

万石云, 赵宁坤, 段玮. 云南省滑坡泥石流与强降水的相关性和多时间尺度特征研究[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 45–50.
[Wan Shiyun, Zhao Ningkun and Duan Wei. Correlation and multi – timescale characteristics of the strong precipitation and the landslide debris flow in Yunnan Province [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 45–50.]

云南省滑坡泥石流与强降水的相关性和 多时间尺度特征研究^{*}

万石云¹, 赵宁坤¹, 段 玮²

(1. 云南省气象台, 云南 昆明 650034; 2. 云南省气象科学研究所, 云南 昆明 650034)

摘 要: 以云南省 1961–2011 年的滑坡泥石流灾害和逐日降水观测数据为基础, 采用相关分析和小波变换分析方法, 研究了云南滑坡泥石流与强降水变化的相关性特征和多时间尺度特征。结论为: 近 51 年来云南滑坡泥石流活动频次呈现出逐步增长的趋势, 云南滑坡泥石流与强降水的变化具有显著的相关关系, 与暴雨的相关性最高, 其次为大暴雨和大雨。云南滑坡泥石流与强降水变化表现出十分明显的多时间尺度变化特征。滑坡泥石流与强降水的变化均存在有 6 年的特征时间尺度变化, 在 6 年的特征时间尺度上, 云南滑坡泥石流的变化一般是相同或滞后于强降水的变化。

关键词: 滑坡; 泥石流; 强降水; 相关系数; 多时间尺度; 云南省

中图分类号: P642.23; X4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2015)01–0045–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2015.01.010

气候变化是当今全球最重要的研究领域之一, 国内外的许多学者在这一领域进行了大量的研究工作, 取得了一系列重要的研究成果^[1–2]。在全球变化的背景下, 天气气候异常导致的局地强降水、冰雹、雷电等极端天气事件逐渐增多, 造成的灾害也日趋严重^[3]。云南地处低纬高原, 特殊的地理位置既受到西南季风的影响, 又受西太平洋、孟加拉湾和南海地区生成的热带风暴影响, 形成了独具特色的立体气候带, 局地强降水多发, 同时云南山地众多, 山区面积占 94%, 地形陡峻, 地质结构复杂, 历次构造运动多变, 地震活动频繁, 使云南成为我国遭受滑坡、泥石流灾害最严重的省份之一^[4]。特别是近十多年以来, 滑坡泥石流灾害频发。例如: 2002 年 8 月 14 日新平发生特大滑坡泥石流灾害, 造成 40 人死亡、23 人失踪、13 人重伤、20 人轻伤, 直接经济损失 3.03 亿元, 在新平的历史上被称为“百年不遇”的特大灾害; 2004 年 7 月 5 日德宏州发生特大山洪泥石流, 造成 19 人死亡、失踪 23 人; 2008 年 11 月 2 日楚雄发生特大滑坡泥石流, 共造成 16 人死亡、4 人被埋、38 人失踪。这些滑坡泥石流灾害都造成了巨大的人员伤亡和财产损失, 严重制约了山区经

济社会发展和生产生活的稳定, 防灾减灾形势严峻, 因此开展滑坡泥石流灾害的预测预报和周期性变化研究在防灾减灾方面具有重大意义。在一定的地质条件下, 滑坡泥石流常常由强降水激发产生, 目前对滑坡泥石流与降水的研究大部分是从其相关性和临界雨强的角度去分析。如: 段旭等研究了云南不同地质地貌条件下滑坡泥石流与降水的关系^[5]; 陶云等分析了云南滑坡泥石流与降水特征的一些相关关系^[6]; 崔鹏等研究了区域暴雨滑坡泥石流的预测预报方法^[7]; 倪化勇等研究了四川石棉县和贡嘎山东坡磨西河流域的滑坡泥石流发生的临界雨量条件^[8–9]; 杜惠良等从气象条件的角度研究了浙江滑坡泥石流发生的预测预报方法^[10]。这些研究成果极大促进了滑坡泥石流的预测预报水平, 在防灾减灾中发挥了重要作用, 但是从时间演变特征的角度来看, 关于滑坡泥石流与强降水变化的多时间尺度特征及其随时间演变的趋势变化的相关研究还不多, 因此本文以云南省滑坡泥石流和强降水的实际观测资料为基础, 采用相关和小波变换分析的方法, 研究了云南滑坡泥石流与强降水变化的相关性特征和多时间尺度特征, 以期在云南滑坡泥石流与强降水的周期

^{*} 收稿日期: 2014–07–24 修回日期: 2014–09–15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41205067)

作者简介: 万石云(1980–), 男, 云南文山州人, 硕士, 工程师, 主要从事灾害性天气监测预警及山地灾害研究。

E-mail: kmwsy_1980@163.com

通讯作者: 段玮(1979–), 男, 云南昆明人, 硕士, 高级工程师, 主要从事青藏高原东南侧区域天气气候研究。

E-mail: duanwain@hotmail.com

性变化关系方面获得进一步有意义的结果。

1 资料和方法

1.1 资料处理

(1)降水资料: 云南省 124 个观测站 1961 - 2011 年的逐日降水资料, 统计了各站的大雨 (≥ 25 mm)、暴雨 (50 mm 日降水量 < 100 mm) 和大暴雨日数 ($100 \text{ mm} \leq \text{日降水量} \leq 250 \text{ mm}$), 以每年各站相应强降水类型日数的总和作为云南强降水的活动指数, 得到 1961 - 2011 年强降水指数的逐年时间序列值, 并做了方差标准化处理。

(2)灾情资料: 主要采用云南省气象台收集的 1961 - 2011 年滑坡泥石流灾情资料, 并整合了云南省国土资源厅和“地球系统科学数据共享平台 (www.geodata.cn)”提供的部分灾情资料。根据文献[4]中方法, 按滑坡泥石流发生的县数逐年进行统计, 即一年里某个县市发生多次滑坡泥石流也只记为一个, 一年里有几个县市发生滑坡泥石流就计为几个。将 1961 - 2011 年云南省滑坡泥石流灾害资料进行统计, 得到逐年的滑坡泥石流活动频次指数 E_d , 其取值范围为 $\{0 \leq E_d \leq 124\}$, 并对其做了方差标准化处理。

1.2 研究方法

本文主要采用相关分析和 Morlet 小波变换研究方法, 相关分析方法参考文献[11]。小波分析是一种能够自动适应时域和频域同步进行的分析方法, 近年来已广泛的运用到大气科学、地理、水文等多个研究领域中, 取得了许多有意义的成果^[12-17]。小波分析是在傅氏变换的基础上引入的, 其 Morlet 小波的母函数为:

$$\Psi(t) = e^{ict} (e^{-\frac{t^2}{2}} - \sqrt{2}e^{-\frac{c^2}{4}}e^{-t^2}). \quad (1)$$

其 Fourier 变换为如下形式:

$$\hat{\Psi}(\omega) = e^{-\frac{(\omega-c)^2}{2}} - e^{-\frac{c^2}{4}}e^{-\frac{\omega^2}{4}}. \quad (2)$$

当 $c \geq 5$ 时, 上式中第二项远远小于第一项, 这样忽略第二项不会影响分析结果的可靠性, 并且只有这样 Morlet 小波的母函数才满足小波存在的允许性条件 ($C_\Psi = \int_R \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$)。这样其母函数变为:

$$\Psi(t) = e^{ict} e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (3)$$

其小波变换形式为:

$$W_{ab}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}\Psi(\frac{t-b}{a})} dx \quad (4)$$

式中: $W_{ab}(f)$ 为小波变换系数; $f(t)$ 为一个信号或平方可积函数; a 为伸缩因子; b 为平移因子。

2 云南省滑坡泥石流活动的年际变化

图 1 中给出了 1961 - 2011 年云南省滑坡泥石流活动频次指数年际变化曲线。从图中趋势曲线变化来看, 近 51 年来云南省滑坡泥石流活动呈明

显增加的趋势, 平均滑坡泥石流活动次数为 19 次/年。从滑坡泥石流活动频次指数逐年变化曲线来看, 1961 - 2011 年 51 年间滑坡泥石流活动频次最大的年份为 2002 年, 共发生 75 次, 比平均值偏多 294%, 滑坡泥石流活动频次最小的年份为 1973 年, 共发生 2 次, 比平均值偏少 89.5%, 最大年和最少年相差 73 次/年, 年际差异大。从曲线逐年的变化来看, 其演变还具有明显的阶段性特征, 在 1994 年以前, 低纬高原区滑坡泥石流活动频次相对较低, 平均为 9.8 次/年, 1994 年之后进入一个高发的时期, 平均为 37.5 次/年, 这应该与全球气候变化导致云南的极端强降水事件增多和人类经济建设活动有关。

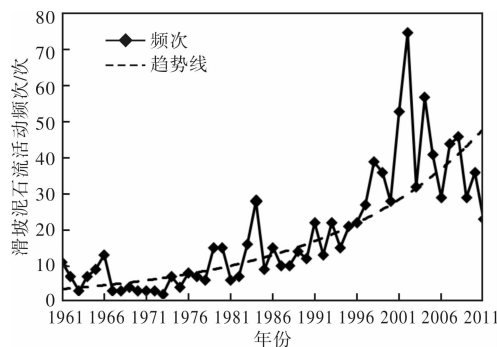
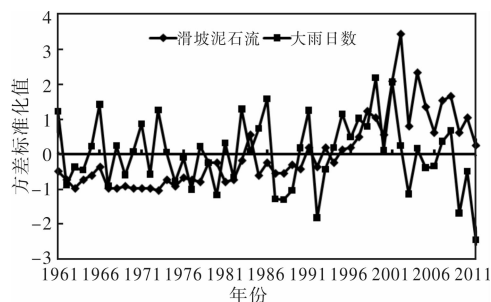


图 1 云南省滑坡泥石流活动频次指数年际变化曲线

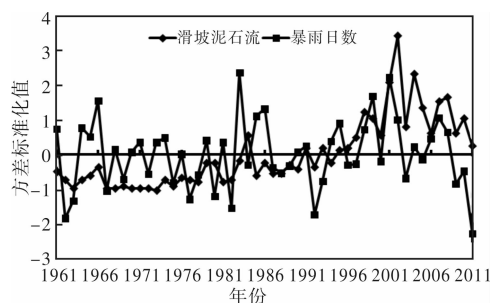
3 云南滑坡泥石流与强降水的相关性

为了消除滑坡泥石流与强降水时间序列的周期性振荡影响, 在图 2 中分别给出了云南省滑坡泥石流与大雨、暴雨和大暴雨的方差标准化距平值时间序列。从图 2 中可以看出, 云南省滑坡泥石流活动与强降水类型之间存在着较为显著的关系。从大雨、暴雨和大暴雨的曲线变化来看, 1961 - 1973 年偏多, 1974 - 1982 年偏少, 1983 - 2001 年偏多, 2002 - 2011 年偏少, 对应滑坡泥石流活动频率来看, 在 1961 - 1995 年, 云南省滑坡泥石流呈现逐年缓慢增长的趋势, 但是总体而言相对整个时段属于偏少, 随着近年来气候变化导致的极端天气增多和人类经济建设活动的影响逐渐加深, 从 1996 年开始云南的滑坡泥石流活动频率有一个突然提升的趋势, 并且从图中可看出这种趋势变化的波峰与强降水的类型有很好的对应关系, 而波谷也与强降水变化的趋势一致, 尤其是在 2010 和 2011 年云南的连续干旱, 降水偏少的情况下, 滑坡泥石流的活动也呈明显的下降趋势, 表明了云南强降水对激发滑坡泥石流活动具有重要的作用。

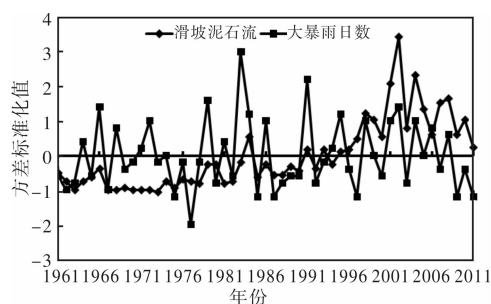
为了定量说明这种相关关系, 在表 1 中给出了滑坡泥石流活动与各种强降水类型的相关系数, 以量化的表述上述的相关关系。从表 1 可以看出, 在 1961 - 2011 年 51 年的时间样本上, 云南滑坡泥石流活动指数与大雨的相关系数为 0.247, 通



(a) 滑坡泥石流与大雨关系



(b) 滑坡泥石流与暴雨关系



(c) 滑坡泥石流与大暴雨关系

图2 云南省滑坡泥石流活动指数与强降水变化的标准化距平值时间序列

过了 0.1 的显著性检验, 与暴雨的相关系数为 0.323, 与大暴雨的相关系数为 0.299, 均能通过 0.05 的显著性检验。其中与暴雨的相关系数最高, 说明云南滑坡泥石流的发生多数为暴雨激发, 其次为大暴雨, 而由大雨激发的概率较低一些。

表1 云南滑坡泥石流活动指数与各类型强降水的相关系数

指数类型	滑坡泥石流 活动指数	大雨日数	暴雨日数	大暴雨日数
滑坡泥石流 活动指数	1.000	0.247	0.323	0.299

4 云南滑坡泥石流和强降水的多时间尺度特征

对云南滑坡泥石流活动指数、大雨日数、暴雨日数、大暴雨日数的标准化年距平值时间序列进行 Morlet 复值连续小波变换, 得到小波变换系数的实部、模值和位相等信息, 通过分析这些信息, 可以揭示云南滑坡泥石流与强降水变化的多时间尺度结构, 以便于研究滑坡泥石流和强降水的活

动周期, 从长期趋势上把握此类灾害的活动规律。

图3和图4中给出了滑坡泥石流活动指数与强降水小波变换系数的实部和模值, 图中的纵坐标和横坐标分别是以年为单位的时间尺度和时间变化。小波系数实部的正负表示云南滑坡泥石流和强降水在不同时间尺度上的大小随时间变化的振荡特征, 不同时间尺度对应的活动变化是不同的, 小尺度上的活动变化表现为嵌套在较大尺度下的比较复杂的变化位相。图3为云南滑坡泥石流与强降水的小波变换系数的实部等值线图, 由图中可以看出, 滑坡泥石流与强降水活动存在明显的多时间尺度变化特征。其中, 滑坡泥石流活动在整整个时域上存在 26 年以上, 17~25 年及 4~9 年三类时间尺度的周期变化特征; 大雨活动存在 26 年以上, 12~18 年及 4~9 年时间尺度的周期变化特征; 暴雨活动存在 14~20 年, 4~9 年及 3~6 年时间尺度的周期变化特征; 大暴雨活动存在 14~20 年, 9~14 年及 4~9 年时间尺度的周期变化特征。

图4为云南滑坡泥石流与强降水的小波变换系数的模值等值线图, 小波变换系数的模值表示能量密度的大小, 模值越大, 表示其所对应时段内相应的时间尺度变化的周期性越明显, 因此, 模值可以把各种时间尺度的周期变化在时间域中的分布情况展示出来。从图中可以看出, 滑坡泥石流 17~25 年尺度的模值最大, 且在整整个时间变化区域上, 说明其周期变化特征最显著, 其次是 4~9 年尺度的周期变化较为显著; 大雨活动 12~18 年尺度的模值最大, 周期变化最显著, 其次是 4~9 年尺度的周期变化较显著; 暴雨活动 14~18 年尺度的模值最大, 周期变化最显著, 其次是 4~9 年尺度的周期变化较显著; 大暴雨活动 9~14 年尺度的模值最大, 周期变化最显著, 其次是 4~9 年尺度较显著。由此看出, 在较大时间尺度上, 强降水的周期变化比滑坡泥石流的变化要短一些, 而在较小的时间尺度上, 滑坡泥石流与强降水的周期变化是一致的。

为了更好地说明云南滑坡泥石流与强降水变化的多时间尺度特征, 本文通过小波方差检验来分析小波变换系数的模值在整整个时间域上平均的时间尺度分布情况。小波方差计算公式为:

$$W_f(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db. \quad (5)$$

式中: $W_f(a)$ 为小波方差; $W_f(a, b)$ 为小波变换系数的模值。利用式(5)计算各时间尺度的小波方差, 根据方差值来分析滑坡泥石流和强降水变化的多时间尺度特征。

图5给出了云南滑坡泥石流和强降水的小波方差的时间尺度分布图, 从图中曲线的波峰可以看出, 云南滑坡泥石流变化的特征时间尺度分别为 3 年、6 年、9 年和 24 年; 大雨变化的特征时间尺度分别为 6 年、15 年和 26 年; 暴雨变化的特征时间尺度分别为 6 年和 16 年; 而大暴雨变化的特征时间尺度则分别为 4 年、6 年、12 年和 17 年。从上

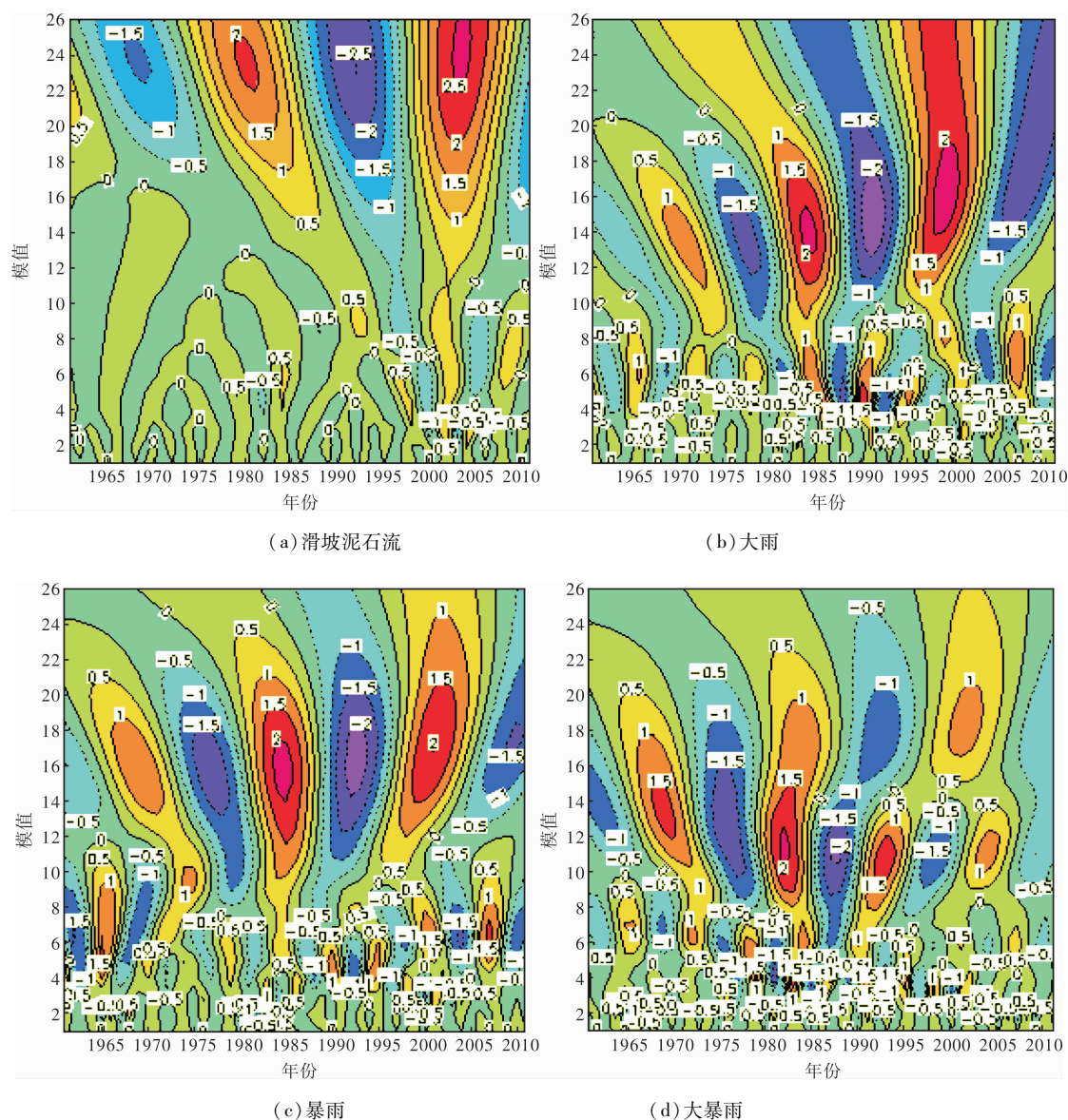


图3 云南滑坡泥石流与强降水的小波变换系数的实部

述的特征时间尺度可以看出, 滑坡泥石流、大雨、暴雨和大暴雨变化均含有约6年的特征时间尺度, 因此可以认为云南滑坡泥石流与强降水变化均可能存在有约12年的特征时间周期变化, 同时也表明在6年的特征时间尺度变化上, 云南滑坡泥石流的变化主要是由强降水造成的。而滑坡泥石流的3年、9年和24年的特征时间尺度变化则可能还包含有地形地貌和地质结构活动变化、地震和人类社会生产活动的影响, 由此看出, 云南滑坡泥石流的变化是多种因素共同作用的结果, 表现出了复杂的时间变化特征。

5 云南滑坡泥石流与强降水变化的时间位相特征

为了进一步分析云南滑坡泥石流与强降水变化在特征时间尺度上的时间变化特征, 以滑坡泥石流与强降水均有的特征时间尺度为例, 在图6中

给出了在特征时间尺度为6年时的云南滑坡泥石流与强降水的标准化年距平值时间序列的小波变换系数的位相。从图6中可以看出, 在特征时间尺度为6年时, 云南滑坡泥石流的时间位相变化一般是相同或滞后于强降水的时间位相变化的。具体来看, 滑坡泥石流的时间位相变化滞后于大雨的时间位相变化, 而与暴雨和大暴雨的时间位相变化一致, 这说明云南滑坡泥石流多发生在大雨发生之后和暴雨和大暴雨发生时, 这与云南强降水激发滑坡泥石流的具体情况是相符合的。

6 结论

本文采用相关分析和小波变换分析方法, 研究了云南滑坡泥石流与强降水变化的相关关系和多时间尺度特征, 得到以下几点结论:

(1) 云南滑坡泥石流活动频次在近51年来呈现出逐步上升的趋势, 其与强降水的变化具有显

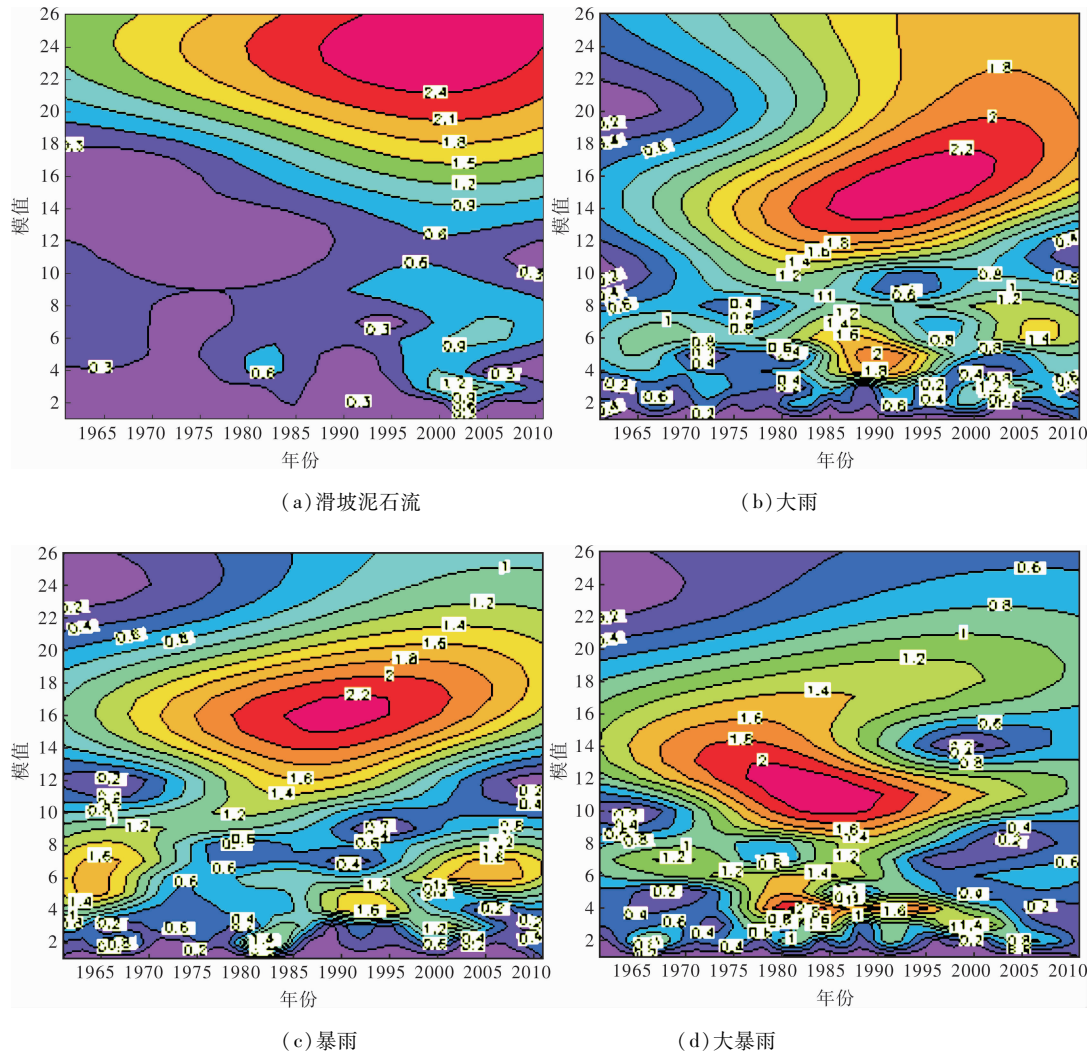


图4 云南滑坡泥石流与强降水的小波变换系数的模值

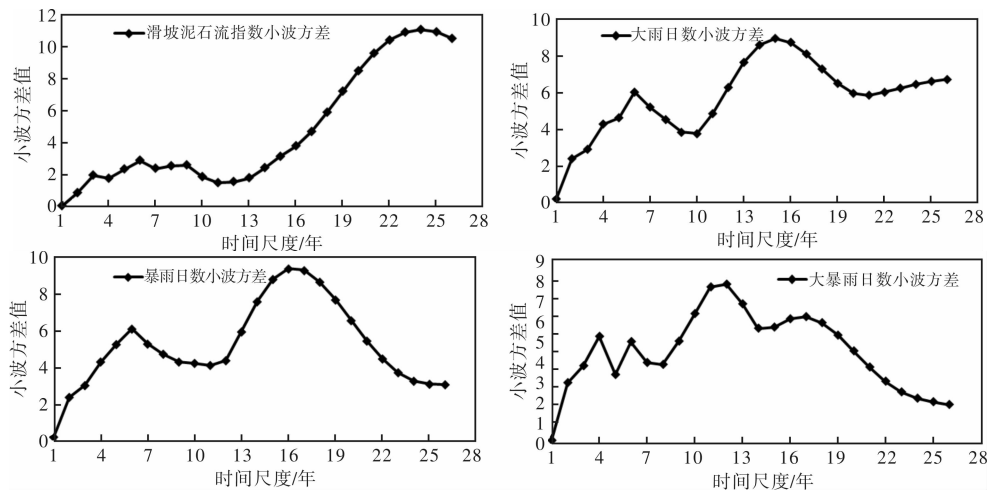


图5 云南滑坡泥石流与强降水的小波方差值的时间尺度分布

著的相关关系, 与暴雨的相关性最高, 其次为大暴雨和大雨。

(2) 云南滑坡泥石流与强降水变化具有十分明显的多时间尺度变化特征。云南滑坡泥石流变化的特征时间尺度分别为3年、6年、9年和24年; 大雨变化的特征时间尺度分别为6年、15年和26

年; 暴雨变化的特征时间尺度分别为6年和16年; 大暴雨变化的特征时间尺度分别为4年、6年、12年和17年。

(3) 云南滑坡泥石流与强降水的变化均含有6年的特征时间尺度, 或者说云南滑坡泥石流与强降水变化均可能存在有12年的特征时间周期变化。

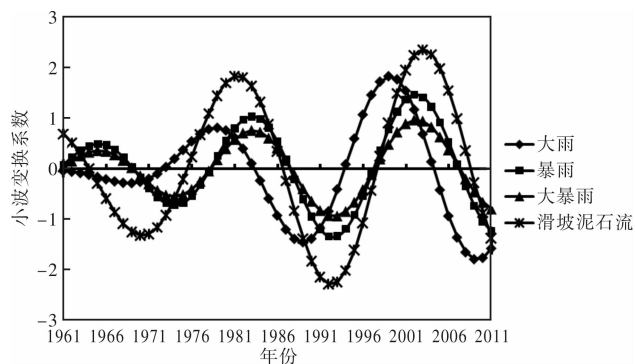


图6 云南滑坡泥石流与强降水变化在特征时间尺度为6年时的小波变换系数的位相

(4) 云南滑坡泥石流的3年、9年和24年的特征时间尺度变化则可能还包含有地形地貌和地质结构活动变化、地震和人类社会经济生产活动的影响,是多种因素共同作用的结果。

(5) 在6年的特征时间尺度上,云南滑坡泥石流的时间位相变化一般是相同或滞后于强降水的时间位相变化的。具体来看,滑坡泥石流的时间位相变化滞后于大雨的时间位相变化,而与暴雨和大暴雨的时间位相变化相一致。

参考文献:

- [1] 叶笃正, 符淙斌, 董文杰, 等. 全球变化科学领域的若干研究进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 435-450.
- [2] 曾庆存, 王会军, 林朝晖, 等. 气候动力学与气候预测理论的研究[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 468-483.
- [3] 符淙斌, 董文杰, 温刚, 等. 全球变化的区域响应和适应[J]. 气象学报, 2003, 61(2): 245-250.
- [4] 唐川, 朱静. 云南滑坡泥石流研究[M]. 北京: 商务印书馆, 2003.
- [5] 段旭, 陶云, 刘建宇, 等. 云南省不同地质地貌条件下滑坡泥石流与降水的关系[J]. 气象, 2007, 33(9): 33-39.
- [6] 陶云, 唐川, 段旭. 云南滑坡泥石流灾害及其与降水特征的关系[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 180-186.
- [7] 崔鹏, 高克昌, 韦方强. 泥石流预测预报研究进展[J]. 学科发展, 2005, 20(5): 363-369.
- [8] 倪化勇, 巴仁基, 刘宇杰. 四川省石棉县地质灾害发生的雨量条件与气象预警(报)[J]. 水土保持通报, 2010, 30(6): 112-118.
- [9] 倪化勇, 李宗亮, 巴仁基, 等. 贡嘎山东坡磨西河流域泥石流暴发的临界雨量值初探[J]. 山地学报, 2007, 25(6): 721-728.
- [10] 杜惠良, 钮学新, 殷坤龙, 等. 浙江省滑坡、泥石流气象条件分析及其预报研究[J]. 热带气象学报, 2005, 21(6): 642-650.
- [11] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2000.
- [12] 廖光明, 延军平, 胡娜娜, 等. 西安市近58年雨涝事件时间序列特征研究[J]. 灾害学, 2013, 28(2): 65-70.
- [13] 于文金, 赵景旺. 唐山市暴雨特征及风险评估研究[J]. 灾害学, 2013, 28(4): 50-54.
- [14] 杨辉, 宋正山. 华北地区水资源多时间尺度分析[J]. 高原气象, 1999, 18(4): 496-508.
- [15] 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.
- [16] 于浩, 杨勤科, 张晓萍, 等. 基于小波多尺度分析的DEM数据综合及尺度转换[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(4): 12-16.
- [17] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.

Correlation and Multi-timescale Characteristics of Strong Precipitations and Landslide Debris Flows in Yunnan Province

Wan Shiyun¹, Zhao Ningkun¹ and Duan Wei²

(1. Meteorological Observatory of Yunnan Province, Kunming 650034, China;

2. Meteorological Institute of Yunnan Province, Kunming 650034, China)

Abstract: Based on the data of landslide debris flow disasters and daily precipitation from 1961 to 2011, correlation and multi-timescale characteristics of the strong precipitation and the landslide debris flows in Yunnan are investigated with correlation analysis and wavelet transform analysis methods. The results show that landslide and debris flow activity frequency showing a gradual increasing trend in recent 51 years, the variations of the strong precipitation and landslide debris flows in Yunnan has significant correlation; the highest correlation with the rainstorm and secondly for heavy rainstorm and heavy rain. The variations of the strong precipitation and the landslide debris flow in Yunnan obviously display multi-timescale features. There were characteristic timescale changes in 6 years of the variation for the strong precipitation and the landslide debris flow, the characteristic time scale of 6 years, the changes of landslide and debris flow in Yunnan is generally identical to the change or lag behind the strong precipitation.

Key words: landslide; debris flow; strong precipitation; correlation coefficient; multi-timescale; Yunnan province