

引黄灌区水稻不同生育期叶绿素含量估测

严林,常庆瑞,刘梦云,王烁

(西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘要: 叶绿素是植物光合作用的物质基础。为了探讨不同生育期水稻冠层光谱与叶绿素含量的响应规律,以宁夏引黄灌区水稻为材料,经小区试验测定水稻冠层光谱与叶绿素含量,分析冠层光谱反射率与叶绿素含量的相关性,建立两者之间的相关模型,结果表明:不同生育期内,水稻冠层光谱反射率差异较大;水稻冠层光谱反射率与叶绿素含量相关性随着生育期的推进而逐渐降低;基于全波段归一化光谱指数(NDSI)构建的拔节期($NDSI_{(456,475)}$, $R^2 = 0.6502$)、抽穗期($NDSI_{(748,782)}$, $R^2 = 0.5264$)、乳熟期($NDSI_{(822,823)}$, $R^2 = 0.5708$)、蜡熟期($NDSI_{(730,731)}$, $R^2 = 0.4396$)叶绿素模型能较好地预测水稻冠层叶绿素含量。

关键词: 引黄灌区;高光谱;水稻;叶绿素含量估测

中图分类号: TP722.4;TP722.5 **文献标志码:** A

Estimation of chlorophyll content in rice at different growth stages based on hyperspectral in yellow river irrigation zone

YAN Lin, CHANG Qing-ru, LIU Meng-yun, WANG Shuo

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Plant chlorophyll is the material basis of plant photosynthesis. In order to investigate the response of rice canopy spectrum and chlorophyll content in different growth stages, the canopy spectral reflectance and chlorophyll content of canopy were measured using the rice plot in Ningxia Irrigation Zone of China. The relationship between canopy spectral reflectance and chlorophyll content was analyzed. The correlation between canopy spectral reflectance and chlorophyll content decreased with the growth period, and the correlation between the canopy spectral reflectance and the canopy reflectance of the canopy was significantly decreased in different growth stages. Based on the normalized vegetation index (NDSI) where stem elongation ($NDSI_{(456,475)}$, $R^2 = 0.6502$), heading ($NDSI_{(748,782)}$, $R^2 = 0.5264$), milk grain ($NDSI_{(822,823)}$, $R^2 = 0.5708$), dough grain ($NDSI_{(730,731)}$, $R^2 = 0.4396$) could be used to predict the chlorophyll content of rice canopy.

Keywords: irrigation districts of the Huanghe River basin; hyperspectrum; rice; chlorophyll content; estimation

叶绿素含量是植物的主要农学参数,是植物光合作用能力、叶片氮素含量以及生长发育的重要指示器,叶绿素含量变化是植物长势监测的重要指标^[1]。叶绿素含量的测定是农业科研和农业生产中经常遇到的问题^[2]。目前,可以使用多种方法对叶绿素含量进行测定,但传统方法不仅费时费力,采样时容易损坏植物叶片组织结构^[3]。另外,由于叶绿素的结构不稳定,容易分解,导致最终测量的叶绿素含量可能会发生变化^[4]。随着高光谱遥感技术的不断发展,可以为植物叶绿素含量无损、快速的定量诊断提供技术支持^[5-6]。国内外学者在利用高光谱

遥感数据监测叶绿素含量大量的研究,王强等^[7]分析了棉花叶绿素密度与原始光谱反射率、一阶导数光谱反射率的相关性,构建了基于比值植被指数和归一化植被指数的叶绿素密度估算模型,其中DR635/DR643为自变量的模型拟合效果最好;孟庆野等^[8]通过对现有植被指数模型的改进,对小麦叶绿素含量进行了估算,取得了较好的可靠性。宫兆宁等^[9]通过分析植物叶片叶绿素含量与“三边”参数的相关性,构建了基于光谱指数的湿地植被叶片叶绿素含量估算模型,取得了较为理想的预测精度。刘桃菊等^[10]探讨了水稻冠层光谱对叶片叶绿素含

量的响应规律,得出了水稻冠层叶片叶绿素监测的特征变量。

光谱指数是通过特定的高光谱遥感数据波段进行线性或非线性组合得到的一种光谱参数^[11],其建立时考虑了部分植物内部的物理机制^[12],可以降低或消除环境背景,如土壤、水体等带来的噪声,比单波段具有更好的灵敏性^[13],可以更准确地提取目标信息。光谱指数如归一化光谱指数、比值光谱指数等已广泛地应用于植被含氮量、含水量、叶面积指数等农学参数的反演^[14],从而对植被的生长状况进行定量或定性的评估^[15]。

目前对水稻冠层光谱反射率与叶绿素含量的研究以南方水稻为主^[16-17],对宁夏引黄灌区水稻的研究并不多见,且多生育期较为少见^[18-21]。为此,本研究以宁夏引黄灌区水稻为研究对象,分析水稻不同生育期内冠层光谱反射率与叶绿素含量的相关性,为利用高光谱遥感技术无损、快速、高效的估测水稻冠层叶绿素含量研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择在宁夏青铜峡市叶盛镇的水稻示范基地。该区地处西北内陆,位于东部季风区与西部干旱区域的交汇地带,属于中温带大陆性干旱气候,冬无严寒,夏无酷暑,四季分明,昼夜温差大,全年日照 3 000 h,年平均气温 8℃,无霜期 176 d,年蒸发量 1 400 mm,年降水量 260 mm,主要集中在 7—9 月。地貌类型为黄河河谷平原,海拔 1 200 m,地形平坦,土层深厚;土壤为灌淤旱耕人为土,质地较砂,土壤有机质含量较低,养分含量较为贫乏。由于此处属于引黄灌溉区,为水稻的生长提供了得天独厚的条件,水稻是当地主要的作物之一。

1.2 试验设计与样品采集

试验于 2015 年 7—9 月在宁夏回族自治区青铜峡市叶盛镇宁夏农科院水稻田间试验区进行。试验共设置 3 个氮素水平,4 个碳素水平,进行碳氮交互试验,共 12 个处理,分别为 CON0、CON1、CON2、C1N0、C1N1、C1N2、C2N0、C2N1、C2N2、C3N0、C3N1 和 C3N2,C0、C1、C2、C3 分别代表四个不同生物物质碳用量水平,分别为 0、4 500、6 750、9 000 kg·hm⁻²,N0、N1、N2 分别表示氮肥(按纯 N 量计)用量分别为 0、240、300 kg·hm⁻²。每个处理设置一个重复,采用随机区组设计,共 24 个试验小区,每个小区面积为 21 × 4.8 = 100.8 m²。水稻品种为宁粳 43 号,采用自然生长方式,分三次施肥,每年五月底插秧,九月底或

十月初收获。田间观测采样时,每个小区内选择 3 个样点,直接在原地进行光谱的测定;同时采集植株样品。每期共获取 72 个样点数据。2015 年在水稻生长的 07 月 14 日(拔节期)、07 月 31 日(抽穗期)、08 月 20 日(乳熟期)和 09 月 15 日(蜡熟期)四个生育期分别进行观测采样,全生育期共获得 328 个样点的数据,分析建模时将每个生育期中的 72 个样点数据按照分层随机抽样法选取 48 个作为建模样本,剩余 24 个作为检验样本。

1.3 冠层光谱测定

水稻冠层光谱采用美国 SVC 公司生产的 SVCHR-1024i 型野外光谱仪测定,光谱范围为 350 ~ 2 500 nm,光谱分辨率(FWHM):350 ~ 1 000 nm, ≤ 3.5 nm;1 000 ~ 1 850 nm, ≤ 9.5 nm;1 850 ~ 2 500 nm, ≤ 6.5 nm。分别在上述四个生育期选择晴朗无云、风力微弱的白天于当地时间 10:00—14:00 时,测定冠层光谱。测量前均用白板进行标定,测量时,为了减少稻田水对光谱的影响,采用光谱仪可选配件光纤探头进行测定,探头距水稻叶片垂直高度约 0.15 m,光谱仪视场角为 7.5°。每个样点测试 5 条光谱曲线,取其平均值作为该样点的光谱反射值,每次观测得到 72 条水稻冠层高光谱数据。

1.4 叶绿素含量测定

采用日本 KONICA MINOLTA 公司生产的 SPAD (Soil Plant Analysis Development Unit)502 叶绿素计,测量与采集光谱对应的水稻植株的冠层叶绿素,每个样点选择 5 株水稻,每株水稻选取冠层展开的第 2、3 片叶进行测量,共取 10 片叶子的平均值作为该样点的叶绿素含量值。每个生育期观测得到与 72 条高光谱曲线数据对应的 72 个叶绿素含量数据。

1.5 数据处理

由于叶绿素含量对光谱的响应波段集中在可见光、近红外波段,且近红外 1 000 nm 之后的波段受各种因素的影响噪声较大,因此本文采用 350 ~ 1 000 nm 波段进行分析,对光谱数据进行平滑去噪之后将其重采样至 1 nm。通过对冠层原始光谱反射率与叶绿素含量的相关分析,选择相关系数最大的波段即特征波段采用指数、一元线性、对数函数、多项式以及幂函数构建叶绿素含量反演模型;基于全波段归一化光谱指数(NDSI)与叶绿素含量的相关性,从中选择对叶绿素含量变化最敏感的波段组合 NDSI 构建叶绿素含量反演模型。

最后采用 R^2 、RMSE 与 RE 作为评价指标来检验反演模型的精度,从中选出最优反演模型。其中, RMSE、RE 计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i} \quad (2)$$

式中, \hat{y}_i 为预测值, y_i 为测量值, n 为样本数。

2 结果与分析

2.1 不同生育期水稻冠层光谱特征

供试水稻不同生育期代表性光谱曲线如图1所示,各生育期反射光谱差异较大。在550 nm处形成一个叶绿素的反射峰,在680 nm处形成一个叶绿素的吸收谷,而在近红外波段(760~1 000 nm)形成一个高反射平台。

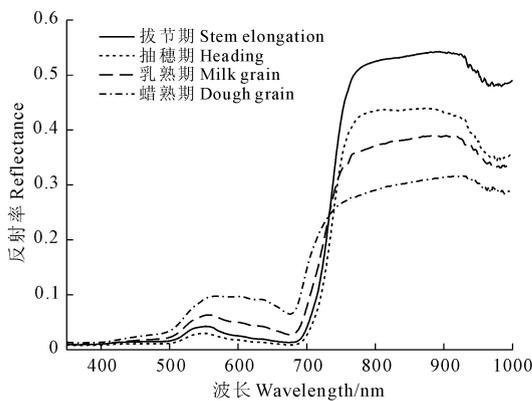


图1 不同生育期水稻冠层光谱特征曲线

Fig.1 Spectral curves at different growth periods of rice canopy

植物不同生育期由于植株体内的叶绿素含量、细胞结构,以及群体的生物量、叶面积指数等的不同,导致各光谱反射特性也会发生变化光谱反射曲线具有明显的差异。在可见光波段(380~760 nm),从拔节期到抽穗期,随着水稻的生长发育,反射率不断下降。从抽穗期到蜡熟期,反射率逐渐升高,最大反射率从0.0297上升到0.0974。不同生育期光谱反射率差异不显著。

在近红外波段,拔节期反射率最高,随着水稻的生长发育,反射率不断下降,且不同时期差异显著。在波长760~920 nm波段范围,光谱反射率分别为:拔节期0.5417、抽穗期0.4389、乳熟期0.3893和蜡熟期0.3152,从拔节期到蜡熟期下降了0.2264,降幅达到41.81%。

2.2 基于敏感波段的叶绿素估算模型

2.2.1 光谱反射率与叶绿素相关性分析 将各生育期水稻冠层光谱反射率分别与其对应的叶绿素含量进行相关性分析,结果如图2所示。从图2可以明

显看出,在可见光波段内,两者呈负相关关系,近红外波段内,两者之间呈极显著正相关关系,且基本维持在同一水平。

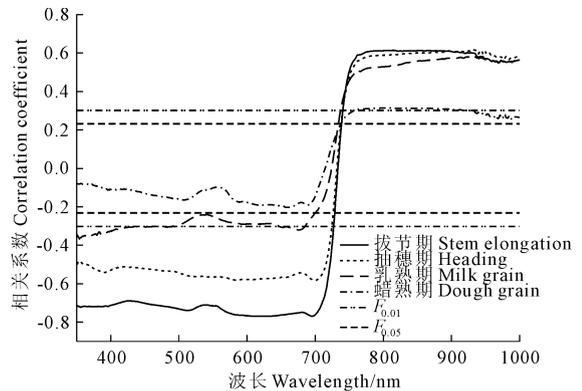


图2 不同生育期冠层光谱反射率与叶绿素含量相关性

Fig.2 Correlation at different growth periods of rice canopy between spectral reflectance and chlorophyll content

在不同生育期,水稻冠层光谱反射率与叶绿素含量的相关性有较大差异。在可见光波段,从拔节期到乳熟期,随着生育期的推进,其光谱反射率与叶绿素含量的相关性逐渐减弱,相关系数由拔节期的-0.7下降到蜡熟期的-0.2以下,其中拔节期与抽穗期的相关系数通过 $F_{0.01}$ 水平的显著性检验;乳熟期相关系数通过 $F_{0.05}$ 水平的显著性检验。近红外波段,从拔节期到乳熟期相关系数均在0.5以上,差异不显著,蜡熟期相关系数在0.3上下波动,但是此时四个生育期均通过 $F_{0.01}$ 显著性水平检验。

2.2.2 基于敏感波段的叶绿素估算模型 根据各生育期水稻冠层光谱反射率与叶绿素含量的相关性,从中选取相关系数最大的波段进行基于单波段的叶绿素含量反演。拔节期,冠层光谱反射率与叶绿素含量的相关性在612 nm处最强,相关系数为-0.7691;抽穗期、乳熟期与蜡熟期相关关系最大的波段,分别为931、932 nm与811 nm,其对应的相关系数分别为0.6195、0.5879与0.3141。根据各生育期所选取的敏感波段构建不同函数类型的冠层光谱叶绿素估算模型,并且对模型进行验证,其结果如表1所示。

以决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)以及相对误差(RE)作为评价指标,选取建模拟合度高、验证误差小的模型作为最佳估算模型。通过对比,各生育期的最佳反演模型分别为:拔节期多项式模型和抽穗期多项式模型、乳熟期指数函数模型、蜡熟期幂函数模型。从拔节期到蜡熟期,建模拟合度与验证拟合度逐渐下降,由拔节期内的0.5921、0.6348下

降到蜡熟期的 0.1708、0.0235; 相对误差 RE 由 4.355% 上升到 19.433%。通过比对蜡熟期各模型

的建模参数与验证参数, 该生育期的叶绿素反演模型估测精度过低, 不能实际应用。

表 1 基于敏感波段构建的不同生育期 SPAD 回归模型及验证

Table 1 Regression models and validation of chlorophyll content at different growth period base on sensitive bands

生育期 Growth period	函数类型 Function type	模型方程 Formula of model	建模精度 Modeling accuracy		验证精度 Validation accuracy		
			R^2	RMSE	R^2	RMSE	RE
拔节期 (R_{612}) Stem elongation	指数 Exponential	$y = 45.955 * \exp(-3.03 * x)$	0.5902	2.444	0.6330	2.042	4.411
	线性 Linear	$y = -119.31 * x + 45.651$	0.5774	2.458	0.6313	2.058	4.444
	对数 Logarithmic	$y = -5.542 * \ln(x) + 22.306$	0.5789	2.453	0.6172	2.090	4.507
	多项式 Polynomial	$y = 866.63 * x^2 - 214.94 * x + 47.662$	0.5921	2.415	0.6348	2.036	4.355
	幂函数 Power	$y = 25.434 * x^{-0.14}$	0.5885	2.472	0.6108	2.107	4.472
抽穗期 (R_{931}) Heading	指数 Exponential	$y = 31.836 * \exp(0.7141 * x)$	0.5162	2.839	0.5330	2.612	4.810
	线性 Linear	$y = 29.743 * x + 30.669$	0.5030	2.848	0.5246	2.596	4.881
	对数 Logarithmic	$y = 8.7946 * \ln(x) + 50.648$	0.4640	2.957	0.4800	2.686	5.164
	多项式 Polynomial	$y = 43.51 * x^2 + 0.8146 * x + 35.074$	0.5129	2.819	0.5537	2.577	4.713
	幂函数 Power	$y = 51.485 * x^{0.212}$	0.4800	2.933	0.4905	2.686	5.069
乳熟期 (R_{932}) Milk gran	指数 Exponential	$y = 32.511 * \exp(0.4457 * x)$	0.3626	1.717	0.4373	1.910	4.006
	线性 Linear	$y = 16.949 * x + 32.128$	0.3611	1.716	0.4372	1.928	4.047
	对数 Logarithmic	$y = 5.7832 * \ln(x) + 44.281$	0.3525	1.727	0.4320	1.968	4.155
	多项式 Polynomial	$y = -7.0169 * x^2 + 22.041 * x + 31.245$	0.3617	1.715	0.4365	1.936	4.067
	幂函数 Power	$y = 44.753 * x^{0.1521}$	0.3541	1.724	0.4332	1.948	4.110
蜡熟期 (R_{811}) Dough grain	指数 Exponential	$y = 8.836 * \exp(1.8351 * x)$	0.1618	4.010	0.0232	4.012	19.541
	线性 Linear	$y = 29.98 * x + 6.838$	0.1452	3.980	0.0235	4.015	19.768
	对数 Logarithmic	$y = 10.503 * \ln(x) + 28.488$	0.1493	3.971	0.0232	4.006	19.762
	多项式 Polynomial	$y = -53.163 * x^2 + 67.598 * x + 0.3433$	0.1469	3.976	0.0237	3.998	19.737
	幂函数 Power	$y = 33.544 * x^{0.6514}$	0.1708	4.002	0.0235	3.996	19.433

2.3 基于 NDSI 的叶绿素估算模型

植被指数是遥感应用研究的常用方法之一, 被成功地应用于植被叶绿素含量等生物物理参量和植物光合作用等生态功能参量估算, 但其对土壤背景的变化比较敏感, 适用于植被发育中期或中等覆盖度的植被监测, 在低密度植被覆盖条件下估算误差较大, 在高覆盖度下容易饱和^[21]。本文参考姚霞等^[22]研究方法, 在 350 ~ 1 000 nm 的波段范围内, 利用 Matlab 编程逐波段计算各生育期水稻冠层光谱反射率的归一化优化指数 (Normalized Difference Spectral Index, NDSI), 其计算公式如下。计算 NDSI 与叶绿素含量的决定系数 (R^2), 最终得到如图 3 所示的各生育期决定系数分布图。

$$NDSI = \frac{R_i - R_j}{R_i + R_j}$$

式中, R_i 和 R_j 表示任意波段的反射率。

从图 3 可以看出, 拔节期 450 ~ 500 nm (横轴) 与 420 ~ 460 nm (纵轴)、540 ~ 580 nm (横轴) 与 750 ~ 1 000 nm (纵轴)、610 ~ 700 nm (横轴) 与 400 ~ 500 nm

(纵轴) 以及 720 ~ 1 000 nm (横轴) 与 700 ~ 750 nm (纵轴) 四个区域内的相关系数均大于 0.8, 其中 475 nm 与 456 nm 组成的 NDSI(475, 456) 与叶绿素的相关性最大, 相关系数为 0.8418。抽穗期, 640 ~ 660 nm (横轴) 与 400 ~ 500 nm (纵轴) 与 740 ~ 1 000 nm (横轴) 与 700 ~ 760 nm (纵轴) 两个组合区域内相关系数均大于 0.7, NDSI 与叶绿素含量相关性最强的波段组合为 782 nm 与 748 nm NDSI(782, 748), 此时相关系数为 0.7675。乳熟期, 相关系数较大的区域逐渐向近红外 - 红光波段转移, 且此时只有 820 ~ 950 nm (横轴) 与 730 ~ 850 nm (纵轴) 区域内的相关系数大于 0.6, 其中由 822 nm 与 823 nm 波段组成的 NDSI(822, 823) 与水稻叶绿素相关性最强, 相关系数为 0.6798。蜡熟期, 冠层光谱反射率与叶绿素的相关性逐渐减弱, 相关系数大于 0.6 的只剩下 700 ~ 750 nm (横轴) 720 ~ 770 nm (纵轴) 波段所组成的狭小区域, 由 730 nm 与 731 nm 波段组合构成的 NDSI(730, 731) 与叶绿素含量的相关性最强, 相关系数为 0.6349。将以上各生育期相关性强的归一化光谱指

数作为特征指数,用于构建水稻叶绿素含量反演模型。

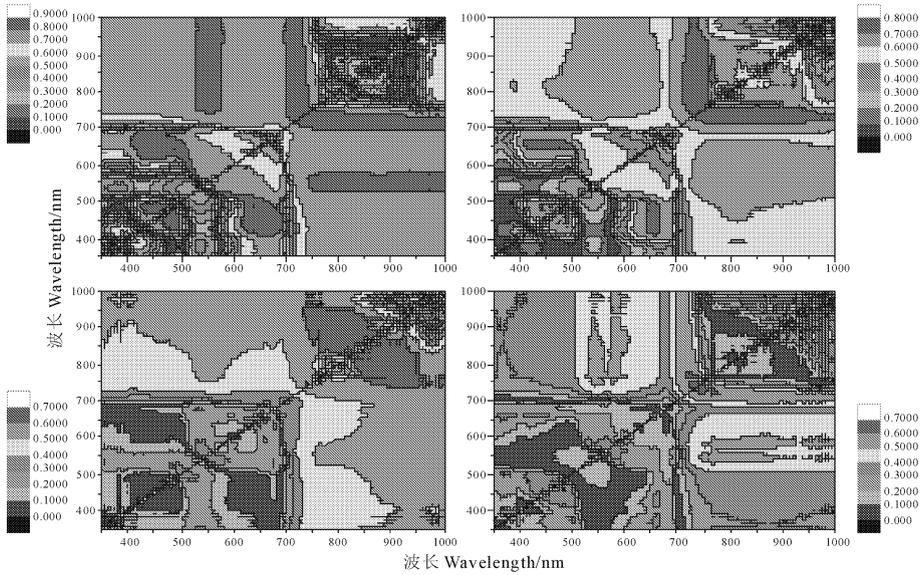


图 3 不同生育期 NDSI 与叶绿素含量相关系数等势线图

Fig.3 Equipotential figure of correlation between NDSI and chlorophyll content at different growth periods

表 2 为基于 NDSI 建立的不同生育期水稻叶绿素估算模型及拟合结果。从表 3 可知从拔节期到乳熟期,拟合 R^2 与检验 R^2 均逐渐减小。利用多项式模型构建的拔节期叶绿素含量反演模型拟合及验证结果较好,其拟合 R^2 与检验 R^2 分别为 0.7515 与 0.6502,而 RMSE 分别为 1.885 与 1.436,其中检验的 RE 为 4.295%。抽穗期,叶绿素含量反演精度最高的为指数函数模型,其拟合 R^2 为 0.6288,检验 R^2 为 0.5254,RE 为 4.553%。乳熟期综合 R^2 、RMSE 与 RE 三者的表现,指数函数模型为最佳模型,其拟合 R^2 、检验 R^2 与 RE 分别为 0.4465、0.5708 与 3.711%。蜡熟期的最佳反演模型为多项式模型,拟合 R^2 为 0.4877,检验 R^2 为 0.4396,RE 为 15.037%。

为了检验所建立的水稻叶绿素估算模型精度及普适性,分别利用检验样本对各生育期的最佳估算模型进行检验,其检验结果如图 4 所示。由图 4 可知,不同生育期,其模型精度差异显著。拔节期,模型精度较高,拟合度 R^2 为 0.6502, RMSE 为 1.4356, RE 为 4.30%;随着生育期的推进,模型精度逐渐下降,至蜡熟期,模型拟合度 R^2 为 0.4396, RMSE 为 2.1403, RE 为 15.04%。

3 讨论

高光谱遥感能够快速无损的获取植物冠层的光谱数据,可以通过高光谱数据分析来得到植物的相关信息。特征光谱选择与植被指数是分析高光谱数

据的主要方法之一。

随着生育期的推进,植物体内的叶绿素含量逐渐降低,植被光合作用减弱,不同生育期内,水稻冠层光谱反射率对叶绿素含量的敏感强度下降明显,本文通过选取不同生育期内与叶绿素含量相关性最高的波段反射率构建不同生育期预测水稻叶绿素含量,结果表明,拔节期和抽穗期模型预测精度较高,而乳熟期与蜡熟期效果则不理想,可能是由于水稻处于拔节期和抽穗期时,水稻植株持续生长,此时光谱反射率与叶绿素含量相关性较高,而在抽穗期以后,植株进入生殖生长阶段,营养物质不断向穗部转移,叶绿素不断分解,光合作用力逐渐下降,叶绿素与光谱反射率的相关性下降明显,导致以敏感波段构建的叶绿素含量估算模型精度下降。

本文利用水稻不同生育期的高光谱数据通过对西北地区水稻的叶绿素相对含量 (SPAD) 进行估算,为水稻分生育期的叶绿素估算提供了科学依据。本文研究表明,不同的建模方法对模型的精度具有较大影响。基于敏感波段、NDSI 构建的非线性模型精度高于线性模型的精度,这可能是由于数据在采集过程中仪器与操作的影响,使两者存在显著的非线性关系。在不同的生育期内,水稻冠层原始光谱对叶绿素含量的敏感波段以及相关系数各不相同,具有较大差异性。各生育期内与叶绿素含量相关性最强的 NDSI 波段组合不同,各生育期的最优模型也不尽相同,造成不同生育期内最优反演模型也不相同。

表 2 基于 NDSI 的不同生育期水稻叶绿素含量估算模型及拟合结果

Table 2 Estimation models and validation of chlorophyll content based on NDSI at different growth periods of rice.

生育期 Growth period	函数类型 Function type	回归方程 Regression equation	建模精度 Modeling accuracy		检验精度 Validation accuracy		
			R^2	RMSE	R^2	RMSE	RE
拔节期 NDSI _(456,475) Stem elongation	指数 Exponential	$y = 45.177 * \exp(-9.121 * x)$	0.7532	1.898	0.6463	1.445	4.288
	线性 Linear	$y = -362.56 * x + 45.022$	0.7509	1.887	0.6492	1.437	4.289
	对数 Logarithmic	——	—	—	—	—	
	多项式 Polynomial	$y = -1218 * x^2 - 328.91 * x + 44.891$	0.7515	1.885	0.6502	1.436	4.295
	幂函数 Power	——	—	—	—	—	
抽穗期 NDSI _(748,782) Heading	指数 Exponential	$y = 33.417 * \exp(2.379 * x)$	0.6288	2.526	0.5264	1.795	4.563
	线性 Linear	$y = 99.275 * x + 32.672$	0.6150	2.506	0.5264	1.794	4.570
	对数 Logarithmic	$y = 7.664 * \ln(x) + 60.6$	0.6011	2.551	0.5110	1.825	4.607
	多项式 Polynomial	$y = -287.28 * x^2 + 149.27 * x + 30.806$	0.6202	2.490	0.5190	1.808	4.574
	幂函数 Power	$y = 65.384 * x^{0.1844}$	0.6195	2.535	0.5162	1.812	4.563
乳熟期 NDSI _(822,823) Milk gran	指数 Exponential	$y = 38.591 * \exp(-76.35 * x)$	0.4465	1.615	0.5708	1.196	3.712
	线性 Linear	$y = -2879.4 * x + 38.646$	0.4375	1.610	0.5714	1.208	3.740
	对数 Logarithmic	——	—	—	—	—	
	多项式 Polynomial	$y = -1E+06 * x^2 - 2648 * x + 38.885$	0.4518	1.589	0.5647	1.221	3.763
	幂函数 Power	——	—	—	—	—	
蜡熟期 NDSI _(730,731) Dough grain	指数 Exponential	$y = 9.516 * \exp(137.88 * x)$	0.4398	3.327	0.2621	2.486	17.419
	线性 Linear	$y = 2383.8 * x + 7.4954$	0.4420	3.216	0.3126	2.332	16.650
	对数 Logarithmic	$y = 10.681 * \ln(x) + 76.376$	0.4722	3.128	0.3737	2.231	15.800
	多项式 Polynomial	$y = -570344 * x^2 + 7660.4 * x - 3.7923$	0.4877	3.081	0.4396	2.140	15.037
	幂函数 Power	$y = 534.34 * x^{0.6258}$	0.4821	3.190	0.3383	2.344	16.585

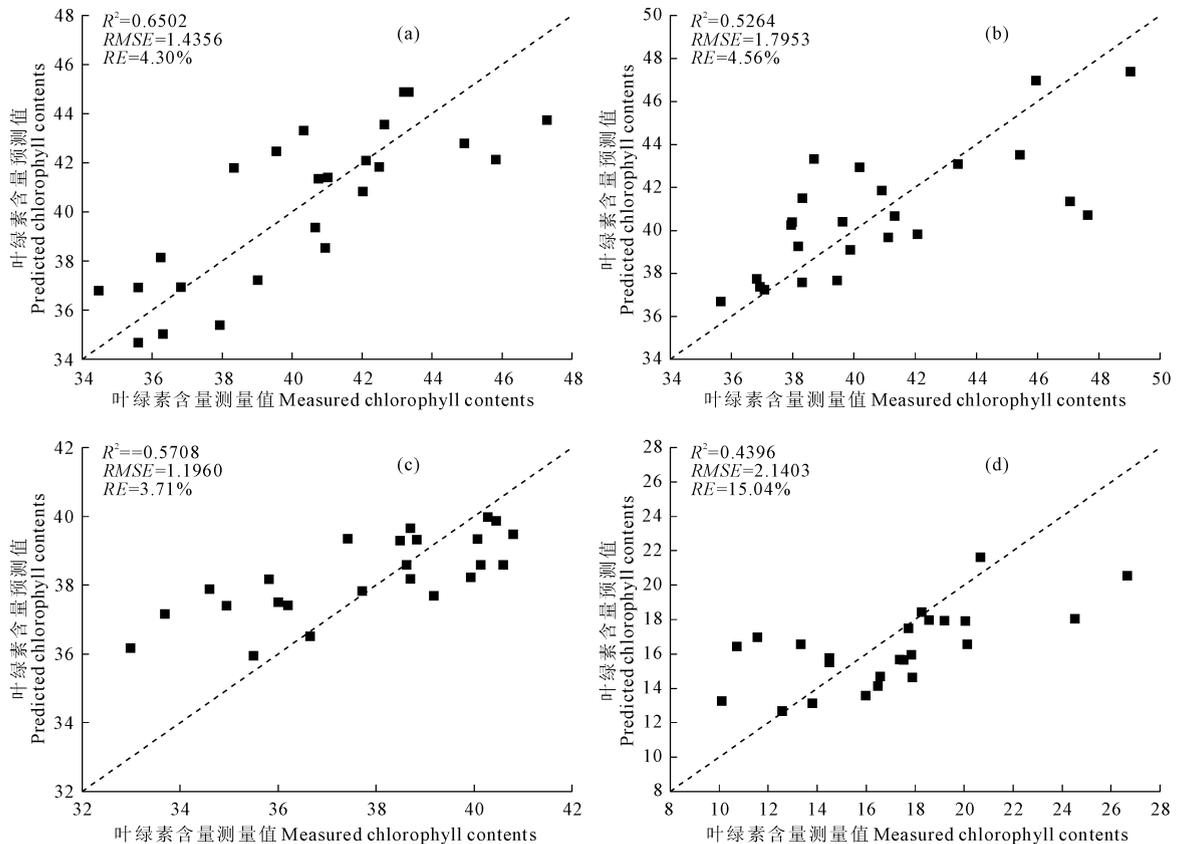


图 4 基于各生育期最佳模型水稻叶绿素含量验证结果

Fig. 4 Validation results of the best models at different growth periods

4 结 论

本文针对西北地区水稻拔节期、抽穗期、乳熟期及蜡熟期,通过分析各生育期冠层光谱反射率与叶绿素含量的相关性,建立了基于敏感波段和 NDSI 的水稻叶绿素含量反演模型,并对模型反演精度进行比较,得到如下结论:

1) 通过对水稻冠层原始光谱与叶绿素含量的相关性分析,得到各生育期敏感波段,分别为拔节期(612 nm)、抽穗期(931 nm)、乳熟期(932 nm)与蜡熟期(811 nm)。

2) 通过分析各生育期逐波段构建的 NDSI 与叶绿素含量的相关性,确定各生育期内与叶绿素含量相关性最强的 NDSI 组合,分别为拔节期 NDSI(475 nm, 456 nm)、抽穗期 NDSI(782 nm, 748 nm)、乳熟期 NDSI(822 nm, 823 nm)与蜡熟期 NDSI(730 nm, 731 nm)。

3) 通过对各生育期内 NDSI 构建的叶绿素含量反演模型比较,得到了各生育期内最佳反演模型,分别为拔节期多项式模型、抽穗期指数模型、乳熟期指数模型和蜡熟期多项式模型。

参 考 文 献:

- [1] 徐新刚,赵春江,王纪华,等.新型光谱曲线特征参数与水稻叶绿素含量间的关系研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(1):188-191.
- [2] 张宪政.植物叶绿素含量测定——丙酮乙醇混合液法[J].辽宁农业科学,1986,(3):28-30.
- [3] Wellburn A R. The spectral determination of chlorophylls a, and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution[J]. Journal of Plant Physiology, 1994,144(3):307-313.
- [4] 姚付启,张振华,杨润亚,等.基于主成分分析和 BP 神经网络的法国梧桐叶绿素含量高光谱反演研究[J].测绘科学,2010,35(1):109-112.
- [5] Vane G, Goetz A F H. Terrestrial imaging spectrometry: Current status, future trends[J]. Remote Sensing of Environment, 1993,44(2-3):117-126.
- [6] Fassnacht K S, Gower S T, Mackenzie M D, et al. Estimating the leaf

area index of north central Wisconsin forests using the Landsat Thematic Mapper[J]. Remote Sensing of Environment, 1997,61(2):229-245.

- [7] 王强,易秋香,包安明,等.基于高光谱反射率的棉花冠层叶绿素密度估算[J].农业工程学报,2012,28(15):125-132.
- [8] 孟庆野,董恒,秦其明,等.基于高光谱遥感监测植被叶绿素含量的一种植被指数 MTCARI[J].光谱学与光谱分析,2012,32(8):2218-2222.
- [9] 宫兆宁,赵雅莉,赵文吉,等.基于光谱指数的植物叶片叶绿素含量的估算模型[J].生态学报,2014,34(20):5736-5745.
- [10] 刘桃菊,胡雯君,张笑东,等.水稻冠层高光谱特征变量与叶片叶绿素含量的相关性研究[J].激光生物学报,2015,24(5):428-435.
- [11] 童庆禧,张兵,郑兰芬.高光谱遥感[M].北京:高等教育出版社,2006:121.
- [12] 颜春燕,牛铮,王纪华,等.光谱指数用于叶绿素含量提取的评价及一种改进的农作物冠层叶绿素含量提取模型[J].遥感学报,2005,9(6):742-750.
- [13] 姜海玲,杨杭,陈小平等.利用光谱指数反演植被叶绿素含量的精度及稳定性研究[J].光谱学与光谱分析,2015,35(4):975-981.
- [14] 王纪华,赵春江,黄文江.农业定量遥感基础与应用[M].北京:科学出版社,2008:21.
- [15] Bannari A, Morin D, Bonn F, et al. A review of vegetation indices[J]. Remote Sensing Reviews, 1995,13(1):95-120.
- [16] 陈小龙,陈灿,周莉.水稻不同生育期叶绿素含量的测定及其相关性分析[J].现代农业科技,2010,(17):42-44.
- [17] 毕景芝,刘湘南,赵冬.基于粗糙集简约的水稻叶片叶绿素含量高光谱反演[J].应用科学学报,2014,32(4):394-400.
- [18] 李云梅,倪绍祥,黄敬峰.高光谱数据探讨水稻叶片叶绿素含量对叶片及冠层光谱反射特性的影响[J].遥感技术与应用,2003,18(1):1-5.
- [19] 韩超.基于叶片光谱估测水稻叶绿素含量研究[D].青岛:青岛科技大学,2010.
- [20] 秦占飞,常庆瑞,申健,等.引黄灌区水稻红边特征及 SPAD 高光谱预测模型[J].武汉大学学报(信息科学版),2016,41(9):1168-1175.
- [21] 谢静,陈适,王珂,等.基于高光谱成像技术的水稻叶片 SPAD 值及其分布问题研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2014,48(2):269-273.
- [22] 虞连玉,蔡焕杰,姚付启,等.植被指数反演冬小麦植被覆盖度的适用性研究[J].农业机械学报,2015,46(1):231-239.
- [23] 姚霞,朱艳,田永超,等.小麦叶层氮含量估测的最佳高光谱参数研究[J].中国农业科学,2009,42(8):2716-2725.