

滇中城市降水特征及其成因分析

何萍¹ 李矜霄^{2,3} 付永梅¹ 刘树华^{4,†}

1. 云南省楚雄师范学院地理科学与旅游管理学院, 楚雄 675000; 2. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; † 通信作者, E-mail: lshuhua@pku.edu.cn

摘要 基于滇中城市群4个主要城市(昆明、曲靖、玉溪和楚雄)近50年的降水资料, 利用统计分析、小波分析、累计距平和灰色关联度分析等方法, 分析滇中城市降水量的年、季、月变化特征以及影响降水量的各种因子。结果表明, 滇中城市近50年平均降水量为928.1 mm, 整体上呈下降趋势, 并在2009年发生突变; 降水量有干、湿季之分, 雨季(5—10月)降水多, 干季(11月至次年4月)降水少, 最大降水量出现在7月(184.0 mm), 最小降水量出现在12月(13.8 mm)。通过小波分析, 发现年降水量呈现22年左右的主周期变化; 夏季降水量呈现以19天为主周期的增减变化, 降水多, 变幅小; 冬季降水量呈现以20天为主周期的增减变化, 降水少, 变幅大。通过灰色关联度分析, 发现自然因子中对降水影响较大的是气温和相对湿度, 人文因子中对降水影响最大的是人口和城市面积, 并且, 自然因子的作用大于人文因子。

关键词 滇中城市; 降水特征; 灰色关联度分析; 自然因子; 人文因子

Analysis of Precipitation Characteristics and Its Causes in Central Yunnan City

HE Ping¹, LI Jinxiao^{2,3}, FU Yongmei¹, LIU Shuhua^{4,†}

1. College of Geography and Tourism Management, Chuxiong Normal University, Chuxiong 675000; 2. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 4. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: lshuhua@pku.edu.cn

Abstract Basing on the nearly 50-year precipitation data of 4 major city (Kunming, Qujing, Yuxi, Chuxiong) in urban agglomeration of central Yunnan, this paper analyzes the variation of precipitation in annual, seasonal, and monthly time scale by using methods including the statistical analysis, the wavelet analysis, accumulative leveling method, and the grey relational analysis. The result shows that the average precipitation in past 50 years is 928.1 mm. The trend of precipitation is declining, and a mutation appears in 2009. Besides, precipitation has a dry and wet season in these region, and the wet season is between May and October but the dry season is between November and April of next year, There are more precipitation in the rainy season and less precipitation in dry season. The maximum of precipitation (184.0 mm) appears in July, but the minimum of precipitation (13.8 mm) appears in December. According to the wavelet analysis, the change of annual precipitation is about 22 years, the summer precipitation has a 19-day increase-decrease cycle with more precipitation and smaller variation, and the winter precipitation has a 20-day increase-decrease cycle with less precipitation and larger variation. The grey relational analysis show that the temperature and the specific humidity are dominant natural factors, and the population and the city size are dominant human factors. Besides, the natural factors play greater role than the artificial factors.

Key words central Yunnan city; precipitation characteristics; grey relational analysis; natural factor; human factor

受全球气候变化和城市化的影响,我国旱涝、暴雨等极端气候事件引发的各种次生灾害威胁着人类生存环境和国民经济的发展。旱涝灾害的发生主要取决于区域降水量,而降水量的变化与多种因素有关。

国际上对不同区域降水的影响因子做过很多研究,尤其在城市化对降水的影响方面。Trenberth等^[1]利用美国近30年的降水资料,分析不同地区和不同时间的强降水特征。Comte等^[2]就淡水珊瑚对珊瑚岛气候和植被变化的响应做了模拟研究。Zhang等^[3]运用Mann-Whitney U检验和皮尔森相关系数等方法,分析ENSO对东江流域降水的影响,发现东太平洋变暖导致秋冬季降水偏多。

我国学者对降水量的研究大多针对不同区域降水量在时间和空间上的变化规律,对其影响因素及影响程度的研究较少。王富强等^[4]运用R/S分析法以及相关和偏相关分析等方法,研究东江流域的降水变化特征及影响因素。李海燕^[5]综合利用线性倾向率、多元线性回归以及M-K突变检验等多种数理统计方法,分析黑河流域降水的多时间尺度特征。王贵锁^[6]采用灰色关联度分析方法,研究影响哈尔滨市降水的5个因子(平均气压、平均气温、平均相对湿度、平均风速和日照时数)。

郑亦佳等对滇中地区近51年地面气象要素的变化特征做了统计分析^[7],对滇中地区的城市热岛进行数值模拟^[8],还就城市化对昆明一次强降水过程影响进行数值模拟研究^[9]。众多学者采用Mann-Kendall非参数检验、灰色关联度分析、统计分析以及线性回归等方法,对昆明、曲靖、玉溪和楚雄4个城市的多时间和多空间尺度的降水特征做了研究^[10-20]。上述研究表明,近50年来,滇中地区增温趋势明显,冬季的增温幅度最大,作为滇中地区发展最快的城市,昆明市的年增温趋势在4个城市中最明显。年降水量呈波动减少的趋势,冬、春季降水量增加,夏、秋季降水量减少。4个城市中,昆明市年降水量的降幅最大,楚雄市呈微弱的上升趋势。年均及各季节的相对湿度均呈显著下降的趋势,各季节的降幅差别不大。滇中地区的城市热岛和干岛现象明显,均存在向下风向偏移的下游效应。

滇中4个城市的降水主要受大气环流的影响,雨季主要受西南气流、东南季风和西风带上南支槽等天气系统的影响,所以降水多。有时雨季降水偏少,主要是副热带高压向西伸展、南支槽强度持续

偏弱和季风偏弱等原因造成的^[7,17]。干季主要受来自低纬度内陆地区偏西气流的影响,城市上空的水汽条件不足,所以降水偏少。2009—2012年出现近50年一遇的连续4年干旱,主要原因是受平均气温升高、南支槽强度持续偏弱、西北部气流异常和青藏高原高压脊发展控制等多种因素的影响,持续地严重干旱,致使滇中和滇西南地区降水较少^[16-17]。云南是亚热带季风气候区,夏季风将印度洋和太平洋的暖湿气流带入,形成滇中地区5—10月多雨的气候(雨季)。冬季盛行从阿拉伯、印度等内陆地区吹来的偏西风,来自低纬度内陆地区的风又干又暖,形成滇中城市11月至次年4月少雨的气候(干季),所以云南的冬季不冷,但降水少。因此,滇中城市具有干湿季分明的气候特征。虽然冬季偶有强大的冷空气翻过云贵高原,影响滇中及其以西地区,但冷空气活动次数不多,冬季很少下雪。由于上述因子的综合作用,形成滇中城市四季温差小、干湿分明和垂直变异显著的低纬度高原气候特征。

虽然对云南地区的降水特征已有一系列的研究,对楚雄、昆明、玉溪等单个城市的降水特征也有一些研究,但系统地研究滇中城市的降水特征和成因尚不多见。鉴于此,本文采用多种时间序列分析方法,系统性地研究滇中城市的年降水量、季降水量和月降水量变化特征,并分析其自然和人文方面的影响因素,以期为区域气象预报、防灾减灾及社会经济发展提供科学资料。

1 数据来源和研究方法

滇中城市群位于云南省中部(23°19'—27°03'N, 100°50'—104°43'E)(图1),国土面积(114600 km²)占全省的29%,人口(2300万左右)约占全省的44.02%,城镇化水平约为60%。本文研究区域为滇中城市群中4个主要城市昆明、楚雄、玉溪和曲靖的城区。这4个城市是云南省各类资源高度聚集的地区,经济总量占全省的近60%。

本研究使用的数据主要依据原始观测和统计资料,来源于云南省信息中心和《云南省统计年鉴》。原始数据保留一位小数,并对数据做订正处理。用于分析降水量的数据是4个城市气象站(站点分布见图1)的日、月、年平均降水量观测数据。

首先利用Excel对滇中4个城市近50年的降水观测数据进行统计分析,然后进行小波周期分析。小波函数反映降水量的周期震荡,小波变换系数为

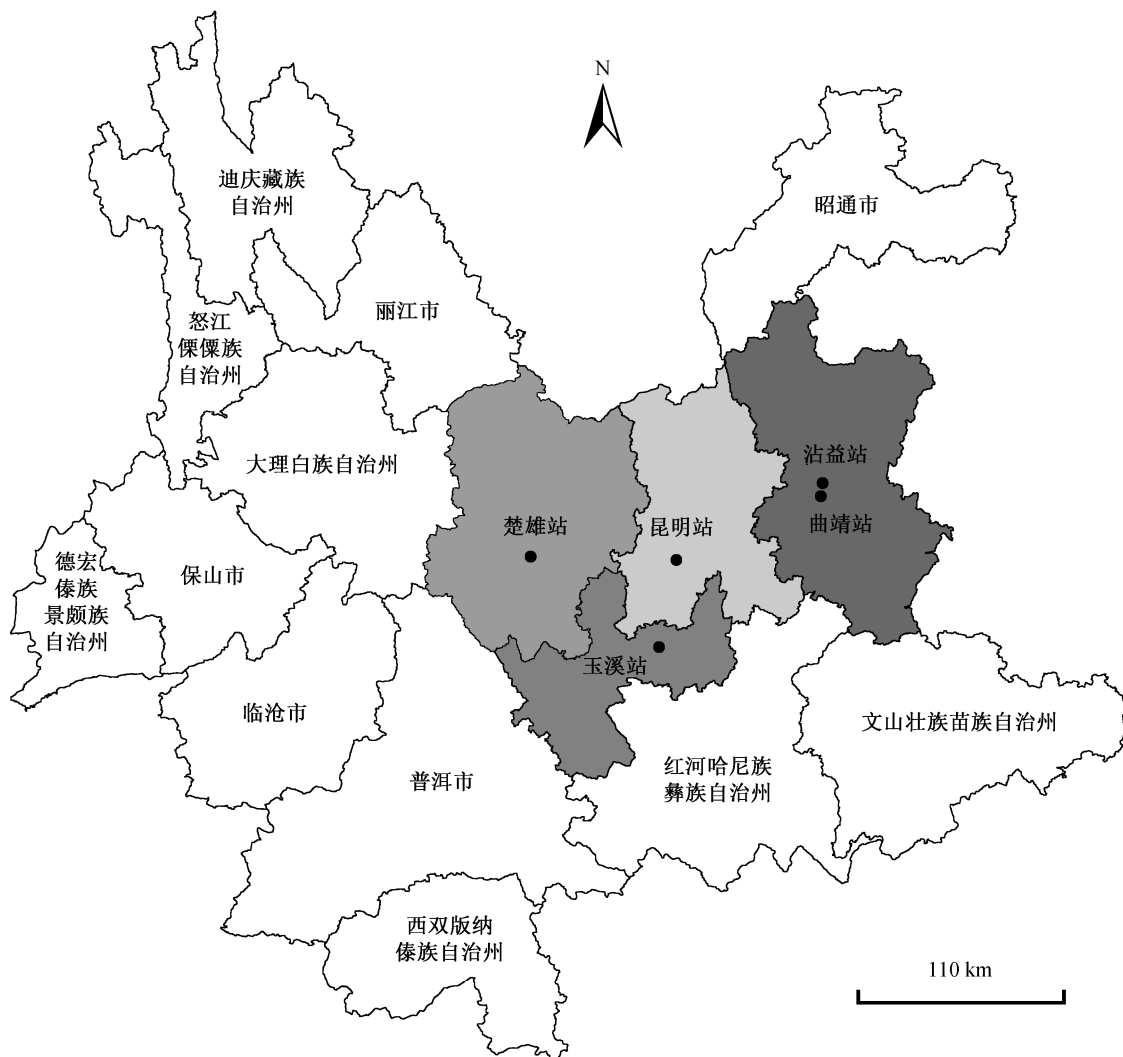


图1 滇中4个城市气象站位置

Fig. 1 Location of four urban meteorological stations in central Yunnan

正表示该时段降水偏多,为负表示降水偏少。其函数表达式^[21]为

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{i=t}^n f(i\Delta t) \Phi\left(\frac{i\Delta t - b}{a}\right), \quad (1)$$

其中, $W_f(a,b)$ 为小波变换系数; a 是频率参数, 表示波动的周期性; b 是时间参数, 表示波动在时间上的平移; Φ 为母小波函数, f 为小波频率, Δt 表示取样间隔。为了判断降水序列变化的主要周期, 采用下式^[21]进行小波方差检验:

$$\text{var}(a) = \sum [W_f(a,b)]^2, \quad (2)$$

其中, $\text{var}(a)$ 表示小波方差。

为了进一步分析降水量的变化, 对近滇中4个主要城市近50年降水量的年变化趋势进行累计距

平分析。首先计算4个城市降水量 x 的平均值 \bar{x} , 然后计算 x 在各个时刻的累计距平值 \hat{x}_t 。计算公式如下:

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}), \quad t = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

采用灰色关联度分析方法, 探讨降水的影响因素。根据文献[12]的研究成果, 结合研究区的实际情况, 以降水量(y)作为参考序列, 以自然因子中的气温(x_1)、相对湿度(x_2)、总云量(x_3)和风速(x_4)以及人文因子中的人口(x_5)、建成区面积(x_6)、绿化覆盖率(x_7)和工业总产值(x_8)作为比较序列, 分析自然因子和人文因子对降水的影响程度。

为了消除各变量间量纲不同的影响, 对降水量及其影响因子用极值法进行无量纲化处理, 然后计

算灰色关联度系数 r_i , 并据此进行排序。计算公式如下:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k), \quad (4)$$

其中, n 为因子数量; $\zeta_i(k)$ 为灰色关联度系数, 取值一般在 0~1 之间。

2 降水量的年际变化和年代际变化

2.1 降水量的年际变化

滇中城市属于亚热带高原季风气候, 近年来由于全球气候变化, 加之受地形的影响, 使得该地区降水有一定波动式的增减变化。图 2 显示, 滇中城市的多年平均降水量为 928.1 mm, 近 50 年的降水量最大值为 1999 年的 1276.9 mm, 最小值为 2011 年的 596.2 mm, 极差为 680.7 mm。滇中城市近 50 年降水整体上呈减少的趋势, 变化幅度不大。1967—1979 年, 降水量相对平稳; 1980—1992 年, 在短期增加后开始减少; 1993—2012 年的 19 年间, 降水出现短期增加后开始明显减少, 尤其是 2009—2012 年出现近 50 年一遇的连续 4 年干旱; 从 2013 年开始, 降水又缓慢地增加。

2.2 年降水量的突变分析

利用累计距平的方法, 对滇中城市近 50 年的降水变化进行突变分析, 结果如图 3 所示。可以看出, 滇中城市近 50 年的降水量呈现增、减交替的变化, 1967—1976 年降水增加, 1977—1982 年降水减少, 1983—1986 年间出现短期的增加, 1987—1992 年间

呈波动式的减少, 1993—2008 年间呈波动式的上升, 2009—2012 年降水急剧减少, 2013 年起开始增多。图 3 显示, 滇中城市近 50 年的降水量发生 3 次突变, 分别为 1977, 1987 和 2009 年, 其中最显著的是 2009 年, 原因在于 2008 年云南降水量较大(1022.7 mm), 从 2009 年开始降水量急速下降(2009 年的降水量为 615.8 mm, 比 2008 年减少 406.9 mm), 并持续干旱 4 年, 到 2013 年旱情才有所缓解。

2.3 年降水量变化周期的小波分析

小波系数等值线可以反映特定尺度下数据序列的波动信息^[22], 因此常用 Morlet 小波实部等值线图来反映气候序列的多时间尺度变化。Morlet 小波是一种单频正弦调制高斯波, 具有很好的时域和频域局部性, 常用于复数信号的分解和时频分析。Morlet 小波的实部是一个对称的小波函数, 可以表示不同时间尺度信号的强弱和位相两方面信息^[23]。反映小波方差随着尺度 a 变化的小波方差图可以呈现序列变化的干扰强度和主周期^[24], 能反映降水量时间序列中各种尺度(周期)的波动及强弱(能量大小)随尺度的变化特征^[25]。

本文采用 Morlet 小波分析方法, 分析滇中城市近 50 年的降水量周期变化, 结果如图 4 所示。可以看出, 滇中城市近 50 年的年降水量周期交替变化十分剧烈, 大尺度变化中嵌套着复杂的小尺度变化。根据式(1)计算得到的小波系数显示, 滇中城市近 50 年的年平均降水量呈现不同时间尺度的周期性震荡(图 4(a)); 根据式(2)计算得到的年降水量小波方

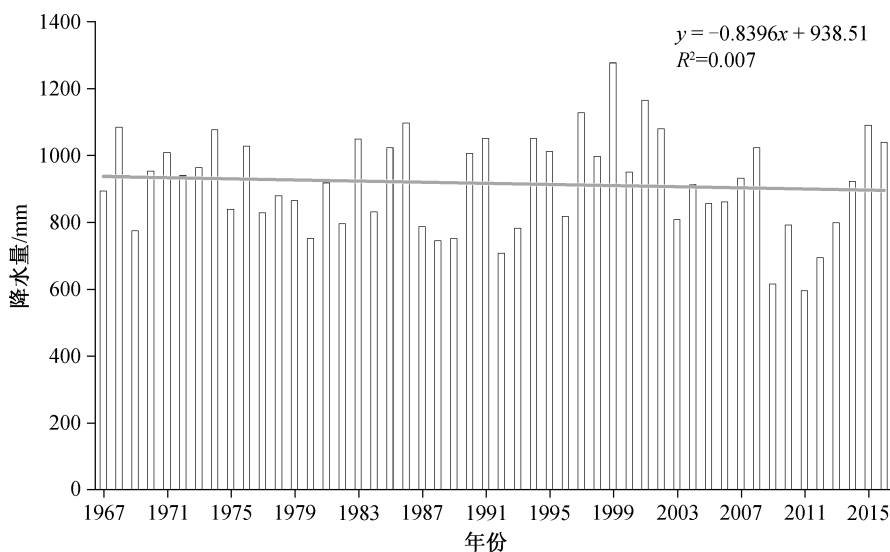


图 2 滇中城市降水年际变化

Fig. 2 Annual change of precipitation in the cities of central Yunnan

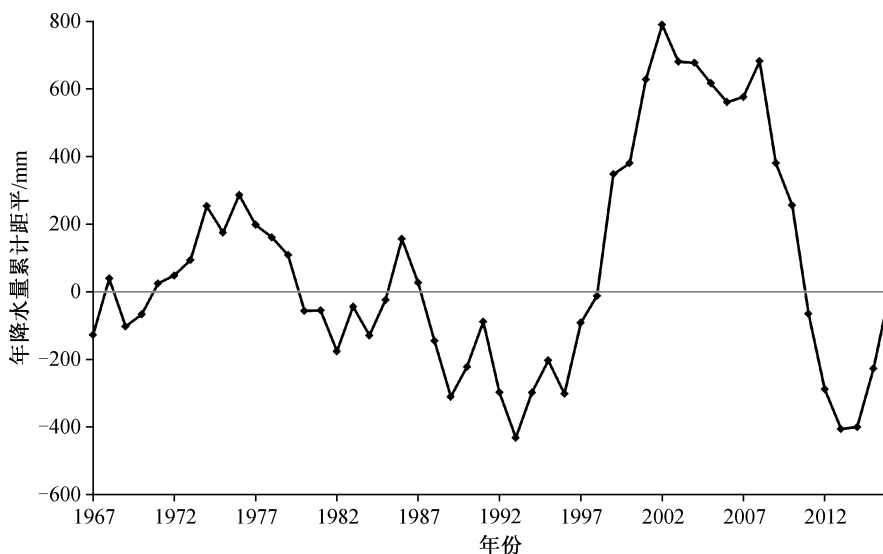
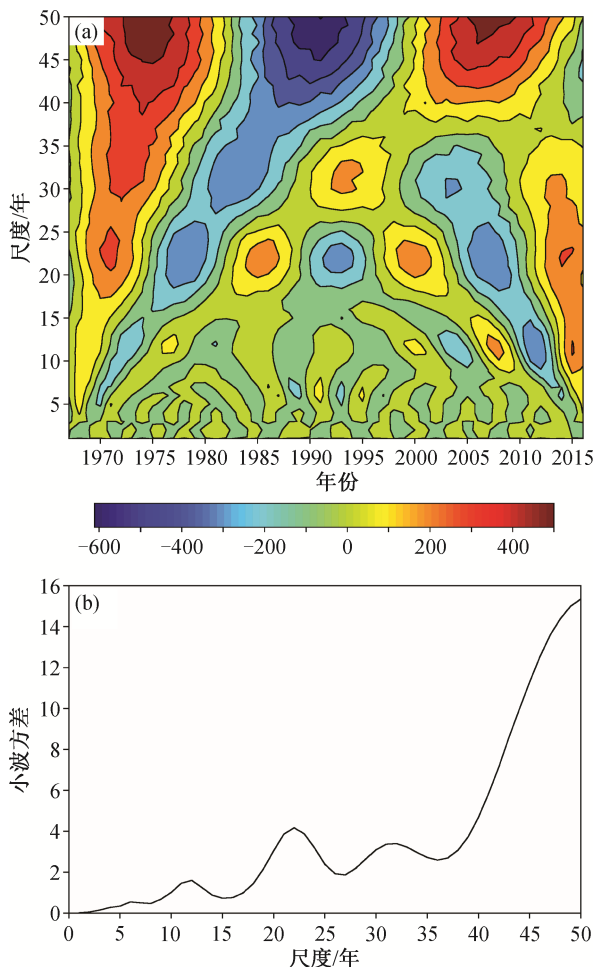


图3 滇中城市近50年降水量突变分析

Fig. 3 Precipitation mutation analysis in the cities of central Yunnan in the last 50 years



(a) 小波系数等值线, 正值代表降水偏多, 负值代表降水偏少, 零值对应突变点, 下同; (b) 小波方差

图4 滇中城市年降水量的的小波分析结果

Fig. 4 Wavelet analysis of the annual precipitation in the cities of central Yunnan

差曲线(图4(b))反映时间序列的主要周期。可以看出, 1967—2016年, 滇中城市的年降水量包含多个不同尺度的时间周期, 3个明显的周期分别对应12, 22和32年的时间尺度。其中, 22年时间尺度的周期震荡最为显著, 为第一主周期, 年降水量经历多→少→多→少→多→少→多的6个循环: 1967—1973年降水量增加; 1974—1982年降水量减少; 1983—1987年降水量增加; 1988—1997年降水量减少; 1998—2004年降水量增加; 2005—2012年降水量减少; 2013—2016年降水量增加, 且2013—2016年的等值线未闭合, 未来几年的降水可能有增多的趋势。

2.4 降水量的年代际变化

以10年为一个年代际, 将1967—2016年分为第一(1967—1976年)、第二(1977—1986年)、第三(1987—1996年)、第四(1997—2006年)和第五(2007—2016年)共5个年代际, 对滇中城市近50年的降水量年代际变化特征进行分析, 结果如图5所示。可以看出, 滇中城市的年代际降水量呈明显减少的趋势。第一、第二和第三年代际的降水逐渐减少; 第四年代际的降水显著增多, 年平均降水量(1003.4 mm)是5个年代际中最多的; 第五年代际的降水量急剧减少, 年平均降水量(850.5 mm)是5个年代际中最少的; 第四与第五两个相邻年代际的年平均降水量极差为152.9 mm。

3 降水量的月变化和季节变化

3.1 降水量的月变化

从图6可以看出, 滇中城市的月降水量变化幅

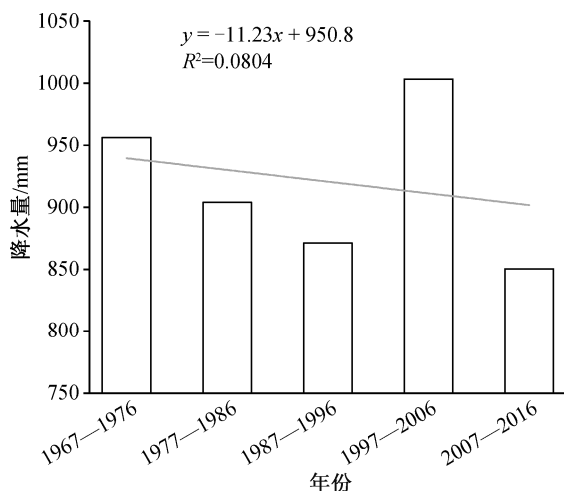


图5 滇中城市降水量的年代际变化

Fig. 5 Interdecadal change of precipitation in the cities of central Yunnan

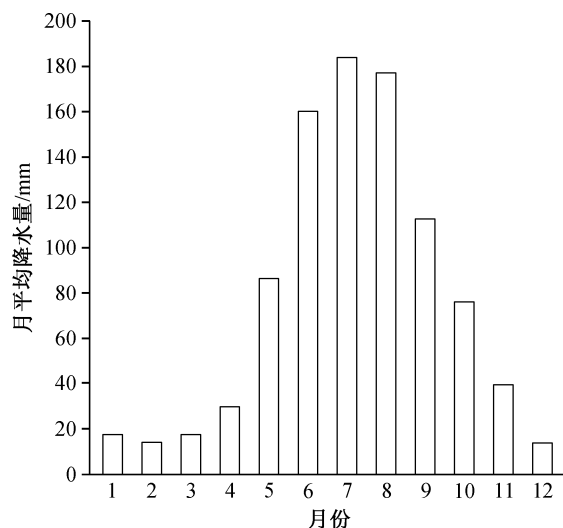


图6 滇中城市近50年降水量的月变化

Fig. 6 Monthly change of precipitation in the cities of central Yunnan in the last 50 years

度较大,降水月份比较集中,有干、湿季之分。雨季(5—10月)降水量占全年的85.8%,7月降水量最大(184.0 mm);干季(11月—次年4月)降水量占全年的14.2%,12月降水量最小(13.8 mm)。

3.2 降水量的季节变化

表1显示,滇中城市春季和冬季降水少,两季降水量之和仅为178.9 mm;夏季和秋季降水多,两季降水量之和为749.2 mm。夏季降水最多(521.2 mm),占比最大(56.1%),冬季降水最少(45.4 mm),占比最小(4.9%)。

3.3 夏季降水特征的小波分析

以7月为代表,对滇中4个城市1967—2016年

表1 滇中城市近50年降水量的季节变化
Table 1 Seasonal changes in precipitation in the cities of central Yunnan in the last 50 years

季节	降水量/mm	占比/%
春季	133.5	14.4
夏季	521.2	56.1
秋季	228.0	24.6
冬季	45.4	4.9
合计	928.1	100.0

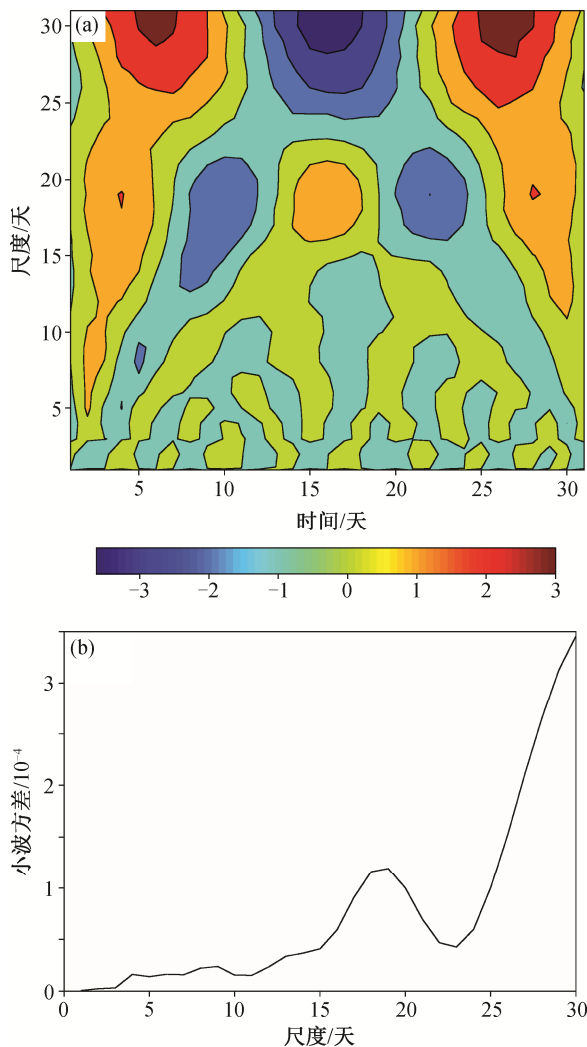
的夏季降水量进行小波分析,结果如图7所示。从图7(b)可以看出,滇中城市夏季7月的降水表现为19天和31天的周期变化,其中31天周期的变化幅度虽大,但不完整,故19天为主要变化周期。图7(a)显示,在变化较明显的19天周期中,滇中4个城市的降水量经历多→少→多→少→多5个阶段的增减交替变化:7月2—5日降水量增加,6—13日降水量相对减少,14—18日降水量增加,19—26日降水量相对减少,27—31日降水量增加。夏季降水量小波系数的数值大,等值线稀疏,表明滇中城市夏季降水较多且变幅小。7月27—31日降水量的小波系数等值线未闭合,预示夏季降水量在2016年以后将比多年平均值大。由于滇中城市夏季降水占全年降水的50%~60%,因此夏季降水的增加势必导致全年降水量增大。

3.4 冬季降水量特征的小波分析

以12月为代表,对滇中4个城市1967—2016年的冬季降水量进行小波分析,结果如图8所示。从图8(b)可以看出,滇中城市冬季12月的降水主要表现为7,10,13和20天的周期变化,其中20天周期的变化幅度最大,为主周期。图8(a)显示,在变化较明显的20天周期中,滇中城市的降水量经历多→少→多→少→多5个阶段的增减交替变化:12月1—6日降水量增加;12月7—13日降水量减少;12月14—20日降水量增加;12月21—26日降水量减少;12月27—31日降水量增加,该阶段等值线未闭合,预测2016年以后降水量会增加。滇中城市冬季降水量小波系数的数值小,等值线密集,表明冬季降水量比夏季少且变化幅度较大。

4 降水的影响因素分析

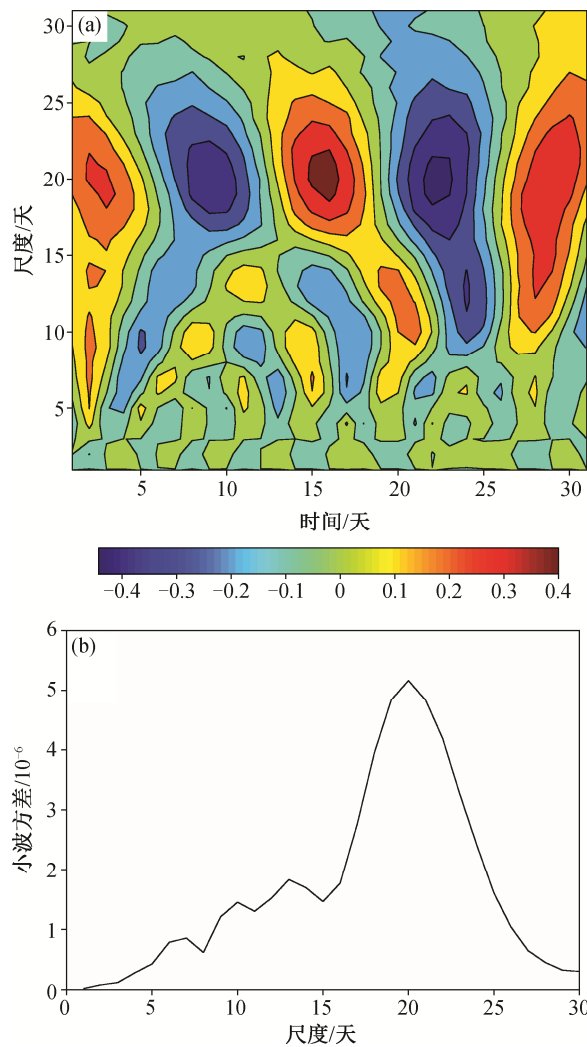
根据文献[7—20]的研究结果,大气环流是影响云南降水的主要因素。本文参考文献[12],采用灰



(a) 小波系数等值线; (b) 小波方差

图7 夏季降水小波变化

Fig. 7 Wavelet transform of precipitation in summer



(a) 小波系数等值线; (b) 小波方差

图8 冬季降水小波变化

Fig. 8 Wavelet transform of precipitation in winter

色关联度分析的方法,对滇中4个代表性城市的气温、相对湿度、总云量、风速、人口、建成区面积、绿化覆盖率和工业总产值等因子与降水量的关系进行灰色关联度分析,确定影响降水的主要因素。其中,气温、相对湿度、总云量和风速代表自然因子,人口、建成区面积、绿化覆盖率和工业总产值代表人文因子。根据式(4)计算得出的灰色关联度系数值如表2所示。

灰色关联度表示因子间的相互影响程度,其值越大,表示该因子对降水的影响越大。从表2可以看出,滇中城市降水影响因子的灰色关联度排序为气温>相对湿度>总云量>风速>人口>建成区面积>绿化覆盖率>工业总产值。显然,自然因子对降水的影响程度大于人文因子。影响滇中城市降水的

表2 相关因子的灰色关联度

Table 2 Grey correlation degree of correlation factor

自然因子	灰色关联度系数	人文因子	灰色关联度系数
气温	0.9999	人口	0.9904
相对湿度	0.9999	建成区面积	0.9774
总云量	0.9998	绿化覆盖率	0.9764
风速	0.9942	工业总产值	0.9730

主要自然因子是气温和相对湿度,人文因子中对降水的影响程度较大是人口和建成区面积。8个因子的灰色关联度值差距不大,均属于高度相关,对降水都有较大的影响。

4.1 自然因子对降水的影响

对滇中城市降水影响最大的自然因子是气温,

其次是相对湿度。在全球气候变暖的背景下,滇中城市的气温也在升高。高气温有利于对流发展,所以大雨和暴雨一般发生在温度较高的夏季。相对湿度对降水的影响更直接,相对湿度越大,空气中水汽含量越多,越容易产生降水。总云量对降水也有影响,总云量越多,产生降水的可能性越大。对降水影响最小的是风速,滇中城市的平均风速为2.1 m/s,属于微风,并且,城市有大面积的高大建筑物阻挡。风速影响着城市上空凝结核的移动和集聚,风速越小,空气中的凝结核越容易堆积,从而越容易成云致雨。

4.2 人文因子对降水的影响

对滇中城市降水影响最大的人文因子是人口。近年来,滇中4个城市的人口不断增加,伴随着人类活动的增多。人类生产生活过程中有大量的热气以及烟雾和粉尘等污染物排放到大气中,使空气中凝结核增多,进而使降水量有所增加。其次,影响滇中城市降水的人文因子是建成区面积。随着城市化进程的加快,滇中4个城市的建成区面积不断扩大,大面积地面为水泥地板和沥青路面,城市下垫面粗糙程度增大,受机械湍流作用的影响较大,产生城市热岛环流,使空气在城市加热上升,容易形成对流雨,所以城市降大雨和暴雨的几率较大。绿化覆盖率对降水也有影响,因为植被可以调节城市小区域的气温和空气湿度。林地比裸地的降水量多,但增量不明显^[14]。与人口、建成区面积和绿化覆盖率相比,工业总产值对降水的影响程度相对小一些。近年来工业总产值不断地增长,生产过程中产生大量的热量、烟雾、粉尘和废弃物等,会增加空气中的凝结核,对降水有一定程度的影响。

综上所述,滇中城市的降水量不是由单一因子决定的,而是自然和人文多个因子共同作用的结果。

5 结论

本文分析昆明、曲靖、玉溪和楚雄4个滇中地区主要城市近50年来的降水特征及成因,得到以下结论。

1) 滇中城市的多年平均降水量为928.1 mm,近50年降水整体上呈减少的趋势,并在2009年发生显著的突变。降水量的年代际变化整体上呈下降的趋势,1997—2006年平均降水量(1003.4 mm)是5个年代际中最多的;2007—2016年降水量(850.5 mm)急剧下降,是5个年代际中最少的。小波分析

发现降水量年变化呈现22年的主周期。

2) 滇中城市降水量最大的月份是7月(184.0 mm),最小的月份是12月(13.8 mm),降水有干、湿季之分,雨季降水量多,干季降水量少。小波分析发现,夏季降水量存在以19天为主周期的增减变化,降水多,变幅小;冬季降水量存在以20天为主要周期的增减变化,降水少,变幅大。

3) 滇中城市的降水主要受大气环流的影响,雨季主要受西南气流、东南季风和西风带上南支槽等天气系统的影响,所以降水多;干季主要受来自低纬度内陆地区偏西气流影响,水汽条件不足,所以降水偏少。

4) 灰色关联度分析发现,自然因子对降水的影响程度大于人文因子,自然因子中对降水影响较大的是气温和相对湿度,人文因子中对降水影响较大的是人口和城市面积。降水量与各因子的灰色关联度非常接近,均呈现高度的相关性,表明滇中城市的降水是多因子共同影响的结果。

参考文献

- [1] Trenberth K E, Dai A, Rasmtssen R M, et al. The changing character of precipitation. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2004, 9(6): 1205–1217
- [2] Comte J C, Join J L, Nicolini E, et al. Modeling the response of fresh groundwater to climate and vegetation changes in coral islands. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22(8): 1905–1920
- [3] Zhang Q, Li J F, Singh V P, et al. Influence of ENSO on precipitation in the East River basin, South China. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 33(5): 66–72
- [4] 王富强, 李玉娟, 吕振豫. 东江流域降水演变特征及其影响因素分析. *人民珠江*, 2016, 37(1): 49–54
- [5] 李海燕. 黑河流域气候变化特征及降水影响因子的初步分析[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2009
- [6] 王贵锁. 基于灰色关联度的哈尔滨市降水量影响因素识别. *水利科技与经济*, 2013, 19(6): 25–27
- [7] 郑亦佳, 刘树华, 何萍, 等. 滇中地区夏季城市热岛效应的数值模拟研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(4): 639–651
- [8] 郑亦佳, 缪育聪, 刘树华, 等. 近51年云南滇中地区地面气象要素变化特征的统计分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1): 8–18

- [9] 郑亦佳, 刘树华, 何萍, 等. 城市化对昆明一次强降雨过程影响的数值模拟研究. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(4): 627-638
- [10] 何萍, 李宏波. 云贵高原中小城市热岛效应分析. 气象科技, 2002, 30(5): 288-291
- [11] 何萍, 李宏波, 束炯, 等. 楚雄市城市气候特征分析. 地理学报, 2003, 58(5): 712-720
- [12] 何萍, 陈辉, 李宏波, 等. 云南高原楚雄市热岛效应因子的灰色分析. 地理科学进展, 2009, 28(1): 25-32
- [13] 李宏波, 何萍. 云南高原城市发展对降雨的影响——以楚雄市为例. 山地学报, 2011, 29(5): 575-580
- [14] 何萍, 李矜霄, 矣永正, 等. 城市化对云南高原楚雄市近年来城市热岛效应影响研究. 干旱区地理, 2016, 39(4): 687-694
- [15] 杨云源, 史正涛, 何萍. 基于多源数据的昆明市主城区建筑区热环境分析. 热带地理, 2013, 33(1): 21-27
- [16] 闫桃, 何萍, 付永梅, 等. 云南省楚雄市的降水特征分析. 广东气象, 2018, 4(2): 4-8
- [17] 刘瑜, 赵尔旭, 黄玮, 等. 云南近46年降水与气温变化趋势的特征分析. 灾害学, 2010, 25(1): 39-44
- [18] 尹晗, 李耀辉. 我国西南干旱研究最新进展综述. 干旱气象, 2013, 31(1): 182-193
- [19] 杨辉, 宋洁, 晏红明, 等. 2009/2010年冬季云南严重干旱的原因分析. 气候与环境研究, 2012, 17(3): 315-326
- [20] 张云瑾, 王梓. ENSO事件对云南夏季降水的影响及其中印度季风环流的作用. 云南大学学报(自然科学版), 2008, 30(增刊1): 324-329
- [21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007
- [22] 王钧, 蒙吉军. 西南喀斯特地区45年来气候变化特征及趋势. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(2): 223-229
- [23] 任艳林. 1965—2011年河北塞罕坝地区降水量变化规律的小波分析. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(6): 918-924
- [24] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(4): 503-509
- [25] 刘笑彤, 蔡运龙. 基于小波分析的径流特性和影响因素多尺度分析——以通天河为例. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 549-556