

# 不同灌水处理下冬小麦地上干生物量的高光谱监测

杨晨波 冯美臣\* 孙 慧 王 超 杨武德 谢永凯 靖秉翰

(山西农业大学农学院, 山西太谷 030801)

**摘 要** 地上干生物量是反映作物生长发育和产量的重要指标。本试验通过不同的灌溉处理,研究了冬小麦生育期地上干生物量的变化规律,分别利用多元线性回归(MLR)和连续投影算法-MLR(SPA-MLR)构建了冬小麦地上干生物量光谱监测模型。结果表明:拔节期+孕穗期+开花期+灌浆期的灌溉方案有利于生物量积累;基于 SPA-MLR 构建的预测模型精度均高于 MLR 预测模型,其中,以开花期模型最优, $R^2$ 达到了 0.96, RMSE 为 0.092,验证集的  $R^2$  为 0.76, RMSE 为 0.18;综合冬小麦主要生育时期(拔节期至灌浆期)的预测模型的  $R^2$  达到了 0.64, RMSE 为 0.30,验证集的  $R^2$  为 0.54, RMSE 为 0.26,可以实现拔节期至灌浆期冬小麦地上干生物量的预测。本研究可为利用高光谱遥感技术预测冬小麦地上干生物量提供技术支持。

**关键词** 冬小麦; 高光谱; 干生物量; 连续投影算法; 回归分析

**Hyperspectral monitoring of aboveground dry biomass of winter wheat under different irrigation treatments.** YANG Chen-bo, FENG Mei-chen\*, SUN Hui, WANG Chao, YANG Wu-de, XIE Yong-kai, JING Bing-han (College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China).

**Abstract:** Aboveground dry biomass is an important indicator for crop growth and yield. An experiment with different irrigation treatments was carried out to examine the changes of aboveground dry biomass of winter wheat. The predictive models for monitoring aboveground dry biomass were established using the methods of MLR and SPA-MLR. The results showed that irrigation at the jointing stage, booting stage, flowering stage and filling stages was a favorable method for aboveground biomass accumulation of winter wheat. The predictive models established with the method of SPA-MLR were more accurate than those built with the MLR method. Among them, the predictive model at the flowering stage of winter wheat performed best, with  $R^2=0.96$ ,  $RMSE=0.092$  and  $R^2=0.76$ ,  $RMSE=0.18$  for the calibration set and validation set, respectively. The predictive model covering all the growth stages from the jointing stage to filling stage of winter wheat achieved good prediction with  $R^2=0.64$ ,  $RMSE=0.30$  and  $R^2=0.54$ ,  $RMSE=0.26$  for the calibration set and validation set, respectively. Such a result indicated that this model could be potentially used to monitor the aboveground dry biomass in the winter wheat field as good predictive accuracy under extensive growth stages was achieved. Our results provide technical support for predicting the aboveground dry biomass of winter wheat using the hyperspectral technology.

**Key words:** winter wheat; hyperspectral; dry biomass; successive projections algorithm (SPA); regression analysis.

生物量是指某一时刻单位面积内作物现存有机物的总量,它不仅反映作物长势,还可以为作物产量预测提供参考。同时,农田生物量是全球碳循

环的重要组成部分,通过监测农田作物生物量可以为陆地生态系统中的能量平衡和能量流动等研究提供基础数据(Bai *et al.*, 2007; 李卫国等, 2007; 侯学会等, 2012)。传统测定生物量的方法破坏性大,而且费时费力,实时性差,因此,寻找一种快速监测生物量的方法,对精确农业的发展具有重要意义。

国家自然科学基金项目(31871571)和山西省科技攻关项目(201603D221037-3, 20150311002-4)资助。

收稿日期: 2018-09-10 接受日期: 2019-02-25

\* 通讯作者 E-mail: fmc101@163.com

高光谱遥感具有分辨率高,波段连续性强,光谱信息量大等特点,可以对目标物进行直接识别和微弱光谱差异分析(王大成等,2008;陈智芳等,2017),因此,高光谱遥感技术可以为作物生理生态参数的实时监测提供技术支持。目前,高光谱遥感技术可以实现对小麦叶绿素(杨海清等,2009;杨峰等,2010;潘蓓等,2013)、氮磷等元素含量(Chen *et al.*,2002;林芬芳等,2009;刘冰峰等,2012;李颖等,2014)、覆盖度(Vaesen *et al.*,2001;姚付启等,2012)、光合有效辐射(杨飞等,2008;李宗南等,2014)、叶面积指数(Patel *et al.*,2001;夏天等,2012;刘轲等,2016)、生物量(王大成等,2008;侯学会等,2012;王备战等,2012)、叶水势(Vila *et al.*,2011;Chen *et al.*,2012;陈智芳等,2017)等的监测。其中关于冬小麦生物量的研究已有很多报道,侯学会等(2012)利用高光谱遥感技术估算冬小麦生物量,得出冬小麦生物量与冠层光谱在552和721 nm处具有显著相关,利用红边位置构建了小麦生物量监测模型, $R^2$ 达到了0.829。杨庆锋等(2008)研究发现,利用560和1220 nm处光谱反射率构建的植被指数预测冬小麦地上干生物量的效果最好,模型 $R^2$ 为0.714。贺佳等(2017)研究发现,冬小麦生物量与冠层光谱670和930 nm附近波段具有较高的相关性,所构建的全生育期和不同生育时期预测模型 $R^2$ 均达到了0.923以上。郑玲等(2013)构建了小麦生物量监测系统,为快速无损地测量小麦生物量提供了技术支持。但上述研究主要是利用植被指数来建立模型,并未对光谱数据进行筛选,可能会对模型精度造成很大影响。成忠等(2010)、孙鸿烨(2014)、王劼等(2011)利用连续投影算法(SPA)对小麦近红外光谱数据进行了选择,结果表明,利用SPA对光谱数据进行选择,能够消除原始光谱数据中的冗余信息,可以使模型结构更加简洁,并提高模型精度。

研究证明,对冬小麦进行合理的灌溉,可以有效地提高冬小麦地上干生物量,从而为提高产量提供了可能(王振华等,2015;姚宁等,2015)。冬小麦不同生育时期的耗水特性不同,因此,研究不同灌水处理下冬小麦冠层光谱的变化规律,具有重要的意义。国内外的研究大多集中在不同氮素水平(贺佳等,2017;贾学勤等,2018)下的干生物量光谱监测,对不同灌水处理下冬小麦地上干生物量进行光谱监测的研究较少。因此,笔者研究不同灌水处理下冬小麦地上干生物量的变化规律,利用多元线性回归

(MLR),分别基于全光谱波段和连续投影算法(SPA)提取的敏感波段,综合不同生育时期的生物量数据,构建了冬小麦不同生育时期及全生育期的地上干生物量预测模型,以期实现冬小麦地上干生物量的快速无损监测,为小麦生产的科学管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与试验设计

试验冬小麦品种为“长4738”和“中麦175”。

试验地点位于山西农业大学农作站,试验于2015年10月—2016年6月进行,5个灌水处理,分别为:雨养(T1)、拔节期+孕穗期+开花期+灌浆期(T2)、拔节期+孕穗期+灌浆期(T3)、拔节期+开花期(T4)、拔节期+灌浆期(T5)。灌溉量为将土壤含水量调整至田间持水量的80%,灌溉深度为1 m。试验采用随机区组设计,重复3次,小麦种植行距为20 cm,小区面积为3 m<sup>2</sup>。氮磷钾肥为基肥,在播种前一次性施入,施入量分别为:氮肥225 kg·hm<sup>-2</sup>、磷肥120 kg·hm<sup>-2</sup>、钾肥120 kg·hm<sup>-2</sup>。其他田间管理一致。

### 1.2 冠层光谱测定

冠层光谱测定采用美国ASD公司生产的Field-Spec 3.0背挂式野外高光谱辐射仪,波段范围为350~2500 nm,光谱仪现场角度为25°,其中350~1000 nm光谱采样间隔1.4 nm,光谱分辨率3 nm;1000~2500 nm光谱采样间隔2 nm,光谱分辨率10 nm。为了减少光照变化带来的误差,光谱采集时间安排在10:00—14:00,选择晴朗无云,无风或风力小于3级的天气进行测量;探头置于冠层上方1.0 m处,与冠层面保持垂直。每个小区测量3个点,每一点的测量重复10次,每次测量前使用白板校正。

### 1.3 地上干生物量测定

在光谱测定位置采集行长10 cm的冬小麦植株,剪去根部装入自封袋中带回室内称重,然后放入烘箱,在105℃下杀青30 min,之后将温度降至80℃烘24 h至恒重(每隔2 h左右测量一次,前后两次测量差值<5%),再换算成单位面积上的冬小麦地上干生物量。

### 1.4 数据处理

连续投影算法(SPA)是一种使矢量空间共线性最小化的前向变量选择算法,它的优势在于可以从全波段中提取出几个特征波长,能消除原始光谱矩

阵中冗余的信息,可用于光谱特征波长的筛选。

多元统计分析能够在多个对象和多个指标互相关联的情况下分析它们的统计规律,很适合农业科学研究的特点。

本研究利用 SPA 对冬小麦冠层光谱进行选择,提取敏感波段;利用多元线性回归 (MLR) 进行模型构建。

为确保模型精度,本研究将每个生育时期 30 个样本以及全生育期 150 个样本,用含量梯度法 (何勇,2016)分为两部分,其中,每个单生育时期 20 个样本用于模型构建,10 个样本用于模型验证;全生育期 100 个样本用于模型构建,50 个样本用于模型验证。本研究采用决定系数 ( $R^2$ ) 和均方根误差 (RMSE) 来评价模型质量。其中, $R^2$ 越接近 1,RMSE 越接近 0,说明模型的预测效果越好。

使用 ViewSpecPro 6.0 对光谱数据进行预处理, MATLAB 2010 提取敏感波段,Excel 2010 和 SPSS 20 进行数据整理及建模,OriginPro 8.0 制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 地上干生物量的变化规律

由图 1 可以看出,冬小麦地上干生物量随着生育时期的推进不断增长。拔节期到开花期的生物量积累速度最快,主要是由于这段时间小麦叶面积迅速增长,光合作用加强。而 T1 处理在抽穗期到开花期阶段出现生物量下降的现象,是由于该时期没有充足的降水,导致养分积累不足,植株自身生存消耗的有机物质大于光合作用积累的有机物质。

受水分胁迫的影响,T1 处理的干生物量在整个生育期均低于其他处理。T2 和 T3 处理在孕穗期进

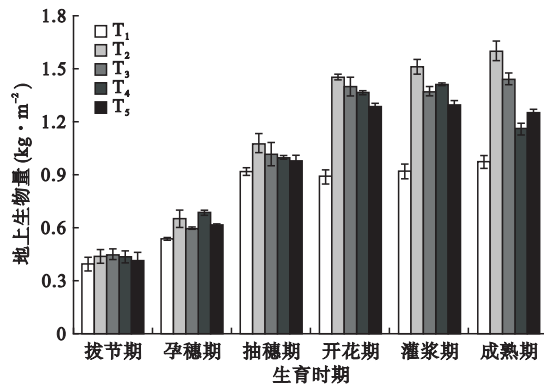


图 1 不同处理下冬小麦地上干生物量变化

Fig.1 Changes of aboveground dry biomass of winter wheat under different treatments

行灌水处理后至开花期,其生物量积累速度明显高于 T4 和 T5,而这段时间是冬小麦地上干生物量的快速积累时期,说明在小麦孕穗期时灌溉有助于冬小麦的生长。T2 和 T4 处理在开花期灌水后生物量都有所增长。灌浆期进行灌水,T2 和 T3 处理的生物量都有所增长,但 T5 处理有所下降,可能是由于植株长期干旱胁迫引起生育期提前,植株出现衰老现象。成熟期 T4 处理生物量较灌浆期出现了明显的下降。由此可见,灌浆期灌溉能延缓作物衰老。表明拔节期、孕穗期、开花期和灌浆期灌溉都能提高冬小麦的地上干生物量。

### 2.2 冬小麦冠层光谱反射率变化

以 T2 处理为例,分析了两个品种不同生育时期 (拔节期至灌浆期) 冠层光谱反射率的变化 (图 2a, b)。为降低噪声干扰,将原始光谱数据 350 ~ 2500 nm 范围内受水汽影响的 1350 ~ 1400、1800 ~ 1950、2450 ~ 2500 nm 波段剔除。从图 2 可以看出,不同生育时期光谱曲线的变化趋势类似。在 520 nm 附近形成一个小的反射峰,分别在 1000 和 1400 nm 附近形成两个吸收谷。在近红外波段的 760 ~ 1100 nm 区域,“中麦 175”的冠层光谱反射率普遍高于“长 4738”。同时,随着生育时期的推进,光谱反射率逐渐增大,并在抽穗期达到最大值。随后由于冠层结构的变化,导致光谱反射率逐渐下降,但“中麦 175”在灌浆期的光谱反射率与开花期相差不大,说明不同品种小麦的冠层光谱变化略有差异。

开花期两个品种不同处理的光谱变化类似 (图 2c, d),在 760 ~ 1100 nm 区域内表现为 T4、T2、T5、T1、T3 依次降低,说明不同灌水处理对不同品种造成的光谱反射率变化有一致性。但“中麦 175”的光谱反射率要普遍高于“长 4738”,这可能是由于品种特性所造成的。

### 2.3 冬小麦地上干生物量的敏感波段提取

利用 SPA 算法提取冬小麦地上干生物量的敏感波段 (表 1)。从表 1 可以看出,冬小麦各个生育时期的敏感波段在可见光和近红外光区域都有分布,大多集中在 680 nm (676 和 684 nm)、730 nm (726、727、732 和 735 nm)、1000 nm (936、1060 和 1070 nm)、2000 nm (1954、2002 和 2003 nm) 以及 2440 nm (2414、2418、2438、2444、2446、2447 和 2449 nm) 等波段附近;除孕穗期外,其余时期的敏感波段均包含可见光和近红外波段。表明冬小麦地上干生物量与近红外波段光谱反射率具有更为重要的关系。

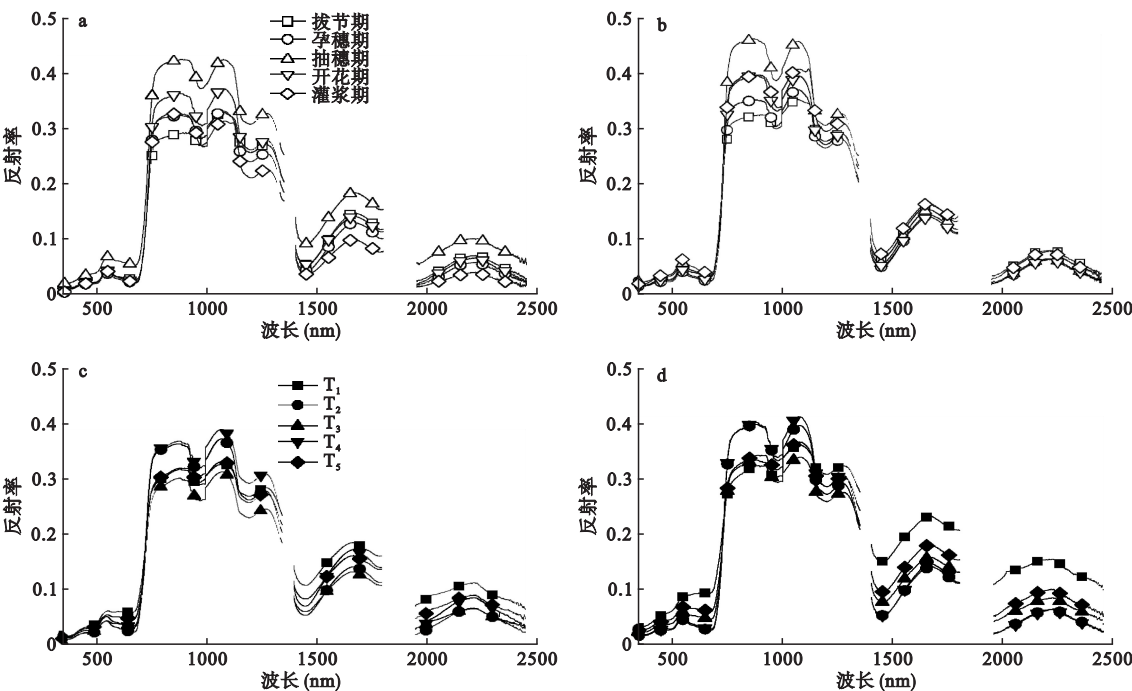


图 2 冠层光谱反射率变化  
Fig.2 Changes of canopy spectral reflectances  
a,c 为“长 4738”,b,d 为“中麦 175”。

| 表 1 地上干生物量的敏感波段  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| Table 1 Sensitive wave band of aboveground dry biomass |                                     |
| 生育期  | 敏感波段 (nm)                           |
| 拔节期  | 350、1401、2414、2438                  |
| 孕穗期  | 2418、2447                           |
| 抽穗期  | 732、1302、2002、2446                  |
| 开花期  | 350、684、727、766、1060、2003、2210、2444 |
| 灌浆期  | 735、1328、1954                       |
| 全生育期   | 352、676、726、936、1070、1214、1420、2449 |

2.4 模型构建与验证

2.4.1 基于 MLR 的冬小麦地上干生物量监测 本研究利用 MLR 构建了基于全光谱波段的冬小麦地上干生物量监测模型,由于 MLR 的数学特性,模型自变量个数不会大于样本个数。从表 2 可以看出,每个生育时期模型提取的敏感波段为 19 个,全生育

| 表 2 MLR 模型的构建与验证                                   |        |         |                   |
|--|--------|---------|-------------------|
| Table 2 Model construction and verification by MLR |        |         |                   |
| 生育期  | 敏感波段数量 | $R_p^2$ | RMSE <sub>p</sub> |
| 拔节期  | 19     | 0.24    | 0.21              |
| 孕穗期  | 19     | 0.10    | 0.27              |
| 抽穗期  | 19     | 0.04    | 3.09              |
| 开花期  | 19     | 0.72    | 0.28              |
| 灌浆期  | 19     | 0.14    | 0.77              |
| 全生育期   | 90     | 0.32    | 0.38              |

期模型的敏感波段为 90 个。除开花期模型( $R_p^2 = 0.72$ ,RMSE<sub>p</sub> = 0.28)外,其他模型精度均较低,不能用于冬小麦地上干生物量的预测。并且,由于 MLR 构建模型的敏感波段数量多,和建模样本的数量有很大关系,从而限制了开花期模型的使用范围。

2.4.2 基于 SPA-MLR 的冬小麦地上干生物量监测

表 3 为 SPA-MLR 模型的构建与验证,从表 3 可以看出,各模型的特征波段与地上干生物量的关系均达到了极显著水平。不同生育时期光谱模型精度差别较大,拔节期、抽穗期和灌浆期模型的  $R^2$  均达到了 0.65 以上,但预测精度很差,仅为 0.06、0.29 和 0.14。这可能是由于不同重复的小麦拔节、抽穗和灌浆的时间跨度较大,使得小麦的长势不均一,造成数据间差异较大,验证精度不高。开花期模型  $R^2$  达

| 表 3 SPA-MLR 模型的构建与验证                                   |         |         |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Table 3 Model construction and verification by SPA-MLR |         |         |         |         |         |
| 生育期  | 建模集     |         |         | 验证集     |         |
|  | $R$     | $R^2$   | RMSE    | $R^2$   | RMSE    |
| 拔节期  | 0.83 ** | 0.68 ** | 0.04 ** | 0.06    | 0.06    |
| 孕穗期  | 0.72 ** | 0.52 ** | 0.12 ** | 0.58 *  | 0.06 *  |
| 抽穗期  | 0.81 ** | 0.65 ** | 0.23 ** | 0.29    | 0.22    |
| 开花期  | 0.98 ** | 0.96 ** | 0.09 ** | 0.76 ** | 0.18 ** |
| 灌浆期  | 0.83 ** | 0.69 ** | 0.22 ** | 0.14    | 0.27    |
| 全生育期   | 0.80 ** | 0.64 ** | 0.30 ** | 0.54 ** | 0.26 ** |

\* 代表显著水平, \*\* 代表极显著水平。



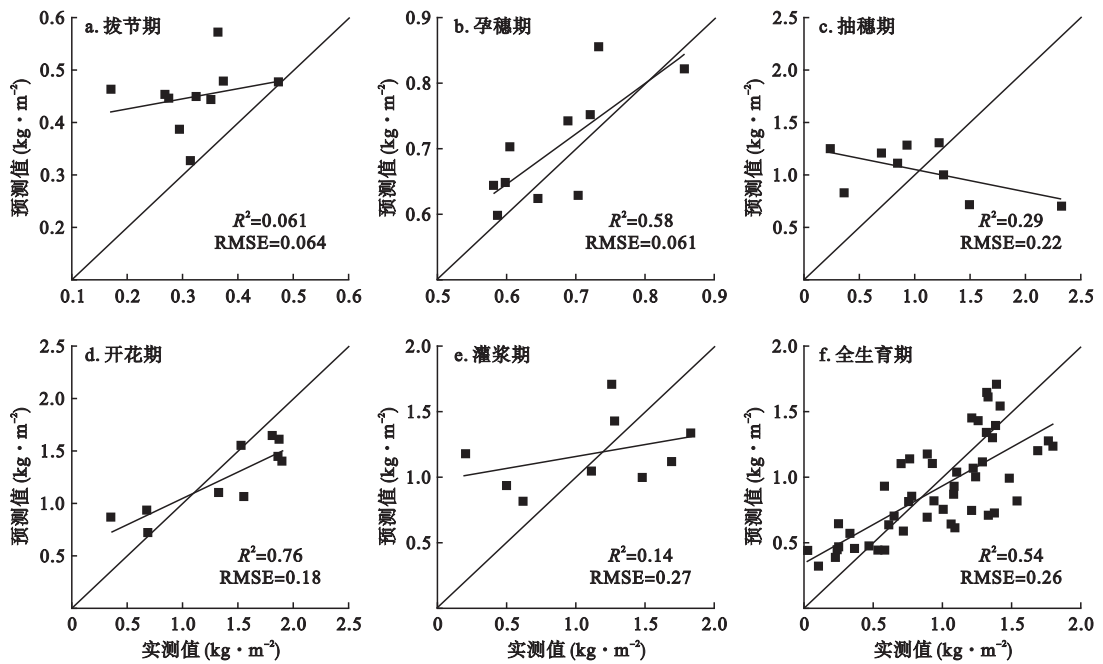


图3 预测值与实测值比较  
Fig.3 Comparison of predicted and measured values

到了0.96, RMSE为0.09, 预测精度最高, 效果最好。孕穗期模型的次之, 但模型对预测结果有明显的高估(图3), 预测结果会存在较大误差, 这可能是由于数据采集时处于孕穗前期, 穗还没有完全孕育成型, 也可能是由于T2和T3处理在孕穗期得到了一定量的灌溉, 使得一部分小麦的生物量得到了有效积累, 造成小麦的长势差异。全生育期模型 $R^2$ 为0.64, RMSE为0.30, 验证模型的 $R^2$ 为0.54, RMSE为0.26, 模型效果较差, 这可能是由于不同生育时期之间的数据差异较大, 对模型构建造成了较大的影响。

结果表明, 相比于只利用MLR建模, 利用SPA-MLR构建的模型, 不仅选取的敏感波段物理意义明确, 而且降低了敏感波段的数量, 使模型结构更加简洁, 验证精度也更高。

### 3 讨论与结论

据测定, 每降5 mm的雨, 约等于向每亩地浇 $3.335\text{ m}^3$ 水, 可使旱地浸透3~6 cm, 但试验地点在试验进行期间的降雨多为小雨, 且次数很少, 并不能达到试验灌水处理要求。因此, 受水分胁迫影响, T1处理每个生育时期的地上干生物量均低于其他处理; 相比于T2和T3处理, T4和T5处理在冬小麦生长前期(孕穗期)没有得到足够的水分, 对地上干生物量积累造成的影响是后期(开花期和灌浆期)

灌溉不能弥补的。相比于T2处理, T3处理在开花期没有进行灌溉, 导致在灌浆期地上干生物量有一定的下降, 而T2处理有一定的增长。随后, 两个处理在灌浆期均进行了灌溉, 地上干生物量均得到了增长, 说明在开花期和灌浆期进行灌溉是必需的。结果表明, 对冬小麦不同生育时期进行合理灌溉有利于冬小麦地上干生物量的积累, 这与姚宁等(2015)和Zhang等(2018)的研究结果一致。此外, 侯学会等(2012)研究发现, 冬小麦地上干生物量在拔节期至灌浆期呈整体上升趋势, 但在成熟期会有小幅的下降。而本研究T2处理地上干生物量从拔节期至成熟期呈上升趋势, 在成熟期并没有下降, 而T4和T5处理却出现了这种现象, 这可能是由于前期水分亏缺导致的。但也有研究表明, 灌浆前期干旱有利于促进灌浆和增加籽粒重量(房稳静等, 2006), 而本研究在灌溉时正处于冬小麦灌浆后期, 使得植株因叶片脱落等原因损失的生物量低于籽粒重量增加所积累的生物量。

不同灌水处理通过影响小麦植株的生长, 进而影响其冠层光谱反射率, 这是由于干旱会导致叶片叶面积减少, 叶绿素含量降低, 细胞代谢受到影响, 从而影响细胞膜结构(陈智芳等, 2017)。本试验以T2处理为例, 对应冬小麦不同生育时期变化发现, 随着生育时期的递进, 光谱反射率先增后减, 在抽穗

期达到最大值,这是抽穗期后叶片逐渐衰老,叶片组织发生变化导致的。同时,本研究给出了两个品种开花期的光谱变化曲线,结果表明,在短波近红外区域,T4、T2、T5、T1、T3处理的光谱反射率依次降低,这是由于相比于其他处理,T4和T2处理在开花期均进行了灌溉,使得小麦植株不同器官间的水分分配进行了重新调整,冠层含水量发生变化(Rock *et al.*, 1986),从而改变了其冠层光谱反射率;抽穗期T3和T5处理的光谱反射率相差不大,但均高于T1处理,而在开花期T1处理的光谱反射率高于T3处理,可能是由于少量的降雨导致的。

冬小麦地上干生物量与可见光和近红外波段的反射率有关,这是由叶片的组织决定的,也是利用高光谱遥感技术对冬小麦地上干生物量进行监测的生理基础。很多研究表明(杨庆锋等, 2008; Zheng *et al.*, 2015; 刘斌等, 2016; 贺佳等, 2017),冬小麦生物量与光谱反射率之间存在良好的相关性。本研究通过SPA算法提取冬小麦地上干生物量的敏感波段,发现这些敏感波段多集中在680、730、1000、2000和2440 nm等波段附近,其中680 nm是构建植被指数常用的波段之一(王超, 2016),而该波段附近的665 nm则是叶绿素a的敏感波段(Yacobi *et al.*, 2011); 730 nm波段属于“红边”位置的范围,Hansen等(2003)研究认为,“红边”区域包含的光谱信息能够表征87%的地上生物量、叶面积指数、叶绿素密度等信息;Zhang等(2012)研究认为,920~1120 nm波段很有可能与叶片水分和干物质的吸收有关;Zhao等(2006)研究指出,叶片水分能够影响2000~2300 nm波段区域内的光谱特征;王超(2016)对冬小麦长势指标的特征波段进行了提取,结果显示,2440 nm附近波段与植株含水量、叶绿素密度以及植株氮素积累均有密切关系。从光谱学角度来看,地上干生物量与光谱波段之间并没有直接的关系,但地上干生物量和叶绿素、水分、氮素等能引起光谱吸收变化的生化物质却有密切的关系(王超, 2016),这也是本研究不同监测模型中存在相似敏感波段的原因。冬小麦地上干生物量与可见光和近红外波段反射率的综合效应相关,这和杨庆锋等(2008)、贺佳等(2017)的研究结果类似,但具体波段却不一致,这可能与提取敏感波段的方法不同有关。

本研究发现,利用SPA-MLR构建的不同生育时期模型中,拔节期模型验证精度很低,主要因为该时期小麦尚未完全封垄,土壤背景噪声较大,导致

SPA算法提取的敏感波段异常,不利于模型的构建;抽穗期和灌浆期,模型验证 $R^2$ 仅为0.29和0.14,与孕穗期和开花期相比有较大差距,这可能是由于虫害、干旱等自然原因导致生物量和叶片光谱反射率的关系异常;全生育期(拔节期至灌浆期)预测模型的精度低于开花期,可能是由于不同生育时期数据离散性较大导致的。同时,仅利用MLR所构建的模型,其提取的敏感波段不仅数量多,而且这些波段之间存在很强的共线性,模型精度很低,适用性不强;而利用SPA进行敏感波段的提取,可以筛选出物理意义明确的波段,减少波段数量,从而简化模型结构,提高模型精度。

本研究表明,以拔节期、孕穗期、开花期和灌浆期结合的灌溉方案生物量最大,是提高冬小麦地上干生物量的最优灌溉方案。利用SPA-MLR得到的冬小麦开花期和全生育期地上干生物量监测模型,验证 $R^2$ 分别为0.76和0.54。天气、病虫害等不定性因素对灌溉处理、植株生长以及构建模型造成的影响,仍有待进一步分析。

## 参考文献

- 陈智芳, 宋妮, 王景雷, 等. 2017. 基于高光谱遥感的冬小麦叶水势估算模型. 中国农业科学, **50**(5): 871-880.
- 成忠, 张立庆, 刘赫扬, 等. 2010. 连续投影算法及其在小麦近红外光谱波长选择中的应用. 光谱学与光谱分析, **30**(4): 949-952.
- 房稳静, 张雪芬, 郑有飞. 2006. 冬小麦灌浆期干旱对灌浆速率的影响. 中国农业气象, **27**(2): 98-101.
- 何勇. 2016. 光谱及成像技术在农业中的应用. 北京: 科学出版社.
- 贺佳, 刘冰峰, 郭燕, 等. 2017. 冬小麦生物量高光谱遥感监测模型研究. 植物营养与肥料学报, **23**(2): 313-323.
- 侯学会, 牛铮, 黄妮, 等. 2012. 小麦生物量和真实叶面积指数的高光谱遥感估算模型. 国土资源遥感, **24**(4): 30-35.
- 贾学勤, 冯美臣, 杨武德, 等. 2018. 基于多植被指数组合的冬小麦地上干生物量高光谱估测. 生态学杂志, **37**(2): 424-429.
- 李颖, 薛利红, 潘复燕, 等. 2014. 氮磷互作对水稻冠层光谱的影响及其PNN识别. 中国农业科学, **47**(14): 2742-2750.
- 李卫国, 赵春江, 王纪华, 等. 2007. 遥感和生长模型相结合的小麦长势监测研究现状与展望. 国土资源遥感, **19**(2): 6-9.
- 李宗南. 2014. 基于光能利用率模型和定量遥感的玉米生长监测方法研究(博士学位论文). 北京: 中国农业科学院.
- 林芬芳, 丁晓东, 付志鹏, 等. 2009. 基于互信息理论的水稻磷素营养高光谱诊断. 光谱学与光谱分析, **29**(9): 2467-2470.

- 刘 斌, 任建强, 陈仲新, 等. 2016. 冬小麦鲜生物量估算敏感波段中心及波宽优选. 农业工程学报, **32**(16): 125-134.
- 刘 轲, 周清波, 吴文斌, 等. 2016. 基于多光谱与高光谱遥感数据的冬小麦叶面积指数反演比较. 农业工程学报, **32**(3): 155-162.
- 刘冰峰, 李 军, 赵刚峰, 等. 2012. 夏玉米叶片全氮含量高光谱遥感估算模型研究. 植物营养与肥料学报, **18**(4): 813-824.
- 潘 蓓, 赵庚星, 朱西存, 等. 2013. 利用高光谱植被指数估测苹果树冠层叶绿素含量. 光谱学与光谱分析, **33**(8): 2203-2206.
- 孙鸿烨. 2014. 近红外光谱建模中的变量选择方法研究(硕士学位论文). 长春理工大学.
- 王 超. 2016. 基于化学计量学方法的冬小麦长势光谱信息提取及监测研究(博士学位论文). 太谷: 山西农业大学.
- 王 劼, 秦琳琳, 吴 刚. 2011. 连续投影算法在小麦高光光谱定量分析中的应用. 电子技术, **38**(9): 13-15.
- 王备战, 冯 晓, 温 暖, 等. 2012. 基于 SPOT-5 影像的冬小麦拔节期生物量及氮积累量监测. 中国农业科学, **45**(15): 3049-3057.
- 王大成, 王纪华, 靳 宁, 等. 2008. 用神经网络和高光谱植被指数估算小麦生物量. 农业工程学报, **24**(supp. 2): 196-201.
- 王振华, 郑旭荣, 姜国军. 2015. 不同灌水量对滴灌春小麦生长与生理指标的影响. 核农学报, **29**(3): 538-548.
- 夏 天, 吴文斌, 周清波, 等. 2012. 基于高光谱的冬小麦叶面积指数估算方法. 中国农业科学, **45**(10): 2085-2092.
- 杨 飞, 张 柏, 宋开山, 等. 2008. 玉米光合有效辐射分量高光谱估算的初步研究. 中国农业科学, **41**(7): 1947-1954.
- 杨 峰, 范亚民, 李建龙, 等. 2010. 高光谱数据估测稻麦叶面积指数和叶绿素密度. 农业工程学报, **26**(2): 237-243.
- 杨海清, 姚建松, 何 勇. 2009. 基于反射光谱技术的植物叶片 SPAD 值预测建模方法研究. 光谱学与光谱分析, **29**(6): 1607-1610.
- 杨庆锋, 王纪华, 莫良玉, 等. 2008. 基于冠层反射光谱的冬小麦干物质积累量的估测研究. 安徽农业科学, **36**(24): 10436-10438.
- 姚 宁, 宋利兵, 刘 健, 等. 2015. 不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响. 中国农业科学, **48**(12): 2379-2389.
- 姚付启, 蔡焕杰, 王海江, 等. 2012. 基于平稳小波变换的冬小麦覆盖度高光谱监测. 农业机械学报, **43**(3): 173-180.
- 郑 玲, 朱大洲, 王 成, 等. 2013. 基于 LabVIEW 的小麦生物量检测系统. 农业机械学报, **44**(9): 214-218.
- Bai JH, Li SK, Wang KR, et al. 2007. Estimating aboveground fresh biomass of different cotton canopy types with homogeneity models based on hyper spectrum parameter. *Agricultural Sciences in China*, **6**: 437-445.
- Chen H, Wang P, Li J, et al. 2012. Canopy spectral reflectance feature and leaf water potential of sugarcane inversion. *Physics Procedia*, **25**: 595-600.
- Chen M, Glaz B, Gilbert RA, et al. 2002. Near-infrared reflectance spectroscopy analysis of phosphorus in sugarcane leaves. *Agronomy Journal*, **94**: 1324-1331.
- Hansen PM, Schjoerring JK. 2003. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*, **86**: 542-553.
- Patel NK, Patnaik C, Dutta S, et al. 2001. Study of crop growth parameters using airborne imaging spectrometer data. *International Journal of Remote Sensing*, **22**: 2401-2411.
- Rock BN, Vogelmann JE, Williams DL, et al. 1986. Remote detection of forest damage. *Bioscience*, **36**: 439-445.
- Vaesen K, Gilliams S, Nackaerts K, et al. 2001. Ground-measured spectral signatures as indicators of ground cover and leaf area index: The case of paddy rice. *Field Crops Research*, **69**: 13-25.
- Vila H, Hugalde I, De Filippo M. 2011. Estimation of leaf water potential by thermographic and spectral measurements in grapevine. *Ria Revista De Investigaciones Agropecuarias*, **37**: 46-53.
- Yacobi YZ, Moses WJ, Kaganovsky S, et al. 2011. NIR-red reflectance-based algorithms for chlorophyll-a estimation in mesotrophic inland and coastal waters: Lake Kinneret case study. *Water Research*, **45**: 2428-2436.
- Zhang C, Liu J, Shang J, et al. 2018. Capability of crop water content for revealing variability of winter wheat grain yield and soil moisture under limited irrigation. *Science of the Total Environment*, **631-632**: 677-687.
- Zhang L, Zhou Z, Zhang G, et al. 2012. Monitoring the leaf water content and specific leaf weight of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in saline soil using leaf spectral reflectance. *European Journal of Agronomy*, **41**: 103-117.
- Zhao CJ, Wang JH, Liu LY, et al. 2006. Relationship of 2100-2300 nm spectral characteristics of wheat canopy to leaf area index and leaf N as affected by leaf water content. *Pedosphere*, **16**: 333-338.
- Zheng L, Zhu D, Liang D, et al. 2015. Winter wheat biomass estimation based on canopy spectra. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, **8**: 30-36.

作者简介 杨晨波,男,1995年生,硕士研究生,主要从事作物生态及信息技术的研究。E-mail: xiancai36@126.com  
责任编辑 李凤芹