

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0002

赵勇,何国华,李海红,等.基于Choudhury-Yang公式的泾河流域蒸散发归因分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):08-14.  
ZHAO Y, HE G H, LI H H, et al. Attribution analysis on evapotranspiration changes in the Jinghe River basin based on Choudhury-Yang equation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 08-14. (in Chinese)

# 基于 Choudhury-Yang 公式的泾河流域 蒸散发归因分析

赵勇,何国华,李海红,王庆明,刘寒青

(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)

**摘要:**1999年以来黄土高原实施了大规模的植树造林工程,但该工程是否加剧了区域水资源压力引发了社会的广泛讨论。为科学解析黄土高原水循环演变过程,基于 Choudhury-Yang 公式计算了黄土高原泾河流域 2000—2014 年蒸散发变化,并定量区分了气候因子和下垫面因子对流域蒸散发变化的贡献。研究表明:退耕还林工程实施以来,泾河流域实际蒸散发呈下降趋势,年均降幅为 $-2.28$  mm;降水是该流域蒸散发变化的主导因子,其平均贡献率达到 76.8%,远大于潜在蒸散发(40.8%)和下垫面变化( $-17.5\%$ )的影响。基于 Choudhury-Yang 公式的蒸散发归因识别方法,对定量区分气候和下垫面变化对流域蒸散发的影响具有重要的科学意义。

**关键词:**Choudhury-Yang 公式;蒸散发;气候变化;下垫面变化;泾河流域

中图分类号:P426 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Attribution analysis on evapotranspiration changes in the Jinghe River basin based on Choudhury-Yang equation

ZHAO Yong, HE Guohua, LI Haihong, WANG Qingming, LIU Hanqing

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** A large-scale afforestation project has been implemented in the Loess Plateau since 1999, but whether the project has intensified regional water supply pressure is being widely debated. In order to scientifically analyze the water cycle process in the Loess Plateau, this study calculated the evapotranspiration changes of the Jinghe River basin based on the Choudhury-Yang equation during 2000 to 2014, and quantitatively distinguished the contribution of climatic factors and that of underlying surface factors to evapotranspiration changes. Results showed that, since the implementation of the afforestation project, the evapotranspiration of the Jinghe River basin has slightly declined at an annual average rate of  $-2.28$  mm. Precipitation was the dominant factor of evapotranspiration changes in the study period, with an average contribution rate of 76.8%, which was far greater than the contribution of potential evapotranspiration change (40.8%) and underlying surface change ( $-17.5\%$ ). This study shows that the Choudhury-Yang equation has important scientific significance for quantitatively distinguishing the effects of climate and underlying surface changes on evapotranspiration.

**Key words:** Choudhury-Yang equation; evapotranspiration; climate change; underlying surface change; Jinghe River basin

收稿日期:2018-10-09 修回日期:2018-10-11 网络出版时间:2018-10-17

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181012.1447.004.html>

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401407);国家杰出青年科学基金(51625904)

作者简介:赵勇(1977—),男,安徽宿州人,教授级高级工程师,主要从事水循环模型构建及水资源管理方面研究。E-mail: zhaoyong@iwhr.com

通信作者:何国华(1990—),男,甘肃庆阳人,博士研究生,主要从事生态水文及水-能源纽带关系研究。E-mail: hegh@iwhr.com

自 20 世纪 50 年代以来,黄土高原实施了大规模的生态修复,特别是 1999 年底实施的退耕还林政策,显著改善了该区域的植被状况。但也有相关研究表明,退耕还林政策会改变黄土高原水循环过程,加剧该区域水资源短缺的压力,特别是近十多年来,黄土高原许多流域径流量急剧衰减,引起了社会各界关于退耕还林工程生态效益的广泛讨论<sup>[1-3]</sup>。蒸散发作为连接大气水、地表水和土壤水的纽带,是影响水循环过程的关键变量,分析蒸散发变化规律及其影响因素,成为科学解析黄土高原水循环过程的关键环节<sup>[4-5]</sup>。

蒸散发是一个复杂的物理过程,科学分析蒸散发变化的归因历来是地理科学研究的热点,许多学者曾通过不同手段对蒸散发变化进行归因分析。例如,党素珍等<sup>[6]</sup>通过蒸散发与气象因子之间的相关关系,分析了泾河上游不同气象因子对蒸散发的贡献;朱非林等<sup>[7]</sup>通过趋势相关法分析了汉江流域气象因子和蒸散发的关系;Zou 等<sup>[8]</sup>则通过敏感性分析确认了我国内陆河流域人类活动对蒸散发改变的影响更大。2000 年,Droogers<sup>[9]</sup>通过 SWAP 模型分析认为土壤含水量是影响土耳其西部地区蒸散发变化的关键指标。Fang 等<sup>[10]</sup>则结合 SWAT 模型和新安江模型讨论了新疆地区农业活动对蒸散发的影响。总的来看,相关性分析和水文模型是目前对蒸散发进行归因分析研究的两个主要手段。相关性分析计算方法简单,但缺少物理机制;水文模型可以较好地刻画区域水循环过程,但由于模型的复杂性和不确定性,往往需要大量的输入参数,并花费较长时间进行调参。

杨大文在前人蒸散发互补理论研究的基础上,推导出服从水分和能量平衡原理的蒸散发表达公式,这就是被国际同行命名为 Choudhury-Yang 公式的流域水热耦合平衡方程<sup>[11]</sup>。由于表达式相对简单,该方程已在全国多个流域进行应用,并被证明具有较高的准确性<sup>[12-13]</sup>。目前,该方程已被广泛应用于径流变化的归因分析中,但关于蒸散发变化的归因分析研究还较少。基于 Choudhury-Yang 公式,本研究建立了能够反映气候和下垫面变化对蒸散发影响的分析方法。考虑到泾河流域是黄土高原植被恢复最明显的地区<sup>[14]</sup>,本研究以泾河流域为研究对象,并将整个研究时期分为 3 段,分别是退耕还林工程实施初期(2000—2004 年),中期(2005—2009 年)以及后期(2010—2014 年)。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

泾河是渭河的一级支流,黄河的二级支流,发源

于宁夏六盘山,横跨宁、甘、陕三省区,在陕西省高陵县注入渭河。泾河流域面积 45 421 km<sup>2</sup>(34°14′~38°10′N,105°49′~108°58′E),海拔范围为 513~2 922 m(图 1)。泾河流域是典型的半干旱地区,多年平均降雨量(1982—2014 年)为 450 mm,而实际蒸散发量则超过降水量的 80%<sup>[15]</sup>。自 20 世纪 80 年代以来,由于严重的水土流失和生态退化,泾河流域实施了大规模的生态修复,特别是 1999 年底开始实施的退耕还林政策,显著改变了泾河流域的植被状况。目前,泾河流域夏季 NDVI(normalized difference vegetation index,归一化差分植被指数)已经达到 0.7,比 2000 年同期增加了 75%。

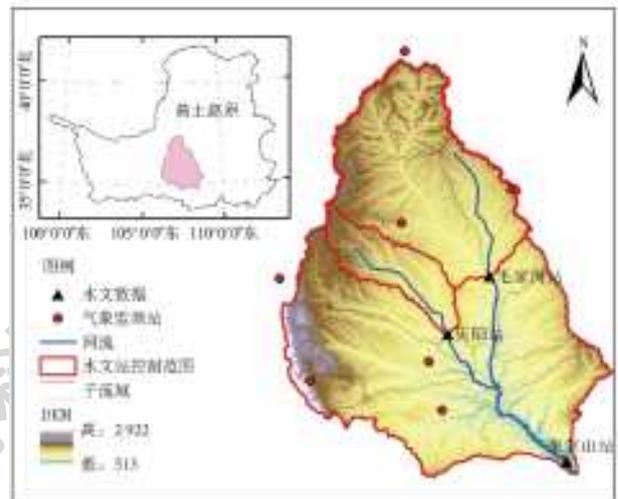


图 1 泾河流域位置

Fig. 1 Location of the Jinghe River basin

### 1.2 数据来源

本研究所用数据主要分为两类。第一类为 Choudhury-Yang 公式所需参数,包括泾河流域逐日气象数据(降水、最低温度、最高温度、相对湿度、日照时数、大气压、风速),泾河流域土壤类型数据,DEM 数据(digital elevation model,数字高程模型)和 NDVI 数据。第二类为校验 Choudhury-Yang 公式计算结果所需数据,主要为泾河流域部分水文站年径流量数据。泾河流域逐日气象数据来自于国家气象信息中心;泾河流域土壤类型数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心,该土壤类型数据是由《1:100 万中华人民共和国土壤图》数字化生成;DEM 数据来自于美国航空航天局 Earthdata 数据网,该数据空间分辨率分别为 30 m;NDVI 数据下载于地理空间数据云,该数据来自于美国航空航天局 MODIS 卫星,空间分辨率为 500 m;泾河流域水文站年径流量数据则来自于 2000—2014 年《泾河流域水文年鉴》。

## 2 研究方法

### 2.1 基于 Choudhury-Yang 公式的蒸散发计算

根据杨大文等人推导出的蒸散发公式,当气候干燥时,区域的实际蒸散发由水量决定;当气候湿润时,区域的实际蒸散发则由能量决定<sup>[11]</sup>。该公式表达式为

$$ET = \frac{P \cdot ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (1)$$

式中:  $ET$  为多年平均年蒸散发量(mm);  $P$  为多年平均年降水量(mm);  $ET_0$  为多年平均年潜在蒸散发量(mm);  $n$  为反映流域下垫面特征的参数。

$n$  是 Choudhury-Yang 公式的关键计算参数,由地形、土壤类型和植被覆盖度共同决定<sup>[16]</sup>。2009 年,杨大文等<sup>[17]</sup>通过大量统计分析,提出计算黄河流域下垫面特征参数  $n$  的计算公式。由于泾河流域属于黄河流域,故本研究采用此公式计算泾河流域的下垫面特征参数。

$$n = 5.755 \left( \frac{k_s}{i_r} \right)^{-0.368} M^{0.292} \exp(-5.428 \tan \beta) \quad (2)$$

式中:  $k_s$  为土壤饱和导水率(mm/h);  $i_r$  为年降水强度;  $M$  为年植被覆盖度;  $\tan \beta$  为流域平均坡度。

$ET_0$  为流域潜在蒸散发,通常由彭曼公式计算,具体计算公式和参数选择参考孙福宝等研究成果<sup>[18]</sup>。

### 2.2 蒸散发变化归因分析

$P$ 、 $ET_0$  和  $n$  被认为是相互独立的变量<sup>[19]</sup>,因此,流域蒸散发  $ET$  可以表示为  $P$ 、 $ET_0$  和  $n$  的函数,并表达成以下全微分的形式

$$\frac{dET}{dt} = \frac{\partial ET}{\partial P} \frac{dP}{dt} + \frac{\partial ET}{\partial ET_0} \frac{dET_0}{dt} + \frac{\partial ET}{\partial n} \frac{dn}{dt} \quad (3)$$

式中:  $t$  表示时间间隔。利用 Choudhury-Yang 公式推求  $P$ 、 $ET_0$  和  $n$  的偏微分形式,其表达式为

$$\frac{\partial ET}{\partial P} = \frac{ET}{P} \left( \frac{ET_0^n}{P^n + ET_0^n} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial ET}{\partial ET_0} = \frac{ET}{ET_0} \left( \frac{P^n}{P^n + ET_0^n} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial ET}{\partial n} = \frac{ET}{P} \left( \frac{\ln(P^n + ET_0^n)}{n} + \frac{(P^n \ln P + ET_0^n \ln ET_0)}{P^n + ET_0^n} \right) \quad (6)$$

利用式(3)–(6),可以分析降水变化、潜在蒸散发变化和下垫面变化对某时段蒸散发变化的贡献。需要说明的是,下垫面参数  $n$  由地形、土壤类型和植被覆盖度共同决定。在某一个确定的流域,地形和

土壤条件相对稳定,因此下垫面参数  $n$  主要受植被覆盖度变化的影响。对于泾河流域来讲,2000 年以后引起植被覆盖度变化的主要原因则是大规模退耕还林和封山育林。

### 2.3 蒸散发计算结果校核

泾河流域现有外调水工程为甘肃环县扬黄工程,该工程 2012 年开始通水,至 2017 年累计调水量 2 392 万  $m^3$ 。由于调水规模较小,本研究未考虑调水工程对  $ET$  的影响,故泾河流域水量平衡公式为

$$P = R + ET + \Delta G + \Delta S + \Delta I \quad (7)$$

式中:  $P$  为某一时段降水深(mm);  $R$  为某一时段径流深(mm);  $\Delta G$  为某一时段流域地下水蓄变量(mm);  $\Delta S$  为某一时段流域土壤水蓄变量(mm);  $\Delta I$  为某一时段流域库容蓄变量(mm)。

通常认为多年平均状态下,流域地下水、土壤水和水库库容蓄变量变化较小,故泾河流域水量平衡公式可以简化为

$$ET = P - R \quad (8)$$

利用式(8),可以对 Choudhury-Yang 公式计算结果进行校核。

### 2.4 变化趋势分析

Mann-Kendall(M-K) 检验是一种有效的非参数统计检验方法,被广泛应用于各种因子的时间序列分析,因此,本研究采用 M-K 检验分析泾河流域降水、潜在蒸散发、实际蒸散发和 NDVI 的变化趋势。考虑到 M-K 检验应用广泛,故本文不再详述其计算过程,关于 M-K 检验的计算公式和相关参数取值参考郭志起和王秀茹的研究成果<sup>[20]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 泾河流域蒸散发计算结果校核

根据式(8),本研究采用庆阳水文站、毛家河水文站、张家山水文站(泾河流域把口站)2000—2014 年实测径流量数据,以及各水文站对应区域 2000—2014 年降水数据,验证 Choudhury-Yang 公式计算结果准确性。从图 2 可以看出,基于 Choudhury-Yang 公式计算的蒸散发与实测蒸散发较为吻合,计算值与实际值的决定系数( $R^2$ )达到了 0.87,均方根误差(RMSE)为 50 mm,而相对误差则为 11%。从图 2 还可以看出,泾河流域蒸散发计算值普遍小于实际值,这是由于 Choudhury-Yang 公式未考虑水库蒸发、农业灌溉蒸发等人类活动影响,导致一部分蒸散发水量未被统计。总的来看,Choudhury-Yang

公式能够较为准确的计算泾河流域蒸散发,其计算结果是合理和可信的。

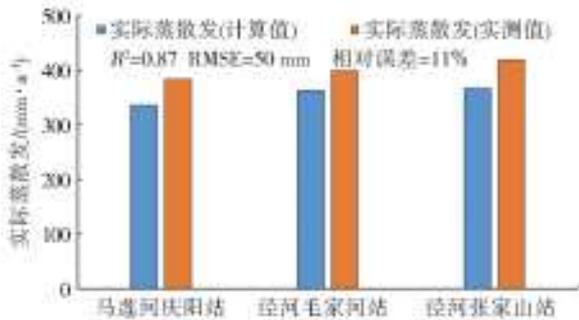


图2 2000—2014年蒸散发计算平均值与实测平均值对比  
Fig. 2 Comparison of the estimated ET and observed ET at 3 stations in the Jinghe River basin during 2000 to 2014

### 3.2 泾河流域蒸散发时空变化

#### 3.2.1 泾河流域蒸散发时间变化

由式(1)和(2)可知,降水、潜在蒸散发和植被生长条件是决定区域蒸散发的3个关键指标。因此,本研究通过M-K检验分析了2000—2014年泾河流域年降水量、年潜在蒸散发量、NDVI值和年实际蒸散发的变化情况(图3)。自2000年开始,泾河流域年降水量整体表现出下降的趋势,年均降幅达到-1.66 mm;分段来看,2000—2004年,泾河流域年

降水明显增加( $M=1.38$ ,90%置信区间),年均增幅高达16.51mm,2005—2009年和2010—2014年,流域降水量则表现为降低的趋势,年均降幅分别为-4.15 mm和-1.58 mm。2000—2014年,泾河流域潜在蒸散发也整体出现显著下降趋势( $M=-2.08$ ,95%置信区间),其中2000—2009年的平均降幅为-3.23 mm( $M=-0.88$ ,未通过90%置信区间检验),但从2010年开始,泾河流域潜在蒸散发明显上升,年均升幅达到11.43 mm( $M=1.29$ ,90%置信区间)。由于大规模退耕还林,泾河流域NDVI过去十多年持续上升,具体从2000年的0.3上升到2014年的0.36,增加了20%;分段来看,泾河流域2000—2004、2005—2009、2010—2014年的NDVI年均变化率分别为0.005,0.004和0.007。

伴随着气候条件和下垫面条件的变化,泾河流域2000—2014年蒸散发也整体表现为下降趋势,年均降幅为2.28 mm。从分段变化趋势来看,蒸散发的变化趋势与降水变化趋势相同;2000—2004年,泾河流域蒸散发显著增加( $M=1.32$ ,90%置信区间),增幅为10.59 mm/a,但2005—2009年和2010—2014年,泾河流域蒸散发则呈现出下降趋势,年均降幅分别达到-8.17 mm和-3.72 mm。

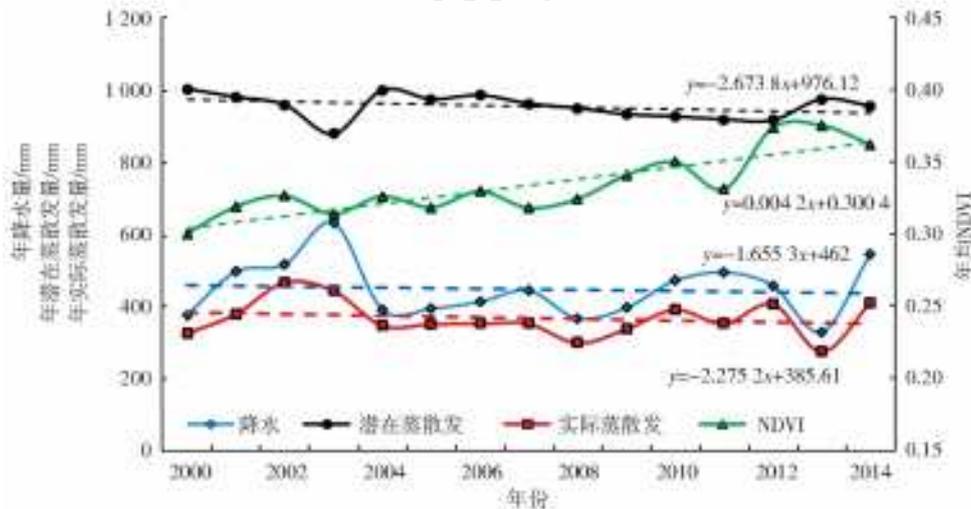


图3 泾河流域2000—2014年降水、潜在蒸散发、实际蒸散发和NDVI的逐年变化  
Fig. 3 Change trends for average annual precipitation, annual potential evapotranspiration, annual actual evapotranspiration, and NDVI from 2000-2014 in Jinghe River basin

#### 3.2.2 泾河流域蒸散发空间变化

泾河流域不同时期蒸散发空间变化见图4。从空间上看,泾河流域蒸散发表现出从西北到东南逐渐增加的特点。2000—2004年,泾河流域年平均实际蒸散发量为394 mm,其中大于400 mm的高值区面积为19 615 km<sup>2</sup>,占整个流域面积的43%;2005—2009年,泾河流域年平均实际蒸散发降低到340 mm,其中高值区面积占整个流域面积的22%;2010—2014年,泾河

流域年平均实际蒸散发则为369 mm,其中高值区面积为13 076 km<sup>2</sup>,占整个流域面积的29%。

泾河流域南部地区是该流域植树造林工程主要实施区,也是蒸散发变化最为剧烈的地区。张荣华<sup>[21]</sup>根据NDVI变化和实际蒸散发变化的空间相关性,分析认为植树造林工程是泾河流域实际蒸散发变化主要影响因素;但参考Gaoetal的研究<sup>[22]</sup>,南部地区同样也是泾河流域降水和潜在蒸散发变化最

为明显的地区,因此,仅利用空间相关性分析很难识别该区域实际蒸散发的控制性要素。

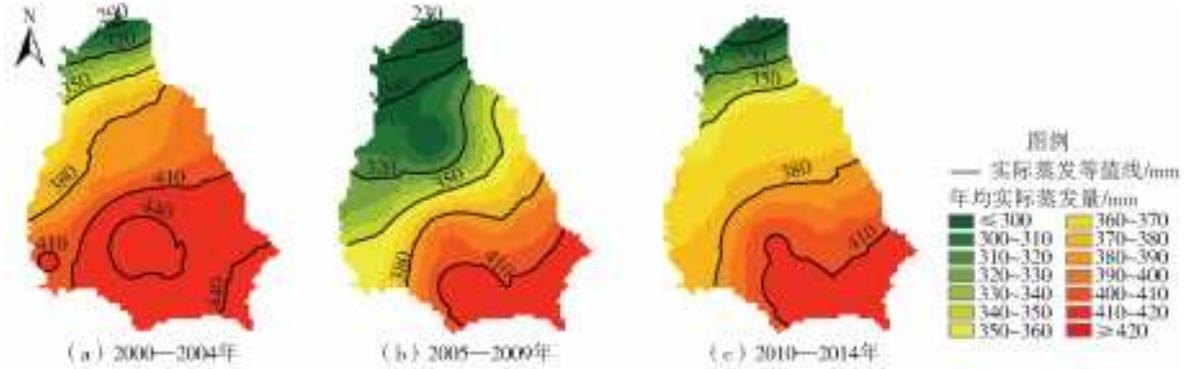


图 4 泾河流域 2000—2014 年实际蒸散发空间变化

Fig. 4 Spatial distribution of average actual ET during 2000—2014 in Jinghe River basin

### 3.3 泾河流域蒸散发变化归因分析

根据式(3)–(6),泾河流域不同时期蒸散发变化及其归因分析见表 1。整体来看,降水变化是影响蒸散发变化的最主要因素,其贡献率为 76.8%,大于潜在蒸散发和下垫面特征参数的影响。在 2000—2004 年,泾河流域蒸散发年均变化率为 10.59 mm,其中降水的贡献为 102.4%,而潜在蒸散发和下垫面特征的贡献仅分别为 -10.3% 和 7.9%。2005—2009 年,泾河流域蒸散发年均变化率为 -8.17 mm,其中降水的贡献为 -7.76 mm,这

说明 2005—2009 年降水量的减少是蒸散发减少的主要原因。2010—2014 年,泾河流域蒸散发呈现出减少趋势,年均变化率为 -3.72 mm,其中降水、潜在蒸散发和下垫面特征参数变化的贡献率分别为 132.3%、-25.9% 和 -73.3%,这表明降水是此期间唯一对蒸散发变化有正向贡献的因素。从空间变化看,在 2000—2014 年,除了一个气象站的实际蒸散发变化主要受下垫面变化的影响外,其他站点的实际蒸散发变化都主要受降水变化的影响(图 5)。

表 1 实际蒸散发变化归因分析

Tab. 1 The attribution analysis of actual ET changes

时段	$\frac{\partial ET}{\partial P} \frac{dP}{dt}$	$\frac{\partial ET}{\partial ET_0} \frac{dET_0}{dt}$	$\frac{\partial ET}{\partial n} \frac{dn}{dt}$	$\frac{dET}{dt}$	不同因素对实际蒸散发变化的贡献率/%		
					P	ET <sub>0</sub>	n
2000—2004	10.85	-0.64	0.84	10.59	102.4	-10.3	7.9
2005—2009	-7.76	-0.57	0.14	-8.17	94.9	6.9	-1.8
2010—2014	-4.92	0.78	0.19	-3.72	132.3	-25.9	-6.4
2000—2014	-1.75	-0.93	0.40	-2.28	76.8	40.8	-17.5

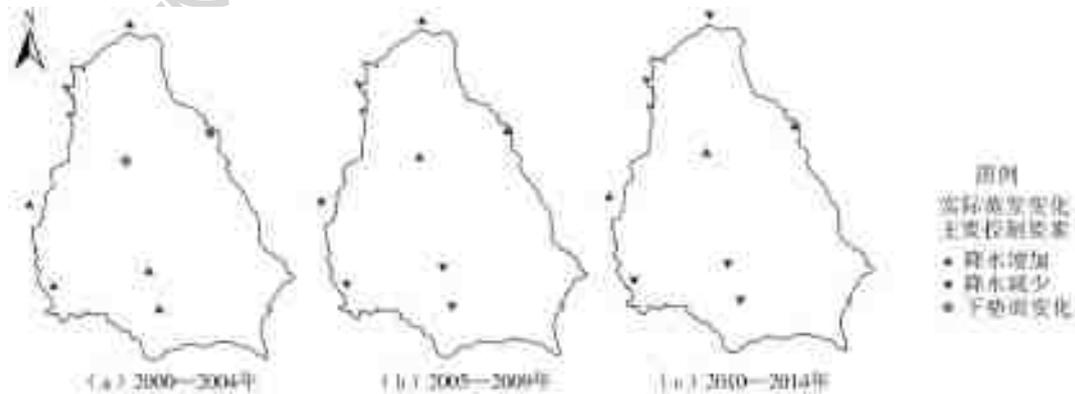


图 5 泾河流域 2000—2014 年不同气象站点实际蒸散发归因分析

Fig. 5 The attribution analysis of actual ET changes at each meteorological station in Jinghe River basin during 2000 to 2014

总的来看,从 2000 年开始,尽管植树造林工程显著改变了泾河流域下垫面状况,但无论在植树造林工程实施的前期、中期或后期,降水都是控制该

区域蒸散发变化的主导因素,且降水的贡献远大于其他因素贡献,这与其他干旱半干旱地区的研究结果类似<sup>[23-24]</sup>。

### 3.4 不确定性分析

许多学者在使用 Choudhury-Yang 公式时,都认为  $P$ 、 $ET_0$  和  $n$  是相互独立的变量,但事实上这三个要素并不完全独立;例如降水会影响区域植被生长状况,也会对潜在蒸散发计算带来影响,因此本研究有可能低估了降水对实际蒸散发变化的贡献。在对区域水量平衡公式进行简化时,本研究假定流域多年平均土壤水蓄变量为零,但根据董国涛等的研究成果<sup>[25]</sup>,泾河流域 2000—2010 年土壤含水量总体表现为增加的趋势,且具有较为明显的空间异质性。此外,Choudhury-Yang 公式主要用于长时间尺度的蒸散发计算,较短的研究时期可能会影响计算精度。气象站点较大的空间分辨率无疑也会给对计算结果带来误差。另外,泾河流域大量的淤地坝建设也会增加流域的水面面积,从而增加流域的实际蒸散发量,这也会给计算结果带来误差。

尽管本研究计算结果存在一定的不确定性,但对比以往研究成果,泾河流域蒸散发变化的归因结果与其他干旱半干旱地区总体一致<sup>[22]</sup>,而且本研究还给出了更加详细的时空变化特征。基于 Choudhury-Yang 公式的蒸散发归因分析方法,与通常采用的相关性分析和水文模型相比较,不仅计算方法简单而且避免了参数不确定对归因结果的影响。

## 4 结论

本研究基于 Choudhury-Yang 公式计算了泾河流域 2000—2014 年蒸散发量,并对蒸散发变化进行了定量归因分析,得出以下结论。

(1) 基于 Choudhury-Yang 公式计算的泾河流域实际蒸散发与观测值较为吻合,两者之间的决定系数 ( $R^2$ ) 达到了 0.85,均方根误差 (RMSE) 为 50 mm,而相对误差则为 11%,证明 Choudhury-Yang 公式在泾河流域是较为可靠的。

(2) 2000 年以来,泾河流域实际蒸散发总体表现为下降趋势,年均降幅达到 -1.66 mm。2000—2004 年,泾河流域蒸散发显著增加,增幅为 10.59 mm/a,但 2005—2009 和 2010—2014 年,泾河流域蒸散发则呈现出下降趋势,年均降幅分别达到 -8.17 mm 和 -3.72 mm。从空间上看,泾河流域实际蒸散发从西北到东南逐渐增加,其中大于 400 mm 区域的面积从植树造林工程实施初期的 43%,减少到中期的 22%,后又增加到末期的 29%。

(3) 降水是控制泾河流域 2000—2014 年蒸散发变化的主要因素,其平均贡献率为 76.8%,大于潜在蒸散发变化 (40.8%) 和下垫面变化 (-17.5%) 的

贡献。换句话说,尽管泾河流域 1999 年以来实施了大规模的退耕还林工程,但气候仍是控制该区域蒸散发变化的主要原因。

### 参考文献 (References):

- [1] 刘昌明,李艳忠,刘小莽,等. 黄河中游植被变化对水量转化的影响分析[J]. 人民黄河,2016,38(10):7-12. (LIU C M, LI Y Z, LIU X M, et al. Impact of vegetation change on water transformation in the middle Yellow River[J]. Yellow River, 2016, 38(10): 7-12. (in Chinese)). DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2016.10.002.
- [2] 周园园,师长兴,杜俊,等. 无定河流域 1956—2009 年径流量变化及其影响因素[J]. 自然资源学报,2012,27(5):856-865. (ZHOU Y Y, SHI C X, DU J, et al. Annual runoff change and influencing factors in the Wuding River basin in 1956-2009[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(5): 856-865. (in Chinese)). DOI: 1000-3037(2012) 05-0856-10.
- [3] 金明,于静洁. 生态保护和植树造林对黑河流域河川径流的影响[J]. 地理科学进展,2008,27(3):47-54. (JING M, YU J J. The impact of ecological protection and afforestation on streamflow in Heihe River basin[J]. Progress in Geography, 2008, 27(3): 47-54. (in Chinese))
- [4] 宁婷婷. Budyko 框架下黄土高原流域蒸散发时空变化及其归因分析[D]. 北京:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2017. (NING T T. The spatiotemporal variability of catchment evapotranspiration and its attribution analysis in the Loess Plateau under the Budyko framework [D]. Beijing: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, 2017. (in Chinese))
- [5] 邵薇薇,杨大文,孙福宝,等. 黄土高原地区植被与水循环的关系[J]. 清华大学学报(自然科学版),2009,49(12):1958-1962. (SHAO W W, YANG D W, SUN F B, et al. Relationship between vegetation cover and water balance in the Loess Plateau[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2009, 49(12): 1958-1962. (in Chinese))
- [6] 党素珍,蒋晓辉,董国涛,等. 泾河上游流域实际蒸散发变化趋势及成因分析[J]. 水土保持研究,2016,23(2):143-147. (DANG S Z, JIANG X H, DONG G T, et al. Variation of actual evapotranspiration and its causes analysis in the upper reaches of the Jinghe River basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(2): 143-147. (in Chinese)). DOI:1005-3409(2016)02-0143-05.
- [7] 朱非林,王卫光,孙一萌,等. 汉江流域实际蒸散发的时空演变规律及成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(4):300-306. (ZHU F L, WANG W G, SUN Y M, et al. Spatial and temporal variations of ac-

- tual evapotranspiration and their causes in Hanjiang River basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(4): 300-306. (in Chinese). DOI: 1000-1980. 2013. 04. 004.
- [8] ZOU M, NIU J, KANG S, et al. The contribution of human agricultural activities to increasing evapotranspiration is significantly greater than climate change effect over Heihe agricultural region[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-14. DOI: 10. 1038/s41598-017-08952-5.
- [9] DROOGERS P. Estimating actual evapotranspiration using a detailed agro-hydrological model[J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1): 50-58. DOI: 10. 1016/S0022-1694(99) 00198-5.
- [10] FANG X, REN L, LI Q, et al. Estimating and validating basin-scale actual evapotranspiration using MODIS images and hydrologic models [J]. Hydrology Research, 2012, 43(1-2): 156-168. DOI: 10. 2166/ nh. 2011. 129
- [11] Roderick M L, Farquhar G D. A simple framework for relating variations in runoff to variations in climatic conditions and catchment properties [J]. Water Resources Research, 2011, 47(12): 667-671. DOI: 10. 1029/2010WR009826.
- [12] YANG D, SUN F, LIU Z, et al. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis [J]. Water Resources Research, 2007, 43(4): 436-451.
- [13] YANG D, SUN F, LIU Z, et al. Interpreting the complementary relationship in non-humid environments based on the Budyko and Penman hypotheses[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(18): 122-140.
- [14] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 2000—2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 中国环境科学, 2016, 36(5): 1568-1578. (ZHAO A Z, LIU X F, ZHU X F, et al. Spatiotemporal analyses and associated driving forces of vegetation coverage change in the Loess Plateau[J]. China Environment Science, 2016, 36(5): 1568-1578. (in Chinese)). DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6923. 2016. 05. 043.
- [15] JIN M L, DICKINSON R E. Land surface skin temperature climatology: benefitting from the strengths of satellite observations [J]. Environmental Research Letters, 2010, 5(4): 186-199.
- [16] ZHANG L, DAWES W R, WALLKERG R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701-708.
- [17] YANG D W, SHAO W W, YEH J F, et al. Impact of vegetation coverage on regional water balance in the non-humid regions of China[J]. Water Resources Research, 2009, 45(7): 450-455. DOI: 10. 1029/2008 WR006948.
- [18] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 等. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究[J]. 水利学报, 2007, 38(4): 409-416. (SUN F B, YANG D W, LIU Z Y, et al. Study on coupled water-energy balance in the Yellow River basin based on Budyko hypothesis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(4): 409-416. (in Chinese)). DOI: 0559-9350(2007)05-0409-08.
- [19] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(10): 1024-1034. (YANG D W, ZHANG S L, XU X Y. Study on coupled water-energy balance in the Yellow River basin based on Budyko hypothesis [J]. Scientia Sinica Technologica, 2015, 45(10): 1024-1034. (in Chinese)) DOI: 10. 1360/N092015-00013.
- [20] 郭志起, 王秀茹. 河北省地区 50 年来降水变化特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 67-72. (GUO Z Q, WANG X R. Variations of precipitation in recent 50 years in Hebei Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(3): 67-72. (in Chinese)) DOI: 1672-1683(2012)03-0067-06.
- [21] 张荣华. 渭河流域蒸散发特征及水量变化分析[D]. 北京: 北京师范大学, 2013. (ZHANG R H. Analysis of evapotranspiration characteristics and water quantity variation in Weihe River basin[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2013. (in Chinese))
- [22] GAO X, SUN M, ZHAO Q, et al. Actual ET modeling based on the Budyko framework and the sustainability of vegetation water use in the loess plateau[J]. Science of the Total Environment, 2016, 579. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2016. 11. 163.
- [23] XU X, YANG D, YANG H, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin[J]. Journal of Hydrology, 2014, 510(6): 530-540. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2013. 12. 052.
- [24] MA Z, KANG S, ZHANG L, et al. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(3-4): 239-249. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2007. 12. 022.
- [25] 董国涛, 党素珍, 何宏谋, 等. 基于地表温度和植被指数特征空间的泾河流域土壤水分监测[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 11-15. (DONG G T, DANG S Z, HE H M, et al. Monitoring of soil moisture based on land surface temperature and vegetation index feature space in the Jinghe watershed[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 11-15. (in Chinese)) DOI: 1672-1683(2014)04-0011-05.