

文章编号: 1008-2786-(2017)3-308-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000226

藏东南色季拉山林线过渡带生长季 低温事件的海拔分布特征

王媛韬^{1,2} 张林^{1*} 沈维¹ 刘新圣³ 罗天祥¹

(1. 中国科学院青藏高原研究所 中国科学院高寒生态与生物多样性重点实验室 北京 100101; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 九江学院 旅游与国土资源学院 江西 九江 332005)

摘 要: 低温事件的加剧可能是限制高山林线向更高海拔爬升的一个关键原因,然而有关高海拔地区不同海拔、不同植被覆盖下的低温事件分布特征的研究十分缺乏。通过对西藏东南部色季拉山急尖长苞冷杉林线过渡带同一坡面不同海拔森林和灌丛冠层温度和土壤温度的监测,并基于冠层温度和土壤温度计算植物的生长季长度,分析生长季期间低温事件在不同海拔、不同植被的分异特征,得到如下结果: 1. 土壤温度定义的生长季比冠层温度定义的生长季滞后近一个月,且对于亚高山森林和林线,冠层温度定义的生长季长度明显大于土壤温度定义的生长季长度。2. 无论以哪种方法定义生长季,期间出现的低温事件均表现为高山杜鹃灌丛>亚高山针叶林和林线,前者低温事件出现频率达后者的2~4倍,且总体而言高山杜鹃灌丛中低温事件的强度更大,持续时间相对更长。研究结果表明高山杜鹃灌丛存在更多的低温事件,而且随海拔增加,其频率、强度和持续时间不断加剧,这可能直接限制了乔木树种幼苗在林线之上低矮灌丛中的存活和生长,进而限制了林线乔木树种向更高海拔的分布。

关键词: 急尖长苞冷杉; 日最低气温; 频率; 气候变化; 生长季长度; 幼苗

中图分类号: Q948.1

文献标志码: A

青藏高原平均海拔超过4 000 m,是一个巨大的低温生态系统。与平原相比,高原空气更稀薄、太阳辐射更强烈,因此具有昼夜温差较大、夜间低温事件较多等特点。这样的气候特征,尤其是不可预测的低温事件发生频率,对高海拔地区植物的生长、繁殖和分布都具有重要影响^[1]。尽管高山植物经过长期的进化与适应,能通过调节自身物候、利用外界条件(如积雪覆盖)来适应寒冷季节的极端低温环境,但在植物生长季的早期和晚期,低温事件会对处于生长期的植物组织(尤其是新生组织)产生不同程

度的危害,而其危害强弱取决于低温事件的频率、强度和持续时间^[2-4]。此外,在生长季早期和晚期,低温事件的出现,将导致无积雪覆盖的表层土壤出现随昼夜节律变化的冻结和解冻现象,由此导致的冻拔(冻举)能将表层土壤抬高数厘米,直接影响着幼苗乃至幼树的生长和存活^[5]。然而,目前有关高海拔地区不同类型植被覆盖下的低温特征及差异的研究并不多见^[6],这限制了我们对高海拔木本植物幼苗和幼树生存微环境条件的全面认识。

基于全球46个林线观测点的数据,Körner和

收稿日期(Received date): 2015-11-25; 修回日期(Accepted date): 2017-07-14。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41471039); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050303); 中国科学院科技基础性工作专项(2015FY11030001); 中科院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-08-02)。[National Natural Science Foundation of China (41471039) of CAS; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA05050303); Basic Work of Science and Technology (2015FY11030001); the Action Plan for West Development of the CAS (KZCX2-XB3-08-02).]

作者简介(Biography): 王媛韬(1991-),女(蒙古族),内蒙古人,硕士研究生,主要从事生态与植被遥感方面的研究。[Wang Yuantao(1991-),female(Mongol),Inner Mongolia,M.Sc.candidate,major in ecology and remote sensing of vegetation.] E-mail: wyuan1166@sina.com

* 通讯作者(Corresponding author): 张林(1979-),男,云南人,副研究员,主要从事植物生态学与气候变化方面的研究。[Zhang Lin(1979-),male,Yunnan province,associate professor,research on phytocology and climate change.] E-mail: zhanglin@itpcas.ac.cn

Paulsen^[7]发现高山林线普遍存在一个相似的生长季土壤低温特征,即地下10 cm土壤平均温度为 $6.7 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$,表明土壤低温是制约森林向更高海拔分布的主要因子。然而,有研究发现,在海拔差异不大($<200\text{ m}$)的情况下,低矮植被(如灌丛、草地)的生长季平均土壤温度反而比高大、郁闭植被(如森林)更高或相当^[8-10]。在现实世界中,却很难见到林线乔木成树分布在林线之上、土壤温度较高的高山灌丛中,甚至连乔木幼苗也很少见^[11],表明影响林线乔木物种分布的机制非常复杂。与土壤温度相比,随海拔增加急剧降低的气温尤其是极端低温对乔木物种的分布也具有重要影响作用。

在藏东南地区,由急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)和方枝柏(*Juniperus saltuaria*)构成的色季拉山高山林线是全球海拔最高的林线之一^[12-13],充足的降水以及高海拔的低温环境导致该地区具有典型的冷湿气候特征。前期研究发现,过去200年来,尽管气温持续变暖,急尖长苞冷杉林线位置并没有显著上升^[14],表明存在着其他影响林线位置的机制。进一步对该区林线微气象观测数据和幼苗移植实验数据分析发现,气候变暖使得生长季提前,进而导致生长季早期低温事件显著增加,最终促使基于种子繁殖的冷杉幼苗死亡率显著增加^[15]。由于幼苗死亡率是决定林线位置和动态的重要机制之一^[16],上述的微气象观测与幼苗移植实验研究为解释过去200年来藏东南高山林线位置变化不明显这一事实提供了新的思路。然而,其中的微气象观测研究主要是基于不同坡向(阴坡和阳坡)、不同植被类型(森林、灌丛、草地)观测点的多年数据进行分析^[15],我们并不清楚,同一坡面不同植被类型之间低温事件的海拔分布格局,是否林线之上的低矮灌丛更容易出现低温事件,从而限制林线树种幼苗的分布和生长。因此,通过同步监测色季拉山急尖长苞冷杉林线过渡带不同海拔冷杉林内和高山杜鹃灌丛的温度,探索生长季期间低温事件随海拔的空间分布规律,将进一步理解气候变暖背景下林线树种幼苗为何难以在林线以上的高山灌丛中定居和生存提供科学数据。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区概况

色季拉山位于藏东南雅鲁藏布江大拐弯西北

侧,属念青唐古拉山向南延伸的余脉,地处西藏东南部林芝县境内。2005年8月,中国科学院藏东南高山环境研究站在色季拉山西坡设立了树线观测点,即本研究区域所在地,具体位于318国道林芝地区八一公路段113道班附近的色季拉山口林线地带(29.60°N , 94.60°E),海拔超过4 100 m(图1)。根据2005—2012年的气象观测结果,阴坡林外(海拔4 390 m)年平均气温 0.7°C ,1月和7月平均气温分别为 -8.4°C 和 8.9°C ,年降水量926.6 mm,主要集中在5—9月。在公路的北侧(阴坡)分布着以急尖长苞冷杉为主的原始林,而南侧(阳坡)则是以方枝柏为主的原始林,形成两树种林分的相对分布景观。在冷杉林线过渡带,常绿灌木薄毛海绵杜鹃(*Rhododendron aganniphum* var. *schizopeplum*)作为优势种广泛分布于冷杉林内外,在林内形成2~3 m高的杜鹃矮曲林,成为亚高山森林的亚冠层;在林线之上,该物种作为优势种密集分布,形成典型的高山常绿灌丛,植被高度在0.5~2 m,并呈现随海拔增加而显著降低的趋势。常见的伴生灌木为黄毛海绵杜鹃(*Rhododendron aganniphum* var. *flavorufum*),一些落叶灌木如山生柳(*Salix oritrepha*)、西南花楸(*Sorbus rehderiana*)、冰川茶藨子(*Ribes glaciale*)和高山绣线菊(*Spiraea alpina*)等通常分布在林缘、林窗等地。林下物种主要包括:岩白菜(*Bergenia purpurascens*)、扫帚岩须(*Cassiope fastigiata*)、木根香青(*Anaphalis xylophiza*)、毛小叶垫柳(*Salix pilosomicrophyua*)、委陵菜(*Potentilla* spp.)和长鞭红景天(*Rhodiola fastigiata*)等。研究区土壤为深褐色高山森林土,土壤深厚,有机质含量较高。

1.2 观测点设置

为排除不同坡向的影响,我们选择在同一坡面(阴坡)沿海拔梯度设置气温观测点。鉴于林线以上为高山灌丛地带,而以下地带为亚高山针叶林,二者植被差异很大,我们在林内不同海拔(N1, 4 210 m; N2, 4 320 m)以及林外不同海拔(N3, 4 500 m; N4, 4 600 m)分别设置观测点。其中,N2点气温数据来自早期建立的自动气象站观测数据,其它3个点则使用Tidbit温度记录仪(v2, Onset, USA),自2011年8月开始观测,自动记录的时间间隔均为1 h。各观测点的植被信息以及温度传感器设置情况详见表1。Vitasse^[17]研究表明,温带森林内地上0.5 m和2 m气温差异不明显,因此我们假定亚高山针叶林内温度在冠层垂直方向无明显差异。分别

比较 N3 和 N4 点日最低温在冠层内部不同高度的差异,发现对于灌丛植被而言,日最低温在冠层垂直方向上不存在明显差异(图 2, $P < 0.05$)。此外,利用 H21 型 HOBO 土壤温湿度监测系统(Onset Inc., USA)同步监测 4 个观测点地下 20 cm 的土壤温度状况,进一步从土壤温度的角度来确定植物生长季长度。其中,N4 观测点的土壤温湿度仪器出现故障,导致 2012 年 4 月以后的土壤温度数据缺失。

1.3 生长季长度估算与低温事件统计

研究基于 4 个海拔 2012 年的观测数据进行分析。由于缺乏不同海拔的植物物候观测数据,而植物地上部分与根系的物候生长存在明显差异^[18],我们分别以如下两种方式定义植物生长季长度:1. 以

5℃的冠层温度来界定生长季的起始日和终止日,即定义冠层温度日均值连续 5 d $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 为生长季开始,以 5 d 中第一天超过 5℃为生长季开始日,连续 5 d 冠层温度日均值 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 为生长季结束,以最后一天超过 5℃为生长季结束日^[19-20];2. 以 3.2℃的土壤温度来界定生长季的起始日和终止日,即定义地下 5 cm 土壤温度日均值连续 5 d $\geq 3.2^{\circ}\text{C}$ 为生长季开始,以 5 d 中第一天超过 3.2℃为生长季开始日,连续 5 d 土壤温度日均值 $\leq 3.2^{\circ}\text{C}$ 为生长季结束,以最后一天超过 3.2℃为生长季结束日^[7,15]。分别按上述两种方法分析生长季期间日最低温度的分布特征。根据每天 24 h 的记录数值计算最低温度值,据此统计生长季期间的低温事件,即日最低气温 $< 0^{\circ}\text{C}$

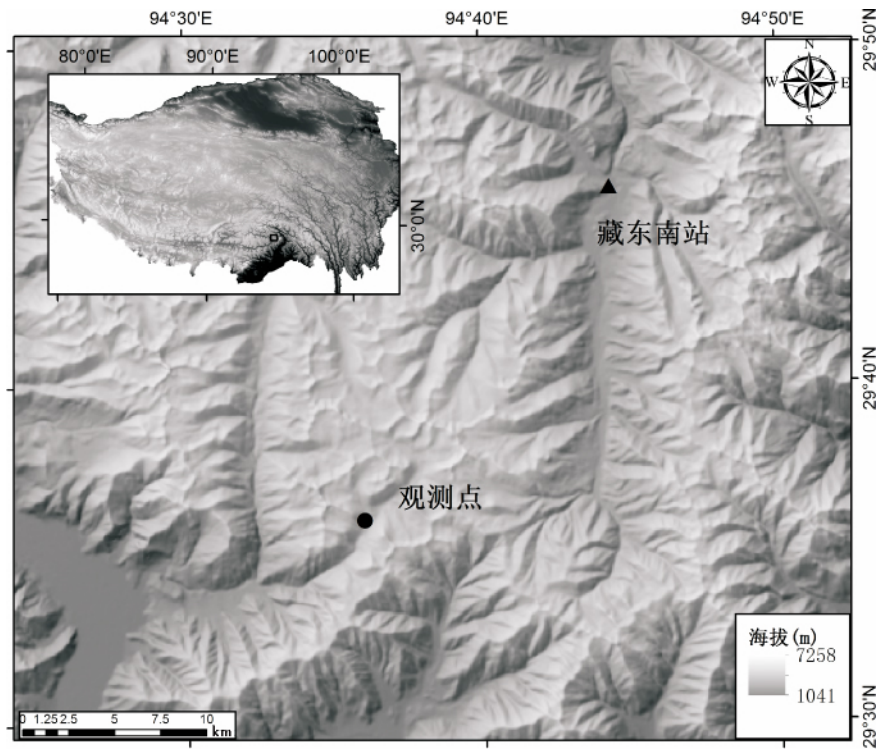


图 1 藏东南色季拉山林线观测点位置

Fig. 1 Location of the observation site in the Sergyemla Mountains, southeast Tibet

表 1 四个观测点的植被信息以及温度传感器设置情况

Tab. 1 Information of vegetation and temperature sensor settings at the four sites

站点	海拔(m)	植被类型	冠层高度(m)	冠层盖度(%)	优势种*	温度传感器距地面高度(m)
N1	4210	山地常绿针叶林	14.7	90	AGS, RAS	1.3
N2	4320	高山林线	11.2	70	AGS, RAS	1.3
N3	4500	高山常绿阔叶灌丛林	0.8	50	RAS	0.2
N4	4600	高山常绿阔叶灌丛林	0.6	45	RAS	0.2

* 急尖长苞冷杉(AGS), 薄毛海绵杜鹃(RAS) .

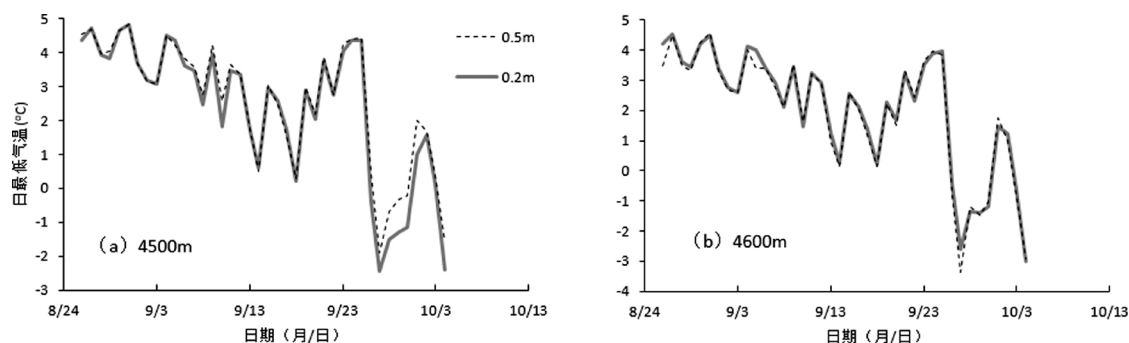


图2 日最低气温在不同冠层高度的比较

Fig. 2 Comparison of daily minimum temperature at different canopy heights

的极端气候特征。分别以频率(气温 $< 0^{\circ}\text{C}$ 的天数)、强度(绝对最低气温)和持续时间(平均每天 $< 0^{\circ}\text{C}$ 的时间)来描述低温冻害事件的分布特征^[15]。由于 N4 点土壤温度数据缺失,而在 6 月 4 日之后 N3 与 N4 点温度基本一致(图 3),因此在利用土壤温度定义生长季长度时,假定两点生长季长度一致。

2 结果与分析

2.1 基于冠层温度与土壤温度的生长季节长度估算

基于冠层温度观测数据,以 5°C 的阈值特征估算了 4 个观测点的生长季节长度,发现林线过渡带主要植被类型生长季长度在 114 ~ 138 d,生长季始于 5 月下旬至 6 月上旬,结束于 9 月末或 10 月初。高山灌丛植被生长季开始日期明显迟于亚高山森林和林线,而结束日期提前,总体表现为高山灌丛植被生长季长度较亚高山森林或林线为短。对于高山灌丛植被,较高海拔地段植被生长季节长度更短,对于森林而言,亚高山森林和林线总体差异不大(表 2)。

利用土壤温度估算的结果则表明,生长季始于 6 月中、下旬、结束于 10 月中旬,持续时间为 116 ~ 124 d。高海拔地段生长季长度反而较长,且随着海

拔的升高,生长季起始日具有提前的趋势,而结束日期变化规律不明显,说明生长季长度的变化在很大程度上是由生长季起始日所决定(表 2)。

对于森林植被而言(N1 和 N2 点),两种方法计算的生长季长度差异较大,相差 15 ~ 19 d,主要体现在生长季起始日的差异较大(土壤温度估算结果滞后近一个月)。对于高山灌丛而言,两种方法计算的生长季长度偏差不大,以土壤温度计算的生长季起始日较冠层温度估算结果推迟 16 d,同样生长季结束日也明显推迟(表 2)。

表 2 基于冠层温度与土壤温度定义的各观测点生长季节长度及起止日

Tab. 2 The length and beginning and ending date of growing season of observation sites based on canopy temperature and soil temperature.

站点	基于冠层温度定义的生长季			基于土壤温度定义的生长季		
	起始	结束	长度/d	起始	结束	长度/d
N1	5.20	10.2	135	6.21	10.14	116
N2	5.19	10.4	138	6.16	10.16	123
N3	5.25	9.28	126	6.10	10.11	124
N4	6.6	9.28	114	-	-	-

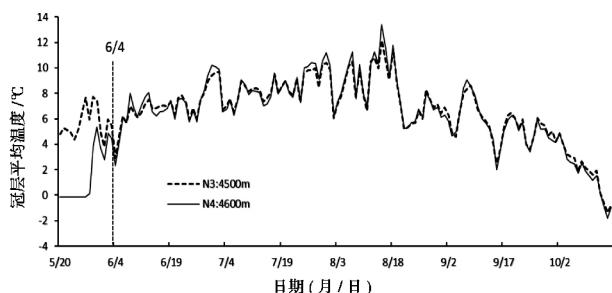


图3 N3 与 N4 点日平均气温的比较

Fig. 3 Comparison of daily mean air temperature for N3 and N4

2.2 生长季期间低温事件的分布特征

由于两种方法计算的生长季长度及起始日、结束日都存在差异,我们分别分析不同估算方法得到的生长季期间的低温事件特征。在以冠层温度定义的生长季内,对于亚高山森林和林线(N1、N2),低温事件主要出现在生长季早期的 5 月 20 日前后,较低海拔的 N1 点出现的低温事件频率略高于较高海拔的 N2 点,但其强度和持续时间均低于 N2 点(表 3)。位于高海拔杜鹃灌丛的 N3、N4 点,绝大部分低

温事件出现在生长季节末期,其出现频率是 N1、N2 点的 2~4 倍,强度也高于 N1,持续性则介于 N1、N2 点之间。此外,由于积雪的存在,在生长季早期,杜鹃灌丛内反而比亚高山针叶林较少发生低温事件,但在生长季末期(9~10 月),杜鹃灌丛内的低温事件则明显多于森林内(图 4)。

在以土壤温度定义的生长季内,由于土壤温度的滞后效应,低温事件均分布在生长季末期(9 月 3 日至 10 月 11 日,图 4),而且频率、强度以及持续性都呈现随海拔升高而增加的明显特征。N3、N4 点的低温事件出现频率是 N1、N2 点的 3~4 倍。在海拔最高的 N4 点,低温事件平均持续时间甚至达到了 5.94 h;在 10 月 9 日,低温事件强度达到了 -1.73°C (表 3),持续时间则由前一天晚 20 点一直到当天早晨 8 点,超过 12 h,并在凌晨 7 点出现 -1.73°C 的最低温度。在 9 月 4 日,N3、N4 点也出现了较剧烈的低温事件,强度在 -1.6°C 左右,持续时间长达 9 h。即使在盛夏晴朗干燥的夜间,高海拔的杜鹃灌丛中也可能发生极端低温事件,例如在 8 月 12 日,N3、N4 点也出现了接近 0°C 的情况(图 4)。

总体而言,不同方法估算的生长季期间的低温事件具有一个共同的分布特征,即低温事件的频率、强度以及持续性都大体呈现随海拔增加而增加的趋势,尤其是以土壤温度定义的生长季内低温事件的海拔变化特征更为明显(表 3)。高山杜鹃灌丛内低温事件出现频率总体达到了 9~16 d,是亚高山森林和林线(2~5 d)的 2~4 倍以上。

3 讨 论

3.1 林线过渡带生长季低温事件分布特征

尽管以不同方式估算的生长季长度存在一定差异,但期间出现的低温事件均一致表现为杜鹃灌丛 > 亚高山森林和林线,而且无论是频率、强度和持续时间都以较高海拔的杜鹃灌丛为最,甚至杜鹃灌丛内的低温事件频率达到了森林或林线的 2~4 倍或更高(表 3),这可能与不同植被冠层厚度差异较大有关:森林的冠层厚度较大,对外界极端气温的缓冲能力较强,而灌丛冠层厚度小,对极端气温的缓冲能力相对较弱,这与前期观测结果一致(在叶面积指数

表 3 生长季期间的低温事件特征

Tab. 3 Characteristics of low-temperature events within growing season

站点	以冠层温度定义的生长季低温事件			以土壤温度定义的生长季低温事件		
	频率/d	强度/ $^{\circ}\text{C}$	持续性/h	频率/d	强度/ $^{\circ}\text{C}$	持续性/h
N1	4	-1.015	2.25	4	-1.07	4.5
N2	2	-1.533	4.5	5	-1.55	4.4
N3	9	-1.556	3.66	15	-1.56	4.93
N4	9	-1.613	3.66	16	-1.73	5.94

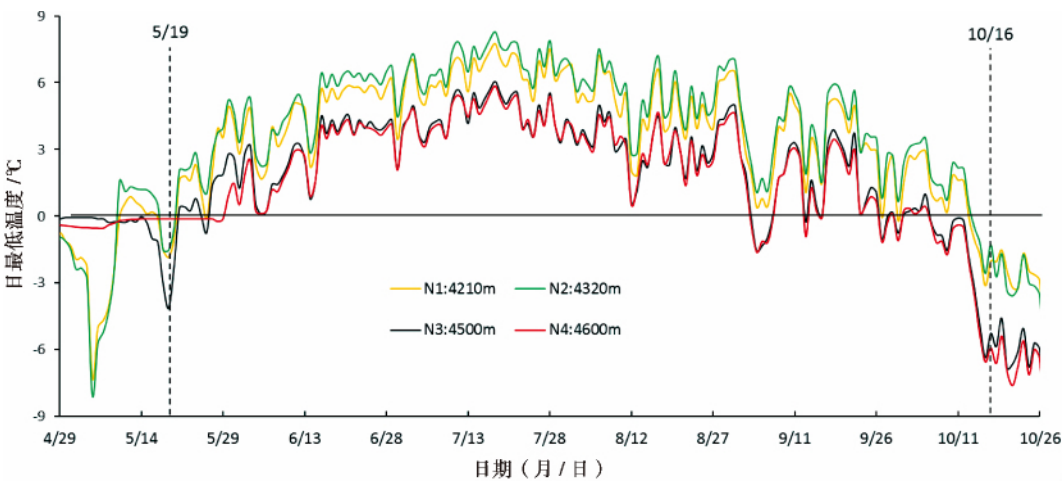


图 4 四个观测点日最低气温的比较

Fig. 4 Comparison of daily minimum air temperature for the four sites

较高的冷杉林线),地表温度的振幅明显低于叶面积指数较低的灌丛、草地^[9]。上述研究结果进一步表明,即使乔木物种的种子能够传播到林线之上的灌丛地带,并顺利萌发^[11],其下一步的存活也必将面临更多的低温事件的考验,这在一定程度上解释了为什么过去200年来该区林线位置并没有明显向上移动^[14],为什么林线乔木仍然难以扩展到林线以上的灌木地带^[15]。

不同植被类型低温事件的海拔分布特征存在一定差异,对于杜鹃灌丛而言,较高海拔地段低温事件发生频率、强度和持续时间总体高于较低海拔地段。对于森林而言,两种统计结果不尽相同。按照冠层温度的统计结果,低温事件在高海拔的林线(N2)反而比低海拔的亚高山森林(N1)更少。主要原因可能是由于N2点林分郁闭度明显低于N1点,透过林冠的辐射增温对N2点的影响更大,同时N1点接近山谷地带,夜间辐射冷却使得山谷地区形成冷空气湖,导致逆温层发生^[21-22],因此在生长季盛期,高海拔的N2点最低气温反而高于低海拔的N1点。

图4进一步表明,在5月,积雪的存在使得N4点整月维持在0℃左右,而N3点则由于积雪提前融化,在5月20日出现了-4.3℃的低温,由此可见,积雪的存在为林下的幼苗和常绿草本植物和提供了良好的庇护场所,而积雪深度强烈影响着幼苗的密度^[23]。在气候变暖条件下,如果变暖导致冬季积雪减少并在初春提前融化,植物势必会突然暴露于极端的低温环境中,造成严重冻伤^[24-25],这对幼苗的存活尤为不利。Sierra-Almeida和Cavieres^[26]在智利安第斯山的一项模拟增温实验表明,气候变暖显著降低了高海拔植物对夏季冻害事件的抵抗能力,进而严重威胁到植物的生存。

鉴于仪器故障(N1点温度记录仪在2013年年初停止运行,N4点土壤温湿度仪2012年4月停止),本文仅根据4个观测点2012年一年的数据进行分析。由于气温的变化存在明显的年际波动,我们目前尚不确定2012年极端温度特征的海拔格局是否在其它年份也存在。Shen等^[15]基于2006—2012年的气象观测数据,比较了林线观测点(N2点)和林外低矮灌丛的极端低温事件,结果表明所有年份低温事件的频率、强度都以后者为高,暗示出极端温度特征的海拔格局可能在不同年份都存在一定的相似性。本研究发现2012年的低温事件主要出现在生长季末期(尤其是杜鹃灌丛),然而,Shen

等^[15]的研究认为低温事件发生在生长季早期比在晚期对冷杉幼苗影响更大,说明低温事件发生的时间可能会因年份不同而发生变化,因此,有必要加强对不同海拔不同植被冠层温度的长期监测。

频率、强度和持续时间是描述低温事件的三要素,从低温对植物的影响来看,通常认为频率的影响最大,例如Shen等^[15]发现低温事件的出现频率对藏东南林线急尖长苞冷杉幼苗存活率的影响大于强度或持续时间。就强度和持续时间而言,由于温度的日变化呈现型曲线变化规律,可以用正态分布描述低于某一阈值的温度变化过程,因此,理论上随持续时间的增加,强度通常呈现增加趋势,本研究中的统计数据也能证实这一点数据在此未层示。(持续时间与强度的相关性 $R^2=0.34-0.59$,显著水平 $P<0.05$)。

3.2 湿润区高山植被生长季长度的估算

植物生长季长度计算方法可以大致概括为三类:1. 基于物候观测;2. 基于地面温度的变化;3. 基于植被指数的变化^[27]。对于湿润区的高山植被(如本研究区),植被上方云量大且覆盖时间较长,加之地表积雪的影响,导致通过遥感手段获取的植被指数的可信度较差,且遥感数据的时间分辨率通常较低,因此基于植被指数计算的生长季长度目前仍存在很大不确定性^[28-30]。物候观测固然是直接获取植物生长季长度的最佳方式。但是,不同环境、不同物种甚至同一物种不同发育阶段的物候特征均存在明显差异^[17]。对于亚高山常绿林而言尤其如此。例如,乔木物种早在芽萌动之前已经开始进行光合作用^[31],其实际生长季长度远高于常规物候的观测结果。在湿润区高山林线过渡带,植被主要受到生长季土壤低温的控制^[1]。在本研究中,利用土壤温度阈值界定生长季的起止,计算的生长季长度(116~124 d)较按冠层温度计算的生长季长度(114~138 d)短约1个月。其中,两种方法计算的生长季长度的差异主要由生长季起始日不同所造成。由于5月研究区土壤仍处于冻结状态,我们认为基于土壤温度计算的生长季长度可能更接近实际情况。此外,基于土壤温度阈值统计的生长季长度在杜鹃灌丛中反而较森林更长,而不同地点生长季长度的差异主要是由起始日而非结束日所决定,这与Liu等^[32]基于中国1955—2000年气象观测数据的研究结果类似。

然而,由于本研究区土壤温度较气温滞后达一

个月^[9]。基于土壤温度与基于气温估算的生长季长度及起止时间均存在一定差异。以 N2 点为例,基于气温估算的 2012 年生长季长度为 138 天,比基于土壤温度估算的生长季长度(123 d)多 15 d;当气温连续 5 d 达 5℃ 以上时(即基于气温统计的生长季开始时)5 cm 土壤温度仍维持在 -0.4℃;当气温连续 5 d 达 5℃ 以下时(即生长季结束时)土壤温度仍高达 6.2℃。由此可见,气温与土壤温度的不同步性暗示出植物地上与地下部分生长的不同步。最近,Abramoff 和 Finzi^[18]整合分析了全球不同地区 40 项研究中的 87 株全株植物物候观测数据,发现根系生长的起始时间比地上芽生长平均滞后 25 ± 8 d。因此,植物生长季的起止及长度的确定,需要根据研究的具体目的和研究对象,有针对性的开展地上或地下的相关测定。与草地相比,森林及灌丛植被生长季长度的确定更加复杂^[19],如何有效的综合物候和地面气象要素的观测,结合遥感手段准确快速的获取区域尺度上植被生长季长度的季节变化和年际变化特征将是今后的一个研究重点。

参考文献(References)

- [1] KÖRNER C. Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of Mountain Ecosystems [M]. Berlin & Heidelberg: Springer - Verlag, 2003, chapter 8: 88
- [2] LARCHER W. Effects of low temperature stress and frost injury on plant productivity [M]. In: Johnson CB (ed) Physiological processes limiting plant productivity. Butterworth London, 1981, 253 - 269
- [3] GU L H, HANSON P J, MAC Post Wet al. The 2007 eastern US spring freeze: increased cold damage in a warming world? [J]. Bio-Science, 2008, 58(3): 253 - 262
- [4] 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
- [5] SMITH D J. Frost-heave activity in the Mount Rae area, Canadian Rocky Mountains [J]. Arctic and Alpine Research, 1987, 19: 155 - 166
- [6] NEUNER G, HACKER J. Ice formation and propagation in alpine plants [M]. In: Lütz, C (Ed.), Plants in alpine regions: cell physiology of adaption and survival strategies. New York: Springer, 2012, 163 - 174
- [7] KÖRNER C, PAULSEN J. A world-wide study of high altitude tree-line temperatures [J]. Journal of Biogeography, 2004, 31(5): 713 - 732
- [8] BADER M Y, RIETKERK M, BREGT A K. Vegetation structure and temperature regimes of tropical alpine treelines [J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2007, 39(3): 353 - 364
- [9] LIU X, LUO T. Spatiotemporal variability of soil temperature and moisture across two contrasting timberline ecotones in the Sergyemla Mountains, Southeast Tibet [J]. Arctic Antarctic and Alpine Research, 2011, 43(2): 229 - 238
- [10] SONG Y T, ZHOU D W, ZHANG H X et al. Effects of vegetation height and density on soil temperature variations [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(8): 907 - 912
- [11] 沈维. 藏东南急尖长苞冷杉的更新受限机制及其气候变化响应意义 [D]. 北京: 中国科学院青藏高原研究所, 博士学位论文. 2014. [SHEN W. Mechanisms controlling seedling recruitment of Smith fir at treeline ecotone in southeast Tibet: implication for warming effect on treeline position [D]. Beijing: Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences.]
- [12] MIEHE G, MIEHE S, VOGEL J et al. Highest treeline in the Northern Hemisphere found in Southern Tibet [J]. Mountain Research and Development, 2007, 27(2): 169 - 178
- [13] LIANG E Y, WANG Y F, XU Y et al. Growth variation in Abies-georgei var. smithii along altitudinal gradients in the Sygera Mountains, southeastern Tibetan Plateau [J]. Trees - Structure and Function, 2010, 24(2): 363 - 373
- [14] LIANG E, WANG Y, ECKSTEIN D et al. Little change in the fir tree-line position on the southeastern Tibetan Plateau after 200 years of warming [J]. New Phytologist, 2011, 190(3): 760 - 769
- [15] SHEN W, ZHANG L, LIU X S et al. Seed-based treeline seedlings are vulnerable to freezing events in the early growing season under a warmer climate: evidence from a reciprocal transplant experiment in the Sergyemla Mountains, southeast Tibet [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 187: 83 - 92
- [16] SMITH W K, GERMINO M J, HANCOCK T E et al. Another perspective on altitudinal limits of alpine timberlines [J]. Tree Physiology, 2003, 23(16): 1101 - 1112
- [17] VITASSE Y. Ontogenic changes rather than difference in temperature cause understory trees to leaf out earlier [J]. New Phytologist, 2013, 198(1): 149 - 155
- [18] ABRAMOFF R Z, FINZI A C. Are above- and below-ground phenology in sync? [J]. New Phytologist, 2015, 205(3): 1054 - 1061
- [19] 俞洁辉, 刘新圣, 罗天祥等. 念青唐古拉山北麓草甸海拔分布上限土壤温湿度的季节变化 [J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1246 - 1254 [YU J H, LIU X S, LUO T X et al. Seasonal variations of soil temperature and moisture at the upper limit of alpine meadow in north-facing slope of the Nianqingtanggula Mountain [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1246 - 1254]
- [20] 王忠. 念青唐古拉山南坡高寒草甸生产力沿海拔梯度的变化机理研究 [D]. 北京: 中国科学院青藏高原研究所, 博士学位论文. 2011. [WANG Z. Mechanisms for altitudinal variations in net primary productivity of alpine meadow in central Tibetan Plateau [D]. Beijing: Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, 2011.]
- [21] COOP J D, GIVNISH T J. Constraints on tree seedling establishment in montane grasslands of the Valles Caldera, New Mexico [J]. Ecology, 2008, 89(4): 1101 - 1111
- [22] ZHANG L, LUO T, Liu X et al. Altitudinal variation in leaf construction cost and energy content of Bergea purpurascens [J].

- Acta Oecologica, 2012, 43: 72–79
- [23] HÄTTENSCHWILER S, SMITH W K. Seedling occurrence in alpine treeline conifers: a case study from the central Rocky Mountains, USA [J]. Acta Oecologica, 1999, 20(3): 219–224
- [24] EASTERLING D R, MEEHL G A, PARMESAN C et al. Climate extremes: observations, modeling, and impacts [J]. Science, 2000, 289(5487): 2068–2074
- [25] CANNONE N, SGORBATI S, GUGLIELMIN M. Unexpected impacts of climate change on alpine vegetation [J]. Front Ecol Environ, 2007, 5(7): 360–364
- [26] SIERRA – Almeida A, CAVIERES L A. Summer freezing resistance decreased in high-elevation plants exposed to experimental warming in the central Chilean Andes [J]. Oecologia, 2010, 163(1): 267–276
- [27] LINDERHOLM H. Growing season changes in the last century [J]. Agricultural and forest meteorology, 2006, 137(1–2): 1–14
- [28] YU H Y, LUEDELING E, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(51): 22151–22156
- [29] SHEN M, SUN Z, WANG S et al. No evidence of continuously advanced green-up dates in the Tibetan Plateau over the last decade [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(26): E2329.
- [30] ZHANG G, ZHANG Y, DONG J et al. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(11): 4309–4314
- [31] HU J, MOORE DJ P, BURNS SP et al. Longer growing seasons lead to less carbon sequestration by a subalpine forest [J]. Global Change Biology, 2009, 16(2): 771–783
- [32] LIU B H, HENDERSON M, ZHANG Y D et al. Spatiotemporal change in China's climatic growing season: 1955–2000 [J]. Climate Change, 2009, 99(1–2): 93–118

Altitudinal Variations of Freezing Events at Timberline Ecotone in the Sergyemla Mountains, Southeast Tibet

WANG Yuantao^{1 2} ZHANG Lin¹ SHEN Wei¹ LIU Xinsheng³ LUO Tianxiang¹

(1. Key Laboratory of Alpine Ecology and Biodiversity, Institute of Tibetan Plateau Research,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Tourism and Territorial Resources, Jiujiang 332005, China)

Abstract: Severe freezing events could be one of the crucial causes preventing the advance of alpine timberline. However, studies on the characteristics of freezing events across altitudes and vegetation types at high elevations are scarce. Based on the measurements of air and soil temperature for forests and shrubs across an *Abies georgei* var. *Smithii* timberline ecotone along a north-facing slope in the Sergyemla Mountains, southeast Tibet, we analyzed altitudinal variations of freezing events for different vegetation types during growing season based on two different definitions—canopy temperature and soil temperature. Results are as follows: 1) compared with canopy temperature of the growing season, soil temperature lagged behind nearly one month, and the length of growing season based on canopy temperature was significantly longer than that calculated by soil temperature for subalpine and timberline forests. 2) Although the growing season length varied between different definitions, there were more freezing events in *Rhododendron* shrubs in the growing season than in the subalpine and timberline forests, and the frequency for the former was 1 to 3 times more than the latter. Besides, the intensity was stronger and the duration was longer in *Rhododendron* shrubs than in the subalpine and/or timberline forests. Our results indicated that there were more growing-season freezing events in *Rhododendron* shrubs at high elevations, with their frequency, intensity, and duration all tending to strengthen with rising altitudes. This might result in the difficulty of seedling establishment above the timberline.

Key words: *abiesgeorgei* var. *smithii*; daily minimum air temperature; frequency; climate change; growing season length; seedling