DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.038
陈蒙恩，魏兴，周育琳，等. 基于 Budyko 假设的三峡库区蓄水前后径流变化归因识别[J].水土保持学报,2024,38(2):76-84.
CHEN Meng'en, WEI Xing, ZHOU Yulin, et al. Attribution identification of runoff change before and after impoundment in the Three Gorges Reservoir Area based on Budyko hypothesis[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(2):76-84.

基于 Budyko 假设的三峡库区蓄水前后径流变化归因识别

陈蒙恩，魏 兴，周育琳，史瑞博，李伊能
(重庆三峡学院土木工程学院,重庆 404100)

摘　要:[**目的**]径流在气候变化和人类活动的共同影响下发生变化,探索径流时空演变规律及其原因对水库科学调度及水资源的可持续利用具有重要指导意义。[**方法**]基于三峡库区"腹心"万州段 1960—2019 年的气象水文数据,首先采用 Mann－Kendall 趋势检验、Pettitt 突变分析和小波分析对三峡库区蓄水前后径流的时空演变特征进行分析,最后采用 2 种 Budyko 水热耦合平衡方程,定量计算气候变化和人类活动对径流变化的影响率。[**结果**](1)研究区年径流量呈显著下降趋势($|z|>2.58$),2003 年(三峡库区蓄水年)出现拐点,随后年内分配更加均匀。(2)与蓄水前相比较,蓄水后气候变化和人类活动对研究区年径流减少的贡献率为 27.9%～29.2%和 70.8%～72.1%。(3)人类活动主要通过改变土地利用类型和建设水利工程影响流域年径流量,林地、建设用地面积的增加和三峡库区的建设影响研究区水文循环过程使年径流量减少。[**结论**]研究结果定量描述人类活动对径流变化的影响,对下一阶段三峡库区水资源管理提供理论支撑。

关键词: 三峡库区万州段;气候变化;人类活动;时空演变;归因分析
中图分类号:P333.1　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)02-0076-09

Attribution Identification of Runoff Change Before and After Impoundment in the Three Gorges Reservoir Area Based on Budyko Hypothesis

CHEN Meng'en, WEI Xing, ZHOU Yulin, SHI Ruibo, LI Yineng
(*School of Civil Engineering*, *Chongqing Three Gorges University*, *Chongqing* 404100, *China*)

Abstract: [**Objective**] Runoff changes under the combined influence of climate change and human activities. Exploring the temporal and spatial evolution of runoff and its causes has important guiding significance for the scientific operation of reservoirs and the sustainable use of water resources. [**Methods**] Based on the meteorological and hydrological data of the Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir Area from 1960 to 2019, Mann-Kendall trend test, Pettitt mutation analysis and wavelet analysis were used to analyze the spatial and temporal evolution characteristics of runoff before and after the impoundment in the Three Gorges Reservoir Area. Finally, two Budyko hydrothermal coupling equilibrium equations were used to quantitatively calculate the influence rate of climate change and human activities on runoff change. [**Results**] (1) The annual runoff in the study area showed a significant downward trend ($|z|>2.58$), with the inflection point appearing in 2003 (the impoundment year of the Three Gorges Reservoir Area), after which the annual distribution was more uniform. (2) Compared to the period before impoundment, the contribution rates of climate change and human activities to the reduction of annual runoff in the study area after impoundment were 27.9% to 29.2% and 70.8% to 72.1%, respectively. (3) Human activities primarily influence the annual runoff of the basin by altering the type of land use and the construction of water conservation projects. [**Conclusion**] This study quantitatively describes the impact of human activities on runoff changes, and

收稿日期:2023-10-25　**修回日期:**2023-12-03　**录用日期:**2023-12-25　**网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-03-07
资助项目:重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ－MSX1392);重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202201210,KJQN202201224,KJQN202101235,KJQN202301209);重庆市万州区科技创新项目(wzstc20230313)
第一作者:陈蒙恩(2000—),男,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事水文模拟预报研究。E-mail: 1779209638@qq.com
通信作者:魏兴(1993—),男,安徽阜阳人,讲师,博士,主要从事水文学及水资源/同位素水文学研究。E-mail: 1035027480@qq.com

provides the oretical support for the next stage of water resources management in the Three Gorges Reservoir Area.

Keywords: Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir; climate change; human activities; space-time evolution; attribution analysis

Received: 2023-10-25　　**Revised**: 2023-12-03　　**Accepted**: 2023-12-25　　**Online**(www.cnki.net): 2024-03-07

径流是人类可利用水资源的主要来源之一，但在气候变化和人类活动的双重影响下，国内多个地区观测到径流发生了变化，水文循环过程也发生不同程度的改变，干旱、洪涝等极端水文事件频发，对人民群众的生命财产安全、城市的正常运转及经济发展构成严峻的挑战[1]。其中，全球气候变暖导致海平面上升、冰川融化和极端气候频发等，改变水文循环过程[2]；人类活动通过建设水利设施、城市化加剧和改变土地利用类型等行为，直接或间接参与区域径流演变过程[3]。因此，重新认识并把握变化环境下的径流时空演变规律，可为下一阶段优化流域水资源综合管理，实现水资源可持续利用提供科学依据[4]。

近年来，识别径流时空演变规律的研究主要集中于年径流量的趋势性、变异性和周期性等[5]；针对径流变化归因分析的方法主要有经验统计方法、基于物理的水文模型和基于 Budyko 假设的敏感性分析法等[6]。相比较其他 2 种方法，基于 Budyko 假设的水文敏感性分析法凭借参数少、结构简单、可解释性强和准确率高等优点，被广泛应用于不同流域的径流变化归因识别。叶婷等[7]运用基于 Budyko 假设下的 Choudhury－Yang 公式，对淮河中上游径流变化进行归因识别得出，人类活动为主导因素，且在 4 个站点的贡献率均在 80%以上；申滔滔[8]利用基于 Budyko 假设下的傅抱璞公式、Choudhury－Yang 公式和张橹经验公式对漳河流域径流变化进行归因识别，3 种公式得到的气候变化和人类活动对径流变化的影响率基本一致；师卫钊等[9]使用 8 种基于 Budyko 假设的水量平衡方程式对嘉陵江流域径流进行归因分析，结果表明，流域径流量呈现显著下降趋势，人类活动对径流减少占主导作用贡献率为 50%～60%。

长江三峡工程是世界上规模最大的水利枢纽工程和综合效益最广泛的水电工程，在防洪、抗旱等方面发挥着重要作用[10]。三峡库区蓄水后，流域水循环过程发生显著变化，探索三峡库区蓄水前后径流变化特征和影响径流的主要影响因素，对保障流域生产生活用水和水库的安全运行意义重大[11]。目前针对三峡库区的径流变化特征研究较少，且多采用单一的水文统计方法或者一种基于 Budyko 假设的水量平衡方程，导致结果具有偶然性和不确定性。因此，本文基于 1960—2019 年三峡库区“腹心”位置万县站的径流资料，采用不同的 Budyko 假设的水量平衡方程进行归因分析，相互印证，增加所得结果的可信度。同时，结合不同时期的土地利用数据，进一步探索径流变化的影响因素，为三峡库区水资源合理开发和科学配置提供参考依据。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

万州区位于重庆市东北部长江三峡库区腹心地带，介于 30°23′50″—31°0′18″N，107°52′22″—108°53′52″E，面积约 3 456.38 km^2，是重庆主城以外最大的中心城市；地处扬子陆块，境内地质构造由东北部大巴山褶皱带形成的东北盆地山区、东南部的川鄂湘黔隆起褶皱带和中西部川东褶皱带形成的低山丘陵区 3 部分组成[12]；气候属亚热带季风温润带，日照充足，平均气温 18.2 ℃，雨量充沛，降水年内和空间分布不均，约 70%的降雨量集中在 5—9 月，多年平均降水量为 1 113.77～1 211.12 mm[13]。境内河流纵横，河流、溪涧切割深，落差大，呈枝状分布，属长江水系[14]。研究区地理位置、水文站和气象站点分布见图 1。

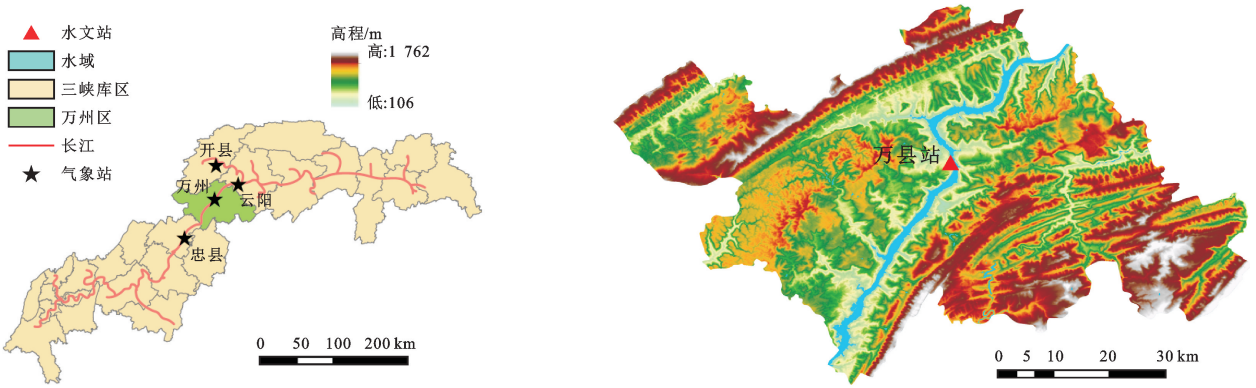


图 1　研究区水文站及气象站位置示意

Fig. 1　Location of hydrological station and meteorological station in the study area

1.2 数据来源

(1)气象数据:收集研究区及周边的3个气象站1960—2019年的平均气温和降雨量等气象数据,源于中国气象数据共享网。研究区的平均气温和降雨量通过泰森多边形计算,潜在蒸散发根据Penman—Moteith公式[15]计算得到。

(2)水文数据:收集研究区万县水文站记录1960—2019年的径流数据,数据来自《中华人民共和国水文年鉴》。

(3)DEM数据:采用从研究区SRTM 90 m数字高程模型产品,来源于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn)。

(4)土地利用数据:土地利用数据来源于中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)[16]。

2 研究方法

2.1 Mann—Kendall趋势检验法

在时间序列趋势分析中,由Mann和Kendall提出的M—K法是世界气象组织(WMO)推荐的趋势检验方法[17]。Mann—Kendall趋势检验法是一种非参数统计检验的方法,进行分析时不需要样本遵从某一特定分布,同时检验效果不受异常值干扰,已被广泛应用于径流、降水、蒸发和气温等水文气象序列的趋势分析中。Mann—Kendall趋势计算出Z值,Z值为正表示趋势增加,负值表示趋势减小。Z的绝对值≥1.28,1.96,2.58时表示分别通过信度90%,95%,99%显著性检验。本研究选用Mann—Kendall趋势检验法对研究区的降水、蒸发、气温和径流等气象水文要素进行趋势检验。

2.2 Pettitt突变分析法

Pettitt突变分析法是一种基于秩的非参数变点检测方法,计算稳健,不受少数异常值干扰,在水文气象领域中广泛应用[18]。该方法的原理为:对于水文气象要素$X=(x_1,\cdots,x_n)$,假设突变点为x_t,可将原时间序列在t时刻划分为$(x_1,x_2,\cdots,x_t)$和$(x_t,x_{t+1},\cdots,x_n)$两部分。对于突变点可能发生时间t,定义统计量$U_{t,n}$:

$$U_{t,n}=\sum_{i=1}^{t}\sum_{j=1}^{n}\mathrm{sgn}(x_j-x_i)(t=2,3,\cdots,n) \quad (1)$$

其中,sgn(·)为符号函数,具体定义为:

$$\mathrm{sgn}(x_j-x_i)=\begin{cases}1, & x_j-x_i>0\\ 0, & x_j-x_i=0\\ -1, & x_j-x_i<0\end{cases} \quad (2)$$

针对统计量序列,对于突变点可能发生的事件t,定义统计量K_t以寻找最有可能的突变点;

$$K_t=\max_{1\leqslant t\leqslant n}|U_{t,n}| \quad (3)$$

突变点的显著性检验公式为:

$$P_t=2\exp\left(\frac{-6K_t^2}{n^3+n^2}\right) \quad (4)$$

对于给定的置信水平α,若$P_t<\alpha$,则拒绝原假设,即在时间t处存在显著突变。

2.3 小波分析法

小波分析是在Fourier分析基础上发展的一种新的时频局部化分析方法,是水文气象中分析周期性特征的常用方法之一[19]。小波分析在找出气候水文要素的时间变化周期的同时,可以准确定位变化点的位置。研究选用经典小波函数—Morlet小波定义为:

$$G(x)=\mathrm{e}^{\frac{t^2}{2}} \quad (5)$$

则其小波系数$W_f(a,b)$为:

$$W_f(a,b)=|a|^{-\frac{1}{2}}\int f(t)g\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \quad (6)$$

式中:a为尺度因子,代表水文—气象要素的周期长度;b为平移因子,表示研究时间参数;$g(t)$为小波母函数。根据小波变换系数公式计算小波方差$W_f(a)$:

$$W_f(a)=\int_{-\infty}^{+\infty}|W_f(a,b)|^2\mathrm{d}b \quad (7)$$

2.4 基于Budyko假设的弹性系数法

基于Budyko假设的弹性系数法是将Budyko模型与水热耦合平衡方程相结合,分析气候变化和人类活动对径流影响[20]。根据水量平衡原理,在多年平均尺度下,可将流域蓄水变化量ΔS假定为零值,则流域的水量平衡方程可以表示为:

$$P=Q+E \quad (8)$$

式中:P为降水量(mm);Q为径流深(mm);E为实际蒸散发量(mm);基于Budyko假设,傅抱璞[21]和YANG[22]给出年尺度的水量能量平衡公式:

$$\frac{E}{P}=1+\frac{E_0}{P}-\left[1+\left(\frac{E_0}{P}\right)^w\right]^{\frac{1}{w}} \quad (9)$$

$$E=\frac{P\times E_0}{(P^w+E_0^w)^{\frac{1}{w}}} \quad (10)$$

式中:E_0为潜在蒸散发量(mm);w为反映下垫面状况的参数,可以根据该流域的年平均降雨量、径流量和潜在蒸散发量进行估算。径流弹性系数或敏感性指的是降水量、潜在蒸发量、下垫面参数的变动对径流变动的影响系数,即对径流的弹性系数,则可以计算出由降水量、潜在蒸散发量、下垫面的变化引起的径流变化,进而求出各个影响因素对径流量的影响率,表达式为:

$$\varepsilon_{x_i}=\frac{\partial Q}{\partial x_i}\times\frac{x_i}{Q} \quad (11)$$

$$\Delta Q_{x_i}=\varepsilon_{x_i}\frac{Q}{x_i}\Delta x_i \quad (12)$$

$$\eta_{xi}=\frac{\Delta Q_{xi}}{\Delta Q}\times 100\% \tag{13}$$

$$x_i=p,E_0,w \tag{14}$$

式中：x_i 分别代表降水量 P、潜在蒸散发量 E_0 和下垫面参数 w；ΔQ_p、$\Delta Q E_0$、ΔQ_w 分别为降水量、潜在蒸散发量和下垫面参数对径流的影响量；ΔP、ΔE_0、Δw 分别为影响评价期和基准期降水量、潜在蒸散发量和下垫面参数变化量；η_P、η_{E_0}、η_w 分别为降水量、潜在蒸散发量和下垫面参数的影响率。

气候变化对径流的影响率为：

$$\eta_C=\eta_P+\eta_{E_0} \tag{15}$$

人类活动对径流的影响率为：

$$\eta_H=1-\eta_C \tag{16}$$

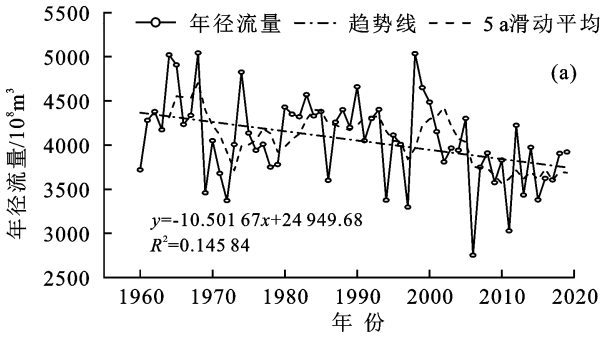
式中：η_C 为气候变化对径流的贡献度；η_H 为人类活动对径流的贡献度。

3　结果与分析

3.1　年径流量变化特征

3.1.1　趋势性分析　本文利用研究区 1960—2019 年水文站年径流量的变化情况，与对应年份进行线性拟合。同时，绘制三峡库区蓄水前后年径流量的年内分布图(图 2)。从图 2 可以看出，研究区多年平均径流量为 4 056×10^8 m^3，最大值出现在 1968 年，为5 043×10^8 m^3/a，最小值出现在 2006 年，为2 753×10^8 m^3/a。从线性拟合情况来看，年径流量呈现出减小趋势，平均气象倾向率为－10.501 67×10^8 m^3/a。从不同时段的年内分布来看，三峡库区起到削峰减洪的作用，蓄水前后年内径流量的极值差由 705×10^8 m^3减至 541×10^8 m^3，年内分配更趋于均匀。在三峡库区蓄水前后研究区的径流量总保持着 1—2 月呈现下降趋势，随后急剧增加并在 7 月达到最大值(蓄水前：795.9×10^8 m^3；蓄水后：655.4×10^8 m^3)，之后 8—12 月均呈现下降趋势，年内径流量主要集中在 6—9 月，分别占蓄水前后年总径流量的61.94%，57.93%。

采用 Mann—Kendall 趋势检验对研究区 1960—2019 年的年降水量、年径流量、潜在蒸散发量和年平均气温数据资料进行趋势检验(表 1)，Mann—Kendall 趋势检验的结果分别为－1.22，－2.90，3.28 和 4.48，说明年降水量和年径流量呈现下降趋势，下降速率分别为 1.394 78 mm/a 和 10.501 67×10^8 m^3/a；年蒸发量和年平均气温呈现上升趋势，上升速率分别为 8.495 35 mm/a 和 0.042 46 ℃/a。年降水量变化趋势不显著($|z|<1.64$)，年径流量、年蒸发量和年平均气温变化趋势显著($|z|>2.58$)，均通过 0.01 的显著性水平检验。



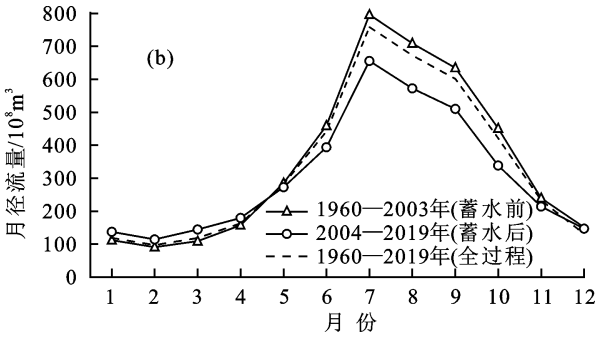


图 2　研究区径流量的时间序列变化趋势

Fig. 2　Time series change trend of runoff in the study area

表 1　1960—2019 年研究区各水文要素的 Mann—Kendall 趋势检验结果

Table 1　Results of Mann－Kendall trend test for hydrological elements in the study area from 1960 to 2019

水文气象要素	Z 值	趋势	显著性
年降水量	－1.22	↓	—
年径流量	－2.90	↓	√
潜在蒸散发量	3.28	↑	√
年平均气温	4.48	↑	√

注：表中“↑”为上升，“↓”为下降，“－”为非显著，“√”为显著。

3.1.2　突变性分析　三峡工程是迄今为止世界上规模最大的水利枢纽工程和综合效益最广泛的水电工程，于 2003 年 6 月蓄水至 135 m 进入围堰发电期，径流量发生明显变化[23]。同时，通过年径流量 Pettitt 突变检验分析(图 3)印证，年径流量在 1995 年之后有明显的减少趋势，在 2003 年发生突变，并通过 0.01 的显著性水平检验。

因此，将 2003 年设置为突变点，在进行后续径流变化归因分析中，将三峡库区蓄水前的 1960—2003 年划分为基准期，蓄水后的 2004—2019 年划分为突变期(基准期表示径流的天然状态即人类活动较少的时期、突变期表示主要受人类活动影响的阶段)，对这 2 个时期内气候和人类活动对于径流变化的贡献率进行定量评估。

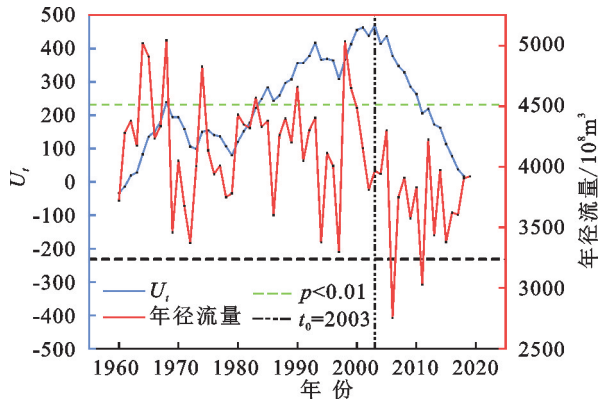


图 3 研究区年径流量的 Pettitt 突变检验结果

Fig. 3 Pettitt mutation test results of annual runoff in the study area

3.1.3 周期变化特征 基于三峡库区蓄水前后 2 段时期研究区的年径流序列，通过小波变换后做年径流小波方差图、年径流小波系数实部等值线图和主周期小波变换系数图(图 4)。从年周期变化看，三峡库区蓄水前后的年径流量均存在丰—枯交替的多尺度时频变化特征和多主周期变化规律。与三峡库区蓄水前相比较，三峡库区蓄水后的年径流量丰—枯交替时间变短，频率增加。三峡库区蓄水前研究区年径流量分别在 25～30 年时间尺度上的周期变换最为突出，小波方差图中在 27～29，21～23，17～19，4～6 年时间尺度上出现周期振荡，28 年和 22 年为年径流的第 1，2 主周期，年径流量最显著的周期变换发生在 28 年左右；三峡库区蓄水后研究区年径流量分别在10～14 年时间尺度上的周期变换最为突出，小波方差图中在 11～13，6～8，3～5 年时间尺度上出现周期振荡，12 年和 7 年为年径流的第 1，2 主周期，年径流量最显著的周期变换发生在 12 年左右。

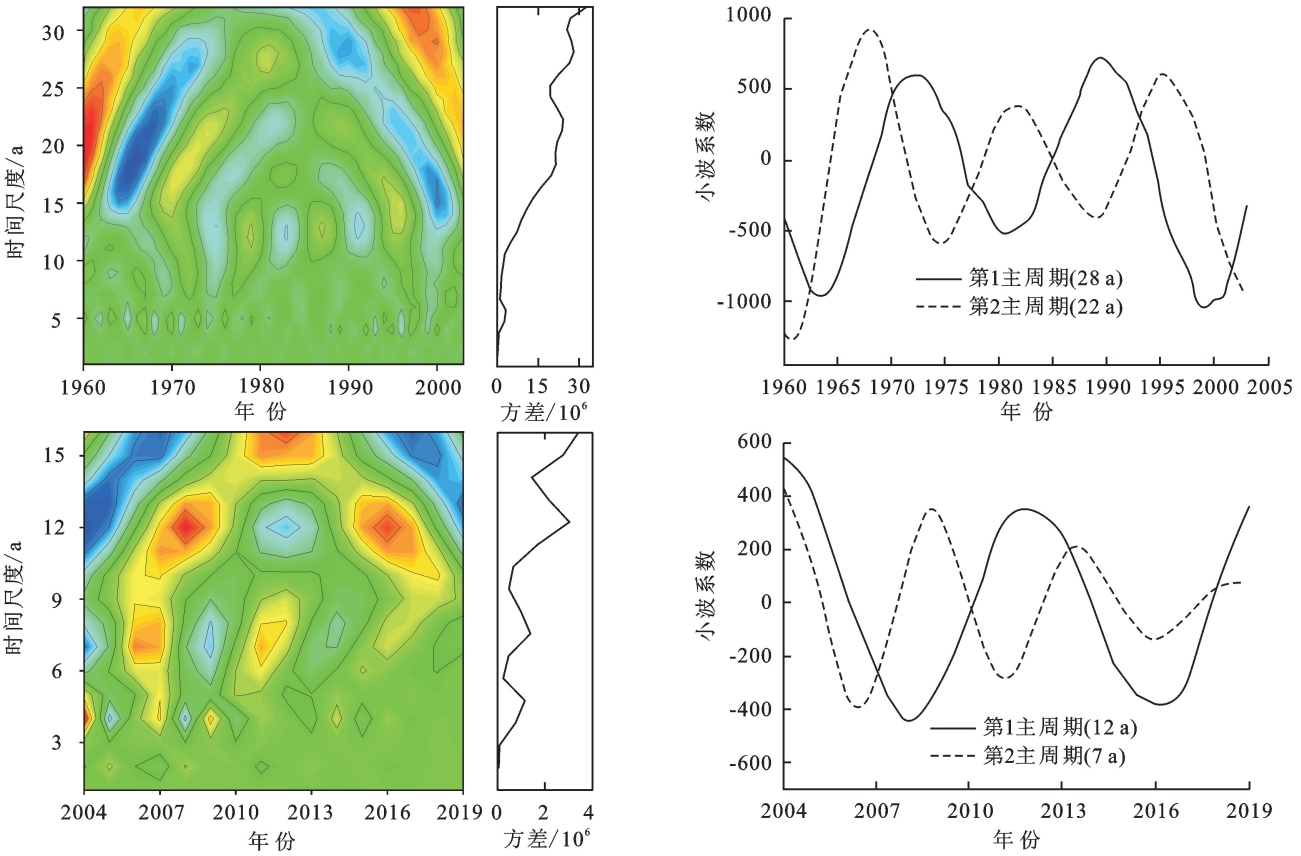


图 4 三峡库区蓄水前后年径流序列小波分析

Fig. 4 Wavelet analysis of annual runoff series before and after impoundment in Three Gorges Reservoir Area

3.2 径流变化归因分析

径流序列变化量是由气候变化和人类活动共同作用的结果，正确识别径流变化的主导因素，对流域的水资源规划、管理及可持续发展具有重要意义[24]。径流变化归因分析方法主要分为 2 个步骤，径流突变点的判定和天然径流量的还原。根据径流量突变点结果分析，将三峡库区正式蓄水年份 2003 年设为突变点，三峡库区蓄水前 1960—2003 年定为基准期，2004—2019 年为突变期。基于傅抱璞和 YANG 的 Budyko 水热耦合平衡方程理论，分析计算出研究区的各个弹性系数(表 2)。根据 2 种方程计算得出的弹性系数可以看出，降水量的弹性系数处于 1.72～1.87，即降雨量增加(减少)1%，导致径流量同时增加(减少)1.72%～1.87%，径流量与降雨量呈现正相

关；潜在蒸发量的弹性系数处于－0.87～－0.72，即潜在增发量增加（减少）1.00%，导致径流量减少（增加）0.72%～0.87%，径流量与潜在蒸发量呈现负相关。对比三峡库区蓄水前后降水量、潜在蒸发量和下垫面弹性系数的绝对值，蓄水后 3 种弹性系数的绝对值均大于基准期，表明气候变化和人类活动的敏感性增强，下垫面发生较大变化。同时，对比降水量、潜在蒸发量和下垫面弹性系数的绝对值大小，降水量的弹性系数最大，表明径流对降水的变化更敏感。

表 2　弹性系数

Table 2　Elasticity coefficient table

Budyko 假设	时期	下垫面参数（w）	弹性系数	
			ε_p	ε_{E0}
傅抱璞	1960—2003	0.46	1.72	－0.72
	2004—2019	0.81	1.87	－0.87
YANG	1960—2003	0.97	1.74	－0.74
	2004—2019	1.31	1.85	－0.85

与三峡库区蓄水前相比较，蓄水后基于 Budyko 假设的傅抱璞和 YANG 经验公式定量分析气候变化和人类活动对径流变化的贡献率（图 5）。在影响评价期，研究区年径流量减少 47.70 mm。对比 2 种不同公式的计算结果，所得出的结果趋势一致。其中，气候变化导致径流减少 13.31～13.93 mm，贡献率为 27.90%～29.20%，而降水量变化占气候变化贡献率的主要部分；人类活动占主导因素使径流减少 33.77～34.39 mm，贡献率为 70.80%～72.10%，即人类活动是三峡库区万州段径流减少的主要影响因素。综上所述，在研究区径流减少的归因分析中，人类活动为主导因素与文献[25]研究结果基本一致。人类活动主要通过建设水利工程和改变下垫面特征 2 个方面影响径流。本文划分的基准期和突变期与三峡蓄水前后 2 个时期相重合，因此在进行归因分析时已将建设水利工程归纳到人类活动的范畴中。另外，人类活动通过改变流域的下垫面特征影响水文循环过程，而土地利用类型变化在人类活动中对流域的影响最直接。

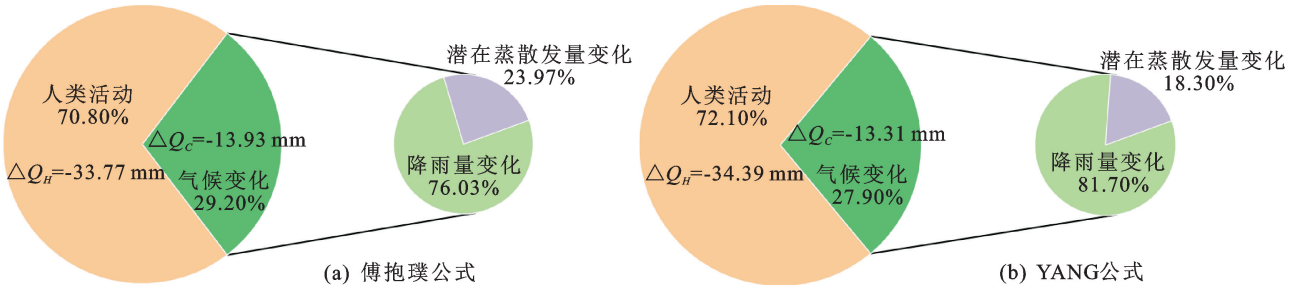


图 5　年径流减少的成因分析饼图

Fig. 5　Cause analysis pie chart of runoff reduction

3.3　下垫面时空演变特征

下垫面的时空演变即土地利用类型在时间和空间上的变化，通过土地利用类型的面积变化来揭示人类对于研究区下垫面的影响，从而探究下垫面在人类活动影响下的变化特征[26]。研究区 5 期土地利用类型见图 6 和表 3。万州区土地类型主要以耕地为主，占比均在 52%以上，1980—2020 年期间呈现出先增加后减少的趋势，1980—2000 年期间增加 176.65 km²，2000—2020 年减少 91.95 km²，40 年间增加 84.70 km²。林地面积占比 25%以上，1980—2020 年期间呈现出先减少后增加的趋势，1980—2000 年期间减少 10.49 km²，2000—2020 年增加 229.45 km²，40 年间增加 219.00 km²。1980—2020 年草地面积持续减少，水域面积和建设用地面积持续增加，其中建设用地变化幅度最大，达到 105.79 km²。

综上所述，研究区耕地呈现先增后减，林地呈现先减后增，转折点均在 2000 年。同时，草地、水域和建设用地面积也在 2000 年表现出异常。通过 2000—2020 年的土地利用转移矩阵（表 4）和桑基图（图 7）分析万州段的土地利用类型变化情况：2000—2020 年林地、水域和建设用地面积均在增加，其中林地增加 230.91 km²，水域增加 22.84 km²，建设用地增加 93.19 km²；耕地和草地面积均在减少，其中 51.48，16.48，85.44 km²的耕地转变为林地、水域和建设用地，257.92，8.86，7.42 km²的草地转变为林地、水域和建设用地。

4　讨 论

受气候变化和人类活动的共同影响，三峡库区在建坝后径流量呈现显著的减少趋势。其中，人类活动比气候变化对三峡库区径流量变化的影响更大。气候变化主要由降雨量和潜在蒸散发变化 2 个因素影响，其中降雨量变化是主要影响因素；而人类活动对径流量的影响主要体现有：(1)用水量需求的增大。随着三峡工程动工，三峡移民迁居至万州区建设新家园，人口增加，用水量也随之增加，直接导致研究区径流量减少。(2)水利设施的建设。为充分利用长江流域丰富的水力资源，修建水利工程，在水库的调度下

有效地消减洪峰，起到防洪排涝、合理供水的重要作用，但水库的修建增加地表径流的无效损耗，也改变原有的自然水循环，对河川径流的影响不容小觑。

(3)土地利用类型的变化。建设用地和耕地面积增多使水资源需求量增加，林地面积增加使植被冠层的截留量和蒸发量增加，造成研究区径流量减少[27]。

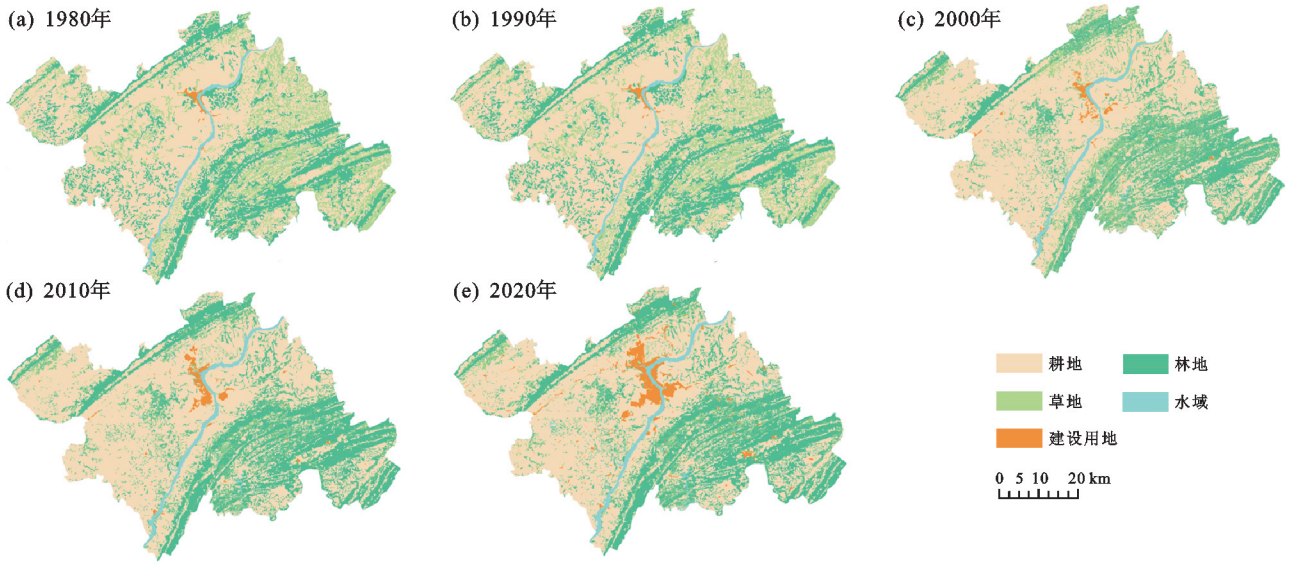


图 6 研究区不同时期土地利用空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of land use in different periods in the study area

表 3 研究区各土地利用类型面积及比例

Table 3 The area and proportion of each land use type in the study area

年份	耕地		林地		草地		水域		建设用地	
	面积/km²	增减/%	面积/km²	增减/%	面积/km²	增减/%	面积/km²	增减/%	面积/km²	增减/%
1980	1 822.51	—	899.11	—	668.03	—	55.00	—	13.00	—
1990	1 822.51	0	899.12	0.01	668.01	−0.01	54.99	−0.01	13.00	0
2000	1 994.17	4.92	888.61	−0.33	481.89	−5.38	69.78	0.43	25.62	0.36
2010	1 991.01	−0.07	1 125.75	6.87	222.92	−7.84	77.77	0.23	41.39	0.46
2020	1 902.21	−2.51	1 118.06	−0.19	222.71	−0.01	93.30	0.45	118.79	2.22

表 4 研究区 2000—2020 年土地利用转移矩阵

Table 4 Land use transfer matrix of study area from 2000 to 2020 km²

土地利用类型		2000 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	总计
2020 年	耕地	1 815.75	39.15	40.23	4.92	1.38	1 901.43
	林地	51.48	806.02	257.92	1.54	0.16	1 117.12
	草地	20.45	34.77	166.59	0.55	0.25	222.61
	水域	16.84	3.87	8.86	62.39	1.25	93.21
	建设用地	85.44	2.40	7.42	0.97	22.57	118.80
	总计	1 989.96	886.21	481.02	70.37	25.61	3 453.17

土地利用类型发生明显变化主要有 3 方面原因：第一，中国有史以来建设最大型的工程项目——三峡工程，在 1994 年正式动工兴建于 2003 年蓄水发电，万州区正处于三峡库区的腹心位置[28]；第二，重庆市万州区是最大的移民城市，三峡库区儿女舍小家、顾大家迁居万州区，因此建设用地面积逐渐增大，人类生活用水需求量增大[29]；第三，在 90 年代末我国推出退耕还林政策，保护和改善生态环境，加强水土保护措施，但植物截留对径流减少产生一定影响[30]。

此外，本文采用的径流量归因方法为基于 Budyko 假设的水热耦合平衡方程，该方法在径流量归因分析中将气候变化和人类活动分割为独立因素，但实际上气候变化和人类活动相互影响且关系密切，并非相互独立。同时，在径流量归因分析中划分为基准期和突变期，实际上基准期内仍存在人类活动活动存在的影响。

后续研究应寻求更加精准的影响评价方法，加强对人类活动和气候变化、降雨和气温等影响机理研究，以控制结果的不确定性，为水资源综合利用可持续发展提供更可靠的理论支撑。

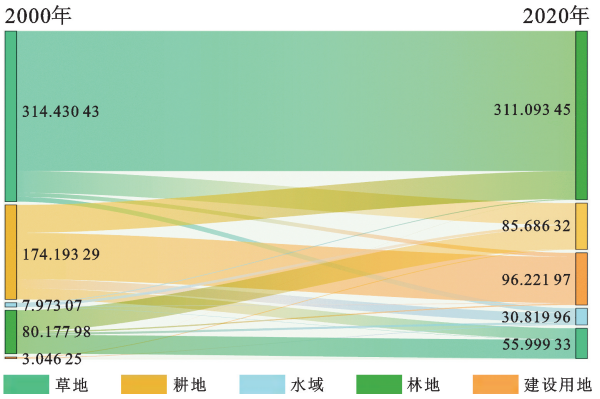


图 7　2000—2020 年研究区土地利用转移桑基图

Fig. 7　Sankey map of land use transfer in the study area from 2000 to 2020

5　结 论

(1)1960—2019 年三峡库区年径流量呈现出下降趋势，气象倾向率为 $-10.501\ 67\times10^{8}\ m^{3}/a$，通过 0.01 的 Mann—Kendall 显著性检验，并在 2003 年发生突变。根据三峡库区蓄水前后径流年内分配分析，相比较三峡库区蓄水后年内分配趋于均匀，更有利于流域内工农业、水生生态系统的稳定发展。

(2)应用弹性系数法对径流变化进行归因分析，认为人类活动(70.8%～72.1%)对径流减少的贡献率大于气候变化(27.9%～29.2%)，且研究发现相比于潜在蒸散发量来说，径流量的变化对降水量的敏感性更高。

(3)三峡库区径流减少主要受以土地利用变化和水利工程建设为主的人类活动影响。其中土地利用变化方面，建设用地和耕地面积增多使水资源需求量增加，林地面积增加使植被冠层的截留量和蒸发量增加，均会造成研究区径流量减少。

参考文献：

[1]　慕全鹏，鲁克新，杨光，等.沮河流域径流变化特征及归因分析[J].水力发电学报，2022，41(12)：80-89.
MU Q P，LU K X，YANG G，et al. Characteristics of runoff changes in Ju River basin and attribution analysis [J].Journal of Hydroelectric Engineering，2022，41(12)：80-89.

[2]　宋高举，王宁练，蒋熹，等.气候变暖背景下祁连山七一冰川融水径流变化研究[J].水文，2010，30(2)：84-88.
SONG G J，WANG Y L，JAING X，et al. Study on glacial melt-water change of Qiyi Glacier in climate warming of Qilian Mountains[J].Journal of China Hydrology，2010，30(2)：84-88.

[3]　段雨佳，何毅，赵杰，等.人类活动对秦岭月河流域径流变化的影响分析[J].干旱区研究，2023，40(4)：605-614.
DUAN Y J，HE Y，ZHAO J，et al. Analysis of impact of human activities on runoff changes in Yue River Basin of the Qinling Mountains[J].Arid Zone Research，2023，40(4)：605-614.

[4]　刘启宁，辛卓航，韩建旭，等.变化环境下东北半干旱地区径流演变规律分析：以洮儿河流域为例[J].水力发电学报，2020，39(5)：51-63.
LIU Q N，XIN Z H，HAN J X，et al. Analysis on evolving trends of streamflow in the semi-arid region in Northeast China under changing environment：A case study of Taoer River basin[J].Journal of Hydroelectric Engineering，2020，39(5)：51-63.

[5]　马彪，刘为锋，张阳，等.三峡入库径流变化归因多方法识别[J].中国农村水利水电，2023(10)：61-68，76.
MA B，LIU W F，ZHANG Y，et al. Multi-method identification of attribution of inflow runoff changes in Three Gorges[J].China Rural Water and Hydropower，2023(10)：61-68，76.

[6]　杨旭洋.变化环境下流域径流演变特征及归因分析研究：以大汶河流域为例[D].西安：西安理工大学，2023.
YANG X Y. Evolution characteristics and attribution analysis of runoff in a changing environment：A casestudy of the Dawen River Basin[D].Xi'an：Xi'an University of Technology，2023.

[7]　叶婷，石朋，钟华，等.基于 Budyko 假设和微分方程的淮河上中游径流变化归因分析[J].河海大学学报(自然科学版)，2022，50(5)：25-32.
YE T，SHI P，ZHONG H，et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation [J].Journal of Hohai University (Natural Sciences)，2022，50(5)：25-32.

[8]　申滔滔.基于 Budyko 框架下漳河流域径流变化归因分析[D].河北 邯郸：河北工程大学，2021.
SHEN T T. Attribution analysis of runoff variation in Zhanghe River Basin based on Budyko framework[D]. Handan，Hebei：Hebei University of Engineering，2021.

[9]　师卫钊，何毅，邵祎婷.嘉陵江上游径流变化及其影响因素归因分析[J].水土保持学报，2023，37(3)：124-131.
SHI W Z，HE Y，SHAO Y T. Attribution analysis of runoff change and its influencing factors in the upper reaches of Jialing River[J].Journal of Soil and Water Conservation，2023，37(3)：124-131.

[10]　彭文启，刘晓波，黄伟，等.三峡工程运行安全综合监测成效与思考[J].中国水利，2023(19)：35-39.
PENG W Q，LIU X B，HUANG W，et al. Effectiveness and reflection on the comprehensive safety monitoring system for the Three Gorges Project[J].China Wa-

ter Resources,2023(19):35-39.

[11] 李海鹏,李昊轩,袁雪梅,等.三峡库区水循环变化及归因分析[J].科学技术创新,2021(8):77-78.
LI H P, LI H X, YUAN X M, et al. Change and attribution analysis of water cycle in Three Gorges Reservoir Area[J]. Science and Technology Innovation, 2021(8): 77-78.

[12] 唐红梅,林孝松,陈洪凯,等.重庆万州区地质灾害危险性分区及评价[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(3):1-5.
TANG H M, LIN X S, CHEN H K, et al. Risk zoning and assessment of geological disasters in Wanzhou area, Chongqing City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(3): 1-5.

[13] 李佳文,周育琳,魏兴,等.CMIP6对三峡库区万州段降水和气温的模拟能力评估[J].长江科学院院报,2023,40(7):32-40.
LI J W, ZHOU Y L, WEI X, et al. Evaluating the ability of CMIP6 Models in simulating precipitation and temperature in Wanzhou City in the Three Gorges Reservoir[J].Journal of Changjiang River Scientific research Institute, 2023, 40(7): 32-40.

[14] 邹敏,刘伟豪,徐杨,等.三峡库区万州段水文特性及泥沙分析[J].水利规划与设计,2018,181(11):71-73.
ZOU M, LIU W H, XU Y, et al. Hydrological characteristics and sediment analysis of Wanzhou section in Three Gorges Reservoir area[J]. Water Planning and Design, 2018, 181(11): 71-73.

[15] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop transpiration-guidelines for computing crop water reuirements-FAO irrigation and drainage Paper56[M]. Rome: FAO, 1998.

[16] 徐新良,刘纪远,张树文,等.中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)[D].资源环境科学数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn/DOI),2018.DOI:10.12078/2018070201).
XU X L, LIU J Y, ZHANG S W, et al. China multi-period land use remote sensing monitoring data set (CNLUCC)[DB/OL]. Resource and Environmental Science Data Registration and Publishing System(http://www.resdc.cn/DOI), 2018. DOI: 10.12078/2018070201).

[17] MEHARI S, TENA A, ADANE A, et al. Analysis of rainfall and temperature variability for agricultural water management in the upper Genale river basin, Ethiopia [J]. Scientific African, 2023, 20: 2468-2276.

[18] 门宝辉,张腾.北京三百年降水序列的成分分析及其随机模拟[J].水利学报,2022,53(6):686-696,711.
MEN B H, ZHANG T. Component analysis and stochastic simulation of precipitation series in Beijing during the last 300 years[J]. Journal Of Hydraulic Engineering, 2022, 53(6): 686-696, 711.

[19] ELIZABETH T, IRENE J, NOBLE P A. Wavelet analysis of annual rainfall over Kerala and sunspot number [J]. New Astronomy, 2023, 98: 1384-1076.

[20] 杨雪琪,武玮,郑从奇,等.基于Budyko假设的沂河流域径流变化归因识别[J].水土保持研究,2023,30(2):100-106.
YANG X Q, WU W, ZHENG C Q, et al. Attribution identification of runoff change in Yihe River Basin based on Budyko hypothesis[J]. Research of Soil and Water Conservatio, 2023, 30(2): 100-106.

[21] FU G B, CHARLES S P, CHIEW F H S. A two-parameter limate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow[J]. Water Resources Research, 2007, 43(11): 2578-2584.

[22] CHOUDHURY B J. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of Hydrology, 1999, 216(1/2): 99-110.

[23] 许全喜.三峡工程蓄水运用前后长江中下游干流河道冲淤规律研究[J].水力发电学报,2013,32(2):146-154.
XU Q X. Study of sediment deposition and erosion patterns in the middle and downstream Changjiang mainstream after impoundment of TGR[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 146-154.

[24] 王鸿翔,王保良,陈昊,等.岷江水文情势演变及生态响应分析[J].长江流域资源与环境,2023,32(9):1960-1970.
WANG H X, WANG B L, CHEN H, et al. Analysis of evolution of hydrological and ecological response in Min River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(9): 1960-1970.

[25] 刘波,陈刘强,周森,等.长江上游重庆段径流变化归因分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(6):1333-1341.
LIU B, CHEN L Q, ZHOU S, et al. Attribution analysis of runoff change in Chongqing section of upper Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(6): 1333-1341.

[26] 王国庆,张建云,管晓祥,等.中国主要江河径流变化成因定量分析[J].水科学进展,2020,31(3):313-323.
WANG G Q, ZHANG J Y, GUAN X X, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 313-323.

(下转第245页)

[49] 元晓春,林惠瑛,曾泉鑫,等.武夷山不同海拔梯度黄山松土壤有机氮解聚酶活性及其影响因素[J].生态学报,2022,42(4):1560-1570.
YUAN X C, LIN H Y, ZENG Q X, et al. Soil organic nitrogen depolymerase activities and its influencing factors of *Pinus taiwanensis* at different altitude gradients in Wuyi Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(4):1560-1570.

[50] 王竹,刘扬,王芳,等.黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态[J].环境科学,2023,44(11):6339-6353.
WANG Z, LIU Y, WANG F, et al. Effects of vegetation types and seasonal dynamics on the diversity and function of soil bacterial communities in the upper reaches of the Heihe River[J]. Environmental Science, 2023,44(11):6339-6353.

[51] 高海宁,李彩霞,孙小妹,等.祁连山北麓不同海拔土壤化学计量特征[J].中国沙漠,2021,41(1):219-227.
GAO H N, LI C X, SUN X M, et al. Stoichiometry characteristics of soil at different altitudes in the Qilian Mountains[J].Journal of Desert Research,2021,41(1):219-227.

[52] 李聪,吕晶花,陆梅,等.文山自然保护区典型植被土壤碳氮储量变化特征[J].生态学杂志,2021,40(11):3531-3542.
LI C, LYU J H, LU M, et al. Variation of soil carbon and nitrogen storage under typical vegetations in Wenshan Nature Reserve [J]. Chinese Journal of Ecology,2021,40(11):3531-3542.

(上接第 84 页)

[27] 万志纲,丁文广,蒲晓婷,等.祁连山国家公园产水量时空变化及驱动因素分析[].水土保持学报,2023,37(6):161-169.
WAN Z G, DING W G, PU X T, et al. Analysis of the spatio-temporal variation and driving factors of water yield in Qilian Mountain National Park[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(6):161-169.

[28] 张云昌.三峡水库蓄水 20 年回顾与展望[J].中国水利,2023(19):5-9.
ZHANG Y C. Twenty years of reservoir impoundment in the Three Gorges: A retrospective and outlook[J]. China Water Resources,2023(19):5-9.

[29] 黄意武,江优优,王广锋.新时代弘扬三峡移民精神的价值意蕴和实践路径[J].重庆社会科学,2021(9):81-90.
HAUNG Y W, JIANG Y Y, WANG G F. The rich meaning and practical path of carrying forward the spirit of the Three Gorges migrants in the new era[J]. Chongqing Social Sciences,2021(9):81-90.

[30] 喻永红.退耕还林可持续性研究:以重庆万州为例[D].杭州:浙江大学,2014.
YU Y H. Research on the viability of the Frain for Green Project: A case study of Wanzhou District in Chongqing[D].Hangzhou: Zhejiang University,2014.

(上接第 233 页)

[30] 陈笑晨,唐振飞,陈锡宽,等.基于 CMIP6 的福建省极端气温预估[J].干旱气象,2022,40(3):415-423.
CHEN X C, TANG Z F, CHEN X K, et al. Projection of extreme temperature in Fujian based on CMIP6 output[J].Journal of Arid Meteorology,2022,40(3):415-423.

[31] 唐振飞,杨婷,陈笑晨,等.SSPs 情景下福建省未来极端降水的模拟与预估[J].气象与环境学报,2023,39(1):26-36.
TANG Z F, YANG T, CHEN X C, et al. Simulation and prediction of future extreme precipitation in Fujian Province under SSPs scenarios[J].Journal of Meteorology and Environment,2023,39(1):26-36.

[32] 杨舒婷.三明市土地利用生态敏感性评价研究[D].福州:福建农林大学,2021.
YANG S T. Research on land use ecological sensitivity assessment in Sanming city[D].Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University,2021.

[33] CHEN J, CAO X, PENG S, et al. Analysis and applications of GlobeLand30: A review[J].ISPRS International Journal of Geo-Information,2017,6(8):e230.

[34] 杨晨辉,王艳君,苏布达,等.SSP“双碳”路径下赣江流域径流变化趋势[J].气候变化研究进展,2022,18(2):177-187.
YANG C H, WANG Y J, SU B D, et al. Runoff variation trend of Ganjiang River Basin under SSP “Double Carbon” path[J]. Climate Change Research, 2022, 18(2):177-187.

[35] YOU Q L, CAI Z Y, WU F Y, et al. Temperature dataset of CMIP6 models over China: Evaluation, trend and uncertainty[J]. Climate Dynamics, 2021, 57(1):17-35.

[36] ZHANG L M, MENG X Y, WANG H, et al. Simulated runoff and sediment yield responses to land-use change using the SWAT model in Northeast China[J]. Water, 2019,11(5):e915.

[49] 元晓春,林惠瑛,曾泉鑫,等.武夷山不同海拔梯度黄山松土壤有机氮解聚酶活性及其影响因素[J].生态学报,2022,42(4):1560-1570.
YUAN X C, LIN H Y, ZENG Q X, et al. Soil organic nitrogen depolymerase activities and its influencing factors of *Pinus taiwanensis* at different altitude gradients in Wuyi Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(4):1560-1570.

[50] 王竹,刘扬,王芳,等.黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态[J].环境科学,2023,44(11):6339-6353.
WANG Z, LIU Y, WANG F, et al. Effects of vegetation types and seasonal dynamics on the diversity and function of soil bacterial communities in the upper reaches of the Heihe River[J]. Environmental Science, 2023,44(11):6339-6353.

[51] 高海宁,李彩霞,孙小妹,等.祁连山北麓不同海拔土壤化学计量特征[J].中国沙漠,2021,41(1):219-227.
GAO H N, LI C X, SUN X M, et al. Stoichiometry characteristics of soil at different altitudes in the Qilian Mountains[J].Journal of Desert Research,2021,41(1):219-227.

[52] 李聪,吕晶花,陆梅,等.文山自然保护区典型植被土壤碳氮储量变化特征[J].生态学杂志,2021,40(11):3531-3542.
LI C, LYU J H, LU M, et al. Variation of soil carbon and nitrogen storage under typical vegetations in Wenshan Nature Reserve [J]. Chinese Journal of Ecology,2021,40(11):3531-3542.

(上接第 84 页)

[27] 万志纲,丁文广,蒲晓婷,等.祁连山国家公园产水量时空变化及驱动因素分析[].水土保持学报,2023,37(6):161-169.
WAN Z G, DING W G, PU X T, et al. Analysis of the spatio-temporal variation and driving factors of water yield in Qilian Mountain National Park[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(6):161-169.

[28] 张云昌.三峡水库蓄水 20 年回顾与展望[J].中国水利,2023(19):5-9.
ZHANG Y C. Twenty years of reservoir impoundment in the Three Gorges: A retrospective and outlook[J]. China Water Resources,2023(19):5-9.

[29] 黄意武,江优优,王广锋.新时代弘扬三峡移民精神的价值意蕴和实践路径[J].重庆社会科学,2021(9):81-90.
HAUNG Y W, JIANG Y Y, WANG G F. The rich meaning and practical path of carrying forward the spirit of the Three Gorges migrants in the new era[J]. Chongqing Social Sciences,2021(9):81-90.

[30] 喻永红.退耕还林可持续性研究:以重庆万州为例[D].杭州:浙江大学,2014.
YU Y H. Research on the viability of the Frain for Green Project: A case study of Wanzhou District in Chongqing[D].Hangzhou: Zhejiang University,2014.

(上接第 233 页)

[30] 陈笑晨,唐振飞,陈锡宽,等.基于 CMIP6 的福建省极端气温预估[J].干旱气象,2022,40(3):415-423.
CHEN X C, TANG Z F, CHEN X K, et al. Projection of extreme temperature in Fujian based on CMIP6 output[J].Journal of Arid Meteorology,2022,40(3):415-423.

[31] 唐振飞,杨婷,陈笑晨,等.SSPs 情景下福建省未来极端降水的模拟与预估[J].气象与环境学报,2023,39(1):26-36.
TANG Z F, YANG T, CHEN X C, et al. Simulation and prediction of future extreme precipitation in Fujian Province under SSPs scenarios[J].Journal of Meteorology and Environment,2023,39(1):26-36.

[32] 杨舒婷.三明市土地利用生态敏感性评价研究[D].福州:福建农林大学,2021.
YANG S T. Research on land use ecological sensitivity assessment in Sanming city[D].Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University,2021.

[33] CHEN J, CAO X, PENG S, et al. Analysis and applications of GlobeLand30: A review[J].ISPRS International Journal of Geo-Information,2017,6(8):e230.

[34] 杨晨辉,王艳君,苏布达,等.SSP“双碳”路径下赣江流域径流变化趋势[J].气候变化研究进展,2022,18(2):177-187.
YANG C H, WANG Y J, SU B D, et al. Runoff variation trend of Ganjiang River Basin under SSP “Double Carbon” path[J]. Climate Change Research, 2022, 18(2):177-187.

[35] YOU Q L, CAI Z Y, WU F Y, et al. Temperature dataset of CMIP6 models over China: Evaluation, trend and uncertainty[J]. Climate Dynamics, 2021, 57(1):17-35.

[36] ZHANG L M, MENG X Y, WANG H, et al. Simulated runoff and sediment yield responses to land-use change using the SWAT model in Northeast China[J]. Water, 2019,11(5):e915.