

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.014

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.

黄土高原典型流域基流变化规律及贡献率分析

张纪元¹, 于坤霞¹, 李占斌¹, 李鹏^{1,2}, 刘永刚³,
莫淑红¹, 赵宾华¹, 杨建宏³, 贾路^{1,4}, 李雪¹

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2. 西安理工大学旱区生态水文与灾害防治
国家林业局重点实验室, 西安 710048; 3. 陕西省水资源与河库调度中心, 西安 710004;
4. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室, 南京 210098)

摘要: [目的] 为探究气候变化和人类活动对基流变化的影响。[方法] 选择黄土高原地区的 4 个典型流域无定河、窟野河、延河和秃尾河作为研究对象。基于 1965—2017 年无定河、窟野河和延河及 1983—2017 年秃尾河逐日流量和多站点气象资料, 分析 9 种基流分割方法的适用性和基流变化特征。基于 Budyko 理论, 采用弹性系数法, 量化气候变化和人类活动对基流变化的贡献率。[结果] 数字滤波法 F4 分割结果在稳定性、离散程度和误差方面表现较好, 在黄土高原地区典型流域中最为适用。4 个流域年基流深、年径流深和年基流指数的变化趋势有较高的一致性, 无定河、窟野河、延河和秃尾河流域多年平均基流指数 BFI 分别为 0.64, 0.42, 0.28 和 0.49, 年基流深和年径流深均呈显著减小趋势 ($p < 0.01$), 而年基流指数均为增加趋势。降水、潜在蒸散发和人类活动对黄土高原地区典型流域基流变化贡献率范围分别是一 56.72%~33.92%, -0.81%~55.16% 和 10.92%~104.37%。[结论] 人类活动是影响黄土高原地区基流演变的主要因素, 研究结果为黄土高原地区水资源综合管理提供理论支持。

关键词: 基流变化; 气候变化; 人类活动; Budyko 理论; 贡献率

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2024)05-0082-10

Analysis of the Characteristics and Contribution Rate of Base Flow in Typical Basins of the Loess Plateau

ZHANG Jiyuan¹, YU Kunxia¹, LI Zhanbin¹, LI Peng^{1,2}, LIU Yonggang³,
MO Shuhong¹, ZHAO Binhua¹, YANG Jianhong³, JIA Lu^{1,4}, LI Xue¹

(1. State Key Laboratory of Ecological Water Resour in Northwest Arid Zone, Xi'an University of
Technology, Xi'an 710048, China; 2. Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological
Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, China; 3. Shaanxi Provincial Water
Resources and River Reservoir Dispatching Center, Xi'an 710004, China; 4. Key Laboratory of Hydrologic-cycle
and Hydrodynamic System of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: [Objective] This study examines the impact of climate change and human activities on baseflow variability across four representative watersheds within the Loess Plateau: the Wuding River, Kuye River, Yan River, and Tutai River. [Methods] Utilizing daily flow data from 1965 to 2017 for the Wuding, Kuye, and Yan rivers, and from 1983 to 2017 for the Tutai River, alongside multi-site meteorological data, we evaluated the applicability of nine baseflow separation methods and characterized baseflow variations. Contributions of climate change and human activities to baseflow changes were quantified using the elasticity coefficient method within the Budyko framework. [Results] The F4 digital filtering method exhibited superior performance in terms of stability, dispersion, and error metrics, making it the most suitable method for the

收稿日期: 2024-04-03

修回日期: 2024-05-13

录用日期: 2024-06-21

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-08-20

资助项目: 陕西省重点研发计划项目 (2023-ZDLSF-60); 国家自然科学基金项目 (52079104); 陕西省青年科技新星项目 (2024ZC-KJXX-058)

第一作者: 张纪元 (1999—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 919457885@qq.com

通信作者: 于坤霞 (1989—), 女, 博士, 副教授, 主要从事变化环境下流域水沙过程分析与模拟研究。E-mail: yukunxia@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

typical watersheds of the Loess Plateau. Trends in annual baseflow depth, annual runoff depth, and annual baseflow index were consistent across the four watersheds, with multi-year average baseflow indices (BFI) of 0.64, 0.42, 0.28, and 0.49, respectively. Significant decreasing trends ($p < 0.01$) were observed in both annual baseflow depth and runoff depth, while the annual baseflow index showed increasing trends. The contributions of precipitation, potential evapotranspiration, and human activities to the changes in baseflow ranged from -56.72% to 33.92% , -0.81% to 55.16% , and 10.92% to 104.37% , respectively. [Conclusion] The findings underscore that human activities are the principal drivers influencing baseflow evolution in the Loess Plateau area, offering theoretical support for integrated water resource management in the region.

Keywords: baseflow variation; climatic change; human activity; Budyko theory; contribution rate

Received: 2024-04-03

Revised: 2024-05-13

Accepted: 2024-06-21

Online(www.cnki.net): 2024-08-20

基流是河川流量中不可或缺的部分,对维持河流的基本生态功能、保证旱季河道流动和揭示地下水与地表水两者之间转换关系有着重要作用^[1-2]。流入河流的基流量和质量受到气候变化和流域综合特征的影响,由于全球气温的上升,导致流域水资源循环显得格格外活跃,特别是在半干旱地区。而半干旱地区流域水资源量占比却不到全球水资源量的 2%^[3],在水资源匮乏地区,地表水在枯水季主要以基流的形式存在,致使基流成为重要的水资源组分。因此,在半干旱地区量化基流的动态变化特征对于水资源管理显得格格外重要。

根据基流分割原理的不同,基流分割方法可分为图解法、数值模拟法和同位素法等^[4-5]。其中数值模拟法应用最为广泛,尤其是数字滤波法,基于其操作简便、适用性强和分割结果稳定等优点被广泛应用于不同地质地貌区域。孙志伟等^[6]基于数字滤波法研究长江上游流域基流的时空分布特征表明,基流指数在年际变化上较为稳定,年内变化枯水期大于丰水期;于艺鹏等^[7]研究表明,修正的滑动最小值法在北洛河流域中最为适用。从现有研究来看,利用数值模拟法进行基流分割具有普遍的适用性,不同流域所使用的基流分割方法也存在差异。大多数研究一般只采用一种基流分割方法进行比较分析,为减小基流分割结果的不确定性,本研究采用多种基流分割方法进行比较分析,选取适合黄土高原地区的基流分割方法。

黄土高原地区是环境变化较大的半干旱地区^[8],近年来,气候变化和人类活动对基流的影响日益加剧,例如,水土保持工作的开展、地下水和煤矿的开采、极端气候的频繁发生等^[9-10]。为控制严重的水土流失,从 1999 年开始实施的退耕还林(草)工程,使大量农田退耕还林还草。随着流域径流的不断减少,导致水资源短缺的加剧,因此已有学者对径流进行研究^[11],但是少有研究考虑径流组分的变

化,即基流。因此,对黄土高原地区基流展开研究显得颇为重要。

本研究选取黄土高原地区无定河、窟野河、延河 1965—2017 年及秃尾河流域 1983—2017 年逐日径流、降水和潜在蒸散发数据,应用数字滤波法、时间步长法和滑动最小值法分析流域基流的年际变化特征,以及弹性系数法来量化气候变化和人类活动对基流变化的贡献,从而为黄土高原河道水资源管理提供理论支持。

1 研究区概况

选取黄土高原无定河、窟野河、延河和秃尾河 4 条典型河流作为研究对象(图 1)。无定河流域($37^{\circ}02' - 39^{\circ}00'N, 107^{\circ}47' - 111^{\circ}34'E$)流经陕西省北部和内蒙古地区,为温带大陆性季风气候,属于黄河一级主要支流,也是陕北榆林最大的一条河流,发源于定边县白于山脉北麓,多年平均降水量为 409.40 mm,年径流深为 33.87 mm,且分布不均^[12],流域总面积 30 261 km²。无定河地貌类型可分为 3 种,分别为河源润地区、风沙滩区和黄土丘陵沟壑区,流域上游以耕地和未利用地为主,中下游以草地和林地为主,流域出口控制水文站为白家川水文站。窟野河流域($38^{\circ}28' - 39^{\circ}52'N, 109^{\circ}00' - 110^{\circ}52'E$)是黄河多沙粗沙支流,为干旱半干旱区,流域地形地貌可分为风沙区和黄土丘陵沟壑区,流域地表植被稀少,林地和草地覆盖率低,土壤侵蚀情况严重,土地利用类型多以耕地和草地为主。多年平均降水量为 395.80 mm,年径流深为 53.28 mm,流域总面积 8 706 km²,流域出口控制水文站为温家川水文站。延河流域属于黄河一级支流($36^{\circ}23' - 37^{\circ}17'N, 108^{\circ}45' - 110^{\circ}28'E$),发源于陕西省北部白于山附近,流经延安市,于延安市延长县南河沟凉水岸附近汇入黄河,流域面积 7 725 km²,为大陆性季风气候,土壤类型以黄棉土为主,土质比较疏松,水土流失严重,地质地貌以崩状丘

陵沟壑区为主。多年平均降水量为 512.60 mm, 年径流深为 24.07 mm, 流域出口控制水文站为甘谷驿水文站。秃尾河流域属于黄河支流(39°00′—39°27′N, 110°32′—110°05′E), 为大陆性季风气候, 发源于陕西省神木县境内瑶镇乡的公泊海子, 流经瑶镇、高家堡等地, 在家峁附近注入黄河, 地处毛乌素沙漠与黄土高原过渡地带, 风沙区位于流域中上游, 黄土丘陵沟壑区位于流域下游, 流域植被覆盖率低, 土壤类型有黄棉土和风沙土等 6 大类型。流域总面积为 3 294 km², 流域出口控制水文站为高家川水文站; 而本研究选取秃尾河流域上游段, 流域面积 2 095 km², 多年平均降水量为 424.70 mm, 年径流深为 97.21 mm, 控制水文站为高家堡水文站。

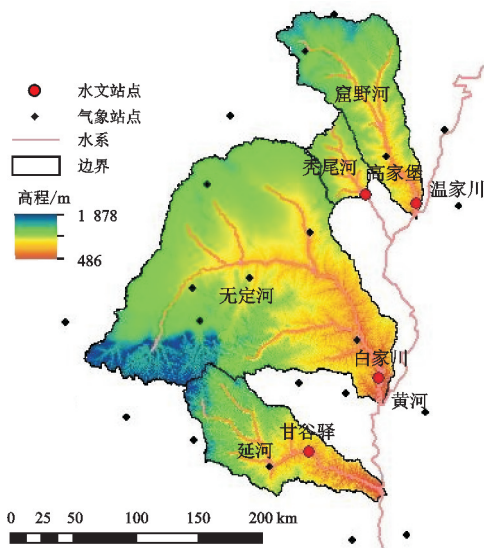


图 1 研究流域概况

Fig.1 Overview of the study basin

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文收集了白家川、温家川、甘谷驿和高家堡 4 个水文站的逐日平均径流量资料, 其中白家川、温家川、甘谷驿 3 个水文站的逐日平均径流量时间序列为 1965—2017 年, 高家堡站时间序列为 1983—2017 年, 且 4 个水文站数据均来自黄河流域水文年鉴; 1965—2017 年逐日平均降水量数据和逐日平均潜在蒸散发数据来自国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>), 包括神木、榆林、乌审召、府谷和绥德等 21 个气象站点数据。

2.2 研究方法

2.2.1 基流分割方法

(1) 数字滤波法

数字滤波法是目前国际领域应用最广泛的基流分割方法, 数字滤波器通常用于信号分析, 允许使用数学公式分离“高频”(即地表径流)和“低频”(即基

流)信号, 从而达到分割基流的目的。目前广泛应用的主要有 4 种^[13]: Lyne-Hollick 滤波法(F1)、Chapman-Maxwell 滤波法(F2)、Boughton-Chapman 滤波法(F3)和 Eckhardt 滤波法(F4)。

F1 滤波法是由 Nathan 和 McMahon 对 Lyne-Hollick 滤波法改进之后的算法, 是一种基于信号分析和处理的方法, 表达式为:

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

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

式中: q_t 、 q_{t-1} 分别为 t 时刻和 $t-1$ 时刻的地表径流量(m^3/s); Q_t 、 Q_{t-1} 分别为 t 时刻和 $t-1$ 时刻的河川径流量(m^3/s); b_t 为第 t 时刻的基流量(m^3/s); α 为滤波法的参数。通过前人研究, α 一般取 0.925 时, 分割基流所得结果最好, 本研究将采用试算法, 将 $\alpha=0.9, 0.925, 0.95$ 带入分别计算。

F2 滤波法是 Chapman-Maxwell 滤波法, 表达式为:

$$b_t = \frac{k}{2-k}b_{t-1} + \frac{1-k}{2-k}Q_t \quad (3)$$

式中: Q_t 为 t 时刻的总径流量(m^3/s); b_t 、 b_{t-1} 为 t 时刻和 $t-1$ 时刻的总基流量(m^3/s); k 为退水系数, 当 k 取 0.95 时, 认为其基流分割结果最合理。

F3 滤波法是 Boughton-Chapman 滤波法, 表达式为:

$$b_t = \frac{k}{1+c}b_{t-1} + \frac{c}{1+c}Q_t \quad (4)$$

式中: k 为退水系数, 一般取值 0.95; c 一般为固定值, 取值为 0.15。

F4 滤波法是 Eckhardt 滤波法, 表达式为:

$$b_t = \frac{\alpha(1-B_{\max})b_{t-1} + (1-\alpha)B_{\max}Q_t}{1-\alpha B_{\max}} \quad (5)$$

式中: 相对于单参数滤波方法来说, 双参数滤波方法可以通过改变 $B_{\max}$ 的值来改变基流的分割过程。然而 $B_{\max}$ 的值是不能通过观测得到的, Eckhardt 推荐对于具有常流水的河流, 以孔隙含水层为主, $B_{\max}$ 一般取值为 0.80; 对于季节性的常流水河流, $B_{\max}$ 一般取值为 0.50; 对于以弱透水层为主的河流, $B_{\max}$ 一般取值为 0.25。该方法普遍适用于长时间水文序列流域。

(2) 时间步长(HYSEP)法

时间步长法首次提出是在 1979 年, 也使基流计算进入了程序化的阶段。时间步长法又细分为 3 种, 固定步长法、滑动步长法和局部最小值法。在使用时间步长法分割基流之前, 需先计算其退水时间, 公式^[14]为 $t = (2.59A)^{0.2}$ 。式中: t 为地表径流停滞所持续的天数; A 为研究流域面积(km^2)。进行基流

分割时所选取的时间步长为 $2t$ 在 3~11 天内与其最为接近的奇数。由于无定河流域、窟野河流域、延河流域、秃尾河流域的流域面积分别为 30 261, 8 706, 7 725, 2 095 km^2 , 所以经过计算可得 4 个流域的 t 均取 11。

(3) 滑动最小值法

滑动最小值法又被称作基流指数法, 该基流分割方法包含 2 种: 标准法 (BFI-f) 和改进法 (BFI-k)。将每年的逐日平均流量按照 $365/N$ 个时段进行划分, 若其最小流量值与拐点检验因子 f 的乘积不大于相邻时间段内的最小流量, 这时就把其当作拐点。为了使其基流分割结果最为理想, 拐点检验因子 f 一般取值为 0.9 或者 0.979^[15], 时间步长 N 则通过试算来确定, 可得无定河、窟野河、延河、秃尾河时间步长均为 $N=7$ 时基流指数变化幅度变小, 逐步趋于稳定。

2.2.2 气候弹性系数法 本研究使用气候弹性系数法定量分析气候变化和人类活动对基流的贡献, 气候弹性系数法是依据水量平衡原则提出的, 该方法计算简便, 应用广泛。

基流的总变化量可表示为:

$$\Delta R_b = \sum \Delta R_b^{xi} \quad (6)$$

式中: ΔR_b 为基流总变化量 (mm); ΔR_b^{xi} 分别为降水量的变化、潜在蒸散发的变化和人类活动影响引起的基流值变化。

ΔR_b^{xi} 可表示为:

$$\Delta R_b^{xi} = \epsilon_i \times \frac{R_b}{x_i} \times \Delta x_i \quad (7)$$

式中: ϵ_i 为基流 R_b 某个控制因子的弹性系数; x_i 为某个控制因素的年平均值; Δx_i 为某个控制因素的变化量。

流域特征参数 n 可以使用相关研究^[16-17]方程和流域水量平衡方程确定:

$$E = \frac{PE_0}{(P^n + E_0^n)^{1/n}} \quad (8)$$

$$P = E + R \quad (9)$$

式中: E 为多年平均实际蒸散发 (mm); P 为多年平均降水量 (mm); R 为多年平均径流量 (mm); n 为流域特征参数。

由于不能直接把基流代入水量平衡方程中, 本研究通过数据拟合的方式 (包括线性函数、对数函数、指数函数和幂函数), 对年基流深和年径流深进行拟合。函数关系式可表示为:

$$R_b = f(R) \quad (10)$$

弹性系数^[18]可表示为:

$$\epsilon_i = \frac{\partial R_b}{\partial x_i} \times \frac{x_i}{R_b} \quad (11)$$

式中: x_i 为某个控制因子的年平均值。

某个控制因子对基流深变化的贡献率表达式为:

$$C_{xi} = \frac{\Delta R_b^{xi}}{\Delta R_b} \times 100\% \quad (12)$$

3 结果与分析

3.1 基于不同方法的基流分割结果变化

3.1.1 基流指数对比分析 采用 9 种基流分割方法对 4 个流域进行基流分割, 得到估算的基流量, 以估算的基流量与径流量的比值为基流指数, 通过分析其均值、标准差和变异系数来判别分割方法的可靠性和稳定性 (图 2)。无定河流域年平均基流指数为 0.07~0.77, 窟野河流域年平均基流指数为 0.06~0.73, 延河流域年平均基流指数为 0.09~0.72, 秃尾河流域年平均基流指数为 0.11~0.93。

F2 和 F3 基流分割方法在 4 个流域中的基流指数平均值均小于其他分割方法, 时间步长法和滑动最小值法的基流指数平均值均比较偏大, F1 和 F4 方法的基流指数平均值适中。通过分析标准差和变异系数可得, 4 个流域的标准差计算值最大为 0.12, 最小值为 0.01, 相对来说数字滤波法 F2、F3 和 F4 的基流分割结果比较稳定, 而无定河流域和秃尾河流域标准差均在 0.10 以下, 比其他 2 个流域更稳定, 对 4 个流域的变异系数分析可得, 依旧是数字滤波法 F2、F3 和 F4 的基流分割结果所得变异系数较小, 说明其离散程度较低。

以枯水指数 (Q_{90}/Q_{50}) 为基准^[19], 同时与数字滤波法 F2、F3 和 F4 的基流分割结果进行误差分析, F2 和 F3 2 种方法的误差在 4 个流域中均达到 60% 以上, 秃尾河流域甚至达到 80% 以上, 然而 F4 方法的误差最小, 4 个流域分别为 22.6%, 6.8%, 10.3% 和 4.1%, 对比来看秃尾河流域误差最小。综合分析可得, 4 个流域基流分割结果较为一致, F2、F3 和 F4 3 种基流分割方法所得结果稳定性比较好, 但是通过分析相对误差可得, F4 方法的误差明显低于 F2 和 F3 2 种方法。最后对实际情况的考虑, 认为数字滤波方法 F4 在这 4 个流域中最为适用 (表 1)。本研究将以数字滤波法 F4 进行分析。

3.1.2 径流深和基流深年际变化特征 通过 Mann-Kendall 检验法对 4 个流域的年径流深、年基流深和年基流指数进行趋势分析 (表 2), 4 个流域的年径流深和年基流深在研究时限内均呈显著性减少趋势, 年基流指数均呈增大趋势, 除秃尾河流域外, 其余流域年基流指数趋势均通过显著性检验 ($p < 0.01$)。Pettitt 突变检验可知 4 个流域年基流深分别在 1988 年、1988 年、1996 年和 2000 年发生突变, 均通过显著性检验 ($p < 0.01$)。

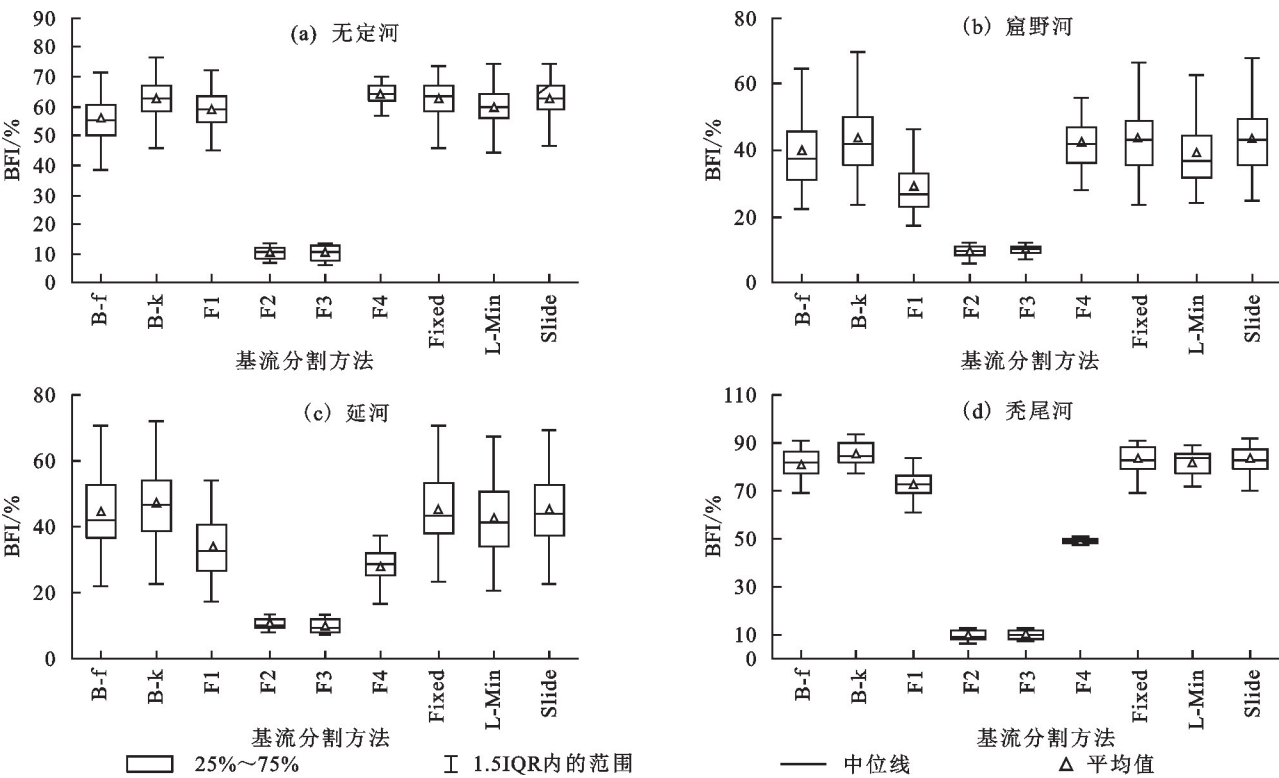


图 2 研究流域基流指数 BFI 分布

Fig.2 The distribution of BFI in the basin was studied

表 1 研究流域基流指数误差

Table 1 The index error of the basin base flow was studied %

流域名称	数字滤波法				时间步长法			滑动最小值法	
	F1	F2	F3	F4	F1	SL	LM	BFI-f	BFI-k
无定河	23.2	68.3	67.1	22.6	61.4	61.2	53.8	43.7	60.1
窟野河	11.1	61.9	60.3	6.8	62.6	63.4	49.2	51.3	64.4
延河	16.3	68.4	66.6	10.3	12.5	12.4	5.4	10.4	17.4
秃尾河	3.3	84.3	82.6	4.1	19.1	19.2	19.1	15.2	21.3

4 个研究区域基流年际变化特征见图 3,分析年径流深、年基流深和年基流指数,可得无定河流域、窟野河流域和延河流域 3 个指标变化幅度比较大,而秃尾河流域相对来说比较平缓。无定河流域年径流深、年基流深和年基流指数平均值分别为 33.87,21.4 mm和 0.64,窟野河流域平均值分别为 53.28,21.23 mm 和 0.42,延河流域平均值分别为 24.07,6.48 mm 和 0.28,秃尾河流域平均值分别为 97.21,47.56 mm 和 0.49,可见,无定河流域年基流指数达到 0.64,说明其基流为径流的重要组成部分,秃尾河流域年径流深和年基流深平均值明显大于其他 3 个流域,且变化比较平稳。4 个流域的年径流深变化趋势基本一致,且均在 2000—2010 年左右年径流深有显著减小的趋势,窟野河流域径流深的减小趋势更为剧烈,其归因于退耕还林和水土保持等一系列恢复生态环境的措施对河道径流量的变化有巨大影响,并且研究区域所处地区为陕北黄土高原地区,地下水的开采对 2000 年之后河道径流量显著减小也有巨大的影响^[20],这也直接导致基流深在此时间段呈显著下降趋势。

表 2 研究流域年径流深、年基流深和年基流指数年际统计特征
Table 2 The interannual statistical characteristics of annual runoff depth, annual base flow depth and annual base flow index were studied

流域名称	指标	Mann-Kendall 检验		Pettitt	
		Z	显著性	年份	显著性
无定河	年径流深	-5.53	***	1988	***
	年基流深	-5.85	***		
	年基流指数	2.22	**		
窟野河	年径流深	-5.44	***	1988	***
	年基流深	-5.59	***		
	年基流指数	2.85	**		
延河	年径流深	-3.81	***	1996	**
	年基流深	-2.78	**		
	年基流指数	4.40	***		
秃尾河	年径流深	-3.99	***	2000	***
	年基流深	-4.29	***		
	年基流指数	0.14	Ns		

注:***表示 0.001 的显著性;**表示 0.01 的显著性;*表示 0.05 的显著性;Ns 表示不显著;-表示未涉及。

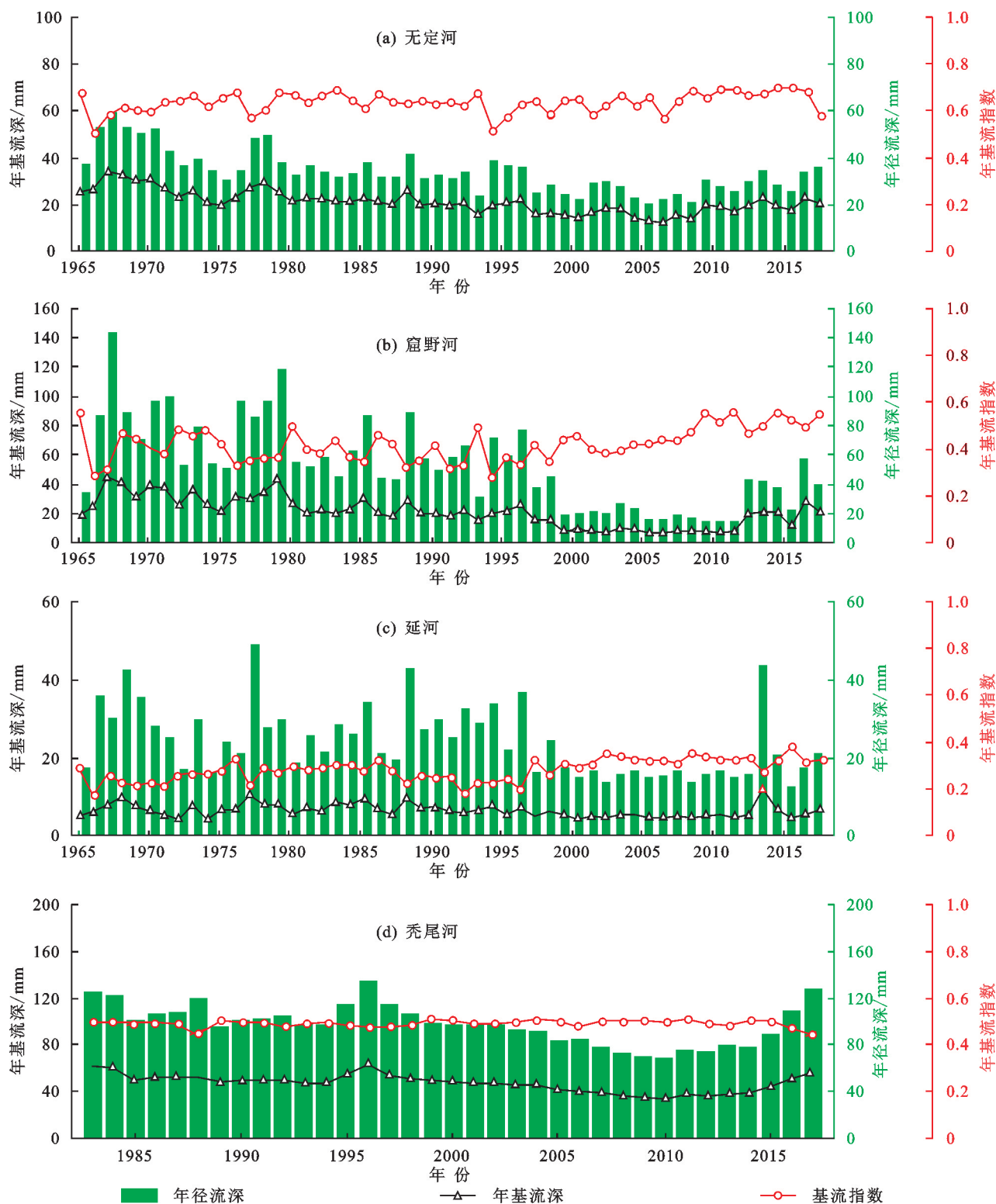


图3 研究流域基流年际变化特征

Fig.3 The interannual variation characteristics of base flow in the basin were studied

3.2 基于 Budyko 假设的基流驱动因素量化

根据年基流深突变点将研究分为基准期和研究期,研究流域 2 个时期气象水文要素和流域特征参数指标统计结果见表 3。

各个流域研究期基流深较基准期基流深都有所减少,变化率为 20%,窟野河流域变化率甚至达到

49.37%(表 3),与河道径流量的减少有密切关系,而秃尾河流域与其他 3 个流域相比,研究期降水量和潜在蒸散发量较基准期都有所增加,且潜在蒸散发增加较多。

将基准期和研究期多年平均降水量、潜在蒸散发量和径流量代入公式(8)和公式(9),推算得到 4 个流

域 2 个时期流域特征参数 n (表 3)。为检验参数 n 的合理性,采用 11 年滑动平均法对计算数据进行平滑处理^[21],模拟得到 4 个流域滑动平均径流量,对比多年平均实测径流量和模拟径流量(图 4)。由图 4 可

知,秃尾河流域的径流模拟值和实测值比较接近,误差仅为 1.05%;无定河和窟野河流域次之,误差分别为 26.72%和 23.33%,延河流域的模拟值与实测值相对来说差值比较大,误差为 50.21%。

表 3 研究流域气象水文要素和流域特征参数指标统计

Table 3 Statistics of meteorological and hydrological elements and characteristic parameters of the study basin									
流域名称	时期	R_b/mm	$\Delta R_b/\%$	p/mm	$\Delta p/\%$	E_0/mm	$\Delta E_0/\%$	n	$\Delta n/\%$
无定河	全时期	20.67		401.24		926.89		2.09	
	基准期	24.11		403.27		927.56		1.97	
	研究期	17.95	-25.55	399.64	-0.91	926.37	-0.13	2.19	11.17
窟野河	全时期	20.28		388.47		932.17		1.83	
	基准期	27.99		390.34		927.43		1.60	
	研究期	14.17	-49.37	386.99	-0.86	935.92	0.92	2.10	31.25
延河	全时期	6.47		503.19		843.03		4.47	
	基准期	7.04		507.11		829.89		4.44	
	研究期	5.50	-21.88	496.61	-2.07	865.19	4.25	4.49	1.13
秃尾河	全时期	46.84		406.19		912.41		1.38	
	基准期	51.34		395.79		870.57		1.02	
	研究期	41.96	-18.27	417.47	5.48	957.73	10.01	1.47	44.11

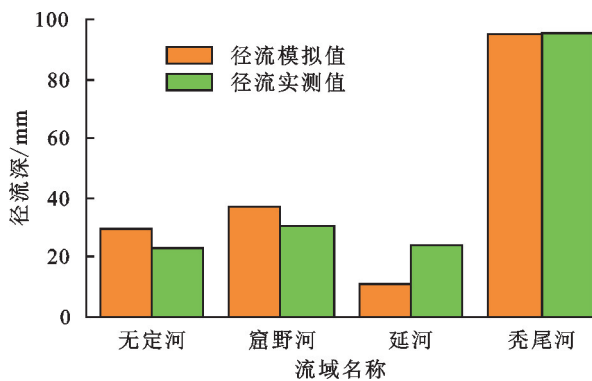


图 4 研究流域多年平均径流模拟值与实测值

Fig.4 The simulated and measured values of multi-year average runoff in the basin were studied

各个流域河道基流量发生变化是由于降水、潜在蒸散发和人类活动等因素的影响,为了量化其对河道基流量变化的贡献率,将采用气候弹性系数法进一步分析。在使用气候弹性系数法来衡量气候变化和人类活动对基流变化的影响之前,需要对年径流深和年基流深进行数据拟合分析^[22] (包括线性函数、对数函数、指数函数和幂函数)。

秃尾河流域径流深与基流深的数据拟合效果最好(图 5),4 个拟合函数的 R^2 均达到 0.99 以上,其中对数函数拟合效果最好, R^2 为 0.998,延河流域拟合效果相对较差;无定河、窟野河均是线性函数拟合最

好, R^2 分别为 0.978 和 0.974,而延河流域是幂函数拟合最好, R^2 为 0.834。综合来看,4 个流域年径流深和年基流深拟合效果均较好。

4 个流域基流深对降水和潜在蒸散发的弹性系数见表 4。 ϵ_p 均为正值, ϵ_{E_0} 和 ϵ_n 均为负值,多流域平均 ϵ_p (0.18~1.12)、 ϵ_{E_0} (-7.24~-1.74) 和 ϵ_n (-5.18~-2.86) 分别为 0.68, -4.63 和 -3.98,结果表明,降水量和潜在蒸散发每增加 1%,基流深变化幅度为 0.68%, -4.63% 和 -3.98%。因此,在这 4 个流域中,基流深对潜在蒸散发最为敏感。

气候弹性系数法对 4 个流域基流变化贡献率最大的是人类活动(104.37%),贡献率最小的是潜在蒸散发(-0.81%)。无定河、窟野河和秃尾河都是人类活动对基流变化影响最大,而延河流域是气候变化对基流的减少起主要作用(表 5),若计算的气候变化和人类活动等因素对河道基流量变化的贡献率为正值,则表明气候变化和人类活动等因素对河道基流量的减少起到促进作用,反之为抑制作用。产生这一结果的主要原因是过去几十年退耕还林措施导致流域下垫面特征的急剧改变,无定河、窟野河和秃尾河流域特征参数 n 出现急剧上升的趋势,而延河则变化不明显。

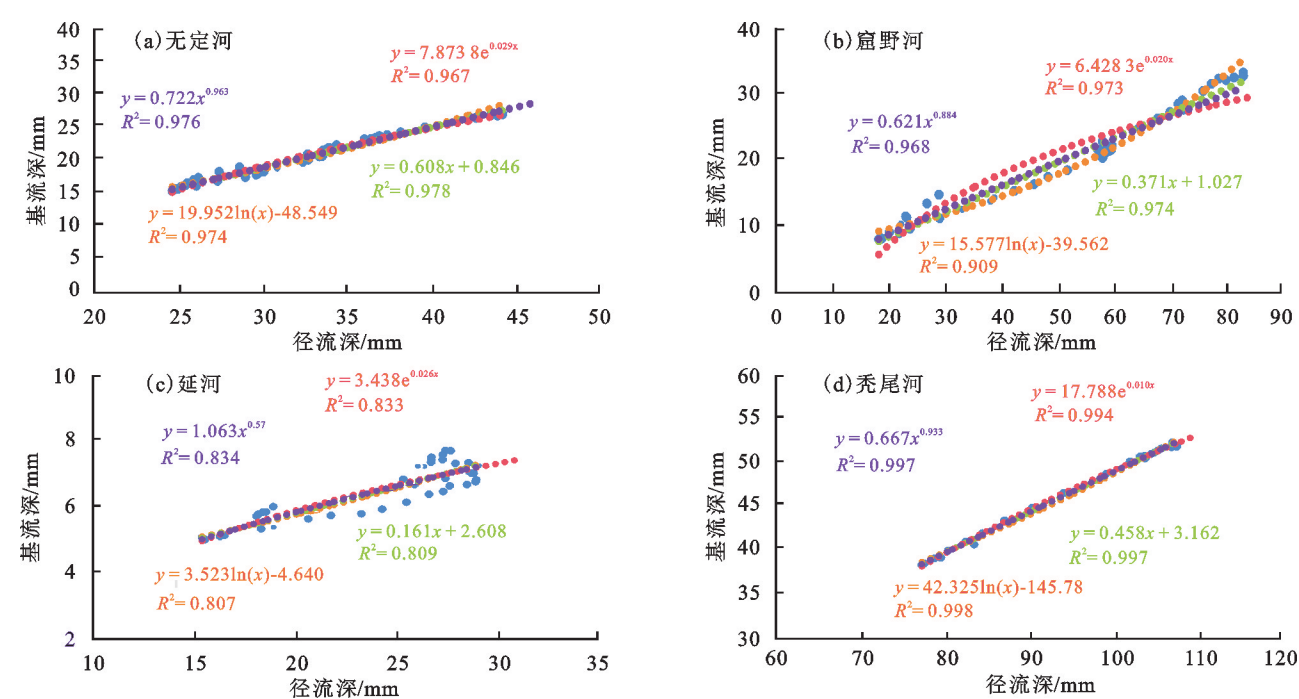


图 5 研究流域基流深与径流深拟合

Fig.5 The fitting of the base flow depth and runoff depth in the basin was studied

表 4 降水、潜在蒸散发和人类活动的弹性系数

Table 4 Elasticity coefficients of precipitation, potential evapotranspiration, and human activities

流域名称	ϵ_p	ϵ_{E_0}	ϵ_n
无定河	0.41	-2.66	-3.61
窟野河	1.02	-7.24	-4.28
延河	1.12	-6.89	-5.18
秃尾河	0.18	-1.74	-2.86

表 5 气候变化和人类活动对研究流域年基流深变化的贡献率

Table 5 The contribution rate of climate change and human activities to the annual basal depth change of the study basin

流域名称	p	E_0	n
无定河	8.89	-0.81	91.92
窟野河	3.31	2.15	94.54
延河	33.92	55.16	10.92
秃尾河	-56.72	52.35	104.37

4 讨论

本文采用数字滤波法、时间步长法、滑动最小值法 3 类 9 种方法对无定河流域、窟野河流域、延河流域和秃尾河流域进行基流分割,在通过与实测基流量(枯水指数)对比之后得出数字滤波法 F4 最适合研究区域,与杨倩楠等^[23]和卢睿等^[24]研究无定河流域和河西走廊内陆河上游山区所确定的基流分割方法一致,均表明数字滤波法 F4 相比较于其他基流分割方法更为适用。基于数字滤波法 F4 对无定河、

窟野河、延河、秃尾河计算的平均基流指数分别为 0.64,0.42,0.28,0.49,与杨倩楠等^[23]在无定河流域基于 Eckhard 提出的数字滤波法计算的白家川水文站平均基流指数 0.67 相近,与雷泳男等^[25]在窟野河流域基于 Eckhard 提出的数字滤波法计算的温家川水文站平均基流指数 0.38 相近,与吴珍妮^[26]在延河流域基于 Eckhard 提出的数字滤波法计算的甘谷驿水文站平均基流指数 0.26 相近,与赵栋^[27]在秃尾河流域基于 Eckhard 提出的数字滤波法计算的高家川水文站平均基流指数 0.49 一样,说明数字滤波法 F4 在这 4 个流域中具有一定的可靠性。所以,在黄河上中游地区,数字滤波法具有普遍的适用性,且相对来说比较可靠。

本文在分析气候变化对基流深变化的贡献率时,只分析降水和潜在蒸散发 2 种气候变化,樊晶晶等^[28]证明在黄土高原地区气候变化中降水和潜在蒸散发的变化对基流深变化的贡献占主导部分。研究结果表明,无定河、窟野河和秃尾河流域人类活动对基流的减少起主要作用,而延河流域气候变化对基流的减少起主要作用^[29]。

近年来,黄土高原地区的径流量在持续减少,径流组分基流量也呈减少趋势。而在黄土高原地区基流量占总流量的绝大部分,因此基流的减少对黄土高原地区生态效应产生一定的负面影响^[3]。秃尾河流域对地下水的开发比较严重,地下水开发量在 2010 年之前逐步增加。由于流域地处神木市矿区腹地,大

规模的煤矿开采导致地下水水位的下降,进一步导致基流的减少。流域内有 2 座中型水库瑶镇水库和采兔沟水库,对基流的减少有一定的影响。窟野河流域内大柳塔煤矿的开采,使得流域断流,基流减少。由于流域内灌区的不断扩大和大型工业的建造,用水量增加,导致地下水的开采量增加,对基流的减少有一定的影响;流域内总灌溉面积 146 km^2 ,水库总库容达 $5\,500 \text{ 万 m}^3$ 。无定河王圪堵等水库的建设和地下水的开发使用,以及煤炭的开采都促进基流的减少。下垫面特征的改变也导致基流的减少,进一步影响土壤蓄水能力的下降;大规模的水土保持工作的开展(过度植树造林),植被覆盖度增加,使得流域实际蒸散发的增加^[30]。总体来说,基流的减少是气候变化和人类活动共同作用的结果。本研究对人类活动对基流变化的影响比较单一化,并没有细分,地下水的过度开采和煤炭开采,下垫面条件改变对引起基流量的减少所产生的贡献,还有待进一步研究。

5 结 论

(1)以枯水指数为条件,分析 9 种基流分割方法在研究区域的适用性表明,数字滤波法 F2 和 F3 误差相对来说比较大,时间步长法和滑动最小值法分割结果普遍偏高,数字滤波法 F1 对比 F4 来说分割结果不够稳定,综合来说,F4 法适合这 4 个流域。

(2)年际分析 4 个流域年基流深、年径流深和年基流指数的变化趋势有较高的一致性,无定河、窟野河、延河和秃尾河流域多年平均基流指数 BFI 分别为 0.64,0.42,0.28 和 0.49。

(3)通过气候弹性系数法量化气候变化和人类活动对基流深变化的贡献率,基流深的变化对潜在蒸散发的变化比降水的变化更为敏感,降水量和潜在蒸散发每增加 1%,基流深变化幅度为 0.68% 和 -4.63%;无定河、窟野河和秃尾河都是人类活动对基流变化影响最大,而延河流域气候变化对基流变化影响最大;降水、潜在蒸散发和人类活动对黄土高原地区典型流域基流变化贡献率分别为 -56.72%~33.92%, -0.81%~55.16% 和 10.92%~104.37%。

参考文献:

- [1] TAN X J, LIU B J, TAN X Z. Global changes in baseflow under the impacts of changing climate and vegetation[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(9): e2020WR027349.
- [2] 徐宗学,武玮,于松延.生态基流研究:进展与挑战[J].*水力发电学报*, 2016, 35(4): 1-11.
- [3] XU Z X, WU W, YU S Y. Ecological baseflow: Progress and challenge[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(4): 1-11.
- [4] WU J W, MIAO C Y, DUAN Q Y, et al. Dynamics and attributions of baseflow in the semiarid Loess Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(7): 3684-3701.
- [5] 钱开铸,吕京京,陈婷,等.基流计算方法的进展与应用[J].*水文地质工程地质*, 2011, 38(4): 20-25.
- [6] QIAN K Z, LV J J, CHEN T, et al. A review on baseflow calculation and its application[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2011, 38(4): 20-25.
- [7] ZHANG J L, ZHANG Y Q, SONG J X, et al. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 252-263.
- [8] 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.
- [9] SUN Z W, LIANG Y, NIU X Q. Spatiotemporal variation characteristics of baseflow in the Upper Yangtze River based on digital filter method[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(11): 23-28.
- [10] 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.
- [11] YU Y P, YANG Y H, LIN P F, et al. Comparison of suitability among automatic baseflow separation methods for separating baseflow in Beiluo River Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(2): 302-307.
- [12] 王椰,史海静,姜艳敏,等.基于 TVDI 的黄土高原干旱时空变化与其影响因素[J].*农业机械学报*, 2023, 54(7): 184-195.
- [13] WANG Y, SHI H J, JIANG Y M, et al. Spatio-temporal variation of drought characteristics and its influencing factors in Loess Plateau based on TVDI[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(7): 184-195.
- [14] TANG Y, LUAN X, SUN J, et al. Impact assessment of climate change and human activities on GHG emissions and agricultural water use[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 296: e108218.
- [15] WEI X, CAI S Q, NI P T, et al. Impacts of climate change and human activities on the water discharge and sediment load of the Pearl River, Southern China[J].

- Scientific Reports, 2020, 10(1): e16743.
- [11] LI S, LIANG W, FU B J, et al. Vegetation changes in recent large-scale ecological restoration projects and subsequent impact on water resources in China's Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2016, 569: 1032-1039.
- [12] 任宗萍, 马勇勇, 王友胜, 等. 无定河流域不同地貌区径流变化归因分析[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4309-4318.
- REN Z P, MA Y Y, WANG Y S, et al. Runoff changes and attribution analysis in tributaries of different geomorphic regions in Wuding River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): 4309-4318.
- [13] 林凯荣, 陈晓宏, 江涛, 等. 数字滤波进行基流分割的应用研究[J]. 水力发电, 2008, 34(6): 28-30.
- LIN K R, CHEN X H, JIANG T, et al. Application and study on base flow separation using digital filters[J]. Water Power, 2008, 34(6): 28-30.
- [14] 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 L L, LIU J L, JIN C J, et al. Baseflow separation methods in hydrological process research: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 3073-3080.
- [15] 雷宇宽. 西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.
- [16] YANG H B, YANG D W, HU Q F. An error analysis of the Budyko hypothesis for assessing the contribution of climate change to runoff[J]. Water Resources Research, 2014, 50(12): 9620-9629.
- [17] CHOUDHURY B. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of Hydrology, 1999, 216(1/2): 99-110.
- [18] NING T T, LI Z, LIU W Z. Separating the impacts of climate change and land surface alteration on runoff reduction in the Jing River Catchment of China[J]. Catena, 2016, 147: 80-86.
- [19] 温艳霞, 燕鑫, 李志. 秃尾河流域河川径流组分变化及归因分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 86-94.
- WEN Y X, YAN X, LI Z. Detecting and attributing the changes in components of streamflow in tuweihe river watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 86-94.
- [20] 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 Y P, JIANG X H, JIN S Y, 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 Science and Environmental, 2004, 26(2): 88-91.
- [21] SHAO R, ZHANG B Q, HE X G, et al. Historical water storage changes over China's Loess Plateau[J]. Water Resources Research, 2021, 57(3): ee2020WR028661.
- [22] MO C X, RUAN Y L, XIAO X G, et al. Impact of climate change and human activities on the baseflow in a typical Karst Basin, Southwest China[J]. Ecological Indicators, 2021, 126: e107628.
- [23] 杨倩楠, 高海东, 韩勇, 等. 无定河流域基流变化特征及其对降水的响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 235-242.
- YANG Q N, GAO H D, HAN Y, et al. Variation characteristics of baseflow and its responses to precipitation in Wuding River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 235-242.
- [24] 卢睿, 朱睿, 尹振良, 等. 河西走廊内陆河上游山区基流分割方法适用性与基流特征分析[J]. 冰川冻土, 2023, 45(5): 1602-1615.
- LU R, ZHU R, YIN Z L, et al. Applicability of base flow separation method and analysis of base flow characteristics in upstream mountains of inland rivers in Hexi Corridor[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(5): 1602-1615.
- [25] 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 Y N, ZHANG X P, ZHANG J J, et al. Suitability analysis of automatic baseflow separation methods in typical watersheds of water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau, China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(6): 57-64.
- [26] 吴珍妮. 黄土区基流分割适宜性方法及基流特征分析[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- WU Z N. Baseflow separation and characteristic analysis of the loess region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [27] 赵栋. 黄土高原典型流域基流分割及其演变驱动因素分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- ZHAO D. Baseflow separation and driving factors of baseflow evolution in typical watershed of Loess Plateau[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.

- [31] 刘佳,范昊明,周丽丽,等.冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J].水土保持学报,2009,23(6):186-189.
LIU J, FAN H M, ZHOU L L, et al. Study on effects of freeze-thaw cycle on bulk density and porosity of black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 186-189.
- [32] 郑秀清,樊贵盛.土壤含水率对季节性冻土入渗特性影响的试验研究[J].农业工程学报,2000,16(6):52-55.
ZHENG X Q, FAN G S. Influence of moisture content on infiltration characteristics in seasonal frozen and thawed soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(6): 52-55.
- [33] WANG W, LI Z B, YANG R, et al. Experimental study of freeze-thaw/water compound erosion and hydraulic conditions as affected by thawed depth on loessal slope[J]. Frontiers in Environmental Science, 2020, 8: e609594.
- [34] WEI X, HUANG C, WEI N, et al. The impact of freeze-thaw cycles and soil moisture content at freezing on runoff and soil loss[J/OL]. Land Degradation and Development, 2018. DOI: 10.1002/ldr.3243.
- [35] 赵娅君,郑粉莉,毋冰龙,等.冻融作用对黑土坡面融雪、风力和降雨侵蚀的影响研究[J].水土保持学报,2024,38(4):63-71.
ZHAO Y J, ZHENG F L, WU B L, et al. Effects of Freeze-thaw Action on Snowmelt, Wind and Rainfall Erosion in Chinese Typical Mollisol Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 63-71.
- [36] 魏霞,李勋贵, HUANG C H. 交替冻融对坡面产流产沙的影响[J].农业工程学报,2015,31(13):157-163.
WEI X, LI X G, HUANG C H. Impacts of freeze-thaw cycles on runoff and sediment yield of slope land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(13): 157-163.
- [37] 孙宝洋,吴志广,李占斌,等.冻融对土壤分离能力及侵蚀阻力的影响[J].农业工程学报,2020,36(11):57-65.
SUN B Y, WU Z G, LI Z B, et al. Effects of freeze-thaw on soil detachment capacity and erosion resistance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11): 57-65.
- [38] ZHAO Y S, WANG E H, CRUSE R M, et al. Characterization of seasonal freeze-thaw and potential impacts on soil erosion in Northeast China[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92(3): 567-571.
- [39] BURYLO M, HUDEK C, REY F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France)[J]. Catena, 2011, 84(1/2): 70-78.
- [40] 兰航宇,段文标,陈立新,等.林型和微立地类型及其土壤性质对土壤抗侵蚀能力的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):108-114.
LAN H Y, DUAN W B, CHEN L X, et al. Effects of forest type, microsite type and soil properties on soil erosion resistance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 108-114.
- [41] 姜玉喆.冻融条件下黑土孔隙特征对土壤抗冲性影响研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2019.
JIANG Y Z. Study on the effect of pore characteristics of black soil on soil scour resistance under freezing-thawing conditions[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [42] 刘佳,范昊明,周丽丽,等.春季解冻期降雨对黑土坡面侵蚀影响研究[J].水土保持学报,2009,23(4):64-67.
LIU J, FAN H M, ZHOU L L, et al. Study on effects of rainfall in the spring thaw period on black soil slope erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 64-67.
- [43] 周丽丽,王铁良,范昊明,等.未完全解冻层对黑土坡面降雨侵蚀的影响[J].水土保持学报,2009,23(6):1-4.
ZHOU L L, WANG T L, FAN H M, et al. Effects of incompletely thawed layer on black soil slope rainfall erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 1-4.
- (上接第91页)
- [28] 樊晶晶,刘纯,穆征,等.不同基流分割方法在秦岭山区—黄土高原过渡带的对比应用及其演化规律研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(3):1-10.
FAN J J, LIU C, MU Z, et al. Comparative application of different base flow segmentation methods in the transition zone between Qinling Mountains and Loess Plateau and its evolution law [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43(3): 1-10.
- [29] LI Z, LIN X Q, XIANG W, et al. Stable isotope tracing of headwater sources in a river on China's Loess Plateau [J]. Hydrological Sciences Journal, 2017, 62(13): 2150-2159.
- [30] ZHANG S L, YANG D W, YANG Y T, et al. Excessive afforestation and soil drying on China's Loess Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123(3): 923-935.