
Study on the Variation Characteristics of Runoff and Sediment in Taizihe Watershed, Liaoning Province

Liu Heping*, Wang Xiuying, Feng Lin, Liang Fengguo

Hydrology Bureau of Liaoning Province, Shenyang, China

Email address:

geohpliu@126.com (Liu Heping), wangxiuying0000@163.com (Wang Xiuying), 312050691@qq.com (Feng Lin), 2441675801@qq.com (Liang Fengguo)

*Corresponding author

To cite this article:

Liu Heping, Wang Xiuying, Feng Lin, Liang Fengguo. Study on the Variation Characteristics of Runoff and Sediment in Taizihe Watershed, Liaoning Province. *Science Discovery*. Vol. 6, No. 6, 2018, pp. 444-454. doi: 10.11648/j.sd.20180606.21

Received: July 18, 2018; **Accepted:** November 5, 2018; **Published:** November 8, 2018

Abstract: Based on runoff and suspended sediment of 9 stream gauging stations and precipitation of 31 rainfall stations from 1973 to 2011 in Taizihe River watershed, areal composition, temporal trend and relationship of runoff and sediment were analyzed. The results showed that the feature of runoff and sediment came from different areas existed above Benxi hydrometric station, while runoff and sediment came from the same area in the Benxi-Liaoyang section, where the erosion and sediment yield were severe, with the percentages of sediment discharge from tributaries larger than the percentages of area and runoff, however, because of reservoirs, a large amount of sediment deposited in this section. The feature of runoff and sediment came from different areas also existed in Liaoyang-Tangmashai section, with Liaoyang and Lishan as the source of runoff and other areas of sediment. For the 9 hydrometric stations, the average correlation coefficient between precipitation and runoff depth, modulus of sediment yield, and sediment concentration was 0.895, 0.607, and 0.315, respectively, indicating a decreasing correlation. The Mann-Kendall trend test showed there was no trend in precipitation, and insignificant decreasing trends in runoff depth and runoff coefficient. There were 5 hydrometric stations showed significant decreasing trend in modulus of sediment yield and 1 station significant increasing trend. There were 6 hydrometric stations showed significant decreasing trend in sediment concentration and 1 station significant increasing trend. The double mass curves analysis showed that under the same precipitation, the runoff depth of only 3 hydrometric stations decreased from 1997, and under the same runoff depth, decreasing trend in the modulus occurred for 6 hydrometric stations, increasing trend for 1 station, and no trend for 2 stations.

Keywords: Runoff, Sediment, Variation Characteristics, Runoff and Sediment Relationship, Taizihe River

辽宁省太子河流域水沙变化特征研究

刘和平*, 王秀颖, 冯琳, 梁凤国

辽宁省水文局, 沈阳, 中国

邮箱

geohpliu@126.com (刘和平), wangxiuying0000@163.com (王秀颖), 312050691@qq.com (冯琳), 2441675801@qq.com (梁凤国)

摘要: 采用太子河流域9处水文站水沙数据、31处雨量站的雨量数据, 分析了该流域水沙组成、变化趋势和水沙关系演变, 结果表明: (1) 本溪站以上流域存在水沙异源; 本溪-辽阳区间水沙同源, 且侵蚀较为严重, 但是由于水库拦蓄, 大量泥沙在区间内沉积; 辽阳-唐马寨区间水沙异源特征明显, 径流主要来源于辽阳和立山两站, 而泥沙另有其源。(2) 各站径流深、输沙模数、含沙量与降水量的相关性依次降低, 相关系数平均分别为0.895、0.607、0.315。(3) Mann-Kendall趋势检验表明, 太子河流域降水量无增减趋势; 各水文站径流深减小趋势不显著; 对于输沙模数, 南甸、本溪、桥头、

辽阳、唐马寨等5站为减小趋势，梨庇峪呈增加趋势；对于含沙量，南甸、本溪、桥头、辽阳、立山、唐马寨等6站为减小趋势，梨庇峪显著增加。（4）双累积曲线分析表明，仅南甸、梨庇峪、二道河子3站从1997年起，相同降水量产生的径流深减小；在相同的径流深下，桥头、本溪、桥头、辽阳、立山、唐马寨等6站侵蚀模数有减小趋势，梨庇峪站有增加趋势。

关键词：径流，泥沙，变化特征，水沙关系，太子河

1. 引言

水土资源是人类生存和发展的重要物质基础，是进行农业生产的基本条件；同时，河流水沙条件是河流演变动力因素；因此，对河流径流、泥沙演变及水沙关系的研究历来受到人们的重视。对于我国的长江、黄河两大流域，研究地比较充分。王延贵等[1]分析了长江上游干支流控制站的水沙特性变化、水沙搭配关系与输沙能力的变化及人类活动的影响，认为水库建设、水土保持、河道采砂、过度开发等人类活动是影响水沙变化的主要因素。钟亮等[2]针对长江重庆出城区河段的水沙变化特征和水沙关系变化做了重点研究。覃红燕等[3]分析了入洞庭湖的荆江三口水沙变化特征及驱动力，认为年径流量和年输沙量趋势性改变是由于上游径流量的不断减少及诸多人为工程共同作用的结果，其中裁弯和三峡工程的影响最为明显。张晓华等[4]分析了黄河上游沙漠宽谷河段水沙变化特点、水沙关系及趋势，指出该河段存在水沙异源现象，并从降雨、支流来水来沙、水库运用、灌区引水引沙和河道冲淤调整等方面分析了来水来沙变化的自然和人为因素。冉大川等[5]分析了黄河头道拐站水沙来源空间分布，结果表明头道拐水文站径流主要来自兰州以上，泥沙主要来自兰州-头道拐区间支流，影响头道拐水沙来源空间分布的主要因素有气候波动、龙羊峡和刘家峡水库调节、工农业用水、水土保持综合治理等。李庆云等[6]的研究表明黄土高原藉河流域近50年输沙量呈显著下降趋势，并于1976年发生突变，70年代中期后坡耕地明显减少而梯田大范围增加，对输沙下降影响显著。在我国东北地区，相关研究主要集中在松花江、辽河等流域。王双银等[7]研究了松花江干流输沙量变化特征，结果表明该流域年输沙量主要受径流量的影响，且有比较一致的变化趋势，但两者的变异点不同步。李建伟等[8]以整个松花江流域为研究对象，分析流域产沙时间变化特征及其影响因素，结果表明1978~1982年间，由于大量土地开垦和不合理农业活动加速土壤侵蚀，导致流域单位降雨造成的输沙量普遍开始显著增加；1995~2002年由于土地利用变化和水保措施实施共同作用，超过1/3的流域单位降雨造成的输沙量开始减少。张燕菁等[9]研究了辽河流域干支流水沙特征，结果表明辽河流域水沙分布具有东水西沙的特点。郭维东和郭文卓[10]研究了辽河下游水沙特性后发现，辽河下游泥沙主要由上游暴雨携带而来。

辽河主要流经辽宁省西北部和中部，该区主要为半干旱半湿润气候区，而辽宁省东南部为湿润地区，年降水量较大，有关该区河流水沙变化及水沙关系的研究较少。本文以辽宁省湿润、半湿润地区的太子河流域为研究区域，以干流及主要支流水文站观测的径流泥沙资料为基础，分

析太子河流域不同区间径流、泥沙的组成特征，采用多种方法研究20世纪70年代至今的径流、输沙时间变化特征，并分析水沙关系演变，以揭示本流域径流泥沙演变特征，为流域水资源开发利用与管理、重大水利工程布局、水土保持规划和环境治理提供科学依据。

2. 资料与方法

2.1. 研究区概况

太子河发源于辽宁省新宾县红石砬子山，流经抚顺、本溪、辽阳、鞍山、营口等五个市，流域面积13883 km²，河长413 km。根据全国第一次水利普查，太子河为浑河一级支流，于海城市三岔河汇入浑河。本文以太子河为研究对象。太子河葭窝水库以上流域面积约占全流域的60%，地势陡峻，山岭连绵，植被较好；葭窝水库至辽阳区间约占全流域的4%，为丘陵地带，地势较缓，植被较差，水土流失较严重；辽阳以下为平原区，河道弯曲，断面变浅，坡度缓，泄洪能力差，易发生洪涝灾害。流域多年平均降水量在700~900 mm；降水量年内分配不均，6~9月份约占全年的70~80%。

2.2. 资料来源

基于站点代表性、资料完整性原则，共收集了本溪、辽阳、唐马寨、南甸、桥头、梨庇峪、二道河子、郝家店、立山等9个水文站逐日径流量和含沙量（悬移质）资料。原始资料中各水文站资料起始年限不一，为使各站径流、泥沙变化趋势具有可比性，本文各水文站资料起始年限统一采用1973年，止于2011年，共39年。9个水文站中，本溪、辽阳、唐马寨三个水文站位于太子河干流，集水面积分别为4324 km²、8082 km²和11203 km²；南甸水文站位于本溪上游支流南太子河，汇入观音阁水库；桥头、梨庇峪、二道河子、郝家店水文站在本溪-辽阳区间，桥头、梨庇峪两站分别位于细河和兰河，均汇入葭窝水库，二道河子和郝家店水文站分别位于汤河和汤河西支，均汇入汤河水库；立山水文站在辽阳-唐马寨区间，位于南沙河。观音阁水库建成于1995年9月，葭窝水库建成于1974年11月，汤河水库建成于1969年12月。

收集太子河流域31个雨量站的年降水量资料，资料年限均为1973~2011年。根据各雨量站与各水文站的位置关系，将相关雨量站的算数平均值作为下游水文站控制流域内的面平均降水量，用于分析降水与径流和输沙的关系。太子河流域水系、水文站、雨量站分布见图1。

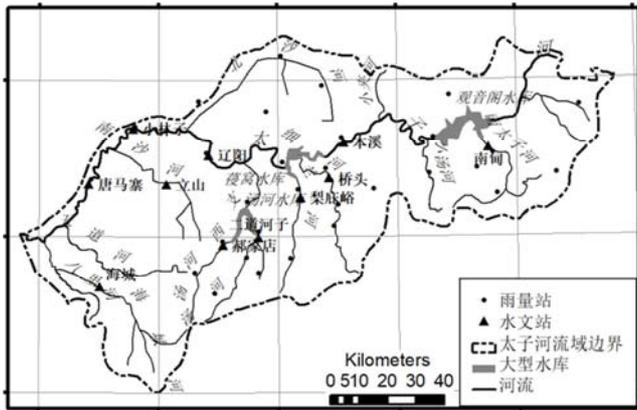


图1 研究区水系及站点分布。

2.3. 分析方法

根据收集的降水量、径流及泥沙数据，计算各水文站的年降水量、年径流量、年径流深、年输沙量、年输沙模数、年均含沙量，分析各指标沿程变化规律及水沙空间组成。对于水沙变化趋势，在绘制逐年变化过程线的基础上，首先采用10年滑动平均过滤掉高频振荡，着重显示年代际变化特征；进一步采用Mann-Kendall趋势检验法[11]定量评价各指标变化趋势的显著性及年变化率。对于降雨-径流关系和径流-泥沙关系，首先采用双累积曲线法[12]分析两者之间的关系，绘制降雨-径流、径流-泥沙双累积曲线，根据双累积曲线斜率找到两者关系发生变化的年份；在此基础上，对关系变化前后的年份序列，分别点绘降雨-径流和径流-泥沙散点图，分析两者函数关系的变化。

3. 结果分析

3.1. 流域水沙空间分布

3.1.1. 流域水沙分布特征

表1为太子河流域不同区间多年平均（1973~2011年）的水沙组成。南甸与本溪站相比，年径流量从 $3.4 \times 10^8 \text{ m}^3$

表1 太子河流域不同区间多年平均（1973~2011年）水沙组成。

| 干流水文站 | 区间支流水文站 | 流域面积/km ² | 年降水量/mm | 年径流量/10 ⁸ m ³ | 年径流深/mm | 年输沙量/10 ⁴ t | 年输沙模数 /t/km ² |
|-------|---------|----------------------|---------|-------------------------------------|---------|------------------------|--------------------------|
| — | 南甸 | 765 | 814.6 | 3.4 | 443.9 | 4.9 | 63.4 |
| 本溪 | — | 4324 | 816.7 | 13.2 | 305 | 35.1 | 81.1 |
| — | 桥头 | 1023 | 751 | 3.2 | 313.9 | 48.8 | 477.4 |
| — | 梨庇峪 | 417 | 748.8 | 0.9 | 224.4 | 16.7 | 400.2 |
| — | 二道河子 | 523 | 710.8 | 1.2 | 233.1 | 4.1 | 79.3 |
| — | 郝家店 | 431 | 729.9 | 0.8 | 185.7 | 3.7 | 86 |
| 辽阳 | — | 8082 | 777.6 | 16.6 | 205.8 | 25.4 | 31.5 |
| — | 立山 | 330 | 699.6 | 0.9 | 260.5 | 12.9 | 402.7 |
| 唐马寨 | — | 11203 | 758.3 | 23.7 | 211.5 | 82.8 | 73.9 |

3.1.2. 流域水沙异源特征

比较各区间支流水文站的年径流量、年输沙量占下游干流水文站的年径流量、年输沙量的比例和相应集水面积比例（图 2），可进一步揭示流域侵蚀水沙来源特征。南甸站面积占本溪站的17.7%，而径流量的占比达到了25.7%，

增加到 $13.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，但是，年径流深两者大小顺序正好相反，分别为443.9 mm和305 mm。对于本溪-辽阳区间，本溪站年径流量 $13.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，桥头、梨庇峪、二道河子、郝家店等支流站的年径流量分别为 $3.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，均小于辽阳站年径流量 $16.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，但各站之和等于 $19.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，大于辽阳站；从年均径流深看，干流本溪站、支流桥头、梨庇峪、二道河子站径流深分别为305 mm、313.9 mm、224.4 mm、233.1 mm，只有郝家店径流深较小，为185.7 mm，而辽阳站仅205.8 mm，小于上游各站的平均值。这可能是由于本溪-辽阳区间有蓼窝、汤河等两座大型水库，水库向下游的输水有相当一部分是通过管道，这一部分水量无法在下游的辽阳站监测到，使得辽阳站的径流量反而小于上游干支流来水量之和，径流深小于上游平均值。对于辽阳-唐马寨区间，辽阳、立山站年径流量分别为 $16.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，两者之和小于唐马寨站的 $23.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；辽阳、唐马寨站年均径流深分别为205.8 mm和211.5 mm，后者略有增加，区间的立山站为260.5 mm，大于唐马寨站，表明该区间可能有灌区回归水、城乡居民生活排水汇入，等使得该区间来水量增加。

由表 1可以看出，南甸与本溪比较，两者年输沙量分别为 $4.9 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $35.1 \times 10^4 \text{ t}$ ，后者为前者的7倍，两站的年输沙模数分别为 63.4 t/km^2 和 81.1 t/km^2 ，后者为前者的1.3倍。在本溪-辽阳区间，桥头、梨庇峪、二道河子、郝家店等支流站输沙量分别为 $48.8 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $16.7 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $4.1 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $3.7 \times 10^4 \text{ t}$ ，本溪和四个支流站的年输沙量之和达到 $108.4 \times 10^4 \text{ t}$ ，而辽阳的输沙量仅为 $25.4 \times 10^4 \text{ t}$ ，约为上游来沙量的1/4，这可能主要是由于该区间蓼窝、汤河两座大型水库拦沙作用所致。对于年均输沙模数，桥头、梨庇峪站高达 477.4 t/km^2 和 400.2 t/km^2 ，二道河子和郝家店站也达到 79.3 t/km^2 和 86 t/km^2 ，均大于辽阳站的 31.5 t/km^2 ，这也表明该区间水库对泥沙的拦蓄作用非常强烈。在辽阳-唐马寨区间，支流立山站年输沙量为 $12.9 \times 10^4 \text{ t}$ ，而唐马寨站年输沙量增加至 $82.8 \times 10^4 \text{ t}$ ，表明该区间侵蚀产沙显著，立山的年输沙模数高达 402.7 t/km^2 ，恰好证明了这一点。

输沙量的比例为14.0%，说明南甸站以上流域是本溪站径流的重要来源地，而不是泥沙主要来源，即本溪站以上流域存在一定程度的水沙异源特征。南甸、本溪两站的输沙模数分别为 63.4 t/km^2 和 81.1 t/km^2 ——南甸站来沙经观音阁水库拦蓄，而本溪站的输沙模数仍然大于南甸站，则反

过来说明，对于本溪站以上区间，除南甸站以上的其他地区侵蚀产沙量很大。

对于本溪-辽阳区间，本溪站由于集水面积占到辽阳站的一半以上，再加以径流深和输沙模数大，分别达到305 mm和81.1 t/km²，因而对辽阳站的径流量和输沙量的贡献分别占到79.3%和138.2%；桥头站的特点为水大沙多，面积占比仅12.7%，而由于径流深和输沙模数分别高达313.9 mm和477.4 t/km²，故对辽阳站的径流和泥沙贡献分别达到19.3%和192.1%，该站集水面积和来水量仅为本溪站的1/4，而输沙量却达到溪站的1.4倍。梨庇峪、二道河子两站对辽阳站径流量的占比与集水面积的占比持平，而输沙量占比显著偏高，分别为65.7%和16.1%，尤其前者，达到集水面积占比的10倍。郝家店站径流量占辽阳站的比例小于其集水面积的占比，而输沙量的占比大于集水面积的占比，说明郝家店站存在水小沙多的特征。总体来看，该区间各水文站集水面积占辽阳站的83.2%，而贡献了116.3%的径流量、426.7%的输沙量，表明该区间来水量丰富，侵蚀较为严重，来沙量巨大，但是由于筏窝、汤河两座大型水库

对径流的调节、对泥沙的拦蓄，径流量和输沙量均小于上游来水、来水总和。

对于辽阳-唐马寨区间，辽阳站集水面积占唐马寨站比例为72.1%，年径流量的占比为70.2%，年输沙量占比为30.7%，径流量的占比基本与集水面积的占比持平，而输沙量显著偏小，与集水面积和径流量不相称，说明辽阳站存在水多沙少的特征，这仍然与辽阳站以上大型水库的拦沙作用有关。立山站集水面积占唐马寨站的比例为2.9%，径流量和输沙量的占比分别为3.6%和15.6%，说明立山站以上流域内侵蚀产沙极为严重；事实上，立山站输沙模数高达402.7 t/km²，仅次于桥头站，但是由于其集水面积小，输沙量对唐马寨站的贡献并不突出。总体来说，辽阳、立山两站输沙量之和占唐马寨站输沙量的46.3%，而集水面积和径流量的占比分别为75.1%和73.8%，表明辽阳-唐马寨区间存在水沙异源，即径流主要来源于辽阳和立山两站，而泥沙另有其源。据推算，该区间除辽阳、立山控制的流域面积外，其余地区的平均输沙模数可高达159.4 t/km²，而具体的空间分布有待于进一步研究。

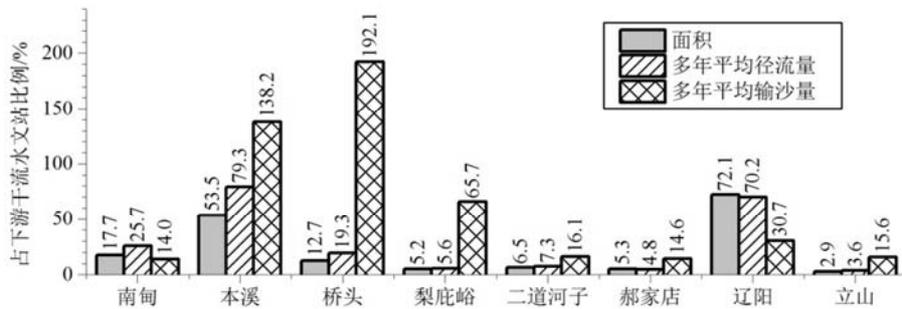


图2 太子河流域代表站集水面积、多年平均年径流量和年输沙量占下游干流水文站的比例。

3.2. 水沙变化趋势

由于降水量、流域下垫面等因素变化的影响，各站水沙变化特征也并不一致。图 4 为太子河流域各水文站年径流深、年输沙模数、年均含沙量1973~2011年的变化过程。从图中可看出，各站径流深变化过程较为一致，且均与流域降水量变化过程一致（图 3）。1973~1976年各站径流深逐渐减小，至1981年持续偏低；之后逐渐增加，1985、1986两年出现显著的峰值；此后出现迅速减小后又有所增加的过程，至1990、1991年出现较小的峰值；经过两年的极低值之后，于1994、1995、1996三年径流深显著增大，1995年更为突出；此后径流深整体偏小，2001年、2005年2010年出现大值，尤其2010年，其值显著大于前两者。

输沙模数和含沙量变化过程与上述径流深不尽一致。在1985、1986、1995、2001、2010等年份，降水量、径流深出现了极大值，对应年份多数站点输沙模数和含沙量也出现了极大值，而其余年份输沙模数和含沙量对径流深和降水量的响应不明显。例如桥头站，在1973~1986年，径流深先减小后增加，而输沙模数和含沙量变化过程正好相反。梨庇峪站90年代中期以前径流深年际变化显著，而输沙模数和含沙量持续偏低；90年代中期至2009年径流深总体偏小，而输沙模数和含沙量自2005年起逐年增加；2010年径流深和输沙模数均达到极值，而含沙量则在2009

年达到极值，2010年反而下降。再如唐马寨站，在1973~1984年，径流深和输沙模数基本为逐渐减小的过程，而此时含沙量持续保持在较高的水平；1985、1986两年径流深、输沙模数均达到极值，而含沙量反而下降。

由上述分析可以看出，径流深变化过程与降水量变化过程基本一致，输沙模数与降水量变化一致性较差，含沙量更差。这可以从三个变量之间的相关系数反映出来。在9个水文站中，径流深与降水量的相关系数最小值为0.832，最大值为0.937，平均为0.895；输沙模数与降水量的相关系数的最小值为0.273，最大值为0.807，平均为0.607；含沙量与降水量的相关系数存在负值，以其绝对值进行统计，最小值为0.024，最大值为0.623，平均仅0.315。

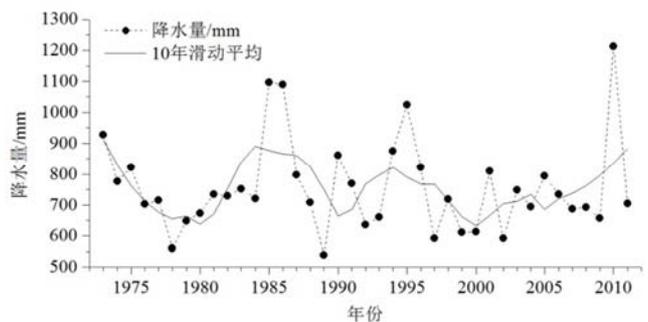
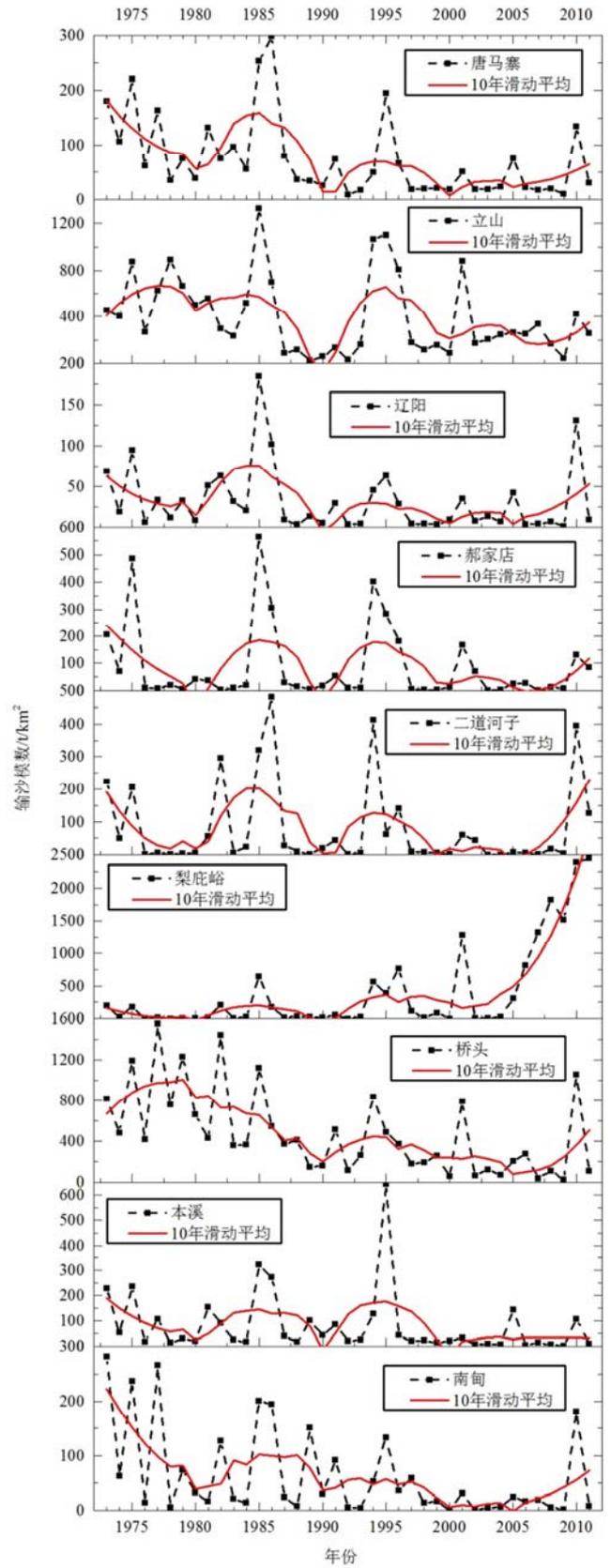
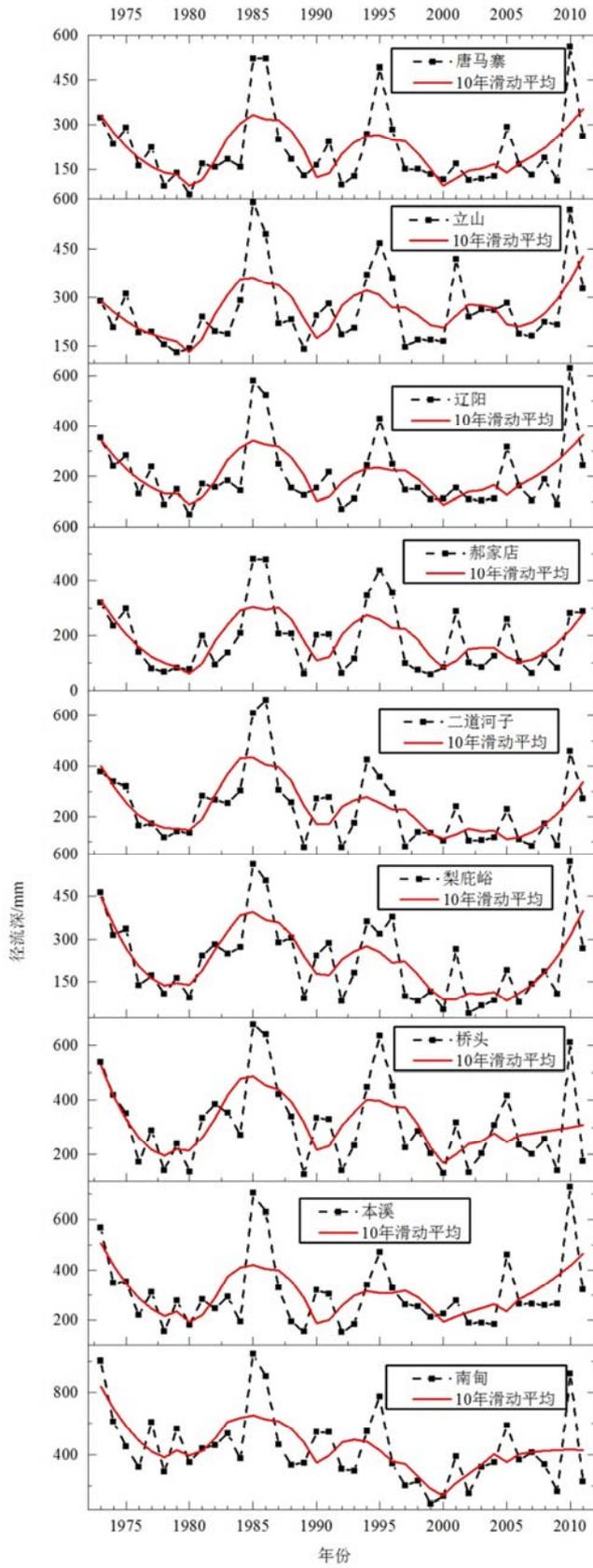


图3 太子河流域降水量变化过程。



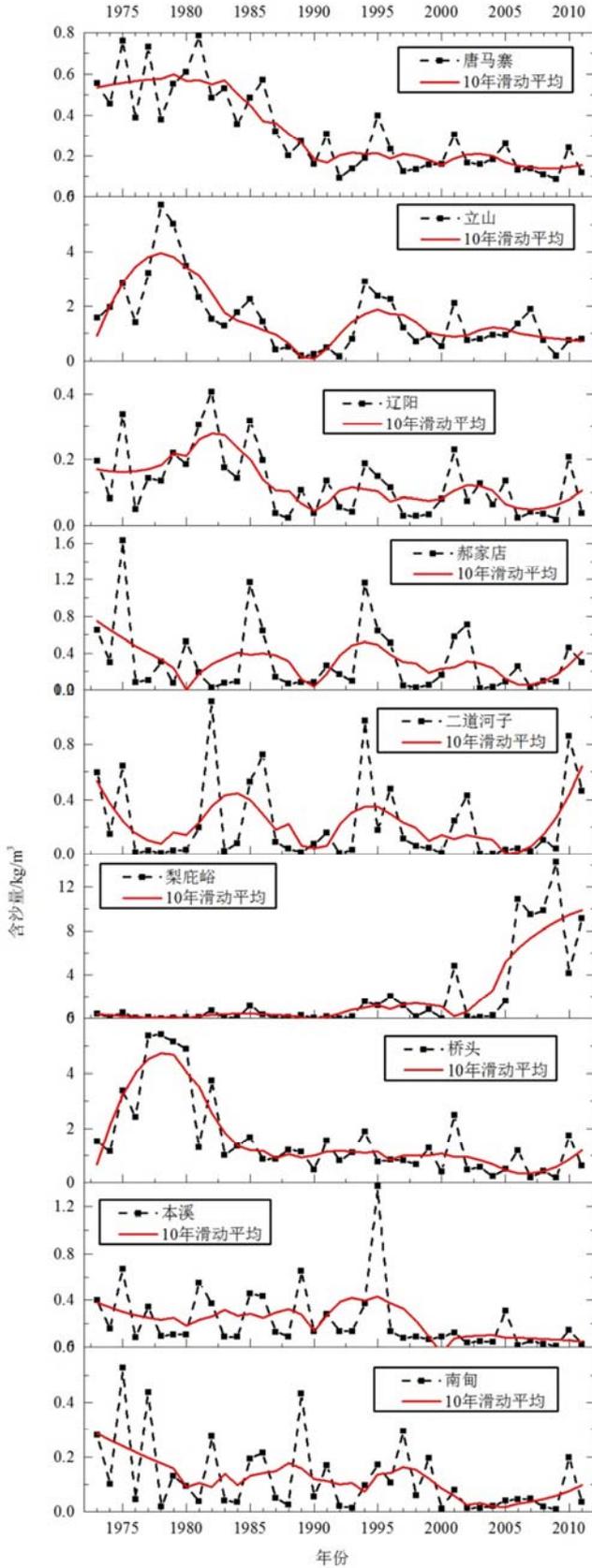


图4 太子河流域径流深、输沙模数、含沙量变化过程。

进一步利用Mann-Kendall趋势检验法分析了各水文站各指标的变化趋势(表 2)。各水文站降水量均无显著变化趋势,故表 2中省略其结果。在各水文站降水量无明显变化趋势的条件下,仅南甸和二道河子站的径流深的减小趋势达到了0.05显著水平,其余各站均无显著变化趋势。输沙模数的情况大为不同:9个代表站中,仅二道河子、郝家店、立山3站输沙模数无显著变化趋势,其余6个站中,南甸、本溪、桥头、辽阳、唐马寨等5站为减小趋势,显著水平达到0.01或0.001,梨底峪输沙模数呈增加趋势,显著水平达0.01。对于含沙量,仅二道河子、郝家店2站无变化趋势,其余7站中,南甸、本溪、桥头、辽阳、立山、唐马寨站为减小趋势,显著水平达到0.05至0.001;梨底峪含沙量显著增加,显著水平达0.001。

表2 太子河流域水沙化Mann-Kendall趋势检验。

| 水文站 | | 南甸 | 本溪 | 桥头 | 梨底峪 |
|------|---------|---------|---------|----------|---------|
| 径流深 | Z | -2.3107 | -0.3871 | -1.488 | -1.6694 |
| | Sig | 0.0209* | 0.6987 | 0.1367 | 0.0950 |
| | β | -7.3306 | -0.4689 | -2.9388 | -3.0925 |
| 输沙模数 | Z | -2.9274 | -3.0726 | -4.3189 | 3.2178 |
| | Sig | 0.0034† | 0.0021† | <0.0001‡ | 0.0013† |
| | β | -1.4405 | -1.3245 | -17.47 | 8.5372 |
| 含沙量 | Z | -2.492 | -3.6049 | -4.5726 | 3.9678 |
| | Sig | 0.0127* | 0.0003‡ | <0.0001‡ | 0.0001‡ |
| | β | -0.0021 | -0.0049 | -0.0467 | 0.0532 |

| 水文站 | | 二道河子 | 郝家店 | 辽阳 | 立山 | 唐马寨 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 径流深 | Z | -1.9842 | -0.5081 | -0.9679 | 0.9194 | -0.738 |
| | Sig | 0.0472* | 0.6114 | 0.3331 | 0.3579 | 0.4605 |
| | β | -3.0613 | -0.5425 | -1.1462 | 1.1762 | -0.8646 |
| 输沙模数 | Z | -0.75 | -1.2339 | -2.3349 | -1.5242 | -3.5688 |
| | Sig | 0.4533 | 0.2183 | 0.0196* | 0.1275 | 0.0004‡ |
| | β | -0.1407 | -0.3319 | -0.4269 | -7.5189 | -2.0828 |
| 含沙量 | Z | -0.2661 | -1.1129 | -2.9032 | -2.7581 | -5.2742 |
| | Sig | 0.7901 | 0.2658 | 0.0037† | 0.0058† | <0.0001‡ |
| | β | -0.0003 | -0.0021 | -0.0035 | -0.0383 | -0.1214 |

注:上标*表示Z值显著水平达到0.05,†表示Z值显著水平达到0.01,‡表示Z值显著水平达到0.001。

3.3. 水沙关系及其演变

上文分析表明,径流深变化过程与降水量变化过程基本一致,输沙模数与降水量变化一致性较差,含沙量更差,这有可能导致各站降雨-径流关系、径流-泥沙关系发生变化。

3.3.1. 降雨-径流关系及其演变

分析9个水文站的降水量-径流深双累积曲线,发现仅南甸、梨底峪、二道河子3个站降水量-径流深双累积曲线发生明显转折(图 5),发生转折的年份均为1997年,从1997年开始,3个站降水量-径流深双累积曲线向下方偏折,表明与此前相比,相同的降水量产生的径流深有所减小,即降雨-径流关系发生了较为显著的变化。其余各站降水量-径流深双累积曲线几乎为一条直线,即在整个研究年限,降雨-径流关系未发生显著变化。

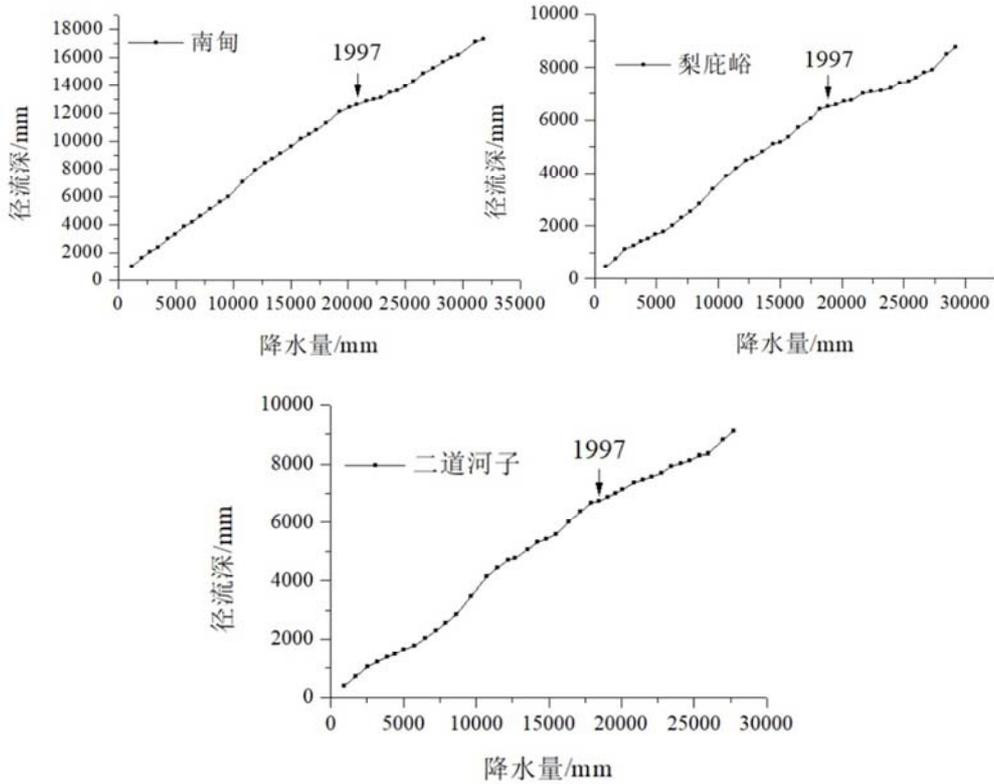
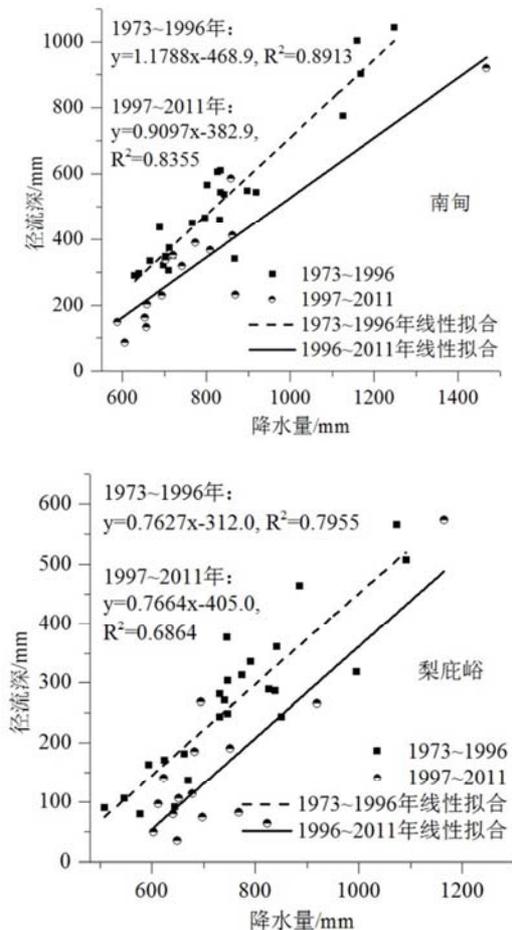


图5 太子河流域部分代表水文站降水量-径流深双累积曲线。

进一步以1997年为分界点，将研究年限分为1973~1996年和1997~2011年两段，分别点绘3站这两个时间段的降水量-径流深散点图，并采用直线方程分别拟合两个时间段的降水量-径流深关系式，结果见图6。从散点图看出，1973~1996年的降水量-径流深点据位于1997~2011年的上方，说明降水量相同时，前者产生的径流深较大，这与双累积曲线的结果一致。

从回归方程看出，对于1997~2011年，南甸和二道河子站降水量-径流深之间直线关系的斜率均明显小于前一段时期，说明降水量愈大，1973~1996年和1997~2011年两段的产流量的差别愈大。

对于梨庇峪站，两个时间段的降水量-径流深回归直线几乎平行，1973~1996年和1997~2011年回归方程的斜率分别为0.7627和0.7664；实际上，从图5看出，对于1997~2011年这一段，2010、2011年两年的降水量-径流深双累积曲线明显上扬，与1997~2009年显著不一致；在图6中，对于1997~2011年，若去掉2010、2011这两年的散点，则利用1997~2009年的散点做回归分析得到的方程为 $y=0.3880x-157.3549$ ， $R^2=0.2995$ ，斜率仅0.3880，远小于1973~1996年的0.7627，说明1997~2009年整体产流能力较1996年及以前减小。



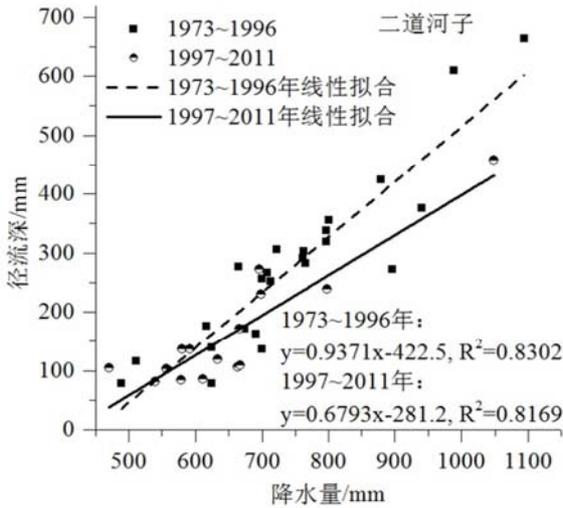


图6 太子河流域部分代表水文站不同时期降水量-径流深关系。

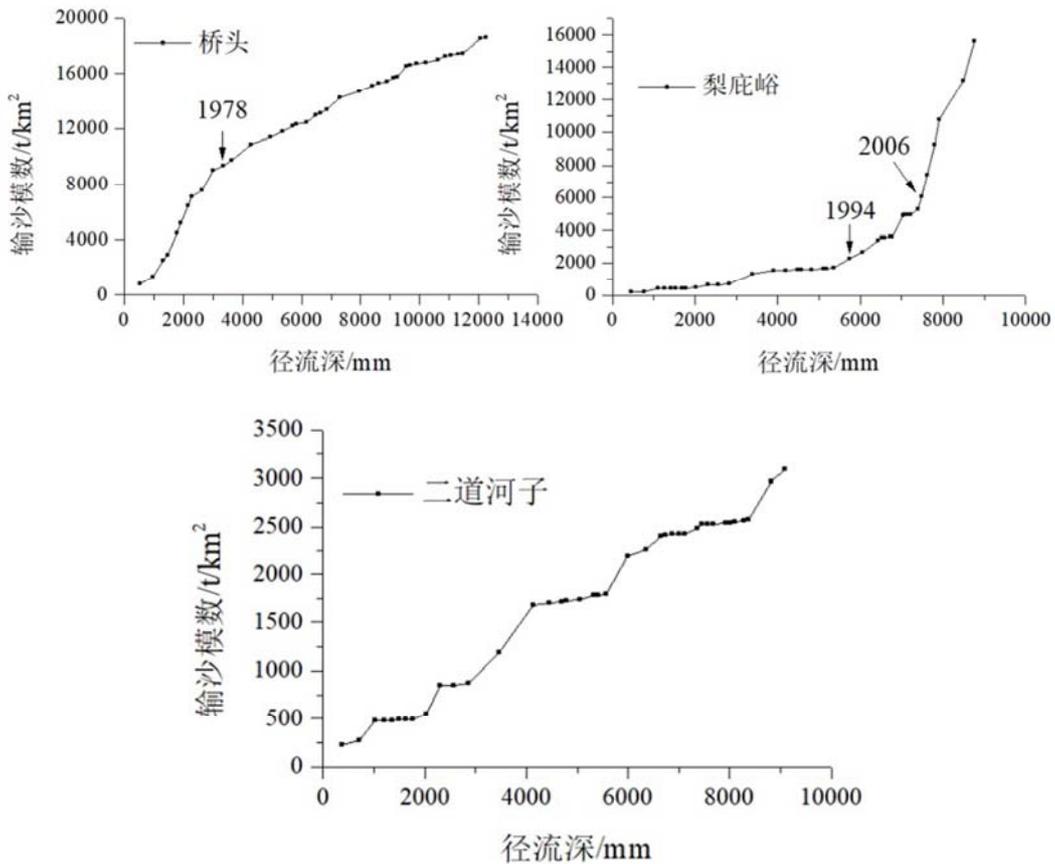


图7 太子河流域部分代表水文站径流深-输沙模数双累积曲线。

进一步以径流深-输沙模数双累积曲线确定的转折点将研究时期分为若干段，分别点绘各时间段的径流深-输沙模数散点图（图 8），并采用直线方程分别拟合各时间段的径流深-输沙模数关系式（表3）。由于二道河子、郝家店2站无明显转折点，在此不予考虑。上文分析指出，径流深-侵蚀模数双累积曲线向上偏折的仅梨庇峪1站，该站径流深-输沙模数散点图表明，1973~1993年的径流深-输沙模数点据位于散点图的最下方，1994~2005年位置略

3.3.2. 径流-泥沙关系及其演变

对9个水文站的径流深-侵蚀模数双累积曲线进行分析，发现根据双累积曲线的变化特征，可以分为3类，其代表站双累积曲线见图 7。第一类为径流深-侵蚀模数双累积曲线向下偏折，包括南甸、本溪、桥头、辽阳、立山、唐马寨，共6个代表站，例如桥头站，在1978年双累积曲线明显向下方转折，表明单位径流深的输沙模数减少，由于后者与前者比值的量纲为含沙量，故表明含沙量有减小的趋势；第二类仅梨庇峪1站，在1994年、2006年双累积曲线向上偏折，表明含沙量有增加趋势；第三类包括二道河子和郝家店2站，双累积曲线呈波折变化，不存在转折点将双累积曲线分成斜率截然不同的两段，这表明含沙量呈波动变化。将上述与表 2中含沙量的Mann-Kendall趋势检验结果对比发现，两者结果完全一致。

有上升，2006~2011年点据位置大大高于前两个时期，这一点据分布格局说明同样的径流深下，三个时期的输沙模数依次增加，也即含沙量依次增加，这与双累积曲线分析结果一致。梨庇峪站径流深-输沙模数直线拟合方程一次项系数（表 3）表现为后一个时段方程的斜率大于前一个时段，这是上述规律下的必然结果。

在上文所述的径流深-侵蚀模数双累积曲线向下偏折的6站中，其径流深-输沙模数散点图又可以分为两类，分

别以桥头和唐马寨为代表(图 8)。对于桥头和唐马寨站, 分别以1983和1987年将研究年限分为前后两个时期, 两站径流深-输沙模数散点的共同点是前一个时期的点据位于后一个时期点据的上方, 表明相同的径流深下, 前一个时期的输沙模数较大, 这与相应水文站的径流深-输沙模数双累积曲线揭示的规律一致。两站所不同的是, 对于桥头站, 后一个时期回归直线的斜率大于前一个时段, 即随着径流深增加, 输沙模数增加较快, 而前一个时段增加较慢, 大约在径流深600 mm时, 两个时段输沙模数接近相等; 而对于唐马寨站, 后一个时期径流深-输沙模数回归直线斜率小于前一个时期, 即随着径流深增加, 后一个时期输沙模数增加较慢, 径流深越大, 两个时段的输沙模数相差越大。由表 3各站径流深-输沙模数直线拟合方程一次项系数看出, 桥头、立山两站为第一个类型, 后一个时段方程的斜率大于前一个时段; 南甸、本溪、辽阳、唐马寨同为第二个类型, 后一个时段方程的斜率小于前一个时段, 与从图 8中图形上得出的规律一致。

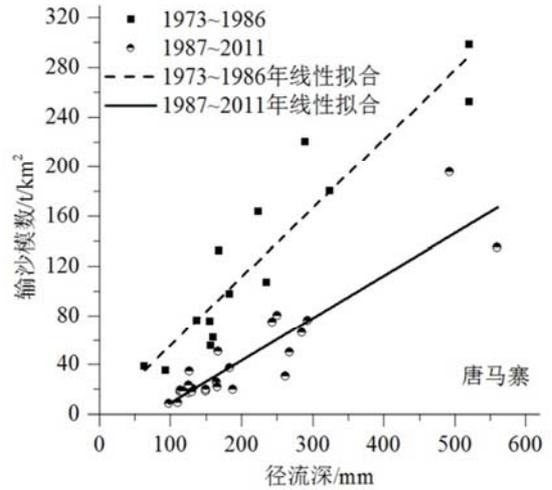
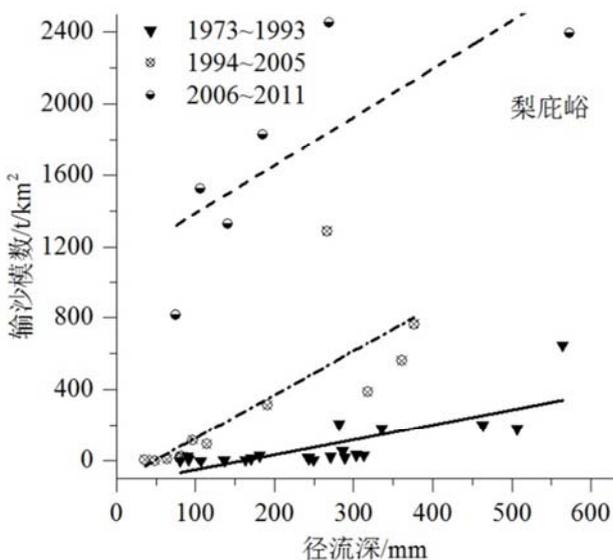
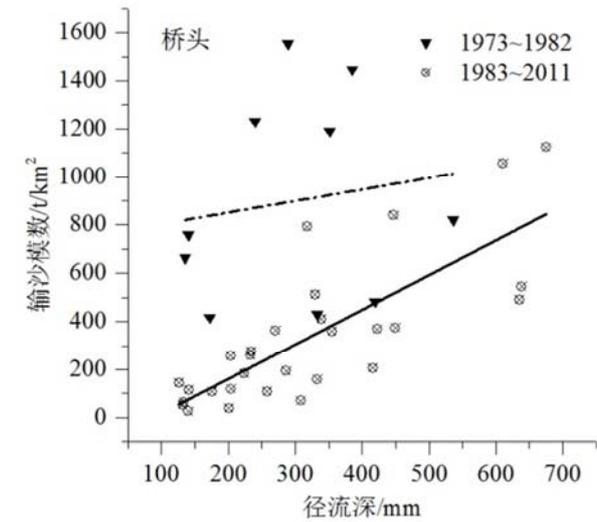


图8 太子河流域部分代表水文站不同时期径流深-输沙模数关系。

表3 太子河流域代表水文站不同时期径流深-输沙模数线性拟合方程。

| 代表水文站 | 时期 | 拟合方程 | R ² |
|-------|------------------------|---|------------------|
| 南甸 | 1973~1977 | $y=0.2955x-4.6141$ | 0.3714 |
| | 1978~1997 1998~2011 | $y=0.2223x-43.27$ $y=0.1807x-36.38$ | 0.5582 0.7062 |
| 本溪 | 1973~1995 | $y=0.6771x-94.94$ | 0.4865 |
| | 1996~2011 | $y=0.2394x-41.09$ | 0.6580 |
| 桥头 | 1973~1982 | $y=0.4781x+756.3$ | 0.0215 |
| | 1983~2011 | $y=1.4379x-126.4$ | 0.6139 |
| 梨庇峪 | 1973~1993 | $y=0.8438x-134.5$ | 0.5834 |
| | 1994~2005 2006~2011 | $y=2.4351x-114.9$ $y=2.6849x+1117.4$ | 0.6022 0.6088 |
| 辽阳 | 1973~1986 | $y=0.2781x-12.92$ | 0.7833 |
| | 1987~2011 | $y=0.2116x-20.38$ | 0.8453 |
| 立山 | 1973~1986 | $y=1.3936x+233.3$ | 0.4017 |
| | 1987~2011 | $y=2.1754x-273.1$ | 0.5274 |
| 唐马寨 | 1973~1986 | $y=0.5544x+0.1045$ | 0.8813 |
| | 1987~2011 | $y=0.3434x-25.30$ | 0.8406 |

注: 方程中y表示相应输沙模数 (t/km^2), x表示相应径流深 (mm)。



4. 讨论

影响流域产流产沙的因素可分为自然因素和人为因素, 其中自然因素主要有降水、蒸发、气温等。贺瑞敏等[13]在海河流域的研究表明, 年均气温对径流量的影响较小, 年均气温升高2℃, 径流量仅减少6.5%; 而降水量对径流量的影响较大, 降水量增加或者减少10%, 径流量将分别增加26%或减少23%。张树磊等[14]研究了辽河流域径流量减少的原因, 认为降水导致径流减少, 潜在蒸发导致径流微弱增加, 下垫面导致径流减少, 其中下垫面对径流减少的贡献率达到75%左右。对于本研究的太子河流域, 若不考虑气温的影响, 上文分析又表明太子河流域降水量没有明显变化趋势, 而径流和泥沙多呈减少趋势, 则这可归结为人为因素。

本文通过分析几个反映人类活动强度的主要指标来反映太子河流域水沙变化的人为因素, 见图 9和表 4。分析表明, 从1980年至2008年, 太子河流域总体上总人口和牲畜增加, 水利工程数量增加, 林地、旱地、水田比例下降, 居民、工况、交通用地和水利设施用地比例增加。总人口和牲畜总量的持续增加, 必然引起人畜生活用水量、

工业生产用水量的增加，而为了满足这些用水量，无论是直接抽取河道径流，还是开采地下水，均会直接或间接导致河道径流的减小。而大型水利工程的修建常常引起泥沙的淤积，从而导致输沙量和含沙量的降低。前文分析的太子河流域水沙变化趋势与上述人类活动效应是一致的，南甸、梨底峪、二道河子等站的降水量-径流深双累积曲线均在1997年发生转折，桥头站径流深-输沙模数双累积曲线在1978年发生转折，这与以上人类活动效应发生较大变化的年代是相符的。

对于本溪站，其上游的观音阁水库建成于1995年9月，在本文资料序列范围内，对该站径流、输沙量、含沙量序列进行考察，可以看出大型水库的运用对其的影响。表2的Mann-Kendall趋势检验表明，本溪站径流深没有增减趋势，而输沙量和径流含沙量呈显著减小趋势，由图4看出，本溪站径流深在1995年以后的变化水平与之前相比没有显著减小，并且在2005、2010两年出现径流深的极大值年，而对于输沙模数和含沙量，在1995年只后，明显减小，在径流深较大的2005、2010两年，输沙模数和含沙量亦然很小。从降水量-径流深双累积曲线结果看，本溪站不存在偏折点，而径流深-输沙模数双累积曲线本溪站发生向下偏折的年份恰为1996年。观音阁水库与下游干流的茆窝水库形成水库群，观音阁水库的蓄水主要为向茆窝水库补水之用，也就是说观音阁水库对本溪站的径流的年内分配起到了调节作用，而对经过本溪站的径流总量没有太大影响，因此本溪站降水量-径流深双累积曲线不存在偏折点。而对于泥沙，随径流进入观音阁水库后便沉积下来，很难随水库放水排向下游，因此本溪站的径流深-输沙模数双累积曲线在水库建成后的1996年向下偏折，同时，本溪站径流深-输沙模数关系直线拟合结果为1996~2011年方程斜率小于1973~1995年。茆窝水库和汤河水库修建年代较早，本文所选资料序列较短，尚不能对这两个水库对径流和输沙的影响进行进一步分析。

李鸿儒等[15]在钦江流域的模拟结果表明，林地、水田减少，旱地、草地、水域、建设用地增加，流域植被覆盖度总体呈下降趋势，同时径流和输沙总量均增加，且输沙量的增加更明显。太子河流域1980至2010年的各类土地利用占流域总面积的百分比（图9）表明，林地、旱地、水田比例下降，居民、工矿、交通用地和水利设施用地比例增加，而各流域径流和输沙量多数表现为减少趋势，这与文献[15]的研究结果基本一致。然而仅梨底峪站的输沙量呈增加趋势，这表明就土地利用对产流和产沙的影响来说，仍然存在值得深入研究的问题。一般来说，林地具有保持水土的作用，林地破坏后，会影响径流的年内分配，常造成严重的土壤侵蚀，导致输沙量增加；而居民、工矿、交通用地在一定程度上减小地表渗透能力，从而增加地表径流；旱地、水田的灌溉、蒸发、蒸腾会消耗水分，其上产生的土壤侵蚀则取决于其水土保持措施情况，情况较为复杂。今后，有待于收集梨底峪站控制流域内更为详细的同时期的土地利用空间分布、水土保持措施、大型水库蓄泄、大型工程引水引沙等、降水量、气温、蒸发、地形等数据，采用分布式水文模型来模拟土地利用变化、水土

保持措施、气候变化等因素的变化对该流域水沙变化的综合效应，从而识别导致该流域输沙率增加的原因。

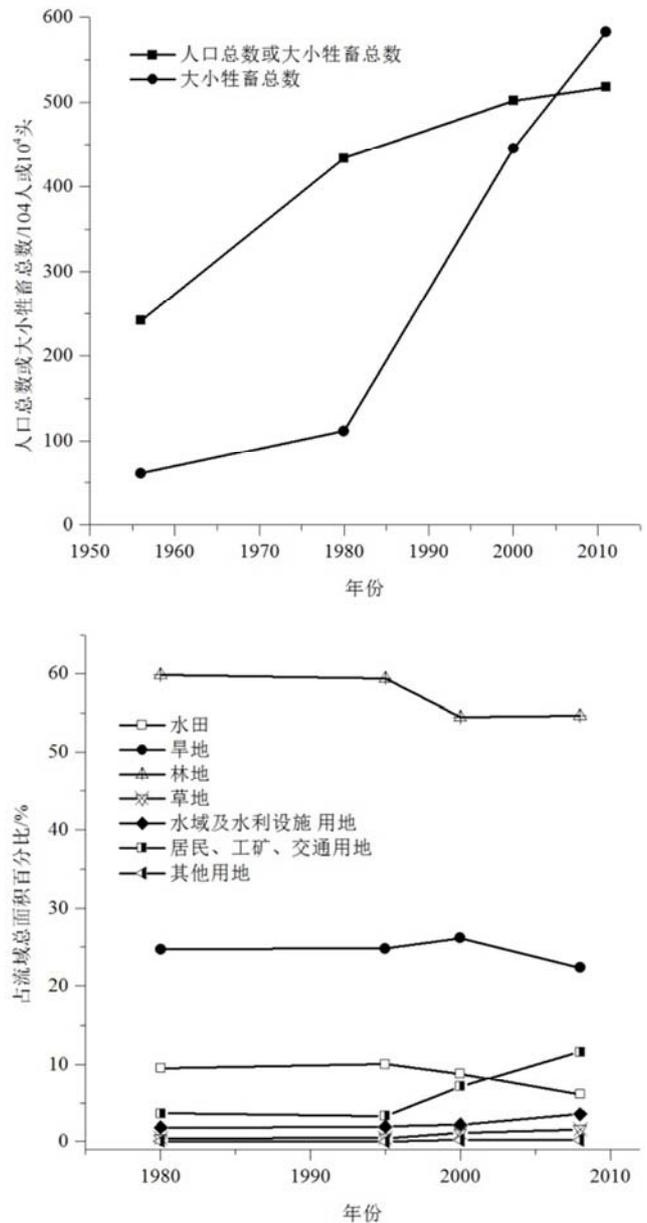


图9 太子河流域主要人类活动指标变化。

表4 太子河流域水利工程数量。

| 年份 | 水库累积兴利库容/10 ⁴ m ³ | 水电站累积年发电量/10 ⁴ kW·h | 排提水泵站累积装机流量/m ³ /s |
|-----------|---|--------------------------------|-------------------------------|
| 1956-1979 | 92769.4 | 8828 | 432.9 |
| 1980-1989 | 1879.7 | 924 | 30.1 |
| 1990-1999 | 138856 | 10159 | 38.7 |
| 2000-2011 | | 8579 | 11 |

5. 结论

以太子河流域20个雨量站的年降水量资料和9个水文站径流量和含沙量资料为基础，分析了太子河流域径流、

泥沙区域组成特征、水沙变化趋势和水沙关系演变,得到以下主要结论:

(1) 干流上本溪、辽阳、唐马寨三站年径流量依次增大,分别为 $13.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $16.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $23.7 \times 10^8 \text{ m}^3$; 从本溪至辽阳,输沙量由 $35.1 \times 10^4 \text{ t}$ 减少至 $25.4 \times 10^4 \text{ t}$,至唐马寨,输沙量又增加至 $82.8 \times 10^4 \text{ t}$ 。南甸站以上流域是本溪站径流的重要来源地,而不是泥沙主要来源。本溪-辽阳区间基本为水沙同源,其中郝家店站存在水小沙多的特征。该区间来水量丰富,侵蚀较为严重,来沙量巨大,但是由于葭窝、汤河两座大型水库的调节、拦蓄,径流量和输沙量均小于上游来总和。辽阳-唐马寨区间存在水沙异源,辽阳、立山两站径流量的占唐马寨的73.8%,输沙量之和占比为46.3%,泥沙另有其源。

(2) 各站径流深变化过程与降水量变化过程基本一致,输沙模数与降水量变化一致性较差,含沙量更差。在9个代表水文站中,径流深与降水量的相关系数平均为0.895,输沙模数与降水量的相关系数平均为0.607;含沙量与降水量的相关系数绝对值平均仅0.315。各水文站降水量均无显著变化趋势,径流深减小趋势也不显著;对于输沙模数,南甸、本溪、桥头、辽阳、唐马寨等5站为减小趋势,显著水平达到0.01或0.001,梨庇峪呈增加趋势,显著水平达0.01;对于含沙量,南甸、本溪、桥头、辽阳、立山、唐马寨等6站为减小趋势,显著水平达到0.05至0.001,梨庇峪则显著增加,显著水平达0.001。

(3) 9个水文站中,仅南甸、梨庇峪、二道河子3站降水量-径流深双累积曲线在1997年向下方偏折,即相同的降水量产生的径流深有所减小。9个水文站中,桥头、本溪、桥头、辽阳、立山、唐马寨等6站的径流深-侵蚀模数双累积曲线在不同年份向下偏折,即相同径流深产生的侵蚀模数(即含沙量)有减小的趋势;梨庇峪站在1994年、2006年双累积曲线向上偏折,表明相同径流深产生的侵蚀模数含沙量有增加趋势;二道河子和郝家店2站双累积曲线呈波折变化,表明径流深与侵蚀模数的关系呈波动变化。

从1980年至2008年,人类活动表现为太子河流域总人口和牲畜增加,水利工程数量增加,林地、旱地、水田比例下降,居民、工矿、交通用地和水利设施用地比例增加,这与太子河流域总体的径流和输沙变化趋势及其关系演变一致,但是还有待于收集更为详细的土地利用、水土保持措施、水利工程、地形及气候等数据,采用分布式水文模型模拟来识别各支流流域水沙变化的主导原因,明确水沙变化的多因子耦合作用机制。

致谢

本文为辽宁省博士科研启动基金项目《辽宁省河流消亡的特征与原因研究》的成果之一。

参考文献

- [1] 王延贵,胡春宏,刘茜,史红玲.长江上游水沙特性变化与人类活动的影响[J].泥沙研究,2016(1): 1-8。
- [2] 钟亮,潘云文,蒋孜伟.长江重庆主城区河段水沙变化特征分析[J].泥沙研究,2015(6):65-71。
- [3] 覃红燕,邹冬生,李峰.近50余年荆江三口水沙变化特征及驱动力分析[J].泥沙研究,2013(3):27-33。
- [4] 张晓华,苏晓慧,郑艳爽,田世民.黄河上游沙漠宽谷河段近期水沙变化特点及趋势[J].泥沙研究,2013(2):44-51。
- [5] 冉大川,姚文艺,张攀,申震洲.黄河头道拐站水沙来源空间分布及其影响因素[J].泥沙研究,2015(1):41-48。
- [6] 李庆云,孙艳伟,余新晓,樊巍.黄土高原藉河流域近50年输沙量变化及影响因素分析[J].泥沙研究,2014(2):44-48。
- [7] 王双银,谢萍萍,穆兴民,高鹏.松花江干流输沙量变化特征分析[J].泥沙研究,2011(4):67-72。
- [8] 李建伟,焦剑,高燕,张延玲.松花江流域产沙时间变化特征及影响因素分析[J].泥沙研究,2014(3):12-19。
- [9] 张燕菁,胡春宏,王延贵.辽河流域水沙变化特征及影响因素分析[J].人民长江,2014.45(1):32-35,68。
- [10] 郭维东,郭文卓.辽河下游水沙特征及影响因素分析[J].沈阳农业大学学报,2010.41(3):360-362。
- [11] Miao, C. Y., J. Rr. Ni, A. G. L. Borthwick. Recent changes of water discharge and sediment load in the Yellow River basin, China[J]. Progress in Physical Geography, 2010. 34(4): 541-561.
- [12] 穆兴民,张秀勤,高鹏,王飞.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[J].水文,2010.30(4):47-51。
- [13] 贺瑞敏,张建云,鲍振鑫,严小林,王国庆,刘翠善.海河流域河川径流对气候变化的响应机理[J].水科学进展,2015, 26(1):1-9。
- [14] 张树磊,杨大文,杨汉波,雷慧闽.1960—2010年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J].水科学进展,2015,26(5): 613-605。
- [15] 李鸿儒,卢远,何文.钦江流域土地利用/覆被变化对径流产沙的影响[J].中国水土保持,2016(4):40-44。