

1955–2010年松花江流域不同区段径流量变化 影响因素定量评估

王彦君^{1,2}, 王随继¹, 苏腾^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为了定量区分气候变化和人类活动对松花江流域不同区段径流量变化的影响程度,应用线性趋势分析、累积距平等方法,对流域内4个不同区段1955-2010年径流量序列进行分析,揭示了径流量在各区段呈现不同的规律。其中江桥以上、江桥—大赉和哈尔滨—佳木斯3个区段各存在3个突变点以及被其分割的4个变化阶段,而大赉—哈尔滨区段只有一个突变点。应用累积量斜率变化率比较方法,在不考虑蒸散的情况下,定量估算了不同阶段降水和人类活动对径流量的影响程度,并探讨了主要人类活动因素的影响。结果表明:与基准期(T_1)相比,人类活动对径流量的变化起着主导作用,其中江桥以上、江桥—大赉和哈尔滨—佳木斯3个区段人类活动对径流量变化的影响程度在 T_2 、 T_3 、 T_4 (1998-2010年)3个阶段分别为75%、95%和80%;而降水的影响程度分别为25%、5%和20%;大赉—哈尔滨区段 T_2 时期降水和人类活动对径流的影响程度分别为25%和75%;主要与不同区段人口变动和水利工程修建这两项人类活动相关。

关 键 词:径流变化;突变年份;降水量;人类活动;松花江流域

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.01.008

中图分类号:K903

文献标识码:A

1 引言

全球变化通过加速大气环流和水循环,在一定程度上改变了区域水资源的时空分布,进而加剧了旱涝灾害和区域水资源的供需矛盾,影响区域水资源的可持续利用(黄荣辉等, 2010; 张建云等, 2009)。径流量受气候、地形、土壤、土地利用覆被以及水利工程等多重影响,是流域对全球变化和人类活动影响的综合反映。为此相继开展了大量有关径流量对气候变化和人类活动响应的研究(Hao et al, 2008; Li et al, 2007; Wang et al, 2009; 孟德娟等, 2013; 奚秀梅等, 2013; 姚治君等, 2003)。

中国作为世界上人口最多的发展中国家,径流变化对国家发展有着重要的影响,旱涝灾害给人民的财产安全和国家经济造成了严重损失(刘彤等, 2011)。目前已对黄河、长江径流量的变化开展了大量研究(Chen et al, 2001; Zhao et al, 2009; 曹建廷

等, 2007; 孔岩等, 2012)。尤其在人类活动贡献率方面进行了许多有益的探讨,逐渐从定性分析过渡到定量研究阶段。例如,有关黄河中游近30年来人类活动对径流量变化的影响程度,以前认为小于降水量的影响(李春晖等, 2009),后来通过多元统计分析,认为接近于降水量的影响(Xu, 2011),近年来根据累积量斜率变化率方法的研究结果为:人类活动对径流量变化的影响程度达到80%左右,表明人类活动成为研究区影响径流量变化的最主要因素(Wang et al, 2012; 王随继等, 2013)。

松花江流域作为中国重要的工农业生产基地,近年来随着人口的不断增加以及工农业和城市化的快速发展,由于农业灌溉引水和修建水利工程等,使得水循环要素的时空分布特征以及水量、水质都发生了明显变化,引起了湿地退化、水土流失、洪涝灾害频发等一系列的生态环境问题(陈静生等, 1999; 金春久等, 1999; 王金龙等, 2009)。虽然

收稿日期:2013-10; 修订日期:2013-12。

基金项目:国家自然科学基金项目(41271027);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB428404)。

作者简介:王彦君(1989-),女,河北邢台人,硕士生,主要研究方向为河流水文学、河流地貌学, E-mail: wangyj.11s@igsrr.ac.cn。

通讯作者:王随继(1966-),甘肃静宁人,副研究员,主要从事河流地貌学与河流沉积学研究, E-mail: wangsj@igsrr.ac.cn。

前人对松花江流域径流量已开展了一定的研究 (Feng et al, 2011; Miao et al, 2011; 宋小燕等, 2009; 徐东霞等, 2009), 但很少涉及气候变化和人类活动对径流量变化影响程度的定量估算。

基于此, 本文利用累积量斜率变化率方法, 对松花江流域4个主要区段内径流量变化的气候和人类活动的影响程度进行了估算, 以期为松花江流域的治理和水资源可持续利用及管理提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

松花江流域是中国七大流域之一, 位于东北地区的北部(119°52'~132°31'E, 41°42'~51°38'N), 干流

全长2309 km, 流域面积55.68万 km², 是黑龙江最大的支流(图1)。有南、北两源, 南源为第二松花江, 北源为嫩江。北源嫩江发源于黑龙江省大兴安岭伊勒呼里山中段南侧的南瓮河, 全长1379 km, 流域面积28.3万 km², 占松花江总流域面积的51.9%, 流量占松花江干流的31%。南源发源于长白山主峰白头山天池, 河源海拔高程2744 m, 全长795 km, 流域面积78180 km², 占松花江流域总面积的14.3%, 贡献松花江干流水量的39%。嫩江与第二松花江在吉林省扶余县的三岔河附近汇合, 干流东流至同江附近注入黑龙江(宋小燕, 2010)。

松花江流域多年平均气温在3~5℃之间, 年较差较大, 7月份日平均温可达20~25℃, 1月份在-20℃以下。多年平均降水量500 mm左右, 其中东南部山区降水可达700~800 mm, 西部地区只有

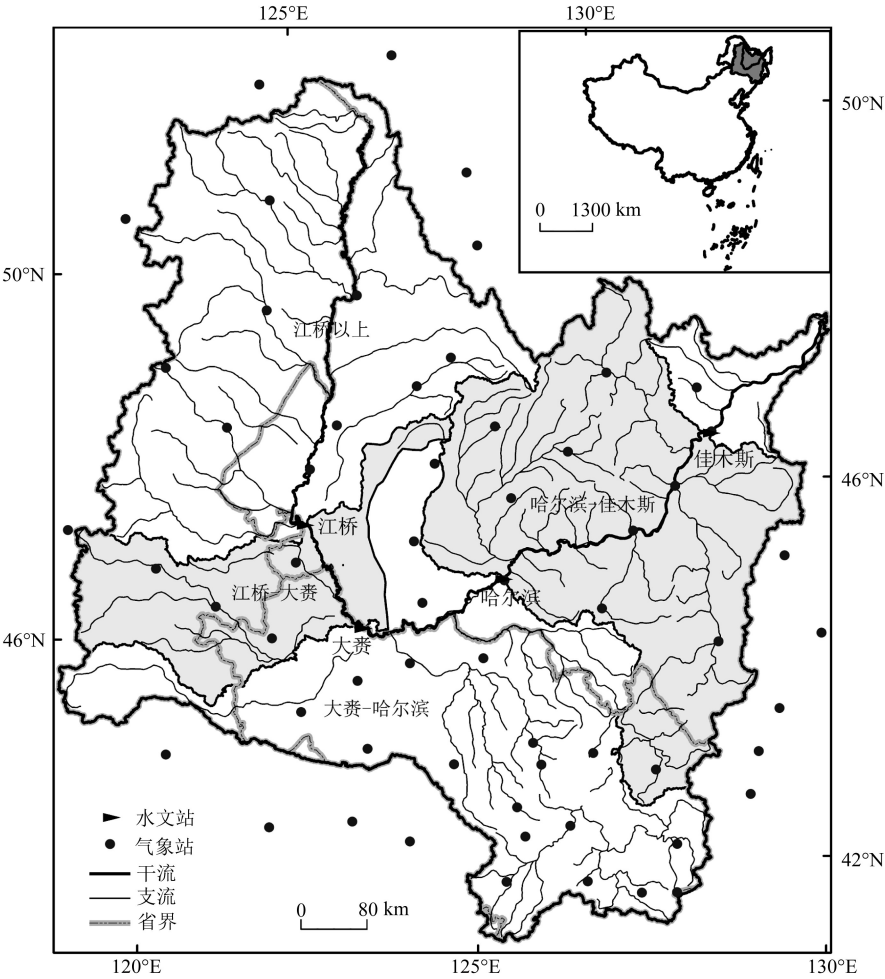


图1 松花江流域不同区段分布及气象站位置

Fig.1 Locations of different sections and meteorological stations in and around the Songhua River Basin

400 mm,整体呈现从东南向西北递减的趋势。流域西部为大兴安岭,北部为小兴安岭,东部和南部为完达山脉和长白山脉,西南部的丘陵地带是松花江与辽河的分水岭,中部为松嫩平原。流域内山区占42.7%,丘陵区占29.1%,平原占27.4%,其他占0.8%。

松花江主要流经黑龙江、吉林两省和内蒙古自治区的东北部,其中黑龙江省境内的流域面积占整个流域面积的48.5%,吉林省占流域面积的24%,内蒙古自治区境内约占28%。

2.2 数据来源

本研究涉及松花江干流江桥、大赉、哈尔滨及佳木斯4个水文站,其中前两站位于嫩江,后两站位于第二松花江汇流后的下游段,据此将松花江流域佳木斯以上河段分为江桥以上、江桥—大赉、大赉—哈尔滨、哈尔滨—佳木斯4个不同的汇流区段(图1),其中江桥—大赉区段汇流面积仅为59146 km²,其他3个区段汇流面积均在15万 km²左右(表1)。径流量数据序列长度为1955-2010年,数据来源为《黑龙江流域水文资料》(中华人民共和国水利部水文局)与《松花江流域泥沙公报2009》(<http://www.slwr.gov.cn/slwsldt/>)。

研究总计涉及61个气象站(其中16个位于流域外)的降水资料。气象站点1955年为36个,1960年增加到55个,1988年后增加到60个左右,数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)。利用ArcGIS 9.3 克里格(Kriging)插值方法,得到上述时期不同区段汇流面积内的年平均降水量。

其他人口和水利建设相关数据来源于《中国水利年鉴》、《黑龙江统计年鉴》和《吉林统计年鉴》。

2.3 研究方法

首先分别应用趋势线分析法和累积距平法分析不同区段径流量的变化趋势,并识别径流量时间序列的突变点,其中累积距平方法判断突变点的机

理和依据在前人文献中已有详细介绍(Ran et al, 2010)。然后,采用累积量斜率变化率分析方法(SCRCQ)(Wang et al, 2012; 王随继等, 2012, 2013)定量分析不同区段径流量变化过程中气候变化和人类活动的影响程度,并探讨不同人类活动对径流影响的阶段性变化。

累积量斜率变化率分析方法的原理有关文献中已有详细说明(Wang et al, 2012; 王随继等, 2012, 2013)。其核心是将变量所有影响因素的总和大小定义为1,根据各影响因素随时间累积的斜率变化率占变量累积斜率变化率的比值,来推求其对变量的影响程度。该方法的计算过程简述如下。

假定在累积径流量变化的某个拐点年份前后,年份与累积径流量之间线性拟合方程的斜率分别为 S_{R2} 和 S_{R1} (单位为10⁸ m³/a);年份与累积降水量之间线性拟合方程的斜率分别为 S_{P2} 和 S_{P1} (单位为mm/a),则降水对径流量变化的贡献率(C_P ,单位%)可以表示为:

$$C_P=100\times[(S_{P1}-S_{P2})/|S_{P2}|]/[(S_{R1}-S_{R2})/|S_{R2}|] \quad (1)$$

同样,拐点前后年份与累积蒸发之间线性拟合方程的斜率分别为 S_{E2} 和 S_{E1} (单位为mm/a),则蒸发对径流量变化的贡献率(C_E ,单位%)可表示为:

$$C_E=-100\times[(S_{E1}-S_{E2})/|S_{E2}|]/[(S_{R1}-S_{R2})/|S_{R2}|] \quad (2)$$

基于水量平衡原理,人类活动对径流量减少的贡献率 C_H (单位%)为:

$$C_H=100-C_P-C_E-C_G \quad (3)$$

式中: C_G 为地下水对径流量的影响。

根据Meng等(2012)对松花江径流量变化的研究,蒸发量对径流量的影响很小,同时由于研究区长系列持续观测的蒸散量数据难以获得,因此本文未考虑蒸散对径流量的影响。同时,地下水主要通过改变径流的年内分配来影响产流量,其对年际尺度上径流的影响可忽略不计。因此松花江径流量变化的主控因素可以归结为降水量和人类活动。由此,(3)式可简化为: $C_H=100-C_P$ 。

表1 松花江流域不同区段年径流特征值

Tab.1 Eigenvalues of annual runoff in different sections of the Songhua River

区段	控制流域面积/km ²	时段	年平均径流量/10 ⁸ m ³	年平均径流深/mm	年平均降水量/mm
江桥以上	162569	1955-2010	202.44	124.53	483.93
江桥—大赉	59146	1955-2010	3.47	5.86	421.98
大赉—哈尔滨	168054	1955-2010	200.57	119.35	562.88
哈尔滨—佳木斯	138508	1955-2010	225.28	162.65	571.11

3 结果与分析

3.1 区段径流量年际变化及趋势分析

图2为松花江干流江桥以上、江桥—大赉、大赉—哈尔滨及哈尔滨—佳木斯4个不同区段径流量年际变化过程曲线。其中江桥以上区段年径流量多年平均值为202.44亿 m³,除1998年特大值外,其他年份年际波动性较小;江桥—大赉区段因为汇流面积小,且无较大支流的汇入,年径流量很小,多年平均值仅为3.47亿 m³,加之人类对水资源开发利用强度增大,1999年以来,该区段径流量持续小于0;大赉—哈尔滨和哈尔滨—佳木斯两个区段年径流量的多年平均值分别为200.57亿 m³、225.28亿 m³,两个区段年径流量同步性较好,波动性不大。

应用线性趋势分析法分析各区段年径流的变化趋势。图2显示江桥以上、江桥—大赉、大赉—哈尔滨及哈尔滨—佳木斯4个区段年径流在波动中整体呈现减少趋势,变化速率分别为 $-1.54\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 、 $-0.65\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 、 $-1.20\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 和 $-2.32\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 。年径流减少量占总量百分比分别为-0.76%、-18.73%、-0.6%和-1.03%,可见江桥—大赉区段径流减少的程度最大。

3.2 径流量突变分析及阶段划分

为消除不同区段径流量大小之间的差异,对各区段年径流量距平进行了标准化处理。图3显示江桥以上区段年径流量在1963和1998年出现了由增大到减少的转变,1982年为减少到增加的转变(图3a);江桥—大赉区段年径流量在1962和1998年发生了由增加到减少的突变,1985年为减少到增加

的突变(图3b);大赉—哈尔滨区段整个时间序列的年径流量处于波动中,在1988年附近发生了增加到减少的突变(图3c);哈尔滨—佳木斯区段年径流量在整个时间序列在1966年出现增加到减少的突变,1980年由减少转为增加,1998年为从增加到减少的突变(图3d)。

江桥以上、江桥—大赉和哈尔滨—佳木斯3个区段年径流在整个时间序列中均发生了3次突变,呈现增加—减少—增加—减少的4个不同变化阶段,其中嫩江江桥以上和江桥—大赉两个区段年径流突变的时间比较一致,哈尔滨—佳木斯区段年径流量第一次突变发生的时间较晚。大赉—哈尔滨区段年径流量在整个时间序列只出现了一个突变点。4个区段的突变点出现年份不同的原因在于各影响因素发生作用的时间相异。多个突变点的出现表明影响因素发生了多次变化。

根据上述突变点将不同区段年径流量的整个时间序列划分为不同的时间阶段(表2),其中第一阶段为 T_1 ,之后依次为 T_2 、 T_3 、 T_4 。

3.3 主控因素影响程度的估算

江桥以上、江桥—大赉、大赉—哈尔滨及哈尔滨—佳木斯4个区段面平均年均降水量分别为483.93 mm、421.98 mm、562.88 mm和571.11 mm;江桥—大赉区段为松嫩平原的一部分,降水量最少;大赉—哈尔滨区段位于流域的最南端降水量最大。图4显示上述4个区段年降水量波动性不大,并且具有较好的同步性。

应用线性趋势分析法得出江桥以上、江桥—大赉、大赉—哈尔滨及哈尔滨—佳木斯4个区段面平均年降水量在波动中整体呈现减少的变化趋势,变

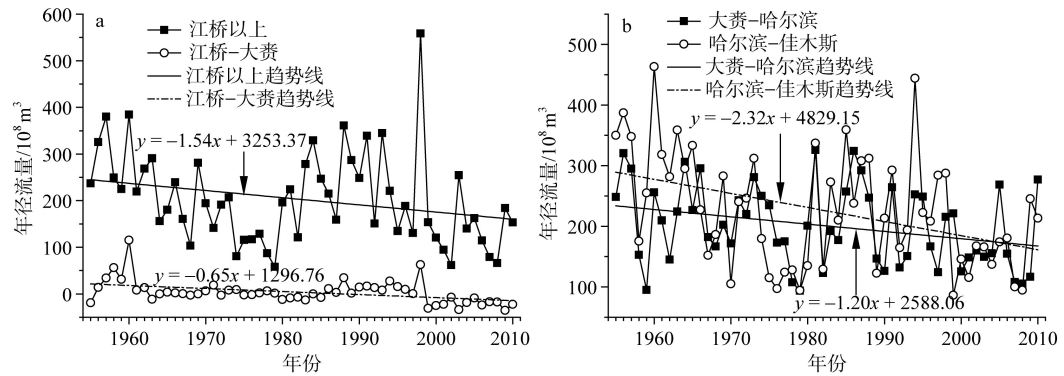


图2 松花江不同区段径流量年际变化和总体趋势

Fig.2 Annual variations and general tendency of runoff in different sections of the Songhua River

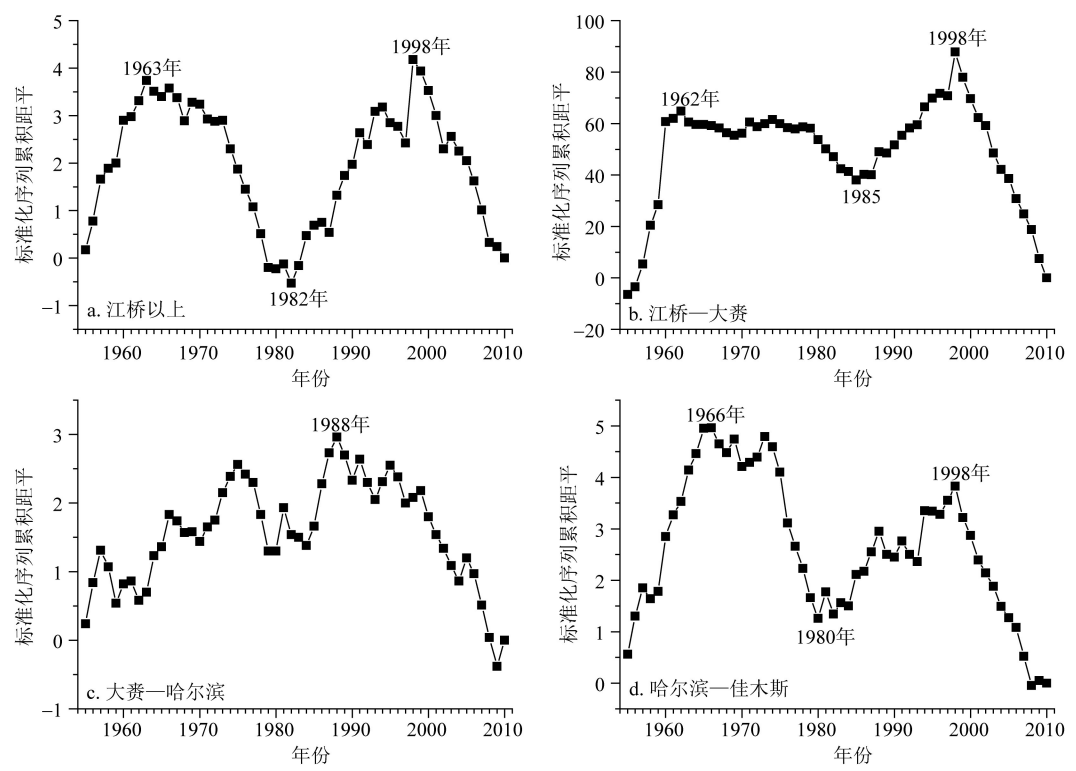


图3 松花江流域不同区段标准化年径流序列累积距平曲线

Fig.3 Cumulative anomaly of standardized annual runoff in different sections of the Songhua River

表 2 松花江流域不同区段年径流的时段划分

Tab.2 Periods divided with inflexion year of runoff in different sections of the Songhua River				
区段	江桥以上	江桥—大赉	大赉—哈尔滨	哈尔滨—佳木斯
T_1	1955-1963 年	1955-1962 年	1955-1988 年	1955-1966 年
T_2	1964-1982 年	1963-1985 年	1989-2010 年	1967-1980 年
T_3	1983-1998 年	1986-1998 年		1981-1998 年
T_4	1999-2010 年	1999-2010 年		1999-2010 年

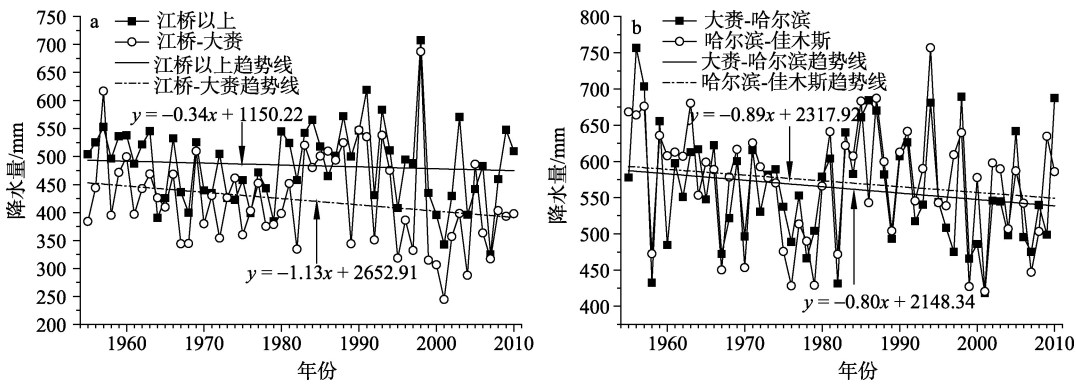


图4 松花江流域不同区段降水量年际变化和总体趋势

Fig.4 Annual variations and general tendency of precipitation in different sections of the Songhua River

化率分别为 -0.34 mm/a、-1.13 mm/a、-0.89 mm/a 和 -0.80 mm/a。可见江桥—大赉区段年降水量减少程度最大,江桥以上区段年降水量变化最小。

对比不同区段降水和径流的变化,降水的变化率明显小于径流的变化率。将各区段径流量第一个突变年份之前的时期(T_1)可作为受控于气候因素

的基准期,这是目前同类研究中较为一致的做法。只有确定了基准期,突变点之后相关因素的变化与基准期相比较,才能揭示某变量的变化量或变化率。突变点的出现表明影响因素发生了变化,突变点之后的时期可以看作气候变化和人类活动共同影响的措施期。

利用径流量的突变年份为界,分别对不同时期年份与累积降水量、年份与累积径流量进行线性回归分析,得到的关系式分别见图5和图6。两类关系式的决定系数 R^2 均大于0.99,表明相关性很强。根据累积量斜率变化率方法中有关参数的获取和计算方法(Wang et al, 2012; 王随继等, 2013),从上述公式中分别提取相关线性关系式的斜率及据其计算的变化率列于表3,其中变化率大于0,表示减少趋势;小于0,为增加趋势。由于所有线性关系式的相关系数都高于0.99,也就是说99%的部分都可以合理解释,其误差部分仅为1%。所以在提取各线性关系式斜率值时保留到小数点后两位,可完全满足计算精度需要。最后给出的各影响因素的贡献率单位为%,实际数值仍然是小数点后两位,精度和误差没有发生变化,该精度对于各影响因素的

贡献率来说已经足够。

表3为根据累积量斜率变化率方法定量估算的各措施期降水和人类活动对径流变化的影响程度。与 T_1 时期相比,江桥以上、江桥一大赉和哈尔滨—佳木斯3个区段 T_2 时期降水对径流的影响程度分别为29%、12%、29%,而人类活动的影响程度分别为71%、88%、71%; T_3 时期降水的影响程度分别为4%、6%、3%,而人类活动的影响程度为96%、94%、97%; T_4 时期降水对径流影响程度为28%、15%、21%,而人类活动的影响大小分别为72%、85%和79%。

可见,上述3个区段降水对径流的影响程度 T_3 时期最小,仅为5%左右,而人类活动对径流的影响程度达到了95%左右, T_2 和 T_4 两个时期主控因素影响程度相差不大,说明降水对径流的影响程度为先减少后增加,而人类活动对径流的影响程度在20世纪80-90年代达到最大,进入21世纪后减少到 T_2 时期的程度。大赉—哈尔滨区段年径流在整个时间序列中只存在一个突变点,措施期(T_2 时期)降水对径流的影响程度为25%,而人类活动对径流的影响程度为75%。显然,人类活动是径流减少最重要

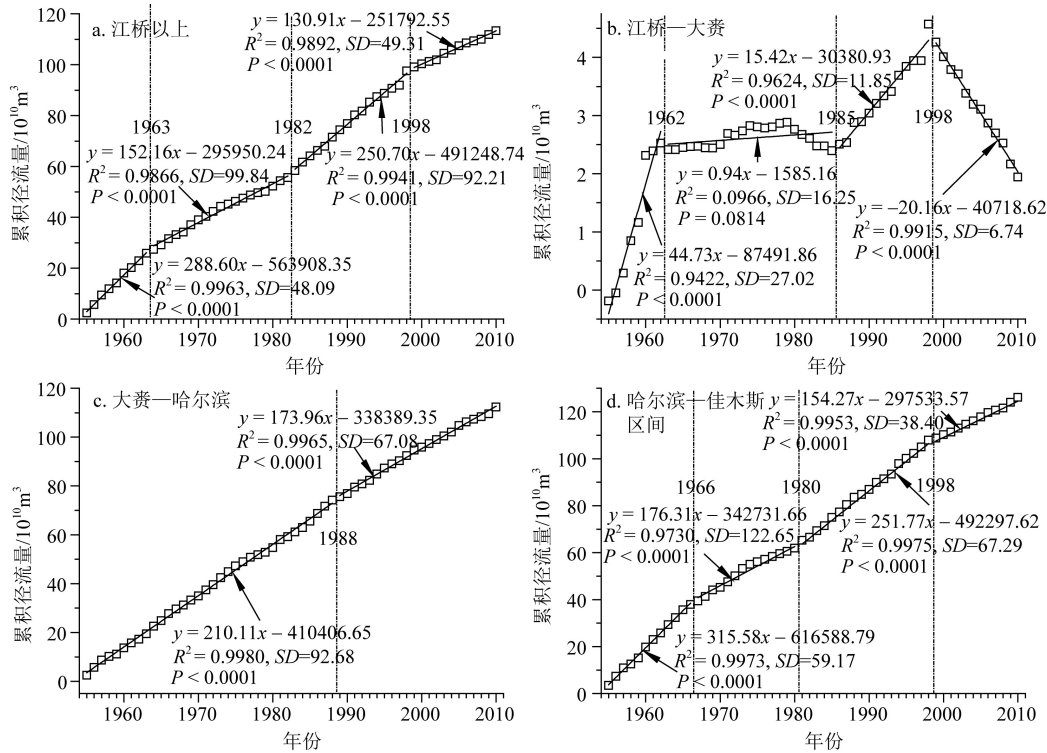


图5 松花江流域不同区段年份与累积径流量关系

Fig.5 Changes of cumulative runoff along the years in different sections of the Songhua River

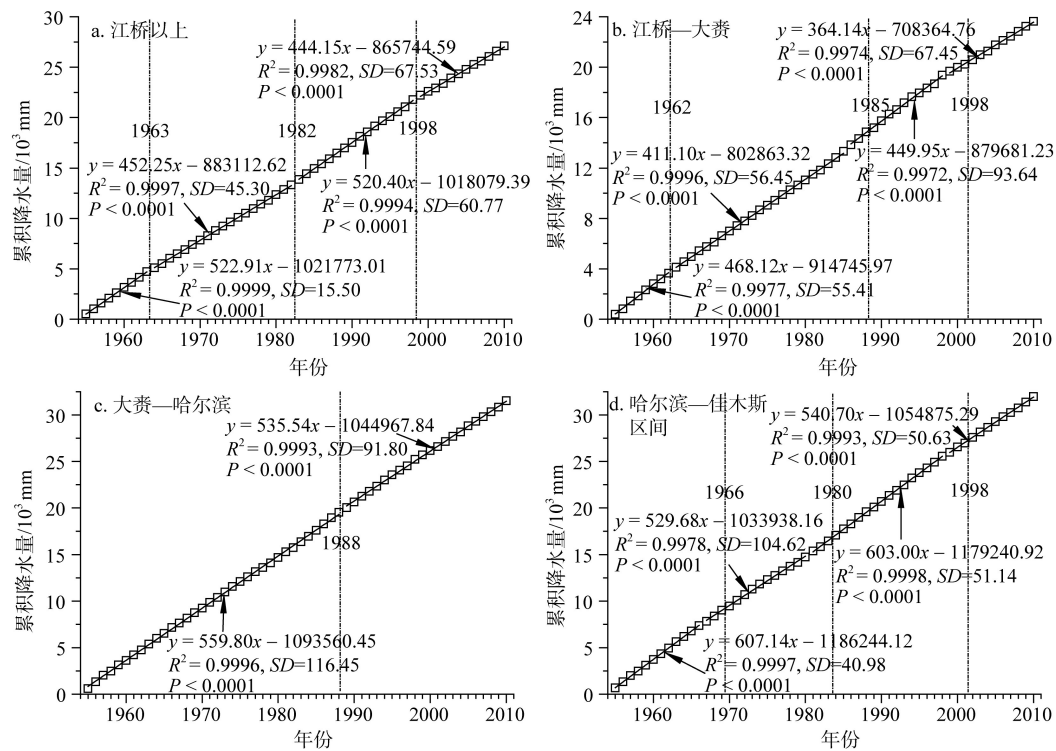


图6 松花江流域不同区段年份与累积降水量关系

Fig.6 Changes of cumulative precipitation along the years in different sections of the Songhua River

表 3 不同时期松花江流域各区段累积量斜率变化率及降水和人类活动的影响程度

Tab.3 Slope change ratio of cumulative quantity and the quantitative impact of precipitation and human activities on runoff change for different sections of the Songhua River in different periods							
区段	时期	降水量 S_p /(mm/a)	变化率/%	径流量 S_R /(10^8 m^3 /a)	变化率/%	降水贡献 C_p /%	人类活动贡献 C_H /%
江桥以上	T_1	522.91		288.6			
	T_2	452.25	13.51	152.16	47.28	29	71
	T_3	520.4	0.48	250.7	13.13	4	96
	T_4	444.15	15.06	130.91	54.64	28	72
江桥—大赉	T_1	468.12		44.73			
	T_2	411.1	12.18	0.94	97.90	12	88
	T_3	449.95	3.88	15.42	65.53	6	94
	T_4	364.14	22.21	-20.16	145.07	15	85
大赉—哈尔滨	T_1	559.8		210.11			
	T_2	535.54	4.33	173.96	17.21	25	75
哈尔滨—佳木斯	T_1	607.14		315.58			
	T_2	529.68	12.76	176.31	47.14	29	71
	T_3	603	0.68	251.77	20.22	3	97
	T_4	540.7	10.94	154.27	51.12	21	79

的影响因素。

3.4 人类活动因素分析

以上分析结果虽然表明,松花江流域径流量变化主要受人类活动影响,但需要对各时期主要人类

活动作进一步分析。由于内蒙古境内的松花江位于嫩江中上游,人口密度较小,植被覆盖度较大,故可认为该区人类活动的影响相对较小。以下仅以黑龙江和吉林两省为例,从人口变化、水土保持工

作、水库建设等方面对此进行讨论。

松花江流域是中国最重要的农业生产基地之一,自20世纪50年代以来,随着人口的快速增加,耕地面积和有效灌溉面积不断增加。黑龙江和吉林两省人口分别从1955年的1321.2万人、1202.1万人增长到2010年的3833.4万人和2723.8万人,其中上述两省人口分别在20世纪90年代末和80年代末之前增加较快,之后有所放缓(图7a)。

黑龙江省耕地的有效灌溉面积从1957年的29.89万 hm^2 增加到2010年的387.50万 hm^2 ,吉林省则从1955年的14万 hm^2 增加到2010年172.68万 hm^2 ,增长约12倍,其中两省有效灌溉面积分别在20世纪90年代末和90年代初进入活跃阶段(图7b)。

松花江流域水土保持工作从20世纪50年代开始,主要包括修建水平梯田、塘坝和植树种草等水土保持措施。黑龙江和吉林两省水土流失治理面积分别从1952年的26万 hm^2 和1956年的13.73万 hm^2 增长到2010年的469万 hm^2 和358.66万 hm^2 ,其中20世纪80年代中期以后加快了水土流失治理速度(图7c)。

水库对调节流域径流起着重要的作用,黑龙江省水库数量从1957年的9个增加到2010年的913个,相应库容从9.66亿 m^3 增加到178.7亿 m^3 ;吉林省水库从1949年的12个增长到2010年的1643个,相应库容从125亿 m^3 增加到320.39亿 m^3 ,其中黑龙江省大兴水库建设时期为20世纪80年代初以前,以及及进入21世纪之后;吉林省大兴水库建设时期为20世纪90年代以前(图7d)。

松花江流域黑龙江省境内(江桥以上、江桥—大赉和哈尔滨—佳木斯区段)20世纪80年代之前人类活动对径流量的影响主要是由人口增加和水库的大量修建水库引起的;80年代初至90年代末流域内大规模开展水土流失治理和农业有效灌溉面积的快速增长,导致人类活动对径流的影响进一步增强;进入21世纪之后,人口增长放缓,大型水库建设除嫩江上游尼尔基水库2006年投入运行外,增长亦放慢;水土流失治理力度加大和农业灌溉持续增加,但人类活动对径流的影响程度减轻,主要是由于流域内水土流失治理开始发挥效益。

松花江流域吉林省境内(大赉—哈尔滨区段)20世纪80年代末之前为人口快速增长和大兴水库建

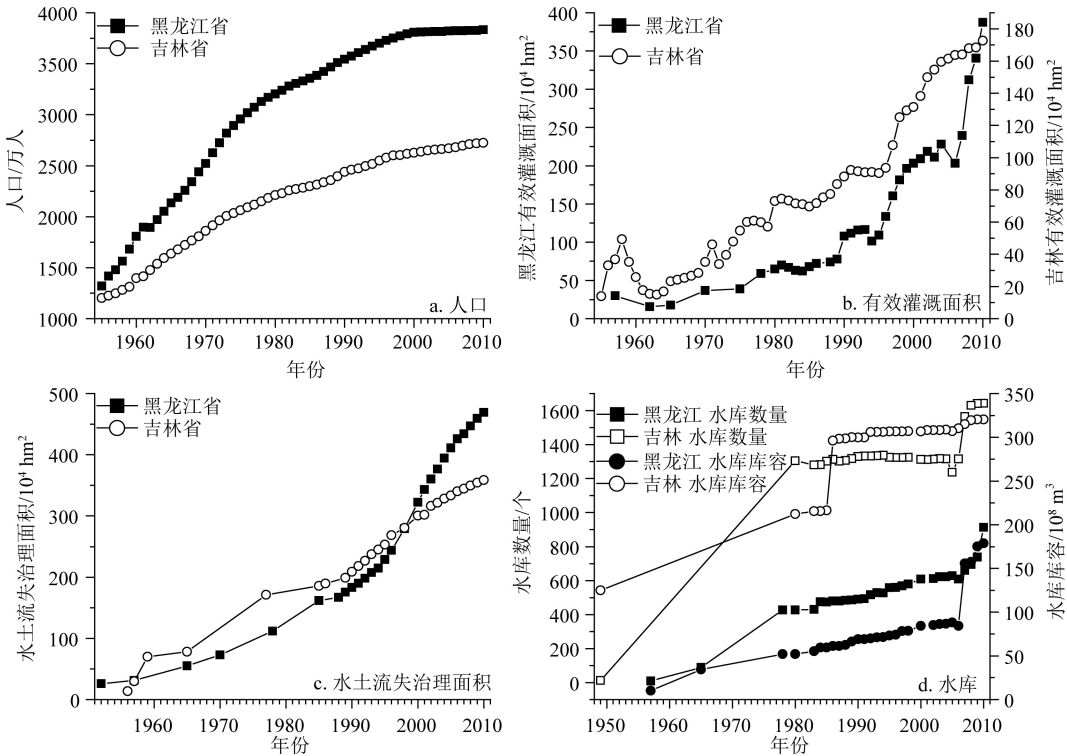


图7 黑龙江省和吉林省主要人类活动变化过程

Fig.7 Variations of main human activities in Heilongjiang and Jilin Province

设阶段,和这一区段1988年左右径流量发生突变相吻合;进入90年代之后影响径流量的主要人类活动为农业灌溉和水土流失治理。据此可知,引起径流量减少的主要人类活动为人口增长和水库修建增加的引水活动。

4 结论

应用统计方法分析了松花江流域4个不同区段径流量变化规律,并定量估算了主控因素的影响程度,主要结论如下:

(1) 松花江流域江桥以上、江桥—大赉、大赉—哈尔滨和哈尔滨—佳木斯4个区段1955-2010年径流量多年平均值分别为202.44亿 m^3 、3.47亿 m^3 、200.57亿 m^3 和225.28亿 m^3 ,径流量整体呈现减少趋势,其中江桥—大赉区段年径流量减少程度最大。

(2) 江桥以上、江桥—大赉和哈尔滨—佳木斯3个区段径流量在1955-2010年间各存在3个突变年份,并可划分为4个不同的变化阶段;大赉—哈尔滨区段只存在1988年一个突变年份。

(3) 以第一个变化阶段(T_1)为基准期,在不考虑蒸散的情况下,定量估算了各措施期降水量变化和人类活动对径流量变化的影响程度:江桥以上、江桥—大赉、哈尔滨—佳木斯3个区段降水对径流量变化的影响程度在 T_2 、 T_3 、 T_4 时期分别约为12%~29%、3%~6%和15%~28%,人类活动对径流量变化的影响程度分别为71%~88%、94%~97%和72%~85%,其中 T_3 期影响最大、 T_4 期明显减小;大赉—哈尔滨区段 T_2 期人类活动的影响程度为75%,而降水的影响程度为25%。人类活动是径流量减少最主要的影响因素,人口增长和水利工程引水是引起径流减少的主要人类活动。

参考文献(References)

曹建廷, 秦大河, 罗勇, 等. 2007. 长江源区1956-2000年径流量变化分析. 水科学进展, 18(1): 29-33. [Cao J T, Qin D H, Luo Y, et al. 2007. Discharge changes of Yangtze River in source area during 1956-2000. Advances in Water Science, 18(1): 29-33.]

陈静生, 夏星辉, 张利田, 等. 1999. 长江、黄河、松花江60-80年代水质变化趋势与社会经济发展的关系. 环境科学

学报, 19(5): 500-505. [Chen J S, Xia X H, Zhang L T, et al. 1999. Relationship between water quality changes in the Yangtze, Yellow and Songhua Rivers and the economic development in the river basins. Acta Scientiae Circumstantiae, 19(5): 500-505.]

黄荣辉, 杜振彩. 2010. 全球变暖背景下中国旱涝气候灾害的演变特征及趋势. 自然杂志, 32(4): 187-195. [Huang R H, Du Z C. 2010. Evolution characteristics and trend of droughts and floods in china under the background of global warming. Chinese Journal of Nature, 32(4): 187-195.]

金春久, 赵峰, 孟庆红, 等. 1999. 湿地在松花江流域防洪抗旱中的作用及保护措施初探. 水资源保护, 58(4): 3-4. [Jin C J, Zhao F, Meng Q H, et al. 1999. Analysis on the effect of wetlands on the floods and protective measures in the Songhua River Basin. Water Resources Protection, 58(4): 3-4.]

孔岩, 王红, 任立良. 2012. 黄河入海径流变化及影响因素. 地理研究, 31(11): 1981-1990. [Kong Y, Wang H, Ren L L. 2012. Analysis of runoff variation of the Yellow River to the sea and its influencing factors. Geographical Research, 31(11): 1981-1990.]

李春晖, 郑小康, 杨志峰, 等. 2009. 黄河天然径流量变化趋势及其影响分析. 北京师范大学学报: 自然科学版, 45(1): 80-85. [Li C H, Zheng X K, Yang Z F, et al. 2009. Trends of annual natural runoff in the Yellow River Basin. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 45(1): 80-85.]

刘彤, 闫天池. 2011. 我国的主要气象灾害及其经济损失. 自然灾害学报, 20(2): 90-95. [Liu T, Yan T C. 2011. Main meteorological disasters in China and their economic losses. Journal of Natural Disasters, 20(2): 90-95.]

孟德娟, 莫兴国. 2013. 气候变化对不同气候区流域年径流影响的识别. 地理科学进展, 32(4): 587-594. [Meng D J, Mo X G. 2013. Identification of impact of climate change on annual runoff in typical basins of different climate zones. Progress in Geography, 32(4): 587-594.]

宋小燕, 穆兴民, 高鹏, 等. 2009. 松花江哈尔滨站近100年来径流量变化趋势. 自然资源学报, 24(10): 1803-1809. [Song X Y, Mu X M, Gao P, et al. 2009. Trends of runoff variation from 1900 to 2005 at Harbin Station of Songhua River. Journal of Natural Resources, 24(10): 1803-1809.]

宋小燕. 2010. 松花江流域水沙演变及其对人类活动的响应[D]. 北京: 中国科学院研究生院. [Song X Y. 2010. Precipitation, streamflow and sediment transport changes

- and its response to human activities in Songhua Basin [D]. Beijing, China: Graduate University of Chinese Academy of Sciences.]
- 王金龙, 刘学伟, 张林. 2009. 黑龙江省水土流失现状及防治对策研究. 东北农业大学学报, 40(9): 131-135. [Wang J L, Liu X W, Zhang L. 2009. Study of soil erosion situation and counter measures in Heilongjiang Province. Journal of Northeast Agricultural University, 40(9): 131-135.]
- 王随继, 李玲, 颜明. 2013. 气候和人类活动对黄河中游区段产流量变化的贡献率. 地理研究, 32(3): 395-402. [Wang S J, Li L, Yan M. 2013. The contributions of climate change and human activities to the runoff yield changes in the middle Yellow River Basin. Geographical Research, 32(3): 395-402.]
- 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 2012. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析: 累积量斜率变化率比较方法的提出及应用. 地理学报, 67(3): 388-397. [Wang S J, Yan Y X, Yan M, et al. 2012. Quantitative estimation of the impact of precipitation and human activities on runoff change of the Huangfuchuan River Basin. Acta Geographica Sinica, 67(3): 388-397.]
- 奚秀梅, 刘海隆. 2013. 塔里木河干流径流量变化与太阳黑子活动的关系. 地理科学进展, 32(6): 880-886. [Xi X M, Liu H L. 2013. Relationship between annual runoff of the mainstream of Tarim River and sunspots activity. Progress in Geography, 32(6): 880-886.]
- 徐东霞, 章光新, 尹雄锐. 2009. 近50年嫩江流域径流变化及影响因素分析. 水科学进展, 20(3): 416-421. [Xu D X, Zhang G X, Yin X R. 2009. Runoff variation and its impacting factor in Nenjiang River during 1956-2006. Advanced in Water Science, 20(3): 416-421.]
- 姚治君, 管彦平, 高迎春. 2003. 潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析. 地理科学进展, 22(6): 599-606. [Yao Z J, Guan Y P, Gao Y C. 2003. Analysis of distribution regulation of annual runoff and affection to annual runoff by human activity in the Chaobai River. Progress in Geography, 22(6): 599-606.]
- 张建云, 王国庆. 2009. 气候变化与中国水资源可持续利用. 水利水运工程学报, (4): 17-21. [Zhang J Y, Wang G Q. 2009. Climate change and sustainable utilization of water resources in China. Hydro-Science and Engineering, (4): 17-21.]
- Chen X Q, Zong Y Q, Zhang E F, et al. 2001. Human impacts on the Changjiang (Yangtze) River Basin, China, with special reference to the impacts on the dry season water discharges into the sea. Geomorphology, 41(2-3): 111-123.
- Feng X Q, Zhang G X, Yin X R. 2011. Hydrological responses to climate change in Nenjiang river basin, Northeastern China. Water Resources Management, 25(2): 677-689.
- Hao X X, Chen Y N, Xu C C, et al. 2008. Impacts of climate change and human activities on the surface runoff in the Tarim River Basin over the last fifty years. Water Resources Management, 22(9): 1159-1171.
- Li L J, Zhang L, Wang H, et al. 2007. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River Basin in China. Hydrological Processes, 21(25): 3485-3491.
- Meng D J, Mo X G. 2012. Assessing the effect of climate change on mean annual runoff in the Songhua River Basin, China. Hydrological Process, 26(7): 1050-1061.
- Miao C Y, Yang L, Liu B Y, et al. 2011. Streamflow changes and its influencing factors in the mainstream of the Songhua River Basin, Northeast China over the past 50 years. Environmental Earth Sciences, 63(3): 489-499.
- Ran L S, Wang S J, Fan X L. 2010. Channel change at toudaoguai station and its responses to the operation of upstream reservoirs in the upper Yellow River. Journal of Geographical Sciences, 20(2): 231-247.
- Wang G S, Xia J, Chen J. 2009. Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model: a case study of the Chaobai River basin in northern China. Water Resources Research, 45(7): W00A11.
- Wang S J, Yan M, Yan Y X, et al. 2012. Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River. Quaternary International, 282: 66-77.
- Xu J X. 2011. Variation in annual runoff of the Wudinghe River as influenced by climate change and human activity. Quaternary International, 244: 230-237.
- Zhao F F, Xu Z X, Zhang L, et al. 2009. Streamflow response to climate variability and human activities in the upper catchment of the Yellow River Basin. Science in China: Technological Sciences, 52(11): 3249-3256.

Quantification of impacts of precipitation and human activities on runoff changes in different sections of Songhua River during 1955–2010

WANG Yanjun^{1,2}, WANG Suiji¹, Su Teng^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The surface runoff of some rivers in the world has decreased significantly with global or regional climate changes and increasing human activities, which has caused severe eco-environmental problems. The Songhua River is a large river in Asia and its basin is an important bread basket in China. The runoff of the whole river basin and in different sections has experienced dramatic changes over the last few decades. It is necessary to study the trend of the runoff changes and quantify the influencing factors on the changes. Based on annual runoff data at 4 gauging stations in the mainstream of the river and annual precipitation data from 61 meteorological stations in and around the river basin during 1955-2010, a decreasing trend of annual runoff and precipitation for four sections (above Jiangqiao, Jiangqiao-Dalai, Dalai-Haerbin and Haerbin-Jiamusi) was revealed using the linear trend method. The cumulative anomaly was employed to detect the abrupt changes of each runoff series. Three inflexion years for the runoff incremental changes were detected and they divided the entire period into four parts: above Jiangqiao (1963, 1982 and 1998), Jiangqiao-Dalai (1962, 1985 and 1998), Haerbin-Jiamusi (1966, 1980 and 1998), and only one turning year (1988) was found in Dalai-Haerbin section. The first period (T_1) is regarded as the baseline period; the others are measurement periods. Without considering the effect of evapotranspiration, the slope change ratio of cumulative quantity (SCRCQ) was adopted to estimate the impacts of precipitation and human activities on runoff changes for the sections. In above Jiangqiao (T_2 : 1964-1982, T_3 : 1983-1998), Jiangqiao-Dalai (T_2 : 1963-1985, T_3 : 1986-1998) and Haerbin-Jiamusi (T_2 : 1967-1980, T_3 : 1981-1998) sections, the impacts of human activities on runoff incremental decrease were 71%~88%, 94%~97% and 72%~85%, respectively, while those of precipitation were 12%~29%, 3%~6% and 15%~28%, respectively, for the measurement periods of T_2 , T_3 and T_4 (1999-2010) compared with T_1 . In the measurement period (1989-2010), the impact of human activities on runoff changes in Dalai-Haerbin section was 75%, while that of precipitation was 25%. Obviously, the human activities were the most important factor causing runoff yield reduction in the later three periods for different sections of this study area. In addition, the impacts of human activities on runoff yield changes reached the maximum in the 1980s and 1990s. Although the runoff yield for different sections showed different variation characteristics, the reduction is mainly due to population increase and construction of water conservation projects.

Key words: runoff change; inflexion year; precipitation; human activities; Songhua River Basin