

黄土丘陵沟壑区小流域基流特点及其影响因子分析

郭军庭¹, 张志强¹, 王盛萍², 张建军¹, Strauss Peter³

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 华北电力大学 能源与环境研究中心, 北京 102206;
3. The Federal Institute of Land and Water Management Research, A-3252, Petzenkirchen, Austria)

摘要: 基流是河川流量的重要组成部分,尤其在干旱的黄土丘陵沟壑区径流量中占有很高比重,为枯季的河流提供流量补给,对黄土丘陵沟壑区基流的特点和影响因子的研究有助于合理调控水量和高效使用水资源。采用数字滤波法分别对蔡家川 6 个嵌套小流域 2006—2008 年日径流量进行基流分割求算基流指数,并且分析了次降雨量、土地利用、植被类型和地形特征等对基流的影响。结果显示,该地区流域的年平均基流指数范围为 0.68~0.82。随着次降雨量增加基流指数减小;土地利用类型中的农地、灌丛和人工林对基流产生负影响;基流指数与流域河网密度和河流比降等线性相关。应用多元线性回归分析得出该区域基流指数 BFI 与次降雨量 P ,河网密度 D 和河流比降 S 成线性关系,进而分析了研究区内无观测数据的流域的基流。

关键词: 基流分割; 数字滤波法; 基流指数; 土地利用

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)01-0087-06

中图分类号: S273.29

Features of Baseflow and Its Influencing Factors for Small Watersheds in Loess Hilly and Gully Region

GUO Jun-ting¹, ZHANG Zhi-qiang¹, WANG Sheng-ping², ZHANG Jian-jun¹, Strauss Peter³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. North China Electric Power University, Energy and Environment Research Center, Beijing 102206; 3. The Federal Institute of Land and Water Management Research, A-3252 Petzenkirchen, Austria)

Abstract: Baseflow is an important component of river flow, especially in the arid loess hilly and gully region. It accounts for a large proportion of total runoff and provide additional flow supply to the rivers during the dry seasons. Therefore, the research of baseflow characteristics and its impact factors in this area could contribute to more reasonable water regulations and more efficient uses of water resources. In this paper, digital filtering method was used to separate the baseflow of Caijiachuan basin from 2006 to 2008. By calculating the baseflow index(BFI), controlling factors including precipitation events, land use, vegetation cover and terrain characteristics of the basin were analyzed. The results show that annual BFI averages ranged from 0.68 to 0.82. BFIs decreased with increase of precipitation. Agricultural land, scrub and plantation had negative effects on the baseflow. BFIs had a linear relationship with rainfall amounts(P), river networks densities(D) and river gradients(S). The regression analysis provides a basis to analyze the characteristics of baseflow in ungauged area.

Keywords: baseflow separation; digital filter; base flow index; land-use and land cover

基于传播时间,将径流划分为地表直接径流和基流^[1]。基流是河川流量中较稳定的径流成分,是对降水事件的反应延迟部分,同时代表部分地下水资源。在黄土丘陵沟壑地区基流为枯水期的河川提供了稳定径流量补给,并且基流占全年河川径流总量相当大

的比重。徐建华等^[2]研究发现黄河河龙区间南部黄土丘陵林区基流较丰富,约占 50%。张建军等^[3]研究发现晋西蔡家川流域因植被覆盖不同 3 a(2004—2006 年)雨季平均基流比例为 48.5%。钱云平等^[4]从降雨变化等分析了 20 世纪 50—90 年代黄土高原

收稿日期:2010-06-17

修回日期:2010-12-15

资助项目:“十二五”科技支撑计划项目“黄土区水源涵养林体系构建技术与示范”(2011BAD38B05)

作者简介:郭军庭(1984—),男(汉族),河北省石家庄市人,在读研究生,研究方向为流域生态水文。E-mail:gjt03@163.com。

通信作者:张志强(1967—),男(汉族),内蒙古自治区包头市人,博士研究生,教授,研究方向为森林水文,土壤侵蚀与流域管理。E-mail:zhqzhang@bjfu.edu.cn。

河流基流特点,结果显示该区内的无定河和秃尾河基流比例平均分别为 55%和 68%。基流的研究有助于人们合理调控水量和高效使用水资源,对水资源紧缺的黄土丘陵沟壑区有重要的实践指导意义,同时基流的研究可为该区域水文模型研究提供校准验证依据。

由于直接径流和基流的响应时间不同而具有不同的退水规律,反映在流量过程线上,直接径流退水快而陡,基流退水慢而平缓。根据上述特点,可用分割流量过程线的方法分割基流。常用的基流分割方法有:图形法、电子滤波法、时间步长法、水文模型法等^[1]。其中,电子滤波法简单易用,计算速度快,适合长系列资料的处理,所以近年来被广泛应用。大量研究^[4-11]结果证明使用滤波法对基流分割的结果具有较好的客观性和可重复性。研究也证明不同的流域的基流分割使用的参数 β 和滤波次数不同,合适的参数和滤波次数对结果的准确性至关重要。Nathon 等^[5]使用 β 范围为 0.9~0.95,滤波 1 次或滤波 2 次。Arnod 等^[6]使用 β 值 0.925 和 1 次滤波对 11 个流域进行了分析。David 等^[7], Eckhardt^[8], Ghanbarpour 等^[9]使用 β 值为 0.85~0.975 对其研究流域进行了分析。在老灌河流域,林凯荣等^[10]选择 β 为 0.85 和使用 2 次滤波得到的结果较为准确。吕玉香等^[11]选择 β 值为 0.925 和 3 次滤波对贡嘎山的流域进行研究得到理想的结果。因此本文为探讨黄土丘陵沟壑区的基流特点,使用滤波法对该区域内 6 个流域 2006—2008 年日流量过程进行基流分割,求算基流指数 BFI(基流量/总径流量),并对基流的影响因子进行初步分析。

1 研究流域概况

蔡家川流域位于山西省吉县(110°39'45"—110°47'45"E, 36°14'27"—36°18'23"N),吕梁山南端,属于黄土丘陵沟壑区。该区广泛分布黄土,以梁峁为主,流域中部沟谷非常发育,切割很深,下部黄土覆盖深厚。流域大体上为由西向东走向,长约 14 km,面积 38 km²,海拔 900~1 513 m。年降水量为 575.9 mm,6—9 月降水占全年降水量的 70%左右。年平均水面蒸发量为 1 732.9 mm,年均气温 10℃。土壤为褐土,黄土母质。森林覆盖率 39.8%,属于由暖温带阔叶落叶林向森林草原的过渡地带。流域上游植被主要为山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、丁香(*Syzygium aromaticum*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)等组成的天然次生林,中游为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等树种组成的人工林,下游为荒草坡和农地。蔡家川各嵌套小流域的分布及其土地利用和植被覆盖面积状况如表 1 所示。

2 研究方法

2.1 试验观测

在研究流域内根据不同土地利用/植被覆盖类型分别选择 5 个嵌套小流域并蔡家川控制流域作为研究对象(表 2)。在研究区内共布设长期自记雨量计 11 台测定降雨量;在各流域出口修建复合测流堰,安置超声波水位计观测径流量。

表 1 各流域土地利用和植被覆盖类型面积比例

%

流域编号	森林覆盖率	农田	草地	灌丛	次生林	人工林	果园	民居	其它
1	10.7	35.9	52.4	0.0	0.0	9.9	0.9	0.9	0.0
2	85.6	4.3	9.0	12.2	42.8	29.4	1.2	0.3	0.9
3	98.3	0.0	1.5	2.4	85.3	10.6	0.0	0.0	0.2
4	93.9	0.5	3.6	7.0	48.1	37.5	1.3	0.0	2.0
5	92.2	1.3	6.3	7.8	55.1	29.2	0.1	0.1	0.1
6	64.8	5.7	28.3	17.7	0.0	44.1	3.0	0.8	0.4

注:1.农田流域;2.主沟控制流域;3.封禁流域;4.半人工半次生林流域;5.次生林流域;6.半农半牧流域。下同。

表 2 流域地形特征

流域编号	面积/km ²	森林覆盖率/%	长度/km	宽度/km	形状系数	河网密度	河流比降
1	0.71	10.7	1.38	0.54	2.54	1.81	8.7
2	34.23	85.6	14.50	1.25	6.14	1.53	1.9
3	1.93	98.3	3.00	0.68	4.40	4.10	8.4
4	3.62	93.9	3.30	1.10	3.00	0.91	8.9
5	18.57	92.2	7.25	2.67	2.72	25.90	7.1
6	2.63	64.8	2.88	0.91	3.55	1.09	12.1

2.2 基流分割

本文采取电子滤波法对日径流过程进行分割,以基流不出现负值和不超总径流为基本标准。电子滤波法源于信号分析,它将信号分为高频信号和低频信号。1990年 Nathan 和 McMahon 首先将电子滤波法引入水文研究中,将日径流时间历时资料作为直接径流(高频信号)和基流(低频信号)的叠加,从日流量过程中分割出基流。通常使用基于 Lynne—Hollick 算法的滤波方程:

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

式中: q_t —— t 时刻过滤出的快速响应(即直接径流信号,以 1 d 为时间步长); Q_t ——实测河川总径流; Q_M —— t 时刻基流, $(0 < Q_M < Q_t)$; t ——时间(d); α , β ——滤波参数($0 < \alpha < 0.5, 0 < \beta < 1$)。研究表明,当上

式应用于日资料的径流分割时,将 α 固定为 0.5, β 参数具有足够的灵活性,可使径流分割达到较好效果。

林凯荣等^[10]在傅里叶分析的基础上阐述数字滤波法的原理,并指出当使用较大参数值时只需较少次数的滤波可得到理想的结果。Nathan 等^[5]和 Arnold 等^[6]通过对比手工分割法和数字滤波法在多个流域的使用结果,得出 β 取 0.925 时数字滤波法得到较为理想的结果。

滤波参数和滤波次数的选择主要取决于所研究流域基流占总流量的比例,即基流指数 BFI 值不同。基于上述分析,本文分别选择参数 β 为 0.925 和 0.700 的不同滤波次数对 2006—2008 年的 6 个研究小流域的日径流量数据进行分割,分别求算其基流指数,并采用直线分割法作比较(表 3)。

表 3 数字滤波法和直线分割法分割基流的基流指数 BFI 值对比

年份	小流域	直线切割法	$\beta=0.925$			$\beta=0.70$		
			滤波 1	滤波 2	滤波 3	滤波 1	滤波 2	滤波 3
2006	1	0.74	0.61	0.52	0.42	0.76	0.67	0.62
	2	0.61	0.64	0.53	0.40	0.79	0.70	0.60
	3	0.62	0.51	0.34	0.26	0.68	0.54	0.46
	4	0.58	0.45	0.28	0.21	0.60	0.46	0.39
	5	0.62	0.64	0.48	0.4	0.78	0.67	0.60
	6	0.40	0.37	0.21	0.14	0.47	0.38	0.30
2007	1	0.87	0.71	0.64	0.60	0.79	0.67	0.60
	2	0.87	0.69	0.56	0.44	0.85	0.78	0.72
	3	0.86	0.74	0.57	0.50	0.87	0.77	0.72
	4	0.88	0.73	0.53	0.50	0.86	0.75	0.69
	5	0.88	0.64	0.48	0.39	0.85	0.75	0.70
	6	0.76	0.52	0.40	0.29	0.75	0.63	0.53
2008	1	0.78	0.75	0.68	0.65	0.83	0.70	0.63
	2	0.71	0.64	0.49	0.41	0.76	0.66	0.51
	3	0.88	0.72	0.62	0.54	0.85	0.80	0.78
	4	0.76	0.47	0.30	0.18	0.66	0.51	0.44
	5	0.74	0.72	0.59	0.52	0.83	0.74	0.69
	6	0.61	0.62	0.48	0.40	0.76	0.66	0.51

3 结果与讨论

3.1 基流分割结果

结合该流域背景^[2-4]以及经验分析,BFI 值在 0.700 左右。直线分割法是基于基流在降雨过程中基本保持不变的假设对产流过程进行分割,因此其分割结果未包含全部基流,结果偏小于实际数值。

对照表 3,点绘滤波法($\beta=0.700$,滤波 1)和直线分割法的分割结果($y=1.013 2x, R^2=0.70$,图 1)。

对于蔡家川流域滤波参数 β 取 0.700,采用一次滤波比较合适。

使用上述滤波参数及次数对研究区 6 个流域日流量过程分割,以 2006 年 2 号控制流域为例,结果如图 2 所示。2006—2008 年农地流域年平均基流指数为 0.79,主沟流域年平均基流指数为 0.80,封禁流域年平均基流指数为 0.80,半人工半次生林流域年平均基流指数为 0.71,次生林流域年平均基流指数为 0.82,半农半牧流域年平均基流指数为 0.66。

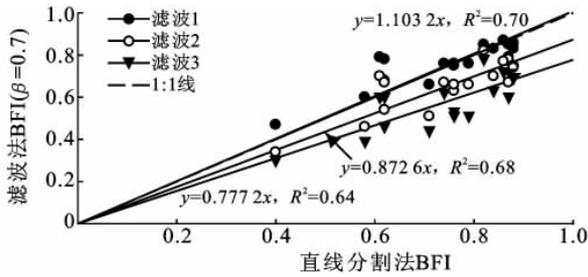


图 1 数字滤波法和直线分割法分割结果 BFI 对比

3.2 降雨对基流的影响

研究流域汛期降雨多以暴雨形式出现,且历时短,降雨强度大,超渗产流形成尖瘦的洪水过程(图 2),相对于降雨量的峰值,基流的峰值在时间上有所滞后。超渗产流形成的洪峰流量大于基流量。

黄土区的次降雨量大于 10 mm 和长历时平均雨强大于 0.1 mm/min 的降雨才会产流^[12-14]。统计上述 6 个流域 2006—2008 年场降雨产流事件(图 3),点

绘降水与基流指数的关系,发现二者有较好的线性关系。在次降雨尺度,随着降雨的增加,基流指数在减小,即直接径流的增加量超过基流的增加量,基流在总径流中所占的比例下降,符合黄土区以超渗产流为主的规律。但点绘降水与基流量的关系,发现次降水和基流量的相关度较低。这在一定程度反映了流域基流还受到下垫面土地利用和植被覆盖类型,地形特征等的特性影响。

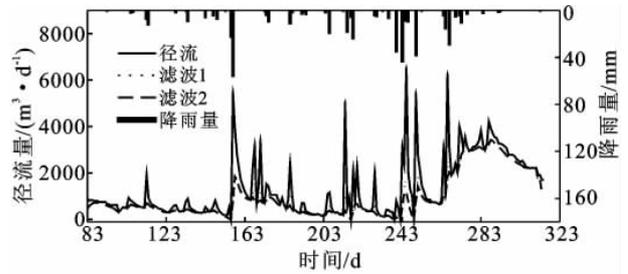


图 2 滤波法(β=0.700)分割 2006 年 2 号流域降雨流量过程

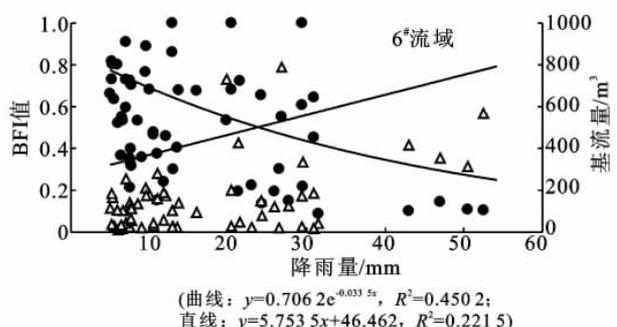
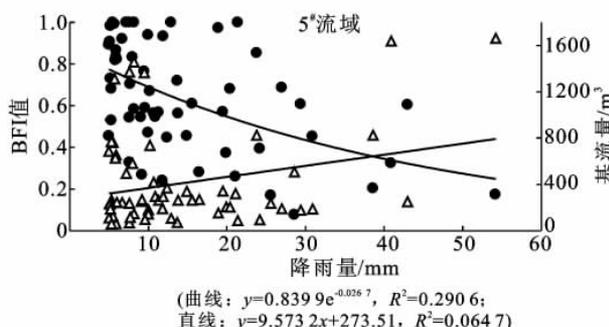
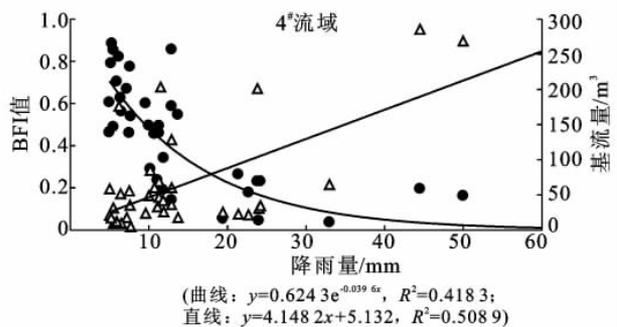
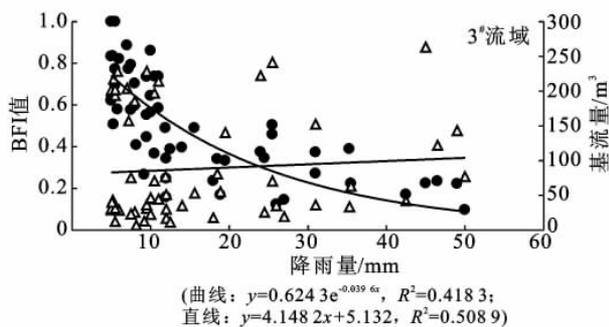
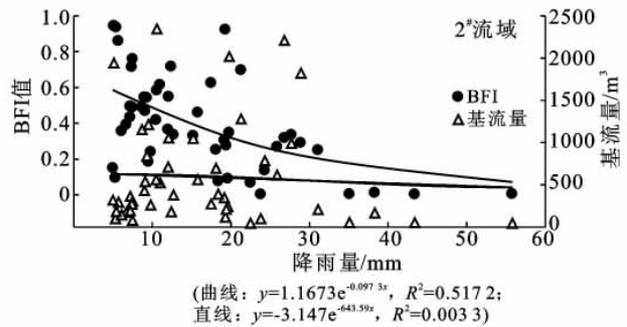
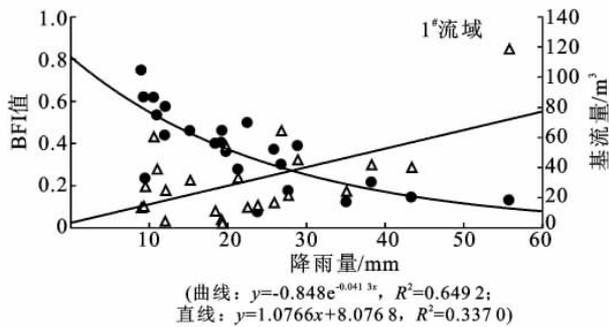


图 3 降雨量对基流和基流指数 BFI 的影响

3.3 土地利用和植被覆盖对基流的影响

土地利用和植被覆盖变化通过改变流域下垫面性质以及降雨的再分配过程对径流产生影响^[15]。在干旱的黄土高原随森林覆盖率的增加,流域的洪峰流量减少,枯水径流量增加,地下径流的增加量在一定程度上弥补地表径流的减少量^[16]。研究区内不同月份的径流量组成成分变化显著(图 4),基流指数 BFI 从雨季月份的 0.1 增加至枯水月份的接近 1。各个流域的月平均 BFI 值变化从 0.60~0.72,这说明研究区内流域的平均月径流量中超过 60% 的径流成分由基流提供。5 号流域的月平均基流指数最高,且其值变化区间最小,说明该流域内径流组成变化相对于其它流域稳定。5 号流域内主要是次生林,人迹罕至,受到较少的干扰。植被空间层次结构好,地表灌草植被覆盖率高,枯枝落叶物多,增加了径流的拦蓄和雨水的入渗。

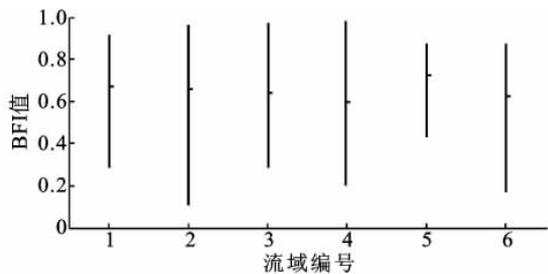


图 4 月平均 BFI 值的变化特征统计(-所标位置为 BFI 均值)

在气候相同的情况下,流域内不同土地利用和植被覆盖的组成差异是导致上述现象的重要原因。为分析研究区内不同土地利用和植被覆盖对基流的影响,本文通过定义方程式(2),求算各土地利用类型雨季的平均基流深。

$$B_{Ci} = \sum_{j=1} B_{Cij} \cdot \Delta S_{ij} \quad (2)$$

式中: B_C ——基流深; ΔS ——各流域土地利用类型面积比例; i ——流域编号; j ——土地利用类型。

由于裸地、民舍等所占比例甚微,方程中仅包含农地、草地、灌木林、次生林、人工林、果园 6 类土地利用与植被类型。根据观测资料,分别计算 1—6 号流域 2006—2008 年雨季平均基流深为:4.36, 2.18, 3.5, 1.88, 2.20, 5.84 mm。将雨季各流域基流深和土地利用类型面积比例代入(2)式求算得各土地利用和植被类型的基流深(mm)为农地:-0.346 7;草地:0.316 4;灌木林:-0.083 5;次生林:0.042 5;人工林:-0.037 7;果园:0.666 8。农地、灌木林和人工林的平均基流深值为负,可以解释为该类土地利用和植被类型对流域的基流起负面作用。在研究区内,人工林下植被覆盖较低,枯枝落叶少,降雨时易形成地表径流,雨水很少渗入地下。同时,人工植被蒸散耗水量大,因此人工林减少流域内基流^[10]。灌木林主要分布在阳坡和半阳坡,生长较稀疏,地表覆被差,不易截蓄径流。蔡家川流域内农作物主要是玉米,它在雨季生物量增加迅速,耗水量大。另外,2007 年底当地人在农田流域修建了蓄水窖,拦截了基流。

3.4 流域的基流指数多元回归分析

为研究该区域的基流特点,本文选择次降雨量、流域面积、沟壑密度、河流比降和森林覆盖率等因素作为变量,基流指数作为因变量,选择 3 a 内研究区各流域降雨事件共计 71 次进行逐步多元线性回归(见表 4),求算该区域的基流指数多元回归式为:

$$BFI = 0.542 - 0.012P + 0.07D + 1.164S \quad (3)$$

$$R^2 = 0.642$$

式中: P ——降雨量; D ——河网密度; S ——河流比降。

回归分析的结果显示,研究区的基流指数与降雨量、河网密度和河流比降成线性相关。随着降雨增加,基流指数减小。河网密度和河流比降增大而基流指数增加。利用该多元回归方程可以估算研究区内没有观测数据的流域或具有相似特征的流域平均基流指数。

表 4 蔡家川流域基流指数回归分析结果

项目	非标准化系数		标准化系数 (Beta 值)	t 统计量	显著性系数 Sig.
	回归系数 B	标准误差			
常数	0.542	0.041	—	13.281	0.000
降雨量	-0.012	0.001	-0.569	-12.104	0.000
河网密度	0.007	0.001	0.259	5.433	0.000
河流比降	1.164	0.414	0.134	2.812	0.005

4 结论

(1) 在黄土丘陵沟壑区的蔡家川流域,使用电子

滤波法对各个嵌套流域 2006—2008 年日径流过程进行分割,选择滤波参数 β 为 0.700,1 次滤波分割得到的结果较为准确。通过基流分割求算出不同流域的

基流指数:农地流域年平均基流指数为 0.79,主沟流域年平均基流指数为 0.80,封禁流域年基流指数为 0.80,半人工半次生林流域年平均基流指数为 0.71,次生林流域年平均基流指数为 0.82,半农半牧流域年平均基流指数为 0.66。

(2) 在次降雨尺度上,研究区内的流域的基流量和降雨量之间相关性不强。黄土丘陵沟壑区的降雨多以短时间强降雨为主,地表形成超渗产流,即地面直接径流增加量明显超过基流的增加量,表现为随降雨量的增加基流指数减小。

(3) 通过定义基流深方程式,计算出研究区内 6 种不同土地利用和植被覆盖类型的年平均雨季基流深(mm)分别为农地: -0.346 7;草地: 0.316 4;灌丛: -0.083 5;次生林: 0.042 5;人工林: -0.037 7;果园: 0.666 8。其中农地、灌丛和人工林的径流深为负值,说明这 3 种土地利用类型对研究区内的基流产生负作用。

(4) 通过多元线性回归分析得出该研究流域内基流指数与次降雨量、河网密度和河流比降成线性关系,基流指数随河网密度,河流比降增加而增大,随次降雨量增加而减小。该关系式对黄土丘陵沟壑区没有观测数据流域的基流指数估算具有一定的参考意义。

[参 考 文 献]

- [1] 陈利群,刘昌明,李东发. 基流研究综述[J]. 地理科学进展, 2006, 25(1): 1-15.
- [2] 徐建华,吴发启,王健,等. 黄土高原产流产沙机制及水土保持措施对水资源和泥沙影响的机理研究[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2005: 4-10.
- [3] 张建军,纳磊,董煌标,等. 黄土高原不同植被覆盖对流域水文的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3597-3605.
- [4] 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.
- [5] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis[J]. Water Resources Research, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [6] 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.
- [7] David P M, Thomas C W. Estimating ground-water recharge from streamflow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate, New Hampshire, USA[J]. Ground Water, 1997, 35(2): 291-304.
- [8] Eckhardt K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352: 168-173.
- [9] Ghanbarpour M R, Teimouri M, Gholami S A. Ground-water contribution to total runoff using base flow separation[C]//International Groundwater Conference, February, New Delhi, India. 2006: 1-4.
- [10] 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.
- [11] 吕玉香,王根绪,张文敬. 贡嘎山黄崩溜沟流域基流估算及其特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2009(3): 17-20.
- [12] 吴钦孝,赵鸿雁,汪有科. 黄土高原油松林地产流产沙及其过程研究[J]. 生态学报, 1998, 18(2): 151-157.
- [13] 潘成忠,上官周平. 黄土区次降雨条件下林地径流和侵蚀产沙形成机制[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1597-1602.
- [14] 张升堂,康绍忠,张楷. 黄土高原水土保持对流域降雨径流的影响分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 56-59.
- [15] 张志强,王盛萍,孙阁,等. 流域径流泥沙多尺度植被变化响应研究[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2356-2364.
- [16] 王礼先,张志强. 干旱地区森林对流域径流的影响[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 439-444.