

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.022

赣江流域气候和土地利用变化对蓝绿水的影响

李文婷^{1,2}, 杨肖丽^{1,2}, 任立良^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:采用标准化降水指数(SPI)确定赣江流域的典型年,基于SWAT模型,对典型年份赣江流域蓝绿水的时空分布进行了分析;设置多种气候与土地利用情景,定量分析了气候和土地利用变化对流域内蓝绿水的影响。结果表明:1972年、1998年和2014年分别为赣江流域的干旱年、湿润年和正常年;湿润年的蓝水量最为丰富,是干旱年的2.01倍,绿水量的变化相对稳定,干旱年绿水系数最高,是湿润年的1.44倍;土地利用变化对蓝绿水的时空分布影响较小;气候变化情景下蓝水量、绿水量分别增加了75.52 mm和30.65 mm,绿水系数减小了2.33%,共同变化情景下蓝绿水变化趋势与气候变化情景大致相同,表明气候变化对流域蓝绿水的影响较大。

关键词:气候变化;土地利用变化;蓝绿水;绿水系数;SWAT模型;赣江流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0166-08

Effects of climate and land use changes on blue and green water in the Ganjiang River Basin // LI Wenting^{1,2}, YANG Xiaoli^{1,2}, REN Liliang^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Typical years in the Ganjiang River Basin were identified according to the standardized precipitation index (SPI). Based on the soil and water assessment tool (SWAT) model, this study analyzed the spatial and temporal distribution of blue and green water in the Ganjiang River Basin in typical years. A variety of climate and land use scenarios were set to quantitatively analyze the effects of climate and land use changes on the blue and green water in the basin. The results show that the drought year, wet year, and normal year were 1972, 1998, and 2014, respectively. The blue water content was the most abundant in the wet year, which was 2.01 times that in the dry year, while the change of the green water content was relatively stable. The green water coefficient was the highest in the dry year, which was 1.44 times that in the wet year. The change of land use had little effect on the spatial and temporal distribution of blue and green water. Under the climate change scenario, the blue and green water contents increased by 75.52 mm and 30.65 mm, respectively, and the green water coefficient decreased by 2.33%, while change trend of the blue and green water under the common change scenario was roughly the same as that under the climate change scenario, indicating that the climate change had a greater impact on the blue and green water in the basin.

Key words: climate change; land use change; blue and green water; green water coefficient; SWAT model; the Ganjiang River Basin

气候变化对区域水循环过程的影响已成为当前研究热点。气候变化改变区域降水、气温以及蒸发条件,进而影响流域径流过程,加剧水资源短缺问题^[1-2]。与此同时,随着人口持续增长,高强度的人类活动改变了土地覆被条件,导致入渗、蒸发和地表

径流等一系列水文过程发生改变^[3-4]。受气候变化和土地利用变化的交互影响,地面上的水资源量被重新分配,进一步加剧了水资源供需之间的矛盾^[5]。因此,定量分析气候变化和土地利用变化对水资源的影响,对于制定科学的水资源管理体系和

基金项目:国家重点研发计划(2016YFA0601504);国家自然科学基金(52079036)

作者简介:李文婷(1996—),女,硕士研究生,主要从事气候变化与人类活动对水资源的影响研究。E-mail: liwentinghhu@163.com

通信作者:杨肖丽(1976—),女,教授,博士,主要从事气候变化与人类活动对水资源的影响研究。E-mail: yangxl@hhu.edu.cn

提高水资源利用效率具有重要意义。

Falkenmark^[6]最早提出了蓝水和绿水的概念,为水资源研究与管理提供了新视角。蓝水主要是指以地表径流、土壤中流、地下径流3种形式存在的水,绿水是指土壤水和实际蒸散量。绿水作为水分消耗的主体,其80%的水资源用于全球农业生产^[7],对维持生态系统的稳定起着不可替代的作用。由于蓝水资源与人类发展需求(饮水、灌溉、航运、发电、工业生产等)息息相关^[8-9],导致传统的水资源研究大多集中于蓝水资源,忽视了绿水资源在生态系统中的重要作用。研究表明,绿水资源作为植物生长的基础,对维持陆地生态系统的稳定具有不可替代的作用^[10]。蓝绿水的变化主要受气候变化和人类活动两方面因素的影响,在长时间尺度上,气候变化对流域水文循环过程的影响起主导作用;在短时间尺度上,土地利用变化则是影响流域水文要素变化的关键因素之一^[11]。近年来,国内外诸多学者陆续开展了流域内蓝绿水对气候变化和土地利用变化的响应研究。Zhang等^[8]基于SWAT(soil and water assessment tool)模型,通过设置气候变化与土地利用变化多种情景,定量研究了赣江上游多情景下蓝绿水的变化情况;Huang^[12]研究了气候变化和土地利用变化交互影响下的全球农业蓝绿水资源的变化情况。Akbar等^[13]研究了气候和土地利用变化对巴基斯坦昆哈尔河流域径流的影响。赵安周等^[14]借助SWAT模型探讨了气候变化和人类活动对渭河流域蓝绿水资源的影响。

赣江是长江的重要支流,地处亚热带湿润地区。赣江流域内气候变化剧烈,降水年内、年际分配不均,导致了洪涝、干旱等气象灾害频发^[15]。此外,由于流域内经济快速发展、城市化进程加快导致建筑用地扩张,下垫面条件发生改变。基于此,本文利用标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)分析典型年份赣江流域蓝绿水资源的时空分布,通过设置不同情景来定量分析气候变化和土地利用变化对赣江流域蓝绿水的影响,以为赣江流域水资源管理提供参考。

1 流域概况

赣江流域位于长江中下游南岸,地处 $24^{\circ}31'N \sim 28^{\circ}45'N$ 、 $113^{\circ}34'E \sim 116^{\circ}38'E$ 之间,总面积 8.35万 km^2 ,是鄱阳湖流域最大的子流域(图1)。赣江上游流域主要为赣州市,中游流域主要为吉安市和抚州市,下游流域包括新余及宜春市的各县。赣江流域气候属于亚热带季风气候,气候温和,雨量充沛,多年平均降水量约为 1600 mm ,多年平均气温

约为 18°C 。赣江流域地势大致呈南高北低的趋势,西北部为九岭山,东部与武夷山接壤,北部多为低丘岗地和平原。流域内土地利用类型以林地和耕地为主,其中林地占比超过65%。流域土壤种类多样,涵盖红壤、黄壤等20多种。

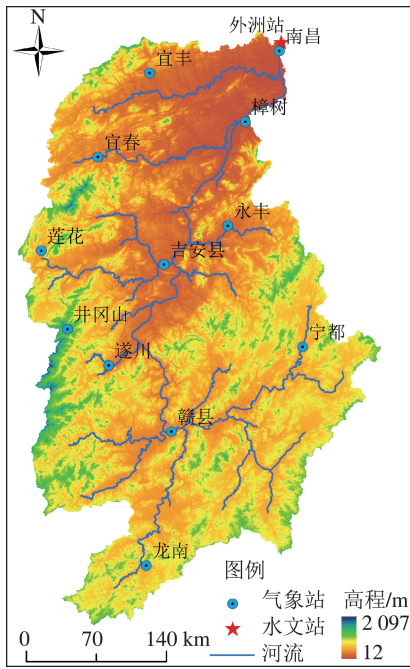


图1 赣江流域概况

Fig. 1 The Ganjiang River Basin

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

SWAT模型需要详细的流域基础数据,表1为构建赣江流域SWAT模型所需的各类数据,主要包括DEM数据、土地利用数据、土壤数据、气象数据、水文数据等。

2.2 SPI

SPI用于表征某时间段内降水量出现的概率,该指数未考虑具体的干旱机理,是一种计算简单、稳定性较好的干旱指数,广泛应用于不同气候区的干旱识别^[16]。SPI具体计算过程见文献^[17]。干旱等级根据GB/T 20481—2017《气象干旱等级》进行划分(表2)。本文采用Matlab程序方法,计算12月尺度的SPI值(SPI-12),确定赣江流域1965—2016年的气候典型年份。

2.3 SWAT模型

选用SWAT模型对区域蓝绿水进行模拟。SWAT模型是基于物理机制的大尺度半分布式水文模型,它可以结合流域内多种地理要素来模拟复杂的流域水文过程^[18]。SWAT模型能够输出蓝绿水的各个组成分量,广泛应用于蓝绿水模拟^[19]。根据

表 1 SWAT 模型基础数据
Table 1 Basic data of SWAT model

数据库类型	数据名称	数据描述	数据来源
空间数据库	DEM 数据	分辨率为 90 m 的数据	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)
	土地利用数据	1990 年、2015 年两期分辨率为 30 m 的数据	中国科学院西部生态环境数据中心 (http://www.resdc.cn/)
	土壤数据	1:100 万	中国科学院南京土壤研究所 (http://www.issas.cas.cn/)
属性数据库	气象数据	1965—2016 年逐日气象监测数据	中国气象数据网 (https://data.cma.cn/)
	土壤属性表	土壤属性库	世界土壤数据库 (HWSD) (http://www.fao.org/)
	天气发生器	气象数据库	中国气象数据网 (https://data.cma.cn/)
水文数据库	水文数据	1965—2016 年外洲站月流量监测数据	赣江流域水文年鉴

表 2 SPI 的旱涝等级
Table 2 Drought/flood rating of SPI

SPI 范围	旱涝等级	SPI 范围	旱涝等级
>2	特涝	>-1~-0.5	轻旱
>1.5~2	重涝	>-1.5~-1	中旱
>1~1.5	中涝	>-2~-1.5	重旱
>0.5~1	轻涝	≤-2	特旱

蓝绿水的定义以及 SWAT 模型输出结果可计算蓝水量、绿水量以及绿水系数,计算过程如下:

$$W_B = W_{YLD} + W_{A_RCHG} \quad (1)$$

$$W_G = ET + W_S \quad (2)$$

$$C_{GW} = \frac{W_G}{W_B + W_G} \quad (3)$$

式中: W_B 为蓝水量, mm; W_{YLD} 为子流域产水量, mm; W_{A_RCHG} 为深层含水层补给量, mm; W_G 为绿水量, mm; ET 为实际蒸散发量, mm; W_S 为土壤含水量, mm; C_{GW} 为绿水系数, 是指流域绿水量所占蓝绿水总量的比例。

2.4 累积距平

累积距平是一种常用的判断趋势变化程度的方法, 它是由曲线直观判断某一要素的变化趋势^[20]。对于序列 x_i , 其某一时刻 s 的累积距平为

$$\hat{x}_s = \sum_{i=1}^s (x_i - \bar{x}) \quad (s = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

2.5 土地利用动态度

土地利用动态度 K 用来表示某一时间段内土地利用类型的变化趋势和速度^[21], 计算公式如下:

$$K = \frac{S_a - S_b}{S_a} \frac{1}{T} \times 100\% \quad (5)$$

式中: S_a 为研究初期的土地利用面积, km²; S_b 为研究末期的土地利用面积, km²; T 为时间长度。

3 结果与分析

3.1 气象要素与土地利用变化

3.1.1 气象要素变化

气候变化是影响流域内蓝绿水分布的重要因

素之一, 分析赣江流域 1965—2016 年降水量和气温的变化情况 (图 2), 有助于理解蓝绿水的变化特征。赣江流域多年平均降水量达 1 636 mm, 在 2002 年达到最高值 (2 124 mm); 多年平均气温为 17.96℃; 多年平均最高气温为 22.75℃; 多年平均最低气温为 14.52℃, 三者均在 2015 年达到最大值 (19.61℃、24.10℃ 和 16.52℃)。利用非参数统计检验对流域内降水量、气温进行趋势性检验, 结果表明, 多年平均降水量统计值 Z 为 0.1207, 未通过 95% 的显著性检验, 表现为不显著的增大; 多年平均气温、多年平均最高气温及多年平均最低气温的统计值 Z 分别为 0.4781、0.3409 和 0.5671, 均通过显著性检验, 呈现显著的增大趋势。

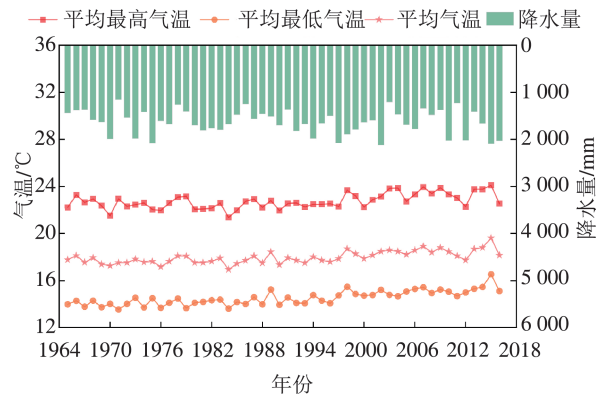


图 2 赣江流域 1965—2016 年降水量和气温变化
Fig. 2 Variations of precipitation and temperature in the Ganjiang River Basin from 1965 to 2016

利用累积距平法对赣江流域 1965—2016 年的降水量、多年平均气温、平均最高气温和平均最低气温进行突变点检验分析 (图 3)。流域内降水量累积距平过程线波动大, 震荡频率较高, 年际变化较大, 1991 年是降水量波动上升的起始点; 平均气温、平均最高气温和平均最低气温大致分为两个变化阶段, 1965—1996 年总体呈减小趋势, 1997—2016 年总体呈增大趋势, 1997 年是平均气温和平均最高气温的突变点, 1996 年是平均最低气温的一个突变点。

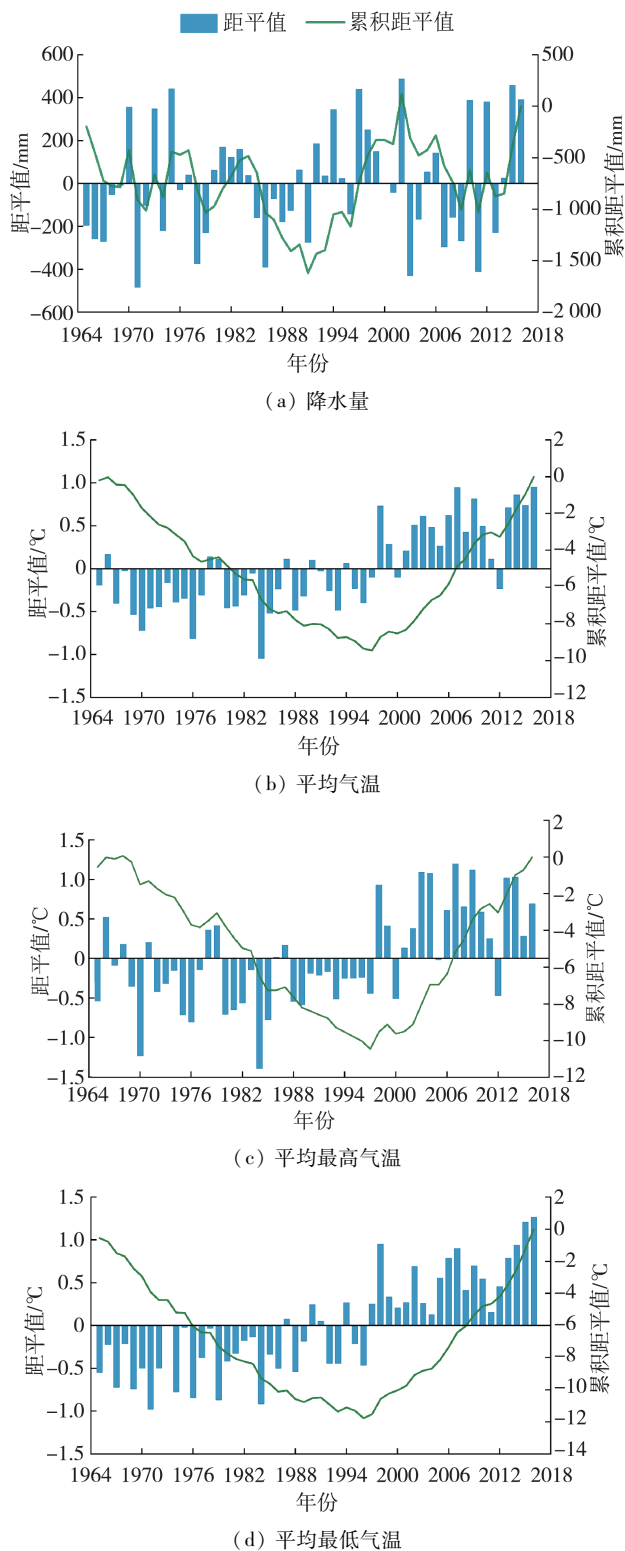


图3 赣江流域降水量和气温累积距平

Fig.3 Cumulative anomalies of precipitation and temperature in the Ganjiang River Basin

基于赣江流域内12个气象站点的降水量、平均气温、平均最高气温、平均最低气温的年均值数据,采用反距离权重法进行空间插值,得到各气象要素的空间分布图(图4)。赣江流域内降水空间分布不均,流域的东部、西部和西北部地区降水较为丰富,流域的南部和中部地区降水较少。流域内平均气

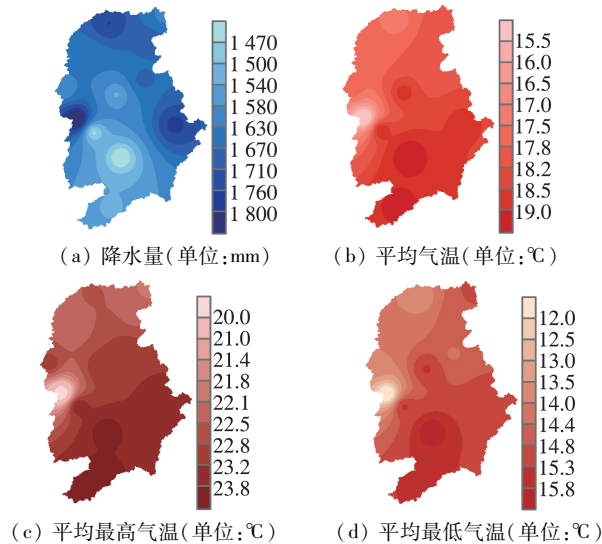


图4 赣江流域多年平均降水量和气温的空间分布

Fig.4 Spatial distributions of multi-year average precipitation and temperature in the Ganjiang River Basin

温、平均最高气温和平均最低气温三者的空间变化趋势基本保持一致,均呈现东西分布不均,流域西部气温较低,东南部气温较高,温差较大。

3.1.2 土地利用变化

在赣江流域1990年和2015年两期土地利用中(表3),林地和耕地是主要土地利用类型,两者占流域总面积90%以上,其中林地占比超过65%,草地、水域、建筑用地和裸地占比较少,均不超过6%。从变化趋势来看,1990—2015年间赣江流域内建筑用地单一动态度为1.38%,其年增速最大,这与流域内经济快速发展、城市化进程加快密切相关。水域单一动态度为0.11%,呈现增大的趋势,这与流域内水利设施的修建、退耕还湖相关。耕地、裸地、林地和草地单一动态度分别为-0.06%、-0.39%、-0.01%和-0.27%,总体均呈现减小的趋势。

3.2 SWAT模型建立与评价

3.2.1 SWAT模型建立

首先根据基础数据建立土壤数据库、气象数据库等,然后根据赣江流域DEM分辨率,通过设置集水区阈值和流域总出口点,经模型运算将赣江流域划分为63个子流域。在生成的子流域基础上,综合考虑各子流域的土地利用、坡度、土壤类型分布情况,生成了941个水文响应单元(HRU)。

3.2.2 参数敏感性分析

SWAT模型参数众多,根据SWAT-CUP中的全局敏感性对参数进行分析,其中 t 值表示参数敏感性程度, t 的绝对值越大表示参数越敏感; p 值表示参数敏感性的显著性, p 越接近0表示越显著。根据敏感性分析结果,选取10个敏感性较高的参数作为赣江流域的率定参数(表4)。其中,对径流产生

表 3 1990—2015 年赣江流域土地利用类型变化

Table 3 Changes of land use types in the Ganjiang River Basin from 1990 to 2015

土地利用类型	面积/km ²		变化面积/km ²	占流域面积比例/%		单一动态度/%
	1990 年	2015 年		1990 年	2015 年	
耕地	20 261. 00	19 941. 00	- 320. 00	25. 14	24. 74	- 0. 06
裸地	11. 22	10. 23	- 0. 99	0. 014	0. 013	- 0. 39
林地	53 221. 94	53 107. 90	- 114. 05	66. 04	65. 89	- 0. 01
草地	4 396. 10	4 117. 48	- 278. 62	5. 45	5. 11	- 0. 27
建筑用地	1 276. 45	1 951. 94	675. 49	1. 58	2. 42	1. 38
水域	1 428. 39	1 468. 94	40. 55	1. 77	1. 82	0. 11

表 4 SWAT 模型参数选择及率定结果

Table 4 Selection of SWAT model parameters and calibration results

敏感度排序	参数符号	参数名称	<i>t</i>	<i>p</i>	率定范围	最优值
1	CH_K2	主河道有效水力传导系数	10. 25	0. 00	5 ~ 130	129. 625
2	ALPHA_BF	基流 α 因子	6. 26	0. 00	0 - 1	0. 749
3	CN2	SCS 径流曲线数	- 6. 15	0. 00	- 0. 2 ~ 0. 2	0. 012 4
4	CH_N2	主河道曼宁系数	3. 87	0. 00	0 - 0. 3	0. 212 7
5	GW_REVAP	地下水蒸发系数	1. 41	0. 16	0 - 0. 2	0. 193 8
6	SOL_AWC	土壤有效含水率	0. 95	0. 34	- 0. 2% ~ 1. 0%	0. 713 2%
7	SOL_K	土壤饱和导水率	- 0. 87	0. 38	- 0. 8% ~ 0. 8%	0. 315 2%
8	ESCO	土壤蒸发补偿系数	- 0. 62	0. 53	0. 8 ~ 1. 0	0. 960 2
9	GW_DELAY	地下水延迟时间	0. 18	0. 86	30 ~ 450 s	93. 419 998 s
10	GWQMN	浅层地下径流系数	0. 08	0. 94	0 ~ 2	1. 3

较为敏感的参数有 CH_K2(主河道水力传导率)、ALPHA_BF(基流 α 因子)、CN2(SCS 径流曲线数)。参数 CH_K2 反映河道汇流过程;参数 ALPHA_BF 主要影响地下水过程;参数 CN2 反映降水前流域下垫面特征,与土壤湿度有关,土壤湿度愈大敏感性愈强。在模型运行过程中,利用赣江流域外洲水文站 1965—2016 年逐月径流观测数据,结合 2015 年土地利用数据,设置 1960—1964 年为模型预热期,1965—1990 年为率定期,1991—2016 年为验证期。参数率定采用 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 算法,外洲水文站敏感参数最优值如表 4 所示。

3.2.3 模型结果评价

本文选用决定系数 R^2 、Nash-Sutcliffe 系数 (E_{ns})、相对误差 R_E 共 3 个指标^[22]对 SWAT 模型模拟结果进行评价(图 5)。结果表明,率定期评价结果为: $R^2 = 0.94$, $E_{ns} = 0.93$, $R_E = -4.1\%$;验证期评价结果为: $R^2 = 0.93$, $E_{ns} = 0.90$, $R_E = 9.5\%$ 。总体模型模拟结果较好,说明 SWAT 模型可用于研究赣江流域蓝绿水对气候变化和人类活动的响应模拟研究。

3.3 典型干湿年份确定

选用 SPI-12 来确定赣江流域 1965—2016 年的典型年份。由图 6 确定 1972 年、1998 年和 2014 年分别为赣江流域的干旱年、湿润年和正常年。

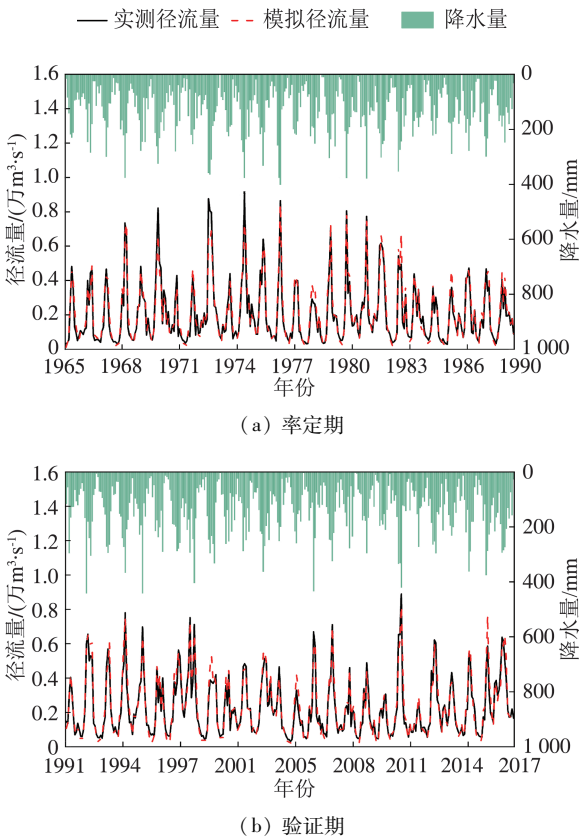


图 5 赣江流域 SWAT 模型月径流模拟率定和验证结果
Fig.5 Calibration and validation results of monthly runoff simulated with SWAT model in the Ganjiang River Basin

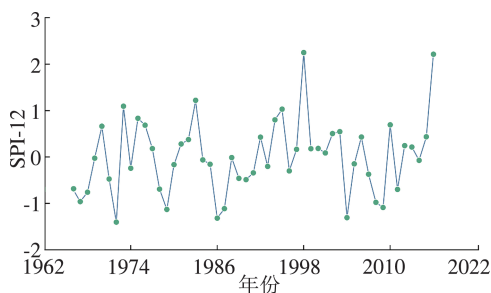


图6 赣江流域历年 SPI-12 值

Fig.6 SPI-12 values of the Ganjiang River Basin over years

3.4 典型年份下的蓝绿水时空变化特征

赣江流域在干旱年、正常年、湿润年的蓝水量分别为 638.99 mm、832.81 mm 和 1283.14 mm。湿润年的蓝水量是干旱年的 2.01 倍,是正常年的 1.54 倍,存在较大差异,这主要是由于湿润年的降水量明显高于干旱年和正常年。与蓝水量相比,赣江流域的绿水量在 3 个典型年份的变化比较稳定,差异不大。干旱年、正常年、湿润年的绿水量分别为 833.52 mm、830.95 mm、815.97 mm。此外,赣江流域干旱年、正常年、湿润年的绿水系数也存在一定差异,分别为 57.26%、51.29% 和 39.64%。干旱年的绿水系数是湿润年的 1.44 倍,表明干旱年的绿水资源比例明显高于湿润年,对于干旱年份,绿水资源对维持生态平衡尤为重要。

赣江流域典型年份的蓝水量、绿水量和绿水系数空间分布见图 7。总体来看,3 个典型年份的蓝水量空间分布基本保持一致,均呈现自北向南减少的趋势。在湿润年,蓝水量最为丰富,流域各地蓝水量均大于 550 mm,北部和东南部大部分地区超过 940 mm;在正常年,流域内蓝水量位于 540 ~ 1 300 mm 之间,南部地区蓝水量不足 600 mm;在干旱年,蓝水量明显减少,整体位于 400 ~ 900 mm 之间,南部地区蓝水量不足 500 mm。

流域内 3 个典型年份的绿水量空间分布总体一致,且差异较小,均呈现从东北向西南递减的趋势。在湿润年,大部分地区的绿水量在 800 mm 以下,东北部少数地区大于 900 mm;在正常年,流域内大部分地区绿水量为 770 ~ 880 mm,北部绿水量较大,大于 910 mm;在干旱年,绿水量较为丰富,流域大部分地区处于 810 mm 以上,北部地区绿水量为 870 ~ 960 mm。

绿水系数的空间分布总体表现为由南部地区向北部地区递减。在湿润年,流域内大部分地区的绿水系数在 39% 以下,西南部少数地区在 47% 以上;在正常年,南部大多数地区绿水系数在 49% 以上,

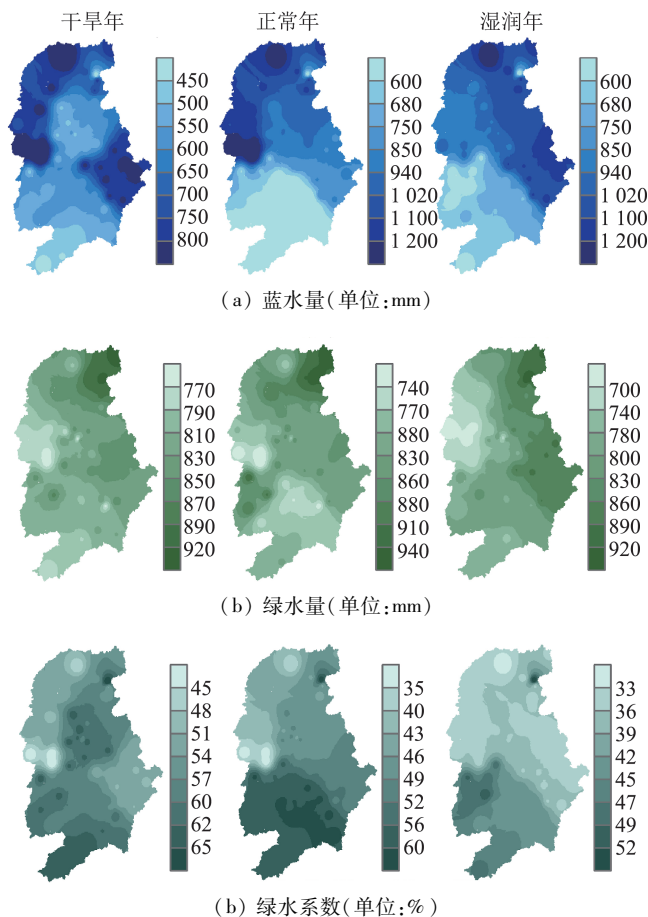


图7 典型年份蓝绿水量、绿水系数的空间分布

Fig.7 Spatial distributions of blue and green water contents and green water coefficient in typical years

北部地区在 43% 以下;在干旱年,流域内绿水系数与其他典型年份相比较,大部分地区在 54% 以上,这主要是由于干旱年份降水量少、气温较高,流域内蒸散发作用消耗的水资源量高于湿润年和正常年,从而导致干旱年份的绿水系数高于其他典型年份。

3.5 气候与土地利用变化对蓝绿水的时空影响

3.5.1 情景设置

采用情景对比法来定量分析气候变化和土地利用变化对赣江流域蓝绿水的影响。赣江流域 1965—2016 年降水量突变年份为 1991 年,同时保证划分的两段气象数据时间长度保持一致,因此选择 1990 年作为划分气象数据的时间点。具体设置见表 5。

3.5.2 蓝绿水时空变化特征

蓝绿水的变化主要受气候变化和人类活动两方面因素的影响,土地利用变化是人类活动作用的直接表现。因此,为定量分析气候变化和土地利用变化对蓝绿水的影响,本文将不同气候情景、土地利用情景分别代入校准好的 SWAT 模型,各情景下蓝绿水的变化情况见表 5。

表 5 赣江流域气候与土地利用情景设置

Table 5 Scenarios of climate and land use in the Ganjiang River Basin

情景	土地利用数据时间	气象数据序列	蓝水量/mm	绿水量/mm	绿水系数/%
基准期	1990 年	1965—1990 年	843.71	820.60	49.71
土地利用变化情景	1990 年	1991—2016 年	843.22	821.11	49.75
气候变化情景	2015 年	1965—1990 年	919.23	851.25	48.55
气候与土地利用共同变化情景	2015 年	1991—2016 年	918.31	852.06	48.61

在土地利用变化情景下,蓝水量、绿水量、绿水系数分别为 843.22 mm、821.11 mm 和 49.75%,与基准期相比,变化微弱,这主要是因为 1990—2015 年赣江流域土地利用类型未发生较大变化,仅有建筑用地的单一动态度为 1.38%,变化程度较大,其余土地利用类型的变化量均较小。因此,土地利用变化对流域内水文过程影响作用较小。

在气候变化情景下,蓝水量、绿水量、绿水系数分别为 919.23 mm、851.25 mm 和 48.55%,与基准期相比,蓝水量、绿水量分别增加了 75.52 mm 和 30.65 mm,绿水系数减小了 2.33%。这主要是由于流域内 1965—2016 年降水量、气温均呈上升趋势,其中降水量的增加会直接导致蓝水量的增加,而气温的升高首先会增加流域内的蒸散发量,其次蒸散发量作为绿水的主要组成部分,其增加将进一步增加绿水量。绿水系数的减小可能是由于降水转化的蓝水量较多,使得绿水资源在蓝绿水总量中所占比例有所下降。

在共同变化情景下,蓝水量、绿水量和绿水系数分别为 918.31 mm、852.06 mm 和 48.61%。共同变化情景下的水资源量变化趋势与气候变化情景下基本一致,表明气候变化对赣江流域蓝绿水量影响较大。

赣江流域各情景下的蓝水量、绿水量和绿水系数空间分布见图 8。整体而言,4 种情景下的蓝水量基本上呈现从北向南减少的趋势。土地利用变化对蓝水量的影响不明显;气候变化情景下,流域内蓝水量整体呈增加趋势,主要集中于流域西北部 and 东南部,这与流域内降水的空间分布有一定关系,赣江流域降水分布由北向南呈现递减的趋势,降水量的分布直接影响蓝水量的分布;共同变化情景下的蓝水量空间变化与气候情景下基本一致,总体呈增加趋势。

各情景下的绿水量的空间分布总体呈现由东向西递减的趋势。与蓝水量变化趋势基本相似,流域内绿水量在土地利用变化情景下变化微弱,在气候变化、共同变化情景下均呈增加趋势。绿水量的空间分布一定程度上受流域内气温分布的影响,赣江流域西部气温较低,东南部气温较高,进而使绿水量具有相似的空间分布特征。

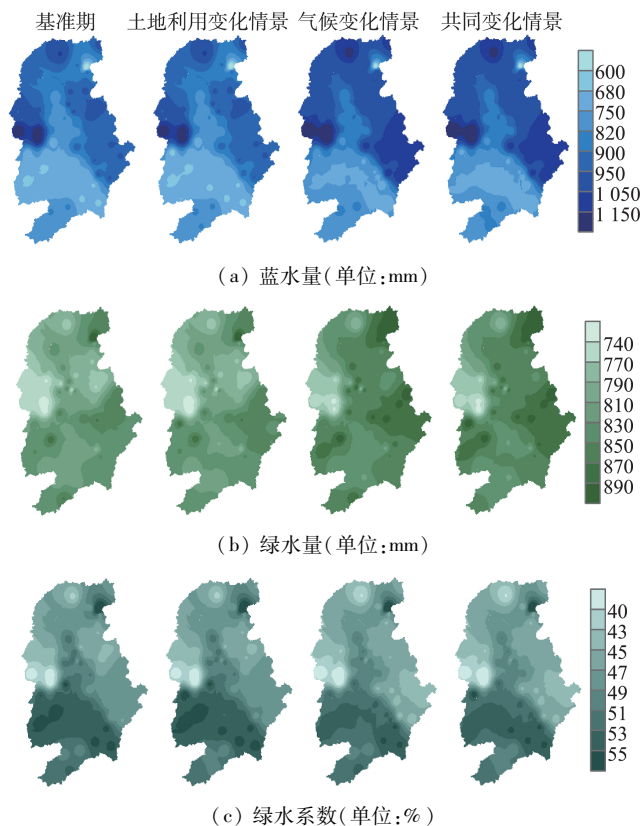


图 8 各情景蓝绿水量、绿水系数的空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of blue and green water quantity and green water coefficient under different scenarios

4 种情景下绿水系数的空间分布均呈现由西南向东北地区递减的趋势。土地利用情景下绿水系数变化不大,气候变化情景下流域西南部的绿水系数呈减小趋势,共同变化情景下绿水系数变化趋势与气候变化情景下基本一致。绿水系数的减小可能是由于在气候变化情景下蓝水量的增幅大于绿水量,绿水量占蓝绿水总量的比例出现了一定程度的下降。

4 结 论

a. SWAT 模型在赣江流域的月径流模拟精度较好,表明模型可用于赣江流域蓝绿水对气候变化和人类活动的响应模拟。

b. 根据 SPI 确定 1972 年、1998 年、2014 年分别为赣江流域的干旱年、湿润年和正常年。赣江流域湿润年的蓝水量是干旱年的 2.01 倍,是正常年的 1.54 倍;赣江流域绿水量在 3 个典型年份的变化比较稳定;赣江流域干旱年的绿水系数是湿润年的

1.44 倍。从空间分布来看,在 3 个典型年份下,蓝水量呈现自北向南减少的趋势;绿水量呈现从东北向西南递减的趋势;绿水系数总体表现为由南部地区向北部地区递减。

c. 土地利用变化情景下,蓝水量、绿水量和绿水系数分别为 843.22 mm、821.11 mm 和 49.75%;气候变化情景下,蓝水量、绿水量和绿水系数分别为 919.23 mm、851.25 mm 和 48.55%;共同变化情景下,蓝水量、绿水量和绿水系数分别为 918.31 mm、852.06 mm 和 48.61%,表明气候变化对赣江流域蓝水量影响较大。从空间分布来看,4 种情景下的蓝水量整体呈现从北向南减少的趋势;绿水量表现为由东向西递减;绿水系数则呈由西南向东北地区递减的趋势。

参考文献:

- [1] 薛联青,杨帆,杨昌兵,等. 外界胁迫作用下塔里木河流域径流变化响应的敏感性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):1-6. (XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Sensitivity analysis of the streamflow alteration subjected to climate changes and anthropogenic activities in the Tarim River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(1):1-6. (in Chinese))
- [2] 邓鹏,孙善磊,黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020,48(1):39-45. (in Chinese))
- [3] ZHOU F, XU Y, CHEN Y, et al. Hydrological response to urbanization at different spatiotemporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region[J]. Journal of Hydrology, 2013, 485: 113-125.
- [4] 刘静,余钟波. 江苏省农产品水足迹与虚拟水流动及其环境影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):320-326. (LIU Jing, YU Zhongbo. Water footprints and virtual water flows of agricultural products in Jiangsu and their environmental impacts[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 320-326. (in Chinese))
- [5] 吴绍洪,高江波,韦炳干,等. 自然灾害韧性社会的理论范式[J]. 地理学报,2021,76(5):1136-1147. (WU Shaohong, GAO Jiangbo, WEI Binggan, et al. Theoretical paradigm for natural disaster-resilient society[J]. Acta Geographica Sinica, 2021,76(5):1136-1147. (in Chinese))
- [6] FALKENMARK M. The new blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning and management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(3): 129-132.
- [7] 谢子波,朱奎,鲁帆,等. 基于水循环模拟的潮白河流域蓝水绿水资源变化趋势分析[J]. 水文,2019,39(1):44-49. (XIE Zibo, ZHU Kui, LU Fan, et al. Trend analysis for blue and green water resources in Chaobai river basin based on hydrologic cycle simulation[J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(1):44-49. (in Chinese))
- [8] ZHANG Y F, TANG C J, YE A Z, et al. Impacts of climate and land-use change on blue and green water: a case study of the Upper Ganjiang River Basin, China[J]. Water,2020,12(10):2661.
- [9] 孙克,聂坚. 基于引力模型的省域灰水足迹空间关联网络分析[J]. 水资源保护,2019,35(6):29-36. (SUN Ke, NIE Jian. Spatial correlation network analysis of provincial grey water footprint based on gravity model[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 29-36. (in Chinese))
- [10] 石嘉丽,张晓龙,李红军,等. 河北坝上地区绿水时空变化及其驱动因素研究[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1030-1041. (SHI Jiali, ZHANG Xiaolong, LI Hongjun, et al. Spatial-temporal changes in green water and its driving factors in the Bashang area of Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1030-1041. (in Chinese))
- [11] 张奇,刘元波,姚静,等. 我国湖泊水文学研究进展与展望[J]. 湖泊科学,2020,32(5):1360-1379. (ZHANG Qi, LIU Yuanbo, YAO Jing, et al. Lake hydrology in China: advances and prospects[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1360-1379. (in Chinese))
- [12] HUANG Z W. Global agricultural green and blue water consumption under future climate and land use changes[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 242-256.
- [13] AKBAR H, GHEEWALA S H. Impact of climate and land use changes on flowrate in the Kunhar River Basin, Pakistan, for the period (1992—2014)[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(8).
- [14] 赵安周,赵玉玲,刘宪锋,等. 气候变化和人类活动对渭河流域蓝水绿水影响研究[J]. 地理科学,2016,36(4):571-579. (ZHAO Anzhou, ZHAO Yuling, LIU Xianfeng, et al. Impact of human activities and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River Basin of Northwest China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016,36(4): 571-579. (in Chinese))

(下转第 189 页)

341. (in Chinese))
- [26] BOUZA-DEAÑO R, TERNERO-RODRÍGUEZ M, FERNÁNDEZ-ESPINOSA A J. Trend study and assessment of surface water quality in the Ebro River (Spain) [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 361 (3/4): 227-239.
- [27] HIRSCH R M, SLACK J R, SMITH R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data [J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(1): 107-121.
- [28] YUAN Y M, CAVE M, ZHANG C S. Using local Moran's I to identify contamination hotspots of rare earth elements in urban soils of London [J]. *Applied Geochemistry*, 2018, 88(Part B): 167-178.
- [29] ZHAI X Y, GUO L, ZHANG Y Y. Flash flood type identification and simulation based on flash flood behavior indices in Chin [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64: 1140-1154.
- [30] ROUSSEEUW P J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 1987, 20: 53-65.
- [31] 刘钦普. 淮河流域化肥施用空间特征及环境风险分析 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24 (9): 1512-1518. (LIU Qipu. Distribution and environmental risk assessment of fertilizer application on farmland in Huai River Basin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24 (9): 1512-1518. (in Chinese))
- [32] 石一珺, 倪中应. 桐庐县水田酸碱度现状及改良措施 [J]. *中国农技推广*, 2016, 32 (5): 52-53. (SHI Yijun, NI Zhongying. Current situation and improvement measures of paddy field pH in Tonglu County [J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2016, 32 (5): 52-53. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-07-05 编辑: 施业)

(上接第 173 页)

- [15] 陈晓菲, 任立良, 江善虎, 等. 赣江上游流域蒸散发量影响因素的遥感分析 [J]. *水资源保护*, 2014, 30 (2): 33-37. (CHEN Xiaofei, REN Liliang, JIANG Shanhu, et al. RS-based analysis of factors influencing evapotranspiration in upstream region of Ganjiang Basin. *Water Resources Protection*, 2014, 30 (2): 33-37. (in Chinese))
- [16] 李晓英, 吴淑君, 王颖, 等. 淮河流域陆地水储量与干旱指标分析 [J]. *水资源保护*, 2020, 36 (6): 80-85. (LI Xiaoying, WU Shujun, WANG Ying, et al. Analysis of terrestrial water storage and drought indices in the Huaihe River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36 (6): 80-85. (in Chinese))
- [17] 王洁, 李王成, 李晨, 等. 基于 SPI 指数的宁夏干旱特征 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2021, 19 (3): 528-538. (WANG Jie, LI Wangcheng, LI Chen, et al. Drought characteristics in Ningxia based on standardized precipitation index [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19 (3): 528-538. (in Chinese))
- [18] 林若兰, 卓文珊, 高延康, 等. 基于 SWAT 模型的北江流域生态径流调节服务评估 [J]. *水资源保护*, 2020, 36 (6): 131-136. (LIN Ruolan, ZHUO Wenshan, GAO Yankang, et al. Assessment of ecohydrological regulation service in the Beijiang River Basin based on SWAT model [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36 (6): 131-136. (in Chinese))
- [19] 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. (LYU Leting, WANG Xiaorui, JIANG Yuan, et al. Research on spatial and temporal distribution features of green and blue water in Dongjiang River Basin based on SWAT model [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33 (5): 53-60. (in Chinese))
- [20] 张小苗, 穆兴民, 赵广举, 等. 基于极端日流量的延河径流变化特征研究 [J]. *人民黄河*, 2018, 40 (8): 12-18. (ZHANG Xiaomiao, MU Xingmin, ZHAO Guangju, et al. Characteristics of runoff variation in Yanhe River based on extreme daily flow [J]. *Yellow River*, 2018, 40 (8): 12-18. (in Chinese))
- [21] 王思远, 刘纪远, 张增祥, 等. 中国土地利用时空特征分析 [J]. *地理学报*, 2001 (6): 631-639. (WANG Siyuan, LIU Jiyuan, ZHANG Zengxiang, et al. Spatial and temporal characteristics of land use in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001 (6): 631-639. (in Chinese))
- [22] 张国栋, 张照玺, 余韵, 等. 汾河上游土地利用变化对径流的影响研究 [J]. *人民黄河*, 2020, 42 (10): 29-33. (ZHANG Guodong, ZHANG Zhaoxi, YU Yun, et al. Study on the influence of land use change on runoff in the upper reaches of Fenhe River [J]. *Yellow River*, 2020, 42 (10): 29-33. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-07-05 编辑: 俞云利)