

# 作物光能利用效率和收获指数时空变化研究进展\*

李贺丽<sup>1,3</sup> 罗毅<sup>1,2\*\*</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; <sup>2</sup> 中国科学院生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; <sup>3</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 1972 年 Monteith 提出的光能利用效率模型是当前大多数作物生长和产量形成模拟研究以及遥感估产所采用的主要方法. 光能利用效率( radiation use efficiency, RUE )和收获指数( harvest index, HI )是其中的两个基本参量. 鉴于目前作物 RUE 和 HI 研究与应用中仍存在着一些问题, 本文综述了相关研究进展, 总结了不同尺度上作物 RUE 和 HI 的研究方法, 介绍了当前遥感估产应用中对 RUE 和 HI 两个关键参数的处置概况, 建议今后研究应在点尺度开展作物 RUE 和 HI 研究的基础上, 寻求其在区域尺度上定量评估的可行性途径, 切实有效地发挥作物 RUE 和 HI 研究在作物实际生产管理中和遥感产量估算方面的应用价值及潜力.

**关键词** 光能利用效率 收获指数 Epsilon 模型 遥感估产

**文章编号** 1001-9332( 2009 )12-3093-08 **中图分类号** S127 **文献标识码** A

**Spatiotemporal variations of crop radiation use efficiency and harvest index : Research progress.** LI He-li<sup>1,3</sup>, LUO Yi<sup>1,2</sup> ( <sup>1</sup>Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; <sup>2</sup>Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; <sup>3</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China ). -Chin. J. Appl. Ecol. 2009 20( 12 ): 3093–3100.

**Abstract :** The radiation use efficiency ( RUE ) model suggested by Monteith in 1972 is one of the most widely applied approaches for modeling net primary production and crop yield, especially by means of remote sensing techniques. To use this approach, RUE and harvest index ( HI ) are the two key parameters that need to be defined, besides the absorbed photosynthetically active radiation. However, there exist some problems in the studies and applications of RUE and HI. This paper reviewed the research progress on RUE and HI, summarized the current methods and procedures for defining RUE and HI values when using the RUE approach for predicting crop yield by remote sensing, and proposed that in order to maximize the effective application of RUE and HI in remote sensing crop yield and crop production management, future researches should seek proper procedures to determine the spatial heterogeneities of RUE and HI at regional scale based on field experiments.

**Key words :** radiation use efficiency; harvest index; Epsilon approach; remote sensing of crop yield.

光能利用效率( radiation use efficiency, RUE )是指植物某一生长时段内累积干物质量与该时段植物冠层吸收的光合有效辐射量的比值<sup>[1]</sup>, 是描述植物光合生产能力的重要指标, 单位为  $\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ . 收获指数( harvest index, HI ), 又名经济系数( economic coefficient ), 是将作物干物质累积量转化为作物经济产量的指标, 一般描述为作物收获时经济产量( 籽

粒、果实等 )与地上部干物质量之比<sup>[2]</sup>, 无量纲, 其本质上反映了作物同化产物在籽粒和营养器官中的分配比例. 1972 年 Monteith 首次提出了基于光能利用效率( RUE ), 将植被冠层吸收的光合有效辐射( absorbed photosynthetically active radiation, APAR )转化为净初级生产力( net primary production, NPP )的计算模式, 被称为光能利用效率模型或 Epsilon 模型<sup>[3]</sup>, 通过收获指数( HI )将计算得到的干物质累积量转化为作物籽粒产量, 进而估算作物产量. 该光能利用效率模型具有经验统计模型所欠缺的生态物理基础, 同时又简化了机理模型的复杂度, 因其简明性

\* 国家自然科学基金项目( 90502005 )和国家高技术研究发展计划项目( 2007AA10Z223 )资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: luoyi.cas@gmail.com

2009-02-26 收稿, 2009-09-29 接受.

和实用性成为当前大多数 NPP、作物生长过程和产量形成模拟<sup>[4-6]</sup>及遥感估产的主要方法<sup>[7-10]</sup>。

RUE、HI 及 APAR 是基于 Epsilon 模型估算 NPP 和作物产量的 3 个基本变量。目前对于 APAR, 无论是实际测量, 还是数值模拟计算, 或是利用遥感数据提取均已进行了大量研究, 估算方法较为成熟<sup>[11-14]</sup>; 而针对 RUE 和 HI 的研究较少, 特别是关于区域 RUE 与 HI 差异性及其评估方法的研究还较缺乏, 导致在实际运用中对 RUE 和 HI 这两个重要参数的处理较为简化, 成为 NPP 和产量估算中除 APAR 外的主要误差来源<sup>[15]</sup>。本文阐明了作物 RUE 和 HI 研究及其在遥感估产应用中的重要意义, 总结了点尺度和区域尺度上作物 RUE 和 HI 的研究进展与研究方法, 以及应用 Epsilon 模型遥感估算作物产量时 RUE 和 HI 的处理现状, 分析了 RUE 和 HI 研究和应用中存在的问题, 进而提出作物 RUE 和 HI 未来的研究方向及思路, 以期今后相关研究与应用提供参考。

## 1 作物 RUE 和 HI 的研究进展

### 1.1 RUE

继 1972 年 Monteith 提出将资源平衡的基本内涵转化为 NPP 估算的模式——Epsilon 模型后, Sellers<sup>[16]</sup>和 Begue<sup>[17]</sup>给出了可通过遥感技术估算 APAR 的依据, Epsilon 模型随即引起广泛关注<sup>[3]</sup>, 对其涉及的关键变量 RUE 的讨论也由此展开。

最初研究认为 RUE 在全球所有植被类型所有季节内是不变的, 即是一个常数<sup>[18]</sup>。Goetz 等<sup>[19]</sup>亦认为植物可以根据可利用资源量的多少来调整冠层叶面积和光能获取形式以达到碳固定的最优化, 是进化过程的一种表现。这些研究认为植物生产量的变化主要体现在 APAR 的变化上, RUE 属于固定值。至今仍有不少研究<sup>[9, 20-21]</sup>认同这一观点。然而, Field 等<sup>[3]</sup>认为, 当资源限制及其他因子扰动发生的速度较快而植物冠层还不能调整时, 其响应将体现在 RUE 的变化上, 而 APAR 将保持相对稳定; 植物对限制性因子干扰的响应可通过降低 APAR 或 RUE 或者同时降低这两项来实现。

Ruimy 等<sup>[22]</sup>认识到不同生态系统间 RUE 的差异, 在综合大量文献资料的基础上, 对不同生态系统给定不同的 RUE 常数值。一个经典的 Epsilon 模型——CASA (carnegie-ames-stanford approach) 模型<sup>[23]</sup>将最大光能利用效率 ( $RUE_{max}$ ) 视为全球范围内的常数, 然后根据植物所处的地理位置对其进行

温度(包含高温因子和低温因子)和水分因子修正, 不再依据生态系统类型指定 RUE 数值。另一个典型的光能利用效率模型——GLO-PEM (global production efficiency model) 模型<sup>[24]</sup>根据  $C_3$  和  $C_4$  植物固碳途径的差异, 对  $C_3$  和  $C_4$  类型植物分别取不同的  $RUE_{max}$  值, 进一步根据植被所处地理位置的温度、水汽压和水分等限制因子对其进行修正。Heinsch 等<sup>[25]</sup>用查表的方式针对不同植被类型给出相应的  $RUE_{max}$  值, 其中耕地被概化为单一类型, 不再细分具体作物类型。该研究将全球植被分为 11 种植被类型, 大大简化了 RUE 的时空变异性<sup>[14]</sup>。实际上, 作物 RUE 在不同类、不同科、不同属及不同品种之间差异很大。例如,  $C_3$  作物 RUE 范围为  $0.85 \sim 3.0 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ,  $C_4$  作物 RUE 可达  $4.8 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ <sup>[22]</sup>。在  $C_3$  作物中, 豆科作物最适条件下的 RUE 范围为  $1.0 \sim 1.7 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ <sup>[26]</sup>, 在没有环境胁迫情况下, 大麦 RUE 为  $1.79 \sim 2.33 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ <sup>[27-28]</sup>, 小麦 RUE 为  $1.46 \sim 2.93 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ <sup>[27-29]</sup>。

作物 RUE 不仅取决于物种遗传因素(叶形、羧化酶含量等), 还受外在环境因素(温度、水汽压差、大气  $\text{CO}_2$  浓度、水分、养分、病虫害、栽培方式等)的强烈影响, 在作物生长阶段内和整个区域上都存在明显差异<sup>[30-35]</sup>。与不采取秸秆覆盖的处理相比, 秸秆覆盖处理的冬小麦 RUE 升高<sup>[36]</sup>。播期对作物 RUE 亦有影响, 正常时期播种作物 RUE 要大于迟播处理, 二者差异达到极显著水平<sup>[37-38]</sup>。Muchow 和 Davis<sup>[39]</sup>研究发现, 在高粱比叶氮(单位叶面积的叶片含氮量)为  $0.5 \sim 1.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  范围内, RUE 与比叶氮呈线性相关。此外, 作物 RUE 对土壤水分胁迫亦极为敏感<sup>[40]</sup>。

Campbell 等<sup>[41]</sup>指出, 在用光能利用效率模型估算作物产量时, 必须考虑作物生长发育过程中 RUE 的时空差异。然而, 目前无论是 RUE 的针对性研究还是作物产量遥感估算中对 RUE 的实际处理对这方面的考虑都远远不够。

### 1.2 HI

运用 Epsilon 模型估算出作物干物质积累量后, 如何估算作物产量是值得研究的又一个问题。除从作物干物质质量的分配机理出发, 以数学模型解释干物质质量转化为产量的生物物理过程外, 还可通过将作物干物质质量乘以作物收获指数(HI)的方式转化为作物产量。与前者相比, 后者形式简单, 且不需要考虑复杂的作物干物质向果实器官转化的过程, 特别适合基于光能利用效率的作物遥感估产, 也是目

前通常采用的方式<sup>[42]</sup>。

HI 的概念一经提出,便受到作物育种及栽培学家的重视<sup>[43]</sup>。较高的干物质量并不意味着高的籽粒产量,生物产量与籽粒产量的相关性并不显著,且作物产量的变异在很大程度上来源于 HI 而不是生物产量<sup>[44]</sup>。一般 HI 变异性多是指由于作物品种产生的差异。然而,对于同一作物品种,其生长环境不同也可以导致 HI 出现差异。在作物生理机制上,HI 指碳素从源分配到籽粒库的比例。因此,该性状一定程度上反映了源器官光合产物转运到库器官的能力大小,即流的畅通性。抽穗前茎秆储藏的非结构性碳水化合物和抽穗后光合产物向穗部的转移水平是 HI 形成的重要机制之一<sup>[43]</sup>。作物 HI 的形成有生理结构功能方面的遗传性,但也会受到耕作水平等环境条件的影响。同一小麦品种的 HI 在不同环境条件下差异很大,环境对其影响达到了极显著水平<sup>[45]</sup>。HI 的这种变化,即同化产物在营养和生殖器官上分配比例的波动,显示了作物对生长环境的适应策略。环境胁迫条件下,个体对某一亏缺资源的竞争能力有赖于获取这一资源的营养器官生物量的增加(如对水分和土壤养分的竞争使根系生物量相对增加),而光合产物向某一器官分配的增加必然导致向其他器官分配的减少<sup>[46]</sup>。Siddique 等<sup>[47]</sup>研究表明,各种种植密度下鹰嘴豆籽粒产量相差不大,但随着密度的增加,干物质量明显增加,HI 明显降低。HI 亦受土壤肥力的影响,中肥土壤下 HI 最高,高肥次之,低肥最低<sup>[48]</sup>。N 量不足时,作物 HI 降低<sup>[49]</sup>;但当施 N 量超过一定水平后,不利于籽粒灌浆,HI 下降<sup>[50]</sup>。严重的土壤水分胁迫会导致作物 HI 下降<sup>[51]</sup>。适当的水分控制有利于作物 HI 的提高<sup>[52]</sup>。在冬小麦生育后期,随着土壤水分的改善,HI 可由 0.22 增至 0.37,增加了 68.2%<sup>[40]</sup>。

目前针对作物 HI 及其与环境之间的关系已做了大量研究,但多侧重于作物育种和栽培上,方法上多借用试验手段,缺乏向区域层面上的提升<sup>[53-54]</sup>,严重限制了研究成果在区域作物产量遥感估测中的推广应用。目前绝大多数研究运用光能利用效率模型进行遥感估产时,常将 HI 取为经验常数值<sup>[6-7,10,20]</sup>,缺乏对 HI 空间变异性的考虑,给遥感估产结果带来很大的不确定性。

## 2 作物 RUE 和 HI 研究所采用的主要方法

### 2.1 点尺度上 RUE 和 HI 变化规律研究

#### 2.1.1 田间试验 田间试验一般根据所研究的影响

因子进行布置,采用生物量调查法获取研究时段的作物干物质量及最终产量,采用直接测定法(如美国 Decagon 公司生产的 Sunflerk 冠层分析仪、英国 Delta 公司生产的 SUNSCAN 冠层分析系统等)或间接计算法(如叶面积指数法、光谱指数法等)获取冠层辐射量<sup>[11,13]</sup>,从而得到作物 RUE 及 HI。

**2.1.2 涡度相关技术** 涡度相关技术是对森林、灌木、草地或农田与大气间进行非破坏性 CO<sub>2</sub> 通量测定的微气象学技术<sup>[55]</sup>。作为目前直接测定植被冠层与大气间 CO<sub>2</sub> 和水热交换量的唯一方法,其灵敏度较高,能反映小时或日尺度的 RUE 变化特征,对植被干扰和破坏较小,为生态系统水平 RUE 及其短期(小时或天)变化研究提供了可靠的途径<sup>[56]</sup>。

涡度相关通量塔的空间代表范围约 1 km<sup>2</sup><sup>[57]</sup>,时间分辨率可通过对高频率数据求积分灵活确定,一般取时间步长为 30 min<sup>[58]</sup>,可以测定作物不同时间段的 NPP。另外,采用辐射传感器可直接测定冠层截获的光合有效辐射 IPAR(intercepted photosynthetically active radiation)。通过考虑不同生育期 IPAR 中冠层反射量和非光合器官吸收量的比例,可将测得的 IPAR 转化为冠层吸收的 APAR<sup>[12]</sup>。得到不同时间段的 NPP 和 APAR 后,即可获得相应时段的 RUE 值<sup>[59]</sup>。该方法缺点是所用仪器比较昂贵,不适宜在不同处理的小区进行对比观测。尽管如此,由于涡度相关技术能连续反映短时间尺度上的 RUE 变化,该方法已成为目前研究短时间尺度上植被 RUE 最可靠的方法<sup>[60]</sup>。

**2.1.3 作物模型** 当需要揭示不同条件下环境因子对作物 RUE 和 HI 的影响时,考虑到试验因素不易控制,且耗财费时等方面,设置多种不同条件的田间试验往往是不现实的,对于需要多年观测的试验更是如此。作物模型作为研究和解释系统行为的理论工具,可以定量分析各个因子对整个系统的影响,进行各种预置条件下的数值模拟试验,揭示环境因素影响系统行为的复杂机制,最终用于指导实践<sup>[61]</sup>。

作物模型可用于揭示环境因子对作物 RUE 和 HI 的影响。作物模型能够在描述环境变量和作物生理过程间相互作用的基础上对作物的生理发育、干物质积累及产量的形成等过程进行恰当的物理描述<sup>[62]</sup>。模型常用“数值试验”,对一个假设的系统进行行为分析,通过改变模型的输入变量和参数来探讨模拟结果对各种假定条件的响应,以研究不同因子对作物 RUE 和 HI 的影响,进而总结规律,应用于实践中。Lobell 等<sup>[12]</sup>设置田间试验研究了不同施

氮水平对  $RUE \times HI$  这一组合项的影响,并利用 Monte Carlo 方法和 CERES-Wheat 作物模型分析了  $RUE \times HI$  这一组合项按正态频率分布情况下取不同常数时值时对产量预测的影响。目前大多数研究借助作物模型对作物产量及其影响因素进行模拟分析,而有关  $RUE$  和  $HI$  本身的模拟研究不多,今后还需加强。

## 2.2 区域尺度上 $RUE$ 和 $HI$ 异质性定量评估

目前区域尺度上  $RUE$  和  $HI$  空间变异规律研究还不多,但已逐渐被提高遥感 NPP 和作物产量精度的研究者所重视。

### 2.2.1 $RUE$ 区域遥感估测的直接法和间接法

间接法是通过监测区域环境胁迫差异来修正  $RUE_{max}$ ,从而获取实际  $RUE$ 。遥感测量的环境胁迫因子主要包括水分、氮素和温度。当严重胁迫发生时,冠层会出现萎黄、落叶和退化等症状,可以通过基于可见光和近红外波段反照率的宽波段光谱植被指数的时间序列监测出来<sup>[63]</sup>。然而,发生严重胁迫的情况比较少见,一般情况下多发生冠层响应并不十分明显的中度胁迫,上述监测方法不再适用。微波信号虽然与土壤水分含量表现出很好的相关性,但现有监测设备的时空分辨率不足,不能满足植被水分胁迫估测的需要<sup>[64]</sup>。基于热辐射的光谱测量(如温度植被指数 TVI)可以通过探测土壤温度与植被冠层温度的差异来预测土壤含水量。但是,土壤温度与植被冠层温度的差异不仅是土壤含水量的函数,还与太阳辐射有关,而且该法不能探测到次表层土壤的水分状况<sup>[24]</sup>,故将其用于大面积植被水分胁迫测量仍比较复杂,有待于进一步深入研究。在现有光合生产效率遥感模型中,由于氮素循环本身以及与碳循环耦合关系的复杂性,很少考虑氮胁迫对  $RUE$  的影响<sup>[65]</sup>。早期利用遥感探测氮胁迫的方法主要是依据光谱植被指数(SVIs)与叶绿素含量之间的经验关系进行<sup>[66]</sup>。最近研究提出可利用超光谱影像依据窄波段反照率来直接确定叶片的氮含量<sup>[67]</sup>。Tilling 等<sup>[68]</sup>利用超光谱、多光谱和热红外遥感影像对澳大利亚 Victoria 州的一个研究点开展了小麦水分和氮素胁迫遥感研究,提出了作物胁迫的遥感光谱及温度探测方法,对小麦氮素、水分胁迫进行了初步定量评价。但窄波段反照率测量易受到大气散射和定向反射的影响,将该法应用到大面积区域面临着数据分析的困难<sup>[69]</sup>。

直接法通过观测由植物光保护机制和叶绿素荧光特性引发的叶片光谱反照率变化来直接获取

$RUE$ <sup>[14]</sup>。基于叶片光保护机制确定  $RUE$  的方法通过观测由叶黄素循环的环氧化作用引发叶片光谱反照率的变化来实现<sup>[70]</sup>。这些变化表现在叶片对 505 nm 和 531 nm 两个窄波段的吸收特性上,可以通过光谱植被指数 PRI(photochemical reflectance index)进行量化。Gamon 等<sup>[71]</sup>提出了光谱植被指数 PRI 的概念,并建立了向日葵  $RUE$  与 PRI 的经验关系,表明该法具有估测全球  $RUE$  的潜力。此后,不少研究<sup>[72-74]</sup>对 PRI 与  $RUE$  的关系进行了探究。然而,限于遥感设备的时空分辨率和该法的经验本质,实现从叶片到冠层、区域、乃至全球的升尺度扩展仍有难度<sup>[14]</sup>。叶绿素荧光特性的遥感估测包括被动(太阳光诱发)和主动(激光诱发)两种方法,目前都面临着技术上的严峻挑战<sup>[75-76]</sup>。

遥感估测区域  $RUE$ ,无论是间接法还是直接法,目前均不成熟。需要指出的是,直接估测技术不仅能够确定各种胁迫因子对植被  $RUE$  的综合影响,还量化了这些胁迫因子对植被光合作用的影响程度<sup>[77]</sup>,具有很大的应用潜力,是今后的努力方向。

### 2.2.2 $HI$ 区域定量评估方法

作为作物品种选育和栽培成效评价的重要指标,大量站点试验对作物  $HI$  的品种特性及其与环境因子间的相互作用进行了较为深入的研究<sup>[40,44-52]</sup>。但关于  $HI$  在区域尺度上的定量评估研究较少。任建强等<sup>[8]</sup>在黄淮海平原冬小麦产量估测研究中,通过将实地调查的  $HI$  采用空间内插的方法获取了研究区域上  $HI$  的空间分布,该法实地调查工作量大,且获取的数据不能应用于其他年份或其他区域。Moriendo 等<sup>[9]</sup>将冬小麦全生育期分为发芽-开花和开花-成熟两个时段,以两个时段的 NDVI 均值为参量定量评估了  $HI$  的空间分布,该法直接运用遥感信息,表达形式比较理想。今后研究应在站点探讨作物  $HI$  变化规律的基础上,借助一定的技术和方法实现其在区域层面的应用,为区域作物生产管理以及产量遥感估测提供不可或缺的信息支撑。

## 3 作物 $RUE$ 和 $HI$ 在遥感估产中的应用

在广泛开展 NPP 研究的基础上,基于光能利用效率模型的作物遥感估产研究也逐渐成为热点。

Leblon 等<sup>[4]</sup>在法国 Camargue 区域水稻产量估测研究中,对不同子区域及不同生育期采用不同的  $RUE$  常数, $HI$  则取常数。Daughtry 等<sup>[5]</sup>对作物产量估算时, $RUE$  采用常数,但考虑了  $C_4$  作物(玉米)和  $C_3$  作物(大豆)的区别,并意识到了水分、养分胁迫

因子会对 RUE 产生影响,HI 取常数。Tao 等<sup>[7]</sup>利用两种经典的光能利用效率模型——CASA 模型<sup>[23]</sup>和 GLO-PEM2<sup>[78]</sup>估算了中国玉米产量,其中 RUE 采用模型各自的处理方法,HI 取常数。Bastiaanssen 和 Ali<sup>[6]</sup>采用 CASA 模型估算了巴基斯坦 Indus 区域的作物产量  $RUE_{max}$  取值考虑了  $C_3$  与  $C_4$  作物类型间的区别,HI 取常数。Lobell 等<sup>[12 20]</sup>和 Ortiz-Monasterio 等<sup>[21]</sup>估算墨西哥 Yaqui 区域冬小麦产量时,RUE 和 HI 均取常数,未考虑环境因子的影响,认为环境因子的影响已通过改变作物的形态特征由 APAR 体现。Moriondo 等<sup>[9]</sup>亦认为环境因子的影响由 APAR 体现,研究中 RUE 取常数,HI 区域分布根据发芽—开花和开花—成熟两个时段的 NDVI 均值估算得出。Duchemin 等<sup>[10]</sup>基于光能利用效率建立了 SAFY (simple algorithm for yield estimates)模型,该算法先取 RUE 为常数,然后根据日平均温度、作物生长最适宜温度、极端低温和极端高温对 RUE 进行了修正,HI 取常数。任建强等<sup>[8]</sup>利用光能利用效率模型在黄淮海平原冬小麦产量估测研究中,RUE 取常数,HI 则采用实测值空间内插的方法获得。

在实际应用中,大多数研究将 RUE 和 HI 这两个关键参量处理为经验常数,这种做法会对 NPP 和产量估算结果造成很大误差。与其他参比模型模拟的 NPP 平均值相比,光能利用效率模型的模拟结果偏离较大,GLO-PEM 模型偏高 17.14%,CASA 模型偏小 15.23%<sup>[15]</sup>。运用光能利用效率模型估算区域作物产量时,平均相对误差在 25% 以上<sup>[6 10]</sup>。因此,合理准确地量化评估 RUE 和 HI 的空间差异性已成为提高 NPP 和作物产量遥感估测精度所必须解决的重要问题。

#### 4 问题和建议

作物 RUE 受内在遗传因素和外在环境因素的影响,在作物生长期和区域上都存在着明显的差异。今后应结合田间试验、涡度相关、模型模拟等多种手段研究不同因素影响下作物 RUE 的变化规律;结合遥感、地理信息系统等技术探索区域 RUE 时空变化评估的理论和方法,从而进一步提高 NPP 和作物产量的遥感估测精度。

不同生长环境下作物 HI 差异极其显著。然而,目前绝大多数研究采用光能利用效率模型估测作物产量时仍将 HI 处理为经验常数,HI 区域空间差异被严重忽视。且在区域尺度上量化评估 HI 的研究比较缺乏。今后应进一步加强作物 HI 的田间试验研

究,探讨不同环境条件下 HI 的变化规律,并积极探索其定量表达形式,建立作物 HI 与环境因子或环境因子作用下的生物物理变量间的响应模型。在此基础上,将地面监测与遥感技术结合起来,探究区域尺度上作物 HI 空间变异性的量化方法,改进基于 Epsilon 模型的遥感估产算法。

#### 参考文献

- [1] Monteith JL. Solar-radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 1972, **9**: 747–766
- [2] Donald CM. In search of yield. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 1962, **28**: 171–179
- [3] Field CB, Randerson JT, Malmstrom CM. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, **51**: 74–88
- [4] Leblon B, Guérif M, Baret F. The use of remotely sensed data in estimation of PAR use efficiency and biomass production of flooded rice. *Remote Sensing of Environment*, 1991, **38**: 147–158
- [5] Daughtry CST, Gallo KP, Goward SN, et al. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **39**: 141–152
- [6] Bastiaanssen WGM, Ali S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus basin, Pakistan. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, **94**: 321–340
- [7] Tao F, Yokozawa M, Zhang Z, et al. Remote sensing of crop production in China by production efficiency models: Models comparisons, estimates and uncertainties. *Ecological Modelling*, 2005, **183**: 385–396
- [8] Ren J-Q (任建强), Chen Z-X (陈仲新), Tang H-J (唐华俊), et al. Regional yield estimation for winter wheat based on net primary production model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2006, **22**(5): 111–117 (in Chinese)
- [9] Moriondo M, Maselli F, Bindi M. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data. *European Journal of Agronomy*, 2007, **26**: 266–274
- [10] 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. *Environmental Modelling & Software*, 2008, **23**: 876–892
- [11] Duan A-W (段爱旺). Measurement and application of intercepted photosynthetically radiation of crop canopy. *Irrigation and Drainage (灌溉排水)*, 1996, **15**(2):

- 53–56 ( in Chinese )
- [ 12 ] Lobell DB , Asner GP , Ortiz-Monasterio JI , *et al.* Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley , Mexico : Estimates and uncertainties. *Agriculture , Ecosystems & Environment* , 2003 , **94** : 205–220
- [ 13 ] Zhang Y-B ( 张运波 ) , Tang Q-Y ( 唐启源 ) . Advances in crop radiation use efficiency study. *Crop Research ( 作物研究 )* , 2006 , **20** ( z1 ) : 557–561 ( in Chinese )
- [ 14 ] Hilker T , Coops NC , Wulder MA , *et al.* The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production : A review of current status and future requirements. *Science of the Total Environment* , 2008 , **404** : 411–423
- [ 15 ] 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. *Global Change Biology* , 1999 , **5** : 56–64
- [ 16 ] Sellers PJ . Canopy reflectance , photosynthesis , and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote Sensing of Environment* , 1987 , **21** : 143–183
- [ 17 ] Begue A . Leaf area index , intercepted photosynthetically active radiation , and spectral vegetation indices : A sensitivity analysis for regularly shaped canopies. *Remote Sensing of Environment* , 1993 , **46** : 45–59
- [ 18 ] Heimann M , Keeling CD . A three-dimensional model of atmospheric CO<sub>2</sub> transport based on observed winds : 2. Model description and simulated tracer experiments// Peterson DH , ed. *Climate Variability in the Pacific and the Western America*. Washington DC : American Geophysical Union , 1989 : 237–275
- [ 19 ] Goetz SJ , Prince SD , Goward SN , *et al.* Mapping net primary production and related biophysical variables with remote sensing : Application to the Boreas region. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* , 1999 , **104** : 27719–27734
- [ 20 ] Lobell DB , Asner GP , Ortiz-Monasterio JI , *et al.* Yield uncertainty at the field scale evaluated with multi-year satellite data. *Agricultural Systems* , 2007 , **92** : 76–90
- [ 21 ] Ortiz-Monasterio JI , Lobell DB . Remote sensing assessment of regional yield losses due to sub-optimal planting dates and fallow period weed management. *Field Crops Research* , 2007 , **101** : 80–87
- [ 22 ] Ruimy A , Dedieu G , Saugier B . Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research* , 1994 , **99** : 5263–5284
- [ 23 ] Potter CS , Randerson JT , Field CB , *et al.* Terrestrial ecosystem production : A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles* , 1993 , **7** : 811–841
- [ 24 ] Prince SD , Goward SN . Global primary production : A remote sensing approach. *Journal of Biogeography* , 1995 , **22** : 815–835
- [ 25 ] Heinsch FA , Reeves M , Votava P , *et al.* User 's guide GPP and NPP ( MOD17A2/A3 ) products NASA MODIS land algorithm [ EB/OL ]. ( 2003-12-02 ) [ 2008-12-05 ]. <http://www.nts.gov/umt.edu/modis/MOD17Users-Guide.pdf>
- [ 26 ] Sinclair TR , Muchow RC . Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy* , 1999 , **65** : 215–265
- [ 27 ] Gregory PJ , Tennant D , Belford RK . Root and shoot growth , and water and light use efficiency of barley and wheat crops grown on a shallow duplex soil in a Mediterranean-type environment. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science* , 1992 , **43** : 555–573
- [ 28 ] Jamieson PD , Martin RJ , Francis GS , *et al.* Drought effects on biomass production and radiation-use efficiency in barley. *Field Crops Research* , 1995 , **43** : 77–86
- [ 29 ] Yunusa IAM , Siddique KHM , Belford RK , *et al.* Effect of canopy structure on efficiency of radiation interception and use in spring wheat cultivars during the pre-anthesis period in a Mediterranean-type environment. *Field Crops Research* , 1993 , **35** : 113–122
- [ 30 ] Prince SD , Goward SN . Evaluation of the NOAA/NASA pathfinder AVHRR land data set for global primary production modelling. *International Journal of Remote Sensing* , 1996 , **17** : 217–221
- [ 31 ] Gower ST , Kucharik CJ , Norman JM . Direct and indirect estimation of leaf area index fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment* , 1999 , **70** : 29–51
- [ 32 ] Turner DP , Urbanski S , Bremer D , *et al.* A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. *Global Change Biology* , 2003 , **9** : 383–395
- [ 33 ] Green DS , Erickson JE , Kruger EL . Foliar morphology and canopy nitrogen as predictors of light-use efficiency in terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology* , 2003 , **115** : 163–171
- [ 34 ] van Oijen M , Dreccer MF , Firsching KH , *et al.* Simple equations for dynamic models of the effects of CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on light-use efficiency and growth of crops. *Ecological Modelling* , 2004 , **179** : 39–60
- [ 35 ] Francescangeli N , Sangiacomo MA , Martí H . Effects of plant density in broccoli on yield and radiation use efficiency. *Scientia Horticulturae* , 2006 , **110** : 135–143
- [ 36 ] Li Q-Q ( 李全起 ) , Chen Y-H ( 陈雨海 ) , Wu W ( 吴巍 ) , *et al.* Effects of straw mulching and irrigation on solar energy utilization efficiency of winter wheat farm-

- land. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(2): 243–246 (in Chinese)
- [ 37 ] Xu G (徐光), Chen C-L (陈才良), Dan F (但芳). Effects of sowing date on development of maize. *Seed World* (种子世界), 2002(1): 26–27 (in Chinese)
- [ 38 ] Kemanian RO, Stockle AC, Huggins DR. Variability of barley radiation use efficiency. *Crop Science*, 2004, **44**: 1662–1672
- [ 39 ] Muchow RC, Davis R. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crops Research*, 1988, **18**: 17–30
- [ 40 ] Fang Q-X (房全孝), Chen Y-H (陈雨海), Li Q-Q (李全起), et al. Effects of soil moisture on radiation utilization during late growth stages and water use efficiency of winter wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2006, **32**(6): 861–866 (in Chinese)
- [ 41 ] Campbell CS, Heilman JL, McInnes KJ, et al. Seasonal variation in radiation use efficiency of irrigated rice. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **110**: 45–54
- [ 42 ] Shi J-Z (施建忠), Wang T-D (王天铎). A mechanistic model describing the photosynthate partitioning during vegetative phase. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 1994, **36**(3): 181–189 (in Chinese)
- [ 43 ] Pan X-H (潘晓华), Deng Q-H (邓强辉). Review on crop harvest index. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 2007, **29**(1): 1–5 (in Chinese)
- [ 44 ] Yuan W-Z (袁葵洲), Guan C-Y (官春云). Review on crop harvest index. *Crop Research* (作物研究), 1994, **8**(4): 45–48 (in Chinese)
- [ 45 ] Li Y-J (李跃进), Song H-X (宋荷仙), Zhu H-Z (朱华忠). Stability analysis of harvest index, biomass and grain yield in wheat. *Southwest China Journal of Agricultural Science* (西南农业学报), 1998, **11**(1): 25–30 (in Chinese)
- [ 46 ] Pan X-Y (潘晓云), Wang Y-F (王永芳). Relationship between growth redundancy and size inequality in spring wheat populations mulched with clear plastic film. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 2002, **26**(2): 177–184 (in Chinese)
- [ 47 ] Siddique KHM, Sedgley RH, Marshall C. Effect of plant density on growth and harvest index of branches in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Field Crops Research*, 1984, **9**: 193–203
- [ 48 ] Song H-X (宋荷仙), Li Y-J (李跃进), Feng T-M (冯天铭). Utilization of harvest index in wheat breeding for high yield. *Southwest China Journal of Agricultural Science* (西南农业学报), 1989, **2**(2): 27–31 (in Chinese)
- [ 49 ] Sinclair TR. Historical changes in harvest index and crop nitrogen accumulation. *Crop Science*, 1998, **38**: 638–643
- [ 50 ] Feng Y-H (冯跃华), Zou Y-B (邹应斌). Impact of different fertilizer-N application on growth and yield formation of transplanted rice under zero tillage and conventional tillage conditions. *Crop Research* (作物研究), 2004(3): 145–150 (in Chinese)
- [ 51 ] Li J (李捷), Wu S-J (吴慎杰). Growth redundancy of spring wheat in semi-arid area. *Hubei Agricultural Sciences* (湖北农业科学), 2002(1): 26–27 (in Chinese)
- [ 52 ] Yang J, Zhang J. Grain filling of cereals under soil drying. *New Phytologist*, 2006, **169**: 223–236
- [ 53 ] Sadras VO, Connor DJ. Physiological basis of the response of harvest index to the fraction of water transpired after anthesis: A simple model to estimate harvest index for determinate species. *Field Crops Research*, 1991, **26**: 227–239
- [ 54 ] Kemanian AR, Stockle CO, Huggins CO, et al. A simple method to estimate harvest index in grain crops. *Field Crops Research*, 2007, **103**: 208–216
- [ 55 ] Baldocchi DD, Hicks BB, Meyers TP. Measuring biosphere-atmosphere exchange of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 1988, **169**: 1331–1340
- [ 56 ] Zhao Y-M (赵育民), Niu S-K (牛树奎), Wang J-B (王军邦), et al. Light use efficiency of vegetation: A review. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2007, **26**(9): 1471–1477 (in Chinese)
- [ 57 ] Kljun N, Calanca P, Rotachhi MW, et al. A simple parameterisation for flux footprint predictions. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, **112**: 503–523
- [ 58 ] Morgenstern K, Black TA, Humphreys ER, et al. Sensitivity and uncertainty of the carbon balance of a Pacific northwest Douglas-fir forest during an El Niño La Niña cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **123**: 201–219
- [ 59 ] Humphreys ER, Black TA, Morgenstern K, et al. Carbon dioxide fluxes in coastal Douglas-fir stands at different stages of development after clearcut harvesting. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**: 6–22
- [ 60 ] Tong X-J (同小娟), Li J (李俊), Wang L (王玲). A review on radiation use efficiency of the cropland. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(6): 1021–1028 (in Chinese)
- [ 61 ] Baird AJ, Wilby RL. Trans. Zhao W-Z (赵文智), Wang G-X (王根绪). Eco-hydrology. Beijing: Ocean

- Press, 2002 ( in Chinese )
- [ 62 ] Ghaffari A , Cook HF , Lee HC. Simulating winter wheat yields under temperate conditions : Exploring different management scenarios. *European Journal of Agronomy* , 2001 , **15** : 231–240
- [ 63 ] Liu WT , Kogan FN. Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *International Journal of Remote Sensing* , 1996 , **17** : 2761–2782
- [ 64 ] Deshayes M , Guyon D , Jeanjean H , *et al.* The contribution of remote sensing to the assessment of drought effects in forest ecosystems. *Annals of Forest Science* , 2006 , **63** : 579–595
- [ 65 ] Goetz SJ , Prince SD. Modelling terrestrial carbon exchange and storage : Evidence and implications of functional convergence in light-use efficiency. *Advances in Ecological Research* , 1999 , **28** : 57–92
- [ 66 ] Penuelas J , Gamon JA , Fredeen AL , *et al.* Reflectance indexes associated with physiological-changes in nitrogen-limited and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment* , 1994 , **48** : 135–146
- [ 67 ] Bausch WC , Duke HR. Remote sensing of plant nitrogen status in corn. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* , 1996 , **39** : 1869–1875
- [ 68 ] Tilling AK , O 'Leary GJ , Ferwerda JG , *et al.* Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. *Field Crops Research* , 2007 , **104** : 77–85
- [ 69 ] Liu X , Smith WL , Zhou DK , *et al.* Principal component-based radiative transfer model for hyperspectral sensors : Theoretical concept. *Applied Optics* , 2006 , **45** : 201–209
- [ 70 ] Gamon JA , Field CB , Bilger W , *et al.* Remote-sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. *Oecologia* , 1990 , **85** : 1–7
- [ 71 ] Gamon JA , Penuelas J , Field CB. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment* , 1992 , **41** : 35–44
- [ 72 ] Filella I , Amaro T , Araus JL , *et al.* Relationship between photosynthetic radiation-use efficiency of barley canopies and the photochemical reflectance index ( PRI ). *Physiologia Plantarum* , 1996 , **96** : 211–216
- [ 73 ] Wu C-Y ( 吴朝阳 ) , Niu Z ( 牛 铮 ) , Tang Q ( 汤 泉 ) , *et al.* Relationship between photochemical reflectance index and light use efficiency in growth duration of wheat. *Acta Photonica Sinica* ( 光子学报 ) , 2009 , **38** ( 1 ) : 138–143 ( in Chinese )
- [ 74 ] Nakaji T , Oguma H , Fujinuma Y. Seasonal changes in the relationship between photochemical reflectance index and photosynthetic light use efficiency of Japanese larch needles. *International Journal of Remote Sensing* , 2006 , **27** : 493–509
- [ 75 ] Moya I , Camenen L , Evain S , *et al.* A new instrument for passive remote sensing 1. Measurements of sunlight-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment* , 2004 , **91** : 186–197
- [ 76 ] Ananyev G , Kolber ZS , Klimov D , *et al.* Remote sensing of heterogeneity in photosynthetic efficiency , electron transport and dissipation of excess light in *Populus deltoides* stands under ambient and elevated CO<sub>2</sub> concentrations , and in a tropical forest canopy , using a new laser-induced fluorescence transient device. *Global Change Biology* , 2005 , **11** : 1195–1206
- [ 77 ] Demmig-Adams B , Adams WW. The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. *Trends in Plant Science* , 1996 , **1** : 21–26
- [ 78 ] Goetz SJ , Prince SD , Goward SN , *et al.* Satellite remote sensing of primary production : An improved production efficiency modeling approach. *Ecological Modelling* , 1999 , **122** : 239–255

---

作者简介 李贺丽 ,女 ,1982 年生 ,博士研究生.主要从事生态水文试验和模型研究. E-mail : lhl237666@ 126. com

责任编辑 张凤丽

---