

九寨沟流域森林覆被变化对径流的影响

李诗琦^{1,3}, 杨青霞², 刘俊雁^{1,3}, 王潘潘², 严贤春³,
廖雨辰¹, 陈琪^{1,3}, 谢雨¹, 吴彦¹

(1. 中国科学院 成都生物研究所, 成都 610041; 2. 九寨沟国家级自然保护区管理局,
四川 阿坝州 623402; 3. 西华师范大学 生命科学学院, 四川 南充 637002)

摘要: 覆被变化引起的径流响应研究不仅是流域水文学的热点之一, 在九寨沟更是与流域的水景观核心遗产价值保护紧密相关, 因此九寨沟流域水资源的研究是迫切需要关注的问题。以 SWAT 模型模拟为基本研究手段, 对九寨沟流域 2009—2017 年森林覆被变化下的流域水文做定量研究, 探究了九寨沟流域对森林覆被变化的响应机理。结果表明: (1) 模型率定期的决定参数 R^2 和纳什效率系数 E_{ns} 均为 0.83, 验证期的 R^2 和 E_{ns} 均为 0.7, 说明 SWAT 模型对九寨沟流域径流量模拟具有较高的适用性。(2) 2016 年九寨沟流域内森林覆被面积较 2004 年有增加的趋势, 其中针叶林面积增加明显(增加了 10.56 km²), 而阔叶林面积有所减少(减少了 2.57 km²)。(3) 相比 2004 年, 2016 年的森林覆被下的 9 年内年均径流量增加 0.13 m³/s。年际变化中显示阔叶林的调蓄能力强于针叶林, 而在年内变化中针叶林有更好的调洪补枯能力。(4) 在气象条件相同的前提下, 2016 年月径流相比 2004 年月径流在枯水期增加 25.93%、丰水期减少 9.86%。综上, 研究结果不仅阐明了保护区森林覆被变化带来的生态效益, 同时也可作为九寨沟地区的水景观核心价值的保护及生态管理措施提供科学依据。

关键词: 九寨沟流域; 森林覆被变化; SWAT 模型; 径流模拟

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0106-07

Impact of Forest Cover Change on Runoff in Jiuzhaigou Basin

LI Shiqi^{1,3}, Yang Qingxia², LIU Junyan^{1,3}, Wang Panpan², YAN Xianchun³,
LIAO Yuchen¹, CHEN Qi^{1,3}, XIE Yu¹, WU Yan¹

(1.Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2.Jiuzhaigou Nature Reserve Administrative Bureau, Abazhou, Sichuan 623402, China;

3.College of Life Science, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637002, China)

Abstract: Studies on runoff responses to cover change are hotspots in watershed hydrology and closely related to the conservation of core heritage value of water landscape in Jiuzhaigou, so the study of water resources in Jiuzhaigou watershed is an urgent problem. We used SWAT model simulations as the basic research tool to quantitatively study the watershed hydrology due to forest cover changes in Jiuzhaigou watershed during 2009—2017, and investigated the response mechanism of Jiuzhaigou watershed to forest cover changes. The results show that: (1) the decision parameters R^2 and E_{ns} and the Nash efficiency coefficient were 0.83 for the calibration and were 0.7 for the validation, indicating that the SWAT model had high applicability to the runoff simulation in the Jiuzhaigou basin. (2) the forest cover within the Jiuzhaigou watershed exhibited an increasing trend from 2004 to 2016, with coniferous forest area increasing 10.56 km² and broadleaf forest area

收稿日期: 2021-10-28

修回日期: 2021-12-06

资助项目: 九寨沟灾后重建科研项目(5132202020000046); 国家重点研发计划项目(2020YFE0203200)

第一作者: 李诗琦(1996—), 女, 四川成都人, 在读硕士, 主要从事森林保护和生态水文研究。E-mail: Lishiqi21@163.com

通信作者: 吴彦(1968—), 男, 四川成都人, 研究员, 主要从事山地植物生态学研究。E-mail: wuyan@cib.ac.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

decreasing 2.57 km²; (3) the average annual runoff under forest cover in 2016 increased 0.13 m³/s within 9 years compared to 2004; compared to broadleaf forests, the coniferous forests presented a worse interannual variability in water storage and better intra-annual flood regulation and replenishment variabilities; (4) under the same meteorological conditions, monthly runoff increased by 25.93% in the high-water period and decreased by 9.86% in the dry period in 2016 compared to that in 2004. Overall, these results elucidate the ecological benefits derived from forest cover changes in the reserve, and can provide a scientific basis for conserving core values of water landscape and ecological management in Jiuzhaigou.

Keywords: Jiuzhaigou basin; forest cover change; SWAT; runoff simulation

植被覆被变化导致林冠截留、蒸散发和下垫面等改变,将直接影响流域的径流过程^[1]。虽然长期来看气候变化是引起流域径流量改变的直接因素,但短期来讲,植物覆被变化是引起流域径流量改变的重要因素^[2]。目前,对于土地利用/植被覆被变化所引起的生态水文过程的改变已开展了较多研究。例如,Bri-ones 等^[3]利用 SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tool)评估了菲律宾 Batangas 流域土地利用变化引起的水文响应,发现森林和草地覆被面积的减少将导致地表径流增加,然而在枯水期时径流量和地下水的补给却有所减少。Sørensen 等^[4]发现森林砍伐后枯水期径流增加了 58%~99%;而部分研究认为森林覆被减少会引起枯水径流量的减少^[5],这可能是由于枯枝落叶层消失,以至于土壤紧实,土壤的蓄水能力以及枯水期入渗能力减弱引起的^[6]。渠勇建等^[7]发现微小的土地利用变化不会显著影响衢江流域流量和水量平衡,而当林地面积持续增加时则会减少地表径流,增加深层水分渗漏以及补给地下水。由此可见,土地利用/植被覆被变化会引起流域内径流量及枯水期径流的改变。然而,以往的这些研究主要局限于探讨人类干扰下(如毁林、造林、草地开垦等)所引起土地利用/植被覆被变化对水文效应的影响^[8-9],而对森林自然演替过程中带来的水文响应的研究较少。

九寨沟是国家级自然保护区,同时也是国家 5A 级风景区,素有“九寨归来不看水”之说,因此九寨沟的水资源无论是对维系当地的生物多样性,还是对水景观核心遗产价值的保护都尤其重要。然而,九寨沟内的原生植被在过去遭受到不同程度的破坏以至于形成了类型多样的次生林。这些次生林正朝着顶级群落为针叶林的方向进行次生演替,且在未来很长一段时间内处于较为活跃的动态演替阶段^[10]。由森林演替带来的森林覆被变化对九寨沟流域内径流的影响尚不明确。因此,本研究基于 SWAT 模型,构建九寨沟流域的水文模型并进行径流模拟。通过对比

分析 2004 年与 2016 年森林覆被变化,旨在定量分析出九寨沟森林覆被变化对流域径流产流的影响,为保护区的水景观核心价值的保护及生态管理措施提供理论依据。

1 研究区概况

九寨沟位处于四川北部(103°46′—104°04′E, 32°51′—33°19′N)^[11],行政区属于四川省阿坝州九寨沟县。境内南北长 40.5 km,东西宽 35.4 km^[12],海拔 1 990~4 800 m,流域面积约为 642.97 km²,年平均径流深度 437.6 mm。九寨沟河流发源于岷山山脉朵尔纳山峰,其境内主要支沟有扎如沟、日则沟、则查洼沟等。九寨沟的湖泊被称为海子,境内湖泊众多,主要集中于日则沟和树正沟^[13]。九寨沟地势南高北低,地形复杂,河流总体呈“Y”字型,水自南向北流,逐渐汇集最后经沟口流出。气候方面,九寨沟年均气温 6~14℃,最冷月(1 月)平均气温 2.5~2℃,最热月(7 月)16~23℃。该地区早雨季分明,降水多集中在 5—9 月,多数地方的年均降水量为 600~840 mm,相对湿度为 60%~70%,年日照时数达 1 400~1 800 h,年总辐射量在 4 000~5 000 MJ/m²^[14]。

2 研究方法

2.1 数据来源及预处理

SWAT 模型模拟所需资料包括:数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),植被覆被数据、土壤类型数据、气象数据以及实测径流量等。其中,DEM 数据来自美国宇航局官网 NASA 网站(<https://www.nasa.gov/>)下载的 30 m 分辨率数字高程模型见图 1。植被覆被数据来源于 2004 年和 2016 年四川省森林资源 2 类调查数据。由于本研究需要将森林覆被类型细化到树种层面,因而根据不同的树种特性修改模型数据库使之成为适用于本研究区的植被。土壤数据来源于联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations,

FAO)提供的全球土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD),分辨率为 1 km。结合全球土壤数据库的数据并运用 SPAW 软件计算土壤相关属性参数,该区域的土壤类型分布情况见图 2。因九寨沟流域及周边地区缺乏模型所必须使用的气象站数据,而离研究区最近的几个国家气象站也相距较远,且都属于低海拔的气象站,其降水量数据与实际降水量相差很大,这些因素会直接影响整个流域模拟的精度,从而对流域模拟的各组成部分的水量平衡造成更大的误差。在直接使用气象站结果较差的情况下,气象数据选择使用 CMADS V1.2(The China Meteorological Assimilation Driving Datasets for the SWAT model V1.2)数据库。CMADS 数据集是由我国水利水电科学研究王浩院士团队及中国气象局信息中心等多家单位联合制作,其融合了 LAPS/STMAS 技术,采用各种技术与科学方法构建,包括数据的循环嵌套、重采样模型的投影和双线性插值,而其中以 CMADS V1.2 的精度较高,且 CMADS 气象数据集已被前人验证能够很好的运用于 SWAT 模型之中^[15-16]。选择 CMADS 数据库中 2008—2017 年的日降水、气温、相对湿度、风速和太阳辐射等数据作为模型的驱动气象数据输入。实测径流数据是由九寨沟风景名胜区管理局提供,具体为平安桥水文站 2009—2017 年的逐月径流量。该实测数据需被用于 SWAT 模型的率定软件 SWAT-CUP 中,针对模型的参数进行敏感性分析和模型参数的率定与验证^[17]。

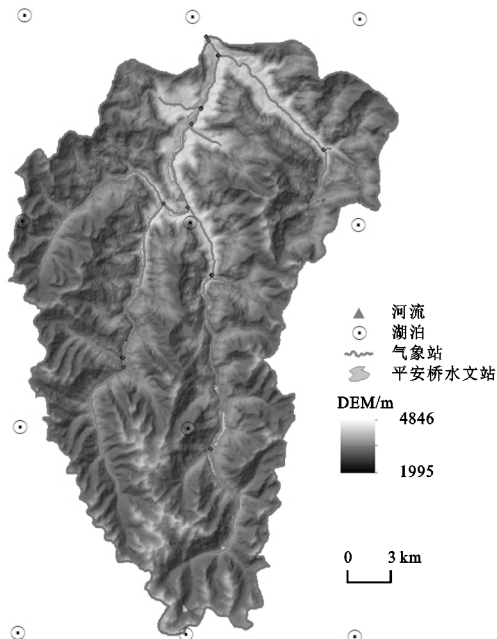


图 1 九寨沟流域 DEM

当模型完成校准和验证后确定模型的最佳参数,再在不改变其他条件的情况下,将 2004 年植被覆被数据替换为 2016 年的植被覆被数据再次进行径流模

拟,植被覆被数据见图 3。最终便可定量分析植被覆被变化对整个流域产流的影响^[18]。

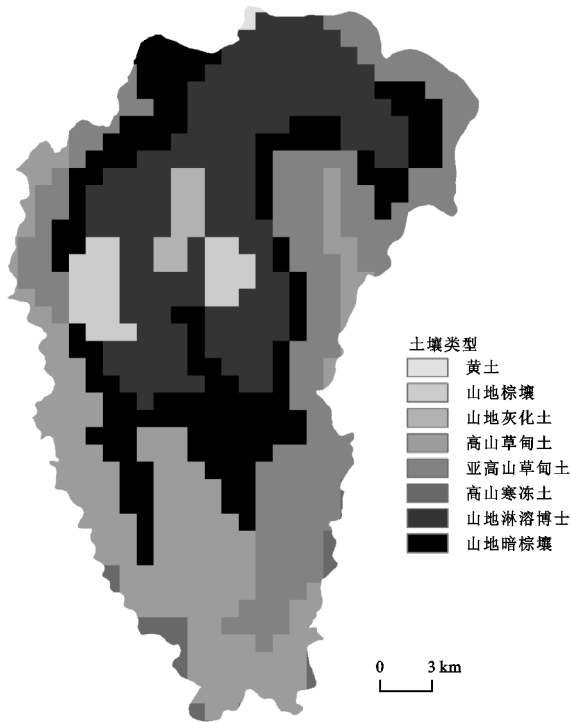


图 2 土壤类型

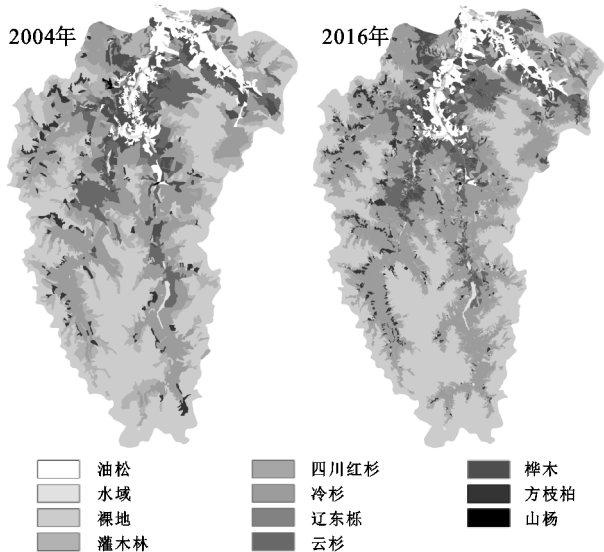


图 3 2004 年与 2016 年植被覆被

2.2 SWAT 模型构建

基于 ArcGIS 10.2 平台,利用九寨沟流域数字高程数据、土壤类型数据、土地利用/植被覆被数据、气象数据,运用 ArcSWAT 2012 年建立九寨沟流域 SWAT 模型数据库。利用数字高程数据提取流域地形特征,包括水系、坡度、坡向及河道参数等,共划分 23 个子流域(图 4)。根据土壤、坡度和植被类型进一步划分为 419 个水文响应单元(HRUs)。模型先计算各个水文响应单元的产流量,然后汇总到各子流域,最后由子流域汇总到流域出口。

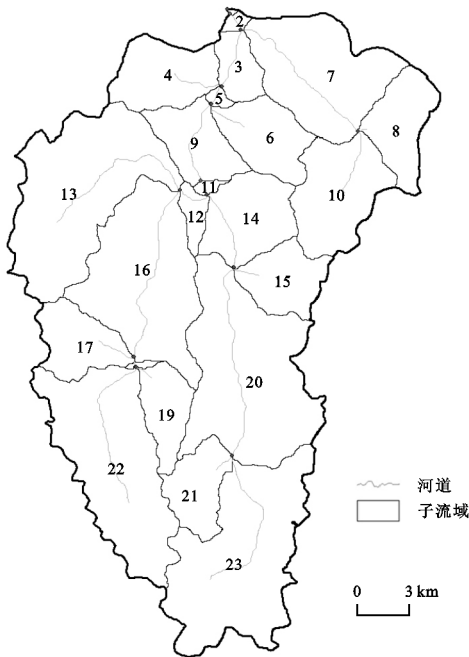


图 4 划分的子流域及河道

2.3 模型校准与验证方法

以九寨沟流域平安桥水文站径流数据对流域 2008—2017 年的月径流进行模拟,把 2008 年作为预热期,2009—2013 年作为模型校准期,2014—2017 年作为模型验证期。运用 SWAT-CUP 软件对模型进行参数的敏感性分析以及确定模型最终的参数值。采用决定系数(R^2)与 Nash-Suttcliffe 效率系数(E_{ns})用以评价模拟径流量和实测径流量的拟合程度。具体计算公式如下:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{0,i} - Q_{avg})(Q_{p,i} - Q_{pavg})}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{0,i} - Q_{avg})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{p,i} - Q_{pavg})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \tag{1}$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{0,i} - Q_{p,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{0,i} - Q_{avg})^2} \tag{2}$$

式中: $Q_{0,i}$ 和 $Q_{p,i}$ 分别为实测的流量和模拟流量(m^3/s); Q_{avg} 和 Q_{pavg} 分别为实测流量与模拟流量的平均值(m^3/s)^[19]。一般认为,当 $R^2 > 0.60$ 且 $E_{ns} > 0.50$ 时模拟的拟合程度令人满意^[20-22]。

3 结果与分析

3.1 参数敏感性分析及模型校准与验证

设置 2008 年为预热期,。采用 2009—2013 年的实测月径流数据对模型率定;2014—2017 年的实测月径流数据对模型进行验证。SWAT-CUP 软件通过预热期估算出初始参数,然后通过 LH-OAT 算法对影响径流的参数进行敏感性分析,选取其中对九寨

沟流域径流形成最主要的敏感性参数。利用 SWAT-CUP 的 SUFI-2 算法,进行迭代,每组迭代 500 次,每组迭代的结果可以得到新的参数范围,再将其代入下一次迭代中,使得参数范围不断减少,直到得到参数最佳值(表 1)。本研究中河岸调蓄量的 α 因子是影响径流的核心参数,另外还包括土壤饱和导水率、平均坡长、深层含水层的渗透系数、主河道水力传导率、地表径流滞后系数等参数。通过率定得到水文站的率定期与验证期的 E_{ns} 分别为 0.83,0.7, R^2 分别为 0.83,0.7。由图 5 可知,率定期 2009—2011 年各年模型模拟的径流量峰值均低于实际的径流量峰值,而 2012 年、2013 年模型模拟的径流量峰值与实测径流量峰值呈持平状态;2009—2013 年模型模拟的各年径流量谷值均高于实测的径流量谷值。验证期在 2014 与 2017 年实测径流量的峰值高于模型模拟的径流量峰值,2015 年与 2016 年的实测径流量与模型模拟的径流量峰值持平;2014—2017 年所有模型模拟的径流量谷值均高于实测的径流量谷值。整体而言,SWAT 模型能较好地模拟九寨沟流域的径流量。率定期与验证期模拟月均流量,其峰、谷值的出现时间与实测值基本吻合,但模型对部分年内的峰、谷的值模拟效果与实测结果有一定差异,不过基本能反映出研究区实际径流量的变化趋势。模型在雨季的模拟效果优于旱季的模拟效果,这可能是由于水文模型依靠降水作为自身驱动力的原因,夏日的雨季雨量充沛,而冬日的降水少温度低,一些高海拔的湖面甚至会结冰等复杂因素所导致的结果。

3.2 植物覆被变化的径流响应

通过查阅相关资料,获得保护区内主要森林类型的叶面积指数、根系分布、田间持水量、导水率等构建模型所需的参数数据,通过修改模型默认的植物数据库使之能更好的适用于九寨沟流域^[23-26]。整个九寨沟流域森林植被类型以云、冷杉林等针叶林为主,其次是油松林和桦木林等阔叶林。九寨沟流域由于早期人类的过量砍伐导致森林受到一定程度的破坏,喜阳的落叶阔叶林是针叶林被破坏后演替形成的次生林。但由于该地区海拔高气候冷,再加之森林的恢复生长使得林分郁闭度增加,导致喜阳的阔叶树种又逐步被云冷杉林所替代^[27]。相比 2004 年、2016 年总体上森林覆被面积增加 1.24%,其中以云冷杉为主的针叶林面积增加较为明显,整体增加了 10.56 km^2 ,约占整个流域面积的 1.65%,而桦木、山杨和栎类林等落叶阔叶林面积有所减少,整体减少了 2.57 km^2 ,约占整个流域面积的 0.4%(表 2)。

表 1 九寨沟流域径流模拟敏感性参数最佳值

敏感性排序	参数名称	参数含义	范围初始	最终范围	最佳值
1	v_ALPHA_BNK.rte	河岸调蓄量的 α 因子	0~1	0.05~0.26	0.13
2	r_SOL_K.sol	土壤饱和导水率	-0.5~0.5	-0.60~-0.44	-0.52
3	r_SLSUBBSN.hru	平均坡长	-0.5~0.5	0.33~0.68	0.54
4	v_RCHRG_DP.gw	深层含水层的渗透系数	0~1	0.58~0.69	0.59
5	v_CH_K2.rte	主河道水力传导率	0~50	27.28~38.66	28.36
6	v_SURLAG.bsn	地表径流滞后系数	0.05~24	16.10~18.71	18.39
7	v_GW_DELAY.gw	地下水延迟时间	30~450	38.43~50.24	41.32
8	v_ALPHA_BF.gw	基流消退系数	0~1	0.58~0.73	0.59
9	r_CN2	SCS 径流曲线系数	-0.5~0.5	-0.03~0.13	0.09
10	v_REVAPMN.gw	浅层地下水蒸发深度阈值	0~500	69.64~136.05	87.24

注:v_表示参数值被赋予取值代,r_表示参数值被赋予原值的若干倍。

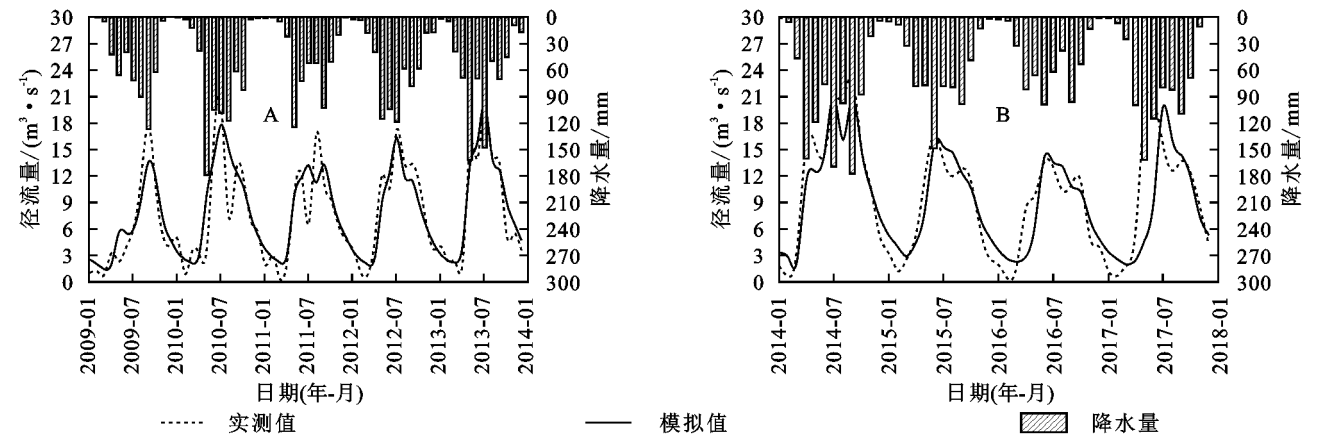


图 5 SWAT 模型对九寨沟流域月径流模拟的率定期(A)与验证期(B)

表 2 不同年份植被覆被变化的对比

植物覆被 类型	2004 年		2016 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
栎类林	8.3952	1.31	7.3935	1.15
冷杉林	136.386	21.22	145.1898	22.59
油松林	36.4752	5.68	35.6139	5.54
桦木林	32.8779	5.12	31.5306	4.91
云杉林	52.9929	8.25	54.7074	8.51
山杨林	0.486	0.08	0.27	0.04
方枝柏林	14.3253	2.23	14.2614	2.22
四川红杉林	14.6628	2.28	15.6258	2.43
森林植被(总)	296.6031	46.15	304.5924	47.39
裸地	239.7609	37.31	226.8639	35.30
灌木	102.7035	15.98	107.5023	16.73

由表 3 可示,相比 2004 年,基于 2016 年植被覆被情况下的年均径流量增加了 0.13 m³/s。表明流域内森林覆被变化对于流域年径流量影响相对较小,其原因可能是本研究只考虑了十余年的森林覆被变化,在短时间内由森林演替变化引起的植被覆被变化不明显所致。由表 3 可示,除 2012 年、2013 年外,在降

雨量充沛的年份,基于 2016 年森林覆被的年均径流量大于 2004 年的年均径流量;而在降雨量较少的年份,基于 2016 年森林覆被的年均径流量小于 2004 年的年均径流量。导致径流量发生变化的原因可能是由于以云冷杉为主的针叶林的增加以及桦木、栎类林为主的阔叶林的减少引起的,表明在年际变化中,阔叶林比针叶林有更强的调洪补枯能力,这与刘延惠^[28]、朱丽等^[29]等的研究结果一致。

表 3 不同年份森林覆被下的年径流量均值

年份	径流量/(m ³ ·s ⁻¹)		变化率/%	降雨量/mm
	2004 年	2016 年		
2009	8.38	8.35	-0.358	507.79
2010	12.06	12.32	2.156	709.99
2011	10.86	10.74	-1.100	502.13
2012	10.68	10.73	0.468	630.39
2013	12.32	12.17	-1.218	683.10
2014	15.37	15.41	0.260	965.19
2015	12.35	12.59	1.943	667.92
2016	10.43	10.22	-2.013	547.99
2017	11.91	12.96	8.810	758.62

从图 6 可以看出,在 2009—2017 年旱季,2004 年径流量小于 2016 年径流量;而在 2009—2017 年雨季,2004 年径流量大于 2016 年径流量。以月降雨距平百分率 $< -20\%$, $-20\% \sim 20\%$, $> 20\%$ 为指标^[30],将每年的 5—9 月划分丰水期,12—翌年 3 月划分为枯水期,其余月份划分为平水期。由此,当处于枯水期时,2016 年比 2004 年平均径流增加了 25.93%,而当处于丰水期时平均径流减少了 9.86%(图 7)。由于 2004—2016 年森林植被最明显的变化是阔叶林逐渐减少和针叶林逐渐增加(表 2),因而本结果表明在年内变化中,相较阔叶林而言,针叶林在丰水期具有更好的持水能力、且在枯水期时的产水能力更强,时钟瑜等^[31]通过实地采样测定研究得出针叶林的土壤最大持水量大于阔叶林,王友生等^[32]通过运用 WetSpa extension 模型得出当处于枯水期时针叶林的产水量大于阔叶林。通过以上研究结果表明阔叶林与针叶林需要按一定比例的合理分布才能使九寨沟流域四季的水量均衡并且可持续发展。因此下一步的工作可以从针阔叶林树的具体配置比例入手,以此达到涵养水源的效果,有利于九寨沟景区未来的发展。

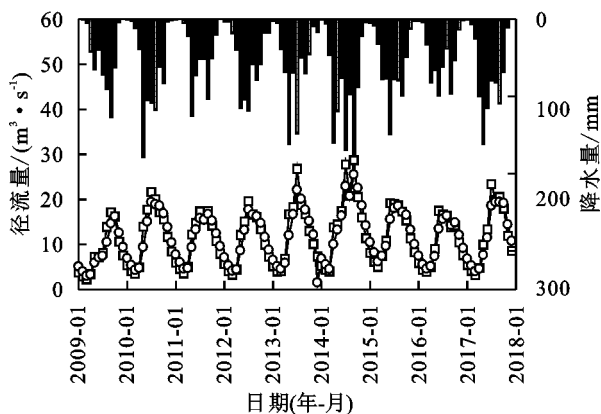


图 6 不同年份植被覆被类型下月径流模拟结果

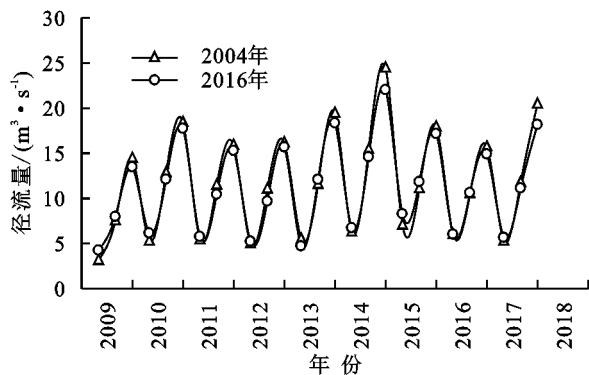


图 7 不同年份植被覆被下各年丰平枯期径流量对比结果

4 结论

(1) 本文通过构建九寨沟流域 SWAT 模型,定量

分析了九寨沟流域森林覆被变化下对径流的影响。结果表明,模型校准期与验证期的径流模拟值与实际测得的实际值拟合程度较高。其纳什效率系数(E_{ns})与决定系数(R^2)在率定期均为 0.83,在验证期均为 0.7,说明 SWAT 模型能很好的适用于九寨沟流域模拟。

(2) 九寨沟流域最主要的植被覆被类型是冷杉林、云杉林等针叶林,其次是油松林、桦木林等阔叶林。随着时间的迁移,在森林自然演替的作用下,森林植被覆被面积呈上升趋势,森林中针叶林整体林地面积增加,增加部分约占整个流域面积的 1.65%,而阔叶林类整体林地面积有所减少,减少了 0.4%。

(3) 2016 年的年均径流量比 2004 年大 $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$ 。除 2012 年、2013 年外,在降水充沛的年份,2004 年的年径流量小于 2016 年森林覆被下的年径流量;而在降水量较少的年份,2004 年的年径流量大于 2016 年森林覆被下的年径流量,表明在年际变化中,阔叶林比针叶林有更强的调洪补枯能力。

(4) 在气象条件不变的情况下,2004 年和 2016 年森林植被覆被下的径流变化整体趋于一致。当处于丰水期时,2016 年模拟的月径流量小于 2004 年的月径流量;而在枯水期时,2016 年的月径流量大于 2004 年的月径流量。表明在年内变化中,针叶林比阔叶林在丰水期有更好的持水能力、在枯水期有更强的产水能力。

九寨沟流域的水资源及水土保持工作,需在森林自然演替的基础上合理改善森林的树种结构,便可朝着有利于景区水资源管理的方向发展。

参考文献:

- [1] 刘蕴瑶,殷有,温一博,等.基于 SWAT 模型社河流域径流对流域景观格局变化的响应[J].沈阳农业大学学报, 2021,52(3):295-305.
- [2] 金鑫,金彦香,杨登兴.基于 LU-SWAT 模型的土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究:以黑河上游为例[J].灌溉排水学报, 2019,38(5):114-121.
- [3] Briones R, Ella V, Bantayan N. Hydrologic impact evaluation of land use and land cover change in Palico Watershed, Batangas, Philippines using the SWAT model[J]. Journal of Environmental Science and Management, 2016,19(1):96-107.
- [4] Sørensen R, Ring E, Meili M, et al. Forest harvest increases runoff most during low flows in two boreal streams[J]. Ambio, 2016,38(7):357-363.
- [5] Cheng G W. Forest change: hydrological effects in the upper Yangtze River valley[J]. Ambio, 1999,28(5):456-459.

- [6] 姚月锋,满秀玲,蔡体久.东北小流域夏季枯水径流对覆被变化的响应[J].水科学进展,2011,22(6):789-794.
- [7] 渠勇建,成向荣,虞木奎,等.基于 SWAT 模型的衢江流域土地利用变化径流模拟研究[J].水土保持研究,2019,26(1):130-134.
- [8] 刘斯文,刘海隆,王玲.开都河流域土地利用/覆被变化对径流的影响[J].人民黄河,2018,40(7):22-26.
- [9] 李烁阳,刘小燕,杨贵羽,等.土地利用变化对渭河流域水文过程的影响[J].水土保持研究,2021,28(3):133-140.
- [10] 马丹炜.九寨沟自然保护区次生林物种多样性分析[J].四川师范大学学报:自然科学版,1999,22(1):83-87.
- [11] 李敏,张捷,钟士恩,等.地震前后灾区旅游地国内游客旅游动机变化研究:以“5.12”汶川地震前后的九寨沟为例[J].地理科学,2011,31(12):1533-1540.
- [12] 林雯.九寨沟自然保护区森林生态系统功能研究[D].成都:四川大学,2006.
- [13] 吴宁.世界自然遗产地[M].北京:科学出版社,2012.
- [14] 刘少英,章小平,曾宗永.九寨沟自然保护区的生物多样性[M].成都:四川出版集团,2007.
- [15] Zhang D, Tan M L, Dawood S, et al. Comparison of NCEP-CFSR and CMADS for hydrological modelling using SWAT in the Muda River basin, Malaysia[J]. Water, 2020,12(11):3288.
- [16] 孟现勇,王浩,雷晓辉,等.基于 CMDAS 驱动 SWAT 模式的精博河流域水文相关分量模拟、验证及分析[J].生态学报,2017,37(21):7114-7127.
- [17] Almeida R A, Pereira S B, Pinto D B F. Calibration and validation of the SWAT hydrological model for the Mucuri river basin[J]. Engenharia Agrícola, 2018,38:55-63.
- [18] 赵传普,徐学选,陈天林,等.关川河流域土地利用变化对径流的影响[J].水土保持研究,2015,22(3):83-87,2.
- [19] 程程.基于 SWAT 模型的土地利用和土地覆被变化及气候变化对元江流域径流的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(5):52-59.
- [20] 李建庆,罗显刚,朱双,等.北江流域土地利用/覆盖变化对水文过程影响研究[J].人民长江,2020,51(8):89-94,129.
- [21] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998,34(1):73-89.
- [22] Athira P. Calibration of hydrological models considering process interdependence: A case study of SWAT model[J]. Environmental Modelling and Software, 2021,144:105131.
- [23] 李凤欢,罗澈葱,翟海涛,等. SWAT 对大沙河水库流域径流模拟研究[J].水土保持研究,2014,21(2):87-93.
- [24] 蓝振江,蔡红霞,曾涛,等.九寨沟主要植物群落生物量的空间分布[J].应用与环境生物学报,2004,10(3):299-306.
- [25] Yi L, He C, Sophocleous M, et al. Assessment of crop growth and soil water modules in SWAT2000 using extensive field experiment data in an irrigation district of the Yellow River basin[J]. Journal of Hydrology, 2008,352(1/2):139-156.
- [26] Naseri F, Azari M, Dastorani M T. Spatial optimization of soil and water conservation practices using coupled SWAT model and evolutionary algorithm[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021,9(4):566-577.
- [27] Liu J Y, Zou H X, Bachelot B, et al. Predicting the responses of subalpine forest landscape dynamics to climate change on the eastern Tibetan Plateau[J]. Global Change Biology, 2021,27(18):4352-4366.
- [28] 刘延惠,张喜,崔迎春,等.贵州开阳喀斯特山地几种不同植被类型的地表径流研究[J].贵州林业科技,2005,33(2):8-10.
- [29] 朱丽.华北土石山区流域防护林空间优化配置[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [30] 曹言,柴素盈,王杰,等.昆明市主城区土地利用变化对地表径流的影响[J].水电能源科学,2018,36(8):22-25,38.
- [31] 时钟瑜,李婕.长白山不同林型土壤水源涵养功能特征[J].水土保持研究,2019,26(6):158-164.
- [32] 王友生.北京山区典型小流域土地利用/森林覆被变化的水文生态响应研究[D].北京:北京林业大学,2013.