

晋江西流域绿水蓝水资源量估算及分析

荣琨¹, 陈兴伟², 李志远³, 李学平¹

(1. 滨州学院 城市与环境系, 山东 滨州 256600; 2. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007; 3. 滨州学院 物理与电子科学系, 山东 滨州 256600)

摘要: 运用 SWAT 模型计算了东南沿海晋江西流域的绿水蓝水资源量。对西流域绿水蓝水的组成和时间分布规律进行了研究, 并分析了西流域与中国北方两流域在绿水占水资源比例上的差异。研究结果表明: (1) 西流域 1973—1979 年绿水蓝水资源总量是传统水资源量的 1.6 倍; (2) 绿水蓝水的年内分布特点为汛期最高, 冬季最低, 且绿水流是绿水的主要组成部分; (3) 由于气候湿润、干燥度指数较小等原因, 晋江西流域水资源以蓝水为主, 约为绿水资源量的 1.8 倍; 但也表明即使在南方地区, 绿水资源仍是水资源的重要组成部分, 应予以重视。

关键词: 绿水; 蓝水; SWAT 模型; 时间分布; 晋江西溪

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)04-0012-04

中图分类号: X143

Estimating Green and Blue Water Resources in Xixi Watershed of Jinjiang Basin

RONG Kun¹, CHEN Xing-wei², LI Zhi-yuan³, LI Xue-ping¹

(1. Department of Urban and Environment, Binzhou University, Binzhou, Shandong 256600, China;

2. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China;

3. Department of Physics and Electronic Science, Binzhou University, Binzhou, Shandong 256600, China)

Abstract: Presently blue water is the main issue in the field of water resources research, whereas less attention has been paid to green water which is important to ecological systems and rain-fed agriculture as a part of water resources. Hence, green and blue water during the period of 1973—1979 in Xixi Watershed of the Jinjiang Basin was calculated using the SWAT model, and their composition feature and temporal distribution were analyzed accordingly. The result was also compared with that of two watersheds in Northern China. (1) The total amount of green and blue water resources was 1.6 times of the amount of conventional water resources in Xixi Watershed; (2) The annual green and blue water in Xixi Watershed reached peak in flood season, and was the lowest in winter, and the green water flow was a major part of green water resources; (3) Because the climate is wet and the aridity index is small in the studied area, the blue water, which was 1.8 times of green water, was the major part of the water resources in Xixi Watershed, but the green water was still an important part even in Southern China.

Keywords: green water; blue water; SWAT model; temporal distribution; Xixi Watershed of Jinjiang Basin

随着人口增长和工农业的高速发展, 世界水资源日益短缺, 导致粮食生产的灌溉用水不足, 直接威胁到生态安全与粮食安全。但是, 目前水资源评估与管理一般仅关注对社会和经济有用的地表水和地下水, 即“蓝水”, 却忽视了占水文循环 60% 以上的“绿水”资源^[1]。绿水与蓝水的概念是在 1995 年由瑞典科学家 Falkenmark^[2] 提出的。绿水是指直接来源于降水

并通过蒸发作用返回大气的水, 绿水的循环主要供给陆生生态系统, 包括绿色植物、农作物等, 故形象地称之为绿水。绿水包含绿水流和绿水储量, 绿水流即实际蒸散发流, 绿水储量即土壤蓄水量^[3]。蓝水即传统水资源评价中的可利用水资源总量, 等于地表水资源量与地下水资源量之和减去重复计算量^[4]。绿水对维持陆地生态系统平衡具有重要作用, 并且是维护陆

收稿日期: 2010-11-01

修回日期: 2010-12-06

资助项目: 福建省科技计划重大项目“基于集水区动态模拟的水库水资源水环境管理平台开发”(2010Y4001); 滨州学院青年人才创新工程科研基金项目“基于 SWAT 模型的小清河流域非点源污染及对海洋环境的影响研究”(BZX YQNLG200911)

作者简介: 荣琨(1983—), 男(汉族), 山东省滨州市人, 硕士, 助教, 主要从事水环境方面的研究。E-mail: rongkun_007@163.com。

通信作者: 陈兴伟(1963—), 男(汉族), 福建省福鼎市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源及水环境方面的研究。E-mail: cxwchen215@163.com。

地生态系统生产性和服务性功能的重要条件; 绿水为雨养农业提供重要支持, 大约 60% 的世界粮食生产依赖于绿水, 绿水资源是世界粮食生产最重要的水源; 绿水在维护陆地生态系统生产功能和服务功能方面具有不可替代的作用, 如作物、鱼类和林木的生产能力及海洋的碳固存、养分吸收和同化等^[5]; 绿水可以维持草原、森林和湿地植物等生态系统的蒸汽流, 为野生生物提供生活环境并维护其生物多样性。这些作用, 使绿水成为水资源管理中的重要组成部分^[6]。目前, 国内外对绿水的估算方法大致有 4 种^[5]: (1) 利用主要生态系统生产单位干物质所需要的蒸散量, 乘以净初级生产力数据来评估绿水流; (2) 根据典型生态系统的蒸散观测资料及其空间信息评估绿水流; (3) 利用土壤—植被—大气模型如 LPJ (lund—potsdam—jena) 全球植被动态模型评估绿水流; (4) 利用水文模型估算流域尺度的绿水流, 如 ACRU 模型、HYLUC 模型、SWAT 模型等。由于数据搜集较困难、所需设备资料较多、适用尺度较大^[6]等原因, 前 3 种方法均不适用于多数中国小尺度流域, 第 4 种方法最为合适^[5]。国际上的绿水研究处于起步阶段, 已受到越来越多的关注; 但国内的绿水研究仍比较匮乏, 绿水概念还未被纳入水资源管理体系中去^[5]。目前的绿水研究存在一些问题, 如多集中在大尺度, 精度不高而不便于绿水规划与管理; 多集中于绿水流的评估, 缺乏绿水流与绿水储量相统一的评估方法; 针对气候变化条件下的绿水评估较少^[6]; 有关绿水资源区域差异的研究较少。运用 SWAT 模型评估绿水资源是一种新兴的绿水估算法, 已经在西非^[7]、伊朗^[8]、中国辽宁省的碧流河^[6,9]、黄河的卢氏流域^[1]得到了成功应用, 用 SWAT 模型评估绿水资源的有效性得到了证明, 但在东南沿海的相关研究尚未见报道。

本研究以东南沿海 2 451 km² 的晋江西流域为例, 以 SWAT 模拟为基础, 在小尺度建立绿水流与绿水储量相统一的多角度评估方法, 以此估算绿水蓝水资源量, 并分析其分布特征, 为水资源管理提供一种新思路。

1 研究区和 SWAT 模型构建

1.1 研究区概况

西溪是晋江的一条支流, 由西北向东南流, 经泉州湾入海。研究区位于安溪水文站(23°03' N, 118°10' E) 以上, 研究区内西溪河道长 105 km, 流域面积 2 451 km², 地面高程在 50~1 500 m 之间。流域多年月平均气温 22~29 °C, 多年平均降水量 1 715 mm, 多年平均径流量为 2.63 × 10⁹ m³, 属晋江流域的高径流区。

土壤类型中红壤、水稻土、黄红壤的面积比例分别为 44.8%、30.2% 和 17.1%, 这 3 类土壤约占 92%, 研究期内的土地利用方式以林地(64.9%)、耕地(20.1%)、草地(10.9%) 为主, 研究期(1973—1979 年) 内的 7 a 间, 西溪流域的土地利用方式和土壤图变化很小^[10]。研究区主要位于安溪、永春两县, 区内经济以农业为主, 盛产“铁观音”茶叶和芦柑, 种植业较发达。

1.2 SWAT 模型构建

SWAT 模型运行所需的地形数据来源于研究区 30 m 精度的 DEM, 运用 ArcView 软件提取河网、坡向、坡度等地形参数; 在 1:50 万的晋江西流域上游地区土壤图和 1:10 万中国科学院南京土壤研究所提供的福建省土地利用/覆被遥感解译数据的基础上绘制土壤图和土地利用图; 土壤物理属性和化学属性资料从参考文献获取, 其中机械组成通过线性插值算法将土壤级配换算为美制标准; 逐日降水数据来源于流域内的 15 个雨量站 1972—1979 年实测资料, 其中 1973, 1975 年为多雨年, 1976 年为正常年, 1977, 1978, 1979 年为少雨年, 利用泰森多边形法实现单站点数据的空间离散, 其它逐日资料由流域内的安溪气象站实测资料获得。资料出处详见参考文献[11]。

由于研究中没有前期土壤含水量数据, SWAT 模型需要较长预热期估算土壤水, 受模拟时段限制, 本研究参考前人研究成果^[11], 只选取第一年(1972 年) 作为模型预热期, 并将 1972 年末的土壤含水量作为初始含水量。在模型中, 选择 Penman—Monteith 方法评估潜在蒸散量, 采用 Ritchie 发展的方法计算绿水流量, 采用土壤深度和含水量的指数函数计算实际土壤水蒸发量, 采用潜在蒸散发和叶面积指数的线性函数计算植物散发量^[9]。

对研究区内 1972—1979 年的径流进行模拟^[11], 同时选取效率系数(E_n) 和相关系数(R^2) 两个指标用于模型适用性评价, 结果表明^[11], 径流模拟的校准期(1972—1975 年) 月模拟效率系数(E_n) 为 0.91, 相关系数(R^2) 为 0.92; 径流模拟的验证期(1976—1979 年) 月模拟 E_n 为 0.85, R^2 为 0.90。参数校准效果较好, 模拟精度符合模拟评价标准($E_n > 0.5$ 和 $R^2 > 0.6$), 满足流域水文模型模拟精度要求。这表明, 该 SWAT 径流模型在研究区有良好的适用性, 其输出的水文参数可以用于进一步的绿水蓝水研究。

2 评估结果及分析

2.1 绿水蓝水的年际变化

从 SWAT 模型输出文件中可以整理并计算得到研究区的绿水蓝水量(表 1)。从表 1 可以看出,

1973—1979 年间, 晋江西流域的年均降水量为 $4.270 \times 10^9 \text{ m}^3$, 绿水蓝水资源量的年均值为 $4.096 \times 10^9 \text{ m}^3$, 是传统可利用水资源量(即蓝水量)的 1.6

倍。绿水流资源量与绿水储量分别为 $1.539 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $2.31 \times 10^8 \text{ m}^3$, 前者是后者的 6.7 倍, 可见在绿水成分中绿水流是主要部分。

表 1 1973—1979 年晋江西流域绿水蓝水资源量

10^8 m^3

| 年份 | 降水量 | 水资源总量 | 绿水资源量 | 蓝水资源量 | 绿水流 | 绿水储量 | 绿水储量变量 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------|
| 1973 | 47.34 | 48.40 | 15.21 | 33.18 | 15.62 | 2.13 | -0.41 |
| 1974 | 40.41 | 40.06 | 15.26 | 24.80 | 14.95 | 2.44 | 0.30 |
| 1975 | 52.36 | 49.66 | 15.87 | 33.79 | 16.06 | 2.25 | -0.19 |
| 1976 | 42.82 | 41.26 | 16.02 | 25.24 | 15.98 | 2.29 | 0.04 |
| 1977 | 38.08 | 36.13 | 15.39 | 20.74 | 14.93 | 2.75 | 0.46 |
| 1978 | 40.63 | 38.95 | 14.75 | 24.20 | 15.14 | 2.36 | -0.39 |
| 1979 | 37.29 | 35.78 | 14.66 | 21.11 | 15.06 | 1.96 | -0.40 |
| 平均值 | 42.70 | 40.96 | 14.81 | 26.15 | 15.39 | 2.31 | -0.59 |

研究期的 7 a 中, 平均绿水量与蓝水量分别为 $1.481 \times 10^9 \text{ m}^3$, $2.615 \times 10^9 \text{ m}^3$, 蓝水量大约是绿水量的 1.8 倍, 可见在研究区蓝水是水资源的最大组成部分。表 1 结果还表明, SWAT 模拟结果的降水量与绿水蓝水资源量年平均值不完全相符, 在 1973 年还出现水资源总量($4.840 \times 10^9 \text{ m}^3$)大于降水量($4.734 \times 10^9 \text{ m}^3$)的情况, 这与甄婷婷等人^[1] SWAT 模拟成果中的个别年份水资源总量大于降水量的结果相一致。究其原因, SWAT 模型需要较长的预热期进行土壤水估算, 而本模拟受模拟时段限制只选取第一年(1972 年)作为预热期, 因此出现误差。但误差值占多年平均值的比例仅为 4.07%, 不影响整个流域的水量平衡^[1]。

2.2 绿水蓝水的年内变化

对 SWAT 模型输出文件中各月绿水蓝水资源量进行统计, 并按相应月份取平均值, 可得到年内绿水蓝水月平均变化过程(图 1)。

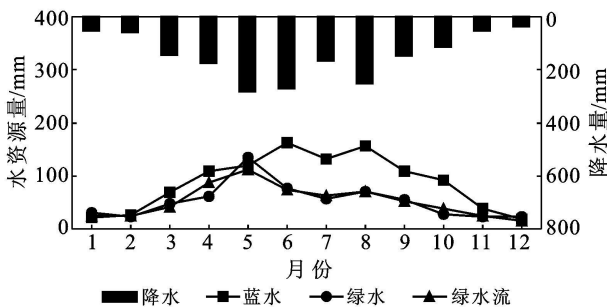


图 1 西河流域绿水和蓝水量 1973—1979 年月平均变化

从图 1 可以看出, 绿水蓝水的变化趋势与降水基本一致, 两者与降水的相关系数(R^2)分别为 0.80 和 0.84, 绿水蓝水的波峰都出现在汛期的 5—8 月, 11 月—翌年 2 月最低。绿水的峰值出现在 5 月, 而蓝水的峰值出现在 6 和 8 月, 除了 1, 5, 12 月, 其它各月的

蓝水量均大于绿水量。2—5 月, 绿水量升高, 这与气温升高绿水流增大有关^[1]。在绿水的成分中, 绿水流的峰值与绿水峰值同样出现在 5 月。除了在 4 月绿水流值稍大、5 月绿水值稍大外, 其它各月中绿水流与绿水差别不大, 可见在年内各月中绿水组分的主要部分是绿水流。

3 结论

(1) SWAT 模型是小尺度下进行绿水量化研究的有效办法, 在中国值得推广使用。利用 SWAT 模型可以进行绿水量估算、蓝水量估算、绿水组分、时间分布等研究, 并为绿水与蓝水的关系研究提供基础。

(2) 1973—1979 年间, 晋江西流域降水量的年平均值为 $4.270 \times 10^9 \text{ m}^3$, 年均绿水蓝水资源量为 $4.096 \times 10^9 \text{ m}^3$, 是传统可利用水资源量的 1.6 倍; 其中绿水资源量为 $1.481 \times 10^9 \text{ m}^3$, 蓝水资源量为 $2.615 \times 10^9 \text{ m}^3$, 绿水与蓝水所占比例分别为 36.2% 和 63.8%; 绿水流约占绿水资源的 87%, 是绿水资源的主要组成部分。

(3) 与辽宁碧流河流域、黄河卢氏流域相比较而言, 由于气候湿润、干燥度指数较小等原因, 晋江西流域水资源以蓝水为主, 但绿水资源量仍占相当数量; 表明我国南方地区也有必要把绿水纳入到传统水资源评估体系中。

(4) 绿水蓝水的年内变化趋势与降水过程基本一致, 汛期最高, 冬季最低; 全年中除了 1, 5, 12 月, 蓝水占优势; 年内各月中绿水组分的主要部分均为绿水流。

(5) 蓝水是西河流域水资源的最大组成部分, 这与黄河卢氏流域^[1]、辽宁碧流河流域^[6,9]的水资源以绿水为主的结论不同。究其原因, 卢氏流域位于黄河中下游的秦岭山脉北麓, 属内陆地区, 干燥度指数(潜

在蒸散量/降水量)^[12]较大,降水大部分都以蒸散发形式散失,形成的地表径流较少,表现为绿水量大于蓝水量,前者是后者的8.4倍;碧流河流域位于辽西南部沿海地区,气候较卢氏流域湿润,干燥度指数较卢氏流域小,虽然绿水量仍然大于蓝水量,但两者之比减小为1.3。这与王亚平等人^[12]研究得出的东北三省自西向东随着气候变湿润,干燥度指数变小的结论是一致的。晋江西流域位于东南沿海最湿润的地区之一,干燥度指数更小,表现为绿水与蓝水之比进一步减小为0.57,因而西流域水资源以蓝水为主。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] Falkenmark M. Coping with water scarcity under rapid population growth[C]. Pretoria: Conference of SADC Minister, 1995: 23-24.
- [3] Falkenmark M, Rockstrom J. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management[J]. Water Resources Plan Management-ASCE, 2006, 132(3): 129-132.
- [4] 陈家琦,王浩,杨小柳.水资源学[M].北京:科学出版社,2002:56-59.
- [5] 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.
- [6] 吴洪涛,武春友,郝芳华,等.绿水的多角度评估及其在碧流河上游地区的应用[J].资源科学,2009,31(3):420-428.
- [7] Jurgen S, Karim C A, Raghavan S, et al. Estimating of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1): 30-49.
- [8] Monireh F, Karim C A, Rainer S, et al. Modeling blue and green water resources availability in Iran [J]. Hydrological Processes, 2008, 23(3): 486-501.
- [9] 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.
- [10] 溪县志编纂委员会.安溪县志[M].北京:新华出版社,1994:106-122.
- [11] 王林,张明旭,陈兴伟.基于SWAT模型的晋江西流域径流模拟[J].亚热带资源与环境学报,2007,2(1):28-33.
- [12] 王亚平,黄耀,张稳.中国东北三省1960—2005年地表干燥度变化趋势[J].地球科学进展,2008,23(6):619-627.
- [3] Ellison, W D. Soil erosion study-part V: Soil transport in splash process[J]. Aric. Eng., 1947, 28: 349-353.
- [4] Maía José Marques, Ramón Bienes, Luis Jiménez, et al. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events: Rainfall simulation over USLE plots [J]. Science of the Total Environment, 2007, 378: 161-165.
- [5] Yu X X, Zhang X X, Li J L, et al. Effects of vegetation cover and precipitation on the process of sediment produced by erosion in a small watershed of loess region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 1-8.
- [6] 赵鸿雁,刘向东,吴钦孝.枯枝落叶层阻延径流速度研究[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1991(14):64-70.
- [7] 张颖,谢宝元,余新晓,等.黄土高原典型树种幼树冠层对降雨雨滴特性的影响[J].北京林业大学学报,2009,31(4):70-76.
- [8] 潘成忠,上官周平.牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J].水利学报,2005,36(3):371-377.
- [9] 王占礼,孙全敏,郑粉莉,等.降雨流动能物理模型研究[J].水利学报,2005,36(11):1280-1284.
- [10] 游珍,李占斌,蒋庆丰.植被对降雨的再分配分析[J].中国水土保持科学,2003,1(3):102-105.
- [11] 张光辉.坡面薄层流水动力学特性的试验研究[J].水科学进展,2002,13(2):159-165.
- [12] 刘青泉,李家春,陈力,等.坡面流及土壤侵蚀动力学(I):坡面流[J].力学进展,2004,34(3):360-372.
- [13] Kirkby M J. Hillslope Hydrology[M]. UK: John Wiley and Sons, Ltd., 1978.
- [14] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,2003.
- [15] Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J]. Earth Surface Processes Landforms, 1996, 21: 509-515.
- [16] 成都科学技术大学水力学教研室.水力学[M].北京:人民教育出版社,1979.
- [17] 肖培青,郑粉莉.上方来水来沙对细沟侵蚀泥沙颗粒组成的影响[J].泥沙研究,2003(10):64-68.
- [18] 张翼.黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀研究[J].水土保持研究,2000,7(2):39-47.
- [19] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003,17(3):34-37.

(上接第11页)