

西双版纳热带季节雨林集水区基流特征*

高 富^{1,2,3,4} 张一平^{1,2*} 刘文杰^{1,2} 唐建维^{1,2} 邓晓保^{1,2}

(¹ 中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; ² 西双版纳热带雨林生态系统研究站, 云南勐仑 666303;

³ 中国科学院研究生院, 北京 100049; ⁴ 中国科学院昆明植物研究所, 昆明 650204)

摘 要 利用西双版纳热带季节雨林集水区 1996—2006 年日径流序列资料, 计算出逐年基流指数值 (BFI); 以二水源假设理论为依据, 用基流指数值对日径流资料做基流分割, 计算出热带季节雨林集水区基流量。结果表明: 西双版纳热带季节雨林集水区年基流指数值在 0.124~0.145, 均值为 0.1322, 年间变化较小; 月基流指数值在 0.131~0.134, 干季大于雨季; 径流总量与降雨量年内变化趋势较为一致。本文结果将为热带森林生态水文功能研究和热带区域水资源的规划管理提供基础数据。

关键词 森林水文; 基流指数; 径流成分; 热带季节雨林; 西双版纳

中图分类号 Q948.112 TV121 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2009)10-1949-07

Characteristics of base flow in tropical seasonal rainforest catchments in Xishuangbanna of Yunnan Province, Southwest China. GAO Fu^{1,2,3,4}, ZHANG Yiping^{1,2}, LIU Wenjie^{1,2}, TANG Jianwei^{1,2}, DENG Xiaobao^{1,2} (¹Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; ²Xishuangbanna Station for Tropical Rain Forest Ecosystem Studies (XSTRE), Menglun 666303, Yunnan, China; ³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650204, China). Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(10): 1949-1955

Abstract Based on the 1996-2006 daily runoff data of tropical seasonal rainforest catchments in Xishuangbanna, the annual base flow index (BFI) values of the catchments were calculated, and by using these BFI values to partition the daily runoff data according as the hypothesis of dual water source, the total base flow of these catchments was calculated with the help of BFI software. The annual BFI values of the catchments varied from 0.124 to 0.145, with an average of 0.1322 and changed less among years, and the monthly BFI values were 0.131-0.134, being higher in dry season than in wet season. The variation pattern of the total base flow was similar with that of rainfall, and the former lagged behind the latter. The findings of this study could provide basic data for the research of tropical forest ecohydrological functioning and the management of water resources in tropical area.

Key words forest hydrology; base flow index (BFI); runoff components; tropical seasonal rainforest; Xishuangbanna

三水源理论假设把集水区出口径流分成三个部分(倪雅茜等, 2005): 地表径流 (surface flow)、地下径流 (underground flow) 和壤中流 (subsurface flow, 或者是 interflow)。二水源理论假设, 把壤中流也归入到地下径流中计算(顾慰祖和谢民, 1997)。就径流量利用而言, 以地下径流与人类福祉最为密切,

是目前可供利用和易于利用的有效水资源量, 而地表径流量中以洪水形式输出的部分难于得到有效利用。地下径流是径流过程线图形中较低的部分, 起伏较少 (Tallaksen, 1995), 是地下水系统的重要组成部分之一。因地下径流在水安全、粮食安全、非点源污染评价, 水资源评价和调查, 水资源配置、工农业供水和降雨径流关系模拟中有着重要的应用, 所以成为令人关注和探求的目标(陈利群等, 2006a; San2thi et al., 2008)。实践中, 常用实际观测径流资料

* 国家重点基础研究发展计划项目 (2003CB415101) 和云南省自然科学基金重点资助项目 (2003C0002Z)。

** 通讯作者 E-mail: yipingzhang@xtbg.ac.cn

收稿日期: 20081221; 接受日期: 20090222

推求的基流指数 (base flow index, BFI) 作为基流分割和径流成分研究的关键参数 (Wahl & Wahl 1995; Tallaksen 1995; 钱云平等, 2004; Santhi et al., 2008)。一般来说, 基流指数较高的区域, 被认为拥有较丰富的可供利用和易于利用的水资源量; 而基流指数较低的地区, 则表示该区域利于人类福祉的水资源量较少 (Tallaksen 1995; 陈利群, 2006b)。

西双版纳热带地区因其特殊的地理环境, 与世界上其他热带地区相比具有降雨量较少, 温度较低的气候环境, 但该地区的低山、沟谷区却发育着与东南亚典型热带雨林区和印度热带雨林区区系结构类似的热带雨林植被和热带季节雨林植被 (Zhang & Cao 1995; Cao & Zhang 1996; Liu et al., 2004, 2005; 朱华, 2007)。随着社会经济发展, 近年来西双版纳热带地区的土地利用和土地覆盖正发生巨大变化。以经济利益为驱动力的人工橡胶林面积正表现出强劲的增长势头 (Liu et al., 2007), 而大面积的人工橡胶林纯林面积的增加, 造成了局部水土流失加剧、滑坡、塌方等地质灾害频发的现象 (汪汇海, 1981), 更为严重的是引起区域水文过程和径流成分比例的改变, 加剧了洪涝和干旱气候灾害损失程度, 直接导致部分区域饮用水枯竭现象, 威胁到人们的生存。水问题已经成为这片热带区域所面临的重大环境问题之一。因此有必要展开西双版纳热带雨林水文过程和基流特征研究。

目前对西双版纳热带季节雨林和人工橡胶林林冠截留量、穿透雨量、树干茎流量等森林水文要素研究已得到较好结果 (刘玉洪等, 1999; 张一平等, 2003, 2004; Liu et al., 2004, 2005, 2007)。Liu 等 (2005) 应用环境同位素技术对西双版纳热带季节雨林雾水来源进行了探讨, 指出该地区大气降水是地下水的唯一补给来源。而对地下水的输出过程和定量评估方面没有研究。刘玉洪等 (1999) 应用直线分割法对人工橡胶林集水区的径流资料做了径流分割的初步研究。而作为区域重要水文参数之一的基流指数还没有报道。基流指数的准确计算对于合理评估有效水资源量, 制定水资源管理规划, 研究流域和集水区尺度上的径流变化规律具有重要意义 (Gburek & Fohrer 1999; 刘昌明和成立, 2000; Haberlandt et al., 2001; 钱云平, 2004; 左海凤等, 2007)。

本文根据西双版纳热带季节雨林小流域集水区 1996—2006 年的日平均径流量数据, 用二水源理论

对逐日径流数据做径流分割, 得到西双版纳热带季节雨林的水文特征基本参数)) 基流指数, 并对径流成分及其组成比例进行定量计算。研究结果将为西双版纳热带地区地带性植被群落的保护、水资源评估提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 热带季节雨林集水区概况

西双版纳热带季节雨林生态系统位于云南省西双版纳州勐腊县境内的国家级自然保护区内 (21°57'N, 101°12'E, 海拔 756~1020 m), 距中国科学院西双版纳热带雨林生态系统定位研究站约 10 km。由于本区位于热带北缘, 终年受西南季风控制, 属热带季风气候, 一年中有雾凉季 (11 月—翌年 2 月)、干热季 (3 月—4 月)、雨季 (5 月—10 月) 之分 (Zhang 1988)。地带性植物群落为热带季节雨林, 植物群落高度 35 m 左右, 结构复杂, 分层现象明显, 可分为 4 层, 其中乔木层按高度分为 3 层: 上层高 30 m 以上, 优势种主要为千果榄仁 (*Terminalia myriocarpa*)、番龙眼 (*Pometia tomentosa*); 中层高度在 16~30 m, 常见种有云南玉蕊 (*Barringtonia macrostachya*)、大叶白颜树 (*Gironniera subaequalis*)、山焦 (*Mitrophora maingayi*) 等; 下层高 16 m 以下, 主要种包括云树 (*Garcinia cowa*)、假广子 (*Knema erratica*)、细罗伞 (*Ardisia tenera*)、蚊花 (*Mezettipsis creaghii*) 及毒鼠子 (*Didymopetalum gelonioides*) 等。灌木层除上层乔木的幼苗幼树外, 常见种有染木 (*Saprosma tematum*)、狭叶巴戟 (*Morinda angustifolia*)、玉叶金花 (*Mussaenda* sp.) 等。草本层与灌木层处于同一层次, 种类不多, 常见的有凤尾蕨 (*Pteris* sp.)、海芋 (*Alocasia macrorrhiza*)、盈江南星 (*Arisaema inkianense*) 等, 藤本及附生植物丰富, 板根及茎花现象显著 (Cao & Zhang 1996; 任泳红等, 1999)。

集水区水文观测采用中国生态系统研究网络统一的观测技术方法和观测设施进行, 通过测流堰上安装的自记水位计记录径流过程线 (中国生态系统研究网络科学委员会, 2007)。

1.2 数据分析方法

1.2.1 资料来源 本研究水文资料来自中国科学院西双版纳热带雨林生态系统研究站。在保证径流序列资料日历年完整基础上, 本文选取研究站点 1996—2006 年的实测逐日平均流量资料。降雨选用距离本集水区约 10 km 的勐仑气象站资料。

11212 处理方法 依据降雨径流关系, 与同期日降雨序列资料进行交叉检查, 对日流量值 ($q_i = 1, 2, \dots, m$) 进行了逐日检查和校正。校正后的逐日流量值 (m^3) 求和得到 1996 年 1 月到 2006 年 12 月逐月径流量 (m^3)。为便于与降雨数据比较进而计算相关参数, 把径流数据转化为以 mm 为单位的数据, 如式 (1) 所示:

$$d_i = \frac{q_i}{A} @1000 \quad (1)$$

式中, d_i 为日平均径流深, A 为集水区面积 (m^2), 此处取 $A = 258300$, 1000 是单位转换常数, 把 m 转换为 mm。月径流深 (mm) 用 D_m 表示, 月内日径流深 d_i 累加得到月总径流深。年径流深 (mm) 由月径流深求和得到。

为准确比较地下径流、地表径流和总径流的年、年内变化过程, 绝对值相差较大的数据系列做了对数变换。

11213 基流指数 (base flow index, BFI) 计算 本文应用 BFI 程序 (Wahl & Wahl, 1995; 左海凤等, 2007), 输入逐日平均流量数据, 取 $n = 5$ 作为分割时间段, 分别计算了西双版纳热带季节雨林集水区 1996) 2006 年的逐年基流指数。月基流指数是多年月平均基流数据基础上, 按照基流指数定义手工计算得到。

11214 径流分割 采用二水源假设, 即总径流 = 地表径流 + 地下径流 (顾慰祖和谢民, 1997)。基流指数 (BFI) 与总径流量的乘积得到地下径流量 $Q_{GF} = Q_m @BFI$, 总径流量减去地下径流量即为地表径流量 $Q_F = Q_m (1 - BFI)$ 。用 BFI 对逐日平均径流总量进行分割, 得到逐日地下径流量和逐日地表径流量值, 累加后得到对应月、年尺度下的值。

2 结果与分析

211 热带季节雨林集水区降雨概况

研究表明 (王馨和张一平, 2005), 本研究区降水多年变化呈现上升趋势, 增加速率为 $2313 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 并且 1997 年后降雨年间波动增大。降水主要集中在下午和后半夜, 呈现出显著的热带季风气候特征; 24 h 降雨强度分级标准, $< 25 \text{ mm}$ 的中小降水事件占总降水事件的 91%, $> 25 \text{ mm}$ 以上的降水事件主要发生在雨季。

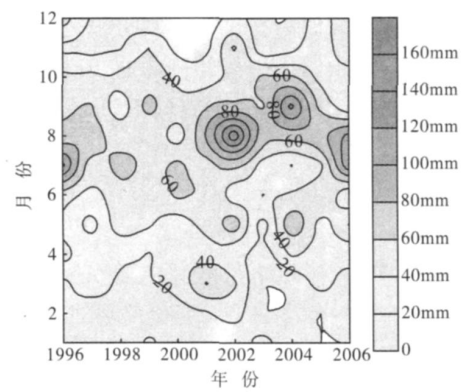


图 1 西双版纳热带季节雨林区逐月 24 h 最大降水量的年、季节分布

Fig 1 Monthly maximum rainfall intensity (in 24 h) during 1996 to 2006 in tropical seasonal rainforest catchment Xishuangbanna, South West China

据统计 1996 年 1 月 1 日) 2006 年 12 月 31 日止, 24 h 最大降雨量为 15718 mm, 发生在 2002 年 8 月, 同时 2002 年雨量为该时段内最大值, 达到了 194813 mm (图 1)。由图 1 可知, 24 h 大气降水量超过 40 mm 的极值主要出现在雨季期间, 雾凉季和干热季期间还没有发现 24 h 降雨量超过 100 mm 的情况。

212 热带季节雨林集水区基流指数 (BFI)

由图 2 可见, 1996) 2006 年基流指数 (BFI) 值

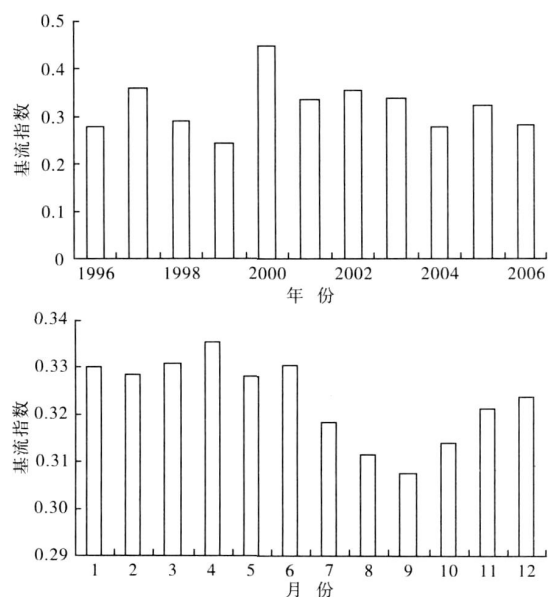


图 2 西双版纳热带季节雨林覆盖集水区基流指数 (BFI) 变化

Fig 2 Base flow index (BFI) variation on yearly and monthly timescale in tropical seasonal rainforest catchment Xishuangbanna

在 0124~0145 均值为 01322。以 2000 年基流指数最大, 1999 年最小 (图 2)。年内各月 BFI 值的变化则表现为雨季低于干季的现象 (图 2), 可能与雨季期间总径流量显著增大有关。

213 热带季节雨林集水区总径流、地表径流和地下径流特征

21311 总径流量与降雨量变化趋势关系 从图 3 可以看到, 利用 3 年滑动平均变化趋势线, 发现集水区总径流的年变化趋势与同时段降雨量变化趋势一致, 表现为明显的 / 增 减 增 0 的趋势, 出现时间与降雨相比具有一定的滞后现象。这是因为降雨到产流发生, 需要经过林冠截持、地被物截留和地面汇流等中间过程的缘故。虽然在 1996、1999 和 2001 年总径流量较大, 但最小径流量没有出现在降雨量最低的 2003 年, 而滞后到 2005 年才出现; 到 2006 年总径流量又开始出现增加的现象。说明西双版纳热带季节雨林使地面径流的产生具有显著滞后效应。

21312 总径流、地下径流、地表径流的年变化 从图 4 可以看出, 西双版纳热带季节雨林集水区的地下径流深仅占总径流量深的 1% 左右, 在 71.3% ~ 211.7% 变动, 所关注时段内的年间波动相对较小。而地表径流深与总径流深的年间变化趋势一致, 具有较大的年间振荡变化幅度。在 1996、1999 和 2001 年, 总径流深绝对值均超过 1000 mm, 而 1997 和 2005 年的绝对值却低于 500 mm。由此可见地下径流虽然所占比重较小, 具有稳定性高, 持续供水能力强的特征。

21313 总径流、地下径流、地表径流的月变化 图 5 显示总径流、地下径流、地表径流和降雨的多年平均值的月变化格局。由此可知, 地下径流量占总径

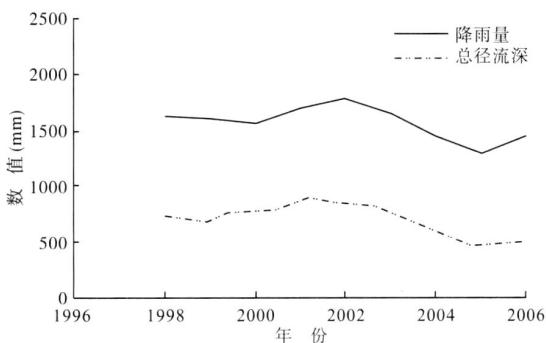


图 3 西双版纳热带季节雨林区逐年降雨量和总径流深移动平均变化趋势线 (1996~2006)

Fig 3 Moving average trend lines of rainfall and total runoff in tropical seasonal rain forest catchment, Xishuangbanna, Southwest China (1996~2006)

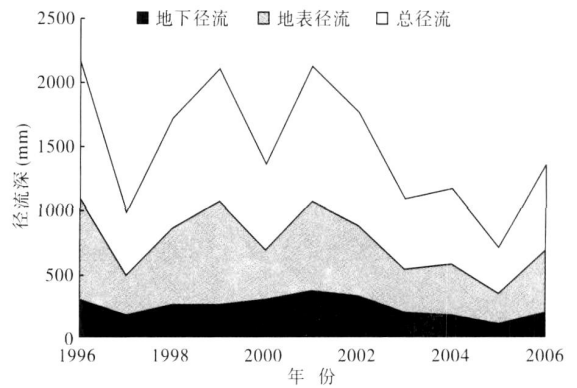


图 4 西双版纳热带季节雨林集水区径流成分年间变化特征

Fig. 4 Characteristics of yearly variation of streamflow components in tropical seasonal rainforest catchment, Xishuangbanna, South-west China

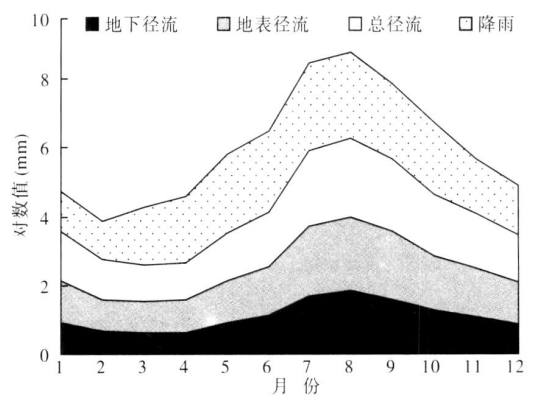


图 5 西双版纳热带季节雨林集水区径流成分年变化特征

Fig. 5 Annual variation of streamflow components in tropical seasonal rainforest catchment, Xishuangbanna, South-west China

流量的比重低, 且各月间变化幅度相对较小。而地表径流和总径流的年内分配模式与降雨分配模式一致。旱季期间的总径流量主要靠地下径流量来维持, 而雨季期间因降雨产生的地表径流量几乎占到总径流量的 8% 左右。

21314 总径流、地下径流和地表径流的季节变化 图 6 显示了集水区总径流、地下径流和地表径流在研究时段内逐年季节变化情况。雨季地下径流深的年间变化较为平缓; 雾凉季总径流深、地表径流深和地下径流深的变化趋势表现为 1996、1999 和 2002 年较高, 而 2000 和 2004 年较低的现象; 干热季各种径流成分的年间波动现象明显, 特别是地下径流深在干热季表现为明显的波动现象。就各径流成分的不同季节变化来看, 以总径流在干热季期间的年间波动最为明显, 地表径流深在雨季期间波动现象明

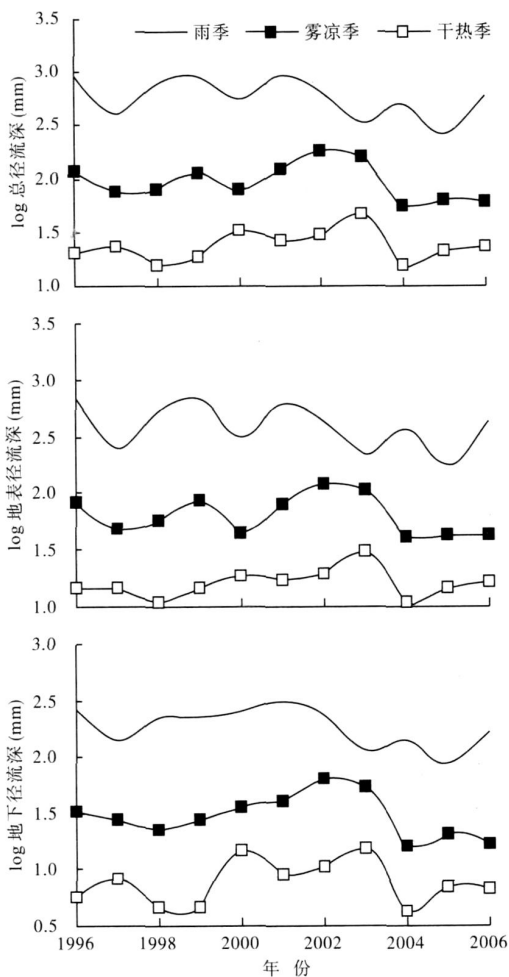


图 6 西双版纳热带季节雨林集水区各径流成分逐年季节变化

Fig 6 Stream flow components variation trends among yearly seasons from 1996 to 2006

显, 年间差异最小的地下径流深在干热季期间却有显著的起伏变化现象。

3 讨论

森林水文的一个争论焦点, 即森林植被与区域水资源关系如何? 因研究方法的局限性、研究对象的复杂性以及区域差异和尺度等因素的综合影响, 所得到的结果彼此难以协调, 甚至相互排斥 (陈军锋和李秀彬, 2001)。尽管如此, 森林水文工作者依然努力工作, 试图从森林水文过程的不同层面来探讨森林植被与区域水资源之间的关系 (Mahner 1992, 1996; Zhou 1995; 张一平等, 1997; 周光益等, 1997; 李凌浩等, 1998; Peres 1999; Schellekens et al, 1999; 李文华等, 2001; 金博文等, 2003; 闫俊华, 2003; Bruijnzeel 2004; Goller et al, 2005; Chandler

2006)。热带森林因具有良好的水文生态效益而受到重视。它不仅可以调节气候、增加森林地形雨和水平降水量, 通过冠层和地被物对降水的截持和缓冲, 减弱雨水对林地土壤的冲刷 (张一平等, 2006), 防止土壤、水分和养分的流失; 而且因热带森林林下土壤具有良好的蓄水涵养能力, 从而对流域径流具有良好调节功能, 能显著增加和延缓地下基流量, 减少地表径流量比重。热带森林的存在可以有效减少和减轻洪旱灾害, 从而增加一个地区的洪旱灾害的抵御能力 (周光益, 1997)。其中基流指数可以作为热带森林水文生态效益的一个定量化指标, 它受区域气候、地质、水文、植被覆盖、地形和土壤等多种因素综合影响, 空间变异性较大, 其数值变化区间范围为 0~0.19。陈利群等 (2006b) 曾系统论述了基流分割方法。左海凤等 (2007) 比较了我国水文部门统一采用的基流计算成果与 BFI 程序计算成果后, 认为取 $n=5$ (n 为使用 BFI 程序计算基流指数时选择的间隔天数), 用 BFI 计算程序中得到的成果合理、可信, 并且此方法具有运行快速、客观等优点。此程序目前广泛应用于水资源管理、供水调度、枯水预测、污染物稀释、水电站管理和灌溉等领域的基流分析, 计算成果亦可作为其他基流分割方法所得结果可信度的验证标准 (Chen et al, 2006; Santhi et al, 2008)。如 Santhi 等 (2008) 对美国本土 8000 多个水文站点长期径流资料计算结果值在上述范围内变动。并表现出从干旱向湿润地区, 基流指数逐渐减小的趋势。陈利群等 (2006a) 分析了黄河源区 4 个水文站 1956~2000 期间的日系列资料, 结果表明黄河源区基流指数较大, 多年平均基流指数为 0.165。钱云平等 (2004) 对黄河中游地区基流计算结果显示, 在所选择的 7 个支流中, 不同时段径流资料基流分割得到的基流指数变化范围在 0.106~0.171。表明基流指数变化受海陆空间位置、区域地形、土壤和植被覆盖变化影响较明显。

位于热带北缘的西双版纳热带雨林区多年平均降雨量 149613 mm, 属于我国水资源分区中的湿润多水地带。本研究表明: 热带季节雨林的年平均基流指数为 0.1322 与其他地区相比, 基流指数偏小 (Talaksen 1995; Haberlandt et al, 2001; Snakhtin 2001)。这可能与该地区处于湿润多水带区域, 雨季期间强降雨较多, 土壤湿度大, 地表径流占总径流比重较大有关 (Santhi et al, 2008)。

西双版纳热带季节雨林的径流调节能力与海南

尖峰岭热带山地雨林径流调节能力有所不同:海南岛尖峰岭热带山地雨林区的基流指数为 0175(周光益等, 1993), 而广东鼎湖山的季风常绿阔叶林所得到的基流指数为 0174(闫俊华等, 2003)。这可能与本研究关注的热带季节雨林集水区面积较小(仅有 2518 km^2), 地形陡峭, 形状指数较大(约 0185), 这些因素可导致地表径流量偏大, 进而影响基流指数值的大小。上述因素对基流指数的影响还需收集更多资料做深入分析。

4 结 论

本文以基流指数计算为切入点, 分析了西双版纳热带季节雨林集水区 1996) 2006 年各径流成分的变化过程和基本特征, 得到以下结果:

1) 西双版纳热带季节雨林集水区径流过程表现为总径流深年间差异明显, 与降雨量年间变化趋势相比, 具有滞后现象; 而地下径流深年间差异不明显, 水量比较稳定, 基流指数为 01322。

2) 与我国其他植被覆盖集水区相比, 西双版纳热带季节雨林集水区的基流指数值偏低; 表明雨季期间的降雨大部分以地表径流的方式输出热带季节雨林生态系统之外; 是否体现出热带季节雨林涵养水源的生态功能有所下降, 还需要和其他观测数据相配合分析。

3) 西双版纳热带季节雨林集水区总径流、地下径流和地表径流表现出显著的年间和季节变化格局。就地下径流占总径流的比例来看, 以旱季大于雨季。

西双版纳热带季节雨林集水区径流成分和基流指数计算结果将有助于正确认识该地区地带性植被的生态水文功能, 为水资源的规划、管理提供参考。

参考文献

- 陈军锋, 李秀彬. 2001. 森林植被变化对流域水文影响的争论. 自然资源学报, 16(5): 474-480
- 陈利群, 刘昌明, 郝芳华, 等. 2006a. 黄河源区基流变化及影响因子分析. 冰川冻土, 28(2): 141-148
- 陈利群, 刘昌明, 李发东. 2006b. 基流研究综述. 地理科学进展, 25(1): 1-15
- 顾慰祖, 谢 民. 1997. 同位素示踪划分滕桥流域流量过程线的试验研究. 水文, (1): 29-32
- 金博文, 康尔泗, 宋克超, 等. 2003. 黑河流域山区植被生态水文功能的研究. 冰川冻土, 25(5): 580-584
- 李凌浩, 林 鹏, 王其兵, 等. 1998. 武夷山不同林龄甜槠林水文效应的比较研究. 应用生态学报, 9(1): 18-22
- 李文华, 何永涛, 杨丽韞, 等. 2001. 森林对径流影响研究的回顾与展望. 自然资源学报, 16(5): 398-406
- 刘昌明, 成 立. 2000. 黄河干流下游断流的径流序列分析. 地理学报, 55(3): 257-265
- 刘玉洪, 马友鑫, 刘文杰, 等. 1999. 西双版纳人工群落林地径流量的初步研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 5(2): 30-34
- 倪雅茜, 张文华, 郭生练, 等. 2005. 流量过程线分割方法的分析探讨. 水文, 25(3): 10-14
- 钱云平, 蒋秀华, 金双彦, 等. 2004. 黄河中游黄土高原区河川基流特点及变化分析. 地球科学与环境学报, 26(2): 88-91
- 任泳红, 曹 敏, 唐建维, 等. 1999. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究. 植物生态学报, 23(5): 418-425
- 汪汇海. 1981. 西双版纳热带森林的过度砍伐与生态环境的异常变化. 热带植物研究, (18): 29-33
- 王 馨, 张一平. 2005. 西双版纳勐仑地区降雨特征及变化趋势分析. 热带气象学报, 21(6): 658-664
- 闫俊华, 周国逸, 张德强, 等. 2003. 鼎湖山顶极森林生态系统水文要素时空规律. 生态学报, 23(11): 2359-2366
- 张一平, 何云玲, 杨根灿. 2006. 滇南热带季节雨林和橡胶林对降雨侵蚀力的减缓效应. 生态学杂志, 25(7): 731-737
- 张一平, 王 馨, 刘文杰. 2004. 热带森林林冠对降水再分配作用的研究综述. 福建林学院学报, 24(3): 274-282
- 张一平, 王 馨, 王玉杰, 等. 2003. 西双版纳地区热带季节雨林与橡胶林林冠水文效应比较研究. 生态学报, 23(12): 2653-2665
- 张一平, 张克映, 马友鑫, 等. 1997. 西双版纳热带地区不同植被覆盖地域径流特征. 土壤侵蚀与水土保持学报, 3(4): 25-30
- 中国生态系统研究网络科学委员会. 2007. 陆地生态系统水环境观测规范. 北京: 中国环境科学出版社
- 周光益, 陈步峰, 曾庆波, 等. 1993. 尖峰岭热带山地雨林更新林产流特征研究. 林业科学研究, 16(1): 70-75
- 周光益. 1997. 中国热带森林水文生态功能. 生态学杂志, 16(5): 47-50
- 朱 华. 2007. 论滇南西双版纳的森林植被分类. 云南植物研究, 29(4): 377-387
- 左海凤, 武淑林, 邵景力, 等. 2007. 山丘区河川基流 BFI 程序分割方法的运用与分析))) 以汾河流域河岔水文站为例. 水文, 27(1): 69-71
- Bruinzeel LA. 2004. Hydrological functions of tropical forest: not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems and Environment, 104: 185-228
- Cao M, Zhang J. 1996. Tree species composition of a seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China. Tropical Ecology, 37: 183-192
- Chandler DG. 2006. Reversibility of forest conversion impacts on water budgets in tropical karst terrain. Forest Ecology and Management, 224: 95-103

- Chen X, Chen DY, Chen XH, et al. 2006. Simulation of base flow accounting for the effect of bank storage and its implication in base flow separation. *Journal of Hydrology*, 327: 539-549.
- Gburck W J, Fohar G J. 1999. Flow and chemical contributions to stream flow in an upland watershed: A base flow survey. *Journal of Hydrology*, 217: 1-18.
- Goller R, Wilcke W, Leng M J, et al. 2005. Tracing water paths through small catchments under a tropical montane rain forest in south Ecuador by an oxygen isotope approach. *Journal of Hydrology*, 308: 67-80.
- Haberlandt U, Klocking B, Krysanova V, et al. 2001. Regionalisation of the base flow index from dynamically simulated flow components- A case study in the Elbe River Basin. *Journal of Hydrology*, 248: 35-53.
- Li H M, Aide T M, Ma Y X, et al. 2007. Demand for rubber is causing the loss of high diversity rain forest in SW China. *Biodiversity Conservation*, 16: 1731-1745.
- Liu W J, Liu W Y, Li P J, et al. 2007. Using stable isotopes to determine sources of fog drip in a tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, SW China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143: 80-91.
- Liu W J, Zhang Y P, Li H M, et al. 2005. Fog drip and its relation to groundwater in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China: A preliminary study. *Water Research*, 39: 787-794.
- Liu W, Meng F R, Zhang Y P, et al. 2004. Water input from fog drip in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China. *Journal of Tropical Ecology*, 20: 517-524.
- Maher A. 1992. Water yield changes after clear-felling tropical rain forest and establishment of forest plantation in Sabah, Malaysia. *Journal of Hydrology*, 134: 77-94.
- Maher A. 1996. Hydrological effects and nutrient losses of forest plantation establishment on tropical rain forest land in Sabah, Malaysia. *Journal of Hydrology*, 174: 129-148.
- Peres C. 1999. Tropical forest disturbance and dynamics in Southeast Asia. *Trends in Ecology & Evolution*, 14: 217-218.
- Santhi C, Allen P M, Muttiah R S, et al. 2008. Regional estimation of base flow for the conterminous United States by hydrologic landscape regions. *Journal of Hydrology*, 351: 139-153.
- Schellekens J, Scatena F N, Bruijnzeel L A, et al. 1999. Modeling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. *Journal of Hydrology*, 225: 168-184.
- Snakhtin V U. 2001. Low flow hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, 240: 147-186.
- Tallaksen I M. 1995. A review of base flow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 165: 349-370.
- Wahl K L, Wahl T L. 1995. Determining the flow of conal springs at New Braunfels, Texas // *Proceedings of Texas Water 95: A Component Conference of the First International Conference on Water Resources Engineering*. American Society of Civil Engineers, August 16-17, 1995, San Antonio, Texas: 77-86.
- Zhang J H, Cao M. 1995. Tropical forest vegetation of Xishuangbanna, SW China and its secondary changes with special reference to some problems in local nature conservation. *Biological Conservation*, 73: 229-238.
- Zhang K. 1988. The climatic dividing line between SW and SE monsoons and their differences in climatology and ecology in Yunnan Province of China. *Climatological Notes*, 38: 197-207.
- Zhou G Y. 1995. Influences of tropical forest changes on environmental quality in Hainan province, P. R. of China. *Ecological Engineering*, 4: 223-229.

作者简介 高 富,男,1973年,博士研究生,主要从事生态水文学和民族植物学研究。Email: cresyn@mail.kib.ac.cn或 gaofu@xtbg.ac.cn
责任编辑 王 伟
