

气候变化和人类活动影响下澧水流域径流 及其不同组分的变化

郑明国, 孙莉英

(中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 目前径流变化相关研究较少涉及径流的不同组分。利用湖南省澧水流域4个水文站点长序列观测资料, 不仅分析了2007-2011年相对于1985年以前径流总量及其历时曲线的变化, 也分析了地表径流和基流及其历时曲线的变化。与1985年以前比, 流域年降雨量保持不变, 最显著的变化为森林覆盖率的增加和大量水库的修建。这些人类活动没有造成年径流总量、年基流量和年地表径流量的显著变化, 但在日时间尺度上对径流过程产生了重要影响。地表径流和地下径流对人类活动存在差异性响应, 2007年以后地表径流在洪峰期流量变小而其他时段变大, 而地下径流汇水受人类活动影响较小, 基流流量除枯水期外与1985年以前基本一致。本文所揭示的规律可能在中国南方具有一定的代表性。

关键词: 径流变化; 基流; 森林; 水库; 澧水

DOI: 10.11821/dlyj201402004

1 引言

河川径流特征是水文水资源学研究的重要内容。气候变化和人类活动影响下河川径流的变化研究, 不仅可以促进对水文过程的进一步认识, 对变化环境下的水资源规划管理也具有重要意义, 目前在国际上受到了广泛关注^[1-4]。气候变化通过气温、降水等因素影响水文循环, 人类活动主要是通过土地利用、水土保持、水库修建等方式改变流域下垫面特性, 从而影响水文径流过程^[5]。径流变化相关研究, 尤其2000年之后, 在中国广泛开展, 以黄河流域^[6-8]和长江流域^[9-11]为最多, 其他地区如青藏高原^[12,13]、海河流域^[14]和西北地区^[15,16]亦较多。河川径流量包含地表径流和地下径流排出量(基流)两种组分, 目前大部分研究主要侧重径流总量的分析, 很少有研究关心径流不同组分的时间变异。地表水和基流对流域管理意义不尽相同, 例如地表水是流域土壤侵蚀的主要原因, 洪水期许多地表水难以有效利用, 而基流是枯水期河川径流的主要补给来源, 对工农业供水、水安全和河流生态系统具有重要作用。因此, 在研究河川径流总量的变化的同时, 也需要研究其不同组分的变化。澧水流域(图1)为洞庭湖四大水系之一, 自20世纪初期实施退耕还林后, 植被覆盖率显著提高, 并修建了大量水库, 下垫面变化在中国南方有一定代表性。本文以澧水流域为研究区, 搜集了澧水流域1985年以前和2007年以后两个时段的水文数据, 不仅分析了两个时段径流总量及其径流历时曲线的变化, 也分析了两个时段地表径流和基流组分及其

收稿日期: 2013-03-15; 修订日期: 2013-08-26

基金项目: 张家界世界地质公园地质遗迹保护专项基金资助科研项目; 国家自然科学基金项目(41271306)

作者简介: 郑明国(1971-), 男, 湖北钟祥人, 博士, 研究兴趣为侵蚀产沙及遥感信息提取。

E-mail: zhengmg.04b@igsnrr.ac.cn

径流历时曲线的变化，目的在于揭示该流域近期径流及其组分的变化以及它们对环境变化的差异性响应。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

澧水流域面积 18496 km²，处于云贵高原向江南丘陵的过渡地区。石门县城以下为下游，属平原地形。桑植县城以上为上游，多高山，山峰海拔多在 1000~2000 m 之间。中游为丘陵地区，海拔基本在 500 m 以上。本文研究区仅涉及石门站（#2，图 1）以上澧水中上游地区，包括张家界市的两区（永定区和武陵源区）两县（桑植县和慈利县）和常德市石门县的绝大部分，面积 15307 km²。气候属典型亚热带湿润季风气候，多年平均降水量约 1500 mm。年降雨自西北向东南递减，河源八大公山多年平均降雨可达 2300 mm，中游石门站处多年平均降雨降至 1340 mm。年内降雨分配不均，汛期（4-9 月）降水占全年 73%。多暴雨，24 小时最大降雨量为 414.7 mm，易发生洪涝灾害，如 1935 年 7 月的特大洪水导致 3 万余人死亡^[17]。流域内以砂页岩和石灰岩为主，土壤为黄壤和黄色石灰土。

研究区林地面积广阔。石门县和张家界市统计数据表明，2009 年澧水中上游林地面积约占 71.1%，耕地面积约占 9.4%。根据各县县志，澧水流域森林在 20 世纪 50 年代后期遭受了较严重破坏，后期虽有恢复，但 1985 年以前森林覆盖率基本保持在 30%-40% 左右。1985 年森林普查数据表明，1985 年澧水中上游森林覆盖率约 43%。1990 年开始的长防林工程和 2000 年以后以退耕还林为主的生态环境建设，使得森林覆盖率逐步提高，2009 年森林覆盖率约 70%。澧水流域水库修建始于 20 世纪 50 年代，但 1985 年以前以小型水库（库容<10⁷ m³）为主，20 世纪 80 年代期间石门站以上所有水库总库容仅约 5.4 亿 m³。1990 年以后修建了许多大中型水库（库容大于 10⁷ m³ 的水库）。目前石门站以上共有 23 座大中型水库，总库容达 41.7 亿 m³。

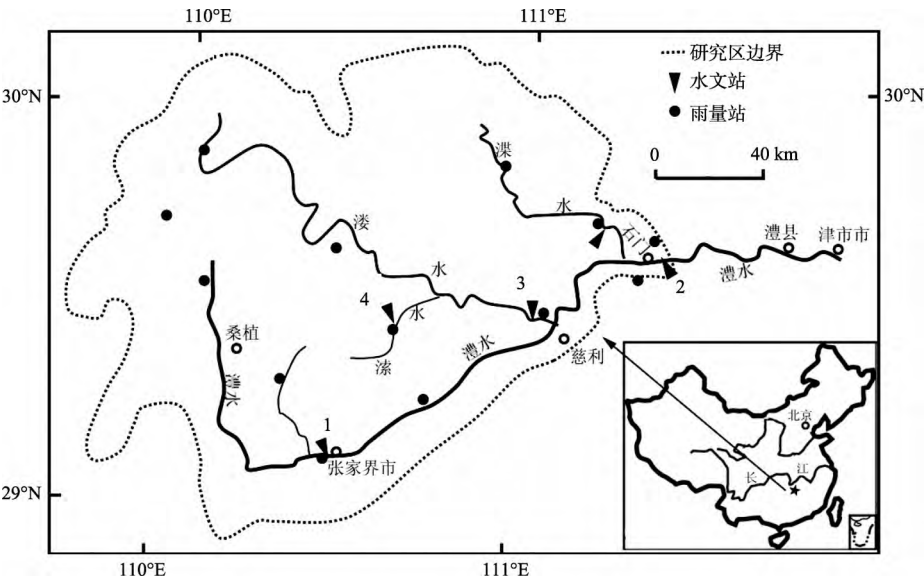


图 1 研究区位置图（图中数字表示水文站编号见表 1）

Fig. 1 Location of the study area, gauging and rainfall stations (Gauging station numbers correspond to those in Tab.1)

2.2 数据来源

本文研究选择张家界（#1）、石门（#2）、长潭河（#3）、双枫潭（#4）4个水文站（图1）进行。这4个水文站中，双枫潭站位于澧水的二级支流澧水上，长潭河站位于澧水的一级支流澧水上，张家界站和石门站位于澧水干流（图1）。所采用的数据包括年径流总量（ Q ， 10^8 m^3 ）和逐日平均流量（ q ， m^3/s ）。另外，具有长时间观测序列的13个雨量站（图1）的数据用于进行年降雨量（ P ， mm ）的变化分析。 P 、 Q 和 q 均来自《中华人民共和国水文年鉴》。桑植气象站和石门气象站观测数据用于进行气象因素的分析，数据来自中国气象科学数据共享服务网（cdc.cma.gov.cn）。这两个气象站分别位于上游的桑植县城和中游的石门县城（图1），所记录年降雨量与水文年鉴记录值高度相关（ $r>0.9$ ）。其他数据来自相关地方志和统计年鉴。

2.3 研究方法

本文仅针对2007年以后时段和1985年以前进行比较，1986-2006年之间的水文数据未获得。研究区许多大中型水库2007年以后才开始运行，如位于溇水流域（图1）的皂市水库，总库容为14.4亿 m^3 ，为研究区第二大水库，2007年才开始蓄水发电，因此1986-2006年期间许多年份人类活动的强度和1985年以前比差异可能并不显著。2007年以后时段本文获取了2007-2011年共计5年的水文数据（表1），1985年以前时段较长，可以将两个时段的比较理解为近期观测值与背景值的比较。尽管只有5年的观测数据，但计算结果表明，在95%的置信水平下，以四站（张家界、石门、长潭河和双枫潭）这5年的样本均值作为多年平均值的估计误差上限（ $1.96\times\text{标准误}/\text{样本均值}$ ）分别为23%、16.5%、8.6%和24.7%，平均为18.2%。这表明，2007-2011年这5年的情况对多年平均状况具有代表性。

表1 水文站数据年限及研究时段的径流量^a

Tab. 1 Description of the experimental sub-watersheds and the observed data

编号	站名	控制面积(km^2)	数据年限	Q_1	Q_2	Q_{BF1}	Q_{BF2}	Q_{SF1}	Q_{SF2}
1	张家界	4627	1954-1985, 2007-2011	49.5	45.1	20.4	17.8	29.0	27.2
2	石门	15307	1954-1985, 2007-2011	152	136	62.9	63.5	88.7	79.8
3	长潭河	4913	1953-1985, 2007-2011	53.7	49.6	22.5	19.5	31.3	30.1
4	双枫潭	414	1959-1985, 2007-2011	4.1	3.3	1.6	1.5	2.5	1.8

注： Q_1 、 Q_{BF1} 、 Q_{SF1} 分别表示1985年以前时段年平均径流量、基流量和地表径流量（ $10^8\text{ m}^3\text{ a}^{-1}$ ）； Q_2 、 Q_{BF2} 、 Q_{SF2} 分别表示2007年以后时段年平均径流量、基流量和地表径流量（ $10^8\text{ m}^3\text{ a}^{-1}$ ）。

目前并没有普遍认同的基流分割方法^[18]。在多种基流分割方法中，数字滤波法目前在国际上应用最为广泛^[18,19]。该方法认为流量过程线为高频信号和低频信号的叠加，高频信号对应地表径流部分，而低频信号对应基流部分，将流量过程线分解为低频和高频信号后，就可以实现基流的分割。黄国如^[19]对同样位于中国南方亚热带湿润地区的东江流域研究表明，在多种基流分割方法中，Chapman等^[20]提出的数字滤波法可能是最优方法。本文因此也采用该方法对逐日平均流量进行分割。该方法假定第*i*天的基流流量 $q_{\text{BF}}(i)$ 为当地地表径流 $q_{\text{SF}}(i)$ 和前一天基流 $q_{\text{BF}}(i-1)$ 的加权平均，即：

$$q_{\text{BF}}(i)=kq_{\text{BF}}(i-1)+(1-k)q_{\text{SF}}(i)$$
 (1)

式中： k 为无降雨发生时的退水系数^[21]，和文献[19]一样，本文 k 取值0.95。设 $q(i)$ 为第*i*天的日平均流量， $q(i)=q_{\text{BF}}(i)+q_{\text{SF}}(i)$ 。代入上式，得：

$$q_{\text{BF}}(i)=0.905q_{\text{BF}}(i-1)+0.048q(i)$$
 (2)

本文利用式（2）进行基流分割。该算法计算的基流流量在枯水期某些时候会大于当

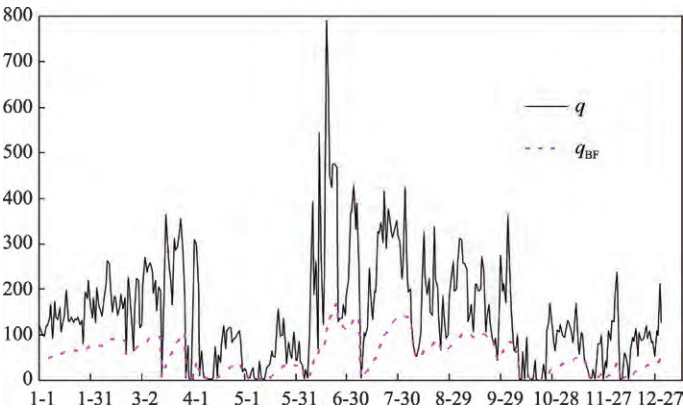


图2 长潭河站（#3）2011年逐日流量的基流分割结果

Fig. 2 Baseflow separation for the Changtanhe Station (#3) in 2011

基流的分割效果。长潭河站（#3）上游建有研究区最大的水库—江垭水库，该水库库容为18.56亿 m^3 ，占长潭河多年平均径流的35%，这一比例为所选择的4个站点中最高。但由图2可以看出，该站点洪峰线仍然非常尖瘦，高频信号非常突出，因此可以认为研究区水库的修建基本不会影响本文的基流分割结果。

本文利用柯尔莫哥诺夫—斯米尔诺夫检验（Kolmogorov-Smirnov Test，以下简称K-T检验）进行1985年以前和2007以后两个时段的比较。K-T检验用于检验两组独立样本观测值是否来自同一个总体，其检验统计量为^[22]：

$$D = \max |F_x - F_y| \tag{3}$$

F_x 和 F_y 分别为待检验的两个变量 x 和 y 的经验分布函数； D 表示 F_x 和 F_y 的最大差异。

$$F_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \leq x \\ 0 & \text{if } x_i > x \end{cases} \tag{4}$$

n 为变量 x 的观测值的数目； x_i 为 x 的第 i 个观测值； F_y 的定义类似。

本文也利用逐日平均流量的流量历时曲线（Flow duration curve, FDC）来分析研究区径流的变化。流量历时曲线反映了大于等于某一流量出现的时间百分比，目前广泛用于评价人类活动和气候变化对水文过程的影响^[23]。定义 q_5/q_{50} 和 q_{95}/q_{50} 为高流量指数和低流量指数^[24]， q_5 、 q_{50} 和 q_{95} 分别表示对应累积频率为5%、50%和95%的流量。高流量指数越小和低流量指数越大，表示径流变化幅度越小，流量分布越均匀。

3 结果分析

3.1 径流变化

图3给出了研究区4个水文站研究时段内历年年径流总量 Q 、年基流总量 Q_{BF} 和年地表径流总量 Q_{SF} 。与1985年以前时段比，2007年以后时段 Q 、 Q_{BF} 和 Q_{SF} 的平均值（表1）变化均不大，相对变化率在10%左右。K-T检验结果表明，两个时段的 Q （ $p>0.49$ ）、 Q_{BF} （ $p>0.42$ ）和 Q_{SF} （ $p>0.38$ ）并没有发生统计上显著的变化（表2）。

目前许多研究运用双累积曲线进行水文时间序列分析^[25]。双累积曲线上转折点的出现表明降雨径流关系发生了变化，这种变化可归因为人类活动导致的下垫面的变化。图4中

天的日平均流量，在此情况下，直接以日平均流量作为日基流量。基流分割的结果 $q_{BF}(i)$ 既包括浅层地下径流，也包括了深层地下径流。图2给出了长潭河站（#3）2011年的基流分割结果。根据 $q_{BF}(i)$ 可计算 $q_{SF}(i)$ ，将 $q_{BF}(i)$ 和 $q_{SF}(i)$ 累计求和可得到年基流总量（ Q_{BF} ， 10^8 m^3 ）和年地表径流总量（ Q_{SF} ， 10^8 m^3 ）。

水库的修建会使得流量过程线变得平缓，从而可能影响

四个站点的 Q 、 Q_{BF} 和 Q_{SF} 和 P 的双累积曲线几乎都为直线, 没有转折点, 表明在年际尺度上, 2007年以后流域的产流环境没有发生显著变化, 相同降雨仍然会产生相同的径流, 甚至相同的基流和地表径流。

3.2 径流历时曲线的变化

图5、图6、图7分别比较了1985年以前和2007年以后两个时段的 q_{BF} 、 q_{SF} 和 q 的流量历时曲线, 三者均发生了一定程度的变化而又各不相同。为叙述方便, 下文将流量区间分为洪峰期、常水期和枯水期三个区间, 洪峰期大致对应累积频率为20%及更大的流量, 枯水期大致对应累积频率为80%及更小的流量, 两者之间为常水期。对于 q_{BF} 言, 洪峰期和常水期变化很小, 两个时段的历时曲线几乎重合, 变化率基本在20%以下, 仅在枯水期发生了变化(图5); 对于 q_{SF} 言, 洪峰期流量变小, 其他时段几乎全部变大(图6); 对于 q 言, 4个站点尽管在枯水期的变化并不相同, 但在洪峰期流量均变小, 常水期流量均变大(图7)。以 q_5 、 q_{50} 和 q_{95} 作为三个流量区间的典型流量, 四个站点的 q_5 的减小率均在35%左右, q_{50} 的增加率在14%~68%间, q_{95} 除石门站(#2)增加了73%外, 其他3个站点均减小, 双枫潭站(#4)减小了18%, 而张家界站(#1)和长潭河站(#3)分别减

表2 各水文站1985以前和2007年以后两时段 Q 、 Q_{BF} 、 Q_{SF} K-T检验的 p 值

Tab. 2 p -values resulting from Kolmogorov-Smirnov tests of Q , Q_{BF} and Q_{SF} between periods before 1985 and after 2007

编号	站名	$Q(10^8\text{ m}^3)$	$Q_{BF}(10^8\text{ m}^3)$	$Q_{SF}(10^8\text{ m}^3)$
1	张家界	0.96	0.71	0.99
2	石门	0.69	0.88	0.50
3	长潭河	0.72	0.42	0.42
4	双枫潭	0.49	0.63	0.38

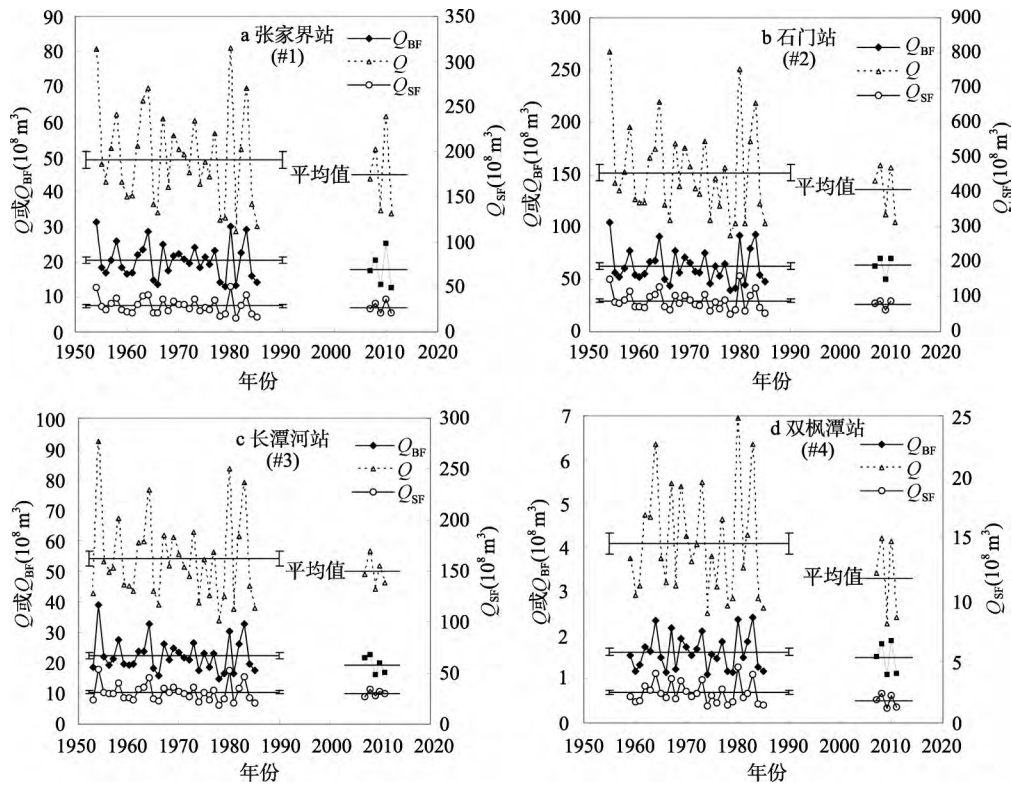


图3 各水文站年径流总量 Q 、年基流总量 Q_{BF} 和年地表径流总量 Q_{SF} 的变化(图中竖线指示标准误)

Fig. 3 Temporal variation of Q , Q_{BF} and Q_{SF} for periods before 1985 and after 2007

(Error bars represent the standard errors for the period before 1985)

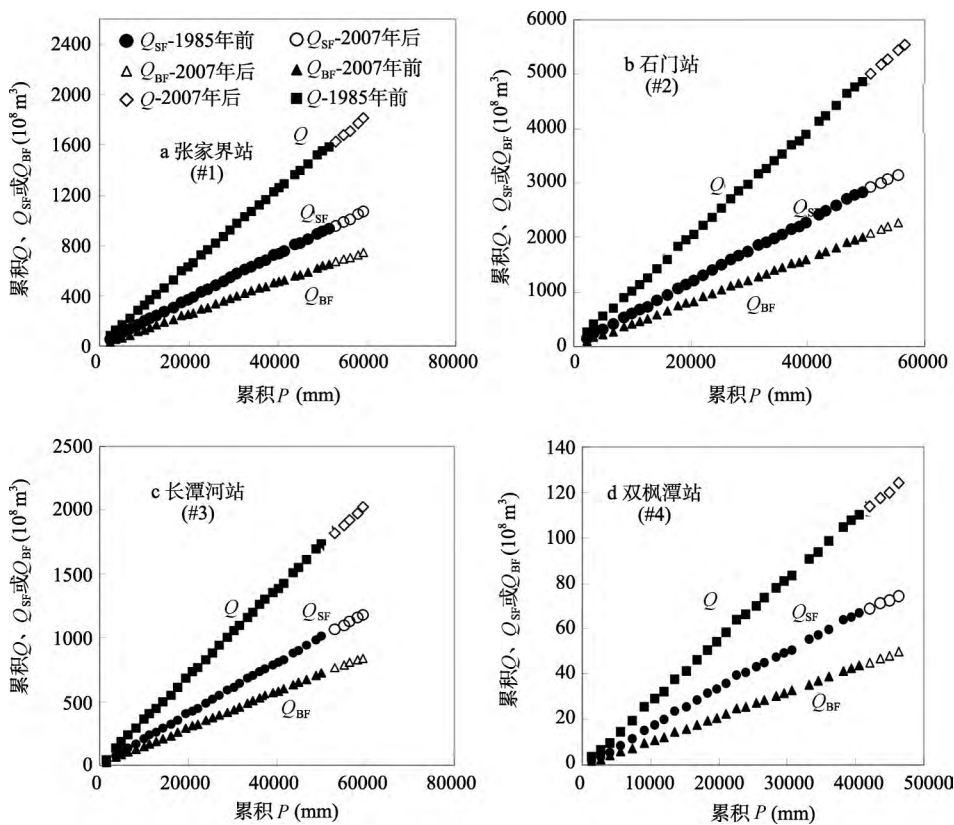


图4 各水文站年降雨量 P 和年径流总量 Q 、年基流总量 Q_{BF} 和年地表径流总量 Q_{SF} 的双累积曲线

Fig. 4 Double mass curves of P versus Q , Q_{BF} and Q_{SF} at four hydrological stations

小了68%和93%（图7），张家界站（#1）2009-2011年期间甚至发生了64天的断流。与 q_5 、 q_{50} 和 q_{95} 的变化对应，4个站点的高流量指数均变小，减小率在50%左右，低流量指数除石门站（#2）外，其他3个站点也减小，其中张家界站（#1）和长潭河站（#3）分别减小了95%和81%。

4 讨论

4.1 径流变化

对长江干流的许多研究表明，自20世纪50年代以来长江流域年径流量并没有发生统计上显著的变化^[9,26-28]，洞庭湖流域^[29]和澧水流域^[30]也有类似研究结果，这与本文分析结果一致。中国南方其他流域很可能也存在这种现象，例如海南省万泉河流域，在降雨变化不大的情况下，森林覆盖率从20世纪60年代的15%增加到70年代的40%，年径流量变化却很小，两个时段的年径流系数均为69%^[32]。尽管目前国内外绝大多数研究认为，植被覆盖度增加会减小产流^[31]。

影响产流变化的因素可概括为气候和人类活动两大类。如2.1部分所述，与1985年以前比，人类活动导致的研究区下垫面的最主要的变化是植被覆盖度的增加和水库的修建。植被通过增加蒸散发而导致径流的减小^[31]，但对于湿润地区，实际蒸散发量接近蒸发力，

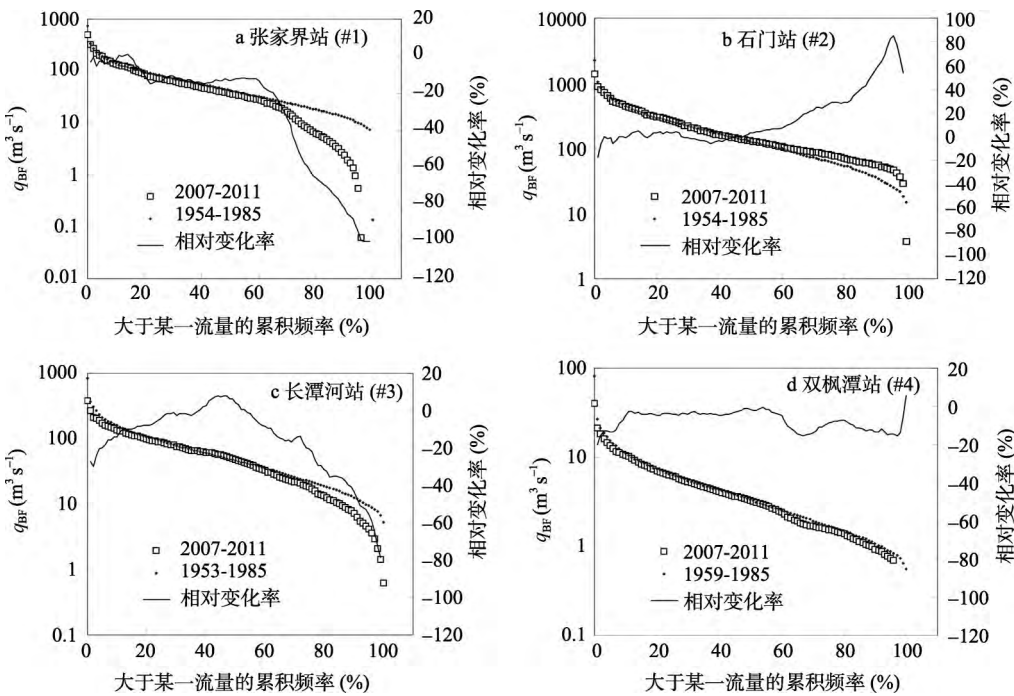


图5 各水文站日基流流量 (q_{BF}) 的历时曲线变化

Fig. 5 Temporal variations of flow duration curves of q_{BF} at the four hydrological stations

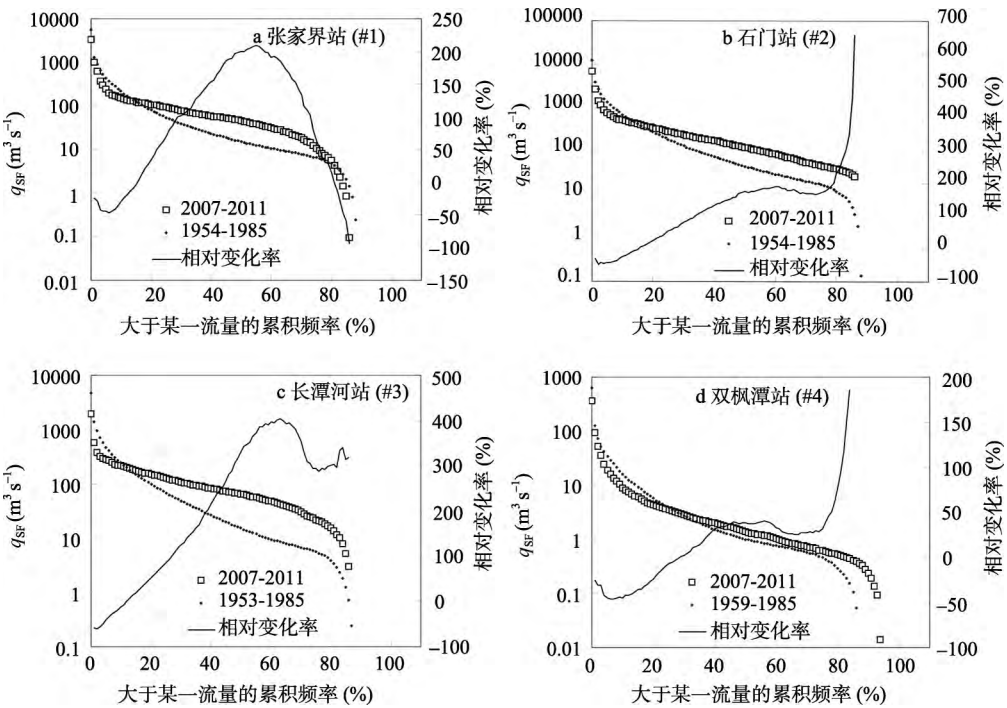


图6 各水文站日地表径流流量 (q_{SF}) 的历时曲线变化

Fig. 6 Temporal variations of flow duration curves of q_{SF} at the four hydrological stations

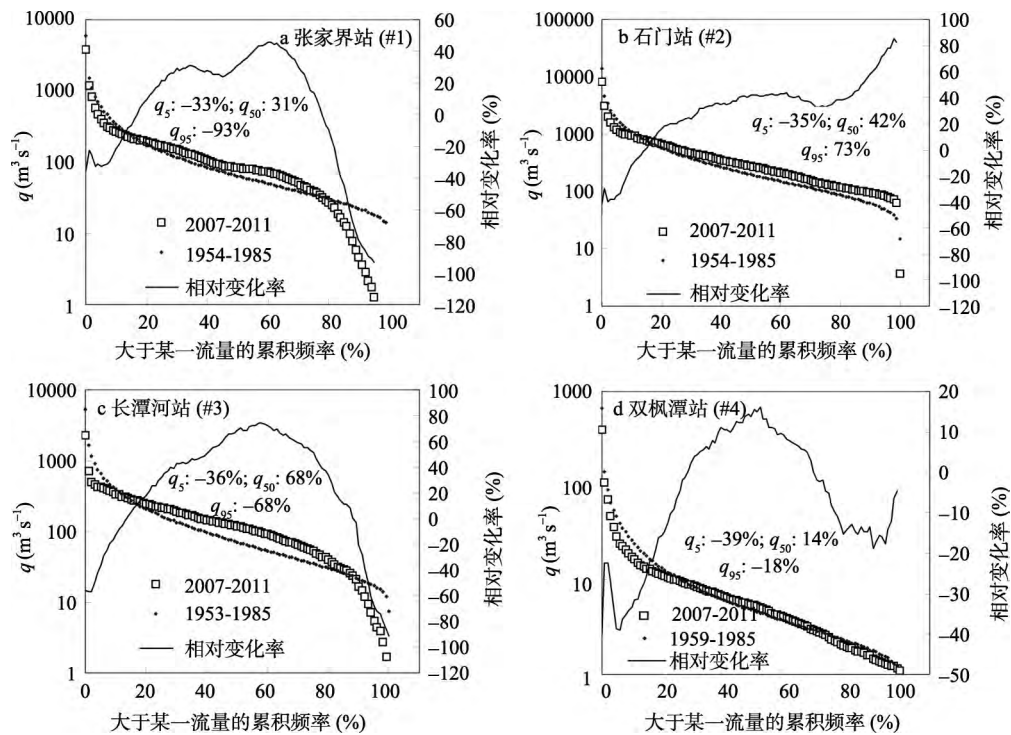


图7 各水文站日总径流量 (q) 的历时曲线变化 (图中给出了两个时段 q_5 、 q_{50} 和 q_{95} 的相对变化率)

Fig. 7 Temporal variations of flow duration curves of q at the four hydrological stations
(The relative change of q_5 , q_{50} and q_{95} are presented)

植被覆盖度的增加不一定引起实际蒸散发量的显著增加,而且由于林下小气候的变化,例如风速的降低,林下蒸散发会变弱^[33]。水库修建导致水体面积的增加,从而引起蒸发量增加,同时人口增加和经济发展也会导致人类耗水量的增加。由于研究区径流非常充沛,这些因素对年径流量的影响应该非常有限。根据张家界市统计年鉴,张家界市2009年境内水资源总量为99亿 m^3 ,当年全年用水量为5.51亿 m^3 ,不到水资源总量的6%。而在中国北方半干旱区,如黄河流域由于水资源量较少,这一比例可超过70%^[8],人类活动用水量成为径流变化的重要原因^[8,34]。和本文图4结果类似,对长江干流上游控制站宜昌站和其上的4条主要支流1956-2000年的数据分析表明,年径流量与年降水量的双累积关系也呈直线,人类活动对年径流变化的影响可以忽略^[33]。

降雨量和蒸发量决定了径流量,影响蒸发的气象因素主要包括气温、风速和空气湿度,因此除年降水量 P 外,本文还选择年平均气温(T , $^{\circ}\text{C}$)、年平均风速(V_w , m/s)和年均相对湿度(RH , $\%$)来分析气候因素对研究区径流量的影响。根据桑植和石门气象站的数据,图8比较了2007年以后这4个气候因素相对于1985年以前的变化。K-T检验结果表明(表3),上游桑植站的这四个因素均没有发生显著变化($p>0.12$)。对位于中游的石门站, P ($p=0.84$)和 RH ($p=0.25$)也没有发生显著变化,但 T ($p=0.008$)和 V_w ($p=0.005$)发生了显著变化。由于 T 增加而 V_w 减小(图8c和图8d),变化

表3 1985以前和2007年以后两时段的气候因素K-T检验的 p 值

Tab. 3 p -values resulting from Kolmogorov-Smirnov tests of climate factors between periods before 1985 and after 2007				
站名	P (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	V_w (m s^{-1})	RH (%)
桑植	0.46	0.999	0.79	0.12
石门	0.84	0.008	0.005	0.25

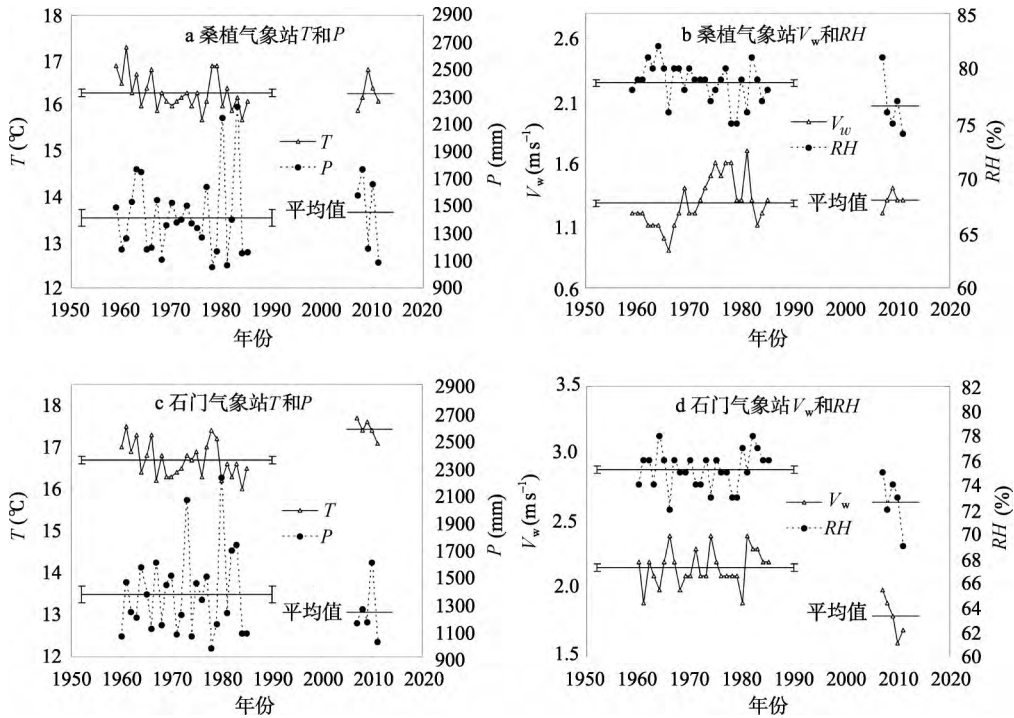


图8 桑植和石门气象站所记录的降水量 (P , mm)、平均气温 (T , $^{\circ}\text{C}$)、平均风速 (V_w , m s^{-1}) 和平均相对湿度 (RH , $\%$) 的变化

Fig. 8 Temporal variations of climate factors at Sangzhi and Shimen meteorological stations

方向相反，两者对流域产流的影响可能互相抵消，因此可以认为在研究区，气候变化对产流影响很小。

在众多影响产流的因素中，降雨应是影响研究区产流年际变化的最重要因素。对年径流量和年降雨量的回归分析的结果（图9），张家界（#1）、石门（#2）、长潭河（#3）、双枫潭（#4）4个水文站的决定系数（ R^2 ）分别为0.92、0.91、0.80、0.77，表明年径流量的80%-90%的变化可以由降雨的变化来解释。对图1中13个雨量站的数据进行K-T检验结果也表明，与1985年以前比，2007年以后年降雨量没有发生显著变化（ $p>0.16$ ）。由于降雨量没有发生显著变化，而人类活动导致的下垫面变化对产流影响也很小，因此研究区2007年以后年径流量没有发生显著变化。

潜水面处地下径流的补给取决于土壤的稳渗率，在有土壤分层的情况下取决于下层土壤的稳渗率。林地的恢复会导致土壤性质的改变，在澧水流域女儿寨的研究表明，退耕还林后土壤非毛管空隙度显著提高^[36]，林下土壤的非毛管空隙度和稳渗率均高于荒地^[37]。非毛管孔隙的增大会导致对壤中流和地下径流的补给变多，但林地这种影响应该随土壤深度变大而减小。在潜水面附近，这种影响可能非常有限，因此植被恢复后尽管可能会使得许多地表径流变为壤中流，但对地下径流的补给量并没有显著增加。可能因为这一原因，研究区植被覆盖度的增加不仅没有使径流总量发生变化，也没有使基流总量发生变化，这与黄河中游黄土林区完全不同。在黄土高原林区，伴随森林面积的增加，年径流量和地表径流量减小，而地下径流量增加^[33]。

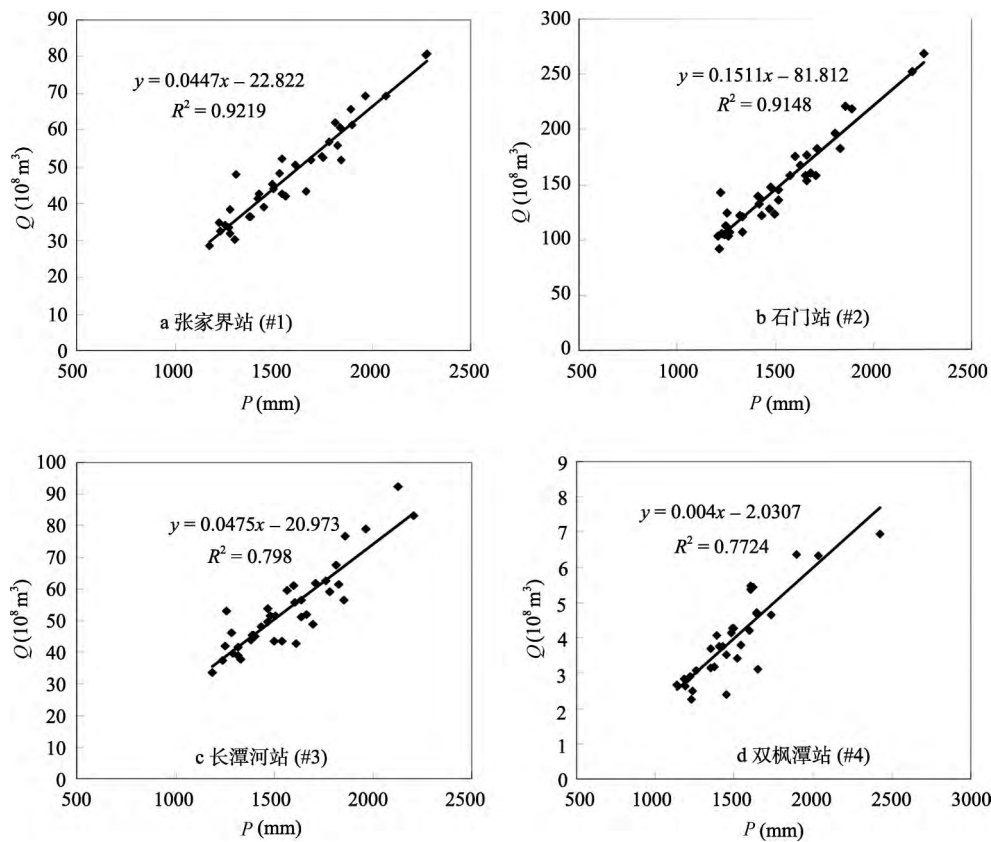


图9 各水文站降雨径流关系（数据点包括了1985年以前和2007年以后两个时段的数据，降雨量为水文站以上流域的面数据，直接根据图1中雨量站作算术平均而得）

Fig. 9 Rainfall-runoff relationships at the four hydrological stations

4.2 径流历时曲线的变化

许多研究表明森林植被可以改变河川年径流量的结构，具有“增枯减洪”的作用^[38]。研究区径流历时曲线的变化不仅与水库的调蓄作用有关，而且应该与植被覆盖度的增加显著相关。例如双枫潭站（#4）以上流域仅有一个中型水库（索溪水库），该水库仅控制了双枫潭站以上约22%的面积，库容为0.287亿m³，仅占双枫潭以上多年平均径流的7%，而其q₅的减小幅度为四个水文站最大（39%，图7）。长潭河站以上水库库容占多年平均径流的比例约35%，但该站q₅的减小幅度却略微低于双枫潭站（36%）。由于森林延缓了地表径流汇流速率，加上水库的调蓄作用，图6中各水文站q_{sf}在洪峰期均减小，而在其他时段变大，流量过程更加平稳，但森林和水库对地下径流的汇流影响不大，因此图5中q_{bf}在洪峰期和常水期期间变化不大。在大流量时段河川径流以地表径流为主，而在小流量时段以基流为主，所以q的流量历时曲线的变化在洪峰期和常水期与q_{sf}一致，而在枯水期与q_{bf}一致（比较图5和图7）。洪峰期河川径流流量的减小意味着洪水风险的降低，常水期河川径流流量的增加意味着可利用水资源量的增加，但枯水期部分河段流量的大幅降低可能会对河道生态系统产生严重的负面影响。张家界站（#1）和长潭河站（#3）枯水期径流的大幅降低很可能与其上游水库在冬季枯水期的蓄水有关。

5 结论

与1985年以前相比,2007年以后澧水中上游下垫面特性发生了显著变化,包括森林覆盖率的显著增加和大量水库的修建。基于4个水文站点的观测数据,本文分析了澧水中上游近期(2007-2011年)相对于1985年以前的水文情势的变化,所得主要结论如下:

(1) 在流域年降雨量保持不变的情况下,两个时段的年径流总量基本保持稳定,变化率小于10%,其差异在统计上并不显著($p>0.38$)。双累积曲线分析也表明,两个时段的产流环境相同,人类活动并没有改变降雨径流关系。尽管在其中的一个气象站观测到了温度和风速的变化,但一方面两者的变化对蒸发影响相反,另一方面它们对产流的影响在研究区远小于降雨因素,因此认为气候因素对年径流量的影响也不大。鉴于研究区径流量非常充沛,可以认为未来有限时间段内,人类活动很难对径流总量产生影响。

(2) 不仅年径流总量在两个时段保持不变,研究区径流地上和地下的分配格局也没有发生变化,年基流量和年地表径流量在两个时段也保持不变。这可能与林地对下层土壤的入渗速率影响较小有关,相关物理机制尚需要通过试验进一步确定。

(3) 人类活动尽管没有改变年径流总量及其组分,但在日时间尺度上对径流过程产生了重要影响。径流及其不同组分的历时曲线对人类活动的响应各不相同。与1985年以前时段比,由于植被对汇流的延缓和水库的调蓄,2007年以后地表径流在洪峰期流量变小而其他时段变大,而地下径流的汇流受植被和水库影响较小,除枯水期外,其他时段地下径流流量与1985年以前比变化不大。总径流流量历时曲线的变化在洪峰期和常水期与地表径流组分一致,而在枯水期与基流组分一致,洪峰期流量的减小表明2007年以后研究区洪水风险显著降低和可利用水资源量的增加,但部分河段枯水径流的大幅减小可能会对河道生态系统产生严重的负面影响。

参考文献(References)

- [1] Barnett T P, Pierce D W, Hidalgo H G, et al. Human-induced changes in the hydrology of the Western United States. *Science*, 2008, 319: 1080-1083.
- [2] Burn D H, Elnur M A H. Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology*, 2002, 255: 107-122.
- [3] Kliment Z, Matoušková M. Runoff changes in the Uman Mountains (Black Forest) and the foothill regions: Extent of influence by human impact and climate change. *Water resources management*, 2009, 23(9): 1813-1834.
- [4] Naik P K, Jay D A. Distinguishing human and climate influences on the Columbia River: Changes in mean flow and sediment transport. *Journal of hydrology*, 2011, 404: 259-277.
- [5] 董磊华, 熊立华, 于坤霞, 等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展. *水科学进展*, 2012, 23(2): 78-285. [Dong Leihua, Xiong Lihua, Yu Kunxia, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 278-285.]
- [6] 赵雪花, 黄强. 黄河上游径流变化的影响因素分析研究. *自然科学进展*, 2004, 14(6): 700-704 [Zhao Xuehua, Huang Qiang. Factors controlling the runoff change in the upper Yellow River. *Advances in Natural Science*, 2004, 14(6): 700-704.]
- [7] 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应. *水科学进展*, 2009, 20(2): 153-158. [Zhang Jianyun, Wang Guoqing, He Ruimin, et al. Variation trends of runoffs in the Middle Yellow River basin and its response to climate change. *Advances in Water Science*, 2009, 20(2): 153-158.]
- [8] 孔岩, 王红, 任立良. 黄河入海径流变化及影响因素. *地理研究*, 2012, 31(11): 1981-1990. [Kong Yan, Wang Hong, Ren Liliang. Analysis of the runoff variation of the Yellow River to the sea and its influencing factors. *Geographical Research*, 2012, 31(11): 1981-1990.]

- [9] 曹建廷, 秦大河, 罗勇, 等. 长江源区 1956-2000 年径流量变化分析. 水科学进展, 2008, 18(10): 29-33. [Cao Jianting, Qing Dahe, Luo Yong, et al. Discharge changes of the Yangtze River in source area during 1956- 2000. *Advances in Water Science*, 2008, 18(10) : 29-33.]
- [10] 叶许春, 张奇, 刘健, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流变化的影响研究. 冰川冻土, 2009, 31(5): 835-842. [Ye Xuchun, Zhang Qi, Liu Jian, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff of Poyang Lake Catchment. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 835-842.]
- [11] 赵军凯, 李九发, 戴志军, 等. 长江宜昌站径流变化过程分析. 资源科学, 2012, 34(12): 2306-2315. [Zhao Junkai, Li Jiufa, Dai Zhijun, et al. Analysis the runoff variation of Yangtze River in Yichang. *Resources Science*, 2012, 34(12): 2306-2315.]
- [12] 李占玲, 徐宗学, 巩同梁. 雅鲁藏布江流域径流特性变化分析. 地理研究, 2008, 27(2): 353-361. [[Li Zhanling, Xu Zongxue, Gong Tongliang. Characteristics of runoff variation in the Yarlung Zangbo River basin. *Geographical Research*, 2008, 27(2): 353-361.]
- [13] 曹建廷, 秦大河, 康尔泗, 等. 青藏高原外流区主要河流的径流变化. 科学通报, 2005, 50(21): 2042-2047. [Cao Jianting, Qing Dahe, Kang Er'si, et al. Changes of runoff of main rivers in the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(21): 2042-2047.]
- [14] 刘春霖, 刘志雨, 谢正辉. 近 50 年海河流域径流的变化趋势研究. 应用气象学报, 2004, 15(4): 385-393. [Liu Chunqin, Liu Zhiyu, Xie Zhenghui. Study of trends in runoff for the Haihe River basin in recent 50 years. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, 15(4): 385-393.]
- [15] 叶柏生, 杨大庆, 韩添丁, 等. 近 50a 西北地区年径流变化反映的区域气候差异. 冰川冻土, 2006, 28(3): 307-311. [Ye Bosheng, Yang Daqing, Han Tianding, et al. Regional patterns of climate change in Northwest China during the last 50 years: Viewed from annual discharge change. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(3): 307-311.]
- [16] 丁永建, 叶柏生, 韩添丁, 等. 过去 50 年中国西部气候和径流变化的区域差异. 中国科学: D 辑, 2007, 37(2): 206-214. [Ding Yongjian, Ye Bosheng, Ha Tianding, et al. Regional difference of annual precipitation and discharge variation over west China during the last 50 years. *Science in China Series D*, 2007, 37(2): 206-214.]
- [17] 刘红运, 陈金安. 澧水流域开发与江垭水利枢纽工程建设. 水力发电, 1999, (7): 1-5. [Liu Hongyun, Cheng Jin'an. Development of Lishui River Basin and construction of Jiangya Water Control Project. *Water Power*, 1999, (7): 1-5.]
- [18] 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. 应用生态学报, 2011, 22(11): 3073-3080. [Xu Leilei, Liu Jinglin, Jin Chagnjie, et al. Baseflow separation methods in hydrological process research: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 3073-3080.]
- [19] 黄国如. 流量过程线的自动分割方法探讨. 灌溉排水学报, 2007, 26(1): 73-78. [Huang Guoru. Base flow separation from daily flow hydrograph using automated techniques. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(1): 73-78.]
- [20] Chapman T G, Maxwell A I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments. In: *Hydrology and Water Symposium*. Institution of Engineers Australia, Hobart. 1996. 539-545.
- [21] Chapman T. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*, 1999, 13: 701-714.
- [22] Rustomji P, Zhang X P, Hairsine P B, et al. River sediment load and concentration responses to changes in hydrology and catchment management in the Loess Plateau region of China. *Water Resource Research*, 2008, 44: W00A04, doi: 10.1029/2007WR006656.
- [23] Brown A E, Zhang L, McMahon T A, et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 2005, 310: 28- 61.
- [24] 胡珊珊, 郑红星, 刘昌明. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响. 地理学报, 2012, 67(11): 62-70. [Hu Shanshan, Zheng Hongxing, Liu Changming. Assessing the impacts of climate variability and human activities on streamflow in the water source area of Baiyangdian Lake. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 62-70.]
- [25] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题. 水文, 2010, 30(4): 47-51. [Mu Xingmin, Zhang Xiuqin, Gao Peng, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology. *Journal of Chinese Hydrology*, 2010, 30(4): 47-51]
- [26] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究. 水科学进展, 2007, 18(2):

- 230-234. [Zhang Jianyun, Zhang Silong, Wang Jinxing, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2) : 230-234.]
- [27] 胡春宏, 王延贵, 张燕菁, 等. 中国江河泥沙变化趋势与主要影响因素. *水科学进展*, 2010, 21(4): 524-532. [Hu Chunhong, Wang Yangui, Zhang YanJing, et al. Variation tendency of runoff and sediment load in China major rivers and its causes. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 524-532.]
- [28] 刘成, 何耘, 张红亚. 水沙动态图法分析中国主要江河泥沙变化. *水科学进展*, 2008, 19(3): 317-324. [Liu Cheng, He Yun, Zhang Hongya. Trends analysis of the water and sediment loads of the main rivers in China using water-sediment diagram. *Advances in Water Science*, 2008, 19(3): 317-324.]
- [29] 覃红燕, 谢永宏, 邹冬生. 湖南四水入洞庭湖水沙演变及成因分析. *地理科学*, 2012, 32(5): 609-615. [Qin Hongyan, Xie Yonghong, Zou Dongsheng. Changes of runoff and sediment discharge into Dongting Lake from the Four Rivers in Hunan Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(5): 609-615.]
- [30] 易帆, 宋维胜. 澧水中上游径流变化规律研究. *水电能源科学*, 2010, 28(9): 15-19. [Yi Fan, Song Weisheng. Research on variation of runoff in upper and middle reaches of Lishui River. *Water Resources and Power*, 2010, 28(9): 15-19.]
- [31] 王礼先, 张志强. 干旱地区森林对流域径流的影响. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 439-444. [Wang Lixian, Zhang Zhiqiang. Impacts of forest vegetation on watershed runoff in dryland areas. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 439-444.]
- [32] Coe M T, Latrubesse E M, Ferreira M E, et al. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. *Biogeochemistry*, 2011, 105: 119-131.
- [33] 刘昌明, 钟骏襄. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析. *地理学报*, 1978, 33(2): 112-126. [Liu Changming, Zhong Junxiang. The influence of forest cover upon annual runoff in the Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 1978, 33(2): 112-126.]
- [34] 许炯心, 孙季. 近50年来降水变化和人类活动对黄河入海径流通量的影响. *水科学进展*, 2003, 14(6): 690-695. [Xu Jiongxin, Su Ji. Influence of precipitation and human activities on water fluxes from the Yellow River into the sea in the past 50 year. *Advances in Water Science*, 2003, 14 (6): 690-695.]
- [35] 许炯心, 孙季. 长江上游干支流悬移质含沙量的变化及其原因. *地理研究*, 2008, 27(2): 332-342. [Xu Jiongxin, Su Ji. Temporal variation in suspended sediment concentration of the upper Changjiang River and its tributaries. *Geographical Research*, 2008, 27(2): 332-342.]
- [36] 吴建平, 吴天乐, 田育新, 等. 坡耕地不同植被恢复对土壤理化性质的影响. *湖南林业科技*, 2006, 33(6): 41-43. [Wu J P, Wu T L, Tian Y X, et al. Effect of revegetation on soils for slope lands. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2006, 33(6): 41-43.]
- [37] 陈业银, 田育新, 李锡泉, 等. 女儿寨小流域林地土壤渗透性能研究. *湖南林业科技*, 2006, 33(5): 14-17. [Cheng Yeyin, Tian Yuxin, Li Xiquan, et al. Research on soil permeability of small area forest watershed ecosystem of Nverzhai. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2006, 33(5): 14-17.]
- [38] 杨大文, 雷慧闽, 丛振涛. 流域水文过程与植被相互作用研究现状评述. *水利学报*, 2010, 41(1): 1142-1179. [Yang Dawen, Lei Huimin, Cong Zhentao. Overview of the research status in interaction between hydrological processes and vegetation in catchment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(1): 1142-1179.]

Recent change of runoff and its components of baseflow and surface runoff in response to climate change and human activities for the Lishui watershed of southern China

ZHENG Mingguo, SUN Liying

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstracts: Temporal change of baseflow and surface runoff, two components of river runoff, receives little attention though the runoff variation has long been an important concern worldwide. This study made a comparison of hydrological regimes in the Lishui river watershed, a mountain watershed in southern China between two periods of 1950s-1985 and 2007-2011. We examine not only the temporal change of runoff and its FDC (flow duration curve), but also the temporal change of its two components and their FDCs. The data used mainly involves the long-term observations at four gauging stations, 13 rainfall stations and two meteorological stations. Annual precipitation remains almost unchanged between the two periods compared with the former period. The latter period, however, was characterized by a high forest cover (about 70% in 2009) and numerous reservoirs. The substantial change in land surfaces induced by human activities makes no statistically significant difference both in annual runoff volume and its two components, which varies by about 10% between two periods. Human activities, however, play an important role at the daily time scale. Our examinations on FDCs show a differential response of the surface runoff and the baseflow to human activities. Responding to the reservoir operations and the high vegetating cover after 2007, the daily surface-runoff discharge decreases in the high-flow period and increases in other periods. The daily baseflow discharge remains insensitive to human activities, with FDCs after 2007 coinciding with those before 1985 except in the low-flow period. Our result may be typical of the humid southern China and is thus indicative of other rivers in southern China.

Key words: runoff change; baseflow; forest; reservoir; Lishui River