

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 13 期 Vol.33 No.13 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 13 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 强度干扰后退化森林生态系统中保留木的生态效应研究综述..... 缪宁,刘世荣,史作民,等 (3889)
- AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理..... 罗巧玉,王晓娟,林双双,等 (3898)

个体与基础生态

- 东灵山不同林型五角枫叶性状异速生长关系随发育阶段的变化..... 姚婧,李颖,魏丽萍,等 (3907)
- 不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和叶绿素荧光特性的影响..... 刘露,丁柳丽,陈伟洲,等 (3916)
- 基于 LULUCF 温室气体清单编制的浙江省杉木林生物量换算因子..... 朱汤军,沈楚楚,季碧勇,等 (3925)
- 土壤逐渐干旱对菖蒲生长及光合荧光特性的影响..... 王文林,万寅婧,刘波,等 (3933)
- 一株柠条内生解磷菌的分离鉴定及实时荧光定量 PCR 检测..... 张丽珍,冯利利,蒙秋霞,等 (3941)
- 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性..... 张丹桔,张健,杨万勤,等 (3947)
- 不同饵料和饥饿对魁蚶幼虫生长和存活的影响..... 王庆志,张明,付成东,等 (3963)
- 禽畜养殖粪便中多重抗生素抗性细菌研究..... 祁诗月,任四伟,李雪玲,等 (3970)
- 链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理调控..... 马金华,孟希,张淑,等 (3978)
- 基于环境流体动力学模型的浅水草藻型湖泊水质数值模拟..... 李兴,史洪森,张树礼,等 (3987)

种群、群落和生态系统

- 干旱半干旱地区围栏封育对甘草群落特征及其分布格局的影响..... 李学斌,陈林,李国旗,等 (3995)
- 宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应..... 王云霓,熊伟,王彦辉,等 (4002)
- 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征..... 莫保儒,蔡国军,杨磊,等 (4011)
- 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响..... 丘清燕,陈小梅,梁国华,等 (4021)
- 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型..... 李建军,张会儒,刘帅,等 (4031)
- 外来植物火炬树水浸液对土壤微生物生态系统的化感作用..... 侯玉平,柳林,王信,等 (4041)
- 崇明东滩抛荒鱼塘的自然演替过程对水鸟群落的影响..... 杨晓婷,牛俊英,罗祖奎,等 (4050)
- 三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其水生食物链累积特征..... 余杨,王雨春,周怀东,等 (4059)
- 元江鲤种群遗传多样性..... 岳兴建,邹远超,王永明,等 (4068)

景观、区域和全球生态

- 中国西北干旱区气温时空变化特征..... 黄蕊,徐利岗,刘俊民 (4078)
- 集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的模拟..... 郭丽娟,国庆喜 (4090)
- 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响..... 张裴雷,方华军,程淑兰,等 (4101)
- 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析..... 张义,张合平 (4111)
- 深圳市景观生态安全格局源地综合识别..... 吴健生,张理卿,彭建,等 (4125)

庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡..... 周年兴,黄震方,梁艳艳 (4134)

气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响 李夏子,韩国栋,郭春燕 (4146)

民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应..... 韩福贵,徐先英,王理德,等 (4156)

血水草生物量及碳贮量分布格局..... 田大伦,闫文德,梁小翠,等 (4165)

5 种温带森林生态系统细根的时间动态及其影响因子 李向飞,王传宽,全先奎 (4172)

资源与产业生态

干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响..... 李少朋,毕银丽,陈咄圳,等 (4181)

城乡与社会生态

上海环城林带保健功能评价及其机制..... 张凯旋,张建华 (4189)

研究简报

北京山区侧柏林林内降雨的时滞效应 史 宇,余新晓,张佳音 (4199)

采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应
..... 胡振宏,何宗明,范少辉,等 (4205)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2013-07



封面图说: 岳阳附近的水源涵养林及水系鸟瞰——水源涵养林对于调节径流,减缓水、旱灾害,合理开发利用水资源具有重要的生态意义。洞庭湖为我国第二大淡水湖,南纳湘、资、沅、澧四水,北由岳阳城陵矶注入长江,是长江上最重要的水量调节湖泊。因此,湖周的水源涵养林建设对于恢复洞庭湖调节长江中游地区洪水的功能,加强湖区生物多样性的保护是最为重要的举措之一。对现有防护林采取人为干扰的调控措施,改善林分空间结构,将有利于促进森林生态系统的正向演替,为最大程度恢复洞庭湖水源林生态功能和健康经营提供重要支撑。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201211041533

王云霓, 熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 曹恭祥, 郭浩, 徐丽宏, 左海军. 宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应. 生态学报, 2013, 33(13): 4002-4010.

Wang Y N, Xiong W, Wang Y H, Yu P T, Cao G X, Guo H, Xu L H, Zuo H J. The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4002-4010

宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化 及其气象因子响应

王云霓¹, 熊伟^{1,*}, 王彦辉¹, 于澎涛¹, 曹恭祥¹, 郭浩², 徐丽宏¹, 左海军¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 中国林业科学研究院荒漠化所, 北京 100091)

摘要: 利用年轮生态学方法和生物量经验方程, 在宁夏六盘山研究了华山松天然林及华北落叶松和油松人工林等 3 种针叶林的年初级净生产力 (NPP) 及其与气象因子间的关系。研究表明: 3 种针叶林生物量的年际变化均符合逻辑斯蒂方程, 林分的现存生物量 (t/hm^2) 为华北落叶松林最大 (141.96), 华山松林 (130.99) 次之, 油松林最小 (123.29)。3 种针叶林 NPP 存在显著的年际差异和种间差异, 林分的 NPP ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 为华北落叶松林 (6.72) > 油松林 (5.76) > 华山松林 (2.66); NPP 年际变化在华山松林呈现“快速增加-缓慢增加-缓慢减小”的趋势, 而华北落叶松林和油松林均为快速上升的趋势。3 种针叶林的 NPP 随年降水量的变化行为不同, 华山松林极轻微地增大, 华北落叶松林和油松林均是先增加后降低; 然而在极端干旱年份或极端湿润年份, 3 种针叶林的 NPP 都趋向于相同的较低值, 其原因可能分别是水分胁迫和低温胁迫。气象因子对林分 NPP 的影响具明显的“滞后效应”和种间差异。华山松林 NPP 与上年 11 月和当年 9、11 月的降水量显著负相关; 油松林 NPP 与上年 9 月及当年 4 月的降水量显著相关; 上年和当年 9 月的降水量均与华北落叶松林 NPP 显著正相关。上年 6 月的温度和当年 3 与 6 月的月均温及月均最高温能显著影响 3 种针叶林的 NPP, 但存在种间差异, 其中华山松林 NPP 与当年与上年生长季各月的温度均呈不同程度的负相关, 而油松林和华北落叶松林则多呈不同程度的正相关。

关键词: 华山松; 华北落叶松; 油松; 年轮宽度; NPP; 气象因子

The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors

WANG Yunni¹, XIONG Wei^{1,*}, WANG Yanhui¹, YU Pengtao¹, CAO Gongxiang¹, GUO Hao², XU Lihong¹, ZUO Haijun¹

1 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of State Forestry Administration, Beijing 100091, China

2 Research Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Using dendroecological methods and empirical biomass equations, we calculated the biomass and net primary productivity (NPP) of three coniferous forests (*Pinus armandii* natural forest, *Larix principis-rupprechtii* plantation, *Pinus tabulaeformis* plantation) in Liupan Mountains of Ningxia, northwest China. Then we analyzed their relation with climatic factors, including monthly air temperature and precipitation. The results indicated that the interannual variation of biomass (t/hm^2) of the three forests studied follows the logistic equation, with the order of *L. principis-rupprechtii* plantation

基金项目: 国家“十二五”科技计划课题 (2011BAD38B0503, 2012BAD22B030102); 国家自然科学基金项目 (41230852, 41071023); 宁夏六盘山森林生态站资助

收稿日期: 2012-11-04; 修订日期: 2013-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xwcaf@163.com

(141.96) > *P. armandii* natural forest (130.99) > *P. tabulaeformis* plantation (123.29). The interannual variation of NPP of *P. armandii* natural forest showed a trend of “fast increase-slow increase-slow decrease”; while the variation of NPP of other two plantations showed a trend of “rapid rising” with some fluctuations. There is a remarkable difference among the NPP ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) of the three forests, with the order of *L. principis-rupprechtii* plantation (6.72) > *P. tabulaeformis* plantation (5.76) > *P. armandii* natural forest (2.66). With increasing annual precipitation, the NPP varied much differently among the three forests, i. e., the NPP of *P. armandii* forest increased very slowly, but the NPP of other two plantations firstly increased and then decreased. However, in the driest or the rainfall-richest years, the NPPs of all three forests tended to their same lower values, but probably with different stresses of drought or low temperature. The NPP response to climatic factors presented a time lag and acted differently among the three forests. The NPP of *P. armandii* forest was significantly and negatively correlated with the precipitation in November of previous year and that in November and September of current year; while the NPP of *P. tabulaeformis* plantation was significantly correlated with the precipitation in September of previous year and that in April in current year, and the NPP of *L. principis-rupprechtii* plantation was significantly and positively correlated with the precipitation in September of both previous and current year. The NPP of all three forests was significantly correlated with the mean temperature and minimum temperature in June and March of current year, and the temperature in June of previous year. However, the NPP response to temperature differently among the three forests, the NPP of *P. armandii* forest was more or less negatively correlated with the temperature in each month of growing season; while the NPP of *P. tabulaeformis* and *L. principis-rupprechtii* forests was more or less positively correlated with the temperature in each month of growth season.

Key Words: *Pinus armandii*; *Larix principis-rupprechtii*; *Pinus tabulaeformis*; tree ring; net primary productivity; climate factor

气候变化会改变树木的生理与物候过程^[1-3],进而改变物种分布^[4-5]、林分组成^[3]和树木生长^[6-7]。森林生物量和净初级生产力(NPP)是森林生态系统的重要特征,可用于指导森林经营和评估气候变化影响^[8-10]。研究表明,由于不同树种生长的气候响应差异^[11-13],导致了生物量和 NPP 的种间差异。森林生物量和生产力还受温度、水分、营养等环境因子影响^[14-18],从而表现出一定时空差异。如, Ni 等^[19]在阿尔泰山和天山的研究表明:云杉林生物量最大,落叶松和落叶松-云杉混交林次之,接着是落叶松-云杉-冷杉和落叶松-云杉-白桦混交林;在生产力上则是落叶松林最大,其它四种林分相似;阿尔泰山的落叶松林生物量和生产力均大于天山。Yamashita 等^[20]研究得知日本柏树(*Chamaecyparis obtusa*)的叶和细根的生物量要高于邻近立地的日本雪松(*Cryptomeria japonica*)。程瑞梅等^[21]曾研究了马尾松(*Pinus massoniana*)林近 30 年中的生物量和 NPP 变化及其与气象因子的关系,得知 NPP 受气象因子影响并存在年际差异。目前研究主要集中于不同地区各种林分的生物量对比或同一林分生物量和 NPP 对气象因子的响应,而对森林生物量和 NPP 年际变化及其气象因子响应关系的种间差异研究较少。要想全面理解气候变化对森林生物量和 NPP 的影响,更好指导林业生产,就需研究比较森林生物量和生产力的年际变化及其影响因子响应关系。

华山松(*Pinus armandii*)为我国特有温性针叶树种,分布广泛,形成纯林或与不同树种混交,宁夏六盘山是其天然分布区的北部边缘。自 20 世纪 60 年代以来,六盘山林区大量营造了华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)的人工林^[22-23],所以这 3 种针叶林对当地的木材生产、水源涵养、水土保持都起着重要作用。

本文利用生物量经验方程和年轮生态学方法,以宁夏六盘山的华山松天然林、华北落叶松人工林和油松人工林为对象,通过研究其生物量和 NPP 的年际变化及其对气象因子的响应,以期揭示树木 NPP 的年际变化和气象因子响应关系的种间差异,并为评价气候变化的林业生产力影响及指导林业经营提供基础数据。

1 研究区自然概况和研究方法

1.1 自然概况

研究区位于宁夏六盘山南侧的香水河小流域,介于东经 106°12′10.6″—106°16′30.5″,北纬 35°27′22.5″—35°33′29.7″,海拔 2040—2931m;地处半湿润向半干旱地区的过渡带上,热量较低,水分充足,年均气温 6.0℃,年降水量 600—800mm,多集中 7—9 月份(图 1);主要乔木树种有华山松、油松、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、少脉槲(*Tilia paucicostata*)、华北落叶松等;灌丛主要有甘肃山楂(*Crataegus kansuensis*)、忍冬(*Caprifoliaceae*)、箭竹(*Fargesia nitida*)、蒙古荚迷(*Viburnum mongolicum*)、刺蔷薇(*Rosa acicularis*)、毛榛子(*Corylus mandshurica*)等;草本优势种主要为铁杆蒿(*Artemisa vestita*)、本氏针茅(*Stipa bungeana*)、苔草(*Carex gmelinii*)、蕨(*Pteridium aquilum*)、东方草莓(*Fragaria orientalis*)、艾蒿(*Artemisa argyi*)、乳白香青(*Anaphalis lactea*)、糙苏(*Phlomis umbrosa*)等;土壤以山地灰褐土为主,厚度为 30—100cm。

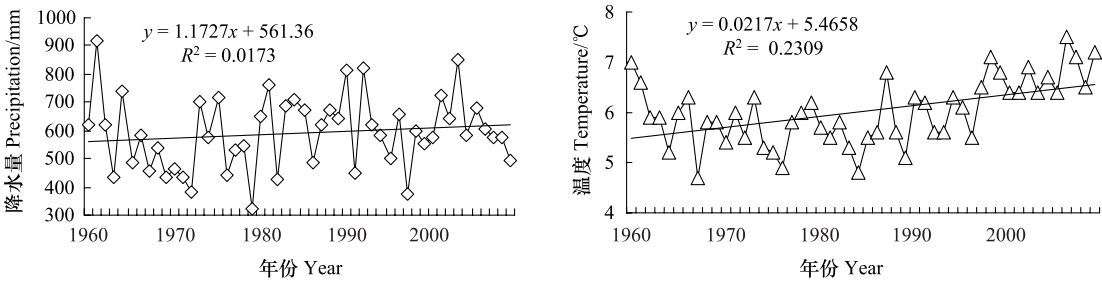


图 1 泾源气象站近 50 年(1960—2009 年)的年降水量和年均气温变化
Fig.1 Change of annual precipitation and temperature from 1960 to 2009 year

1.2 试验样地设置

本研究中 3 种针叶林均位于香水河小流域大南沟的东南坡面上,3 个树种的海拔分布呈条状斑块分布,从下到上依次为油松、华北落叶松和华山松,海拔差小于 200m。华山松是天然次生林,林龄为 61a;华北落叶松和油松均是人工林,林龄分别为 31a 和 29a。依据 3 种林分的空间分布特征,各选取样地 4—6 个(20m×20m),对样地每木调查;同时在各乔木样地内设置灌木和草本样方,调查其群落特征(表 1)。

表 1 3 种针叶林样地植被基本情况
Table 1 The basic characteristics of different vegetation standard plots

植被类型 Vegetation	海拔/m Elevation	坡位 Slope position	坡向 Slope aspect	林龄/a Age	乔木层 Tree layer			草本层 Herb	
					郁闭度 Canopy density	胸径/cm Diameter	树高/m Height	优势种 Dominant	盖度/% Coverage
华山松	2260	中	东南	61	0.75	15.8	8.7	鬼灯檠	9
华北落叶松	2174	下	东南	31	0.83	16.9	15.3	蕨	49
油松	2157	下	东南	29	0.78	17.9	9.9	东方草莓	42

1.3 研究方法

1.3.1 生物量和生产力的估算

在每个研究样地中,选取 5-7 棵与平均胸径相近、长势良好的标准木,用生长锥在胸径处垂直交叉钻取两个树芯,树芯保存在塑料管中密封,带回实验室,固定、风干、打磨后,用 Lintab 年轮分析仪测量年轮宽度(精确到 0.01mm)。

用当年测定的胸径 D_{2009} 依次减去历年两个树芯年轮的宽度之和 d_n (cm),得到历年的胸径 D_n (cm):

$$D_n = D_{2009} - d_n \tag{1}$$

式中, $d_n = (d_{2009} + d_{2008} + \cdots + d_{n+2} + d_{n+1})$

对华山松和油松的标准木的单株生物量(W_n),采用程堂仁^[24]在与六盘山相邻的小陇山地区测定的生物

量模型(式(2)和(3))计算:

$$\text{华山松} \quad \ln W_n = 2.4119 \ln D_n - 2.2962 \quad (R^2 = 0.9968) \quad (2)$$

$$\text{油松} \quad \ln W_n = 2.5444 \ln D_n - 2.5075 \quad (R^2 = 0.9869) \quad (3)$$

对华北落叶松的标准木,采用 2006 年莫菲(未发表)调查的 20 棵不同胸径(9.9—22.6 cm)的解析木数据建立的数量关系计算单株地上生物量($W_{\text{地上}}$),其根生物量($W_{\text{根}}$)用罗云建的模型^[25]计算:

$$\ln W_{\text{地上}} = 2.2235 \ln D_n - 1.9634 \quad (R^2 = 0.9235) \quad (4)$$

$$\ln W_{\text{根}} = 2.0885 \ln D_n - 3.4782 \quad (R^2 = 0.9742) \quad (5)$$

$$W_n = W_{\text{地上}} + W_{\text{根}} \quad (6)$$

基于标准木的单株生物量和样地树木数量及样地面积,可以计算样地及单位面积上的生物量。样地的年净初级生产力 NPP 为样地历年单位面积上的生物量之差。

$$\text{NPP}_i = W_i - W_{i-1} \quad (7)$$

式中, W_i 是第 i 年的总生物量(t), NPP_i 是第 i 年的净初级生产力($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), i 表示年份。

1.3.2 气象数据的收集与处理

气象数据来自宁夏泾源县气象站(106°12'E, 35°40'N),主要包括平均温度(℃)、最高温度(℃)、平均最低温度(℃)、降水量(mm)等的月值和年值。由于树木生长同时受当年及上一年的气象因子影响,本研究在进行 NPP 与气象因子相关分析时,选择前一年 6 月到当年 12 月的气象资料进行分析。

林分间 NPP 对比进行方差分析(One-way ANOVA),采用最小显著差数法(LSD)进行差异显著性检验($\alpha = 0.05$)。图中均值误差线为标准差(SD)。

2 结果分析

2.1 生物量与生产力的年际变化

华山松、华北落叶松和油松 3 种针叶林的单位面积生物量和 NPP 的年际变化如图 2 所示。可知:3 种针叶林的生物量均持续增加,但华北落叶松林和油松林的增长速度远大于华山松林。华山松林生物量从 1960 年的 2.52 t/hm^2 到 2009 年的 130.99 t/hm^2 ,在近 50 年中增长超过了 50 倍;而华北落叶松林和油松林从 1989 年的 2.01 和 2.70 t/hm^2 到 2009 年的 141.96 和 123.29 t/hm^2 ,分别超过或接近华山松林的现存生物量。在 2002 年之前,华山松林的生物量最大,华北落叶松林生物量最小;但在 2002 年华北落叶松林生物量超过油松林,在 2008 年华北落叶松林生物量超过了华山松林。说明华北落叶松林生物量增速最大,油松林次之,华山松林最小。拟合分析表明:3 种针叶林生物量对林龄的增长均以 Logistic 模型拟合较好。

在 3 种针叶林中,华山松林 NPP 年际变化总体表现出“快速增加-缓慢增加-缓慢减小”的趋势,但年际间波动存在差异,在 1960—1972 年是快速上升,1972—1991 年间是波动中上升的,自 1991 年后开始波动中下降;而华北落叶松林和油松林的生产力呈现波动快速上升的趋势,且华北落叶松林波动更大。方差分析表明,3 种针叶林的生产力存在极显著差异($\text{sig} < 0.001$),但华北落叶松林和油松林差异不显著($\text{sig} = 0.187$)。3 种针叶林 NPP($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)变化范围存在差异,华山松林为 0.54—4.9,平均为 2.66,变异系数 0.42;华北落叶松和油松林分别为 1.16—13.34 和 1.22—9.48,分别平均为 6.72 和 5.76,变异系数分别为 0.59 和 0.40。总之,华北落叶松林的 NPP 最大,年际变异也最大,油松林的 NPP 次之,华山松林 NPP 最小,但华山松林 NPP 变异系数大于前者,说明环境因子对华北落叶松林 NPP 的影响较大。

2.2 生产力随年降水量的变化

图 3 是 3 种针叶林 NPP 随年降水量的变化。随着年降水量增加,华山松林的 NPP 呈现为极微弱增加,而华北落叶松林和油松林均先升高后降低。在极端湿润年,3 种林分 NPP 趋于相同,且华北落叶松和油松林低于正常年份,这可能是极端湿润年的较低温度限制生长的结果;而在极端干旱年份,3 种林分的 NPP 也趋向于相同,这可能是受到了极端干旱年份的水分亏缺限制。

2.3 生产力对气象因子的响应

3 种针叶林 NPP 与不同月份气象因子的相关分析见表 2,表现出 NPP 对气象因子响应的明显“滞后效

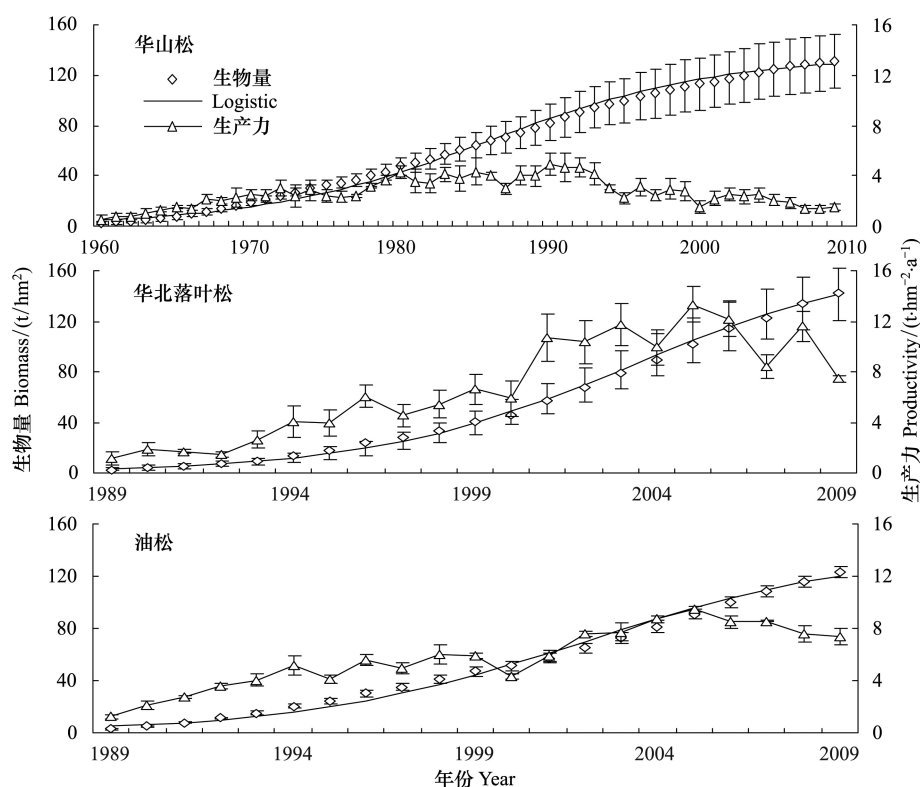


图2 3种针叶林的单位面积生物量和生产力的年际变化

Fig. 2 Interannual changes of biomass and productivity of three tree species

应”, 华山松林 NPP 与上年 11 月份降水极显著性负相关 ($P < 0.01$), 相关系数为 0.3; 与上年 6、7 月的月均温呈显著负相关 ($P < 0.05$), 相关系数分别达到 0.42 和 0.30。说明上年 11 月降水和 6、7 月月均温度对华山松 NPP 有着显著影响。另外两种人工林的 NPP 与上年 9 月的月降水量和 6 月温度呈显著正相关, 说明上年 9 月降水量和 6 月温度对人工林 NPP 有着显著影响。

从表 2 还可看出, 3 种针叶林 NPP 对当年气象因子的响应有所差异。华山松林与 9、11 月降水呈显著负相关; 华北落叶松林与 9 月降水呈极显著正相关; 而油松林与 4 月降水呈显著负相关。说明生长季末期和前期的降水对林分 NPP 的影响较大。华北落叶松和油松林 NPP 与大多月份温度成正比, 而华山松林 NPP 与大多月份温度成反比。另外两人工林 NPP 与 3、6 月温度指标呈显著或极显著正相关性, 落叶松与 5、7 月最低温呈显著相关, 油松与 2、4 月月均最高温、4—7 月最低温显著或极显著正相关性; 而华山松林 NPP 主要与 3、5、6 月月均温和月均最高温显著或极显著相关。不同类型林分 NPP 与温度的相关性差异可能是由于不同树种具有不同光合特性与适宜温度范围以及林分位置 (海拔、坡位等)。

3 讨论

3.1 生物量与生产力的年际动态

华山松林生物量从 1960 年的 2.52 t/hm^2 到 2009 年的 130.99 t/hm^2 , 年均净增 2.66 t/hm^2 ; 而华北落叶松和油松人工林分别从 1989 年的 2.01 t/hm^2 和 2.70 t/hm^2 到 2009 年的 141.96 t/hm^2 和 123.29 t/hm^2 , 分别超过或接近华山松天然林的现存生物量。本文中华山松林生物量远高于全国平均生物量 (48.287 t/hm^2)^[26], 但其

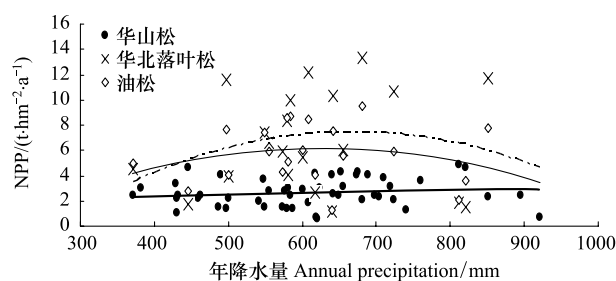


图3 3种针叶林生产力随年降水量的变化

Fig. 3 Variation in productivity of three tree species as change of annual precipitation

年均净增量低于气候优越的长江上游($2.68\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[27]、贵阳市牛场乡($4.08\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[28]和岷江茂县($15.15\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[29]。本研究中 31a 生华北落叶松林生物量高于全国平均值($102.601\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[26],但低于生长在青海大通退耕还林地 20a 生的华北落叶松林($243.12\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[30]。本研究的 26a 生油松林生物量远高于全国平均值($25.358\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[26],但低于岷江上游大沟流域的 24a 生油松人工林($177.46\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[31]。造成以上差异的原因包括研究对象的立地条件^[32]、林龄^[25,10]和密度^[31,10]等因素。

表 2 3 种典型针叶林的生产力与气象因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between productivity of tree stands and the meteorological factors

月份 Month	降水 Precipitation			温度 Temperature			月均最低温 Mean min Temperature			月均最高温 Mean max Temperature		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
-6	-0.04	0.16	0.00	-0.42 **	0.53 *	0.59 **	-0.27	0.52 *	0.44 *	-0.31 *	0.48 *	0.60 **
-7	0.02	-0.15	-0.17	-0.30 *	0.24	0.33	-0.25	0.33	0.43	-0.09	0.15	0.22
-8	0.25	-0.12	-0.07	-0.24	0.08	0.16	0.01	0.23	0.24	-0.11	0.01	0.09
-9	-0.26	0.44 *	0.52 *	-0.07	-0.13	-0.11	0.12	0.15	0.05	0.02	-0.23	-0.17
-10	-0.2	0.14	0.01	0.07	0.11	0.21	0.15	0.12	0.14	0.14	0.05	0.25
-11	-0.30 *	-0.33	-0.19	-0.06	0.15	0.15	-0.1	0.23	0.24	0.1	0.04	0.04
-12	0.14	0.13	0	0.06	-0.22	-0.32	0.11	-0.08	-0.16	0.08	-0.35	-0.41
1	0.13	-0.06	-0.25	-0.08	0.25	0.27	0.01	0.35	0.34	-0.04	0.13	0.2
2	0.16	-0.13	-0.22	-0.23	0.29	0.49 *	-0.08	0.26	0.45 *	-0.25	0.32	0.55 *
3	0.18	-0.3	-0.06	-0.47 **	0.60 **	0.51 *	-0.24	0.32	0.29	-0.49 **	0.68 **	0.58 **
4	-0.02	-0.39	-0.50 *	-0.13	0.39	0.60 **	-0.05	0.42	0.62 **	-0.06	0.41	0.58 **
5	0.24	0.04	0.11	-0.38 **	0.34	0.33	-0.17	0.49 *	0.52 *	-0.32 *	0.28 *	0.25
6	0.13	-0.01	-0.01	-0.51 **	0.60 **	0.61 **	-0.29 *	0.61 **	0.64 **	-0.45 **	0.55 **	0.52 *
7	0.06	-0.01	-0.01	-0.36 *	0.31	0.21	-0.3 *	0.54 *	0.50 *	-0.13	0.16	0.06
8	0.14	-0.12	-0.19	-0.16	0.08	0.15	0.03	0.3	0.42	-0.01	0.01	0.04
9	-0.32 *	0.6 **	0.36	0.02	-0.12	-0.09	0.09	0.31	0.2	0.16	-0.3	-0.2
10	-0.2	-0.1	0.01	-0.07	0.33	0.19	0.03	0.36	0.22	0.04	0.24	0.14
11	-0.37 **	-0.2	-0.27	0.1	0.21	0.33	0.06	0.38	0.45 *	0.21	-0.01	0.17
12	0.15	-0.02	-0.06	0.04	-0.24	-0.2	0.08	-0.11	-0.07	0.06	-0.33	-0.26

* * 在 $P<0.01$ 水平下显著; * 在 $P<0.05$ 水平下显著; * * refers to significant on the level of $P<0.01$; * refers to significant on the level of $P<0.05$; A: 华山松 *Pinus armandii*; B: 华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii*; C: 油松 *Pinus tabulaeformis*; 月份中数字前的“-”表示上一年

3 种针叶林的生物量随林龄增加符合逻辑斯蒂生长曲线,但油松和华北落叶松林的年净生长量大于华山松林,且华北落叶松林的增速大于油松林。这可能与林分起源、不同树种的生长特性差异^[33,13]、各林分的生长发育期^[25]、人为干扰程度、经营强度等多个因素有关。本研究中,华山松林的海拔较高,坡位偏上,加之其为成熟林,所以生物量积累速率下降,再加上人为采集种子的破坏,导致其 NPP 最小;而华北落叶松和油松林处在中幼龄林阶段,处于海拔较低的坡下位,立地条件较为优越,所以生物量积累速率较大,NPP 较高。此外,华山松为喜荫树种,高温干燥会限制其生长,而春季风大容易造成华山松的生理干旱;冬季雪害严重,可能会对树木造成物理伤害,引起树木倾斜、折断和倒伏,在一定程度上影响其生长,这一点可以从华山松林 NPP 与 11 月降水显著负相关得到验证(表 2)。

3.2 生产力对气象条件的响应

3.2.1 3 种针叶林生产力对降水的响应

本研究中,华山松林 NPP 与上年 11 月份和当年 9、11 月月降水量显著负相关;油松林 NPP 与上年 9 月与当年 4 月月降水量显著正相关;9 月月降水量显著地促进华北落叶松林当年和下年的 NPP。这与前人的研究基本一致^[34-36]。该区 4 月气温回升,蒸散增多,树木形成层细胞开始分裂,而此时雨季还没到来,故该时段的水分供应是树木生长的主要限制,若水分供应充足,生长就快;若降水量较少,容易造成土壤水分亏缺,树木可

利用水分就少,生长就受限。但此时底层土壤尚未融化,这一时期降水大量增加可能会导致林地积水,造成树木根部的无氧呼吸,降低树木生产潜力。研究区 9 月月均温大于 10°C , 热量条件相对充足, 温度不是限制光合作用的因素, 充足的降水利于叶片光合作用和积累更多有机物质^[37], 也利于土壤微生物活动和促进叶、嫩枝、芽的成熟^[36]。此外, 六盘山区树木在 9 月生长进入缓慢期^[38], 光合产物进入储备阶段, 充足的养分储备及适量的土壤水分可保证树木安全越冬, 利于来年生长。因此, 9 月降水不仅影响林分当年 NPP, 还影响树木下年的萌芽和 NPP。

3.2.2 3 种针叶林生产力对温度的响应

本研究中华山松林 NPP 与大多数月份的气温呈负相关, 主要受 3、5、6、7 月温度影响; 而华北落叶松和油松林均与大多数月份的气温呈正相关, 主要受 3、6 月份温度的显著或极显著影响。前人有关树木生长对气温响应的研究结果也较为复杂^[21,39-40]。气温高低会通过直接影响树干形成层生长的速度和持续时间^[33,41-42]而影响树木生产力, 温度在一定程度的升高, 对林分 NPP 是有利的, 而与月均温、月均最高温和月均最低温相关性的差异可能由于不同树种具有不同的光合特性与适宜温度范围以及林分位置。华山松喜湿润凉爽的气候, 对土壤水分要求严格, 温度生理阈值相对较小; 而华北落叶松和油松的土壤适应性比较强, 生理阈值相对较宽。研究区 5、6 月是新针叶萌芽期, 7 月是树木生长的旺盛期, 树木对水分需求均较大; 而本试验中, 华山松林处于较上的坡位, 在水分较少的前提下, 温度高时会造成干旱胁迫, 而处于下坡位的华北落叶松林和油松林因坡面水分再分配而受干旱胁迫较小, 反而因温度升高而生长加快。

4 主要结论

(1) 3 种针叶林的生物量随林龄的增加而增加, 但华北落叶松和油松人工林的年净生长量大于华山松天然次生林, 华北落叶松林生物量增长速度大于油松林。华北落叶松林生物量 (141.96 t/hm^2) > 华山松林 (130.99 t/hm^2) > 油松林 (123.29 t/hm^2), 多年平均 NPP 为华北落叶松 ($6.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) > 油松 ($5.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) > 华山松 ($2.66 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。同种林分的 NPP 存在年际差异。华山松林年际变化表现为“快速增加-缓慢增加-缓慢减小”的趋势, 华北落叶松林和油松林呈现出波动快速上升的趋势。

(2) 3 种针叶林 NPP 对年降水量的响应具有一定的相似性和种间差异性。3 种针叶林 NPP 随年降水量增加而异, 华山松林极轻微地增大, 华北落叶松林和油松林均是先增加后降低; 无论是在极端干旱年还是在极端湿润年, 均趋向于相同的较低值, 其原因可能分别是干旱胁迫与低温胁迫。气象条件对针叶林 NPP 的影响具有明显的“滞后效应”和种间差异。华山松林 NPP 与上年 11 月和当年 9、11 月的月降水量显著负相关; 油松林 NPP 与上年 9 月和当年 4 月月降水量显著相关; 9 月月降水量增加能显著增大华北落叶松林当年和下年的 NPP。华山松林 NPP 主要受上一年 6 月和 7 月的月均温、当年 3、5、6 月的月均温及月均最高温及 6、7 月的月均最低温的限制; 而华北落叶松林和油松林的 NPP 与当年 3、6 月温度的显著或极显著相关。

References:

- [1] Walther G R. Plants in a warmer world. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2003, 6: 169-185.
- [2] Delbart N, Picard G, Le Toan T, Kergoat L, Quegan S, Woodward I, Dye D, Fedotova V. Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale. Global Change Biology, 2008, 14(3): 603-614.
- [3] Lafleur B, Pare' D, Munson AD, Bergeron Y. Response of northeastern North American forests to climate change: Will soil conditions constrain tree species migration?. Environmental Reviews, 2010, 18: 279-289.
- [4] Neilson R P, Pitelka L F, Solomon A M, Nathan R, Midgley G F, Fragoso J M V, Lischke H, Thompson K. Forecasting regional to global plant migration in response to climate change. Bioscience, 2005, 55(9): 749-759.
- [5] McKenney D W, Pedlar J H, Lawrence K, Campbell K, Hutchinson MF. Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees. Bioscience, 2007, 57(11): 939-948.
- [6] Brassard BW, Chen HYH, Bergeron Y. Influence of environmental variability on root dynamics in northern forests. Critical Reviews in Plant Sciences, 2009, 28(3): 179-197.
- [7] Nabeshima E, Kubo T, Hiura T. Variation in tree diameter growth in response to the weather conditions and tree size in deciduous broad-leaved

- trees. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259: 1055-1066.
- [8] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, Solomon A M, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263:185-190.
- [9] Bontemps J D, Hervé J C, Dhôte J F. Dominant radial and height reveal comparable historical variations for common beech in north-eastern France. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(8): 1455-1463.
- [10] Dafeng Hui, Jun Wang, Xuan Le, Weijun Shen, Hai Ren. Influences of biotic and abiotic factors on the relationship between tree productivity and biomass in China, *Forest Ecology and Management*, 2012, 264: 72-80.
- [11] Goldblum D, Rigg L S. Tree growth response to climate change at the deciduous-boreal forest ecotone, Ontario, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(11): 2709-2718.
- [12] Battipaglia G, Saurer M, Cherubini P, Siegwolf R T W, Cotrofo M F. Tree rings indicate different drought resistance of a native (*Abies alba* Mill.) and a nonnative (*Picea abies* L. Karst.) species co-occurring at a dry site in Southern Italy. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(3): 820-828.
- [13] Miyamoto Y, Griesbauer H P, Green D S. Growth responses of three coexisting conifer species to climate across wide geographic and climate ranges in Yukon and British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(3): 514-523.
- [14] Knapp A K, Smith M D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. *Science*, 2001, 291: 481-484.
- [15] Malhi Y, Baker T R, Phillips O L, Almeida S, Alvarez E, Arroyo L, Chave J, Czimczik C I, Fiore A D, Higuchi N, Killeen T J, Laurance S G, Laurance W F, Lewis S L, Montoya L M M, Monteagudo A, Neill D A, Vargas P N, Patiño S, Pitman N C A, Quesada C A, Salomão R, Silva J N M, Lezama A T, Martínez R V, Terborgh J, Vinceti B, Lloyd J. The above-ground coarse wood productivity of 104 Neotropical forest plots. *Global Change Biology*, 2004, 10(5): 563-591.
- [16] Boisvenue C, Running S W. Impacts of climate change on natural forest productivity-evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology*, 2006, 12(5): 862-882.
- [17] Raich J W, Russell A E, Kitayama K, Parton W J, Vitousek P M. Temperature influences carbon accumulation in moist tropical forests. *Ecology*, 2006, 87(1): 76-87.
- [18] Keeling H C, Phillips O L. The global relationship between forest productivity and biomass. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(5): 618-631.
- [19] Ni J. Forest productivity of the Altay and Tianshan Mountains in the dryland, northwestern China, *Forest Ecology and Management*, 2004, 202(1/3): 13-22.
- [20] Yamashita T, Kasuya N, Nishimura S, Hiroshi Takeda. Comparison of two coniferous plantations in central Japan with respect to forest productivity, growth phenology and soil nitrogen dynamics. *Forest Ecology and Management*, 2004, 200(1/3): 215-226.
- [21] Cheng R M, Feng X H, Xiao W F, Wang R L, Wang X R, Du H T. Response of net productivity of masson pine plantation to climate change in North Subtropical Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8):2086-2095.
- [22] Wang J L, Jin H X, Yang Z K, Wang G. Species diversity and productivity of *Larix principis-rupprechtii* plantation woods in Liupan Mountains. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*. 2008, 44(1): 31-35, 42.
- [23] Liu G, Lu Y C, Li X H, Lei X D, Ning J K. Effects of Climatic Factors on Tree Ring Growth in Liupanshan Region, Northwest China. *Journal of northeast forestry university*, 2009,37(4): 1-4.
- [24] Cheng T Y, Ma Q Y, Feng Z K, Luo X. Research on forest biomass in Xiaolong Mountains, Gansu Province. *Journal of Beijing forestry university*, 2007, 29(1): 31-36.
- [25] Luo Y J, Zhang X Q, Wang X K, Zhu J H, Zhang Z J, Sun G S, Gao F. Biomass and its distribution patterns of *Larix principis-rupprechtii* plantations in northern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(1):13-18.
- [26] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in china. *Acta ecologica sinica*, 1996, 16(5):497-508.
- [27] Yuan C M, Lang N J, Meng G T, The Structural Feature and Biomass of Soil and Water Conservative Plantation of Armand eille in the Upper Reach of the Yangtze Rive. *Journal of northeast forestry university*, 2002,30(3):5-7.
- [28] Xiong Z H, Yan M, Wu X X. Analysis on growth and soil nutrition of *P. armandi*-*P. adenopoda* Maxim mixed forest. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2005,24(4):299-302.
- [29] Kong W J, Zheng Z. The aboveground biomass and net primary productivity of degraded and artificial communities in Maoxian, upper reach of Minjiang river. *Journal of Mountain Science*, 2004,22(4):445-450.
- [30] Gao G X, Li W Z, Zhou X C, Jia J S, Shi C Q, Liu G Q. Research on biomass and productivity of conversion cropland to forest in Datong County of Qinghai Province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007,25(1):21-25.
- [31] Li W B, Bao W K, He B H, Wu W Y, Li F L. BiomassCompositions of *Pinus tabulaeformis* Plantation and Their Relationships in the Dagou Valley

- of the Upper Minjiang River. Journal of Mountain Science, 2007, 25(2): 236-244.
- [32] Li H T, Wang S N, Gao L P, Yu G R. The carbon storage of the subtropical forest vegetation in central Jiangxi Province. Acta ecologica sinica, 2007, 27(2): 693-704.
- [33] Pederson N, Cook E R, Jacoby G C, Peteet D M, Griffin K L. The influence of winter temperatures on the annual radial growth of six northern-range-margin tree species. Dendrochronologia, 2004, 22: 7-9.
- [34] Shi J F, Lu H Y, Wan J D, Li S F, Nie H S. Winter-half year temperature reconstruction of the last century using Pinus armandii franch tree-ring width chronology in the eastern Qinling Mountains. Quaternary sciences, 2009, 29(4): 831-836.
- [35] Peng J F, Yang A R, Tian Q H. Response of radial growth Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) to climate factors in Wanxian Mountain of He'nan Province. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 5977-5983.
- [36] Du S, Yamanakab N, Yamamotoa F, Otsuki K, Wang S Q, Hou Q C. The effect of climate on radial growth of *Quercus liaotungensis* forest trees in Loess Plateau, China. Dendrochronologia, 2007, 25(1): 29-36.
- [37] Gao L S, Wang X M, Zhao X H. Response of Pinus koraiensis and Picea jezoensis var. komarovii to climate in the transition zone of Changbai Mountain, China. Chinese journal of plant ecology, 2011, 35(1): 27-34.
- [38] Xiong W, Wang Y H, Yu P T, Liu H L, Shi Z J, Guan W. The growth in stem diameter of Larix principis-rupprechtii and its response to meteorological factors in the south of Liupan Mountain. Acta ecologica sinica, 2007, 27(2): 432-441.
- [39] Tan L Y, Zhao Z J, Kang D W, Kang W, Li J Q. A Study on the Relationship between the Radial Growth of Picea purpurea and the Climatic Factors in Wanglang National Nature Reserve Journal of Sichuan agricultural university, 2011, 29(1): 29-34.
- [40] Li Z S, Liu G H, Fu B J, Zhang Q B, Hu C J, Luo S Z. Evaluation of temporal stability in tree growth-climate response in Wolong National Natural Reserve, western Sichuan, China. Chinese journal of plant ecology, 2010, 34(9): 1045-1057.
- [41] Wang Y X, Lu Z H, Su H X, Sang W G. Response Analysis Between Tree Ring Widths and Climatic Factors Along Different Regions in Tianshan Mountains Northwestern China. Journal of china university of Mining and Technology, 2007, 36(2): 251-256.
- [42] Zhu H F, Wang L L, Shao X M, Fang X Q. Tree Ring-width Response of Picea schrenkiana to Climate Change. Acta geographica sinica, 2004, 59(6): 863-870.

参考文献:

- [21] 程瑞梅, 封晓辉, 肖文发, 王瑞丽, 王晓荣, 杜化堂. 北亚热带马尾松净生产力对气候变化的响应. 应用生态学报, 2011, 31(8): 2086-2095.
- [22] 王俊玲, 金红喜, 杨占彪, 王刚. 六盘山华北落叶松人工林多样性、生产力研究. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(1): 31-35, 42.
- [23] 刘刚, 陆元昌, 李晓慧, 雷相东, 宁金魁. 六盘山地区气候因子对树木年轮生长的影响. 东北林业大学学报, 2009, 37(4): 1-4.
- [24] 程堂仁, 马钦彦, 冯仲科, 罗旭. 甘肃小陇山森林生物量研究. 北京林业大学学报, 2007, 29(1): 31-36.
- [25] 罗云建, 张小全, 王效科, 朱建华, 张治军, 孙贵生, 高峰. 华北落叶松人工林生物量及其分配模式. 北京林业大学学报, 2009, 31(1): 13-18.
- [26] 方精云, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [27] 袁春明, 郎南军, 孟广涛, 方向京, 李贵祥, 温绍龙. 长江上游华山松水土保持人工群落的结构特征与生物量. 东北林业大学学报, 2002, 30(3): 5-7.
- [28] 熊忠华, 严敏, 伍孝贤. 华山松、响叶杨混交林的生长及土壤养分分析. 山地农业生物学报, 2005, 24(4): 299-302.
- [29] 孔维静, 郑征. 岷江上游茂县退化生态系统及人工恢复植被地上生物量及净初级生产力. 山地学报, 2004, 22(4): 445-450.
- [30] 高国雄, 李文忠, 周心澄, 贾俊姝, 史常青, 刘国强. 青海大通退耕还林地生物量与生产力的研究. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 21-25.
- [31] 李武斌, 包维楷, 何丙辉, 吴文妍, 李芳兰. 岷江上游大沟流域油松人工幼林生物量组成及其影响因素. 山地学报, 2007, 25(2): 236-244.
- [32] 李海涛, 王姗姗, 高鲁鹏, 于贵瑞. 赣中亚热带森林植被碳储量. 生态学报, 2007, 27(2): 693-704.
- [34] 史江峰, 万建东, 李升峰, 聂宏善. 采用华山松树轮宽度重建秦岭东缘近百年冬半年温度. 第四纪研究, 2009, 29(4): 831-836.
- [35] 彭剑锋, 杨爱荣, 田沁花. 万仙山油松径向生长与气候因子的. 生态学报, 2011, 31(20): 5977-5983.
- [37] 高露双, 王晓明, 赵秀海. 长白山过渡带红松和鱼鳞云杉径向生长对气候因子的响应. 植物生态学报, 2011, 35(1): 27-34.
- [38] 熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 何常清, 杜阿朋, 刘海龙. 六盘山南坡华北落叶松树干直径生长及其对气象因子的响应. 生态学报, 2007, 27(2): 432-441.
- [39] 谭留夷, 赵志江, 康东伟, 康文, 李俊清. 王朗自然保护区紫果云杉径向生长与气候因子的关系. 四川农业大学学报, 2011, 29(1): 29-34.
- [40] 李宗善, 刘国华, 傅伯杰, 张齐兵, 胡婵娟, 罗淑政. 川西卧龙国家级自然保护区树木生长对气候响应的稳定性评估. 植物生态学报, 2010, 34(9): 1045-1057.
- [41] 王云霞, 陆兆华, 苏宏新, 桑卫国. 天山云杉树木年轮宽度对气候因子变化的响应. 中国矿业大学学报, 2007, 36(2): 251-256.
- [42] 朱海峰, 王丽丽, 邵雪梅, 方修琦. 雪岭云杉树轮宽度对气候变化的响应. 地理学报, 2004, 59(6): 863-870.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 13 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review of ecological effects of remnant trees in degraded forest ecosystems after severe disturbances MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3889)
- Mechanism and application of bioremediation to heavy metal polluted soil using arbuscular mycorrhizal fungi LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LIN Shuangshuang, et al (3898)

Autecology & Fundamentals

- Changes of allometric relationships among leaf traits in different ontogenetic stages of *Acer mono* from different types of forests in Donglingshan of Beijing YAO Jing, LI Ying, WEI Liping, et al (3907)
- The combined effects of increasing CO₂ concentrations and different temperatures on the growth and chlorophyll fluorescence in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta) LIU Lu, DING Liuli, CHEN Weizhou, et al (3916)
- Research on biomass expansion factor of chinese fir forest in Zhejiang Province based on LULUCF greenhouse gas Inventory ZHU Tangjun, SHEN Chuchu, JI Biyong, et al (3925)
- Influence of soil gradual drought stress on *Acorus calamus* growth and photosynthetic fluorescence characteristics WANG Wenlin, WAN Yinjing, LIU Bo, et al (3933)
- Isolation, identification, real-time PCR investigation of an endophytic phosphate-solubilizing bacteria from *Caragana korshinskii* Kom. roots ZHANG Lizhen, FENG Lili, MENG Qixia, et al (3941)
- Plant's and soil organism's diversity across a range of *Eucalyptus grandis* plantation ages ZHANG Danju, ZHANG Jian, YANG Wanqin, et al (3947)
- Effects of diet and starvation on growth and survival of *Scapharca broughtonii* larvae WANG Qingzhi, ZHANG Ming, FU Chengdong, et al (3963)
- Multidrug-resistant bacteria in livestock feces QI Shiyue, REN Siwei, LI Xueling, et al (3970)
- Physiological regulation related to the decline of *Alexandrium catenella* MA Jinhua, MENG Xi, ZHANG Shu, et al (3978)
- Numerical simulation of water quality based on environmental fluid dynamics code for grass-algae lake in Inner Mongolia LI Xing, SHI Hongsen, ZHANG Shuli, et al (3987)

Population, Community and Ecosystem

- Influence of enclosure on *Glycyrrhiza uralensis* community and distribution pattern in arid and semi-arid areas LI Xuebin, CHEN Lin, LI Guoqi, et al (3995)
- The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors WANG Yunni, XIONG Wei, WANG Yanhui, et al (4002)
- Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in Semiarid Loess Area MO Baoru, CAI Guojun, YANG Lei, LU Juan, et al (4011)
- Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan QIU Qingyan, CHEN Xiaomei, LIANG Guohua, et al (4021)
- A space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake based on improved PSO LI Jianjun, ZHANG Huiru, LIU Shuai, et al (4031)
- Allelopathic effects of aqueous extract of exotic plant *Rhus typhina* L. on soil micro-ecosystem HOU Yuping, LIU Lin, WANG Xin, et al (4041)
- The impact of natural succession process on waterbird community in a abandoned fishpond at Chongming Dongtan, China YANG Xiaoting, NIU Junying, LUO Zukui, et al (4050)
- Mercury contents in fish and its biomagnification in the food web in Three Gorges Reservoir after 175m impoundment YU Yang, WANG Yuchun, ZHOU Huaidong, et al (4059)

- Microsatellite analysis on genetic diversity of common carp, *Cyprinus carpio*, populations in Yuan River
 YUE Xingjian, ZOU Yuanchao, WANG Yongming, et al (4068)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area HUANG Rui, XU Ligang, LIU Junmin (4078)
- Simulation of soil respiration in forests at the catchment scale in the eastern part of northeast China
 GUO Lijuan, GUO Qingxi (4090)
- The early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in an alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau
 ZHANG Peilei, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (4101)
- Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services ZHANG Yi, ZHANG Heping (4111)
- The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen
 WU Jiansheng, ZHANG Liqing, PENG Jianet al (4125)
- Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: a Mount Lushan case study
 ZHOU Nianxing, HUANG Zhenfang, LIANG Yanyan (4134)
- Impacts of climate change on dominant pasture growing season in Central Inner Mongolia
 LI Xiazi, HAN Guodong, GUO Chunyan (4146)
- Phenological Characteristics of Typical Herbaceous Plants (*Lris lacteal*) and Its Response to Climate Change in Minqin Desert
 HAN Fugui, XU Xianying, WANG Lide, et al (4156)
- Biomass and distribution pattern of carbon storage in *Eomecon chionantha* Hance
 TIAN Dalun, YAN Wende, LIANG Xiaocui, et al (4165)
- Temporal dynamics and influencing factors of fine roots in five Chinese temperate forest ecosystems
 LI Xiangfei, WANG Chuankuan, QUAN Xiankui (4172)

Resource and Industrial Ecology

- Effects of AMF on soil improvement and maize growth in mining area under drought stress
 LI Shaopeng, BI Yinli, CHEN Peizhen, et al (4181)

Urban, Rural and Social Ecology

- Health function evaluation and exploring its mechanisms in the Shanghai Green Belt, China
 ZHANG Kaixuan, ZHANG Jianhua (4189)

Research Notes

- Time lag effects of rainfall inside a *Platycladus Orientalis* plantation forest in the Beijing Mountain Area, China
 SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jiayin (4199)
- Long-term effects of harvest residue management on soil total carbon and nitrogen concentrations of a replanted Chinese fir
 plantation HU Zhenhong, HE Zongming, FAN Shaohui, et al (4205)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 彭少麟

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 13 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 13 (July, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元