

喜马拉雅山北坡卡鲁雄曲径流与气候变化

张 菲¹, 刘景时¹, 巩同梁², 王 宏²

(1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085;

2. 西藏自治区水文水资源局, 拉萨 850000)

摘要: 以冰川融水补给为主的喜马拉雅山北坡的卡鲁雄曲流域, 近 20 年平均气温以 $0.34^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的趋势上升, 高于西藏年均温 $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的增长率, 更是明显高于全国和全球气温的增长率, 且极端最高温都出现在 20 世纪 90 年代。后 10 年气温 (1994~2003 年) 比前十年 (1983~1993 年) 升高 0.5°C , 径流量增加了 26%; 不同月份径流增加强度不同, 10~2 月增加了 44%, 7~9 月增加了 27%, 3~6 月增加了 24%。径流对气候变化的响应最灵敏 (一年中有 8 个月的增加趋势通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验), 尤其是秋冬季的径流 (增加趋势超过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验)。受冰川消融和季风影响, 不同时期的径流有不同的影响因素, 但存在共性, 即气温对径流起着积极主导作用, 而降水对径流的影响具有不确定性, 即正负双面效应。

关键词: 水情; 气候变化; Mann-Kendall 检验; 卡鲁雄曲; 西藏

1 引言

在全球变暖的大环境下, 作为淡水最大储存的冰川日益退缩, 以冰川融水补给为主的河流将直接受到影响, 尤其在中国等亚洲地区^[1]。我国这类河流主要分布在西部地区, 冰川水资源是下游, 尤其是干旱与半干旱区人民赖以生存的生命之源和社会经济可持续发展的生命线^[2]。最新研究表明 20 世纪下半叶以来, 由于冰川退缩造成的青藏高原冰川水资源的净损失量高达 $5869.24 \times 10^8 \text{ m}^3$, 相当于 10 条黄河的水量^[2, 3]。虽然冰川退缩消融能使得储存的水资源大量释放, 带来可利用的水资源的暂时增多, 但是日积月累, 最终会超越临界点而造成冰川的完全消失, 这将带来不可想象的后果^[4, 5]。喜马拉雅山是我国以及印度、东南亚很多河流的发源地, 由于冰雪融水占很大比重, 所以对气候变化比较敏感, 但在我国喜马拉雅山一侧冰川水文对气候变化响应的研究却很少^[6]。杨锡金等在 1975 年对羊卓雍错流域西侧枪勇的冰川在冰川气象, 夏季径流、冰川的积累消融、物质平衡等方面作了观测研究^[7]; 刘天仇用降水、气温的变化分析了羊卓雍错湖面水位变化的原因^[8]。本文选取我国喜马拉雅山一侧唯一具有长期水文气象观测的卡鲁雄曲为典型区域, 分析近 20 年来河流水情, 并与气候特征结合来探讨径流变化的原因, 可以为农业水利部门提供一定的科学依据。

2 流域概况

卡鲁雄曲位于青藏高原南部喜马拉雅山北坡、雅鲁藏布江以南, 是羊卓雍错的西岸主要支流, 其源头为卡若拉山, 河源为海拔 7206 m 的勒金康桑峰 (图 1)。流域面积 286

收稿日期: 2006-04-15; 修订日期: 2006-08-17

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(2005CB422003); 国家自然科学基金 (40571037); 中国科学院院长基金 [Foundation: National Basic Research Program of China, No.2005CB422003; National Natural Science Foundation of China, No.40571037; CAS Presidential Foundation]

作者简介: 张菲 (1983-), 女, 山西运城人, 硕士, 2004 年毕业于北京师范大学地理系, 主要从事寒区水文与水资源研究, E-mail: zhangfei@itpcas.ac.cn



图 1 卡鲁雄曲流域位置及冰川分布

Fig. 1 The distribution of glaciers in the Karu Xiongqu watershed

km²，高度范围是 4550 m~7200 m，其间 4900 m 以上有现代冰川 50 条，总面积 59.42 km²，覆盖率20.78%^[9]，5100 m 以上为高山冻土区，以下为深层季节冻土区^[10]。

该区属于南亚季风气候区中的南亚Ⅳ型气候区，处在喜马拉雅山的雨影地区，属于半干旱地区。多年平均气温为 2.0 ℃，波动范围是 1.0 ℃到 3.1 ℃，1983 年 1 月曾出现最低温为 -8.1 ℃。多年平均降水量 370.5 mm，且年内分配很不均匀，集中在每年印度季风影响的 6~9 月，占全年降水的 90%以上。

卡鲁雄曲流域内仅有翁果冰川径流实验站（海拔 4550 m），位于浪卡子县翁果乡省拉村，建于 1975 年，期间曾间断观测。作者收集了现有 1983~2003 年的连续逐月降水、蒸发、气温、流量等水文气象以及冰川冻土资料；收集了距离翁果水文站 8 km 处的浪卡子气象站（海拔 4432 m）1983~2003 年的连续逐月气温资料，由于气象站的数据更能反映当地的气温状况，文中的气温分析采用浪卡子站 1983~2003 年的资料。采用 Mann-Kendall 趋势检验法，Sen 坡度估计以及相关统计分析法，对气温、降水量、径流、蒸发作分析，探讨冰川融水补给的河流水文特征，旨在为研究大陆型冰川对江河湖泊的径流补给机制提供基础数据。

3 趋势检验方法

Mann-Kendall 检验 (M-K 法) 是一种非参数统计检验方法，变量可以不具有正态分布特征，因此适用于水文变量的趋势检验^[11, 15]。假定 X_1, X_2, \dots, X_n 的时间序列变量， n 为时间序列的长度，M-K 法定义了统计量 S ：

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sng}(x_j - x_k) \tag{1}$$

式中： x_j, x_k 分别为 j, k 年相应的测量值，且 $k > j$ ，而

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & x_j - x_k > 0 \\ 0 & x_j - x_k = 0 \\ -1 & x_j - x_k < 0 \end{cases} \tag{2}$$

接着，
$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{3}$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{4}$$

式中： Z 为一个正态分布的统计量，正值表明有上升的趋势，负值表示有下降的趋势。本文选定三个显著性水平 α ，0.01，0.05，0.1，分别用***，**，* 表示。

如果确定了有变化趋势，再用 Sen 坡度估计法^[12]来计算变化趋势大小，趋势函数如下：

$$f(t) = Qt + B \tag{5}$$

式中： Q 表示变化的趋势大小， B 是常数

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \tag{6}$$

式中： $j > k$ 。如果时间序列长度是 n ，那么将得到 $N = n(n-1)/2$ 个 Q_i ，最终的 Q 由 N 决定：

$$Q = \begin{cases} Q_{[(N+1)/2]} & N \text{ 是奇数} \\ \frac{1}{2}(Q_{[N/2]} + Q_{[(N+2)/2]}) & N \text{ 是偶数} \end{cases} \tag{7}$$

4 水文气象要素变化分析

采用 M-K 检验时，如果通不过显著性检验，则认为没有变化趋势；当月气温、降水、径流、蒸发均没有变化，表 1 中不列该月的值。

4.1 气温变化特征

已有研究表明西藏大部分地区四季和年平均气温为升温趋势，尤其是秋冬季；最低温度上升最显著，而且高海拔地区比低海拔地区升温强烈。西藏年平均气温以 0.26℃/10a 的增长率上升，明显高于全国和全球气温的增长率，20 世纪 90 年代多异常偏暖年^[2, 17]。从 1983~2003 年年均气温距平曲线看出(图 2b)：正距平年占了 81%，而且正距平幅度不断增大。后 10 年(1994~2003)比前 10 年(1983~1993)年均温上升了 0.5℃，通过 3

表 1 卡鲁雄曲流域逐月径流深 (mm)、气温 (°C)、降水 (mm)、蒸发 (mm) 的 M-K 趋势检验
Tab. 1 M-K trend test of monthly runoff depth (mm) , temperature (°C) , precipitation (mm) and evaporation (mm)

	1 月	2 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年均
径流 (Q)	0.28***	0.19***	no	1.77**	1.79**	0.78**	0.43***	0.25***	0.25***	0.45**
气温 (T)	no	no	no	no	no	no	no	0.14**	no	0.03*
降水 (P)	no	no	1.85**	no	no	no	no	no	no	no
蒸发 (E)	no	no	-2.13**	no	no	no	no	1.46**	no	no

***, **, *分别代表显著性水平为 0.01, 0.05, 0.1

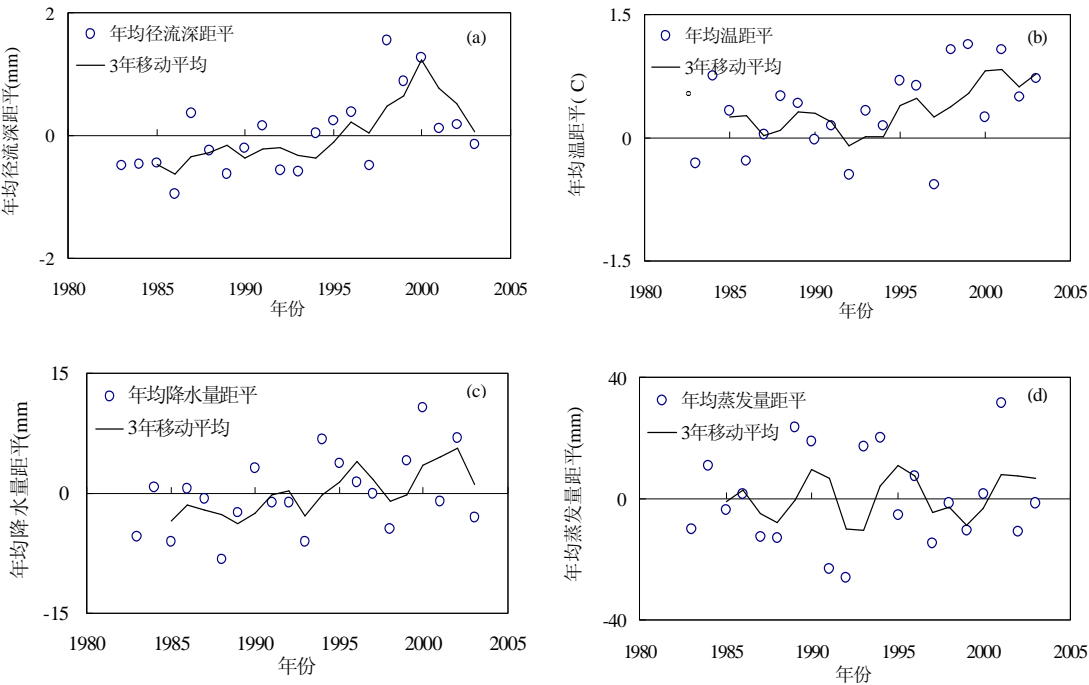


图 2 卡鲁雄曲翁果站年均径流深 (a)、年均降水量 (c)、年均蒸发 (d) 和浪卡子站 1983~2003 年年均温 (b) 距平图

Fig. 2 The annual anomalies of runoff (a), temperature (b), precipitation (c) and evaporation (d) in the Karuxung watershed 年滑动平均, 能更明显地看到增温趋势。

从 M-K 方法分析检测的气象水文参数结果可以看到(表 1), 年均温以每年 0.03 °C 的趋势上升, 统计趋势 (正距平) 始于 1993 年, 并且通过 $\alpha = 0.1$ 的显著性检验, 即 20 世纪 90 年代以来增温尤为显著。从月份来看, 11 月以年均 0.14 °C/ 年的趋势上升, 且通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验, 而其他月的均温没有显著变化。

4.2 降水蒸发变化特征

青藏高原的降水量自 20 世纪 70 年代以来基本都呈现不同程度的上升趋势^[13], 从 1983~2003 年降水量距平图来看 (图 2c), 正负距平交替出现, 作出 3 年滑动平均, 可以看出波动上升的趋势。降水变化检测结果中 (表 1), 只有 6 月份以 1.85 mm/ 年的趋势增加, 且通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验, 而其他月份均没有变化趋势。

蒸发采用的是 E601 型蒸发器测得的值。从年均蒸发距平来看 (图 2d), 正负距平交替出现, 基本看不出增加或减小趋势。从 M-K 法检验蒸发结果 (表 1) 可以看出 6 月蒸发量有减小趋势, 11 月均蒸发量呈现增加趋势, 且都通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验, 而其他月份均没有显著变化。

4.3 径流变化特征

从年均径流深的 3 年滑动平均可以看出径流深有明显上升的趋势 (图 2a), 尤其在 1998~2000 年出现急剧增加。利用 M-K 趋势检验得到, 年均径流以 0.45 mm/ 年的趋势增加, 统计趋势 (正距平) 始于 1994 年, 并且通过了 $\alpha = 0.05$ 的检验 (表 1)。各月中, 除了 3~6 月没有显著变化外, 其他月份的增加趋势都通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验, 其中秋冬季 (10~2 月) 径流的增加趋势通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验, 比夏季更为显著。将后 10 年 (1994~2003 年) 与前 10 年 (1983~1993 年) 的径流量比较, 10~2 月增加了 28%~67%, 以 1 月增幅最大, 7~9 月增加了 21%~32%。由于 7~9 月径流占全年总径流的 65% 以上, 因此其径流的增加对全年径流的增加起着重要的作用。

5 径流变化机制

由 M-K 检验表可以看出，相对于气温、降水、蒸发来说，径流的变化是最明显的（有 8 个月的径流增加通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验），秋冬季的变化趋势更为明显（通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验），因此河川径流可以更灵敏地指示气候变化，即水文站流量数据灵敏地响应了气候变化对水文过程的影响，且具有较高的可靠性和代表性^[17]。河川径流受气候、地貌、土壤、植被等自然条件及人类活动的耦合作用，在某种尺度上，河流流量特征的季节模式反应了区域气候和自然地理条件的综合效应^[17, 18]，因此探讨径流的变化机制能够从一定程度上反应区域气候的变化。卡鲁雄曲流域冰川覆盖率为 20.78%，冰雪融水是重要的水源补给，根据冰川及水文站消融期观测 4 月某些时期气温处于 0℃ 以上，会产生一定的冰雪融水，因此确定 4~10 月为消融期，本文分消融期与非消融期来探讨径流变化机制。卡鲁雄曲流域受印度洋季风的影响，因此消融期又分非季风期（4~6 月）和季风期（7~10 月）。

将 4~6 月径流与气温作相关（图 3），线性回归方程如下：

$$Q_4 = 0.9529T_4 + 2.385 \quad R = 0.69 \tag{8}$$

$$Q_5 = 5.0013T_5 - 19.313 \quad R = 0.84 \tag{9}$$

$$Q_6 = 14.886T_6 - 103.49 \quad R = 0.92 \tag{10}$$

式中： Q_4 、 Q_5 、 Q_6 分别为 4~6 月各月径流深（mm）； T_4 、 T_5 、 T_6 分别为 4~6 月各月气温（℃）； R 为复相关系数。

根据复相关系数 R 值可以看出径流与气温高度相关，置信度超过 99.9%，且从 4 月到 6 月， R 值不断增大，说明径流与气温的相关性越来越高。 T 的系数相当于度日因子，相当于每增加 1℃ 所增加的径流量，4~6 月该值由 1.0 增加到 14.9，说明消融强度增加，气温对径流的贡献越来越大。按照 M-K 统计检验，4~6 月径流和气温均没有变化趋势，表现同步（表 1）。将后 10 年（1994~2003 年）与前 10 年（1983~1993 年）的径流量比较，4 月融水增大 19%，是由于 1999 年 4 月气温 6.2℃ 远远高于多年平均 2.4℃，致使当月冰雪融水是多年平均的 2.2 倍；5 月融水增大 46%，是由于 1995 年 5 月气温 9.3℃ 远远高于多年平均 6.2℃，致使当月冰川融水是多年平均的 3.0 倍；6 月融水增大 9%，也是 1998 年 6 月气温 11.6℃ 高于多年平均 9.8℃，致使当月冰川融水是多年平均的 1.8 倍。4~6 月前后 10 年径流变化的比较说明：卡鲁雄曲近些年来极端升温的出现，导致极端融水出现在 20 世纪 90 年代。

7 月开始，印度洋季风带来大量降水，同时远远高于 0℃ 的气温使得冰雪大量消融，

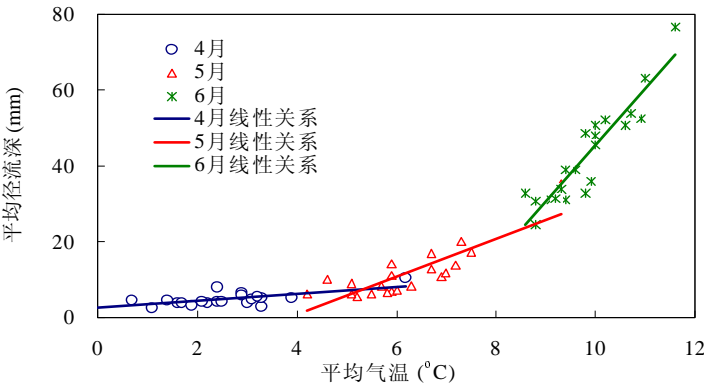


图 3 卡鲁雄曲翁果站 1983~2003 年 4~6 月平均径流深与平均气温的线性相关

Fig. 3 The linear relationship between runoff depth and temperature from April to June, 1983-2003

此时冰雪融水和雨水共同补给径流，径流受到气温和降水的共同作用。虽然气温和降水没有表现出变化趋势，但径流已经有很敏感的变化。将 7~10 月径流与气温降水作多元回归，方程如下：

$$Q_7 = 14.557T_7 + 0.202P_7 - 85.553 \quad R = 0.352 \quad (11)$$

$$Q_8 = 16.316T_8 + 0.337P_8 - 92.355 \quad R = 0.420 \quad (12)$$

$$Q_9 = 7.803T_9 + 0.188P_9 - 2.247 \quad R = 0.412 \quad (13)$$

$$Q_{10} = 2.479T_{10} - 0.160P_{10} + 19.901 \quad R = 0.575 \quad (14)$$

式中： $Q_7 \cdots Q_{10}$ 及 $P_7 \cdots P_{10}$ 分别为 7~10 月各月径流深及降水量 (mm)； $T_7 \cdots T_{10}$ 分别为 7~10 月各月气温 (°C)；R 为复相关系数。

同样由复相关系数 R 值可以看出径流与气温和降水存在可靠相关，置信度超过 95%，且从 7 月到 10 月 R 值不断增大说明径流与二者的相关性越来越高。其中 P 的系数相当于降雨径流系数，相当于每增加 1 mm 所增加的径流量，7~8 月该值由 0.202 增加到 0.337，说明降水越大对径流的贡献越来越大。但 10 月降水与流量负相关，说明 10 月降水产生的降温作用使径流减少。另外 T 的系数在 8 月最大，与 8 月降水最多，降雨径流系数最大，感热释放使 8 月流量最大一致。

卡鲁雄曲消融期 (4~10 月) 的这些特征，是由于以冰雪融水补给为主的河流与以降水补给为主的河流有完全不同的产流机制^[14]。高寒山区的每次降水伴随着降温过程，而且多为固态降水，冰面为新雪覆盖，反射率增大，消融明显减弱，致使流量锐减，在整个消融期，这种流量和气温的同步性，大陆性冰川地区表现得尤其突出，而卡鲁雄曲的补给来源是大陆型冰川，所以径流与气温的对应关系非常好，回归方程中表现为 T 的系数均为正数；而径流与降水的关系则存在不确定性，表现为 P 的回归系数有正有负。

非消融期 (11~3 月)，随着降水的减少，同时气温低于 0 °C 不足以引起消融，此时径流的补给主要是依赖夏季储存于土壤和近地表中地下水的释放，月径流受前期月径流的共同影响^[16]，由表 1 看出，11~2 月径流的增加均通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验，趋势明显高于其他月份，也就是说冬季的径流能更敏感地指示气候变化。表 1 中气温除了 11 月增加趋势超过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验，其他月份的气温、降水均没有变化，而此时，径流的增加趋势都超过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验，这再一次说明径流对气候的响应最为敏感。

6 结论与讨论

卡鲁雄曲是冰雪融水补给为主的流域，利用 M-K 趋势检验，Sen 坡度估计以及线性相关方法，分析了近 20 年来该流域水文、气候变化，结论如下：

(1) 各种水文、气象要素中，径流的变化最显著 (一年中有 8 个月的增加趋势通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验)，比气温、降水能更灵敏地反映气候变化，尤其是秋冬季的径流 (增加趋势超过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验)。

(2) 近 20 年来，年均温以 0.34 °C/10a 的趋势上升，高于西藏 0.26 °C/10a 的增长率，更是明显高于全国和全球气温的增长率，而且极端最高温都出现在 20 世纪 90 年代。后 10 年 (1994~2003 年) 比前 10 年 (1983~1993 年) 升高 0.5 °C，径流量增加了 26%；不同月份径流增加强度不同，10~2 月增加了 44%，7~9 月增加了 27%，3~6 月增加了 24%。

(3) 分消融期和非消融期、季风来临前后探讨了径流变化机制。季风来临前，径流与气温有很好相关性 (置信度超过 99.9%)；而季风来临后，径流与气温、降水复相关 (置信度超过 95%)。气温对径流起着积极主导作用，而降水对径流的影响则存在不确定性，具有正负双面效应。根据可靠的线性方程 (式 8~14)，可以进行未来不同情景预测。

(4) 非消融期 (11~3 月) 的径流主要是由前期储存于土壤和近地表中的地下水补给，

因此受到前期月份的共同作用, 其他月份径流增加的累积使得此期间的变化程度更明显(增加趋势超过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验)。

(5) 由于中国喜马拉雅山水文、气象台站稀少, 本文利用典型冰川流域卡鲁雄曲建立的融水径流与气温及降水相关的统计模型可用于本区其他无水文气象观测的河流的水循环评价估计。我们下一步的工作是这些模型的应用和检验, 以便更准确的理解和认识我国喜马拉雅山冰川水文过程及其与气候变化关系。

参考文献 (References)

- [1] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 2005, 438: 303-309.
- [2] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang et al. An Assessment of the Issues of Climatic Shift from Warm-dry to Warm-wet in Northwest China. Beijing: China Meteorological Press, 2002. 7-75. [施雅风, 沈永平, 李栋梁 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型评价. 北京: 气象出版社, 2002. 7-75.]
- [3] Shi Yafeng, Zhang Xiangsong. Effect of climate change to surface water resources of arid area in Northwest and future trend. *Science in China (D Series)*, 1995, 25(9): 968-977. [施雅风, 张祥松. 气候变化对西北干旱区地表水资源的影响和未来趋势. 中国科学 (D 辑), 1995, 25(9): 968-977.]
- [4] Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan et al. Evolution and Prediction of Climate and Environment. Beijing: Science Press, 2005. 104-181. [秦大河, 丁一汇, 苏纪兰 等. 气候与环境的演变与及预测. 北京: 科学出版社, 2005. 104-181.]
- [5] Shen Yongping, Liang Hong. Global ice melting accelerated would threaten to human environmental safety. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(2): 208-211. [沈永平, 梁红. 全球冰川消融加剧使人类环境面临威胁. 冰川冻土, 2001, 23(2): 208-211.]
- [6] Pratap Singh, Lars Bengtsson. Hydrological sensitivity of a large Himalayan basin to climate change. *Hydrological Processes*, 2004, 18: 2363-2385.
- [7] Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijin. Glaciers of Xizang (Tibet). Beijing: Science Press, 1986. 67-98. [李吉均, 郑本兴, 杨锡金. 西藏冰川. 北京: 科学出版社, 1986. 67-98.]
- [8] Liu Tianchou. Changes of Yamzho Lake water stage in Xizang. *Scientia Geographica Sinica*, 1995, 15(1): 55-62. [刘天仇. 西藏羊卓雍错水位动态研究. 地理科学, 1995, 15(1): 55-62.]
- [9] Mi Desheng, Xie Zichu, Luo Ruixiang et al. China Glacier Information System XI: Gangze Water System. Xi'an: Atlas Press, 2001. 207-213. [米德生, 谢自楚, 罗祥瑞 等. 中国冰川编目 XI: 恒河水系. 西安: 地图出版社, 2001. 207-213.]
- [10] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing et al. Geocryology in China. Beijing: Science Press, 2000. 9-218. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆 等. 中国冻土. 北京: 科学出版社, 2000. 9-218.]
- [11] Donald H Burn, Mohamed A Hag Elnur. Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology*, 2002, 55: 107-122.
- [12] Sirois Allan. A brief and biased overview of time series analysis or how to find that evasive trend. In WMO Report No.133: WMO/EMEP Workshop on Advanced Statistical Methods and Their Application to Air Quality Datasets 1998.
- [13] Du Jun, Ma Yucai. Climate trend and rainfall over Tibetan Plateau from 1971-2000. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59 (3): 375-382. [杜军, 马玉才. 青藏高原降水变化趋势的气候分析. 地理学报, 2004, 59(3): 375-382.]
- [14] Yang Zhenjiang. Glacial Water Resources in China. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991. 90-92. [杨针娘. 中国冰川水资源. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991. 90-92.]
- [15] Omar I Abdul Aziz, Donald H Burn. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin. *Journal of Hydrology*, 2006, 319: 282-294.
- [16] Ding Yongjian, Ye Baisheng, Liu Shiyin. Effect of climatic factors on stream flow in the alpine catchment of the Qilian Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(5): 431-437. [丁永建, 叶柏生, 刘时银. 祁连山区流域径流影响因素分析. 地理学报, 1999, 54(5): 431-437.]
- [17] Gong Tongliang, Liu Changming, Liu Jingshi. Hydrological response of Lhasa River to climate change and permafrost degradation in Xizang. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(5): 519-526. [巩同梁, 刘昌明, 刘景时. 拉萨河冬季径流对气候变暖和冻土退化的响应. 地理学报, 2006, 61(5): 519-526.]
- [18] Li Lijuan, Zheng Hongxing. Characteristics and driving forces of annual runoff changes for rivers in North China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(3): 309-317. [李丽娟, 郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析: 以潮白河为例. 地理学报, 2000, 55(3): 309-317.]

Hydrological Regime of the Karuxung Watershed in North Himalayas

ZHANG Fei¹, LIU Jingshi¹, GONG Tongliang², WANG Hong²

(1. *Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100085, China;*

2. *Water Resources Survey and Hydrology Bureau of Tibetan Autonomous Region, Lhasa 850000, China)*

Abstract: Water supply of the Karuxung watershed is mainly from melt water and rainfall, therefore both climate warming and precipitation increasing have positive impacts on runoff. Mann-Kendall trend analysis, the Sen's slope estimate and correlation analysis are employed to analyze data from Wengguo hydrometric station and Langkazi meteorological station. The results indicate that runoff, air temperature, precipitation and evaporation all have showed significant upward trends. Of which runoff change is most sensitive to climate change, especially during fall and winter. It is concluded that more trends are observed than are expected to occur by chance. In recent 20 years, the annual mean temperature has increased dramatically with a rate of 0.34 °C every 10 years, which is higher than that of Xizang (Tibet) region which is 0.26 °C every 10 years, and the extremely high temperatures all appeared in the 1990s. For the temperature, the latter 10 years is 0.5 °C higher than the former 10 years, whereas the runoff increased by 26%. Different periods have different growth extents. October to February, July to September and March to June increased by 44%, 27% and 24%, respectively. During ablation period, the runoff change is affected mostly by climate change from April to June, whereas the runoff is affected by climate and precipitation jointly when monsoon comes, and the rainfall influences the runoff with uncertainty. During non-ablation period, runoff change is more obvious for it is influenced by the former months, and its key supply is base flow.

Key words: hydrological regime; climate change; Mann-Kendall trend analysis; Karuxung, Xizang