

冬小麦冠层对入射光合有效辐射吸收比例的估算方法评价

李贺丽^{1,2}, 罗毅^{1*}, 薛晓萍³, 赵玉金³, 赵红³, 李峰³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 山东省气象局气候中心, 济南 250031)

摘要: 目前研究估算作物冠层对入射光合有效辐射的吸收比例 (f_{APAR}) 时多采用冠层光能截获效率 (f_{IPAR})、冠层叶面积指数 (LAI) 和 Beer-Lambert 法则、冠层光谱植被指数等信息。该文以冬小麦为例, 利用田间观测数据序列 (包括冠层 LAI 、冠层 f_{IPAR} 和冠层光谱特性等方面) 对各种 f_{APAR} 估算方法进行了较为全面的总结、分析、评价, 以明确各法的优势和不足, 为今后相关研究提供参考。结果表明, 冬小麦营养生长期内 f_{APAR} 与 f_{IPAR} 值较为接近, 而冬小麦生殖生长期内二者差异显著; 整个研究时段内, 利用 f_{IPAR} 估算的 f_{APAR} 结果较好; 根据叶面积指数和 Beer-Lambert 法则估算的 f_{APAR} 在抽穗至腊熟期间结果偏小, 原因在于该法不能体现穗部对光合有效辐射的有效吸收; 直接借用文献记载的 $f_{APAR} \sim NDVI$ (归一化差值植被指数) 函数关系估算的 f_{APAR} 在冬小麦营养生长阶段及生殖生长季末期均明显偏大。此外, 通过将 f_{APAR} 与 $NDVI$ 、比值植被指数 (RVI)、土壤调整植被指数 ($SAVI$)、修改型土壤调整植被指数 ($MSAVI$) 等常用植被指数进行相关性分析, 发现 f_{APAR} 与 $NDVI$ 的相关关系最强, 基于田间数据证实了采用 $NDVI$ 估算 f_{APAR} 的合理性。

关键词: 估算, 辐射, 作物, 评价, 冬小麦, 田间测量

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.035

中图分类号: TP79, S181

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-04-0201-06

李贺丽, 罗毅, 薛晓萍, 等. 冬小麦冠层对入射光合有效辐射吸收比例的估算方法评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 201-206.

Li Heli, Luo Yi, Xue Xiaoping, et al. Assessment of approaches for estimating fraction of photosynthetically active radiation absorbed by winter wheat canopy [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 201-206. (in Chinese with English abstract)

0 引言

光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 指太阳辐射中波长位于 380~710 nm 之间能为植物光合作用和生物量生产所利用的那部分电磁辐射。大气上界 PAR 占理论太阳辐射的比例通常取为 0.48^[1-3], 而到达冠层顶部的 PAR 要受到大气透明度的影响^[4]。根据中国科学院禹城综合试验站 (116.6°E, 36.8°N) 自动辐射气象站逐日观测资料, 植物冠层顶部 (距地面 1.5 m 高处) PAR 仅占太阳总辐射的 40%, 变化范围为 26%~53%。植物冠层截获的光合有效辐射量 (intercepted photosynthetically active radiation, $IPAR$) 为冠层顶部入射的 PAR 与冠层底部透射的 PAR 之差, 冠层吸收的光合有效辐射量 (absorbed photosynthetically active radiation, $APAR$) 一般认为等于 $IPAR$ 扣除冠层与土壤反射差额的剩余部分^[5]。不过估算作物 $APAR$ 时, 需要考虑作物凋落期内非光合器官对 PAR

吸收显著增加等因素^[6-8]。作物冠层对入射 PAR 的吸收比例 (f_{APAR}) 即指作物 $APAR$ 与冠层顶部入射 PAR 之比 (无量纲)。 f_{APAR} 是基于光能利用效率 (radiation use efficiency, RUE) 模型估算作物生物产量和籽粒产量的一个关键参量^[6,9], 因此, 精确合理地确定 f_{APAR} 非常重要^[10]。

目前相关研究采用的 f_{APAR} 估算方法多以经验关系为基础, 由于作物冠层 f_{APAR} 较难直接测得 (尤其在凋落期内), 少有研究对其估算结果实施精度评价^[3,9]。关于各种 f_{APAR} 估算方法的综合评价研究更是鲜见。本文以冬小麦为例, 在大量田间观测数据 (包括叶面积指数、冠层光能截获效率和冠层光谱特性等) 的基础上对当前普遍采用的 f_{APAR} 估算方法进行了比较全面的归纳总结, 以明确各法的优势和不足以及在实际运用中应注意的问题, 为今后相关研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 目前常用的 f_{APAR} 估算方法

当前普遍采用的 f_{APAR} 估算方法概括起来主要有以下 3 类:

(1) 根据作物冠层对 PAR 的截获效率估算 f_{APAR}

作物冠层对入射光合有效辐射的截获系数 (f_{IPAR}), 亦称截获效率, 是指作物 $IPAR$ 与作物冠层顶部入射 PAR 之比, 采用下式计算^[6,11]:

$$f_{IPAR} = \frac{PAR_{incident} - PAR_{transmitte d}}{PAR_{incident}} \quad (1)$$

收稿日期: 2010-05-11 修订日期: 2011-04-02

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KSCX2-EW-B-1); 国家自然科学基金项目 (90502005)。

作者简介: 李贺丽 (1982—), 女, 河南遂平县人, 博士生, 主要从事生态水文方面的研究。北京 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 100101。Email: lhl237666@126.com

※通信作者: 罗毅 (1966—), 男, 河南省罗山县人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事作物生长模型及水文模型研究。北京 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 100101。

Email: luoyi.cas@hotmail.com

式中, $PAR_{incident}$ 与 $PAR_{transmitted}$ 分别表示作物冠层顶部和底部的光合有效辐射量。Lobell 等^[6]在田间测量小麦冠层截获效率 f_{IPAR} 的基础上, 根据实测的 f_{IPAR} 数据估算了 f_{APAR} 。该研究假定当作物冠层全绿时, 冠层与土壤反射 PAR 的差额以及被非光合器官吸收的 PAR 占冠层 $IPAR$ 的 5%, 即 f_{APAR} 数值上等于 f_{IPAR} 的 95%; 当作物完全凋落即完熟时, 冠层与土壤反射 PAR 的差额以及被非光合器官吸收的 PAR 占冠层 $IPAR$ 的 100%, 即冠层光合器官不再吸收 PAR , f_{APAR} 数值上等于 0; 在作物凋落期间, f_{APAR} 占 f_{IPAR} 的比例采用线性内插法计算, 即呈线性减少趋势, 作物凋落期一般始于作物完熟前的 1 至 2 周。该法估算 f_{APAR} 需要实测的 f_{IPAR} 数据, 仅适用于田间尺度研究。不过通过将其它估算方法在田间尺度上与之对比分析, 可为区域尺度上 f_{APAR} 估算方法的优选及局地校正提供基础。

(2) 根据叶面积指数和 Beer-Lambert 法则估算 f_{APAR} Ruimy 等^[1]采用叶面积指数 (leaf area index, LAI) 和 Beer-Lambert 法则估算 f_{APAR} :

$$f_{APAR} = 0.95 [1 - \exp(-k \cdot LAI)] \quad (2)$$

式中, k 为消光系数, 一般取 0.5。该法将 f_{APAR} 与作物冠层 LAI 相联系, 适用于区域或田间尺度上 f_{APAR} 估算。

(3) 根据光谱植被指数估算 f_{APAR}

根据光谱植被指数估算 f_{APAR} 是目前大多数全球或区域相关研究常用的方法^[3,9,12-14], 其中采用最广泛的光谱植被指数是归一化差值植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI):

$$NDVI = (R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red}) \quad (3)$$

式中, R_{nir} , R_{red} 分别表示近红外和红光波段的反照率。当前文献中依据作物冠层 NDVI 估算 f_{APAR} 的表达式亦不止一种。Myneni 和 Williams^[10]提出了 f_{APAR} 与 NDVI 如下线性关系式:

$$f_{APAR} = 1.1638NDVI - 0.1426 \quad (4)$$

Bastiaanssen 和 Ali^[13]根据文献记载数据拟合了 f_{APAR} 与 NDVI 关系式:

$$f_{APAR} = 1.257NDVI - 0.161 \quad (5)$$

Goetz 等^[12]研究采用的 f_{APAR} 与 NDVI 线性关系如式 (6):

$$f_{APAR} = 1.67NDVI - 0.08 \quad (6)$$

Prince^[15]和 Hanan 等^[14]在研究中采用了 f_{APAR} 与 NDVI 最简单的线性关系:

$$f_{APAR} = NDVI \quad (7)$$

Verhoef^[16]提出的 SAIL (scattering by arbitrarily inclined leaves) 辐射传输模型中采用了 f_{APAR} 与 NDVI 的非线性关系:

$$f_{APAR} = -0.7547NDVI^2 + 1.8207NDVI - 0.1624 \quad (8)$$

1.2 试验概况

本研究在中国科学院禹城综合试验站 (116.6°E, 36.8°N) 2008—2009 年冬小麦生长季进行。该站位于山东省禹城市, 平均海拔约 20 m, 属暖温带半湿润季风气候区。土壤属潮土, 质地以粉砂和轻壤为主, 成土母质为黄河冲积物, pH 值 8.5 左右。土壤有机质质量分数为

0.6%~1.0%, 肥力中等。冬小麦于 2008-10-14 播种, 2009-06-09 收获, 关键物候的起始日期见表 1。种植密度为 500 株/m², 行距 0.2 m。整个冬小麦生育期内施氮肥 (N) 210 kg/hm², 磷肥 (P₂O₅) 100 kg/hm², 钾肥 (K₂O) 50 kg/hm², 水分供给充分。其他栽培管理措施与当地农户保持一致。

表 1 中国科学院禹城综合试验站
2008—2009 年冬小麦生长季物候表

Table 1 Phenological stages of winter wheat during 2008-2009 growth season at Yucheng Comprehensive Experimental Station

物候	起始日期
播种	2008-10-14
发芽	2008-10-25
返青	2009-03-07
拔节	2009-04-07
孕穗	2009-04-22
抽穗	2009-04-27
开花	2009-05-04
腊熟	2009-06-03
成熟	2009-06-09

1.3 田间观测与数据处理

自冬小麦返青始至收获期间, 对冬小麦冠层叶面积指数 LAI、冠层光截获和光谱特性进行了连续观测。观测时间间隔计划为 1 周, 受天气条件和灌溉事件等因素的影响, 实际测定时对间隔时间进行了适当调整, 一般不超过 10 日。测量时, 将整个试验田平均分为 3 个子区。测量 LAI 时, 每个子区选取 0.2 m 行长冬小麦为测量样本。采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-3000C 面积仪测定样本的总绿叶面积, 然后根据取样面积计算 LAI。

冬小麦冠层光截获观测采用英国 Delta 公司生产的 SUNSCAN 冠层分析系统 (SUNSCAN Canopy Analysis System)。SUNSCAN 冠层分析系统由 SUNSCAN 探测器、掌上电脑、三脚架、BFS (beam fraction sensor) 传感器 4 部分构成。BFS 传感器用来在 SUNSCAN 探测器测定作物冠层底部透射 PAR 量的同时测定冠层顶部入射的 PAR 量。参考史泽艳等^[17]关于冠层 PAR 测量方法的比较研究, 本研究在测定冬小麦冠层 PAR 截获时采用垂直于麦行的测量方法。测量选取晴好天气进行, 每个子区随机选取 3 个测点, 于当日正午 30 min 之内完成。根据测得的冬小麦冠层顶部和底部的 PAR 数据, 利用式 (1) 计算冠层当日对入射 PAR 的截获效率 f_{IPAR} 。

冬小麦冠层光谱特性观测采用美国 ASD (analytical spectral devices) 公司生产的 ASD Field Spec Handheld 野外光谱仪。ASD Field Spec Handheld 野外光谱仪波长测定范围为 325~1 075 nm, 包含了被广泛用于植被研究的可见光和近红外波段。该仪器光谱分辨率 3.5 nm, 采样间隔为 1.5 nm, 视场角为 25°。光谱测定选取晴好天气, 于当日正午 60 min 之内完成, 观测人员均系黑色衣帽着装。

在每个子区内随机选取 3 个测点，每个测点按照最优时间间隔（16 s）读取 5 条光谱曲线，取其均值，以减小随机误差的影响。此外，为保证数据质量，对每个子区实施光谱观测前，均先执行暗电流采集、优化和已知反照率特性的参考白板的光谱采集等操作，用于冠层光谱反照率的校正和计算。冠层光谱反照率数据运用 ASD 公司专门为 Field Spec Handheld 光谱仪配备的数据后处理软件 ViewSpecPro 进行输出。

鉴于中分辨率成像光谱仪（moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS）近红外（841~876 nm）和红光（620~670 nm）波段较窄，使得近红外波段的水汽吸收区被剔除，红波段对叶绿素也更敏感^[18]，因此本次研究选用与 MODIS 近红外波段和红色波段相当的波谱范围来计算植被指数。具体计算时，参考已有研究^[19-23]对光谱仪测量数据的处理方法，取 841~876 nm 和 620~670 nm 范围内光谱反照率的平均值作为本研究计算冠层植被指数所需的近红外和红外波段的反照率值。

2 结果与分析

2.1 冬小麦返青至收获期间 LAI、 f_{IPAR} 、NDVI 逐日变化分析

研究采用三次样条函数插值方法对测得的 LAI、 f_{IPAR} 、NDVI 数据序列进行插值处理，得到冬小麦 LAI、 f_{IPAR} 、NDVI 自返青至收获期间的逐日变化曲线（图 1）。在冬小麦返青至孕穗期间，LAI、 f_{IPAR} 、NDVI 迅速增加，并在孕穗期达到最大值。孕穗结束后，LAI、 f_{IPAR} 、NDVI 开始降低。收获时，LAI 接近于 0，NDVI 降至 0.3 左右，减小幅度均较大。作物成熟时，尽管已无吸收光能的绿色器官存在（即 f_{APAR} 接近于 0），但不发生光合作用的穗、茎、叶仍保持着较高的光截获效率， f_{IPAR} 降低趋势相对不明显。因此，作物冠层截获的光合有效辐射 $IPAR$ 与冠层吸收的光合有效辐射 $APAR$ 差异较大，二者在概念上及数

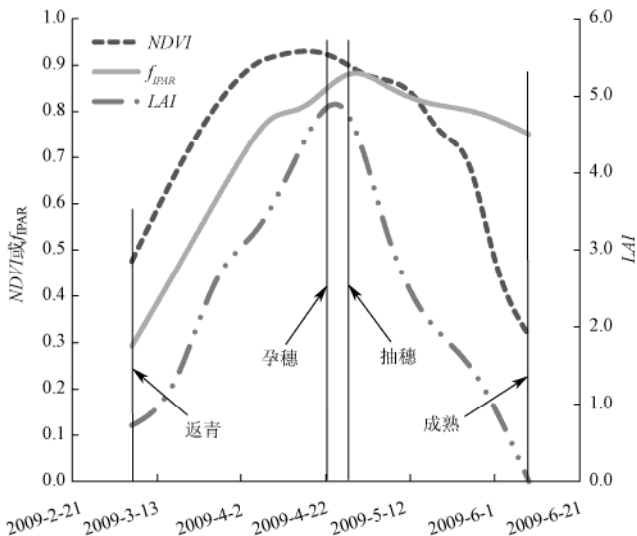
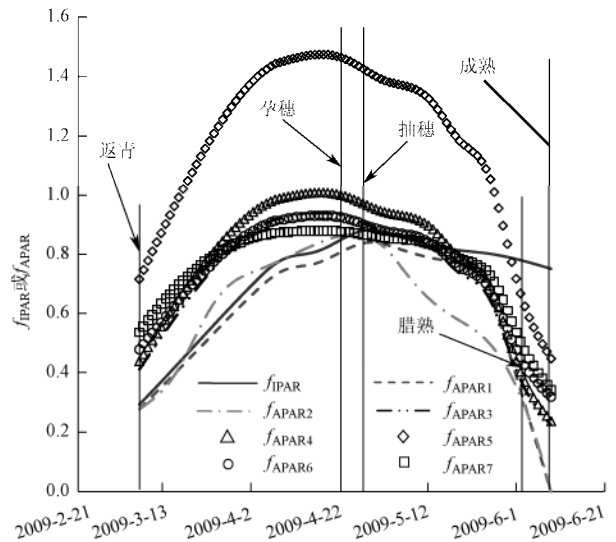


图 1 冬小麦返青至收获期间叶面积指数 LAI、冠层光能截获效率 f_{IPAR} 、归一化差值植被指数 NDVI 的变化过程
Fig.1 Daily time-profiles of the LAI, f_{IPAR} and the NDVI of winter wheat during the period from re-greening to maturity

值上均不能混淆。然而，当前研究将 f_{IPAR} 等同于 f_{APAR} 的现象普遍存在^[2]。鉴于此，需要特别提及的是，光能利用效率 RUE 作为一个描述光能与作物生物量转化关系的重要指标，在参比不同文献中 RUE 数值的大小时，清楚其计算时采用的光能辐射项是太阳辐射或是 PAR ，是 $IPAR$ 或是 $APAR$ 非常重要^[11]。

2.2 f_{APAR} 估算方法比较分析

本研究根据田间实测的 LAI、 f_{IPAR} 、NDVI 数据采用前述多种方法对 f_{APAR} 进行了估算。参考 Lobell 等^[6]研究，采用 f_{IPAR} 估算的 f_{APAR} 记为 f_{APAR1} ，其中凋落期起始时间定在冬小麦完熟前 2 周，这亦与田间观测一致；采用 LAI 根据式（2）估算的 f_{APAR} 记为 f_{APAR2} ；采用 NDVI 数据根据式（4）~（8）估算的 f_{APAR} 相应记为 f_{APAR3} ~ f_{APAR7} 。由于 f_{APAR} 数值难于直接测得，本文评价不同方法的 f_{APAR} 估算结果时遵循以下 2 个原则：① 根据定义，作物冠层吸收的光合有效辐射等于冠层截获光合有效辐射减去冠层和土壤反射差额以及被非光合器官吸收的部分^[6-7]，因此， f_{APAR} 原则上应小于 f_{IPAR} 。鉴于此，首先以实测 f_{IPAR} 数据系列为基准，若 f_{APAR} 估算结果小于 f_{IPAR} ，则符合客观事实；若 f_{APAR} 估算结果大于或远大于 f_{IPAR} ，则认为误差较大；② 在上述原则的基础上，再以 f_{APAR} 估算方法中一致且相近的结果为基准。即在满足前述原则的条件下，若多数方法的估算结果增减趋势一致，那么趋势异常的估算结果误差较大；若多数方法的估算结果数值接近，那么与之偏离的估算结果误差较大。



注： f_{APAR1} 为根据 Lobell 等(2003)^[6]采用 f_{IPAR} 估算的 f_{APAR} ， f_{APAR2} 为根据 LAI 和 Beer-Lambert 法则估算的 f_{APAR} ，采用冠层 NDVI 根据式(4)~(8)估算的 f_{APAR} 相应记为 f_{APAR3} ~ f_{APAR7} 。

图 2 作物冠层光能截获效率 f_{IPAR} 及采用不同方法估算的冠层光能吸收效率 f_{APAR} 结果分析

Fig.2 Measurements of the f_{IPAR} and the estimated f_{APAR} values by different methods from regreening to maturity

不同方法估算的 f_{APAR} 值以及实测的 f_{IPAR} 系列如图 2 所示。在冬小麦返青至孕穗阶段，不同方法估算的 f_{APAR} 增长趋势一致。数值上，仅 f_{APAR1} 稍小于 f_{IPAR} ，符合客观

规律： f_{APAR2} 稍大于 f_{IPAR} ；基于 $NDVI$ 数据估算的 f_{APAR} 除 f_{APAR5} 偏离较远外，其余比较接近，但均远远大于 f_{IPAR} ，误差较大。在冬小麦抽穗至成熟阶段，各法估算的 f_{APAR} 均呈减少趋势，较为一致。数值上，除 f_{APAR5} 外，其他方法估算的 f_{APAR} 均小于 f_{IPAR} ，较为合理；但 f_{APAR2} 减小速度较快，数值偏低，其余各法估算的 f_{APAR} 值比较接近。冬小麦完熟时，已无吸收光能的绿色器官存在，作物干物质积累过程亦基本停止， f_{APAR} 接近于 0，而根据 $NDVI$ 数据估算的 f_{APAR} 普遍偏大。可见，整个研究时段内 f_{APAR1} 的估算结果较好。

在此基础上，本文给出了冬小麦不同生长期各法 f_{APAR} 估算结果的均方根偏差 ($RMSD$)。其中， f_{APAR} 值采用 f_{APAR1} 数据系列，如表 2。根据 LAI 和 Beer-Lambert 法则估算的 f_{APAR2} 在返青至抽穗及腊熟至成熟期间精度较高， $RMSD$ 分别为 0.06 和 0.01；在冬小麦抽穗后至腊熟期间，穗部吸收光有效辐射并进行光合作用^[24]，绿叶开始变黄并逐渐凋落。但因该法仅与 LAI 相联系，不能考虑穗部对光有效辐射的有效吸收，致使抽穗至腊熟期间 f_{APAR} 估算结果偏小 (图 2)， $RMSD$ 为 0.14。根据文献记载的 f_{APAR} - $NDVI$ 函数关系估算的 f_{APAR} 值在冬小麦返青至抽穗阶段及生育末期明显偏大 (图 2)， $RMSD$ 为 0.15~0.65；其它时段估算精度较高 ($RMSD=0.04\sim0.11$)，但 f_{APAR5} 除外。因此， f_{APAR} 估算方法的选取可结合冬小麦生长阶段信息来确定。此外，鉴于 f_{APAR} - $NDVI$ 之间关系受冠层、土壤、大气等因素的影响^[10]，具体应用中，应根据当地实测数据资料对文献记载的 f_{APAR} - $NDVI$ 函数关系进行先前校正。

表 2 冬小麦不同生长期各法 f_{APAR} 估算结果的均方根偏差 ($RMSD$) 分析

Table 2 Root-mean-square-deviations of the estimated f_{APAR} of winter wheat by different methods during different growth periods

f_{APAR} 估算方法	返青—抽穗	抽穗—腊熟	腊熟—成熟
$f_{APAR2} = 0.95(1 - \exp(-k \cdot LAI))$	0.06	0.14	0.01
$f_{APAR3} = 1.1638NDVI - 0.1426$	0.18	0.04	0.15
$f_{APAR4} = 1.257NDVI - 0.161$	0.24	0.10	0.16
$f_{APAR5} = 1.67NDVI - 0.08$	0.65	0.47	0.38
$f_{APAR6} = NDVI$	0.20	0.04	0.23
$f_{APAR7} = -0.7547NDVI^2 + 1.8207NDVI - 0.1624$	0.20	0.11	0.26

注： f_{APAR} 值采用 f_{APAR1} 数据系列。

2.3 f_{APAR} 与常用植被指数相关性分析

鉴于不同植被指数对土壤背景、大气条件等干扰的消除程度是不同的，本文进一步分析了 f_{APAR} 与 $NDVI$ 、比值植被指数 (ratio vegetation index, RVI)、土壤调整植被指数 (soil adjusted vegetation index, $SAVI$)、修正型土壤调整植被指数 (modified soil adjusted vegetation index, $MSAVI$) 等常用植被指数相关性，供今后相关研究参考。基于前述分析， f_{APAR} 值采用 f_{APAR1} 数据系列。其中， RVI 、 $SAVI$ 和 $MSAVI$ 植被指数采用下式计算^[25-27]：

$$RVI = R_{nir} / R_{red} \quad (9)$$

$$SAVI = (R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red} + L)(1 + L) \quad (10)$$

$$MSAVI = (2R_{nir} + 1 - \sqrt{(2R_{nir} + 1)^2 - 8(R_{nir} - R_{red})}) / 2 \quad (11)$$

式中， R_{nir} 、 R_{red} 分别表示近红外和红光波段的反照率； L 为土壤调节系数，一般取值 0.5^[26]。作物冠层 f_{APAR} 与 $NDVI$ 、 RVI 、 $SAVI$ 、 $MSAVI$ 的相关关系如图 3 所示。

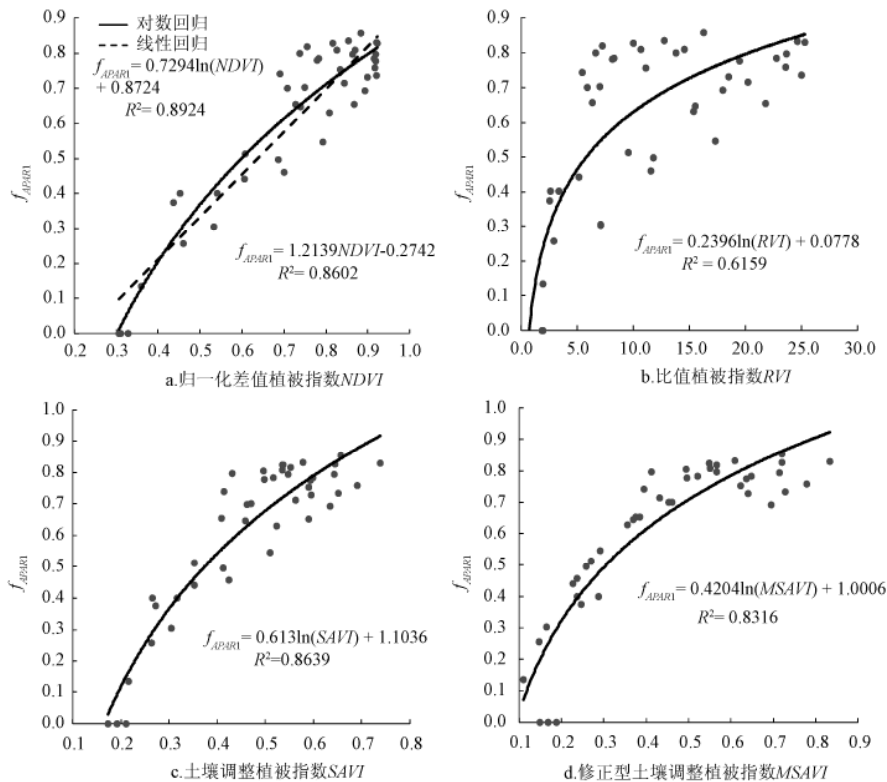


图 3 f_{APAR1} 与常用植被指数相关性分析

Fig.3 Relationships between the f_{APAR1} and several commonly used vegetation indices of winter wheat canopy

可以看出, 作物冠层 f_{APAR} 与 $NDVI$ 之间确实存在极显著的相关关系 (相关系数 $R=0.93$, $p<0.01$, $n=42$), 这与已有文献^[10, 12-13]记载一致。针对本研究中的冠层、土壤和大气条件, 二者的线性和对数回归关系分别为:

$$f_{APAR1}=1.214NDVI-0.274 \quad (R^2=0.86) \quad (12)$$

$$f_{APAR1}=0.729\ln(NDVI)+0.872 \quad (R^2=0.89) \quad (13)$$

回归方程 (12)、(13) 式的确定性系数 R^2 分别为 0.86、0.89, 可用于本研究区域和其它相似区域 (冠层、土壤和大气等方面相似) 的 f_{APAR} 估算。此外, 作物冠层 f_{APAR} 与 $SAVI$ 、 $MSAVI$ 、 RVI 之间相关性也较强 (图 3), 不过相关系数较之 $NDVI$ 均有所减小, 尤其是 RVI 减小幅度较大。这亦表明当前全球或区域 f_{APAR} 估算方法普遍采用 $NDVI$ 植被指数来构建是合理的、可行的。

3 结 论

鉴于作物冠层对入射光合有效辐射的吸收比例 f_{APAR} 在作物生长评价及作物生物量和产量模拟研究中的重要性, 本研究以冬小麦田间观测数据为基础, 对当前普遍采用的 f_{APAR} 估算方法进行了总结、分析和评价。结果表明: 作物冠层对光合有效辐射的吸收系数不等于其对光合有效辐射的截获效率 f_{IPAR} , 二者在作物凋落期差异较大。鉴于此, 在参比不同文献中光能利用效率的大小时, 清楚各文献对于光能辐射项的定义非常重要。整个研究时段内根据冠层 f_{IPAR} 估算的 f_{APAR} 精度较好, 但该方法不适用于区域应用。鉴于冠层叶面积指数 LAI 和归一化差值植被指数 $NDVI$ 可通过遥感手段获取, 利用它们来估算 f_{APAR} 是目前全球或区域研究常用的方法。但需要注意的是, LAI 法因不能考虑穗部对光合有效辐射的有效吸收, 会导致冬小麦抽穗至腊熟期间 f_{APAR} 估算结果偏低; f_{APAR} - $NDVI$ 关系因受局地冠层、土壤、大气等因素的影响, 具体运用时非常有必要根据当地相关数据资料对其实施先期校正。此外, 通过将 f_{APAR} 与 $NDVI$ 、土壤调整植被指数 $SAVI$ 、修正型土壤调整植被指数 $MSAVI$ 、比值植被指数 RVI 等常用植被指数进行相关性分析, 发现 f_{APAR} 与 $NDVI$ 的相关关系最强, 基于田间数据证实了采用 $NDVI$ 估算 f_{APAR} 的合理性。

[参 考 文 献]

- [1] Ruimy A, Kergoat L, Bondeau A. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of differences in light absorption and light-use efficiency[J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(Suppl.1): 56-64.
- [2] Duchemin B, Maisongrande P, Boulet G, et al. A simple algorithm for yield estimates: evaluation for semi-arid irrigated winter wheat monitored with green leaf area index[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2008, 23(7): 876-892.
- [3] Sithole V B. Yield Assessment at Field Level Using Satellite Measurements and Semi-empirical Crop Modelling - A Case Study in Gutland Area, Germany[D]. Netherlands: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 2009.
- [4] 王仰仁. 考虑水分和养分胁迫的 SPAC 水热动态与作物生长模拟研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2004. Wang Yangren. Water, Heat Transfer and Crop Growth Simulation in SPAC with Water and Nutrient Stress[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [5] Gallo K P, Daughtry C S T. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies[J]. *Agronomy Journal*, 1986, 78 (4): 752-756.
- [6] Lobell D B, Asner G P, Ortiz-Monasterio J I, et al. Remote sensing of regional crop production in the yaqui valley, Mexico: estimates and uncertainties[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 94(2): 205-220.
- [7] Asner G P, Wessman C A, Archer S. Scale dependence of absorption of photosynthetically active radiation in terrestrial ecosystems[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(4): 1003-1021.
- [8] Asrar G, Fuchs M, Kanemasu E T, et al. Estimating absorbed photosynthetically active radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat[J]. *Agronomy Journal*, 1984, 76(2): 300-306.
- [9] Moriondo M, Maselli F, Bindi M. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data[J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(3): 266-274.
- [10] Myneni R B, Williams D L. On the relationship between f_{APAR} and $NDVI$ [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 200-211.
- [11] Bonhomme R. Beware of comparing RUE values calculated from PAR vs solar radiation or absorbed vs intercepted radiation[J]. *Field Crops Research*, 2000, 68(3): 247-252.
- [12] Goetz S J, Prince S D, Goward S N, et al. Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach[J]. *Ecological Modelling*, 1999, 122(3): 239-255.
- [13] Bastiaanssen W G M, Ali S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus basin, pakistan[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 94(3): 321-340.
- [14] Hanan N P, Prince S D, Bégué A. Estimation of absorbed photosynthetically active radiation and vegetation net production efficiency using satellite data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 76(3/4): 259-276.
- [15] Prince S D. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(6): 1301-1311.
- [16] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 16(2): 125-141.
- [17] 史泽艳, 高晓飞, 谢云. 冠层底部光合有效辐射三种测量方法的比较[J]. *资源科学*, 2005, 27(1): 104-107. Shi Zeyan, Gao Xiaofei, Xie Yun. Comparison of three methods for measurement of transmitted photo-synthetically active radiation[J]. *Resources Science*, 2005, 27(1):104-107. (in Chinese with English abstract)

- [18] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 195–213.
- [19] Hinzman L D, Bauer M E, Daughtry C S T. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1986, 19(1): 47–61.
- [20] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000, 205.
- [21] 代辉, 胡春胜, 程一松, 等. 不同氮水平下冬小麦农学参数与光谱植被指数的相关性[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(4): 16–21.
Dai Hui, Hu Chunsheng, Cheng Yisong, et al. Correlation between agronomic parameters and spectral vegetation index in winter wheat under different nitrogen levels[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(4): 16–21. (in Chinese with English abstract)
- [22] Li F, Gnyp M L, Jia L, et al. Estimating N status of winter wheat using a handheld spectrometer in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2008, 106(1): 77–85.
- [23] 王登伟, 黄春燕, 马勤建, 等. 棉花高光谱植被指数与 LAI 和地上鲜生物量的相关分析[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(3): 426–429.
Wang Dengwei, Huang Chunyan, Ma Qinjian, et al. Relationships analysis between cotton leaf area index, aboveground fresh biomass and hyperspectral vegetation indices[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 24(3), 426–429. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王志敏, 张英华, 张永平, 等. 麦类作物穗器官的光合性能研究进展[J]. *麦类作物学报*, 2004, 24(4): 136–139.
Wang Zhimin, Zhang Yinghua, Zhang Yongping, et al. Review on photosynthetic performance of ear organs in triticeae crops[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2004, 24(4): 136–139. (in Chinese with English abstract)
- [25] Bannari A, Morin D, Bonn F, et al. A review of vegetation indices[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1995, 13(1/2): 95–120.
- [26] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index(SAVI)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295–309.
- [27] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 119–126.

Assessment of approaches for estimating fraction of photosynthetically active radiation absorbed by winter wheat canopy

Li Heli^{1,2}, Luo Yi^{1*}, Xue Xiaoping³, Zhao Yujin³, Zhao Hong³, Li Feng³

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Research Centre of Climate, Shandong Bureau of Meteorology, Jinan 250031, China)

Abstract: The approaches for estimating the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by crop canopy (f_{APAR}) include the one using the fraction of intercepted photosynthetically active radiation (f_{IPAR}), the one by the leaf area index (LAI) and the Beer-Lambert law and the ones with the different linear or non-linear relationships between the f_{APAR} and the normalized difference vegetation index $NDVI$. In this paper, all the above f_{APAR} estimation methods were tested using the field data of the LAI , f_{IPAR} and the spectral characteristics of winter wheat, with the aims to illustrate the advantages and disadvantages of them and offer references for further study. The results showed that the f_{APAR} was close to the f_{IPAR} during the vegetative growth period with the green leaves dominated canopy, while a remarkable difference was found between them in the reproductive stage with the increasing leaf senescence. The approach using the f_{IPAR} to estimate the f_{APAR} gave a good estimation. The approach by the Beer-Lambert law and the LAI underestimated the f_{APAR} from the heading to dough stages, which may be due to the absorption of photosynthetically active radiation by the green wheat stems and spikes not being included. The empirical f_{APAR} - $NDVI$ relationships vastly overestimated the f_{APAR} during the vegetative growth period and the end of reproductive period. The correlation analysis of the f_{APAR} to the $NDVI$, the ratio vegetation index (RVI), the soil adjusted vegetation index ($SAVI$) and the modified soil adjusted vegetation index ($MSAVI$) of the wheat canopy was performed. It demonstrated that the correlation between the $NDVI$ and the f_{APAR} was the best, which makes it more useful in the f_{APAR} estimation.

Key words: estimation, radiation, crops, evaluation, winter wheat, field measurements