

刘剑锋,方 鹏,陈 琳,等. 基于 MODIS NDVI 的冬小麦收获指数遥感提取[J]. 江苏农业科学,2022,50(13):219-225.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.13.033

# 基于 MODIS NDVI 的冬小麦收获指数遥感提取

刘剑锋<sup>1</sup>, 方 鹏<sup>2</sup>, 陈 琳<sup>1</sup>, 张喜旺<sup>2</sup>

(1. 黄河水利职业技术学院, 河南开封 475004; 2. 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 河南开封 475004)

**摘要:**为研究利用遥感技术反演冬小麦收获指数,以河北省馆陶县为例,使用 2016 年、2017 年、2018 年连续 3 年冬小麦生长期内的 MODIS NDVI 时间序列数据,并基于农学观点和冬小麦生理机制,提出了一种构建收获指数(HI)相关参数的新模型  $HI_{MEAN}$ ,并与已有相关模型  $HI_{NDVI}$  和  $HI_{NDVI\_SUM}$  进行比较,最后建立了收获指数的预测模型。结果表明,与收获指数参数模型  $HI_{NDVI}$  和  $HI_{NDVI\_SUM}$  相比,模型  $HI_{MEAN}$  的精度最高。进一步反演了 2018 年河北省馆陶县的冬小麦收获指数,与实测冬小麦收获指数对比,其  $r^2$  为 0.632 9,说明收获指数参数模型  $HI_{MEAN}$  在反演冬小麦收获指数时,理论基础更加合理,同时也具有最高的精度。同时,收获指数参数模型  $HI_{MEAN}$  构建也为后续的以及其他作物收获指数提取研究提供了一种可行的思路。

**关键词:**冬小麦;收获指数;时间序列;MODIS NDVI;遥感提取; $HI_{MEAN}$

**中图分类号:**S127 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)13-0219-07

收获指数(harvest index)是影响农作物产量十分重要的理化参数<sup>[1]</sup>,也是诸多作物估产模型的关键参数之一<sup>[2-3]</sup>。作物收获指数是农作物在收获期的籽粒总质量和作物总生物量的比值<sup>[4]</sup>,反映了作物光同化产物在籽粒和营养器官上的分配比例。根据作物生理学理论,生物量表示作物生理潜力,籽粒质量由籽粒库容限定,所以收获指数标志着经济产物与同化产物的效率,也反映了源的生理效能、源、库、流在一定程度上会影响作物的产量<sup>[5]</sup>。现代小麦育种持续关注小麦收获指数与小麦生物量的关系。一些研究表明,收获指数与产量之间是正相关的,收获指数不断提高也会促进小麦产量的增长<sup>[6-8]</sup>。因此,关注和研究冬小麦收获指数,对于准确理解冬小麦生理机制和冬小麦增产、估产具有重要意义。

传统农业大多通过实地测量方法获取小麦收获指数,这种方法费时、费力、效率较低而且难以大范围获取小麦收获指数。也有部分学者通过气象资料分析构建冬小麦气象模型来计算收获指数<sup>[9]</sup>。这种方法综合考虑了各个气象因素对收获指数的影响力,但是需要大量的年际气象累积数据,而且能否适用于小区域还有待验证。除此之外,更多的农业研究者关注的是小麦生长自然环境、遗传基因等因素对小麦收获指数的影响<sup>[10-12]</sup>,而鲜见利用遥感技术提取小麦收获指数。

遥感技术的快速发展为诸多研究领域提供了新的研究手段,但国内外利用遥感数据提取冬小麦收获指数的文章偏少,可用模型精度也不高。Moriondo 等通过分析冬小麦开花期至成熟期和出苗期到开花期的归一化植被指数(NDVI)变化关系,建立了收获指数与 NDVI 的模型,但侧重考虑生长过程中温度和水的负面影响,因此适应水分胁迫较大的地区,对于其他区域的效果有待验证<sup>[3]</sup>。Walter 等采用新颖的摄影测量方法,通过数字摄影相机和相关软件建立小面积的小麦 3D 点云图来预测生物量、植株高度、收获指数,取得了较好的效果<sup>[13]</sup>。但摄影相机成像区域较小,难以大面积推广。Richards 等通过对干旱环境下冬小麦生物量、叶面积、收获指数等关系的分析,提出了一种非线性的模型来计算收获指数,因此适用于干旱环境,且具有经验偏差<sup>[14]</sup>。Li 等综合分析了现有的几类冬小麦收获指

收稿日期:2021-08-17

基金项目:国家重点研发计划(编号:2021YFE0106700);河南省科技攻关项目(编号:212102110033);2020 年度河南省高等职业学校青年骨干教师培养计划(编号:2020GZGG091);全球环境基金(GEF)水资源与水环境综合管理主流化项目(编号:MWR-C-3-9)。

作者简介:刘剑锋(1980—),女,山东潍坊人,硕士,副教授,主要从事农业遥感、GIS 应用、三维地理信息建模等研究。E-mail:liu-jian-feng@163.com。

通信作者:张喜旺,博士,教授,主要从事农业遥感、生态遥感研究。

E-mail:zxiwang@163.com。

数反演模型在不同土壤氮肥条件下的反演精度,指出了利用 NDVI 反演冬小麦收获指数是最可行的<sup>[15]</sup>。任建强等基于 NDVI 时序数据,提出了一种冬小麦生殖阶段与营养阶段比值的收获指数参数模型<sup>[16]</sup>,但该模型忽略了冬小麦生殖生长阶段的籽粒质量也是总生物量的一部分,也导致了反演结果偏低。

总体而言,国内外利用遥感卫星数据提取冬小麦收获指数的研究偏少,精度普遍偏低。为了改进收获指数遥感反演模型,提高利用卫星数据反演冬小麦收获指数精度,从而更加深入地解析遥感数据与收获指数的关联机制,本研究依据前人研究基础,提出了一种新的构建收获指数的参数模型  $HI_{MEAN}$ ,建立了参数模型与实测数据的定量关系,以期为冬小麦收获指数遥感反演工作提供思路。

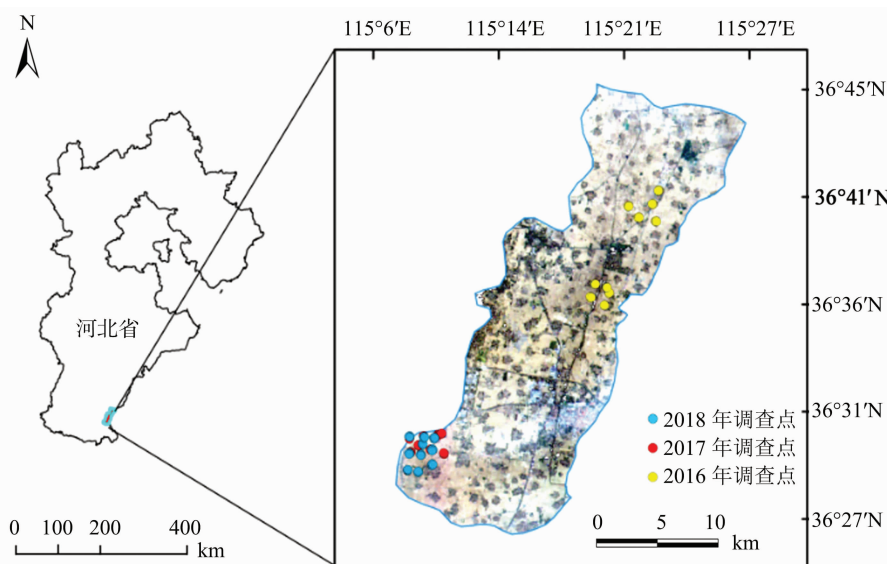


图1 研究区域位置

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区

馆陶县地处华北平原,与山东省接壤,临近河南省,地理位置为  $36^{\circ}46'35'' \sim 36^{\circ}27'8''N$ ,  $115^{\circ}7'12'' \sim 115^{\circ}28'5''E$ ,总面积  $456 \text{ km}^2$ 。馆陶县属于古河道冲积平原,地势西南高,东北低,平均海拔约为  $40 \text{ m}$ 。县内有卫运河和章河流经,卫运河县界内全长  $40.5 \text{ km}$ ,章河全长  $4.2 \text{ km}$ ,属季节性河流。气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季炎热干燥,冬季寒冷,日照充足,四季分明,年平均气温  $14^{\circ}\text{C}$ ,全年无霜期  $200 \text{ d}$ ,年日照  $2557 \text{ h}$ 。良好的自然条件和气候条件,使其成为华北平原重要的冬小麦种植区(图1)。

### 1.2 数据

**1.2.1 遥感影像数据** 本研究所使用的遥感影像数据为  $16 \text{ d}$  合成的 MODIS13Q1 VI 数据,来源于美国地质调查局(USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>),选取  $250 \text{ m}$  分辨率的 NDVI。该数据采用限定视角内最大值合成法(CV-MVC)<sup>[17]</sup>,在合成时间段内拥有更大的 NDVI 像元值、更小的观测视角、更接近星下点,并且能最大程度地减小双向反射的影响,使合成的 NDVI 数据精度更高。时间段分别为 2015 年 10 月 16 日至 2016 年 6 月 25 日、2016 年 10 月 16 日至 2017 年 6 月 25 日、2017 年 10 月 16 日至 2018 年 6 月 25 日。每期数据 16 景影像,共计 48 景影像。

**1.2.2 实测收获指数** 本研究采用 2016 年、2017 年、2018 年连续 3 年的地面实测收获指数数据。考虑到 MODIS 13Q1 NDVI 数据的空间分辨率为  $250 \text{ m}$ ,研究区内设置 10 个边长为  $250 \text{ m}$  的大样方,每个样方内设置 5 个样点。每个样点实测种植密度并取 10 株样本,烘箱设置温度为  $105^{\circ}\text{C}$  杀青  $1 \text{ h}$ ,再用  $80^{\circ}\text{C}$  烘干  $24 \text{ h}$  至恒质量,得到小麦的所有干质量生物量。通过实测每株的籽粒质量和生物量获取实测收获指数。

**1.2.3 冬小麦空间分布** 基于外业调查资料,利用 Landsat 遥感影像进行冬小麦种植区识别,获得 2016—2018 年的河北省馆陶县冬小麦种植区分布数据。

## 2 研究方法

### 2.1 时序数据平滑处理

MODIS NDVI 虽然经过最大值合成,但提取的时序数据噪声依然很大,呈现明显的锯齿状波动,从而影响定量反演冬小麦收获指数的精度。针对这种情况,经比较现有方法的优缺点<sup>[18-20]</sup>,本研究选取 Savitzky-Golay 滤波对时序数据进行平滑处理<sup>[21-24]</sup>,以便更清晰地描述冬小麦生长关键时期时间序列特征曲线的变化。处理模型如下:

$$y_j' = \frac{\sum_{i=j-n}^j c_i y_{i+j}}{N} \quad (1)$$

式中: $y_{i+j}$ 是拟合之前的第 $(i+j)$ 个 NDVI 时间序列数据; $y_j'$ 是拟合之后的 NDVI 时间序列数据; $n$ 为滑动窗口的宽度; $N$ 为滤波器长度; $c_i$ 为滤波卷积系数。

### 2.2 模型构建

**2.2.1 模型理论基础** 从作物生理学角度看,作物收获指数是收获期籽粒总质量和作物地上总生物量的比值,实质上反映了作物干物质在籽粒和营养器官上的分配比例<sup>[3-4]</sup>。冬小麦在一个生长周期内要经过漫长的生长阶段,其中返青期至开花期、开花期至乳熟期是最重要的 2 个生长阶段。返青期至开花期阶段,小麦营养生长器官发育完善,奠定了小麦生长过程的生物量基础;而在开花期至乳熟期阶段,小麦营养生长器官发育达到极致后,小麦干物质逐渐集中到籽粒部分,这是小麦产量形成的关键阶段<sup>[25-26]</sup>。基于这 2 个关键阶段开展收获指数研究成为探讨遥感反演方法的焦点<sup>[16,27-29]</sup>。

**2.2.2 现有模型存在的问题** 国内外相关研究不多,本研究对现有收获指数模型进行合理改进和优化,提出了一种新的模型,以期实现模型在精度方面的提升。

目前城建模型<sup>[3,16]</sup>如公式(2)、公式(3)所示。

$$HI_{NDVI} = HI_{\max} - HI_{\text{range}} \times (1 - HI_{\text{post}}/HI_{\text{pre}}) \quad (2)$$

式中: $HI_{NDVI}$ 为收获指数模拟参数; $HI_{\max}$ 为理论最大收获指数,取值 0.48; $HI_{\text{range}}$ 为收获指数最大值和最小值之差,取值 0.18; $HI_{\text{post}}$ 为开花期到成熟期 NDVI 均值; $HI_{\text{pre}}$ 为返青期到开花期 NDVI 均值。该模型考虑到冬小麦生长过程水分胁迫对收获指数的影响,因此最大收获指数  $HI_{\max}$  当作某一常数以减轻水分胁迫带来的负面影响。然而,该模型的区域适应性不足,且  $HI_{\max}$  获取困难。

$$HI_{NDVI\_SUM} = \sum NDVI_{\text{post}} / \sum NDVI_{\text{pre}} \quad (3)$$

式中: $HI_{NDVI\_SUM}$ 为收获指数模拟参数; $\sum NDVI_{\text{post}}$ 为冬小麦开花期到乳熟期的 NDVI 累计值; $\sum NDVI_{\text{pre}}$ 为返青期到开花期的 NDVI 累计值。该模型依据冬小麦生长阶段的时序 NDVI 累计值计算收获指数,在区域尺度获取冬小麦收获指数也是可行的。然而,只考虑到生物量与营养生长阶段有关,而忽略了生殖生长阶段所产生的籽粒质量也是生物量的一部分这一关键问题。

**2.2.3  $HI_{\text{MEAN}}$ 模型构建** 基于上述分析,根据作物生理学和农学理论,冬小麦地上总生物量不仅包括营养生长阶段的干物质在茎秆部分的分配,还包括生殖生长阶段的干物质在籽粒部分的分配。因此,利用  $HI_{\text{mean\_post}}$  与  $HI_{\text{mean\_pre}} + HI_{\text{mean\_post}}$  的比值建立的参数模型  $HI_{\text{MEAN}}$ ,不仅具有严谨的理论基础,而且实际反演冬小麦收获指数时更加简单易行。

由于 NDVI 与生物量之间的相关性,以及现有模型的经验,本研究依照冬小麦生长期內营养生长阶段和生殖生长阶段的时序 NDVI 特征曲线的变化,建立参数模型  $HI_{\text{MEAN}}$ ,公式如下。

$$HI_{\text{MEAN}} = \frac{HI_{\text{mean\_post}}}{HI_{\text{mean\_pre}} + HI_{\text{mean\_post}}} \quad (4)$$

式中: $HI_{\text{MEAN}}$ 为收获指数模拟参数; $HI_{\text{mean\_post}}$ 是冬小麦开花期至成熟期的 NDVI 均值,用以表征冬小麦生殖生长阶段生产的籽粒质量; $HI_{\text{mean\_pre}}$ 是冬小麦返青期到开花期的 NDVI 均值,用以表征冬小麦生长阶段的生产生物量。

## 3 结果与分析

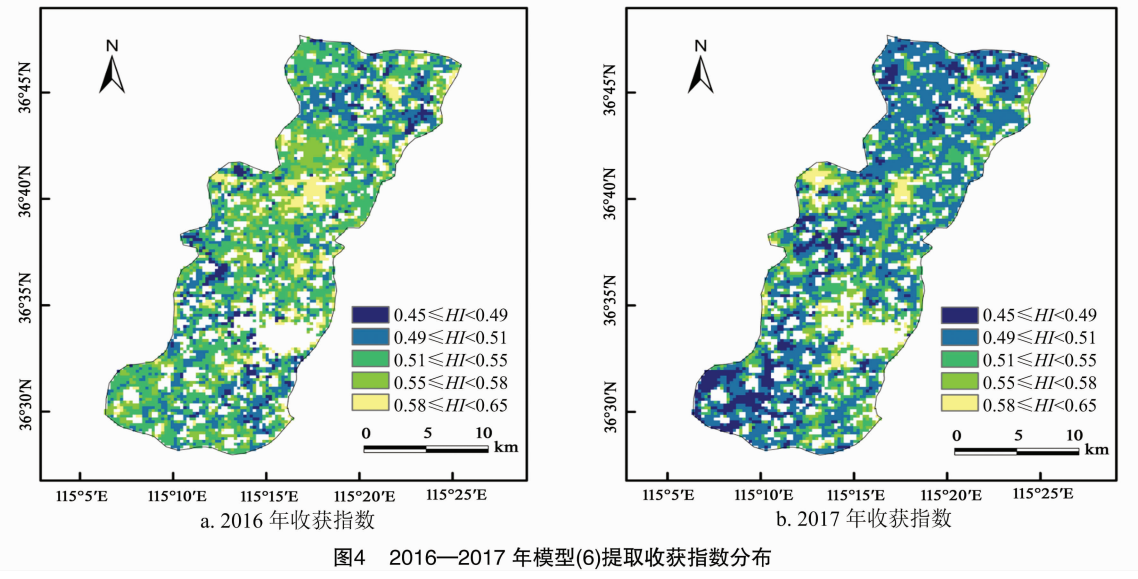
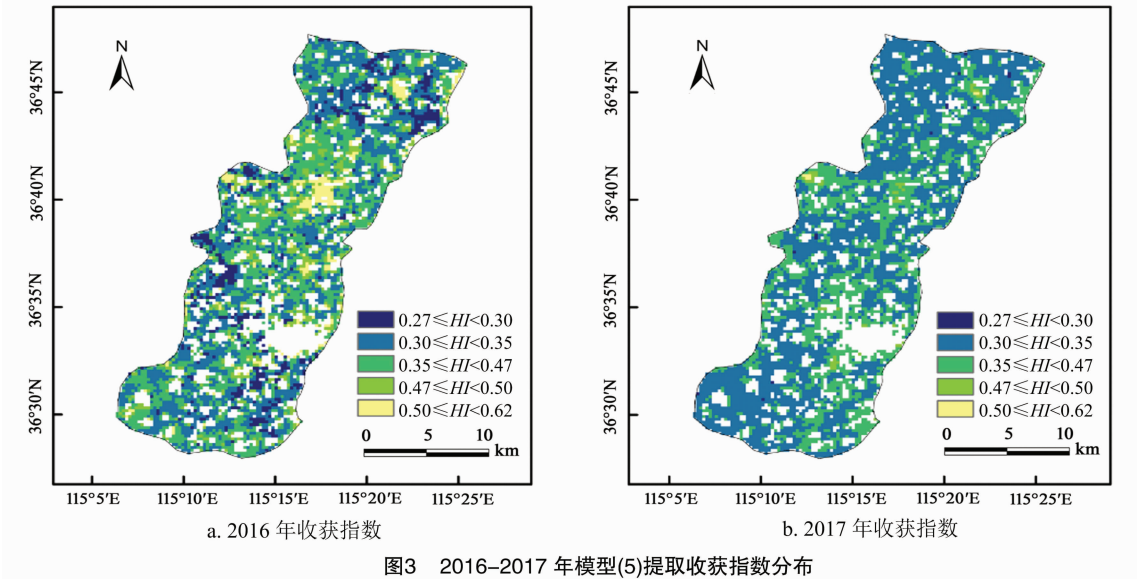
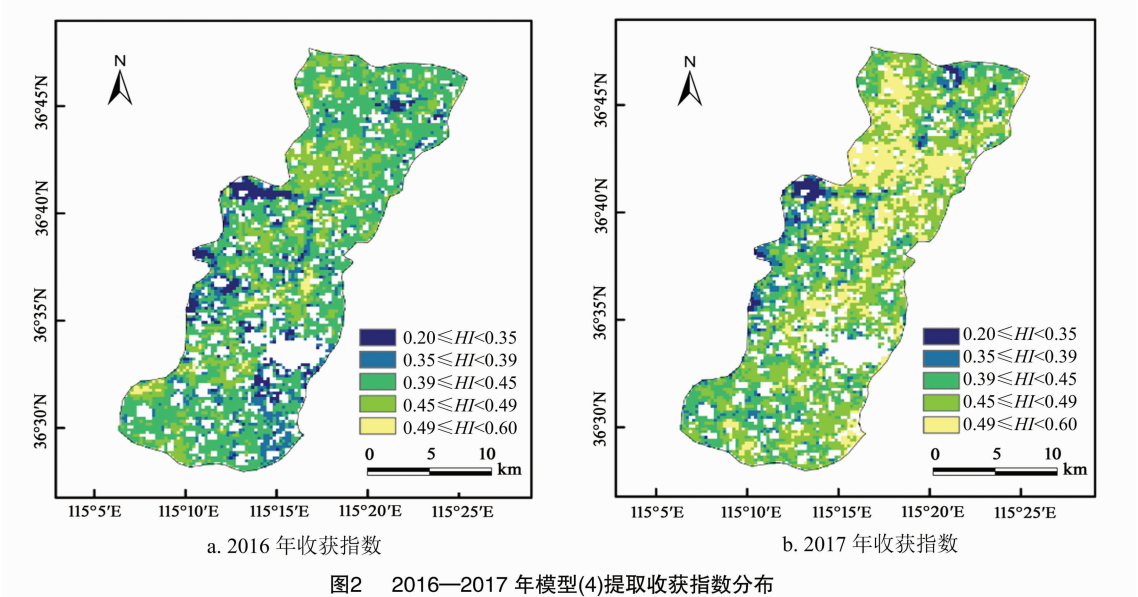
### 3.1 提取模型参数

利用平滑后的 2016 年和 2017 年的 NDVI 时间序列,基于收获指数参数模型(2)、(3)、(4)计算得到冬小麦收获指数模拟参数,如图 2、图 3、图 4 所示。

经统计,在上述 2 期的收获指数空间分布图中,模型(2)所提取的收获指数范围为 0.35~0.65,模型(3)提取的参数范围为 0.36~0.65,模型(4)提取的参数范围为 0.43~0.66。由于模型都是依据 NDVI 时间序列数据变化来响应冬小麦营养生长阶段和生殖生长阶段的变化,都具农学理论支撑,所得数据基本合理。

### 3.2 模拟参数与实测值的拟合

基于上述计算结果,以样方为基础与实测值进

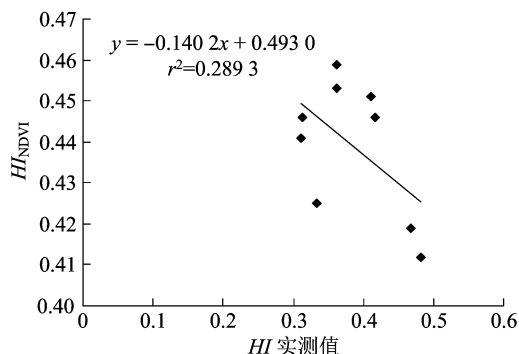


行回归分析,探测各模型的拟合程度,结果如图 5、图 6、图 7 所示。

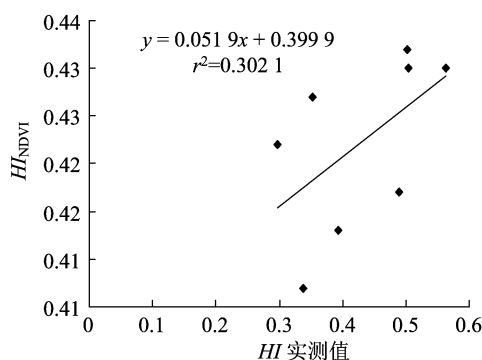
由图 5 可知,基于模型(2)的模拟参数与实测收获指数的拟合结果,2016 年  $r^2$  为 0.289 3,2017 年为 0.302 1。总体而言,利用模型(2)反演得到的收获指数具有一定的精度,但是并不高。该模型最初是由 Moriondo 等提出并将其应用到意大利格罗塞托省和福贾省的小麦收获指数研究<sup>[3]</sup>。该区域气候类型为典型的地中海气候,夏季炎热干燥,降水

较少,小麦受水分限制较大;冬季温和多雨,适合小麦生长。与我国华北平原相比,该区域在冬季气温偏高,降水较多,具有良好的小麦生长条件,且该区域种植的冬小麦没有返青期,因此该模型应用到华北平原冬小麦种植区域的收获指数反演时精度偏低。

图 6、图 7 为基于模型(3)和(4)得到的模拟参数与实测收获指数的拟合结果。2016 年  $r^2$  分别为 0.389 2 和 0.423 0;2017 年分别为 0.590 4 和 0.676 6。

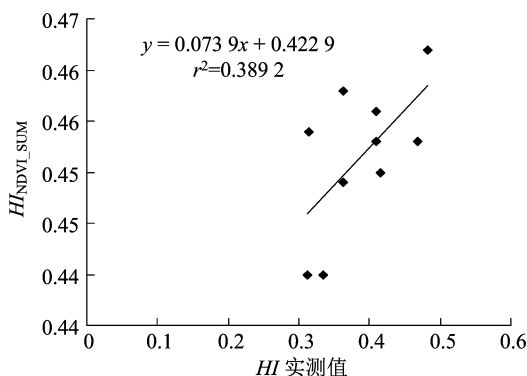


a. 2016 年拟合结果

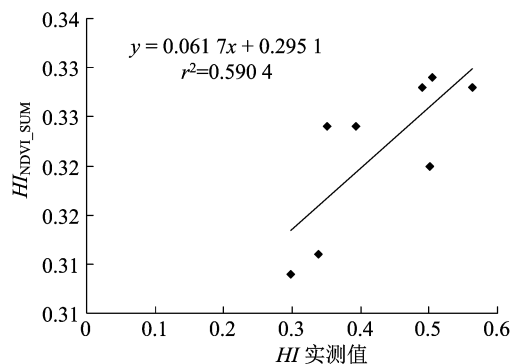


b. 2017 年拟合结果

图5 基于模型(2)的 2016—2017 年模拟参数与实测收获指数的拟合结果

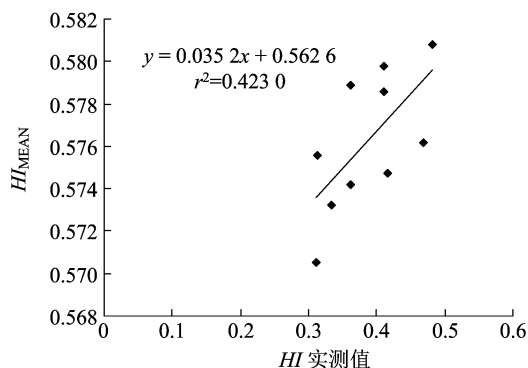


a. 2016 年拟合结果

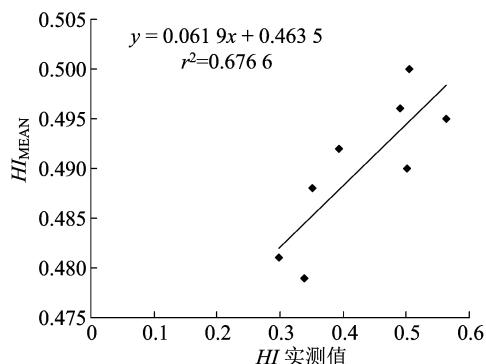


b. 2017 年拟合结果

图6 基于模型(3)的 2016—2017 年模拟参数与实测收获指数的拟合结果



a. 2016 年拟合结果



b. 2017 年拟合结果

图7 基于模型(4)的 2016—2017 年模拟参数与实测收获指数的拟合结果



与模型(2)相比,模型(3)和(4)侧重考虑了冬小麦的生长机制和农学基础,根据冬小麦 NDVI 曲线变化与冬小麦生物量变化的关系来构建收获指数反演模型,具有较强的理论支撑。因此,拟合优度有了很大的提高。而且模型(4)在模型(3)的基础上进行了改进,具有更加严谨的农学依据。

综合上述分析可知,本研究构建的  $HI_{MEAN}$  参数模型与实测收获指数数据拟合程度最高,其  $r^2$  最高达到 0.676 6。进而证明了  $HI_{MEAN}$  参数模型反演收获指数的优越性。

### 3.3 预测模型建立

根据 2016—2017 年实测数据以及  $HI_{MEAN}$  的计算结果,构建预测冬小麦收获指数的线性预测函数,如式(5)所示。

$$Y = 0.0572X + 0.5112. \quad (5)$$

式中: $Y$ 为预测的收获指数; $X$ 为从 NDVI 时序数据中提取的  $HI_{MEAN}$  参数。

### 3.4 收获指数空间分布

根据模型(4)计算得到的 2018 年研究区冬小麦模拟参数  $HI_{MEAN}$ ,带入公式(5)中,并以冬小麦种植区为掩模,提取得到 2018 年馆陶县冬小麦收获指数空间分布,如图 8 所示。可以看出,2018 年的冬小麦收获指数范围主要集中在 0.53~0.54,与 2018 年实测的馆陶县冬小麦收获指数数值分布基本一致,反演精度较高。从空间分布情况看,中部较高,四周偏低;北部冬小麦收获指数比南部冬小麦收获指数高。

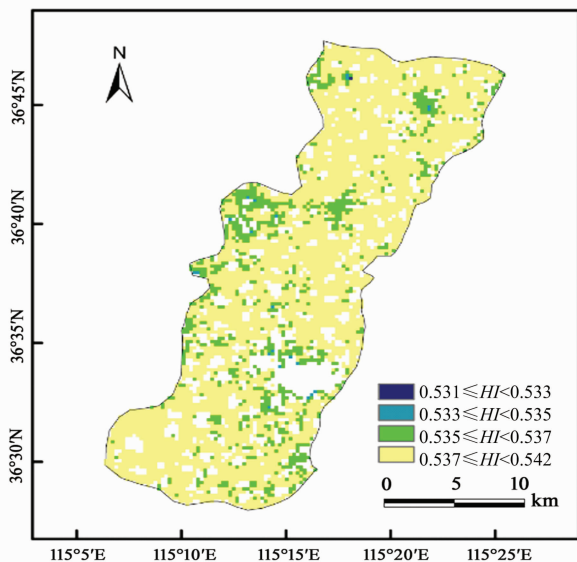


图8 2018 年预测模型反演冬小麦收获指数空间分布

将 2018 年实测的冬小麦收获指数与预测结果进行分析,结果如图 9 所示。可以看出,预测结果与 2018 年实测的收获指数呈现出明显的线性关系, $r^2$  为 0.632 9。分析结果表明,通过  $HI_{MEAN}$  参数模型建立的 2018 年冬小麦收获指数模型能很好地反映实际的收获指数情况。

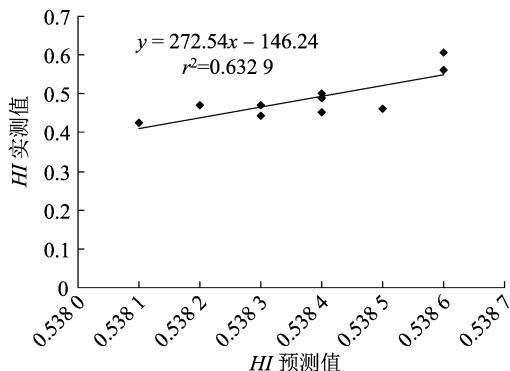


图9 预测收获指数与实测收获指数相关性

## 4 结语

利用遥感技术开展作物收获指数的研究尚不够成熟,目前的研究精度普遍不高,因此很有进行深入研究的必要。本研究依据农学和作物生理学原理,利用冬小麦营养生长阶段与全生育阶段的 NDVI 均值之比,作为构建与收获指数相关的参数模型  $HI_{MEAN}$ ,相对于现有模型,理论上更加合理。从验证结果看,该模型反演精度也最高,为今后的冬小麦收获指数反演提供了一种可行的方法。

但是在利用遥感技术反演冬小麦收获指数时,还应注意以下问题:(1)目前国内外对于收获指数的研究很少涉及到作物生长环境因素对作物收获指数的影响,如气温、降水、蒸散发等环境因素。在今后的研究中应加以重视。(2)MODIS13Q1 NDVI 虽然经过最大值合成法处理,但依然存在一定的精度问题。通过 Savitzky-Golay 滤波对 NDVI 时间序列数据进行平滑,剔除部分异常值,获得更接近实际的冬小麦时序特征曲线对于研究收获指数具有明显的益处。最后,本研究提出的研究方案,从理论上来讲,也可用于玉米、水稻、高粱等粮食作物,有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Kobata T, Koç M, Barutçular C, et al. Harvest index is a critical factor influencing the grain yield of diverse wheat species under rain -

- fed conditions in the Mediterranean zone of southeastern Turkey and northern Syria[J]. *Plant Production Science*, 2018, 21(2): 71–82.
- [2] Donald C M, Hamblin J. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria[J]. *Advances in Agronomy*, 1976, 28: 361–405.
- [3] Moriondo M, Maselli F, Bindi M. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data[J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(3): 266–274.
- [4] Bhatt G M. Variation of harvest index in several wheat crosses[J]. *Euphytica*, 1976, 25(1): 41–50.
- [5] 刘兆晔, 于经川, 杨久凯, 等. 小麦生物产量、收获指数与产量关系的研究[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(2): 182–184.
- [6] 梁云娟, 郜庆炉, 薛 香. 小麦单株产量、收获指数与主要农艺性状的灰色关联度分析[J]. *生物数学学报*, 2013, 28(2): 355–360.
- [7] Rose T, Nagler S, Kage H. Yield formation of Central – European winter wheat cultivars on a large scale perspective[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 86: 93–102.
- [8] Yang J X, Richards R A, Jin Y, et al. Both biomass accumulation and harvest index drive the yield improvements in soybean at high and low phosphorus in south – west China[J]. *Field Crops Research*, 2022, 277: 108426.
- [9] 姬志杰, 于永强, 张 稳, 等. 基于气象资料的中国冬小麦收获指数模型[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(20): 4158–4168.
- [10] Sharma R C, Smith E L, McNew R W. Stability of harvest index and grain yield in winter wheat[J]. *Crop Science*, 1987, 27(1): 104–108.
- [11] White E, Wilson F. Responses of grain yield, biomass and harvest index and their rates of genetic progress to nitrogen availability in ten winter wheat varieties[J]. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 2006, 45(1): 85–102.
- [12] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. *Irrigation Science*, 2008, 27(1): 1–10.
- [13] Walter J, Edwards J, McDonald G, et al. Photogrammetry for the estimation of wheat biomass and harvest index[J]. *Field Crops Research*, 2018, 216: 165–174.
- [14] Richards R A, Townley – Smith T F. Variation in leaf area development and its effect on water use, yield and harvest index of droughted wheat[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1987, 38(6): 983.
- [15] Li H L, Luo Y, Xue X P, et al. A comparison of harvest index estimation methods of winter wheat based on field measurements of biophysical and spectral data[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 109(4): 396–403.
- [16] 任建强, 陈仲新, 周清波, 等. 基于时序归一化植被指数的冬小麦收获指数空间信息提取[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 160–167.
- [17] Zhang X W, Qiu F, Qin F. Identification and mapping of winter wheat by integrating temporal change information and Kullback – Leibler divergence[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 76: 26–39.
- [18] 张喜旺, 陈云生, 孟 琪, 等. 基于时间序列 MODIS NDVI 的农作物物候信息提取[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(20): 158–164.
- [19] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT – a program for analyzing time – series of satellite sensor data[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(8): 833–845.
- [20] 吴文斌, 杨 鹏, 唐华俊, 等. 两种 NDVI 时间序列数据拟合方法比较[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 183–188.
- [21] 黄耀欢, 王建华, 江 东, 等. 利用 S – G 滤波进行 MODIS – EVI 时间序列数据重构[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(12): 1440–1443, 1513.
- [22] Chen J, Jönsson P, Tamura M, et al. A simple method for reconstructing a high – quality NDVI time – series data set based on the Savitzky – Golay filter[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 332–344.
- [23] Atkinson P M, Jeganathan C, Dash J, et al. Inter – comparison of four models for smoothing satellite sensor time – series data to estimate vegetation phenology[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 400–417.
- [24] 周增光, 唐 婷. 基于质量权重的 Savitzky – Golay 时间序列滤波方法[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(2): 232–239.
- [25] 江 东, 王乃斌, 杨小唤, 等. NDVI 曲线与农作物长势的时序互动规律[J]. *生态学报*, 2002, 22(2): 247–252.
- [26] Benedetti R, Rossini P. On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics: the case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 45(3): 311–326.
- [27] 夏 浪, 张瑞瑞, 陈立平, 等. 基于无人机高光谱影像的地表植被生物量反演波段优选[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(9): 87–90.
- [28] Rasmussen M S. Assessment of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from the AVHRR[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(18): 3431–3442.
- [29] Lopresti M F, di Bella C M, Degioanni A J. Relationship between MODIS – NDVI data and wheat yield: a case study in Northern Buenos Aires Province, Argentina[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2015, 2(2): 73–84.