

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.042

# 基于 SEBAL 模型的农作物 NPP 反演\*

苏伟<sup>1,2</sup> 刘睿<sup>1</sup> 孙中平<sup>3</sup> 刘婷<sup>1</sup> 姜方方<sup>1</sup> 曹飞<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100081;

3. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094)

**摘要:** 基于能量平衡原理, 运用 SEBAL 陆地能量平衡模型, 利用国产 HJ-1 卫星 CCD、IRS 影像反演了河北省保定市涿州市和高碑店市的农作物净初级生产力(NPP)。利用 HJ-1 卫星影像、DEM、气象数据, 反演净辐射通量、土壤热通量、感热通量, 通过能量平衡计算蒸发比系数, 进而计算光能利用率; 基于 DEM 计算太阳总辐射, 结合通过 HJ-1 卫星影像计算的光合有效辐射分量 (fPAR) 反演被作物吸收的光合有效辐射 (APAR); 利用反演的农作物 APAR 和光能利用率 2 个因子, 反演农作物 NPP。实验结果表明: 研究区日蒸散量范围为 4.43 ~ 8.18 mm/d, 均值为 6.28 mm/d, 与利用气象数据和 Penman-Monteith 公式计算结果(7.15 mm/d)大致相等, 反演精度较高; 研究区农作物 NPP 均值为 31.02 g/(m<sup>2</sup>·d), 最高达到 139.29 g/(m<sup>2</sup>·d), 其空间分布特征与地物类型分布特征一致。

**关键词:** 农作物 净初级生产力 反演 SEBAL 模型 蒸散 光合有效辐射

**中图分类号:** S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)11-0272-08

## 引言

耕地质量是食品安全的基础, 是指耕地用于一定的农作物栽培时, 耕地对农作物的适宜性、生物生产力的大小、耕地利用后经济效益的多少和耕地环境是否被污染。其中, 耕地生产力即耕地地力, 是农田承载力估算、农田合理利用和科学管理的依据<sup>[1]</sup>。净初级生产力(Net primary productivity, NPP, 单位: g/(m<sup>2</sup>·d), 以干物质计, 下同), 是指绿色植物在单位时间和单位面积上所能累积的有机干物质质量, 它能够以统一的尺度标准体现生态系统生产力, 是很好的农田生产力衡量指标, 避免了以作物产量衡量农田生产力时由于农业结构调整、作物品种变化等的干扰<sup>[2]</sup>。

目前, 对于农作物 NPP 的反演方法主要分为 2 类: 利用模型估算, 如 BIOME-BGC 模型、GLO-PEM 模型等; 基于统计分析的方法, 利用农业统计中的产量、面积等资料计算农作物 NPP。现有的 NPP 估算模型大体分为 4 种类型: 气候生产力模型、生理生态过程模型、光能利用率模型和生态遥感耦合模型<sup>[3]</sup>。其中, 气候生产力模型建于 NPP 研究的起步阶段, 形式简单, 应用广泛<sup>[4]</sup>, 但忽略

了许多影响 NPP 的植物生态生理反应和复杂生态系统过程和功能变化, 且以点代面。生理生态过程模型机理清楚, 但过程模型比较复杂、研究涉及的领域广泛、所需参数太多、而且难以获得<sup>[5]</sup>。光能利用率模型和生态遥感耦合模型是结合遥感技术和农作物生理过程的模型, 建立在农作物生理过程的基础上, 可以进行快速、精确、大范围的农作物 NPP 反演, 是目前农作物 NPP 反演的主要方法<sup>[6-7]</sup>。MOD17A3 是基于 MODIS (TERRA 卫星) 遥感参数、通过 BIOME-BGC 模型计算 NPP 的, 目前已在全球不同区域的植被生长状况、生物量估算、环境监测和全球变化等研究中得到验证和广泛应用<sup>[8-11]</sup>。

陆面能量平衡方法 SEBAL (Surface energy balance algorithm for land) 模型是由荷兰 Bastiaanssen 教授提出的基于遥感的陆面能量平衡模型<sup>[12]</sup>, 该模型具有清楚的物理意义<sup>[13]</sup>, 自 1994 年应用以来, 在欧洲和亚非国家得到成功应用。SEBAL 模型最初是用于蒸散发的估算与反演, 美国爱达荷州水利部门曾对 SEBAL 模型进行了地面验证, 在作物的整个生长期, SEBAL 模型估算蒸散发误差约为 4%; 中国科学院兰州大气物理研究所

收稿日期: 2014-01-08 修回日期: 2014-02-15

\* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD20B0103)、国土资源部公益性行业科研专项资助项目(201011006-04)和农业部农业信息技术重点实验室开放课题资助项目(201203)

作者简介: 苏伟, 副教授, 博士生导师, 主要从事农业遥感应用研究, E-mail: suwei@cau.edu.cn

通讯作者: 孙中平, 高级工程师, 主要从事环境遥感与 GIS 应用研究, E-mail: sunnybnu14@163.com

在黑河地区地气相互作用观测实验研究的结果表明,计算 1 d 的蒸散发值时,估计误差在 8% 以内。2003 年始,Bastiaanssen 等开始将 SEBAL 模型用于农作物产量预测<sup>[14]</sup>、农作物生物量估算<sup>[15-16]</sup>,以墨西哥雅集山谷流域为研究区,反演小麦生物量并预测小麦的产量为 5.5 t/hm<sup>2</sup>,在实际测量的小麦产量范围内。国内目前关于利用 SEBAL 模型的农作物生物量估算、NPP 估算和产量预测方面的研究较少<sup>[17]</sup>。本文在 Bastiaanssen 等的研究基础上,开展基于 SEBAL 模型的农作物 NPP 反演方法研究,作为农田生产力估算与等级评价的依据,从而为耕地质量监测与评价探索新方法。

### 1 陆面能量平衡方法

陆面能量平衡方法(SEBAL)中的陆面能量平衡是指地球表面所获得的净辐射能等于土壤热通量、感热通量和潜热通量之和。图 1 简单描述了农作物 NPP 的反演方法流程图。基于可见光和近红外遥感影像、热红外遥感影像、DEM、气象数据等计算净辐射量、土壤热通量、感热通量,采用循环递推方法计算地表辐射温度和空气动力学温度的换算关系,从而基于能量平衡原理计算光能利用率,并进一步结合农作物吸收光能有效辐射 APAR 的估算结果反演农作物 NPP。

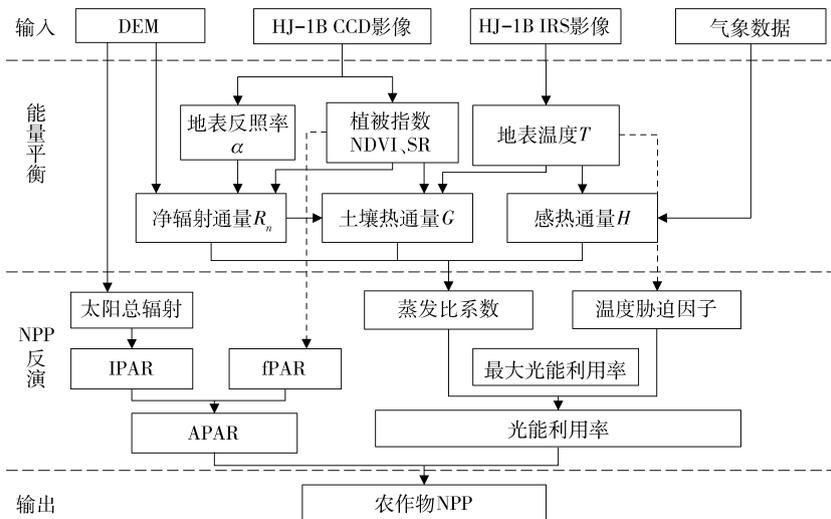


图 1 农作物净初级生产力 NPP 反演流程图

Fig. 1 Workflow of crop net primary productivity inversion

#### 1.1 陆面能量平衡分量

SEBAL 模型建立在地表能量平衡的基础上,能量平衡方程为

$$R_n = G + H + \lambda E \quad (1)$$

式中  $R_n$ ——净辐射通量

$G$ ——土壤热通量

$H$ ——感热通量

$\lambda E$ ——潜热通量,地表蒸散所用能量

$\lambda$ ——水的汽化潜热  $E$ ——蒸散量

各分量的计算公式见文献[12],其中,在计算感热通量的过程中,考虑到近地层大气的极不稳定性和遥感影像的信噪比,模型中引入了 Monin - Obukhov 定律进行递归运算,通过多次迭代修正空气动力学阻抗,直到取得稳定的  $H$  值, $H$  递归计算如图 2 所示,迭代循环参数设置的依据是  $H$  是否稳定。每个分量的所有参数计算过程中,参数的计算结果都要与模型的正常值进行比较,看是否处在合理的值域内。

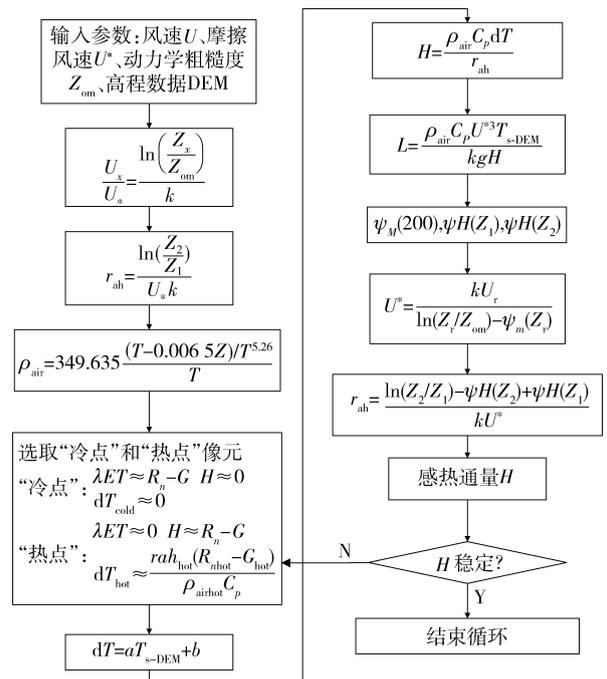


图 2 感热通量 H 递归循环流程图

Fig. 2 Loop workflow of sensible flux H

## 1.2 农作物 NPP 反演方法

模型中 NPP 的反演可由作物吸收的光合有效辐射 (APAR) 和实际光能利用率 ( $\varepsilon$ ) 2 个因子来表示,其估算公式为

$$N_{\text{NPP}(x,t)} = A_{\text{APAR}(x,t)} \varepsilon_{(x,t)} \quad (2)$$

式中  $A_{\text{APAR}(x,t)}$ ——像元  $x$  在  $t$  月份吸收的光合有效辐射,  $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$

$\varepsilon_{(x,t)}$ ——像元  $x$  在  $t$  月份的实际光能利用率

由于光能利用率受到气温、水分、土壤、营养、疾病、个体发育、基因型差异和作物维持与生长的不同能量分配等因素的影响,因而在模型中引入作物分类结果,从而考虑不同作物、非农作物植被(树木、草地等)的光能利用率。模型中,实际光能利用率是基于蒸发比系数影像、温度胁迫因子影像和最大光能利用率(即理想条件下的光能利用率)逐像元计算得到的。

### 1.2.1 APAR 的反演

利用遥感数据估算光合有效辐射(PAR)中被作物吸收的部分(APAR)是根据植被对红外和近红外波段的反射特征来实现的。作物吸收的有效辐射 APAR 取决于太阳总辐射和作物本身的特征,计算式为

$$A_{\text{APAR}(x,t)} = 0.5 S_{\text{SOL}(x,t)} f_{\text{IPAR}(x,t)} \quad (3)$$

式中  $S_{\text{SOL}(x,t)}$ —— $t$  月份在像元  $x$  处的太阳总辐射,  $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$

$f_{\text{IPAR}(x,t)}$ ——作物对入射光合有效辐射的吸收比例

### 1.2.2 fPAR 的反演

研究表明,在一定范围内 fPAR 与归一化植被指数 NDVI、比值植被指数 SR 之间存在较好的线性关系,与两种指数之间的线性关系为

$$f_{\text{IPAR}(x,t), \text{NDVI}} = \frac{(N_{\text{NDVI}(x,t)} - N_{\text{NDVI}(i,\text{min})}) (f_{\text{IPAR}_{\text{max}}} - f_{\text{IPAR}_{\text{min}}})}{N_{\text{NDVI}(i,\text{max})} - N_{\text{NDVI}(i,\text{min})}} + f_{\text{IPAR}_{\text{min}}} \quad (4)$$

$$f_{\text{IPAR}(x,t), \text{SR}} = \frac{(S_{\text{SR}(x,t)} - S_{\text{SR}(i,\text{min})}) (f_{\text{IPAR}_{\text{max}}} - f_{\text{IPAR}_{\text{min}}})}{S_{\text{SR}(i,\text{max})} - S_{\text{SR}(i,\text{min})}} + f_{\text{IPAR}_{\text{min}}} \quad (5)$$

式中  $N_{\text{NDVI}(i,\text{min})}$ 、 $N_{\text{NDVI}(i,\text{max})}$ ——农作物的 NDVI 最小值和最大值

$f_{\text{IPAR}_{\text{max}}}$ 、 $f_{\text{IPAR}_{\text{min}}}$ ——fPAR 最大值和最小值

$S_{\text{SR}(i,\text{max})}$ 、 $S_{\text{SR}(i,\text{min})}$ ——第  $i$  种植被类型 NDVI 的 95% 和 5% 下侧百分位数

Los 通过对  $f_{\text{IPAR}(x,t), \text{NDVI}}$ 、 $f_{\text{IPAR}(x,t), \text{SR}}$  所估算结果的比较发现,由 NDVI 所估算的 fPAR 比实测值高,而

由 SR 所估算的 fPAR 则低于实测值,但其误差小于直接由 NDVI 所估算的结果,考虑到该情况,本研究中将公式(4)、(5)组合起来用以反演 fPAR,即

$$f_{\text{IPAR}(x,t)} = \beta f_{\text{IPAR}(x,t), \text{NDVI}} + (1 - \beta) f_{\text{IPAR}(x,t), \text{SR}} \quad (6)$$

式中  $f_{\text{IPAR}(x,t), \text{NDVI}}$ ——基于归一化植被指数计算的 fPAR

$f_{\text{IPAR}(x,t), \text{SR}}$ ——基于比值植被指数计算的 fPAR

$\beta$ —— $f_{\text{IPAR}(x,t), \text{NDVI}}$ 与 $f_{\text{IPAR}(x,t), \text{SR}}$ 之间的调整系数

## 2 研究区概况与数据源

### 2.1 研究区概况

研究区为河北省的 2 个农业主产区:涿州市和高碑店市,地理位置为东经  $115.768^\circ \sim 116.246^\circ$ 、北纬  $39.058^\circ \sim 39.614^\circ$ ,东接固安县,东北及北侧与北京市大兴区及房山区毗邻,南部与雄县、容城县毗邻,西接定兴县、涞水县,隶属于河北保定市。研究区遥感影像如图 3 所示,总面积为  $1414.5 \text{ km}^2$ ,海拔高度在  $20 \sim 70 \text{ m}$  之间,高差  $50 \text{ m}$ ,坡度为  $1/660$ ,属暖温带半湿润季风区,大陆性季风气候特点显著,温差变化大,四季分明。据多年气象统计资料,研究区年平均温度  $11.6^\circ\text{C}$ ,7 月份温度最高,月平均温度为  $26.1^\circ\text{C}$ ,1 月份气温最低,月平均温度  $-5.4^\circ\text{C}$ 。年平均降水量  $617 \text{ mm}$ ,年蒸发量  $1757.10 \text{ mm}$ ,无霜期  $181 \text{ d}$ ,大于等于  $10^\circ\text{C}$  的积温  $4198^\circ\text{C}$ ,光热资源能满足一年两熟作物和多种杂粮、油料、果蔬生长需要。主要地貌类型为山麓平原和冲积平原,在以上自然地理条件的影响下,研究区农作物以小麦、玉米、花生、大豆、地瓜、土豆、棉花等为主。

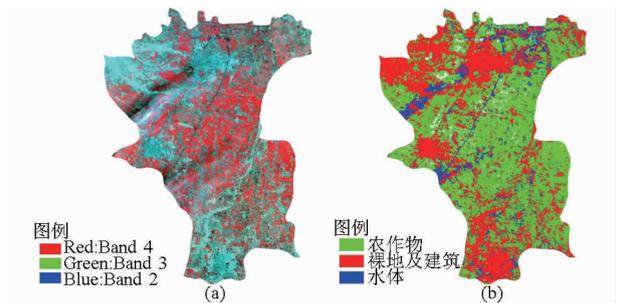


图3 研究区 HJ-1 CCD 影像和农作物提取结果

Fig. 3 HJ-1 CCD image and crop areas in study area

(a) CCD 影像 (b) 农作物提取结果

### 2.2 数据源

自 20 世纪 80 年代以来遥感技术被大量用于农业中<sup>[18]</sup>,本研究所使用的遥感影像为具有我国自主知识产权的 HJ-1 卫星的 CCD、IRS 影像,HJ-1 CCD 影像具有高时间分辨率(2~4 d)和较高的空间分辨率(30 m);HJ-1 IRS 影像空间分辨率为 150 m,重访周期为 96 d。研究过程中采用 2011 年 5 月 23 日上

午 10:58 获取的 HJ-1B CCD 晴空无云过境影像, 条带号为 2, 行号为 66; 同时采用 2011 年 5 月 23 日上午 11:00 获取的 HJ-1B IRS 晴空无云过境影像, 条带号为 455, 行号为 67。

DEM 数据的分辨率为 30 m。还收集距离研究区最近的国家级气象站点数据, 如风速、平均气温、气压等, 用以运行 SEBAL 模型所需气象资料, 气象站为北京站, 站号 54511, 纬度 39.48°, 经度 116.28°, 海拔高度为 31.3 m。

### 2.2.1 HJ-1 卫星影像几何精校正

以具有地理参考的 SPOT5 影像为基准, 对研究区的 HJ-1B CCD 和 HJ-1B IRS 影像进行几何精校正, 首先, 选取 30 个控制点, 误差在 1 个像元之内, 满足精度要求, 采用二次多项式校正法和双线性内插法进行重采样; 然后, 将 DEM 与校正后的 HJ-1B CCD 和 HJ-1B IRS 影像进行几何配准, 精度也控制在 1 个像素以内, 最终投影坐标统一转换为 UTM-WGS84 坐标。

### 2.2.2 基于 DEM 的坡度、坡向计算

基于校正后的 DEM 计算研究区的坡度、坡向, 并计算坡度、坡向的正弦值、余弦值, 计算单位为度, 正北向为 0°, 顺时针方向为正, 当地表坡度为 0° 时, 朝向无意义。进而, 基于计算的坡度、坡向的正弦值、余弦值, 进一步计算太阳入射角余弦、瞬间短波入射辐射、24 h 大气层外辐射等参数。

### 2.2.3 基于 HJ-1 CCD 卫星影像的农作物提取

农作物提取利用最大似然分类器, 采用 432 波段组合标准假彩色方式, 波段组合结果中农作物由于长势良好, 故成猩红色, 建筑物及未利用地呈蓝色, 水体呈深蓝到黑色, 据此选择训练样本。样本选取完成后, 为避免地类中混入其他地类的样本、提高农作物提取精度, 对训练样本进行了提纯, 利用多维可视化分析器对之前选取的训练样本进行提纯, 然后利用最大似然法对影像进行分类。

## 3 结果与分析

### 3.1 关键地表参数反演结果

#### 3.1.1 地表反照率

研究区地表反照率是基于大气顶层反射率反演结果和 DEM 数据计算的, 其合理数值范围为: 水体等于 0.05, 盐碱地在 0.50~0.60 之间, 沙漠在 0.30~0.40 之间, 农作物在 0.15~0.25 之间, 森林在 0.10~0.15 之间, 本研究反演的地表反照率结果如图 4 所示, 统计分析结果如表 1 所示。

从图 4 和表 1 可以看出: 研究区内的地表反照率集中分布在 0.14~0.19 之间, 这是农作物的地表

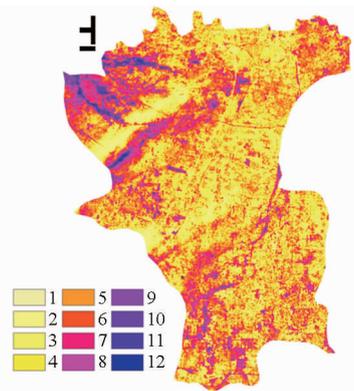


图 4 地表反照率反演结果

Fig.4 Surface albedo inversion result

表 1 地表反照率反演统计分析结果

Tab.1 Statistical result of surface albedo inversion

等级	范围	频率	等级	范围	频率
1	0	122	7	0.18~0.19	1 161 374
2	0~0.14	552 768	8	0.19~0.20	565 828
3	0.14~0.15	2 142 732	9	0.20~0.21	272 193
4	0.15~0.16	2 817 923	10	0.21~0.23	119 979
5	0.16~0.17	2 616 248	11	0.23~0.24	53 869
6	0.17~0.18	1 855 240	12	0.24~0.31	13 337

反照率合理区间值, 这与图 3 的农作物提取空间分布结果完全一致。整个研究区的地表反照率均值为 0.163 45, 从小到大依次为: 建筑用地及裸地、农作物、水体, 随着地表反照率的增高, 土地利用类型逐渐由植被覆盖最好的农作物区域(水体由于镜面反射原因导致反照率极低)过渡到覆盖最差的盐碱地和沙地。

#### 3.1.2 地表温度

地表温度的反演基于地表比辐射率反演结果及 HJ-1B IRS 影像的第 4 波段完成, 其中地表比辐射率是利用 NDVI 指数和地表反照率反演结果生成的。研究区地表温度的反演结果如图 5 所示。

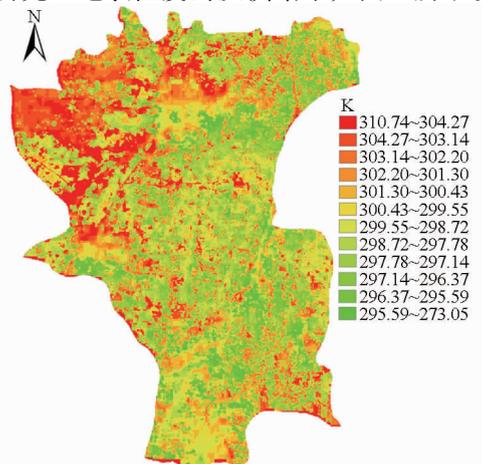


图 5 地表温度反演结果

Fig.5 Surface temperature inversion result

研究区内地表温度平均值为 298.06 K, 最低值为 270 K, 对应于水面; 最高值为 310.74 K, 对应裸地和建筑, 随着植被覆盖的减少, 地表温度增高。

### 3.2 地表能量平衡分量反演结果

#### 3.2.1 净辐射通量

地表净辐射通量是地面能量、物质输送与交换过程中的原动力, 它的变化将导致其他分量的变化, 研究过程中利用地表反射率反演结果、大气透射率、地表比辐射率和地表温度, 反演得到净辐射量, 反演结果如图 6 所示。

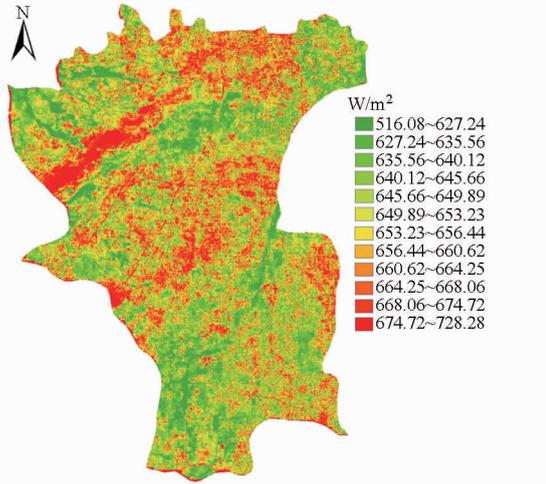


图 6 净辐射通量反演结果

Fig. 6 Net radiation flux inversion result

图 6 净辐射通量反演结果表明: 净辐射通量低值出现在山体附近, 高值出现在平坦的种植区域; 从散点图中可以看出: 研究区净辐射通量范围在 500 ~ 800  $W/m^2$ , 均值为 634.22  $W/m^2$ 。

#### 3.2.2 土壤热通量

土壤热通量是通过地表土壤截面单位面积的热量, 与土壤垂直温度梯度成正比。研究过程中利用 NDV、净辐射量、地表温度、地表显热温度, 反演得到土壤热通量, 反演结果如图 7 所示。

土壤热通量在能力平衡中是一个取值较小的量, 本研究反演得到的土壤热通量范围为 50.21 ~ 102.65  $W/m^2$ , 均值为 76.54  $W/m^2$ , 水体和建筑裸地的土壤热通量计算方法与植被不同, 其中植被的土壤热通量与净辐射量的比值约为 10%, 建筑物及裸土的约为 25%, 其空间分布趋势与地表温度及净辐射通量的空间分布特征大体相同。

#### 3.2.3 感热通量

感热通量的计算采用较复杂的迭代循环运算, 需要用到动量传输地表粗糙度、摩擦风速和热量传输空气动力学阻力。在利用 NDVI、DEM 和坡度计算动量传输地表粗糙度的基础上, 结合气象数据计算摩擦风速和热量传输空气动力学阻力和参考高度

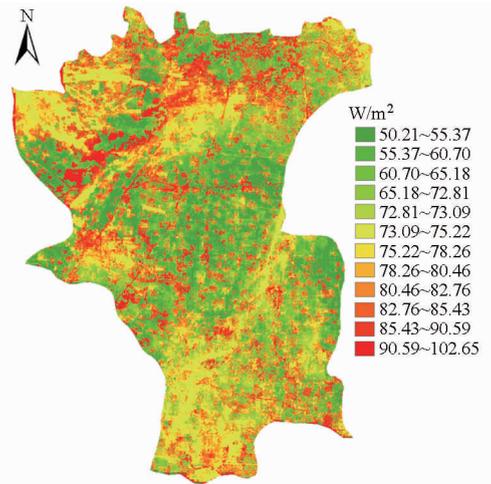


图 7 土壤热通量反演结果

Fig. 7 Soil heat flux inversion result

的地表显热温度以及地表温度, 计算感热通量, 迭代循环过程中设置的参数方案如表 2 所示。

表 2 迭代循环参数设置方案

Tab. 2 Parameters in iterative cycle program

参数	冷点	热点
空气温度/K	21.3	
海拔高度/m	29	16
地表温度/K	298.947	305.03
净辐射通量/ $(W \cdot m^{-2})$	661.222	637.823
土壤热通量/ $(W \cdot m^{-2})$	71.938	81.616
空气动力学阻抗/ $(s \cdot m^{-1})$	31.779	31.213
大气压/Pa	112.127 1	112.127 636 4
空气密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	1.314 331	1.3143 381 62
感热通量(假设)/ $(N \cdot m^{-2})$	0	228.027 74
$dT$	0	13.156 220 14
$a$	2.162 784 83	-646.558 04

$dT$  的计算公式确定后, 就可计算  $H$ , 但是该结果只是一个初步的估算, SEBAL 模型需要在内部利用 Monin - Obukov 方法重复计算  $H$  至少 5 次, 来估算和更新  $r_{ah}$  和  $U_*$ , 直到结果趋于稳定, 图 8 为  $dT$  与  $T_0$  线性关系 5 次迭代结果, 从图中可以看出: 随着迭代次数增加, 各参数开始趋于稳定, 尤其第 4 次与第 5 次基本重合, 故将第 5 次结果作为迭代终点,

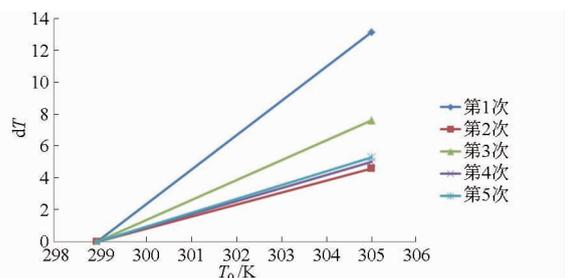


图 8  $dT$  与  $T_0$  线性关系 5 次迭代结果

Fig. 8 Fifth iterative result of the linear relationship between  $dT$  and  $T_0$

生成感热通量影像。5 次迭代后所得感热通量影像如图 9 所示。

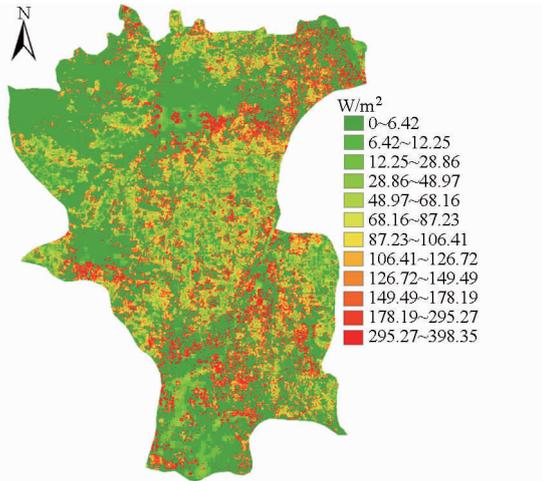


图 9 感热通量反演结果

Fig.9 Sensible heat flux inversion result

### 3.3 日蒸散量反演结果

获得感热通量后即可计算  $\lambda E$ ,  $E$  代表 Landsat 卫星过境瞬间的蒸散量,利用地表反射率、24 h 大气外辐射、大气透射率、地表温度和蒸散比,计算 24 h 蒸散量。图 10 为研究区内 24 h 实际蒸散量反演结果。

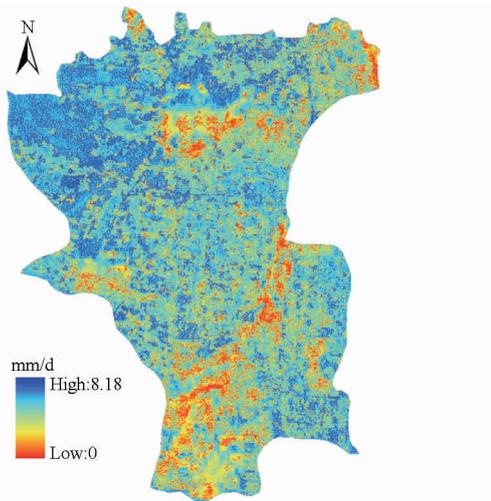


图 10 24 h 实际蒸散量反演结果

Fig.10 24 hour actual evapotranspiration inversion result

反演结果表明:研究区内日蒸散量均值为 6.28 mm/d,范围为 4.43 ~ 8.18 mm/d,且随着植被覆盖度增加而增大,水体、农作物的蒸散量明显高于建筑及裸地。在植被长势好且植被盖度高的地方,作物的生命活动旺盛,蒸腾量大,整个像元的蒸散阻抗低,潜热能所占的比例增大,像元内的表面温度降低。在裸土区域以土壤蒸发为主,对蒸散贡献较大的叶面蒸腾不占优势,故裸土区的蒸发量小,整个像元的蒸散阻抗高,像元内的表面温度升高。蒸散量

反演精度的验证利用 Penman - Monteith 公式进行,利用 Penman - Monteith 公式基于气象站数据计算得到的当日参考作物蒸散量为 5.04 mm/d,作物系数为 1.42,从而计算得到农作物实际蒸散量为 7.15 mm/d;而本研究反演的日蒸散量的均值为 6.28 mm/d,证明反演结果合理。

### 3.4 农作物 NPP 反演结果

利用第 1 节论述的原理,反演研究区农作物 NPP 的空间结果如图 11 所示,NPP 值的统计结果如表 3 所示。研究区农作物净初级生产力 NPP 均值为 31.02  $g/(m^2 \cdot d)$ ,最高达到 139.29  $g/(m^2 \cdot d)$ 。图 11 表明:NPP 空间差异比较大,这与当天的地物类型、气象状况、土壤条件等因素密切相关。从图中可以看出,研究区东部冬小麦的产区的 NPP 值比较高,因为在 5 月份冬小麦正处于灌浆期,所以净初级生产力会比较高;其他农作物如棉花,在 5 月下旬时还处于出苗期,故净初级生产力较低。表 3 表明:研究区内农作物 NPP 的值集中分布区间为 23.88 ~ 30.67  $g/(m^2 \cdot d)$ ,是均值分布区间;其次是 38.82 ~ 59.19  $g/(m^2 \cdot d)$ ,属于长势较好的农作物区域;再次是 6.91 ~ 19.81  $g/(m^2 \cdot d)$ ,属于长势稍差的农作物区域。

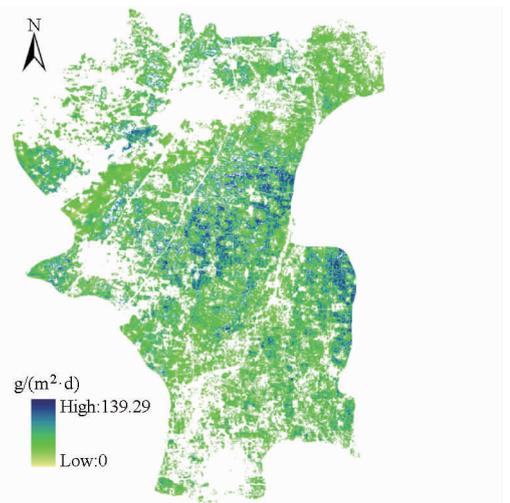


图 11 农作物 NPP 反演结果

Fig.11 Crop net primary productivity inversion result

表 3 农作物 NPP 反演结果统计分析  
Tab.3 Statistical results of crop net primary productivity inversion result

等级	范围/ ( $g \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ )	频率	等级	范围/ ( $g \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ )	频率
1	0.00 ~ 4.00	322	7	23.88 ~ 30.67	2 422 741
2	4.00 ~ 6.91	88 908	8	30.67 ~ 38.82	1 023 381
3	6.91 ~ 11.66	1 040 830	9	38.82 ~ 48.32	1 052 513
4	11.66 ~ 15.74	1 040 274	10	48.32 ~ 59.19	1 051 675
5	15.74 ~ 19.81	1 040 277	11	59.19 ~ 74.80	176 686
6	19.81 ~ 23.88	1 055 158	12	74.80 ~ 139.29	81 777

## 4 结论

(1)以能量促使农作物生长为驱动,基于能量平衡原理,利用 SEBAL 陆地能量平衡模型反演农作物 NPP 是可行的。

(2)研究区日蒸散量范围为 4.43 ~ 8.18 mm/d,均值为 6.28 mm/d,与利用气象数据和 Penman - Monteith 公式计算结果(7.15 mm/d)大致相等;反演的蒸散量随着植被覆盖度增加而增大,水体、农作物的蒸散量明显高于建筑物及裸地。

(3)研究区涿州市和高碑店市农作物净初级生产力 NPP 均值为 31.02 g/(m<sup>2</sup>·d),最高达到 139.29 g/(m<sup>2</sup>·d),其空间分布特征与地物类型分布特征一致,因此,农作物 NPP 可以作为耕地生产力评价的一个指示器。

(4)HJ-1 卫星影像同时具有高时间分辨率和较高的空间分辨率,本研究基于该卫星影像的蒸散量反演与 NPP 反演结果表明该影像可用于农作物定量参数反演,是农业灾害监测的有效数据源。

## 参 考 文 献

- 1 陈印军,肖碧林,方琳娜,等. 中国耕地质量状况分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3557 - 3564.  
Chen Yinjun, Xiao Bilin, Fang Linna, et al. The quality analysis of cultivated land in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(17): 3557 - 3564. (in Chinese)
- 2 闫慧敏,刘纪远,曹明奎. 中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用[J]. 地理学报, 2007, 62(2): 171 - 180.  
Yan Huimin, Liu Jiuyan, Cao Mingkui. Spatial pattern and topographic control of China's agricultural productivity variability[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(2): 171 - 180. (in Chinese)
- 3 朱文泉,陈云浩,徐丹,等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296 - 300.  
Zhu Wenquan, Chen Yunhao, Xu Dan, et al. Advances in terrestrial net primary productivity (NPP) estimation models [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(3): 296 - 300. (in Chinese)
- 4 Uchijiam I, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetation. (1) Chikugo model for evaluation net primary productivity [J]. Journal of Agriculture Meteorology, 1985, 40: 343 - 352.
- 5 Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results [J]. Global Change Biology, 1999, 5(Supp.1): 1 - 15.
- 6 Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing [J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(1): 74 - 88.
- 7 Fang J Y, Piao S L, Field C B, et al. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999 [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2003, 1(6): 293 - 297.
- 8 Zhao M, Heinseh F A, Nemani R R, et al. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2): 164 - 176.
- 9 Rasmus F, Inge S, Michael S R, et al. Evaluation of satellite based primary production modeling in the semi-arid Sahel [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 105(3): 173 - 188.
- 10 国志兴,王宗明,刘殿伟,等. 基于 MOD17A3 数据集的三江平原低产农田影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 152 - 155.  
Guo Zhixing, Wang Zongming, Liu Dianwei, et al. Analysis of the influence factors of low-yield cropland in the Sanjiang Plain based on MOD17A3 dataset [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 152 - 155. (in Chinese)
- 11 朱锋,刘志明,王宗明,等. 东北地区农田净初级生产力时空特征及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2010, 32(11): 2079 - 2084.  
Zhu Feng, Liu Zhiming, Wang Zongming, et al. Temporal-spatial characteristics and factors influencing crop NPP across northeastern China [J]. Resources Science, 2010, 32(11): 2079 - 2084. (in Chinese)
- 12 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, 212 - 213: 198 - 212.
- 13 Sun Z P, Wei B, Su W, et al. Evapotranspiration estimation based on SEBAL model in the nansi lake wetland of China [J]. Mathematics and Computer Modeling, 2011, 54(3 - 4): 1086 - 1092.
- 14 Bastiaanssen W G M, Ali S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 94(3): 321 - 340.
- 15 Hellegers P J G J, Soppe R, Perry C J, et al. Combining remote sensing and economic analysis to support decisions that affect water productivity [J]. Irrigation Science, 2009, 27(3): 243 - 251.
- 16 Zwart S J, Bastiaanssen W G M, de Fraiture C, et al. WATPRO: a remote sensing based model for mapping water productivity of wheat [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(10): 1628 - 1636.
- 17 Sun Z P, Wu G Z, Shen W M, et al. Estimation of net primary productivity of Sanhu national nature reserve in China by integrating HJ-1 remote sensing image with surface energy balance algorithm for land model [J]. Sensor Letters, 2013, 11(6 -

7): 1121 – 1127.

- 18 黄青, 李丹丹, 陈仲新, 等. 基于 MODIS 数据的冬小麦种植面积快速提取与长势监测[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 163 – 167.

Huang Qing, Li Dandan, Chen Zhongxin, et al. Monitoring of planting area and growth condition of winter wheat in China based on MODIS data [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 163 – 167. (in Chinese)

- 19 胡玉福, 蒋双龙, 刘宇, 等. 基于 RS 的安宁河上游植被覆盖时空变化研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 205 – 215.

Hu Yufu, Jiang Shuanglong, Liu Yu, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage on upper anning river based on RS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 205 – 215. (in Chinese)

## Crop NPP Inversion Using Surface Energy Balance Algorithm for Land Model

Su Wei<sup>1,2</sup> Liu Rui<sup>1</sup> Sun Zhongping<sup>3</sup> Liu Ting<sup>1</sup> Jiang Fangfang<sup>1</sup> Cao Fei<sup>3</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

3. Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The crop net primary productivity is inversion using HJ – 1 CCD and IRS remote sensing images in Zhuozhou and Gaobeidian, Baoding City, Hebei Province. This inversion is done based on surface energy balance algorithm for land model. There are two important components in this inversion process: efficiency for solar energy utilization and absorbed photosynthetic active radiation (APAR). Firstly, HJ – 1 CCD and IRS remote sensing images, DEM, meteorological data are used to estimate net radiation flux, soil heat flux, sensible heat flux to the air. These three fluxes are used to compute instantaneous evaporative fraction, which is used to inversion efficiency for solar energy utilization. Secondly, extraterrestrial radiation is computed using DEM. At the same time, crop absorbed photosynthetic active radiation is computed based on the fraction of photosynthetically active radiation (fPAR). And the fPAR is computed using normalized difference vegetation index and spectral ratio index resulting from HJ – 1 CCD remote sensing images. At last, the inversion APAR and efficiency for solar energy utilization are used to estimate crop net primary productivity. Experiment results indicate that the inversion result of 24 hour actual evapotranspiration is from 4.43 mm/d to 8.18 mm/d, mean value of which is 6.28 mm/d. This value is close to 7.15 mm/d, which is the computed result using Penman – Monteith formula. This indicates our inversion accuracy can meet our application requirements. The mean value of crop NPP  $31.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , the highest value is  $139.29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , the spatial pattern is same to land cover type. These indicate that this study is reasonable and feasible.

**Key words:** Crop Net primary productivity Inversion Surface energy balance algorithm for land model Evapotranspiration Photosynthetically available radiation