

文章编号: 1001-1498(2000) 03-0295-06

# 利用种源试验预测气候变暖 对马尾松生长的影响

周志春<sup>1</sup>, 李建民<sup>2</sup>, 金国庆<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400;

2. 福建省林业厅速生丰产用材林基地办公室, 福建福州 350003)

**摘要:** 研究全球气候变暖对林木生长的影响具有重要意义。以马尾松种源区域试验测定材料为例尝试预测气候变暖对我国林木生长的效应。根据Schmidting's 回归法预测, 若年均温提高2℃, 马尾松9年生树高生长将下降8%左右。作者认为回归法有其固有缺点而难以确切说明气候变暖的效果。鉴于此, 本文参照Matyas's 生长反应模型和作者已有研究基础, 构建不同种源在年均温环境梯度的反应函数, 确定增温后不同地理区域树高生长的变化值, 从而建立随产地年均温或地理纬度的反应模型。结果表明该模型可较好地预测气候变暖在不同地理区域内的效果, 年均温增高2℃将加速北部种源的生长, 而南部种源的生长有不同程度的下降。

**关键词:** 马尾松; 气候变暖; 种源试验; 遗传反应; 适应性

中图分类号: S722.7

文献标识码: A

现代工业革命导致CO<sub>2</sub>等温室气体的增加, 全球气候不断变暖。由于树木在相对较短时间内无法通过迁移或遗传选择来适应这种快速的环境变化, 研究气候变暖对林木生长的效应(EC)具有重要意义。该问题虽可借助数学模型加以解决, 但简单有效的方法是利用林木种源试验来分析、建模和预测林木对气候变化的反应<sup>1-3)</sup>。在林木种源试验中观察到的变异, 从另一个角度可解释为对气候变化的适应性反应, 将一种源从其原产地推移至试验栽植地, 可看作是对环境变化的模拟, 在空间上的变异模式可用来说明对时间尺度上环境变化的反应<sup>4)</sup>。

给定立地上影响一种源表现的主要因子是起源地和栽植地间的气候差异。在林木种源试验中经常观察到这样的现象: 当一种源北移一定距离时其生长表现常超过当地种源, 但北移距离过远则因受冻害而不如当地种源, 向南推移时也逊于当地种源, 这表明林木生长与起源地和栽植地间的气候差异呈曲线关系。据此, Schmidting<sup>5)</sup>利用火炬松(*Pinus taeda* L.) 和挪威云杉(*Picea abies* L. Karst), Carter<sup>6)</sup>利用北美东部8种常见树种的种源试验资料验证生长与温度的回归模型以预测EC。基于生态学距离概念, Matyas 利用生长反应模型模拟班克松(*P. banksiana* Lamb.) 种源生长和成活率对试验地气候的反应, 以确定年均温升高对林木生长的影响<sup>2)</sup>。据预测, 若大气中CO<sub>2</sub>按目前水平继续增长, 21世纪中叶大气中CO<sub>2</sub>含量将达到工业革命前的2倍。假定全球增暖全部由CO<sub>2</sub>效应引起, 则预计到2050年全球将增温2℃左右<sup>7)</sup>。考虑到我国大部分地区处在中纬度, 增温幅度应基本上接近全球平均增温值。本文将利用我国分布最为广泛的针叶树种马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.) 的种源区域试验为例, 尝试研究

收稿日期: 1999-11-08

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(编号: 396205)

作者简介: 周志春(1963-), 男, 江苏丹阳县, 副研究员, 在读博士。

\* 研究中得到南京林业大学陈天华教授和中国林科院亚林所陈益泰研究员的指导, 谨致谢忱。

气候变暖对我国林木生长的影响,以指导变化环境中的林木良种推广和应用,供参考。

## 1 数据来源和研究方法

### 1.1 试验数据来源和筛选

试验数据来源于马尾松第一次全分布区种源区域试验林测定材料<sup>8)</sup>。鉴于幼年树高生长是与适应性有关的最重要的经济性状,适宜 EC 的研究<sup>9)</sup>,因此本文收集 9 个生长较好测试点 9 年生树高测定数据建模来研究 EC<sup>10)</sup>。在这 9 个测试点中,因四川涪陵和河南桐柏 2 个区试点对种源鉴别能力较低,在研究 EC 时未包括这两个区试点(表 1)。

表 1 24 个马尾松种源在 7 个生长较好地点的 9 年生树高均值

种源 (省、县)	原产地 年均温/ °C	各试验点 9 年生树高 $H/m$						
		广西南宁 (21.6 <sup>①</sup> )	广东韶关 (20.5)	福建大田 (18.9)	江西弋阳 (17.8)	福建邵武 (17.7)	四川仁寿 (17.4)	安徽六安 (15.0)
广东高州	22.6	8.10	8.34	7.61	6.52	7.26	5.37	3.89
广东信宜	22.3	8.22	8.50	7.74	6.29	7.55	4.88	3.76
广西岑溪	21.3	8.40	8.59	8.08	6.70	8.06	5.35	-
广西忻城	20.7	8.38	8.98	7.49	6.73	7.37	5.34	3.58
广东英德	20.6	8.09	8.22	7.87	7.00	7.88	-	-
广西宁明	20.5	7.90	8.54	7.48	6.31	7.41	5.16	-
福建永定	20.1	6.36	6.85	6.95	6.55	7.53	4.49	3.98
广西恭城	19.8	7.49	7.91	7.25	6.73	7.33	4.91	3.96
四川涪陵	18.2	5.90	6.40	6.62	-	7.22	4.69	4.08
江西吉安	18.0	5.93	6.71	6.51	6.35	6.69	4.83	3.71
江西崇义	17.9	-	7.41	7.57	6.43	7.76	4.78	4.08
福建邵武	17.7	6.38	6.35	7.37	-	7.74	4.69	3.68
浙江永康	17.5	5.13	5.90	6.37	6.10	6.63	4.19	4.22
湖南慈利	16.8	5.40	6.46	5.85	6.04	6.60	4.49	4.34
浙江庆元	16.7	6.03	6.14	6.80	6.32	6.86	4.39	4.46
四川蒲江	16.4	6.29	6.86	6.85	6.34	6.61	4.30	3.97
安徽潜山	16.3	4.36	5.45	5.36	5.69	5.76	3.44	3.89
湖南安化	16.2	5.89	6.53	6.13	6.04	6.68	4.35	4.48
湖北远安	16.0	4.95	5.82	5.92	6.18	6.63	4.50	3.90
贵州都匀	15.8	6.15	7.69	6.79	6.16	7.13	4.54	4.55
贵州黎平	15.7	-	6.30	6.85	6.68	6.89	4.54	3.76
安徽太平	15.4	5.13	5.45	6.05	5.90	6.43	3.87	3.93
陕西固始	15.3	4.20	5.64	5.34	5.94	6.15	3.26	4.49
陕西城固	14.4	4.24	5.49	5.32	5.50	6.20	3.87	4.15

①括号内为各试验点的年均温度/°C。

### 1.2 研究方法

已有研究证实虽然产地或栽植地的降水量、光照、无霜期等气候因子与林木生长有关,但温度才是最重要的生长限制因子<sup>11,12)</sup>。在温度变量中年均温(T)或年均最低温(MT)的变异最有用,是一个结合纬度、海拔和海洋效应的复合因子,因此本文主要研究 T 或 MT 的变化效应。

因测试点间立地指数差异引起的种源反应变化会影响 EC 研究结果,本文采用 Matyas 和 Yeatman 所描述的生态学距离(Ecological Distance)<sup>13)</sup>。据此概念,种源在测试点上的数量反应(这里指树高生长偏离当地种源的百分数(HD)与种源原产地和测试点间的年均温差异(TD)有关。按 Schmidtling's 回归法<sup>5)</sup>,建立 HD 与 TD 的二次回归模型以预测 EC。在求算

HD 时, 需确定各测试点上的当地种源的树高生长值。因当初在建立种源测试林时未意识到当地种源参试的重要性, 许多测试林没有包括当地种源, 这里将分别测试点建立种源树高生长 (H) 与其原产地年均温 (T) 的回归方程以确定“当地”种源的树高生长期望值<sup>[12]</sup>。

由于 Schmidting 的回归法只能给出 EC 的一般性结论, 因此本文还将参照 Matyas 的生长反应模型<sup>[2]</sup>并结合作者已有的研究<sup>[10]</sup>, 构建不同种源在年均温环境梯度上的树高生长反应函数, 确定各种源在其原产地 (H<sub>0</sub>) 及推移至年均温增高 2 的栽植地 (H<sub>p</sub>) 的树高生长期望值, 建立随原产地年均温或地理纬度变化的 EC 反应模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 利用 Schmidting 的回归法的 EC 研究结果

表 2 列出各测试点上种源树高 H 与原产地年均温 T 的回归方程和相应的“当地”种源树高期望值。由于马尾松树高生长存在显著的种源 × 地点交互<sup>[12]</sup>, 种源 H 与 T 的关系因测试点不同而存在差异。年均温较高的南部栽植点如广西南宁和广东韶关, 因气候温暖适宜, 所有种源的生长潜力都能得到充分表达, 种源 H 与 T 几乎呈线性关系, 来自年均温较高地区的种源树高生长量较大, 而来自年均温较低地区的种源树高生长量较小。对于地处中部的栽植点包括福建大田、邵武和四川仁寿, 种源 H 和 T 呈曲线关系, 原产地年均温高于栽植点的种源生长较快, 低于栽植点的种源生长较慢, H 与 T 的二次多项式回归可解释 56% ~ 68% 的树高变异。江西弋阳是一个较例外的中部栽植点, 年均温接近栽植点处的种源表现最佳。而对于北部的安徽六安栽植点, 虽同样发现种源 H 与 T 呈曲线关系, 但二次多项式回归方程的拟合性较差 ( $R^2 = 0.2236$ ), 生长较慢的种源来自栽植点南部。

表 2 各测试点种源 H 与产地 T 的回归方程和相应的“当地”种源树高期望值

试验地点	种源 H 与其原产地 T 的回归方程	R <sup>2</sup>	“当地”种源树高期望值/m
广西南宁	$H = -3.02 + 0.52 T$	0.814 7**	8.11
广东韶关	$H = -0.33 + 0.40 T$	0.717 6**	7.94
福建大田	$H = -6.87 + 1.22 T - 2.53 T^2$	0.682 0**	7.15
江西弋阳	$H = -3.86 + 1.02 T - 2.48 T^2$	0.563 3**	6.42
福建邵武	$H = -5.74 + 1.22 T - 2.79 T^2$	0.601 3**	7.10
四川仁寿	$H = -4.43 + 0.81 T - 0.017 T^2$	0.639 7**	4.52
安徽六安	$H = 5.82 - 0.14 T + 2.54 T^2$	0.223 6**	4.29

注: \*\* 示在 1% 水平上显著。

根据表 2 给出的“当地”种源树高期望值, 分别测试点求算 HD 和 TD, 然后利用各测试点的数据合并分析, 建立 HD 与 TD 的二次多项式回归方程。图 1 表征 HD 与 TD 的二次多项式方程具有较好的拟合性,  $R^2 = 0.6898$ , 远优于 Schmidting<sup>[5]</sup> 和 Carter<sup>[6]</sup> 对火炬松、挪威云杉、北美东部多种树种的研究结果。该方程截距为 -0.66, 没有显著偏离于 0, 可假设图中曲线为零截距。构成种子调拨模型的图中曲线, 可用来预测年均温增高对林木生长的影响。设定年均温升高 2, 等同于将原产地年均温低 2 的种源推移至试验栽植点。图 1 预测结果认为, 若年均温升高 2, 马尾松 9 年生树高生长将下降 8% 左右。

### 2.2 EC 随产地年均温或地理纬度变化的反应模型

24 个种源在年均温环境梯度上的树高反应函数及增温 2 后树高的变化值 (EC) 列于表

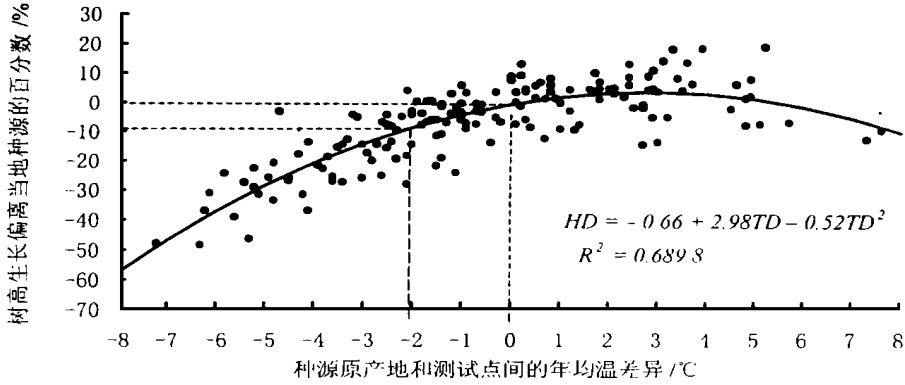


图1 马尾松所有种源试验点 HD 与 TD 回归模型

3. 发现来自年均温较高地区的种源其树高反应函数的拟合性较好, 而随着产地年均温的降低, 反应函数的拟合性变差, 类似种源在纬度环境梯度上反应函数的拟合结果<sup>[10]</sup>。研究表明气候变暖对不同地理区域内马尾松生长的影响是不同的。马尾松中心产区 and 优良种源区, 地处其分布区的南部如南岭山脉和云开大山等, 长期自然选择的结果使得南部种源已适应现有的温暖气候条件, 全球增温的结果若超过南部种源对现有气温适应的极限, 将导致生长势和竞争力的下降。对于中北部的马尾松(这里年均温低于 19.6 ), 气候变暖将使树高生长有显著的增加。

表 3 不同种源在年均温环境梯度的树高反应函数和 EC 值

种源 (省、县)	产地年均温/ 均温/	产地 纬度/ (°N)	在年均温环境梯度上的树高反应函数				$H_o/m$	$H_p/m$	EC/%
			$H = \alpha + \beta T + \gamma T^2$						
			$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$R^2$			
广东高州	22.6	21.09	-36.09	4.02	-0.091	0.90	8.31	7.76	-6.62
广东信宜	22.3	22.35	-35.82	3.93	-0.087	0.83	8.58	8.34	-2.80
广西岑溪	21.3	22.94	-117.41	12.44	-0.307	0.67	8.49	6.02	-29.09
广西忻城	20.7	24.05	-40.44	4.40	-0.098	0.90	8.50	8.77	3.18
广东英德	20.6	24.17	-23.50	3.03	-0.073	0.52	8.15	7.95	-2.45
广西宁明	20.5	22.13	-119.32	12.58	-0.310	0.76	8.43	6.95	-17.56
福建永定	20.1	24.85	-45.62	5.31	-0.134	0.60	6.88	6.17	-10.32
广西恭城	19.8	24.83	-38.01	4.31	-0.102	0.80	7.52	7.67	1.99
四川涪陵	18.2	29.75	-41.87	4.97	-0.128	0.60	6.32	6.47	2.37
江西吉安	18.0	27.08	-46.38	5.38	-0.137	0.79	6.20	6.58	6.13
江西崇义	17.9	25.70	-36.85	4.22	-0.100	0.66	6.62	7.49	13.14
福建邵武	17.7	27.08	-57.29	6.59	-0.169	0.63	6.43	6.97	8.40
浙江永康	17.5	28.90	-37.86	4.60	-0.121	0.47	5.74	6.03	5.05
湖南慈利	16.8	29.50	-28.93	3.59	-0.092	0.49	5.40	6.03	11.67
浙江庆元	16.7	27.82	-30.81	3.78	-0.096	0.47	5.55	6.31	13.69
四川蒲江	16.4	30.25	-35.98	4.20	-0.103	0.66	5.09	6.30	23.77
安徽潜山	16.3	30.63	-30.06	3.71	-0.097	0.34	4.55	5.21	14.51
湖南安化	16.2	28.47	-22.46	2.84	-0.070	0.48	5.11	5.95	16.44
湖北远安	16.0	31.07	-44.91	5.37	-0.142	0.61	4.79	5.90	23.17
贵州都匀	15.8	26.27	-29.96	3.61	-0.089	0.52	4.98	6.25	25.50
贵州黎平	15.7	26.23	-50.59	5.88	-0.151	0.67	4.49	6.16	37.19
安徽太平	15.4	30.28	-35.47	4.29	-0.112	0.44	4.15	5.41	30.36
陕西固始	15.3	32.22	-23.75	3.12	-0.084	0.16	4.40	5.18	17.73
陕西城固	14.4	33.32	-30.46	3.83	-0.103	0.35	3.50	4.85	38.57

从物种散布和进化角度看, 起源于中心产地的中北部种源, 在长期进化过程中曾经历过各种各样的气候变化, 现有的气候也许并不是最适宜的, 气温升高将使中北部种源的生长潜力得以充分发挥, 当然这还应假设降水量等气候因子在比较适宜的范围内。相关分析表明, EC 与产地年均温几乎呈线性关系, 相关系数为  $-0.8657$ , 可通过线性回归方程  $EC = 116.39 - 5.95T$  较好地预测年均温增高  $2^{\circ}\text{C}$  后不同地理区域内马尾松树高生长的变化值。EC 与产地纬度也呈显著的相关 ( $R = 0.7192$ )。

### 3 讨论

气候变暖是一个不可回避的问题, 对林木生长产生长期而深刻的影响, 还可能引起树种分布区的改变。研究林木群体对气候变化的反应, 选择表型稳定的群体不仅可扩大其栽植范围, 而且能较好地应付意外的环境变化。种源试验是林木遗传育种的基础, 原在于确定最具优良性状的林分、群体和地区, 为人工造林提供优良的种植材料。种源试验除具严格意义上的营林目的外, 还可用于诸如遗传型与环境互作、区域划分、适应和生态极限、遗传变异和基因迁移模式、起源中心确定、分类和进化历史、早晚相关、环境成图、驯化效果和现有进化性变化、引种效应、生理滞后效应、与其它树种互作等研究, 而利用林木种源试验的数据建模则是研究 EC 非常有效的方法<sup>[4]</sup>。

本文采用的 Schmidtling's 回归法<sup>[5]</sup>虽能预测气候变暖对林木生长的影响, 但仅能说明 EC 的大致预测结果。研究发现许多树种存在着适应滞后性 (Adaptation Lag)<sup>[4]</sup>, 在大多数栽植地通常来自较温暖地区的种源表现较好, 对于栽植地北部的种源其 HD 大多低于零, 这样利用 HD 和 TD 构建的回归模型其 EC 预测结果对多数树种来说大致相似, 即全球气候变暖将使林木生长和木材产量下降, 因此作者认为 Schmidtling's 回归法有其固有的缺点, 难以确切说明 EC。利用回归模型, Schmidtling 认为年均温提高  $4^{\circ}\text{C}$ , 火炬松和挪威云杉的树高生长将比遗传适应的种源减小  $5\% \sim 10\%$ <sup>[5]</sup>。Carter 认为年均最低温的升高将使北美东部 8 种常见树种的高生长有不同程度的下降<sup>[6]</sup>。

与利用回归法研究结果不同的是, 一些学者认为气候变暖对不同地理区域林木的影响不同, 这应比较符合实际情况。Beuker 发现在芬兰北部若年均温提高  $4^{\circ}\text{C}$ , 挪威云杉和欧洲赤松 (*P. sylvestris* L.) 木材产量将有显著增长, 在其南部则影响较小甚至木材生产略有下降<sup>[1,15]</sup>。Matyas 认为若降水量充足, 年均温的升高将加速班克松的生长, 但在其分布区南缘, 树木生长和竞争力将下降, 且会发生群落演替<sup>[2]</sup>。本研究结合作者已有研究基础<sup>[9]</sup>, 构建了 EC 随产地年均温和地理纬度变化的气候模型, 可用来较好地预测气候变暖对不同地理区域内林分生长的影响。对于广泛分布于我国东部湿润亚热带地区的马尾松来讲, 已有研究都发现温度变量是马尾松生长的主要限制因素, 气候变暖对马尾松生长的作用非常深远。对于北部种源, 降水量似不成问题, 增温的结果将加速北部种源的生长, 而对南部种源, 气候变暖将使其生长有不同程度的下降。

#### 参考文献:

- 1] Beuker E. Long-term effects of temperature on the wood production of *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* (L.) Karst. in old provenance experiments [J]. Scan J For Res, 1994, 9(1): 34~45.
- 2] Matyas C. Modeling climate change effects with provenance test data [J]. Tree Physiology, 1994, 14: 797~804.
- 3] Persson B. Effects of climate and provenance transfer on survival, production and stem quality of Scots pine (*Pinus*

- sylvestris*) in northern Sweden R] Swed Univ Agric Sci Dep For Yield Res Rep, 1994, 37.
- 4] Matyas C. Effect of environmental change on the productivity of tree populations. Perspectives of forest genetics and tree breeding in a changing world JJ. IUFRO-World-Series, 1997, 6: 109 ~ 121.
  - 5] Schmidting R C. Use of provenance tests to predict response to climate change: loblolly pine and Norway spruce JJ. Tree Physiology, 1994, 14: 805 ~ 817.
  - 6] Carter K K. Provenances tests as indicators of growth response to climate change in 10 north temperate tree species JJ. Can J For Res, 1996, 26(6): 1089 ~ 1095.
  - 7] 陆雅海, 朱华潭. 全球气候变化对我国农业的影响与对策 JJ. 世界农业, 1996, (8): 41 ~ 43.
  - 8] 荣文琛, 岳水林, 赵世远, 等. 马尾松造林区优良种源选择 JJ. 林业科学研究, 1994, 7(5): 542 ~ 549.
  - 9] Matyas C. Climate adaptation of trees: rediscovering provenance tests JJ. Euphytica, 1996, 92(1~2): 45 ~ 54.
  - 10] 周志春, 黄光霖, 金国庆. 马尾松不同种源对环境的反应函数和优良种源的合理布局 JJ. 林业科学研究, 1999, 12(3): 229 ~ 236.
  - 11] 全国马尾松种源试验协作组. 马尾松种源变异及种源区划分的研究 JJ. 亚热带林业科技, 1987, (2): 81 ~ 89.
  - 12] 周志春, 金国庆. 马尾松不同产地的遗传稳定性和生态学基础 JJ. 南京林业大学学报, 1998, 22(3): 79 ~ 79.
  - 13] Matyas C, Yeatman C W. Effects of geographical transfer on growth and survival of jack pine populations JJ. Silvae Genetica, 1992, 43(6): 370 ~ 376.
  - 14] Lindgren D, Persson A, Matyas C. Vitalization of results from provenance tests. Perspectives of forest genetics and tree breeding in a changing world JJ. IUFRO-World-Series, 1997, 6: 73 ~ 85.
  - 15] Beuker E, Kolstrom M, Kellomaki S, et al. Change in wood production of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* under a warmer climate comparison of field measurements and results of a mathematical model JJ. Silva Fennica, 1996, 30(2/3): 239 ~ 246.

## Predicting the Impact of Climate Warming on Growth of Masson Pine Using Provenance Regional Trials

ZHOU Zhi-chun<sup>1</sup>, LI Jian-min<sup>2</sup>, JIN Guo-qing<sup>1</sup>

(1. The Research Institute of Subtropical Forestry, CAF, Fuyang 311400, Zhejiang, China;

2. Forestry Bureau of Fujian Province, Fuzhou 350003, Fujian, China)

**Abstract:** Global climate change is an undoubtedly fact. It is very important to evaluate and predict impact of climate warming on tree growth. This study is attempted to determine the impact of global warming on growth of forest tree using data from provenance tests of masson pine (*Pinus massoniana*) as an example. It was found that Schmidting's regression model predicts a loss of about 8% in height growth if the average yearly temperature increases by 2 °C. The author believes that Schmidting's regression method couldn't be used to precisely evaluate the effect of climate warming because of its inherently shortcoming. Based on Matyas's growth response model and author's research foundation, therefore, the author tries to model response functions of various provenances at average yearly temperature gradient, calculate height changes at different geographic areas after climate warming and establish response model of height change with average yearly temperatures or latitudes of seed sources. The results indicated that impacts of climate warming on masson pine height growth at different geographic zones could be predicted with response model of height change. An increase in average yearly temperature by 2 °C will result in accelerated growth at the northern part of masson pine distribution area if precipitation is sufficient, and at the southern of distribution area, the growth will decline.

**Key words:** masson pine; climate warming; provenance tests; genetic response; adaptability