

李睿,宗晨,娄运生,等. 不同水分管理和遮阴下水稻株高及成熟期高光谱估算[J]. 江苏农业科学,2021,49(3):82-90.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.03.014

不同水分管理和遮阴下水稻株高及成熟期高光谱估算

李睿^{1,2,3},宗晨⁴,娄运生^{1,2},张震²,马莉²,李君²

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏南京 210044; 2. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室,江苏南京 210044;

3. 福建省大气探测技术保障中心,福建福州 350008; 4. 福建省气象服务中心,福建福州 350001)

摘要:通过田间试验研究了不同水分管理和遮阴处理对水稻株高、成熟期及冠层高光谱特征的影响,通过相关性分析、线性与非线性回归等统计方法,构建水稻株高和成熟期高光谱估算模型。水分管理设 2 个水平,节水灌溉(W,无水层)与常规灌溉(F,水深 5 cm);遮阴处理设 3 个水平,对照(CK,无遮光)、轻度遮阴(S1,单层遮光)和重度遮阴(S2,双层遮光)。结果表明,遮阴处理下,节水灌溉对水稻株高有抑制作用。水稻株高与冠层光谱反射率在近红外波段最为敏感,呈极显著正相关关系($P < 0.01$),在可见光波段达显著负相关关系($P < 0.05$)。8 种植被指数与水稻不同生育期株高均达极显著相关关系($P < 0.01$)。在拔节期至成熟期统一估算株高模型中,估算水稻株高效果较好的为归一化植被指数(NDVI),准确率为 71.6%;在拔节期和抽穗期分段估算水稻株高模型中基于增强型植被指数(EVI)模拟效果较好,成熟期基于重归一化植被指数(RDVI)模拟效果较好,准确率分别为 72.9%、77.7%、73.6%,表明分生育期估算株高模型模拟准确率较统一估算株高模型有所提高。在使用单变量和多变量模拟水稻成熟期模型中,三变量非线性回归模型模拟准确率最高,其中 EVI、NDWI 和 LAI 三变量建模的模拟准确率为 74.2%。以上结果为水稻株高及成熟期高光谱估算提供了试验依据。

关键词:水分管理;遮阴;株高;成熟期;高光谱

中图分类号:P49;S127 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)03-0082-09

太阳辐射是维持地球生态系统与气候系统能量平衡的重要因子,同时也是地球表层能量的根本来源^[1]。中国近 50 年到达地面的太阳总辐射呈明显下降趋势,其中 1961—2008 年华东地区太阳总辐射下降速率为 $2.05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ 年})$ ^[2-3],下降速率明显。江苏淮河以南是长江流域稻—麦轮作区,在

生育期间阴雨寡照天气较多,给水稻分蘖、开花、灌浆和结实带来危害^[4-5]。目前,太阳辐射减弱对水稻影响的研究表明,拔节期光照减弱使水稻茎鞘物质积累减少,株高、千粒质量和每穗粒数下降,导致产量减少;始穗期弱光导致结实率及千粒质量下降,总产量大幅下降^[6-9]。因此,研究太阳辐射减弱对作物生长的影响已成为气候变化研究领域的热点问题之一。

近年来水资源与农业生产之间的矛盾日益加深,因水分亏缺造成的作物减产损失超过了其他逆境损失的总和^[10]。我国是水稻主要生产国之一,水稻需消耗大量的农业生态用水,而农业灌溉水利用效率仅为 40% 左右^[11]。因此,提高水稻水分利用

收稿日期:2020-03-25

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20190305);国家自然科学基金(编号:41875177、41375159)。

作者简介:李睿(1993—),女,福建三明人,硕士,助理工程师,主要从事应用气象研究。E-mail:461917970@qq.com。

通信作者:娄运生,博士,教授,主要从事农业气象、全球变化生态学。E-mail:yunshlou@163.com。

[10]叶靖,董立强,王术,等. 种植方式对水稻产量及相关性状的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(6):73-75.

[11]郑华斌,姚林,刘建霞,等. 种植方式对水稻产量及根系性状的影响[J]. 作物学报,2014,40(4):667-677.

[12]何瑞银,罗汉亚,李玉同,等. 水稻不同种植方式的比较试验与评价[J]. 农业工程学报,2008,24(1):167-171.

[13]程建平,罗锡文,樊启渊,等. 不同种植方式对水稻生育特性和产量的影响[J]. 华中农业大学学报,2010,29(1):1-5.

[14]严洪斌,郭咏梅,宋晶晶,等. 水、旱栽培条件下杂交稻主要农艺性状和品质性状比较研究[J]. 西南农业学报,2008,21(3):552-556.

[15]郭咏梅,穆平,刘家富,等. 水、旱栽培条件下稻米主要品质性状的比较研究[J]. 作物学报,2005,31(11):1443-1448.

[16]蔡一震,王维,张祖建,等. 水旱种植下多个品种蒸煮品质和稻米 RVA 谱的比较性研究[J]. 作物学报,2003,29(4):508-513.

率,发展节水灌溉是水稻可持续生产的必由之路。相关研究发现,节水灌溉可使根系活力增强,茎秆粗壮,叶绿素含量、叶面积指数、净光合速率及干物质积累量增加,并且可以改善水稻土壤通气条件,抑制株高生长,从而提高抗倒伏性^[12-18]。

株高是水稻重要生长指标之一,在一定范围内,水稻的生物产量和籽粒产量均随株高呈线性变化,株高较低会造成植株中下部通风透光率差,冠层叶片堆积,影响灌浆,使产量下降^[19]。曾勇军等研究认为,株高的增加能够提高水稻产量^[20]。但植物株高过高会出现倒伏现象,从而导致产量降低^[21]。因此,高产水稻也需一定的株高保证^[22]。在水稻生长期掌握株高状况,不仅可以及时了解长势,还可以根据株高提前估算产量。目前水稻株高测定多依靠传统人工方法,工作量大、时间长且缺乏便捷性,而高光谱遥感监测技术可以提供更加便捷的获取方式。基于高光谱数据反演水稻等作物的生长指标已有研究^[23-29],李燕强等分别通过高光谱和中分辨成像光谱仪(MODIS)数据提取光谱参数,建立较准确的小麦株高估算模型^[30-31]。研究认为,使用近地高光谱数据估算水稻株高可以克服MODIS数据受空间分辨率及大气的影 响,提高株高估算模型精度^[32],因此,本研究采用近地高光谱数据的水稻株高进行估算。

水稻的成熟收获期是获得优质稻米最重要的环节之一,水稻成熟度和收获时期对籽粒品质具有重要的影响,适期进行收割有利于提高水稻产量及品质。研究表明,稻穗含水率下降至20%~23%,穗后25d左右为最佳收获时间,此时蛋白质含量较高,可获得较好品质^[33-35]。目前对水稻成熟程度的判断,主要依靠经验观测法,对叶片及稻穗颜色等作物特征进行主观判断,误差大且不适用于大范围种植区^[36]。已有研究采用植被指数对水稻等作物成熟度进行建模估算^[37],但仅局限于使用光谱植被指数建模,未加入与生长相关的指标。本研究结合稻穗含水率与生长指标,通过线性与非线性方法建模,找出能够指示水稻成熟度的高光谱植被指数,分析确定适宜收获期,以期在全球气候变化背景下,对水稻成熟期精确估算提供技术支撑,为精准农业提供支持。

1 材料与方 法

1.1 试验田概况

本试验在江苏农业气象重点实验室农业气象

试验站进行。供试土壤是黏粒含量为26.1%的潴育型水稻土。供试水稻品种为南粳5055。水稻育苗完成日期为2017年5月7日,移栽日期为6月7日,行株距为20 cm×20 cm。移栽前每个小区撒播315 g复合肥。

1.2 试验设计

本试验在田间条件下进行,使用2因素随机区组设计,水稻灌溉方式分2组水平,节水灌溉(W,无水层)与常规灌溉(F,水深5 cm)。遮阴处理分3组水平,对照(CK,自然光)、轻度遮阴(S1,单层遮阴)和重度遮阴(S2,双层遮阴)。水稻从2017年7月(拔节期)至2017年10月(灌浆期)放置遮阳网。黑色遮阳网通过钢管支架覆盖在遮阴处理小区水稻冠层上方30 cm处,随水稻生长定期调整其高度。试验设6个处理:(1)常规灌溉+无遮阴(FCK);(2)淹水灌溉+轻遮阴(FS1);(3)淹水灌溉+重遮阴(FS2);(4)节水灌溉+无遮阴(WCK);(5)节水灌溉+轻遮阴(WS1);(6)节水灌溉+重遮阴(WS2)。每种处理均设3组重复,各处理随机排列,共18个小区,每个小区面积为2 m×2 m=4 m²。

1.3 测定方法

1.3.1 水稻冠层光谱测定 每隔5~7 d在天气晴朗无云或少云、微风或少风的天气,于10:00—14:00(太阳高度角>45°)时使用便携式高光谱仪(ASD FieldSpec HandHeld)进行水稻冠层光谱反射率测定。该光谱仪的有效波段范围为350~2 500 nm,在350~1 050 nm区间,光谱分辨率为3 nm,光谱采样间隔为1.4 nm;在1 050~2 500 nm区间,光谱分辨率为10 nm,光谱采样间隔为2 nm,探头视场角为25°。探头垂直向下水平放置进行测定,探头距水稻冠层垂直距离为0.6 m。遇遮阴处理的小区时,撤离黑色遮阳网布后再进行测定。每个小区重复测量3次,以其平均值作为该观测点的光谱反射率。

1.3.2 株高 每隔5~7 d与冠层光谱反射率同步测定,使用长卷尺测量水稻植株底部至冠层,每个小区测量3株植株,取平均值。

1.3.3 叶面积指数(LAI)测定 每隔5~7 d与冠层光谱反射率同步测定。使用手持式叶面积指数仪(LI-2000)在天气光线良好的条件下进行测定,测定时在水稻冠层采集1个点,在底部采集4个不同方向的点,读出仪器上的LAI数值并记录,每个小区重复测定3次,取其平均值。

1.3.4 稻穗含水率 待水稻抽穗后每隔 5~7 d 与冠层光谱反射率同步测定。随机在每个小区抽取 3 株水稻,每株水稻取 1 个整穗,测定鲜质量后放置于 105 ℃烘箱内杀青 20 min,在 80 ℃恒温烘干至恒质量,称质量并取其平均值。用下式计算稻穗含水率:

$$\text{稻穗含水率} = (\text{穗鲜质量} - \text{穗干质量}) / \text{穗鲜质量} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.5 遮阴率的测定 遮阳网的透光率采用 AccuPAR 植物冠层分析仪 (DECAGON LP-80) 进行测定。每个生育期选择晴朗无云天气,在

11:00—13:00 完成测定。每次使用时均对仪器进行准确率校正,测量时同步记录网下光照度及网外光照度。遮阴率的计算公式为

$$\text{遮阴率} = 1 - \text{网内光照度} / \text{网外光照度} \times 100\% \quad (2)$$

1.4 植被指数选取

依据株高与冠层光谱的相关性选取 8 种植被指数,用于估算水稻株高(表 1)^[38]。把自变量设为不同类型植被指数,株高作为因变量,构建水稻株高的高光谱估算模型。

表 1 采用的植被指数及计算公式

植被指数	计算公式
大气阻抗植被指数 (ARVI)	$ARVI = [R_{Nir} - (2R_{Red} - R_{Blue})] / [R_{932} + (2R_{Nir} - R_{Blue})]$
土壤调整植被指数 (SAVI)	$SAVI = [1.5 \times (R_{Nir} - R_{Red})] / (R_{Nir} + R_{Red} + 0.5)$
增强型植被指数 (EVI)	$EVI = 2.5 \times (R_{Nir} - R_{Red}) / (R_{Nir} + 6R_{Red} - 7.5R_{Blue} + 1)$
调整型土壤调节植被指数 (MSAVI)	$MSAVI = \{2R_{Nir} + 1 - \sqrt{[(2R_{Nir} + 1)^2 - 8 \times (R_{Nir} - R_{Red})]}\} / 2$
归一化植被指数 (NDVI)	$NDVI = (R_{Nir} - R_{Red}) / (R_{Nir} + R_{Red})$
优化型土壤调节植被指数 (OSAVI)	$OSAVI = (R_{Nir} - R_{Red}) / (R_{Nir} + R_{Red} + 0.16)$
重归一化植被指数 (RDVI)	$RDVI = (R_{Nir} - R_{Red}) / \sqrt{(R_{Nir} + R_{Red})}$
比值植被指数 (RVI)	$RVI = R_{Nir} / R_{Red}$
归一化水指数 (NDWI)	$NDWI = (R_{Nir} - R_{Mir}) / (R_{Nir} + R_{Mir})$

注: R_{Nir} 、 R_{Red} 、 R_{Blue} 、 R_{Mir} 分别表示近红外光、红光、蓝光、中红外光波段下的光谱反射率; R_{932} 为 932 nm 波长下的光谱反射率。

1.5 水稻株高估算模型

线性函数: $y = ax + b$; 对数函数: $y = a \ln(x) + b$; 幂函数: $y = ax^b$; 抛物线: $y = ax^2 + bx + c$; 指数函数: $y = ae^x$ 。

1.6 水稻成熟期估算模型

本研究回归模型使用单变量、双变量和三变量线性与非线性的拟合模型。包括单变量线性,即线性函数 $y = ax + b$;

非线性函数:(1) 幂函数: $y = ax^b$, (2) 抛物线: $y = ax^2 + bx + c$, (3) 指数函数: $y = ae^x$, (4) 对数函数: $y = a \ln(x) + b$ 。双/三变量线性: $y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + d$; 非线性: $y = ax_1^2 + bx_1 + cx_2^2 + dx_2 + ex_3^2 + fx_3 + g$ 。

1.7 数据处理

原始光谱曲线采用 ASD View Spec Pro 4.5 软件进行分析处理。采用 Matlab 进行数据筛选及建模。采用 SPSS 21.0 进行显著性检验 (LSD 法, $\alpha = 0.05$)。采用 Origin Pro 8.5 和 Microsoft Excel 2010 进行数据处理与绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水分管理和遮阴处理对水稻株高的影响

由图 1 可知,水稻生长前期,各处理下株高均无

较明显差异。随着水稻生长,从抽穗期开始各处理出现差异,至成熟期各处理株高不再持续增长。成熟期,常规灌溉条件下,轻度遮阴 (FS1) 和重度遮阴 (FS2) 处理下株高比无遮阴 (FCK) 处理下株高分别下降 3.3%、4.9%,均达显著水平 ($P < 0.05$); 节水灌溉条件下,轻度遮阴 (WS1) 和重度遮阴 (WS2) 处理下株高比无遮阴 (WCK) 处理下株高分别升高 17.5%、15.6%,亦达显著水平 ($P < 0.05$)。

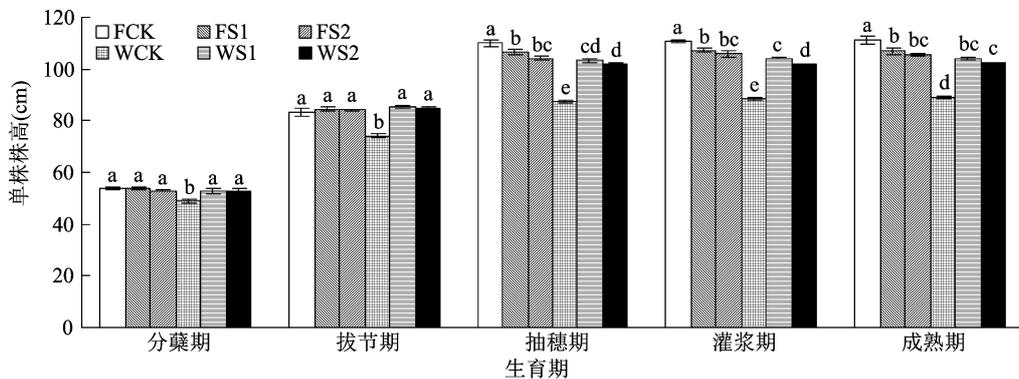
水稻抽穗期至成熟期,在无遮阴处理条件下,节水灌溉 (WCK) 的株高比常规灌溉 (FCK) 处理平均降低 25.3%,差异达显著水平 ($P < 0.05$),表明节水灌溉对自然无遮阴条件下水稻株高抑制作用明显。水稻抽穗和灌浆时期,在轻度遮阴条件下,节水灌溉 (WS1) 的株高比常规灌溉 (FS1) 分别减少 2.3%、2.4%,差异达显著水平 ($P < 0.05$); 在重度遮阴条件下,节水灌溉 (WS2) 的株高比常规灌溉 (FS2) 的株高分别下降 2.0%、4.0%,亦通过显著性检验 ($P < 0.05$)。表明遮阴处理下,节水灌溉对水稻株高有明显的抑制作用。

2.2 水稻株高与冠层光谱反射率的相关性

由图 2 可知,可见光波段下的水稻株高与水稻

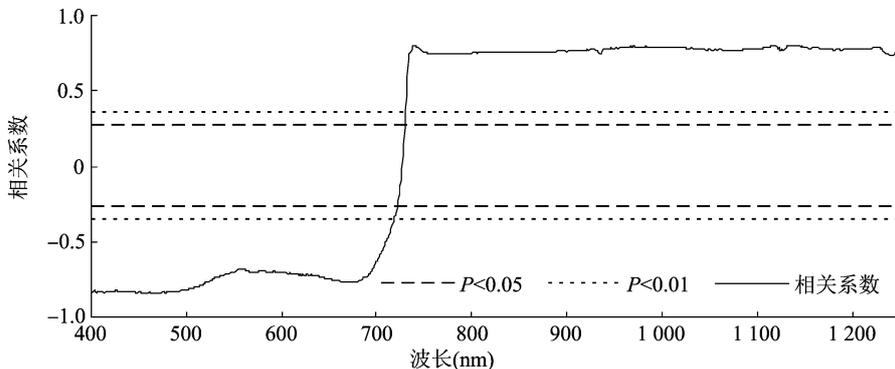
光谱反射率存在负相关关系,其中在 400 ~ 720 nm 波段下水稻株高与冠层高光谱反射率达显著负相关关系($P < 0.05$),在 400 ~ 717 nm 波段下达极显著相关($P < 0.01$),在 465 nm 波段附近有最大负相关,相关系数为 -0.84,在 557 nm 波段处形成 1 个波峰,在 667 nm 波段处形成 1 个波谷;光谱反射率在 670 ~ 740 nm 波段的相关系数随波长的增加呈上

升趋势,在 727 nm 波段附近达到 0;在近红外光波段,水稻株高与光谱反射率为正相关关系,相关系数较平稳,在 934、1 127、1 244 nm 附近均有 1 个小低谷,但在 761 ~ 1 200 nm 波段均达极显著水平($P < 0.01$)。表明可见光与近红外光波段均为水稻株高的敏感波段。



柱上短线表示标准误差,不同字母表示同一生育期处理间差异显著($P < 0.05$)

图1 水稻主要生育期处理间株高的比较



2.3 水稻拔节期至成熟期株高统一估算模型

2.3.1 水稻拔节期至成熟期株高与植被指数的相关性 根据冠层光谱反射率与株高的相关性选取 8 种不同植被指数,依据植被指数公式(表 1),计算得到水稻拔节期至成熟期各植被指数与株高的相关系数。株高与 8 种不同植被指数的相关系数范围为 0.635 ~ 0.720(表 2),且均达极显著相关($P < 0.01$),根据统计学规定,相关系数 $|r| \geq 0.5$ 为有效范围。相关系数最高的为 NDVI,达 0.720,最小的是 ARVI,为 0.635,8 种植被指数与株高均为中度相关关系,表明选取的 8 种植被指数均可模拟水稻株高。

表 2 拔节期至成熟期株高与植被指数的相关系数

植被指数	相关系数(r)
ARVI($R_{932}, R_{760}, R_{470}$)	0.635 **
SAVI(R_{907}, R_{760})	0.663 **
EVI($R_{906}, R_{760}, R_{473}$)	0.708 **
MSAVI(R_{905}, R_{760})	0.689 **
NDVI(R_{905}, R_{760})	0.720 **
OSAVI(R_{919}, R_{760})	0.691 **
RDVI(R_{911}, R_{760})	0.685 **
RVI(R_{905}, R_{760})	0.692 **

注:括号内为各波长下的光谱反射率。*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著或极显著相关。下同。

2.3.2 水稻拔节期至成熟期株高统一估算模型的拟合与验证 本研究使用水稻数据的 2/3 进行建模,1/3 进行验证。拟合方程为所选 5 种回归模型

中模拟效果最好的模型,其余省略。表 3 中所选植被指数拟合与验证的 r^2 均达极显著水平,说明 8 种植被指数均能用于水稻拔节期至成熟期株高的统

一模拟模型,拟合模型的 r 范围为 0.412 ~ 0.520,最小值为 ARVI 的,最大值为 NDVI 的,拟合模型的均方根误差 (RMSE) 范围为 0.065 ~ 0.075,MSAVI 的最小,RVI 的最大,验证模型中决定系数范围为 0.362 ~ 0.513,最小值为 RVI 的,最大值为 NDVI

的,验证模型的均方根误差范围是 0.093 ~ 0.110,最小值为 NDVI 的,最大值为 RVI 的。在 8 个模型中,基于 NDVI 建模的拟合与验证 r^2 最大,均方根误差值最小,所以 NDVI 可较好地模拟水稻拔节期至成熟期的株高。

表 3 拔节期至成熟期水稻株高统一估算模型的拟合与验证

植被指数	拟合方程	拟合		验证	
		r^2	RMSE	r^2	RMSE
ARVI	$y = 6.769e^{7.050x}$	0.412 **	0.073	0.474 **	0.100
SAVI	$y = 0.653e^{9.028x}$	0.447 **	0.070	0.405 **	0.107
EVI	$y = 0.639e^{15.503x}$	0.510 **	0.068	0.508 **	0.093
MSAVI	$y = 0.659e^{9.572x}$	0.486 **	0.065	0.412 **	0.105
NDVI	$y = 17.467x^2 + 6.526x + 0.603$	0.520 **	0.069	0.513 **	0.093
OSAVI	$y = 0.642e^{10.030x}$	0.482 **	0.071	0.395 **	0.108
RDVI	$y = 0.644e^{9.962x}$	0.477 **	0.069	0.404 **	0.108
RVI	$y = 0.636x^{4.060}$	0.484 **	0.075	0.362 **	0.110

2.4 不同生育期株高分段估算模型

2.4.1 不同生育期株高与植被指数的相关性 分析不同生育期(拔节期、抽穗期和成熟期,下同)的株高与 8 种植被指数的相关性可知,8 种植被指数与拔节期、抽穗期和成熟期株高的相关系数范围为 $0.682 \leq r \leq 0.756$,均达极显著水平 ($P < 0.01$),与拔节期至成熟期株高植被指数的相关系数相比有所上升。其中抽穗期的相关系数均高于拔节期和成熟期,成熟期的相关系数均低于拔节期和抽穗期。综上所述,所选 8 种植被指数均能用于模拟水稻拔节期、抽穗期和成熟期的株高。

2.4.2 不同生育期水稻株高估算模型的拟合与验证 表 5 为水稻不同生育期株高估算模型精度,拟合方程为 5 种回归模型中拟合效果最好的模型,其余省略。拔节期所有拟合模型的决定系数(r^2)均达极显著水平 ($P < 0.01$),拟合模型的 r^2 范围为 0.513 ~ 0.573,均方根误差的范围为 0.021 ~ 0.026;验证模型的决定系数范围为 0.277 ~ 0.531,仅 RVI 未通过显著性检验 ($P > 0.05$),均方根误差的范围为 0.028 ~ 0.037。从水稻拔节期的拟合与验证模型的决定系数及均方根误差来看,EVI 的拟合 r^2 为 0.573,拟合 RMSE 为 0.021,并且验证 r^2 达 0.531,拟合与验证 r^2 均为极显著水平 ($P < 0.01$),验证 RMSE 为 0.029。因此,基于 EVI 建立的模型拟合度较好,可用于模拟水稻拔节期株高。

在抽穗期整体模拟效果较好,拟合 r^2 范围为

表 4 不同生育期株高与植被指数的相关性

植被指数	各生育期株高与植被指数的相关系数		
	拔节期	抽穗期	成熟期
ARVI	($R_{742}, R_{929}, R_{487}$)	($R_{760}, R_{935}, R_{477}$)	($R_{760}, R_{1116}, R_{453}$)
	0.719 **	0.729 **	0.682 **
SAVI	(R_{757}, R_{763})	(R_{757}, R_{935})	(R_{754}, R_{997})
	0.709 **	0.750 **	0.687 **
EVI	($R_{756}, R_{763}, R_{455}$)	(R_{760}, R_{935})	($R_{760}, R_{997}, R_{466}$)
	0.750 **	0.754 **	0.688 **
MSAVI	(R_{757}, R_{762})	(R_{747}, R_{936})	(R_{772}, R_{898})
	0.736 **	0.742 **	0.688 **
NDVI	(R_{760}, R_{905})	(R_{760}, R_{930})	(R_{783}, R_{991})
	0.703 **	0.756 **	0.694 **
OSAVI	(R_{756}, R_{763})	(R_{760}, R_{997})	(R_{756}, R_{973})
	0.720 **	0.753 **	0.691 **
RDVI	(R_{751}, R_{766})	(R_{760}, R_{940})	(R_{776}, R_{989})
	0.715 **	0.750 **	0.687 **
RVI	(R_{755}, R_{763})	(R_{755}, R_{997})	(R_{755}, R_{997})
	0.703 **	0.752 **	0.691 **

0.601 ~ 0.612,均达极显著水平 ($P < 0.01$),均方根误差的范围为 0.016 ~ 0.023;验证 r^2 范围为 0.540 ~ 0.627,均通过极显著检验 ($P < 0.01$),均方根误差的范围为 0.037 ~ 0.059。其中 EVI 建立的模型拟合 r^2 为 0.612,验证 r^2 为 0.603, RMSE 分别为 0.019、0.039。因此,基于 EVI 建立的二次多项式模型可用于水稻抽穗期株高的模拟。

表 5 不同生育期水稻株高估算模型的拟合与验证

生育期	植被指数	拟合方程	拟合		验证	
			r^2	RMSE	r^2	RMSE
拔节期	ARVI	$y = -5.354x^2 - 0.629x + 0.823$	0.527 **	0.024	0.492 **	0.031
	SAVI	$y = -533.710x^2 + 27.773x + 0.450$	0.544 **	0.023	0.512 **	0.028
	EVI	$y = 1.909x^{0.208}$	0.573 **	0.021	0.531 **	0.029
	MSAVI	$y = -199.740x^2 + 14.640x + 0.597$	0.549 **	0.025	0.531 **	0.028
	NDVI	$y = -336.490x^2 + 27.952x + 0.240$	0.535 **	0.024	0.443 *	0.030
	OSAVI	$y = -461.260x^2 + 28.666x + 0.381$	0.535 **	0.026	0.442 *	0.030
	RDVI	$y = 0.135\ln(x) + 1.321$	0.513 **	0.025	0.509 **	0.028
	RVI	$y = -67.900x^2 + 147.930x - 79.746$	0.521 **	0.025	0.277	0.037
抽穗期	ARVI	$y = -92.482x^2 - 53.659x - 6.715$	0.601 **	0.021	0.627 **	0.059
	SAVI	$y = -76.681x^2 + 4.382x + 1.002$	0.610 **	0.018	0.540 **	0.043
	EVI	$y = -184.670x^2 + 6.842x + 1.003$	0.612 **	0.019	0.603 **	0.039
	MSAVI	$y = -96.614x^2 + 4.990x + 1.000$	0.602 **	0.023	0.547 **	0.042
	NDVI	$y = -43.103x^2 + 3.305x + 1.004$	0.611 **	0.020	0.610 **	0.037
	OSAVI	$y = -75.367x^2 + 4.353x + 1.003$	0.611 **	0.021	0.604 **	0.039
	RDVI	$y = -85.510x^2 + 4.639x + 1.002$	0.611 **	0.019	0.599 **	0.041
	RVI	$y = -11.239x^2 + 24.154x - 11.912$	0.612 **	0.016	0.592 **	0.037
成熟期	ARVI	$y = -14.348x^2 - 5.929x + 0.531$	0.475 *	0.049	0.391 *	0.053
	SAVI	$y = -78.859x^2 + 4.132x + 1.047$	0.517 **	0.042	0.535 **	0.044
	EVI	$y = -192.340x^2 + 6.754x + 1.045$	0.513 **	0.045	0.513 **	0.044
	MSAVI	$y = -93.161x^2 + 4.093x + 1.061$	0.506 **	0.048	0.499 **	0.048
	NDVI	$y = -45.004x^2 + 3.457x + 1.042$	0.515 **	0.044	0.470 *	0.046
	OSAVI	$y = -77.905x^2 + 4.351x + 1.044$	0.516 **	0.043	0.501 **	0.045
	RDVI	$y = -88.002x^2 + 4.320x + 1.047$	0.517 **	0.041	0.542 **	0.044
	RVI	$y = -10.889x^2 + 23.496x - 11.566$	0.511 **	0.046	0.457 *	0.046

成熟期中拟合 r^2 范围为 0.475 ~ 0.517, 除 ARVI 外均达极显著水平 ($P < 0.01$), 均方根误差的范围为 0.041 ~ 0.049; 验证 r^2 范围为 0.391 ~ 0.542, 均通过显著性检验 ($P < 0.05$), 均方根误差的范围为 0.044 ~ 0.053。其中 RDVI 建立的模型拟合 r^2 为 0.517, RMSE 为 0.041; 验证 r^2 为 0.542, RMSE 为 0.041。因此, 基于 RDVI 建立的模型可用于水稻成熟期株高模拟。综合来看, 不同生育时期分段模拟准确率较统一估算模型有所提高, 可更加准确估算出水稻株高。

2.5 水稻成熟期高光谱估算

2.5.1 建模方法

研究表明, 稻穗含水率下降至 20% ~ 23% 时, 可认为水稻进入完熟期^[33-35]。在成熟期时水稻叶绿素含量呈明显下降趋势, 且相关研究表明, 作物叶绿素含量的变化可通过增强型植被指数 (EVI) 或归一化植被指数 (NDVI) 进行监测^[36,39], 其中 EVI 能与生物量、叶面积指数等生理参数建立

更好的线性关系, 并能更好地避免高浓度气溶胶与大气背景噪声等对模型准确率的影响, 是研究植被覆盖的最佳指数之一^[40]。稻穗含水率的变化可通过归一化水指数 (NDWI) 进行监测^[41-42]。EVI 与 NDWI 的计算公式见表 7。本研究把稻穗含水率作为因变量, 通过高光谱提取出的 EVI、NDWI 与生长指标作为自变量, 通过线性和非线性方法建模从而模拟稻穗含水率, 当穗含水率下降至 20% ~ 23% 时, 认为水稻达最佳成熟收获期。

2.5.2 水稻成熟期估算模型参数的相关性

由表 6 可知, 稻穗含水率与 NDWI、EVI、株高和 LAI 均呈极显著相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数范围为 0.550 ~ 0.931, 其中最大的是 NDWI 的, 为 0.931, 最小的是株高的, 为 0.550。有许多学者已成功运用高光谱反演 LAI^[24,43], 并且 LAI 与稻穗含水率极显著相关。成熟期的株高在“2.4.2”节已证明可用 RDVI 进行估算, 并且株高与稻穗含水率的相关性

达显著水平。因此,所选 4 种参数均可用于估算水稻成熟期。

表 6 各参数与稻穗含水率的相关性

建模参数	相关系数
NDWI	0.931**
EVI	0.843**
株高	0.550**
LAI	0.719**

2.5.3 水稻成熟期估算模型的拟合与验证 由表 7 可知,单变量模型的拟合 r^2 均达显著水平 ($P < 0.05$), 范围为 0.371 ~ 0.423, 拟合 RMSE 为 0.050 ~ 0.053, 验证 r^2 范围为 0.309 ~ 0.359, 验证 RMSE 为 0.085 ~ 0.088, 其中归一化水指数 (NDWI) 建立的非线性指数函数模型拟合 r^2 为 0.423, 验证 r^2 为 0.359, 均通过显著性检验 ($P < 0.05$), 拟合 RMSE 为 0.050, 验证 RMSE 为 0.085, 该模型模拟效果相较于其他单变量模型较好; 双变量模型拟合 R^2 范围为 0.390 ~ 0.532, 拟合 RMSE 为 0.030 ~ 0.062, 验证 R^2 范围为 0.362 ~ 0.516, 验证 RMSE 为 0.051 ~ 0.079, 整体模拟效果相比于单

变量模型有所提高,其中基于 EVI、NDWI 建立的非线性模型拟合 R^2 达 0.532, 验证 R^2 为 0.516, 均达极显著水平 ($P < 0.01$), 拟合 RMSE 为 0.030, 验证 RMSE 为 0.072, 模拟效果相比于其他双变量模型精度更高; 在三变量模型中, 拟合 R^2 范围为 0.521 ~ 0.560, 拟合 RMSE 范围为 0.032 ~ 0.069, 验证 R^2 范围为 0.503 ~ 0.551, 验证 RMSE 范围为 0.051 ~ 0.087, 可明显看出三变量模型的模拟效果相比单变量与双变量模型模拟精度更高, 其中基于 EVI、NDWI 和 LAI 参数建立的非线性三元二次模型拟合 R^2 为 0.560, 验证 R^2 为 0.551, 均通过极显著水平检验 ($P < 0.01$), 拟合 RMSE 为 0.032, 验证 RMSE 为 0.051, 模拟效果为最佳。综上所述, 使用三变量模型进行建模精度较高, 并且非线性模型精度比线性模型更高。

图 3 为水稻成熟期最佳模拟模型模拟值与实测值的散点图, 从图中可以直观地看出该模型的模拟效果。EVI、NDWI 和 LAI 建立的非线性模型模拟准确率为 74.2%, 拟合 R^2 为 0.551, 均方根误差 RMSE 为 0.051。因此, 基于 EVI、NDWI 和 LAI 建立的非线性模型可较好地模拟水稻成熟期。

表 7 水稻成熟期估算模型拟合与验证

建模参数	拟合方程	拟合		验证	
		r^2/R^2	RMSE	r^2/R^2	RMSE
EVI	线性: $y = 0.568EVI + 0.126$	0.371*	0.053	0.309	0.088
	非线性: $y = 0.665EVI^{0.716}$	0.411*	0.053	0.321*	0.088
NDWI	线性: $y = 0.952EVI + 0.032$	0.379*	0.050	0.350*	0.086
	非线性: $y = 0.171e^{2.141EVI}$	0.423*	0.050	0.359*	0.085
EVI、NDWI	线性: $y = -0.022 + 0.321EVI + 0.672NDWI$	0.513**	0.051	0.505**	0.074
	非线性: $y = 0.121 - 0.703EVI^2 + 1.088EVI + 2.029NDWI^2 - 1.018NDWI$	0.532**	0.030	0.516**	0.072
EVI、LAI	线性: $y = 0.592EVI + 0.021LAI + 0.054$	0.416**	0.062	0.396**	0.072
	非线性: $y = -0.065 - 1.003EVI^2 + 1.669EVI + 0.019LAI^2 - 0.093LAI$	0.436**	0.037	0.413**	0.055
EVI、株高	线性: $y = 0.576EVI + 0.06 \text{ 株高} + 0.06$	0.421**	0.055	0.401**	0.076
	非线性: $y = -0.320 - 0.886EVI^2 + 1.544EVI - 0.146 \text{ 株高}^2 + 0.334 \text{ 株高}$	0.393*	0.030	0.362*	0.062
NDWI、LAI	线性: $y = 1.075LSWI - 0.016LAI + 0.031$	0.404**	0.062	0.414**	0.069
	非线性: $y = 0.389 + 1.803LSWI^2 - 0.416LSWI + 0.006LAI^2 - 0.055LAI$	0.433**	0.041	0.438**	0.051
NDWI、株高	线性: $y = 0.941LSWI + 0.176 \text{ 株高} - 0.148$	0.390*	0.057	0.415**	0.079
	非线性: $y = -1.758 + 2.584LSWI^2 - 1.152LSWI - 1.922 \text{ 株高}^2 + 4.129 \text{ 株高}$	0.412**	0.031	0.450**	0.060
EVI、NDWI 和 LAI	线性: $y = -0.033 + 0.337EVI + 0.729NDWI - 0.006LAI$	0.530**	0.051	0.529**	0.062
	非线性: $y = 0.137 - 0.721EVI^2 + 1.131EVI + 1.788NDWI^2 - 0.784NDWI + 0.008LAI^2 - 0.053LAI$	0.560**	0.032	0.551**	0.051
EVI、NDWI 和株高	线性: $y = -0.101 + 0.363EVI + 0.646NDWI + 0.001 \text{ 株高}$	0.521**	0.069	0.503**	0.087
	非线性: $y = -1.291 - 0.431EVI^2 + 0.822EVI + 2.277NDWI^2 - 1.204NDWI - 1.372 \text{ 株高}^2 + 2.883 \text{ 株高}$	0.541**	0.034	0.526**	0.054

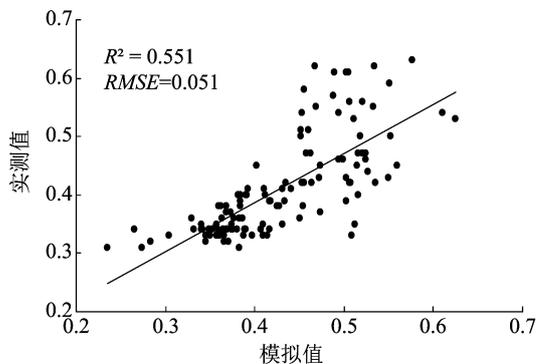


图3 水稻成熟期模拟模型的模拟值与实测值比较

3 结论

(1)在不同水分管理和遮阴处理的耦合作用下,节水灌溉对遮阴处理下水稻株高有抑制作用。

(2)水稻冠层光谱在近红外光波段下与株高呈显著正相关关系($P < 0.01$),在可见光波段下与株高呈显著负相关关系($P < 0.05$)。可见光与近红外光波段均为株高的敏感波段。

(3)水稻拔节期至成熟期株高可用 NDVI 建立的二次多项式模型进行估算,准确率为 71.6%。

(4)在分不同生育期建模估算水稻株高的模型中,使用 EVI 建立的模型能较好地估算水稻拔节期和抽穗期株高,估算准确率分别为 72.9%、77.7%,使用 RDVI 估算成熟期水稻株高准确率为 73.6%。表明分生育期估算株高模型模拟准确率较统一估算株高模型有所提高。

(5)使用 EVI、NDWI 和 LAI 三变量建立的估算模型能较准确地模拟稻穗含水率,从而模拟水稻成熟期,准确率为 74.2%。

4 讨论

本试验在前人研究的基础上,根据波段相关性选取 8 种不同植被指数 (ARVI、SAVI、EVI、MSAVI、NDVI、OSAVI、RDVI、RVI) 分析水稻拔节期至成熟期株高与植被指数的相关性,结果说明株高与所选植被指数均达极显著相关关系($P < 0.01$),此结论与前人研究结果^[30-31,44]一致,但统一估算模型的决定系数不高,平均值为 0.48,且验证的决定系数下降,均方根误差增大,这主要是因为统一估算模型中,含不同的生育期,而不同生育时期水稻植株的发育程度和生理状态有较大差异,导致水稻冠层光谱反射率对株高的敏感程度不同。

在不同生育期(拔节期、抽穗期和成熟期),水

稻株高与 8 种不同植被指数均达极显著相关($P < 0.01$),比拔节期至成熟期统一估算模型平均提高 0.04、0.07、0.01,其中抽穗期相关性最高,说明水稻冠层光谱反射率对株高最为敏感的阶段为抽穗时期。3 个不同生育期分段估算模型的拟合决定系数分别较统一估算模型平均提高 0.06、0.13、0.03,验证决定系数分别提高 0.04、0.16、0.06,均方根误差减小,说明分生育期模拟株高能克服不同遮阴处理和灌溉条件下对水稻株高的影响。因此,把不同生育时期分开研究,选择不同生育期的最优植被指数与方程,能更加精确地估算水稻株高,估算结果可以有效防止水稻生长后期因株高过高倒伏进而提高作物产量。

本研究通过高光谱数据提取 EVI 与 NDWI 指数和生长指标进行建模,模拟水稻成熟期。通过对比单变量和三变量建模发现,三变量建模能有效提高模拟精度,相比于单变量、双变量分别提高 0.14、0.10。采用线性与非线性法进行建模,通过对比发现非线性建模模拟精度比线性建模有所提升。利用光谱植被指数及生长指标进行建模估算水稻稻穗含水率从而判断水稻成熟期,为准确、及时收割水稻以获得最佳稻米品质提供参考依据。但本研究的不足之处在于监测结果具有不确定性,水稻成熟时期易受天气影响,在成熟时期连续的阴雨天气或者连续晴天都会使水稻成熟期推迟或者提前,对模拟结果造成一定误差。

参考文献:

- [1] 庞嘉粟. 旬太阳总辐射气候学计算方法[J]. 气象, 1979(2): 20-21.
- [2] Chen Y, Wang P, Zhang Z, et al. Rice yield development and the shrinking yield gaps in China, 1981—2008 [J]. Regional Environmental Change, 2017, 17(4): 2397-2408.
- [3] 尹青, 张华, 何金海. 近 48 年华东地区地面太阳总辐射变化特征和影响因子分析[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(1): 37-46.
- [4] 李林, 张更生, 陈华. 阴害影响水稻产量的机制及其调控技术 I、水稻分蘖期间模拟阴害对产量形成的影响[J]. 中国农业气象, 1994(02): 28-32.
- [5] 孙萌萌, 王莹慧, 汪育文, 等. 南粳 5055 及其亲本的光合特性[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 1-9.
- [6] 李君, 娄运生, 马莉, 等. 夜间增温和水分管理耦合对水稻叶片光合作用和荧光特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(3): 506-513.
- [7] Vaz J, Sharma P K. Photoinhibition and photosynthetic acclimation of rice. (*Oryza sativa* L. cv Jyothi) plants grown under different light

- intensities and photoinhibited under field conditions [J]. *Indian Journal of Biochemistry & Biophysics*, 2009, 46(3): 253–260.
- [8] 马莉, 姜运生, 李君, 等. 太阳辐射对稻田甲烷排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2725–2736.
- [9] 李睿, 姜运生, 张震, 等. 节水灌溉和遮光强度对水稻生长发育的耦合影响[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(11): 702–714.
- [10] 陈立松, 刘星辉. 水分胁迫对荔枝叶片呼吸代谢有关酶活性的影响[J]. *林业科学*, 2003, 39(2): 39–43.
- [11] 姚林, 郑华斌, 刘建霞, 等. 中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1381–1387.
- [12] 孙彦坤, 曹印龙, 付强, 等. 寒地井灌稻区节水灌溉条件下土壤温度变化及水稻产量效应[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(6): 67–70.
- [13] 陈厚存, 李桂云, 吴中华, 等. 水稻间歇灌溉增产机理与防治蚊媒应用研究[J]. *中国稻米*, 2012, 18(2): 33–36.
- [14] 文廷刚, 王伟中, 杨文飞, 等. 水稻穗分化期外源植物生长调节剂处理对颖花分化与退化的影响[J]. *江苏农业学报*, 2019, 35(3): 514–522.
- [15] 刘明, 李岩, 郭贵华, 等. 长江下游不同类型水稻分蘖期耐淹能力比较[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1373–1381.
- [16] 李沅媛, 龚道枝, 严为光, 等. 两种水分条件下夏玉米叶片气孔行为对光质的瞬时响应[J]. *中国农业气象*, 2017, 38(2): 113–120.
- [17] Kumar A, Nayak A K, Pani D R, et al. Physiological and morphological responses of four different rice cultivars to soil water potential based deficit irrigation management strategies [J]. *Field Crops Research*, 2017, 205: 78–94.
- [18] 夏琼梅, 陈清华, 李从英, 等. 浅湿交替节水灌溉对水稻产量及生物学特性的影响[J]. *中国稻米*, 2015, 21(4): 114–117.
- [19] Guerra L C, Agy G, Hook J E, et al. Irrigation water use estimates based on crop simulation models and kriging [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89(3): 199–207.
- [20] 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 等. 水稻理想株型的研究进展[J]. *中国稻米*, 2006, 12(1): 10–13.
- [21] 张晶, 吴绍洪, 刘燕华, 等. 土地利用和地形因子影响下的西藏农业产值空间化模拟[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 59–65.
- [22] 郭相平, 甄博, 王振昌. 旱涝交替胁迫增强水稻抗倒伏性能[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(12): 130–135.
- [23] 李亚妮, 鲁蕾, 刘勇. 基于 PROSAIL 模型的水稻田缨帽三角-叶面积指数模型及其应用[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(12): 3976–3984.
- [24] 常好雪, 蔡晓斌, 陈晓玲, 等. 基于实测光谱的植被指数对水稻叶面积指数的响应特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(1): 205–211.
- [25] Varvia P, Rautiainen M, Seppänen A. Bayesian estimation of seasonal course of canopy leaf area index from hyperspectral satellite data [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2018, 208: 19–28.
- [26] 孙华, 鞠洪波, 张怀清, 等. 三种回归分析方法在 Hyperion 影像 LAI 反演中的比较[J]. *生态学报*, 2012, 32(24): 7781–7790.
- [27] Sid'ko A F, Botvich I Y, Pisman T I, et al. Estimation of chlorophyll content and yield of wheat crops from reflectance spectra obtained by ground-based remote measurements [J]. *Field Crops Research*, 2017, 207: 24–29.
- [28] Sun J, Shi S, Yang J, et al. Estimating leaf chlorophyll status using hyperspectral lidar measurements by PROSPECT model inversion [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 212: 1–7.
- [29] 张静静, 周卫红, 邹萌萌, 等. 灌浆期水稻叶片铜含量变化的高光谱遥感定量监测研究[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(23): 324–330.
- [30] 李燕强, 张娟娟, 熊淑萍, 等. 不同冬小麦品种株高的高光谱估算模型[J]. *麦类作物学报*, 2012, 32(3): 523–529.
- [31] 隋学艳, 朱振林, 朱传宝, 等. 基于 MODIS 数据的山东省小麦株高遥感估算研究[J]. *山东农业科学*, 2009(2): 5–7, 11.
- [32] Scotford I M, Miller P C H. Applications of spectral reflectance techniques in northern European cereal production: a review [J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(3): 235–250.
- [33] Dong C F, Xu N X, Ding C L, et al. Suitable gibberellic acid treatment for double-purpose rice (*Oryza sativa* L.), varieties at different harvest times [J]. *Field Crops Research*, 2016, 193: 178–185.
- [34] 雍忠, 盛玉波, 姜国先. 不同收获时间对保墒旱直播栽培水稻品质的影响[J]. *现代农业科技*, 2017(23): 7, 9.
- [35] Zheng H B, Cheng T, Yao X, et al. Detection of rice phenology through time series analysis of ground-based spectral index data [J]. *Field Crops Research*, 2016, 198: 131–139.
- [36] 蒙继华, 吴炳方, 杜鑫, 等. 基于 HJ-1A/1B 数据的冬小麦成熟期遥感预测[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 225–230.
- [37] 陈维君. 水稻成熟度和收获时期的高光谱监测[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [38] 黄敬峰, 王福民, 王秀珍. 水稻高光谱遥感实验研究[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2010.
- [39] Maccioni A, Agati G, Mazzinghi P. New vegetation indices for remote measurement of chlorophylls based on leaf directional reflectance spectra [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B – Biology*, 2001, 61(1/2): 52–61.
- [40] 王正兴, 刘闯, Alfredo H. 植被指数研究进展: 从 AVHRR – NDVI 到 MODIS – EVI [J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 979–987.
- [41] Gao B C. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 58(3): 257–266.
- [42] Sow M, Mbow C, Hély C, et al. Estimation of herbaceous fuel moisture content using vegetation indices and land surface temperature from MODIS data [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(6): 2617–2638.
- [43] 贺佳, 刘冰锋, 李军. 不同生育时期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(24): 141–150.
- [44] 王小平. 基于高光谱的半干旱区作物水分胁迫及其生理参数监测模型研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.