

孔功, 朱大伟, 谢伊娜, 等. 气候和土地利用变化对松华坝来水量的影响[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 143-154. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.012

KONG Gong, ZHU Dawei, XIE Yina, et al. Impacts of climate and land use change on the inflow of water to Songhuaba reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 143-154. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.012

气候和土地利用变化对松华坝来水量的影响

孔 功¹, 朱大伟¹, 谢伊娜¹, 李小红², 张洪波¹, 张润云¹

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘要:【目的】为定量评估气候和土地利用变化对松华坝来水量的贡献,【方法】基于松华坝水源保护区建立以来的多时期气候和土地利用数据,采用气候倾向率和MK趋势检验方法分析气候变化趋势,利用GIS空间叠加工具分析土地利用时空变化特征,并结合SWAT模型模拟流域水文过程,分析气候和土地利用变化对水库来水量的影响。【结果】结果表明:1980—2014年间气温以 $0.586\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率上升,降水以 $12.5\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率减少。耕地、林地、灌木和草地为研究区主要的土地利用类型,1980—2010年间耕地面积增长,林地略有退化,该变化使得来水量增加。【结论】气候变化是导致水库来水量变化的主要原因,历史变化情景下秋季来水量变化最为敏感。气温和降水变化对来水量的共同作用和单独作用都不呈线性关系。气温升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情景下,月均来水量减少 63.6 万 m^3 ;降水增加 10% 情景下,月均来水量增加 423.4 万 m^3 。

关键词: 气候变化; 土地利用变化; SWAT模型; 水库来水量; 松华坝流域

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.012

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)01-0143-12



Impacts of climate and land use change on the inflow of water to Songhuaba reservoir

KONG Gong¹, ZHU Dawei¹, XIE Yina¹, LI Xiaohong², ZHANG Hongbo¹, ZHANG Runyun¹

(1. School of Kunming University of Science and Technology Power Engineering, Kunming 650500, Yunnan, China;

2. Jiangsu Water Resources and Design Institute Co., Yangzhou 225000, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] To quantitatively assess the contribution of climate and land use changes to the inflow of Songhuaba reservoir, [Methods] based on multi-period climate and land-use data since the establishment of Songhuaba water conservation district, the climate change trend is analyzed by the method of Climate Propensity Rate and MK trend test, the spatio-temporal variation characteristics of land use are explored by the GIS spatial overlay tool, and the watershed hydrological processes are simulated by SWAT model, so as to analyze the impacts of climate and land use changes on the reservoir inflow of the study area. [Results] The results show that temperature of the study area increases at a rate of $0.586\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ and precipitation decreases at a rate of $12.5\text{ mm}/10\text{ a}$ during 1980—2014. The main land use types in the study area include cropland, forest, shrub and

收稿日期: 2023-12-22; 修回日期: 2024-01-10; 录用日期: 2024-01-15; 网络出版日期: 2024-02-04

基金项目: 水灾害防御全国重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2022490411); 云南省自然科学基金项目(2023Y0410); 长江下游洪涝灾害集成调控与应急除险技术装备国家重点研发计划项目(2021YFC3000100)

作者简介: 孔 功(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文学水资源方向研究。E-mail: kg742535078@163.com

通信作者: 张洪波(1979—), 男, 讲师, 博士, 主要从事水文学及水资源方向研究。E-mail: zhanghongbo@kust.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

grassland. Between 1980 and 2010, the size of cropland increases while forest slightly declines, which resulted in the increase of the reservoir inflow. [Conclusion] Climate change is the main cause of the reservoir inflow variation, and the autumn inflow is the most sensitive in the historical change scenarios. Changes in temperature and precipitation are not linearly related to the inflow amount, either jointly or individually. The average monthly inflow decreases by 0.636 million m^3 with the temperature increase of $1^\circ C$, and increases by 4.234 million m^3 with 10% increase of precipitation.

Keywords: climate change; land use change; reservoir inflow; SWAT model; Songhuaba basin

0 引言

气候变化和土地利用/覆被变化(Land Use/Cover Change, LUCC)是影响流域水资源的两大主要因素^[1-3]。全球气候变暖使得降雨量、降水强度和降水时空分布发生改变,从而导致流域水资源及水循环发生相应变化^[4-5]。土地利用变化通过改变流域下垫面条件和水文循环分量的分配过程,对流域土壤湿度、蒸散发和流域产汇流过程造成了显著影响^[6]。越来越多的研究表明,气候和土地利用变化的叠加作用呈现非线性特征^[7],且地域性差异明显^[8]。此外,近年来治水思路的提出和“江河战略”的确立,对水与人、水与自然关系的探究提出了理论性要求^[9-10]。因此,从不同时间尺度探究流域径流对气候变化和LUCC的响应,明确两者对流域水资源的贡献,对流域水安全和水资源管理具有重要意义。

水文模拟法是探究气候和土地利用变化对流域径流贡献的主要手段^[11]。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)经多次改善和模块拓展,不仅能够结合GIS和RS提供的空间数据模拟流域复杂的水文过程,而且模型计算效率高、输入数据易获取且可以进行长时间序列的模拟^[12]。因此,SWAT模型在水文过程、非点源污染、泥沙、农业管理等多个领域得到了充分的应用^[13],其在流域径流模拟方面应用尤为广泛^[14-15]。通过对现有众多研究成果进行分析评判^[16-18],发现这些研究都表明气候因子和人类活动共同对水文循环过程、河川径流演变产生影响,两者的作用经常互相交织并互相影响。由于各地区气候和土地利用变化程度不同,两者对径流的贡献存在差异,但主导因素为气候变化^[19]。目前国内外相关研究主要集中在大、中型流域^[20-22],对资料缺乏的小流域关注较少。此外,用水量的急剧增长使得水库成为区域供水的重要一环^[23],区域治水工作的开展势必依托相关水库的径流研究,而我国对各地区尤其是干旱地区的水库流域径流模拟研究尚显不足。

昆明市是全国十四个缺水省会城市之一,人均地表水资源占有量仅为 $1\ 065\ m^3$,远低于全国 $2\ 240\ m^3$

的平均水平和云南省 $4\ 874\ m^3$ 的平均水平^[24-25]。近年来,持续的城市虹吸效应使得人口快速增长,水资源供需矛盾愈发凸显。松华坝水库是昆明市供水安全的重中之重,并且探讨气候变化和LUCC的水文响应,已成为国内外研究的热点问题^[26]。因此,本文以松华坝流域为研究区域,基于松华坝水源保护区设立以来的多时期气候和土地利用数据,利用气候倾向率和MK趋势检验法综合分析气候变化特征,采用GIS空间叠加工具分析土地利用变化特征,并结合SWAT模型模拟不同气候和土地利用情景下的来水量变化,评估两者对水库来水量的贡献,并定量评估气候变化和LUCC对松华坝水库来水量的影响,以期为研究区域水资源管理规划提供一定参考。

1 研究区概况

松华坝水库位于昆明市盘龙区,是昆明市供水“七库一站”重要组成部分和云南省昆明市安全用水生命线。水库调节盘龙江径流和洪水,是昆明集防洪、供水和水土保持为一体的大型水利设施^[27],其供水量占昆明主城区供水总量的20.0%~47.6%。松华坝水库是盘龙江重要水利枢纽,为多年调节水库,1995年加固扩建后总库容2.29亿 m^3 ,上游控制流域面积593 km^2 ,占松华坝水源保护区总面积的90%。水库属长江上游金沙江水系,主要支流有冷水河和牧羊河(见图1)。流域地形呈东北高西南低,海拔介于1 911~2 782 m,属亚热带高原季风气候,气候温和,多年平均气温 $15.6\ ^\circ C$,多年平均降水量958 mm,年内雨量分布不均,每年85%的雨量主要集中在6—10月,11月—次年5月为旱季^[28]。为保护水源地,昆明市政府于1981年批准建立了松华坝省级自然保护区,该水源保护区是全国第一个水源保护区^[29]。当前,松华坝水库上游控制流域的土地利用类型包括耕地、林地、灌木地、草地、水域和建设用地。

2 数据来源及处理

2.1 水文气象数据

水文资料收集了松华坝水库1984—2014年逐月入库径流资料。气象资料来源于中国气象网

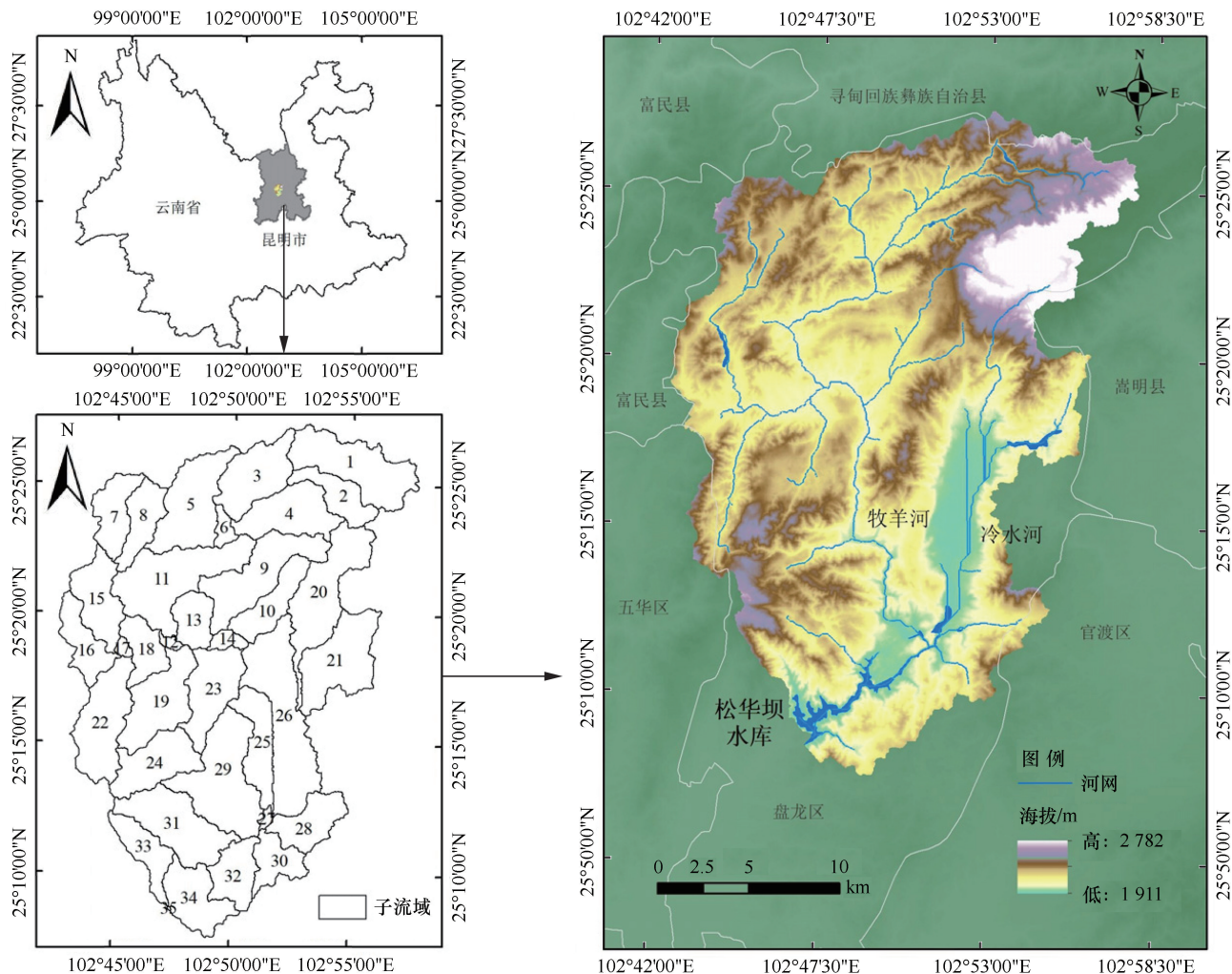


图 1 松华坝流域河网及子流域分布

Fig. 1 Map of the river network and sub-basins in the Songhuaba watershed

(<https://data.cma.cn/>), 收集了昆明站和嵩明站日尺度气象数据, 时间为 1980—2014 年之间, 主要包括降水数据、最高和最低气温、平均气压、风速、相对湿度、蒸发、日照时数, 其中部分缺失数据由天气发生器模拟补充。对气象数据的处理主要包括数据格式转换、拼接、计算太阳辐射和利用天气发生器构建 SWAT 气象数据库。

2.2 地理空间数据

地理空间数据主要包括 DEM 数据、土壤数据和土地利用数据。在本研究中, 选用了 ASTER GDEM V2 DEM 数据, 数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn>), 空间分辨率为 30 m×30 m。指定流域出口, 经水文分析后得到河网和流域范围。土壤数据来源于寒旱区科学大数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>) 的世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSO), 空间分辨率为 1 km×1 km, 经

重采样为 30 m×30 m。本研究获取了 1980 年和 2010 年土地利用数据, 该数据来源于中科院资源环境科学与数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>), 中国多时期土地利用遥感监测数据集, 空间分辨率为 30 m×30 m。对土地利用数据的处理, 主要是基于 ArcGIS 工具进行投影栅格、掩膜提取、重分类等。根据 SWAT 模型土地分类要求, 本研究将土地利用类型分为耕地、林地、灌木地、草地、水域和建设用地共 6 类。

3 研究方法

本文主要研究思路如下(见图 2): (1) 分析历史气候和土地利用变化特征; (2) 评估气候和土地利用变化对来水量的贡献; (3) 定量评估气候变化的来水量响应。

3.1 SWAT 模型构建

SWAT 模型是由美国农业部农业研究中心开发的一个具有很强物理机制的分布式水文模型, 可以在不

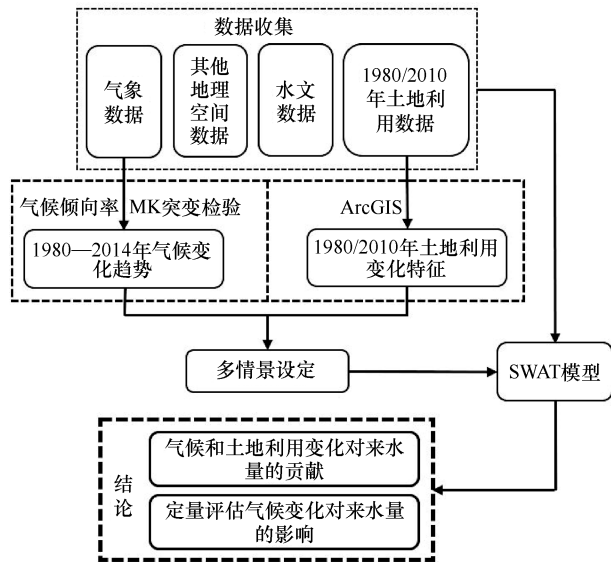


图2 研究技术路线

Fig. 2 Research framework in this study

同的土壤条件、土地利用类型、气候状况和人类活动的干扰下做出有效的径流模拟^[30]。它首先根据流域的地形因子、河网分布等特征,以最小集水面积阈值将整个研究流域划分为若干子流域^[31]。在此基础上构建数据库,进一步按流域的土地利用类型、土壤类型和坡度面积阈值划分水文响应单元(Hydrological response unit, HRUs)并单独计算产流量,最后通过河道汇流演算求得出出口断面的总径流量^[32]。文中最小集水面积阈值设置为1 000 hm²,将整个流域划分为35个子流域,其中,流域出口位于35号子流域(见图1)。构建气象数据库时,日辐射量根据童成立等^[33]建立的基于站点位置和日照时数的模拟方法,利用Matlab工具计算。划分水文响应单元时,设置土地利用、土壤和坡度面积阈值为10%,利用SWAT模型自动生成水文响应单元的空间位置信息^[34]。

3.2 气候倾向率和Mann-Kendall突变分析方法

气温和降水的趋势分析方法有气候倾向率、累积距平、Mann-Kendall(MK)非参数检验、滑动平均、小波分析等^[35]。本文采用最小二乘法计算样本与时间的线性回归系数,从而对松华坝流域1980—2014年平均气温的变化趋势进行分析^[36]。将气象要素变化用一元线性函数表示

$$y = kx + b \quad (1)$$

式中, y 为某一气象要素值; x 为年纪序列号; b 为常数; k 为斜率,以 $10 \times k$ 作为气候倾向率。

采用Mann-Kendall进行气候突变分析^[37],其优点是会受到少量异常样本的干扰^[38]。MK突变检验

结果包括 UF 统计量和 UB 统计量, $UF > 0$ 则表明序列呈上升趋势, $UF < 0$ 则表明序列呈下降趋势^[35]。

设时间序列 $\{x_t\}$,观察值序列 $\{x_t, t = 1, 2, \dots, n\}$,构造序列秩

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i (k = 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

其中

$$r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{Var(s_k)}} (k = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

其中, $UF_1 = 0$,当 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立,且连续同分布。

$$E(s_k) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (5)$$

$$Var(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (6)$$

根据时间序列 x 的逆序(x_n, x_{n-1}, \dots, x_1),重复上述步骤取相反数即可得到 UB_k 计算公式为

$$UB_k = -UF_k (k = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

分别绘制到 UF_k 和 UB_k 曲线图,若 UF_k 和 UB_k 曲线交点在置信线之间,交点对应的时刻便是突变开始的时间^[35]。

4 结果和讨论

4.1 SWAT模型适用性分析

为了分析气候和土地利用变化的径流响应,基于2010年土地利用和1984—2014年月径流还原数据,采用SWAT-CUP的SUFI-2算法^[30]进行参数率定和验证。选取1984—1985年进行模型预热,1986—2006年进行模型率定,2007—2014进行验证,设定迭代次数2 000次,采用全局敏感性分析方法逐一调参,最终选用的参数如表1所列。

本文采用决定性系数 R^2 、纳什效率系数 NS 和百分比偏差 $PBIAS$ 作为评价指标^[39-40]检验模型在研究区的适用性,由此得到松华坝水库流域率定期和验证期实测月径流与模拟月径流对比图和适用性评价结果(见图3)。一般认为, R^2 越高, Ens 越大, $|PBIAS|$ 越小,表示模拟效果越好;当 $R^2 > 0.75$, $Ens > 0.75$, $|PBIAS| < 10\%$ 时,即认为模型模拟效果优秀^[41]。

根据模拟结果,率定期: $R^2 = 0.81$ 、 $NS = 0.81$ 、 $|PBIAS| = 2.4$;验证期: $R^2 = 0.80$ 、 $NS = 0.78$ 、 $|PBIAS| = 5.1$ 。SWAT模型在率定期和验证期 R^2 和

表 1 SWAT-CUP 参数率定取值

Table 1 SWAT-CUP Parameter rate setting values

SWAT-CUP 参数	参数含义	最小值	最大值	最终取值
v_ _SLSUBBSN. hru	平均坡长	10	30	18.18
v_ _CANMX. hru	冠层最大储水量	50	80	53.20
v_ _ESCO. hru	土壤蒸发补偿系数	0	0.5	0.05
r_ _CN2. mgt	径流曲线系数	0	0.3	0.03
r_ _SOL_Z(). sol	土壤层厚度	0	0.5	0.03
r_ _SOL_BD(). sol	土壤容重	-0.5	0	-0.30
r_ _SOL_AWC(). sol	土壤有效含水量	-0.5	0.5	-0.22
v_ _GW_DELAY. gw	地下水滞后系数	400	500	433.43
v_ _ALPHA_BF. gw	基流 α 系数	0.5	1	0.90
v_ _GW_REVAP. gw	地下水再蒸发系数	0.02	0.2	0.07
v_ _REVAPMN. gw	浅层地下水再蒸发系数	0	500	100.38
v_ _CH_K2. rte	主河道水力传导率	-0.01	100	46.52

注: r 表示将现有值 $\times(1+\text{最终取值})$; v 表示将现有值替换为最终取值。

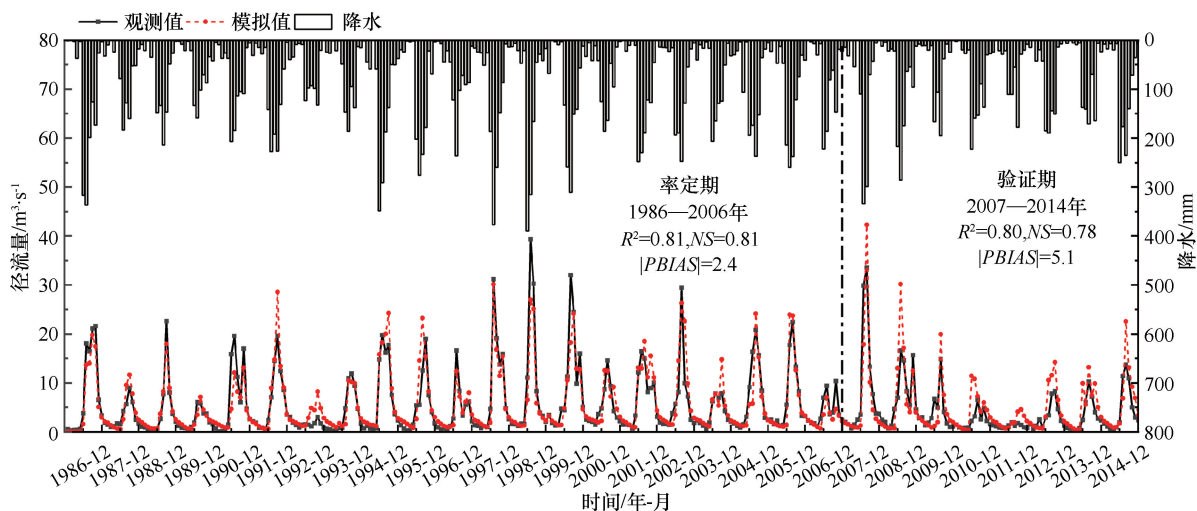


图 3 松华坝水库月径流模拟结果

Fig. 3 Simulation results of monthly runoff from Songhuaba Reservoir

NS 均大于 0.75, $|PBIAS|$ 均小于 10%, 说明 SWAT 模型在松华坝水库流域模拟效果较好, 适用于研究区气候和土地利用变化的水文响应研究。

4.2 气温和降水变化趋势分析

4.2.1 气候倾向率分析

气温和降水是对流域径流影响最大的气候要素^[42], 因此对松华坝水源保护区设立以来的气温和降水变化趋势进行具体分析。

1980—2014 年, 松华坝流域多年平均气温为 $15.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 气温整体呈上升趋势, 增温速率为 $0.586\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 上升趋势显著[见图 4(i)]。春(3—5 月)、夏(6—8 月)、秋(9—11 月)、冬(12 月至次年 2 月)4 个季节气温也呈增长趋势[见图 4(a)—(d)], 其中夏季、冬季升温速率大于春秋两季, 且冬季升温最为明显, 表明夏冬两季尤其是冬季升温对年平均气温的上升起主要作用。

松华坝流域降水量年内分布不均, 夏季降水量占全年降水量的 60% 以上。1980—2014 年, 间多年平均降水量 976.58 mm , 总体呈减小趋势, 减少速率为 $12.5\text{ mm}/10\text{ a}$ 。1999 年降水量最高($1\ 358.25\text{ mm}$), 2011 年降水量最低(615.8 mm) [见图 4(j)]。春夏两季降水量呈升高趋势, 秋冬两季降水量呈降低趋势且秋季降低速度最快, 为 $7.3\text{ mm}/10\text{ a}$ [见图 4(e)—(h)], 表明秋冬两季尤其是秋季降水减少对年降雨量降低起主要作用。总体来看, 松华坝流域气温呈上升趋势, 降水呈波动性下降趋势。

4.2.2 Mann-Kendall 突变分析

松华坝流域 MK 趋势检验结果显示, 1980—2014 年间平均气温 UF 值呈现先下降后上升的趋势, 1992 年以后上升趋势显著且 $UF > 0$, 表明 1992 年以后松华坝流域平均气温呈上升趋势, 且在 2003 年以后超过了 $\alpha = 0.01$ 的显著水平[见图 5(a)]。 UF 值线与

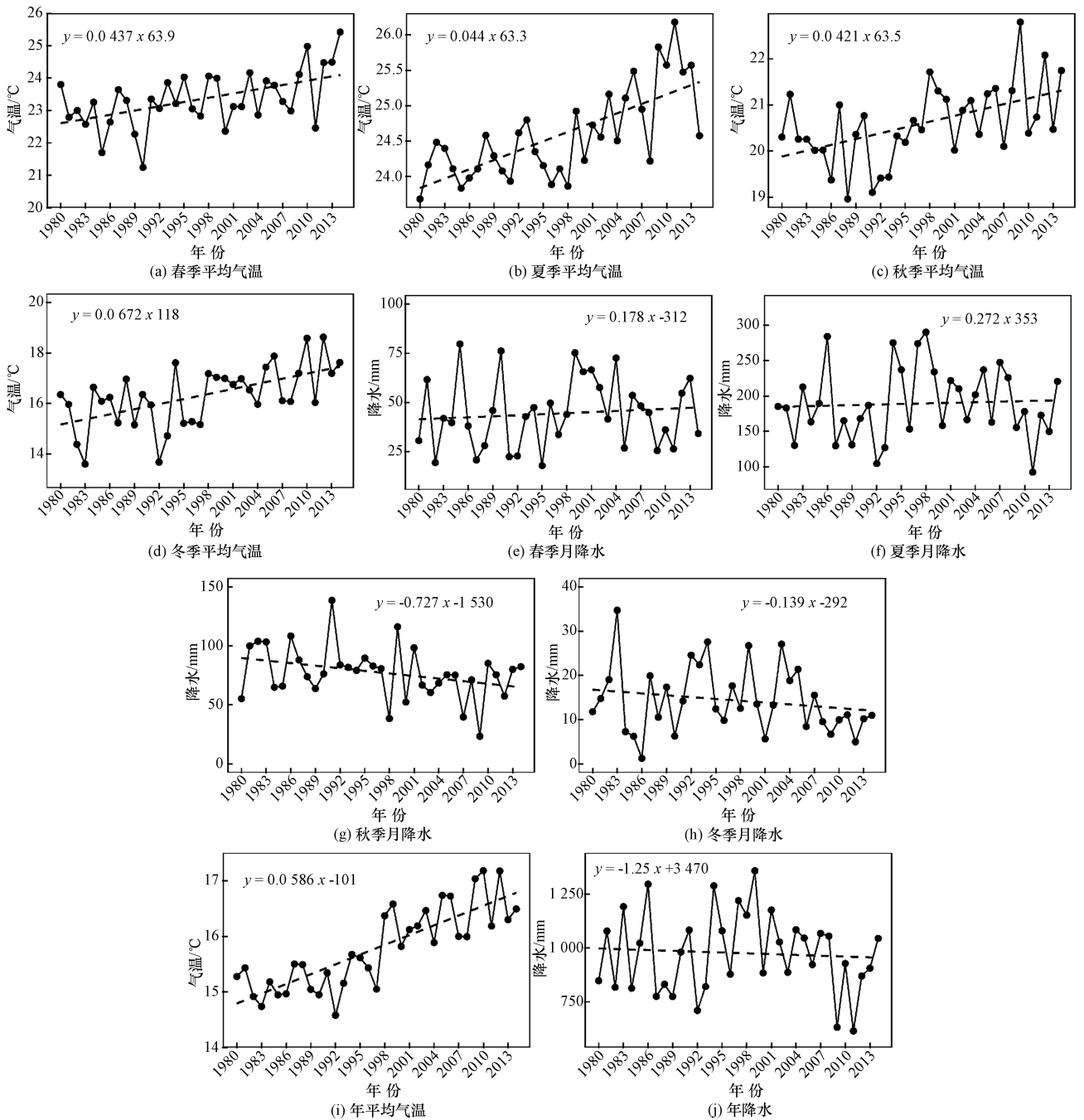


图4 松华坝流域气温与降水变化趋势

Fig. 4 Trends in temperature and precipitation in the Songhuaba watershed

UB 值线在 0.01 置信水平下于 1998 年相交, 交点存在于 2.56 置信区间内, 表明松华坝流域平均气温在 1998 年发生突变。

1980—1986 年, 年降水量 MK 检验的 UF 值在 0 值上下反复变化, 表明降水量变化在该时期内呈增减快速交替趋势。1986—1995 年 $UF < 0$, 流域内降水量呈减小趋势; 1996—2011 年 $UF > 0$, 降水量呈增长趋势, 2011—2014 年变化趋势不显著[见图 5(b)]。松华坝流域年降水量变化不显著, 在 1980—2014 年发

生多次显著突变。

4.3 土地利用变化分析

运用 GIS 数据集空间叠加分析功能, 计算得到 1980—2010 年土地利用转移矩阵(见表 2)和流域土地利用空间变化空间分布(见图 6)。结果表明: 耕地、林地、灌木和草地是流域主要的土地利用类型, 1980—2010 年土地利用变化主要是四者之间的相互转化。草地向耕地和灌木的转化发生在 8 号、14 号、20 号子流域, 转化面积分别为 3.33 km^2 和 3.36 km^2 ,

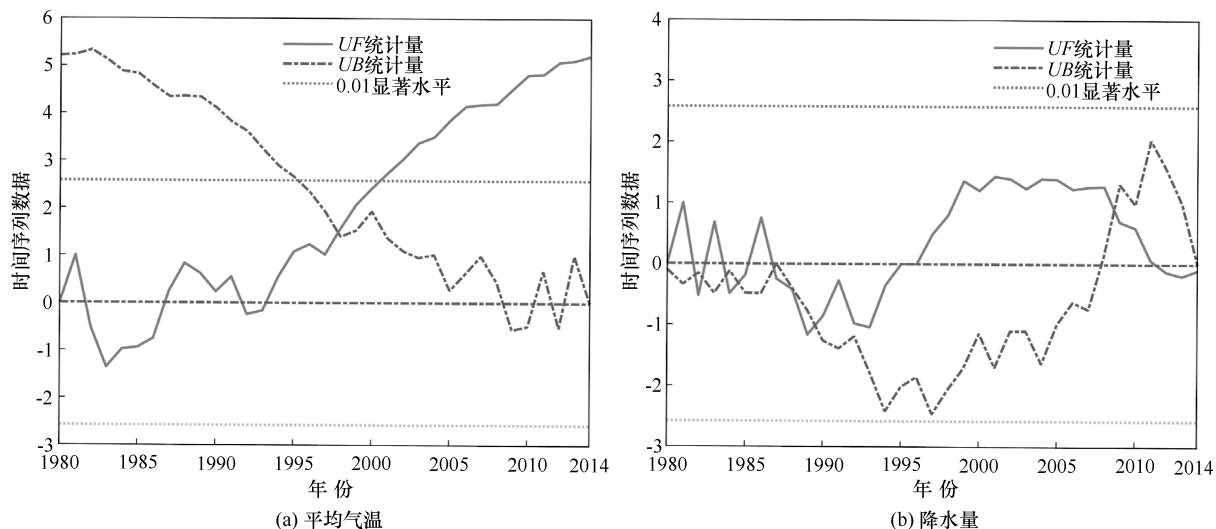


图5 平均气温与降水的 MK 趋势检验

Fig. 5 MK trend test for mean temperature and precipitation

表2 土地利用面积转移矩阵

Table 2 Land use area transfer matrix

土地利用类型		耕地	林地	灌木	草地	水域	建筑用地	总计
1980—2010 年	耕地 (AGRL)	130.02	0.39	0.17	0.38	0.40	0.25	131.63
	林地 (FRST)	0.40	208.83	1.07	2.56	0.02	0.00	212.87
	灌木 (RNGB)	0.17	0.11	109.75	0.11	0.01	0	110.14
	草地 (PAST)	3.33	0.16	3.36	112.10	0.01	0.00	118.96
	水域 (WATR)	0.01	0.01	0.01	0.01	4.71	0.001	4.75
	建筑用地 (URBN)	0.33	0.00	0.01	0.00	0.00	6.84	7.18
	总计	134.27	209.50	114.36	115.16	5.14	7.10	585.53

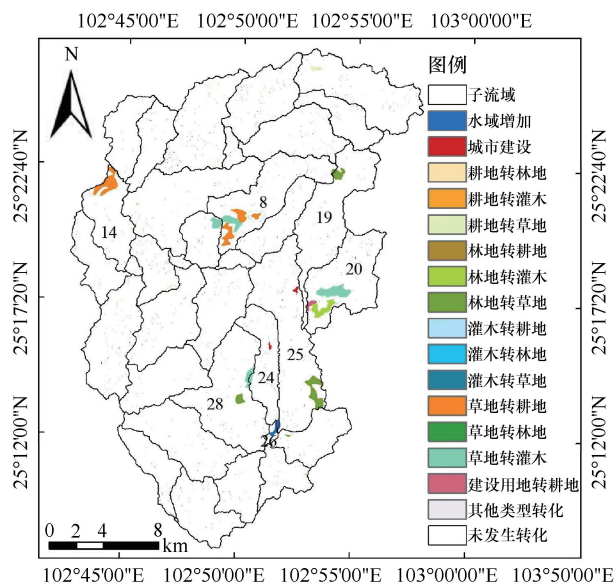


图6 1980—2010 年土地利用变化空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of land use change from 1980 to 2010

转化比例分别为 2.8% 和 2.82%；林地向草地和灌木的转化主要发生在 25 号和 20 号子流域，转化面积分别为 2.56 km² 和 1.07 km²，转化比例分别为 1.2% 和

0.5%。此外，少量耕地转化为林地和水域，这可能与 1995 年除险加固扩建完成后蓄水增加有关。总体来看，1980—2010 年土地利用变化轻微。

根据各地类间的转化，绘制 1980—2010 年发生转化的各地类面积转化(见图 7)。结果表明：1980—

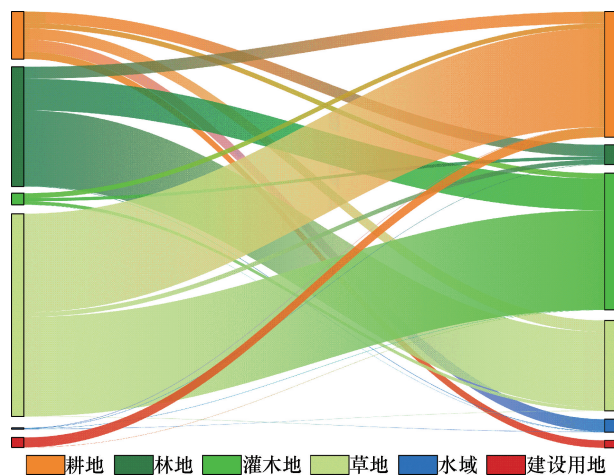


图7 1980—2010 年土地利用转化

Fig. 7 Land use transformation map from 1980 to 2010

2010年草地是面积变化最大的地类, 草地向耕地和灌木地的转化使得草地面积减少 3.64 km²(见表2)。林地主要向灌木地和草地转化, 耕地部分转化为林地、草地、水体和建设用地, 灌木地向其他地类的转化轻微。1980—2010年间, 四大主要地类间的相互转化使得耕地和灌木地面积增加, 而林地和草地的面积减少。

4.4 气候和土地利用变化的径流响应对比及分析

4.4.1 气候和土地利用变化的来水量响应对比

利用收集的1980年、2010年土地利用数据和1980—2014年气候数据, 考虑到松华坝降水在1999年达到最高且气温在1999年左右发生突变, 故设置如下情景(见表3), 利用验证后的SWAT模型模拟各情景下的流域出口径流以探究土地利用和气候变化的径流响应。

表3 历史气候和土地利用变化情景组合

Table 3 The scenarios combination of historical climate and land use change

情景代码	土地利用数据	气候数据
S1	1980年	1980—1999年
S2	2010年	1980—1999年
S3	1980年	2000—2014年
S4	2010年	2000—2014年

如表4所列, 4种情景下松华坝水库多年平均各月来水量分布如下: 6—12月来水量最大, 占全年来水量的80%以上, 其余月份入库水量相对较小, 8—9月达到月入库水量的最大值, 随后逐渐减小, 次年4月处于月入库水量最小值。在相同的土地利用背景下(S1与S3、S2与S4), 2000—2014年气候条件较1980—1999年气候条件下多年平均月来水量减小约172.8万m³; 在相同气候背景下(S1与S2、S3与S4), 2010年土地利用状况较1980年增加约1.5万m³, 气候变化和土地利用对水库来水量的影响占比分别为99.1%和0.9%。两种气候情景下来水量变化较大, 分析原因在于自1981年水源保护区设立以来流域内土地利用变化趋于稳定。模拟结果表明, 气候变化是导致水库来水量变化的主要原因, 且在1980年和2010年土地利用条件下(S1和S3、S2和S4), 由气候变化导致的月均来水量变化相近。

4.4.2 历史气候变化对四季来水量的影响

在1980年和2010年土地利用条件下, 由气候变化导致的多年平均各月来水量变化相近, 因此详细分析2010年土地利用条件下, 由1980—1999年(S2)和2000—2014年(S4)两期气候变化导致的春(3—5

表4 各情景下多年平均各月来水量 10⁴ m³

Table 4 Multi-year average monthly inflow under various scenarios 10⁴ m³

月 份	情景代码			
	S1	S2	S3	S4
1	773.90	775.51	576.27	577.35
2	618.27	619.52	405.11	405.97
3	453.09	454.22	305.57	306.35
4	317.63	318.45	197.03	197.59
5	368.14	369.07	252.56	253.06
6	881.91	881.87	1 026.12	1 024.39
7	2 111.82	2 111.39	1 954.77	1 955.14
8	2 527.95	2 530.63	3 181.72	3 185.17
9	2 545.60	2 549.02	1 879.08	1 882.88
10	1 888.79	1 891.41	1 495.48	1 499.05
11	1 278.69	1 281.62	1 010.43	1 012.14
12	962.45	964.38	730.86	732.40
月均来水量	1 227.35	1 228.92	1 084.58	1 085.96

月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)、冬(12月—次年2月)来水量变化。

如图8所示, 相较于S2情景, S4情景下4个季节中秋季来水量响应程度最大, 其中9月来水量减小666.14万m³, 春季来水量响应程度最小。

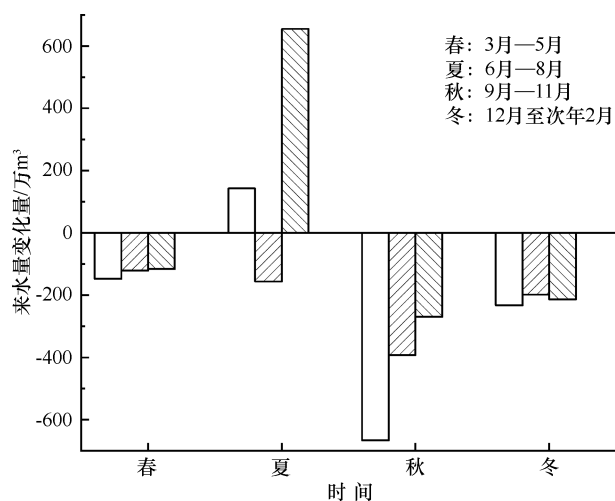


图8 气候变化导致的来水量变化

Fig. 8 Changes in water inflow caused by climate change

(1) 春季来水量: 均为减小趋势, 月均减少128.25万m³。

(2) 夏季来水量: 7月减少, 6、8月为增加, 8月增幅达654.54万m³, 整体表现为增加趋势, 月均增加213.60万m³。

(3) 秋季来水量: 均为减少趋势, 月均减少442.66万m³。

(4) 冬季来水量: 均为减少趋势, 月均减少

214.56 万 m^3 。

结果表明：气候变化下四季中秋季来水量骤减对各月来水量减小起主要作用。相较于 1980—1999 年气候情景，2000—2014 年气候情景下夏季来水量增加可能是因为降水量的增加。

4.4.3 历史土地利用变化对四季来水量的影响

保持 2000—2014 年气候数据不变，探究 1980 年 (S3) 和 2010 年 (S4) 两期土地利用情景下四季来水量变化。相较于 S3 情景，S4 情景下，月均来水量增加 1.40 万 m^3 (见表 4)。如图 9 所示：1980 年和 2010 两期土地利用情景下总体上四季来水量均呈增加趋势，其中秋季来水量增加最为明显，月均增加 3.03 万 m^3 ，春季、夏季和冬季来水量月均增加分别为 0.61 万 m^3 、0.70 万 m^3 和 1.16 万 m^3 ，表明 2010 年较 1980 年土地利用下秋季水量增长对各月来水量增加起主要作用。王博威等^[44]证实，主要地类中，林地和耕地对流域产流量和蒸发量有极大影响，结合 1980—2010 年土地利用变化，林地面积减少和耕地面积扩张是导致水库来水量增加的主要原因。整体来看，土地利用对水库来水量影响轻微。

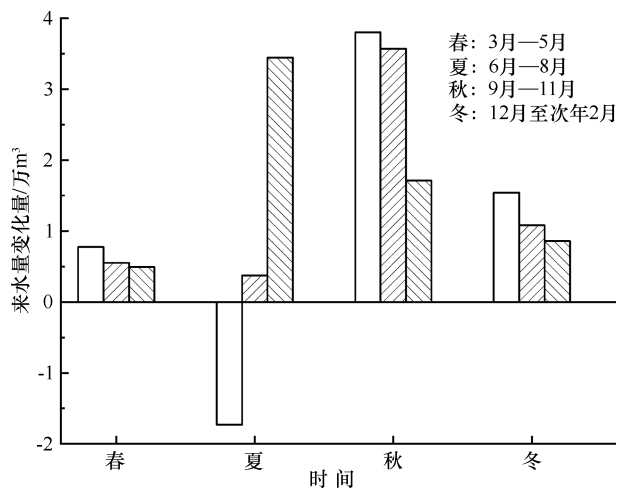


图 9 土地利用变化导致的来水量变化

Fig. 9 Changes in water availability caused by land-use change

4.5 设定气候变化对水库来水量的影响

气候变化作为松华坝水库来水量变化的主要驱动力。为了深入分析气候变化对松华坝水库入库水量的

影响，结合 1980—2014 年气温升高和降水减少变化趋势，设立如下情景 (见表 5) 模拟松华坝水库来水量，以定量评估气候变化的径流响应。

表 5 情景设置

Table 5 Scenario Setting

情景代码	土地利用数据	气象数据
S4 (基准)	2010 年	2000—2014 年
S5		气温增加 1 $^{\circ}C$ ，降水不变
S6		气温不变，降水增加 10%
S7		气温减小 1 $^{\circ}C$ ，降水增加 10%
S8		气温增加 0.5 $^{\circ}C$ ，降水减少 5%
S9		气温增加 1 $^{\circ}C$ ，降水减少 10%
S10		气温增加 1.5 $^{\circ}C$ ，降水减少 15%
S11		气温增加 1 $^{\circ}C$ ，降水增加 10%

如表 6 所列，以 S4 情景为基准，保持土地利用数据不变，气候变化对来水量的影响表现为，气温升高使得来水量减少，降水增加使得来水量增加。气温和降水单独变化时，气温升高 1 $^{\circ}C$ 时 (S5)，月均来水量减少 63.6 万 m^3 ；降水增加 10% 时 (S6)，月均来水量增加 423.4 万 m^3 。通过 S6、S7、S11 情景对比和 S5、S9 和 S11 情景的对比，发现气温和降水变化对来水量的影响并不呈线性关系。气温和降水综合变化时，两者变化对来水量的影响并不是单纯的两者分别作用的叠加，且对比 S8、S9 和 S10 情景发现，气温和降水对来水量的共同作用也不呈线性关系。所设情景内，相较于气温升高、降水减少情景 (S9)，来水量对气温降低、降水增加情景 (S7) 的响应程度较高。气温降低 1 $^{\circ}C$ ，降水增加 10% 时 (S9)，月均来水量增幅高达 493.3 万 m^3 。

4.6 讨论

松华坝地处低纬度干旱地区，气温呈上升趋势，降水呈波动性下降趋势，这与宁忠瑞等^[43]研究结果一致。此外，本文设定多个情景利用 SWAT 模型模拟松华坝流域来水量，发现气候变化对水库来水量的影响远大于土地利用变化，这与程程^[16]、霍君君等^[45]对两者的径流响应研究结果一致。由于气温和降水综合变化时对来水量的影响并不是两者分别作用的叠加且气温和降水对来水量的共同作用和单独作用

表 6 各设定情景下多年平均月来水量变化

Table 6 Changes in multi-year average monthly water inflow under the set scenarios

项 目	情景代码							
	S4 (基准)	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
月平均来水量	1 085.96	1 022.36	1 509.40	1 579.29	836.07	604.67	434.52	1 080.77

都不呈线性关系, 因此气候变化对来水量影响的定量评估仅代表该情景下的来水量状况, 然而就当前的气候变化趋势而言, 本文设定情景下的径流模拟对未来来水量变化依然具有一定参考价值。了解供水水源地的来水量变化原因并定量评估其变化, 可为因地制宜确定治水思路和水资源管理策略提供参考。

本文着重研究历史气候和土地利用变化对径流的影响, 根据气候变化趋势设定未来情景以供参考, 但未结合未来的土地利用状况进行研究。当前, 土地利用格局预测方法已趋于成熟, 如 CA-Markov 模型、FLUS 模型等, 而气象要素众多, 且未来预测主要依靠国际耦合模式比较计划产品 (Climate Model Intercomparison Project, CMIP)。因此, 加快构建未来气候和土地利用模式以预测流域径流是相关研究的一大热点。

松华坝水库上游无其他水利工程, 故可减小水库上游水利工程的干扰对水库天然来水量进行合理模拟。水库对区域供水的重要性不言而喻, 但对大多数位于流域中下游的水库来说, 其上游水利工程的调蓄作用加大了其径流模拟研究的难度, 而流域中下游往往是工农业生产和人口的集中分布区, 对该地区水库的径流研究往往更具参考价值。随着水文模型和遥感技术的发展, 未来应结合水库上游水利工程对其进行径流研究。

5 结 论

(1) SWAT 模型在松华坝流域适用性良好, 率定期和验证期 R^2 和 NS 均大于 0.75, $|PBIAS|$ 均小于 10%。

(2) 1980—2014 年, 松华坝流域气温总体以 $0.586\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ a}$ 的速率上升, 冬季升温最快; 降水总体以 $12.5\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率减少, 秋季降水减幅最大。MK 突变检验表明, 1992 年以后流域平均气温呈上升趋势, 突变开始时间为 1998 年; 流域年降水量变化不显著, 在 1980—2014 年发生多次显著突变。

(3) 气候变化是水库来水量变化的主要驱动力。在历史气候和土地利用变化情景下, 四个季节中秋季来水量变化最为敏感; 在土地利用变化情景下, 林地减少, 耕地增加导致来水量增加。

(4) 气温和降水变化对来水量的共同作用和单独作用都不呈线性关系。所设情景内相较于气温升高、降水减少情景, 来水量对气温降低、降水增加情景的响应程度较高。气温降低 $1\text{ }^\circ\text{C}$, 降水增加 10% 时, 月均来水量增幅高达 493.3 万 m^3 。气温升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 情景

下, 月均来水量减少 63.6 万 m^3 ; 降水增加 10% 情景下, 月均来水量增加 423.4 万 m^3 。

参考文献 (References):

- [1] PAN Z, LIU P, GAO S, et al. Improving hydrological projection performance under contrasting climatic conditions using spatial coherence through a hierarchical Bayesian regression framework [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(8): 3405-3421.
- [2] YANG L, FENG Q, YIN Z, et al. Identifying separate impacts of climate and land use/cover change on hydrological processes in upper stream of Heihe River, Northwest China [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(5): 1100-1112.
- [3] GUO J, SU X, SINGH V P, et al. Impacts of climate and land use/cover change on streamflow using SWAT and a separation method for the Xiyang River basin in Northwestern China [J]. Water, 2016, 8(5): 192.
- [4] AHN K H, MERWADE V M. Quantifying the relative impact of climate and human activities on streamflow [J]. Journal of Hydrology, 2014, 515(14): 257-266.
- [5] ZHANG Y, ZHONG P, CHEN J, et al. Impacts of climate change and human activities on the Three Gorges reservoir inflow [J]. Water, 2017, 9(12): 957.
- [6] 梁国付, 丁彦彦. 气候和土地利用变化对径流变化影响研究——以伊洛河流域伊河上游地区为例 [J]. 地理科学, 2012, 32(5): 635-640.
LIANG Guofu, DING Shengyan. The impacts of climate and land use changes on the runoff effects; case in the upper reaches of the Yihe River, the Yiluo River Basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(5): 635-640.
- [7] MENG C, ZHANG H, WANG Y, et al. Contribution analysis of the spatial-temporal changes in streamflow in a typical elevation transitional watershed of Southwest China over the past six decades [J]. Forests, 2019, 10(6): 495.
- [8] ZHANG H, MENG C, WANG Y, et al. Comprehensive evaluation of the effects of climate change and land use and land cover change variables on runoff and sediment discharge [J]. The Science of The Total Environment, 2019, 702: 134401.
- [9] 李国英. 为以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴提供有力的水安全保障 [J]. 水利发展研究, 2023, 23(7): 1-2.
LI Guoying. Strengthening water security for efforts to advance the rejuvenation of the Chinese nation on all fronts through a Chinese path to modernization [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(7): 1-2.
- [10] 李肇桀, 张旺, 刘璐, 等. 对国家“江河战略”的认识与思考 [J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 12-15.
LI Zhaojie, ZHANG Wang, LIU Lu, et al. Understanding and reflection on the national “River Strategy” [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(1): 12-15.

- [11] 刘春葵, 占车生, 夏军, 等. 关于气候变化与人类活动对径流影响研究的评述[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 379-385, 393.
LIU Chunzhen, ZHAN Chesheng, XIA Jun, et al. A review of studies on the impacts of climate change and human activities on runoff[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, (4): 379-385.
- [12] 郑莉萍, 胡煜佳, 张森林, 等. 基于 SWAT 模型的璧南河流域径流模拟分析[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2023, 40(3): 31-47.
ZHENG Liping, HU Yujia, ZHANG Senlin, et al. Simulation analysis of runoff in Binan River Basin based on SWAT model [J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science), 2023, 40(3): 31-47.
- [13] 桑灿, 李兆华, 冯学高, 等. 基于 SWAT 模型的白莲河流域总磷关键源区识别与最佳管理措施(BMPs)研究[J/OL]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(2): 374-386.
SANG Can, LI Zhaohua, FENG Xuegao, et al. Identification of phosphorus emission critical source areas and evaluation of best management practices in Bailian River Basin based on SWAT model [J/OL]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(2): 374-386.
- [14] 田晶, 郭生练, 刘德地, 等. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(11): 2307-2318.
TIAN Jing, GUO Shenglian, LIU Dedi, et al. Impacts of climate and land use/land cover changes on runoff in the Hanjiang River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(11): 2307-2318.
- [15] AHMED N, WANG G, BOOIJ M J, et al. Separation of the impact of land use/landcover change and climate change on runoff in the upstream area of the Yangtze River, China [J]. Water Resources Management, 2021, 36(1): 181-201.
- [16] 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.
CHENG Cheng. Impacts of land use/land cover change and climate change on the runoff in Yuan River Basin based on SWAT model[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(5): 52-59.
- [17] 窦小东, 彭启洋, 张万诚, 等. 基于情景分析的 LUCC 和气候变化对南盘江流域径流的影响[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 84-89.
DOU Xiaodong, PENG Qiyang, ZHANG Wancheng, et al. Impacts of LUCC and climate change on runoff in the Nanpan River Basin based on scenario analysis[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 84-89.
- [18] ZHANG L, JIANG Y, YANG M, et al. Quantifying the impacts of land use and cover change (LUCC) and climate change on discharge and sediment load in the Hunhe River Basin, Liaoning Province, Northeast China[J]. Water, 2022, 14(5): 737.
- [19] CHAWLA I, MUJUMDAR P P. Isolating the impacts of land use and climate change on streamflow [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(8): 3633-3651.
- [20] CHEN Q, CHEN H, ZHANG J, et al. Impacts of climate change and LULC change on runoff in the Jinsha River Basin [J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(1): 85-102.
- [21] HU J, MA J, NIE C, et al. Attribution analysis of runoff change in Min-Tuo River Basin based on SWAT model simulations, China [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 2900.
- [22] ANDARYANI S, TROLLE D, NIKJOO M R, et al. Forecasting near-future impacts of land use and climate change on the Zilbier River hydrological regime, Northwestern Iran [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(6): 1-14.
- [23] 张斌, 陈圣波, 张梦娇, 等. 苏子河流域土地利用变化对大伙房水库水量的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(1): 320-327.
ZHANG Bin, CHEN Shengbo, ZHANG Mengjiao, et al. Effects of land use change on water quantity of Dahuofang reservoir in Suzi River Basin [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2023, 53(1): 320-327.
- [24] XIAO L. Investigation and analysis of water resources in drinking water source area for Kunming City [J]. Journal of Water Resources Research, 2019, 8(1): 100-107.
- [25] ZHAO X, RAO H, YI Q, et al. Scenarios simulation on carrying capacity of water resources in Kunming City [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2012, 5: 107-112.
- [26] 王强, 许有鹏, 高斌, 等. 西苕溪流域径流对土地利用变化的空间响应分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(4): 632-641.
WANG Qiang, XU Youpeng, GAO Bin, et al. Runoff spatial responses to land use change in Xitiao River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4): 632-641.
- [27] 张建. 松华坝水库供水流量监测自动化系统研制 [J]. 云南水力发电, 2005, 21(3): 85-88.
ZHANG Jian. Development of automated system for monitoring water supply and flow in Songhuaba reservoir [J]. Yunnan Water Power, 2005, 21(3): 85-88.
- [28] 王坤香, 王克勤. 昆明松花坝水源区坡耕地对集水区产流产沙的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(6): 66-72.
WANG Kunxiang, WANG Keqin. Effects of sloping land on the runoff and sediment on catchment area in Songhuaba reservoir in Kunming [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(6): 66-72.
- [29] 张建林, 施永生. 松华坝水库水源保护区的生态修复技术探讨 [J]. 云南化工, 2006, 33(4): 47-49.
ZHANG Jianlin, SHI Yongsheng. Discussion on the reestablishment technique of Songhuaba reservoir conservation area [J]. Yunnan Chemical Technology, 2006, 33(4): 47-49.
- [30] 刘宁, 张霞, 祝雪萍, 等. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的碧流河流域径流模拟 [J]. 水力发电, 2019, 45(3): 18-22.
LIU Ning, ZHANG Xia, ZHU Xueping, et al. Runoff simulation using SWAT model and SUFI-2 algorithm in Biliu River Basin [J]. Water Power, 2019, 45(3): 18-22.

- [31] LUO K, TAO F, DENG X, et al. Changes in potential evapotranspiration and surface runoff in 1981—2010 and the driving factors in upper Heihe River Basin in Northwest China [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(1): 90-103.
- [32] ARNOLD J G, MORIASI D N, GASSMAN P W, et al. SWAT: model use, calibration, and validation [J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(4): 1491-1508.
- [33] 童成立, 张文菊, 汤阳, 等. 逐日太阳辐射的模拟计算[J]. *中国农业气象*, 2005, 26(3): 165-169.
TONG Chengli, ZHANG Wenju, TANG Yang, et al. Simulation of daily solar radiation[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, 26(3): 165-169.
- [34] 史晓亮, 杨志勇, 严登华, 等. 滦河流域土地利用/覆被变化的水文响应[J]. *水科学进展*, 2014, 25(1): 21-27.
SHI Xiaoliang, YANG Zhiyong, YAN Denghua, et al. On hydrological response to land-use/cover change in Luanhe River Basin [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(1): 21-27.
- [35] 王雨茜, 杨肖丽, 任立良, 等. 长江上游气温、降水和干旱的变化趋势研究[J]. *人民长江*, 2017, 48(20): 39-44.
WANG Yuqian, YANG Xiaoli, REN Liliang, et al. Variation trend analysis of temperature, precipitation and drought in upper Yangtze River Basin[J]. *Yangtze River*, 2017, 48(20): 39-44.
- [36] 魏永亮, 韩方昕, 杨永寿. 1971—2015年玉树地区气温变化特征分析[J]. *现代农业科技*, 2016(20): 179-183.
WEI Yongliang, HAN Fangxin, YANG Yongshou. Analysis on change characteristics of temperature in Yushu Area from 1971 to 2015[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016(20): 179-183.
- [37] GUO M, LI J, HE H, et al. Detecting global vegetation changes using Mann-Kendal (MK) trend test for 1982—2015 time period[J]. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(6): 907-919.
- [38] 张楠, 张保留, 吕连宏, 等. 碳达峰国家达峰特征与启示[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(4): 1912-1921.
ZHANG Nan, ZHANG Baoliu, LYU Lianhong, et al. Peaking characteristics and enlightenment based on carbon peak countries[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(4): 1912-1921.
- [39] SADEGHI S, SAGHAFIAN B, NAJARCHI M. Assessment of impacts of change in land use and climatic variables on runoff in Tajan River Basin[J]. *Water Supply*, 2020, 20(17): 2779-2793.
- [40] ANAND J, GOSAIN A K, KHOSA R. Prediction of land use changes based on land change modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga Basin to land use change using the SWAT model [J]. *The Science of The Total Environment*, 2017, 644: 503-519.
- [41] MARIN M, CLINCIU I, TUDOSE N C, et al. Assessment of seasonal surface runoff under climate and land use change scenarios for a small forested watershed: upper Tarlung Watershed (Romania) [J]. *Water*, 2022, 14(18): 2860.
- [42] 屈吉鸿, 石红旺, 李志岩. 基于 SWAT 模型的青龙河流域气候变化径流响应研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(4): 8-15.
QU Jihong, SHI Hongwang, LI Zhiyan. Runoff responses to climate change in Qinglong River Watershed based on SWAT model [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(4): 8-15.
- [43] 宁忠瑞, 张建云, 王国庆. 1948—2016 年全球主要气象要素演变特征[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(9): 4085-4095.
NING Zhongrui, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing. Variation and global pattern of major meteorological elements during 1948-2016 [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(9): 4085-4095.
- [44] 王博威, 李建柱, 冯平. 土地利用变化对潘家口水库控制流域径流影响[J]. *水利学报*, 2018, 49(3): 379-386.
WANG Bowei, LI Jianzhu, FENG Ping. Impacts of land use change on runoff in Panjiakou reservoir Watershed [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(3): 379-386.
- [45] 霍军军, 伊明启, 王静, 等. 拉萨河流域径流对土地利用和气候变化的响应分析[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(10): 33-39.
HUO Junjun, YI Mingqi, WANG Jing, et al. Response of runoff in Lhasa River Basin to land use and climate change [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(10): 33-39.

(责任编辑 康健)