

黄土高原主要造林树种需水定额计算与分析 *

张晓明,余新晓,武思宏,陈丽华

(北京林业大学 水土保持学院 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室,北京 100083)

摘 要:根据气象资料,运用彭曼公式(Penman's formula)和桑斯维特公式(Thorntwait fomular)计算并分析晋西黄土区主要造林树种刺槐、油松和苹果林地的潜在蒸散量,结合林种不同林龄的耗水特性系数,计算得出刺槐、油松和苹果生长季(5 - 10 月)的需水定额,并对其年内及不同龄级需水量的变化趋势作了分析。结果显示,刺槐 5 个龄级的年耗水量:2 a 生刺槐年耗水量为 390. 65 mm,3 a 生 398. 85 mm,5 a 生 411. 4 mm,7 a 生 529. 7 mm,13 a 生 633. 95 mm;油松 3 个龄级段的年耗水量,17 ~ 19 a 生为 653. 5 mm,19 ~ 20 a 生 658. 7 mm,25 ~ 28 a 生 655. 6 mm;苹果 2 个龄级的年耗水量,4 a 生为 319. 9 mm,8 a 生为 526. 35 mm。同时,确定出各龄级树种的月需水量和耗水量的年内变化趋势,为黄土高原抗旱造林提供参考依据。

关键词:造林树种;需水定额;黄土高原

中图分类号:S715. 5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)01-0036-05

Calculation and Analysis of Quota of Water Requirement
of Main Afforestation Species in Loess Plateau

ZHAN Xiao-ming, YU Xin-xiao, WU Si-hong, CHEN Li-hua

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:According to the local weather data,the potential evapotranspiration of artificial *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia* and *Malus pumila* in the west of Shanxi Province was calculated and analyzed by both Penman's formula and Thornthwaita's formula. According to the result and the water consumption coefficients of the water demands of artificial *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia* and *Malus pumila* in their growing period (May-Oct.) were worked out respectively. Then the water supply-demand equilibriums were analyzed. The results show that:calculate out quota of water requirement of the main plantation tree species such as *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia* and *Malus pumila* estimate annual water consumption of the main plantation tree species of different age. The 5 age-class annual water consumption of *Robinia pseudoacacia* are:biyearly:390. 65 mm,triennium:398. 85 mm,lustrum:411. 4 mm,septennial:529. 7 mm and the thirteen years:633. 95 mm. The 3 age-class annual water consumption of *Pinus tabulaeformis* are:17 ~ 19 years:653. 5 mm;19 ~ 20 years:658. 7 mm;25 ~ 28 years:655. 6 mm. The 2 age-class annual water consumption of *Malus pumila* are:four years:319. 9 mm;eight years:526. 35 mm. At the same time we ascertain the monthly water requirement and annual change trend of water consumption of different age-class.

Key words :afforestation tree species;quota of water requirement ;Loess Plateau

1 引 言

我国黄土高原地区的水土流失成为制约该区生态建设的最大问题,解决该问题的必由之路就是恢复植被。而黄土高原地区处于半湿润半干旱地区向干旱地区的过渡地带,水资源总体表现为短缺,严重制约着生态环境的建设与恢复。在现有条件下,如何充分有效利用有限的水资源成为恢复该区植被的关键,因此,森林植被耗水、需水及用水定额的计算和分析成为必要。我国对缺水区域植被生态系统需水做了相对较多的研究^[1-4],并估算了一些地区的生态建设需水量^[5-8]。王礼先估算了西北植被建设生态建设需水定额为 $220 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 左右,新疆、河西走廊和柴达木盆地 200 ×

$10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ^[7]。陈丽华将生态用水划分为:绿色植物用水、动物用水和维护无机环境的生物平衡所需的水分 3 部分,计算出北京市森林植被的生态用水定额为 $370. 53 \text{ mm}/\text{a}$ ^[8]。

在植被需水研究方面,由于近几年来先进测试技术引入国内,有关树木需水量研究进展很快,开辟了许多新的研究途径,取得了一系列研究成果^[9-10],采用水量平衡法和能量平衡法,建立了许多计算需水量的计算公式,揭示出植物需水量与一些气象因子之间的关系。该文以黄土高原为例,以该区域主要造林树种油松、刺槐和经济林树种苹果等为主要研究对象,围绕该地区的生态建设需水问题,讨论生态需水定额的定义、分类、定量计算方法,并筛选适合的数学模型,

* 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:张晓明(1979 -),男,山西偏关人,博士生,主要从事水土保持与林业生态工程研究。

在此理论基础上研究归纳适合该区域的抗旱造林技术体系,力图为该区域生态建设提供理论依据和技术方案。

2 研究区概况及研究方法

2.1 试验区概况

研究区为山西省吉县蔡家川流域,位于黄土高原西南部,地理坐标为北纬 35°53′-36°21′,东经 110°27′-111°07′。年平均降水量为 579.5 mm,集中于 7-9 月,无霜期平均 170 d 左右,年平均气温 10℃。属于暖温带、半湿润地区,半湿生落叶阔叶林与森林草原地带。土壤类型为褐土,普遍呈碱性。流域中上游植被类型主要为白桦(*Betalaplaty phylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、丁香(*Syringa oblata*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decne)等组成的天然次生林,中游为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等树种组成的人工林及天然草本植被,以及山杨(*Populus davidiana*)沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、绣线菊(*Spirean thunbeigii*)、黄刺玫(*Rose Yanthin* Lndl)等组成的天然次生灌木植被为主。

2.2 研究方法

2.2.1 林木蒸腾速率测定

采用离体水平中的气孔计法和快速称重法,单株水平中的热脉冲法和整树容器法。

(1) 气孔计法。使用 LI-1600 稳态气孔计,首先设定环

$$ET_a = \frac{\left\{ \frac{p_0}{p} [0.75 Q_A (a + b \frac{n}{N}) - T_k^4 (0.56 - 0.079 \sqrt{e_a}) (0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) + 0.26 (e_s - e_a) (1 + C \cdot u_2)] \right\}}{\left(\frac{p_0}{p} + 1.0 \right)}$$

(1)

式中: p_0 、 p ——海平面标准大气压和计算地点实际气压(hPa); $\frac{p_0}{p}$ ——饱和水气压-温度曲线的斜率(hPa/℃); $\frac{n}{N}$ ——湿度计常数; n 、 N ——实际日照时数和理论日照时数(h); $\frac{T_k}{5}$ ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数; C ——风速修正系数; a 、 b ——用日照时数计算太阳辐射的经验系数; e_s ——饱和水气压; e_a ——平均水汽压; T_k ——平均温度; Q_A ——理论太阳辐射; u_2 ——风速。

(2) 桑斯维特法(Thorntwait fomular)。该公式主要适用于干旱和半干旱地区,研究区所在地山西吉县即属此例,公式如下:

$$ET_a = 1.6 K_d \left(\frac{10 T_i}{I} \right)^a$$

(2)

其中: $I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$,

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49239$$

式中: ET_a ——某月的潜在蒸散量(cm); T_i ——该月平均气温(℃); K_d ——平均昼长改正系数,以每月 30 d、每天 12 h 作标准,各地各月的时间改正值,可从 K_d 表中查得; I ——热效应指标,等于 12 个月的总和。

3 结果与分析

林木耗水量确定即首先计算各阶段潜在蒸散量 ET_a ,然后利用具体林木的植物系数 K_d 修正,便可得到该林木的需水量 Et_a ,通过桑斯维特法和彭曼法进行计算,并对 2 种方法所算得的结果进行综合,以确定黄土高原地区主要造林树种的耗水量和需水量。

境相对湿度,仪器自动控制干空气流量,使叶室相对湿度保持稳定;然后用固定参数(界面层阻力恒定为 0.15 s/cm),并测定数据:空气水汽密度(ρ_a)、叶室水汽密度(ρ_c)、干空气流量(F)和叶面积(A);最后通过公式: $Tr = (\rho_c - \rho_a) F / A$ 计算出蒸腾速率(Tr)。

(2) 快速称重法。如果枝叶离体短时间内蒸腾改变不大,可剪取枝叶在现场进行 2 次间隔称重,用离体失水量和间隔时间换算蒸腾速率,代表正常生长状况下的蒸腾速率。

(3) 热脉冲法。该方法用热脉冲加热树液,在上下方固定距离测定温度变化,以确定树液流速,对断面树液流速再积分成为断面流量。

(4) 整树容器法。该法是凌晨从地面处锯断树木,原地移入盛水的容器(铁桶)中,在桶边安装水位指示针,加水至指针水位。由于树冠蒸腾的进行,树干断面吸入水分,桶内水位不断下降,定时计录水位下降高度,同时保证桶内有充足的水量。

2.2.2 植被耗水计算方法

采用彭曼公式和桑斯维特公式计算研究区人工刺槐、油松和苹果林的潜在蒸散量。

(1) 彭曼公式(Penman's fomular)。彭曼公式是综合性公式^[11],它在能量平衡法的基础上,引用干燥力的概念,经过简捷的推导而来,公式如下:

3.1 潜在蒸散量和植物系数估算

植物系数和潜在蒸散量是计算林木耗水的关键性数据,其中潜在蒸散量(ET_a)可以根据桑斯维特法或彭曼法来计算;确定植物系数首先要有植物需水量数据(Et_a),这个数据是通过对林木充分灌水条件下测定的,以充分灌水保证林木生长发育不受水因子的限制,其次用公式: $K_d = Et_a / ET_a$ 计算出植物系数。

刺槐、油松和苹果等主要造林树种或经济树种,在黄土高原地区,其耗水几乎都集中在 5-10 月,所以植物耗水定额的确定仅利用到该时间段内的潜在蒸散量数据。

利用式(2)和试验区多年月平均气象数据计算一般年份各月的潜在蒸散量;同时,利用式(1)的彭曼法计算实际年份潜在蒸散量的逐日过程。最后综合两种方法的计算结果,得出当地 5-10 月的蒸散量(表 1)。

林木植物系数是计算林木需水量的关键性参数之一,它综合反映某种林木的耗水特性。运用桑斯维特法与彭曼法估算相应时段内不同林龄刺槐、苹果林的潜在蒸散量,结合充分灌水条件下相应时段内不同林龄刺槐、苹果的需水量,最后分别求得不同林龄刺槐、苹果的植物系数,并综合了桑斯维特法与彭曼法的计算结果,得出刺槐、苹果的部分龄级的植物系数(表 2)。

3.2 刺槐需水定额确定和分析

根据潜在蒸散量(ET_a)计算结果(表 1)以及不同龄级刺槐的植物系数(K_d)计算结果(表 2),运用式(3)求出刺槐各月耗水量和年耗水量(表 3)。

不同生长阶段耗水量 =

潜在蒸散量(ET_a) × 植物系数(K_d)

(3)

表 1 桑斯维特法和彭曼法计算的各月潜在蒸散量 mm

方法	月份	5	6	7	8	9	10	合计
桑斯维特法	多年月平均	93.05	120.50	138.21	113.95	71.48	35.86	573.04
彭曼法	第一年	71.43	86.77	108.68	126.79	122.62	49.36	565.65
	第二年	109.17	105.93	126.07	146.58	134.65	42.36	664.76
两方法综合值		95.00	120.00	135.00	125.00	100.00	45.00	620.00

表 2 部分龄级刺槐、苹果的植株系数 K_c 估算值

树种	林龄/a	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	平均
刺槐	2	0.44	0.38	0.52	0.88	0.83	0.89	0.66
	3	0.43	0.40	0.53	0.90	0.85	0.91	0.67
	5	0.42	0.42	0.55	0.92	0.90	0.93	0.69
	7	0.42	0.58	0.78	1.28	1.00	1.22	0.88
	13	0.41	0.71	0.96	1.52	1.20	1.56	1.06
苹果	4	0.26	0.38	0.48	0.92	0.50	0.44	0.50
	8	0.32	0.42	0.93	1.52	0.85	1.00	0.84

表 4 是刺槐林耗水实测数据,其林分密度为 2 m ×5 m,苹果密度 3 m ×4 m。刺槐需水实际测定值(表 4)与估算结果(表 3)之间存在差值,这部分差额体现在林地蒸发量和林木蒸腾量上。实际的气候条件和土壤水分供给条件下,树木的生长是否受到了水因子的限制是很难确定的,特别是水量

表 4 林木正常生长低限水分环境条件下的刺槐幼林林地耗水

观测年	月份	土壤含水量	降水量/	单株林木蒸腾耗水	林地土壤	林地蒸散耗水量	蒸腾蒸散比
		/ %	mm	量/(kg ·株 ⁻¹)	蒸发量/mm	/ mm	
1993 2 a 生刺槐	5	10.48	34.80	76.94	33.51	41.20	0.19
	6	11.03	37.50	146.30	42.24	56.87	0.26
	7	12.26	76.30	211.78	40.07	61.24	0.35
	8	16.33	148.40	330.64	69.44	102.50	0.32
	9	14.73	55.60	154.66	55.45	70.92	0.22
	10	12.44	15.50	84.76	36.69	45.17	0.19
	合计		368.10	1005.08	277.40	377.91	
1994 3 a 生刺槐	5	12.51	14.45	95.79	18.89	30.73	0.39
	6	9.34	41.55	127.79	15.13	41.00	0.63
	7	11.15	96.20	243.07	42.77	77.98	0.45
	8	16.37	158.42	478.34	107.63	153.45	0.30
	9	10.96	18.40	281.80	54.73	90.40	0.39
	10	12.06	41.10	47.38	10.32	15.20	0.32
	合计		370.12	1274.20	249.47	408.75	
1993 5 a 生刺槐	5	10.56	34.80	155.84	27.97	47.45	0.41
	6	11.24	37.50	166.90	33.39	54.25	0.38
	7	12.11	76.30	330.42	29.16	70.46	0.59
	8	14.56	148.40	515.20	59.84	124.24	0.52
	9	13.27	55.60	281.12	34.64	69.78	0.50
	10	12.64	15.50	122.60	29.56	44.89	0.34
	合计		368.10	1572.08	214.56	411.07	

该数据引自国家“八五”攻关项目的研究成果。

5 个龄级的刺槐,其年内耗水波动均相似,耗水量呈单峰曲线。从 5 月开始,一直到 8 月,均呈上升趋势,8 月各龄级刺槐耗水量达年内最高点(图 1)。在这个波动过程中,除了土壤含水量外,叶面积和光照时间起到主要的作用,几乎是在叶面积最大和光照时间最长的时间内出现了耗水峰值。

5 月各龄级刺槐叶面积相差不是很大,同时叶面的蒸腾能力差距没有充分体现出来,故各龄级刺槐耗水量接近,均偏低在 40 mm 左右。6 - 8 月随着光照时间的延长和叶面积的增加,各龄级耗水量逐渐增加,到 8 月达到最大;同时随各龄级间叶面积量的差额增大,各龄级耗水量差额逐渐增大,到 8 月差额达到最大。8 - 10 月随着叶片的逐渐衰老和脱

供给还比较充分的时候。

无论那个龄级的刺槐,其最大估算耗水量均出现在 8 月,其中 13 a 生刺槐估算耗水量最大,为 190 mm,2 a 生估算耗水量最小,为 110 mm;5 个龄级中,13 a 生刺槐年耗水总量最大,为 633.95 mm,2 a 生最小,为 390.65 mm。

表 3 部分龄级的刺槐林需水量估算值 mm

树种	林龄/a	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	合计
刺槐	2	41.8	45.6	70.2	110.00	83.00	40.0	390.6
	3	40.8	48.0	71.5	112.5	85.0	40.9	398.8
	5	39.9	50.4	74.2	115.0	90.0	41.8	411.4
	7	39.9	69.6	105.3	160.0	100.0	54.9	529.7
	13	38.95	85.2	129.6	190.0	120.0	70.2	633.9

落,各龄级耗水量逐渐下降;同时,各龄级间叶面积量的差额减少,各龄级耗水量差额逐渐缩小(图 1)。

随龄级的增加,刺槐耗水量随之增大(图 2)。其中 2,3,5 a 生刺槐年耗水量在 400 mm 左右,7 a 生在 529.7 mm,13 a 生在 633.95 mm。2,3,5 级龄刺槐年耗水总量接近,是由于该 3 个龄级的叶面积、生物量差额不大,导致耗水量接近;7 a 生与 13 a 生相差 5 年,其年耗水总量相差 104.25 mm。

3.3 油松需水定额确定与分析

通过 2 个样地的油松蒸腾量观测值和蒸发量观测值来估算油松的年耗水量。在两样地连续观测 4 - 10 月的油松林地蒸发量(表 5),最后得出油松林地平均蒸发量为 194.8

mm。不同龄级油松 4 - 10 月的蒸腾量见表 6。在得出油松林地蒸发量和油松林蒸腾量基础上,估算出油松每月耗水量和年耗水总量(表 7)。

表 5 油松林地蒸发量mm

地块	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	合计
1	12.4	11.7	10.1	14.2	9.2	5.0	8.7	71.3
2	17.3	43.5	7.1	69.3	54.7	35.2	27.7	318.2
平均	14.9	27.6	8.6	41.8	32.0	20.1	18.2	194.8

表 6 油松蒸腾量mm

龄级/a	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	合计
17~19	50.3	70.6	69.1	100.5	77.4	65.7	25.1	458.7
19~20	54.9	60.5	76.8	101.6	78.2	63.6	28.3	463.9
25~28	59.5	65.0	66.3	105.9	77.7	66.2	20.2	460.8

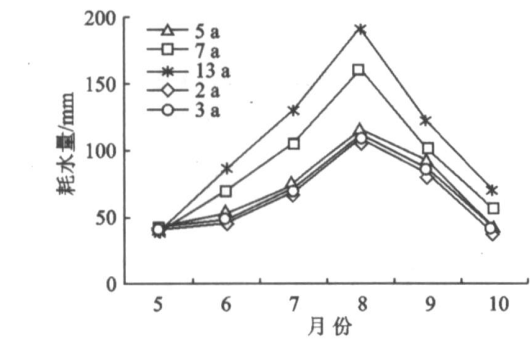


图 1 不同龄级刺槐年内各月耗水变化

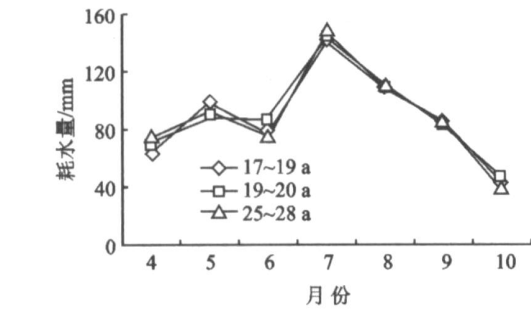


图 3 不同龄级油松耗水年内变化

在 4 - 10 月,各龄级油松月耗水量接近,其年耗水总量也比较接近,均在 655 mm 左右(图 4)。油松属于针叶林,其生长缓慢,相近树龄的油松生物量相近,另外由于其他原因,如土壤水分变化等,均会影响其耗水量的大小(图 4)。

3.4 苹果需水定额确定与分析

表 8 是 4 a 生苹果的实际观测数据,其中林地年总耗水

表 8 林木正常生长低限水分环境条件下的苹果幼林林地耗水

树种	月份	土壤含水量 / %	降水量/mm	单株林木蒸腾耗水量/(kg·株 ⁻¹)	林地土壤蒸发量/mm	林地蒸散耗水量/mm	蒸腾蒸散比
4 a 生苹果	5	11.90	14.45	61.47	19.82	24.94	0.21
	6	11.11	41.55	185.94	27.69	43.19	0.36
	7	12.86	96.20	189.51	49.77	65.56	0.24
	8	18.88	158.42	357.00	87.62	117.37	0.25
	9	12.99	18.40	185.94	35.92	51.42	0.30
	10	14.29	41.10	94.32	6.72	14.58	0.54
合计			370.12	1074.18	277.54	317.06	

中 8 a 生苹果耗水量较大,为 190 mm,4 a 生耗水量较小,为 115 mm。苹果为阔叶树种,其生长速度一般快于针叶树种,不同树龄苹果树间生物量差额大于针叶树种间的差额,其 4

表 7 油松耗水量mm

龄级/a	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	合计
17~19	65.2	98.2	77.7	142.3	109.4	85.8	43.3	653.5
19~20	69.8	88.1	85.4	143.4	110.2	83.7	46.5	658.7
25~28	74.4	92.6	74.9	147.7	109.7	86.3	38.4	655.6

3 个不同龄级的油松,其最大耗水量均出现在 7 月,最小耗水量出现在 10 月,其年耗水总量在 655 mm 左右(表 7)。3 个龄级的油松,其年内耗水波动均相似。从 5 月开始,一直到 7 月,均呈上升趋势,但在 6 月有低点,到 7 月各龄级油松耗水量达年内最高点,在 4 - 10 月中,10 月耗水量为全年最低点(图 3)。

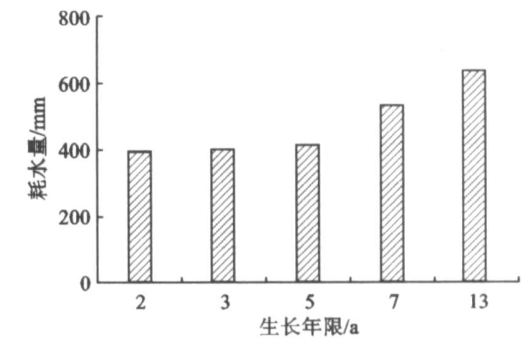


图 2 不同龄级刺槐耗水量

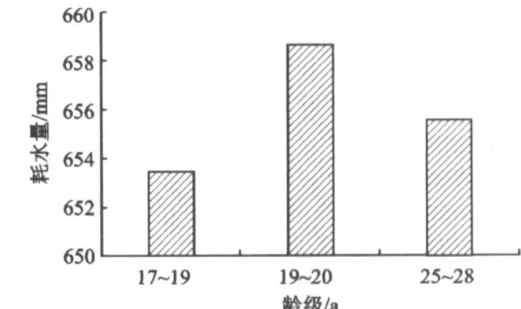


图 4 不同龄级油松耗水量

量为 317.06 mm;8 月的耗水量最大,为 117.37 mm;10 月的耗水量最低,为 14.58 mm。林地年蒸发总量为 277.54 mm;8 月的蒸发量最大,为 87.62 mm;10 月的蒸发量最低,为 6.72 mm。与估算结果相比(表 9),其 4 a 生苹果总耗水量以及最大、最小月耗水量与对应的耗水估算值相近。

2 个不同龄级的苹果,其最大耗水量均出现在 8 月,其

a 生与 8 a 生苹果年耗水总量差额达 206.45 mm(图 6)。与刺槐年耗水量变化相类似,苹果年耗水量也呈单峰曲线。从 5 月开始,一直到 8 月,均呈上升趋势,8 月各龄级刺槐耗水

量达年内最高点(图 5)。在 5 月各龄级刺槐耗水量接近,均在 25 mm 左右,6 - 8 月各龄级耗水量差额逐渐增大,到 8 月差额达到最大;8 - 10 月其各龄级耗水量差额逐渐缩小。

4 结 论

(1)采用桑斯维特法和彭曼法计算了主要造林树种潜在

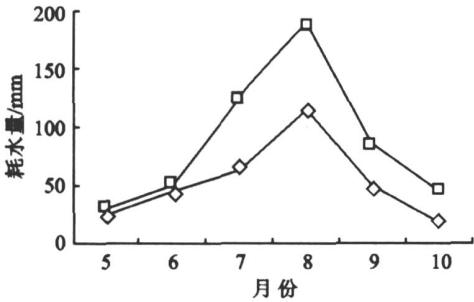


图 5 不同龄级苹果年内耗水变化

表 9 苹果年平均耗水估算值		mm						
树种	林龄/a	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	合计
苹果	4	24.7	45.6	64.8	115.0	50.0	19.8	319.9
	8	30.4	50.4	125.5	190.0	85.0	45.0	526.3

(3)根据公式:不同生长阶段耗水量 = 潜在蒸散量 (ET_a) \times 植物系数 (K_a)算出了刺槐和苹果不同龄级的耗水量,其中得出 2,3,5,7,13 a 生刺槐的年需水量,分别为 390.65,398.85,411.4,529.7,633.95 mm,4,8 a 生苹果的年需水量分别为 319.9,526.35 mm。同时利用试验推算方法得出了油松在 17~19,19~20,25~28 a 共 3 个龄级段油松的年耗水量,分别为 653.5,658.7,655.6 mm。

参考文献:

[1] 丰华丽,王超,等.河流生态与环境用水研究进展[J].河海大学学报,2002,30(3):19-23.
[2] 左其享.干旱半干旱地区植被生态用水计算[J].水土保持学报,2002,16(3):114-117.
[3] 丰丽华,王超,等.干旱区流域生态需水量估算原则分析[J].环境科学与技术,2002,25(1):31-33.
[4] 贾宝全,张志强,等.生态环境用水研究现状、问题分析

蒸散量,得出试验区 5 - 10 月潜在蒸散量,分别为 95,120,135,125,100,45 mm,这与试验区各月蒸散能力相吻合。

(2)试验区主要造林树种刺槐 5 个龄级的植物耗水系数分别为 0.66,0.67,0.69,0.88,1.06,主要经济树种苹果 2 个龄级的植物耗水系数分别为 0.50,0.84。

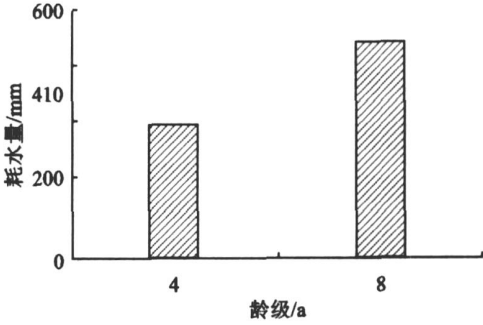


图 6 不同龄级苹果耗水量

与基本构架探索[J].生态学报,2002,22(10):1734-1740.
[5] 贾宝全,许英勤.干旱区生态用水的概念和分类:以新疆为例[J].干旱区地理,1998,21(2):8-12.
[6] 贾宝全,慈龙骏.新疆生态用水量的初步估算[J].生态学报,2000,20(2):243-250.
[7] 王礼先.植被生态建设与生态用水:以西北地区为例[J].水土保持研究,2000,7(3):5-7.
[8] 陈丽华,王礼先.北京市生态用水分类及森林植被生态用水定额的确定[J].水土保持研究,2001,8(4):161-164.
[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] 王斌瑞,王百田.黄土高原径流林业技术研究[J].林业科技通讯,1996,9:13-15.
[11] 彭世彰,索丽生.节水灌溉条件下作物系数和土壤水分修正系数实验研究[J].水利学报,2004,34(1):17-21.

(上接第 11 页)

[12] 黄炎和,卢程隆.闽南次降雨量与土壤侵蚀量的关系研究[J].水土保持学报,2002,16(3):76-78.
[13] Gal M, Arcan L, Shainberg I, et al. Effect of exchangeable sodium and phosphogypsum on crust structure-Scanning electron microscope observations [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48:872-878.

[14] Levy G J, Levin J, Gal M, et al. Polymers 'effects on infiltration and soil erosion during consecutive simulated sprinkler irrigations [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56:902-907.
[15] McIntyre D S. Permeability measurements of soil crust formed by raindrop impact [J]. Soil Sci., 1958, 85:813-817.