

基于冬小麦植被指数的氮肥调控技术研究*

张俊华^{1,2} 张佳宝^{1†} 李立平³

(1 封丘农田生态系统国家试验站,土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所),南京 210008)

(2 中国科学院研究生院,北京 100039)

(3 河南工业大学化学化工系,郑州 450052)

NITROGEN REGULATION TECHNOLOGY BASED ON CANOPY SPECTRAL PROPERTY OF WINTER WHEAT

Zhang Junhua^{1,2} Zhang Jiabao^{1†} Li Liping³

(1 State Experimental Station of Agror Ecosystem in Fengqiu, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China) (2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(3 College of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China)

关键词 归一化植被指数;比值植被指数;氮肥;农学参量;氮肥利用率

中图分类号 S143

文献标识码 A

施用氮肥是提高作物产量的重要措施,但不合理施用是导致氮肥利用率偏低的主要原因之一,减少农田中氮肥的损失是提高利用率和降低环境污染的共同基础。寻求一种快速、可靠、廉价、非破坏性的作物氮素营养水平田间诊断方法,然后建立一个通用的施氮模型,对指导作物氮肥管理具有重要意义。

作物冠层光谱分析是一种无损测试遥感技术,为当今氮素诊断的有效方法。随着遥感多光谱融合技术的发展,出现了比值植被指数(Ratio Vegetation Index, RVI)^[1]和归一化差异植被指数(简称归一化植被指数, Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)^[2],这两种指数增强了对植被的响应能力,是目前已有的多种植被指数中应用最广泛的方法。许多国内外学者对不同作物不同生育期 NDVI 和 RVI 与作物生物量、磷素、氮素水平等之间的相关性进行了研究,表明这两种指数可以较准确的估算这些农学参量^[3,4]。估测早期作物氮素水平的主要目的之一是确定追肥的最佳时期, Roth^[5]和 Moges 等^[6]都指出起身期前后是冬小麦追施氮肥的最理想时期,利

用 NDVI 估测施肥量,氮素利用率提高了近 20 %^[7]。据统计,如果全世界氮肥利用率提高 20 %,就会节约 47 亿美元^[8]。

推荐施肥也是目前研究的热点之一。一些研究人员通过土壤施肥量调查、测土、基于 GIS 数据库等推荐大田施肥量^[9~11],但这些方法或工作量较大,或不能实时监测当季作物的长势,或费用较高,无法较方便、廉价、准确的估算当季作物施肥量。基于此,本文分析了冬小麦(*Triticum durum*)不同生长过程中 NDVI 和 RVI 与冬小麦基本农学参量之间的关系,选出更能预测冬小麦氮素水平的植被指数和最佳表征时期,然后结合整个生育期氮素积累量建立施氮模型,估测当季施氮量,检验施氮模型的可行性,以期作为作物氮素的诊断及氮肥的高效利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 试验地点 试验设在中国科学院封丘农

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2005CB121103)资助

† 通讯作者,研究员,博士生导师。E-mail: jbzhang@issas.ac.cn

作者简介:张俊华(1977~),女,宁夏中卫人,博士研究生,主要从事数字农业方面的研究

收稿日期:2006-03-08;收到修改稿日期:2006-06-24

业生态实验站,位于黄河北岸的河南省封丘县潘店乡(东经 114 24',北纬 35 01'),地属半干旱、半湿润的暖温带季风气候。年平均降雨量为 605 mm,年蒸发量为 1 875 mm,年均气温 13.9℃,≥0℃积温在 5 100 以上,无霜期 220 d 左右。供试土壤为潮土(底锈干润锥形土),有机质含量为 9.89 g kg⁻¹,全氮 0.57 g kg⁻¹,速效磷 9.29 mg kg⁻¹,速效钾 34.5 mg kg⁻¹。

1.1.2 试验材料 小麦品种为 9023,播种量为 180 kg hm⁻²。2004 年 10 月 16 日播种,2005 年 6 月 4 日收割。

1.1.3 试验设计 试验共 9 个处理,每处理重复 4 次,共 36 个小区,小区面积 27 m²,随机区组排列,氮肥基本量为 N 200 kg hm⁻²(当地常规施用量),常规基肥 追肥 = 4 6;各处理的磷、钾肥用量相同(P₂O₅:80 kg hm⁻²;K₂O:30 kg hm⁻²),均在基肥时一次性施入。各小区氮肥均施用尿素,施用量如表 1 所示。追肥分别于返青期和抽穗期施入,施肥后灌水。

表 1 冬小麦施肥方案(N kg hm⁻²)

处理编号	基肥	追肥	追肥
1	0	0	0
2	200	0	0
3	70	130	0
4	100	50	50
5	100	100	0
6	100	x	0
7	100	2/3x	1/3x
8	70	x	0
9	70	2/3x	1/3x

注:x 为根据冬小麦返青期测定的 NDVI 所计算出的施氮量

1.2 光谱数据的测量及部分指标的测定

试验选择了冬小麦分蘖期(2004 年 11 月 13 日)、返青期(2005 年 3 月 20 日)、抽穗期(2005 年 4 月 15 日)和乳熟期(2005 年 5 月 15 日)四个关键生育期进行测定,采用便携式植物光谱仪(GreenSeeker)^[12]测定作物冠层光谱。该仪器由美国 NTech 公司生产,具有两个直接向上的光电二极管传感器,可以接收通过装有红光(Red,波段为 671 ±6 nm)和近

红外(NIR,波段为 780 ±6 nm)干涉过滤器的入射光,该仪器还有两个向下的光电二极管传感器,它和向上的传感器一样可以接收通过平行和干涉过滤器的光线。NDVI 值和 RVI 的计算公式如下:

$$NDVI = \frac{(NIR_{ref}/NIR_{inc}) - (Red_{ref}/Red_{inc})}{(NIR_{ref}/NIR_{inc}) + (Red_{ref}/Red_{inc})} \quad (1)$$

$$RVI = \frac{NIR_{ref}/NIR_{inc}}{Red_{ref}/Red_{inc}} \quad (2)$$

式中,NIR_{ref}和 Red_{ref}是近红外和红光区的反射率; NIR_{inc}和 Red_{inc}是近红外和红光区的入射率。

测定不受天气情况和时间的限制,测量时传感器探头向下,距冠层垂直高度 0.5 m。该仪器测试视场角为 3.4°,测定植被指数的速度为 10 个 s⁻¹,每个小区光谱测量重复 2 次。

与光谱测量同步,每小区随机剪取 20 cm ×20 cm 代表性植株的地上部分,测定其生物量(鲜生物量和干生物量)、地上部分全氮含量,并采集表层 0~20 cm 土样,用蒸馏法测定全氮含量。

2 结果与分析

2.1 冬小麦不同生育期植被指数(NDVI 和 RVI)与相应时期农学参量的关系

表 2 列出了两种植被指数与冬小麦生物量、地上部分含氮量和地上部分氮素积累量之间的相关系数。在测定的四个生育期,两种指数与三个农学参量之间均呈正相关关系。

NDVI 和 RVI 与作物生物量在冬小麦返青期和抽穗期呈显著相关,以返青期相关性最强。从返青期到乳熟期,NDVI 和 RVI 与生物量之间的拟合相关性逐渐减小。

NDVI 和 RVI 与冬小麦地上部分氮素含量的拟合关系表明,在返青、抽穗和乳熟三个生育期,两种植被指数与冬小麦地上部分氮素含量均呈极显著正相关,抽穗期相关系数(R² > 0.85)高于其他三个时期(R² < 0.70),其次为乳熟期。NDVI 在分蘖期与作物含氮量的相关性最差。

表 2 不同生育期冬小麦 NDVI, RVI 和三个农学参量的相关系数

生长期	生物量		含氮量		氮素积累量	
	NDVI	RVI	NDVI	RVI	NDVI	RVI
分蘖期	0.388 3	0.440 6	0.257 8	0.391 7	0.221 2	0.308 2
返青期	0.751 8	0.703 1	0.600 5	0.525 0	0.659 9	0.499 0
抽穗期	0.603 2	0.550 6	0.866 9	0.862 4	0.876 3	0.792 4
乳熟期	0.392 2	0.327 2	0.669 5	0.692 2	0.639 9	0.628 4

氮素积累量,即作物吸氮量,指土地单位面积上地上部所含氮素的总量,等于地上部含氮量与单位土地面积上地上部干重的乘积。NDVI 和 RVI 与氮素积累量的相关性与它们与茎叶含氮量的相关性趋势一致,且均为抽穗期两种指数与作物含氮量和氮素积累量之间用指数方程拟合相关系数最大,其他时期用二项式方程拟合较为理想。

两种植被指数与收获期茎叶生物量、最终产量、茎叶含氮量、籽粒氮素积累量以及整个地上部分氮素积累量都有密切的关系。NDVI 和 RVI 与返青期和抽穗期农学参量达极显著相关(图 1,图 2),且抽穗期植被指数与收获期各农学参量以指数方程拟合效果最佳;乳熟期相关系数总体低于抽穗期(图 3,图 4),而在分蘖期,由于冬小麦覆盖度小,土壤背景干扰强,植被指数精度较低;且在作物生长初期,氮

素积累量很小,土壤本身的氮素可以维持其生长,故不能准确反映不同施氮条件下作物的产量,所以该时期植被指数与产量的相关系数最小。两种植被指数与籽粒氮素积累量、整个地上部分总氮素积累量的相关性高于与产量、地上部分生物量的相关性,表明红光和近红外波段对作物氮素敏感。在返青期后两种指数与收获期各农学参量的相关性以 NDVI 较显著。测定结果显示虽然相同时期 NDVI 和 RVI 与各农学参量的相关系数相差不大,但是相同处理不同重复在各生育期间 NDVI 值的标准差都较小,测定值比 RVI 稳定;在生长前期,相同处理各重复间 RVI 值标准差非常小,但随着覆盖度的增加,尤其是在抽穗期,重复间的标准差有大幅度的增加,说明在冬小麦生长的中后期利用 RVI 表征作物长势的效果较 NDVI 差。

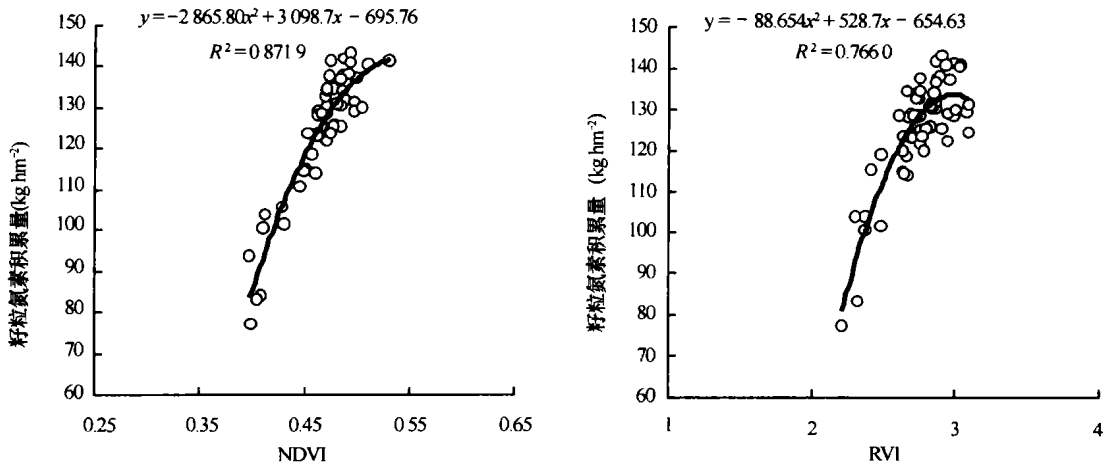


图 1 返青期冬小麦 NDVI, RVI 与收获期籽粒氮素积累量的关系

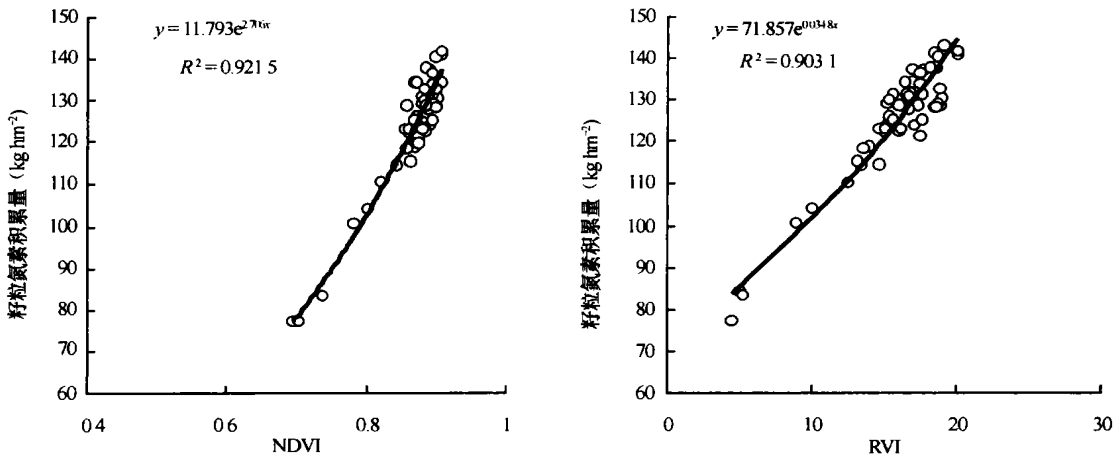


图 2 抽穗期冬小麦 NDVI, RVI 与收获期籽粒氮素积累量的关系

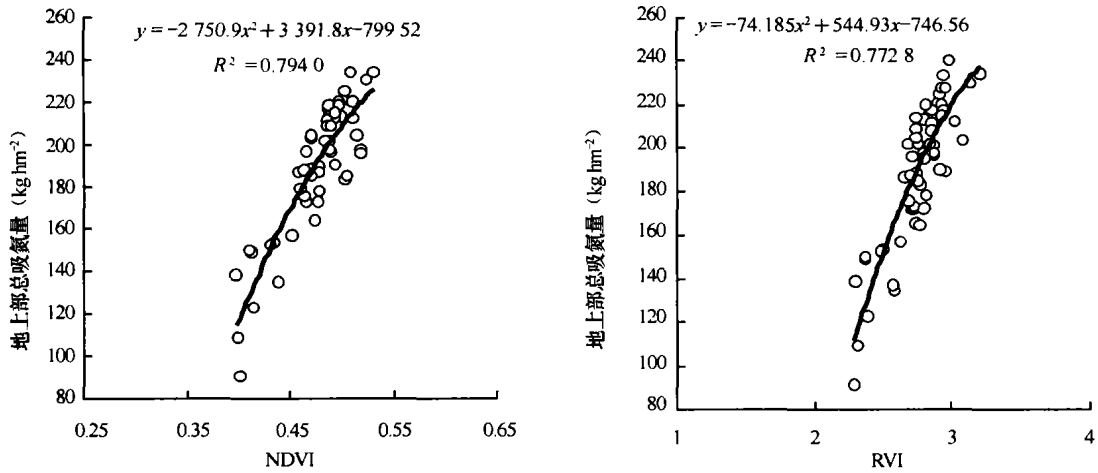


图3 返青期冬小麦 NDVI, RVI 与收获期地上部分总氮素积累量的关系

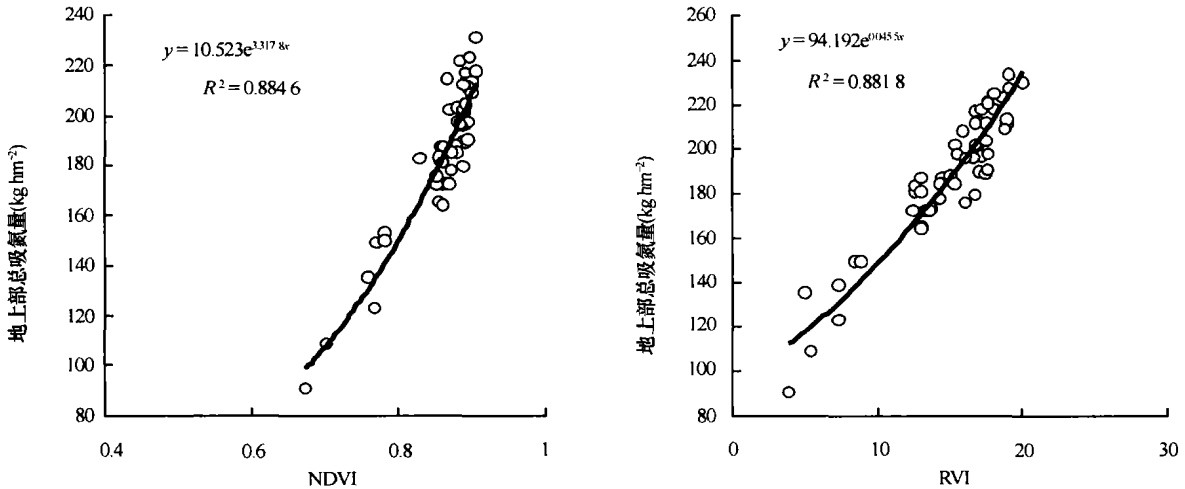


图4 抽穗期冬小麦 NDVI, RVI 与收获期地上部分总氮素积累量的关系

2.2 植被指数在施氮模型中的应用

李立平等在 2004 ~ 2005 年相同地点不同地块的试验也得到了相同结论:冬小麦从返青期开始其冠层 NDVI 值与整个地上部分吸氮量显著相关。返青期后冬小麦氮素积累量等于收获期作物地上部分氮素积累量与返青期前作物氮素积累量之差,采用返青期 NDVI(x) 与该时期到收获期氮素积累量(y) 建立多项式方程⁽¹⁾:

$$y = a_1 x^2 - a_2 x + b_0 \quad (3)$$

式中, a_1 、 a_2 和 b_0 为拟合方程的系数,其值随时间和地点的变化而变化。同时假设这段时期冬小麦从土壤中吸收的氮素占其氮素积累量的 50%,则这一时期需要追肥量(z)为:

$$z = 0.5 \times y \quad (4)$$

不同处理小麦秸秆和籽粒的含氮量不同,不施氮肥的处理 1 含量最低,其次为处理 9,处理 7 最高但与其他处理差异不大(数据未列出)。从表 3 可以看出,收获期地上部分吸氮量和收获后土壤全氮含量也是不施氮肥的处理最低,处理 2 由于基肥时一次性施入氮肥 200 kg hm^{-2} ,作物不能及时吸收,许多氮肥以氨挥发的形式损失或被淋失到表层以下,故作物吸氮量和收获后残留在表层土壤的全氮均较低,这也说明氮肥一次性以基肥施用的方式是不可取的。其他处理一般都是施氮量高作物的吸氮量高,表层土壤的全氮含量也相对较高,相同施氮量作物吸氮量高时残留在土壤中的含氮量低。处理 3、5 和 7 地上部分吸氮量

(1) 李立平. 土壤和作物养分信息快速获取技术研究. 中国科学院博士学位论文, 2004

高于施氮量,说明作物从所施肥料中吸收氮素的同时,也大量吸收土壤中的氮素。土壤中的氮素除了每季人为施入的氮肥外,该地区灌溉带入土壤中的氮量不足 10 kg hm^{-2} ,大气干湿沉降氮超过 50 kg hm^{-2} ^[13]。

表 3 不同处理施氮量与氮肥利用率情况

处理 编号	产量 (kg hm^{-2})	总施氮量 (N kg hm^{-2})	施肥方式		收获期地上 部分吸氮量 (kg hm^{-2})	收获后土壤 全氮含量 (g kg^{-1})	当季氮肥 利用率(%)
			基肥 (N kg hm^{-2})	追肥 (N kg hm^{-2})			
1	4 672 ±149	0	0	0	130.1	0.503	—
2	5 728 ±528	200	200	0	193.8	0.537	31.85
3	5 725 ±217	200	70	130 + 0	203.0	0.570	36.46
4	5 696 ±80	200	100	50 + 50	192.7	0.574	31.30
5	5 936 ±126	200	100	100 + 0	202.9	0.581	36.44
6	5 866 ±229	158.56	100	58.56 + 0	190.8	0.536	38.29
7	6 050 ±199	158.4	100	38.93 + 19.47	204.6	0.530	47.03
8	5 749 ±241	129.61	70	59.16 + 0	193.6	0.532	49.00
9	5 885 ±157	130.05	70	39.72 + 19.86	187.8	0.545	44.41

根据冬小麦籽粒和秸秆产量及其它们中的氮含量,计算作物地上部分总吸氮量,以不施肥的处理 1 作为对照,计算作物地上部分的氮肥利用率^[13]。由于连年施肥耕种,该地基础肥力较高(0~20 cm 表层土壤全氮含量为 0.57 g kg^{-1}),不施氮肥的处理最终产量为 $4\,672\text{ kg hm}^{-2}$,但仍与其他施氮处理产量差异较大,经济效益最低。处理 2 作物长势不稳定,重复间产量的标准差大,其他施氮处理重复间的较小。除处理 4 外,其他处理若总施氮量相同,追肥两次的产量高于追肥一次的产量。从整体来讲,8 个施氮处理产量差异不大,变异系数仅 0.06,但施肥量相差较大,表明在产量一定、满足冬小麦生长养分基本需求的情况下,氮肥利用率随着氮肥施用量的增加而下降,进入环境的氮随着施氮量的增加而增加,致使经济效益和环境效益变差。同时说明该地区土壤肥力较高,而当地传统施肥量过高,以至于造成不必要的经济损失,同时也污染了环境。根据返青期作物光谱植被指数与其氮素水平的关系,建立施氮模型估算的施氮量比当地通常的施氮量减少 20%~35%,氮素利用率提高了 5%~16%。最终经济效益为粮食收入减去肥料和麦种花费。按当地尿素 1.90 元 kg^{-1} ,小麦 1.37 元 kg^{-1} ,不计农药和人工费用,采用该方法估测施氮量的处理产生的经济效益比通常农民常规施肥的经济效益增加 2.3%~6.5%,兼顾了经济效益和环境效益。

3 结 论

返青期、抽穗期和乳熟期的冬小麦冠层两种植被指数(NDVI 和 RVI)与相应时期的生物量、茎叶含氮量以及收获期产量、籽粒含氮量、整个地上部分氮素积累量都有较好的相关性,与 Stone^[14]、Hinzman^[15]等利用 NDVI 和 RVI 估测作物生物量和小麦茎叶总吸氮量结果一致,而且随着作物生长期的延伸,NDVI 估测生物量和氮素吸收率的准确性增加^[16]。从冬小麦整个生育期来看,在返青期和抽穗期,两种植被指数与各农学参量相关性达极显著水平,返青期用多项式拟合效果较好,抽穗期用指数关系效果最佳;NDVI 和 RVI 对各农学参量估测的精度无显著性差异,但 NDVI 效果更好一些。应用返青期的 NDVI 值估算冬小麦施氮量,原理简单明了,引入参数少,实用性强,可以在保证产量的前提下减少施肥量,提高氮肥利用率,增加经济效益,改善环境效益。但该方法假设从返青期到收获期冬小麦从土壤中吸收的氮素占其氮素积累量的 50%,这一估计值比较粗糙,可以通过测定不施氮地块土壤的全氮含量和普通施氮地块土壤全氮含量计算出一个响应系数,进一步比较准确的估算该值,而且作物种植时空条件不同,两个方程还有待于进一步验证。

参 考 文 献

[1] Shibayama M, Akiyama T. A spectroradiometer for field use. VII.

- Radiometric estimation of nitrogen levels in field rice canopies. *Japanese Journal of Crop Science*, 1986, 55(4): 439 ~ 445
- [2] 郭锐. 植被指数及其研究进展. *干旱气象*, 2003, 21(4): 71 ~ 75
- [3] 任红艳, 潘剑君, 张佳宝. 不同磷肥水平的小麦冠层多光谱特征研究. *土壤*, 2005, 37(4): 405 ~ 409
- [4] Zhang J H, Wang K, Bailey J S. Predicting nitrogen status of rice using multispectral data at canopy scale. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 108 ~ 107
- [5] Roth G W, Fox R H, Marshall H G. Plant disuse tests for predicting nitrogen fertilizer requirements of winter wheat. *Agron. J.*, 1989, 81: 502 ~ 507
- [6] Moges S M, Raun W R, Mullen R W. Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, 27(8): 1 431 ~ 1 441
- [7] Stone J B, Raun W R, Whitney R W, *et al.* Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. *Transactions ASAE*, 1996, 39(5): 1 623 ~ 1 631
- [8] Raun W R, Johnson G V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.*, 1999, 91: 357 ~ 363
- [9] Roelcke M, Han Y, Schleaf K H. Recent trends and recommendations for nitrogen fertilization in intensive agriculture in Eastern China. *Pedosphere*, 2004, 14(4): 449 ~ 460
- [10] Liu X J, Ju X T, Chen X P. Nitrogen recommendations for summer maize in northern China using the Nmin test and rapid plant tests. *Pedosphere*, 2005, 15(2): 246 ~ 254
- [11] Zhou L Q, Shi Z, Wang R C. A GIS-based database management package for fertilizer recommendations in paddy fields. *Pedosphere*, 2004, 14(3): 347 ~ 353
- [12] Lukina E V, Freeman K W, Wynn K J, *et al.* Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant N uptake. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24(6): 885 ~ 898
- [13] 蔡祖聪, 钦绳武. 华北潮土长期试验中的作物产量、氮肥利用率及其环境效应. *土壤学报*, 2006, 43(6): 885 ~ 891
- [14] Stone M, Solie J B, Whitney R W. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. *Trans. ASAE*, 1996, 39(5): 1 623 ~ 1 631
- [15] Hinzman L, Bauer M E, Daughtry C S T. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 1986, 19: 47 ~ 61
- [16] Thomason W E, Raun W R, Johnson G V. Production system techniques to increase nitrogen use efficiency in winter wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25(10): 2 261 ~ 2 283