

中国“倒春寒”天气的发生及对 树木春季生长影响

王梓¹, 徐军亮¹, 魏红旭²

(1. 河南科技大学 林学院, 河南 洛阳 471003; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘要:近年来,随着气候变化而产生的“倒春寒”天气迹象日趋明显,然而中国尚未完全掌握其对农业生态系统的危害原理,尤其有关树木生长方面的信息反馈十分有限。资料显示:中国对“倒春寒”的关注始于1975年,但主要研究区主要集中于中国西南地区,因此目前尚缺乏全国尺度上的把握;研究内容方面国内侧重“倒春寒”的大气成因及其对农作物冻害的评估,有关树木受害的关注度明显不足,相反国外研究更加注重探讨“倒春寒”对森林生态系统的影响方面并且已经取得了一定的进展;在“倒春寒”对植物的冻害机制方面,中国研究更倾向于“持续低温”和“气温骤降”的影响,而国外则认为是在全球变暖作用下植物物候提前所致。通过国外有关树木的研究结论对中国全境尺度春季温度数据进行分析后,发现近年来“倒春寒”很有可能已经给中国树木的春季生长造成了严重影响,希望引起同行们对此问题的重视。

关键词:“倒春寒”;全球变化;气温波动;低温冻害;春季高温

中图分类号:S 761.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)16-0195-07

当前随着全球城市化的快速推进,以人类活动为主要驱动因子的土地利用方式的转变和城市面积的不断

第一作者简介:王梓(1982-),女,河南新乡人,博士,讲师,现主要从事植物水分生理及植物抗性等工作。E-mail:wang_zi_xx@126.com.

责任作者:魏红旭(1983-),男,吉林人,博士,助理研究员,现主要从事城市森林与苗木生理生态学等工作。E-mail:Weihongxu@iga.ac.cn.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41401063)。

收稿日期:2015-05-18

扩张正在导致气候在全球范围内不断发生着变化^[1]。全球气候变化导致极端天气事件在全球范围内愈加频发,诸如暴雨、干旱、冻害、热浪等极端天气发生的强度也随之不断攀升,已经给全球生态系统造成了严重破坏,但是预计未来这种破坏作用还将继续加强^[2]。在大气CO₂浓度激增的背景之下全球温度变暖的趋势已成不争的事实^[3],因此以发芽和开花为标志的春季物候也随之悄然提前^[4-6],同时春季温度的异常波动逐渐频繁^[7-8],因此一旦春季温度骤降至0℃以下时植物遭受“倒春寒”冻害的几率大大增加^[5,8-10]。近年来,随着“倒

Research on the Effect of Ozone Pollution on Horticultural Crops

ZHANG Lu, JIA Lili, SUI Jiaxin, ZHANG Yue, CHEN Yajun

(College of Horticulture, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030)

Abstract: As one of the major pollutants in the tropospheric air, ozone seriously impaired human health, animals and plants' growth and development. In this paper, the emergence and development of ozone pollution were systematically summarized. Impacts of ozone on leaf visible symptom, growth and physiological parameters, blossom and fruiting, yield and product quality in horticultural crops were summed up. Differences of ozone sensitivity among horticultural crops and the underling mechanisms were investigated. Plant screening criteria for ozone indicator and its application potential were discussed. Methods and approaches for preventing and mitigating ozone damage were generalized. In the end, future prospect was made for responses of horticultural crops to ozone stress.

Keywords: ozone; horticultural crops; review

春寒”灾害天气在全球各地的频发,相关研究报道在世界各地不断涌现,其对全球植物生态系统的危害性受到关注^[5,8-9,11]。

部分资料显示中国大陆境内也存在植物生态群落春季物候逐渐提前的征兆^[12],并且随着春季温度异常波动的发生^[13],中国相继出现报道表明“倒春寒”已经给农作物^[14-15]、树木^[13,16-17]和草本植物^[18-19]的春季生长带来了不同程度的破坏性作用。对此,虽然自古以来中国便有历史记载“倒春寒”天气的发生^[15],但是如今遍查国内研究数据库不难发现,国内对于“倒春寒”灾害天气的研究存在严重的研究区域和对象的偏重性,不仅缺乏在全国尺度上对中国“倒春寒”天气发生的系统梳理和总结,也缺乏对于“倒春寒”灾害天气成因和危害的系统分析,对于国际社会研究“倒春寒”的关注度也有待提高。尤其值得一提的是,树木作为承担陆地植物生态系统碳汇功能的主体之一,“倒春寒”对其碳汇功能的影响甚至具有多年的长期效应^[9],但是国内对于树木方面的研究证据却相对较少,这使得在制定应对“倒春寒”灾害时缺乏关键的科学决策依据。

该研究遍查中国知网(<http://www.cnki.net>)数据库,通过“倒春寒”的关键词搜索,从结果中统计历年所有期刊中相关文章报道,针对研究区和研究对象对中国相关研究情况做综合总结;另一方面,为了解国际上目前对于“倒春寒”影响树木或森林生态系统方面的研究进展,利用 Google scholar 数据库和 Web of Science 中的 SCI 文献数据库遍查“spring + frost/chill/cold/low temperature + warm spell/high temperature/temperature fluctuation + tree/forest”的关键词组合查找相关研究报道,总结国外对于“倒春寒”天气形成危害的定义和其对树木生长的关键影响机制。最后,结合国内外相关研究的总结和对比,定位中国大陆境内曾有多次报道过发生“倒春寒”的区域省份内的典型城市,利用权威的世界气象资料数据库(<http://www.wunderground.com>)^[20]对其进行近 10 年的历史资料统计分析,最终找出中国全境的“倒春寒”发生特征及其对中国森林树木春季生长的潜在影响,最终提出相应的应对策略以供参考。现通过系统总结能够帮助国内同行对“倒春寒”灾害天气的发生有一个更加直观的认识,以期相关部门提供理论依据,唤起人们对于“倒春寒”影响树木生长问题的重视,以防未来中国可能出现的大规模“倒春寒”冻害。

1 中国对“倒春寒”天气灾害的研究现状

通过对中国知网中“倒春寒”主题的期刊检索,共查到 267 条结果。由于这些结果中很大一部分对于该文

的参考意义并不大,因此通过设立如下 3 个限定条件对结果进行进一步的精选:

一是有明确的研究区域,对于研究地点含糊其辞或宽泛而谈的文章不做统计考虑;

二是有确定的研究对象,可以是“倒春寒”天气本身,也可以是受灾的植物对象;

三是通过数据得到明确的结论,但数据的形式既可以是调查结果也可以是历史资料。

通过精选,最终认定 1975—2014 年的 101 篇报道同时符合以上 3 个条件,占检索总量的 38%。进一步对这 101 篇文章做精读后总结的结果如图 1 所示。总体来看,从 1975 年至今的研究报道数量呈递增趋势,近 5 年来的数量增加尤其明显,其中仅 2011 年文献数量就高达 10 篇,可见中国学者对于“倒春寒”的关注度逐渐提高,这很可能是中国近年来春季极端天气愈加频发所致。在历史数量统计的基础上,以 5 年为一个区段对研究对象进行分类,由图 1 可知,多数研究以“倒春寒”的天气形成特征为对象,其数量占各时期文献总数量的 78%。数量其次的研究对象是庄稼农作物,由 1975—1984 年的 7% 上升至 1995 年以后的 16%。包括树木在内的有关木本植物的研究论文的数量相对并不是很多,1975—1984 年有 7%,1995—2004 年仅有 4%,最近 5 年内仅有 12%。可见,国内多数对于“倒春寒”危害植物生长的研究更倾向于对农作物方面,而有关树木生长的研究相对较少。

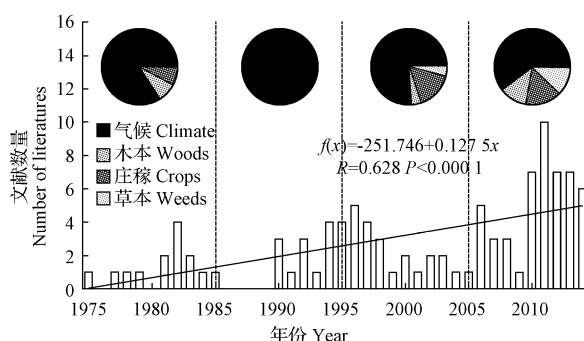


图 1 有关“倒春寒”主题的研究论文在 CNKI 数据库中的年代分布以及各年代区间内研究内容的分类及其比例

Fig. 1 The temporal distribution of article about SFFWS in CNKI and the type and the scale of the study at different times

从国内各省份研究的统计来看,中国西南地区的广西、贵州和云南三省关于“倒春寒”的研究最多,其论文数量分别达 21、20、13 篇,表明中国西南地区对“倒春寒”的关注度较高,很可能与当地“倒春寒”的发生频

次较多、破坏力较大有关;来自中国东南地区的浙江和广东两省的“倒春寒”研究论文数量其次,分别为7篇和6篇;在中原地区河南和陕西两省分别有3篇;在东北地区仅辽宁省出现可查论文,数量为4篇。可见,除西南地区外,中国的东南、中原和东北地区的研究领域也都有不同程度的对“倒春寒”问题的关注,说明“倒春寒”天气灾害对于中国而言是一个大范围事件。

从全国各地选择代表性的研究报告并总结后的结论如表1所示。单从天气特征角度来讲,“倒春寒”灾害多发生于3、4月份^[21-23],但是云南省的“倒春寒”发生似乎较早,从2月份起便有报道记录^[24-25]。而以植物为对象的研究中,对于“倒春寒”灾害的发生似乎更倾向于

定义为春季持续低温引起所致。例如林迢等^[26]和舒素芳^[27]关于浙江省水稻的研究结果表明4月份早期连续3 d出现低温会引发“倒春寒”冻害,而曾维英等^[14]关于贵州省小麦的研究和张加云等^[28]关于烤烟的研究结果表明,“倒春寒”引发冻害的主要特征是持续的春季低温。另外,有关树木的研究观点则似乎更偏重于强调气温骤降的因素^[13,16]。

综上所述,国内有关“倒春寒”的研究大多集中于近5年来的西南三省,研究对象多为“倒春寒”天气特征,有关“倒春寒”对树木春季生长的研究相对较少,并且对其形成危害的原因多认为来自于春季3、4月份的持续低温或气温骤降。

表 1

国内有关“倒春寒”的研究现状

Table 1

Current state of SFFWS research in China

研究年份	第一作者	研究区	研究对象	主要研究结论
1998	吴增福	江苏省	“倒春寒”特征	3、4月份24 h降温8℃左右,或者48 h降温14℃左右,低温持续时间3 d及以上出现“倒春寒”天气
1999	庞文保	陕西省	水稻	初春3月气温回升较快,而在春季后期4月或5月气温较正常年份偏低的天气易发生“倒春寒”,灰色系统GM(1,1)-周期分析模型是一种较好的“倒春寒”统计预报方法
1999	张云瑾	云南省	“倒春寒”特征	2—4月时期低纬高原已经明显回暖时出现的强冷空气过程中出现“倒春寒”
2000	林迢	浙江省	水稻	4月初起连续3 d(含以上)日平均气温≤11℃出现水稻的“倒春寒”冻害,浙江省“倒春寒”出现频率东部高于西部,北部高于南部;“倒春寒”主要发生在4月的前3候
2006	尤红	云南省	“倒春寒”特征	2—4月已明显回暖时出现的强冷空气过程,并以持续低温为主要“倒春寒”特征
2007	王海	山西省	紫花苜蓿	3月下旬到4月上旬气温持续回升,突遭寒流袭击,气温急剧下降到0℃以下出现“倒春寒”灾害
2008	舒素芳	浙江省	水稻	4月前半月平均气温连续3 d低于11℃或连续2 d以上低于10℃时出现“倒春寒”冻害,“倒春寒”具有明显的年际变化特征,是影响小麦产量的重要气象灾害
2009	曾维英	贵州省	小麦	3月下旬至4月由于受强冷空气的影响,出现持续低温天气的过程中出现“倒春寒”
2010	李勇	贵州省	“倒春寒”特征	3月21日至4月30日,凡出现日均温度≤10℃并持续3 d以上的时段为“倒春寒”天气过程
2010	王桂春	辽宁省	“倒春寒”特征	初春3月气温回升较快,而在春季后期4月或5月气温较正常年份偏低的天气为“倒春寒”
2012	于海英	辽宁省	杨树	4月上旬后,24 h内降温幅度达最低3~10℃以上,持续3~5 d后出现“倒春寒”;“倒春寒”发生程度越重,杨树烂皮病中、重度病害发生的面积和比率增加越明显
2012	周瑞莲	山东省	三叶草	3月份气温开始回升,最高气温15℃,之后随3月17日降雪,最低气温降至0℃以下(7℃/—1℃)时出现“倒春寒”
2012	张加云	云南省	烤烟	2—4月天气已经明显回暖时出现的强冷空气过程中出现“倒春寒”,特征是持续低温
2012	ZHENG Y P	河南省	松树	2—3月连续骤降至0℃以下时出现“倒春寒”冻害
2014	赵虹	河南省	小麦	3月中下旬至4月上旬的晚霜冻害导致“倒春寒”冻害

2 国际关于“倒春寒”影响树木春季生长的研究进展

如上文所述,虽然国内学术领域对于“倒春寒”影响树木春季生长的研究相对较少,但是国际对此的研究现状却与国内情况相反,可查报道中有关“倒春寒”影响树木生长的文献数量为181篇,占总数的42%,具体近年来相关度最高的代表性研究成果的总结如表2所示。直观来看,国际上对于“倒春寒”的结论多来自于对2007年^[9,11]和2009年^[8]北美和欧洲地区的2场大规模“倒春寒”冻害的研究,其研究目标主要是受灾比较严重的森林生态系统^[5,9,11,29-31],其中包括树木在内的木本植物是主要的研究对象^[32-35],研究手段除了传统的地面观察以

外还灵活运用遥感影像解译和历史资料大数据分析等现代化科研技术^[9,30],也有研究从模拟控制试验的角度来揭示植物受“倒春寒”冻害的生理生态学机制^[34-35]。综合来看,国际对于“倒春寒”灾害发生特征的定义可归纳为2种类型。其一是3—4月份间温度连续提前回升7 d左右后遭遇连续3~4 d日的降温^[6,8-9,11,33],其二则是北温带5月下旬气温已普遍回暖时发生晚春霜冻^[5,31-32]。可见,国外解析“倒春寒”影响树木生长的着眼点更看重在全球气候变化影响下森林物候逐渐提前这一主因,由此增加树木遭受春季冻害的风险,这点和国内观点略有不同,后者更倾向于单纯的降温霜冻的影响。

表 2 国外关于“倒春寒”影响树木春季物候的主要研究进展

Table 2 Current state of SFFWS research on spring-growth trees at abroad

研究年份	第一作者	研究区	研究对象	主要研究结论
2007	GU L H	美国密苏里州	当地植物群落	3 月末日最低温连续 7 d 超过 15℃,之后在 4 月初时下降至-7℃以下出现“倒春寒”冻害
		美国田纳西州	当地植物群落	3 月中旬日最低温连续 8 d 超过 15℃,之后在 4 月初时下降至-5℃以下时发生“倒春寒”冻害
2007	AUGSPURGER C K	美国伊利诺斯州	20 种森林植物	3 月 9—14 日的日最高温在 15℃以后,之后 3 月 17—19 日气温骤降至 0℃以下时发生“倒春寒”冻害
	AUGSPURGER C K			3 月 19 日至 4 月 3 日的日最高温平均在 20℃以上,之后 4 月 4—10 日气温骤降至 0℃以下发生“倒春寒”冻害
2009	C K	美国伊利诺斯州	20 种森林植物	3 月份 2~6 d 的日均温达到 21.1℃以上,之后 4 月份中最低温下降至-1.7℃以下时发生“倒春寒”冻害
2009	KREYLING J	德国南部和保加利亚之间	欧洲山毛榉	5 月份温度下降至-2~6℃时出现“倒春寒”冻害
2010	HUFKENS K	美国东北部	3 种阔叶硬木	4 月末至 5 月初的升温幅度大于往年的 4℃,在 5 月上旬气温骤降至-2.41℃后出现“倒春寒”冻害
2011	HÄNNINEN H	全球	树木物候	受全球变化影响,树木发芽等物候提前后易遭受“倒春寒”霜冻
2010	PAGTER M	丹麦	八仙花	早春的提前升温导致枝芽提前解除休眠从而增加“倒春寒”冻害的可能性
1960—2010	FITCHETT J M	伊朗	柑橘	日最高温、最低温同时表现出提高的趋势,增加柑橘遭受“倒春寒”冻害的风险
1979—2009	KIM Y	美国	植物群落	研究区内春季霜冻天数正在以每年 1.6 d 的速率下降,但是“倒春寒”发生几率正在以每年 1.5 d 的速率提升
2012	FISICHELLI N	德国	针叶、阔叶苗木	在“倒春寒”的影响下,针叶树成活率和茎长生长的受害程度低于阔叶树
2012	FISICHELLI N	德国	针叶、阔叶苗木	“倒春寒”发生前的提前升温所导致的树木物候提前导致降温时阔叶树死亡率增加,相反导致针叶树死亡率下降
2013	LINKOSALO T	芬兰南部	松树和云杉	通过叶绿素荧光检测间接证明云杉比松树在春季增温阶段具有更强的光合潜力,但同时也对“倒春寒”更加敏感
2004	WANG T	欧洲	植物群落	区域性春季温度波动约剧烈,多种类植物越加同时表现出对“倒春寒”的敏感性,植物的分布位置的影响就越小

3 中国典型城市“倒春寒”历史特征分析

根据上文有关国内外研究“倒春寒”灾害天气的研究进展,选取中国各地具有代表性的区域性省份城市,以 2005—2014 年的气象资料数据以 Box-whisker 盒式散点图的形式对中国 2—4 月份的动态天气特征进行综合分析。由于中国大部分研究集中于西南三省(图 2),因此选取贵阳、大理和南宁 3 个城市分别作为西南地区的贵州省、云南省和广西省的代表城市,并以 3 个城市每年的同期气象温度的平均值作为西南地区的温度波动代表。类似的,根据图 2 的文献综述结果,选取郑州市、杭州市和沈阳市分别作为中原地区河南省、东南地区浙江省和东北地区辽宁省的城市代表,分别进行春季温度分析,以此揭示近 10 年来中国各地“倒春寒”气候对树木春季生长所形成的潜在影响。

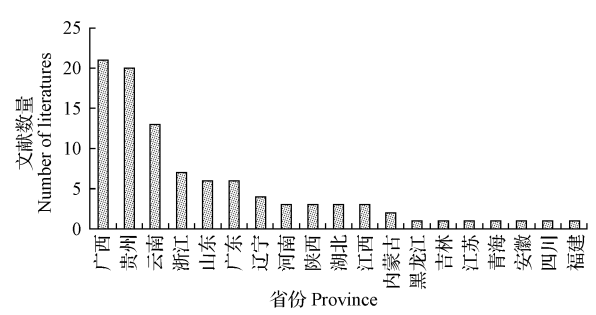


图 2 有关“倒春寒”主题的研究论文在 CNKI 数据库中来自全国各省的文献数量

Fig. 2 The number of articles about SFFWS in CNKI over China

有关西南地区的气象分析结果如图 3 所示。根据国内资料显示(表 1)该地区的“倒春寒”频发季节多集中于

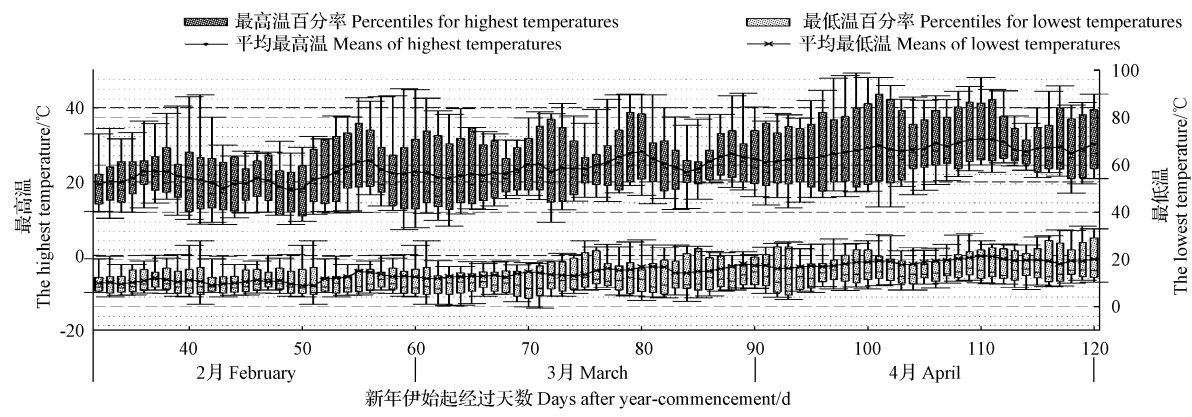


图 3 2005—2014 年中国西南地区的昆明、南京、贵阳三省每年 2 月 1 日至 4 月 30 日的日均气温的 Box-whisker 盒式散点序列及变化趋势

Fig. 3 Box-whisker cassette scatter sequence and variation of mean temperature in the Southwest China of Kunming, Nanjing and Guiyang from 1st February to 30th April over the period between 2005 and 2014

2、3 月份,在此期间虽然 10 年的温度均值稳步攀升,但是在 3 月上旬出现了 2 次明显的 0°C 左右低温:第一次出现在 3 月初,为期 5 d;第二次出现在 3 月 10 日(即元旦后第 70 天左右)左右,为期 3 d。2 次降温前夕,从 2 月末开始出现为期 1 周左右的最高温超过 40°C ,极有可能导致树木物候提前而引发“倒春寒”灾害。因此,根据历史资料判断,中国西南地区过去 10 年中的每年 3 月初,极有可能在树木方面发生“倒春寒”冻害。

有关中原地区的气象分析结果如图 4 所示。从 2 月末开始形成明显的温度异常波动格局,其中从 3 月初开始日最高温连续多次由 20°C 攀升至 30°C 以上,攀升期一般为 5 d,期间最低温虽然持续在 0°C 上下徘徊,但是此后从元旦后第 75 天开始,最低温迅速下降至 -8°C 左

右,形成极其明显的“倒春寒”冻害特征。分析结果和 ZHENG 等^[13]对河南省鸡公山保护区中松树所遭受的“倒春寒”冻害特征温度极高。

有关东南地区的气象分析结果如图 5 所示,自新年起最高温和最低温同时表现出剧烈波动的动态变化格局。日均最高温自 2 月末开始为期 9 d 的剧烈攀升,直到元旦后第 67 天的 3 月上旬达到接近 30°C 的水平,之后最低温出现为期 4 d 的骤降,由 0°C 下降至 -3°C 左右。其后,整个 3 月份中最高、最低温始终呈现周期性波动,直到元旦后第 90 天的 4 月初。因此,判断对于中国东南地区的树木春季生长而言,整个 3 月份都存在极大的“倒春寒”危害的风险。

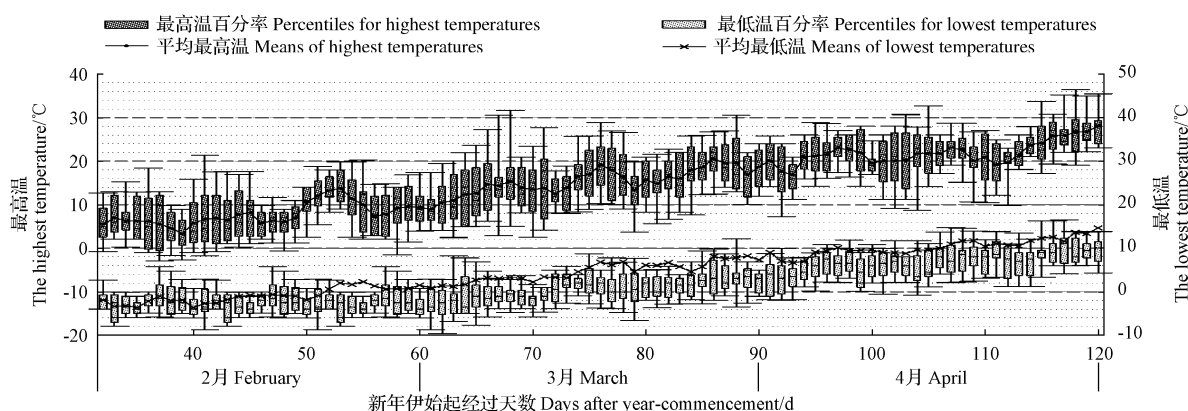


图 4 2005—2014 年中国中原地区郑州市在每年 2 月 1 日至 4 月 30 日的气温年均值的 Box-whisker 盒式散点序列及变化趋势

Fig. 4 The Box-whisker cassette scatter sequence and variation of mean temperature in the Central China of Zhengzhou from 1st February to 30th April over the period between 2005 and 2014

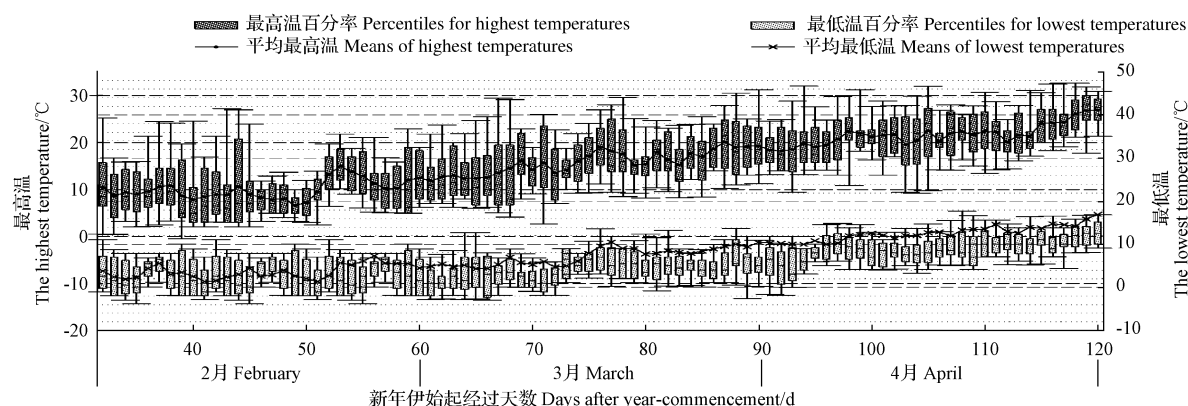


图 5 2005—2014 年中国东南地区杭州市在每年 2 月 1 日至 4 月 30 日期间气温年均值的 Box-whisker 盒式散点序列及变化趋势

Fig. 5 The Box-whisker cassette scatter sequence and variation of mean temperature in the Southeast China of Hangzhou from 1st February to 30th April over the period between 2005 and 2014

有关东北地区的气象分析结果如图 6 所示,整体上较全国其他地区都呈现更加明显的温度攀高的动态格局。从元旦后第 63 天的 3 月上旬开始至 3 月末日最高温持续升高至 20°C ,但是进入 4 月份以后日最低温仍然徘徊在 0°C 左右,表现出极强的对树木春季生长影响的明显“倒春寒”冻害特征。由于中国东北地区整体上地

处北纬 40°C 以上地区,该纬度区间也是目前国外“倒春寒”冻害爆发频率最高的纬度地区(表 2),因此该研究分析的中国东北地区的总结结果和大部分国外研究结论接近,说明最近 10 年中国东北地区“倒春寒”危害树木春季生长的问题比较严重,但是相关研究并没有对此引起足够重视。

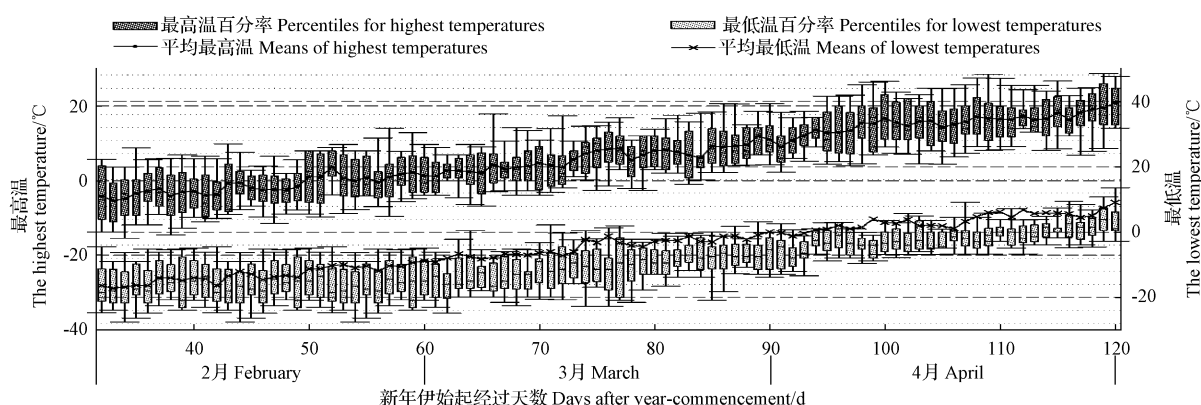


图6 2005—2014年中国东北地区沈阳市在每年2月1日至4月30日的日气温年均值的Box-whisker盒式散点序列及变化趋势

Fig. 6 The Box-whisker cassette scatter sequence and variation of mean temperature in the Northeast China of Shenyang from 1st February to 30th April over the period between 2005 and 2014

4 讨论与结论

从研究内容来看,国内研究更偏重于对“倒春寒”天气特征的分析。但是通过同国外的研究对比后发现,国内的“以天气论天气”的研究思路和结果并不利于指导中国农林业的生产。从植物春季物候角度来看,国内对于“倒春寒”的研究重点针对农作物品种,这虽然与中国是农业大国的基本国情有关,但是中国学者对于树木春季生长的关注度过低,导致对大陆境内森林生态系统抵御“倒春寒”的“防灾减灾”预案方面出现严重的理论储备不足现象,直接影响未来“倒春寒”灾害天气的有效预测和应对措施的制定。因此,通过该文应唤起国内同行更多的有关“倒春寒”对树木春季生长影响的重视。

目前,国内对于“倒春寒”的理解整体上更倾向于“低温冻害”或“气温骤降”的概念;与之不同,国外对其的理解则更偏重于全球变暖驱动下春季物候提前所导致的春季冻害风险。相比较而言,课题组更倾向于国际同行的思路。因为从植物生理学角度来讲,如果没有物候提前的现象存在,植物在春季其实是可以不通过不完全解除休眠来抵抗降温霜冻。通过对全国各地典型城市的历史气象资料分析后不难发现,中国各地的春季温度确实存在提前回暖后降温的明显特征,而且由南向北愈加明显。目前国际上越来越多的研究报道利用遥感手段和历史资料的大数据分析相结合的手段进行大尺度的“倒春寒”特征分析,但中国相关研究还相对少见,因此建议相关地学和遥感领域的同行在未来研究中充分合作,提高中国对“倒春寒”影响森林生态系统的研究水平。

该研究通过对中国相关研究报道的总结和分析,发现国内对于“倒春寒”的研究数量逐年攀高,而研究区域大多集中于西南三省。但是从全国尺度来看,“倒春寒”天气特征的出现非常广泛,特别是中国的中原和东北地区存在极强的“倒春寒”危害风险。因此,建议中国未来

的相关研究更多的关注北方地区,为北方地区的森林生态系统抵御未来“倒春寒”的危害提供有效的基础理论支持。

参考文献

- [1] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use[J]. Science, 2005, 309: 570-574.
- [2] SMITH M D. The ecological role of climate extremes: current understanding and future prospects[J]. Journal of Ecology, 2011, 99: 651-655.
- [3] BLUNDEN J, ARNDT D S, BARINGER M O. State of the climate in 2010[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92: 1-26.
- [4] SPARKS T H, MENZEL A, STENSETH N C. European cooperation in plant phenology[J]. Climate Research, 2009, 39: 175-177.
- [5] HUFKENS K, FRIEDL M A, KEENAN T F, et al. Ecological impacts of a widespread frost event following early spring leaf-out[J]. Global Change Biology, 2012, 18(7): 2365-2377.
- [6] FITCHETT J M, GRAB S W, THOMPSON D I, et al. Increasing frost risk associated with advanced citrus flowering dates in Kerman and Shirza, Iran, 1960—2010[J]. International Journal of Biometeorology, 2014, 58(8): 1811-1815.
- [7] MEEHL G A, KARL T, EASTERLING D R, et al. An introduction to trends in extreme weather and climate events: observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections[J]. Bulletin - American Meteorological Society, 2000, 81: 413-416.
- [8] AUGSPURGER C K. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing[J]. Ecology, 2013, 94(1): 41-50.
- [9] GU L H, HANSON P J, POST W M, et al. The 2007 eastern US spring freeze: Increased cold damage in a warming world[J]. Bio Science, 2008, 58(3): 253-262.
- [10] KAU KORANTA T, AHVONEN R, YLAMAKI A. Climatic potential and risks for apple growing by 2040[J]. Agriculture and Food Sciences, 2010, 19: 144-159.
- [11] AUGSPURGER C K. Spring 2007 warmth and frost: phenology, damage and refoliation in a temperate deciduous forest[J]. Functional Ecology, 2009, 23(6): 1031-1039.
- [12] DAI J H, WANG H J, GE Q S. The decreasing spring frost risks during the flowering period for woody plants in temperate area of eastern China over past 50 years[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(4): 641-652.

- [13] ZHENG Y P, YANG Q P, XU M, et al. Responses of *Pinus massoniana* and *Pinus taeda* to freezing in temperate forests in central China[J]. Scandianavian Journal of Forest Research, 2012, 27(6): 520-531.
- [14] 曾维英, 张艳梅. “倒春寒”天气对六枝小麦产量的影响[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(9): 72-74.
- [15] 胡淳焰, 茅军念, 林巧燕. 山地农业的春季冻害和“倒春寒”防御[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 144-148.
- [16] 于海英, 柴守权, 周玉江, 等. “倒春寒”与杨树烂皮病发病的关系[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(6): 927-930.
- [17] 邱念伟, 周峰, 张士超, 等. 人工模拟“倒春寒”对杨树叶片活力的影响[J]. 林业科学, 2014, 50(7): 17-22.
- [18] 王海, 张垚, 赵祥, 等. “倒春寒”对不同秋眠级紫花苜蓿脯氨酸含量与产量的影响[J]. 草原与草坪, 2007, 125(6): 12-17.
- [19] 周瑞莲, 赵梅, 王进, 等. 冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(14): 4462-4471.
- [20] EISNER B H, SHETH S, HERRICK B, et al. The effects of ambient temperature, humidity and season of year on urine composition in patients with nephrolithiasis[J]. BJU International, 2012, 110(11c): 1014-1017.
- [21] 吴增福, 杨有盛, 朱福顺. “倒春寒”的划分和预报服务探讨[J]. 气象科学, 1998, 18(3): 288-294.
- [22] 李勇, 杨晓光, 代姝玮, 等. 气候变化背景下贵州省“倒春寒”灾害时空演变特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2099-2108.
- [23] 王桂春, 宋若宁, 薄兆海, 等. 大连地区 2008 年“倒春寒”成因分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(23): 12595-12597.
- [24] 张云瑾, 尹红梅. 云南 70~90 年代“倒春寒”的天气气候特征[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1999, 21(5): 370-373.
- [25] 尤红, 曹中和, 郭文华, 等. 昆明静止锋下的云南强“倒春寒”天气分析[J]. 气象, 2006, 32(3): 56-62.
- [26] 林迺, 简根梅, 裘鹏霄, 等. 浙江早稻育秧期低温危害规律及对策[J]. 科技通报, 2000, 16(6): 427-432.
- [27] 舒素芳. 金华市“倒春寒”的特征规律分析[J]. 浙江农业科学, 2008(5): 635-638.
- [28] 张加云, 吉文娟, 刘芳今. 2011 年 3 月云南“倒春寒”过程及其对烤烟影响评估[J]. 云南地理环境研究, 2012, 24(1): 35-29.
- [29] WANG T, OTTLÉ C, PENG S S, et al. The influence of local spring temperature variance on temperature sensitivity of spring phenology[J]. Global Change Biology, 2014, 20(5): 1473-1480.
- [30] KIM Y, KIMBALL J S, DIDAN K, et al. Response of vegetation growth and productivity to spring climate indicators in the conterminous United States derived from satellite remote sensing data fusion[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 194: 132-143.
- [31] HÄNNINEN H, TANINO K. Tree seasonality in a warming climate[J]. Trends in Plant Science, 2011, 16(8): 412-416.
- [32] KREYLING J, NAGY T L, JENTSCH A, et al. Late frost sensitivity of juvenile *Fagus sylvatica* L. differs between southern Germany and Bulgaria and depends on preceding air temperature[J]. European Journal of Forest Research, 2012, 131(3): 717-725.
- [33] PAGTER M, WILLIAMS M. Frost dehardening and rehardening of *Hydrangea macrophylla* stems and buds[J]. Hort Science, 2011, 46(8): 1121-1126.
- [34] FISICHELLI N, VOR T, AMMER C. Broadleaf seedling responses to warmer temperatures ‘chilled’ by late frost that favors conifers[J]. European Journal of Forest Research, 2014, 133(4): 587-596.
- [35] LINKOSALO T, HEIKKINEN J, PULKKINEN P, et al. Fluorescence measurements show stronger cold inhibition of photosynthetic light reactions in Scots pine compared to Norway spruce as well as during spring compared to autumn[J]. Frontiers in Plant Science, 2014(5): 1-8.

Spring Frost Following Warm Spell and Its Effect on the Growth of the Trees in Spring

WANG Zi¹, XU Junliang¹, WEI Hongxu²

(1. College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003; 2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130102)

Abstract: The weather events of ‘spring frost following warm spell’ (SFWS), driven by climate change, has been more and more frequent up to date. However, the mechanism for effects of SFWS on forestry system has not been well detected, especially about information of tree-growth response. Materials in China revealed that the attention to SFWS was commenced at 1975, and most studies were found from southwest provinces, resulting in insufficient evidence at the national scale. For research objectives, results from Chinese studies were mainly obtained about the atmospheric cause and frost damage to crops, whilst frost damage to trees apparently obtained deserved attention. In contrast, international studies focused mainly on effects of SFWS on forest system. For the mechanism of frost-damage to plants exposed to SFWS, it was considered to be caused by continuous low temperature and sudden decline of temperature in spring according to Chinese studies, while it was concluded to be caused by phenology advance driven by global warming according to international points. Therefore, through analysis on conclusions from international studies on trees and temperature data of China at the national scale, it was shown that SFWS may have probably caused damages to trees in Chinese forests. It was hoped that results in the present study could summon more attention about SFWS effect on trees in China.

Keywords: ‘spring frost following warm spell’; global change; temperature fluctuation; low-temperature frost; spring warm temperature