

文章编号: 1008 - 2786 - (2013) 4 - 448 - 08

长白山西坡小叶章侵入苔原带调查与机理分析

宗盛伟¹, 许嘉巍^{1*}, 吴正方¹

(1. 东北师范大学城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024)

摘 要: 受火山活动干扰, 长白山各坡向植被演替进程表现出较大差异, 东坡植被演替处于早期阶段; 而北坡出现岳桦(*Betula ermanii* Charm.) 上侵现象; 南坡植被演替处于二者之间。经过多年野外调查对比分析, 首次提出长白山西坡苔原带出现小叶章(*Deyeuxia angustifolia* (Kom.) Y. L. Chang) 侵入苔原的现象。调查显示小叶章呈现从低海拔处向高海拔逐渐侵入的趋势, 威胁牛皮杜鹃(*Rhododendron chrysanthum* Pall.) 及笃斯越橘(*Vaccinium uliginosum* Linn.) 等苔原带植物的生存, 并导致苔原带景观变化。在调查长白山西坡小叶章侵入苔原带的基础上, 根据苔原带的环境变化设计小叶章移栽与增温实验、小叶章种子着床实验。实证了小叶章上侵是火山喷发后植被演替的一个特殊阶段, 并提出长白山苔原带西坡小叶章上侵代表了岳桦林带上移的理论。

关键词: 长白山; 苔原带; 小叶章; 火山干扰; 植物演替

中图分类号: Q948.3

文献标志码: A

长白山具有中国高山区域最完整的温带湿润山地垂直带谱。对长白山植被垂直分布研究始于 20 世纪 30 年代的竹内亮(日本)。随后, 众多学者对长白山植被垂直分布规律进行了描述, 分析了水热条件, 并肯定了火山活动对植被分布的制约作用^[1-3]。近年来, 长白山植被垂直带谱的变化研究令人瞩目, 其中, 石培礼、李文华、邹春静、王晓春、于大炮、王晓东、刘惠清等对长白山北坡岳桦种群向上迁移的趋势以及林缘形状、气候变化等外界因素进行了较多分析^[4-7]。

与北坡岳桦(*Betula ermanii* Charm.) 上侵现象相对应, 经过多年的野外实地调查对比以及文献分析^[8-10], 发现长白山西坡岳桦林带的小叶章(*Deyeuxia angustifolia* (Kom.) Y. L. Chang) 正逐步侵入到海拔更高的苔原带, 形成与基质差异明显的斑块。如图 1, 黄色斑块为小叶章斑块, 绿色基质为牛皮杜鹃群落。小叶章为禾本科野青茅属的多年生、

湿中生根茎禾草, 多分布于岳桦林、湿地及低地, 在长白山西坡的岳桦林下尤为常见^[9]。长白山西坡岳桦林下的小叶章侵入苔原带始于 20 世纪 80 年代末, 首先出现在苔原带下缘(林线附近), 并逐年增多、上扩, 形成斑块, 威胁牛皮杜鹃(*Rhododendron chrysanthum* Pall.)、笃斯越橘(*Vaccinium uliginosum* Linn.) 等苔原带植物生存。

植物向高海拔地区侵入存在于全球范围内的高山生态系统中^[11]。但大多表现为乔木的上侵^[12], 草本植物向高海拔地区的侵入现象极为少见。在国外研究中, Tsuyuzaki 和 Shiro 发现日本 Usu 火山喷发形成了一片平均深 27.5 cm 的浅水水域, 多年后演替为湿地植被, 湿生植物并非来自于土壤种子库以及周边植物的繁殖, 而是来源于山峰之外的低海拔生境^[13]; Wearne 和 Morgan 发现了澳大利亚东部金雀儿草侵入亚高山植被现象, 认为这是一种本地生态系统重构^[14]。长白山西坡小叶章向苔

收稿日期(Received date): 2012 - 10 - 13; 改回日期(Accepted): 2013 - 02 - 25。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(41171038&41171072)。[National Natural Science Foundation of China (No. 41171038&41171072)]。

作者简介(Biography): 宗盛伟(1986 -), 男(汉族), 山东青岛人, 博士生, 主要从事自然地理学研究。[Zong Shengwei (1986 -), male, born in Qingdao, Shangdong Province, Ph D candidate, mainly engaged in physical geography.] E-mail: zongsw049@nenu.edu.cn

* 通信作者(Correspondent author): 许嘉巍(1964 -), 男(汉族), 吉林通化人, 教授。[Xu Jiawei (1964 -), male, born in Tonghua, Jilin Province, professor.] E-mail: xujw634@nenu.edu.cn



图1 苔原带小叶章群落斑块(摄于2010-09-16)

Fig. 1 *D. angustifolia* patch in tundra zone(The photograph was taken on September 16th, 2010.)

原带侵入现象是十分新颖而且特殊的现象,这种植被的变化反映了环境的变化。在全球气候变暖的背景下,长白山苔原带气候正逐渐变暖^[15],那么小叶章的上侵是否与之相关? 1986年的台风在长白山西坡产生了大量的林窗,小叶章在岳桦林林窗内迅速生长,这种大量的繁殖是否与侵入苔原带有关? 另外,火山活动对长白山植被有着显著的干扰作用^[3],这是否意味着小叶章的上侵是火山干扰后植被演替的结果? 本文在介绍小叶章侵入苔原带现象的基础上,通过对这三种假设进行实验和理论上初步的论证,针对长白山的区域特点以及环境要素的变化,分析小叶章上侵的驱动因素,从而为全面的理解长白山植被变化和植被分布的特殊性提供依据;并丰富高山地带植物入侵研究,为全球范围内存在的高山植被带上移现象提供实证参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

长白山火山锥体位于中朝两国的交界处,自下而上具有4个明显的植被垂直带,在西坡依次为:针阔混交林带(1 150 m以下);针叶林带(1 150 ~ 1 750 m);岳桦林带(1 750 ~ 2 050 m);高山苔原带(2 050 m以上)。研究区位于长白山西坡林线附近的高山苔原带(41°58'~41°59'N, 127°59'~128°01'E),海拔2 080~2 380 m范围内。苔原带气候条件恶劣,年均气温-7.4℃,风力大,全年平均风速11.7 m/s,太阳辐射量较强,年均506.6 J/cm²,年均降雨量为900~1 340 mm,降水丰富但蒸发强烈。生长季时间短,不足4个月(6月中旬—9月下旬)^[16]。苔原带物理风化强烈,地表多为疏松的火

山岩风化物 and 火山灰等火山喷发物,流水侵蚀严重。高山苔原土直接发育其上,土层薄,粗骨化,土壤肥力低下;质地疏松多孔,透水性和通气性良好,保水能力差。主要为石质苔原土及苔原土、灌丛苔原土3类^[17]。

与低温、强风的环境条件相适应,长白山苔原带植物形态矮小,多匍匐生长,且生长缓慢;以灌木为主,多呈丛生状、座垫状;根系发达,地下部分多于地上部分;具有旱生形态,植物叶片多革质或背面密生绒毛;且植物随着海拔增高趋于矮小^[10]。苔原植被群落结构简单,极地或高山种属约占80%。主要植物有牛皮杜鹃、宽叶仙女木(*Dryas octopetala* var. *asiatica*)、笃斯越橘、高山笃斯越橘(*Vaccinium uliginosum*)、毛毡杜鹃(*Rhododendron confertissimum*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、圆叶柳(*Salix rotundifolia*)、高岭风毛菊(*Saussurea alpicola*)、白山龙胆(*Gentiana jamesii*)、宽叶苔草(*Carex siderosticta*)、松毛翠(*Phyllodoce caerulea*)、长白耧斗菜(*Aquileia japonica*)等^[18]。

1.2 研究方法

根据小叶章侵入苔原带现象提出的3种假设,研究拟从两个方面进行:首先通过野外调查工作得出小叶章的侵入对于苔原带景观以及植物群落的影响;其次针对长白山苔原带西坡环境演变特点设计小叶章移栽与增温实验,以及种子着床实验。

1.2.1 野外调查

调查时间为2010-09-16,调查方法为样带法和样方法。在长白山西坡的苔原带海拔2 080 ~ 2 380 m,按样带法以100 m海拔间隔设置100 m × 100 m的4个样地,进行景观格局调查,记录小叶章侵入斑块的数量、面积、形状等信息。通过分析斑块数量、斑块平均面积、斑块平均周长、景观相似性指数(小叶章斑块的类型面积/景观总面积)、最大斑块指数(最大斑块面积/景观总面积),说明小叶章斑块沿海拔变化情况。

同时,对样地内小叶章侵入斑块进行群落调查。视斑块大小、外形不同,每个样地选择有代表性的3~5个1 m × 1 m的样方,主要统计样方内植物的种类、盖度、高度、株数,计算重要值和 α 群落多样性指数。并根据小叶章盖度将侵入斑块进行分类,如图2:小叶章盖度>70%的斑块(以下称重度侵入斑块,即A)、小叶章盖度70%~30%的斑块(以下称中度侵入斑块,即B)和小叶章盖度<30%的斑块(以下称轻度侵入斑块,即C)。重要值按照草本植物

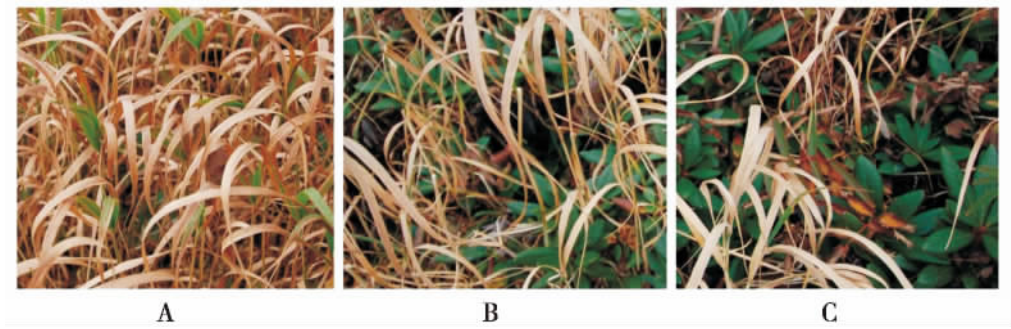


图 2 小叶章不同侵入程度斑块分类
Fig. 2 Classify of *D. angustifolia* patches at different degree of invasion

群落重要值计算方法: 重要值 = 相对高度 + 相对盖度; α 多样性指数是物种丰富度和均匀度的综合反映。本研究采用 2 种较为普遍使用的 α 多样性指数测度群落物种的多样性: Shannon - Wiener 多样性指数(H) 与 Pielou 均匀性指数(E)

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i)$$
$$E = H / \ln S$$

式中 S 为样方物种总数, P_i 为第 i 种植物数量占样方中总物种数的比例。

1. 2. 2 小叶章移栽与增温实验

增温处理采用国际冻原计划 ITEx(International Tundra Experiment) 所采用的被动式增温装置——开顶增温箱 OTC(open top chamber) ^[19]。增温箱为正六边形圆台状, 底部直径 208 cm, 顶部直径 150 cm, 高 60 cm, 斜边与地面的夹角均为 70°。由于小叶章主要侵入牛皮杜鹃和笃斯越橘群落, 在苔原带选择此两种群落进行移栽和增温实验, 每种群落中随机布设 3 组模拟增温样方和对照样方, 组间间隔 3 ~ 5 m; 在岳桦林下挖取 30 cm × 30 cm × 10 cm(长宽高) 的小叶章斑块若干, 每个增温样方及对照样方中分别移栽 3 个斑块。采用 HOBO 数据采集器记录增温箱内外的空气温度和土壤温度, 并观察小叶章生长状况, 主要记录小叶章株高、结穗个数及株数, 数据差异性检验采用 T - test 检验。实验时间为 2011 年 6 月初至 9 月末。

1. 2. 3 种子着床实验

2010 年 9 月在长白山西坡岳桦林下采集了小叶章种子, 晾晒后于室温黑暗处贮藏。2011 - 06 - 15 选取足量种子浸泡处理, 以打破种子休眠, 然后选取沉在水底的成熟种子作为实验用种子。2011 - 07 - 18 进行播种实验, 选取 30 cm × 30 cm 面积大小的牛皮杜鹃群落、笃斯越橘群落及火山灰裸地 3

种生境, 每种生境选取 3 个重复样地, 撒播种子数量设置为 3 个水平: 200 粒、400 粒、1 000 粒。按均匀性原则进行播撒, 记录种子萌发情况。对比野外萌发实验, 在实验室内采用 HDL 人工气象室模拟小叶章种子萌发, 模拟环境设置为温度 20℃, 湿度 40%, 光照 2 500 lx。萌发种子数量同样设置为 200 粒、400 粒、1 000 粒 3 个水平, 每个水平重复 3 次, 记录种子萌发情况。

2 结果与分析

2. 1 景观与群落调查结果

如表 1 所示, 海拔 2 080 m 处位于林线附近, 小叶章斑块数量虽少, 但面积很大, 连续成片; 沿海拔升高小叶章斑块数量、面积呈减小的趋势。从景观相似性指数和最大斑块指数的变化可以看出, 小叶章斑块在苔原带整体景观中的相似性程度很小, 在低海拔处对于景观构成的影响更大, 而在苔原带上部由于分布较少而对于景观的影响较小。总体上, 小叶章斑块呈现向高海拔逐渐侵入的趋势, 并导致苔原带景观变化。

表 1 小叶章斑块沿海拔梯度的景观单元特征
Table 1 Landscape patch characteristics index of *D. angustifolia* patch at altitude gradient

斑块特征	海拔 /m			
	2 080	2 180	2 280	2 380
斑块数量 / 个	5	7	5	3
斑块平均面积 /m ²	1 260.4	145.6	25.8	12
斑块平均周长 /m	148	51	23.2	14
景观相似性指数	0.630	0.109	0.013	0.002
最大斑块指数	0.3	0.03	0.005	0.002

根据小叶章盖度将侵入斑块进行分类,并沿海拔梯度进行调查分析,如表 2。结果显示,重度侵入斑块 A 所占比重随海拔升高而减小,中度侵入斑块的变化并没有沿海拔变化的规律性,而轻度侵入斑块 C 所占比重基本上随海拔升高而增加。说明小叶章斑块是逐步侵入到苔原带植物群落中的,在侵入过程中,海拔越高受到的阻力越大,与牛皮杜鹃、笃斯越橘等苔原带优势物种的竞争体现了其较强的竞争力。

表 2 小叶章不同侵入斑块沿海拔梯度比重变化
Table 2 Change in ratios of *D. angustifolia* patches at three degrees of invasion and altitude gradient /%

斑块类型	海拔 /m			
	2 080	2 180	2 280	2 380
斑块 A	60	43	40	33
斑块 B	20	43	20	33
斑块 C	20	14	40	33

根据小叶章在侵入斑块的相对高度和相对盖度确定了小叶章重要值,如表 3。在重度侵入斑块 A 中小叶章重要值随海拔升高逐渐减小,但在海拔 2 380 m 处重要值较高;在中、轻度侵入斑块 B、C 中小叶章重要值随海拔升高而降低。伴随着海拔的升高,小叶章在群落中的重要值基本呈现减小的趋势,但在侵入苔原带植物群落过程中重要值不断增加,反映了其逐渐侵入的趋势。海拔 2 380 m 处重要值达到了 0.93,群落结构呈现单一化特点,可见,苔原带海拔越高,生态位越少,小叶章一旦侵入就容易演

替为以其自身为主导的群落。

表 3 不同海拔梯度下小叶章不同侵入斑块的重要值变化
Table 3 Changes in Important value of *D. angustifolia* in various invasive patches at altitude gradient

海拔 /m	小叶章重要值		
	斑块 A	斑块 B	斑块 C
2 380	0.93	0.26	0.00
2 280	0.67	0.33	0.11
2 180	0.74	0.36	0.21
2 080	0.88	0.44	0.22

通过对 3 种侵入斑块的植物群落进行群落 α 多样性分析(图 3),可以看出 Shannon - Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数基本呈现随海拔升高而减小的趋势,伴随着小叶章侵入程度的增加,Shannon - Wiener 指数表现出明显的减小趋势,群落的多样性逐渐减小说明小叶章一旦侵入将会威胁其他苔原带植物的生长,导致物种数量的减小;Pielou 均匀度指数在中度侵入群落中均匀度最高,其次是重度侵入斑块。说明在侵入过程中,小叶章的加入使得群落资源分配发生变化,在轻度侵入斑块中整个群落受到扰动表现出较低的均匀性,伴随着侵入的加剧,且在形成斑块之后将逐步取代牛皮杜鹃、宽叶仙女木、笃斯越橘等苔原带植物。特别是在小叶章重度侵入斑块中,较高的小叶章(60 cm)限制了牛皮杜鹃(20 cm)、笃斯越橘(10 cm)的采光,这种竞争机制导致了侵入成功后的小叶章将占据群落优势地位。

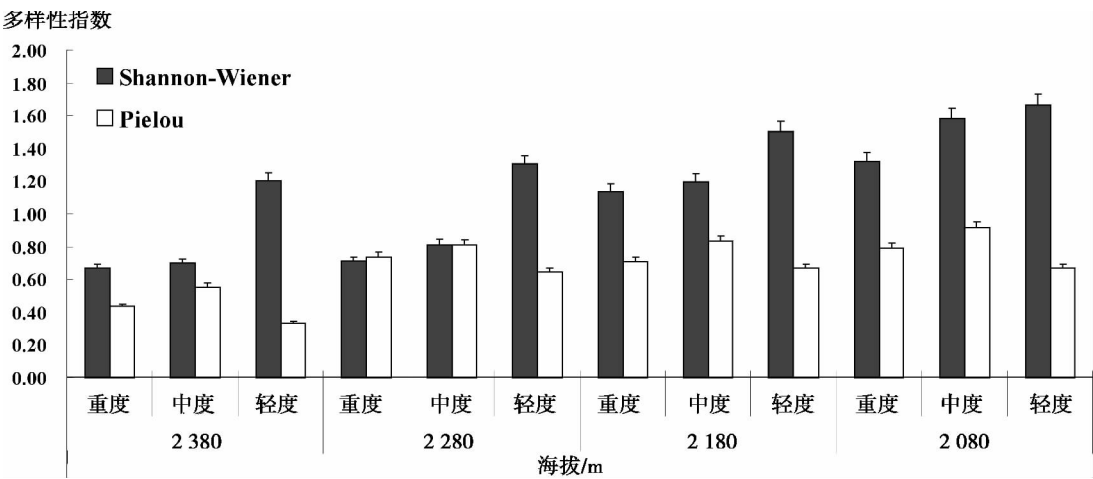


图 3 不同海拔梯度下小叶章不同侵入斑块植物群落 α 多样性变化
Fig.3 Changes in α diversity of *D. angustifolia* in various invasive patches at altitude gradient

2.2 小叶章移栽与增温实验结果

经测量 增温处理后空气温度(20 cm 高度) 平均增加 2.18℃ 地表、5 cm 及 10 cm 温度分别增加 1.53℃, 1℃ 和 0.59℃; 土壤含水量变化较小 5 cm 处土壤含水量减少了 3%, 10 cm 处没有变化。OTC 增温处理后主要起到了提高温度、减小风害的作用, 对土壤含水量影响较小。但在这种增温条件下, 小叶章的生长明显受到了抑制, 如表 4 所示。首先, OTC 除增加温度外还能有效的遮挡苔原带的强风, 植物因不受风害影响, 高度会有所提高^[20], 但小叶章株高增加效果却不明显, 反而在增温箱外的相对大风区域高度反而增加; 其次, 增温处理后繁殖期小叶章没有结穗, 虽然有研究表明 OTC 可能会对植物的传粉产生影响^[21]。但是从株数上来看, 小叶章的无性繁殖也并没有因为增温而产生更多的植株。此外, 增温箱对土壤水分影响较小, 总体上来说改良了小叶章的生长环境, 但却并不能促进小叶章的生长。实验结果与窦晶鑫在三江平原土壤电缆加热后小叶章的表现不同, 其增温后促进了小叶章的生长^[22]。原因可能在于高山地区增温后温度依然较低, 因此并不能促进小叶章的生长, 而三江平原湿地区域是小叶章良好的生存环境, 在此基础上进行增温能够较好的促进其生长。

表 4 增温处理后小叶章生长状况

Table 4 Growth parameters of *D. angustifolia* under warming treatment in two habitats

群落	结穗个数/个		株高/cm		株数/株		
	OTC	Control	OTC	Control	Original number	OTC	Control
RC	0	9	38	53 **	28	35	48 **
VU	0	5	49	62 **	33	48	91 **

注: RC 表示牛皮杜鹃群落(*Rhododendron chrysanthum* Pall.) 群落(下同); VU 表示笃斯越橘(*Vaccinium uliginosum* Linn.) 群落(下同); OTC: 增温箱内; Control: 对照; Original number: 增温处理前原有斑块株数, 取 9 次重复平均值; 结穗个数取 9 次重复平均值; 株高取 9 月底 10 次测量的平均值。* * 表示数据差异性 $p < 0.001$ 。

2.3 小叶章种子着床实验

苔原带恶劣的气候条件使得种子的萌发较为困难, 在实验室条件下种子在 6 d 之后便开始萌发, 萌发率也较之野外条件下高。野外实验中大概 3 周之后种子才开始萌发, 且较大部分的小叶章种子没有萌发, 在笃斯越橘和牛皮杜鹃两种苔原带植物群落

中, 小叶章萌发数量均为 0。这与群落繁茂的枝叶和较厚的枯枝落叶层有关, 小叶章种子难以接触到土壤, 从而难以着床生长。而在火山灰裸地中, 小叶章种子较易萌发, 并随播种数量的增多而增多, 如表 5。这说明小叶章能够在火山灰裸地中着床生长, 从而逐渐发展。在苔原带恶劣的气候条件下, 植物生长的生化过程是受到抑制的, 小叶章种子的萌发率较低从侧面反映了侵入苔原带的困难性。

表 5 不同生境条件下小叶章种子萌发情况

Table 5 Seed germination of *D. angustifolia* in different habitats /%

播种数量 /个	VU	RC	裸地	实验室
	萌发数量	萌发数量	萌发率	萌发率
200	0	0	33	49
400	0	0	32	52
1 000	0	0	36	46

3 结论与讨论

3.1 结论

从实验结果可以看出:

1. 小叶章斑块在苔原带整体景观中的相似性程度较小, 沿海拔升高面积和数量均减少, 小叶章确实存在沿海拔升高逐渐侵入苔原带的趋势, 并导致苔原带景观变化; 伴随着小叶章向苔原带植物群落的侵入, 群落多样性逐渐减小, 而小叶章的重要值则呈现增加趋势; 小叶章的侵入将会威胁其他苔原带植物的生长, 侵入成功后很容易演替为以其自身为主导的群落。

2. 针对气候变暖是否是驱动力的假设, 实验结果显示小叶章对于模拟温度的升高表现出消极的响应, 说明长白山苔原带环境温度的升高并不是小叶章上侵的最直接因素。

3. 长白山苔原带西坡的环境变化主要受到火山喷发以及台风干扰影响, 针对此种假设展开种子着床实验, 结果显示大量的种源是小叶章侵入苔原带的保证, 因此台风的影响是小叶章上侵的影响因素之一; 小叶章能够成功入侵的生境并不是苔原带原生植物群落, 而是火山干扰形成的火山灰裸地, 因此火山干扰是小叶章上侵的因素之一。

3.2 讨论

1. 本次调查与前人工作的比较

在对长白山苔原带植物调查研究中, 钱家驹编

写了长白山苔原带植物名录,其中记录小叶章主要分布在长白山岳桦林带^[9]。黄锡畴、李崇禧针对长白山高山苔原带环境特点分析了其植物特征:具有寒旱生特征的冷湿生、多年生植物^[10]。钱宏对苔原带植被进行了详细的分类与调查,针对不同的区域环境特点划分了5个植被型,以及21个群系和42个群丛,其中小叶章仅出现在牛皮杜鹃-长圆叶柳-小叶章群丛,建群种牛皮杜鹃的盖度为50%,长圆叶柳盖度为25%,小叶章盖度10%~15%,并指出该群丛主要分布在深度约为0.5~1 m的窄沟内^[8]。本次调查结果与以上学者们的调查结果有着显著的不同,从目前的植被状况上看,小叶章的分布范围已经不仅仅局限于深度0.5~1 m的窄沟内,且小叶章的盖度已明显提高,其对于景观水平以及群落水平的影响已十分显著。针对小叶章侵入苔原带的研究已非常必要。

2. 气候变暖的影响

伴随着全球气候变暖,高山地区的气候变化更加突出^[23]。长白山苔原带气候变暖也已经得到证实^[15]。而且众多研究表明气候变暖会导致物种从低海拔向高海拔上移^[21]。但这一理论并不适应于所有区域。长白山苔原带在各坡向上热量条件相似,然而,北坡岳桦的上侵明显,西坡则出现小叶章上侵现象,东坡、南坡却并未发现植物上侵。可见,各坡向上植被对气候变化无相同或者相似的响应。显然,气候变化并不能完全解释小叶章上侵的原因。特别是通过增温实验,可以看出小叶章对气温升高表现出不良的生长状况,说明高海拔地区小叶章对于气候变暖的响应是消极的,或者至少,气候变暖不利于小叶章与笃斯越橘、牛皮杜鹃等苔原带植物的种间竞争。

3. 台风干扰作用

1986年台风过境之后,长白山西坡岳桦林带产生了风倒区,形成了大量的林窗,小叶章等林下优势草本植物得以大量繁殖,随风传播到苔原带的种子数量明显增加。丰富的种源使得小叶章侵入苔原带成为可能。相似研究中,Baret认为*R. alceifolius*侵入高海拔地区的重要策略就是产生大量的种子^[24-25]。但这一假设也不能完全解释小叶章的上侵。长白山苔原带植被覆盖度较高,植物多匍匐于地表,繁茂的枝叶以及较厚的枯枝落叶层使得种子难以落到土壤上,进而生根发芽。萌发实验充分验证了这一点。因此,即使种源丰富,小叶章也难以在

苔原带着床生长。可见台风的干扰并不是小叶章上侵的直接原因。

4. 火山喷发后的植被演替过程

排除气候变暖与台风干扰的间接影响,小叶章上侵现象应当理解为植被演替的一个过程,而这一过程的驱动力也应当源自于外界环境的变化。长白山苔原带的环境变化与火山活动息息相关,众多研究肯定了火山活动对于植被演替的制约作用^[2,26]。长白山西坡苔原发育在火山灰和火山岩风化物之上,土壤侵蚀严重。暴雨后经常形成火山灰裸地。实验表明,火山灰裸地可以为小叶章种子着床提供场所,一旦种子着床成功之后,在恶劣环境的胁迫下快速进行无性繁殖,从而形成侵入斑块。

小叶章是岳桦的主要伴生种,种子源自于岳桦林下。不排除台风干扰对于小叶章上侵的促进作用,但如果种子不能够着床生长,种源再丰富也无法侵入苔原带。对比其他坡面,北坡坡面缺失火山灰,无法形成火山灰裸地,东坡虽有火山灰裸地,但缺少岳桦林,小叶章种子数量少;西坡不仅有火山灰裸地,小叶章种子又极其丰富,在多种因素综合作用下促成了小叶章侵入苔原带现象。

长白山火山喷发后的植被演替表现为高山及亚高山逐步发育苔原带,随后亚高山的苔原将被岳桦林取代。综合北坡岳桦上侵和西坡小叶章上侵现象分析,两者均代表了岳桦林带的上移,都是火山喷发后植被演替的一个特殊阶段。这一论断尚需长时间序列的野外观测与更多调查数据的支持,从而更为深入的理解温带高山地区植被垂直带变动的机理,并进一步解释长白山植被分布的特殊性;同时为高山植物入侵研究提供参考。

参考文献(References)

- [1] Zhao Dachang. Vertical vegetation belts of Changbai Mountain[R]. Research For Ecosystem, 1980, 1: 65-70 [赵大昌. 长白山的植被垂直分布带[G]//森林生态系统研究, 1980, 1: 65-70]
- [2] Xu Wenduo, He Xingyuan, Chen Wei, et al. Characteristics and succession rules of vegetation types in Changbai Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 162-174 [徐文铎, 何兴元, 陈玮, 等. 长白山植被类型特征与演替规律的研究[J]. 生态杂志, 2004, 23(5): 162-174]
- [3] Liu Qijing, Wang Zhan, Wang Shaoxian. Effects of recent volcanic eruptions on Alpine and Subalpine vegetation in the Changbai Mountain[J]. Scientia Geographica Sinica, 1993, 13(1): 57-61 [刘琪璟, 王战, 王少先. 长白山近期火山爆发对高山亚高山植被的影响[J]. 地理科学, 1993, 13(01): 57-61]
- [4] Shi Peili, Li Wenhua. Boundary from effects of timberline ecotone

- on colonization of woody plants and timberline dynamics in Changbai Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 389–398 [石培礼, 李文华. 长白山林线交错带形状与木本植物向苔原扩展和林线动态的关系[J]. *生态学报*, 2000, 20(04): 573–580]
- [5] Zou Chunjing, Wang Xiaochun, Han Shijie. Position of *Betula ermanii* population ecotone in Changbai Mountains[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 15(12): 2217–2220 [邹春静, 王晓春, 韩士杰. 长白山岳桦种群过渡带位置的研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2217–2220]
- [6] Yu Dapao, Zhou Li, Dong Baili, et al. Structure and dynamics of *Betula ermanii* population on the Northern slope of Changbai Mountain[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5): 30–34 [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[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 30–34]
- [7] Wang Xiaodong, Liu Huiqing. Climatic response of *Betula ermanii* from closed treeline in Changbai Mountains[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(5): 551–560 [王晓东, 刘惠清. 长白山突变型林线岳桦对气候变化的响应[J]. *山地学报*, 2011, 29: 551–560]
- [8] Qian Hong. Alpine tundra vegetation on the Changbai Mountain[J]. *Research For Ecosystem* 6: 72–96 [钱宏. 长白山高山冻原植被[J]. *森林生态系统研究*, 1992, 6: 72–96]
- [9] Qian Jiaju. Vertical plant list of Changbai Mountain[M]. Changchun: Northeast Normal University Press, 1979. [钱家驹. 长白山植物垂直分布名录[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1979.]
- [10] A. Pauchard, C. Kueffer, H. Dietz, et al. Aint no mountain high enough: plant invasions reaching new elevations[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(9): 479–486
- [11] J. Lenoir, Jc Gegout, Pa Marquet, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century[J]. *Science*, 2008, 320(5884): 1768
- [12] S Tsuyuzaki. Wetland development in early stages of volcanic succession[J]. *Journal of Vegetation Science*, 1997, 8(3): 353–360
- [13] Lj Wearne, Jw Morgan. Shrub invasion into subalpine vegetation: implications for restoration of the native ecosystem[J]. *Plant Ecology*, 2006, 183(2): 361–376
- [14] X Wang, H Liu. Responses of tree islands to air temperature change at treeline on north-facing slopes of the Changbai Mountains[J]. *Physical Geography*, 2011, 32(4): 374–392
- [15] Wei Jing, Wu Gang, Wang Huan, et al. Phosphorus and sulphur bio-cycling in alpine tundra ecosystem of Changbai Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1230–1234 [魏晶, 吴钢, 王欢, 等. 长白山高山冻原生态系统的磷硫生物循环的研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1230–1234]
- [16] Meng Xianxi. The alpine tundra soil on the Changbai Mountain of China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1982, 2(1): 57–64 [孟宪玺. 长白山的高山苔原土[J]. *地理科学*, 1982, 2(1): 57–64]
- [17] Huang Xichou, Li Chenghao. An analysis on the ecology of Alpine tundra landscape of Changbai Mountains[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1984, 39(3): 285–297 [黄锡畴, 李崇皓. 长白山高山苔原的景观生态分析[J]. *地理学报*, 1984, 39(3): 285–297]
- [18] Qian Jiaju, Zhang Wenzhong. A brief report on the research of the Changbaishang Alpine tundra vegetation[J]. *Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition*, 1980, 1: 51–67 [钱家驹, 张文仲. 长白山高山冻原植物的调查研究简报(I)[J]. *东北师大学报: 自然科学版*, 1980, 1: 49–65]
- [19] G M Marion. Temperature enhancement experiments[G]// *The ITEX Manual*. Danish Polar Center, Copenhagen, Denmark, 1996: 14–19
- [20] H Jönsson, M G Heisler, B E Shapiro, et al. Tundra plants response to warming[J]. *PNAS*, 2006, 103(5): 1155–1156
- [21] K Klanderud, H J B Birks. Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants[J]. *The Holocene*, 2003, 13(1): 1–6
- [22] Dou Jingxin, Liu Jingshuang, Wang Yang, et al. Effect of simulated soil warming on the growth and physiological characters of *Deyeuxia angustifolia*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1845–1851 [窦晶鑫, 刘景双, 王洋, 等. 模拟土壤温度升高对湿草甸小叶章生长及生理特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1845–1851]
- [23] S Solomon. Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge Univ Pr, 2007.
- [24] S Baret, S Maurice, T Le Bourgeois, et al. Altitudinal variation in fertility and vegetative growth in the invasive plant *Rubus alceifolius* Poir (Rosaceae), on Réunion island[J]. *Plant Ecology*, 2004, 172(2): 265–273
- [25] C L Quiroz, P Choler, F Baptist, et al. Alpine dandelions originated in the native and introduced range differ in their responses to environmental constraints[J]. *Ecological research*, 2009, 24(1): 175–183
- [26] Dai Lu, Wu Yaoxiang, Han Shijie, et al. Effect of great volcanic eruption on historical vegetation succession on eastern slope of Changbai Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(10): 1771–1778 [戴璐, 武耀祥, 韩士杰, 等. 火山大爆发对长白山东坡历史植被演替的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(10): 1771–1778]

Investigation and Mechanism Analysis on the Invasion of *Deyeuxia. angustifolia* to Tundra Zone in Western Slope of Changbai Mountain

ZONG Shengwei¹, XU Jiawei¹, WU Zhengfang¹

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

Abstract: The tundra of Changbai Mountain is the typical temperate Alpine tundra. Due to the volcanic interference, the plant successions of the four slopes were different. In eastern slope, it is at the early stage. While, there is *Betula ermanii* invasion to tundra zone in northern slope. And plant succession in the south slope is between them. On the basis of plant community investigation, the paper introduced the phenomenon of *Deyeuxia. angustifolia* invasion to tundra zone. There is a gradually invasive trend of *D. angustifolia* into tundra zone. The Alpine tundra plants, such as *Rhododendron chrysanthum* Pall. and *Vaccinium uliginosum* Linn., were threatened by the invasion. And invasion of *D. angustifolia* changed the landscape of Alpine tundra. To reveal the reason of invasion, we carried out the experiments of transplant, temperature enhancement and seed germination. The results showed that the effect of simulated climate warming on the growth of *D. angustifolia* was negative. And seeds of *D. angustifolia* could not germinate in tundra plant community. Contrarily, it could germinate in bare soil based on volcanic ash. Finally, we draw a conclusion that the invasion of *D. angustifolia* was the special stage of the plant succession after the volcano eruption, which represented the invasion of *Betula ermanii* zone.

Key words: Changbai Mountain; Alpine tundra; *Deyeuxia. angustifolia*; volcanic disturbance; plant succession