

引用格式:周华,刘琪璟. 九连山亚热带常绿阔叶林小流域气候及水文特征分析[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 125-136. [Zhou H, Liu Q J. Climate and hydrology characteristics of subtropical evergreen broadleaved forest in Jiulianshan[J]. *Resources Science*, 2018, 40(1): 125-136.] DOI :10.18402/resci.2018.01.12

九连山亚热带常绿阔叶林小流域气候及水文特征分析

周 华, 刘琪璟

(北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘 要: 森林及其流域是一个复杂的动态自然生态系统, 对其降雨、温度、蒸发和径流的长期研究有助于理解系统生态过程的动态变化。根据江西九连山虾公塘气象观测场 1975—2015 年逐日气象资料及 4 号水文观测堰 2009—2013 年小流域逐日径流资料, 应用累积距平和小波变换等方法分析九连山亚热带常绿阔叶林气候和小流域径流变化特征及其二者的一致性。结果表明: ① 九连山亚热带常绿阔叶林多年平均温度为 17.1 °C, 降雨量为 1816.3mm, 蒸发量为 781.6mm, 3—10 月降雨量约占全年降雨量的 82.6%; ② 多年平均温度在震荡中呈现微弱上升趋势, 温度变化倾向率为 0.14 °C/10a; 平均降雨量和蒸发量呈现整体下降趋势, 变化倾向率分别为 -11.81mm/10a 和 -50.13mm/10a; 年均温度、降雨量和蒸发量均存在准 14a 左右的主要震荡周期; ③ 九连山常绿阔叶林小流域多年平均径流量为 1066.2mm, 径流系数为 0.54; 月径流量与降雨量呈显著的线性关系; 大雨以上天气时, 径流量恢复到降雨前流量水平的持续时间约为 12~48h; 年内径流量与降雨量存在 20d 左右的短周期和 60d 左右的长周期, 与蒸发量的震荡格局基本相似, 降水量、蒸发量与径流量的震荡周期具有一致性, 径流量对年内气候季节变化的响应明显; 降水条件是引起径流量变化的主要原因。这些结果表明气候变化对森林小流域径流量的周期性变化有重要影响。

关键词: 九连山; 亚热带常绿阔叶林; 径流量; Morlet 小波变换; 水文气候

DOI :10.18402/resci.2018.01.12

1 引言

森林作为陆地最重要的生态系统, 其水文功能对系统的稳定性、连续性以及系统生产力、物种多样性至关重要, 在抑制洪峰、减少侵蚀、调节降雨等方面发挥了不可或缺的作用^[1,2]。从水文学的角度来看, 森林具有对水分的蒸散和森林土壤对水分的涵养两大功能。气候、地形、土壤、植被以及人类活动共同影响流域的径流特性, 其演变过程存在一定的规律性, 同时也表现出强烈的随机性^[3]。对森林的过度干扰可能导致蒸散减少、径流增加, 从而产生水土流失现象^[4]。恢复森林的林分结构和水文特征到原始状态, 可以稳定和提高了森林生态系统的生物多样性^[5]。

在全球变暖的大背景下, 研究亚热带常绿阔叶林森林生态系统水文气候特征, 认识其发生规律和演化趋势, 对森林结构与功能、水资源合理利用以及生物多样性保护等具有重要意义和实际应用价值^[6-8]。

九连山地处中国重要地理界线之一的南岭东段腹地, 保存有大面积原生性低海拔常绿阔叶林。在中国植被区划中, 九连山是中亚热带与南亚热带季风常绿阔叶林的过渡地带, 其植被特征具有典型性、代表性和过渡性, 生物多样性非常丰富。亚热带常绿阔叶林作为九连山地区的主要植被类型, 从海拔 280m 的沟谷到 1200m 的山脊均有分布, 且大部分为天然林^[9]。从 1980 年代初开始, 李昌华等对九

收稿日期: 2017-05-15, 修订日期: 2017-10-06

基金项目: 国家高新技术发展计划(2013AA122003)。

作者简介: 周华, 男, 贵州遵义人, 博士生, 主要研究方向为森林经理和森林水文。E-mail: jeamourvous@163.com

通讯作者: 刘琪璟, E-mail: liuqijing@bjfu.edu.cn

连山亚热带常绿阔叶林开展了一系列的研究工作,陆续发表了关于这一区域森林植被、土壤、水文和气候等的研究论文^[10-15],并应用水分循环模型对这一流域的降水流出特性进行了数量评价^[15]。近年来,针对九连山亚热带常绿阔叶林的研究逐步增多。简敏菲等分析了九连山植物群落分布与环境因子的相互关系^[16],范娟、简敏菲等对九连山优势种群的空间分布格局及其种间关联进行了研究^[17, 18],何俊等研究了2008年冰雪灾害对该区植被的影响^[19, 20],邸月宝等对九连山森林生态系统的碳储量及其分配格局进行了研究^[21]。

总的来看,由于进行长期的水文气候监测工作量大、成本高,涉及仪器维护、数据整理以及人员安排等诸多因素,目前针对较大流域面积的森林水文研究仍比较少见,特别是较长时间序列的水文气候研究在九连山尚属首次。在对以往相关研究进行回顾和总结的基础上,根据该地区长期的气候及水文监测资料,本文尝试用小波变换、累积距平等方法研究了九连山亚热带常绿阔叶林的气候和水文变化特征,以供读者参考。

2 研究区概况

江西九连山位于赣粤边境的江西省龙南县和广东省连平县交界处,属中低山丘陵地貌,是赣江和东江的分水岭,地理坐标为24°29'18"N-24°38'55"N和114°22'50"E-114°31'32"E(图1)。九连山受大陆和海洋气候的双重影响,气候温和湿润,干湿季节鲜明。地质构造复杂,成土母质多样,土壤的水平和垂直分布规律明显,以山地黄红壤为主,土壤中速效磷和速效钾含量较低,具有较厚的腐殖质层,厚度一般在15~25cm,土层厚度在50~100cm^[14, 22]。

研究区量水观测堰集水区位于九连山亚热带常绿阔叶林内,总流域面积约3.8km²,目前为中国南方森林小流域观测面积最大的一座量水堰(图1)。流域内地势南高北低,海拔高度660~1430m,坡度约25°~40°,为赣江源头之一。该流域内保存有大面积低海拔原生性亚热带常绿阔叶林,植被类型丰富,海拔梯度变化明显,群落结构复杂,已查明高等植物有2796种。主要植被群落类型有罗浮锥(*Castanopsis faberi*)林、钩锥(*C. tibetana*)林、鹿角锥(*C. lamontii*)林、甜槠(*C. eyrei*)林、木荷(*Schima super-*

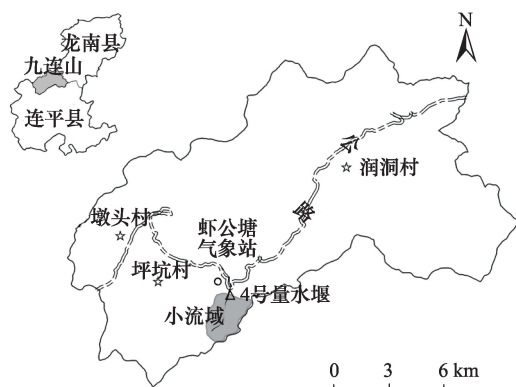


图1 研究流域、量水堰和气象站位置

Figure 1 The watershed and location of the stream and rain gages of study area

ba)林、深山含笑林(*Michelia maudiae*)等^[12, 22],山顶矮林和灌草丛常见有猴头杜鹃(*Rhododendron simiarum*)林、冷箭竹(*Bashania fangiana*)及野古草(*Arundinella anomala*)群落。层间植物常见瓜馥木(*Fissistigma oldhamii*)、尾叶那藤(*Stauntonia ovatifoliola*)、络石(*Trachelospermum jasminoides*)、南五味子(*Kadsura longipedunculata*)等。

3 研究方法

3.1 数据获取

1981年,中国科学院原自然资源综合考察委员会与江西九连山自然保护区管理处合作,在保护区虾公塘保护站建立人工气象观测场进行逐日观测,观测要素包括温度、降水、蒸发和相对湿度等^[11, 15]。为了获得较长的时间序列,1975—1981年气象数据从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)下载研究区附近站点气象数据,然后通过空间插值估算^[23]。因此,本文研究的气象数据区间为1975—2015年,其中蒸发量数据区间为1982—2015年。

2001年,在虾公塘六号桥附近建立三角量水堰,用于观测九连山常绿阔叶林小流域内河流径流特征,该小流域面积约3.8km²。量水堰采用半自动水位计记录径流过程,需人工逐日按时更换记录纸,记录纸上的间隔最小为10分钟。综合各种因素考虑,最终选择2009—2013年径流观测资料用于水文特征分析。

3.2 数据分析

3.2.1 累积距平法

距平是某一系列数值中的某一个数值与平均

2018年1月

值的差,在水文气象领域常直接用作气象预报值。根据距平正、负值的特点,当距平累积(即距平值累加)持续增大时,表明该时段内距平持续为正,即降雨量或径流量高于平均水平。当距平累积为零时,表明该时段距平持续不变,即降雨量或径流量保持在平均水平。当距平累积持续减小时,表明该时段内距平持续为负,即降雨量或径流量低于平均水平。从而可以较直观而准确地确定径流量的年际变化阶段^[24]。累积距平的计算公式为:

$$CA_j = \sum_{i=1}^j (R_i - \bar{R}) \quad (j \leq n) \quad (1)$$

式中 CA_j 为第1年至 j 年的累积距平; $(R_i - \bar{R})$ 为序列第 i 年的距平值; n 为序列长度。累积距平的正负极值点可能出现突变,对每一个序列只提取信号最强的1~3个极值点,且不提取序列首尾各4个时间尺度处的值^[25]。

3.2.2 小波变换法

小波分析能准确地确定序列的变化周期,具有一定的稳定性^[26-28]。实际研究中,最关键的步骤就是由小波变换方程得到小波系数,然后通过这些系数来分析时间序列的时频变化特征^[23, 25, 29]。本研究中,小波变换的原理及具体方法详见相关参考文献^[25, 30]。

4 结果与分析

4.1 气候变化特征

4.1.1 气候总体变化特征

通过1975—2015年九连山虾公塘气象观测场资料,绘制其气候变化趋势(图2)。从图2a可知,1975—2015年九连山亚热带常绿阔叶林年平均气

温在波动中总体呈现微弱上升趋势,平均温度变化倾向率为 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,年平均最高温度值出现在1998年,为 $19.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低温度值出现在1984年,为 $15.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据5年滑动平均线显示,1990—2000年波动幅度比较剧烈,而其他年份波动幅度比较平缓。从图2b、2c可知,九连山亚热带常绿阔叶林年平均降雨量和蒸发量都呈现整体下降的趋势,变化倾向率分别为 $-11.81\text{mm}/10\text{a}$ 和 $-50.13\text{mm}/10\text{a}$,后者的下降趋势更为明显。年平均降雨量由1975—1985年的 1881.4mm 减少到2006—2015年的 1810.8mm ,年平均蒸发量由1980s的 850.1mm 下降到2010s的 675.1mm 。

各气象指标的年内分配情况如表1和图3所示。根据41年(1975—2015年)的观测结果表明,九连山亚热带常绿阔叶林多年年平均温度为 $17.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,历史极端高温为 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、极端低温为 $-7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量 1816.3 mm ,年平均降雨日数 173d ,年平均蒸发量 781.6 mm (见表1)。这些结果与以往对该地区的研究结果略有不同^[1],主要原因是其数据观测统计的时间正好处于本研究时间段的早期(1981—1996年)。从图2的温度、降雨量和蒸发量变化趋势线可知,李昌华等的研究结果中多年温度平均值要比本研究低,而多年平均降雨量和蒸发量要比本研究高,这与其文献中的实际结论一致。此外,在2008年1月下旬至2月上旬,中国南方发生大范围的冰冻天气,九连山虾公塘气象观测站的最低温度为 $-3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,日平均气温持续保持在 0.5 至 $-3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的时间长达近两周(1月25日—2月6日),而在1991

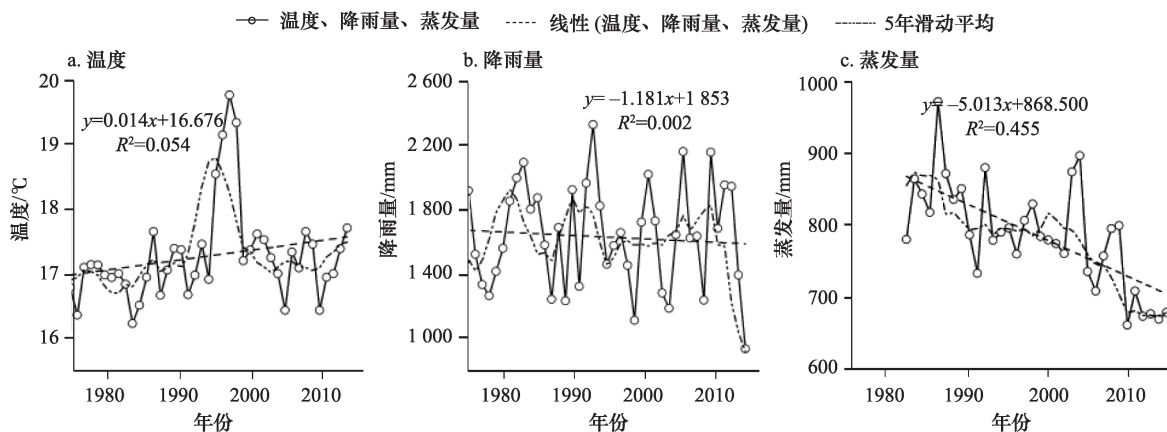


图2 1975—2015年九连山常绿阔叶林平均温度、降雨量和蒸发量变化趋势

Figure 2 Trends of average annual temperature, precipitation and evaporation in Jiulianshan from 1975 to 2015

表1 1975—2015年九连山常绿阔叶林平均温度、极端温度、降雨量、蒸发量和降雨日数统计

Table 1 Statistical characteristic of the average temperature, extreme high-temperature, extreme low-temperature, precipitation, evaporation and rainy days in Jiulianshan from 1975 to 2015

月份	温度 /℃	极端 高温/℃	极端 低温/℃	降雨量 /mm	蒸发量 /mm	降雨 日数/天
1月	7.5	19.3	-0.8	63.9	38.0	10
2月	9.7	21.4	0.7	101.7	37.6	12
3月	12.9	23.7	3.6	170.6	46.4	18
4月	17.8	26.6	9.1	222.9	60.6	17
5月	21.1	28.7	14.0	276.7	73.8	20
6月	23.6	30.2	18.0	298.6	80.5	22
7月	24.6	31.7	20.3	182.8	108.3	18
8月	24.2	31.1	20.0	191.2	93.5	18
9月	22.2	29.7	16.7	156.9	75.1	12
10月	18.4	27.1	10.4	54.5	72.3	8
11月	13.8	24.2	4.6	50.0	51.6	9
12月	8.8	20.5	0.0	46.4	44.0	9
合计	17.1	37.0 ^a	-7.4 ^b	1 816.3	781.6	173

注：a、b为研究期内的历史最高温(1984年7月)和最低温(1991年12月)。

年12月29日出现近40年历史极端低温(-7.4℃)时,日平均气温维持在0℃的时间仅为3d,2008年南方普遍的持续低温天气实属历史罕见。这次冰雪灾

害对九连山海拔700~760m以上的阔叶林和杉木纯林造成了一定的影响^[19]。九连山的降水主要集中在湿润季(3—9月),约占全年降水的83%;干旱季(10月至翌年2月)降水仅占全年降水的17%,与李昌华等的研究结果基本一致^[11]。

4.1.2 气候阶段性变化

从温度累积距平的波动来看(图4a),近40年温度变化主要有三个阶段:1975—1995年,1995—2000年,2000—2015年。各阶段年平均温度分别是16.7℃,18.2℃和16.9℃,相对平均值的变化率分别是-2.40%,6.04%和-1.18%。1975—1995年累积距平持续下降,阶段性温度低于多年平均水平;1995—2000年累积距平呈连续增加趋势,阶段性温度有所上升;而2000—2015年温度累积距平的波动变化不大。

从降雨量累积距平的波动来看(图4b),降雨量变化主要有五个阶段:1975—1980年,1980—1985年,1985—1991年,1991—2009年,2009—2015年。各阶段的年平均降雨量分别是1686.0mm,2054.0mm,1736.6mm,1789.1mm,1800.9mm,相对平均值的变化率分别是-7.17%,13.09%,-4.39%,-1.50%,-0.08%。1980年以前,年降雨量比较小,处

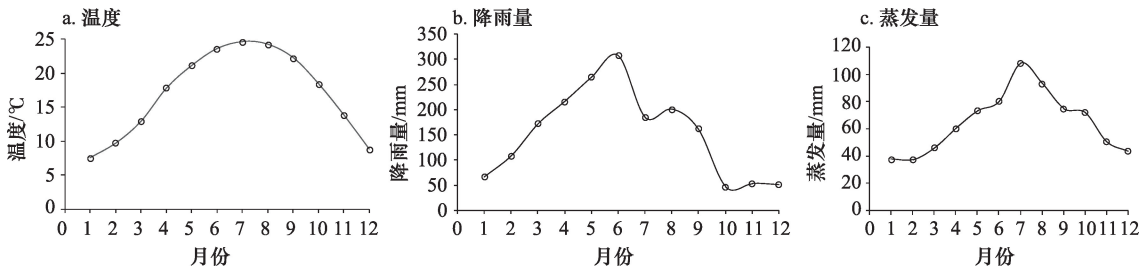


图3 1975—2015年九连山常绿阔叶林温度、降雨量和蒸发量月均分配

Figure 3 Monthly distributions of temperature, rainfall and evaporation in Jiulianshan from 1975 to 2015

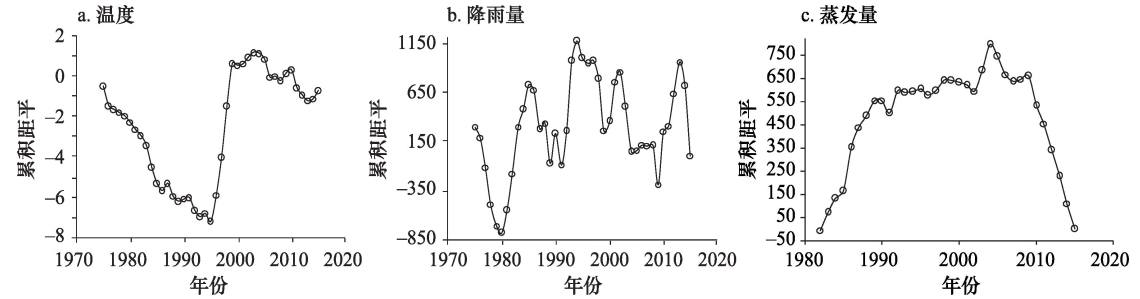


图4 1975—2015年九连山常绿阔叶林温度、降雨量和蒸发量累积距平曲线

Figure 4 Cumulative departure curve of temperature, precipitation and evaporation in Jiulianshan from 1975 to 2015

2018年1月

于相对枯水阶段;1980以后,累积距平波动比较明显,经历了三个比较明显的波动阶段,年降雨量呈减少—增加—减少的趋势。

从蒸发量累积距平的波动来看(图4c),蒸发量的变化主要有三个阶段:1982—1990年,1990—2004年,2004—2015年。各阶段的年平均蒸发量分别是842.4mm,796.9mm,723.9mm,相对平均值的变化率分别是7.78%,1.96%,7.38%。1990年以前,年蒸发量较大,而1990—2004年累积距平波动变化不大,2004年以后,累积距平持续下降,阶段性蒸发量减少。

4.1.3 气候周期性变化特征

通过小波变换,对九连山亚热带常绿阔叶林多年平均温度、降雨量和蒸发量进行周期性分析,得到Morlet小波系数方差(图5a)。从图5a可以看出,九连山年平均温度存在9a、14a和30a左右的波动周期;年平均降雨量存在6a、14a和21a左右的波动周期;年平均蒸发量存在8a和14a左右的波动周期。

小波方差分析检验表明,九连山年平均温度的最大峰值出现在30a左右,该周期内震荡明显,可视为第一主周期,其次分别是14a和9a左右的短周期,但14a的周期峰值与30a周期的峰值较为接近。从30a左右的波动周期来看,九连山亚热带常绿阔叶林多年平均温度经历了高一低—高一低—高的变化过程,具有全局性特征。

九连山平均降雨量的最大峰值出现在14a左右,可视为第一主周期,其次存在21a左右的长周期和6a左右的短周期。由小波系数实部等值线图可

以看出(图5b),14a左右和21a左右两个尺度的波动周期变化在整个分析时段表现非常稳定,具有全域性。从14a左右的波动周期特征来看,研究期内降雨量经历了准5次的丰—枯变化过程,即将进入相对枯水阶段,预计持续到2020年之后进入相对丰水期。

4.2 小流域径流量变化特征

4.2.1 小流域径流总体变化

从表2可知,九连山亚热带常绿阔叶林小流域多年平均径流量为1066.2mm,径流系数为0.54。

干旱季(10月至翌年2月)径流量明显偏少,平均约占全年径流量的15.7%。河槽径流量最大值出现在5—6月,介于184.8~203.0mm,径流系数在0.53~0.59之间。在不考虑地下径流和植物蒸腾的情况下,10月份降水偏少,但流域依然保持着较大的径流量。尽管在接下来的几个月有降雨补充,但径流量仍逐渐下降,在2月降至最低值36.2mm。表3显示了九连山亚热带常绿阔叶林雨季径流量的分配特征。其中,3—6月的径流量占到了全年径流量的一半以上,多年均值为52.7%;7—10月约占全年径流量的30%左右。旱季期间主要为壤中流,地表径流占全年比例很小;湿润季主要为中上层滞容水和表面水,地表径流占全年比例高^[15]。

值得注意的是,表2中月平均降雨量统计值与表1中相应的统计值有一定差异,尤其是旱季差异更为明显。解释原因是,表2的统计区间为2009—2013年,除2009年降雨量较低外,其余年份均高于近40a平均值,因此造成了统计值总体偏高的现象,

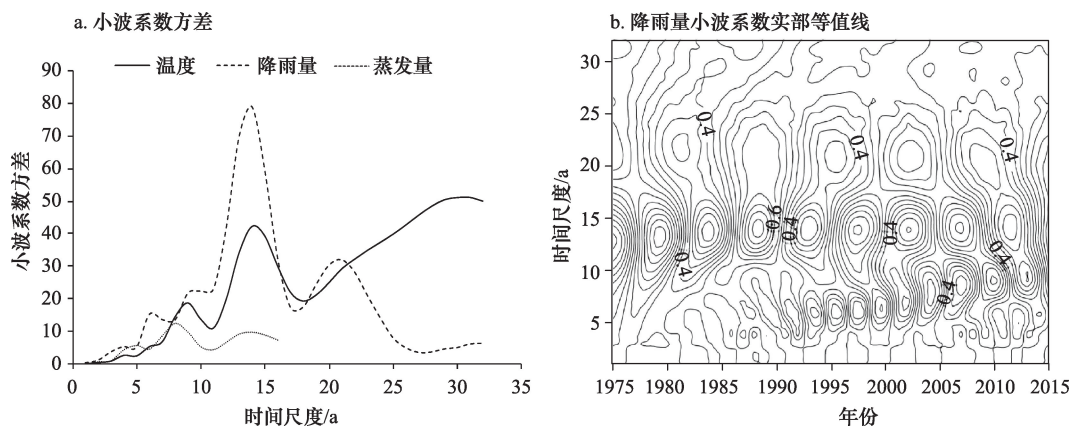


图5 1975—2015年九连山常绿阔叶林气候因子小波系数方差图和降雨量小波系数实部等值线

Figure 5 Wavelet coefficient variances on temperature, precipitation and evaporation in Jiulianshan from 1975 to 2015

表2 2009—2013年九连山平均月降雨量、径流量、蒸发量、径降比和水量变化统计

Table 2 Month mean precipitation, runoff, evaporation, runoff/precipitation, and water balance of subtropical evergreen broad-leaf forest in Jiulianshan from 2009 to 2013

月份	降雨量 /mm	径流量 /mm	蒸发量 /mm	径降比 ^a	水量变化 ^b /mm
1	68.4	43.0	33.9	0.63	-8.5
2	58.6	36.2	42.5	0.62	-20.1
3	130.4	65.0	55.5	0.50	9.9
4	202.4	107.7	55.4	0.53	39.3
5	342.2	203.0	62.6	0.59	76.6
6	358.6	184.8	63.6	0.52	110.2
7	204.6	105.8	97.9	0.52	0.9
8	199.9	91.6	84.6	0.46	23.7
9	186.1	81.9	64.1	0.44	40.1
10	48.4	55.6	66.3	1.15	-73.5
11	101.0	42.3	35.5	0.42	23.2
12	84.2	49.3	35.5	0.59	-0.6
总计	1 984.8	1 066.2	697.4	0.54	221.1

注: a为本文直接采用各月径流量与降雨量的比值(径降比)作为径流系数的参考值,可更直观说明森林在旱季的水源涵养功能,请读者注意与月径流系数区别;b为水量变化未考虑地下径流、植物蒸腾和土壤蓄水量的变化。

这也表明九连山年内降雨分配的随机性很强。从后文的分析还可知,当地降雨年内存在20d和35d左右的振荡周期,因此在旱季中的任一月份皆有可能出现较大降雨量的情况,历史观测也证明了这一点。其中,旱季降雨量超过100mm以上的月份中,10月出现了6a,11月出现了7a,12月出现了5a,1月出现了10a,2月出现了16a。

表3 2009—2013年九连山常绿阔叶林汛期径流年内分配统计特征

Table 3 Statistic characteristics of annual flood season runoff distribution of Jiulianshan from 2009 to 2013 (万m³,%)

年份	3-6月	7-10月	3-10月	全年	3-6月 百分比	7-10月 百分比	3-10月 百分比
2009	166	64	230	268	61.8	24.0	85.9
2010	292	121	413	498	58.6	24.3	82.9
2011	143	158	301	352	40.6	44.9	85.6
2012	248	125	373	467	53.1	26.7	79.8
2013	216	167	383	439	49.1	38.1	87.2
平均	213	127	340	405	52.7	31.6	84.3

4.2.2 径流量与降雨量的相关性

图6a和图6b是研究期内九连山亚热带常绿阔叶林径流量、降雨量和蒸发量的年内分配情况。径流量的年内变化趋势与降水量总体相似。从图6中可以看出,九连山亚热带常绿阔叶林年内月径流量具有明显的多峰分布特征。在5—6月的降雨量高峰期时,系统可贮存大量的水分,到了降水明显偏少的10月份仍可保持较高的地表径流。10月的径降比为1.15(表2),说明该月的径流量大于降雨量,这充分表明森林生态系统具有水源涵养、调节水量再次分配的功能。该结论与类似的研究结果一致^[31]。

图7a是九连山亚热带常绿阔叶林多年月降雨量和月径流量的相关关系;图7b是降雨强度和径流量的相关关系。从图7可知,流域月径流量与月降雨量之间存在显著的线性关系(R^2 为0.85),而与降雨强度关系不明显(R^2 为0.50),这与亚热带地区类似的研究结果一致^[2, 31]。小流域的流出一般由表面

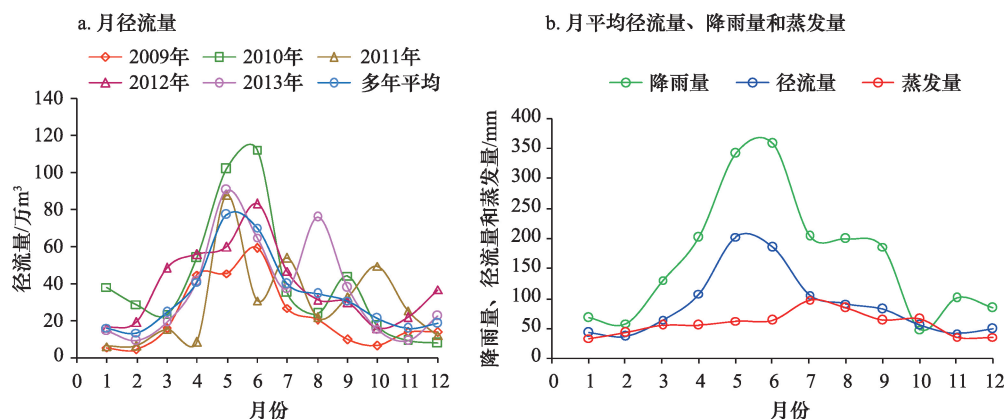


图6 2009—2013年九连山常绿阔叶林径流的年内分配特征以及降雨量、径流量和蒸发量的月分配

Figure 6 Distribution characteristics of annual runoff and monthly variation of rainfall, runoff and evaporation in Jiulianshan from 2009 to 2013

2018年1月

流出、中间流出和地下水流出3部分组成,表面流出是九连山小流域的重要流出特性。以2010年为例,若将流量水平在1mm/h近似看作地表径流^[15],根据全年10分钟观测间隔数据记录推算,则全年地表径流量约占总径流量的14.3%,且主要集中在湿润季,这与以往研究结果基本一致^[15]。地表径流与降雨强度的关系不是十分显著,表明九连山亚热带常绿阔叶林的产流形式较为复杂,可能主要受流域内地形、植被、土壤等因素的影响^[6, 7, 32]。

为进一步说明降雨强度与径流量变化的响应关系,研究选取了降雨特征具有代表性时间段(2010年6月11日-23日)的小时降雨量和径流量进

行分析举例。该时间段内累计降雨量为527.4mm,降雨强度在(0~38.8)mm/h之间,连续24h降雨量最高达177.8mm,按气象观测标准,分别具有无雨、小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨的特征(图8)。从图8可以看出,小到中雨时,径流量值前后流量水平几乎没有变化或者变化很小,表明九连山常绿阔叶林林冠和土壤对降雨有一定的截留率和较大的吸水能力,这与以往研究结论基本相同^[14, 33];大到暴雨过后,径流量恢复到降雨前流量水平的持续时间在12~24h左右;大暴雨之后,径流量恢复到降雨前流量水平的持续时间在48h以上。该区域以往的研究结果表明,大雨或暴雨之后完全恢复到基础流量的

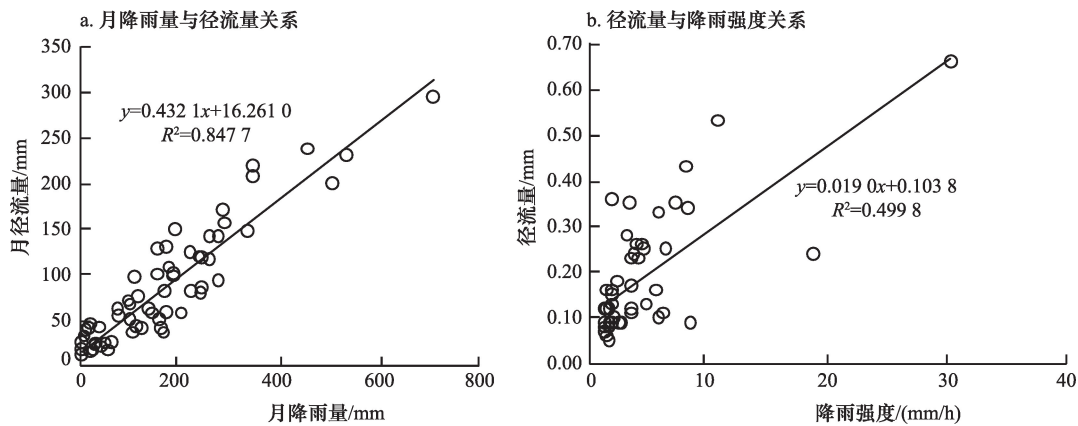


图7 2009—2013年径流量与降雨量和降雨强度的关系

Figure 7 The relationship between runoff and rainfall and the relationship between surface runoff and rainfall intensity from 2009 to 2013

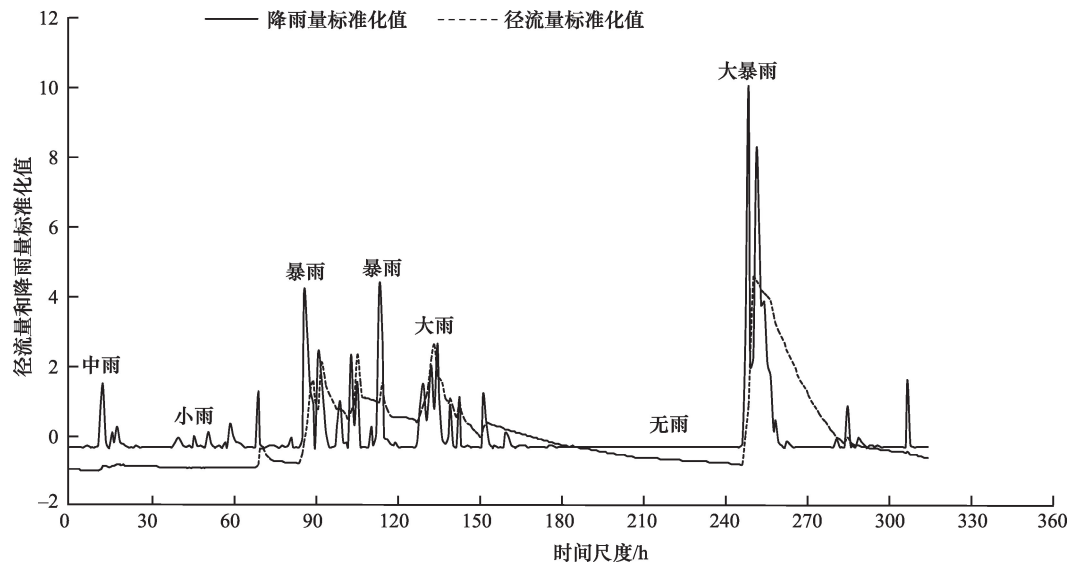


图8 连续降雨量与径流量的关系

Figure 8 Relationship between rainfall and runoff over 312 hours in Jiulianshan

持续时间在10~15d左右^[15],与本文的结果稍有差异,主要原因是以往的研究考虑了后续降雨的影响,而且所观测流域的地形和面积也不同。实际上,如果考虑后续降雨,本例中首场暴雨之后完全恢复到初始流量水平的持续天数也在10d左右,与文献中的结果基本一致。严格来讲,在降雨是整个生态系统唯一的水量来源时,降雨后径流恢复到降雨前的时间仅凭当日的降雨量难以准确估计,这主要与整个生态系统降雨之前的持水量有很大关系,具体流出特性还需要更多的数据来进一步研究。从图8还可知,在大雨以上天气时,研究区径流峰值滞后降雨峰值约1~2h左右,说明森林土壤透水性能良好;连续2~4d暴雨后,再次降大雨以上天气的降雨峰值几乎才与径流峰值同步,这与同处亚热带的常绿阔叶林生态系统研究结果差异较为明显,原因可能是由于观测流域的植被、地形、土壤以及产

流形式等差异引起的^[2, 8, 31, 32],但这种连续多日暴雨的情况极其少见。

4.2.3 年内径流量与降雨量的周期性

通过对九连山亚热带常绿阔叶林年内降雨量、蒸发量和径流量进行周期性分析,得到其Morlet小波系数实部等值线图和小波方差图(图9a、9b和9c,蒸发量实部等值线图略)。从图9a可知,就1年365d时间序列而言,降雨量存在20d和60d左右比较明显的波动周期,10d和35d左右的震荡周期不是很明显;准60d时间尺度的小波方差峰值最大,可视为第一主周期,其次为20d左右的短周期。蒸发量序列存在35d和16d左右的波动周期,12d和60d左右的震荡周期不是很明显。

从图9b可知,径流量同样存在20d和60d左右的震荡周期,10d和35d左右的震荡周期不是很明显;从图9c可知,准60d时间尺度的小波方差峰值最

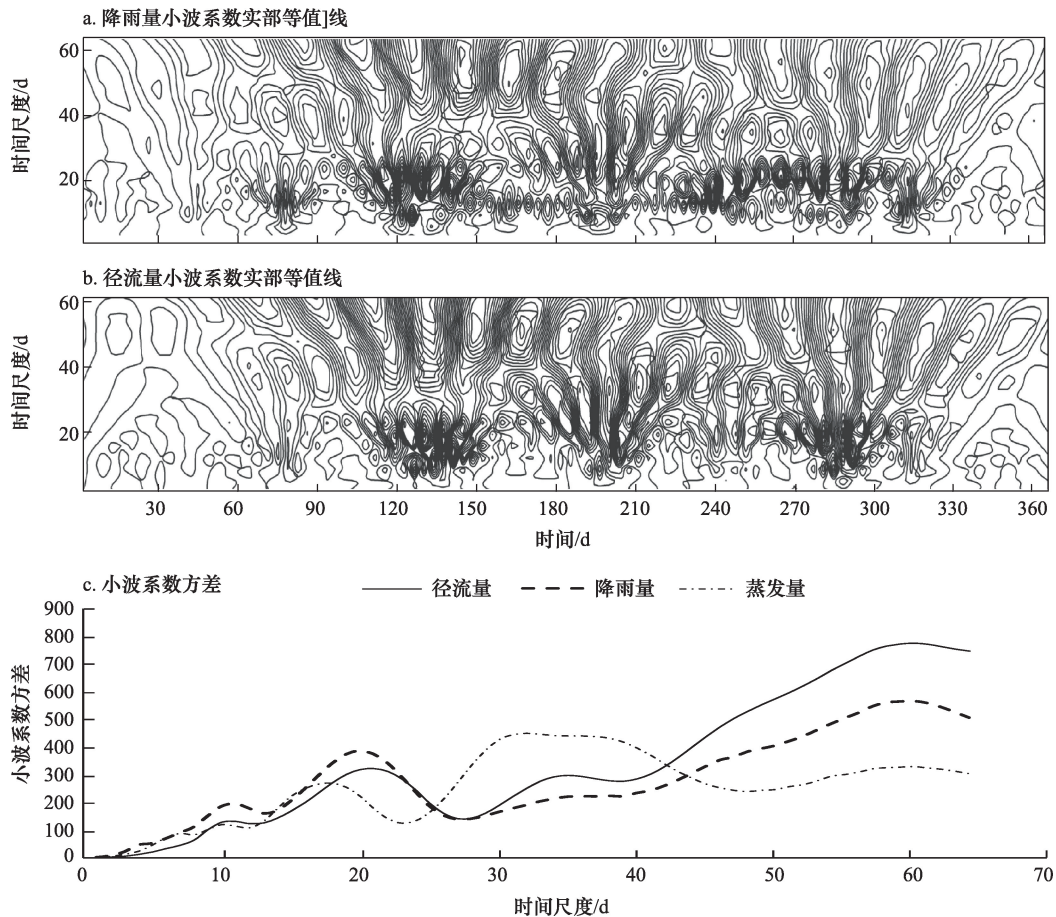


图9 2009—2013年九连山常绿阔叶林年内降雨量、径流量小波系数实部等值线以及小波系数方差

Figure 9 Wavelet coefficient variances on temperature and precipitation in Jiulianshan from 2009 to 2013

2018年1月

大,可视为第一主周期,其次为20d左右的短周期。

根据对年内径流量和降雨量的周期性分析结果,可以看出,九连山年内径流量与降雨量存在60d左右的长震荡周期和20d左右的短震荡周期;除降雨量较大的4—6月外,径流量与蒸发量存在基本相似的震荡格局,说明降水量、蒸发量与径流量的震荡周期具有相当的一致性,径流量对年内气候季节变化的响应明显(图10a,10b)。

5 结论

亚热带常绿阔叶林是中国典型的植被类型,具有分布广、面积大,类型复杂,生物多样性高的特点,在保护区域生态环境、维持全球性碳平衡和人类的持续发展等方面都具有极其重要的作用^[34]。由于九连山地处中亚热带和南亚热带的交界,受大陆和海洋性气候的双重影响,气候变化的阶段性特征比较明显,年内和年际间降雨分配格局具有一定的周期性和随机性,导致九连山亚热带常绿阔叶林小流域的流出特性也具有相似的特征。

5.1 气候变化特征

1975—2015年,九连山亚热带常绿阔叶林多年平均温度为17.1℃,降雨量为1816.3mm,蒸发量为

781.6mm,历史极端高温为37℃、极端低温为-7.4℃。多年平均降雨日数为173天,3—10月降雨约占全年降雨的82.6%。多年平均温度在波动中呈现微弱上升趋势,温度变化倾向率为0.14℃/10a;平均降雨量和蒸发量呈现整体下降趋势,变化倾向率分别为-11.81mm/10a和-50.13mm/10a。

40多年里,九连山亚热带常绿阔叶林多年平均温度、降雨量和蒸发量阶段性变化特征相对比较明显。1970年代末降雨量明显偏少,1990年代后期气温明显偏高,2004年以后阶段性蒸发量减少。

九连山亚热带常绿阔叶林年平均温度存在9a、14a和30a左右的波动周期;年平均降雨量存在6a、14a和21a左右的波动周期;年平均蒸发量存在8a和14a左右的波动周期。其中,年均温度、降雨量和蒸发量均存在准14a左右的主震荡周期。

5.2 径流量特征及其与气候因子的关系

九连山亚热带常绿阔叶林小流域多年平均径流量为1066.2mm,约405.2万m³,径流系数为0.54。流域湿润季径流量约为340万m³,占全年的84.3%;干旱季径流量约为65万m³,占全年的15.7%。小流域径流量峰值一般出现在5—6月,可达184.8~

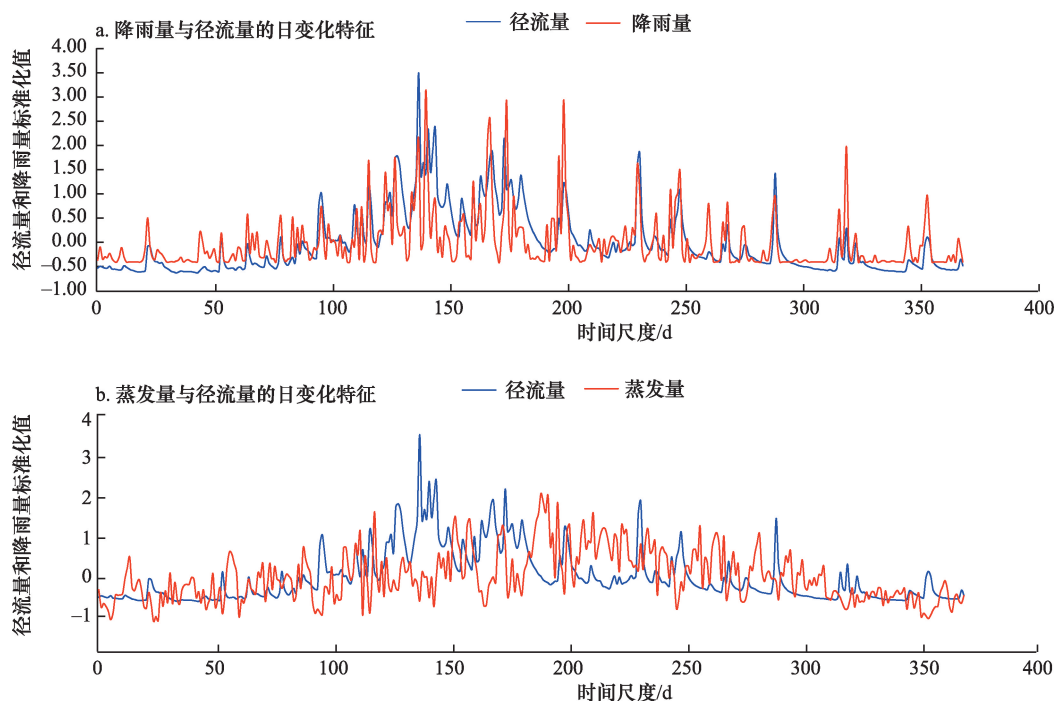


图10 降雨量和蒸发量与径流量多年日变化特征

Figure 10 The diurnal variation between the normalized precipitation and evaporation and runoff in Jiulianshan.

203.0mm;在10月份降水偏少的情况下,小流域依然能保持着较大的径流量,在1—2月降至最低值。

小流域月径流量与月降雨量呈显著的线性关系,二者具有极其吻合的同步变化特征。地表径流与降雨强度的关系不显著,当大雨以上天气时,表面流出是九连山小流域的重要流出特性,在不考虑后续降雨的情况下,径流量恢复到降雨前流量水平的持续时间约为12~48h,完全恢复到基础流量水平则在10~15d左右。

九连山亚热带常绿阔叶林年内径流量与降雨量存在60d左右的长周期和20d左右的短周期,与蒸发量的震荡格局基本相似,说明降水量、蒸发量与径流量的震荡周期具有一致性,径流量对年内气候季节变化的响应明显。降水条件是引起径流量变化的主要原因,蒸发量会对径流变化产生一定的影响。

致谢:本研究得到江西九连山国家级自然保护区管理局的大力支持和帮助。

参考文献(References):

- [1] McCulloch J S G, Robinson M. History of forest hydrology[J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 150(2-4): 189-216.
- [2] 申卫军, 彭少麟, 周国逸, 等. 鹤山丘陵草坡的水文特征及水量平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(2): 162-168. [Sheng S J, Peng S L, Zhou G Y, et al. Hydrological properties and water balance of grassland ecosystem in Heshan hill region [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2): 162-168.]
- [3] 李红霞, 覃光华, 张永强, 等. 青藏高原东部地区水文气候变化趋势分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 71-77. [Li H X, Qin G H, Zhang Y Q, et al. Analysis on the trends of hydroclimatic variation in eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2016, 37(4): 71-77.]
- [4] Paula M D D, Groeneveld J, Huth A. Tropical forest degradation and recovery in fragmented landscapes—simulating changes in tree community, forest hydrology and carbon balance[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2015, 3: 664-677.
- [5] Mazziotta A, Heilmann-Clausen J, Bruun H H, et al. Restoring hydrology and old-growth structures in a former production forest: Modelling the long-term effects on biodiversity[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 381: 125-133.
- [6] 徐小牛, 王勤, 平田永二. 亚热带常绿阔叶林的水文生态特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1570-1574. [Xu X N, Wang Q, Eiji H. Eco-hydrological characteristics of a subtropical evergreen broadleaved forest in Japan [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1570-1574.]
- [7] 黄忠良, 孔国辉, 余清发, 等. 亚热带季风常绿阔叶林水文功能及其养分动态的研究[J]. 植物生态学报, 2000, 24(2): 157-161. [Huang Z L, Kong G H, Yu Q F, et al. Hydrological function and nutrient dynamics in lower subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest [J]. *Acta phytocologica Sinica*, 2000, 24(2): 157-161.]
- [8] 徐小牛, 邓文鑫, 张赞齐, 等. 安徽老山亚热带常绿阔叶林不同林龄阶段土壤特性及其水源涵养功能的变化[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 177-181. [Xu X N, Deng W X, Zhang Y Q, et al. Changes in soil properties and water conservation function of subtropical evergreen broad-leaved forest along a chronosequence at Laoshan, Anhui [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1): 177-181.]
- [9] 刘信中, 肖忠优, 马建华. 江西九连山自然保护区科学考察与森林生态系统研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002. [Liu X Z, Xiao Z Y, Ma J H. Scientific Survey and Study on the Forest Ecosystem in Jiangxi Jiulianshan Natural Reserve [M]. *Beijing: China Forestry Publishing House*, 2002.]
- [10] 川口英之, 李昌华, 片桐成夫, 等. 中国南部九连山常绿阔叶林的区系组成和林分结构[J]. 江西林业科技, 2005, (S1): 1-16. [Kawaguchi H, Li C H, Katagiri S, et al. Floristic composition and stand structure of evergreen broad-leaved forest in Jiulianshan, Southern China [J]. *Jiangxi forestry science and technology*, 2005, (S1): 1-16.]
- [11] 李昌华, 唐茂聪, 吉庆森. 江西九连山常绿阔叶林区气候资源[J]. 资源科学, 2001, (S1): 3-14. [Li C H, Tang M C, Ji Q S. The climate of evergreen broad-leaved forest area in the Jiulian Mountain of Jiangxi province [J]. *Resources Science*, 2001, (S1): 3-14.]
- [12] 堤利夫, 李昌华, 岩坪五郎, 等. 江西九连山常绿阔叶林资源研究[J]. 资源科学, 2001, (S1): 15-35. [Tsutsumi T, Li C H, Chiba K, et al. A study of the evergreen broad-leaved forest in the Jiulian Mountain of Jiangxi province [J]. *Resources Science*, 2001, (S1): 15-35.]
- [13] 片桐成夫, 李昌华, 川口英之, 等. 中国南部天然常绿阔叶林的凋落物养分归还[J]. 资源科学, 2001, (S1): 58-67. [Katagiri S, Li C H, Kawaguchi H, et al. Nutrients return of litterfall of a natural evergreen broad-leaved forest in southern China [J]. *Resources Science*, 2001, (S1): 58-67.]
- [14] 李昌华, 李中菊. 江西九连山常绿阔叶林下土壤的物理性质、水分状况及水源涵养能力的初步研究[J]. 自然资源学报, 1991, (4): 370-379. [Li C H, Li Z J. A preliminary study on the physical properties, moisture condition, and water retention ability of the soil under the evergreen broad-leaved forest of the Jiulian Mountain]

2018年1月

- tain in Jiangxi province [J]. *Journal of Natural Resources*, 1991, (4): 370-379.]
- [15] 李昌华, 福岛义宏, 铃木雅一. 九连山常绿阔叶林小流域的流出特性[J]. 资源科学, 2001, (S1): 36-57. [Li C H, Fukushima Y, Suzuki M. The waterflow property of small watersheds covered of the evergreen broad-leaved forest in the Jiulianshan Mountain [J]. *Resources Science*, 2001, (S1): 36-57.]
- [16] 简敏菲, 刘琪璟, 梁跃龙, 等. 江西九连山常绿阔叶林群落的排序与生态梯度分析[J]. 资源科学, 2010, 32(7): 1308-1314. [Jian M F, Liu Q J, Liang Y L, et al. Analysis on ordination and ecological gradient of the evergreen broad-leaved forest community in Jiulian Mountain of Jiangxi province [J]. *Resources Science*, 2010, 32(7): 1308-1314.]
- [17] 范娟, 赵秀海, 汪金松, 等. 江西九连山亚热带常绿阔叶林优势种空间分布格局[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2729-2737. [Fan J, Zhao X H, Wang J S, et al. Spatial patterns of dominant species in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Jiulian Mountain Jiangxi Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(9): 2729-2737.]
- [18] 简敏菲, 刘琪, 朱笃, 等. 九连山常绿阔叶林乔木优势种群的种间关联性分析[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 672-680. [Jian M F, Liu Q J, Zhu D, et al. Inter-specific correlations dominant populations of tree layer species in evergreen broad-leaved forest in Jiulianshan Mountain of subtropical China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(4): 672-680.]
- [19] 何俊, 赵秀海, 孙兆军, 等. 冰雪灾害对江西九连山常绿阔叶林的影响[J]. 广西植物, 2013, (6): 780-785. [He J, Zhao X H, Sun Z J, et al. Effects of the ice and snow damage to the evergreen broad-leaved forest of Jiulianshan Mountain in Jiangxi Province [J]. *Guihaia*, 2013, (6): 780-785.]
- [20] 何俊, 赵秀海, 张春雨, 等. 九连山自然保护区常绿阔叶林冰雪灾害研究[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(2): 180-185. [He J, Zhao X H, Zhang C Y, et al. Ice and snow disasters to the evergreen broad-leaved forest in the Jiulianshan nature reserve in Jiangxi, China [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2011, 17(2): 180-185.]
- [21] 邸月宝, 王辉民, 马泽清, 等. 亚热带森林生态系统不同重建方式下碳储量及其分配格局[J]. 科学通报, 2012, 57(17): 1553-1561. [Di Y B, Wang H M, Ma Z Q, et al. Carbon storage and its allocation pattern of forest ecosystems with different restoration methods in subtropical China (in Chinese)[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(17): 1553-1561.]
- [22] 林英, 龙迪宗, 杨祥学, 等. 江西省九连山自然保护区的植被[J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1981, 5(2): 110-120. [Lin Y, Long D Z, Yang X X, et al. Vegetation of Jiulianshan nature sanctuary, Jiangxi province [J]. *Acta Phytocologia et Geobotanica Sinica*, 1981, 5(2): 110-120.]
- [23] 路云阁, 李双成, 蔡运龙. 近40年气候变化及其空间分异的多尺度研究-以内蒙古自治区为例[J]. 地理科学, 2004, 24(4): 432-438. [Lu Y G, Li S C, Cai Y L. Multiscale studies on climatic change and its spatial heterogeneity in recent 40 years: a case study in Inner Mongolia [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(4): 432-438.]
- [24] 穆兴民, 李靖, 王飞, 等. 黄河天然径流量年际变化过程分析[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(2): 1-5. [Mu X M, Li J, Wang F, et al. Analysis on the annual natural runoff variety process of the Yellow River [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2003, 17(2): 1-5.]
- [25] 周俊菊, 师玮, 石培基, 等. 石羊河上游1956-2009年出山径流量特征及其对气候变化的响应[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 27-34. [Zhou J J, Shi W, Shi P J, et al. Characteristics of mountainous runoff and its responses to climate change in the upper reaches of Shiyang river basin during 1956-2009 [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2012, 48(1): 27-34.]
- [26] 孙卫国, 程炳岩. 交叉小波变换在区域气候分析中的应用[J]. 应用气象学报, 2008, 19(4): 479-487. [Sun W G, Cheng B Y. Application of cross wavelet transformation to Analysis on Regional Climate Variations[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, 19(4): 479-487.]
- [27] 陈涛, 孙卫国, 程炳岩. 交叉小波变换在河南降水时频分析中的应用[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(5): 685-692. [Cheng T, Sun W G, Cheng B Y. Bivariate Wavelet analysis of He 'nan precipitation and ENSO [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2002, 25(5): 685-692.]
- [28] 陈仁升, 康尔泗, 张济世. 小波变换在河西地区水文和气候周期变化分析中的应用[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 339-345. [Chen R S, Kang E S, Zhang J S. Application of wavelet transform on annual runoff, yearly average air temperature and annual precipitation periodic variations in Hexi region [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(3): 339-345.]
- [29] 王经民. 小波分析在树木气象学中的应用[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(4): 24-27. [Wang J M. Wavelet analysis applied in dendroclimatology [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2004, 19(4): 24-27.]
- [30] 刘俊萍, 田峰巍, 黄强. 黄河上游河川径流变化多时间尺度分析[J]. 应用科学学报, 2003, 21(2): 117-121. [Liu J P, Tian F W, Huang Q. A multiple time scale analysis of the runoff variation along the upper reaches of the Yellow River [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2003, 21(2): 117-121.]
- [31] 闫俊华, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山顶级森林生态系统水文要素时空规律[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2359-2366. [Yan J H, Zhou G Y, Zhang D Q, et al. Spatial and temporal variations of some hydrological factors in a climax forest ecosystem in the Dinghushan

- region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2359–2366.]
- [32] 周传艳, 周国逸, 闫俊华, 等. 鼎湖山地带性植被及其不同演替阶段水文学过程长期对比研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(2): 208–217. [Zhou C Y, Zhou G Y, Yan J H, *et al.* Long-term comparative study of the hydrological characteristics of forests in different successional stages in the Dinghushan biosphere reserve, Guangdong province, China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(2): 208–217.]
- [33] 李昌华, 刘曙光, 唐茂聪. 江西九连山区常绿阔叶林林冠截留量的估算[J]. 自然资源学报, 1997, 12(3): 38–47. [Li C H, Liu S G, Tang M C. The estimation of the crown interception of the evergreen broad-leaved forests in the Jiulian Mountainous district, Jiangxi province [J]. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(3): 38–47.]
- [34] 宋永昌, 陈小勇, 王希华. 中国常绿阔叶林研究的回顾与展望[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005, (1): 1–8. [Song Y C, Cheng X Y, Wang X H. Studies on evergreen broad-leaved forests of China: a retrospect and prospect [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2005, (1): 1–8.]

Climate and hydrology characteristics of subtropical evergreen broadleaved forest in Jiulianshan

ZHOU Hua, LIU Qijing

(Forestry College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Forests and their catchments are dynamic and complex natural systems that demand detailed study of local climate change trends and impacts on water resources. In order to understand their ecological complexity and dynamism it is necessary to study the precipitation, temperature, evaporation and runoff at multiple spatial and temporal scales. Based on daily meteorological data from Xiagongtang station in 1975–2015 and runoff from Number 4 station from 2009–2013 in Jiulianshan, climate and stream flow characteristics and their relationships were analyzed using accumulative anomaly and wavelet transformation. We found that the mean annual temperature was 17.1°C, mean annual precipitation was 1816.3 mm and mean annual evaporation was 781.6 mm. The precipitation from March to October was 82.6% of annual precipitation. The mean annual temperature presented an increasing trend with a trend rate of 0.14°C/10a for past years whereas precipitation and evaporation declined with a slope of –11.81 mm/10a and –50.13 mm/10a, respectively. At the same time, there were significant main periods of quasi 14 years for temperature, precipitation and evaporation, and a minor cycle of quasi 20 years for precipitation. The surface runoff was 1066.2 mm and runoff coefficient was 0.54. There was a significantly positive correlation between precipitation and surface runoff. After heavy rainfall discharge returning to the original level before raining might take about 12–48 h. In a year, there were significant periods at a scale of 20 and 60 days for surface runoff, precipitation and evaporation and the response of runoff variation to climate change was significant. Precipitation had a significant impact on surface runoff as well as evaporation. These results showed that forests and climate change have an important role modifying cycles of runoff and precipitation in subtropical mountain catchments.

Key words: Jiulianshan; subtropical evergreen broadleaved forest; runoff; Morlet wavelet transform; hydrology and climate