

# 龙江流域降水、径流时序特征分析<sup>①</sup>

陈文华, 甘淑

(云南大学 亚洲国际河流中心, 云南 昆明 650091)

**摘要:** 通过对空间分布于云南沿边地带的龙江流域 42 a 来主要气象站和代表水文站的资料收集, 获得各气象站的月降水资料和夏中水文站的月实测天然径流资料. 利用数学模型方法, 从降水和径流年际变化、年内分配的不均匀性、集中性等方面分析了龙江流域径流的变化规律. 得出以下结论: 龙江流域降水、径流的年际变化趋势一致, 并可能存在一个准 8~11 a 的波动周期(其中径流周期较明显); 降水的年内变化较径流变化要显著、剧烈, 且降水主要集中在 7 月, 比径流的集中期提前 1 个月; 径流的年内分配主要受降水年内分配影响, 但在冬季和春季, 受季节特性所决定的流域蓄水和蒸发影响也比较明显.

**关键词:** 龙江流域; 降水; 径流; 时序特征

**中图分类号:** K 928.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-7971(2007)05-0485-06

全球变暖将导致水文循环加剧, 未来气候的潜在变化将对河流系统造成深远的影响. 在不同的气候情景模拟下, 未来中国各区地表径流量将产生不同变化, 我国西南、西北、东北等地区的河川径流有可能增加<sup>[1]</sup>. 在过去数十年内, 中国西南纵向岭谷区的气温和降水也都显示出增加趋势<sup>[2]</sup>. 然而区内气温和降水的空间分布在很大程度上受地貌格局<sup>[3]</sup>的影响. 伊洛瓦底江流域位于纵向岭谷区最西边, 是西南暖湿气流在我国的入境处. 目前有关纵向岭谷区气候与水文变化的研究多在澜沧江、元江、怒江等流域进行<sup>[4-6]</sup>. 伊洛瓦底江流域尚未见有关报道. 本研究通过对瑞丽江夏中水文站 1959~2000 年的月径流实测资料和 1959~2000 年流域主要气象站的月降水资料的分析, 揭示龙江流域径流年际变化以及年内分配的规律, 以期为流域的综合管理提供科学依据.

## 1 研究区概况

选取属于伊洛瓦底江水系的瑞丽江上游段的龙江流域(图 1)作为研究对象. 龙江发源于高黎贡山西南支脉尖高山南侧, 由北向南折向西南流经

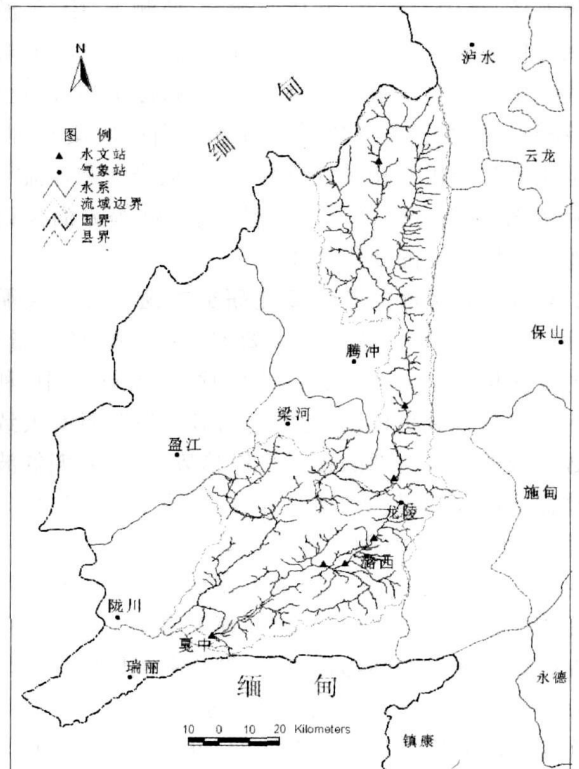


图 1 龙江流域水系示意图

Fig. 1 Longjiang drainage basin and rivers network

① 收稿日期: 2007-03-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划专题(2003CB415105), 云南省自然科学基金重点项目(2003C0002Z).

作者简介: 陈文华(1982-), 男, 硕士生, 主要从事生态系统变化及跨境生态安全方面的研究.

通讯作者: 甘淑, 教授, 主要从事区域生态环境管理与 3S 技术应用方面的研究.

腾冲、龙陵、梁河、陇川、潞西 5 个县(市), 河长约 200 km, 在遮放盆地接纳来自东北方向的芒市大河后改称瑞丽江. 该流域面积约 7 762 km<sup>2</sup> (占瑞丽江流域面积的 91.6%), 位于 24°6′18″~25°5′39″N, 97°56′6″~98°53′23″E 之间. 流域以中山宽谷地貌为主, 最高海拔 3 760 m, 最低海拔 784 m, 基本格局是东西两侧山脉夹持着龙江干流, 由东北向西南延伸, 地势不断降低, 形态呈哑铃形. 流域南北跨度约 2 个纬度, 主要属中、北亚热带气候区. 流域降水受孟加拉湾暖湿气流影响, 降水成因一致, 是我省多雨区之一. 全流域植被覆盖良好, 少见裸地. 龙江流域上游段和下游段支流发育, 分布有较多的山间盆地, 人口较多, 是云南西部重要的农业区.

## 2 研究方法

资料调查表明, 在龙江流域设有东营、龙江桥、腾龙桥、戛中等水文、水质监测站, 监测上、中、下游水文情势及水质、泥沙状况. 本文基于对龙江流域代表水文站——戛中站 42 a 以来的月实测天然径流资料, 以及相关气象站月降水资料的收集整理, 运用趋势分析及相关性研究方法, 从降水和径流年际变化、年内分配的不均匀性、集中性等方面探讨龙江流域径流的变化规律.

**2.1 降水、径流的年际变化研究方法** 在水文循环过程中, 历年气象或水文要素(降水量、径流量)的变化构成了一个较长的时间序列. 在研究中, 利用随机过程分析机制, 通常可将其分解为具有大致数量级的较长时期的相对平稳趋势、较短时期的波动振荡以及随机扰动项 3 部分. 即原变量=趋势分量(表示在较长时间尺度上变量缓慢变化的趋势)+年际变化(表示在趋势上下波动具有较短时间尺度周期性变化的序列分量)+随机扰动(表示不存在任何规律性的纯随机过程, 没有系统性偏倚且相互之间具有独立性). 通过选择适当的数学模型对变量的时间序列进行平滑处理, 可以得出反映时间序列的趋势和年际变化特征.

本文针对普通多点滑动平均法不可避免地缩短原时间序列, 不便对序列两端进行处理的不足, 采用了一种不减少序列长度的平滑方法<sup>[7]</sup>, 即二项式系数加权平均法对序列进行处理. 由于该方法可使当前项权重最大, 而其前后项的权重逐渐减小, 因此既保留了当前项特征, 又考虑到前后项的影响, 能够较好地反映原序列的长期特征.

具体方法为: 对于  $i = 1, 2, \dots, N$  的要素序列  $X_i$ , 取步长为  $n$  ( $n$  取单数), 采用如下公式(1~3)进行  $l$  阶平滑, 计算  $X_i$  所对应的平滑序列  $\bar{X}_i$ , 即

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=a}^n C_m^{j-1} X_k}{\sum_{j=a}^n C_m^{j-1}}, \quad i \leq L \text{ 时}, \quad (1)$$

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{i=1}^n C_m^{j-1} X_k}{2^m}, \quad L < i \leq N - L \text{ 时}, \quad (2)$$

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^b C_m^{j-1} X_k}{\sum_{j=1}^b C_m^{j-1}}, \quad i > N - L \text{ 时}, \quad (3)$$

式中,  $m = n - 1$ ,  $L = m/2$ ,  $k = j - L - 1 + i$ ,  $a = 2 + L - i$ ,  $b = n - i + N - L$  ( $N$  为样本容量), 本文  $n$  取 11.

**2.2 降水、径流的年内变化研究方法** 水文循环过程中有关特征参数的年内变化也称年内分配或季节分配. 描述降水、径流的年内变化通常包含“量”和“结构”2 方面变化的特征. 前者是指降水量、径流总量等数值上的变化, 后者则从降水、径流过程的“形状”上进行分析, 反映不同时段内降水、径流的比例, 本文中主要针对后者进行分析.

计算年内变化特征的指标有多种不同方法, 水文分析使用较多的有各月(或季)占年降水、径流的百分比、汛期/非汛期占年径流的百分比等<sup>[8-13]</sup>. 为了进一步定量分析龙江流域水循环的变化, 除了采用上述常规方法外, 还采用年内不均匀系数、集中度(期)等不同指标, 从不同角度探讨揭示降水、径流年内变化的规律.

**2.2.1 年内分配不均匀系数计算方法** 天然河流客观上存在受气候因素以及与流域调蓄能力有关的下垫面因素的影响, 如以降水补给为主的河流, 降水、蒸发等气象要素的季节性波动, 在很大程度上决定了径流年内变化的不均匀性<sup>[8,9]</sup>. 采用年内分配不均匀系数  $C_{yv}$  和径流年内分配完全调节系数  $C_{yr}$  来衡量径流年内分配的不均匀性.  $C_{yv}$  越大表示月径流相差越悬殊, 年内分配越不均匀. 具体指标的计算采用以下公式

$$C_{yv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (Z_i / \bar{Z} - 1)^2}{12}}, \quad (4)$$

式中,  $Z_i$  为第  $i$  月降水量(径流量)占年降水量(径

流量) 的百分比、 $\bar{Z}$  为各月平均占全年百分比, 即  $100\% / 12 = 8.33\%$ 。

另外, 从水文分析角度讲, 径流年内分配完全调节系数  $C_{yr}$  表示了径流的年内分配的某种特性, 用“大于”年内月平均径流的各月径流之和与年径流总量的比值来表示不均匀程度。该指标的具体计算采用以下公式

$$C_{yr} = \frac{\sum_{i=1}^{12} f(i)(R_i - \bar{R})}{\sum_{i=1}^{12} R_i},$$

$$f(i) = \begin{cases} 0, & R_i < \bar{R} \\ 1, & R_i \geq \bar{R} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $R_i$  为第  $i$  月径流量,  $\bar{R}$  为年内月平均径流量, 即  $\bar{R}$  等于年径流总量的  $8.33\%$ 。

2.2.2 年内分配集中程度计算方法 集中度和集中期是利用实测的月降水(径流)资料反映年降水(径流)的集中程度和最大降水(径流)量出现的时段。计算方法可以采用将 1 a 内各月的降水、径流量作为向量分析, 其中各月变量的大小作为向量的长度, 所处的月份为向量的方向<sup>[13~15]</sup>。即确定 1~12 月每月的方位角  $\theta_i$  分别为  $0, 30, \dots, 330^\circ$ , 并把每个月的变量值  $Z_i$  分解为  $x$  和  $y$  2 个方向上的分量, 然后分别按以下算法进行合成分量  $x, y$  的计算

$$x = \sum_{i=1}^{12} Z_i \cos \theta_i, \quad y = \sum_{i=1}^{12} Z_i \sin \theta_i, \quad (6)$$

进一步处理得出月最大降水、径流合成系数  $K$ , 即

$$Z = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (7)$$

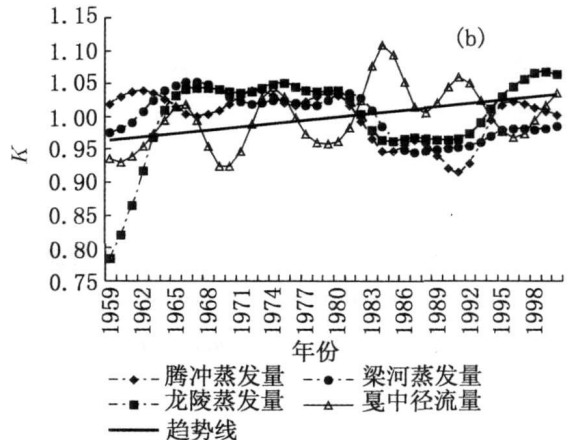
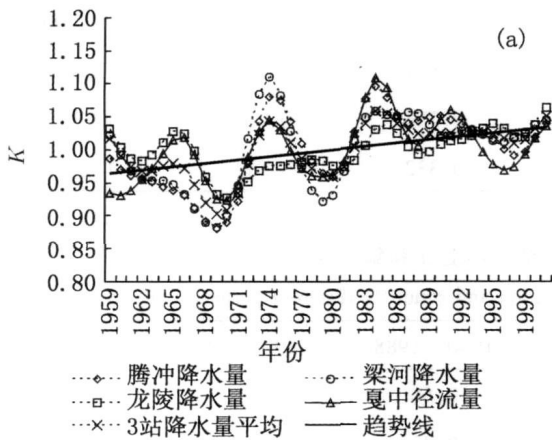


图 2 龙江流域降水、径流年代际变化及趋势 (a), 蒸发、径流年代际变化及趋势 (b)

Fig. 2 The variation curve of (a) annual precipitation and annual runoff, (b) annual evaporation and annual runoff in Longjiang catchment

由此可以按以下处理定义集中度  $d$  和集中期  $t$ ,

$$d = \frac{Z}{\sum_{i=1}^{12} Z_i}, \quad y = \arctan \frac{y}{x}. \quad (8)$$

分析(8)式含义可知, 合成向量的方位角, 也就是向量合成后重心所指示的角度, 即: 集中期  $t$  指示了月降水、径流量合成后的总效应, 表示了 1 a 中最大月降水、径流量出现的月份; 而集中度  $d$  则反映了集中期降水(径流)值占年总降水(径流)量的比值。

### 3 研究结果分析

基于对龙江流域及周边 9 个气象站降水数据收集整理, 初步的分析表明: 9 个站的年降水量标准化距平值在 1959~2000 年 42 a 间呈现上升趋势; 流域外保山、泸水 2 站的降水年内分配与其它站有明显差异; 陇川、瑞丽、盈江 3 站虽未直接处于龙江流域范围内, 但其降水年内分配曲线与流域内其它几站很相似。最后确定, 在龙江流域 3 个水文分区<sup>[16]</sup>中各选一个站即梁河站、龙陵站、腾冲站作为降水代表站, 以这 3 站降水数据的平均值作为流域历年降水情况的代表, 运用上述方法开展有关探讨。

3.1 降水、径流的年际变化 对腾冲、梁河、龙陵站年降水数据和夏中站年径流数据进行均值标准化处理( $K = X_i / \bar{X}$ ,  $X_i$  为第  $i$  年变量值,  $\bar{X}$  为变量多年平均值), 然后按二项式系数加权平均法进行平滑, 使降水、径流的年际变化处于同一坐标系统中, 其结果如图 2(a)。

分析图 2(a) 可知, 从 1959~ 2000 年腾冲、梁河、龙陵 3 站年降水和戛中站年径流量都表现出逐渐上升的总趋势, 并且降水和径流的年代际波动变化也表现出一定程度的一致性, 说明在该流域降水变化是引起流域径流变化的首要因素; 降水和径流表现出近似 8~ 11 a 的年际变化周期(其中径流变化的周期较明显).

为验证此周期性, 运用时间序列周期方差分析外推法<sup>[17]</sup> 分别对流域降水、径流序列进行周期分析, 结果显示: 降水序列周期约为 9 a, 方差分析  $F$  值为 0.9569, 置信度为 0.515, 相关系数 0.97, 周期不太显著; 径流序列周期约为 9 a, 方差分析  $F$  值为 4.4170, 置信度为 0.998, 相关系数 0.98, 周期较显著. 所得结果与图 2(a) 所示结果比较接近.

在研究时间序列 1959~ 2000 年中, 上述年际周期呈现先增加(1960~ 1979 年) 然后逐渐缩短(1980~ 2000 年) 的趋势, 且年代际波动幅度也出现了先增后减现象, 这在降水的变化中尤为显著. 降水波动幅度在 1959~ 1969 年和 1984~ 2000 年相对较小说明在这两段时间内降水在平均值上下的年际波动较频繁, 在进行二项式系数加权平均低通滤波时这种高频短周期波动被平滑掉了, 因此这 2 段曲线变化相对平缓. 而径流在相应时间段内仍保持较明显的年代际周期, 说明在这 2 段时期, 尤其是在 1984~ 2000 年这一时期流域径流变化主要受降水以外的其它因素影响. 为进行相关探索, 研

究中对流域蒸发变化也进行了对比分析(图 2(b)), 可以看出在这段时期径流与蒸发呈显著地反向变化关系.

另外从图 2(a) 还可看出虽然降水和径流的年际波动变化整体上表现出一定程度的一致性, 但 1959~ 2000 年降水与径流的变化仍经历了 1959~ 1961(不一致), 1962~ 1988(基本一致), 1989~ 2000(相对一致) 3 个变化阶段. 这一现象的形成可能是由于各时段内土地覆盖类型变化剧烈程度不同造成的. 结合相关政策调控时序分析初步推断: 其中 1959~ 1961 年由于经过了“大跃进”运动, 在农业“以粮为纲”、工业上大炼钢铁的影响下, 流域内森林遭受破坏, 土地覆盖类型发生了巨大变化引起了降水与径流关系的不一致; 1962~ 1988 年段流域内土地覆盖类型变化不太剧烈, 降水与径流变化关系比较一致; 20 世纪 80 年代末 90 年代后城市发展迅速, 由于大力实行退耕还林、天然林保护政策, 流域内土地覆盖类型又一次发生重大变化, 引起了这段时期流域降水与径流变化的不一致. 对年径流的变化而言, 土地覆盖类型变化的剧烈程度可能是引起降水与径流关系不对应的重要原因, 若土地覆盖类型长期不变或是变化缓慢, 降水与径流关系应该保持基本一致的相对稳定状态.

3.2 降水、径流的年内变化 根据公式(4)~ (8) 计算了龙江流域不同时段降水、径流(戛中站) 年内分配不均匀性、集中度和集中期(表 1, 2).

表 1 龙江流域降水、径流年内分配不均匀性

Tab. 1 Unevenness of annual distribution of precipitation and runoff in different period, Longjiang catchment

	多年平均	1960~ 1969	1970~ 1979	1980~ 1988	1989~ 1996	1997~ 2000
降水量 $C_{yv}$	0.834	0.895	0.861	0.861	0.788	0.805
径流量 $C_{yv}$	0.730	0.746	0.763	0.709	0.706	0.738
径流量 $C_{yr}$	0.323	0.324	0.326	0.332	0.311	0.320

表 2 龙江流域降水、径流年内分配的集中度  $d$  和集中期  $t$

Tab. 2 Concentration rate and period of annual distribution of precipitation and runoff in different period, Longjiang catchment

	多年平均	1960~ 1969	1970~ 1979	1980~ 1988	1989~ 1996	1997~ 2000
降水量 $d$	0.56	0.59	0.57	0.56	0.53	0.54
径流量 $d$	0.48	0.47	0.49	0.47	0.46	0.48
降水量 $t$	7.26	7.24	7.21	7.18	7.38	7.37
径流量 $t$	8.31	8.31	8.27	8.26	8.43	8.38

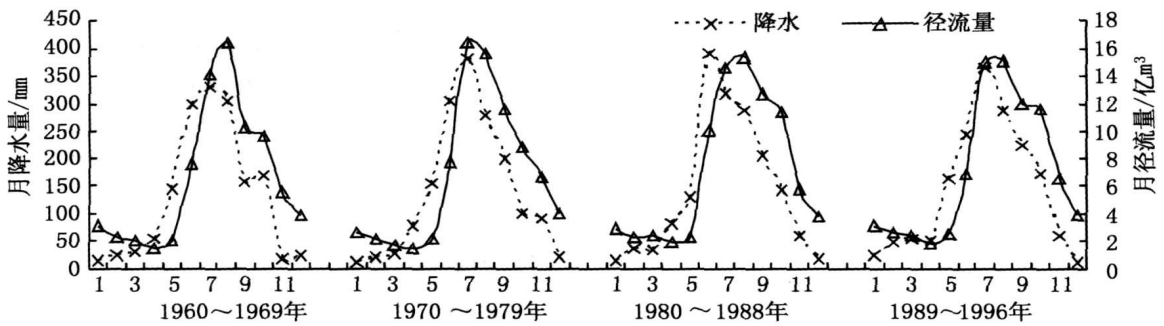


图 3 龙江流域不同时段降水量与径流量年内分配

Fig. 3 The annual distribution curve for precipitation and runoff in different period, Longjiang catchment

根据表 1, 2 所得的结果以及图 3 可以看出, 代表夏中水文站径流年内分配的不均匀性的 2 个指标  $C_{yv}$  和  $C_{yr}$  的变化规律并不一致. 即表现为径流量  $C_{yv}$  从 20 世纪 60 年代至 90 年代呈现先增后降趋势, 20 世纪 60 和 70 年代径流  $C_{yv}$  值较高, 20 世纪 90 年代最小. 径流量  $C_{yr}$  值虽然也出现先增后减现象, 但最高值出现在 80 年代, 年代间  $C_{yr}$  变化不超过 0.02; 降水量  $C_{yv}$  值的变化则呈现逐渐减小趋势, 降水量  $C_{yv}$  (多年平均 0.834) 比径流量  $C_{yv}$  (多年平均 0.730) 大, 说明降水年内分配不均匀性比径流年内分配不均匀性更显著. 从降水、径流年内分配的集中性看(表 2), 2 者集中度的变化趋势与上述年内分配不均匀性  $C_{yv}$  的变化趋势很相似. 即夏中水文站的径流年内分配集中度高值时段对应其  $C_{yv}$  的高值时段, 降水的集中度变化也是如此. 就集中期而言, 降水集中期为 7 月初, 径流集中期为 8 月初. 到 90 年代, 降水集中期推迟到 7 月中旬, 而径流集中期也相应推迟到 8 月中旬, 也就是说在研究时段内径流集中期与降水集中期有 1 个月左右的滞后期. 总体上看(图 3), 在不同研究时段, 前 7 个月径流的变化特征都十分相似(1~4 月径流逐渐减少, 5~7 月径流急剧增加), 而后 5 个月径流的变化在 20 世纪 60, 80 和 90 年代较为相似, 峰值出现在 8 月份, 在 9~12 月呈阶状下降趋势. 由图 3 中还可以看出, 夏中水文站 1~4 月径流与降水呈相反变化趋势, 这种变化在一定程度上说明了在干旱季节径流对流域地下蓄水和蒸发量年内变化较为敏感.

#### 4 结 论

通过以上分析, 可以整理得出如下结论:

(1) 从年际变化看, 龙江流域降水、径流的年

际变化趋是一致的. 可能有一个 8~11a 的波动周期, 平均约为 9 a. 降水年际波动在 20 世纪 80 年代末表现较显著. 部分时段可能由于短期内土地覆盖变化剧烈和蒸发变化的影响引起径流变化与降水变化缺乏一致性的现象;

(2) 径流与降水集中度的变化趋势与各自的年内分配不均匀性  $C_{yv}$  变化趋势相似, 说明这 2 个指标存在一定相关性. 各时段集中期变化不大, 降水主要集中在 7 月, 而径流与之相比则推迟 1 个月左右;

(3) 从年内分配过程来看, 在各个时段中, 1~7 月份径流的变化特征十分相似, 后 5 个月径流的变化在 20 世纪 60, 80 和 90 年代较为相似. 在总体上, 径流的年内分配主要受降水年内分配影响, 在冬季和春季受流域地下蓄水和蒸发季节变化的影响较为明显.

本文仅应用了有限的指标来揭示龙江流域径流年代际变化、年内变化的规律, 这些指标从不同侧面反映了降水、径流的变化特性. 但由于其它数据的缺乏未能对降水和径流年际、年内特征变化的原因及其社会经济和生态环境效应进行深入探讨, 今后将继续加强这方面的研究.

#### 参考文献:

[1] 游松财, Kiyoshi Takahashi, Yuzuru Matsuoka. 全球气候变化对中国未来地表径流的影响[J]. 第四纪研究, 2002, 22(2): 148-157.

[2] 尤卫红, 何大明, 段长春. 云南纵向岭谷气候变化对河流径流量的影响[J]. 地理学报, 2005, 60(1): F11.

[3] 甘淑, 何大明. 纵向岭谷区地势曲线图谱及地貌特征分析[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2004, 26(6): 534-540.

[4] 尤卫红, 何大明. 澜沧江月径流量变化的相关性和多

- 时间尺度特征[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2005, 27(4): 314-322.
- [5] 尤卫红, 何大明, 郭志荣. 澜沧江径流量变化与云南降水量场变化的相关性特征[J]. 地理科学, 2005, 25(4): 420-426.
- [6] 尤卫红, 段长春, 何大明. 纵向岭谷作用下的干湿季气候差异及其对河流径流量的影响[J]. 科学通报, 2006, 51(增刊): 56-65.
- [7] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [8] 黄锡荃, 李惠明, 金伯欣. 水文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [9] 刘俊民, 余新晓. 水文与水资源学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [10] 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.
- [11] 郭汉清. 中西河流域降水变化与径流关系研究[J]. 山西水土保持科技, 2005, 3: 20-21.
- [12] 杨海坤, 莫淑红. 黑河流域主要水文要素变化特征分析[J]. 西北水力发电, 2006, 22(1): 28-31.
- [13] 燕华云, 杨贵林, 汪青春. 长江源区径流年内分配时程变化规律分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 526-529.
- [14] 汤奇成, 程天文, 李秀云. 中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究[J]. 地理学报, 1982, 37(4): 383-393.
- [15] 杨远东. 河川径流年内分配的计算方法[J]. 地理学报, 1984, 39(2): 218-227.
- [16] 唐一清. 谱系群分析在水文分区中的应用[J]. 云南水利: 水资源专辑, 1985, 2: 10-18.
- [17] 唐启义, 冯明光. DPS 数据处理系统——实验设计、统计分析及模型优化[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

## Preliminary study on the characteristics of annual precipitation and runoff in Longjiang catchment

CHEN Weirhua, GAN Shu

(Asia International Rivers Center, Yunnan University, Kunming 650091, China)

**Abstract:** The serial characteristics of precipitation and runoff in Longjiang catchment have been analyzed based on the gauge records of runoff and annual precipitation between 1959—2000. Indexes of unevenness and concentration were calculated for runoff and precipitation annual distribution. By analysis, the conclusions is that the changing trend of runoff was similar to that of precipitation in long period. A cycle period from 8 to 11 years was found both in runoff and precipitation, which in runoff was more obviously; Due to the impacts of runoff-supplying source, 47.5% of the annual total runoff occurred in summer. Runoff annual distribution was evenner than that of precipitation. Precipitation distribution centralized in July, and runoff in August, about 1 month lags to precipitation; The changing of runoff was caused primarily by precipitation, but the seasonal changes in ground water and evaporation would have also obviously effect on the river regimes in winter and spring.

**Key words:** Longjiang catchment; precipitation; runoff; characteristics