

# 额济纳绿洲胡杨 (*Populus euphratica*) 酚类物质含量 和分布及其与土壤水分的关系

程春龙, 刘 松, 廖容苏, 武逢平, 李俊清\*

(北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**采用分光光度法测定了额济纳绿洲胡杨(*Populus euphratica*)的披针形叶、卵圆形叶、嫩枝、枝( $D < 5$  mm)、枝(5 ~ 10 mm)、主干树皮、根( $D < 2$  mm)、根(2 ~ 5 mm)和根(5 ~ 10 mm)9类器官中的总酚、黄酮和缩合单宁含量。结果表明,总酚含量较高的器官为皮(27.93 mg/g),叶、根、枝中总酚含量分别为17.64 mg/g(两类叶均值)、16.72 mg/g(三类根均值)、12.19 mg/g(三类枝均值);黄酮含量较高的器官为皮(51.30 mg/g),叶、根、枝中黄酮含量分别为28.45 mg/g(两类叶均值)、39.99 mg/g(三类根均值)、23.67 mg/g(三类枝均值);根中缩合单宁含量较高,三类根均值为22.10 mg/g,皮、叶、枝中缩合单宁含量分别为8.41 mg/g、4.03 mg/g(两类叶均值)、4.47 mg/g(三类枝均值)。披针形叶和卵圆形叶中酚类物质含量没有显著性差异( $P > 0.05$ );随着枝不断成熟,嫩枝、枝( $D < 5$  mm)、枝(5 ~ 10 mm)中酚类物质逐渐减少;随着根直径减少,根中缩合单宁逐渐增加,细根( $D < 2$  mm)中的缩合单宁含量最高(25.95 mg/g)。分析胡杨各器官中酚类物质含量与土壤水分的关系,结果表明卵圆形叶中酚类物质含量与土壤水分含量成显著负相关关系( $P < 0.05$ ,总酚: $r = -0.949$ ;黄酮: $r = -0.923$ ;缩合单宁: $r = -0.944$ )。研究揭示了极端干旱地区胡杨各器官中酚类物质的变化规律,及其与环境因子的相互作用关系。

**关键词:**胡杨;多酚;总酚;黄酮;缩合单宁;水分

文章编号:1000-0933(2008)01-0069-07 中图分类号:Q142, Q948, S718.5 文献标识码:A

## Concentration and distribution of phenolic compounds in *Populus euphratica* in Ejina oasis and their correlation with soil water contents

CHENG Chun-Long, LIU Song, LIAO Rong-Su, WU Feng-Ping, LI Jun-Qing\*

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

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 0069 ~ 0075.

**Abstract:** With colorimetric methods, the concentrations of total phenolics, flavonoids and condensed tannins were measured in nine categories of organs within *Populus euphratica*, including lanceolate leaves, ovate leaves, green branches, branches ( $D < 5$  mm in diameter), branches (5 – 10 mm), barks, roots ( $D < 2$  mm in diameter), roots (2 – 5 mm) and roots (5 – 10 mm). The results showed phenolic compounds were present throughout the collected organs with the higher total phenolics concentrations in barks (27.93 mg/g), and the mean total phenolics concentrations in two categories of leaves, roots and branches in three classes were 17.64 mg/g, 16.72 mg/g, and 12.19 mg/g respectively. The higher flavonoids were present in barks (51.30 mg/g), and the mean flavonoids contents in two categories of leaves, roots and

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(3041369);国家科研院所社会公益研究专项资助项目(2005DIB4J141)

**收稿日期:**2006-09-27; **修订日期:**2007-01-19

**作者简介:**程春龙(1982 ~),男,湖南邵阳人,硕士,主要从事保护生物学研究. E-mail: chunlong82@sina.com

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

**Foundation item:** The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30471369) and National Academic Institutional commonweal Research Programs (No. 2005DIB4J141)

**Received date:**2006-09-27; **Accepted date:**2007-01-19

**Biography:** CHENG Chun-Long, Master, mainly engaged in conservation biology. E-mail: chunlong82@sina.com

branches in three classes were 28.45 mg/g, 39.99 mg/g, and 23.67 mg/g respectively. And the higher condense tannins contents were found in roots (mean = 22.10 mg/g for three categories of roots), and the average condense tannins contents in barks, leaves in two categories, and branches in three classes were 8.41 mg/g, 4.03 mg/g, and 4.47 mg/g respectively. There was no significant difference between the phenolic compounds of lanceolate leaves and ovate leaves ( $P > 0.05$ ). Phenolic compounds in branches decreased with the branches maturation and resulted in the orders as follow: green branches > branches ( $D < 5$  mm) > branches (5–10 mm). Condensed tannins in roots decreased with the root diameter, and the highest condensed tannins contents were found in small root ( $D < 2$  mm) (25.95 mg/g). By analyzing correlation between phenolic compounds in all collected organs and soil water contents, the results indicated that the phenolic compounds in ovate leaves had negative relation with soil water contents ( $P < 0.05$ ), and the  $r$  values for total phenolics, flavonoids and condensed tannins were -0.949, -0.923 and -0.944 respectively. Data reported here revealed the variation of phenolics compound in different organs of *P. euphratica*, and their relationships with the environmental factors in extremely arid areas were discussed.

**Key Words:** *Populus euphratica*; phenolic compounds; total phenolics; flavonoids; condensed tannins; water contents

酚类物质是植物体内最普遍存在的次生代谢物质和唯一分子水平上的防御物质<sup>[1]</sup>。多酚(包括简单酚、水解单宁和缩合单宁)和黄酮是两类重要的酚类物质。酚类物质在抵御植物体内和体外不利环境条件所起的重要作用得到了生态学界的充分重视<sup>[2]</sup>。近年研究表明,其不仅是阻止动物取食和病原微生物侵染的基本物质<sup>[3,4]</sup>,而且具有防暑御寒<sup>[5]</sup>、抗紫外辐射<sup>[6]</sup>、清除自由基<sup>[7]</sup>、影响土壤养分循环<sup>[8~10]</sup>等作用。影响酚类物质在植物体内分布的因素可分为生物因素和非生物因素。生物因素包括植物的种类、基因型、植物不同部位和同一部位的不同发育阶段等<sup>[11,12]</sup>;非生物因素即环境因素有营养状况、光照、温度、CO<sub>2</sub>和 O<sub>3</sub>浓度、水分条件和土壤酸碱度等<sup>[13]</sup>。研究和探讨植物中酚类的分布规律及其与植物所处环境条件的关系是化学生态学的重要内容<sup>[14]</sup>,其结果可以为进一步解释植物次生代谢物质在植物-动物、植物-微生物和植物-环境等相互关系中扮演的角色提供基础。

胡杨(*Populus euphratica*)是重要的荒漠河岸林树种,其适应能力极强,耐盐碱、水湿、抗风沙,是一种十分珍贵的林木种质资源。胡杨是一种地下水湿生植物(phreatophyte),其对所处环境水分条件极为敏感<sup>[15,16]</sup>。近年来,由于黑河上游来水量减少,额济纳绿洲地下水位逐年下降,导致胡杨林日趋衰退。前人的研究主要集中于水分对于胡杨生长、更新、种子萌发和扩散及胡杨群落植物多样性的影响等方面<sup>[17~22]</sup>,胡杨次生代谢物质的变化则未见报道,而水分条件的变化如何影响胡杨次生代谢物质的合成和转运,对于揭示胡杨对环境的主动适应过程具有重要的意义。本研究选取额济纳绿洲的胡杨为对象测定其酚类物质的含量,拟解决以下两个问题:(1)胡杨各器官中酚类物质的含量和分布。(2)胡杨酚类物质的分布与环境的相互关系,主要考察水分条件的变化如何影响胡杨酚类物质的合成、运输、和储存。

## 1 研究地概况

额济纳绿洲位于内蒙古西北部,沿黑河下游分布有我国第二大荒漠河岸胡杨林。关于该地区的气候和植被状况已有报道<sup>[8]</sup>。采样地点位于额济纳达来呼布镇以东 20km 七道桥附近的胡杨林中,该林分 1974 年被被封育,是额济纳胡杨林国家级自然保护区的核心地区。

## 2 研究方法

### 2.1 采样

采样于 2006 年 7 月进行,在样地选取 5 棵(编号 No.1 ~ No.5)胸径 16cm 左右( $BHD = (16 \pm 2)$  cm)的胡杨作为采集对象。分别采集胡杨的叶、枝、皮和根。在高度 1.3m 左右剥取主干树皮,去掉干枯树皮。叶片采集向阳叶,根据胡杨叶形的不同,将胡杨的叶分为披针形叶(成年胡杨树下部的萌条叶)和卵圆形叶(成年胡杨的主要树叶叶形)。分别采集嫩枝(即绿色的枝,green branch)和木质化枝。根据木质化枝和根直径的不

同,采集  $D < 5\text{mm}$  和  $5\text{mm} < D < 10\text{mm}$  的枝及  $D < 2\text{mm}$ 、 $2\text{mm} < D < 5\text{mm}$ 、 $5\text{mm} < D < 10\text{mm}$  的根。合计采集样品 45 个,每个样品采集大约 100g 左右,带回实验室室温下阴干( $25^{\circ}\text{C}$  左右),然后剪碎混合均匀,粉碎过 40 目筛,冰箱冷藏保存备用( $1^{\circ}\text{C}$ )。

根主要取自胡杨周围深度为 20 ~ 80cm 土壤中,在取根的同时,测定所取根周围土壤的水分含量。分别在 30cm、60cm 土壤层用铝盒取 3 个平行土样作为根系土壤含水量分析对象。每棵胡杨采集根系土样 6 个,其平均值作为土壤水分含量数据,合计采集 30 个土样。铝盒土样用便携式电子天平快速称重,记录后带回住地  $105^{\circ}\text{C}$  烘箱干燥 12h 后称重。土壤含水量  $\theta_m = (M_w - M_s) / M_s \times 100\%$ , 式中  $\theta_m$  为土壤含水量; $M_w$  为土样湿重; $M_s$  为土样干重。将同一棵胡杨两个土层水分含量的平均值作为该胡杨根系土壤水分含量。

## 2.2 样品提取和测定

准确称取 2.00g 样品,分别加 40、30、20ml 丙酮水溶液(丙酮:水 = 4:6)回流提取 3 次,每次 1h。正交实验表明该方法能最大限度提取胡杨中的酚类物质。虽然一部分酚类物质未能完全提取出来,该方法适合应用于比较不同样品中的含量<sup>[23]</sup>。将 3 次提取液抽滤合并,旋转减压蒸馏掉丙酮后,用蒸馏水定容至 100ml 容量瓶中备测。

总酚采用 Folin-Denis 法(F-D 法)测定<sup>[24]</sup>,标准曲线以没食子酸(Gallic acid)为标准物(澳海精细化学试剂公司,中国浙江);黄酮采用  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3\text{-NaNO}_2$  法测定<sup>[25]</sup>,标准曲线以芦丁(Routine)为标准物(Sigma 公司,美国);缩合单宁采用香草醛盐酸法测定<sup>[26]</sup>,标准曲线以儿茶素(Catechin)为标准物(Sigma 公司,美国)。其具体测定过程照参考文献,略有改变。总酚、黄酮、缩合单宁含量分别以标准物质没食子酸、芦丁、儿茶素的相对含量表示。

## 2.3 数据分析

采用经典的统计方法计算出每棵胡杨根系土壤水分平均值,用 30cm 和 60cm 土层土壤水分的平均值来衡量胡杨土壤水分状况。在方差分析的基础上,利用多重比较的方法(LSD),检验胡杨各器官酚类物质含量平均值的差异。将每棵胡杨土壤水分平均值与对应叶、枝、皮、根的酚类物质含量作 Pearson 相关分析。

## 3 结果

### 3.1 胡杨酚类物质含量和分布

采集的胡杨 No. 1 ~ No. 5 胸径分别为 16.9、16.2、16.9、17.2cm 和 17.5cm, Pearson 相关分析表明胡杨酚类物质含量在这个胸径范围内没有相关性( $P > 0.05$ )。酚类物质在所有采集的胡杨器官中都有分布,总酚含量较高的器官为皮(27.93 mg/g),叶、根、枝中总酚含量分别为 17.64 mg/g(两类叶均值)、16.72mg/g(3 类根均值)、12.19 mg/g(3 类枝均值);黄酮含量较高的器官为皮(51.30 mg/g),叶、根、枝中黄酮含量分别为 28.45 mg/g(两类叶均值)、39.99 mg/g(3 类根均值)、23.67 mg/g(3 类枝均值);缩合单宁含量较高的器官是根(3 类根均值 = 22.10 mg/g),皮、叶、枝中缩合单宁含量分别为 8.41 mg/g、4.03 mg/g(两类叶均值)、4.47 mg/g(三类枝均值)。单因素方差分析表明胡杨不同器官间酚类物质(总酚、黄酮和缩合单宁)含量有显著性差异( $P < 0.001$ )。图 1 为胡杨不同器官中酚类物质含量及多重比较结果。

胡杨细分的叶、枝和根中酚类物质含量分别见图 2、图 3 和图 4。枝中酚类物质含量变化顺序为:嫩枝 > 枝( $D < 5\text{mm}$ ) > 枝(5 ~ 10 mm)。嫩枝和枝(5 ~ 10mm)比较,两者之间总酚和黄酮含量有显著性差异( $P$  值分

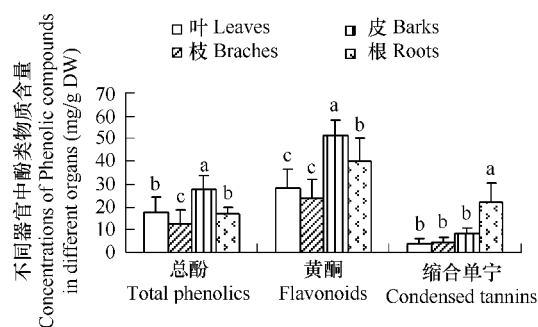


图 1 不同器官中酚类物质含量比较

Fig. 1 Concentrations of phenolic compounds in different organs  
相同字母为同类物质含量差异不显著( $P < 0.05$ , Fisher LSD 检验);下同

Same letters are not significantly different in the concentration of same compound by Fisher's LSD post hoc contrasts ( $P < 0.05$ ); the same below

别为 0.022,0.023);根缩合单宁变化由高到低为:根( $D<2\text{ mm}$ )>根( $2\sim5\text{ mm}$ )>根( $5\sim10\text{ mm}$ )。根( $D<2\text{ mm}$ )和根( $5\sim10\text{ mm}$ )中的缩合单宁有显著性差异( $P=0.020$ )。卵圆形叶与披针形叶的酚类物质含量没有显著性差异( $P>0.05$ )。

3.2 胡杨酚类物质含量与土壤水分的关系

No.1~No.5 胡杨的土壤平均含水量(30cm 与 60cm 土层平均值)分别为 1.81%、10.90%、10.86%、7.76% 和 9.18%,将其与对应叶、枝、皮和根的酚类物质含量作 Pearson 相关分析,结果表明卵圆形叶的酚类物质含量与水分有显著的负相关性( $P<0.05$ ),其回归方程、相关系数和  $P$  值见表 1。

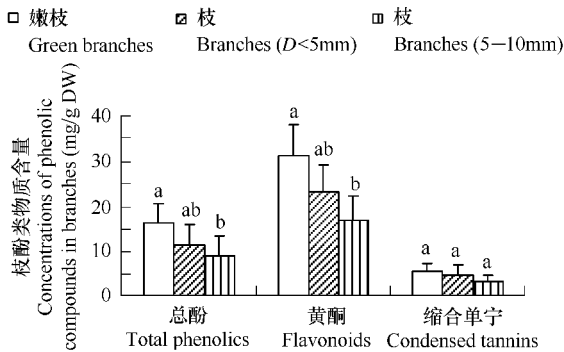


图3 3类枝中酚类物质含量

Fig 3 Concentrations of Phenolic compounds in three categories of branches

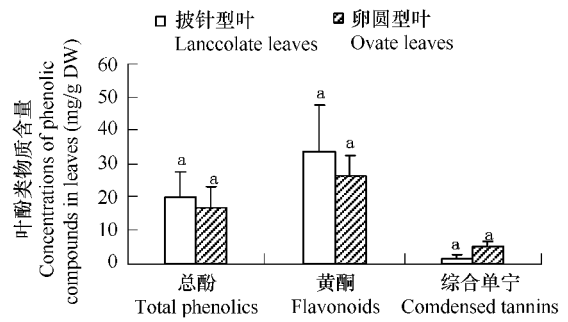


图2 两类叶中酚类物质含量

Fig. 2 Concentrations of Phenolic compounds in two categories of leaves

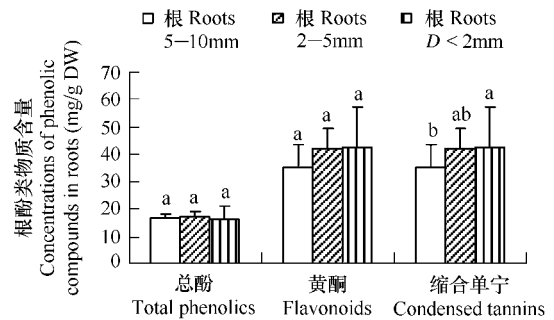


图4 3类根中酚类物质含量

Fig 4 Concentrations of Phenolic compounds in three categories of roots

表1 土壤水分含量与卵圆形叶酚类物质含量的相关关系

Table 1 The correlation between soil water contents and phenolic compounds concentrations (mg/g DW) of ovate leaves

|                        | 回归方程 Regression equation | 相关系数 $r$ | $P$ 值 $P$ -value |
|------------------------|--------------------------|----------|------------------|
| 总酚 Total phenolics     | $y = -1.701x + 30.424$   | -0.949   | 0.014            |
| 黄酮 Flavonoids          | $y = -1.524x + 38.670$   | -0.923   | 0.026            |
| 缩合单宁 Condensed tannins | $y = -0.375x + 8.042$    | -0.944   | 0.016            |

4 讨论

胡杨是一种多叶形的植物,有披针形叶和卵圆形叶两种基本叶形。披针形叶着生于幼树和成年树下部萌条上,卵圆形叶是成年胡杨的主要叶形,随着胡杨的成熟,披针形叶被卵圆形叶取代乃至消失。胡杨叶形变化的原因及不同叶形的功能差异是人们所关注的问题。苏培玺等<sup>[27]</sup>研究表明,卵圆形叶光合效率和水分利用效率比披针形叶高。本研究选取同时具有披针形叶和卵圆形叶的胡杨,测定两种不同叶形的酚类物质含量,其在胡杨叶中含量较高(图2),两类叶中酚类物质的含量没有显著性差异( $P>0.05$ ),表明其跟胡杨叶形没有相关性。胡杨树皮中的总酚和黄酮含量(分别达27.93mg/g和51.30mg/g)是胡杨各器官中最高的,表明胡杨趋向于在表皮器官中(叶和皮)合成和累积较多的酚类物质。Wang等<sup>[25]</sup>研究了兴安落叶松中不同器官中的黄酮含量,结果表明叶中的黄酮含量与太阳辐射强度成正相关性。Rozema等<sup>[6]</sup>也发现,随着环境光照强度的升高,植物体内能吸收紫外光线的多酚等次生代谢物质的含量也逐渐增加。胡杨叶和皮中相对较高的酚类

物质对于其抵御强烈的紫外辐射,减少高温伤害,维持胡杨体内正常的生理活动具有重要的意义。

植物体内酚类次生代谢物质含量受到周围环境因素的强烈影响。在强酸、贫瘠的土壤条件下,植物体内及其枯枝落叶常含有很高的多酚类物质<sup>[28,29]</sup>。水分是极端干旱区最重要的限制性因子,我们研究了我国西北极端干旱区胡杨酚类次生代谢物质与土壤水分的关系,结果表明卵圆形叶中酚类物质含量跟土壤水分含量有显著的负相关性(表1)。酚类物质分子中芳环是疏水部分,但由于带有大量的亲水的酚羟基或其他亲水基团,使整个分子显示较强的亲水性<sup>[30]</sup>,表明酚类次生物质可能具有保水的功能,能够降低叶片的水分蒸腾作用,减少水分散失,初步证明了胡杨能够合成和调节体内酚类次生代谢物质的含量以适应土壤水分条件的变化。

相对成熟的卵圆形叶与未成熟的披针形的酚类物质含量没有显著性差异,而随着枝的生长和不断成熟,其酚类物质含量逐渐减少,总酚、黄酮和缩合单宁含量的变化规律都为:嫩枝 > 枝( $D < 5\text{mm}$ ) > 枝( $5 \sim 10\text{mm}$ ),而且嫩枝和枝( $5 \sim 10\text{mm}$ )之间的总酚、黄酮含量有显著性差异(总酚: $P = 0.022$ ;黄酮: $P = 0.023$ )。叶和枝的酚类物质变化不同的原因可能是叶和枝所处的微环境的差异,叶直接暴露于高温和紫外辐射下,受到更强烈的环境胁迫,无论是卵圆形叶还是披针形叶必须累积较多的酚类物质以抵御不利的环境条件,而枝受到的环境压力相对较少。枝在逐渐成熟过程中酚类物质减少可能有两途径:(1)转运,即木质化程度较高的枝向木质化程度较低的枝转运,维持嫩枝中较高的酚类物质含量。(2)转化,酚类物质是木质素的前体物质<sup>[31]</sup>,枝的木质化过程中,一部分酚类物质转化为木质素。本研究表明酚类物质在植物体内转运和转化相当频繁和活跃,而且受到光照、温度等环境因素的强烈影响。

植物的地下部分是植物生物量的重要组成部分,尤其在干旱荒漠地区植物根系生物量占整株植物的生物量的比例更高。然而,以往的研究中还未见到有对胡杨根系次生代谢物质含量的报道。我们的研究表明,胡杨的根中含有较高的酚类物质,特别是平均缩合单宁含量达  $22.10\text{mg/g}$ ,高于地上部分器官的缩合单宁含量,而且随着根直径的增加,缩合单宁含量逐渐减少,两者成负相关性(图2)。缩合单宁是酚类物质中阻止微生物取食和侵染的主要物质<sup>[3]</sup>,其含量随胡杨根系直径的减少而增加,表明细根受到更大的取食压力,缩合单宁的增加减少了细根被取食的可能性,可能对维持细根发挥正常的生理作用产生积极作用。胡杨根系较高的酚类物质含量会导致其在土壤中维持较高水平,加之叶、枝等凋落物含有的酚类物质,胡杨根系土壤中酚类物质是相当可观的,必然对胡杨林生态系统养分循环起着重要作用。通常认为,根系和凋落物中较高的酚类物质含量会降低凋落物分解<sup>[32~34]</sup>,多酚中的单宁能够与蛋白质结合,形成难以降解的单宁-蛋白质聚合物,从而降低土壤中N的循环速率,可能会导致生态系统养分循环受到N的限制。由此可见,大量酚类物质进入胡杨林下土壤,可能会导致其养分循环速率降低。然而,养分循环速率的降低对胡杨林生态系统的利弊如何,还未有定论。Palm<sup>[8]</sup>认为低质量的有机物(N含量低,单宁和木质素含量高)输入生态系统中,降低了营养元素释放甚至固定它们,使得养分释放和植物的需求可能达到一种动态平衡,有利于植物的生长。可溶性有机氮素假说(DON hypothesis)<sup>[9,10]</sup>也认为凋落物中较多的酚类物质虽然限制了N矿质化,但是促进了更多的DON的释放,导致“DON:矿质N”比例增加。较高的“DON:矿质N”比例会减少整个生态系统中N的损失,缩短微生物参与的矿质化周期,从而有利于植物利用有机N。进而推测处于贫瘠环境条件下的植物合成较多的酚类物质可能是为了控制N循环,导致植物以有机态的形式吸收利用环境中有限的N。胡杨生长在极端干旱环境下,其合成较高含量的酚类物质是否是对其干旱贫瘠的土壤条件主动适应,其具体的适应机制如何,有待进一步的研究。

## 5 结论

胡杨受到外界环境的各种选择性压力,导致酚类次生代谢物质在胡杨不同器官中含量不同,反映了环境因素对胡杨合成次生代谢物质的影响。(1)胡杨各器官中总酚含量变化规律为:皮 > 叶 > 根 > 枝;黄酮含量为:皮 > 根 > 叶 > 枝;缩合单宁含量为:根 > 皮 > 枝 > 叶。表明胡杨在表皮部位累积较多的酚类物质。(2)胡杨披针形叶与卵圆形叶之间酚类物质含量没有显著性差异( $P > 0.05$ );而胡杨的枝在成熟过程中酚类物质含

量明显减少,表现为枝中酚类物质含量嫩枝 > 枝 ( $D < 5\text{mm}$ ) > 枝 ( $5 \sim 10\text{mm}$ ),其中嫩枝和枝 ( $5 \sim 10\text{mm}$ ) 的总酚、黄酮含量有显著性差异 ( $P$  值分别为 0.022, 0.023)。(3) 根中含有较高的酚类物质,尤其是缩合单宁含量在各器官中含量最高,且缩合单宁含量随着根直径的增加而下降,表明细根受到更大的取食压力。(4) 卵圆形叶中酚类物质的含量随根系土壤水分含量的增加而减少,两者有显著的负相关性(总酚:  $r = -0.949$ ; 黄酮:  $r = -0.923$ ; 缩合单宁:  $r = -0.944$ ),表明卵圆形叶中酚类物质的合成受到水分条件的强烈影响。本研究表明,胡杨通过调节酚类次生代谢物质的体内的合成,转运和转化等过程来抵御极端干旱环境下各种环境因子的胁迫。

#### References:

- [ 1 ] Appel H M. Phenolics in ecological interaction. J. Chem. Ecol., 1993, 19:1521—1551.
- [ 2 ] Cheng C L, Li J Q. Research advance in ecological significance and quantification of plant polyphenols. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(12):2457—2460.
- [ 3 ] Muir A D, Gruber M Y, Hinks C F, *et al.* Effect of condensed tannins in the diets of major crop insects. In: Gross G G ed. Plant Polyphenols 2. Chemistry, Biology, Pharmacology, Ecology. New York: Kluwer Academic Publishers, 1999. 867—881.
- [ 4 ] Myster R W. Foliar pathogen and insect herbivore effects on two landslide tree in Puerto Rico. Forest Ecology and Management, 2002, 169:231—242.
- [ 5 ] Chang Z Y, Zhang M L. Anatomical structures of young stems and leaves of some *Caragana* species with their ecological adaptabilities. Bull. Bot. Res., 1997, 17(1):66—71.
- [ 6 ] Rozema J, Chardonnetts A, Tosserams M, *et al.* Leaf thickness and UV-B absorbing pigments of plants in relation to an elevational gradient along the Blue Mountains, Jamaica. Plant Ecol., 1997, 128:151—159.
- [ 7 ] Salah N, Miller N J, Paganga G, *et al.* Polyphenolic flavanols as scavengers of aqueous phase radical sandals chain-breaking antioxidants. Arch. Biochem. Biophys., 1995, 322(2):339—346.
- [ 8 ] Palm C A. Contribution of agroforestry trees to nutrient requirements in intercropped plants. Agroforestry Systems, 1995, 30: 105—124.
- [ 9 ] Northup R R, Dahlgren R A, McColl, J G. Polyphenols as regulators of plant-litter-soil interaction in northern California pygmy forest: a positive feedback? Biogeochemistry, 1998, 42:189—220.
- [ 10 ] Northup R R, Zeng S Y, Daligren R A, *et al.* Polyphenols control of nitrogen release from pine litter. Nature, 1995, 377: 227—229.
- [ 11 ] Covelo F, Gallardo A. Temporal variation in total leaf phenolics concentration of *Quercus robur* in forested and harvested stands in northwestern Spain. Can. J. Bot., 2001, 79: 1262—1269.
- [ 12 ] Riipi M, Ossipov V, Lempa K, *et al.* Seasonal changes in birch leaf chemistry: are there trade-offs between leaf growth and accumulation of phenolics? Oecologia, 2002, 130: 380—390.
- [ 13 ] Chaves N, Escuder J C. Variation of flavonoid synthesis induced by ecological factors. In: Inderjit D ed. Principles and Practices in Plant Ecology: Allelochemical Interactions. Boca Raton: CRC Press, 1999. 267—285.
- [ 14 ] Hattenshwiler S, Vitousek P M. The role of polyphenols in terrestrial ecosystem nutrient cycling. Tree, 2000, 15(6):238—243.
- [ 15 ] Brignolas F, Thierry C, Guerrier G, *et al.* Compared water deficit response of two *Populus × euramericana* clones, Luisa Avanzo and Dorskamp. Annals of Forest Science, 2000, 57: 261—266.
- [ 16 ] Chen S L, Wang S S, Altman A, *et al.* Genotypic variation in drought tolerance of poplar in relation to abscisic acid. Tree Physiology, 1997, 17: 797—803.
- [ 17 ] Gao R H, Dong Z, Zhang H, *et al.* 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.
- [ 18 ] Gao R R, Huang P Y, Zhao R H. Studies on seed germination and adaptability mechanism of *Populus euphratica* seedling. Journal of Huabei Coal industry Teachers College, 2004, 25(3):47—50.
- [ 19 ] Horton J L, Kolb K, Tekharts C. Responses of riparian trees to interannual variation in ground water depth in a semi-arid river basin. Plant, Cell and Environment, 2001, 24: 293—340.
- [ 20 ] Zhang Y B, Li J W, Zhang H, *et al.* Spatiotemporal patterns of seed dispersal in *Populus euphratica*. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8):1994—2000.
- [ 21 ] 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 Sinica, 2005, 25(8):1987—1993.

- [22] Zhong H P, Liu H, Wang Y, Tuo Y, *et al.* Relationship between Ejina oasis and water resources in the lower Heihe River basin. *Advances in Water Science*, 2002, 13(2):223—228.
- [23] Cork S J, Krockenberger A K. Methods and pitfall of extracting condensed tannins and other phenolics from plants: insight from investigations on eucalyptus leaves. *J. Chem. Ecol.*, 1991, 17:165—179.
- [24] AOAC. Official Methods of Analysis, 15th ed. In: Association of Official Analytical Chemists. Washington, D. C., USA, 1990.
- [25] Wang W J, Li X Y, Zu Y G. Dynamic feature of flavonoids content in different organs of larch (*Larix gmelinii*). *Journal of Forestry Research*, 2005, 16(2): 89—92.
- [26] Price M L, Van S S, Butler L G, A critical evaluation of the vanillin reaction as an assay for tannin in sorghum. *J. Agric. Food Chem.*, 1978, 26:1214—1218.
- [27] Su P X, Zhang L X, Du M W, *et al.* Photosynthetic character and water use effect of different leave shapes of *Populus euphratica* and their response to CO<sub>2</sub> enrichment. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(1): 34—40.
- [28] Bruijnzeel L A, Waterloo M J, Proctor J, *et al.* Hydrological observations in montane rain forests on Gunung Silam, Sabah, Malaysia, with special reference to the Massenerhebung effect. *J. Ecol.*, 1993, 81: 145—167.
- [29] Kapos V, Tanner E V J. Water relations of Jamaican upper montane rain forest trees. *Ecology*, 1985, 66: 241—25.
- [30] Song L J, Di Y, Shi B. The significance and development trend in research of plant polyphenols. *Progress in Chemistry*, 2000, 12(2):161—170.
- [31] Stafford H A, Flavonoid evolution: an enzymic approach. *Plant Physiology*, 1991, 96:680—685
- [32] Campbell I C, Fuchshuber L. Polyphenols, condensed tannins, and processing rates of tropical and temperate leaves in an Australian stream. *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 1995, 14:174—182.
- [33] Constantinides M, Fownes J H. Nitrogen mineralization from leaves and litters of tropical plants — relationship to nitrogen, lignin and soluble polyphenol concentrations. *Soil Bio. l Biochem.*, 1994, 26: 49—55.
- [34] Driebe E M, Whitham T G. Cottonwood hybridization affects tannin and nitrogen content of leaf litter and alters decomposition. *Oecologia*, 2000, 123:99—107.

#### 参考文献:

- [2] 程春龙,李俊清.植物多酚的定量分析方法和生态作用研究进展. *应用生态学报*,2006, 17(12): 2457~2460.
- [17] 高润宏,董智,张昊,等. 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.
- [18] 高瑞如,黄培佑,赵瑞华. 胡杨种子萌发及幼苗生长适应机制研究. *淮北煤炭师范学院学报*, 2004, 25(3):47~50.
- [20] 张玉波,李景文,张昊,等. 胡杨种子散布的时空分布格局. *生态学报*, 2005, 25(8):1987~1993.
- [21] 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.
- [22] 钟华平,刘恒,王义,托娅,等. 黑河流域下游额济纳绿洲与水资源的关系. *水科学进展*, 2002,13(2):223~228.
- [27] 苏培玺,张立新,杜明武,等. 胡杨不同叶形光合特性、水分利用效率及其对加富 CO<sub>2</sub> 的响应. *植物生态学报*,2003, 27(1):34~40.
- [30] 宋立江,狄莹,石碧. 植物多酚研究与利用的意义及发展趋势. *化学进展*,2000, 12(2):161~170.