

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220391

黄土高原采矿扰动对小流域基流过程的影响

马 瑞^{1a}, 宋小燕^{1a,1b}, 孙文义², 雷晓平^{1a}, 宋松柏^{1a,1b}

(1. 西北农林科技大学 a. 水利与建筑工程学院; b. 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 解析黄土高原地区采矿活动的水文响应有助于促进矿区生态保护和高质量发展, 选取黄土高原白马河、松塔河、昕水河和州川河四个典型小流域, 研究了8种基流分割方法在黄土高原的适用性, 并采用基于对比流域的距平累积差值曲线法(DACP)分析了采矿扰动对流域基流过程的影响。结果表明, Chapman-Maxwell 滤波法和 Eckhardt 滤波法在黄土高原典型小流域中适用性最佳, 分割基流量相对稳定, 基流过程线符合流域的降水产流机制和退水过程; 1956~2012年四个小流域的基流量整体呈显著下降趋势; 随着采矿扰动强度增加, 基流的 DACP 指数上升, 采矿扰动增加了流域基流量。

关键词: 采矿扰动; 对比流域; 基流分割; 黄土高原

中图分类号: TV121⁺.4; P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)01-0022-04

1 概况

白马河流域和松塔河流域位于山西省晋中市, 芦家庄站为白马河和松塔河两个流域控制站, 独堆站为松塔河流域控制站。白马河流域中北部有矿区分布, 包括开元、段王、康家庄等 60×10^4 t 以上级煤矿, 松塔河流域无矿区分布。昕水河流域和州川河流域位于山西省临汾市, 大宁、吉县水文站分别为昕水河和州川河的出口站。昕水河流域中东部分布有大量矿区, 包括国有重点煤矿东河煤矿和 60×10^4 t 以上级安泰煤矿, 州川河流域内无矿区分布。流域概况见表 1。黄土高原煤炭资源丰富, 煤炭开采强烈干扰流域的水文循环过程, 从而影响水循环系统和生态环境稳定。基流是黄土高原地表径流中保障水资源和生态环境安

全的重要组成部分, 作为地下水与地表水之间的转化成分, 受到采矿活动的直接影响, 但目前关于采矿扰动对矿区基流过程影响的研究较少。为此, 本文选取两组位置邻近且气候、土壤、地形地貌、地质条件、国家环保管控政策等相对一致的黄土高原典型小流域白马河流域和松塔河流域、昕水河流域和州川河流域作为研究区, 以无矿区流域作为参照, 研究了 8 种基流分割方法在黄土高原的适用性, 并采用对比流域的距平累积差值法对同组流域基流过程进行对比分析, 从众多因素中甄别出采矿活动的影响, 从而揭示流域基流过程对采矿扰动的响应机制。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

选取流域控制站大宁站、吉县站、独堆站、芦家庄站 1956~2012 年逐日径流为基础数据。由于《中华人民共和国水文年鉴》于 1990~2002 年停刊, 1990~2002 年的水文资料未能获取。

2.2 研究方法

2.2.1 基流分割方法

(1) 基流指数法。基流指数(BFI)法是将每

表 1 流域概况
Tab. 1 Basin overview

对比流域	流域名称	测站	经纬度	流域面积 / km ²	多年平均年径流量 / 10 ⁸ m ³	年径流深 / mm	矿区
A组	白马河	芦家庄	(113.0°E, 37.7°S)	2 367	1.15	48.5	有
	松塔河	独堆	(113.2°E, 37.7°S)	1 152	0.64	55.6	无
B组	昕水河	大宁站	(110.7°E, 36.5°S)	4 326	1.42	32.8	有
	州川河	吉县站	(110.7°E, 36.0°S)	454	0.16	34.7	无

收稿日期: 2022-03-03, 修回日期: 2022-04-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费(2452020167); 国家自然科学基金项目(42177328)

作者简介: 马瑞(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为流域水文学, E-mail: 15291992860@163.com

通讯作者: 宋小燕(1983-), 女, 博士、副教授, 研究方向为水文学, E-mail: xiaoyansong@nwsuaf.edu.cn

年日径流按照固定时间间隔划分为 $365/N$ 个时间段,比较每个时间段与相邻时间段最小流量值,若这个时间段最小流量与拐点检验因子 f 乘积小于等于相邻时间段最小流量值,则该点为流量过程线上的一个拐点,将所有的拐点找出并连接起来即得到基流过程线^[1]。

(2)时间步长法。时间步长(HYSEP)法有三种,分别为固定时间间隔法(FI)、滑动时间间隔法(MI)和局部最小值法(LM)。固定时间间隔法是以固定时间间隔内最小流量作为该时段任意时刻基流的一种分割方法。滑动时间间隔法选择某一时段,将该时段相邻 $(2N-1)/2$ 天时间内最小流量作为该时段的基流,连接所有最小流量即得到基流过程。局部最小值法选择时段中心点前后 $(2N-1)/2$ 天最小流量为相邻时间间隔内中心点基流值,再通过插值得到中心点之外时段基流^[2]。

(3)数字滤波法。数字滤波法包括 Lyne-Hollick 滤波法、Boughton-Chapman 滤波法、Chapman-Maxwell 滤波法和 Eckhardt 滤波法^[1]。

Lyne-Hollick 滤波法:

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

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

式中, q_t 为时段 t 内的地表径流量; β 为滤波参数,一般取 0.925; Q_t 为 t 时段的实测径流。

Boughton-Chapman 滤波法:

$$b_t = b_{t-1}k/(1+f) + Q_{t-1}f/(1+f) \quad (3)$$

式中, f 为参数,通常取值为 0.15。

Chapman-Maxwell 滤波法:

$$b_t = b_{t-1}k/(2-k) + q_t(1-k)/(2-k) \quad (4)$$

式中, k 为退水系数,通常取值为 0.95。

Eckhardt 滤波法:

$$b_t = \frac{\alpha(1-B)b_{t-1} + (1-\alpha)Bq_t}{1-\alpha B} \quad (5)$$

式中, α 为退水常数,取 0.925; B 为最大基流指数,取 0.8^[3]。

基流指数法是利用不同分割方法所得结果的基流指数,比较其均值、极值比和标准偏差,判断基流序列的稳定性^[1-2,4-6]。

2.2.2 基于对比流域的距平累积法

采用基于对比流域的距平累积法评价采矿扰动对基流过程的影响。采用对比流域分析法,综合流域径流序列变化和采矿历史信息,筛选出开采区与非开采区的对比流域,分别绘制两个流域基流过程的距平累积曲线(ACP),在此基础上,计算并绘制有矿区扰动和无矿区扰动流域基流的距平累积曲线差值(DACP),差值消除了气候和

生态环境背景的干扰,可反映受采矿活动影响的基流变化^[7]。

距平累积法(ACP)表达式为:

$$Y_k = \sum_{i=1}^k \frac{y_i - \bar{y}}{\bar{y}} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中, Y_k 为基流距平累积百分率(ACP); \bar{y} 为流域年基流量的平均值。

距平累积曲线差值(DACP)表达式为:

$$\Delta Y_k = Y_{k1} - Y_{k2} \quad (7)$$

式中, ΔY_k 为 DACP 值; Y_{k1} 、 Y_{k2} 分别为受、不受采矿活动影响流域基流距平累积百分率。

3 结果与分析

3.1 基流分割方法的适用性

3.1.1 基流过程线对比

选择有代表性的丰水年绘制基流过程线,通过频率分析计算,松塔河独堆站、白马河芦家庄站选取 1977 年基流过程线(图 1),昕水河大宁站、州川河吉县站选取 1964 年绘制基流过程线(图 2)。

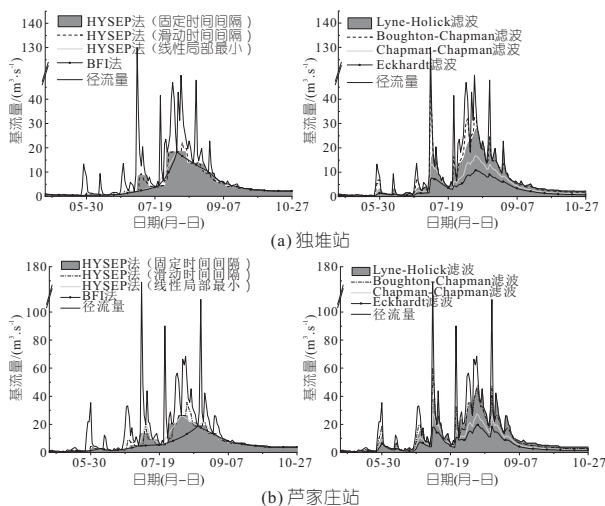


图 1 独堆站、芦家庄站 1977 年 8 种基流分割方法基流过程线

Fig. 1 Baseflow hydrographs of 8 baseflow segmentation methods in 1977 in Dudui station and Lujiazhuang station

由图 1、2 可知,基于 8 种基流分割方法得到的基流过程线差异较大。BFI 法分割基流变幅小且稳定,能够反映基流变化长期趋势,但对地表径流变化敏感性差,难以反映特定地区降水产流机制和退水规律;HYSEP 法能够反映基流变化长期趋势和局部变化特征,但其退水过程划分包括了前期洪水未退完的地下径流,放大了退水过程的水量,且过程线有拐点,这与流域下垫面对降雨汇流的迟滞效应决定地下径流过程为光滑曲线的规律相违背^[8];数字滤波法对径流过程敏感性强,且得到的基流过程线比较光滑,不仅可反映基流

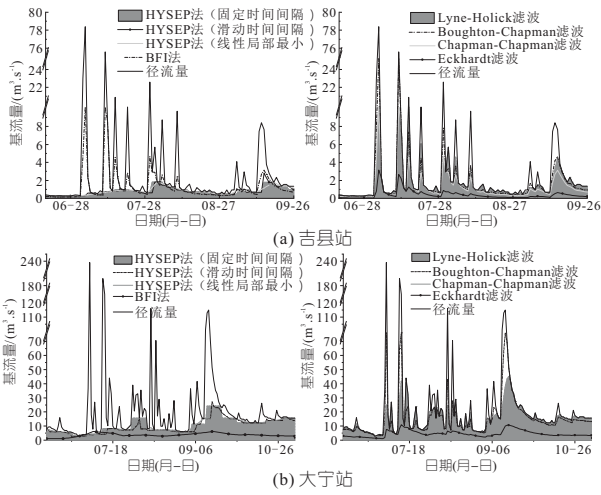


图 2 吉县站、大宁站 1964 年 8 种基流分割方法基流过程线
 Fig. 2 Baseflow hydrographs of 8 baseflow segmentation methods in 1964 in Jixian station and Daning station

变化的趋势,还能反映特定地区降水的产流机制和退水规律。

3.1.2 基流指数对比

分别计算 8 种基流分割方法的基流指数,结果见表 2。由表 2 可知, Lyne-Hollick 滤波法所得基流指数均值最大, Boughton-Chapman 滤波法次之, BFI 法和 Chapman-Maxwell 滤波法较为接近, Eckhardt 滤波法偏小。BFI 法和 HYSEP 法的极值比和标准偏差系数普遍高于数字滤波法, Chapman-Maxwell 滤波法和 Eckhardt 滤波法的极值比和标准偏差系数最小, 分割效果最好。BFI 法和 HYSEP 法分割出的基流起伏较大, 对地表径流变化不敏感; 数字滤波法将基流视为低频信号分割, 比较平滑稳定^[9], 但 Lyne-Hollick 滤波法和 Boughton-Chapman 滤波法所得基流指

表 2 8 种基流分割方法年基流指数统计特征值

Tab. 2 Statistical characteristic of BFI of 8 baseflow separation methods

测站	统计特征	BFI 法	HYSEP 法			数字滤波法			
			FI	MI	LM	Lyne-Hollick	Boughton-Chapman	Chapman-Maxwell	Eckhardt
独堆站	均值	0.493 2	0.545 8	0.544 0	0.519 8	0.711 5	0.626 8	0.459 0	0.328 4
	极值比	2.834 5	2.410 7	2.309 5	2.583 8	1.512 8	1.394 3	1.304 0	1.297 6
	偏差系数	0.121 0	0.102 4	0.104 2	0.114 9	0.073 8	0.053 5	0.033 7	0.020 5
芦家庄站	均值	0.458 9	0.660 9	0.662 5	0.618 0	0.698 1	0.613 3	0.434 8	0.265 2
	极值比	2.927 4	1.717 2	1.690 7	2.014 9	1.448 6	1.359 1	1.457 7	1.363 9
	偏差系数	0.115 0	0.094 4	0.092 8	0.102 8	0.067 7	0.051 7	0.038 5	0.016 9
吉县站	均值	0.523 2	0.535 1	0.536 8	0.541 0	0.681 7	0.421 8	0.376 0	0.113 1
	极值比	6.900 7	5.751 2	6.152 5	5.719 1	2.511 5	1.619 5	1.626 8	1.409 2
	偏差系数	0.220 2	0.217 5	0.218 1	0.217 6	0.155 9	0.056 4	0.050 1	0.007 6
大宁站	均值	0.444 7	0.474 4	0.473 6	0.464 0	0.696 3	0.520 8	0.436 4	0.201 3
	极值比	3.666 7	3.046 3	2.944 5	3.282 7	1.661 1	1.535 3	1.528 8	1.288 7
	偏差系数	0.164 7	0.158 6	0.155 9	0.162 0	0.106 0	0.062 9	0.051 5	0.013 1

数值偏高。

从基流过程和基流指数综合来看, Chapman-Maxwell 滤波法和 Eckhardt 滤波法分割出的基流更加稳定、符合流域实际情况, 且为自动分割方法, 应用简便, 在黄土高原典型小流域中的适用性较强。

3.2 基流的趋势变化特征

基于 8 种基流分割方法的优选结果, 采用 Chapman-Maxwell 数字滤波法开展基流过程趋势变化特征和采矿扰动的影响分析。

松塔河、白马河、州川河和昕水河四个流域年基流变化过程及其趋势线见图 3, 趋势检验结果见表 3。由图 3、表 3 可知, 两组对比流域年基流深整体呈下降趋势, 且通过了 99% 的显著性检验, 下降趋势达到极显著水平。四个流域基流量均在 1970 年代中期之后呈急剧下降趋势, 反映了

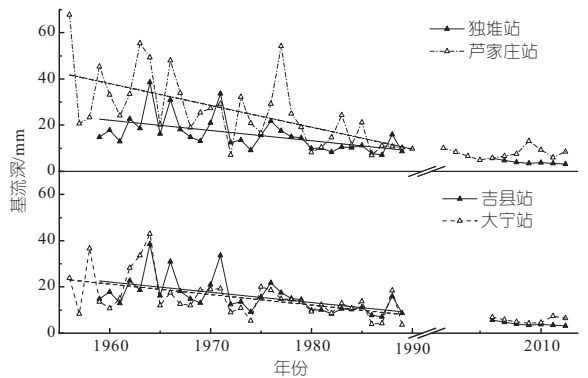


图 3 四个流域年基流变化过程及趋势线

Fig. 3 Variation process and trend line of annual baseflow in four watersheds

特定地区基流变化的共有特征, 但基流变化的强度差异反映出采矿扰动的影响。

3.3 采矿扰动对基流过程的影响

基于山西省煤炭产业的发展历程和研究区所

表 3 趋势检验结果
Tab. 3 Trend test results

测站	S	R ²	P	abs(U)
独堆站	-1.189	0.356	1.5×10 ⁻⁴ **	5.14**
芦家庄站	-0.944	0.401	4.4×10 ⁻⁵ **	5.64**
吉县站	-0.444	0.293	0.001 65**	5.59**
大宁站	-0.454	0.254	0.002 38**	4.06**

注:S 为趋势线斜率;R² 为趋势线拟合的相关系数;P 为线性回归显著性检验的统计量,abs(U) 为 M-K 检验统计量的绝对值。

在晋中市、临汾市原煤产量,探讨采矿扰动下的基流趋势变化。两组对比流域的距平累积曲线 ACP 及其差值曲线 DACP 变化趋势见图 4。

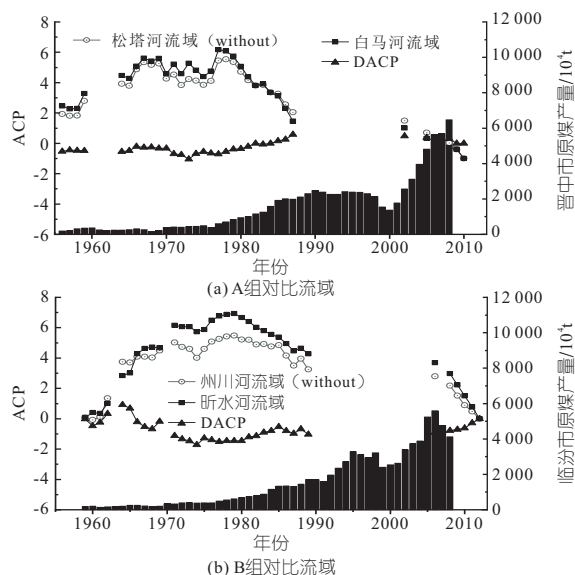


图 4 对比小流域基流距平累积过程线
(柱状图表示采矿规模)

Fig. 4 Anomaly cumulative percentage variations of baseflow in paired watersheds (the bar graph represents the mining scale)

由图 4 可知,A、B 组流域 1971~1990 年 DACP 值与原煤产量的相关系数(r)为 0.778 4、0.788 1, $0.5 \leq |r| \leq 0.8$, 线性关系显著且呈正相关,即采矿扰动增加了基流量。建国以来,山西省煤炭产业经历了不同的发展时期^[10]。1960 年,国家压缩基础建设投资,到国民经济调整时期有所增加,煤炭产业得到持续发展,晋中市和临汾市原煤产量分别从 142×10^4 、 248×10^4 t 恢复至 258×10^4 、 246×10^4 t, DACP 值分别从 -0.24、-0.16 上升至 -0.28、22.2。三五(1966~1970)、四五(1971~1975)时期,受到国家煤炭开发重点建设南移和文化大革命动荡的影响,山西能源工业遭受严重挫折,原煤产量分别出现两段下降态势, DACP 值整体呈下降趋势。五五(1976~1980)时期进入改革开放发展新阶段,六五(1981~1985)、七五(1986~1990)时期,中央决定将山西建设成全国的重化工基地,能源建设得到充足发展,两市

原煤产量持续增加,实现了从百万吨到千万吨的飞跃, DACP 值分别上升 0.17、6.40。2000 年以后是山西能源产业调整、优化、提升的阶段,煤炭产业稳定持续发展,数据有所缺失, A 组 DACP 值呈平稳状态, B 组则呈上升趋势。

综上所述,采矿扰动强度降低, DACP 有下降趋势,采矿扰动强度增加时 DACP 出现上升的趋势,尤其是 1976 年以后,原煤产量飞跃,采矿扰动强度增加明显, DACP 值上升趋势显著,采矿扰动对流域基流量有促进作用。

4 结论

a. 本文研究了 8 种基流分割方法在黄土高原小流域基流分割的适用性,并在此基础上采用基于对比流域的 DACP 指数分析了采矿扰动对流域基流过程的影响。

b. 8 种基流分割方法中, Chapman-Maxwell 滤波法和 Eckhardt 滤波法的基流过程线分割效果最佳,符合流域退水曲线规律,基流量分割结果稳定,适用于黄土高原地区。

c. 基于 Chapman-Maxwell 滤波法对两组对比流域松塔河流域和松塔—白马河流域、昕水河流域和州川河流域 1956~2012 年基流过程进行分割,四个小流域的基流量整体呈下降趋势。

d. 采矿扰动强度与 DACP 呈显著正相关关系,采矿扰动强度降低, DACP 有下降趋势,采矿扰动强度增加, DACP 有上升趋势,采矿扰动对流域基流量有促进作用。

e. 因自然地理、煤炭资源、生态立地、开采地质、开发程度、开采模式等方面的差异性,导致煤炭开采对地表水、地下水及与地表生态水文影响存在空间异质性,采矿扰动的水文影响机制未来仍需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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(3): 118-123.
- [3] 钟皓, 张殷钦. 漳河流域基流演变规律[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 28-32.
- [4] 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.
- [5] 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.

