

全球变暖背景下西藏高原高海拔地区木本植物分布限制因子分析

田睿^{2,3}, 黄晓慧^{1,3,4}, 周尧治^{2,3,4*}

(1.西藏农牧学院 资源与环境学院, 西藏 林芝 860000; 2.西藏农牧学院高原生态研究所, 西藏 林芝 860000; 3.西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000; 4.西藏生态安全联合实验室, 西藏 林芝 860000)

摘要:【目的】探明在气候变化条件下木本植物在西藏高原高海拔地区分布的主要限制因子及适应途径。【方法】参照林线相关理论及青藏高原针叶林树线热量条件, 比较青藏高原生态条件最为接近的那曲镇与阿里地区狮泉河镇的热量因素在全球变暖条件下的变化趋势, 分析木本植物在西藏高原高海拔地区分布的主要限制因子。【结果】夏季温度是北半球非热带林线的主要限制因素之一, 在全球变暖背景下, 那曲镇各热量指标均显著上升, 热量条件基本能满足木本植物的生存需要。那曲镇木本植物分布的限制因子为大风日数多, 在持续且强烈的大风环境中其新梢或叶片往往脱水枯死。【结论】风是限制西藏高寒高海拔地区木本植物生存的主要因子, 在做好防风措施后, 应选择抗风能力强的植物作为那曲镇的城镇绿化树种。

关键词: 木本植物; 树线; 高海拔地区; 分布限制因素; 风

中图分类号: S728.9

文献标识码: A

文章编号: 2095-7300 (2021) 03-0015-08

Analysis on Limiting Factors of Woody Plant Distribution in High Altitude Area of Tibet Plateau Under the Background of Global Warming

TIAN Rui^{2,3}, HUANG Xiaohui^{1,3,4}, ZHOU Yaozhi^{2,3,4*}

(1. Resources & Environment College, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China;
2. Res. Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China;
3. Tibet Key Laboratory of Forest Ecology in Plateau Area, Ministry of Education, Linzhi 860000, China;
4. Tibet ecological security joint laboratory, Linzhi 860000, China)

Abstract: 【Objective】 The main limiting factors and adaptive approaches of woody plants in high altitude areas of Tibet Plateau under the condition of global warming were explored. 【Methods】 According to the theory of forest line and the heat condition of coniferous forest line in Qinghai Tibet Plateau, the change trend of heat factors in Naqu Town and Shiquanhe town in Ali area under the condition of global warming was compared, and the main limiting factors and adaptive ways of woody plants in high altitude areas of Tibet were analyzed. 【Results】 Summer temperature is one of the main limiting factors of the forest line outside the tropical zone in the northern hemisphere. Under the background of global warming,

收稿日期: 2021-04-06

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2017YFC0506801)。

作者简介: *为通信作者。周尧治, 博士后, 副教授, 硕士生导师。研究方向: 景观生态学研究, E-mail: zyzhn666@126.com。田睿, 硕士研究生, 研究方向: 森林生态学研究, E-mail: trui0731@163.com。

引文格式: 田睿, 黄晓慧, 周尧治. 全球变暖背景下西藏高原高海拔地区木本植物分布限制因子分析[J]. 湖南生态科学学报, 2021, 8(3): 15-22.
TIAN R, HUANG X H, ZHOU Y Z. Analysis on limiting factors of woody plant distribution in high altitude area of Tibet Plateau under the background of global warming[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2021, 8(3): 15-22.

the heat index of Naqu Town increased significantly, and the current heat condition can basically meet the survival needs of woody plants. The limiting factors of woody plant distribution in this area is that the number annual gale days (97.4 days / year) in Naqu Town is very large, and the shoots and leaves of woody plants are easy to dry and die in case of gale. 【Conciusion】 Gale is the limiting factor for the survival of woody plants in high altitude and cold areas of Tibet. On the premise of wind prevention measures, the construction of urban green plants in Naqu Town is feasible.

Key words:Woody plant; treeline; high altitude area; dominant factor of distribution; wind

高山树线即树木能够生长的最高海拔高度^[1-3],是树木在山地垂直自然带上分布的上限,是地球上最明显的生态系统分界线之一^[4]。这一全球性的生态过渡带现象引起了学术界广泛而持久的探索兴趣,学者从高山树线交错带植物区系^[5-6]、树线形成机制、气候变化条件下树线的动态变化等方面进行了大量的研究^[7-9]。基于欧洲阿尔卑斯山脉树线的考察,认为树线以上没有人口聚集的城市存在^[10]。但是在我国青藏高原情况不同,树线以上分布较多的人口聚集区域。那曲镇位于高山林线以上,近年来城市绿化建设遇到技术难题,亟待解决该区域木本植物分布的限制因子。

树线处较低的生长季温度限制了植物组织形成过程中的某些生理生化过程,植物细胞的分裂及生长受阻^[11],使植物光合作用产物分配不出去,阻碍了树线树木的生长^[12-13],且导致树线木本植物当年生组织角质层或蜡质层发育不充分,缺乏对冬季干燥的抵抗力而脱水^[14-16]。

Tranquillini指出温度对树线高度具有压倒一切的影响^[17],目前一致的认识是树线的高度取决于生长季温度或积温,而不是冬季低温^[18-19],树线高度与最热月平均温度10℃大体一致的现象在全球广泛存在^[20-21]。Körner则认为生长季平均温度5.5~7.5℃更为适当,最热月平均温度10℃的规律仅适用于温带^[18]。在东亚和南亚的研究表明,生长季积温如温暖指数(WI)15℃·月是限制树线高度的主要气候因子^[22]。王襄平等(2004)发现影响我国高山树线高度的限制因子为生长季温度条件,我国高山树线高度的温度指标为年生物温度3.5℃,温暖指数为14.2℃·月,生长季平均温度8.2℃,最热月均温10℃^[19]。

自20世纪末西藏自治区及那曲地区各级政府、相关主管部门和社会团体开始致力于那曲城镇绿化,希望能够改善那曲镇生态环境,为当地居民营造绿树成荫的城市景观。经过近20多年的努力,只有那曲市政府、机关大院零星存有植物^[23],而那曲镇街道目前仍是全球唯一没有木本植物绿化的地市级城市街道。从20世纪末人们开始那曲镇的植树试验^[23],至今没有取得成功。本文利用西藏高原那曲镇气象站和阿

里地区狮泉河镇气象站1961—2018年的气象数据,以阿里地区狮泉河镇为对比,分析那曲镇木本植物生长的限制因子与适应机制。

1 研究方法

1.1 研究区概况

那曲镇地处西藏自治区北部,位于青藏高原腹地,海拔4 500 m,太阳辐射强,气温低,四季不分明,气候干燥,多大风天气;多年平均降水量为431.88 mm,年降水量变化率为15.9 mm/10 a;多年平均气温为-1.3℃,多年平均大风天数为95.7 d。目前没有绿化树种。

狮泉河镇位于西藏自治区的西部,素有“世界屋脊的屋脊”之称,与尼泊尔、印度交界,海拔4 250米,是我国平均海拔最高的地区。该区主要受西风环流的控制和影响,气候寒冷干燥、多大风,日照充足,太阳辐射强烈。多年平均气温为1.2℃。由于远离水汽源地,且受喜马拉雅山及冈底斯山脉阻挡,阿里地区降水稀少,多年平均降水天数仅为36 d,多年平均降水量71.2 mm,多年平均大风天数为65.9 d。狮泉河镇的城市绿地建设是近年发展起来的,主要绿化树种为班公柳和秀丽水柏枝等。

1.2 海拔树线主要热量指标

- (1) 月平均温度最热月为7月;
- (2) 月平均温度最冷月为1月;
- (3) 年生物温度(Annual biotemperature, ABT),

$$ABT = \frac{1}{12} \sum t_i$$

式中: t_i 为大于0℃的月平均温度,如果 $t_i > 30℃$, 则 $t_i = 30℃$;

- (4) 温暖指数(Warmth Index, WI):

$$WI = \sum (t_i - 5)$$

式中: t_i 为大于5℃的月平均温度;

- (5) 生长季平均温度为月均温大于5℃的月平均温度。

1.3 线性变化的分离和预测

为了分离出海拔树线边界热量指标的线性变化部分,设热量指标为时间的线性函数,即: $Y=B_0+B_x$ 。式中, X 为年份(如为1980年,则 $X=1980$), Y 为海拔树线边界热量指标, B_0 为常数项, B 为线性变化率。

2 结果

2.1 最冷月与最热月均温

1960—2018年那曲镇和狮泉河镇的气温最冷月与最热月均温变化见图1。那曲镇1月均温最低值出现在1966年和1968年,分别为-20.4℃和-19.1℃。随

后那曲地区的1月均温开始上升,在2005年达到-6.9℃。1961—2018年期间,1月均温上升趋势较明显。1961—1980年期间,1月均温平均值为-13.9℃,1999—2018年期间,1月均温的平均值为-10.7℃。狮泉河镇1月均温波动范围在-17.6℃至-7.6℃之间。1961—1980年期间,1月均温平均值为-12.4℃,1999—2018年期间,1月均温平均值为-11.2℃,升温趋势不明显。1999—2018年期间,1月均温那曲镇略高于狮泉河镇。但狮泉河镇的城镇绿化近年来发展较快,如班公柳(*Salix bangongensis*)和秀丽水柏枝(*Myricaria elegans*)在不需要冬季防护的条件下即可顺利越冬,而那曲镇的绿化建设仍不乐观。可见冬季温度不是西藏高原高海拔地区木本植物分布的主要限制因子。

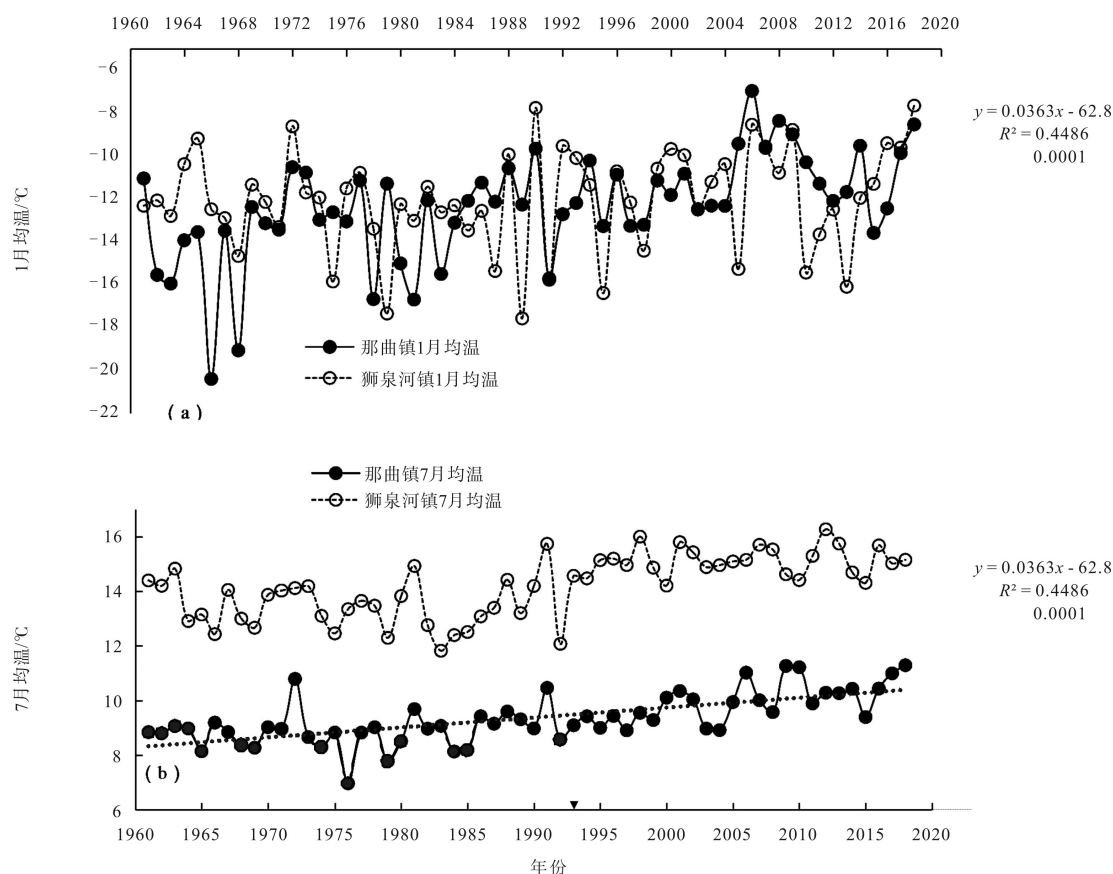


图1 那曲和阿里最冷月 (a) 最热月 (b) 均温

Fig.1 The coldest month (a) and hottest month (b) average temperature in Naqu town and Shiquanhe town

从图1中可以看出阿里地区狮泉河镇的7月均温高于那曲镇,1960—2018年,那曲镇7月均温为9.19℃,而阿里地区狮泉河镇7月均温为14.4℃。已有的研究表明^[10,23]最热月温度表征的热量状况是高海拔地区木本植物一年中碳获取量的前提,足够的

光合同化产物是该区域木本植物生长及新梢形成防御系统的物质基础。最热月均温10℃是高海拔地区木本植物生存的下限阈值^[23-25]。由于受全球气候变暖影响,2000—2018年那曲镇最热月均温达到10.4℃,基本达到树线所需的温度。

2.2 温暖指数及年生物温度

受全球气温变暖影响,那曲镇温暖指数和年生物温度上升趋势明显 ($P < 0.0001$)。那曲镇温暖指数在1960—1980年的均值为 $9.5^{\circ}\text{C} \cdot \text{月}$,2000—2018年

期间,那曲镇温暖指数均值为 $15.5^{\circ}\text{C} \cdot \text{月}$,已超过中国树线温暖指数阈值 $14.2^{\circ}\text{C} \cdot \text{月}$ [21]。那曲镇年生物学温度1960—1980年均值为 2.73°C ,2007—2018年均值为 3.53°C ,已达到中国树线阈值 3.5°C 。

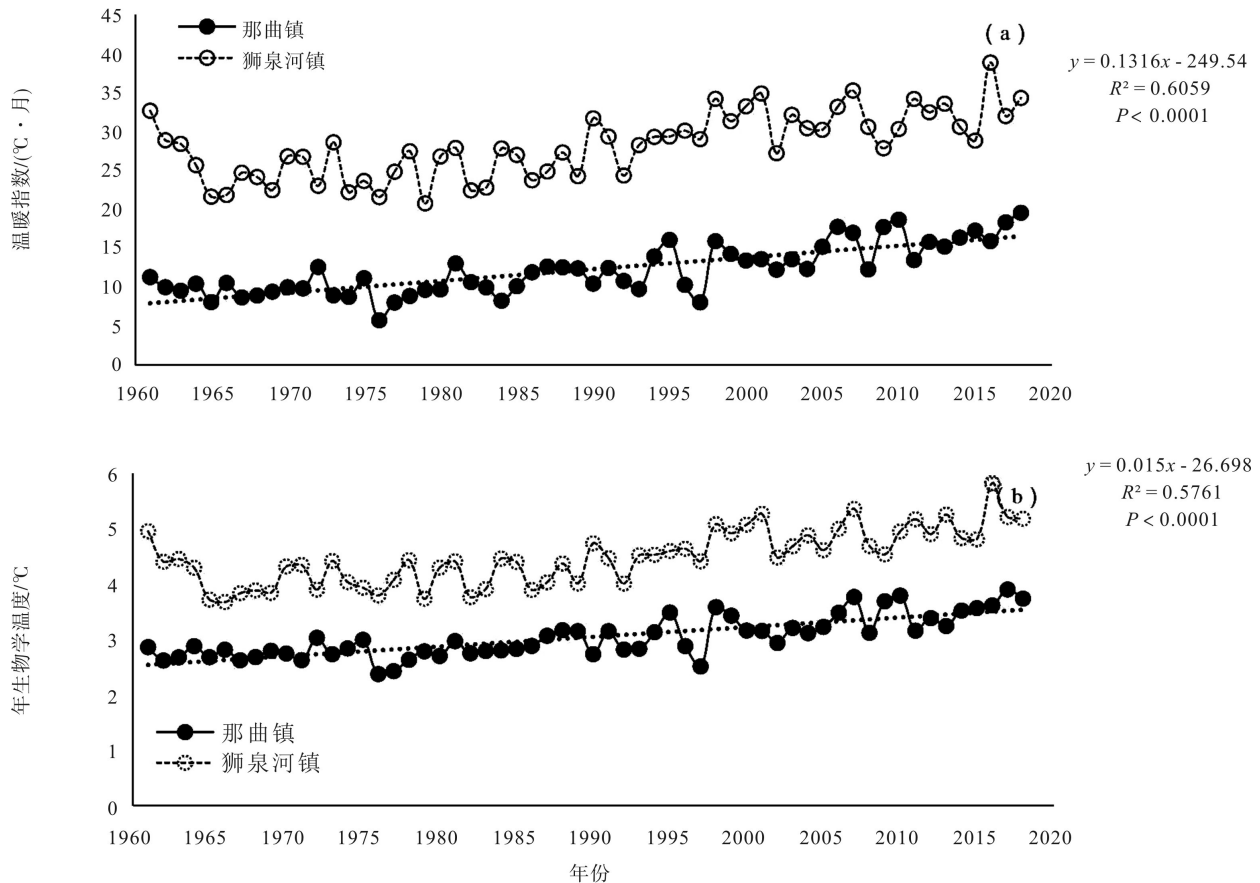


图2 温暖指数 (a) 和年生物温度 (b)

Fig.2 Warm index (a) and Annual biotemperature (b)

2.3 生长季均温

1960—2018年那曲镇生长季均温升高趋势非常显著 ($P < 0.0001$),有接近阿里地区狮泉河镇生长季均温的趋势,二者差值显著 ($P < 0.001$) 下降 (见图3、图4)。在2000—2018年期间,那曲镇生长季均温为 9.8°C ,超过中国树线阈值 8.2°C [21],尤其到2009年之后生长季均温稳定通过树线阈值。

2.4 风速

风速超过一定阈值,其对高寒高海拔地区木本

植物的负面影响会远远大于其正面的影响。那曲镇的年大风天数明显高于狮泉河镇,两地五年平均值分别为101.5 d和58.2 d (图5)。风速对高寒高海拔地区木本植物的负面影响主要是因为较大的风速会加速木本植物水分损失,青藏高原为亚洲季风区降水集中于生长季 (6—9月),而冬春季降水量较少,因此干旱的冬春季风速会加剧本本植物在非生长季节脱水。那曲镇和狮泉河镇的冬春风速多年平均值分别为 2.4 m/s 和 1.9 m/s (图6)。较大的冬春风速和年大风日数是导致那曲镇城镇绿化困难的重要因素。

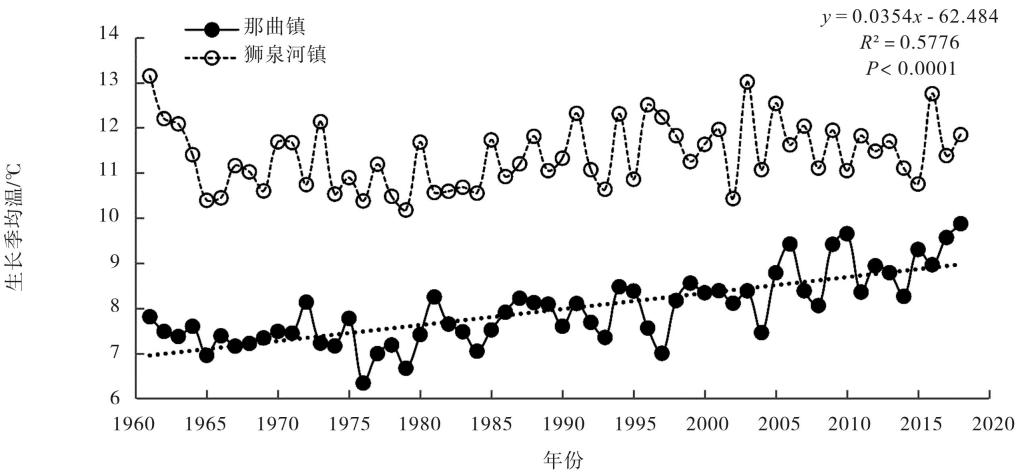


图 3 生长季均温

Fig.3 Average temperature of growth season

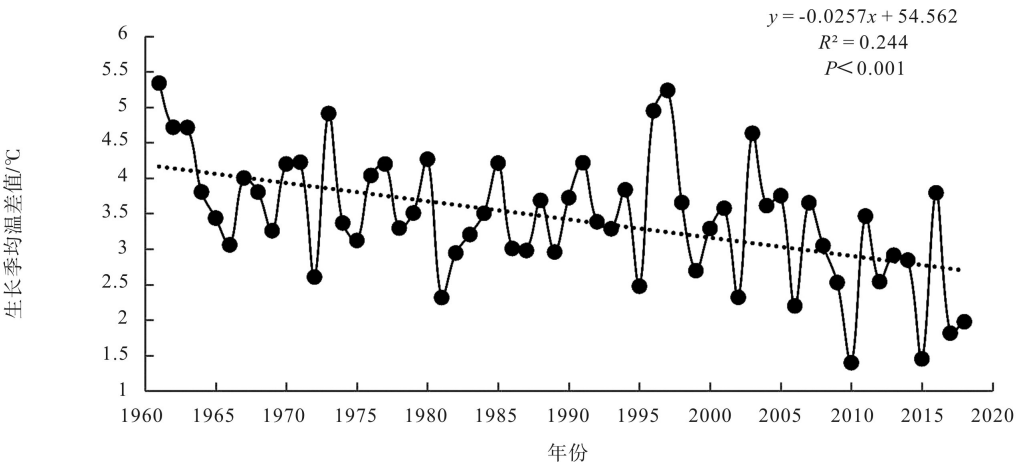


图 4 那曲镇与狮泉河镇生长季均温差值

Fig.4 Average temperature difference between Naqu Town meteorological station and Shiquanhe town meteorological station in growing season

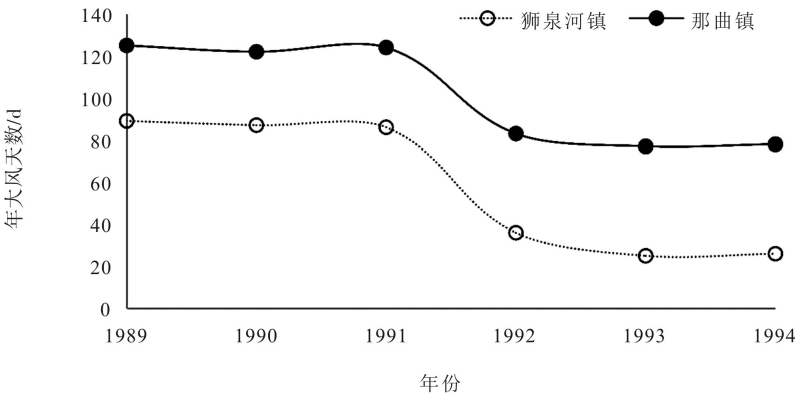


图 5 狮泉河镇与那曲镇年大风天数

Fig.5 Annual gale days in Shiquanhe town and Naqu Town

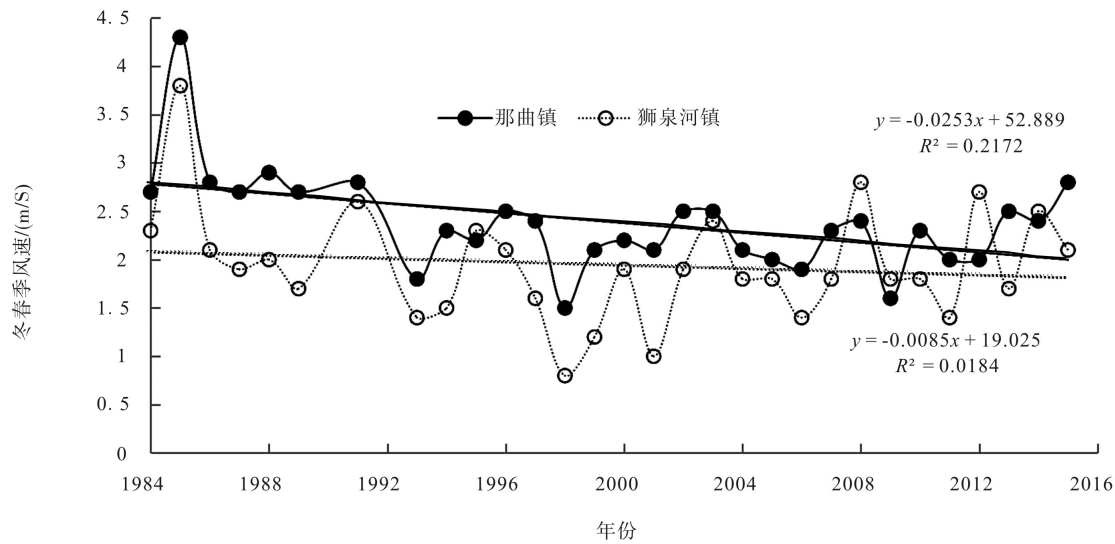


图6 狮泉河镇与那曲镇冬春平均风速

Fig. 6 Average wind speed in winter and spring in Shiquanhe town and Naqu Town

3 讨论与结论

那曲镇最热月平均温度、温暖指数、年生物温度、生长季均温均超过中国树线阈值，而风速大于17 m/s的日数达97.4 d/a^[24]。说明那曲镇的热量条

件基本达到木本植物海拔树线水平，但那曲镇及其周边20 km范围内没有高于10 cm的木本植物分布（如金露梅 *Potentilla fruticosa* 在那曲镇周边20 km范围内不高于10 cm），其限制因素主要是风如图7示意。

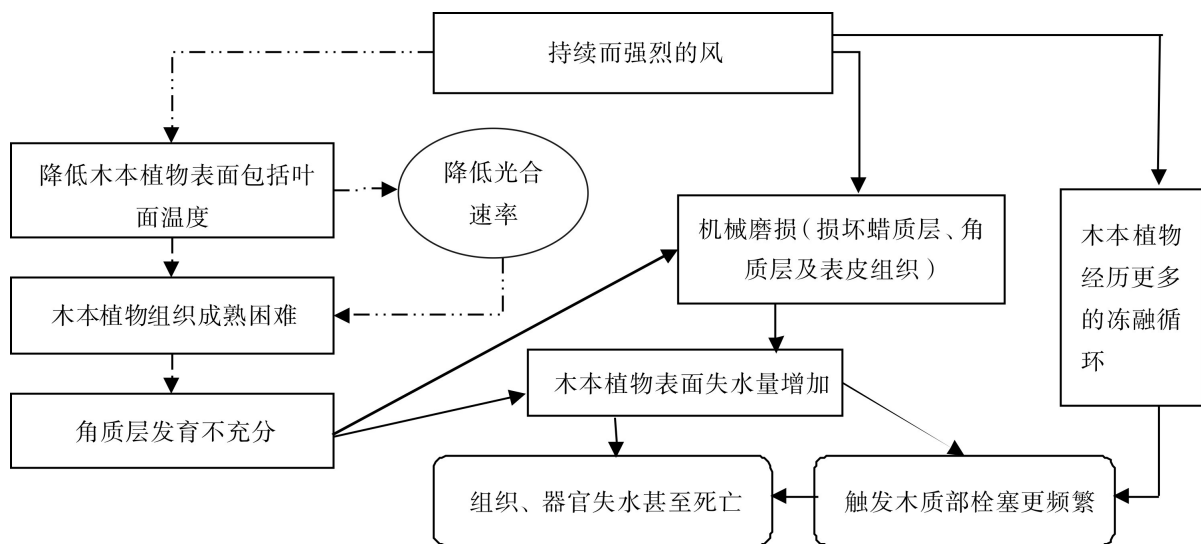


图7 风与冰雹对那曲镇周边木本植物的损伤机制

(带虚线箭头为降低作用；带实线的箭头为增强作用)

Fig. 7 damage mechanism of wind and hail on woody plants around Naqu town

(Arrow with dotted line indicates lowering effect; arrow with solid line indicates enhancing effect)

因为大风（大于17 m/s）日数多（97.4 d/a^[24]），木本植物新梢与叶片在持续而强烈的大风环境中容易受到机械损伤（图8，藏柳叶片正面与背面的白色条纹不是表皮毛，而是颗粒物在叶片表面的划痕，图

片均为200倍放大）而脱水枯死。大风是树线形成的重要环境限制因素^[25-26]，大风对高海拔地区木本植物的影响机制主要包括：①风的冷却效应加剧热量不足，影响木本植物光合速率和同化产物的积累，从

而妨碍生长及防御系统的形成;②持续而强烈的风会导致木本植物机械损伤及木质部栓塞;③加速木本植物及土壤水分损失,造成木本植物非生长季脱

水。因此,在风力强劲的林线地区,有利的地形可以遮挡或减缓强风的侵袭,从而有利于林线木本植物的生存^[27]。

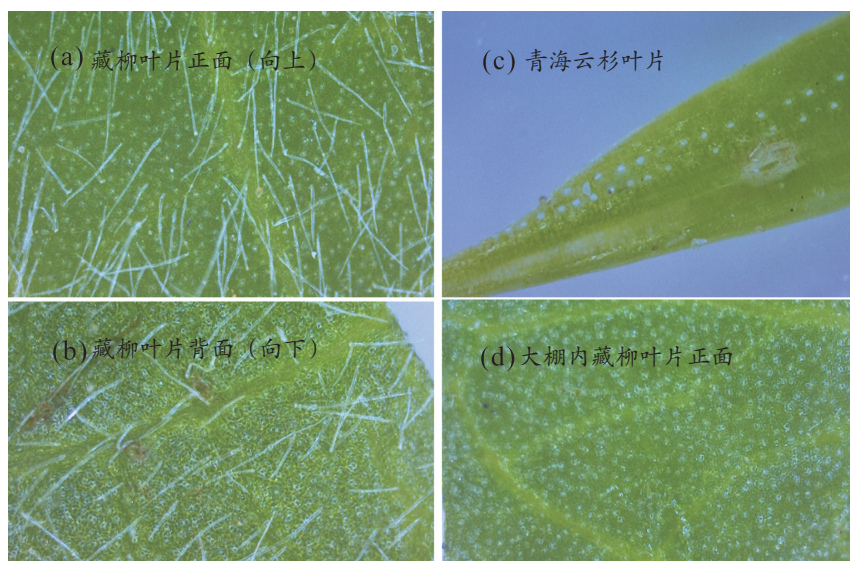


图8 风携带颗粒物对那曲镇引种木本植物叶片的损伤

Fig.8 Damage of wind on the leaves of introduced woody plants in Naqu town.

生长季温度被认为是全球林线形成和维持的主要控制因素^[3,11,12],其支持证据包括:(1)林线位置与等温线之间存在全球一致的关系^[11,14,28];(2)林线位置波动与过去的温度变化一致^[3];(3)在北纬30°到北纬52°之间林线高度随纬度上升几乎呈线性下降,变化速率为每增加1个纬度林线海拔下降120~130 m^[29-30]。因此,此前那曲镇城镇绿化失败的重要原因是生长季热量没有完全满足树木的生理需求。

此外,气候变暖背景下,那曲镇降水量呈增加趋势^[31],而该区域年大风日数^[32-33]及冬春风速呈下降趋势(图5,图6),这种气候变化有利于该区域木本植物的生存。

通过本文的分析我们发现:

(1)最热月温度表征的热量状况是高海拔地区木本植物一年中碳获取量的前提,足够的光合同化产物是该区域木本植物生长及新梢形成防御系统的物质基础。同时分布于季节分明地区的木本植物可以通过休眠抵抗冬季低温。西藏高海拔地区城镇绿化实践证明最热月均温较高的狮泉河镇(1960—2018年7月均温为14.4℃)木本植物能够生存;而那曲镇最热月均温较低(1960—2018年7月均温为9.19℃)木本植物生存较困难。因此对于西藏高原高海拔地区木本植物生存而言,夏季温度比冬季温度更重要。

(2)2016年以后,那曲镇各热量指标稳定通过

林线阈值基本能满足木本植物的生存需要。但那曲镇年大风(大于17 m/s)日数多(97.4 d/a),木本植物新梢与叶片在持续而强烈的大风环境中脱水枯死是限制木本植物生存的主要因子。

(3)在那曲镇绿化建设中,笔者建议选择强抗风能力的植物,同时营造避风的生境以降低风速。

参考文献:

- [1] SCUDERI L A. Late-Holocene upper timberline variation in the southern Sierra Nevada[J]. *Nature*, 1987,325:242-244.
- [2] HOLTMEIER, F K. Ecological aspects of climatically-caused timberline fluctuations [M]. *Mountain Environments in Changing Climates*; Beniston, M., Ed.; Routledge: London, UK, 1994.
- [3] HARSCH M A, HULME P E, MCGLONE M S, et al. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming[J]. *Ecology letters*, 2009, 12(10): 1040-1049.
- [4] 石培礼. 亚高山林线生态交错带的植被生态学研究[D]. 北京:中国科学院(自然资源综合考察委员会), 1999.
- [5] 戴君虎,崔海亭. 国内外高山林线研究综述[J]. *地理科学*, 1999, 19(3): 243-249.
- [6] 杨振林, 石培礼. 高山林线交错带的景观格局与生态过程[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(1): 44-55.
- [7] HOLTMEIER F K, BROLL G. Treeline research—from the

- roots of the past to present time. A review [J]. *Forests*, 2019 (11):38.
- [8] 王亚锋,梁尔源. 树线波动与气候变化研究进展[J]. *地球环境学报*, 2012, 3(3):855-861.
- [9] 张雨,芦晓明,王亚锋. 北半球树线波动及其驱动因素研究进展[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(11): 3430-3439.
- [10] KORNER C. Alpine Ecosystems and the High-Elevation Treeline[J]. *Encyclopedia of Ecology* 2008. 138-144,doi: 10.1016/b978-0-12-409548-9.00720-X.
- [11] KORNER C. Alpine Treelines [M]. Berlin: Springer Basel, 2012.
- [12] HOLTMEIER F K. Mountain Timberlines: Ecology, Patchiness, and Dynamics [M]. Dordrecht: Springer, 2009.
- [13] 沈维,张林,罗天祥. 高山林线变化的更新受限机制研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(9): 2858-2868.
- [14] KORNER C, PAULSEN J. A world-wide study of high altitude treeline temperatures[J]. *Journal of Biogeography*, 2004, 31(5):713-732.
- [15] HADLEY J.L.; SMITH W.K. Wind effects on needles of timberline conifers: Seasonal influences on mortality [J]. *Ecology* 1986, 67(1), 12 - 19.
- [16] NAGY L, GRABHERR G. The Biology of Alpine Habitats [M]. New York: Oxford University Press, 2009.
- [17] TRANQUILLINI W. Physiological ecology of the alpine timberline [M]. Berlin and New York: Springer-Verlag, 1979.
- [18] KORNER C. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation[J]. *Oecologia*, 1998, 115(4): 445-459.
- [19] 王襄平,张玲,方精云. 中国高山林线的分布高度与气候的关系[J]. *地理学报*, 2004,59(6): 871-879.
- [20] FOLEY J A, KUTZBACH J E, COE M T. et al. Feedbacks between climate and boreal forests during the Holocene epoch [J]. *Nature*, 1994,371: 52-54.
- [21] LLOYD A H, GRAUMLICH L J. Holocene dynamics of treeline forests in the Sierra Nevada[J]. *Ecology*, 1997,78(4): 1199-1210.
- [22] OHSAWA M. An interpretation of latitudinal patterns of forest limits in South and East Asia mountains [J]. *Journal of Ecology*, 1990, 78(2):326-339.
- [23] 唐宇丹,扎西,周直升,等. 西藏那曲树木引种研究——树种选择与种植技术[J]. *西藏科技*, 2010(4): 66-69,80.
- [24] 叶笃正,高由禧,周明煜,等. 青藏高原气象学[M]. 北京:科学出版社,1979.
- [25] GRACE J. Plant Responses to Wind [M]. London: Academic Press, 1977.
- [26] GRACE J. Tree lines [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1989, 324(1223): 233-245.
- [27] JOBBAGY E G, JACKSON R B. Global controls of forest line elevation in the northern and southern hemispheres [J]. *Global Ecology & Biogeography Letters*, 2000, 9(3):253-268.
- [28] GRACE J. Climatic tolerance and the distribution of plants [J]. *New Phytologist*, 1987, 106(1):113-130.
- [29] HOLTMEIER F K, BROLL G. Response of Scots pine (*Pinus sylvestris*) to warming climate at its altitudinal limit in northernmost subarctic Finland [J]. *Arctic*, 2011, 64(3):269-280.
- [30] WALSH S J, BUTLER D R, MALANSON G P, et al. Mapping, modeling, and visualization of the influences of geomorphic processes on the alpine treeline ecotone, Glacier National Park, MT, USA [J]. *Geomorphology*, 2003, 53(1-2):129 ~ 145.
- [31] 洛桑卓玛,拉巴,巴丹卓玛. 西藏那曲地区40多年来降水趋势变化气候分析[J]. *山地学报*, 2014, 32(3): 380-384.
- [32] 张雷,石汉青,燕亚菲,等. 西藏冰雹的气候特征[J]. *高原山地气象研究*, 2012, 32(1):56-60+76.
- [33] 央美,达瓦泽仁,贡觉顿珠. 那曲地区近四十年大风日数变化趋势分析[J]. *西藏科技杂志*, 2011(8): 63-65.

责任编辑: 罗小宁
英文校对: 王芬