

基于 NDVI 加权指数的冬小麦种植面积遥感监测

王利民, 刘佳, 杨玲波, 杨福刚, 滕飞, 王小龙

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 该文针对农业信息服务中冬小麦种植面积调查业务的现状与需求, 提出了一种基于 NDVI (normal difference vegetation index) 时间序列的冬小麦 NDVI 加权指数 (WNDVI, weighted NDVI index) 影像算法, 可在训练样本、验证样本选择的基础上实现冬小麦面积的自动提取, 并以河北省安平县及周边地区 2013—2014 年度冬小麦面积提取为例, 采用 GF-1/WFV (wide field view) 数据进行了算法实现。算法的主要思路是在时序影像基础上, 通过冬小麦 NDVI 加权指数影像的构建, 扩大冬小麦地类与其他地类的差异, 结合自适应的阈值获取方法, 区分冬小麦地类, 获取冬小麦作物面积。算法包括冬小麦时间序列影像的获取、基于网格的样本点设置、构建冬小麦 NDVI 加权指数影像、迭代确定冬小麦 NDVI 加权指数提取阈值、精度验证这 5 个部分。影像的获取根据冬小麦的生长时间确定, 保证每月 1 景 GF-1/WFV 无云影像, 并进行预处理及 NDVI 计算; 同时将研究区划分为一定数量的网格, 每个网格再等分为 2×2 个子网格, 根据目视解译、专家知识、实地调查等方法, 确定左上网格中心点及右下网格中心点的地物类型。统计该期所有左上网格点冬小麦及其他地物的 NDVI 均值, 冬小麦 NDVI 大于其他地物的将该期影像的权值设置为 1, 否则设置为 -1, 将所有时相 NDVI 影像进行加权平均, 即可获取冬小麦 NDVI 加权指数影像。获取冬小麦 NDVI 加权指数影像后, 还需设置合适的阈值提取冬小麦。该文选用右下网格点目视解译分类结果作为阈值提取依据, 具体方法是将冬小麦指数从小到大按照一定间隔划分, 作为冬小麦 NDVI 加权指数提取阈值, 将各阈值二值法运用, 与右下网格点的冬小麦提取的目视解译结果对比, 精度最高的就是最优冬小麦 NDVI 加权指数分割阈值。在所有网格中, 以初始识别获取的冬小麦面积为准, 等概率选择 10 个样方作为精度验证样方进行验证。精度验证结果表明分类总体精度达到 94.4%, Kappa 系数达 0.88。该文通过构建冬小麦 NDVI 加权指数, 将比较复杂的多个参数转换为一个参数, 并且农学意义明确, 相比传统的 NDVI 时序影像进行冬小麦面积的提取, 具有自动化程度高、面积提取精度高、分类结果稳定的特点, 已经在全国农作物面积遥感监测业务中进行了应用。

关键词: 遥感; 作物; 监测; 种植面积; 冬小麦; GF-1; NDVI; 多时相; NDVI 加权指数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.018

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0127-09

王利民, 刘佳, 杨玲波, 杨福刚, 滕飞, 王小龙. 基于 NDVI 加权指数的冬小麦种植面积遥感监测 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 127—135. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.018 <http://www.tcsae.org>

Wang Limin, Liu Jia, Yang Lingbo, Yang Fugang, Teng Fei, Wang Xiaolong. Remote sensing monitoring winter wheat area based on weighted NDVI index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 127—135. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.018 <http://www.tcsae.org>

0 引言

大宗农作物的播种面积及其产量是国家制定粮食政策, 保证粮食安全的重要依据^[1-5], 而播种面积是作物估产的关键步骤, 并已成为中国农情遥感监测的重要工作内容^[6-8]。随着遥感技术的迅速发展, 其为快速、准确获取作物种植空间分布提供了有效的手段。国内外先后开展利用多种遥感数据在不同尺度提取作物空间分布信息的研究^[9-14]。利用遥感方法进行冬小麦种植面积监测方法较多, 针对不同的业务应用需求, 需设定合理的研究尺度, 并选取合适的数据源, 运用科学合理的作物面积提取方法进行作物面积的提取, 得到满足要求的作物面积估算成果。目前, 利用遥感技术进行冬小麦面积提取识

别主要方法有单一时相法、多时相法、空间抽样法等。

单一时相法主要通过选取作物关键物候期的单景遥感影像, 利用监督分类、非监督分类、面向对象分类等多种技术方法, 基于地物的光谱、纹理特征等信息, 对目标作物进行识别及面积提取, 其优势是处理数据量小, 效率高, 时效性强, 相比多时相方法无需作物完整物候期的所有遥感影像即可进行, 便于进行当年度作物即时播种面积等的提取^[15-19]。李平阳等^[20]基于返青拔节期单时相 HJ-1A 卫星数据, 对衡水市 2010 年、2012 年、2013 年的冬小麦种植面积进行了识别, 马氏距离等 4 种分类方法 3 个年度的分类精度都达到了 90.0%。多时相法是根据待识别目标作物的物候特征, 选取合适的多时相影像, 通过构建植被指数或者光谱特征信息集, 采用与单时相数据类似的方法进行作物分类及面积提取^[21-24]。由于多时相数据能够对多个作物物候期发育特征表征, 较单时相的遥感影像具有更大区分能力, 算法与分类精度都更为稳定^[25-27]。Turner 等^[28]利用 3 个时相的 SPOT-XS (systeme probatoire d'observation de la Terre/XS) 影像,

收稿日期: 2015-12-30 修订日期: 2016-06-14

基金项目: “十二五”国家科技重大专项 (高分辨率对地观测系统重大专项“高分农业遥感监测与评估示范系统 (一期)”)。

作者简介: 王利民, 内蒙古宁城人, 副教授, 主要从事农业遥感监测业务运行研究。北京 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 100081。

Email: wlmbs@163.com

采用非监督分类与监督分类相结合的方法，获取了较高精度的非洲半干旱地区水稻作物分布图。空间抽样方法是遥感与传统统计调查方法相结合的农作物面积估算方法，可以在统计抽样框架下，通过遥感技术获取抽样区的作物面积推算区域农作物面积数量，比较常用的抽样方法是空间分层抽样^[29-31]。针对种植结构复杂、地块破碎、区域尺度遥感影像难于获取等，该方法是较为有效的农作物面积遥感估测方法^[32-34]。Luiz 等^[35]使用遥感分层抽样的方法，利用 Landsat TM 影像，对 2005/2006 年度巴西南里奥格兰德市的大豆进行分类，成功获取了大豆种植面积和数量，与实际统计结果相比，总体变异系数为 3.4%，达到了较高的精度。

由以上研究概述可以看出,多时相遥感数据分类技术是稳定获取高精度、全覆盖农作物面积空间分布与数量的有效方法之一^[36-37]。在国家或者省级尺度冬小麦面积遥感监测业务中,为满足全国或省级尺度遥感影像全覆盖,高精度冬小麦面积信息获取的要求,该文提出一种利用多时相遥感数据构建NDVI加权指数,提取冬小麦面积的方法。该方法以覆盖冬小麦物候期的多时相遥感影像为数据源,通过均匀网格抽样方法,提取抽样点NDVI,判断冬小麦与其他地物类型的差异,对各时期NDVI进行加权平均,得到冬小麦NDVI加权指数(WNDVI, weighted NDVI index)影像,结合样本点对冬小麦提取最优阈值进行自适应确定,得到监测区内冬小麦面积空间分布及数量。该方法在充分利用多时相影像包含的物候信息基础上,将复杂的各时期NDVI阈值的设置转变为较为简单的样本点冬小麦目视提取,减少了对专家知识的依赖,降低了决策树方法的主观性,决策原理更为直观,保证了不同作业人员提取不同地区冬小麦面积的一致性,已在中国冬小麦遥感监测业务中得应用,并提高了业务运行效率。

1 研究区概况

研究区主要位于安平县及其周边地区（图1），安平县隶属河北省衡水市，总面积 493 km²，地理坐标为 E115°19'至 115°40'，N38°14'至 38°21'，海拔高度 26 m。东接饶阳县，西邻深泽县，南抵深州市、辛集市，北靠安国市、博野县。安平县地处太行山前冲积扇前缘，境内多为滹沱河冲积平原。地势平缓，略显西高东低，平均坡降为 1/3 250。海拔最高 31.5 m，最低 18.5 m。滹沱河自西向东流经该县，曲度小，西部河谷宽约 300~500 m，东部河谷宽约 200~300 m，谷深 2~4 m。属半旱半湿润大陆性季风气候区，春季少雨多风，夏季高温多雨，秋季气温适中，冬季寒冷少雪，四季分明，冷暖干湿差异较大，年日照时数 2 400~3 100 h，年均降水量 300~800 mm，1 月平均气温在 3 ℃以下，7 月平均气温 18~27 ℃。土壤母质类型以河流冲积物为主，西部有少量的冲积洪积物。土层深厚，冲积层次明显，表层质地以沙壤、轻壤质沉积物为主，土壤颜色发灰，富含云母。粮食作物有小麦、玉米、谷子、高粱、甘薯、黍子、稻谷、

荞麦等；经济作物有棉花、花生、芝麻、向日葵、食用菌、烟草等，2010年粮食生产总产量达到24.3万t。

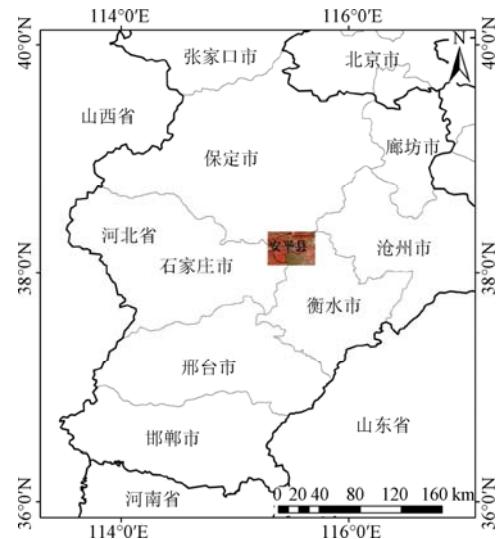


图 1 研究区地理位置图
Fig.1 Location map of study area

2 研究方法

2.1 GF-1号卫星数据获取

高分一号卫星，是由中国航天科技集团公司研制的高分辨率对地观测应用卫星，于 2013 年 4 月 26 日在酒泉卫星发射中心发射升空。GF-1 卫星共有 4 台 16 m 分辨率多光谱相机 (WFV1~WFV4)，每台相机包含蓝 (0.45~0.52 μm)、绿 (0.52~0.59 μm)、红 (0.63~0.69 μm) 和近红外 (0.77~0.89 μm) 4 个波段，4 台相机组合幅宽可达 800 km，重访周期 4 d。该文选取了覆盖研究区的 2013 年 10 月 26 日、11 月 27 日、12 月 29 日、2014 年 1 月 3 日、2 月 9 日、3 月 29 日、4 月 14 日、5 月 17 日、6 月 27 日的 GF-1 号卫星 9 景 WFV 影像，覆盖了冬小麦从种植到收获的整个生长发育期。影像来自中国资源卫星中心推送至农业部遥感应用中心的高分数据，以晴空影像为标准，图 2 给出了研究区 2014 年 5 月 17 日 GF-1/WFV 影像图，各幅影像的文件名称、获取时间、传感器名称、轨道号等内容列于表 1。

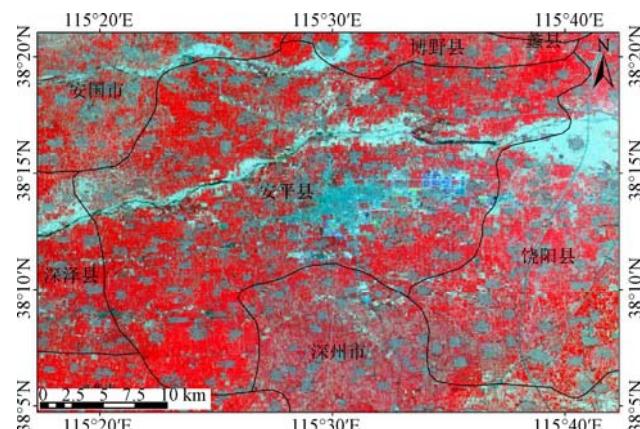


图 2 2014 年 5 月 17 日安平县及周边区域 GF-1/WFV 影像图
 Fig.2 GF-1/WFV image of Anping county and peripheral zone at May 17th, 2014 (R/G/B:4/3/2)

表 1 安平县及周边区域 GF-1 卫星 WVF 影像列表
Table 1 GF-1/WVF image list of Anping county and peripheral zone

序号 Series	影像传感器与轨道号 Sensors/Orbit	获取时间 Acquiring time
1	GF1_WVF3_E115.3_N38.9_20131026_L1A0000105257	2013-10-26
2	GF1_WVF2_E115.1_N37.6_20131127_L1A0000125579	2013-11-27
3	GF1_WVF1_E115.8_N38.0_20131229_L1A0000140949	2013-12-29
4	GF1_WVF3_E114.9_N38.9_20140103_L1A0000191264	2014-01-03
5	GF1_WVF4_E115.0_N38.5_20140209_L1A0000163596	2014-02-09
6	GF1_WVF1_E114.5_N38.0_20140329_L1A0000192447	2014-03-29
7	GF1_WVF1_E116.5_N38.0_20140414_L1A0000203494	2014-04-14
8	GF1_WVF1_E114.2_N38.0_20140517_L1A0000227339	2014-05-17
9	GF1_WVF1_E115.3_N38.0_20140627_L1A0000261219	2014-06-27

2.2 GF-1 号卫星影像预处理

自中国资源卫星应用中心获取 GF-1 原始影像, 级别为 1A 级, 需要经过辐射定标和大气校正预处理, 使用农业部遥感应用中心开发的相关软件进行快速批处理。其中辐射定标的公式如下所示

$$L(\lambda) = \text{Gain} \cdot \text{DN} + \text{Bias}.$$

式中 $L(\lambda)$ 为传感器入瞳处辐射亮度值 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$), Gain 为增益系数, Bias 为偏置系数, DN 为观测灰度值, Gain 和 Bias 都由中国资源卫星应用中心提供。大气校正使用 6S 辐射传输模型进行, 需要由中国资源卫星中心获取 GF-1/WVF 传感器光谱响应函数, 将波谱响应函数重采样为 2.5 nm 间隔输入模型, 并根据卫星影像自带的元数据信息确定卫星观测几何、大气模式等参数, 运行 6S 模型获取研究区影像地表反射率。几何精校正平面精度达到 1 个像元以内, 具体是先使用区域网平差模型对传感器 RPC(rational polynomial coefficients) 参数进行修正, 再基于 15 m 空间分辨率的 LandSat-8/ OLI 影像作为底图进行精校正。

在大气校正和几何精校正的基础上, 计算每景影像的归一化植被指数 (NDVI, normal difference vegetation index), 计算公式为: $\text{NDVI} = (\text{Ref4} - \text{Ref3}) / (\text{Ref4} + \text{Ref3})$, Ref4 和 Ref3 分别为 WVF 第 4 和第 3 波段的反射率^[38]。

2.3 地面调查数据

在该文使用的技术方法中, 包括两类地面调查数据, 第一以点的方式选择的训练样本, 第二以样方式选择的验证样本。训练样本又包括 2 种, 其一是作为获取 9 期影像中每 1 期影像的冬小麦权值的依据, 并通过 9 期加权求和构建冬小麦 NDVI 加权指数, 称为权值样本; 其二是作为冬小麦 NDVI 加权指数分类阈值的依据, 评价不同阈值划分结果获得的冬小麦面积精度, 称为阈值样本。样方式选择的样本是对研究结果进行精度评价的, 为保证业务运行的规范性, 该文采用制作研究区规则网格的方法选择各类样本。

制作覆盖研究区的规则网格, 考虑到研究区的大小和作物种植分布情况, 根据等间距的规则获取 10×10 个网格, 作为一个基准网格, 本次研究网格大小为 4.1 km×4.0 km; 在每个基准网格的基础上, 再将其划分为 2×2

个网格, 分别获取左上、右下 2 个子网格的中心点, 称为左上中心、右下中心; 共产生了在研究区均匀分布的 100 个左上网格、100 个右下网格。中心点作物类型的确定及 NDVI 平均值的获取, 在分类体系确定为冬小麦、其他 2 种地物类型前提下, 采用目视识别的方式逐一确定 200 个中心点位置的地物类型, 判别依据主要是在地面调查基础上结合专家知识进行的: 读取各点的 NDVI 值, 分别计算两类地物的平均值, 作为下一步冬小麦面积提取的权值和阈值参数; 在作为权值的 100 个左上角点中, 计有 47 个冬小麦点, 53 个其他点, 冬小麦比例 47%; 作为阈值样本的 100 个右下角点中, 计有 44 个冬小麦点, 56 个其他点, 冬小麦比例 44%。在以往的分类过程中, 多是以样方式构建训练样本, 该文以点的方式作为训练样本, 精度更容易控制, 对于网格内地物类型无特殊要求, 简化了业务流程, 作业强度也有较大幅度降低。

精度验证样方, 是对研究结果进行精度评价的依据, 与常规的精度验证方式相同。该文是在上述规则网格基础上, 根据等概率原则选取了 10 个网格作为精度验证样方。首先计算每个网格中粗分类结果中的冬小麦面积, 从小到大进行排序, 最小为 0, 最大 45.0%, 按照 5% 的比例分级, 统计每个级别的频数, 等概率抽取 10 个网格作为最终整个研究区冬小麦面积提取的验证样方, 图 3 给出了样方位置分布。主要基于地面调查, 在更高空间分辨率影像数据支持下, 结合历史资料、专家知识等辅助信息的基础上, 对分类结果进行人工目视解译修正, 样方修正结果作为冬小麦精度验证真值。

2.4 冬小麦发育期

安平及周边研究区内冬小麦一般在每年秋季 10 月 10 日前后陆续开始播种, 下一年 6 月 20 日前完成收获, 生长期近 8 个月。按照生长季内冬小麦发育特点, 可以划分为以下 9 个发育时期, 即播种 (10 月 10 日—30 日)、出苗 (11 月 1 日—20 日)、分蘖 (11 月 21 日—12 月 20 日)、越冬 (12 月 21 日—2 月 28 日)、返青 (3 月 1 日—3 月 31 日)、拔节 (4 月 1 日—5 月 10 日)、抽穗 (5 月 11 日—20 日)、乳熟 (5 月 21 日—30 日) 和成熟 (6 月 1—20 日) 等。研究区域以南地区冬小麦生长期可能会有所提前, 以北区域生长期可能会有所推迟。

2.5 冬小麦面积提取技术流程

基于多时相 GF-1/WVF 影像 NDVI 数据提取冬小麦面积的主要思路是, 采用覆盖冬小麦全生长阶段的 9 期 NDVI 数据, 准确反映研究区冬小麦生长过程, 将研究区待分地物确定为冬小麦、其他两种类型, 通过定义冬小麦 NDVI 加权指数 (WNDVI) 影像的方法, 将 9 期 NDVI 影像加权平均, 形成一幅反映冬小麦、其他两种地物类型最大差异的冬小麦 NDVI 加权指数特征性影像, 对特征性冬小麦 NDVI 加权指数影像进行阈值分割, 获取冬小麦面积空间分布, 并统计获取面积数量。主要过程包括冬小麦 NDVI 加权指数 (WNDVI) 影像的定义与构建、冬小麦 NDVI 加权指数 (WNDVI) 影像的提取阈值自适应确定、冬小麦类型识别与面积提取等 3 个内容, 具体技术流程见图 4 所示。

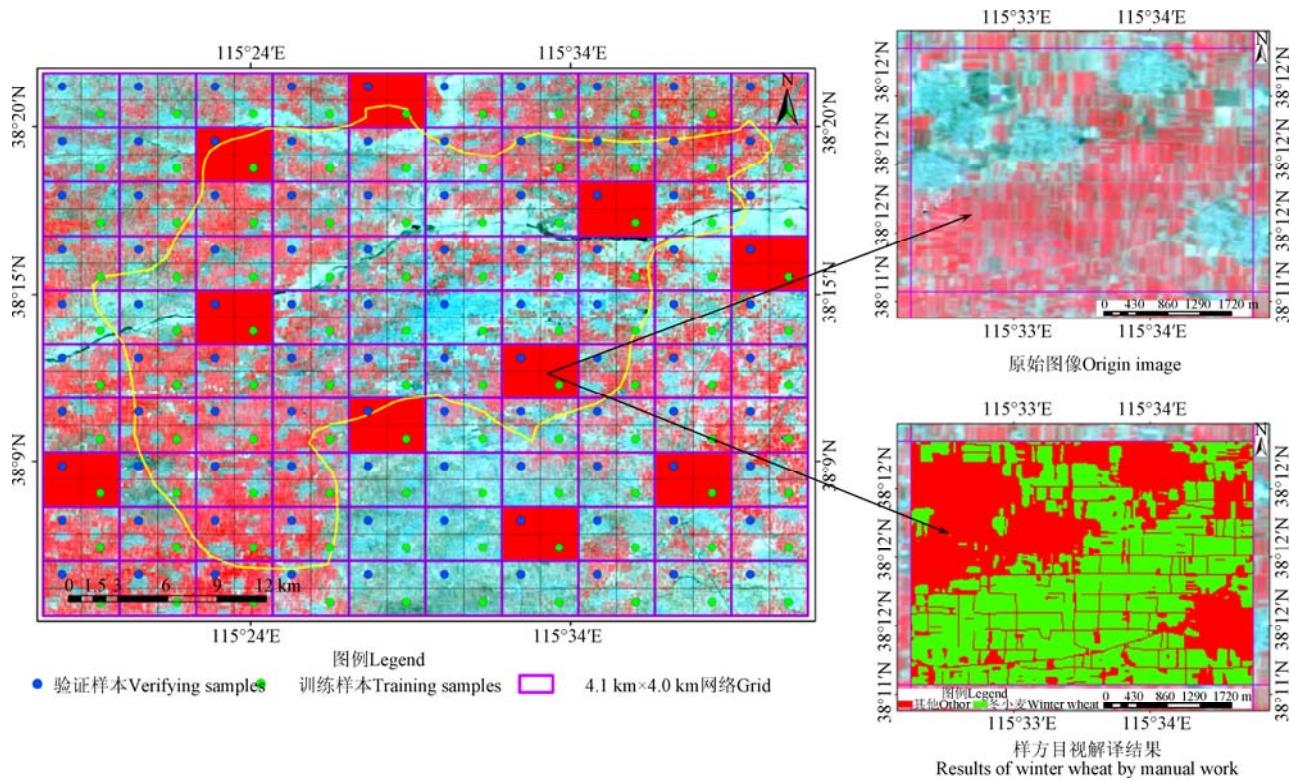


图3 地面网格划分及样方点的选取
Fig.3 Selection of ground grids and sample points

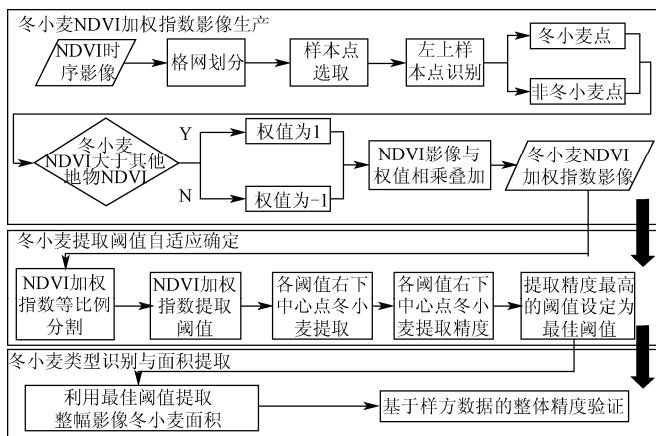


图4 基于 NDVI 加权指数的作物面积识别与提取
Fig.4 Crop area identification and extraction based on weighted NDVI index

1) 冬小麦 NDVI 加权指数 (WNDVI) 影像的定义与构建。冬小麦 NDVI 加权指数是根据时序影像中冬小麦生长优势对影像设置大小不同的权值，并将各时期影像 NDVI 加权叠加后的指数值，具体计算方法如下：

$$p^i = \begin{cases} 1 & \left(\overline{NDVI}_w^i > \overline{NDVI}_o^i \right) \\ -1 & \left(\overline{NDVI}_w^i < \overline{NDVI}_o^i \right) \end{cases}, \quad (1)$$

$$WNDVI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (NDVI^i \times P^i). \quad (2)$$

式中 P 为权值， i 表示第 i 期影像，下标 w 表示冬小麦类型，下标 O 表示其他地物类型。

权值 P 是根据权值样本获取的。首先，分别计算每期 NDVI 影像两种地物类型阈值样本的平均值，具体到安平及周边地区，就是计算 9 期 NDVI 影像中每 1 期 47 个冬小麦类型、53 个其他地物类型阈值样本的平均值，分别获得两类各 9 个平均值。比较每 1 期两个平均值的大小，若当期冬小麦 NDVI 平均值大于其他地物 NDVI 平均值，其权值设定为 1；若当期冬小麦 NDVI 平均值小于其他地物的 NDVI 平均值，其权值设定为 -1。将权值应用到对应时期的影像，即各期 NDVI 影像与权值相乘，并将 9 期乘积结果加和平均，得到的结果称之为冬小麦 NDVI 加权指数 (WNDVI) 影像，其实质是通过加权的方式将冬小麦与其他地物类型的差异进行了特征性放大，使冬小麦类别像元 WNDVI 值最大化，便于通过设定 WNDVI 阈值的方式，剔除非冬小麦类型。

2) 冬小麦 NDVI 加权指数 (WNDVI) 影像提取阈值的自适应确定。该文采用自适应 WNDVI 提取方式，实现不同区域最优 WNDVI 阈值的自动计算。具体过程是，将冬小麦 NDVI 加权指数以 1% 的比例等分，比例从 0 开始至 100% 结束，循环迭代 101 次，得到各次的 WNDVI 提取阈值；将该阈值用于阈值样本点位置的冬小麦识别，并与该点目视获取的结果相比较，计算该 WNDVI 提取阈值对应的准确率，选择 101 个结果中正确率最高的阈值，即为最优的 WNDVI 影像提取阈值。区别于传统的人工经验方式提取阈值，该方法的优势是，无需人工干预，尽可能减少了人为误差，只要阈值样本冬小麦分类结果准确，即可获取一致的 WNDVI 阈值。

3) 冬小麦类型识别与面积提取。使用最优 WNDVI

阈值, 提取 WNDVI 影像中的冬小麦像元, 获取其分布范围并计算整个研究区的冬小麦种植面积。

2.6 精度验证

该文基于地面网格的目视解译结果, 采用混淆矩阵的方式对冬小麦空间分布结果进行精度评价, 评价指标包括总体精度、用户精度、制图精度和 Kappa 系数 4 项。其中, 总体分类精度指的是所有分类正确像元占总像元数的比例, 制图精度指所有正确分类像元占参考影像该类像元的比例, 用户精度指所有正确分类像元占分类参考影像该类像元的比例, 具体定义及计算方式可参考相关参考文献, 此处不再赘述^[39-44]。

3 结果与分析

3.1 冬小麦 NDVI 加权指数 (WNDVI) 影像计算

根据 WNDVI 影像计算流程, 统计每一时期影像所有网格左上中心点 (权值样本) 的 NDVI 值, 并结合该点目视分类结果, 分别统计冬小麦地类和其他地类的平均 NDVI 值, 若冬小麦 NDVI 平均值大于其他地类, 则将其 NDVI 乘以权值 1, 否则就乘以权值-1, 并将各期影像 NDVI 加权值求和并除以影像的期数, 即可得到最终的 WNDVI 影像, 如图 5 所示。

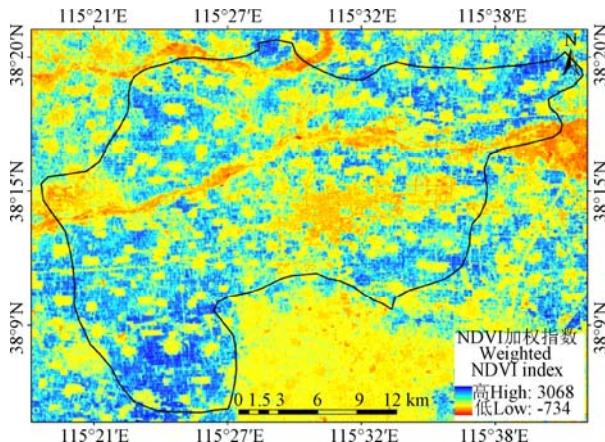


图 5 2013-2014 年度安平县及周边冬小麦 NDVI 加权指数影像
Fig.5 Weighted NDVI index image from 2013 to 2014 in Anping and peripheral zone

由图可以比较直观地看出, 冬小麦类型的 WNDVI 值明显高于其他类型, 表明了 WNDVI 具有特征性的放大冬小麦 NDVI 值、提高冬小麦与其他地物类型差异的能力。读取左上中心点 (权值样本) 的 WNDVI 值, 以及 9 期 NDVI 值, 分别计算冬小麦、其他地物类型的平均值, 结果如表 2 所示。

表 2 NDVI 均值结果与 NDVI 加权指数的比较

Table 2 Comparison between NDVI mean value and weighted NDVI index

地物类别 Ground object type	NDVI 平均值 NDVI mean values	NDVI 加权指数 Weighted NDVI index
冬小麦 Winter wheat	3 763	2 771
其他 Others	2 634	1 332
差异绝对值 Absolute deviation	1 129	1 439
差异倍数 Deviation multiplier	1.43	2.08

从表 2 分析可发现, 与原始影像的 NDVI 平均值相比较, WNDVI 指数显著扩大了冬小麦与非冬小麦的差异, 差异绝对值从 1 129 增加到 1 439, 差异倍数更是从 1.43 增加到 2.08。这也说明, 与基于原始影像 NDVI 值的方法相比, 采用 WNDVI 指数值将更有利于进行冬小麦面积的识别与提取。

3.2 冬小麦识别阈值的确定及提取

获取得到 WNDVI 影像后, 还需要设置合理的冬小麦识别阈值, 以提取冬小麦种植区域。相比传统的依靠专家知识反复试错方法获取冬小麦识别阈值, 该文提出一种基于阈值样本的自适应阈值计算方法, 可以最大程度的降低专家知识差异、主观认识不同而造成的阈值设置差异所导致的分类结果差异甚至错误, 更为适合业务化运行。具体方法是根据 WNDVI 的分布范围, 以一定的间隔比例逐个设置提取阈值, 并将提取阈值应用于阈值样本点的冬小麦提取工作; 将提取结果与冬小麦目视识别结果进行对比, 统计提取准确率, 准确率最高的提取阈值即为最优 WNDVI 提取阈值。

依据上述方法, 本次研究区域的 WNDVI 提取阈值设定为 1 600 时, 阈值样本具有最高的总体识别精度 94.0%, 其中冬小麦的识别精度为 95.5%。利用自适应选取的 WNDVI 提取阈值, 进行冬小麦分类工作。提取结果如图 6 所示。从图上可以看出安平县冬小麦种植分布广泛, 在县内不同区域均有分布, 这也与实际情况相吻合。

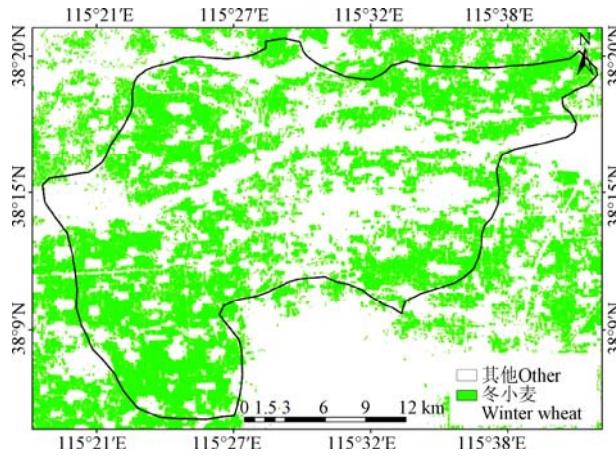


图 6 安平县及周边 2013-2014 年度冬小麦空间分布
Fig.6 Winter wheat spatial distribution of Anping county and peripheral zone from 2013 to 2014

3.3 精度评价与效率分析

依据选取的 10 个地面样方, 对分类结果进行精度验证, 结果如表 3 所示。从表上可以看出, 使用冬小麦 NDVI 加权指数方法结合自适应指数提取阈值计算方式获取的分类成果总体精度达到 94.4%, 其中冬小麦类别的制图精度达到了 93.7%, 用户精度达到 90.2%, Kappa 系数为 0.88, 满足农情遥感监测的需求。

该方法采用自适应阈值提取分割技术, 无需专家知识人工确定, 因此对于提高分类结果的精度、稳定性方面具有很大的优势。在以往工作流程基础上, 本文采用了最大似然监督、决策树分类两种分类方法对同样的输

入数据, 采用同样的验证样方对冬小麦面积提取结果进行了精度验证, 其中决策树分类方法由 3 位作业人员分别进行。结果表明, 采用多时相数据最大似然的监督分类方法, 总体分类精度为 92.7%; 采用 NDVI 阈值决策的方法, 3 位作业人员获得的总体精度分别为 86.2%、88.1%、92.5%。与该文研究结果相比较, 都低于该文研究结果, 分别低 1.7%、8.2%、6.3% 和 1.9%。并且, 视不同的方法、不同的作业人员, 精度变化较大, 精度稳定性差。使用该文提出的方法, 将专家知识的运用从较为复杂的各物候期冬小麦 NDVI 提取阈值的确定, 转移到单纯的样本点冬小麦地类识别, 只要作业人员对样本点地物目视判读正确, 则最后提取结果将完全一致, 并且精度将有所提高。

表 3 冬小麦面积提取结果精度评价
Table 3 Accuracy results for winter wheat area

作物类型 Crop	冬小麦 Winter wheat/km ²	其他 Other/km ²	总计 Total/km ²
冬小麦 Winter wheat	52.32	5.7	58.02
其他 Other	3.53	103.21	106.73
总计 Total	55.85	108.91	164.76
用户精度 User accuracy/%	90.2	96.7	
制图精度 Mapping accuracy/%	93.7	94.8	
总体精度 Overall accuracy/%	94.4	Kappa 系数 Kappa coefficient	0.88

该文方法可以通过编程实现冬小麦的自动提取, 无需额外的人工干预, 与以往的业务监测方法相比, 冬小麦面积识别与提取速度得到了极大地提高。与以往使用的 NDVI 决策树方法为例, 每个区域各个时期冬小麦的 NDVI 提取阈值可能不尽相同, 每期影像都需要不断调整阈值以获取最佳结果, 因此无法实现自动化识别。使用该文方法, 作业人员只需在每个作业地区的样本点判读上耗费少量时间, 后续工作即可交由程序自动完成。结合实际应用时间的初步对比, 在不考虑前期数据预处理的情况下, 一个县域范围的冬小麦平均提取时间, 从原来的 6 h, 缩短到 3 h 甚至更短, 效率提高了 50% 以上。

4 讨 论

快速、准确、稳定地获取区域尺度大宗农作物面积和数量, 是中国农作物遥感监测业务主要研究与工作目标, 以往可获取遥感数据源的限制是影响冬小麦面积遥感监测业务自动化的主要瓶颈。GF-1/WFV 数据的使用, 为这一问题提供了解决途径, 但仍有以下技术细节需在应用中加以改进。

首先是晴空区影像的选择问题。尽管 WFV 数据具有 4 d 的重访周期, 但对于中国多云多雨地区而言, 获得每月 1 期的晴空区影像仍具有一定的难度, 在后期应用中可以采取 NDVI 最大值合成方式获取每月 1 期的晴空数据, 业务化运行能力将会进一步提高。

其次是样本点的选择问题。目前以点的形式选择样本, 尽管已经避免了样方选取时边界匹配问题, 但对全

国范围数万个样本点的选择仍具有较大的工作量, 后期可以考虑对全国范围进行典型样区布点的方式, 通过多个分类单元公用权值样本和验证样方的方式减少样本量。在样本点的类型确认方面, 可以采用冬小麦谱特征设置的方式进行自动识别。通过减少样本量和增加自动识别能力两个方面的技术改进, 达到进一步降低工作强度的目标。

第三是该方法对其他大宗作物的适用性问题。由于采用二分法赋每期影像的权重, 该文方法只适用于两种地物类型的提取。对于有多种地物存在的情况, 可以将多种地物情况转化为 2 种地物类别, 采取逐次应用该技术的方式进行应用。

5 结 论

该文通过定义冬小麦 NDVI 加权指数 (WNDVI), 面向中国农情遥感监测业务对农作物面积信息自动化获取的需要, 结合 GF-1/WFV 数据的特点, 构建了适合于业务运行的冬小麦识别与提取技术流程, 实现了冬小麦面积遥感识别与提取, 获得了以下主要结论。

1) 利用先验知识构建冬小麦 NDVI 加权指数 (WNDVI) 影像, 通过自适应的方式获取分类阈值, 进行冬小麦识别与种植面积提取是可行的, 试验结果总体精度达到了 94.4%, Kappa 系数达到了 0.88。

2) 利用冬小麦 NDVI 加权指数 (WNDVI) 影像进行冬小麦面积提取, 与以往的作业方法相比, 降低了对专家知识的依赖, 算法客观性强, 稳定性高, 精度提高 1.7%~8.2% 左右, 效率提高了 50% 以上。

3) 不同作业员、不同作业区域冬小麦提取结果一致性较好, 具有区域业务化应用的前景。后期在中国尺度的冬小麦面积提取工作中, 可以利用 1:10 万分幅作为分类单元, 开展区域化业务应用。

[参 考 文 献]

- [1] 陈水森, 柳钦火, 陈良富, 等. 粮食作物播种面积遥感监测研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 166—170.
Chen Shuisen, Liu Qinhuo, Chen Liangfu, et al. Review of research advance in remote sensing monitoring of grain crop area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(6): 166—170. (in Chinese with English abstract)
- [2] Congalton R G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 37(1): 35—46.
- [3] Fang H L. Rice crop area estimation of an administrative division in China using remote sensing data[J]. Int J Remote Sensing, 1998, 19(17): 3411—3419.
- [4] 焦险峰, 杨邦杰. 全国棉花种植面积遥感检测抽样方法设计[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 168—171.
Jiao Xianfeng, Yang Bangjie. Design of sampling method for cotton area estimation using remote sensing at a national level [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(4): 168—171. (in Chinese with English abstract)

- [5] 吴炳方. 中国农情遥感速报系统[J]. 遥感学报, 2004, 8(6): 481—497.
Wu Bingfang. China crop watch system with remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(6): 481—497. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杨邦杰, 裴志远. 国家级农情遥感监测系统的研究开发与运行[J]. 农业工程学报, 2003, 19(增刊): 11—14.
Yang Bangjie, Pei Zhiyuan. National agricultural condition monitoring system based on satellite remote sensing: development, application and improvement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(Supp.): 11—14. (in Chinese with English abstract)
- [7] 周清波. 国内外农情遥感现状与发展趋势[J]. 中国农业资源与区划, 2004, 25(5): 9—14.
Zhou Qingbo. Status and tendency for development in remote sensing of agriculture situation[J]. Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning, 2004, 25(5): 9—14. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张锦水, 潘耀忠, 胡潭高, 等. 冬小麦种植面积空间抽样效率影响因子分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 169—173.
Zhang Jinshui, Pan Yaozhong, Hu Tangao, et al. Analysis of influence factors about space sampling efficiency of winter wheat planting area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(8): 169—173. (in Chinese with English abstract)
- [9] Wolter P, Mladenoff D J, Host G E, et al. Improved forest classification in the Northern Lake states using multi-temporal Landsat image[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1995, 61: 1129—1143.
- [10] Turne M, Congalton R. Classification of multi-temporal SPOT-XS satellite data for mapping rice field on a West African floodplain[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19: 21—41.
- [11] Liu L Y, Wang J H, Bao Y S, et al. Predicting winter wheat condition, grain yield and protein content using multi-temporal EnviSat-ASAR and Landsat TM satellite images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(4): 737—753.
- [12] Sergio M V, Jose'M C, Alfredo R. Cuadrat-Prats, et al. Early prediction of crop production using drought indices at different time-scales and remote sensing data: Application in the Ebro alley (north-east Spain)[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(3): 511—518.
- [13] Benz U C, Hofmann P, Willhauck G, et al. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2004, 58: 239—258.
- [14] 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.
- [15] Quarmby N A, Townshend J R G, Settle J J, et al. Linear mixture modeling applied to AVHRR data for crop area estimation[J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(3): 415—425.
- [16] Quarmby N A, Milnes M, Hindle T L, et al. The use of multitemporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(2): 199—210.
- [17] 张建国, 李宪文, 吴延磊. 面向对象的冬小麦种植面积遥感估算研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 156—160.
Zhang Jianguo, Li Xianwen, Wu Yanlei. Object oriented estimation of winter wheat planting area using remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 156—160. (in Chinese with English abstract)
- [18] Lennington R K, Sorensen C T, Heydorn R P. A mixture model approach for estimating crop areas from Landsat data[J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 14(1/2/3): 197—206.
- [19] 武永利, 赵永强, 靳宁. 单时相 MERSI 数据在冬小麦种植面积监测中的应用[J]. 中国农学通报, 2011, 27(14): 127—131.
Wu Yongli, Zhao Yongqiang, Jin Ning. Monitoring of winter wheat area based on mono temporal MERSI data[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(14): 127—131. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李平阳, 郭品文, 国文哲. 基于 HJ-1A 卫星数据的衡水地区冬小麦面积遥感估算应用[J]. 气象与减灾研究, 2015, 38(2): 47—54.
Li Pingyang, Guo Pinwen, Guo WenZhe. The estimation of winter wheat area based HJ-1A remote sensing image[J]. Meteorology and Eteorology and Disaster Reduction Research, 2015, 38(2): 47—54. (in Chinese with English abstract)
- [21] Badhwar G D. Classification of corn and soybeans using multitemporal thematic mapper data[J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 16(2): 175—181.
- [22] Jakabauskas M E, Legates D R, Kastens J H. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2002, 37(1/2/3): 127—139.
- [23] 张喜旺, 秦耀辰, 秦奋. 综合季相节律和特征光谱的冬小麦种植面积遥感估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 154—163.
Zhang Xi旺, Qin Yaochen, Qin Fen. Remote sensing estimation of planting area for winter wheat by integrating seasonal rhythms and spectral characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 154—163. (in Chinese with English abstract)
- [24] 朱长明, 骆剑承, 沈占锋, 等. 基于地块特征基元与多时相遥感数据的冬小麦播种面积快速提取[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 94—99.
Zhu Changming, Luo Jiancheng, Shen Zhanfeng, et al. Winter wheat planting area extraction using multi-temporal remote sensing data based on filed parcel characteristic[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(9): 94—99. (in Chinese with English abstract)

- [25] 李颖, 陈秀万, 段红伟, 等. 多源多时相遥感数据在冬小麦识别中的应用研究[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(4): 47—49.
Li Ying, Chen Xiuwan, Duan Hongwei, et al. Application of multi-source and multi-temporal remote sensing data in winter wheat identification[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2010, 26(4): 47—49. (in Chinese with English abstract)
- [26] Conese C, Maselli F. Use of multi-temporal information to improve classification performance of TM scenes in complex terrain[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1991, 46(4): 187—197.
- [27] 潘耀忠, 李乐, 张锦水, 等. 基于典型物候特征的 MODIS-EVI 时间序列数据农作物种植面积提取方法: 小区域冬小麦实验研究[J]. 遥感学报, 2011, 15(3): 578—594.
Pan Yaozhong, Li Le, Zhang Jinshui, et al. Crop area estimation based on MODIS-EVI time series according to distinct characteristics of key phenology phases: A case study of winter wheat area estimation in small-scale area[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(3): 578—594. (in Chinese with English abstract)
- [28] Turner M D, Congalton R G. Classification of multi-temporal SPOT-XS satellite data for mapping rice fields on a West African floodplain[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(1): 21—41.
- [29] Carfagna E, Gallego F J. Using remote sensing for agricultural statistics[J]. *International Statistical Review*, 2005, 73(3): 389—404.
- [30] Delinc J. A European approach to area frame survey[J]. *Processing of the Conference on Agricultural and Environmental Statistical Applications in Rome (CAESAR)*, 2001, 2: 1—10.
- [31] Tsiligrides T A. Remote sensing as a tool for agricultural statistics: A case study of area frame sampling methodology in Hellas[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1998, 20: 45—47.
- [32] 杨邦杰, 裴志远, 焦险峰, 等. 基于 CBERS-1 卫星图像的新疆棉花遥感监测技术体系[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 146—149.
Yang Bangjie, Pei Zhiyuan, Jiao Xianfeng, et al. Cotton growing area monitoring in Northwest China using CBERS-1 data based on satellite remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2003, 19(6): 146—149. (in Chinese with English abstract)
- [33] 谭建光, 张锦水, 高晨雪, 等. 基于结构规模的冬小麦种植面积遥感抽样估算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(23): 114—122.
Tan Jianguang, Zhang Jinshui, Gao Chenxue, et al. Winter wheat area estimation based on structure and scale using remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(23): 114—122. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘国栋, 邬明权, 牛铮, 等. 基于 GF-1 号卫星数据的农作物种植面积遥感抽样调查方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 160—166.
Liu Guodong, Wu Mingquan, Niu Zheng, et al. Investigation method for crop area using remote sensing sampling based on GF-1 satellite data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(5): 160—166. (in Chinese with English abstract)
- [35] Luiz A J B, Formaggio A R, Epiphanio J C N, et al. Objective sampling estimation of regional crop area supported by remotely sensed images[J]. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2012, 47(9): 1279—1287.
- [36] 刘佳, 王利民, 杨福刚, 等. 基于 HJ 时间序列数据的农作物种植面积估算[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 199—206.
Liu Jia, Wang Limin, Yang Fugang, et al. Remote sensing estimation of crop planting area based on HJ time-series images[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(3): 199—206. (in Chinese with English abstract)
- [37] 王利民, 刘佳, 杨福刚, 等. 基于 GF-1 卫星遥感的冬小麦面积早期识别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 194—201.
Wang Limin, Liu Jia, Yang Fugang, et al. Early recognition of winter wheat area based on GF-1 satellite[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(11): 194—201. (in Chinese with English abstract)
- [38] Viovy N, Arino O, Belward A S. The Best Index Slope Extraction (BISE): A method for reducing noise in NDVI time-series[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(8): 1585—1590.
- [39] 甘甫平, 王润生, 王永江, 等. 基于遥感技术的土地利用与土地覆盖的分类方法[J]. 土地资源遥感, 1999, 42(4): 39—44.
Gan Fuping, Wang Runsheng, Wang Yongjiang, et al. The classification method for land use and land cover based on remote sensing technology[J]. *Remote Sensing for Land & Resource*, 1999, 42(4): 39—44. (in Chinese with English abstract)
- [40] Anssen L L F, Vanderwel F J M. Accuracy assessment of satellite-derived land-cover data: A review[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1994, 60(4): 419—426.
- [41] Kalkhan M A, Reich R M. Assessing the accuracy of landsat thematic mapper classification using double sampling[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(11): 2049—2060.
- [42] Congalton R G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 37(1): 35—46.
- [43] Hay A M. The derivation of global estimation from a confusion matrix[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9(8): 1395—1398.
- [44] Congalton R G. A comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensing data[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54(5): 593—600.

Remote sensing monitoring winter wheat area based on weighted NDVI index

Wang Limin, Liu Jia, Yang Lingbo, Yang Fugang, Teng Fei, Wang Xiaolong

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Remote sensing technology is a major method to obtain spatial distribution and quantity of winter wheat area, and classification method suitable for business operation is a key technology target of annual winter wheat remote sensing monitoring. Aimed at the conditions and demands of winter wheat background survey business operation in agriculture information service, this paper had proposed a weighted NDVI index (WNDVI) based on normal difference vegetation index (NDVI) time sequence. By taking the extraction of 2013-2014 winter wheat area of Anping County, Hebei Province as an example, the algorithm was realized by using GF-1/WFV (wide field view) data. The main idea of the algorithm was to amplify the difference between winter wheat land type and other ground object types by establishing a winter wheat area index based on time sequence images, and to differentiate winter wheat land type from the others and thus to obtain the crop area of winter wheat by automated threshold value setting method. The algorithm included the following 5 parts: acquisition of winter wheat time sequence images, sample points setting based on grid, establishment of winter wheat area index, identifying winter wheat area index estimation threshold value by iteration, and accuracy validation. Acquisition of images was based on the identification of growth time of winter wheat, and the principle was to ensure to get one GF-1/WFV cloudless image each month. Growth period of winter wheat in Anping County was from October 1st to June 30th of the next year, including 9 growing stages, i.e. seeding, germinating, tillering, overwintering, reviving, jointing, head sprouting, milking maturity and maturity. One GF-1/WFV cloudless image was selected in the middle 10 days of each month, and a total of 9 images were selected for pre-processing and NDVI calculation. Meanwhile, the study area was divided into a certain number of grids, and each grid was further divided into 2×2 sub-grids. The ground object types of central points in upper left and lower right grid were identified by visual interpretation, expert knowledge and field investigation. In this paper, a total of 10×10 equal interval grids with the average grid size of 4.1 km × 4.0 km, as well as 400 sub-grids with the size of 2.05 km × 2.0 km were obtained. The average NDVI values of winter wheat and other ground objects on all upper left centers of this period were calculated. If the winter wheat NDVI was higher than that of other ground objects, the weight of the images of the period was set to 1, and otherwise, set to -1. The winter wheat area index images can be obtained by using the weighted average of NDVI images of all time phases. After obtaining winter wheat area index, it was also necessary to set appropriate threshold value for winter wheat area extraction. The paper took the visual interpretation classification results of lower right grid points as the basis for threshold value extraction. The specific method was to divide winter wheat area index from small to large with certain intervals, and then to make dimidiate extraction of winter wheat area indices of the lower right centers by taking each divided value as the extraction threshold value. By comparing with the visual interpretation result, the result with the highest accuracy was taken as the optimal winter wheat area index extraction threshold value, which was identified to be approximately 1 600 with self-adaptation approach finally. In all grids, accuracy validation was conducted by taking the 10 plots with equal probability. Accuracy validation results showed that the overall classification accuracy had reached 94.4%, with Kappa coefficient of 0.88. The area extraction accuracy of this method was about 1.7% higher than that of conventional method based on NDVI time sequence images. By establishing winter wheat area index, this paper converted a complicated multiple-parameter problem into a single-parameter problem with clearly defined agricultural significance. This method is featured with high automatic degree and stable classification results, and it has been widely applied in the crop area remote sensing monitoring practices in China.

Keywords: remote sensing; crops; monitoring; planting area; winter wheat; GF-1; NDVI; multi-temporal phases; weighted NDVI index