

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222418

基于 SWAT 模型的典型厄尔尼诺/拉尼娜年 广西北部湾南流江蓝绿水评估

童 凯^{1a,1b}, 赵银军^{1a,1b}, 胡宝清^{1a,1b}, 肖大远²

(1. 南宁师范大学 a. 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室;

b. 广西地表过程与智能模拟重点实验室, 广西 南宁 530001; 2. 广西沿海水文中心, 广西 钦州 535000)

摘要: 广西北部湾沿海区域水资源充沛, 但受厄尔尼诺/拉尼娜事件等影响, 年际分布不均匀。以广西北部湾最大入海河流南流江流域为例, 通过 SWAT 模型研究了流域典型厄尔尼诺/拉尼娜年蓝绿水特征。结果表明, 1971~2015 年流域多年平均蓝水为 835.0 mm/年, 绿水流为 929.0 mm/年, 绿水储为 114.0 mm/年; 典型厄尔尼诺年(1997 年)/拉尼娜年(2007 年)蓝水、绿水流、绿水储分别为多年平均值的 145.7%/51.6%、92.4%/96.9%、115.5%/78.3%; 厄尔尼诺/拉尼娜事件造成南流江降水明显增多/减少, 主要影响蓝水; 流域气候湿润, 绿水流主要受太阳辐射和风速等因素影响。研究结果可为水资源合理高效利用及区域高质量发展等提供参考。

关键词: 蓝绿水; SWAT 模型; 厄尔尼诺/拉尼娜年; 南流江流域

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0046-04

1 概况

南流江是桂南沿海诸河中流程最长、流域面积最大、水量最丰富的河流, 发源于玉林市大容山, 自东北向西南注入北部湾, 干流全长 285 km, 流域面积 9 232 km² (图 1(常乐水文站以上面积 6 645 km²)), 多年年均径流量 56 × 10⁸ m³。流域内土壤类型为红壤、砖红壤等, 土地利用以耕地和林地为主。流域属于南亚热带季风气候区, 年均气温 21~24 °C, 年均降雨量 1 400~1 900 mm。根据蓝绿水定义^[1], 分析评估南流江蓝水、绿水流、绿水储具有重要意义。广西北部湾沿海区域虽然水资源充沛, 但年际分布不均匀, 并受厄尔尼诺/拉尼娜事件影响。目前对该地区水资源的研

究主要集中在降水、径流方面, 针对蓝水绿水资源的研究相对较少。1997~1998 年发生了 20 世纪最强的一次厄尔尼诺事件, 对我国和全球造成重大影响和危害^[2]; 2007 年拉尼娜事件造成的大气环流异常导致 2008 年初我国大范围持续低温雨雪冰冻灾害^[3]。鉴此, 本文以广西北部湾最大入海河流——南流江流域为例, 利用 SWAT 模型模拟分析流域 1971~2015 年及典型厄尔尼诺/拉尼娜年份(1997 年/2007 年)蓝绿水特征, 以期水资源合理高效利用及区域高质量发展等提供参考。

2 研究数据和方法

2.1 数据来源

采用的数据包括 90 m 空间分辨率 DEM 数据, 2000 年土地利用数据, 世界土壤数据库(HWSD)土壤属性数据, 流域内及周边 7 个气象站日气象数据, 常乐水文站逐月径流量数据。数据基本情况见表 1。DEM、土地利用、土壤数据为模型基础数据; 气象数据为模型驱动数据; 水文数据用于模型参数率定和验证。

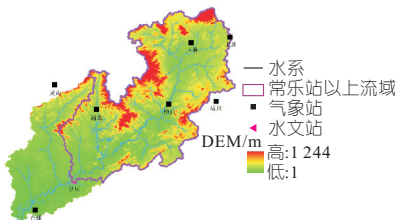


图 1 南流江流域位置图

Fig. 1 Location and topography of Nanliu River Basin

收稿日期: 2022-11-16, 修回日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(42161005); 广西科技基地和人才项目(桂科 AD20159065); 广西特聘专家项目(2019B16)

作者简介: 童凯(1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为流域水文过程, E-mail: ktong@nncu.edu.cn

通讯作者: 赵银军(1979-), 男, 博士、教授, 研究方向为河流分类与河流管理, E-mail: yinjunzhao@nncu.edu.cn

表 1 数据来源

Tab. 1 Data sources

数据	数据名称和说明	数据来源
地形	90 m 空间分辨率 DEM	SRTM(https://srtm.csi.cgiar.org/)
土地利用	2000 年 100 m 土地利用遥感监测数据	中国科学院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn/)
土壤	土壤属性数据	世界土壤数据库(HWSD)
气象	7 个气象站数据,包括最高最低气温、风速、降雨、相对湿度、太阳辐射	广西壮族自治区气象局
水文	常乐水文站逐月径流量	广西沿海水文中心

2.2 SWAT 模型

SWAT 模型可直接输出流域蓝绿水的各分量,是进行蓝绿水研究比较高效的方法^[4]。选取决定系数(R^2)、纳什效率系数(N_{NSE})和相对误差(R_{RB})对模型进行率定和验证。

2.3 蓝绿水计算

根据蓝水、绿水的定义,可根据 SWAT 模型各水文变量的输出结果进行计算。蓝水(B_{BW})可用模型输出的子流域产水量(W_{WYLD})及深层含水层补给量(D_{DA_RCHG})之和表示;绿水(G_{GW})为绿水流(G_{GWF})和绿水储(G_{GWS})之和,其中绿水流为实际蒸散发量(E_{ET}),绿水储为土壤含水率(S_{SW});绿水系数 G_{GWC} 是指某一地区或流域绿水所占的比重。具体计算方法为:

$$B_{BW} = W_{WYLD} + D_{DA_RCHG} \quad (1)$$

$$G_{GW} = E_{ET} + S_{SW} \quad (2)$$

$$G_{GWC} = [G_{GW} / (G_{GW} + B_{BW})] \times 100\% \quad (3)$$

2.4 Mann-Kendall(M-K)趋势检验

本文利用 Mann-Kendall 方法对各水资源量进行趋势检验,如果一个趋势处于 0.05 的显著性水平,则该趋势被认为具有统计学意义。

3 结果与分析

3.1 径流模拟

将 1971~1995 年设为率定期,1996~2015 年设为验证期。利用常乐站月径流资料对 SWAT 模型进行率定和验证,模型各参数率定值见表 2。率定期的 R_{RB} 、 N_{NSE} 、 R^2 分别为 -2.8%、

表 2 南流江径流模拟率定的 SWAT 模型参数

Tab. 2 Calibrated parameters used in SWAT model

for Nanliu River Basin

参数名称	参数描述	范围	率定值
ALPHA_BF	基流 α 因子	0~1	0.035
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0~1	0.35
GW_DELAY	地下水迟滞时间	0~500	2
CH_K2	主河道水力传导度	0.02~150	15
CN2(*)	SCS 径流曲线系数	-0.3~0.3	-0.15
SOL_AWC(*)	有效田间持水量	-0.5~0.5	0.25

注: * 参数乘以 (1+%), 如率定值为 0.25, 即参数乘以 (1+25%)。

0.831、0.859, 验证期的 R_{RB} 、 N_{NSE} 、 R^2 分别为 2.9%、0.874、0.891。总体模拟效果较好,说明 SWAT 模型在南流江具有较好的适用性。

3.2 水资源量时间变化

1971~2015 年南流江流域多年平均降水量为 1760.9 mm, 典型厄尔尼诺年(1997 年)、拉尼娜年(2007 年)降水量分别为 2137.9、1323.4 mm, 分别高于、低于多年平均 377.0、437.5 mm。由 M-K 检验可知, 年降水并未发生明显突变, 整体呈不显著的减少趋势, M-K 检验值为 -0.176。

蓝水随降水呈明显的年际波动变化, 最大年蓝水为 1981 年的 1537.4 mm, 最小为 1989 年的 161.5 mm。蓝水随降水呈不显著的减少趋势, M-K 检验值为 -0.059。绿水流年际变化相对较小, 幅度在 809.8~1037.6 mm 之间。根据 M-K 检验, 1971~1977 年呈增加趋势, 1978~2008 年呈减少趋势, 之后又呈增加趋势。绿水储年际变幅在 81.0~143.5 mm 之间, 整体呈不显著减少趋势, M-K 检验值为 -0.293。多年平均蓝水、绿水分别为 835.0、1043.0 mm, 绿水高于蓝水; 多年平均绿水流、绿水储分别为 929.0、114.0 mm, 分别占绿水的 89.1%、10.9%。

3.3 蓝绿水资源空间分布特征

南流江流域多年平均和典型厄尔尼诺年/拉尼娜年蓝水空间变化见图 2(a)。由图 2(a)可知,

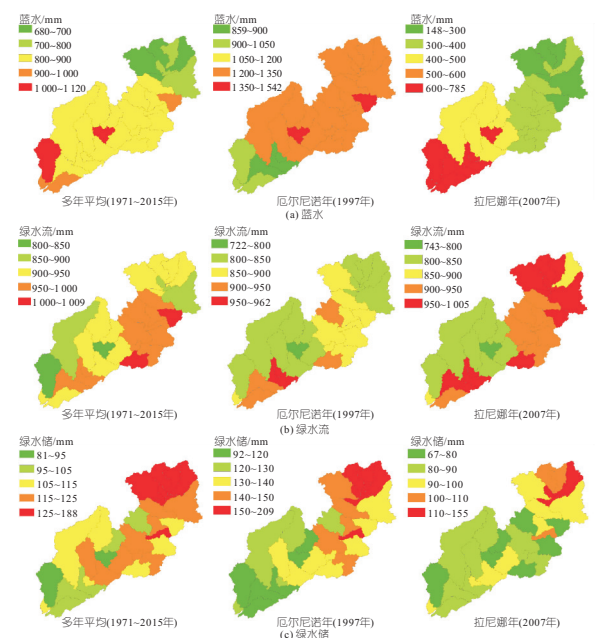


图 2 南流江流域多年平均和典型厄尔尼诺年、拉尼娜年蓝水绿水资源空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual blue water, green water flow, green water storage of typical reference years in Nanliu River Basin

多年平均蓝水空间分布整体呈自东北(上游)向西南(下游)增加的趋势,上游蓝水小于 800 mm/年,下游大于 900 mm/年,流域平均为 835.0 mm/年。受当年降水影响,典型厄尔尼诺年蓝水空间分布与多年平均空间分布特征不同,呈中上游大(大于 1 200 mm)、下游小(850~1 050 mm)的特点,流域平均为 1 217.0 mm,明显高于多年平均值。典型拉尼娜年蓝水空间分布与多年平均空间分布特征较为一致,呈自东北(上游)向西南(下游)增加的趋势,但明显低于多年平均,范围在 148~785 mm 之间,流域平均为 431.3 mm。

南流江绿水流空间分布见图 2(b)。由图 2(b)可知,多年平均绿水流空间分布整体呈流域中间高、两端稍低的特征,范围在 800~1 009 mm/年之间。典型厄尔尼诺年绿水流空间分布与多年平均相似,整体呈流域中间高、两端稍低的特征,范围在 722~962 mm 之间。典型拉尼娜年绿水流空间分布呈东北部高西部低的特征,东北部高于 950 mm,西部低于 850 mm。南流江绿水流多年平均和典型厄尔尼诺年/拉尼娜年流域平均值分别为 929.0、858.0、900.6 mm(图 3)。绿水流为实际蒸散发量(E_{ET}),本文 SWAT 模型模拟结果与采用 Penman-Monteith 公式计算的参考作物蒸散量^[5]和基于 MODIS 卫星数据反演的蒸散量^[6]接近。

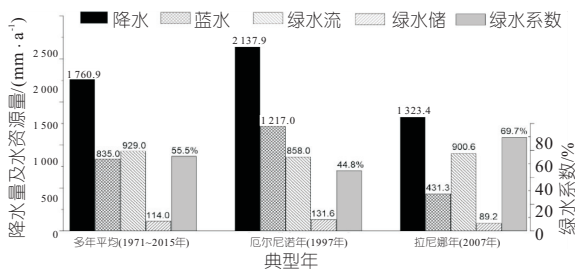


图 3 南流江多年平均和典型厄尔尼诺年

(1997 年)/拉尼娜年(2007 年)降水量和蓝水绿水资源

Fig. 3 Precipitation, blue water, green water flow, green water storage of typical reference years in Nanliu River Basin

南流江绿水储空间分布见图 2(c)。由图 2(c)可知,南流江流域多年平均和典型厄尔尼诺年/拉尼娜年绿水储空间分布类似,呈自东北(上游)向西南(下游)减少的趋势,范围分别为 81~188、92~209、67~155 mm,流域平均值分别为 114.0、131.6、89.2 mm(图 3)。典型厄尔尼诺年/拉尼娜年南流江蓝水、绿水流、绿水储分别为多年平均值(1971~2015 年)的 145.7%/51.6%、92.4%/96.9%、115.5%/78.3%。

4 讨论

南流江流域 1971~2015 年多年平均水资源量为 1 878.0 mm,蓝水为 835.0 mm,占水资源总量的 44.5%,绿水为 1 043.0 mm,占水资源总量的 55.5%(图 3)。流域绿水资源主要以绿水流为主(绿水流 929.0 mm),占绿水资源总量的 89.1%。我国北方的黄河流域、渭河流域及黑河流域的气候较为干旱,降雨较少且更多转化为绿水,绿水占水资源总量的比例明显高于南流江的 55.5%,甚至达到 80%以上^[4,7]。而我国南方的东江流域和北江流域,气候湿润,降水较多且更多转化为蓝水,流域蓝水高于绿水^[8-9]。南流江与北江和东江同属于湿润地区,年降水量接近,但由于南流江年均气温相对更高,使降水更多转化为蒸发(即绿水流),流域蓝水略低于绿水。

厄尔尼诺/拉尼娜事件造成大气环流异常从而导致气候异常,特别是降水^[3]。典型厄尔尼诺年(1997 年)和拉尼娜年(2007 年)南流江流域降水量分别为 2 137.9、1 323.4 mm,分别高于或低于多年平均 377.0、437.5 mm(图 3)。流域蓝水对厄尔尼诺/拉尼娜事件响应敏感,典型厄尔尼诺年随降水量的明显增加,蓝水较多年平均值增加 382.0 mm。流域水资源分配模式由以绿水为主转变为以蓝水为主,蓝水高于绿水,绿水系数由 55.5%降至 44.8%。与之相反,典型拉尼娜年蓝水较多年平均值减少 403.7 mm,绿水系数达 69.7%。典型厄尔尼诺年/拉尼娜年南流江降水、蓝水、绿水流、绿水储分别为多年平均值(1971~2015 年)的 121.4%/75.2%、145.7%/51.6%、92.4%/96.9%、115.5%/78.3%。

典型厄尔尼诺南流江流域降水量较多年平均增加 377.0 mm,而绿水(989.6 mm)并未增加,甚至略低于多年平均值(1 043.0 mm)(图 3)。其中绿水储为 131.6 mm,高于多年平均值(114.0 mm);绿水流为 858.0 mm,低于多年平均值(929.0 mm)。绿水流为实际蒸散发,受降水量、辐射能量(日照时长)和空气动力(风速)等气候因素的影响^[10]。珠江流域多年平均年降水量在 1 000 mm 以上^[11],降水为蒸散发提供充足水汽来源,因此实际蒸散发取决于日照时长和风速。典型厄尔尼诺南流江流域平均日照时长、风速分别为 3.89 h、1.97 m/s,低于多年(1971~2015 年)平均的 4.71 h、2.15 m/s。厄尔尼诺/拉尼娜事件造成南流江流域降水明显增多/减少,主要影响蓝水,而

绿水流并不受此影响。南流江流域气候湿润,绿水流主要受太阳辐射和风速等因素影响。

5 结论

典型厄尔尼诺年(1997年)/拉尼娜年(2007年)南流江蓝水、绿水流、绿水储分别为多年平均值的 145.7%/51.6%、92.4%/96.9%、115.5%/78.3%。厄尔尼诺/拉尼娜事件造成南流江流域降水明显增多/减少,主要影响蓝水,而绿水流并不受此影响。南流江流域气候湿润,绿水流主要受太阳辐射和风速等因素影响。

参考文献:

- [1] FALKENMARK M. Coping with water scarcity under rapid population growth[R]. Conference of SADC Ministers. Pretoria, 1995:23-24.
- [2] 王彰贵,蔡怡,张丽,等. 1997/98年厄尔尼诺特征及97年气候异常[J]. 海洋预报, 1998, 15(3):124-131.
- [3] 高辉,王永光. 2007年海温和大气环流异常及对我国气候的影响[J]. 气象, 2008, 34(4):107-112.
- [4] 李文婷,杨肖丽,任立良,等. 基于 SWAT 模型的黄

- 河源区蓝/绿水资源时空分布特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(8):59-66.
- [5] 关保多,代俊峰,杜君,等. 广西多站点参考作物蒸散量时空变化分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6):126-128.
- [6] 田义超,梁铭忠,胡宝清. 2000-2013年北部湾海岸带蒸散量时空动态特征[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8):146-158.
- [7] 赵安周,朱秀芳,潘耀忠,等. 典型年份渭河流域蓝水绿水时空差异分析[J]. 中国农业气象, 2016, 37(2):149-157.
- [8] 吕乐婷,王晓蕊,江源,等. 基于 SWAT 模型的东江流域蓝水、绿水时空分布特征研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(5):53-60.
- [9] 高艺桔,周月英,刘祖发,等. 基于 SWAT 的北江流域蓝绿水评估及其干旱响应[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(6):18-26.
- [10] 李修仓,姜彤,温姗姗,等. 珠江流域实际蒸散发的时空变化及影响要素分析[J]. 热带气象学报, 2014, 30(3):483-494.
- [11] 杨洋,滑申冰,张陵,等. 基于 RCP4.5、RCP8.5 未来碳排放情景下西江流域径流变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(12):34-37.

Assessment of Blue/Green Water in Typical El Niño/La Niña Years in the Nanliu River Basin, Beibu Gulf Based on SWAT Model

TONG Kai^{1a,1b}, ZHAO Yin-jun^{1a,1b}, HU Bao-qing^{1a,1b}, XIAO Da-yuan²

(1a. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education;

1b. Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 2. Guangxi Coastal Hydrology Centre, Qinzhou 535000, China)

Abstract: The Guangxi coastal of Beibu Gulf has abundant water resources, but the inter-annual distribution is uneven under the influence of El Niño/La Niña events. The Nanliu River is the largest river located in the costal of Beibu Gulf, Guangxi. Based on SWAT model, the characteristics of blue water, green water flow, and green water storage in typical El Niño/La Niña years in the river basin were quantitatively analyzed. The results show that from 1971 to 2015, the annual average blue water, green water flow, and green water storage in the river basin was 835.0 mm/year, 929.0 mm/year, and 114.0 mm/year, respectively. In the typical El Niño years (1997)/La Niña years (2007), the blue water, green water flow and green water storage in the river basin are 145.7%/51.6%, 92.4%/96.9% and 115.5%/78.3% of the multi-year average, respectively. The El Niño/La Niña event caused a significant increase/decrease in precipitation in the river basin, which mainly affected the amount of blue water. Due to humid climate in the basin, the amount of green water flow was mainly affected by solar radiation and wind speed. The research can provide an important reference for the rational and efficient utilization of water resources and the high-quality development of the region.

Key words: blue/green water; SWAT model; El Niño/La Niña years; Nanliu River Basin