

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221653

# 基于变参数 Budyko 方程的东南沿海小流域径流变化分析

周月娇<sup>1</sup>,董增川<sup>1</sup>,陈光跃<sup>2</sup>,徐超<sup>2</sup>,储媚<sup>2</sup>,朱圣男<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 温州市水文管理中心, 浙江 温州 325000)

**摘要:** 东南沿海地区受东亚季风变化与人类活动的影响,流域水文过程发生改变,区域水资源合理开发利用面临挑战。以飞云江为例,构建基于滑动平均处理的变参数 Budyko 方程,分析流域内径流变化情况,并结合 CMIP5 模式定性预测未来径流变化趋势。结果表明,时变 Budyko 模型对年径流的模拟效果远优于常参数模型。在消除周期影响后飞云江流域水文气象要素均呈上升趋势。气候对飞云江流域径流变化的贡献率达 85.56%,并呈下降趋势;下垫面对径流变化的贡献率 2000~2020 年相较 2000 年以前提升了 6%。同时气候对径流变化的影响强度变化剧烈;下垫面对径流减少的影响强度减弱。此外在 RCP4.5 情景下飞云江流域未来径流将呈减少趋势。研究成果可为区域水资源规划提供理论支撑。

**关键词:** 气候; 下垫面; 变参数 Budyko; 飞云江流域

**中图分类号:** TV121;P333

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)07-0012-04

## 1 概况

飞云江位于东南沿海地区,是浙江温州地区的第二大河,全长 193 km,流域面积 3 719 km<sup>2</sup> (图 1)。流域属季风气候区,气候温和,年平均气温 17~21 °C,平均降雨量 1 400~2 000 mm。其河道上游的珊溪水利枢纽、赵山渡饮水工程,是温州市最重要的供水水源,并兼具发电、灌溉、防洪的综合效益;下游人口密集,民营企业众多,经济发达;同时沿岸的泰顺廊桥、百丈飞瀑、石胜林海等水文化景点承担着提升温州市人民生活水平的重要职责。为探究保障东南沿海地区水资源利用、人民生活水平的中小流域河流的径流演变特征及驱动因素,本文以东南沿海的飞云江流域为

例,建立时变的 Budyko 方程量化气候与下垫面对径流的影响;并结合土地利用变化趋势及未来 RCP4.5 情景下的降水状况获取未来径流特征,以期支撑区域水资源的合理开发利用。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

采用 1960~2020 年降水、气温、相对湿度、径流等水文气象数据及 1980~2020 年 5 期的土地利用数据,采用泰森多边形法计算流域平均降水量。采用 Penman-Monteith 公式<sup>[1]</sup>以瑞安站的气温求解整个研究区的潜在蒸散发量。考虑流域内水库蓄水变化、农业、工业及生活用水量,对山口站逐年实测径流资料进行还原,并依据流域集水面积计算径流深。选取模拟效果较好的国际耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)RCP4.5 排放情景下的 CanESM2 全球气候模式<sup>[2]</sup>,模拟飞云江流域未来降水情况。

### 2.2 基于 Budyko 假设的互补关系

描述 Budyko 假设的表达式<sup>[3]</sup>为:

$$E/P = f(E_0/P, n) \quad (1)$$

式中, $E$ 、 $E_0$  分别为年均实际蒸散量、年均潜在蒸散量,mm; $P$  为年均降水量,mm; $n$  为模型参

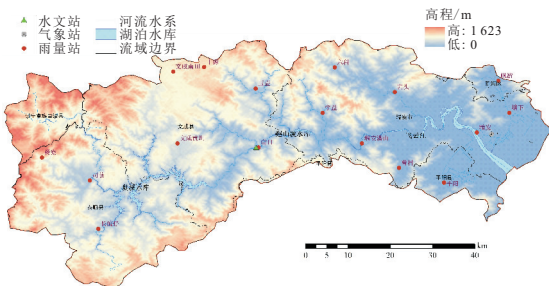


图 1 飞云江流域概况

Fig. 1 General picture of Feiyunjiang Basin

收稿日期: 2022-08-11, 修回日期: 2022-09-13

基金项目: 温州市水文高质量发展先行区建设项目(WZSW-GZLFZXXQ-202105)

作者简介: 周月娇(2000-),女,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源,E-mail:425480770@qq.com

通讯作者: 董增川(1963-),男,博士、教授、博导,研究方向为水文学及水资源,E-mail:zcdong@hhu.edu.cn

数<sup>[4]</sup>,与人类活动、土壤性质、植被覆盖、土地利用等有关。

为捕捉各因素在年尺度上对径流的影响,引入时序  $t$  作为方程参数  $n$  的解释变量,由此获得时变方程:

$$R_t = P_t \left[ 1 - f\left(\frac{E_0}{P}, n_t\right) \right] = P_t \left[ 1 - \frac{E_0/P_t}{(1 + E_0^{n_t}/P_t)^{1/n_t}} \right] \quad (2)$$

式中,  $R_t$  为  $t$  时刻径流量;  $p_t$  为  $t$  时刻降雨量;  $n_t$  为  $t$  时刻模型参数,与人类活动、土壤类型、植被覆盖、土地利用有关。

随后采用分解法分离径流的影响要素,即设流域内降水量与潜在蒸散发量相互独立,则径流量变化值与降水和潜在蒸散量存在关系为:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial P} dP + \frac{\partial R}{\partial E_0} dE_0 + P d\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right) + d\left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right) E_0 \quad (3)$$

式中,  $R$ 、 $P$  分别为径流量、降雨量。

在闭合流域内,设土壤含水率保持不变,径流量可表示为降水量与实际蒸散发量的差值,若流域径流发生改变,设时段初、末状态下径流分别为  $R_{t-1}$ 、 $R_t$ ,得到径流变化量  $\Delta R$  的两种表达方式为:

$$\Delta R = (\partial R/\partial P)_{t-1} \Delta P + (\partial R/\partial E_0)_{t-1} \Delta E_0 + \Delta(\partial R/\partial P) P_t + \Delta(\partial R/\partial E_0) E_{0,t} \quad (4)$$

$$\Delta R = (\partial R/\partial P)_t \Delta P + (\partial R/\partial E_0)_t \Delta E_0 + \Delta(\partial R/\partial P) P_{t-1} + \Delta(\partial R/\partial E_0) E_{0,t-1} \quad (5)$$

综合两种表达方式,引入权重因子  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )<sup>[5]</sup>,气候与下垫面对径流造成的影响  $\Delta R_q$  和  $\Delta R_x$  分别为:

$$\Delta R_q = \alpha [(\partial R/\partial P)_{t-1} \Delta P + (\partial R/\partial E_0)_{t-1} \Delta E_0] + (1 - \alpha) [(\partial R/\partial P)_t \Delta P + (\partial R/\partial E_0)_t \Delta E_0] \quad (6)$$

$$\Delta R_x = \alpha [\Delta(\partial R/\partial P) P_t + \Delta(\partial R/\partial E_0) E_{0,t}] + (1 - \alpha) [\Delta(\partial R/\partial P) P_{t-1} + \Delta(\partial R/\partial E_0) E_{0,t-1}] \quad (7)$$

将式(2)代入式(6)、(7)得到年尺度上气候与下垫面对径流造成的影响量  $\Delta R_q$  和  $\Delta R_x$  分别为:

$$\Delta R_q = P_t \left[ 1 - \frac{E_0/P_t}{(1 + E_0^{n_t}/P_t)^{1/n_t}} \right] - P_{t-1} \left[ 1 - \frac{E_0/P_{t-1}}{(1 + E_0^{n_{t-1}}/P_{t-1})^{1/n_{t-1}}} \right] \quad (8)$$

$$\Delta R_x = P_t \left[ 1 - \frac{E_0/P_t}{(1 + E_0^{n_t}/P_t)^{1/n_t}} \right] - P_t \left[ 1 - \frac{E_0/P_t}{(1 + E_0^{n_{t-1}}/P_t)^{1/n_{t-1}}} \right] \quad (9)$$

则基准期到干扰期的径流变化量  $R_\Delta$  为:

$$R_\Delta = \left[ \sum_{t=t_1+1}^{t_2} \frac{\Delta R_{qt}}{t_2 - t_1} - \sum_{t=t_0+1}^{t_1} \frac{\Delta R_{qt}}{t_1 - (t_0 + 1)} \right] + \left[ \sum_{t=t_1+1}^{t_2} \frac{\Delta R_{xt}}{t_2 - t_1} - \sum_{t=t_0+1}^{t_1} \frac{\Delta R_{xt}}{t_1 - (t_0 + 1)} \right] \quad (10)$$

式中,  $t_0$ 、 $t_1$ 、 $t_2$  分别为基准期与干扰期的时间点;式(10)等号右侧第 1、2 项分别为从基准期到干扰期气候与下垫面变化对径流的影响量。

### 3 计算结果

#### 3.1 水文气象要素时间序列分析

对飞云江流域降水、潜在蒸散发及径流深时间序列进行统计分析,得到飞云江流域多年平均降水量为 1 930.81 mm,年降水量最大值为 2016 年的 2 588.74 mm,最小值为 1967 年的 1 224.77 mm,倾向率为 3.997 mm/10a;多年平均潜在蒸散发量为 1 011.39 mm,年潜在蒸散发量最大值为 2004 年的 1 175.97 mm,最小值为 1989 年的 925.50 mm,倾向率为 0.682 mm/10a;多年平均径流深为 1 309.21 mm,年径流深最大值为 1962 年的 2 055.68 mm,最小值为 1967 年的 657.78 mm,倾向率为 0.710 mm/10a。

此外,进行径流演变归因分析旨在探究影响因子对径流长期变化趋势的影响<sup>[6]</sup>,因此在分析时间序列时可消除其周期性波动和随机性成分。利用小波分析法分析年降水量、潜在蒸散发量、径流深时间序列变化周期<sup>[7]</sup>,再进行滑动平均处理。飞云江流域降水量、潜在蒸散发量、径流深第一主周期分别为 11.73、24.84、25.03 年。由此对原始序列进行 25 年为单位的滑动平均处理,结合 Mann-Kendall 检验可知,飞云江流域降水、潜在蒸散发量、径流均呈显著上升趋势。

通过 Mann-Kendall 突变点检验分析飞云江流域年径流深的突变状况,见图 2。飞云江原始年径流深序列的 UF 线与 UB 线在 1981~1983 年间与 2002 年左右存在相交关系。结合 Pettitt 突变检验加以验证,最终得出飞云江流域原始径流序列在 1981、2002 年发生突变。同理,经滑动平均处理后的径流序列在 1979 年发生突变。

#### 3.2 时变 Budyko 模型的径流影响因子分离

为明确飞云江流域径流变化的动态过程、分析径流演变规律,对原始径流序列与滑动平均后的径流序列分别进行常参数与变参数的 Budyko 方程计算。并基于贝叶斯信息准则  $B_{BIC}$ 、均方根误差  $R_{RMSE}$  和纳什效率系数  $N_{NSE}$  三个指标评价 Budyko 模型径流模拟结果,见表 1。由表 1 可知,基于滑动平均处理后的时变 Budyko 模型的

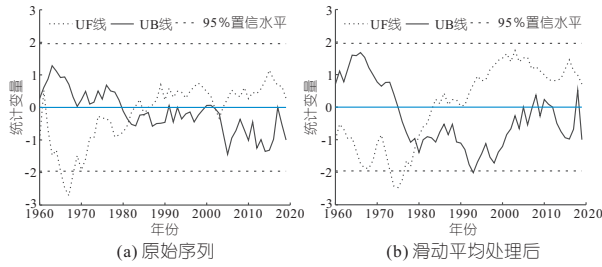


图2 飞云江流域年径流深突变分析  
Fig. 2 Analysis of annual runoff depth mutation in Feiyunjiang Basin

径流模拟能力较好。若径流模拟时均采用常参数 Budyko 模型,则经滑动平均处理后模型的  $B_{BIC}$ 、 $R_{RMSE}$  值远小于原始序列值,  $B_{BIC}$  值较原始序列缩小 0.3 倍,  $R_{RMSE}$  值较原始序列缩小约 0.8 倍,即滑动平均处理后模型模拟精度变高。再对比经过滑动平均处理的常参数 Budyko 模型与时变 Budyko 模型,得到时变 Budyko 模型  $B_{BIC}$ 、 $R_{RMSE}$  值远小于常参数模型,  $B_{BIC}$  值较常参数模型缩小 0.3 倍,  $R_{RMSE}$  值较常参数模型缩小约 0.6 倍,即基于滑动平均处理的时变 Budyko 模型的模拟精度较高。经滑动平均处理的常参数模型的  $N_{NSE}$  指标接近 0,而未经滑动平均处理和经滑动平均处理的时变模型的  $N_{NSE}$  指标接近 1,表明滑动平均处理仅能使模拟结果接近实测值的平均值水平,若想提高模型可信度、获得更好的模拟效果需采用基于滑动平均处理后的时变 Budyko 模型。

表1 不同类型 Budyko 方程径流模拟分析结果  
Tab. 1 Runoff simulation analysis results of different types of Budyko equations

| 径流序列类型 | 参数 $n$                   | 年径流模拟检验结果 |            |           |
|--------|--------------------------|-----------|------------|-----------|
|        |                          | $B_{BIC}$ | $R_{RMSE}$ | $N_{NSE}$ |
| 原始     | 1960~1980年               | 0.91      | 577.87     | 106.62    |
|        | 1981~2001年               | 1.03      |            |           |
|        | 2002~2020年               | 1.15      |            |           |
| 滑动平均   | 1960~1978年               | 0.96      | 278.94     | 10.08     |
|        | 1979~2020年               | 1.07      |            |           |
|        | $n_t = 0.00543t - 9.778$ | 394.86    | 26.93      | 0.05      |

采用基于滑动平均处理后的时变 Budyko 模型,结合滑动平均处理后的径流序列的突变结果,将滑动平均处理后的径流序列划分为基准期(1960~1978年)、干扰期(1979~2020年)两个阶段,进行径流演变影响因子分析。由表2可知,飞云江流域气候与下垫面对径流的影响存在差异,在基准期二者均导致年径流持续递减,分别为径流深累积减少 11.99、46.73 mm;在干扰期气候变化则导致年径流累积增加 121.49 mm,下垫面变化导致年径流累积减少 87.32 mm。此外,干扰期相对基准期径流深增加,表明气候是引起径流变化的主导因子,气候变化对径流改变的贡献率达 85.56%。

表2 流域气候与下垫面变化对径流的改变  
Tab. 2 Changes in runoff caused by climate and underlying surface changes in the watershed

| 类型  | 基准期径流     | 干扰期径流     | 基准期至干扰期   |            |
|-----|-----------|-----------|-----------|------------|
|     | 深累积影响量/mm | 深累积影响量/mm | 径流深改变量/mm | 径流深变化贡献率/% |
| 气候  | -11.99    | 121.49    | 3.67      | 85.56      |
| 下垫面 | -46.73    | -87.32    | 0.62      | 14.44      |

### 4 径流演变归因分析

细化年尺度上气候与下垫面对径流深的累积影响量,由图3(a)可知,下垫面与气候对径流的影响作用相反,下垫面促使径流减少;同时由图3(a)中的斜率变化可以看出,下垫面对径流影响强度基本保持稳定,在2000年后强度有轻微减弱趋势;气候对径流变化的影响强度在1960~1980年变化剧烈,呈现出1960~1980年影响剧烈,1980年以后逐渐变弱,在1990~1995、2003~2004、2015年以后又存在明显增强状态。由图3(b)可知,1960~2020年飞云江流域整体上下垫面对径流变化的贡献率有逐渐增加趋势,但气候仍是引起径流变化的主导因素。

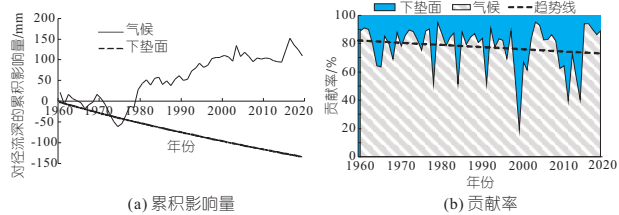


图3 飞云江流域逐年气候与下垫面对径流影响  
Fig. 3 Influence of annual climate and underlying surface on runoff in Feiyunjiang Basin

分析下垫面变化情况<sup>[8]</sup>,由图4可知飞云江流域土地利用变化主要集中于流域中下游地区。由于人口密集及城市开发建设活动日益剧烈,自2000年以来飞云江流域下游城乡、工矿、居民用地面积显著扩大趋势,所占面积由 57.72 km<sup>2</sup>增加至 153.95 km<sup>2</sup>,扩大近 3 倍。城乡、工矿、居民用地面积的逐步扩大,使得下垫面不透水率增加<sup>[9]</sup>,发生降雨时下渗量减少,地表径流在短期内迅速增加,由于下垫面因素促使径流减少的强度发生改变。此外由于 2002 年以来珊溪水库、赵山

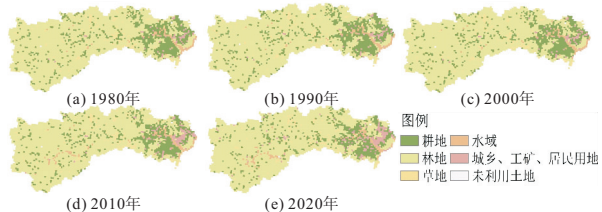


图4 1980~2020年飞云江流域各时段各类型土地利用面积  
Fig. 4 Land use area of each type at each time period in Feiyunjiang Basin from 1980 to 2020

渡水利枢纽等水利工程建设,水域面积在 2010 年由 69.54 km<sup>2</sup> 陡增至 87.49 km<sup>2</sup>。结合图 3(b) 可知,在不透水面积、水域面积显著增加的影响下,2000~2020 年下垫面对径流变化的平均贡献率相较 2000 年以前提升 6 个百分点。

在经济发展与城市建设的同时,人们愈发重视生态系统保护,减少人为因素对自然水循环影响的发展理念愈发深入人心,因此在探究未来径流变化趋势时,设定下垫面对径流变化的影响趋势不发生改变。分析未来 RCP4.5 情景下 CanESM2 全球气候模式模拟的飞云江流域未来降水情况,由图 5 可知,在 RCP4.5 情景下飞云江流域 2021~2100 年降水量总体呈减小趋势。在 2021~2100 年中有 58.8% 年份的年降水量低于历史时期的年均降水量,且年降水量变化比例在 -52.41%~34.39% 之间。总体而言,在 RCP4.5 情景下飞云江流域未来的多年平均降水量较历史时期减少了 2.32%,变幅较小。考虑到下垫面具有促使径流减少的作用及未来降水具有减少趋势,则未来径流亦将呈现减少状态。

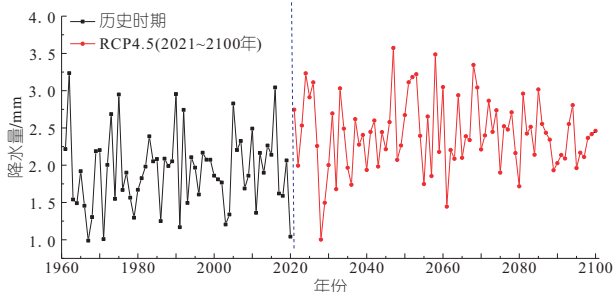


图 5 飞云江流域 RCP4.5 情景下 2021~2100 年年降雨变化  
Fig. 5 Variation of annual rainfall in Feiyunjiang Basin from 2021 to 2100 under RCP4.5 scenario

## 5 结论

a. 以东南沿海的飞云江流域为例,对原始水文序列与滑动平均后的水文序列分别进行常参数

### Analysis of Runoff Changes in Small Coastal Watershed in Southeast China Based on Budyko Equation with Variable Parameters

ZHOU Yue-jiao<sup>1</sup>, DONG Zeng-chuan<sup>1</sup>, CHEN Guang-yue<sup>2</sup>, XU Chao<sup>2</sup>, CHU Mei<sup>2</sup>, ZHU Sheng-nan<sup>1</sup>  
(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. Wenzhou Hydrological Management Center, Wenzhou 325000, China)

**Abstract:** Affected by the changes of East Asian monsoon and human activities, the hydrological processes in the southeast coastal area have been changed, and the rational development and utilization of regional water resources are facing challenges. Taking Feiyunjiang as an example, the variable parameter Budyko equation based on the moving average treatment was constructed to analyze the runoff change in the basin, and the future runoff change trend was predicted qualitatively combined with the CMIP5 model. The results show that the time-varying Budyko model is much better than the constant parameter Budyko model in the simulation of annual runoff. The hydrometeorological elements in Feiyunjiang Basin showed an upward trend after eliminating the influence of cycle. The contribution rate of climate to runoff variation in the Feiyunjiang Basin reached 85.56%, and showed a downward trend. Compared with before 2000, the contribution rate of the underlying surface to runoff change increased by 6% from 2000 to 2020. At the same time, the influence intensity of climate on runoff change changed sharply. The influence of the underlying surface on runoff reduction was weakened. In addition, under the RCP4.5 scenario, the runoff in the Feiyunjiang Basin will show a decreasing trend in the future. The research results can provide theoretical support for regional water resources planning.

**Key words:** climate; underlying surface; variable parameter Budyko; Feiyunjiang Basin

与变参数的 Budyko 方程计算,建立时变的 Budyko 方程量化气候变化与下垫面对径流的影响,得到气候是引起飞云江流域径流变化的主导因子,但贡献率逐渐降低。

b. 气候对径流变化的影响强度在研究期内波动剧烈,存在 4 次明显增强的状况;流域内城乡、工矿、居民用地面积增加使得下垫面对径流减少的影响强度减弱。同时结合土地利用变化趋势及未来 RCP4.5 情景下 CanESM2 模式模拟的未来降水情况,定性分析得到径流将呈减少趋势。以此支撑区域水资源的合理开发利用。

## 参考文献:

- [1] 王菱,陈沈斌,侯光良.利用彭曼公式计算潜在蒸发的高度订正方法[J].气象学报,1988,46(3): 381-383.
- [2] 王晓欣,姜大勝,郎咸梅. CMIP5 多模式预估的 1.5 °C 升温背景下中国气温和降水变化[J]. 大气科学, 2019,43(5):1158-1170.
- [3] 杨林,赵广举,穆兴民,等.基于 Budyko 假设的洮河与大夏河径流变化归因识别[J].生态学报,2021, 41(21): 8421-8429.
- [4] 王卫光,陆文君,邢万秋,等.黄河流域 Budyko 方程参数  $n$  演变规律及其归因研究[J].水资源保护, 2018, 34(2): 7-13.
- [5] ZHOU SHA, YU BOFU, ZHANG LU, et al. A new method to partition climate and catchment effect on the mean annual runoff based on the Budyko complementary relationship[J]. Water resources research, 2016, 52(9):7163-7177.
- [6] 苗正伟,路梅,丁志宏.基于时变 Budyko 模型的溇沱河上游径流变化归因分析[J].长江科学院院报, 2022,39(7):29-35,44.
- [7] 陈一明,何子杰,贾月,等.基于小波变换的径流与降水时频变化及相关性分析——以五郎河为例[J].中国农村水利水电,2017(10):13-17,22.
- [8] 黎遥,赵胜楠,石林峰.基于遥感影像的土地利用变化与驱动因子分析——以湖北神农架林区为例[J].江苏科技信息,2022,39(2): 65-68.
- [9] 梅超,刘家宏,王浩,等.城市下垫面空间特征对地表产汇流过程的影响研究综述[J].水科学进展, 2021, 32(5): 791-800.