

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第6期 Vol.33 No.6 **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 6 期

2013 年 3 月 (半月刊)

目 次

专论与综述

- 基于遥感技术的森林健康研究综述..... 高广磊,信忠保,丁国栋,等 (1675)
Agent 农业土地变化模型研究进展..... 余强毅,吴文斌,杨 鹏,等 (1690)

个体与基础生态

- 辽东湾北部近海沙蜃的动态分布..... 王 彬,秦宇博,董 婧,等 (1701)
口虾蛄 proPO 基因全长 cDNA 的克隆与组织表达..... 刘海映,刘连为,姜玉声,等 (1713)
中缅树鼯头骨及下臼齿几何形态与环境的关系..... 朱万龙,贾 婷,黄春梅,等 (1721)
亚热带 3 种树种凋落叶厚度对其分解速率及酶活性的影响..... 季晓燕,江 洪,洪江华,等 (1731)
浙北地区常见绿化树种光合固碳特征..... 张 娇,施拥军,朱月清,等 (1740)
两种高质牧草不同生育期光合生理日变化及光响应特征..... 郭春燕,李晋川,岳建英,等 (1751)
基于 WOFOST 作物生长模型的冬小麦干旱影响评估技术..... 张建平,赵艳霞,王春乙,等 (1762)
基于线粒体 DNA 控制区的斑翅草蛉不同地理种群遗传分化研究..... 周志军,尚 娜,刘 静,等 (1770)
圈养尖吻蝾螈雌体大小、窝卵数和卵大小之间的关系..... 胡明行,谭群英,杨道德 (1778)
应用寄生蜂和不育雄虫防控田间橘小实蝇..... 郑思宁,黄居昌,叶光禄,等 (1784)
青蒿素对外生菌根真菌化感效应..... 李 倩,袁 玲,王明霞,等 (1791)

种群、群落和生态系统

- 海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用..... 李纯厚,林 琳,徐姗姗,等 (1798)
上升流和水团对浙江中部近海浮游动物生态类群分布的影响..... 孙鲁峰,柯 昶,徐兆礼,等 (1811)
半干旱区生态恢复关键生态系统识别——以内蒙古自治区和林县为例..... 彭 羽,高 英,冯金朝,等 (1822)
太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应..... 金冠一,赵秀海,康峰峰,等 (1832)
重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对干旱胁迫的响应..... 王轶浩,王彦辉,于澎湃,等 (1842)

景观、区域和全球生态

- 城市典型水域景观的热环境效应..... 岳文泽,徐丽华 (1852)
外来树种桉树引种的景观生态安全格局..... 赵筱青,和春兰 (1860)
基于耕地生态足迹的重庆市耕地生态承载力供需平衡研究..... 施开放,刁承泰,孙秀峰,等 (1872)
大气 CO₂ 浓度升高对稻田根际土壤甲烷氧化细菌丰度的影响..... 严 陈,许 静,钟文辉,等 (1881)

资源与产业生态

- 基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价..... 柯丽娜,王权明,孙新国,等 (1889)
亚热带养殖海湾皱瘤海鞘生物沉积的现场研究..... 闫家国,齐占会,田梓杨,等 (1900)
黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征..... 张丽娜,李 军,范 鹏,等 (1907)

旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应..... 张丁辰,蔡典雄,代 快,等 (1916)

商洛低山丘陵区农林复合生态系统中大豆与丹参的光合生理特性..... 彭晓邦,张硕新 (1926)

外源油菜素内酯对镉胁迫下菊芋幼苗光合作用及镉富集的调控效应..... 高会玲,刘金隆,郑青松,等 (1935)

基于侧柏液流的测定对 Granier 原始公式系数进行校正 刘庆新,孟 平,张劲松,等 (1944)

研究简报

湿地自然保护区保护价值评价方法..... 孙 锐,崔国发,雷 霆,等 (1952)

干热河谷印楝和大叶相思人工林根系生物量及其分布特征..... 高成杰,唐国勇,李 昆,等 (1964)

海滨沙滩单叶蔓荆对沙埋的生理响应特征..... 周瑞莲,王 进,杨淑琴,等 (1973)

宁夏贺兰山、六盘山典型森林类型土壤主要肥力特征 姜 林,耿增超,张 雯,等 (1982)

学术争鸣

小兴安岭十种典型森林群落凋落物生物量及其动态变化..... 侯玲玲,毛子军,孙 涛,等 (1994)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2002)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 328 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说: 亭亭玉立的白桦树——白桦为落叶乔木,可高达 25m,胸径 50cm。其树冠呈卵圆形,树皮白色,纸状分层剥离;叶三角状、卵形或菱状卵形;花单性,雌雄同株。白桦树喜光,耐严寒,对土壤适应性强,喜酸性土,沼泽地、干燥阳坡及湿润阴坡都能生长。常与红松、落叶松、山杨、蒙古栎混生。白桦的天然更新好,生长较快,萌芽强,在人为的采伐迹地或火灾、风灾等自然损毁的迹地里,往往由白桦首先进入,为先锋树种,而形成白桦次生林。白桦分布甚广,我国大、小兴安岭及长白山均有成片纯林,在华北平原和黄土高原山区、西南山地亦为阔叶落叶林及针叶阔叶混交林中的常见树种。

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/stxb201112121897

高成杰,唐国勇,李昆,谢青海. 干热河谷印楝和大叶相思人工林根系生物量及其分布特征. 生态学报, 2013, 33(6): 1964-1972.

Gao C J, Tang G Y, Li K, Xie Q H. Root biomass and its distribution of *Azadirachta indica* and *Acacia auriculiformis* plantations in the Dry-hot Valley. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1964-1972.

干热河谷印楝和大叶相思人工林根系 生物量及其分布特征

高成杰¹, 唐国勇^{1, 2}, 李 昆^{1, 2, *}, 谢青海²

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 昆明 650224;

2. 国家林业局云南元谋荒漠生态系统定位研究站, 昆明 650224)

摘要:以元谋干热河谷 10 年生印楝和大叶相思为研究对象, 采用分层挖掘法对印楝纯林、大叶相思纯林及印楝×大叶相思混交林根系生物量及其分布特征进行研究。结果表明: 印楝×大叶相思混交林根系总生物量为 2.707 t/hm², 介于印楝纯林(2.264 t/hm²) 和大叶相思纯林(3.405 t/hm²) 之间。混交林内主根总生物量为 1.057 t/hm², 为印楝纯林和大叶相思纯林的 69.9% 和 69.7%, 而除粗根外, 混交林内其它径级的侧根(中根、小根和细根)生物量均介于印楝纯林和大叶相思纯林之间, 分别为印楝纯林的 228.7%、120.1%、450.0%, 为大叶相思纯林的 71.3%、65.8% 和 48.8%。干热河谷印楝和大叶相思人工林根系在土壤表层分布比例大, 尤其是 0—0.2 m 土层内, 其根系生物量占根系总生物量的 63.6%—76.3%。根系垂直累积生物量与土壤深度可用二次方程拟合, 拟合方程的二阶导数表明, 垂直方向上, 印楝纯林根系分布较混交林均匀, 而混交林较大叶相思纯林均匀。

关键词: 印楝; 大叶相思; 干热河谷; 混交林; 根系生物量; 垂直分布

Root biomass and its distribution of *Azadirachta indica* and *Acacia auriculiformis* plantations in the Dry-hot Valley

GAO Chengjie¹, TANG Guoyong^{1, 2}, LI Kun^{1, 2, *}, XIE Qinghai²

¹ Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, China

² Yuanmou Desertification Ecosystem Research Station, State Forestry Administration, Kunming 650224, China

Abstract: Afforestation is an important tool in ecological restoration in Dry-hot Valleys, a fragile landtype, where vegetation deterioration and soil erosion have developed into a serious problem in southwestern China. However, the root biomass of plantations in Dry-hot Valleys is poorly known and understood. *Azadirachta indica* A. Juss. is planted extensively in Dry-hot Valleys for its drought-resistance and multifunctionality, and *Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth is a fast growing species which can rapidly improve soil conditions. Establishing plantations with *A. indica* and *A. auriculiformis* in Dry-hot Valleys is important for soil and water conservation, soil amelioration, prevention of ecological damage and also helps the regional economy. To improve the understanding nutrient accumulation and distribution, soil moisture dynamics, root competition and evaluate efficiency of mixed plantations, this study investigated root biomass and the characteristics of root distribution in 10 year-old *A. indica* and *A. auriculiformis* plantations in the Dry-hot Valley ecosystem in Yuanmou County, Yunnan Province, China. Data from sample trees were averaged to determine root biomass characteristics for a pure *A.*

基金项目: 国家“十二五”科技支撑课题(2011BAD38B0404); 林业公益性行业专项(201104002-3-2); 中国林科院资源昆虫研究所基本科研业务费专项(ririca201001M)

收稿日期: 2011-12-12; 修订日期: 2012-08-20

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

indica plantation, a pure *A. auriculiformis* plantation and a mixed plantation of *A. indica* and *A. auriculiformis*. A total of 24 mature trees were excavated to a depth of 1.0 m to collect all root biomass for each tree. The results show root biomass in the mixed plantation (2.707 t/hm^2) was between the root biomass of a pure *A. indica* plantation (2.264 t/hm^2) and a pure *A. auriculiformis* plantation (3.405 t/hm^2). The taproot biomass in the mixed plantation (1.057 t/hm^2) was approximately 69.9% and 69.7% of the taproot biomass in the pure *A. indica* plantation and the pure *A. auriculiformis* plantation, respectively, whereas the biomasses of medium, small and fine roots from the lateral roots in the mixed plantation were 228.7%, 120.1% and 450.0% of roots in the pure *A. indica* plantation and 71.3%, 65.8% and 48.8% of those in the pure *A. auriculiformis* plantation, respectively. Root biomasses of these plantations were mainly concentrated at a soil depth of 0—0.2 m, which accounted for 63.6%—74.4% of their root biomass within a depth of 0—1.0 m. Compared to the mixed plantation, the pure *A. auriculiformis* plantation had a shallower root profile while the pure *A. indica* plantation had a deeper root profile. There was 30.9% of the taproot biomass in the upper 0.4 m soil layer in the pure *A. indica* plantation, but only 2.8% for *A. indica* in the mixed plantation. However, there was only 0.3% of lateral root biomass below the 0.4 m soil layer in the pure *A. indica* plantation, while there were 6.8% and 9.6% of lateral root biomasses in the pure *A. auriculiformis* plantation and mixed plantation, respectively, which indicated root biomass of *A. indica* was mainly allocated to lateral roots in the mixed plantation. The relationship between the accumulated root biomass and soil depth could be fitted with quadratic equations. The second derivatives of these equations showed the vertical root biomass of the mixed plantation was more evenly distributed than in the pure *A. auriculiformis* plantation, but was less evenly distributed than in the pure *A. indica* plantation. This study documented the characteristics of root biomass distribution for *A. indica* and *A. auriculiformis* in different restoration patterns, and the research results will provide useful scientific reference data for plantation management in the Dry-hot Valley region.

Key Words: *Acacia auriculiformis*; *Azadirachta indica*; Dry-hot Valley; mixed stand; root biomass; vertical distribution

地下根系生物量一般占植被生物量的 20%—40%^[1],在植物水分和养分吸收及生物地球化学循环中扮演着重要角色^[2-5]。根系的分布特征(尤其是细根)反映了植物对土壤资源的利用状况,是植物生长和稳定的决定因素,尤其在干旱、半干旱地区^[6-7]。在人工林营造过程中,不同林分类型林木根系分布特征可能存在较大的差异^[8-9],对纯林和混交林地下生物量及其空间分布的研究,有助于了解不同营林模式下树种对土壤资源的利用状况以及营林模式的筛选。

20 世纪 90 年代以来,随着全球植被生物量和土地生产力研究的不断深入,植物根系的研究已成为国际研究热点^[4-5,10-11]。国内学者对不同植被根系生物量、空间分布、根系间以及根系与土壤环境间的相互作用^[6, 8, 12-16]等方面进行了诸多研究,建立多种回归方程对根系空间分布特征进行了描述^[13-14]。但根系生物量的测定繁琐费时,并缺乏统一有效的方法而存在很大的不确定性^[17],森林地下生物量的测定大多基于样木相对生长方程,其细根生物量常被忽略或缺测,所建立的根系生物量分布方程也多是根系生物量随空间变化趋势的简单反映。在研究区域上,我国根系生物量研究很少涉及到造林困难区域(如干热河谷);研究对象多集中于草本、灌木和经济树种^[18]。人工林营造过程中,不同营林模式下林木根系生物量分布特征还缺乏对比研究,根系研究的基础资料和内容仍然需要积累和不断深入。

干热河谷是我国特有的生态脆弱区,植被破坏和水土流失严重^[19]。为了改善生态,近年来该地区引进了众多适应性强的多功能树种,如印楝(*Azadirachta indica* A.)和大叶相思(*Acacia auriculiformis* A.)。印楝因其耐旱和多功能性,在干热河谷广泛种植^[20];而大叶相思具根瘤,是良好的辅佐、护土改土的速生树种^[21],将两树种进行混交造林对于干热河谷地区水土保持、土壤改良、生态防护、区域经济等方面具有重要意义。目前,干热河谷印楝和大叶相思研究多集中于林下更新、抗旱、抗高温等方面^[22-23],尚未涉及根系生物量方面的研究。对干热河谷主要人工林根系生物量及其分布特征进行研究,对于了解该地区人工林生态系统中的营养元

素积累与分布、水分动态、树种混交效益和根系竞争都具有重要的意义。本文以元谋干热河谷印楝和大叶相思为研究对象,对印楝纯林、大叶相思纯林及印楝×大叶相思混交林根系生物量及其分布特征进行对比研究,旨在为我国西南干热河谷植被恢复提供理论依据。

1 研究区概况

1.1 地理位置和自然条件

试验点位于国家林业局云南元谋荒漠生态系统定位研究站(25°40'N,101°52'E,下称元谋生态站),海拔1120 m,年均温 21.9℃,最高月均温 27.1℃(5月),最低月均温 14.5℃(12月),年降水量 634.0 mm,其中90%以上的降水集中在6—10月份;年蒸发量 3911.2 mm,年均干燥度 2.8,≥10℃的年积温 8003℃,日照时数 2670 h,无霜期 350—365 d,属南亚热带干热季风气候区。植被为以扭黄茅(*Heteropogon contortus* L.)等禾本科中低草植物为主,间有稀疏坡柳(*Dodonaea viscosa* L.)、余甘子(*Phyllanthus emblica* L.)等灌木的稀树灌草丛。土壤类型为燥红土^[22]。

1.2 试验林营造

在元谋生态站内选取面积约 7.0 ha 的撂荒坡地(20 世纪 90 年代)为试验地。试验地位于西坡中部,曾经过坡改梯,坡度约 12°,立地条件相对一致。于 2001 年 5 月中旬(雨季初期)选择印楝和大叶相思等树种百日容器苗,采用块状整地(规格 60 cm×60 cm×60 cm),按照 2 m×3 m 株行距进行造林。造林模式有印楝纯林、大叶相思纯林和印楝×大叶相思混交林(树种比例 1:1),行间混交,每个造林模式面积约 2.3 hm²。造林后进行严格封禁管理。

2 研究方法

2.1 标准地调查与根系生物量测定

2010 年 11 月上旬(旱季初期)采取典型随机取样方法,在印楝纯林、大叶相思纯林及印楝×大叶相思混交林标准样地内分别布设调查样方各 2 块,面积 600 m²(20 m×30 m)/块,按照对角线分 5 个点采集 0—20 cm 土壤混合样,测定其土壤理化性质(表 1)。用平均标准木法获取根系生物量^[24-26],即对标准地林木进行每木检尺,计算出林木的平均胸径、树高和冠幅等测树指标(表 1)。标准木的选择要求其胸径、周围林木的密度和分布尽可能与标准样地的平均水平接近,根据要求在各林分内分树种选出标准木各 6 株,共计 24 株,将其从根颈处伐倒。

为了避免林木之间根系的遗漏,结合前期研究,根据林木冠幅和种植密度(2 m×3 m),将根系挖掘的水平范围确定为以树干基部为中心,半径为 1 m 的圆内,垂直深度大于 1 m。每挖掘 0.1 m 的深度,即分别将根系按照主根和各级侧根洗净后晾干称重,侧根按照细根($d \leq 0.2$ cm)、小根($0.2 \text{ cm} < d \leq 1.0$ cm)、中根($1.0 \text{ cm} < d \leq 2.0$ cm)和粗根($d > 2.0$ cm)进行分级^[27],而后对各级根系分别取样,在 70℃ 下烘干至恒重。

表 1 标准样地林分特征和土壤基本理化性质(0—20 cm)

Table 1 Plantation characteristics and soil physical-chemical properties (0—20 cm) of the standard plots

林分类型 Stand types	树种 Species	平均胸径 DBH /cm	平均树高 Tree height /m	平均冠幅 Crown diameter /m×m	土壤水分含量 Soil water content /%	土壤容重 Soil bulk density /(g/m ³)	土壤有机质 Soil organic matter /(g/kg)	土壤有效养分 Soil available nutrients /(mg/kg)		
								N	P	K
纯林 Pure plantation	印楝 <i>Azadirachta indica</i>	4.48	3.88	1.8×1.8	2.40	1.51	4.32	31.2	3.95	24.0
纯林 Pure plantation	大叶相思 <i>Acacia auriculiformis</i>	6.16	6.36	3.2×2.9	3.48	1.50	7.19	49.1	5.39	69.2
混交林 Mixed plantation	印楝 <i>A. indica</i>	4.62	4.17	2.1×1.9	3.52	1.66	7.34	54.4	7.34	37.9
	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	5.81	6.62	2.8×2.6						

2.2 数据处理和分析方法

通过单因素方差分析(one-way ANOVA, LSD 法),比较纯林和混交林内树种单株根系生物量差异(表2),并通过样本平均根系生物量和林分密度分析印楝纯林、大叶相思纯林及印楝×大叶相思混交林林分根系生物量及其分布特征。

表2 不同林分下印楝和大叶相思单株根系生物量及其分配

Table 2 Root biomass and its allocation of *A. indica* and *A. auriculiformis* per plant in the pure and mixed plantations

树种 Species	林分类型 Stand types	主根/kg Tap root	侧根 Lateral root/kg				总根系 Total/kg
			粗根 Coarse root	中根 Medium root	小根 Small root	细根 Fine root	
印楝	纯林 Pure plantation	0.950±0.322 a	0.171±0.047 a	0.102±0.015 a	0.183±0.072 a	0.008±0.002 a	1.415±0.284 a
<i>A. indica</i>	混交林 Mixed plantation	0.525±0.161 b	0.222±0.039 a	0.216±0.059 b	0.206±0.082 a	0.024±0.008 ab	1.193±0.175 a
大叶相思	纯林 Pure plantation	0.948±0.241 ab	0.437±0.172 a	0.329±0.008 c	0.334±0.076 a	0.081±0.020 c	2.128±0.501 b
<i>A. auriculiformis</i>	混交林 Mixed plantation	0.796±0.299 ab	0.853±0.373 b	0.253±0.085 bc	0.234±0.125 a	0.054±0.035 bc	2.190±0.534 b

数值为平均值±标准差($n=6$);同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)

运用 Gale^[28]提出的根系分布模型 $Y = 1 - \beta^d$ 对人工林根系的垂直分布特征进行分析,式中 Y 是从土壤表面(0 cm)至深度 d (cm)的土层内根系累积生物量所占总根系生物量的比例, β 是消光系数。 β 值越大表明深层根系所占比例越大;反之,表层土壤中根系所占比例大。

对根系累积生物量与土壤深度进行拟合,选取最优方程描述地下根系垂直分布状况:

$$\sum B_i = f(d)$$

式中, $i=1,2,\dots,10$,分别对应 0—0.1 m, 0.1—0.2 m, $\dots$, 0.9—1.0 m 土层; d 为土壤深度,单位为 m; B_i 为 i 土层范围内林分根系平均生物量,单位为 t/hm^2 。

3 结果

3.1 根系生物量及其分配

根系生物量测定结果表明,印楝×大叶相思混交林的根系总生物量介于印楝纯林和大叶相思纯林之间(表3)。由于印楝和大叶相思混交比例为 1:1,倘若分别树种单独考察,混交林内印楝根系总生物量($0.955 t/hm^2 \times 2$)低于纯林($2.264 t/hm^2$),而大叶相思($1.752 t/hm^2 \times 2$)则稍高于纯林($3.405 t/hm^2$),混交林根系减少的生物量主要来自印楝。可能印楝以 1:1 的比例,2 m×3 m 株行距与大叶相思营造的行间混交林,使其根系生长发育受到了抑制。

表3 印楝纯林、大叶相思纯林、印楝×大叶相思混交林林分根系生物量及其分配

Table 3 Root biomass and its allocation in the pure *A. indica* plantation, the pure *A. auriculiformis* plantation and the mixed plantation of *A. indica* and *A. auriculiformis*

林分类型 Stand types	树种 Species	主根 Tap root /(t/hm^2)	侧根 Lateral root/(t/hm^2)				总根系 Total /(t/hm^2)
			粗根 Coarse root	中根 Medium root	小根 Small root	细根 Fine root	
纯林	印楝	1.512	0.274	0.164	0.293	0.014	2.264
Pure plantation	<i>A. indica</i>	(67.1%)	(12.1%)	(7.2%)	(12.9%)	(0.6%)	(100%)
纯林	大叶相思	1.516	0.699	0.526	0.535	0.129	3.405
Pure plantation	<i>A. auriculiformis</i>	(44.5%)	(20.5%)	(15.4%)	(15.7%)	(3.8%)	(100%)
混交林	印楝	0.420	0.178	0.173	0.165	0.019	0.955
Mixed plantation	<i>A. indica</i>	(44.0%)	(18.6%)	(18.1%)	(17.3%)	(2.0%)	(100%)
	大叶相思	0.637	0.683	0.202	0.187	0.043	1.752
	<i>A. auriculiformis</i>	(36.4%)	(39.0%)	(11.5%)	(10.7%)	(2.5%)	(100%)
	印楝×大叶相思	1.057	0.860	0.375	0.352	0.063	2.707
	<i>A. indica</i> and <i>A. auriculiformis</i>	(39.0%)	(31.8%)	(13.9%)	(13.0%)	(2.3%)	(100%)

林分根系生物量数据基于样本平均根系生物量和林分密度计算所得;括号内的数字为根系生物量所占百分比

从主根和各级侧根来看(表3),混交林中主根总生物量最低(1.057 t/hm^2),分别为印楝纯林和大叶相思纯林的 69.9% 和 69.7%,而除粗根外,其他径级的侧根(中根、小根和细根)生物量均介于印楝纯林和大叶相思纯林之间,分别为印楝纯林的 228.7%、120.1%、450.0%,为大叶相思纯林的 71.3%、65.8% 和 48.8%。

同一树种在纯林和混交林中差异最大的是主根和侧根中的粗根生物量(表3)。印楝作为主根比较发达的树种^[20],在纯林中主根生物量占总量的 67.1%,混交林中仅占 44.0%;大叶相思也与之近似,只是二者量的差异略小。但是,侧根中粗根生物量却与此大不相同,在植株只有纯林半数的情况下,混交林内大叶相思粗根生物量与纯林几乎相同,印楝亦占纯林粗根生物量的 65.0%。混交林中树种侧根生物量分配比例的增加,反映出在干热河谷环境中,种间根系对地下营养空间的竞争激烈,尤其是混交林中印楝粗根、中根、小根、细根生物量所占比例,较纯林高 6.5%、10.9%、4.4% 和 1.4%,主根生物量的这种转移,有助于提高印楝的养分、水分吸收能力。

3.2 人工林根系生物量垂直分布特征

印楝纯林、大叶相思纯林和两个树种混交林,其根系生物量分布均呈现出随土层深度的增加而递减趋势(图1),不过,随土层深度的变化,三种林分根系分布变化特征各异。总体上看,各林分根系生物量集中分布在 0—0.2 m 的土层内,印楝纯林、大叶相思纯林及两个树种混交林的根系生物量分别占各自根系总生物量的 63.6%、76.3%、74.4%,若再向下延伸 0.2 m,3 种林分几乎 80% 以上的根系生物量都分布在此土层内。

不过,从主根垂直分布的情况看,印楝纯林有 30.9% 的主根生物量分布在 0.4 m 以下土层中,到 0.8—1.0 m 土层时,仍有 7.0% 的主根生物量分布;而大叶相思主根基本分布于 0.4 m 以上土层中。混交林中的印楝主根就不如纯林中那样发达,仅 2.8% 的主根生物量分布在 0.4 m 以下土层中。同时,从各级侧根调查结果看,印楝纯林只有 0.3% 的根系生物量分布在 0.4 m 以下土层中,大叶相思纯林和两个树种混交林则分别为 6.8% 和 9.6%。说明在混交林中,印楝根系生物量的积累流向了各级侧根。

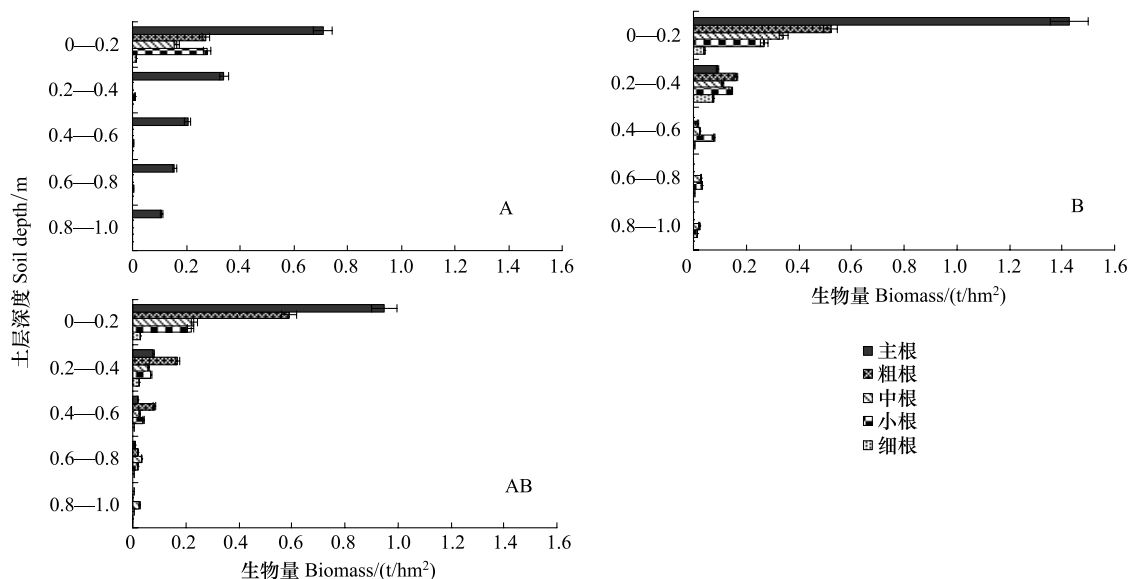


图1 根系生物量分布特征

Fig. 1 Root biomass distribution characteristics

A: 印楝纯林 The pure *Azadirachta indica* plantation; B: 大叶相思纯林 The pure *Acacia auriculiformis* plantation; AB: 印楝×大叶相思混交林 The mixed plantation of *A. indica* and *A. auriculiformis*; 粗根, 中根, 小根和细根均为侧根 Coarse root, medium root, small root and fine root belong to lateral root

运用 Gale^[26] 提出的根系分布模型($Y=1-\beta^d$)对根系的垂直分布进行分析, β 值越小表明表层土壤中根系所占比例大。结果表明,大叶相思纯林、印楝×大叶相思混交林、印楝纯林内 β 值分别为 0.942、0.947、0.962。

即大叶相思纯林根系分布于土壤表层的比例较高,其次是两个树种混交林,印楝纯林最低。另外,根系累积生物量与土层深度的二次回归方程的相关系数在 0.875—0.884 之间,均达到极显著水平(表 4)。对回归方程求一阶导数并令其为 0,可求得大叶相思纯林、混交林及印楝纯林中根系累积生物量最大时,土层深度分别为 0.737、0.756、0.805 m,也与上述结果吻合。而生物量累积值分别为 3.506、2.768、2.247 t/hm²,分别占实际生物量的 102.94%、102.28%、99.92%。

回归方程的二阶导数 $f''(x)$ 表示随土层深度的增加,其根系生物量累积速度的快慢,负值表明生物量累积速度在递减,值越小说明递减速度越快。由 $f''(x)$ 值的大小可判定,随着土层深度的增加 3 种林分根系生物量累积速度降低,降低速度为大叶相思纯林>混交林>印楝纯林。而 $|f''(x)|$ 反映地下根系生物量分布的均匀状况, $|f''(x)|$ 越小,根系分布越均匀。由此可看出,在根系垂直分布方面,印楝纯林根系分布比较均匀,其次混交林根系分布比大叶相思纯林更均匀。

表 4 土层深度与地下根系累积生物量的关系

Table 4 Relationship between soil depth and accumulated root biomass

林分 Stands	拟合方程 Regression equation	R^2	$X_{\max}(f'(x)=0)$	$f(x)_{\max}$	$f''(x)$
印楝纯林 Pure <i>A. indica</i> plantation	$f(x) = -3.170x^2 + 5.101x + 0.195$	0.875 *	0.805	2.247 (99.92%)	-6.340
大叶相思纯林 Pure <i>A. auriculiformis</i> plantation	$f(x) = -3.906x^2 + 5.756x + 1.385$	0.879 *	0.737	3.506 (102.94%)	-7.812
印楝×大叶相思混交林 Mixed plantation of <i>A. indica</i> and <i>A. auriculiformis</i>	$f(x) = -3.302x^2 + 4.993x + 0.881$	0.884 *	0.756	2.768 (102.28%)	-6.604

* 表示显著水平 $P < 0.001$; x 为土层深度(m); $f(x)$ 为地下根系累积生物量(t/hm²); $X_{\max}$ 为根系累积生物量最大时土层深度(m); $f(x)_{\max}$ 为根系累积生物量最大值(t/hm²); $f''(x)$ 为函数的二阶导数,括号内的数字为 $f(x)_{\max}$ 占实际根系生物量的百分比

4 结论与讨论

4.1 营林模式对根系生物量的影响

大量研究表明,同一树种在纯林和混交林模式下根系生物量可能存在较大的差异^[8-9]。如王政权等人^[15]研究发现,水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)和落叶松(*Larix gmelinii*)混栽后提高了水曲柳根系总生物量,但降低了落叶松根系总生物量。本研究中,干热河谷 10 a 生印楝×大叶相思混交林内两个树种的根系总生物量居于印楝纯林和大叶相思纯林之间(表 3)。分别树种考察,混交林中大叶相思平均单株根系生物量有所提高,印楝单株根系生物量则相反;不过,中根、小根和细根生物量则呈现相反趋势(表 2)。

混交林中的印楝平均单株根系生物量低于纯林,可能与大叶相思的生长抑制有关。大叶相思生长迅速,是退化荒坡及森林采伐迹地的优良先锋树种或更新树种^[21],混交林内大叶相思植株平均冠幅(2.8 m×2.6 m)接近于造林株行距(2 m×3 m),且树高和冠幅均大于印楝植株(表 1)。按 1:1 进行行间混交的情况下,大叶相思几乎遮盖了印楝植株,占据了印楝的地上营养空间,影响其正常的生长发育,导致印楝生物量积累下降(包括根系生物量)。另一方面,混交林内印楝植株的中根、小根和细根等吸收根生物量稍高于纯林植株,可能与两种林分内土壤养分状况有关。一般来说,在贫瘠立地条件下,当土壤养分和水分有效性提高时,有利于吸收根生物量的积累^[29-30]。在干热河谷贫瘠的燥红土条件下营造印楝与固氮树种大叶相思混交林,使得林地土壤水分和有效养分均高于印楝纯林(表 1),此种条件可能有助于提高印楝植株的吸收根生物量,使其高于印楝纯林地。印楝与固氮树种大叶相思进行混交,提高了混交林内总根系生物量及其对水分和营养物质吸收起主要作用的细根、小根和中根生物量,虽然这些指标仍低于大叶相思纯林,但却比印楝纯林有所提高,而且混交林内两个树种的各级侧根总生物量比例高于任一树种纯林(表 3),这在干热河谷植被恢复中可能更具有满足需求的更深层次的生态学意义。

4.2 营林模式对根系生物量垂直分布的影响

根系的空間分布特征反映了植物根系对土壤物质和能量利用的潜能,直接影响地上部分植物生物量^[31]。

Gale 等人^[28]通过对 123 份林木根系垂直分布资料进行分析总结,发现树木或林分大部分根系位于 50 cm 土层以上。本研究中的印楝和大叶相思人工林的根系生物量基本分布在 0—0.4 m 土层中,尤其在 0—0.2 m 土层(63.6%—76.3%)分布最多,高于沙漠地区臭柏(*Sabina vulgaris*) (30.69%—64.98%)^[32]和沙蒿(*Artemisa arenaria*) (53.52%—67.11%)^[7]等植物在该土层的分布比例。根据 Gale 提出的方程($Y=1-\beta^d$)得到印楝纯林、大叶相思纯林和印楝×大叶相思混交林 3 种林分下的 β 值为 0.942—0.962,低于全球陆地生态系统中 β 的平均值(0.966)^[33],说明在西南干热河谷,由于气候、土壤以及造林技术等原因,所营造的人工林树种的根系大部分都生长和分布于林地土壤表层,该土层是人工植被水肥管理和经营的关键部分。

除植物自身遗传特征外,根系的垂直分布主要受土壤环境的影响,如土壤水分、容重、养分等理化性质^[34-35]。在干热河谷,由于季节性干旱现象明显且严重,90% 以上的降雨集中在 6—10 月。据有关研究^[36],在元谋干热河谷降水流失不大,如赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*) + 山毛豆(*Tephrosia candida*) 混交林地年径流系数约 2.55%,宜林荒地约 2.75%;降水入渗也不多,0.40—0.65 m 土层的土壤含水量在 12% 左右,但旱季和雨季之差只有 1.35%—1.53%,0.40 m 以上土层则可能达到 8% 以上。所以,印楝和大叶相思人工林土壤表层(0—0.4 m)根系生物量分布比例大,提高了根系对季节性降水的利用效率,促进其植株季节生长,增强来年旱季的抗逆能力。进入旱季后(11 月—翌年 5 月),降水极少,温度偏高,蒸发量大,印楝主根发达,多达 30% 的主根生物量分布于 0.4 m 以下土层,可通过这些根系吸收深层土壤水分;大叶相思则是侧根发达,占根系总生物量的 55% 以上,小根和细根生物量也较大,可从更大范围土层中吸收水分。两个树种各有优势,使其能适应干热河谷严酷的季节性干旱气候,保证植株存活。与沙漠地区不同,西南干热河谷地区燥红土土壤容重大(表 1),质地黏重,通透性差,旱季土壤板结、紧实^[37],黏重紧实的土层阻碍了植物根系向深层土壤的穿透^[34],加之一般造林整地深度基本都在 60 cm 以上,很容易导致人工林树种的侧根生物量主要分布于土壤表层。这可能是两个树种根系生物量多分布于 0.4 m 以上土层的一个原因。再者,印楝根系相对分布较深,大叶相思则相对较浅,二者综合平均的结果,使混交林总根系生物量在土壤表层(0—0.4 m)的分布比例(89.2%)大于印楝纯林(79.0%)而小于大叶相思纯林(93.3%)。

采取相同整地方式和深度,以及造林密度和株行距的情况下,印楝与大叶相思混交,不仅根系生物量小于纯林,主根生物量的垂直分布也发生了很大变化。两个树种混交的目的,是大叶相思作为固氮型的伴生树种,促进主要树种印楝的生长发育,提高其种子产量。从本研究来看,采用 2 m×3 m 株行距营造的行间混交林,种间对地下营养空间和水(养)分的竞争激烈,印楝主根的垂直分布格局与纯林相比发生了很大变化,仅有 2.8% 的主根生物量分布在 0.4 m 以下土层中,其余都转移分配到以上土层的各级侧根中。从这种竞争变化看,在干热河谷这一混交组合是不合适的,也提出了一个非常值得注意的问题,即树种根系分布格局及其生物量在土层中的分配,受环境影响会发生一定程度的适应性变化。仅从树种单一种植时的根系情况,考察其是否适宜组合营造混交林有片面性。

最后,大叶相思纯林与印楝纯林比较,前者在土壤表层的根系分布比例高于后者,则可能与它们之间的生物学特征有关。印楝根系比较发达^[20],尤其是主根生物量的比例较大,在 1.0 m 以下的土层深处仍有分布;大叶相思根系分布相对较浅^[21],主根也主要集中分布在土壤表层(图 1)。通过拟合的地下生物量垂直分布方程得到的印楝纯林根系生物量累积值最大时的土壤深度(0.805 m)大于大叶相思纯林(0.767 m)(表 4),与实际挖取调查的结果比较吻合,该回归模型可为相同条件下的同类研究借鉴。

当然,进一步的研究需要将不同营林模式下人工林根系生物量及其分布特征与不同土层土壤含水率及理化性状有机地联系起来,并从林木对干旱胁迫的适应策略和种间及种内竞争等角度解析造成林木根系生物量分布特征及其差异的机制。另外,需要在干热河谷旱季和雨季两个不同时期对根系,特别是微细根和细根进行动态监测,探明不同林分树种的根系季节性动态特征及其功能,从而更好地指导人工林营造和人工群落经营过程中的水肥管理以及造林树种和造林模式的筛选。

References:

- [1] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [2] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(14): 7362-7366.
- [3] Richardson A D, Statland C B, Gregoire T G. Root biomass distribution under three cover types in a patchy *Pseudotsuga menziesii* forest in western Canada. *Annals of Forest Science* 2003, 60(6): 469-474.
- [4] Rau B M, Johnson D W, Chambers J C, Blank R R, Lucchesi A. Estimating root biomass and distribution after fire in a great basin woodland using cores and pits. *Western North American Naturalist*, 2009, 69(4): 459-468.
- [5] Lecain D R, Morgan J A, Milchunas D G, Mosier A R, Nelson J A, Smith D P. Root biomass of individual species, and root size characteristics after five years of CO₂ enrichment on native shortgrass steppe. *Plant and Soil*, 2006, 279(1/2): 219-288.
- [6] Wang J, Liu M S, Cheng C, Xu C, Liu X K, Wang H J. Spatial distributions of soil water, salts and roots in an arid arbor-herb community. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4120-4127.
- [7] Wang H, Sun D Y, Liu L X, Ma Z W, Wang B. Ecological characteristics of roots of *Artemisa arenaria* population in arid desert area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(1): 99-102.
- [8] Zhang Y D, Shen Y X, Bai S B, Wang Z Q. Effects of the mixed on root growth and distribution of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii*. *Scientia Silvae Sinica*, 2001, 37(5): 16-23.
- [9] Liao L P, Deng S J, Yu X J, Han S J. Growth, distribution and exudation of fine roots of Chinese fir trees grown in continuously cropped plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(4): 569-573.
- [10] Hoffmann C W, Ustoltsev V A. Modelling root biomass distribution in *Pinus sylvestris* forests of the Turgai Depression of Kazakhstan. *Forest Ecology and Management*, 2001, 149(1/3): 103-114.
- [11] Kodrik M. Distribution of root biomass and length in *Picea abies* ecosystem under different immission regimes. *Plant and Soil*, 1994, 167(2): 173-179.
- [12] Luo D H, Xia J, Yuan J W, Zhang Z H, Zhu J D, Ni J. Root biomass of Karst vegetation in a mountainous area of southwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 611-618.
- [13] Bai Y F, Xun Z X, Li D X. Study on seasonal fluctuation of biomass for *Leymus chinense* grassland. *Grass China*, 1994, (3): 1-5.
- [14] Si J H, Feng Q, Li J L, Zhao J. Spatial distribution pattern of *Populus euphratica* fine roots in desert riparian forest. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(1): 1-4.
- [15] Wang Z Q, Zhang Y D. Study on the root interactions between *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii*. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(3): 346-350.
- [16] Hao Y R, Peng S L. Variation of roots and its impact factors in succession. *Ecology and Environment*, 2005, 14(5): 762-767.
- [17] Persson H. Method of studying root dynamics in relation to nutrient cycling // Harrison A F, Ineson P, Heal O W, eds. *Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems: Field Methods, Application and Interpretation*. London and New York: Elsevier Application Science, 1990.
- [18] Yu W T, Yu Y Q. Advances in the research of underground biomass. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6): 927-932.
- [19] Zhang J P, Zhang X B, Yang Z, Wang D J. Studies on eco-environment degradation and the experiment of environment recovering and rebuilding. *Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition*, 2001, 26(6): 733-739.
- [20] Gong W, Hu T X, Gong Y B, Ye M. Present situation of introduction, management and utilization of *Azadirachta indica* in China. *Nonwood Forest Research*, 2004, 22(3): 60-63.
- [21] Ren H, Peng S L. The ecological and biological characteristics of *Acacia auriculaeformis*. *Guihaia*, 1998, 18(2): 146-152.
- [22] Li K, Zeng J M, Zhao H. Drought resistance in relation to free proline in the major tree species in dry and hot river valley of Jinsha. *Forest Research*, 1999, 12(1): 103-107.
- [23] Ma J M, Li K, Zhang C S. Regeneration of *Acacia glauca* and *Leucaena leucacephala* plantations in Yuanmou dry and hot valley. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1365-1369.
- [24] Luo T X, Brown S, Pan Y D, Shi P L, Ouyang H, Yu Z L, Zhu H Z. Root biomass along subtropical to alpine gradients: global implication from Tibetan transect studies. *Forest Ecology and Management*, 2005, 206(1/3): 349-363.
- [25] Deng K M, Luo T X, Zhang L, Wang X Y, Li C H. Root biomass of different stand-age *Pinus yunnanensis* forests and its distribution pattern in different soil depths. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(1): 21-24.
- [26] Yue Y J, Yu X X, Mu C L, Liu X L, Su Y M, Zheng S W. Root biomass and its distribution patterns of plantations in the dry river valleys of the upper reaches of Minjiang River. *Journal of Northeast Forestry University*, 2008, 36(2): 16-18.
- [27] Zhang J E. *Methods and Technologies of Common Experimental Study in Ecology*. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 98-99.
- [28] Gale M R, Grigal D E. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(8): 829-834.
- [29] King J S, Albaugh T J, Allen H L, Buford M, Strain B R, Dougherty P. Below-ground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and

- fine root dynamics in loblolly pine. *New Phytologist*, 2002, 154(2): 389-398.
- [30] Burton A J, Pregitzer K S, Hendrick R J. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forest. *Oecologia*, 2000, 125(3): 389-399.
- [31] Ren A Z, Gao Y B, Wang J L. Root distribution and canopy structure of *Salix gordejewii* in different sandy land habitats. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 399-404.
- [32] Zhang G S, Wang L H, Li Y L, Dong Z, Qi J Q. Root distribution and root weight of *Sabina Vulgaris* in Mu Us Sandy Land. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(4): 378-383.
- [33] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, Mooney H A, Sale O E, Schulze E D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 1996, 180: 389-411.
- [34] Côté B, Bélanger N, Courchesne F, Fyles J W, Hendershot W H. A cyclical but asynchronous pattern of fine root and woody biomass production in a hardwood forest of southern Quebec and its relationships with annual variation of temperature and nutrient availability. *Plant and Soil*, 2003, 250(1): 49-57.
- [35] Mou P, Mitchell R J, Jones R H. Root distribution of two tree species under a heterogeneous nutrient environment. *Journal of Applied Ecology*, 1997, 34(3): 645-656.
- [36] Li K, Chen Y D. Study on input of water regime and soil water content in the plantation of the Yuanmou dry and hot river valley. *Forest Research*, 1995, 8(6): 651-657.
- [37] Li K, Zeng J M. Effects of some tree species on soil in Yuanmou hot and dry valley. *Journal of Southwest Forestry College*, 1999, 19(3): 161-164.

参考文献:

- [6] 王珺, 刘茂松, 盛晟, 徐驰, 刘小恺, 王汉杰. 干旱区植物群落土壤水盐及根系生物量的空间分布格局. *生态学报*, 2008, 28(9): 4120-4127.
- [7] 王辉, 孙栋元, 刘丽霞, 马仲武, 王彬. 干旱荒漠区沙蒿种群根系生态特征研究. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 99-102.
- [8] 张彦东, 沈有信, 白尚斌, 王政权. 混交条件下水曲柳落叶松根系的生长与分布. *林业科学*, 2001, 37(5): 16-23.
- [9] 廖利平, 邓仕坚, 于小军, 韩士杰. 不同连栽代数杉木人工林细根生长、分布与营养物质分泌特征. *生态学报*, 2001, 21(4): 569-573.
- [12] 罗东辉, 夏婧, 袁婧薇, 张忠华, 祝介东, 倪健. 我国西南山地喀斯特植被的根系生物量初探. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 611-618.
- [13] 白永飞, 许志信, 李德新. 羊草草原群落生物量季节动态研究. *中国草地*, 1994, (3): 1-5.
- [14] 司建华, 冯起, 李建林, 赵健. 荒漠河岸林胡杨吸水根系空间分布特征. *生态学杂志*, 2007, 26(1): 1-4.
- [15] 王政权, 张彦东. 水曲柳落叶松根系之间的相互作用研究. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 346-350.
- [16] 郝艳茹, 彭少麟. 根系及其主要影响因子在森林演替过程中的变化. *生态环境*, 2005, 14(5): 762-767.
- [18] 宇万太, 于永强. 植物地下生物量研究进展. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 927-932.
- [19] 张建平, 张信宝, 杨忠, 王道杰. 云南元谋干热河谷生态环境退化及恢复重建试验研究. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2001, 26(6): 733-739.
- [20] 龚伟, 胡庭兴, 宫渊波, 叶萌. 印楝在我国的引种与经营利用现状. *经济林研究*, 2004, 22(3): 60-63.
- [21] 任海, 彭少麟. 大叶相思的生态生物学特征. *广西植物*, 1998, 18(2): 146-152.
- [22] 李昆, 曾觉民, 赵虹. 金沙江干热河谷造林树种游离脯氨酸含量与抗旱性关系. *林业科学研究*, 1999, 12(1): 103-107.
- [23] 马姜明, 李昆, 张昌顺. 元谋干热河谷苏门答腊金合欢、新银合欢人工林天然更新初步研究. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1365-1369.
- [25] 邓坤枚, 罗天祥, 张林, 王学云, 李长会. 云南松林的根系生物量及其分布规律的研究. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 21-24.
- [26] 岳永杰, 余新晓, 慕长龙, 刘兴良, 宿以明, 郑绍伟. 岷江上游干旱河谷区人工林根系生物量及分布格局. *东北林业大学学报*, 2008, 36(2): 16-18.
- [27] 章家恩. *生态学常用实验研究方法与技术*. 北京: 化学工业出版社, 2007: 98-99.
- [31] 任安芝, 高玉葆, 王金龙. 不同沙地生境下黄柳 (*Salix gordejewii*) 的根系分布和冠层结构特征. *生态学报*, 2001, 21(3): 399-404.
- [32] 张国盛, 王林和, 李玉灵, 董智, 齐锦秋. 毛乌素沙地臭柏根系分布及根量. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 378-383.
- [36] 李昆, 陈玉德. 元谋干热河谷人工林地的水分输入与土壤水分研究. *林业科学研究*, 1995, 8(6): 651-657.
- [37] 李昆, 曾觉民. 元谋干热河谷地区不同造林树种对土壤的改良作用研究. *西南林学院学报*, 1999, 19(3): 161-164.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 6 March, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Review and Monograph

- Forest health studies based on remote sensing: a review GAO Guanglei, XIN Zhongbao, DING Guodong, et al (1675)
- Progress of agent-based agricultural land change modeling: a review YU Qiangyi, WU Wenbin, YANG Peng, et al (1690)

Autecology & Fundamentals

- Dynamic distribution of *Nemopilema nomurai* in inshore waters of the northern Liaodong Bay, Bohai Sea WANG Bin, QIN Yubo, DONG Jing, et al (1701)
- Full length cDNA cloning and tissue expression of prophenoloxidase from *Oratosquilla oratoria* LIU Haiying, LIU Lianwei, JIANG Yusheng, et al (1713)
- Morphometrics investigation of the skulls, mandibles and molar in *Tupaia belangeri* from Yunnan, Guizhou, Guangxi ZHU Wanlong, JIA Ting, HUANG Chunmei, et al (1721)
- Effects of litter thickness on leaf litter decomposition and enzyme activity of three trees in the subtropical forests JI Xiaoyan, JIANG Hong, HONG Jianghua, et al (1731)
- The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species in northern Zhejiang ZHANG Jiao, SHI Yongjun, ZHU Yueqing, et al (1740)
- Diurnal changes in the photosynthetic characteristics of two high yield and high quality grasses during different stages of growth and their response to changes in light intensity GUO Chunyan, LI Jinchuan, YUE Jianying, et al (1751)
- Evaluation technology on drought disaster to yields of winter wheat based on WOFOST crop growth model ZHANG Jianping, ZHAO Yanxia, WANG Chunyi, et al (1762)
- Genetic diversity of *Conocephalus maculatus* of different geographic populations based on mitochondrial DNA control region analysis ZHOU Zhijun, SHANG Na, LIU Jing, et al (1770)
- Relationships among female body size, clutch size, and egg size in captive *Deinagkistrodon acutus* HU Minghang, TAN Qunying, YANG Daode (1778)
- The field control of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) with parasitoid and sterile male ZHENG Sining, HUANG Juchang, YE Guanglu, et al (1784)
- Allelopathic effects of artemisinin on ectomycorrhizal fungi LI Qian, YUAN Ling, WANG Mingxia, et al (1791)

Population, Community and Ecosystem

- Establishment of integrated methodology for bay ecosystem health assessment and its application in Daya Bay LI Chunhou, LIN Lin, XU Shannan, et al (1798)
- The influence of upwelling and water mass on the ecological group distribution of zooplankton in Zhejiang coastal waters SUN Lufeng, KE Chang, XU Zhaoli, et al (1811)
- Identification of key ecosystem for ecological restoration in semi-arid areas: a case study in Helin County, Inner Mongolia PENG Yu, GAO Ying, FENG Jinzhao, et al (1822)
- The great rainfall effect on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain JIN Guanyi, ZHAO Xiuhai, KANG Fengfeng, et al (1832)
- The litter-fall characteristics and their response to drought stress in the Masson pins forests damaged by acid rain at Chongqing, China WANG Yihao, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al (1842)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Thermal environment effect of urban water landscape YUE Wenzhe, XU Lihua (1852)
- Landscape ecological security pattern associated with the introduction of exotic tree species *Eucalyptus* ZHAO Xiaoqing, HE Chunlan (1860)
- Ecological balance between supply and demand in Chongqing City based on cultivated land ecological footprint method SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1872)
- Effect of elevated CO₂ on methanotrophs in the rhizosphere of rice plant YAN Chen, XU Jing, ZHONG Wenhui, et al (1881)

Resource and Industrial Ecology

- The seawater environment quality evaluation research base on variable fuzzy pattern recognition model KE Lina, WANG Quanming, SUN Xinguo, et al (1889)
- An *in situ* study on biodeposition of ascidian (*Styela plicata*) in a subtropical aquaculture bay, southern China YAN Jiaguo, QI Zhanhui, TIAN Ziyang, et al (1900)
- Distribution of soil NPK nutrient content in deep soil profile of typical apple orchards on the Loess Plateau ZHANG Lina, LI Jun, FAN Peng, et al (1907)
- Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize fields ZHANG Dingchen, CAI Dianxiong, DAI Kuai, et al (1916)
- Photosynthetic characteristics of soybean and salvia in an agroforestry system in the Hilly Region, Shangluo, China PENG Xiaobang, ZHANG Shuoxin (1926)
- Regulation of exogenous brassinosteroid on growth and photosynthesis of *Helianthus tuberosus* seedlings and cadmium biological enrichment under cadmium stress GAO Huiling, LIU Jinlong, ZHENG Qingsong, et al (1935)
- Calibration coefficients of Granier original formula based on sap flow of *Platycladus orientalis* LIU Qingxin, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (1944)

Research Notes

- An evaluation index system classifying the conservation value of wetland nature reserves based on AHP SUN Rui, CUI Guofa, LEI Ting, et al (1952)
- Root biomass and its distribution of *Azadirachta indica* and *Acacia auriculiformis* plantations in the Dry-hot Valley GAO Chengjie, TANG Guoyong, LI Kun, et al (1964)
- Physiological response of *Vitex trifolia* to sand burial in the sand coast ... ZHOU Ruilian, WANG Jin, YANG Shuqin, et al (1973)
- Soil fertility under different forest types in the Helan and Liupan Mountain ranges of Ningxia Province JIANG Lin, GENG Zengchao, ZHANG Wen, et al (1982)

Opinions

- Dynamic of litterfall in ten typical community types of Xiaoxing'an Mountain, China HOU Lingling, MAO Zijun, SUN Tao, et al (1994)

《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,探索自然奥秘,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

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 6 期 (2013 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 6 (March, 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