

基于电导率质量守恒的南方丘陵山区基流分割研究

郭玉雪,江梓欣,许月萍,管泽鉴,陈思维,梁 霄

(浙江大学建筑工程学院,浙江 杭州 310058)

摘要:为探讨电导率质量守恒(CMB)法在南方丘陵山区小流域基流分割中的应用,以浙江省永安溪流域为研究对象,通过在流域空间范围内构建电导率监测网络对电导率数据进行了长期稳定的观测,分析了不同降雨等级下降水量、径流量和电导率之间的相关关系及其空间异质性,采用 CMB 法提取了基流,并将结果与不同基流分割方法的结果进行比较。结果表明:永安溪流域电导率沿干流呈先下降后上升的变化趋势,在时间分布上与丰枯水期呈负相关关系;与传统数字滤波法、时间步长法和基流指数法相比,CMB 法能够有效识别出显著的长期基流贡献,尤其在应对水质剧烈波动和降雨稀释影响时具有较高的稳定性。

关键词:基流分割;电导率质量守恒法;河流生态;南方丘陵山区;永安溪流域

中图分类号:TV121⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0105-08

Research on baseflow separation in southern hilly and mountainous areas based on conductivity mass balance//
GUO Yuxue, JIANG Zixin, XU Yueping, GUAN Zejian, CHEN Siwei, LIANG Xiao(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To investigate the application of the conductivity mass balance (CMB) method for baseflow separation in small river basins of southern hilly and mountainous areas, the Yong'an Creek Basin in Zhejiang Province was selected as the study area, where a conductivity monitoring network was established to enable long-term and stable observations of water conductivity. The correlations between precipitation, runoff, and conductivity as well as their spatial heterogeneity at different rainfall levels were analyzed. The CMB method was then employed to extract baseflow, and the results were compared with those obtained by other baseflow separation methods. Results indicate that the conductivity in the Yong'an Creek Basin shows a trend of first decreasing and then increasing along the main stream, and in terms of temporal distribution, it has a negative correlation with dry and flood seasons. Compared to the traditional digital filtering method, the hydrograph separation program (HYSEP) method, and the baseflow index (BFI) method, the CMB method can effectively identify significant contributions of long-term baseflow, and it demonstrates high stability, particularly in addressing severe water quality fluctuations and rainfall dilution effects.

Key words: baseflow separation; conductivity mass balance method; river ecology; southern hilly and mountainous area; the Yong'an Creek Basin

基流是维持河流生态稳定和保障流域水资源可持续利用的重要基础,作为水文模型的关键参数,其对揭示流域水文机理具有重要价值^[1]。基流分割指将径流分割为地表径流与基流,以估量地下水占径流的比例,其对理解和量化径流过程具有重要意义^[2-6]。当前基流无法通过直接观测得到,只能采用一定的方法进行估算,因此基流分割一直是国内外水文学研究的重点和难点之一。

国内外对基流分割方法研究较多,目前已发展出示踪剂分割法、直线分割法、时间步长法

(hydrograph separation program, HYSEP)、数字滤波法、水文模型法、水量平衡法等多种方法。而电导率作为水体指标^[7]的一种,利用其进行基流分割适用性强,物理意义明确。相较于其他数学方法,电导率质量守恒(conductivity mass balance, CMB)法结果的可解释性更好,且不需要流域的其余参数,逐渐被应用在基流分割研究中。例如:范宁江等^[7]对黑河流域的研究表明,通过计算支流电导率对邻近干流的贡献可推算各支流流量对干流的贡献率;Longobardi等^[8]在意大利南部 Ciciriello 流域的研究中发现,

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1700802);国家自然科学基金项目(52579023)
作者简介:郭玉雪(1990—),女,研究员,博士,主要从事水文预报与水库调度研究。E-mail:yuxueguo@zju.edu.cn
通信作者:许月萍(1975—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:yuepingxu@zju.edu.cn

CMB 法较传统递归数字滤波法的基流分割结果更准确,表现出更好的适用性;Kissel 等^[9]在德国低海拔山脉区域的研究表明,使用 CMB 法估算基流时,不同时间尺度下的监测数据(如每周或每月监测数据)对基流分割结果的影响不明显,CMB 法和数字滤波法的结果也较为一致;王琰等^[10]在美国科罗拉多河流域的研究发现,使用 CMB 法的结果对其他基流分割方法进行参数修正后,可以有效提高其他基流分割方法的准确度。目前,将电导率作为特征性指标进行基流分割的相关研究中主要存在以下问题:① 现有研究主要集中在大流域多点源分析^[11-17],缺乏在小微流域中细致的应用研究;② 在研究高度人类活动干扰的流域时,往往因地表径流与基流的电导率数值差异较小,导致模型分割效果不佳。因此,如何更精确地确定水体电导率与雨强、流量的相关关系,解析降雨对电导率的影响效应,仍是该方法在应用中的关键难题。

南方丘陵山区地形复杂、水资源分布不均^[18],基流能够揭示地下水与地表水的相互关系,提高水文预测精度,进而改善洪水和干旱预警能力^[19]。本文以浙江省台州市永安溪流域为研究对象,通过收集区域内降水量、径流量和电导率数据,分析不同降雨等级下降水量、径流量和电导率之间的相关关系,揭示区域降水对电导率的影响机制。采用 CMB 法进行基流分割,并与 HYSEP 法、基流指数(baseflow index, BFI)法、数字滤波法等进行对比,评估不同基流分割方法在南方丘陵山区的适用性,以期为复杂水文条件下南方丘陵地带基流分割及水资源管理提供理论依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

永安溪流域(28°28'N~28°30'N, 120°17'E~121°04'E)属于椒江水系,位于台州市仙居县及临海市境内,东临台州市区、西接丽水、南接温州、北接金华,河源天堂尖位于仙居与缙云交界处(28°30'48"N, 120°21'29"E),河口三江村位于永丰镇(28°52'43"N, 121°03'38"E)。永安溪是灵江流域一级支流,流域面积 2704 km²,沿途流经缙云、磐安、仙居、临海,于三江村河口右岸注入灵江。永安溪河长 141.3 km,平均坡降 1.54 ‰,糙率 0.039,洪水期水面宽为 250~300 m。图 1 为永安溪流域概况。

1.2 数据来源

采用台州市水雨情中心(www.shui00.com)发布的实测降水数据集,取永安溪流域及其周边曹店、宁溪、白塔、沙段等 22 个雨量站 2022 年 11 月至

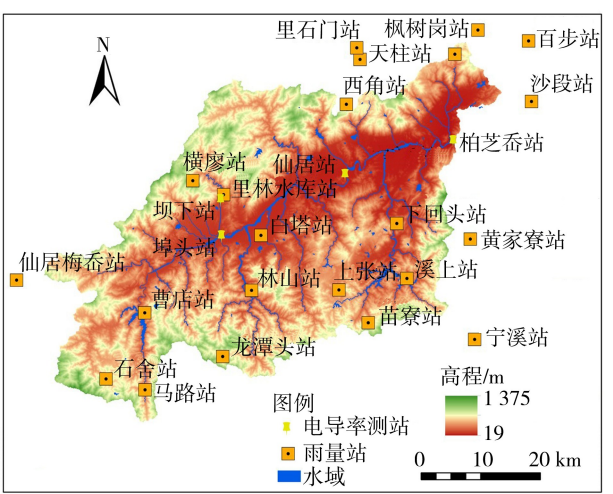


图 1 永安溪流域概况

Fig. 1 Overview of the Yong'an Creek Basin

2023 年 10 月的日尺度数据进行分析;径流数据和电导率数据来源于坝下、埠头、仙居、柏芝岙 4 个电导率测站,数据长度与降水数据保持一致。

1.3 电导率测站布置

4 个电导率测站的整体试验布置如图 1 所示。电导率监测采用 DDM-206A 在线电导率传感器,采集频率为 15 min/次。坝下站位于里林水库库区水域,设置于永安溪支流河道中;埠头站位于永安溪流域中上游,设置于永安溪干流水位站中;仙居站位于永安溪流域中游,因水井水体流动性差,该站点由水位站迁移至河道;柏芝岙站设置在永安溪流域出口断面,位于主河道中。坝下、埠头、柏芝岙站数据时间长度为 2022 年 11 月 1 日至 2023 年 10 月 31 日,仙居站数据时间长度为 2023 年 5 月 18 日至 10 月 31 日。

2 研究方法

2.1 CMB 法

基流通过土壤和岩层的运输过程后汇入河道与地表径流共同组成河川径流,故基流中的离子浓度更大,其电导率较地表径流更高。总径流量中的基流占比(即 BFI)可以通过 CMB 法获得^[20],计算公式为

$$\beta = Q_B / Q = (C_Q - C_R) / (C_B - C_R) \quad (1)$$

式中: β 为基流占比; Q_B 为基流量; Q 为总径流量; C_Q 为径流电导率; C_B 为基流电导率; C_R 为地表径流电导率。

C_B 和 C_R 可分别在地下水和地表水中直接测量,但在野外试验过程中,通常很难直接获取。根据相关研究^[21],假设 C_B 为观测获得的溪流电导率最高值,认为该时期总径流量几乎 100% 由基流组成,而 C_R 为观测获得的溪流电导率最低值,认为该时期总径流量几乎 100% 由地表径流组成,由此可以计算获得相对准确的基流量。

2.2 BFI 法

BFI 法分为标准 BFI 法和改进 BFI 法,计算时需要确定单位时段长度 N 和拐点调试参数(标准 BFI 法参数 f 和改进 BFI 法参数 k)。 N 值的选取对基流量计算结果有较大影响,可依据最小流量选择原理确定 N 值。BFI 随 N 值的增大而减小,当 $N \geq 5$ 时,BFI 趋于稳定,因此本文取 $N=5^{[22]}$ 。拐点调试参数的变化对基流量影响不显著, f 和 k 一般分别取经验值 0.9 和 0.979 15。

2.3 数字滤波法

数字滤波法简单易行,主要有单参数^[23-25]和双参数^[26]法。数字滤波法来源于信号分析,在不同领域中广泛应用,其主要原理是选择滤波函数将高频与低频信号分离。在基流分割中,低频信号被视作基流,高频信号被视为地表径流。

2.4 HYSEP 法

HYSEP 法具有操作简便、迅速、可计算长序列径流资料等优点,是美国地质调查局使用的主要基流计算方法^[27]。该方法有固定 HYSEP 法、滑动 HYSEP 法和局部最小值法 3 种计算方法。计算时采用经验公式计算退水时段:

t = (2.95A)^{0.2} (2)

式中: t 为地表径流停止后退水持续时间; A 为流域出口控制面积,本文为 2 704 km²。

3 结果与分析

3.1 降水量、径流量和电导率时空变化

基于电导率测站的地表电导率和径流量数据,

并结合雨量站点获取的集水区面雨量数据,研究坝下、埠头、仙居和柏芝岙站降水量、径流量和电导率的时间分布特征,结果见图 2。结果表明,永安溪流域的降水量和径流量均集中在夏秋两季,呈现显著的季节性变化特征;电导率在强降雨后出现显著下降,其变化趋势因地理位置、流域特征及季节变化而存在差异。坝下站位于里林水库灌区附近,径流量较小且稳定,但由于流域蓄水能力有限,流量并不总是随降水量波动;其电导率的变化主要受径流量波动和水质浓度变化的影响,集中在 100 mS/m 以内,表现为枯水期电导率较高,丰水期较低。埠头站位于流域中上游,径流量峰值为 173 m³/s,其电导率在 50~150 mS/m 之间波动。仙居站位于流域中游,其电导率在 50~100 mS/m 之间波动。柏芝岙站位于流域出口,其电导率较其他站点显著上升,波动范围更广,介于 0~400 mS/m 之间。

综合对比 4 个电导率测站的数据,干流电导率空间分布呈现从中上游到下游先降后升的趋势。中上游因径流流经的山区和丘陵地带富含钙、镁等矿物质,降雨径流溶解导致电导率升高;尤其在少雨期,集水区蓄水量少,使电导率显著上升。中游植被截留和土壤过滤作用降低了水体中溶解固体的浓度,使电导率降低。下游受工业废水、城市排水等人类活动的影响,溶解固体浓度上升,使电导率升高;同时,河道较宽,蒸发作用显著,导致水体中溶解的固体浓度进一步升高,电导率显著上升^[28]。干流电导率的空间分布特征反映了流域内地质条件、水文过程以及人类活动的综合影响,为进一步研究流域

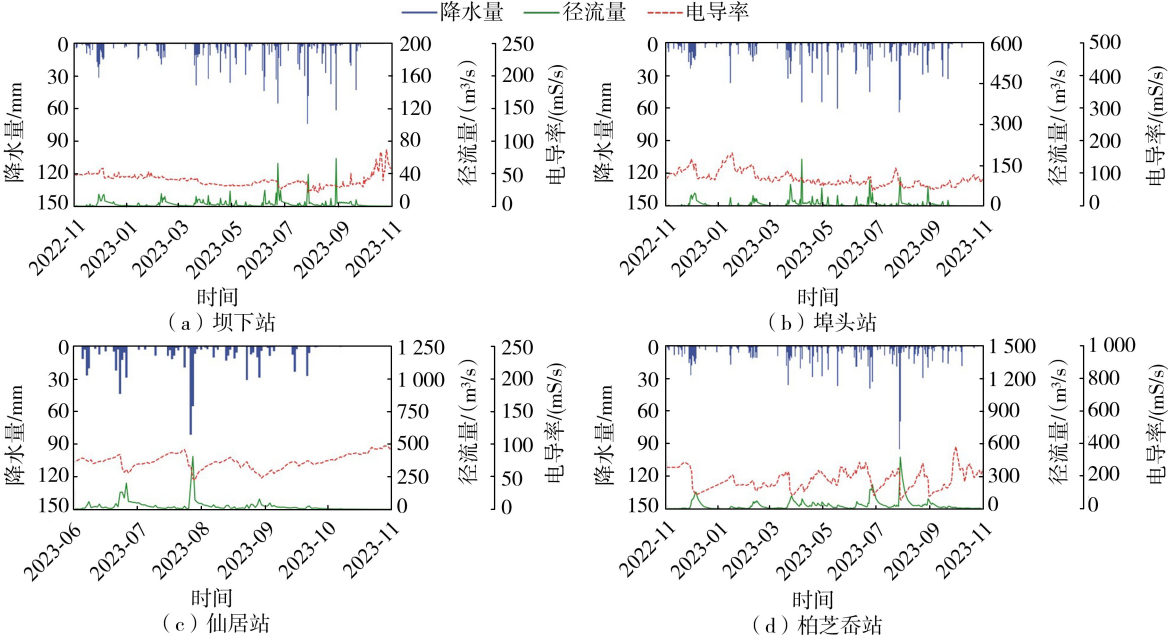


图 2 电导率测站降水量、径流量和电导率时间分布

Fig. 2 Temporal distributions of precipitation, runoff, and conductivity at conductivity monitoring stations

水环境变化提供了重要依据。整体而言,永安溪流域降水量与电导率呈现显著负相关关系。这种关系主要源于降雨径流稀释了水体中的溶解固体,而在降雨较少的时期,电导率通常较高,可能源于蒸发作用、地下水补给以及溶解固体浓度上升的综合影响。

3.2 降水量、径流量和电导率之间的相关关系

根据中国气象局的降雨分级标准,将 24 h 降水量介于 2.0~9.9 mm 定义为小雨,10.0~24.9 mm 定义为中雨,25.0~49.9 mm 定义为大雨。结合各站点数据,分析不同降雨等级下降水量、径流量和电导率之间的相关关系。根据降雨分级标准,统计得到监测期内坝下站降雨情况为小雨 62 天、中雨 33 天、大雨 18 天;埠头站为小雨 60 天、中雨 32 天、大雨 17 天;仙居站为小雨 38 天、中雨 11 天、大雨 8 天;柏芝岙站为小雨 67 天、中雨 38 天、大雨 10 天。表 1 给出不同降雨等级下电导率测站当日降水量、当日径流量、当日电导率、前日降水量之间的皮尔逊相关系数;图 3 为各站点在典型降雨事件中降水量、径流量、电导率等要素随时间变化的情况。

受水库调控的坝下站降雨强度越大,径流量增幅与电导率降幅越显著,大雨事件中径流量与降水量呈强正相关关系,电导率受稀释效应影响显著下降。埠头站因地形较陡和高渗透性土壤的影响,降雨强度与径流量呈正相关,大雨时径流量显著增加,但电导率与降水量相关性较弱,保持相对稳定。仙

居站兼具地形陡峭与农业面源输入双重特征,大雨时产生的径流量显著增加,但电导率受当日降水量影响微弱,而前日降水量通过稀释作用使电导率大幅下降;中雨时受稀释作用和水文滞留效应的共同影响,电导率随降水量增加而降低,与降水量呈负相关关系,而与径流量的相关关系不明显,体现出流域中游水文与溶质迁移过程的非线性特征。柏芝岙站小雨时因稀释效应弱导致电导率响应滞后,前日降水量与电导率呈微弱负相关关系;中雨时因冲刷和稀释效益相互拮抗导致相关性不显著;大雨时前日降水量产生的径流量汇集导致电导率下降。

整体而言,各站点因地理位置、地形特征和人类活动的不同,降水量、径流量和电导率之间的响应特征表现出显著的空间差异。中上游站点因污染源较少和水质稳定,电导率响应较弱;中游站点因农业面源输入和水文滞留效应,降水量、径流量和电导率三者间表现出非线性响应特征,而坝下站受水库调蓄作用影响,三者相关关系减弱;下游站点则因集水区面积大,传播路径长,表现出降水量对电导率影响的滞后性。这些规律为理解流域水文过程和水质变化的区域差异提供了重要依据。

3.3 不同方法基流分割结果对比

采用 8 种方法对永安溪流域内 4 个电导率测站的径流量进行基流分割,结果如图 4 所示。

a. 坝下站采用 CMB 法得到的基流曲线表现出较高的平滑性,且整体基流占比较高,表明该方法能

表 1 不同降雨等级下电导率测站降水量、径流量、电导率之间的皮尔逊相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficients between precipitation, runoff, and conductivity at different rainfall levels at conductivity monitoring stations

电导率测站	指标	皮尔逊相关系数											
		小雨				中雨				大雨			
		前日降水量	当日降水量	当日径流量	当日电导率	前日降水量	当日降水量	当日径流量	当日电导率	前日降水量	当日降水量	当日径流量	当日电导率
坝下	前日降水量	1.00	-0.02	0.13	-0.18	1.00	-0.13	0.30	0.15	1.00	0.10	0.37	-0.41
	当日降水量	-0.02	1.00	0.49	0.03	-0.13	1.00	0.05	0.03	0.10	1.00	0.69	-0.24
	当日径流量	0.13	0.49	1.00	0.04	0.30	0.05	1.00	0.07	0.37	0.69	1.00	-0.37
	当日电导率	-0.18	0.03	0.04	1.00	0.15	0.03	0.07	1.00	-0.41	-0.24	-0.37	1.00
埠头	前日降水量	1.00	0.02	0.09	0.22	1.00	-0.08	0.42	0.12	1.00	-0.02	0.25	-0.25
	当日降水量	0.02	1.00	0.34	0.04	-0.08	1.00	0.27	0.04	-0.02	1.00	0.46	0.01
	当日径流量	0.09	0.34	1.00	-0.08	0.42	0.27	1.00	0.27	0.25	0.46	1.00	0.13
	当日电导率	0.22	0.04	-0.08	1.00	0.12	0.04	0.27	1.00	-0.25	0.01	0.13	1.00
仙居	前日降水量	1.00	0.14	0.28	-0.23	1.00	0.13	0.90	-0.23	1.00	0.29	0.87	-0.63
	当日降水量	0.14	1.00	0.25	0.06	0.13	1.00	-0.09	0.40	0.29	1.00	0.55	-0.09
	当日径流量	0.28	0.25	1.00	-0.64	0.90	-0.09	1.00	-0.45	0.87	0.55	1.00	-0.62
	当日电导率	-0.23	0.06	-0.64	1.00	-0.23	0.40	-0.45	1.00	-0.63	-0.09	-0.62	1.00
柏芝岙	前日降水量	1.00	0.09	0.55	-0.28	1.00	-0.14	0.57	0.03	1.00	0.45	0.88	-0.77
	当日降水量	0.09	1.00	0.10	0.05	-0.14	1.00	-0.24	0.27	0.45	1.00	0.63	-0.26
	当日径流量	0.55	0.10	1.00	-0.53	0.57	-0.24	1.00	-0.56	0.88	0.63	1.00	-0.75
	当日电导率	-0.28	0.05	-0.53	1.00	0.03	0.27	-0.56	1.00	-0.77	-0.26	-0.75	1.00

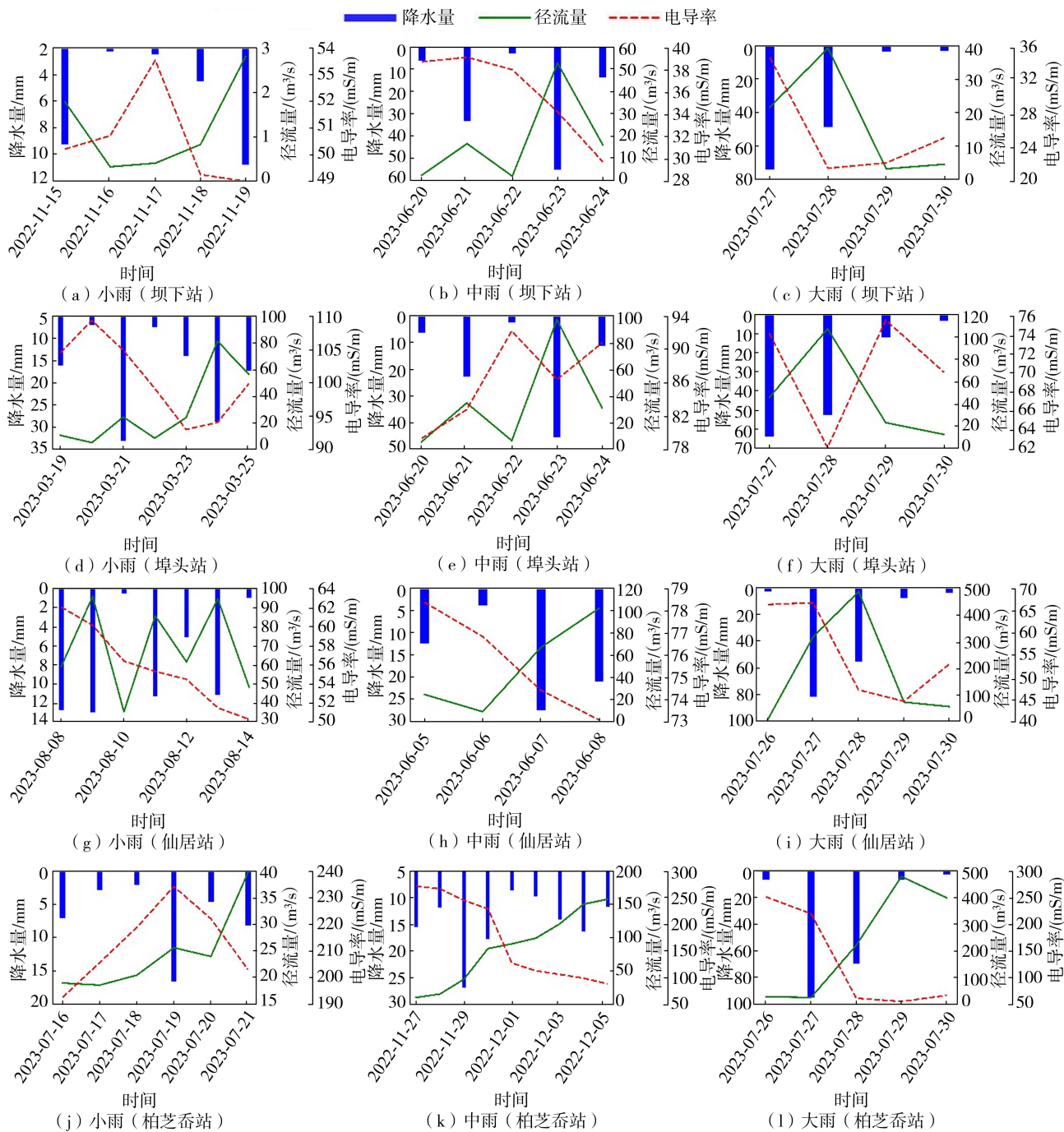


图 3 不同降雨等级下典型降雨事件降水量、径流量和电导率随时间的变化

Fig. 3 Temporal variations of precipitation, runoff, and conductivity for typical rainfall events at different rainfall levels

够有效识别出显著的长期基流贡献;BFI 法和单参数数字滤波法得到的基流曲线整体偏低,尤其在总径流量波动较大时,这两种方法倾向于低估基流;HYSEP 法的结果整体相似,但在径流量高峰期基流占比相对较低。

b. 埠头站 CMB 法基流分割结果表明,基流量波动与总径流量变化趋势一致,显示出良好的基流分割效果。CMB 法在径流量高峰期表现出较强的稳定性,得到的基流曲线未因径流量急剧增加而产生显著波动;而 HYSEP 和 BFI 法在径流量波动较大

时,基流占比明显偏低,尤其在径流量高峰期表现更为显著;双参数数字滤波法得到的基流曲线虽然较为平滑,但在高径流量条件下仍存在一定偏差,需要进一步验证其适用性。

c. 仙居站 CMB 法得到的基流曲线呈现出较为明显的季节性变化,与降雨事件的相关性较弱。与其他方法相比,CMB 法得到的基流占比相对较高,尤其在旱季,该方法可能更适用于识别具有稳定地下水补给的流域;而 HYSEP 法则在汛期得到更高的基流占比,可能更适用于识别受降雨影响较大的

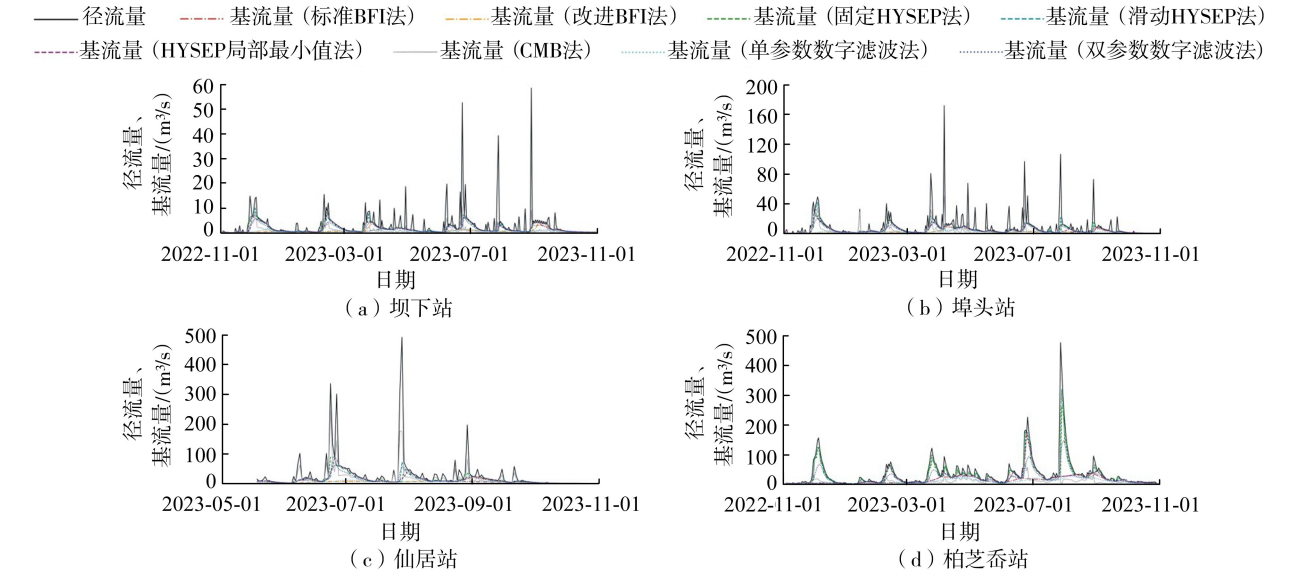


图 4 电导率测站基流分割结果

Fig. 4 Baseflow separation results at conductivity monitoring stations

流域;BFI 法和单参数数字滤波法在该站点的基流分割结果整体偏低,对降雨事件的响应较为敏感;双参数数字滤波法分割得到的基流曲线较为平滑,但可能低估了降雨事件期间的基流贡献。

d. 柏芝岙站 CMB 法得到的基流曲线对降雨事件的响应较为迅速,能够捕捉到基流的变化过程,这一现象表明,该站点地下水补给过程存在显著的降雨驱动特征;HYSEP 法在该站点的基流分割结果整体较为平稳,对降雨事件的响应相对滞后;BFI 法和单参数数字滤波法在该站点的基流分割结果整体偏低,倾向于低估了降雨事件期间的基流贡献;双参数数字滤波法得到的基流曲线较为平滑,但无法捕捉到基流的变化;CMB 法在柏芝岙站对基流峰值拟合不足主要归因于其流域出口位置的特殊性,作为流域汇水点,其来水组成复杂,削弱了 CMB 法的基流分割效果。

表 2 为不同方法在 4 个电导率测站测量周期内获得的 BFI 值。CMB 法计算结果的波动性较大,从流域中上游至下游 BFI 值呈上升趋势,最小值出现在位于支流的坝下站,最大值出现在流域出口的柏芝岙站。两种 BFI 法计算结果较为接近,为 0.20~0.25,标准 BFI 法得到的指数值略小于改进 BFI 法。

两种数字滤波法结果相差明显,单参数数字滤波法在各站点计算出的 BFI 值为 0.18~0.20,而双参数数字滤波法则为 0.42~0.44,双参数数字滤波法得到 BFI 值大的原因可归因于其灵活的参数设定^[29-30],尤其是滤波参数(a)和最大 BFI,较大的 a 值使得基流曲线更平滑,减少了短期径流量波动的影响,使 BFI 值较大。HYSEP 法得到的 BFI 值均保持在 0.5 左右,区别不大。

从结果看,CMB 法与双参数数字滤波法分割效果相似,但 CMB 法物理意义明确,能够基于水化学质量平衡为单纯依赖径流量信号的数学分离提供物理约束与机理支撑,使基流分割结果具有更好的可解释性;与单参数数字滤波法和 HYSEP 法相比,CMB 法在径流量高峰期仍能有效分割基流,而其他方法在这种情况下容易低估基流^[31];BFI 法得到的 BFI 值较低,表明其在基流分割时倾向于低估基流。整体而言,CMB 法在 4 个电导率测站的基流分割中表现出一定的优势,尤其在径流量剧烈波动时能够通过水质参数辅助识别基流,同时该方法具有物理意义明确、计算简单的优势,在电导率数据质量较好且流域水文地质条件相对简单的站点,能够提供合理的基流分割结果。

表 2 不同方法计算的电导率测站 BFI 值

Table 2 BFI values at conductivity monitoring stations obtained by different methods								
电导率测站	CMB 法	标准 BFI 法	改进 BFI 法	单参数数字滤波法	双参数数字滤波法	固定 HYSEP 法	滑动 HYSEP 法	HYSEP 局部最小值法
坝下	0.25	0.22	0.25	0.18	0.44	0.54	0.53	0.52
埠头	0.32	0.24	0.24	0.20	0.44	0.53	0.54	0.50
仙居	0.55	0.20	0.23	0.20	0.42	0.50	0.49	0.48
柏芝岙	0.55	0.20	0.23	0.20	0.42	0.50	0.49	0.48

4 结 论

- a. 对于永安溪流域的坝下、埠头、仙居、柏芝岙 4 个电导率测站,电导率沿干流呈先下降后上升的变化趋势;在时间分布上与丰枯水时期呈负相关关系,即枯水期电导率较高,丰水期电导率较低。
- b. 强降雨事件中,降雨的稀释效应显著降低了电导率,尤其在流域中游和下游站点,稀释效应更为明显。相比之下,小雨事件对电导率的影响较小,电导率的显著变化主要集中在中雨和大雨事件中,降雨强度越大,稀释效应对电导率影响越明显。
- c. 与常用的基流分割方法相比,CMB 法物理意义明确、计算过程简单、稳定性好,在永安溪流域 4 个电导率测站的基流分割中均表现出较好的适用性,能够有效识别不同时期的基流占比。

参考文献:

[1] 吴珍妮,穆兴民,高鹏,等. 北洛河上游基流分割适宜性方法及基流特征[J]. 人民黄河,2019,41(3):94-99. (WU Zhenni, MU Xingmin, GAO Peng, et al. Baseflow separation and characteristic analysis of the upstream of Beiluo River Basin[J]. Yellow River, 2019, 41(3): 94-99. (in Chinese))

[2] 吕向林,姬世保,仇亚琴,等. 汾河流域上游基流特征及其影响因素[J]. 水资源保护,2022,38(2):147-153. (LYU Xianglin, JI Shibao, QIU Yaqin, et al. Characteristics of base flow in upstream of Fen River Basin and its influencing factors [J]. Water Resources Protection,2022,38(2):147-153. (in Chinese))

[3] 王京晶,徐宗学,赵刚,等. 基流分割对城市雨洪模拟不确定性分析的影响[J]. 水资源保护,2022,38(5):65-71. (WANG Jingjing, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Impact of baseflow separation on uncertainty analysis of urban storm water simulation [J]. Water Resources Protection,2022,38(5):65-71. (in Chinese))

[4] 王玉莲,杨泽凡,闫龙,等. 基于多方法综合比较的南水北调西线工程水源区生态需水研究[J]. 水资源保护,2024,40(4):137-147. (WANG Yulian, YANG Zefan, YAN Long,et al. Research on ecological water demand in water source area of west route of South-to-North Water Diversion Project based on multi-method comprehensive comparison [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4):137-147. (in Chinese))

[5] 胡彩虹,师晨,刘成帅,等. 基于数值模拟的黄河中游典型流域基流分割研究[J]. 中国农村水利水电,2024(7):60-68. (HU Caihong, SHI Chen, LIU Chengshuai, et al. Numerical simulation-based baseflow separation study of a typical basin in the middle reaches of the Yellow River[J]. China Rural Water and Hydropower,2024(7):

60-68. (in Chinese))

[6] 王辉,马巍,杨智,等. 基于数字滤波和 LOADEST 模型的思茅河基流氮磷输出通量估算[J]. 水资源保护,2023,39(6):186-194. (WANG Hui, MA Wei, YANG Zhi,et al. Estimation of base flow nitrogen and phosphorus output flux in the Simao River based on digital filtering and LOADEST model[J]. Water Resources Protection, 2023,39(6):186-194. (in Chinese))

[7] 范宁江,刘玉虹,安树青,等. 电导率作为流域水文变化指标初探[J]. 应用生态学报,2006,17(11):2127-2131. (FAN Ningjiang, LIU Yuhong, AN Shuqing, et al. Electrical conductivity as an indicator of hydrological characteristics in catchment scale[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(11): 2127-2131. (in Chinese))

[8] LONGOBARDI A, VILLANI P, GUIDA D, et al. Regression approaches for hydrograph separation: implications for the use of discontinuous electrical conductivity data[J]. Water,2018,10(9):1235.

[9] KISSEL M, SCHMALZ B. Comparison of baseflow separation methods in the German low mountain range [J]. Water,2020,12(6):1740.

[10] 王琰,楼青云,吕航. 基于电导率质量平衡法的基流分割方法研究[J]. 吉林建筑大学学报,2024,41(3):35-39. (WANG Yan, LOU Qingyun, LYU Hang. Study on base flow separation method based on conductivity mass balance method[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2024,41(3):35-39. (in Chinese))

[11] ZHONG Rong, LI Bo, ZHANG Xue, et al. Optimal baseflow separation scheme considering both high precision and low cost-take major watersheds in the United States as an example[J]. Journal of Hydrology,2022,612:128133.

[12] HAGEDORN B. Hydrograph separation through multi objective optimization: revealing the importance of a temporally and spatially constrained baseflow solute source [J]. Journal of Hydrology,2020,590:125349.

[13] CARTWRIGHT I. Implications of variations in stream specific conductivity for estimating baseflow using chemical mass balance and calibrated hydrograph techniques [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022,26(1):183-195.

[14] 张纪元,于坤霞,李占斌,等. 黄土高原典型流域基流变化规律及贡献率分析[J]. 水土保持学报,2024,38(5):82-91. (ZHANG Jiyuan, YU Kunxia, LI Zhanbin, et al. Analysis of the characteristics and contribution rate of base flow in typical basins of the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(5):82-91. (in Chinese))

[15] 林学钰,廖资生,钱云平,等. 基流分割法在黄河流域地下水研究中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),

- 2009,39(6):959-967. (LIN Xueyu, LIAO Zisheng, QIAN Yunping, et al. Baseflow separation for groundwater study in the Yellow River Basin, China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(6): 959-967. (in Chinese))
- [16] 王冠, 鲁程鹏, 李姝蕾, 等. 五种基流分割方法在长江螺山站的应用对比研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 118-123. (WANG Guan, LU Chengpeng, LI Shulei, et al. Applied comparison of five separation methods of base flow at Luoshan station of Yangtze River [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(3): 118-123. (in Chinese))
- [17] XIE Jiaxin, LIU Xiaomang, WANG Kaiwen, et al. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States [J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124628.
- [18] 张璞, 刘欢, 胡鹏, 等. 全国不同区域河流生态基流达标现状与不达标原因[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 176-182. (ZHANG Pu, LIU Huan, HU Peng, et al. Current situation of compliance of river ecological base flow and noncompliance reasons in different regions of China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 176-182. (in Chinese))
- [19] CHEN Hao, HUANG Saihua, XU Pueping, et al. Using baseflow ensembles for hydrologic hysteresis characterization in humid basins of southeastern China [J]. Water Resources Research, 2024, 60(4): e2023WR036195.
- [20] 郎明翰, 王希臣, 满秀玲, 等. 大兴安岭多年冻土区森林小流域基流分割[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(5): 90-96. (LANG Minghan, WANG Xichen, MAN Xiuling, et al. Baseflow separation of a forested watershed in the permafrost region of the Daxing'an Mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(5): 90-96. (in Chinese))
- [21] 李光录, 樊立娟. 长江源区基流分割方法对比及基流特征分析[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(4): 185-190. (LI Guanglu, FAN Lijuan. Comparative analysis of base flow separation methods and characteristics of base flow in the headwaters of the Yangtze River [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(4): 185-190. (in Chinese))
- [22] 孙志伟, 梁越, 钮新强. 基于数字滤波法的长江上游流域基流时空分布特征[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(11): 23-28. (SUN Zhiwei, LIANG Yue, NIU Xinqiang. Spatiotemporal variation characteristics of baseflow in the Upper Yangtze River based on digital filter method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(11): 23-28. (in Chinese))
- [23] ARNOLD J G, ALLEN P M, MUTTIAH R, et al. Automated base flow separation and recession analysis techniques [J]. Groundwater, 1995, 33(6): 1010-1018.
- [24] ARNOLD J G, ALLEN P M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(2): 411-424.
- [25] 钱云平, 蒋秀华, 金双彦, 等. 黄河中游黄土高原区河川基流特点及变化分析[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(2): 88-91. (QIAN Yunping, JIANG Xiuhua, JIN Shuangyan, et al. Analysis on the characteristic and variation of base flow in Loessial Plateau of the middle reaches of Huanghe River [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26(2): 88-91. (in Chinese))
- [26] ECKHARDT K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation? [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(2): 507-515.
- [27] YAN Xin, SUN Jineng, HUANG Yanan, et al. Detecting and attributing the changes in baseflow in China's Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2023, 617: 128957.
- [28] 徐晋轩, 李一阳, 潘兴瑶, 等. 多时空尺度协同的场次降雨水资源量评价方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 19-25. (XU Jinxuan, LI Yiyang, PAN Xingyao, et al. Evaluation method of precipitation water resources based on multiple temporal and spatial scale coordination [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 19-25. (in Chinese))
- [29] 周星, 沈忱, 倪广恒, 等. 结合退水曲线的数字滤波基流分割方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(3): 318-323. (ZHOU Xing, SHEN Chen, NI Guangheng, et al. Digital filter baseflow separation method based on a master recession curve [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2017, 57(3): 318-323. (in Chinese))
- [30] 王海彬, 刘家宏, 刘希胜, 等. 基于 ANUSPLIN 插值法的青海湖流域数字流域模型研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 82-91. (WANG Haibin, LIU Jiahong, LIU Xisheng, et al. Study on digital watershed model of the Qinghai Lake Basin based on ANUSPLIN interpolation method [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 82-91. (in Chinese))
- [31] 郝帅, 张洪波, 杨佳雯, 等. 未来气候情景下秦岭北麓水资源涵养区径流组分的结构性演化[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 169-179. (HAO Shuai, ZHANG Hongbo, YANG Jiawen, et al. Structural evolution of runoff components in water resources conservation area at northern foot of the Qinling Mountains under future climate scenarios [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 169-179. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-07 编辑: 施业)