

地面滴灌对 107 杨幼林生长和水肥利用的影响¹⁾

贺勇

兰再平 孙尚伟 刘俊琴

(湖南省林业厅,长沙,410004)

(中国林业科学研究院世界银行项目办公室)

摘 要 以北京永定河沙地 107 杨人工幼林为研究对象,比较滴灌和常规沟灌对杨树生长的影响。结果表明:滴灌栽培 107 杨,2、3 年生幼龄林的蓄积量分别为 13.37、41.15 m³/hm²,是沟灌的 2.22、1.68 倍。滴灌能明显促进 107 杨各器官的生长,增加生物产量,滴灌栽培使 3 年生杨树单株的干生物量为沟灌的 2.42 倍,并且滴灌还能提高 107 杨幼林体内含水率。滴灌栽培 107 杨幼林 2、3 年生的水分利用率分别是 0.84 和 3.89 m³/hm²,分别是沟灌的 1.91 倍和 2.84 倍。滴灌能减少 107 杨幼林田间养分的流失,显著提高 107 杨幼林田间各养分利用率,同时对 107 杨单株植物各养分利用率也有一定提升。

关键词 107 杨;杨树生长;滴灌
分类号 S725.3

Effects of Drip Irrigation on the Growth and Use Efficiency of Water and Fertilizer of Young ‘107’ Poplar Plantation//He Yong(Forestry Department of Hunan Province, Changsha 410004, P. R. China); Lan Zaiping, Sun Shangwei, Liu Junqin(World Bank Loan Project Office, Chinese Academy of Forestry)//Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(11):37-41.

We studied the growth and use efficiency of water and fertilizer of ‘107’ poplar trees (*Populus×euramericana* cv. ‘74/76’) in the young plantations with drip irrigation and furrow irrigation on sandy soil of Yongding River in Beijing. The drip irrigation on the volume growth of 2-and 3-year-old ‘107’ poplar plantation, respectively, reached 13.37 and 41.15 m³/hm², which was 2.22 and 1.68 times as much as that with the furrow irrigation treatment. It was significantly promoted the growth of various organs and the biomass and water content of ‘107’ poplar tree with drip irrigation. The stem biomass of 3-year-old ‘107’ poplar tree with drip irrigation was 2.42 times as much as that with the furrow irrigation. Water use efficiencies of 2-and 3-year-old ‘107’ poplar plantation with drip irrigation were 0.84 and 3.89 m³/hm², which were 1.91 and 2.84 times as much as that with the furrow irrigation, respectively. Compared with the furrow irrigation of young ‘107’ poplar plantation, drip irrigation significantly increased the field nutrient utilization and decreased the loss of field nutrient as well as single tree.

Keywords ‘107’ poplar; Poplar growth; Drip irrigation

我国杨树人工林面积已达 757 万 hm²,居世界首位^[1],但由于绝大部分林地为非宜林地,立地条件较差,经营管理粗放,生产力普遍较低,其平均生产力为 15 m³·hm⁻²·a⁻¹以下,低于国际中等水平(20~30 m³·hm⁻²·a⁻¹),更远低于国际最高水平(53 m³·hm⁻²·a⁻¹)^[2]。随着我国木材需求量的逐年增加,急需通过高效的集约经营措施,提高我国现有杨树人工林的生产力,从而缓解我国日益增加的木材缺口压力。

灌溉能提高植物根区的土壤水分有效性及改善树体的水分状况,提高植物生长量,是一项重要的杨树人工林集约经营措施^[3-4]。然而,灌溉虽可促进林木生长,但不适当的灌溉管理不仅会浪费大量水资源,而且还会对环境产生负面影响(土壤盐渍化、地下水污染等)^[5-6]。受社会发展和经济条件的限

制,目前我国对杨树人工林灌溉时,大都采用传统的灌溉技术(沟灌、畦灌、漫灌、穴灌等)^[7-9],这些传统的灌溉技术不仅会浪费大量水资源,而且较差的灌溉管理和较长的灌溉间隔,限制了林木的生长。与传统灌溉技术相比,滴灌具有灌水均匀、节水、省工、省能,而且对土壤和地形的适应性强等特点^[10]。目前,国内外一些地区已经将滴灌技术运用到杨树栽培中,并开展了一系列相关研究^[11-21],研究表明采用滴灌技术栽培杨树能极大地提高杨树人工林的生产力^[22-26],取得的综合效益远大于常规灌溉^[14,20-21]。但是,在滴灌状态下,研究杨树对水肥利用率的较少。我国水资源极度亏缺^[27],而且近年来地下水和河流污染以及土壤盐渍化问题也日益严重。因此,在面临水资源亏缺、环境污染和木材缺口的三重压力下,如何通过高效且环境友好的节水灌溉方式,大幅提高杨树人工林生产力成为我国森林培育工作者共同面临的难题。本文在灌溉施肥一体化条件下采用相同控制指标(相同的灌溉量和施肥量),按照沟灌和滴灌的技术要求来运行操作,比较两种灌溉方式,对杨树幼林生长情况及水分、养分利用效率的影响。

1) 国家林业局引进国际先进林业科学技术项目(2009-4-48)。
第一作者简介:贺勇,男,1988 年 6 月生,湖南省林业厅造林处,中国林业科学研究院硕士研究生。E-mail:303061228@qq.com。
通信作者:兰再平,中国林业科学研究院世界银行项目办公室,研究员。E-mail:zplan@139.com。
收稿日期:2015 年 5 月 8 日。
责任编辑:王广建。

1 研究区概况

研究区位于北京市大兴区林场,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均日照时间 2 620.4 h,年均气温 11.6℃,冬季平均气温-2.3℃,夏季平均气温 25.1℃,年平均降水量 552.9 mm,全年无霜期 180~200 d。

试验地土壤为永定河故道冲积的沙土,土壤剖面调查表明,土壤从地表向下 1.2 m 无明显腐殖质层,均为质地均匀的细沙。地下水位深 36 m,土壤密度(1.46±0.15)g/cm³,土壤田间持水量为 10%,有机质质量分数低于 0.2%,土壤蓄水保肥能力差。

2 材料与方法

2.1 试验材料

采用滴灌栽培和常规栽培的欧美杨 107 无性系(*Populus×euramericana* cv. ‘74/76’)人工林作为研究对象。该人工林于 2011 年春季安装了自动化地表滴灌系统,采用 30 cm 长的插条进行扦插造林,株行距为 2 m×4 m,滴灌毛管在地表沿行距方向铺设。滴灌栽培和常规沟灌栽培的杨树人工林面积均为 1 600 m²,中间设有 50 m 的缓冲带,株数均为 200 株。在生长当年对新造林进行了统一的灌溉与施肥管理,年末平均树高为 3.5 m,平均胸径为 2.3 cm。

2.2 试验设计

从 4 月初到 9 月底,滴灌栽培采用少量多次的方式灌溉,每次灌水量 6~9 mm,灌水总量为 250 mm;常规沟灌栽培灌溉 5 次,春季一次、夏季三次和秋季 1 次,每次灌水量 50 mm,灌水总量为 250 mm。从 5 月下旬到 8 月底,滴灌栽培施肥随灌水进行,每隔十天施肥一次,共施 10 次;常规栽培施肥 4 次,施肥后灌水,施肥总量与滴灌栽培相等,具体施肥量见表 1。

表 1 107 杨幼林年度每株施肥标准

			kg
年度	N	P	K
2012	0.09	0.015	0.02
2013	0.16	0.020	0.05

注:氮肥为尿素,磷肥为磷酸一铵,钾肥为氯化钾,均为可溶性肥料。

2.3 数据调查与处理

林分生长量调查与计算:分别于 2012 年和 2013 年生长季末,对试验小区所有样木的树高和胸径进行调查,运用欧美杨二元立木材积公式^[28]: $V=0.254\ 547\ 545D^2H+0.784\ 642\ 807D^2$ 计算立木材积,进而得出每公顷蓄积量。

生物量调查与养分含量测定:每年生长季末,在各小区内选择 3 株标准木进行树干解析,测定其枝、

叶、干、根部位生物量及 N、P、K 元素质量分数。每年生长季前和长季末,对各小区土壤 0~80 cm 土层进行碱解氮、有效磷和速效钾质量分数测定。

养分利用效率的计算方法(以 N 为例):田间养分利用效率(N_{UE})是单位养分资源消耗量所获得的生物产量,计算公式为^[28]:

$$N_{UE} = Y/N_{con};$$
$$N_{con} = N_f - (N_e - N_i).$$

式中: Y 为树木生物产量, N_{con} 为土壤 N 的消耗量, N_f 为施氮量, N_e 和 N_i 各为生长期末和生长初始的土壤氮量。

植物养分利用效率(N_{UEp})是树木个体吸收单位养分资源生产的生物产量。计算公式为^[28]:

$$N_{UEp} = Y/N_{up}$$

式中: Y 为树木生物产量, N_{up} 为树体氮吸收量。

田间耗水量测定:采用美国 DECAGON 公司生产的 EC-5 土壤湿度传感器测量土壤水分变化情况。各处理选出 3 株标准木,再沿滴灌管线或灌溉沟线选 3 个测点(分别位于标准木树干基部、距基部 50 cm 处、距基部 100 cm 处);垂直管线或灌溉沟线方向各选 2 个测点(分别位于距标准木树干基部 100 cm 处和 200 cm 处)。结合根系分布情况和计划湿润层深度,土壤水分测量深度为 80 cm,每 20 cm 分为一层。每日记录各观测点土壤水分变化情况。在林地周边空地无林木遮挡处安装一个气象用标准雨量筒,测量降水数据。

根据《灌溉试验规范》(SL13-2004)中的水量平衡法计算耗水量,公式如下:

$$E_{T1-2} = 10 \sum (r_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P).$$

式中: E_{T1-2} 为阶段需水量; r_i 为第 i 层的土壤干密度; H_i 为第 i 层的土壤厚度; W_{i1} 、 W_{i2} 分别为第 i 层土壤在计算时段始末的含水率; M 为时段内灌水量; P 为时段内降水量。

水分利用率(W_{UE})的计算方法:水分利用率指的是农田蒸散消耗单位质量水所生产的干物质量,计算公式为^[29]:

$$W_{UE} = B/E_T.$$

式中: W_{UE} 为水分利用率; B 为生物总量; E_T 为耗水量。

运用 excel 软件进行计算和经济效益分析,应用 R 语言软件对调查数据进行单因素方差分析(ANOVA)。

3 结果与分析

3.1 不同灌溉方式对 107 杨幼林生长的影响

由表 2 可知,滴灌栽培的 107 杨幼林在树高、胸

径和蓄积的生长均明显优于沟灌栽培的,方差分析表明两者从第 2 年到第 3 年,在树高、胸径和蓄积量上均始终存在极显著差异($p<0.001$),并且双方

在蓄积的差距逐渐加大。同时,在均匀度方面,滴灌栽培区也好于常规灌溉区。

表 2 不同灌溉方式 107 杨幼林 2、3 年生树高、胸径和蓄积量

灌溉方式	2 年生			3 年生		
	胸径/cm	树高/m	蓄积/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	胸径/cm	树高/m	蓄积/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$
滴灌	(6.1 ± 0.46) A	(7.38 ± 0.34) A	(13.37 ± 2.32) A	(10.1 ± 0.86) A	(11.14 ± 0.53) A	(41.15 ± 8.25) A
沟灌	(4.7 ± 0.83) B	(5.92 ± 0.66) B	(6.03 ± 2.24) B	(7.7 ± 1.51) B	(9.10 ± 1.15) B	(24.56 ± 9.25) B

注:表中数值为“平均值±标准差”,同列不同大写字母表示差异显著($p<0.001$)。

从图 1~3 中可以看出,107 杨的生长期主要集中在 5—8 月份,9 月份基本停止生长。不论滴灌还是沟灌,107 杨第 3 年的蓄积开始快速增长,增长量远大于第 2 年。滴灌条件下 107 杨胸径、树高和蓄积的生长高峰期为 7 月,而沟灌条件下 107 杨胸径、树高和蓄积的生长高峰期则为 8 月。

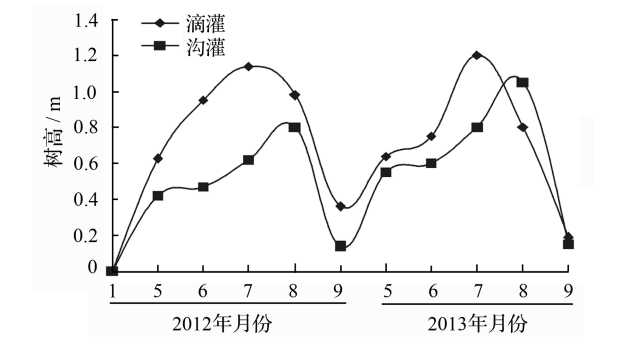


图 1 107 杨不同灌溉方式各月胸径生长量

3.2 不同灌溉处理水分利用率

由表 3 可知,滴灌第 1 年(即 107 杨第 2 年)能提高整株生物量,比沟灌提高了 118.80%;滴灌第 2 年,其他部分生物量也大幅度增加,3 年生杨树叶、枝、干、根和单株的干生物量分别比沟灌栽培的提高了 111.88%、163.66%、141.79%、153.63%和 142.41%。

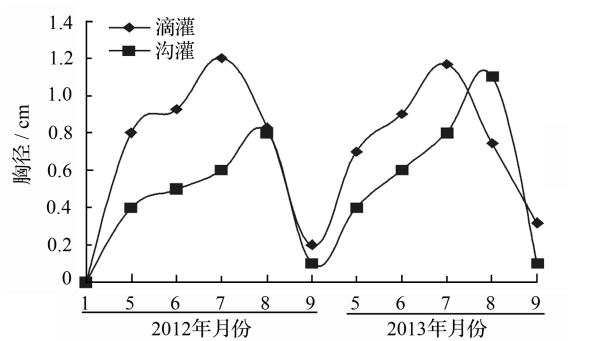


图 2 107 杨不同灌溉方式各月树高生长量

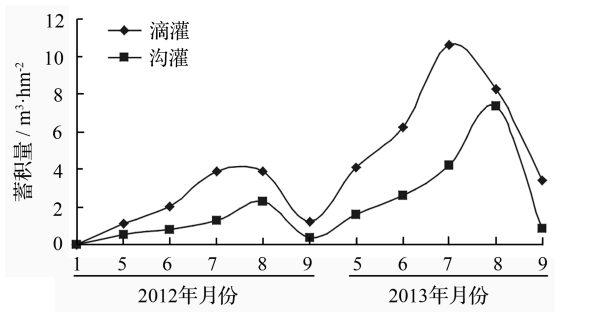


图 3 107 杨不同灌溉方式各月蓄积生长量

同时发现,在含水率方面,滴灌栽培的杨树也略大于沟灌栽培的,分别为沟灌栽培的 103.38%、108.22%、104.60%、117.29%和 107.54%。由此可见,滴灌栽培不仅能促进 107 杨幼林各器官的生长、增加生物量,还能提高 107 杨体内含水率。

表 3 不同灌溉处理 107 杨幼林 2、3 年生生物量

器官	灌溉方式	2 年生			3 年生		
		鲜质量/kg	干质量/kg	含水率/%	鲜质量/kg	干质量/kg	含水率/%
叶	滴灌	(2.83 ± 0.41) A	(0.93 ± 0.15) A	67.00	(9.88 ± 0.85) A	(3.71 ± 0.32) A	62.50
	沟灌	(2.13 ± 0.62) B	(0.75 ± 0.22) B	64.81	(4.47 ± 1.20) B	(1.75 ± 0.47) B	60.88
枝	滴灌	(1.48 ± 0.36) A	(0.70 ± 0.17) A	52.92	(7.54 ± 0.61) A	(3.82 ± 0.31) A	49.39
	沟灌	(1.08 ± 0.45) B	(0.55 ± 0.23) B	48.90	(2.71 ± 0.75) B	(1.45 ± 0.40) B	46.55
干	滴灌	(8.60 ± 1.86) A	(3.61 ± 0.78) A	58.00	(34.37 ± 4.07) A	(16.48 ± 1.95) A	52.06
	沟灌	(3.71 ± 1.03) B	(1.65 ± 0.46) B	55.45	(13.73 ± 2.22) B	(6.82 ± 1.10) B	50.36
根	滴灌	(4.85 ± 0.76) A	(1.78 ± 0.28) A	63.42	(16.83 ± 3.08) A	(6.06 ± 1.11) A	64.00
	沟灌	(3.34 ± 0.67) B	(1.53 ± 0.31) B	54.07	(5.39 ± 1.28) B	(2.39 ± 0.57) B	55.67
单株	滴灌	(17.76 ± 3.49) A	(7.02 ± 1.38) A	60.49	(68.63 ± 8.42) A	(30.06 ± 3.69) A	56.19
	沟灌	(10.26 ± 2.79) B	(4.49 ± 1.22) B	56.25	(26.30 ± 5.38) B	(12.40 ± 2.54) B	52.84

注:表中数值为“平均值±标准差”,同列不同大写字母表示差异显著($p<0.001$)。

从表 4 可以看出,107 杨幼林生物量增量逐年增加,滴灌栽培的增加幅度大于沟灌栽培的。滴灌

栽培 107 杨幼林 2、3 年生的水分利用率分别是沟灌的 1.91 倍和 2.84 倍,因此,相对于沟灌,滴灌栽培能

大幅度提高 107 杨幼林的水分利用率。

表 4 107 杨幼林生物量增量和水分利用率

树龄/ a	滴灌生物量 增量/kg·hm ⁻²	沟灌生物量 增量/kg·hm ⁻²	差异 率/%	滴灌耗水 量/m ³ ·hm ⁻²	沟灌耗水 量/m ³ ·hm ⁻²	差异 率/%	滴灌水分利 用率/kg·m ⁻³	沟灌水分利 用率/kg·m ⁻³	差异 率/%
2	6 703.26	3 543.48	47.14	8 025.00	8 103.00	0.96	0.84	0.44	47.62
3	28 807.78	9 889.85	65.67	7 397.00	7 470.00	0.98	3.89	1.32	66.07

3.3 不同灌溉处理养分利用率

从表 5~6 可以看出,2、3 年生 107 杨幼林对 N、P、K 元素的消耗量和吸收量逐年加大,且第 3 年显著增加,各养分元素消耗、吸收量由大到小的顺序为:N、K、P;而利用率由大到小的顺序为:P、K、N;说明滴灌栽培能减少田间养分的流失。

在田间养分利用率方面,3 年生 107 杨各养分

利用率均高于 2 年生,滴灌栽培各养分利用率明显均优于沟灌栽培;在植物养分利用率方面,3 年生 107 杨各养分利用率均高于 2 年生,滴灌栽培各养分利用率略高于沟灌栽培。因此,107 杨幼林随着树龄的增长,田间养分利用率和植物养分利用率不断提升;滴灌栽培能显著提高 107 杨幼林的田间养分利用率,同时对植物养分利用率也有一定提升。

表 5 107 杨幼林田间养分利用率

树龄/ a	灌溉 方式	生物量增量/ kg·hm ⁻²	土壤氮消耗量/ kg·hm ⁻²	土壤磷消耗量/ kg·hm ⁻²	土壤钾消耗量/ kg·hm ⁻²	氮利用 率/%	磷利用 率/%	钾利用 率/%
2	滴灌	6 703.26	87.62	16.65	34.28	76.50	402.60	195.51
	沟灌	3 543.48	102.34	15.86	20.27	34.62	223.42	174.81
	差异率/%	47.14	14.38	4.74	40.87	54.75	44.51	10.59
3	滴灌	28 807.78	212.26	30.26	67.76	135.72	952.13	425.17
	沟灌	9 889.85	181.60	17.99	54.62	54.46	549.68	181.08
	差异率/%	65.67	14.44	40.55	19.39	59.87	42.27	57.41

表 6 107 杨幼林单株养分利用率

树龄/a	灌溉方式	生物量增量/g	氮吸收量/g	磷吸收量/g	钾吸收量/g	氮利用率/%	磷利用率/%	钾利用率/%
2	滴灌	5 362.61	43.49	6.58	19.32	123.31	814.99	277.57
	沟灌	2 834.78	22.16	3.75	12.01	127.92	755.94	236.03
	差异率/%	47.14	49.05	43.01	37.84	3.60	7.25	14.97
3	滴灌	23 046.22	115.19	18.41	43.36	200.07	1 251.83	531.51
	沟灌	7 911.88	40.66	6.84	20.84	194.59	1 156.71	379.65
	差异率/%	65.67	64.70	62.85	51.94	2.74	7.60	28.57

4 结论与讨论

有研究显示,与常规灌溉相比,滴灌技术应用于北京沙地杨树人工用材林培育,可大大加快树木的生长,林地生产力显著提高,随着树龄的增长这种差异越来越明显^[14],滴灌栽培的 107 杨幼林 2、3 年生的蓄积量分别为 13.37、41.15 m³/hm²,是沟灌的 2.22、1.68 倍,并且滴灌能使 107 杨生长整齐。

与常规灌溉相比,地下滴灌能大幅度增加杨树林地生物量,6 年生杨树林提高幅度达 118.72%,尤其是主干和叶的生物量较常规灌溉增加了 147.40%和 178.33%^[15]。本研究发现滴灌能明显促进 107 杨各器官的生长,增加生物量,滴灌栽培使杨树 3 年生单株的叶、枝、干、根的生物量分别为沟灌的 2.12、2.63、2.42、2.54 倍,增幅效果较之前的研究更加明显,并且滴灌还能提高 107 杨幼林体内的含水率。

杨建伟等^[30]研究表明,土壤含水量越低,杨树干物质积累量和水分利用率越低。本研究发现,相

比于常规沟灌,滴灌能及时补充土壤水分并大幅度提高 107 杨幼林的水分利用率,滴灌栽培 107 杨幼林 2、3 年生的水分利用率分别是 0.84、3.89 kg/m³,分别是沟灌的 1.91、2.84 倍,同时随着 107 杨幼林树龄的增长,水分利用率也显著提高。

2、3 年生 107 杨幼林对 N、P、K 元素的消耗量和吸收量逐年加大,各养分元素消耗、吸收量由大到小的顺序均为:N、K、P,这和余常兵等^[31]对杨树幼林养分积累量的研究结果相吻合。但是利用率由大到小的顺序均为:P、K、N,并且随着树龄的增长,107 杨幼林田间各养分利用率和植物各养分利用率均不断提升。相比于常规沟灌,滴灌能减少 107 杨幼林田间养分的流失,显著提高 107 杨幼林田间各养分的利用率,同时对 107 杨单株各养分利用率也有一定提升。

建议在干旱半干旱及存在季节性干旱的地区营造速生丰产用材林时,结合当地经济条件推广地表滴灌技术,实施集约经营。这不仅使水资源得到可

持续利用,而且将大幅度提高林地生产力,从根本上减轻我国木材需求对天然林和生态公益林的压力。

参 考 文 献

[1] 国家林业局.全国森林资源统计:第七次全国森林资源清查[M].北京:中国林业出版社,2010.

[2] 郑世锴.杨树丰产栽培[M].北京:金盾出版社,2006.

[3] Kim H S, Oren R, Hinckley T M. Actual and potential transpiration and carbon assimilation in an irrigated poplar plantation[J]. Tree Physiology, 2008, 28(4):559-577.

[4] Coyle D R, Coleman M D. Forest production responses to irrigation and fertilization are not explained by shifts in allocation[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 208(1):137-152.

[5] Gårdenäs A I, Hopmans J W, Hanson B R, et al. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2005, 74(3):219-242.

[6] Robert T, Lazarovitch N, Warrick A W, et al. Modeling salt accumulation with subsurface drip irrigation using HYDRUS-2D[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(1):233-240.

[7] 任忠秀,聂立水,张强,等.水氮耦合下毛白杨无性系材积生长规律及品种选择[J].中南林业科技大学学报,2011,31(8):187-193.

[8] 孙兆地,聂立水,辛颖,等.水氮耦合效应对三倍体毛白杨林木生长状况的影响[J].土壤通报,2012,43(4):896-902.

[9] 史册,范文波,朱红凯,等.不同灌水梯度下新疆杨耗水过程与灌溉制度初步研究[J].中国农村水利水电,2011(9):1-7.

[10] 康绍忠.农业水土工程概论[M].北京:中国农业出版社,2007:452-482.

[11] 傅建平,兰再平,孙尚伟,等.滴灌条件下杨树人工林土壤水分运移[J].林业科学,2013,49(6):25-29.

[12] 傅建平,兰再平,孙尚伟,等.滴灌条件下杨树人工林土壤水分变化规律研究[J].北京林业大学学报,2013,35(6):61-66.

[13] 傅建平,兰再平,孙尚伟,等.地面滴灌对 107 杨人工林根系分布的影响[J].林业科学研究,2013,26(6):766-772.

[14] 贾黎明,邢长山,李景锐,等.地下滴灌条件下杨树速生丰产林生产力及效益分析[J].北京林业大学学报,2005,27(6):43-49.

[15] 韦艳葵.地下滴灌下沙地杨树速生丰产机制与灌溉制度研究[D].北京:北京林业大学,2003.

[16] Christersson L. Biomass production of intensively grown poplar in the southernmost part of Sweden: Observations of characters, traits and growth potential[J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30

(6):497-508.

[17] O'Neill M K, Shock C C, Lombard K A, et al. Hybrid poplar (*Populus* spp.) selections for arid and semi-arid intermountain regions of the western united states[J]. Agroforestry System, 2010, 79(3):409-418.

[18] Musselman R C. Response of transplanted aspen to drip irrigation on reclaimed mine lands[D]. Colorado State: Colorado State University, 2007.

[19] 张龙宁,向地奎,席本野,等.三倍体毛白杨人工林浅层土壤细根对地下滴灌不同水分处理的响应[J].东北林业大学学报,2013,41(7):40-44.

[20] 席本野,王烨,邱楠,等.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[J].生态学报,2012,32(17):5318-5329.

[21] 席本野,贾黎明,王烨,等.地下滴灌条件下三倍体毛白杨根区三土壤水分动态模拟[J].应用生态学报,2011,22(1):21-28.

[22] 司婧,贾黎明,韦艳葵,等.地下滴灌对杨树速生丰产林碳储量的影响[J].北京林业大学学报,2012,34(1):14-18.

[23] 贾黎明,刘诗琦,祝令辉,等.我国杨树林的碳储量和碳密度[J].南京林业大学学报:自然科学版,2013,37(2):1-7.

[24] Hansen E A. Irrigation short rotation intensive culture hybrid poplars[J]. Biomass, 1988, 16(4):237-250.

[25] 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[J]. Forest Ecology and Management, 1996, 80(1/3):163-174.

[26] Khamzina A, Lamers J P A, Vlek P L G. Tree establishment under deficit irrigation on degraded agricultural land in the lower amu darya river region, aral sea basin[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(1):168-178.

[27] Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J, et al. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth[J]. Science, 2000, 289:284-288. DOI: 10.1126/science.289.5477.284.

[28] 陈章水.杨树栽培实用技术[M].北京:中国林业出版社,2005.

[29] 李韵珠,王凤仙,黄元仿.土壤水分和养分利用效率几种定义的比较[J].土壤通报,2000,31(4):150-155.

[30] 杨建伟,梁宗锁,韩蕊莲.不同干旱土壤条件下杨树的耗水规律及水分利用效率研究[J].植物生态学报,2004,28(5):630-636.

[31] 余常兵,罗治建,陈卫文.幼龄杨树养分含量及其积累季节变化研究[J].福建林学院学报,2005,25(2):181-186.