

# 水利水运工程学报

## HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

### 近50年伊洛河流域径流演变归因分析

倪用鑫, 余钟波, 吕锡芝, 马力, 张秋芬, 王建伟

#### Analysis on attribution of runoff evolution in Yiluo River basin in the past 50 years

NI Yongxin, YU Zhongbo, L Xizhi, MA Li, ZHANG Qiufen, WANG Jianwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20211026001>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

##### 海河流域径流变化趋势及其归因分析

Analysis of runoff change trend and its attribution in Haihe River basin

水利水运工程学报. 2017(4): 59 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.009>

##### 大渡河流域年径流变化特征及其归因分析

Variation characteristics of annual runoff and its attribution analysis in Dadu River basin

水利水运工程学报. 2021(3): 96 <https://doi.org/10.12170/20200608001>

##### 渭河干流径流变化趋势及突变分析

Analysis of variation trend and abrupt point of runoff in the mainstream of Weihe River Basin

水利水运工程学报. 2019(2): 33 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.005>

##### 海河流域近500年旱涝演变规律分析

Evolution of drought and flood in the Haihe River Basin for the last 500 years

水利水运工程学报. 2020(4): 17 <https://doi.org/10.12170/20190603002>

##### 黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟

Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin

水利水运工程学报. 2019(5): 36 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.005>

##### 宁夏清水河流域水沙变化特点分析

Analysis on the characteristics of flow and sediment variation in Qingshuihe River basin of Ningxia

水利水运工程学报. 2020(4): 57 <https://doi.org/10.12170/20200213002>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20211026001

倪用鑫, 余钟波, 吕锡芝, 等. 近50年伊洛河流域径流演变归因分析[J]. 水利水运工程学报, 2022(1): 59-66. (NI Yongxin, YU Zhongbo, LÜ Xizhi, et al. Analysis on attribution of runoff evolution in Yiluo River basin in the past 50 years[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(1): 59-66. (in Chinese))

# 近50年伊洛河流域径流演变归因分析

倪用鑫<sup>1,2</sup>, 余钟波<sup>2</sup>, 吕锡芝<sup>1</sup>, 马力<sup>1</sup>, 张秋芬<sup>1</sup>, 王建伟<sup>1</sup>

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院 河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室, 河南 郑州 450003;  
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 流域尺度的径流变化反映了气候和人类活动的综合影响, 然而目前伊洛河流域径流演变的量化归因尚不明晰。基于 Budyko 假设构建解析径流变化归因的模型, 量化评估径流对各环境因素变化的敏感性系数, 定量揭示各因素对径流变化的贡献。结果表明, 1970—2018 年间, 伊洛河流域径流显著下降 ( $\alpha=0.05$ ), 且在 1991 年发生突变, 突变后径流减少了 46.43 mm (34.32%)。径流变化对降水、潜在蒸散发和下垫面参数的敏感性系数分别为 0.42、-0.18 和 -78.36, 即降水每增加 1 mm 将导致径流增加 0.42 mm, 潜在蒸散发量每增加 1 mm 将导致径流减少 0.18 mm, 下垫面参数每增加 1 个单位将导致径流减少 78.36 mm。气候变化和人类活动对径流变化的贡献率分别为 42.60% 和 56.36%, 人类活动引起的下垫面变化是径流变化的主要原因, 其中植被变化是下垫面变化的主导因素。研究结果可为流域径流演变归因和水资源管理规划提供理论支撑。

**关键词:** 径流演变; 归因分析; Budyko 假设; 伊洛河流域

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)01-0059-08

气候变化和人类活动对水文过程的影响是全球水文学研究的热点问题。气候变化和人类活动对径流过程的影响十分敏感, 气候变化导致了全球极端降雨等降雨模式的变化, 人类活动变化则改变了流域水文过程的时空模式, 两者的共同作用导致了严重的供水危机和生态环境问题<sup>[1]</sup>。近 50 年来, 伊洛河流域径流量发生趋势性锐减<sup>[2]</sup>, 可利用水资源急剧衰减, 进一步加剧了流域水资源短缺的形势, 已引起政府决策部门和公众的广泛关注。

径流变化成因有降水的影响, 有气候变暖的影响, 也有植被恢复、取用水等人类活动的影响。量化气候变化和人类活动对径流量的影响, 可以更好地揭示径流变化的主导因素, 对水资源管理者和决策者有着重要的参考价值。评估气候变化和人类活动对径流演变影响的常用方法有经验统计和水文模型等方法。贺瑞敏等利用澳大利亚水量平衡模型对伊洛河流域径流进行模拟, 得出降水减少是该流域径流锐减的主要原因<sup>[3]</sup>。王国庆采用流域水文模型分析了伊洛河流域不同年代径流变化原因, 指出气候变化是伊洛河流域径流减少的主要因素<sup>[4]</sup>。刘绿柳等针对黄河流域水资源短缺问题, 应用 SWAT 模型对伊洛河等流域的径流变化进行分析, 认为气候变化对径流变化贡献大于人类活动<sup>[5]</sup>。然而, 其他研究者利用经验统计方法或其他模型得到了相反的结论。Luan 等利用双累积曲线、新安江模型等方法分析径流减少的贡献, 指出下垫面变化是径流变化的主导因素<sup>[6]</sup>。方宏阳等利用流域尺度水均衡模型评估了气候变化和人类活动对径流的影响, 指出人类活动是主要原因<sup>[7]</sup>。以往的研究利用上述方法就流域径流变化的归因分析进行了大量研究, 但难以得到一致的结论。在现有方法尚不完善的情况下, 准确估计气候变化及人类活动对径流变化的影响尚存

收稿日期: 2021-10-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0605004); 中国博士后科学基金项目(2020T130235); 河南省自然科学基金项目(202300410541); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKF-2021-05)

作者简介: 倪用鑫(1987—), 男, 河南孟州人, 工程师, 博士研究生, 主要从事水文水资源及水土保持研究。

E-mail: niyongxin@126.com 通信作者: 吕锡芝(E-mail: nihulvxizhi@163.com)

在困难。

除了上述方法,基于 Budyko 理论的方法由于具有明显的物理意义且计算过程相对简单,已成为近年来的研究热点且得到了成功的应用<sup>[8-10]</sup>。因此,本研究在系统分析水循环要素的变化趋势的基础上,利用 Budyko 假设分析了伊洛河流域水循环演变机理与水资源衰减原因,量化解析了径流对各驱动因素变化的敏感性,评估了各环境因素对径流变化的贡献。

## 1 研究区与数据来源

伊洛河属于黄河中游下段的一级支流,流经陕西、河南两省的 21 个县市(图 1),全长 974 km,主要干流伊河和洛河分别长 265 和 447 km,流域出口控制水文站为黑石关站,控制面积为 18 563 km<sup>2</sup>,地处 33°39' N~34°54' N 和 109°43' E~113°11' E 之间,海拔为 92~2 616 m。伊洛河流域多年平均降水量约 690 mm,气候分区为湿润和半湿润地区。伊洛河上游为土石山区,植被较好;下游为黄土丘陵区,植被相对稀疏,水土流失严重<sup>[3]</sup>。近年来受气候和人类活动等因素影响,流域内可利用水资源急剧减少,面临严重的缺水危机。

伊洛河流域 1970—2018 年的径流数据来源于《中华人民共和国水文年鉴》的黄河流域水文资料,对其进行还原计算得到天然径流。降水数据取自流域内的 142 个雨量站,气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),选取流域周边 11 个气象站点的日平均气压、降水、蒸散发、平均相对湿度、日照时数、平均温度、最高温度、最低温度和平均风速等,潜在蒸散发量由 Penman-Monteith 公式计算。30 m 分辨率的 DEM 数据来源于地理空间数据云([www.giscloud.cn](http://www.giscloud.cn)),用于表示地形分布特征和提取流域边界。1 km 分辨率的土地利用数据和归一化植被指数 NDVI 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)。

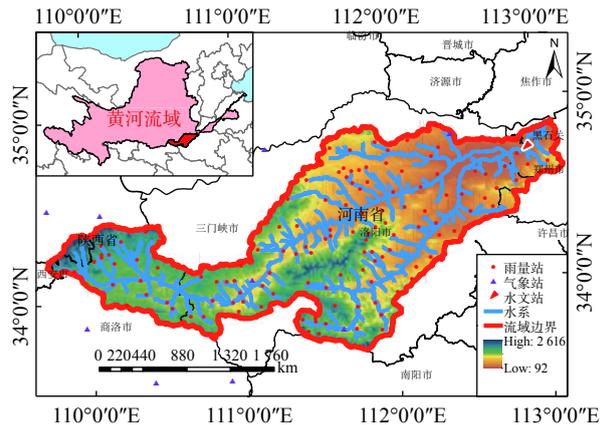


图 1 伊洛河流域地理位置

Fig. 1 Location of the Yiluo River basin

30 m 分辨率的 DEM 数据来源于地理空间数据云([www.giscloud.cn](http://www.giscloud.cn)),用于表示地形分布特征和提取流域边界。1 km 分辨率的土地利用数据和归一化植被指数 NDVI 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)。

## 2 研究方法

### 2.1 径流系列趋势分析与突变检验

本研究趋势分析和突变检验选用 Mann-Kendall(MK)检验方法,该方法为水文气象系列常用的趋势分析和突变检测方法<sup>[11]</sup>。统计值  $Z$  为 MK 趋势显著性检验值,其正负表示系列存在增加或减少趋势。如果  $Z$  的绝对值大于  $\alpha$  显著性水平值  $Z_{1-\alpha/2}$ ,则表明系列在  $1-\alpha/2$  置信区间趋势显著。

系列变量的突变点检验统计值为  $U_F$  和  $U_B$ ,  $U_F$  的正负表示系列的上升和下降趋势,超出  $\alpha$  显著性水平说明变化趋势明显。如果  $U_F$  和  $U_B$  在显著性水平之间存在交点,则该点即为突变点<sup>[12]</sup>。突变点将系列变量分为基准期和变化期,本研究采用滑动  $t$  检验方法验证两个子系列样本平均值是否存在显著性差异。

### 2.2 径流变化的归因分析方法

归因分析采用基于 Budyko 假设的水热耦合平衡方程,在长时间尺度上蒸散发量主要受供水条件和辐射能量的平衡关系决定,结合水量平衡方程( $P=Q+E$ ,  $P$ 、 $Q$ 、 $E$  分别为年平均降水量、年径流量、年平均实际蒸散发量)可推算出流域的径流量。该方程最初由 Budyko 提出<sup>[13]</sup>,函数形式为  $E/P = f(E_0/P)$ ,描述了流域

气候、水文和下垫面之间的相互作用。方程经过以往研究的不断完善已发展为多种形式, 其中 Choudhury-Yang 公式被普遍用于流域实际蒸散发量计算<sup>[14]</sup>, 表达式如下:

$$E = \frac{E_0 P}{(P^n + E_0^n)^{1/n}} \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为年平均潜在蒸散发量;  $n$  为流域特征参数, 与流域的地形地貌、土地利用类型、植被等因素相关。

结合敏感性系数定义和水量平衡方程, 对 Choudhury-Yang 公式求偏导, 可得到  $Q$  对  $P$ 、 $E_0$  和流域特征参数  $n$  的敏感性系数计算公式,  $n$  由最小二乘法求得, 具体结合 Excel 中单变量求解方法。

$$\frac{\partial Q}{\partial P} = 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{P}{E_0}\right)^n\right]^{1+1/n}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial E_0} = -\frac{1}{\left[1 + \left(\frac{E_0}{P}\right)^n\right]^{1+1/n}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial n} = \frac{E_0 P}{(P^n + E_0^n)^{1/n}} \left[ \left(-\frac{1}{n^2}\right) \ln(P^n + E_0^n) + \frac{1}{n} \frac{1}{P^n + E_0^n} (\ln P P^n + \ln E_0 E_0^n) \right] \quad (4)$$

根据各因素突变前后两阶段的变化量  $\Delta X$ , 结合式(2)~(4)推导的敏感性系数, 可计算求得径流变化各因素影响量  $\Delta Q_X$  及其贡献率  $F_P$ :

$$\Delta Q_X = \frac{\partial Q}{\partial X} \Delta X \quad (5)$$

$$F_P = \frac{\Delta Q_X}{\Delta Q} \times 100\% \quad (6)$$

### 2.3 径流变化归因结果检验

归因分析结果验证采用降雨-径流双累积曲线方法, 假设不受人活动影响时, 降水量与径流量的双累积曲线是一条直线, 其线性变化反映了人类活动对流域径流的影响。利用变化期降雨量代入拟合的基准期降雨-径流关系式, 可推算出仅受降雨影响下的径流量, 与基准期实测径流量的差值即为降雨变化的影响量, 由此可计算得到人类活动的影响量及相应的贡献率。双累积曲线表达式如下:

$$X(t) = \sum_{i=1}^t x_i, Y(t) = \sum_{i=1}^t y_i, Y(t) = f(X(t)) \quad (7)$$

式中:  $x_i$  表示第  $i$  年的降水量;  $y_i$  表示第  $i$  年的径流。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 流域水文气象要素变化特征

1970—2018 年伊洛河流域径流呈现减小趋势(-1.05 mm/a), 降水呈减小趋势(-0.62 mm/a), 平均气温呈增加趋势(0.03 °C/a), 蒸散发呈增加趋势(0.43 mm/a)。降水减少、气温增加表明气候存在暖干化的趋势, 加上蒸散发消耗的加剧, 直接导致了流域径流的减少。MK 趋势分析结果表明, 径流和气温统计值  $Z$  分别为 -1.89 和 4.75, 均通过了 95% 的显著性检验, 气温甚至超过了 99% 的显著水平, 这说明径流和气温变化趋势显著, 降水和蒸散发量的统计值为 -0.49 和 0.85, 变化趋势不显著。具体见图 2。

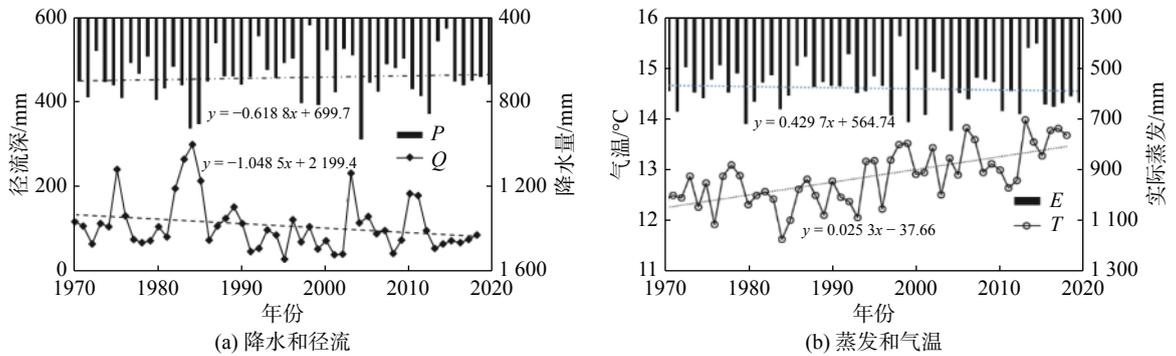


图2 伊洛河流域水文气象要素变化线性趋势

Fig. 2 The linear trend of changes in hydrological and and meteorological elements in the Yiluo River basin

MK 突变检验结果表明径流系列在 1991 年发生突变(图 3), 突变点的滑动  $t$  检验值为 2.83, 超过 0.01 显著性水平, 说明径流在 1991 年突变显著。径流量突变的年份与流域内故县水库下闸蓄水的时间相吻合, 表明径流量从此开始受人类活动影响。突变点将径流系列分为基准期(1970—1990)和变化期(1991—2018), 和基准期相比, 变化期多年平均径流减少了 46.43 mm, 减少 34.32%。

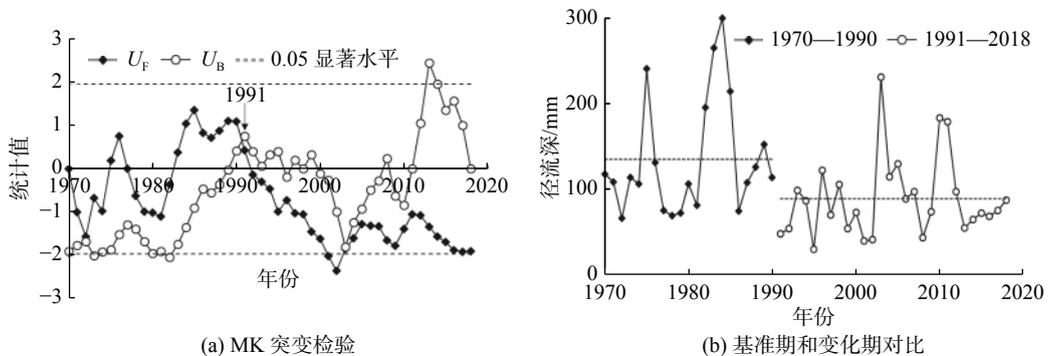


图3 伊洛河流域突变检验及变化前后对比

Fig. 3 Runoff mutation test in Yiluo River basin and comparison during the two periods

### 3.2 流域径流对气候和下垫面变化的敏感性分析

将流域降水、径流和潜在蒸散发各阶段均值代入式(1)进行最小二乘法计算, 得到各阶段的下垫面参数  $n$ (表 1), 结合式(2)~(4)可求得伊洛河流域径流变化对降水、潜在蒸散发和下垫面参数的敏感性系数分别为 0.42、-0.18 和 -78.36。结果表明伊洛河流域降水量每增加 1 mm 将导致径流增加 0.42 mm, 潜在蒸散发量每增加 1 mm 将导致径流减少 0.18 mm, 下垫面参数每增加 1 个单位将导致径流减少 78.36 mm。

表 1 伊洛河流域水文要素阶段特征值及变化量

Tab. 1 Characteristic values and changes of hydrological elements in the Yiluo River Basin

时段	$Q/\text{mm}$	$P/\text{mm}$	$E_0/\text{mm}$	$n$
1970—1990	135.28	705.81	986.97	1.96
1991—2018	88.85	668.04	1 009.41	2.29
变化量 $\Delta$	-46.43	-37.77	22.44	0.33

### 3.3 伊洛河流域径流变化归因分析

结合径流对各变量变化的敏感性系数, 以及相应的两阶段变化量, 代入式(5), 可分别计算出各因素变

化导致的径流变化量。伊洛河流域降水、潜在蒸散发和下垫面参数引起的径流变化量为-15.80、-3.98 和 -26.17 mm, Budyko 框架模拟的径流变化总量为-45.95 mm, 与实测的径流变化量 46.43 mm 的误差仅为 -0.48 mm(1.04%), 这表明 Budyko 假设应用于伊洛河流域模拟径流的阶段变化结果与实测值基本一致。

径流变化归因分析结合式(2), 可求得气候变化和下垫面变化对径流变化的贡献率(表 2)。由表 2 可见, 降水变化和下垫面特征变化为径流变化的主导因素。

表 2 径流演变各影响因素贡献率  
Tab. 2 Contribution rate of each influencing factor to runoff evolution

项目	$\Delta Q_{\text{实测}}$	$\Delta Q_{\text{气候}}$			$\Delta Q_{\text{下垫面}}$	误差
		$\Delta Q_P$	$\Delta Q_{E0}$	小计		
影响量/mm	-46.43	-15.80	-3.98	-19.78	-26.17	-0.48
贡献率/%	100	34.03	8.57	42.60	56.36	1.04

### 3.4 双累积曲线结果验证

对伊洛河流域的降水和径流系列数据进行双累积曲线分析, 结果如图 4 所示。在 1991 年前降水-径流拟合关系良好, 决定性系数  $R^2$  为 0.988, 可以认为流域径流过程处于天然状态, 受人类影响较小。累积降水和累积径流的关系在 1991 年发生明显的变化, 这表明在 1991 年后径流开始受人类活动影响, 偏离量说明了降水和人类活动的影响量。

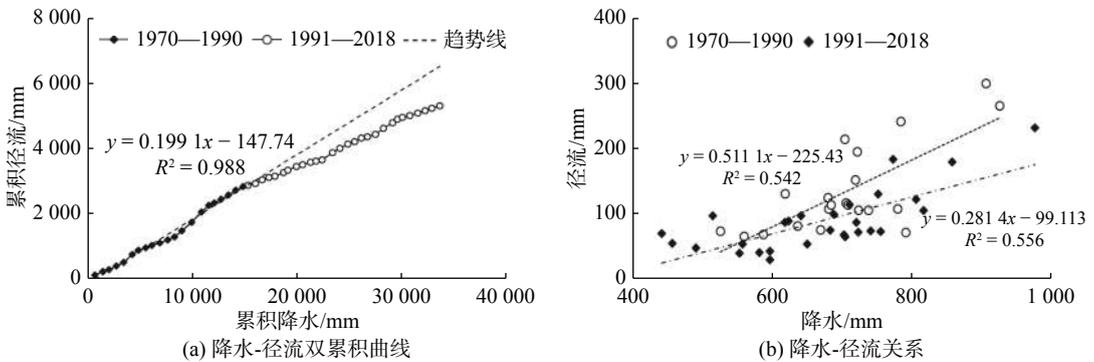


图 4 伊洛河流域双累积曲线及降水-径流关系

Fig. 4 The double accumulation curve and precipitation-runoff relationship of the Yiluo River basin

根据拟合的 1970—1990 年降水-径流关系线, 结合变化期 1991—2018 年的平均降水, 可计算出不受人类活动影响时 1991—2018 年的模拟径流结果, 即仅考虑降水变化时的径流量为 116.01 mm, 降水变化导致的径流变化量为 19.27 mm, 结合实测的两阶段径流变化量 46.43 mm, 可推算出人类活动的影响量为 27.16 mm, 降水和人类活动的贡献率分别为 41.50% 和 58.50%, 这与基于 Budyko 假设计算的影响量和贡献率基本一致, 说明计算的结果是可信的。

### 3.5 结果讨论

以往研究<sup>[15-16]</sup>表明, 影响径流的因素可以概括为气候变化和人类活动。由于降水、温度和风速的变化, 气候变化改变了水资源的空间分布, 对干旱和洪水等极端水文事件有直接影响。人类活动通过改变植被条件、土地利用方式及水利水保工程建设等影响了流域的水循环过程, 是流域径流减少的主导因素, 这与本研究的结论基本一致。同样, 也存在一些与本研究相悖的结论, 这些研究<sup>[3-5]</sup>利用水文模型归因分析时通常选用土地利用变化作为人类活动的影响, 通过对 1980—2018 年近 5 期的土地利用数据分析可知土地利用面积整体变化不大(图 5), 而土地利用面积的变化无法真实反映下垫面变化的影响, 往往导致模拟时低估了人类活动的影响, 因此得出了与本研究相反的结论。

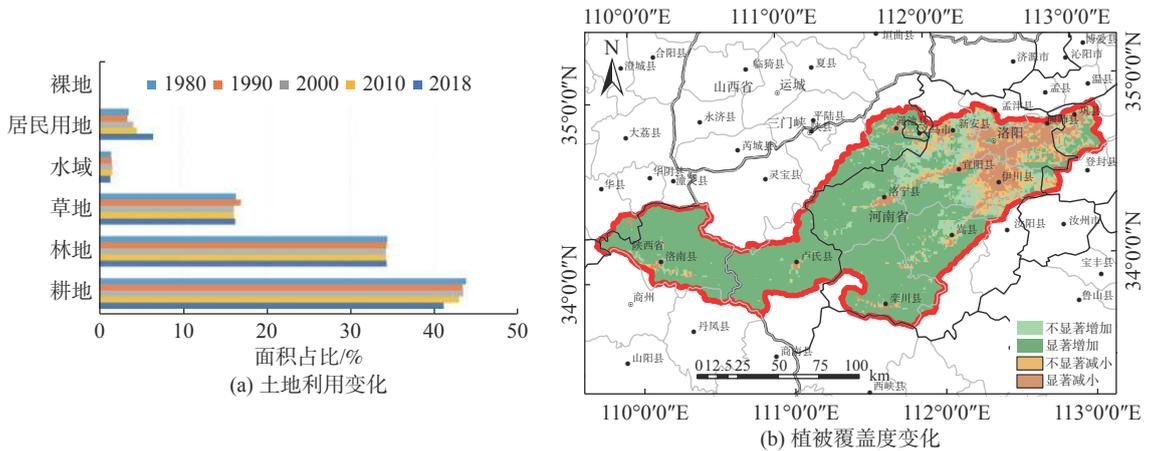


图 5 伊洛河流域土地利用和植被覆盖度变化趋势

Fig. 5 Land use and vegetation change trends in the Yiluo River basin

降水和蒸发是径流变化的最直接的影响因素。在全球气候变暖的背景下,相对于基准期(1970—1990),伊洛河流域变化期(1991—2018)多年平均降水减少了 37.77 mm,多年平均潜在蒸散发量增加了 22.44 mm。降水减少而蒸散发增加,流域暖干化趋势明显,是导致伊洛河流域径流锐减的主要驱动因子。基于 Budyko 假设的 Choudhury-Yang 公式中,下垫面参数  $n$  代表了植被、土壤和地形,由于在一定的时空间尺度内,土壤和地形相对变化不大,下垫面的变化主要反映了植被在内的土地利用的变化。同时,为了减少水土流失改善生态环境,流域内开展了一系列的水土保持措施建设。根据国务院第一次水利普查水土保持情况专项普查成果统计,截止到 2011 年,流域内修建梯田 186.24 km<sup>2</sup>,种植水土保持林等植被措施 2 163.61 km<sup>2</sup>,修建淤地坝 1 079 座,累积淤地面积 21.95 km<sup>2</sup>,这些措施极大地改变了伊洛河流域的下垫面特征,改善了流域的植被条件,反映了人类活动对径流变化的影响。利用伊洛河流域 1980、1990、2000、2010、2018 的 5 期土地利用数据(图 5)和转移矩阵(表 3)分析流域土地利用变化情况,发现耕地面积明显减少,耕地逐渐转变成林地、草地和居住用地,居住用地显著增加,反映了城市化建设的影响。草地、林地和耕地等植被面积占比超过 90%,是下垫面变化的主要因素,显著影响了流域径流过程。

表 3 伊洛河流域土地利用转移矩阵

Tab. 3 Land use transfer matrix of Yiluo River basin

单位: %

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	居住用地	裸地
耕地	33.741	2.245	3.075	0.734	4.826	0.006
林地	2.154	28.758	1.601	0.132	0.199	0
草地	3.574	1.679	11.445	0.054	0.241	0
水域	0.722	0.138	0.138	0.493	0.138	0
居住用地	1.793	0.048	0.054	0.036	1.956	0
裸地	0.012	0	0	0	0	0.006

根据 1981—2018 年伊洛河流域的植被 NDVI 指数,结合一元线性回归  $\theta$ slope 公式和  $F$  检验,分析流域的植被时空变化趋势。结果表明:在时间上,1981—2018 年伊洛河流域植被覆盖明显增加( $P < 0.01$ );在空间上,流域 70.76% 以上的区域植被覆盖显著增加,植被覆盖显著减少区域仅占 10.27%,其他区域变化趋势不明显。植被的叶面截留和蒸腾消耗了相当一部分降水,是水文循环的关键环节,因此植被也是径流变化的间接影响因子,在产汇流过程中起着重要作用,是准确评估可利用水资源的最大不确定因子。然而,目前的研究无法准确量化植被变化对径流变化的贡献。因此,在缺水严重的黄河流域,植被变化的影响对准确评估可利用水资源显得至关重要。

## 4 结 语

以伊洛河流域为研究区,基于 Budyko 理论的 Choudhury-Yang 公式,分别对研究区径流变化中气候变化和人类活动的影响进行归因分析,得出主要结论如下:

(1)伊洛河流域 1970—2018 年径流呈显著的减小趋势,且在 1991 年发生突变,突变前后径流变化了 46.43 mm(34.32%)。

(2)径流变化对降水、潜在蒸散发和下垫面参数的敏感性系数分别为 0.42、-0.18 和 -78.36,即降水每增加 1 mm 将导致径流增加 0.42 mm,潜在蒸散发量每增加 1 mm 将导致径流减少 0.18 mm,下垫面参数每增加 1 个单位将导致径流减少 78.36 mm。

(3)降水、潜在蒸散发和下垫面变化对径流变化的贡献分别为 34.03%、8.58% 和 56.36%,与双累积曲线分析结果基本一致,人类活动引起的下垫面变化是径流变化的主要驱动因素,降水变化的影响也不可忽视。

(4)由于流域下垫面特征主要受植被、地形和土壤等因素影响,而地形和土壤等因素在短时期内变化不大,因此下垫面变化主要受植被变化主导。

## 参 考 文 献:

- [1] 塞弗. 气候及土地利用变化对水文过程影响的模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2016. (MUHAMMAD S. Modeling of the hydrological impacts of climate and land use changes on hydrological process[D]. Nanjing: Hohai University, 2016. (in Chinese))
- [2] 赵丽霞, 徐十锋, 赵旭, 等. 黄河伊洛河流域径流变化特性及趋势分析[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(12): 70-73, 97. (ZHAO Lixia, XU Shifeng, ZHAO Xu, et al. Analysis on runoff variation characteristics and trend in Yiluo River Basin in Henan Province[J]. China Flood & Drought Management, 2020, 30(12): 70-73, 97. (in Chinese))
- [3] 贺瑞敏, 王国庆, 张建云. 环境变化对黄河中游伊洛河流域径流量的影响[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 297-298, 301. (HE Ruimin, WANG Guoqing, ZHANG Jianyun. Impacts of environmental change on runoff in the Yiluohe River Basin of the middle Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(2): 297-298, 301. (in Chinese))
- [4] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (WANG Guoqing. Impacts of climate change on hydrology and water resources in the middle reaches of the Yellow River Basin[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [5] 刘绿柳, 王秀杰, 张鹏飞. 基于SWAT模型的气候变化和人类活动对伊洛河径流影响分析[J]. 人民珠江, 2020, 41(1): 1-6, 75. (LIU Lüliu, WANG Xiujie, ZHANG Pengfei. Research on impacts of climate change and human activities on runoff in the Yiluo River based on SWAT Model[J]. Pearl River, 2020, 41(1): 1-6, 75. (in Chinese))
- [6] LUAN J K, ZHANG Y Q, MA N, et al. Evaluating the uncertainty of eight approaches for separating the impacts of climate change and human activities on streamflow[J]. Journal of Hydrology, 2021, 601: 126605.
- [7] 方宏阳, 袁喆, 严登华, 等. 黄河流域径流演变归因研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(4): 1-6, 58. (FANG Hongyang, YUAN Zhe, YAN Denghua, et al. Study on attribution of runoff evolution of Yellow River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(4): 1-6, 58. (in Chinese))
- [8] 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 Fubao, YANG Dawen, LIU Zhiyu, et al. Study on coupled water-energy balance in Yellow River Basin based on Budyko Hypothesis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(4): 409-416. (in Chinese))
- [9] 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 Dawen, ZHANG Shulei, XU Xiangyu. Attribution analysis for runoff decline in Yellow River Basin during past fifty years based on Budyko hypothesis[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2015, 45(10): 1024-1034. (in Chinese))

Chinese))

- [10] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等. 1960—2010年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 605-613. (ZHANG Shulei, YANG Dawen, YANG Hanbo, et al. Analysis of the dominant causes for runoff reduction in five major basins over China during 1960—2010[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5): 605-613. (in Chinese))
- [11] 马进国, 郑艳爽, 张晓华, 等. 宁夏清水河流域水沙变化特点分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(4): 57-63. (MA Jinguo, ZHENG Yanshuang, ZHANG Xiaohua, et al. Analysis on the characteristics of flow and sediment variation in Qingshuihe River basin of Ningxia[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(4): 57-63. (in Chinese))
- [12] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007. (WEI Fengying. Modern climate statistics diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese))
- [13] BUDYKO M I. Climate and life[M]. America: Academic Press, 1974.
- [14] 杨汉波. 流域水热耦合平衡方程推导及其应用[D]. 北京: 清华大学, 2008. (YANG Hanbo. Derivation and application of the coupled water-energy balance equation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese))
- [15] BAO Z X, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin, Northern China: climate variability or human activities?[J]. Journal of Hydrology, 2012, 460/461: 117-129.
- [16] ZHANG C Q, ZHANG B, LI W H, et al. Response of streamflow to climate change and human activity in Xitiao River basin in China[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(1): 43-50.

## Analysis on attribution of runoff evolution in Yiluo River basin in the past 50 years

NI Yongxin<sup>1,2</sup>, YU Zhongbo<sup>2</sup>, LÜ Xizhi<sup>1</sup>, MA Li<sup>1</sup>, ZHANG Qiufen<sup>1</sup>, WANG Jianwei<sup>1</sup>

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Henan Key Laboratory of Yellow River Basin Ecological Protection and Restoration, Zhengzhou 450003, China; 2. College of Hydrology and Water Recourses, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Watershed-scale runoff changes reflect the combined effects of climate and human activities. However, the attribution of runoff evolution in the Yiluo River basin is currently unclear. Based on the Budyko hypothesis, this study team builds a model to analyze the attribution of runoff changes, quantitatively evaluates the sensitivity coefficient of runoff to changes in various environmental factors, and quantitatively reveals the contribution of various factors to runoff changes. The results show that the runoff of the Yiluo River Basin decreased significantly ( $\alpha=0.05$ ) from 1970 to 2018, a mutation point occurred in 1991 and the runoff decreased by 46.43 mm (34.32%) during the change period. The sensitivity coefficients of runoff changes to precipitation, potential evapotranspiration and underlying surface parameters are 0.42, -0.18 and -78.36, respectively, that is, every 1 mm increase in precipitation will lead to an increase of 0.42 mm in runoff, and an increase of 1 mm in potential evapotranspiration will lead to a decrease of 0.18 mm in runoff. Each increase of 1 unit of the underlying surface parameter will result in a decrease of 78.36 mm in runoff. The contribution rates of the climate change and human activities to runoff change are 42.60% and 56.36%, respectively, and underlying surface changes caused by human activities are the main reason of runoff changes, among which vegetation change is the dominant factor in underlying surface changes. The research results can provide theoretical support for the attribution of runoff evolution and water resources management planning in the basin.

**Key words:** runoff evolution; attribution analysis; Budyko hypothesis; Yiluo River basin