

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第14期 Vol.33 No.14 **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 14 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

石鸡属鸟类研究现状..... 宋 森,刘迺发 (4215)

个体与基础生态

不同降水及氮添加对浙江古田山 4 种树木幼苗光合生理生态特征与生物量的影响.....
..... 闫 慧,吴 茜,丁 佳,等 (4226)

低温胁迫时间对 4 种幼苗生理生化及光合特性的影响..... 邵怡若,许建新,薛 立,等 (4237)

不同施氮处理玉米根茬在土壤中矿化分解特性..... 蔡 苗,董燕婕,李佰军,等 (4248)

不同生育期花生渗透调节物质含量和抗氧化酶活性对土壤水分的响应.....
..... 张智猛,宋文武,丁 红,等 (4257)

天山中部天山云杉林土壤种子库年际变化..... 李华东,潘存德,王 兵,等 (4266)

不同作物两苗同穴互作育苗的生理生态效应..... 李伶俐,郭红霞,黄耿华,等 (4278)

镁、锰、活性炭和石灰及其交互作用对小麦镉吸收的影响..... 周相玉,冯文强,秦鱼生,等 (4289)

CO₂ 浓度升高对毛竹器官矿质离子吸收、运输和分配的影响 庄明浩,陈双林,李迎春,等 (4297)

pH 值和 Fe、Cd 处理对水稻根际及根表 Fe、Cd 吸附行为的影响 刘丹青,陈 雪,杨亚洲,等 (4306)

弱光胁迫对不同耐荫型玉米果穗发育及内源激素含量的影响..... 周卫霞,李潮海,刘天学,等 (4315)

玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响..... 焦念元,宁堂原,杨萌珂,等 (4324)

不同林龄胡杨克隆繁殖根系分布特征及其构型..... 黄晶晶,井家林,曹德昌,等 (4331)

植被年际变化对蒸散发影响的模拟研究..... 陈 浩,曾晓东 (4343)

蝇蛹金小蜂的交配行为及雄蜂交配次数对雌蜂繁殖的影响..... 孙 芳,陈中正,段毕升,等 (4354)

西藏飞蝗虫粪粗提物的成分分析及其活性测定..... 王海建,李彝利,李 庆,等 (4361)

不同水稻品种对稻纵卷叶螟生长发育、存活、生殖及飞行能力的影响..... 李 霞,徐秀秀,韩兰芝,等 (4370)

种群、群落和生态系统

基于 *mtCOII* 基因对山东省越冬代亚洲玉米螟不同种群的遗传结构分析
..... 李丽莉,于 毅,国 栋,等 (4377)

太湖湿地昆虫群落结构及多样性..... 韩争伟,马 玲,曹传旺,等 (4387)

西江下游浮游植物群落周年变化模式..... 王 超,赖子尼,李新辉,等 (4398)

环境和扩散对草地群落构建的影响..... 王 丹,王孝安,郭 华,等 (4409)

黄土高原不同侵蚀类型区生物结皮中蓝藻的多样性..... 杨丽娜,赵允格,明 姣,等 (4416)

景观、区域和全球生态

基于景观安全格局的建设用地管制分区..... 王思易,欧名豪 (4425)

黑河中游湿地景观破碎化过程及其驱动力分析..... 赵锐锋,姜朋辉,赵海莉,等 (4436)

2000—2010 年青海湖流域草地退化状况时空分析 骆成凤,许长军,游浩妍,等 (4450)

基于“源”“汇”景观指数的定西关川河流域土壤水蚀研究 李海防,卫 伟,陈 瑾,等 (4460)

农业景观格局与麦蚜密度对其初寄生蜂与重寄生蜂种群及寄生率的影响 ... 关晓庆,刘军和,赵紫华 (4468)

CO₂ 浓度和降水协同作用对短花针茅生长的影响..... 石耀辉,周广胜,蒋延玲,等 (4478)

资源与产业生态

城市土地利用的生态服务功效评价方法——以常州市为例..... 阳文锐,李 锋,王如松,等 (4486)

城市居民食物磷素消费变化及其环境负荷——以厦门市为例..... 王慧娜,赵小锋,唐立娜,等 (4495)

研究简报

间套作种植提升农田生态系统服务功能..... 苏本营,陈圣宾,李永庚,等 (4505)

矿区生态产业评价指标体系 王广成,王欢欢,谭玲玲 (4515)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 308 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-07



封面图说: 古田山常绿阔叶林景观——亚热带常绿阔叶林是我国独特的植被类型,生物多样性仅次于热带雨林。古田山地处中亚热带东部,浙、赣、皖三省交界处,由于其特殊复杂的地理环境位置,分布着典型的中亚热带常绿阔叶林,是生物繁衍栖息的理想场所,生物多样性十分突出。中国科学院在这里建立了古田山森林生物多样性与气候变化研究站,主要定位于研究和探索中国亚热带森林植物群落物种共存机制,阐释生物多样性对森林生态系统功能的影响,以及监测气候变化对于亚热带森林及其碳库和碳通量的影响。

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/stxb201301080065

黄晶晶, 井家林, 曹德昌, 张楠, 李景文, 夏延国, 吕爽. 不同林龄胡杨克隆繁殖根系分布特征及其构型. 生态学报, 2013, 33(14): 4331-4342.

Huang J J, Jing J L, Cao D C, Zhang N, Li J W, Xia Y G, Lü S. Cloning root system distribution and architecture of different forest age *Populus euphratica* in Ejina Oasis. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4331-4342.

不同林龄胡杨克隆繁殖根系分布特征及其构型

黄晶晶¹, 井家林¹, 曹德昌², 张楠¹, 李景文^{1,*}, 夏延国¹, 吕爽¹

(1. 北京林业大学森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学生物学院, 北京 100083)

摘要:以中龄林和成熟林胡杨为研究对象, 采用挖剖面法和根窗法, 研究胡杨繁殖根系分布、根系构型, 以及胡杨根蘖与繁殖根系构型之间的关系。结果表明: (1) 细根 ($d < 2$ mm) 的根长密度、根表面积密度, 随深度增加呈现指数函数分布; (2) 中龄林细根的根长密度、根表面积密度在 0—90 cm 各层都是显著大于成熟林的对应指标 ($P < 0.05$), 成熟林的中等粗根 ($5 \text{ mm} < d < 20 \text{ mm}$)、粗根 ($20 \text{ mm} < d$) 根长密度及根表面积在深层 (70—90 cm) 和中浅层 (40—50 cm) 都显著大于中龄林的对应指标 ($P < 0.05$); (3) 在中龄林中, 根表面积、根分枝数、根分形维数及平均分枝角度是分析根系构型的主成分因子, 而在成熟林中, 根体积、根分枝数及平均分枝角度是分析根系构型的主成分因子; 根系各径级的主成分分析显示 1—2 mm 各个径级对根系表面积和根体积影响显著; (4) 两种林龄繁殖根系上的不定芽及分蘖株数均无显著差异 ($P > 0.05$), 且两种林龄的一级侧根数、分枝角度亦无显著差异 ($P > 0.05$); (5) 对比两种林龄不同根序上的根蘖芽发现, 二级根上不定芽个数均是同组一级根上不定芽个数的 3—4 倍; 基于以上对胡杨根系的功能权衡的分析, 得出: 细根对胡杨根系构型有重要的影响, 在胡杨根系功能权衡中扮演重要角色。

关键词: 胡杨; 根长密度; 根表面积密度; 根系分布; 根系构型

Cloning root system distribution and architecture of different forest age *Populus euphratica* in Ejina Oasis

HUANG Jingjing¹, JING Jialin¹, CAO Dechang², ZHANG Nan¹, LI Jingwen^{1,*}, XIA Yanguo¹, LÜ Shuang¹

1 The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Department of Biology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Plant population regeneration is of great importance for restoration of degraded ecosystems and preservation of biodiversity in the extreme arid region. The effects of soil environment on the characters and sprouting of propagative root of *populus euphratica* were investigated to elucidate the development mechanism of adventitious buds and root suckers. It was contributive to ameliorate the regeneration of the degraded riparian forest in the Northwest of China. Based on the investigation on soil profile and rhizotron in middle-aged and mature-aged *Populus euphratica* forest, the cloning root distribution characteristics, the root architecture, and the relationship between the sucker root and propagative root architecture were analyzed. Results show that: (1) with the increasing of the soil depth, the root length density (RLD) and root surface Area density (SAD) of fine root ($d < 2$ mm) present the exponential function. (2) In different depths among 0—90 cm, the RLD and SAD of the fine root in middle-aged forest were significantly larger than the ones in mature-aged forest ($P < 0.05$). However, in 70—90 cm (deeper layers) and 40—50 cm (shallower layers), the RLD and SAD of the middle-sized thick roots ($5 \text{ mm} < d < 20 \text{ mm}$) and the thick roots ($20 \text{ mm} < d$) in middle-aged forest, were significantly smaller than those in the mature-aged forest ($P < 0.05$). (3) In the middle-aged forests, the root surface area, the root

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31070553, 30570332); 中国林业科学研究院重大项 (CAFYBB2011002)

收稿日期: 2013-01-08; **修订日期:** 2013-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijingwen@bjfu.edu.cn

forks, the root fractal dimension, and the average branch angle were chosen as principal components in analyzing the root architecture. But the root volume, the root forks, and the average branch angle were chosen as principal components in mature-aged forest. The principal component analysis on the root order showed that the diameter class among 1—2 mm significantly influenced the SAD and the root volume. (4) There were no significant difference in the amount of the adventitious buds on cloning roots, the first-ordered lateral roots and branch angle between the two-age forests ($P < 0.05$). (5) It was found that the amount of the adventitious bud on the second-ordered roots were 3—4 times more than that on the first-ordered roots by comparing the shoot bud on different root orders in the two-age forests. Based on the analyses on the trade-off of *Populus euphratica* root. Our result suggested that the fine roots ($d < 2$ mm) would significantly affect the clone root architecture of *Populus euphratica*, and played an important role in the trade-off of *Populus euphratica* root function.

Key Words: *Populus euphratica*; root length density; root surface area density; root distribution; root architecture

根系是植物摄取、运输和贮存碳水化合物和营养物质以及合成一系列有机化合物的器官^[1],同时也是寻觅新的生境、繁殖的器官^[2-3]。由于干旱区资源环境相对比较匮乏,干旱区植物根系在适应环境时形成了一定的适应机制,McCulley^[4]研究干旱区深根系植物通过水分的再分配,对深层营养的提升作用。李修仓^[5]在研究干旱区无性系芦苇^[6]根系分布对水分的响应时发现:旱生芦苇根系深度达 250 cm 以上,毛细根分布最多区域在 0—30 cm 土层。曾凡江^[7]在研究干旱区的骆驼刺根系时发现:水土条件较好时,水平根系分布广泛,产生根蘖苗获取资源;水土条件匮乏时,垂直根系分布发达。张大勇^[8]研究认为植物的不同功能在其生活史中一般存在着权衡关系,干旱区植物根系在发育过程中也存在着多种功能的权衡。

胡杨(*Populus euphratica*)我国干旱荒漠地区唯一能够形成森林的乔木种^[9]。近年来黑河上游下泄水量不足、地下水位的下降和人力的破坏^[10-12],胡杨林退化严重^[11-12]。由于有性繁殖失败^[13-14],目前额济纳胡杨林主要依靠无性根蘖繁殖维持胡杨林的更新^[15-16]。胡杨的生理特性及所处的生态环境与 Cottonwood^[17]有很大的相似性^[18],David^[19-20]研究 cottonwood(*Populus deltoides*)时发现,该物种的繁殖更新与该区域的水文动态节律关系密切。Rood^[21]研究 cottonwood 根系构型时发现:根系分布的深浅受到水文动态节律和河流流量的影响,李建林^[22]研究了极端干旱区胡杨吸水根系的分布,赵文智等^[16]的研究表明胡杨的根蘖发生与水分关系密切,曹德昌^[13,18]的研究表明胡杨根蘖和林窗特性、土壤特性以及深度有关。但这些主要是研究吸水根分布情况,根蘖数量和生长的影响,没有涉及胡杨根系不同功能如何权衡、根蘖如何发生的,与根系特征存在着怎样的关系等关键性问题。在研究中发现胡杨的根蘖和不定芽主要发生在位于土壤 10—50 cm 这部分根系上,而且与根系构型特征有密切的关系。基于此本文重点研究胡杨繁殖根系如何分布、根系构型成什么规律、根蘖产生和根系构型关系呈现出什么样的规律?以揭示胡杨根系在适应荒漠区环境的特殊适应机制。同时,这些问题的研究在胡杨林保护与维持方面具有重要理论与实践意义。

1 研究地概况和研究方法

1.1 研究地概况

研究地在黑河下游内蒙古额济纳旗地区,典型的大陆干旱气候,降雨稀少,蒸发强烈,温差很大,年平均降雨 42 mm,年平均蒸发量为 3755 mm,是降雨的 89 倍多。样地设在二道桥胡杨林保护区,地理坐标为:北纬 41°58′,东经 101°03′,平均海拔 930 m,根据 2006—2011 年做的 3 块固定样地(100 m×100 m)胡杨林数据,选取两个 50 m×50 m 样地,调查样地的基本数据。

1.2 研究方法

1.2.1 基于根窗的根蘖数据测定

2011 年 5 月份在两种样地中分别做 5 个根观察窗。首先,在二道桥两个样地中分别选取 5 株根蘖苗,以每个苗为中心进行挖取剖面,挖取一个长度为 2 m,宽度为 1 m,深度为 60 cm 的剖面,然后把玻璃贴在剖面上,固定四个角。其后,进行遮阳处理,玻璃面上搭盖一层遮阳布,坑的上面完全铺盖一层遮阳网。数据采集

于根系平衡一两个月后进行。首先,在玻璃板上对照刻度尺用记号笔划出刻度,标记深度,萌蘖点位置;此后每隔一个星期,利用扫描仪(Canoscan LiDE 700F, Canon, Japan)扫描根窗上的图像,利用 WinRHIZO 2009 根分析软件(Regent instruments Inc., Quebec, Canada)

1.2.2 不同胡杨林龄根系构型和空间分布测定。

试验一:中龄林和成熟林的根系构型与根蘖研究。在包含中龄林和成熟林的样地中,以根蘖苗为参考中心,用铁铲挖取确定根系的走势,沿着根系走势(10 m 范围内)挖出完整的根系。每个林龄生境做 5 个重复,在挖取时,尽量保持胡杨的根系构型空间位置,同时拍照,记录胡杨根系的不定芽的个数、一级侧根数、二级侧根数,分枝夹角。把取出的完整根系带回实验室清洗,然后利用 Epson Twain Pro 根系扫描仪对根系进行扫描,获取根系构型参数数据。

试验二:胡杨繁殖根系的构型分布的研究。根据以往胡杨根蘖的研究^[12,14,15,18],挖取繁殖根系(在自然生长条件下,深度分布分为 10—50 cm,可以产生萌蘖芽,并且根蘖芽最终可以长成根蘖的根系)。在两种林龄生境中分别选取 5 丛根蘖苗,以此为参照中心,挖长宽为 100 cm×60 cm 深度为 90 cm 的坑,10 cm 一层取出根系,把挖出来的根系装入事先准备好的低温保温箱中,带回实验室清洗,利用 Epson Twain Pro 根系扫描仪对根系进行扫描,利用 WinRHIZO 2009 根分析软件(Regent instruments Inc., Quebec, Canada)分析提取数据。收获的数据包括:总根长(cm)、根平均直径(mm)、根表面积(cm^2)、根总体积(cm^3)、根分叉数、根尖点,平均分支角度,分形维数。按直径把根分为 6 个级别:1—4 级从 0 mm 开始,每隔 0.5 mm 分一级,一直到 2 mm,第 5 个径级为 2—5 mm,第 6 个径级为 5—20 mm,第 7 个径级为大于 20 mm,对大于 1 cm 根系数据直接利用游标卡尺和直尺进行测量。

1.2.3 根长密度,根表面积密度测量

根长密度(RLD), $\text{RLD} = L/V$ (L 是根系长度, V 为土壤体积);

根表面积密度(SAD), $\text{SAD} = S/V$ (S 是根系表面积, V 是土壤的体积)。

1.2.4 土壤数据的测量

土壤的含水量和土壤可溶性盐测定,利用土壤测定仪(HH2 Moisture Meter & Wet Sensor WET-2, (精度 ± 3 %), Delta-T Devices Ltd., 英国)测量含水量,土壤电导率,两者测量方法为:在每一层土层的 4 个角和中心处选取点。

利用 Shapiro-Wilk 和 Levene 检验对数据的正态性和方差齐次性进行检验,如果数据不满足此条件即对其进行一定的数据转换。方差分析对各根系形态(RLD、SAD),并对根系构型参数进行主成分分析,采用 sigmaplot10.0 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1.1 胡杨林样地基本特征

胡杨样地(1)的树木平均胸径为 44 cm。林下主要有多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*), 苦豆子(*Sophara alopecuroides*), 芨芨草(*Achnatherum splendens*), 猪毛菜(*Salsola collina*), 骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*), 黑果枸杞(*Lycium ruthenicum* Murr), 蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)。土壤有机质含量为 0.548%。胡杨样地(2)的树木平均胸径为 78 cm。林下主要有:多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*), 苦豆子(*Sophara alopecuroides*), 猪毛菜(*Salsola collina*)。土壤有机质为 0.380%。两种林型的主要干扰类型为:旅游,放牧。依据胡杨林龄和胸径的关系^[14],用测量胡杨的胸径来表征胡杨林龄^[23],把胡杨林样地划分为中龄林,成熟林龄。

2.1.2 胡杨根长密度垂直分布特征

根长密度(RLD)是单位土壤体积的根长,表征根系在某一土壤层的根长的多少。根长密度对根系吸水 and 营养物质影响较大^[27]。研究结果显示(表 1),在中龄林内,径级 $d < 2$ mm 的根长密度在 0—10 cm 土层的根长密度最大,为 0.3874 cm/cm^3 ,显著高于其余各层($P < 0.05$);径级 2—5 mm 的根长密度在 0—10 cm 土层的根长密度最大,为 0.0294 cm/cm^3 ,显著高于其余各层($P < 0.05$);径级 5—20 mm 的根长密度在 20—30 cm 土

层的根长密度最大,为 0.0053 cm/cm^3 ,显著高于其余各层 ($P<0.05$);径级 $d>20 \text{ mm}$ 的根长密度在 $50\text{—}60 \text{ cm}$ 最大,为 0.0061 cm/cm^3 ,显著高于其余各层 ($P<0.05$)。

在成熟林内,径级 $d<2\text{mm}$ 的根长密度,在 $0\text{—}10\text{cm}$ 土层的根长密度最大,为 0.1407 cm/cm^3 ,显著高于其余各层 ($P<0.05$);径级 $2\text{—}5\text{mm}$ 的根长密度,在 $50\text{—}60 \text{ cm}$ 土层的根长密度最大,为 0.0158 cm/cm^3 ,显著高于其余各层 ($P<0.05$);径级 $5\text{—}20 \text{ mm}$ 的根长密度,在 $50\text{—}60 \text{ cm}$ 土层的根长密度最大,为 0.0158 cm/cm^3 ,显著高于其余各层 ($P<0.05$);径级 $d>20\text{mm}$ 在 $50\text{—}60 \text{ cm}$ 土层的根长密度最大为 0.0060 cm/cm^3 显著高于其余各层 ($P<0.05$)。

表 1 不同林龄不同深度各个径级的根长密度的方差分析

Table 1 Analysis of variance of root length density influenced by forest age, soil depth, root diameter

深度 Depth/cm	中龄林 Middle age forest 根长密度 RLD/(cm/cm^3) 径级 diameter/mm				成熟林龄 Mature age forest 根长密度 RLD/(cm/cm^3) 径级 diameter/mm			
	<2mm	2—5mm	5—20mm	>20mm	<2mm	2—5mm	5—20mm	>20mm
0—10	0.3874b	0.0294c	0.0017b	0d	0.1407c	0.0040c	0.0025a	0f
10—20	0.3123c	0.0221d	0.0045c	0d	0.1278d	0.0059d	0.0050c	0f
20—30	0.2810d	0.0175a	0.0053d	0d	0.1758e	0.0084a	0.0026a	0f
30—40	0.0620e	0.0041e	0.0100e	0.0036a	0.0242a	0.0010e	0.0152d	0.0034a
40—50	0.0674f	0.0174a	0.0143a	0.0043b	0.0228a	0.0120f	0.0141b	0.0055b
50—60	0.0722a	0.0133f	0.0147a	0.0061d	0.0125b	0.0093b	0.0158e	0.0060c
60—70	0.0758a	0.0109g	0.0107f	0.0049c	0.0137b	0.0092b	0.0138b	0.0050d
70—80	0.0823g	0.0099b	0.0082g	0.0045c	0.0223a	0.0092b	0.0113f	0.0033e
80—90	0.0569h	0.0094b	0.0128h	0.0038ab	0.0177f	0.0084a	0.0125g	0.0025a

检验方法为 LSD,同一列不同字母表示显著差异 ($P<0.05$)

2.1.3 胡杨根表面积密度垂直分布特征

根表面积密度(SAD)是单位土壤体积的根表面积。根系表面积密度是研究水分吸收或养分吸收的重要参数之一。研究结果显示(表 2),在中龄林生境径级 $d<2 \text{ mm}$ 的根表面积密度,在 $0\text{—}10 \text{ cm}$ 为 $0.0791 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$,显著大于其各层 ($P<0.05$);径级 $2\text{—}5 \text{ mm}$ 的根表面积密度,在 $0\text{—}10 \text{ cm}$ 为 $0.0262 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$,显著大于其各层 ($P<0.05$);径级 $5\text{—}20 \text{ mm}$ 的根表面积密度,在 $60\text{—}70 \text{ cm}$ 为 $0.0484 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$,显著大于其各层 ($P<0.05$);径级 $d>20 \text{ mm}$ 的根表面积密度在 $50\text{—}60\text{cm}$ 为 $0.0500 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$,显著大于其各层 ($P<0.05$)。

表 2 不同林龄不同深度各个径级的根表面积密度的方差分析

Table 2 Different depths of different forest age diameter of the root surface area density analysis of variance

深度/cm Depth	中龄林 Middle age forest 根表面积密度 SAD/(cm^2/cm^3) 径级 Diameter/mm				成熟林龄 Mature age forest 根表面积密度 SAD/(cm^2/cm^3) 径级 diameter/mm			
	<2mm	2—5mm	5—20mm	>20mm	<2mm	2—5mm	5—20mm	>20mm
0—10	0.0791a	0.0262d	0.0017b	0c	0.0201b	0.0034c	0.0050a	0f
10—20	0.0614b	0.0204a	0.0075c	0c	0.0201b	0.0051d	0.0134d	0f
20—30	0.0455c	0.0167e	0.0110d	0c	0.0318c	0.0067b	0.0034a	0f
30—40	0.0084d	0.0125b	0.0435e	0.0334a	0.0318c	0.0101a	0.0401e	0.0284b
40—50	0.0100e	0.0187f	0.0343a	0.0389b	0.0033a	0.0117e	0.0333b	0.0451a
50—60	0.0092f	0.0133b	0.0334a	0.0500c	0.0026a	0.0100a	0.0342b	0.0550c
60—70	0.0150g	0.0210a	0.0484f	0.0450d	0.0025a	0.0101a	0.0226c	0.0451a
70—80	0.0042g	0.0094c	0.0159g	0.0400b	0.0050d	0.0092a	0.0225c	0.0267b
80—90	0.0059h	0.0086c	0.0217h	0.0334a	0.0026a	0.0067b	0.0267f	0.0184d

检验方法为 LSD,同一列不同字母表示显著差异 ($P<0.05$)

在成熟林生境径级 $d<2 \text{ mm}$ 的根表面积密度,在 $20\text{—}40 \text{ cm}$ 为 $0.0318 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$,显著大于其各层 ($P<$

0.05); 径级 2—5 mm 的根表面积密度, 在 40—50 cm 为 $0.0117 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, 显著大于其各层 ($P<0.05$); 径级 5—20 mm 的根表面积密度, 在 30—40 cm 为 $0.0401 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, 显著大于其各层 ($P<0.05$); 径级 $d>20 \text{ mm}$ 的根表面积密度, 在 50—60 cm 为 $0.0550 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, 显著大于其各层 ($P<0.05$)。

图(1)、(2)显示, 两种林龄根系密度, 径级小于 2 mm (吸水根系) 的根长密度, 随着深度的增加, 根长密度呈降低的趋势; 根表面积密度也是呈现出相同的规律。0—70 cm 中龄林和成熟林根长密度分别占总根量的 90%, 92.8%, 并且中龄林的每层土样根长密度都是要显著大于成熟林的 ($P<0.05$); 根表面积呈现出同样的规律, 径级为 2—5 mm 中龄林根长密度是随着深度的增加, 根长密度降低; 中龄林根表面积密度呈现出同样的规律。成熟林的根长密度是随着深度的增加, 先增加后降低; 根表面积密度也是同样的规律。在 30—40 cm 土层, 成熟林的根长密度显著大于中龄林的 ($P<0.05$), 中林龄的前 30 cm 土层根长密度显著大于成熟林的 ($P<0.05$)。在 0—30 cm, 40—50 cm, 60—70 cm 土层, 中林龄的根表面积密度显著大于成熟林的 ($P<0.05$)。对于径级 2—5 mm、 $>20 \text{ mm}$ 的两种林龄根系密度, 其均呈现出先增加后降低的规律。

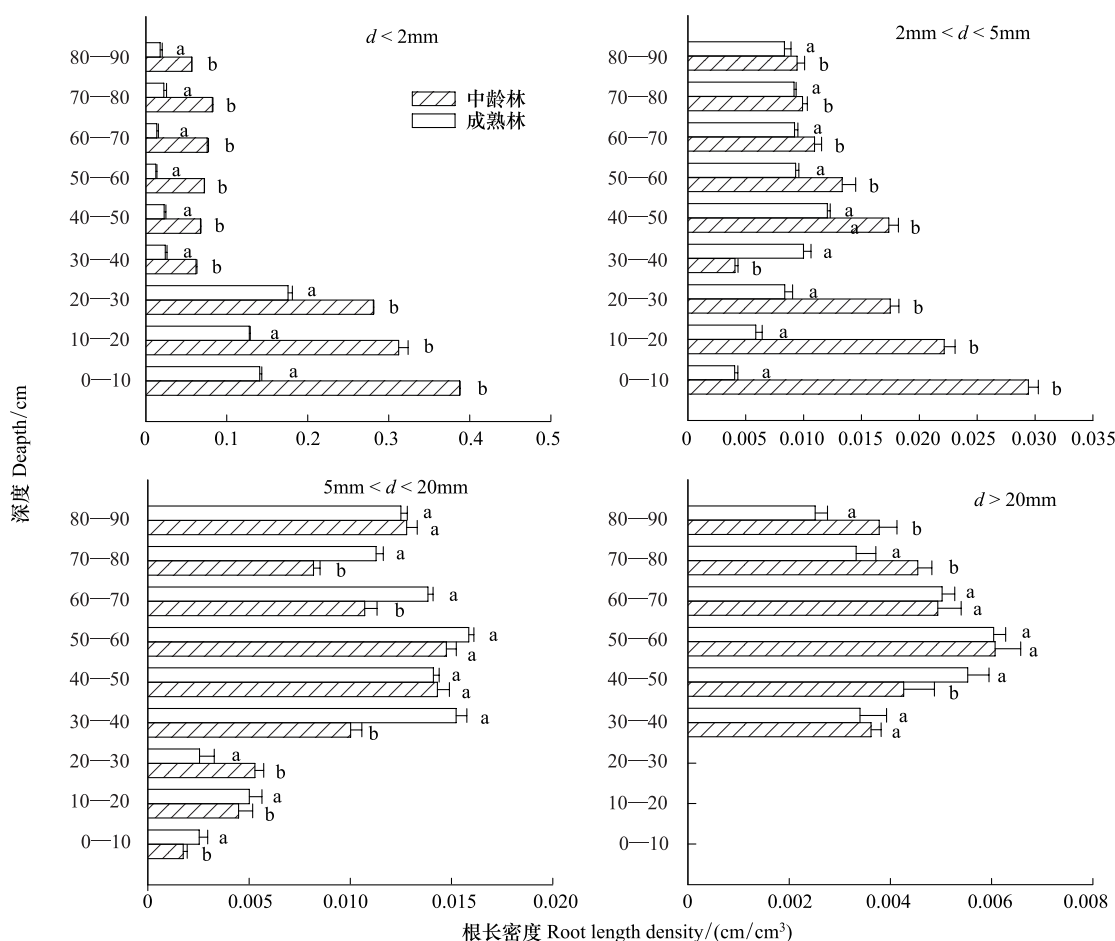


图1 两种林龄不同深度各径级的根长密度对比

Fig.1 Two kinds of forest age at each diameter level root length density contrast in different depth

不同林龄条形图上不同字母表示是表示差异显著 ($P<0.05$)

2.2.1 胡杨构型参数的主成分分析

根系构型是植物适应生态环境的外部形态表现形式。为了研究不同林龄生境根系构型参数, 那些根系构型主成分因子, 来反映胡杨繁殖根系生态适应策略。对根系构型的 13 个参数 (主根轴长, 根表面积, 根体积, 总根长, 平均径级, 根分枝数, 根尖点, 分形维数, 平均分支角度, 一级侧根数, 一级侧根长, 二级侧根数, 二级侧根长度) 进行了主成分分析, 在中龄林生境中分析结果如表(3): 根表面积、根分枝数、根分形维数, 平均分枝

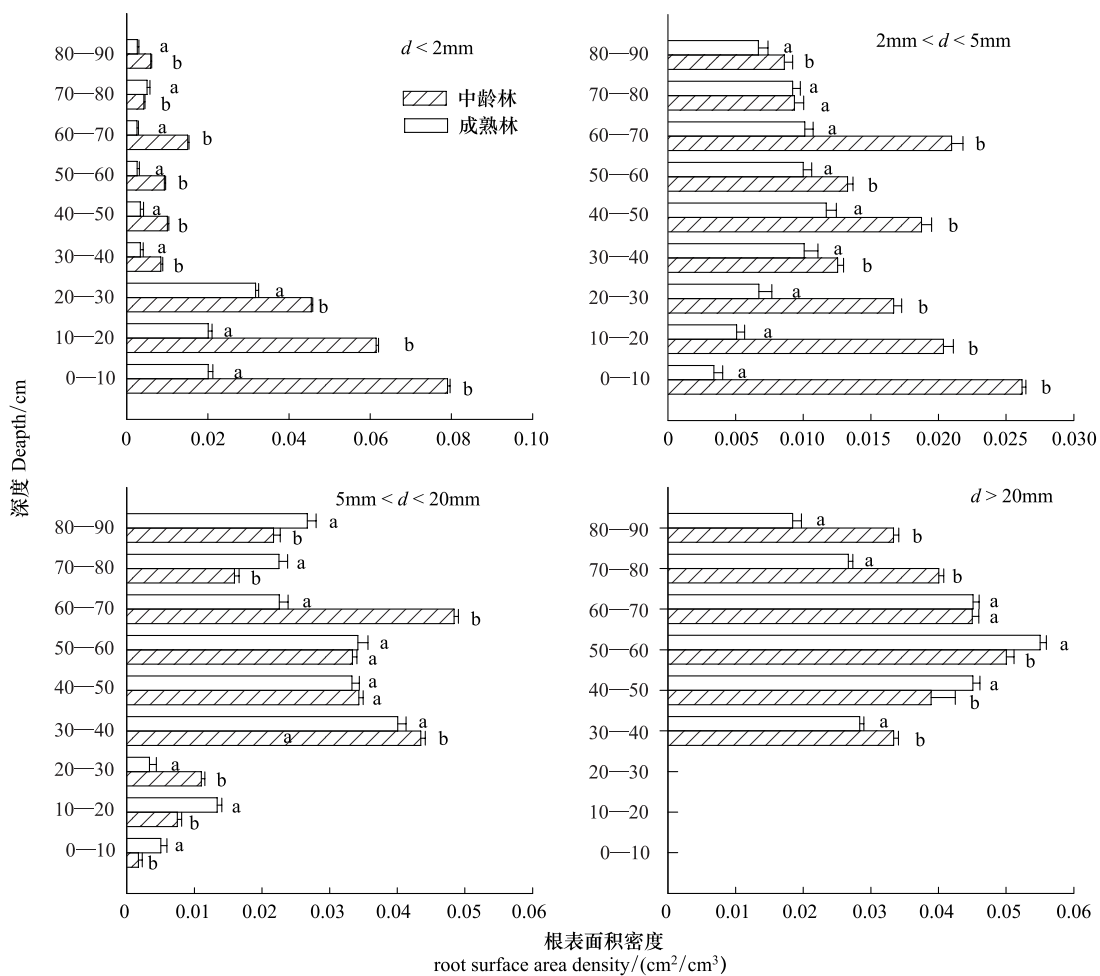


图2 两种林龄不同深度各径级的根表面积密度对比

Fig.2 Two kinds of forest age at each diameter level root surface area density contrast in different depth

不同林龄条形图上不同字母表示是表示差异显著 ($P<0.05$)

角度4个参数是分析根系构型的主成分因子,其特征值分别为3.869、1.594、1.411、1.019,均大于1;根表面积、根分枝数、根分形维数,平均分枝角度4个参数的方差贡献率分别为42.91%、17.71%、15.68%、11.32%,累计方差贡献率为87.70%。成熟龄林生境数据分析结果如表(4):根体积、根分枝数,平均分枝3个参数是分析根系构型的主成分因子,其特征值分别为3.620、1.743、1.082,均大于1;根体积、根分枝数,平均分枝角度的方差贡献率分别为45.25%、21.78%、13.57%,累计方差贡献为80.60%。

表3 中龄林根系构型参数主成分分析

Table 3 Principal component analysis on the Middle age forest root architecture parameters			
主成分 Principle component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance	累积贡献率/% Cumulative variance
根表面积 Root surface area/cm ²	3.869	42.991	42.991
根分枝数 Root forks	1.594	17.707	60.698
根分形维数 Root fractal dimension	1.411	15.682	76.380
平均分枝角度 Average branch angle	1.019	11.321	87.701

为了研究在不同径级水平上,哪种径级对根系构型参数影响显著,对不同径级进行主成分分析。分析结果如表(4):在中龄林生境中1—2 mm这两个径级的根表面积特征值为4.794、1.021,均大于1;贡献率分别为79.15%、17.01%,累积贡献率为96.16%。在成熟林生境1—2 mm这两个径级的根表体积特征值分别

为 3.902,1.162,均大于 1;贡献率分别为 65.08%,19.37%,累积贡献率为 84.44%。由此,1—2 mm 2 个级别径级是根表面积,根体积的主成分因子,即 1—2 mm 2 个级别的径级对根系构型影响显著。通常定义直径在 2 mm 以下的根为细根^[24-26],因此得出胡杨细根对根系构型参数有重要的影响。

表 4 成熟林根系构型参数主成分分析
Table 4 Principal component analysis on the Mature age forest root architecture parameters

主成分 Principle component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance	累积贡献率/% Cumulative variance
根体积 Root volume/cm ³	3.620	45.253	45.253
根分枝数 Root forks	1.743	21.784	67.037
平均分枝角 Average branch angle	1.085	13.567	80.604

表 5 各种径级下根表面积和根体积的主成分分析
Table 5 principal component analysis of different root diameter (*d*) level under the root surface area and root volume

主成分 Principle component	中龄林 Middle age forest			成熟林 Mature age forest		
	根表面积 Root surface area/cm ²			根体积 Root volume/cm ³		
	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance of%	累积贡献率/% Cumulative%	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance of%	累积贡献率/% Cumulative%
1m< <i>d</i> ≤1.5mm	4.794	79.149	79.149	3.902	65.076	65.076
1.5mm< <i>d</i> <2mm	1.021	17.010	96.159	1.162	19.365	84.442

2.2.2 两种林龄胡杨繁殖根系构型对根蘖的影响

采用 Pregizer 等根序的分级法^[30],以独立出现萌蘖芽的侧根定义为一级根,将明显可见的具有一组独立侧根定义为二级根,数据分析显示,如表 6,两种林龄的一级根上萌蘖芽的个数对比差异不显著($P<0.05$),二级根上萌蘖芽的个数对比差异不显著($P<0.05$)。中龄林的二级根萌蘖芽的个数是一级根萌蘖芽个数的 3.24 倍,成熟林的二级根萌蘖芽的个数是一级根萌蘖芽个数的 3.36 倍。两种林龄的一级侧根数,分枝角度在同一组对比差异不显著($P<0.05$)。繁殖根系构型分析表明,繁殖根系产生不定芽,不定芽生长成根蘖差异不显著,可能是由生物学特性所决定原因。一级侧根数,和分枝角度是繁殖根系一种空间拓展能力的表征,与林龄是无关的。

表 6 不同林龄胡杨根蘖、繁殖根系构型参数的方差分析
Table 6 Analysis of variance on root sucker, cloning root architecture parameters in different *populus* forest

	一级根上萌蘖芽个数 Number shoot bud of first order	二级根上萌蘖芽个数 Number shoot bud of second order	一级侧根数 First class Later root	分枝角度 Branch Angle
中龄林 Middle age forest	13.6±1.3a	4.2±0.7a	11.0±1.4a	47.16±3.7a
成熟林 Mature age forest	14.8±3.7a	4.4±0.8a	12.2±1.2a	50.6±4.2a

同一列不同字母表示显著差异($P<0.05$)

2.2.3 基于根窗的胡杨根蘖的生长规律

根蘖苗横向和纵向生长速率是一个周期的平均生长长度。从图(3)可以看出,20 cm 深度,中龄林的两种林龄纵向生长速率是成熟林的 1.6 倍;30 cm 深度,成熟林的两种林龄纵向生长速率是中龄林的 4 倍;在 40 cm 深度,成熟林的两种林龄纵向生长速率是中龄林生境的 17 倍;50 cm 深度,成熟林是中龄林的 4 倍;60 cm 深度,成熟林的两种林龄纵向生长速率是中龄林的 7 倍。径向生长速率的对比,10 cm 深度,成熟林是中龄林 2 倍,30 cm、40 cm 深度成熟林是中龄林生境的 2 倍,50 cm 深度成熟林是中龄林的 4 倍,60 cm 深度成熟林生境是中龄林生境 6 倍。

2.3 土壤的水分和电导率的空间分布规律

表 7 中显示,中龄林生境中,80—90 cm 土层的含水量最大,显著大于其余各层($P<0.05$);成熟林生境

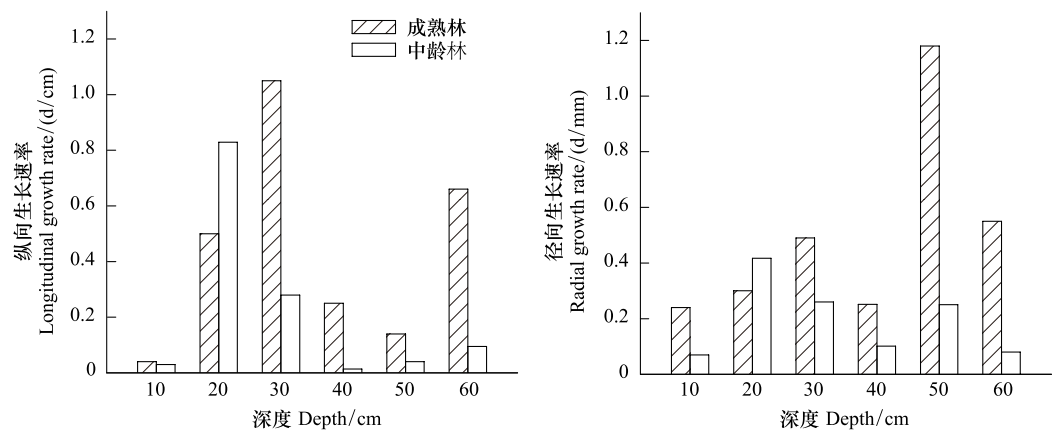


图3 两种林龄的根蘖苗生长速率对比

Fig. 3 Two kinds of forest age root sucker growth rate contrast

中,80—90 cm 土层的含水量最大,显著大于其他各层。中龄林生境土壤含水率变化规律为,随着深度的增加,含水率增加,并在40—50 cm处出现一个峰值;成熟林生境的含水率变化规律为,随着深度的增加,含水率增加。两种龄林在土深0—10 cm的含水率都是最低的,中龄林生境在40—50 cm处的含水率显著高于50—80 cm处的含水率,这可能由于胡杨根系对水力具有提升作用^[28],造成该土层含水率增加。

中龄林生境在80—90 cm土深处,电导率显著大于其他各层($P<0.05$);成熟林生境的电导率的最大值出现在0—10 cm处($P<0.05$)。中龄林生境在40—90 cm处时,土壤的电导率很高,成熟林靠近0—40 cm处的土层表面的电导率很高。

表7 不同生境中各土层深度土壤含水量和土壤电导率平均值比较

土壤深度 Soil depth/cm	土壤含水量 Soil water content/%		土壤电导率 Soil conductivity/(ms/d)	
	中林龄	成熟林	中林龄	成熟龄林
	Middle age forest	Mature age forest	Middle age forest	Mature age forest
0—10	19.92a	6.75c	549.41a	775.35a
10—20	24.75ab	13.65b	415.00a	515.68b
20—30	26.10abc	21.16a	494.55a	501.15b
30—40	28.57bc	23.30a	503.23a	478.33b
40—50	31.00bc	23.53a	1601.35b	470.00b
50—60	27.18abc	24.45a	1524.18b	454.00b
60—70	24.28ab	25.20a	1632.85b	443.43b
70—80	30.93bc	26.08a	630.00ac	392.43b
80—90	33.48c	26.30a	1792.10b	342.00c
平均值 Mean	27.36	21.16	1015.85	482.04

检验方法为 LSD,同一列不同字母表示显著差异 ($P<0.05$)

3 讨论与结论

3.1 胡杨繁殖根系分布特征

研究表明,杨树根系密度的垂直规律为随深度呈现出递减趋势^[29]。本研究显示,两种林龄细根($d<2$ mm)分布规律呈现为随着深度增加,根长密度和根表面积密度先降低、再略有上升的趋势。叶茂^[30]等在研究塔里木河胡杨根系时发现,前30 cm无细根的分布;杨丽^[31]研究额济纳胡杨林根系得出,细根的根长密度是呈现出指数函数的分布,这些和本研究的结论均一致。亦有研究表明,表层土壤含水能力较差时会引导根系向深处生长来需找水资源^[32]。本试验表明:在40 cm以上的土壤深度处,胡杨细根的根长密度随深度增加略微增加,原因可能是土壤的含水率随深度的增加而呈现出增加趋势(如表7),在极端干旱的环境条件下,根系

为了寻找水源,增加根长密度。

对于两种林龄的细根($d < 2 \text{ mm}$)的根长密度、根表面积对比,中龄林都是显著大于成熟林($P < 0.05$)的(图3),原因为:一方面,可能在于不同林龄生境的土壤环境因素(表7);另一方面,这可能由于植物学特性、林龄的差异所造成。有研究表明,根长密度随林龄的增加而增加^[33],而本试验结果却得到相反的结果,这可能由于中龄林的根系活力比成熟林的根系活力要强,中龄林根系为了扩张更大空间、寻找资源;相对而言,成熟林具有较为稳定的根系空间布局,需要生长更多的吸水根来满足植物的生长和发育。

对于径级 $2 \text{ mm} < d < 5 \text{ mm}$ 的根长密度、根表面积对比,数据显示:成熟林根长密度在 30—40 cm 处,以上指标是显著大于中龄林的,其余各层都是中龄林的以上指标显著大于成熟林的($P < 0.05$)。对于根表面积的对比,只有在 70—80 cm 土层处,中龄林生境和成熟林生境的差异不显著($P < 0.05$),其余各层差异显著。对于径级为 $5 \text{ mm} < d < 20 \text{ mm}$ 的两种林龄的根长密度和根表面积密度对比,成熟林的根长密度在 0—10 cm、30—40 cm、70—80 cm 三层显著大于中龄林的对应指标($P < 0.05$)。成熟林根表面积密度在 0—20 cm、80—90 cm 两层是显著大于中龄林的($P < 0.05$)。对于径级 $d > 20 \text{ mm}$ 的两种林龄的根长密度、根表面积密度对比,成熟林根长密度在 40—50 cm 土层处,显著大于中龄林的对应指标($P < 0.05$),成熟林根表面积密度在 40—60 cm 土层处显著大于中龄林的($P < 0.05$)。由此得到:成熟林的中等粗根($5 \text{ mm} < d < 20 \text{ mm}$)和粗根($20 \text{ mm} < d$)在深层和中浅层分布较多,这与胡杨是一种水平根系很发达的浅根系物种有关^[34]。中等粗根分布在深层土壤是为了运输吸水根从深处吸收的营养物质和水分,粗根在中浅层分布则起到支撑固定和延伸作用,当遇到风沙、干旱等时节,能起到保证物种生存的重要作用。胡杨根系在生长过程受外界环境如水分、营养元素诱导,不断延伸寻找优质斑块,条件适宜时产生大量各种径级的根系来满足不同功能需要,例如有的根系在于固着、适应水分过程,吸收营养物质,有的根系可能更着重于寻觅新的生境、繁殖。

3.2 胡杨繁殖根系的构型特征

3.2.1 两种林龄胡杨根蘖与繁殖根系构型的关系

武逢平^[12]研究胡杨在额济纳绿洲 3 种生境内的根蘖繁殖特性,发现不同生境类型根蘖苗生长情况不一样,曹德昌^[18]研究不同林隙胡杨根蘖的发生特征,发现根蘖的发生与环境因子的相关性不显著,提出了根蘖发生机制的随机性与环境资源异质性的假说。本研究表明,两种林龄繁殖根系产生不定芽,同组对比差异不显著的。两种林龄的一级侧根数,和分枝角度同组对比差异不显著。从根系构型对根蘖影响来看,影响并不显著。不同根系构型上的不定芽的试验数据显示,两种林龄的二级根上萌蘖芽个数是一级根上萌蘖芽个数的 3—4 倍,与林龄无关,而是由生物学特性决定的,可能与根系激素的极性运输有关^[35-36]。

3.2.2 不同林龄胡杨根蘖生长规律分析

基于根观察窗试验发现,两种林龄胡杨在不同深度都有根蘖苗产生,表现为:由自身生物学特性决定的随机性^[11]。两种林龄生境不同深度的根蘖苗生长速率不一样,只有在 20 cm 深度处,中龄林根蘖苗生长速率是大于中龄林生境的,在其他深度处都是成熟林根蘖苗大于中龄林生境的。其中原因一方面可能是由生物学特性决定,即成熟林繁殖能力要强于中龄林;另一方面,亦可能在于克隆植物对资源异质性的分配发生了“趋富特化”,即将相对多的生物量投向吸收丰富资源的器官和部分^[37]。成熟林的胡杨通过克隆根系来为资源相对中龄林比较匮乏的繁殖根系输送营养物质供给根蘖苗生长,以消除这种由于资源异质性所带来的不利条件。

3.2.3 胡杨繁殖根系构型特点

根表面积、根体积、根分枝数、根分形维数,平均分枝角度 5 个参数是分析根系构型的主成分因子。中龄林生境中,根表面积、根分枝数、根分形维数,平均分枝角度 4 个参数是分析根系构型的主成分因子,成熟龄林生境数据结果为:根体积、根分枝数、平均分枝角度。中龄林胡杨根系是通过根表面积来高效率利用营养和水分资源,拓展根系空间分布格局,并造成根分枝数变多、分形维数变大、根系分枝程度和分生能力变强、分枝角度变大、根系侧根趋于水平生长,以增强根的觅食能力^[38]。成为成熟林后,空间结构相对稳定,根系空间格局相对已经成型,根系分形维数就不再是构型参数的主成分因子,根系表面积亦被根系体积所代替。胡杨的生

活史也是靠根系构型阶段性调整来适应周围的生态环境,根系构型参数亦处于阶段性的变化中。

细根在养分和水分吸收^[39]、土壤养分周转^[40]及生态系统生产力等方面发挥着重要作用,且细根能分泌多种物质,包括无机和有机成分,并具有化学他感作用^[41]。根系直径在 1—2 mm 各个径级,对根系表面积和根体积影响极其显著,即细根($d < 2$ mm)的对胡杨繁殖根系构型影响比较显著。细根对根系构型参数解释越强,说明细根对根系构型影响越强。

3.2.4 胡杨繁殖根系分布及构型对土壤的适应机制

两种林龄的含水率对比,中龄林每层都是要大于成熟林的,这可以从两种林龄的根长密度和根表面积密度的对比图看出,中龄林的细根在每层都是要显著大于成熟林($P < 0.05$),表明细根对水分的响应比较敏感。在 0—60 cm 深度,中龄林与成熟林同层含水率对比,中龄林都是要大于成熟林。但是两种林龄的胡杨不同根系构型上萌蘖芽对比差异不显著,两种林龄的分枝角度,一级侧根数同组对比差异不显著($P < 0.05$)。表明在极端环境下,只要是满足生长繁殖的最低条件,胡杨繁殖根系会高效率利用有限资源,来完成繁殖、拓展功能。

4 结论

胡杨根系细根对水分和营养物质的响应比较敏感,在表层能大量分布、占据空间,为繁殖根系的繁育做铺垫。中等粗根($5 \text{ mm} < d < 20 \text{ mm}$)和粗根($d > 20 \text{ mm}$)在深层分布,分别在水平和垂直方向上拓展空间,起到支撑和运输水分营养物质和繁殖的功能。

胡杨繁殖根系产生根蘖,受到水盐阈值的控制,主要还是由生物学特性决定,只要能满足生理的最低要求,胡杨根蘖就可以通过根系构型差异所决定的根系分布来消除极端环境带来的不利条件,并繁衍后代、拓展本物种的分布。

在极端干旱环境下,胡杨细根在其根系功能权衡中扮演着重要角色。在极端干旱区退化的胡杨林内由于地下水位下降,无法生长表层细根、无法形成根蘖。只有当地下水位提高、并满足表层根系生长后,胡杨根蘖才能成功繁殖。

References:

- [1] Zhang X Q, Wu K H, Dieter Murach. A review of methods for fine-root production and turnover of trees. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 875-883.
- [2] Cook R E. Clonal plant populations. *American Scientist*, 1983, 71: 244-253.
- [3] Dong M. Plant Clonal Growth in Heterogeneous Habitats: Risk-spreading. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(6): 543-548.
- [4] McCulley R L, Jobbágy E G, Pockman W T, Jackson R B. Nutrient uptake as a contributing explanation for deep rooting in arid and semi-arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141: 620-628.
- [5] Li X C, Hu S j, Li Y T, Li X M. Study on the root distribution and soil water dynamics under *Phragmites* arid area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(2), 97-101.
- [6] Chambers R M, Meyerson L A, Saltonatall K. Expansion of *Phragmites australis* into tidal wetlands of north America. *Aquatic Botany*, 1999, 64(3/4): 261-273.
- [7] Zeng F J, Guo H F, Liu B, Zeng J, Zhang X L. Response of Ecological Properties of Roots of *Alhagi sparsifolia* SHAP. Seedlings to Different Irrigation Treatments. *Arid Zone Research*, 2009, 26(6), 853-857.
- [8] Zhang D Y. Plant Reproductive Ecology and Life History Evolution. Beijing: SciencePress, 2004
- [9] Liu Z L, Zhu Z Y, Hao D Y. The Study of Oasis Ecosystem Damage and Conservation in the lower Reaches of Black River (Erginar River). *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2001, 15(3): 1-8.
- [10] Wang S J, Chen B H, Li H Q. *Populus euphratica* forest. Beijing: ChinaEnvironmental SciencePress, 1995.
- [11] Gao RH, Dong Z, Zhang H, Li J Q. Study on regeneration process and biodiversity characteristic of *Populus euphratica* community in the Ejina Natural Reserve, Inner Mongolia of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1019-1025.
- [12] Wu F P, Li J Q, Li J W, Cheng C L, Wang X H. The charactertics of root suckers of *Populus euphratica* Oliv. in three habitats of Ejina oasis, 2008, 28(10): 4704-4708.
- [13] HAO P, ZHANG N, LIU Q W, L I J W. The Effects of Water and Soil Types on the Seed Germination and Seedling Survival of *Populus euphratica* in Arid Region in China. *Eurasian J. For. Res*, 2012, 15(1): 9-17.

- [14] Cao D C, LI J W, HUANG ZH Y, Baskin C C, Baskin J M, HAO P, ZHOU W L, Li J Q. Reproductive Characteristics of a *Populus euphratica* Population and Prospects for Its Restoration in China. Plos one, 2012, 7(7), e39121.
- [15] Zhang Y B, Li J W, Zhang H, Li J Q, Wu P, Zhao J. Analysis on the Factors Cause the Failure of *Populus euphratica* Sexual Regeneration in Nature. Science Technology and Engineer, 2005, 5 (8):467-472.
- [16] Zhao W Z, Chang X L, Li Q Y. Artificial water diversion effects of Heihe River on *Populus euphratica* Oliv. desert riparian forests in Ejina. Acta Ecologica Sinia, 2005, 25 (8): 1987-1993.
- [17] Stewart B R, Louise P M. Big old cottonwoods. Canadian Journal of Botan, 2003, 81(7): 764-767.
- [18] Cao D C, Li J W, Chen W Q. Development and growth of root suckers of *Populus euphratica* in different forest gaps in Ejina Oasis. Acta Ecologica Sinia, 2009, 29(4): 1954-1961.
- [19] Lytle D A, Poff N L. Adaptation to natural flow regimes. Trends in Ecology & Evolution, 2004, 19 (2): 94-100.
- [20] Lytle D A, Merritt D M. Hydrologic regimes riparian forests: a structured population model for cottonwood. Ecology, 2004, 85 (9): 2493-2503.
- [21] Rood S B, Bigelow S G, Hall A A. Root architecture of riparian trees: river cut-banks provide natural hydraulic excavation, revealing that cottonwoods are facultative phreatophytes. Trees, 2011, 25: 907-917.
- [22] Li J L, Feng Q, Si J H. Distribution of uptake roots of *Populus euphratica* Oliv in extreme arid region, Arid Land Geography. 2008, 31(1): 98-100.
- [23] Sun H X, Yao Y F. Study on Technology of Diversiform-leaved Poplar Forest Regeneration and Restoration of Ejina Oasis. 2000, 14(5): 70-73.
- [24] Dusserre J, Audebert A, Radanielson A, Chopart J L. Towards a simple generic model for upland rice root length density estimation from root intersections on soil profile, Plant and Soil, 2009, 25: 277-288.
- [25] Vogt K A, Grier C C, Meier G E, Keyes M R. Organic matter and nutrient dynamics in forest floors of young and mature *Abies amabilis* stands in Western Washington, as affected by fine-root input. Ecological Monographs, 1983, 53(2): 139-157.
- [26] Van Praag H J, Sougnez-Remy S, Weissen F, et al. Root turnover in a beech and a spruce stand of the Belgian Ardennes. Plant and Soil, 1988, 105: 87-103.
- [27] Pregitzer K S, DeForest J L, Burton A J, Allen M F, Ruess R W, Hendrick R L. Fine root architecture of nine North American trees. Ecological Monographs, 2002, 72: 293-309.
- [28] Hao X P, Chen Y N, Li W H, Guo B, Zhao R F. Evidence and ecological effects of hydraulic lift in *Populus euphratica*. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(6): 1125-1131.
- [29] Douglas G B, McIvor I R, Potter J F, Foote L G. Root distribution of poplar at varying densities on pastoral hill country. Plant and Soil, 2010, 333: 147-161.
- [30] Ye M, Xu, H L, Wang X F, Shen R X. Spatial Distribution Characteristics of Root System of *Populus euphratica* in the Algan Transection of the Lower Tarim River. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(4): 0801-0807.
- [31] Yang L, Zhang Q L, Chang J B. Spatial distribution characteristics of roots of *populus euphratica*. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2006, 27(1): 15-17.
- [32] Bakker M R, Augusto L, Achat D L. Fine root distribution of trees and understory in mature stands of maritime pine (*Pinus pinaster*) on dry and humid sites. Plant and Soil, 2006, 286: 37-51.
- [33] Wang S W, Pan C D. Root system spatial distribution of different aged *Armeniaca vulgaris* cv. Luntaibaixing in arid oasis under irrigation. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(9): 2353-2360.
- [34] Wang Y B, Nurbay Abdusalih, Niels Thevs. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(12): 1937-1941.
- [35] Mc Steen P, Leyser O. Shoot branching. Annu. Rev. Plant Biol, 2005, 56: 353-374.
- [36] Palme K, Gälweiler L. PIN-pointing the molecular basis of auxin transport. Current Opinion in Plant Biology, 1999, 2(5): 339-425.
- [37] Chen J S, Dong M, Yu Dan, Liu Q. Intracolonial spatial division of labour in two stoloniferous plants with different branching type in response to reciprocal patchiness of resources. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 920-924.
- [38] Dong M. Clonal growth in plants in relation to resource heterogeneity: foraging behavior. Acta Botanica Sinica, 1996, 38(10): 828-835.
- [39] Cronan C S. Belowground biomass, production, and carbon cycling in mature Norway spruce, Maine, U. S. A. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(2): 339-350.
- [40] Bakker M R, George E, Turpault M P, Zhang J L, Zeller B. Impact of Douglas-fir and Scots pine seedlings on plagioclase weathering under acidic conditions. Plant and Soil, 2004, 266: 247-259.
- [41] Smith W H. Character and significance of forest tree root exudates. Ecology, 1976, 57: 324-331.

参考文献:

- [1] 张小全, 吴可红, Dieter Murach. 树木细根生产与周转研究方法评述. 生态学报, 2000, 20(5): 875-883.

- [3] 董 鸣. 异质性生境中的植物克隆生长: 风险分摊. 植物生态学报, 1996, 20(6): 543-548.
- [5] 李修仓, 胡顺军, 李岳坦, 李雪梅. 干旱区旱生芦苇根系分布及土壤水分动态. 草业学报, 2008, 17(2): 97-101.
- [7] 曾凡江, 郭海峰, 刘 波, 曾 杰, 张晓蕾. 疏叶骆驼刺幼苗根系生态学特性对水分处理的响应. 干旱区研究, 2009, 26(6): 853-857.
- [8] 张大勇. 植物生活史进化与繁殖生态学. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] 王世绩, 陈炳浩, 李护群. 胡杨林. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [10] 刘钟龄, 朱宗元, 郝敦元. 黑河(额济纳河)下游绿洲生态系统受损与生态保育对策的思考. 干旱区资源与环境, 2001, 15(3): 1-8.
- [11] 高润宏, 董智, 张昊, 李俊清. 额济纳绿洲胡杨林更新及群落生物多样性动态. 生态学报, 2005, 25(5): 1019-1025.
- [12] 武逢平, 李俊清, 李景文, 程春龙, 王旭航. 胡杨(*Populus euphratica*)在额济纳绿洲三种生境内的根蘖繁殖特性. 生态学报, 2008, 28(10): 4703-4709.
- [15] 张玉波, 李景文, 张昊, 李俊清, 乌平, 赵健. 额济纳胡杨有性繁殖失败因素分析. 科学技术与工程, 2005, 5(8): 467-472.
- [16] 赵文智, 常学礼, 李秋艳. 人工调水对额济纳胡杨荒漠河岸林繁殖的影响. 生态学报, 2005, 25(8): 1987-1993.
- [18] 曹德昌, 李景文, 陈维强, 彭程, 李俊清. 额济纳绿洲不同林隙胡杨根蘖的发生特征. 生态学报, 2009, 29(4): 1954-1961.
- [22] 李建林, 冯 起, 司建华. 极端干旱区胡杨吸水根系的分布与模拟研究. 干旱区研究, 2008, 31(1): 98-100.
- [23] 孙洪祥, 姚云峰. 额济纳绿洲胡杨林更新复壮技术研究. 干旱区资源与环境, 2000, (Z1): 70-73.
- [28] 郝兴明, 陈亚宁, 李卫红, 郭斌, 赵锐锋. 胡杨根系水力提升作用的证据及其生态学意义. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1125-1131.
- [30] 叶茂, 徐海量, 王晓峰, 申瑞新. 塔里木河下游阿拉干断面胡杨根系空间分布规律研究. 西北植物学报, 2011, 31(4): 0801-0807.
- [31] 杨 丽, 张秋良, 常金宝. 胡杨树根系空间分布特性. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2006, 27(1): 15-17.
- [33] 王世伟, 潘存德. 干旱区绿洲灌溉条件下不同树龄轮台白杏根系空间分布. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2353-2360.
- [34] 王永斌, 努尔巴依·阿布都沙力克, Niels Thevs. 胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)根繁殖特征. 生态学杂志, 2007, 26(12): 1937-1941.
- [37] 陈劲松, 董鸣, 于丹, 刘庆. 资源交互斑块性生境中两种不同分枝型匍匐茎植物的克隆内分工. 生态学报, 2004, 24(5): 920-924.
- [38] 董鸣. 资源异质性环境中的植物克隆生长: 觅食行为. 植物学报, 1996, 38(10): 828-835.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 14 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

A review of the researches on *Alectoris* partridge SONG Sen, LIU Naifa (4215)

Autecology & Fundamentals

Effects of precipitation and nitrogen addition on photosynthetically eco-physiological characteristics and biomass of four tree seedlings in Gutian Mountain, Zhejiang Province, China YAN Hui, WU Qian, DING Jia, et al (4226)

Effects of low temperature stress on physiological-biochemical indexes and photosynthetic characteristics of seedlings of four plant species SHAO Yiruo, XU Jianxin, XUE Li, et al (4237)

Decomposition characteristics of maize roots derived from different nitrogen fertilization fields under laboratory soil incubation conditions CAI Miao, DONG Yanjie, LI Baijun, et al (4248)

The responses of leaf osmoregulation substance and protective enzyme activity of different peanut cultivars to non-sufficient irrigation ZHANG Zhimeng, SONG Wenwu, DING Hong, et al (4257)

Interannual variation of soil seed bank in *Picea schrenkiana* forest in the central part of the Tianshan Mountains LI Huadong, PAN Cunde, WANG Bing, et al (4266)

Physiological & ecological effects of companion-planted grow seedlings of two crops in the same hole LI Lingli, GUO Hongxia, HUANG Genghua, et al (4278)

Effects of magnesium, manganese, activated carbon and lime and their interactions on cadmium uptake by wheat ZHOU Xiangyu, FENG Wenqiang, QIN Yusheng, et al (4289)

Effects of increased concentrations of gas CO₂ on mineral ion uptake, transportation and distribution in *Phyllostachys edulis* ZHUANG Minghao, CHEN Shuanglin, LI Yingchun, et al (4297)

Effects of pH, Fe and Cd concentrations on the Fe and Cd adsorption in the rhizosphere and on the root surfaces of rice LIU Danqing, CHEN Xue, YANG Yazhou, et al (4306)

Effects of low-light stress on maize ear development and endogenous hormones content of two maize hybrids (*Zea mays* L.) with different shade-tolerance ZHOU Weixia, LI Chaohai, LIU Tianxue, et al (4315)

Effects of maize || peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize JIAO Nianyuan, NING Tangyuan, YANG Mengke, et al (4324)

Cloning root system distribution and architecture of different forest age *Populus euphratica* in Ejina Oasis HUANG Jingjing, JING Jialin, CAO Dechang, et al (4331)

Impact of vegetation interannual variability on evapotranspiration CHEN Hao, ZENG Xiaodong (4343)

Mating behavior of *Pachycrepoides vindemmiae* and the effects of male mating times on the production of females SUN Fang, CHEN Zhongzheng, DUAN Bisheng, et al (4354)

Component analysis and bioactivity determination of fecal extract of *Locusta migratoria tibetensis* (Chen) WANG Haijian, LI Yili, LI Qing, et al (4361)

Effects of different rice varieties on larval development, survival, adult reproduction, and flight capacity of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) LI Xia, XU Xiuxiu, HAN Lanzhi, et al (4370)

Population, Community and Ecosystem

Genetic structure of the overwintering Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Guenée) collections in Shandong of China based on *mtCOII* gene sequences LI Lili, YU Yi, GUO Dong, TAO Yunli, et al (4377)

The structure and diversity of insect community in Taihu Wetland HAN Zhengwei, MA Ling, CAO Chuanwang, et al (4387)

Annual variation pattern of phytoplankton community at the downstream of Xijiang River WANG Chao, LAI Zini, LI Xinhui, et al (4398)

Effect of species dispersal and environmental factors on species assemblages in grassland communities WANG Dan, WANG Xiao'an, GUO Hua, et al (4409)

- Cyanobacteria diversity in biological soil crusts from different erosion regions on the Loess Plateau: a preliminary result YANG Lina, ZHAO Yunge, MING Jiao, et al (4416)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Zoning for regulating of construction land based on landscape security pattern WANG Siyi, OU Minghao (4425)
- Fragmentation process of wetlands landscape in the middle reaches of the Heihe River and its driving forces analysis ZHAO Ruifeng, JIANG Penghui, ZHAO Haili, et al (4436)
- Analysis on grassland degradation in Qinghai Lake Basin during 2000—2010 LUO Chengfeng, XU Changjun, YOU Haoyan, et al (4450)
- Research on soil erosion based on Location-weighted landscape index (LWLI) in Guanchuanhe River basin, Dingxi, Gansu Province LI Haifang, WEI Wei, CHEN Jin, et al (4460)
- Effects of host density on parasitoids and hyper-parasitoids of cereal aphids in different agricultural landscapes GUAN Xiaoqing, LIU Junhe, ZHAO Zihua (4468)
- Effects of interactive CO₂ concentration and precipitation on growth characteristics of *Stipa breviflora* SHI Yaohui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (4478)
- Resource and Industrial Ecology**
- Eco-service efficiency assessment method of urban land use: a case study of Changzhou City, China YANG Wenrui, LI Feng, WANG Rusong, et al (4486)
- Changes in phosphorus consumption and its environmental loads from food by residents in Xiamen City WANG Huina, ZHAO Xiaofeng, TANG Lina, et al (4495)
- Research Notes**
- Intercropping enhances the farmland ecosystem services SU Benying, CHEN Shengbin, LI Yonggeng, et al (4505)
- Assessment indicator system of eco-industry in mining area WANG Guangcheng, WANG Huanhuan, TAN Lingling (4515)

《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 骆世明

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 14 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 14 (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