

晋西黄土区主要造林树种耗水特性分析*

杨锋伟^{1,2},陈丽华¹,朱清科¹,毕华兴¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京 100083;
2. 国家林业局 科学技术司,北京 100714)

摘 要:依据水量平衡原理,采用盆栽试验分别测算晋西黄土区主要造林树种油松、刺槐、苹果在其生长季(4 - 10 月)成熟单株树木的耗水量,并根据林地土壤水分动态及土壤水分特征曲线标定的各树种无效水界值,分析了各树种土壤水分供耗特点及其有效性。结果表明: 2002 贫水年生长季降水量 430.7 mm,试验树种同期耗水量为 430 ~ 470 mm,树木供耗失衡,2003 丰水年降水量 870.2 mm,耗水量为 450 ~ 510 mm 但降雨分配不均,5 月,10 月树木供耗也略有失衡; 不同树种年内土壤含水量变化趋势相近,而同月耗水量差异较大,同一树种不同月耗水量差异也较大,丰水年各试验地土壤水分状况要好于贫水年; 油松、刺槐、苹果 1 和苹果 2 无效水界值为:8.0%,8.4%,9.4%和 9.9%,油松较其它树种利用水分能力最强。贫水年单株树木土壤含水量在一段时间内低于对应树种的无效水界值,影响树木正常生长。单株树木依靠冬季和次年春季降水补充,生长季初期都能恢复到速效水水平。

关键词:造林树种;耗水量;水分平衡;土壤水分;黄土区

中图分类号:S715 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2008)01-0041-05

Analysis of Water Consumption of Main Afforestation
Species in Western Shanxi of Loess Plateau

YANG Feng-wei^{1,2},CHEN Li-hua¹,ZHU Qing-ke¹,BI Hua-xing¹

(1. College of Soil and Water Conservation in Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. Department of Science and Technology of State Forestry Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: In order to provide the scientific basis and practical instruction for the vegetation reconstruction and recovery in Loess Plateau, this paper measured and calculated water consumption of potted mature *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia*, *Malus pumila* 1 and *Malus pumila* 2 separately during the growing season (from Apr. to Oct.), which were the main afforestation species in western Shanxi of Loess Plateau, based on the theory of prevention of water transport in horizontal direction. Besides, according to the data of soil water dynamic and the range of available moisture of potted mature trees, it analyzed the relationship between water supply and consumption and the soil moisture availability and deficit state. Several conclusions are listed as follows: In the deficit water year (2002), during the growing season the precipitation was 430.7 mm and the water consumption of potted trees was from 430 mm to 470 mm. More water consumption and less available water supply occurred, showing a serious water deficiency. In the abundant water year (2003), during the growing season the precipitation was 870.2 mm and the water consumption of potted trees was from 450 mm to 510 mm. Due to uneven distribution of rainfall, the water budget lost balance a bit in May and Oct. The curves of soil water content of different species have similar change trends in annual but different in same month. Those of same species in different test plots have different change trends in same month either. Non-available soil water content of *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia*, *Malus pumila* 1 and *Malus pumila* 2 is less than 8.0%, 8.4%, 9.4% and 10.9% respectively, which indicates that *Pinus tabulaeformis* use water more efficiently than others. In the deficit water year (2002), for several months, soil water content of potted trees is lower than its non-available soil water content, which could influence trees healthy growing. After supplements of precipitation of winter in the year and spring in the next year, soil water contents are higher than the lower limit of soil readily available moisture content.

Key words: main afforestation species; water consumption; water balance; soil water; Loess area

水是维持生态系统正常运转所需要的基本要素,在水资源中(包括降水资源、地表水资源和地下水资源),降水量直接影响到地表水和地下水资源的数量,是林木生长最能直接

利用的水资源,在黄土高原干旱半干旱地区甚至是林木生长赖以生存的惟一水资源。因此,水分成为制约黄土区生态环境建设的“瓶颈问题”^[1-3]。建国以来,黄土区营造了大面积

* 收稿日期:2006-12-29
基金项目:林业科学技术研究项目(2003-045-L45)
作者简介:杨锋伟(1969 -),男,博士,主要从事林业生态工程研究。

防护林,由于对林地水分环境容量研究不够,在造林后期林地土壤出现干化现象^[4-5]。基于上述现象,林木耗水特性的研究日益引起关注^[1,6-7]。通过研究苗木蒸腾、耗水和抗旱的生理学特性,建立植被与水分的协调关系,为黄土区的造林树种选择与林分结构配置提供理论指导^[8-10]。在准确定量测算树木蒸腾耗水量技术方面,国内外已有许多人开展了深入研究^[11-17]。但关于黄土区造林树种单株耗水量的研究则较少,该研究利用水量平衡原理,根据长期定位观测资料定量测算生长季主要造林树种成熟单株树木耗水量,并对各树种耗水特性、林木土壤水分供耗特点作了分析,为黄土区植被重建与恢复提供科学依据和实践指导。

1 研究区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川流域,该地区土壤为褐土,黄土母质,属暖温带大陆性气候,多年平均年降水量 575.9 mm,降水量年际变化较大,且季节分配不均匀,旱季 4 - 6 月降雨量占全年总降雨量的 26.9%,雨季 7 - 10 月占 64.2%。蒸发量远大于降雨量,吉县年均蒸发量为 1 723.9 mm。营造防护林的主要树种有刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*) 和侧柏 (*Platycladus orientalis*) 等乔木。经济林树种主要有苹果 (*Malus pumila*)、杏树 (*Armeniaca vulgaris*) 和梨树 (*Pyrus hopeiensis*) 等。

2 研究方法

2.1 实验设计

采用盆栽试验,盆栽容器为蒸腾桶,该桶壁厚 0.5 cm、桶高 2 m,直径 1.7 m。盆栽树种有刺槐、油松、苹果 1、苹果 2,于 1996 年栽植,1998 年将蒸腾桶移入,方法是:根据桶的口径沿苗木周围开挖环形坑道,至适当深度后将蒸腾桶从苗木上方顺入,桶壁高出桶内地面约 5 cm。试验设计从 2002 年开始,桶内试验土壤为原状土。各试验树种桶底均外接导水管和盛水器,量测土内径流。试验地树种特征见表 1 (2002 年测定)。

表 1 试验树种特征

树种	树龄/a	树高/m	胸径/cm	冠幅/m
油松	9	2.85	3.06	1.0
刺槐	8	4.15	3.02	1.3
苹果 1	10	3.26	4.12	1.8
苹果 2	7	2.98	3.41	1.6

2.2 单株耗水量计算的原理和方法

桶栽试验苗木土壤表面有秸秆覆盖,土面蒸发量很小,且由于桶壁阻隔,各桶栽苗内土壤水分与周围土体水分不发生交换。在对桶栽的单株苗木长期土壤含水率动态监测的基础上,由实测资料根据水量平衡计算生长季单株耗水量。根据水量平衡方程:

$$W_f = W_0 + P - ET - R_s - R_f \tag{1}$$

式中: W_0 ——某一时段初期土壤贮水量 (mm); W_f ——时段末期土壤贮水量 (mm); P ——该时段有效降雨量 (mm); ET ——单株耗水量 (mm), 包括土面蒸发和单株蒸腾; R_s ——深层渗漏量 (mm); R_f ——地表径流量 (mm)。

经过试验设计,蒸腾桶壁高于桶内土壤表面约 5 cm,且试验地为水平阶地,因此在该试验中无地表径流,即 $R_f = 0$, 式 (1) 又可写为

$$ET = P + W_0 - W_f - R_s = P - W - R_s \tag{2}$$

式中: W ——土壤储水量的变化量 (mm)。

土壤贮水量 W 可根据下式计算:

$$\text{土壤贮水量} = [\text{土壤水分含量}(\%) + \text{土壤容重}(\text{g/cm}^3) \times \text{土层厚度}(\text{mm})] / \text{水容重}(1.0 \text{ g/cm}^3) \times 100 \tag{3}$$

式 (3) 中研究区试验树种桶内各层土壤容重见表 2。

表 2 土壤容重 g/cm^3

土层深/cm	刺槐	油松	苹果 1	苹果 2
0 - 20	1.12	1.05	1.06	1.06
20 - 60	1.16	1.23	1.10	1.10
60 - 100	1.21	1.26	1.14	1.14

2.3 降水

降雨量用自记雨量计测定并结合气象站资料得到。

2.4 土壤水分动态变化测定

2002 年用土钻法测定土壤含水率,即在生长季 (4 - 10 月) 每月上旬和中旬分别测定各桶栽树种 0 - 20、20 - 40、40 - 60、60 - 80 和 80 - 100 cm 5 层土壤含水率,每次测定时每个层次 2 个重复。考虑土钻对蒸腾桶内土体破坏,于 2003 年起改用 TDR 测定,其埋深也按照上述 5 个层次进行,土壤贮水量根据式 (3) 计算。

2.5 试验土壤水分特征曲线测定

利用离心机 (H-1400DF) 测定试验土壤水分特征曲线,并计算出不同水势下的土壤含水量。选取盆栽土样,用环刀采单个原状土样,在实验室中使之饱和,利用离心机 H-1400DF 在不同转速下离心 60 ~ 70 min,使之达到水分平衡,称重。离心结束后土样烘干 (105℃) 称重,计算不同水势下的土壤含水量。

转速为 n_i (r/min) 时的土壤水势 ψ_i (10^5 Pa) 为:

$$\psi_i = - (1.12 \times 10^{-8} \times r \times n_i^2) \quad (r \text{ 为离心半径, cm})$$

土壤水势为 ψ_i 时的土壤含水量为

$$SWC = [(\psi_i \text{ 时的土壤湿重} - \text{烘干土样重}) / \text{烘干土样重}]$$

3 结果与分析

3.1 试验树种生长季耗水量测算与分析

黄土高原地区,林地的耗水时段主要集中在生长季节,即每年的 4 - 10 月。因此在计算黄土高原地区单株苗木的耗水支出时,以其生长季 (4 - 10 月) 为耗水量的计算时段^[18]。研究区 4 - 10 月多年平均降水量为 521.4 mm,2002 年生长季降水量为 430.7 mm,低于多年同期的平均值,属于贫水年。2003 年生长季降水量为 870.2 mm,高于多年同期的平均值,属于丰水年^[19]。表 3 为 2002 和 2003 年生长季各月降水量表。2002 年为贫水年,各盆栽树木无地表径流和土内径流 (即 $R_s = 0$)。

表 3 2002 年和 2003 年生长季各月降水量 mm

年份	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	4 - 10 月
2002	29.2	41	101	52.5	55	112	40	430.7
2003	60.2	36.2	55.2	69.2	440.2	134.2	75	870.2

式 (2) 可写成:

$$ET = P - W \tag{4}$$

将土壤水分资料,代入式 (4),计算树木生长季耗水量,见表 4 和图 1。

2003 年为丰水年,8 月降水量大,各盆栽树木产生土内径流。将土壤水分资料和土内径流量代入式(2)、(3)计算树木生长季耗水量,见表 5 和图 1。

表 4 2002 年单株树木生长季各月供耗平衡

树种	月份	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	小计
	降雨量/mm	29.2	41.0	101.0	52.5	55.0	112.0	40.0	430.7
刺槐	W/mm	5.6	- 38.7	26.7	- 30.1	- 51.1	37.3	11.6	- 38.7
	ET/mm	23.6	79.7	74.3	82.6	106.1	74.7	28.4	469.4
油松	W/mm	6.6	- 29.5	29.2	- 27.7	- 39.3	35.6	14.8	- 10.3
	ET/mm	22.6	70.5	71.8	80.2	94.3	76.4	25.2	440.9
苹果 1	W/mm	6.2	- 33.1	20.4	- 40.8	- 41.3	38.7	17.0	- 32.8
	ET/mm	23.0	74.1	80.6	93.3	96.3	73.3	23.0	463.4
苹果 2	W/mm	5.2	- 32.1	23.1	- 34.2	- 43.5	39.5	14.4	- 27.7
	ET/mm	24.0	73.1	77.9	86.7	98.5	72.5	25.6	458.3

表 5 2003 年单株树木生长季各月供耗平衡

树种	月份	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	小计
	降雨量/mm	60.2	36.2	55.2	69.2	440.2	134.2	75.0	870.2
刺槐	W	22.4	- 35.9	- 23.8	- 31.6	75.3	72.9	28.3	107.6
	R_s	0.0	0.0	0.0	0.0	252.9	0.0	0.0	252.9
	ET	37.8	72.1	79.0	100.8	112.0	61.3	46.7	509.7
油松	W	22.0	- 28.0	- 15.7	- 16.8	64.3	78.7	31.1	135.6
	R_s	0.0	0.0	0.0	0.0	275.6	0.0	0.0	275.6
	ET	38.2	64.2	70.9	86.0	100.4	55.5	43.9	459.0
苹果 1	W	16.0	- 33.5	- 26.1	- 24.9	49.7	73.4	32.7	87.4
	R_s	0.0	0.0	0.0	0.0	285.5	0.0	0.0	285.5
	ET	44.2	69.7	81.3	94.1	105.0	60.8	42.3	497.3
苹果 2	W	15.7	- 27.4	- 22.5	- 21.5	71.9	71.0	29.4	116.7
	R_s	0.0	0.0	0.0	0.0	264.1	0.0	0.0	264.1
	ET	44.5	63.6	77.7	90.7	104.2	63.2	45.6	489.4

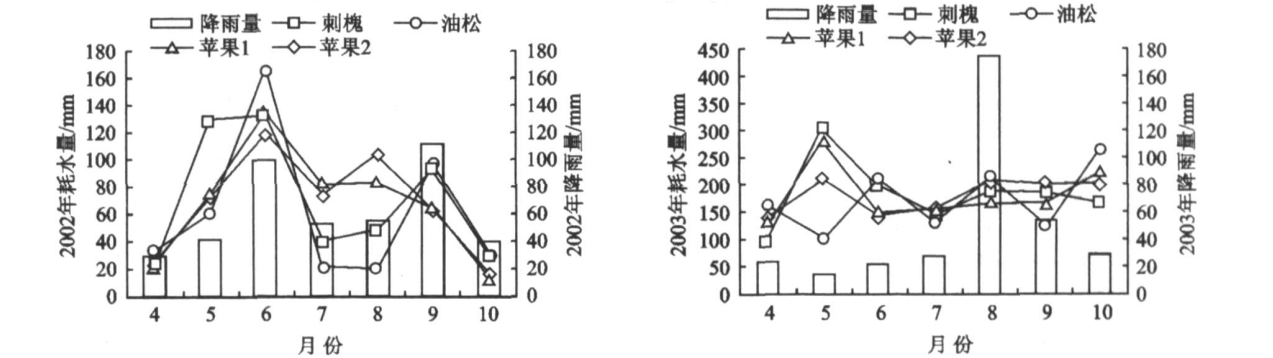


图 1 2002 和 2003 年单株树木生长季各月蒸腾耗水量变化

2002 贫水年生长季降水为 430.7 mm,由表 4 可知:单株树木水分收入项为生长季内降水,支出项仅为其蒸散量。4 月树木生长初期,林木蒸腾耗水甚微,且气温较低,各盆栽树木耗水量相对较少,降雨补给与蒸腾消耗基本持平。5 月气温回升较快,植物蒸腾加剧,而降雨量较 4 月变化不大,出现了土壤水分亏缺。而生长旺期的 6,7,8 月植物蒸腾作用持续加剧,各树木耗水量明显增加,约占整个生长季耗水总量的 50%~60%,而惟一水分补给的大气降水为 208.5 mm,占生长季降水的 48.4%,供耗矛盾剧烈,土壤水分持续亏缺。到生长季末期的 9,10 月,树木耗水量减少,且降雨补充及时,供耗矛盾得到缓解,土壤含水量增加。生长季内总降水量小于同期各树木总耗水量,贫水年生长季树木供耗失衡,土壤水分出现亏缺。

2003 丰水年生长季各树木耗水特性与 2002 年基本一致。整个生长季内降水丰沛,但分配不均,5,10 月出现供耗

矛盾,其余月份土壤水分未出现亏缺现象。生长季内总降水量均大于同期各树木总耗水量,但因降雨分配不均,丰水年树木供耗也会略有失衡。

2003 年(丰水年)生长季各单株耗水量均大于 2002 年(贫水年)。油松耗水量较刺槐、苹果 1 和苹果 2 耗水量最小,说明油松较刺槐、苹果树为低耗水树种。

3.2 单株土壤水分有效性分析

3.2.1 单株树木土壤水分有效性季节变化分析

当降水供应不再满足耗水之需时,通过分析土壤水分有效性来考察土壤水分的消耗是否影响苗木生长。土壤水分特征曲线是土壤水分的能量(水势)和数量(含水率)指标间的关系曲线。它反映了土壤保持水分的情况,可以标定出测试样地的有效水利用范围。根据土壤水分对植物生长有效性原理,按照凋萎湿度、生长阻滞含水量和田间持水量对土壤水进行分级分析。由原状土测定的田间持水量值反查土

壤水分特征曲线模型,试验样地土壤的田间持水量相当于 - 0.02 ~ 0.03 MPa 水势时的土壤持水量。造林树种的永久凋萎点达到 - 2.0 MPa 以下,可将 - 2.0 MPa 作为有效水下限。在有效水范围内,随着土壤水势下降,即含水量降低,植物根系吸收水分的难度增加。- 1.0 MPa 水势值是水容量变化的关键点之一,因此可将 - 1.0 MPa 作为迟效水的上限。通过测定刺槐、油松、苹果 1 和苹果 2 土壤水分特征曲线,得到对应的曲线拟合方程,并对对应树种的土壤水分进行了分类(表 6)。

树木土壤含水量值处于其无效水界值以下,植物不能吸收利用,其持续时间的长短,直接影响树木的生长。由表 6 可知,单株树种中,油松利用水分能力最强,其有效水界值下限可以达到 8.0 %。其次为刺槐,而苹果 1 和苹果 2 利用水分能力较弱。说明在干旱条件下,苹果树首先受到水分胁迫,影响其生长。

表 6 林外单株树木土壤水分特征曲线拟合方程与土壤水分有效性范围

树种	土壤水分特征 曲线拟合方程	采样 深度/ cm	重力流出水/ % (- 0.03 MPa)	有效水范围/ %		无效水范围/ % (- 2 MPa)
				速效水 (- 0.03 ~ - 1 MPa)	迟效水 (- 1 ~ - 2 MPa)	
刺槐	$SWC = 14.03 - 0.1707 R^2 = 0.914 \quad n = 25$	40 - 60	> 17.2	17.2 ~ 9.5	9.5 ~ 8.4	< 8.4
油松	$SWC = 13.67 - 0.1783 R^2 = 0.939 \quad n = 25$	40 - 60	> 16.9	16.9 ~ 9.1	9.1 ~ 8.0	< 8.0
苹果 1	$SWC = 15.428 - 0.1624 R^2 = 0.871 \quad n = 25$	40 - 60	> 18.8	18.8 ~ 10.6	10.6 ~ 9.4	< 9.4
苹果 2	$SWC = 16.024 - 0.1514 R^2 = 0.892 \quad n = 25$	40 - 60	> 19.8	19.8 ~ 11.3	11.3 ~ 9.9	< 9.9

注:苗木的土壤含水量为 0 - 1 m 深度各测次的平均值。

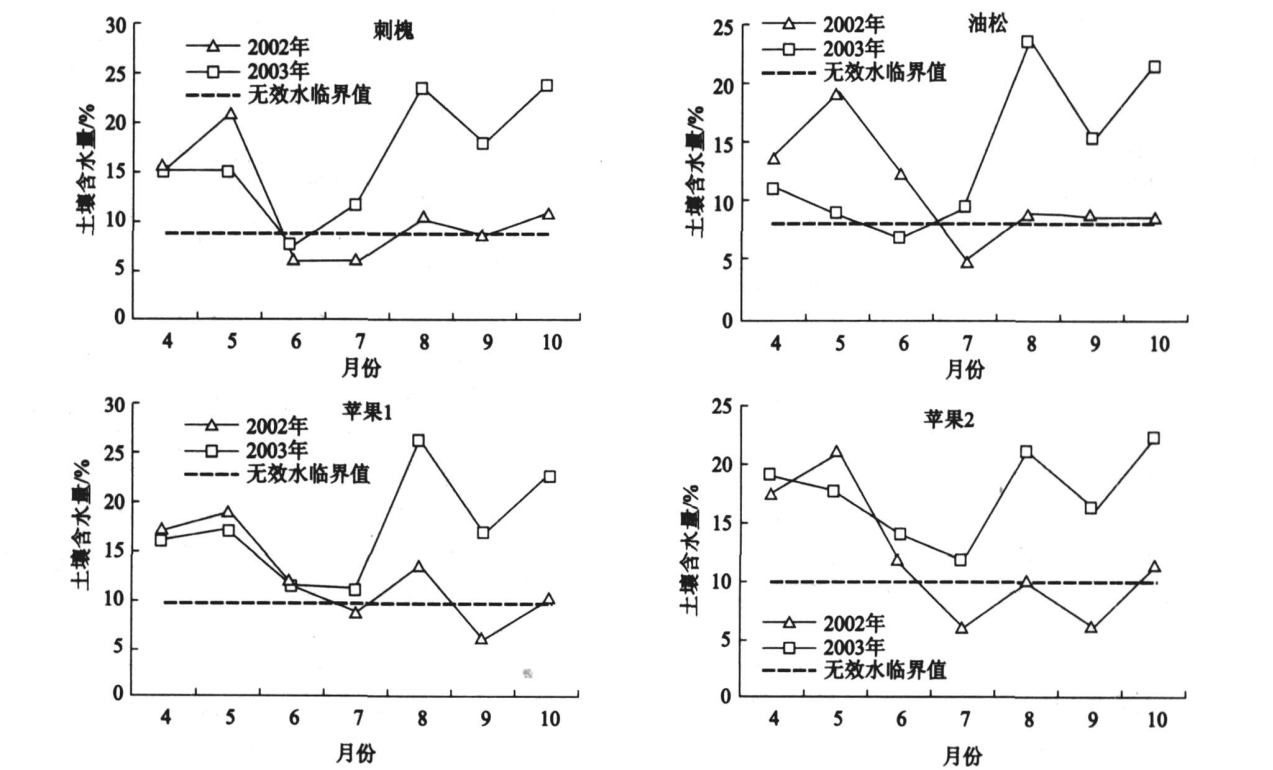


图 2 2002 年和 2003 年林外单株树木生长季各月土壤含水量动态变化

图中显示 2002 年苹果 1、苹果 2 土壤含水量值在较长时间内低于无效水临界值,但实际图中仅表示的是半月一次测定的土壤含水量当月测两次的平均值,而当月有降水及时补充林地土壤水,虽对测定时刻土壤含水量值影响较小,但树木并未因此而死亡。

3.2.2 单株树木土壤水分年际供耗分析

树木蒸腾耗水主要集中在生长季,进入 11 月树木停止生长,土壤开始冻结,水分损耗主要是以蒸发为主。表土因枯落物及积雪覆盖防止了土壤水分损耗,至次年 4 月初,若有大量积雪融化或有降雨补给,土壤水分含量会持续增加,树木开始生长时的土壤含水量会恢复到去年 4 月初的状态,从而可保证林木一直正常生长。表 7 为 2000 - 2004 年单株树种 4 月中旬土壤含水量。

表 7 林外单株树木土壤含水量对照 %				
年份	刺槐	油松	苹果 1	苹果 2
2000	11.3	9.6	17.3	18.4
2002	14.8	12.4	15.2	16.8
2003	15.2	9.1	15.0	19.2
2004	16.3	14.2	17.0	17.4

除油松 2000 年 2003 年 4 月中旬土壤含水量波动较大外,其余树种变化不明显。由表 8 可知,各树种土壤含水量均在速效水范围内。1999 - 2003 年各年降水量分别为 402.3,489.8,432.6(4 - 10 月),485.5 和 922.5 mm,分别为贫水年、正常年、贫水年、丰水年。1999 - 2003 年土壤水分在得到冬季和次年春季降水补充后,生长季初期都能恢复到速效水水平,各单株树木土壤水分能达到年际供耗平衡。因此,试验树种在保持适当营养空间下(本试验盆栽容器直径 1.7 m),树木土壤水分可达到年际收支平衡,能稳定生长。

4 结 论

(1) 依据水量平衡方程,通过测算得出:油松、刺槐、苹果 1 和苹果 2 生长季(4 - 10 月)总耗水量,2002 贫水年分别为 440.9,469.4,463.4 和 458.3 mm;2003 丰水年分别为 459.0,509.7,497.3 和 489.4 mm。贫水年生长季内降水量小于同期各树木总耗水量,生长季单株树木供耗失衡。丰水年生长季内降水丰沛但降雨分配不均,5,10 月树木供耗也略有失衡。且丰水年各林木耗水量大于贫水年各林木耗水量。油松生长季耗水量最小,较刺槐、苹果树为低耗水树种。

(2) 不同树种年内土壤含水量变化趋势相近而同月耗水量差异较大,同一树种不同月耗水量差异也较大。丰水年各试验地土壤水分状况要好于贫水年。通过土壤水分特征曲线,标定出油松、刺槐、苹果 1 和苹果 2 有效土壤水范围,其中上述树种的无效水界值为:8.0%,8.4%,9.4%和 9.9%,油松较其它树种利用水分能力最强。贫水年单株树木土壤含水量在一段时间内低于对应树种的无效水界值,影响树木正常生长。单株树木依靠冬季和次年春季降水补充,生长季初期都能恢复到速效水水平,各单株树木土壤水分能达到年际供耗平衡。

(3) 刺槐、油松、苹果作为晋西黄土区退耕还林造林树种,在保持合理营养空间下(试验盆栽容器直径 1.7 m),树木可正常生长。通过试验,据水量平衡方程计算成熟单株树种生长季内蒸腾耗水量,是一种较为适用的实验方法。

参考文献:

[1] 王华田,张光灿,刘霞.论黄土丘陵区造林树种选择的

原则[J].世界林业研究,2001,14(5):74-78.

[2] 周晓红,赵景波.黄土高原气候变化与植被恢复[J].干旱区研究,2005,22(1):116-118.

[3] 王力,邵明安,侯庆春.土壤干层量化指标初探[J].水土保持学报,2000,14(4):87-90.

[4] 魏天兴,朱金兆.黄土区人工林地水分供耗特点与林分生产力研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(4):45-51.

[5] 孙中文,孙中峰,张学培,等.黄土区人工林地的土壤水分研究动态[J].干旱区研究,2005,22(2):167-170.

[6] Wullschlegel S D,Meinzer F C,Vertessy R A. A review of whole-plant water use studies in trees[J]. Tree Physiology,1998,18:499-512.

[7] 马履一,王华田,林平.北京地区几个造林树种耗水性比较研究[J].北京林业大学学报,2003,25(2):1-7.

[8] 王百田,张府娥.黄土高原主要造林树种苗木蒸腾耗水特性[J].南京林业大学学报:自然科学版,2003,27(6):93-97.

[9] 韩蕊莲,梁宗锁,侯庆春,等.黄土高原适生树种苗木的耗水特性[J].应用生态学报,1994,5(2):210-213.

[10] 刘淑明,陈海滨,孙长忠,等.黄土高原主要造林树种的抗旱性研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2003,31(4):149-153.

[11] 孙长忠,黄宝龙.单株平衡法的建立[J].林业科学,1996,32(4):378-381.

[12] 陈建耀,刘昌明,吴凯.利用大型蒸渗仪模拟土壤-植物-大气连续体水分蒸散[J].应用生态学报,1999,10(1):45-48.

[13] 石青,余新晓,李文宇,等.水源涵养林林木耗水称重法试验研究[J].中国水土保持科学,2004,2(2):84-87.

[14] Lachenaud P, Montagnon C. Competition effects in cocoa (*Theobroma cacao* L.) hybrid trials[J]. Euphytica, 2002,128:97-104.

[15] Alarcon J J, Domingo R, Green S R, et al. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees[J]. Plant and Soil, 2000,227:77-85.

[16] Steve Green, Brent Clothier. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree[J]. Plant and Soil, 2003,206:61-77.

[17] Ferrara G, Flore J A. Comparison between different methods for measuring transpiration in potted apple trees[J]. Biologia Plantarum, 2005,46(1):41-47.

[18] 何永涛,李文华,李贵才,等.黄土高原地区森林植被生态需水研究[J].环境科学,2004,25(3):35-39.

[19] 张晓明.黄土丘陵沟壑区坡面稳定林分结构设计研究[D].北京:北京林业大学,2004.