

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

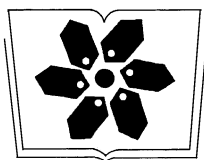
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第17期 Vol.32 No.17 **2012**

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 32 卷 第 17 期 2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

基于生物生态因子分析的长序榆保护策略.....	高建国,章 艺,吴玉环,等 (5287)
闽江口芦苇沼泽湿地土壤产甲烷菌群落结构的垂直分布.....	余晨兴,仝 川 (5299)
涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响.....	刘 渡,李 俊,于 强,等 (5309)
地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长及生理特性的影响.....	席本野,王 焯,邸 楠,等 (5318)
绿盲蝽危害对枣树叶片生化指标的影响.....	高 勇,门兴元,于 毅,等 (5330)
湿地资源保护经济学分析——以北京野鸭湖湿地为例.....	王昌海,崔丽娟,马牧源,等 (5337)
湿地保护区周边农户生态补偿意愿比较.....	王昌海,崔丽娟,毛旭峰,等 (5345)
湿地翅碱蓬生物量遥感估算模型.....	傅 新,刘高焕,黄 舸,等 (5355)
增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤有机碳组成的影响.....	郑娇娇,方华军,程淑兰,等 (5363)
大兴安岭 2001—2010 年森林火灾碳排放的计量估算.....	胡海清,魏书精,孙 龙 (5373)
基于水分控制的切花百合生长预测模型.....	董永义,李 刚,安东升,等 (5387)
极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放.....	刘殿君,吴 波,李永华,等 (5396)
黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应.....	许明祥,王 征,张 金,等 (5405)
小兴安岭 5 种林型土壤呼吸时空变异	史宝库,金光泽,汪兆洋 (5416)
疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素.....	刘文杰,陈生云,胡凤祖,等 (5429)
COII 参与茉莉酸调控拟南芥吲哚族芥子油苷生物合成过程	石 璐,李梦莎,王丽华,等 (5438)
Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用	王艳萍,王 力,卫三平 (5445)
三峡水库消落区不同海拔高度的植物群落多样性差异.....	刘维湄,王 杰,王 勇,等 (5454)
基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系	苏宏新,李广起 (5467)
山地枣树茎直径对不同生态因子的响应.....	赵 英,汪有科,韩立新,等 (5476)
幼龄柠条细根的空间分布和季节动态	张 帆,陈建文,王孟本 (5484)
山西五鹿山白皮松群落乔灌木层的种间分离.....	王丽丽,毕润成,闫 明,等 (5494)
长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响.....	马晓霞,王莲莲,黎青慧,等 (5502)
基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型.....	刘 娟,熊淑萍,杨 阳,等 (5512)
上海环城林带景观美学评价及优化策略	张凯旋,凌焕然,达良俊 (5521)
旅游风景区旅游交通系统碳足迹评估——以南岳衡山为例.....	窦银娣,刘云鹏,李伯华,等 (5532)
一种城市生态系统现状评价方法及其应用.....	石惠春,刘 伟,何 剑,等 (5542)
黄海中南部细纹狮子鱼的生物学特征及资源分布的季节变化.....	周志鹏,金显仕,单秀娟,等 (5550)
蓝藻堆积和螺类牧食对苦草生长的影响.....	何 虎,何宇虹,姬娅婵,等 (5562)
黑龙江省黄鼬冬季毛被分层结构及保温功能.....	柳 宇,张 伟 (5568)
虎纹蛙选择体温和热耐受性在个体发育过程中的变化	樊晓丽,雷焕宗,林植华 (5574)
水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响	白秀玲,周云凯,张 雷 (5581)
专论与综述	
城市绿地生态评价研究进展.....	毛齐正,罗上华,马克明,等 (5589)
全球变化背景下生态学热点问题研究——第二届“国际青年生态学者论坛”	万 云,许丽丽,耿其芳,等 (5601)
研究简报	
雅鲁藏布江高寒河谷流动沙地适生植物种筛选和恢复效果.....	沈渭寿,李海东,林乃峰,等 (5609)
学术信息与动态	
生态系统服务时代的来临——第五届生态系统服务伙伴年会述评	吕一河,卫 伟,孙然好 (5619)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 334 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-09	



封面图说: 带雏鸟的白枕鹤一家——白枕鹤是一种体型略小于丹顶鹤的优美的鹤。体羽蓝灰色,腹部较深,背部较浅,脸颊两侧红色,头和颈的后部及上背为白色,雌雄相似。其虹膜暗褐色,嘴黄绿色,脚红色。白枕鹤常常栖息于开阔平原芦苇沼泽和水草沼泽地带,有时亦出现于农田和海湾地区,尤其是迁徙季节。主要以植物种子、草根、嫩叶和鱼、蛙、软体动物、昆虫等为食。繁殖区在我国北方和西伯利亚东南部。我国白枕鹤多在黑龙江、吉林、内蒙古繁殖,与丹顶鹤的繁殖区几乎重叠,为国家一级保护动物。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201203160352

席本野, 王 焱, 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及生理特性的影响. 生态学报, 2012, 32(17): 5318-5329.

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.

地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长及生理特性的影响

席本野¹, 王 焱¹, 邸 楠¹, 贾黎明^{1,*}, 李广德², 黄祥丰¹, 高园园¹

(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. 中央广播电视大学农林医药学院, 北京 100039)

摘要:在 6、7 年生三倍体毛白杨 (triploid *Populus tomentosa*) 纸浆林中研究了地下滴灌 (SDI) 下不同土壤水势 (-25、-50、-75 kPa, 即灌溉起始阈值) 对林木生长及生理特征的影响。结果表明: 与不灌溉 (CK) 相比, SDI 使 6、7 年生林分的生产力分别平均提高 24% 和 28%; 其中, -25 kPa 使 6 年生林分的生产力达到 $39.90 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 较 CK 极显著提高 43.5% ($P < 0.01$)。各水势处理间, -25 kPa 的生产力在林分 6 年生时分别较 -50 和 -75 kPa 极显著提高 20% 和 31% ($P < 0.01$), 在 7 年生时分别提高 13% 和 14% ($P > 0.05$)。能在毛白杨速生期内 (4—7 月) 大幅提高土壤含水率 (20 和 50 cm 处分别平均提高 35% 和 27%)、树干日平均液流速率 (46%, SF_{mean})、黎明前叶水势 (41%, ψ_{pd}) 是 SDI 促进林木生长的重要机制。灌溉起始水势阈值的差异对毛白杨 SF_{mean} 和 ψ_{pd} 无显著影响 ($P > 0.05$)。3 个水势处理中, -25 kPa 的平均 SF_{mean} 和 ψ_{pd} 均最高, 且其能使根系活动剧烈的表土层 (0—20 cm) 的水分有效性有最大幅的提高, 这可能是其对林木生长有最大促进作用的主要原因。综上, 应在毛白杨纸浆林培育中大力推广 SDI, 并在应用时可将距滴头 10 cm、地下 20 cm 处的土壤水势达到 -25 kPa 作为灌溉起始阈值。另外, 在与试验地环境相似地区栽植毛白杨时, 应于 4—7 月灌溉, 8—10 月一般可不灌溉。

关键词: 地下滴灌; 水分管理; 液流; 土壤水势; 三倍体毛白杨; 纸浆林

Effects of soil water potential on the growth and physiological characteristics of *Populus tomentosa* pulpwood plantation under subsurface drip irrigation

XI Benye¹, WANG Ye¹, DI Nan¹, JIA Liming^{1,*}, LI Guangde², HUANG Xiangfeng¹, GAO Yuanyuan¹

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

2 The Faculty of Agroforestry & Medicine, The Open University of China, Beijing 100039, China

Abstract: Subsurface drip irrigation (SDI) is an intensive silvicultural practice which has the potential to increase productivity of triploid *Populus tomentosa* pulpwood plantations. In order to efficiently apply SDI in the cultivation of *P. tomentosa* pulpwood plantations, it is necessary to determine irrigation timing. A field experiment was conducted to investigate the effect of soil water potential (ψ_{soil}) on the growth and physiological characteristics of 6—7 year old trees under SDI in a *P. tomentosa* pulpwood plantation. The experiment included three ψ_{soil} treatments, which initiated irrigation when the ψ_{soil} at 20 cm soil depth and 10 cm distance from a drip emitter reached -25, -50, and -75 kPa, respectively. A control non-irrigation treatment (CK) was also included. Meteorological factors, ψ_{soil} , groundwater level, and tree growth were monitored hourly, daily, every 1—10 days, and monthly for two years, respectively. Soil water content at 20 and 50 cm depth, pre-dawn leaf water potential (ψ_{pd}), and trunk sap flow rate were measured in selected periods. Results showed

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“优质高效森林培育与经营研究方向”开放基金 (000-1108003)

收稿日期: 2012-03-16; 修订日期: 2012-06-14

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

that relative to CK, SDI could improve diameter, height, and individual volume increment of *P. tomentosa*. Irrespective of SDI treatment, SDI on average increased annual volume growth of the 6- and 7-year-old plantations by 24% and 28%, respectively over the CK treatment. Annual volume growth of the 6-year-old plantation following the -25 kPa treatment reached $39.90 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, which was 43.5% higher than the CK treatment ($P < 0.01$). Relative to the -50 and -75 kPa treatments, annual volume growth in the -25 kPa treatment was 20% and 31% higher ($P < 0.01$) in the 6-year-old plantation, respectively, and 13% and 14% higher ($P > 0.05$) in the 7-year-old plantation, respectively. Relative to CK during the fast growing period (April—July) of *P. tomentosa*, SDI increased the soil water content at 20 and 50 cm depth by 35% and 27%, respectively; increased average daily trunk sap flow rate (SF_{mean}) by 46%; and increased ψ_{pd} by 41%. The ψ_{soil} threshold for initiating irrigation had no significant effect ($P > 0.05$) on the SF_{mean} and ψ_{pd} of *P. tomentosa*. However, among the three ψ_{soil} treatments, the average SF_{mean} and ψ_{pd} values were highest following the -25 kPa treatment. The increase of soil water availability in the 0—20 cm soil layer (i. e., active rooting zone) was also greatest in the -25 kPa treatment. These results may explain why the -25 kPa treatment had the highest tree growth rate among the three ψ_{soil} treatments. Overall, the observed increase in soil water content, SF_{mean} , and ψ_{pd} indicate that these are the mechanisms by which SDI significantly improves *P. tomentosa* tree growth. In conclusion, our findings suggest that SDI should be promoted in the cultivation of *P. tomentosa* pulpwood plantations. To realize optimum tree growth, irrigation should be initiated when the ψ_{soil} at 20 cm depth and 10 cm distance from a drip emitter reaches -25 kPa. Furthermore, it is recommended that irrigation should be applied between April and July, and terminated between August and October when planting *P. tomentosa* in regions similar to our experimental plantation.

Key Words: subsurface drip irrigation; water management; sap flow; soil water potential; triploid *Populus tomentosa*; pulpwood plantation

发展杨树速生丰产纸浆林是解决我国造纸纤维原料供需矛盾^[1]的途径之一^[2-4]。三倍体毛白杨 (triploid *Populus tomentosa*) 作为短轮伐期纸浆林新品种,在我国北方速生纸浆林建设中发挥着重要作用^[3]。然而,良种潜力的充分发挥需依赖优良的培育方法才能得以实现,因此急需针对毛白杨纸浆林建立配套的集约经营措施来促使其生产潜力的极大发挥。据国内外速生丰产林发展经验,灌溉是一种事半功倍的集约经营措施,可短时间大幅提高林地生产力。

滴灌作为一种高效、经济、环保的灌水方法^[5],目前在国外已广泛应用于杨树人工林培育^[6-9],但其在国内相同领域的应用还极少^[10-12]。多数研究表明滴灌能大幅提高杨树人工林生产力^[6-7, 11-12],但随品种、气候、灌溉水质等因子的变化也有研究发现滴灌对杨树的生长无促进作用,甚至还会降低其生长^[7, 13]。因此,将滴灌用于毛白杨纸浆林培育极具潜力,但具体效果如何目前尚不明确。

灌溉时间的合理确定有助于滴灌技术的高效利用。目前,国内外在杨树人工林中应用滴灌时,大都还是经验地确定灌溉时间,这无疑会限制其潜力的发挥。因此,若在毛白杨纸浆林中高效地应用滴灌,需首先建立一种简易、合理的灌溉时间确定方法。监控土壤水势是一种很好的选择,其不仅测法简单快速,不需测定降雨和蒸发,甚至还可通过选择合适的灌溉起始阈值来减少水分深层渗漏^[14]。目前,该法已广泛用于农业灌溉^[15-17],但在杨树人工林灌溉中却极少应用,只有 Hansen^[6]和 Shock 等^[18]曾将其用于杨树人工林的滴灌和喷灌。

本文研究目标是:(1)了解滴灌对毛白杨生长和生理特征的影响;(2)为毛白杨纸浆林滴灌确定合适的灌溉起始土壤水势阈值;(3)根据林木生长节律、多年地下水位动态及气象因子变化特征,为毛白杨纸浆林的水分管理策略提出建议。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与研究对象

试验地位于山东省高唐县梁村镇(36°58'N, 116°14'E)。该地区地势平坦,气候为暖温带半干旱季风区域

大陆性气候,年均降水量 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。试验地土壤为潮土,其基本性质见文献^[19]。

本文研究对象为三倍体毛白杨速生纸浆林。林地总面积 3.9 hm²,于 2005 年春季栽植三倍体毛白杨无性系 B301(*P. tomentosa* × *P. bolleana*) × *P. tomentosa*,苗木采用 1 年生根苗,平均胸径 2 cm,平均苗高 2.5 m。整地方式为机械穴状,穴直径 1.2 m,深 1 m,造林前以复合肥为基肥施于穴底部,回填少量表土后栽植苗木。林木采取宽窄行带状栽植模式,株距 1 m,窄行距 2 m,宽行距 6 m。2005—2006 年,林内间作棉花,除对其进行常规漫灌和施肥外未单独对林木进行水肥管理。2007—2009 年,林内无间作,无水肥管理;因定期喷撒除草剂,林内杂草稀疏。

为开展本研究,于 2008 年春季即对林地约一半区域铺设滴灌管(2008—2009 年未使用),目的是使在管道铺设过程中受扰动的树木根系有充足时间恢复自然生长状态。滴灌管铺设方式为每 2 行树铺设 3 根滴灌管,即分别铺设在窄行中央和宽行内距树行 60 cm 处。滴灌管管径为 16 mm,埋深根据我们前期的研究基础^[11]经验地定为 20 cm。滴头为迷宫式滴头,间距 50 cm,流量为 2 L/h。

1.2 试验设计

试验于 2010、2011 年 4—10 月份开展。试验以土壤水势(ψ_{soil})为参试因子,当距离滴头 10 cm、地表下 20 cm 处的 ψ_{soil} 达到一定阈值时即开始灌溉。试验采用完全随机区组设计,共设 3 个土壤水势阈值处理,分别为 -25、-50 和 -75 kPa,3 次重复(每重复小区面积约为 720 m²,内含林木约 180 株);由于试验地所在当地每年对毛白杨林分进行管理时一般不灌溉,因此,本研究另设 1 个无灌溉的对照处理(CK),亦为 3 次重复(每重复小区面积约为 240 m²,内含林木约 60 株)。2010 年初即试验开始时,-25、-50、-75 kPa 和 CK 处理的平均胸径分别为(9.26±0.29)、(9.01±0.15)、(8.96±0.16)和(9.17±0.11) cm,之间无显著差异($P>0.05$);平均树高分别为(12.26±0.08)、(11.98±0.13)、(11.94±0.14)和(12.03±0.19) m,之间无显著差异($P>0.05$);各处理各重复小区内林木的胸径和树高变异系数分别在 14%—18% 和 9%—14% 之间。

本研究欲利用参考作物潜在蒸散量(ET_0)和毛白杨作物系数等参数算出毛白杨林分的实际蒸散量,然后以此来设计灌水定额。但由于缺乏毛白杨的作物系数资料,同时为达到对林分进行充分灌溉的目的,因此根据前期获取的毛白杨蒸腾耗水资料,将毛白杨的作物系数定为 1.2,即以各处理两次灌水之间累积 ET_0 的 120% 对林分进行充分灌溉。灌水定额具体计算方法见式(1)。由于本研究的目的在于使土壤一定深度处的水势值保持在一定阈值之上,因此基于上述假设而导致的灌水定额估算偏差并不会对试验结果造成太大影响。此外,因灌溉期间地下水位相对较深,且考虑到 120 cm 以下土层因砂粒含量较多^[19]而毛管水上升高度有限,所以在计算灌水定额时不将地下水补给量考虑在内。

$$m = 120\% ET_0 - P \cdot (1 - \lambda) \quad (1)$$

式中, m 为灌水定额(mm); P 为降雨量(mm); λ 是冠层降雨截获率(%),依据与本试验林分栽植密度和郁闭度相近的山杨林分的林冠降雨截留率(13%)^[20]和我国温带山地落叶阔叶林的平均林冠降雨截留率(18%)^[21],本研究假定试验林分的冠层降雨截获率为 15%。

各灌溉处理每次的灌溉时长利用式(2)进行计算。

$$t = (m \cdot s) / (\eta \cdot n \cdot q) \quad (2)$$

式中, t 是灌溉时长(h); s 是每株林木的平均占地面积,为 4 m²; η 是灌水利用系数,本研究取 0.9; n 是每株林木平均拥有的滴头数,为 3; q 是滴头流量,为 2 L/h;其它参数含义同上。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水势和含水率

在各水势处理(不含 CK)第二重复小区的中部安装一组共 6 个机械式张力计进行 ψ_{soil} 测定,测定时间为 2010 和 2011 年的 4—10 月。张力计布设位置定在距离滴头 10 cm、地表下 20 cm 处,其中,宽、窄行内各布设 3 个。从试验起始日起,每天 7:00 左右对张力计进行读数,然后算出每个水势处理的 ψ_{soil} 平均值,当其低于

设计阈值时即对该处理进行灌溉。

2011 年,利用 TDR 水分探头(北京时域通科技有限公司,北京,中国)对各试验处理(含 CK)的土壤体积含水率进行测定,测定时间为 4—10 月。在各试验处理第二重复小区内选择 2 个具有代表性的地点,分别在其地下 20 和 50 cm 处埋设 TDR 探头(均位于滴头正下方),即每土层 2 个传感器,数据采集间隔为 30 min。

1.3.2 黎明前叶水势

在 2011 年 6 月选择 3 个典型晴天(6 月 4、20、26 日),于黎明 5:00 左右,在各试验处理第二重复小区内各选择 3 株平均标准木,然后在每株样树的冠层中部摘取 3 片生长发育良好的叶片进行黎明前叶水势(ψ_{pd})测定。测定方法为压力室法。因仪器故障,在 6 月 20 日未能测得 -50 kPa 的 ψ_{pd} 。

1.3.3 树干液流速率

2010 年 5 月 1—31 日,在各试验处理第二重复小区内选择 3 株平均标准木,在其树干距地面 1.3 m 处的南方位安装一套热扩散探针(TDP 30, Dynamax Inc., Houston, USA)以测定各样树的液流速率。数据采集方式为每 10 s 采集 1 次,每 10 min 计算平均值并记录。

1.3.4 林木生长

在各试验处理第二重复小区的前、中、后 3 段中分别选 10 株树即每处理共 30 株树作为样树,在生长季内每月对其测定 1 次胸径。另外,在每年 11 月初对各处理各试验小区中的林木进行等距抽样来测定树高和胸径。其中,-25、-50 和 -75 kPa 处理各试验小区的样本数为 80—90 株,CK 处理各小区样本数为 30—35 株。最后,利用平均胸径、树高数据根据平均实验形数法计算平均标准木的材积。通过在 2009 年生长季末对 12 株平均标准木的树干解析,得出毛白杨实验形数为 0.445。

1.3.5 气象因子及地下水位

气象因子利用距试验地约 250 m 远的全自动气象站(Delta-T Devices Ltd., Cambridge, England)进行测定,测定指标包括太阳总辐射、空气温度、空气相对湿度、风向、风速、降雨量等。 ET_0 利用气象数据,根据 Penman-Monteith 公式^[22]计算获得。地下水位利用试验地东北、西南角的两口地下水位观测井进行测定,测定时间为 2009 年 8 月到 2011 年 10 月底,测定频率为 1—10 d。

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,如果处理间差异显著,用 Duncan 法在 0.05 或 0.01 水平上进行多重比较。采用 Excel 2010 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 总体灌溉情况

试验地区在春季土壤解冻后多出现干旱天气,所以为促使林木正常展叶,每年在试验开始前先对各水势处理的林木同时灌溉 1 次,即浇展叶水,以将土壤浇透为标准。2010 和 2011 年浇展叶水的时间分别是 4 月 13 日和 4 月 7 日,灌水量分别为 17 mm 和 14 mm,之后即开始正式试验。

-25、-50 和 -75 kPa 处理在 2010 年的总灌溉次数(含展叶水)分别为 22、11、7 次,在 2011 年分别为 21、10、6 次。因此,-25、-50、-75 kPa 处理在 2010 和 2011 年的平均灌水间隔期分别为 5、10、14 d。

因 2010 与 2011 年 4—6 月的降雨量较少,所以该时期内每次的灌水定额均可由式(1)计算得出。然而,从每年 7 月开始,由于个别降雨事件的雨量较大,导致根据式(1)计算灌水定额时出现负值的现象。这种情况正好反映出本研究确定灌水定额方法的局限性。因此,下一步研究中需对灌水定额的计算方法进行改进。由于本研究的目的在于使土壤水势保持在一定阈值之上以判断其对林木生长和生理特征的影响,所以在遇到这种情况时,根据前期的灌溉时间来经验地确定当次的灌水时长,然后将其换算为相应的灌水量。最终,-25、-50 和 -75 kPa 处理在 2010 年的总实际灌水量(含展叶水)分别为 336、307、300 mm,在 2011 年分别为 323、291、274 mm。

2.2 各处理林木生长

如图 1 所示,各试验处理的毛白杨每年均有两个生长高峰期,分别是 5 和 7 月,其次在 6 月份生长较快,

毛白杨这 3 个月的累积胸径生长量平均可占全年的 84% 左右。在 4 和 8 月,毛白杨的生长速度相对缓慢,其在该时期的累积胸径生长量平均占全年的 13% 左右。在每年 9—10 月内,毛白杨几乎停止或极少生长,其在该时期内的累积胸径生长量平均仅占全年的 3% 左右。另外,从图 1 还可看出,在毛白杨的主要生长月份(4—8 月),各水势处理的平均胸径生长量除在 2010 年 4 和 8 月低于 CK 外,在其它月份均明显高于 CK,其幅度达到 20%—110%;各水势处理间,-25 kPa 处理各月的胸径增长量均最大,而-75 kPa 处理一般最小。

各试验处理在不同年份对林木胸径、树高、单株材积增长量和生产力的影响不尽相同(表 1)。2010 年,-25 kPa 的胸径增长量最大,为 1.07 cm,而 CK 最小,仅为 0.73 cm;-25 kPa 的胸径增长量较-50 kPa 高 14.8% ($P>0.05$),较-75 kPa 和 CK 分别显著高 24.3% 和 46.6% ($P<0.05$);虽然差异不显著,但-50 和-75 kPa 的胸径增长量与 CK 相比仍分别高出 27.7% 和 17.9%。2011 年,虽然各处理间差异不显著($P>0.05$),但-25 kPa 的胸径增长量仍最大,达到了 0.75 cm;与 CK 相比,-25、-50、-75 kPa 处理分别较其高出约 40.5%、29.7% 和 31.0%。

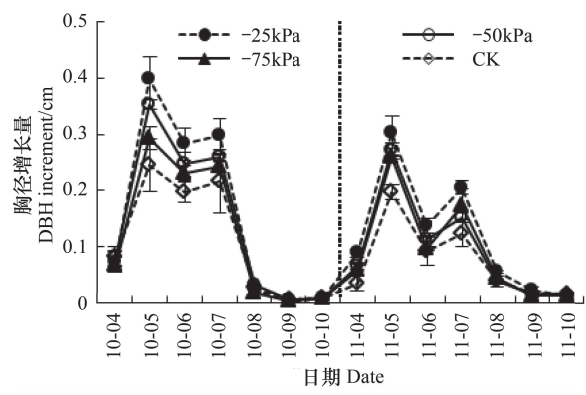


图 1 2010 与 2011 年各处理林木胸径生长月动态
Fig.1 Monthly dynamics of DBH (diameters at breast height) increments of different treatments in 2010 and 2011
虚线为 2010 和 2011 年的分界线

表 1 2010 与 2011 年各试验处理林木生长对比

Table 1 Comparison of tree growth among different treatments in 2010 and 2011

年份 Year	处理 Treatment	胸径增长量 DBH increment /cm	树高增长量 Height increment /m	单株材积增长量 Individual volume increment /(m ³ /株)	林地生产力 Plantation productivity /(m ³ hm ⁻² a ⁻¹)
2010	CK	0.73(0.07) b	1.11(0.08) a	0.0111(0.0011) B	27.79(2.79) B
	-25 kPa	1.07(0.04) a	1.17(0.08) a	0.0160(0.0004) A	39.90(0.98) A
	-50 kPa	0.93(0.09) ab	1.08(0.09) a	0.0133(0.0008) B	33.22(1.92) B
	-75 kPa	0.86(0.03) b	1.13(0.10) a	0.0122(0.0005) B	30.62(1.17) B
2011	CK	0.54(0.05) a	0.98(0.01) b	0.0099(0.0010) a	24.66(2.52) a
	-25 kPa	0.75(0.04) a	1.13(0.05) a	0.0138(0.0012) a	34.50(3.08) a
	-50 kPa	0.70(0.09) a	1.05(0.03) ab	0.0122(0.0012) a	30.52(3.11) a
	-75 kPa	0.70(0.03) a	1.04(0.01) ab	0.0120(0.0007) a	30.07(1.85) a

数据为平均值(标准误);同年份同列下不同小写和大写字母分别表示差异显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$),检验方法为 Duncan 检验

2010 年,各处理的树高增长量均在 1.1 m 左右,无显著差异($P>0.05$)。但 2011 年,各处理间却差异显著($P<0.05$),其中,-25 kPa 的增长量最大,为 1.13m,较 CK 显著高 15.6% ($P<0.05$);然而,与-50 和-75 kPa 相比其却未有显著优势($P>0.05$)。

2010 年,-25 kPa 的单株材积增长量最大,为 0.0160 m³/株,较-50、-75 kPa 和 CK 分别极显著高 20.3%、31.1% 和 44.1%。2011 年,各处理间差异不显著($P>0.05$),但-25 kPa 的单株材积生长量仍最大,CK 最小;-25、-50 和-75 kPa 分别较 CK 高 39.4%、23.2% 和 21.2%。

2010 年,-25 kPa 的林地生产力最高,达到了 39.90 m³ hm⁻² a⁻¹,较-50、-75 kPa 和 CK 分别极显著高 20.1%、30.3% 和 43.5% ($P<0.01$);虽然差异不显著,但-50 和-75 kPa 的生产力仍分别较 CK 高 19.5% 和 10.2%。2011 年,各处理间生产力差异不显著($P>0.05$);与 CK 处理 24.66 m³ hm⁻² a⁻¹ 的生产力相比,-25、-50 和-75 kPa 处理的生产力分别达到了 34.50、30.52 和 30.07 m³ hm⁻² a⁻¹,分别较其高出 39.9%、23.8% 和

21.9%。此外,2011 年各处理的生产力均较 2010 年有所下降,这可能是因为 2011 年林分郁闭度较高,光照代替水资源成为限制林木生长的主要因子;也可能是毛白杨的自身生长节律,即在达到一定林龄之后毛白杨的连年生长量会逐渐下降,因为据田间实际观测发现毛白杨是一个前期生长快而后期生长缓慢的树种。

2.3 各处理土壤水势和含水率变化

如图 2 所示,试验期间,各水势处理的 ψ_{soil} 均很好地保持在其设定阈值之上,但因实际操作和其它问题,各处理的 ψ_{soil} 会在个别天明显低于设计阈值,即在 ψ_{soil} 低于阈值几天后才开始灌溉。此外,在 2011 年 10 月,虽然 -25 kPa 处理的 ψ_{soil} 一直低于其设计阈值,但并未对其灌溉,这主要是因为该月内毛白杨的绝大多数树叶已经脱落且生长几乎停止已无再对其灌溉的必要。每年从 4 月初到浇展叶水之前,各处理的 ψ_{soil} 值基本相同且保持一致的变化趋势。浇完展叶水时,即试验正式开始时,各处理的 ψ_{soil} 在 2010 和 2011 年分别为 -7 和 -6.5 kPa。之后,随着灌溉起始阈值的不同,各处理 ψ_{soil} 的变化趋势差异明显。随着灌溉阈值的降低(负的更多), ψ_{soil} 波动的频率减小但幅度却增大。在毛白杨生长最快的 4—7 月份内(从浇完展叶水算起),-25、-50 和 -75 kPa 处理在 2010 年的平均 ψ_{soil} 分别为 -19.1、-26.1 和 -34.7 kPa,在 2011 年分别为 -16.8、-24.8 和 -32.4 kPa。由此可见,灌溉起始水势阈值的差异能明显影响表层土壤水分的有效性,阈值越高,土壤的平均水分状况越好。在每年 8—10 月份,各处理的土壤水势基本保持相同的变化趋势。而且,由于受雨季降雨的影响(图 2),各处理的 ψ_{soil} 在 8—10 月份均可一直保持在各自的设计阈值之上(仅有 -25 kPa 处理的 ψ_{soil} 在 2011 年 10 月低于其设计阈值),因此,此时期内各处理均没有再进行灌溉。8—10 月份内,-25、-50 和 -75 kPa 处理在 2010 年的平均 ψ_{soil} 分别为 -8.8、-13.7 和 -13.3 kPa,在 2011 年分别为 -22.9、-17.9 和 -19.4 kPa,其值大多高于对应年份 4—7 月的平均 ψ_{soil} 。

如图 3 所示,2011 年 4—7 月,各处理在不同土层的土壤水分变化趋势和有效性差异明显。其中,各水势处理的含水率均呈现周期性的“干旱—湿润”变化,而 CK 处理由于无灌溉水的补充,其含水率呈逐渐下降趋势,直到受强降雨的影响(图 2)才明显增加。在毛白杨生长最快的 4—7 月份,-25、-50、-75 kPa 和 CK 处理在 20 cm 深处的平均含水率分别为 0.353、0.337、0.336 和 0.254 cm^3/cm^3 ,在 50 cm 处分别为 0.357、0.367、0.373 和 0.289 cm^3/cm^3 。由此可见,以不同水势阈值起始灌溉均可大幅度提高土壤水分的有效性;但是,阈值越高,表土层(20 cm)的水分有效性提高越多,阈值越低,深土层(50 cm)的水分有效性提高越多。在 8—10 月份,由于受雨季降雨的影响,各处理各土层的含水率变化趋势基本一致且其之间的差异也逐渐缩小;期间,-25、-50、-75 kPa 和 CK 处理在 20 cm 深处的平均含水率分别为 0.350、0.352、0.352 和 0.335 cm^3/cm^3 ,在 50 cm 土层分别为 0.374、0.385、0.389 和 0.356 cm^3/cm^3 ,其值均高于 4—7 月份的平均值。

2.4 各处理黎明前叶水势

如表 2 所示,在 2011 年 6 月的 3 个典型晴天,-25 和 -50 kPa 处理的 ψ_{pd} 均显著($P < 0.05$,6 月 20 和 26 日)或极显著($P < 0.01$,6 月 4 日)高于 CK,其平均幅度分别为 47% 和 45%。-75 kPa 处理的 ψ_{pd} 在 6 月 4 和 20 日与 CK 无显著差异($P > 0.05$),但在 6 月 26 日却较其显著高约 65% ($P < 0.05$)。各水势处理之间的 ψ_{pd} 虽在 3 个典型晴天均无显著差异($P > 0.05$),但 ψ_{pd} 有随灌溉起始阈值的升高而升高(负的更少)的趋势。

表 2 2011 年 6 月各试验处理在 3 个典型晴天的黎明前叶水势

Table 2 Pre-dawn leaf water potential of different treatments on three typical clear days in June 2011

处理 Treatment	叶水势 Leaf water potential/(-MPa)		
	6 月 4 日	6 月 20 日	6 月 26 日
-25 kPa	0.700(0.030) A	0.275(0.049) a	0.149(0.012) a
-50 kPa	0.769(0.023) A	—	0.179(0.047) a
-75 kPa	0.812(0.035) AB	0.400(0.010) ab	0.225(0.070) a
CK	0.925(0.053) B	0.461(0.062) b	0.653(0.193) b

数据为平均值(标准误);同列内不同小写和大写字母分别表示差异显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$),检验方法为 Duncan 检验

2.5 各处理树干液流速率

如图 4 所示,2010 年 5 月,除了在有降雨的 16 和 17 日外,-25、-50 和 -75 kPa 处理的日平均液流速率

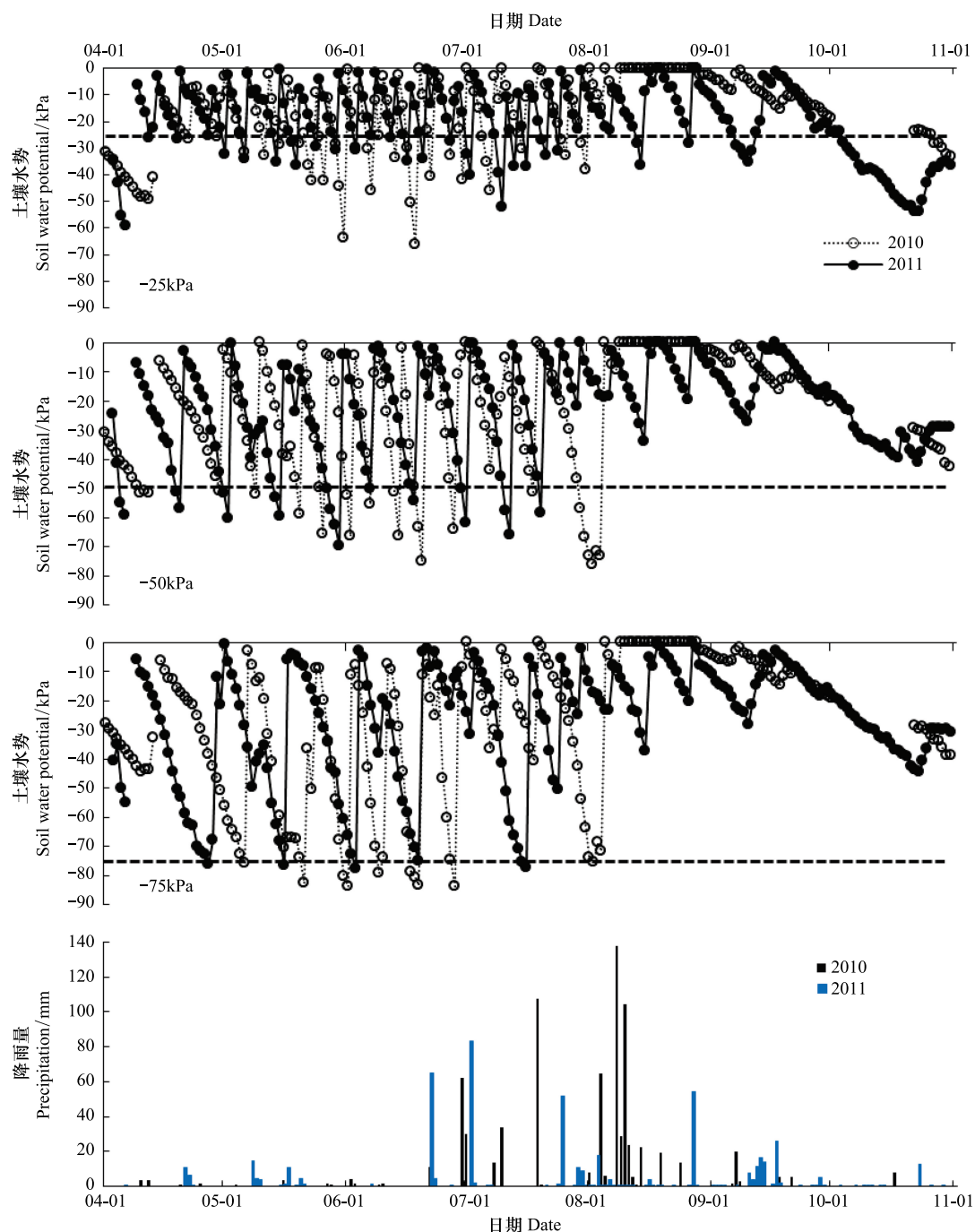


图2 2010与2011年各处理土壤水势变化及降雨量

Fig.2 Soil water potential variation of different treatments and precipitation in 2010 and 2011

(SF_{mean})几乎一直高于CK;其中,-25和-75 kPa处理的优势最为明显,二者各天的 SF_{mean} 分别较CK高约50%—87%和47%—74%;-50 kPa处理的优势较小,其各天的 SF_{mean} 仅比CK高约3%—19%。对于各水势处理,-25 kPa的 SF_{mean} 最大,-75 kPa次之,-50 kPa最小,它们的月平均 SF_{mean} 分别为 2.24×10^{-3} , 2.13×10^{-3} 和 1.53×10^{-3} cm/s。然而,虽然各试验处理间的 SF_{mean} 存在较大差异,但其还未达到显著水平($P>0.05$)。

2.6 多年地下水位年动态、潜在蒸散量和降雨量

试验地所在地区地下水位的年变幅非常大(图5),所监测到的2009(从8月上旬开始)、2010和2011年的最低地下水位分别为175、367和388 cm,最高水位分别为138、38和85 cm,平均年变化幅度达到316 cm

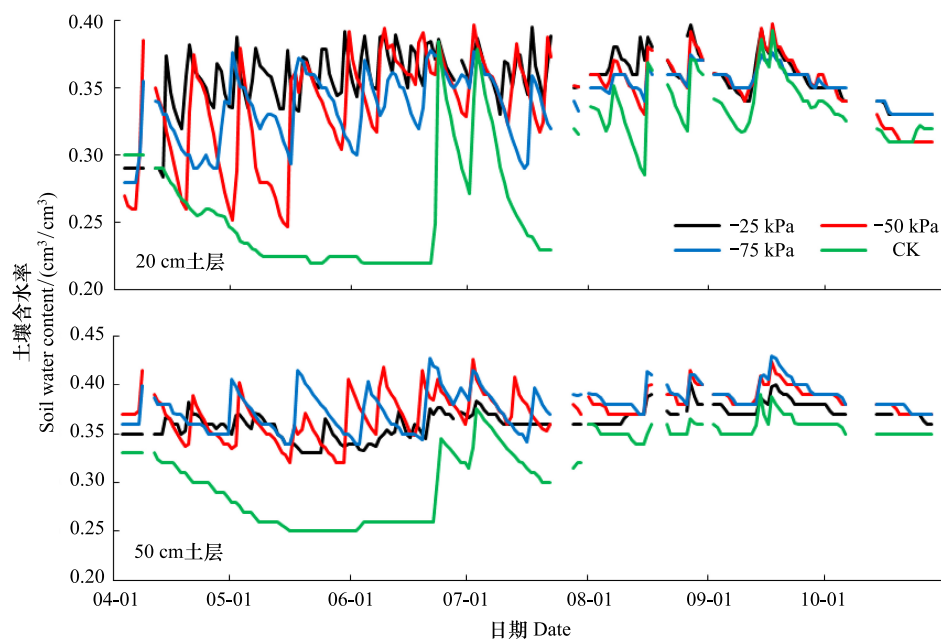


图3 2011年4—10月份各处理20和50 cm土层的土壤含水率变化

Fig. 3 Soil water content variation at 20 and 50 cm depth of different treatments from April to October 2011

(不含2009年)。总体来讲,每年年初到6月中下旬,地下水位呈逐渐下降的趋势,尤其是在3月下旬到6月中旬之间由于当地农业灌溉需抽取大量地下水,所以此期间内地下水位下降异常剧烈。而从6月中下旬到9月,由于前期农田灌溉水的不断下渗和受雨季降雨的影响,地下水位开始迅速回升,一般在9月份上升到每年的最高峰。此后一直到年底,随降雨的减少和水分的不断下渗,地下水位又开始逐渐下降。

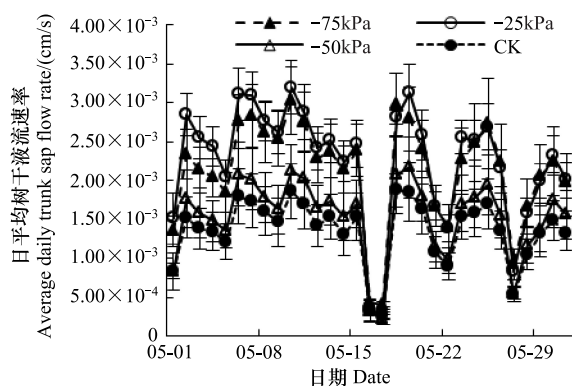


图4 2010年5月各处理日平均树干液流速率变化

Fig. 4 Variation of average daily trunk sap flow rate of different treatments in May 2010

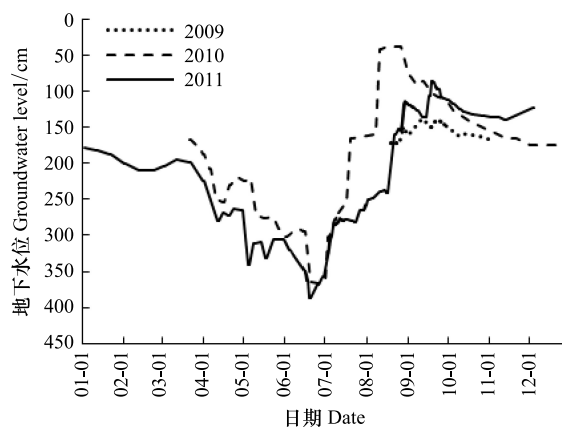


图5 2009—2011年地下水位动态

Fig. 5 Dynamics of groundwater level in 2009—2011

如表3所示,在4、5、6、10月,试验地所在地区的多年平均 ET_0 均高于降雨量,其总和达到392 mm,约为同期降雨量总和的2.4倍。而在7—9月,多年平均降雨量却均远高于多年平均 ET_0 ,其总和为528 mm(因2011年8月仅采集到部分降雨数据,故不将该月数据计算在内),约为同期 ET_0 总和的2.3倍。

3 结论与讨论

3.1 滴灌下土壤水势对毛白杨生长的影响

Hansen^[6]发现在1—4年生杨树人工林中地表滴灌可使林木树高生长量提高2%—22%,在3—5年生林分中可使生物量增长量提高27%—33%。Dickman等^[7]发现,在林木栽植第4年,与不灌溉的林分相比,地表

滴灌能显著提高 *Populus × euramericana* (Dode) Guinier cv. ‘Eugenei’ 人工林的生长,但对 *Populus tristis* Fisch × *Populus balsamifera* L. cv. ‘Tristis 1’ 人工林的生长无显著影响。贾黎明等^[11]在北京沿河沙地 I-214 杨树人工林中研究发现,与常规灌溉相比,地下滴灌可大大增加树木的生长量,在林木栽植第 4 年,林地生产力达到 22.78—25.81 m³ hm⁻² a⁻¹,比常规灌溉增加了 3.9—4.6 倍。张广才等^[12]研究发现,与渠灌相比,滴灌可使沙地杨树防护林的树高和胸径分别提高 3.98% 和 28.19%。与这些学者的研究结果相似,本研究发现,地下滴灌能明显促进毛白杨的生长。在 2010 和 2011 年,与不灌溉的处理相比,虽然地下滴灌促进树木生长的绝对显著优势 ($P < 0.01$) 仅出现在 2010 年的 -25 kPa 处理中,但总体来讲,地下滴灌仍能使胸径生长量分别平均提高 31% 和 33%,树高生长量分别提高 2% 和 10%,单株材积生长量分别提高 25% 和 28%,林地生产力分别提高 24% 和 28%。此外,考虑到本研究是在郁闭度已经较高的 6—7 年生的毛白杨纸浆林中开展,此时光照可能已开始逐渐代替土壤水分成为限制林木生长的主要因子,而且林木也可能开始处于生长缓慢期,但本研究中采用的地下滴灌技术仍能将生产力提高 10.2%—43.5%,因此,如果在毛白杨生长迅速的幼龄林阶段即对其进行地下滴灌,那么其生产力必将会有更大幅度的提高。综上,建议在毛白杨纸浆林培育中大力推广地下滴灌技术。

表 3 2009—2011 年试验所在地 4—10 月参考作物潜在蒸散量及降雨量

Table 3 Reference crop potential evapotranspiration and precipitation in the experiment site from April to October in 2009—2011

	年份 Year	月份 Month						
		4	5	6	7	8	9	10
参考作物潜在蒸散量/mm	2009	96.6	131.3	143.7	94.7	82.4	63.5	75.3
Reference crop potential evapotranspiration	2010	80.4	110.9	113.8	100.6	70.1	60.5	59.4
	2011	96.3	104.5	116.4	96.8	71.6	50.9	47.0
	平均 Mean	91.1	115.6	124.6	97.4	74.7	58.3	60.6
降雨量 Precipitation/mm	2009	5.0	78.4	133.8	180.0	122.2	88.2	0.0
	2010	15.2	11.4	82.8	187.2	438.4	36.2	9.2
	2011	18.4	42.2	72.0	160.0	89.0 ^a	90.2	16.2
	平均 Mean	12.9	44.0	96.2	175.7	216.5	71.5	8.5

a 因仪器故障,仅采集到部分降雨数据

与 Hansen^[6] 和 Shock 等^[18] 的研究结果相似,在本研究的 3 个水势处理中,最高的水势阈值 (-25 kPa) 能最大地促进林木生长和林地生产力的提高。2010 年, -25 kPa 处理的胸径、单株材积生长量均明显高于 -50 和 -75 kPa (表 1),其当年林地生产力达到 39.90 m³ hm⁻² a⁻¹,较后两者极显著提高 20% 和 31% ($P < 0.01$)。2011 年,虽然 3 个水势处理间的各生长指标均差异不显著 ($P > 0.05$, 表 1),但 -25 kPa 的林地生产力仍较 -50 和 -75 kPa 高出 13% 和 14%。因此,可将距离滴头 10 cm,地下 20 cm 深处的土壤水势达到 -25 kPa 作为毛白杨纸浆林的灌溉起始土壤水势阈值。

本研究中,因考虑到试验地内毛白杨近三分之一 (29%) 的细根分布于 0—20 cm 的表土层^[19],以及因 0—30 cm 土层的导水率高于 30—70 cm^[19] 而致使 30 cm 深处的土层交界面会对水分下渗产生一定的阻碍作用^[23],所以将土壤水势的监测位置定在距离滴头 10 cm、地下 20 cm 处。然而,实际上,土壤不同位置的水势变化与植物耗水量的相关程度是不同的,所以其在反映植物耗水变化时的敏感性也不同^[16]。因此,在下一步研究中,应对距滴灌管不同距离不同深度处土壤水势的时空变化、滴灌条件下毛白杨的根系分布状况以及土壤湿润体内的水分分布变化进行监测^[16, 24],以确定用于指导毛白杨纸浆林滴灌起始时间的张力计的最佳布设方式。

3.2 不同灌溉起始阈值对毛白杨生理特征及土壤水分有效性的影响

与不灌水的 CK 相比,土壤水分有效性、黎明前叶水势以及树干液流速率的提高可能是地下滴灌处理中毛白杨林木生长改善和林地生产力提高的主要外因和重要生理机制。2011 年,3 个水势处理在毛白杨生长最

快的4—7月份的平均含水率均明显高于CK(图3),其中,在20和50 cm处分别较其高约32%—39%和24%—29%。从3个典型晴天的 ψ_{pd} 来看,3个水势处理的 ψ_{pd} 几乎均显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)高于CK(除了在6月4和20日,-75 kPa与CK无显著差异),提高幅度为30%—47%(3d平均值)。从树干液流速率来看,在2010年5月,-25、-50和-75 kPa的 SF_{mean} 几乎一直高于CK(除了5月16和17日),提高幅度分别为50%—87%、47%—74%和3%—19%。虽然各水势处理与CK的 SF_{mean} 差异未达到显著水平,但由于滴灌下林木的胸径增长量明显高于CK(图1)即边材面积增长量亦高于CK,所以各水势处理下的树干边材液流通量比CK高的程度将会更大。这意味着滴灌下毛白杨的蒸腾耗水量会远高于CK,但同时光合总产量也可能会远多于CK,从而最终促使林木生长的提高。

随着灌溉起始阈值的升高根区土壤水势明显升高(图2)。理论上讲,这种土壤水分有效性的差异应该会对林木生理特征产生明显影响,但本研究发现土壤水势的差异(图2)并未对毛白杨 ψ_{pd} (表2)和 SF_{mean} (图4)产生显著影响($P>0.05$)。然而, ψ_{pd} 却有随土壤水势的升高而升高的趋势,而 SF_{mean} 对土壤水势未有相似的响应。总体来讲,3个水势处理中,-25 kPa处理的平均 ψ_{pd} (表2)和 SF_{mean} (图4)均为最高,这可能是-25 kPa在2010和2011年的生长以及生产力能极显著高于($P<0.01$)和高于($P>0.05$)-50、-75 kPa的原因之一。另外,将更多的灌溉水聚集在表土层从而使表土层(0—20 cm)的水分有效性有更大幅度的提高(图2,3)可能是-25 kPa处理拥有最高生长优势的另外一个重要原因。因为在试验地0—90 cm土层中,0—20 cm的表土层中分布的细根最多且根系吸水活动最为激烈^[19],所以在毛白杨速生期内使该土层的水分有效性有更大幅度的提高将会促进树木更快的生长。与本研究结果相似,刘玉春等^[25-26]在温室内开展层状土壤番茄地下滴灌试验时发现,与上砂下壤的层状土壤相比,均质土壤中的地下滴灌能使0—20 cm表土层的含水率提高28%,所以其水分利用效率和产量也相应提高了32%和33%。

3.3 毛白杨纸浆林年总水分管理策略

每年4—7月为毛白杨生长最快的时期,该时期内试验地周围在2010和2011年的平均地下水位为297 cm(图5),远低于试验地内毛白杨细根的最大分布深度(约150 cm)^[19],而且由于试验地120 cm以下土层中土壤的砂性较强,毛管水上升作用较弱,因此,该时期内毛白杨很可能无法通过吸收地下水资源来供给其蒸腾耗水。另外,每年4—6月,试验地所在地区的 ET_0 远高于降雨量(表3),这意味着该时期内仅通过降雨所带来的水资源可能远无法满足毛白杨林分的蒸腾耗水。在每年7月,虽然降雨量会明显高于 ET_0 ,但由于该时期内地下水位的平均埋深仍较大(在2010和2011年平均为269 cm,图5),即仍无法为毛白杨提供稳定的地下水资源,因此,如果在该时期内仅依靠降雨来为处于生长高峰期的毛白杨提供水资源存在较高的风险。然而,在每年8—10月,地下水位通常会大幅度回升,其在2010和2011年的平均值为118 cm,显然,此时期内毛白杨已有一部分吸水根系直接处在地下水中或处于毛管边缘^[19],这意味着毛白杨可能依靠深层根系通过吸收地下水来供给其蒸腾所需^[27-28]。此外,由于该时期内试验地所在地区的降雨量远高于 ET_0 ,因此土壤会因得到大量的降雨补充而在即使没有灌溉的情况下也能保持较高的水分有效性(图2,图3)。显然,每年8—10月份较高的土壤水分有效性和较浅的地下水位已可能满足处于生长缓慢期的毛白杨的蒸腾耗水,不至于使其经受水分胁迫而死亡。综上,在与本研究试验地所在地区气候、地下水位及土壤条件相似的地区栽植毛白杨时,应在每年4—7月进行灌溉,而在8—10月除非遇到极端干旱年一般不需灌溉。

致谢:感谢美国爱达荷大学 Mark Kimsey 研究员对英文摘要的修改。

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] Camp C R. Subsurface drip irrigation: a review. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1998, 41(5): 1353-1367.
- [6] Hansen E A. Irrigating short rotation intensive culture hybrid poplars. Biomass, 1988, 16(4): 237-250.
- [7] Dickmann D I, Nguyen P V, Pregitzer K S. Effects of irrigation and coppicing on above-ground growth, physiology, and fine-root dynamics of two field-grown hybrid poplar clones. Forest Ecology and Management, 1996, 80(1/3): 163-174.
- [8] Ceulemans R, Deraedt W. Production physiology and growth potential of poplars under short-rotation forestry culture. Forest Ecology Management, 1999, 121(1/2): 9-23.
- [9] Voltas J, Serrano L, Hernández M, Pemán J. Carbon isotope discrimination, gas exchange and stem growth of four Euramerican hybrid poplars under different watering regimes. New Forests, 2006, 31(3): 435-451.
- [10] Liu F J, Zheng S K, Zang D Q. Studies on relationship between water supply and growth in a poplar plantation. I. The effect of water supply on growth, architecture and leaf quantity of tree. Forest Research, 1988, 1(2): 153-161.
- [11] Jia L M, Xing C S, Wei Y K, Li Y A, Yang L. The growth and photosynthesis of poplar trees in fast-growing and high-yield plantations with subterranean drip irrigation. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(2): 61-67.
- [12] Zhang G C, Zhang Z W, Shi X N, Yu W P, Ma H, Wu G L. Study on comprehensive benefits of applying drip irrigation in sandy land shelterbelt. Forest Research, 2004, 17(S1): 78-82.
- [13] Musselman R C. Response of Transplanted Aspen to Drip Irrigation on Reclaimed Mine Lands: Final Report. Fort Collins: USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station, 2007.
- [14] Hodnett M G, Bell J P, Ah Koon P D, Soopramanien G C, Batchelor C H. The control of drip irrigation of sugarcane using 'index' tensiometers: some comparisons with control by the water budget method. Agricultural Water Management, 1990, 17(1/3): 189-207.
- [15] Wang D, Kang Y H, Wan S Q. Effect of soil matric potential on tomato yield and water use under drip irrigation condition. Agricultural Water Management, 2007, 87(2): 180-186.
- [16] Liu Y C, Li J S. Effects of lateral depths on alternative placements of tensiometers used for drip irrigation scheduling. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 18-24.
- [17] Shock C C, Wang F X. Soil water tension, a powerful measurement for productivity and stewardship. Hortscience, 2011, 46(2): 178-185.
- [18] Shock C C, Feibert E B G, Seddigh M, Saunders L D. Water requirements and growth of irrigated hybrid poplar in a Semi-Arid environment in eastern Oregon. Western Journal of Applied Forestry, 2002, 17(1): 46-53.
- [19] Xi B Y, Wang Y, Jia L M, Si J, Xiang D K. Property of root distribution of triploid *Populus tomentosa* and its relation to root water uptake under the wide-and-narrow row spacing scheme. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(1): 47-57.
- [20] Pan C Z, ShangGuang Z P. Generation mechanism of woodland runoff and sediment on Loess Plateau under hypo-rainfall: a case study of artificial *P. tabulaeformis* and secondary natural *P. dadidiana* stands. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(9): 1597-1602.
- [21] Wen Y G, Liu S R. Quantitative analysis of the characteristics of rainfall interception of main forest ecosystems in China. Scientia Silvae Sinicae, 1995, 31(4): 289-298.
- [22] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998.
- [23] Li J S, Yang F Y, Li Y F. Water and nitrogen distribution under subsurface drip fertigation as affected by layered-textural soils. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(7): 25-31.
- [24] Coelho E F, dos Santos D B, de Azevedo C A V. Sensor placement for soil water monitoring in lemon irrigated by micro sprinkler. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2007, 11(1): 46-52.
- [25] Liu Y C, Li J S. Effects of lateral depth and layered-textural soils on water and nitrogen use efficiency of drip irrigated tomato. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6): 7-12.
- [26] Liu Y C, Li J S. Effects of lateral depth and layered-textural soils on water and nitrate dynamics and root distribution for drip fertigated tomato. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7): 782-790.
- [27] Snyder K A, Williams D G. Root allocation and water uptake patterns in riparian tree saplings: response to irrigation and defoliation. Forest Ecology and Management, 2007, 246(2/3): 222-231.
- [28] Wilske B, Lu N, Wei L, Chen S P, Zha T G, Liu C F, Xu W T, Noormets A, Huang J H, Wei Y F, Chen J, Zhang Z Q, Ni J, Sun G, Guo K, McNulty S, John R, Han X G, Lin G H, Chen J Q. Poplar plantation has the potential to alter the water balance in semiarid Inner Mongolia.

Journal of Environmental Management, 2009, 90(8): 2762-2770.

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和作用. 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.
- [10] 刘奉觉, 郑世凯, 臧道群. 田间供水与杨树生长关系的研究——I. 供水处理对杨树生长、树体结构和叶量的影响. 林业科学研究, 1988, 1(2): 153-161.
- [11] 贾黎明, 邢长山, 韦艳葵, 李延安, 杨丽. 地下滴灌条件下杨树速生丰产林生长与光合特性. 林业科学, 2004, 40(2): 61-67.
- [12] 张广才, 张振文, 时新宁, 于卫平, 马晖, 伍光林. 滴灌在沙地防护林上应用的综合效益初步研究. 林业科学研究, 2004, 17(增刊): 78-82.
- [16] 刘玉春, 李久生. 滴灌灌溉计划制定中毛管埋深对负压计布置方式的影响. 农业工程学报, 2010, 26(4): 18-24.
- [19] 席本野, 王烨, 贾黎明, 司静, 向地奎. 宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨根系分布特征及其与根系吸水的关系. 生态学报, 2011, 31(1): 47-57.
- [20] 潘成忠, 上官周平. 黄土区次降雨条件下林地径流和侵蚀产沙形成机制: 以人工油松林和次生山杨林为例. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1597-1602.
- [21] 温远光, 刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降雨截留规律的数量分析. 林业科学, 1995, 31(4): 289-298.
- [23] 李久生, 杨风艳, 栗岩峰. 层状土壤质地对地下滴灌水氮分布的影响. 农业工程学报, 2009, 25(7): 25-31.
- [25] 刘玉春, 李久生. 毛管埋深和层状质地对番茄滴灌水氮利用效率的影响. 农业工程学报, 2009, 25(6): 7-12.
- [26] 刘玉春, 李久生. 毛管埋深和土壤层状质地对地下滴灌番茄根区水氮动态和根系分布的影响. 水利学报, 2009, 40(7): 782-790.

CONTENTS

Conservation strategies for <i>Ulmus elongata</i> based on the analysis of biological and ecological factors	GAO Jianguo, ZHANG Yi, WU Yuhuan, et al (5287)
Vertical distribution of methanogen community structures in <i>Phragmites australis</i> marsh soil in the Min River estuary	SHE Chenxing, TONG Chuan (5299)
Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland	LIU Du, LI Jun, YU Qiang, TONG Xiaojuan, et al (5309)
Effects of soil water potential on the growth and physiological characteristics of <i>Populus tomentosa</i> pulpwood plantation under subsurface drip irrigation	XI Benye, WANG Ye, DI Nan, et al (5318)
Physiological indices of leaves of jujube (<i>Zizyphus jujuba</i>) damaged by <i>Apolygus lucorum</i>	GAO Yong, MEN Xingyuan, YU Yi, et al (5330)
Economic analysis of wetland resource protection: a case study of Beijing Wild Duck Lake	WANG Changhai, CUI Lijuan, MA Muyuan, et al (5337)
Comparative studies on the farmers' willingness to accept eco-compensation in wetlands nature reserve	WANG Changhai, CUI Lijuan, MAO Xufeng, et al (5345)
Remote sensing estimation models of <i>Suaeda salsa</i> biomass in the coastal wetland	FU Xin, LIU Gaohuan, HUANG Chong, LIU Qingsheng (5355)
Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau	ZHENG Jiaojiao, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (5363)
Estimating carbon emissions from forest fires during 2001 to 2010 in Daxing'anling Mountain	HU Haiqing, WEI Shujing, SUN Long (5373)
Predicting the effects of soil water potential on the growth of cut lily	DONG Yongyi, LI Gang, AN Dongsheng, et al (5387)
Rain enrichment-accelerated carbon emissions from soil in a <i>Nitraria sphaerocarpa</i> community in hyperarid region	LIU Dianjun, WU Bo, LI Yonghua, et al (5396)
Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region	XU Mingxiang, WANG Zheng, ZHANG Jin, et al (5405)
Temporal and spatial variability in soil respiration in five temperate forests in Xiaoxing'an Mountains, China	SHI Baoku, JIN Guangze, WANG Zhaoyang (5416)
Distributions pattern of phosphorus, potassium and influencing factors in the upstream of Shule river basin	LIU Wenjie, CHEN Shengyun, HU Fengzu, et al (5429)
COI1 is involved in jasmonate-induced indolic glucosinolate biosynthesis in <i>Arabidopsis thaliana</i>	SHI Lu, LI Mengsha, WANG Lihua, et al (5438)
Modeling canopy rainfall interception of a replanted <i>Robinia pseudoacacia</i> forest in the Loess Plateau	WANG Yanping, WANG Li, WEI Sanping (5445)
The differences of plant community diversity among the different altitudes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	LIU Weiwei, WANG Jie, WANG Yong, et al (5454)
Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing	SU Hongxin, LI Guangqi (5467)
Response of upland jujube tree trunk diameter to different ecological factors	ZHAO Ying, WANG Youke, HAN Lixin, et al (5476)
The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a young <i>Caragana korshinskii</i> plantation	ZHANG Fan, CHEN Jianwen, WANG Mengben (5484)
Interspecific segregation of species in tree and shrub layers of the <i>Pinus bungeana</i> Zucc. ex Endl. community in the Wulu Mountains, Shanxi Province, China	WANG Lili, BI Runcheng, YAN Ming, et al (5494)
Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season	MA Xiaoxia, WANG Lianlian, LI Qinghui, et al (5502)
A model to predict dry matter accumulation dynamics in wheat based on the normalized method	LIU Juan, XIONG Shuping, YANG Yang, et al (5512)
Optimization strategies and an aesthetic evaluation of typical plant communities in the Shanghai Green Belt	ZHANG Kaixuan, LING Huanran, DA Liangjun (5521)
Carbon footprint evaluation research on the tourism transportation system at tourist attractions; a case study in Hengshan	DOU Yindi, LIU Yunpeng, LI Bohua, et al (5532)
An urban ecosystem assessment method and its application	SHI Huichun, LIU Wei, HE Jian, et al (5542)
Seasonal variations in distribution and biological characteristics of snailfish <i>Liparis tanakae</i> in the central and southern Yellow Sea	ZHOU Zhipeng, JIN Xianshi, SHAN Xiujuan, et al (5550)
Effects of cyanobacterial accumulation and snail grazing on the growth of <i>vallisneria natans</i>	HE Hu, HE Yuhong, JI Yachan, et al (5562)
The structure and thermal insulation capability of <i>Mustela sibirica manchurica</i> winter pelage in Heilongjiang Province	LIU Yu, ZHANG Wei (5568)
Ontogenetic shifts in selected body temperature and thermal tolerance of the tiger frog, <i>Hoplobatrachus chinensis</i>	FAN Xiaoli, LEI Huanzong, LIN Zhihua (5574)
The influence of tubificid worms bioturbation on organic phosphorus components and their vertical distribution in sediment of Lake Taihu	BAI Xiuling, ZHOU Yunkai, ZHANG Lei (5581)
Review and Monograph	
Research advances in ecological assessment of urban greenspace	MAO Qizheng, LUO Shanghua, MA Keming, et al (5589)
Ecological hot topics in global change on the 2 nd International Young Ecologist Forum	WAN Yun, XU Lili, GENG Qifang, et al (5601)
Scientific Note	
Screening trial for the suitable plant species growing on sand dunes in the alpine valley and its recovery status in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China	SHEN Weishou, LI Haidong, LIN Naifeng, et al (5609)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 17 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 17 (September, 2012)

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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:1000717	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 70.00 元