

塔里木河流域汛期地表径流变化趋势和预测分析

陈保留

(塔里木河流域干流管理局, 新疆 库尔勒 841000)

摘 要: 基于塔里木河流域三源流和干流 1957–2008 年实测月地表径流数据, 运用 Mann–Kendall 非参数检验和小波变换等方法, 探究三源流和干流汛期地表径流变化趋势, 并建立周期性叠加趋势模型预测其 2009–2025 年地表径流量特征和变化趋势。结果表明: 近 50 多年来, 塔里木河源流 7、8、9 月地表径流均呈增加趋势, 干流 7、8、9 月地表径流均呈减少趋势, 反映出源流用水量持续增加挤占干流水资源量。根据预测, 塔里木河三源流 2009–2025 年, 7 月和 8 月多年平均地表径流量属平偏丰水期, 9 月属偏丰水期; 7 月和 9 月地表径流量呈增加趋势, 8 月地表径流量呈下降趋势。塔里木河干流 2009–2025 年, 7 月多年平均地表径流量属平偏丰水期, 8 月和 9 月属偏丰水期; 7 月和 8 月地表径流量呈增加趋势, 9 月地表径流量无明显增大或减小趋势。

关键词: 汛期; 地表径流; 变化趋势; 周期性; 径流预测; 塔里木河

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)05-0070-07

Change trend and forecast of surface runoff in Tarim river basin in flood season

CHEN Baoliu

(Tarim River Basin Management Bureau, Korla 841000, China)

Abstract: Based on the data of measured monthly runoff from the source flows and the main stream of Tarim river from 1957 to 2008, the article analyzed the variation tendency of runoff in the flood season and predicted the possible runoff of source flows and the main stream of Tarim river from 2009 to 2025 with Mann–Kendall nonparametric test and wavelet transformation. In the recent half century, surface runoff at source flows of Tarim River increased from July to September, and surface runoff of main stream of Tarim river decreased in the same period, which reflected that the increasing water consumption of the source flows took up the water resource in the main stream of Tarim River. The prediction shows that during the period of 2009 to 2025, the annual mean surface runoff of the source flows in Tarim River in July and August will belong to flat partial wet period, and that in September will belong to partial wet period; the surface runoff shows an increasing trend in July and September, and shows a decreasing trend in August. From 2009 to 2025, the annual mean surface runoff of the main streams in Tarim River in July belongs to flat partial wet period, and that in August and September belongs to partial wet period; the surface runoff shows an increasing trend in July and August, but that in September don't increase obviously or shows the trend of decrease.

Key words: flood season; surface runoff; variation trend; periodicity; forecast of runoff; Tarim River basin

塔里木河是我国最大的内陆生态河流, 对维持流域整体生态安全和经济社会持续发展具有重要意义。20 世纪 50 年代以来, 流域大规模的水土资源

开发, 一方面促进了流域社会经济的快速发展, 但另一方面大量生态水被挤占, 造成流域生态环境急剧退化^[1]。2000 年以来, 国务院和新疆维吾尔自治区

收稿日期: 2015-03-21; 修回日期: 2015-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171427、31370551、31400466、41471099)

作者简介: 陈保留(1969-), 男, 新疆库尔勒人, 本科, 工程师, 主要从事流域水资源管理工作。

人民政府相继出台政策措施,在全流域推行最严格水资源管理制度,制定流域不同来水频率水量分配方案,严控流域农业灌溉用水总量^[2]。流域已有的研究中,对年际间径流变化特征^[3]、趋势^[4]、周期性^[5],径流受气候因子^[6]、人类活动的影响^[7],流域生态需水量^[8],流域水资源承载力^[9]等进行大量分析。在塔里木河流域,相同来水量年份年内月径流过程差异极大,因此强化流域月径流趋势和预测分析对于指导流域水量分配显得尤为重要。7、8、9 月是流域年内汛期,也是农业灌溉高峰期,同时也是流域建群种胡杨等落种繁育期。因此,该时段的水情预报对于强化流域水资源管理,维持流域的生态系统稳定具有指导意义。本文基于 1957 - 2008 年流域汛期 7、8、9 月径流资料,借助 Mann - Kendall 单调性检验对源流和干流各月径流变化趋势进行分析;通过建立周期性叠加趋势模型,预测源流 2009 - 2025 年地表径流量及变化趋势,并通过干流与源流地表径流的定量关系预测干流相应时段地表径流量及变化趋势,以期为塔里木河流域水资源分配提供决策依据。

1 研究区概况

塔里木河流域是环塔里木盆地的阿克苏河、喀什噶尔河、叶尔羌河、和田河、开都 - 孔雀河、迪那河、渭干河、库车河、克里雅河和车尔臣河等九大水系 144 条河流的总称。从最长源流叶尔羌河上游的支流拉斯开木河至尾间台特玛湖全长 2 437 km,流

域总面积 102.86 万 km² (图 1)。流域多年平均降水深 111.1 mm,水面蒸发量 1 125 ~ 1 600 mm (折算为 E601 蒸发器)。

流域多年平均地表径流量为 398.3 亿 m³,主要由源流山区冰川降雪补给。目前与塔里木河干流常年有地表水联系的和田河、叶尔羌河和阿克苏河 3 条源流多年平均地表径流量为 194.1 亿 m³,汛期 7、8、9 月多年平均地表径流量为 129.3 亿 m³,占全年径流量的 66.7%。塔里木河干流自身不产流,水量均来自源流补给,干流上游阿拉尔多年平均地表径流量为 45.3 亿 m³,汛期 7、8、9 月多年平均地表径流量为 31.8 亿 m³,占全年径流量的 70.2%。

2 资料来源及分析方法

2.1 资料来源

降水或融雪强度一旦超过下渗强度,超过的水量可能暂时留于地表,当地表贮留量达到一定限度时,即向低处流动,成为地表水而汇入溪流,这一过程称为地表径流,而此过程的水量称为地表径流量。

塔里木河三源流地表径流量是指阿克苏河沙里桂兰克、协合拉;叶尔羌河喀群,提孜那甫河江卡;和田河乌鲁瓦提、同古孜洛克等 6 个出山口水文站实测径流量之和。塔里木河干流自身不产流,水量主要由三源流补给,干流地表径流量是指干流上游阿拉尔水文站实测的径流量(图 1)。

塔里木河各源流和干流历年月地表径流量资料均由塔里木河流域管理局提供。

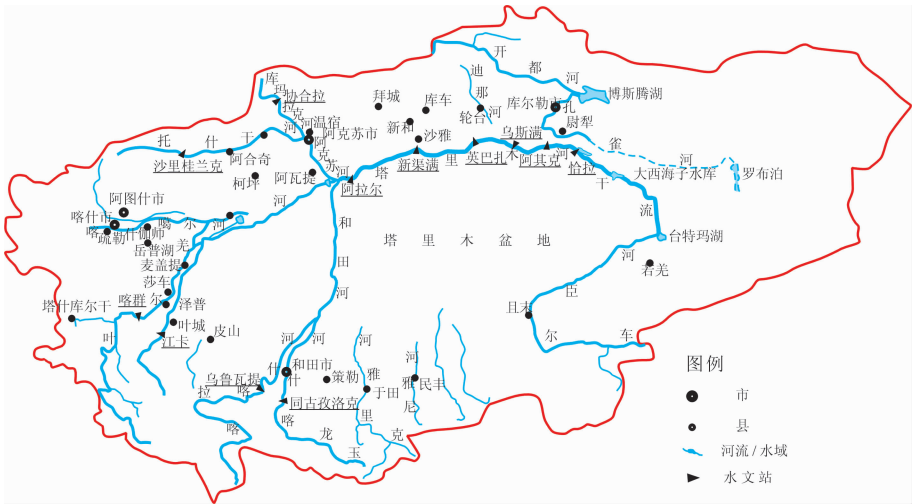


图 1 塔里木河流域水系分布示意图

2.2 分析方法

在径流趋势和预测分析中,文中采用的非参数 Mann - Kendall 趋势检验方法^[10] 和小波分析方

法^[11] 比较普遍,在此不做详细介绍。

2.2.1 周期性叠加趋势模型 若时间序列数据具有周期性和趋势性,则可以利用周期性叠加趋势模

型进行预测。方法如下:

如果在时段 $T + \tau$ 的期望值($\mu_{T+\tau}$) 为:

$$\mu_{T+\tau} = \alpha_T + b_\tau + \delta_{T+\tau} \tag{1}$$

式中: a_T 是时段 T 的平均值; b_τ 是该时段的斜率; $\delta_{T+\tau}$ 是在时段 $T + \tau$ 的周期增量。

利用历史资料建立预报模型分两步:第 1 步, 先根据完整周期的时间序列资料估计模型有关参数, 并对未来时段进行预测;第 2 步, 用余下不够一个完整周期的数据更新预报模型, 并做相应的预测。由于计算过程复杂, 本文利用 DPS 统计软件进行周期性叠加趋势模型的分析预测^[12]。

2.2.2 预报精度的评价 参考水文情报预报规范 (GB/T 22482 - 2008) 洪水期和中长期预报精度评价方法: 当一次预报的误差小于许可误差时, 视为合格预报。合格预报次数与预报总次数的百分数为合格率, 表示多次预报总体的精度水平。预报合格率 (QR) 计算公式如下:

$$QR = \frac{n}{m} \times 100\% \tag{2}$$

式中: n 为合格预报次数, 预报值在实测值 20% 的许可误差范围内, 即视为合格预报; m 为预报总次数。

预报项目的精度按合格率的大小分为 3 个等级见表 1。

表 1 预报项目精度等级表			
精度等级	甲	乙	丙
合格率 QR/%	QR≥85	85>QR≥70	70>QR≥60

预报精度达到甲、乙两个等级者, 可用于发布正式预报; 精度达到丙级者, 可用于参考性预报; 精度丙级以下者, 只能用于参考性估报。

3 塔里木河源流及干流汛期径流趋势分析

根据塔里木河源流及干流 1957 - 2008 年汛期 7、8、9 月经流量变化过程线, 采用线性回归方程拟合各月经流量变化趋势(图 2)。

从图 2 可以看出, 源流和干流年际间 7、8、9 月地表径流量均呈波动变化。从拟合趋势线性方程斜率正负来看, 源流各月均为正值, 干流均为负值, 说明总体上源流来水量呈增加趋势, 干流来水量呈减少趋势。

采用非参数 Mann - Kendall 单调趋势检验, 对塔里木河源流和干流 7、8、9 月地表径流量变化趋势进行检验(表 2)。

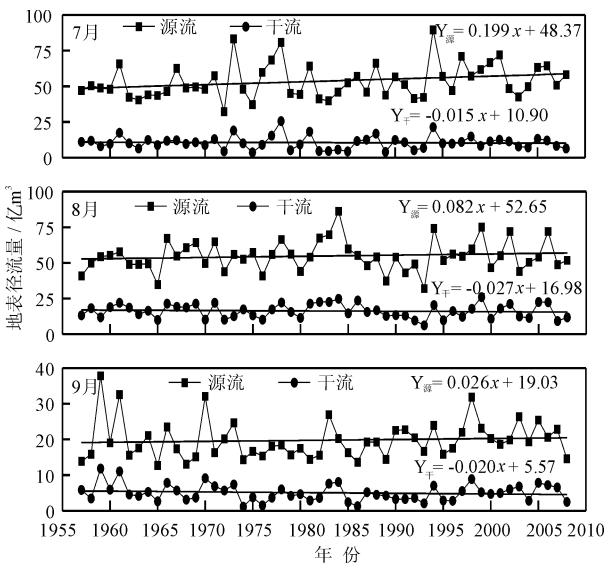


图 2 塔里木河源流和干流 7、8、9 月地表径流变化趋势

经检验, 源流 7、8、9 月经流量均呈不显著的增加趋势, 年增加速率分别为 0.18 亿、0.05 亿和 0.08 亿 m³。干流 7、8、9 月经流量均呈不显著的减少趋势, 年减少速率分别为 0.01 亿、0.03 亿和 0.01 亿 m³。

汛期 7、8、9 月源流地表径流均表现为增加趋势, 干流地表径流均呈下降趋势, 反映出近 50 多年以来源流区耗用水量呈增加趋势。其最主要原因可能与源流区农业灌溉面积扩大和粗放的引水灌溉方式, 超引流域有限的水资源量有关。干流 7、8、9 月地表径流均呈减少趋势, 导致干流生态环境持续退化, 尤其是干流下游大西海子水库以下 320 km 河道在 2000 年以前断流近 30 年。2000 年以来, 通过塔里木河流域近期综合治理各项措施, 塔河干流下游生态环境逐步得到恢复, 整个流域生态恶化趋势有所减缓, 但总体而言流域生态系统仍然非常脆弱。从分析来看, 源流区挤占干流水资源现象仍十分严重。

表 2 塔里木河源流和干流 7、8、9 月地表径流变化趋势检验						
月份	源/干流	平均值/ 亿 m ³	Z ₀	β	显著性	趋势
7 月	源流	53.64	1.94	0.18	不显著	增加
	干流	10.52	-0.17	-0.01	不显著	减少
8 月	源流	54.82	0.48	0.05	不显著	增加
	干流	16.26	-0.59	-0.03	不显著	减少
9 月	源流	19.79	1.85	0.08	不显著	增加
	干流	5.05	-0.58	-0.01	不显著	减少

注: 统计变量 Z₀ > 0, 为增加趋势; Z₀ < 0, 为减小趋势, Z₀ 的绝对值大于 1.96 表明增加或减少趋势显著。β 表示时间序列变化率。

4 塔里木河源流及干流汛期径流量预测分析

塔里木河源流出口以前地表径流量受人类活动影响较小,基本可认为是天然径流量,可根据其周期性建立预测模型进行径流预测。干流水资源量受源流山区来水和源流绿洲耗用水大小的综合影响,因此对干流水资源量进行预测时,通过预测源流地表径流量和源流区耗用水量,根据二者的差值预测干流地表径流量。

4.1 塔里木河源流 7、8、9 月地表径流预测模型的建立

塔里木河流域源流地表径流量主要源于山区冰川和降雪融化,径流量大小受气候因素影响^[13]。区域的气候因素(气温、降水等)在时间尺度上具有明显的周

期变化特征,因此径流量也相应存在一定的周期性。为了构建源流 7、8、9 月径流的周期性叠加趋势模型,首先需确定源流各月地表径流的周期性(图 3)。

从图 3 可以看出,塔里木河源流 7 月地表径流存在 6 和 17 a 的主周期;8 月存在 6 和 14 a 的主周期;9 月存在 4、9、12 和 20 a 的主周期。兼顾预测结果准确性和合理性的时间尺度,分别选取 7、8、9 月地表径流的 17、14 和 12 a 主周期,并利用上述主周期处的小波系数值,通过非线性拟合构建各月周期性叠加趋势模型(表 3)。

将 1957–2008 年 7、8、9 月径流数据和已确定的主周期,分别带入表 2 中相应周期性叠加趋势模型,得到以下各月预报模型及有关参数(表 4)。

根据预报模型计算得到源流 7、8、9 月份径流的拟合值,并将其与实际值进行对照(图 4)。

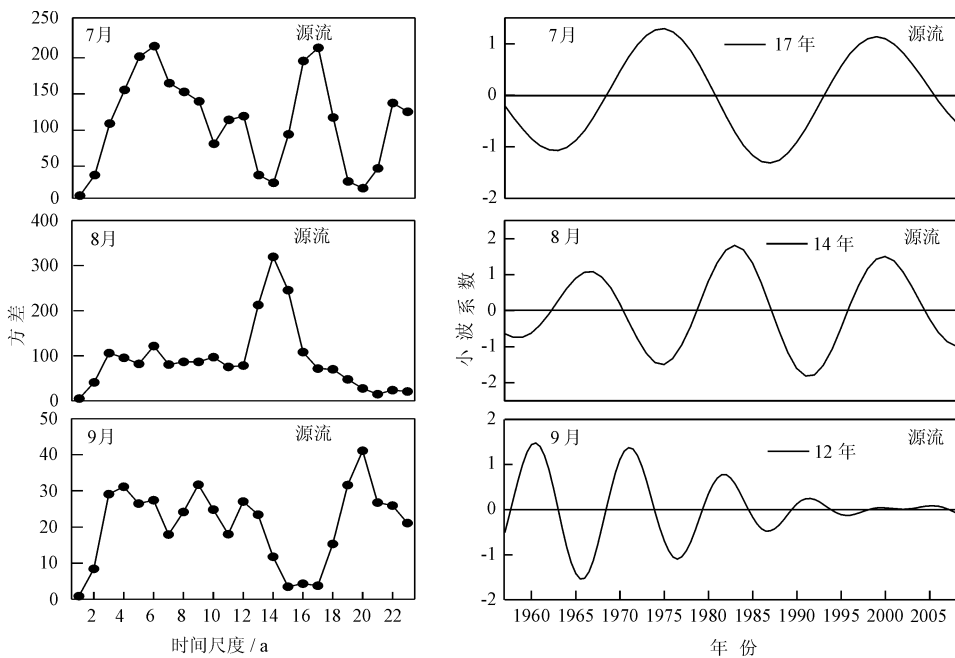


图 3 塔里木河源流 7、8、9 月地表径流周期性分析

表 3 塔里木河源流 7、8、9 月份径流量周期性叠加趋势模型

月份	周期/a	周期性叠加趋势模型	R^2	F 值	P 值
7	17	$y = 0.9926\sin(0.2934x + 6.28) + 0.0446$	0.69	35.80	< 0.0001
8	14	$y = 1.3545\sin(0.3905x + 6.28) + 0.0851$	0.88	117.95	< 0.0001
9	12	$y = 0.7404\sin(0.5873x + 6.28) + 0.0195$	0.60	24.28	< 0.0001

表 4 塔里木河源流 7、8、9 月份径流量预报模型

月份	α	β	γ	A	B	预报模型
7	0.01000000	0.01000000	0.01000000	58.08509036	0.15320528	$X(\tau) = 58.08509036 + 0.15320528\tau + d_{\tau+i}$
8	0.01000000	0.01000000	0.01000000	54.76313404	-0.01907565	$X(\tau) = 54.76313404 - 0.01907565\tau + d_{\tau+i}$
9	0.15377843	0.01000000	0.01000000	24.16471199	0.06407399	$X(\tau) = 24.16471199 + 0.06407399\tau + d_{\tau+i}$

注: α 为周期均值平滑参数; β 为周期内斜率平滑参数; γ 为周期增量平滑参数; A 为周期均值; B 为斜率。

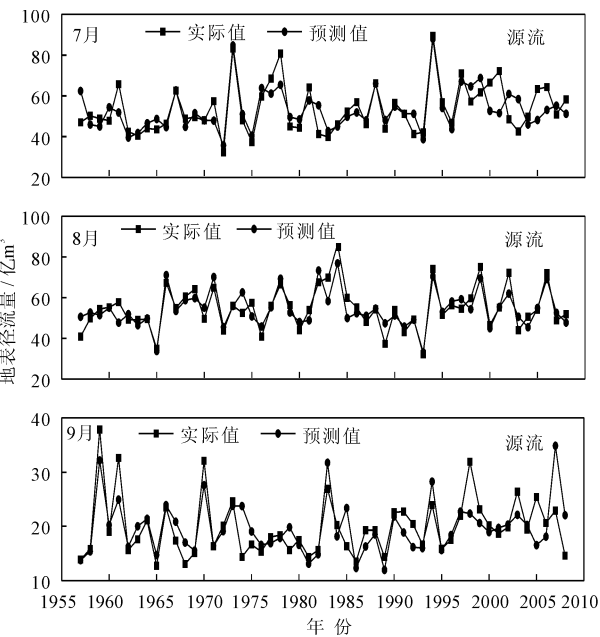


图4 1957–2008 年塔里木河源流 7、8、9 月地表径流过程模拟

在图 4 中,根据塔里木河源流 7、8、9 月径流实测值与拟合值之间的差值计算,得出模型的平均百分拟合误差分别为 8.2%、7.5% 和 11.03%。

根据预报精度的评价方法,分别计算源流 7、8、9 月预报合格率,并参照表 1 预报项目精度等级表对预报精度进行评级(表 5)。

精 度	月 份		
	7	8	9
合格率(QR) / %	82.7	96.2	78.8
精度等级	乙	甲	乙

由表 5 可知,塔里木河源流 7 月和 9 月径流预报精度为乙级,8 月径流预报精度为甲级,均可用于发布正式预报。

4.2 塔里木河源流区耗用水量与径流量的关联性分析

借助参数(Person 检验)、非参数(Kendall’s tau – b)关联检验,对源流区耗用水量与地表径流量之间的关联性进行分析(表 6)。

经 Person 检验和 Kendall’s tau – b 检验,源流汛

期 7、8、9 月耗用水量与地表径流量的关联系数分别大于 0.9 和 0.7,均显著相关。因此,通过建立源流区耗用水量与地表径流量间的关系模型,可推算源流不同地表径流量下的耗用水量。

月份	Pearson			Kendall’s tau – b		
	关联系数	Sig	显著性	关联系数	Sig	显著性
7	0.952	<0.0001	显著	0.772	<0.0001	显著
8	0.924	<0.0001	显著	0.734	<0.0001	显著
9	0.946	<0.0001	显著	0.724	<0.0001	显著

基于 1957–2008 年源流 7、8、9 月地表径流量与耗用水量,构建二者之间的定量关系模型(图 5)。

由图 5 可知,塔里木河源流区 7、8、9 月份耗水量与径流量回归方程判定系数(R^2)分别为 0.91、0.86 和 0.90,拟合精度较好,能够反映出源流区耗水量随源流地表径流量对应关系。

4.3 塔里木河源流和干流 7、8、9 月地表径流预测

借助 Person – III 型分布曲线,计算塔里木河源流和干流 7、8、9 月 10%、25%、50%、75% 和 90% 五种来水频率时的地表径流量(表 7)。

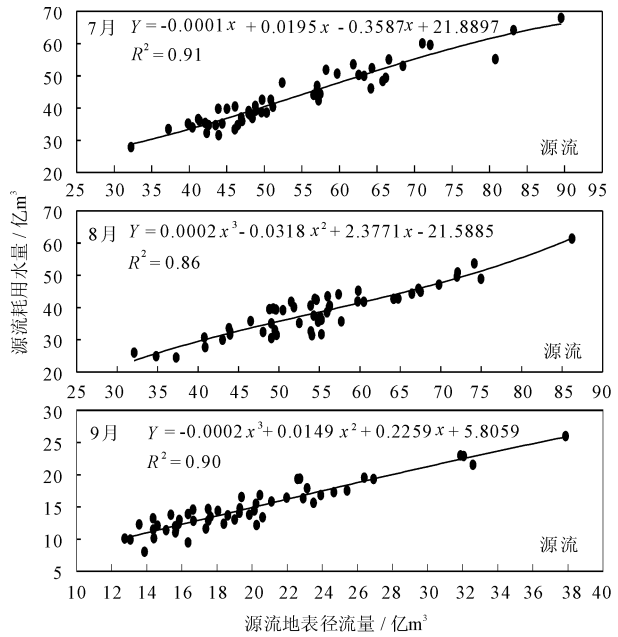


图5 塔里木河源流区耗用水量与地表径流量的关系

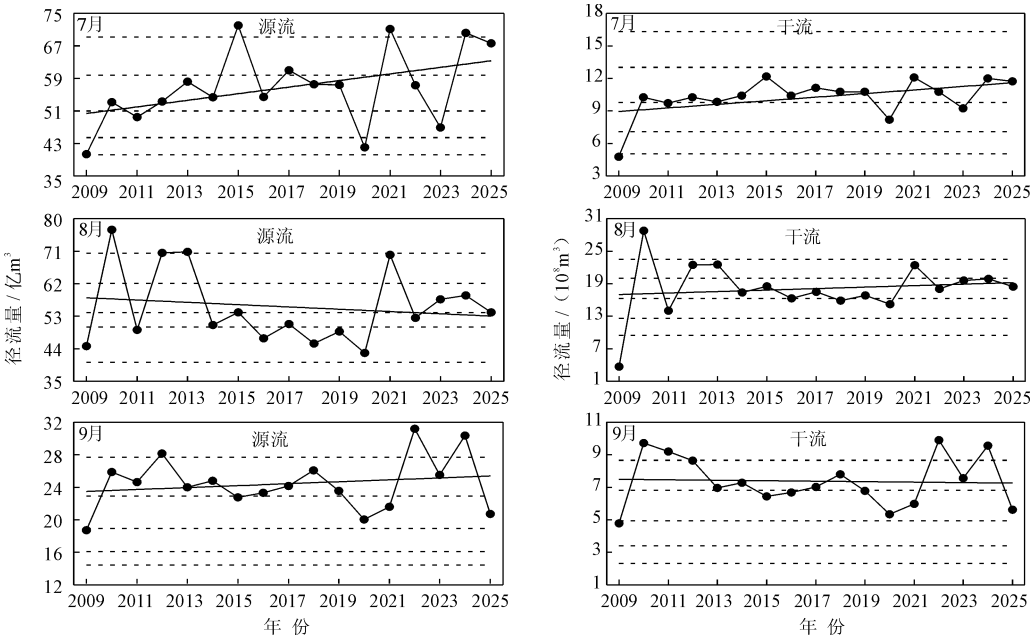
月份	10%		25%		50%		75%		90%	
	源流	干流	源流	干流	源流	干流	源流	干流	源流	干流
7	69.19	16.33	59.78	13.03	51.01	9.78	44.48	7.09	40.19	5.05
8	70.46	23.48	62.08	20.01	53.96	16.32	50.07	12.59	42.37	9.48
9	27.69	8.66	22.94	6.83	18.94	4.95	16.07	3.41	14.43	2.32

通过已建立的预测模型,预测源流和干流今后若干年 7、8、9 月可能的地表径流量,结合已划分的来水频率区间,并依据流域已确定的不同来水频率区间水量分配方案。

根据表 4 确定的源流 7、8、9 月地表径流量预测模型,计算源流 2009 – 2025 年 7、8、9 月地表径流量预测值,并绘制过程线和趋势线(图 6)。结合图 5 确定的 7、8、9 月的源流区耗用水量与地表径流回归方程,计算 2009 – 2025 年相应时段源流区间耗用水量。源流地表径流量与耗用水量差值得到干流 2009 – 2025 年 7、8、9 月地表径流量预测值,并绘制变化趋势线(图 6)。

对源流 2009 – 2025 年地表径流预测值统计可知:7 月和 8 月多年平均地表径流量分别为 56.86 亿和 55.58 亿 m^3 ,介于 25% ~ 50% 来水频率之间,属平偏丰水期;9 月多年平均地表径流量为 24.44

亿 m^3 ,介于 10% ~ 25% 来水频率之间,属偏丰水期。从变化趋势来看:7 和 9 月地表径流量呈增加趋势,7 月增加趋势更为显著;8 月地表径流量呈下降趋势。具体来看,7 月份:2015、2021 和 2024 年地表径流小于 10% 来水频率,来水特丰;2009、2020 年地表径流大于 75% 来水频率,来水偏枯,其中 2009 年接近于 90% 来水频率,来水特枯;其余年份除 2011、2023 年外,地表径流小于 50% 来水频率,即多数年份来水偏丰。8 月份:2010、2012、2013 和 2021 年地表径流接近或小于 10% 来水频率,来水特丰;2015 和 2025 年地表径流接近于 50% 来水频率;其余年份除 2023 和 2024 年,地表径流量大于 50% 来水频率,即多数年份来水偏枯,尤其 2014 – 2020 年来水持续偏枯。9 月份:除 2009 年外,其余年份地表径流均小于 50% 来水频率,其中 2012、2022 和 2024 年小于 10% 来水频率,来水特丰。



图注: 1.图中五条虚线自上而下分别是相应时段10%、25%、50%、75%和90%来水频率下的地表径流量; 2.图中实线表示变化趋势。

图 6 塔里木河源流和干流 7、8、9 月的地表径流预测

对干流 2009 – 2025 年地表径流预测值统计可知:7 月多年平均地表径流量为 10.27 亿 m^3 ,介于 25% ~ 50% 来水频率之间,属平偏丰水期。8、9 月多年平均地表径流量分别为 18.09 亿和 7.37 亿 m^3 ,介于 10% ~ 25% 来水频率之间,属偏丰水期。从变化趋势来看:7、8 月地表径流量呈增加趋势,7 月增加趋势更为显著;9 月地表径流量变化趋势基本持平。具体来看,7 月份:2009 年地表径流大于 90% 来水频率,来水特枯;2020 和 2023 年地表径流

介于 50% ~ 75% 来水频率,来水偏枯;2011 和 2013 年地表径流接近 50% 来水频率;其余年份地表径流介于 25% ~ 50% 来水频率,来水偏丰。8 月份:2009 年地表径流大于 90% 来水频率,来水特枯;2010 年地表径流小于 10% 来水频率,来水特丰;2011 年地表径流介于 50% ~ 75% 来水频率,来水偏枯;2016、2018 和 2019 年地表径流接近于 50% 来水频率;其余年份地表径流介于 10% ~ 50% 来水频率,来水偏丰。9 月份:除 2009 年外,其余年份地表径流均小

于 50% 来水频率,来水偏丰,其中 2010、2011、2012、2022 和 2024 年地表径流接近或小于 10% 来水频率,来水特丰。

4.4 塔里木河源流和干流 7、8、9 月地表径流预报精度评价

根据模型预报精度的评价方法,对比源流和干

流 2009 – 2013 年 7、8、9 月地表径流模型预报值与实际值,并对其预报合格与否进行定性评价(表 8)。根据表 8 模型预报精度评定结果可知:源流仅 2009 年 9 月预报不合格;干流 2009 年 7 和 9 月、2010 年 7 月预报不合格,说明模型预报精度较高,预报结果较可靠。

表 8 2009 – 2013 年塔里木河流域源流和干流模型预报值和实际值对照 亿 m³

月份	项目	源流					干流				
		2009	2010	2011	2012	2013	2009	2010	2011	2012	2013
7	实际	35.2	56.5	46.6	51.8	55.3	2.3	13	8.4	9.9	8.4
	预报	40.4	53.2	49.4	53.3	58.2	4.8	10.3	9.7	10.3	9.9
	是否合格	√	√	√	√	√	×	×	√	√	√
8	实际	43.6	78.9	46.6	67.0	73.7	3.9	29.7	12.7	20.3	23.6
	预报	44.7	77	49.2	70.5	70.8	3.7	28.8	14	22.5	22.5
	是否合格	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
9	实际	15.4	27.3	27.9	30.8	22.0	2.9	10.7	10.1	7.5	7.1
	预报	18.7	25.9	24.6	28.2	24.0	4.8	9.7	9.2	8.6	7
	是否合格	×	√	√	√	√	×	√	√	√	√

注:“√”表示预报合格;“×”表示预报不合格。

5 结 语

(1)塔里木河源流 7、8、9 月地表径流均呈增加趋势,其中 7 月份增加趋势最明显;干流 7、8、9 月地表径流均呈减少趋势,8 月份减少趋势最明显。

(2)根据预测,源流 2009 – 2025 年 7 月和 8 月多年平均地表径流量属平偏丰水期,9 月属偏丰水期。源流 7 和 9 月地表径流量呈增加趋势,8 月地表径流量呈下降趋势,需警惕 2014 – 2020 年 8 月来水可能持续偏枯。干流 2009 – 2025 年 7 月多年平均地表径流量属平偏丰水期,8 和 9 月属偏丰水期。干流 7 和 8 月地表径流量呈增加趋势,9 月地表径流量无明显增大或减小趋势。

参考文献:

[1] 祝向民,周海鹰,王福勇. 塔里木河流域人水和谐相处的探索与初步实践[J]. 水利水电技术,2006,37(1):43 – 47.

[2] 新疆维吾尔自治区人民政府,中华人民共和国水利部. 塔里木河流域近期综合治理规划报告[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002,34 – 36.

[3] 张修宇,左其亭. 变化环境下塔里木河流域径流序列变化特

征及成因分析[J]. 水利水电技术,2013,44(10):6 – 12.

[4] 陈亚宁,郝兴明,徐长春. 新疆塔里木河流域径流变化趋势分析[J]. 自然科学进展,2007,17(2):205 – 210.

[5] 孙 鹏,张 强,白云岗,等. 塔里木河流域径流量周期性特征及其影响因素[J]. 地理科学,2013,33(2):216 – 222.

[6] 刘新华,徐海量,张青青,等. 气候变化对阿克苏河流域径流过程的影响[J]. 自然资源学报,2012,27(11):1931 – 1939.

[7] 段建军,王彦国,王晓风,等. 1957 – 2006 年塔里木流域气候变化和人类活动对水资源和生态环境的影响[J]. 冰川冻土,2009,31(5):781 – 791.

[8] 胡顺军. 塔里木流域干流流域生态 – 环境需水研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2007.

[9] 孟丽红,陈亚宁,李卫红. 新疆塔里木河流域水资源承载力评价研究[J]. 中国沙漠,2008,28(1):185 – 190.

[10] 范泽华,戚 蓝,黄津辉,等. 气候变化对石羊河流域水资源影响分析[J]. 水利水电技术,2012,43(1):7 – 11.

[11] 李彦彬,尤 凤,徐建新,等. 黄河径流变化规律的小波分析[J]. 水利水电技术,2012,43(1):17 – 21.

[12] 唐启义,冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M]. 北京:科学出版社,2002,546 – 549.

[13] 杨志峰,李春晖. 黄河流域天然径流量突变性与周期性特征[J]. 山地学报,2004,22(2):140 – 146.