第52卷第4期
2012年7月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol.52, No.4
July 2012

文章编号：1000-8608(2012)04-0559-08

东北地区典型水库控制流域径流变化及驱动因子分析

祝雪萍*， 张 弛， 曹明亮， 周惠成

（大连理工大学 水利工程学院，辽宁 大连 116024）

摘要： 结合3种趋势检验及模糊直接识别法对水文要素变化进行分析.以东北地区9个水库控制流域的气象、水文数据及土地利用情况为基础，重点分析了径流变化及其驱动因子降雨、降雨年内分布、蒸发及土地利用等变化情况.根据径流及其他因子的变化特征将研究水库流域归类成气候变化显著型（汤河、碧流河、观音阁及葠窝水库流域）、土地利用变化显著型（闹德海及丰满水库流域）及自然状况较好型（白山、桓仁及大伙房水库流域），继而对各类流域分别有针对性地提出变化深入分析方法及水库运行管理建议，最终为东北水库流域典型水文变化的深入研究奠定基础.

关键词： 水文变化；水库流域；气候变化；土地利用变化；趋势检验

中图分类号： TV12 **文献标志码：** A

0 引 言

在过去几十年中，东北地区的水库控制流域受气候变化及人类活动的影响，径流普遍呈现下降的趋势，导致水库调度规则及水库功能等产生调整的需求.针对单个流域进行水文要素的变化趋势分析[1,2]，未能整体把握东北地区的水库流域水资源变化特点.亟需对多个典型水库流域的水文要素及驱动因子进行变化趋势分析，为水库调度适应性调整奠定基础.

河川径流序列受天气系统和流域下垫面系统综合作用的影响，是一非线性、弱相依、高度复杂的动态系统[3].造成径流变化的驱动因子多种多样，各因子具有不同时空作用特点且相互之间关联性不强，导致研究复杂化.对于不同的流域，起主要作用的影响因子各不相同.为进行深入研究，有必要对各个影响因子的重要程度进行分析，从而有针对性地进行引水工程、水保工程等的合理规划及水库调度规则的调整.

国内外对水文序列趋势分析方面的研究很多[4-7]，一般采用一种或几种检验方法分别检验.Spearman秩次相关系数是一种等级相关系数，主要通过分析水文序列与其时序的相关性来进行趋势检验；Kendall秩次相关系数包括一种等级交错系数，主要通过分析水文序列与其配对等级顺序排位的位置是否颠倒或者换位，得出等级换位的次数，进而计算得到；线性趋势回归检验的目的是表达两个具有线性相关的变量间的定量关系.由于三者侧重点各不相同，能够起到相互补充的作用，且它们的检验统计量的大小均能够表征变化趋势的显著程度，最终选择三者共同对水文要素序列进行综合检验.另外，作为基础趋势检验方法，Spearman秩次相关检验、线性趋势回归及Kendall秩次相关检验法计算简单，容易实现，且有较多成功应用[6,7]；而模糊直接识别法能够简单有效地判断事物的归属，在选择使用多种分析方法时，可能出现各方法结果不同的情况，这时需引入模糊直接识别法快速识别出综合结果的归属.因此，本文结合这3种检验方法进行分析，并引进模糊直接识别法进行综合判定，构成趋势检验体系.借助于该水文要素趋势检验体系，首先对水库控制流域的径流量进行趋势检验，并对各流域的多个驱动因子分别进行趋势检验，判定各流域的主要驱动因子；根据径流及其他因子的变化

收稿日期： 2011-01-15； **修回日期：** 2012-05-22.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(50809010,51079014).
作者简介： 祝雪萍*(1985-)，女，博士生，E-mail：zxp198682@163.com.

特征将研究水库流域归类成3类，分别提出各类水库未来研究方向及对水库运行管理的建议.

1　研究区概况

选取东北地区有代表性的9个大型水库控制流域为研究对象，其主要位于吉林省、辽宁省及内蒙古边界，各水库控制流域位置见图1.选取的9个水库流域，最小面积1 228 km²(汤河水库)，最大面积23 500 km²(丰满水库)，各水库特征参数见表1，各水库总库容、流域面积、多年平均降雨及多年平均径流量数据摘自各水库管理局编写的水库调度工作手册.

以上各大型水库的水文要素站点及已有资料年份情况如表2所示，n为站点数，其中“－”指未搜集到该流域内的蒸发站实测资料或由于气象站点不在流域内或离流域较远，数据不适宜作为分析的依据.水库入库径流、降雨及蒸发资料由吉林省水文局及辽宁省水文局提供或由辽宁省水文年鉴、各水库调度工作手册查得.气象数据(包括流

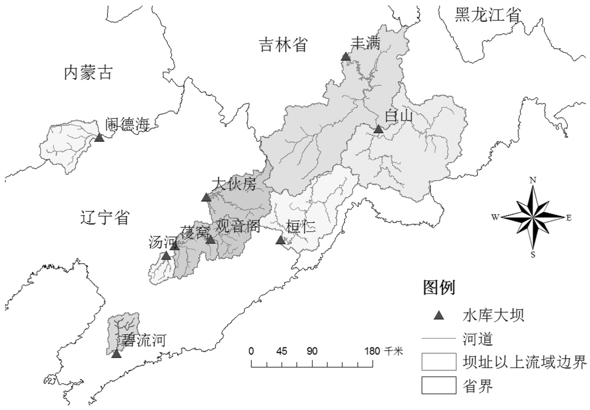

图1　研究区水库控制流域位置图

Fig.1　Location of the reservoir-controlled basins studied

表1　研究区水库概况

Tab.1　The characteristics of reservoirs studied

水库	水库类型	总库容/10⁸ m³	流域面积/km²	年代	多年平均降雨/mm	多年平均径流量/10⁸ m³
白山	大(Ⅰ)型	59.10	19 000	1940～2000	749.9	75.40
丰满	大(Ⅰ)型	110.00	23 500	1940～2000	738.0	123.40
闹德海	大(Ⅱ)型	2.23	4 051	1950～1990	419.0	2.61
大伙房	大(Ⅰ)型	22.68	5 437	1950～2000	792.4	14.70
桓仁	大(Ⅰ)型	34.60	10 400	1930～2000	830.4	44.80
观音阁	大(Ⅰ)型	21.68	2 795	1950～2000	826.3	9.85
葠窝	大(Ⅱ)型	7.91	3 380	1950～1990	822.0	24.50
汤河	大(Ⅱ)型	7.07	1 228	1950～2000	786.0	2.93
碧流河	大(Ⅱ)型	9.34	2 085	1950～2000	742.8	6.14

表2　大型水库流域的雨量站、蒸发站及气象站情况

Tab.2　The precipitation, evaporation and meteorological stations within each basin studied

水库流域	雨量站		蒸发站		气象站	
	年份	n	年份	n	年份	n
白山	1957～2005	4	—		1958～2007	3
丰满	1957～2005	23	1964～2006	1	1958～2007	5
闹德海	1956～2006(1970～2002)1)	1(8)1)	—		1958～2007	3
大伙房	1956～2007	9	1964～2000(缺1991)	3	1958～2007	2
桓仁	1970～2002	9	1964～2000(缺1991)	1	1958～2007	2
观音阁	1952～2008	6	1964～2000(缺1991)	2	—	
葠窝	1952～2006	6	—		1958～2007	1
汤河	1954～2006	3	1973～2006(缺1992～1994)	1	—	
碧流河	1978～2005(1958～2005)2)	9(1)2)	1964～2000(缺1991)	1	1958～2007	6

注：1)水文年鉴提供降雨资料；

2)碧流河水库调度手册提供水库大坝上游平均降雨量

域内及流域附近的)由中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/)提供.本文将以蒸发站实测蒸发资料为主,气象站资料估算水域蒸发为补充(针对无蒸发实测资料流域),分析各水库流域的多年蒸发变化趋势.

2　水文要素趋势检验体系

本文建立水文要素趋势检验体系,采用Spearman秩次相关检验、Kendall秩次相关检验及线性趋势回归检验[8]3种基本检验方法,并引进模糊直接识别法[9],综合判定水文序列的变化趋势:(1)对各单一检验方法检验结果的显著程度进行级别描述(表3、4);(2)将3种检验方法检验结果的显著性级别描述进行加权平均,求出综合检验结果;(3)根据级别隶属区间得出序列变化综合显著程度.

2.1　单检验结果级别描述

Spearman秩次相关检验[8]及线性趋势回归检验[8]的计算统计量均服从 T 分布,需要根据流域资料系列长度进行检验,通常取显著性水平 α 为0.1和0.01,当 $\alpha\leqslant 0.01$ 时,说明检验具有高度显著性水平;当 $0.01<\alpha\leqslant 0.1$ 时,说明检验是显著的[6,10].参考 T 统计量值的大小区间,将变化趋势的显著性程度划分为6个级别,并以数字±1、±2、±3描述,如表3所示.

表3　Spearman秩次相关及线性趋势回归检验统计结果级别描述

Tab.3　Level description of the results by using Spearman's rank correlation and linear trend regression inspections

检验区间	显著程度	级别描述
$(0, \lvert T_{0.1/2}\rvert)$	微弱上升/下降	±1
$(\lvert T_{0.1/2}\rvert, \lvert T_{0.01/2}\rvert)$	上升/下降	±2
$(\lvert T_{0.01/2}\rvert, +\infty)$	显著上升/下降	±3

Kendall秩次相关检验[8]:对于序列 $X=\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$,先确定所有对偶值 $(x_i, x_j; j>i)$ 中 $x_i<x_j$ 出现的个数(设为 p),顺序 (i,j) 的子集是 $(i=1; j=2,3,\cdots,n)$, $(i=2; j=3,4,\cdots,n)$, $\cdots$, $(i=n-1; j=n)$.如果按顺序前进的值全部大于前一个值,这是一种上升趋势,其中 $p=(n-1)+(n-2)+\cdots+1$,为等差级数,总和为 $\frac{1}{2}(n-1)n$.若系列全部倒过来,则 $p=0$,为下降趋势.由此可知,对无趋势的序列,p 的数学期望 $E(p)=\frac{1}{4}(n-1)n$.选取统计量为

$$Z=\tau/\sqrt{\mathrm{var}(\tau)}$$

其中 $\tau=\frac{4p}{n(n-1)}-1$;$\mathrm{var}(\tau)=\frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}$.当 n 足够大时,Z 近似服从标准正态分布.本文各流域资料为40～50 a,可以认为统计量服从标准正态分布.通常取显著性水平 α 为0.1和0.01,当 $\alpha\leqslant 0.01$ 时,说明检验具有高度显著性水平;当 $0.01<\alpha\leqslant 0.1$ 时,说明检验是显著的.在 α 计算结果满足上述条件情况下,如果 τ 为零,则 p 的数学期望为零,表明无趋势;若 τ 为正,则表明被检验序列具有上升趋势;若 τ 为负,说明被检验序列趋势是下降的.由于Kendall统计检验值能够以正负表征序列的上升或下降趋势,将其结果级别描述如表4.

表4　Kendall秩次相关检验统计结果级别描述

Tab.4　Level description of the test results by Kendall's rank correlation inspection

临界值	检验区间	显著程度	级别描述
$\lvert Z_{0.01/2}\rvert=2.575$	$(-\infty, -2.575]$	显著下降	−3
	$(-2.575, -1.645]$	下降	−2
	$(-1.645, 0)$	微弱下降	−1
$\lvert Z_{0.1/2}\rvert=1.645$	$(0, 1.645)$	微弱上升	1
	$[1.645, 2.575)$	上升	2
	$[2.575, +\infty)$	显著上升	3

2.2　模糊模式识别

模糊直接识别法[9]:给定论域 U 上 n 个模糊子集 A_{0_1}, A_{0_2}, $\cdots$, A_{0_n},并已确定隶属函数 $\mu_{A_{0_i}}(a_0)$, $i=1,2,\cdots,n$,其中 $a_0\in U$ 是一待识别的对象.根据最大隶属度原则,若 $\mu_{A_{0_i}}(a_0)=\max\limits_{j=1,2,\cdots,n}\mu_{A_{0_j}}(a_0)$,则 a_0 应归属于 A_{0_i}.文中有6个模糊子集 A_{0_1}, A_{0_2}, $\cdots$, A_{0_6},分别为微弱上升/下降、上升/下降及显著上升/下降;将上述3种检验结果的显著性级别描述进行加权平均,求出综

合检验结果 x,为待识别的对象;若 x 对 A_{0_i} 的隶属度最大,则综合显著程度结果 x 应归属于 A_{0_i}.

2.2.1 隶属函数简图 检验结果对各级别(±1、±2、±3)的隶属函数为三角形隶属函数,见图 2,其中 0 级别表示无变化趋势. 对于某一综合检验结果 x,落入两相邻级别之间,必隶属于其一,故只需计算其对于相邻两个级别(b 和 d)的隶属度,以确定它的归属级别.

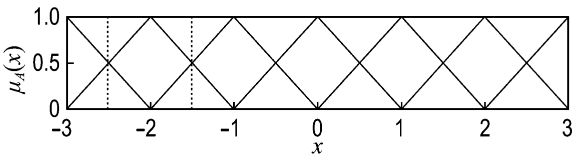

图 2 隶属函数简图

Fig. 2 Membership function diagram

2.2.2 模糊综合识别 根据最大隶属度原则,若 $\mu_{A_{0_b}}(x) > \mu_{A_{0_d}}(x)$,则 x 归属于级别 b;否则,x 归属于级别 d. 为便于检验结果的综合评定,结合隶属函数简图反推归属于各级别的隶属区间,结果见表 5.

表 5 综合隶属区间、归属级别和显著程度描述

Tab. 5 Comprehensive level description, significant degree and corresponding membership interval

隶属区间	归属级别	显著程度
[−3.0,−2.5)	−3	显著下降
[−2.5,−1.5)	−2	下降
[−1.5,−0.5)	−1	微弱下降
[−0.5,0.5]	0	无趋势
(0.5,1.5]	1	微弱上升
(1.5,2.5]	2	上升
(2.5, 3.0]	3	显著上升

3 径流变化分析

研究首先引用趋势检验体系对各水库多年平均入库径流量进行检验分析,发现各大型水库的年径流量均为下降趋势,大致形成 3 个级别:微弱下降、下降及显著下降,见表 6. 由表 6 可知,葠窝和碧流河水库径流呈显著下降趋势;丰满、闹德海、观音阁及汤河水库呈下降趋势;其余 3 个水库流域仅呈现出微弱下降趋势.

表 6 研究区大型水库年径流量变化趋势检验

Tab. 6 Trend analysis result of annual inflow variation for each reservoir studied

水库	Kendall	Spearman	线性趋势回归	综合检验	归属级别	综合显著程度
白山	−1	−1	−1	−1.0	−1	微弱下降
丰满	−2	−2	−2	−2.0	−2	下降
闹德海	−3	−2	−1	−2.0	−2	下降
大伙房	−1	−1	−1	−1.0	−1	微弱下降
桓仁	−1	−1	−1	−1.0	−1	微弱下降
观音阁	−2	−2	−1	−1.7	−2	下降
葠窝	−3	−3	−3	−3.0	−3	显著下降
汤河	−2	−2	−1	−1.7	−2	下降
碧流河	−3	−3	−3	−3.0	−3	显著下降

4 驱动因子分析

气候变化和土地利用变化是影响水文循环的最主要因素. 对于入库流量变化不同级别的水库流域,造成其变化的原因是多样而复杂的. 因此,必须对各水库流域的相关驱动因子进行深入检验分析,根据实际情况,判别各水库相应的主要变化原因.

4.1 气候因子

降雨是径流的直接来源,是气候因素中最为重要的因素. 降雨的年内分布也影响着径流的变化;蒸发对产汇流有着不容忽视的影响,且能够综合体现气温、太阳辐射等多种气候因子的变化. 故选取降雨、降雨年内分布及蒸发作为本文的主要气候分析因子.

4.1.1 降雨及降雨年内分布 各流域降雨及降雨年内分布趋势检验结果见表 7. 可以看出,汤河和碧流河水库的多年平均降雨呈下降趋势,其余各水库流域的降雨均呈微弱下降趋势;碧流河水库的汛期降雨占年降雨比例呈下降趋势,其他各水库流域均呈微弱下降趋势.

4.1.2 蒸发 由于蒸发站数据的不完整,采用两种蒸发资料进行分析:流域内有蒸发实测资料地区,采用各站蒸发皿实测蒸发平均值;流域内没有蒸发实测资料地区,选取最邻近的气象站资料,以 Penman 方法[11]估算流域内水域蒸发. 虽然蒸发皿水面蒸发和计算所得水域蒸发都不能和实际蒸发等同,但在分析多年变化趋势上具有一定代表性.

各大型水库流域多年蒸发变化趋势检验结果见表 7. 可以看出，大伙房、桓仁及葠窝水库流域蒸发有显著下降趋势；汤河及碧流河水库流域蒸发有显著上升趋势；观音阁水库蒸发有下降趋势；白山、丰满及闹德海水库流域均为微弱变化趋势.

综合各典型大型水库流域的降雨及蒸发多年变化情况，闹德海、丰满及白山水库流域各气候因子的变化均为微弱变化(包括微弱上升和微弱下降)；大伙房、桓仁、观音阁及葠窝水库的多年降雨变化微弱，蒸发变化较显著；而汤河和碧流河水库的降雨及蒸发均有明显的变化，属于气候因子变化较显著区域.

表 7　各典型大型水库流域气候因子变化趋势检验

Tab. 7　The trend analysis result of climate variation in each typical reservior basin studied

水库流域	P						R_{fs}						E_w					
	Kendall	Spearman	线性趋势回归	综合检验	归属级别	综合显著程度	Kendall	Spearman	线性趋势回归	综合检验	归属级别	综合显著程度	Kendall	Spearman	线性趋势回归	综合检验	归属级别	综合显著程度
白山	−1	−1	−1	−1	−1	WD	−1	−1	−1	−1	−1	WD	−1	−1	−1	−1	−1	WD
丰满	−1	−1	−1	−1	−1	WD	−1	−1	−1	−1	−1	WD	1	1	1	1	1	WI
闹德海	−1	−1	−1	−1	−1	WD	−1	−1	−1	−1	−1	WD	−1	−1	−1	−1	−1	WD
大伙房	−1	−1	−1	−1	−1	WD	−1	−1	−1	−1	−1	WD	−3	−3	−3	−3	−3	SD
桓仁	−1	−1	−1	−1	−1	WD	−1	−1	−1	−1	−1	WD	−3	−3	−3	−3	−3	SD
观音阁	−1	−1	−1	−1	−1	WD	−2	−1	−1	−1.3	−1	WD	−2	−2	−2	−2	−2	D
葠窝	−1	−1	−1	−1	−1	WD	−1	−1	−1	−1	−1	WD	−3	−3	−3	−3	−3	SD
汤河	−2	−2	−2	−2	−2	D	−1	−1	−1	−1	−1	WD	3	3	3	3	3	SI
碧流河	−2	−2	−2	−2	−2	D	−2	−2	−2	−2	−2	D	2	3	3	2.6	3	SI

注：P 为多年平均降雨；R_{fs}为降雨年内分布，即汛期降雨占年降雨的比例；E_w 为水域蒸发；SI、I、WI、WD、D、SD 分别代表显著上升、上升、微弱上升、微弱下降、下降及显著下降

4.2　土地利用变化因子

水库流域中人类活动的影响因素主要包括上游中小水利工程、上游村镇直接取用水及上游土地利用变化. 在人类活动影响各因素中，中小水利工程的变化、人类取用水的变化多与土地利用变化在一定程度上相关. 因为上游土地利用的变化一定程度上代表着需水结构的变化(一般是开荒和城镇化)，需水结构的变化一方面导致上游村镇取用水的变化，一方面导致水利工程的建设，从而影响循环. 因此，可以说土地利用的变化和水利工程的变化、人类取用水息息相关，考虑了前者就在一定程度上考虑了后者. 因此在目前的定性分析中，可选土地利用作为主要人类活动影响因子，其他人类影响因子作用可在下一步用分布式水文模型深入研究.

4.2.1　土地利用变化面积　对各水库上游流域的 20 世纪 80 年代(1986 年)及 2000 年两期土地利用做对比分析，各种土地利用均有不同程度改变. 水文因子分析一般为 40～50 a 尺度，而土地利用变化由于资料所限，分析的是 15 a 尺度. 根据文献[12]的相关定性描述：20 世纪 50 年代，在“大跃进”和极左路线时期，加上“以粮为纲”和“大炼钢铁”等错误指导思想，草地、林地、沼泽地等面积日趋缩小；80 年代以后，“施行农村联产承包责任制，大量的荒地被开垦”. 可以看出，东北地区受国家宏观经济政策的影响，土地利用整体呈林草地减少、工农建设用地增加的变化趋势. 因为各年代阶段变化特点在一定程度上相似，且目前只做相关定性分析，故对已有资料进行一定概化，将 15 a 阶段的土地利用变化进行简单的比例扩大处理，转换为过去 45 a 左右的土地利用变化. 各水库流域过去 45 a 土地利用的总变化面积及变化比例见表 8.

4.2.2　确定变化量级　径流及气候因子的趋势检验结果有正负(表征上升、下降)之分，而土地利用的变化却为多元化，各种土地利用类型之间相

表8　各流域土地利用变化情况

Tab. 8　Land use transformation of the studied basins

水库流域	变化面积/km^2	总面积/km^2	变化比例/%
白山	286.90	19 000	1.51
丰满	1 548.65	23 500	6.59
闹德海	695.96	4 051	17.18
大伙房	67.42	5 437	1.24
桓仁	134.16	10 400	1.29
观音阁	60.37	2 795	2.16
葠窝	22.65	3 380	0.67
汤河	37.33	1 228	3.04
碧流河	67.76	2 085	3.25

互转化.但分析知近40～50 a来,总体变化方向一致,即林地变为耕地和城市用地,因此这里只选取一个方向.初步将变化比例分为1、2、3三个量级,分别表示微弱变化、有变化及显著变化,级别区间分别为(0,5.50]、(5.50,11.01]及(11.01,+∞).具体方法为将所选的研究区土地利用变化最显著的(闹德海水库流域,变化比例为17.18%),土地利用变化最小的(葠窝水库流域,变化比例为0.67%)作为土地利用变化的范围,简单将这个范围均分成3个等级,取三等分点(5.5%、11.01%)为级别临界值,则各水库流域变化级别如表9所示.

表9　各流域土地利用变化显著性级别

Tab. 9　Significance levels of land use changes of studied basins

水库流域	显著性级别	水库流域	显著性级别
白山	1	丰满	2
闹德海	3	大伙房	1
桓仁	1	观音阁	1
葠窝	1	汤河	1
碧流河	1		

由土地利用变化显著性级别可知,闹德海、丰满两流域有较明显的变化趋势,其他流域的土地利用变化比例均小于5.50%,属于微弱变化情况.

4.3　驱动因子综合检验

将各水库流域的径流及各驱动因子的多年变化趋势显著性总结如表10所示.表中检验级别均不为0,说明各流域的径流及相应的驱动因子均发生了变化.水库径流量存在不同程度的减小趋势;驱动因子的变化说明对于各水库流域,其入库流量的变化受着多种影响的相互作用,复杂多样的影响因子共同导致水资源的变化.

表10　各水库流域要素综合检验变化显著性级别

Tab. 10　Integral variance significance levels of driving factors for each reservoir basin

水库流域	显著性级别				
	年降雨	降雨年内分布	水面蒸发	土地利用变化	年径流
白山	−1	−1	−1	1	−1
丰满	−1	−1	1	2	−2
闹德海	−1	−1	−1	3	−2
大伙房	−1	−1	−3	1	−1
桓仁	−1	−1	−3	1	−1
观音阁	−1	−1	−2	1	−2
葠窝	−1	−1	−3	1	−3
汤河	−2	−1	3	1	−2
碧流河	−2	−2	3	1	−3

5　流域分类及研究建议

流域水文循环受到多种影响因子的共同影响,但在研究中需要关注各流域水资源变化的主要影响因子,在分析流域径流发生何种变化的基础上,据此将各水库流域归为某种因子变化较为显著的类别,从而对水库管理方式做出适应性调整.

5.1　气候变化显著型流域

由表10可知,观音阁、葠窝、汤河及碧流河水库流域的径流量下降趋势较显著.其驱动因子中土地利用因子均仅有微弱变化,而气候因子的变化较为明显:汤河及碧流河水库的降雨及蒸发均有显著变化;而观音阁和葠窝水库主要是蒸发变化较显著.

此类水库上游流域径流变化主要由气候变化引起,水库的调度规则需要调整,例如多年一遇防洪标准这样的指标.下一步研究建议设定未来气候情景,以分布式水文模型耦合气候模型,同时考虑水利工程及取用水的人类因子,模拟各种气候情景下的流域水资源变化情况,为水库管理提供决策支持.

5.2　土地利用变化显著型流域

由表10可知,丰满及闹德海水库流域的径流量呈下降趋势.其气候因子变化不明显:降雨及

降雨年内分布均微弱下降，蒸发微弱变化.而土地利用变化较显著，在 20 世纪 80 年代至 2000 年阶段内，二者城镇用地分别增加 0.04%和 0.07%，灌溉面积分别增加 5.23%和 1.75%，属于人类活动较为明显流域.

流域的径流变化主要由土地利用变化引起，水库的预报方案需要考虑人类活动进行修正.建议下一步研究根据政策变化及土地利用发展趋势设定未来土地利用情景，借助于分布式水文模型，同时考虑水利工程及取用水等其他人类因子，模拟各种可能土地利用情景下的流域水资源变化情况，提供水库流域水资源的多种可能状态，为水库管理提供决策支持.

5.3　自然状况较好型流域

由表 10 可知，东北地区有部分流域的多年径流呈微弱下降趋势，如白山、大伙房及桓仁水库流域.其气候因子及土地利用变化因子均为微弱变化(除桓仁、大伙房流域的水面蒸发有较为显著的变化，原因在于降雨、温度、湿度、风速、日照等多因素导致蒸发的下降)，较为接近自然状况，径流微弱减少主要由气候的微弱变化引起.

这类水库在短时期内还能够较好地发挥水库的功能，水库调度规则等无需大的修正.但为在社会经济快速发展的同时，保证水资源的量和质，建议这类水库的管理需要参考和借鉴其他类型水库流域变化特征，加强水资源的保护，协调经济与社会发展，以免步入其他流域水资源严重减少的后尘.

6　结　语

(1)气候变化显著型流域，如观音阁、葠窝、汤河及碧流河水库的径流量下降趋势较明显，其土地利用因子均微弱变化，而气候因子中有一项或多项变化显著.

(2)土地利用变化显著型流域，如丰满及闹德海水库的径流量呈下降趋势，其气候因子变化不明显，土地利用变化较为显著.

(3)自然状况较好型流域，如白山、大伙房及桓仁水库径流均为微弱下降，其驱动因子中气候因子及土地利用因子变化不明显，共同引起径流量的微弱下降.

依此对各类流域分别有针对性地提出变化分析方法及水库运行管理建议.针对各种不同变化显著型流域，在未来深入研究时可据此选取代表流域，避免对大量研究流域分别建立模型，以节省时间和精力.该结论将为东北水库流域典型水文变化的深入研究奠定基础.

参考文献：

[1] 宋小燕，穆兴民，高　鹏，等. 松花江流域哈尔滨站降雨径流历史演变及其驱动力分析[J]. 中国水土保持科学，2010，**8**(2)：46-51.
SONG Xiao-yan，MU Xing-min，GAO Peng，*et al*. Analysis on historical evolution and driving force of rainfall and runoff of Harbin Station in Songhua River [J]. **Science of Soil and Water Conservation**，2010，**8**(2)：46-51. (in Chinese)

[2] 徐东霞，章光新，尹雄锐. 近 50 年嫩江流域径流变化及影响因素分析[J]. 水科学进展，2009，**20**(3)：416-421.
XU Dong-xia，ZHANG Guang-xin，YIN Xiong-rui. Runoff variation and its impacting factor in Nenjiang River during 1956-2006 [J]. **Advances in Water Science**，2009，**20**(3)：416-421. (in Chinese)

[3] 蒋晓辉，刘昌明，黄　强. 黄河上中游天然径流多时间尺度变化及动因分析[J]. 自然资源学报，2003，**18**(2)：142-147.
JIANG Xiao-hui，LIU Chang-ming，HUANG Qiang. Multiple time scales analysis and cause of runoff changes of the upper and middle reaches of the Yellow River [J]. **Journal of Natural Resources**，2003，**18**(2)：142-147. (in Chinese)

[4] Birsana M V，Molnar P，Burlandoa P，*et al*. Streamflow trends in Switzerland [J]. **Journal of Hydrology**，2005，**314**：312-329.

[5] CHEN Hua，GUO Sheng-lian XU Chong-yu，*et al*. Historical temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin [J]. **Journal of Hydrology**，2007，**344**：171-184.

[6] 曹明亮，张　弛，周惠成，等. 丰满上游流域人类活动

影响下的降雨径流变化趋势分析[J]. 水文，2008，**28**(5):86-89.

CAO Ming-liang，ZHANG Chi，ZHOU Hui-cheng，*et al*. Analysis on trends of rainfall and runoff under the influence of human activities of the upstream basin of Fengman reservoir [J]. **Journal of China Hydrology**，2008，**28**(5):86-89. (in Chinese)

[7] Matter M A，Garcia L A，Fontane D G，*et al*. Characterizing hydroclimatic variability in tributaries of the Upper Colorado River Basin — WY1911-2001 [J]. **Journal of Hydrology**，2010，**380**:260-276.

[8] 丁　晶，邓育仁. 随机水文学[M]. 成都:成都科技大学出版社，1988.

DING Jing，DENG Yu-ren. **Stochastic Hydrology** [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press，1988. (in Chinese)

[9] 王本德. 水文中长期预报模糊数学方法[M]. 大连:大连理工出版社，1993.

WANG Ben-de. **Fuzzy Mathematic Methods of Hydrological Long-Term Forecast** [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press，1993. (in Chinese)

[10] 代堂刚. 运用季节性Kendall检验数学模型分析渔洞水库水质变化趋势[J]. 水资源研究，2009，**30**(2):14-15.

DAI Tang-gang. Analysis on water quality change trend of Yudong reservoir based on the seasonal Kendall inspection mathematical model [J]. **China Water Resources Research**，2009，**30**(2):14-15. (in Chinese)

[11] Penman H L. Natural evaporation from open water，bare soil and grass [J]. **Proceedings of Royal Society London. Ser. A**，1948，**A193**:120-145.

[12] 张树文，张养贞，李　颖，等. 东北地区土地利用/覆被时空特征分析[M]. 北京:科学出版社，2006.

ZHANG Shu-wen，ZHANG Yang-zhen，LI Ying，*et al*. **Temporal and Spatial Characteristic Analysis of Land Use/Cover of the Northeast Region，China** [M]. Beijing: Science Press，2006. (in Chinese)

Analyses of change trends of inflow and driving factors in typical reservoir-controlled basins，Northeast China

ZHU Xue-ping*，ZHANG Chi，CAO Ming-liang，ZHOU Hui-cheng

(School of Hydraulic Engineering，Dalian University of Technology，Dalian 116024，China)

Abstract: An inspection system，combined by three non-parametric tests and fuzzy recognition，is introduced to investigate the hydrological variation trends. Based on the meteorological & hydrological data and land use at 9 reservoir-controlled basins in Northeast China，the trend analyses were performed concerning the variation of inflow and its driving factors (i. e. precipitation，annual precipitation distribution，evaporation and land use). According to the results，the reservoir basins studied are classified into three types. One type of basins，mainly influenced by climate，includes Tang River，Biliu River，Guanyinge and Shenwo reservoir basins. The second type takes land use as its significant driving factor，including Naodehai and Fengman reservoir basins. The third type has good natural conditions，consists of Baishan，Huanren and Dahuofang reservoir basins. Furthermore，on the basis of the above conclusions，the recommendations for research direction and reservoir management in future are put forward，which will promote further analyses of hydrological change in reservoir-controlled basins，Northeast China.

Key words: hydrological change; reservoir basins; climate change; land use change; trend test