

胡胜, 杨冬冬, 吴江, 等. 基于数字滤波法和 SWAT 模型的灞河流域基流时空变化特征研究[J]. 地理科学, 2017, 37(3): 455-463. [Hu Sheng, Yang Dongdong, Wu Jiong et al. Spatiotemporal Variation Characteristics of Baseflow in the Bahe River Basin Based on Digital Filter Method and SWAT Model. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(3): 455-463.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.03.016

基于数字滤波法和 SWAT 模型的灞河流域基流时空变化特征研究

胡胜^{1,2}, 杨冬冬^{1,2}, 吴江^{1,2}, 高宇³, 邱海军^{1,2}, 曹明明¹, 宋进喜^{1,2}, 万虹麟⁴

(1. 西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 西北大学地表系统与灾害研究院, 陕西 西安 710127;

3. 陕西省土地工程建设集团, 陕西 西安 710175; 4. 河北水利电力学院水利工程系, 河北 沧州 061001)

摘要: 将国内外应用较广的数字滤波法和分布式水文模型 SWAT 相结合, 在进行基流时间特征分析的基础上, 通过修正基流退水系数 α 、模型效率评价、重新运行模型、GIS 空间插值和趋势分析等方法, 创新性地实现了基流空间特征的可视化表达。研究结果表明: ① 2001~2012 年灞河流域年均基流指数(BFI)为 0.43, 总体呈增加的趋势。年降水量与年径流、年基流均呈明显的正相关关系, 与年基流指数呈明显的负相关关系; ② 基流年内变化较为稳定, 在时间上存在秋季 > 春季 > 夏季 > 冬季、汛期 > 非汛期的关系。枯水期的基流指数高达 0.78, 表明基流是枯水期河流的主要补给来源; ③ 灞河流域基流在空间上表现为自东南向西北、自上游向下游逐渐增加的趋势, 这种空间分异规律是由流域的地势和河流流向决定的。

关键词: 数字滤波法; SWAT 模型; SWAT Bflow; 时空变化特征; 基流; 灞河流域

中图分类号: K903 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2017)03-0455-09

目前学术界对基流还没有统一的定义^[1], 基流(Baseflow)通常指地下水和其他延迟的水资源补给河川径流的部分水量^[2]。基流的大小与流域的地形地势、气候、土壤、植被、流域面积、下垫面情况密不可分^[3]。基流是河流常年稳定的补给来源, 尤其是枯水期, 基流成为河流的主要补给形式。对于干旱和半干旱地区而言, 年基流指数甚至超过了地表径流在河川径流中的比例^[4]。基流在维系河流生态功能、工农业生产生活供水、保证河流生态需水、流域水量平衡、揭示地表水与地下水交换规律、稳定区域地质稳定等方面发挥重要的功能^[1,3,5]。然而, 基流不像河川径流可以通过水文站直接观测获得, 而是需要通过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、难点^[6-11]。

学者们从基流定义、产生机制、影响因素、基流分割方法、国内外研究进展等方面作了较为全面的综述研究^[1,10]。目前, 基流分割方法有直接分割法(直线分割法、库捷林方法、退水曲线法)、水量平衡法(参数分割法、水文模拟法)、同位素法和时间序列分析法(基流指数法、数字滤波法、平滑最小值法、时间步长法)四大类十余种方法。但是, 各种径流分割的理论和方法存在较大争议^[10,12], 各种基流分割方法也没有很好的普适性。自 Nathan 和 Mc Mahon^[13] 1990 年首次将数字滤波技术引入到基流分割中, 该方法已经成为国际上使用最为广泛的基流分割方法。数字滤波法能够将高频信号(地表径流)和低频信号(基流)分离, 达到快速从逐日流量过程中分割基流的目的^[9]。后续研究者不断对数字滤波法进行了改进, 目前普遍使用的

收稿日期: 2016-04-15; **修订日期:** 2016-06-20

基金项目: 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(131551KYSB20160002)、国家自然科学基金项目(41401602)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JQ2-4021)、陕西省重点科技创新团队计划项目(2014KCT-27)、西北大学研究生自主创新项目(YZZ15011)资助。[Foundation: International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences(131551KYSB20160002), National Natural Science Foundation of China(41401602), Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China(2014JQ2-4021), Key Scientific and Technological Innovation Team Plan of Shaanxi Province(2014KCT-27), Graduate Student Innovation Project of Northwest University(YZZ15011).]

作者简介: 胡胜(1988-), 湖北枣阳人, 博士研究生, 主要从事水文水资源与地质灾害等方面研究。E-mail: husheng198800@126.com

通讯作者: 邱海军, 副教授。E-mail: rgbixpl@163.com

有F1、F2、F3、F4共4种数字滤波法。由于研究区域的不同,4种滤波法也面临适用性问题^[14]。国内外学者在基流方面做了大量工作,并且取得一系列重要成果。除了研究不同分割方法在基流分割方面的差异外,同时还对基流的时间序列特征^[4,15,16]、基流变化原因^[3,17]、基流分割方法的区域适用性^[18,19]、基流指数(Baseflow Index, BFI)的回归分析^[14,17]做了深入研究。然而,地理要素的时空特征研究是地理学永恒的主题。地表过程的特征不仅体现在时间序列的变化上,更要能够展示其空间分布规律。从前人^[4,15,16]的工作中可以看出,研究者们大多侧重于流域基流特征的时间序列分析,鲜有人对流域基流的空间特征进行可视化表达,有也只是单纯地对个别水文站进行空间特征描述。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型基于水量平衡原理和ArcGIS平台,具有强大的地理要素空间表达能力,研究者也能进行二次开发构建流域水文信息可视化系统^[20]。分布式水文模型SWAT为地表过程要素的空间化和定量化研究带来了新的机遇。

基于这种考虑,本研究将数字滤波法和SWAT模型有机结合起来,先利用数字滤波法实现传统的基流时间特征分析,在此基础上通过模型参数率定、参数率定后模型效率评价、GIS空间插值与全局趋势分析等方法实现灞河流域年均基流的空间化表达,力求全面反映灞河流域基流的时空分布特征,为SWAT模型参数率定方法的优化、流域地下水资源的开发与保护、河流生态需水量政策的制定提供依据。

1 研究区域

灞河,发源于秦岭北麓蓝田县灞源乡九道沟,位于八百里秦川中段、西安市东南,是渭河南岸的一级支流,也是西安重要的水源地之一(图1)。灞河全长104.1 km,流域面积2 581 km²,地理范围介于109°00′~109°47′E、33°50′~34°27′N之间,流域落差1 142 m,上游河道平均比降9‰,下游河道比降为1.58‰。流域南高北低,地势自东南向西北倾斜,上游流经秦岭石质山地,中下游流经横岭丘陵、黄土台塬和关中平原。灞河流域为暖温带大陆性季风气候,降水量由南向北逐渐递减,秦岭山区年降水量在830 mm以上,横岭丘陵、黄土台塬在710~830 mm,流域年蒸发量776 mm。

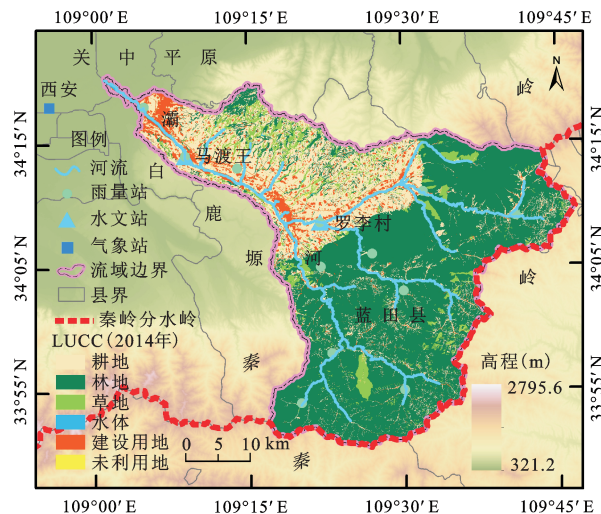


图1 研究区位置与土地利用类型

Fig.1 The location and land use classes of the Bahe River Basin

2 数据需求与来源

本文使用的数据及其来源如下:① 数字高程模型(DEM):本文采用SRTM的30 m×30 m分辨率地形产品数据,进行了滤波处理和误差修正;② 土地利用图:本文使用了灞河流域县区2014年第二次全国土地调查数据库并进行土地利用重分类,得到耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地6种土地利用类型(图1);③ 土壤数据:采用了联合国粮农组织官网HWSD数据库(<http://www.fao.org/home/en/>)提供的1:100万土壤数据集;④ 水文数据:水文数据由西安理工大学图书馆特色馆藏《黄河流域水文资料(2001~2012)》(纸质版)整理得到,其中灞河流域涉及2个水文站和12个雨量站;⑤ 气象数据:SWAT模型需要输入逐日降水、气温、风速、相对湿度、太阳辐射等数据,本文使用的气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn/>),选取临近灞河流域的西安站来构建SWAT模型的天气发生器。

3 方法与模型

3.1 研究方法

1) 数字滤波法(F1)。本文采用SWAT官网提供的数字滤波基流分割工具(SWAT Bflow)实现对北洛河流域水文站的基流分割。SWAT Bflow程序的算法参照Arnold和Allen等人^[6,7]提出的单参

数数字滤波方法,其滤波方程为:

$$q_t = \beta q_{t-1} + \frac{1+\beta}{2}(Q_t - Q_{t-1}) \quad (1)$$

$$b_t = Q_t - q_t \quad (2)$$

式中: Q_t 和 Q_{t-1} 分别第 t 和 $t-1$ 时刻的径流; q_t 和 q_{t-1} 分别第 t 和 $t-1$ 时刻的地表径流; β 为滤波参数, Arnold^[7]和 Nathan^[13]等人认为当 β 值取 0.925 时,能够得到较好的分割结果; b_t 为第 t 时刻的基流。

2) SWAT 模型效率评价方法。本文采用国内外文献中普遍使用的确定系数(R^2)、纳什效率系数(NSE)和百分比偏差(PBIAS)进行 SWAT 模型效率的评价,3种评价方法的计算公式可以参考相关文献^[21-24],本文不再一一介绍。

此外,为了量化基流在总径流量所占比重,一般用基流指数来描述,它反映了河川基流量在总径流量的分量。

3.2 模型与程序

SWAT 模型是美国农业部(USDA)农业研究局(ARS)Jeff Arnold 博士开发的流域尺度模型,它具有很强的物理基础,能在资料缺乏的地区建模^[25]。目前该模型在国外的北美、非洲、中东、欧洲等地^[26-29]得到广泛应用,近些年国内研究者在诸多流域^[22,30-33]开展过研究工作。SWAT Bflow 是 SWAT 模型官网提供的一款基流滤波程序,它的分割原理采用了 Arnold 和 Allen 等人^[6,7]提出的单参数数字滤波方法,能够快速地计算河川径流中的基流部分。SWAT-CUP 是一款开源、免费的 SWAT 模型校准和不确定性分析程序,具有界面友好、参数率定灵活便捷、校验方法多样化、处理速度快、效率高等特点^[22]。本文采用了 SUFI2 方法进行模型校准。

4 结果分析

4.1 基流年内变化分析

4.1.1 逐日变化分析

图2展示了灞河流域马渡王水文站2001~2012年逐日降雨-径流过程线和数字滤波法3个通道(Bflow Pass1、2、3)的基流分割结果,其中 Bflow Pass1 分割的基流最大, Bflow Pass3 分割的基流最小。选取何种通道分割的基流结果,需要视研究区具体情况而定,这是因为流域内的基流变化往往受到降水类型、土地利用类型、土壤类型和暗沟排水等因素共同作用^[7]。灞河流域地处秦岭山区与关中平原、湿润地区与半湿润地区的过渡地带,流域内植被类型和土壤类型多样,逐日降雨和径流的年内变化剧烈,降雨集中在夏秋季节,且暴雨和洪峰较多(图2)。为了能够显示具体的分割细节,图2中给出了2009年5~10月逐日基流分割结果的局部放大图。不难看出,数字滤波法的第二通道(Bflow Pass2)分割的结果更准确,因为 Bflow Pass1 分割的基流过高且变化剧烈, Bflow Pass3 分割的基流过于平滑,也不能很好地表现与河川径流的对应关系。

4.1.2 逐月变化分析

图3a为灞河流域2001~2012年月均径流、基流、基流指数、降水量年内变化情况。从图中可以看出灞河在春季(3~5月)和夏秋季(6~11月)出现了2次汛期,夏秋季为主汛期。2001~2012年灞河流域月均径流在4.44~36.4 m³/s之间变化,平均值为13.01 m³/s,最高值出现在9月,最低值出现在2月。与河川径流相比,灞河流域的月均基流量变化较为平稳,基流均值为5.64 m³/s,变化范围在3.01~10.20 m³/s之间,最大值和最小值分别出现在

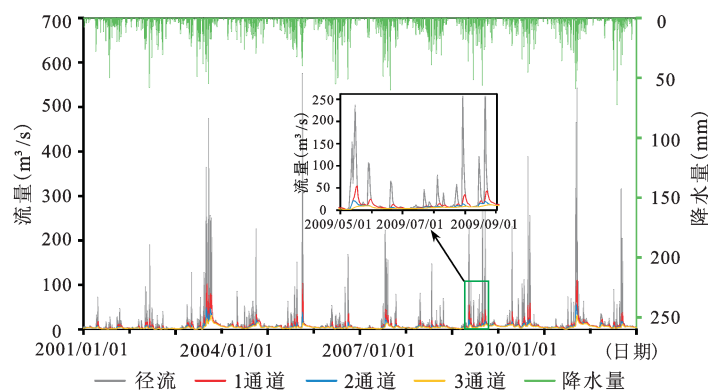


图2 马渡王水文站逐日降雨-径流过程线与数字滤波分割

Fig.2 Daily precipitation-runoff process and baseflow separation for Maduwang hydrological station

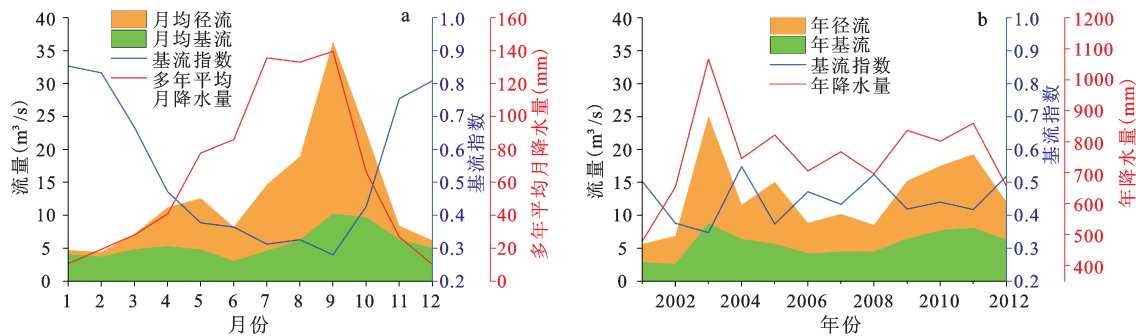


图3 马渡王水文站2001~2012年月均和年均基流特征

Fig.3 Monthly and yearly baseflow characteristics of Maduwang hydrological station in 2001- 2012

9月和6月,8~10月的基流比其他月份高。

虽然以往不少研究者^[11,17]建立了气温、降水与径流的线性拟合关系,但水文、气象过程一般具有非线性特征,简单的线性拟合很难清楚表达二者之间的关系。在处理非线性特征要素之间相互关系(周期性、相关性等)时,连续小波变换、交叉小波变换和小波相干法能够探讨径流与气候因子在时频域中的多时间尺度相关关系及周期特征^[34],因而受到国内外研究者^[34-37]的青睐。然而,该方法要求数据的时间序列较长。本文年月尺度的分析数据只有12个,样本数量较少,采用该方法的效果不理想。因此,我们对线性、指数、对数、多项式、幂指数5种拟合方法进行了比较,发现6次多项式拟合结果的确定系数 R^2 最高。拟合结果表明月均径流、月均基流与多年平均月降水量呈显著的正相关关系,它们的多项式拟合方程分别为 $y=(-2E-05)x^6+0.0029x^5-0.1419x^4+3.1608x^3-34.182x^2+179.4x-338.52$ ($R^2=0.85$)、 $y=0.852x^6-32.596x^5+502.27x^4-3985.7x^3+17183x^2-38167x+34179$ ($R^2=0.36$)。月均基流指数(BFI)与多年平均月降水量呈显著的负相关关系,拟合方程为 $y=-267596x^6+950967x^5-(1E+06)x^4+(1E+06)x^3-414694x^2+85443x-6830.2$ ($R^2=0.98$),二者在图像上表现为近似轴对称图形(图3a中的红线与蓝线)。从图2中的逐日降雨-径流过程线可以发现,强降雨使得地表径流和河川径流迅速增大,但是基流的变化幅度较小,由基流指数的计算公式($BFI=\text{基流总量}/\text{总流量}$)可知,基流指数反而变小,这也是多年平均月降水量与月均基流指数呈负相关的原因所在。

4.1.3 季节变化分析

在月均基流分析的基础上,统计了春夏秋冬4

个季节、汛期与非汛期的基流特征。基流年内变化较为稳定,春夏冬差别很小,基流存在秋季($8.74 \text{ m}^3/\text{s}$)>春季($4.95 \text{ m}^3/\text{s}$)>夏季($4.60 \text{ m}^3/\text{s}$)>冬季($4.25 \text{ m}^3/\text{s}$)、汛期($6.24 \text{ m}^3/\text{s}$)>非汛期($4.78 \text{ m}^3/\text{s}$)的数量关系,基流指数的大小关系为冬季(0.83)>春季(0.51)>秋季(0.49)>夏季(0.33)、非汛期(0.78)>汛期(0.37),说明枯水期灞河流域以地下水补给为主。

4.2 基流年际变化分析

从图3b中可以看出,几组因子存在明显的对应关系:①年径流、年基流与年降水量均呈明显的正相关关系,这说明降水是影响河川径流和基流的决定性因素,年径流与年降水量的拟合方程为 $y=-0.0009x^6+0.0886x^5-3.4175x^4+67.726x^3-725.75x^2+3992.7x-8128.5$ ($R^2=0.95$),年基流与降水量的拟合方程为 $y=0.9443x^6-35.241x^5+537.89x^4-4270x^3+18455x^2-40785x+36299$ ($R^2=0.90$)。②年基流指数(BFI)与年降水量呈明显的负相关关系,拟合方程为 $y=(-1E+09)x^6+(4E+09)x^5-(4E+09)x^4+(2E+09)x^3-(7E+08)x^2+(1E+08)x-(9E+06)$ ($R^2=0.87$),二者在图像上也表现为近似轴对称图形(图3b中的红线与蓝线)。这与陈利群^[11]、牛明慧^[38]等人的研究结果相一致。

图3b还表明2001~2012年灞河流域年基流呈现出线性的增加趋势,增加幅度为 $2.68 (\text{m}^3/\text{s})/10\text{a}$,年均基流在 $(2.60\sim 8.74) \text{ m}^3/\text{s}$ 波动,年均值为 $5.64 \text{ m}^3/\text{s}$ 。通过SWAT Bflow程序对灞河流域12a的日径流分割得到年均基流指数(表1),如前所述Bflow Pass2分割结果较为准确,中游的罗李村年均基流指数(BFI)为0.37,基流退水系数 α 为0.0187,下游的马渡王年均基流指数为0.43,基流退水系数 α 为0.0334。

表1 灞河流域2001~2012年年均基流分割结果				
Table 1 Results of yearly baseflow separation for the Bahe River				
Basin in 2001-2012				
水文站	基流指数			ALPHA_BF
	Bflow Pass1	Bflow Pass2	Bflow Pass3	
罗李村	0.53	0.37	0.31	0.0187
马渡王	0.58	0.43	0.37	0.0334

4.3 基流退水系数 α 对SWAT模拟结果的影响

水文模型的运行和校准工作必定会涉及到参数率定问题,以往研究中研究者们根据研究区的特点会选择多种(有的多达十几种)参数进行模型的校准工作。众所周知,每个流域都有不同的水文参数,如河流比降、基流退水系数、地下水迟滞系数等,如果能够通过某种方法计算出这些参数,就大大提高了参数率定的效率,然而大多数研究者却忽视了这一问题。本文将探讨通过数字滤波法计算得到的基流退水系数 α 对SWAT模型模拟结果的影响。

由上可知,灞河流域年均退水系数 α 在0.018 7~0.033 4之间。因此,在SWAT CUP 2012中对基流退水系数 α 作如下设置:v_ALPHA_BF.gw 0.0187 0.0334,模拟次数100,并且不再率定其他参数。图4是SWAT模型原始模拟结果和经过校准基流退水系数 α 后的模拟结果对比,月尺度的模拟对比表明,基流退水系数 α 率定对汛期洪峰模拟有很大改善作用,弥补了参数校准前洪峰模拟过低的问题。表2为基流退水系数 α 率定前后的SWAT模型效率评价。可以看出,基流退水系数 α 率定前后模拟结果差异显著,经过参数率定后的模拟精度大大提高。如马王渡水文站确定系数 R^2 由0.83提高到0.84,纳什效率系数(NSE)由0.72提高到0.80,百分比偏差($PBIAS$)由28.64%降低到15.96%。罗李村水文站的模拟结果精度也大大提高,且比马渡王水文站的模拟效果更好。

4.4 基流的空间分布特征与趋势分析

基于时间序列分析的基流特征研究较为普遍,然而从子流域角度进行基流的空间特征研究还很少有人涉及。究其原因,主要是中小尺度流域的水文站点数量有限,采样点不足和分布不均成为制约利用GIS空间插值方法实现基流空间特征可视化的一大难题。基于水量平衡原理的分布式水文模型SWAT能够实现水文响应单元(HRUs)

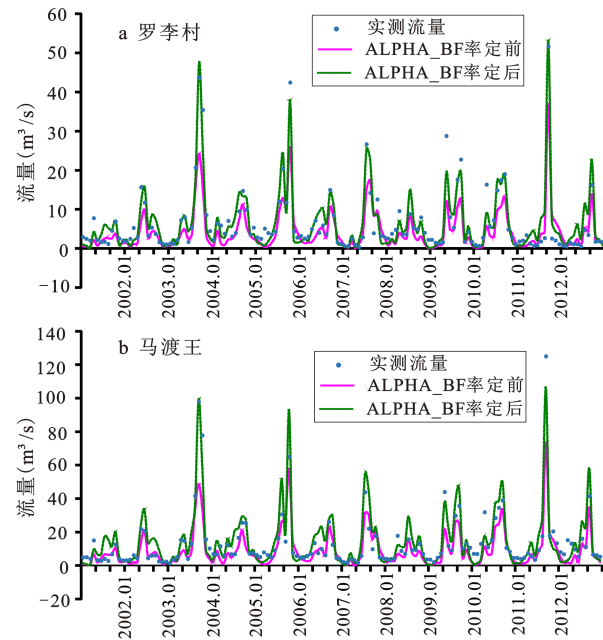


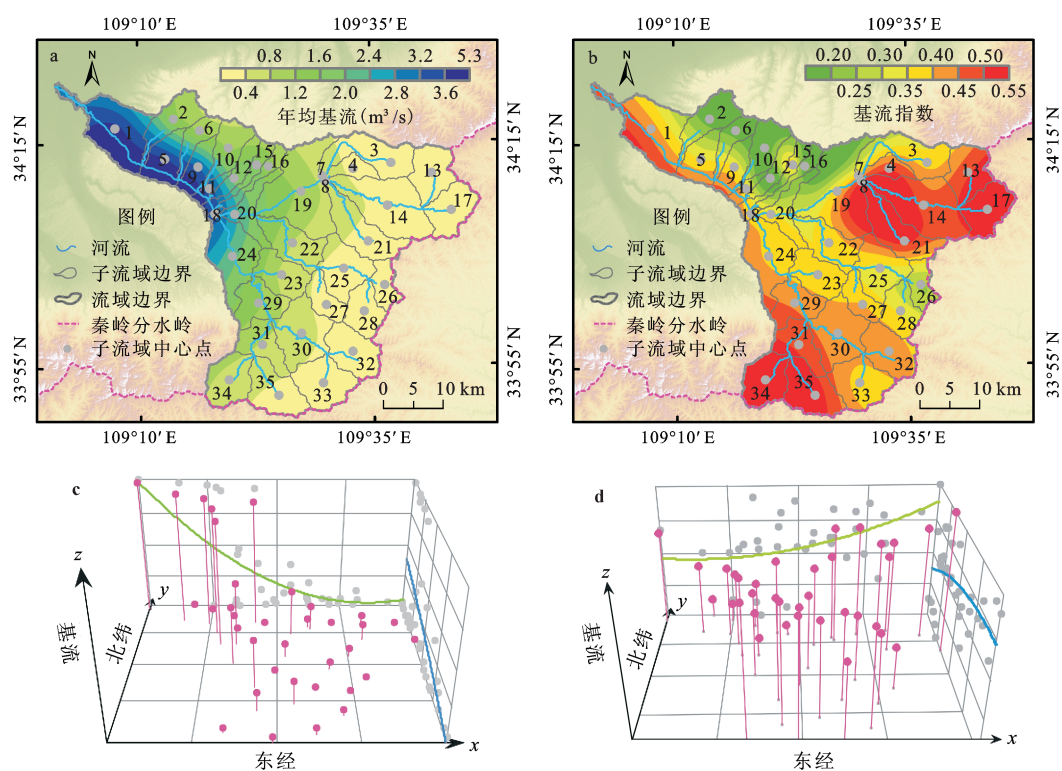
图4 基流退水系数 α 率定前后模拟结果对比

Fig.4 Simulation results comparison before and after calibrating baseflow α factor

表2 基流退水系数 α 对SWAT模型效率的影响						
Table 2 Baseflow α factor impacts on the efficiency of the SWAT model						
水文站	ALPHA_BF率定前			ALPHA_BF率定后		
	R^2	NSE	$PBIAS$	R^2	NSE	$PBIAS$
罗李村	0.85	0.71	31.84%	0.88	0.88	5.96%
马渡王	0.83	0.72	28.64%	0.84	0.80	15.96%

和子流域尺度的水循环过程模拟。而通过数字滤波得到了灞河流域的年均基流退水系数 α ,经过参数率定后模型的模拟精度大大提高,能够满足流域水文预报。基于此,我们在SWAT 2012中修正灞河流域的年均基流退水系数 α ,再次运行模型。这样既实现了子流域的径流模拟,又保证了模型模拟的精度。然后再次利用SWAT Bflow实现灞河流域子流域的逐日基流分割。为了能够实现基流的可视化表达,我们将每个子流域的年均基流值和BFI提取到子流域中心点上,利用GIS空间分析的克里金插值法(Kriging)以及地统计分析工具的全局趋势分析得到灞河流域年均基流和BFI的空间分布与趋势变化图(图5)。

图5a显示,灞河流域子流域的年均基流在0.04~5.30 m^3/s 之间,马渡王水文站所在的Sub1子流域的年均基流为5.30 m^3/s ,与图3中计算的年均



图中序号为子流域编号

图5 灞河流域年均基流和基流指数的空间分布(a,b)与变化趋势(c,d)

Fig.5 Spatial distribution(a,b) and change trend(c,d) of yearly baseflow and BFI in the Bahe River Basin

值 $5.64 \text{ m}^3/\text{s}$ 十分吻合,说明上述基流插值方法可信度较高。GIS全局趋势分析(图5c)表明,年均基流在空间变化上呈现自东向西(绿线)、自南向北(蓝线)递增的趋势。灞河流域年均基流自东南向西北递增的趋势是由地势和河流流向决定的,灞河下游地区的基流明显高于中上游地区,二者最高的130多倍。年均基流的高值区($>2.4 \text{ m}^3/\text{s}$)集中分布在子流域1、5、9、11、15、18,这些子流域大多属于灞河流域下游地区;低值区($<0.8 \text{ m}^3/\text{s}$)集中分布在子流域3、4、7、8、13、14、17、21、25、26、27、28、30、31、32、33、34、35,它们均位于上游地区,中值区($0.8\sim 2.4 \text{ m}^3/\text{s}$)分布在中游地区的其他子流域。灞河流域90%以上子流域年均BFI小于0.5,也进一步证明了在年尺度上降水转换为地表径流的效率更高,地表径流量在灞河流域总径流量中占绝对优势,降雨是灞河流域主要的补给形式。从基流指数的全局趋势分析图(图5d)中可以看出,基流指数表现出自东向西(绿线)、自南向北(蓝线)递减的趋势。个别子流域的BFI大于0.5,

BFI的高值区($0.4\sim 0.55$)主要分布在秦岭山区,这表明秦岭具有重要的水源涵养功能,枯水期能够为灞河流域提供稳定的地下水来源。

5 结论与讨论

5.1 结论

1) 数字滤波法与SWAT模型的有机结合,为研究基流、地表径流的空间分布特征提供了新的机遇,也为地表过程要素的空间化提供了一种新思路。由于受不同气候类型、补给方式的影响,湿润地区河流的基流指数一般偏低,干旱、半干旱地区则偏高,数字滤波法哪个通道的基流分割结果更合理需因河流而异。

2) 基流作为河川径流的重要组成部分,在参与河流与地下水补给交换过程中占有举足轻重的地位。虽然基流变化稳定,但仍主要受降水量变化的影响,无论是年尺度还是与尺度,河川径流、基流均与降水量呈显著的正相关关系,基流指数则与降水量呈显著的负相关关系。

3) 从时间特征来看,基流年内变化十分稳定,基流指数(BFI)在冬春季节明显高于夏秋季,表明枯水期基流对河川径流贡献更大,而丰水期地表径流对河川径流贡献更大,这主要受制于当地的气候条件。从空间特征看,年均基流的空间分布与流域地形、河流走向有密切关系,而年均基流指数分布却没有明显的规律性,总体而言,高度植被覆盖的森林地区年均基流指数比其他下垫面偏高,表明森林具有良好的水源涵养功能,枯水期能够为河流提供稳定的地下水补给。

4) SWAT模型参数众多,参数率定是一个繁重的工作。通过某种程序或方法计算能够获取的参数,可以直接输入模型,这样就大大提高了参数率定的效率,也提高了模拟的精度,从而更好地满足流域水文预报。

5.2 讨论

① 气候变化和人类活动共同影响着流域的径流过程。2001~2012年灞河流域年降水量呈逐渐增加的趋势,年径流和年基流也随之增加,在这种变化过程中气候变化和人类活动对径流、基流的贡献率是多少?谁占主导地位?由于数据序列时间较短,本文未能进行深层次的原因探讨。② 本文虽然进行了降水、径流、基流、基流指数的拟合与相关性分析,但是也只是简单的多项式拟合。然而降水、径流过程都具有非线性特征,如果处理长时间序列的降水、径流数据,最好使用连续小波变换、交叉小波变换和小波相干法,因为该方法能够探讨径流与气候因子在时频域中的多时间尺度相关关系及周期特征。③ 基流的空间分布在一定程度上反映了流域地下水的丰富度。图5a直观展示了灞河流域基流的空间分布趋势与流域地势、河流水系有密切关系,但这种分布特征与流域的气候、植被和土壤是什么样的内在关系?这些因素的分布与变化对流域产汇流有什么样的影响?这些问题都是以后研究应该关注的问题。④ SWAT Bflow程序能够实现逐日流量的基流分割,并计算出基流指数和基流退水系数 α ,这为SWAT模型的参数率定提供了科学参考,通过SWAT CUP率定后,能很好地提升SWAT模型的模拟效率。⑤ 本文的主要目的在于探讨灞河流域基流的时空特征,然而目前使用的基流分割方法多达十几种,且每种方法的估算结果差异较大。为了实现与SWAT水文模型的耦合研究,我们选用

了SWAT官网推荐使用的数字滤波法(F1)进行基流分割,但是该分割方法不一定是最佳的方法,由于篇幅有限,本文并没有将该方法与其他分割方法进行对比性和差异性研究,这也是不足之处。当然,这是以后研究需要加强的环节。

参考文献(References):

- [1] 徐磊磊,刘敬林,金昌杰,等.水文过程的基流分割方法研究进展[J].应用生态学报,2011,22(11):3073-3080. [Xu Leilei, Liu Jinglin, Jin Changjie et al. Baseflow separation methods in hydrological process research: A review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 3073-3080.]
- [2] Hall F R. Base-flow recessions—A review[J]. Water Resources Research, 1968, 4(5): 973-983.
- [3] 张华,张勃,赵传燕.黑河上游多年基流变化及其原因分析[J].地理研究,2011,30(8):1421-1430. [Zhang Hua, Zhang Bo, Zhao Chuanyan. Annual base flow change and its causes in the upper reaches of Heihe River. Geographical Research, 2011, 30(8): 1421-1430.]
- [4] 戴明英.黄河中游支流基流的分割及特性分析[J].人民黄河,1996,(10):40-43. [Dai Mingying. Baseflow separation and characteristic analysis of tributaries in the middle reaches of the Yellow River. Yellow River, 1996(10): 40-43.]
- [5] 张殷钦.基流对流域水量平衡的影响研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014. [Zhang Yanqin. Study on the impact of base-flow on watershed water balance Yangling: Yangling: Northwest A&F University, 2014.]
- [6] Arnold J G, Allen P M. Automated methods for estimating base-flow and ground water recharge from streamflow records[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(2): 411-424.
- [7] Arnold J G, Allen P M, Muttiah Ret al. Automated base flow separation and recession analysis techniques[J]. Groundwater, 1995, 33(6): 1010-1018.
- [8] Koskela A I, Fisher T R, Utz R M et al. A new precipitation-based method of baseflow separation and event identification for small watersheds (< 50 km²)[J]. Journal of Hydrology, 2012, 450(450/451): 267-278.
- [9] 杨蕊,王龙,韩春玲.9种基流分割方法在南盘江上游的应用对比[J].云南农业大学学报:自然科学,2013,28(5):707-712. [Yang Rui, Wang Long, Han Chunling. Nine kinds of base flow separation methods apply and comparative in the Upper Reach of Nanpan River. Journal of Yunnan Agricultural University, 2013, 28(5): 707-712.]
- [10] 陈利群,刘昌明,李发东.基流研究综述[J].地理科学进展,2006,25(1):1-15. [Chen Liqun, Liu Changming, Li Fadong. Reviews on base flow researches. Progress in Geography, 2006, 25(1): 1-15.]
- [11] 陈利群,刘昌明,郝芳华,等.黄河源区基流变化及影响因子分析[J].冰川冻土,2006,28(2):141-148. [Chen Liqun, Liu

- Changming, Hao Fanghua et al. Change of the baseflow and its impacting factors in the source regions of Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(2): 141-148.]
- [12] Partington D, Brunner P, Simmons C T et al. Evaluation of outputs from automated baseflow separation methods against simulated baseflow from a physically based, surface water-groundwater flow model[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, (458/459): 28-39.
- [13] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [14] 黄国如. 流量过程线的自动分割方法探讨[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(1): 73-78. [Huang Guoru. Base flow separation from daily flow hydrograph using automated techniques. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(1): 73-78.]
- [15] 祖明娟, 管仪庆, 张丹蓉, 等. 海流兔河近 50 年来基流变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(3): 38-42. [Zu Mingjuan, Guan Yiqing, Zhang Danrong et al. Analysis of base flow variation characteristic in Hailiutu River in past 50 years. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2013, 24(3): 38-42.]
- [16] 党素珍, 王中根, 刘昌明. 黑河上游地区基流分割及其变化特征分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(12): 2232-2237. [Dang Suzhen, Wang Zhonggen, Liu Changming. Baseflow separation and its characteristics in the upper reaches of the Heihe River Basin. *Resources Science*, 2011, 33(12): 2232-2237.]
- [17] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域基流特点及其影响因子分析[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 87-92. [Guo Juntao, Zhang Zhiqiang, Wang Chengping et al. Features of baseflow and its influencing factors for small watersheds in Loess Hilly and Gully Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(1): 87-92.]
- [18] 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 等. 自动基流分割法在黄土高原水蚀风蚀交错区典型流域适用性分析[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(6): 57-64. [Lei Yongna, Zhang Xiaoping, Zhang Jianjun et al. Suitability analysis of automatic baseflow separation methods in typical watersheds of water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(6): 57-64.]
- [19] 于艺鹏, 杨亚辉, 蔺鹏飞, 等. 自动基流分割法在北洛河流域的适宜性对比[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(2): 302-307. [Yu Yipeng, Yang Yahui, Lin Pengfei et al. Comparison of suitability among automatic baseflow separation methods for separating baseflow in Beiluo River Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(2): 302-307.]
- [20] 朱睿. 基于 GIServices 的 SWAT 水文模型服务研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014. [Zhu Rui. Research on SWAT hydrological modeling based on GIServices for web services. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.]
- [21] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [22] 胡胜. 基于 SWAT 模型的北洛河流域生态水文过程模拟与预测研究[D]. 西安: 西北大学, 2015. [Hu Sheng. Simulation and prediction research of the ecohydrological process based on SWAT model in Beiluo River Basin. Xi'an: Northwest University, 2015.]
- [23] Gupta H V, Sorooshian S, Yapo P O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1999, 4(2): 135-143.
- [24] Moriasi D N, Arnold J G, Liew M V et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [25] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(1): 79-86. [Wang Zhonggen, Liu Changming, Huang Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe Basin. *Progress in Geography*, 2003, 22(1): 79-86.]
- [26] Dile Y T, Srinivasan R. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data - scarce watersheds: An application in the Blue Nile River Basin[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2014, 50(5): 1226-1241.
- [27] Rouholahnejad E, Abbaspour K C, Srinivasan R et al. Water resources of the Black Sea Basin at high spatial and temporal resolution[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(7): 5866-5885.
- [28] Abbaspour K C, Rouholahnejad E, Vaghefi S et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 524: 733-752.
- [29] Troin M, Caya D, Velázquez J A et al. Hydrological response to dynamical downscaling of climate model outputs: A case study for western and eastern snowmelt-dominated Canada catchments[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, (4): 595-610.
- [30] 刘昌明, 夏军, 郭生练, 等. 黄河流域分布式水文模型初步研究与进展[J]. *水科学进展*, 2004, 15(4): 495-500. [Liu Changming, Xia Jun, Guo Shenglian et al. Advances in distributed hydrological modeling in the Yellow River basin. *Advances in Water Science*, 2004, 15(4): 495-500.]
- [31] 赖正清, 李硕, 李呈罡, 等. SWAT 模型在黑河中上游流域的改进与应用[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(8): 1404-1413. [Lai Zhengqing, Li Shuo, Li Chenggang et al. Improvement and applications of SWAT model in the upper-middle Heihe River Basin. *Journal of Natural Resource*, 2013, 28(8): 1404-1413.]
- [32] 刘贵花, 栾兆擎, 阎百兴, 等. 基于 SWAT 模型的三江平原沼泽性河流的径流模拟[J]. *水文*, 2014, 34(1): 46-51. [Liu Guihua, Luan Zhaoqing, Yan Baixing et al. Runoff simulation for marsh rivers in Sanjiang Plain based on SWAT model. *Journal of China Hydrology*, 2014, 34(1): 46-51.]
- [33] 王林, 陈兴伟. 退化山地生态系统植被恢复水文效应的 SWAT

- 模拟[J]. 山地学报, 2008, 26(1): 71-75. [Wang Lin, Chen Xingwei. Simulation of hydrological effects on vegetation restoration of degraded mountain ecosystem with SWAT model. Journal of Mountain Science, 2008, 26(1): 71-75.]
- [34] 刘志方, 刘友存, 郝永红, 等. 黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1137-1146. [Liu Zhifang, Liu Youcun, Hao Yonghong et al. Multi-time scale cross-wavelet transformation between runoff and climate factors in the upstream of Heihe River. Arid Land Geography, 2014, 37(6): 1137-1146.]
- [35] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79 (1): 61-78.
- [36] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11(5/6): 561-566.
- [37] 祁晓凡, 蒋忠诚, 罗为群. 典型表层岩溶水系统降水量与泉流量的交叉小波分析[J]. 地球与环境, 2012, 40(4): 561-567. [Qi Xiaofan, Jiang Zhongcheng, Luo Weiqun. Cross wavelet analysis of relationship between precipitation and spring discharge of a typical epikarst water system. Earth and Environment, 2012, 40(4): 561-567.]
- [38] 牛明慧, 孔珂, 徐征和. 济南市南部山区汛期的基流量变化[J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2013, 27(4): 414-418. [Niu Minghui, Kong Ke, Xu Zhenghe. Base flow changes of Jinan southern mountains in flood season. Journal of University of Jinan: Sci. & Tech., 2013, 27(4): 414-418.]

Spatiotemporal Variation Characteristics of Baseflow in the Bahe River Basin Based on Digital Filter Method and SWAT Model

Hu Sheng^{1,2}, Yang Dongdong^{1,2}, Wu Jiang^{1,2}, Gao Yu³, Qiu Haijun^{1,2}, Cao Mingming¹, Song Jinxi^{1,2}, Wan Honglin³

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. Institute of Earth Surface System and Hazards, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an 710175, Shaanxi, China; 4. Department of Water Conservancy, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, Hebei, China)

Abstract: Baseflow plays an important role in maintaining the health and the ecological functions of rivers. Baseflow separation is also a hot topic of hydrology all the time. The article combines the Digital Filter Method and SWAT which is a distributed hydrological model and widely used at home and abroad. It creatively realizes the visual representation of the spatial features of baseflow on the basis of analyzing the time characteristics of baseflow and by correcting baseflow alpha factor, evaluating the model efficiency, rerunning the SWAT model, GIS spatial interpolation and trend analysis etc. The results show that: 1) The annual average Baseflow Index (BFI) of the Bahe River Basin from 2001 to 2012 is 0.43, presenting an increasing trend on the whole. The annual precipitation has a positive correlation with annual runoff and annual baseflow; but it obviously shows a negative relation between annual precipitation and annual Baseflow Index (BFI); 2) The change of baseflow is relatively stable within a year, and the base flow in different seasons tends to be: Autumn> Spring> Summer> Winter, while flood season is bigger than that of the non-flood season. BFI is as high as 0.78 in dry seasons, which shows that baseflow is the main replenishment source of river in dry seasons; 3) The baseflow of the Bahe River Basin tends to be an increasing tendency from Southeast to Northwest and from upstream to downstream in spatial terms. Also, such a spatial variation law is determined by the terrain of the basin and the direction of the river.

Key words: Digital Filter Method; SWAT Model; SWAT Bflow; spatiotemporal variation characteristics; baseflow; the Bahe River Basin