

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0018

Xu Fengying, Ge Yingchun, Xu Zhongmin, *et al.* A review of evaluation methods of crop water productivity [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 156-163. [徐凤英, 盖迎春, 徐中民, 等. 作物水生产力评估方法研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 156-163.]

# 作物水生产力评估方法研究

徐凤英, 盖迎春\*, 徐中民, 王维真

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 农业用水作为消耗水资源最多的部分, 在全球和区域水资源消耗中占据很大比例. 农业水生产力的评价对于改进区域农业水资源利用方式, 促进农业经济发展具有重要意义, 尤其是在水资源匮乏地区. 首先阐述了作物水生产力的基本概念, 分析了影响作物水生产力的核心要素; 其次总结了作物水生产力的评价方法, 将其分为收获方法、模型方法和集成遥感或 GIS 的模型方法, 并分析了这三类方法优缺点; 最后对作物水生产力研究发展趋势进行了展望, 认为将 RS 或 GIS 与模型结合用来估算作物水生产力的方法, 将是目前研究的发展方向.

**关键词:** 作物水生产力; 评估方法; 作物水生产力模型

**中图分类号:** S214.4 **文献标识码:** A

## 0 引言

灌溉农业作为全球最大的淡水资源消耗产业, 约占淡水消耗总量的 70%, 在某些国家或地区甚至高达 80% 以上<sup>[1]</sup>, 预计到 2025 年全球人口将达到 80 亿, 而全球农业用水量将增加到每年 5 600 km<sup>3</sup><sup>[2-3]</sup>, 致使农业用水与工业、生活和生态用水矛盾更加突出, 尤其是水资源匮乏地区. 为了满足日益增长的全球人口生活所需, 农业发展依然在未来占据着重要的地位. 而灌溉农业对于全球粮食供应和养活不断增加的全球人口有着重要的作用<sup>[4]</sup>. 如何用更少的水资源生产出更多的粮食已经成为农业部门面临的巨大挑战, 作物水生产力的提高是缓解农业用水与其他行业用水矛盾的重要方法之一. 作物水生产力的评价对国家或区域农业的发展有重要作用<sup>[5]</sup>.

作物水生产力的研究已成为近年来国内外研究热点之一, 一些国际上著名机构已经在全球范围内相继开展了一系列的作物水生产力研究计划<sup>[1]</sup>. 国外在伊朗<sup>[6]</sup>、坦桑尼亚<sup>[7]</sup>、尼日利亚<sup>[8-9]</sup>、西亚<sup>[10-11]</sup>、巴基斯坦<sup>[12]</sup>等地以及中东地区和印度半

干旱区域<sup>[13-14]</sup>的作物水生产力进行了相关研究. 国内在漳河灌区<sup>[11, 15]</sup>、黄河流域<sup>[16]</sup>、华北平原<sup>[17]</sup>、阿克苏灌区<sup>[18]</sup>等地展开了作物水生产力的相关研究, 均取得重要进展.

## 1 作物水生产力概念及评估原理

作物水生产力概念始于 Viets<sup>[19]</sup>1966 年提出的作物水分利用效率 (Water Use Efficiency, WUE), 指农作物平均产量与蒸散发之间的比率, 即单方水的有效产出. 早期的农业水分利用效率主要用于田间尺度或作物尺度等微观尺度<sup>[20]</sup>, 由于灌溉用水在农业用水中的重要地位, 因此农业中常使用灌溉效率概念, 即作物的水资源消耗量 (作物蒸散量减去有效降水量) 与水资源供给 (总灌溉引水量) 的比值<sup>[21]</sup>. 灌溉效率计算中水资源消耗量并未考虑渗漏和地表径流补给, 对于整个流域而言, 渗漏和地表径流损失的水资源可能通过水循环重复利用, 所以这些消耗部分并没有实质性的损失, 以上概念会导致作物水分利用效率偏低<sup>[1]</sup>. 为了克服水资源利用效率估算偏低的不足, 一些研究者提出了新的灌

收稿日期: 2012-09-16; 修订日期: 2012-12-12

基金项目: 中国科学院西部行动计划三期项目“黑河流域生态-水文遥感产品生产算法研究与应用试验”(KZCX2-XB3-15); 国家自然科学基金项目“黑河流域中游水-生态-经济模型综合研究”(91125019)资助

作者简介: 徐凤英 (1986—), 女, 四川蓬安人, 2010 年毕业于西华师范大学, 现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所读硕士研究生, 主要从事作物水生产力研究. E-mail: xfy677@163.com

\* 通讯作者: 盖迎春, E-mail: gtw@lzb.ac.cn

溉效率的概念. Jensen<sup>[22]</sup>提出了灌溉水净利用系数概念, 此概念中加入了灌溉回归水, 使其更适用于水资源管理; Willardson 等<sup>[23]</sup>提出了消耗比例概念, 如消耗性使用比例即作物蒸散量占田间灌溉水量的百分比; Keller 等<sup>[24]</sup>提出了灌溉水有效利用系数概念, 即作物蒸散量与田间净灌溉水量之比, 田间净灌溉水量为田间总灌溉水量减去可被重复利用的地表径流和渗漏; Perry<sup>[25]</sup>和 Burt 等<sup>[26]</sup>提出了收益性和非收益性消耗比例概念, 认为此概念可保持与水资源管理的一致性. Seckler 等<sup>[27]</sup>将这些概念称为新经典灌溉利用系数, 但从根本上讲还是一种工程学上的效率概念<sup>[1]</sup>. 随着水资源短缺的加剧, 一些研究者开始关注农业水资源的经济产出. IWMI(International Water Management Institute)提出了作物水生产力(Water Productivity, WP)的概念<sup>[1, 27]</sup>, 即单位(体积或价值)水量所生产出的产品数量或价值. 作物水生产力的定义依据在使用时转移或者消耗的水量有以下三种表达方式: 纯自然的作物水生产力概念; 自然的和经济的综合作物水生产力概念以及经济作物水生产力概念; 水生产力提出后更强调水资源产生的价值. 例如, 对于一个流域来说提高 WP 就是从单位水量获得更大的价值. 本文从作物水生产力的评估原理, 评估方法比较等方面综述了作物水生产力国内外的研究成果, 并展望未来评估方法.

作物水生产力评估包括水生产力现状估算及其时空动态的预测, 基本原理是: 根据研究目的确定作物水生产力的具体定义, 通过直接测量或借助模型计算获取水流(如蒸散量、灌溉水等)与产出(粮食产量、经济产出等)信息, 在此基础上使用作物产出值除以水资源消耗量计算作物水生产力<sup>[1, 27]</sup>. 农业生产中常用的作物水生产力指标有  $WP_T$ 、 $WP_{ET}$ 、 $WP_{I+P}$ 、 $WP_I$ 和  $WP_{\$}$ . 在作物尺度, 蒸腾( $T$ )是唯一的出项, 可以用  $WP_T$ 表示:

$$WP_T = \frac{Y}{T} \quad (1)$$

式中:  $Y$  为作物产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $T$  为水分消耗量( $\text{mm}$ ). 在田间尺度评价作物水生产力时, 水资源消耗量用蒸散量(Evapotranspiration,  $ET$ )表示. 因此, 可以使用  $WP_{ET}$ , 将式(1)中的  $T$  换为  $ET$ ; 如果入项为灌溉和降雨, 而灌溉和降水同时作为作物耗水量, 则使用  $WP_{I+P}$ 表示, 将式(1)中的  $T$  换为  $(I+P)$ , 其中:  $I$  为灌溉水量;  $P$  为有效降水量. 如果在干旱地区, 降雨量很少的情况下, 可以使用

$WP_I$ 表示, 将式(1)中的  $T$  换为  $I$ . 作物水生产力单位均为  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . 如果研究者主要对作物的经济产量感兴趣, 作物水生产力也可以依据经济效益来表述, 用  $WP_{\$}$ 表示<sup>[28-29]</sup>:

$$WP_{\$} = \frac{Y_{\$}}{ET} \quad (2)$$

式中:  $Y_{\$}$  为作物的经济产量( $\$ \cdot \text{hm}^{-2}$ ),  $\$$  为美元符号; 此表达式中作物水生产力单位为  $\$ \cdot \text{m}^{-3}$ . 尽管作物水生产力的表达方式不同, 但其表达的含义都是单位水的产量或产值.

$WP_{ET}$ 在年际间、地区间均具备可比性、且方法易统一, 计算简便, 因此我国目前计算作物水生产力宜采用此指标<sup>[30]</sup>.

影响作物水生产力的要素主要包括土壤、农作物种类和品种、气候和管理, 从以上公式可以看出, 这些要素主要通过水流和产出信息对作物水生产力产生影响. 土壤物理性质决定其渗透和蓄水能力, 这影响着降水转换为土壤水分的能力和土壤水分向地下径流转换的能力, 进而影响作物水生产力; 经研究发现, 玉米、高粱等 C4 作物的水分和养分利用效率要明显高于小麦、水稻等 C3 作物, 其水生产力也相应要高一些; 而气候则是通过大气饱和和水汽压影响蒸散发, 从而影响作物水生产力; 管理要素主要是指田间管理, 包括灌溉、施肥、除草剂使用和种植方式等, 这些都能直接或间接影响作物水生产力<sup>[1, 5, 31]</sup>. 综合目前国内的研究结果发现, 今后提高作物水生产力的关键在于作物品种的改良、作物对气候的响应以及在各个空间尺度上的作物和水资源综合管理水平的提高, 从而尽可能地提高作物产量水平, 而在我国提高农作物水生产力水平的任务是十分艰巨的, 特别是在水资源短缺的北方地区, 提高作物水生产力是实现节水的重要方式之一. 此外, 还需继续寻找提高作物水生产力的途径<sup>[32-34]</sup>.

## 2 评估方法

### 2.1 收获法

收获法<sup>[35]</sup>是农学中测定作物水生产力的传统方法, 即作物收获部分或全部干物质产量与田间耗水量的比值来计算作物水生产力. 田间耗水量则通过水量平衡法来估算<sup>[36]</sup>. 徐攀<sup>[37]</sup>利用此方法估算了黄淮海平原区域作物水生产力, 得出 1999 年黄淮海平原粮食作物水生产力为  $1.52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . 但是此方法由于获取产量数据和田间耗水量估算均存在一些

误差, 导致计算结果有一定偏差。

## 2.2 模型方法

模型方法即根据作物生长所需要的气象条件、作物品种、土壤状况以及管理措施等条件模拟, 描述作物的生长发育过程、籽粒形成过程, 同时还模拟作物生长过程的水分消耗量, 进而进行作物水生产力的估算<sup>[38]</sup>。现用于作物水生产力评估的模型主要有 SWAP、APSIM 和 DASSAT 模型。

### 2.2.1 SWAP 模型

SWAP(Soil-Water-Atmosphere-Plant)模型最早由 Feddes 等在 SWATR(Soil Water Actual Transpiration Rate)模型的基础上开发而成, 经过 30 多年的发展, 不断完善了作物生长模拟、土壤蒸发和植物蒸腾等子模块, 形成了土壤-水-大气-植物耦合模型(Soil-Water-Atmosphere-Plant; SWAP)模型<sup>[39]</sup>。该模型是一个基于物理机制的农业水文模型, 用来模拟农田尺度上水盐运移过程的专业模型<sup>[40]</sup>。SWAP 模型中采用简单作物模型模拟作物最终产量, 运用联合国粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 公式计算作物参考蒸散量, 结合土壤的实际含水量计算作物实际蒸散量, 进而计算作物水生产力。因此, SWAP 模型有着广泛的实用性和有效性, 特别是在农业灌溉水管理方面。但是 SWAP 模型模拟过程需要大量较为详细的参数, 包括气象数据、土壤数据、作物参数、灌溉数据以及初始条件和边界条件。由于获取详细数据有困难, 因此 SWAP 在应用推广方面受到一定限制<sup>[41]</sup>。

在运用 SWAP 模型模拟作物水生产力的实践中, Vazifedoust 等<sup>[29]</sup>选择伊朗的 8 个半干旱区域, 用校准后的 2004—2005 年的灌溉、土壤和作物数据以及 SWAP 模型, 估算了小麦、玉米、向日葵和甜菜的水生产力: 小麦和玉米为  $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 向日葵为  $1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 甜菜为  $1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。Singh 等<sup>[42]</sup>在印度的 Sirsa 地区使用 SWAP 模型分析灌溉作物水生产力, 利用 2001—2002 年常规的气象、土壤和作物数据, 选择两块小麦-水稻和三块小麦-棉花的套种地估算作物产量、作物蒸腾以及作物蒸散量, 进而估算作物水生产力。结果显示, 夏季作物(棉花和小麦)的水生产力低于冬季作物(小麦)的水生产力, 这主要是由于在夏季饱和水汽压差较大, 而饱和水汽压差主要影响作物蒸腾( $T$ )水分利用效率, 因此饱和水汽压对作物水生产力影响也较大。

### 2.2.2 APSIM 模型

APSIM(Agricultural Production System Sim-

ulator)模型<sup>[43]</sup>是澳大利亚联邦科工组织和昆士兰州政府的农业生产系统小组(Agricultural Production Systems Research Unit; APSRU)联合开发的农业系统模拟模型, 主要包括 4 个模块: 生物物理模块, 管理模块, 环境模块以及驱动模拟过程模块。APSIM 可模拟作物生长过程及土壤水氮动态, 通过生物物理模块模拟出作物产量, 环境模块模拟水分利用过程, 得到作物蒸散量。目前, 该模型能模拟的作物包括小麦、玉米、棉花、油菜、紫花苜蓿、豆类作物以及杂草等。APSIM 模型把各种不同的作物模型集成到一个公用的平台, 该平台的使用使得模型或模块之间的相互比较更加容易。因此, APSIM 模型具有很强的灵活性和可操作性, 并且已经在世界各地得到了广泛应用<sup>[44-45]</sup>。

在运用 APSIM 模型模拟作物水生产力的实践中, 陈超等<sup>[46]</sup>利用校准后的 APSIM 模型和华北平原区域 32 个气象站 1961—2005 年逐日气象数据, 结合 GIS 技术, 对华北平原不同供水情景下冬小麦、夏玉米水生产力空间分布特征进行了模拟研究。模拟结果表明: 当不考虑作物品种变化时, 华北平原小麦、玉米  $WP_{ET}$  分布响应于该区平均气候状况, 呈现出明显的东西分布特征, 表现为西部低东部高。

### 2.2.3 DSSAT 模型

农业技术推广决策支持系统 DSSAT(Decision Support System for Agro-technology Transfer)于 1983 年由美国 IBSNAT(International Benchmark Sites Network for Agro-technology Transfer)计划资助开发, 是一个基于生理生态的机理性模型, 综合考虑作物生长与大气、土壤、生物和人文等因素的相互作用。DSSAT 模型主要用于田间尺度, 研究单一作物在不同气候和土壤条件下作物的生长、发育和产量。DSSAT 模型中的 CERES(Crop Environment Resource Synthesis)模块(即将 5 个谷类作物模型整合为一个独立的模块)可估算作物产量。同时, 提供了 Priestly-Taylor 方法和 Penman-Monteith 方法来计算参考蒸散量, 然后估算作物实际蒸散量<sup>[47]</sup>。DSSAT 模型能评价 17 种作物水生产力的状况, 并且具有操作简洁、功能强大、应用范围广等优点, 此模型是最为广泛的作物模型之一<sup>[46]</sup>。

Amor 等<sup>[48]</sup>应用 DSSAT 模型中的 CERES 模块同时结合 GIS 对菲律宾吕宋岛上北伊洛克斯的拉瓦格流域(The Laoag River Basin, Ilocos Norte, Luzon)水稻、玉米和花生的水生产力进行了模拟。

结果显示: 在同等条件下, 玉米的作物水生产力最大, 其次是花生, 最小是水稻。同时 Nangia 等<sup>[49]</sup>在不同灌水量和施氮肥情况下对美国盖恩施维尔地区用 DSSAT 模型对玉米水生产力进行了模拟, 结果显示灌水量和施肥对作物水生产力的影响是极大的。杨勤等<sup>[50]</sup>利用 DSSAT 作物模型中的 CERES-Wheat 小麦模型, 在排除虫害和病害影响条件下, 以宁夏永宁站永良 4 号春小麦为样本进行品种参数调试及模拟验证, 确定品种参数。

### 2.3 结合遥感或 GIS 的模型方法

由于采用模型方法估算作物水生产力受空间数据资料的收集和整理、空间数据处理的限制, 使其大多限于田间尺度上的评价, 评价区域尺度作物水生产力空间变化时受到限制<sup>[51]</sup>。因此, 一些研究者通过与遥感或 GIS 结合的模型方法, 为作物水生产力在区域水平上的研究提供新的方法。结合遥感和 GIS 的优势, 有利于空间表达模型模拟的蒸散量、产量和作物水生产力, 同时, 也为分析感兴趣区域的作物水生产力提供了方便和可视化的效果<sup>[52]</sup>。

早在 20 世纪 80 年代就有研究者指出, 遥感信息通过对模拟过程重新初始化和参数化的方法用来提高模型的精度。目前, RS 技术通常以驱动法<sup>[53]</sup>、初始化/参数化法<sup>[54]</sup>和同化法<sup>[55]</sup>这三种方式和模型进行集成。目前国内外遥感数据主要是通过 SEBAL 模型结合来评估作物水生产力, Zwart 等<sup>[56]</sup>、Immerzeel 等<sup>[57]</sup>和 Li 等<sup>[58]</sup>都使用结合遥感数据的 SEBAL 模型分别估算了墨西哥雅基河流域、南印度的 Bhima 流域和中国华北平原的小麦作物水生产力。结果显示: 雅基河流域小麦水生产力高于 Bhima 流域和中国华北平原。同时, 遥感数据还可结合 SSEB 和 WATPRO 模型来评估作物水生产力, Cai 等<sup>[59]</sup>使用结合遥感数据的 SSEB 模型模拟出印度恒河流域水稻水生产力为  $0.74 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在遥感数据和 WATPRO 模型结合上, Zwart 等<sup>[60]</sup>对全球小麦使用遥感数据和 WATPRO 模型描绘小麦水生产力, 结果显示小麦水生产力变化范围为  $0.2 \sim 1.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

GIS 技术可以揭示作物水生产力的区域分布特征和存在的问题, 目前 GIS 与模型结合一般分为三个层次: 连接、结合和集成<sup>[53]</sup>。Kang 等<sup>[61]</sup>利用结合 GIS 的地下水模型 MODFLOW(模块化三维有限差分地下水流模型)对黄河流域柳园口灌区的作物水生产力进行了模拟, 认为减少非有益的蒸散量可以使更多的水应用在其他领域, 从而提高作物水

生产力。同时 Liu 等<sup>[62]</sup>在集成的层次上, 开发了基于 GIS 的 EPIC 模型(GEPIC 模型), 并且模拟了全球的作物水生产力。结果表明: 世界各国或地区作物水生产力发展水平极度不平衡, 发达国家远高于发展中国家。Zwart 等<sup>[63]</sup>, Cai 等<sup>[64]</sup>和张治川<sup>[65]</sup>的研究也证实了这一点, 以水稻看, 我国水稻水生产力只有  $0.4 \sim 0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 而西欧国家已经达到了  $1.7 \sim 2.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

### 3 评价方法比较分析

收获法是估算作物水生产力的基础方法, 比较简单, 精度不高, 使得计算结果存在一定的偏差, 使用该方法评估作物水生产力的事例也较少。

模型方法能综合考虑气象、土壤、作物品种、作物中种植因素对作物生长发育的影响, 逐日连续地模拟生育期内作物的生长发育状况。有一定的模拟水平, 是一种常用的模拟作物水生产力的研究方法。由于模型完善及功能逐渐被认可, 目前被研究人员广泛使用。大多数模型在单点(plot/field-specific)尺度上的模拟取得了良好效果, 并得到了很好的检验, 但是在区域尺度上使用模型时由于获取大范围、大尺度的宏观数据的困难, 而且由于应用尺度的增大, 我们需要考虑更多的过程, 增加了问题的复杂性, 这就影响了作物模型在区域尺度上的应用。然而, 模型方法模拟作物水生产力的研究和应用还存在许多问题。例如, 在研究方面, 对作物许多生理生态过程的认识仍然不够透彻, 一些过程描述仍然是经验性的, 从而影响到模型的普适性。在应用方面, 模型应用于区域尺度的要求日益迫切, 但是, 区域地表土壤和作物参数以及其他环境参数的获取困难是困扰作物模型区域应用的主要问题, 并且还会影响模拟精度。此外, 模型一般均需要大量参数, 有些参数可靠性不强, 导致模型验证和检验两方面都存在一定问题<sup>[66-68]</sup>。

在进行区域尺度的研究时, 将 RS 或 GIS 技术结合在模型中, 将会比单纯的模型方法具有更大的优越性, 有助于解决一些模型方法不能解决的问题<sup>[52]</sup>。随着 RS 和 GIS 技术的发展, 将会有更多的研究人员利用这种方法对大尺度的作物水生产力进行研究。结合 RS, 通过使用定量数据来代替模型中一些难获得的参数来改进模型的精度, 而且可以更容易获取大范围的宏观数据, 提高模型的应用尺度。结合 GIS 的模型方法可以弥补单纯模型方法在构建空间数据库、空间制图和空间分析等方面存在

表 1 各种评估方法比较

Table 1 A comparison of different evaluation methods

方法	优点	缺点	适用范围
收获方法	方法简单	精度不高,误差较大	单点或相同类型区
模型方法	基于生理生态机理,能综合考虑气候、土壤和作物等因素对水生产力的影响;并且在单点尺度上有良好的模拟和验证	目前还没有完全普适的用于区域或者更大尺度的模型	单点或相同类型区
结合 RS 或 GIS 的模型方法	同时考虑了模型的机理性、RS 的宏观性和 GIS 的空间分析能力	RS、GIS 和模型结合存在一些技术难点	区域尺度或者更大范围

的不足,而 GIS 的空间分析功能可以将模型模拟的作物水生产力与其影响因素进行叠加分析,探寻作物水生产力的时空变化规律。

目前,将 RS、GIS 技术与模型结合还存在一些技术难题,比如当使用模型从田间尺度扩展到区域尺度时所涉及到描述作物生长的物理和生态过程是否适用并未得到验证<sup>[69]</sup>。此外,大多数模型是建立在田间尺度上的一维模型,将其从田间尺度扩展到区域尺度通常是采用 GIS 空间分析技术,将空间不均匀的气候、土壤和作物等要素划分为均质性单元,然后在每个单元运行模型,再利用 GIS 来表达模型模拟结果,得到作物水生产力的空间分布。但是这种扩展是“伪三维”的,这种一维模型在三维空间应用存在的主要问题是单元间的相互作用,例如:区域上不同作物生长的竞争和物质的水平流动问题。而结合 RS、GIS 和模型的方法并没有解决这个难题,因为此方法仍然是在每个均匀的单元上应用模型,单元之间并不发生交换,并不能从根本上解决水平物质交换问题<sup>[70-71]</sup>。表 1 列出了各种方法的优缺点以及适用范围。

## 4 结论与展望

### 4.1 展望

从表 1 中可以看出,现阶段对作物水生产力评估方法中收获方法比较适用于单点或相同类型区域,但存在精度不高的问题。而模型方法比收获方法在单点尺度上要有更好的模拟和验证效果。目前,将 RS 或 GIS 与模型进行结合用来估算作物水生产力的方法无疑可以进一步提高结果的准确性,将是今后评估的发展趋势。虽然还存在一些不足和技术难点,但从整体上看,这种方法既充分利用了模型的机理性,又考虑了遥感技术的宏观性和 GIS 技术的空间分析处理能力,将模型的应用提升至大范围的区域尺度,从而对模型的应用前景进行了有效的扩展和提高。

随着遥感技术的发展,模型模拟单元的空间分辨率将逐步提高,利用遥感数据直接估测土壤水分养分等参数将成为可能,而模型输入参数的插值结果也将会随着空间插值算法的不断完善变得更加精确。因此,遥感数据和模型的结合,对于提高模拟作物水生产力评价的精度,提高模型的普适性,挖掘其应用潜力,指导作物精确灌溉以保护环境、节约水资源等有着广阔的应用前景。目前,农业水资源利用不仅要实现节水目标,更重要的是要在节水的前提下实现产出的高效益。所以,要强调作物水生产力的经济产出,在评估方法方面,可以在模型中加入社会经济因素模块,结合生态经济,建立其参数库,综合考虑经济因素和风险分析,能够从机理上解释作物水生产力和社会经济的关系,以实现作物经济水生产力的估算。

### 4.2 结论

利用模型对作物水生产力进行模拟,是目前主要的评估方法,但从长远来看,模型的研究和开发方面应该有待提高。例如,在研制方面,要有明确的应用目标和终端用户;而且还应该提高一些模块的研究力度,如病虫害模块和土壤盐碱度模块。目前,已经有越来越多的研究人员选择将 RS 或 GIS 技术运用到作物水生产力的研究中,运用 RS 的实时性、宏观性,以及 GIS 强大的空间分析能力,从而提高研究的尺度和结果的准确性。在 RS、GIS 技术和模型结合方面还应该根据不同目的采取不同侧重点。比如结合是为了研究,则应该实现模型源代码的共享;如果是为了广泛用户应用,则应该在模型的简单性、直观性、界面交互性和友好性方面做出更大努力。本文首先对作物水生产力的概念和评估方法进行了基本的介绍,然后对国内外应用这些方法做出的评估案例进行了系统的分析。通过以上分析可以看出,未来作物水生产力评估中将 RS 或 GIS 技术与模型进行结合虽然并不能完美的模拟出结果,但必将会是当前作物水生产力评估方法的重要趋势和发展方向。

## 参考文献 (References):

- [1] Liu Hu, Zhao Wenzhi. Advances in researches of agriculture water productivity [J]. *Advance in Earth Science*, 2007, **22** (1): 58–63. [刘鹤, 赵文智. 农业水生产力研究进展[J]. *地球科学进展*, 2007, **22**(1): 58–63.]
- [2] Rockstrom J, Barron J. Water productivity in rainfed systems: overview of challenges and analysis of opportunities in water scarcity prone savannahs [J]. *Irrigation Science*, 2007, **25**: 299–311.
- [3] Ge Yingchun, Li Xin. Water resources management decision support system: review and prospect [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(5): 1248–1256. [盖迎春, 李新. 水资源管理决策支持系统研究进展与展望[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(5): 1248–1256.]
- [4] Kijne J W, Barker R, Molden D. *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement* [M]. Wallingford, UK: CABI Publishing, 2003: 1–332.
- [5] Zwart S J, Bastiaanssen W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, **69**: 115–133.
- [6] Rashidi M, Gholami M. Review of crop water productivity values for tomato, potato, melon, watermelon and cantaloupe in Iran [J]. *International Journal of Agricultural & Biology*, 2006, **80**: 186–196.
- [7] Igbadun H E, Mahoo H F, Tarima S K P R, *et al.* Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the great Ruaha River basin, Tanzania [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, **85**: 141–150.
- [8] Igbadun E L, Ramalan A A, Oiganji E. Effects of regulated deficit irrigation and mulch on yield, water use and crop water productivity of onion in Samaru, Nigeria [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, **109**: 162–169.
- [9] Oluwasemire K O, Stigter C J, Owonubi J J. Seasonal water use and water productivity of millet-based cropping systems in the Nigerian Sudan savanna near Kano [J]. *Agricultural Water Management*, 2002, **56**: 207–227.
- [10] Oweis I T Y, Hachum A Y. Improving water productivity in the dry areas of West Asia and North Africa [M]// Kijne J W, Barker R, Molden D. *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*. Wallingford, UK: CABI Publishing, 2003: 179–198.
- [11] Loeve R, Dong B, Molden D. Issues of scale in water productivity in the Zhanghe irrigation system: implications for irrigation in the basin context [J]. *Paddy Water Environ*, 2004, **2**: 227–236.
- [12] Ahmada M D, Turrall H, Nazeer A, *et al.* Diagnosing irrigation performance and water productivity through satellite remote sensing and secondary data in a large irrigation system of Pakistan [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, **96**: 551–564.
- [13] Allam M N, Abdel-Azim R. Review and analysis of water use efficiency and water productivity in Egypt [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, **96**: 1275–1284.
- [14] Mukherjee A, Sarkar S, Chakraborty P K. Marginal analysis of water productivity function of tomato crop grown under different irrigation regimes and mulch managements [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, **104**: 121–127.
- [15] Bluemling B, Yang Hong, Pahl-Wostl C. Making water productivity operational: A concept of agricultural water productivity exemplified at a wheat maize cropping pattern in the North China plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, **91**: 11–13.
- [16] Cai Ximing, Yang Yichen, Claudia R. Agricultural water productivity assessment for the Yellow River basin [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, **98**: 1297–1306.
- [17] Bouman B A M, Feng L, Tuong T P, *et al.* Exploring options to grow rice using less water in Northern China using a modelling approach II. Quantifying yield, water balance components, and water productivity [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, **88**: 23–33.
- [18] Nuer Maimaiti. The analysis of crop water productivity in Aksu River basin irrigation system [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2010, **16**(8): 933–934. [努尔·麦麦提. 阿克苏河流域灌区作物水分生产率现状分析[J]. *水利科技与经济*, 2010, **16**(8): 933–934.]
- [19] Viets F G. *Increasing water use efficiency by soil management* [C]// *Plant Environment and Efficiency Water Use*. Madison, Wisconsin, USA, 1966: 259–274.
- [20] Wouter W. *Influences on the Efficiency of Irrigation Water Use* [D]. Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1992: 31–41.
- [21] Lei Bo, Liu Yu, Xu Di, *et al.* Advance in evaluation study on utility of a agriculture water utilization [J]. *Advances in Water Science*, 2009, **20**(5): 732–738. [雷波, 刘钰, 许迪, 等. 农业水资源利用效用评价研究进展[J]. *水科学进展*, 2009, **20**(5): 732–738.]
- [22] Jensen M E. *Water conservation and irrigation system* [C]// *Proceedings of the Climate-Technology Seminar*, Colombia, 1977: 208–250.
- [23] Willardson L S, Allen R G, Frederiksen H, *et al.* Universal fractions and the elimination of irrigation efficiencies [C]// Paper presented at the 13<sup>th</sup> Technical Conference of the US Committee on Irrigation and Drainage. Denver: Colorado, 1994: 15.
- [24] Keller A A, Keller R J. *Effective Efficiency: A Water Use Efficiency Concept for Allocating Freshwater Resources* [R]. Winrock International: Water Resources and Irrigation Decision, VA, 1995: 19.
- [25] Perry C J. *The IIMI water balance framework: a model for project level analysis* [R]. Colombo: Twmi, 1996.
- [26] Burt C M, Clemmens A J, Strelkoff T S, *et al.* Irrigation perform measures: efficiency and uniformity [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1997, **123**: 423–442.
- [27] Seckler D, Molden D, Sakhivadivel R. The concept of efficiency in water resource management and policy [M]// Kijne J W, Barker R, Molden D. *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*. Wallingford, UK: CABI Publishing, 2003: 37–52.
- [28] Bouman B A M. A conceptual framework for the improvement of crop water productivity at different spatial scales [J]. *Agricultural Systems*, 2007, **93**: 43–60.
- [29] Vazifedoust M, van Dam J C, Feddes R A, *et al.* Increasing water productivity of irrigated crops under limited water sup-

- ply at field scale[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, **95**: 89–102.
- [30] Li Yuanhua, Zhao Jinhe, Zhang Siju, *et al.* Calculation method & application of moisture productivity[J]. *China Water Resources*, 2001, **8**: 65–68. [李远华, 赵金河, 张思菊, 等. 水分生产率计算方法及其应用. *中国水利*, 2001, **8**: 65–68.]
- [31] Xu Di, Gong Shihong, Li Yinong, *et al.* Overview of recent study on improvement approaches and methods for crop water productivity[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, **41**(6): 631–639. [许迪, 龚时宏, 李益农, 等. 作物水分生产率改善途径与方法研究综述. *水利学报*, 2010, **41**(6): 631–639.]
- [32] Li Baoguo, Huang Feng. Agricultural water analysis framework and crop water productivity in China[J]. *Water Saving Irrigation*, 2009, **4**: 16–23. [李保国, 黄峰. 农业用水分析新框架和中国粮食作物水分生产力. *节水灌溉*, 2009, **4**: 16–23.]
- [33] Liu Qijun, Li Fengrui. A systemic consideration of the development of water-saving society in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(6): 1202–1210. [刘七军, 李锋瑞. 对我国节水型社会建设的系统思考[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(6): 1202–1210.]
- [34] Deng Zhengyong, Zhang Qiang, Wang Runyuan, *et al.* A review of the commercial crops in Northwest China: response to regional climate change and coping technology[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(4): 855–862. [邓振镛, 张强, 王润元, 等. 西北地区特色作物对气候变化响应及应对技术的研究进展[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(4): 855–862.]
- [35] Wang Jianlin, Yang Xinmin, Fang Quanxiao. The expatiation on menstruating method of field water use efficiency in different scale [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, **26**(6): 66–80. [王建林, 杨新民, 房全孝. 不同尺度农田水分利用效率测定方法评述[J]. *中国农学通报*, 2010, **26**(6): 77–80.]
- [36] Liu Guoshui. The Study on the Crop Evapotranspiration Measurement and Computation [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2008. [刘国水. 作物蒸散量测定与计算方法研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2008.]
- [37] Xu Pan. Estimation of Regional Water Productivity for Grain Crops in Huang-Huai-Hai Plain [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. [徐攀. 黄淮海平原区域粮食作物水分生产力的估算[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.]
- [38] Pan Xuebiao. The Theory of Crop Models [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 1–203. [潘学表. 作物模型原理[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 1–203.]
- [39] Wei Zhanmin. Study on Crop-Water Relationship and Availability of Field Irrigation Water Based on SWAP Model Simulation in Arid Area [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2003. [魏占民. 干旱区作物-水分关系与田间灌溉水有效性的 SWAP 模型模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2003.]
- [40] van Dam J C, Huygen J, Wesseling J G, *et al.* Theory of SWAP version 2.0. Technical Reference Manual [M]. Technical Document 45, Wageningen: Winand Staring Centre, 1997: 1–167.
- [41] He Jin. The Study of Farmland Water Simulation Based on SWAP Model[D]. Xian: Chang'an University, 2006. [何锦. 基于 SWAP 模型的农田水分动态模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.]
- [42] Singh R, van Dam J C, Feddes R A. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, **82**: 253–278.
- [43] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L. An over view of APSIM, a model designed for farming systems simulation [J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, **28**: 267–288.
- [44] Shen Yuying, Nan Zhibiao, Bill Bellotti, *et al.* Development of APSIM(Agricultural Production Systems Simulation) and its application[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(8): 1027–1032. [沈禹颖, 南志标, Bill Bellotti, 等. APSIM 模型的发展与应用[J]. *生态应用学报*, 2002, **13**(8): 1027–1032.]
- [45] Lin Zhonghui, Mo Xingguo, Xiang Yueqin. Research advances on crop growth models [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, **29**(5): 750–758. [林忠辉, 莫兴国, 项月琴. 作物生长模型研究综述[J]. *作物学报*, 2003, **29**(5): 750–758.]
- [46] Chen Chao, Yu Qiang, Wang Enli, *et al.* Modeling the spatial distribution of crop water productivity in the north China plain[J]. *Resources Science*, 2009, **31**(9): 1477–1485. [陈超, 于强, 王恩利, 等. 华北平原作物水分生产力区域分异规律模拟[J]. *资源科学*, 2009, **31**(9): 1477–1485.]
- [47] Luo Qunying, Lin Erda. New advance of the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)[J]. *Meteorological Monthly*, 1996, **22**(12): 10–13. [罗群英, 林而达. 农业技术决策支持系统 (DSSAT) 新进展[J]. *气象*, 1996, **22**(12): 10–13.]
- [48] Amor V M I, Ashim D G, Rainer L. Application of GIS and crop growth models in estimating water productivity [J]. *Agriculture Water Management*, 2002, **54**: 205–225.
- [49] Nangia V, de Fraiture C, Turrall H. Water quality implications of raising crop water productivity [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, **95**: 825–835.
- [50] Yang Qin, Xu Yinlong, Lin Erda, *et al.* Application of DSSAT crop prediction of potential yield of spring wheat, Ningxia [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, **27**(2): 41–48. [杨勤, 许吟隆, 林而达, 等. 应用 DSSAT 模型预测宁夏春小麦产量演变趋势[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, **27**(2): 41–48.]
- [51] Xu Xinliang, Du Chaozheng, Min Xibi. Research progress on the combination of RS & GIS technology and crop model [J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2012, **40**(16): 9146–9150. [徐新良, 杜朝正, 闵稀碧. RS 和 GIS 技术与作物模型结合的研究发展[J]. *安徽农业科学*, 2012, **40**(16): 9146–9150.]
- [52] Wesseling J G, Feddes R A. Assessing crop water productivity from field to regional scale [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, **86**: 30–39.
- [53] Li Cunjun, Wang Jishi, Wang Xian, *et al.* Methods for integration of remote sensing data and crop model and their prospects in agricultural application [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, **24**(11): 295–301. [李存军, 王记实, 王娴, 等. 遥感数据和作物模型集成方法与应用前景[J]. *农业工程学报*, 2008, **24**(11): 295–300.]
- [54] Plummer S E. Perspectives on combining ecological process models and remotely sensed data [J]. *Ecological Modelling*,

- 2000, **129**(2-3): 169-186.
- [55] Fischer A, Kergoat L, Dedieu G. Coupling satellite data with vegetation functional models; Review of different approaches and perspectives suggested by the assimilation strategy [J]. *Remote Sensing Review*, 1997, **15**(1-4): 283-303.
- [56] Zwart S J, Bastiaanssen W G M. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, **89**: 287-296.
- [57] Immerzeel W W, Gaur A, Zwart S J. Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, **95**: 11-24.
- [58] Li Hongjun, Zheng Li, Lei Yuping, *et al.* Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in north China plain using remote sensing technology[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, **95**(11): 1271-1278.
- [59] Cai X L, Sharma B R. Integrating remote sensing, census and weather data for an assessment of rice yield, water consumption and water productivity in the Indo-Gangetic river basin [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, **97**: 309-316.
- [60] Zwart S J, Bastiaanssen W G M, de Fraiture C. A global benchmark map of water productivity for rainfed and irrigated wheat [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, **97**: 1617-1627.
- [61] Kang Yinong, Khan Shahbaz, Ma Xiaoyi. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security a review [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, **19**: 1665-1674.
- [62] Liu J, Zehnder A J B, Yang H. Drops for crops: modeling crop water productivity on a global scale [J]. *Global NEST Journal*, 2008, **10**(3): 295-300.
- [63] Zwart S J, Bastiaanssen W G M, de Fraiture C. WATPRO: A remote sensing based model for mapping water productivity of wheat [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, **97**: 1628-1636.
- [64] Cai Ximing, Rosegrant M W. World water productivity: current situation and future options[M] // Kijne J W, Barker R, Molden D. *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*. Wallingford, UK: CABI Publishing, 2003: 163-178.
- [65] Zhang Zhichuan. Study on Integrated Technologies for Improving Crop Water Productivity [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. [张治川. 提高作物水分生产率技术集成研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.]
- [66] Molden D, Murray-Rust H, Sakthivadivel R, *et al.* A water productivity framework for understanding and action[R]// Kijne J W, Barker R, Molden D. *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*. Wallingford, UK: CABI Publishing, 2003.
- [67] Pichter S E. Perspectives on combining ecological process models and remotely sensed data [J]. *Ecological Modelling*, 2000, **129**(2-3): 169-186.
- [68] Feng Qinghe, Zhang Jianping, Wang Xiangdong, *et al.* Progresses and perspectives in crop growth simulation research [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2002, **25** (Suppl.): 17-19. [丰庆河, 张建平, 王向东, 等. 作物模拟研究的进展[J]. 河北农业大学学报, 2002, **25**(增刊): 17-19.]
- [69] Wu Zejin, Han Zhencheng, Jin Huigang. The application and prospect of '3S' technology in crop growth model [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2008, **12**(4): 138-140. [吴泽金, 韩振成, 靳会刚. "3S"在作物模型中的应用与展望[J]. 河北农业科学, 2008, **12**(4): 138-140.]
- [70] Hansen J W, Jones J W. Scaling-up crop models for climate variability applications [J]. *Agricultural System*, 2000, **65**: 43-72.
- [71] Luo Yi, Guo Wei. Development and problems of crop models [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, **24**(5): 307-312. [罗毅, 郭伟. 作物模型研究与应用中存在的问题[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(5): 307-312.]

## A Review of Evaluation Methods of Crop Water Productivity

XU Feng-ying, GE Ying-chun, XU Zhong-min, WANG Wei-zhen  
*(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)*

**Abstract:** Water consumption in agriculture is the most part of water resources consumption in both global and regional scales. Valuation of agricultural water productivity is of importance for improving the local agricultural water resources utilization, especially in the arid areas. In this paper, first, the basic concept of crop water productivity (CWP) is introduced, and the core of its affecting factors is analyzed. Then, the evaluation methods

of CWP are summarized and divided into the harvest method, the model method and the integrated RS (or GIS) method. The advantages and disadvantages of these three methods are discussed. Finally, the development trend of research on CWP is prospected, and it is considered that the method of RS (or GIS) combined with model method to estimate the CWP will be better in the future.

**Key words:** crop water productivity; evaluation methods; model of crop water productivity