

长白山北坡岳桦林线变动的水热条件分析

王晓东, 刘惠清

(东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024)

摘 要:近50年来长白山北坡林线种群呈现明显的扩张态势。为揭示林线变动机制,本文以长白山天池气象站的气象数据(1953-2007年)为基础,结合野外的气温观测,以温暖指数(WI)及湿润指数(HI)为生态气候指标,以 $16^{\circ}\text{C}\cdot\text{月}$ 和 $68.8\text{ mm}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{月}$ 为阈值,通过数据保证率的计算推测55年来长白山北坡岳桦林线的水热条件变化。结果表明:以WI和HI指标确定的林线位置分别在1975~2460 m和1584~2231 m。WI与HI变化对林线高度变动影响的交互作用不显著($p>0.05$),WI与HI变化呈显著负相关($p<0.01$),两种林线变化也呈负相关($r=-0.11<0$),交互作用和相关分析结果显示水热条件的不同步变化使岳桦林线上侵不能达到各自的潜在高度,林线位置波动在1975~2231 m。林线上缘波动的复杂程度高于下缘,波动幅度与胁迫力的大小呈正相关。

关 键 词:长白山北坡;生态气候指标;数据保证率;林线上侵

从山地郁闭森林到树岛间的整个过渡带为高山林线群落交错带^[1],对全球气候变化高度敏感^[2]。长白山北坡岳桦苔原过渡带是研究气候变化与植被相关性的理想地段^[3],其林线的位置、宽度和变动引起人们的高度关注,邹春静等采用梯度取样方法与分形分析判断长白山北坡海拔2080 m附近是林线过渡带^[4]。常禹等利用遥感数据进行景观分类和对环境因子分析的长白山林线位置在海拔1705~1956 m^[5]。于大炮等采用游动分割窗技术辨析了长白山北坡林线位于海拔2000 m,宽度为40 m^[6]。常禹等应用地理信息与多变量分析方法确定长白山北坡林线宽度为50~60 m^[7]。一些学者发现气候变暖导致岳桦上侵^[8],岳桦林面积增加^[9],种群从稳定型向增长型过渡^[10],这些都表明气候对长白山林线变动的影响。近50年全球气候明显变暖,采用林线形状^[11]、径级结构^[12]及景观边界^[7]等的分析证明长白山北坡林线变动非常明显。

但上述研究多是从植被变化角度来认识林线变动,从生态气候角度辨析林线位置、宽度^[13]与气候的关系较少。本文利用实测气温数据与长白山天池54年的气象资料,采用温暖指数和湿润指数分析岳桦林线生态气候的变化,探讨1953-2007年来长白山北坡岳桦林线位置、宽度的变动机制。

收稿日期:2010-10; 修订日期:2011-01.

基金项目:国家自然科学基金项目(40871005)。

作者简介:王晓东(1971-),男,博士生,研究方向为自然地理学。E-mail:wangxd219@nenu.edu.cn

通讯作者:刘惠清,女,教授,博士生导师。E-mail:liuhq595@nenu.edu.cn

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

长白山北坡岳桦林线的海拔为1900~2000 m左右,局部地区可以上升至2100 m以上^[14],属湿润性亚高山气候,冬季寒冷多风,夏季湿润多雨。年平均气温低,生长季节短。土壤贫瘠,土层较薄。环境恶劣,不适于其他树种生长,遂使岳桦成为优势种,少见其它乔木和灌木^[11]。

1.2 野外样方调查与径级结构分析

2008年7-10月和2009年7-10月在研究区内选择一系列样带,每一样带都自林线最前缘(树岛)自高而低与等高线垂直连续取样至坡面郁闭林(郁闭度 >0.2)。样方的大小为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$,共采集108个样方。用GPS(TATO 108)测定样方的经纬度和海拔,用坡度仪测定坡度,主要调查样方内岳桦(灌丛和乔木两种生活型)的棵数和胸径(地面高1.2 m处测量)的大小。胸径用卷尺测量(精确到0.1 cm),树高小于2 m用测绳测量,大于2 m用平板仪测算;树高大于1.5 m精确到0.1 m,树高小于1.5 m精确到0.01 m。

径级结构是年龄结构^[15]的反映,其结构变化可揭示岳桦种群的动态。对样方内岳桦径级结构的

统计分析发现:小径级数量占明显优势($\leq 1\text{ cm}$, 灌丛:48%;乔木:81%),径级结构为明显的倒J型,小径级增长趋势明显。通过GM(1,1)模型的残差分析发现径级为12~15 cm时,残差最大(5.80~9.26),曲线开始出现明显变化(图1),径级结构分析结果表明近50年来岳桦种群膨胀,特别是近20年来这种扩张趋势愈加明显。为揭示种群扩张与水热条件的关系,本文采用温暖指数和湿润指数表征水热条件,从生态气候的角度探讨林线扩张的水热机制。

1.3 气温的测量与推算

在长白山北坡把40个自动测温仪(HO-BO-Temp data-logger)分别沿海拔梯度(1970~2100 m)放在不同的位置测量气温,记录时间间隔为1h,测温时间517d(2007年5月1日至2008年10月1日),统计实地监测的气温数据,逐日、逐月计算该时段的日均温与月均温;再根据2007-2008年天池气象站(2624 m)的气温数据和长白山北坡的垂直递减率^[16]推算40个位置上同期的日均温与月均温;对同一时段内的测量数据和推算数据进行相关性检验和配对样本T检验,结果表明无显著差异(相关检验, $P<0.05$;配对样本的 t 检验, $P>0.05$),可以用天池台站多年的气象资料(1953-2008年)拟推长白山北坡的生态气候数据。

1.4 研究方法

以长白山天池气象站的数据(1953-2007年)为基础,选择对林线分布起关键作用的热量和水分因子推算生态气候指标:温暖指数(Warmth Index, WI)^[17],即月平均气温高于 5°C 的总和,作为岳桦生长的热量条件。计算公式:

$$WI = \sum^n (t - 5) \tag{1}$$

式中: t 为月平均气温($^{\circ}\text{C}$),用湿润指数(Humidity Index, HI)^[18]作为岳桦生长的水分条件。计算式:

$$HI = \frac{P}{WI} \tag{2}$$

式中: P 为年降水量(mm)。选择天池气象站的降水与气温数据(1953-2007年)和长白山北坡的垂直递减率推算长白山北坡不同海拔的月均温和年降水量,计算各海拔的 WI 和 HI 。利用数据保证率计算方法^[19],定量分析长白山北坡岳桦苔原交错带位置,对交错带位置的变化运用趋势分析与小波分

析方法来进一步认识,并用交互作用与相关分析对 WI 和 HI 确定的林线位置及变化进行综合分析。

2 结果与分析

2.1 以WI为指标确定的林线位置 and 变化

2.1.1 林线位置的推断

长白山北坡岳桦生长所需的 WI 值范围为 $16\sim 21.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{月}$ ^[20],选择 $16^{\circ}\text{C}\cdot\text{月}$ 为岳桦种群生存的阈值,依据天池气象站55年的气温数据和垂直递减率推算每一年的岳桦林线位置,将计算结果取均值,确定林线海拔为2106 m。各年份的林线海拔年际变化大(标准差:224.99;单个样本的 $K-S$ 检验($P=0.01<0.05$,分布不均匀)),且均值的保证率只有50%,均值描述林线位置不可靠。

根据多年生植物在特定地段稳定存活温度效率保证率不得低于90%的原则^[21-22],在某一特定海拔高度上 WI 保证率达90%时(连续10年内有9年 WI 值达到 $16^{\circ}\text{C}\cdot\text{月}$),岳桦是景观的主体,此时位置就是林线的下缘;当海拔高度达到 WI 保证率为10%时(连续10年内只有1年 WI 值达到 $16^{\circ}\text{C}\cdot\text{月}$),苔原是景观的主体,岳桦仅在呈斑块状的个别生境出现,此时位置即林线上缘,上下缘的间距就是林线交错带的宽度。根据对长白山北坡55年 WI 保证率的分析,获得林线的上缘为2460 m,下缘为1975 m,上下缘间距485 m。

2.1.2 林线位置变化

以间距10年为运算步长,逐次分为46个时间阶段,即第1阶段:1953-1962年,第2阶段:1954-1963年,以此类推至第46阶段:1998-2007年;用岳桦适宜生存的最低值($WI=16^{\circ}\text{C}\cdot\text{月}$)分别以保证率90%和10%计算每一阶段林线上下缘位置;对

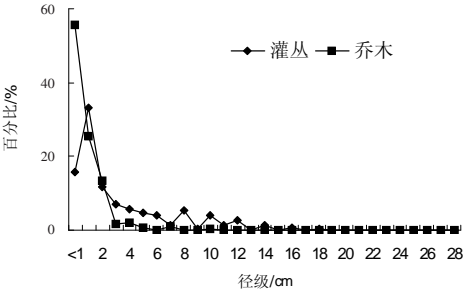


图1 岳桦种群径级结构分析图
Fig.1 Diameter-class structure analysis of *Betula ermanii* population

每一阶段林线上下缘高度作趋势与小波分析,探讨林线位置的变化规律。将46个时段的林线(由WI确定)上下缘高度作趋势分析(图2),从趋势图可见林线呈现整体上升态势,下缘推进快于上缘(斜率:下缘(1.3346)>上缘(0.6845))。推进过程非匀速,呈现较为明显的波动状态($R^2<0.8$),上缘波动幅度大于下缘(R^2 :下缘(0.076)>上缘(0.035)),说明林线对气候条件优越的地段(下缘)变化响应敏感。

46个时段林线高度的趋势分析表明林线整体上升为非线性趋势,为分析林线变动与热量变化的关系,对46个时段的林线上下缘高度作小波分析(图3)。结果显示:林线上缘波动程度高于下缘,变化过程较下缘复杂(下缘突变点:5个;上缘突变点:8个)。下缘在50年代中期迅速上升并持续到60年代末,经短暂调整后,在70年代中期分别经历10年左右的上升期与10年左右的调整期,90年代后以较快速度上侵(年上侵率:31 m/a)。林线上缘波动程度大,过程复杂。上缘从50年代中期到60年代中后期缓慢上侵,60年代末呈较短暂的陡状上侵后经历20多年较长时间的徘徊,80年代中后期开始呈小幅度调动的快速上侵。从上侵过程看岳桦林线呈脉动式上升,下缘呈稳定性上侵,说明在东北

地区快速增暖^[23]的大背景下,下缘热量条件好,胁迫低,对热量变化的响应敏感;上缘则相反,由于热量条件较差,胁迫发生的几率高,林线上侵困难,需要长时间积攒能量才能实现脉冲式上侵。

2.2 以HI为指标确定的林线位置和变化

2.2.1 林线位置的推断

长白山北坡岳桦HI值范围在46.5~68.8 mm/℃·月^[20],选择68.8 mm·月为岳桦种群生存的阈值,依据天池气象站55年的气温、降水数据和垂直递减率推算出各年份的生态气候林线位置,对获得的数据取均值后确定林线位置的海拔为1928 m。但年际变化大(标准差:213.73;单个样本的K-S检验($P=0.014<0.05$,分布不均匀))。

根据多年生植物在特定地段稳定存活的水分均值保证率不得低于80%的原则^[22],当在某一高度上HI的保证率达到80%,岳桦占据优势,此时的海拔即林线的下缘。相反当高度达到HI的保证率为20%时,苔原占优势,岳桦仅在个别生境出现,此时的海拔就是林线的上缘。根据这种对交错带确定的方法,计算55年湿润指数(HI)的保证率,结果表明林线上缘为2231 m,下缘为1584 m,上下缘间距

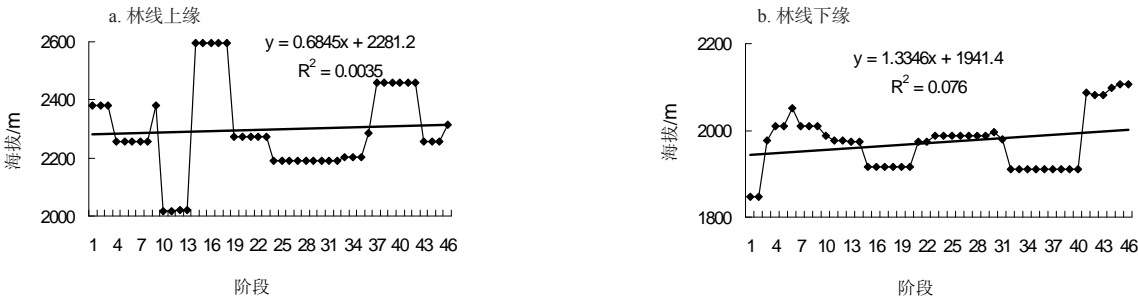


图2 林线上缘(a)与下缘(b)变化的趋势分析图

Fig.2 Change trend of upper limit (a) and lower limit (b) of treeline

(注:第1阶段(1953-1962年),第2阶段(1954-1963年),以此类推至第46阶段(1998-2007年))

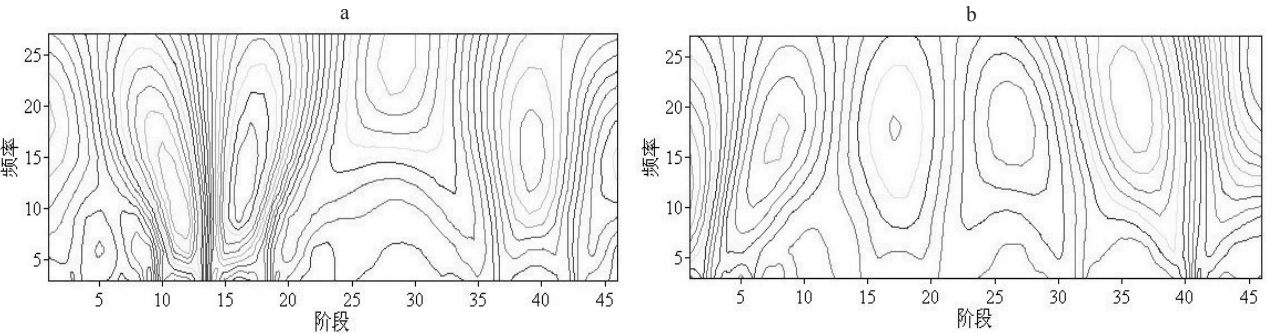


图3 林线上缘(a)与下缘(b)变化的小波分析图

Fig.3 Wavelet analysis of upper limit (right) and lower limit (left) of treeline

(注:第1阶段(1953-1962年),第2阶段(1954-1963年),以此类推至第46阶段(1998-2007年))

648 m。

2.2.2 林线位置变化

采用和温暖指数同样的方法,以10年间距为运算步长,以岳桦适宜生存的HI最高值68.8 mm·月为阈值,分别以保证率80%和20%计算46个时段林线的上下缘,并对全时段林线上下缘作趋势分析与小波分析,探寻林线位置的变化规律。

从趋势图(图4)可以看出林线整体呈上升趋势(斜率:上缘,3.5470>0;下缘,0.2237>0),但推进过程非匀速,波动式上升较为明显($R^2<0.8$),下缘波动程度大于上缘(R^2 :上缘(0.2216)>下缘(0.0008)),表明岳桦林线上侵态势明显。

为进一步分析林线的变化特点,对46个时段林线上下缘位置作小波分析(图5)。结果显示:林线下缘波动过程简单(4个突变点),50年代中期林线上移受阻,此状态持续到70年代末;80年代初脉冲式回升,之后持续15年的波状上升。上缘波动过程复杂(6个突变点),50年代中期到80年代,除两个阶段短暂上侵外,总体呈现缓慢上升趋势;80年代后在高位徘徊,近期有突变下降趋势。从全程看林线呈脉动式上侵,随着降水量的增加(总降水量趋势方程(1953-2007年)斜率:3.5924>0),水分条件

改善,林线上移。

2.3 岳桦林线变化的综合分析

为全面分析林线变化机制,对WI与HI确定的两种林线界线做综合分析。首先,计算长白山北坡2000 m处各年份(1953-2007年)的WI与HI值;其次,按各年份WI与HI确定的两种林线高度和2000 m处的WI、HI值做多元相关分析(表1);最后,对WI与HI值确定的两种林线高度做交互作用分析。结果显示WI与HI值对林线高度影响的交互作用不显著($p>0.05$)说明两种林线的推进在空间上不具叠加效应。WI与HI值的变化呈显著负相关($r=-0.68<0, p<0.01$),两种林线变化也呈负相关($-0.11<0$)。两种林线的推演在时间上不具同步性(负相关),交互作用与相关分析表明两种林线在上移过程中彼此抑制,不能达到各自的潜在高度。在综合考虑岳桦林线高度时,选取两者空间的交集。

表1 温暖指数(WI),湿润指数(HI)和两种林线高度的相关分析表
Tab.1 Correlation analysis among warmth index (WI),

| humidity index (HI) and elevations of two treelines | | | |
|---|---------|---------|-------|
| 相关系数 | WI | HI | X1 |
| HI | -0.68** | | |
| X ₁ | 0.97** | -0.69** | |
| X ₂ | -0.14 | 0.62** | -0.11 |

注: 显著性水平 * $p<0.05$, ** $p<0.01$; X₁:由 WI 确定的林线高度; X₂: 由 HI 确定的林线高度。

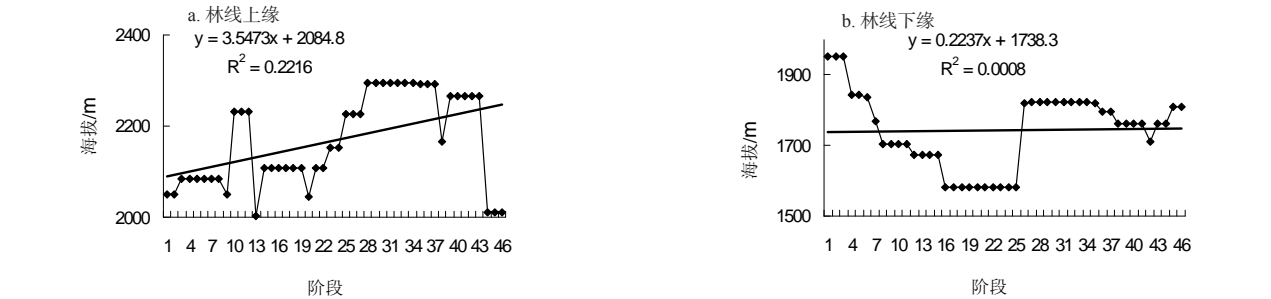


图 4 林线上缘(a)与下缘(b)变化的趋势分析图

Fig.4 Change trend of upper limit (a) and lower limit (b) of treeline
注:第1阶段:1953-1962年;第2阶段:1954-1963年;以此类推至第46阶段:1998-2007年

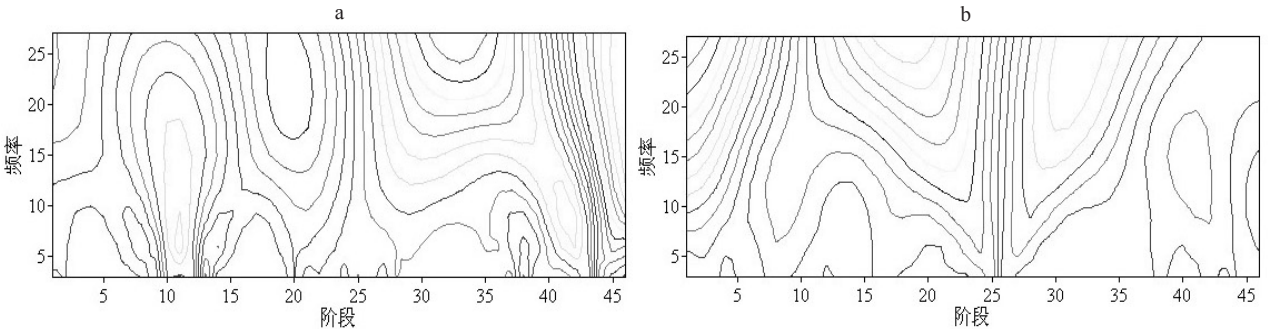


图 5 林线上缘(a)与下缘(b)变化的小波分析图

Fig.5 Wavelet analysis of upper limit (right) and lower limit (left) of treeline
注:第1阶段:1953-1962年;第2阶段:1954-1963年;以此类推至第46阶段:1998-2007年

即长白山北坡岳桦林线范围是1975~2231 m,上下缘间距为256 m。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 气候条件是控制长白山北坡林线分布格局最重要的生态因子^[23],近50年长白山北坡林线在生态气候的控制下,呈明显上侵。

(2) 根据天池气象站的气温、降水数据(1953-2007年)和长白山北坡的垂直递减率推算长白山北坡不同海拔高度的 WI 与 HI 值及岳桦对生态气候的需求低限,确定 $16^{\circ}\text{C}\cdot\text{月}$ 和 $68.8\text{ mm}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{月}$ 为岳桦热量和水分的阈值。

(3) 趋势分析表明,1953-2007年,以 WI 为指标确定的林线上侵260 m,年均上升4.7 m,以 HI 为指标确定的林线上侵216 m,年均上升3.9 m。

(4) 采用数据保证率计算方法,即分别用 WI 与 HI 的数据保证率90%和10%递推计算得出长白山北坡岳桦林线的海拔为1975~2460 m、1584~2231 m。相关与叠加分析发现两种林线在上侵中呈负相关,不具有交互效应,使林线上侵不能达到各自的潜在高度,最终确定岳桦林线位置为1975~2231 m。

(5) 小波分析结果表明岳桦林线呈脉动式上侵($R^2<0.8$),林线下缘波动过程简单,表明下缘条件趋好,对气候变化响应较积极,上缘波动过程复杂,胁迫力较下缘大,上侵阻力较大。

3.2 讨论

(1) 由于缺乏长系列的气象资料,对林线位置变化研究的时间尺度仅为几十年,对百年以上,特别是火山喷发后林线的实际生长年龄^[24]匹配性差,没有从更长的时间尺度上对岳桦林线的演变做以分析。

(2) 在对气候要素仅选择气温与降水两个因子,实际上风^[25],日照,积雪^[26]等因素对林线位置亦有影响,特别是强劲的山谷风必影响林线上侵,本文中对这些因子没有分析。

(3) 本文仅研究了气候林线,林线变化还受地形、土壤^[27]等生境因子影响,本文将在另文中讨论。

(4) 由于林线对气候变化有一定的滞后性与抗性^[28],实际林线与文中利用 WI 与 HI 为指标推测出的岳桦林线有些许差异,且林线高度与宽度与其他

学者研究结果有差异^[29-31],也大于实际宽度^[32]。这与本文仅用两个因子分析林线位置与宽度有关,但本文揭示的只是林线变动的潜在方向,实际林线处种子及幼苗的繁殖生长对气候变化的响应为非线性^[33],与本文的结论存在偏差。但在生态气候控制下,植被对水热条件的变化具有高度敏感性,实际林线变动会以本文揭示的趋势不断对气候变化做出响应。

参考文献

- [1] Korner C H. Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems. Springer-Verlag, Germany, 2003, 344.
- [2] Greenberg J A, Dobrowski S Z, Vanderbilt V C. Limitations on maximum tree density using hyperspatial remote sensing and environmental gradient analysis. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(1): 94-101.
- [3] Noble I R. A model of the responses of ecotones to climate change. Ecological Applications, 1993, 3(3): 396-403.
- [4] 邹春静, 王晓春, 韩士杰. 长白山岳桦种群过渡带位置的研究应用. 应用生态学报, 2004, 5(12): 2217-2220.
- [5] 常禹, 布仁仓, 胡远满, 等. 利用GIS和RS确定长白山自然保护区森林景观分布的环境范围. 应用生态学报, 2003, 14(5): 671-675.
- [6] 于大炮, 唐立娜, 王绍先. 长白山北坡植被垂直带群落交错区的定量判定. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1760-1764.
- [7] 常禹, 布仁仓, 胡远满, 等. 长白山北坡苔原/岳桦景观边界的定量检测. 地理科学, 2003, 23(4): 477-483.
- [8] 周晓峰, 王晓春, 韩士杰, 等. 长白山岳桦苔原过渡带动态与气候变化. 地学前缘, 2002, 9(1): 227-231.
- [9] 刘菲, 金森. 气候变化对东北温带次生落叶阔叶混交林的影响. 东北林业大学学报, 2005, 33(3): 16-17.
- [10] 邹春静, 韩士杰, 周玉梅, 等. 过渡带中岳桦种群生态特征的研究. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 1-6.
- [11] 石培礼, 李文华. 长白山林线交错带形状与木本植物向苔原侵展和林线动态的关系. 生态学报, 2000, 20(4): 573-580.
- [12] 于大炮, 周莉, 董百丽, 等. 长白山北坡岳桦种群结构及动态分析. 生态学杂志, 2004, 23(5): 30-34.
- [13] 杨振林, 石培礼. 高山树线交错带的景观格局与生态过程. 地理科学进展, 2007, 26(1): 44-55.
- [14] 王晓春, 韩士杰, 邹春静, 等. 长白山岳桦种群格局的地统计学分析. 应用生态学报, 2002, 13(7): 781-784.
- [15] Dang H S, Zhang Y Z, Zhang K R. Age structure and regeneration of subalpine (*Abies fargesii*) forests across an altitudinal range in the Qinling Mountains, China. Forest Ecology and Management, 2010, 259(3): 547-554.
- [16] 景贵和. 综合自然地理学. 长春: 东北师范大学出版社,

- 1990: 112.
- [17] 马占云, 林而达, 吴正方. 东北地区湿地生态系统的气候特征. 资源科学, 2007, 29(6): 16-24.
- [18] 沈泽昊, 方精云. 基于种群分布地形格局的两种水青冈生态位比较研究. 植物生态学报, 2001, 25(4): 392-398.
- [19] 韩春坛, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 固液态降水分离方法探讨. 冰川冻土, 2010, 32(2): 249-256.
- [20] 徐文铎. 中国东北主要植被类型的分布与气候的关系. 植物生态学报, 1986, 10(4): 254-263.
- [21] 元来福. 国内外农业气候区划中的热量指标. 气象科技, 1980, 4(8): 62-65.
- [22] 吴正方. 东北地区植被过渡带生态气候学研究. 地理科学, 2002, 22(2): 119-225.
- [23] 郝占庆, 郭水良, 叶吉. 长白山北坡木本植物分布与环境关系的典范对应分析. 植物生态学报, 2003, 27(6): 733-741.
- [24] 钱家驹. 长白山上岳桦林的调查研究. 长白山论文集. 长春: 东北师大出版社, 1981: 164-176.
- [25] Juvik J O, Banko N P, Hughes K. Forest climatology near the tree line in Hawaii. Agricultural and Forest Meteorology, 1993, 66(3-4): 159-172.
- [26] Hiemstra C A, Liston G E, William A. Reiners observing, modelling, and validating snow redistribution by wind in a Wyoming upper treeline landscape. Ecological Modelling, 2006, 197(1-2): 35-51.
- [27] Klopatek M J, Conant T R, Francis M J. Implications of patterns of carbon pools and fluxes across a semiarid environmental gradient. Landscape Urban Plan, 1998, 39(4): 309-317.
- [28] 戴君虎, 崔海亭. 国内外高山林线研究综述. 地理科学, 1999, 19(3): 243-239.
- [29] Yu D P, Wang G G, Dai L M, et al. Dendroclimatic analysis of *Betula ermanii* forests at their upper limit of distribution in Changbai Mountain, Northeast China. Forest Ecol Mang, 2007, 240(1-3): 105-113.
- [30] Wang X P, Fang J Y, Tang Z Y, et al. Climatic control of primary forest structure and DBH-height allometry in Northeast China. Forest Ecology and Management, 2006, 234(1-3): 264-274.
- [31] Deng H B, Hao Z Q, Wang Q L. The changes of co-possession of plant species between communities with altitudes on northern slope of Changbai Mountain. Journal of Forestry Research, 2001, 12(2): 89-92.
- [32] Sun X J, Luo Y L, Tian J, et al. Pollen record of surface sediments from vertical forest zones of Changbai Mountain, Northeast China and their relations to the modern vegetation. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(8): 910-916.
- [33] Cairns D M. Simulating carbon balance at treeline for krummholz and dwarf tree growth forms. Ecological Modelling, 2005, 187: 314-328.

Water and Heat Changes of *Betula ermanii* Treeline on Northern Slope of Changbai Mountains

WANG Xiaodong, LIU Huiqing

(College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: The treeline of *Betula ermanii* population had an obviously expanding trend on the northern slope of the Changbai Mountains in recent 50 years. In order to examine the changing mechanism of treeline, in this study, based on the data from Tianchi meteorological station (2624 m altitude) regarded as a referencing site (1953-2007) and the air temperature field measurement, using two eco-climatic preferences which were warmth index (WI) and humid index (HI), the ecotone boundary between *Betula ermanii* and tundra on the northern slope of the Changbai Mountains was determined by assurance ratio. The results were calculated by using the thresholds at $16\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{month}$ and $68.8\text{ mm}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{month}$, and they showed that the two treelines were at 1975-2460 m and 1584-2231 m respectively. The interaction influence of WI and HI changes on treeline was not significant ($p>0.05$). There was a significant negative correlation between WI and HI change ($p<0.01$). In addition, there was a negative correlation between two treelines changes ($r = -0.11<0$). The results of correlation and interaction analysis indicated that the two treelines were unable to reach their potential height due to the asynchronous changes of heat and water. Therefore, the range of *Betula ermanii* treeline was estimated to be 1975-2231 m. The wavelike rise in *Betula ermanii* treeline (slope was positive, $R^2 < 0.8$) was discussed by trend and wavelet analyses. The fluctuation process was simple in lower treeline (the characteristic of catastrophe point). However, the complex fluctuation process in upper treeline indicated that fluctuation of treeline shift increased owing to large stresses.

Key words: northern slope of Changbai Mountains; eco-climatic preferences; assurance ratio; treeline shift

本文引用格式:

王晓东, 刘惠清. 长白山北坡岳桦林线变动的水热条件分析. 地理科学进展, 2011, 30(3): 313-318.