

气候变化对挠力河流域水文情势驱动影响的分析

殷世平¹, 李滨江², 潘华盛³, 高峰⁴, 于敏¹

(1. 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省水文局, 哈尔滨 150001;
3. 黑龙江省气象台, 哈尔滨 150030; 4. 宝清县生产力促进中心, 黑龙江 宝清 155600)

摘要: 为了达到挠力河流域以及整个三江平原水资源综合利用、管理和农业可持续发展的目的, 基于 1961—2013 年挠力河流域宝清与菜咀子站气象、水文监测资料, 采用统计相关和趋势分析、Mann-Kendall 突变检测等方法, 分析研究了流域中游区段降水、气温及径流变化特征, 特别是突变前后特征变化。结果表明: 近 53 年气温呈明显的升温趋势, 而降水和径流呈稍降趋势, 基本变化不大。文中揭示出挠力河流域气温和降水突变时间基本发生在 1987 年。从 1987 年后开始由低温多雨时段转为高温少雨时段。近 53 年宝清降水与径流相关系数为 0.85, 尤其突变前时段相关系数高达 0.96, 在降水距平百分率 $>10\%$ 和 $<10\%$ 的年份对应径流多和少正确率达 0.93; 突变后略有下降, 表明降水多少几乎完全驱动了挠力河中上游径流大小的变化, 并分析了温度变化是加速或减弱降水对径流的驱动影响。另外还分析了宝清降水对挠力河中下游径流的驱动作用, 表现在突变前降水对径流的驱动作用不大, 而主要是依靠下垫面蓄水和水利工程对径流变化起着重要的驱动作用, 突变后宝清的降水对下游的驱动作用在增加。

关键词: 气候变化; 降水; 径流; 驱动; 突变

中图分类号: P933

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0038-08

Analysis of Driving Influence of Climate Change on the Hydrological Situation in Naoli River Basin

YIN Shiping¹, LI Binjiang², PAN Huasheng³, GAO Feng⁴, YU Min¹

(1. Institute of Meteorological Science of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China;

2. Hydrology bureau of Heilongjiang Province, Harbin 150001, China; 3. Meteorologica Observatory of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China; 4. Productivity Promotion Center, Baoqing, Heilongjiang 155600, China)

Abstract: In order to achieve the purpose of the water resource use and agricultural development of the Naoli river valley and the whole sanjiang plain, based on the monitoring data from two meteorological and hydrological stations in Baoqing and Caizuizi of Naoli River Basin from 1961 to 2013 we adopted the statistical correlation and trend calculation, Mann-Kendall method to analyze the variation characteristics of the basin precipitation, temperature and runoff the in middle section, characteristics the change, especially before and after the mutation. The results showed that the temperature was significant warming trend, the precipitation and runoff were slightly down trend, which had not much changed in nearly 53 years. Mutations of the temperature and precipitation of Naoli River valley occurred in 1987. Since 1987, the low temperature and rainy period shifted to high temperature and less rain period. The correlation coefficient was 0.85 between the precipitation and runoff in Baoqing nearly 53 years, correlation coefficient was as high as 0.96 in mutation time. The corresponding in runoff year more and less accuracy was 0.93 in the year with the precipitation anomaly percentage $>10\%$ and $<10\%$. The correlation coefficient declined slightly in after mutation, showing that almost entirely the size of the middle and upper reaches of Naoli river runoff changes were driven by precipitation. The influence of temperature change accelerated or reduced effect of precipitation on runoff. Precipitation for role of driving force in runoff in Baoqing in the middle and lower reaches of Naoli river was also analyzed, showing that driving effect of precipitation in before time of the mutations on runoff was not significant, but mainly relied on that the underlying surface water storage and water conservancy projects played the important role in driving run-

收稿日期: 2016-03-15

修回日期: 2016-06-15

资助项目: 中国气象局沈阳大气环境研究所 2016 年开放项目(2016SYIAE10); 黑龙江省自然科学基金项目(D201414); 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015M18); 黑龙江省科技攻关项目(GC09C106)

第一作者: 殷世平(1972—), 女, 黑龙江勃利县人, 高级工程师, 主要从事遥感、气候变化研究。E-mail: 113309724@qq.com

通信作者: 潘华盛(1940—), 男, 黑龙江哈尔滨市人, 研究员, 主要从事气候变化与应用研究。E-mail: panhsqxt@163.com

off changes. After mutations, driver effect of precipitation in Baoqing rose in lower reaches.

Keywords: climate change; precipitation; runoff; driver; mutation

挠力河为乌苏里江最大支流,发源于完达山脉勃力县境内的七里嘎山,自西南流向东北,全长 596 km。流域地处三江平原腹地,流域总面积为 24 863 km²,占三江平原总面积近 1/4。其中耕地面积占三江平原的 27.07%。据统计 2002 年流域内耕地面积为 95.6 万 hm²,其中灌溉面积 25.6 万 hm²。区内粮食总产量占三江平原粮食总产量 162 亿 kg 的 13.7%。区内包括七星河和挠力河两个国家湿地自然保护区,还有三环泡、东升、大佳河省级湿地自然保护区图略。

近二、三十年来我国地理、水文、气象等部门科技工作者,对三江平原湿地特别是沼泽湿地研究了下垫面的改变和土地利用变化,导致了土壤下渗变化,影响了湿地的蓄水调洪功能,进而影响径流变化^[1-6]。研究了气候变化尤其气候变暖背景下对水资源、气候资源及空间格局分布影响的研究^[7-16];也对水利工程建设 and 气候变化对径流变化的影响作用进行了研究^[10-15]。文献反映气候要素本身的变化情景对径流影响的研究较少。本文从气候变化特别是气候突变(变暖)前后降水、气温对挠力河径流驱动的影响进行较深入分析研究,分析三江平原挠力河流域水文演变对流域气候变化及湿地沼泽分布和人类活动土地利用变化的影响。研究结果可为气候变化对水资源影响应用及合理调配管理挠力河流域及整个三江平原水资源综合利用和农业发展提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文所涉及的资料包括气象部分 1961—2013 年逐年挠力河流域中游段的年平均气温,来自宝清县国家气象监测站,水文部分的同期年降水、年径流量资料均来自宝清、菜咀子水文监测站。

1.2 研究方法

文中采用的大多是在气候变化分析上常用的一些方法,气候变化趋势分析法、相关统计分析法、气候突变检测法,文中采用 Mann-Kendall 检测法^[17];气象中的谱分析法,功率谱周期分析法^[18]。

2 结果与分析

2.1 挠力河流域气候变化

2.1.1 气温变化 选取宝清站气温 1961—2013 年年际变化代表挠力河流域气温变化见图 1。多年年平均气温(1971—2000 年)为 4.0℃。近 53 a 气温变化呈线性

趋势上升,平均以 0.37℃/10 a 增加,53 a 年平均增加近 2.0℃。从气温变化来看,1961—1987 年 27 a 为低温时段,平均 3.4℃,低于历年平均 0.6℃。若按低于年平均气温 0.5℃即定义为低温年的话,其中 1962 年、1964—1966 年、1968—1974 年、1976—1977 年、1980—1981 年、1984—1985 年、1987 年共计 18 a,占此段年份 0.67,平均 10 a 就有 7 次发生低温。而且低温具有群发性,有 2~5 a 连续发生特点。特别指出的是低于年平均气温 1℃为特低年,其中有 1964—1966 年、1969 年、1972 年、1974 年、1977 年、1984 年共计 8 a,占此段年份 0.30,平均 3 a 就有 1 次发生特低年、1969 年发生了建国以来的极低温年,较历年低 2.1℃。

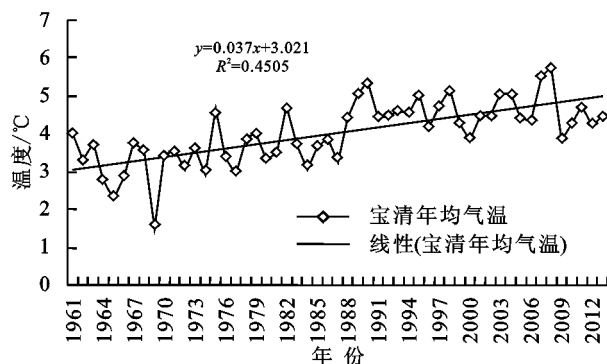


图1 宝清 1961—2013 年年均气温变化

1988—2013 年 26 a 为气温较高时段,平均 4.7℃,高于历年平均气温 0.6℃,两个时段平均气温差为 1.2℃。在此高温时段里,1 次低温年也未发生,仅有 2 a 稍低温,2000 年、2009 年低于历年均值 0.3℃。再次表明气候变暖低温次数大大减少。同时也表明,挠力河气温变化同黑龙江省及全国年气温变化具有同步变化特征^[19-20]。另外分析气温变化的突变时间也是气候变暖的开始期,采用 Mann-Kendall 突变趋势法,计算 UF, UB, 它们的交点就是突变开始的时间^[17]。经计算挠力河年平均气温突变时间在 1987 年(图 2),给定高值显著性水平 $\alpha = 0.001$,查正态分布表 $U_{\alpha} = 3.09$, $|UF| > U_{\alpha}$ 则表明近 53 a 来年气温存在显著的升温变化趋势。为进一步分析气温长时期阶段性周期变化规律做功率谱(图 3)。由图明显所见峰值在 27 a 左右具有显著周期变化,谱值超过红噪音谱检验。表明宝清气温存在 27 a 左右长周期变化,与气温突变开始时间 1987 年相一致。也就是说气温由 1987 年开始从低温时段转为气温较高时段。另外也看到谱值在 0.26 附近存在一个 3~4 a 短周期的变化,但未通过检验。

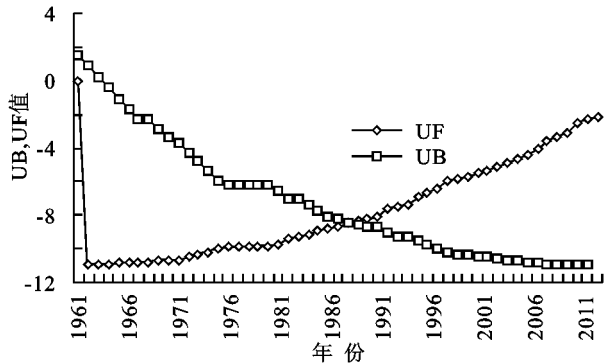


图2 1961—2013年宝清年气温突变时间 UB,UF 值

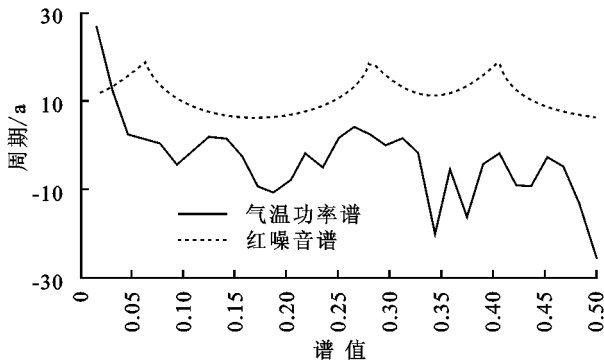


图3 宝清年气温功率谱

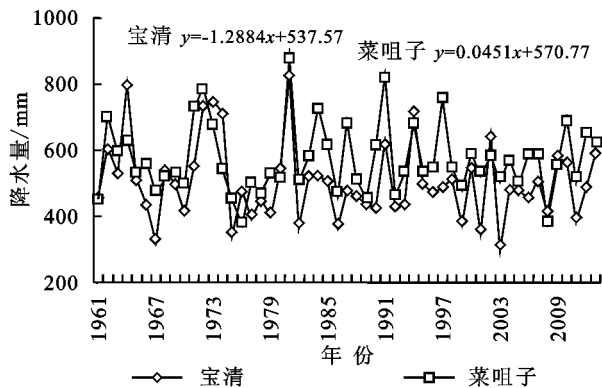


图4 1961—2013年宝清、菜咀子年降水变化

2.1.2 挠力河流域宝清和菜咀子站年降水变化 选取宝清站代表挠力河中上游面上降水,菜咀子站代表中下游面上降水。1961—2013年年降水变化见图4,从变化趋势来看,近53 a宝清降水均呈稍下降趋势,以每年1.3 mm稍降,变化不明显。菜咀子以每年0.5 mm速度稍升。以宝清降水为例,近53 a降水变化可分为2个时段1961—1986年26 a为多水时段,平均522 mm高于多年平均(1971—2000年为510 mm)12 mm,稍多。1987—2013年26 a为少水时段,平均485 mm低于多年平均25 mm,稍少。降水极值827 mm出现在1981年高于多年平均317 mm多6成。而位于挠力河流域东北部的菜咀子降水升降变化也基本同宝清变化;经计算宝清与菜咀子降水相关系数达0.70远高于信度0.01检验,表明宝清降水多则菜咀子降水也多。菜咀子1981年降水也达到了

876 mm的极值,高于多年平均366 mm,多5成多。1981年雨量使整个三江平原及挠力河流域发生重涝,给农业生产带来极大损失^[21]。相反菜咀子降水1976年为极少372 mm,低于多年平均200 mm,少4成,造成挠力河流域严重干旱粮食减产。经计算宝清降水突变时间见图5UF,UB值,它们的交点1986年UF,UB值为-8.6是宝清降水突变开始的时间,通过显著性水平 $\alpha=0.001$ 检验,这正好符合上面近53 a降水时段的划分。也与宝清年气温1987年突变开始期基本一致。分析表明挠力河流域从1987年后,开始由冷湿气候转为暖干气候;也就是气象上所说的由低温多雨时段转为高温少雨时段^[20]。另从宝清年降水功率谱(图略)所见,近53 a中宝清降水具有5.5~6.9 a,4.8~4.9 a震荡周期通过红噪音检验。若取周期6.5 a,第四与第五周期转换时间也恰为1986年。

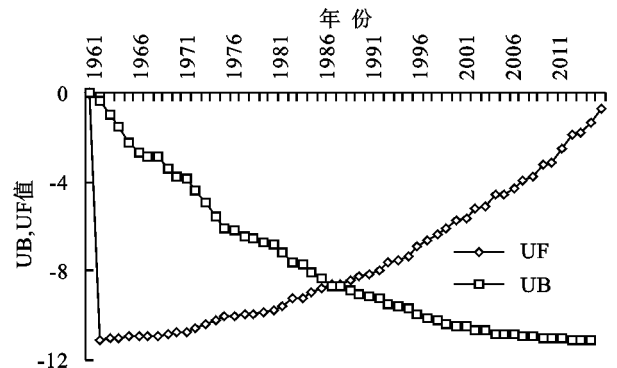


图5 1961—2013年宝清年降水突变时间 UB UF 值

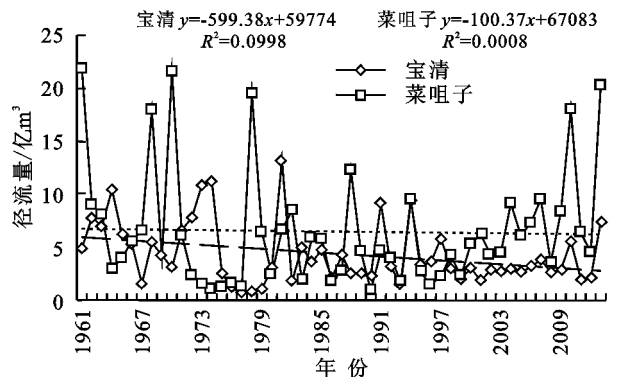


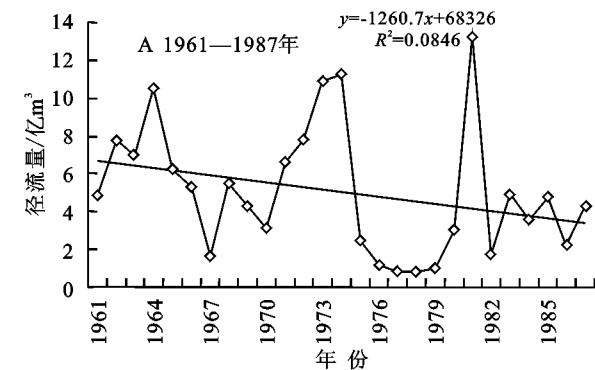
图6 1961—2013年宝清和菜咀子年径流量变化

2.2 宝清和菜咀子年径流量变化分析

2.2.1 宝清和菜咀子径流变化 同样选取挠力河流域宝清和菜咀子水文站,宝清站代表挠力河由山区进入平原区入流站,控制流域面积3 689 km²;菜咀子站是代表出流站,控制流域面积20 796 km²,两站53 a径流变化(图6)。宝清多年平均径流为43 560.7万m³,菜咀子多年平均径流为64 372.6万m³,区间有宝石河、小挠力河、内外七星河、蛤蚂通河、大索伦河等多条河流汇集,区间径流20 811.9万m³。从两站径流变化趋势看,呈下降趋势,宝清径流下降比菜嘴

子下降稍大一些。宝清以 $599\text{ 万 m}^3/\text{a}$ 速度下降,菜嘴子以 $100\text{ 万 m}^3/\text{a}$ 速度下降,宝清径流下降速度为菜嘴子下降速度的 6 倍。原因一是宝清降水的减少要大于菜嘴子降水的减少;宝清两个降水时段(1987—2013 年)及(1961—1986 年)减少 48 mm ,而菜嘴子两个时段降水减少 3 mm 。宝清年降水与年径流量相关系数高达 0.82 远大于 0.01 信度检验,表明宝清降水多则径流量就大,反之降水少径流量就小。也表明降水的多少是驱动径流变化的主要原因。而菜嘴子降水与径流量相关系数为 -0.04 ,无关系可寻。原因二是宝清县在挠力河上游修建了大型水利枢纽扭工程龙头桥水库,控制了下游的径流量,每年减少向下游供水 $8\,000\text{ 万 m}^3$ 。而菜嘴子径流的减少主要是在它上游有大量水稻田的增加,如五九七农场水稻由 1984 年 13 hm^2 到 2009 年 $16\,000\text{ hm}^2$ 扩大了 $1\,230.8$ 倍。友谊农场由 1984 年的 377 hm^2 到 2006 年 $21\,347\text{ hm}^2$ 扩大了 56.6 倍。由于水稻面积大幅增加,抽取地下水灌溉,使地下水水位下降,这样增加了地表径流补充土壤包气带的水分,影响地表径流的的产水量,导致径流量减少。这也充分表明水利工程和土地利用驱动地表径流减少的另一主要原因。

另外,由图 6 可见在近 53 a 的宝清和菜咀子站径流变化中,其中有 17 a 径流量大于菜咀子径流量,占总年数的 32%。其中较典型年份 1964 年、1972 年、1973 年、1974 年、1981 年、1991 年,宝清年降水较历年偏多 3.1~5.7 成,尤其 1981 年三江平原发生了建国以来的最大洪涝,出现了有记录以来最高值,而且这几年宝清年径流量高于菜咀子很多,最小差值年



2.2.3 宝清和菜咀子径流阶段性变化 由图 6 知,宝清年径流量突变发生时间在 1987 年,作突变前时段 1961—1987 年年径流变化见图 8A。由图所见近 27 a 径流下降速度明显,以 $1\,260.7\text{ 万 m}^3/\text{a}$ 速度下降。而突变后期 1988—2013 年时段计 26 a 径流下降速度趋于平缓,以 $189.6\text{ 万 m}^3/\text{a}$ 速度下降,较突变前减少径流量

1991 年宝清高于菜咀子 $45\,205\text{ 万 m}^3$,最大差值年 1974 年宝清高于菜咀子 $101\,401\text{ 万 m}^3$ 。这些典型年份挠力河流域均发生严重内涝,河水泛滥成灾,淹没农田、湿地,河水倒灌,整个排水系统陷于瘫痪。同时也表明宝清至菜咀子站区间有广阔的沼泽湿地对径流有很大调节作用^[1-2]。

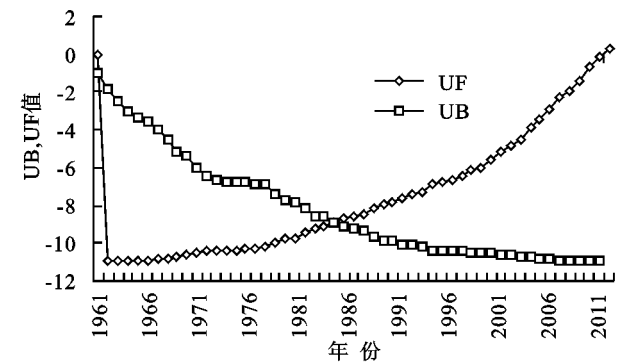
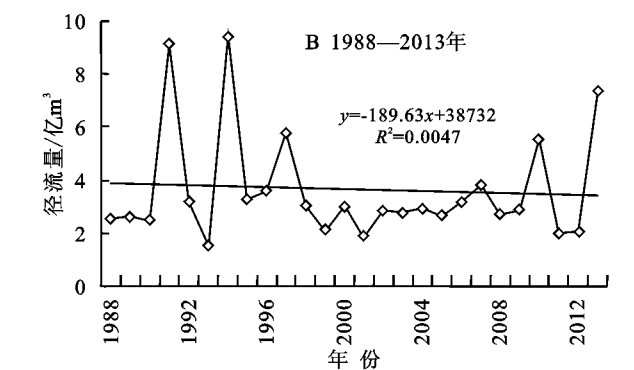


图 7 宝清年径流突变时间 UB,UF 值

2.2.2 挠力河流域径流突变时间和周期分析 同样采用 Mann-Kendall 法,计算 UF,UB 值,它们的交点就是宝清年径流突变开始的时间(见图 7)。宝清径流突变时间在 1987 年 UB,UF 交点值在 -8.5 ;菜咀子年径流突变时间在 1985 年,UB,UF 交点值在 -8.9 较宝清突变提前 2 a。以上均通过显著性水平 $\alpha=0.001$ 检验,表明年径流突变时间基本同年气温、降水突变时间相同。另从宝清年径流功率谱所见,近 53 a 中宝清年径流第一峰值具有 $10.7\sim10.8\text{ a}$ 显著周期;次峰值都比较接近具有 $9.5\sim9.8\text{ a}$ 震荡周期均通过红噪音检验。以上周期变化基本与宝清降水周期值的 2 倍近似。进一步表明降水和径流变化存在密切的相关关系。



1 071.1 万 m^3/a ,减少 85%(图 8B)。菜咀子年径流量突变发生时间在 1985 年,作突变前时段 1961—1984 年年径流变化见图 9A。在 24 a 径流变化中,突变前年径流量呈明显下降趋势,平均以 $2\,610.1\text{ 万 m}^3/\text{a}$ 速度下降,较图 6 中菜咀子 53 a 径流下降速度大很多,同时也较宝清突变前下降大,几乎为宝清下降速度的 2 倍。而且这

图 8 宝清年径流变化

段年份有 11 a,宝清年径流大于菜咀子年径流量,占这段年数的 45%。表明在宝清至菜咀子区间有大量的降

水及洪水滞留湿地蓄水造成了菜咀子年径流量小于宝清年径流量。

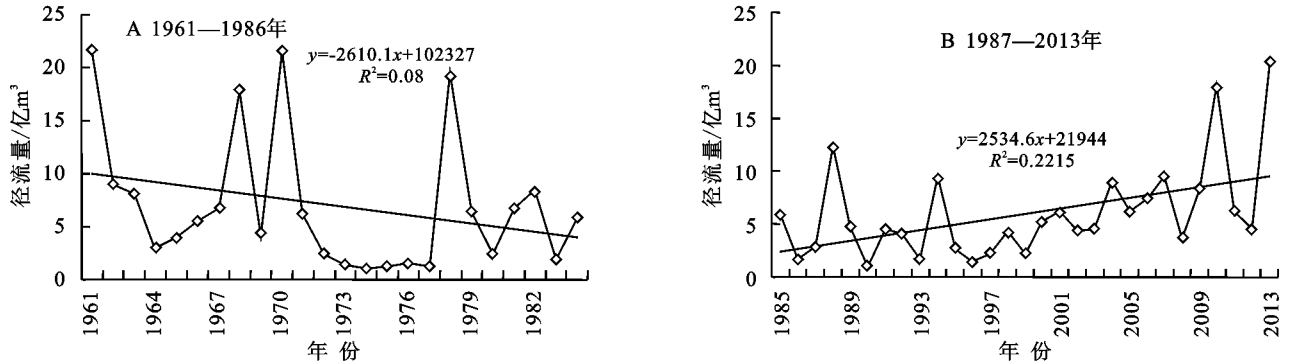


图9 菜咀子年径流变化

菜咀子在突变后期 1985—2013 年时段计 29 a 径流以 $2\,534.6\text{ 万 m}^3/\text{a}$ 速度上升,见图 9B。图 9A 与图 9B 比较,突变后时段径流上升速度较突变前时段径流下降速度要小。可见 53 a 来菜咀子径流呈稍下降趋势。在 29 a 径流量上升时段里,宝清年径流大于菜咀子径流的年份有 1986 年、1987 年、1990 年、1991 年、1995 年、1996 年、1997 年 7 a,占此段年数 24%,明显少于突变前宝清年径流大于菜咀子径流 11 a 的记录。并且明显看到这 7 a 中宝清降水仅 1991 年降水特多,其余 6 a 降水偏少或特少的特点。而菜咀子降水呈波动,多与少降水差不多。这样就造成了宝清的径流量也不大,高于菜咀子径流差值比较小。另外受环境影响,在 1985—2013 年正逢变暖时期,宝清和菜咀子之间挠力河流域广大湿地地区呈干旱状态,绝大部分降水被蓄存,少部分流入河槽,造成菜咀子径流减少。值得一提的是 1991 年挠力河流域发生严重的洪涝,宝清降水 687 mm,较历年偏多 31%,属特多等级。而菜咀子降水 826 mm 较历年偏多 42% 属特多等级,为 53 a 来降水第二位;但菜咀子径流量 1991 年在 53 a 中排序为 26 位,再次表明宝清和菜咀子区间较多沼泽湿地,加之有较大型的水利工程、水库、滞洪区和排水工程建成,发挥了巨大的蓄水作用。另外 1985 年后的 29 a 里宝清和菜咀子的径流变化趋于平稳,尤其是宝清年径流量的变化更是平稳一些。这种年径流量的变化也是对气候变暖,年气温明显升高和降水减少的一种响应。

2.3 降水对径流变化的驱动影响

2.3.1 宝清降水为挠力河中上游流域径流变化的主要驱动因子 仍选取宝清站降水与径流(1961—2013 年)变化见图 10。近 53 a 中降水与径流同呈下降趋势,降水以 1.3 mm/a 速度下降;径流以 $599\text{ 万 m}^3/\text{a}$ 速度下降。降水与径流相关系数达 0.85,远远超过信度 0.01 检验。两序列升降大小变化几乎是同步的。经查降水与径流之间的正负距平符号相同达

41 a,正确率 78%。另外对径流有影响取宝清降水距平百分率(公式: $p = (R_i - R_m) / R_m$; p 为距平百分率; R_i 为要素实测值; R_m 为要素多年平均值) $>10\%$ 和 $<-10\%$ 的年份,也就是降水偏多、偏少一成的年份对应宝清径流量的变化关系。在降水距平百分率 $>10\%$ 的 12 a 里,有 10 a 对应径流偏多 $>10\%$,正确率达 83%;降水最大年 1981 年距平百分率 62%,对应径流增加 200%。在降水距平百分率 $<-10\%$ 的 20 a 里,有 19 a 对应径流 $<-10\%$,正确率达 0.95,降水最小年 2003 年距平百分率 -42%,对应径流减少 37%。

另外,从降水的突变前后时段与径流变化关系分析,图 5 表明宝清降水突变时间在 1987 年。经计算降水突变前时段 1961—1987 年,降水呈 2.6 mm/a 速度下降,径流呈 $1\,337.5/\text{a}$ 速度下降。突变后时段 1988—2013 年,降水呈 0.4 mm/a 速度上升,上升不明显;径流呈 $220\text{ 万 m}^3/\text{a}$ 下降,较突变前时段下降速度放缓。突变前的 26 a 降水与径流相关系数为 0.96,相关关系非常高。在降水距平百分率 $>10\%$ 和 $<-10\%$ 的年份 1962 年、1964 年、1966 年、1967 年、1970 年、1972 年、1973 年、1974 年、1975 年、1977 年、1978 年、1979 年、1981 年、1982 年、1986 年共计 15 a,其中仅有 1966 年降水偏少则对应径流偏多,正确率达 0.93,表明降水多少几乎完全驱动径流的大小。从 1988—2013 年的 26 a 中,同样在降水距平百分率 $>10\%$ 和 $<-10\%$ 的 17 a 中,去掉 2002 年、2009 年降水偏多对应径流偏少外,正确率达 0.88,表明突变后降水仍是驱动径流变化的主要因素。

2.3.2 宝清和菜咀子降水变化对挠力河中下游径流驱动影响的分析 宝清降水对下游菜咀子径流的影响,在 1961—2013 年的 53 a 中,宝清降水与菜咀子径流总体相关系数为 -0.001 67 远未达到信度检验,关系不密切。分析宝清降水突变前后时段变化对菜咀子径流影响之间的变化关系。

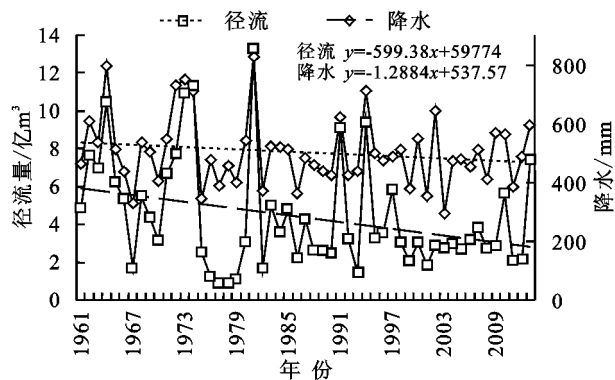


图10 1961—2013年宝清降水与径流变化

(1) 宝清降水突变前 1961—1986 年对菜咀子径流的驱动作用。突变前 1961—1986 年时段的变化(见图 11A)。此段 26 a 宝清降水呈 2.6 mm/a 速度下降,但不明显;同样菜咀子径流也呈 2 586 万 m^3/a 速度下降。表明此段降水对菜咀子径流影响不很明显。计算降水与径流相关系数为 -0.21,未通过信度检验,但也反应了它们反相关关系。宝清降水多则菜咀子径流少,反之亦然。如宝清 1972 年、1973 年、1974 年 3 a 降水偏多 30% 以上,而菜咀子径流减少 60% 以上;1981 年是近 53 a 降水最多一年,而菜咀子径流却减少 50%。此时段正处于

挠力河湿地保存较好时期,平均对削减洪峰可达 56%,对削减洪峰流量起重要作用^[1]。此时段宝清降水对菜咀子径流的驱动作用不大,主要是下垫面蓄水和水利工程对径流变化起着重要的驱动作用。

(2) 宝清降水突变后 1987—2013 年对菜咀子径流驱动作用。突变后 1987—2013 年时段的变化(见图 11B)。此段 27 a 宝清降水呈 0.4 mm/a 速度上升,变化不大;菜咀子径流呈 2 766 万 m^3/a 速度上升,表明此段降水对菜咀子径流影响较大。计算降水与径流相关系数为 0.39,通过信度检验。宝清降水大则菜咀子径流就大,反之亦然。选取宝清降水距平百分率 > 10% 的年份有 6 a 对应菜咀子径流,其中有 4 a 径流偏多在 10% 以上,正确率达 0.67。尤其降水特多的 1994 年对应径流偏多 48%。宝清降水距平百分率 < 10% 的年份有 11 a,其中有 9 a 对应菜咀子径流偏少,正确率 0.82。降水特少的 2003 年偏少 42%,径流偏少 30%。表明此段宝清降水对挠力河中下游径流变化有重要驱动作用,气候变暖后,宝清降水对下游的径流作用在加大,这也可能此时段由于湿地被大量开垦为农田,湿地面积大大减少,蓄水调洪功能减弱的原因。

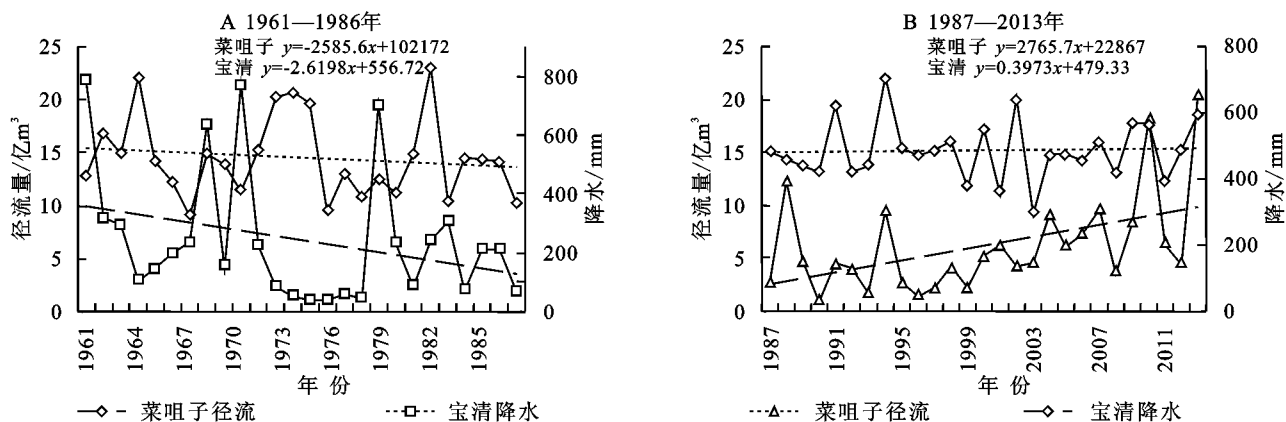


图11 宝清降水与菜咀子径流关系

(3) 菜咀子降水变化对挠力河中下游径流的影响。因菜咀子站本身降水和径流变化就代表挠力河中下游降水和径流变化。菜咀子降水与径流变化关系见图 12。近 53 a 降水几乎未有多大变化,每年增加不到 0.05 mm。径流每年减少 100.4 万 m^3 ,不到历年的 0.2% 微乎其微。总的看来降水与径流变化不明显。从降水与径流变化相关关系,相关系数为 -0.04 未通过检验。如果从降水突变前后两个阶段去分析,两者关系就较明显。菜咀子和宝清降水的突变时间同在 1986 年。

① 突变前 1961—1986 年降水对径流驱动影响。此段时间 26 a,降水以 0.5 mm/a 速度上升;径流以 2 586 万 m^3/a 速度下降,占历年径流 0.04,变化也不大(见图 13A)。降水与径流的相关系数为 -0.18,略小于宝清降

水与径流的相关系数。降水多而径流小,这似乎与水量平衡方程有矛盾;经计算上游的宝清降水与菜咀子降水相关系数为 0.68,表明宝清降水偏多则菜咀子降水也偏多。若菜咀子径流少,表明菜咀子上游大量的湿地蓄水和水库的蓄水发挥了巨大的作用的缘故;少部分是因蒸发的作用影响了径流。因此突变前时段湿地和水利工程建设应是驱动径流变化的主要因子。

② 突变后 1987—2013 年降水对径流驱动影响。此段时间 27 a,降水以 0.9 mm/a 速度下降,变化不明显;径流以 2 765 万 m^3/a 速度上升,占历年径流 0.04,变化也不大(见图 13B)。降水与径流的相关系数为 0.19,未通过检验,但也反映了降水多则径流多,反之亦然的特点。选取菜咀子降水距平百分率 <

10%的1988年、1989年、1992年、1999年、2001年、2003年、2005年、2008年、2011年共9 a其中有8 a对应径流偏少,正确率0.89。降水距平百分率 $>10\%$ 的年份有1987年、1991年、1994年、1997年、2010年、2012年、2013年共7 a,其中有3 a对应径流偏多,正确率0.43。在突变后27 a里降水距平百分率 $<10\%$ 和 $>10\%$ 共有16 a,其中有11 a径流有较好对应,正确率0.69。同时段宝清降水对菜咀子径流相关系数为0.39,而在降水距平百分率 $<10\%$ 和 $>10\%$ 对径流变化正确率为0.75,都高于菜咀子。综上表明,此时段宝清的降水对菜咀子的径流变化起着重要的驱动作用,而菜咀子降水起着次要的驱动作用。

总结以上突变前时段,主要是下垫面湿地蓄水和

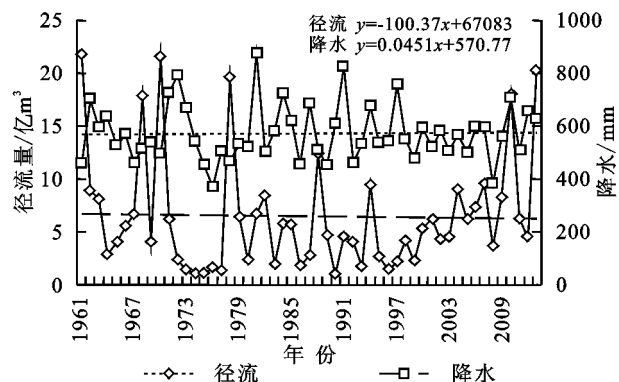
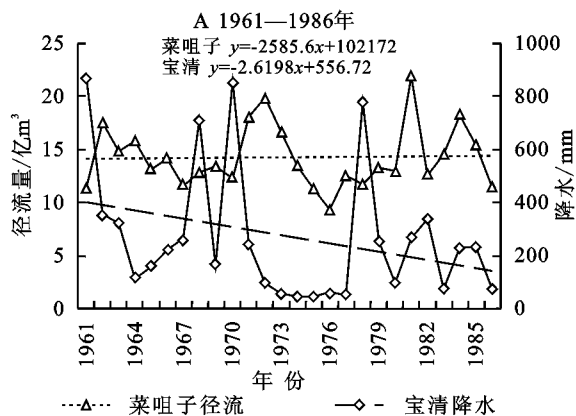


图12 菜咀子1961—2013年降水与径流变化

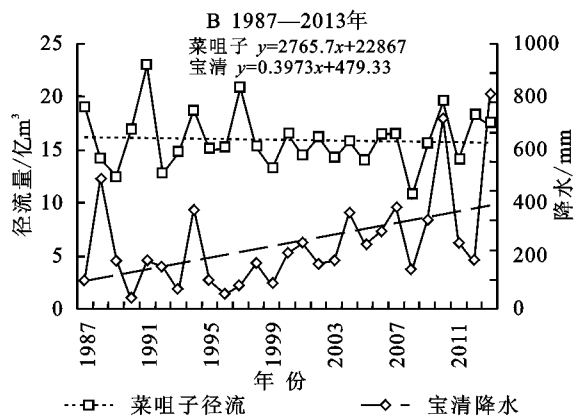


图13 菜咀子降水与径流变化

2.4 宝清气温变化对径流的驱动的助推影响

气温升高或降低,通过土壤、植被、江河、湖泊蒸发强弱作用来驱动径流变化。另一方面气候变暖,土壤温度升高加快,冻结层变薄,加快土壤蒸发能力,使土壤含水量减少,浅水层变深,加强了入渗的补充,导致径流减少。以宝清站年气温和径流1961—2013年计53 a变化关系图略。气温以 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 呈上升趋势,而径流以 $599\text{ 万 m}^3/\text{a}$ 呈下降趋势。气温与径流两序列相关系数达 -0.33 远大于信度0.01检验,反相关关系,气温升高则径流减少,反之气温降低则径流偏大。

为分析气温变化特别是气候变暖前后时段对径流变化的影响,按突变前后时段气温与径流相关来看,在突变前1961—1987年计27 a中气温与径流的相关系数为 -0.30 。在此段中低于历年平均 0.5°C 共有18 a,其中仅有1970年、1976年、1977年、1980年、1984年5 a气温偏低则径流偏小,而其他13 a则气温偏低径流偏大,正确率达73%,尤其1981年气温低 0.6°C 而径流量发生了近53 a最大值,超历年均值3倍多,出现了严重的低温洪涝天气。这表明气温偏低,江河湖泊水面蒸发量减少,植被蒸散量减少,陆

面蒸发也在减少,导致了径流减少缓慢;相反的等于加速了降水的驱动能力。也恰如此段宝清处在低温多雨时段,27 a中低于历年均值 0.6°C ,而径流量却增加了 $6\,638\text{ 万 m}^3$ (较1971—2000年均值),增加了0.15。突变后1988—2013年时段内,气温与径流相关系数为 -0.10 。取高于历年均值 0.5°C 有1989年、1990年、1995年、1997年、1998年、2003年、2004年、2007年、2008年、2011年共10 a。其中仅有1997年1 a,气温偏高对应径流偏大些,其他9 a则气温偏高对应径流偏少,正确率达90%。尤其2008年气温偏高 1.7°C 为近53 a内最高值,对应径流偏少60%。此时段正处气候变暖高温少雨期,气温较历年提高 0.6°C ,而径流却减少 $7\,867\text{ 万 m}^3$ 减少了0.18。可见气候变暖后导致径流量偏小,表明温度偏高导致蒸发量增大,这样大大减弱了降水对径流的驱动影响。另外也分析了宝清温度变化对挠力河中游菜咀子径流影响,关系不显著(相关系数为 -0.05)不再赘述。

3 结论与讨论

通过近53 a来对挠力河流域中游段气温、降水、径流变化的分析,特别是突变前后(即变暖前后)两个时段

变化特征的分析,表明大气降水是驱动径流变化的主要因子;而气温变化的影响是,若气温偏低起到了加速降水对径流的驱动能力,气温偏高却起到了减弱降水对径流的驱动影响。另外也分析了下垫面蓄水和水利工程建设对挠力河中下游径流变化的驱动作用。上述研究分析的内容方法和结果,在我国相关的学科领域中是不多见的。本文对于在气候变暖背景下规划三江平原特别是挠力河流域治理和水资源综合利用,实现农业可持续发展具有现实和长远意义。

对于大气降水和水利工程对径流的驱动作用的关系,如何定量分析各自的贡献以及水面的蒸发驱动作用和这些因素的驱动机理等方面还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘兴土. 三江平原沼泽湿地的蓄水与调洪功能[J]. 湿地科学, 2007, 5(1): 64-68.
- [2] 陈刚起, 张文芬. 三江平原沼泽对河川径流影响的初步探讨[J]. 地理科学, 1982, 2(3): 254-263.
- [3] 王薇, 李传奇. 蓄滞洪区的功能、价值与多目标利用[J]. 水利发展研究, 2004, (9): 26-28.
- [4] 陈刚起. 三江平原沼泽径流的试验研究[C]//黄锡畴. 中国沼泽研究. 北京: 科学出版社, 1989: 120-125.
- [5] 于宏敏, 刘赫男, 潘华盛, 等. 黑龙江七星河湿地面积锐减原因的研究[J]. 自然灾害学报, 2013, 23(6): 234-239.
- [6] 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[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230-234.
- [7] 潘华盛, 张桂华, 李向东. 气候变暖对黑龙江省水资源的影响及对策[J]. 黑龙江水专学报, 2004, 31(1): 1-4.
- [8] 李彩侠, 李倩, 王雅珍, 等. 近 52 年黑龙江省农业气候资源变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 187-192.
- [9] 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 1031-1040.
- [10] 陈晶, 杨帆, 田宝兴, 等. 黑龙江省黑土区近 50 年来四季气温时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 1-5.
- [11] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. 中国水利, 2008(2): 55-58.
- [12] 林凯荣, 何艳虎, 陈晓宏. 气候变化及人类活动对东江流域径流影响的贡献分解研究[J]. 水利学报, 2012, 43(11): 1312-1321.
- [13] 刘春葵, 夏军. 气候变暖条件下水文循环变化监测与归因研究的几点认识[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 313-318.
- [14] 李峰平, 张光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学, 2013, 33(4): 458-464.
- [15] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304.
- [16] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 853-858.
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [18] 黄嘉佑, 李黄. 气象中的谱分析[M]. 北京: 气象出版社, 1984.
- [19] 周秀杰, 王凤玲, 潘华盛, 等. 近 60 年来黑龙江省与东北及全国气温变化特点分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 124-129.
- [20] 潘华盛, 王勇, 邹滨, 等. 黑龙江省 2012 年后由暖干转暖湿型气候变化及预测分析[J]. 黑龙江大学工程学报, 2013, 4(3): 45-50.
- [21] 潘华盛, 刘育生. 三江平原天气气候与农业[M]. 北京: 气象出版社, 1991.

(上接第 37 页)

- [12] 赵卫东, 汤国安, 徐媛, 等. 梯田地形形态特征及其综合数字分类研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 295-300.
- [13] 陈勇, 刘京, 刘举. 黄土高原梯田质量评价系统设计研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6): 227-230.
- [14] 霍云霄, 朱冰冰. 黄土丘陵区水平梯田保水保土效益分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 24-28.
- [15] 赵卫东, 徐媛, 马雷, 等. 顾及梯田地形的 Grid-TIN 混合格网数字高程模型研究[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(2): 11-16, 127.
- [16] 李慧. 梯田 DEM 构建方法研究[D]. 西安: 西北大学, 2014.
- [17] 程德强, 高春留, 赵牡丹, 等. 基于 DEM 与遥感影像数据的梯田信息强化表达研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 124-130.
- [18] 祝士杰, 汤国安, 张维, 等. 梯田 DEM 快速构建方法研究[J]. 测绘通报, 2011, 9(4): 68-70, 82.
- [19] 张宝国, 吴倩, 陈桂英, 等. 关于低山丘陵区水平梯田断面优化设计的探讨[J]. 水土保持应用技术, 2007(2): 31-33.
- [20] 赵华. 梯田规划设计中田块规格标准分析[J]. 水土保持科技情报, 2001(5): 20-22.
- [21] 高华端, 李锐. 区域土壤侵蚀过程的地形因子效应[J]. 亚热带水土保持, 2006, 18(2): 6-9, 14.
- [22] 杨勤科, 郭伟玲, 张宏鸣, 等. 基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 203-206, 211.
- [23] 秦伟, 朱清科, 张岩. 通用土壤流失方程中的坡长因子研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 117-124.