密云水库入库流量变异性及其影响因素

刘星才，徐宗学，占车生，孙永亮
（北京师范大学 水科学研究院 水沙科学教育部重点实验室，北京 100875）

摘　要：对密云水库流域入库站下会站（潮河）和张家坟站（白河）不同时期的流量变异性进行了研究，分析了降水和土地利用变化与流量变异的关系。借助流量变异分析方法，统计分析了日平均流量过程的脉动数量和脉动持续期，在此基础上分析了不同时期的流量变异和波动。研究结果表明，下会站和张家坟站 2002 年以后的流量较 20 世纪 80 年代均有所减少，且流量过程变化更为平缓。这 2 个站点的流量变异性主要由降水变化引起。草地增加是流量缓慢变化的一个原因，林地减少使得高阈值流量略有增加，但可能导致总流量有所减少。总的来说，土地利用状况因为在研究时期内变化不大，没有对流量变异产生明显的影响。

关键词：密云水库；潮白河；流量变异性；LOWESS；土地利用
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2011)01-0040-06　　**中图分类号**：P343.9

Variability and Potential Impact Factors of Inflows into the Miyun Reservoir

LIU Xing-cai, XU Zong-xue, ZHAN Che-sheng, SUN Yong-liang
(*Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of the Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*)

Abstract: Analysis on the variability of inflows into the Miyun Reservoir was performed at both Xiahui (Chaohe River) and Zhangjiafen(Baihe River) stations and the relationships between the flow volumes and precipitation and land use change were addressed. Based on inflow variability analysis, daily pulse number and mean pulse duration were statistically discussed for the estimation of various stream flow thresholds. The results show that the inflows decreased and exhibited less temporal variability at both Xiahui and Zhangjiafen stations during 2002—2006, comparing to those in the 1980s. The variability of the stream flows was mainly affected by precipitation. The increase of grassland area might reduce the inflow velocity, and the decrease of forest increased the high threshold volumes and at the same time could reduce total flow volume. However, land use change had only little contribution to stream flow variations, owing to only insignificant change was detected during this time period.

Keywords: **Miyun Reservoir; Chaohe and Baihe River; inflow; variability; LOWESS; land use**

密云水库是目前北京市当地惟一的地表饮用水水源地。然而，到 2006 年，潮白河流域已经连续干旱了 7 a，密云水库可利用水量只有 6.0×10^8 m^3 多，其入库径流也逐年减少[1-2]。因此，北京市水资源紧缺形势非常严峻。为了保护密云水库水源地，众多学者进行了大量的研究工作。对密云水库流域的潮白河径流进行了模拟和预测[3-4]，对水质变化趋势、非点源污染态势等进行了分析[5-8]，并开展了气候变化和人类活动（土地利用变化）对流域的影响和干扰的研究[2,9-12]。秦永胜等[4]的研究表明，在坡面尺度（面积约 9 000 m^2）和小流域尺度（面积约 27 000 m^2），荒坡地径流系数都要显著大于水源保护林地，而且水源保护林表现出较大调蓄能力和水源涵养作用。徐宗学等[13]根据北京地区 20 个气象站 44 a 的逐月降水观测资料对北京地区降水量的时空分布规律进行了分析。对该地区的气候变化研究表明，1961—2004 年间北京市气温呈持续上升趋势，而降水量呈下降趋势[14]。

气候因素和土地利用变化是影响水文过程的 2 个主要原因[15-16]，一般在较大时间尺度上气候变化对水文过程的影响更明显，土地利用变化对径流过程的影响程度则直接与人类改变流域的活动强度相关[17]。在小区尺度上的试验研究显示，土地利用类型的改变对径流将产生较大影响，但在流域/集水区尺度上的研究却找不到类似的证据[18]，尤其是径流

收稿日期：2010-05-10　　**修回日期**：2010-07-14
资助项目：北京市自然科学基金“变换环境下的北京市水资源时空分布变异规律”(8062021)；北京师范大学“京师学者”特聘教授启动经费
作者简介：刘星才(1984—)，男(汉族)，江西省吉安市人，在读博士研究生，研究方向为生态水文学。E-mail：xingcai.liu@mail.bnu.edu.cn。
通信作者：徐宗学(1962—)，男(汉族)，山东省淄博市人，博士，教授，主要从事水文学及水资源研究。E-mail：zxxu@bnu.edu.cn。

变化同时明显地受到气候变化的影响时[19]。因此,有必要寻求一种有效的方法来评估流域尺度上土地利用变化对径流产生的影响程度。

Archer 和 Williams 等采用流量变异分析方法评估了英格兰北部的 Kielder 水库调度方案及泰恩河(Tyne)的水利发电运营中人类活动措施相比于正常情况(自然状态)下对泰恩河下游所造成的不同影响[20]。Archer[21]也将该方法应用于评价被造林围绕的沼泽地对水文情势的影响。1997 年 Clausen 和 Biggs[22]研究了河流流量变异性对水生生物分布的影响,他们的研究中选用了 34 个水文情势相关变量进行分析。2000 年 Clausen 和 Biggs[23]研究了新西兰 62 条终年河流的河流情势变异性,其研究采用的是日流量数据。Archer 和 Newson[24]于 2002 年研究了 Coalburn 流域(1.5 km^2)1967—1998 年的流量变异性。2007 年 Archer[19]采用同样分辨率的数据,通过对 Wales 中部 Plynlimon 高地西部 2 个相邻小流域 Wye 河和 Severn 河流域的对比研究,分析了土地利用变化导致的流量变异性,从而反映土地利用变化对水文情势的影响。径流变异结果中混杂着气候变化、土地利用变化等多种因素的影响,为了更好地显示土地利用变化对径流的影响,Archer 等在研究中采取了对年降水序列数据进行回归的方法以消除气候变化的影响。

研究表明,密云水库流域气温有增加趋势,但增量很小[14],有人指出降水和人类活动是影响该流域径流量变化的主要因素[25-26]。因此,相对降水和土地利用变化这 2 个变幅较大的环境要素以及强烈的人为干扰活动(如水利工程、水保措施等),气温对流量变异的影响很小。本文主要探讨了 20 世纪 80 年代和 2002—2006 年 2 个时期内密云水库入库流量变异性及降水量、土地利用变化和其它人类活动对径流的影响。

1　研究区域和方法

1.1　流域概况

密云水库流域是指潮白河流域中密云水库所控制的部分,位于北纬 40°19″—41°38″和东经 115°25″—117°35″,包括白河子流域(面积 6 277.5 km^2)和潮河子流域(面积 9 227.5 km^2)。流域内地形西北高,以海拔 1 000～2 300 m 的中山为主,东南部多分布低山、丘陵,少量平原河滩地。该流域属暖温带季风型大陆性半湿润半干旱气候,四季分明,干旱冷暖变化明显。多年平均降雨量为 488.9 mm,且多集中在 7—9 这 3 个月份。年平均气温 9～10 ℃,向北部以 1～2.5 ℃的梯度递减。

1.2　流量变异分析方法

流量变异分析[19,21,23-24]是基于大于阈值流量的脉动频率和持续期进行水文扰动的分析方法,其本质是对流量过程的频率分析。脉动可以看作是相对于给定流量阈值的一次涨落,其持续期则是指从给定流量起涨点到回落到该流量点的时间,图 1 表示脉动和脉动持续期的定义和度量方法。对水文特征的扰动影响包括气候变化、土地利用/植被覆盖变化及其它人类活动等。流量变异分析主要通过度量流量过程线上单位时间内的脉动数量和每次脉动的平均持续时间来表现不同径流过程间的差异。

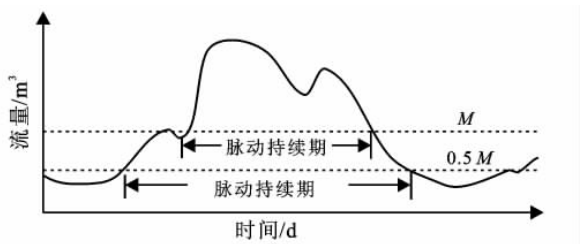


图 1　流量脉动及脉动持续期示意图(*M* 为流量平均值,下同)

考虑到目前该流域资料有限,而流量变异性分析对资料的时间分辨率要求又比较高,因此,本文只选择了潮河流域(下会站)1980—1991 年和 2003—2006 年,白河流域(张家坟站)1982—1991 年和 2002—2006 年间的日平均流量数据。计算了 2 个站点各年对应每个流量阈值的脉动数量(忽略年始和年末的不完整的脉动过程)和年内脉动平均持续期。本研究分析以年数据为单位,且最终结果的比较是基于多年平均值,因此,2 个站点的时段年份不相同不会对结果造成明显影响。为了便于叙述,文中将下会站 1980—1991 年和张家坟站 1982—1991 年阶段称为第 1 时期,以此代表 20 世纪 80 时年代;下会站 2000—2006 年和张家坟站 2000—2006 年阶段称为第 2 时期。需要指出的是,因数据有限,这里的 2 个时期与后面的土地利用数据时间并不十分对应,采取这种分期是为了使 2 种数据时间尽量接近。为了比较 2 个时期的流量变化,对脉动数量和脉动平均持续期分别进行时段平均,即第 1 时期流量阈值上的脉动数量和平均持续期进行年平均,得到一个时间序列,长度为流量阈值个数;对第 2 时期进行同样操作,得到第 2 个时间序列。2 个时间序列分别代表了相应时期的平均流量变化,分析这 2 个时间序列数据,考察了不同时期的流量变异特征。尽管上述 2 个时期包含年份数量相差较大,但本文的流量变异性研究主要对每 1 a 的流量过程做统计分析,最后对比也是通过统计指标在不同时段的年平均值来比较的,因此基本可以反映出 2 个时段的平均流量变化情况。数据

分析以年为单位，一般选择流量平均值(以 M 表示)的倍数作为阈值流量。本文选择了 0.5M，1M，2M，3M，4M，5M，6M，7M，8M，10M，12M，15M，18M，20M，25M，30M，35M，40M，60M，80M 和 100M 等 20 个阈值流量进行分析，认为这些阈值能够覆盖流量过程脉动的主要频率。考虑到研究时段内各年份的平均值间差异较大，为了能在统一阈值流量谱内表现不同年份间差异，选择了所有研究时段的流量数据样本平均值作为平均值。

1.3 LOWESS 拟合技术

局部权重散点平滑[27]是一种稳健的拟合技术，其本质是对序列数据进行分段拟合，只是拟合时采取了加权线性回归。对于每个区段内的数据，其权重计算如下：

$$w_i=[1-|\frac{x-x_i}{d(x)}|^3]^3$$

式中：x——被平滑点数据的 x 坐标；x_i——给定区间内的 x 坐标；$d(x)$——x 与给定区间内其它 x 坐标点的最大差值，即 $\max(x-x_i)$。权重计算出来以后，在回归线性方程的两边同时乘以 $\sqrt{w_i}$，使得该数据点在回归时对误差平方和的影响为原来的 w_i 倍。

LOWESS 是一种非线性拟合方法，其优势在于：(1) 对 2 个变量之间关系的描述是开放式的，不套用现成的数学函数；(2) 它可以检测出变量之间局部、细微的关系变化。年降水和年平均流量之间有明显的相关性，但降水和流量过程之间的关系难以用简单的线性关系来描述。因此，本文将 2 个时期数据作为一个整体，采用 LOWESS 方法对计算得到的各流量阈值上的脉动数量和脉动平均持续期时间序列和年降水量进行拟合，并用原始值减去拟合值得到残差。对拟合值和残差进行了同样的时段平均计算，分别得到 2 个新的时间序列值。

2 结果分析

2.1 降水量变化

根据潮河流域 14 个雨量站和白河流域 29 个雨量站逐日降水分别计算了 2 个流域 1980—1991 年和 2000—2006 年 2 个时段各年的面雨量。根据下会站和张家坟站逐日流量资料分别计算了相应时段的年径流量，并分析了年降水与径流量的关系(图 2)。从图 2 中可以看出，降水量和流量有明显的相关关系。相关性分析显示，潮河流域年降水量与下会站年平均流量相关系数达 0.81，白河流域年降水量和张家坟站年平均流量相关系数为 0.65。这表明降水是流量过程变化的一个重要影响因素。在进行流量变异分析时，为考察土地利用变化的影响，采用了前面所述的 LOWESS 拟合方法消除降水因素干扰。对 2 个站点年径流量趋势分析表明，2 个站的径流量均有下降趋势。下会站 1980—1991 年时段内多年平均径流量为 2.18×10^8 m^3，2000—2006 年多年平均径流量为 8.8×10^7 m^3。张家坟站 1982—1991 年的多年平均径流量为 3.15×10^8 m^3，2000—2006 年期间多年平均径流量为 1.77×10^8 m^3。2 个站点在不同时段内的多年平均径流量都有明显差别，并且减少趋势显著。

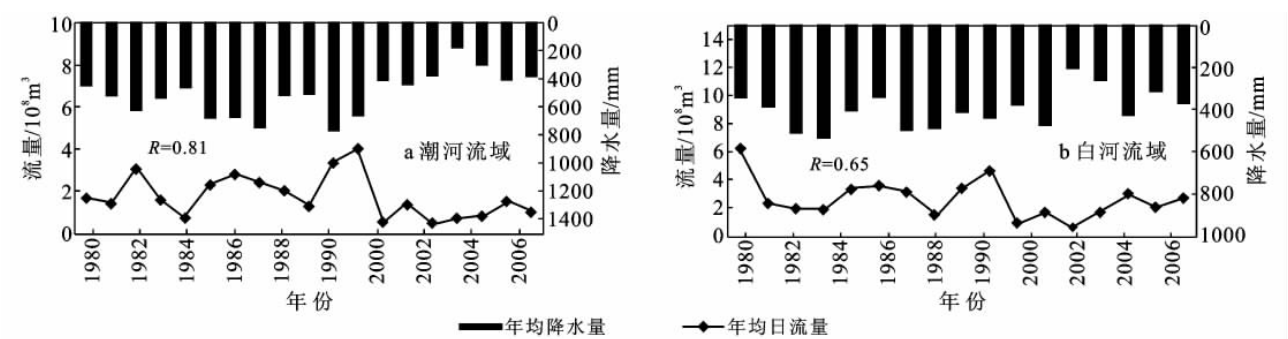


图 2 潮河流域年降水和下会站年径流量与白河流域年降水和张家坟站年均日流量(*R* 为相关系数)

2.2 土地利用变化

根据密云水库流域 1990 年和 2000 年的土地利用图分析了 2 个时期的土地利用变化情况。

表 1 显示了密云水库流域 1990 年和 2000 年各地类所占百分比。从表 1 中可知，2 个时期均以林地、草地和耕地为主。1990 年密云水库流域 3 种地类占的比例分别为 49.67%，27.47%和 20.72%，2000 年分别为 49.74%，27.10%和 20.63%。总体上说，2 个时期的土地利用变化很小。表 1 显示，除了草地和水域面积，其它几种地类变化很小；2000 年较 1990 年林地和水域面积有所减少，草地、耕地面积有所增加。

密云水库过去 30 a 间的水利工程设施建设较多，但大多数集中在 20 世纪 80 年代以前，之后则很少；水土保持措施则从 20 世纪 80 年代开始一直保持

增长趋势[28]。值得注意的是,在 1980—2000 年间尽管密云水库流域水土保持措施的实施中林地持续增加,但其总的林地面积仍然有所减少,这应该跟流域内砍伐、采矿等造成的植被破坏有关。

表 1　密云水库流域 1990 年和 2000 年各地类面积比例　%

地 类	1990 年	2000 年	变化
林 地	49.67	49.74	−0.07
草 地	27.47	27.10	0.37
耕 地	20.71	20.63	0.08
水 域	0.59	0.99	−0.40
建设/居民地	0.54	0.61	−0.07
未利用地	1.02	0.94	0.08

2.3　流量变异分析

2.3.1　*流量脉动数量变化*　在统计得到各年份在各流量阈值的脉动数量后,分别对下会站和张家坟站 2 个时期流量的年脉动数量求时段平均值及其 LOWESS 拟合值和残差(图 3)。

从图 3a 可以看到,除了 0.5 M 这一流量阈值外,下会站和张家坟站其它流量阈值上的年脉动数量第 1 时期平均值均较第 2 时期平均值要高。脉动数量少,意味着流量过程较平滑,或者变化较平缓。而不同时段的流量过程脉动数量在整个阈值流量谱上都呈现出一致变化时,通常意味着不同时段的流量过程平均值有明显差异。如下会站 1980—1991 年期间的年平均流量为 2 528 m^3/s,2003—2006 年期间的年平均流量为 1 131 m^3/s;张家坟站 1982—1991 年期间的年平均流量为 3 650 m^3/s,2002—2006 年期间的年平均流量为 2 282 m^3/s。这 2 个站径流的衰减主要应归因于降水的减少,文献[13—14]均已指出该流域降水量的下降趋势。

图 3b 中显示了对降水量进行 LOWESS 拟合后的脉动数量的时段平均,其总体趋势与图 3a 中的原始结果相近。图 3c 则显示了消除降水量影响的流量脉动数量的变化。

不同于图 3a 和图 3b,图 3c 中流量阈值谱上的脉动数量并未从低流量阈值到高流量阈值呈明显的递减趋势。另外,下会站第 1 时期在除了 2 M 和 3M 外的流量阈值上的脉动数量时段平均值都低于第 2 时期的时段平均值;张家坟站则除了 5M,7M,20M,25M,30M,35M,40M,60M,80M 和 100M 这些流量阈值,其它流量阈值上的脉动数量第 1 时期时段平均值都要低于第 2 时期时段平均值。

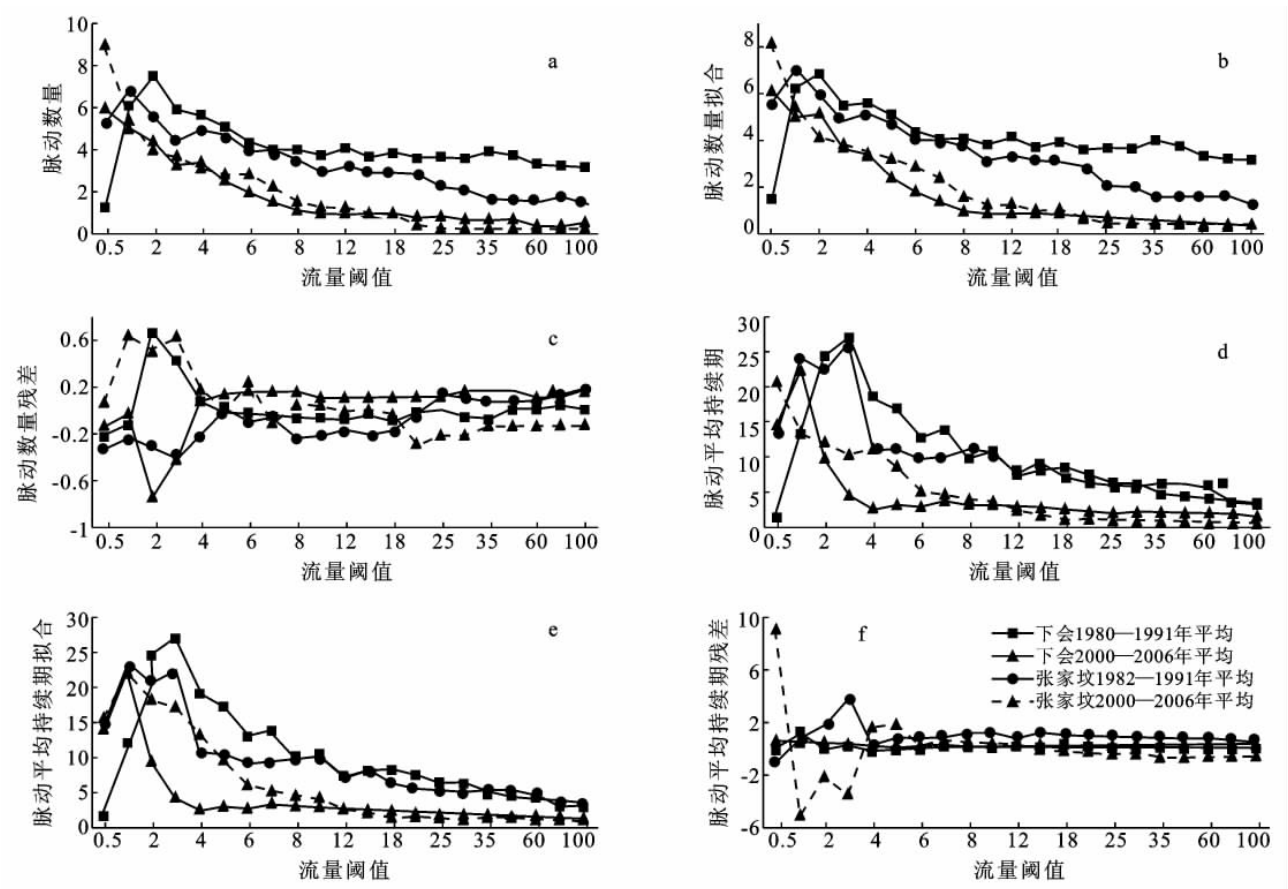


图 3　下会站和张家坟站流量变异分析(图中横坐标标值为 M 的倍数)

消除降水量影响后的流量变化没有表现出明显的下降趋势，而且第2时期的流量波动较第1时期稍有增加。与之对应的土地利用变化是林地和水域面积的减少，草地面积增加。这些土地利用变化在一定程度上增加了高流量阈值的脉动数量，蓄水能力有所减弱。由于低流量阈值对应的是高频率，相反高流量阈值出现频率要低得多，因此第2时期的流量波动增加可能与土地利用变化有关。

2.3.2 *流量脉动平均持续期变化* 脉动持续期反映了一次脉动经历的时间，如一次降雨产生径流到径流消退的时间。本文计算了下会站和张家坟站2个时期内各流量阈值上的脉动平均持续期时段平均值及其LOWESS拟合结果和残差，见图3d，3e，3f。除了0.5M和1M这2个流量阈值，下会站第1时期其它流量阈值上的脉动平均持续期时段平均值都要比第2时期时段值平均高。张家坟站则除了0.5M和4M之外，其它流量阈值上的脉动平均持续期第1时期平均值都高于第2时期平均值(图3d)。结合以上的分析，认为下会站和张家坟站后一时段的流量变化均较前一时段要平缓。

图3e显示了采用LOWESS技术拟合后的脉动平均持续期。下会站和张家坟站的拟合结果与未拟合之前变化趋势一致。图3f中的脉动平均持续期残差线图显示出一些不同的变化。下会站除了0.5M和18M外所有流域阈值上的脉动平均持续期第2时期平均值比第1时期平均值均高，而张家坟站除了0.5M，4M，5M外其它流量阈值上的脉动平均持续期第1时期平均值高于第2时期平均值。下会站消除降水影响后的脉动平均持续期呈现出的不同变化，表明第2时期流量变化较第1时期要缓慢；张家坟站第1时期在高流量阈值上的脉动持续期较长而低流量阈值的脉动持续期较短。结合前面的土地利用变化分析，认为林地面积的减少可能导致径流量减少；然而该流域大量的水利工程设施如水库、塘坝等这些因素的影响因缺乏详细资料尚无法估计。草地面积的增加则增强了流域截留能力，使得流量过程变化趋于平缓。

3 结论

本文对密云水库流域入库流量过程变异性进行了研究。结果表明，潮白河流域第2时期(2002—2006年)的流量较第1时期(20世纪80年代)明显减少。总体来看第2时期的流量变化较20世纪80年代这段时间平缓。该流域的水利工程设施等主要兴建于20世纪80年代以前，但在90年代以后不少工程逐渐废弃，到2000年以后水库、塘坝等对地表水的截留作用已经不明显[26]。因此，通过消除降水因素影响，结合土地利用变化分析，认为林地减少是导致径流量减少的可能原因之一；而草地增加则使得流量过程变化较缓慢。但总体上降水量是影响流量变异的主要因素，土地利用变化的影响相对较小。尽管有证据表明在小流域尺度上土地利用类型的变化对径流有较大的影响，但本文的研究显示其对流量变异性没有显著的影响，其原因可能是流域在研究时段内土地利用变化很小的缘故。由于资料限制，无法进行详细的论证，因而有待于今后基于更加详尽的数据作进一步的研究。

流量变异分析方法可以较好地区分气候变化(如降水)因子和人类活动(如土地利用变化)对河流流量变化的影响。由于该方法基于流量过程的分析，因此流量数据的时间分辨率对分析结果有一定的影响。本文所使用的日平均流量数据还不能很好地表现出一场降雨所形成的流量的波动。小区试验研究表明，土地利用变化所导致的流域下垫面变化在场次暴雨中对流量过程有更明显的影响。因此，采用更高分辨率的流量数据进行研究可以更好地分析高频率流量的变异、波动情况，也能更详细地反映出其影响因素的信息，尤其是对于土地利用/下垫面变化这种短时间尺度上对径流影响明显的因素。

[参 考 文 献]

[1] 高迎春，姚治君，刘宝勤，等. 密云水库入库径流变化趋势及动因分析[J]. 地理科学进展，2002，21(6)：547-553.

[2] 董文福，李秀彬. 密云水库上游地区“退稻还旱”政策对当地农民生计的影响[J]. 资源科学，2007，29(2)：21-27.

[3] 庞靖鹏，刘昌明，徐宗学. 基于SWAT模型的径流与土壤侵蚀过程模拟[J]. 水土保持研究，2007，14(6)：88-93.

[4] 秦永胜，余新晓，陈丽华，等. 北京密云水库流域水源保护林区径流空间尺度效应的研究[J]. 生态学报，2001，21(6)：913-918.

[5] 谷照升，杨天行，徐清. 无单元方法在密云水库水质分析中的应用[J]. 中国科学D辑，2005，35(S1)：255-260.

[6] 李慧敏，孟凡艳，杜桂森，等. 密云水库东西库区的水质与浮游藻类分析[J]. 湖泊科学，2007，19(2)：146-150.

[7] 苏保林，王建平，贾海峰，等. 密云水库流域非点源模型系统[J]. 清华大学学报：自然科学版，2006，46(3)：355-359.

[8] 王蕾，杨敏，郭召海，等. 密云水库水质变化规律初探[J]. 中国给水排水，2006，22(13)：45-58.

[9] 高成德，田晓瑞. 北京密云水库集水区水源保护林最佳

森林覆盖率研究[J].林业实用技术,2005(8):3-5.

[10] 华珞,张志刚,冯琰,等.用^{137}Cs示踪法研究密云水库周边土壤侵蚀与氮磷流失[J].农业工程学报,2006,22(1):73-78.

[11] 林道辉,杨志峰.密云水库水环境保护与库区社会经济可持续发展研究[J].水科学进展,2000,11(1):38-42.

[12] 肖洋,陈丽华,余新晓,等.北京密云水库油松人工林对降水分配的影响[J].水土保持学报,2007,21(3):154-157.

[13] 徐宗学,张玲,阮本清.北京地区降水量时空分布规律分析[J].干旱区地理,2006,29(2):186-192.

[14] 张玲,徐宗学,阮本清.北京城市热岛效应对气温和降水量的影响[J].自然资源学报,2006,21(5):747-755.

[15] 邓慧平,李秀彬,张明,等.气候与地表覆被变化对梭磨河流域水文影响的分析[J].地理科学,2001,21(6):493-497.

[16] Jones J A. Global Hydrology: Processes, Resources and Environmental Management [M]. New York, Harlow: Addison Wesley Longman, 1997.

[17] White A B, Kumar P, Saco P M, et al. Changes in hydrologic response due to stream network extension via land drainage activities[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003,39(6): 1547-1560.

[18] OConnell E, Beven K, Carney J, et al. Review of impacts of rural land use and management on flood generation: Impact study report, DEFRA, R& D Technical Report FD2114/TR[R]. London: Defra Flood Management Division, 2005: 142.

[19] Archer D R. The use of flow variability analysis to assess the impact of land use change on the paired Plynlimon catchments, mid-wales[J]. Journal of Hydrology, 2007,347(3-4): 487-496.

[20] Archer D R, Williams G. Resolving conflicts between sustainable energy and water resources in the regulation of the River Tyne, England[C]// Modelling and Management of Sustainable Basin-scale Water Resources Systems (Proceedings of a Boulder Symposium). Wallingford, Oxfordshire: IAHS Publ, 1995, 231:3-14.

[21] Archer D R. Indices of flow variability and their use in assessing the impact of land use changes[C]// Seventh National Symposium. British Hydrological Society, 2000:67-73.

[22] Clausen B, Biggs B. Relationships between benthic biota and hydrological indices in New Zealand streams[J]. Freshwater Biology,1997,38(2):327-342.

[23] Clausen B, Biggs B J F. Flow variables for ecological studies in temperate streams: groupings based on covariance[J]. Journal of Hydrology, 2000, 237(3/4): 184-197.

[24] Archer D, Newson M. The use of indices of flow variability in assessing the hydrological and instream habitat impacts of upland afforestation and drainage[J]. Journal of Hydrology, 2002, 268(1/4): 244-258.

[25] 李丽娟,姜德娟,李九一,等.土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J].自然资源学报,2007,22(2):211-224.

[26] 孙宁,李秀彬,冉圣洪,等.潮河上游降水—径流关系演变及人类活动的影响分析[J].地理科学进展,2007,26(5): 41-47.

[27] Cleveland W S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots [J]. J. Am. Stat. Assoc., 1979,74:829-836.

[28] 李子君,李秀彬.水利水保措施对潮河流域年径流量的影响:基于经验统计模型的评估[J].地理学报,2008,63(9):958-968.