泾河下游平原地区多年平均降水量为研究区内最大,约为 500~700mm,但其降水量年际变化呈现出显著减少的趋势。结果表明,平原地区降水量总体呈现显著减少的趋势,而在部分海拔较高的六盘山东北部等山区,降水量呈现出更为显著的增加趋势,这些结果与近些年山区植被覆盖率提高可能存在一定相互印证的关系。

### 3.2 基于卫星遥感的蒸散发时空分布特征

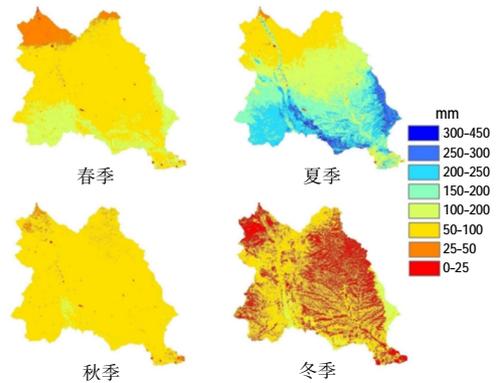
MOD16 产品的算法是在 Penman-Monteith 公式的基础上改进的,考虑了土壤表面蒸发、冠层截流水分蒸发和植物蒸腾<sup>[20-21]</sup>,能够较好地反映研究区实际蒸散发(AET)的情况。研究区多年平均 AET 呈现出自西北向东南逐渐递增的空间变化格局(见图 5a),与多年平均降水量的空间分布规律基本对应,降水量较小的地区,多年平均 AET 值也相对较小。中宁附近多年平均 AET 值最小,约为 150.0 mm/a;降水相对丰沛的六盘山、南华山地区,多年平均 AET 值分别达到 495.3 mm/a 和 513.9 mm/a。靠近河流的平原地区多年平均蒸散发总量明显大于内陆地区,且不同季节的蒸散量

相差较大,地表蒸散量空间分布差异显著(见图5b),总体上,年内 AET 值夏季>春季>秋季>冬季,和年内降水分布略有差别,这与各类植物和经济作物的分布和生长特征有关。

研究区域 2000~2017 年期间 AET 增长趋势值的空间分异性较为明显,六盘山区 AET 年际变化趋势值最大(见图 6a),增长率为 9.7%,与降水量增加的趋势具有一致性。宁夏三河源地区 79%的区域在 0.05 的显著性水平下( $P<0.05$ )呈现出 AET 值增加的趋势,其中研究区 19%的区域通过了 0.01 的显著性水平检验( $P<0.01$ ),AET 值呈现出更为显著的增加趋势,主要位于六盘山区和泾河上游,且蒸散量较大。经过进一步分析,不同土地利用类型的实际蒸散发分布规律为:林地>耕地>草地。蒸散量显著增加的地区为多为河谷平



(a)研究区多年平均 AET 分布



(b)研究区多年平均四季 AET 分布

图5 研究区 2000~2017 年多年平均实际蒸散发量和多年平均四季实际蒸散发量空间分布

Fig.5 Spatial distributions of multiyear average yearly and seasonal evapotranspiration values from 2000 to 2017 in the study area

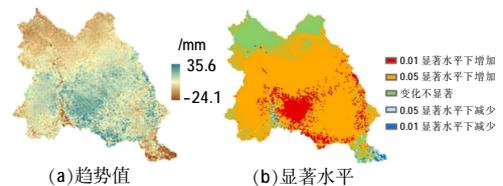


图6 研究区年实际蒸散发量(AET)2000~2017 年时间变化趋势

Fig.6 Trend map of annual actual evapotranspiration in the study area from 2000 to 2017

原和丘陵,该地区近年来耕地面积不断扩张,农业灌溉活动频繁。而 AET 值显著( $P<0.05$ )减少的区域为北部清水河流域和东南部泾河下游地区(见图 6b),占 5%,该地区降水变化同样具有减少的趋势。其他地区近年来蒸散量呈波动上升趋势。

### 3.3 地表径流分析与评价

对研究区域三个子流域的代表站年径流系列进行频率计算,并对不同年型出现的频次进行统计(见表 1),出现频次是指不同年型出现的次数在对应长度的年径流系列中所占的比例。通过临近流域的同期年径流对比、长短系列的样本分布参数对比大致接近,验证了资料的代表性。经过频率计算并采用 P-III 型曲线适线,选取五种年型对应频率的年径流量,由设计年径流成果得知(见表 2),在不同频率下,泾河流域地表水资源最为丰富,占宁夏三河源地区地表水资源总量的 72%以上,枯水年对全区地表水资源的贡献可达 89%;清水河地理位置更偏西北,地表水资源量最少,是黄河上游典型的缺水型流域。而近年的丰枯年型为平水年和枯水年居多,尤其是葫芦河,近年来平均径流量明显小于历史平均值;三个子流域各自的枯水年地表径流量仅为平水年的 1/6~1/3。宁夏三河源地区以农业为主,夏灌容易受区域降水不均衡影响,而全区年径流系数常年小于 0.1,降水转化为径流的比例较小,水资源可利用量受限。因此,合理规划与利用宁夏三河源地区乃至黄河流域干旱半干旱区域的水资

源,是尤为突出和关键的问题。

### 3.4 各流域水文要素对比与分析

根据宁夏三河源地区各流域 2000~2017 年关键水文要素的统计(见图 7),考虑流域水量平衡:

$$P-R=AET+\Delta S \quad (5)$$

式中: $P$ 为年降水量(mm); $R$ 为年径流深(mm); $AET$ 为实际年蒸散量(mm); $\Delta S$ 为水储量变化值(mm)。降水是宁夏三河源地区水资源最主要的来源,在年尺度上,水循环关键要素中降水同径流与实际蒸散发之和存在差异,导致一些年份出现储水量的盈余和亏缺。在偏丰水年,如 2007 和 2011 年,降水较为丰沛,在三个子流域上降水大于蒸散发和径流之和,水分盈余,存在水储量增加的情况;而在偏枯水年,天然降水量显著偏少,年径流减少,且实际蒸散发量超过降水量,水分亏缺,此时存在地下水的补给。尤其是清水河流域(见图 7c),降水量少、蒸散发作用强,近 10 年间就有 5 年存在区域储水量亏缺的现象,不利于农业和经济的发展。流域尺度上,泾河流域水资源量最为丰富,而清水河流域水资源量最少,可考虑合理利用引黄灌区,适当调配流域水资源。

近期宁夏三河源地区水循环要素变化的主要影响因素可能源自人类活动,如土地利用变化、农耕经济迅速发展导致的大型引灌区的建设、水土保持和植树造林工程的实施、城市化发展等,而对这些因素的影响定量化的研究尚需深层次的探讨。

表1 代表站年径流系列丰、平、枯年型出现频次统计

Table1 Statisics of occurrence of annual runoff volume under different statistical quantiles at representative stations

水文站	年数 $la$	丰水年		偏丰水年		平水年		偏枯水年		枯水年		多年平均径流量 $/10^8m^3$
		次数	频次/%	次数	频次/%	次数	频次/%	次数	频次/%	次数	频次/%	
桃园	29	3	10.3	8	27.6	7	24.1	8	27.6	3	10.3	14.51
秦安	39	5	12.9	10	25.6	10	25.6	10	25.6	4	10.3	3.22
泉眼山	34	4	11.8	9	26.5	8	23.5	9	26.5	4	11.8	1.35

表2 不同频率年径流量计算成果

Table2 Calculation results of annual runoff volume under different probabilities of exceedance

水文站	对应流域	$C_v$	$C_s$	$C_v/C_s$	P-III 曲线 拟合度	不同频率下年径流量设计值/ $10^8m^3$					2000~2017 年 平均径流量 $/10^8m^3$
						5%	25%	50%	75%	95%	
桃园	泾河	0.6	1.86	3.1	0.956	31.8	18.1	11.99	8.24	5.82	9.11
秦安	葫芦河	0.71	1.19	1.68	0.982	7.58	4.42	2.78	1.54	0.37	1.06
泉眼山	清水河	1.25	3.27	2.62	0.892	4.71	1.6	0.66	0.37	0.31	1.13

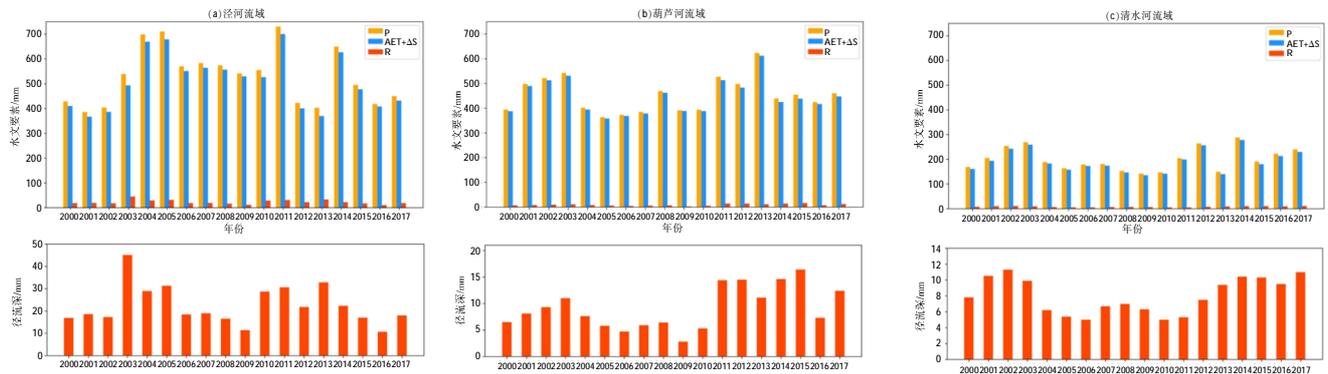


图7 宁夏三河源各流域源区 2000~2017 年关键水文要素年均值

Fig.7 Time series of annual values of key hydrological variables of the three river source areas from 2000 to 2017

## 4 结论与展望

基于水文实测资料和卫星遥感数据,通过统计频率分析、时间趋势分析和水量平衡计算,揭示了宁夏三河源地区近 20 年的水循环时空格局和演变规律。主要结论为:

(1)宁夏三河源地区 2000~2017 年的降水量空间上呈现出自东南向西北逐渐减少的分布特征。研究区 18%的区域在 0.05 的显著性水平下 ( $P < 0.05$ ) 呈现出降水量增加的趋势,36%的区域在 0.05 的显著性水平下呈现出降水量减少的趋势。年内降水量呈现夏季>秋季>春季>冬季的特点。

(2)研究区的实际蒸散量呈现出自西北向东南逐渐递增的变化特征,与多年平均降水量的空间分布情况基本对应。约 80%地区在 0.05 的显著性水平下 ( $P < 0.05$ ) 呈现出 AET 值增加的趋势,且六盘山区 AET 年际变化趋势值最大。年内 AET 值存在夏季>春季>秋季>冬季的特点。

(3)研究区 2000~2017 年间年径流量偏少,小于近 40 年历史平均值,丰枯年型以平水年和枯水年居多。泾河流域地表水资源最为丰富,对全区地表水资源的贡献最多;清水河地表水资源量最少;葫芦河近年来平均年径流量明显小于历史平均值,干旱缺水的情况最为明显。

(4)在水量平衡方面,蒸散发和径流量等支出项之和与降水量在一些年份出现水分盈余和水分亏缺现象,造成流域地表和地下储水量发生变化;近年来地表地下水总储水量的出现一定亏缺。

### 参考文献:

[1] 张小侠. 雅鲁藏布江流域关键水文要素时空变化规律研究[D]. 北

京:北京林业大学,2011. (ZHANG Xiaoxia, Spatial-Temporal Evolutional Laws of the Key Hydrological Elements in Yarlung Zangbo River Basin [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese))

- [2] 马颖,张松涛. 海河水系降水与径流趋势变化及突变分析[J]. 海河水利, 2010(6):4-6. (MA ying, ZHANG Songtao, Analysis on trend and catastrophe of precipitation and runoff in Hai River River system[J]. Haihe Water Resources, 2010(6):4-6. (in Chinese))
- [3] 郝振纯,苏振宽. 土地利用变化对海河流域典型区域的径流影响[J]. 水科学进展, 2015,26(4):491-499. (HAO Zhenchun, SU Zhenkuan. Effects of land use change on runoff in the typical areas in Haihe River basin [J]. Advances in Water Science, 2015,26(4):491-499. (in Chinese))
- [4] Zhang K, Kimball J S, Running S W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2016,3(6):834-853.
- [5] 王宏伟. 流域蒸散发量遥感估算及灵敏度分析—以湟水河流域为例[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012. (WANG Hongwei. Evapotranspiration Estimated by Remote and Sensitivity Analysis in Huangshui Basin [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2012. (in Chinese))
- [6] Kalma J D, McVicar T R, McCabe M F. Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data [J]. Surveys in Geophysics, 2008,29(4-5):421-469.
- [7] Li Z L, Tang R, Wan Z, et al. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data [J]. Sensors, 2009,9(5):3801-3853.
- [8] Zhang K, Kimball J S, Nemani R R, et al. A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006 [J]. Water Resources Research, 2010,46(9).
- [9] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. Nature, 2010,467(7318):951.
- [10] Mu Q, Heinsch F A, Zhao M, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global

- meteorology data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007,111(4): 519-536.
- [11] Wan Z, Zhang K, Xue X, et al. Water balance -based actual evapotranspiration reconstruction from ground and satellite observations over the conterminous United States [J]. *Water Resources Research*, 2015,51(8):6485-6499.
- [12] 贺添, 邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001-2010 年蒸散发时空格局变化分析[J]. *地球信息科学学报*, 2014,16(6):979-988. (HE Tian, SHAO Quanqin. Spatial-temporal variation of terrestrial evapotranspiration in china from 2001 to 2010 using MOD16 products [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2014,16(6):979-988. (in Chinese))
- [13] 叶红, 张廷斌, 易桂花, 等. 2000-2014 年黄河源区 ET 时空特征及其与气候因子关系[J]. *地理学报*, 2018,73(11):69-86. (YE Hong, ZHANG Tingbin, YI Guihua, et al. Spatio-temporal characteristics of evapotranspiration and its relationship with climate factors in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018,73(11):69-86. (in Chinese))
- [14] 朱芮芮, 李兰, 王浩, 等. 降水量的空间变异性 and 空间插值方法的比较研究[J]. *中国农村水利水电*, 2004(7):25-28. (ZHU Ruirui, LI Lan, WANG Hao, et al. Comparative study on the spatial variability of rainfall and its spatial interpolation methods [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2004(7):25-28. (in Chinese))
- [15] 石朋, 芮孝芳. 降雨空间插值方法的比较与改进[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2005,33(4):361-365. (SHI Peng, RUI Xiaofang. Comparison and improvement of spatial rainfall interpolation methods [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2005,33(4):361-365. (in Chinese))
- [16] 李巍, 范文义, 毛学刚, 等. 降雨量空间插值方法比较研究[J]. *安徽农业科学*, 2014,42(12):3667-3669. (LI Wei, FAN Wenyi, MAO Xuegang, et al. Comparison of spatial interpolation methods for rainfall [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014,42(12): 3667-3669. (in Chinese))
- [17] SL278-2002, 水利水电工程水文计算规范[S]. (SL278-2002, Regulation for Hydrology Computation of Water Resources and Hydropower Projects [S]. (in Chinese))
- [18] Hevesi J A, Istok J D, Flint A L. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I: structural analysis [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992,31(7): 661-676.
- [19] Borga M, Vizzaccaro A. On the interpolation of hydrologic variables: formal equivalence of multiquadratic surface fitting and kriging [J]. *Journal of Hydrology*, 1997,195(1-4):160-171.
- [20] Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(8):1781-1800.
- [21] 赵燊, 陈少辉. 基于台站和 MOD16 数据的山东省蒸散及潜在蒸散时空变化[J]. *地理科学进展*, 2017,36(8):1040-1047. (ZHAO Shen, CHEN Shaohui. Spatiotemporal variations of evapotranspiration and potential evapotranspiration in Shandong Province based on station observations and MOD16 [J]. *Progress in Geography*, 2017,36(8): 1040-1047. (in Chinese))

## Study on Spatiotemporal Variability and Changes of Key Water Cycle Elements in the Three River Source Area of Ningxia from 2000 to 2017

CAO Yi<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Ke<sup>1,2,3,4</sup>, LI Zhijia<sup>2</sup>, ZHANG Weijiang<sup>5</sup>, ZHANG Jing<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. China Meteorological Administration-Hohai University Joint Laboratory of Hydrometeorology, Nanjing 210098, China; 5. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** To predict the changes in water resources in the context of climate changes in northwest China, it is of great importance to explore changes in the key elements of water cycle in typical inland basins of this region. Based on the ground-observed hydrological data and MODIS satellite data, we applied the linear trend analysis and statistical frequency analysis to investigate the spatiotemporal patterns of precipitation, actual evapotranspiration (AET), and runoff of the Three River Source Area of Ningxia from 2000 to 2017. The results show that annual AET and precipitation in the study area decreases from southeast to northwest, which is consistent with the spatial pattern of climatic condition. Furthermore, about 18% of the region shows significant ( $P < 0.05$ ) increasing trend in precipitation, while 79% of the region shows significant ( $P < 0.05$ ) increasing trend in AET. Since 2000, annual runoff of the main rivers is generally lower than the normal. In recent years, changes in water storage tend to deficit rather than surplus, implying that water resource shortage in this region is deteriorating during the study period.

**Key words:** water cycle; spatio-temporal change; MODIS; surface water resources