气候变化下车尔臣河径流响应及生态需水研究

魏光辉, 洪良鹏, 王露阳, 刘锋

引用本文:
魏光辉, 洪良鹏, 王露阳, 等. 气候变化下车尔臣河径流响应及生态需水研究[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3211-3221.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2024-0885

魏光辉, 洪良鹏, 王露阳, 等. 气候变化下车尔臣河径流响应及生态需水研究[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3211-3221.
WEI G H, HONG L P, WANG L Y, et al. Study on runoff response and ecological water demand under climate change in the Qarqan River basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(12): 3211-3221.

开放科学 OSID

气候变化下车尔臣河径流响应及生态需水研究

魏光辉[1,2], 洪良鹏[2], 王露阳[2], 刘锋[1*]

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2.新疆塔里木河流域管理局, 新疆 库尔勒 841000)

摘 要:本文以新疆车尔臣河近60余年的径流、气温及降水资料为基础,借助非参数检验、R/S分析、小波分析等经典理论方法,系统探讨了气候变化下径流响应特征以及流域生态需水的保障程度。结果表明:近60年来,径流、气温呈现显著增加趋势,降水变化不显著;径流、气温的突变年份分别为2000年和1997年,降水无法判定其突变点;径流、气温与降水的赫斯特指数(H)分别为0.751 4、0.961 9、0.732 3,其值均大于0.5,表明未来径流、气温将持续增加、上升,降水也将持续呈现不确定性变化;径流主要有21、12、4 a的变化周期,气温主要有7、11、25 a的变化周期,降水主要有6、28 a的变化周期;斯皮尔曼相关分析表明,径流与气温、降水的变化密切相关;流域生态需水量为3.58亿m^3,扣除生产需水,多年平均情况下生态需水水量完全有保证。

关键词:气候变化;非参数检验;持续性分析;相关分析;生态需水;车尔臣河

中图分类号:P333.1;P467;X143 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2025)12-3211-11 doi:10.11654/jaes.2024-0885

Study on runoff response and ecological water demand under climate change in the Qarqan River basin

WEI Guanghui[1,2], HONG Liangpeng[2], WANG Luyang[2], LIU Feng[1*]

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2.Bureau of Xinjiang Tarim River Basin Management, Korla 841000, China)

Abstract: Based on the runoff, temperature, and precipitation data of the Qarqan River in Xinjiang over the past 60 years, this study systematically explores the runoff response characteristics under climate change and the guarantee degree of ecological water demand in the basin by using classical theoretical methods such as non-parametric test, R/S analysis, and wavelet analysis. The results show that: over the past 60 years, runoff and temperature have shown a significant increasing trend, while the change in precipitation has been insignificant; the abrupt change years of runoff and temperature are 2000 and 1997 respectively, and the abrupt change point of precipitation cannot be determined; the Hurst indices (H) of runoff, temperature, and precipitation are 0.751 4, 0.961 9, and 0.732 3 respectively, all of which are greater than 0.5, indicating that runoff and temperature will continue to increase in the future, and precipitation will also continue to show uncertain changes; runoff mainly has change cycles of 21, 12, and 4 years, temperature mainly has change cycles of 7, 11, and 25 years, and precipitation mainly has change cycles of 6 and 28 years; Spearman correlation analysis shows that the correlation between runoff and temperature, as well as between runoff and precipitation, is closely related; the ecological water demand of the basin is 3.58×10^8 m^3, and after deducting the production water demand, the ecological water demand is fully guaranteed under the condition of multi-year average.

Keywords: climate change; non-parametric testing; continuity analysis; related analysis; ecological water demand; Qarqan River

收稿日期:2024-10-16 **录用日期**:2025-06-20

作者简介:魏光辉(1981—)男,新疆石河子人,正高级工程师,主要从事干旱区水资源高效利用与生态保护研究。E-mail:530748965@qq.com

***通信作者**:刘锋 E-mail:23539583@qq.com

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2021D01A101);新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2023J017);国家自然科学基金项目(U2003204、52579015);国家重点研发计划项目(2023YFC3206804)

Project supported: General Program of Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region(2021D01A101); University Research Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region(XJEDU2023J017); National Natural Science Foundation of China(U2003204, 52579015); National Key Research and Development Program of China(2023YFC3206804)

水资源兼具重要自然资源与经济资源双重属性，是支撑经济社会发展的重要基础。当前，受气候变化、人类活动等多重因素叠加影响，全球范围内极端水文事件频发，对自然生态与人类社会构成潜在威胁，也使得河川径流在多年时间尺度上呈现出趋势性、突变性与周期性特征[1-2]。

车尔臣河流域矿产资源富集、交通条件便利，区位发展优势突出。同时它也是塔里木河流域生态屏障的核心组成，域内绿洲生态系统是社会经济可持续发展的核心载体，且高度依赖有限水资源，呈现“有水则为绿洲、无水即为荒漠”的显著特征。受干旱恶劣的自然环境与极端脆弱的生态条件制约，该流域经济社会发展必须以生态安全保障为前提。为科学规划流域地表水资源、避免未来发展中人工与天然绿洲协调机制受损，探讨车尔臣河径流与气温、降水等主要气候变量的时序变化特征及响应关系，分析流域生态需水保障程度，对推动“一带一路”沿线社会经济发展、粮食安全等，以及保障区域水安全与生态安全，均具有重要现实意义。

当前，国内学者围绕该区域开展了土地覆被/利用变化、地下水化学特征、气候变化响应、尾闾台特玛湖适宜水面与生态变化等研究[3-18]。针对当前车尔臣河流域径流演变研究存在的规律分析系统性不足、尾闾湖泊适宜水面不清，生态水利用效率不高等问题，本研究基于车尔臣河近60余年（1957—2021年）径流、气温及降水数据，系统地探讨了年尺度下的径流、气温及降水演变特征与内在关系，分析了流域植被生态需水量，为流域水资源高效利用与生态保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

车尔臣河流域总面积为4.74万 km^2，主要涉及新疆且末县与若羌县，平原区多年平均气温10.1 ℃，年均降水量18.8 mm，年均蒸发量2 507 mm。截至2023年年底，流域内地区生产总值38.85亿元，其中第一产业增加值12.1亿元，第二产业增加值5.2亿元，灌溉面积4.49×10^4 hm^2，城镇人均可支配收入4.02万元，农村人均可支配收入2.24万元，工业以采矿业和制造业为主，农业以粮食、棉花、油料、蔬菜和瓜果为主。

1.2 数据来源

车尔臣河水文数据（且末水文站，1957—2021年）来自新疆维吾尔自治区水文局；同期气温与降水数据来自且末县国家气象站；流域土地利用/覆被面积数据来自1990年、2000年、2010年及2020年Landsat-TM影像（分辨率为30 m），通过对影像数据进行人工解译，并在野外实地验证和修正，计算得到土地变化具体数据。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析

采用常用的Mann-Kendall分析法[19-20]。假设时间序列 $X_t=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$（$n\geqslant10$），标准正态分布统计量 Z，若 $Z>0$，则 X_t 呈上升趋势，反之则呈下降趋势。

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & S>0\\ 0 & S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & S<0\end{cases} \tag{1}$$

$$Var(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{2}$$

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sgn}(x_j-x_i) \tag{3}$$

$$\mathrm{sgn}(x_j-x_i)=\begin{cases}1 & x_j-x_i>0\\ 0 & x_j-x_i=0\\ -1 & x_j-x_i<0\end{cases} \tag{4}$$

式中：sgn()为符号函数。

以斜率 β 衡量 X_t 的变化趋势，若 $\beta>0$，则 X_t 呈上升趋势，反之则 X_t 呈下降趋势。

$$\beta=\mathrm{Median}\left(\frac{x_j-x_i}{j-i}\right)\quad \forall j>i \tag{5}$$

式中：Median()表示取中值。

1.3.2 突变分析

采用Pettitt突变分析法。对于时间序列 X_t，假设存在突变点 x_t，定义统计量 $U_{t,n}$：

$$U_{t,n}=U_{t-1,n}+\sum_{j=1}^{n}\mathrm{sgn}(x_t-x_j) \tag{6}$$

定义统计量 K_t，寻找最有可能的突变点 t：

$$K_t=\max_{1\leqslant t\leqslant n}\left|U_{t,n}\right| \tag{7}$$

定义显著性水平 P_t 与置信水平 α（α=0.05），若 $P>\alpha$，则认为时间 t 处不存在显著突变，反之则存在[21-22]。

$$P_t=2\exp\left(\frac{-6K_t^2}{n^3+n^2}\right) \tag{8}$$

1.3.3 持续分析

R/S法具体计算过程详见文献[23]。

1.3.4 周期分析

本研究选取常用的Morlet小波[24]。假设 $\psi(t)$ 为基小波函数，则：

$$\psi_{a,b}(t)=|a|^{-1/2}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\quad 其中a,b\in R,a\neq 0 \tag{9}$$

式中:$\psi_{a,b}(t)$为子小波;尺度因子a反映小波周期长度;平移因子b反映小波平移时间。

假设给定的连续信号$f(t)\in L^2(R)$,则小波系数为[25]:

$$W_f(a,b)=|a|^{-1/2}\int_R f(t)\overline{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \tag{10}$$

式中:$W_f(a,b)$为小波系数;$\overline{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$为$\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$的复共轭函数。

小波方差为:

$$Var(a)=\int_{-\infty}^{+\infty}\left|W_f(a,b)\right|^2 db \tag{11}$$

1.3.5 植被生态需水量计算

植被生态需水量是指维持正常生长所需的基本水量[26-27],其计算方法主要有潜水蒸发法和面积定额法,但这两种方法均存在一定的不足。潜水蒸发法依赖于地下水埋深资料,且受潜水蒸发极限埋深制约,计算精度难以保障;而面积定额法则忽略了同一植被类型内的生长差异。本文结合研究区植被类型(主要包括乔、灌、草3类植被,乔木类植被以胡杨为典型代表,灌木类植被以柽柳、梭梭为典型代表,草本类植被以芦苇、罗布麻、骆驼刺等为代表)的空间分布和植被覆盖度特征,同时参考典型植被区蒸散发监测结果,构建了植被生态需水计算模型[28-29],详见式(12)。

$$ER_j=a_j\sum_{i=1}^{n}\left(ET_{ij}\times\frac{V_{ij}}{\frac{1}{n}\sum V_{ij}}\right) \tag{12}$$

式中:ER_j为j类植被的生态需水量,mm;ET为天然植被分布区的实际蒸散,mm;V_{ij}为j类植被i个分区的植被覆盖度;a_j为j类植被的模型系数,针对保护区、重点修复区1、重点修复区2、重点修复区3、一般修复区,模型系数分别取1、2、3、2、4。

2 径流变化对气候的响应

2.1 趋势性分析

研究区径流、气温与降水的基本变化特征见表1、表2、表3。多年平均径流8.966亿m³,变差系数为0.329;多年平均气温10.5 ℃,变差系数为0.113;多年平均降水量25.2 mm,径流变差系数为0.550。

为了明确车尔臣河在1957—2021年间径流、气温及降水的变化趋势,将三者与年份进行了回归分析,所得线性回归方程如表4所示。年径流线性回归系数为0.057 9,决定系数(R^2)为0.298 5,表明近60余年来呈显著增加趋势。年均气温线性回归系数为0.030 5,R^2为0.602 2,同样通过置信度0.05的检验,

表1 径流多年变化特征

Table 1 Multi-year variation characteristics of runoff

数据类型 Data type	多年平均/亿m³ Average/100 million m³	变差系数 Coefficient of variation	最大年径流 Maximum annual runoff			最小年径流 Minimum annual runoff			最大与最小年径流比 Ratio of maximum to minimum
			年份 Year	径流量/亿m³ Runoff/100 million m³	与多年平均比 Ratio to multi-year average	年份 Year	径流量/亿m³ Runoff/100 million m³	与多年平均比 Ratio to multi-year average	
年径流量	8.966	0.329	2016	17.51	1.95	1963	4.62	0.52	3.79

表2 气温多年变化特征

Table 2 Multi-year variation characteristics of temperature

数据类型 Data type	多年平均 Average/℃	变差系数 Coefficient of variation	最大年气温 Maximum annual temperature			最小年气温 Minimum annual temperature			最大与最小年气温比 Ratio of maximum to minimum
			年份 Year	气温 Temperature/℃	与多年平均比 Ratio to multi-year average	年份 Year	气温 Temperature/℃	与多年平均比 Ratio to multi-year average	
气温	10.5	0.113	2021	12.3	1.17	1981	7.5	0.72	1.64

表3 降水多年变化特征

Table 3 Multi-year variation characteristics of precipitation

数据类型 Data type	多年平均 Average/mm	变差系数 Coefficient of variation	最大年降水 Maximum annual precipitation			最小年降水 Minimum annual precipitation			最大与最小年降水比 Ratio of maximum to minimum
			年份 Year	降水量 Precipitation/mm	与多年平均比 Ratio to multi-year average	年份 Year	降水量 Precipitation/mm	与多年平均比 Ratio to multi-year average	
降水	25.2	0.550	2019	64.9	2.57	1960	3.7	0.15	17.75

表4 车尔臣河年径流、气温、降水量线性回归统计

Table 4 Linear regression statistics of annual runoff, temperature and precipitation in the Qarqan River

数据类型 Data type	回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination(R^2)	决定系数临界值 Critical value of coefficient determination(α=0.05)	是否显著 Significant or not
径流	y=0.057 9x−109.26	0.298 5	0.080 7	显著
气温	y=0.030 5x−49.926	0.602 2	0.080 7	显著
降水	y=0.137 8x−248.31	0.018 5	0.080 7	不显著

表5 车尔臣河径流、气温及降水量变化趋势检验

Table 5 Trend test of annual runoff, temperature and precipitation in the Qarqan River

数据类型 Serial number	M-K趋势检验计算结果 Calculation results of M-K trend test		Theil-Sen Median计算结果 Calculation results of Theil-Sen Median(β)
	Z	显著性检验 Significance test(95%)	
径流	3.619	显著	0.064 7
气温	6.320	显著	0.038 2
降水	1.865	不显著	0.159 2

说明近60余年来气温显著上升。年降水量线性回归系数为0.137 8，R^2仅为0.018 5，未通过置信度0.05的检验，显示近60余年来降水量变化不显著，呈不确定性波动。

采用Mann-Kendall（M-K）趋势分析法对表4结果进行复核，结果如表5所示。径流统计检验值Z=3.619，通过置信度95%检验；β=0.064 7（大于0），结合Z值与β值判定其呈显著增加趋势，该结果与回归分析完全一致。气温统计检验值Z=6.320，通过置信度95%检验；β=0.038（大于0），据此判定其呈显著增加趋势，与回归分析结果完全一致。降水量统计检验值Z=1.865，未通过置信度95%检验；β=0.159 2（大于0），结合两项指标判定其增加趋势不明显，该结果同样与回归分析完全一致。

2.2 突变性分析

累积距平分析。该方法的过程线可直观展示时间序列参数的丰枯或升降变化，结果如图1所示。径流累积距平过程线在1957—2000年呈向下波动趋势；2001—2021年转变为向上波动的趋势，初步判定2000年为丰枯变化的转捩点。气温变化同样分为两个时期：1957—1984年为总体降温阶段，累积距平过程线向下波动；1985—2021年转为缓慢升温阶段，过程线波动上升，初步判定1984年为气温变化的转捩点。降水变化趋势不明显，整体呈现“减少-增加”交替的3轮波动，具体表现为1957—1968年减少（过程线向下）、1969—1974年增加（过程线向上）、1974—1980年减少、1980—1989年增加、1989—2000年波动减少、2001—2021年重新波动增加，因此无法明确判定其变化转捩点。

Pettitt突变分析。首先采用SPSS软件绘制径流、气温及降水量数据的P-P图，3类数据的散点均分布在对应斜率直线两侧，表明数据符合正态分布。其次，计算统计量（t），结果如图2所示。径流统计量在1957—2000年持续向下波动，2000—2021年转为持续向上波动，2000年达到最小值，故判定2000年为变化转捩点。气温统计量的变化同样分为两个阶段：1957—1997年呈持续向下波动，1997年达到最小值；1998—2021年转为持续向上波动，初步判定1997年为气温变化转捩点，该结果与累积距平分析（判定1984年为转捩点）存在差异。需说明的是，累积距平分析更侧重反映趋势变化，仅能粗略估测突变时段；而Pettitt非参数检验法可排除数据自相关影响，更精准捕捉突变特征[14]，故最终采信1997年为气温转捩点。降水统计量无稳定变化规律，仅呈现两轮“减少-增加”波动，无法判定明确转捩点，与累积距平分析结果一致。

2.3 持续性分析

利用R/S分析方法，以车尔臣河1957—2021年的径流、气温及降水数据，计算得到赫斯特指数（H），结果见表6。由表6可知径流的H值为0.751 4，大于0.5，推断其未来仍将延续持续增长的趋势。气温的H值为0.961 9，同样大于0.5。前文已证实，气温在近60余年中呈持续增长态势，且其H值高于径流量的H值，表明气温未来的增长持续性将强于径流量的变化持续性。降水的H值为0.732 3，虽大于0.5，但需结合前文分析解读——前文分析显示，降水近60余年中增加趋势不明显，即不确定性较强，因此H>0.5表明其未来仍将延续这一不确定性变化特征，而非显著增长。

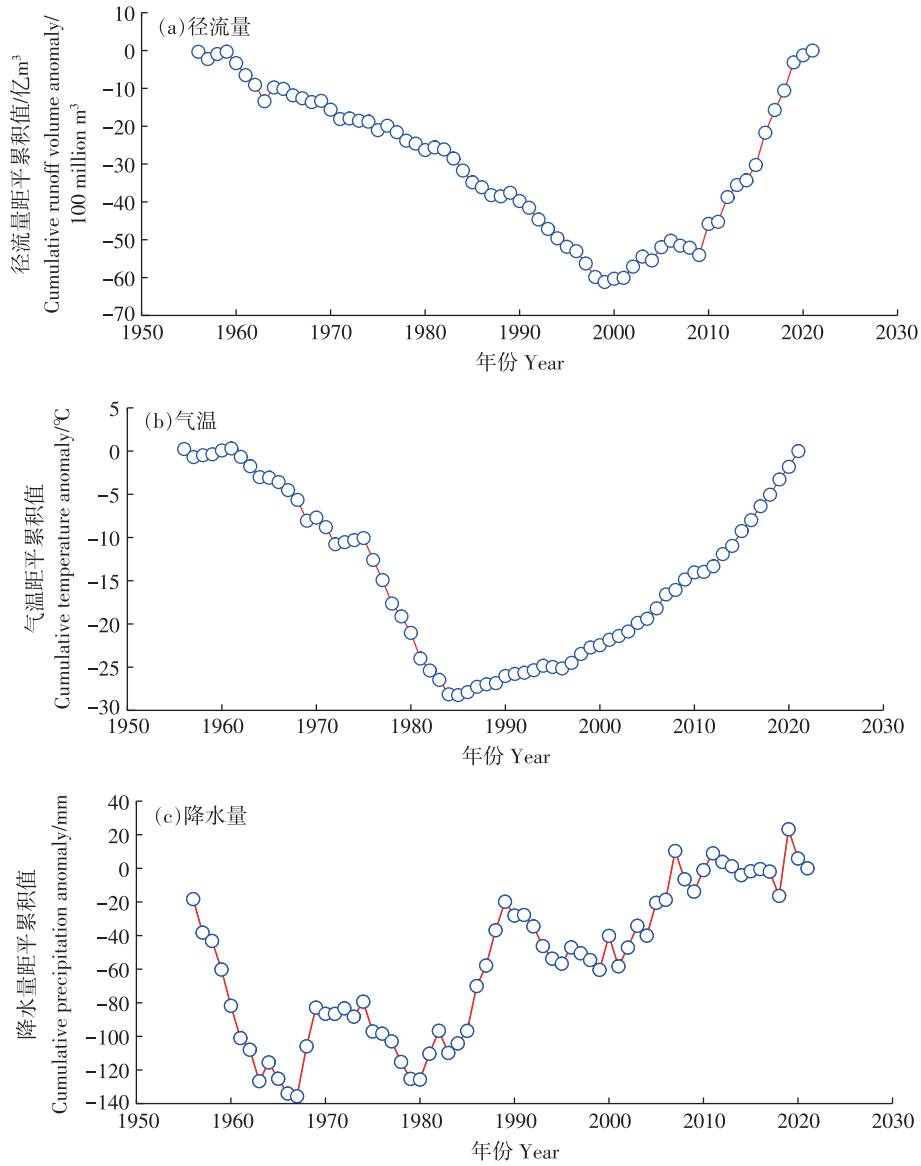


图1 车尔臣河径流、气温及降水量累积距平过程线

Figure 1 Cumulative anomaly process line of runoff, temperature and precipitation in the Qarqan River

表6 车尔臣河径流、气温及降水的R/S分析

Table 6 R/S analysis of runoff, temperature and precipitation in the Qarqan River

数据类型 Data type	赫斯特指数(线性拟合值) Hurst exponent(Linear fitting value)	相关系数 Correlation coefficient	相关系数临界值 Critical value (P=0.05)	是否显著 Significant or not
径流	0.751 4	0.582 5	0.284	显著
气温	0.961 9	0.773 8	0.284	显著
降水	0.732 3	0.705 6	0.284	显著

2.4 周期性分析

采用Morlet小波分析方法绘制小波系数图与方差图,结果见图3。径流(图3a)主要变化周期为21、12、4 a;21 a周期以枯丰交替的形式呈现,包含5个中心,4 a周期的尺度变化较明显。气温(图3b)主要变化周期为7、11、25 a;25 a周期以冷暖交替形式呈现,含9个中心;11 a周期与7 a周期的尺度变化及分布均较明显。降水(图3c)主要变化周期为6、28 a;28 a周期以枯丰交替形式呈现,含7个中心;6 a周期的尺度变化及分布均较明显。

2.5 相关性分析

车尔臣河发源于昆仑山木孜塔格峰,是一条以冰川融水为主要补给来源的河流。开展径流与气温、降水的响应研究,对于明确径流演变的内在机理、实现水资源的优化配置、积极应对流域极端水文

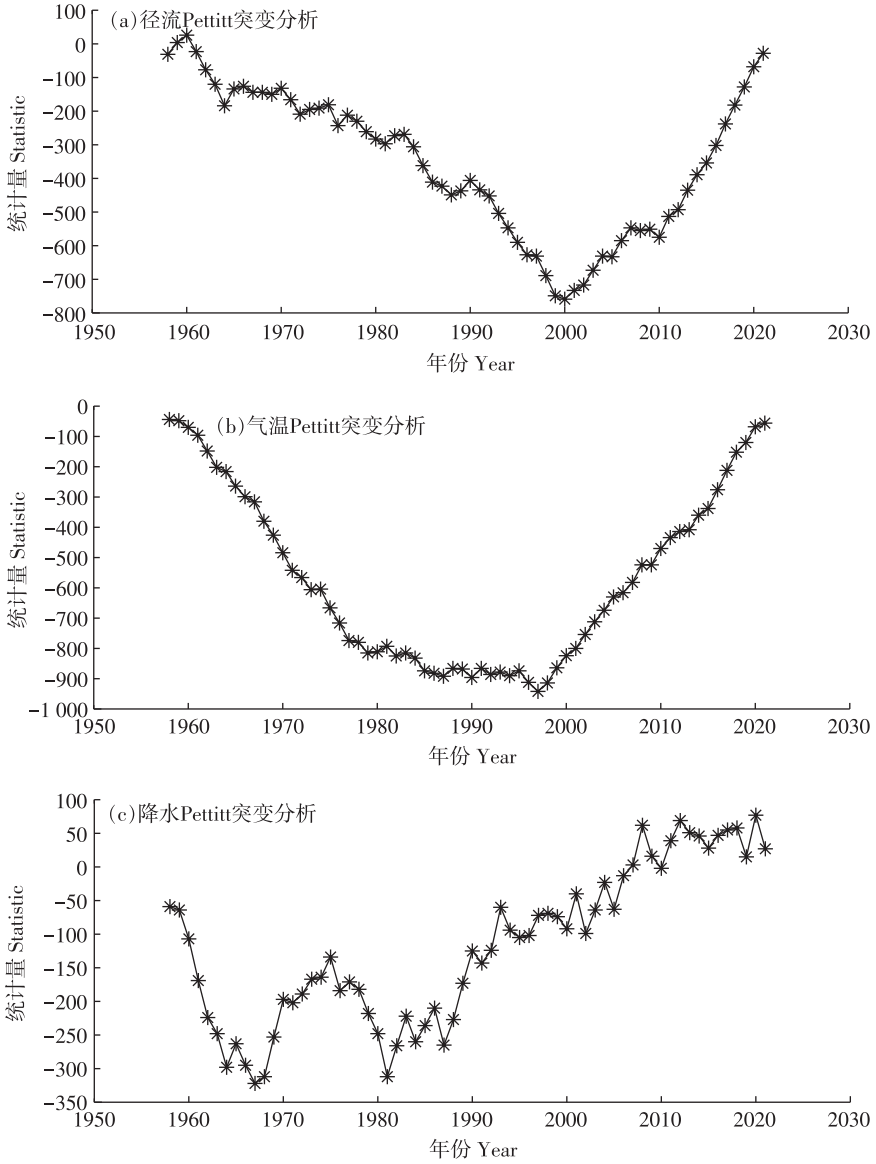


图2 车尔臣河径流、气温及降水数据的Pettitt分析

Figure 2 Pettitt analysis of runoff, temperature and precipitation data in the Qarqan River

事件具有重要意义。运用斯皮尔曼相关分析方法，对车尔臣河径流与气温、降水的相关关系进行分析，结果见表7。

由表7可知，径流与气温的相关系数为0.371，达到极显著水平，径流与降水的相关系数为0.317，达到显著水平。上述结果表明温度、降水量与径流的变化关系均十分密切。车尔臣河地处昆仑山北坡，是一条以冰川融雪及大气降水补给为主要来源的河流。本

表7 车尔臣河径流与气温、降水的相关关系

Table 7 Correlation between runoff and temperature, precipitation

参数 Parameter	斯皮尔曼相关分析Spearman correlation analysis	
	相关系数Correlation coefficient	显著性Significance
气温	0.371	极显著
降水	0.317	显著

注：极显著是指通过置信度为0.01（双尾）的检验，显著是指通过置信度为0.05（双尾）的检验。

Note: Extremely significant refers to passing the test with a confidence level of 0.01 (two-tail), and significant refers to passing the test with a confidence level of 0.05 (two-tail).

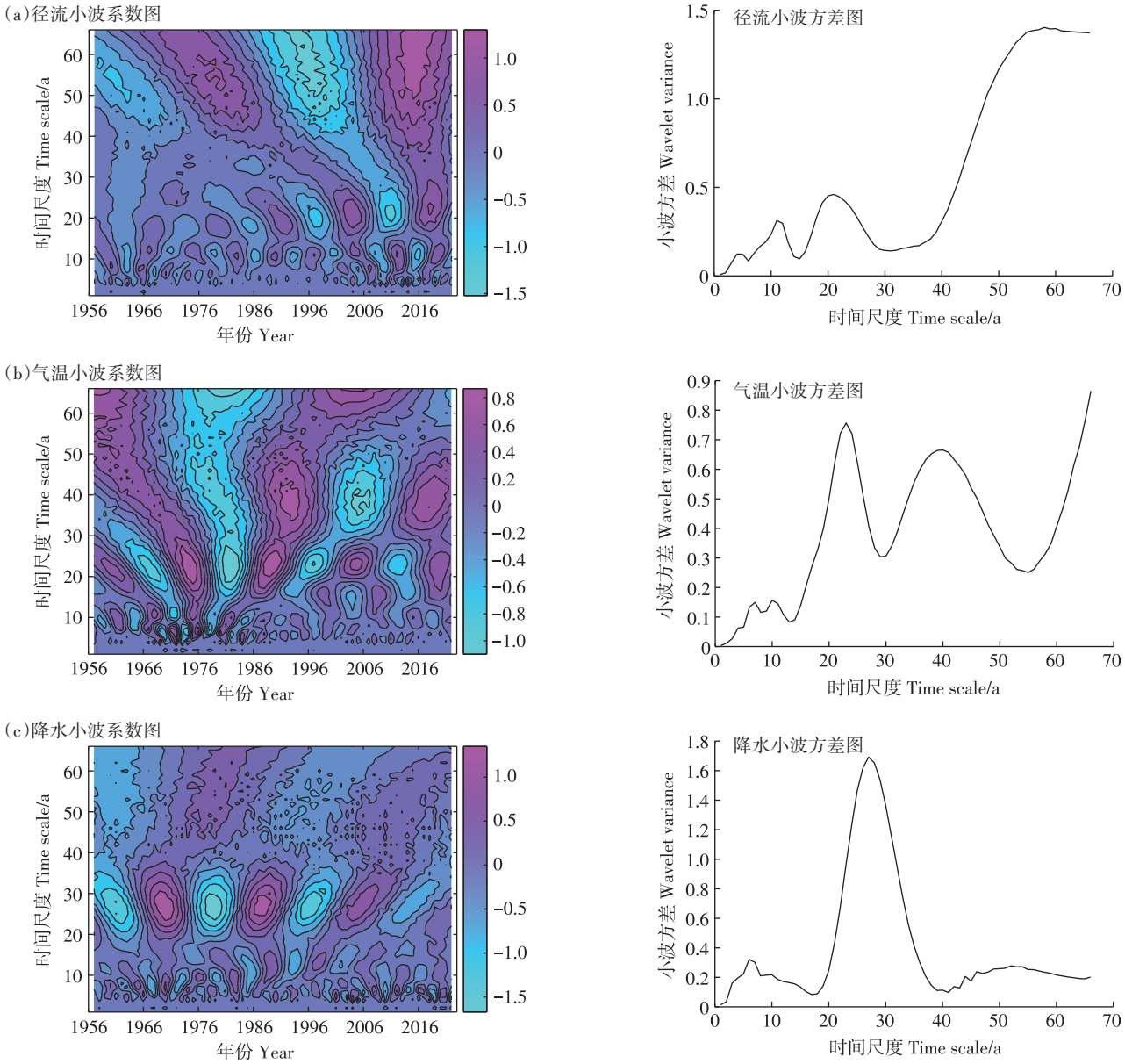


图3 车尔臣河径流、气温及降水小波分析

Figure 3 Wavelet analysis of runoff, temperature and precipitation in the Qarqan River

研究分析显示流域内气温升高导致源流冰雪融化加速,从而增加了径流。例如,在春季,随着气温回升,高山冰川和积雪开始融化,为河流提供了丰富水源,形成春汛。同时,降水也是车尔臣河径流的主要来源,降水强度越大、持续时间越长,形成的径流量就越大。由于降水在年内分布不均,因此往往会在强降雨后形成短暂的洪流,造成径流的年内剧烈变化。径流与气温、降水之间存在着复杂的非线性关系,相互影响、相互作用,共同构成了流域水文循环系统。深入研究它们之间的相关性,对于水资源管理、防洪抗旱、气候变化研究等都具有重要的意义。

3 流域植被生态需水分析

3.1 流域土地利用/覆被变化

基于流域在1990、2000、2010年和2020年的Landsat-TM影像数据(分辨率为30 m),对这4个年份的影像数据进行人工解译,从而计算出土地利用/覆被面积的变化(表8)。1990—2020年,车尔臣河流域土地利用覆被变化显著。耕地、水域和居民工矿用地面积呈明显增加趋势,与1990年相比,2020年分别增加237.42%、269.52%、195.77%,面积分别增加了363.10、382.38、17.41 km^2;其中耕地、居民工矿用地面

表8 车尔臣河流域1990—2020年土地利用/覆被面积变化

Table 8 Changes in land use/cover area in the Qarqan River basin(1990—2020)

土地利用/覆被类型 Land use/Cover type	面积 Area/km²				变化幅度 Change magnitude/%			
	1990年	2000年	2010年	2020年	1990—2000年	2000—2010年	2010—2020年	1990—2020年
耕地	152.93	301.68	386.42	516.02	97.27	28.09	33.54	237.43
有林地	0.18	0.18	0.70	78.95	0	288.65	11 157.56	43 652.87
疏林地	281.33	313.12	313.05	182.76	11.30	−0.02	−41.62	−35.03
灌木林地	185.82	193.86	192.32	310.99	4.33	−0.79	61.70	67.36
高覆盖草地	1 488.65	1 182.88	1 140.94	1 113.83	−20.54	−3.55	−2.38	−25.18
中覆盖草地	817.21	934.31	918.62	834.96	14.33	−1.68	−9.11	2.17
低覆盖草地	3 383.13	3 400.17	3 353.93	3 428.23	0.50	−1.36	2.22	1.33
水域	141.88	602.36	615.97	524.26	324.57	2.26	−14.89	269.52
居民工矿用地	8.89	9.92	11.93	26.31	11.56	20.23	120.50	195.77
未利用地	18 301.25	17 822.73	17 823.36	17 754.78	−2.61	0	−0.38	−2.99

积呈现逐渐增加趋势，耕地面积1990—2000年、2000—2010年、2010—2020年分别增加97.27%、28.09%、33.54%，面积分别增加了148.75、84.74、129.61 km²；居民工矿用地面积1990—2000年、2000—2010年、2010—2020年分别增加11.56%、20.23%、120.50%，增加面积1.03、2.01、14.38 km²。有林地、灌木林地面积呈现上升趋势，2020年有林地、灌木林地面积分别增加了78.76、125.17 km²，疏林地面积减少了98.56 km²。高覆盖草地面积急剧减少，减少了374.82 km²，降幅高达25.18%；中覆盖草地和低覆盖草地面积分别小幅增加17.75 km²和45.10 km²，增幅分别为2.17%和1.33%。未利用地面积整体变化不大，仅微幅减少了2.99%。在遥感影像中，车尔臣河流域天然植被稀少，大多数为未利用地，这种变化与耕地面积的持续扩大有关，农业用水量不断增加，生态用水的消耗量不断加大，导致流域生态环境退化。由此可见，整个流域耕地与水域面积的增长，抢占了生态用水，使得天然植被覆盖度降低，同时也导致未利用地面积减小。

3.2 流域生态需水量分析

3.2.1 生态需水量计算范围

依据研究区植被覆盖度调查结果，植被生态需水量计算范围划分为重点保护区、敏感保护区、重点修复区和一般修复区(表9)。其中，保护区是指归一化植被指数(NDVI)处于稳定状态的区域，修复区是指NDVI处于非稳定状态(增长或下降)的区域；敏感保护区和一般修复区植被覆盖度小于30%，植被稀疏，多为疏林地、灌木林地和草地为主，主要分布在农田边缘和沙漠边缘。

表9 车尔臣河流域生态需水量计算范围

Table 9 Calculation scope of ecological water demand in the Qarqan River Basin

分区 Zoning		植被变化模式 Vegetation change pattern	未来趋势 Future trend	植被盖度 Vegetation coverage
保护区	重点保护区	无趋势	无趋势	NDVI≥0.3
		对数型	高度稳定	NDVI≥0.3
		Logistic型	高度稳定	NDVI≥0.3
	敏感保护区	无趋势	无趋势	NDVI≤0.3
		对数型	高度稳定	NDVI≤0.3
		Logistic型	高度稳定	NDVI≤0.3
修复区	重点修复区1	对数型	低度稳定	NDVI≥0.3
		Logistic型	低度稳定	NDVI≥0.3
	重点修复区2	线性	减少趋势	NDVI≥0.3
		指数型	减少趋势	NDVI≥0.3
	重点修复区3	线性	增长趋势	NDVI≥0.3
		指数型	增加趋势	NDVI≥0.3
	一般修复区	对数型	低度稳定	0.03≤NDVI≤0.3
		Logistic型	低度稳定	0.03≤NDVI≤0.3
		线性	减少趋势	0.03≤NDVI≤0.3
		线性	增长趋势	0.03≤NDVI≤0.3
		指数型	减少趋势	0.03≤NDVI≤0.3
		指数型	增加趋势	0.03≤NDVI≤0.3

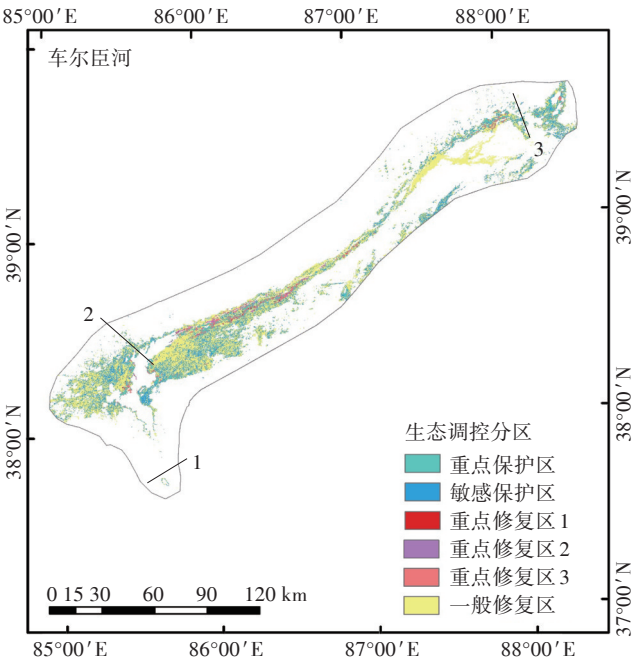
根据天然植被现状及发展趋势，计算植被生态需水量，主要包括基本生态需水量与修复生态需水量两部分。其中天然植被基本生态需水量是指维持当前流域内天然植被正常生长所需水量，可实现天然植被不会产生大范围严重退化；天然植被修复生态需水量则指在满足基本需水量的基础上，实现流域内天然植被正常生长并逐步恢复退化区植被所需的水量，体现

更高的水量保障要求。基于该思路,完成了流域天然植被生态保护及修复分区(图4),结合流域土地利用/覆被、植被覆盖度及典型植被生育期内蒸散发实测值数据(表10),最终计算出天然植被生态需水量。

3.2.2 植被生态需水量计算

根据植被生态需水计算模型,结合不同修复区恢复年限,以2020年为现状年,以2035年为规划水平年,计算得到车尔臣河流域生态需水量为3.58亿m^3,其中:车尔臣河大石门水库–塔提让镇河段,河岸带生态保护及修复水量为2.24亿m^3(保护水量为0.52亿m^3,修复水量为1.72亿m^3);塔提让镇–台特玛湖河段,河岸带生态保护及修复水量为1.34亿m^3(保护水量为0.41亿m^3,修复水量为0.93亿m^3)。

由前述计算可知,车尔臣河多年平均径流量为8.966亿m^3,生态保护及修复水量为3.58亿m^3,现状年流域地表水"三条红线"用水指标为2.53亿m^3,地下水"三条红线"用水指标为0.42亿m^3。经水量平衡计算,扣除流域生产与植被生态需水,多年平均情况下(按照河流多年来水频率50%估算)车尔臣河尚有2.856亿m^3水量未利用,考虑车尔臣河径流未来将呈现每10 a 0.057 9亿m^3的增长趋势,表明流域植被生态需水水量是完全有保证的。



1.大石门水库断面Dashimen Reservoir section,2.塔提让镇断面Tatirang Town section,3.台特玛湖断面Taitema Lake section

图4 车尔臣河流域生态保护与修复区空间分布

Figure 4 Spatial distribution of ecological protection and restoration areas in the Qarqan River Basin

4 讨论

车尔臣河发源于昆仑山山脉,其主要补给源包括冰川融水、地下水与大气降水,且以冰雪融水补给为主,径流年际变化较小(变差系数为0.329)。通过计算可知,在全球气候变暖的背景下,车尔臣河平原区气温正在以每10 a 0.3 ℃的速度上升,气温的上升必将导致源流区冰川融化速度加快。达伟等[3]的研究表明,气温和降水共同控制着车尔臣河流域水文过程的变化,未来车尔臣河径流将呈现显著增加趋势,水文干旱事件发生频率也会同步增加,修筑控制性的水利枢纽工程是应对流域水旱灾害的重要途径。作为以冰川融水为主要补给的河流,如何做好源流区冰川动态变化监测以及应对气候变化所导致的流域极端降水事件,提升气候变化应对韧性,妥善处理极端水文事件对流域生产、生活造成的不确定性影响,已经成为当务之急。

车尔臣河流域气候干旱,生态环境脆弱,经济基础薄弱,水利工程设施不完善。河流沿岸天然植被距河道可达5~40 km,过渡带分布区介于人工绿洲与沙漠之间,河流很难与其产生水力联系。Zhao等[30]的研究表明,车尔臣河尾闾湖泊台特玛湖的水面面积不宜过大,应当控制入湖水量,使台特玛湖水面维持在180 km^2以内,多余水量可通过水利工程调控用于上、中游生产生态用水。车尔臣河作为塔里木盆地东南缘河流廊道,为流域生态保护修复提供了水量基础,但如何通过工程措施调度该部分水量引入河岸带与过渡带,实现生态保护与修复的人工干预,提升水资源利用效率,这也是下一步需要思考解决的问题。

表10 车尔臣河流域典型植被生育期内蒸散发实测值

Table 10 Calculation scope of ecological water demand in the Qarqan River Basin

典型植被 Typical vegetation	计算方法 Calculation method	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 April	10月 October	合计 Total
胡杨	涡度仪实测/mm	62.44	101.89	233.79	285.59	215.07	178.85	120.34	1 197.97
柽柳	波文比实测/mm	33.74	93.06	144.52	211.24	144.04	72.23	63.85	762.68
芦苇	波文比实测/mm	45.12	243.33	304.4	285.43	344.21	273.57	90.68	1 586.74

5 结论

（1）车尔臣河流域径流、气温显著增加，降水变化不显著；径流和气温的突变年分别为2000年和1997年，降水无明确突变点。三者赫斯特指数均>0.5，表明未来径流、气温将持续上升，降水变化仍不确定。径流主要变化周期为21、12、4 a，气温主要变化周期为7、11、25 a，降水主要变化周期为6、28 a。

（2）斯皮尔曼分析显示，研究区径流与气温相关系数为0.371（极显著），与降水相关系数为0.317（显著），气温、降水均与径流变化密切相关。

（3）研究区生态需水量为3.58亿m^3：车尔臣河大石门水库-塔提让镇河段河岸带为2.24亿m^3（基本0.52亿m^3、修复1.72亿m^3）；塔提让镇-台特玛湖河段河岸带为1.34亿m^3（基本0.41亿m^3、修复0.93亿m^3）。

参考文献：

[1] 钱立鹏, 刘长征, 易佳昕. 玛纳斯河径流演变的驱动因素研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(11): 31-34. QIAN L P, LIU C Z, YI J X. Study on the driving factors of river flow evolution of the Manas River[J]. *Yellow River*, 2022, 44(11): 31-34.

[2] 刘柏君, 贺丽媛, 李红艳. 干旱区河流径流演变及成因分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(9): 40-43. LIU B J, HE L Y, LI H Y. Runoff variation and its induced factors of the river in arid area[J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(9): 40-43.

[3] 达伟, 王书峰, 沈永平, 等. 1957—2019年昆仑山北麓车尔臣河流域水文情势及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 46-55. DA W, WANG S F, SHEN Y P, et al. Hydrological response to the climatic changes in the Qarqan River basin at the northern slope of Kunlun Mountains during 1957—2019[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(1): 46-55.

[4] 吕雯改, 江宇威, 马兴羽, 等. 昆仑山北坡车尔臣河流域平原区地表水和地下水水化学特征[J]. 干旱区地理, 2024, 47(10): 1617-1627. LÜ W G, JIANG Y W, MA X Y, et al. Chemical characteristics of surface water and groundwater in plain area of the Qargan River basin on the north slope of Kunlun Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(10): 1617-1627.

[5] 高福翔, 姜凤, 周金龙, 等. 新疆车尔臣河流域地表水与地下水化学特征及其硼来源的初步分析[J]. 环境科学, 2024, 45(12): 7146-7156. GAO F X, JIANG F, ZHOU J L, et al. Preliminary analysis of the chemical characteristics and boron sources of surface water and groundwater in the Cherchen River basin of Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(12): 7146-7156.

[6] 李军, 欧阳宏涛, 周金龙. 新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素[J]. 环境科学, 2024, 45(1): 207-217. LI J, OUYANG H T, ZHOU J L. Controlling factors of groundwater salinization and pollution in the oasis zone of the Cherchen River basin of Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(1): 207-217.

[7] 艾克热木·阿布拉, 阿布都米吉提·阿布力克木, 安外尔·艾则孜, 等. 塔里木河和车尔臣河对台特玛-康拉克湖水域面积变化影响分析[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(1): 52-57. AIKEREMU ABULA, ABDIMIJIT ABLEKIM, ANWAR EZIZ, et al. Influence of Tarim River and Qarqan River on water area change of Tetima-Kanglayka Lakes[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(1): 52-57.

[8] AILI A, XU H L, WAHEED A, et al. Unveiling the benefits of artificial ecological measures: water conveyance improves the water quality of the Taitema Lake, northwestern China[J]. *Hydrology*, 2024, 11(8): 129.

[9] GUO W J, JIAO A Y, WANG W Q, et al. Change and driving factor analysis of eco-environment of Typical Lakes in arid areas[J]. *Water*, 2023, 15(11): 2107.

[10] YAN W, MA X F, LIU Y, et al. Ecological assessment of Terminal Lake basins in central Asia under changing landscape patterns[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4842

[11] ZUO T F, CHEN Y N, DING J L. Research on vegetation coverage dynamics and prediction in the Taitema Lake region[J]. *Water*, 2022, 14(5): 725.

[12] YE Z X, CHEN S F, ZHANG Q F, et al. Ecological water demand of Taitema Lake in the lower reaches of the Tarim River and the Cherchen River[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(4): 832.

[13] YANG C D, XU M, KANG S C, et al. Streamflow abrupt change and the driving factors in glacierized basins of Tarim basin, northwest China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2024, 15(1): 75-89.

[14] YANG Y H, ZHOU H H, YE Z X, et al. Estimation of *Populus euphratica* forest leaf litterfall and time variation of nutrient in leaf litter during decomposition along the main channel of the Tarim River, China[J]. *Water*, 2021, 13(18): 2514.

[15] JIANG N, ZHANG Q Q, ZHANG S C, et al. Spatial and temporal evolutions of vegetation coverage in the Tarim River basin and their responses to phenology[J]. *CATENA*, 2022, 217: 106489.

[16] SONG J, BETZ F, AISHAN T, et al. Impact of water supply on the restoration of the severely damaged riparian plants along the Tarim River in Xinjiang, northwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111570.

[17] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.

[18] WANG F, CHEN Y N, LI Z, et al. Developing a long short-term memory (LSTM) - based model for reconstructing terrestrial water storage variations from 1982 to 2016 in the Tarim River basin, northwest China[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 889.

[19] 李继清, 张鹏, 赵莹玉, 等. 变化环境下近60年西江流域径流时空演变特征[J]. 湖泊科学, 2023, 35(3): 1033-1048. LI J Q, ZHANG P, ZHAO Y Y, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of runoff in the Xijiang River basin in recent 60 years under the changing environment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 1033-1048.

[20] 鲁帆, 江明, 蒋云钟, 等. 变化环境下海河流域天然河川径流丰枯

概率演变规律[J]. 水科学进展, 2023, 34(1):12-20. LU F, JIANG M, JIANG Y Z, et al. Evolution law of wet and dry probability of natural river runoff in Haihe River basin under changing environment [J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(1):12-20.

[21] 陈红光, 孟凡浩, 萨楚拉, 等. 北方牧区草原内陆河流域径流演变特征及其驱动因素分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(1):39-50. CHEN H G, MENG F H, SA C L, et al. Analysis of the characteristics of runoff evolution and its driving factors in a typical inland river basin in arid regions[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(1):39-50.

[22] 尹德超, 王旭清, 王雨山, 等. 近60年来白洋淀流域河川径流演变及湿地生态响应[J]. 湖泊科学, 2022, 34(6):2122-2133. YIN D C, WANG X Q, WANG Y S, et al. Runoff evolution and wetland ecological response in Lake Baiyangdian basin in recent 60 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(6):2122-2133.

[23] 栗士棋, 杜付然, 程芳芳, 等. 近60 a河南省河川径流演变特征研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(6):38-43. LI S Q, DU F R, CHENG F F, et al. Evolution of river runoff in the Henan Province during the recent 60 years[J]. *Yellow River*, 2022, 44(6):38-43.

[24] 徐宗学, 班春广, 张瑞. 雅鲁藏布江流域径流演变规律与归因分析[J]. 水科学进展, 2022, 33(4):519-530. XU Z X, BAN C G, ZHANG R. Evolution laws and attribution analysis in the Yarlung Zangbo River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(4):519-530.

[25] 陈沛源, 俞巧, 李金文, 等. 1957—2016年泾河干流径流量变化趋势分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(8):22-27. CHEN P Y, YU Q, LI J W, et al. Changes of runoff in the Jinghe River basin in 1957—2016 [J]. *Yellow River*, 2022, 44(8):22-27.

[26] 雷逸甦, 粟晓玲, 褚江东, 等. 基于生态系统恢复力的干旱区植被生态需水阈值计算方法与应用[J]. 湖泊科学, 2024, 36(2):645-656. LEI Y S, SU X L, CHU J D, et al. Calculation method and application of ecological water demand threshold for vegetation in arid areas based on ecosystem resilience[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(2):645-656.

[27] 张丹, 鲍军, 李想, 等. 考虑河流生态需水约束的调水规模研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5):917-929. ZHANG D, BAO J, LI X, et al. Study on the water transfer scale considering the constraint of river ecological water demand[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(5):917-929.

[28] 武连洲, 白涛, 黄强. 基于RVA阈值区间集成的河道内生态需水计算与应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(6):168-174. WU L Z, BAI T, HUANG Q. Integrated calculation of ecological water demand of rivers based on RVA threshold interval and its application[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(6):168-174.

[29] 马佳丽, 刘东伟, 王杰, 等. 基于长时间序列(1975—2020年)生态耗水的岱海动态生态需水分析[J]. 湖泊科学, 2022, 34(1):207-219. MA J L, LIU D W, WANG J, et al. Dynamic ecological water demand based on long-term ecological water consumption in Lake Daihai, 1975—2020[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(1):207-219.

[30] ZHAO X F, XU H L, ZHANG P. Changes of lake area, groundwater level and vegetation under the influence of ecological water conveyance: a case study of the tail lake of Tarim River in China[J]. *Water*, 2022, 14(7):1026.

(责任编辑:潘淑君)