

干旱区不同供水量下杨树水分效应和生态用水量研究

刘明虎, 张景波, 孙 非, 高君亮

(中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200)

摘 要:水分是干旱区林木生长的主要限制因子,科学地确定林木的合理供水量是林木获得速生丰产的关键。以乌兰布和沙区的小美旱杨为研究对象,探讨了不同供水量与土壤环境及小美旱杨生长指征的相互关系,结果表明:不同供水量下土壤的增湿效应存在显著差异,1 500 m³/(hm²·a)和 3 000 m³/(hm²·a)的供水量下的水分补给层主要在 50 cm 以上土层,而 4 500,6 000,7 500 m³/(hm²·a)供水量下的水分补给层则为 70 cm 以上土层;不同处理间各月土壤含水量差异均随供水量的增加而递减,在供水量不变的条件下,随着林龄的增加,耗水量逐年递增;土壤贮水量、土壤有效含水量、田间持水量、生态用水量、叶片鲜重、蒸腾速率、最佳含水量均随供水量增加而增加,土壤温度随供水量增加而递减,其降温幅度在 0.31~1.24℃ 之间。

关键词:干旱区;小美旱杨;供水量;水分指标;生态用水量

中图分类号:S714.2;S715

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)06-0058-06

Study on Moisture Effects and Ecological Water Consumption of Poplar Stands under Different Water Supply in Arid Area

LIU Ming-hu, ZHANG Jing-bo, SUN Fei, GAO Jun-liang

(Experimental Centre of Desert Forestry CAF, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China)

Abstract: Water is the main limiting factor for forest growth in arid region. Scientific determination of reasonable water supply is the key to achieve the fast-growth and high-yield of forest trees. *Populus poplar's* of Ulan Buh sandy area was selected as the study object to explore the relationship between the different water supplies and soil environment, growth indications of *Populus poplar's*. The result showed as follows: there were significantly differences of humidification effect of soil between different water supply amounts. Water supply layer mainly occurred in soil layer of 0—50 cm with water addition of 1 500 m³/(hm²·a) and 3 000 m³/(hm²·a), whereas it occurred in soil layer of 0—70 cm with the water supply rates of 4 500, 6 000 and 7 500 m³/(hm²·a). Soil moisture differences of each month between the different treatments were decreasing with the increase of water supply. Water consumption has been increasing year by year with increase of the stand age under the same water supply rate. Soil water storage, soil available water, field capacity, ecological water consumption, leaf fresh weight, transpiration rate and the optimum moisture content index increased with the increase of the water supply quantity. Soil temperature decreased with the increases of water supply quantity, and drop range of temperature was between 0.31 and 1.24℃.

Key words: arid area; *Populus poplar*; water supply; water index; ecological water consumption

杨树是我国北方干旱区主要的人工造林树种,其速生丰产的前提是具有良好的水分条件。引黄灌溉是河套地区林业发展的重要举措,但由于长期超量灌溉导致土地次生盐渍化现象屡见不鲜从而影响了杨树的生长。另外,随着经济发展和人口的增长,需水

量剧增,使得黄河水资源供给已近临界状态,供水能力已显不足^[1],水资源短缺已成为该地区林业发展的瓶颈。因此,如何有效而科学地利用水资源,确定杨树速生林的合理供水量是当前河套地区发展林业可持续亟待解决的问题。基于此,本文从探讨供水与土

壤环境及林木生长指征的相互关系入手,研究杨树速生林的水分供需关系及其生态用水量,以期为干旱区合理开发利用水资源和杨树速生林的集约化经营提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古磴口县境内的中国林业科学研究院沙漠林业实验中心第二实验场(106°46'E, 40°28'N),属荒漠与干草原的过渡地带,地处内蒙古河套平原西南,东临黄河,境内建有三盛公黄河水利枢纽工程,引黄灌溉十分便利。海拔 1 044~1 061 m;年均温 7.6℃,无霜期 170 d,日照时数 3 170.4 h;太阳总幅射 643.32 kJ/cm²;年均降水量 148 mm,多集中于 7—9 月;年均蒸发量 2 400 mm;相对湿度 47%;平均风速 3 m/s,主风向西北风,≥8 级大风日数 7.9~28.3 d。

2 研究方法

供试树种为小美旱杨(*Populus popular's*),栽植密度为 4 m×5 m(495 株/hm²)。每个试验小区面积 0.13 hm²,按随机区组排列,各区间设立 15 m 宽的隔离带,年供水量分 5 个水平处理,分别为 1 500 m³/(hm²·a)(W1),3 000 m³/(hm²·a)(W2),4 500 m³/(hm²·a)(W3),6 000 m³/(hm²·a)(W4),7 500 m³/(hm²·a)(W5),每个处理设 4 个重复,试验地总面积为 2.6 hm²。采用管道供水方式,用水表控制供水量。为消除苗木不齐的影响,造林第二年进行了平茬处理,实验为期 4 a。

2.1 土壤水分

每年 4—9 月,每月 12 日和 27 日采集 0—20, 20—50,50—70,70—100 cm 土层的土样用烘干法测定含水率,每个处理重复 3 次;同时,定点采用环刀法分层测定土壤容重和田间持水量,每块样地设置 5 个测点,4 次重复。土壤贮水量的计算公式为:

$$W_s = W \times d_v \times h$$

式中: W_s ——土壤贮水量(m³/hm²); W ——土壤重量含水率(%); d_v ——土壤容重(g/cm³); h ——土层厚度(cm)。

最佳含水量下限 = 田间持水量 × 0.7;

土壤有效含水量 = 土壤贮水量 - 凋萎含水量;

土壤水分亏缺值 $k = [(f - W)/F] \times 100\%$

式中: F ——田间持水量(%); W ——土壤重量含水率(%)。

2.2 土壤温度

每年 4—9 月,按气象站常规观测法测定 0,10,

20,40,80 cm 土层深度的土壤温度,隔天观测,每天观测 3 次。

2.3 蒸腾速率

在生长季,每月 15 日、30 日用 Li-6400P 便携式光合仪测定林木蒸腾速率,每日观测 24 h 或 14 h (6~20 h),每 2 h 测 1 次,测定部位为树冠南面下部枝条第 8 片叶,各处理重复 6 次,并同步观测日照、温度、风速、相对湿度。树冠月蒸腾耗水量计算公式为^[2]:

$$W_c = T \times (H + H_c \times O) \times P \times C \times L \times K$$

式中: T ——功能叶蒸腾速率; H_c ——阴雨天白昼时数; O ——阴天系数(0.7); P ——叶位系数,枝条上全部叶的平均蒸腾速率与功能叶蒸腾速率的比值,5 月、6 月为 0.74,7 月、8 月为 0.80,9 月、10 月为 0.83; C ——树冠系数(1.0); L ——树冠叶鲜重; K ——换算系数,即 $K = 1/1000 \times \text{株距} \times \text{行距}$ 。

2.4 林木生长调查

在生长季,每月定期定株测定叶片数、叶重量,每个处理重复 3 次。每年 9—10 月,每木调查林木生长量(树高、胸径、冠高等)。材积的计算如下:

$$V = 0.268538427D^2H + 0.005528450DH + 0.560172171D^2$$

式中: V ——单株材积; D ——胸径; H ——树高。

生态用水量 = 蒸腾耗水量 + 土壤蒸发量 + 土壤贮水量^[3]。

3 结果与分析

3.1 不同供水量的土壤水分效应

3.1.1 不同供水量下土壤水分的垂直分布效应 图 1 显示,在 1 500~7 500 m³/(hm²·a) 供水量范围内,随供水量的增加各土层土壤含水量均增加,其中,土壤含水量最高值均分布在 20—50 cm 土层中,最低值均分布在 70—100 cm 土层中;1 500,3 000,4 500,6 000,7 500 m³/(hm²·a) 供水量下土壤最高含水量分别为 12.52%,16.30%,19.39%,22.05% 和 24.37%,依次分别提高 3.78%,3.09%,2.66% 和 2.32%;最低含水量分别为 7.17%,9.50%,15.41%,17.56%,19.87%,依次分别提高 2.33%,5.91%,2.15%,2.31%。值得注意的是,1 500,3 000 m³/(hm²·a) 供水量下 50—70 cm 处的土壤含水量均小于 20 cm 土层,而 4 500,6 000,7 500 m³/(hm²·a) 供水量下则与此相反。说明低供水量下的水分补给区在 50 cm 以上土层,而高供水量下的水分补给区在 70 cm 以上土层。这是因为在土壤吸力和水分重力的双重作用下,水分垂直运行速度越快,渗流土层越深^[4]。

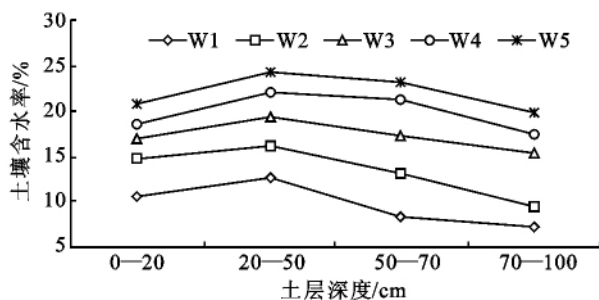


图 1 不同供水量下土壤含水率的垂直分布

注: W1, W2, W3, W4, W5 分别为 1 500, 3 000, 4 500, 6 000, 7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的灌水量, 下同。

3.1.2 不同供水量下土壤水分的月变化效应 图 2 显示, 各月的土壤含水率(4 个土层的均值)均随着供水量的增加而增加, 最低供水量与最高供水量下土壤含水率的差值呈随月份推移而递增的趋势。受供水影响, 土壤含水率峰值的发生时间也存在差异, 即 1 500, 3 000, 4 500, 6 000 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下, 峰值出现在 6 月, 而 7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下其峰值出现在 7 月; 在林木生长季, 土壤含水率分布范围不同: 1 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下为 7.88%~10.17%; 3 000 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下为 11.43%~15.93%; 4 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下为 15.14%~18.81%; 6 000 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下为 17.53%~21.02%; 7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下为 18.80%~22.67%。需要说明的是, 3 000 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量的土壤含水率仅在 6 月份达到 15.93%, 其它月份均在 15% 以下, 而 4 500, 6 000, 7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下土壤含水率在林木生长季始终保持在 15% 以上, 尤其是 7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下, 其 8 月、9 月份的土壤含水量高达 20.66% 和 21.57%, 为林木速生丰产创造了良好的水分条件。

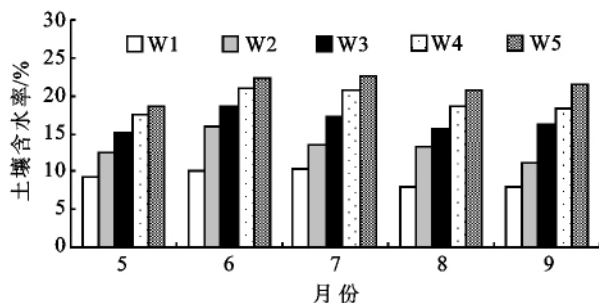


图 2 不同供水量下土壤含水率的月变化

3.1.3 不同供水量下土壤水分的年变化效应 图 3 表明, 不同供水量下, 小美旱杨林内土壤含水率随着林龄的增加而递减。1 500, 3 000, 4 500, 6 000, 7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下的最高土壤含水率表现为: 4 a 生时分别为 11.51%, 14.06%, 18.96%, 21.76%, 24.62%; 5 a 生时分别为 9.29%, 13.64%, 18.91%,

21.52%, 23.57%; 6 a 生时分别为 8.98%, 13.35%, 15.70%, 19.19%, 20.86%; 7 a 生时分别为 8.84%, 12.59%, 15.58%, 17.15%, 19.21%。这是因为随林龄增加, 林木各生长指标均逐年递增, 对水分的消耗也相应增加, 土壤含水量因此而呈逐年下降趋势。其降幅与供水量有关, 即供水量越大, 降幅越大(1 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量除外)。表明供水量越大, 林木生长速度越快, 因而水分消耗越多, 也揭示出水分是干旱区林木生长的主要障碍因子。

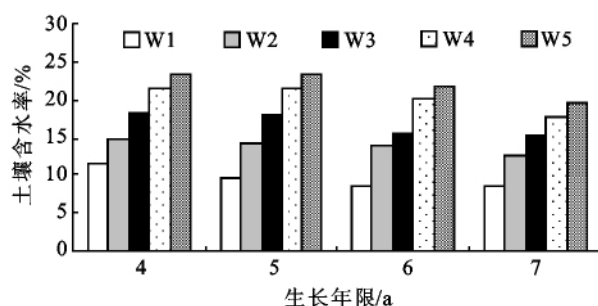


图 3 不同供水量下土壤含水率的年变化

3.1.4 不同供水量下土壤温度的垂直分布效应 通过供水可调节辐射平衡, 增加土壤导热率, 从而改善土壤的水热状况和林木生长条件^[5-6]。Gary 指出, 水分迁移强度与土壤温度有关^[7]。由图 4 可知, 各土层土壤温度的变化规律均为 $W1 > W2 > W3 > W4 > W5$, 即供水量越大, 土壤温度越低; 各供水量下, 土壤温度随土层深度的增加而降低。土壤温度梯度与供水量有直接关系, 随供水量的增加温度的垂直幅差呈递增趋势。其中, 1 500, 3 000, 4 500, 6 000, 7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量的幅差分别为 8.64, 9.58, 9.39, 9.55, 9.66℃。从水平分布比较, 各处理间地表温度差异最小, 变幅为 1.66℃, 20 cm 土层差异最大, 变幅为 3.26℃。

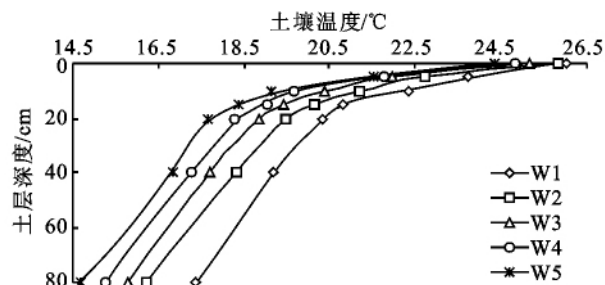


图 4 不同供水量下月平均土壤温度垂直分布

3.1.5 不同供水量下土壤温度的月变化效应 图 5 显示, 供水前(4 月)各处理间土壤温度差异不明显, 供水后土壤温度出现明显规律性变化, 即土壤温度随供水量的增加而递减, 其降幅为 0.31~1.24℃, 其中, 1 500, 3 000, 4 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量的降幅最大, 为 0.96~1.24℃, 6 000, 7 500

$\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下 8 月份降幅最大,为 $0.53 \sim 0.64^\circ\text{C}$ 。从土壤温度月变化中看出,4 月份土壤温度最低,介于 $9.37 \sim 10.67^\circ\text{C}$;最高值出现在 7 月,范围为 $24.45 \sim 27.67^\circ\text{C}$ 。地温是林木生长的重要因素,尤其是在林木萌芽期(4 月),因此,这时应适当降低供水量,以提高地温,此后随着气温的升高,再逐步加大供水量。由于 7 月份是研究区的高温期(月均温 24.96°C),同时也是林木的速生期和耗水高峰期(单株月耗水 $1\,255.2 \sim 2\,432.2\text{ kg}$),因此,最大供水期应设在 7 月,以降低地温和满足林木对水分的需求。

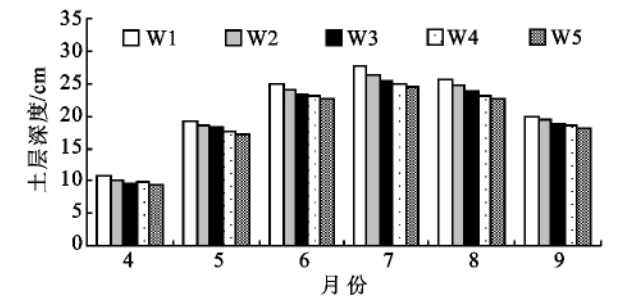


图 5 不同供水量下土壤温度月变化

3.1.6 供水量对土壤水分特征值的影响 由表 1 看出,土壤贮水量、有效含水量、田间持水量、最佳含水

表 1 不同供水量下 5—9 月土壤水分特征值(4 a 均值)

指 标	供水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$				
	1500	3000	4500	6000	7500
土壤贮水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	717.1	770.4	819.3	857.7	910.0
土壤有效含水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	561.9	582.6	609.6	703.8	713.8
田间持水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	933.8	1003.2	1016.4	1026.6	1053.4
最佳含水量下限/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	653.7	702.2	711.5	718.6	737.4
土壤水分亏缺值/%	63.7	51.2	39.0	31.7	27.8

3.1.7 供水量对林木生长的影响 由表 2 可见,林木胸径、树高和材积均随供水量的增加而增加,7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下的林木生长指标显著高于 6 000,4 500,3 000,1 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下的林木生长指标。前者的胸径倍数分别是后者的 1.25, 1.30, 2.12, 3.23 倍,树高倍数分别为 1.18, 1.31, 1.49, 1.55 倍,林木材积的倍数为 1.81, 2.13, 6.21, 15.00 倍。这主要是因为灌溉是促进林木生长的重要措施,通过供水可增加叶量和叶面积,扩大受光面积,使胸径与树高均得到显著提高,进而使材积得到增产^[8]。

表 2 不同供水量的林木生长指标

林木生长 指标	供水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$				
	1500	3000	4500	6000	7500
林龄/a	8	8	8	8	8
胸径/cm	6.1	9.3	15.1	15.7	19.7
树高/m	7.54	7.89	8.95	9.94	11.72
单株材积/ m^3	0.0096	0.0232	0.0676	0.0797	0.144
材积量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	4.752	11.484	33.462	39.452	71.280

量下限 4 项指标均随供水量的增加而增加。其中,土壤贮水量由低到高依次增加 53.3, 48.9, 38.4, 52.3 m^3/hm^2 ,即每增加 1 500 m^3/hm^2 的供水量,相应提高土壤贮水量的百分比为 4.69%~7.43%,最高供水量 7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 较最低供水量 1 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 下土壤贮水量增加了 192.9 m^3/hm^2 ,增幅为 26.9%。土壤有效含水量的增量低于前者,由低到高依次增加 20.7, 27.0, 94.2, 10.0 m^3/hm^2 ,但增幅差异较大,最大为 15.5%,最小仅为 1.42%,这主要与土壤吸湿量有关。田间持水量变幅相对较小,其增幅依次为 7.43%, 1.32%, 1.0%, 2.61%,说明供水对土壤田间持水量影响不大,且只发生在供水期,这是因为土壤类型一定时,田间持水量基本恒定。最佳含水量下限由低到高依次增加 48.5, 9.3, 7.1, 18.8 m^3/hm^2 。土壤水分亏缺值与上述特征值变化规律相反,即随供水量的增加而递减,由低到高依次递减 12.5%, 12.2%, 7.3%, 3.9%,且不同供水量间 K 值差异较大。以上结果表明,供水量是引起土壤各项水分特征值变化的主要因素,确定林木的合理供水量是杨树获得速生丰产的关键。

3.2 杨树速生林生态需水量变化动态

3.2.1 供水量对蒸腾速率的影响 表 3 表明,小美旱杨的蒸腾速率随供水量的增加而递增。7 月为蒸腾速率的高峰期,1 500, 3 000, 4 500, 6 000, 7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量的蒸腾速率分别为 0.463 0, 0.516 3, 0.524 , 0.574 8, 0.635 5 $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$,最高供水量下的蒸腾速率较最低供水量下提高了 1.37 倍。9 月为低谷期,蒸腾速率分别为 0.372 7, 0.399 2, 0.416 2, 0.423 2, 0.496 8 $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$,最高供水量下的蒸腾速率为最低供水量下的 1.33 倍。此结果与魏天兴等^[9]的研究结果相吻合,即供水量的大小决定耗水量的大小,供水促进耗水。据研究,在诸多影响因子中,气候因素对杨树蒸腾的影响远不如土壤含水量,光合有效辐射、叶片气孔限制值与蒸腾速率显著相关^[10];各树种的光合速率随土壤含水量降低而明显下降,不同土壤水分对叶片蒸腾速率、水分利用率和生物量的影响存在差异^[11]。

表 3 不同供水量下的蒸腾速率 g/(g·h)

供水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
1500	0.3828±0.1888	0.4723±0.2242	0.4630±0.1285	0.4577±0.1259	0.3727±0.1267
3000	0.4125±0.1933	0.4982±0.2287	0.5163±0.1369	0.4742±0.1418	0.3992±0.1357
4500	0.4231±0.1892	0.5058±0.2038	0.5248±0.1493	0.4837±0.1165	0.4162±0.1409
6000	0.4289±0.1855	0.5190±0.2155	0.5748±0.1721	0.5180±0.1501	0.4232±0.2097
7500	0.4679±0.1745	0.5858±0.2472	0.6355±0.6355	0.6202±0.2000	0.4968±0.1754

3.2.2 供水量对叶片鲜重的影响 供水既可改善土壤水分状况,又能有效促进林木叶量的生长,而叶片鲜重是衡量林木耗水量的重要指征之一。表 4 显示,叶片鲜重随供水量的增加而递增,其中,7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下的叶量鲜重较 1 500,3 000,

4 500,6 000 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下分别增加了 128.12%,99.75%,92.89%,19.79%。各处理间叶量的差异均随着供水量的递增而加大;叶量峰值期出现在 8 月,同时也是各供水量处理间叶片鲜重差异最大的时期。

表 4 不同供水量下林木单株叶片鲜重 kg/株

供水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	平均
1500	1.68±1.14	2.09±1.17	2.86±1.84	3.45±2.67	2.28±1.52	2.47±1.67
3000	1.78±1.16	2.42±1.43	3.87±2.92	3.94±3.03	2.56±1.63	2.91±2.03
4500	2.04±1.02	2.81±1.90	4.30±3.39	4.08±2.94	2.76±1.78	3.20±2.20
6000	2.17±0.97	3.22±1.92	4.64±3.67	6.57±5.90	3.43±1.37	4.01±2.75
7500	2.85±1.45	3.68±2.49	4.88±3.68	7.87±6.76	4.81±3.03	4.82±3.48

3.2.3 供水量对杨树用材林生态用水量的影响 杨树用材林生态用水量随供水量的增加而增加,由表 5 可见,5—9 月的生态用水量排序均为 $W_5>W_4>W_3>W_2>W_1$;生态用水量月变化规律为,1 500,3 000,4 500,6 000 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下的峰值均在 5 月,依次为 2 000.1,2 060.4,2 117.5,2 134.1 m^3/hm^2 ,而 7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下的峰值为 7 月的 2 212.2 m^3/hm^2 。这主要是因为生态用水量的组分中,土壤蒸发量所占比重最大,约占 61.15%~65.24%;其次为土壤贮水量,约占 33.42%~36.81%;杨树蒸腾耗水量最小,约占 1.34%~2.04%。所以土壤蒸发量是决定生态用水量的主导因子。在干旱地区,5 月份是干燥多风季节,此时,相对湿度较低,风速较大,因此土壤蒸发量相对较高,导致生态用水量较高。而 7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下 7 月时,由于具有较高的土壤贮水量(1 043.95 m^3/hm^2),已超过土壤蒸发量(1 006.33 m^3/hm^2),因而其生态用水量较高。在 6 月份,由于土壤蒸发量迅速下降,且蒸腾耗水量和土壤贮水量相对较低,导致生态用水量急剧下降,7 月份由于蒸腾耗水量和土壤贮水量迅速增加,使得生态用水量迅速提升,8、9 月份由于土壤蒸发量和土壤贮水量下降,其生态用水量逐月下降至 1 240.3~1 581.6 m^3/hm^2 。比较月平均生态用水量可知,由低到高依次分别增加 81.5,69.1,88.4,73.9 m^3/hm^2 ,即每增加 1 500 m^3/hm^2 供水量,可分别提高 4.85%,3.92%,4.83%,3.85%的生态用水量。

表 6 表明,不同供水处理的杨树用材林生态用水量均随着林龄的增加而递增。6 a 生林地与 5 a 生林地相比,1 500,3 000,4 500,6 000,7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下的生态用水量分别增加了 697.37,994.27,631.60,178.34,351.94 m^3/hm^2 ,7 a 生林地较 6 a 生林地分别提高 4 219.96,3 968.87,4 019.24,4 146.27,4 120.88 m^3/hm^2 。由供需关系可以看出,在各处理中,仅有 7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下的供水量亏缺量较小,其它处理的水分亏缺状况较为严重。

4 结 论

(1) 1 500,3 000 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下的水分补给层主要在 50 cm 以上土层,而 4 500,6 000,7 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下的水分补给层则为 70 cm 以上土层;在 20—100 cm 土层内,受供水量影响,1 500,3 000,4 500,6 000 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水量下的土壤含水量峰值期发生在 6 月,而 6 000 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 下为 7 月;1 500,3 000 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 供水下的低谷期为 9 月,而其他三者为 5 月。土壤含水量与林木生长和耗水关系密切,在供水量不变的条件下,随着林龄的增加,林木生长指标和耗水量都在逐年递增,导致土壤含水量同步下降。

(2) 土壤温度随供水量增加而递减,其降温幅度为 0.31~1.24℃。1 500,3 000,4 500 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 在 7 月时降幅最大,其他二者在 8 月份降幅最大。在林木生长初期应适当降低供水量,以提高地温,以利于林木萌发期的生长,最大供水期应在 7 月。

表 5 不同供水量下蒸腾耗水、土壤蒸发量、土壤贮水量、生态用水量月变化 m³/hm²

供水量/ (m ³ ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	耗水因子	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	合计	平均
1500	蒸腾耗水量	26.71	44.37	74.94	80.02	40.13	266.18	53.24
	土壤蒸发量	1305.00	944.67	1006.33	836.00	616.67	4708.67	941.73
	土壤贮水量	668.37	688.77	798.52	681.27	583.53	3420.45	684.09
	生态用水量	2000.1	1677.8	1879.8	1597.5	1240.3	8395.3	1679.1
3000	蒸腾耗水量	31.43	53.31	109.76	99.23	53.63	347.36	69.47
	土壤蒸发量	1305.00	944.67	1006.33	836.00	616.67	4708.67	941.73
	土壤贮水量	723.92	732.37	849.17	752.92	688.52	3746.88	749.51
	生态用水量	2060.4	1730.3	1965.3	1688.2	1358.8	8802.9	1760.6
4500	蒸腾耗水量	38.73	64.93	112.53	114.03	60.75	390.98	78.20
	土壤蒸发量	1305.00	944.67	1006.33	836.00	616.67	4708.67	941.73
	土壤贮水量	773.75	758.67	913.32	832.10	771.10	4048.70	809.74
	生态用水量	2117.5	1768.3	2032	1782.1	1448.5	9148.3	1829.7
6000	蒸腾耗水量	43.58	77.27	142.20	182.11	81.59	526.76	105.35
	土壤蒸发量	1305.00	944.67	1006.33	836.00	616.67	4708.67	941.73
	土壤贮水量	785.53	799.20	977.80	961.18	831.18	4354.90	870.98
	生态用水量	2134.1	1821.1	2126.3	1979.3	1529.4	9590.3	1918.1
7500	蒸腾耗水量	64.76	96.63	161.90	241.28	133.98	698.55	139.71
	土壤蒸发量	1305.0	944.67	1006.33	836.00	616.67	4708.67	941.73
	土壤贮水量	828.78	864.53	1043.95	984.75	830.92	4552.93	910.59
	生态用水量	2198.6	1905.8	2212.2	2062	1581.6	9960.2	1992.0

表 6 不同林龄杨树地水分供耗状况 m³/hm²

收支项目	林龄/ a	供水量/(m ³ ·hm ⁻² ·a ⁻¹)				
		1500	3000	4500	6000	7500
年生态 用水量	5	6523.7	6817.1	7387.5	8089.3	8351.9
	6	7221.1	7811.4	8019.1	8267.7	8703.8
	7	11441.0	11780.3	12038.4	12414.0	12824.7
年供水量 (含降雨)	5	1896.0	3396.0	4896.0	6396.0	7896.0
	6	2452.0	3952.0	5452.0	6952.0	8452.0
	7	2642.0	4142.0	5642.0	7142.0	8642.0
年亏缺量	5	4627.7	3421.1	2491.5	1693.3	455.9
	6	4769.1	3859.4	2567.1	1315.7	251.8
	7	8799.0	7638.3	6396.4	5272.0	4182.7

(3) 土壤贮水量、土壤有效含水量、田间持水量、最佳含水量指标均随供水量增加而增加,每增加 1 500 m³/(hm²·a) 供水量,可提高土壤贮水量 4.69%~7.43%;土壤有效含水量增幅差异较大,最大为 15.5%,最小为 1.42%;供水量对田间持水量影响不明显,土壤水分亏缺值随供水量增加而递减。

(4) 供水可以促进耗水,供水量的多寡决定耗水量的大小,蒸腾速率随供水量增加而递增,7 月为蒸腾速率的高峰期,9 月为低谷期。

(5) 杨树用材林地生态用水量随供水量增加而增加;每增加 1 500 m³/(hm²·a) 供水量,可使生态用水量依次分别提高 4.85%,3.92%,4.83%,3.85%;不同供水量处理下的杨树用材林生态用水量均随林龄的增

长而递增,与此同时,各处理的亏缺量呈逐年增加趋势;各年的水分亏缺量均随供水量的增加而递减。

参考文献:

[1] 肖洪浪,龚家栋,卢琦,等. 中国水情[M]. 北京:开明出版社,2000.

[2] 刘奉觉,郑世锴,臧道群. 杨树人工幼林的蒸腾变异与蒸腾耗水量估算方法的研究[J]. 林业科学,1987,23(营林专辑):35-44.

[3] 宋炳煜,杨劼,郭广芬,等. 皇甫川流域人工杨树林地的生理生态用水[J]. 水土保持学报,2004,18(6):159-162.

[4] 王葆芳,朱灵益. 灌溉对群众杨生长条件的调控作用研究[J]. 林业科学,1992,28(6):556-559.

[5] 北京林学院. 气象学[M]. 北京:中国林业出版社,1981.

[6] M N 布德科. 地表面热量平衡[M]. 李怀瑾,译. 北京:科学出版社,1960.

[7] H φ 库利克. 干旱地区沙地水分状况与水分平衡[M]. 赵兴梁,译. 呼和浩特:内蒙古林学院出版社,1989.

[8] 刘奉觉. 田间供水与杨树生长的关系的研究[J]. 林业科学研究,1988,1(2):150-160.

[9] 魏天兴,余新晓,朱金兆,等. 黄土区防护林主要造林树种水分供需关系研究[J]. 应用生态学报,2001,12(2):185-189.

[10] 张津林,张志强,查同刚,等. 沙地杨树人工林生理生态特性[J]. 生态学报,2006,26(5):1523-1532.

[11] 杨建伟,梁宗锁,韩蕊莲,等. 不同土壤水分含量对 4 个树种的影响[J]. 西北林学院学报,2004,19(1):9-13.