

农林复合模式蒸散耗水的研究*

孟平 张劲松 宋兆民 陆光明 马秀玲

摘要 应用土壤分层水量平衡模型,对林带与冬小麦的根系吸水量、林带和农田的蒸散耗水量、林带影响农田土壤水分范围与程度进行了研究,结果表明:(1)冬小麦拔节至乳熟期间,林带根系吸水以消耗农田土壤水分为主,主要表现在 $0.0\sim 1.5H$ (H 为树高)范围内。(2)林带可降低12.3%的农田蒸散量。(3)由于林带的影响,在农田中, $0.0\sim 0.5H$ 为土壤水分降低区, $0.5\sim 5.0H$ 为土壤水分提高区。总体平均, $0\sim 200$ cm 农田土壤贮水量可提高11.2%。

关键词 农林复合模式、土壤分层水量平衡模型、蒸散耗水、根系吸水

在我国黄淮海平原,自“六五”计划开始,营造了由单一片林、农田林网、林粮间作、果粮间作等多种形式和结构组成的农林复合系统^[1,2]。有关农林复合模式耗水特征及土壤水分状况的问题,国内外已开展了不少的研究^[3~9],但以往的工作,大都注重于模式中农田水分变化,对林带根系吸水及其对农田水分的影响范围和程度,仅为定性描述程度,缺乏定量的研究,即忽视林带本身的耗水特征,这样从复合系统的角度来看,缺少完整的分析资料。总之,系统地、定量地研究半干旱平原农区农林复合模式的耗水特征,以充分有效地利用有限的水资源,是亟待研究的重要课题。本项研究试图运用农林复合模式土壤分层水量平衡模型,对林带与冬小麦的根系吸水量、林带和农田的蒸散耗水量、林带影响农田土壤水分范围与程度进行模拟计算与分析,以阐明农林复合模式的耗水特征,为半干旱平原农区发展农林业提供一定的理论依据。

1 试验区概况及测点布置

试验区地处黑龙港流域的河北省绕阳县官厅乡($115^{\circ}40'$ E, $40^{\circ}38'$ N),属温带大陆性气候。年平均气温 12.2 C,年均日照时数 276.4 h,年均降水量 549.8 mm,且年内降水量分配不均匀,多集中于6~8月份。地下水位 $8\sim 10$ 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。种植制度一年两熟。该试验区占地 849 hm²,于1983年始建,目前已形成一个完整的农林复合系统试验区。系统结构配置以农田防护林为主,辅以林粮间作、果粮间作及成片用材林、经济林。试验区林木覆盖率1993年为20.4%。

在试验区中部选择一代表性较好的农田林网。网格面积为 500 m \times 250 m。林带树种为毛白杨(*Populus tomentosa* Carr.)。一路两行(3 m \times 5 m)。树龄10 a,树高18 m,枝下高4.0 m,透风度 $0.4\sim 0.5$ 。林网内冬小麦品种为“农大97”。本研究以东西林带及其防护下的北侧农田为观测对象。设林带树高为 H ,在林带北侧中心线上 $0.0H$ (林带林缘处)、 $0.5H$ 、 $1.0H$ 、 2.0

1995—12—24 收稿。

孟平副研究员,张劲松,宋兆民(中国林业科学研究院林业研究所 北京 100091);陆光明,马秀玲(北京农业大学资源与环境学院)。

* 本文系“八五”国家科技攻关“农林复合系统结构与功能研究”专题的部分内容。

H、5.0H处布设观测点(见图1)。对照点设在试区东北方向500m处的旷野农田内。

2 观测项目及方法

(1)土壤物理性质测试:0~200cm土层中,按土壤质地类型,分层次地进行颜色、质地、结构、容重、田间持水量、饱和含水量、凋萎系数及风干土含水量的分析与测试(3次重复)。

(2)土壤水分运动参数的测定:由田间采集原状土样,采用压力板法测定土壤水分特征曲线,采用室内定水位法测定饱和导水率,采用 Jackson^[10]方程计算求出非饱和导水率。

(3)林带及冬小麦根系的测定:①冬小麦根长密度的测定采用根钻法分层取土样,清洗土壤和杂质后,用交叉法求得^[11]: $L=11 \times 14 \times N \times \gamma$, $RD=L/V$ 。式中:L为根系长度(cm),RD为根长密度(cm/cm^3),N为交点数, γ 是与网格形状有关的常数。本研究中根钻横断面积约为 45.4 cm^2 ,每隔10cm取土样,取样点深度100cm。测定时期为:拔节、抽穗、扬花、乳熟期。②林带根长密度的测定采用挖剖面法分层取样。清洗后以根直径 $\leq 1 \text{ mm}$ 为吸水根的界限进行分类,再求算吸水根的根长密度和非吸水根的干重,其求算方法和公式同冬小麦。研究中取样深度为200cm,每隔10cm取样,土样体积为: $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 。测量时期为:于9月下旬测定一次。假设年内树木根系数量变化较小,并忽略不计。

(4)土壤含水量的测定:采用土钻法测定土壤含水量,每隔10d测定1次,0~40cm土层每10cm取一土样;40~200cm土层每20cm取一土样(3次重复)。

(5)农田小气候观测:冬小麦拔节至乳熟期间,选择典型天气日,每旬观测2~3d。观测时刻为:07~19时,每小时观测一次,夜间蒸散忽略不计。于各测点活动面及活动面上0.5m、2.0m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1m处用天空辐射表进行总辐射与反射辐射的观测;与此同时,用LI-1600型稳态气孔仪测定小麦旗叶气孔阻抗;并采用 Penmam Monteith^[12]公式求算农田蒸散耗水量。

(6)林带蒸腾量的测定:利用TN-100型扭力天平,采用快速称重法测定单株林木的蒸腾强度,换算成林带蒸腾耗水量,换算公式为: $TW=TR \times h \times B/10$ (单位: t/hm^2),式中TW为林带蒸腾量,TR为蒸腾强度,h为小时数,B为鲜叶生物量重。观测时间与农田小气候观测同步。

(7)降雨量的观测:测点设置与水分观测点分布相同(观测按国家标准进行)。

(8)分层土壤水分平衡模型:对于地势平坦的平原农区,地表迳流量可忽略不计。若将根层分成若干层次,则分层土壤水量平衡方程可表示为:

$$\begin{cases} (\theta_{i+1} - \theta_i) \Delta Z_i = P' + IR' - CI^s + \Delta QX'_i + QZ'_{i,2} - EV' - ST'_i - SW'_i \\ (\theta_{i+1} - \theta_i) \Delta Z_i = \Delta QX'_i + QZ'_{i,i+1} - QZ'_{i-1,i} - ST'_i - SW'_i \quad (i > 1) \end{cases}$$

边界条件为:

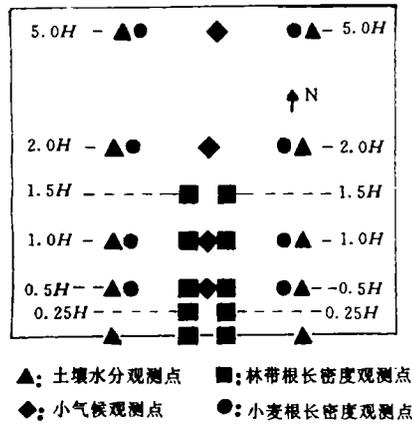


图1 测点布置示意图

$$\begin{cases} -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} + K(\theta) |_{z=0} = -EV' \\ \theta_i |_{z=200 \text{ cm}} = \theta_i' \end{cases}$$

式中: θ 为容积含水量(%); i 为土壤层次序号; j 为时间序号; Z 为土层厚度(cm); ΔQ_x 为水平方向土壤层次间非饱和流入量与流出量之差($\Delta Q_x = Q_{x左} - Q_{x右}$); QZ 为垂直方向上土壤层次间非饱和流量(并规定向下为正,向上为负); ST 、 SW 为林木根系吸水量、作物根系吸水量; D 、 K 为土壤水非饱和扩散率和非饱和导水率; EV 为土壤蒸发率。 P 为降雨量, IR 为灌溉量; CI 为截留量。

3 结果与分析

3.1 复合模式吸水量

3.1.1 林带根系吸水量 根据根系吸水模式计算表明(见表1):冬小麦拔节至乳熟期间,一条长500 m、宽5 m的林带,其总根系吸水量为1 237.1 m³,其中分布在农田中的林带根系的吸水量为920.5 m³/hm²,占总量的74.4%,且0.0~0.5H范围内林带根系吸水为主要部分,占总量的56.8%,而分布在林带区的根系的吸水量为316.1 m³,仅占总量的25.6%。所以说,林带耗水是以消耗农田土壤水分为主,具有与农作物争水的矛盾。

3.1.2 冬小麦根系吸水量 各观测时段内,距离林带树高不同倍数处的冬小麦根系水量的计算值(见表2),冬小麦拔节至乳熟期间0.5、1.0、2.0、5.0H处小麦根系吸水量分别为

98.2、108.7、129.8、145.7 mm。小麦根系吸水量水平分布呈抛物线状。曲线拟合方程: $SW = 83.1870 + 1.8005X - 0.0156X^{1.95}$ ($0.0H < X < 5.0H$),相关系数 $R=0.9914$ 。方程中: X 为距离林带的长度(m), SW 为拔节至乳熟期间小麦根系吸水量(mm)。

3.1.3 复合模式根系吸水关系 林带根系吸水范围由林带区和农田中0.0~1.5H组成,其中0.0~1.5H为林带根系和冬小麦根系的交织区,林带吸水量为920.5 m³,冬小麦根系吸水量为1 317.3 m³,两者比例是1:1.43,所以说在农林争水过程中,小麦吸水占优势。林带根系总吸水量为1 236.6 m³,0.0H~5.0H范围内冬小麦根系吸水总量为5 488.3 m³,两者比例1:4.44,小麦吸水量占模式总吸水量的81.6%,林带吸水量仅占18.4%。从林带和冬小麦根系吸水的比例关系来说,在拔节至乳熟期间,小麦耗水是农林复合模式耗水的主要特征。

3.2 复合模式蒸散耗水量

3.2.1 林带蒸散量 在冬小麦拔节至乳熟期间,林带总蒸散量为255.6 mm,日平均为4.2 mm,其中,林带蒸腾量为241.9 mm,日平均为4.0 mm,占蒸散量的94.6%;土壤蒸发量为

表1 林带根系吸水量水平分布

(1994-04-10~06-10)

项 目	林带区	农 田 区				合 计
		0.0~0.5H	0.5~1.0H	1.0~1.5H	小 计	
吸水量(m ³)	316.1	702.5	149.6	68.4	920.5	1 236.6
占总量(%)	25.6	56.8	12.1	5.5	74.4	100

表2 复合模式中冬小麦根系吸水量的分布

(1993年,单位:mm)

观测时间	0.5H	1.0H	2.0H	5.0H
04-10~19	11.0	11.7	13.3	14.3
04-20~29	22.0	25.8	24.9	24.6
04-30~05-09	26.8	29.9	32.2	38.8
05-10~19	18.6	18.0	40.3	33.8
05-20~29	10.4	13.2	20.5	22.3
05-30~06-10	9.40	10.1	9.8	11.9
合 计	98.2	108.7	129.8	145.7

13.7 mm, 日平均为 0.2 mm, 占蒸散量的 5.4%。对比各测定时期内的蒸腾量和蒸发量的差值(见表 3)可知, 林带的耗水以蒸腾方式为主。

表 3 林带蒸腾量与土壤蒸发量比较

(1994年, 单位: mm)

观测时间	04(月)			05(月)			合计
	10~19	20~29	30~09	10~19	20~29	30~10	
蒸散	40.1	41.2	41.8	42.6	44.5	45.4	55.6
蒸腾	37.2	38.7	39.6	40.5	42.5	47.4	241.9
蒸发	2.9	2.5	2.2	2.1	2.0	2.0	13.7

表 4 复合模式中农田蒸散水平分布状况

(1993年, 单位: mm)

观测时间	0.5H	1.0H	2.0H	5.0H	对照点
04-10~19	14.5	16.5	21.5	22.5	31.8
04-20~29	18.5	25.7	26.5	31.0	44.9
04-30~05-09	28.7	28.0	38.5	49.0	55.8
05-10~19	23.2	21.5	40.4	47.4	54.0
05-20~29	24.1	18.4	29.5	41.8	41.7
05-30~06-10	19.9	14.8	24.4	28.4	26.4
合计	141.4	134.2	180.8	217.9	254.0
日平均	2.32	2.20	2.96	3.60	4.17

3.2.2 农田蒸散量 从表 4 可知, 农林复合模式内, 农田蒸散的水平分布具有不均匀性。在冬小麦拔节期至乳熟期内, 0.5、1.0、2.0 和 5.0H 处的蒸散量分别为 141.4、134.3、180.8 和 219.7 mm。根据实测资料, 经统计拟合得到: 0.0~5.0H 范围内, 农田蒸散量日平均值 ET 水平分布服从曲线方程:

$$ET = \begin{cases} 2.773X^{-0.0766} & (0.0H < X \leq 1.0H) \\ -0.1241 + 0.8455\ln(X) & (1.0H < X \leq 5.0H) \end{cases}$$

从方程的曲线(见图 2)可知, 18 m(1.0H)附近的农田蒸散量为最小。为估算复合系统内农田蒸散耗水总量在水平方向上的平均值 \overline{ET} , 可用下式求值:

$$\overline{ET} = \int_{t_1}^{t_2} \cdot \int_{0.0H}^{5.0H} ET(X) dx dt / \int_{0.0H}^{5.0H} dx$$

式中 t_1, t_2 为时间值(天数)。经计算, 其值为 190.7 mm, 对照点蒸散量 254.0 mm, 林带可降低 23.7% 的农田蒸散量。故农林复合模式中, 林带具有降低农田蒸散的水分效应。但在林带树高不同倍数处, 不同时段内, 这种水分效应会表现出不同差别(见表 5)。

3.2.3 复合模式蒸散耗水关系 在农林复合模式中, 冬小麦拔节至乳熟期间, 单位面积林带蒸散量为 14.25 m³/hm², 单位面积的农田蒸散量为 6.30 m³/hm², 两者比例为 2.26:1; 全网络林带蒸散总量为 42.75 m³, 网内农田蒸散总量为 1 180.5 m³, 两者比例为

0.036:1, 两者合计为 1 743.0 m³。故从单位面积的林带蒸散量和农田蒸散量的比例来看, 林带蒸散是复合模式耗水的主要特征, 但从实际区域面积蒸散比例而言, 农田蒸散耗水是农林复合模式耗水的主要特征。

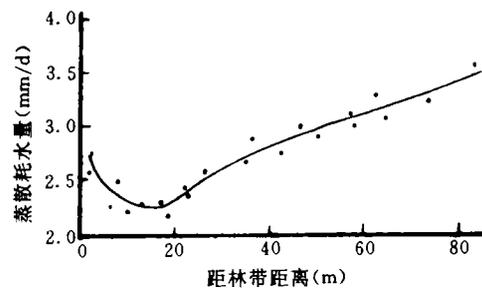


图 2 复合模式内(0.0~5.0H)农田蒸散水平分布

表 5 林带蒸散效应水平分布

(1993年, 单位: %)

观测时间	0.5H	1.0H	2.0H	5.0H
04-10~19	54.4	48.1	10.3	10.3
04-20~29	58.2	41.9	40.8	30.0
04-30~05-09	48.6	49.8	31.0	12.9
05-10~19	57.0	60.1	25.9	12.2
05-30~06-10	24.6	30.3	11.7	-7.5
平均	47.5	47.8	24.8	9.7

3.3 林带对农田土壤水分影响程度及范围

随着离林带距离的增加,0.0~5.0H 范围内,0~200 cm 土层贮水量呈抛物线状趋势(见图 3)。在冬小麦拔节至乳熟期间,0.0、0.5、1.0、2.0 及 5.0H 处平均贮水量分别为 493.6、598.4、663.9、666.9 和 603.1 mm。对照点(CK)为 601.7 mm。若设土壤贮水量为 W (mm),带距为 X (m),经统计拟合得到 W 和 X 的关系表达式:

$$W = 518.022 + 8.2256X - 0.102X^{1.95} (0.0H \leq X \leq 5.0H), \text{ 相关系数 } R = 0.9277.$$

对比 CK,可求得林带对复合模式中农田土壤水分的影响程度。其计算式 $E = (W - W_{CK}) / W_{CK}$ 。式中: E 为林带对农田土壤水分影响程度,可称为林带的土壤水分效应。 W 和 W_{CK} 分别表示农田土壤贮水量和 CK 点土壤贮水量。

从图 4 可知,0.0~0.5H 范围为土壤贮水量的降低区,称为林带的负效应区;0.5~5.0H 为土壤贮水量提高区,称林带的正效应区。其中在 1.5~2.0H 范围内正效应达最大。经统计回归,林带的土壤水分效应 E 和带距 X 的关系可表示为:

$$E = -13.864 + 1.3679X - 0.017X^{1.95} (0.0H \leq X \leq 5.0H)$$

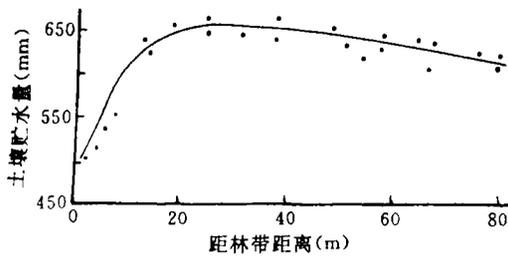


图 3 0~200 cm 土壤贮水量水平分布

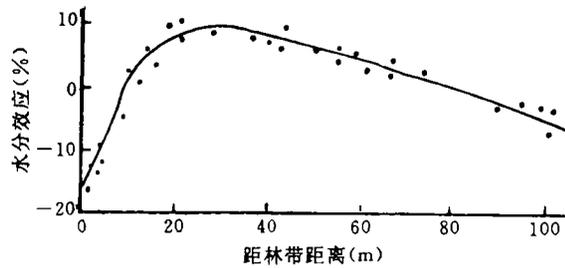


图 4 林带对农田土壤水分影响的水平分布

0.0~5.0H 范围内,200 cm 土层贮水量可提高 11.2%,故复合模式中林带的总体效应为正。正效应的存在,是由于林带具有降低气温和减少蒸散等小气候效应的作用。但在负效应区,这种小气候还不能抵消林带根系吸水对农田土壤水分的消耗,而且还存在较大强度的湍流运动。随着林距的增加,由于林带根系吸水量的减小及湍流运动的减弱,林带的负效应将逐渐减弱,正效应随之增加。到一定带距时,正效应达到最大值,此后,又由于林带降低农田蒸散作用的减弱,其值也开始减小。

4 结 论

(1)冬小麦拔节期至乳熟期间,分布在林带区的根系吸水量占总量 25.6%;分布在 0.0~1.5H 农田范围内的根系吸水量占总量的 74.4%。故林带吸水以消耗农田土壤水分为主。

(2)0.0~1.5H 范围内农田土壤为林带和冬小麦根系分布的交织区,该范围内小麦吸水量“农林争水”过程中,小麦吸水占优势。

(3)林带蒸散耗水以蒸腾方式为主。农田蒸散水平分布具有不均匀性,林带可降低 12.3% 的农田蒸散量。

(4)水平方向上,0.0~0.5H 范围为土壤水分的降低区,0.5~5.0H 为土壤水分的提高区。

因此,建议在农林复合模式经营中,需加强 0.0~1.5H 范围内农田灌水的管理,或根据物

种生物学特性,选择种植耐荫性植物。所以黄淮海平原农区发展农林业,在理论上具有可行性。

参 考 文 献

- 1 谢京湘. 农林复合生态系统研究概况. 北京林业大学学报, 1988, 10(1): 104~108.
- 2 宋兆民. 黄淮海平原综合防护林生态经济效益的研究. 北京农业大学出版社, 1990.
- 3 任勇. 道路农田防护林系统水分关系的研究. 生态学杂志, 1993, 12(4): 1~6.
- 4 Eastham J. The effect of tree spacing on evaporation from an agroforestry experiment, *Agri For. Meteorol.*, 1988, 42(1): 355~368.
- 5 陆光明. 农林复合系统中农田蒸散及可能蒸散的研究. 北京农业大学学报, 1993, 18(4): 409~415.
- 6 McGowan M, Williams J B. The water balance of an records. *J. of Soil Sci.*, 1980, 31(1): 217~230.
- 7 Nizinski J. A model of transpiration and soil-water balance for a mature oak forest. *Agric. For. Meteorol.*, 1989, 47: 1~17.
- 8 卢振民. 田间作物蒸腾量测算方法研究. 农业生态研究, 北京: 气象出版社, 1989. 344~350.
- 9 刘昌明. 土壤-植物-大气连续体的蒸散发模型. 水利学进展, 1992, 3(4): 255~263.
- 10 Danlei Hilles. *Fundamentals of soil physics.* New York: Academic Press, 1980.
- 11 Bohn W (薛德榕译). 根系研究法. 北京: 科学出版社, 1979.
- 12 Hathfield J L. Evaluation of canopy temperature model over various. *Agric. For. Meteorol.*, 1984, 32: 41~53.

Study on Evapo-transpiration on Agroforestry

Meng Ping Zhang Jinsong Song Zhaomin Lu Guangming Ma Xiuling

Abstract This dissertation, applying the model of soil layered water balance of agroforestry, calculates the water uptake by the roots of wheat and shelterbelt, the evapo-transpiration, and the extent that the effects of shelterbelt exerted on the field soil water, then to study the evapo-transpiration of agroforestry. The results show that: (1) Water uptake by roots of the shelterbelt mostly come from the field at the jointing-filling stage of winter wheat, which is obviously indicated in $0.0H \sim 1.5H$. (2) If the field is protected by the shelterbelt, the average evapo-transpiration is 12.3% lower than that of the open wide field. (3) The field soil water content reduces in $0.0H \sim 0.5H$ and raises in $0.5H \sim 5.0H$ because of the shelterbelt effect. In general, the soil water capacity at the field soil depth of $0 \sim 200$ cm can be raised by 11.2%.

Key words agroforestry, model of soil layered water balance, evapo-transpiration, water uptake by roots

Meng Ping, Associate Professor, Zhang Jinsong, Song Zhaomin (The Research Institute of Forestry, CAF Beijing 100091); Lu Guangming, Ma Xiuling (Beijing Agriculture University).