

金马河、江安河流域降雨与径流关系研究

温李明, 刘智媛, 朱心悦, 刘秀群, 肖晓, 赵雨晴, 张学禹

成都市气象局, 四川 成都

收稿日期: 2024年7月8日; 录用日期: 2024年8月19日; 发布日期: 2024年8月29日

摘要

利用2018~2020年5~9月金马河、江安河流域小时降雨数据和径流数据, 分析了金马河、江安河流域的面雨量特征及其与径流的关系。研究表明: 1) 江安河径流及径流的日变化和面雨量的同期相关性最好, 其次与2天前的面雨量也显著相关; 2) 金马河径流和2天前面雨量的相关性最好, 但径流日变化与面雨量日变化达不到显著相关, 可能是受人工调节的影响; 3) 提前7小时的面雨量与径流显著相关, 提前16小时的累积面雨量也与径流显著相关。

关键词

降雨, 径流, 关系

Study on the Relationship between Rainfall and Runoff in Jinma River and Jiang'an River Basins

Liming Wen, Zhiyuan Liu, Xinyue Zhu, Xiuqun Liu, Xiao Xiao, Yuqing Zhao, Xueyu Zhang

Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu Sichuan

Received: Jul. 8th, 2024; accepted: Aug. 19th, 2024; published: Aug. 29th, 2024

Abstract

Based on the hourly precipitation data and corresponding runoff data of Jinma River and Jiang'an River basins from May to September during 2018~2020, the area rainfall characteristics and its relationship between runoff of Jinma River and Jiang'an River basins were analyzed. The study showed that: 1) The runoff and its daily variation of the Jiang'an River were significantly correlated with area rainfall, followed by area rainfall two days ago. 2) The correlation between the runoff

of Jinma River and area rainfall two days ago was the best. But there is no significant correlation between the daily variation of the run off and area rainfall, which may be affected by artificial regulation. 3) The area rainfall 7 hours in advance was significantly correlated with runoff, and the accumulated area rainfall 16 hours ago was also significantly correlated with runoff.

Keywords

Rainfall, Runoff, Relationship

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

金马河为岷江干流(外江), 江安河为都江堰灌溉渠(内江), 两河由西北而东南流经成都市温江区, 为温江境内的两条主要河流, 流域暴雨容易造成河水陡涨, 加之堤岸不牢、河道弯曲、水利工程等缘故, 易造成温江境内洪涝灾害。2005年, 温江仅出现1次较大降水天气过程, 尽管日降雨量仅43.3 mm, 但因输水工程不畅, 部份渠段受阻, 沿渠低洼地区造成315户房屋进水, 农作物被淹2573亩, 花木被淹6814亩。2013年7月8~11日的特大暴雨天气过程, 造成区内受灾人口11,330户、31,824人, 房屋倒塌80余间, 道路损毁9136米, 桥梁垮塌7座; 花木受灾面积87,551亩、农作物受灾面积10,949亩, 洪涝灾害造成直接经济损失31,440万元。因此掌握金马河和江安河汛期洪峰与降雨量的关系, 能够为防洪抢险工作提供更加科学的决策依据, 有利于防汛工作的顺利开展。

流域内降雨是导致河流洪峰变化的直接原因, 关于河流洪峰和降雨量的关系在国内有诸多研究。一般而言, 降雨量的大小与洪峰流量有很好的对应关系, 肖立炎等[1]的研究发现, 任意6 h的最大降雨量对洪峰的贡献最大, 并且建立了萍水河上游流域降水与城区河内洪峰关系的方程。此外, 为了降低模型的复杂性, 也可以通过逐步回归方程来建立降雨和洪峰的关系(王欢等[2]、胡坚等[3]、陈强[4])。刘熠炎等[5]还通过统计方法讨论了富水流域降雨与水位的关系。同时, 河流洪峰相对于降雨有滞后性(何宁等[6]), 不同类型的降雨形成的洪峰有明显区别(吴璐等[7]), 应该根据实际情况进行研究分析。在强降雨和洪峰的关系研究中, 需要把气象站点观测到的降雨量转换为面雨量, 如何较为科学的计算面雨量, 陈宁等[8]和胡燕平等[9]讨论了面雨量相关计算方法的适用性, 并在此基础上给出了流域关键站的径流预报方法。本文主要通过面雨量算术平均法和逐步回归方程以及统计方法讨论了金马河、江安河流域降雨与径流的关系。

2. 资料与方法

2.1. 资料

本文中金马河径流数据采用2018年观测数据, 并结合2018~2020年紫坪铺下泄金马河过流流量测算, 江安河径流采用2018~2020年5~9月温江区江安河水文站点日数据和小时数据。降雨数据采用2018~2020年5~9月温江区国家气象站和所有自动气象站小时数据, 以及金马河、江安河上游沿河区域自动气象站降水小时数据, 由于紫坪铺对下游金马河、江安河有明显调节和消峰作用, 故暂不考虑紫坪铺上游雨量情况, 本文采用金马河、江安河沿河气象站点信息如表1。

Table 1. Meteorological stations in Jinma River and Jiang'an River basin
表 1. 金马河、江安河流域气象站点信息表

河流名称	站点总数	站名	站号	站名	站号
金马河	14	都江堰灌口景区	S1083	崇州羊马	S1654
		都江堰龙池紫坪	S1077	温江寿安	S1704
		都江堰青城山月城湖	S1252	温江和盛	S1018
		都江堰奎光塔	S1251	温江天府	S1713
		都江堰聚源大合	S1067	温江柳城	S1709
		都江堰玉堂白马	S1058	温江金马	S1702
		崇州观胜兴裕	S1660	温江金马永盛	S1710
江安河	18	都江堰幸福石马	S1072	都江堰崇义	S1253
		都江堰灌口景区	S1083	温江寿安	S1704
		都江堰龙池紫坪	S1077	温江和盛	S1018
		都江堰青城山月城湖	S1252	温江万春	S1707
		都江堰奎光塔	S1251	温江天府	S1713
		都江堰聚源大合	S1067	温江柳城	S1709
		郫都友爱	S1312	温江涌泉	S1711
		郫都友爱清河	S1309	温江公平	S1708
郫都友爱花园	S1313	温江国家站	56187		

2.2. 方法

本文采用 pearson 相关、超前滞后相关、多项式回归等统计学方法对降雨、径流数据进行分析。

1) pearson 相关

pearson 相关用来描述两组线性数据的一同变化移动的趋势。用数学公式表示, pearson 相关系数等于两个变量的协方差除以两个变量的标准差。

2) 超前滞后相关

两个时间序列是否相关, 最简单的方法就是求二者的相关系数, 但是往往一个过程的响应并不是实时的, 可能当 a 过程发生以后一段时间 b 过程才会发生, 这样的关系往往不是同时期的相关系数可以表现的。超前滞后相关就是为了分析两个过程的发生演变是否在时间的先后上有一定的相关性。

3) 多项式回归

研究一个因变量与一个或多个自变量间多项式的回归分析方法, 称为多项式回归。一元 n 次多项式回归方程为:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$$

多项式回归的最大优点就是可以通过增加 x 的高次项对实测点进行逼近, 多项式回归可以处理相当一类非线性问题, 它在回归分析中占有重要的地位, 因为任一函数都可以分段用多项式来逼近。

4) 面雨量分析方法: 面雨量计算方法很多, 常见的有三角形法、泰森多边形法、算术平均法等。由于金马河、江安河流域气象站点布设较密集均匀, 较符合算术平均法的使用规则, 因此采用简明易懂、易于操作的算数平均法, 同时也便于今后基层业务人员在业务中的计算和运用。

3. 金马河、江安河降雨与径流关系

3.1. 同期相关情况

采用 2018~2020 年江安河、金马河径流有效数据，即江安河、金马河径流变化的日数据，与温江区及上游金马河面雨量(金马河面雨量)、温江区及上游江安河面雨量(江安河面雨量)开展 pearson 相关分析(见表 2)。

可以发现，金马河、江安河径流与同期面雨量呈显著正相关($p < 0.01$)，此外，江安河径流日变化与温江及上游面雨量也呈显著正相关($p < 0.01$)，可见温江本地及其上游降雨对江安河、金马河径流影响明显，还对江安河日径流变化影响明显，而对金马河径流日变化却无明显影响。

Table 2. Pearson correlation coefficient between runoff, daily variation of runoff and area rainfall in Jiang'an River and Jinma River during the same period

表 2. 江安河、金马河径流及径流日变化与面雨量的同期 pearson 相关系数

内容 1	内容 2	相关系数	Sig. (2-tailed)
江安河径流	江安河面雨量	0.355**	0
江安河径流日变化	江安河面雨量日变化	0.446**	0
金马河径流	金马河面雨量	0.352**	0
金马河径流日变化	金马河面雨量日变化	0.07	0.4

**在 0.01 级别(双尾)，相关性显著。

3.2. 超前滞后相关情况

将江安河、金马河流域面雨量超前/滞后变化 3 天与江安河、金马河径流及其日变化与做相关分析(表 3、图 1 和图 2)，可以发现，江安河径流变化和面雨量的同期相关性最好，在面雨量超前 2 天时，同样呈现出显著的正相关；而在面雨量滞后的情况下，江安河径流和面雨量无任何相关性。可见，江安河面雨量对江安河当日和 2 天后的径流变化影响较为明显。

对金马河而言，金马河面雨量超前/滞后变化 3 天与金马河径流均有显著相关性，且在面雨量超前 2 天时，相关性最好，但从日变化的相关性来看，却无明显相关，可能与金马河受人工调控影响较大有关。

Table3. The lead/lag correlation coefficient between the runoff/daily variation of runoff and the area rainfall/daily variation of area rainfall in Jiang'an River and Jinma River

表 3. 江安河、金马河径流/径流日变化与江安河、金马河面雨量/面雨量日变化超前/滞后相关系数

内容 1	面雨量 滞后 3 天	面雨量 滞后 2 天	面雨量 滞后 1 天	同期	面雨量超前 1 天	面雨量 超前 2 天	面雨量 超前 3 天
江安河径流	0.144	0.074	0.031	0.355**	0.078	0.283**	0.146
金马河径流	0.315**	0.284**	0.302**	0.352**	0.348**	0.392**	0.283**
内容 1	面雨量日变 化滞后 3 天	面雨量日变 化滞后 2 天	面雨量日变 化滞后 1 天	同期	面雨量日变化 超前 1 天	面雨量日变化 超前 2 天	面雨量日变化 超前 3 天
江安河径 流日变化	-0.024	-0.021	-0.274**	0.446**	-0.364**	0.252**	-0.074
金马河径 流日变化	-0.025	-0.057	-0.041	0.07	-0.061	0.178	-0.144

**在 0.01 级别(双尾)，相关性显著。

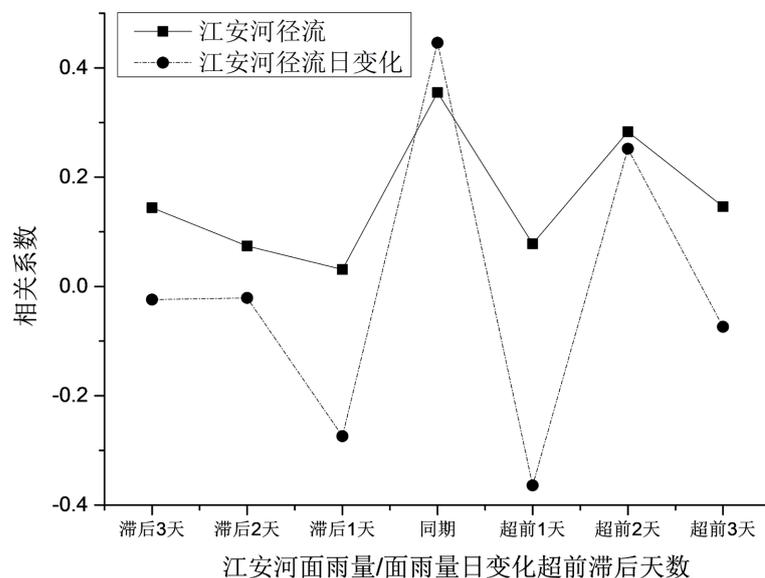


Figure 1. The lead/lag correlation coefficient between runoff/daily variation of runoff and area rainfall/daily variation of area rainfall in Jiang'an River

图 1. 江安河径流/径流日变化与江安河面雨量/面雨量日变化超前滞后相关系数

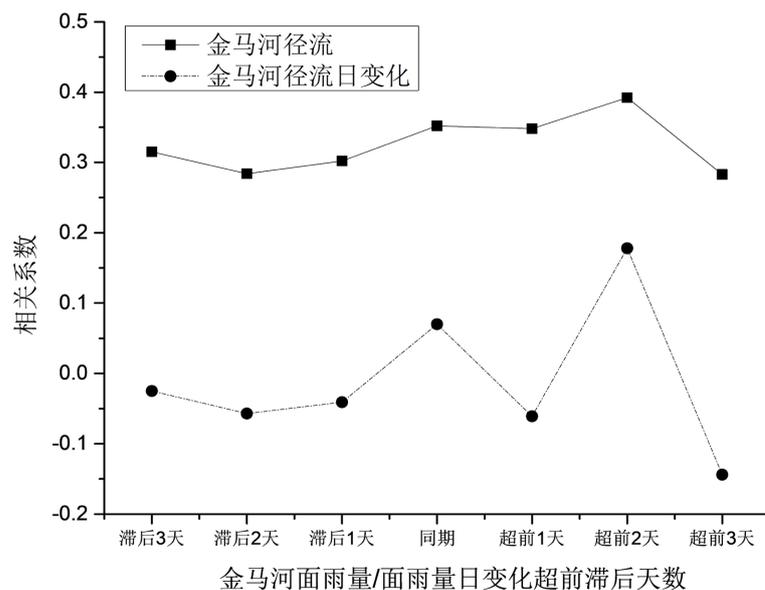


Figure 2. The lead/lag correlation coefficient between runoff/daily variation of runoff and area rainfall/daily variation of area rainfall in Jinma River

图 2. 金马河径流/径流日变化与金马河面雨量/面雨量日变化超前滞后相关系数

3.3. 径流预测

为了分析河流径流造成的内涝风险，通过对防汛部门的调研，在近年来的重大天气过程中，金马河作为重要的泄洪通道，警戒流量达到 $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，无漫堤现象，对温江内涝无明显影响，且金马河径流日变化与面雨量无明显相关关系，可能主要受上游人工调节影响较大。因此，本文主要对江安河径流进行分析。

3.3.1. 洪峰过境典型案例

本章节主要采用江安河洪峰过境时的小时径流和面雨量数据进行分析，经过调研，地方防汛办提供了近3年来江安河洪峰过境典型案例共4例，均集中在2020年8月，具体案例如表4。

Table 4. Typical case of Jiang'an River flood peak transit

表 4. 江安河洪峰过境典型案例

案例	典型案例时间	小时最大流量(m ³ /s)	小时最大流量出现时间	案例期间平均流量(m ³ /s)
1	2020年8月6日0时~8日17时	87.9	7日4时	55.12
2	2020年8月11日0时~13日23时	143	11日18时	77.32
3	2020年8月15日0时~17日23时	231	16日11时	108.55
4	2020年8月29日0时~31日23时	148	31日09时	83.14

3.3.2. 超前滞后相关情况

将4例典型案例的小时径流和面雨量做同期和超前滞后相关分析(表略)。可以发现，在面雨量超前6~7小时期间，面雨量与径流相关最明显，且都通过了 $p < 0.01$ 的显著性检验，而面雨量滞后的情况下，与径流基本没有显著的相关性。因此，降雨量对6~7小时后的径流有很好的指示性。

3.3.3. 径流预测分析

1) 径流对小时降雨量的回归

采用多项式回归分析方法，通过径流(y)对提前降雨量(x)的回归，来分析降雨量对径流预测的具体指示意义。在多项式回归分析中，若回归面雨量的高次项达到n次而 x^n 的系数项小于 10^{-5} ，意义不大，我们则采用n-1次的回归方程。

从前述超前滞后相关分析可以看出，径流与提前6~7小时的面雨量存在显著相关，本节我们也验证

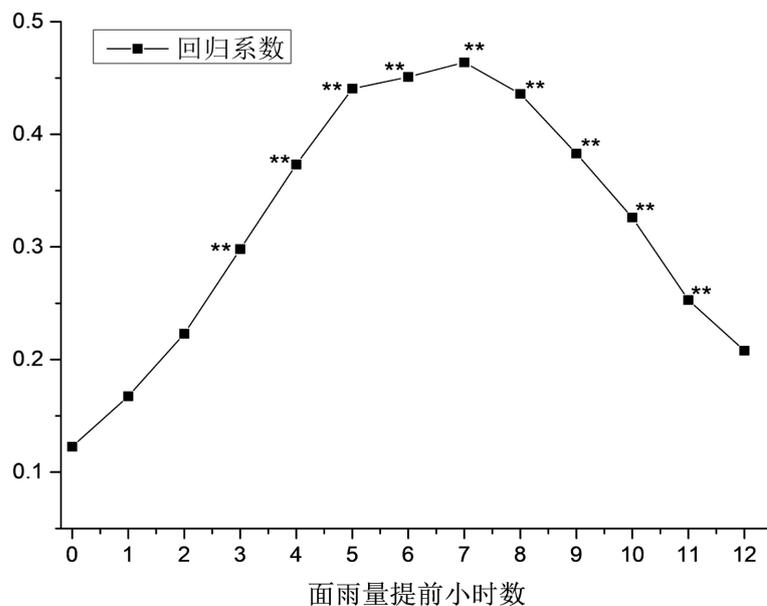


Figure 3. Regression coefficient of runoff on hourly area rainfall with advance variation

图 3. 径流对提前变化的小时面雨量的回归系数

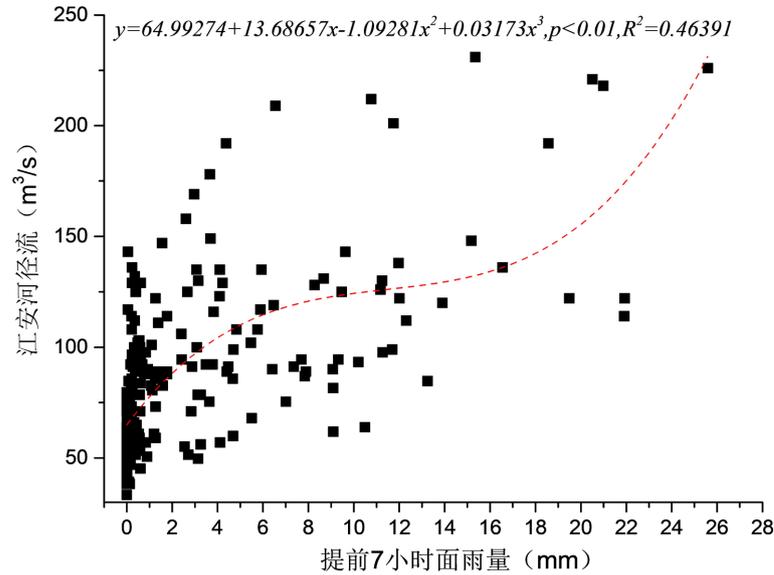


Figure 4. Regression of runoff on 7-hour advance area rainfall

图 4. 径流对提前 7 小时面雨量的回归

了径流对提前 1~12 小时面雨量回归系数的情况(图 3)。可以看出, 径流对提前 7 小时的面雨量回归系数最大, 并且通过显著性检验。因此, 本文重点分析了径流对提前 7 小时的面雨量回归情况(图 4)。

用径流对提前 7 小时的降雨进行回归分析发现, 提前 7 小时面雨量(x)可以解释径流(y)变化的 46.391% ($y = 64.99274 + 13.68657x - 1.09281x^2 + 0.03173x^3, p < 0.01, R^2 = 0.46391, n = 246$)。

2) 径流对累积降雨量的回归

此外, 影响径流的不只是小时降雨, 与一段时间的累积面雨量也有密切关系, 为此, 本文将洪峰过境案例中径流和提前不同小时的累积面雨量进行相关分析(图 5)。

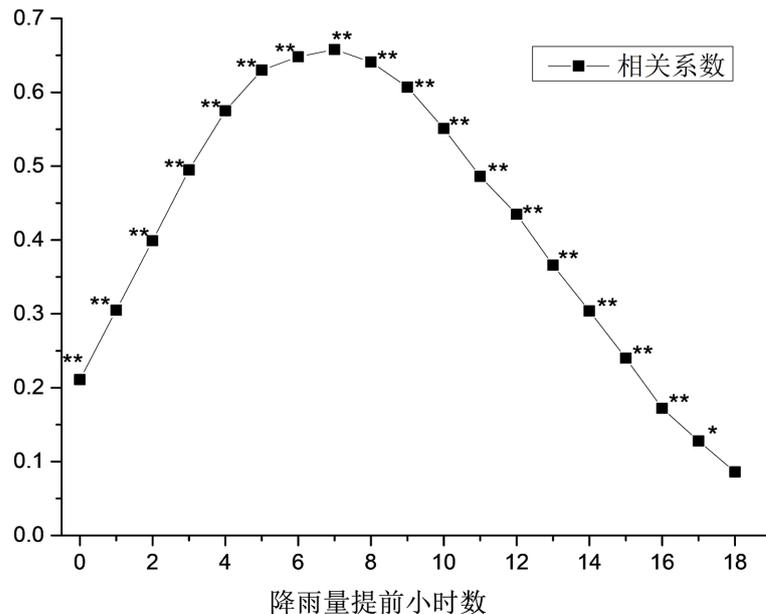


Figure 5. Correlation coefficient between runoff and accumulated area rainfall at different hours in advance

图 5. 径流与提前不同小时的累积面雨量的相关系数

可以发现,提前7小时的累积面雨量也与径流有最好的相关性,验证了上述利用径流对提前7小时面雨量回归的合理性。本文主要考虑在今后业务运用中需要对径流进行预测,在选取累积面雨量时间段上,不考虑面雨量滞后变化情况,并要求面雨量与径流达到极显著性相关关系($p < 0.01$)。

从图5可以看出,从当前到提前16小时的累积面雨量(共17个小时)与径流均有极显著相关关系,故我们采用径流对当前到提前16小时的累积雨量进行回归分析(图6)。

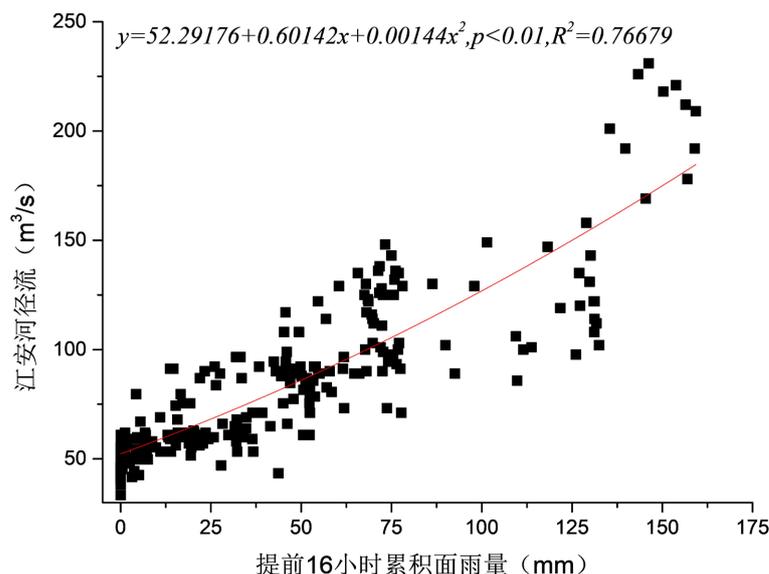


Figure 6. Regression of runoff on 16 hours advance accumulated area rainfall
图 6. 径流对提前 16 小时累积面雨量的回归

提前16小时的累积面雨量(x)可以解释径流(y)变化的76.679% ($y = 52.29176 + 0.60142x + 0.00144x^2$, $p < 0.01$, $R^2 = 0.76679$, $n = 260$)。

3) 径流小时变化对面雨量小时变化的回归

为找出径流和面雨量的小时变化对应关系,本文同样尝试利用径流小时变化对面雨量小时变化进行回归分析。然而,通过径流小时变化和提前的面雨量小时变化的相关关系分析(表略)发现,在提前4到6小时的面雨量小时变化和径流小时变化有正相关关系,但相关系数均不超过0.2,回归方程均通不过显著性检验($p < 0.01$),故本文中暂不考虑使用面雨量的小时变化来预测径流小时变化。

3.4. 径流预测检验

在实际工作中,主要是针对在出现强降雨天气过程时,业务人员可根据当前实际的小时面雨量或精细化数值预报模式面雨量,对未来7小时或16小时的径流进行预测。

在2021年8月4~5日温江区域性暴雨天气过程中,由于数值预报降雨量偏小,因此我们直接采用实际的雨量数据进行径流量预测并进行检验。

采用当前的实际面雨量作为初始值,逐小时对未来7小时的径流进行预测(图7),并使用累积16小时面雨量对径流进行预测(图8)。

通过对2021年8月4~6日预测和实际径流的验证来看,利用提前7小时的面雨量预测的径流与实际径流的相关系数为0.724 ($p < 0.01$, $n = 65$),利用提前16小时累积面雨量预测的径流与实际径流相关系数为0.640 ($p < 0.01$, $n = 56$),均显著相关。

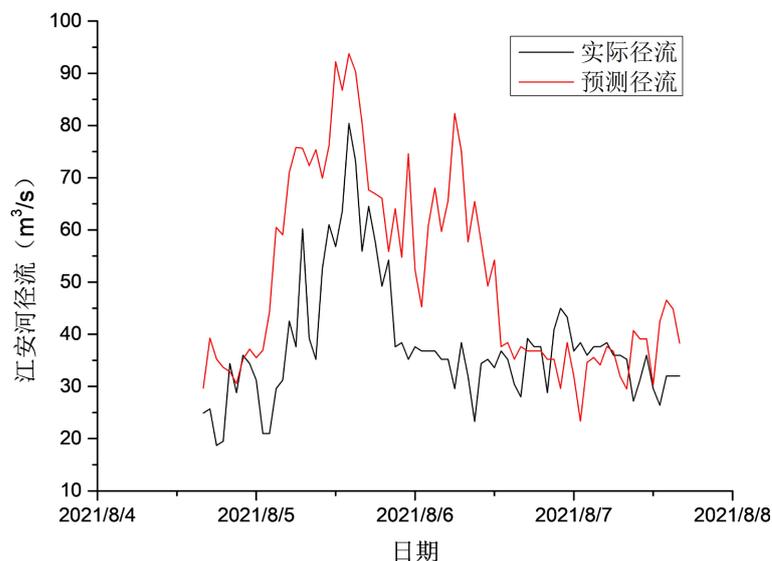


Figure 7. Verification of runoff prediction based on 7-hour advance rainfall of August 4~6, 2021

图 7. 2021 年 8 月 4~6 日提前 7 小时降雨量对径流预测检验

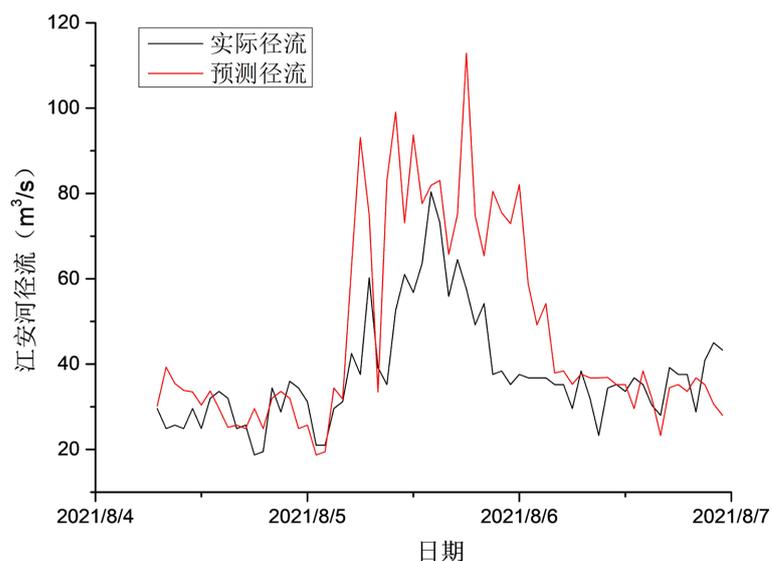


Figure 8. Verification of runoff prediction based on 16 hours advance accumulated rainfall of August 4~6, 2021

图 8. 2021 年 8 月 4~6 日提前 16 小时累积降雨量对径流预测检验

在实际情况下，江安河径流不仅受降雨量影响，还受人工调控、水文过程的影响，因此，仅根据降雨量预测江安河最大径流峰值会出现比实际径流大、比实际时间提前的情况，且降雨量无法很好地解释径流的减小。因此，在峰值回落期间的径流变化暂时无法很好的预测。

4. 结论

1) 江安河径流及径流的日变化与面雨量的同期相关性最好，其次与提前 2 天的面雨量也显著相关；金马河径流与同期及 2 天前面雨量的相关性显著，但金马河径流日变化与面雨量相关不显著，可能主要是受人工调节的影响。

2) 通过对江安河洪峰过境案例分析发现, 提前 7 小时的面雨量与径流的相关性最显著; 提前 7 小时面雨量(x)可以解释径流(y)变化的 46.391%, ($y = 64.99274 + 13.68657x - 1.09281x^2 = 0.03173x^3, p < 0.01, R^2 = 0.46391, n = 246$)。

3) 提前 16 小时的累积面雨量(x)可以解释径流(y)变化的 76.679%, ($y = 52.29176 + 0.60142x + 0.00144x^2, p < 0.01, R^2 = 0.76679, n = 260$)。

基金项目

成都市气象局重点课题(2021-1(2)); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目——基于 WRF-CMAQ 模式的成都平原经济区空气质量预报效果检验(SCQXKJQN202102)。

参考文献

- [1] 肖立炎, 鄂清元, 邓学友, 徐朝霞, 李菲, 黄惠东. 萍水河上游流域降水与城区河内洪峰关系的研究[J]. 江西气象科技, 2004, 27(2): 17-19.
- [2] 王欢, 单九生, 邓虹霞. 信江流域洪峰期水位预测方法初探[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(4): 352-354.
- [3] 胡坚, 黄昕怡, 何泽良, 林明丽, 敬钢球. 湘潭县主汛期涓水流域洪峰与降水量关系分析[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(2): 214-215, 218.
- [4] 陈强. 银盘-彭水区间流量与面雨量关系研究[J]. 水资源开发与管理, 2021(11): 23-27.
- [5] 刘熠炎. 富水流域致洪面雨量研究[J]. 农业灾害研究, 2024, 14(3): 172-174.
- [6] 何宁, 游泉雄, 戴劲, 黄娟, 黄昕怡. 湖南省水府庙水库流域洪峰与汛期面雨量关系分析[J]. 农业灾害研究, 2024, 14(3): 137-139.
- [7] 吴璐, 靖春悦, 张晓欧, 王红燕. 沙澧河上游关键区汛期强降水面雨量对洪峰的影响[J]. 气象与环境科学, 2010, 33(3): 29-32.
- [8] 陈宁, 黄鹂, 沈树勤, 曾明剑, 杨秋明. 江苏省流域面雨量气候特征及与雨涝关系的探讨[J]. 气象科学, 2005, 25(5): 518-527.
- [9] 胡燕平, 布亚林, 肖刚, 等. 沙、澧河流域面雨量计算及流量预报[J]. 河南气象, 2004, 30(4): 29-30.