

西双版纳地区雾的气候学特征及其影响因素

彭海英¹, 史正涛², 童绍玉¹

(1. 云南财经大学国土资源与持续发展研究所, 昆明 650221;

2. 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650500)

摘要: 采用Man-Kendall趋势分析、突变分析及灰色关联分析方法, 分析1961—2016年间西双版纳地区雾、气温、降水等气象观测资料, 以认识西双版纳地区雾的气候学特征及其与气温和降水之间的相互影响和相互作用。结果显示, 西双版纳地区的雾主要发生在旱季期间的清晨, 年雾日数和年雾时长呈显著减少趋势, 与区域降水不显著减少的趋势一致, 与气温显著升高的趋势相反。西双版纳地区年降水量突变时间不显著, 年雾日数和年雾时长的突变时间早于年均温突变时间, 说明雾对西双版纳区域环境变化的响应较气温和降水更敏感, 是指示区域环境变化的重要气象因子之一。西双版纳地区气温、降水和雾事件密切联系并相互影响: 年均温、年降水量对年雾时长的影响低于年雾时长对二者的影响, 年雾日数相对更容易受到气温和降水量变化的影响; 年雾日数、年雾时长对年降水量的影响小于二者对年均温的影响, 气温相对更容易受到雾事件的影响。降水减少和气温升高不利于雾的形成, 可能是西双版纳地区年雾日数和年雾时长减少的原因。

关键词: 气温; 降水; 雾日数; 雾时长; 相互作用和相互影响; 西双版纳

DOI: 10.11821/dlyj020190727

1 引言

以气候变化为代表的全球变化越来越受到科学界、社会公众和各国政府的关注。雾是重要的气象要素, 主要由悬浮于近地表空气中的水滴或冰晶组成, 其形成、发展和消散主要发生在大气气溶胶荷载表面, 与空气中水汽含量高度相关, 在水汽充足且空气冷却达到饱和或过饱和状态时, 空气中的水分凝结而产生雾, 雾形成后的直接作用是降低大气能见度^[1,2]。雾的发展变化在人类早期就已经有所认识, 随着航空、航海和陆路交通的发展, 雾事件发生时导致的能见度恶化易引发交通事故, 造成人民生命财产的重大损失^[3]。此外, 雾事件过程中常伴随着污染物与空气中的水汽相结合的现象, 有毒有害物质被人体吸入后容易在体内滞留并诱发或者加重疾病, 有可能损害人体健康^[4], 因而, 雾天尤其是浓雾天气被认为是灾害性天气之一。另一方面, 对某些生态系统而言, 雾是其重要的水分和养分来源, 在智利、厄瓜多尔、秘鲁以及其他沿海国家和地区, 常采用捕雾网收集雾水作为其生产生活用水^[5]; 雾是热带山地云雾林区区别于其他山地雨林的重要气象要素, 雾虽然不直接带来降水, 但雾为热带山地提供了额外的水分和化学组分输入, 是

收稿日期: 2019-08-26; 修订日期: 2019-11-06

基金项目: 云南省水利厅水利科技项目 (2014003)

作者简介: 彭海英 (1983-), 女, 湖南慈利人, 博士, 讲师, 研究方向为气候变化与生态水文。

E-mail: pengfish539@126.com

通讯作者: 史正涛 (1964-), 男, 甘肃宁县人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为气候变化与水资源安全。

E-mail: shizhengtao@163.com

热带山地云雾林得以存在和发展的基础^[6]；加利福尼亚地区海岸森林中，林冠层及林下植被能有效截留雾中携带的水分，且雾的凝结核中所含的养分以及溶解于雾水中的大气养分还是植物重要的养分资源^[7]；生活在非洲纳米比亚沙漠中的雾姥甲虫，在雾事件过程中，通过调整其身体姿态从雾水中捕获其自身所需水分^[8]。雾与区域生态环境之间关系密切，既受区域环境变化的影响，也能改变和影响区域生态环境。黄玉仁等通过在西双版纳地区景洪和勐养的观测证实，由于高强度人类活动及城市发展导致的城市热岛效应，使得位于城区的景洪观测点相对于热带森林保护区的勐养观测点而言，雾日数减少，雾事件持续时间较短，雾水含量减少^[9]。Ingwersen指出，俄勒冈州布尔朗市福克斯溪实验流域内，花旗松的大量砍伐、木材的运输和伐木后对残留植被的燃烧，可能导致流域内雾滴和流域流量显著下降，在伐木结束五、六年后随着植被的逐渐恢复，雾水逐渐增加^[10]。以上研究说明区域生态环境的变化有可能引起雾等气象因子的变化，从而引起区域气候变化，而气候变化又将通过一定方式反馈于生态环境。因此，有必要加强认识和研究雾的气候学特征，更好地理解雾的自然属性，获取相关知识信息，为雾的利用和预测提供基础支持。

由于雾滴十分微小，导致雾的液态含水量较低^[11]，且雾的时空间变化与热力学、物理学和化学过程的各种复杂交互作用密切相关。这种复杂性导致雾的各相关因子的参数化存在很大的不确定性，其算法的精度十分有限^[5]，因而在不同时间和空间尺度上，尤其是在地形复杂区域，对雾的发展演化过程的认识和理解还不充分，雾的观测和表征主要体现在雾的生发、雾持续时间和能见度等方面。雾的气候学研究中，常见的研究途径是采用气象站的定点、长期观测资料，统计雾事件频率并分析其年际变化趋势。王丽萍研究指出，中国大多数区域雾日数有减少趋势，并认为气温升高导致中国大部分地区大雾减少，且大雾日数与相对湿度有着显著的正相关关系^[12]。LaDochy基于洛杉矶1950—2001年间的气象数据的统计分析，发现洛杉矶的雾尤其是能见度低于500 m的浓雾事件频率显著减少，认为这与快速城市化、城市热岛效应以及城市的空气污染治理有着显著的相关关系^[13]。Hanesiak等采用逻辑回归技术，研究了加拿大北极地区1953—2004年间的气候数据，发现雾的频率在其东部地区减少而在西南部地区升高^[14]。Forthun等基于线性回归分析，发现美国东南部地区雾事件的频率呈降低趋势^[3]。仅仅关注雾日的出现频率容易夸大雾事件的总量，因为雾的生成、发展和消散仅仅出现在一天中的某些时间，因此，当前应加强对雾事件相关要素的研究，满足其认识和服务生产生活的需要。Zhang等研究了中国华北平原雾天能见度的参数化及其与微观物理性质之间的关系，指出在中国华北平原地区的浓雾事件中，同时考虑雾的液态含水量和雾滴数浓度可显著降低能见度计算的相对误差^[15]。基于观测站点的气象特征仅能代表有限的空间范围，随着遥感技术的发展，利用遥感影像观测雾的发展变化特征越来越受到关注。Dennis和Eric基于1980—1999年的AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 影像和2000—2013年MODIS (the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 影像，结合气象站观测数据，发现加利福尼亚中部山谷地区冬季雾事件的频率降低了46%^[16]。

本研究拟通过统计分析西双版纳地区1961—2016年间雾日数及雾持续时长的年际变化特征，研究其与气温和降水之间的相互联系，认识西双版纳地区雾的自然属性，提高对雾的科学理解，分析雾对人类日常生活的直接和间接影响，以便更好地在生产、生活实践活动中利用甚至预测雾事件，为保护和恢复生态环境提供科学基础和理论依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

西双版纳傣族自治州位于 $99^{\circ}56'E\sim 101^{\circ}51'E$ 、 $21^{\circ}08'N\sim 22^{\circ}36'N$ 之间,是东南亚热带雨林分布的最北缘,是中国重要的热带林区,有着十分丰富的生物多样性,属于印缅生物多样性热点地区^[17]。西双版纳地区多年平均温 $21.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,四季温差较小,多年平均降水量 1490 mm ,其中5—10月降水量占年降水量的84%,形成了明显的旱季(11月至次年4月)和雨季(每年5—10月),区内年日照时数总量为 1858.7 h 。西双版纳地区自20世纪50年代开始大规模引种天然橡胶,是中国重要的橡胶种植园区^[18]。

2.2 数据来源

采用西双版纳地区勐海、景洪和勐腊3个气象观测站1961—2016年的降水、气温和雾的观测数据,将各月、季、年中的累积雾日数记为月、季、年雾日数,将各月、季、年中的雾事件的累积持续时间记为月、季、年雾时长。其中春、夏、秋、冬季分别为每年的3—5月、6—8月、9—11月和12至次年2月,雨季和旱季分别为每年的5—10月和11至次年4月。数据来源于国家气象科技数据中心和云南省气象局。

2.3 趋势分析

Mann-Kendall趋势检验是基于时间序列的秩与其时间顺序之间的相关性,用于时间序列中的趋势显著性检验^[19],它是观测量的秩的函数,不受数据实际分布的影响,对外界的敏感性较小。趋势的显著性可通过比较其统计变量的 Z 值来检验:当 $|Z|$ 大于等于1.28、1.64、2.33时,表示分别通过了信度为90% (0.10)、95% (0.05)和99% (0.01)的显著性检验。

2.4 突变检验

采用Mann-Kendall突变检验确定时间序列突变开始时间及突变区域^[20]。分别计算时间序列 X 及其逆序排列的时间序列 X' 的统计序列 UF_k 和 UB_k : $UF_k > 0$ 表明序列呈上升趋势, $UF_k < 0$ 则表明序列呈下降趋势;当它们超过临界直线时(在0.05显著性水平下,临界值 $|U|=1.96$),表明上升或下降趋势显著;若 UF 和 UB 这两条曲线出现交点,且交点在临界直线之间,交点对应的时刻就是突变开始时刻。

2.5 灰色关联分析

相关分析方法是常用的检验自然界中各要素相互联系相互制约的重要分析方法,但无论是没考虑其他变量对分析变量影响的常规相关分析方法,还是消除了其他变量影响之后的偏相关分析方法,均认为两个因素之间的相关程度相等。这与实际情况不完全相符合,如气温对雾的关联程度与雾对气温的关联程度可能并不等同。本研究采用灰色关联分析方法^[21]来度量西双版纳地区年雾日数、年雾时长与年均温、年降水量的相关程度以克服上述缺陷。为消除量纲的影响,在计算之前,先将年雾日数、年雾时长、年均温及年降水量进行均值变换。

3 结果分析

3.1 西双版纳地区雾日数和雾时长变化特征

3.1.1 雾生发时间在日时间尺度上的变化特征 图1是西双版纳地区勐海、景洪和勐腊3个测站1961—2016年间雾事件生发时刻在每小时时间的百分比。由图1可知,西双版纳地区的雾主要出现在2:00—12:00之间;其中景洪和勐腊测站的雾事件出现时间集中在2:

00—11:00之间；勐海测站的雾事件出现时间相对集中在8:00—11:00之间，该时段内雾生发时间占其总生发时间的97.38%，而景洪和勐腊对应时段的比例分别为44.85%和37.18%。

3.1.2 雾日数和雾时长月变化特征 图2是西双版纳地区3个测站1961—2016年间月平均雾日数和雾时长变化特征。由图2a和图2d知，西双版纳地区雾事件主要集中在10—12月以及1—2月期间，该时间段内雾日数和雾时长分别占年雾日数和年雾时长的76.20%和84.36%，其中10月、11月、12月、1月和2月的月雾日数分别占年雾日数的9.62%、14.64%、21.05%、21.44%和9.46%，对应各月的雾时长分别占年雾时长的7.88%、16.11%、25.29%、24.37%和10.71%。西双版纳地区1—2月及10—12月期间月雾日数和雾时长变异系数相对较低，而5—8月期间月雾日数和雾时长变异系数相对较高，各月雾时长变异系数相对大于月雾日数（图1b和图1e）。除勐海站10—11月期间外，西双版纳地区月雾日数在0.05显著性水平上呈显著下降趋势（图2c）；除勐海站4月、8月以及10—11月期间外，西双版纳地区月雾时长在0.05显著性水平上呈显著下降趋势（图2f）。

3.1.3 雾日数和雾时长季节变化特征 图3是西双版纳地区3个测站1961—2016年间春、夏、秋、冬四季的雾日数、雾时长变化特征。由图3a、图3d可知，西双版纳地区的雾事件主要发生在秋、冬季期间，春、夏、秋、冬四季的雾日数分别占全年雾日数的13.53%、5.77%、31.46%和49.23%，雾时长分别占全年雾时长的9.13%、2.18%、27.87%和60.83%。西双版纳地区在春、夏季雾日数和雾时长的变异性较大，秋、冬季的变异性相对较小；景洪站四季雾日数和雾时长变异性最大，其次依次为勐腊和勐海（图3b和图

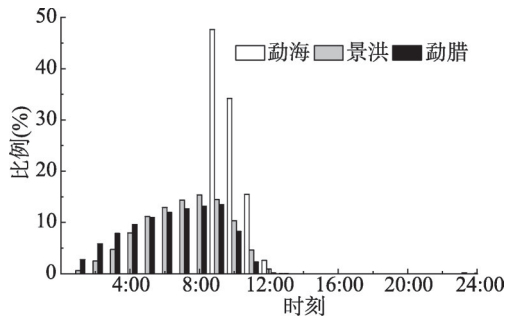


图1 1961—2016年西双版纳地区雾事件生发时刻的逐小时比例

Fig. 1 Hourly percentage of fog in Xishuangbanna from 1961 to 2016

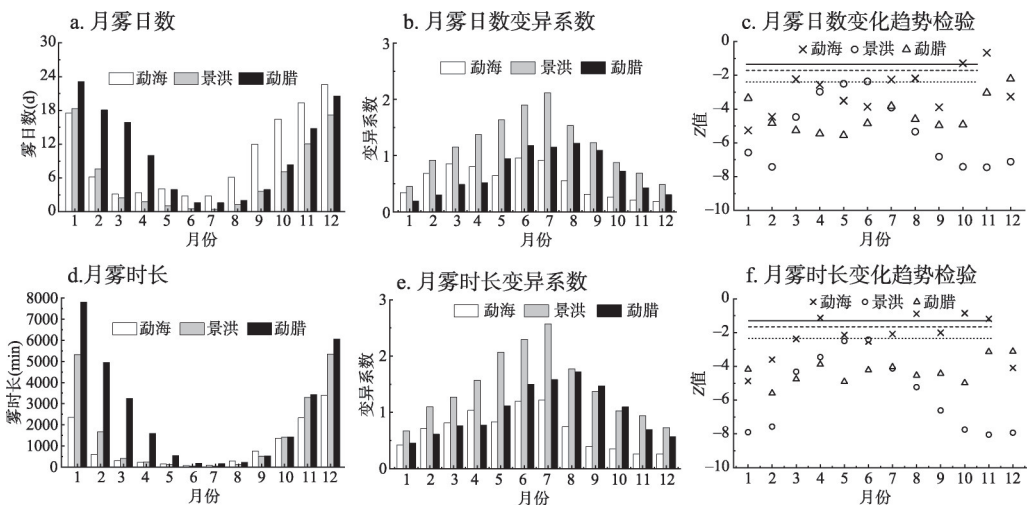


图2 1961—2016年西双版纳地区月雾日数和月雾时长分布特征、变异系数及其变化趋势检验

Fig. 2 Monthly distribution, variable coefficient and trend test of fog days and accumulative duration of fog events from 1961 to 2016 in Xishuangbanna

注：图c、图f中实线、虚线和点线分别是趋势检验Z值的0.10、0.05和0.01显著性水平的临界值。

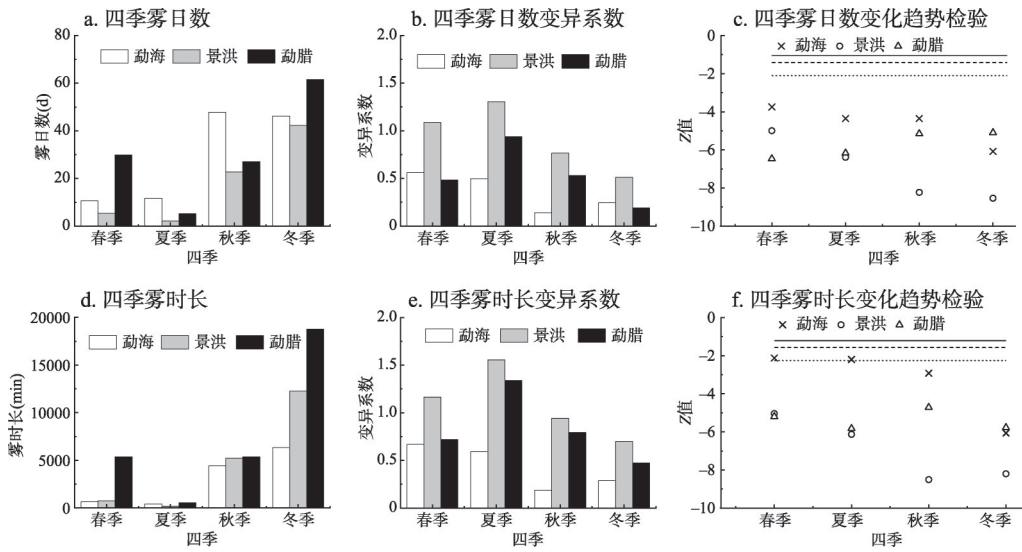


图3 1961—2016年西双版纳地区春、夏、秋、冬四季雾日数和雾时长分布特征、变异系数和变化趋势检验
 Fig. 3 Seasonal distribution, variable coefficient and trend test of fog days and accumulative duration of fog events from 1961 to 2016 for spring, summer, autumn and winter in Xishuangbann

注：图c、图f中实线、虚线和点线分别是趋势检验Z值的0.10、0.05和0.01显著性水平的临界值。

3e)。西双版纳地区春、夏、秋、冬四季雾日数和雾时长在0.05显著性水平上呈显著下降趋势（图3c和图3f）。

图4是西双版纳地区3个测站1961—2016年间旱、雨季雾日数、雾时长变化特征。由图4a、图4d可知，西双版纳地区的雾主要发生在旱季期间，旱、雨季雾日数分别占年雾日数的75.22%和24.78%，旱、雨季雾时长分别占年雾时长的85.08%和14.92%。雨季雾日数和雾时长变异系数相对较大（图4b和图4d），旱、雨季雾日数和雾时长均在0.05显著性水平上呈显著下降趋势（图4c和图4f）。

3.1.4 雾日数和雾时长年变化特征 图5是西双版纳地区3个测站1961—2016年间年雾日数和年雾时长占年日数和年时长百分比。从年雾日数看，勐腊的年雾日数最多，其次为勐海和景洪（图5a）；勐海、景洪、勐腊最多年雾日数分别出现在1978年（167d）、1978年（144 d）和1965年（208 d），最少年雾日数分别出现在2005年（74 d）、2013年（2 d）、2015年（42 d）。从年雾时长看，勐腊的年雾时长最长，其次为景洪和勐海（图5b）；勐海、景洪、勐腊最大年雾时长分别出现在1978年（17054 min）、1962年（46154 min）和1966年（64995 min），最少年雾时长分别出现在2005年（6984 min）、2010年（49min）和2016年（2010 min）。勐海、景洪和勐腊年雾日数变异系数分别为0.20、0.59和0.31，年雾时长变异系数分别为0.21、0.76和0.54，各测站年雾时长的变异系数均大于年雾日数，说明年雾时长的变化强度相对较大。

1961—2016年间，勐海、景洪、勐腊年雾日数变化趋势检验的Z值分别为-6.53、-8.95和-7.07，年雾时长的Z值分别为-5.60、-9.07和-6.42，说明其年雾日数和年雾时长均在0.01显著性水平上呈显著下降趋势。勐海、景洪、勐腊年雾日数占年日数的百分比分别从20世纪60年代的37.87%、34.22%和41.71%下降到21世纪前十年的25.59%、7.09%和26.31%，年雾日数分别减少了32.41%、79.28%和36.91%；年雾时长占年时长的百分比分别从20世纪60年代的2.52%、7.27%和6.77%下降到21世纪前十年的1.69%、0.63%和4.12%，年雾时长分别减少了32.96%、91.26%和39.13%。

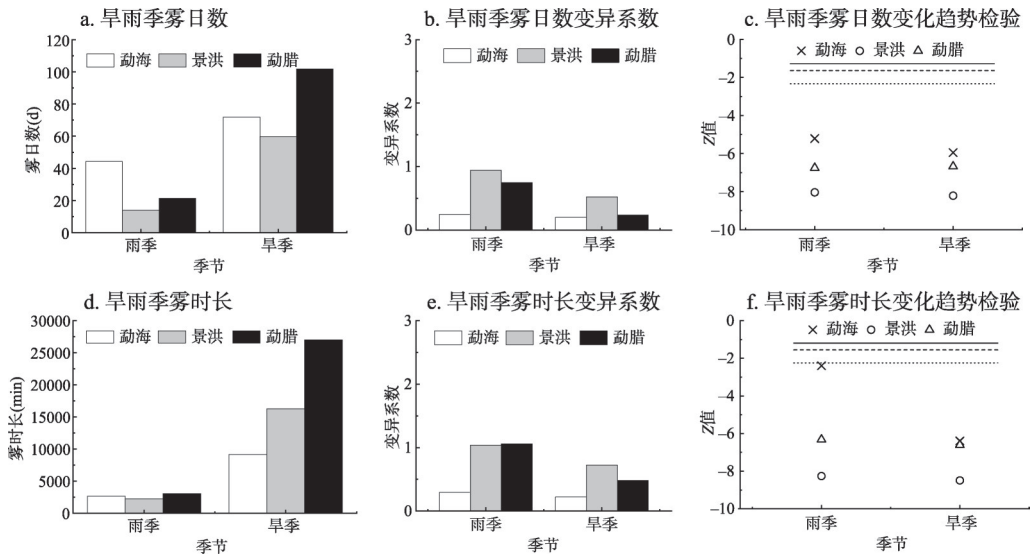


图4 1961—2016年西双版纳地区旱季、雨季雾日数和雾时长分布特征、变异系数和变化趋势检验
 Fig. 4 Seasonal distribution, variable coefficient and trend test of fog days and accumulative duration of fog events for the dry season and wet season in Xishuangbanna in 1961-2016

注：图c、图f中实线、虚线和点线分别是趋势检验Z值的0.10、0.05和0.01显著性水平的临界值。

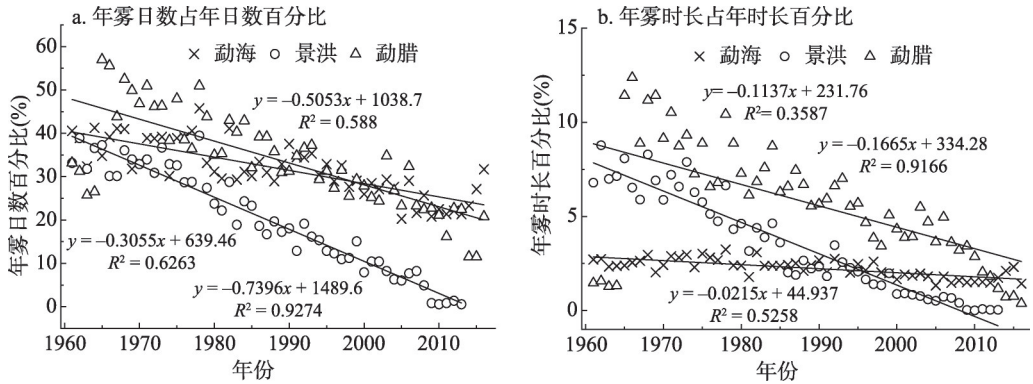


图5 1961—2016年西双版纳地区年雾日数和年雾时长占年日数和年时长百分比
 Fig. 5 Percentage of annual fog days(a) and accumulative duration of fog events(b) in Xishuangbanna

3.1.5 年雾日数和年雾时长突变特征 图6是西双版纳地区1961—2016年间年雾日数时间序列距平及突变检验的UF和UB曲线。勐海站年雾日数的UF和UB曲线在1982年、1985—1986年间、1988—1989年间以及1997—1998年间有4个交点(图6d),其中1982年的交点在0.05显著性水平的阈值之内,结合图6a,可认为勐海测站年雾日数在1982年发生突变。同理,结合图6b和图6e、图6c和图6f,可认为景洪和勐腊测站年雾日数分别于1972年和1967—1968年间发生突变。综上所述,西双版纳地区年雾日数的突变主要发生在20世纪60年代末期至20世纪80年代初期之间,其中勐腊年雾日数发生突变的时间最早,其次依次是景洪和勐海。

图7是西双版纳地区1961—2016年间年雾时长时间序列距平及其突变检验的UF和UB曲线。结合图7a和图7d、图7b和图7e、图7c和图7f,可认为勐海、景洪和勐腊测站年雾时长分别于1974—1975年间、1970—1971年间和1964—1965年间发生突变。综合

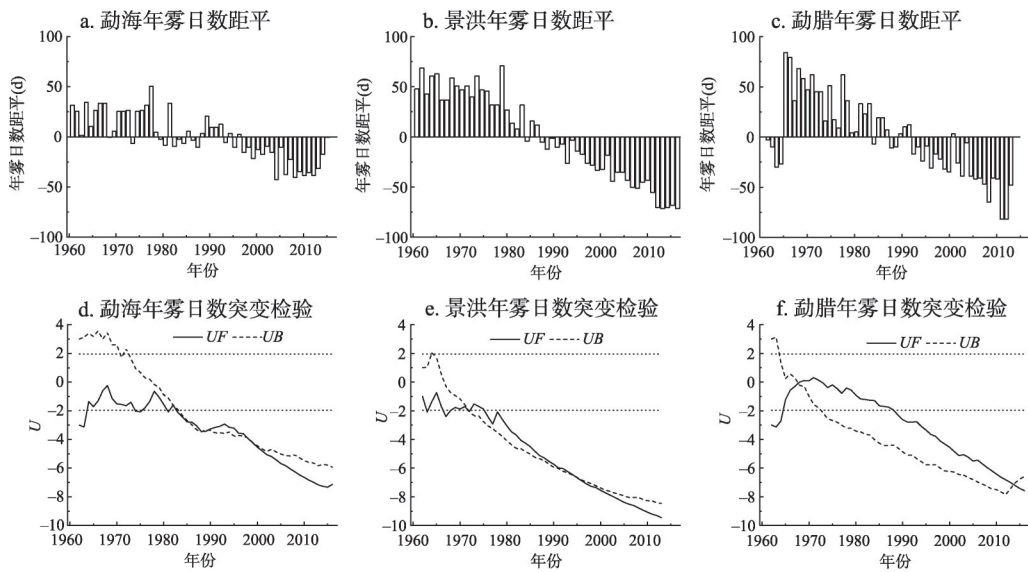


图6 1961—2016年西双版纳地区年雾日数距平变化及其突变检验的 UF 和 UB 曲线

Fig. 6 Anomaly distribution(a, b, c), UF and UB curves of abrupt change test(d, e, f) for annual fog days in Xishuangbanna in 1961-2016

来看，西双版纳地区年雾时长的突变主要发生在20世纪60年代中后期到20世纪70年代早期，勐腊的年雾时长突变时间最早，其次依次是景洪和勐海。结合图6和图7可知，西双版纳地区年雾日数的突变时间略滞后于年雾时长。

3.2 西双版纳地区降水和气温变化特征

表1是西双版纳地区3个测站1961—2016年间年均温和年降水量变化特征。由表1可知，从年均温来看，景洪的年均温最高，其次为勐腊和勐海；勐海的年均温变异系数相

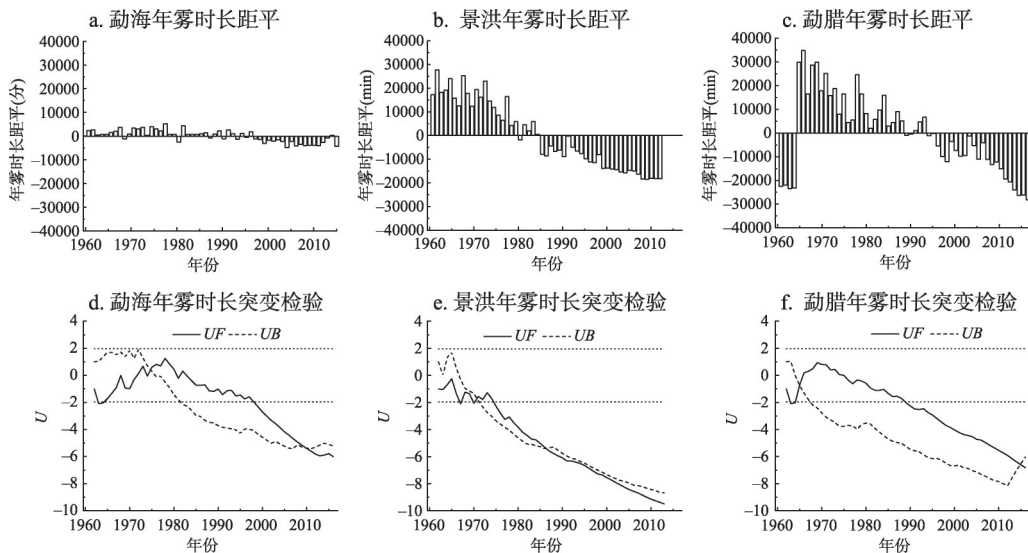


图7 1961—2016年西双版纳地区年雾时长距平变化及其突变检验的 UF 和 UB 曲线

Fig. 7 Anomaly distribution(a, b, c), UF and UB curves of abrupt change test(d, e, f) for accumulative duration of fog events in Xishuangbanna

比较大,其次为景洪和勐腊。1961—2016年期间,勐海、景洪、勐腊3个测站的年均温在0.01显著性水平上呈显著升温趋势,其中勐海、景洪、勐腊年均温最高值分别出现在2010(20.1℃)、2014年(23.5℃)和2010年(22.5℃),勐海、景洪、勐腊年均温最低值分别出现在1971年(17.4℃)、1971年(21.1℃)和1971年(20.3℃)。从年降水量来看,勐腊年降水量最高,其次为勐海和景洪;勐腊的年降水量变异系数最大,其次为景洪和勐海。1961—2016年期间,勐海、景洪、勐腊3个测站的年降水量呈不显著减少趋势,其中勐海、景洪、勐腊3个测站年降水量最高值分别出现在2001年(1733.8mm)、2001年(1667.8mm)和2002年(2273.8mm),年降水量最低值分别出现在2003年(983.8mm)、2014年(848.6mm)和2004年(1080.6mm)。

图8是西双版纳地区年均温时间序列距平及其突变检验的 UF 和 UB 曲线。结合8a和图8d,可认为1961—2016年间,勐海测站的年均温的突变时间不明显;结合图8b和图8e、图8c和图8f,可认为景洪和勐腊测站年均温分别于1987—1988年间和1978—1979年间发生突变。综上所述,西双版纳地区年均温的突变时间主要发生在20世纪70年代末期至20世纪80年代末期之间。

图9是西双版纳地区1961—2016年间年降水量时间序列距平及其突变检验的 UF 和 UB 曲线。结合图9a和图9d、图9c和图9f可知,勐海和勐腊两个测站年降水量的 UF 和

表1 1961—2016年西双版纳地区年均温和年降雨量均值、变异系数和趋势检验

Tab. 1 The mean value, variable coefficient and trend test of annual temperature and precipitation in 1961-2016

	气温			降水		
	年均温(℃)	变异系数	Z值	年降水(mm)	变异系数	Z值
勐海	18.696±0.576	0.031	6.523***	1321.695±168.599	0.130	-0.997
景洪	22.399±0.575	0.025	7.287***	1155.837±185.267	0.148	-1.081
勐腊	21.538±0.540	0.024	7.668***	1518.036±235.879	0.152	-0.304

注:***表示在0.01的显著性水平上趋势显著。

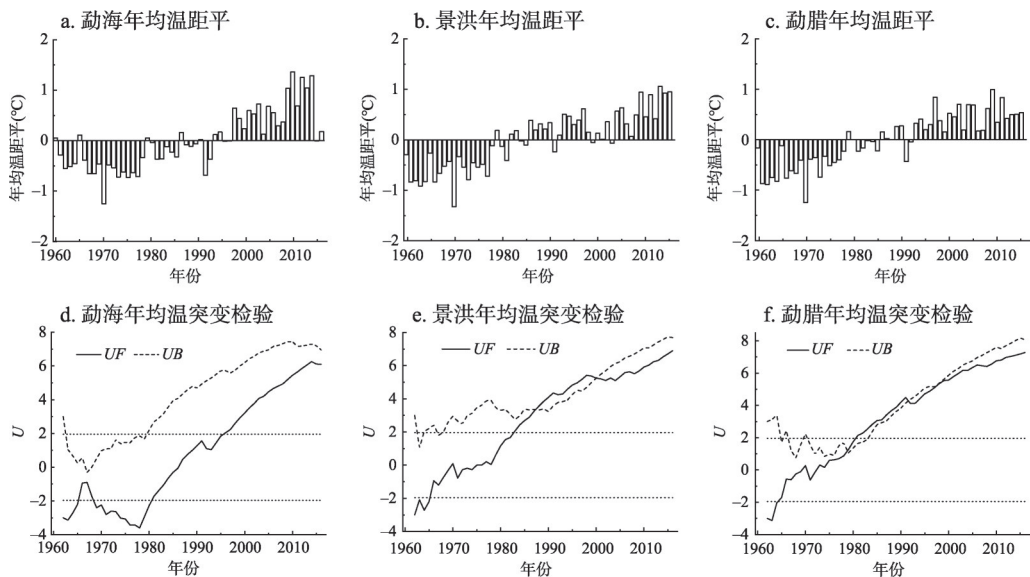


图8 1961—2016年西双版纳地区年均温距平变化及其突变检验的 UF 和 UB 曲线

Fig. 8 Anomaly distribution, UF and UB curves of abrupt change test for annual average temperature in Xishuangbanna in 1961-2016

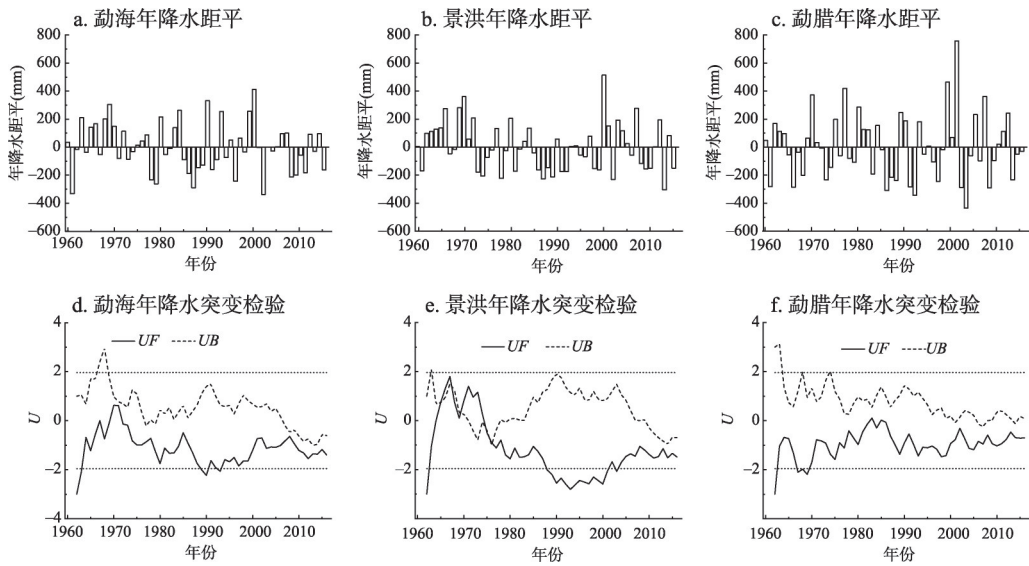


图9 1961—2016年西双版纳地区年降水量距平变化及其突变检验的 UF 和 UB 曲线

Fig. 9 Anomaly distribution UF and UB curves of abrupt change test for annual precipitation in Xishuangbanna in 1961-2016

UB 曲线在 1961—2016 年间无交点, 说明其降水量序列无明显的突变点。结合图 9b 和图 9e, 景洪站年降水量的 UF 和 UB 曲线有 4 个交点且均在 0.05 显著性水平阈值之内, 但景洪测站大部分年份 UF 值位于 0.05 显著性水平的阈值 ± 1.96 范围之内, 结合表 1 所示的年降水量不显著减少趋势, 可认为景洪站年降水量在 1961—2016 年间无明显突变。

综上, 西双版纳地区年雾日数和年雾时长的突变时间早于年均温的突变时间, 年雾日数、年雾时长的最高值和年均温的最低值均出现在 20 世纪 60—70 年代, 年雾日数、年雾时长的最低值和年均温的最高值均出现在 21 世纪尤其是 2010 年以后, 而年降水量的最高值和最低值均出现在 21 世纪尤其 2000—2009 年期间, 说明西双版纳地区的气象因子在 21 世纪以来的变率较大, 也说明雾对西双版纳区域环境变化的响应较气温和降水更敏感, 是指示区域环境变化的重要气象因子之一。

3.3 西双版纳地区雾与气温和降水的关系

由表 2 可知, 西双版纳地区年均温、年降水量与年雾日数的关联度大于二者与年雾时长的关联度, 说明西双版纳地区年降水量、年均温对年雾日数的影响大于其对年雾时长的影响。除勐海测站外, 西双版纳地区年降水量与年雾日数、年雾时长的关联度大于年均温与二者的关联度, 说明西双版纳地区年降水量对年雾日数和年雾时长的影响大于年均温对二者的影响。

由表 3 可知, 除勐腊测站外, 西双版纳地区年雾日数与年均温、年降水量的关联度小于年雾时长与二者的关联度, 说明西双版纳地区年雾日数对年均温、年降水量的影响小于年雾时长对二者的影响; 除景洪测站外, 西双版纳地区年雾日数、年雾时长与年降水量的关联度小于二者与年均温的关联度, 说明西双版纳地区年雾日数、年雾时长对年降水量的影响小于二者对年均温的影响。

结合表 2 和表 3 可知, 勐海、景洪和勐腊测站的年降水量与年雾日数的关联度大于年雾日数与年降水量的关联度, 说明区内年降水量对年雾日数的影响大于年雾日数对年降水量的影响; 除景洪测站外, 西双版纳地区年降水量与年雾时长的关联度小于年雾时长

表2 1961—2016年西双版纳地区年均温、年降水量与年雾日数、年雾时长的灰色关联度

Tab. 2 Gray relation degree among average annual temperature and annual precipitation and annual fog days, annual accumulative duration of fog events in 1961-2016

	勐海		景洪		勐腊	
	年雾日数	年雾时长	年雾日数	年雾时长	年雾日数	年雾时长
年降水	0.589	0.576	0.666	0.597	0.698	0.609
年均温	0.661	0.620	0.627	0.566	0.627	0.566

表3 1961—2016年西双版纳地区年雾日数、年雾时长与年均温、年降水量的灰色关联度

Tab. 3 Gray relation degree among annual fog days, annual accumulative duration of fog events and average annual temperature and annual precipitation in 1961-2016

	勐海		景洪		勐腊	
	年降水	年均温	年降水	年均温	年降水	年均温
年雾日数	0.589	0.613	0.592	0.567	0.613	0.643
年雾时长	0.604	0.636	0.594	0.582	0.611	0.625

与年降水量的关联度，说明区内年降水量对年雾时长的影响小于年雾时长对年降水量的影响。除勐腊测站外，西双版纳地区年均温与年雾日数的关联度大于年雾日数与年均温的关联度，说明区内年均温对年雾日数的影响大于年雾日数对年均温的影响；勐海、景洪和勐腊测站的年均温与年雾时长的关联度小于年雾时长与年均温的关联度，说明区内年均温对年雾时长的影响小于年雾时长对年均温的影响。

4 讨论和结论

4.1 讨论

西双版纳地区的雾在清晨最为普遍，这与美国洛杉矶的雾的生成时间较为一致，这可能是由于西双版纳和洛杉矶地区主要以辐射雾为主^[13,22]，辐射雾形成机制导致辐射雾的出现时间以清晨为主。西双版纳地区的雾主要集中在11月至次年2月期间，秋、冬季雾日最多，这样的季节变化与全国较一致^[23]。从旱季和雨季变化来看，西双版纳地区旱季期间受干暖热带大陆气团控制，以晴朗天气为主^[24]，白天地表接收大量太阳辐射温度升高，夜间地表释放长波辐射温度降低，有利于近地表形成逆温层，从而有利于西双版纳地区旱季期间雾的形成。

降低空气温度使其冷却到露点或增加空气中的水汽致空气饱和，是产生水汽凝结有利于雾形成的两条途径^[25]。曾波等研究发现，中国南方地区相对湿度与降水量呈显著的正相关关系^[26]，说明降水减少伴随着大气相对湿度降低。本研究发现年降水量对年雾日数的影响大于年雾日数对年降水量的影响，说明了降水对雾事件生成和发展的重要性，而西双版纳地区的年降水量呈减少趋势，有可能预示着区域的水分补给和输入减少，从而影响区域雾事件的生成和发展。研究时段内，西双版纳地区气温显著升高，导致近地层空气的露点随之升高、饱和水汽压增大，在水汽输入不能增加大气实际水汽含量的背景下，大气相对湿度下降，大气难以达到或接近饱和，不利于雾的形成。这与丁一汇等提出的在气候变暖背景下，由于温度和饱和比湿增加导致的中国近地面相对湿度减少，对雾和霾形成的环境条件可能产生了明显影响的论断一致^[2]。

雾事件频率及其持续时间变化是中国和全球气候变化的重要表现，雾形成后在一定

程度上减少到达地表的太阳辐射,降低近地表气温。在本研究中的表现是年雾时长对年均温的影响大于年均温对年雾时长的影响,说明了雾事件对环境的重要影响。这也得到了相关研究的证实,如Ritter等在加那利群岛的研究指出,在有雾情况下,环境温度中值为7~15℃,而在无雾情况下,环境温度中值达到9~21℃^[27]。Dennis等指出,加利福尼亚中央谷地地区冬季雾的减少,增加了区内的太阳辐射,提升了日最高气温,通过改变能量平衡导致区内果树芽体的累积寒冷时数减少,对区内果树产生不利影响,建议加强对雾事件的观测力度,谨慎规划果树的管理和更新^[16],以适应气候变化,降低经济损失。

雾虽然对交通不利,但西双版纳地区因雾和逆温形成的山腰暖带有利于热带作物向山地较高海拔扩展,其高海拔多雾区盛产优质茶叶,且雾和当地自然景观的组合还是重要的旅游资源^[28]。雾水是西双版纳地区热带季雨林重要的水分和养分来源,Liu等证实,雾是西双版纳境内植被,尤其是植株幼苗和浅根系林下植物,在旱季期间的重要水分来源,雾水中携带的养分还是区域植被养分的重要来源^[29,30]。一方面雾水及其携带的养分可直接被植物叶片、树干、树枝拦截吸收;另一方面,雾水及其携带的养分滴落在土壤表面,经植物根系吸收为植物所用^[7]。由此可见,雾是西双版纳地区重要的气候资源,是西双版纳地区热带季雨林存在和发展的重要基础,有着重要的生态学意义。西双版纳地区雾事件发生频率和持续时长间降低必将导致雾事件过程累积雾水量的变化,这有可能影响区域天然植被的发展和演化,也有可能影响区域重要经济作物如茶叶等的发展。

4.2 结论

通过对1961—2016年间西双版纳地区雾的气象观测资料分析,得到以下主要结论:

(1) 西双版纳地区的雾主要发生在旱季期间的清晨;年雾日数和年雾时长在0.01显著性水平上呈显著降低趋势,这与全球气候变化背景下区域气温显著升高的趋势相反,与区域降水减少的趋势一致,且年雾时长的变异性大于年雾日数的变异性。

(2) 西双版纳年雾日数的突变时间略滞后于年雾时长的突变时间,年雾日数和年雾时长的突变时间早于年均温的突变时间,而年降水量的突变时间不显著,说明雾对西双版纳区域环境变化的响应较气温和降水更敏感,是指示区域环境变化的重要气象要素。

(3) 西双版纳地区气温、降水和雾事件密切联系并相互影响。其中,年均温、年降水量对年雾日数的影响大于其对年雾时长的影响,年雾日数对年均温、年降水量的影响小于年雾时长对二者的影响,同时年均温对年雾日数的影响大于年雾日数对年均温的影响,年降水量对年雾日数的影响大于年雾日数对年降水量的影响,说明年雾日数相对更容易受到气温和降水的影响。年降水量对年雾时长的影响小于年雾时长对年降水量的影响,年均温对年雾时长的影响小于年雾时长对年均温的影响,说明年雾时长是指示并影响区域气候变化的重要气象因子。年降水量对年雾日数和年雾时长的影响大于年均温对二者的影响,说明在气温显著升高背景下,近地表空气饱和和水汽压增大,在降水减少,区域的水分输入和补给减少的前提下,大气难以达到或接近饱和,不利于雾的形成和维持。雾形成后,在其维持期间可有效降低到达地表的太阳辐射,不利于地表快速升温,可能是年雾日数、年雾时长对年降水量的影响小于二者对年均温的影响的原因,说明雾事件更容易对气温产生影响。

致谢: 真诚感谢匿名审稿专家在论文评审过程中所付出的时间和精力,评审专家建设性的意见和建议,对本文研究思路的梳理和研究结论的凝练有重要意义,使文章获益良多。

参考文献(References)

- [1] 李子华. 中国近40年来雾的研究. 气象学报, 2001, 59(5): 616-624. [Li Zihua. Study of fog in China over the past 40 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 59(5): 616-624.]
- [2] 丁一汇, 柳艳菊. 近50年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 37-48. [Ding Yihui, Liu Yanju. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(1): 37-48.]
- [3] Forthun G M, Johnson M B, Schmitz W G, et al. Trends in fog frequency and duration in the southeast United States. *Physical Geography*, 2006, 27(3): 206-222.
- [4] 周广强, 陈敏, 彭丽. 雾霾科学监测及其健康影响. 科学, 2013, 65(4): 56-59. [Zhou Guangqiang, Chen Min, Peng Li. Scientific monitoring of fog and haze and its effects on health. *Science*, 2013, 65(4): 56-59.]
- [5] Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. Fog Research: A Review of Past Achievements and Future Perspectives. *Pure & Applied Geophysics*, 2007, 164(6-7): 1121-1159.
- [6] Bruijnzeel L A, Veneklaas E J. Climatic conditions and tropical mountain forest productivity: The fog has not lifted yet. *Ecology*, 1998, 79(1): 3-9.
- [7] Dawson T E. Fog in the California redwood forest: Ecosystem inputs and use by plants. *Oecologia*, 1998, 117(4): 476-485.
- [8] Hamilton W J, Seely M K. Fog basking by the Namib Desert beetle, *Onymacris unguicularis*. *Nature*, 1976, 262: 284-285.
- [9] 黄玉仁, 黄玉生, 李子华, 等. 生态环境变化对雾的影响. 气象科学, 2000, 20(2): 129-135. [Huang Yuren, Huang Yusheng, Li Zihua, et al. The influence of ecoenvironmental variation on fog. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2000, 20(2): 129-135.]
- [10] Ingwersen J B. Fog drip, water yield, and timber harvesting in the bull run municipal watershed, Oregon. *Journal of the American Water Resources Association*, 1985, 21(3): 469-473.
- [11] Gultepe I, Pearson G, Milbrandt J A, et al. The fog remote sensing and modeling field project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(3): 341-359.
- [12] 王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 气候变化对中国大雾的影响. 地理学报, 2006, 61(5): 527-536. [Wang Liping, Chen Shaoyong, Dong Anxiang. Impact of climate warming of fog in China. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(5): 527-536.]
- [13] LaDochy S. The disappearance of dense fog in Los Angeles: Another urban impact?. *Physical Geography*, 2005, 26(3): 177-191.
- [14] Hanesiak J M, Wang X L. Adverse-weather trends in the Canadian Arctic. *Journal of Climate*, 2005, 18(16): 3140-3156.
- [15] Zhang J, Xue H, Deng Z, et al. A comparison of the parameterization schemes of fog visibility using the in-situ measurements in the North China Plain. *Atmospheric Environment*, 2014, 92: 44-50.
- [16] Dennis B, Eric W. Winter fog is decreasing in the fruit growing region of the Central Valley of California. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(9): 3251-3256.
- [17] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403: 853-858.
- [18] 邹国民, 杨勇, 曹云清, 等. 西双版纳橡胶种植业现状、问题及发展的探讨. 热带农业科技, 2015, (3): 1-3. [Zou Guomin, Yang Yong, Cao Yunqing, et al. Current state of natural rubber tree and its development proposal in Xishuangbanna. *Tropical Agricultural Science & Technology*, 2015, (3): 1-3.]
- [19] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3-4): 350-363.
- [20] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007: 63-66. [Wei Fengying. *Statistical Diagnosis and Prediction Technology for Contemporary Climate*. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 63-66.]
- [21] 徐建华. 现代地理学中的数学方法: 第3版. 高等教育出版社, 北京, 2017: 288-291. [Xu Jianhua. *Mathematical Methods in Contemporary Geography: Third Edition*. Higher Education Press, Beijing, 2017: 288-291.]
- [22] 黄玉生, 许文荣, 李子华, 等. 西双版纳地区冬季辐射雾的初步研究. 气象学报, 1992(1): 112-117. [Huang Yusheng, Xu Wenrong, Li Zihua, et al. An observation and analysis on the radiation fog in xishuangbanna. *Acta Meteorologica Sinica*, 1992, 50(1): 112-117.]
- [23] 王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 中国雾区的分布及其季节变化. 地理学报, 2005, 60(4): 689-697. [Wang Liping, Chen Shaoyong, Dong Anxiang. The distribution and seasonal variations of fog in China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(4): 689-697.]
- [24] 张克映. 滇南气候的特征及其形成因子的初步分析. 气象学报, 1963, (2): 90-102. [Zhang Keying. Preliminary analysis of climate characteristics and impact factors of southern Yunan. *Acta Meteorologica Sinica*. 1963, (2): 90-102.]
- [25] 刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 我国大雾的气候特征及变化初步解释. 应用气象学报, 2005, 16(2): 220-230. [Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, Li Qingxiang, et al. Preliminary research on the climatic characteristics and change of fog in

- China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(2): 220-230.]
- [26] 曾波, 王钦. 我国南方地区 50 a 冬季降水和相对湿度特征分析. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(4): 828-839. [Zeng Bo, Wang Qin. Analysis of precipitation and relative humidity in winter in south of China in the past 50 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(4): 828-839.]
- [27] Ritter A, Regalado C M, Aschan G. Fog reduces transpiration in tree species of the Canarian relict heath-laurel cloud forest (Garajonay National Park, Spain). *Tree Physiology*, 2009, 29(4): 517-528.
- [28] 刘文杰, 李红梅. 我国西双版纳雾资源及其评价. *自然资源学报*, 1996, 11(3): 263-267. [Liu Wenjie, Li Hongmei. The fog resource in Xishuangbanna of China and its evaluation. *Journal of Natural Resources*, 1996, 11(3): 263-267.]
- [29] Liu W J, Meng F R, Zhang Y P, et al. Water input from fog drip in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, South-West China. *Journal of Tropical Ecology*, 2004, 20(5): 517-524.
- [30] Liu W J, Li P J, Duan W P, et al. Dry-season water utilization by trees growing on thin karst soils in a seasonal tropical rainforest of Xishuangbanna, Southwest China. *Ecohydrology*, 2014, 7(3): 927-935.

Climatological characteristics of fog and its influencing factors in Xishuangbanna

PENG Haiying¹, SHI Zhengtao², TONG Shaoyu¹

(1. Institute of Land Resources and Sustainable Development, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China; 2. College of Tourism and Geographical Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: This paper analyzed climatological characteristics of fog and its interaction with temperature and precipitation by methods of Man-Kendall trend analysis, abrupt change analysis and grey correlation analysis based on meteorological observations of fog, temperature, and precipitation from 1961 to 2016 in Xishuangbanna, southwest China. Results showed that, the fog mainly occurred in the early morning during the dry season in the study area. The frequency of annual fog days and annual cumulative duration of fog events decreased significantly at the significance level of 0.01, which was consistent with the insignificant decrease of precipitation, and opposite with the significant increase of temperature. The abrupt change time for annual fog days and cumulative duration of fog events were earlier than annual average temperature, but it was not obvious for annual precipitation, which suggested that fog was more sensitive to environmental changes than temperature and precipitation, and fog was one of the major indicators of environmental changes. Temperature, precipitation and fog events are closely related to each other in Xishuangbanna, which has less influences for the annual average temperature and annual precipitation on annual cumulative duration of fog than influences of annual cumulative duration of fog on annual average temperature and annual precipitation. The number of annual fog days was much affected by changes of temperature and precipitation. It has less influences for the annual fog days and annual cumulative duration of fog on annual precipitation than their influences on annual average temperature. The temperature was much affected by changes of fog events, and decreasing rainfall and rising temperature were not conducive to the formation of fog, which might result in a decrease of fog days and duration of fog events.

Keywords: temperature; precipitation; fog days; duration of fog events; interaction; Xishuangbanna