

不同水氮耦合条件下棉花冠层 NDVI 分析与产量估算

温鹏飞 朱鹏 张强 张泽 田敏 吕新*

(石河子大学 农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室,新疆 石河子 832000)

摘要 为研究冠层归一化差值植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)在棉花重要生育时期估算棉花产量的可行性,使用 GreenSeeker 分别对不同灌水施肥条件下棉花光谱反射率 NDVI 值进行测定优化,建立 NDVI 值与产量关系数学模型,并对模型精度进行验证。结果显示:不同水氮组合随着生育期的推移棉花冠层 NDVI 值变化趋势基本一致,都呈“低-高-低”的变化规律;选取在棉花出苗后 80、105 和 140 d 冠层 NDVI 值分别与产量进行相关性分析,得出冠层 NDVI 值与产量具有明显的正相关关系,相关系数分别为 $R^2 = 0.376\ 0, 0.093\ 4, 0.363\ 9$ 。利用独立的试验数据对相关系数最高的水氮组合棉花出苗后 80 d 的产量模型进行模型验证,其相关系数 $R^2 = 0.712\ 6$,均方根误差(Root mean square error, RMSE) $561.04\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。因此,棉花出苗后 80 d 的冠层 NDVI 值可以估测棉花产量。

关键词 水氮耦合;归一化差值植被指数;估测模型;产量;棉花

中图分类号 S 562; S 143.1

文章编号 1007-4333(2016)01-0033-06

文献标志码 A

Canopy NDVI analysis and yield estimation of cotton under different nitrogen and irrigation combinations

WEN Peng-fei, ZHU Peng, ZHANG Qiang, ZHANG Ze, TIAN Min, LV Xin*

(College of Agronomy/Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract In order to study the correlation of NDVI value of canopy to cotton yield during important development stages of cotton, the NDVI values of cotton spectral reflectance under different irrigation and fertilization conditions were optimized by GreenSeeker. A mathematical model of the correlation between NDVI value and yield was established and the accuracy of the model was verified. The results showed: With the development of plant, the change trends of values of the cotton canopy NDVI was relatively consistent under different water and nitrogen combinations, and all displayed “low-high- low” trend. The correlation analysis between cotton canopy NDVI values and yields at 80, 105 and 140 d after seedling emergence were tested, and the correlation coefficient (R^2) were 0.376 0, 0.093 4, 0.363 9 respectively. Positive correlation between canopy NDVI and yields was significant. Independent experimental data was adopted to evaluate the mathematical model of the correlation between NDVI value and cotton yield at 80 d. The results showed that the correlation coefficient was 0.712 6, root mean square error (RMSE) was $561.04\ \text{kg}/\text{hm}^2$. Therefore, the cotton canopy NDVI of 80 d after seedling emergence was better for cotton yields estimation.

Keywords coupling effects of water and nitrogen; normalized difference vegetation index; estimation models; yield; cotton

归一化差值植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)是利用绿色植被对近红外

光的高反射率和对红光的低反射率的光谱特征计算的植被指数,是判断作物生长状况的重要植被指数

收稿日期: 2015-04-01

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD11B02); 国家“863”计划项目(2013AA100307)

第一作者: 温鹏飞, 硕士研究生, E-mail: 1181544926@qq.com

通讯作者: 吕新, 教授, 主要从事农业信息化和农业生态研究, E-mail: lxshz@126.com

之一,该指数能够很好地反映植被的生长状况,对作物生物化学特征敏感,被广泛应用在作物长势监测和营养诊断^[1]。近年来遥感技术的发展为作物诊断的无损监测提供了新的方法,利用反射光谱来估测作物产量已成为重要手段之一^[2-3]。美国 Oklahoma 州立大学最初应用 GreenSeeker 获得 NDVI 值来分析作物的氮素营养状况,推荐氮肥施用量,以达到合理施肥、指导生产实践的目的^[4]。王磊等^[5]、胡昊等^[6]、李升东等^[7]、李新伟等^[8-9]和潘薇薇等^[10]研究利用 NDVI 建立的产量估测模型能够很好预测作物的产量。这些研究都验证了在大田栽培条件下,采用遥感技术,根据植被的光谱特性 NDVI 值的差异可以诊断作物产量。前人研究建立的各种数学模型,大都是在田间施氮量这单一因素水平上进行的,然而水分作为作物营养吸收的重要介质却很少作为冠层 NDVI 值的影响因素进行研究。

本研究拟在棉花水氮精准管理的基础上,获取棉花生长过程信息,采用 GreenSeeker 近距离测取棉花冠层光谱数据,以揭示在棉花水氮一体化管理的条件下冠层 NDVI 值的变化规律,从而建立叶片光谱反射率与产量之间的数学模型,以期为实现棉花生长监测管理的科学化提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验在新疆 147 团六户地镇进行。土壤质地为中壤土,0~20 cm 土层有机质质量分数 19.09 g/kg,碱解氮质量分数 51.50 mg/kg,速效磷质量分数 19.89 mg/kg,速效钾质量分数 212.88 mg/kg,田间持水量 30.1 g/m³,土壤容重 1.2 g/cm³。

1.2 试验设计

试验时间 2014 年,试验设 4 个氮(N)水平,即施尿素 0(N₀)、200(N₂₀₀)、400(N₄₀₀)和 600(N₆₀₀) kg/hm²(全部作为追肥);设 3 个水分水平,分别为 3 000(300 mm, W₃₀₀₀)、4 500(450 mm, W₄₅₀₀)和 6 000(600 mm, W₆₀₀₀) m³/hm²,采用双因素完全随机分组,共 12 个处理,3 次重复。供试棉花品种选为新陆早 45(XLZ 45),种植模式为“1 膜 2 管 4 行”,膜宽 2.05 m,行距配置为 30 cm+60 cm+30 cm,株距 15 cm,种植密度 21.3 万株/hm²。试验田种植方式为棉花连作,南北走向,两头设置保护行。4 月 25 日播种,并灌出苗水,6 月份开始第 1 次灌水,氮肥分 7 次随水施肥(见表 1),磷钾肥 P₂O₅和 K₂O 各 150 kg/hm² 播前一次性施入。小区长、宽为 13 m、2.05 m。化学调控与其他管理措施按高产栽培要求进行。水氮配比如表 1 所示。

表 1 水氮分配表

Table 1 Method of water and nitrogen distribution

项目 Items	日期(月-日) Date											
	06-09	06-17	06-25	07-03	07-11	07-19	07-27	08-05	08-13	08-21	08-29	
单次灌溉占总量的百分数 Percent of per irrigation account for the total irrigation	4	6	10	12	15	20	12	6	6	5	4	
单次施氮占总量的百分数 Percent of per fertilizer account for the total fertilizer	0	0	10	10	20	20	20	10	10	0	0	

1.3 测定项目及方法

1) 主动遥感光谱仪 GreenSeeker 获取棉花各生育期冠层 NDVI 值。每隔 8~10 d,时间选在天气晴朗的 11:00—14:00。测量时将光谱探头平行于棉花植被冠层,选取长势均匀、固定长度的棉花带,行进速度 1.25 m/s、探头高度维持在 50 cm 左

右,每小区选取长势均匀的点 3 个,进行 3 次重复。取平均值作为该小区植被指数值。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

式中: NIR 表示近红外波段光谱反射率, R 表示红光波段光谱反射率。

2) 验证数据,在大田随机选取 10 个小区(每小

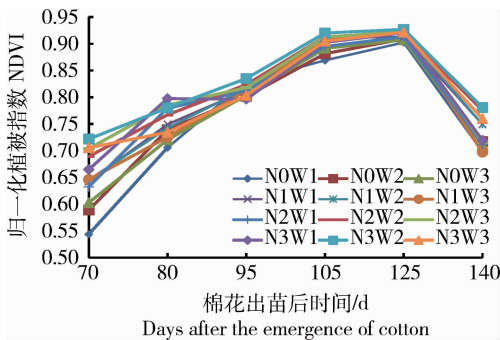
区面积 20 cm²), 获得每个小区冠层 NDVI 值, 同样采集小区产量数据作为模型的验证数据。

3) 采用 Microsoft Excel 2003、SPSS 13.0 和 origin 8.6 分析数据和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理冠层 NDVI 值变化

棉花冠层 NDVI 值整体变化趋势为: 首先随着生育期进程逐渐升高, 到棉花出苗后 125 d 时达到峰值, 随后逐渐降低。冠层 NDVI 值整体呈现“低-高-低”趋势。棉花出苗后 70 d 棉花冠层 NDVI 值逐渐增大, 低氮处理增大进度较慢, 高氮处理增大进度相对较快。棉花出苗后 70 d 冠层 NDVI 值处于低水平, 平均值在 0.6 左右; 出苗后 125 d 冠层 NDVI 值急剧上升且维持在较高水平, 达到 0.9 左右; 到吐絮期再逐渐降低(图 1)。这可能是由于在生育前期由于气温低、生物量小, 红光波段与近红外波段的反射率差异小, 随着生物量的逐渐增加, 地面植被覆盖度增加, 近红外波段的光谱反射率也逐渐升高, 后期随着棉花叶片脱落, 光谱值也随之下降。



N0、N1、N2 和 N3 分别代表 N₀、N₂₀₀、N₄₀₀ 和 N₆₀₀ 4 个氮水平; W1、W2 和 W3 分别代表 W₃₀₀₀、W₄₅₀₀ 和 W₆₀₀₀ 3 个水分处理
N0, N1, N2 and N3 represent N₀, N₂₀₀, N₄₀₀ and N₆₀₀ four nitrogen levels; W1, W2 and W3 represent W₃₀₀₀, W₄₅₀₀ and W₆₀₀₀ three water treatments

图 1 不同水氮处理下冠层 NDVI 值生育期的变化

Fig. 1 Change of canopy NDVI value under different water and nitrogen combinations of growth period

2.2 不同水氮处理冠层 NDVI 值方差分析

在不同生育期冠层 NDVI 值随施肥灌水的变化表现出差异性(表 2)。在灌水 W₃₀₀₀、W₆₀₀₀ 水平下, 4 个施氮处理出苗后 70、105 和 125 d 均达到极

显著差异, 其他差异不明显。当常规灌水 W₄₅₀₀ (除棉花出苗后 95 d 外) 水平下施氮处理间达到极显著差异, 常规灌水不同施氮水平下冠层 NDVI 值之间具有显著性差异与前人研究结果一致^[11]; 在相同氮处理不同灌水水平下, 除棉花出苗后 105 d 差异性比较显著外 ($P < 0.01$), 其他冠层 NDVI 值差异性不明显, 说明水分对冠层 NDVI 值的影响较小。在棉花出苗后 105 d 冠层 NDVI 值表现出差异性, 可能是由于棉花生殖生长与营养生长共进阶段, 因此差异性比较明显; 水氮交互作用对棉花出苗后 80、105 和 140 d 冠层 NDVI 值均达到显著差异, 说明不同的施肥量和灌水量会影响冠层 NDVI 值的变化; 其中棉花出苗后 105 d 时达到极显著差异 ($P < 0.01$), 这可能是由于棉花需水需肥最关键时期, 水肥配比和水肥多少明显对冠层 NDVI 值造成很大影响。

2.3 棉花出苗后 80、105 和 140 d 冠层 NDVI 值与产量相关关系

为了定量的探索棉花冠层 NDVI 值与产量的相关特性, 进行如下相关分析。从表 2 结果可知冠层 NDVI 值在棉花出苗后 80、105 和 140 d 具有显著性差异, 因此选取这 3 个时期获取的冠层 NDVI 值分别与产量进行相关性分析, 由图 2 可知, 冠层 NDVI 值与产量都呈现二次抛物线函数关系。3 个时期冠层 NDVI 值与产量相关关系分别为: $y = -373\ 395x^2 + 698\ 401x - 320\ 359$ ($R^2 = 0.376\ 0$)、 $y = -43\ 421x^2 + 68\ 729x - 21\ 288$ ($R^2 = 0.093\ 4$)、 $y = -4 \times 10^6 x^2 + 7 \times 10^6 x - 3 \times 10^6$ ($R^2 = 0.363\ 9$); 通过结果分析可知: 在一定范围内随着冠层 NDVI 值增加, 棉花产量增加, 当超过一定数值, 棉花产量随之下降。但二者相关性并不是很高, 可能是由于叶片中含水量影响冠层光谱反射率的吸收从而造成相关系数下降; 为了验证利用冠层 NDVI 值预测产量的可靠性, 应用同期测的独立数据对出苗后 80 d 产量模型进行验证。结果表明, 预测值与实测值的回归关系达到极显著水平 ($P < 0.01$), 相关系数为 0.716 2。均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 为 561.04 kg/hm², 因此可以利用棉花出苗后 80 d 获取的冠层 NDVI 值估测作物产量, 但是预测值与实测值之间仍然存在明显差距(图 3), 说明利用冠层 NDVI 值对棉花产量进行估测还有许多限制性因素。

表 2(a) 相同水处理不同氮水平冠层 NDVI 值显著性检验

Table 2(a) Significance test of canopy NDVI value under the same water and different nitrogen level treatment

水处理 Water treatment	氮水平 Nitrogen level	棉花出苗后时间/d Days after the emergence of cotton					
		70	80	95	105	125	140
W ₃₀₀₀	N ₀	0.543 75 b	0.705 82 a	0.828 46 a	0.868 99 c	0.902 47 d	0.698 02 a
	N ₂₀₀	0.641 91 a	0.749 33 a	0.812 86 a	0.911 95 a	0.912 39 bc	0.749 48 a
	N ₁₀₀	0.632 64 a	0.779 45 a	0.812 64 a	0.894 99 b	0.913 1 b	0.712 42 a
	N ₆₀₀	0.664 84 a	0.797 54 a	0.796 41 a	0.902 72 a	0.920 42 a	0.719 37 a
	<i>P</i>	1.47E-07	0.13	0.44	4.22E-07	4.77E-09	0.81
W ₄₅₀₀	N ₀	0.588 97 c	0.739 34 ab	0.801 41 a	0.881 55 b	0.908 98 b	0.717 07 b
	N ₂₀₀	0.645 49 bc	0.742 25 ab	0.816 55 a	0.911 97 a	0.920 86 a	0.748 68 ab
	N ₁₀₀	0.689 26 ab	0.767 10 a	0.823 76 a	0.913 09 a	0.921 52 a	0.775 80 a
	N ₆₀₀	0.721 72 a	0.780 04 a	0.834 98 a	0.920 20 a	0.927 02 a	0.780 86 a
	<i>P</i>	2.09E-04	1.00E-03	0.08	1.56E-11	1.00E-03	0.01
W ₆₀₀₀	N ₀	0.602 88 bc	0.720 37 a	0.803 60 a	0.891 42 b	0.907 24 b	0.711 36 a
	N ₂₀₀	0.646 03 ab	0.725 35 a	0.812 47 a	0.909 34 a	0.923 45 a	0.697 32 a
	N ₁₀₀	0.703 75 a	0.785 27 a	0.817 79 a	0.912 48 a	0.922 94 a	0.716 04 a
	N ₆₀₀	0.705 50 a	0.734 37 a	0.803 58 a	0.904 87 a	0.921 62 a	0.759 74 a
	<i>P</i>	2.77E-04	0.51	0.83	5.43E-04	1.33E-04	0.37

注:每列数字后相同字母表示在 0.05 水平上无显著性差异。下表同。

Note: Values followed by the same letters in each column are not significantly different at 0.05 level. The same as table 2(b).

表 2(b) 相同氮水平不同水处理 NDVI 值显著性检验

Table 2(b) Significance test of canopy NDVI value under the same nitrogen level and different water treatment

氮水平 Nitrogen level	水处理 Water treatment	棉花出苗后时间/d Days after the emergence of cotton					
		70	80	95	105	125	140
N ₀	W _{3 000}	0.543 75 a	0.705 82 a	0.828 46 a	0.868 99 b	0.902 47 a	0.698 02 a
	W _{4 500}	0.588 97 a	0.739 34 a	0.801 41 a	0.881 55 ab	0.908 98 a	0.717 07 a
	W _{6 000}	0.602 88 a	0.720 37 a	0.803 60 a	0.891 42 a	0.907 24 a	0.711 36 a
	<i>P</i>	0.28	0.89	0.43	3.80E-03	0.26	0.98
N ₂₀₀	W _{3 000}	0.641 91 a	0.749 33 a	0.812 86 a	0.911 95 a	0.912 39 b	0.749 48 a
	W _{4 500}	0.645 49 a	0.742 25 a	0.816 55 a	0.911 97 a	0.920 86 a	0.748 68 a
	W _{6 000}	0.646 03 a	0.725 35 a	0.812 47 a	0.909 34 a	0.923 45 a	0.697 32 a
	<i>P</i>	0.99	0.60	0.99	0.81	2.58E-03	0.47
N ₁₀₀	W _{3 000}	0.632 64 a	0.779 45 a	0.812 64 a	0.894 99 b	0.913 10 b	0.712 42 a
	W _{4 500}	0.689 26 a	0.767 10 a	0.823 76 a	0.913 09 a	0.921 52 ab	0.775 80 a
	W _{6 000}	0.703 75 a	0.785 27 a	0.817 79 a	0.912 48 a	0.922 94 a	0.716 04 a
	<i>P</i>	0.06	0.97	0.81	0.02	0.04	0.1
N ₆₀₀	W _{3 000}	0.664 84 a	0.797 54 a	0.796 41 a	0.902 72 b	0.920 42 a	0.719 37 a
	W _{4 500}	0.721 72 a	0.780 04 a	0.834 98 a	0.920 20 a	0.927 02 a	0.780 86 a
	W _{6 000}	0.705 52 a	0.734 37 a	0.803 58 a	0.904 87 b	0.921 62 a	0.759 74 a
	<i>P</i>	0.22	0.20	0.07	6.50E-04	0.46	0.12

表 2(c) 不同水氮处理冠层 NDVI 值显著性检验

Table 2(c) Significance test of canopy NDVI value under the different nitrogen and water treatment

处理 Treatment	棉花出苗后时间/d Days after the emergence of cotton					
	70	80	95	105	125	140
灌水×施氮 W×N	0.260	0.012	0.186	5.350×10^{-6}	0.160	0.050

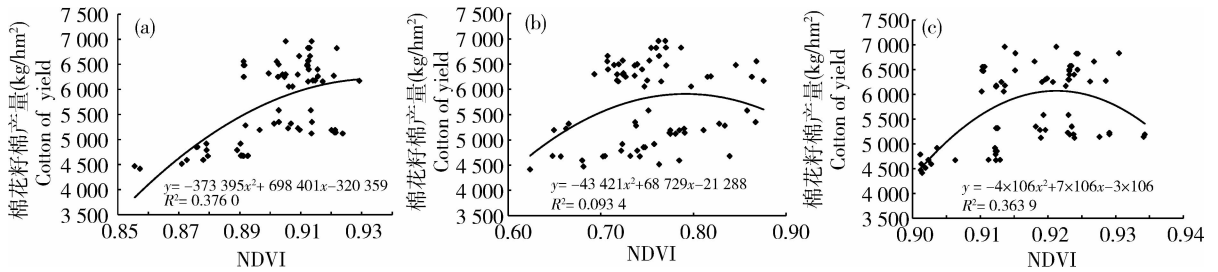


图 2 棉花出苗后 80 d (a)、105 d (b) 和 140 d (c) 冠层 NDVI 值与产量相关关系

Fig. 2 Relation between cotton canopy NDVI value and production

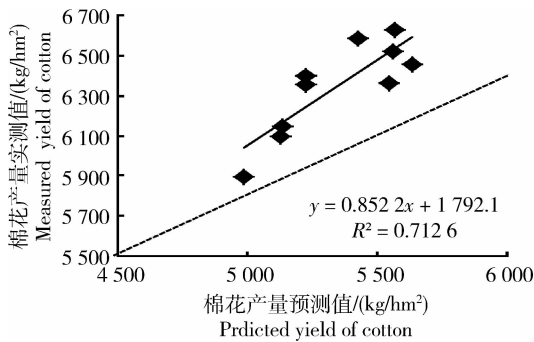


图 3 棉花产量实测值与预测值比较

Fig. 3 Comparison of predicted yield and measured yield of cotton

3 讨论

不同水氮组合随着生育期的推移棉花冠层 NDVI 值变化趋势基本一致,都呈“低-高-低”的变化规律;棉花出苗 70 d 以后冠层 NDVI 值迅速增长,到距出苗 125 d 达到顶峰,随着生育期的推移呈下降趋势。在常规灌水 W_{4500} (除棉花出苗后 95 d 外) 水平下施氮处理间冠层 NDVI 值均达到极显著差异,这与李新伟等^[8-9]、石宏刚等^[12] 研究有相似的结果。

本试验表明在棉花出苗后 80、105 和 140 d 的冠层 NDVI 值随着施氮量灌水量变化具有明显的差异性,选取这 3 个时期光谱值分别与产量进行相关分析呈现正相关关系,相关系数分别为 $R^2 = 0.376 0, 0.093 4, 0.363 9$ 。选取相关系数最高的棉

花出苗后 80 d 产量模型进行验证,分析可知预测值与实测值的回归关系达到极显著水平 ($P < 0.01$), 相关系数为 0.716 2, 但二者存在明显的误差,说明在水肥精准管理的基础上应用冠层 NDVI 值能够预测作物产量,但是仍然存在一定的局限性。前人研究表明利用棉花冠层 NDVI 值估产是可行的,但具体哪个时期和水肥组合效果最佳,估测模型得出的结论不一致,可能是由于作物品种、肥水和土壤肥力等条件各不相同,此问题有待进一步探讨。由于试验数据有限,本试验只采用 1 年的数据,估测模型得出的试验结果还需在多区域以及多年度进行更精准验证,从而完善冠层 NDVI 值对棉花产量的估测。

参 考 文 献

[1] 张卫峰,马林,黄高强,武良,陈新平,张福锁. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. 中国农业科学, 2013, 46(15), 3161-3171
Zhang W F, Ma L, Huang G Q, Wu L, Chen X P, Zhang F S. The development and contribution of nitrogenous fertilizer in China and challenges faced by the country [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(15), 3161-3171 (in Chinese)

[2] 姚霞,吴华兵,朱艳,田永超,周治国,曹卫星. 棉花功能叶片色素含量与高光谱参数的相关性研究[J]. 棉花学报, 2007, 15(4): 267-272
Yao X, Wu H B, Zhu Y, Tian Y C, Zhou Z G, Cao W X. Relationship between pigment concentrations and hyperspectral parameters in functional leaves of cotton [J]. *Cotton Science*, 2007, 15(4): 267-272 (in Chinese)

- [3] 朱艳,吴华兵,田永超,姚霞,刘小军,周治国,曹卫星. 基于冠层反射光谱的棉花叶片氮含量估测[J]. 应用生态学报, 2007, 33(10):2263-2268
Zhu Y, Wu H B, Tian Y C, Yao X, Liu X J, Zhou Z G, Cao W X. Estimation of nitrogen concentration in cotton leaf based on canopy reflectance spectra [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 33(10):2263-2268 (in Chinese)
- [4] William R R, Gordon V J. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. *Agron*, 1999, 91(10):357-363
- [5] 王磊, 自由路, 卢艳丽, 王贺, 杨俐萍. 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 L, Bai Y L, Lu Y L, Wang H, Yang L P. NDVI analysis and yield estimate on in winter wheat based on GreenSeeker [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4):747-753 (in Chinese)
- [6] 胡昊, 自由路, 杨俐萍, 卢艳丽, 王磊, 王贺, 王智勇. 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 H, Bai Y L, Yang L P, Lu Y L, Wang L, Wang H, Wang Z Y. Diagnosis of nitrogen nutrition in winter wheat via SPAD-502 and GreenSeeker[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4):748-752 (in Chinese)
- [7] 李升东, 王法宏, 司纪升, 孔令安, 张宾, 冯波. 节水灌溉对小麦旗叶主要光合参数和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6):47-50
Li S D, Wang F H, Si J S, Kong L A, Zhang B, Feng B. The relationship between normalized difference vegetation index and yield of different genotype wheat varieties [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(6):47-50 (in Chinese)
- [8] 李新伟, 余炳凤, 吕新, 田敏, 石宏刚. 不同氮水平下棉花冠层 NDVI 分析与产量估测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7):231-236
Li X W, Yu B F, Lv X, Tian M, Shi H G. Canopy NDVI analysis and yield estimation for cotton in different nitrogen treatments [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7):231-236 (in Chinese)
- [9] 李新伟, 吕新, 张泽, 陈剑, 石宏刚, 田敏. 棉花氮素营养诊断与追肥推荐模型[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12):209-214
Li X W, Lv X, Zhang Z, Chen J, Shi H G, Tian M. Diagnosis of nitrogen nutrition and recommended model of topdressing for cotton [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12):209-214 (in Chinese)
- [10] 潘薇薇, 危常州, 丁琼, 符静, 张永帅. 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 W W, Wei C Z, Ding Q, Fu J, Zhang Y S. Nitrogenous fertilizer recommendation model for cotton under mulch drip irrigation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1):204-210 (in Chinese)
- [11] 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 Z H. 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)
- [12] 石宏刚, 王海江, 吕新, 李新伟, 郑琦, 李万涛, 余露, 邵奇. 基于光谱法的棉花氮素营养诊断研究[J]. 中国土壤与肥料, 2014, 13(5):80-85
Shi H G, Wang H J, Lv X, Li X W, Zheng Q, Li W T, Yu L, Shao Q. Study on diagnosing nitrogen status of cotton using Greenseeker[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014, 13(5):80-85 (in Chinese)

责任编辑:袁文业