doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.013

# 基于遥感的农业用水效率评价方法研究进展\*

尚松浩'蒋磊'杨雨亭2

(1.清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084;2.澳大利亚联邦科学与工业研究组织水土研究所,堪培拉 ACT 2601)

摘要:遥感技术的发展为区域尺度蒸散发计算、作物分布识别及估产提供了一条有效途径,为基于遥感信息的灌区 灌溉水利用效率及作物水分利用效率定量评价奠定了基础。回顾总结了遥感蒸散发模型、瞬时蒸散发升尺度方 法、日蒸散发插值方法、作物分布识别方法及作物估产模型的研究进展,评述了遥感蒸散发及作物估产结果在灌区 灌溉水利用效率及作物水分利用效率评价中的应用情况。提出了相关领域需要进一步研究的问题,包括适合非均 匀下垫面特点且具有较强物理基础的灌区遥感蒸散发模型、日蒸散发插值中灌溉或降雨引起土壤含水量突变情况 的处理、农田蒸散发中灌溉水有效消耗量的准确估算、能适应复杂种植结构并且适用于多年的作物分布遥感识别 模型以及精度较高且可操作性强的遥感估产模型等。

关键词:灌溉水利用效率 作物水分利用效率 遥感 蒸散发 作物分布 作物估产 中图分类号: S127 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)10-0081-12

# Review of Remote Sensing-based Assessment Method for Irrigation and Crop Water Use Efficiency

Shang Songhao<sup>1</sup> Jiang Lei<sup>1</sup> Yang Yuting<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
 2. CSIRO Land and Water, Canberra ACT 2601, Australia)

Abstract: Advances in remote sensing (RS) technology provide an effective approach for the estimation of regional evapotranspiration, crop classification and yield, which lays the foundation for the quantitative assessment of irrigation efficiency and crop water use efficiency. Relevant models and methods were reviewed, including RS-based evapotranspiration models, upscaling methods of instantaneous evapotranspiration to daily evapotranspiration, interpolation methods of available daily evapotranspiration, RS-based crop classification methods and crop yield estimation models, and assessment methods for irrigation efficiency and crop water use efficiency based on evapotranspiration and crop yield estimations. Furthermore, key issues that require further investigation were proposed, including RS-based evapotranspiration model with strong physical bases and applicable to heterogeneous land surfaces, proper interpolation method of daily evapotranspiration considering the abrupt change of soil water content due to irrigation and/or precipitation, precise estimation of irrigation water consumption in farmland evapotranspiration, RS-based crop classification model applicable to complex cropping pattern and multiyears, and operational RS-based crop yield estimation model with higher precision. With further developments of RS technology and relevant models, the quantitative assessment results of irrigation water use efficiency and crop water use efficiency will provide sound foundation for agricultural water management. Key words: Irrigation water use efficiency Crop water use efficiency Remote sensing

Evapotranspiration Crop classification Crop yield estimation

\*国家自然科学基金资助项目(51479090)和"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2013BAB05B03)

收稿日期:2015-06-29 修回日期:2015-07-25

作者简介:尚松浩,副教授,博士生导师,主要从事农业水文水资源研究,E-mail: shangsh@ tsinghua.edu.cn

# 引言

水是制约全球粮食安全、能源安全及环境健康 的重要因素<sup>[1]</sup>。农业是我国第一用水大户,农业用 水(主要是灌溉用水)占用水总量的60%以上,其中 北方干旱、半干旱、半湿润地区占70%以上<sup>[2]</sup>。但 灌溉用水效率总体较低,提高用水效率是水资源管 理的重要内容<sup>[3]</sup>,对于水资源可持续利用及社会经 济可持续发展至关重要。

近年来,随着工业及生活用水的不断增加,一些 灌区灌溉用水量呈现下降趋势。特别是 20 世纪末 全国开展大型灌区节水改造以来,干旱区灌溉可用 水量呈现减少的趋势<sup>[4]</sup>。如何准确估算不同条件 下的灌溉用水效率与作物水分利用效率、定量评估 灌区节水改造工程实施及灌溉用水量减少对用水效 率的影响,是灌溉用水管理中需要解决的关键问题。

农业用水效率评价中涉及到灌溉引水量、农田 耗水量、作物种植面积及产量等。目前,灌区的灌溉 引水量及主要渠道的分水量一般有监测数据,但不 同农田的耗水量、产量则难以大规模监测。随着遥 感技术的发展,遥感信息在水文学<sup>[5]</sup>、农业科学<sup>[6-7]</sup> 中的应用越来越广,为灌区尺度蒸散发计算<sup>[8]</sup>、作 物分布识别及估产<sup>[9]</sup>提供了可能。结合遥感信息 及有关地面观测信息计算灌区蒸散发及作物产量的 时空变化,可以进一步估算灌溉水利用效率和作物 水分利用效率,为农业水资源高效利用提供技术支 撑。

本文针对农业用水效率评价中涉及的主要问题,评价了基于遥感信息的区域蒸散发计算模型、作物分布识别及产量估算模型、基于遥感信息的灌溉 用水效率及作物水分利用效率评价方法等方面的研 究进展,指出了需要进一步深入研究的几个关键问题。

# 基于遥感信息的农业用水效率评价方法 研究框架

将水从水源输送到农田到被作物吸收利用,并 转化为生物量及产量,主要经过3个过程,即输配水 过程、灌水过程、作物吸水及产量形成过程。相应的 用水效率分别为渠系水利用系数(输配水效率)、田 间水利用系数(农田灌水效率)和作物水分利用效 率,其中前2个过程的效率通常统称为灌溉水利用 系数(灌溉效率)。这些效率指标是各种农业用水 效率指标<sup>[10-11]</sup>中最常用的指标。

在灌溉效率指标中,灌溉水利用系数表示输水、 灌水过程中的综合水分利用效率,通常表示为渠系 水利用系数与田间水利用系数的乘积<sup>[12]</sup>,其定义与 相互关系为

$$E_c = W_f / W_d \tag{1}$$

$$E_f = W_r / W_f \tag{2}$$

$$E_i = E_c E_f = W_r / W_d \tag{3}$$

E<sub>f</sub>——田间水利用系数

E<sub>i</sub>——灌溉水利用系数

₩<sub>d</sub>——渠首总引水量

W<sub>f</sub>——进入田间的净灌水量

W,——灌入作物根系层的水量

在当前的灌溉用水管理中,只有自灌溉水源的 引水量以及主要渠道的分水量是有监测数据的,而 进入田间的净水量与贮存在作物根系层的水量在一 般情况下很难进行大范围监测,因此难以根据灌溉 用水资料对上述3个灌溉效率指标进行直接的定量 计算。传统的渠道渗漏试验测定或模型模拟往往只 能得到一段渠道的渠道水利用系数<sup>[13]</sup>,田间水利用 系数的测定也往往只能针对典型农田进行。另一方 面,这些灌溉效率指标除了与灌溉渠系布置及灌水 技术等因素有关外,还与灌溉引水量及灌溉水文过 程密切相关<sup>[14]</sup>,由于灌溉渠系、渠道渗漏过程<sup>[15]</sup>及 田间灌水过程的复杂性,这类指标很难通过现场监 测或数学模型进行准确计算。

作物水分利用效率则反映作物吸收水分并形成 经济产量过程中的效率,通常表示为单位水分消耗 (农田蒸散发)的粮食产量,即

$$W_{UE} = 0.1 Y / ET$$
 (4)

式中 W<sub>UE</sub>——作物水分利用效率,kg/m<sup>3</sup>

Y——作物单产,kg/hm<sup>2</sup>

ET——农田蒸散发量,mm

通过对农田耗水量及产量的试验观测可以得到 农田尺度的作物水分利用效率<sup>[16]</sup>,但难以在整个灌 区范围内进行试验观测。利用模型模拟可以得到农 田或灌区尺度作物水分利用效率<sup>[17-18]</sup>,但如果要模 拟得到作物水分利用效率的空间分布特征,往往需 要详细的土壤、作物、用水等因素的分布作为模型输 入,靠传统的统计方法难以准确获得。

根据灌溉水利用系数、作物水分利用效率的概念,除了目前已有的灌区引水量监测数据之外,还需要定量估算灌溉水的有效消耗量、确定灌区主要作物分布、估算作物产量分布。随着以遥感信息为基础的区域蒸散发计算模型<sup>[8]</sup>、作物分布识别及估产模型<sup>[9]</sup>的不断发展,为灌区尺度灌溉水利用效率及作物水分利用效率的定量评价提供了基础(图1), 其总体思路为:





method of agricultural water use efficiency

(1)利用遥感蒸散发模型估算灌区蒸散发,其 中灌溉农田的蒸散发量扣除有效降水量得到灌溉水 的有效消耗量,进一步估算出灌区灌溉水有效利用 率。

(2)利用灌区主要作物识别模型得到灌区内主要作物的空间分布,利用作物估产模型估算主要作物产量的分布,进一步根据其蒸散发量和产量估算作物水分利用效率的空间分布。

# 2 区域遥感蒸散发模型与灌溉用水效率评价方法

#### 2.1 区域遥感蒸散发估算模型

目前蒸散发的主要观测方法包括基于水量平衡 的蒸渗仪<sup>[19]</sup>、基于能量平衡理论的波文比系统<sup>[20]</sup> 以及基于紊流相似理论的涡度相关系统<sup>[21]</sup>等,这些 观测方法通常被认为是测定小尺度蒸散发量较为准 确和有效的手段。然而由于观测设备及维护费用高 昂导致这些方法无法在大尺度、长时段上进行应用, 发展蒸散发计算模型便成为获取区域蒸散发信息的 一个有效途径,尤其是对于较大的区域和较长的时 间尺度。蒸散发模型研究一直是水文、气象、农业、 生态等相关领域研究的热点,且已取得了一系列的 成果<sup>[22]</sup>。

随着遥感技术的发展与应用,基于遥感观测估 算陆面蒸散发已成为蒸散发研究领域的一大热点, 尤其是在区域蒸散发的估算上具有明显的优势<sup>[23]</sup>。 遥感蒸散发模型一般可分为经验半经验模型、能量 平衡余项模型以及植被指数模型等类型。

#### 2.1.1 经验半经验模型

经验半经验模型通常利用遥感数据与蒸散发之 间的经验或半经验关系直接估算蒸散发量<sup>[23]</sup>,其基 础是 Jackson 等于 1977 年提出的关于蒸散发与净辐 射、中午前后冠-气温差的经验关系<sup>[24]</sup>。该经验回 归模型的一般形式<sup>[25]</sup>可以表示为

 $T_a$ ——与 $T_a$ 同时刻的气温,℃

B、n—与表面粗糙度、风速、大气稳定性等 因素有关的经验回归系数

以上模型的优点是简单、便于应用,但模型参数 与研究区的地形、气象、植被等特征有关<sup>[23]</sup>,不便于 在大尺度上应用。

在 Jackson 等提出经验模型<sup>[24]</sup>的基础上,进一 步发展了三角形[26]和梯形[27]陆面温度-植被指数 状态空间模型,其中温度一般采用遥感监测的陆面 温度 $(T_{a})$ 或陆面温度与气温 $(T_{a})$ 之差 $(T_{a} - T_{a})$ ,植 被指数一般采用归一化植被指数(NDVI)或植被覆 盖度(f\_)。这2种模型在具体计算时需要选择一条 蒸散发为零而温度较高的暖边(Warm edge)和蒸散 发不受胁迫而温度较低的冷边(Cold edge)来构建 一个特征空间,实际蒸散发则根据以上2种极限情 况下的蒸散发进行插值得到。在实际应用中,陆面 温度-植被指数空间中各像元对应的散点图一般分 布比较分散,暖边和冷边等极限情况的确定具有较 大的主观性;同时,冷、暖边界的确定也受限于研究 区的地理位置以及遥感图像的空间精度<sup>[28]</sup>。Long 等结合地表能量平衡方程和辐射平衡公式,从理论 上推导出特征空间中暖边与冷边的计算方法,为这 类经验型模型提供了一定的理论依据<sup>[28]</sup>。

# 2.1.2 能量平衡余项模型

能量平衡余项模型通过估算地表能量平衡方程 中的显热通量和地表热通量,将蒸散发作为能量平 衡方程的余项来计算得到,即

$$L_E = R_n - H - G \tag{6}$$

式中  $L_E$ ——潜热通量,W/m<sup>2</sup>

*R*<sub>n</sub>——净辐射通量,W/m<sup>2</sup>

H-----显热通量,W/m<sup>2</sup>

G-----地表热通量,W/m<sup>2</sup>

因此,能量平衡余项模型的关键是如何准确估 算不同条件下的净辐射通量、显热通量和地表热通 量。对于不同的植被参数化方案以及对辐射通量和 湍流热交换描述方式的不同,此类模型又可分为单 源模型和双源模型。

单源模型将植物冠层和表层土壤简单处理为一 个均一的整体,不区分土壤蒸发和植被蒸腾。 Bastiaanssen等提出的 SEBAL模型(Surface energy balance algorithm for land)<sup>[29]</sup>和Su提出的 SEBS模型(Surface energy balance system)<sup>[30]</sup>是单层模型的 典型代表。Allen等针对农作物耗水问题,在 SEBAL 模型基础上发展了 METRIC 模型(Mapping evapotranspiration at high resolution with internalized calibration)<sup>[31]</sup>。Long 等基于理论推导得到干、湿 点,对 SEBAL 模型进行了改进<sup>[32]</sup>,避免了实际操作 中干、湿点选取的主观性与不确定性。Wu 等将能 量平衡余项模型与 Penman – Monteith 方程结合,开 发了遥感蒸散发模型 ETWatch,并将其应用于区域 水资源管理中<sup>[33]</sup>。

双源模型将植物冠层和表层土壤分开处理,潜 热、显热的涌源均有2个(土壤、冠层),从而能够区 分土壤蒸发和植物蒸腾。Norman等开发的TSEB (Two-source energy balance)模型<sup>[34]</sup>及Sánchez等在 TSEB模型基础上发展的STSEB(Simplified twosource energy balance)模型<sup>[35]</sup>均属于双源模型。 Long等在梯形模型的基础上,发展了双源梯形蒸散 发模型TTME(Two-source trapezoid model for evapotranspiration)<sup>[36]</sup>。Kanoua等比较了SEBAL模 型和TTME模型在孟加拉国一地区的应用效果,二 者计算结果总体一致;但从水面蒸发估算结果来看, TTME模型计算结果更好<sup>[37]</sup>。

Yang 等在混合双源蒸散发模型<sup>[38-40]</sup>和梯形模型的基础上,提出了混合双源梯形模型 HTEM (Hybrid dual-source scheme and trapezoid frameworkbased evapotranspiration model)<sup>[41]</sup>。该模型在山东 位山灌区农田、美国爱荷华(Iowa)州中部农田及亚 利桑那(Arizona)州东南部灌木林的应用结果表 明<sup>[41-43]</sup>,模型计算精度高于 SEBS、SEBAL 等单源 模型和 TTME、TSEB 等双源模型,并且可以较好地 区分土壤蒸发和植物蒸腾。

相对来说,单源模型的特点是潜热、显热的涌源 只有一个,模型结构相对简单,模型参数较少,因而 应用较为广泛;但单源模型无法区分土壤蒸发和植 被蒸腾,不适用于植被非均匀、非完全覆盖的下垫 面。而双源模型则较为复杂,模型参数较多;同时双 源模型可将蒸散发分为土壤蒸发和植被蒸腾,能更 好地反映植被特征对蒸散发的影响,更适用于植被 非均匀、非完全覆盖的下垫面。

2.1.3 植被指数模型

这类模型首先建立遥感植被指数与冠层导度之间的关系,并将计算得到的冠层导度带入 Penman – Monteith 公式<sup>[44]</sup>中直接计算蒸散发量<sup>[45]</sup>。Leuning 等进一步改进了冠层导度模型,并结合 MODIS 数据 及北美和澳大利亚的 15 个通量站观测数据对该模型进行了验证<sup>[46]</sup>。该模型经过了一系列改进<sup>[47-48]</sup>,成为了 MODIS 全球陆面蒸散发产品(MOD16 ET)的标准算法。此类模型的优势在于 Penman – Monteith 模型本身具有很强的物理基础, 其缺点在于需要较高空间分辨率的气象数据作为模

型输入。同时, MOD16 ET 仅考虑了气象条件对冠 层导度的影响, 使其无法完全表达水分(如土壤水) 对 ET 的限制作用<sup>[47]</sup>。

Yang 等比较了 3 个双源模型(HTEM、TSEB 及 MOD16)的物理基础及其在中国黑河生态水文遥感 试验(MUSOEXE - 12)区的应用效果,结果表明 HTEM 效果较好,而 MOD16 效果较差<sup>[49]</sup>。

# 2.2 瞬时蒸散发到日蒸散发的升尺度方法

根据遥感蒸散发模型计算得到的潜热通量可以 计算得到卫星过境时刻的瞬时蒸散发速率,即

$$ET_i = \frac{L_{Ei}}{L\rho_w} \tag{7}$$

式中 ET<sub>i</sub>----瞬时蒸散发速率,m/s

 $L_{Ei}$ ——瞬时潜热通量,W/m<sup>2</sup>

L——水的蒸发潜热,J/kg

 $\rho_w$ ——水的密度,kg/m<sup>3</sup>

对于瞬时蒸散发速率,需要采用一定的方法将 其升尺度得到日蒸散发量以及更长时段的蒸散发 量,以便用于水文分析及用水管理。目前常用的升 尺度方法包括恒定蒸发比法、日蒸发比法、不同的辐 射比法、参考蒸散发比法等。这些方法主要利用晴 天时白天潜热通量与有关能量通量比值的日内特征 来推算日蒸散发。

2.2.1 恒定蒸发比法

蒸发比 $f_{EA}$ 指潜热通量 $L_{E}$ 与有效能量 $(A = R_{n} - G)$ 的比值,即

$$f_{EA} = \frac{L_E}{R_n - G} = \frac{L_E}{L_E + H} \tag{8}$$

根据有关研究,蒸发比在白天(特别是中午前后)变化较小,因此可以假定蒸发比在白天保持不变<sup>[50]</sup>,则可根据瞬时蒸发比和日有效能量计算出日 蒸散发量

$$ET_{d} = \frac{(R_{n} - G)_{d}}{(R_{n} - G)_{i}}ET_{i}$$
(9)

式中下标 d、i 分别表示日值、瞬时值,下同。

# 2.2.2 修正蒸发比法

有关研究表明采用恒定蒸发比通常会低估全天的蒸散发,估计值偏低 10% 左右,因此 Anderson 等 提出了将瞬时蒸发比增加 10% 得到日蒸发比的修 正蒸发比法<sup>[51]</sup>,即

$$ET_{d} = 1.1 \frac{(R_{n} - G)_{d}}{(R_{n} - G)_{i}} ET_{i}$$
(10)

2.2.3 日蒸发比法

为进一步考虑白天与全天蒸散发、有效能量、蒸 发比的差异对日蒸散发的影响, Van Niel 等提出了 日蒸发比法<sup>[52]</sup>,即

$$ET_{d} = \beta_{LE} \beta_{A} \beta_{ET} \frac{(R_{n} - G)_{d}}{(R_{n} - G)_{i}} ET_{i}$$
(11)

式中 β<sub>LE</sub>——白天与全天蒸散发差异修正系数,取 值为1.1,与式(10)一致

> $\beta_{A}$ ——白天与全天有效能量差异修正系数  $\beta_{FT}$ ——白天与全天蒸发比差异修正系数

# 2.2.4 恒定太阳辐射比法

太阳辐射比 $f_{\varepsilon s}$ 指潜热通量 $L_{\varepsilon}$ 与到达地表的太阳短波辐射 $R_{s}$ 的比值,即

$$f_{ES} = \frac{L_E}{R_s} \tag{12}$$

假设太阳辐射比在白天保持不变,则可得到<sup>[53]</sup>

$$ET_{d} = \frac{R_{sd}}{R_{si}}ET_{i}$$
(13)

一般情况下, R<sub>s</sub>在白天的变化过程可以采用正弦曲线来描述, 据此可得到日蒸散发的计算公式为

$$ET_{d} = \frac{2N}{\pi \sin(\pi t/N)} ET_{i}$$
(14)

式中 N——一天内白天时长,h

t——日出到卫星过境的时间,h

由于式(14)的特点,恒定太阳辐射比法也被称 为正弦关系法<sup>[54]</sup>。

2.2.5 恒定外空辐射比法

外空辐射比 f<sub>ee</sub>是指潜热通量 L<sub>e</sub>与大气层外界 太阳辐射通量 R<sub>e</sub>的比值,即

$$f_{Eg} = \frac{L_E}{R_g} \tag{15}$$

假定外空辐射比在一天内保持不变, Ryu 等提 出了一种根据瞬时遥感蒸散发数据推算 8 d 平均蒸 散发的方法<sup>[55]</sup>。将该方法应用于 1 d,则日蒸散发 计算公式为

$$ET_{d} = \frac{R_{gd}}{R_{gi}}ET_{i}$$
(16)

2.2.6 恒定显热比法

显热比f<sub>Hn</sub>指显热 H 与净辐射 R<sub>n</sub>的比值,即

$$f_{Hn} = \frac{H}{R_n} \tag{17}$$

假设显热比在白天保持不变,并忽略日尺度上的土壤热通量,则可得到<sup>[56]</sup>

$$L_{Ed} = \frac{R_{nd}}{R_{ni}} (R_{ni} - H_i)$$
 (18)

式中  $L_{Ed}$ ——日潜热通量,W/m<sup>2</sup>

 $H_i$ ——瞬时显热通量,W/m<sup>2</sup>

进一步忽略瞬时地表热通量 G<sub>i</sub>,则日蒸散发可以通过下式(文献[54]中称为改进蒸发比法)计算

$$ET_d = \frac{R_{nd}}{R_{ni}}ET_i \tag{19}$$

2.2.7 参考蒸散发比法

在 METRIC 模型中, Allen 等引入了参考蒸散发 比,并假设白天参考蒸散发比保持不变<sup>[31]</sup>,即

$$f_{ET_r} = \frac{ET_i}{ET_{r,i}} = \frac{ET_d}{ET_{r,d}}$$
(20)

式中 f<sub>ET</sub> 参考蒸散发比

*ET*<sub>r,d</sub>——日参考作物蒸散发<sup>[57]</sup>

ET<sub>r,i</sub>——瞬时参考作物蒸散发

考虑坡度修正<sup>[31]</sup>后可得到日蒸散发的计算公式

$$ET_{d} = C_{rad} \frac{ET_{r,d}}{ET_{r,i}} ET_{i}$$
(21)

式中 C<sub>rad</sub>——坡度修正系数

一些研究者根据实测资料对以上部分方法进行 了比较分析。Colaizzi 等利用美国德克萨斯(Texas) 州不同下垫面蒸渗仪实测蒸散发资料,比较评价了 5种方法的适用性,结果表明植被覆盖条件下参考 蒸散发比法效果最好,而裸地情况下恒定蒸发比法 效果最好<sup>[58]</sup>。陈鹤等根据中国华北典型农田涡度 相关系统观测资料,对4种方法的适用性进行了比 较分析,结果表明这4种方法在总体上具有一致性, 但改进蒸发比法更适合研究区农田<sup>[54]</sup>。Xu等比较 了5种方法在中国华北、西北不同植被类型条件下 的适用性,结果表明太阳辐射比法在植被休眠期应 用效果最好,而参考蒸散发比法在植被生长期效果 最好<sup>[59]</sup>。

# 2.3 日蒸散发量的插值方法

由于受卫星过境频率及云层遮蔽的影响,会在 不少天内没有合适的遥感信息进行蒸散发计算,这 时需要在已有日蒸散发的基础上构建逐日蒸散发序 列。常用的方法包括日参考蒸散发比插值法、日蒸 发比插值法、基于 Penman – Monteith 公式的数据同 化法、表面阻力法等<sup>[59]</sup>。

# 2.3.1 日参考蒸散发比插值法

将有遥感数据的晴天日参考蒸散发比进行插值 得到其逐日序列,进一步根据逐日参考作物蒸散发 计算得到逐日蒸散发序列。目前一般采用线性插值 或三次样条插值方法,其中三次样条插值方法的效 果一般优于线性插值<sup>[31]</sup>。一般情况下,一个月有一 天的遥感数据基本上能插值得到比较合理的结果, 在作物快速生长期则需要更密的遥感数据<sup>[31]</sup>。但 由于三次样条插值的特点,插值结果在有些情况下 可能会出现不合理的波动<sup>[60]</sup>,这时需要对插值结果 进行必要的修正或采用更合适的方法。

以上插值方法对于无灌溉及降雨的时段比较适合;但对于中间有灌溉或降雨的时段,灌溉或降雨前

后土壤水分会发生突变,日参考蒸散发比会发生较 大变化(特别是植被覆盖度比较低、土壤蒸发占蒸 散发的比例较高的情况下),插值结果可能不符合 实际情况。因此,在日参考蒸散发比插值过程中需 要进一步考虑灌溉或降雨的影响,研究提出更合理 的插值方法。

# 2.3.2 日蒸发比插值法

在 SEBAL 模型中,通常假定式(8)中定义的蒸 发比瞬时值可以代表日蒸发比值,也可以代表卫星 过境日前后一段时间的蒸发比,因此可以采用类似 于式(9)的方法计算卫星过境日前后一段时间内的 蒸散发<sup>[61]</sup>。但这种恒定蒸发比假定只在土壤含水 量变化不大的情况下近似成立,在遥感数据时间间 隔较长的情况下可能带来较大误差。这时可以采用 与参考蒸散发比类似的插值方法对已有的晴天日蒸 发比进行插值得到逐日蒸发比,然后根据各日的有 效能量(可以忽略日尺度的土壤热通量,直接用净 辐射表示)计算出逐日蒸散发。在插值中也需要考 虑降雨或灌溉前后土壤水分突变对蒸发比的影响。

# 2.3.3 基于 Penman - Monteith 公式的数据同化法

该方法以计算蒸散发的 Penman – Monteith 公 式<sup>[57]</sup>为模型算子,将有遥感数据的晴天日参考蒸散 发同化到 Penman – Monteith 公式,得到逐日蒸散发 序列<sup>[59]</sup>。其中的同化算法可以采用顺序数据同化 算法(如集合卡尔曼滤波算法和粒子滤波算法)或 连续数据同化算法(如三维变分算法、四维变分算 法等)<sup>[62]</sup>。

#### 2.3.4 表面阻力法

根据有遥感数据的晴天蒸散发估算结果,利用 Penman – Monteith 公式可以反算出表面阻力,进而 根据叶面积指数、温度、饱和水汽压差等资料计算出 无遥感数据时的表面阻力,最后根据 Penman – Monteith 公式计算得到逐日蒸散发序列<sup>[59]</sup>。

文献[59]中比较了不同方法的应用效果,结果表明日参考蒸散发比插值法与采用 SCE-UA (Shuffled complex evolution method)算法的数据同化方法效果较好。

# 2.4 基于遥感蒸散发的灌溉用水效率评价方法

遥感蒸散发模型已成为分析大尺度蒸散发时空 变化的主要手段<sup>[63-64]</sup>,在干旱区也得到了广泛应 用<sup>[65]</sup>。但遥感蒸散发模型同时也存在一些问 题<sup>[66]</sup>,如对地面气象观测资料的分辨率要求较高、 一些参数的确定具有主观性等。

近年来,遥感蒸散发模型也逐步被应用于灌区 耗水计算及用水管理中。Ahmad 等利用 SEBAL 模 型计算了巴基斯坦一个大型灌区一年内的蒸散发 量,并利用公平性、充分性、可靠性、水分生产力等指标评价了灌溉效果<sup>[67]</sup>。Yang等利用 HTEM 模型和 SEBAL 模型分别计算了中国内蒙古河套灌区节水 改造以来(2000—2010 年)作物生长期蒸散发量的 时空变化,分析了灌区节水改造对农田及天然植被 耗水的影响<sup>[42,68]</sup>。Liaqat 等利用 SEBS 模型计算分 析了巴基斯坦一个大型灌区不同季节、不同种植结 构下的耗水量<sup>[69]</sup>。以上研究表明遥感蒸散发模型 可以应用于灌区耗水分析及用水评价,为基于遥感 蒸散发的灌溉用水效率评价奠定了基础。

蒋磊等提出了利用遥感蒸散发计算结果对灌区 灌溉水利用效率进行评价的方法<sup>[13]</sup>。该方法以 SEBAL模型计算得到的灌区蒸散发为基础,将灌区 内土地利用类型分为灌溉地、非灌溉地两部分,将灌 溉地的蒸散发量扣除有效降水作为灌溉水有效利用 量,灌溉水有效利用率则定义为灌溉水有效利用量 与灌区净引水量(总引水量与排水量之差)的比值。 利用该方法评价了内蒙古河套灌区节水改造以来 (2000—2010年)灌溉水有效利用率的动态变化,及 其与降水、灌溉引水量的关系<sup>[13]</sup>。Wu等利用 SEBS 模型估算了黑河中游蒸散发量,评估了各灌区的灌 溉水利用效率<sup>[70]</sup>。

以上研究表明利用遥感蒸散发计算结果对灌区 灌溉水利用效率进行定量评价是可行的。相对于传 统的评价方法,基于遥感蒸散发的灌区灌溉水利用 效率评价方法是一种可操作性较强的方法。以上实 际应用灌区<sup>[13,70]</sup>均位于干旱区,划分农田蒸散发的 水分来源(灌溉与降水)比较容易;而对于半湿润、 湿润区灌区来说,如何准确估算灌溉水的有效消耗 还需要进一步研究。因此,基于遥感蒸散发的灌区 灌溉水利用效率评价方法还需要进一步开展深入研 究工作。

# 3 灌区作物分布遥感识别及估产模型与作 物水分利用效率评价方法

## 3.1 灌区作物分布遥感识别模型

农作物遥感识别是遥感技术在农业领域应用的 重要内容,也是资源遥感的重要组成部分。作物遥 感识别方法与遥感分类方法的发展基本同步。 Ulaby等在1982年利用雷达和 Landsat 卫星数据对 作物种植类型进行识别,可认为是作物种植类型遥 感识别的最初尝试。作物分布遥感识别的主要根据 是不同作物在光谱特征或植被指数等方面的差异。 随着遥感技术的不断发展,作物分布遥感识别方法 也有很大的发展。这些方法可以从不同的角度来进 行分类,如作物识别的基本单元、识别中是否需要训 练样本、识别中是否需要估计各类作物在特征空间 分布的先验概率等<sup>[71-72]</sup>。

3.1.1 基于不同基本单元的识别方法

根据作物识别中的基本单元,作物遥感识别方 法可以分为像元分类法、亚像元分类法及地块分类 法等。

像元分类法基于像元光谱等特征的相似性将每 一个像元分为某一作物类型,例如极大似然 法<sup>[73-74]</sup>、最邻近点法、决策树方法<sup>[74-76]</sup>、支持向量 机<sup>[74]</sup>、熵分类法<sup>[77]</sup>等。

亚像元分类法将一个像元的作物分为若干种作物的组合,特别适用于处理混合像元问题。主要方法包括模糊分类法<sup>[78-79]</sup>、模糊神经网络法<sup>[79-81]</sup>等。

地块分类法将地块分布信息与遥感信息相结 合,一般情况下具有较高的识别精度,例如基于规则 的分类方法<sup>[82]</sup>。

3.1.2 非监督分类方法与监督分类方法

根据识别过程中是否需要有已知的分类样本, 识别方法大致可以分为非监督分类方法、监督分类 方法两类<sup>[71]</sup>,近年来半监督分类方法<sup>[83]</sup>也逐渐应 用于遥感图像分类识别。

非监督分类是指仅利用遥感图像中地物光谱特 征的分布规律,按照一定的方法随其自然地进行分 类,然后通过对各类作物光谱响应曲线进行分析、与 实地调查相比较后确定分类结果中具体的类别属 性。常用的非监督分类方法有聚类方法、逐步归纳 (Progressive generalization)法<sup>[84]</sup>、增强分类法<sup>[85]</sup>等。

监督分类又称为训练区分类,它是利用对地面 样区的实况调查资料,从已知训练样区得出实际地 物的统计资料用作图像分类的判别依据,并依据一 定的判别规则对所有图像像元进行判别处理,使得 具有相似特征并满足一定识别规则的像元归并为一 类。常用的监督分类方法主要有最小距离法<sup>[74]</sup>、 Mahalanobis 距离法<sup>[74]</sup>、极大似然法<sup>[73-74]</sup>、波谱角 法<sup>[74]</sup>、决策树方法<sup>[74-76]</sup>、傅里叶变换法<sup>[86]</sup>、人工神 经网络方法<sup>[81]</sup>、支持向量机法<sup>[74]</sup>等。

针对高光谱等高维数据在分类过程中存在的 "高维小样本"问题,将少量的训练样本与大量的未 知样本相结合,可以实现遥感影像的半监督分类,例 如混合高斯模型<sup>[87]</sup>、DE-self-training 算法<sup>[88]</sup>等。

3.1.3 参数分类方法与非参数分类方法

根据识别中是否需要估计各类作物在特征空间 分布的先验概率,作物识别方法可以分为参数分类 方法与非参数分类方法。

在参数分类方法中,根据训练样本,估计各类作 物在特征空间分布的先验概率,然后进行分类判别, 例如极大似然法<sup>[73-74]</sup>。

在非参数分类方法中,直接根据训练样本选择 最佳分类准则,如最邻近点法、决策树方法<sup>[74-76]</sup>、支 持向量机<sup>[74]</sup>和人工神经网络方法<sup>[81]</sup>等。

3.1.4 组合分类方法

由于不同的分类方法各有优、缺点,将不同的方法组合起来进行作物识别可能取得更好的效果。 Wardlow 等将图像分析与统计分析相结合,利用增强型植被指数 EVI 和归一化植被指数 NDVI 序列对 美国中部大平原的作物种植结构进行了识别<sup>[89]</sup>。 Peña-Barragán 等将基于对象的图像分析法和决策 树法相结合,提出了基于对象的作物识别方法<sup>[90]</sup>。 Pervez 等利用阈值依赖决策树法对阿富汗灌溉面积 进行了识别<sup>[91]</sup>。

农作物种植类型遥感识别是一个复杂的过程, 目前遥感作物识别方面存在的主要问题在于遥感数 据本身的不确定性所导致的异物同谱、同物异谱和 混合像元等现象。特别是对于中国北方干旱区多数 灌区,由于土地利用制度和耕作体系等因素导致混 合像元大量存在。针对混合像元问题,亚像元分类 方法还需要进一步发展完善。

对于监督分类,需要定期进行采样调查,耗费大量的人力和财力,并且样点的选取也有很大的主观性。目前已有一些学者建立了适用于多年种植结构的识别模型<sup>[92]</sup>,但其研究区域种植结构相对单一。 对于种植结构复杂的中国灌区,如何建立能够适应 复杂种植结构并且适用于多年的作物类型遥感识别 模型是未来研究中亟需解决的关键问题。

#### 3.2 农作物估产模型

我国是一个农业大国,人口众多,地域广阔,气 候复杂多变,准确进行农作物估产关系到我国的粮 食安全等重大战略性问题。

大面积农作物长势与产量的遥感监测一般利用 覆盖范围大、重复周期短的卫星资料(如 NOAA-AVHRR、EOS-MODIS、风云系列等),结合地面实际 调查资料建立农作物长势监测指标与估产模型来实 现。目前农作物遥感估产模型可以分为经验统计模 型、生产效率模型、作物生长模型等<sup>[93-94]</sup>。

# 3.2.1 经验统计模型

经验统计模型根据一个或多个遥感参数(如植被指数、光合有效辐射、温度、水分等)与作物产量的相关关系进行估产<sup>[95-96]</sup>,其中最常用的遥感参数为归一化植被指数 NDVI。文献[97]根据 MODIS NDVI 和蒸散发胁迫指数构建了干旱指数 DSI,并分析了山东、河南冬小麦不同生育期 DSI 与产量的相关关系。这类经验统计模型比较简单,因此应

用比较广泛;但由于气象、水分、农田管理等条件 的年际变化,可能会导致模型中的一些经验参数 随年份变化,模型难以在不同地区、不同年份直接 应用。

#### 3.2.2 生产效率模型

生产效率模型以 Monteith 在 1972 年提出的辐射利用效率(RUE)模型<sup>[98]</sup>为基础,根据 RUE 与作物吸收的光合有效辐射计算出作物总初级生产力(GPP),并进一步计算出产量<sup>[94,99]</sup>。这类模型有一定的物理基础,但需要较为详细的遥感信息以得到逐日的 GPP 动态过程,模型中的一些参数也需要通过统计分析得到。

3.2.3 作物生长模型

将遥感信息应用于作物生长模型也可用于作物 估产<sup>[100-102]</sup>,作物生长模型能详细描述作物生长及 产量形成过程,但需要详细的土壤、气象、农田管 理等方面的资料,在大区域内应用还存在一定的 难度。

农作物产量影响因素众多,从相关的遥感信息 及地面气象等信息中筛选出影响作物产量的主要因 素,建立精度较高、可操作性强的遥感估产模型是需 要进一步研究的内容。

#### 3.3 灌区尺度作物水分利用效率评价方法

根据遥感蒸散发模型及作物估产模型计算得到 灌区内主要作物蒸散发、产量的空间分布,即可根据 式(4)计算得到不同作物水分利用效率 WUE 的空 间分布,并进一步分析 WUE 的影响因素<sup>[100,103-104]</sup>, 提出提高 WUE 的措施。

在 WUE 的计算中,ET 为作物生长期的蒸散发,因此还需要对作物出苗到成熟的时间进行识别。已 有研究表明,植物物候与遥感植被指数(如 NDVI 或 叶面积指数 LAI 等)存在密切关系,因此根据对 NDVI 序列动态变化特征的分析,可以确定植物的 物候期<sup>[105-107]</sup>。

相关的研究还包括对农田生态系统水分利用效 率(WUE<sub>GPP</sub>)的评价<sup>[108-109]</sup>。由于农田 GPP 与产量 之间存在密切的关系,WUE<sub>GPP</sub>的评价结果也可以为 WUE 评价提供参考。

遥感蒸散发及遥感估产结果的不确定性也会给 WUE带来相应的不确定性。WUE的准确评价还需 要遥感蒸散发及遥感估产精度的进一步提高。

# 4 结论与展望

随着遥感技术的发展,遥感数据的时空分辨率 不断提高,遥感信息在区域尺度蒸散发计算、作物分 布识别及估产等领域的应用越来越广泛,计算精度 也不断提高。在有关研究的基础上,提出了基于遥 感信息的灌区灌溉水利用效率及作物水分利用效率 定量评价分析框架,归纳总结了相关模型及方法的 研究进展,指出了需要进一步研究的问题。

(1)在各类遥感蒸散发模型中,双源蒸散发模型(特别是混合双源蒸散发模型)从土壤蒸发和植被蒸腾两个方面考虑蒸散发过程,能够较好地考虑植被特征对蒸散发的影响。适合非均匀下垫面特点、具有较强物理基础的灌区遥感蒸散发模型,是未来遥感蒸散发模型发展的重点。

(2)在瞬时蒸散发到日蒸散发的升尺度方法中,参考蒸散发比法对于植被生长期有比较好的适用性;而在日蒸散发量的插值方法中,日参考蒸散发比、日蒸发比插值法比较简单实用,但如何选择合适的插值方法还需要进一步探讨,插值中特别要注意时段内灌溉或降雨引起土壤含水量突变情况的处理。

(3)根据灌区遥感蒸散发计算结果,进一步估 算灌溉农田蒸散发中消耗的灌溉水量,可以对灌区 灌溉水利用效率进行定量评价。如何准确估算农田 蒸散发中灌溉水的有效消耗量,是基于遥感蒸散发 的灌区灌溉水利用效率评价方法中需要进一步深入 研究的问题。

(4)在作物识别方法中,针对复杂种植结构的 亚像元方法还有待进一步发展,能适应复杂种植结 构并且适用于多年的作物分布遥感识别模型是未来 研究中亟需解决的关键问题。

(5)作物产量受诸多自然、人为因素的影响,从 相关的遥感信息及地面气象等信息中筛选出影响作 物产量的主要因素,建立精度较高、可操作性强的遥 感估产模型是遥感估产领域需要进一步研究的内 容。

(6)根据遥感蒸散发及作物估产结果可以定量 评价作物水分利用效率 WUE 的空间分布及影响因 素,WUE 的准确评价还需要遥感蒸散发及遥感估产 精度的进一步提高。

#### 参考文献

- 1 United Nations World Water Assessment Programme. The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world [M]. Paris: UNESCO, 2015.
- 2 中华人民共和国水利部.中国水资源公报 2013 [M].北京:中国水利水电出版社, 2014.
- 3 国务院. 国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见[J]. 中国水利,2012(7):1-3.

- 4 许迪,龚时宏. 大型灌区节水改造技术支撑体系及研究重点[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 806-811. Xu Di, Gong Shihong. Technical supporting system for water saving orientated rehabilitation of large irrigation districts [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7): 806-811. (in Chinese)
- 5 Karimi P, Bastiaanssen W G M. Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting—Part 1: review of the accuracy of the remote sensing data [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(1): 507-532.
- 6 赵春江.农业遥感研究与应用进展[J].农业机械学报,2014,45(12):277-293. Zhao Chunjiang. Advances of research and application in remote sensing for agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12):277-293. (in Chinese)
- 7 史舟,梁宗正,杨媛媛,等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 247 260. Shi Zhou, Liang Zongzheng, Yang Yuanyuan, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 247 - 260. (in Chinese)
- 8 Liou Y-A, Kar S K. Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms—a review [J]. Energies, 2014, 7(5): 2821-2849.
- 9 Atzberger C. Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs [J]. Remote Sensing, 2013, 5(2): 949-981.
- 10 Perry C. Efficient irrigation; inefficient communication; flawed recommendations [J]. Irrigation and Drainage, 2007, 56(4): 367-378.
- 11 崔远来,熊佳. 灌溉水利用效率指标研究进展[J]. 水科学进展,2009,20(4):590-598.
   Cui Yuanlai, Xiong Jia. Advances in assessment indicators of irrigation water use efficiency [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4):590-598. (in Chinese)
- 12 郭元裕. 农田水利学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1997.
- 13 蒋磊,杨雨亭,尚松浩. 基于遥感蒸发模型的干旱区灌区灌溉效率评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 95-101. Jiang Lei, Yang Yuting, Shang Songhao. Evaluation on irrigation efficiency of irrigation district in arid region based on evapotranspiration estimated from remote sensing data [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20): 95-101. (in Chinese)
- 14 Soto-García M, Martínez-Alvarez V, García-Bastida P A, et al. Effect of water scarcity and modernization on the performance of irrigation districts in south-eastern Spain [J]. Agricultural Water Management, 2013, 124: 11 19.
- 15 Yao Y Q, Feng S Y, Mao X M, et al. Coupled effects of canal lining and multi-layered soil structure on canal seepage and soil water dynamics [J]. Journal of Hydrology, 2013, 430 431: 91 102.
- 16 Shang S H, Mao X M. Data envelopment analysis on efficiency evaluation of irrigation-fertilization schemes for winter wheat in North China [C]//Li D L, Zhao C J. Computer and Computing Technologies in Agriculture II. Boston: Springer, 2009, 1: 39-48.
- 17 Nyakudya I W, Stroosnijder L. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (Zea mays L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: modelling with AquaCrop [J]. Agricultural Water Management, 2014, 146: 280 296.
- 18 Jiang Y, Xu X, Huang Q Z, et al. Assessment of irrigation performance and water productivity in irrigated areas of the middle Heihe River basin using a distributed agro-hydrological model [J]. Agricultural Water Management, 2015, 147: 67-81.
- 19 Kang S Z, Gu B J, Du T S, et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region [J]. Agricultural Water Management, 2003, 59(3): 239 - 254.
- 20 Zhang B Z, Kang S Z, Li F S, et al. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(10): 1629-1640.
- 21 Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2013, 487: 24 38.
- 22 Wang K, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability [J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(2): RG2005.
- 23 Li Z L, Tang R L, Wan Z M, et al. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data [J]. Sensors, 2009, 9(5): 3801-3853.
- 24 Jackson R D, Reginato R J, Idso S B. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements [J]. Water Resource Research, 1977, 13(3): 651-656.
- 25 Seguin B, Itier B. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2): 371 - 383.
- 26 Jiang L, Islam S. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(17): 2773-2776.
- 27 Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 246 263.
- 28 Long D, Singh V P, Scanlon B R. Deriving theoretical boundaries to address scale dependencies of triangle models for evapotranspiration estimation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D5): D05113
- 29 Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation [J]. Journal of Hydrology, 1998, 213(1-4): 198-212.
- 30 Su Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6(1): 85-100.

- 31 Allen R G, Tasumi M, Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model [J]. Journal of Irrigation and Drainage System, 2007, 133(4): 380 - 394.
- 32 Long D, Singh V P. A modified surface energy balance algorithm for land (M-SEBAL) based on a trapezoidal framework [J]. Water Resources Research, 2012, 48(2): W02528.
- 33 Wu B F, Yan N N, Xiong J, et al. Validation of ETWatch using field measurements at diverse landscapes: a case study in Hai Basin of China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 436 - 437: 67 - 80.
- 34 Norman J M, Kustas W P, Humes K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77(3-4): 263-293.
- 35 Sánchez J M, Kustas W P, Caselles V, et al. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 1130 - 1143.
- 36 Long D, Singh V P. A Two-source Trapezoid Model for Evapotranspiration (TTME) from satellite imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 370-388.
- 37 Kanoua W, Merkel B. Comparison between the two-source trapezoid model for evapotranspiration (TTME) and the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) in Titas Upazila in Bangladesh [OL]. FOG-Freiberg Online Geoscience, 2015, 39: 65 – 85.
- 38 Guan H, Wilson J L. A hybrid dual-source model for potential evaporation and transpiration partitioning [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(3-4): 405-416.
- 39 杨雨亭,尚松浩. 双源蒸散发模型估算潜在蒸散发量的对比[J]. 农业工程学报,2012,28(24):85-91. Yang Yuting, Shang Songhao. Comparison of dual-source evapotranspiration models in estimating potential evaporation and transpiration [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24):85-91. (in Chinese)
- 40 Yang Y T, Shang S H, Guan H D. Development of a soil-plant-atmosphere continuum model (HDS-SPAC) based on hybrid dualsource approach and its verification in wheat field [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(10): 2671 - 2685.
- 41 Yang Y T, Shang S H. A hybrid dual source scheme and trapezoid framework based evapotranspiration model (HTEM) using satellite images: algorithm and model test [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(5): 2284 2300.
- 42 Yang Y T. Evapotranspiration over heterogeneous vegetated surfaces: models and applications [M]. Heidelberg: Springer, 2015.
- 43 Yang Y T, Scott R L, Shang S H. Modeling evapotranspiration and its partitioning over a semiarid shrub ecosystem from satellite imagery: a multiple validation [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, 7(1): 073495.
- 44 Monteith J L. Evaporation and environment [C] // 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge: Cambridge University Press, 1965, 19: 205 234.
- 45 Cleugh H A, Leuning R, Mu Q, et al. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(3): 285 - 304.
- 46 Leuning R, Zhang Y Q, Rajaud A, et al. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman – Monteith equation [J]. Water Resources Research, 2008, 44(10): W10419.
- 47 Mu Q, Heinsch F A, Zhao M, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(4): 519-536.
- 48 Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781 - 1800.
- 49 Yang Y T, Long D, Guan H, et al. Comparison of three dual-source remote sensing evapotranspiration models during the MUSOEXE - 12 campaign: revisit of model physics [J]. Water Resources Research, 2015, 51(5): 3145 - 3165.
- 50 Sugita M, Brutsaert W. Daily evaporation over a region from lower boundary layer profiles measured with radiosondes [J]. Water Resources Research, 1991, 27(5): 747 - 752.
- 51 Anderson M C, Norman J M, Diak G R, et al. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 60(2): 195-216.
- 52 Van Niel T G, McVicar T R, Roderick M L, et al. Correcting for systematic error in satellite-derived latent heat flux due to assumptions in temporal scaling: assessment from flux tower observations [J]. Journal of Hydrology, 2011, 409: 140 148.
- 53 Jackson R D, Hatfield J L, Reginato R J, et al. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements [J]. Agricultural Water Management, 1983, 7(1-3): 351-362.
- 54 陈鹤,杨大文,吕华芳.不同作物类型下蒸散发时间尺度扩展方法对比[J].农业工程学报,2013,29(6):73-81. Chen He, Yang Dawen, Lü Huafang. Comparison of temporal extrapolation methods for evapotranspiration over variant underlying croplands [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6):73-81. (in Chinese)
- 55 Ryu Y, Baldocchi D D, Black T A, et al. On the temporal upscaling of evapotranspiration from instantaneous remote sensing measurements to 8-day mean daily-sums [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 152: 212 222.
- 56 Sanchez J M, Scavone G, Caselles V, et al. Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from Landsat-TM and ETM + data: application to the Basilicata region [J]. Journal of Hydrology, 2008, 351(1-2): 58-70.
- 57 Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements [R]. Rome: FAO, 1998.
- 58 Colaizzi P D, Evett S R, Howell T A, et al. Comparison of five models to scale daily evapotranspiration from one-time-of-day measurements [J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(5): 1409-1417.

- 59 Xu T R, Liu S M, Xu L, et al. Temporal upscaling and reconstruction of thermal remotely sensed instantaneous evapotranspiration [J]. Remote Sensing, 2015, 7(3): 3400 - 3425.
- 60 Shang S H. Log-cubic method for generation of soil particle size distribution curve [J]. The Scientific World Journal, 2013: 1 -7.
- 61 Bastiaanssen W G M, Ahmad M D, Chemin Y. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus [J]. Water Resources Research, 2002, 38(12): 1273.
- 62 Reichle R H. Data assimilation methods in the Earth sciences [J]. Advances in Water Resources, 2008, 31(11): 1411-1418.
- 63 Kalma J D, McVicar T R, McCabe M F. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data [J]. Surveys in Geophysics, 2008, 29(4-5): 421-469.
- 64 Yebra M, van Dijk A, Leuning R, et al. Evaluation of optical remote sensing to estimate actual evapotranspiration and canopy conductance [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 129: 250 261.
- 65 王国华,赵文智. 遥感技术估算干旱区蒸散发研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(8): 848-858. Wang Guohua, Zhao Wenzhi. Advances in the application of remote sensing to evapotranspiration research in arid regions [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(8): 848-858. (in Chinese)
- 66 冯景泽,王忠静. 遥感蒸散发模型研究进展综述[J]. 水利学报,2012,43(8):914-925. Feng Jingze, Wang Zhongjing. A review on evapotranspiration estimation models using remotely sensed data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(8):914-925. (in Chinese)
- 67 Ahmad M, Turral H, Nazeer A. 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(4): 551 564.
- 68 Yang Y T, Shang S H, Jiang L. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 164: 112 - 122.
- 69 Liaqat U W, Choi M, Awan U K. Spatio-temporal distribution of actual evapotranspiration in the Indus Basin Irrigation System [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(11): 2613 2627.
- 70 Wu X J, Zhou J, Wang H J, et al. Evaluation of irrigation water use efficiency using remote sensing in the middle reach of the Heihe River, in the semi-arid Northwestern China [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(9): 2243 - 2257.
- 71 Ulaby F T, Li R Y, Shanmugan K S. Crop classification using airborne radar and Landsat data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1982, GE-20(1): 42-51.
- 72 Cihlar J. Land cover mapping of large areas from satellites: status and research priorities [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(6-7): 1093-1114.
- 73 Belward A S, De Hoyos A. A comparison of supervised maximum likelihood and decision tree classification for crop cover estimation from multitemporal Landsat MSS data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1987, 8(2): 229 - 235.
- 74 Yang C, Everitt J H, Murden D. Evaluating high resolution SPOT 5 satellite imagery for crop identification [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 75(2): 347 - 354.
- 75 Hansen M, Dubayah R, DeFries R. Classification trees: an alternative to traditional land cover classifiers [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(5): 1733 - 1748.
- 76 Kandrika S, Roy P S. Land use land cover classification of Orissa using multi-temporal IRS-P6 awifs data: a decision tree approach [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(2): 186-193.
- 77 Long D, Singh V P. An entropy-based multispectral image classification algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 51(12): 5225 - 5238.
- 78 Shalan M A, Arora M K, Ghosh S K. An evaluation of fuzzy classifications from IRS 1C LISS Ⅲ imagery: a case study [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(15): 3179 - 3186.
- 79 Zhang J, Foody G M. Fully-fuzzy supervised classification of sub-urban land cover from remotely sensed imagery: statistical and artificial neural network approaches [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(4): 615-628.
- 80 Mannan B, Ray A K. Crisp and fuzzy competitive learning networks for supervised classification of multispectral IRS scenes [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(17): 3491-3502.
- 81 Heremans S, Bossyns B, Eerens H, et al. Efficient collection of training data for sub-pixel land cover classification using neural networks [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(4): 657-667.
- 82 Conrad C, Fritsch S, Zeidler J, et al. Per-field irrigated crop classification in arid Central Asia using SPOT and ASTER data [J]. Remote Sensing, 2010, 2(4): 1035 - 1056.
- 83 Miller D J, Brwoning J. A mixture model and EM-based algorithm for class discovery, robust classification, and outlier rejection in mixed labeled/unlabeled data sets [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(11): 1468-1483.
- 84 Cihlar J, Xiao Q, Beaubien J, et al. Classification by progressive generalization: a new automated methodology for remote sensing multichannel data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(14): 2685 - 2704.
- 85 Beaubien J, Cihlar J, Simard G, et al. Land cover from multiple thematic mapper scenes using a new enhancement-classification methodology [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(D22): 27909 27920.
- 86 Zhang M W, Zhou Q B, Chen Z X, et al. Crop discrimination in Northern China with double cropping systems using Fourier analysis of time-series MODIS data [J]. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(4): 476-485.

87	熊彪,江万寿,李乐林. 基于高斯混合模型的遥感影像有指导非监督分类方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,
	36(1): 108 – 112.
	View Big Ling Wander Li Lelin Course minture model based and another mind electification for some to another income [1]

Xiong Biao, Jiang Wanshou, Li Lelin. Gauss mixture model based semi-supervised classification for remote sensing image [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(1): 108-112. (in Chinese)

- 88 王俊淑,江南,张国明,等. 高光谱遥感图像 DE-self-training 半监督分类算法[J]. 农业机械学报,2015,46(5):239-244. Wang Junshu, Jiang Nan, Zhang Guoming, et al. Semi-supervised classification algorithm for hyperspectral remote sensing image based on DE-self-training[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(5):239-244. (in Chinese)
- 89 Wardlow B D, Egbert S L, Kastens J H. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the US Central Great Plains [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(3): 290 - 310.
- 90 Peña-Barragán J M, Ngugi M K, Plant R E, et al. Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(6): 1301-1316.
- 91 Pervez S, Budde M, Rowland J. Mapping irrigated areas in Afghanistan over the past decade using MODIS NDVI [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 149: 155 - 165.
- 92 Zhong L, Gong P, Biging G S. Efficient corn and soybean mapping with temporal extendability: a multi-year experiment using Landsat imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 1-13.
- 93 Doraiswamy P C, Hatfield J L, Jackson T J, et al. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(4): 548 - 559.
- 94 Xin Q, Gong P, Yu C, et al. A production efficiency model-based method for satellite estimates of corn and soybean yields in the midwestern US [J]. Remote Sensing, 2013, 5(11): 5926 - 5943.
- 95 Becker-Reshef I, Vermote E, Lindeman M, et al. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(6): 1312 - 1323.
- 96 Mulianga B, Bégué A, Simoes M, et al. Forecasting regional sugarcane yield based on time integral and spatial aggregation of MODIS NDVI [J]. Remote Sensing, 2013, 5(5): 2184 - 2199.
- 97 黄健熙,张洁,刘峻明,等. 基于遥感 DSI 指数的干旱与冬小麦产量相关性分析[J].农业机械学报,2015,46(3):166-173. Huang Jianxi, Zhang Jie, Liu Junming, et al. Correlation analysis between drought and winter wheat yields based on remotely sensed drought severity index [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 166-173. (in Chinese)
- 98 Monteith J L. Solar-radiation and productivity in tropical ecosystems [J]. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3): 747-766.
- 99 苏涛,冯绍元,徐英. 基于光能利用效率和多时相遥感的春玉米估产模型[J]. 遥感技术与应用,2013,28(5):824-830. Su Tao, Feng Shaoyuan, Xu Ying. Spring maize yield estimation based on radiation use efficiency and multi-temporal remotely sensed data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(5):824-830. (in Chinese)
- 100 Mo X, Liu S, Lin Z, et al. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain [J]. Ecological Modelling, 2005, 183(2-3): 301-322.
- 101 Claverie M, Demarez V, Duchemin B, et al. Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using high spatial and temporal resolution remote sensing data [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124: 844-857.
- 102 靳华安,王锦地,柏延臣,等. 基于作物生长模型和遥感数据同化的区域玉米产量估算[J]. 农业工程学报,2012,28(6): 162-173.

Jin Huaan, Wang Jindi, Bo Yanchen, et al. Estimation on regional maize yield based on assimilation of remote sensing data and crop growth model [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 162 - 173. (in Chinese)

- 103 Bastiaanssen W G M, Thiruvengadachari S, Sakthivadivel R, et al. Satellite remote sensing for estimating productivities of land and water [J]. International Journal of Water Resources Development, 1999, 15(2): 181-196.
- 104 Li F, Zhan C, Xu Z, et al. Remote sensing monitoring on regional crop water productivity in the Haihe River Basin [J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(6): 1080 - 1090.
- 105 Wei H Y, Heilman P, Qi J G, et al. Assessing phenological change in China from 1982 to 2006 using AVHRR imagery [J]. Frontiers of Earth Science, 2012, 6(3): 227 - 236.
- 106 刘慧,胡宏昌,胡和平,等. 遥感植被物候识别中逻辑斯蒂模型的适用性研究[J]. 水力发电学报,2015,34(6):88-94.
   Liu Hui, Hu Hongchang, Hu Heping, et al. Applicability of logistic model for phenology detection based on remote sensing data [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(6): 88-94. (in Chinese)
- 107 Pan Z, Huang J, Zhou Q, et al. Mapping crop phenology using NDVI time-series derived from HJ-1 A/B data [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 34: 188 - 197.
- 108 Tang X G, Li H P, Desai A R. How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth? [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 7483.
- 109 仇宽彪,成军锋,贾宝全.中国中东部农田作物水分利用效率时空分布及影响因子分析[J].农业工程学报,2015, 31(11):103-109. (in Chinese)

Qiu Kuanbiao, Cheng Junfeng, Jia Baoquan. Spatio-temporal distribution of cropland water use efficiency and influential factors in middle and east of China [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 103 - 109. (in Chinese)