

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.05.010

基于 SWAT 模型的东江流域蓝水、 绿水时空分布特征研究

吕乐婷¹, 王晓蕊¹, 江 源², 孙才志¹

(1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁 大连 116029; 2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘要: 基于 SWAT(soil and water assessment tool)模型,对东江流域天然状态下的降雨径流过程进行模拟,进而评估流域蓝水、绿水的时空分布特征。结果表明:东江流域蓝水、绿水资源量都非常丰富,多年平均蓝水资源量 $274.67 \times 10^8 \text{ m}^3$,绿水资源量 $178.72 \times 10^8 \text{ m}^3$ (主要以绿水流为主),蓝水资源是绿水资源的 1.54 倍。东江流域以蓝水为主的水资源构成体系主要是由流域湿热多雨的气候条件决定的。从时间变化来看,近年来东江流域蓝水资源、绿水资源、绿水流、绿水储皆无显著增加或降低趋势。从空间分布上来看,蓝水资源格局主要受降雨格局控制,而绿水资源不但受气候条件影响,还受流域下垫面的自然属性以及人类活动干扰,如土地利用方式、土壤类型等,分布格局较为复杂。

关键词: 蓝水;绿水;SWAT 模型;东江流域

中图分类号:X522

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2017)05-0053-08

Research on spatial and temporal distribution features of green and blue water in Dongjiang River Basin based on SWAT model

LYU Leting¹, WANG Xiaorui¹, JIANG Yuan², SUN Caizhi¹

(1. College of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116000, China;

2. College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the SWAT model, the natural rainfall runoff in the Dongjiang River Basin is simulated so that the temporal and spatial distribution features of green water and blue water in the basin can be evaluated. Results show that green water and blue water resources are both very rich in Dongjiang River Basin. For many years the average blue water resource has been 275 billion m^3 and the average green water resource has been 179 billion m^3 for many years, which is mainly made of green water flow. The blue water is 1.54 times that of the green water. The composition of water resources of the Dongjiang River Basin is mainly determined by the humid and rainy climate of the basin. From the point of time change, blue water, green water, green water flow and green water storage all have no tendency of decreasing or increasing in recent years. From the spatial distribution point of view, the distribution pattern of blue water is mainly controlled by the rainfall distribution pattern. However, the green water is not only influenced by climatic conditions but also affected by the natural attributes of the underlying surface of the basin and human disturbances, such as the way of land usage, soil type and so on. Its distribution pattern is more complex.

Key words: blue water; green water; SWAT model; Dongjiang River Basin

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501002-04);辽宁师范大学青年科研项目(LS2014L013);辽宁省教育厅科研项目(L201683678)

作者简介:吕乐婷(1984—),女,讲师,博士,主要从事水资源评估及水文生态系统保护研究。E-mail: lvleting@lnnu.edu.cn

通信作者:江源,教授,博士生导师。E-mail: jiangy@bnu.edu.cn

蓝水、绿水的概念由 Falkenmark 等^[1]于 1995 年在评价水资源对农业生产过程的影响时提出。蓝水是指来源于大气降水中的可见地表水和地下水,存在于河流、湖泊和含水层,是可以直接被人类利用的水资源。绿水是指来源于大气降水并下渗到非饱和土壤层中供给植物生长的水,对陆地生态系统生产性和服务性功能的维护具有重要意义。绿水又包括绿水流 (green water flow) 和绿水储 (green water storage), 绿水流即实际蒸散发, 绿水储是指储存在土壤中的水分^[2]。从水文循环全过程及水量平衡角度出发, 通过森林、草地、农田及湿地蒸散作用消耗的绿水占全球陆地降水总量的 65%, 而蓝水资源仅占 35%, 全球超过 80% 的粮食生产都依赖绿水^[3]。蓝水、绿水概念的提出把生态过程与水循环过程紧密联系起来, 体现了水文过程与植被之间的相互作用关系。因此, 绿水资源作为对于流域生态系统至关重要的水资源逐渐得到了国内外专家学者的关注。科学全面地评价蓝水、绿水资源是水资源规划与管理的新思路, 具有重要的现实意义。

目前, 确定绿水资源的方法主要有 3 类: 生物学方法、水文学方法以及生物水文耦合法^[4]。水文学方法即利用水文模型, 基于水量平衡原理, 从流域尺度评估蒸散发量 (绿水) 以及径流量 (蓝水), 具有成本低、研究数据易获取、可深入揭示水文过程机理、能同时评价蓝水、绿水资源量及其时空变化特征、能够进行情景模拟分析等特点, 受到国内外科学家越来越多的关注。常用的大尺度水文模型有 HYLUC (hydrological land use change) 模型、STREAM (spatial tools for river basin environment analysis and management) 模型等, 小尺度水文模型有 ACRU (agricultural catchments research unit), SWAT (soil and water assessment tool) 模型等, 其中以 SWAT 模型的应用尤为广泛。Faramarzi 等^[5]结合 SWAT 模型和连续不确定性匹配算法 SUFI-2 (sequential uncertainty fitting - version 2), 以子流域为空间尺度, 对伊朗蓝水、绿水资源的时空分布进行了讨论, 发现灌溉方式对水文循环的影响十分显著。Schuol 等^[6]用非洲 207 个水文站点的数据对 SWAT 模型进行了率定和验证, 并利用模型评价了非洲可用蓝水、绿水资源的时空分布现状。Zang 等^[7-8]利用 SWAT 模型评估了自然条件下黑河流域蓝水、绿水资源状况及人类活动和气候变化对其的影响。吴洪涛等^[9-10]利用 SWAT 模型, 分别对碧流河流域及卢氏流域的蓝水、绿水资源时空分布进行了评估。徐宗学等^[11]在梳理了蓝水、绿水概念及评价方法的基础上, 利用 SWAT 模型结合 SUFI-2 算法, 对渭河流域

近 50 年蓝水、绿水流及绿水储资源的时空分布进行了多尺度评估, 为西北地区水资源规划及管理提供了科学依据。赵安周等^[12-14]利用 SWAT 模型分析了典型年份渭河流域蓝水、绿水时空差异, 并在此基础上研究了近 30 年气候变化和人类活动对渭河流域蓝绿水资源的影响, 并指出蓝绿水资源在人类活动的影响下发生了转换, 其研究结果为渭河流域生态水资源规划提供了有价值的理论依据。对于蓝水、绿水资源的研究是目前国际相关学科研究的热点, 国内此方面的研究较少。

东江流域位于我国南方湿润地区, 是我国东南沿海水资源承载负荷最重的流域之一, 也是香港、深圳、东莞等重要城市的饮用水源, 东江流域水资源变化会对区域生态环境和经济发展产生重大的影响。对东江流域水文水资源的研究一直是国内外学者关注的重点, 研究成果也十分丰富。但目前对于东江水资源的研究多集中在对传统水资源——地表径流的研究, 而对流域生态系统更为重要的水源——绿水资源研究尚浅。本文基于 SWAT 模型, 从水文循环的角度出发, 对东江流域天然状态下的水文过程进行模拟, 进而评估流域蓝水、绿水资源分配情况, 并分析近年来流域蓝水、绿水资源量变化情况及空间分布特征。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

东江为珠江四大水系之一, 位于东经 $113^{\circ}25'$ ~ $115^{\circ}52'$, 北纬 $22^{\circ}26'$ ~ $25^{\circ}12'$ 。东江发源于江西省寻乌县桎髻钵山, 地跨江西、广东两省, 沿途流经主要城市包括龙川市、河源市、东莞市, 深圳市等。东江干流全长 562 km, 流域总面积 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。东江流域地处亚热带季风气候区, 气温高, 雨量充沛。流域多年平均气温约 21°C , 年均降雨量 $1\,600 \sim 2\,200 \text{ mm}$ 。流域地势东北高, 西南低, 上游以山地、丘陵为主, 中游以丘陵、平原为主, 下游以平原为主。以往对于东江流域的水文模拟研究, 大多选择博罗水文站作为流域出口^[15-17], 因此本文亦选择博罗站以上区域作为研究区域 (图 1)。博罗水文站是东江干流下游的主要控制站, 其汇水面积达 $25\,325 \text{ km}^2$, 占东江流域总面积的 71.7%。

1.2 数据来源

收集了包括气象数据、水文数据、地形数据、土地利用数据、土壤类型数据等基础数据。气象数据包括 1955—2010 年日降雨、气温、太阳辐射、风速、相对湿度, 来源于国家中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>)。水文数据包括东江

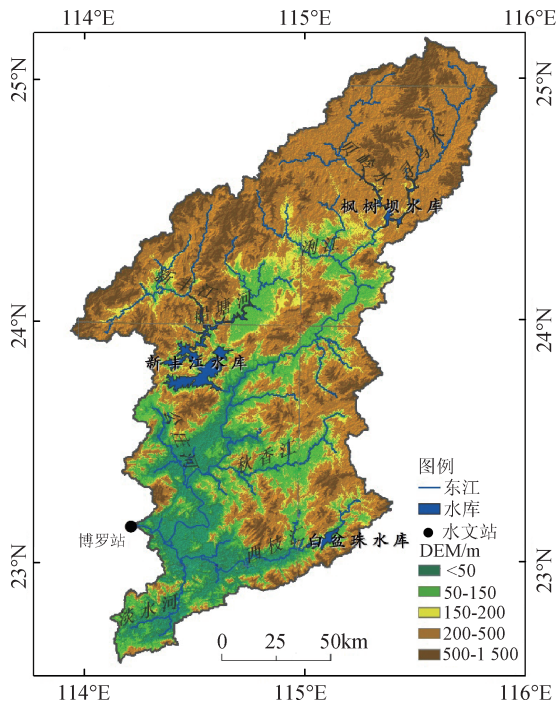


图1 东江流域地形及水系概况

干流4个主要水文站点:龙川站、岭下站、河源站和博罗站1955—2010年径流数据,来源于中国水文年鉴。流域DEM数据空间分辨率30m,来源于美国地质调查局网站(<http://glovis.usgs.gov/>)。土地利用数据根据Landsat TM/ETM影像参照中国科学院资源环境数据中心的土地分类系统,并结合东江流域土地利用实地调查样点资料解译而得^[18],其中Landsat TM/ETM影像数据来源于中国科学院国际科学数据服务平台(<http://www.cnisc.cn/zcfw/sjfw/gjksxsjx/>)。土壤类型数据(1:1000000)由中国科学院南京土壤研究所提供。水系图采用国家基础地理信息中心提供的1:250000水系矢量图层。

2 研究方法

2.1 SWAT模型

SWAT模型是基于物理基础的半分布式水文模型,它可以模拟复杂流域的水文过程^[19],在流域径流模拟、水污染模拟^[20]、水资源评估^[21-22]等多个研究领域有着广泛的应用。SWAT模型根据水量平衡原理模拟流域的水文循环过程,水量平衡方程为

$$W_t = W_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day},i} - Q_{\text{surf},i} - E_{a,i} - w_{\text{seep},i} - Q_{\text{gw},i}) \quad (1)$$

$i=1,2,\dots,t$

式中: W_t 为土壤 t 天最终含水量; W_0 为第 i 天土壤初始含水量; $R_{\text{day},i}$ 为第 i 天的降水量; $Q_{\text{surf},i}$ 为第 i 天地表径流量; $E_{a,i}$ 为第 i 天的蒸散发量; $w_{\text{seep},i}$ 为第 i 天离开土壤剖面底部的渗透水流和旁通水流量

量; $Q_{\text{gw},i}$ 为第 i 天回归流的水量。

SWAT模型能够直接输出蓝水、绿水的各个分量,因此在估算蓝水、绿水资源量方面十分适用。根据蓝水、绿水的定义以及SWAT模型输出结果可知,蓝水可用SWAT模型输出的子流域产水量以及深层含水层补给量之和表示;绿水为实际蒸散发量;绿水储为土壤含水量,绿水即为实际蒸散发量与土壤含水量之和^[23]。

2.2 绿水系数计算

绿水系数为某一地区或流域绿水资源占水资源总量的比例^[7],计算公式为

$$I_{\text{GWC}} = \frac{g}{g+b} \quad (2)$$

式中: I_{GWC} 为绿水系数; g 为绿水资源量,包括绿水流和绿水储量; b 为蓝水资源量。

2.3 东江流域SWAT模型的建立

使用前期建立的东江流域SWAT模型^[24],为进一步细化流域水文过程在空间上的差异,本研究对原模型进行了改进:将东江流域(博罗站集水区)划分为46个子流域,468个水文响应单元。利用人类活动影响极小时期:1953—1963年的月径流数据用于率定(模型预热期为1953—1954年),1964—1974年月径流数据用于验证。在此时间段内,东江流域内目前的三大水库(新丰江水库、枫树坝水库和白盆珠水库)中仅新丰江水库建成。本研究在数据收集有限的前提下,基本还原了流域天然状态下的降雨产流过程。除此之外,本研究对模型参数的率定也进行了改进:由于径流曲线数、土层有效含水量等参数与土地利用及土壤类型密切相关,因此在率定时将不同土地利用及土壤类型的参数分开率定;同时为了简化计算,选择了占土地利用比例最大的林地、果园、草地以及占土壤类型比例最大的赤红壤、红壤、水稻土,对其径流曲线数及土层有效含水量进行分开率定^[25]。参数的率定与验证利用SWAT-CUP软件提供的SUFI-2算法进行。

模型适用性采用确定性系数(R^2)及Nash-Sutcliffe效率系数(E_{NS})进行评价^[26],其中 R^2 表示模拟值与实际值变化趋势的一致性,其值越接近1,表明模拟值与实际值变化趋势越吻合; E_{NS} 表示实测值和模拟值的偏离程度,当 $E_{\text{NS}} \leq 0.36$ 时,认为模拟效果不好, $0.36 < E_{\text{NS}} < 0.75$ 时,认为模拟效果令人满意, $E_{\text{NS}} \geq 0.75$ 时,认为模拟的结果非常好^[16]。一般,当 $R^2 \geq 0.6$, $E_{\text{NS}} \geq 0.5$ 时,模型的模拟结果被认为是可信的。

改进后的东江流域SWAT模型径流模拟结果见图2,模拟值与实测值拟合程度较好,率定期 R^2 为

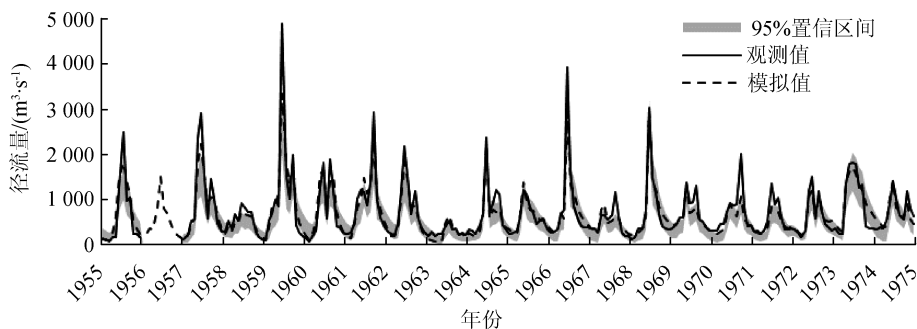


图2 博罗站 1955—1974 年月径流量模拟结果

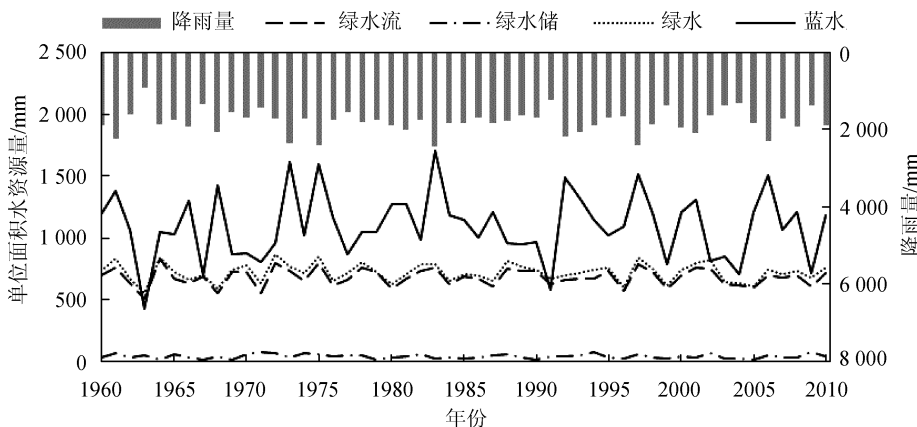


图3 1960—2010 年东江流域蓝水、绿水资源分配及变化状况

0.89, E_{NS} 为 0.87; 验证期 R^2 为 0.88, E_{NS} 为 0.87。总体来看,东江流域 SWAT 模型模拟精度较高,可基本准确地描述流域水文过程,适用于后续的蓝水、绿水资源评估研究。

3 结果与分析

3.1 1960—2010 年东江流域绿水、蓝水资源量分配及变化

东江流域 1960—2010 年年均蓝水资源量 $274.67 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中地表径流 $243.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。年均绿水资源量 $178.72 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中绿水流 $169.20 \times 10^8 \text{ m}^3$, 绿水储 $9.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。流域多年平均绿水系数 40%。可见,东江流域水资源配置以蓝水资源为主,蓝水资源占水资源总量的 60.58%, 约为绿水资源的 1.54 倍。

流域绿水资源主要以绿水流为主,占绿水资源总量的 94.67%。绿水储仅占绿水资源总量的 5.33%。在绝大多数年份,流域蓝水资源量都高于绿水资源量,相反的情景仅发生于 1956、1963、1991 和 2002 年,而这 4 个年份皆为特枯水年(年径流距平百分率小于 -20%)(图 3)。

东江流域以蓝水为主的水资源分配模式与现有许多流域的研究成果有所区别。在多数流域中,绿水资源是水资源构成的主体,如贵州中部降雨强度较小的喀斯特地区,绿水资源占水资源量 87.4%,

蓝水仅占 12.6%^[27];黄河右岸地处温带山地气候区的卢氏流域,绿水资源量占水资源总量 89% 以上^[28];地处干旱半干旱区域的黑河流域,绿水资源量约为蓝水资源量的 7.3 倍,占水资源总量 88.04%;青海省东北部半干旱地区的湟水流域,绿水资源量约为蓝水资源量的 3.8 倍,约占水资源总量的 79%;在东北碧流河流域,绿水资源量约为蓝水资源量的 1.3 倍,约占水资源总量 56.5%。上述流域绿水资源量都大于蓝水,甚至有些流域绿水超过蓝水若干倍,这主要是由流域气候条件造成的,与东江流域相比,这些流域降雨量较低,气候干旱,干燥度(潜在蒸发量与降雨量比值)较高且大于 1^[29],降雨大部分经过冠层截留和入渗转化为生态系统用水,难以形成地表径流。而东江流域地处亚热带季风气候区,降雨量高,干燥度为 0.5~0.7,产流方式以蓄满产流为主,降雨更多转化为地表径流,因此流域蓝水资源量高于绿水资源量。在同处湿润地区的东南沿海晋江西溪流域蓝水资源量高于绿水资源量,约为绿水资源量的 1.8 倍^[30],与本研究结果一致。

经一元回归分析可知,近年来东江流域蓝水、绿水、绿水流、绿水储资源量皆无显著增加或降低趋势。经相关分析可知,东江流域蓝水资源量与降雨量的相关系数高达 0.97 ($P < 0.01$),绿水、绿水流资源量与降雨量的相关系数分别为 0.41、0.40 ($P < 0.01$);绿水系数与降雨量呈显著负相关关系,相关系

数为 $-0.83(P < 0.01)$; 绿水储资源量与降雨量未有显著的相关关系。蓝水资源量与降雨量呈高正相关关系, 说明蓝水资源量主要来自于降雨。绿水、绿水流资源量与降雨量的相关程度一般, 而绿水系数与降雨量呈高负相关关系, 这是因为降雨量越大, 水资源总量越高, 而绿水主要来自于冠层截留、植物根系及土壤储存, 不会随降雨量增大而无限增加。因此, 绿水系数在绿水资源量达到饱和状态后会随降雨增加而降低。绿水储更多受地表土壤类型影响, 与降雨未有显著的相关关系。

3.2 不同时间段东江流域蓝水、绿水资源空间分布格局

对东江流域自然状态下蓝水、绿水资源的时空分布格局进行了探索, 将 1960—2010 年划分为 3 个

阶段: 1960—1970 年、1971—1990 年、1991—2010 年。分别对这 3 个阶段流域单位面积蓝水、绿水资源量进行统计分析。各个时间段绿水流资源量、绿水储资源量、蓝水资源量、绿水系数及其空间分布情况见图 4~7。

1960—1970 年, 东江流域平均单位面积绿水流资源量为 600 ~ 860 mm, 中游新丰江水库区域绿水流资源量最高, 浏江及下游西枝江区域绿水流资源量最低。1970—1990 年, 东江流域平均单位面积绿水流资源量为 620 ~ 840 mm, 高值区出现在新丰江水库、公庄河以及西枝江下游区域, 低值区为浏江及西枝江上游区域。1991—2010 年, 东江流域平均单位面积绿水流资源量为 610 ~ 810 mm, 高值区出现在新丰江水库以及新丰江上游区域, 低值区为上游

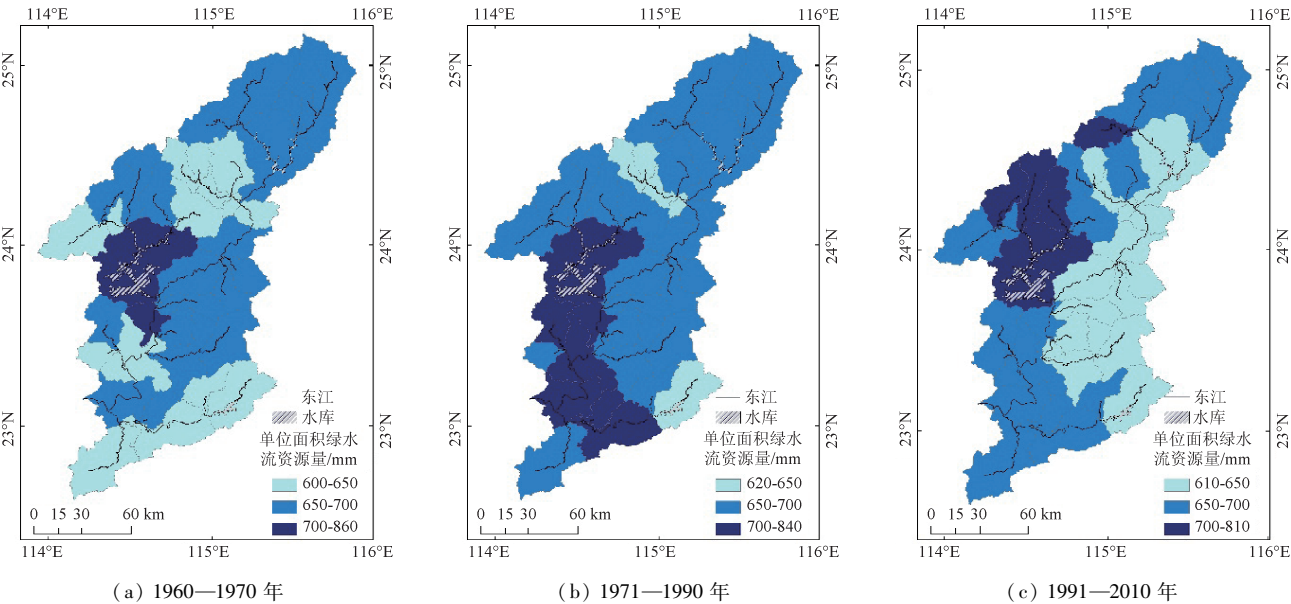


图 4 东江流域不同时期年均绿水流空间分布

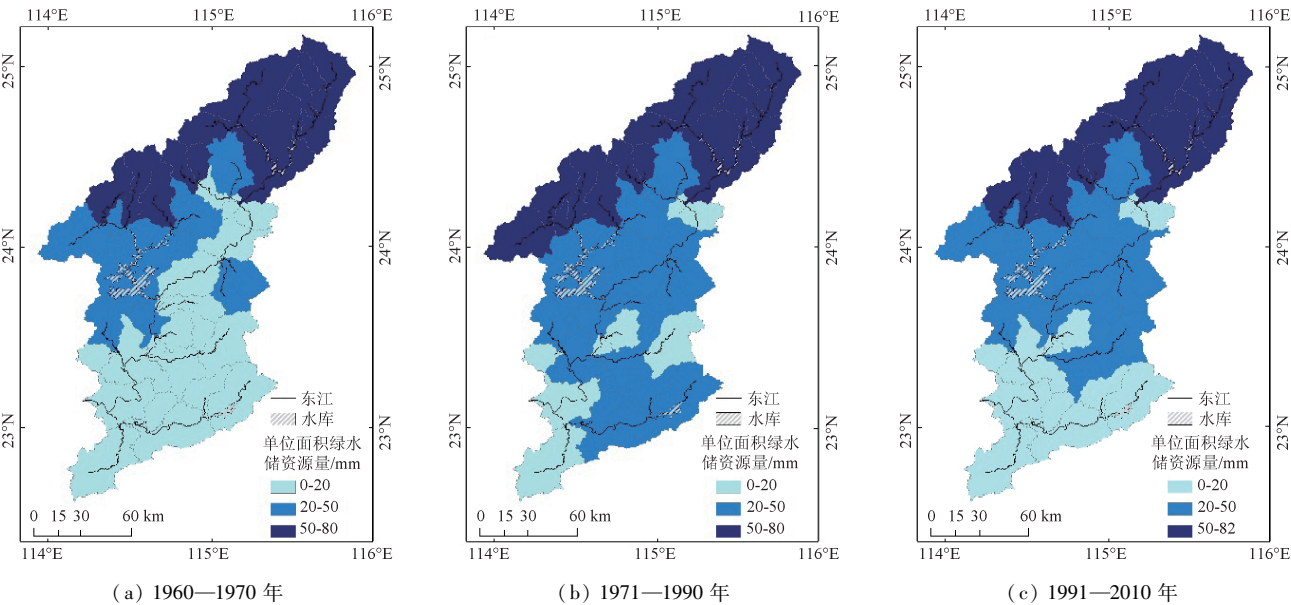


图 5 东江流域不同时期年均绿水储空间分布

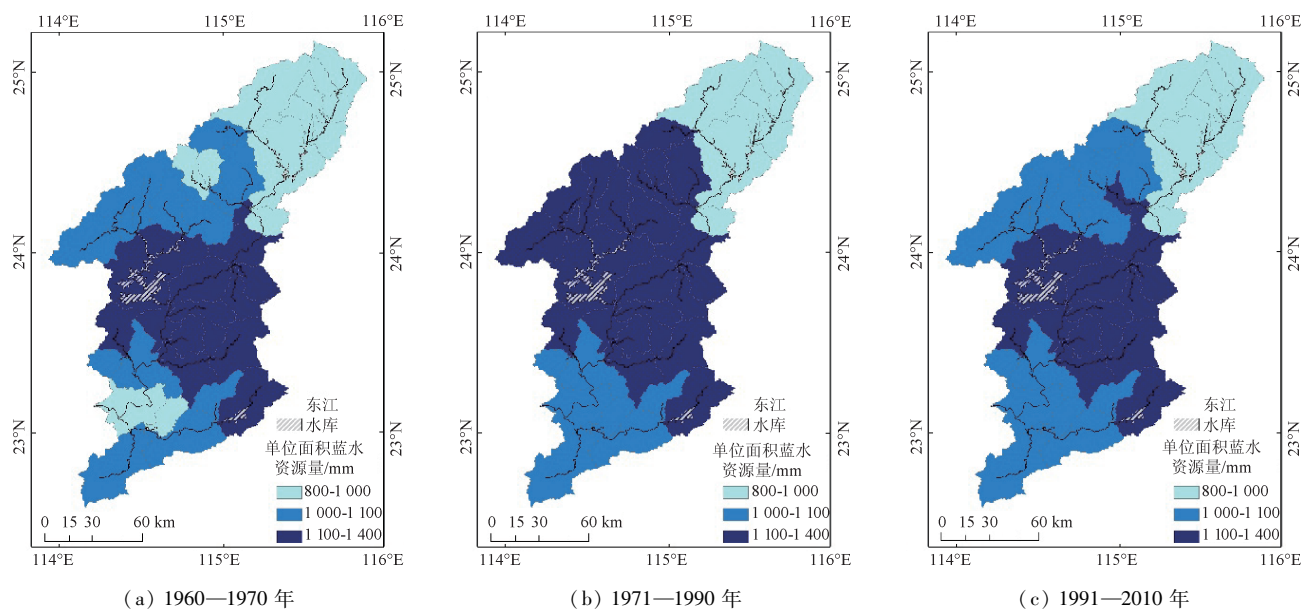


图6 东江流域不同时期年均蓝水深度空间分布

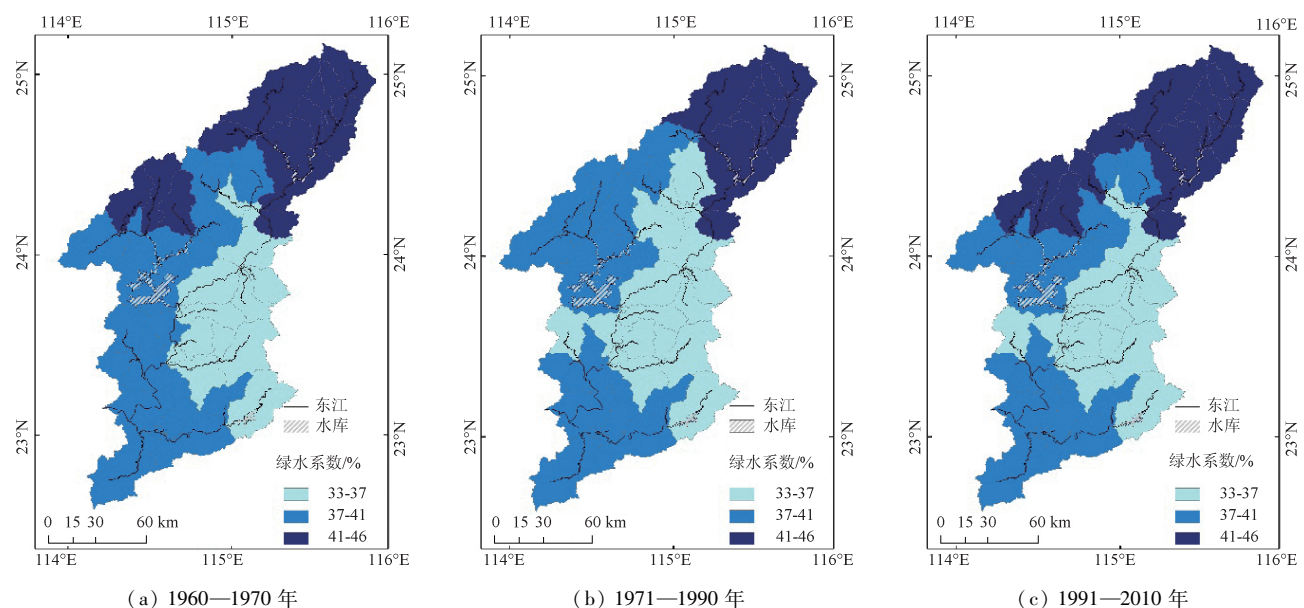


图7 东江流域不同时期年均绿水系数空间分布

及中游干流东部区域。整体来看,新丰江水库区域由于水面面积大,水面蒸发较强,其绿水流资源量一直居流域最高。20 世纪 70 年代至 90 年代,下游绿水流出现增加趋势,90 年代以后,干流东侧绿水流明显减少,这些都可能由于降水、气温在中游、下游的波动引起的。

绿水储资源量在流域南北差异明显,北部东江源地区绿水储资源最为丰富,中部其次,南部最低。20 世纪 70 年代至 90 年代,中部及南部绿水储资源量皆有升高趋势,90 年代之后,南部绿水资源量储降低。绿水储资源量的分布格局与流域土壤类型有很大关系,上游及流域西北部九连山一带土壤多为红壤,中下游则以赤红壤为主。赤红壤较红壤贮水

库容小,失水速度快,保水供水性能皆弱于红壤^[31],这是流域绿水储资源量南北差异的主要原因。此外,南部地区多为大中城市,随着城市建设用地的不断扩大,该区域土地利用类型逐渐转化为城市用地、工业用地等,路面固化使得该区域裸露土壤面积减少,绿水储资源量也随之降低。

蓝水资源量呈现从上游至下游先增后减的空间格局。流域中部蓝水资源最为丰富,单位面积蓝水资源量为 1 100 ~ 1 400 mm,南部蓝水资源量略低,单位面积蓝水资源量为 1 000 ~ 1 100 mm,北部东江源地区蓝水资源量最低,单位面积蓝水资源量为 850 ~ 1 000 mm。蓝水资源的空间分布差异主要由降雨量从流域中部向南北递减造成^[32]。

流域3个时间段绿水系数大小及空间分布相对稳定,呈现由北向南先减后增的格局。上游东江源地区绿水系数最高,这是由于上游降雨量相对较低,且植被茂盛,植物截留、蒸腾作用显著,造成总蒸散比例较中下游高。中部降雨量为流域最高,因此绿水系数较低。流域南部气温为流域最高^[33],蒸发量大。下游农田和城镇用地比例较大,农作物灌溉会使得蒸散量增大。

从空间变化来看,东江流域蓝水资源主要受降水变化影响,由上游至下游呈现先增后减的空间格局。绿水资源(尤其绿水流)既受自然条件(如气候、土壤类型)的影响,又受各种管理条件(如土地利用方式、农业灌溉、水库修建)的影响,空间分布格局较为复杂。绿水储主要受土壤类型影响,空间分布格局较为稳定,在流域北部东江水源涵养区最高,并向南递减。

4 结 论

a. 东江流域绿水、蓝水资源量都非常丰富,1960—2010年流域年均蓝水资源量 $274.67 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均绿水资源量 $178.72 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中绿水流 $169.20 \times 10^8 \text{ m}^3$,绿水储 $9.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从资源构成上来看,东江流域主要以蓝水资源为主,蓝水占水资源总量的60.58%,这是由流域湿热多雨的气候条件决定的。

b. 近年来东江流域蓝水资源、绿水资源、绿水流、绿水储皆无显著增加或降低趋势。流域蓝水资源时间、空间分布格局主要受降雨格局控制。而绿水资源不但受气候条件影响,同时受流域下垫面的自然属性以及人类活动干扰,时空分布格局较为复杂。

参考文献:

[1] FALKERMARK M, ROCKSTRÖM M J. The new blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning and management[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2006, 132(3): 129-132.

[2] 吴洪涛,武春友,郝芳华,等. “绿水”的多角度评估及其管理研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(6): 61-67. (WU Hongtao, WU Chunyou, HAO Fanghua, et al. Research on assessment and management of green water[J]. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(6): 61-67. (in Chinese))

[3] LIU J G, ZEHNDER A, YANG H. Global consumptive water use for crop production: the importance of green water and virtual water[J]. Water Resources Research,

2009, 45: W05428.

[4] 程国栋,赵文智. 绿水及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2006(3): 221-227. (CHENG Guodong, ZHAO Wenzhi. Green water and its research progresses [J]. Advances in Earth Science, 2006(3): 221-227. (in Chinese))

[5] FARAMARZI M, ABBASPOUR K C, SCHULIN R, et al. Modelling blue and green water resources availability in Iran[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(3): 486-501.

[6] SCHUOL J, ABBASPOUR K C, YANG H, et al. Modeling blue and green water availability in Africa [J]. Water Resources Research, 2008, 44(7): 212-221.

[7] ZANG C F, LIU J, VELDE M V D, et al. Assessment of spatial and temporal patterns of green and blue water flows under natural conditions in inland river basins in Northwest China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2859-2870.

[8] ZANG C, LIU J, JIANG L, et al. Impacts of human activities and climate variability on green and blue water flows in the Heihe River Basin in Northwest China[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2013, 10(10): 9477-9504.

[9] 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. (WU Hongtao, WU Chunyou, HAO Fanghua et al. Research on water resource assessment and management innovations with green water concept introduced [J]. Future and Development, 2008(10): 2-10. (in Chinese))

[10] 甄婷婷,徐宗学. 基于 SWAT 模型的卢氏流域蓝水绿水资源量评价[C]// 变化环境下的水资源响应与可持续利用:中国水利学会水资源专业委员会 2009 学术年会. 大连:中国水利学会, 2009.

[11] 徐宗学,左德鹏. 拓宽思路,科学评价水资源量:以渭河流域蓝水绿水资源量评价为例[J]. 南水北调与水利科技, 2013(1): 12-16. (XU Zongxue, ZUO Depeng. Scientific assessment of water resources with broaden thoughts: a case study on the blue and green water resources in the Wei River Basin [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(1): 12-16. (in Chinese))

[12] 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(2): 149-157. (ZHAO Anzhou, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Spatiotemporal variation of blue-green water under typical reference years in the Weihe River Basin [J]. Chinese Journal of Agrometeorology. 2016(2): 149-157. (in Chinese))

[13] 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. [EB/OL]. [2016-05-11] <http://www.cnki.net/kcms/detail/22.1124.P.20160511.1452.010.html>.

- [14] 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.
- [15] 王兆礼. 气候与土地利用变化的流域水文系统响应--以东江流域为例[D]. 广州:中山大学,2008.
- [16] WU Y,CHEN J. Estimating irrigation water demand using an improved method and optimizing reservoir operation for water supply and hydropower generation:a case study of the Xinfengjiang reservoir in southern China [J]. Agricultural Water Management,2013,116:110-121.
- [17] 中国河湖大典编撰委员会. 中国河湖大典珠江卷[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [18] 任斐鹏. 东江流域水生生态功能分区研究[D]. 北京:北京师范大学,2011.
- [19] 王中根,刘昌明,黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究 [J]. 地理科学进展, 2003, 22 (1): 79-86. (WANG Zhonggen, LIU Changming, HUANG Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe Basin [J]. Progress in Geography, 2003, 22 (1): 79-86. (in Chinese))
- [20] 林晓娟,黄津辉,林超,等. 岳城水库流域污染源模拟 [J]. 水资源保护,2015,31(1):74-79. (LIN Xiaojuan, HUANG Jinhui, LIN Chao, et al. Simulation of pollution sources of Yuecheng Reservoir Basin[J]. Water Resources Protection,2015,31(1):74-79. (in Chinese))
- [21] 张圣微,雷玉平,姚琴,等. 土地覆被和气候变化对拉萨河流域径流量的影响 [J]. 水资源保护,2010,26(2):39-44. (ZHANG Shengwei, LEI Yuping, YAO Qin, et al. Runoff response to land cover and climate change in Lhasa River Basin [J]. Water Resources Protection, 2010, 26 (2): 39-44. (in Chinese))
- [22] 王苓如,薛联青,王思琪,等. 气候变化条件下洪泽湖以上流域水资源演变趋势 [J]. 水资源保护,2015,31(3):57-62. (WANG Lingru, XUE Lianqing, WANG Siqi, et al. Evolutionary tendency of water resources in the basin above Hongze Lake under the condition of climate change [J]. Water Resources Protection,2015,31(3):57-62. (in Chinese))
- [23] 臧传富. 黑河流域蓝绿水时空变化研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
- [24] 吕乐婷,彭秋志,郭媛媛,等. 基于 SWAT 模型的东江流域径流模拟[J]. 自然资源学报,2014(10):1746-1757. (LYU Leting, PENG Qiuzhi, GUO Yuanyuan, et al. Runoff simulation of Dongjiang River Basin Based on the soil and water assessment tool [J]. Journal of Natural Resources, 2014(10):1746-1757. (in Chinese))
- [25] SCHUOL J, ABBASPOUR K C, SRINIVASAN R, et al. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model [J]. Journal of Hydrology,2008,352(1/2):30-49.
- [26] 左德鹏,徐宗学. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的渭河流域月径流分布式模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2012,48(5):490-496. (ZUO Depeng, XU Zongxue. Distributed hydrological simulation using SWAT and Sufi-2 in the Wei River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48 (5): 490-496. (in Chinese))
- [27] 温志群,杨胜天,宋文龙,等. 典型喀斯特植被类型条件下绿水循环过程数值模拟 [J]. 地理研究, 2010, 29 (10): 1841-1852. (WEN Zhiqun, YANG Shengtian, SONG Wenlong, et al. The numerical simulation on green water cycle of typical vegetation types in karst area [J]. Geographical Research, 2010, 29 (10): 1841-1852. (in Chinese))
- [28] 甄婷婷,徐宗学,程磊,等. 蓝水绿水资源量估算方法及时空分布规律研究:以卢氏流域为例 [J]. 资源科学, 2010,32(6):1177-1183. (ZHEN Tingting, XU Zongxue, CHENG Lei, et al. Spatiotemporal distributions of blue and green water resources: a case study on the Lushi Watershed [J]. Resources Science, 2010, 32 (6): 1177-1183. (in Chinese))
- [29] 史建国,张燕卿,何文清,等. 黄河流域干燥度时空格局变化研究 [J]. 干旱地区农业研究,2009,27(1):242-247. (SHI Jianguo, ZHANG Yanqing, HE Wenqing, et al. Study on spatial and temporal variation of arid index in Yellow River Basin [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2009,27(1):242-247. (in Chinese))
- [30] 荣琨,陈兴伟,李志远,等. 晋江西溪流域绿水蓝水资源量估算及分析 [J]. 水土保持通报,2011,31(4):12-15. (RONG Kun, CHEN Xingwei, LI Zhiyuan, et al. Estimating green and blue water resources in Xixi Watershed of Jinjiang Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2011,31(4):12-15. (in Chinese))
- [31] 全斌,陈健飞,郭成达. 福建赤红壤旱地与红壤旱地水分特性的比较 [J]. 土壤与环境,2001,10(2):115-120. (QUAN Bin, CHEN Jianfei, GUO Chengda. A comparative study on soil water characteristics of lateritic red earth dry land and red earth dry land in Fujian Province [J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10 (2): 115-120. (in Chinese))
- [32] ZHAN C, XU Z, Ye A, et al. LUCC and its impact on runoff yield in the Bai River catchment: upstream of the Miyun Reservoir basin [J]. Journal of Plant Ecology, 2011,4(1/2):61-66.
- [33] 彭秋志. 东江流域河流生态分类研究 [D]. 北京:北京师范大学,2011.

(收稿日期:2016-12-20 编辑:王 芳)