

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2009.01131

油菜叶片气孔导度与冠层光谱植被指数的相关性

孙金英^{1,2} 曹宏鑫^{2,*} 黄云¹

¹ 西南大学资源与环境学院, 重庆 400716; ² 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所 / 数字农业工程技术研究中心, 江苏南京 210014

摘要: 利用冠层光谱实时、无损和定量监测植物叶片气孔导度, 对于改善作物水分利用效率以及产量和品质预测预报具有十分重要的意义。本研究采用裂区设计法(宁油 18 和宁油 16 两个品种)、两个供氮水平(N₁₈₀: 纯氮 180 kg hm⁻²、P₂O₅ 120 kg hm⁻²、K₂O 180 kg hm⁻²和硼砂 15 kg hm⁻²; N₀: CK)于 2007—2008 年测定油菜冠层光谱反射率、叶片气孔导度以及叶面积指数(LAI)和叶片鲜、干生物量, 利用各波段光谱反射率组合产生的植被指数, 分析油菜叶片气孔导度的变化规律及其与光谱植被指数的相关性, 从而建立光谱植被指数对叶片气孔导度的估算模型。结果表明, 在整个生育期油菜叶片气孔导度呈“双峰”变化, LAI 和叶片鲜、干生物量均呈单峰曲线变化; 开花前光谱植被指数与油菜叶片气孔导度和油菜冠层叶片平均气孔导度均呈极显著正相关, 且光谱植被指数对油菜冠层叶片气孔导度的拟合效果好于对油菜叶片气孔导度的。光谱植被指数与冠层叶片气孔导度的量化关系可为今后快速、无损、大面积的油菜作物气孔导度估算奠定一定基础。

关键词: 油菜; 气孔导度; 光谱; 植被指数; 相关性

Correlation between Canopy Spectral Vegetation Index and Leaf Stomatal Conductance in Rapeseed (*Brassica napus* L.)

SUN Jin-Ying^{1,2}, CAO Hong-Xin^{2,*}, and HUANG Yun¹

¹ College of Resources and Environment, South West University, Chongqing 400716, China; ² Institute of Agricultural Resources and Environment Research / Engineering Research Center for Digital Agriculture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China

Abstract: It plays a very important role for improving water use efficiency of crops and predicting crop yield and quality to monitor leaf stomatal conductance with real time, non-destructively and quantitatively by using canopy spectral characteristics. In the paper, the spectral reflectance, leaf stomatal conductance, LAI (leaf area index), leaf fresh and dry biomass of two rapeseed varieties were determined in a field experiment by split-plot design with the main plot of N levels and the subsidiary plot of cultivars, 3 replications, and plot area of 4.3 m by 7.0 m in 2007–2008. The changes in leaf stomatal conductance and the correlation between leaf stomatal conductance and spectral vegetation index were analyzed based on the vegetation index combined with spectral reflectance in all kinds of bands. The estimating models for spectral vegetation index of leaf stomatal conductance were established according to the relationship between spectral vegetation index and leaf stomatal conductance. The results showed that there were two peaks in changes curve of leaf stomatal conductance, and one peak in the changes curve of LAI, leaf fresh and dry biomass in the whole growth period. There existed significantly positive correlation between spectral vegetation index and leaf stomatal conductance or canopy leaf stomatal conductance before flowering, and the spectral vegetation index better fitted into canopy average stomatal conductance than into leaf stomatal conductance. The quantitative relationships between spectral vegetation index and canopy leaf stomatal conductance laid the foundation for rapid and non-destructive stomatal conductance estimates in a large area of rapes in future.

Keywords: Rapeseed (*Brassica napus* L.); Stomatal conductance; Spectrum; Vegetation index; Correlation

气孔导度(stomatal conductance)表示气孔张开的程度, 它直接影响作物的光合、呼吸及蒸腾作用, 进而影响作物的产量和品质^[1-2]。气孔是植物叶片与

外界气体交换的主要通道, 它可根据环境条件的变化调节其开度大小而使植物在水分损失较少的条件下获取最多的 CO₂。Eastin 等^[3]认为水分胁迫引起光

本研究由江苏省“六大人才高峰”项目(06-G-169)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 曹宏鑫, E-mail: caohongxin07@yahoo.cn; Tel: 025-48390125

第一作者联系方式: E-mail: sunjinying240@sina.com

Received(收稿日期): 2009-01-05; Accepted(接受日期): 2009-03-17.

合产物的减少,首先是由于气孔而非内部阻力。因此,研究植物叶片气孔导度的实时、无损和定量监测技术,对于改善作物水分利用效率以及产量和品质预测预报都具有十分重要的意义^[1-2]。国内外就植物叶片气孔导度与冠层光谱特征之间的关系已有研究。Carter^[4]研究表明部分松树种叶片的气孔导度与比值指数(R701/R820)的相关程度高于比值指数(R701/R820)与叶片二氧化碳同化率的相关。另外,简单比值植被指数(SR)或归一化植被指数(NDVI)与气孔导度有良好的相关关系^[5-6];而 Flexas 等^[7]还曾尝试利用荧光特征参数 F_v/F_o 无损监测叶片气孔导度,两者的关系可用双曲线函数拟合,拟合效果很好。田永超等^[8]认为比值指数(R1650/R760)可较好监测不同水氮条件下水稻叶片的气孔开闭特征。

植被在 400~700 nm 波段范围内的反射光谱主要由叶绿素和其他色素的吸收决定^[9],而在近红外波段的反射光谱主要受叶片细胞排列方式和植被结构影响^[10],利用这两个波段反射光谱的组合可产生大量植被指数,并广泛应用于地表植被调查和研究。然而,利用地面遥感光谱定量监测油菜叶片气孔导度的研究仍鲜有报道。本研究旨在阐明油菜叶片及冠层叶片气孔导度与冠层光谱植被指数的量化关系,建立基于光谱植被指数的油菜叶片及冠层叶片

气孔导度监测模型,以期为油菜生长状况及产量品质的遥感监测奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与设 计

于 2007—2008 年在江苏省农业科学院院部试验田种植江苏省农业科学院经济作物研究所育成的宁油 18(V1)和宁油 16(V2)。试验地前茬为水稻,土壤肥力中等,0~40 cm 耕层含有机碳 13.70 g kg⁻¹、速效氮 54.95 mg kg⁻¹、速效磷 24.25 mg kg⁻¹、速效钾 105.03 mg kg⁻¹,行距 40 cm,株距 17~20 cm,每小区栽 10 行,小区间空一行。采用裂区设计,主区为氮肥水平,副区为品种,品种随机排列,重复 3 次,共 12 个小区,小区面积 7.0 m×4.3 m。2007 年 9 月 26 日播种,11 月 4 日移栽。2008 年 1 月中旬至 2 月中旬发生雨雪灾害,旬平均气温较常年偏低 1~4℃,降水量较常年多 3 倍(表 1),使宁油 16 号抽薹、初花及收获等生育时期分别较上年推迟 18、10 和 3 d。设 2 个施肥水平,即施肥 N₁₈₀(纯氮 180 kg hm⁻²、P₂O₅ 120 kg hm⁻²、K₂O 180 kg hm⁻²和硼砂 15 kg hm⁻²)和不施肥 N₀(CK)。氮肥按基肥 苗肥 腊肥=5 3 2,其余肥料全部基施。田间管理按大田管理方式进行。试验中测定和取样同步进行,间隔时间为 14 d

表 1 2008 年南京地区 1~2 月份气象情况
Table 1 Weather data from Jan. to Feb. of 2008 in Nanjing area

项目 Item	1 月上旬 The first ten days of Jan.	1 月中旬 The middle ten days of Jan.	1 月下旬 The last ten days of Jan.	2 月上旬 The first ten days of Feb.	2 月中旬 The middle ten days of Feb.	2 月下旬 The last ten days of Feb.
平均气温 Average temperature (°C)	4.5	1.4	-1.2	-0.8	2.4	6.2
与常年相比 Comparison with normal year (°C)	2.0	-1.0	-4.0	-4.0	-3.0	1.0
旬极端最低气温 The lowest temperature (°C)	-5.9	-3.6	-7.6	-8.5	-6.4	-2.4
降水量 Rainfall (mm)	0	63	47	6	0	13
与常年相比 Comparison with normal year	—	Increasing 2 to 3 times	Increasing 3 times	Decreasing 5/10	—	Decreasing 2/10
累积最大积雪深度 The largest snow depth (cm)	—	4	37	28	—	—
降水日数 Rain days (d)	—	7	6	3	0	2
日照 Sun time (h)	39	9	9	55	77	62
与常年相比 Comparison with normal year	Decreasing a bit	Decreasing 8/10	Decreasing 8/10	Increasing 2/10	Increasing 9/10	Increasing 7/10

(越冬期和特殊天气除外)。

1.2 冠层光谱测定

冠层光谱反射率采用美制 EXOTECH 100BX 四波段光谱辐射计, 选择晴天 9:00~10:00 之间太阳高度角大于 45°时测定。光谱仪探头表面平行于油菜冠层并与冠层保持 2 m 垂直距离, 测试范围为直径 50 cm 的一个圆, 每次测量前后均进行标准白板校正。EXOTECH 100BX 四波段光谱辐射计的 ABCD 4 个波段对应于美国陆地卫星 TM1234 波段, 其中 A 为蓝光波段(以下简称 B), 波长 450~520 nm; B 为绿光波段(以下简称 G), 波长 520~600 nm; C 为红光波段(以下简称 R), 波长 630~690 nm; D 为近红外波段(以下简称 NIR), 波长 760~900 nm。用该仪器测量值计算的植被指数与卫星遥感数据具有可比性。

1.3 气孔导度、叶面积指数和叶干鲜重测定

采用 ECA-PB0402 光合测定仪, 与冠层光谱反射率同步测定气孔导度, 选择晴天无云的上午 9:00~10:00 测定, 越冬期前测定叶位为顶部第 1 片完全展开功能叶, 越冬期后测定叶位为顶部第 1 和 2 片完全展开功能叶。测量时尽量不触摸所测量的叶片及所测部位的叶表面, 以防改变自然状态的叶温, 影响测量数据的准确性。上样时要叶面朝上, 夹在叶室的有效部分, 即 3 cm×2 cm 的标准叶室内, 防止叶室漏气而测量不准。当 ΔCO_2 值稳定时记录数

据, 每小区测 3 株, 求气孔导度的平均值。用孔径 6 mm 的单孔打孔器(德国基尔大学植物营养和土壤研究所设计)分别从距叶梢和叶柄 2 cm 处开始顺次打孔, 每张叶片共打 20 孔, 并注意避开中心叶脉和已枯萎部分, 将打下的圆形叶片计数并装入纸袋烘干(75℃烘 48 h)、称重(W_1 , 单位: g); 打孔后的剩余叶片装入纸袋烘干、称重(W_2 , 单位: g)。叶面积(cm^2)= $(W_1 + W_2) \times \text{打孔数} \times 3.14 r^2 / W_1$, 其中 r 为打孔器的半径, 这里为 3 mm。与光谱测量同步, 每次每小区取代表性植株 3 株, 用 0.001 g 精度电子天平称叶片鲜重后置恒温干燥箱内烘干, 前半小时温度控制在 105℃杀青, 以后维持在 70~80℃, 12 h 后第一次称重, 然后每隔 1 h 称重一次, 当样本前后 2 次重量差 5%时不再烘烤, 称得干重。进一步计算 LAI (全部叶片的面积与占地面积之比, 面积单位: cm^2)。

1.4 光谱植被指数的计算

用红、绿、蓝光 3 个波段的组合代替常规 NDVI 中的红光波段, 其中包括绿光波段、蓝光波段、绿光与红光波段的和、绿光与蓝光波段的和、红光与蓝光波段的和以及红绿蓝 3 波段的和, 各种波段组合构成的植被指数公式见表 2。NDVI 的通用公式为 Visible NDVI= $\text{VNDVI}=(\text{NIR}-\text{VIS})/(\text{NIR}+\text{VIS})$, 其中, NIR 为近红外波段, VIS 为可见光波段, 它可能是红绿蓝的一个波段, 也可能是几个波段的组合。

表 2 光谱植被指数的公式
Table 2 Formula of spectral vegetation index

名称 Name	计算公式 Formula	参考文献 Reference
RVI	$\text{RVI} = \text{NIR}/\text{Red}$	Person & Miller ^[11]
NDVI	$\text{NDVI}=(\text{NIR}-\text{Red})/(\text{NIR}+\text{Red})$	Rouse et al. ^[12]
Green NDVI	$\text{GNDVI}=(\text{NIR}-\text{Green})/(\text{NIR}+\text{Green})$	Gitelson et al. ^[13]
Blue NDVI	$\text{BNDVI}=(\text{NIR}-\text{Blue})/(\text{NIR}+\text{Blue})$	Wang et al. ^[14]
Green-Red NDVI	$\text{GRNDVI}=[\text{NIR}-(\text{Green}+\text{Red})]/[\text{NIR}+(\text{Green}+\text{Red})]$	Wang et al. ^[14]
Green-Blue NDVI	$\text{GBNDVI}=[\text{NIR}-(\text{Green}+\text{Blue})]/[\text{NIR}+(\text{Green}+\text{Blue})]$	Wang et al. ^[14]
Red-Blue NDVI	$\text{RBNDVI}=[\text{NIR}-(\text{Red}+\text{Blue})]/[\text{NIR}+(\text{Red}+\text{Blue})]$	Wang et al. ^[14]
Pan NDVI	$\text{PNDVI}=[\text{NIR}-(\text{Green}+\text{Red}+\text{Blue})]/[\text{NIR}+(\text{Green}+\text{Red}+\text{Blue})]$	Wang et al. ^[14]

2 结果与分析

2.1 油菜叶片气孔导度的变化趋势

同一测定日期, 相同品种和施肥处理第 1 片完全展开功能叶的平均气孔导度与其相邻叶位的绝对相差较小, 一般在 0.05 左右, 最大为 0.07。因此, 取 3 株第 1 片完全展开功能叶气孔导度平均值代表油菜叶片气孔导度。在油菜整个生育期随发育期推移

4 个处理的叶片气孔导度变化呈“双峰”曲线(图 1)。在移栽初期, 叶片气孔导度随时间缓慢增加, 在越冬前第一次达到高峰(2007 年 12 月 8 日); 进入越冬期后, 由于油菜停止生长, 在 2008 年 1 月 8 日叶片气孔导度最小; 春季返青后, 油菜恢复生长, 叶片气孔导度迅速增加, 2008 年 3 月 27 日再次达到高峰, 成为全生育期最大值; 开花后, 油菜角果大量形成,

叶片养分开始向角果转移, 叶片内部组织结构开始发生变化, 叶片光合作用减小。研究表明, 在形成油菜籽粒产量的营养物质中, 大约有 1/3 来源于叶片光合作用, 2/3 来源于角果光合作用^[15-17]。叶片气孔导度呈下降趋势直到成熟。另外, 4 个处理油菜的叶片气孔导度差异较小, 仅越冬前施肥处理高于对照,

施肥区 V1 大于 V2, 无肥区 V2 大于 V1; 越冬后, 无论施肥区还是无肥区, 均基本上 V2 大于 V1。

2.2 油菜生长参数的变化趋势

从图 2 和图 3 可知, 不同处理油菜的 LAI 和叶干鲜重均不同, 施肥处理高于无肥处理, 品种间差异较小, 均呈单峰曲线。

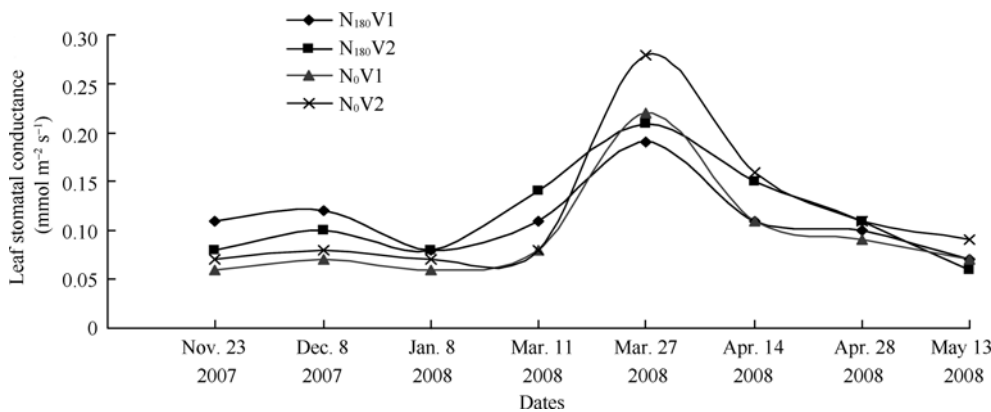


图 1 整个生育期油菜叶片气孔导度的变化趋势

Fig. 1 Changes in leaf stomatal conductance of rapeseed in the whole growth period

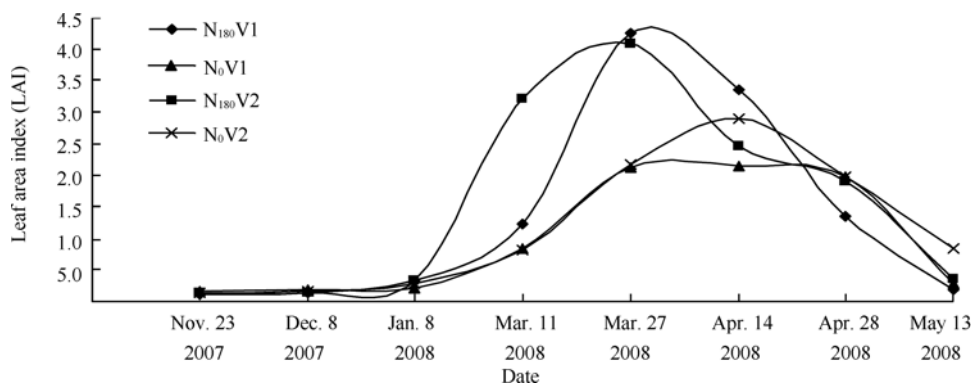


图 2 整个生育期油菜叶面积指数的变化趋势

Fig. 2 Changes in LAI of rapeseed in the whole growth period

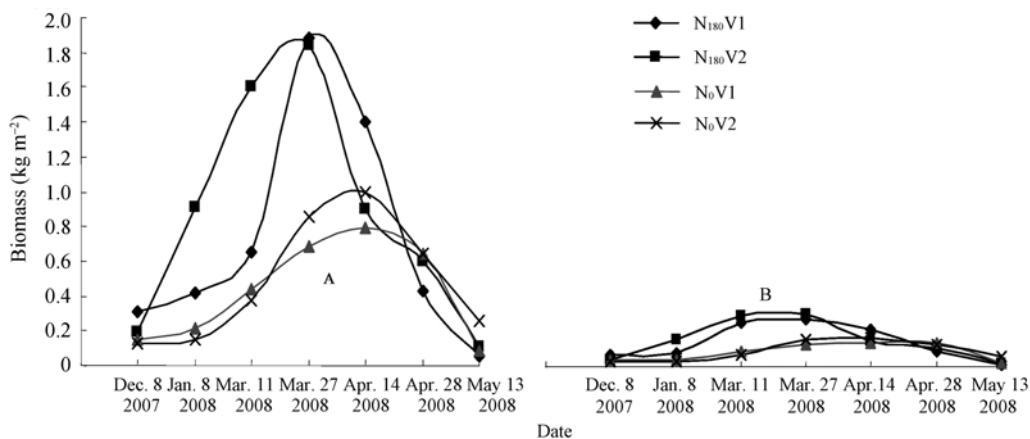


图 3 整个生育期油菜叶鲜、干生物量的变化趋势

Fig. 3 Changes in leaf fresh and dry biomass of rapeseed in the whole growth period

A: 油菜叶鲜生物量; B: 干生物量。
A: fresh leaf biomass; B: dry biomass.

2.3 光谱植被指数与油菜叶片气孔导度的关系

相关分析表明, 开花前光谱植被指数与油菜叶片气孔导度呈极显著正相关; 开花后则相反, 除 BNDVI 与油菜叶片气孔导度显著相关外, 其他光谱植被指数与油菜叶片气孔导度相关性均不显著(表 3), 这是由于开花期间, 油菜冠层光谱主要反映花的信息, 而角果形成后, 油菜冠层光谱主要反映角果的信息, 此时, 叶片对冠层光谱的影响减少。因此, 开花后光谱植被指数与油菜叶片气孔导度的相关性较低。

2.4 油菜叶片气孔导度的光谱植被指数估算模型

根据光谱植被指数与叶片气孔导度的关系(表 2), 建立光谱植被指数对叶片气孔导度的拟合方程(线性和非线性)(表 4)。由表 4 可见, 光谱植被指数变量回归 R^2 值, 除 RVI 以乘幂形式最好外, 其他以指数形式最好, 各种光谱植被指数对叶片气孔导度的拟合效果都较好, 但不同光谱植被指数也有一定差别, 其中, 以 BNDVI 对油菜叶片气孔导度的拟合效果最好, R^2 值为 0.6462; GBNDVI、GNDVI、PNDVI、RBNDVI、GRNDVI 和 NDVI 的拟合效果次之, R^2 都在 0.6001 以上; 而 RVI 的拟合效果较差, R^2 值为 0.5676。

2.5 油菜冠层叶片气孔导度的光谱植被指数估算模型

冠层叶片气孔导度对于大面积(航空、航天尺度)遥感监测有重要意义, 它是植物水分监测、光合生产力调查的重要手段。进一步分析光谱植被指数与油菜冠层叶片平均气孔导度(即近似为油菜叶片气孔导度和叶面积指数的乘积)的关系表明, 其相关顺序与光谱植被指数和油菜叶片平均气孔导度的相关性一致(表 5), 光谱植被指数对冠层叶片平均气孔导度的最佳拟合方程为线性和指数形式(图 4), 且光谱植被指数对油菜冠层叶片平均气孔导度的拟合效果好于对油菜叶片气孔导度的, 原因是试验中光谱参

数来源于冠层反射光谱值, 其对植物冠层生长参数更敏感。从图 4 可看出, 除 GNDVI 和 GBNDVI 以指数形式最好外, 其他以直线形式最好, R^2 值都在 0.7270 以上, 其中, RVI 变量回归方程的 R^2 值达 0.8074。

3 讨论

光谱技术的发展, 使利用作物光谱特征反演农学参数成为可能^[18-22], 如何精确提取作物冠层光谱信息, 消除和减少土壤背景的影响, 提高反射光谱的预测精度是影响该技术使用的关键。本研究尝试利用各波段光谱反射率构成的植被指数来提高油菜冠层叶片气孔导度光谱监测的精度, 分析不同植被指数与油菜冠层叶片气孔导度的定量关系, 表明利用 RVI 建立油菜冠层叶片气孔导度光谱模型的 R^2 达 0.8074; 由红、绿、蓝光各波段组合构成的植被指数(GNDVI、BNDVI、GRNDVI、GBNDVI、RBNDVI 和 PNDVI)对油菜冠层叶片气孔导度拟合方程的 R^2 相差不大, 但拟合效果都好于常规 NDVI; 由绿光波段以及绿蓝光波段构成的 GNDVI 和 GBNDVI 相对其他几个植被指数(BNDVI、GRNDVI、RBNDVI 和 PNDVI)对油菜冠层叶片气孔导度具有较好的估算效果, 这是由绿光波段和蓝光波段对油菜叶片气孔导度敏感性以及 GNDVI 和 GBNDVI 特有的公式形式决定的。

光谱植被指数与冠层群体叶片气孔导度的量化关系为今后快速、无损、大面积的油菜作物气孔导度估算奠定了一定基础, 同时也为油菜冠层叶片气孔导度光谱监测仪器的研究开发提供新的理论依据和技术支持。但本研究中油菜冠层叶片气孔导度监测模型仅建立在 2 个施肥水平、2 个品种的基础之上, 试验数据来源有限, 所有量化方程还有待进一步测试和完善。且 2008 年初南方雪灾, 这次连续低温雨雪冰冻天气给油菜正常生长发育造成不利影响,

表 3 光谱植被指数与油菜叶片气孔导度的相关性
Table 3 Correlation between spectral vegetation index and leaf stomatal conductance in rapeseed

	RVI	NDVI	GNDVI	BNDVI	GRNDVI	GBNDVI	RBNDVI	PNDVI
开花前($n = 20$) Before flowering stage	0.710**	0.732**	0.743**	0.756**	0.738**	0.749**	0.743**	0.743**
开花后($n = 12$) After flowering stage	-0.165	-0.250	-0.039	0.616*	-0.153	0.176	-0.029	-0.030

*和**分别表示 0.05 和 0.01 水平显著性。

* and ** denote significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 4 开花前油菜叶片气孔导度与光谱植被指数的回归方程

Table 4 Regression equation between leaf stomatal conductance and spectral vegetation index before flowering

植被指数 Vegetation index		回归方程 Regression equation	决定系数 R^2
比值植被指数 RVI	线性 Linear	$y = 0.0492x - 0.0216$	0.5043
	对数 Logarithmic	$y = 0.1593 \ln(x) - 0.041$	0.5315
	乘幂 Power	$y = 0.0302x^{1.2505}$	0.6001
	指数 Exponential	$y = 0.0353e^{0.3853x}$	0.5676
归一化植被指数 NDVI	线性 Linear	$y = 0.4276x - 0.0762$	0.5343
	对数 Logarithmic	$y = 0.1921 \ln(x) + 0.2746$	0.5123
	乘幂 Power	$y = 0.3609x^{1.5107}$	0.5808
	指数 Exponential	$y = 0.0229e^{3.3598x}$	0.6044
绿光波段构成的 NDVI GNDVI	线性 Linear	$y = 0.6086x - 0.1511$	0.5516
	对数 Logarithmic	$y = 0.2749 \ln(x) + 0.3461$	0.5468
	乘幂 Power	$y = 0.6354x^{2.1657}$	0.6221
	指数 Exponential	$y = 0.0126e^{4.7945x}$	0.6272
绿红光波段构成的 NDVI GRNDVI	线性 Linear	$y = 0.4034x + 0.0621$	0.5447
	指数 Exponential	$y = 0.0678e^{3.1721x}$	0.6172
蓝光波段构成的 NDVI BNDVI	线性 Linear	$y = 0.6096x - 0.2459$	0.5711
	对数 Logarithmic	$y = 0.3704 \ln(x) + 0.312$	0.5647
	乘幂 Power	$y = 0.4842x^{2.9127}$	0.6401
	指数 Exponential	$y = 0.0060e^{4.7898x}$	0.6462
绿蓝光波段构成的 NDVI GBNDVI	线性 Linear	$y = 0.4608x + 0.0151$	0.5617
	对数 Logarithmic	$y = 0.0976 \ln(x) + 0.274$	0.5197
	乘幂 Power	$y = 0.3600x^{0.7692}$	0.5915
	指数 Exponential	$y = 0.0469e^{3.6247x}$	0.6369
红蓝光波段构成的 NDVI RBNDVI	线性 Linear	$y = 0.3725x + 0.0313$	0.5517
	对数 Logarithmic	$y = 0.0713 \ln(x) + 0.2323$	0.4570
	乘幂 Power	$y = 0.2589x^{0.5615}$	0.5188
	指数 Exponential	$y = 0.0533e^{2.9258x}$	0.6237
红绿蓝光波段构成的 NDVI PNDVI	线性 Linear	$y = 0.3865x + 0.1183$	0.5518
	指数 Exponential	$y = 0.1055e^{3.0374x}$	0.6246

RVI: ratio vegetation index; NDVI: normalized difference vegetation index; GNDVI: NDVI constituted by green band; GRNDVI: NDVI constituted by green and red bands; BNDVI: NDVI constituted by blue band; GBNDVI: NDVI constituted by green and blue bands; RBNDVI: NDVI constituted by red and blue bands; PNDVI: NDVI constituted by red, green and blue bands.

表 5 光谱植被指数与油菜冠层叶片气孔导度的相关性

Table 5 Correlation between spectral vegetation index and canopy leaf stomatal conductance of rapeseed

	RVI	NDVI	GNDVI	BNDVI	GRNDVI	GBNDVI	RBNDVI	PNDVI
开花前(n=20) Before flowering stage	0.898**	0.853**	0.863**	0.879**	0.870**	0.880**	0.876**	0.882**
开花后(n=12) After flowering stage	-0.249	-0.326	-0.117	0.601*	-0.231	0.108	-0.098	-0.104

* 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平显著性。

* and ** denote significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

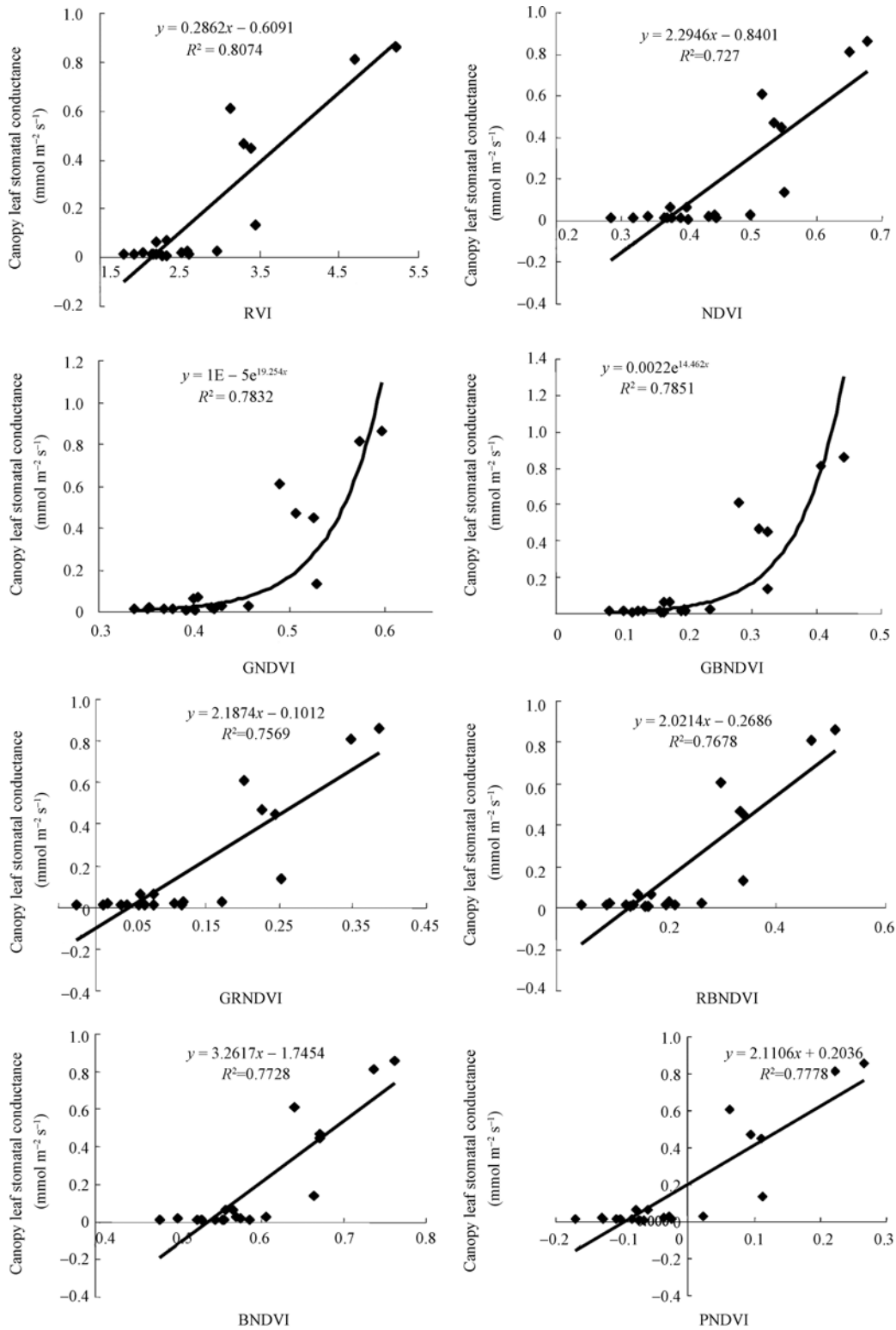


图 4 开花前光谱植被指数对油菜冠层叶片气孔导度的拟合方程
 Fig. 4 Fitted regression equation between spectral vegetation index and canopy leaf stomatal conductance of rapeseed before flowering

属特殊年份。因此, 今后研究工作的重点是通过地面遥感和高空或卫星遥感相结合, 获得大面积的航

空成像或卫星影像高光谱资料, 建立较大尺度的农业遥感应用技术, 使结果具有较好的可靠性和普适性。

4 结论

光谱植被指数对油菜冠层叶片气孔导度的拟合效果好于对油菜叶片气孔导度的, 光谱植被指数变量回归的 R^2 值都在 0.7270 以上。

致谢: 本研究得到江苏省农业科学院金之庆、石春林、葛道阔、魏秀芳、朱大威、陈玉泉等老师, 扬州大学刘岩、南京农业大学岳延滨等同学的帮助和支持, 在此表示诚致的谢意。

References

- [1] Zhang J-H(张佳华), Wang C-Y(王长耀). Water deficit crop yield model based on remote sensing and crop photosynthesis. *J Hydraulic Eng* (水利学报), 1999, 30(8): 35–39(in Chinese with English abstract)
- [2] Zhang J-H(张佳华), Fu C-B(符淙斌), Wang C-Y(王长耀). Study on stomatal conductance distribution of winter wheat in regional scale using remote sensing information. *Acta Meteorol Sin* (气象学报), 2000, 58(3): 347–353(in Chinese with English abstract)
- [3] Eastin J D, Sullivan C J. Environmental Stress Influences on Plant Persistence, Physiology, and Production. In: Tesar M B ed. *Physiological Basis of Crop Growth and Development*. Madison, WI: ASA Special Publication, 1984. pp 201–238
- [4] Carter G A. Reflectance wavebands and indices for remote estimation of photosynthesis and stomatal conductance in pine canopies. *Remote Sens Environ*, 1998, 63: 61–72
- [5] Myneni R B, Ganapol B D, Asrar G. Remote sensing of vegetation canopy photosynthetic and stomatal conductance efficiencies. *Remote Sens Environ*, 1992, 42: 217–238
- [6] Verma S B, Sellers P J, Walthall C L, Hall F G, Kim J, Goetz S J. Photosynthesis and stomatal conductance related to reflectance on the canopy scale. *Remote Sens Environ*, 1993, 44: 103–116
- [7] Flexas J, Escalona J M, Evain S, Gulias J, Moya I, Osmond C B, Medrano H. Steady-state chlorophyll fluorescence (Fs) measurements as a tool to follow variations of net CO₂ assimilation and stomatal conductance during water-stress in C₃ plants. *Physiol Plant*, 2002, 114: 231–240
- [8] Tian Y-C(田永超), Zhu Y(朱艳), Yao X(姚霞), Zhou C-J(周昌俊), Cao W-X(曹卫星). Quantitative relationships between canopy spectral reflectance and leaf stomatal conductance in rice. *J Plant Ecol* (植物生态学报), 2006, 30(2): 261–267(in Chinese with English abstract)
- [9] Mutanga O, Skidmore A K, Wieren S. Discrimination tropical grass (*Cenchrus ciliaris*) canopies grown under different nitrogen treatment using spectroradiometry. *J Photogram Remote Sens*, 2003, 57: 263–272
- [10] Jago R A, Mark E J C, Curran P J. Estimation canopy chlorophyll concentration from field and air born spectra. *Remote Sens Environ*, 1999, 68: 217–224
- [11] Pearson R L, Miller D L. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie. In: *Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment*. MI: ERIM Ann Arbor, 1972. pp 1357–1381
- [12] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, Deering D W, Harlan J C. *Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation of Natural Vegetation*. Greenbelt, MD, USA: NASA/GSFC, Type III Final Report, 1974. pp 1–371
- [13] Gitelson A A, Kaufman Y, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MO-DIS. *Remote Sens Environ*, 1996, 58: 289–298
- [14] Wang F-M(王福民), Huang J-F(黄敬峰), Tang Y-L(唐延林), Wang X-Z(王秀珍). New vegetation index and its application in estimating leaf area index of rice. *J Rice Sci* (水稻科学), 2007, 21(2): 159–166(in Chinese with English abstract)
- [15] Leng S-H(冷锁虎), Zhu G-R(朱耕如). Study on the origin rape grain dry matter. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1992, 18(4): 250–270(in Chinese with English abstract)
- [16] Fu S-Z(傅寿仲). Photosynthesis and output formation of rape. *Jiangsu Agric Sci* (江苏农业科学), 1980, (6): 18–21(in Chinese with English abstract)
- [17] Fu S-Z(傅寿仲), Zhu G-R(朱耕如). *Oil Crop Science in Jiangsu Province* (江苏油作科学). Nanjing: Nanjing Sci & Tech Press, 1995. pp 220–237(in Chinese)
- [18] Liu W-D(刘伟东), Xiang Y-Q(项月琴), Zheng L-F(郑兰芬), Tong Q-X(童庆禧), Wu C-S(吴长山). Relationships between rice LAI, CHD and hyperspectra data. *J Remote Sens* (遥感学报), 2000, (4): 279–283 (in Chinese with English abstract)
- [19] Thiemann S, Kaufmann H. Determination of chlorophyll content and trophic state of lakes using field spectrometer and IRS_1C satellite data in the Mecklenburg lake district Germany. *Remote Sens Environ*, 2000, 73: 227–235
- [20] Tian Q, Tong Q, Guo X, Zhao C. Spectroscopic determination of wheat water status using 1650–1850 nm spectral absorption features. *Intl J Remote Sens*, 2001, 22: 2329–2338
- [21] Jensen A, Lorenzen B. Radiometric estimation of biomass and nitrogen content of barley grown at different nitrogen levels. *Intl J Remote Sens*, 1990, 11: 1809–1820
- [22] Filella I, Penuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *Intl J Remote Sens*, 1994, 15: 1459–1470