

滴灌下欧美 107 杨苗高水肥耦合效应

王 梓^{1,2}, 马履一², 贾忠奎², 公宁宁²

(1. 河南科技大学 林学院, 河南 洛阳 471003; 2. 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: 水分和氮肥是影响欧美 107 杨 *Populus × euramericana* ‘74/76’生长的重要因素。以 1 年生欧美 107 杨为试验材料, 采用田间裂区试验设计, 研究不同灌溉、氮施入量对欧美 107 杨苗高的影响, 并建立水—苗高的水肥回归模型。结果表明: 不同水肥处理下苗高之间有极显著差异($P<0.01$), 各因素效应顺序为氮施入量>水肥互作>灌溉量。欧美 107 杨苗高在 300~360 cm 的水肥方案为灌溉量 8.45~19.25 kg·株⁻¹, 施氮肥量 4.57~9.12 g·株⁻¹, 即施尿素 413.94~826.31 kg·hm⁻²; 苗高在 360~400 cm 的水肥方案为灌溉量 36.02~41.87 kg·株⁻¹, 施氮肥量 8.68~11.43 g·株⁻¹, 即施尿素 786.08~1 035.05 kg·hm⁻²。水肥优化管理方案可为定向培育 1 年生欧美 107 杨苗木提供理论依据。表 3 参 14

关键词: 森林培育学; 欧美 107 杨; 苗高; 水肥耦合; 滴灌

中图分类号: S723.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2012)01-0029-06

Interaction of water and fertilizer on seedling height for first-year growth *Populus × euramericana* ‘74/76’ with drip irrigation

WANG Zi^{1,2}, MA Lü-yi², JIA Zhong-kui², GONG Ning-ning²

(1. College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan, China; 2. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Water and nitrogen fertilizer are important influences on plants. To optimize irrigation and fertilizer schemes for cultivation of high quality first-year growth *Populus × euramericana* ‘74/76’, a split plot design with four water treatments, three nitrogen fertilizer treatments and three replications was used with ranges of seedling height growth. Water treatments were supplied at watering to 100%, 80%, 60% field capacity or no watering for trees; nitrogen treatments were supplied at 0, 8.00 or 15.08 g·tree⁻¹. Based on a quadratic regression of seedling heights, a regressive math model between seedling heights (y) and irrigation water (x_1), nitrogen (x_2) was established: $y=297.378+1.737x_1+5.382x_2-0.008x_1^2-0.197x_2^2-0.015x_1x_2$. Results showed significant differences for seedling heights ($P<0.01$) with an influence of nitrogen > water and nitrogen > water. For seedling heights between 300 and 360 cm, the optimum combination was: irrigation water of between 8.45 – 19.25 kg·tree⁻¹ and nitrogen of between 4.57 – 9.12 g·tree⁻¹; for seedling heights between 360 and 400 cm the best combination was: irrigation of between 36.02 – 41.87 kg·tree⁻¹ and nitrogen of between 8.68 – 11.43 g·tree⁻¹. This research could contribute to water and fertilizer saving for cultivation of high quality *Populus × euramericana* ‘74/76’. [Ch, 3 tab. 14 ref.]

Key words: silviculture; *Populus × euramericana* ‘74/76’; seedling height; interactions of water and fertilizer; drip irrigation

收稿日期: 2011-03-14; 修回日期: 2011-05-26

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD24B01); 北京市教育委员会学科建设与研究生教育建设项目(CXYBL2008-2010); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(BLJD200904)

作者简介: 王梓, 讲师, 博士研究生, 从事植物水分生理生态研究。E-mail: wang_zi_xx@126.com。通信作者: 马履一, 教授, 博士生导师, 从事植物水分生理生态研究。E-mail: maluyi@bjfu.edu.cn

森林资源的匮乏造成中国木材的供需矛盾日益突出。随着国民经济的快速发展，人们对木材的需求和贸易量越来越大，而中国木材产量却因环境与资源问题而不断下降。要解决木材供需矛盾，加快速生丰产用材林建设是重要途径^[1]。欧美107杨 *Populus × euramericana* “74/76”因其具有生长快、成材早、产量高、成活率高、抗性强及材质优良等特点，是重要的速生丰产用材林之一。速生丰产林在拥有优良的树种品种的同时，也要辅以科学的经营措施，才能发挥林木的最大潜力。水分和肥料是林木生长发育的两大重要因素，也是最容易控制的两大因素。长期以来，实际生产中，对欧美107杨采用粗放经营方式，灌溉施肥大多依靠经验，没有从苗木自身需水需肥规律出发。盲目的水肥管理措施不但造成林木单位面积蓄积量低，产品质量不高，效益和产出值远远低于预期水平等问题，还导致了水肥资源浪费和环境污染。因此，研究欧美107杨水肥耦合效应，实现水分和养分管理精确化，可有效提高水肥的利用效率，并有利于发挥苗木生长潜能，具有广泛的生态、经济和社会效益。目前，有关欧美107杨水肥管理的研究较多从单一的水、肥因素出发，注重不同灌溉量、肥料品种的施用，考察不同灌溉或施肥水平下杨树的形态和生理指标变化^[2-5]，而杨树水肥耦合效应的研究较少，且以盆栽试验为主^[6-7]，与大田推广还有一定差距。为此，本研究采用田间裂区设计，通过考察不同水肥梯度处理对欧美107杨苗高生长的影响，探究水肥之间的交互效应，分析各因素效应，定量评价水和氮肥因子对苗高增长的作用^[8-14]，旨在为制定培育优质欧美107杨苗木的节水节肥技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于北京林业大学产学研联合培养研究生基地， $40^{\circ}02' \sim 40^{\circ}23'N$, $115^{\circ}50' \sim 116^{\circ}29'E$ ，属暖温带大陆性季风气候，年平均气温为 $11.8^{\circ}C$ ，年平均降水量为 550.3 mm 。供试土壤为潮土，土壤田间持水量为 22.06% 。

1.2 试验材料

试验材料为欧美107杨扦插苗。插穗选择采穗圃1年生苗干上枝条，直径为 $1.0 \sim 1.5\text{ cm}$ ，长度 $18 \sim 20\text{ cm}$ ，插穗上下两端截成平切口，有腋芽 $4 \sim 5\text{ 个} \cdot \text{穗}^{-1}$ ，插穗上端第1个腋芽保持完好，与上切口之间留有 $1 \sim 2\text{ cm}$ 的间距。2009年4月2~3日进行深翻整地，4~5日进行扦插，株行距为 $0.3\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ ，扦插前，插穗浸水 48 h 。

1.3 试验设计

田间试验布置采用裂区设计，主处理A为灌溉量，设4个水平；副处理B为氮肥施入量，设3个水平，设重复小区3个·处理 $^{-1}$ ，共12个处理组合（表1）；面积为 $24\text{ m}^2 \cdot \text{小区}^{-1}$ 。欧美107杨栽植的株距为 30 cm ，行距为 80 cm ，栽植 $100\text{ 株} \cdot \text{小区}^{-1}$ ，各处理之间埋设 100 cm 深的塑料布防止水分相互渗透。

表1 水与氮肥的处理组合

Table 1 Treatment combination of water and N fertilizer

副处理B(氮施入量)	主处理A(每次灌溉上界)			
	A1(ck): 不灌溉	A2: 田间持水量 60%	A3: 田间持水量 80%	A4: 田间持水量
B1: 氮肥施入量 $15.08\text{ g} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$	A1B1	A2B1	A3B1	A4B1
B2: 氮肥施入量 $8.00\text{ g} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$	A1B2	A2B2	A3B2	A4B2
B3(ck): 不施肥	A1B3	A2B3	A3B3	A4B3

1.4 灌溉水平

利用滴灌管灌溉，采用重力滴灌系统的内镶式滴灌管，管径为 6 mm ，滴头间距 30 cm ，毛灌间距 80 cm ，欧美107杨旁布设毛管 $1\text{ 条} \cdot \text{行}^{-1}$ ，各个水分处理采用独立的阀门和水表控制灌溉量。

为保证苗木成活，在成活期(4月)充分供水。第1次灌水是在扦插后当天，之后 10 隔 d 采用烘干法测定1次田间土壤含水量，每次均灌溉至田间持水量状态。灌溉量计算为：灌水量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)= $10\ 000 \times (\text{预定达到的田间含水量} - \text{当时土壤含水量}) \times \text{土壤容重} \times \text{预定湿润层厚度}$ 。

控水试验开始于 5 月份, 隔 10 d 测定 1 次田间土壤含水量, 相应的试验处理每次灌溉至设定的灌溉上界, 从开始扦插到 9 月上旬, 4 种灌溉下株均浇水分为 14.30, 30.37, 37.74 和 48.45 kg。

1.5 施肥水平

氮肥施入量依据 2008 年沙培施肥试验结果^[4], 确定施肥时间及施肥量(表 2)。

表 2 施肥计划表

Table 2 Fertilizer schedule

处理方案	施肥量/(g·株 ⁻¹)			总施肥量/(g·株 ⁻¹)
	出苗后 45 d(05-20)	出苗后 86 d(07-01)	出苗后 117 d(08-01)	
方案 1	3.02	5.92	6.14	15.08
方案 2	0.38	1.48	6.14	8.00
方案 3	0	0	0	0

肥料选用尿素[分子式 CO(NH₂)₂, 分子量 60.06], 含氮量 460 g·kg⁻¹, 属中性速效肥料, 密度 1.335 g·cm⁻³, 熔点 132.7 °C, 穴施覆土施入。

1.6 测定指标

测定项目主要是苗高。在 10 月底树木停止生长后测定苗高, 重复 8 次·处理⁻¹。利用 SPSS 17.0 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对苗高的影响

表 3 显示不同灌溉施肥处理下欧美 107 杨的苗高。可看出: 处理 10 的苗高最大, 为 390.4 cm, 其次为处理 11 和处理 8, 分别为 385.6 cm 和 382.5 cm; 处理 3 的苗高最小为 319.3 cm。通过方差分析, *F* 值为 6.648, *P*<0.01, 说明 12 种处理之间存在极显著性差异。结果表明: 欧美 107 杨是喜水喜肥的植物, 该试验中最大的水肥处理下欧美 107 杨的苗高最高, 最小的水肥处理苗高最低, 要获得较大的苗高生长, 需重视苗木的水肥处理。

表 3 试验方案及试验结果

Table 3 Experiment scheme and results

处理号	实际灌溉量/(kg·株 ⁻¹)	氮施入量/(g·株 ⁻¹)	苗高/cm
处理 1(A1B1)	14.30	15.08	354.5
处理 2(A1B2)	14.30	8.00	350.2
处理 3(A1B3)	14.30	0.00	319.3
处理 4(A2B1)	30.37	15.08	370.7
处理 5(A2B2)	30.37	8.00	366.5
处理 6(A2B3)	30.37	0.00	345.8
处理 7(A3B1)	37.74	15.08	378.5
处理 8(A3B2)	37.74	8.00	382.5
处理 9(A3B3)	37.74	0.00	350.8
处理 10(A4B1)	48.45	15.08	390.4
处理 11(A4B2)	48.45	8.00	385.6
处理 12(A4B3)	48.45	0.00	363.4

多重均衡子集的结果显示, 12 种处理可以大致分为 4 组, 第 1 组为处理 3, 苗高为 319.3 cm, 第 2 组为处理 1, 处理 2, 处理 6 和处理 9, 苗高范围为 345.8~354.5 cm, 第 3 组为处理 4, 处理 5 和处理 12, 苗高范围为 363.4~370.7 cm, 第 4 组为处理 7, 处理 8, 处理 10 和处理 11, 苗高范围为 378.5~390.4 cm。

2.2 苗高函数模型的建立

以苗高为目标函数,灌水量和施氮量为自变量,求得苗高与各因素回归模型为:

$$y=297.378+1.737x_1+5.382x_2-0.008x_1^2-0.197x_2^2-0.015x_1x_2 \quad (1)$$

模型(1)中: y 为苗高(cm); x_1 为灌溉量(kg·株⁻¹), x_2 为氮肥施入量(g·株⁻¹)。对回归方程进行拟合优度检验,判定系数 $R^2=0.987$,说明该方程可以代表样本数据。对回归方程进行显著性检验, $F=93.134$,查 F 检验临界值(F_α)表,得 $F_{0.05}(5, 90)=2.32$, $F>2.32$,说明方程在 $\alpha=0.05$ 时达到显著水平,能够反映苗高变化与灌溉量和施肥量之间的关系。

2.3 因素的主次效应

为判断各因素对苗高的影响效应,对偏回归系数进行标准化处理,得出 x_1 , x_2 , x_1^2 , x_2^2 与 x_1x_2 的标准系数,分别为 1.108, 1.703, -0.307, -0.969 和 -0.187。可以得出各因素对苗高的影响为氮施入量(x_2)>灌溉量(x_1)>水肥互作(x_1x_2)。

本次试验中,氮施入量和灌溉量是影响欧美 107 杨苗高生长的主导因素,两者对苗高生长表现为正效应,表明适当增加氮肥和灌溉量有利于苗高生长,氮施入量对苗高生长的影响大于灌溉量。原因在于苗高的速生期为 7~8 月,此时北京地区降水丰富,很好地满足了苗木生长对水分的需求,一定程度上降低了灌溉的影响力;水肥互作效应表现为负效应,两者之间具有相互替代或相互消减的作用;从 x_1^2 和 x_2^2 的标准系数为负值可以看出,灌溉量和氮施入量有最大值,过量的灌溉或施肥会引起苗高的降低。

2.4 单因素效应分析

为了进一步探讨水、肥单因素效应,对回归模型(1)进行降维处理:将 2 个因素中的 1 个因素固定在同一水平,可得到另一因素对苗高的一元二次子模型。

2.4.1 水分效应分析 分别令 $x_2=0$, 8.00, 15.08, 代入回归模型(1), 得到水分效应模型(2)~(4):

$$y=297.378+1.737x_1-0.008x_1^2; \quad (2)$$

$$y=327.826+1.617x_1-0.008x_1^2; \quad (3)$$

$$y=333.74x_1+1.511x_1-0.008x_1^2. \quad (4)$$

模型(2)~(4)表示氮施入量在 0, 8.00 和 15.08 g·株⁻¹ 时,灌溉量和苗高之间的关系。这是一组一元二次回归方程,表明 3 种施氮条件下,灌溉量对苗高的影响基本一致,均呈抛物线型,灌溉量有最适值,未达到灌溉最适值之前,灌溉有助于苗高增加,超过最适值后,随着灌溉量增加,苗高将会降低。本次试验中,灌溉量在 14.30~48.45 kg·株⁻¹ 时,苗高随灌溉量增加呈上升趋势,均在灌溉量为 48.45 kg·株⁻¹ 时苗高达到最大,通过模型(2)~(4)计算出 3 种施氮水平下的苗高分别为 362.8, 387.4 和 388.2 cm,这与实际苗高 363.4, 385.6 和 390.4 cm 十分接近。灌溉量较小时,最大施氮量(施氮量为 15.08 g·株⁻¹)的效应值大于经济施氮量(施氮量为 8.00 g·株⁻¹),但随着灌溉量增大,最大施氮量的效应值低于经济施氮量,说明在 2 种不同高氮处理下,灌溉所发挥的效能是不一样的,灌溉在经济施氮量下所发挥的效能值大于最大施氮量。两者效应值大于施氮量为 0,但是随着灌溉量增大,后者与前 2 种处理之间的差异逐步减小,说明在低氮处理下,灌溉可以部分替代氮肥的效能,一定程度上弥补氮肥施入量不足的问题。

2.4.2 氮素效应分析 分别令 $x_1=0$, 14.30, 30.37, 37.70 和 48.45, 代入回归模型(1), 得到氮素效应模型(5)~(9):

$$y=297.378+5.382x_2-0.197x_2^2; \quad (5)$$

$$y=320.581+5.168x_2-0.197x_2^2; \quad (6)$$

$$y=342.752+4.926x_2-0.197x_2^2; \quad (7)$$

$$y=351.493+4.817x_2-0.197x_2^2; \quad (8)$$

$$y=362.756+4.655x_2-0.197x_2^2. \quad (9)$$

模型(5)~(9)表示灌溉量在 0, 14.30, 30.37, 37.70 和 48.45 kg·株⁻¹ 时,施氮量与苗高之间的关系。这同样是一组一元二次回归方程,说明不同灌溉水平下施氮处理也存在最适值。对方程进行分析,求得各单因素回归方程的极值点,得到:当 $x_1=0$ kg·株⁻¹,在施氮量 x_2 为 13.66 g·株⁻¹ 时,有最大苗高 $y=334.1$ cm;当 $x_1=14.30$ kg·株⁻¹,在施氮量 x_2 为 13.12 g·株⁻¹ 时,有最大苗高 $y=354.5$ cm;当 $x_1=30.37$ kg·株⁻¹,在施氮量 x_2 为 12.50 g·株⁻¹ 时,有最大苗高 $y=373.6$ cm;当 $x_1=37.70$ kg·株⁻¹,在施氮量 x_2 为 12.23 g·株⁻¹ 时,

有最大苗高 $y=380.9 \text{ cm}$; 当 $x_1=48.45 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$, 在施氮量 x_2 为 $11.81 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$ 时, 有最大苗高 $y=390.3 \text{ cm}$ 。可以看出, 在试验设计的范围内, 苗高随着氮肥施入量的增加而增加, 不同施肥水平下, 苗高之间的变化随灌溉量的变化有较小差异, 说明灌溉量对氮肥施入量影响不明显。

2.4.3 单因素边际效应 边际苗高可反映各因素的最适投入量和单位投入量变化对苗高增减速率的影响。多元回归模型中边际苗高是指在其他因素恒定条件下, 增加单位量某一因素时, 苗高的增加量。通过对回归子模型(2)和模型(5)求一阶偏导, 得到水、氮的边际效应模型(10)和模型(11)。

$$\text{水: } dy/dx_1 = 1.737 - 0.016x_1; \quad (10)$$

$$\text{氮: } dy/dx_2 = 5.382 - 0.394x_2. \quad (11)$$

从模型(10)与模型(11)中得出, 水、氮因素边际效应均呈递减趋势, 氮肥的边际效应递减率大于灌溉量。水、氮投入量较低时, 苗高增长速率明显, 随着投入量的增加, 增长速率递减, 当边际效应等于 0 时, 为最适投入量, 此时, 灌溉量为 $108.56 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$, 施氮量为 $13.66 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 之后再增加投入量, 将出现负效益。本试验中最大灌溉量为 $48.45 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$, 此时没有超过最适投入量, 属于呈正效益。

2.5 苗高模拟寻优

为了满足实际栽植中对苗高的需求, 结合多重均衡子集的结果, 对苗高分为 $300\sim360 \text{ cm}$ 和 $360\sim400 \text{ cm}$ 2 个区间, 采用频率分析方法寻优。将灌溉量($0\sim50 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$)和氮肥施入量($0\sim16 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$)的试验设计范围内划分为 8 个水平, 构成 64 个生产因素组合, 其中, 苗高为 $300\sim360 \text{ cm}$ 有 26 个水肥方案, 在 $360\sim400 \text{ cm}$ 有 38 个水肥方案。对 64 个水肥方案进行频数分析, 比较寻优, 找出 1 年生欧美 107 杨苗高的最高值为 391.7 cm 。此时的灌溉量为 $50 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$, 氮肥用量为 $12 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。欧美 107 杨苗高为 $300\sim360 \text{ cm}$ 的水肥方案为灌溉量 $8.45\sim19.25 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$, 施氮肥量 $4.57\sim9.12 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 即施尿素 $413.94\sim826.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 苗高在 $360\sim400 \text{ cm}$ 的水肥方案为灌溉量 $36.02\sim41.87 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$, 施氮肥量 $8.68\sim11.43 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 即施尿素 $786.08\sim1035.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3 结论与讨论

水分和氮肥是影响欧美 107 杨生长的重要因素, 合理的水肥管理可以有效促进苗木生长, 同时提高水肥资源利用效率, 节约资源, 降低成本, 减少污染。本试验通过对欧美 107 杨水肥苗高的耦合效应研究发现: 增加灌溉量和氮施入量均可提高苗高生长; 对苗高影响作用的大小依次为: 氮施入量、灌溉量和水肥互作; 水肥互作效应表现为负效应, 两者之间具有相互替代或相互消减的作用, 当某一因素缺乏时, 加大另一因素的投入可提高苗高, 但灌溉量和氮施入量有最适值, 过量的灌溉或施肥则会引起苗高的降低。频数分析表明: 欧美 107 杨苗高为 $300\sim360 \text{ cm}$ 的水肥方案为灌溉量 $8.45\sim19.25 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$, 施氮肥量 $4.57\sim9.12 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 即施尿素 $413.94\sim826.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 苗高为 $360\sim400 \text{ cm}$ 的水肥方案为灌溉量 $36.02\sim41.87 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$, 施氮肥量 $8.68\sim11.43 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 即施尿素 $786.08\sim1035.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

本试验采用的是滴灌的灌溉方式, 减少了径流和深层渗漏的影响, 最大限度地降低无效的田间水量损失。但从目前调查来看, 绝大部分苗圃采用的是漫灌或喷灌, 较少有苗圃露天采用滴灌灌溉。所以, 如果将试验结果推广到非滴灌灌溉的苗圃中, 需要进一步考察不同灌溉方式之间的相互关系。

欧美 107 杨苗高水肥耦合效应的研究为苗木培育精准化灌溉施肥制度的制订奠定了基础, 也是在精准林业技术领域所做的积极探索。中国精准化林业建设刚刚起步, 如何结合中国林业建设的现实情况, 建立合理的经营管理方式, 实现标准化生产作业, 真正实现资源的可持续发展是林业研究人员亟须解决的问题。

参考文献:

- [1] 赵天锡, 陈章水. 中国杨树集约栽培[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 9~11.
- [2] WELHAM C, VAN REES K C J, SEELY B, et al. Projected long-term productivity in Saskatchewan hybrid poplar plantations: weed competition and fertilizer effects [J]. Can J For Res, 2007, 37: 356~370.
- [3] 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.

- JIA Liming, XING Changshan, LI Jingri, *et al.* Productivity and benefit analysis of fast-growing and high-yield plantations of poplar under subsurface drip irrigation [J]. *J Beijing For Univ*, 2005, **27** (6): 43 – 49.
- [4] 邓坦. 欧美 107 杨扦插苗需肥规律和合理施肥技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- DENG Tan. *A Study on Fertilizer Requirement Characteristics and Rational Fertilization Techniques of Populus × euramericana ‘74/76’ Cutting Stock* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [5] van den DRIESSCHE R, THOMAS B R, KAMELCHUK D P. Effects of N, NP, and NPKS fertilizers applied to four-year old hybrid poplar plantation [J]. *New For*, 2008, **35**: 221 – 233.
- [6] 王力, 邵明安, 侯庆春, 等. 不同水肥条件对杨树生物量的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, **32** (3): 53 – 57.
- WANG Li, SHAO Ming'an, HOU Qingchun, *et al.* Effect of different water, N and P content on the bio-mass of poplar [J]. *Northwest Sci-Technol Univ Agric For Nat Sci Ed*, 2004, **32** (3): 53 – 57.
- [7] 董雯怡, 赵燕, 张志毅, 等. 水肥耦合效应对毛白杨苗木生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21** (9): 2194 – 2200.
- DONG Wenyi, ZHAO Yan, ZHANG Zhiyi, *et al.* Coupling effects of water and fertilizer on the biomass of *Populus tomentosa* seedlings [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21** (9): 2194 – 2200.
- [8] 肖自添, 蒋卫杰, 余宏军. 作物水肥耦合效应研究进展[J]. 作物杂志, 2007 (6): 18 – 22.
- XIAO Zitian, JIANG Weijie, YU Hongjun. The recent research on crop coupling effect of water and fertilizer [J]. *Crops*, 2007 (6): 18 – 22.
- [9] 孙文涛, 孙占祥, 王聪翔, 等. 滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J]. 中国农业科学, 2006, **39** (3): 563 – 568.
- SUN Wentao, SUN Zhanxiang, WANG Congxiang, *et al.* Coupling effect of water and fertilizer on corn yield under drip fertigation [J]. *Sci Agric Sin*, 2006, **39** (3): 563 – 568.
- [10] 尹光华. 丘陵半干旱区春小麦水肥耦合效应[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 2005.
- YIN Guanghua. *Effects of Water and Fertilizers Coupling on Spring Wheat in Hilly Semi-Arid Area* [D]. Shenyang: Chinese Academy of Sciences. Institute of Applied Ecology, 2005.
- [11] 刘作新. 长期试验条件下的水肥耦合效应[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 2003.
- LIU Zuoxin. *Coupling of Water and Fertilizer under Long-term Fertilization* [D]. Shenyang: Chinese Academy of Sciences. Institute of Applied Ecology, 2003.
- [12] 王海艺, 韩烈保, 杨永利, 等. 水肥对洋白蜡生物量的耦合效应研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28** (增刊1): 64 – 68.
- WANG Haiyi, HAN Liebao, YANG Yongli, *et al.* Coupling effect s of water and fertilizer on the biomass of *Fraxinus pennsylvanica* [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28** (supp 1): 64 – 68.
- [13] 华元刚, 陈秋波, 林钊沐, 等. 水肥耦合对橡胶树产胶量的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19** (6): 1211 – 1216.
- HUA Yuangang, CHEN Qiubo, LIN Zhaomu, *et al.* Coupling efects of water and chemical fertilizers on *Hevea brasiliensis* latex yield [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19** (6): 1211 – 121.
- [14] 薛亮, 周春菊, 雷杨莉, 等. 夏玉米交替灌溉施肥的水氮耦合效应研究[J]. 农业工程学报, 2008, **24** (3): 91 – 94.
- XUE Liang, ZHOU Chunju, LEI Yangli, *et al.* Effect of water and nitrogen coupling under alternate furrow irrigation and fertilizer placement on summermaize [J]. *Trans CSAE*, 2008, **24** (3): 91 – 94.