

# 农田生态系统光能利用效率及其影响因子分析

同小娟<sup>1, 3</sup>, 李俊<sup>2\*</sup>, 于强<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国林业科学研究院 林业研究所, 北京 100091)

**摘要:** 在华北平原冬小麦/夏玉米轮作田进行了连续 3 年的涡度相关观测, 对农田生态系统光能利用效率 (LUE) 及其影响因子进行分析。结果表明: 农田生态系统的 LUE 季节变化明显。冬小麦田和夏玉米田的最大日平均 LUE 分别出现在 4 月中下旬和 8 月初。2003~2005 年的季节平均 LUE 冬小麦田分别为 0.8、1.2、1.0  $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ; 夏玉米田分别为 2.0、1.9、2.0  $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。冬小麦田的 LUE 随叶面积指数 (LAI) 增加呈对数增长。在玉米田, 营养生长阶段的 LUE 随 LAI 增加先增后降; 生殖生长阶段的 LUE 随 LAI 减少线性降低。相同 LAI 下, 玉米生殖生长阶段的 LUE 明显低于营养生长阶段。LAI 大于 4 时, 冬小麦田和夏玉米田的 LUE 均随光合有效辐射 (PAR) 的增加线性下降。夏玉米田 LUE 随饱和差 (VPD) 增加而降低, 而冬小麦田 LUE 与 VPD 之间的关系不明显。

**关键词:** 农田生态系统; 光能利用效率; 涡度相关; 华北平原

**中图分类号:** S123 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3037(2009)08-1393-09

## 1 引言

光能利用效率 (LUE) 是作物生长模型中最有用的参数之一<sup>[1]</sup>。它还广泛应用于基于遥感的初级生产力<sup>[2]</sup>和净初级生产力<sup>[3]</sup>估算及全球碳循环的尺度扩展研究中。有关作物 LUE 的研究通常是在叶片<sup>[4,5]</sup>、群体<sup>[6~10]</sup>和产量水平上进行的。群体水平的 LUE 主要由生物量收获法获得。该方法所需仪器简单, 但工作量大, 对植被有一定的破坏<sup>[11]</sup>, 不能反映短期 (小时或日尺度) LUE 变化。此外, 该方法未考虑根系生物量, 使所得 LUE 偏低<sup>[12]</sup>。近 20 年来, 随着微气象观测技术的发展, 对 LUE 的研究已由群体水平扩展到生态系统水平, 其时间分辨率大大提高。在各种微气象学方法中, 涡度相关技术 (Eddy covariance, EC) 以其观测精度高、不需扩散系数和大气稳定性校正、可在不扰动下垫面的情况下连续大面积直接测定能量、物质通量等诸多优点为大多数研究者所采用。基于涡度相关法的 LUE 研究已在森林<sup>[13]</sup>、草地<sup>[14]</sup>和农田<sup>[14,15]</sup>展开。

在作物生长季养分充足且没有水分胁迫的条件下, 用生物量收获法获得的 LUE 通常为常数<sup>[16]</sup>。然而, 一些研究发现 LUE 在作物生长季内并非固定不变, 而是随作物的生长发育

收稿日期: 2009-02-18; 修订日期: 2009-05-12。

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KJX2-YW-432-1); 国家自然科学基金重大项目 (30590381-04); 北京市重点学科项目 (XK100220655)。

第一作者简介: 同小娟 (1975-), 女, 陕西白水人, 博士, 讲师, 主要从事陆地生态系统水、碳通量和全球变化方面研究。E-mail: tongxjsxbs@sina.com

\*通讯作者简介: 李俊 (1969-), 博士, 副研究员, 主要从事农田生态系统碳氮循环与温室气体地气交换研究。E-mail: lijun@igsrr.ac.cn

不断变化<sup>[14,17,18]</sup>。LUE的变化主要决定于植物冠层的物理和生物过程。影响LUE变化的物理因子有饱和差(VPD)<sup>[19,20]</sup>、温度<sup>[20]</sup>、太阳辐射<sup>[14,20]</sup>、生物因子有叶面积指数(LAI)<sup>[18]</sup>、叶片氮含量<sup>[21]</sup>等。目前人们对LUE的研究取得了很大的进展,但有关LUE变化特征和生理控制机制的认识仍很有限<sup>[14]</sup>。另外,尽管人们对生态系统水平的光合作用进行了大量研究,但有关生态系统水平的光能利用效率研究还不多见。本研究基于连续3年的涡度相关观测,探讨了华北平原冬小麦/夏玉米轮作田LUE的季节和年际变化特征,分析了影响农田生态系统LUE的物理和生物因子,以期作为作物生长模型、碳循环模型以及总初级生产力的遥感估算提供可靠的参数。

## 2 研究地点概况和研究方法

### 2.1 研究地点概况

试验观测在中国科学院禹城综合实验站(36°57'N, 116°38'E, 海拔22.0 m)进行。该站属暖温带大陆季风气候。近40年年平均气温13.2℃, 7月平均气温26.9℃, 1月平均-2.4℃;年总辐射量为5242 MJ·m<sup>-2</sup>;年平均降水量585 mm。降水季节分配不均,冬春干旱少雨,6~8月降水量约占全年的70%。

禹城试验区土壤母质为黄河冲积物,土壤质地以粉砂土、轻壤土和中壤土为主。土壤有机质含量为1.21%, pH值为7.9~8.0。作物种植制度为冬小麦/夏玉米轮作一年两熟制。冬小麦通常在每年10月中旬播种,第二年6月上/中旬收获;夏玉米在6月中下旬播种,9月下旬/10月上旬收获。冬小麦、夏玉米品种分别为科禹13和鲁单981。有关冬小麦、夏玉米的田间管理措施参见文献[22]和[23]。在冬小麦和夏玉米生长旺季每周用叶面积仪测定叶面积,收获后测产考种。

### 2.2 通量与小气候梯度观测

涡度相关系统、小气候梯度观测系统位于大片均匀农田的中心。涡度相关系统主要由CSAT3型三维超声风速温度计和快速响应的LI-7500型红外CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O分析仪组成。小气候梯度观测系统包括2层AR-100型3杯风速计和2层HMP-45C型温湿度传感器。实验中温湿度传感器平均高度为2.2 m和3.4 m,超声风速温度计平均高度为2.8 m。观测期间,风浪区的长度在200 m以上,较好地满足了微气象梯度观测的要求。光合有效辐射由Li-190SB型点状光量子表测定。此外,测定的项目还包括总辐射、净辐射、降水、土壤温度、土壤水分等。上述仪器均与CR5000型数据采集器相连,昼夜连续自动采集,每30 min输出一组平均值。

### 2.3 通量数据处理

对涡度相关测定的10 Hz原始数据进行平均,经三维坐标旋转和WPL校正<sup>[24]</sup>得到水、热和CO<sub>2</sub>的30 min平均通量。对雨天或清晨有露水时采集的通量数据及超出正常范围(±3)的异常数据予以剔除。此外,当夜间摩擦风速小于临界值时,删除相应的通量数据。本研究中,不同季节采用了不同的临界摩擦风速:3~5月为0.15 m·s<sup>-1</sup>,6~9月为0.18 m·s<sup>-1</sup>,10月至次年2月为0.12 m·s<sup>-1</sup>。对上述被去除的数据和由于仪器故障、停电等原因缺失的数据进行插补,具体插补方法见参考文献[22]。

### 2.4 光能利用率计算

本研究中,生态系统水平的LUE可由下式计算:

$$LUE = \frac{GPP}{PAR} \quad (1)$$

其中,  $GPP$  为总初级生产力 ( $gC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ),  $PAR$  为光合有效辐射 ( $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ )。由上式获得的  $LUE$  不仅能反映单个植物的生理生化特征, 而且还能反映生态系统的特征如植物种群密度、地上生物量以及叶面积指数<sup>[25]</sup>。公式 (1) 中的  $GPP$  可由下式获得:

$$GPP = R_{ec} - NEE \tag{2}$$

其中,  $NEE$  为生态系统净碳交换 ( $gC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ),  $R_{ec}$  为生态系统呼吸 ( $gC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ )。在农田,  $NEE$  可由涡度相关法直接获得。 $NEE$  为正表示农田向大气排放  $CO_2$ , 反之表示农田吸收大气  $CO_2$ 。 $R_{ec}$  由考虑  $LA$  后改进的  $Q_{10}$  模型得出<sup>[23]</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 LUE的季节和年际变化

在主要生长季 (3~6月初), 麦田  $LUE$  具有明显的季节变化 (图 1g~i)。冬小麦返青期气温较低 (图 1a~c), 作物冠层光合能力较弱,  $LUE$  比较低。从小麦起身期开始, 随着温度升高和  $LA$  增加 (图 1a~f),  $LUE$  不断增加。在孕穗—抽穗期 (4月中下旬), 麦田日平均  $LUE$  达到最大, 2003~2005年分别为 1.8、2.4和 2.0  $gC \cdot MJ^{-1}$ 。在籽粒灌浆期和成熟期, 由于小麦叶片的衰老和死亡, 植物冠层光合能力下降, 于是导致  $LUE$  降低。作物生长后期呼吸增加造成生物量生产的降低<sup>[26]</sup>、籽粒充实期较高的温度及较大的饱和差 ( $VPD$ ) 也是导致  $LUE$  降低的重要原因。与 2003、2005年相比, 2004年  $LUE$  在开花后下降比较明显。这一方面是由于 2004年小麦灌浆期土壤水分含量较低 (图 1b), 水分胁迫造成了小麦冠层

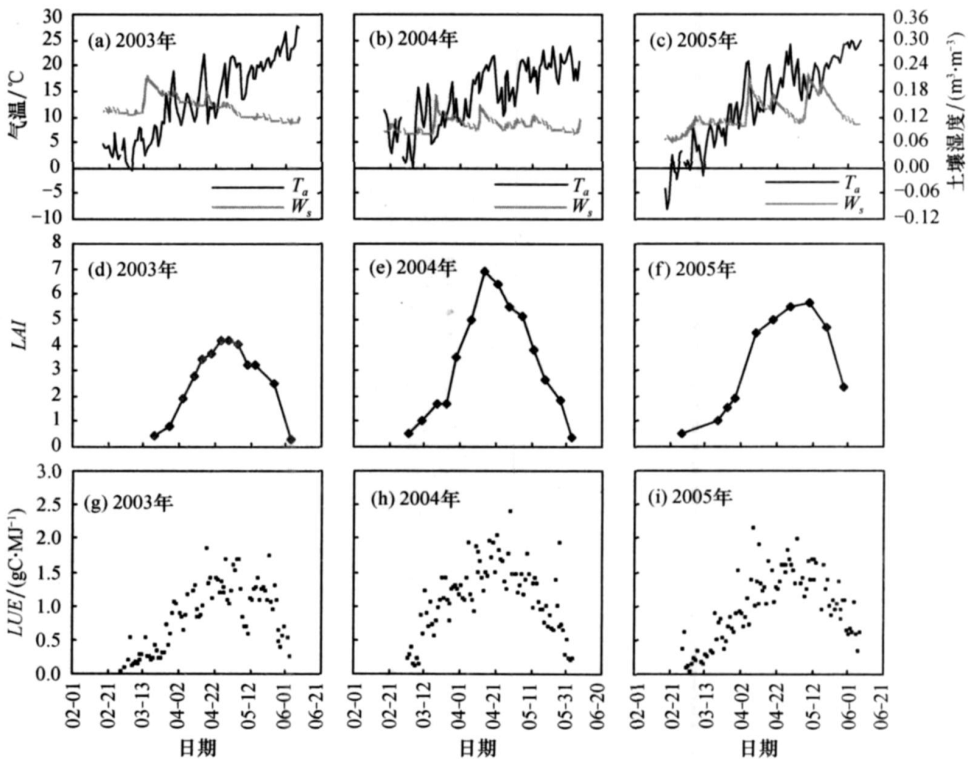


图 1 冬小麦田气温 ( $T_a$ )、土壤湿度 ( $W_s$ )、 $LAI$  和  $LUE$  的季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of air temperature, soil moisture,  $LAI$  and  $LUE$  in a winter wheat field

光合能力快速下降。另一方面,2004年 LA 达到最大后下降比较快(图 1e),造成小麦冠层光合作用急剧下降。

与麦田类似,玉米田的 LUE 也随玉米的生长发育不断变化(图 2g~i)。苗期玉米 LUE 较小。七叶期后玉米 LUE 迅速增加,孕穗开花期(8月初)达到最大,其最大日平均值 2003~2005 年分别为 4.2、5.0 和 4.0  $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。开花期后玉米 LUE 逐渐下降。籽粒灌浆后期到成熟期 LUE 下降比较明显。在玉米生长盛期 LAI 一直较高(图 2d~f),植物冠层光合持续时间较长,使得 LUE 长时间维持在相对较高的水平。在玉米生长后期,尽管 LAI 仍较大,但由于温度的降低(图 2a~c),造成植物冠层光合作用能力下降,于是引起 LUE 降低。另外,玉米生长后期叶片衰老也是其 LUE 降低的一个原因。

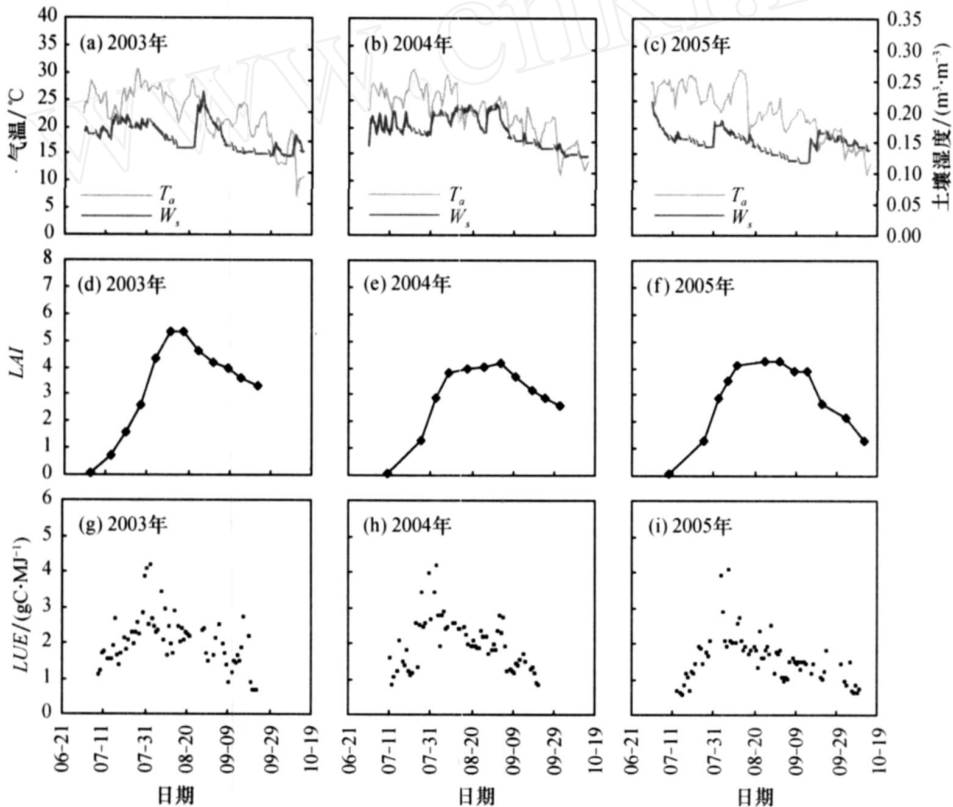


图 2 夏玉米田气温 ( $T_a$ )、土壤湿度 ( $W_s$ )、LAI 和 LUE 的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of air temperature, soil moisture, LAI and LUE in a summer maize field

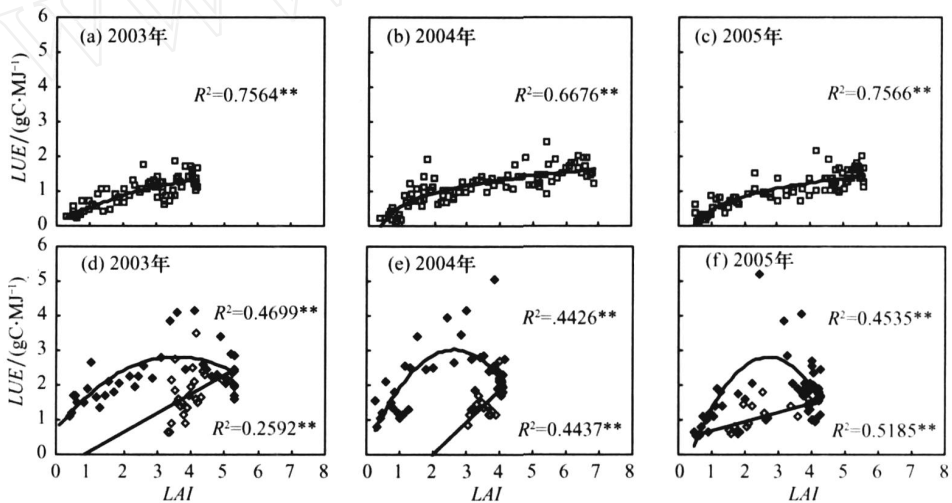
本实验中,主要生长季的麦田平均 LUE 在 2003 和 2005 年较小,分别为 0.8、1.0  $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ;2004 年较大,为 1.2  $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。这主要与 2004 年小麦 LAI 较大、返青—拔节期温度较高有关(图 1b、e)。夏玉米生长季内,2003~2005 年 LUE 平均值分别为 2.0、1.9、2.0  $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ,年际间差别不大。玉米田的 LUE 比小麦田的 LUE 大近 1 倍。与小麦 ( $C_3$  作物)相比,玉米 ( $C_4$  作物)的碳同化能力强,其光饱和点和饱和光强下的光合速率较高,因而光能利用效率也较高。

需要指出的是,本实验中冬小麦、夏玉米田的 LUE 在生长季内不是一个固定值,而是随作物的生长发育不断变化的。这与 Lecoecur 和 Ney<sup>[27]</sup>对豌豆、Rinaldi 和 Vonella<sup>[28]</sup>对甜菜的研究结论类似。本实验测定的玉米田季节平均 LUE 与 Tumer 等<sup>[14]</sup>在玉米生长旺盛季所得

结果接近。玉米田的最大日平均 LUE ( $4 \sim 5 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ) 高于 Suyker 等<sup>[15]</sup> ( $2.4 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ )、Loomis 和 Amthor<sup>[29]</sup> ( $3.3 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ )、Lindquist 等<sup>[9]</sup> ( $2.5 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ) 在玉米田所得的结果。这可能与栽培管理措施、气候环境条件、作物品种不同有关。

### 3.2 LAI 对 LUE 的影响

实验结果表明:在主要生长季,冬小麦田 LUE 均随 LAI 增加呈对数增长 (图 3a~c), 并达 0.01 显著水平。LAI 小于 2 时, LUE 随 LAI 升高迅速增加。LAI 超过 2 后, LUE 随 LAI 变化的幅度变缓。其原因在于: LAI 较大时, 对应的太阳辐射比较强, 大部分小麦叶片达到光饱和 (见 3.3 节); LAI 较大时, 小麦冠层结构比较密集, 叶片之间相互遮阴, 于是降低了冠层下部叶片的光合速率。由图 3a~c 可以看出, 小麦冠层 LUE 变化的 67%~76% 可由 LAI 得到解释。本研究所得冬小麦田 LUE 随 LAI 的变化趋势与 Luo 等<sup>[30]</sup> 对向日葵、Choudhury<sup>[31]</sup> 对小麦、Peil 等<sup>[32]</sup> 对黄瓜、Francescangeli 等<sup>[18]</sup> 对菜花的研究结果类似。



注:◆表示玉米营养生长阶段,◇表示玉米生殖生长阶段。\* \*:  $P < 0.01$ , 下同。

图 3 冬小麦田 (a~c) 和夏玉米田 (d~f) LUE 与 LAI 的关系

Fig. 3 Relationship between LUE and LAI in the winter wheat (a - c) and summer maize (d - f) fields

与麦田不同的是,玉米田 LUE 随 LAI 的变化规律在营养生长和生殖生长阶段有所差别。在玉米营养生长阶段, LUE 随 LAI 增加先增后降, 达 0.01 显著水平。LUE 的拐点出现在 LAI 为 2~3 (2004 和 2005 年) 或 3~4 (2003 年) 时。在玉米生殖生长期, LUE 则随 LAI 减少线性降低, 达 0.01 显著水平。夏玉米营养生长阶段叶片光合能力较强; 进入生殖生长阶段, 随着叶片衰老, 光合能力下降, 相同 LAI 下玉米营养生长阶段的 LUE 高于生殖生长阶段 (图 3d~f)。与本研究结果不同的是, Norman 和 Arkebauer<sup>[33]</sup> 发现玉米 LUE 随 LAI 的增加而降低, 他们认为这主要是 LAI 对 LUE 的影响小于直接辐射的影响造成的。

### 3.3 辐射对 LUE 的影响

植物冠层光合作用主要受冠层吸收的太阳辐射尤其是光合有效辐射 (PAR) 控制<sup>[34]</sup>。本实验结果表明: 当 LAI > 4 时, 冬小麦和夏玉米田的 LUE 均随 PAR 增加线性降低 (图 4), 达 0.01 显著水平。本研究结果与 Kooman 等<sup>[35]</sup> 在土豆田、Tumer 等<sup>[14]</sup> 在玉米田所得结果类似。这可能是由于: 太阳辐射比较大时, 太阳光大多以平行光的形式到达叶片<sup>[36]</sup>, 这使

得到达冠层下部的太阳光比较少。当太阳辐射比较小时,散射辐射在太阳辐射中所占比例增加。与直接辐射相比,散射辐射能有效地穿过叶片,这样会有更多的太阳辐射穿过冠层上部达到下部,叶片之间光的分布更加平衡<sup>[37]</sup>,于是增加了作物冠层下部遮阴叶片的同化速率<sup>[38]</sup>;在辐射强度较大时,大部分叶片会出现光饱和;辐射低时,蓝光/红光之比增加,蓝/红光之比的增加使单位叶面积光合作用速率增强<sup>[39]</sup>,主要是蓝光刺激了光化学反应<sup>[37]</sup>和气孔的张开<sup>[40]</sup>。

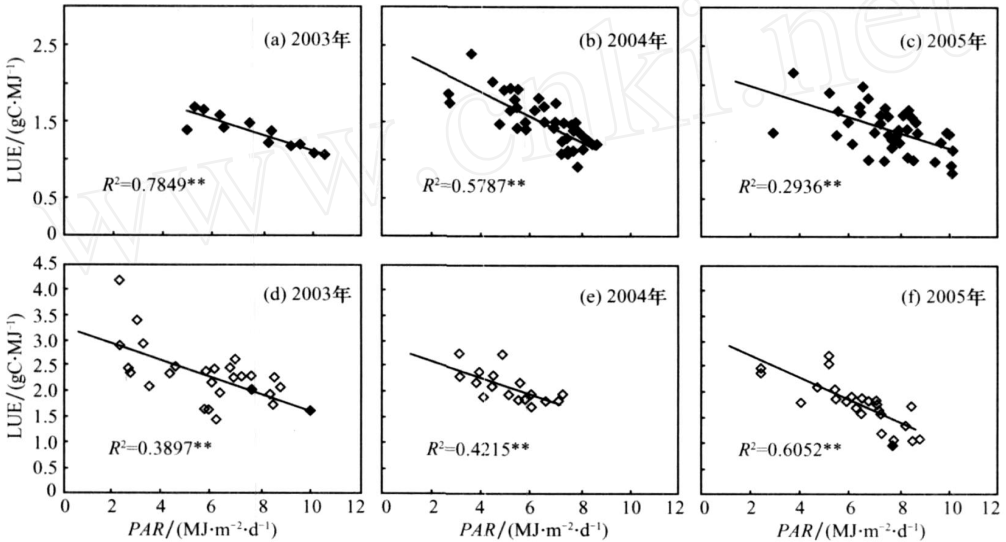


图 4 冬小麦 (a ~ c)和夏玉米 (d ~ f)生长盛期 (LAI>4)LUE与 PAR的关系

Fig. 4 Relationship between LUE and PAR when LAI was large than 4 in winter wheat (a - c) and summer maize (d - f) fields

### 3.4 VPD对LUE的影响

饱和差 (VPD)通过影响叶片伸展、叶片气孔导度和光合速率来影响作物的生长<sup>[8]</sup>。本实验中,夏玉米田的LUE随VPD增加线性降低(图5),达0.01显著水平。随着VPD增加,玉米叶片的气孔阻力增加、供给叶绿体的CO<sub>2</sub>浓度降低,最终导致叶片对CO<sub>2</sub>的吸收减少<sup>[41]</sup>。本研究结果与Stöckle和Kiniry<sup>[42]</sup>对高粱和玉米、Kemanian等<sup>[43]</sup>对大麦、Rouphael和Colla<sup>[20]</sup>对南瓜的研究结果类似。但也有研究表明,雨养蓖麻的LUE随VPD的增加而增

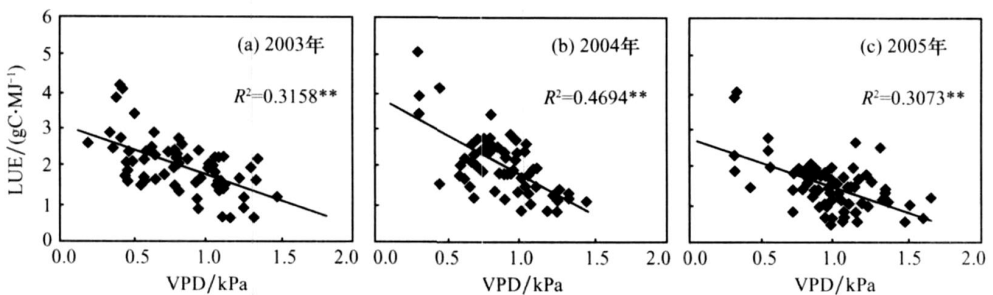


图 5 夏玉米田 LUE与 VPD的关系

Fig. 5 Relationship between LUE and VPD in a summer maize field

加<sup>[8]</sup>,这可能与实验所在地的环境条件不同有关。本实验中,冬小麦田的 LUE 与 VPD 间的关系不明显(图未列),其原因有待于进一步研究。

#### 4 结论

综上所述,得出以下结论:

(1) 华北平原农田生态系统的 LUE 的季节变化明显。冬小麦田和夏玉米田最大日平均 LUE 分别在出现在 4 月中下旬和 8 月初。2003~2005 年的季节平均 LUE 冬小麦田分别为 0.8、1.2、1.0  $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ;夏玉米田分别为 2.0、1.9、2.0  $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。

(2) 冬小麦田 LUE 随 LAI 增加呈对数增长。在玉米田,营养生长阶段的 LUE 随 LAI 增加先增后降,最大 LUE 一般出现在 LAI 达到最大之前;生殖生长阶段的 LUE 随 LAI 下降线性降低。相同 LAI 下,玉米生殖生长阶段的 LUE 明显低于营养生长阶段。LAI 较大时(LAI>4)冬小麦、夏玉米田 LUE 均随 PAR 的增加线性降低。夏玉米田 LUE 随 VPD 增加线性降低,而冬小麦田 LUE 与 VPD 之间的关系不明显。

#### 参考文献 (References):

- [1] Kiniry J R, Tischler C R, van Esbroeck G A. Radiation use and leaf  $\text{CO}_2$  exchange for diverse  $\text{C}_4$  grasses[J]. *Bioenergy*, 1999, 17: 95 - 112.
- [2] Running SW, Nemani R R, Heinsch F A, et al. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production[J]. *BioScience*, 2004, 54: 547 - 560.
- [3] Ahl D E, Gower S T, Mackay D S, et al. Heterogeneity of light use efficiency in a northern Wisconsin forest: Implications for modeling net primary production with remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93: 168 - 178.
- [4] 刘允芬,张宪洲,周允华,等. 西藏高原田间冬小麦的表现光合量子效率[J]. 生态学报, 2000, 20(1): 35 - 38. [LU Yun-fen, ZHANG Xian-zhou, ZHOU Yun-hua, et al. Apparent quantum yield of photosynthesis of winter wheat in the field in Tibetan Plateau *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 35 - 38.]
- [5] 刘允芬,于贵瑞,王利军,等. 红壤丘陵区双季稻表现光合量子效率的研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(4): 49 - 52. [LU Yun-fen, YU Gui-rui, WANG Li-jun, et al. Apparent quantum yield of photosynthesis of double cropping rice in red earth hilly region of China *Chinese Journal of EcoAgriculture*, 2004, 12(4): 49 - 52.]
- [6] Kiniry J R, Jones C A, O'Toole J C, et al. Radiation use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species[J]. *Field Crops Research*, 1989, 20: 51 - 64.
- [7] Muchow R C, Robertson M J, Pengelly B C. Radiation-use efficiency of soybean, mungbean and cowpea under different environmental conditions[J]. *Field Crops Research*, 1993, 32: 1 - 16.
- [8] Kumar P V, Srivastava N N, Victor U S, et al. Radiation and water use efficiencies of rainfed castor beans (*Ricinus communis* L.) in relation to different weather parameters[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 81: 241 - 253.
- [9] Lindquist J L, Arkebauer T J, Walters D T, et al. Maize radiation use efficiency under optimal conditions[J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97: 72 - 78.
- [10] 房全孝,陈雨海,李全起,等. 土壤水分对冬小麦生长后期光能利用及水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(6): 861 - 866. [FANG Quan-xiao, CHEN Yu-hai, LI Quan-qi, et al. Effects of soil moisture on radiation utilization during late growth stages and water use efficiency of winter wheat *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(6): 861 - 866.]
- [11] 赵育民,牛树奎,王军邦,等. 植被光能利用率研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1471 - 1477. [ZHAO Yu-min, NIU Shu-kui, WANG Jun-bang, et al. Light use efficiency of vegetation: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(9): 1471 - 1477.]
- [12] Muurinen S, Peltonen-Sainio P. Radiation-use efficiency of modern and old spring cereal cultivars and its response to nitrogen in northern growing conditions[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96: 363 - 373.
- [13] Sims D A, Rahman A F, Cordova V D, et al. Midday values of gross  $\text{CO}_2$  flux and light use efficiency during satellite overpass can be used to directly estimate eight-day mean flux[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131: 1 - 12.

- [14] Tumer D P, Urbanski S, Bremer D, *et al* A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 383 - 395.
- [15] Suyker A E, Vema S B, Burba G G, *et al* Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated maize and irrigated soybean during a growing season[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131: 180 - 190.
- [16] Sinclair T R, Muchow R C. Radiation use efficiency[J]. *Advances in Agronomy*, 1999, 65: 215 - 265.
- [17] Campbell C S, Heilman J L, McInnes K J, *et al* Seasonal variation in radiation use efficiency of irrigated rice[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 110: 45 - 54.
- [18] Francescangeli N, Sangiacomo M A, Mart íH. Effects of plant density in broccoli on yield and radiation use efficiency [J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, 110: 135 - 143.
- [19] Kiniry J R, Landivar J A, Witt M, *et al* Radiation-use efficiency response to vapor pressure deficit for maize and sorghum [J]. *Field Crops Research*, 1998, 56: 265 - 270.
- [20] Rouphael Y, Colla G. Radiation and water use efficiencies of greenhouse zucchini squash in relation to different climate parameters[J]. *European Journal of Agronomy*, 2005, 23: 183 - 194.
- [21] Sinclair T R, Horie T. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation efficiency: A review [J]. *Crop Science*, 1989, 29: 90 - 98.
- [22] 李俊, 于强, 孙晓敏, 等. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制 [J]. 中国科学, 地球科学 (D辑), 2006, 36(增刊): 210 ~ 223. [LI Jun, YU Qiang, SUN Xiao-min, *et al* Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain. *Science in China, Series D*, 2006, 36 (S1): 210 - 223.]
- [23] Tong X J, Li J, Zhang X S, *et al* The mechanism and bio-environmental controls on ecosystem respiration in a cropland in North China Plains[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2007, 5: 1347 - 1358.
- [24] Webb E K, Peaman G, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106: 85 - 100.
- [25] Gilmanov T G, Soussana J F, Aires L, *et al* Partitioning European grassland net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 121: 93 - 120.
- [26] Gallagher J N, Biscoe P V. Radiation absorption, growth and yield of cereals[J]. *Journal of Agricultural Science Cambridge*, 1978, 91: 47 - 60.
- [27] Lecoer J, Ney B. Change with time in potential radiation-use efficiency in field pea[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 19: 91 - 105.
- [28] Rinaldi M, Vonella A V. The response of autumn and spring sown sugar beet (*Beta Vulgaris* L.) to irrigation in southern Italy: Water and radiation use efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2006, 95: 103 - 114.
- [29] Loomis R S, Amthor J S. Yield potential, plant assimilatory capacity, and metabolic efficiencies[J]. *Crop Science*, 1999, 39: 1584 - 1596.
- [30] Luo Y Q, Hui D F, Cheng W X, *et al* Canopy quantum yield in a mesocosm study[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 100: 35 - 48.
- [31] Choudhury B J. A sensitivity analysis of the radiation use efficiency for gross photosynthesis and net carbon accumulation by wheat[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101: 217 - 234.
- [32] Peil R M, González Real M M, López G ávez J. Light interception of a greenhouse cucumber crop: measurements and modeling results[J]. *Acta Hort*, 2002, 588: 81 - 87.
- [33] Norman J M, Arkebauer T J. Predicting canopy photosynthesis and light use efficiency from leaf characteristics[A]. In: Boote K J, Loomis R S. Modelling Crop Photosynthesis—From Biochemistry to Canopy[C]. Madison, USA: American Society of Agronomy, 1991. 75 - 94.
- [34] Larcher W. Physiological Plant Ecology[M]. Springer, Berlin, 2003.
- [35] Kooman P L, Fahem M, Tegera P, *et al* Effects of climate on different potato genotypes I. Radiation interception, total and tuber dry matter production[J]. *European Journal of Agronomy*, 1996, 5: 193 - 205.
- [36] Farquhar G and Roderick M. Pinatubo, diffuse light and the carbon cycle[J]. *Science*, 2003, 299: 1997 - 1998.
- [37] Urban O, Janouš D, Acosta M, *et al* Ecophysiological controls over the net ecosystem exchange of mountain spruce



- stand Comparison of the response in direct vs diffuse solar radiation[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 157 - 168.
- [38] Gu L H, Baldocchi D D, Wofsy S C, *et al* Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: Enhanced photosynthesis[J]. *Science*, 2003, 299: 2035 - 2038.
- [39] Matsuda R, Ohashi-Kaneko K, Fujiwara K, *et al* Photosynthetic characteristics of rice leaves grown under red light with or without supplemental blue light[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2004, 45: 1870 - 1874.
- [40] Aphab P J, Jarvis P G Separation of direct and indirect responses of stomata to light: Results from a leaf inversion experiment at constant intercellular CO<sub>2</sub> molar fraction[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44: 791 - 800.
- [41] Fan S M, Goulden M L, Munger J W, *et al* Environmental controls on the photosynthesis and respiration of a boreal lichen woodland: A growing season of whole-ecosystem exchange measurements by eddy correlation[J]. *Oecologia*, 1995, 102: 443 - 452.
- [42] Stöckle C O, Kiriyy J R. Variability in crop radiation use efficiency associated with vapor-pressure deficit[J]. *Field Crops Research*, 1990, 25: 171 - 181.
- [43] Kemanian A R, Stöckle C O, Huggins D R. Variability of barley radiation-use efficiency[J]. *Crop Science*, 2004, 44: 1662 - 1672.

## Analysis of Bio-physical Controls on Light Use Efficiency in a Farmland Ecosystem

TONG Xiao-juan<sup>1,3</sup>, LI Jun<sup>2</sup>, YU Qiang<sup>2</sup>

(1. The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Research Institute of Forestry, CAF, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Light use efficiency (LUE) is one of the important parameters in estimating crop productivity. LUE is also used in estimating net primary production and studying global carbon cycle based on remote sensing. The eddy covariance method was used to study the variable characteristics and effect factors of ecosystem LUE over winter wheat and summer maize fields in the North China Plain from 2003 to 2005. The results showed that LUE had obvious seasonal variations in winter wheat and summer maize fields. The maximal mean daily LUE appeared in mid/late April in winter wheat field and in early August in summer maize field. In 2003, 2004 and 2005, the average seasonal values of LUE for winter wheat were 0.8, 1.2 and 1.0 gC · MJ<sup>-1</sup>, for summer maize 2.0, 1.9 and 2.0 gC · MJ<sup>-1</sup>, respectively. LUE for winter wheat field had remarkably logarithmic relationship with leaf area index (LAI). In summer maize field, LUE increased with an increase of LAI firstly and then decreased with increasing LAI during nutrient period. At reproductive stage, LUE in maize field reduced with a decrease of LAI. At the same LAI, LUE at nutrient stage was higher than that at reproductive stage in maize field. LUE for wheat and maize fields decreased linearly with the increase of photosynthetically active radiation (PAR) when LAI was more than 4. In maize field, LUE markedly reduced with the decrease of water vapor deficit (VPD). However, the relationship between LUE and VPD was not obvious in winter wheat field.

**Key words:** farmland ecosystem; light use efficiency; eddy covariance; North China Plain