

# 贡嘎山东坡不同流域河川径流特征对比分析

吕玉香<sup>1,2</sup>, 王根绪<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 选取贡嘎山东坡海螺沟流域冰川河和森林区不同尺度3条沟, 结合最近10余年的径流和相应的降水、温度等资料, 运用径流分割、相关分析等方法对相邻的冰川区和森林区河川径流组分、年内分配、年际变化进行对比分析。结果表明: 海螺沟冰川河是冰川融水(50.1%)、地下水(27.9%)、降水(18.2%)混合型补给的河流, 6~9月径流组分主要是冰川径流(62.3%)和降雨径流(22.7%)。枯季径流主要成分是地下水(67.9%)和融雪径流(22.5%), 年内分配不均匀系数为0.76。森林区河沟枯季以地下水补给为主, 湿季以降水补给为主, 黄崩溜沟和马道沟年内分配差异较大, 不均匀系数分别为0.90、1.11。观景台沟年内径流过程较稳定, 不均匀系数为0.70。最近10余年来, 冰川河的年径流量呈单调上升趋势, 年递增率为 $0.93\text{ m}^3/\text{s}$ 。其中夏季径流量增幅最为明显, 冬春季节气温的升高、春秋降水量的增加以及全年水面蒸发量的显著减少可能是其径流变化的原因。森林区观景台沟径流量多年变化不显著, 变差系数为0.09, 年递增率为 $-0.004\text{ m}^3/\text{s}$ 。夏季径流减少幅度最大, 降水量的减少是主导因素, 该沟雨季径流量的波动变化控制着年径流量多年变化。森林区对气候变化的敏感性小于冰川河。

**关键词:** 贡嘎山; 河川径流; 径流分割; 年内分配; 年际变化

**中图分类号:** P343 P512.31

**文献标识码:** A

河川径流特征是水文水资源学研究的重要内容之一, 它与河川径流的补给来源、流域的下垫面条件、水热条件、以及人类活动等有着密切的联系。森林区径流不仅是联系森林土壤和外界水分和其他营养元素的桥梁, 也对生态群落的时空分布有控制作用<sup>[1]</sup>, 而森林在涵养水源、调节径流及削减和延迟洪峰方面也具有重要功能, 森林与水的相互作用问题一直是森林水文学领域的热点问题; 冰川往往是下游许多河流的水源。随着全球变暖, 河川径流特征也发生着相应的变化, 且不同流域对这种变化的响应也不尽相同, 这种变化不仅直接影响着水资源的开发利用与合理配置, 同时还影响着与其相关的一系列物理、化学和生物过程。贡嘎山发育着茂密的原始森林和现代海洋性冰川, 本文选取贡嘎山东坡海螺沟流域一条冰川河以及森林区3条支沟, 分别分析比较其径流组成成分、年内分配、年际变化特

征, 旨在为探求不同小流域上的河川径流特征及其变化规律, 为该区森林及水资源的科学管理及合理利用提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

贡嘎山位于青藏高原东南缘, 大雪山脉的中南段, 地理位置介于 $101^{\circ}30' \sim 102^{\circ}15' \text{ E}$ 和 $29^{\circ}20' \sim 30^{\circ}20' \text{ N}$ 。主峰海拔7556 m, 是横断山系最高峰。该区地质构造异常复杂, 地貌形态千奇百怪, 沟谷密集、水系发育。研究区域为贡嘎山东坡海螺沟流域, 拥有从亚热带到寒带的完整的山地自然垂直带谱, 气候、植物、土壤等具有明显的垂直分异。由于贡嘎山地处我国东部亚热带温暖湿润季风区与青藏高原东部高原温带半湿润区的过渡带上, 东部主要为东南季风的迎风坡, 潮湿多雨, 冬暖夏湿, 属于亚热带

收稿日期 (Received date): 2007-10-23; 改回日期 (Accepted): 2008-02-07.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金重点项目 典型山地水文生态系统水循环多尺度耦合的对比实验研究 (40730634)。[ Key Projects of National Natural Science Foundation (40730634) ]

作者简介 (Biography): 吕玉香 (1984-) 女, 山东成武人, 硕士研究生, 主要从事生态水文学研究。[ Lü Yuxiang (1984-) female born in Chengwu in Shandong Province postgraduate specialized in mountain ecology and hydrology ]

山地湿润型季风气候, 年平均相对湿度在 90% 以上, 气温的年振幅和日较差比较缓和。研究区年平均气温 4.2 °C, 年最高气温为 23.2 °C, 年最低气温为 -14.0 °C。由于受季风和地形的影响, 试验区降水比较充沛, 降水量大, 年平均降水日数多达 261 d 蒸发量小, 河川径流特别丰富。

中科院成都山地灾害与环境研究所于 1988 年正式建立了贡嘎山高山生态系统观测站, 高山水文观测系统是其重要组成部分, 该系统包括 4 个水文控制断面, 1 个地下水位观测井, 1 个森林径流场和 1 个气象站 (图 1)。贡嘎山高山气象站位于贡嘎山东坡海拔 3 000 m 处, 观测与高山水文观测系统直接相关的降水、蒸发、气温和日照等要素。河川径流观测主要包括冰川水文观测和森林区水文观测。海螺沟冰川水文站位于海螺沟的上游, 主要进行冰川水文观测; 黄崩溜沟分布在海螺沟森林区, 属海螺沟流域的一级支流, 而观景台沟和马道沟各是黄崩溜沟的一条支沟, 森林区水文观测便在黄崩溜沟、观景台沟和马道沟这 3 个不同尺度的流域内分别设置水文站同时进行。

上述 4 个水文站均采用月自记水位仪记录水位

过程, 由水位流量关系计算流量。这些水文站的流域特征参数详见表 1。建站以来, 贡嘎山站已基本建成了较为完整的高山山地生态环境定位观测试验系统。该区完整连续的气象资料观测始于 1988 年, 海螺沟和黄崩溜沟的流量资料始于 1990 年, 观景台沟和马道沟最早开始于 1995 年。

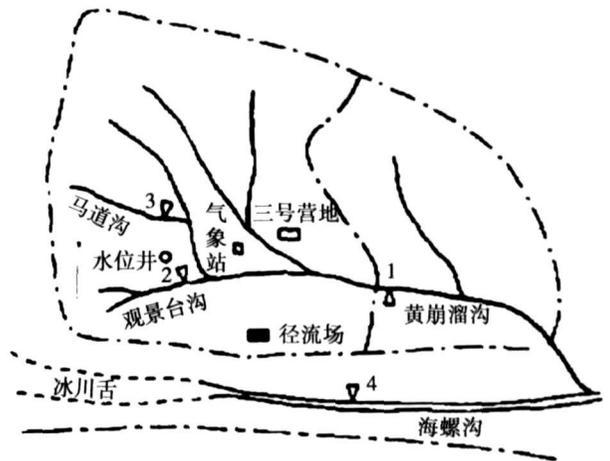


图 1 贡嘎山高山水文观测系统

Fig 1 The system of hydrological observation in Gongga Mountain

表 1 贡嘎山高山水文站流域特征参数

Table 1 The parameters of the alpine hydrological gages in Gongga Mountain

沟名	测站高程 (m)	集水面积 (km <sup>2</sup> )	河长 (km)	河道比降 (%)	冰川面积 (km <sup>2</sup> )	森林灌丛面积 (km <sup>2</sup> )	高山草甸面积 (km <sup>2</sup> )	测流工程
海螺沟	2 920	80.5	1.50	6.93	29.6	15.5	15.0	天然河槽
黄崩溜沟	2 960	7.47	5.07	3.68	0	5.51	1.80	平坦 V 型堰
观景台沟	3 060	1.05	1.20	60.0	0	0.95	0.10	平坦 V 型堰
马道沟	3 100	0.407	1.10	50.0	0	0.31	0.09	三角薄壁堰

## 2 研究方法

### 2.1 径流分割方法

海螺沟冰川是典型的海洋性冰川, 本文采用曹真堂等对冰川河流的径流分割方法<sup>[2]</sup>, 对海螺沟冰川河进行径流分割。

关于基流分割方法, 国内外已有很多研究, 一般分为电子滤波法、时间步长法、环境同位素和水化学方法、水文模型法和图形法, 其中图形法又分为直线分割法、库捷林法、退水曲线法等, 本文选用直线分割法<sup>[3]</sup>。选用年内最小流量连一直线作为冰川区

的基流量 (地下水流量) 分割出地下水径流。

在 1~3 月上旬及 11 月下旬~12 月, 逐日和月平均气温在 0 °C, 冰川无融水, 降雨也主要是固态形式, 但白天在直接日射下仍有积雪融水径流, 故河川径流主要补给来源为积雪径流, 总径流减去地下水径流就分隔出了积雪融水径流。

无降水日流量与气温存在一定的函数关系。利用冰川区径流分割方法划分冰川融水径流。该区冰川消融期为 3 月中旬至 11 月中旬, 选出降水量在 0~1.0 mm 的平均气温值和日平均流量值, 利用线性拟合的方法建立相关函数式, 得到

$$Q = 2.2016T + 1.4015 \quad (1)$$

然后利用此式和 3月中旬至 11月中旬的温度值计算出流量值,再减去地下水部分就得到了冰川融水径流。

在此期间的总径流减去冰川融水径流和地下水径流得到了雨水径流。

## 2.2 年内分配

径流的变化通常包含“量”和“结构”的变化。前者通常是指径流总量、流量等数值上的变化。而后者则注重从径流过程线的“形状”上进行分析,它反映不同时段内径流的比例。本文径流年内分配特征的分析即属于后者<sup>[4]</sup>。径流年内分配特征的标度有多种不同方法,本文采用年内不均匀系数  $C_v$ 、相对变化幅度  $C_m$ 、汛期~非汛期占年径流的百分比数、与降雨的相关系数  $R_p$ 、与气温的相关系数  $R_T$  等不同指标,从不同角度分析径流年内分配特征的变化规律。

### 2.2.1 不均匀系数

本文用径流年内分配不均匀系数  $C_v$ 来衡量径流年内分配的不均匀性,计算公式如下

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2)$$

其中

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} x_i$$

式中  $x_i$ 为年内各月径流量 ( $i=1, 2, 3, \dots, 12$ ),  $\bar{x}$ 为年内月平均径流量。由式(1)中可以看出,值越大即表明年内各月径流量相差悬殊,径流年内分配越不均匀。

### 2.2.2 变化幅度

本文用两个指标来衡量河川径流的变化幅度,一个是相对变化幅度  $C_m$ ,即取河川径流最大月流量 ( $Q_{max}$ )和最小月流量 ( $Q_{min}$ )之比;另一个是绝对变化幅度  $\Delta Q$ ,即最大最小月河川径流之差,定义如式(2)

$$\begin{cases} C_m = Q_{max} / Q_{min} \\ \Delta Q = Q_{max} - Q_{min} \end{cases} \quad (3)$$

## 2.3 年际变化

本文用各条沟年径流量变差系数  $C_v$ 值、极值比、递增率等指标来表征和分析径流量的年际变化。

### 2.3.1 年径流变差系数

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中  $n$ 为观测年数;  $K_i$ 为第  $i$ 年的年径流变率,即第  $i$ 年平均径流量与正常径流量的比值。  $K_i > 1$ 表明该年水量比正常情况多,  $K_i < 1$ 则相反。年径流量的  $C_v$ 值反映年径流量总体系列离散程度,  $C_v$ 值大,年径流的年际变化剧烈,这对水利资源的利用不利,而且易发生洪涝灾害;  $C_v$ 小,则年径流量的年际变化小,有利于径流资源的利用<sup>[5]</sup>。

### 2.3.2 极值比

极值比 ( $K_m$ )是系列中最大值与最小值的倍比值,可以作为反映降水、径流年际变幅的指标。年径流极值比除了受气候因素影响外,还与下垫面条件和流域面积大小有密切关系。

### 2.3.3 递增率

递增率 ( $\Delta$ )是系列结束年份与开始年份之差与系列年数的比值,单位是  $(m^3/s)/a$

## 3 分析结果与讨论

### 3.1 径流组分

由于 2004年的气温接近多年平均值,且是丰水年。故选用 2004年作为代表年进行分析。

海螺沟冰川河的径流分割结果如图 2

海螺沟冰川河是冰川融水 (50.1%)、地下水 (27.9%)、降水 (18.2%)混合型补给的河流,积雪融水补给占 3.8%,流量过程较平稳。枯季径流组分主要是地下水、积雪融水,湿季以冰川融水、雨水、地下水补给为主。实际上,本区枯季也应该有冰川融水补给,因为海螺沟冰川是典型的季风型海洋性冰川,冰川活动层底部以下的冰体常年处于零温状态,而该区又是新构造的活动区,地热资源非常丰富,使得冰川在摇动季节也有可能消融。另外,湿季也应该有少量融雪径流<sup>[6]</sup>。只是这两部分径流所占比例非常小,按照本文所用径流分割方法很难细致的划分出来,这也是此方法的弊端所在。

森林区 3 个小流域冰川面积为零,故冰川融水补给为零。森林区的太阳辐射也小于冰川区,因此由太阳直射造成的融雪径流也比冰川区少得多。且下垫面条件比冰川区复杂的多,加之林冠、地被物的截留,已不能按照冰川河的径流分割方法,给出个径流组分的定量分析。本文主要根据森林区各条溪沟的年内径流过程,结合降雨、气温以及下垫面条件进

行判断。

黄崩溜沟有峨眉冷杉过、成林, 尤其是冰碛物成土的土壤、灌草和裸露岩层等土地覆盖方式并存, 土壤渗漏性强, 根据长期实验及观测, 即使发生最大降雨, 也未发生地表坡面径流, 而流域沟道和出口断面产流均以壤中流、地下径流形式出现。分析比较黄崩溜的年径流过程与雨量分布 (见图 2), 发现两个过程较一致, 径流峰值与降水强度峰值几乎呈一一对应关系, 径流量的变化与降水量的变化趋于一致, 只是峰值出现时间要相对滞后一段时间。可见该区径流形成受降雨影响较大。枯季, 降水主要以固体形式存在, 径流主要组成成分主要是浅层地下水组成的基流。温度较低, 林区太阳辐射相对较少, 因此融雪径流很少。若以最枯流量作为深层地下水补给量, 深层地下水补给仅占年径流总量的 7.5%。湿季, 随着雨季的来临, 由降雨形成的径流 (主要是壤中流) 占了流于出口断面的主导地位。另外, 伴随着温度上升, 融雪径流也开始增加, 这也是造成春汛的主要原因。

观景台沟中段切割至基岩, 有地下水回归, 土壤蓄水容量更大。其年径流过程与雨量分布也很一致, 径流峰值与降雨强度峰值也呈一一对应关系, 只是峰值出现时间更为滞后。径流成分与黄崩溜沟较为相似。枯季径流组分主要是地下径流, 但受温度的影响, 偶尔有断流现象。湿季主要是降雨形成的

径流和地下径流。

马道沟流域为坡积物成土的峨眉冷山林成龄纯林覆盖, 土壤层较厚, 地表下渗能力强, 蓄水容量较大, 需要很大的雨量和历时才能使坡面基本达到饱和状态, 因此马道沟对降雨的响应最为迟缓。该沟枯季断流, 6月中旬才开始出现流水 (主要是土壤完全饱和和产生的回归流), 当溪沟径流出现以后, 整个雨季径流对降雨的响应才开始敏感。因此流域出口断面测得的主要是降雨产生的径流, 无深层地下水补给。

总之, 海螺沟冰川区和与其相邻的整个黄崩溜流域径流组分差异很大, 主要表现在冰川区冰川融水补量最大, 其次是地下水和降水。而森林区径流组分因季节而异, 枯季以地下水补给为主, 但补给量较小; 湿季以降水补给为主, 年径流过程主要受降雨分配的控制。黄崩溜沟与其嵌套小流域径流组分也有差异, 马道沟枯季断流, 无地下水补给; 观景台沟中段切割至基岩, 有地下水回归, 偶尔也出现断流; 黄崩溜沟干流海拔低, 地下水补给量多于这两条支沟。

### 3.2 河川径流年内分配特征及规律

对各条沟 1995~2006 年月平均径流量分析计算, 得到各流域多年平均的年内分配情况, 详细计算结果表 2。

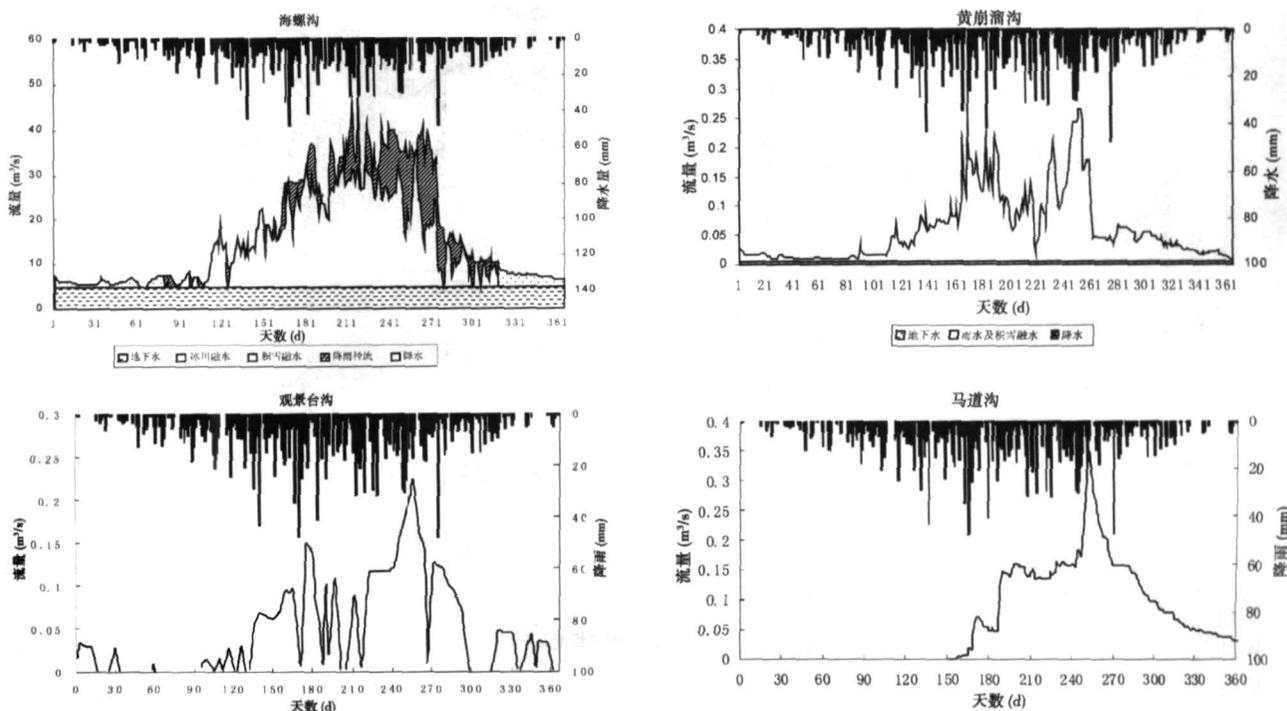


图 2 贡嘎山东坡不同流域 2004 年逐日径流分割结果及径流过程

Fig. 2 The results of daily runoff separation and runoff process of different basins in the eastern slope in the Gongga Mountain in 2004

表 2 贡嘎山不同流域河川径流年内分配特征

Table 2 Annual runoff distribution of different basins in in Gongga Mountain

沟 名	洪水期		枯水期		连续最大 4个月		$C_w$	$C_m$	相关系数	
	月	百分比 (%)	月	百分比 (%)	月	百分比 (%)			$R_p$	$R_T$
海螺沟	7~8	38.2	11~3	13.6	6~9	60.3	0.76	11.0	0.91	0.98
黄崩溜沟	7~9	59.6	12~4	8.83	6~9	72.2	0.90	17.8	0.83	0.94
观景台沟	7~9	49.3	1~4	8.15	7~10	62.0	0.70	11.37	0.71	0.81
马道沟	8~9	46.3	1~5	0	7~10	82.5	1.11	-	0.55	0.68

$C_w$ : 年内分配不均匀系数,  $R_p$  径流与降雨相关系数;  $C_m$  径流相对变化幅度;  $R_T$  径流 温度相关系数。

### 3.2.1 海螺沟

海螺沟冰川河春汛一般出现在 4 月初, 主要是由于气温回升使冰川融水增加所致, 其洪峰非常低; 夏汛则由冰川融水和降雨叠加所致。年径流主要分布在 6~9 月, 其间径流占年总径流量的 60.3%, 此时的径流组分主要是冰川径流和降雨径流, 分别占 62.3%, 22.7%。枯季分布在 11~3 月, 占 13.6%, 最枯流量多出现在 2 月, 枯季径流主要成分是地下

水和融雪径流, 分别占 67.9%, 22.55%, 相对变化幅度  $C_m$  为 11.0 年内分配不均匀系数为 0.76 本流域地下水的补给量多而稳定, 加之严寒季节的冰雪融水, 使得冰川河水文站水文断面即使在降水稀少的枯水季节也有较大的流量, 这可在一定程度上缓解径流的年内分配不均。但是, 由于该区大气降水较为集中, 而雨季气温的偏高又致使冰川消融更为强烈, 故冰川河径流量的季节变化仍很显著<sup>[7]</sup>。

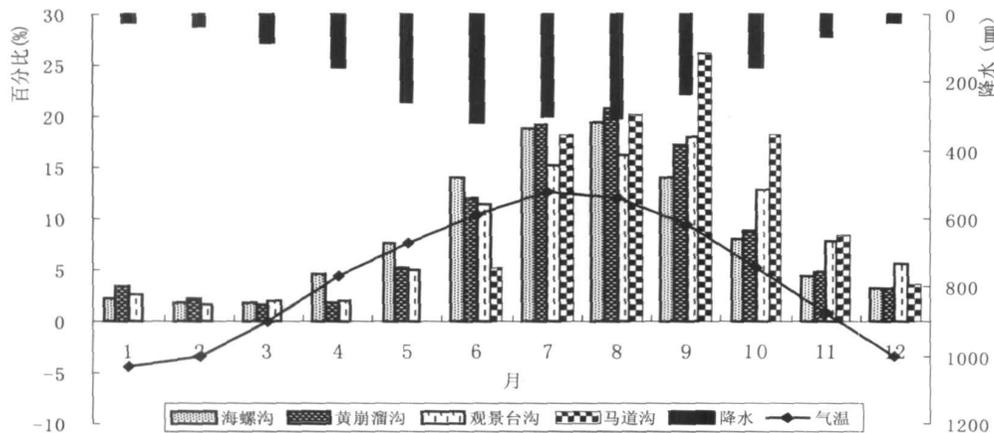


图 3 贡嘎山东坡不同流域各月径流量所占百分比

Fig 3 The percentage of monthly runoff of different basins in in the eastern slope in Gongga Mountain

### 3.2.2 黄崩溜沟

黄崩溜沟年径流主要分布在 6~9 月, 占年径流总量的 72.2%, 此时径流主要成分是降雨径流。枯季 12~4 月, 占 8.83%, 最枯流量出现在 3 月。此时径流组分主要是地下水 and 少量的融雪水。相对变化幅度  $C_m$  为 17.8 年内分配不均匀系数为 0.90。黄崩溜沟的森林覆盖率比海螺沟冰川河集水区大, 而森林具有消洪补枯的作用, 使径流年内分配趋于

均匀, 因此海螺沟冰川河的径流量季节变化应该较黄崩溜沟显著。但是黄崩溜沟的不均匀系数 (0.90) 却大于海螺沟 (0.76)。造成这种现象的主要原因是: 黄崩溜沟水文站的海拔比海螺沟水文站海拔高 40m 河沟的下切深度比海螺沟冰川河浅, 因此得到的地下水补给量比海螺沟冰川河少了很多 (海螺沟地下水补给占 27.9%, 黄崩溜沟 7.5%), 且该区域土壤表层有较厚的冻土层, 则冬季测得出

口断面径流量很小,而在春夏季节,随着积雪冻土的融化形成的融水径流的增加,以及雨季降雨洪峰流量的增加,流域出口断面径流量迅速增加,使得径流的年内分配出现较大差异。

### 3.2.3 观景台沟

观景台沟年径流主要分布在 7~10 月,占 62.0%,此时径流主要成分是降雨径流和浅层地下水。枯季 12~4 月,占 8.15%,径流主要组分是地下水和少量融雪水。相对变化幅度  $C_m$  为 11.37,年内分配不均匀系数为 0.70 年内径流过程较为稳定。观景台沟也是黄崩溜沟的嵌套小流域,其年内分配比黄崩溜沟要均匀得多,主要因为是观景台沟森林灌丛覆盖率在 80%以上,土壤层较厚,蓄水能力强;黄崩溜沟森林覆盖率低,还有冰碛物成土的土壤、灌草和裸露岩层等土地覆盖方式并存,土壤渗漏性强,蓄水调水能力弱,导致这一大流域对降水的响应更为敏感。

### 3.2.4 马道沟

马道沟流域土壤层较厚,地表下渗能力强,蓄水容量大,径流过程滞后于主要降水期达一个月。年径流主要分布在 7~10 月,主要是降雨形成的径流,以及少量的地下水回归流。洪水期集中在 8~9 月份,占年径流总量的 48.82%,枯季在 1~5 月,断流,直到 6 月才有少量溪流。年内分配差异最为显著。

图 3 是各条沟每月径流所占百分比与月平均气温、月降水总量之间的组合关系。可以直观的看出马道沟和黄崩溜沟年内分配较不均匀,且森林区径流峰值相对于降雨峰值有明显的滞后,故森林区丰枯季的来临要比冰川河推迟一个月左右;而海螺沟和观景台沟年内径流过程较平稳。径流的年内分配和其补给来源关系密切,这几条沟主要来源于冰川融水、降雨和地下水,而地下水是以上 3 种水源转化补给的一种形式。海螺沟冰川融水补给比重最大,因此径流量的年内分配与气温关最为密切。森林区河沟各个月径流量与降水相关系数在 0.55~0.83 之间,且都通过了显著性水平 0.05 的检验。但是森林区河沟径流年内分配与气温相关性也很强,这主要是因为枯季降水较少,气温对径流影响较为显著,特别是每年的 1、2 月期间气温降至零度以下。坡面土层冻结,河沟的水源补给大大减少,一些支沟出现

冻断,甚至黄崩溜沟干流也会出现短时断流。而 4 月中旬以后,气温上升较快,地面逐渐解冻,地下水和溪沟径流都明显增大。

### 3.3 河川径流年际变化特征

径流的年际变化受降水变率的影响,同时也受补给来源、河流所处地理位置、地形、地貌、流域面积等众多下垫面因素影响<sup>[8]</sup>。本文选取中等流域观景台沟作为森林区代表与冰川河进行对比分析。研究冰川区和森林区年径流量多年变化规律的及其原因,为流域管理和水土保持等方面的工作提供基本的依据。河川径流的多年变化主要分变化幅度和变化过程两个方面,用年径流变差系数、极值比分析年际间的变化幅度,以递增率及其与气温、降水的相关系数分析多年变化过程。

#### 3.3.1 变化幅度

一般来讲,冰雪融水补给为主的河历年径流变差系数  $C_v$  值相对较小。以地下水补给为主的河流因为受地下含水层的调蓄,径流量较稳定,  $C_v$  值也不大。而以降水补给为主的河历年径流量  $C_v$  值一般较大。海螺沟主要补给来源是冰川融水 (50.1%)、地下水 (27.9%)、降水 (18.2%),年径流变差系数  $C_v$  值 0.37 (详见表 3),其中冬季的径流年际变化较大,  $C_v$  值 0.37。秋季径流年际差异较小。观景台沟以降水、地下水混合补给为主,年径流变差系数  $C_v$  值仅为 0.09 年际变化较为均匀,其中春季径流年际变化较为显著,变差系数高达 0.55。极值比与变差系数大小相对应。

#### 3.3.2 多年变化趋势及其对气候变化的响应

海螺沟年多年平均径流量为  $12.75 \text{ m}^3/\text{s}$  径流量有明显增加的趋势 (图 4),递增率为  $0.93 (\text{m}^3/\text{s})/\text{a}$  春夏秋冬四季径流均增加,其中夏季平均径流量的增幅最大,对年平均径流的增加贡献较大,秋季径流与年平均径流大小接近,变化过程也趋于一致,冬季径流量最小。观景台沟多年平均径流量为  $0.025 \text{ m}^3/\text{s}$  多年变化不显著,且呈现多年丰枯交替的趋势。年径流量递增率为  $-0.0004 (\text{m}^3/\text{s})/\text{a}$  其中冬春季节平均径流量增加,夏秋两季径流量递增率为负,特别是 2001 年以后减少幅度更大,这两个季节径流年际变化是全年径流量略有减少的主要原因。此流域冬春季节径流量大小接近,夏秋季节径流量接近,且都分布在年平均径流量的两侧。

表 3 贡嘎山不同流域河川径流年际变化特征

Table 3 The runoff inter-annual variation characters of different basins in in Gongga Mountain

沟 名	时间	年径流量 (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta$ (m <sup>3</sup> /s) /a	C <sub>v</sub>	K <sub>m</sub>
海螺沟	全年	12.75	0.93	0.37	3.11
	春	7.10	0.47	0.43	3.97
	夏	26.53	2.26	0.39	3.35
	秋	13.45	0.73	0.37	2.82
	冬	3.67	0.24	0.56	-
观景台沟	全年	0.025	-0.0004	0.09	1.33
	春	0.009	0.0005	0.55	-
	夏	0.042	-0.0019	0.15	1.73
	秋	0.038	-0.0001	0.14	1.71
	冬	0.009	0.0003	0.26	2.05

说明:  $\Delta Q$  径流绝对变化幅度; C<sub>v</sub> 年径流变差系数; K<sub>m</sub> 年径流极值比。

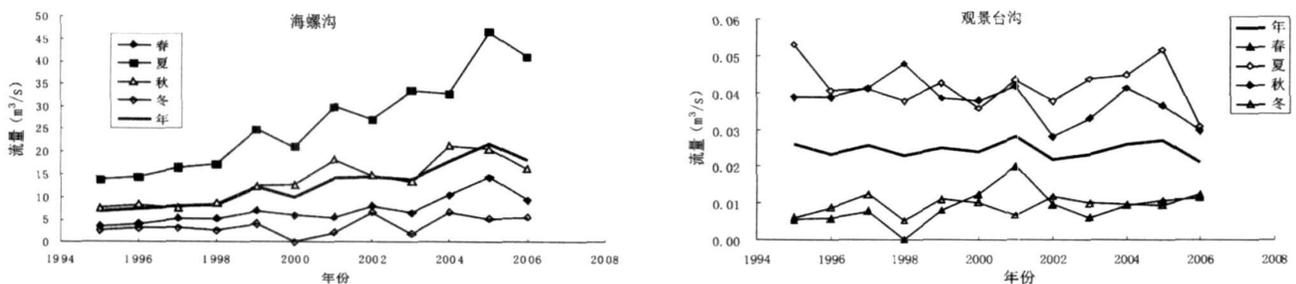


图 4 贡嘎山东坡不同流域河川径流年际变化趋势

Fig 4 The trend of inter-annual runoff variations of different basins in the eastern slope in Gongga Mountain

河川径流量的多年变化是气候变化、人类活动等综合作用的结果。本区域人类活动很少,气候变化应该是主导因素。气温的增加主要导致冰川消融量的增加,改变高山区降水形态,影响流域的总蒸发。最近 10 多年来,本区降水和气温均略有增加,增温率为  $0.15^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ,年降水总量增幅为  $32.7\text{ mm}/(10\text{ a})$ ,水面蒸发量明显减少,减少幅度为  $86.8\text{ mm}/(10\text{ a})$ ,这些因素都有利用河川径流量的增加。

为定量分析年径流变化与气候因素耦合关系,计算了年径流与降水、年平均气温、年最高温、年最低温、水面蒸发量的相关系数(表 4)。

从相关系数来看,水面蒸发量的逐年减少是导致海螺沟年径流量变化的主要因素,其中春、夏季节水面蒸发量对径流影响较大;降水与年径流量相关系数不大,主要是因为年降水变率小于径流递增率,但是降水量的增加是影响春、秋季径流的主导因素

(相关系数分别为 0.717、0.527);年平均气温与径流量相关系数也很低,主要是因为气温是控制冬春季节径流量的主导因素,而冬春季节径流所占比例较小,且年增温率小于径流递增率;最高气温也主要通过影响冬春季节径流起作用;最低气温对径流变化影响不大。因此,海螺沟径流量的多年动态变化是水面蒸发、降水、年平均气温等因素综合作用的结果,也说明海螺沟冰川河对气候变化的敏感性较强。而在观景台沟,气候因素的作用明显不同。此区域几乎全部被森林灌草、高山草甸覆盖,水面蒸发的作用远远小于冰川区;降水量的变化是观景台沟径流量多年变化的主导因素,其相关系数为 0.729 降水量的影响主要集中在夏季,其相关系数达到了 0.702 气温与径流量的相关性不强,甚至出现了负相关,但最高气温仍是影响冬季径流的主导因素。由此可判断,观景台沟雨季径流量的波动变化控制着年径流量多年变化。

表 4 贡嘎山东坡不同流域年径流量与气候因素相关系数

Table 4 The correlation coefficients of runoff and climatic factors in the eastern slope in Gongga Mountain

沟 名	时间	径流—降水	径流—平均温	径流—最高温	径流—最低温	径流—蒸发
海螺沟	全年	0.212	0.260	-0.003	0.083	-0.773
	春	0.717	0.345	0.484	0.017	-0.607
	夏	-0.170	0.082	0.293	-0.059	-0.645
	秋	0.527	0.094	-0.131	-0.017	-0.386
	冬	-0.272	0.367	0.373	-0.130	-0.379
观景台沟	全年	0.729	-0.585	-0.483	-0.382	0.044
	春	0.281	-0.378	-0.358	-0.306	-0.516
	夏	0.702	-0.248	-0.232	0.375	-0.087
	秋	-0.023	0.040	-0.451	0.102	0.137
	冬	0.162	0.243	0.360	-0.168	0.317

## 4 结论

### 1. 河川径流组成及年内分配特征

海螺沟冰川区和与其相邻的整个黄崩溜沟流域径流组分差异很大, 冰川区冰川融水 (50.1%)、地下水 (27.9%)、降水 (18.2%)。年径流主要分布在 6~9 月, 其间径流占年总径流量的 60.3%, 此时的径流组分主要是冰川径流和降雨径流, 分别占 62.3%, 22.7%。枯季分布在 11~3 月, 占 13.6%, 径流主要成分是地下水和融雪径流, 分别占 67.9%, 22.55%。而森林区径流组分因季节而异, 枯季以浅层地下水补给为主, 但补给量较小; 湿季以降水补给为主, 年径流过程主要受降雨分配的控制, 其丰枯季的来临比冰川河推迟一个月左右。冰川区径流年内分配不均匀系数 (0.76) 小于森林区的黄崩溜沟 (0.90) 和马道沟 (1.11), 大于观景台沟 (0.70)。

### 2. 河川径流多年变化特征

冰川区海螺沟多年平均径流量为  $12.75 \text{ m}^3/\text{s}$  年径流量有逐年上升的趋势, 年递增率  $0.93 (\text{m}^3/\text{s})/\text{a}$  四季径流量均逐年增加, 其中夏季径流年递增率最大, 达到了  $2.26 (\text{m}^3/\text{s})/\text{a}$  年际变差系数为 0.37 其中枯季径流年际差异较大冬季变差系数为 0.56 春季为 0.43。森林区中等流域观景台沟径流观景台沟多年平均径流量为  $0.025 \text{ m}^3/\text{s}$  变化不显著, 且呈现多年丰枯交替的趋势, 年径流量递增率为  $-0.0004 (\text{m}^3/\text{s})/\text{a}$  冬春季节径流略有增加, 夏秋径流减少, 其中夏季径流量减少幅度最大, 为

$0.0019 (\text{m}^3/\text{s})/\text{a}$  这也全年径流量略有减少的主要原因。

### 3. 气候因素对径流的影响

气温直接影响该区的冰雪径流的形成和变化, 因此气温与海螺沟径流量年内分配的相关系数大于森林区。气温的缓慢上升是整个流域冬春季节径流增加的主要原因。

降水是影响整个流域年内分配的关键因素, 与各小流域相关系数在在 0.55~0.91 间, 且都通过了显著性水平 0.05 的检验。春秋季节降水量的增加是导致海螺沟春秋季节径流量逐年增加的主要原因; 森林区观景台沟径流量的动态变化受降水量的控制, 年径流量与降水相关系数为 0.729 夏季径流量与降水相关系数为 0.702。

最近 10 多年来水面蒸发量的显著减少也是促使海螺沟径流量逐年增加有利因素, 其相关系数为  $-0.773$ 。

### 参考文献 (References)

- [1] Wang Jinye, Che Kejun. Analysis of the runoff components in the forestry areas of the Qilian Mountains and their temporal and spatial variation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 1999 21 (1): 59~63 [王金叶, 车克钧. 祁连山森林覆盖区河川径流组成与时空变化分析 [J]. *冰川冻土*, 1999 21 (1): 59~63]
- [2] The Characteristics of glacier hydrology in the area of the Gongga Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 1995 17 (1): 73~82 [曹真堂. 贡嘎山区的冰川水文特征 [J]. *冰川冻土* 1995 17 (1): 73~82]
- [3] Chen Linqun, Liu Changming. Reviews on base flow researches [J]. *Progress in Geography* 2006 25 (1): 1~15 [陈利群, 刘昌明. 基流研究综述 [J]. *地理科学进展* 25 (1): 1~15]

- [4] Zheng Hongxing, Liu Changning. Changes of annual runoff distribution in the headwater of the Yellow River Basin [J]. *Progress in Geography* 2003, 22(6): 585~590 [郑红星, 刘昌明. 黄河源区径流年内分配变化规律分析 [J]. *地理科学进展* 2003, 22(6): 585~590]
- [5] Huang Xiquan. Hydrology [M]. Beijing Higher Education Press 1992: 58~74 [黄锡荃. 水文学 [M]. 北京: 高等教育出版社 1992: 58~74]
- [6] Chang Genwei, Yu Xiniao, Zhan Yutao. Hydrologic Circulation and Mathematic Simulation of Mountain Forest Ecosystem [M]. Beijing Science Press 2004: 55~74 [程根伟, 余新晓, 赵玉涛. 山地森林生态系统水文循环与数学模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 55~74]
- [7] Li Wei, Cheng Genwei. Features of the natural runoff of Hailuo Ravine in Mt. Gongga [J]. *Journal of Mountain Science* 2004, 22(6): 698~701 [李伟, 程根伟. 贡嘎山东坡海螺沟的河川径流特征 [J]. *山地学报*, 2004, 22(6): 698~701]
- [8] Abulizi, Shang Sichen. Analysis of the characters of the runoff of Xinjiang Rivers [J]. *Arid Environmental Monitoring* 2003, 17(2): 112~116 [阿不力克木·阿不力孜, 商思臣. 新疆河流径流特征分析 [J]. *干旱环境监测*, 2003, 17(2): 112~116]
- [9] Li Weihong, Chen Yaning. The research of responses of runoff to climatic change in northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang [J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences* 2006, 36 (Additional II): 39~44 [李卫红, 陈亚宁. 新疆天山北坡河川径流对气候变化的响应研究 [J]. *中国科学 D 辑, 地球科学*, 2006, 36 (增刊 II): 39~44]

## Comparative Analysis on the Annual Runoff Characteristics of Different Basins in the Eastern Slope in Gongga Mountain

LÜ Yuxian<sup>1, 2</sup>; WANG Genxu<sup>1</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment Chinese Academy of Science & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China)

2. Graduate College of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A glacial river and three gullies of different scales in the Eastern Slope of the forest area in Gongga Mt are selected. Combined with the data of runoff and their corresponding precipitation and temperature in recent ten years, and the comparative analysis of runoff components, annual runoff distribution, inter-annual runoff variability in the adjacent glacial and forest areas are given using runoff separation, correlative analysis and other methods. The results indicate that: The glacial river in Hailuo Ravine is mainly supplied by glacial meltwater (50.1%), groundwater (27.9%), precipitation (18.2%). The key components are glacial runoff (62.3%) and rainfall runoff (22.7%) from June to September, while the main components are groundwater (67.9%) and snowmeltwater (22.55%) in dry seasons. The uneven index of annual distribution is 0.76. The gullies in forest area are mainly supplied by groundwater, while are rainfall in wet seasons. Both Huangbengliu Gully and Madao Gully have higher unevenness of annual runoff, and the indices are 0.90, 1.11, respectively. Guanjingtai Gully has a steady annual runoff process, and the uneven index is 0.70. The annual runoff of glacial river has a monotonous rising trend in recent ten years, and the ascending rate is  $0.93 \text{ m}^3/\text{s}$ . The increase amplitude of summer runoff is the most significantly. The rise of temperature in spring and winter, the increase of precipitation in spring and autumn, the significant decrease of evaporation in the whole year are possible reasons of runoff variation. There is no significance of inter-annual runoff variability in Guanjingtai Gully in forest area, and the variation coefficient is 0.09, and the ascending rate is  $-0.004 \text{ m}^3/\text{s}$ . The decrease amplitude of summer runoff is the most significantly, and the leading factor is the reduction of the precipitation, so the inter-annual runoff variability is controlled by the runoff fluctuation in rainy season. The sensitivity of runoff to climate change in forest area is higher than glacial river.

**Key words:** Gongga Mountain; runoff; runoff separation; annual runoff distribution; inter-annual runoff variability