

基于 Hyperion 高光谱影像的冬小麦地上干生物量反演

任建强¹ 吴尚蓉¹ 刘 斌² 陈仲新¹ 刘杏认³ 李 贺⁴

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 北京洛斯达数字遥感技术有限公司, 北京 100120; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 在黄淮海粮食主产区选择河北省衡水市深州市为试验区,以冬小麦地上干生物量为研究对象,以作物冠层高光谱和 EO-1 Hyperion 高光谱卫星数据为主要数据源,在分析冠层高光谱构建的窄波段植被指数(N-VIs)与实测冬小麦地上干生物量间相关性基础上,提出了利用拟合精度 R^2 极大值区域重心确定冬小麦干生物量敏感的光谱波段中心的方法,并运用该方法确定了冬小麦生物量敏感波段中心。在此基础上,以敏感波段中心筛选结果为指导,利用窄波段植被指数及相关波段开展 Hyperion 高光谱卫星遥感区域冬小麦干生物量遥感反演和精度验证。最终,按精度最高原则优选区域冬小麦地上生物量反演结果。其中,研究采用了冬小麦孕穗期 Hyperion 数据,涉及的植被指数包括窄波段归一化植被指数(N-NDVI)、窄波段差值植被指数(N-DVI)和窄波段比值植被指数(N-RVI)。结果表明,通过与实测冬小麦地上干生物量对比,利用冠层高光谱冬小麦地上干生物量反演敏感波段筛选结果及其相应波段构建的 Hyperion 窄波段植被指数进行孕穗期作物干生物量估算取得了较好结果,其精度由大到小为:N-NDVI、N-RVI、N-DVI。其中,以波段 B₁₈(波长 528.57 nm)、波段 B₈₂(波长 962.91 nm)构建的 Hyperion N-NDVI 估算区域冬小麦地上干生物量精度最高,相对误差(RE)和归一化均方根误差(NRMSE)分别为 12.65% 和 13.78%。

关键词: 冬小麦; 生物量; 高光谱遥感; 敏感波段; 植被指数

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0199-13

Retrieving Winter Wheat Above-ground Dry Biomass Based on Hyperion Hyperspectral Imagery

REN Jianqiang¹ WU Shangrong¹ LIU Bin² CHEN Zhongxin¹ LIU Xingren³ LI He⁴

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China
2. Beijing North-star Digital Remote Sensing Technology Co., Ltd., Beijing 100120, China
3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China
4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: How to efficiently use hyperspectral remote sensing data to quantitatively retrieve bio-physical and bio-chemical crop parameters and accurately obtain regional crop growth information has always been one of the hot issues in agricultural quantitative remote sensing researches. Based on optimal selection of sensitive hyperspectral bands, the research on retrieval of winter wheat above-ground dry biomass (ADB_M) from Hyperion hyperspectral imagery was carried out in Shenzhou County, Hebei Province of Huang-Huai-Hai Plain which was the major grain producing region in China. Firstly, through analyzing relationship and their coefficient of determination (R^2) values between field-measured ADB_M of winter wheat and narrow band vegetation index (N-VIs) from crop canopy hyperspectral data, the method of determining hyperspectral sensitive band centers based on areas weight of R^2 maximum values was proposed and applied. Then, supported by results of hyperspectral sensitive band centers, Hyperion hyperspectral remote sensing data was used to retrieve winter wheat ADB_M at regional scale by using the N-VIs, and the accuracy of winter wheat biomass estimation results was validated. The Hyperion remote sensing data was acquired on Apr. 23, 2014, which was at the booting stage of winter wheat, and the

used N - VIs included narrow band normalized difference vegetation index (N - NDVI), narrow band difference vegetation index (N - DVI) and narrow band ratio vegetation index (N - RVI). Compared with field-measured winter wheat ADBM, based on optimal selection of sensitive hyperspectral bands and Hyperion N - VIs constructed by the selected sensitive bands, the method of using Hyperion N - VIs to retrieve winter wheat ADBM had better performance, and the accuracy order of winter wheat ADBM of the N - VIs were determined, showing a descending trend as follows: N - NDVI, N - RVI and N - DVI. Among them, based on the Hyperion N - NDVI constructed by the selected sensitive bands (528.57 nm and 962.91 nm), the retrieval result of ADBM of winter wheat was the best and the relative error (RE) and normalized root mean square error (NRMSE) were 12.65% and 13.78%, respectively. It was proved that based on optimal selection of sensitive hyperspectral bands, using Hyperion N - VIs to retrieve winter wheat ADBM had certain feasibility and effectiveness. It could provide a new thought thread for hyperspectral remote sensing sensitive bands selection and for the improvement of quantitatively retrieving bio-physical and bio-chemical crop parameters.

Key words: winter wheat; biomass; hyperspectral remote sensing; sensitive bands; vegetation index

0 引言

利用遥感技术准确获取作物生物量信息对开展农作物长势监测、区域作物产量估算、农田生态系统和全球碳循环等研究都具有重要意义^[1]。目前,通过遥感获取生物量主要模型包括机理模型、半机理模型和经验模型^[2-4]。其中,经验模型直接利用遥感特征参量与地上生物量数据建立统计模型,尽管该方法本身涉及作物生物量形成机理较少,但因方法简单、可操作性强,从而得到了较广泛的应用。其中,归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)、差值植被指数(DVI)等是最常用遥感特征参量^[5]。从遥感数据源看,目前农作物生物量估算主要应用多光谱、高光谱和雷达等遥感数据^[6-7],其中,多光谱遥感数据应用最广泛^[8]。高光谱遥感数据由于具有更高光谱分辨率(波段宽度小于10 nm),使得地表植被光谱分析有更多的波段选择,为定量分析植物理化变量与光谱特征的关系提供了强有力的数据支撑,也为深入开展作物生物量等关键农情参数定量反演提供了丰富信息源。

众多研究表明,高光谱遥感数据在作物生物量等生物理化参数估算方面比多光谱遥感数据更具特点和优势,已经成为最有应用潜力的遥感数据类型之一^[9]。但由于高光谱原始数据信息量大、波段多且相邻波段信息相关性高,信息冗余性必然会增加^[10-11]。因此,如何进行高光谱敏感波段选取和有效信息提取成为高光谱数据应用的关键步骤之一,也是进一步开展植被参数高光谱遥感反演模型研究的重要工作基础。国内外学者已经开展了一系列高光谱作物参数反演敏感波段选择、波段组合以及遥感指数筛选研究^[12-14]。

综合看,目前利用高光谱遥感数据进行农作物理化参量遥感反演大多集中应用非成像冠层高光

谱^[15-17],少量研究采用航空高光谱遥感影像^[18-21],而利用高光谱卫星遥感数据(如EO-1 Hyperion)的研究相对更少^[22]。特别是目前利用高光谱进行作物理化参量反演大多集中在作物冠层含水率、叶绿素(含氮量)、叶面积指数、覆盖度、生物量等参数^[23-26],其中,作物地上干生物量(Above-ground dry biomass, ADBM)方面的研究相对较少^[22]。

本文在粮食主产区黄淮海地区选择典型试验区,以冬小麦地上干生物量 ADBM 为研究对象,以窄波段归一化植被指数(Narrow band normalized difference vegetation index, N - NDVI)、窄波段比值植被指数(Narrow band ratio vegetation index, N - RVI)、窄波段差值植被指数(Narrow band difference vegetation index, N - DVI)为遥感特征参量,在利用作物冠层高光谱进行作物生物量敏感波段中心优选基础上,以敏感波段中心筛选结果为指导,利用EO-1 Hyperion 高光谱遥感数据和窄波段植被指数开展区域冬小麦地上干生物量遥感反演研究,以期为进一步提高遥感高光谱卫星数据植被理化参数估算精度提供理论依据与技术支持。

1 研究区域概况

研究区主要位于黄淮海粮食主产区河北省衡水市,地面调查区位于深州市(37°42'36"~38°09'36"N, 115°21'36"~115°48'02"E)。该区域属于温带半湿润季风气候,区域主要农作物种植制度为冬小麦-夏玉米一年两熟制。其中,冬小麦种植时间为上年9月下旬至10月上旬,返青期为下年2月下旬至3月上旬,拔节期为4月上旬至4月中旬,孕穗期为4月下旬,抽穗期为5月上旬,乳熟期为5月下旬,成熟期为6月上旬。2014、2015 年对深州市 7 个典型样方在冬小麦孕穗期、抽穗期和乳熟期进行实地调查 6 次,累计获得 42 个样方数据和 210 个调查样点数

据,主要包括作物冠层光谱和作物地上干生物量测量等;另外,调查区内均匀分布 7 个长期定位调查样点,用于观测冬小麦主要生育期地上干生物量指标。研究区及地面试验采样点空间分布如图 1 所示。

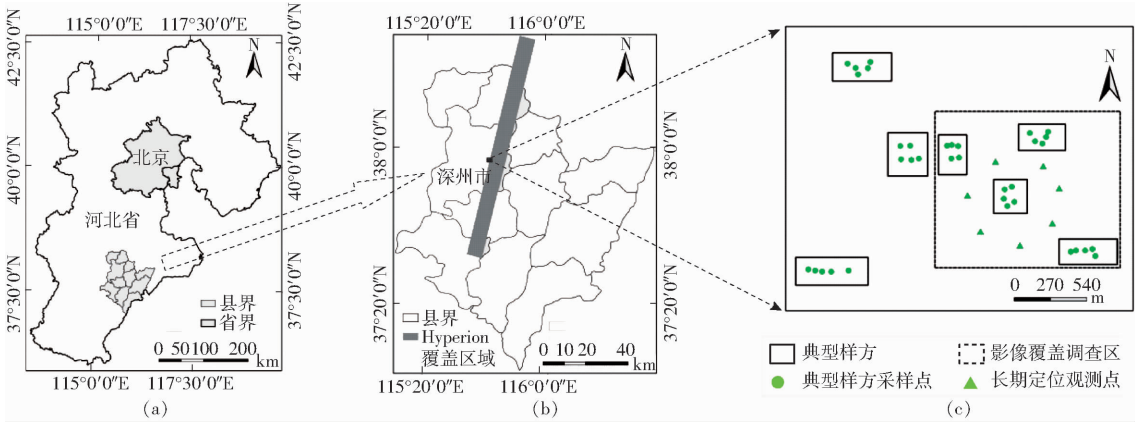


图 1 研究区示意图
Fig.1 Location of study region

2 研究方法

首先,在利用作物冠层高光谱数据构建任意两个窄波段间植被指数 $N-VIs$ 基础上,建立 $N-VI$ 与冬小麦实测地上干生物量间线性模型。其中,本研究涉及的窄波段植被指数包括 $N-NDVI$ 、 $N-DVI$ 和 $N-RVI$;其次,绘制 $N-VIs$ 与冬小麦实测地上干生物量拟合精度 R^2 二维图;在此基础上,通过确定 R^2 极大值区域和极大值区域重心,从而确定 $N-VIs$ 对冬小麦干生物量敏感的波段中心;然后,以基于 $N-VIs$ 确定的估算冬小麦干生物量的敏感波段中心为指导,选择预处理后的 Hyperion 相关敏感波段反射率构建相应 $N-VIs$,并在冬小麦干生物量与 Hyperion $N-VIs$ 相关性分析基础上,优选估算生物量精度最高的 $N-VI$ 及 Hyperion 相关波段;最终,完成基于 Hyperion 的区域冬小麦生物量高精度反演和精度验证,主要技术路线如图 2 所示。

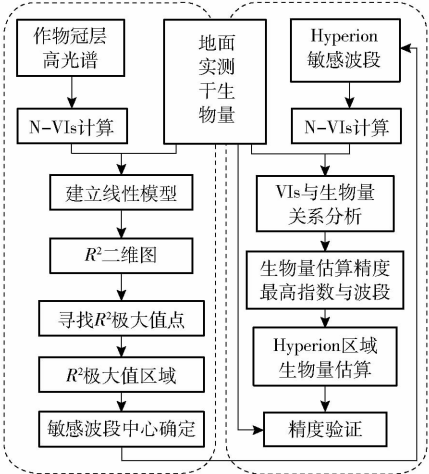


图 2 研究技术路线流程

Fig.2 Flow chart of research technology route

2.1 高光谱作物地上干生物量敏感波段选取

2.1.1 冠层高光谱窄波段植被指数 ($N-VIs$)

为了便于研究作物冠层高光谱数据构建的任意 2 个波段间植被指数 ($N-VI$) 与生物量的相关关系,本研究选取了计算最为简单且最常用的归一化植被指数 ($NDVI$)、差值植被指数 (DVI) 和比值植被指数 (RVI) 进行冬小麦生长期内作物生物量估算。具体计算公式为

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED}) \quad (1)$$

$$DVI = R_{NIR} - R_{RED} \quad (2)$$

$$RVI = R_{NIR} / R_{RED} \quad (3)$$

式中 R_{NIR} ——近红外光谱反射率
 R_{RED} ——红光光谱反射率

常规宽波段植被指数 $NDVI$ 、 DVI 和 RVI 由近红外和红光波段构成,而高光谱提供了更加丰富的光谱信息,当近红外波段或红光波段不真正限制在电磁波谱的近红外区域和红光区域,而是针对高光谱任意波段进行两两组合时^[13],便可构成窄波段归一化植被指数 $N-NDVI$ 、窄波段比值植被指数 $N-RVI$ 和窄波段差值植被指数 $N-DVI$ 。具体计算公式为

$$N-NDVI_{ij} = (R_i - R_j) / (R_i + R_j) \quad (4)$$

$$N-DVI_{ij} = R_i - R_j \quad (5)$$

$$N-RVI_{ij} = R_i / R_j \quad (6)$$

式中 i, j ——高光谱波段

R_i, R_j —— i, j 波长所对应的高光谱反射率

获得的冠层高光谱波长在 350 ~ 2 500 nm 之间,但由于主要针对可见光——近红外波段范围开展研究,且冠层光谱在 1 350 ~ 1 415 nm 和 1 800 ~ 1 950 nm 受大气和水蒸气影响较大^[27]。因此,本研究仅选择 350 ~ 1 000 nm 范围光谱(含 650 个波段)进行敏感

波段中心筛选及生物量估算研究。

2.1.2 冠层高光谱 N-VIs 与冬小麦地上干生物量相关性

在研究作物冠层高光谱 N-VIs 指数与冬小麦地上干生物量间相关性基础上,建立 N-VI 与冬小麦干生物量间的拟合 R^2 二维图。在此基础上,以表征拟合精度的决定系数(R^2)为衡量指标,确定对生物量估算相关性高的波段区域,为冬小麦干生物量估算敏感波段优选提供依据。其中,利用 350 ~ 1 000 nm 波长范围内的地面作物冠层高光谱数据任意两波段构建的 N-VI 分别与地面实测干生物量进行线性拟合,拟合方程为

$$y = ax + b \tag{7}$$

式中 x ——作物冠层高光谱 N-VIs
 y ——冬小麦地上干生物量,kg/hm²
 a ——一次项系数 b ——常数项

表征冬小麦地上干生物量拟合精度的决定系数 R^2 为

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \right)^2 \tag{8}$$

式中 o_i ——实测作物地上生物量,kg/hm²
 x_i ——对应 N-VI
 $\bar{o}, \bar{x}$ —— o_i, x_i 的均值

R^2 越接近于 1,说明冬小麦地上干生物量与 N-VI 间线性关系拟合效果越好,拟合精度越高,且 R^2 越大说明所选波段对冬小麦地上干生物量越敏感。

2.1.3 作物地上干生物量敏感波段中心确定

由于在 N-VI 与地上干生物量间的 R^2 二维图中, R^2 极大值区域并不是均匀分布,且 R^2 极大值点与 R^2 极大值区域重心不一定完全重合,导致 R^2 极大值点对应波段不一定与最优波段中心重合。因此,为保证利用所选波段中心进行作物生物量估算的结果更具稳定性和准确性,本研究通过确定 R^2 极大值区域重心获得敏感波段中心。首先,在获得 N-VI 与冬小麦地上干生物量间的拟合 R^2 二维图基础上,确定 N-VI 对冬小麦地上干生物量估算相关性高的波段区域;其次,在该区域内寻找 R^2 极大值点,并遍历该点 8 邻域内满足显著性要求的所有点,将这些点的集合标记为 R^2 极大值区域 Ω ;最后,将 R^2 极大值点区域的重心作为每个 R^2 极大值点区域的敏感波段中心。作物地上干生物量敏感波段中心确定示意图如图 3 所示。其中,重心计算公式为

$$\begin{cases} \bar{u} = \frac{\sum_{(u,v \in \Omega)} uf(u,v)}{\sum_{(u,v \in \Omega)} f(u,v)} \\ \bar{v} = \frac{\sum_{(u,v \in \Omega)} vf(u,v)}{\sum_{(u,v \in \Omega)} f(u,v)} \end{cases} \tag{9}$$

式中 $f(u,v)$ ——波段坐标为 (u,v) 的 R^2 值
 $(\bar{u}, \bar{v})$ ——敏感波段中心坐标

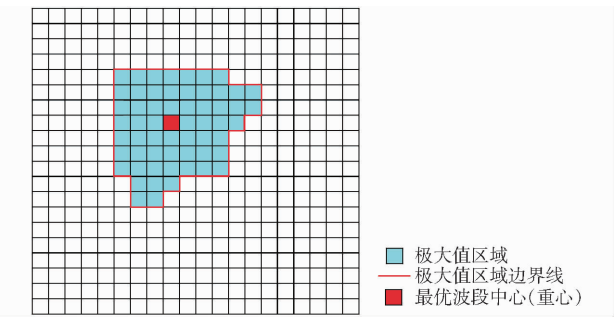


图 3 作物地上干生物量敏感波段中心确定示意图

Fig. 3 Sketch map of sensitive band center of crop ADBM

由相关系数显著性检验可知,当样本数量为 30 时, $R^2 > 0.130$,N-VIs 与实测作物地上干生物量呈显著相关关系; $R^2 > 0.214$,N-VIs 与实测地上干生物量极显著相关关系。为了保证本研究敏感波段中心筛选结果的精度和可靠性,本研究采用 $R^2 > 0.214$ 的极显著相关关系标准进行敏感波段区域的筛选。筛选过程中,需要在 R^2 二维图中寻找 $R^2 > 0.214$ 的极大值点,并遍历该点 8 邻域内 $R^2 > 0.214$ 的所有点,将这些点的集合标记为极大值区域 Ω ,并以 $R^2 = 0.05$ ^[28] 为梯度显示 R^2 分布区域。此外,为了提高所选敏感波段估算作物干生物量的精度,并减少工作量,研究中可根据 N-VIs 与作物地上生物量间拟合 R^2 二维图的特点,选择更高拟合精度标准的 R^2 二维区域进行相关敏感波段优选研究。

2.2 作物地上干生物量反演

2.2.1 高光谱卫星遥感数据植被指数

在利用作物冠层高光谱数据计算窄波段植被指数 N-VIs 进行冬小麦生物量估算敏感波段中心筛选基础上,以敏感波段中心为指导,选择敏感中心对应的 Hyperion 波段,并以 Hyperion 波段反射率计算相应的 N-VIs 植被指数。

2.2.2 高光谱卫星遥感植被指数与地上生物量关系模型建立

在筛选遥感数据波段及构建相应 Hyperion 窄波段植被指数基础上,建立 Hyperion 窄波段植被指数与冬小麦实测地上干生物量间线性模型,方程为

$$Y = cX + d \tag{10}$$

式中 X ——关键生育期的 Hyperion N-VIs

Y ——关键生育期地上干生物量,kg/hm²
 c ——一次项系数 d ——常数项

2.2.3 基于 Hyperion N - VIs 的区域冬小麦地上干生物量估算

在建立不同敏感波段下 Hyperion N - VIs 与冬小麦实测地上干生物量间统计模型基础上,将 Hyperion 高光谱遥感数据计算的窄波段植被指数 N - VI 代入到相关地上干生物量估算模型,从而获得不同敏感波段下区域冬小麦生物量空间分布结果。在此基础上,利用预留的实测地上生物量验证点数据对上述区域冬小麦生物量空间分布结果进行精度验证。最终,根据精度最高原则,确定冬小麦地上干生物量反演 Hyperion 最优波段,并将精度最高的生物量估算结果作为区域冬小麦地上生物量估算最佳结果。

2.3 作物地上生物量遥感估算精度验证

除了常用表征模型精度的决定系数 R^2 外,本研究中作物地上生物量遥感估算模型结果验证精度评价指标还包括归一化均方根误差 (Normalized root mean square error, NRMSE) 和相对误差 (Relative error, RE), 公式为

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i)^2}{n}} \times 100\% \tag{11}$$

$$RE = \frac{|o_i - p_i|}{o_i} \times 100\% \tag{12}$$

式中 p_i ——通过窄波段植被指数拟合的作物地上生物量,kg/hm²
 n ——样本量

其中,当 NRMSE 和 RE 小于 10% 时,判断模拟结果精度为极好,NRMSE 和 RE 大于 10% 小于 20% 时模拟结果为好,NRMSE 和 RE 大于 20% 小于 30% 时模拟结果为中等,NRMSE 和 RE 大于 30% 时模拟结果为差^[29-30],判断标准优先考虑 NRMSE,其次为 RE。

本研究在作物冠层高光谱干生物量敏感波段中心确定中,主要利用 2014 年、2015 年累计获得的 42 个样方地上干生物量和冬小麦冠层高光谱数据。其中,30 个样方数据用于模型建立,12 个样方数据用于精度验证;在基于 Hyperion 高光谱卫星遥感进行区域冬小麦地上干生物量估算研究中,本研究仅获取到 2014 年冬小麦孕穗期 1 景 Hyperion 高光谱遥感卫星影像。受 Hyperion 遥感影像幅宽较窄影响,仅覆盖了 2014 年地面部分典型样方中 18 个调查点和 7 个长期定位观测点,因此,研究中仅采用 25 个

点位数据开展 Hyperion 高光谱遥感干生物量模型建立与精度验证。其中,15 个用于模型建立,10 个用于精度验证。

3 数据获取与处理

3.1 地面数据采集与处理

3.1.1 地面样方布设与观测

本研究典型样方数据采集主要包括 GPS 定位信息、冬小麦冠层高光谱和冬小麦地上干生物量。研究区共布设 7 个典型样方,样方选择不仅考虑了小麦样方在区域内分布的均匀性,而且考虑了小麦长势和品种的代表性。其中,2014 年和 2015 年共进行 6 次地面样方数据采集,具体地面样方调查时间分别为 2014 年 4 月 23 日(孕穗期)、5 月 9 日(抽穗期)、5 月 28 日(乳熟期)和 2015 年 4 月 14 日(拔节期)、5 月 7 日(抽穗期)和 5 月 27 日(乳熟期)。调查中,每个样方内均匀布置 5 个采样点,每个采样点样框大小为 50 cm × 50 cm,在每个样点分别进行冬小麦地上干生物量和冠层高光谱采集。为准确获得每个地面样方的地上干生物量和冠层光谱数据,研究中将 5 个样点的干生物量和冠层光谱信息分别进行平均处理,从而获得更加准确的典型样方观测数据,进而提高参与建模和模型验证的样方数据质量。

3.1.2 地上干生物量和冠层光谱获取

在冬小麦地上生物量实地调查过程中,在对采样点进行准确定位基础上,分别收割样点中 50 cm × 50 cm 采样框内冬小麦地上部分并装入保鲜袋。在实验室中,对冬小麦植株 105℃ 杀青 2 h,并在 80℃ 干燥至恒质量(前后两次质量差不大于 5%),称得植株地上部干生物量。在此基础上计算采样点单位面积冬小麦地上干生物量(kg/hm²)。

冬小麦冠层光谱利用美国 ASD FieldSpec Pro 2500 型光谱仪(350 ~ 2 500 nm)进行测量。其中,在 350 ~ 1 000 nm 光谱范围内采样间隔为 1.4 nm(重采样后间隔为 1 nm),在 1 000 ~ 2 500 nm 光谱范围内采样间隔为 2 nm。测定光谱在 10:00—14:00 之间且天气晴朗无风、阳光照射充足条件下进行。光谱测量过程中,首先将探头垂直对准参考板进行优化,然后开始样方内冬小麦冠层光谱的采集。光谱采集时,探头垂直向下,探头距离冠层高度约 1.2 m,探头视场角为 25°,每个采样点测量 10 条高光谱。在此基础上,利用 ViewSpecPro 软件对光谱数据进行平均,并将平均值作为相应采样点的反射光谱值。此外,利用 ENVI Classic 软件中 smooth(s1,5) 函数 9 点加权移动平均法对光谱数据进行平滑。最终,

得到观测样方地面高光谱反射率数据。

3.2 高光谱遥感卫星数据获取与处理

本研究所用遥感数据为 1 景 EO-1 Hyperion 高光谱卫星数据,相关遥感数据由美国地质勘探局网站(<http://glovis.usgs.gov>)下载获得。Hyperion 是美国地球观测卫星 EO-1 搭载的高光谱成像仪,是第 1 台星载高光谱传感器,成像幅宽为 7.7 km×42 km,空间分辨率为 30 m,光谱分辨率为 10 nm,共 242 个波段,光谱范围为 357~2 576 nm。其中,1~70 波段覆盖 357~1 058 nm 的可见光和近红外区域,71~242 波段覆盖 852~2 576 nm 的短波红外区域。

本研究中利用的 Hyperion 影像获取时间为 2014 年 4 月 23 日,影像中心位置为 38°01′1.52″N, 114°44′6.69″E。Hyperion 数据预处理在 ENVI Classic Workshop 插件下进行,主要包括条纹修复及坏线去除、未标定及水汽吸收严重波段剔除、Smile 效应校正、大气校正、几何校正等。通过对影像的处理,剔除了噪声波段以及无效波段,有效波段共有 176 个,分别为波段 8~57、波段 79~120、波段 128~166、波段 179~223。本研究中用到的波段主要集中在 350~1 000 nm 范围内 8~57、79~85 波段,其中,波段 8~57 波长范围为 426.82~925.41 nm,波段 79~85 波长范围为 932.64~993.17 nm。

3.3 其他辅助数据

本文中涉及其他辅助数据包括研究区冬小麦作物分布图、作物物候信息、行政边界(县级、市级、省级)等。其中,高精度冬小麦作物分布图由农业部农业遥感重点实验室(原农业部农业信息技术重点实验室)提供,该数据由 16 m 空间分辨率 GF-1 遥感数据通过目视解译获得,通过与地面作物样方验证,作物分布图总体精度和 Kappa 系数分别为 97.53%、0.951 0。由于本研究采用的 Hyperion 高光谱影像分辨率为 30 m,为了提取 Hyperion 高光谱影像冬小麦地上生物量空间分布信息,本研究通过对 16 m 空间分辨率作物分布图进行重采样,从而获得与 Hyperion 高光谱影像一致的空间分辨率,便于提取冬小麦地上生物量空间分布信息。

4 结果与分析

4.1 冠层高光谱估算地上干生物量敏感波段选取

4.1.1 冠层高光谱窄波段植被指数 N-VIs 结果

研究中,在对样方采集的作物冠层高光谱数据光谱平均及光谱平滑等预处理基础上,利用 Matlab 软件,根据式(4)~(6),在冬小麦关键生育期分别计算并绘制任意两波段组合的 N-NDVI、N-DVI 和 N-RVI,获得冬小麦 N-NDVI、N-DVI 和 N-

RVI 分布,如图 4 所示。其中,在 350~1 000 nm 高光谱范围内任意两波段间组合及相关 N-NDVI、N-DVI 和 N-RVI 值均为 650×650 个。图 4 所示 N-VIs 分布图是用其中一个冬小麦样方孕穗期、抽穗期和乳熟期等不同生育期 N-NDVI、N-DVI 和 N-RVI 计算的二维分布图。

由图 4a~4f 可知,N-NDVI 和 N-DVI 红色区域为正值,蓝色部分为负值,且 N-NDVI 和 N-DVI 的绝对值以(350,350)、(1 000,1 000)两点间连线为轴呈轴对称分布,因此,在分析时只需研究对称轴一侧 N-NDVI 和 N-DVI 即可。以对称轴下侧为例,存在一些 N-NDVI 和 N-DVI 变化较为明显的区域,各个生育期窄波段植被指数变化比较明显区域 N-VIs 最小值、最大值和平均值的统计结果如表 1 所示,该结果符合冬小麦不同生育期内植被指数与冠层光谱的变化规律^[31]。由于 N-RVI 与 N-NDVI、N-DVI 计算公式形式的不同,任意两波段构建的 N-RVI 在分布上不具有对称性,且在数值上只有正值。由图 4g~4i 可以看出,N-RVI 数值分布区域界线明显,数值较大的 N-RVI 主要分布在横轴 740~1 000 nm 范围、纵轴 350~700 nm 范围内,其中,横轴 750~1 000 nm、纵轴 350~520 nm 范围和横轴 740~1 000 nm、纵轴 600~700 nm 范围两个区域的 N-RVI 在冬小麦生育期内变化明显。各个生育期内窄波段植被指数变化比较明显的区域,具体指数分布结果如表 1 所示。

4.1.2 冠层高光谱 N-VIs 与地上干生物量相关性

将 650×650 个 N-NDVI、N-DVI 和 N-RVI 数据分别与 30 个地面实测干生物量数据建立线性模型,并输出每个 N-VI 拟合干生物量的拟合精度 R^2 (图 5)。图 5 中横、纵坐标为作物冠层高光谱波长且波长范围为 350~1 000 nm, R^2 二维图内任意点即为该点对应的横轴(λ_1)、纵轴(λ_2)2 个波段反射率构建的 N-VIs 与干生物量间拟合精度 R^2 。由图 5 可看出,拟合精度 R^2 分布以(350,350)、(1 000,1 000)两点对角线为轴对称分布,从 R^2 二维分布区域可以得到 N-NDVI、N-DVI 和 N-RVI 对冬小麦干生物量相关性较大的区域及相关波段信息。

4.1.3 高光谱窄波段植被指数估算生物量敏感波段中心确定

由于 N-VIs 与干生物量间 R^2 分布二维图中极大值区域分布特点各不相同,为了突出极大值区域间界线划分,也便于更直观地显示与生物量敏感的 R^2 区域和敏感波段中心的确定,进一步提高所选敏感波段估算作物干生物量的精度,同时为了减少研究的工作量,本研究在 N-NDVI、N-DVI 和 N-

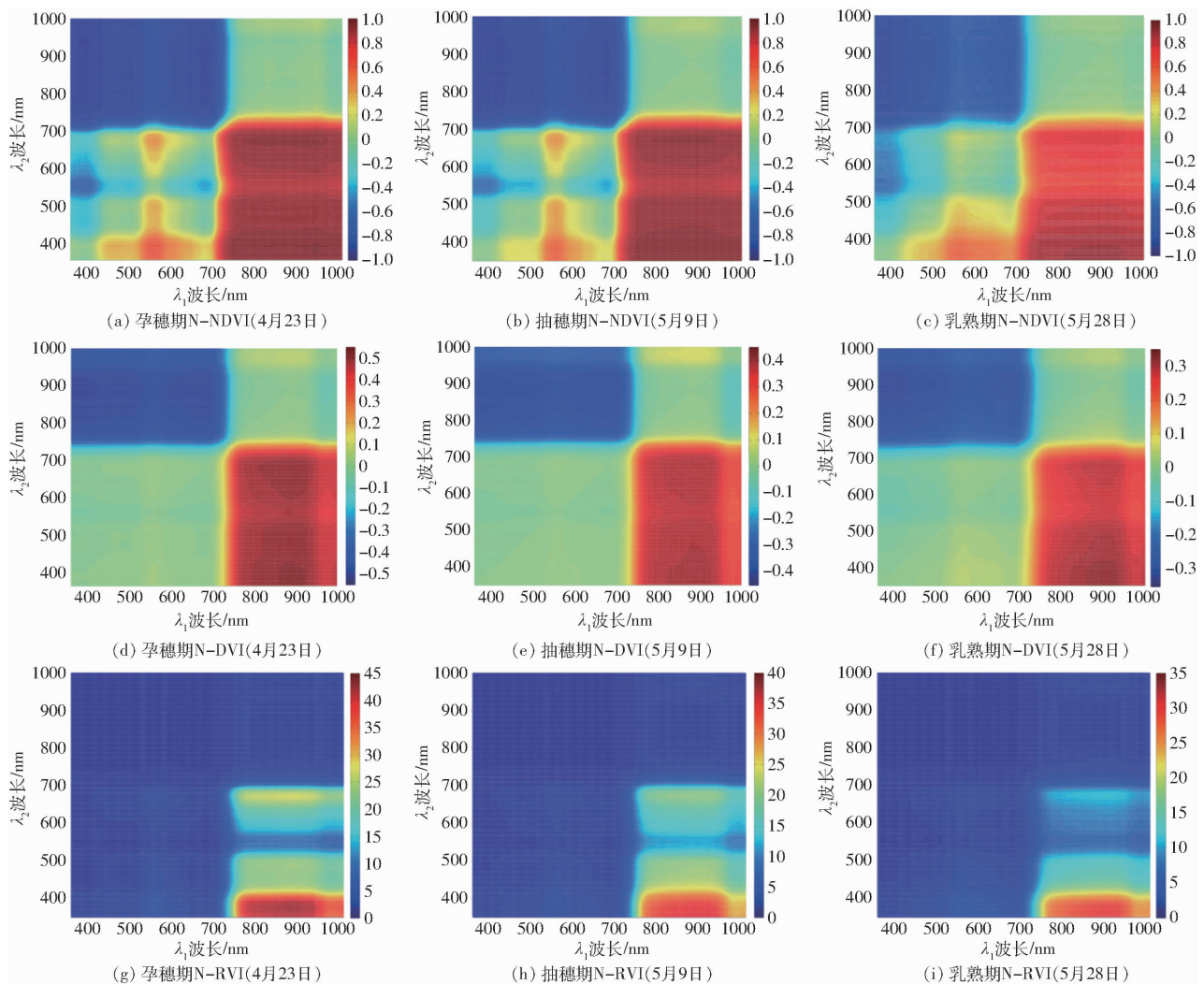


图 4 冬小麦 N-VIs 分布二维图(2014 年)

Fig.4 Two dimensional distributions of N-VIs of winter wheat (2014)

表 1 主要生育期冬小麦冠层高光谱 N-VIs 分布统计

窄波段			Tab.1 Statistics of winter wheat canopy hyperspectral N-VIs in main growth stages								
植被指数	坐标轴范围/nm		孕穗期 VIs			抽穗期 VIs			乳熟期 VIs		
	横轴	纵轴	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
N-NDVI	680~1 000	350~720	0.45	0.93	0.87	0.56	0.94	0.89	0.40	0.76	0.74
	520~580	350~510	0.37	0.65	0.40	0.35	0.60	0.39	0.25	0.58	0.39
	640~700	520~570	-0.45	-0.30	-0.32	-0.44	-0.30	-0.31	-0.16	-0.06	-0.07
N-DVI	720~1 000	350~750	0.13	0.52	0.51	0.09	0.41	0.38	0.07	0.27	0.24
	760~930	830~1 000	0.04	0.08	0.06	0.04	0.07	0.05	0.01	0.03	0.02
N-RVI	750~1 000	350~520	18.00	53.00	48.00	15.00	42.00	35.00	8.00	25.00	19.00
	740~1 000	600~700	12.00	34.00	28.00	11.00	21.00	17.00	4.00	7.50	6.00

RVI 拟合冬小麦干生物量 R^2 二维图中分别选择 $R^2 \geq 0.65$ 、 $R^2 \geq 0.60$ 、 $R^2 \geq 0.70$ 的 R^2 二维区域进行相关敏感波段中心确定研究,并确定了相应的极大值区域,如图 6a 中 A~H、图 6b 中 A~D、图 6c 中 A~I 为满足条件的 R^2 极大值区域 Ω 。为了更直观地显示波段敏感区域,本研究在图 6 中仅显示了 $R^2 > 0.45$ 区域结果。

在确定 N-VIs 与干生物量的敏感区域后,根据

式(9)分别计算敏感区域 Ω 的重心作为敏感波段中心。通过计算可知,图 6a 中 A~H 的重心分别为 (840 nm,387 nm)、(500 nm,465 nm)、(963 nm,527 nm)、(859 nm,543 nm)、(729 nm,538 nm)、(962 nm,701 nm)、(829 nm,699 nm)、(718 nm,717 nm);图 6b 中 A~D 的重心分别为 (502 nm,454 nm)、(623 nm,428 nm)、(947 nm,593 nm)、(956 nm,736 nm);图 6c 中 A~I 的重心分别为 (439 nm,623 nm)、(506 nm,461 nm)、

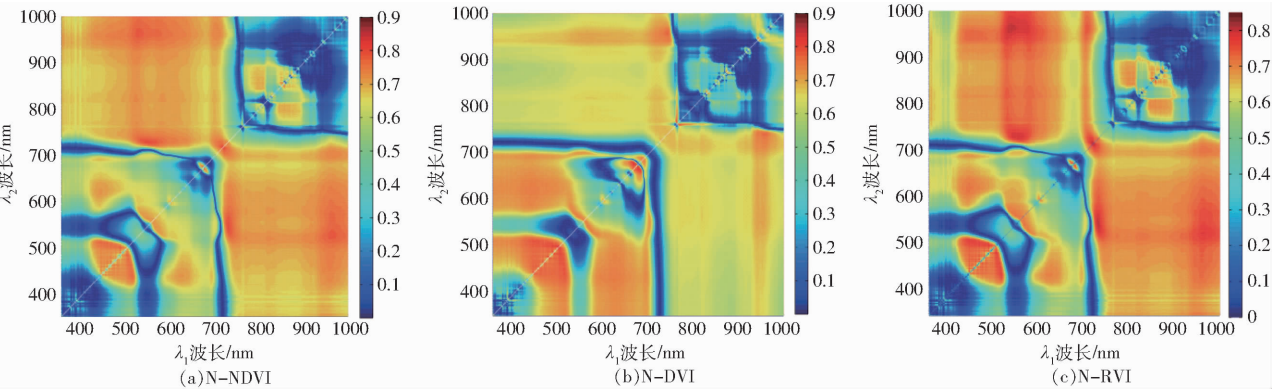


图 5 N-VIs 与冬小麦地上干生物量间拟合 R^2 二维图

Fig. 5 Two dimensional maps of R^2 values for N-VIs versus ADBM of winter wheat

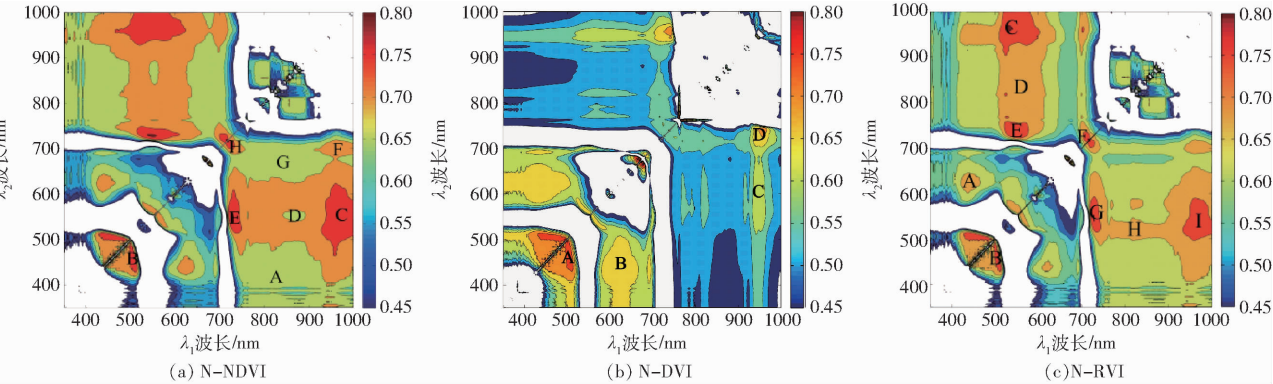


图 6 N-VIs 拟合冬小麦干生物量 R^2 二维等值线

Fig. 6 R^2 contour maps showing relationship between N-VIs and dry winter wheat biomass

(538 nm,965 nm)、(553 nm,850 nm)、(550 nm,740 nm)、
(721 nm,715 nm)、(730 nm,552 nm)、(818 nm,519 nm)、
(970 nm,539 nm)。

4.2 基于 Hyperion 的区域冬小麦生物量遥感反演
4.2.1 Hyperion 遥感波段选取与 N-VIs 计算

在基于冠层高光谱窄波段植被指数(N-VIs)确定冬小麦干生物量高光谱敏感波段中心基础上,确定不同敏感波段中心所对应的 Hyperion 波段。其中,由于构建窄波段植被指数的冠层高光谱分辨率为 1 nm,因此,构建植被指数的两个波段中心可能会出现在同一 Hyperion 波段,这种情况在 Hyperion 波段选取时予以舍弃。如敏感波段中心(718 nm,717 nm)的 2 个波段中心将同时出现在 Hyperion 的 B₃₇波段(中心波长 721.90 nm,半值波宽 10.600 4 nm),导致构建 N-NDVI 植被指数一直为零,因此,这种情况敏感波段选取时将予以舍弃。另外,由于 Hyperion 遥感预处理时剔除了 1~7 波段(波长范围 355.59~416.64 nm),因此,敏感波段中心(840 nm,387 nm)也将不予考虑。最终,建立了 N-NDVI、N-DVI 和 N-RVI 估算冬小麦生物量敏感波段中心与 Hyperion 波段对应关系,如表 2 所示。

根据表 2 中 N-NDVI、N-DVI 和 N-RVI 对应的 Hyperion 高光谱敏感波段,利用 ENVI 软件中

Band Math 功能进行波段运算,计算 Hyperion 相关波段所对应的窄波段植被指数。在此基础上,利用研究区内冬小麦空间分布信息对相关波段构建的 N-VIs 进行掩膜处理,从而获得 2014 年覆盖影像内冬小麦孕穗期 N-VIs 空间信息。在此基础上,对 2014 年研究区覆盖影像内冬小麦孕穗期 N-VIs 最大值、最小值和平均值进行统计,结果如表 2 所示。由于篇幅限制,本研究仅列出冬小麦孕穗期 Hyperion N-VIs 结果中全部 N-NDVI 空间分布图作为示例,如图 7 所示。

4.2.2 基于 Hyperion 的区域生物量反演结果及精度验证

在计算 Hyperion 对应窄波段植被指数基础上,根据地面实测生物量样方 GPS 信息提取相应点位的窄波段植被指数,并建立 Hyperion 窄波段植被指数与冬小麦地上干生物量间关系模型。最后,完成对所构建生物量反演模型的精度验证。由于 Hyperion 影像幅宽较窄,只覆盖了一部分试验区域,覆盖区域共包含 25 个地面实测点,本文中用其中 15 个实测点数据进行遥感反演模型建立,10 个实测点数据进行反演精度验证。验证结果如表 3 所示。

依据 2.3 节中精度验证评价标准,由表 3 可以看出,基于 N-NDVI 冬小麦地上干生物量估算相对

表 2 Hyperion 遥感波段选取与 N - VIs 计算

Tab.2 Selection of Hyperion bands and statistic of winter wheat N - VIs in 2014

N - VIs 指标	冠层高光谱敏感波段中心		Hyperion 高光谱遥感波段		冬小麦 Hyperion N - VIs		
	λ_1 波段	λ_2 波段	λ_1 波段	λ_2 波段	最大值	最小值	平均值
	波长/nm	波长/nm	(波长/nm)	(波长/nm)			
N - NDVI	465	500	B ₁₂ (467. 52)	B ₁₅ (498. 04)	- 0. 035	- 0. 10	- 0. 058 4
	527	963	B ₁₈ (528. 57)	B ₈₂ (962. 91)	0. 98	0. 45	0. 672 5
	538	729	B ₁₉ (538. 74)	B ₃₈ (732. 07)	0. 95	0. 46	0. 632 1
	543	859	B ₂₀ (548. 92)	B ₅₀ (854. 18)	0. 99	0. 55	0. 728 4
	699	829	B ₃₅ (701. 55)	B ₄₈ (833. 83)	0. 97	0. 60	0. 736 5
	701	962	B ₃₅ (701. 55)	B ₈₂ (962. 91)	0. 95	0. 30	0. 515 7
N - DVI	454	502	B ₁₁ (457. 34)	B ₁₅ (498. 04)	0. 001	- 0. 003	0. 001 5
	428	623	B ₈ (426. 82)	B ₂₇ (620. 15)	0. 001 8	- 0. 008 6	- 0. 007 2
	593	947	B ₂₄ (589. 62)	B ₈₁ (952. 82)	0. 63	0. 36	0. 530 1
	736	956	B ₃₈ (732. 07)	B ₈₁ (952. 82)	0. 26	0. 15	0. 232 3
N - RVI	439	623	B ₉ (436. 99)	B ₂₇ (620. 15)	0. 41	1. 42	0. 852 6
	461	506	B ₁₁ (457. 34)	B ₁₆ (508. 22)	0. 91	1. 05	0. 994 1
	538	965	B ₁₉ (538. 74)	B ₈₂ (962. 91)	9. 50	15. 60	13. 101 1
	553	850	B ₂₀ (548. 92)	B ₅₀ (854. 18)	11. 70	18. 10	15. 080 2
	550	740	B ₂₀ (548. 92)	B ₃₉ (742. 25)	6. 56	9. 98	8. 520 4
	715	721	B ₃₆ (711. 72)	B ₃₇ (721. 90)	0. 62	0. 75	0. 660 7
	552	730	B ₂₀ (548. 92)	B ₃₈ (732. 07)	0. 11	0. 23	0. 159 2
	519	818	B ₁₇ (518. 39)	B ₄₇ (823. 65)	0. 002	0. 10	0. 005 8
	539	970	B ₁₉ (538. 74)	B ₈₃ (972. 99)	9. 55	15. 60	13. 332 6

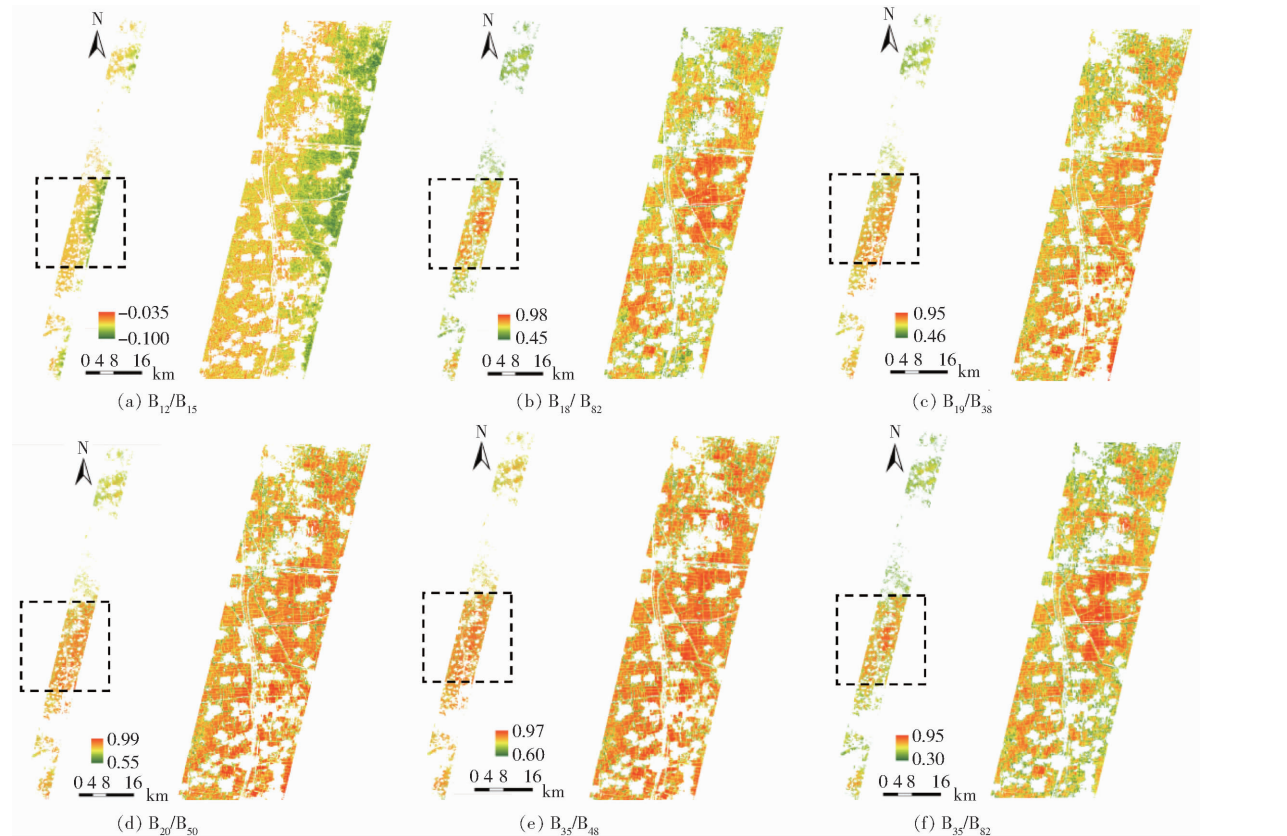


图 7 冬小麦孕穗期 Hyperion N - NDVI 空间分布(2014 年)

Fig. 7 Spatial results of Hyperion N - NDVI of winter wheat at booting stage (2014)

误差范围为 12. 65% ~ 15. 46% ,归一化均方根误差范围为 13. 78% ~ 16. 73% 。其中,以 B₁₈ (528. 57 nm)、B₈₂ (962. 91 nm) 波段构建的 N - NDVI 估算干生物量精度最高, R^2 为 0. 720 6,RE、NRMSE 分别为 12. 65%

和 13.78% ;基于 N - RVI 冬小麦地上干生物量估算相对误差范围为 12.77% ~ 19.66% ,归一化均方根误差范围为 14.53% ~ 18.95% 。其中,以 B₃₆ (711.72 nm)、B₃₇ (721.90 nm) 波段构建的 N - RVI 估算干生物量精度最高, R^2 为 0.700 1, RE、NRMSE 分别为 12.77% 和 14.53% ;基于 N - DVI 冬小麦地

上干生物量估算相对误差范围为 16.83% ~ 20.81% ,归一化均方根误差范围为 18.90% ~ 23.22% 。其中,以 B₃₈ (732.07 nm)、B₈₁ (952.82 nm) 波段构建的 N - DVI 估算干生物量精度最高, R^2 为 0.692 4, RE、NRMSE 分别为 16.83% 和 18.90% 。

表 3 基于 Hyperion N - VIs 的区域冬小麦生物量估算精度(孕穗期,2014 年)

Hyperion			拟合方程 $Y = cX + d$ ($n = 15$)	生物量精度验证 ($N = 10$)		
N - VIs 指标	λ_1 波段波长/nm	λ_2 波段波长/nm		R^2	RE/%	NRMSE/%
N - NDVI	B ₁₂ (467.52)	B ₁₅ (498.04)	$Y = -155\ 502X - 5\ 157.5$	0.443 4 **	15.00	16.14
	B ₁₈ (528.57)	B ₈₂ (962.91)	$Y = 20\ 498X - 8\ 917.4$	0.720 6 **	12.65	13.78
	B ₁₉ (538.74)	B ₃₈ (732.07)	$Y = 23\ 302X - 10\ 563$	0.553 1 **	15.46	16.73
	B ₂₀ (548.92)	B ₅₀ (854.18)	$Y = 21\ 763X - 11\ 579$	0.618 7 **	14.36	16.06
	B ₃₅ (701.55)	B ₄₈ (833.83)	$Y = 23\ 837X - 14\ 037$	0.513 2 **	14.96	16.04
	B ₃₅ (701.55)	B ₈₂ (962.91)	$Y = 14\ 032X - 3\ 769.3$	0.648 8 **	14.21	15.59
N - DVI	B ₁₁ (457.34)	B ₁₅ (498.04)	$Y = 2 \times 10^6 X + 7\ 121.6$	0.660 9 **	18.46	20.04
	B ₈ (426.82)	B ₂₇ (620.15)	$Y = 340\ 546X + 6\ 565.7$	0.697 1 **	19.15	19.88
	B ₂₄ (589.62)	B ₈₁ (952.82)	$Y = 23\ 362 - 36\ 804X$	0.538 7 **	20.81	23.22
	B ₃₈ (732.07)	B ₈₁ (952.82)	$Y = 22\ 376 - 83\ 438X$	0.692 4 **	16.83	18.90
N - RVI	B ₉ (436.99)	B ₂₇ (620.15)	$Y = 9\ 037.1X - 3\ 405.3$	0.607 6 **	16.16	17.16
	B ₁₁ (457.34)	B ₁₆ (508.22)	$Y = 66\ 860 - 63\ 359X$	0.574 0 **	19.66	18.95
	B ₁₉ (538.74)	B ₈₂ (962.91)	$Y = 24\ 220 - 1\ 536.4X$	0.740 4 **	14.07	15.22
	B ₂₀ (548.92)	B ₅₀ (854.18)	$Y = 22\ 490 - 1\ 230X$	0.690 3 **	13.85	15.90
	B ₂₀ (548.92)	B ₃₉ (742.25)	$Y = 26\ 036 - 2\ 588.6X$	0.733 7 **	15.17	15.14
	B ₃₆ (711.72)	B ₃₇ (721.90)	$Y = 72\ 284X - 44\ 556$	0.700 1 **	12.77	14.53
	B ₂₀ (548.92)	B ₃₈ (732.07)	$Y = 71\ 987X - 7\ 282.1$	0.671 0 **	16.83	18.50
	B ₁₇ (518.39)	B ₄₇ (823.65)	$Y = 93\ 288X + 3\ 526.8$	0.718 6 **	13.81	14.63
	B ₁₉ (538.74)	B ₈₃ (972.99)	$Y = 24\ 220 - 1\ 536.4X$	0.716 1 **	13.22	14.76

注:拟合方程中 X 分别为 Hyperion 波段 λ_1 、 λ_2 构建的 N - VI, Y 为对应 N - VI 拟合冬小麦地上干生物量(单位:kg/hm²);**表示通过 0.01 显著性检验。

可见,基于 Hyperion 高光谱遥感数据的窄波段植被指数在区域冬小麦孕穗期干生物量反演中获得了较好的精度结果,根据本研究精度评价标准,其总体精度由大到小为:N - NDVI、N - RVI、N - DVI。受篇幅限制,本文仅列出 N - NDVI、N - RVI 和 N -

DVI 中精度最高的冬小麦地上干生物量反演结果,具体干生物量结果和相关验证如图 8 ~ 10 所示。其中,根据本文采用精度最高结果作为区域冬小麦地上干生物量反演结果的规则,本研究最终采用 B₁₈ (528.57 nm) 和波段 B₈₂ (962.91 nm) 构建的

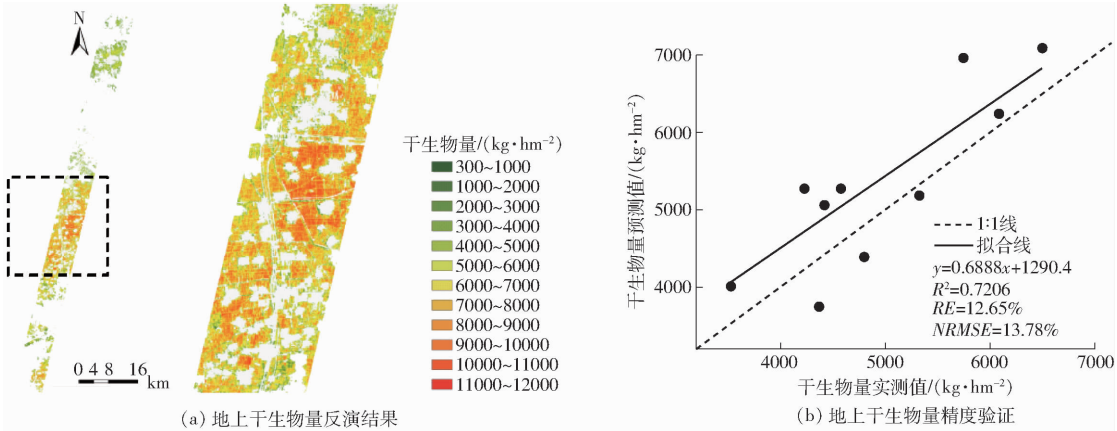


图 8 基于 Hyperion N - NDVI 的冬小麦地上干生物量反演和验证(孕穗期,2014 年)

Fig. 8 Result of ADBM of winter wheat and their validation based on Hyperion N - NDVI(booting stage, 2014)

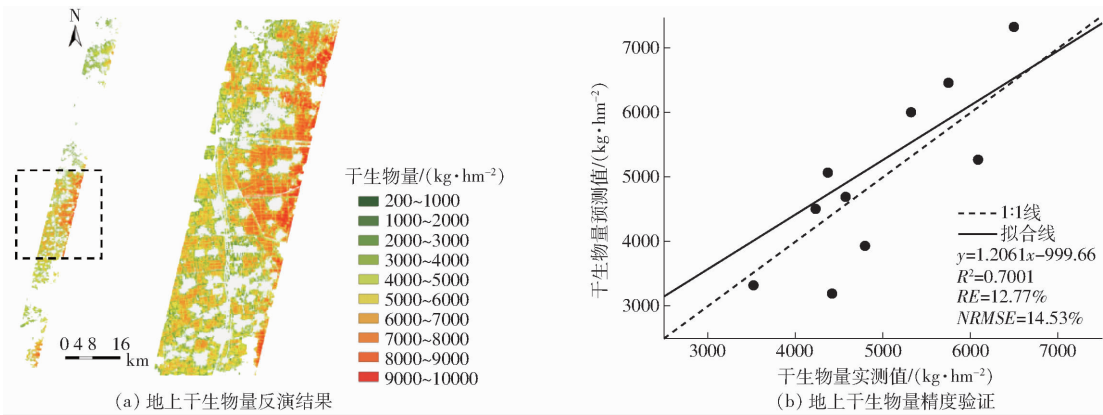


图 9 基于 Hyperion N - RVI 的冬小麦地上干生物量反演和验证(孕穗期,2014 年)

Fig.9 Result of ADBM of winter wheat and their validation based on Hyperion N - RVI(booting stage, 2014)

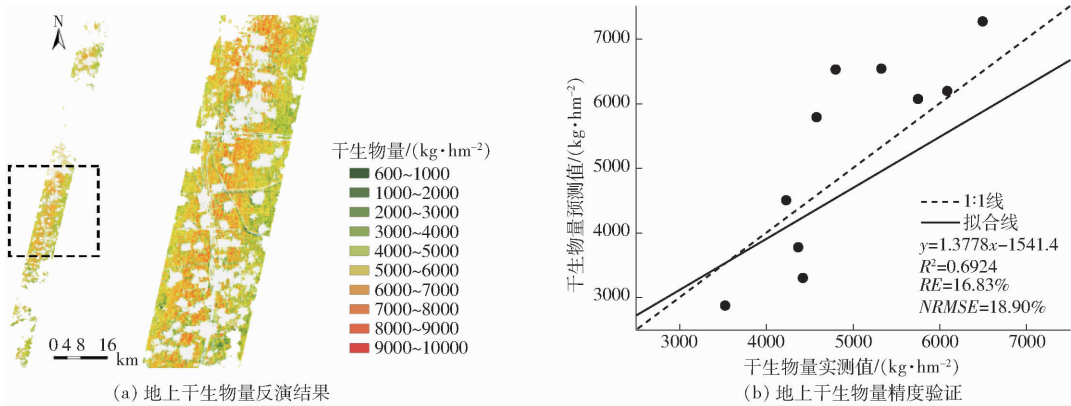


图 10 基于 Hyperion N - DVI 的冬小麦地上干生物量反演和验证(孕穗期,2014 年)

Fig. 10 Result of ADBM of winter wheat and their validation based on Hyperion N - DVI(booting stage, 2014)

Hyperion N - NDVI 最高精度生物量估算结果作为区域冬小麦孕穗期干生物量反演结果,即 RE、NRMSE 分别为 12.65% 和 13.78%,如图 8 所示。

5 讨论

(1)敏感波段中心确定方法或过程有待进一步完善。本研究敏感波段中心筛选过程中,拟合精度通过线性模型得出,下一步有必要尝试利用非线性模型开展敏感波段选择研究;其次,目前本研究只应用了 NDVI、DVI 和 RVI 等常见植被指数,其他多波段构成的复杂植被指数(如三角叶绿素植被指数 TCI、增强型植被指数 EVI 等)敏感波段中心筛选工作有待进一步开展;此外,本方法与直接采用极大值点进行高光谱遥感卫星敏感波段选择相比,作物生物量反演精度间差异也是下一步研究的重点之一。

(2)敏感波段指导高光谱遥感卫星应用存在一定不足,且试验中忽略了一些外部因素影响。如受数据质量或者遥感传感器自身特点等多因素影响,所选择卫星遥感数据波段与筛选出的冠层高光谱敏感波段在数量以及位置上难以一一对应,这使得在遥感反演过程中损失了部分植被指数,这可能会对

研究结果产生一定影响。另外,本研究目前仅采用了冬小麦孕穗期 1 景 Hyperion 高光谱遥感卫星影像进行区域冬小麦地上干生物量反演研究,尽管能够满足本研究冬小麦生物量敏感波段中心确定方法验证和应用目标,且得到了基于 Hyperion N - VIs 区域冬小麦孕穗期地上生物量反演精度及其精度排序等应用结果,但利用其他关键生育期 Hyperion 影像窄波段植被指数进行农作物地上干生物量反演精度对比研究将是下一步深入开展的工作。

6 结论

(1)在分析冠层高光谱构建的窄波段植被指数(N - VIs)与冬小麦地上干生物量间相关性基础上,提出了通过确定拟合精度 R^2 极大值区域重心,从而确定窄波段植被指数对冬小麦干生物量敏感的波段中心。在此基础上,以敏感波段中心筛选结果为指导,应用估算生物量精度最高的植被指数对应的相关波段开展 Hyperion 高光谱遥感区域冬小麦干生物量遥感反演和精度验证研究。通过与实测冬小麦地上干生物量对比,基于冠层高光谱作物生物量敏感波段优选和窄波段植被指数的 Hyperion 高光谱遥感影像区域冬小麦干生物量估算取得了较好结

果,证明本研究方法具有一定可行性。

(2)在冠层高光谱 $N - VIs$ 与冬小麦干生物量间拟合 R^2 二维图基础上,通过计算 $N - VIs$ 与作物地上干生物量间拟合精度 R^2 二维区域极大值区域重心,分别确定了基于 $N - VIs$ 的作物地上干生物量反演的高光谱敏感波段中心。通过计算可知,冠层高光谱 $N - NDVI$ 与干生物量的敏感波段中心为 (840 nm, 387 nm)、(500 nm, 465 nm)、(963 nm, 527 nm)、(859 nm, 543 nm)、(729 nm, 538 nm)、(962 nm, 701 nm)、(829 nm, 699 nm)、(718 nm, 717 nm);冠层高光谱 $N - DVI$ 与干生物量的敏感波段中心为 (502 nm, 454 nm)、(623 nm, 428 nm)、(947 nm, 593 nm)、(956 nm, 736 nm);冠层高光谱 $N - RVI$ 与干生物量

的敏感波段中心为 (439 nm, 623 nm)、(506 nm, 461 nm)、(538 nm, 965 nm)、(553 nm, 850 nm)、(550 nm, 740 nm)、(721 nm, 715 nm)、(730 nm, 552 nm)、(818 nm, 519 nm)、(970 nm, 539 nm)。

(3)在冠层高光谱反演作物生物量敏感波段中心指导下,基于孕穗期 Hyperion 高光谱遥感数据的窄波段植被指数在区域冬小麦孕穗期干生物量反演中获得了较为满意的精度结果,其总体精度由大到小为: $N - NDVI$ 、 $N - RVI$ 、 $N - DVI$ 。其中,以波段 B_{18} (528.57 nm)、波段 B_{82} (962.91 nm) 构建的 Hyperion $N - NDVI$ 估算区域冬小麦地上干生物量精度最高,相对误差 (RE) 和归一化均方根误差 (NRMSE) 分别为 12.65% 和 13.78%。

参 考 文 献

- 1 ZHENG D, RADEMACHER J, CHEN J, et al. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(3): 402–411.
- 2 杜鑫,蒙继华,吴炳方. 作物生物量遥感估算研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(11): 3098–3102.
DU Xin, MENG Jihua, WU Bingfang. Overview on monitoring crop biomass with remote sensing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(11): 3098–3102. (in Chinese)
- 3 MACHWITZ M, GIUSTARINI L, BOSSUNG C, et al. Enhanced biomass prediction by assimilating satellite data into a crop growth model [J]. *Environmental Modelling & Software* 2014, 62: 437–453.
- 4 杜文勇,何雄奎,SHAMAILA Z,等. 冬小麦生物量和产量的 AquaCrop 模型预测[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(4): 174–178, 183.
DU Wenyong, HE Xiongkui, SHAMAILA Z, et al. Yield and biomass prediction testing of AquaCrop model for winter wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(4): 174–178, 183. (in Chinese)
- 5 ANDREA A, PÉTER B, CSABA L, et al. Estimating biomass of winter wheat using narrowband vegetation indices for precision agriculture [J]. *Journal of Central European Green Innovation*, 2015, 3(2): 13–22.
- 6 MARIOTTO I, THENKABAIL P S, HUETE A, et al. Hyperspectral versus multispectral crop-productivity modeling and type discrimination for the HypsIRI mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 139: 291–305.
- 7 LIU J, PATTEY E, MILLER J R, et al. Estimating crop stresses, aboveground dry biomass and yield of corn using multi-temporal optical data combined with a radiation use efficiency model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 1167–1177.
- 8 郑阳,吴炳方,张森. Sentinel-2 数据的冬小麦地上干生物量估算及评价[J]. *遥感学报*, 2017, 21(2): 318–328.
ZHENG Yang, WU Bingfang, ZHANG Miao. Estimating the above ground biomass of winter wheat using Sentinel-2 data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(2): 318–328. (in Chinese)
- 9 ZANDLER H, BRENNING A, SAMIMI C. Potential of space-borne hyperspectral data for biomass quantification in an arid environment: advantages and limitations [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(4): 4565–4580.
- 10 程志庆,张劲松,孟平,等. 植被参数高光谱遥感反演最佳波段提取算法的改进[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 179–185.
CHENG Zhiqing, ZHANG Jingsong, MENG Ping, et al. Improvement of algorithm used for extraction hyperspectral feature bands of vegetation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(12): 179–185. (in Chinese)
- 11 THENKABAIL P S, ENCLONA E A. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3): 354–376.
- 12 HANSEN P M, SCHJOERRING J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 542–553.
- 13 王福民,黄敬峰,王秀珍,等. 波段位置和宽度对不同生育期水稻 NDVI 影响研究[J]. *遥感学报*, 2008, 12(4): 626–632.
WANG Fumin, HUANG Jingfeng, WANG Xiuzhen, et al. Effects of band position and bandwidth on NDVI measurements of rice at different growth stages [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(4): 626–632. (in Chinese)
- 14 SIEGMANN B, JARMER T. Comparison of different regression models and validation techniques for the assessment of wheat leaf area index from hyperspectral data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(18): 4519–4534.
- 15 付元元,王纪华,杨贵军,等. 应用波段深度分析和偏最小二乘回归的冬小麦生物量高光谱估算[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(5): 1315–1319.
FU Yuanyuan, WANG Jihua, YANG Guijun, et al. Band depth analysis and partial least square regression based winter wheat

- biomass estimation using hyperspectral measurements [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(5): 1315 – 1319. (in Chinese)
- 16 GNYP M L, BARETH G, LI F, et al. Development and implementation of a multiscale biomass model using hyperspectral vegetation indices for winter wheat in the North China Plain [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 33: 232 – 242.
- 17 刘冰峰, 李军, 贺佳, 等. 基于高光谱植被指数的夏玉米地上干物质量估算模型研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 254 – 262. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160336&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.036.
- LIU Bingfeng, LI Jun, HE Jia, et al. Estimation models of above-ground dry matter accumulation of summer maize based on hyperspectral remote sensing vegetation indexes [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 254 – 262. (in Chinese)
- 18 陈鹏飞, NICOLAS Tremblay, 王纪华, 等. 估测作物冠层生物量的新植被指数的研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(2): 512 – 517.
- CHEN Pengfei, NICOLAS Tremblay, WANG Jihua, et al. New index for crop canopy fresh biomass estimation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(2): 512 – 517. (in Chinese)
- 19 BENDIG J, YU K, AASEN H, et al. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 39: 79 – 87.
- 20 CASAS A, RIAÑO D, USTIN S L, et al. Estimation of water-related biochemical and biophysical vegetation properties using multi-temporal airborne hyperspectral data and its comparison to MODIS spectral response [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 148: 28 – 41.
- 21 田明璐, 班松涛, 常庆瑞, 等. 基于无人机成像光谱仪数据的棉花叶绿素含量反演[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 285 – 293. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161139&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.039.
- TIAN Minglu, BAN Songtao, CHANG Qingrui, et al. Estimation of SPAD value of cotton leaf using hyperspectral images from UAV based imaging spectroradiometer [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 285 – 293. (in Chinese)
- 22 MARSHALL M, THENKABAIL P S. Advantage of hyperspectral EO – 1 Hyperion over multispectral IKONOS, GeoEye – 1, WorldView – 2, Landsat ETM +, and MODIS vegetation indices in crop biomass estimation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 108: 205 – 218.
- 23 FU Y, YANG G, WANG J, et al. Winter wheat biomass estimation based on spectral indices, band depth analysis and partial least squares regression using hyperspectral measurements [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 100: 51 – 59.
- 24 郑玲, 朱大洲, 董大明, 等. 多信息融合的冬小麦地上鲜生物量检测研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(6): 1818 – 1825.
- ZHENG Ling, ZHU Dazhou, DONG Daming, et al. Monitoring of winter wheat aboveground fresh biomass based on multi-information fusion technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6): 1818 – 1825. (in Chinese)
- 25 LIU K, ZHOU Q, WU W, et al. Estimating the crop leaf area index using hyperspectral remote sensing [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(2): 475 – 491.
- 26 李粉玲, 常庆瑞. 基于连续统去除法的冬小麦叶片全氮含量估算[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 174 – 179. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170722&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.022.
- LI Fenling, CHANG Qingrui. Estimation of winter wheat leaf nitrogen content based on continuum removed spectra [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 174 – 179. (in Chinese)
- 27 PSOMAS A, KNEUBÜHLER M, HUBER S, et al. Hyperspectral remote sensing for estimating aboveground biomass and for exploring species richness patterns of grassland habitats [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(4): 9007 – 9031.
- 28 THENKABAIL P S, SMITH R B, DE PAUW E. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71(2): 158 – 182.
- 29 MICHELE R, NICOLA L, ZINA F. Evaluation and application of the OILCROP – SUN model for sunflower in southern Italy [J]. *Agricultural Systems*, 2003, 78: 17 – 30.
- 30 姜志伟, 陈仲新, 任建强, 等. 粒子滤波同化方法在 CERES – Wheat 作物模型估产中的应用 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(14): 138 – 146.
- JIANG Zhiwei, CHEN Zhongxin, REN Jianqiang, et al. Estimation of crop yield using CERES – Wheat model based on particle filter data assimilation method [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(14): 138 – 146. (in Chinese)
- 31 王磊, 白由路, 卢艳丽, 等. 基于 Green Seeker 的冬小麦 NDVI 分析与产量估算 [J]. *作物学报*, 2012, 38(4): 747 – 753.
- WANG Lei, BAI Youlu, LU Yanli, et al. NDVI analysis and yield estimation in winter wheat based on Green Seeker [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 747 – 753. (in Chinese)