

# 小波变换在岷江上游杂古脑流域径流时间序列分析中的应用\*

林 勇<sup>1</sup> 刘世荣<sup>2\*\*</sup> 李崇巍<sup>1</sup> 葛剑平<sup>1</sup> 索安宁<sup>1</sup> 陈宝玉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京师范大学生命科学学院, 北京 100875; <sup>2</sup> 中国林业科学研究院森林生态环境和保护研究所, 北京 100091)

**【摘要】** 采用 Dmey 小波函数对杂古脑(岷江的一个重要流域)水文站 41 年(1962 ~ 2002)的月径流时间序列进行了多尺度分析和周期性分析. 结果表明, 无论在 64 月(5.4 年)还是在 128 月(10.7 年)的时间尺度上, 1962 ~ 1978 年期间杂古脑流域植被虽然破坏严重, 但其径流相对稳定, 并略低于多年历史平均; 1986 ~ 1997 年期间径流明显处于上升趋势, 表明全球变暖对岷江上游水文动态规律具有重要影响. 周期性分析发现, 在最近 40 多年间, 杂古脑流域径流出现了多次丰枯交替, 次数与时间尺度有关(5 年尺度 7 次, 10 年尺度 3 次). 这表明在流域尺度上研究土地利用/土地覆盖变化的水文效应时应考虑全球气候变化的影响.

**关键词** 小波变换 杂古脑 径流时间序列 尺度  
**文章编号** 1001 - 9332(2005)09 - 1645 - 05 **中图分类号** P338 **文献标识码** A

**Application of wavelet transform to monthly runoff time serial analysis in Zagunao watershed, the upper Minjiang River.** LIN Yong<sup>1</sup>, LIU Shirong<sup>2</sup>, LI Chongwei<sup>1</sup>, GE Jianping<sup>1</sup>, SUO Anning<sup>1</sup>, CHEN Baoyu<sup>1</sup> (<sup>1</sup> College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; <sup>2</sup> Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China). - Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(9): 1645 ~ 1649.

Runoff is an important component of regional water resources, and its dynamics is to some extent an indicator of water resources dynamics in a region. To know the runoff dynamics and water resources in a region is essential for the sustainable utilization and planning of water resources, and for the research on hydrological response of vegetation change at watershed scale. To disclose the water resources dynamics in Upper Minjiang River, one of the large reaches of Yangze River in southwest China, this paper analyzed the runoff dynamic features of Zagunao watershed, an important watershed in Minjiang River basin. Multi-Resolution Analysis (MRA) and periodicity analysis were conducted with Dmey wavelet function on the monthly runoff data from 1962 to 2002 observed by Zagunao hydrological station, which provided a data-based approximation on the evolution of monthly runoff in Zagunao watershed. It was found that the runoff dynamics in Zagunao watershed was relatively stable during 1962 ~ 1978, despite that this period was just in correspondence with the term of intensive deforestation activities in Upper Minjiang River basin. It was also clear that the runoff in Zagunao watershed was increased from 1986 to 1997, which was inconsistent with the commonly accepted viewpoint that the runoff decreased with increasing vegetation cover in forest watershed. However, the increasing trend from 1986 ~ 1997 was consistent with the research results in Yichang by Wang Wensheng and with the global warming at global and continent scale, which meant that global climate change plays a big role in runoff dynamics in Upper Minjiang River. Periodicity analysis showed that the rich-short water periodicity at the scale of 10 years (120 months) and 5 years (60 months) was 3 and 7 times, respectively, which could provide invaluable information for the eco-hydrological function research of forest landscape in Minjiang river basin and the sustainable utilization of water resources. The results from the case study highlighted that sometimes, it was very necessary to consider the role of global climatic warming in disclosing the hydrological response of land use/cover change at watershed scale, otherwise, it would be difficult to explain some hydrological phenomena.

**Key words** Wavelet transform, Zagunao watershed, Runoff time serial, Scale.

## 1 引 言

由于工农业不断发展、人口爆炸式增长和不合理的资源开发利用, 我国的水资源状况日益恶化, 并带来一系列的生态和环境问题<sup>[4]</sup>. 在中国许多地区, 水资源已成为制约地区可持续发展的瓶颈, 而水

资源的合理利用和配置成为经济可持续发展的前提之一<sup>[4]</sup>. 径流是水资源重要组成部分, 其动态特征在某种程度上可以指示一个地区水资源量的动态变

\*国家重点基础研究发展规划项目(2002CB111504)和中国杰出青年基金资助项目(30125036).  
\*\*通讯联系人.

2005 - 04 - 07 收稿, 2005 - 05 - 31 接受.

化规律. 了解径流动态变化规律也是在流域尺度上进行森林植被变化的水文响应研究的重要基础和前提. 径流时间序列分析可为水资源调控提供依据, 对于保险业和水电设施设计标准的制定以及冲积平原管理也具有重要意义<sup>[20,25]</sup>. 了解径流的时间动态和长期发展趋势, 并在此基础上进行水资源的合理配置和开发是实现区域水资源可持续利用的前提之一.

水文尺度是指水文过程、水文观测或水文模型的特征时间或长度, 水文尺度问题则是指水文系统在不同尺度之间进行尺度转换时遇到的问题<sup>[2,14]</sup>. 自 20 世纪 90 年代初水文尺度问题被正式提出后<sup>[19]</sup>, 尺度问题一直受到广泛的关注和重视<sup>[6,7]</sup>, 并成为生态水文科学研究的理论焦点<sup>[14]</sup>. 径流过程或者径流时间序列同样具有尺度特征, 且大时间尺度包含着小的时间尺度, 不同时间尺度隐含着不同的水资源变化规律和丰枯变化趋势<sup>[15,23]</sup>. 小波分析中的多分辨率分析方法 (multi-resolution analysis, MRA) 可以在不同的时间尺度上分析水文时间系列的周期性和演变趋势, 并可借助小波变换的时频局部化优势准确地找到时间序列的大小时间尺度 (周期) 和突变点所在的位置, 从而为系统分析、预测提供重要依据<sup>[22,30]</sup>. 传统的傅立叶变换因对时间序列平稳性的要求具有很大的局限性, 而小波变换则不受随机过程的平稳性与否的影响, 因而具有更大的应用价值<sup>[9,20]</sup>.

目前小波分析在径流研究中的应用报道较多, 如薛小杰等<sup>[25]</sup>采用二次样条小波变换函数分析了黄河上、中、下游 4 个水文站的年径流数据, 发现黄河 20 世纪 50 年代以来实测年径流序列均有明显减少的趋势; 王文圣等<sup>[23]</sup>利用 Marr 小波作为母函数分析了长江宜昌站 98 年的年平均流量资料, 并根据小波变换系数分析了在 4 年、16 年和 32 年 3 个时间尺度上周期变化以及丰水期和枯水期交替变化对应的突变点; 郑泽权等<sup>[30]</sup>结合小波变换系数模极值与李氏指数分析了珠江三角洲顺德网河区大洲站年最高水位序列中的突变位置; Gauchet<sup>[5]</sup>利用小波变换的时-频局部特性并结合其他径流时间变异参数对法国 Guyana 地区的 9 个流域分类, 为偏远流域特征描述提供了一种新的方法; Nakken<sup>[20]</sup>将小波变换应用到降水、径流以及降水-径流关系的时间变异研究中, 并将人为因素和气候因素的影响分离开.

岷江上游地处四川盆地向青藏高原的过渡区,

是长江上游重要的水源涵养生态功能区, 也是我国一个重要的大尺度、复合型生态过渡带和生态系统脆弱区. 其自然环境的复杂性、生态系统的脆弱性、经济发展的边缘性和社会文化的过渡性在我国都具有很典型的代表性<sup>[8]</sup>. 随着流域上游人口的增加和 20 世纪中后叶的大规模天然林采伐, 该地区森林覆盖率显著下降, 森林植被严重退化. 而土地利用和土地覆盖的变化引起流域水文状况的明显变化, 进而影响岷江下游成都平原区的农业可持续发展. 岷江流域土地利用/土地覆盖变化以及其水文响应 (径流变化) 的研究虽较多<sup>[3,8,12,16,17]</sup>, 但岷江流域径流时间序列的研究却较少. 本文运用小波变换工具对岷江上游的杂古脑河流域 41 年 (1962 ~ 2002 年) 的月径流数据进行多时间尺度分析, 旨在揭示杂古脑流域径流长期变化趋势和各种时间尺度特征 (周期性), 为岷江上游地区森林植被动态变化的水文响应的研究提供基础水文信息, 同时也为岷江上游流域规划和水资源优化配置提供技术支持.

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 研究区概况

岷江是长江上游的主要支流之一, 是长江上游水量最大的支流. 岷江上游指都江堰以上的岷江河段, 长约 340 km, 而杂古脑河是岷江上游主要的支流之一, 位于四川省理县境内 (102°8' ~ 103°8' E, 31°2' ~ 31°9' N), 总长约 168 km, 流域面积约 4 632 km<sup>2</sup>. 杂古脑流域气候受高原地形影响, 为冬寒夏凉的高山气候, 以杂古脑流域的米亚罗镇 (海拔 2 760 m) 为例, 1 月份月平均气温 - 8 °C, 7 月份月平均气温 12.6 °C, 10 月的年积温为 1 200 ~ 1 400 °C. 全年降水量 700 ~ 1 000 mm, 年蒸发量 1 000 ~ 1 900 mm. 杂古脑流域海拔 1 400 ~ 5 767 m, 平均 3 630 m. 由于气候冷寒湿润, 适宜粗枝云杉 (*Picea asperata*)、岷江冷杉 (*Abies faxoniana*) 林和冷、云杉混交林占优势. 另外, 干旱的阳坡还有川滇高山栎 (*Quercus aquifolioides*) 和高山松林, 立地条件差的地段为高山川滇高山栎灌丛. 海拔 4 000 m 森林线以上主要分布着一些稀疏的小杜鹃 (*Rhododendron* spp.)、高山柳 (*Salix oritrepha*) 等灌丛和一些草本植物组成的高山草甸和冰雪覆盖. 1953 ~ 1978 年间进行过大规模皆伐, 之后可采资源趋于枯竭, 年采伐量逐渐减少, 至 1998 年停采封育. 岷江上游水源补给主要是雨水, 约占年径流量 50% ~ 60%, 其次为地下水, 约占 30% ~ 40%; 季节性融雪水可占 5% ~ 10%<sup>[28]</sup>. 杂古脑流域冰雪覆盖面积比例很大, 以米亚罗林区为例, 冰雪覆盖面积比例 (33%)<sup>[29]</sup>, 远远高于其他植被类型或者说土地覆盖类型. 与整个岷江上游地区相比, 冰雪融化对杂古脑流域径流具有更重要的影响.

在杂古脑流域设有杂古脑水文站 (103°10' E, 31°26' N)

和桑坪水文站(103°35'E,31°29'N),主要利用杂古脑水文站监测的月平均径流数据(1962.1~2002.12)(数据来源四川省水文勘探局,控制流域面积为2465 km<sup>2</sup>,图1)进行小波变换分析.

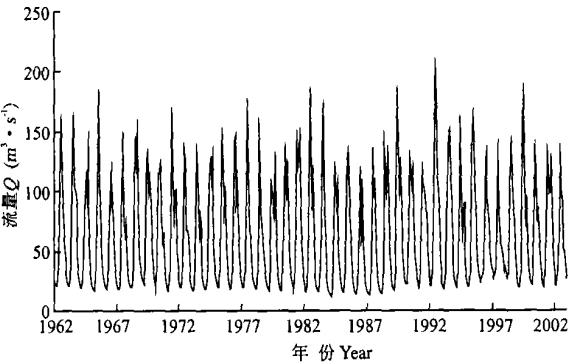


图1 岷江上游杂古脑水文站月平均径流过程(1962.1~2002.12)  
Fig.1 Monthly average runoff of Zagunao hydrological station.

2.2 研究方法

2.2.1 小波分析简介<sup>[20,26]</sup> 小波是具有震荡特性、能迅速衰减到零的一类函数,即  $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$ . 由  $\psi(t)$  的伸缩和平移构成一族函数系:

$$\psi_{a,b}(t) = a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad b \in \mathbb{R}, a \in \mathbb{R}, a > 0 \quad (1)$$

式中,  $\psi_{a,b}(t)$  为子小波;  $a$  为尺度因子或频率因子;  $b$  为时间因子或平移因子. 对于能量有限信号  $f(t)$ , 其连续小波变换定义为

$$W_f(a,b) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

式中,  $\psi^*(t)$  为  $\psi(t)$  的复共轭函数. 式(2)说明小波变换是对信号用不同的滤波器进行滤波. 实际上,对于固定的尺度  $a$ ,  $W_f(a,b)$  是  $b$  的一元函数,描述尺度  $a$  下信号序列“平滑”的结果,表示原来的函数或信号  $f(t)$  在  $t=b$  点附近(由尺度  $a$  确定)按  $\psi_{a,b}(t)$  进行加权平均. 当  $a>1$  时,  $a$  越大,小波函数图变得越低越宽;而当  $0<a<1$  时,  $a$  越小,图形变得越高越窄. 当小波沿着时间轴移动(由参数  $b$  控制)并随着  $a$  的变动而伸缩时,研究信号或时间序列  $f(t)$  的形状和小波  $\psi_{a,b}(t)$  在位置  $b$  处进行形状比较,小波变换系数  $W_f(a,b)$  则体现了二者之间的相似程度.  $W_f(a,b)$  值越大,说明时间序列  $f(t)$  具有越明显的  $a$  时间尺度变化特征. 参数  $b$  表示分析的时间中心或时间点. 而参数  $a$  体现的是以  $x=b$  为中心的附近范围大小. 所以一般称  $a$  为尺度参数,而参数  $b$  为时间中心参数. 当中心参数  $b$  不变时,小波变换  $W_f(a,b)$  体现的是原来的函数信号  $f(x)$  在  $x=b$  点附近随着分析和观察的范围逐渐变化所表现出来的变化.

任何信号或者时间系列都可以用理想的低通滤波器和高通滤波器分解为高频部分  $d_1$  和低频部分  $a_1$ , 其中低频部分  $a_1$  可以用低通滤波器和高通滤波器进一步分解为低频部分  $a_2$  和 高频部分  $d_2$ , 同样  $a_2$  可以分解为低频部分  $a_3$  和 高频部分  $d_3$ , 如此重复进行,可以获得任意尺度上时间序列的概

貌(低频部分)和细节成分(高频部分). 对于大多数信号来说,低频部分往往是最重要的,给出了信号的特征. 而高频部分则与噪音及扰动联系在一起. 多分辨率分析(MRA)就是利用小波变换来获得信号或时间序列在不同水平(或者层次)上的低频成分和高频成分,从而分析信号的变化特征,具体算法和原理参见文献<sup>[26]</sup>.

2.2.2 数据来源和处理 首先将杂古脑水文站41年的月平均径流数据(1962~2002)(图1)前行标准差标准化处理(图2),然后利用 Matlab 6.5 小波分析工具包的 Dmey 小波函数对标准化后的径流时间序列进行多尺度时间分析(MRA),得到其在不同时间尺度上的趋势成分. 为了揭示杂古脑流域径流的周期性现象,还运用 Dmey 小波对标准化径流时间序列进行了连续小波变换,获得在3年、5年和10年3个时间尺度上的小波变换系数线,揭示不同时间尺度上杂古脑流域径流丰枯期变化.

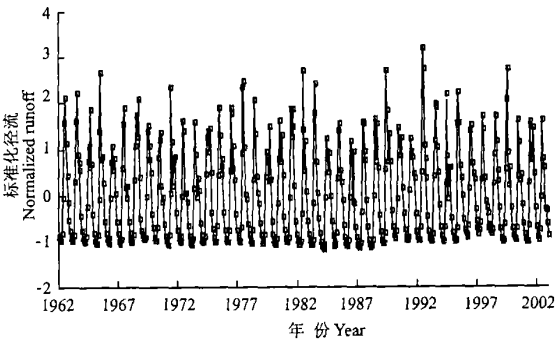


图2 岷江上游杂古脑水文站标准化月径流时间序列  
Fig.2 Normalized monthly runoff of Zagunao hydrological station in Upper Minjiang River(1962.1~2002.12).

3 结果与分析

3.1 杂古脑流域径流时间序列长期趋势分析

由于各种周期性和随机性因素影响,杂古脑流域41年的月径流时间序列的长期趋势很不明显(图1和图2). 为此,利用 dmey 小波变换函数在水平5、水平6和水平7(相应的尺度  $a$  为  $2^5$ 、 $2^6$  和  $2^7$ ) 上将径流时间序列进行低通滤波,获得杂古脑流域径流在3个尺度上的低频概貌成分(图3). 由图3可以看出,在水平6(64月或者说5.1年的尺度上,图3  $a_6$ ) 上,杂古脑流域的径流在1962~1978年间比较平稳,径流量比历史多年平均偏低,而此后径流量波动剧烈,呈现一个明显的丰枯期交替变化:1978~1989年的枯水期和1989~2000年的丰水期. 杂古脑流域径流在1972~1986年期间径流下降,1986~1995年期间一直处于上升趋势,而1994年以后径流下降,但仍高于多年历史平均. 水平7(128月即10.6年的尺度上,图3  $a_7$ ) 也可以发现类似规律,最近20年比前20年径流时间变动更为剧烈. 另外,从

3 个水平上(尤其水平 5 上)都可以看出杂古脑流域的径流在 1985 和 1994 年附近达到历史最低和最高值。

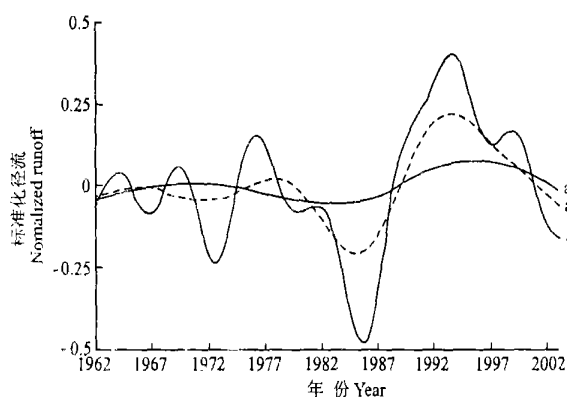


图 3 杂古脑径流在不同时间尺度上的概貌

Fig. 3 Approximation of normalized monthly runoff of Zagunao at different levels.

### 3.2 杂古脑流域径流时间序列周期性分析

为了揭示杂古脑流域月径流时间序列的周期性成分,利用 Dmey 小波对时间序列进行连续小波变换,得到 3 个时间尺度上( $a = 36, 60$  和  $120$ )小波变换系数图(图 4)。不同时间尺度下的小波系数可以反映不同时间尺度下径流变化特征:正的小波系数对应于丰水期,负的小波系数对应于枯水期,小波系数为零对应着突变点;小波系数绝对值越大,表明该时间尺度变化越显著<sup>[5]</sup>。由图 4 可以看出,在 10 年(120 月)的尺度上,杂古脑流域径流在 1962~2002 年期间经历了 3 次丰枯交替,分别为 1968 年前的枯水期、1968~1976 年的丰水期、1976~1983 年的枯水期、1983~1990 年的丰水期、1990~1997 年的枯水期和 1997 年~2002 年的丰水期。在 5 年(60 月)的时间尺度上,可以发现 7 次丰枯交替,而在 3 年(36 月)的尺度上丰枯交替次数更多。无论从 3 年、5 年还是 10 年尺度上的小波变换系数  $W_f(a, b)$  来

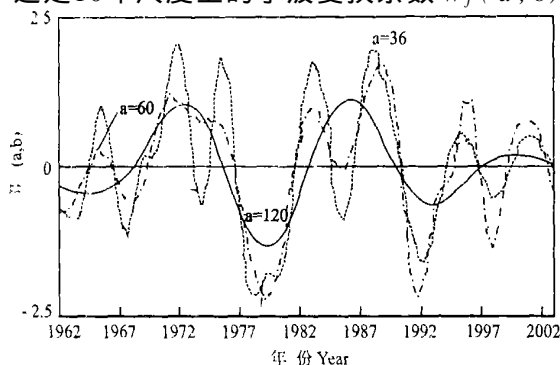


图 4 岷江上游杂古脑地表月径流时间序列 Dmey 小波变换系数

Fig. 4 Wavelet transform coefficient for Zagunao normalized monthly runoff time series at different scales.

看,杂古脑流域径流在 2002 年前几年内都处于丰水期。另外,在 3 年和 5 年的尺度上  $W_f(a, b)$  周期性波动节拍比较一致,波动幅度大于 10 年尺度上的小波变换系数,说明杂古脑流域径流时间序列以 3~5 年周期性变化为主。

## 4 讨 论

从杂古脑流域径流时间序列来看,水文时间序列存在着多个时间尺度,且大时间尺度包含着小时时间尺度,不同时间尺度隐含着水资源的变化规律。多时间尺度的存在,使得水文系统的描述和分析变得困难。小波分析为分析水文序列多时间尺度的变化、进一步水文计算、预测奠定了基础<sup>[22~24]</sup>。岷江上游杂古脑流域径流时间序列动态受多种因素影响,如全球增温、植被退化和人工水电设施建设等。本文仅分析了杂古脑流域径流的多时间尺度特征,为以后岷江流域植被格局动态的水文效应研究提供基本的水文信息。另外,作为区域水资源的重要组成部分,杂古脑流域径流序列的周期性和长期趋势分析,也为当地水资源的合理规划和可持续利用提供科学依据。

杂古脑流域径流量 1972~1986 年的 14 年内处于下降趋势,与王文圣等<sup>[23]</sup>在长江宜昌站年径流小波变换结果一致。宜昌站 1890~1987 年的年平均径流序列在 12~14 年的时间尺度上出现了 4 次丰枯交替,其中 1965~1987 年为枯水期,而 1986~1995 年期间流域径流增加,虽然 1995~2002 年期间径流又呈现下降趋势,但从小波变化系数来看,1986~2002 年总体处于丰水期。杂古脑流域径流动态规律可能与全球气候变化有关。游松财<sup>[27]</sup>研究表明,长江上游四川段的夏季径流增加春季径流减少,但全年总趋势增加。Labat 等<sup>[11]</sup>研究也表明,随着全球气候变化,在大洲的尺度上亚洲地区地表径流在增加。这些在某种程度上解释了岷江上游杂古脑流域径流在 1986~1995(或 1986~2002)间增加的现象。

岷江上游地区在 20 世纪 1950~1978 年,植被破坏严重,森林覆盖率下降了 10%~20%<sup>[1,3,12]</sup>,而 1986~1995 年岷江上游森林植被(有林地和灌木林)面积显著增加,植被以恢复为主,但对应时间段内的径流却因为森林覆盖率的增加而增加。这种现象很难根据植被-径流模型来解释,但可以从全球气候变化对径流的影响机制来解释。杂古脑流域气候冬寒夏凉,雪被盖度大。以其中的米亚罗林区为例,雪被面积比例高达 30% 以上<sup>[29]</sup>。全球变暖对融雪

过程将产生重要影响,从而影响杂古脑径流动态过程.另一方面,森林覆盖率与径流的关系很复杂,森林覆盖率增加将导致流域径流减少的论断一直有争议<sup>[13]</sup>.不同尺度观测下的现象或过程的稳定性和变动性将直接影响使用数据对现象的定性和定量解释<sup>[2,18]</sup>.本文也发现不同时间尺度上的低通滤波和小波变换的水文规律不同,说明在进行岷江上游森林植被水文效应研究中必须明确研究的时空尺度,根据研究对象的时空尺度研究其植被格局变化对径流过程的影响.在今后岷江上游森林植被生态水文研究中应对全球气候变化的影响给予足够重视.

### 参考文献

- Bao W-K(包维楷), Chen Q-H(陈庆恒), Liu Z-G(刘照光). 1995. Degradation of mountain ecosystems in the upper reaches of Minjiang River and countermeasures for their rehabilitation and reconstruction. *Resour Environ Yangze Valley* (长江流域资源与环境), 44(3): 277 ~ 282 (in Chinese)
- Bloschl G, Sivapalan M, et al. 1995. Special issue on scale issues in hydrological modelling. *Hydrol Proc*, 9: 251 ~ 290
- Fan H(樊宏). 2002. A study on 50 years land use and cover changes of watershed of upper Minjiang River. *J Mount Sci* (山地科学), 20(1): 64 ~ 69 (in Chinese)
- Fang Z-Y(方子云), Wang D(汪达). 2001. Watershed management for water environment and resources protection. *Water Resour Prot* (水资源保护), (4): 4 ~ 7 (in Chinese)
- Gauchere C. 2002. Use of wavelet transform for temporal characterization of remote watersheds. *J Hydrol*, 269: 101 ~ 121
- Gupta V K, Mesa O J, Dawdy D R. 1994. Multiscaling theory of flood peaks: Regional quality analysis. *Water Resour Res*, 30(12): 3405 ~ 3421
- Gupta V K, Waymire E G. 1990. Multi-scaling properties of special rainfall and river flow distribution. *J Geophys Res*, 95(3): 1999 ~ 2009
- Hu Z-B(胡志斌), He X-Y(何兴元), Jiang X-B(江晓波), et al. 2004. Landscape pattern change at the upper reaches of Minjiang River and its driving force. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 15(10): 1797 ~ 1803 (in Chinese)
- Huang M C. 2004. Wave parameters and function in wavelet analysis. *Ocean Eng*, 31: 111 ~ 125
- James L D. 1995. NSF research in hydrological sciences. *J Hydrol*, 172: 3 ~ 14
- Labat D, Godderis Y, Probst J L, et al. 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Adv Water Resour*, 27: 631 ~ 642
- Li A-N(李爱农), Zhou W-C(周万村), Jiang X-B(江小波). 2003. Dynamic change of landuse/land cover during 15 years in upper reaches of Minjiang River supported by RS & GIS. *J Soil Water Cons* (水土保持学报), 17(4): 153 ~ 156 (in Chinese)
- Li D-F(李道峰). 2003. Impact of land-cover and climate change on runoff of source regions of the Yellow River. Ph.D. thesis. Beijing: Beijing Normal University. (in Chinese)
- Liu J-M(刘建梅), Pei T-F(裴铁麟). 2003. Research progress on hydrological scaling. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 14(12): 2305 ~ 2310 (in Chinese)
- Liu J-P(刘俊萍), Tian F-W(田峰巍), Huang Q(黄强), et al. 2003. Study on runoff dynamics in Yellow River Valley using wavelet analysis. *Prog Nat Sci* (自然科学进展), 13(4): 383 ~ 387 (in Chinese)
- Liu L-J(刘丽娟), Zan G-S(曾国盛), Ge J-P(葛剑平). 2004. Vegetation hydrological effect model of typical watershed in the upstream of Minjiang Valley. *J Beijing For Univ* (北京林业大学学报), 26(6): 1 ~ 24 (in Chinese)
- Liu S-R(刘世荣), Sun P-S(孙鹏森), Wang J-X(王金锡), et al. 2001. Hydrological functions of forest vegetation in upper reaches of Yangtze River. *J Nat Resour* (自然资源学报), 16(5): 451 ~ 456 (in Chinese)
- Liu X-Z(刘贤赵). 2004. Discussion on the problem of scale in hydrology. *Arid Land Geogr* (干旱区地理), 27(1): 61 ~ 65 (in Chinese)
- Morin E, Enzel Y, Shamir U, et al. 2001. The characteristic time scale for basin hydrological response using radar data. *J Hydrol*, 252: 85 ~ 99
- Nakken M. 1999. Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns. *Environ Model Softw*, 14: 283 ~ 295
- Nian F-H(年福华), Li X(李新). 2000. Review of geo-hydrology research in arid region of China. *Arid Land Geogr* (干旱区地理), 23(1): 91 ~ 95 (in Chinese)
- Wang W-S(王文圣), Ding J(丁晶), Xiang H-L(向红莲). 2002. Application and prospect of wavelet analysis in hydrology. *Adv Water Sci* (水科学进展), 13(4): 515 ~ 520 (in Chinese)
- Wang W-S(王文圣), Ding J(丁晶), Xiang H-L(向红莲). 2002. Multiple time scales analysis of hydrological time series with wavelet transform. *J Sichuan Univ* (Eng Sci) (四川大学学报·工程科学版), 34(6): 14 ~ 17 (in Chinese)
- Wang W-S(王文圣), Zhao T-X(赵太想), Ding J(丁晶). 2004. Study on change characteristics of hydrological time series with continuous wavelet transform. *J Sichuan Univ* (Eng Sci) (四川大学学报·工程科学版), 36(4): 6 ~ 9 (in Chinese)
- Xue X-J(薛小杰), Jiang X-H(蒋晓辉), Huang Q(黄强), et al. 2002. The application of wavelet analysis in hydrological sequence trend analysis. *J Appl Sci* (应用科学学报), 20(4): 426 ~ 428 (in Chinese)
- Yang F-S(杨福生). 2003. Engineering Analysis of Wavelet Transform and Its Application. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- You S-C(游松财), Takahashi K, Matsuo Y. 2002. The impacts of global climatic change on surface runoff in China. *Quat Sci* (第四纪研究), 23(2): 148 ~ 157 (in Chinese)
- Zan G-S(曾国盛). 2003. Study on the watershed vegetation hydrological model—A case study of Minjiang watershed. Master thesis. Beijing: Beijing Normal University. (in Chinese)
- Zhang Y-D(张远东). 2004. A Study on Restoration Pattern, Hydrological Effects and Management Planning of Sub-alpine Forest in Western Sichuan. Beijing: Postdoctorate Report of Chinese Academy of Forestry. (in Chinese)
- Zheng Z-Q(郑泽权), Xie P(谢平), Cai W(蔡伟). 2001. Primary application of wavelet analysis on non-steady hydrological times series. *Inter J Hydr En* (水电能源科学), 19(3): 49 ~ 51 (in Chinese)

作者简介 林 勇,男,1971年生,博士.主要从事景观生态和森林水文研究,发表论文 5 篇. Tel: 010-58801407; E-mail: yonglin0793@vip.sina.com