

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第33卷 第5期 Vol.33 No.5 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 (SHENTAI XUEBAO)

第33卷 第5期 2013年3月 (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制 ..... 王晶苑, 张心昱, 温学发, 等 (1337)  
工业大麻对重金属污染土壤的治理研究进展 ..... 梁淑敏, 许艳萍, 陈 裕, 等 (1347)  
最佳管理措施评估方法研究进展 ..... 孟凡德, 耿润哲, 欧 洋, 等 (1357)  
灌木年轮学研究进展 ..... 芦晓明, 梁尔源 (1367)

### 个体与基础生态

- 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局 ..... 王艳兵, 德永军, 熊 伟, 等 (1375)  
土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响 ..... 裴 斌, 张光灿, 张淑勇, 等 (1386)  
湖北石首麋鹿昼间活动时间分配 ..... 杨道德, 李竹云, 李鹏飞, 等 (1397)  
三种杀虫剂亚致死浓度对川硬皮肿腿蜂繁殖和搜寻行为的影响 ..... 杨 桦, 杨 伟, 杨春平, 等 (1405)

### 种群、群落和生态系统

- 三沙湾浮游动物生态类群演替特征 ..... 徐佳奕, 徐兆礼 (1413)  
滇西北高原纳帕海湿地湖滨带优势植物生物量及其凋落物分解 ..... 郭绪虎, 肖德荣, 田 昆, 等 (1425)  
安徽新安江干流滩涂湿地草本植物区系及物种多样性 ..... 杨文斌, 刘 坤, 周守标 (1433)  
湿地芦苇根结合好气细菌群落时空分布及其与水质因子的关系 ..... 熊 薇, 郭逍宇, 赵 霖 (1443)  
三种温带树种叶片呼吸的时间动态及其影响因子 ..... 王兆国, 王传宽 (1456)  
不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应 ..... 周 洁, 张志强, 孙 阁, 等 (1465)  
不同生态区域沙地建群种油蒿的钙组分特征 ..... 薛苹苹, 高玉葆, 何兴东 (1475)  
藏北高寒草甸植物群落对土壤线虫群落功能结构的影响 ..... 薛会英, 胡 锋, 罗大庆 (1482)  
铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征 ..... 朱永恒, 沈 非, 余 健, 等 (1495)  
环丙沙星对土壤微生物量碳和土壤微生物群落碳代谢多样性的影响 ..... 马 驿, 彭金菊, 王 芸, 等 (1506)  
基于生态水位约束的下辽河平原地下水生态需水量估算 ..... 孙才志, 高 翳, 朱正如 (1513)

### 景观、区域和全球生态

- 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案 ..... 苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治, 等 (1524)  
不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响 ..... 李建兴, 何丙辉, 谌 芸 (1535)  
京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究 ..... 孟 丹, 王明玉, 李小娟, 等 (1545)  
窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素 ..... 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 等 (1559)  
模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与 C、N、P 分配格局 ..... 李明月, 王 健, 王振兴, 等 (1569)  
铁炉渣施加对稻田甲烷产生、氧化与排放的影响 ..... 王维奇, 李鹏飞, 曾从盛, 等 (1578)

### 资源与产业生态

- 食用黑粉菌侵染对茭白植株抗氧化系统和叶绿素荧光的影响 ..... 闫 宁, 王晓清, 王志丹, 等 (1584)

- 佛手低温胁迫相关基因的差异表达 ..... 陈文荣,叶杰君,李永强,等 (1594)  
美洲棘薺马对不同蔬菜寄主的偏好性 ..... 朱亮,石宝才,官亚军,等 (1607)  
茉莉酸对棉花单宁含量和抗虫相关酶活性的诱导效应 ..... 杨世勇,王蒙蒙,谢建春 (1615)  
造纸废水灌溉对毛白杨苗木生长及养分状况的影响 ..... 王烨,席本野,崔向东,等 (1626)  
基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率 ..... 赵晨,王远,谷学明,等 (1636)

### 研究简报

- 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征 ..... 周彬,韩海荣,康峰峰,等 (1645)  
基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析 ..... 贾宝全 (1654)  
薇甘菊萎焉病毒感染对薇甘菊光合特性和 4 种酶活性的影响 ..... 王瑞龙,潘婉文,杨娇瑜,等 (1667)  
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 \* 338 \* zh \* P \* ¥ 90.00 \* 1510 \* 34 \* 2013-03



**封面图说:**美丽的油松松枝——油松又称红皮松、短叶松。树高可达 30m,胸径达 1m。其树皮下部灰褐色,裂成不规则鳞块;针叶 2 针一束,暗绿色,较粗硬;球果卵形或卵圆形,长 4—7cm,有短柄,与枝几乎成直角。油松适应性强,根系发达,树姿雄伟,枝叶繁茂,有良好的保持水土和美化环境的功能,是中国北方广大地区最主要的造林树种之一,在华北地区无论是山区或平原到处可见,人工林很多,一般情况下在山区生长最好。在山区生长的油松,多在阴坡、半阴坡,土壤湿润和较肥沃的地方。

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/stxb201207231045

王烨,席本野,崔向东,李广德,贾黎明,苏曼琳,刘丹.造纸废水灌溉对毛白杨苗木生长及养分状况的影响.生态学报,2013,33(5):1626-1635.  
Wang Y, Xi B Y, Cui X D, Li G D, Jia L M, Su M L, Liu D. Effects of irrigation with paper mill effluent on growth and nutrient status of *Populus tomentosa* seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1626-1635.

## 造纸废水灌溉对毛白杨苗木生长及养分状况的影响

王 烨<sup>1</sup>, 席本野<sup>1</sup>, 崔向东<sup>2</sup>, 李广德<sup>3</sup>, 贾黎明<sup>1,\*</sup>, 苏曼琳<sup>1</sup>, 刘 丹<sup>4</sup>

(1. 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; 2. 河北政法学院园林系,石家庄 050061;

3. 中央广播电视台农林医药学院,北京 100039; 4. 山东省林木种质资源中心,济南 250014)

**摘要:**为了探讨工业造纸废水用于杨树人工林灌溉的可行性,以三倍体毛白杨(triploid *Populus tomentosa*)1年生盆栽苗木为对象,研究了不同浓度造纸废水(分别稀释到12.5% (1F7Q)、16.7% (1F5Q)、25% (1F3Q)、33.3% (1F2Q)、50% (1F1Q))灌溉对苗木生长及养分状况、土壤化学性质的影响。结果表明:造纸废水灌溉对土壤pH值、速效P含量无显著影响( $P>0.05$ ),但能显著提高土壤有机质、全N及碱解N的含量( $P<0.05$ )。适当稀释的废水灌溉能促进三倍体毛白杨的苗木生长,提高土壤和植株养分水平:灌溉后1F5Q地径、苗高生长量分别为10.5 mm和97.3 cm,较CK分别显著增加102%和47% ( $P<0.05$ );1F5Q和1F3Q处理苗木总生物量为247 g和230 g,分别较CK显著提高19%和11% ( $P<0.05$ );废水灌溉可显著提高植株根、叶N含量和茎P含量( $P<0.05$ ),但对植株叶、根P含量和茎N含量影响不大( $P>0.05$ )。造纸废水通过一定处理后,可应用于苗木灌溉并促进其生长,提高地力。对于三倍体毛白杨,将废水稀释到16%—25%能起到较好的灌溉效果。

**关键词:**造纸废水;灌溉;三倍体毛白杨;苗木;植物养分

## Effects of irrigation with paper mill effluent on growth and nutrient status of *Populus tomentosa* seedlings

WANG Ye<sup>1</sup>, XI Benye<sup>1</sup>, CUI Xiangdong<sup>2</sup>, LI Guangde<sup>3</sup>, JIA Liming<sup>1,\*</sup>, SU Manlin<sup>1</sup>, LIU Dan<sup>4</sup>

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

2 The Faculty of Landscape Architecture, Hebei College of Politics and Law, Shijiazhuang 050061, China

3 The Faculty of Agroforestry and Medicine, The Open University of China, Beijing 100039, China

4 Center for Forest Genetic Resource of Shandong Province, Jinan 250014, China

**Abstract:** The pulp and paper industry is a very large consumer of fresh water, and almost all the input reappears as effluent requiring treatment and disposal. As poplar can recycle organic residues from wastewater due to its high water and nutrient use, paper mill effluent (PME) could serve as a source of water and nutrients for poplar plantations. Consequently, irrigating poplar plantations with PME will reduce the need for other inputs of irrigation and fertilization. However, some elements (e.g. Na) which commonly occur in PME also represent a potential risk to poplar growth, since they have only moderate tolerance to salinity. Improper irrigation can result in toxicities and nutrient imbalance in plants. We hypothesized that diluting PME with pure water to a suitable concentration could avoid negative effects and would have better irrigation and fertilization value. In this study, a pot experiment was conducted from June to September in 2009 to investigate the effect of irrigation with different dilutions of PME on (1) the growth and nutrient status of one-year-old triploid *Populus tomentosa* seedlings and (2) soil chemical properties. The experiment included five PME irrigation

**基金项目:**国家林业公益性行业科研专项经费重大项目(201004004);北京林业大学“985”优势学科创新平台开放基金(000-1108003)

**收稿日期:**2012-07-23; **修订日期:**2012-12-24

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

treatments which diluted the concentration of PME to 12.5% (1F7Q), 16.7% (1F5Q), 25% (1F3Q), 33.3% (1F2Q) and 50% (1F1Q), respectively. A control pure water irrigation treatment (CK) was also included. At the end of the experiment, height, ground-level diameter, and biomass of the seedlings in all treatments were measured as indicators of plant growth, total N and P of stems, leaves, and roots were analyzed to indicate plant nutrient status, and soil chemical properties (pH, organic matter, total N, available N and P) were also measured. PME irrigation had no significant effect on the pH and available P content of the soil ( $P>0.05$ ), but percentages of organic matter, total N, and available N increased significantly with increasing concentration of PME ( $P<0.05$ ). With appropriate dilution, PME irrigation significantly increased the N content in roots and leaves and the P content in stems ( $P<0.05$ ), but had no significant influence on the P content in leaves and roots and the N content in stems ( $P>0.05$ ). The growth of *P. tomentosa* seedlings increased markedly when the concentration of PME increased from 12.5% (1F7Q) to 16.7% (1F5Q), but when the concentration continued to increase (1F3Q, 1F2Q, 1F1Q), increments in ground-level diameter and height decreased gradually. Relative to the CK treatment, the increment of ground-level diameter and height of *P. tomentosa* seedlings following only the 1F5Q treatment were significantly higher (102% and 47% respectively,  $P<0.05$ ). Biomass of *P. tomentosa* seedlings in the 1F5Q and 1F3Q treatments reached 247 and 230 g, respectively, which were significantly higher than the CK treatment (19.3% and 11.1%,  $P<0.05$ ). However, no significant difference was detected between the other PME treatments and CK ( $P>0.05$ ). In conclusion, PME irrigation promoted the growth of *P. tomentosa* seedlings, and increased plant nutrient status and soil fertility. When the dilution concentration of PME was appropriate, the growth of *P. tomentosa* seedlings was significantly improved by PME irrigation. Consequently, our findings suggest that PME can be used to irrigate *P. tomentosa* seedlings, but it should be diluted to an appropriate concentration. From our results, it is recommended that the dilution concentration of PME should be 16%—25%, and trials are needed to validate these conclusions under field conditions.

**Key Words:** paper mill effluent; irrigation; triploid *Populus tomentosa*; seedling; plant nutrients

目前,我国木浆生产量远不能满足造纸工业的需求<sup>[1]</sup>,发展速生丰产纸浆林是解决这一问题的主要途径之一<sup>[2-4]</sup>。三倍体毛白杨(triploid *Populus tomentosa*)因材性白、纤维长、纤维含量高、具有优良造纸性能而在我国北方速生纸浆林建设中发挥着重要作用<sup>[1,3]</sup>。毛白杨对水肥需求量大,灌溉和施肥是大幅提高其纸浆林生产力的重要集约经营技术措施<sup>[5-7]</sup>。然而,随着淡水资源的持续紧张,不允许也不可能在林地上大量用水。因此,如何实现灌溉水源的开源节流是利用灌溉措施提高杨树速生丰产林生产力时所面临的重要问题之一。

同时,造纸工业是一个水资源需求量大且废水排放量也很大的行业<sup>[8]</sup>。如果能合理地利用造纸废水进行灌溉,一方面,将有助于缓解发展杨树速生纸浆林所面临的灌溉水资源短缺问题。同时,造纸废水中富含的养分也可为速生杨树提供大量有机质及氮、磷等营养元素,促进其生长。另一方面,造纸废水灌溉纸浆林可实现水资源的循环利用,而且减少因灌溉和施肥而产生的纸浆林生产投入,降低成本,达到经济效益和环境效益的双赢<sup>[9]</sup>,实现清洁生产、循环经济。

废水灌溉作为一种处理废水的新方式已引起国内外众多学者的关注。国外关于废水灌溉杨树的研究起步较早,主要集中于耐废水灌溉品种的选育、植物修复、废水灌溉对土壤环境和地下水的影响等方面<sup>[10-14]</sup>。国内关于杨树废水灌溉的研究尚处于起步阶段,仅见于利用生活污水灌溉杨树人工林<sup>[15-16]</sup>和造纸废水灌溉沙漠杨树生态公益林<sup>[17-18]</sup>,且这些研究主要关注如何有效利用杨树-土壤系统达到废水净化以避免因灌溉造成环境污染,而没有考虑如何科学地利用废水灌溉来提高杨树林的生产力。另一方面,造纸废水中存在的其它元素(如Na)会对杨树的生长造成潜在威胁,杨树对废水的耐受能力因品种而异<sup>[19]</sup>,因此,将造纸废水直接用于毛白杨纸浆林灌溉可能会对林木生长及环境产生不利影响,但如果将造纸废水进行一定程度的稀释,降低废水中有害物质的浓度,则可能实现科学地利用造纸废水灌溉大幅促进林木生长的目的。

因此,本文研究目标是:(1)确定不同稀释比例造纸废水灌溉对毛白杨苗木生长及养分状况的影响;(2)确定其对土壤肥力的影响;(3)为科学合理地利用造纸废水灌溉毛白杨速生纸浆林提供一定理论及实践支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于山东省高唐县( $36^{\circ}58'N, 116^{\circ}14'E$ )泉林生态科技有限公司一号苗圃。该地区平均海拔27 m,气候为暖温带半干旱季风区域大陆性气候,年均降雨量544.7 mm,年均蒸发量1880 mm,年均气温13.2°C,全年日照总时数2651.9 h,无霜期204 d。

### 1.2 试验材料与试验设计

研究选用1年生三倍体毛白杨无性系B301( $(P. tomentosa \times P. bolleana) \times P. tomentosa$ )根蘖苗为试验材料,平均地径1.46 cm,平均苗高1.2 m。供试苗木于2009年4月2日移栽于室外的塑料花盆(35(口径)×40(高)cm)中,每盆1株。盆栽土壤取自山东泉林生态科技有限公司二号苗圃并按田间实际容重填装,其理化性质见表1。试验开始前,使用清水浇灌。

试验设5个处理,分别为:1F7Q、1F5Q、1F3Q、1F2Q、1F1Q(aFbQ表示废水F与清水Q的比例为a:b),即灌溉水中的废水比例分别为12.5%、16.7%、25%、33.3%、50%;另设一个清水灌溉处理(CK)作为对照;每处理6次重复。试验采取完全随机区组设计。废水与清水的平均水质见表2。

表1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

砂粒 Sand /%	粉粒 Silt /%	粘粒 Clay /%	质地* Texture	容重 Bulk density /(g/cm <sup>3</sup> )	pH值 pH value	有机质 Organic matter /%	全氮 Total nitrogen /%	碱解氮 Alkali hydrolysable N /(mg/kg)	速效磷 Rapidly available P /(mg/kg)	速效钾 Rapidly available K /(mg/kg)
43.94	56.06	0.01	粉壤	1.499	8.57	1.8	0.06	15.73	4.56	52.91

\* 美国农部制

表2 试验选用造纸废水与清水主要水质指标

Table 2 Characteristics of paper mill effluent and pure water used for experiment

来源 Source	电导率 Electrical conductivity /(mS/cm)	pH值 pH value	硝态氮 Nitrate nitrogen /(mg/L)	铵态氮 Ammonium nitrogen /(mg/L)	总氮 Total nitrogen /(mg/L)	总磷 Total phosphorus /(mg/L)	化学需氧量 Chemical oxygen demand /(mg/L)	生物化学 需氧量 Biological oxygen demand /(mg/L)
造纸废水* Paper mill effluent	1.9	8.7	12.90	76.20	47.00	0.26	726	152
清水 Pure water	2.3	8.6	0.23	0.09	1.08	0.06	11	0

\* 当地造纸厂排出的用于制造有机肥原料的制浆中段水

试验期间,各处理采用相同灌水方法即固定间隔周期(15 d)灌溉,从2009年6月9日至9月4日共计灌溉7次。为了避免水分胁迫,本试验选择供试苗木日平均耗水量的上限进行灌溉,根据何茜<sup>[20]</sup>对三倍体毛白杨苗木蒸腾耗水的研究结果,确定各处理每次灌水定额为4 L。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 植株生长

2009年10月中旬,对各试验处理苗木的苗高、地径进行测量,并在各处理中随机选择3株苗木进行收获,收获时按叶、枝、茎、根分开采集。样品带回实验室洗净后,先在恒温干燥箱中105 °C杀青30 min,然后调至70 °C烘干至恒重后测定生物量。

#### 1.3.2 植株养分含量

将称重后的植物样品粉碎过筛,用N、P联合测定消煮法进行消煮,然后分别用凯氏定氮法和钼锑抗比色

法对叶、茎、根中的 N、P 含量进行测定。

### 1.3.3 土壤化学性质

在上述随机选择的 3 个样本苗木花盆中采用四分法进行土壤取样。土样带回实验室风干后过筛,用 pH 计(PHS-3C,上海越磁电子科技有限公司,上海,中国)测定土壤 pH 值,重铬酸钾稀释热法测定有机质含量,凯氏定氮法测定全 N 含量,碱解蒸馏法测定碱解 N 含量,钼锑抗比色法测定速效 P 含量。

### 1.4 数据处理

采用 SPSS 13.0 软件对试验数据进行 One-way ANOVA 分析,若处理间差异显著,用 Duncan 法在 0.05 或 0.01 水平上进行多重比较。采用 Excel 2007 软件进行图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同稀释比例造纸废水对毛白杨生长的影响

#### 2.1.1 苗高、地径

试验期间,不同处理间毛白杨地径、苗高净生长量差异显著( $P<0.05$ )(表 3)。各废水灌溉处理的地径生长量均高于 CK,但仅有 1F5Q 达到显著水平,其地径生长量达 10.5 mm,较 CK 显著提高 102% ( $P<0.05$ )。苗高生长对废水灌溉的响应与地径相似,仍为 1F5Q 生长最快,其苗高生长量达 97.3 cm,较 CK 显著提高 47% ( $P<0.05$ );其它废水灌溉处理与 CK 无显著差异( $P>0.05$ )。此外,对于各废水灌溉处理,当废水比例从 12.5% (1F7Q) 增加到 16.7% (1F5Q) 时,毛白杨苗高、地径生长量增加,但当废水比例继续增大时,苗高、地径生长量却逐渐减小。

表 3 造纸废水灌溉对毛白杨生长的影响

Table 3 Effects of irrigation with pulp mill effluent on growth of *Populus tomentosa*

处理 Treatment	地径生长量/mm Basal diameter increment	苗高生长量/cm Seedling height increment	生物量/g Biomass
CK	5.2±1.8 b	65.8±9.7 b	207±13.7 c
1F7Q	5.6±1.1 b	60.1±13.4 b	196±9.0 c
1F5Q	10.5±1.6 a	97.3±11.6 a	247±19.3 a
1F3Q	7.7±1.7 ab	80.4±12.7 ab	230±5.4 b
1F2Q	6.4±1.3 b	68.9±13.6 b	225±14.4 bc
1F1Q	5.8±2.0 b	66.7±13.1 b	220±12.3 bc

表中数据为各处理样本平均值±标准误差数据为平均值(标准误差);同列下不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),检验方法为 Duncan 检验

#### 2.1.2 生物量

不同处理间毛白杨总生物量差异显著( $P<0.05$ )(表 3)。其中,1F5Q 和 1F3Q 的总生物量分别达到 247 和 230 g,较 CK 分别显著增加 19.1% 和 10.6% ( $P<0.05$ )。其它废水灌溉处理的总生物量与 CK 相比无显著差异( $P>0.05$ )。当废水比例从 12.5% (1F7Q) 增加到 16.7% (1F5Q) 时,毛白杨总生物量逐渐增加,但当废水比例继续增大时,总生物量却逐渐减小。

### 2.2 对土壤化学性质的影响

#### 2.2.1 pH 值

如表 4 所示,经造纸废水灌溉后的土壤 pH 值在 8.71—8.81 之间变化,略高于 CK,但造纸废水灌溉对土壤 pH 值的影响还未达到显著水平( $P>0.05$ ),可见,短期废水灌溉不会引起土壤酸碱度的显著变化。

#### 2.2.2 有机质含量

如表 4 所示,造纸废水灌溉对土壤有机质含量影响显著。随着灌溉水中废水比例的增加,土壤有机质含量呈上升趋势。除了废水比例最低的 1F7Q 与 CK 相比无显著优势外( $P>0.05$ ),其余废水灌溉处理的土壤有机质含量均显著高于 CK,达到 1.35%—1.45%,增幅为 23.9%—33.0% ( $P<0.05$ )。不同废水灌溉处理间的土壤有机质含量无显著差异( $P>0.05$ )。

表4 造纸废水灌溉对土壤化学性质的影响

Table 4 Effects of irrigation with paper mill effluent on the chemical properties of soil

处理 Treatment	pH值 pH value	有机质/% Organic matter	全N/% Total nitrogen	碱解N/(mg/kg) Available nitrogen	速效P/(mg/kg) Available phosphorus
CK	8.64±0.05a	1.09±0.04 b	0.067±0.007 C	31.33±6.02 b	4.30±0.12 a
1F7Q	8.71±0.05 a	1.22±0.10 ab	0.105±0.011 B	47.96±2.99 a	4.60±0.25 a
1F5Q	8.77±0.06 a	1.35±0.04 a	0.129±0.009 AB	53.07±3.86 a	5.32±0.38 a
1F3Q	8.79±0.03 a	1.39±0.02 a	0.138±0.008 A	54.34±2.41 a	4.51±0.23 a
1F2Q	8.78±0.02a	1.44±0.09 a	0.144±0.009 A	53.07±3.56 a	4.68±0.32 a
1F1Q	8.81±0.05a	1.45±0.07 a	0.148±0.007 A	57.21±5.76 a	4.37±0.13 a

表中数据为各处理样本平均值±标准误(标准误);同列中不同小写和大写字母表示差异显著( $P<0.05$ )和极显著( $P<0.01$ ),检验方法为Duncan检验。

### 2.2.3 N含量

如表4所示,废水灌溉对土壤全N含量影响显著。随着灌溉水中废水比例的增加,土壤全N含量逐渐升高,达到0.105%—0.148%,较CK极显著提高56.7%—129.9%( $P<0.01$ )。各废水灌溉处理间,1F7Q的土壤全N含量与1F5Q无显著差异,但极显著低于1F3Q、1F2Q和1F1Q( $P<0.01$ );而1F5Q、1F3Q、1F2Q和1F1Q之间又无显著差异。由此可见,当灌溉水中的废水含量达到一定程度后,废水比例的继续升高并不能带来土壤全N含量的继续显著增加。

土壤碱解N含量受造纸废水灌溉的影响亦达到显著水平(表4)。废水灌溉处理的土壤碱解N含量达到47.96—57.21 mg/kg,较CK显著提高53.1%—82.6%( $P<0.05$ )。处理间无显著差异( $P>0.05$ ),且土壤碱解N含量未表现出随灌溉水中废水比例的升高而逐渐增加的趋势。可见,影响土壤碱解N含量的不只是废水灌溉,还存在其它因素。

### 2.2.4 P含量

如表4所示,造纸废水灌溉对土壤速效P含量的影响不明显。废水灌溉后土壤速效P含量在4.60—5.32 mg/kg之间,与CK差异不显著( $P>0.05$ )。此外,对于各废水灌溉处理,土壤速效P含量也未出现随灌溉水中废水比例的升高而逐渐增加的趋势。

## 2.3 对植株养分的影响

### 2.3.1 N含量

如图1所示,造纸废水灌溉对毛白杨茎N含量无显著影响,但能显著影响叶、根N含量。当灌溉水中废水比例在16.7%—33.3%之间时(即1F5Q、1F3Q、1F2Q),废水灌溉能极显著提高毛白杨叶N含量( $P<0.01$ );但当废水比例不在此范围时(即1F7Q、1F1Q),废水灌溉对叶N含量的提高作用并不显著( $P<0.05$ )。各废水灌溉处理间,随灌溉水中废水比例的升高,叶N含量呈现先增加后下降的变化趋势。其中,当废水比例为16.7%时(1F5Q),植株叶N含量最高,达2.47%,较CK极显著提高14.7%( $P<0.01$ )。由此可见,叶N含量与灌溉水中的废水含量不成正比关系。与叶N含量不同,根N含量对造纸废水灌溉的响应无规律可循。其中,1F5Q、1F2Q和1F1Q的根N含量分别达到1.19%、1.25%和1.19%,较CK分别显著高11.3%、17.0%和11.8%( $P<0.05$ );但1F7Q和1F3Q则与CK无显著差异( $P>0.05$ )。

综上,从各处理毛白杨各器官(图1)和土壤中的N含量(表4)变化可以看出,虽然随灌溉水中废水比例的增加,土壤N素水平有逐渐增大的趋势,但并未带来更高的N素利用效率。

### 2.3.1 P含量

如图2所示,与CK相比,废水灌溉对毛白杨根、叶P含量无显著影响,且各废水灌溉处理间的差异也不明显( $P>0.05$ )。但是,各处理间毛白杨的茎P含量却差异显著( $P<0.05$ )。其中,1F5Q和1F2Q的茎P含量为0.076%和0.069%,较CK分别显著提高44.9%和31.6%( $P<0.05$ );而其它废水灌溉处理与CK相比则无明显变化( $P>0.05$ )。

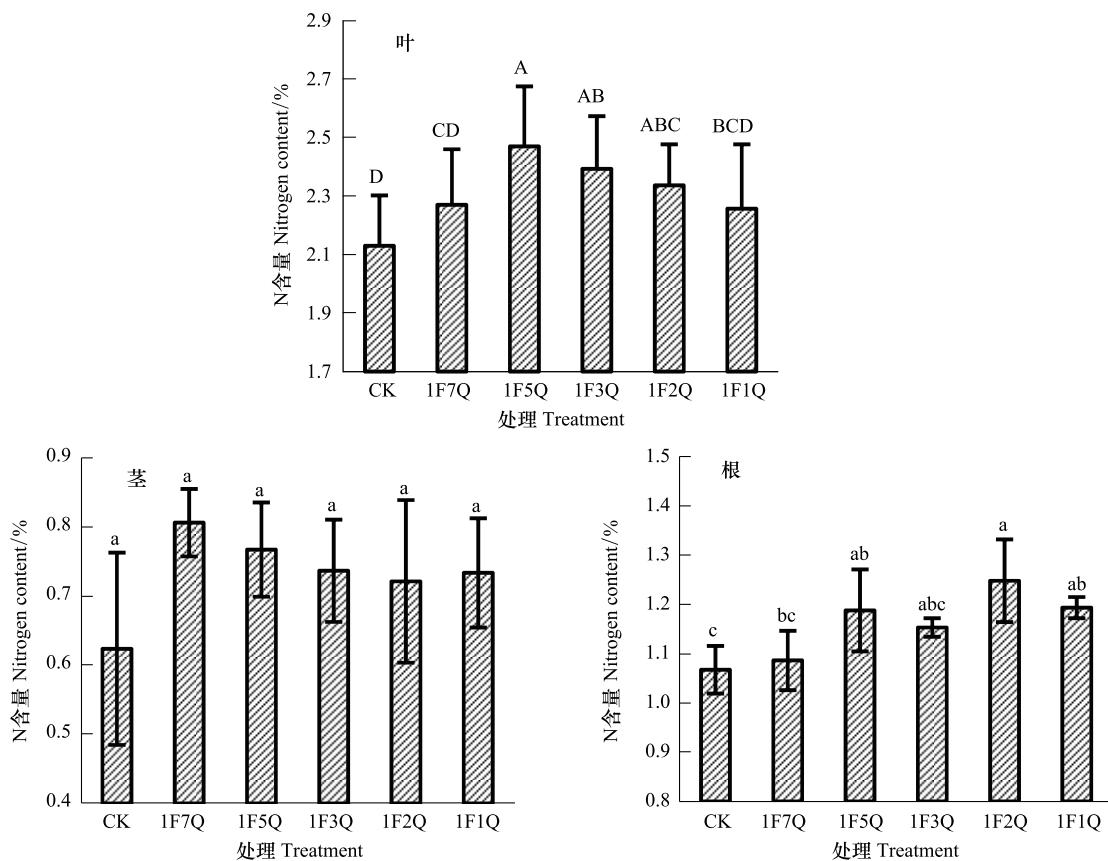


图1 不同处理毛白杨各器官N含量

Fig. 1 Nitrogen content in different organs of *P. tomentosa* under different treatments

### 3 结论与讨论

#### 3.1 造纸废水灌溉对土壤化学性质的影响

大多研究表明造纸废水灌溉能使土壤 pH 值显著升高 ( $P < 0.05$ )<sup>[21-22]</sup>, 其原因可能主要与造纸废水中含有  $\text{HCO}_3^- \text{Cl}^-$  有关<sup>[23]</sup>。但也有研究表明, 造纸废水灌溉会使土壤 pH 值下降<sup>[24]</sup>, 对土壤碱度有一定的稀释作用。Kumar 等<sup>[25]</sup>的研究结果则显示土壤 pH 值受造纸废水灌溉的影响不大。本研究结果显示废水灌溉能使毛白杨盆栽苗木土壤的 pH 值略微升高 ( $P > 0.05$ ), 造纸废水灌溉对土壤 pH 值的效应之所以不固定, 可能与废水灌溉的灌溉量以及灌溉土壤的 pH 本底值有关。本试验造纸废水的 pH 值略高于土壤本底值, 废水灌溉使试验土壤的 pH 值仅有小幅度升高。此外, 本试验条件下, 造纸废水灌溉后土壤 pH 值保持在 8.71—8.81 之间, 不会对毛白杨生长产生抑制作用<sup>[26]</sup>。

Roy 等<sup>[22]</sup>的研究显示造纸废水灌溉能显著提高表层土壤的有机质和 N 含量 ( $P < 0.05$ ); Kumar 等<sup>[25]</sup>发现, 不同废水稀释比例灌溉会对土壤肥力有不同程度的提高, 在 100% 废水时表现得最为明显; 侯培强等<sup>[17]</sup>认为在土壤肥力本底值较低时, 废水灌溉使土壤有机质和全 N 含量有明显增加 ( $P < 0.05$ )。这种增加可能是造纸废水富含有机物和悬浮物而引起的<sup>[27]</sup>。本研究中, 参试土壤肥力本底值较低, 造纸废水灌溉显著提高了土壤有机质 ( $P < 0.05$ )、全 N ( $P < 0.01$ ) 和碱解 N 含量 ( $P < 0.05$ ), 这意味着如将造纸废水稀释后用于毛白杨人工林或苗圃灌溉可显著提高土壤肥力。

废水灌溉会对土壤速效 P 含量有不同影响: Singh 等<sup>[28]</sup>在对造纸废水灌溉对土壤肥力水平影响的研究中发现, 废水灌溉对土壤有效 P 含量无显著影响 ( $P > 0.05$ ); 而 Muthukumar 等<sup>[29]</sup>认为造纸废水灌溉能使土壤 P 含量有显著提升 ( $P < 0.05$ )。本研究表明造纸废水灌溉后土壤速效 P 无显著变化。造成研究结果不同的原因可能是废水中 P 含量的差异, 本研究所用灌溉水含 P 较少, 因而不能显著增加土壤速效 P 含量。

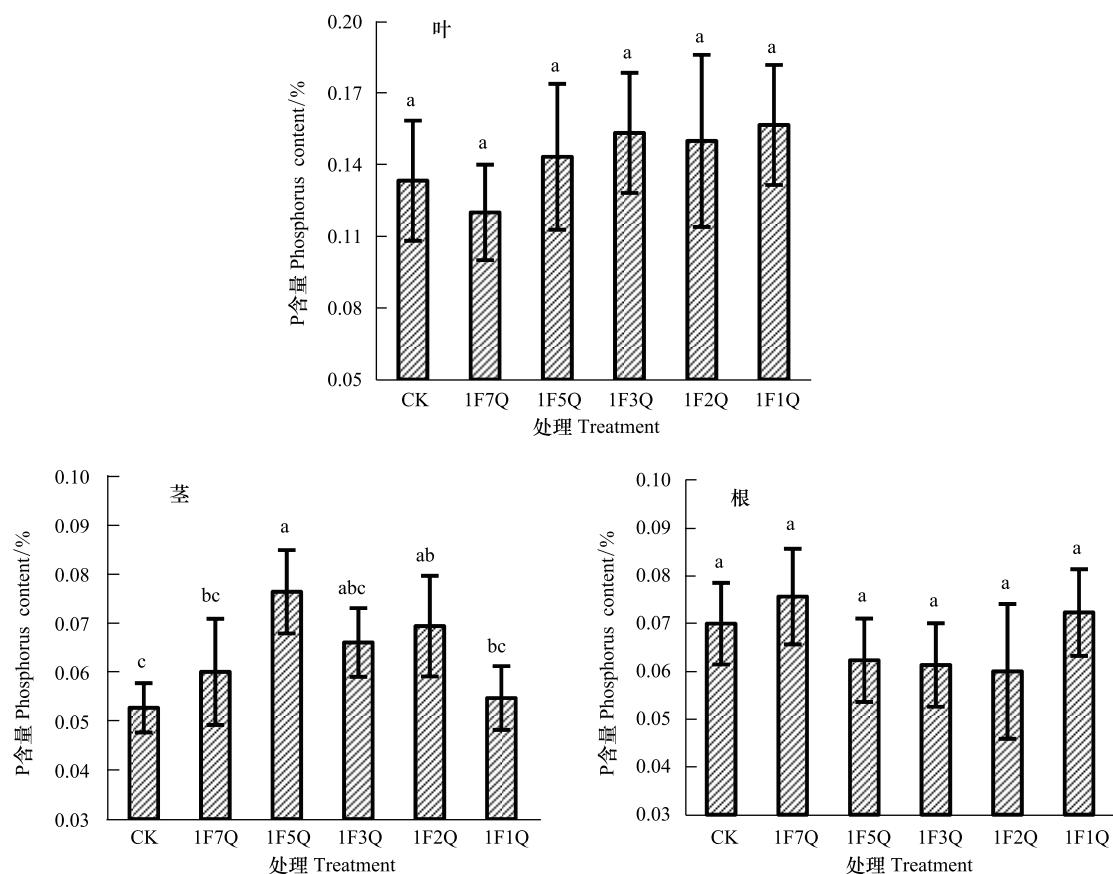


图2 不同处理毛白杨各器官N含量

Fig. 2 Phosphorus content in different organs of *P. tomentosa* under different treatments

### 3.2 造纸废水灌溉对植株养分的影响

杨树作为植物修复树种用于废水处理时,对废水中N、P的吸收可能与土壤物理、化学性质、树种品种、管理等因素有关<sup>[30]</sup>,因此在废水灌溉对杨树植株养分状况影响的研究中出现了很多不同的结论。如:Fillion等<sup>[31]</sup>认为,未经处理的废水灌溉使得杂交杨NM5(*P. nigra*×*P. maximowicci*)叶N含量、叶、茎、根P含量显著下降( $P<0.05$ ),这可能是因为过高的废水灌溉量会降低植物根系活力,从而减少了对N、P等元素的吸收<sup>[32]</sup>。而Guidi等<sup>[13]</sup>的研究发现,同样是使用未经处理的废水,灌溉后对杂交杨NM5(*P. nigra*×*P. maximowicci*)叶、茎、根的N含量有极显著提高( $P<0.01$ ),但对叶、茎的P含量无显著影响( $P>0.05$ )。由此可见,即使是同一个品系的杨树,对废水中N、P的吸收量受多种因素制约。本研究发现适当稀释的造纸废水灌溉能显著提高三倍体毛白杨叶( $P<0.01$ )、根N( $P<0.05$ )含量和茎P含量( $P<0.05$ ),但对茎N含量和叶、根P含量均无显著影响( $P>0.05$ )(图1,图2)。

另外,本研究中,造纸废水灌溉对植株养分含量的作用规律异于对土壤养分含量的作用规律。对土壤养分有最大提高作用的处理(1F1Q)未能使植物养分含量得到相应的最大提高。由此可见,在将造纸废水用于林木灌溉时,不仅要考虑如何利用废水灌溉增加土壤肥力,同样还应保证植物对土壤养分吸收的最大化。从叶氮素含量来,1F5Q处理对毛白杨植株养分状况的改善效果最好。

### 3.3 造纸废水灌溉对植株生长的影响

将造纸废水稀释到16.7%(1F5Q)和25%(1F3Q)时,废水灌溉能显著促进三倍体毛白杨植株生长( $P<0.05$ )。这主要是因为1F5Q和1F3Q处理不仅显著提高了土壤有机质及N素营养(表4),而且还促进了毛白杨对土壤养分的吸收,使植株叶片养分状况(N含量)得到显著提高(图1)。然而,当灌溉水中的废水比例较

低(12.5% (1F7Q))或较高时(33.3% (1F2Q)、50% (1F1Q)),废水灌溉虽也能显著提高土壤有机质和N素营养,但对毛白杨生长的促进作用较小(1F2Q、1F1Q),甚至还会抑制生长(1F7Q)。产生此种现象的原因可能是造纸废水中不仅富含N元素,而且还可能含有其它抑制植物生理活动的元素或离子<sup>[33]</sup>。因此,当灌溉水中的废水比例较低时,造纸废水灌溉可能不仅不能提供足够的养分供给植物生长,废水中含有的其它元素或离子可能还对植物根系的吸水、吸养作用产生抑制,从而导致植株干物质积累下降;当灌溉水中的废水比例较高时,通过灌溉虽能提供丰富养分供植物生长,但其高浓度的干扰物质可能同时也严重抑制了植物根系的生理活动,使其不能吸收富裕的土壤养分,从而使植株生长不具明显优势。Hayman等<sup>[34]</sup>在利用造纸废水灌溉苜蓿时就发现,长期造纸废水灌溉容易引起苜蓿根区土壤Na<sup>+</sup>累积过高,从而对苜蓿根系的吸收性能产生抑制作用。因此,利用造纸废水灌溉毛白杨苗木时,除了要考虑废水灌溉对土壤肥力和植物养分的影响外,还应考虑如何利用其最大限度地促进植物生长。对于三倍体毛白杨1年生苗木,将造纸废水稀释至16%—25%后进行灌溉能取得较好的效果。

#### 4 问题与建议

本研究旨在为科学合理地利用造纸废水灌溉三倍体毛白杨苗木及速生纸浆林提供依据,但试验是在盆栽条件下进行的,将造纸废水用于大田灌溉还有很多问题需要解决。如,长期造纸废水灌溉可能会造成土壤盐碱化<sup>[25,33]</sup>,从而使耐盐碱能力不强的杨树难以生长<sup>[35]</sup>;可能会使土壤电导率会增加,从而对土壤的物理化学性质造成影响<sup>[27,33-34,36]</sup>;会造成土壤养分含量的不平衡,使某些营养元素含量过高而对植物产生毒害作用<sup>[29]</sup>;因此,针对以上问题,建议下一步开展合理灌溉方式和方法、灌溉制度、土壤及水体环境连续监测和评价等方面的系统研究,以促进造纸废水的综合利用,促进林木生长,实现社会、生态、经济效益的可维护和可持续。

#### References:

- [1] He X Y. China's pulp and paper mills need to focus more on their fiber strategy-How to secure the future fiber supply?. *China Pulp and Paper Industry*, 2008, 29(15): 20-23.
- [2] Shen G F. Some problems on development of fast growing and high yielding plantations in China. *World Forestry Research*, 1992, (4): 67-74.
- [3] Kang X Y, Zhu Z T. Status and role of triploid *Populus tomentosa* in pulp production in China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(S1): 51-56.
- [4] Zheng S K. High Yield Cultivation of Poplar. Beijing: Golden Shield Press, 2006.
- [5] Dong W Y, Zhao Y, Zhang Z Y, Li J Y, Nie L S. Coupling effect of water and fertilizer on the biomass of *Populus tomentosa* seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2194-2200.
- [6] Ren Z X, Nie L S, Zhang Z Y, Zhang Q, Song L J, Li Y. Coupling effects of water and nitrogen on the stand volume and economic benefit of *Populus tomentosa* clone plantations. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(1): 25-31.
- [7] Xi B Y, Wang Y, Di N, Jia L M, Li G D, Huang X F, Gao Y Y. Effects of soil water potential on the growth and physiological characteristics of *Populus tomentosa* pulpwood plantation under subsurface drip irrigation. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5318-5329.
- [8] Tewari P K, Batra V S, Balakrishnan M. Efficient water use in industries: cases from the Indian agro-based pulp and paper mills. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(1): 265-273.
- [9] Patterson S J, Chanasyk D S, Baron V S. Growth of winter wheat irrigated with diluted kraft pulp mill effluent on soils amended with gypsum and wood ash. *Canadian Journal of Soil Science*, 2009, 89(5): 657-670.
- [10] Zalesny R S Jr, Wiese A H, Bauer E O, Riemschneider D E. *Ex situ* growth and biomass of *Populus bioenergy* crops irrigated and fertilized with landfill leachate. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 33(1): 62-69.
- [11] Zalesny J A, Zalesny R S Jr, Coyle D R, Hall R B, Bauer, E O. Clonal variation in morphology of *Populus* root systems following irrigation with landfill leachate or water during 2 Years of establishment. *Bioenergy Research*, 2009, 2(3): 134-143.
- [12] Anneli A, Karacic A, Weih M. Biomass allocation and nutrient use in fast-growing woody and herbaceous perennials used for phytoremediation. *Plant and Soil*, 2008, 305(1/2): 189-206.
- [13] Guidi W, Labrecque M. Effects of high water supply on growth, water use and nutrient allocation in willow and poplar grown in a 1-year pot trial.

- Water, Air, and Soil Pollution, 2010, 207(1/4) : 85-101.
- [14] Zupanc V, Justin M Z. Changes in soil characteristics during landfill leachate irrigation of *Populus deltoides*. Waste Management, 2010, 30(11) : 2130-2136.
- [15] Bai B X, Yang H Q, Fan W, Bian X M. Effect of slow filtering eco-treatment with different hydraulic loading rates of domestic wastewater on soil and poplar growth. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22) : 6163-6172.
- [16] Bai B X, Fan W, Yang H Q, Bian X M, Zhao H. Effects of domestic wastewater slow infiltration on the growth of poplar 'Zhonglin 2001' plantation. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6) : 1403-1408.
- [17] Hou P Q, Ren J, Tao L, Chen X M, Fu X Y. Effects of the desert ecological forest irrigated by papermaking waste water on soil nutrition element. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2008, 27(1) : 42-45.
- [18] Ren J, Tao L, Hou P Q. Effect of papermaking wastewater irrigation on Na<sup>+</sup> content of *Populus alba*. Environmental Chemistry, 2010, 29(2) : 295-298.
- [19] Good J E G, Winder J D, Sellers E, Williams T G. Species and clonal variation in growth responses to water logging and submersion in the genus *Salix*. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh Section B-Biological Sciences, 1992, 98 : 21-48.
- [20] He Q. Evaluation and Selection on *Populus Tomentosa* Superior Clones with Drought Resistance and Water-Saving [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [21] Patterson S J, Chanasyk D S, Naeth M A, Mapfumo E. Effluent effects on the nutrient concentrations and growth of reed canarygrass (*Phalaris arundinacea* L.) and hybrid poplar (*Populus deltoids* × *P. petrowskyana* L.). Canadian Journal of Soil Science, 2007, 89(2) : 223-234.
- [22] Roy R P, Prasad J, Joshi A P. Changes in soil properties due to irrigation with paper industry wastewater. Journal of Environmental Science and Engineering, 2008, 50(4) : 277-282.
- [23] Mancino C F, Pepper I L. Irrigation of turfgrass with secondary sewage effluent: soil quality. Agronomy Journal, 1992, 84(4) : 650-654.
- [24] Xia J B, Liu Q, Xie W J, Sun J K, Liu Q, Lu Z H. Effect of wastewater irrigation on soil hydrological properties in reed marsh. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12) : 63-68.
- [25] Kumar A, Singhal V, Joshi B D, Rai J P N. Lysimeteric approach for water pollution control from pulp and paper effluent using different soil textures. Indian Journal of Scientific and Industrial Research, 2004, 63(5) : 429-438.
- [26] Zhao X M, Sun X Y, Wang H Q, Tian Y, Kang X Y. Dynamics of soil nutritional factors and pH value of triploid *Populus tomentosa* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3) : 3414-3423.
- [27] Kannan K, Oblisami G. Influence of irrigation with pulp and paper mill effluent on soil chemical and microbiological properties. Biology and Fertility of Soils, 1990, 10(3) : 197-201.
- [28] Singh S K. Effect of irrigation with paper mill effluent on the nutrient status of soil. International Journal of Soil Science, 2007, 2(1) : 74-77.
- [29] Muthukumar T, Vediappan S. Comparison of arbuscular mycorrhizal and dark septate endophyte fungal associations in soils irrigated with pulp and paper mill effluent and well-water. European Journal of Soil Biology, 2010, 46(2) : 157-167.
- [30] Paranychianakis N V, Angelakis A N, Leverenz H, Tchobanoglous G. Treatment of wastewater with slow rate systems: a review of treatment processes and plant functions. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2006, 36(3) : 187-259.
- [31] Fillion M, Brisson J, Teodorescu T I, Sauvé S, Labrecque M. Performance of *Salix viminalis* and *Populus nigra* × *Populus maximowiczii* in short rotation intensive culture under high irrigation. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(9) : 1271-1277.
- [32] Licht L A, Isebrands J G. Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities. Biomass and Bioenergy, 2005, 28(2) : 203-218.
- [33] Patterson S J, Chanasyk D S, Mapfumo E, Naeth M A. Effects of diluted Kraft pulp mill effluent on hybrid poplar and soil chemical properties. Irrigation Science, 2008, 26(6) : 547-560.
- [34] Hayman J P, Smith L. Disposal of saline effluents by controlled spray irrigation. Journal (Water Pollution Control Federation), 1979, 51(3) : 526-533.
- [35] Shannon M C, Bañuelos G S, Draper J H, Ajwa H, Jordahl J, Licht L. Tolerance of hybrid poplar (*Populus*) trees irrigated with varied levels of salt selenium, and boron. International Journal of Phytoremediation, 1999, 1(3) : 273-288.
- [36] Patterson S J, Chanasyk D S, Naeth M A, Mapfumo E. Effect of municipal and pulp mill effluents on the chemical properties and nutrient status of a coarse-textured Brunisol in a growth chamber. Canadian Journal of Soil Science, 2008, 88(3) : 429-441.

**参考文献:**

- [1] 何旭阳. 中国的制浆造纸厂应更关注其造纸纤维战略——如何保障未来造纸纤维的供应?. 中华纸业, 2008, 29(15): 20-23.
- [2] 沈国舫. 对发展我国速生丰产林有关问题的思考. 世界林业研究, 1992, (4): 67-74.
- [3] 康向阳, 朱之悌. 三倍体毛白杨在我国纸浆生产中的地位与作用. 北京林业大学学报, 2002, 24(增刊): 51-56.
- [4] 郑世凯. 杨树丰产栽培. 北京: 金盾出版社, 2006.
- [5] 董雯怡, 赵燕, 张志毅, 李吉跃, 聂立水. 水肥耦合效应对毛白杨苗木生物量的影响. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2194-2200.
- [6] 任忠秀, 聂立水, 张志毅, 张强, 宋连君, 李赟. 水氮耦合效应对毛白杨无性系人工林林分蓄积量与经济效益的影响. 北京林业大学学报, 2012, 34(1): 25-31.
- [7] 席本野, 王烨, 邸楠, 贾黎明, 李广德, 黄祥丰, 高园园. 地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长季生理特性的影响. 生态学报, 2012, 32(17): 5318-5329.
- [15] 白保勋, 杨海青, 樊巍, 卞新民. 生活污水慢渗生态处理对土壤及杨树生长的影响. 生态学报, 2010, 30(22): 6163-6172.
- [16] 白保勋, 樊巍, 杨海青, 卞新民, 赵辉. 生活污水慢渗对‘中林2001’杨树人工林生长的影响. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1403-1408.
- [17] 侯培强, 任珺, 陶玲, 陈学民, 伏小勇. 造纸废水灌溉对沙漠生态林土壤营养成份的影响. 兰州交通大学学报, 2008, 27(1): 42-45.
- [18] 任珺, 陶玲, 侯培强. 造纸废水灌溉对新疆杨体内钠离子含量的影响. 环境化学, 2010, 29(2): 295-298.
- [20] 何茜. 毛白杨抗旱节水优良无性系评价与筛选 [D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [24] 夏江宝, 刘庆, 谢文军, 孙景宽, 刘擎, 陆兆华. 废水灌溉对芦苇地土壤水文特征的影响. 农业工程学报, 2009, 25(12): 63-68.
- [26] 赵雪梅, 孙向阳, 王海燕, 田赟, 康向阳. 三倍体毛白杨速生林土壤养分因子及pH值动态变化. 生态学报, 2010, 30(13): 3414-3423.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 5 March, 2013 (Semimonthly)**  
**CONTENTS**

**Frontiers and Comprehensive Review**

- The effect of nitrogen deposition on forest soil organic matter and litter decomposition and the microbial mechanism ..... WANG Jingyuan, ZHANG Xinyu, WEN Xuefa, et al (1337)  
Advances and the effects of industrial hemp for the cleanup of heavy metal pollution ..... LIANG Shumin, XU Yanping, CHEN Yu, et al (1347)  
A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture ..... MENG Fande, GENG Runzhe, OU Yang, et al (1357)  
Progresses in dendrochronology of shrubs ..... LU Xiaoming, LIANG Eryuan (1367)

**Autecology & Fundamentals**

- The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation ..... WANG Yanbing, DE Yongjun, XIONG Wei, et al (1375)  
Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings ..... PEI Bin, ZHANG Guangcan, ZHANG Shuyong, et al (1386)  
Diurnal activity time budget of Père David's deer in Hubei Shishou Milu National Nature Reserve, China ..... YANG Daode, LI Zhuyun, LI Pengfei, et al (1397)  
Sublethal effects of three insecticides on the reproduction and host searching behaviors of *Sclerodermus sichuanensis* Xiao (Hymenoptera: Bethyidae) ..... YANG Hua, YANG Wei, YANG Chunping, et al (1405)

**Population, Community and Ecosystem**

- Seasonal succession of zooplankton in Sansha Bay, Fujian ..... XU Jiayi, XU Zhaoli (1413)  
Biomass production and litter decomposition of lakeshore plants in Napahai wetland, Northwestern Yunnan Plateau, China ..... GUO Xuhu, XIAO Derong, TIAN Kun, et al (1425)  
The flora and species diversity of herbaceous seed plants in wetlands along the Xin'anjiang River from Anhui ..... YANG Wenbin, LIU Kun, ZHOU Shoubiao (1433)  
Spatial-temporal variation of root-associated aerobic bacterial communities of *phragmites australis* and the linkage of water quality factors in constructed wetland ..... XIONG Wei, GUO Xiaoyu, ZHAO Fei (1443)  
Temporal dynamics and influencing factors of leaf respiration for three temperate tree species ..... WANG Zhaoguo, WANG Chuankuan (1456)  
Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions ..... ZHOU Jie, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (1465)  
An analysis of calcium components of *Artemisia ordosica* plant on sandy lands in different ecological regions ..... XUE Pingping, GAO Yubao, HE Xingdong (1475)  
Effects of alpine meadow plant communities on soil nematode functional structure in Northern Tibet, China ..... XUE Huiying, HU Feng, LUO Daqing (1482)  
Soil fauna diversity of abandoned land in a copper mine tailing area ..... ZHU Yongheng, SHEN Fei, YU Jian, et al (1495)  
Effects of ciprofloxacin on microbial biomass carbon and carbon metabolism diversity of soil microbial communities ..... MA Yi, PENG Jinju, WANG Yun, et al (1506)  
Estimation of ecological water demands based on ecological water table limitations in the lower reaches of the Liaohe River Plain, China ..... SUN Caizhi, GAO Ying, ZHU Zhengru (1513)

**Landscape, Regional and Global Ecology**

- The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming ..... SU Yongxian, ZHANG Hong'ou, CHEN Xiuzhi, et al (1524)  
Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration ..... LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun (1535)

- The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade ...  
..... MENG Dan, WANG Mingyu, LI Xiaojuan, et al (1545)
- Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment .....  
..... LEI Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al (1559)
- Photosynthetic characteristics, biomass allocation, C, N and P distribution of *Schima superba* seedlings in response to simulated  
nitrogen deposition ..... LI Mingyue, WANG Jian, WANG Zhenxing, et al (1569)
- Effect of iron slag adding on methane production, oxidation and emission in paddy fields .....  
..... WANG Weiqi, LI Pengfei, ZENG Congsheng, et al (1578)
- Resource and Industrial Ecology**
- Antioxidative system and chlorophyll fluorescence of *Zizania latifolia* Turcz. plants are affected by *Ustilago esculenta* infection .....  
..... YAN Ning, WANG Xiaoqing, WANG Zhidan, et al (1584)
- Analysis of cold-regulated gene expression of the Fingered Citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle) .....  
..... CHEN Wenrong, YE Jiejun, LI Yongqiang, et al (1594)
- Hosts preference of *Echinothrips americanus* Morgan for different vegetables ... ZHU Liang, SHI Baocai, GONG Yajun, et al (1607)
- Induction effects of jasmonic acid on tannin content and defense-related enzyme activities in conventional cotton plants .....  
..... YANG Shiyong, WANG Mengmeng, XIE Jianchun (1615)
- Effects of irrigation with paper mill effluent on growth and nutrient status of *Populus tomentosa* seedlings .....  
..... WANG Ye, XI Benye, CUI Xiangdong, et al (1626)
- Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach .....  
..... ZHAO Chen, WANG Yuan, GU Xueming, et al (1636)
- Research Notes**
- Characteristics of precipitation distribution in *Pinus tabulaeformis* plantations under different canopy coverage in Taiyue Mountain .....  
..... ZHOU Bin, HAN Hairong, KANG Fengfeng, et al (1645)
- Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing ..... JIA Baoqun (1654)
- Effects of *Mikania micrantha* wilt virus infection on photosynthesis and the activities of four enzymes in *Mikania micrantha* H. B. K. ....  
..... WANG Rui long, PAN Wanwen, YANG Jiaoyu, et al (1667)

# 《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研工作者,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研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

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第5期 (2013年3月)

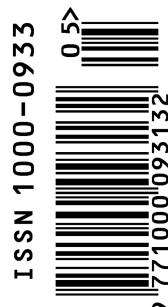
## ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 5 (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
主 编	王如松
主 管	中国科学技术协会
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
出 版	科学出版社 地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717
印 刷	北京北林印刷厂
发 行	科学出版社 地址:东黄城根北街16号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局
国 外 发 行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京399信箱 邮政编码:100044
广 告 经 营	京海工商广字第8013号
许 可 证	

Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
Editor-in-chief	WANG Rusong
Supervised by	China Association for Science and Technology
Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
Domestic	All Local Post Offices in China
Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元