

土地利用及降雨和气温变化对生态流量的影响研究

赖敬明, 邹进, 张洪波, 姚彤悦

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650504)

摘要: 针对降雨量、气温和土地利用变化对生态流量的影响开展定量研究。以云龙湖流域为研究对象, 采用 SWAT 模型和改进的 Tennant 法, 定量分析了土地利用和降雨量、气温对月尺度生态流量过程的影响。研究结果表明: 2008-2018 年云龙湖流域内水域和建设用地面积有较大幅度的增加, 使流域月平均生态流量和生态流量峰值均有一定程度的增大。经计算, 流域水域和建设用地的增长率分别为 950%、100%, 累计年生态流量增加了 $7.82 \text{ m}^3/\text{s}$; 生态流量与降雨量和气温关系密切, 其与降雨量呈正相关, 与气温呈负相关, 相较于气温, 降雨量对生态流量的影响更大; 在相同变幅下, 降雨量增加比减少对生态流量产生的影响更大, 气温下降比上升导致的生态流量变化更大。经计算, 降雨量变幅分别为 10% 和 -10% 时, 相应的生态流量变化量分别为 $+0.0617$ 和 $-0.0570 \text{ m}^3/\text{s}$, 气温变幅分别为 1°C 和 -1°C 时, 相应的生态流量变化量分别为 -0.0151 和 $+0.0193 \text{ m}^3/\text{s}$ 。综上所述, 降雨、气温和土地利用变化对生态流量的影响均较为显著。

关键词: 生态流量; SWAT 模型; 改进的 Tennant 法; 土地利用; 降雨; 气温

中图分类号: TV213.4; X143

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)02-0093-08

Effects of land use, precipitation and temperature change on ecological flow

LAI Jingming, ZOU Jin, ZHANG Hongbo, YAO Tongyue

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: Quantitative research was conducted targeting at the impact of precipitation, temperature and land use change on the ecological flow. Using the soil & water assessment tool (SWAT) model and the improved Tennant method, the impacts of precipitation, temperature and land use on the monthly ecological flow process in Yunlong Reservoir basin were quantitatively analyzed. The results show that the area of water and construction land in Yunlong Reservoir basin has expanded significantly during the period of 2008-2018, resulting in the increase of the monthly average ecological flow and the peak ecological flow to a certain extent. According to the calculation results, the growth rate of water area and construction land was 950% and 100% respectively, and the accumulative annual ecological flow increased by $7.82 \text{ m}^3/\text{s}$. The ecological flow was closely related to precipitation and temperature, which was positively correlated with precipitation and negatively correlated with the air temperature. Compared with the temperature, precipitation had a greater impact on the ecological flow. Under the same amplitude, the increase of precipitation presented a greater impact on ecological flow than the decrease, whereas the drop of temperature gave a larger impact on ecological flow than the rise. It has been calculated that when the precipitation amplitude was +10% and -10%, the corresponding changes of ecological flow was $+0.0617 \text{ m}^3/\text{s}$ and $-0.0570 \text{ m}^3/\text{s}$, and when the temperature amplitude was $+1^\circ\text{C}$ and -1°C , the changes of ecological flow was $-0.0151 \text{ m}^3/\text{s}$ and $+0.0193 \text{ m}^3/\text{s}$, respectively. In conclusion, precipitation, temperature and land use change have a significant influence on the ecological flow.

Key words: ecological flow; soil & water assessment tool (SWAT) model; improved Tennant method; land use; precipitation; temperature

收稿日期: 2021-05-26; 修回日期: 2021-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52069010)

作者简介: 赖敬明 (1995-), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 研究方向为水环境与水生态。

通讯作者: 张洪波 (1979-), 男, 山东济南人, 博士, 讲师, 研究方向为陆地降雨径流及污染物迁移过程模拟。

1 研究背景

近半个世纪以来,气候变暖以及土地覆被破坏程度不断加剧,使全球水循环发生变化,生态系统(尤其是陆地水生态系统)趋于失衡,由此导致的河流生态系统健康问题成为困扰人类社会发展的的重要因素之一。因此,研究人类活动和气候变化对流域生态流量的影响具有重要意义^[1-3]。

迄今为止,关于生态流量对环境变化的响应研究已经取得较多成果。梅嘉洺等^[4]以旬河流域历史实测径流量数据为基础,选取 SWAT(soil & water assessment tool)模型定量探究了研究区径流量对气候变化的响应。綦昕瑶等^[5]基于逐日水文气象数据和土地利用及土地耕作属性等数据,通过 IHACRES(identification of unit hydrographs and component flows from rainfall, evaporation and streamflow data)水文模型和统计分析等方法分析发现,人类活动是东江源秋季径流量减少的主要原因。金纯等^[6]利用水力学法和水文学法对大渡河上游的生态流量进行了确定,得出了能满足鱼类及栖息地保护要求的最小生态流量。这些研究主要聚焦于人类活动或气候变化某一单项的影响,且研究中对生态流量的计算方法也缺少创新。

因此,为探究人类活动和气候变化对生态流量的影响规律,本文采用 SWAT 模型对云龙水库流域进行径流模拟,并运用改进的 Tennant 法计算流域的生态流量,同时,改进了 Tennant 法的划分标准。利用分布式水文模型定量分析了土地利用、降雨量和气温对生态流量变化趋势的影响,以期为流域水资源的可持续利用和人类与生态环境争水问题的解决提供一定的科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

云龙水库流域位于金沙江支流掌鸠河中上游,地理坐标范围为东经 $102^{\circ}16'07'' \sim 102^{\circ}35'33''$ 、北纬 $25^{\circ}43'34'' \sim 26^{\circ}07'43''$,径流面积为 743 km^2 ,河网总长达 447 km 。研究区内地势西北高东南低,以峡谷地貌为主。春冬季干旱,夏秋季多雨,降雨径流年内变化悬殊,年径流变差系数达 0.45 。流域内有云龙水库和双化水库,且分别设有雨量站。研究区水系及雨量站分布见图 1。近年来随着全球气候的变化,流域降雨量发生了较大改变,2008-2018 年间降雨量平均每年增加 30.45 mm 。2014 年,以云龙水库为供水源,在掌鸠

河(云龙水库下游)修建了云龙水库引水供水工程,至 2018 年,该工程使流域内城市建设用地面积增加了 0.4% ,水域面积增至总汇水面积的 2.83% ,流域土地利用也发生了较大的变化。

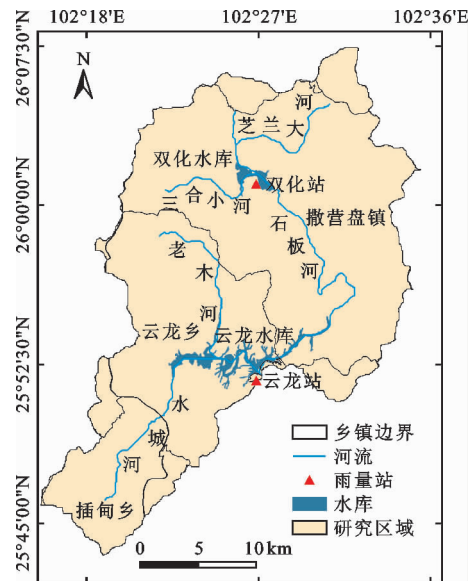


图 1 研究区水系及雨量站分布

2.2 数据来源

2.2.1 气象数据 本文使用的气象数据是由中国农业大学开发的中国大气同化驱动数据集(China Meteorological Assimilation Datasets for the SWAT Model, CMADS v1.0)。其空间分辨率为 $(1/3)^{\circ}$,时间分辨率为逐日,覆盖范围为东亚地区,时间尺度为 2008-2018 年^[7-9]。

2.2.2 地理数据

(1)数字高程数据。高程数据为地理空间数据云的 ASTER GDEM 30M 数据,分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,高程数据及其他栅格数据的投影坐标均采用 WGS_1984_UTM_Zone_48N。

(2)土壤数据。世界土壤数据库(HWSD_v1.1)(2009)出自联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)和维也纳国际应用系统分析研究所(International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA),时间分辨率为年,比例为 $1:1\,000\,000$ 。

(3)土地利用数据。土地利用数据采用中科院环境数据中心 2010、2015、2018 年的中国土地利用现状遥感监测数据,分辨率为 1 km 。

2.2.3 水文数据 水文数据为双化雨量站实测降雨、径流和蒸散发等数据。该数据源于禄劝县水务局,时间尺度为日尺度,序列长度为 2008-2018 年。

2.3 研究方法

2.3.1 SWAT 模型理论 SWAT 模型是美国农业部农业研究中心 (Agricultural Research Service, Department of agriculture, U. S., USDA ARS) 为评估水和土壤而开发的分布式水文模型,后与 ArcGIS 结合,应用于水文循环模拟预测、非点源污染管理优化等研究。模型采用分布式原理,基于水、土壤、泥沙、污染物以及其他生源物质等下垫面和气候情势进行子流域和水文响应单元划分,形成多个独立的计算模块。模型可基于水量平衡原理计算流域中能量的传递、降雨和地表径流的形成、土壤水和地下水的运移以及水分的蒸散发等复杂过程^[10-12]。

2.3.2 生态流量计算方法 用于计算生态流量的方法有 5 种,分别为逐月频率计算法、新逐月频率计算法^[13]、最小月平均流量法^[14]、年内展布法^[15]、SWAT 模型法^[16-20],其中,SWAT 模型法是基于 Tennant 法的生态流量标准对 SWAT 模型的径流结果进行处理,得到模拟的流域生态流量。通过与其他水文计算方法进行对比,本文选用具有一定物理机理的 SWAT 模型法进行生态流量的计算。同时,本文对 Tennant 法进行了改进,在原有的生态流量划分标准基础上提出了适用于本流域的划分标准,改进后的 Tennant 法将目标时段的生态流量划分为差、一般、好、最佳 4 个等级,其中,“一般”表示生态流量的最低值,低于最低值则对水体周边的生态环境及物种产生负面影响,达到或高于最低值则表示流量能满足水生动植物栖息生存的最低条件;“最佳”表示该流量不仅能满足水中鱼类、植物等物种对栖息环境的要求,还能达到滋养周边环境的作用。

具体研究步骤如下:

(1) 水文期的划分和典型年的选取。研究区位于北亚热带季风区,降雨径流呈季节性特征,故将研究区的生态流量划分为丰水期(6-9 月)、平水期

(10-11 月)和枯水期(12-翌年 5 月)3 个时段。

根据观测站系列年均流量值 Q_i 计算系列均值 \bar{Q}_i 和年径流模数 k_{it} ;若有多个测站,则由公式(1)求得各测站每年的平均径流模数 \bar{k}_i ,取年径流模数或者平均年径流模数接近 1 的为典型年。

$$\bar{k}_i = \frac{\sum_{i=1}^N k_{it}}{N} \quad (1)$$

式中: k_{it} 为年径流模数(i 为测站序号, t 为观测年份); N 为测站数; \bar{k}_i 为平均年径流模数,其值越接近于 1,则典型年效果越好。

研究区年平均径流和年径流模数计算结果见表 1。由表 1 可知,2009 年的年径流模数 $k_{2009} = 1.034$,最接近 1,故选取该年为典型年。2009 年测站各月平均流量见表 2,根据表 2 按丰水期、平水期和枯水期的时段划分计算出该 3 个水文期的平均流量分别为 4.080、0.750、0.534 m^3/s 。

表 1 研究区年平均径流和年径流模数计算表

年份	年均流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	年径流模数 k_t	$ k_t - 1 $
2008	2.010	1.186	0.186
2009	1.752	1.034	0.034
2010	1.586	0.936	0.064
2011	0.757	0.447	0.553
2012	1.396	0.824	0.176
2013	1.349	0.796	0.204
2014	1.189	0.701	0.299
2015	1.470	0.868	0.132
2016	2.231	1.317	0.317
2017	2.250	1.328	0.328
2018	2.650	1.564	0.564

表 2 2009 年测站实测月平均流量

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	0.888	0.331	0.238	0.566	0.838	5.983	3.292	4.450	2.595	1.032	0.468	0.343

(2) 生态流量百分比的选取。根据现有资料,以 Tennant 法流量为主参考量,分别为每个划分时段的生态流量设置 4 个流量等级:最低限、最佳范围下限、最佳范围上限和最大值。其中,平水期(10-11 月)及枯水期(12-翌年 5 月)生态流量的最低限和最佳范围下限根据测站水生生物的最低和最佳

生存需水要求确定,丰水期(6-9 月)及平水期(10-11 月)生态流量的最大值采用相应时段内河道的最大安全过流量,枯水期(12-翌年 5 月)生态流量的最大值取典型年该时段的月均流量最大值。不同同时段的生态流量百分数由公式(2)求得,计算结果见表 3、4。

$$P_t = \frac{Q_t}{\bar{Q}_t} \times 100\% \quad (2)$$

式中： P_t 为 t 时段(丰、平、枯水期)的生态流量百分比，%； Q_t 为 t 时段的生态流量， m^3/s ； \bar{Q}_t 为 t 时段的平均流量， m^3/s 。

表3 双化水库测站各水文期不同等级相应生态流量 m^3/s

水文期	最低限	最佳范围下限	最佳范围上限	最大值
丰水期	0.367	1.428	4.080	4.610
平水期	0.075	0.263	0.750	1.088
枯水期	0.080	0.214	0.747	0.886

表4 双化水库测站各水文期生态流量百分比 %

级别	丰水期		平水期		枯水期	
	计算值	确定值	计算值	确定值	计算值	确定值
最小值	9	10	10	10	15	15
最佳范围下限	35	35	35	35	40	40
最佳范围上限	100	100	100	100	140	140
最大值	113	115	145	150	166	170

(3)改进 Tennant 法的生态流量划分标准。由表4中的“最小值”、“最佳范围”、“最大值”生态流量级别的百分比可确定研究区丰、平、枯水期的“差或最差”“最佳范围”以及“最大”3个生态流量状况的推荐基流百分比值。改进 Tennant 法将“最小值”和“最佳范围下限”所属的百分比区间值等间值划分为“一般”“好”“非常好”“极好”4个生态流量状况，改进 Tennant 法的各水文期不同流量状况相应的推荐基流百分比见表5。

表5 改进 Tennant 法各水文期不同流量状况相应的推荐基流百分比 %

河道流量状况	丰水期	平水期	枯水期
最大	115	150	170
最佳范围	35 ~ 100	35 ~ 100	40 ~ 140
极好	30	30	35
非常好	25	25	30
好	20	20	25
一般	15	15	20
差或最差	10	10	15
极差	0 ~ 10	0 ~ 10	0 ~ 15

另外，相较于原 Tennant 法的汛期、非汛期两个划分时段，本文的划分时段增多，计算结果更为理

想，且典型年流量值最接近年均流量值，改进 Tennant 法在保留原 Tennant 法合理性的基础上使流量更能体现出流域的丰枯变化规律，克服了传统 Tennant 法不适用于季节性流量变化较大的区域的缺陷，保证了该方法应用于研究区生态流量计算的合理性和实用性。

3 结果与分析

3.1 基于 SWAT 模型的模拟结果

本文建立了流域的 SWAT 模型，将全流域划分为21个子流域。因双化站在流域上游，受人类活动影响较小，故采用双化站(5#子流域)的实测径流量数据，通过 SWAT - CUP 对模型进行率定和验证。模型验证指标包括 R^2 值、 NS (no significance) 值和相对误差值，验证结果表明，模型率定期 R^2 、 NS 和相对误差值分别为 0.82、0.78 和 -11.2%，验证期分别为 0.90、0.67 和 14.4%。根据 Moriasi 等^[21]的研究结论，当 $R^2 > 0.7$ 、 $NS > 0.5$ 且相对误差在 $\pm 25\%$ 时即可认为模型已达到满意程度。故所建立的模型已满足精度要求。

按照表5中改进 Tennant 法的“一般”河流流量状况对应的推荐基流百分比标准，将模拟的月径流量处理成月生态流量过程，取各月多年均值为 SWAT 模型的模拟结果。为了与其他不同方法的计算结果进行比较，本文还采用另外4种水文学方法计算了生态流量过程，结果如图2所示。

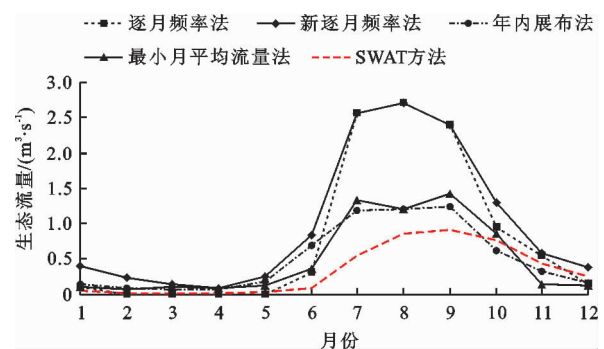


图2 不同模型方法对多年平均月生态流量过程的计算结果比较

分析图2可知：(1)由 SPSS 分析得出的 SWAT 方法的模拟结果与其他水文学方法的结果相似度为 83.9% ~ 88.2%，生态流量过程的变化趋势基本吻合，丰枯交替明显。(2)在丰水期(6-9月)，由于降水量较多以及不同方法间的差异，导致 SWAT 方法与其他水文学方法计算的生态流量相差较大(尤其是7、8、9月)，差值范围为 0.74 ~ 2.01 m^3/s 。

(3)在平水期和枯水期,随着降水量的减少,各方法计算结果的差异减小,最大差值为 $0.52 \text{ m}^3/\text{s}$ 。基于上述分析认为SWAT方法的计算结果满足要求。

3.2 土地利用变化下的生态流量

3.2.1 土地利用情景 本文基于研究区域的水文特征,选取研究期内的2010、2015和2018年3个土地利用变化典型年建立土地利用情景(以下将2010、2015、2018年土地利用情景分别简称为2010土地、2015土地、2018土地)。研究期各典型年的土地利用变化情况见表6。

由表6可以看出,2010-2015年研究区域内的人类活动较少,仅有 1 km^2 林地转化成为工业用地,人类活动未对研究区产生较大的扰动;2015-2018年5种土地利用类型发生了改变,改变较大的为耕地、林地、草地和水域,变化面积分别为-18、10、-13和 19 km^2 ,居民区增加了 1 km^2 ,对河流水文情势造成了一定的影响。

3.2.2 土地利用对生态流量的影响 在同一套流域气象数据(CMADS v1.0(2008-2018))基础上,利用已校准的模型模拟流域在3种情景下2008-2018年的生态流量过程(假设2010土地为原始状态,2015土地和2018土地为变化态)。通过改进的Tennant法对模拟结果进行划分,得到不同情景的月生态流量过程,结果见图3。

根据图3通过计算得出,在2015土地情景下,多年平均生态流量为 $2.23 \text{ m}^3/\text{s}$,与2010土地情景模拟结果 $2.22 \text{ m}^3/\text{s}$ 相近,且其丰、枯水期占比以及最大、最小生态流量值也与2010土地情景下基本相同,可知2010-2015年生态流量变化较小,土地利用变化不大,与表6所示的结果相符,后续只需以2010土地作为基准进行比较研究即可。在2018土地情景模拟结果中,由于林地、水域和居民区增加,耕地、草地减少,多年平均生态流量增至 $3.46 \text{ m}^3/\text{s}$,

较2010土地情景模拟年均值增加了55.16%,年内月生态流量的 C_V 值为0.85,小于1.02(2010土地情景 C_V 值)。如图3所示,2014年2月因流域内兴修掌鸠河引水供水工程(即云龙水库),各情景生态流量值自2014年以后明显增大。

在“一般”划分标准下(表5)的2015-2018年月生态流量过程见图4。

由图4可以看出:(1)各土地利用情景与实测情况的年内变化明显且呈周期性,6-9月为丰水期,10-11月为平水期,12-翌年5月为枯水期,丰枯有序交替;(2)在该时段内,2018土地情景下的生态流量值总体大于2010土地情景,且2018土地模拟月生态流量较2010、2015土地模拟值不断增大,平均增幅分别为0.12%和0.11%(2010土地与2015土地基本相同);(3)生态流量峰值(2018年除外)分别以8.91%和29.25%的趋势增加,最大峰值约为最小峰值的2倍;(4)2018土地模拟最小月生态流量为0,最大月生态流量为 $2.41 \text{ m}^3/\text{s}$,相较于2010土地情景,极端生态流量变幅增大,易于达到水生生物产卵的水流刺激条件,有利于其繁衍和生存;(5)在2010土地情景下模拟的2015年丰、枯水期生态流量占比分别为52.07%、10.76%,2018土地情景下模拟的2018年丰、枯水期占比分别为60.29%、10.45%,可知由于土地利用的变化,水资源量进一步向丰水期(6-9月)集中,时间分布不均状况加剧。

2015-2018年实测月生态流量值及其每年的月生态流量峰值均呈波动增大趋势,平均增幅分别为0.63%和11.93%,最大峰值约为最小峰值的2倍,极端生态流量差值亦逐年变大;在实测数据中,2018年较2015年的丰、枯水期占比变化分别为7.12%、-1.62%,生态流量进一步集中于丰水期,与模拟结果的变化趋势一致。

表6 研究期各典型年的土地利用变化情况

序号	土地利用类型	2010 土地		2015 土地		2018 土地		2008-2018 年变化	
		面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	变化率/%
1	耕地(AGRL)	107	14.40	107	14.40	89	11.98	-18	-16.82
2	林地(FRST)	524	70.52	523	70.39	534	71.87	+10	+1.91
3	草地(PAST)	109	14.67	109	14.67	96	12.92	-13	-11.93
4	水域(WATR)	2	0.27	2	0.27	21	2.83	+19	+950.00
5	居民区(URML)	1	0.13	1	0.13	2	0.27	+1	+100.00
6	工业用地(UIDU)	0	0	1	0.13	1	0.13	+1	
	土地总面积	743	100	743	100	743	100		

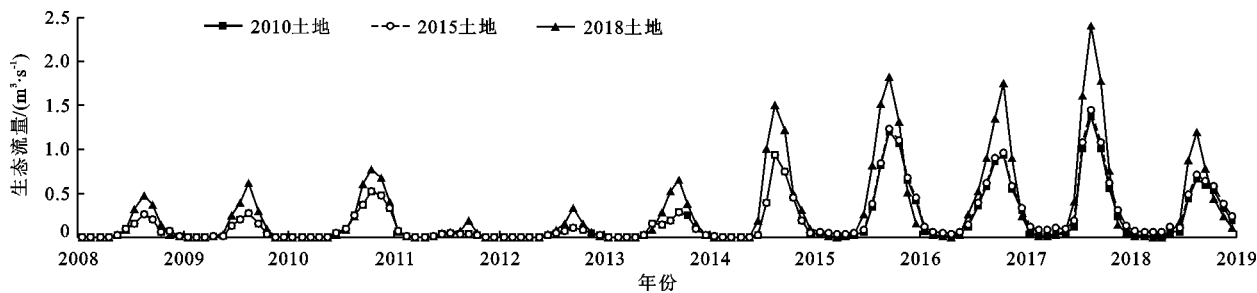


图3 2008 - 2018年不同土地利用情景下月生态流量过程模拟结果

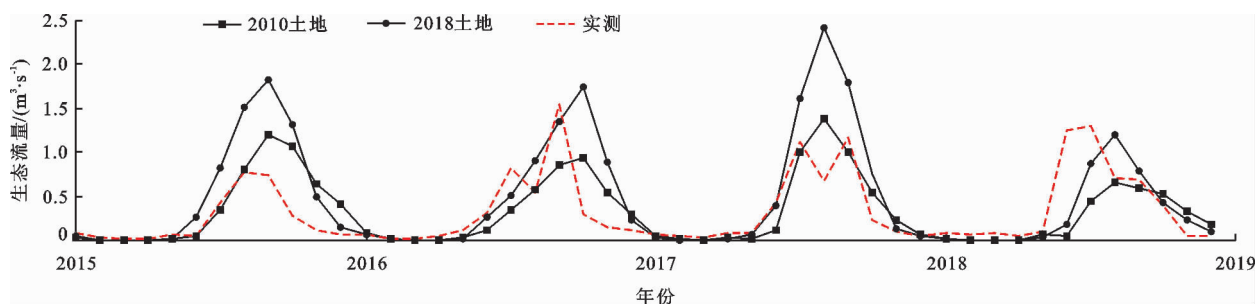


图4 “一般”划分标准下2015 - 2018年月生态流量过程

各土地利用情景下2015 - 2018年累计年生态流量变化曲线见图5。由图5可见,相较于2010土地,2015土地下研究时段内年生态流量的累计变化量增加了 $2.08 \text{ m}^3/\text{s}$,而2018土地相较2015土地的累计变化量增加了 $5.74 \text{ m}^3/\text{s}$,因而2008 - 2018年的年生态流量累计值增加了 $7.82 \text{ m}^3/\text{s}$ 。土地利用对生态流量变化产生的贡献率为32.90%。(因2008 - 2010年间无较大的土地利用变化,故将2010年土地利用情况近似看作2008年土地利用情况)

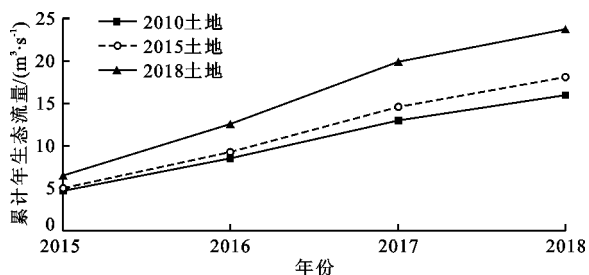


图5 各土地利用情景下2015 - 2018年累计年生态流量变化曲线

3.3 降雨量和气温变化下的生态流量

3.3.1 气候变化情景 由流域的实测降雨(2008 - 2018年)和蒸发(2012 - 2018年)资料可得,年际降雨量整体呈增大趋势,年均增加量为 30.45 mm ,增幅为41.5%;年际蒸发量呈减小趋势,年均减少量为 15.23 mm ,减幅为9.18%。二者为气象数据的主要变量,引起的气象变化较大,因此,本文选取降雨量和气温作为反映气候变化的影响因子建立模拟情景。

以模型当前降雨量值 P 为基础,分别减小和增大10%、20%建立5个降雨情景,分别记为 $P - 20\%$ 、 $P - 10\%$ 、 P 、 $P + 10\%$ 、 $P + 20\%$;以模型当前气温值 T 为基础,分别减小和增大 1.0 、 $2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 建立5个气温情景,分别记为 $T - 2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T - 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 T 、 $T + 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T + 2.0 \text{ }^\circ\text{C}$,共计25种组合气候变化情景。

3.3.2 降雨量和气温对生态流量的影响 在已校准的SWAT模型基础上,分别将各气候情景对应的配置数据代入模型,模拟得到对应情景下的流域月径流量和径流过程。经改进的Tennant法处理得到不同气候情景下流域的月生态流量过程,2015 - 2018年不同气候情景下流域月生态流量过程对比如图6所示。

由图6可知,各气候情景月生态流量过程的变化趋势基本一致。在时间分布上,降雨量和气温对月生态流量过程基本无影响;而在水资源量上影响则较为明显,且在丰水期尤为突出。越靠近年内月生态流量峰值,月生态流量变幅越大。在相应变幅下,降雨量 P 增加20%与减少20%的年生态流量变化最小值为 $+0.0158 \text{ m}^3/\text{s}$,气温 T 上升 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 与下降 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 的年生态流量变幅最大值仅为 $-0.0151 \text{ m}^3/\text{s}$,表明降雨量引起的月生态流量变化较大,气温引起的变化较小。

由图6(a)可以看出,在研究时段内,年生态流量随着气温的下降而增大。气温每下降 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 导致年生态流量平均增大 $0.0168 \text{ m}^3/\text{s}$;当降雨量为 P 时,

气温升高 1 ℃ 和降低 1 ℃ 导致的年生态流量变化量分别为 -0.015 1 和 +0.019 3 m³/s,表明气温下降比上升导致的年生态流量变化更大,且降雨量越大,影响越大。由图 6 (b)可以看出,在相同截流、下渗和蒸散发条件下,年生态流量随着降雨量的增加而增加,降雨量每增加 10% 对应的年生态流量值平均增大 0.058 8 m³/s;当气温为 T 时,降雨量增大 10% 和减小 10% 产生的年生态流量变化量分别为 +0.061 7 和 -0.057 0 m³/s,表明降雨量增加比减少对年生态流量产生的影响更大,且气温越高,影响

越大。因此,流域生态流量受降雨量和气温影响较大且存在明显的相关关系,各气候情景下流域年生态流量及其变化量详见表 7。

根据实测资料,研究区 2008 - 2018 年降雨量呈增大趋势,年均增量为 30.45 mm,气温虽增速较慢,但也在不断上升。由于降雨的补给作用大于升温导致的蒸发作用,使年生态流量平均以每年 0.91 m³/s 的速率不断增大。同时,在研究时段内,实测生态流量仅在水资源量上有较大变化,而在丰、平、枯水期分布等时间尺度上基本均未发生变化,与模拟结果一致。

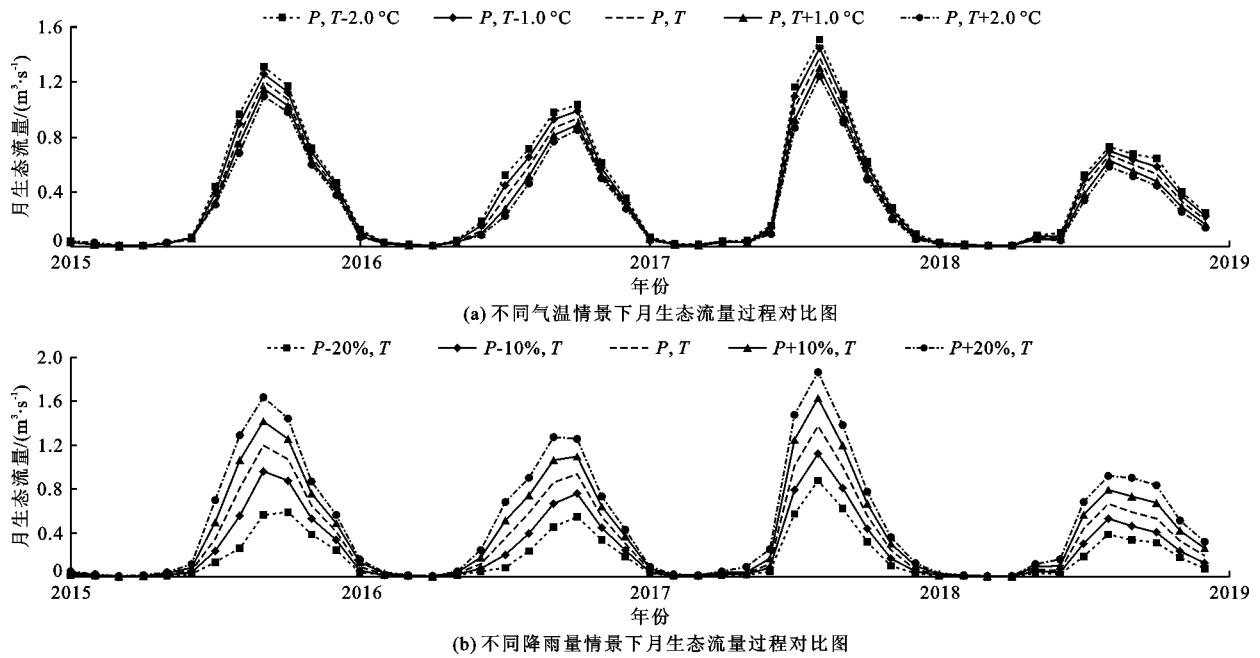


图 6 2015 - 2018 年不同气候情景下流域月生态流量过程对比

表 7 各气候情景下流域年生态流量及其变化量

气候情景	$P - 20\%$	$P - 10\%$	P	$P + 10\%$	$P + 20\%$	$(P - 20\%) - P$	$P - (P + 20\%)$	变化量 Δ
$T - 2.0\text{ }^\circ\text{C}$	0.1057	0.1625	0.2253	0.2914	0.3607	-0.1196	-0.1354	0.0158
$T - 1.0\text{ }^\circ\text{C}$	0.0911	0.1443	0.2041	0.2683	0.3361	-0.1130	-0.1320	0.0190
T	0.0778	0.1278	0.1848	0.2465	0.3125	-0.1070	-0.1277	0.0207
$T + 1.0\text{ }^\circ\text{C}$	0.0673	0.1146	0.1697	0.2288	0.2928	-0.1024	-0.1231	0.0207
$T + 2.0\text{ }^\circ\text{C}$	0.0596	0.1048	0.1585	0.2167	0.2787	-0.0989	-0.1202	0.0213
$(T - 2.0\text{ }^\circ\text{C}) - T$	0.0279	0.0347	0.0405	0.0449	0.0482			
$T - (T + 2.0\text{ }^\circ\text{C})$	0.0182	0.0230	0.0263	0.0298	0.0338			
变化量 Δ	-0.0097	-0.0117	-0.0142	-0.0151	-0.0144			

4 讨论

4.1 土地利用影响分析

在土地利用方面,王钰双等^[22]通过对闽江流域的径流响应研究发现建设用地类型的产流作用明

显,本文所研究的云龙水库流域由于土地利用类型的变化(如 2014 年兴修的云龙水库工程),水域、建设用地面积增大,产流作用增强,使生态流量增加,这一结果与前者结论一致。此外,林若兰等^[23]在生态径流调节服务评估研究中发现,在北江流域,自然

植被对径流调节服务起正向促进作用,而耕地面积比例与调节径流深呈负相关关系。这与本文云龙水库流域在研究时段内土地利用面积变化与生态流量的变化关系结论一致。(2008-2018年云龙水库流域耕地面积减少 18 km^2 ,林地面积增加 10 km^2 ,相应的生态径流增大了 55.16% 。)

4.2 气候因子影响分析

经分析,降雨量与生态流量呈正相关,气温与生态流量呈负相关,且生态流量对降雨量变化的敏感性比气温变化的敏感性更强。曹灿等^[24]研究发现南渡江上游流域径流对降雨量变化的敏感性高于气温,刘卫林等^[25]研究表明盱江流域的气温与径流呈弱负相关,降雨量与径流呈强正相关,气温对径流的影响远小于降雨量对径流的影响,该两个文献中的研究结果与本文结论一致。

降雨作为水文循环的重要环节,直接影响着生态流量。根据本研究结果,降雨量每增加 10% 会使年生态流量平均增加 $0.0588\text{ m}^3/\text{s}$;降雨量的增加比减少对年生态流量产生的影响更大,且气温越高,影响越大。气温则通过改变蒸发量间接地对生态流量产生影响。根据计算成果,气温每上升 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 导致的年生态流量平均减少量为 $0.0168\text{ m}^3/\text{s}$;气温下降比相同幅度的气温上升所导致的生态流量变化更大,且降雨量越大,两者变化差距越大,这与岳广涛等^[26]的研究结论一致。

5 结 论

(1)基于云龙水库流域的实际水文情势,提出了改进的Tennant法,并采用SWAT模型对流域进行生态流量模拟,使生态流量的模拟结果更具合理性。

(2)研究时段内,由于土地利用发生变化(水域和建设用地面积增大),流域的产流作用增强,生态流量及其峰值增大,极端生态流量幅度变大,水资源时间分布不均状况进一步加剧。经计算,研究时段内土地利用对年生态流量变化的贡献率约为 32.90% 。

(3)降雨量和气温主要通过改变水资源量来影响生态流量,越靠近年内月生态流量峰值,则两者的影响越大;降雨量的变化对生态流量的影响比气温变化的影响更大。

(4)降雨量与生态流量呈正相关,气温与生态流量呈负相关。相同变幅下,降雨量增加比减少对生态流量产生的影响更大,且气温越高,这种影响越大;气温下降比气温上升导致的生态流量变化更大,且降雨量越大,两者的差距越大。

参考文献:

- [1] ZHAO Weijun, YAN Tingting, DING Xue, et al. Response of ecological quality to the evolution of land use structure in Taiyuan during 2003 to 2018 [J]. Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(1): 1777-1785.
- [2] 柴朝晖,姚仕明. 河流生态研究热点与进展[J]. 人民长江, 2021, 52(4): 68-74.
- [3] 夏军,张永勇,穆兴民,等. 中国生态水文学发展趋势与重点方向[J]. 地理学报, 2020, 75(3): 445-457.
- [4] 梅嘉沼,唐亚男,李仪,等. 基于SWAT模型的旬河流域气候变化水文响应研究[J]. 水生态学杂志, 2021, 42(3): 7-13.
- [5] 蔡昕瑶,刘贵花,贺志明,等. 东江源寻乌水流域径流变化特征及其原因分析[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2020, 44(1): 89-94.
- [6] 金纯,姜翠玲,吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2): 8-14.
- [7] 孟现勇,师春香,刘时银,等. CMADS数据集及其在流域水文模型中的驱动作用——以黑河流域为例[J]. 人民珠江, 2016, 37(7): 1-19.
- [8] 田扬,肖桂荣. 基于CMADS驱动下SWAT模型的敖江流域径流模拟[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 27-32.
- [9] 谷新晨,肖森元,杨广,等. 基于CMADS和SWAT模型的玛纳斯河流域水文过程模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(2): 116-123.
- [10] LI Qiang, NIE Ningming, LU Zhonghua, et al. The study of parallelization of SWAT hydrology cycle [M]. Singapore, Springer, 2019.
- [11] 田扬,肖桂荣. 基于CMADS驱动下SWAT模型的敖江流域径流模拟[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 27-32.
- [12] 王慧亮,康永飞,张锦霞. 基于贝叶斯平均的非点源污染多模型模拟与不确定性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(5): 1221-1228.
- [13] 江善虎,周乐,任立良,等. 基于生态流量阈值的河流水文健康演变定量归因[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 356-365.
- [14] 刘中培,李鑫,窦明,等. 淮河干流河南段基本生态流量保证率研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 50-54+71.
- [15] 赵然杭,彭毅,王好芳,等. 基于改进年内展布计算法的河道内基本生态需水量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 114-119.
- [16] 肖玉成,董飞,张新华,等. 基于SWAT分布式水文模型的河道内生态基流[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(1): 85-90.

(下转第107页)

- [5] 张淑兰,张海军,张鑫傲,等. 陕西省水资源生态足迹及其可持续利用分析[J]. 人民长江,2021,52(4):130-136.
- [6] 王先庆,李 博,李 进,等. 基于生态足迹模型的水资源可持续利用分析[J]. 人民长江,2019,50(5):107-112.
- [7] 李允洁,吕惠进,卜 鹏. 基于生态足迹法的浙江省水资源可持续利用分析[J]. 长江科学院院报,2016,33(12):22-26+32.
- [8] LI Bo, WANG Xianqing, WEI Tao, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources in karst region based on the ecological footprint model—Liupanshui city case [J]. Journal of Water Supply, 2018, 67(6): 566-575.
- [9] 李林汉,田卫民,岳一飞. 基于层次分析法的京津冀地区水资源承载能力评价[J]. 科学技术与工程,2018,18(24):139-148.
- [10] 李维乾,解建仓,李建勋,等. 基于 AHP - BN 的陕西经济可持续发展水资源保障研究[J]. 水力发电学报,2012,31(5):6-13.
- [11] 金菊良,张礼兵,魏一鸣. 水资源可持续利用评价的改进层次分析法[J]. 水科学进展,2004,15(2):227-232.
- [12] 温淑瑶,马占青,周之豪,等. 层次分析法在区域湖泊水资源可持续发展评价中的应用[J]. 长江流域资源与环境,2000,9(2):196-201.
- [13] 徐卫红,于福亮,龙爱华. 基于熵权的模糊物元模型在水资源可持续利用评价中的应用[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(S2):157-160.
- [14] 张 杰,邓晓军,翟禄新,等. 基于熵权的广西水资源可持续利用模糊综合评价[J]. 水土保持研究,2018,25(5):385-389+396.
- [15] 杨江州,周 旭,蔡振饶,等. 岩溶城市(贵阳市)水资源可持续利用评价研究[J]. 水电能源科学,2018,36(2):36-39.
- [16] 陈璇璇,张旖旎,刘 莉,等. 基于超效率 DEA 模型的陕晋两省水资源利用效率评价[J]. 灌溉排水学报,2020,39(10):138-144.
- [17] 刘俊国,赵丹丹. “量 - 质 - 生” 三维水资源短缺评价: 评述及展望[J]. 科学通报,2020,65(36):4251-4261.
- [18] LI Bo, WU Qiang, ZHANG Wenping, et al. Water resources security evaluation model based on grey relational analysis and analytic network process: A case study of Guizhou Province[J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 37: 101429.
- [19] 陈 午,许新宜,王红瑞,等. 基于改进序关系法的北京市水资源可持续利用评价[J]. 自然资源学报,2015,30(1):164-176.
- [20] 王丽珍,黄跃飞,王光谦. 基于不确定性的区域水资源可持续性评价[J]. 水力发电学报,2013,32(6):83-91.
- [21] 牛冲槐,曹海曼. 中部六省高技术产业研发创新的相对效率分析——基于超效率 DEA 方法[J]. 工业技术经济,2015,34(2):111-116.
- [22] 赵 前,焦 捷,王以华. 中国省际科技竞争力评价——基于超效率 DEA 的分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2011,51(6):820-826.
- [23] 岳 进,郭 辉. 基于区间层次分析法和专家群决策的 MOOC 适切性评价[J]. 电化教育研究,2019,40(3):54-58.
- [24] 李建林,马会萌,田春光,等. 基于区间层次分析法的电化学储能选型方案[J]. 高电压技术,2016,42(9):2707-2714.
- [25] 肖 峻,王成山,罗凤章. 区间层次分析法的权重求解方法初探[J]. 系统工程与电子技术,2004,26(11):1597-1600.
- [26] 肖 峻,罗凤章,王成山,等. 区间层次分析法的权重求解方法比较研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2004(3):12-16.

(上接第 100 页)

- [17] JIANG Xuechen, ZHANG Jing, SONG Yongyu, et al. Comparative study on the dynamic calculation method of river ecological water demand[J]. Earth and Environmental Science, 2020, 569(1): 012081.
- [18] 任 朋,齐 进. 基于改进 Tennant 法的南渡江生态基流计算[J]. 中国农村水利水电,2020(9):182-184+189.
- [19] 姚云泽,姜翠玲,万福涛. 基于多种水文学方法的滦河典型断面生态基流研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):941-949.
- [20] 何 兵,高 凡,覃 珊,等. 基于多种水文学方法的干旱区内陆河流健康流量重构[J]. 水土保持通报,2019,39(1):160-166.
- [21] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3):885-900.
- [22] 王钰双,陈芸芝,卢文芳,等. 闽江流域不同土地利用情景下的径流响应研究[J]. 水土保持学报,2020,34(6):30-36.
- [23] 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.
- [24] 曹 灿,孙 瑞,吴志祥,等. 基于 SWAT 模型的南渡江上游流域径流对气候变化的响应[J/OL]. 水土保持研究,2022,29(2):255-264.
- [25] 刘卫林,黄一鹏,万一帆,等. 盱江流域径流模拟及其对气候变化的响应[J]. 水电能源科学,2020,38(8):18-21+78.
- [26] 岳广涛,祝雪萍,杨军生,等. 汾河兰村 - 二坝流域径流模拟及气候变化对径流影响研究[J]. 中国农村水利水电,2021(3):46-52.