

基于 OTC 模拟的臭氧浓度升高对 华山松生长的影响*

刘常富¹ 刘辰¹ 何兴元² 阮亚男⁴ 徐胜² 陈振举^{1,2,3**} 彭俊杰² 李腾²

(¹沈阳农业大学林学院, 沈阳 110866; ²中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110164; ³中国森林生态系统监测网络辽宁辽河平原森林生态系统定位研究站, 辽宁昌图 112500; ⁴辽宁大学生命科学院, 沈阳 110036)

摘要 利用树木年代学技术,以生长在开顶箱内的华山松为试材,研究高浓度臭氧条件下树木个体生长及典型森林生态系统的动态演变规律和适应机制.结果表明:高浓度臭氧抑制了华山松茎节的生长,茎节长度、直径年均生长量分别降低了 35.0% 和 12.9%;年轮宽度生长量和年轮细胞数量分别降低 11.5% 和 54.1%,但管胞直径的变化不明显.区域水平上,臭氧浓度的波动与当地植被生长变化(NDVI)显著相关.

关键词 华山松 臭氧 径向结构 开顶箱 树木年代学 木本植物解剖学

文章编号 1001-9332(2013)10-2731-06 **中图分类号** Q89 **文献标识码** A

Effects of elevated ozone on *Pinus armandii* growth: A simulation study with open-top chamber. LIU Chang-fu¹, LIU Chen¹, HE Xing-yuan², RUAN Ya-nan⁴, XU Sheng², CHEN Zhen-ju^{1,2,3}, PENG Jun-jie², LI Teng² (¹ College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; ² State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110164, China; ³ Research Station of Liaohe-River Plain Forest Ecosystem, Chinese Forest Ecosystem Research Network, Changtu 112500, Liaoning China; ⁴ College of Life Science, Liaoning University, Shenyang 110036, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(10): 2731–2736.

Abstract: By using open-top chamber (OTC) and the techniques of dendrochronology, this paper studied the growth of *Pinus armandii* under elevated ozone, and explored the evolution dynamics and adaptation mechanisms of typical forest ecosystems to ozone enrichment. Elevated ozone inhibited the stem growth of *P. armandii* significantly, with the annual growth of the stem length and diameter reduced by 35.0% and 12.9%, respectively. The annual growth of tree-ring width and the annual ring cells number decreased by 11.5% and 54.1%, respectively, but no significant change was observed in the diameter of tracheid. At regional scale, the fluctuation of ozone concentration showed significant correlation with the variation of local vegetation growth (NDVI).

Key words: *Pinus armandii*; ozone; radial structure; open-top chamber; dendrochronology; wood anatomy.

臭氧是一种对植物影响很大的强氧化剂,对流层中臭氧浓度升高对植物的影响已经成为当今世界密切关注的问题.目前,大气臭氧浓度较工业革命前升高了 38%,并且将以每年 1%~2% 的速度继续上升^[1].据估计,与 2000 年相比,2100 年对流层臭氧

浓度将持续升高,其最高增幅可达 62%^[2].全球约有 1/4 国家面临臭氧浓度 >60 nmol·mol⁻¹ 的威胁^[3-4].我国大气中平均臭氧体积分数为 50×10⁻⁹~60×10⁻⁹,且东部地区比西部地区高 20×10⁻⁹^[5].这势必影响区域森林生态系统中个体与群体的生长和演化.在全球臭氧浓度变化趋势下,开展不同树种对臭氧的响应特性研究有助于了解树木个体和群体生长改变和减缓环境胁迫的潜力和机制.

研究发现,树木年轮细胞的个数、大小和细胞壁厚度等细胞尺度参数能够提供分辨率较高、气候信

* 国家自然科学基金项目(31100327,41071035,31000225,41271066,31170573,31270518)、沈阳农业大学“天柱山学者”计划项目、中国森林生态系统监测网络 CFERN & GENE 奖励计划项目和辽宁省建筑生态物理技术与评价重点实验室开放基金项目(JZ-200909)资助.
* * 通讯作者. E-mail: zhenjuchen@hotmail.com
2012-11-23 收稿,2013-07-24 接受.

息丰富的代用资料^[6], 同时也能反映出不同于年轮宽度的气候信息^[7-8], 有助于全面地了解树木生长受气候和环境影响的参数化过程. 目前年轮细胞结构分析正在成为研究全球(气候)变化与树木生长关系的新焦点. 国内已有关于树木年轮细胞与温度、降水关系的研究^[9-10], 而年轮细胞结构对臭氧浓度的响应研究却鲜见报道.

华山松(*Pinus armandii*)是我国特有的五针松树种, 耐寒力强^[11], 自然分布跨 13 个纬度(23°30'—36°30' N)、24 个经度(88°50'—113° E)^[12], 是我国森林的主要组成树种之一, 也是北方大面积荒山造林的主要树种和极有应用潜力的城市园林绿化常绿树种.

本研究以华山松为例, 通过开顶箱模拟高浓度臭氧环境, 研究高浓度臭氧条件下华山松的年轮结构变化特征, 探寻大气臭氧浓度升高对北方针叶树种径向生长的影响, 为研究年轮细胞结构对环境变化的响应提供科学依据.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

试验地点位于辽宁省沈阳市的中国科学院沈阳树木园(41°46' N, 123°26' E)内, 海拔 41 m, 占地面积 5 hm². 该地区属暖温带半湿润季风型大陆性气候, 四季分明, 雨热同期, 年均气温 7.4 °C, 极端最高气温 38.3 °C, 极端最低气温 -32.3 °C, 年均降水量 755 mm, 降水主要集中在 6—8 月, 占全年降水量的 64.4%, 无霜期 150 d, 地带性土壤为淋溶褐色土.

1.2 供试材料

试验设备主要为开顶箱(高 3 m、直径 4 m). 试验设置高浓度 O₃ 处理(80±8 nmol·mol⁻¹, 约为目前大气本底浓度的 2 倍, 以下简称 O 处理), 并以自然臭氧浓度 45 nmol·mol⁻¹ 处理为对照 CK, 每个处理 3 次重复. 2007 年选取自然生长的 4、5 年生华山松植株栽植于开顶箱内, 分别于 2007 年 6 月中旬至 2007 年 10 月上旬、2008 年 6 月中旬至 2008 年 10 月上旬通 O₃, 每天 8:00—16:00 通气. 于 2011 年 11 月中旬采集树木轮盘及枝茎生长量数据.

1.3 样本采集及分析

分别于 2010 年和 2011 年 11 月下旬采用刻度尺和游标卡尺逐年测量华山松枝茎长度和枝茎直径生长量. 测量结果取两次测量的平均值, 用 Z 指数值进行标准化^[13].

2011 年 11 月下旬, 在每个开顶箱中选定华山

松样木 5 株, 伐倒后在树木近地面一端锯取厚度约 4 cm 的圆盘, 编号. 置于室内通风处晾干, 抛光圆盘端表面, 采用 80、240、400、600 目的砂纸逐级打磨, 直至圆盘表面年轮界线清晰可见. 在打磨好的圆盘上, 通过髓心做两条互相垂直的基准线, 准确定年后, 用精度为 0.001 mm 的 LINTAB5 树木年轮测量分析系统, 逐轮测量所设基准线方向的各年的年轮宽度, 取平均值、标准化.

采集各处理中华山松不同树木上的多年生枝, 用无水乙醇浸泡, 4 °C 低温保存待用. 将多年生枝用小型滑动切片机(G. S. L. 1)沿径向切成厚度为 20 μm 的薄片, 置于载玻片上, 用配置好的沙黄:AS-TRA BLUE 溶液(2:1)染色 15 min, 再将试样按照清水-无水乙醇-二甲苯的顺序清洗干净, 封胶、晾干. 将制作好的切片用生物显微镜图像采集系统获取细胞图像信息. 本研究采用 OLYMPUS(BX51)系统显微镜采集切片图像比例为 1:200. 细胞切片图像样本片段在 Photoshop 图像软件下连接细胞图像, 并以使图像更清晰. 每年年轮从当年的晚材与下一年早材的交界线开始, 向早材方向逐个测量, 为了均匀反映树木生长状况, 对每年的树木年轮沿径向随机选取大体平行的 3 条直线, 逐年测量细胞的数目和管胞的径向直径. 按照以上步骤逐轮测量其细胞数量及大小. 求取 3 条直线的平均值并且标准化.

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 16.0 软件对各项指标进行数据处理和制图. 大气臭氧浓度与区域植被指数(NDVI)数据来自荷兰皇家气象研究所数据共享网站(<http://climexp.knmi.nl/>), 选用区域包含模拟试验所在地的典型东北地区(42°—48° N, 120°—128° E), 其公共区间为 1981—2001 年. 格点臭氧数据应用前, 选用中国气象科学研究数据共享服务网站(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)瓦里关站(36° N, 101° E)的大气臭氧浓度数据验证其对中国局部区域的适用性和有效性.

2 结果与分析

2.1 高浓度臭氧对华山松枝茎生长量的影响

由图 1 可以看出, 高浓度臭氧条件下华山松的茎节长度和直径的生长受到抑制. 2007 年将树苗移入开顶箱后, O 处理与 CK 的苗木茎节长度生长量当年均明显下降, 2008 年茎节长度生长量均显著升高, 出现生长释放现象^[14], 2007—2008 年, O 处理

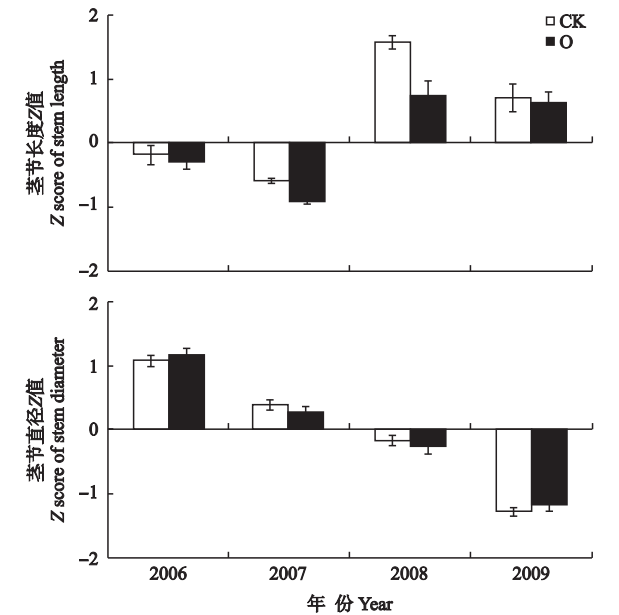


图 1 不同处理华山松的茎节长度和茎节直径生长量标准化 Z 值

Fig. 1 Z-scores of increment of stem length and diameter of *Pinus armandii*.

O:高浓度 O₃ Elevated ozone (80±8 nmol·mol⁻¹); CK:对照 Control (45 nmol·mol⁻¹). 下同 The same below.

的开顶箱内华山松茎节长度相对生长率比 CK 降低 45.5%; 华山松茎节长度的年均生长量降低了 35%. 2009 年停止高浓度臭氧熏蒸后, 对茎节长度生长的抑制作用有所缓解.

对华山松茎节直径的年均相对生长率比较发现, 高浓度臭氧熏蒸处理的茎节直径平均相对生长率低于 CK, 表明高浓度臭氧对茎节直径生长有抑制作用(表 1). 臭氧浓度倍增使华山松茎节直径年均生长量降低 12.9%, 2009 年停止高浓度臭氧熏蒸后, 对茎节直径生长的抑制作用有所缓解.

2.2 高浓度臭氧对华山松年轮细胞生长的影响

由图 2 可以看出, 在高浓度臭氧处理(2007—2008 年)期间, 与 CK 相比, O 处理的华山松年轮宽度年均降低 11.5%. 说明年轮宽度对臭氧浓度升高响应的指示性比茎节长度、茎节直径更精准. 一般认为, 生长变化率超过 25%、50%、100% 分别为轻度、

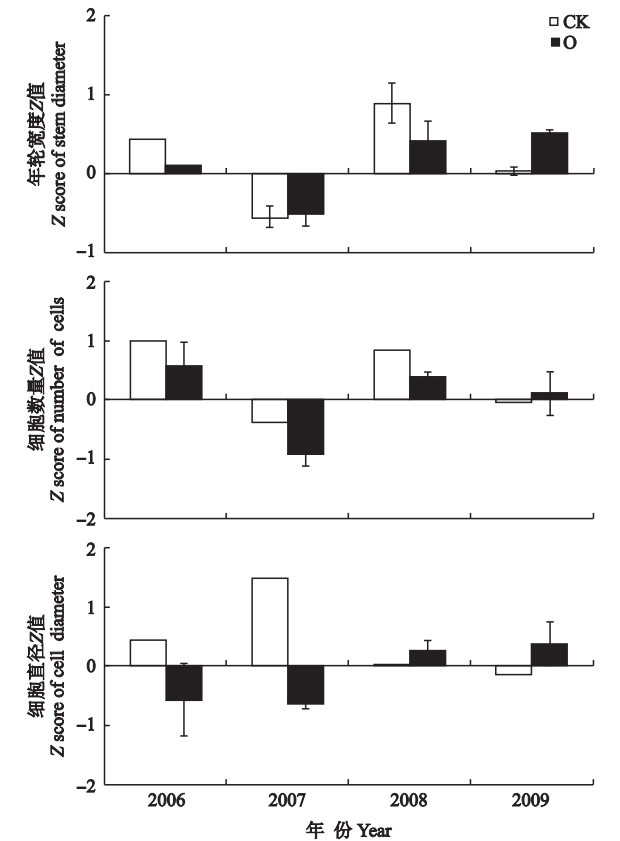


图 2 华山松年轮宽度及细胞数量和直径变化标准化 Z 值

Fig. 2 Z-scores for the variations of *Pinus armandii* tree-ring width and trees-ring cell numbers.

中度和强度释放^[15]. 本研究中, 2007 年华山松的年轮宽度出现中度生长释放现象, 2008 年 O 处理平均生长释放量为 56.4%, 低于 CK 的 69.8%.

2007—2008 年, O 处理的开顶箱内华山松管胞数量降低 54.1%, 均小于 CK, 说明高浓度臭氧抑制了华山松管胞数量的增长. 但是, 高浓度臭氧对其管胞直径并没产生明显的影响.

2.3 臭氧浓度变化对区域森林植被的影响

臭氧的垂直分布主要集中在中、低平流层, 对流层臭氧约占臭氧总量的 10%, 上下各层间浓度的变化有关联性^[16]. 我国瓦里关站(36° N, 101° E)监测的大气臭氧变化与所对应的空间格点数据一致($r_{1991-2001}=0.65, P<0.01$), 说明空间格点数据可以有效地指示区域乃至地表臭氧浓度的变化, 所以采用区域长序列大气臭氧浓度格点数据研究大气臭氧变化对区域森林植被的影响, 可在宏观水平上进一步验证臭氧浓度升高对树木生长的胁迫作用. 所选地区(42°—48° N, 120°—128° E)数据显示, 每年 3 月臭氧浓度最高(417.31 DU), 8 月最低(304.05 DU). 公共区间(1981—2001 年)内, 格点

表 1 华山松茎节直径的年均相对生长率

Table 1 Annual relative growth rate of *Pinus armandii*'s stem diameter (%)

处理 Treatment	2006	2007	2008	2009
O	15.3	14.5	22.0	29.4
CK	14.2	16.5	22.8	31.8

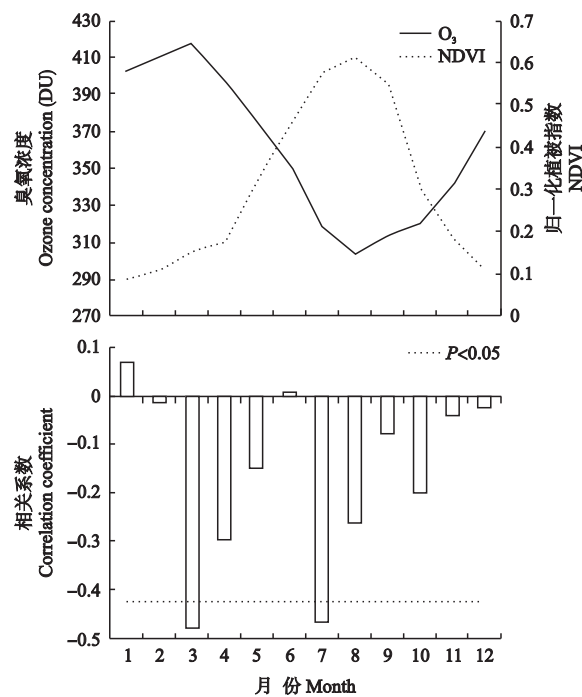


图3 1981—2001年东北地区月均臭氧浓度(O_3)与NDVI相关性

Fig. 3 Correlation between monthly ozone concentration (O_3) and NDVI in Northeast China from 1981 to 2001.

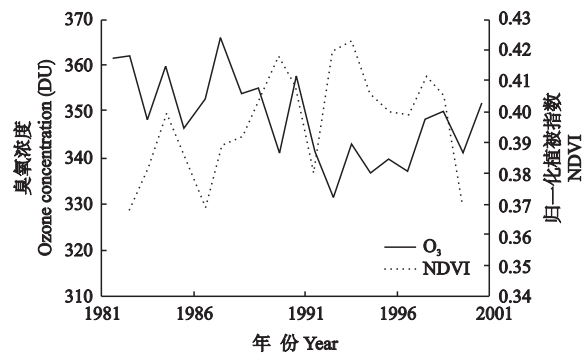


图4 1981—2001年东北地区生长季(3—10月)内臭氧浓度(O_3)与NDVI的变化

Fig. 4 Change of ozone concentration (O_3) and NDVI in the growing season (from March to October) in Northeast China from 1981 to 2001.

数据指示的区域大气臭氧浓度与植被(NDVI)变化呈负相关(图3),其中3月和7月达到显著水平,臭氧浓度与NDVI变化的相关具有显著的季节特征。

公共区间内(1981—2001年),臭氧波动与植被变化(NDVI)在生长季(3—10月)呈反相位变化(图4),而且在年际、长时间尺度上臭氧浓度变化与植被覆盖指数NDVI也呈显著负相关。

3 讨 论

3.1 高浓度臭氧胁迫对树木年轮细胞的影响

树木年轮的形成要经由形成层细胞分裂、径向扩张和成熟3个过程^[17-18],细胞分裂速率、伸长速率和细胞壁增厚速率受到外界环境的影响形成宽窄不等的年轮.臭氧作为一种氧毒性污染物,在进入树木细胞后产生大量活性氧产物,持续的臭氧胁迫打破了植物体内活性氧与抗氧化系统之间的平衡,对树木组织细胞产生毒害作用,影响其正常生理功能和物质代谢^[19],降低叶片气孔导度^[20],促使叶片气孔关闭^[21],降低树木光合速率^[21-23],影响树木水分及养料的运输^[24],迫使可溶性糖含量相应降低,直接影响葡萄糖的合成及碳水化合物的存储和运输^[25],进而抑制树轮细胞形成层和其他分生区的生长,导致年轮细胞合成速率下降^[26],年轮细胞数量减少.年轮宽度的生长主要包括细胞数量和体积的生长.本研究的结果表明臭氧浓度的升高降低细胞分裂的速度,而对分化过程中细胞直径影响不大。

3.2 臭氧浓度升高对树木径向生长的抑制作用

由于高浓度臭氧对树木生理机能的胁迫,使得树木(径向)生长受到抑制:挪威云杉(*Picea abies*) 在开顶箱臭氧浓度提高1.5倍时,总生物量降低8%^[27];美国五针松(*Pinus strobus*) 在臭氧浓度升高后,年轮宽度增长受抑^[28];黑杨(*Populus nigra*) 在高浓度臭氧条件下年轮宽度生长量降低了46%^[29];臭氧浓度倍增导致白桦(*Betula platyphylla*) 导管数量减少,细胞壁厚度增加等.本研究也表明,高浓度臭氧抑制华山松茎节长度和直径的生长,抑制年轮宽度及年轮细胞数量的增长。

本研究中细胞数量降低幅度远大于年轮宽度、茎节长度、茎节直径,表明年轮细胞的生长参数具环境胁迫敏感性,年轮细胞水平的变化所含环境信息丰富。

不同树种对臭氧的敏感性不同^[30-31].开顶箱臭氧熏蒸试验研究发现,欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*) 比黑杨对臭氧浓度变化更敏感;速生树种对臭氧浓度变化的响应更敏感^[30],针叶树种与阔叶树种对臭氧浓度升高的响应机制亦不同.所以,开展更多树种对臭氧浓度升高的响应研究,有助于进一步系统了解树木生长与环境因子变化的关系。

3.3 臭氧浓度升高对区域森林生态系统的影响

高浓度臭氧对树木生理上的影响造成森林树木叶子形态及组织结构特征的变化^[32],从而影响树木冠层结构^[33]、增加病虫害的发生,导致树木生物量和生产力的降低^[34].在区域水平上,东北地区大气臭氧浓度变化显著(图5),1979—2011年,年均臭

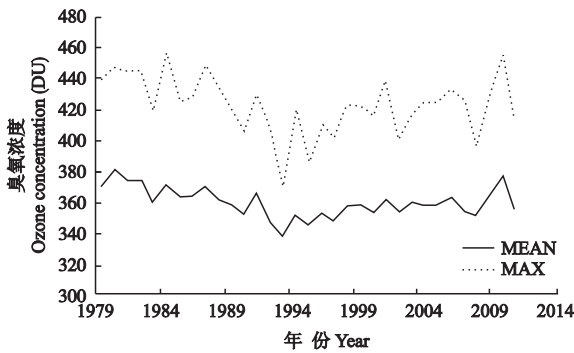


图5 1979—2011 年东北地区臭氧浓度年际变化
Fig. 5 Interannual variations of ozone concentration in North-east China from 1979 to 2011.

氧浓度呈现先降低后升高的趋势,自 1993 年,东北地区平均臭氧浓度与年臭氧浓度最大值均呈极显著的升高趋势. 本研究中,无论是在季节(尤其是在生长季 3—10 月)还是在年际水平上,区域臭氧变化均制约着当地植被 (NDVI) 的丰、枯变化,这一结果支持前述试验结果. 本文生长季从 3 月开始 10 月结束是因为所选研究区南部部分地区的 3 月温度已超过 0℃,研究区北部部分地区 10 月温度已低于 0℃,而东北地区植被在气温 3℃ 时即可萌芽^[35],从 3 月开始,研究区 NDVI 显著升高,从 10 月开始,显著降低,所以以 3—10 月为该地区的树木生长季;区域臭氧和 NDVI 季节反相位变化在 7 月达到拐点:7 月气温为全年最高,NDVI 达到最大,臭氧浓度最低,表明除温度外,臭氧浓度也是影响植被 (指数) 变化的潜在因素之一,具体机理有待进一步研究. 在臭氧量继续升高的趋势下,区域森林生态系统的生长将受到抑制,且幅度有加大趋势. 预计到 2100 年东北地区由 NDVI 指示的植被生物量将比 2000 年降低 2.5%.

另外,城市化进程导致城市光化学污染,使臭氧对环境的胁迫加重^[36-37],筛选抗臭氧污染树种成为城市建设所必须. 针叶树种较阔叶树种对臭氧污染相对不敏感,所以在臭氧变化剧烈的区域种植华山松等针叶树种有利于缓解臭氧浓度升高.

本文树木年轮样本永久切片制作方法丰富了树木年代学的研究方法.

参考文献

[1] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis (Report Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 2001) [EB/OL]. (2003-02-25) [2012-09-22]. <http://www.ipcc.ch/pub/spm22-01.Pdf>

[2] IPCC. Data Distribution Centre. Scenario Data for the Atmospheric Environment. [EB/OL]. (2011-05-16) [2012-10-1]. http://www.ipcc-data.org/sres/ddc_sres_emissions.html

[3] Yan K (颜 坤), Chen W (陈 玮), Zhang G-Y (张国友), *et al.* Effects of elevated CO₂ and O₃ on active oxygen metabolism of *Quercus mongolica* leaves. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21** (3): 557-562 (in Chinese)

[4] Fowler D, Cape JN, Coyle M, *et al.* The global exposure of forests to air pollutants. *Water, Air and Soil Pollution*, 1999, **116**: 5-32

[5] Huang S (黄 爽), Zhao T-H (赵天宏), Jin D-Y (金东艳), *et al.* Photosynthetic physio-response of urban *Quercus mongolica* leaves to surface elevated ozone concentration. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology* (辽宁林业科技), 2009 (5): 1-4 (in Chinese)

[6] Wang H (王 辉), Shao X-M (邵雪梅), Fang X-Q (方修琦), *et al.* Responses of *Pinus koraiensis* tree ring cell scale parameters to climate elements in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22** (10): 2643-2652 (in Chinese)

[7] Li Y (李 雁), Liang E-Y (梁尔源), Shao X-M (邵雪梅). Variations of *Picea crassifolia* tree-ring cell structure and their implications to past climate in eastern margin of Qaidam Basin, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19** (3): 524-532 (in Chinese)

[8] Dittmar C, Zech W, Elling W. Growth variations of common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe: A dendroecological study. *Forest Ecology and Management*, 2003, **173**: 63-78

[9] Huang R-F (黄荣凤), Furukawa I, Bao F-C (鲍甫成), *et al.* Response of tree-ring structure of poplar to climate factors in the Mu Us Desert. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2005, **27** (3): 24-29 (in Chinese)

[10] Zhao X-P (赵西平), Guo M-H (郭明辉), Zhu X-L (朱熙岭). Advance in research on the effects of temperature on trees growth and wood formation. *Forest Engineering* (森林工程), 2005, **21** (6): 1-4 (in Chinese)

[11] Yin X-G (尹训刚), Wu X-D (吴祥定). Modelling analysis of Huashan pine growth response to climate. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (应用气象学报), 1995, **6** (3): 257-264 (in Chinese)

[12] Zheng F-J (郑方钧), Fu L-G (傅立国). Plants of China. China: Science Press, 1978 (in Chinese)

[13] Ju X-S (鞠笑生), Zou X-K (邹旭凯), Zhang Q (张强). The method of climatic drought-flood index and its analysis. *Journal of Natural Disasters* (自然灾害学报), 1998, **7** (3): 51-57 (in Chinese)

[14] Yang G-X (杨国馨), Ye Y-Z (叶永忠), Yuan Z-L (袁志良), *et al.* Research on growth release for *Pinus*

- tabulaeformis* Carr. in Baotianman National Reserve. *Henan Science* (河南科学), 2012, **30**(1): 58–61 (in Chinese)
- [15] Feng X-H (封晓辉), Cheng R-M (程瑞梅), Xiao W-F (肖文发), *et al.* The application of tree-ring on forest disturbance history reconstruction. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(11): 3215–3222 (in Chinese)
- [16] Wang T-J (王体健), Sun Z-B (孙照渤). Development of study on ozone variation and its climatic effect. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 1999, **14**(1): 37–43 (in Chinese)
- [17] Fritts HC. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976
- [18] Vaganov EA, Anchukaitis KJ, Evans MN. How well understood are the process that create dendroclimatic records? A mechanistic model of the climatic control on conifer tree-ring growth dynamics// Hughes MK, Swetnam TW, Diaz HF, eds. *Dendroclimatology: Progress and Prospects*. Berlin: Springer-Verlag, 2011: 37–75
- [19] Ruan Y-N (阮亚男), He X-Y (何兴元), Chen W (陈 玮), *et al.* Effects of elevated O₃ concentration on anti-oxidative enzyme activities in *Pinus tabulaeformis*. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(5): 1032–1037 (in Chinese)
- [20] Moldau H, Sober J, Sober A. Impact of acute O₃ exposure on CO₂ uptake by two cultivars of *Phaseolus vulgaris* L. *Photosynthetica*, 1993, **28**: 133–141
- [21] Scebba F, Pucciarelli I, Soldatini GF, *et al.* O₃-induced changes in the antioxidant systems and their relationship to different degrees of susceptibility of two clover species. *Plant Science*, 2003, **165**: 583–593
- [22] Zhang W-W (张巍巍), Zhao T-H (赵天宏), Wang M-Y (王美玉), *et al.* Effect of elevated ozone concentration on photosynthesis of *Pinus tabulaeformis*. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2007, **26**(3): 1024–1028 (in Chinese)
- [23] Fu S-L (付士磊), Wu H (吴 红). Effects of elevated O₃ on photosynthesis in *Pinus tabulaeformis*. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2010, **25**(2): 11–14 (in Chinese)
- [24] Liu M (刘 闽). Investigation and analysis on ozone pollution status in Shenyang City. *Environmental Protection Science* (环境保护科学), 2010, **36**(3): 4–6 (in Chinese)
- [25] Wage DJ, Baker FA. Potential effects of ozone, climate, and spruce budworm on Douglas-fir growth in the Wasatch Mountains. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, **33**: 910–921
- [26] Karnosky DF, Zak DR, Pregitzer KS, *et al.* Tropospheric O₃ moderates responses of temperate hardwood forests to elevated CO₂: A synthesis of molecular to ecosystem results from the Aspen FACE project. *Functional Ecology*, 2003, **17**: 289–304
- [27] Karlsson PE, Medin EL, Selldén G, *et al.* Impact of ozone and reduced water supply on the biomass accumulation of Norway spruce saplings. *Environmental Pollution*, 2002, **119**: 237–244
- [28] Bartholomay AG, Eckert RT, Smith KT. Reductions in tree-ring widths of white pine following ozone exposure at Acadia National Park, Maine, U. S. A. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, **27**: 361–368
- [29] Novak K, Cherubini P, Saurer M, *et al.* Ozone air pollution effects on tree-ring growth, $\delta^{13}\text{C}$, visible foliar injury and leaf gas exchange in three ozone-sensitive woody plant species. *Tree Physiology*, 2007, **27**: 941–949
- [30] Bortier K, Temmerman LD, Ceulemans R. Effects of ozone exposure in open-top chambers on poplar (*Populus nigra*) and beech (*Fagus sylvatica*): A comparison. *Environmental Pollution*, 2000, **109**: 509–516
- [31] Reich PB. Quantifying plant response to ozone: A unifying theory. *Tree Physiology*, 1987, **3**: 63–91
- [32] Sicard P, Dalstein-Richier L, Vas N. Annual and seasonal trends of ambient ozone concentration and its impact on forest vegetation in Mercantour National Park (South-eastern France) over the 2000–2008 period. *Environmental Pollution*, 2011, **159**: 351–362
- [33] Kitao M, Winkler JB, Löw M, *et al.* How closely does stem growth of adult beech (*Fagus sylvatica*) relate to net carbon gain under experimentally enhanced ozone stress? *Environmental Pollution*, 2012, **166**: 108–115
- [34] Bussotti F, Agati G, Desotgiu R, *et al.* Ozone foliar symptoms in woody plant species assessed with ultrastructural and fluorescence analysis. *New Phytologist*, 2005, **166**: 941–955
- [35] Chen Y-M (陈有民). *Landscape Dendrology*. Beijing: China Forestry Press, 1990 (in Chinese)
- [36] Reyes HJ, Vaquera H, Villasenor JA. Estimation of trends in high urban ozone levels using the quantiles of (GEV). *Environmetrics*, 2010, **21**: 470–481
- [37] Paoletti ED, Marco A, Racalbutto S. Why should we calculate complex indices of ozone exposure? Results from Mediterranean background stations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **128**: 19–30

作者简介 刘常富,男,1971年生,博士/教授.主要从事城市森林生态学与园林生态学研究. E-mail: liucf898@163.com

责任编辑 李凤琴