

## 林-果-农复合系统中植物蒸腾及系统蒸散的研究

陆光明 孟平 马秀玲 宋兆民 张劲松 李春友 马明川

(中国农业大学资源和环境学院,北京 100094)

**摘要:** 本文讨论了林(带)、果(梨)、农(冬小麦)复合系统中植物蒸腾、耗水特征及耗水关系。结果表明冬小麦是系统中蒸腾耗水的主要部分(占系统耗水量的 69.3%),梨树居中(占 23.6%)。系统中蒸散耗水关系也表现出类似的规律。进一步分析指出,从合理利用水资源角度考虑,适当发展具有三层结构的林-果-农复合系统是可行的。

**关键词:** 林-果-农复合系统; 蒸腾; 植物蒸散

**中图分类号:** S727.24

林-果-农复合系统是农用林业(Agroforestry)或农林复合生态系统的一种类型。它是由农田林网及网内果树与农作物组成的三个层次的复合群体结构。这种配置有利于单位面积上垂直利用空间的增加,提高净生产力和产品多样性。

农林复合系统中的植物蒸腾(散)是水分循环中的一项重要分量,历来受到国内外学者的重视,尤其是在防护林的水分效应研究方面,已经做了很多有意义的工作<sup>[1~4]</sup>。不少学者对树木蒸腾耗水及其与环境因子的关系进行了研究<sup>[5,6]</sup>。前人工作中相当一部分是偏重于受林带保护的农田的,另一部分则是偏重于林地的,而从农林复合系统角度来探讨农林之间的水分关系的工作甚少。任勇等<sup>[7]</sup>最近就道路农田防护林系统中树木和作物的耗水关系进行了有益的研究,但他们的工作仅涉及到林带与作物组成的二个层次的复合系统。对林-果-农组成的三层结构的复合系统中的水分关系尚未见报导。本文重点探讨林(毛白杨)·果(梨树)·农(冬小麦)复合系统中植物蒸腾(散)耗水规律、耗水关系,并将它们与两层结构的农田林网及旷野麦田(单一农业系统)进行比较,以进一步揭示其蒸腾(散)耗水特征。同时,在水资源紧张地区,发展三层结构或多层结构的农林业,对有限的水资源会带来什么影响,也是急需回答的生产问题。本文将为此提供一些理论依据。

### 1 基本情况

**1.1 试区自然条件** 试验点选择在河北省饶阳县官厅乡农林复合系统试验区内,属暖温带半干旱季风气候区,年平均温度 12.2℃,年降水量 549.8 mm,多集中于 6~8 月份。地下水位 8~10 m,地势平坦,地貌类型为滹沱河决口淤积平原,土壤类型为砂壤质潮土或轻度潮土。试验区面积为 847 hm<sup>2</sup>。

**1.2 测点设置** 在试区中部选择一代表性较好且具有三层结构(即林-果-农)的林网,网格面积 500×250 m<sup>2</sup>。林带树种为毛白杨,一路两行(3 m×5 m)。树龄 11 年,树高约 17 m,枝下高 5.0 m,冠幅 6.5 m,胸径 21.3 cm,疏透度 0.5~0.7。网内种有梨树带,树龄 10 年,树高

3.4 m, 胸径 9.3 cm, 冠幅 2.6 m。每带 4 行梨树, 株行距 3 m × 5 m, 梨树带之间距离为 25 m, 带间种植冬小麦, 品种为“农大 97”, 小麦地与梨树地有灌溉条件。林带、梨树和小麦实际种植面积分别为 1.2 hm<sup>2</sup>、3.9 与 6.5 hm<sup>2</sup>(相应比例关系为 1:3, 25:5.42)。测点分布见图 1。图 1 中 H 为林带平均高度, 0.5H 与 4H 为分别距林网南林带的距离(用 H 来度量)。作为对照点之一的旷野麦田(无林带保护的农田, 本文为单一麦田)设在本试验点东北方向 4 km 处; 另一对照点选在本试验点以北并与其相邻的林网内(称林·农系统), 网内种有冬小麦, 林网面积与前同。

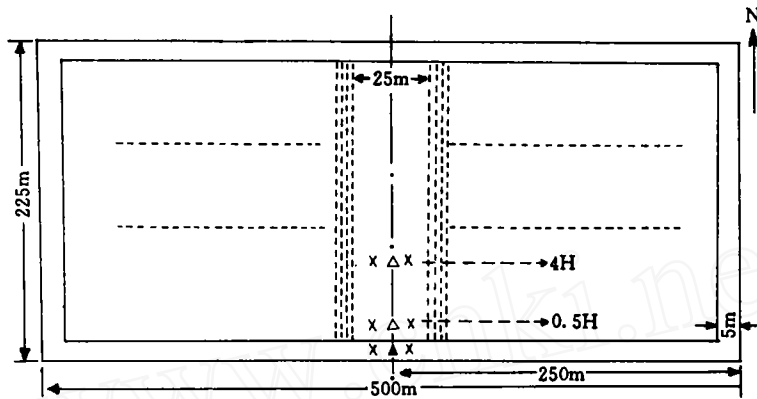


图 1 测点分布示意图

Fig. 1 Sketch map of the distribution of measuring spot

- 林带 Forest belt    ····· 梨树带 Pear belt  
 △ 小气候与冬小麦生物产量测点 The measuring spot of microclimate and biomass of winter wheat  
 × 土壤水分测点 The measuring spot of soil moisture  
 ● 梨树蒸腾测点 The measuring spot of transpiration of pear  
 ▲ 杨树蒸腾测点 The measuring spot of transpiration of Poplar  
 H 树高 Tree height

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 生物量** 小麦返青后每 10~15 d 测定一次密度、株高、叶面积指数, 收获时进行产量分析。于 4 月中旬及 5 月中旬各测定一次梨树及杨树的叶面积。

**1.3.2 土壤水分** 用土钻法分别测定林带、梨树及麦地的土壤含水量, 测深至 2 m, 两个重复, 时间同上。

**1.3.3 农田小气候** 于各测点活动面(植株平均高度 2/3 处)及活动面上 0.5 m 及 2.0 m 处用通风干湿表与轻便风速表进行温湿风梯度观测, 并于活动面上 1 m 处用国产天空辐射表进行总辐射和反射辐射观测, 用日产红外测温仪测小麦叶温。测定时间分别于 4 月中旬(正逢梨树开花, 杨树展叶期, 小麦拔节期)及 5 月中旬(小麦扬花灌浆、梨树座果期), 各观测五天, 共 10 d。从 7 点到 19 点, 每小时观测一次。

**1.3.4 杨树与梨树的蒸腾量** 用感量为 0.01 的 TN-100 型扭力天平, 采用离体快速称重法进行测定。测定时对树体的东、南、西、北四个方位上的中部枝叶进行取样。观测时间与小

气候观测同步。快速称重法在前苏联、中国及欧洲国家广泛采用。

1.3.5 计算方法

①梨树与杨树蒸腾

$$ET = \frac{(W_1 - W_2) \times 60}{W_1 \times \text{称重间隔时间(分)}} \quad (1)$$

式中  $ET(g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$  为以叶鲜重为基础的蒸腾速率;  $W_1$  第一次称重值;  $W_2$  第二次称重值; 称重间隔时间为 3 min 左右。

②小麦蒸腾量

依据 Pemen-Monteith 方法导出蒸腾的估算模式计算, 其计算式:

$$E = \frac{I \cdot \Delta A' + C_p \cdot \rho \cdot D / r_a}{L \cdot \Delta + r(1 + r_{sr} / r_a)} \quad (2)$$

式中  $A'$  为冠层的净辐射,  $D$  为空气饱和差,  $r_{sr}$  为冠层总气孔阻力,  $L$ 、 $\Delta$  分别为汽化潜热和饱和水汽压随温度变化的斜率,  $\rho \cdot C_p$  分别为干空气密度和比热,  $r$  为干湿球常数,  $r_a$  为边界层阻力。

③蒸散量(EP)

植物蒸腾加棵间土壤蒸发称之为蒸散。本文用土壤水分平衡法计算系统内 75 d 的总蒸散耗水量(03-26~06-08)。期间降水总量为 103.8 mm, 麦田灌溉量 280 mm, 梨树地灌溉量为 300 mm。杨树林带未灌水。计算公式如下:

$$EP = (W_2 - W_1) + P + IR \quad (3)$$

式中  $EP$  为蒸散量(mm);  $W_2$  为 03-26 2 m 土层的储水量;  $W_1$  为 06-08(小麦收获日)2 m 土层的储水量;  $IR$ : 灌溉量;  $P$ : 期间降水量, 忽略地表径流与地下水补给量。

2 结果和分析

2.1 系统内蒸腾耗水强度比较 表 1 中的系统蒸腾耗水量( $\sum E$ )是由林带蒸腾( $E1$ )、梨树蒸腾( $E2$ )及小麦蒸腾( $E3$ )组成。由表 1 可知:

表 1 蒸腾耗水量\*

Table 1 Transpiration water consumption

mm

时期 Period	$\sum E$	杨树 Poplar		梨树 Pear		冬小麦 Winter wheat		气象要素平均值 Average value of meteorologic element			
		$E1$	$E1/\sum E(\%)$	$E2$	$E2/\sum E(\%)$	$E3$	$E3/\sum E(\%)$	$T$	$V$	$R$	$D$
04-18~22 (5 d) (Five days)	18.0	4.2	23.3	5.7	31.7	8.1	45.0	17.8	2.7	0.285	14.1
05-14~18 (5 d) (Five days)	25.5	7.1	27.8	6.0	23.5	12.4	48.7	24.3	2.2	0.326	16.9
合计 Total (10 d) (Ten days)	43.5	11.3	25.9	11.7	26.9	20.5	47.2	-	-	-	-

\*  $T$ : 气温 Air Temperature ( $^{\circ}C$ );  $V$ : 风速 Wind speed ( $m \cdot s^{-1}$ );  $R$ : 净辐射 Net radiation ( $kw \cdot m^{-2}$ );  $D$ : 空气饱和差 Air saturation defency (hpa)

①5月中旬5 d的系统总蒸腾耗水量达25.5 mm,比4月中旬5 d耗水量高41.7%。这是由于5月中旬气温较4月中旬明显升高(5 d平均气温升高6.5℃),净辐射增加(较4月份多14.4%),空气饱和差大(19.9%),加之植物5月份进入旺盛生长时期,导致蒸腾耗水强度迅速增高。

②不论4月中旬,还是5月中旬,均以小麦耗水强度最大,为系统蒸腾耗水的主要部分,分别占系统蒸腾耗水的45.0%和48.7%。梨树及杨树次之,10 d平均各约占系统总蒸腾量的1/4,梨树略高于杨树。

2.2 系统内蒸腾耗水日变化比较 由图2看出:

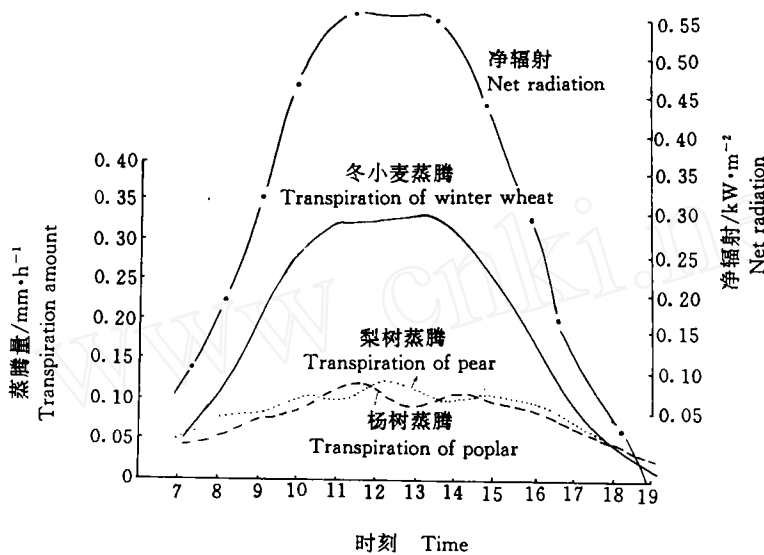


图2 蒸腾量及净辐射日变化

Fig.2 Daily variation of transpiration amount and net radiation

①系统内小麦、梨树及杨树等植物的蒸腾速率日变化曲线,均为单峰型,即从早晨开始,蒸腾强度迅速上升,11~13时达到峰值,14时后又迅速下降。

②冬小麦蒸腾速率日变幅最大,梨树与杨树日变幅表现平缓。据计算,小麦蒸腾速率日变幅(10 d平均)为0.324 mm,分别是梨树与杨树日变幅的3.48倍与4倍。

2.3 蒸腾速率与气象因子的关系 植物蒸腾速率除取决于其生理特性外,还受环境中许多生态因子的综合影响。其中尤以气象因子的影响最为明显,气象因子中,净辐射作为主要能源强烈影响着植物的水分输出,由图2明显看出,蒸腾速率日变化与净辐射日变化趋势相同。

分析蒸腾速率与各因子的单相关系数,结果表明,净辐射( $R$ )、气温( $T$ )、空气饱和差( $D$ )等因子,经 $t$ 检验达极显著相关( $\alpha=0.01$ ),其中净辐射的相关系数最高;风速( $V$ )达显著相关( $\alpha=0.05$ )。

根据以上分析,我们建立了下列蒸腾速率( $E$ )与各气象因子的逐步回归方程,并通过 $F$

检验(样本数 52)。

毛白杨:  $E_1 = 0.0863R + 0.0065T - 0.0014D$

复相关系数  $R = 0.8330, F = 36.27$

梨 树:  $E_2 = 0.1008R + 0.0013T + 0.008D + 0.0060V$

复相关系数  $R = 0.8038, F = 21.45$

冬小麦:  $E_3 = 0.5587R + 0.070T - 0.0012D - 0.0045V$

复相关系数  $R = 0.9877, F = 937.7$

2.4 系统内蒸腾耗水量关系分析 表 2 给出了一个林-果-农复合系统中按各占面积大小算得的 10 d 蒸腾耗水量关系。由表可知,冬小麦是系统各组成成分中,耗水量最多的一部分,它占系统总耗水量 69.3%,其次是梨树占 23.7%,而杨树林带仅占总蒸腾耗水量的 7.1%。

表 2 系统蒸腾耗水关系(10 d 测值)

$m^3$

Table 2 Relations of transpiration water consumption within the composite system

系统面积/hm <sup>2</sup> Acreage of system	系统总蒸腾耗水量 Total transpiration water consumption within the system	杨树 Poplar		梨树 pear		冬小麦 Winter wheat	
		耗水量* Water consumption	占系统/%** Percent of total water consumption within the composite system	耗水量* Water consumption	占系统/%** Percent of total water consumption within the composite system	耗水量* Water consumption	占系统/%** Percent of total water consumption within the composite system
11.5	1914.6	135.7	7.1	452.6	23.6	1326.3	69.3

\*耗水量。Water consumption.

\*\*占系统(%)。Percent of total water consumption within the composite system.

2.5 土壤水分状况及系统蒸散耗水(EP)关系分析

2.5.1 土壤水分状况 ①林

带:前已述及,系统中杨树林带在观测期间未灌水,2 m 土层初始含水量(03-26)为 339.7 mm,至 06-08 同一土层内尚存 242.8 mm 水分,表明林带主要靠降水和消耗土壤中存贮的水分维持生长。图 3 是杨树林带土壤容积含水量随时间和深度的二维分布,它表现为林带水分消耗的主要土壤层次处于 20~100 cm 之间,这正与杨树林带根系密集区吻合(另文讨论);此外,随时间推移,水分消耗逐渐向下扩张。130 cm 土层

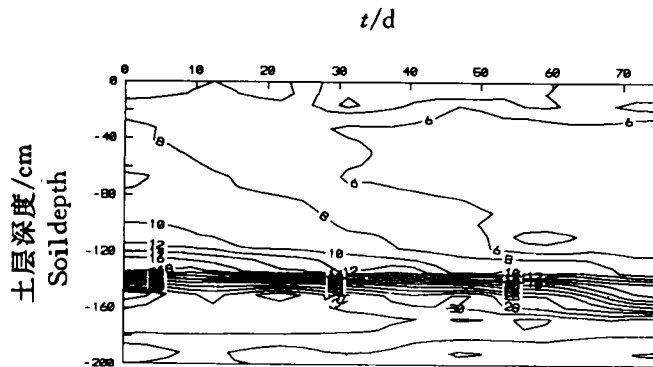


图 3 杨树林带土壤容积含水量随时间和深度的变化

Fig. 3 Variation of soil volume moisture content of Poplar forest belt with time and depth

以下水分变化已较平缓,且于 130~150 cm 土层内,等值线密集,其原因是由于该土层土壤质地紧实属轻粘土。②麦地与梨树带:麦地与梨树带除降水外均有灌溉水补充,因此它们的观测终止日 2 m 的土层含水量分别达到 664.2 mm 与 716.8 mm,均分别较初始观测日高出 95.7 mm 与 152.0 mm。

2.5.2 系统蒸散耗水(EP)关系分析 由表3可知:①系统蒸散耗水关系与蒸腾耗水关系类同(与表1比较)。尽管由于加上棵间土面蒸发的影响,各占系统耗水量比例上有所不同,但仍表现冬小麦是系统中耗水的主要部分,占38.4%,次为梨树占34.9%,所占比重最小的是林带,仅占26.7%。②该地区春季降水量远不敷蒸散的需要,即便是蒸散量最低的林带,其蒸散量也是同期降水的1.93倍。

表3 林-果-农复合系统蒸散耗水关系\*

mm

Table 3 Relations of evapotranspiration water consumption within the composite system of forest belt-fruit tree-crop

系统蒸散量* Evapotranspiration amount of system	期间降水量* Precipitation	杨树 Poplar		梨树 Pear		冬小麦 Winter wheat	
		EP** 占系统(%)***	占系统(%)***	EP** 占系统(%)***	占系统(%)***	EP** 占系统(%)***	占系统(%)***
750.5	103.8	200.7	26.7	261.8	34.9	288.0	38.4

\* 指1995-03-26~06-08期间的蒸散量和降水量。metant the evapotranspiration amount or Precipitation between Mar. 26, 1995 and June 8, 1995.

\*\* 蒸散量(EP). Evapotranspiration amount

\*\*\* 占系统(%). Percent of total Evapotranspiration amount within the composite system

2.6 不同类型农林复合系统蒸腾耗水量比较 表4中所列林-果-农系统、林农系统及旷野均按相同的总面积计算。由表4看出:①由于树林的保护,不论林-果-农系统,还是林农系统均较无林保护的麦田蒸腾耗水少,分别少22.9%与9.2%。②3种处理中以林-果-林复合系统耗水量最低,10d蒸腾耗水仅1914.6 m<sup>3</sup>,较林农系统少耗水15.1%。其原因前已述及,主要是由于麦田蒸腾耗水明显大于梨树之故。表明,发展3层结构的林-果-农系统并没有比二层结构的林农系统更多的消耗水分,相反却使土地资源利用率得以提高。从合理利用水资源角度考虑,适当发展林果农复合系统是可行的。

表4 不同类型复合系统蒸腾耗水量比较\*

m<sup>3</sup>

Table 4 Comparison of transpiration water consumption of the composite system in different types

林-果-农(三层结构) Forestbelt-fruittree-crop (Three layers of structure)	林-农(二层结构) Forestbelt-crop (Two Layers of structure)	无林农田(单一农业) Unstocked forest land (Single agriculture)
1914.6	2255.1	2483.8

\* 按10d观测值计算。 These figures in the table were calculated according to the measure value of ten days.

### 3 结论

①林-果-农复合系统内蒸腾耗水强度以冬小麦最大,10d总蒸腾耗水量占系统的47.2%。次为梨树带及杨树林带。它们的蒸腾速率日变化进程均表现为单峰型。11~13时为峰值出现时间。冬小麦蒸腾速率日变幅最大,分别是梨树与杨树的3.48倍与4倍。

②系统中植物蒸腾速率与气象因子关系密切。其中净辐射、气温、空气饱和差及风速是主要影响因子。据此,分别建立了小麦、梨树及杨树蒸腾速率与气象因子关系的逐步回归方程。

③考虑系统中各个组成部分的实际占有面积,计算其10d蒸腾耗水量,结果表明,冬小麦是系统中耗水量的主要部分,约占系统总耗水量的69.3%;梨树带占23.7%;杨树林带仅占7.1%。

④分析林带区土壤水分变化状况表明,林带消耗水分的主要土壤层次处于20~100 cm之间。

⑤运用土壤水量平衡法计算了系统蒸散量。结果表明,系统中蒸散耗水关系与蒸腾耗水关系类同。总趋势是冬小麦仍为系统中耗水的主要部分、次为梨树及杨树。

⑥林-果-农系统与林农系统,由于林木的保护,其10 d蒸腾耗水量均低于无林保护的麦田;而林-果-农系统又较林农系统少耗水15.1%,这表明,从合理利用水资源角度考虑,适当发展具有三层结构的林-果-农复合系统是可行的。

### 参 考 文 献

- 1 康斯坦季诺夫 A. P [俄]. 闻大仲译,林带与农作物产量. 中国林业出版社,1974,18~20
- 2 Rosenberg N J [美],何章起译,小气候——生物环境. 北京:科学出版社,1982,273~286
- 3 陆光明等. 农林复合系统中农田蒸散及作物水分利用效率的研究. 北京农业大学学报,1992,18(4):409~414
- 4 宋兆民等. 复合防护林网水热效应研究. 黄淮海平原综合防护林体系生态经济效益研究. 北京:北京农业大学出版社,1990,61~66
- 5 杨文斌. 干旱区几种树木的蒸腾速率及其与环境因子关系. 干旱研究,1998,4:47~55
- 6 王孟本等. 柠条林蒸腾状况与土壤水分动态研究. 水土保持通报,1990,10(6):85~90
- 7 任勇等. 道路农田防护林系统水分关系研究. 生态学杂志,1993,12(4):1~6

## Study on the Plant Transpiration and System Evapotranspiration Within an Agroforest System of Forest Belt-Fruit Tree-Crop

Lu Guangming Meng Ping Ma Xiuling

(College of Agricultural Resources and Environment Science, CAU, Beijing 100094)

**Abstract:** The relationship between the plant transpiration, characteristics of water consumption and the water consumptin within an agroforest system of forest belt-fruit tree (pear)-crop (winter wheat) is cliscussed. The results indicated that the transpiration by winter wheat made up the major (69.3%) part of total transpined water consumption within the system. The transpired water consumption of the pear ranked the second (23.6% of total transpired recl water consumption within the system). The samilar pattern was found for evapotranspined water consumption within the composite system. It was further indicated in the paper that, considering the rational utilization of water resource, it is warkable to develop a proper composite system of forest belt-fruit tree-crop with three layers of structure.

**Key words:** plant transpiration; evapotranspiration