

引用格式: 甘容, 徐孟莎, 左其亭. 伊洛河流域基流分割及其时空变化特征[J]. 资源科学, 2022, 44(9): 1824-1834. [Gan R, Xu M S, Zuo Q T. Baseflow separation and spatiotemporal variation characteristics in the Yiluo River basin[J]. Resources Science, 2022, 44(9): 1824-1834.] DOI: 10.18402/resci.2022.09.07

伊洛河流域基流分割及其时空变化特征

甘容^{1,2}, 徐孟莎^{1,2}, 左其亭^{1,3}

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001; 2. 河南省地下水污染防治与修复重点实验室, 郑州 450001; 3. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室, 郑州 450001)

摘要:基流是径流中相对稳定的组成部分,是枯水期径流的主要来源。为探究伊洛河流域径流和基流的时空变化特征,本文通过比较 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型及 Chapman 法在伊洛河流域基流分割的适用性,选择最优基流分割方法,确定流域的基流过程,并采用 Mann-Kendall 检验法、年内分配指标和反距离加权插值法,分析径流、基流和基流指数 (Baseflow index, *BFI*) 的年际、年内变化和空间分布特征。结果表明:①通过黑石关站实测径流数据验证,SWAT 模型在伊洛河流域的适用性较好,模拟基流比 Chapman 法更精确;②1964—2017 年伊洛河流域径流、基流和 *BFI* 均呈显著下降趋势,但三者突变情况有所差异;径流和基流年内呈现“单峰型”分布,且具有明显的季节性和不均匀性的特点,基流迟滞效应显著;③径流、基流和 *BFI* 值在流域西部和中部相对较高,东部相对较低,整个地区 90% 以上的子流域年均 *BFI* 小于 0.5。本文结果可为伊洛河流域水资源合理开发利用及生态环境保护提供参考。

关键词:时空变化; SWAT 模型; 径流; 基流; 基流指数; 伊洛河流域

DOI: 10.18402/resci.2022.09.07

1 引言

水资源是维持生态平衡和正常运转的重要组成部分,是人类生产生活不可或缺的自然资源^[1,2]。径流作为流域水文循环的关键要素,影响着河流流量、水位变化以及河流生态系统平衡,其可以划分为直接径流和基流^[3]。基流通常来源于地下水和其他延迟流入河流的浅层地下流,是径流中相对稳定的组成部分^[4],可维持枯水季河流流量和生态系统健康。基流在流域水量平衡、地表水与地下水交换、水资源评价与管理、非点源污染、生态需水、工农业生产生活供水等方面的研究中占有重要地位^[5]。

基流量无法直接测量,国内外学者一般采用数值模拟法^[4,6](如数字滤波法、滑动最小值法、时间步长法、加里宁法等)或者模型模拟法^[7](如 SWAT 模型

等)估算基流。由于气候、下垫面条件不同,基流分割方法在不同流域的适用性存在差异^[8]。迄今为止,国内外学者关于基流做了大量研究,主要集中在基流分割方法的适用性、基流特征以及影响因素等方面。夏露等^[9]比较了 9 种数值模拟法在黄河中游碛瓦川流域的适用性,分析了基流变化特征及影响因素。雷雨宽^[10]采用数字滤波法、*BFI* 法和时间步长法共 3 类 6 种方法对西阳河进行基流分割,对比发现数字滤波法二次滤波分割结果更符合该流域的基流特征和降水径流关系特点。甘容等^[11]结合非线性库方法改进 SWAT 模型对沙颍河流域径流过程进行模拟,分析了径流及其组分变化特征。Xie 等^[12]建立了一个仅依赖于实测径流的评估标准,并将其应用于评估 9 种基流分割方法在美国毗邻地区 1815 个集水区的适用性。

收稿日期: 2022-07-05 修订日期: 2022-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51509222; 51909091); 国家重点研发计划课题项目 (2021YFC3200201)。

作者简介: 甘容,女,湖北随州人,副教授,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: ganrong168@163.com

通讯作者: 徐孟莎,女,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 1119638079@qq.com

2022年9月

SWAT模型是以ArcGIS为基础的分布式水文模型,在径流过程模拟、污染物运移、以及径流驱动因素等^[13]方面应用广泛,但在基流过程方面的研究较少。该模型基于水量平衡原理,并借助ArcGIS运行平台,能够实现流域水文要素(如径流或基流)的空间可视化表达^[14]。国内外学者基于SWAT模型对径流或基流的研究侧重于时间变化特征方面,很少涉及空间特征研究,且对子流域角度关注不足。

黄河流域生态保护和高质量发展是重大国家战略,推进“黄河战略”是实现流域治理和保护的有力保障^[15,16]。伊洛河是黄河流域中游下段重要的一级支流,近年来,水利工程建设严重影响了流域水生态功能和生态环境。而基流对于维持河流生态系统健康、生态系统结构与功能的完整性具有重要的作用^[4]。目前对于伊洛河流域径流演变及驱动因素的研究较多,但对于径流的重要组成部分之一基流的量化以及时空分布特征研究较少,特别是空间分布。因此,本文采用SWAT模型及Chapman法对基流过程进行模拟量化,分析基流分割方法的适用性;基于最优模拟结果,探讨流域径流、基流和 BFI 的时间演变特征;将SWAT模拟结果与反距离加权插值法相结合,实现流域径流、基流和 BFI 的空间分布可视化表达。通过全面研究水文要素的时空变化特征,旨在为伊洛河流域的水资源开发利用、生态环境保护 and 建设提供理论依据。

2 研究区概况、数据资料与研究方法

2.1 研究区概况

伊洛河是黄河中游三花区间的一条重要支流,位于 $109^{\circ}43'E-113^{\circ}10'E$ 和 $33^{\circ}39'N-34^{\circ}54'N$,横跨河南、陕西两省,流域面积约为 18881 km^2 ^[17],占黄河流域总面积的2.37%(图1),由支流伊河和干流洛河汇流而成^[18]。流域属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温为 $7.8\sim 13.9^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量为 $710\sim 930\text{ mm}$,降水集中在6—9月^[19]。从空间分布来看,上游降水量大于下游。降水是径流的主要驱动力因子,可控制年径流的80%左右。

伊洛河地势表现为西南高、东北低,地形以山地、丘陵为主。土壤类型主要包括锥形土、淋溶土、冲积土、岩性土4类,土地利用类型主要包括耕地、林地、草地、水体、建设用地5类^[20]。近年来,随着城

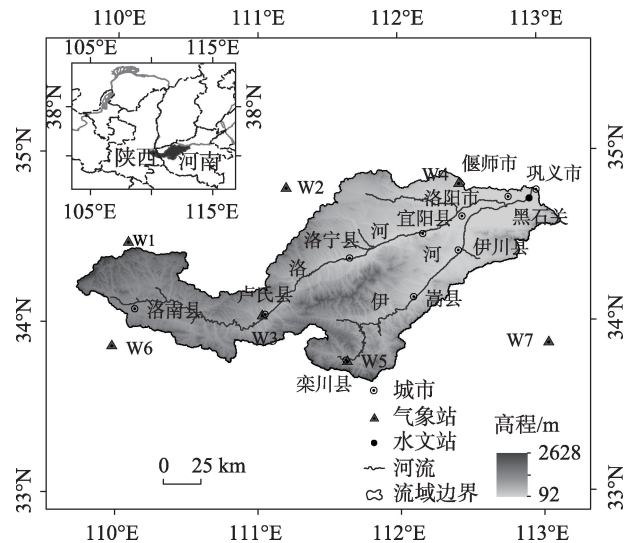


图1 研究区伊洛河流域位置

Figure 1 Location of the Yiluo River Basin

市化发展、植树造林和水利工程建设,土地利用类型和水资源管理模式发生改变,进而影响了流域水文平衡。

2.2 数据资料

本文采用伊洛河流域的数字高程模型(DEM)、土壤类型数据、土地利用数据以及7个气象站点的日实测数据(如降水、蒸发、温度、湿度等)构建SWAT模型;黑石关水文站的实测径流数据用于模型的校准和验证,数据信息详见表1。

2.3 研究方法

采用SWAT模型及Chapman法对伊洛河流域黑石关站实测径流数据进行基流分割,选择适用于该流域的最优基流分割方法,确定基流过程。基于基流分割最优结果,从时间和空间两方面探讨伊洛河流域径流、基流和 BFI 的变化特征,具体方法使用流程见图2。

表1 数据类型及来源

Table 1 Data types and sources

数据名称	数据描述	数据来源
数字高程模型 (DEM)	90 m 分辨率	地理空间数据云
土壤类型数据	1:100 万	世界土壤数据库
土地利用数据	1 km 分辨率	中国科学院资源环境科学与数据中心
气象数据	1960—2017年7个站点的日实测数据	中国气象数据网
径流数据	1964—2017年黑石关水文站月实测数据	《黄河流域水文资料》

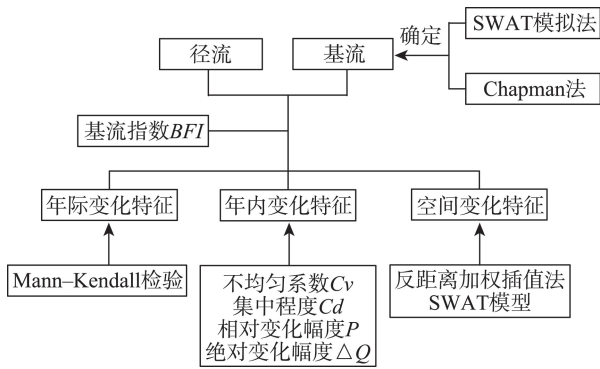


图2 方法流程图

Figure 2 Methodology flow chart

2.3.1 SWAT 模型原理

SWAT 模型首先基于 DEM, 根据河网水系将流域划分为多个子流域(Sub-basin), 并通过河道或渠系等路径实现拓扑连通, 子流域再根据地表覆盖类型、土壤类型、坡度等特征的不同组合进一步划分为多个水文响应单元(HRU), 每个水文单元单独计算水循环过程^[21]。在本文中, 伊洛河流域被划分为 32 个子流域和 280 个 HRU。SWAT 模拟水文循环过程依据是水量平衡原理, 模拟地表径流采用 SCS-CN (Soil Conservation Service curve number) 法。模型共设置两类含水层, 即浅层含水层和深层含水层。其中, 浅层含水层是河道中基流的主要补给来源, 其水量平衡方程为:

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \quad (1)$$

式中: $aq_{sh,i}$ 、 $aq_{sh,i-1}$ 分别为第 i 、 $i-1$ 天浅层含水层的储水量, mm; $w_{rchrg,sh}$ 为第 i 天浅层含水层的补给量, mm; w_{revap} 为第 i 天由浅层含水层流回根区的水量, mm; $w_{pump,sh}$ 为第 i 天浅层含水层输出的水量, mm; Q_{gw} 为第 i 天汇入河道的基流量, mm, 由下式表达:

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp(-\alpha_{gw} \cdot \Delta t) + w_{rchrg,sh} [1 - \exp(-\alpha_{gw} \cdot \Delta t)], aq_{sh} > aq_{shthr,q} \quad (2)$$

$$Q_{gw,i} = 0, aq_{sh} \leq aq_{shthr,q} \quad (3)$$

式中: $Q_{gw,i}$ 、 $Q_{gw,i-1}$ 分别为第 i 、 $i-1$ 天汇入河道的基流量, mm; α_{gw} 表示基流的退水常数或比例常数; Δt 表示时间步长, 即 1d; $aq_{shthr,q}$ 表示浅层含水层的水位阈值, mm。

本文通过手动调参对 SWAT 模型进行校准。为

评估模型模拟的性能, 选取纳什效率系数(NSE)、决定系数(R^2)和百分比偏差(PBIAS)3个指标进行评价, 其计算原理参见文献[22]。

2.3.2 数字滤波 Chapman 法

径流包含地表径流和基流, 数字滤波法将地表径流看作是高频信号、基流看作是低频信号, 根据信号差异分割出基流。1991 年, Chapman 通过改进 Lyne-Hollick 数字滤波模型, 提出 Chapman 法^[23], 计算公式如下:

$$Q_{d(i)} = \frac{3\alpha - 1}{3 - \alpha} Q_{d(i-1)} + \frac{2}{3 - \alpha} (Q_i - \alpha Q_{d(i-1)}) \quad (4)$$

$$Q_{b(i)} = Q_i - Q_{d(i)} \quad (5)$$

式中: $Q_{d(i-1)}$ 、 $Q_{d(i)}$ 分别为第 $i-1$ 、 i 天的地表径流量, m^3/s ; Q_{i-1} 、 Q_i 为第 $i-1$ 、 i 天的径流量, m^3/s ; $Q_{b(i)}$ 为第 i 天的基流量, m^3/s ; α 为滤波系数, 在本文中取值为 0.925。

2.3.3 径流与基流特征测算方法

(1) 基流指数

基流指数(BFI)表示基流对总径流的贡献值大小^[24], 由下式表达:

$$BFI = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q_b(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt} \quad (6)$$

式中: Q 为总径流量, m^3/s ; Q_b 为基流量, m^3/s ; t 为时间步长; t_1 、 t_2 分别为开始、结束的时间。

(2) 年内分配指标

本文采用不均匀系数 C_v 、集中程度 C_d 、相对变化幅度 P 和绝对变化幅度 ΔQ 对径流或基流的年内分配进行量化^[11]。

C_v 反映径流或基流年内分配的不均匀程度, 其值越小, 表示年内分配越均匀, 其计算公式为:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{12} (R_j - \bar{R})^2}{12\bar{R}^2}} \quad (7)$$

式中: R_j 为第 j 月的流量, m^3/s ; \bar{R} 为一年所有月份的平均流量, m^3/s 。

C_d 用来评估径流或基流在年内的集中程度。其原理是将 12 个月份的流量平均值作为矢量, 流量大小作为模长, 月份为方向, 1 至 12 个月的方向分别定为 30° , 60° , \dots , 360° , 分别向两个坐标轴投影, 在不同坐标轴的分量为:

2022年9月

$$R_x = \sum_{j=1}^{12} R_j \cos \theta_j, R_y = \sum_{j=1}^{12} R_j \sin \theta_j \quad (8)$$

式中: R_x 和 R_y 分别为年内流量在 X 轴和 Y 轴的分量; θ_j 为第 j 月的矢量角度, $j=1, 2, \dots, 12$ 。合并分量:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (9)$$

集中度 Cd 为:

$$Cd = \frac{R}{\sum_{j=1}^{12} R_j} \quad (10)$$

变化幅度能够反映年内 12 个月份中最大流量(径流量或基流量)与最小流量(径流量或基流量)的关系,可以由下式表示:

$$P = Q_{\max} / Q_{\min} \quad (11)$$

$$\Delta Q = Q_{\max} - Q_{\min} \quad (12)$$

式中: P 为相对变化幅度; ΔQ 为绝对变化幅度, m^3/s ; Q_{\max} 和 Q_{\min} 分别为年内最大和最小月流量, m^3/s 。

(3) Mann-Kendall 检验

基于 Mann-Kendall (MK) 统计检验方法, 可对水文序列进行趋势判别、显著性检验及突变分析, 其计算原理参见文献[25,26]。

(4) 反距离加权插值法

反距离加权插值法^[27]简称 IDW 法, 其本质是加权平均, 具体计算公式如下:

$$Z_p = \frac{\sum_{k=1}^n (Z_k \times W_k)}{\sum_{k=1}^n W_k} \quad (13)$$

式中: p 代表的是每个内插点; Z_p 为每个待求内插点值; Z_k 为每个已知采样点值; W_k 为每个已知采样点对应的权, 由采样点与内插点的距离决定, 即:

$$W_k = \left(\frac{1}{d_k}\right)^u \quad (14)$$

式中: d_k 为内插点与每个已知采样点之间的距离; u 为权指数。

3 结果与分析

3.1 模型的校准和验证

首先对参数进行敏感性分析, 本文选取了影响径流模拟精度的共 15 个重要参数, 通过人工调整参数取值, 提高模型模拟的可靠性。参数及其最优值如表 2 所示, 由参数最优值驱动模型得到月径流模拟的最优结果。SWAT 模型用户手册建议 2~5 年的

表 2 率定参数及其最优值

Table 2 Calibration parameters and their optimal values

序号	参数名称	物理意义	最优值
1	$r_CN2.mgt$	湿润条件下的初始 SCS 径流曲线数	-0.121
2	$v_USLE.P.mgt$	水土保持措施	0.804
3	$v_SOL_AWC.sol$	土壤层有效水容量(水/土壤, mm/mm)	0.912
4	$v_CANMX.hru$	最大冠层截留量/mm	25
5	$v_SLSUBBSN.hru$	平均坡长/m	33
6	$v_ESCO.hru$	土壤蒸发补偿系数	0.35
7	$v_EPCO.hru$	植物吸收补偿因子	0.95
8	$v_CH_K2.rte$	主河道河床有效水力传导度/(mm/hr)	45
9	$v_CH_N2.rte$	主河道河床曼宁系数	0.1
10	$r_SOL_K.sol$	土壤饱和和水力传导度/(mm/hr)	-0.15
11	$v_GW_REVP.gw$	浅层地下水再蒸发系数	0.12
12	$v_GW_DELAY.gw$	地下水延迟时间/d	50
13	$v_GWQMN.gw$	浅层含水层产生基流的阈值深度/mm	500
14	$v_REVAPMN.gw$	浅层含水层再蒸发或渗透到深层含水层的阈值深度/mm	200
15	$v_ALPHA_BF.gw$	基流 alpha 因子/d	0.331

预热期, 以减少模型初始化过程中带来的空值问题。基于伊洛河黑石关水文站实测径流数据, 本文选择 1960—1963 年作为 SWAT 模型径流模拟的预热期, 1964—2000 年和 2001—2017 年分别作为校准期和验证期。

校准期模型评价指标 NSE 、 R^2 和 $PBIAS$ 分别为 0.72、0.72 和 3%, 验证期 NSE 、 R^2 和 $PBIAS$ 分别为 0.75、0.79 和 22%, 结果表明伊洛河流域 SWAT 模型满足评价指标标准, 月尺度径流模拟结果可信。模拟值与实测值吻合较好, 径流量过程线走势相近(图 3)。由此可知, SWAT 水文模型在伊洛河流域有较好的适用性, 模拟结果可靠。

3.2 SWAT 与 Chapman 模拟基流比较

分别采用 SWAT 模型模拟法和 Chapman 滤波法对伊洛河流域黑石关站 1964—2017 年基流进行估算, 对比结果如图 4 所示, 两基流序列变化过程具有较好的一致性。基于 Chapman 法分割基流量的多年平均值为 $34.6 \text{ m}^3/\text{s}$, BFI 为 0.49; SWAT 模拟基流量的多年平均值为 $31.4 \text{ m}^3/\text{s}$, BFI 为 0.41, Chapman 法分割结果相较于 SWAT 模拟结果偏高。

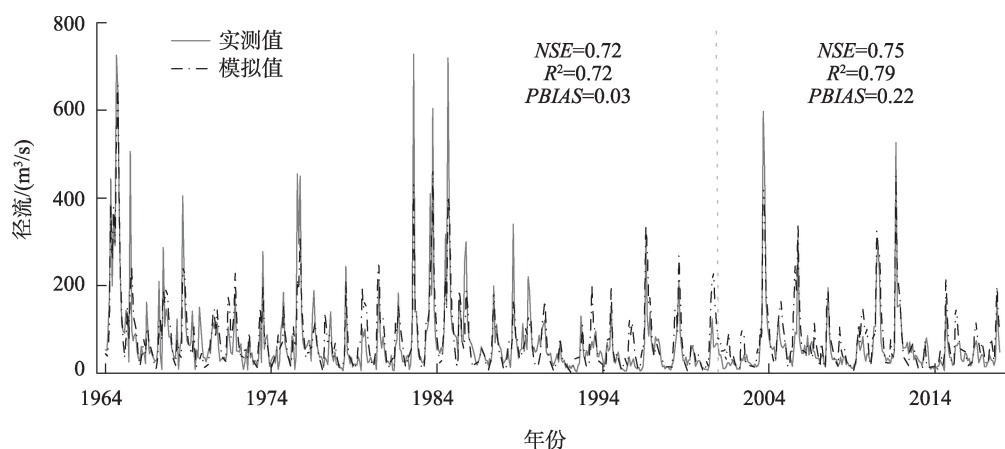


图3 1964—2017年实测与模拟径流过程

Figure 3 Measured and simulated streamflow processes, 1964-2017

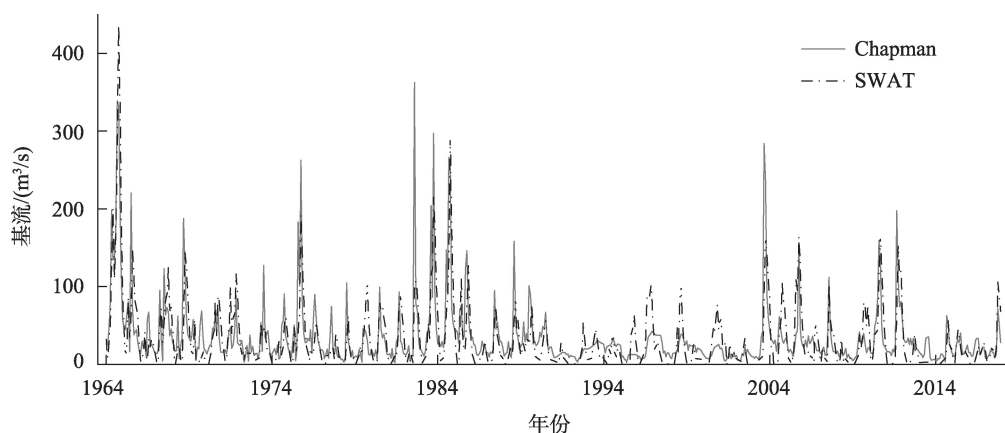


图4 1964—2017年Chapman法与SWAT模型模拟法估算基流过程

Figure 4 Chapman method and Soil and Water Assessment Tool (SWAT) simulation method to estimate the baseflow processes, 1964-2017

以1976年、1966年、2014年分别作为丰($P=25\%$)、平($P=50\%$)、枯($P=75\%$)水平年的典型年,通过比较不同水平年的年内基流过程线(图5),进一步分析两种基流分割方法在伊洛河流域的适用性。基于Chapman法模拟的基流过程线在汛期变

化幅度较大,起涨时间早于SWAT模拟法,且基流峰值的出现时间与总径流相近。SWAT模拟的基流过程线在退水期(11月—次年2月)降落比较明显。根据流域下垫面特性,该地区气候温和湿润,降水丰沛,地势高峻,河沟密闭,坡陡石多^[17],植被分布复

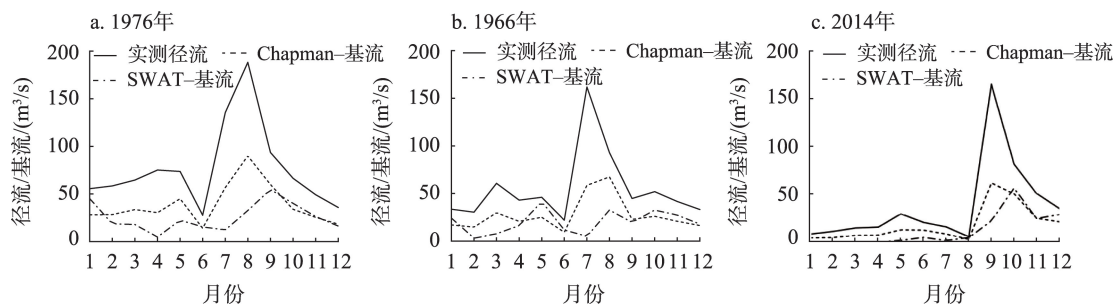


图5 丰(a)、平(b)、枯水(c)年的年内基流过程线

Figure 5 Baseflow processes for high (a), medium (b), and low (c) flow years

2022年9月

杂,土壤被湿润后下渗率小;径流潜力高,使得地表径流产汇流速度较快,而对基流汇出产生阻尼和迟滞效应^[28],基流峰值出现时间应滞后于总径流,由图可知 SWAT 模拟的基流过程符合这一特征。

综上所述,SWAT 模拟的基流表现较好,模拟效果更精确。因此本文最终采用 SWAT 模拟值作为最终结果,以进一步分析。

3.3 年际变化特征

1964—2017年期间,伊洛河流域黑石关站的径流量、基流量及 *BFI* 整体呈减少趋势(图6)。根据 MK 趋势检验法计算得到径流、基流及 *BFI* 的 *Z* 值分别为-2.92、-2.22、-2.92,表明随着时间推移,径流、基流和 *BFI* 呈显著下降趋势且分别通过了 99%、95%和 99%的显著性检验。径流量和基流量两个序列变化过程高度相关,Person 相关系数为 0.92,但径流的下降速度大于基流,*BFI* 主要集中在 0.2~0.5 之间。径流年际变化较为剧烈,在 1964 年、1984 年达到顶峰,且丰、枯水年相差较大。由于包气带对下渗水起到调节和再分配的作用,基流量年际变化幅度相对缓和,年均基流量最高值和最低值相差较小。

近几十年来,在全球气候变化背景下,气温升高,年降水量变化幅度加大,使得水文循环过程受到影响。根据赵丽霞等^[29]的研究,自 20 世纪中叶以来,伊洛河流域年降雨量呈减少趋势,且降雨和径流的过程线变化相似,说明降雨减少是导致径流减少的因素之一。径流量和基流量两个序列趋势走向高度相关,所以基流量减少在一定程度上也受到气候的影响。此外,伊洛河流域内人类活动增加,如兴建水利工程、建设渠系、实施水土保持措施以及流域间调水等,这些人类活动的开展改变了流域的下垫面条件,使得径流和基流过程受到影响。因此,1964—2017年期间气候变化和人类活动共同导致伊洛河流域径流量和基流量的减少^[30]。

根据伊洛河黑石关站 MK 突变检验结果(图7),径流、基流和 *BFI* 的 UF_k 曲线均位于零值以下。径流的 UF_k-UB_k 线有多个交点,说明径流没有发生明显突变, UF_k 线在 1995 年后位于 -1.96 信度线以下,说明径流在 1995 年之后表现为显著减小趋势。基流在 1968 和 1984 年左右可能发生明显突变,且在 1990—2015 年期间减小趋势显著。 *BFI* 在 1970

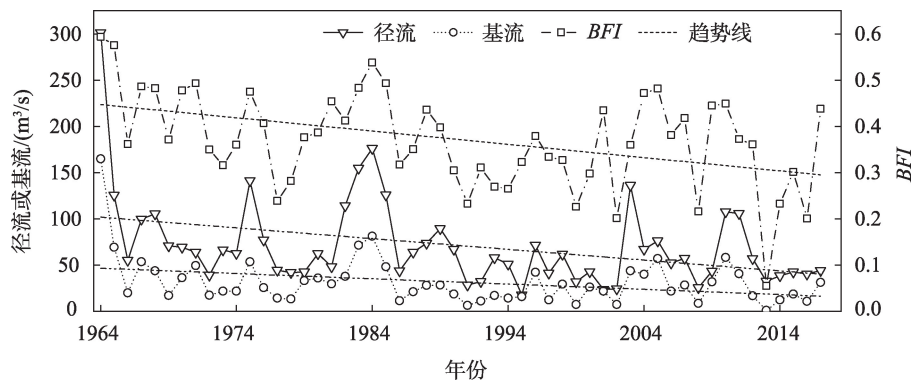


图6 1964—2017年径流、基流和 *BFI* 年际变化过程

Figure 6 Interannual variations of streamflow, baseflow, and baseflow index (*BFI*), 1964-2017

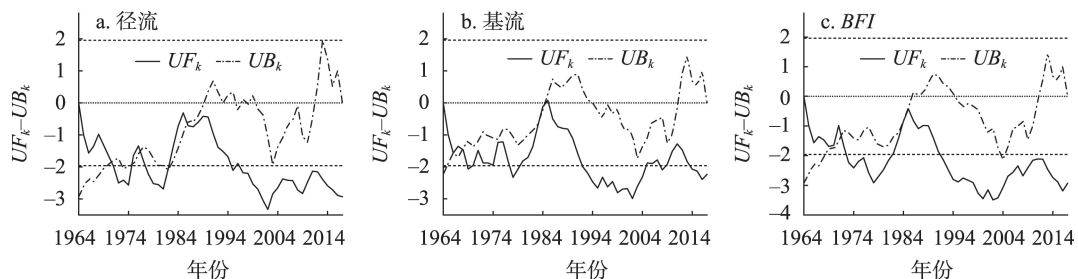


图7 1964—2017年年径流量、年基流量和年 *BFI* 突变检验

Figure 7 Mutation test of the annual average streamflow, baseflow, and baseflow index (*BFI*), 1964-2017

年和1984年左右可能发生明显突变,且于1990年开始减小趋势显著。1965年之后伊洛河流域水利设施和水土保持措施等人类活动增多^[29],水文演变特征受到影响,因而基流和 BFI 在20世纪60年代末期可能发生突变。由于 BFI 受到径流和基流两变量控制, BFI 和基流突变时间可能存在偏差。根据伊洛河流域降雨资料,从1984年到1985年,年降雨量呈跳跃式减少,从而导致基流和 BFI 在此期间可能发生突变。总体而言,伊洛河流域黑石关站的径流、基流和 BFI 突变情况有所差异。

3.4 年内变化特征

伊洛河流域季风气候特征明显,降水和气温呈季节性分布,径流和基流亦受气候的影响。为探究径流和基流在气候影响下的年内分布规律,本文对1964—2017年径流和基流的多年平均年内变化进行分析。如图8所示,径流和基流在年内均呈现“单峰型”的特点,即先增加后减少。平均径流量9月最多为132.66 m^3/s ,2月最少为33.33 m^3/s ;平均基流量10月最多为70.65 m^3/s ,3月最少为4.69 m^3/s 。径流量和基流量的年代际间变化剧烈,各个月份的变化幅度有较大差异。径流量在7—10月份年代际间变化幅度较大,基流量在8—11月份年代际间变化幅度较大。以上特征均能反映基流的迟滞效应。 BFI 先减小,5—9月份呈小幅度波动变化,10月份开始上升。丰水期 BFI 相对较小,枯水期 BFI 相对较大且均大于0.5,表明枯水期基流是径流的主要来源。

伊洛河流域黑石关站的径流和基流年内分配亦表现出明显的季节性和不均匀性(图9),秋季占比最大,径流和基流分别占全年的37.1%和48.1%;其次是夏季,径流和基流分别占全年的32.2%和

24.3%,冬、春两季占比相对较小。径流和基流的年内不均匀系数 C_v 分别为0.49和0.65,集中度 C_d 分别为0.32和0.43,相对变化幅度 P 分别为3.98和15.05,绝对变化幅度 ΔQ 分别为99.33和65.95 m^3/s ,表明径流和基流年内分配不均匀,极值差距较大。

该流域降水量集中在6—9月,且在7月达到最大值。径流量最大值的出现时间滞后于降水量。资料显示^[17],尽管降水是伊洛河径流的主要来源,但流域土壤蒸发量较大,年均蒸发量为1793.0 mm,是年平均降水量的2.9倍。其中,夏季蒸发量是降水量的2.9倍;秋季蒸发量是降水量的1.8倍。虽然夏季的降水量大于秋季,但夏季蒸发量远大于秋季,导致秋季径流量和基流量相对较高。

3.5 空间分布特征

从子流域角度研究伊洛河流域多年平均径流、基流和 BFI 的空间分布特征。基于校准好的SWAT模型,实现对子流域的径流和基流模拟。将模拟得到的每个子流域的多年平均径流值、基流值和 BFI 值提取到子流域中心点上,利用GIS空间分析工具中的反距离加权插值法(IDW)得到年均径流、基流和 BFI 的空间分布(图10)。

从整体空间分布特征上看,多年平均径流值和基流值在伊洛河流域西部和中部相对较高,在东部相对较低。子流域14、16、19、20、21、22、27、32的径流值较高(>125 m^3/s),子流域14和21的基流值最高(>75 m^3/s),西部和中部的其他子流域基流值较高(45~75 m^3/s)。 BFI 的高值区(>0.4)主要分布在西部和中部地区,而整个流域90%以上的地区年均 BFI 值小于0.5。流域西部和中部地区的土地利用类型以草地和林地为主(图11),草地和林地具有较

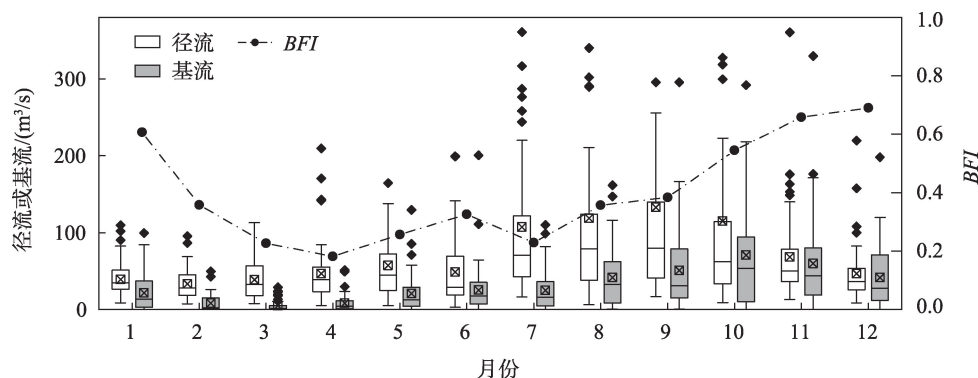


图8 径流和基流变化箱型图

Figure 8 Box plot of streamflow and baseflow variations

2022年9月

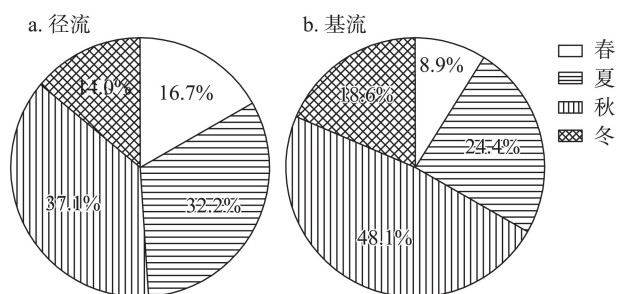


图9 径流和基流的季节分配

Figure 9 Seasonal distribution of streamflow and baseflow

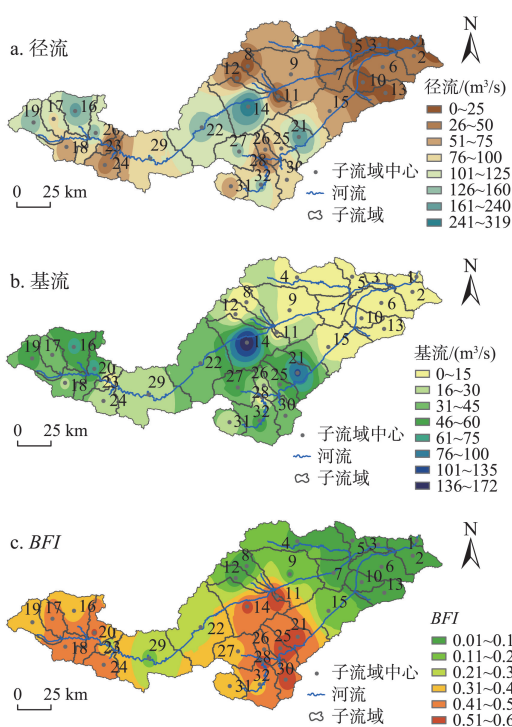


图10 年均径流(a)、基流(b)和BFI(c)的空间分布

Figure 10 Spatial distribution of multiyear average streamflow (a), baseflow (b), and baseflow index (BFI) (c)

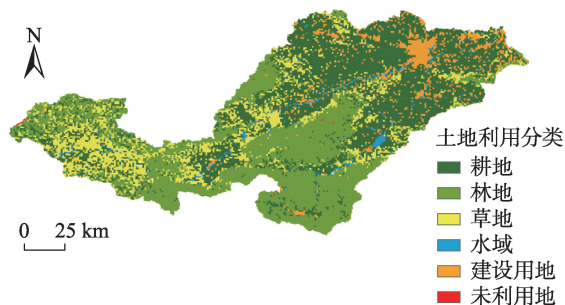


图11 伊洛河流域土地利用类型分布

Figure 11 Distribution of land use types in the Yiluo River Basin

好的水源涵养功能,在调节径流、消洪补枯、涵养土壤水分等方面作用显著^[31]。因此,伊洛河流域西部和中部地区水文循环过程稳定,能够较好维持径流组分之间的交换与贮存关系,多年平均径流值和基流值相对较高;且该地区年均BFI值较大,说明植被覆盖保障了径流调节能力,在枯水期能够保持稳定的地下水补给^[32]。

4 结论

本文通过比较 SWAT 水文模型和数字滤波 Chapman 法在伊洛河流域基流分割的适用性,选择最优基流分割方法,确定流域的基流过程;基于模拟结果,分析流域径流和基流的时空演变特征,具体结论如下:

(1)校准期和验证期的 SWAT 模型满足评价指标标准,黑石关站月尺度径流模拟值与实测值有较好的一致性,SWAT 模型在伊洛河流域的适用性较好。SWAT 模拟的年均基流值小于 Chapman 滤波法,且前者基流的迟滞效应显著,基流模拟效果更精确。

(2)1964—2017 年伊洛河流域黑石关站的径流、基流和 BFI 均呈整体下降趋势,且通过了 95% 的显著性检验。此外,三者的突变情况有所差异,径流没有发生明显突变,基流在 1968 和 1984 年可能发生明显突变, BFI 在 1970 年和 1984 年可能发生明显突变。

(3)伊洛河流域黑石关站径流和基流的年内分配呈现“单峰型”的特点,径流和基流分别在 9 月和 10 月上升为最大值,在 2 月和 3 月下降为最小值,极值相差悬殊。年内分配亦表现出明显的季节性和不均匀性的特点,秋季占比最大,其次是夏季,春冬两季占比较小。

(4)从整体空间分布特征上看,年均径流、基流和 BFI 值在伊洛河流域西部和中部相对较高,在东部相对较低,且整个地区 90% 以上的子流域年均 BFI 小于 0.5。西部和中部地区土地覆盖以草地和林地为主,该地区具有较好的水源涵养功能。

然而,由于技术限制无法实现对 SWAT 模拟的基流进行自动校准,异参同效和手动校准在一定程度上增加了主观性和不确定性。本文只重点展示了径流和基流的时空分布特征,但关于径流和基流

对流域气候变化、人类活动等的具体响应机制,需要进一步探究。

参考文献(References):

- [1] 贾绍凤, 梁媛. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 29–36. [Jia S F, Liang Y. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 29–36.]
- [2] 张峰, 薛惠锋. 基于绿色发展的工业全要素水资源效率时空特征[J]. 资源科学, 2021, 43(5): 964–973. [Zhang F, Xue H F. Spatiotemporal characteristics of industrial total factor water resource efficiency based on green development[J]. Resources Science, 2021, 43(5): 964–973.]
- [3] 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 M H, Wang X C, Man X L, 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.]
- [4] Gan R, Xu M S, Yang F, et al. The assessment of baseflow separation method and baseflow characteristics in the Yiluo River basin, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2022, DOI: 10.1007/s12665-022-10425-6.
- [5] 胡胜, 杨冬冬, 吴江, 等. 基于数字滤波法和SWAT模型的瀾河流域基流时空变化特征研究[J]. 地理科学, 2017, 37(3): 455–463. [Hu S, Yang D D, Wu J, et al. Spatiotemporal variation characteristics of baseflow in the Bahe river basin based on digital filter method and SWAT model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(3): 455–463.]
- [6] 李芳, 靳少波, 邹松兵, 等. 黄河源区白河基流分割方法适用性分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 587–597. [Li F, Jin S B, Zou S B, et al. Analysis of the applicability of baseflow separation methods in Baihe River Basin, the source regions of Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 587–597.]
- [7] Zhu Y, Chen L, Wei G, et al. Uncertainty assessment in baseflow nonpoint source pollution prediction: The impacts of hydrographic separation methods, data sources and baseflow period assumptions [J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 915–925.
- [8] 张泳华, 刘祖发, 赵铜铁钢, 等. 东江流域基流变化特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 75–81. [Zhang Y H, Liu Z F, Zhao T T G, et al. Variation characteristics and influencing factors of base flow in Dongjiang River Basin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 75–81.]
- [9] 夏露, 毕如田, 宋孝玉, 等. 砚瓦川流域河川基流变化规律及其驱动因素[J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8430–8442. [Xia L, Bi R T, Song X Y, et al. Study on the variation of baseflow and its driving factors in the Yanwachuan watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8430–8442.]
- [10] 雷宇宽. 酉阳河流域典型年汛期的基流分割研究[J]. 水文, 2021, 41(1): 35–41. [Lei Y K. Research on base flow separation at Youyang River Basin in flood season of typical flow years[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(1): 35–41.]
- [11] 甘容, 陈长征. 沙颍河流域径流过程模拟与径流组分变化特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 83–91. [Gan R, Chen C Z. Simulation of runoff process and variation characteristic in Shaying River Basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 83–91.]
- [12] Xie J X, Liu X M, Wang K W, et al. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States[J]. Journal of Hydrology, 2020, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124628.
- [13] Akoko G, Le T H, Gomi T, et al. A review of SWAT model application in Africa[J]. Water, 2021, DOI: 10.3390/w13091313.
- [14] 安晨, 方海燕. 基于SWAT模型的妣水河流域径流空间分布特征[J]. 水文, 2021, 41(4): 81–87. [An C, Fang H Y. Spatial distribution characteristics of runoff in Guishui River Basin based on SWAT model[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(4): 81–87.]
- [15] 徐辉, 师诺, 武玲玲, 等. 黄河流域高质量发展水平测度及其时空演变[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 115–126. [Xu H, Shi N, Wu L L, et al. High-quality development level and its spatiotemporal changes in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 115–126.]
- [16] 刘建华, 黄亮朝, 左其亭. 黄河下游经济-人口-资源-环境和谐发展水平评估[J]. 资源科学, 2021, 43(2): 412–422. [Liu J H, Huang L C, Zuo Q T. Evaluation of harmonious development of economy-population-resource-environment in the lower reaches of the Yellow River[J]. Resources Science, 2021, 43(2): 412–422.]
- [17] 梁国付. 伊洛河流域景观动态及其径流效应研究: 以伊河上游地区为例[D]. 开封: 河南大学, 2010. [Liang G F. Research on Landscape Dynamines and Effects on Runoff in Yiluo River Basin: A Case Study in Upper Reaches of Yihe River[D]. Kaifeng: Henan University, 2010.]
- [18] 王志良, 尚冉冉, 陈海涛, 等. 基于Kendall检验法的伊洛河水质变化趋势分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 17–23. [Wang Z L, Shang R R, Chen H T, et al. Analysis of water quality change trend of Yiluo River based on Kendall test method[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(2): 17–23.]
- [19] 刘松韬, 张东, 李玉红, 等. 伊洛河流域河水资源及水化学组成控制因素[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1184–1196. [Liu S T, Zhang D, Li Y H, et al. Water sources and factors controlling hydro-chemical compositions in the Yiluo River Basin[J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1184–1196.]
- [20] 连颢, 黄峰. 伊洛河上游流域退耕还林/还草对蓝水绿水分配的

2022年9月

- 影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1409–1420.
- [Lian X, Huang F. Green/blue water allocation as affected by Grain-for-Green practices in the upper reaches of the Yiluo River [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(9): 1409–1420.]
- [21] Li C Y, Fang H Y. Assessment of climate change impacts on the streamflow for the Mun River in the Mekong Basin, Southeast Asia: Using SWAT model[J]. Catena, 2021, DOI: 10.1016/j.catena.2021.105199.
- [22] 张金萍, 王宇昊. 基于 SWAT 模型和降水随机模拟的径流预测[J]. 中国农村水利水电, 2021, (7): 12–18. [Zhang J P, Wang Y H. Runoff prediction based on SWAT model and stochastic simulation of precipitation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021, (7): 12–18.]
- [23] Chapman T G. Comment on “evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses” by R. J. Nathan and T. A. McMahon[J]. Water Resources Research, 1991, 27(7): 1783–1784.
- [24] 韩鹏, 王艺璇, 李岱峰. 黄河中游河龙区间河川基流时空变化及其对水土保持响应[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 505–521. [Han P, Wang Y X, Li D F. Spatial and temporal variations of baseflow and its responses to soil and water conservation in Hekouzheng–Longmen section in the middle reaches of the Yellow River[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(3): 505–521.]
- [25] 王淑丽, 李志萍, 赵贵章, 等. 2005–2018 年渭河玄武河段水质演变趋势分析[J]. 人民长江, 2021, 52(5): 13–17. [Wang S L, Li Z P, Zhao G Z, et al. Analysis of water quality evolution trend of Xuanwu section of Guohe River from 2005 to 2018[J]. Yangtze River, 2021, 52(5): 13–17.]
- [26] 王泉轩, 左小清, 杨泽楠, 等. 基于 Mann-Kendall 检验和信息熵的成都市 1980—2016 年降水时空变化[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 26–33. [Wang X X, Zuo X Q, Yang Z N, et al. Spatio-temporal changes of precipitation in Chengdu from 1980 to 2016 based on Mann-Kendall test and information entropy[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4): 26–33.]
- [27] 王可伟, 高利华, 江锋. 基于改进反距离加权算法的海底 DEM 建模方法[J]. 海洋测绘, 2021, 41(1): 61–64. [Wang K W, Gao L H, Jiang F. A method of seabed DEM modeling based on the improved inverse distance weighted interpolation algorithm[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2021, 41(1): 61–64.]
- [28] 莫崇勋, 谢燕平, 班华珍, 等. 不同基流分割方法在澄碧河的适用性探讨[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 86–92. [Mo C X, Xie Y P, Ban H Z, et al. Discussion on the applicability of different baseflow segmentation methods in Chengbi River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 86–92.]
- [29] 赵丽霞, 徐十锋, 赵旭, 等. 黄河伊洛河流域径流变化特性及趋势分析[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(12): 70–73. [Zhao L X, Xu S F, Zhao X, et al. Analysis on runoff variation characteristics and trend in Yiluo River Basin in Henan Province[J]. China Flood & Drought Management, 2020, 30(12): 70–73.]
- [30] 刘绿柳, 王秀杰, 张鹏飞. 基于 SWAT 模型的气候变化和人类活动对伊洛河径流影响分析[J]. 人民珠江, 2020, 41(1): 1–6. [Liu L L, Wang X J, Zhang P F. Research on impacts of climate change and human activities on runoff in the Yiluo River based on SWAT model[J]. Pearl River, 2020, 41(1): 1–6.]
- [31] 左其亭, 王娇阳, 杨峰, 等. 水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 13–19. [Zuo Q T, Wang J Y, Yang F, et al. Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 13–19.]
- [32] 乔飞, 富国, 徐香勤, 等. 三江源区水源涵养功能评估[J]. 环境科学研究, 2018, 31(6): 1010–1018. [Qiao F, Fu G, Xu X Q, et al. Assessment of water conservation function in the Three-River Headwaters Region[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(6): 1010–1018.]

Baseflow separation and spatiotemporal variation characteristics in the Yiluo River basin

GAN Rong^{1,2}, XU Mengsha^{1,2}, ZUO Qiting^{1,3}

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Key Laboratory of Groundwater Pollution Prevention and Rehabilitation, Zhengzhou 450001, China; 3. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Baseflow is the relatively stable component of streamflow and main source of streamflow during dry periods. To investigate the spatiotemporal variation characteristics of streamflow and baseflow in the Yiluo River basin, this study compared the suitability of the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model and Chapman method for baseflow separation in the Yiluo River basin, and selected the optimal baseflow separation method to determine the baseflow process in the basin. The Mann-Kendall test, intraannual distribution index and inverse distance weighted (IDW) interpolation algorithm were used to analyze the interannual and intraannual variations and spatial distribution characteristics of streamflow, baseflow, and baseflow index (*BFI*). The results show that the SWAT model is better applicable in the Yiluo River basin and more accurate than the Chapman method in simulating baseflow, based on validation by the measured streamflow data at Heshiguan Station. There is an overall significant decreasing trend in streamflow, baseflow, and *BFI* in 1964-2017 at Heshiguan Station in the basin, but with differences in mutations. The annual streamflow and baseflow showed a single-peaked distribution with obvious seasonality and non-uniformity. The baseflow hysteresis effect is significant. Streamflow, baseflow, and *BFI* values are relatively high in the western and central parts of the basin and low in the eastern part. More than 90% of the sub-basins in the region have an average annual *BFI* of less than 0.5. The results of this paper can provide references for the rational development and utilization of water resources and eco-environmental protection in the Yiluo River basin.

Key words: spatiotemporal variation; SWAT model; streamflow; baseflow; baseflow index; Yiluo River basin