

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221970

# 基于 Budyko 假设的乌伦古河源区径流变化特征及归因识别

翟梦飞<sup>1,2</sup>,高 凡<sup>1,2</sup>,刘 坤<sup>1,2</sup>,姜 凤<sup>1,2</sup>

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 揭示流域径流演变特征及定量识别驱动因素贡献率对流域水资源适应性管理和水安全保障至关重要。基于乌伦古河源区二台水文站 1960~2015 年实测逐月径流序列及同期气象和人类水土资源开发利用影像数据,采用滑动移除小波分析法、Mann-Kendall 趋势检验法、滑动 t 检验法等方法分析水文气象要素序列演变趋势及突变特征,基于 Budyko 假设的弹性系数法定量识别气候变化与人类活动对研究区径流变化的贡献率。结果表明,乌伦古河源区径流序列呈不显著上升趋势,降水序列呈显著上升趋势,潜在蒸散发序列呈显著下降趋势;径流序列于 1995 年发生突变,相较于基准期 1960~1994 年,变化期 1995~2015 年径流对降水、潜在蒸散发及下垫面特征参数的敏感性系数分别增加了 8.8%、25.0%、7.8%;降水与潜在蒸散发、下垫面特征参数变化对径流变化的贡献率分别为 39.2%、7.0%、53.8%,研究区径流变化由人类活动与气候要素共同驱动,人类活动为主要驱动因素。

**关键词:** Budyko 假设; 径流变化; 驱动因素定量识别; 滑动移除小波分析; 乌伦古河源区

**中图分类号:** TV121<sup>+</sup>.4; P339

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)04-0044-05

## 1 概况

乌伦古河作为阿勒泰地区第二大河流,水系组成主要包括发源于我国境内阿尔泰山东段南坡的四条主要河流和发源于阿尔泰山北坡蒙古国境内的布尔根河,最后汇入乌伦古湖,是乌伦古湖的重要补给水源(图 1)。乌伦古河流域降水较少,蒸发强烈,水系流域面积为  $6.14 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,二台水文站以上集水面积(国内)达到  $1.84 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,山区季节性降水和积雪融水是河流径流的主要补给来源,是乌伦古河的径流形成来源。目前,关于乌伦古河流域的研究主要集中在流域径流变化特征、趋势及径流模拟方面,而关于量化驱动因素对径流变化贡献率的研究相对较少。鉴此,本文以出口控制性水文站二台站 1960~2015 年逐月

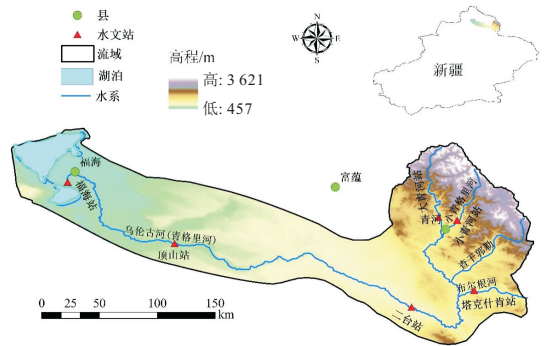


图 1 乌伦古河流域地理位置

Fig. 1 Geographic location of Ulungu River basin

径流序列及同期流域气象站点气象和人类活动、下垫面资料为基础数据,采用 Mann-Kendall 趋势检验法、滑动 t 检验法、滑动移除小波分析法等方法分析乌伦古河源区水文气象要素序列的演变趋势及突变特征,基于 Budyko 假设的弹性系数

**收稿日期:** 2022-09-21, **修回日期:** 2022-10-25

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51769036);2021 年研究生“新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室”研究项目(ZDSYS-YJS-2021-06)

**作者简介:** 翟梦飞(1997-),男,硕士研究生,研究方向为内陆干旱区水文过程及水资源利用,E-mail:1429740477@qq.com

**通讯作者:** 高凡(1980-),女,博士、副教授、硕导,研究方向为水资源系统工程与河湖生态保护修复,E-mail:gutong-fan0202@163.com

法估算径流改变对各驱动因素的弹性系数,定量评价气候变化、人类活动对径流变化的贡献率,以为流域水资源合理配置及社会经济可持续发展提供指导。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

选取乌伦古河流域源流区出山口二台水文站 1960~2015 年共 56 年实测逐月径流数据及同期国家气象站点青河站的气象数据,其中潜在蒸散发数据是基于同期气象数据,根据 Penman-Monteith 公式<sup>[1]</sup>计算得出。水文及气象资料分别来源于阿勒泰水文水资源勘测局和中国气象数据共享网 (<http://data.cma.cn>)。遥感影像数据源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>),分辨率 30 m,包括 1990、2000 年的 Landsat-TM/ETM 遥感影像数据及 2015 年的 Landsat 8 遥感影像数据,根据研究需要,将其划分为耕地、林地、草地、水域、城乡居民用地、未利用地 6 类土地利用类型。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall 趋势检验法<sup>[2]</sup>(以下简称 M-K 法)是目前水文气象数据分析常用的一种检验时间序列的变化趋势特征、显著性及突变点的时间序列检验方法。

#### 2.2.2 滑动 t 检验法

滑动 t 检验法<sup>[3]</sup>,通过序列中 2 段子序列的均值有无显著差异来验证 2 个总体均值的差异性,若 2 段子序列的均值差异超过一定显著性水平,即表示序列发生突变。

#### 2.2.3 滑动移除小波分析法

滑动移除小波分析法(MC-WT)是一种新的动力学结构突变检测方法<sup>[4]</sup>,该方法与 MC-R/S 类似,通过检测时间序列不同时间段内数据对于整个序列标度指数贡献的大小确定序列的突变点与突变区间。

#### 2.2.4 基于 Budyko 假设的弹性系数法

以 Budyko 假设<sup>[5]</sup>为理论框架,通过弹性系数法量化气候变化、人类活动与下垫面变化三种因素对径流变化的影响,研究下垫面植被变化、气候季节性变化与流域水热耦合参数间的耦合关系。利用水量平衡方程计算气候对流域径流变化的贡献率,从而得出人类活动因素对流域径流变化的贡献。

(1)敏感性分析。在一闭合流域下,可认为循环过程中水量平衡,水量平衡可通过径流量、降水量和蒸散发量来描述,多年时间尺度上的流域蓄水量可忽略不计,结合 Budyko 假设将其阐述为:

$$P = Q + E + \Delta S \quad (1)$$

式中, $P$  为降水量,mm; $Q$  为径流深,mm; $E$  为实际蒸散发量,mm; $\Delta S$  为流域内蓄水量的变化,假设  $\Delta S = 0$ 。

结合 ZHANG L 等<sup>[6]</sup>的研究使用平均年蒸散发量分析植被,基于 Budyko 假设的水热耦合平衡方程计算长时间尺度下的实际蒸散发,具体参考文献<sup>[7~9]</sup>,继而求出降水、潜在蒸散发、下垫面的径流弹性系数,若弹性系数为正,则表示径流量随其增加而增大,若弹性系数为负,则表示径流量随其增加而减小。

(2)贡献率分析。为量化气候变化与人类活动对径流变化的贡献率,基于突变时间,分为基准期的径流深与变化期的径流深变化,依据径流的气候弹性系数、潜在蒸散发弹性系数和下垫面弹性系数分别估算气候和人类活动引起的径流变化量,并据此计算气候变化与人类活动导致径流变化的贡献率。

## 3 结果与分析

### 3.1 乌伦古河径流、降水、潜在蒸散发要素序列变化特征

#### 3.1.1 趋势特征

乌伦古河源区 1960~2015 年共 56 年径流、降水、潜在蒸散发序列的变化趋势见表 1,可以看出研究区 56 年间径流( $Z = 0.08$ )呈不显著上升趋势,降水( $Z = 2.33$ )呈显著上升趋势,潜在蒸散发( $Z = -3.61$ )呈显著下降趋势,伴随降水显著增加及潜在蒸散发显著下降,径流量增加趋势不显著,表明气象因素并非影响径流变化的唯一因素<sup>[10]</sup>。

表 1 径流、降水、潜在蒸散发要素 M-K 趋势检验值

Tab. 1 M-K trend test value of runoff, precipitation and potential evapotranspiration elements

时间序列	检验统计量 $Z$	变化趋势	显著性水平
径流	0.08	上升	不显著
降水	2.33	上升	显著
潜在蒸散发	-3.61	下降	显著

#### 3.1.2 径流突变特征

基于滑动移除小波分析法及传统突变点检验方法(M-K 法、滑动 t 检验法)检测乌伦古河源区径流突变点,结果见图 2。滑动移除小波分析法(选取滑动步长  $L = 1$  年(12 个月))分析结果表明,乌伦古河源区径流突变点可能发生于 1988 年

或 1995 年前后, 鉴于 1988 年径流出现最大值, 且在 1995 年之前径流量与降水量呈现较好一致性, 而之后并不显著, 则可认为径流突变应发生在 1995 年。结合 M-K 法分析结果, 在 1995 年前后统计值超过临界值, 同时通过滑动 t 检验法分析滑动步长分别为 1、3、5、10、12 年等的径流突变点, 最后确定滑动步长为 12 年时效果较好, 分析结果与 M-K 法分析结果一致, 即乌伦古河源区径流 1995 年发生突变。

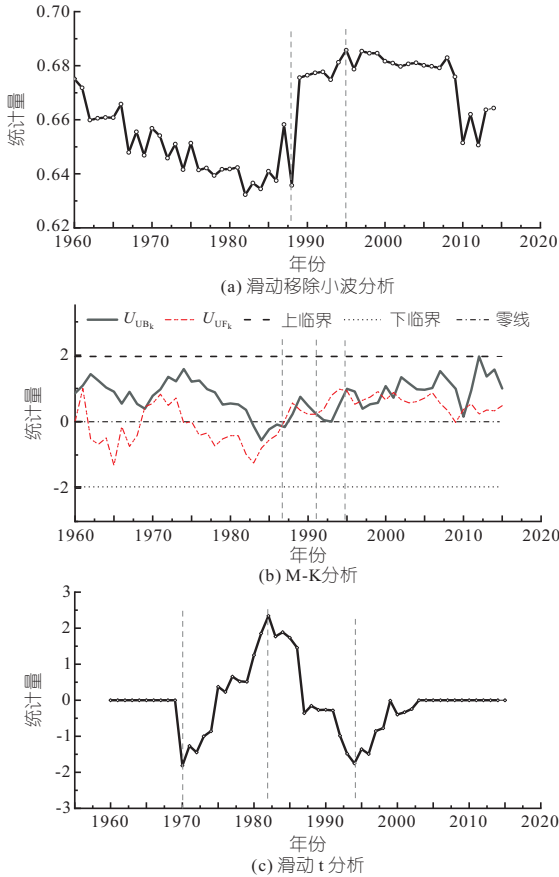


图 2 乌伦古河源区径流突变点分析结果

Fig. 2 Analysis results of runoff catastrophe points in the source area of Ulungu River

### 3.2 径流对气象因素响应的敏感性分析

乌伦古河源区径流在 1995 年发生突变, 故将 1960~1994 年作为基准期, 1995~2015 年作为变化期, 采用基于 Budyko 假设的敏感性分析计算方法, 得到研究区径流对降水、潜在蒸散发及下垫面参数变化的弹性系数(表 2)。可以看出, 基准期下垫面特征参数为 0.67, 变化期变为 0.79, 乌伦古河源区变化期平均潜在蒸散发与径流深相较基准期均减少, 降水与下垫面特征参数较基准期增大, 径流系数较基准期减少。乌伦古河源区径流变化与  $P$  呈正相关(基准期与变化期降水的弹性系数由 1.47 变为 1.60, 绝对值增幅为 8.8%), 与  $E_0$  呈负相关(基准期与变化期潜在

表 2 降水及潜在蒸散发敏感性系数表

Tab. 2 Sensitivity coefficient of precipitation and potential evapotranspiration

项目	1960~1994 年	1995~2015 年	变幅/%
$P/\text{mm}$	166.65	191.66	15.00
$R/\text{mm}$	53.24	50.63	-4.90
$E_0/\text{mm}$	1 073.00	1 011.00	-20.30
$\omega$	0.67	0.79	18.40
$R/P$	0.32	0.26	-17.30
$E_0/P$	6.44	5.27	-18.10
$\epsilon_P$	1.47	1.60	8.80
$\epsilon_{E_0}$	-0.48	-0.60	25.00
$\epsilon_\omega$	-1.71	-1.85	7.80

注:  $P$  为年均降水;  $R$  为年均径流深;  $E_0$  为年均潜在蒸散发;  $\omega$  为下垫面特征参数;  $R/P$  为径流系数;  $E_0/P$  为干旱指数;  $\epsilon_P$  为降水弹性系数;  $\epsilon_{E_0}$  为潜在蒸散发弹性系数;  $\epsilon_\omega$  为下垫面弹性系数。蒸散发的弹性系数由 -0.48 变为 -0.60, 绝对值增幅为 25%, 与  $\omega$  呈负相关(基准期与变化期的径流对下垫面特征参数的弹性系数由 -1.71 变为 -1.85, 绝对值增幅为 7.8%)。

年均降水量、潜在蒸散发量、年均径流深在基准期分别为 166.65、1 073.00、53.24 mm, 在变化期内分别为 191.66、1 011.00、50.63 mm, 变化期较基准期年均降水量上升 15%, 潜在蒸散发量下降 4.9%, 而变化期年均径流深较基准期下降 4.9%。研究区径流突变前后径流与降水序列一致性对比分析见图 3。结果表明, 基准期径流与降水变化趋势基本一致, 变化期在潜在蒸散发显著减少期间径流增加速率明显缓于降水增加趋势, 可认为径流变化是由气象因素与人类活动共同作用所致。基于敏感性分析得到的降水、潜在蒸散发及下垫面特征参数的弹性系数, 表明在潜

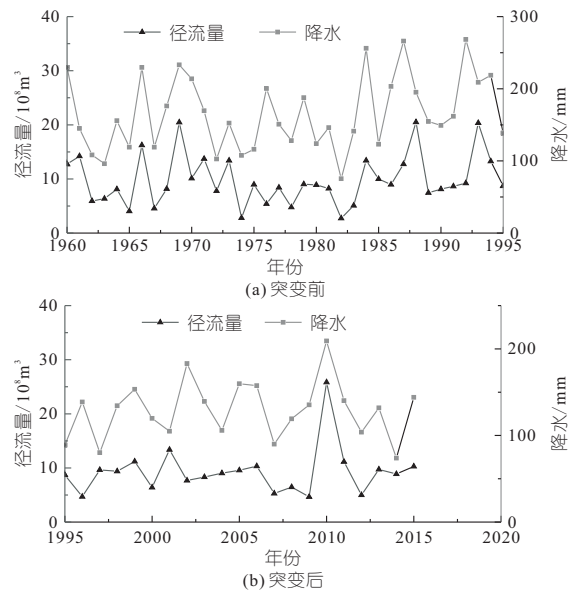


图 3 突变前后降水、径流一致性对比

Fig. 3 Consistency comparison of precipitation and runoff before and after abrupt change

在蒸散发及下垫面等其他外在条件不变情况下,同等级别的降水增加 10% 时在 1995 年以前会使径流增加 14.7%,在 1995 年之后会使径流增加 16.0%,表明径流对降水的敏感性增强,同样,在降水等其他外在条件不变情况下,潜在蒸散发与下垫面特征参数增加 10% 时,1995 年之前分别会使径流减少 4.8%、17.1%,1995 年之后分别会使径流减少 6.0%、18.5%。

### 3.3 气候变化和人类活动对径流变化贡献率的定量分析

基于二台站实测月水文数据计算出的年均径流深,得出变化期与基准期径流深变化量为  $-2.61$  mm,采用基于 Budyko 假设的弹性系数法计算出径流深变化量为  $-2.11$  mm。与基准期相比,变化期径流深减少了 4.9%,根据公式计算各因素贡献率,表明下垫面变化对径流的减少

贡献最大为 53.8%,其次为降水,潜在蒸散发变化较小,故影响较小。降水和潜在蒸散发对径流变化的贡献分别为 39.2%、7.0%。进一步证明了变化期径流演变由人类活动与气候要素共同驱动,且下垫面特征参数的变化为主要驱动,贡献占比最大,表明人类活动是研究区径流变化主要驱动因素。1990、2000、2015 年研究区三期土地利用/覆被变化见图 4,各类型面积占比见表 3,可以看出未利用地与草地是研究区的主要土地利用类型,自 1990 年始耕地面积呈增加趋势,2015 年耕地面积、草地面积、城乡居民用地较 1990 年分别增长 20.7%、48%、523%,林地与未利用地面积较 1990 年分别减少 68%、19%,草地、城乡居民用地及林地面积变幅剧烈,进一步反映出研究区域内人类对下垫面改造而引起的流域径流变化的响应非常显著。

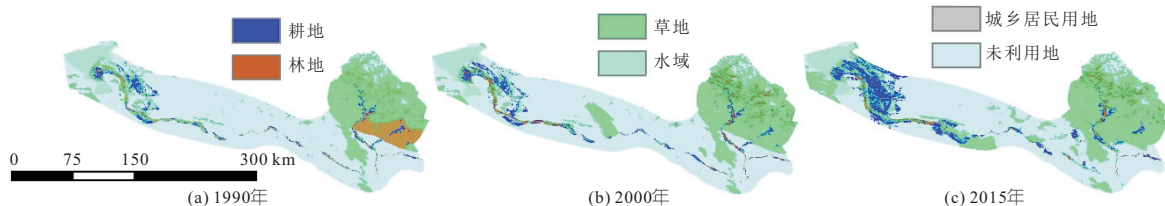


图 4 1990、2000、2015 年三期土地利用空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of land use in 1990, 2000 and 2015

表 3 1990、2000、2015 年土地利用类型面积变化

Tab. 3 Land use type area change in 1990, 2000 and 2015

土地类型	面积/km <sup>2</sup>			1990年	2000年	2015年	较1990	
	1990年	2000年	2015年	占比/%	占比/%	占比/%	年变幅/%	
草地	6 263.37	7 677.19	9 284.19	24.41	29.92	36.19	48.23	
城乡居民用地	15.57	26.91	97.02	0.06	0.10	0.38	523.19	
耕地	596.99	771.83	1 832.41	2.33	3.01	7.14	206.95	
林地	2 216.10	1 003.34	701.09	8.64	3.91	2.73	-68.36	
水域	1 126.26	1 214.39	1 237.99	4.39	4.73	4.83	9.92	
未利用地	15 439.19	14 963.40	12 504.35	60.17	58.32	48.74	-19.01	

## 4 结论

a. 研究区 56 年来径流量呈不显著上升趋势,降水量呈显著上升趋势,潜在蒸散发呈显著下降趋势,气象因素并非影响径流变化的唯一因素。

b. 滑动移除小波分析结果表明,研究区径流在 1995 年发生突变,与传统的 M-K 法和滑动 t 检验法结果一致,验证了滑动移除小波分析法在径流序列突变检验中的可操作性。

c. 1960~1994 年为基准期,1995~2015 年为变化期,基于 Budyko 假设的敏感性分析计算结果表明,相较于基准期,变化期径流对降水、潜在蒸散发及下垫面特征参数的敏感性系数分别增加了 8.8%、25.0%、7.8%,径流变化在变化期对

气象因素(降水、潜在蒸散发)及下垫面特征参数的敏感性显著增加。

d. 基于 Budyko 假设的弹性系数法计算出变化期人类活动导致年均径流深变化量为  $-2.61$  mm,降水与潜在蒸散发、下垫面特征参数变化对径流变化的贡献率分别为 39.2%、7.0%、53.8%,进一步证明了变化期径流变化由人类活动与气候要素共同驱动,且人类活动为主要驱动因素。

### 参考文献:

- [1] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56[J]. FAO, 1998, 56.
- [2] 朱永华, 张生, 赵胜男, 等. 气候变化与人类活动对地下水埋深变化的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 199-205.
- [3] 吕琳莉, 李朝霞. 雅鲁藏布江中下游径流变异性识别[J]. 水力发电, 2013, 39(5): 12-15.
- [4] 孙东永, 张洪波, 王义民. 滑动移除小波分析法在动力学结构突变检验中的应用[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 079201.
- [5] 张丽梅, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别[J]. 生态学报, 2018, 38(21):

