

# 桐麦间作系统辐射光谱成分变化规律的研究

李芳东, 傅大立, 王保平, 文瑞君

(林业部泡桐研究开发中心, 郑州 450003)

**摘要:**对系统内外太阳辐射的 3 个波段: 紫外辐射( $UVR$  300~400nm), 光合有效辐射( $PAR$  400~700nm)和近红外辐射( $NIR$  700~1100nm)进行了分析。对比研究表明, 试验期间系统内的光谱成分  $UVR : PAR : NIR$  为 5.2 : 48.2 : 46.6, 系统外对照区为 5.1 : 52.4 : 42.5。其中, 小麦开花期系统内外分别为 5.2 : 51.5 : 43.2 和 5.0 : 51.9 : 43.1, 小麦灌浆期分别为 4.9 : 46.5 : 48.6 和 5.3 : 52.6 : 42.1, 小麦成熟期分别为 5.4 : 45.0 : 49.6 和 5.0 : 53.4 : 41.6, 从小麦灌浆期开始, 桐麦间作系统内的  $PAR$  减少较为明显; 间作系统对漫射辐射中的  $PAR$  吸收阻隔相对多于直射辐射, 对近红外辐射的吸收阻隔极少; 系统内外的紫外直射辐射( $D-UVR$ )和紫外漫射辐射( $S-UVR$ )占总辐射强度大致相等, 均为 2%。系统内的直射  $PAR$ ( $D-PAR$ )占总辐射的含量为 30%, 低于系统外 5%, 而漫射  $PAR$ ( $S-PAR$ )为 16%, 高于系统外 1%。系统内的近红外直射辐射( $D-NIR$ )占总辐射的含量也为 30%, 低于系统外 4%, 而近红外漫射辐射( $S-NIR$ )为 20%, 比系统外的 12%高出 8%; 系统外直射辐射的  $PAR$  成分与直射辐射量呈正相关, 漫射辐射与总辐射的  $PAR$  成分与其辐射量相关不明显,  $PAR$  成分趋于常数(52%)。间作系统内直射辐射的  $PAR$  成分与其直射辐射量呈正相关, 散射辐射与总辐射的  $PAR$  成分与其辐射量相关不明显, 当辐射量大于  $150W/m^2$  时,  $PAR$  成分趋于 0.52。

**关键词:** 桐麦间作系统; 太阳辐射; 光谱成分; 直射; 漫射;  $PAR$ ;  $UVR$ ;  $NIR$

## A study of the spectral variations of solar radiation inside and outside the inter-crop system of *Paulownia* trees and wheat crop

LI Fang-Dong, FU Da-Li, WANG Bao-Ping, WEN Rui-Jun (*Paulownia Research and Development Center of China, Zhengzhou 450003, China*)

**Abstract:** We studied solar radiation by separating it into three wavebands: ultra-violet radiation ( $UVR$ , 300~400nm), photosynthetically active radiation ( $PAR$ , 400~700nm) and near infra-red radiation (700~1100nm). The comparative study showed that the spectral composition of the solar radiation  $UVR : PAR : NIR$  was 5.2 : 48.2 : 46.6 inside the inter-cropping system and 5.1 : 52.4 : 42.5 outside the inter-cropping system (control). The compositions of three wavebands,  $UVR : PAR : NIR$  were 5.2 : 51.5 : 43.2 and 5.0 : 51.9 : 43.1 inside and outside the inter-cropping system during flowering, respectively; and 4.9 : 46.5 : 48.6 and 5.3 : 52.6 : 42.1 inside and outside the inter-cropping system during grain filling, respectively and 5.4 : 45.0 : 49.6 and 5.0 : 53.4 : 41.6 inside and outside the system during maturing, respectively. Since grain filling,  $PAR$  inside the inter-cropping system of *Paulownia* trees and wheat crop was significantly reduced. Diffuse  $PAR$  of the incident radiation was attenuated more than direct  $PAR$ , and  $NIR$  was attenuated less than  $PAR$  by the trees. The fractions of direct  $UVR$  ( $D-UVR$ ) or diffuse  $UVR$  ( $S-UVR$ ) of the total solar radiation inside the inter-cropping system were 2%, similar to those outside. The fraction of direct beam  $PAR$  ( $D-PAR$ ) of total solar radiation was 30% inside the inter-cropping system, 5% less than that outside the system; whereas the fraction of diffuse  $PAR$  ( $S-PAR$ ) inside the inter-cropping system was 16%, 1% higher than that outside. The fraction of direct  $NIR$  ( $D-NIR$ ) of total solar ra-

基金项目: 林业部重点攻关课题“农桐间作优化生态、经济栽培模式研究”的部分内容

本研究得到 UNDP 澳籍专家王应平博士、中国科学院华南植物研究所周国逸研究员帮助, 在此一并致谢!

收稿日期: 1997-11-08; 修订日期: 1998-11-27

diation was 30%, 4% less than that outside, and the fraction of diffuse *NIR* (*S-NIR*) was 20%, 8% higher than that outside. Outside the inter-cropping system, the fraction of *PAR* of the direct beam radiation positively correlated with the flux density of direct beam radiation, the fractions of *PAR* of the diffuse radiation and total solar radiation were not significantly correlated with their respective flux densities, and approximately constant (52%). Inside the inter-cropping system, the fraction of *PAR* of the direct beam was positively correlated with the flux density of direct beam radiation, the fractions of *PAR* of total solar radiation inside the inter-cropping system are not significantly correlated with their respective flux densities, and approaches a constant value (52%) when the flux density is greater than  $150\text{W}/\text{m}^2$  for both diffuse and total solar radiation.

**Key words:** inter-cropping system; solar radiation; spectral composition; direct beam; diffuse; ultra-violet radiation (*UVR*); photosynthetically active radiation (*PAR*); near infra-red radiation (*NIR*)

文章编号: 1000-0933(2000)01-0109-09

中图分类号: S181, S718.5

文献标识码: A

太阳辐射可分成 3 个波段: 紫外辐射 (*UVR* 300~400nm), 光合有效辐射 (*PAR* 400~700nm) 以及近红外辐射 (*NIR* 700~1100nm), 紫外辐射对植物细胞的生长发育、基因突变有重要的影响<sup>[1]</sup>, 近红外对植物表面有加热效应, 在植物与环境的热交换中起着主导作用<sup>[2]</sup>。紫外辐射与近红外辐射对光合作用没有直接的影响, 光合有效辐射是影响植物光合作用及干物质产量的最主要因子<sup>[3]</sup>。

泡桐 (*Paulownia*) 是我国著名的多用途乡土树种, 具有生长快, 材质好, 根系分布深, 树冠稀疏, 与农作物实行间作矛盾相对较小等优良特性。60 年代以来, 农桐间作栽培形式得到了广泛的推广, 并成为目前推广面积最大、最受群众欢迎的农林间作类型之一。桐麦间作系统, 构成了桐麦双层受光结构。

由于植物叶片对各波段的吸收率不一样, 当入射太阳光透过林冠后, 其光谱成分也将发生变化。研究表明, 植物叶片对紫外辐射与光合有效辐射的吸收率在 0.8 与 0.9 之间, 而对近红外辐射的吸收率只有 0.1 左右<sup>[4]</sup>。这样, 农桐间作系统内光谱成分的变化也受太阳辐射中直射光的比例以及泡桐林冠结构的影响。对桐麦间作系统内光谱成分的研究, 国内尚未见报道, 而国外早在 60 年代就有这方面的研究<sup>[5]</sup>。并且现在已利用植物对不同光波吸收率不同的特征, 通过遥感技术来监测地表植物结构、叶面积指数等变化<sup>[6~7]</sup>。本文通过对农桐间作系统内光谱成分变化的研究, 为更准确地分析林冠对间作系统内光合有效辐射所占比例以及系统内太阳辐射对作物光合作用与蒸腾作用的不同影响奠定基础<sup>[8~10]</sup>。

## 1 研究地区概况与试验研究方法

试验站设在河南省扶沟县江村林场, 地理坐标为:  $34^{\circ}18'N$ ,  $114^{\circ}26'E$ 。江村林场地处豫中部黄泛区冲积平原, 土壤为沙壤土, 属暖温带大陆性季风气候, 四季分别、雨热同季。年平均气温  $14.3^{\circ}\text{C}$ , 年平均降水量  $689.7\text{mm}$ , 年平均日照时数  $1883\text{h}$ 。试验地泡桐品种为毛白 33 (*Paulownia* × '*Tomentosi-fortunei* 33'), 1990 年栽植, 树行南北向, 有株行距  $5\text{m} \times 10\text{m}$ ,  $5\text{m} \times 15\text{m}$ ,  $5\text{m} \times 20\text{m}$ ,  $5\text{m} \times 25\text{m}$  等间作模式, 测定主要在  $5\text{m} \times 20\text{m}$  的间作模式上进行。树行平均高  $13\text{m}$ , 平均枝下高  $5.3\text{m}$ , 东西冠幅平均约  $5.6\text{m}$ 。小麦品种为豫西 832 (*Triticum aestivum* *Lim.* cv. '*Yuxi* 832'), 播种量为  $225\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

## 2 试验研究方法

采用美国 Li-cor 公司生产的 Li-800 光谱测定仪定时定位测定。光谱测定从 7:00 开始至 17:00, 每 2h 测定一轮回, 每次测定桐麦间作系统不同点及对照区的辐射光谱。其中, 直射辐射是用  $0.5\text{m}$  长的圆管套在辐射传感器上, 仅让直射阳光从细长圆管通过进入传感器测定的, 漫射辐射则是用直径  $0.05\text{m}$  的圆形挡片, 在传感器上方  $1.5\text{m}$  处阻挡直射阳光, 并使所有漫射光辐射在传感器上测定的。这种方法是国外对直射光与漫射光光谱进行测定的标准方法之一<sup>[11]</sup>。

测定主要在  $5\text{m} \times 20\text{m}$  的间作模式上分 7 个测点进行, 同时, 在桐麦间作系统外, 选定一个固定对照点, 记为 CK 进行数据的测定。7 个测点是按如下方式选择的: 离东树行  $1\text{m}$  (即离西树行  $19\text{m}$ , 依此类推) 处;  $3.5\text{m}$  处;  $6.5\text{m}$  处;  $10\text{m}$  处;  $13.5\text{m}$  处;  $16.5\text{m}$  处;  $19\text{m}$  处。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 系统外太阳入射的光谱特征

图 1 为两种不同天气状况下的太阳入射光谱成分的分布图形。根据其波长大小, 太阳入射光谱可分为 3 个波段: 紫外辐射 ( $UVR$  300~400nm), 光合有效辐射 ( $PAR$  400~700nm) 和近红外辐射 ( $NIR$  700~1100nm)。可以看出, 太阳入射光谱有如下明显特点, 总趋势是紫外辐射所占比例较小, 而光合有效辐射和近红外辐射所占比例较大,  $PAR : NIR \approx 1 : 1$ , 辐射波峰在 500~700nm 间。其中, 晴天以直射辐射为主, 阴天天气则直射与漫射并重, 漫射  $PRA$  的相对含量高于直射辐射。

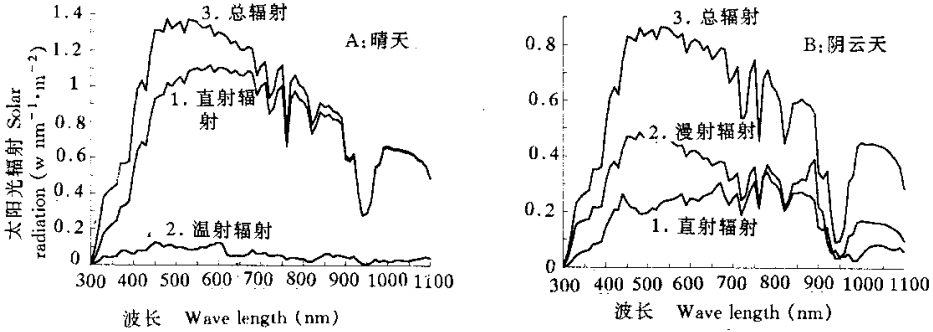


图 1 不同天气状况的太阳辐射光谱

Fig. 1 Spectral composition of solar radiation under different sky conditions

1 Direct beam, 2 Diffuse, 3 Total radiation, A Sunny, B Cloudy

#### 3.2 桐麦间作系统的总辐射光谱成分的特征

3.2.1 小麦不同生长期系统内外太阳光谱成分的特征 图 2 显示了小麦不同生长发育时期桐麦间作系统内外的光谱成分变化趋势。因为  $UVR$  占总辐射的比例一般小于 5%, 所以只显示了其成分  $PAR$  与  $NIR$  的变化趋势。可以看出, 小麦抽穗与开花期, 系统内外及系统内不同点间的光谱成分 ( $PAR : NIR$ ) 差异不明显 (图 2A)。此时期, 树行对太阳辐射的阻隔较少, 对紫外辐射和近外辐射的阻截更少, 间作系统内各点的光谱成分变化趋同 (参见表 1)。据观测, 这一时期泡桐处于萌动期和发叶初期。在小麦开花末期, 泡桐尚是小叶稀疏, 叶面积仅为生长期最大叶面积的 1/10 以下。

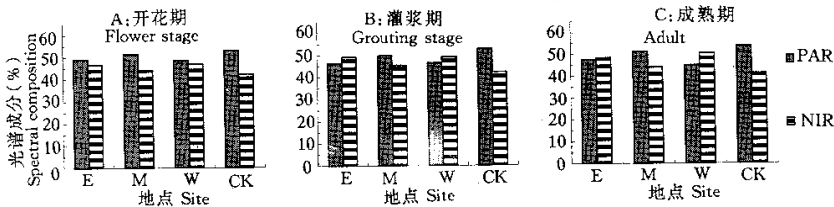


图 2 桐麦间作系统不同点太阳辐射的比较

Fig. 2 Comparison of solar radiation at different locations in the inter-cropping system of *Paulownia*-wheat

E 树行东冠下点 East to the row of trees, M 树行中冠外点 The middle between rows of trees, W 树行西冠下点 West to the row of trees, CK 对照区 Control, A. Flower period, B. Milk period, C. Mature period

小麦灌浆期, 系统内外辐射光谱组成差异增大 (图 2B), 主要表现在系统内 (E, M, W)  $PAR$  所占总辐射的比例有所下降, 尤其是树行冠下各点 (E, W) 的  $PAR$  比例下降明显, 而  $NIR$  所占比例有所上升。其主要原因是因为树冠对  $PAR$  的吸收较多, 据测定, 树叶对  $PAR$  的吸收率大约为 80%, 而对  $NIR$  的吸收率仅为

20%左右<sup>[9]</sup>。当太阳光穿过树冠后,PAR含量相对减少,而NIR含量相对增加。小麦进入成熟期后,系统外的光谱成分差异更加明显,与对照相比,系统内光谱成分PAR的相对含量减少,NIR的相对含量上升。

从小麦抽穗开花期至成熟期止,系统内的平均光谱成分UVR:PAR:NIR为5.2:48.2:46.6,而系统外对照区的平均光谱成分UVR:PAR:NIR为5.1:52.4:42.5(表1)。其中,4月份系统内外的光谱成分差别很小,进入5月份后,桐麦间作系统内的光谱成分中PAR含量逐渐下降,而NIR含量却相应上升,UVR含量也有上升的趋势,这说明泡桐树行对太阳辐射传输的阻隔以PAR为主。因此,PAR截获的多少成为桐麦间作系统中竞争的焦点。

表1 桐麦间作系统小麦各生长发育阶段系统内外光质的比较

Table 1 Comparison of spectral composition inside and outside the inter-cropping system of *Paulownia*-wheat growth and development

类别	测定点	日期 Date									平均值
Waveband	Site	4-20	4-25	4-30	5-05	5-10	5-15	5-20	5-25	5-31	Average
紫外辐射	对照 CK	5.59	4.89	4.58	5.22	5.64	4.93	5.27	4.91	4.84	5.10
UVR(%)	系统内*	5.49	4.99	5.29	5.12	5.36	4.06	5.39	5.43	5.62	5.19
光合有效辐射	对照 CK	52.11	52.48	51.01	50.44	53.79	51.76	53.66	53.08	53.58	52.43
PAR(%)	系统内	51.94	52.02	50.97	48.57	48.82	43.64	45.62	46.09	46.38	48.23
近红外辐射	对照 CK	42.30	42.63	44.41	44.34	40.57	43.30	41.07	42.01	41.57	42.47
NIR(%)	系统内	42.57	42.99	43.74	46.31	45.82	52.30	48.99	48.48	48.00	46.58

\* Inter-cropping system

3.2.2 桐麦间作系统内外太阳辐射光谱成分日变化规律 图3为从小麦开花期至成熟期止,桐麦间作系统内外不同点光谱成分的日平均变化趋势。7:00(图3A)和17:00(图3C)间作系统内外的光谱成分差异明显,树冠下各点(E,W)的PAR成分小于NIR,而冠外点(M)及对照区(CK)的PAR成分大于NIR,中午前后(图3B),系统内外的光谱成分差别最小,各点PAR:NIR均大于1,其中,树冠遮荫处(E,W)的PAR:NIR值小于未遮荫处(M),而系统内小于系统外。这种变化规律是由于林冠对入射PAR截获随太阳入射角度的降低而增加造成的。

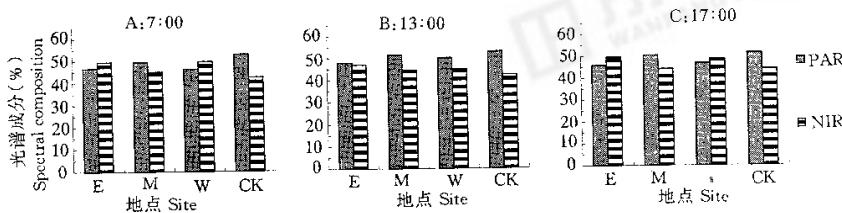


图3 桐麦间作系统内外光谱成分的日变化

Fig. 3 Variation of the spectral composition at different times inside and outside the inter-cropping system of *Paulownia*-wheat

E 树行东冠下点 East to the row of trees, M 树行中冠外点 The middle between rows of trees, W 树行西冠下点 West to the row of trees, CK 对照区 Control

小麦生长发育不同阶段,桐麦间作系统内外的光谱成分有较大差异(表2),其中,系统内UVR、PAR和NIR的相对比例为各观测点的均值。小麦开花期,系统内的平均光谱成分UVR:PAR:NIR为5.2:51.5:43.2,系统外对照区的平均光谱成分UVR:PAR:NIR为5.0:51.9:43.1。9:00以前系统内UVR的相对含量高于系统外(对照CK),11:00以后又高于系统外,系统外的紫外辐射峰值在9:00,而系统内的紫外辐射峰值在13:00。上午系统内的PAR相对含量低于系统外,下午高于系统外;近红外辐射

之。总的来讲,小麦开花期系统内外的光谱成分差异甚小,不太明显。小麦灌浆期,系统外  $UVR$  的相对含量峰值后移到 11:00,系统内  $UVR$  的相对含量仅在 15:00 高于系统外,系统内外光谱成分  $UVR : PAR : NIR$  分别为 4.9 : 46.5 : 48.6 和 5.3 : 52.6 : 42.1。小麦成熟期,系统内外光谱成分  $UVR : PAR : NIR$  分别为 5.4 : 45.0 : 49.6 和 5.0 : 53.4 : 41.6。从灌浆期至成熟期,系统内外的光谱成分差异明显,主要表现在间作系统内的  $PAR$  减少较为明显,因此,桐麦间作系统的辐射竞争将主要发生在灌浆期和成熟期。

表 2 小麦各生长发育阶段桐麦间作系统内外光谱成分日变化比较

Table 2 Comparison of the diurnal variation of the spectral composition inside and outside the inter-cropping system of *Paulownia*-wheat of different stages of wheat growth and development

时 期 Period	类 别 Type	测定点 Site	时 间 Time (O'clock)						平均值 Average
			7	9	11	13	15	17	
开花期	紫外辐射 $UVR(\%)$	对照 CK	5.27	5.37	5.13	4.80	4.59	4.96	5.02
		系统内*	5.17	5.26	5.26	5.32	5.21	5.20	5.24
	光合有效辐射 $PAR(\%)$	对照 CK	52.76	52.33	52.56	52.10	50.43	51.02	51.87
		系统内	51.15	51.79	52.16	52.46	51.16	50.44	51.53
	近红外辐射 $NIR(\%)$	对照 CK	41.97	42.30	42.31	43.10	44.98	44.02	43.11
		系统内	43.68	42.95	42.58	42.22	43.62	44.37	43.24
灌浆期	紫外辐射 $UVR(\%)$	对照 CK	5.39	5.51	6.14	5.18	4.80	4.82	5.31
		系统内	4.72	5.09	4.72	4.82	5.06	4.81	4.87
	光合有效辐射 $PAR(\%)$	对照 CK	52.56	53.60	54.72	50.57	52.47	51.36	52.55
		系统内	46.97	47.84	46.54	44.02	46.80	46.76	46.49
	近红外辐射 $NIR(\%)$	对照 CK	42.05	40.89	39.14	44.25	42.72	43.82	42.15
		系统内	48.30	47.07	48.74	51.15	48.14	48.43	48.64
成熟期	紫外辐射 $UVR(\%)$	对照 CK	4.44	5.08	5.26	5.39	4.91	4.71	4.96
		系统内	5.74	5.31	5.44	5.34	5.20	5.21	5.37
	光合有效辐射 $PAR(\%)$	对照 CK	52.97	53.82	53.99	54.16	53.16	52.17	53.38
		系统内	43.15	46.74	47.26	43.20	45.35	44.37	45.01
	近红外辐射 $NIR(\%)$	对照 CK	42.59	41.11	40.75	40.45	41.93	43.11	41.66
		系统内	51.11	47.96	47.30	51.46	49.45	50.42	49.62

\* Inter-cropping system

### 3.3 桐麦间作系统内外的直射辐射和漫射辐射光谱成分变化

3.3.1 系统内外直射辐射和漫射辐射光谱成分变化特征 桐麦间作系统内外的直射辐射和漫射辐射的光谱成分有较大地差异(图 4),直射辐射的  $UVR$  成分约占 2%,而漫射辐射的  $UVR$  成分在 5%以上。系统内冠外点(M)和系统外(CK)直射辐射  $PAR$  与  $NIR$  比值近为 1,树冠下各点(E,W)则稍小于 1。由于树行对漫射辐射中的  $PAR$  吸收阻隔较多,而对  $NIR$  的吸收阻隔较少,导致系统内的漫射  $PAR$  占总辐射的比例显著小于对照区。树行东冠下漫射辐射  $PAR : NIR$  接近 1 : 2,而对照区其比值为 1.25 : 1。造成这种差异的原因,一方面是由于直射光与漫射光的成分和强度差异,另一方面,也与桐叶对直射光与漫射光的吸收不同有关。

图 5 为间作系统内外直射辐射和漫射辐射占总辐射强度的比例,图中显示,系统内外的紫外直射辐射( $D-UVR$ )和紫外漫射辐射( $S-UVR$ )占总辐射的比例大致相等,均为 2%。系统内的直射  $PAR(D-PAR)$  占总辐射的比例为 30%,比系统外的 35%低 5%,而漫射  $PAR(S-PAR)$  为 16%,高于系统外 1%。系统内的近红外直射辐射( $D-NIR$ )占总辐射的比例也为 30%,低于系统外 4%,而近红外漫射辐射( $S-NIR$ )为 20%,比系统外的 12%高出 8%。总的来讲,系统内直射  $PAR$  与  $NIR$  的相对比例减少,而漫射的  $NIR$  相对比例显著增加。

3.3.2 桐麦间作系统内外直射辐射和漫射辐射传输光谱日变化规律 图 6 为间作系统内外直射辐射与漫射辐射光谱成分日变化规律。系统外清晨和傍晚的太阳直射辐射以  $NIR$  为主(图 6A1,A3),中午(13:00)  $PAR$  所

占总辐射的比例比清晨和傍晚要高一些(图 6A2)。漫射辐射在早晚太阳入射角较小时,系统外  $PAR$  成分显著大于  $NIR$ (图 6B1, B3),中午(13:00)太阳入射角较大时, $PAR$  与  $NIR$  成分近等(图 6B2)。间作系统内,泡桐对直射光谱成分影响较小,而对漫射光谱成分影响较大,系统内  $PAR$  成分显著低于系统外,系统内冠下点(E,W)显著低于冠外点(M)。

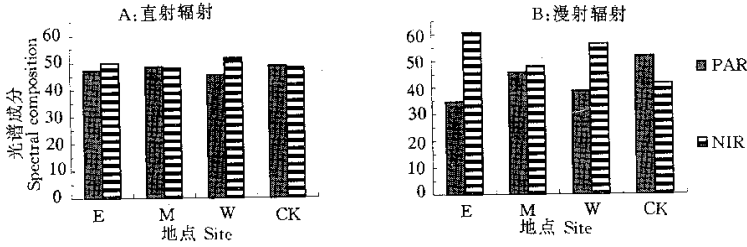


图 4 桐麦间作系统内外的直射辐射和漫射辐射光谱成分比较

Fig. 4 Comparison of the spectral compositions of the direct beam (A) and diffuse radiation (B) inside and outside the inter-cropping system of *Paulownia*-wheat

E 树行东冠下点 East to the row of trees, M 树行中冠外点 The middle between rows of trees, W 树行西冠下点 West to the row of trees, CK 对照区 Control

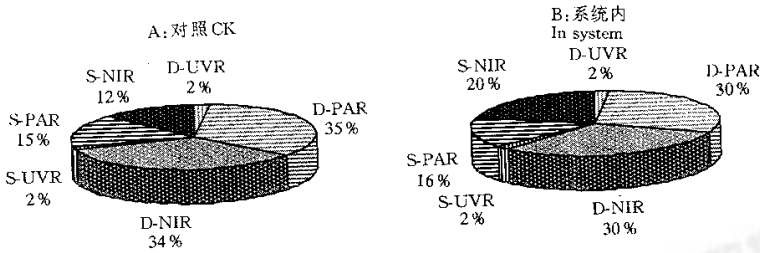


图 5 桐麦间作系统内外直射和漫射辐射组成比较

Fig. 5 Comparison of the compositions of direct beam and diffuse radiation inside and outside the inter-cropping system of *Paulownia*-wheat

A Control, B Inter-cropping system

表 3 进一步说明了系统内外光谱成分的变化规律。测定期内,系统内外直射光谱  $UVR : PAR : NIR$  分别为  $2.6 : 44.7 : 52.7$  和  $2.4 : 36.9 : 60.7$ 。其中,9:00 以前和 15:00 以后,系统内外的紫外辐射较低,均低于 2%,系统内的  $UVR$  比例峰值在 9:00,系统外在 13:00。系统内的  $PAR$  比例低于系统外;近红外辐射则反。系统内外散射光谱  $UVR : PAR : NIR$  分别为  $6.3 : 49.0 : 44.7$  和  $5.3 : 39.5 : 55.2$ ,从 7:00 至 17:00,系统内  $PAR$  成分均小于系统外,而  $NIR$  则大于系统外, $UVR$  成分除 13:00 外,系统内也低于系统外。

### 3.4 桐麦间作系统内外光谱 $PAR$ 成分与辐射量的相关分析

系统内外  $PAR$  相对含量与辐射量的相关分析对预测系统内外光能利用潜力具有重要的意义。根据测定结果,系统外直射辐射的  $PAR$  成分与直射辐射量呈正相关(图 7A1),并可用自然对数曲线拟合;系统外漫射辐射的  $PAR$  成分与漫射辐射量有关(图 7A2),当漫射辐射量小于  $70W/m^2$ , $PAR$  成分随着漫射辐射量的增大而增加,当漫射辐射量大于  $70W/m^2$  时, $PAR$  成分趋于常数;系统外总辐射的  $PAR$  成分与总辐射量相关不明显(图 7A3), $PAR$  的成分趋于常数(0.52)。间作系统内直射辐射的  $PAR$  成分与直射辐射量呈正相关(图 7B1),可用自然对数曲线拟合,但其相关指数低于系统外;系统内漫射辐射的  $PAR$  成分与漫射辐射量,总辐射的  $PAR$  成分与总辐射量相关不明显(图 7A2、A3),总趋势是当辐射量小于  $150W/m^2$

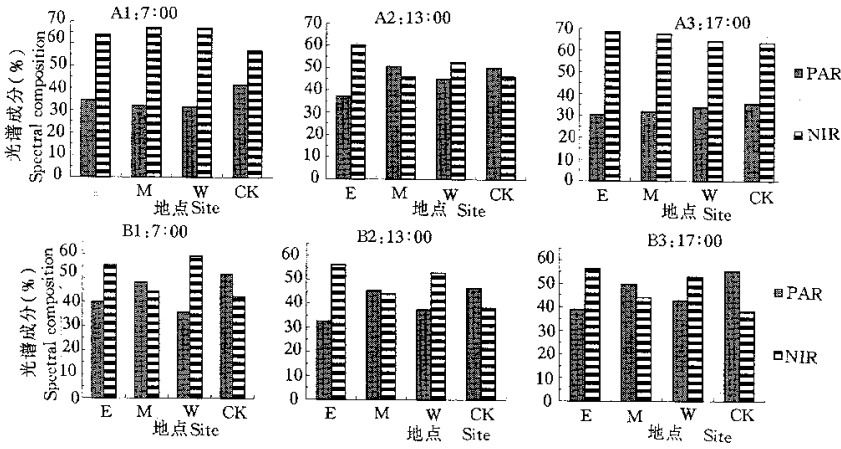


图 6 桐麦间作系统内外直射辐射与漫射辐射光谱成分日变化

Fig. 6 Diurnal variation of the spectral composition of direct beam and diffuse radiation inside and outside the intercropping system of *Paulownia*-wheat

E 树行东冠下点 East to the row of trees, M 树行中冠外点 The middle between rows of trees, W 树行西冠下点 West to the row of trees, CK 对照区 Control, A 直射辐射 Direct beam radiation, B 漫射辐射 Diffuse radiation

时,随着辐射量的增大 PAR 成分有增加之趋势,当辐射量大于  $150W/m^2$  时,PAR 成分趋于常数,与辐射量大小无关。

#### 4 结论

##### 4.1 太阳辐射传输光谱特征

太阳辐射中紫外辐射所占总辐射比例较小( $<5\%$ ),而光合有效辐射和近红外辐射所占比例较大,  $PAR : NIR \approx 1 : 1$ 。直射辐射的 PAR 相对含量比漫射辐射低,晴天 PAR 占总辐射的比例比阴天天气低。

表 3 桐麦间作系统内外直射辐射与漫射辐射组成成分日变化

Table 3 Comparison of diurnal variation of the composition of direct beam and diffuse radiation inside and outside the intercropping system of *Paulownia*-wheat

类别 Type	测定点 Site	时间 Time						平均值 Average	
		7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00		
直射辐射	紫外辐射	对照 CK	1.58	3.14	2.93	3.42	2.94	1.48	2.58
	UVR(%)	系统内	1.30	3.34	3.17	2.70	2.48	1.52	2.42
	光合有效辐射	对照 CK	36.83	48.82	49.58	47.59	48.27	37.09	44.70
	PAR(%)	系统内	31.20	40.09	42.95	38.85	37.86	30.35	36.88
	近红外辐射	对照 CK	61.59	48.03	47.49	48.99	48.79	61.44	52.72
	NIR(%)	系统内	67.50	56.56	53.88	58.44	59.66	68.13	60.70
漫射辐射	紫外辐射	对照 CK	5.95	7.35	7.45	3.61	6.71	6.64	6.28
	UVR(%)	系统内	5.88	5.34	5.13	4.90	5.05	5.49	5.30
	光合有效辐射	对照 CK	51.29	46.62	49.32	38.99	53.11	54.90	49.04
	PAR(%)	系统内	41.95	36.89	34.63	36.82	42.02	44.45	39.46
	近红外辐射	对照 CK	42.76	46.03	43.23	57.40	40.18	38.46	44.68
	NIR(%)	系统内	52.17	57.77	60.24	58.29	52.93	50.07	55.24

### 万方数据

#### 4.2 桐麦间作系统的辐射成分变化

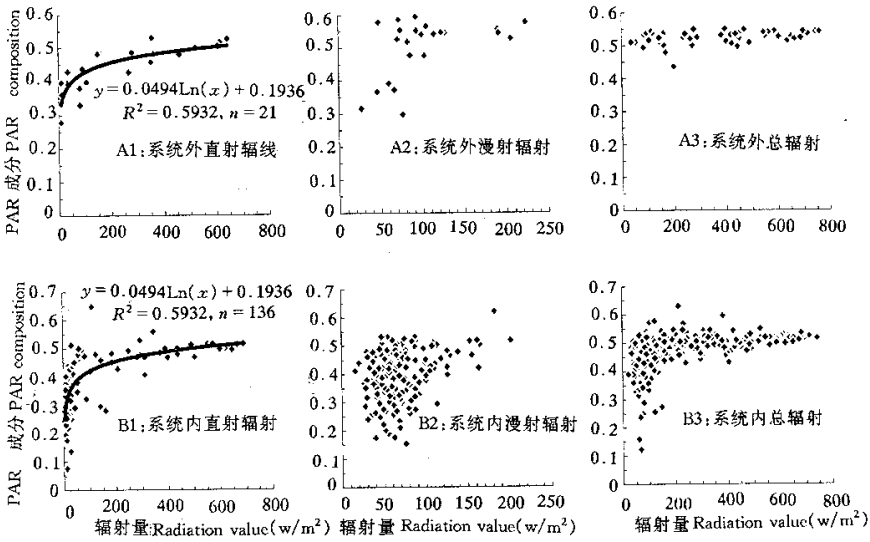


图7 桐麦间作系统内外  $PAR$  成分与辐射量的关系

Fig. 7 The relationship between the fraction of  $PAR$  and incident radiation flux density inside (A) and outside (B) the inter-cropping system of *Paulownia*-wheat

整个时段中,系统内的光谱成分为  $UVR : PAR : NIR = 5.2 : 48.2 : 46.6$ ,而系统外对照区的光谱成分为  $UVR : PAR : NIR = 5.1 : 52.4 : 42.5$ 。其中,4月份系统内外的光谱成分差别很小,进入5月份后,桐麦间作系统内的光谱成分中  $PAR$  比例逐渐下降,而  $NIR$  比例却相应上升, $UVR$  比例也有上升的趋势,这说明泡桐树行对辐射传输的阻隔以  $PAR$  为主。因此, $PAR$  截获的多少成为桐麦间作系统竞争的焦点。小麦生长发育不同阶段,桐麦间作系统内外的辐射组成有较大差异。其中,小麦开花期系统内外的光谱成分 ( $UVR : PAR : NIR$ ) 分别为  $5.2 : 51.5 : 43.5$  和  $5.0 : 51.9 : 43.1$ ,小麦灌浆期分别为  $4.9 : 46.5 : 48.6$  和  $5.3 : 52.6 : 42.1$ ,小麦成熟期分别为  $5.4 : 45.0 : 49.6$  和  $5.0 : 53.4 : 41.6$ 。从小麦灌浆期开始,桐麦间作系统内的  $PAR$  减少较为明显,因此,桐麦间作系统的辐射竞争将主要发生在灌浆期和成熟期。长期以来,光照变化的研究时有报道,但受多种因素的影响,研究只停留在光照强度对小麦产量与品质的影响<sup>[12~13]</sup>。对间作系统内太阳辐射光谱变化的研究,为将来进一步探讨光谱对小麦籽粒形成、干粒重及最终产量的影响奠定了基础<sup>[14]</sup>。

#### 4.3 桐麦间作系统的直射辐射和漫射辐射

系统内外的紫外直射辐射 ( $D-UVR$ ) 和紫外漫射辐射 ( $S-UVR$ ) 占总辐射的相对含量大致相等,均为 2%。系统内的直射  $PAR$  ( $D-PAR$ ) 占总辐射的比例为 30%,低于系统外 5%,而漫射  $PAR$  ( $S-PAR$ ) 为 16%,高于系统外 1%。系统内的近红外直射辐射 ( $D-NIR$ ) 占总辐射的比例也为 30%,低于系统外 4%,而近红外漫射辐射 ( $S-NIR$ ) 为 20%,比系统外的 12% 高出 8%。漫射光的  $UVR$  成分显著高于直射辐射。间作系统对漫射辐射中的  $PAR$  吸收阻隔较多,对近红外辐射的吸收阻隔较少;对直射辐射的  $UVR$  与  $NIR$  均有较大程度地吸收和阻截,尤其是树行冠下各点。

#### 4.4 桐麦间作系统内外光谱 $PAR$ 成分与辐射量的相关性

系统外直射辐射的  $PAR$  成分与直射辐射量呈正相关,产并可用自然对数曲线拟合;系统外漫射辐射的  $PAR$  成分与漫射辐射量有关,当漫射辐射量小于  $70W/m^2$  时, $PAR$  成分随着漫射辐射量的增大而增加,当漫射辐射量大于  $70W/m^2$  时, $PAR$  成分趋于常数;系统外总辐射的  $PAR$  成分与总辐射量相关不明



显,  $PAR$  成分趋于常数。间作系统内直射辐射的  $PAR$  成分与漫射辐射量, 总辐射的  $PAR$  成分与总辐射量相关不明显, 当辐射量小于  $150\text{W}/\text{m}^2$  时, 随着辐射量的增大  $PAR$  成分有增加之趋势, 当辐射量大于  $150\text{W}/\text{m}^2$  时,  $PAR$  成分趋于常数,  $PAR$  成分与其辐射量大小无关。

### 参考文献

- [1] Jones H G. *Plants and Microclimate: a Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge University Press, Cambridge, 1983. 323.
- [2] Monteith J L. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London, 1973.
- [3] McCree K J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, 1992, **9**: 191~216.
- [4] Gates D M. *Biophysical Ecology*. Springer-Verlag, NEW York, 1980.
- [5] Federer C A and Tanner C B. Spectral distribution of light in the forest. *Ecology*, 1966, **47**: 555~560.
- [6] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing and Environment*, 1984, **16**: 125~141.
- [7] Sellers P J. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote Sensing and Environment*, 1987, **21**: 143~183.
- [8] 周国逸. 生态系统水热原理及其应用. 北京: 气象出版社, 1997.
- [9] 李芳东, 傅大立, 王保平. 桐麦间作系统小麦光合生理适应性规律的研究. 北京林业大学学报, 1998, (3): 93~100.
- [10] 李芳东, 王保平, 傅大立. 桐麦间作系统小麦蒸腾速率和水分利用效率变化的研究. 北京林业大学学报, 1998, (3): 115~120.
- [11] Weiss A and Norman J M. Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1985, **34**: 205~213.
- [12] 卢琦, 阳含熙, 慈龙骏, 等. 农桐间作系统辐射传输对农作物产量和品质的影响. 生态学报, 1997, **17**(1): 36~44.
- [13] 王绍中. 环境生态条件对小麦品质的影响研究进展. 华北农学报, 1994, **9**(增刊): 141~144.
- [14] 李芳东, 王保平, 傅大立. 桐麦间作系统内光量分布及其对小麦产量的影响. 北京林业大学学报, 1998, (3): 101~107.

