

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2020.01-03

赣江流域蓝水绿水资源时空变化分析

崔思源

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安, 710077)

摘要: 在当今的水资源管理中, 分析评估气候变化下流域内蓝水、绿水资源的时空变化情形, 能为维持生态系统稳定、保障社会经济的发展提供依据。本文利用 SWAT 模型模拟了赣江流域 1960~2013 年的水文循环过程, 基于趋势分析、Mann-Kendall 检验等方法, 分析了流域内蓝水及绿水资源的时空变化情况。在空间上看, 赣江流域内蓝水及绿水资源多呈上升趋势, 只有流域西部、中部少数地区绿水流和蓝水流有下降的倾向, 绿水储量在整个流域内都呈现出了显著的上升趋势 ($P < 0.05$)。在整个流域尺度上, 蓝水与绿水资源在过去 50 年间都呈现出上升趋势, 蓝水流、绿水流、绿水储量的变化倾向率分别为 11.3mm/10a、4.87mm/10a、16.4mm/10a, 其中绿水流、绿水储量自 20 个世纪 90 年代后的上升趋势非常显著 ($P < 0.05$), 而蓝水流则在最近 20 年间呈现出略微的下降趋势, 在未来规划管理中应考虑人类活动取用水对水资源量的影响。

关键词: 赣江流域; SWAT 模型; 蓝水绿水; 时空变化

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4701(2020)01-0021-09

0 引言

水资源问题已经受到了世界的广泛关注, 其影响制约着社会的可持续性发展, 也是 21 世纪全球资源环境的首要问题, 水资源量供需矛盾对社会经济发展、人类生存环境的影响也日益受到重视^[1-2]。受人类活动和全球气候变化影响, 全球范围内许多地区的气象-水文过程已经产生了显著的变化, 从而影响区域水资源量^[3-4]。在全球气候变化的大背景下, 分析水资源量的时空变化情况, 能为区域水资源管理和保护提供切实可行的依据。

Falkenmark 为了更好的评价农业地区水资源量, 于 1995 年提出了蓝水、绿水的概念^[5]。这一概念在之后得到逐步完善, 绿水也可以进一步区分为绿水流及绿水储量^[6-7]。在全球尺度的水文循环中, 约有 65% 的降水通过森林、草地、农田等蒸散发作用返回大气形成绿水流, 而仅有约 35% 的降水存储于地表及地下水体中, 即蓝水流^[8]。在实际生产中, 绿水占了水资源利用的绝大

部分, 全球粮食生产 80% 的水分来源于绿水, 林草地等生态系统几乎完全依赖于绿水^[9]。因此, 绿水资源对于农业生产、生态系统维护都具有重要意义。

在传统的水资源评价分析中, 通常只考虑被人类直接利用的水资源量, 即只评价易于开发利用的可再生地表、地下水资源量^[10-11]。在水资源管理和保护的决策过程中, 人们往往关注地表、地下水资源量的时空分布情况, 通过修建相应的水利、管网工程对水资源量进行调配, 并结合政策、管理制度等非工程措施实现对水资源的管理和保护^[12-13]。因此, 人类对水资源开发和利用主要集中在可见的蓝水资源, 往往忽略了绿水资源。在变化环境下, 综合考虑蓝水、绿水的时空分布及变化特征, 能为区域水资源管理及保护提供更为可靠的依据。例如, 吴洪涛等基于区域蓝水、绿水时空变化分析结果, 从水资源管理角度提出了因地制宜的建议^[14]。熊莹等引入绿水概念, 进一步发展了水资源配置模型, 为流域水权界定提供了新思路^[15]。谢子波分析了下垫面条件对绿水资源影响, 指出耕地对降水的利用效率最高^[16]。

收稿日期: 2019-09-05

作者简介: 崔思源(1993-), 男, 硕士, 助理工程师。

考虑到不同地区在下垫面和气候条件上的差异,需要明确蓝水、绿水资源的时空分配和年际变化特征, SWAT (Soil & Water Assessment Tool) 模型以地理空间信息和气象信息为输入, 结合物理学基础相关的蒸散发经验公式, 以水量平衡作为约束条件, 能较准确的估计流域内不同地区蓝水、绿水资源的时空变化情况, 是一种行之有效的方法。赣江是江西省内流入鄱阳湖之五大河流中的第一大河流, 每年入湖量占五河入水总量的 75% 以上, 流域内水资源量合理开发利用是鄱阳湖生态经济区建设和保护鄱阳湖的关键^[7]。另一方面, 尽管赣江流域水资源承载力较大, 但空间分布极不均匀, 南昌等地区水资源开发利用量已严重超标^[8]。先前对赣江地区的研究着重于气候/土地利用变化对径流的影响^[9], 暂未有人对流域内蓝水绿水资源变化情况进行分析。本文以赣江流域为研究对象, 分析了流域内 1960~2013 年蓝水、绿水资源的时空变化情况, 可为赣江流域的水资源管理提供科学的依据。

1 研究方法

1.1 SWAT 模型

SWAT 模型是美国农业部研究开发的半分布式流域尺度水文模型, 该模型以流域地理空间信息和气象水文等数据作为输入, 能模拟流域内水量、泥沙和水质等水文物理化学过程。随着地理信息技术的发展, SWAT 模型的应用也逐渐普及, 该模型模拟精度较高, 且在不同地区的适用性较好, 已在全球范围内各大流域得到了广泛的应用^[20, 21]。SWAT 模型将一个流域划分为若干个子流域, 并进一步将每个子流域划分为若干个水文响应单元, 每一个水文响应单元都有其对应的土壤、土地利用及坡度特征。SWAT 模型通过对各水文响应单元的水文过程进行模拟, 考虑耗水因素后, 最终可以得到不同断面流量及子流域各项水文参数, 该模型输出的各项参数可用来直接计算蓝水、绿水资源^[9, 22]。

1.2 蓝水及绿水计算

根据 SWAT 模型在子流域尺度输出的各项水文变量, 可以直接得到或计算出相应的蓝水流、绿水流和绿水储量, 其中, 蓝水流为地表径流、壤中流、地下径流三者之和, 绿水流为实际蒸散发量, 绿水储量为土壤含水量^[7, 9]。

1.3 统计分析方法

本文选用一元线性回归方法、Mann-Kendall 方法来分析各变量时间序列的趋势和突变情况。一元线性回归方法通过拟合变量 X_i 与时间 t_i 之间的线性回归方程 $X_i = a \cdot t_i + b$ 来分析时间序列的变化趋势, 其中回归系数 a 可采用最小二乘法估计:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n X_i t_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n X_i) (\sum_{i=1}^n t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (1)$$

式中: n 为样本序列长度, 回归系数 a 可用来表示变量的倾向率, 通常以 a 的十倍作为变化的倾向率, 反应某一种气象、水文要素每十年的变化趋势。

Mann-Kendall 方法通过构建服从标准正态分布的变量 Z 来判断时间序列的趋势, 有:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V_{ar}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V_{ar}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $V_{ar}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$, 统计量 S 由样本序列 X 计算得到:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n Sf(X_j - X_k) \quad (3)$$

式中: $Sf()$ 为符号函数:

$$Sf(X_j - X_k) = \begin{cases} +1, & (X_j - X_k) > 0 \\ 0, & (X_j - X_k) = 0 \\ -1, & (X_j - X_k) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

当 Z 大于 0 时说明时间序列呈现出上升趋势, 否则为下降趋势。对于给定的显著性水平 α , 当 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ 时, 说明时间序列在 α 显著水平下有显著的变化趋势。

Mann-Kendall 方法同样可以通过构建正序列和逆序列, 将其绘制于图上来判断时间序列是否存在突变。首先根据样本序列 X 计算正向统计量 UF , 再根据逆序排序后的样本序列 X 逆计算得到逆序统计量 UB , 将 UF 和 UB 同时绘制于以时间为横坐标的图中, 同时绘制相应的辅助线作为显著性评判依据, 通常取显著性水平 $\alpha=0.05$, 即绘制统计量为 ± 1.96 两条辅助线。在判别中, UF 曲线上升代表序列有增加趋势, 反之则呈减少趋势, 当两条曲线的交点位于两条辅助线区间内时,

可以认为样本序列在这一时间段发生了突变。上述各方法的具体步骤同样可见文献^[23]。

2 研究区概况与数据

2.1 研究区概况

赣江位于江西省境内，是长江的主要支流，也是江西省内最大的河流。赣江干流全长 766km，流域总面积 8.35 万 km²，经外洲水文站汇入鄱阳湖。赣江流域属于亚热带湿润季风气候，多年平均年降水量可达 1 570mm，主要集中在 4~10 月。流域内地形以山地丘陵为主，约占总面积的三分之二，水域面积约占

1.6%，耕地和林地面积占总面积的九成以上，受水资源量变化影响较大。

2.2 数据

为构建赣江流域分布式水文模型，在地理信息方面收集整理了区域内 90×90 米 DEM (digital elevation model) 数据、1:100 万分辨率土壤数据、1980~2015 年共 7 期土地利用数据；在气象水文方面收集整理了流域内 51 个气象站 1960~2013 年逐日降水、气温、风速、日照时间、相对湿度数据，以及赣江流域出口外洲水文站同期的逐日径流资料。在选取土地利用数据之前，本文先对比了 1980~2010 年间赣江流域下垫面变化情况 (表 1)，结果表明流域下垫面类型变化较小，因此只选

表 1 赣江流域下垫面年际变化情况

土地利用类型	1980	1990	1995	2000	2005	2010	2015	%
耕地	24.8	24.7	24.7	24.7	24.8	24.7	24.5	
林地	66.8	66.5	66.8	66.7	66.6	66.6	66.0	
草地	5.2	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.5	
水域	1.7	1.7	1.6	1.7	1.7	1.7	1.8	
城乡、居民、建设用地	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	2.2	
未利用	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	

用 2010 年的土地利用信息作为模型输入。

3 结果与分析

3.1 径流序列一致性检验

流域径流过程受气候条件和下垫面条件的影响较大，当任意一个条件发生显著变化时，径流资料的一致性就很有可能遭到破坏^[24]。过去几十年间，随着社会经济的高速发展，人类活动对下垫面的变化影响尤为显著，因此，在构建赣江流域水文模型之前，应对流域径流序列进行分析，确定各时期资料的一致性。前人研究表明我国大部分流域实测径流在 1980 年后呈现出较明显的下降趋势，在最近十余年间尤为显著，但长江中下游区域 20 世纪 90 年代洪水频发，年径流量略呈上升趋势^[25]。因此，本文比较了 1995 年前后的降水-径流关系，分析了外洲水文站年径流量的变化趋势 (图 1~2)。结果表明流域内不同时期降雨-径流关系非常接

近，且年径流量在过去 50 年间未呈现出显著的变化趋势，年代变化和滑动平均结果表明年径流量略呈波动上升趋势，线性回归分析结果表明其变化倾向率为 6.6 亿 m³/10 年，此外，M-K 检验在 0.1 显著性水平下显著性的阈值为 1.645，本次样本序列经过 M-K 检验的 Z 值仅为 0.827，即在年际上变化趋势并不显著。综上，可认为赣江流域径流资料服从一致性假定。

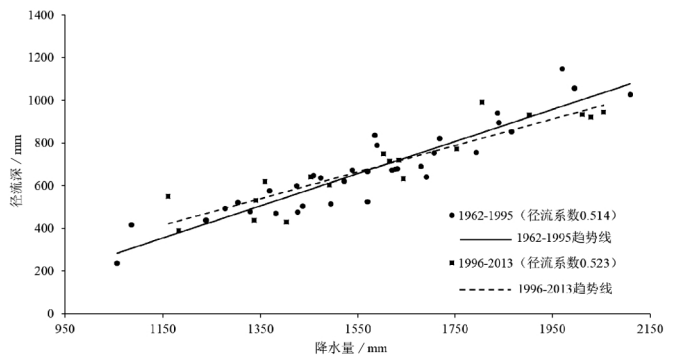


图 1 1995 年前后赣江流域降水产流系数对比

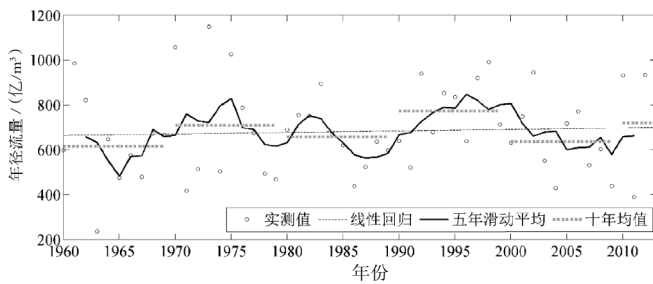


图2 赣江流域年径流量变化趋势(1960~2013)

3.2 模型结果检验

本次研究将 SWAT 模型的率定期设置为 1960~1995 年, 其中前两年设定为预热期, 模型验证期为 1996~2013 年。在模型率定和验证工作开展前, 先对

SWAT 模型中的参数进行敏感性分析, 各参数在流域内的最优取值及参数敏感性排序见表 2。结果表明土壤、植被、地形因素是影响赣江流域产汇流的主要因子, 敏感性最高的 6 个参数分别为土壤-浅层地下水交换时间、SCS 径流曲线系数、平均坡面倾斜度、土壤湿容重、地下水交换系数、冠层最大蓄水量。

为评估率定期和验证期的拟合结果, 本文选用纳什效率系数(NSE)和确定性系数(R^2)评估模型模拟逐月径流量时的表现, 两个参数越接近 1 表明拟合结果越好。大量的研究认为: 当 $NSE \geq 0.7$ 或 0.75 时, 说明模型模拟效果好^[26-28]。在本次研究中, 模型率定期的 $NSE=0.93$, $R^2=0.94$, 模型验证期的 $NSE=0.92$, $R^2=0.93$, 说明

表2 模型参数敏感性分析结果

SWAT 参数	参数含义	参数取值范围	最佳值	参数敏感性绝对值
GW_DELAY	土壤水-浅层地下水交换时间/天	0~500	35.75	6.65
CN2*	SCS 径流曲线系数	-0.5~0.5	-0.24	6.01
HRU_SLP	平均坡面倾斜度/(m/m)	0~1	0.81	3.83
SOL_BD*	湿润土壤容重/(g/cm ³)	-0.5~0.5	-0.46	3.51
GW_REVAP	地下水交换系数	0.02~0.2	0.14	2.97
CANMX	冠层最大蓄水量/mm	0~10	8.13	2.65
SURLAG	地表径流滞后系数	1~10	5.52	2.14
SOL_AWC*	土壤可能蓄水能力/(水 mm/土壤 mm)	-0.5~0.5	-0.35	1.51
RCHRG_DP	深层含水层渗透系数	0~1	0.14	1.51
ALPHA_BF	基流因子 α	0~1	0.92	1.38
EVLAI	水域叶面积指数	0~10	5.29	1.13
EPCO	植物蒸腾补偿因子	0.01~1	0.50	1.08
SFTMP	降雪气温/°C	-5~5	2.44	1.00
ESCO	土壤蒸发补偿因子	0.01~1	0.93	0.76
FFCB	初始土壤含水量(田间持水量比值)	0~1	0.61	0.66
GWQMN	产生回归流的浅层地下水埋深阈值/mm	0~5 000	1 722.5	0.64
REVAPMN	浅层地下水参与深层地下水交换阈值/mm	0~500	213.8	0.62
TIMP	结冰气温滞后系数	0.01~1	0.54	0.37
BIOMIX	土壤组分重分布	0~1	0.04	0.16
SOL_K*	土壤饱和导水率/(mm/hr)	-0.5~0.5	0.41	0.08
SOL_ALB	湿润土壤反射率	0~1	0.86	0.01

注:* 表示率定时参数的变化方式为乘以(1+x), 即按百分比浮动。

模拟的径流序列与实测径流序列非常一致。图 4 为模拟与实测月径流量的比较，同样可以看出模拟值与实测值在变化幅度及周期上均保持一致。

在模型率定和验证后，本文基于模拟结果分析了流域过去 50 年间的水量平衡情况，对构建的 SWAT 模型作进一步论证(表 3、图 3)。研究结果表明，赣江流域内 1962~2013 年间逐年的降水量与水资源总量（蓝水流、绿水流与绿水储量蓄变量之和）十分接近，水量平衡系数的多年均值为 0.999。因此，上述结果表明模拟结果令人满意，模型能正确地模拟赣江流域的水循环过程，可进一步基于模型结果对流域内蓝水绿水资源的时空变化情况进行分析。

3.3 蓝水绿水资源空间分布特征

模型将流域划分为 47 个子流域，基于各子流域逐年的蓝水流、绿水流及绿水储量的模拟结果，可以得到流域内蓝水及绿水资源在空间上的分布及变化情况(图 5~6)。流域内蓝水流呈现出明显的区域特征，东部和北部地区蓝水资源量要远大于南部地区（超过 200mm）。与之相比，绿水资源在空间上的差异较小，南方地区绿水流较中部地区偏高 30~90mm，流域北部绿水储量较其他大部分地区偏高 10~30mm。

从年际变化上来看，流域内 87.2%的地区蓝水资源量呈现出上升趋势，其中 25.5%的地区上升趋势超过 0.1 的显著性水平。流域绿水资源量同样普遍呈现出上

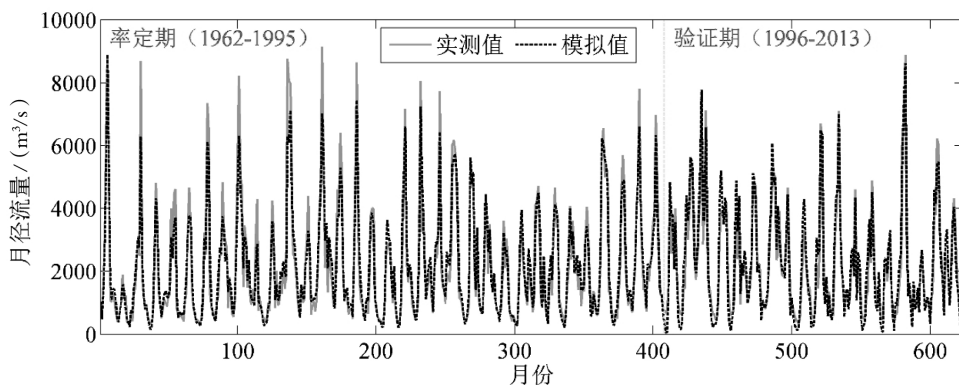


图 3 月径流模拟与实测结果对比

表 3 赣江流域水量平衡分析结果

年份	降水	蓝水流	绿水流	绿水储量	绿水储量蓄变量	水资源总量	水量平衡系数
1962	1 717.96	1 118.72	632.36	117.71	-	-	-
1963	1 055.38	411.52	626.13	136.17	18.46	1 056.11	1.000 7
1964	1 459.93	884.40	614.74	100.20	-35.97	1 463.17	1.002 2
1965	1 426.76	761.96	632.61	126.54	26.34	1 420.91	0.995 9
1966	1 368.56	754.45	614.75	127.07	0.53	1 369.73	1.000 9
...
2009	1 337.05	645.67	654.10	200.88	35.11	1 334.88	0.998 4
2010	1 902.14	1 250.66	658.41	190.54	-10.34	1 898.73	0.998 2
2011	1 181.96	523.71	679.17	172.77	-17.77	1 185.11	1.002 7
2012	2 011.18	1 296.13	663.68	214.47	41.70	2 001.51	0.995 2
2013	1 359.77	742.24	649.92	186.01	-28.46	1 363.70	1.002 9
均值	1 576.81	933.58	640.42	143.14	1.34	1 571.90	0.998 7

mm

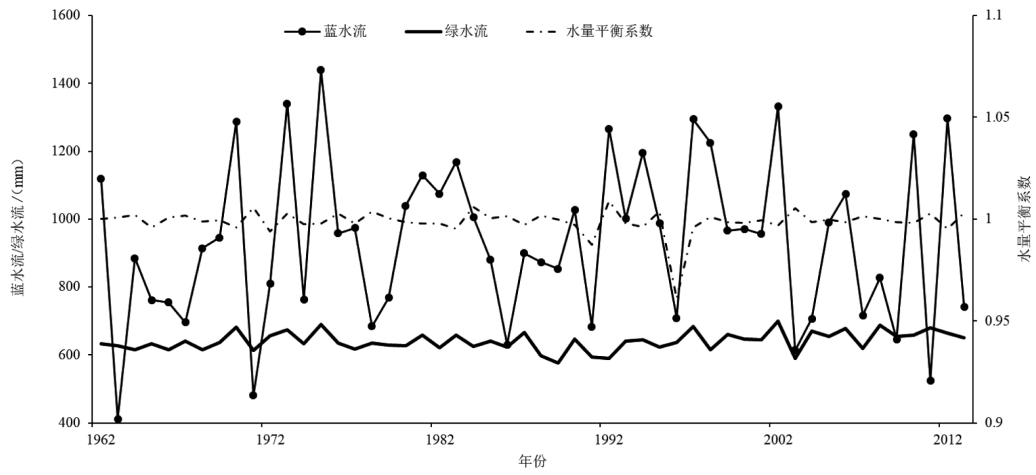


图4 赣江流域蓝水、绿水流及水量平衡系数年际变化

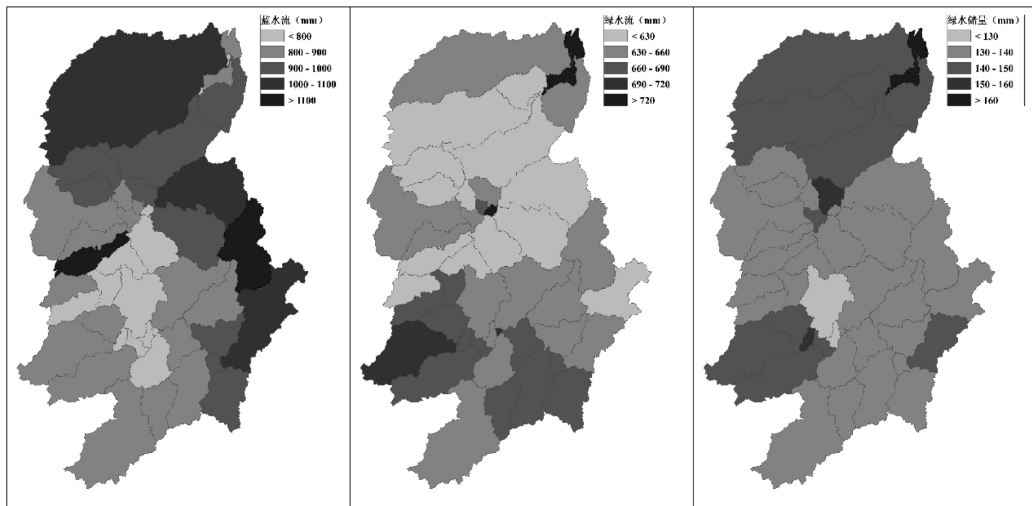


图5 赣江流域多年平均蓝水、绿水资源空间分布特征

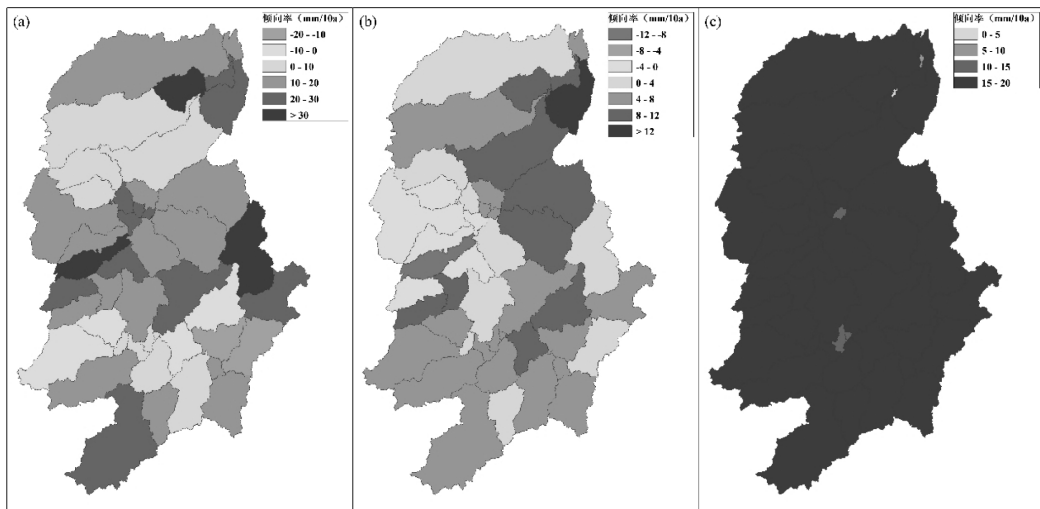


图6 赣江流域各子流域蓝水、绿水资源变化趋势(1962~2013)

(a. 蓝水流; b. 绿水流; c. 绿水储量)

升趋势,85.1%的地区绿水流有所上升,68.1%的地区上升趋势超过了 0.1 的显著性水平;整个流域绿水储量均有增加,且上升趋势都超过了 0.05 的显著性水平。

蓝水、绿水资源量的时空变化结果表明,赣江流域的北部和东部地区洪涝风险较高,从而导致河岸侵蚀、耕地作物受损等次生灾害,在汛期应加强对高风险地区的监控和预警工作,必要时及时实施河道疏浚和河岸加固工程。对于绿水流较小的地区,可通过增强土壤下渗能力、增加地表覆被等方法,减少降水产生的地表径流,增加区域内绿水流,从而提高区域内降水利用效率;对于绿水流较大的农业地区,适宜播种耗水量较低的作物,以保障下游地区有足够的蓝水流汇入。

需要说明的是蓝水流和绿水流的分配比例呈现出显著的区域特征,例如在全球尺度上蓝水流、绿水流占降水比例分别为 35%和 65%。与之相比,渭河流域绿水流占比在不同典型年份均超过 80%^[29];金沙江上游流域

绿水流占比可达 78%,而金沙江下游流域绿水流占比仅为 40.8%^[30];本次研究结果表明赣江流域绿水流占比约为 40.7%,这也与前人在我国东南沿海一带的研究结果较为一致(39%)^[31]。

3.4 蓝水绿水资源年际变化特征

基于整个流域逐年的蓝水流、绿水流及绿水储量的模拟结果,本文进一步对整个流域 1962~2013 年间绿水、蓝水资源的变化进行分析。趋势分析结果表明赣江流域降水、蓝水流、绿水流及绿水储量均呈上升趋势,倾向率分别为 17.8mm/10a、11.3mm/10a、4.87mm/10a、16.4mm/10a,其中绿水流及绿水储量的上升趋势非常显著,均超过了 0.05 的显著性水平。

流域内降水、蓝水流、绿水流及绿水储量的 Mann-Kendall 突变检验结果如图 7 所示,图中结果能更详细的反映流域内蓝水、绿水资源的年际变化情况。结果表明:流域内蓝水流和降水的变化趋势较为一致,均在

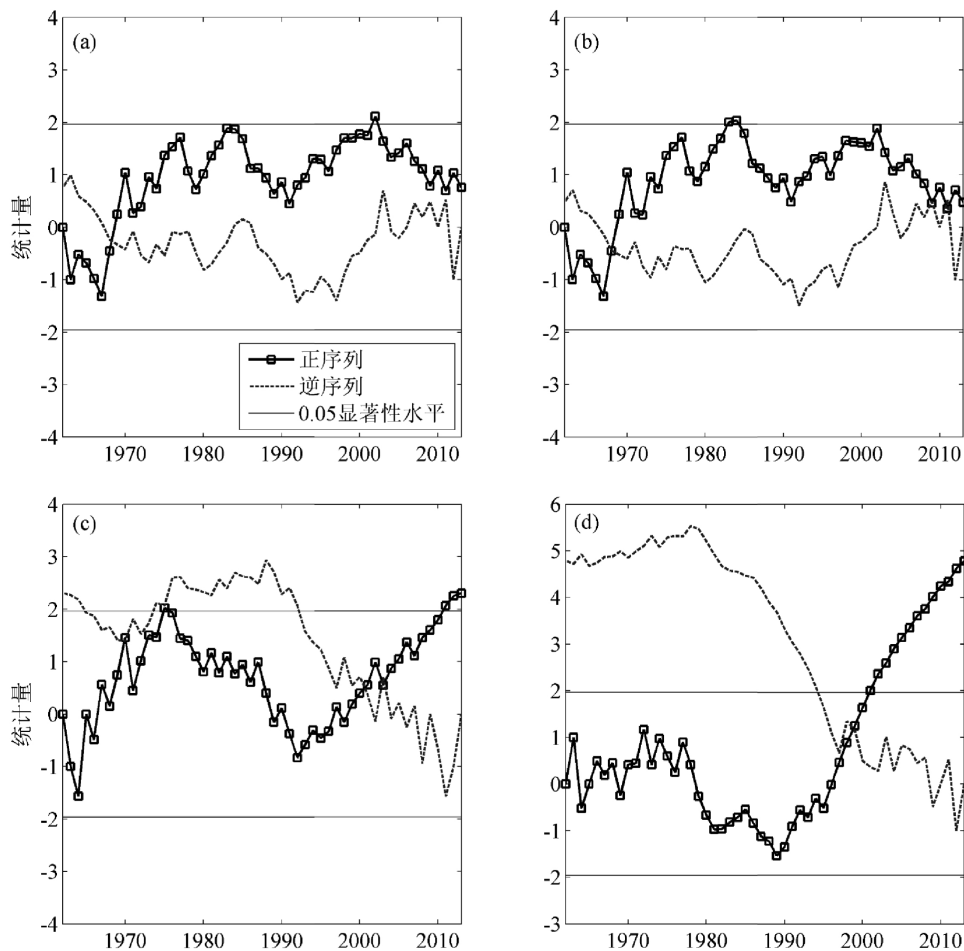


图 7 赣江流域降水、蓝水流、绿水流与绿水储量年序列 Mann-Kendall 突变检验
(a. 降水; b. 蓝水流; c. 绿水流; d. 绿水储量)

1967年出现了一次导致序列增加的突变,此后呈增加趋势直到1985年,而在1986~2000年序列略微波动,无明显趋势,2000年后序列呈现出下降趋势,蓝水流下降幅度要大于降水的下降幅度,这表明蓝水流减少可能同时受到了气候变化和人类活动取用水的多重影响;流域内绿水流和绿水储量均呈现出先减后增的变化规律,在2000年前后出现了导致序列增加的突变,此后两者均呈现出显著的上升趋势,超过了0.05的显著性水平。

4 结论与建议

本次研究以赣江流域为研究对象,基于SWAT构建了流域分布式水文模型,模拟了流域内不同区域和时段的水文循环过程,进一步评价了区域内1960~2013年间蓝水、绿水资源量的时空变化情况,主要结论如下:

(1)流域径流时间序列变化并不显著,服从一致性假设,年径流量变化的倾向率为6.6亿 $m^3/10$ 年。模型的敏感性分析结果表明土壤、植被、地形因素是影响赣江流域产汇流的主要因子;

(2)整个流域多年平均蓝水流、绿水流及绿水储量分别为936.4mm、640.4mm、139.0mm,其中蓝水流空间差异性较大,流域东部和北部地区蓝水资源量较为丰富,超过南部地区200mm以上,而绿水资源的空间差异性较小;

(3)从空间分布上看,流域内大部分地区的蓝水、绿水资源量呈上升趋势,只有西部和中部少数地区呈现出不显著的下降趋势,而绿水储量在整个流域都呈现出显著的上升趋势($P<0.05$);

(4)从年际变化上看,整个赣江流域的蓝水流在2000年之前有明显的上升趋势,但在最近却呈现出下降趋势,其下降幅度要大于降水序列的下降幅度,说明蓝水流受到了气候变化和人类活动取用水的共同影响。与之相比,流域内的绿水流及绿水储量在1960~1990年间变化不大甚至略有下降,但在之后呈现出了非常显著的上升趋势,说明流域内的降水越来越多地被储存在土壤中,而不是形成径流或被植物吸收利用。

(5)基于SWAT模型的模拟结果,可以较准确地评估蓝水、绿水的时空分布情况。在蓝水流较大的地区,应注意防范洪涝风险;在绿水流较大且增加显著的区域,

在维持农业生产的同时还应注意保障下游区域的蓝水流;流域内绿水储量上升显著,有利于农业、林业产业的进一步发展。

参考文献:

- [1] 姜文来. 中国21世纪水资源安全对策研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 66~71.
- [2] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262~269.
- [3] Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, et al. Stationarity Is Dead: Whither Water Management [J]. Science, 2008, 319: 573~574.
- [4] IPCC, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)]. 2014, Geneva, Switzerland.
- [5] Falkenmark M. Land~water linkages: A synopsis: Land and Water Integration and River Basin Management [R]. Land and Water Bulletin No.1, 1995, FAO, Rome.
- [6] Falkenmark M, Rockström J. The new blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning and management [J]. Journal of Water Resources Planning and Management~ASCE, 2006, 132(3): 129~132.
- [7] Liu J G, Yang H, Hoff H, et al. Spatially explicit assessment of global consumptive water uses in cropland: green and blue water [J]. Journal of Hydrology, 2010, 384(3): 187~197.
- [8] 程国栋, 赵文智. 绿水及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(3): 221~227.
- [9] 张云英, 袁喆, 许继军, 等. 金沙江流域蓝水绿水时空变化特征分析[J]. 人民长江, 2017, 20(48): 45~51+57.
- [10] Jewitt G P W, Garratt J A, Calder I R, et al. Water resources planning and modelling tools for the assessment of land use change in the Luvuvhu Catchment, South Africa [J]. Physics & Chemistry of the Earth Parts A/b/c, 2004, 29(15): 1233~1241.
- [11] Rost S, Gerten D, Bondeau A, et al. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system [J]. Water Resources Research, 2008, 44(9): 137~148.
- [12] 吕振霖. 江苏水资源管理与保护的对策思考 [J]. 水资源保护, 2008, 24(4): 78~82.
- [13] 蒋旭光, 周潮洪. 天津市水资源管理与保护的对策措施[J]. 水利水电技术, 2010, 41(10): 6~9.

- [14] 吴洪涛,武春友,郝芳华,等. 引入绿水概念的水资源评估及其管理革新研究[J]. 未来与发展,2008(10):2~10.
- [15] 熊莹,吕孙云,梅亚东,等. 考虑蓝、绿水区别的水权界定研究[J]. 人民长江,2010,41(1):6~10.
- [16] 谢子波. 基于水循环模拟的绿水资源评价及其演变规律研究[D]. 中国矿业大学,2018.
- [17] 熊晓娟. 赣江流域水资源生态补偿机制研究[D]. 上海海洋大学,2014.
- [18] 吴速英,许洪胤,钟洪鸣,等. 赣江流域水资源承载能力初步分析[J]. 中国资源综合利用,2009,27(2):28~30.
- [19] 熊飞勇. 基于 SWAT 模型的赣江蜀水流域气候\土地利用变化情景下的径流响应研究[D]. 2015.
- [20] Zhao A,Zhu X,Liu X,et al. Impacts of land use change and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River Basin of northwest China [J]. Catena, 2016, 137: 318~327.
- [21] 赵阳,余新晓,郑江坤,等. 气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响 [J]. 农业工程学报,2012,28(22):252~260.
- [22] 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(5):57~64.
- [23] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 气象出版社,1999.
- [24] 詹道江,徐向阳,陈元芳. 工程水文学,第 4 版[M]. 中国水利水电出版社,2010.
- [25] 张建云,章四龙,王金星,等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展,2007,18(2):230~234.
- [26] 唐芳芳,徐宗学,左德鹏. 黄河上游流域气候变化对径流的影响[J]. 资源科学,2012,34(6):1079~1088.
- [27] 张荣飞,王建力,李昌晓. SWAT 模型在黄河流域宁夏段的适用性评价及展望 [J]. 西南大学学报(自然科学版),2013,35(9):154~160.
- [28] 王潺,杨国范,林茂森. 土地利用变化对牯牛河流域径流的影响[J]. 人民长江,2017,48(8):32~37.
- [29] 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(02):33~41.
- [30] 张云英,袁喆,许继军,等. 金沙江流域蓝水绿水时空变化特征分析[J]. 人民长江,2017,20:49~55+61.
- [31] Naramngam S,Tong S T. Environmental and economic implications of various conservative agricultural practices in the Upper Little Miami River Basin [J]. Agricultural Water Management,2013,119:65~79.

编辑:张绍付

Spatio-temporal variations of blue and green water resources in the Ganjiang River Basin

CUI Siyuan

(Xi'an Research Institute Co.,Ltd. China Coal Technology and Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China)

Abstract: For water resources management, it is essential to evaluate the spatio-temporal variations of blue and green water resources under climate change, which is beneficial to the local eco-system and social-economic development. Based on the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model, this paper studied the hydrological processes in the Ganjiang River Basin during the 1960 to 2013 period. The spatio-temporal variations of blue and green water were further analyzed by using trend analysis and Mann-Kendall methods. Spatial analysis showed that the blue and green water displayed increasing trends in most of the study area, and the decreasing trend can only be detected in the west and central regions. For the whole study area, the blue and green water resources displayed increasing trends during the past 50 years. The blue water flow, green water flow and green water storage were increased at a rate of 11.3mm/10a, 4.87mm/10a, 16.4mm/10a, respectively. More specifically, the green water resources (flow and storage) showed significant increasing trends since the 1990s ($P < 0.05$), while the blue water flow was decreased slightly. Results suggested that human consumption exerted huge impacts on water resources, and should be considered in future planning and management.

Key words: Ganjiang River Basin; SWAT model; Blue/Green water; Spatio-temporal variations

翻译:崔思源