

# 农林复合系统水热资源利用率的研究\*

孟平<sup>1)</sup> 樊巍<sup>2)</sup> 宋兆民<sup>1)</sup> 张劲松<sup>1)</sup> 辛学兵<sup>1)</sup>

(1) 中国林业科学研究院林业研究所, 100091, 北京; 2) 河南省林业科学研究所, 450003, 郑州;  
第一作者 37 岁, 男, 研究员)

**摘要** 系统地研究了农林复合系统对自然资源利用率的影响, 结果表明: 农林复合系统具有提高资源利用率的功能, 但系统内不同模式之间光能利用率差异较大, 梨粮复合模式光能利用率比周边种植模式高 10.3%, 系统内光能利用率则比旷野平均提高了 25.0%。农林复合系统水分利用率一般可比旷野农田高 10.3%~15.2%。农林复合模式热量利用效率比一般旷野农田高 11%~13%。农林复合系统不仅能改善农田生境与提高资源利用效率, 还能增加农民的经济收入, 可在我国北方平原农区大力推广。

**关键词** 农林复合系统; 水分利用率; 光能利用率; 热量资源利用率

**分类号** S718.554

70 年代以来, 由于人口剧增、粮食短缺、资源危机与环境恶化等问题的日益突出, 复合农林业的理论研究和实践经营, 得到了世界上众多国家和地区(特别是广大的发展中国家)的普遍关注和广泛重视。众多的国际研究组织及机构, 如: FAO、ICRAF、CGIAR、CIAF、ICRISAF、ITA、IDRC 对复合农林业的结构、功能及优化模式等开展了一系列的研究工作。大量研究表明<sup>[1-4]</sup>, 农林复合系统对农田生态环境具有综合的改良作用, 在提高生物多样性、充分挖掘生物潜力、协调资源合理利用、改善与保护生态环境、促进粮食增产及经济的可持续发展等方面具有重要的理论和实践意义, 并可为农业和林业的可持续发展提供新的思维模式。它是当前人类改善自然环境中积极、有效而又力所能及的生物工程。农林复合系统的多层次结构及空间上的合理利用, 在提高资源利用率方面具有独特功能<sup>[5]</sup>, 它打破了单一的农业生产模式, 将林带(网)、作物和林带(网)、作物和经济林(如果树)等结合在一起, 形成一个多种类型、多层次、多功能的立体复合种植系统, 从而提高了资源的利用率和作物的产量。

黄淮海平原是我国东部最大的冲积平原, 长期以来受旱、涝、风沙、盐碱等不利因素的影响, 农业发展受到极大的限制, 资源的利用效率较低。自开展平原绿化工程以来, 我国在该地域建立了大范围的农林复合系统, 农业生态环境得到了明显的改变<sup>[6]</sup>, 改变了近地气层中风场、温度场、湿度场的分布特征<sup>[7]</sup>, 使其与大气之间的能量进行不同程度的交换, 导致农林复合系统中光、热、水等自然资源的重新分配, 从而改变农林复合系统热量平衡、水分平衡各分量的组成, 因此, 开展农林复合系统资源利用率的研究是十分必要的。但过去只重视林农复合系统结构与配置方面的研究, 对多层次复合系统的功能研究特别是资源利用率的研究并不多且不系统。本研究从自然资源利用效率方面对农林复合系统进行综合评价, 为复合农林业的发展提供理论依据。

\* 本文属“八五”国家攻关“农林复合系统结构与功能研究”专题的研究内容。  
1998-09-02 收稿。

## 1 试验区概况

试验区设在河北省饶阳县大官亭乡, 位于 38°10' N, 115°40' E, 属温带大陆性季风气候, 年平均气温 12.2℃, 年均降水量 549.8 mm, 并大多集中于 7~8 月, 地下水位 8~10 m, 土壤为沙质盐碱土。试验区始建于 1983 年, 占地 840 hm<sup>2</sup>, 目前已经形成一个由多种农林复合模式组成的农林复合系统, 乔木树高 13~15 m, 冠幅 4~6 m; 果树高 3~5 m, 冠幅 2~3 m。主要树种有毛白杨(*Populus tomentosa* Carr.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn.)、苹果(*Malus* spp.)、梨(*Pyrus* spp.)、桃(*Amgdalus* spp.)等。主栽树种于 1983~1984 年栽植, 果树于 1985~1986 年栽植。

## 2 试验设计与计算方法

### 2.1 试验设计

在试验区中部选择 3 个典型的农林复合模式, 第 1 种为林(毛白杨)、果(梨)、农复合模式: 果树带(4 行)南北长 215 m, 株行距为 3 m × 5 m, 网格面积 25 m × 215 m, 种冬小麦和夏大豆(*Glycine max* (Linn.) Merr.), 在果树栽种的最初 8 a 内间作农作物, 林带、果树带和作物带的面积比为 1.00 : 3.34 : 5.56。第 2 种林(毛白杨)、果(梨或桃)、农复合模式: 每隔 15 m 种 4 行果树, 果树株行距为 3 m × 5 m, 在果树未进入盛果期前, 间作冬小麦和夏大豆。第 3 种为周边种植型林(毛白杨)、农复合模式: 周边为林带, 中间种植冬小麦和夏大豆, 网格面积 215 m × 180 m。并以旷野(单一农业系统)为对照。

### 2.2 观测项目及方法

设立 30 个观测点, 测定活动面上 0.5、1.0、2.0 m 处的温度、风速、辐射、湿度和农作物的气孔开度、光合强度。用压痕法测定叶片气孔开度, 用半叶法测定光合强度, 每 10 d 测定一次土壤湿度, 测深 1 m, 小气候从 8:00 至 20:00 每小时观测 1 次; 气孔开度每日测 4 次, 即 5:15~5:30、10:00、14:00 及 18:30~19:00。

### 2.3 计算方法

#### 2.3.1 光能利用率( $E$ )

$$E = MT / \sum Q = 0.10 \times 10^{-4} T \times Y / \sum Q \quad (1)$$

式中:  $M$ ——农作物干物质质量(kg · hm<sup>-2</sup>);  $E$ ——光能利用率;  $Y$ ——生长季产量(kg · hm<sup>-2</sup>);  $Q$ ——生长期中辐射总量(kJ · hm<sup>-2</sup>);  $T$ ——燃烧 1 g 干物质释放的能量, 农作物平均 17.793 kJ · g<sup>-1</sup>, 树木平均 18.338 2 kJ · g<sup>-1</sup>[8]。

#### 2.3.2 月总辐射量的经验公式<sup>[9]</sup>

$$(Q + q) = (Q + q_0) \times (0.248 + 0.752R_1) \quad (2)$$

式中:  $(Q + q)$ ——月总辐射量(kJ · cm<sup>-2</sup> · 月<sup>-1</sup>);  $(Q + q_0)$ ——晴天的月总辐射量(kJ · cm<sup>-2</sup>);  $R_1$ ——月的日照百分率。

#### 2.3.3 树木生物量计算<sup>[10]</sup>

$$\text{毛白杨 } m = 0.0914 D^{2.6089} \quad (3)$$

式中:  $m$ ——全株的生物量(kg);  $D$ ——胸径(cm);  $m_1$ ——地上部分生物量(kg)。地上部分( $m_1$ )占全株生物量( $m$ )的 80%。

### 2.3.4 热量利用效率

$$F = Y / \sum T \quad (4)$$

式中:  $F$ ——热量利用效率,即大于  $0$  的积温每  $1$  在单位面积上获得的作物或林果产量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $Y$ ——作物或林果产量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $\sum T$ ——作物或林果生育期内大于  $0$  的积温。

### 2.3.5 积温利用指数

$$I = (\sum T_1 + \sum T_2 + \dots) / \sum T \quad (5)$$

式中:  $I$ ——积温利用指数;  $\sum T_i (i=1, 2, 3, \dots)$ ——某种作物生育期内大于  $0$  的积温;  $\sum T$ ——整个生长季内大于  $0$  的总积温。

### 2.3.6 时间效率

$$K_t = Q / M \quad (6)$$

式中:  $K_t$ ——时间效率,  $Q$ ——生育期内利用的气候资源量,  $M$ ——年生长季内对应的气候资源总量。

### 2.3.7 土地生产率

$$R = \sum(YC) / S \quad (7)$$

式中:  $R$ ——土地生产率;  $Y$ ——产量;  $C$ ——价格;  $S$ ——土地总面积。

### 2.3.8 水分利用率

$$\text{水分利用率} = P / E (\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}) \quad (8)$$

式中:  $P$  为某作物单位面积的产量,  $E$  为某作物单位面积上的耗水量。

### 2.3.9 营养元素循环率

$$\text{循环率} = (\text{归还量} / \text{吸收量}) \times 100\% \quad (9)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 光能利用率

光资源是作物生产的基本能源。光能利用率是衡量系统功能的一个重要指标,它是系统内风、温度、湿度、生物因素等的综合反映。太阳总辐射中对作物的光合有效辐射占  $45\% \sim 50\%$ , 其中  $1\% \sim 4\%$  最多不超过  $5\%$  用于光合成,我国作物的平均光能利用率为  $0.28\%$ <sup>[10]</sup>。

3.1.1 系统建成前后的光能利用率 从表 1 可以看出: 1992 年夏作物(小麦)的光能利用率明显比 1984 年高。虽然秋作物花生受当年秋旱和虫害的严重影响,略有降低,但是整个系统的实际光能利用率比 1984 年提高了  $62.3\%$ 。

表 1 试验区农作物和林木的光能利用率

%

时间(年-月-日)	小麦	玉米	棉花	花生	林木	加权平均	备 注
1984-04-10, 06-10	0.46	0.75	0.51	0.23	0.85	0.53	系统建成前
1992-04-10, 06-10	0.76	1.16	0.49	0.19	1.39	0.86	秋旱和虫害严重
1992-04-10, 06-10	0.59	0.91	0.19	0.18	-	0.54	对照(牛村乡)

注: 小麦(*Triticum aestivum* Linn.), 玉米(*Zea mays* L.), 棉花(*Gossypium hirsutum* L.), 花生(*Arachis hypogaea* Linn.)。

3.1.2 系统内与原自然条件相似的邻近地区(牛村乡)的光能利用率 为了更好地说明农林

复合系统能提高光能利用率, 选择 1992 年大灾之年与系统外牛村乡进行比较, 农林复合系统建成前牛村乡与该区的土壤条件、灌溉条件及作物生长状况基本相似。农林复合系统内每一种作物的光能利用率均比牛村乡高, 从农田的实际光能利用率来看, 系统内的光能利用率较牛村乡提高了 59.3% (表 1)。

3.1.3 不同处理林木与作物的光能利用率 根据实验资料和气象资料, 计算出在 1993-05-21 ~ 06-10 不同模式的不同植物及整个农田的实际光能利用率 (表 2)。由表 2 看出: 周边种植模式内小麦光能利用率比林果(梨)农复合模式内小麦光能利用率提高 5.3%, 比旷野农田内小麦光能利用率提高 13.0%; 林果(梨)农复合模式内小麦光能利用率则要比旷野农田高 7.5%; 就总体而言, 周边种植模式的光能利用率比旷野农田提高了 18.9%, 林果(梨)农复合模式光能利用率比旷野农田提高了 31.1%。因此, 农林复合系统内不论哪种模式林木与作物的光能利用率都不同程度地比旷野农田高。其产量也明显比旷野农田高 (表 3)。

表 2 3 种模式的林木与作物的光能利用率 %

项目	林果(梨)农复合模式	周边种植模式(林网)	旷野农田
小麦	1.14	1.20	1.06
毛白杨	4.30	2.24	-
梨树	1.41	-	-
加权平均	1.39	1.26	1.06

表 3 3 种模式的热量资源利用效率、积温利用指数及作物产量

项目	林果农复合模式	林果农复合模式	周边种植模式	旷野
热量利用效率/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	4.32	4.80	4.26	4.00
积温利用指数	2.64	2.64	1.88	0.90
产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	8 391.60	10 615.30	11 725.10	9 110.90

注: 热量利用效率为各作物单一热量利用效率按系统面积百分比加权平均值。

### 3.2 热量利用效率

由表 3 可知, 林果农复合模式的热量利用效率最高, 分别比林果农复合模式、周边种植模式和旷野高 11%、13% 和 20%。积温利用指数与此结果相同。这充分表明了由林果农 3 层结构组成的复合系统的热量资源利用效率比单一农作物有显著提高。

### 3.3 水分利用效率

水分利用效率是指某作物单位面积的产量与该作物单位面积上耗水量的比值。从表 4 中可以看出, 系统的总水分效率与光能、热量资源的利用率的排列顺序相同, 仍为林果农复合模式为最高。周边种植型模式比旷野农田冬小麦的水分利用率高 13.4%, 一般而言, 农林复合系统水分利用率可比旷野农田高 10.3% ~ 15.2%<sup>[12]</sup>。

系统内的作物产量总体平均高于旷野, 但不同处理的产量有差异 (表 3)。由表 4 看出: 林果农复合模式水分利用率比旷野低 2.3%, 是由于该模式内果树株行距 (5 m) 小, 在种间竞争中小麦处于劣势的原因, 因此, 在应用中该种模式的行距应根据实际需求适当加大; 周边种植模式小麦产量比旷野高 28.6% (表 3), 水分利用率比旷野高 5.3%。

### 3.4 时间效率

时间效率是从时间上来评价系统内外对自然资源的利用程度。计算结果表明(时间效率按

表 4 3 种模式的水分利用效率  $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$

项目	林果农复合模式	林果农复合模式	周边种植模式	旷野
毛白杨	40.13	40.13	40.13	
梨树	36.14	36.14		
冬小麦	24.34	25.69	28.26	24.92
夏大豆	4.11	3.69		
夏玉米				9.51
系统总利用效率	39.00	39.67	37.71	35.82

面积百分比进行加权平均), 林果农复合模式 和 中光能的时间效率分别比旷野高 15.0% 和 18.5%; 热量的时间效率分别比旷野高 14.1% 和 14.3%。这是由于复合系统中的作物、果树和林带均在该时段上利用能量, 因此多层次组成的复合系统从时间上更有效地利用了自然资源, 获得更高的总产量。

### 3.5 养分循环效率

周边种植型农林(毛白杨)复合模式的研究结果表明, 模式内年平均枯落物量达  $0.5545 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 物质归还率为 35.72%, N、P、K、Ca、Mg、Mn 6 种元素的平均循环率为 15.28%, 比单一农作物群落提高了 9.53%。N、P、K、Ca、Mg、Mn 6 种元素循环率分别比旷野农田提高 12.5%、32.75%、34.36%、23.4%、26.8% 和 8.6%。

### 3.6 农林复合系统对水热环境的调节作用

长期以来, 黄淮海平原农区受旱、涝、风沙、盐碱等不利因素的影响, 造成农业生态环境恶化且产量不稳定。农林复合系统的建立, 改善了农业生境条件, 作物长势健壮, 对养分的摄取及对资源的利用率都有所提高。1992 年发生严重的低温冷害, 使该地区秋作物大面积减产。系统内作物产量明显比系统外(牛村乡)高, 系统内玉米、谷子、棉花、花生产量分别比系统外高 37.6%、175.0%、214.2% 和 5.8%, 作物产量增高说明农林复合系统的抗灾能力强, 资源利用率高。

由于秋冬及初春多偏北寒冷大风, 农林复合系统的防风作用使系统内的温度升高。在系统内距北林带南侧愈近, 防风效果愈显著, 温度也愈高, 04-08、04-10、04-11 该地区受寒冷空气袭击, 特别是 04-10, 日最低气温仅为  $-0.8$ , 风速为  $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 风向为 NNW。此时正值系统内鸭梨开花期, 因此鸭梨受冻严重, 座果率很低几乎绝产(表 5)。而雪梨此时未到开花期, 受冻情况不明显。从表 5 中可以看出: 系统内距北林带南侧愈近, 其鸭梨受冻害愈轻, 座果率愈高; 系统内梨树的受冻害程度明显比系统外的轻。

表 5 距林带南侧不同距离的鸭梨座果率  
(1992-04-28, 05-04)

处 理	$S_{0.5H}$	$S_{1H}$	$S_{2H}$	$S_{4H}$	$S_{5H}$	对 照
座果率	14	10	9	4	3	5

注: H 为林带的高度。

1988 年的观测结果表明, 农林复合系统减轻了干热风强度。系统内小麦灌浆速度高于旷野, 特别是后期连续 3 次干热风, 系统内小麦灌浆速度明显高于旷野, 则其防干热风的能力增强, 光能利用率高。

## 4 结 论

农林复合系统具有提高资源利用率的功能, 但系统内不同模式之间差异较大。梨粮复合模式光能利用率比周边种植模式高 10.3%, 农林复合系统内平均光能利用率、水分利用率、热量利用效率则分别比旷野平均提高了 25.0%、10.3%、11% 左右。

以农(粮)为主的林农复合系统模式既能改善局部生态气候条件, 提高水热资源利用效率, 同时又能提高土地生产率和农民经济收入, 是值得在我国北方平原农区推广的一种农林业模式。但农林复合系统是由树木、作物和牧草共栖在同一块土地上, 种间的竞争使其资源重新分配; 同时不同的配置模式(如植物种间的株行距)对系统内资源的利用率影响较大。建议加强农林复合系统内种间关系的研究。

## 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, 1989, 10(1): 104~108.
- 2 Nizinski J. A model of transpiration and soil-water balance for a mature oak forest. Agric. For. Meteorol., 1989, 47(1): 1~17.
- 3 Daniel H. Fundamentals of soil physics. New York: Academic Press, 1980. 1~6.
- 4 Hatfield J L. Evaluation of canopy temperature evapotranspiration models over various crops. Agric. For. Meteorol., 1984, 32(1): 41~53.
- 5 陆光明, 马秀玲. 农田防护林是提高气候-土地资源利用率的一项重要措施. 北京农业大学学报, 1990, 16(2): 45~48.
- 6 宋兆民. 黄淮海平原防护林体系建设对农业生态系统的改造和调控作用. 见: 宋兆民主编. 黄淮海平原综合防护林体系生态经济效益的研究. 北京: 北京农业大学出版社, 1990. 1~5.
- 7 张冀, 宋兆民, 卫林. 林网中的风速分布规律和防风效应. 见: 宋兆民主编. 黄淮海平原综合防护林体系生态经济效益的研究. 北京: 北京农业大学出版社, 1990. 35~44.
- 8 贺庆棠. 用生物量法对植物群体太阳能利用率的初步估算. 北京林业大学学报, 1986, 2(3): 52~59.
- 9 叶菲莫娃 H A. 植物产量的辐射因子. 王炳忠译. 北京: 气象出版社, 1987. 5~11.
- 10 崔连山, 刘亚民, 贝军. 黄淮海平原脱盐化潮土综合防护林体系适生树种选择的研究. 见: 宋兆民主编. 黄淮海平原综合防护林体系配套技术研究. 北京: 气象出版社, 1991. 67~74.
- 11 吕士行, 范世和, 曹福亮. 南方型无性系生物量的研究. 见: 南京林业大学杨树课题组编. 黑杨派南方型无性系速生丰产技术论文集. 北京: 学术书刊出版社, 1989. 130~170.
- 12 陆光明. 农林复合系统中农田蒸散及水分利用效率的研究. 北京农业大学学报, 1992, 18(4): 26~30.

## A Study on the Utilization Efficiency of Water and Energy Resources of Agroforestry System

*Meng Ping*<sup>1)</sup> *Fa Wei*<sup>2)</sup> *Song Zhaomin*<sup>1)</sup> *Zhang Jinsong*<sup>1)</sup> *Xin Xuebing*<sup>1)</sup>

(1) The Research Institute of Forestry, CAF, 100091, Beijing, China;

2) The Forestry Institute of Henan Province, 450003, Zhengzhou, China)

**Abstract** This paper dealt with the utilization efficiency of natural resources of agroforestry by the field experimental methods. The results showed that agroforestry had function of raising the utilization of natural resources. Compared with those in the wide field, the agroforestry could raise 25.0%, 10.3%~15.2%, 11.0%~13.0% of the Utilization thermal of solar energy, soil water and energy respectively, and also local peasant's income. So agroforestry is spreading in plain agricultural area.

**Key words** agroforestry; water utilization; utilization rate of solar energy; efficiency of natural resources