自动基流分割方法在黄土区流域的应用研究

豆 林[1,2], 黄明斌[1,3]

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 基流是河川径流在枯水季节的主要径流来源。由于难以通过实测方法获得基流量数据,选择适合的基流分割技术对于基流研究至关重要。利用黄土区 6 个流域的多年径流量资料,选取 PART 法、滤波法及滑动最小值法等目前广泛使用的自动基流分割方法对区域内河流的基流量进行了分割,以检验自动基流分割方法在本地区的适用性,并应用选定的基流分割方法对黄土区流域的基流特点做了简单分析。研究结果表明,3 种方法所获得的基流指数值有所差异,滤波法分割的基流过程与实际基流状况更为相符。因此,滤波法可作为黄土区流域基流的最优分割方法。应用滤波法得到的研究流域基流占总径流比重为 37%~64%,而基流量在近 50 a 中呈现逐渐降低趋势。

关键词: 基流分割; PART 法; 滤波法; 滑动最小值法; 黄土区流域

文献标识码: B 文章编号: 1000-288X(2010)03-0107-05 中图分类号: P343.1

Applied Study of Baseflow Separation Methods in Watersheds of Loess Plateau

DOU Lin[1,2], HUANG Ming-bin[1,3]

(1. *The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3. *Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Baseflow is the main source of streamflow in the dry season of a year. Due to the difficulty in measurement, it is important to select an adaptive baseflow separation method for further baseflow research. In order to test the applicability of automated baseflow separation methods on the Loess Plateau, six watersheds located in the hilly and gully region were chosen to estimate several widely used techniques, which are PART, digital filter technique, and smoothed minima method. Comparison shows that the results of all three type methods have little difference. The discharge hydrograph demonstrates that the result of digital filter method is more consistent with the actual discharge condition. Since the true values of the baseflow index are unknown, it is difficult to find which method may give the best estimation. However, the digital filter method appears to be more plausible than other methods for this region and the results from the method are objective and authentic. For the study area, result from digital filter method shows that the baseflow index is 37%~64%, which means that baseflow accounts for a large proportion of the total runoff. However, the baseflow volume has been gradually reduced in the recent 48 years.

Keywords: baseflow separation; PART; recursive digital filter; smoothed minima method; watersheds of the Loess Plateau

基流是河川径流中比较稳定的径流部分,是枯水季节主要的径流来源,它在水安全、水资源评价和调查、水资源配置及降雨—径流关系模拟中有着重要的应用。在黄土高原地区,非汛期的河川径流主要由基流补给,基流的变化对流域的水循环具有重大的影响,尤其是 20 世纪后期,在气候变化及人类活动的双重影响下,非汛期河川径流大幅度减少[1-2], 20 世纪 90 年代无定河、黄甫川等河流的入黄水量比 50—60

收稿日期: 2009-09-30 修回日期: 2009-10-30

资助项目: 国家 973 计划子专题"坡面土壤侵蚀发生发展过程的动力学机制"(2007CB407201); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0858)

作者简介: 豆林(1982—),女(汉族),山东省济南市人,博士研究生,研究方向为生态水文。E-mail: doulin2008@sina.com。

通信作者: 黄明斌(1968—),男(汉族),湖北省钟祥市人,研究员,博士生导师。主要研究方向为生态水文和土壤物理。E-mail: hmbd@nwsuaf.edu.cn。

年代减少约 1/2[2]，因此研究黄土高原流域基流变化对合理利用水资源、加强水资源管理等具有重要的意义。此外，基流在侵蚀产沙研究及降雨—径流关系模拟中也具有重要的作用，在河流流量主要由基流补给的非汛期，河流产沙量较少，说明基流对产沙的影响较小[3]；在分析降雨—径流关系时，地表径流与地下径流对降雨的响应机制不同，在研究中也需将两者分开讨论。

国内外对于基流的分割方法做过许多研究，人工直接分割的方法中有直线分割法[4]及退水曲线法[5]等；有的学者利用水量平衡或水文模拟的方法来分割基流，如利用非线性水库假设的方法[6]和 SWAT (soil and water assessment tool)[7]模型模拟分割法等；最近环境同位素方法也被用于基流分割[8]，并取得了较好的研究结果。采用数学方法分割流量过程线的自动分割技术因为在实际操作中简单易用的特点得到了快速发展和广泛应用，开发出大量的自动基流分割方法，其中应用较广的有 HYSEP 法[9]、PART 法[10]、数字滤波法(digital filter technique)[11]、滑动最小值法(smoothed minima method)[12-13]等。

对于我国黄土区流域基流分割，也有学者做过研究[3,14]。但是，对于相同的流域，不同方法所得出的基流结果有较大差异，目前在方法上需要筛选比较。因为基流本身难以直接量测，传统的基流计算方法均采用人工在日流量过程图上手动切割，工作量大且存在主观误差。因此选择合适的基流自动分割方法可得到客观、稳定基流，对分析水土保持治理、土地利用变化和植被恢复等流域水循环的影响具有非常重要的意义。

1 资料与方法

1.1 资料

本文选取黄土高原区 6 个流域作为研究对象(表 1)，研究区地处干旱半干旱地区，多年平均降水量 420~ 530 mm。所选流域面积范围约为 283~ 1 121 km^2，其中，黑木头川、小理河、大理河属于无定河的一级支流，清凉寺沟、清涧河、佳芦河为黄河一级支流。地貌均属于黄土丘陵沟壑区。这些流域具有从 20 世纪 50 年代末至今的长序列径流资料，但是在验证自动基流分割方法时仅选取了 1959—1967 年的数据资料，其原因在于 20 世纪 70 年代以来在黄土高原开展的大规模水土保持治理工作对河川径流产生较大影响，为了更好地反映各基流分割方法的稳定性，选取了受人类活动较少的 70 年代以前的径流资料进行分析，并且去除了日流量资料不完整的年份，将分析时段统一为 1959—1967 的连续 9 a，其时间长度已能够满足基流分割的需要。在确定了适用的基流分割方法后，再对研究区域 1959—2006 年的长序列径流资料进行分析，从而获取黄土区基流的特征与变化情况。

表 1 研究区域基本情况

流域名称	控制站点	流域面积/ km^2	降雨量/ mm	日流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)
清凉寺沟	杨家坡	283	502	0.55
黑木头川	殿市	326	424	0.54
大理河	青阳岔	662	457	1.13
小理河	李家河	807	454	1.16
清涧河	子长	913	525	1.32
佳芦河	申家湾	1 121	442	3.20

注：表中降雨量和日流量数据皆为多年平均值。

1.2 研究方法

由于难以通过实测方法获得基流量数据，导致以往对于径流分割有不同的理解。目前国际上普遍采用的方法是根据对降水响应速度的快慢将径流分为直接径流(quickflow)和基流(baseflow)[15](也称作地表径流与地下径流)。在基流应用过程中，一般以年基流量以及基流占总径流量的比重(即基流指数，Baseflow Index，简称 BFI)来量化。

现行的基流分割方法主要有：图形法(人工分割)、自动分割法、水文模型法等。基流自动分割法易于通过计算机的自动计算而完成，因此得到广泛应用。

1.2.1 PART 法 PART 是美国地质调查局(USGS)提出的用于分割基流的一种计算机程序，该方法以日流量为数据源，并非基于前期降雨，而是基于前期径流消退进行分割。这种方法的运行规则如下[10]：首先将日平均流量数据排列成单维数组，然后在数组中选择符合前期衰退要求的日值，在符合条件的这些天数中，如果日衰退量小于 0.1 个对数周期[16]，日径流量值即作为地下水排泄量(基流量)，在其余的日期中，基流值则通过线性插值的方法来获得。

1.2.2 数字滤波法 数字滤波法是近年来国际上研究最为广泛的基流分割方法，它来源于信号分析，能够通过数字滤波器将信号分解为高频和低频信号。Nathan 和 Mcmahon[11]首次将这种技术应用于水文研究中，将日径流资料作为地表径流(高频信号)和基流(低频信号)的叠加从而将基流划分出来。该方法是一种模仿人工分割流量过程线的数学方法，但它是客观的并且是可重复的，已经在实践中得到了大量的验证[17-18]。Arnold 等人对美国 11 个流域的滤波法基流分割结果进行了验证，并与已有的 PART 法分

割结果进行了对比, 结果表明, 滤波法和 PART 法都能够取代手工分割而且客观准确的再现基流[19]。其滤波方程如下:

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

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

式中: q_t ——t 时刻过滤出的地表径流(快速响应信号); Q_t ——实测河川径流量; b_t ——t 时刻的基流; β——滤波参数。Nathan 和 McMahon[11] 以及 Arnold 等人[19] 通过大量研究发现 β 值取 0.925 时, 能够得到较好的分割结果。

1.2.3 *滑动最小值法*　滑动最小值法(Smoothed Minima Method) 是由英国水文研究所(UKIH) 提出的[12], 在有些文献中也将其简称为 UKIH 法。其计算步骤如下: 首先, 将每年(水文年) 以 5 d 为一个单元进行划分; 确定每个单元中的最小流量值 q_{bi}, 并将其与相邻单元中选出的最小值进行对比。如果对于一个选定的最小值 q_{bi}, $0.9q_{bi} < q_{bi-1}$ 且 $0.9q_{bi} < q_{bi+1}$, 则 q_{bi} 为基流过程线上的一个拐点; 将序列中所有的拐点在流量过程线图中直线连接, 即可得到基流过程线, 过程线以下的面积即为总基流量的估算值, 基流量与总径流量的比值为基流系数(baseflow index)。Wahl 后来对此方法进行了改进, 指出每个单元的天数(N) 是可调节的, 可以通过试算法求得[16]。该方法简便易用, 已在不少国家和地区得以验证[13, 20]。

2　结果与分析

2.1　参数的确定

滑动最小值法中的参数 N 通过试算的方式来获得, 首先设定 N 的取值为 0~ 10 之间的 11 个自然数值, 将每个值代入滑动最小值法模型中, 通过对所试算出的流域的年基流指数进行分析对比从而最终确定 N 的大小。在此以大理河为例, 对 N 值的确定进行说明。

图 1 显示了大理河流域 1959—1967 年各年的基流指数估算值与 N 值的关系, 每一条曲线表示当 N 从 0~ 10 变化时各年 BFI 估算值的大小变化情况。从图中可以看出, 随着 N 值的增加, BFI 估算值迅速减少, 但当 N 值大于 2 时, N 值的增量与 BFI 值的减少量基本呈线性关系。Wahl 对此线性关系的解释为, 总径流中的直接径流(地表径流) 已经被完全排除, 这时 N 值的增加都是对基流(地下径流) 的削减[13]。

因此, 选取曲线拐点 $N = 2$ 为基流分割的分割单元。即在基流分割过程中, 选取每 2 d 单元内的最小流量再与其它单元进行比较。

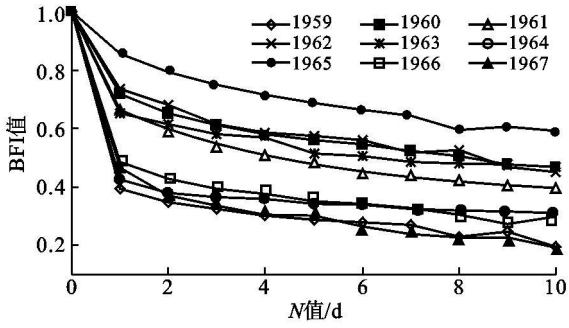


图 1　基流指数(BFI) 与 N 值关系

对清凉寺沟等其它 5 组径流数据的分析也显示出了同样的结果, $N = 2$ 符合滑动最小值法中 N 值的最优选择原则。

2.2　基流分割结果的 BFI 值对比

表 2 中列出了应用 PART 法、滤波法、滑动最小值法 3 种基流分割方法计算出的 6 个流域的多年平均基流指数值, 从表 2 中可以看出, 3 种方法所得的结果存在一定的差异, 以清凉寺沟为例, 滤波法得出的多年平均 BFI 值最大, 为 0.38, 而滑动最小值法得出的结果最小, 仅为 0.31。滤波法的 BFI 值计算结果最高; 在清凉寺沟、黑木头川、小理河 3 个径流序列中, BFI 计算值为 PART 法> 滑动最小值法; 大理河、佳芦河的 BFI 值 PART 法< 滑动最小值法; 在清涧河径流序列中, PART 法与滑动最小值法的 BFI 计算结果基本相等。

表 2　各基流分割方法所得的流域多年平均 BFI 值结果

流域名称	PART 法	滤波法	滑动最小值法
清凉寺沟	0.341	0.380	0.312
黑木头川	0.508	0.523	0.487
大理河	0.523	0.566	0.540
小理河	0.477	0.484	0.424
清涧河	0.422	0.488	0.420
佳芦河	0.501	0.555	0.515
平均值	0.462	0.499	0.450

尽管 3 种方法所取得的 BFI 值略有不同, 但三者之间的相关性分析结果显示, PART 法与滤波法的相关系数 r 为 0.945, 与滑动最小值法之间 r 值为 0.955, 而滤波法与滑动最小值法的相关性最好, r 为 0.987。可以表明这 3 种方法在不同流域间实际应用时都具有稳定性。

2.3　各基流分割方法的径流过程对比

流域出口断面的流量过程线, 是流域内降雨过程产生的径流经过流域地表及地下汇流到出口断面叠加而形成的[21]。对于地表径流与地下径流的分割,

可以从流量过程线图中表现出来。为了更直观地了解几种基流分割方法对径流的分割特点,本文选取了大理河青阳岔站 1966 年 6—7 月的流量资料,采用 PART 法、滤波法及滑动最小值法对径流量进行了分割,分割后的流量过程见图 2。从图 2 中可以直观地看出,在流量较低、变化较小的 7 月 1 日至 24 日阶段,3 种分割结果的差别很小;而在流量较大的 6 月下旬,3 种方法的结果有明显的不同,PART 法和滑动最小值法的基流过程比滤波法的结果偏平,基本上是流量过程线最低点的直线连接,单从 2 种方法的演算步骤中可以看出,两者都是通过基流拐点连线的线性插值获得基流过程,而在《水文学手册》中,对基流划分方法的描述为"从流量过程线的起涨点延长到退水段上"[22],这 2 种基流方法的分割并没有显示出径流的退水过程;滤波法所依据的滤波方程则对逐日径流量均进行分析,因此产生的基流曲线较为平滑,也更符合基流分割的原则,可以认为滤波法划分的基流过程与实际情况更为接近。

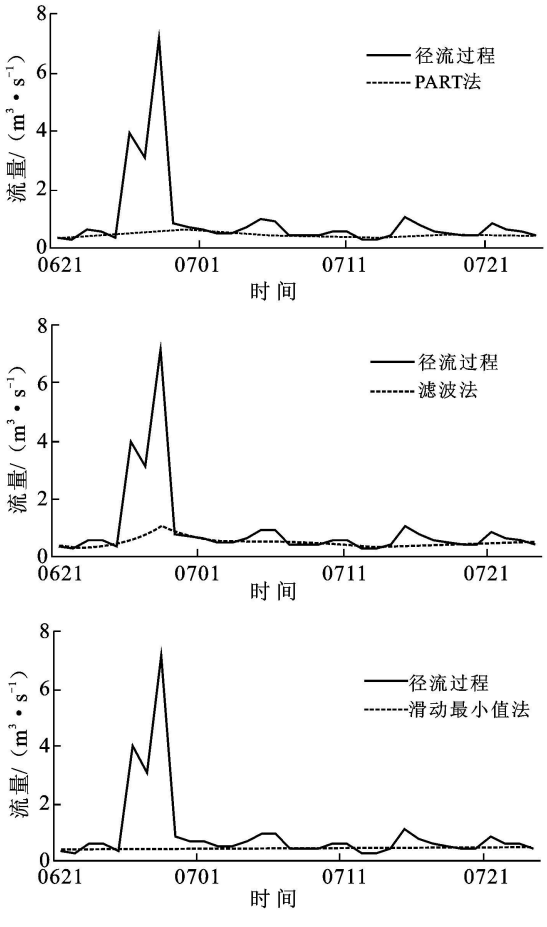


图 2 大理河流域 1966 年 6 月 21 日至 7 月 24 日基流与总径流过程

基流量难以实测,任何分割方法都是对基流量的一种估算,各种基流分割方法的对比也只能力求得出一个更加接近于实际径流情况的结果。对于本文中选取的 6 个流域,滤波法得出的各流域年平均基流指数 BFI 在 0.38~ 0.57 之间,与文献[3]中丘陵沟壑区地下径流量约占总径流量 40% ~ 60% 的结论基本一致,且其获得的基流过程线满足基流分割的基本特点[11]。因此,滤波法可作为黄土区流域基流分割的最优选择,可以用其结果代表流域的实际基流状况进行应用。

2.4 黄土区流域基流的特征

本文利用滤波法、PART 法及滑动最小值法对研究区域 1959—2006 年近 50 a 的基流量进行了计算,其多年平均 BFI 值结果见表 3。从表 3 中可以看出,3 种方法对长序列径流的基流分割结果基本一致,从而也验证了滤波法在黄土区应用的可行性及准确性。6 个流域基流占总径流的比重各有不同,范围在 37%~ 64% 之间,其中无定河支流黑木头川、小理河、大理河的基流比重较大,BFI 值均在 0.60 左右,佳芦河的多年平均基流指数也达到 0.61,而清凉寺沟流域的基流比重则较小,只占 37%。

表 3 各流域多年平均基流指数统计

流域名称	站 点	统计时段	滤波法	PART 法	滑动最小值法
清凉寺沟	杨家坡	1959—2006	0.37	0.36	0.32
黑木头川	殿 市	1959—2006	0.64	0.66	0.63
大理河	青阳岔	1959—2006	0.63	0.62	0.61
小理河	李家河	1959—2006	0.58	0.57	0.55
清涧河	子 长	1959—2006	0.51	0.47	0.46
佳芦河	申家湾	1959—2006	0.61	0.57	0.58

为了更好地了解黄土区流域内基流的变化情况,采用滤波法分割的基流结果对研究流域各年代的基流状况做了统计,从表 4 中可以看出,年基流量与基流指数的变化趋势并不一致。

各流域的基流量基本上都随年代的增加呈现明显下降趋势,如佳芦河,基流量由 20 世纪 60 年代的 $5.08\times10^7\ m^3$ 减少到 21 世纪初的 $1.51\times10^7\ m^3$,与 60 年代相比,近期基流量相对减少 70%,其它流域的基流下降情况稍好,但相对减少率也在 10%~ 45% 之间。

基流指数的变化则并非如基流量的变化趋势那样单一,从总体上看,各流域 20 世纪 80 年代的基流指数普遍较高,年代间变化呈现出由 60 年代到 80 年代逐渐增大,而后逐渐下降或在本世纪初再次升高的趋势。我国从 20 世纪 50 年代开始在黄土高原各流域内先后开展了不同规模的水土保持工作,尤其是 70 年代以来,水土流失治理程度明显提高,水保措施的实施一定

程度上改变了流域内的水文情势, 林草植被对降水的截留会将一部分地表径流转化为地下径流, 然而由于增加的植被可能加大对土壤水分的吸收和蒸腾, 再加上气候条件的影响及水资源开发利用的增加, 这些因素的影响都可能会使基流量逐渐减少, 而地表径流向地下径流的转换则只体现在了 BFI 值的变化上。

表 **4**　各流域基流指数的年代间变化

时间序列		1959－1969	1970－1979	1980－1989	1990－1999	2000－2006
清凉寺沟	$Q_b/10^8\,m^3$	0.054	0.047	0.031	0.033	0.017
	BFI	0.380	0.370	0.420	0.360	0.310
黑木头川	$Q_b/10^8\,m^3$	0.083	0.085	0.085	0.076	0.047
	BFI	0.520	0.690	0.710	0.650	0.590
大理河	$Q_b/10^8\,m^3$	0.188	0.126	0.153	0.147	0.170
	BFI	0.560	0.570	0.670	0.660	0.720
小理河	$Q_b/10^8\,m^3$	0.169	0.154	0.143	0.158	0.116
	BFI	0.480	0.630	0.660	0.580	0.570
清涧河	$Q_b/10^8\,m^3$	0.196	0.195	0.214	0.189	0.176
	BFI	0.470	0.50	0.610	0.480	0.490
佳芦河	$Q_b/10^8\,m^3$	0.508	0.443	0.313	0.218	0.151
	BFI	0.560	0.610	0.670	0.550	0.680

注: Q_b 为年基流量; BFI 为基流指数。

3　结 论

河川基流作为枯水季节河流的重要补给来源, 是区域水资源评价及水量平衡研究的一项重要内容, 探求合适的基流分割方法成为国内外水文研究关注的热点问题。

本文选取了 3 种常用的自动基流分割方法——PART 法、滤波法、滑动最小值法, 对其在黄土区的应用进行了分析比较, 确定了本研究区的适用方法并对研究流域的基流特点进行了分析, 得出以下结论: 3 种基流分割方法所得出的结果不尽相同, 滤波法的 BFI 值较高, 而滑动最小值法的结果相对较低。

从 3 种分割结果的基流过程, 进一步了解到 PART 法及滑动最小值法所得出来的基流序列是水文特征点的直线连接; 滤波法所依据的滤波方程则对逐日径流量进行分析, 其结果与实际基流过程更为接近, 也更符合基流的退水特点。因此滤波法被作为研究区域基流分割的最优方法。

同时, 本文利用滤波法获得了 6 个研究流域的基流量, 结果表明, 研究区内基流占总径流量的比重较大, 近 50 a 的平均基流指数在 37% ~ 64% 之间, 而基流量的年代际变化显示, 在水土保持治理及其它自然、人为活动影响下, 基流量呈现持续减少趋势, 因此加强对基流的研究具有重要的现实意义。

[参 考 文 献]

[1] 景可, 申元村. 黄土高原水土保持对未来地表水资源影响研究[J]. 中国水土保持, 2002 (1): 12-14.

[2] 王玲, 夏军, 张学成. 无定河 20 世纪 90 年代入黄水量减少成因分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(4): 463-469.

[3] 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, 18(10): 40-43.

[4] 叶镇国. 土木工程水文学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000: 17-18.

[5] 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.

[6] Wittenberg H. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage process [J]. Hydrological Processes, 1999, 13(5): 715-726.

[7] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2000 [R]. Texas, Texas Water Resources Institute TR-193, College Station, 2002: 498.

[8] Hoeg S, Uhlenbrook S, Leibundgut Ch. Hydrograph separation in a mountainous catchment-combining hydrochemical and isotopic tracers [J]. Hydrological Processes, 2000, 14(7): 1199-1216.

[9] Sloto R A, Crouse M Y. HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis [R]. U.S. Geological Survey, Water-resources investigations report 96-4040. 1996.

[10] Rutledge A T. Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records-update [R]. U.S. Geological Survey, Water-resources investigations report 98-4148. 1998.

(下转第 133 页)

[7] Zhang T, Cen M. Robust DEM co-registration method for terrain changes assessment using least trimmed squares estimator [J]. Advances in Space Research, 2008, 41(11): 1827-1835.

[8] Rosenholm D, Torelegard K. Three-dimensional absolute orientation of stereo models using digital elevation models[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54(10): 1385-1389.

[9] Pilgrim L J. Robust estimation applied to surface matching[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 51: 243-257.

[10] Pilgrim L J. Surface matching and difference detection without the aid of control points[J]. Survey Review, 1996, 33(259): 291-304.

[11] 熊兴华, 钱曾波, 王任享. 遗传算法与最小二乘法相结合的遥感图像子像素匹配[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 54-59.

[12] Besl P J, Mckay N D. A Method for Registration of 3-D Shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.

[13] 张同刚, 岑敏仪, 吴兴华. 无控制 DEM 匹配的最小法向距离算法[J]. 自然科学进展, 2006, 16(7): 868-873.

[14] Li Z, Xu Z, Cen M, et al. Rubust surface matching for automated detection of local deformations using least-median-of-squares estimator[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67(11): 1283-1292.

[15] 王小平, 曹立明. 遗传算法: 理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 20-49.

[16] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 446-452.

(上接第 111 页)

[11] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses [J]. Water Resources Research, 1990, 26: 1465-1473.

[12] Institute of Hydrology. Low flow studies [R]. Wallingford, Oxon, United Kingdom, report No. 3, 12-19.

[13] Wahl K L, Wahl T L. Determining the flow of Comal Springs at New Braunfels, Texas [C]// Texas Water'95, American Society of Civil Engineers. San Antonio, Texas, August 6-17, 1995: 77-86.

[14] 钱云平, 蒋秀华, 金双彦, 等. 黄河中游黄土高原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.

[15] Smakhtin V U. Low flow hydrology: a review [J]. Journal of Hydrology, 2001, 240: 147-186.

[16] Barnes B S. The structure of discharge recession curves [J]. Transactions of American Geophysical Union, 1939, 20(4): 721-725.

[17] 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.

[18] Santhi C, Allen P M, Muttiah R S, et al. Regional estimation of baseflow for the conterminous United States by hydrologic landscape regions [J]. Journal of Hydrology, 2008, 351: 139-153.

[19] Arnold J G, Allen P M, Muttiah R, et al. Automated base flow separation and recession analysis techniques [J]. Ground Water, 1995, 33(6): 1010-1018.

[20] 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.

[21] 詹道江, 叶守泽. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 77-78.

[22] 梅德门特. 水文学手册[M]. 张建云, 李纪生, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 314-316.