

不同氮水平下棉花冠层 NDVI 分析与产量估测*

李新伟 余炳凤 吕新田 敏石宏刚

(石河子大学新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832003)

摘要:以 2011—2013 年连续 3 个棉花生长季的田间试验数据为基础,利用 GreenSeeker 获取冠层归一化差值植被指数(NDVI),研究不同氮营养条件下棉花的产量变化、冠层 NDVI 值随施氮量和生育期的动态变化,以及 NDVI 与产量的相关性定量分析,建立基于 NDVI 的棉花产量估算模型。结果表明,生育期冠层 NDVI 值总体上呈“低-高-低”变化趋势。棉花 4 个生育期(盛蕾期、花期、盛铃期和初絮期)的 NDVI 值与产量的相关系数(r)分别为 0.7137、0.8479、0.8979、0.6926,在花期($P=0.0034$)、盛铃期($P=0.0008$)达到极显著正相关。经验证,NDVI 能够估测关键生育期的产量,其中以盛铃期预测精度最高($R^2=0.9082$,RSME 为 301.67 kg/hm²,RE 为 5.15%)。

关键词:棉花 冠层 归一化植被指数 氮水平 产量估测

中图分类号: S127; S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)07-0231-06

引言

遥感技术是快速获取农田作物重要营养元素及产量实时信息的重要手段之一,植被指数是反映作物生长信息重要的光谱参数。而 GreenSeeker 是目前用于地面快速获取归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)的主要工具,它克服了传统方法时效性差的缺点,同时摆脱了被动高光谱遥感对外界光源的严格要求而被广泛应用^[1]。NDVI 能很好地反映作物的生长状况和营养信息,并对作物产量进行估测。研究表明,NDVI 值与作物的生长状况、发育时期关系紧密^[2-4],可用于反演作物的叶片氮含量^[5-6]、叶片叶绿素含量^[7-8]、叶面积指数^[9-11]和产量等^[12]。

随着研究的深入,利用 GreenSeeker 对作物进行营养诊断及产量估测已得到人们的广泛认可^[13-15]。如何准确、实时获得冠层 NDVI 值,建立高精度、可靠的估产模型,是目前研究的重点。因此本文连续 3 年使用 GreenSeeker 遥感工具研究不同氮营养水平下棉花各生育期冠层 NDVI 值的动态变化特征,分析各生育期 NDVI 值与产量的相关关系,建立棉花产量估算模型,并依据独立的试验资料进行追肥模型的验证,以期实现膜下滴灌条件下棉花实时、精准的推荐施肥。

1 材料与与方法

1.1 试验区概况

试验在石河子大学农学院试验站(85°94'E, 44°27'N)进行,供试材料为棉花常规早熟品种新陆早 48 号。采用膜下滴灌栽培(一膜两管四行),宽窄行(20 + 45 + 20 + 60 cm)模式,株距 10 cm。2011—2013 年连续 3 年进行(2011 年 4 月 28 日出苗、7 月 8 日打顶、9 月 10 日测产量;2012 年 5 月 1 日出苗、7 月 10 日打顶、9 月 15 日测产量;2013 年 5 月 3 日出苗、7 月 15 日打顶、9 月 20 日测产量)。试验区属于典型干旱气候,土壤质地为沙壤土,0~20 cm 土层含有有机质、碱解氮、速效磷、速效钾分别为:17.82 g/kg、52.38 mg/kg、25.88 mg/kg、186 mg/kg。

1.2 试验设计

2011—2012 年设 5 个氮处理,分别施纯氮 0、120、240、360 和 480 kg/hm²,分别用 N0、N1、N2、N3、N4 表示。重复 3 次,共 15 个小区,小区面积为 51 m²,试验小区为随机排列。磷、钾肥作为基肥在播种前一次性施入,磷肥和钾肥施入量分别为 225 kg/hm²、227.5 kg/hm²。2013 年采用同一品种,同一栽培模式,获取模型验证数据。氮肥为尿素(含 N46%)、磷肥为重过磷酸钙(含 P₂O₅ 46%)、钾肥为氯化钾(含 K₂O 50%),水、氮肥配比见表 1。

收稿日期:2014-02-06 修回日期:2014-03-13

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA101902)

作者简介:李新伟,博士生,主要从事精准农业和农业信息化研究,E-mail: xinshili123@163.com

通讯作者:吕新,教授,博士生导师,主要从事绿洲生态和农业信息化研究,E-mail: lvshz@126.com

表1 水肥配比表

Tab.1 Method of water and nitrogen distribution

参数	合计	灌溉次数										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
灌溉占总量的比例/%	100	4	6	10	12	15	20	12	6	6	5	4
施肥占追肥总量的比例/%	100	0	0	10	10	20	30	20	10	0	0	0

1.3 数据获取

1.3.1 光谱数据获取

分别于2011年和2012年棉花盛蕾期、花期、盛铃期、初絮期,用GreenSeeker获取NDVI数据。测量时将光谱传感器平行于棉花冠层,距离地面高度50cm、长度10m。其上操作保持一致,每小区选取长势均匀的3个点,3次重复。测试中在GreenSeeker的手持设备进行编号并及时将数据传到计算机上。对所获得的数据进行差异显著性分析后,取平均值作为该区的光谱测量值。2013年获取对应数据15组,作为模型验证数据。

1.3.2 产量测定

9月初进行测产,10月进行实收,称量并记录小区各次收获的籽棉产量。采用Microsoft Excel 2003、SPSS 13.0、Origin 9.0软件进行数据整理、分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 不同生育期棉花冠层NDVI值随施氮量的变化

总体上看2011年棉花盛铃期冠层NDVI值最大,盛蕾期最小,花期和初絮期NDVI值相差不明显(见图1)。随着施氮量的增加冠层NDVI值呈现“低-高”的趋势,在N2处理时NDVI值最大,随氮水平的提高NDVI值不再增加。年间比较,2012年与2011年结果一致,这可能是由于施氮量过多之后棉株营养生长旺盛,棉花生物量迅速增加,冠层NDVI达到饱和导致出现上述结果。从NDVI值误差上看低氮处理的标准误差大于高氮处理的误差,

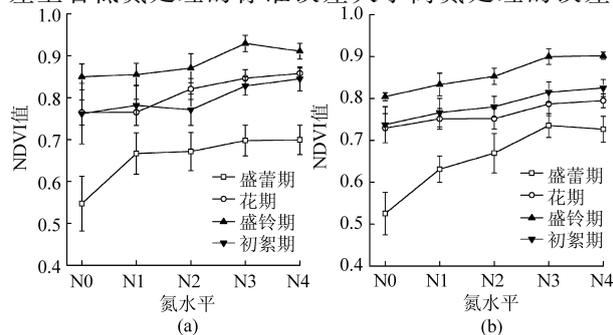


图1 棉花各生育期冠层NDVI值随施氮量变化曲线

Fig.1 Cotton canopy NDVI value change trend with nitrogen application rate in different growth period

(a) 2011年 (b) 2012年

这可能是土壤肥力差,棉花长势不均匀导致NDVI值误差大。

2.2 不同氮处理棉花NDVI随生育期的变化

通过2011年和2012年数据可以看出棉花冠层NDVI值的动态变化趋势基本一致,呈现“低-高-低”趋势(见图2)。棉花从盛蕾期开始到花期,冠层NDVI值大幅度上升,在盛铃期达到最大,之后NDVI值下降。这可能由于随着生育期的推进,叶片叶绿素含量大幅度升高,对红光的吸收增大、反射率下降,近红外光谱反射率增加,使NDVI值急剧上升。但在盛铃期生殖生长大于营养生长时期光谱吸收接近饱和,并伴随有叶片脱落,可能会导致NDVI值有所降低,因此其冠层NDVI值表现为以上结果。盛蕾期、初絮期的标准误差大于盛铃期,是棉花生长前期和后期长势不均或有杂草、出现病虫害,NDVI值获取受外界因素影响大所致。

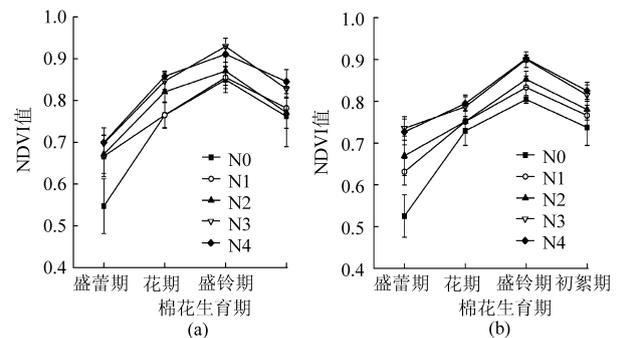


图2 棉花不同氮水平冠层NDVI值随着生育期变化曲线

Fig.2 Cotton canopy NDVI value change trend with growth periods in different nitrogen treatments

(a) 2011年 (b) 2012年

2.3 棉花冠层NDVI值与施氮量的定量关系

在棉花盛蕾期、花期、盛铃期和初絮期,随着氮肥施用量的增加,棉花NDVI值均呈线性增加趋势(图3)。其中花期的决定系数最高($R^2 = 0.9147$),在盛铃期和初絮期相关系数较低,这与不同氮水平NDVI随生育期变化结果一致。在各个时期不施肥处理的NDVI稳定性较差,且在盛蕾期和初絮期表现更明显,可能是前期地力条件差,长势不均和后期氮肥胁迫所致。本试验中NDVI值与测定前的施氮量较累积施氮量相关性最好,这与潘薇薇等^[16]研究结果一致。

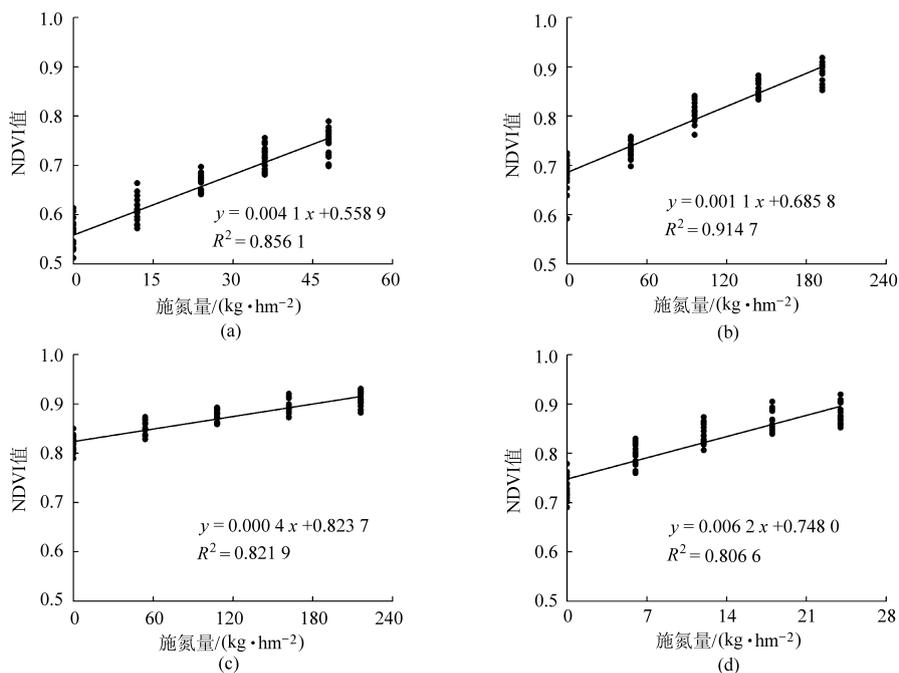


图 3 棉花各生育期 NDVI 值与施氮量的关系

Fig. 3 Relation of canopy NDVI value and nitrogen fertilizer level at different growth stages ($n = 90$, $P_{0.05} = 0.127$, $P_{0.01} = 0.178$)

(a) 盛蕾期 (b) 花期 (c) 盛铃期 (d) 初絮期

2.4 不同氮水平处理及施肥量对棉花产量的影响

结果表明随着施氮量的增加,产量呈现先增加后降低的趋势如图 4 所示,图中产量数据为 3 次重复的平均值,氮处理间不同字母表示达到显著性差异。2011 年和 2012 年连续 2 年 N0 处理与 N1、N2、N3、N4 处理的产量差异达显著水平,N2 和 N3 处理产量差异显著。表明施肥量增加到一定程度,对增产效果不显著,当肥料严重过剩时反而会使产量降低。随着施氮量的增加棉花产量并不是线性的,而是施氮量超过一定量,产量反而有所下降,即棉花产量随施氮量增高呈抛物线变化(见图 5)。

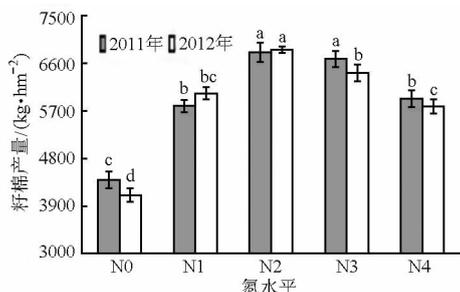


图 4 不同氮水平的棉花产量

Fig. 4 Cotton yields change with different nitrogen treatments

2.5 不同生育期 NDVI 与产量的相关性分析

由表 2 可知,棉花 4 个生育期不同施氮量的 NDVI 值与产量的相关性均表现出正相关关系,从 2011 年的试验结果看,棉花盛铃期 NDVI 值与产量呈极显著相关,且相关系数最大($r = 0.9080$),在初

絮期没有 NDVI 值与产量显著相关性。2012 年的试验结果表明棉花盛铃期 NDVI 值与产量呈显著相关,且相关系数最大($r = 0.8889$),但在盛蕾期 NDVI 值与产量相关不显著。从年际间比较,2011 年两者相关性比 2012 年相对较高,这可能由于年际间的棉花长势、测量系统误差引起的。从 2011—

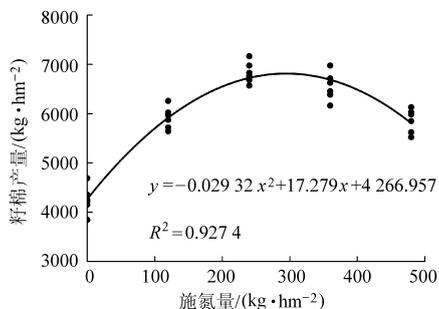


图 5 棉花产量随施氮量变化回归曲线

Fig. 5 Fitting regression equation of cotton yield nitrogen treatment ($n = 30$, $P_{0.05} = 0.354$, $P_{0.01} = 0.592$)

表 2 棉花不同生育期冠层 NDVI 与产量相关系数
Tab. 2 Coefficients between canopy NDVI and yield at different growth stages

年份	样本数	生育期			
		盛蕾期	花期	盛铃期	初絮期
2011	15	0.7678*	0.8670*	0.9080**	0.7052
2012	15	0.6796	0.8474*	0.8889*	0.6818*
2011—2012	30	0.7137*	0.8479**	0.8979**	0.6926

注: $r_{0.05(15)} = 0.564$, $r_{0.01(15)} = 0.715$, $r_{0.05(30)} = 0.329$, $r_{0.01(30)} = 0.547$, * 在 0.05 水平上显著相关, ** 在 0.01 水平上显著相关。

2012年年际数据看,花期和盛蕾期的NDVI值与产量呈极显著相关,且相关系数和单个年份的相差不大,建立回归模型时可以使用年际间数据。

2.6 棉花估产模型的建立

基于棉花冠层NDVI值与其产量的相关性,使用2011—2012年年际间的数据建立了二者之间的线性回归模型,试图利用NDVI值估测棉花产量(见

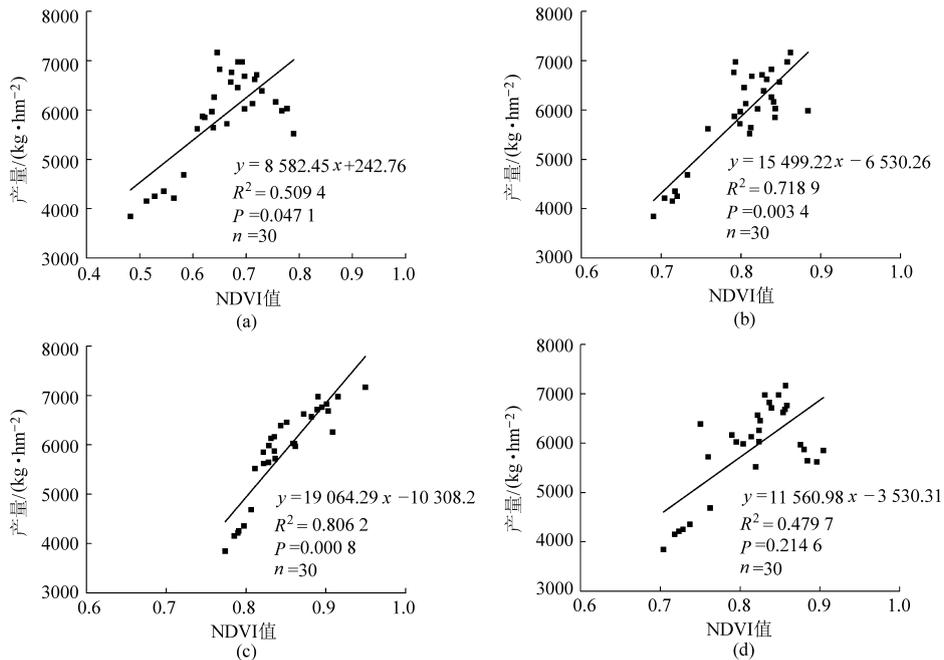


图6 棉花各生育期NDVI值与产量的回归关系

Fig. 6 Relation of canopy NDVI value and yield at different growth stages

(a) 盛蕾期 (b) 花期 (c) 盛铃期 (d) 初絮期

2.7 棉花估产模型的验证

为探明关键生育期的棉花冠层群体参数估测模型的准确性,用2013年独立试验资料对预测模型进行验证($n = 15$),选取精度(R^2)、均方根误差(RMSE)、相对误差(RE)作为检验指标(见表3)。通过对棉花4个生育期产量与NDVI的回归模型检验分析可知:模型的决定系数在盛铃期最大($R^2 = 0.9064$),在盛蕾期最小($R^2 = 0.6812$);模型的均方根误差在盛铃期最小(RMSE为 301.67 kg/hm^2),花期最大(RMSE为 441.61 kg/hm^2);模型的相对误差在盛铃期最小(RE为 5.15%),盛蕾期最大(RE为 15.32%)。进一步验证产量在盛铃期预测的准确

表3 棉花各生育时期产量预测值与实测值模型检验分析
Tab. 3 Model validation analysis for predicted yield and measured yield in different growing stages

生育期	R^2	RMSE/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	RE/%
盛蕾期	0.6812	429.41	15.32
花期	0.8786	441.61	7.53
盛铃期	0.9064	301.67	5.15
初絮期	0.7704	375.47	9.40

图6)。纵观棉花整个生育期,棉花盛铃期NDVI值与其产量的决定系数最大($R^2 = 0.8062$),而初絮期的决定系数最小。从显著水平看棉花花期、盛铃期NDVI值与其产量的线性关系达到了极显著水平($P < 0.01$)。说明利用冠层NDVI值均可以估算棉花的产量,其中以棉花盛铃期NDVI值估测产量的可靠性较高。

度最高。

3 讨论

NDVI是判断作物生长状况的重要植被指数之一,表示了植物生长状态及植被空间分布密度^[17]。当其值在 $0 \sim 1$ 之间时,表明植被近红外光谱反射率(NIR)与红光光谱反射率(R)反差大,说明有植被覆盖,且随覆盖度增大而增大。卢艳丽等^[18]利用GreenSeeker获取小麦的NDVI随生育进程表现出先升高后下降的变化趋势,且在灌浆期达到最大。这与本试验结果冠层NDVI值在棉花生育期呈“低-高-低”变化趋势基本一致。从不同施氮水平上可知,随着施氮量的增加棉花冠层NDVI值增大,但施肥量达到一定程度,NDVI值不再增加。这与前人在利用GreenSeeker对玉米NDVI值随施氮量变化的研究结果一致^[19],而与胡昊等^[20]小麦NDVI值随着施氮量的增加而增加的研究结果不一致,这可能是作物差异引起的。

估算作物产量可以为产量图的生成提供数据支持,为生产管理提供决策。不少学者用NDVI与作

物产量的显著相关性间接估算作物产量^[21-22]。综合试验3年结果,棉花花期、盛铃期冠层NDVI与产量相关性均达到了极显著水平,其中以盛铃期相关性最高。可见,利用冠层NDVI估测棉花产量是可行的。

本研究建立的NDVI与产量的回归模型表明,利用盛蕾期、花期、盛铃期、初絮期的NDVI均可以预测棉花产量,且以盛铃期预测效果最好。这与前人研究花铃期是棉花产量形成的关键时期的观点基本一致^[23]。利用棉花某一时期的冠层NDVI估产是可行的,但模型的普适性与可靠性还需要大量的试验数据进行验证。

4 结论

(1) 棉花冠层NDVI值随着生育期的推进呈“低-高-低”变化趋势,在盛铃期达到最大,之后

NDVI值缓慢下降。棉花盛铃期冠层NDVI值最大,盛蕾期最小,花期和初絮期NDVI值相差不明显。

(2) 棉花4个生育期不同施氮量的NDVI值与产量的相关性均表现出正相关关系,2011年和2012年的试验结果表明棉花花期、盛铃期NDVI值与产量均呈显著正相关;从2011—2012年年际间的数据看,花期和盛蕾期的NDVI值与产量呈极显著相关(r 分别为0.8479、0.8979),且相关系数和单个年份的相差不大,可用年际间数据建立回归模型。

(3) 在棉花4个关键生育期(盛蕾期、花期、盛铃期和初絮期)建立了NDVI值与产量之间的线性回归模型。试验使用2013年获取的NDVI数据验证估算模型,通过相关决定系数、均方根误差和相对误差的验证分析,结果表明冠层NDVI值对产量的估测在棉花盛铃期可靠性最高。

参 考 文 献

- William R R, Gordon V J. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91(3): 357 - 363.
- Mkhabela M S, Bullock P, Raj S, et al. Crop yield forecasting on the canadian prairies using MODIS NDVI data[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2011, 115(3): 385 - 393.
- Hasegawa K, Matsuyama H, Tsuzuki H, et al. Improving the estimation of leaf area index by using remotely sensed NDVI with BRDF signatures[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 514 - 519.
- Aboelghar M, Arafat S, Saleh A, et al. Retrieving leaf area index from SPOT4 satellite data[J]. *The Egypt Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2010, 13(2): 121 - 127.
- Wright D L, Rasmussen V P, Ramsey R D, et al. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management[J]. *GI Science & Remote Sensing*, 2004, 41(4): 287 - 300.
- Yao Xinfeng, Yao Xia, Jia Wenqing, et al. Comparison and intercalibration of vegetation indices from different sensors for monitoring above-ground plant nitrogen uptake in winter wheat[J]. *Sensors*, 2013, 13(3): 3109 - 3130.
- 于静,李斐,樊明寿. 主动作物冠层传感器 GreenSeeker 在马铃薯氮素营养诊断中应用的可行性分析[J]. *中国蔬菜*, 2012(8): 20 - 25.
Yu Jing, Li Fei, Fan Mingshou. Possible application of GreenSeeker in diagnosing potato nitrogen nutrition status[J]. *China Vegetables*, 2012(8): 20 - 25. (in Chinese)
- Soenen S A, Peddle D R, Hall R J, et al. Estimating above ground forest biomass from canopy reflectance model inversion in mountainous terrain[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7): 1325 - 1337.
- Chen J F, Chen K M, Xu J B. Research on the remote sensing monitoring of grassland productivity based on TM - NDVI[J]. *Agriculture Science and Technology*, 2011, 12(1): 119 - 122.
- 彭虢,张树文. 基于NDVI与LAI的水稻生长状况研究[J]. *遥感技术与应用*, 2002, 17(1): 12 - 16.
Peng Xiao, Zhang Shuwen. Research on rice growth status based on NDVI and LAI[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2002, 17(1): 12 - 16. (in Chinese)
- 杨峰,范亚民,李建龙,等. 高光谱数据估测稻麦叶面积指数和叶绿素密度[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 237 - 242.
- Gianquinto G, Orsini F, Fercondini M, et al. A methodological approach for defining spectral indices for assessing tomato nitrogen status and yield[J]. *European Journal of Agronomy*, 2011, 35(3): 135 - 143.
- 宋文冲. 基于GreenSeeker遥感技术的小麦-玉米估产模型及推荐施肥研究[D]. 北京:中国科学院, 2006.
- 冯宗会. 不同水氮管理下NDVI监测及优化施氮研究[D]. 北京:首都师范大学, 2012.
Feng Zonghui. A study in normalized difference vegetation index monitoring and optimization of nitrogen application with different levels of water and nitrogen[D]. Beijing: Capital Normal University, 2012. (in Chinese)
- 王磊,自由路,卢艳丽,等. 基于GreenSeeker的冬小麦NDVI分析与产量估算[J]. *作物学报*, 2012, 38(4): 747 - 753.
Wang Lei, Bai Youlu, Lu Yanli, et al. NDVI analysis and yield estimation in winter wheat based on GreenSeeker[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 747 - 753. (in Chinese)
- 潘薇薇,危常州,丁琼,等. 膜下滴灌棉花氮素推荐施肥模型的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 204 - 210.

- Pan Weiwei, Wei Changzhou, Ding Qiong. Nitrogenous fertilizer recommendation model for cotton under mulch – drip irrigation [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 204 – 210. (in Chinese)
- 17 李民赞. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京:科学出版社,2006:195 – 196.
- 18 卢艳丽,胡昊,白由路,等. 植被覆盖度对冬小麦冠层光谱的影响及量化估产研究[J]. *麦类作物学报*,2010, 30(1):96 – 100.
Lu Yanli, Hu Hao, Bai Youlu, et al. Effects of vegetation coverage on the canopy spectral and yield quantitative estimation in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(1): 96 – 100. (in Chinese)
- 19 郭建华,王秀,孟志军,等. 主动遥感光谱仪 Greenseeker 与 SPAD 对玉米氮素营养诊断的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008,14(1):43 – 47.
Guo Jianhua, Wang Xiu, Meng Zhijun, et al. Study on diagnosing nitrogen nutrition status of corn using Greenseeker and SPAD meter[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(1): 43 – 47. (in Chinese)
- 20 胡昊,白由路,杨俐苹,等. 基于 SPAD – 502 与 Greenseeker 的冬小麦营养诊断的研究[J]. *中国农业生态学报*,2010, 18(4):748 – 752.
Hu Hao, Bai Youlu, Yang Liping, et al. Diagnosis of nitrogen nutrition in winter wheat (*Triticum aestivum*) via SPAD – 502 and GreenSeeker [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 748 – 752. (in Chinese)
- 21 Ferrio J P, Villegas D, Zarco J, et al. Assessment of durum wheat yield using visible and near-infrared reflectance spectra of canopies[J]. *Field Crops Research*, 2005, 94(2 – 3): 126 – 148.
- 22 Grohs D S, Bredemeier C, Mundstock C M, et al. Model for yield potential estimation in wheat and barley using the GreneSeeker sensor[J]. *Engenharia Agricola*, 2009, 29(1): 101 – 112.
- 23 孙振纲,许琦,刘彦军. 棉花花铃期管理技术[J]. *现代农业科技*,2011(7):96 – 97.
Sun Zhengang, Xu Qi, Liu Yanjun. Management techniques of cotton in florescence[J]. *Xiandai Nongye Keji*, 2011(7): 96 – 97. (in Chinese)
- 24 何亚娟,潘学标,裴志远,等. 基于 SPOT 遥感数据的甘蔗叶面积指数反演和产量估算[J]. *农业机械学报*,2013,44(5): 226 – 231.
He Yajuan, Pan Xuebiao, Pei Zhiyuan, et al. Estimation of LAI and yield of sugarcane based on SPOT remote sensing data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 226 – 231. (in Chinese)
- 25 黄青,李丹丹,陈仲新. 基于 MODIS 数据的冬小麦种植面积快速提取与长势监测[J]. *农业机械学报*,2012,43(7):163 – 167.
Huang Qing, Li Dandan, Chen Zhongxin, et al. Monitoring of planting area and growth condition of winter wheat in China based on MODIS data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(7): 163 – 167. (in Chinese)

Canopy NDVI Analysis and Yield Estimation for Cotton in Different Nitrogen Treatments

Li Xinwei Yu Bingfeng Lü Xin Tian Min Shi Honggang

(Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: The field experiment was carried out in three cotton growing seasons from 2011 to 2013. Cotton canopy normalized difference vegetation index (NDVI) was obtained by GreenSeeker at full-bud stage, flowering stage, full-boll stage, early-wadding stage. Yields, from different nitrogen application rates, were collected at harvest stage and compared with each other. Canopy NDVI, changing with nitrogen application level and growth period, were analyzed, separately. Furthermore, the correlation analysis was done between yield and canopy NDVI. Yield estimation models were established for cotton based on NDVI value. Results indicate that, in the four growth stages, with N rates increasing, canopy NDVI value presents a trend of “low-high-low”. And the correlation coefficient between canopy NDVI and yield is 0.713 7, 0.847 9, 0.897 9, 0.692 6, respectively, and significantly positive correlative at flowering stage ($P = 0.003 4$) as well as full-boll stage ($P = 0.000 8$). Regression between predicted yield and measured yield values of the year of 2013 shows that the correlation coefficient is maximum at full-boll stage ($R^2 = 0.908 2$), and the root mean square error (RMSE) is 301.67 kg/hm², while the relative error (5.15%) is minimum. The results suggest that it is especially feasible to use canopy NDVI to estimate yield of cotton at the full-boll stage.

Key words: Cotton Canopy NDVI Nitrogen treatments Yield estimation