

文章编号: 1000-5862(2020)01-0089-06

# 东江源寻乌水流域径流变化特征及其原因分析

慕昕瑶<sup>1,2</sup>, 刘贵花<sup>1\*</sup>, 贺志明<sup>3</sup>, 齐述华<sup>1</sup>, 史佳旺<sup>1</sup>, 杨先擎<sup>1</sup>

(1. 江西师范大学地理与环境学院, 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022;

2. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007; 3. 江西省人工影响天气办公室, 江西 南昌 300096)

**摘要:** 东江源水资源安全影响着珠三角社会经济发展和香港繁荣稳定, 径流是水资源安全评价的重要水文要素. 该文收集东江源区干流寻乌水 1980—2016 年逐日水文气象数据、6 期土地利用及土地耕作属性等数据, 采用 IHACRES 水文模型和统计分析等方法, 分析寻乌水径流变化特征及其影响因素. 结果表明: 在模型基准期(1980—1992) 和变化期(2009—2016) 中, 径流年际变化模拟效果评价指标  $R^2$ 、 $N_s$  和  $P_{bias}$  的值分别为 0.99、0.99、0.37 和 0.82、0.82、0.04, 这表明 IHACRES 模型适合寻乌水流域的径流模拟. 在季节径流模拟时, 春、夏和冬季模拟效果令人满意,  $0.72 \leq R^2 \leq 0.92$ ,  $0.71 \leq N_s \leq 0.75$ ,  $1.72 \leq P_{bias} \leq 2.33$ ; 秋季模拟效果较差,  $R^2$ 、 $N_s$  和  $P_{bias}$  值分别为 0.53、0.39 和 -9.61. 这表明气候要素是影响东江源区径流年际变化的主要原因, 人类活动造成东江源秋季径流减少. 结合土地利用图, 变化期果园面积增长约 40%, 与林地减少面积相当, 果树在秋季成熟期需要充足水分, 从河道取水量增加, 是秋季径流量减少的重要因素.

**关键词:** 东江源区; 寻乌水流域; 径流变化; IHACRES; 土地利用变化

**中图分类号:** P 33; F 301 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2020.01.15

## 0 引言

径流是流域水循环的重要环节, 径流量的变化对整个水文生态系统的演化造成重要影响, 同时也对区域经济发展造成一定影响<sup>[1]</sup>. 气候变化和人类活动等以不同方式影响流域径流变化过程<sup>[2-4]</sup>. 尤其近年来人类活动日益频繁, 极大改变了流域下垫面条件, 破坏了流域生态系统平衡, 使水文过程的恢复与保护日益迫切和必要<sup>[5-6]</sup>.

东江源作为内地珠三角地区和香港地区的重要饮用水源地, 保护其水资源安全尤为重要. 东江源区作为我国重要的脐橙产区, 脐橙种植显著改变了东江源区的土地利用类型, 对流域径流产生一定影响, 从而影响到东江源流域水循环过程. 现有研究多为流域水文要素的简单统计分析, 曾金凤<sup>[7]</sup> 通过水文数据定性分析了东江源区水资源开发利用中的问题; 李志萌等<sup>[8]</sup> 从东江源区水质对珠江三角洲地区的重要性着手, 提出应解决该区水土流失等问题; 陈瑞冰等<sup>[9]</sup> 对东江源区坡地果园水土流失的防治做了研究分析. 以上研究均为水文数据的定性分析, 缺乏针对东江源区径流变化的定量研究.

针对东江源区水资源研究存在的问题, 本文通过借助 IHACRES 模型并结合统计分析等方法分析了流域径流演化特征及其影响因素, 定量刻画了气候变化和人类活动的影响量.

## 1 研究区域

东江源区位于江西省赣州市的东南部(见图 1), 地处赣州市的寻乌县、定南县和安远县交界处, 地理坐标为  $E114^{\circ}47' \sim 115^{\circ}53'$ 、 $N24^{\circ}20' \sim 25^{\circ}13'$ <sup>[10]</sup>, 其南部为广东省、东部为福建省. 东江源区的源头位于娅髻钵山南侧, 发源地为娅髻钵山, 主河道长为 127.0 km, 流域面积约为 3 495.79 km<sup>2</sup>, 约占东江全流域面积的 1/10. 寻乌水为东江源的主干河流, 在斗晏水库下游进入广东省, 在江西省境内主河道长为 115.4 km, 流域面积约为 1 974.00 km<sup>2</sup>. 流域内地势北部高南部低, 山地、丘陵为该区主要地貌类型, 另外还有盆地相间其中. 流域的气候类型是较为典型的亚热带湿润季风气候, 夏季高温多雨, 冬季温和少雨, 热量资源丰富. 另外, 该区降水充沛, 流域多年平均降水量为 1 601.2 mm. 降水量年际变化大, 年内分配不均匀, 其空间分布和年内变化与降水量变

收稿日期: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(41501026), 江西省教育厅科学基金(GJJ160321) 和江西省博士后科研基金(2014KY13) 资助项目.

通信作者: 刘贵花(1984-), 女, 山东菏泽人, 助理研究员, 博士, 主要从事水文水资源研究. E-mail: yafeng9918@163.com

化趋势相似,水资源较为丰富,年平均径流量为  $15.1 \text{ 亿 m}^3^{[11]}$ .

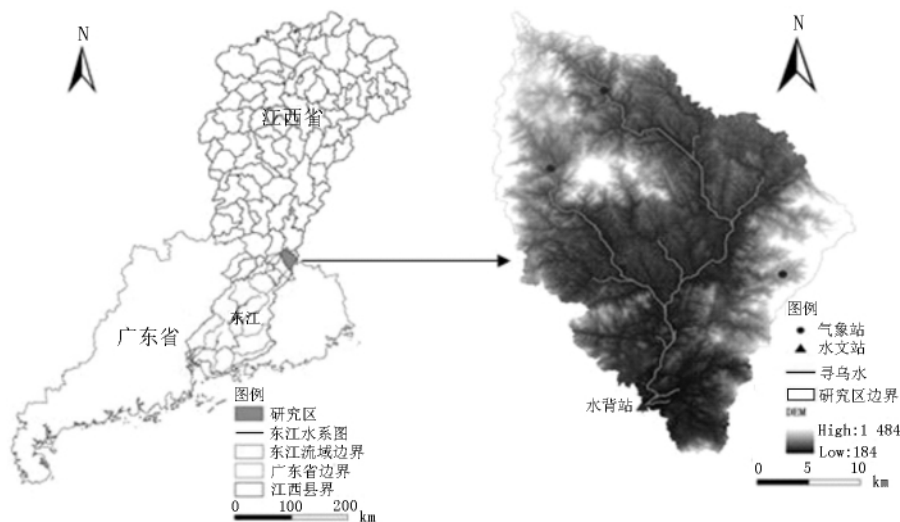


图1 研究区示意图

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

本文主要收集东江源 1980—2016 年的逐日降水、径流和气温数据,并分别选择 1980—1992 年和 2009—2016 年作为 IHACRES 模型的基准期和变化期;收集 1990—2015 年各期土地利用及土地耕作属性数据,分析东江源区土地利用变化特征。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 IHACRES 模型** IHACRES 模型是 A. J. Jakeman 等<sup>[12-13]</sup>提出的一个以单位线原理为基础的集总式概念性降雨-径流模型,模型由 2 个基本模块串联而成,非线性模块将降雨转化为有效降雨,线性模块将有效降雨转化为径流。模型在国外广泛用于径流模拟,并在一些资料缺乏地区中推广使用<sup>[14-15]</sup>。模型参数较少,需输入数据包括降水、径流量、气温、流域面积等,减少了因模型复杂、参数和输入数据多而造成的模拟结果的不确定性。模型中存在调整模型效果的参数,其中  $w$  为流域干时常数, $f$  为温度调节因子, $c$  为保证在整个基准期模拟的有效降雨总量等于观测总径流量的一个非自由参数, $t_r$  为参照温度, $l$  为产流的延迟时间系数。

**2.2.2 模型评价指标** Nash-Sutcliffe 效率系数 ( $N_s$ )、相关系数 ( $R^2$ ) 和相对误差 ( $P_{BIAS}$ ) 被用来评价模型校准期和验证期的模拟效果<sup>[16-17]</sup>。 $R^2$  表示模拟值与实测值之间的拟合效果,范围为 0 ~ 1,其值越大表示拟合效果越好。

$$N_s \text{ 计算公式为 } N_s = 1 - \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2 /$$

$\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - m(Q_{obs}))^2$ , 其中  $Q_{obs}$ 、 $Q_{sim}$  和  $m(Q_{obs})$  分别为实测值、模拟值和实测值均值; $n$  代表数据个数。 $N_s$  值越接近于 1.0,模拟效果越好,当  $N_s < 0$  时,模型模拟值还不如实测值的均值效果好。当  $N_s$  值在 0.50 ~ 0.65 之间时,模型效果令人满意;而当  $N_s > 0.65$  时,模型模拟效果较好。

$$\text{相对误差}(P_{BIAS}) \text{ 计算公式为 } P_{BIAS} = \sum_{i=1}^n (Q_{obs} -$$

$Q_{sim}) \times 100 / \sum_{i=1}^n Q_{obs}$ , 其中  $Q_{obs}$  和  $Q_{sim}$  分别为实测值和模拟值。 $P_{BIAS}$  最优值为 0,负值表示实测值小于模拟值,正值表示实测值大于模拟值,当  $|P_{BIAS}| = 15 \sim 25$  时,模型模拟效果令人满意;当  $|P_{BIAS}| = 10 \sim 15$  时,模拟效果较好;当  $|P_{BIAS}| < 10$  时,模拟效果非常好。

## 3 结果与讨论

### 3.1 径流年际变化特征及驱动因素

**3.1.1 模型构建** IHACRES 模型所需要输入的数据有东江源区的降水、径流、气温等数据,参数较少,可以减少一些模拟结果的不确定性。模型没有反映下垫面的参数,因此本文将人类活动影响相对较少的 1980—1992 年作为基准时段,用该时段降水、径流及气温数据率定模型参数;然后输入变化时段 (2009—2016 年) 实际降水、径流及气温数据,应用与此前相同的参数运行模型,模拟径流可以作为在基准时段包含了人类活动影响的“基准径流”。除降水和气温以外,实测径流与基准径流的差值可视作其他因子如人类活动的影响。

3.1.2 模型模拟与原因分析 模型输入数据为东江源干流寻乌水流域日降水、日径流、日气温和流域面积数据,采用月尺度进行模拟,选取基准时段(1980—1992 年)降水、气温和径流数据率定参数.参数取值分别为  $w=30$ ,  $f=0.5$ ,  $c=0.002\ 8$ ,  $t_r=20$ ,  $l=0$ . 模型月径流模拟效果较好,其中效率系数为 0.99,相对误差为 0.37,这表明 IHACRES 模型可以

用于寻乌水流域的径流变化研究.在利用 IHACRES 模型进行模拟时,选取 1980 年作为模型预热期,得到 1980—1992 年的模拟径流与实测径流值年际变化特征(见图 2 和图 3).应用模型率定的参数,求出变化时段(2009—2016)径流模拟值,与实测值相比较,模型  $N_s$  为 0.82,  $P_{BIAS}$  值为 0.04,  $R^2$  为 0.82,这表明变化期径流变化主要受气候因素的影响.

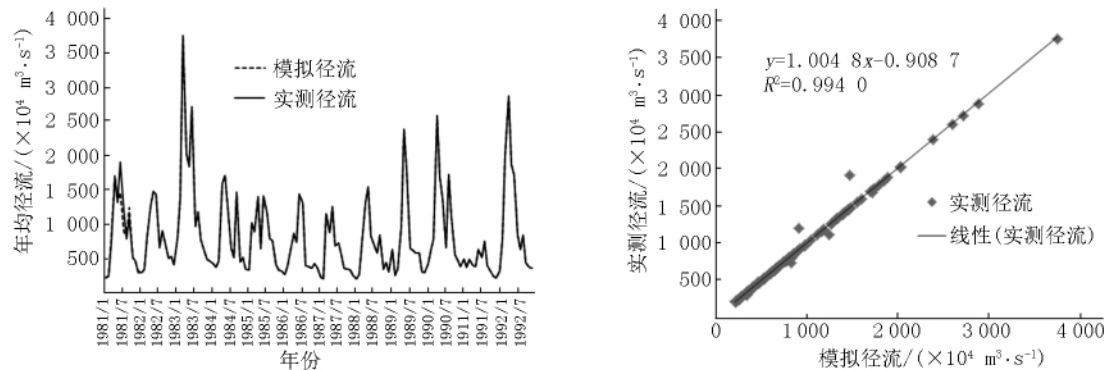


图 2 东江源寻乌水流域 1980—1992 年基准期模拟径流值与实测径流值年际变化比较

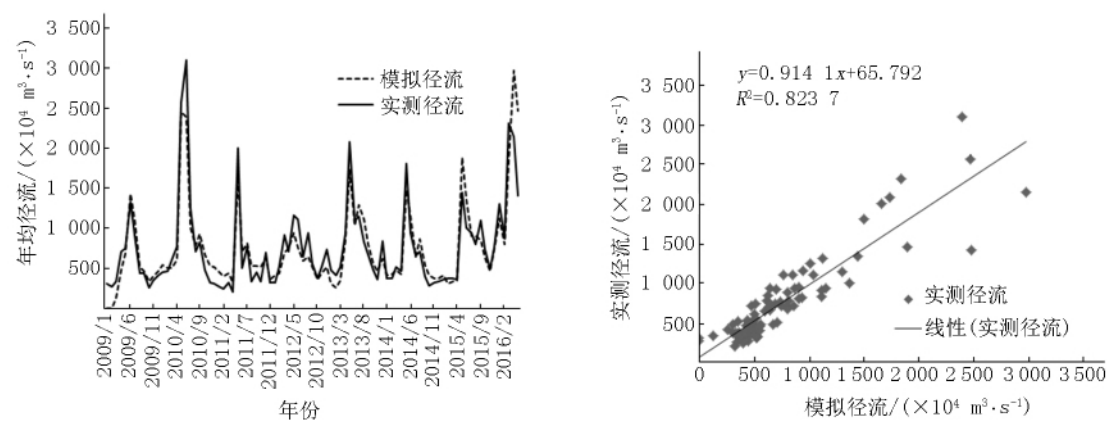


图 3 东江源寻乌水流域 2009—2016 年变化期模拟径流值与实测径流值年际变化比较

3.2 径流年内变化特征及驱动因素

3.2.1 径流季节变化特征 分析研究区基准期(1980—1992 年)和变化期(2009—2016 年)径流模拟值与实测值的年内变化特征(见图 4 和图 5),模型  $N_s$ 、 $P_{BIAS}$ 、 $R^2$  值见表 1. 可知基准期径流各季模拟效果较好,效率系数均在 0.90 以上,相对误差绝对值小于 2,其中春季模拟效果最好.变化期模拟效果春季最好,  $N_s$ 、 $P_{BIAS}$ 、 $R^2$  分别为 0.72、2.33 和 0.92;秋季最差,  $N_s$ 、 $P_{BIAS}$ 、 $R^2$  分别为 0.39、-9.61 和 0.53,实测径流值显著小于模拟径流值.结合图 3,这表明人类活动对东江源区径流年内变化的影响较大,造成秋季径流显著减少.

3.2.2 原因分析 根据已有资料,得到研究区 1990—2015 年 6 期土地利用图(见图 6),从图 6 可看出,1990—2015 年东江源区林地以及耕地面积有所下降,而果园面积大幅增加.分析 1990—2015 年各类型土地利用变化柱状图(见图 7),耕地面积所占比例有

所波动,整体呈下降趋势,由 1990 年的 13.58% 下降到 2015 年的 7.33%;变动较为明显的是林地和果园面积,林地面积所占比例一直处于下降状态,在 2000—2015 年下降速度较快,由 2000 年的 72.68% 下降到 2015 年的 45.05%;而果园面积占比则一直处于上升状态,由 1990 年的 1.14% 增长到 2015 年的 42.40%,增加面积基本与林地减少面积相当.

表 1 东江源寻乌水流域 1980—1992 年季节径流数据模拟有效性系数

时期	季节	$N_s$	$R^2$	$P_{BIAS}$
1980—1992	春季	0.99	0.99	0.22
	夏季	0.94	0.94	1.93
	秋季	0.99	0.99	-0.61
	冬季	0.99	0.99	-0.21
2009—2016	春季	0.72	0.92	2.33
	夏季	0.71	0.72	-1.72
	秋季	0.39	0.53	-9.61
	冬季	0.75	0.76	1.98

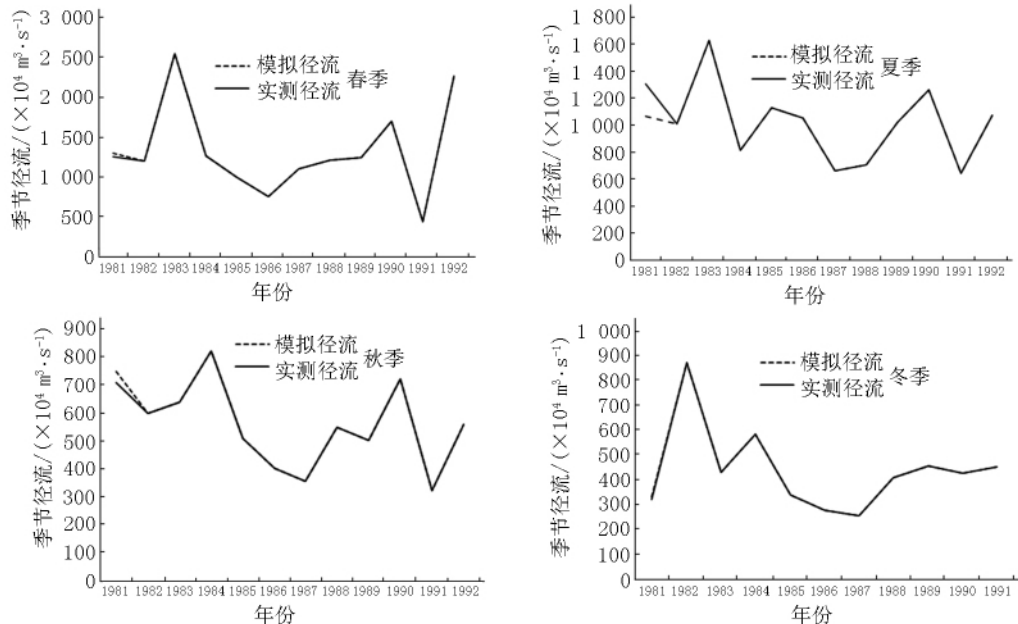


图4 东江源寻乌 watershed 1980—1992 年模拟径流值与实测径流值季节变化比较

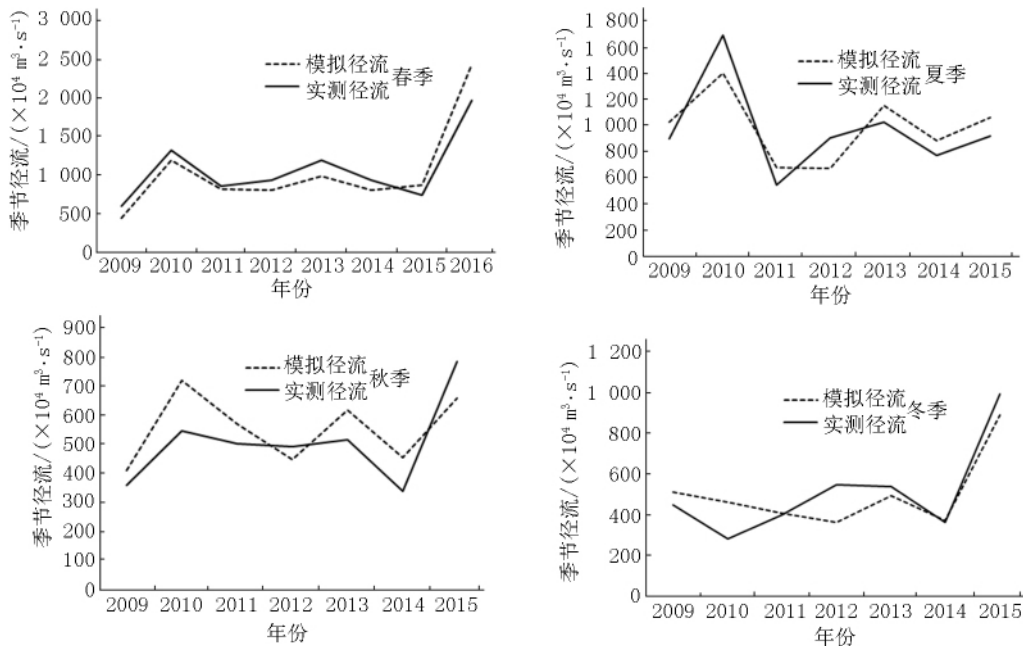


图5 东江源寻乌 watershed 2009—2016 年模拟径流值与实测径流值季节变化比较

赣南是我国著名的脐橙生产基地,寻乌县是主要的脐橙产区,寻乌县年平均降水基本满足脐橙生长发育需求,但由于东江源区是属于较为典型的亚热带季风气候,降雨年内分配不均.脐橙生长前期雨水多,而在脐橙成熟期雨水偏少,影响果实膨大,从而影响脐橙产量<sup>[18]</sup>.脐橙在生长过程中需要大量的水分,但丘陵山区用于灌溉果园的水资源有限,于是赣南脐橙生产中开始大力推广机械化节水灌溉技术.2010年江西省补充微喷灌设备5.1万套,大部分安装在赣南果园<sup>[19]</sup>.为保证果园灌溉水源,保证脐橙产量和质量,地方政府加大蓄水工程建设力度,储蓄雨水进行果园灌溉,使得东江源秋季实测径流

量显著低于模拟径流量.

## 4 结论

本文收集东江源 1980—2016 年水文气象数据、1990—2015 年 6 期土地利用数据,采用 IHACRES 模型和统计分析等方法,研究东江源寻乌 watershed 的径流变化特征及其驱动因素,主要研究结果如下:

1) 分别选择 1980—1992 年和 2009—2016 年作为模型的基准期和变化期,研究径流年际变化特征.在模型基准期,相关系数( $R^2$ )、效率系数( $N_s$ )均为 0.99,非常接近 1;相对误差( $P_{BIAS}$ )为 0.37,其绝对

值远小于10,这表明径流模拟值与实测值拟合效果非常好.在变化期, $R^2$ 和 $N_s$ 值均为0.82; $P_{BIAS}$ 值为

0.04,模型模拟效果令人满意.这表明气候要素是影响东江源区径流年际变化的主要因素;

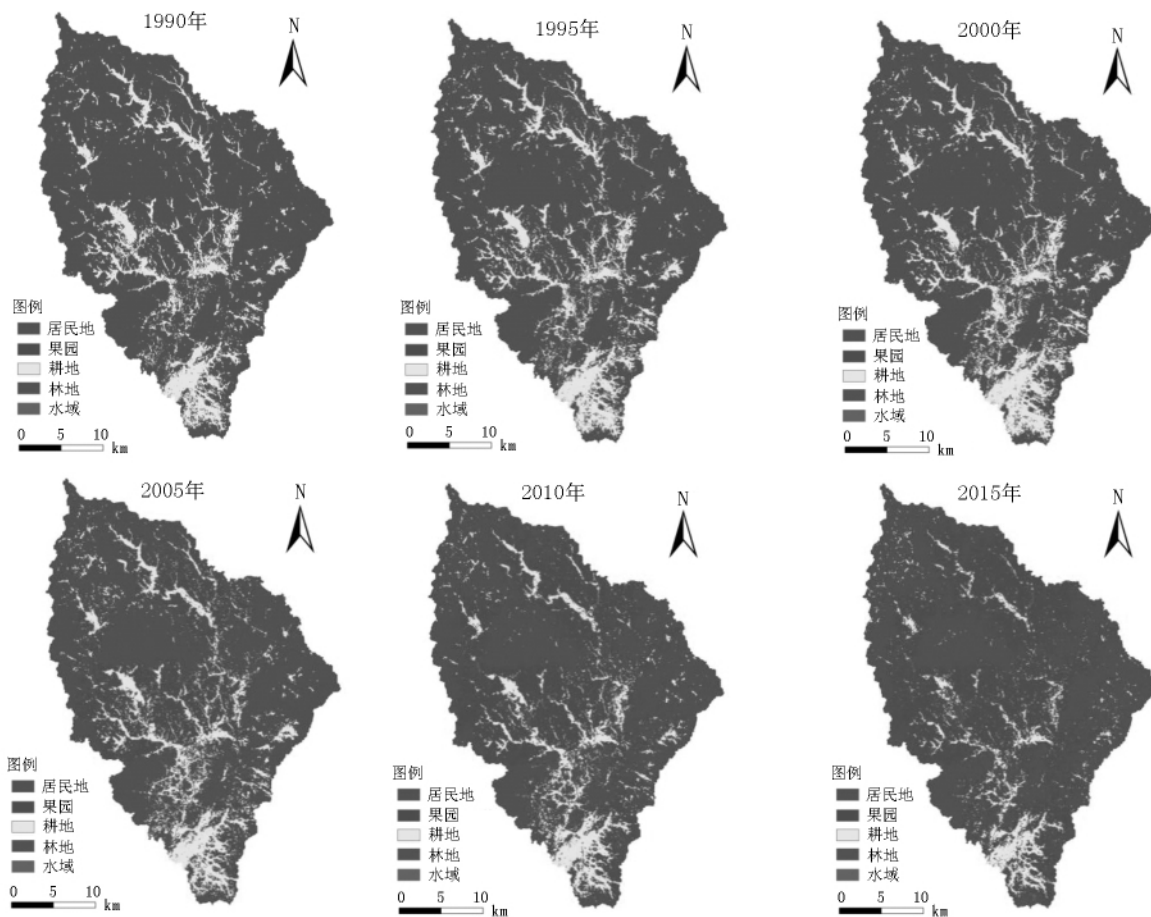


图6 东江源寻乌水流域1990—2015年土地利用图

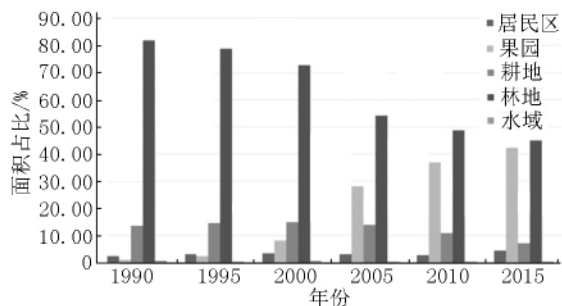


图7 东江源寻乌水流域1990—2015年各地类面积变化柱状图

2) 通过径流模拟值分析季节变化特征,计算模型评价指标值,基准期各季节 $R^2$ 和 $N_s$ 值均在0.94以上, $|P_{BIAS}|=0.21 \sim 1.93$ ,这表明基准期各季节径流模拟值与实测值拟合效果较好.在变化期,春季、夏季和冬季 $R^2=0.72 \sim 0.92$ , $N_s=0.71 \sim 0.75$ , $|P_{BIAS}|=1.72 \sim 2.33$ ,模型模拟效果可以接受;而秋季,模型 $R^2$ 、 $N_s$ 和 $P_{BIAS}$ 值分别为0.53、0.39和-9.61,模拟效果较差,模型模拟值大于实测值,这表明研究区径流季节变化除受气候要素影响外,还受人类活动等其他因素的影响;

3) 通过分析研究区土地利用变化特征,结合区域土地耕作方式,研究区近年来林地及耕地面积显著减

少,而果园面积急剧增加.为解决秋季降雨较少与脐橙成熟期需要大量水分的矛盾,地方政府修建蓄水工程汲取河道水量,导致东江源秋季实测径流量减少.

## 5 参考文献

- [1] Xie Ping, Wu Ziyi, Sang Yanfang, et al. Evaluation of the significance of abrupt changes in precipitation and runoff process in China [J]. Journal of Hydrology, 2018, 560: 451-460.
- [2] Ye Xuchun, Zhang Qi, Liu Jian, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China [J]. Journal of Hydrology, 2013, 494: 83-95.
- [3] Zhang Lulu, Podlasly C, Feger K, et al. Different land management measures and climate change impacts on the runoff: a simple empirical method derived in a mesoscale catchment on the Loess Plateau [J]. Journal of Arid Environments, 2015, 120: 42-50.
- [4] Jiang Cong, Xiong Lihua, Wang Dingbao, et al. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying pa-

- rameters [J]. Journal of Hydrology, 2015, 522: 326-338.
- [5] Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, et al. Stationarity is dead: whither water management? [J]. Science, 2008, 319( 5863 ): 573-574.
- [6] Zheng Hongxing, Zhang Lu, Zhu Ruirui, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Research, 2009, 45( 7 ): 641-648.
- [7] 曾金凤. 东江源寻乌水水资源开发利用问题与对策建议 [J]. 江西水利科技, 2016, 42( 2 ): 115-119.
- [8] 李志萌, 喻中文. 保护区生态系统功能及其产品开发利用: 以江西东江源区水资源为例 [J]. 鄱阳湖学刊, 2015( 6 ): 89-98.
- [9] 陈瑞冰, 席运官. 东江源区坡地果园水土流失防治分析 [J]. 中国水土保持科学, 2012, 10( 2 ): 92-96.
- [10] 卢艳敏. 东江源区土地可持续利用现状与生态安全评价研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2012.
- [11] 游小燕, 刘英标, 华芳. 东江源区水环境保护策略探析 [J]. 人民珠江, 2007( 1 ): 72-74.
- [12] Jakeman A J, Glittlewood L, Whitehead P G. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments [J]. Journal of Hydrology, 1990, 117( 1/2/3/4 ): 275-300.
- [13] Dye P J, Croke B F W. Evaluation of streamflow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments [J]. Environmental Modelling and Software, 2003, 18( 8/9 ): 705-712.
- [14] 柴晓玲, 郭生练, 彭定志, 等. IHACRES 模型在无资料地区径流模拟中的应用研究 [J]. 水文, 2006, 26( 2 ): 30-33, 21.
- [15] Alredaisy S M A. Recommending the IHACRES model for water resources assessment and resolving water conflicts in Africa [J]. Journal of Arid Land, 2011, 3( 1 ): 40-48.
- [16] Popov E G. Gidrologicheskie prognozy: hydrological forecasts [M]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979: 126-135.
- [17] Deo R C, Şahin M. Application of the artificial neural network model for prediction of monthly standardized precipitation and evapotranspiration index using hydrometeorological parameters and climate indices in eastern Australia [J]. Atmospheric Research, 2015, 161/162: 65-81.
- [18] 李树勇, 周小江, 殷剑敏, 等. 寻乌县脐橙种植气候地形土壤综合区划 [J]. 江西农业学报, 2007, 19( 5 ): 40-43.
- [19] 董希慧, 廖禹, 潘松, 等. 赣南脐橙机械化节水灌溉技术现状与对策分析 [J]. 江西农业学报, 2014, 26( 4 ): 36-38.

## The Variation Characteristics of Runoff and Its Driving Factors in the Xunwu River Basin of the Source Area of Dongjiang River

QI Xinyao<sup>1,2</sup>, LIU Guihua<sup>1\*</sup>, HE Zhiming<sup>3</sup>, QI Shuhua<sup>1</sup>, SHI Jiawang<sup>1</sup>, YANG Xianqing<sup>1</sup>

( 1. College of Geography Environment, Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022, China; 2. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian 350007, China; 3. Jiangxi Weather Modification Office, Nanchang Jiangxi 300096, China)

**Abstract:** The safety of water resources in the source area of Dongjiang River affects the social and economic development of the Pearl River Delta and the prosperity and stability of Hongkong. Runoff is an important hydrological factor for water resources security evaluation. The data include hydro-meteorological data and land use data, such as daily values of runoff, rainfall, temperature during 1980—2016, and land use maps and land tillage data of six phases, which is the main stream of the source area of Dongjiang River. The IHACRES model and statistical analysis methods are adopted to analyze the characteristics of runoff change and its driving factors in the Xunwu River. Some conclusions can be drawn as follows. The two stages of 1980—1992 and 2009—2016 are selected as the datum period and change period of the IHACRES model, respectively. The three evaluation criteria values (  $R^2$ ,  $N_s$  and  $P_{BIAS}$  ) of annual runoff simulation in both datum period and change period are 0.99, 0.99, 0.37 and 0.82, 0.82, 0.04, respectively, which indicates that IHACRES model is suitable for runoff simulation in the Xunwu River Basin. The effect of seasonal simulation is also acceptable (  $0.72 \leq R^2 \leq 0.92$ ,  $0.71 \leq N_s \leq 0.75$ ,  $1.72 \leq P_{BIAS} \leq 2.33$  ) except autumn. The  $R^2$ ,  $N_s$  and  $P_{BIAS}$  values of the model in autumn are 0.53, 0.39 and -9.61, respectively. These indicate that the climatic factors are the main causes of the interannual variation of runoff in the source area of Dongjiang River. Human activities induce the decrease of runoff in the source area of Dongjiang River in autumn. By analyzing the characteristics of land use change of the study area, the area of orchard increases by about 40% and the area of woodland decreases by about 40% in recent years. The orchards need sufficient water in the autumn mature period and increase water intake from river, which results in the reduction of the measured runoff in autumn.

**Key words:** the source area of Dongjiang River; the Xunwu River basin; runoff change; IHACRES; land use change (责任编辑: 刘显亮)