

## 基于优化光谱指数的夏玉米地上生物量估算

王涵<sup>1,2</sup>, 张王菲<sup>1\*</sup>, 杨浩<sup>2</sup> (1.西南林业大学林学院, 云南昆明 650224; 2.国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

**摘要** 以夏玉米为研究对象, 首先获取拔节期、大喇叭口期、抽雄期和灌浆期 4 个关键生育期的地面高光谱数据, 并实测各生育期的地上生物量(AGB); 其次基于任意波段组合的波段优化算法, 分别构造 6 种不同波段组合形式的两波段和三波段光谱指数; 然后将构造的 12 种光谱指数与地面实测的 AGB 进行相关性分析, 从中筛选出相关性最好的光谱指数作为最优光谱指数构建夏玉米全生育期的 AGB 估算模型; 最后对最优光谱指数估算夏玉米各关键生育期 AGB 的性能进行系统评价。结果表明: 基于波段优化算法筛选的最优三波段光谱指数 TBI6(760, 925, 895) 与夏玉米各生育期和全生育期的 AGB 均具有良好的相关性, 其构建的 AGB 估算模型具有较高的精度, 可为夏玉米全生育期 AGB 的快速无损估算及 AGB 监测装置的集成与开发提供参考。

**关键词** 夏玉米; 地上生物量; 高光谱; 光谱指数; 波段优化算法

**中图分类号** S127 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2023)24-0005-04

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.24.002



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Estimation of Aboveground Biomass of Summer Maize Based on Optimized Spectral Index

WANG Han<sup>1,2</sup>, ZHANG Wang-fei<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>2</sup> (1. Forestry College of Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224; 2. National Agricultural Informatization Engineering Technology Research Center, Beijing 100097)

**Abstract** Summer maize was used as the research object, firstly, ground hyperspectral data were obtained for four key fertility stages (pulling stage, trumpeting stage, tasseling stage, filling stage), and the above-ground biomass (AGB) of each fertility stage was measured empirically. Secondly, waveband optimization algorithms based on arbitrary waveband combinations were constructed for six different waveband combination forms of two-band and three-band spectral indices, respectively. Then, the 12 constructed spectral indices were correlated with the ground-truthed AGB, from which the best correlated spectral index was selected as the optimal spectral index to construct the AGB estimation model for summer maize at full fertility. Finally, the performance of the optimal spectral index for estimating AGB at each critical fertility stage of summer maize was systematically evaluated. The results showed that the optimal three-band spectral index TBI6 (760, 925, 895) screened based on the band optimization algorithm had good correlation with the AGB of summer maize at all fertility stages and the whole fertility period, and the AGB estimation model constructed by it had high accuracy, which could provide a reference for the rapid and nondestructive estimation of AGB of summer maize at the whole fertility period and the integration and development of AGB monitoring devices.

**Key words** Summer maize; Above-ground biomass (AGB); Hyperspectral; Spectral index; Band optimization algorithm

研究表明, 农业系统的产量必须以 3% 的速度增长才能满足全球人口增加和耕地面积减少带来的粮食需求<sup>[1]</sup>, 玉米作为世界上最重要的粮食作物之一, 其产量和品质对全球粮食安全具有重要影响。地上生物量 (above-ground biomass, AGB) 是作物产量形成的基础, 是评价作物光能利用效率的重要指标之一<sup>[2]</sup>。准确、高效地获取玉米的 AGB 信息对快速评估玉米的生长状况具有重要意义, 有利于农田管理者的科学决策和精准管理<sup>[3]</sup>。传统的 AGB 测量方法多为人工破坏性取样, 该方法虽精度可靠, 但耗时费力, 且具有滞后性, 无法满足当代精准农业高通量、实时监测作物生长状况的需求<sup>[4]</sup>。因此, 低成本、高效、稳健获取作物表型状况的平台和技术是迫切需要的<sup>[5]</sup>。

遥感技术能够高时效、远距离、非接触地捕获作物冠层的辐射能量, 并通过分析捕获的信号进行处理, 进而获取作物冠层高通量的表型信息, 这可为快速无损监测作物 AGB 信息提供技术支撑<sup>[6-8]</sup>。由于形式简单、计算高效, 基于遥感技术获取的植被指数 (vegetation indices, VIs) 已成为监测作物 AGB 的重要工具<sup>[9-10]</sup>。例如, 岳继博等<sup>[11]</sup>基于 RADAR-SAT-2 全极化雷达和 GF1-WFV 的多光谱卫星数据, 利用随

机森林方的方法并使用光学 VIs 和雷达 VIs 较好地估算了冬小麦的 AGB; 肖武等<sup>[12]</sup>基于无人机多光谱影像利用红边波段的数据构建了多种 VIs, 结合一元回归、多元逐步回归和反向传播神经网络 3 种方法构建 AGB 估算模型, 结果表明神经网络模型估测精度最高; 王秀珍等<sup>[13]</sup>基于 ASD 高光谱数据以 VIs 为模型输入变量使用逐步回归方法估算水稻 AGB, 结果表明以蓝边一阶微分总和与红边一阶微分总和构成的 VIs 估算效果最优。上研究结果表明, 基于 VIs 监测作物的 AGB 状况虽然可行, 但还存在一定局限性, 主要体现在: 受生育期、品种等的影响, 基于 VIs 构建的不同时期的 AGB 监测模型不一致, 导致模型的通用性变差无法准确反映作物整个生长阶段的 AGB 状况。这一因素导致基于光学遥感技术监测作物多生育期的 AGB 状况还面临一定挑战。

高光谱技术的发展使高通量获取作物冠层精细的光谱信息成为可能<sup>[14-15]</sup>, 部分学者开始致力于寻找合适的光谱指数以进一步提高 VIs 估算作物 AGB 的精度<sup>[16-17]</sup>。基于任意波段组合的波段优化算法凭借其可充分挖掘光谱信息的高效性能受到诸多学者的青睐, 现有的研究中, 该算法通常用于两波段光谱指数的筛选, 而在三波段光谱指数中的应用却鲜有研究。该研究以地面便携式地物光谱仪 (ASD) 为遥感平台, 获取了夏玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄期和灌浆期的地面高光谱反射率数据, 系统评估了任意波段组合的两波段和三波段光谱指数估算夏玉米多生育期 AGB 的性能, 以寻找监测夏玉米 AGB 的最优指标, 以期 AGB 实时监测装置

**基金项目** 国家重点研发项目 (2021YFD2000102)。

**作者简介** 王涵 (1995—), 女, 河北辛集人, 硕士研究生, 研究方向: 农业遥感。\* 通信作者, 教授, 博士, 博士生导师, 从事农林业遥感研究。

**收稿日期** 2022-12-28

的研发与集成提供参考,也为精准农业的科学决策提供技术支撑。

## 1 材料与方法

**1.1 试验区及试验设计** 研究区位于北京市昌平区小汤山国家精准农业研究示范基地(40°10'60"N,116°26'30"E)。该地区年降水量为508 mm,年平均温度为13℃,是典型的暖温带半湿润大陆性季风气候。试验于2021年6—9月进行,采用完全随机试验,试验设计包括5个种植品种(郑单958、京九16、天赐19、京糯2008、农科糯336),4个密度(30 000、45 000、67 500、90 000株/hm<sup>2</sup>),3个随机重复,共80个小区,小区为3.6 m×2.5 m。

**1.2 ASD数据获取及处理** 于2021年7月13日、7月21日、8月5日、8月21日分别采集了玉米拔节期(S<sub>1</sub>)、大喇叭口期(S<sub>2</sub>)、抽雄期(S<sub>3</sub>)、灌浆期(S<sub>4</sub>)4次ASD数据。其中ASD使用的是英国ASD公司生产的FieldSpec 4,并用View Spec Pro软件将ASD测定的数据转换为原始反射率数据,为避免边缘及水汽等因素对冠层光谱的影像,该研究选择了400~1 200 nm的波段进行分析处理。所有ASD数据均选择在当地时间12:00—13:00的天气晴朗、无风、无云、光照稳定的条件下进行。每次采集时使用Spectralon白色参考面板进行校准,每5个小区校准一次,采集时探头位于冠层上方60 cm处。每个小区每次共采集10条数据,最终使用10条数据的平均值,以减小误差。

**1.3 地上生物量数据获取** 每期试验在完成ASD数据采集后,同步进行地面破坏性取样以获取准确的玉米AGB数据。取样方法:每个小区随机选取2株能够代表整个小区长势的玉米植株,并带回实验室进行烘干,称重。烘干时先在105℃下杀青30 min,然后在80℃下烘干至恒重并使用高精度天平测量干物质重量。最后由公式(1)计算得到玉米各小区的生物量数据。

$$AGB = \frac{(DW_1 + DW_2) \times N}{2 \times L \times W} \times 1000 \quad (1)$$

式中:DW<sub>1</sub>和DW<sub>2</sub>分别为2株玉米的干重;N为每个小区玉米株数;L为小区长度,该研究为3.6 m;W为小区宽度,该研究为2.5 m。

**1.4 光谱指数计算** 植被指数通过与生物量的经验关系被广泛用于生物量监测。目前,用于作物生物量监测的植被指

数大多是由3种形式发展而来的,即归一化差异植被指数、差异植被指数和比率植被指数。此外,通过添加一个常数,土壤调整光谱指数通常被用作估算作物的AGB。最佳植被指数和叶绿素指数也被证明与作物AGB联系紧密。因此,该研究选取了6种形式的两波段光谱指数:归一化插值光谱指数(NDSI)、差值光谱指数(DSI)、比率植被指数(RSI)、土壤调整光谱指数(SASI)、叶绿素光谱指数(CSI)、最佳光谱指数(OSI)。考虑到已报道的三波段光谱指数监测植被生理特性的敏感性,该研究使用了6种形式的三波段光谱指数。该研究使用的两波段光谱指数和三波段光谱指数见表1。

表1 该研究使用的光谱指数的计算公式

Table 1 Calculation formula for spectral index used in this study

光谱指数 Spectral index	计算公式 Calculation formula	参考文献 References
NDSI	$(R_{A1} - R_{A2}) / (R_{A1} + R_{A2})$	[18]
RSI	$R_{A1} / R_{A2}$	[19]
DSI	$R_{A1} - R_{A2}$	[18]
SASI	$(1+L) \times (R_{A1} - R_{A2}) / (R_{A1} + R_{A2} + L)$	[19]
CSI	$(R_{A1} - R_{A2}) / R_{A1}$	[18]
OSI	$(1+0.45) \times (2R_{A2} + 1) / (R_{A1} + 0.45)$	[18]
TBI 1	$(R_{A1} - R_{A2}) / (R_{A2} + R_{A3})$	[20]
TBI 2	$(R_{A1} - 1.8R_{A2}) / (R_{A3} - 1.8R_{A2})$	[20]
TBI 3	$R_{A1} / (R_{A2} \times R_{A3})$	[21]
TBI 4	$R_{A1} / (R_{A2} + R_{A3})$	[21]
TBI 5	$(R_{A1} - R_{A2}) / (R_{A1} + R_{A2} - 2R_{A3})$	[20]
TBI 6	$(R_{A1} - R_{A2} + 2R_{A3}) / (R_{A1} + R_{A2} + 2R_{A3})$	[20]

**1.5 模型构建与验证** 该研究于2021年采集了玉米4个生长时期共320组ASD和生物量实测数据,其中,重复1、重复2和重复3的数据(240组)被用于构建玉米生物量估算模型,重复4的数据(80组)被用于验证模型精度和稳定性,决定系数(R<sup>2</sup>)和均方根误差(RMSE)2个指标被用于评价构建的估算模型的精度和稳定性。

## 2 结果与分析

**2.1 不同生育期AGB分布** 统计各生育期用于建模和验证的AGB的范围、均值、标准差和变异系数,结果如表2所示。由表2可知,夏玉米各生长时期获取的AGB数据具有较大的变异系数,且建模集与验证集的标准差和变异系数具有相似的变化趋势,表明该数据可以用于进一步的分析。

表2 训练集和验证集的夏玉米AGB的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of AGB of summer maize for calibration and validation datasets

生育期 Growth stage	建模集 Calibration dataset				验证集 Validation dataset			
	范围 Range kg/hm <sup>2</sup>	均值 Mean kg/hm <sup>2</sup>	标准差 SD//kg/hm <sup>2</sup>	变异系数 CV//%	范围 Range kg/hm <sup>2</sup>	均值 Mean kg/hm <sup>2</sup>	标准差 SD//kg/hm <sup>2</sup>	变异系数 CV//%
S <sub>1</sub>	642~3 067	1 545	522	33.79	926~2 577	1 579	502	31.79
S <sub>2</sub>	2 827~7 956	5 111	1 314	25.71	2 311~8 275	5 001	1 547	30.93
S <sub>3</sub>	3 301~16 583	8 716	2 464	28.27	4 182~13 032	8 529	2 366	27.74
S <sub>4</sub>	4 900~23 683	10 293	3 536	34.35	4 167~15 170	10 421	2 811	26.97

**2.2 光谱指数与AGB相关性分析** 基于高光谱原始反射率数据,利用任意波段组合优化算法构建表1中6种形式的

两波段光谱指数,并绘制其与夏玉米AGB的相关性热力图(图1)。从图1可以看出,不同光谱指数与AGB的相关性变

化具有相似性,在波长为 720~760 和 820~840 nm 时,相关性较好;各光谱指数与 AGB 相关性最优时的光谱组合分别为 NDSI (826, 762)、RSI (826, 762)、DSI (833, 762)、SASI (833,

762)、CSI (826, 762) 和 OSI (879, 754), 对应的相关系数分别为 -0.82、-0.81、-0.82、-0.84、-0.81 和 0.79。

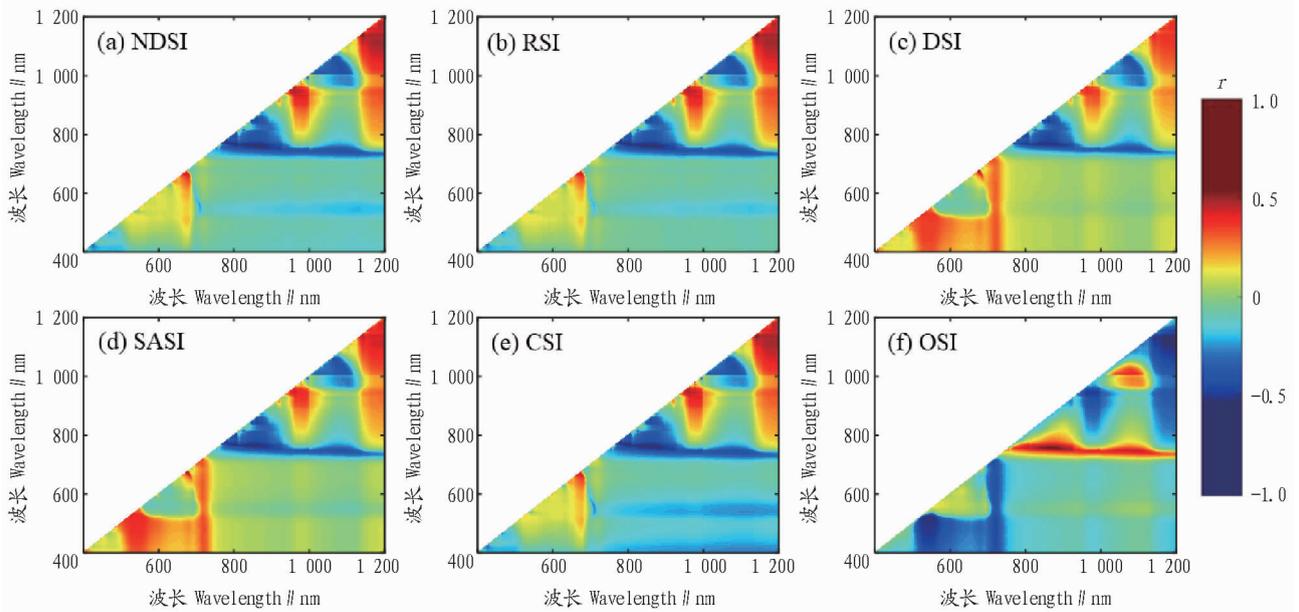


图 1 两波段光谱指数与 AGB 相关性分析

Fig.1 Correlation analysis between two-band spectral index and AGB

基于高光谱原始反射率数据,利用任意波段组合优化算法构建表 1 中 6 种形式的三波段光谱指数,并绘制其与夏玉米 AGB 的相关性热力图(图 2)。由图 2 可知,与夏玉米多生长期 AGB 联系最紧密的 6 种不同形式的三波段光谱指数分别为 TBI1 (762, 834, 691)、TBI2 (826, 400, 762)、TBI3 (495, 538, 400)、TBI4 (762, 825, 761)、TBI5 (726, 826, 400) 和 TBI6

(760, 925, 895), 对应的相关系数分别为 -0.83、-0.80、0.61、-0.82、-0.81 和 -0.85。对比两波段光谱指数可知,构造的三波段光谱指数大多数与夏玉米多生育期 AGB 联系更紧密,相关性更高,TBI3 结果较差主要是因为选择的波段相关性较差。这表明基于任意波段组合优化算法构建的三波段光谱指数估算夏玉米多生育期 AGB 是切实可行的。

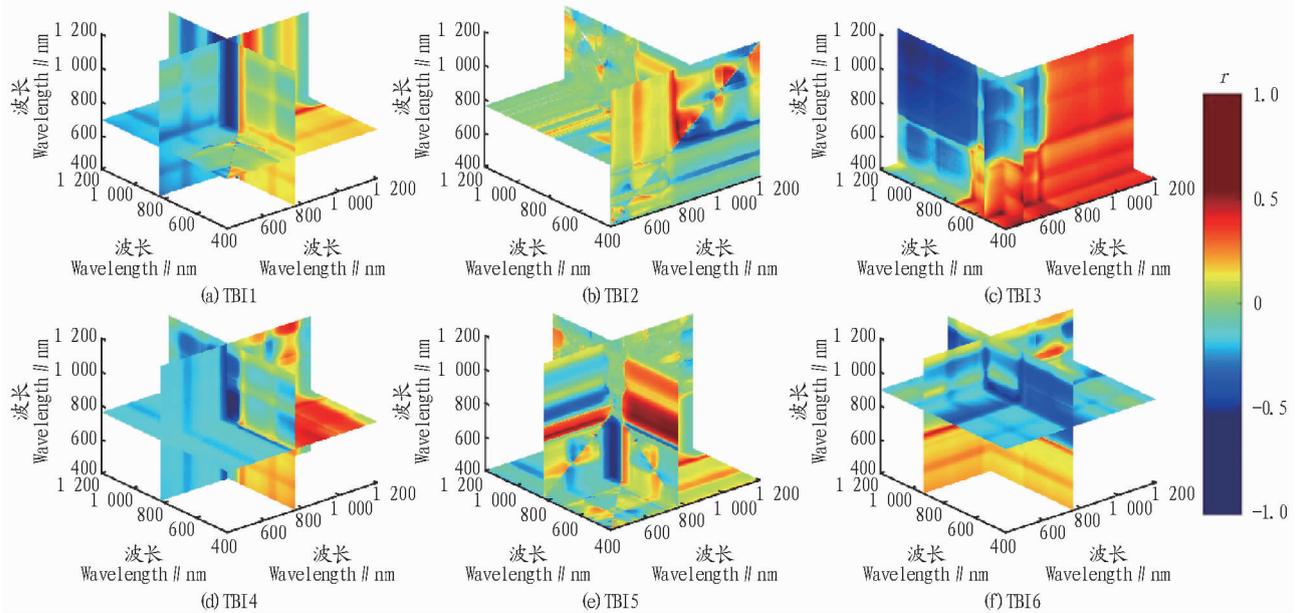


图 2 三波段光谱指数与 AGB 相关性分析

Fig.2 Correlation analysis between three-band spectral index and AGB

2.3 基于最优光谱指数估算夏玉米 AGB 由图 2 可知, TBI6 (760, 925, 895) 与夏玉米全生育期 AGB 相关性最高,联

系最紧密( $r = -0.85$ ), 该研究将其作为最优光谱指数构建 AGB 的估算模型。TBI6 (760, 925, 895) 与 AGB 的相关性示

意图及基于其构建的 AGB 估算模型效果如图 3 所示。由图 3 可知, TBI6(760, 925, 895) 与玉米全生育期 AGB 展现出良好的线性相关, 这表明基于任意波段组合的波段优化算法筛选的三波段光谱指数 TBI6(760, 925, 895) 可以跨越生育期对光谱指数估算 AGB 的影响, 但是对于 4 个生育期的相关性

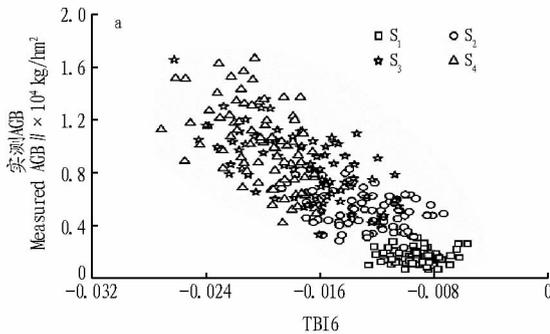


图 3 TBI6 与 AGB 的相关性 (a) 以及 TBI6 估算 AGB 效果 (b)

Fig.3 Correlation between TBI6 and AGB (a) and estimation of AGB effect by TBI6 (b)

为进一步验证基于任意波段组合的波段优化算法筛选的光谱指数 TBI6(760, 925, 895) 的可靠性, 该研究选取了已被证实可以良好估算夏玉米 AGB 的 2 种光谱指数 MSAVI 和 MSR, 并将 2 个光谱指数与夏玉米全生育期 AGB 进行相关性分析, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, MSAVI 和 MSR 在夏玉

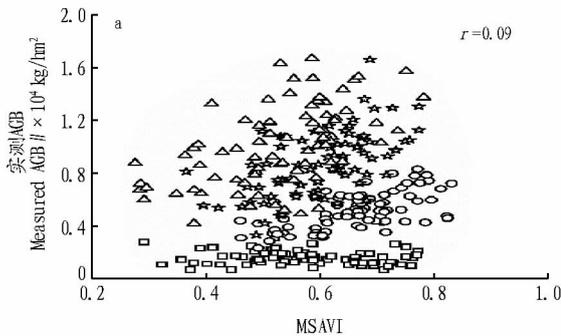


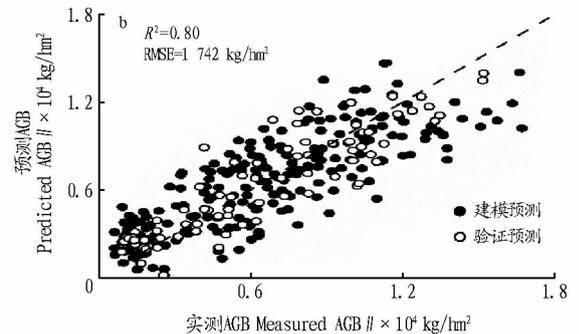
图 4 常规光谱指数 MSAVI (a) 和 MSR (b) 与全生育期 AGB 相关性分析

Fig.4 Correlation analysis between conventional spectral indices MSAVI (a) and MSR (b) and whole growth period AGB

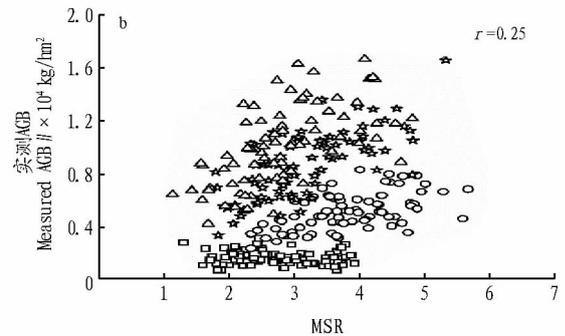
### 3 讨论

该研究基于任意波段组合算法探究了 12 种不同形式波段组合的光谱指数在估算夏玉米全生育期 AGB 中的应用, 由相关性分析结果可知, 与 AGB 相关性较好的波长多位于 720~760 和 820~840 nm, 其主要原因是不同处理方式 (密度、品种) 导致夏玉米各小区 AGB 的差异, 而这种差异在叶绿素的强吸收和强反射作用下, 更明显地体现在可见光区域 (红边和绿边区域), 而 820~840 nm 则与作物内蛋白质含量联系紧密, 进而能较好地反映 AGB 的变化。由筛选的最优光谱指数 TBI6(760, 925, 895) 与夏玉米全生育期 AGB 的相关性分析可知, 与其他 3 个生育期相比, 最优光谱指数与 AGB 在拔节期的相关性较差, 其原因是在这一时期, 夏玉米刚开始快速生长, 叶片未完全舒展, 冠层尚未完全封垄, 此时提取的光谱信息受土壤的影响较大, 不能较好地反映 AGB 的变化。与常规光谱指数相比, TBI6(760, 925, 895) 与 AGB 在单个生育期和全生育期均保持良好的线性关系, 表明基于

也存在差异,  $S_1$  (拔节期) 结果较差。基于 TBI6(760, 925, 895) 构建的 AGB 估算模型的验证和建模样本点都均匀分布在 1:1 线附近, 其中验证  $R^2$  为 0.80, RMSE 为 1 742 kg/hm<sup>2</sup>, 表明模型的精度较高, 可以用于夏玉米全生育期 AGB 的估算。



米单个生育期也展现出较好的线性相关, 然而与整个生育期的 AGB 相关性较差, 表明常规光谱指数估算 AGB 时受生育期的影响较大, 无法克服生育期的影响。这也表明基于任意波段组合的波段优化算法筛选的三波段光谱指数估算夏玉米全生育期 AGB 取得的效果较好。



波段优化算法筛选的三波段最优光谱指数可以克服生育期对 AGB 估算的影响。此外, 与复杂的机器学习算法 (如随机森林、支持向量机等) 相比, 该研究基于单变量线性回归方法构建的 AGB 估算模型复杂度和计算成本更低, 更有利于缺乏专业数理统计知识和遥感技能的农业工作者估算作物多生长阶段的 AGB 状况, 可为 AGB 监测装置的集成与研发提供参考。

### 4 结论

该研究基于夏玉米 4 个关键生育期的地面高光谱数据, 利用任意波段组合的波段优化算法构造了 12 种不同波段组合形式的光谱指数, 并建立了最优光谱指数与夏玉米全生育期 AGB 的定量关系模型。结果表明: 720~760 和 820~840 nm 的波段范围与夏玉米 AGB 状况联系紧密, 可为夏玉米 AGB 的快速准确估算提供有效信息。与常规光谱指数相比, 基于任意波段组合的波段优化算法筛选的最优三波段光

- [13] 兰晓燕,张元,朱龙波,等.艾叶化学成分、药理作用及质量研究进展[J].中国中药杂志,2020,45(17):4017-4030.
- [14] 胡倩,刘大会,曹艳.艾叶黄酮类化合物的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2019,10(12):3648-3653.
- [15] 段雨萍,孙炜炜,苗雨坤,等.艾叶总三萜的提取工艺优化及其抑菌活性[J].现代食品科技,2020,36(5):88-95.
- [16] 靳然,于密密,赵百孝,等.电感耦合等离子质谱测定不同产地艾叶的微量元素研究[J].环球中医药,2011,4(6):420-422.
- [17] 杨文婷,黄土棚,翁德会,等.蕲艾挥发油体外抑菌作用及其机理[J].北方园艺,2017(23):22-28.
- [18] 李小姐,陈志坚,关强强,等.艾叶提取物对大肠杆菌抑菌活性的研究[J].黑龙江畜牧兽医,2019(6):140-142,173.
- [19] 喻昕,尹美珍,王静晖,等.艾叶多糖的直接及免疫协同抗肿瘤作用[J].湖北理工学院学报,2014,30(3):53-56.
- [20] 李钦.艾蒿总黄酮诱导人肝癌细胞株 SMMC7721 凋亡及相关调控基因的研究[D].南昌:南昌大学,2016.
- [21] 刘瑞.艾叶提取物异泽兰黄酮诱导肝癌细胞凋亡机制的研究[D].广州:南方医科大学,2019.
- [22] 丁圆平,刘靖怡,田洋,等.艾叶挥发油对 A549 细胞的抑制作用[J].中成药,2019,41(9):2063-2068.
- [23] 李美萍,王微,张婕,等.艾叶提取物对黄嘌呤氧化酶的抑制作用及对高尿酸血症小鼠的降尿酸作用[J].现代食品科技,2019,35(1):22-30.
- [24] 胡岗,尹美珍,喻昕,等.艾叶多糖体外抗氧化作用研究[J].时珍国医国药,2015,26(11):2650-2652.
- [25] 尚喜雨,曲震理,刘尚书,等.艾叶提取物对 2 型糖尿病小鼠血糖和氧化应激的影响[J].中国现代医药杂志,2020,22(5):35-37.
- [26] 尹美珍,胡岗,苏振宏,等.艾叶多糖 I 型糖尿病小鼠的降血糖作用[J].时珍国医国药,2015,26(9):2072-2074.
- [27] 赵桂芝,王绪平,俞志明,等.艾叶挥发油对耳肿胀急性炎症模型小鼠的抗炎作用研究[J].浙江中医杂志,2016,51(4):288-289.
- [28] 吴子建,王斌,段文秀,等.顶空进样-气相色谱-质谱联用法检测 3 年陈艾条燃烧产物中挥发性成分[J].安徽中医药大学学报,2017,36(2):64-67.
- [29] 靳然,赵百孝,于密密,等.艾燃烧生成物组分固相微萃取气相色谱质谱法定性分析[J].北京中医药大学学报,2011,34(9):632-636.
- [30] 李炎强,胡军,张晓兵,等.艾叶及其烟气颗粒物挥发性成分的分析[J].烟草科技,2005,38(10):15-17,21.
- [31] 张潇予,李瑞,薛澄,等.基于 HS-GC-MS 分析不同艾绒比艾条及其艾烟中挥发性成分[J].中药材,2020,43(5):1164-1169.
- [32] 周次利,吴焕淦,窦传字,等.三年陈蕲艾艾烟化学成分的 GC-MS 分析[C]//中国针灸学会.2011 中国针灸学会年会论文集(摘要).北京:中国针灸学会,2011:4107-4116.
- [33] 许小宇,单思,王雯蕾,等.不同加工工艺艾条艾烟化学成分的 HS-GC-MS 分析[J].中华中医药杂志,2021,36(1):506-509.
- [34] 杨梅.艾叶燃烧产物有效成分药效研究[D].武汉:中南民族大学,2009.
- [35] 赵红梅,李小敏,关丽娟,等.爱婴病房艾条熏蒸对 HBsAg 灭活效果的研究[J].中华护理杂志,2000,35(1):11-12.
- [36] 孟笑男,许焕芳,崔莹雪,等.艾燃烧生成物对快速老化模型小鼠 P8 大脑单胺类神经递质含量的影响[J].中华中医药杂志,2014,29(9):2761-2763.
- [37] 王昊,杨佳,赵百孝,等.艾燃烧生成物对 ApoE 基因敲除小鼠脑内神经递质 5-HT、GABA 的影响[J].世界中医药,2016,11(8):1410-1413.
- [38] 杨佳.不同浓度艾烟长期干预对大鼠心血管疾病易感因子影响的实验研究[D].北京:北京中医药大学,2013.
- [39] 崔莹雪.艾灸及艾烟对 ApoE<sup>-/-</sup>小鼠动脉粥样硬化胆固醇代谢和炎症反应的影响[D].北京:北京中医药大学,2014.
- [40] 杨佳,赵百孝,韩丽,等.不同浓度艾烟长期干预对大鼠血清 vWF 及 ox-LDL 表达的影响[J].世界中医药,2013,8(8):859-861.
- [41] 韩丽,赵百孝,刘铜华,等.不同浓度艾烟干预对大鼠肺脏及血清 SOD、MDA 表达的影响[J].中国针灸,2015,35(7):687-690.
- [42] 韩丽.艾烟的毒理学实验研究[D].北京:北京中医药大学,2013.
- [43] 胡海,赵百孝,郭继红,等.艾烟冷凝物对肺泡 II 型上皮细胞 A549 形态及活性的影响[J].北京中医药大学学报(中医临床版),2012,19(6):13-15.
- [44] 胡海,赵百孝,郭继红,等.艾烟冷凝物对肺泡 II 型上皮细胞 A549 活性及凋亡的影响[J].北京中医药大学学报,2012,35(6):426-429,436.
- [45] DOU C Z, WU H G, MA X P, et al. Influence of moxa smoke on mitochondrial transmembrane potential and Bax/Bcl-2 in alveolar type II epithelial A549 cells[J]. Journal of acupuncture and tuina science, 2016, 14(5): 305-310.
- [46] 窦传字,吴焕淦,洪宗国,等.不同储存年份的艾条燃烧生成自由基的 ESR 波谱研究[J].世界中医药,2013,8(8):852-855.
- [47] 武娟,万定荣,江远明,等.艾灸疗法原材料艾绒的燃烧热值测定研究[J].上海针灸杂志,2020,39(12):1623-1627.

(上接第 8 页)

谱指数 TBI6(760, 925, 895) 构建的 AGB 估算模型精度和稳定性更高,可有效改善不同生育期 AGB 估算模型不一致问题。研究结果可用于设计快速高效的 AGB 诊断系统以及增强地面传感器与卫星传感器之间的联系,为夏玉米大面积 AGB 监测提供技术支持。

## 参考文献

- [1] SHU M Y, SHEN M Y, DONG Q Z, et al. Estimating the maize above-ground biomass by constructing the tridimensional concept model based on UAV-based digital and multi-spectral images [J]. Field crops research, 2022, 282: 1-12.
- [2] 低光下光能利用率与水稻生物量密切相关[J].农业科技与信息, 2017(16):6.
- [3] 张宁丹,任建强,吴尚蓉.基于花后累积地上生物量比例的冬小麦动态收获指数估算[J].农业工程学报,2022,38(7):189-199.
- [4] LI B, XU X M, ZHANG L, et al. Above-ground biomass estimation and yield prediction in potato by using UAV-based RGB and hyperspectral imaging [J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2020, 162: 161-172.
- [5] 韩文霆,汤建栋,张立元,等.基于无人机遥感的玉米水分利用效率与生物量监测[J].农业机械学报,2021,52(5):129-141.
- [6] 刘杨,黄珏,孙乾,等.利用无人机数码影像估算马铃薯地上生物量[J].遥感学报,2021,25(9):2004-2014.
- [7] NIU Y X, ZHANG L Y, ZHANG H H, et al. Estimating above-ground biomass of maize using features derived from UAV-based RRB imagery [J]. Remote sensing, 2019, 11(11): 1-21.
- [8] 张建,谢田晋,王楚锋,等.基于低空无人机被动遥感的作物株高及生物量自适应高精度解算方法:CN202011101682.7[P].2021-01-12.
- [9] 吴亚鹏,贺利,王洋洋,等.冬小麦生物量及氮积累量的植被指数动态模型研究[J].作物学报,2019,45(8):1238-1249.
- [10] MAIMAITIJIAN M, SAGAN V, SIDDIKE P, et al. Vegetation Index Weighted Canopy Volume Model (CVM<sub>VI</sub>) for soybean biomass estimation from Unmanned Aerial System-based RGB imagery [J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2019, 151: 27-41.
- [11] 岳继博,杨贵军,冯海宽.基于随机森林算法的冬小麦生物量遥感估算模型对比[J].农业工程学报,2016,32(18):175-182.
- [12] 肖武,陈佳乐,宣宏志,等.基于无人机影像的采煤沉陷区玉米生物量反演与分析[J].农业机械学报,2018,49(8):169-180.
- [13] 王秀珍,黄敬峰,李云梅,等.水稻地上鲜生物量的高光谱遥感估算模型研究[J].作物学报,2003,29(6):815-821.
- [14] KHAN A, VIBHUTE A D, MALI S, et al. A systematic review on hyperspectral imaging technology with a machine and deep learning methodology for agricultural applications [J]. Ecological informatics, 2022, 69: 1-12.
- [15] 张敏,郭涛,刘珂,等.基于高光谱植被指数的水稻 lai 遥感估算[J].西南农业学报,2022,35(11):2651-2658.
- [16] 曹中盛,李艳大,黄俊宝,等.监测花生叶面积指数和地上部生物量的最优植被指数及适宜波段带宽[J].中国油料作物学报,2022,44(6):1320-1328.
- [17] 陈小芳,李军,李新伟,等.基于高光谱的水稻生物量估测模型研究[J].安徽科技学院学报,2021,35(5):53-59.
- [18] 董新,杨震雷,张亦然,等.基于不同阶段分高光谱植被指数的牧区草场地上生物量估算[J].草地学报,2022,30(9):2438-2448.
- [19] 吾木提·艾山江,尼加提·卡斯木,陈晨,等.基于多维高光谱植被指数的冬小麦叶面积指数估算[J].农业机械学报,2022,53(5):181-190.
- [20] 肖璐洁,杨武德,冯美臣,等.基于高光谱植被指数的冬小麦估产模型[J].生态学杂志,2022,41(7):1433-1440.
- [21] 范玲玲.基于多源遥感数据的夏玉米冠层氮素遥感监测研究[D].合肥:安徽大学,2020.