

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

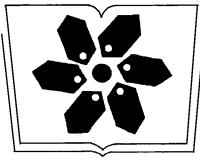
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 21 期
Vol.30 No.21
2010



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 30 卷 第 21 期 2010 年 11 月 (半月刊)

目 次

棉铃虫幼虫对人类呈味物质的取食反应·····	李为争,付国需,王英慧,等 (5709)
西藏拉萨机场周边风沙源空间分布及演变趋势·····	李海东,沈渭寿,邹长新,等 (5716)
新疆沙湾冷泉沉积物的细菌系统发育多样性·····	曾 军,杨红梅,徐建华,等 (5728)
应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康·····	裴雪姣,牛翠娟,高 欣,等 (5736)
不同海拔天山云杉叶功能性状及其与土壤因子的关系·····	张慧文,马剑英,孙 伟,等 (5747)
滨河湿地不同植被对农业非点源氮污染的控制效果·····	徐华山,赵同谦,贺玉晓,等 (5759)
内蒙古温带荒漠草原能量平衡特征及其驱动因子·····	阳伏林,周广胜 (5769)
南北样带温带区栎属树种功能性状对气象因子的响应·····	冯秋红,史作民,董莉莉,等 (5781)
伏牛山自然保护区物种多样性分布格局·····	卢训令,胡 楠,丁圣彦,等 (5790)
减弱 UV-B 辐射对烟草形态、光合及生理生化特性的影响 ·····	陈宗瑜,钟 楚,王 毅,等 (5799)
川西亚高山针阔混交林乔木层生物量、生产力随海拔梯度的变化 ·····	刘彦春,张远东,刘世荣,等 (5810)
三峡库区消落带水淹初期地上植被与土壤种子库的关系·····	王晓荣,程瑞梅,肖文发,等 (5821)
洞庭湖西岸区防护林土壤和植物营养元素含量特征·····	柏方敏,田大伦,方 晰,等 (5832)
择伐对阔叶红松林主要树种径向与纵向生长的影响·····	蒋子涵,金光泽 (5843)
野鸭湖典型湿地植物光谱特征·····	刘 克,赵文吉,郭逍宇,等 (5853)
三种线性模型在杉木与马尾松地位指数相关关系研究中的比较·····	朱光玉,吕 勇,林 辉,等 (5862)
不同干扰类型下羊草种群的空间格局·····	陈宝瑞,杨桂霞,张宏斌,等 (5868)
基于 SWAT 模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究——以石羊河上游杂木河流域为例 ·····	王军德,李元红,李赞堂,等 (5875)
2D 与 3D 景观指数测定山区植被景观格局变化对比分析 ·····	张志明,罗亲普,王文礼,等 (5886)
基于投影寻踪的珠江三角洲景观生态安全评价 ·····	高 杨,黄华梅,吴志峰 (5894)
海峡两岸 16 个沿海城市生态系统功能比较 ·····	张小飞,王如松,李 锋,等 (5904)
同安湾围(填)海生态系统服务损害的货币化预测评估 ·····	王 萱,陈伟琪,张璐平,等 (5914)
太阳辐射对玉米农田土壤呼吸作用的影响 ·····	孙敬松,周广胜,韩广轩 (5925)
水分胁迫下 AM 真菌对沙打旺生长和抗旱性的影响·····	郭辉娟,贺学礼 (5933)
宁夏南部旱区坡地不同粮草带比间作种植模式比较·····	路海东,贾志宽,杨宝平,等 (5941)
节节草生长对铜尾矿砂重金属形态转化和土壤酶活性的影响·····	李 影,陈明林 (5949)
自然植物群落形成过程中铜尾矿废弃地氮素组分的变化 ·····	安宗胜,詹 婧,孙庆业 (5958)
硅介导的水稻对二化螟幼虫钻蛀行为的影响 ·····	韩永强,刘 川,侯茂林 (5967)
饥饿对转基因鲤与野生鲤生长竞争和性腺发育的影响·····	刘春雷,常玉梅,梁利群,等 (5975)
专论与综述	
河流水质的景观组分阈值研究进展 ·····	刘珍环,李 猷,彭 建 (5983)
研究简报	
长期模拟增温对岷江冷杉幼苗生长与生物量分配的影响 ·····	杨 兵,王进闯,张远彬 (5994)
环境因素对长额斗蟋翅型分化的影响 ·····	曾 杨,朱道弘,赵吕权 (6001)

川西亚高山针阔混交林乔木层生物量、 生产力随海拔梯度的变化

刘彦春,张远东*,刘世荣,张笑鹤

(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)

摘要:川西亚高山针阔混交林是该地区云冷杉暗针叶林大规模采伐后自然恢复形成的主要次生林类型之一,是由采伐迹地向顶极暗针叶林演替过程中的重要阶段。采用样地调查与异速生长模型相结合的方法,研究了川西亚高山林区4个海拔梯度(A:2900—3050 m;B:3150—3300 m;C:3300—3450 m;D:3450—3550 m)40 a生针阔混交林的生物量与生产力变化。结果表明,林分乔木层生物量、生产力随海拔上升而不断下降,分别由A梯度的157.07t/hm²、3.43 t·hm⁻²·a⁻¹下降到D梯度的54.65t/hm²、1.36 t·hm⁻²·a⁻¹,气温的海拔间差异以及林分密度的递减是影响林分生物量、生产力变化的主要原因;阔叶类树种单株平均生物量、生产力随海拔升高而显著下降,由A梯度的200.55 kg、4.96 kg/a下降到D梯度的47.86 kg、1.19 kg/a;而针叶类树种单株平均生物量、生产力则逐渐上升,由A梯度的51.57 kg、1.28 kg/a上升到D梯度的73.88 kg、1.84 kg/a,但未达显著水平,阔、针叶类树种生物量、生产力变化分异是物种的生物学特性和林分环境共同作用的结果。相关分析显示,该地区阔叶类树种对海拔梯度的响应比针叶树种更为敏感和显著。

关键词:地上生物量;海拔梯度;亚高山;次生林;自然恢复

Changes of tree layer aboveground biomass, ANPP to altitudinal gradient in the subalpine secondary mixed forest of Western Sichuan, China

LIU Yanchun, ZHANG Yuandong*, LIU Shirong, ZHANG Xiaohe

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

Abstract: Subalpine forest region of Western Sichuan was located in the outer fringe of southeastern Qinghai-Tibet Plateau with high mountains and deep valleys, and was covered with subalpine forests, mainly dark coniferous ones. The forest had been greatly reduced and degraded, as a long-term over-logging on a large scale. Natural secondary coniferous-broadleaved forest was one of the main secondary forest types in subalpine region of Western Sichuan, which was originated from the clear-cutting lands between 1950s — 1980s due to the overexploitation of coniferous forests. Additionally, it was an important transitional stage in the secondary succession from cutting-blank to climax community. Our objectives were to quantify the aboveground biomass and aboveground net primary productivity (ANPP) of coniferous-broadleaved forests at different altitude, and to explore whether different response of coniferous species and broadleaf ones to changing altitude was existed or not. Based on the history data of forest management and field survey, we investigated eighteen sample plots of coniferous-broadleaved forests with 40 years old, distributed along four (A: 2900 — 3050 m; B: 3150 — 3300 m; C: 3300 — 3450 m; D: 3450 — 3550 m) altitudes from 2900 m to 3550 m, all of which were located on the same slope of Jiabi Mountain in Miyaluo forest region. We sampled 4 or 5 plots with similar site conditions and stand factors in each gradient. All tree layer plants (DBH ≥ 5 cm) were surveyed and sorted into two groups: broadleaf species and coniferous species, based on the leaf characters. Aboveground biomass was calculated using allometric relationships of this region summarized

基金项目:林业公益性行业科研专项(200804001);国家自然科学基金项目(30590383);国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD03A0404)

收稿日期:2009-10-10; 修订日期:2009-12-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyd@caf.ac.cn

by other experts. The ANPP was estimated by the mean annual increment method. The biomass and ANPP of tree layer decreased from 157.07 t/hm², 3.43 t·hm⁻²·a⁻¹ to 54.65 t·hm⁻², 1.36 t·hm⁻²·a⁻¹ respectively, with increasing elevation. The temperature difference and reducing stand density among altitudes were possibly the main factors affecting the stand biomass and ANPP. Individual biomass and ANPP of broadleaf species decreased from 200.55 kg, 4.96 kg/a at A to 47.86 kg, 1.19 kg/a at D with increasing altitude. However, opposite conclusion was found in coniferous species. The corresponding values of coniferous species increased from 51.57 kg, 1.28 kg/a at A to 73.88 kg, 1.84 kg/a at D. But there were no significant difference at 0.05 level. This heterogeneity seems to be in part responsible for differences in biological characteristics of species and forest habitat. Correlation analysis revealed that broad-leaf species were more significant and sensitive in response to altitude than coniferous species in this region. The difference of biomass and ANPP between different altitudes may be narrowed down with the global warming.

Key Words: aboveground biomass; altitudinal gradient; subalpine; secondary forest; natural restoration

川西亚高山林区地处青藏高原东南缘和长江上游,森林资源极为丰富,主要森林类型是亚高山暗针叶林,这些森林集中分布于金沙江、雅砻江、岷江、大渡河等流域及其支流,不仅是我国西南高山林区木材生产基地和物种基因库,而且还是承担水源涵养、水土保持和维持长江流域生态安全等多种功能的绿色屏障^[1-2]。20世纪50年代以来,随着川西亚高山森林的大规模开发利用,以冷杉(*Abies* spp.)为主要优势树种的原始暗针叶林被大面积采伐,之后陆续进行了以云杉(*Picea* spp.)为主要树种的人工更新^[2]。同时,在较为偏远和高海拔采伐迹地,以及伐后未及时完成人工更新的迹地则进行着以桦木(*Betula* spp.)等阔叶先锋树种为主的天然更新^[2]。1998年,天然林资源保护工程正式启动,川西森林全面禁伐封育。在经历大规模采伐、人工更新及实施封育后,川西亚高山森林处于大规模的恢复之中,不同林龄的人工云杉林和天然次生林成为该区域最主要的森林类型^[3-5]。云冷杉-桦木针阔混交林是川西亚高山地区主要森林类型之一,是原始暗针叶林采伐后,自然恢复演替中介于次生阔叶林和地带性暗针叶林之间的过渡阶段^[6]。

近几十年来,由于大气CO₂等温室气体浓度迅速上升而引起的全球变暖已是国际社会公认的全球性环境问题。森林生态系统对全球碳循环影响的研究倍受关注^[5,7-8]。海拔梯度作为影响山地森林群落结构和物种组成的重要因素之一,包含多种环境因子的梯度效应^[9],因而研究森林群落的海拔梯度格局已经成为森林生态系统研究的重要内容,对揭示植物群落的环境梯度变化规律,了解植物适应性沿海拔梯度的变化趋势等具有重要意义^[10]。植物群落特征随海拔梯度变化的研究多见于物种多样性方面^[11-13],生物量研究则偏重于草地生态系统,而森林生态系统生物量随海拔梯度变化的研究较为缺乏。已有的研究表明,海拔高度变化而引起的环境因子尤其是温度因子的变化会对植物生长,发育及各种生理代谢产生影响,进而会影响植被的干物质及生物量积累^[14]。Carolina等对亚马逊河流域中部热带雨林的研究发现地上生物量与海拔梯度呈正相关^[15],刘兴良等对巴郎山高山栎灌丛研究发现,种群、单株生物量均随海拔升高而降低^[16],通过对西双版纳橡胶林的研究,贾开心等发现地上生物量随海拔上升而不断下降^[17]。川西亚高山地区的次生针阔混交林是由次生阔叶林向地带性暗针叶林过渡的中间群落,在该时期,群落结构与物种组成是否随海拔变化而表现出一定的规律性,不同物种生物量变化是否一致?基于以上疑问,本文以川西米亚罗林区20世纪60年代采伐迹地上自然恢复的云冷杉-桦木混交林为研究对象,依据海拔高度划分为4个梯度(A:2900—3050 m;B:3050—3300 m;C:3300—3450 m;D:3450—3550 m)进行对比分析。研究川西亚高山地区针阔混交林结构与功能、生物量与生产力及其对海拔梯度的响应,以期积累乔木层地上生物量随海拔梯度变化的基础数据,并为该区天然次生林能量流动与养分循环等研究提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省理县米亚罗林区,地理坐标为31°24′—31°55′N,102°35′—103°4′E。海拔在2200—

5500 m 之间,气候受高原地形的决定性影响,属冬寒夏凉的高山气候。以海拔 2760 m 的米亚罗镇为例,全年降水量 700—1400 mm,年蒸发量 1000—1900 mm,1 月份均温 -8°C ,7 月份均温 12.6°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 1200—1400 $^{\circ}\text{C}$ 。米亚罗林区植被垂直成带明显,其类型和生境随海拔及坡向而有所差异。原生森林分布于海拔 2400—4200 m 之间,以亚高山暗针叶林为主,优势树种为岷江冷杉(*Abies faxoniana* Rehd et Wils.)和紫果云杉(*Picea purpurea* Mast.)。1950—1978 年间进行过大规模皆伐,之后采伐量逐年减少,至 1998 年停采封育。采伐迹地初期多形成悬钩子(*Rubus* spp.)或箭竹(*Sinarundinaria nitida*)灌丛。1955 年以后,迹地上陆续开展了以粗枝云杉(*Picea asperata* Mast.)为主的人工更新。同时,迹地上以桦木为主的次生阔叶树种的天然更新也普遍发生,经灌丛、次生阔叶林、针阔混交林阶段向暗针叶林自然恢复^[18-19]。米亚罗森林土壤主要为山地棕壤,该地区乔木树种主要有冷杉(*Abies* spp.),云杉(*Picea* spp.),桦木(*Betula* spp.),铁杉(*Tsuga chinensis* Pritz),岷江柏(*Cupressus chengiana* S. Y. Hu),油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选设

通过查阅米亚罗林区森林经营资料、调查访问和实地考察,在夹壁沟的 4 个海拔梯度内选择坡度、坡向,物种组成及土壤等环境条件基本一致的同龄次生针阔混交林(由 2 个或 2 个以上树种组成,且针、阔叶树种材积比不小于 1/5(或大于 5))样地 18 块,每个梯度相差 150 m。该针阔混交林由以桦树、槭树为主的先锋树种和以冷杉、粗枝云杉为主的顶级树种组成。林分采伐前均为老龄暗针叶林,在 19 世纪 60 年代前后进行了采伐,之后自然恢复,无明显的火烧、病虫害、放牧等干扰。林分年龄首先根据采伐年代进行初步确定,再选取样地内 2—3 株平均木用生长锥钻取树芯并查数年轮加以确定。各样地面积 20 m \times 20 m。记录海拔、经纬度坐标、坡度、坡向、坡位、优势树种等基本情况,目测林分郁闭度、灌木盖度和草本盖度,对所有样地进行每木检尺,测定林内乔木层($DBH \geq 5$ cm)全部树木的胸径、树高和冠幅。灌木层($DBH < 5$ cm),草本层,凋落物层及根系生物量因条件所限没有测算。样地基本情况见表 1。

1.2.2 数据处理

根据异速生长方程计算单株各器官生物量,然后相加得单株生物量。依据针叶、阔叶属性将各样地树种分为两类并分别统计生物量,两类生物量之和为样地总生物量($DBH \geq 5$ cm 的乔木层生物量)。然后分别换算成单位林地面积生物量。各树种本地区或附近地区异速生长方程见表 2。

林分净生产量(ΔP_n)应为 T_1 — T_2 期间植物的生长量(Y_n),植物凋落物枯损量(ΔL_n),被动物吃掉的损失量(ΔG_n)3 个分量之和^[20],因条件所限,本文仅以乔木层年平均净生产量来衡量。

林分生产力采用下面公式求得: $\Delta P_n = \frac{W}{a}$,式中 ΔP_n 代表生产力, W 为某林龄时的生物量, a 为林龄。

单株平均生物量、生产力为各梯度样地内每株林木生物量、生产力的平均值,其计算公式如下:

$$\text{单株平均生物量计算公式: } W = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (W_{si} + W_{bi} + W_{li})$$

$$\text{单株平均生产力计算公式: } S_s = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (s_i)$$

式中, W_s , W_b , W_l 分别为树干,树枝,叶片生物量, S_s 为单株平均生产力, s_i 为第 i 株林木的生产力。 M 为某一梯度处的样地个数, n 为样地内树木株数。在 SPSS 15.0 软件中进行单因素方差分析以检验差异显著性,并对林分生物量与林分因子进行偏相关分析。利用 SigmaPlot 10.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 林分乔木层生物量随海拔梯度的变化

通过对 4 个海拔梯度林分生物量变化分析(表 3)可知,川西亚高山地区针阔混交林乔木层生物量随海拔升高而降低,由 A 梯度的 157.07 t/hm² 下降到 D 梯度的 54.65 t/hm²;林分内阔叶、针叶类生物量亦分别随海拔升高而下降,分别由 A 梯度的 101.43、55.64 t/hm² 下降到 D 梯度的 32.89、21.76 t/hm²,并且阔叶类生物

表 1 川西亚高山针阔混交林样地基本状况
Table 1 Outline of coniferous-broadleaved mixed forests in Miyaluo, Western Sichuan

海拔梯度 Altitudinal gradient/m	平均林龄 Average stand age/a	海拔 Elevation /m	坡度 Gradient /(°)	坡向 Slope direction /(°)	林龄 Stand age/a	优势种 I Dominance species I	胸径/cm /组成 I /% DBH/ Prop ortion	优势种 II Dominance species II	胸径/cm /组成 II /% DBH/ Prop ortion	优势种 III Dominance species III	胸径/cm /组成 III /% DBH/ Prop ortion
A	40.4	2936	35	NE25	38	云杉 <i>Picea</i> spp.	14.0 ± 2.8/5	桦树 <i>Betula</i> spp.	17.8 ± 4.9/3	冷杉 <i>Abies</i> spp.	17.3 ± 2.1/2
		2950	40	NW10	45	桦树 <i>Betula</i> spp.	21.5 ± 3.2/4	冷杉 <i>Abies</i> spp.	21.2 ± 5.5/3	云杉 <i>Picea</i> spp.	13.5 ± 2.5/3
		2955	45	NE40	39	桦树 <i>Betula</i> spp.	18.3 ± 3.6/5	槭树 <i>Acer</i> spp.	23.0 ± 4.5/3	云杉 <i>Picea</i> spp.	21.0 ± 7.0/2
		3069	40	NE10	36	槭树 <i>Acer</i> spp.	(7.3 ± 2.6)/5	冷杉 <i>Abies</i> spp.	(11.5 ± 5.5)/4	桦树 <i>Betula</i> spp.	(9.3 ± 2.6)/1
		3067	30	SW70	44	冷杉 <i>Abies</i> spp.	(25.6 ± 7.0)/4	槭树 <i>Acer</i> spp.	(16.0 ± 3.6)/3	桦树 <i>Betula</i> spp.	(21.0 ± 4.0)/3
B	42.5	3159	40	N	44	冷杉 <i>Abies</i> spp.	20.4 ± 5.5/4	桦树 <i>Betula</i> spp.	20.8 ± 8.9/4	槭树 <i>Acer</i> spp.	16.3 ± 2.5/2
		3178	33	N	38	桦树 <i>Betula</i> spp.	14.1 ± 2.25/5	冷杉 <i>Abies</i> spp.	18.7 ± 4.6/4	槭树 <i>Acer</i> spp.	8.9 ± 6.2/1
		3238	20	W	46	云杉 <i>Picea</i> spp.	24.6 ± 6.0/5	桦树 <i>Betula</i> spp.	22.0 ± 4.8/3	铁杉 <i>Tsuga chinensis</i>	30.1 ± 6.1/2
		3278	35	NE70	42	桦树 <i>Betula</i> spp.	19.5 ± 4.7/4	槭树 <i>Acer</i> spp.	16.0 ± 2.8/3	冷杉 <i>Abies</i> spp.	21.3 ± 4.5/2
C	41.6	3317	30	NE20	39	桦树 <i>Betula</i> spp.	18.2 ± 3.0/6	冷杉 <i>Abies</i> spp.	20.8 ± 4.8/4	-	桦树 <i>Betula</i> spp.
		3345	30	SW25	41	冷杉 <i>Abies</i> spp.	18.5 ± 4.5/4	槭树 <i>Acer</i> spp.	22.0 ± 4.0/3	桦树 <i>Betula</i> spp.	18.3 ± 3.9/3
		3388	30	NE30	39	桦树 <i>Betula</i> spp.	17.5 ± 2.2/6	冷杉 <i>Abies</i> spp.	22.0 ± 5.0/3	冷杉 <i>Abies</i> spp.	22.0 ± 6.2/1
		3451	30	NW20	44	桦树 <i>Betula</i> spp.	21.0 ± 3.3/4	冷杉 <i>Abies</i> spp.	23.9 ± 8.3/4	-	-
		3545	15	NW20	40	桦树 <i>Betula</i> spp.	16.1 ± 2.6/6	冷杉 <i>Abies</i> spp.	10.3 ± 3.1/4	-	-
D	40.3	3548	15	SW40	43	桦树 <i>Betula</i> spp.	20.4 ± 5.5/6	云杉 <i>Picea</i> spp.	18.7 ± 3.5/2	冷杉 <i>Abies</i> spp.	22.0 ± 4.3/2
		3548	15	SW40	38	桦树 <i>Betula</i> spp.	17.1 ± 3.6/6	冷杉 <i>Abies</i> spp.	17.5 ± 4.7/3	云杉 <i>Picea</i> spp.	20.0 ± 4.1/1
		3548	15	SW40	41	桦树 <i>Betula</i> spp.	19.5 ± 3.7/6	冷杉 <i>Abies</i> spp.	25.0 ± 8.9/2	云杉 <i>Picea</i> spp.	20.4 ± 5.8/2
		3548	15	SW40	40	桦树 <i>Betula</i> spp.	18.0 ± 3.3/6	冷杉 <i>Abies</i> spp.	16.1 ± 4.4/2	云杉 <i>Picea</i> spp.	7.9 ± 0.3/2

A: 2900—3050 m; B: 3150—3300 m; C: 3300—3450 m; D: 3450—3550 m; 树种组成按材积比初步确定; NE25 表示北偏东 25 度(25 degree North by East),其它表意相同

表 2 川西亚高山次生林乔木地上生物量异速生长模型

Table 2 Allometric relationships for above-ground tree biomass in subalpine secondary forest in Western Sichuan

树种名称 Tree	树高与胸径关系 Height and breast relationships	地上部分器官 Organs of aboveground	异速生长方程 Allometric relationships	相关系数 Correlation coefficient	文献来源 Origin of references
冷杉 <i>Abies</i> spp.	$H = 45.7974 + \frac{-1837.2261}{D + 39.4060}$	干 Stem	$W = 0.0139(D^2 \cdot H)^{1.0075}$	$R^2 = 0.9986$	[13]
		枝 Branch	$W = 0.0014(D^2 \cdot H)^{1.0503}$	$R^2 = 0.9118$	
		叶 Leaf $D < 40\text{cm}$	$W = 0.0003(D^2 \cdot H)^{1.2032}$	$R^2 = 0.9341$	
云杉 <i>Picea</i> spp.	$H = \frac{D}{1.1295 + 0.0161 \times D}$	$D > 40\text{cm}$	$W = 11.506 \ln(D^2 \cdot H) - 74.733$	$R^2 = 0.7539$	[13]
		干 Stem	$W = 0.0405D^{2.568}$	$R^2 = 0.9890$	
		枝 Branch	$W = 0.0037D^{2.7386}$	$R^2 = 0.9450$	
桦木 <i>Betula</i> spp.	$H = 33.2727 - \frac{1031.4484}{D + 31.5493}$	叶 Leaf $D < 40\text{cm}$	$W = 0.0014D^{2.9302}$	$R^2 = 0.9419$	[10]
		$D > 40\text{cm}$	$W = 29.541 \ln D - 63.15$	$R^2 = 0.7574$	
		干 Stem	$W = 0.14114(D^2 \cdot H)^{0.7234}$	$R^2 = 0.9801$	
槭树 <i>Acer</i> spp.	$H = \frac{D}{0.841178 + 0.031825 \times D}$	枝 Branch	$W = 0.00724(D^2 \cdot H)^{1.0225}$	$R^2 = 0.7744$	[21]
		叶 Leaf	$W = 0.01513(D^2 \cdot H)^{0.8085}$	$R^2 = 0.8281$	
		干 Stem	$W = 0.3274(D^2 \cdot H)^{0.7218}$	$R^2 = 0.9325$	
杨木 <i>Poplar</i> spp.	$H = \frac{D}{0.74623 + 0.042052 \times D}$	枝 Branch	$W = 0.01349(D^2 \cdot H)^{0.7198}$	$R^2 = 0.9114$	[22]
		叶 Leaf	$W = 0.02347(D^2 \cdot H)^{0.6929}$	$R^2 = 0.8917$	
		干 Stem	$W = 0.0537(D^2 \cdot H)^{0.927}$	$R^2 = 0.987$	
其它阔叶树 Other broadleaf species	-	枝 Branch	$W = 0.01245(D^2 \cdot H)^{0.9504}$	$R^2 = 0.863$	[13]
		叶 Leaf	$W = 0.0221(D^2 \cdot H)^{0.7583}$	$R^2 = 0.786$	
		干 Stem	$W = 0.0097(D^2 \cdot H) + 5.8252$	$R^2 = 0.9914$	
		枝 Branch	$W = 0.0051(D^2 \cdot H) + 3.508$	$R^2 = 0.9825$	
		叶 Leaf	$W = 0.0004(D^2 \cdot H) + 0.7563$	$R^2 = 0.9333$	

同属异种间生长差异不大,不会对结论产生实质性影响,因此本文未做种别上的细分

表 3 不同海拔梯度林分乔木层生物量变化及差异显著性检验

Table 3 Biomass changes of tree layer and statistical test at different altitudes (F)

类别 Classify	海拔梯度/m Altitudinal gradients	生物量 Biomass / (t/hm ²)			合计 Total
		茎 Stem	枝 Branches	叶 Leaves	
阔叶类 Broad leaved species	A	56.13 ± 4.46 ^a	37.33 ± 13.37 ^a	7.97 ± 2.25 ^a	101.43 ± 11.02 ^a
	B	44.44 ± 17.81 ^{ab}	18.62 ± 4.80 ^b	6.91 ± 2.25 ^a	69.97 ± 23.69 ^{ab}
	C	36.28 ± 13.94 ^b	21.63 ± 3.85 ^{ab}	7.20 ± 2.98 ^a	65.11 ± 20.37 ^b
	D	18.64 ± 3.19 ^c	10.52 ± 2.93 ^c	3.72 ± 0.54 ^b	32.89 ± 6.67 ^c
	F	20.41 ^{**}	11.14 [*]	11.33 [*]	20.86 ^{**}
针叶类 Needle species	A	44.44 ± 16.08 ^a	6.47 ± 2.75 ^a	4.73 ± 2.69 ^a	55.64 ± 18.52 ^a
	B	41.05 ± 11.86 ^a	6.08 ± 1.90 ^a	4.58 ± 1.33 ^a	51.71 ± 15.09 ^a
	C	37.50 ± 17.84 ^a	5.55 ± 4.17 ^a	4.57 ± 3.78 ^a	47.62 ± 25.79 ^a
	D	17.23 ± 11.60 ^b	2.54 ± 1.75 ^b	1.99 ± 1.52 ^b	21.76 ± 14.85 ^b
	F	27.06 ^{**}	4.37	1.07	28.57 ^{**}
总生物量 Total	A	100.57 ± 32.20 ^a	43.80 ± 15.24 ^a	12.70 ± 4.00 ^a	157.07 ± 37.24 ^a
	B	85.50 ± 17.31 ^b	24.69 ± 4.19 ^b	11.49 ± 1.99 ^a	121.68 ± 22.82 ^b
	C	73.78 ± 38.68 ^b	27.18 ± 8.02 ^b	11.77 ± 6.10 ^a	112.73 ± 52.74 ^b
	D	35.87 ± 9.56 ^c	13.06 ± 3.18 ^c	5.71 ± 1.24 ^b	54.65 ± 12.50 ^c
	F	26.14 ^{**}	14.23 ^{**}	20.07 ^{**}	25.97 ^{**}

A: 2900—3050 m; B: 3150—3300 m; C: 3300—3450 m; D: 3450—3550 m; 树种组成按材积比初步确定; 数据为平均值 ± 标准误差, $n = 18$; 表中同列标不同字母者表示组间差异显著 ($P < 0.05$); 标有相同小写字母者表示组间差异不显著 ($P > 0.05$)

量随梯度下降速度要快于针叶类。

随着海拔梯度的增加,除针叶类枝、叶生物量变化差异不显著外,林分针叶、阔叶类各器官生物量均逐渐下降,且达到显著水平。两类树种各器官生物量分配随海拔升高而表现出一定的规律性,即叶生物量比例均不断上升,分别由 A 梯度的 8.5%、7.8% 上升到 D 梯度的 9.1%、11.3%,林分乔木层叶生物量比例则由

8.0% 上升到 10.5%; 而茎和枝生物量比例不同程度有所下降。随海拔升高, 针叶类树种茎、枝、叶生物量分配比例基本不变, 维持在 79%:12%:9% 左右。

各海拔梯度的阔叶类生物量均达到林分乔木层总生物量的 57% 以上, 即桦木、槭树等阔叶树种仍占据主要地位, 说明该区暗针叶林采伐后自然恢复 40 a 的林分, 正处于针阔混交林的初期阶段^[6], 随着林分的进一步发育, 以冷杉为主的针叶类生物量将不断增加, 并最终恢复为该地区地带性暗针叶林顶级群落。

2.2 林分中针叶、阔叶类单株生物量对海拔梯度的响应

由图 1 可知, 随海拔梯度的上升, 以桦树为主的阔叶类树种单株平均生物量不断下降, 由 A 梯度的 200.55 kg 下降到 D 梯度的 47.86 kg, 具体表现为各器官生物量均逐渐下降; 而以云杉、冷杉为主的针叶类树种单株平均生物量不断上升, 由 A 梯度的 51.57 kg 上升到 D 梯度的 73.88 kg。

海拔梯度 A, B 处, 阔叶类单株平均茎、叶生物量高于针叶类树种, 相反, 在 C, D 梯度处, 针叶树种茎生物量较高, 当海拔超过 3300 m 时, 针叶类树种单株生物量达到并超过阔叶类树种。表明, 相对于桦树等阔叶树种, 该地区云冷杉树种更适应于因海拔增加而引起的生境变化。

与林分生物量的器官分配状况相似, 随海拔梯度增加, 平均单株茎、叶生物量所占比例不断上升, 而枝生物量比例不断下降。阔叶类树种茎干生物量维持在 50% 左右。而针叶类树种茎、枝、叶比例为 79%:12%:9%, 与林分针叶类单位面积生物量分配比例相同。

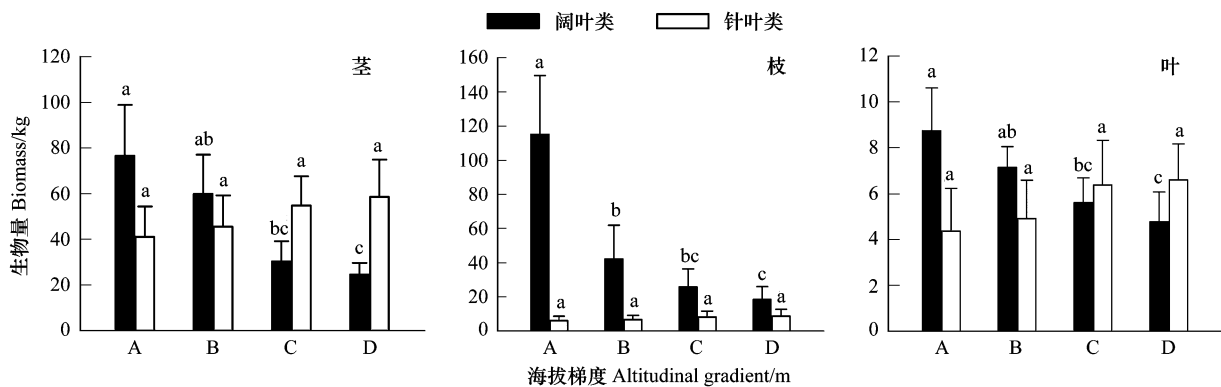


图 1 不同海拔梯度林分不同树种单株产量结构及分配

Fig. 1 Individual biomass structures and their allocations of different species at different altitudes

A: 2900—3050 m; B: 3150—3300 m; C: 3300—3450 m; D: 3450—3550 m; 树种组成按材积比初步确定; 数据为平均值 \pm 标准误差, $n = 18$; 图中各组间标不同字母者表示组间差异显著 ($P < 0.05$); 标有相同小写字母者表示组间差异不显著 ($P > 0.05$)

2.3 不同海拔梯度针阔混交林生产力结构分析

由图 2 可知, 随海拔梯度的上升, 林分生产力及林分单株平均生产力均逐渐下降, 林分生产力由 A 梯度的 $3.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 下降到 D 梯度的 $1.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 林分单株平均生产力则由 A 梯度的 6.24 kg/a 下降到 D 梯度的 3.02 kg/a 。针叶、阔叶类树种单位面积生产力分别由 A 梯度的 1.38 、 $2.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 下降到 D 梯度的 $0.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.82 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。阔叶类树种单位面积生产力在各海拔梯度均明显高于针叶树种。

针叶、阔叶类树种单株平均生产力变化则相反, 阔叶类单株平均生产力随海拔上升而逐渐下降, 由 A 梯度的 4.96 kg/a 下降至 D 梯度的 1.19 kg/a ; 针叶类单株平均生产力则随海拔升高而增加, 由 A 梯度的 1.28 kg/a 上升到 D 梯度的 1.84 kg/a 。当海拔超过 3300 m 时, 针叶树单株生产力则高于阔叶树。

2.4 林分乔木层树种组成随海拔梯度的变化

在样地选设时, 选取针阔混交比例较为接近的样地作为研究对象。表 1 已对各样地针、阔树比例作以简单分类, 针、阔叶树比例约为 4:6 (按材积初算)。树种组成的差异, 如针、阔叶密度, 胸高断面面积, 树高等因素可能对生物量、生产力的变化产生一定影响, 因此有必要对其加以分析。如表 4, 林分密度随海拔上升而明显下降, 由 A 梯度的 $4201 \text{ 株}/\text{hm}^2$, 下降到 D 梯度的 $1551 \text{ 株}/\text{hm}^2$; 针、阔叶类密度也都呈下降趋势。然而, 各梯

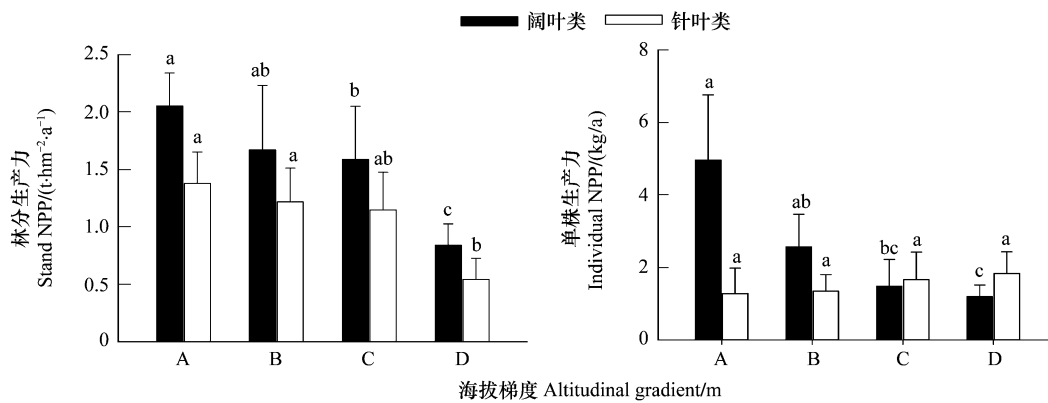


图2 不同海拔梯度林分及单株生产力变化

Fig. 2 Changes of productivity in stand and individual level at different altitudes

度针、阔密度比(树种组成)在各梯度间差异不显著。同样,各梯度针、阔类胸高断面积比变化差异也不显著,阔叶类比例在49%—63%间变化(表4)。这表明,尽管林分密度与海拔梯度呈负相关(表5),但林分针、阔树种密度、胸高断面积比无显著变化,即林分树种组成在各海拔梯度间差异不显著。

表4 不同海拔梯度林分乔木层密度及树种组成

Table 4 Density and species composition of stands at different altitudes

海拔 Elevation/m	林分密度 Stand density/(株/hm ²)		林分胸高断面积 Stand breast-height basal area/(m ² /hm ²)	
	阔叶类	针叶类	阔叶类	针叶类
A	2314 ± 562 ^a	1887 ± 630 ^a	20.1 ± 3.3 ^a	19.2 ± 12.9 ^a
比例 Proportion	0.61	0.39	0.51	0.49
B	1961 ± 776 ^{ab}	1200 ± 57 ^{ab}	16.0 ± 5.2 ^a	16.4 ± 3.8 ^a
比例 Proportion	0.58	0.42	0.49	0.51
C	1625 ± 661 ^b	1186 ± 1426 ^b	15.8 ± 6.1 ^a	6.7 ± 2.8 ^b
比例 Proportion	0.67	0.33	0.55	0.44
D	1076 ± 336 ^c	475 ± 171 ^c	8.4 ± 1.5 ^b	5.0 ± 1.9 ^b
比例 Proportion	0.69	0.31	0.63	0.37
F	42.5 ^{**}	16.2 ^{**}	2.06	2.65

林分生物量、生产力与主要林分因子的偏相关分析显示(表5),林分生物量、生产力均与海拔梯度呈负相关关系(除针叶类单株生物量、生产力)。林分总生物量、阔叶类单株生物量与生产力达到极显著水平($P < 0.01$)。林分生产力、总单株生物量也达到显著水平($P < 0.05$)。而针叶类单株(单位面积)生物量、生产力变化未达到显著水平($P > 0.05$)。密度与海拔梯度呈负相关,但不显著($P > 0.05$)。林龄、密度与生物量、生产力的相关性不显著。针、阔叶比仅对针、阔叶类单面生产力的影响达到显著。分析说明,林分生物量、生产力的变化与海拔变化关系密切,而林龄、密度的影响不大。阔叶类树种对海拔梯度的响应比针叶类树种更为敏感和显著。

3 结论与讨论

该林区暗针叶林大规模采伐后,在地势平缓,交通便利的林地先后开展了以云杉为主要造林树种的人工更新。与该地区人工恢复的同龄级云杉林^[15,23-24]相比,云冷杉-桦木针阔混交林的4个梯度平均生物量和生产力均较低。同自然恢复的次生阔叶林相比,该阶段的针阔混交林生物量要明显高于29年生次生阔叶林,而生产力则不及后者^[25];与该地区48年生白桦阔叶林生物量相比则略低,而生产力却高于后者^[26]。与其它地区的针阔混交林相比,该区具有较高的生物量,其高于河南罗山董寨的麻栎—马尾松针阔混交林^[27],而生产力与其接近^[27](附表)。

表 5 林分生物量、生产力与林分因子偏相关分析

Table 5 Partial correlation analysis between biomass, NPP and stand factors

R	El	Ag	De	Co	BHBA	STB	IB	STNPP	INPP	BNPP	CNPP	BINPP	CINPP	BIB	CIB
El	1														
A	0.13	1													
D	-0.37	-0.22	1												
C	0.20	0.03	-0.42	1											
BHBA	0.01	0.41	0.73**	0.12	1										
STB	-0.74**	-0.06	0.25	-0.09	0.56*	1									
IB	-0.54*	-0.51	-0.12	0.36	0.37	0.51	1								
STNPP	-0.60*	-0.32	-0.35	0.42	0.94**	0.26	0.52	1							
INPP	-0.02	-0.43	-0.09	0.15	0.45	0.01	0.68*	0.67*	1						
BNPP	-0.66*	-0.52	0.20	0.56*	0.49	0.15	-0.05	0.70**	0.13	1					
CNPP	-0.26	0.04	-0.15	-0.55*	0.44	0.67*	0.63*	-0.15	0.18	-0.54	1				
BINPP	-0.75**	-0.44	-0.10	0.41	0.10	0.53	0.94**	0.58*	0.59*	-0.01	0.56	1			
CINPP	0.07	-0.49	-0.27	-0.29	0.42	0.58*	0.94**	0.41	0.63*	-0.11	0.74**	0.81**	1		
BIB	-0.78**	-0.43	-0.02	0.46	0.01	0.54	0.93**	0.59*	0.58*	0.01	0.57*	0.99**	0.82**	1	
CIB	0.21	-0.16	-0.08	-0.34	0.29	0.64*	0.71**	0.30	0.48	-0.07	0.73**	0.56*	0.89**	0.58*	1

偏相关-双尾检验; ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$; R 偏相关系数; El 海拔; Ag 林; De 密度; Co 林分阔、针叶比; BHBA 胸高断面积; STB 林分总生物量; IB 单株生物量; STNPP 林分总生产力; INPP 单株生产力; BNPP 阔叶类生产力; CNPP 针叶类生产力; BINPP 阔叶类单株生产力; CINPP 针叶类单株生产力; BIB 阔叶单株生物量; CIB 针叶单株生物量

对川西亚高山地区不同海拔梯度针阔混交林生物量的研究表明:

川西亚高山地区针阔混交林乔木层生物量随海拔升高而降低,林分针叶、阔叶类总生物量随海拔升高而下降,并均达到极显著水平($P < 0.01$)。林分乔木层及单株总生产力均不断下降(林分水平差异显著)。这主要是由于随海拔上升,环境条件趋于恶劣引起的。海拔高度不同,光、热、水、气等因子的综合效应产生差异,本地区海拔每升高 100 m,平均气温降低 0.56°C ^[2],由 A 梯度到 D 梯度温度相差约 $3\text{—}4^{\circ}\text{C}$ 。此外,高海拔地区风力大,空气稀薄,气候条件更加恶劣,植物生长期缩短,有效积温降低,影响了植物有机物的形成^[16]。在产量器官分配关系上,茎、枝生物量比重随海拔升高有所下降,而叶生物量比重不断增加。这是由于在适宜的生境条件下,种群会通过增加主干,皮和枝叶生物量,以适应种群对空间扩展和繁殖需求,而当环境条件趋于严酷时,植物种群通过调整投资策略实现最大可能的生存繁衍空间,而其他营养生长可能弱化,以增强对环境的适应^[28]。叶生物量比重随海拔升高而增加,以加强同化能力,积累有机物,是适应严酷环境的生理表现。

阔叶类树种单株平均生物量、生产力随海拔上升而下降,达到极显著水平($P < 0.01$);而针叶类树种单株平均生物量、生产力不断上升,但未达到显著水平($P > 0.05$)。并且当海拔超过 3300 m 时,针叶树单株生物量、生产力明显高于阔叶树。这可能是物种生物学特性、林分环境共同作用的结果。云冷杉林需要温凉的气候和比较分明的四季,冬季有一定的雪覆被,生长季中具有充分的湿度。云冷杉抗寒能力强,但对湿度要求较敏感,需要空气相对湿度达 60% 以上及较多的冬季降雨量^[29]。通常随海拔上升,会伴随温度的下降,降水量,雪被覆盖和空气相对湿度的增加^[29],因此,云冷杉林得到较充分的生长。另外,林分密度逐渐下降(表 4),林分内竞争减弱,针叶类树种个体生长得到相对较多的资源和空间,也有利于林分单株产量的提高。

21 世纪全球变暖将比 20 世纪更为严重,全球表面温度预计在 21 世纪将升高 $1.4\text{—}5.8^{\circ}\text{C}$ ^[30],青藏高原是全球气候变化的“启动器”和“放大器”,其升温更早于和高于全球平均值^[31]。徐影等^[31]研究表明,2100 年青藏高原冬季最低温与夏季最高温将分别上升 $6\text{—}8^{\circ}\text{C}$ 、 $4\text{—}7^{\circ}\text{C}$ 。川西林区降水充足,气温是影响植物生长的主要生态因子^[29],在气候变暖的趋动下,植被群落分布界线向更高的海拔高度迁移^[32]。因此,未来各梯度林分生物量均会不同程度有所提高;李川等^[33]研究发现,海拔越高,变暖趋势越明显,因此,高海拔的林分环境因子向低海拔趋同,其林分生物量提高会较快,高低海拔间的生物量差异可能会减小。

作为我国西南林区重要组成部分的川西林区,气温偏低,环境异质性大,植物生长季短,大多数植物特别是顶极物种生长缓慢,自然恢复到顶极、碳贮量达到理想状况需要较长的时间。因此,在漫长的演替过程中,次生针阔混交林对维持该地区的物种多样性,群落结构,碳水循环等方面起着重要作用。据鲍俊仁等^[26]研究,与白桦次生林,岷江冷杉林及紫果云杉林相比,川西地区的针阔混交林具有较高的土壤碳贮量,可见,针阔混交林具有其特殊的生态优势。

本文研究仅针对林分某一时期乔木层生物量,没有调查灌木层,草本层,枯落物及土壤层(根系、土壤微生物等),但由于乔木层碳储量在整个生态系统碳储量中占有极大的比重^[34],因此可一定程度上反应林分的碳储量水平。同时,研究中未考虑群落结构变化对生物量时空动态变化的影响,随林分的进一步发育,林分树种组成是否会发生变化,林分及不同组分的生物量是否仍随海拔梯度变化表现一定的规律,以及若海拔继续升高,是否有同样的结论等问题仍待进一步研究。

附表 其它地区不同林型生物量与生产力研究结果

Appendix Data of biomass and NPP of different forest types in other areas

地点 Site	林型 Forest type	林龄 Age/a	乔木层生物量 Biomass / (t/hm ²)	乔木层生产力 NPP/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	参考文献 Reference
川西-理县	白桦次生林	29	49.70	5.15	[25]
川西-平武	白桦次生林	48	116.76 *	2.43 *	[26]
川西-松潘	紫果云杉天然林	40—51	134.41	2.99	[24]
川西-理县	云杉人工林	40	125.40	3.14	[15]
川西-峨边	峨眉冷杉人工林	35—36	173.00	4.81	[23]
河南罗山董寨	麻栎-马尾松针阔混交林	38	103.00	2.71	[27]
川西-理县	云冷杉-桦木针阔混交林	41	111.53	2.72	本文 ^A

* 在原文基础上按本文公式进行换算得到,碳密度取0.5; A:本研究取各梯度均值

References:

- [1] Zhou D Z, Yang Y P. Preliminary studies on regeneration characteristic of birch in alpine forest of Western Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 1980, 16(2): 154-156.
- [2] Yang Y P, Li C B. *Sichuan Forest*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1992: 368.
- [3] Jiang Y X. Community characteristic and classification principle of alpine dark coniferous forest in Miyaluo, West Sichuan. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1963, 1(1): 42-50.
- [4] Jiang Y X. The primary study on habitat type of alpine forest in Miyaluo and Markang, West Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 1963, 8(4): 321-335.
- [5] Fang J Y. Forest productivity in China and its response to global climate change. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 513-517.
- [6] Ma J M, Liu S R, Shi Z M, Zhang Y D, Kang B, Chen B Y. Changes of species composition and diversity in the restoration process of sub-alpine dark brown coniferous forests in Western Sichuan, China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(5): 17-25.
- [7] Sedjo R A. The global carbon cycle. *Science*, 1988, 241(4874): 1737-1738.
- [8] Dixon R K, Solomon A M, Brown S. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [9] Sedjo R A. Climate and forests. *Science*, 1989, 244(4905): 631.
- [10] Zhang K K, Pan C D, Bazhaerbiehe A, Kou F T, Tan W P. Altitudinal changes of forest community types and species diversity in Kanasi tourism region. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2008, 45(2): 225-231.
- [11] Wang C T, Wang Q J, Long R J, Jing Z C, Shi H L. Changes in plant species diversity and productivity along an elevation gradient in an alpine meadow. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(2): 240-245.
- [12] Zhu Y, Kang M Y, Jiang Y, Liu Q R. Altitudinal pattern of species diversity in woody plant communities of mountain Helan, Northwestern China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3): 574-581.
- [13] Zhang L, Su Z Y, Chen B G. Altitudinal patterns of species diversity in the montane forest communities: a review. *Journal of Mountain Science*, 2005, 23: 736-743.

- [14] Wu Y Q, Liu G H, Fu B J, Guo Y H, Hu C J. Soil CO₂ emission distribution along an elevation gradient and the controlling factors in the forest ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4678-4686.
- [15] Carolina V E, William E M, Nazare A R, Luizao F J, Luizao A P, Lima N H. Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian forest: effects of soil and topography. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234: 85-96.
- [16] Liu X L, Liu S R, Su Y M, Cai X H, Ma Q Y. Aboveground biomass of *Quercus aquifolioides* shrub community and its responses to altitudinal gradients in Balangshan Mountain, Sichuan Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(2): 1-7.
- [17] Jia K X, Zheng Z, Zhang Y P. Changes of rubber plantation aboveground biomass along elevation gradient in Xishuangbanna. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(9): 1028-1032.
- [18] Zhang Y D, Zhao C M, Liu S R. Woodland hydrological effects of spruce plantations and natural secondary series in sub-alpine region of Western Sichuan. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(6): 713-719.
- [19] Zhang Y D, Liu S R, Ma J M, Shi Z M, Liu X L. Woodland hydrological effects of birch forests in sub-alpine region of Western Sichuan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2939-2946.
- [20] Liu X L, Ma Q Y, Yang D S, Shi Z M, Su Y M, Zhou S Q, Liu S R, Yang Y P. Studies on root biomass and productivity in dominant plantation populations in the mountainous land in Western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 542-551.
- [21] Chen C G. Biomass regression equation of broad-leaved Korean pine forest. *Yanbian Forestry Science and Technology*, 1983, (1): 2-19.
- [22] Zhu X W, Xiao Y, Tian L H. Empirical formula and analysis on yield determination of leaf, branch, root in natural mountain poplar secondary forest. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 1988, (1): 30-34.
- [23] Su Y M, Liu X L, Xiang C H. Research on biomass and productivity of *Abies Fabri* plantations. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2000, 21(2): 31-36.
- [24] Jiang H, Zhu J J. A primary study about the relationship between nature stand production of *Picea asperata* and ecology environment condition. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 1986, 28(5): 538-548.
- [25] Su Y M, Wang J X, Shi L X, Hou G W, Liu X L. Vegetation biomass and biological productivity dynamics of cutting-blanks in their early succession stage in Western Sichuan. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 1999, 20(4): 14-21.
- [26] Xian J R, Zhang Y B, Wang K Y, Hu T X, Yang H. Carbon stock and its allocation in five forest ecosystems in the subalpine coniferous forest zone of Western Sichuan province, Southwest China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2009, 33(2): 283-290.
- [27] Yang T. The investigating and study to the natural secondary mixed forest's biomass and the root system's spreading character of the oak and the horse-tail pine. *Journal of Xinyang Agricultural College*, 2004, 14(4): 4-9.
- [28] Liu X L, Yue Y J, Zheng S W, Liu S R, Shi Z M, Yang D S, Yang Y P, Ma Q Y. The altitudinal gradient changes of population demography characteristics of *Quercus aquifolioides* population. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2005, 26(4): 9-16.
- [29] Li W H, Luo T X. Productivity patterns and mathematical models of spruce-fir forests in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 512-520.
- [30] Houghton J T, Ding Y. *Climate Change 2000*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 770.
- [31] Xu Y, Ding Y H, Li D L. Climatic change over Qinghai and Xizang in 21 century. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(5): 451-458.
- [32] Jian N. A simulation of biomass on the Tibetan plateau and their responses to global climate change. *Mountain Research and Development*, 2000, 20(1): 80-89.
- [33] Li C, Chen J, Zhu Y J. Preliminary research on climatic change of West Sichuan plateau in recent fifty years. *Plateau Meteorology*, 2003, 22: 138-145.
- [34] Cheng T R, Feng Q, Ma Q Y, Wang Y T, Kang F F, Feng Z K, Zhang Y L, Deng X R. Carbon pool and allocation of forest vegetations in Xiaolong Mountains, Gansu province. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 34-36.

参考文献:

- [1] 周德彰, 杨玉坡. 四川西部高山林区桦木更新特性的初步研究. *林业科学*, 1980, 16(2): 154-156.
- [2] 杨玉坡, 李承彪. 四川森林. 北京: 中国林业出版社, 1992: 368.
- [3] 蒋有绪. 川西米亚罗高山暗针叶林的群落特点及其分类原则. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1963, 1(1): 42-50.
- [4] 蒋有绪. 川西米亚罗、马尔康高山林区生境类型的初步研究. *林业科学*, 1963, 8(4): 321-335.
- [5] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 513-517.
- [6] 马姜明, 刘世荣, 史作民, 张远东, 康冰, 陈宝玉. 川西亚高山暗针叶林恢复过程中群落物种组成和多样性的变化. *林业科学*, 2007, 43(5): 17-25.
- [10] 张荟荟, 潘存德, 巴扎尔别克-阿斯勒汗, 寇福堂, 谭卫平. 喀纳斯旅游区森林群落类型及其物种多样性随海拔梯度的变化. *新疆农业科学*, 2008, 45(2): 225-231.

- [11] 王长庭, 王启基, 龙瑞军, 景增春, 史惠兰. 高寒草甸群落植物多样性和初级生产力沿海拔梯度变化的研究. 植物生态学报, 2004, 28(2): 240-245.
- [12] 朱源, 康慕谊, 江源, 刘全儒. 贺兰山木本植物群落物种多样性的海拔格局. 植物生态学报, 2008, 32(3): 574-581.
- [13] 张璐, 苏志尧, 陈北光. 山地森林群落物种多样性垂直格局研究进展. 山地学报, 2005, (23): 736-743.
- [14] 吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 郭玉华, 胡婵娟. 森林生态系统土壤 CO₂ 释放随海拔梯度的变化及其他影响因子. 生态学报, 2007, 27(11): 4678-4686.
- [16] 刘兴良, 刘世荣, 宿以明, 蔡小虎, 马钦彦. 巴郎山川滇高山栎灌丛地上生物量及其对海拔梯度的响应. 林业科学, 2006, 42(2): 1-7.
- [17] 贾开心, 郑征, 张一平. 西双版纳橡胶林生物量随海拔梯度的变化. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1028-1032.
- [18] 张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西亚高山人工云杉林和自然恢复演替系列的林地水文效应. 自然资源学报, 2004, 19(6): 713-719.
- [19] 张远东, 刘世荣, 马姜明, 史作民, 刘兴良. 川西亚高山桦木林的林地水文效应. 生态学报, 2005, 25(11): 2939-2946.
- [20] 刘兴良, 马钦彦, 杨冬生, 史作民, 宿以明, 周世强, 刘世荣, 杨玉坡. 川西山地主要人工林种群根系生物量与生产力. 生态学报, 2006, 26(2): 542-551.
- [21] 陈传国. 阔叶红松林生物量的回归方程. 延边林业科技, 1983, 1: 2-19.
- [22] 朱兴武, 肖瑜, 田联会. 山杨天然次生林叶、枝、根产量测定的经验公式及其分析. 青海农林科技, 1988, 1: 30-34.
- [23] 宿以明, 刘兴良, 向成华. 峨眉冷杉人工林分生物量和生产力研究. 四川林业科技, 2000, 21(2): 31-36.
- [24] 江洪, 朱家骏. 云杉天然林分生物量和生产力的研究. 四川林业科技, 1986, 28(5): 538-548.
- [25] 宿以明, 王金锡, 史立新, 侯广维, 刘兴良. 川西采伐迹地早期植被生物量与生产力动态初步研究. 四川林业科技, 1999, 20(4): 14-21.
- [26] 鲜骏仁, 张远彬, 王开运, 胡庭兴, 杨华. 川西亚高山 5 种森林生态系统的碳格局. 植物生态学报, 2009, 33(2): 283-290.
- [27] 杨涛. 麻栎-马尾松天然次生混交林生物量结构及根系分布特征调查研究. 信阳农业高等专科学校学报, 2004, 14(4): 4-9.
- [28] 刘兴良, 岳永杰, 郑绍伟, 刘世荣, 史作民, 杨冬生, 杨玉坡, 马钦彦. 川滇高山栎种群统计特征的海拔梯度变化. 四川林业科技, 2005, 26(4): 9-16.
- [29] 李文华, 罗天祥. 中国云冷杉林生物生产力格局及其数学模型. 生态学报, 1997, 17(5): 512-520.
- [31] 徐影, 丁一汇, 李栋梁. 青藏地区未来百年气候变化. 高原气象, 2003, 22(5): 451-458.
- [33] 李川, 陈静, 朱燕君. 川西高原近五十年气候变化的初步研究. 高原气象, 2003, 22: 138-145.
- [34] 程堂仁, 冯菁, 马钦彦, 王玉涛, 康峰峰, 冯仲科, 张彦林, 邓向瑞. 甘肃小陇山森林植被碳库及其分配特征. 生态学报, 2008, 28(1): 34-36.

2008 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2009 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	8956	1	生态学报	1.669
2	应用生态学报	7979	2	植物生态学报	1.656
3	植物生态学报	3742	3	应用生态学报	1.632
4	西北植物学报	3584	4	生物多样性	1.474
5	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3460	5	生态学杂志	1.276
6	植物生理学通讯	3187	6	植物学通报	1.058
7	生态学杂志	3148	7	西北植物学报	1.046
8	遗传学报	2142	8	植物生理与分子生物学 学报	1.034
9	植物生理与分子生物学学报	1855	9	遗传学报	0.887
10	昆虫学报	1580	10	遗传	0.835

★《生态学报》2008 年在核心版的 1868 种科技期刊排序中总被引频次 8956 次,全国排名第 2;影响因子 1.669,全国排名第 14;第 1~8 届连续 8 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 30 卷 第 21 期 (2010 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 21 2010

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

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
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

订 购 全国各地邮局
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

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

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

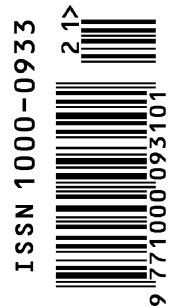
Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



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 70.00 元