植物营养与肥料学报 2007,13(6):1092-1097
Plant Nutrition and Fertilizer Science

利用叶绿素计进行冬小麦变量施肥及其效应研究

蒋阿宁[1,2], 黄文江[1*], 刘克礼[2], 王纪华[1], 赵春江[1], 刘良云[1]
(1 国家农业信息化工程技术研究中心,北京 100097; 2 内蒙古农业大学农学院,呼和浩特 010019)

摘要: 为实现冬小麦优质高产的目标,利用叶绿素计测定拔节期倒一叶和倒二叶的 SPAD 值代替实验室土壤养分测定,进行变量施肥。试验选用能反映植株氮素时空分布规律的归一化 SPAD 值和变量施肥模型进行变量施肥管理(变量区),以相邻地块常规非变量(均一)施肥区(对照区)为对照,研究了不同氮肥处理冬小麦植株氮素营养的空间分布特性及其变量施肥效应。对不同生育时期变量施肥处理和对照处理的倒一叶与倒二叶 SPAD 值进行比较,结果表明,变量施肥能满足冬小麦一生对氮素的需要,并延缓植株的衰老; 变量施肥提高了冬小麦的产量及子粒蛋白质含量。应用地统计学软件(ArcGIS 10.0)进行了空间差值分析,结果表明,变量施肥其产量和蛋白质含量的空间变异均较对照区有所降低。

关键词: 冬小麦; 变量施肥; SPAD 读数; 产量; 蛋白质含量
中图分类号: S512.1.062　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2007)06-1092-06

Study on chlorophyll meter-based variable rate fertilizer application and influence on winter wheat

JIANG A-ning[1,2], HUANG Wen-jiang[1*], LIU Ke-li[2], WANG Ji-hua[1], ZHAO Chun-jiang[1], LIU Liang-yun[1]
(*1 National Engineering Research Center for Information Technology in Agricultural, Beijing 100097, China; 2 Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China*)

Abstract: The aim of this study was to develop a time-specific and time-critical method to overcome the limitations of traditional field sampling methods for variable rate fertilization. Farmers, agricultural managers and grain processing enterprises are interested in measuring and assessing soil and crop status in order to apply optimum amount of fertilizers. Field experiments were conducted during 2005-2006 at the Xiaotangshan Precision Agriculture Experimental Base, Changping District, Beijing (40°18′29″ N to 40°18′32″ N, 116°44′02″ E to 116°44′22″ E). SPAD readings of winter wheat in the variable-rate plots were measured at Feek 5 growth stage in 2005, in order to decide the additional N rate to apply. The uniform rate fertilizer management was chosen as the CK. The SPAD readings of the first and second fully expanded leaf collected at different growth stages were compared between variable-rate treatment and CK, and the results showed that variable rate treatment could provide adequate nitrogen for winter wheat. The grain yield and protein content were measured among the CK and variable rate fertilizer treatments. Geostatistical analysis (ArcGIS10.0) was carried out to examine within-field spatial variability and the contour maps of yield and grain content. It indicated that variable rate treatments reduced the spatial variability of wheat yield and grain protein content.

Key words: winter wheat; variable nitrogen application; SPAD readings; yield; grain protein content

合理利用化肥及研究施肥技术对中国农业发展有着非常积极的意义[1]。变量施肥技术是精准农业的重要组成部分,它根据作物实际需要,基于科学施肥方法,确定对作物的变量投入,即按需投入[2]。

收稿日期: 2006-10-23　　**修改稿收到日期**: 2007-04-12
基金项目: 国家自然科学基金(40471093,40571118); 北京市自然科学基金(4052014,6062019); 国家"973"项目(2005CB121103); 农业部"引进国际先进农业科学技术"专项基金项目(2006-G63)资助。
作者简介: 蒋阿宁(1982—),女,硕士研究生,内蒙人,主要从事遥感农业应用方面的研究。Tel: 13474705281, E-mail: Jianganing@126.com
* 通讯作者 Tel: 010-88448055, E-mail: huangwj@nercita.org.cn

对变量施肥的效果，国内外学者们做了一些研究。美国科罗拉多州大学 Koch 等[3]研究表明，变量施氮比传统施肥有更大的经济可行性；Mamo 等[4]研究了空间和时间上最经济的玉米施肥量，表明变量施氮比统一施氮肥料用量少，经济收益高；Wittry 等[5]对比了玉米和大豆轮作种植情况下变量施磷与传统施磷的试验结果，认为施肥方法不影响作物对磷的反应，变量施磷可减少 12%～41% 磷肥用量。在中国，薛绪掌等[6]对冬小麦变量施氮的效果研究表明，变量施氮区产量略低于均匀施肥，且产量变异系数增加；变量区的经济效益略低于对照区，但变量施氮降低了土壤硝态氮浓度，减少了污染地下水的可能，生态效果明显。宋晓宇等[7]通过变量施肥前后作物光谱信息的变化，建立了冬小麦拔节期与灌浆初期光谱特征值的变化量与变量施肥量之间的关系，结果表明，变量施肥能够改善冬小麦生长状况。梁红霞等[8]对冬小麦变量施肥效益的研究显示，变量施肥能够改善冬小麦的长势差异状况，显著提高冬小麦子粒产量；张书慧等[9]研究发现，变量施肥可以在一定程度上提高玉米的产量，并具有均衡土壤养分的作用。

植株全氮含量可以很好地反映作物氮营养，与作物产量也有很好的相关性，是一个重要的诊断指标。但由于全氮分析操作繁琐，工作量较大，使它在具体应用中有很大的缺陷。近年来，一些研究表明，利用手持叶绿素计测定植株叶片的 SPAD 值以估计作物氮营养状况和进行氮素推荐[10-11]，并且已经在棉花[12]、水稻[13]等作物上得到了应用。本研究利用拔节期不同叶位叶片 SPAD 测定值监测植株营养水平动态，在冬小麦对氮肥响应敏感的作业单元内，根据作物的生长状况，确定冬小麦变量施肥中的追施氮量，并对变量施肥的实际效果进行了分析，以期为施肥决策与田间管理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于 2005～2006 年在国家农业信息化工程技术研究中心精准农业试验基地进行。国家精准农业示范基地位于北京市昌平区小汤山镇，地处北纬 40°10′，东经 116°26′。试验地土壤为潮土，土壤中 0—30 cm 土层全氮含量 0.94～0.98 g/kg，有机质 15.3～15.8 g/kg，硝态氮 3.00～15.04 mg/kg，有效磷 2.20～21.18 mg/kg，速效钾 106.96～132.77 mg/kg。

试验选用偏紧凑型的京冬 8 小麦为供试材料。播种时间为 2005 年 9 月 27 日和 9 月 28 日，播种量 330～345 kg/hm^2，不施基肥。根据冬小麦拔节期倒一叶和倒二叶 SPAD 的测定值，采用变量追肥计算公式[1.2 中公式(5)]获得每个小区的施肥量作为变量施肥区(共 20 个小区，分别记做：S－01、S－02、S－03……S－20，以下简称变量区)，一个对照处理(共 20 个小区，分别记为：CK－01、CK－02、CK－03……CK－20，各施肥小区的施肥量为变量区的平均施肥量，以下简称对照区)。小区面积为 3 m×3 m，随机区组排列，其它条件完全相同，变量施肥于 2006 年 4 月 14 日进行，按各小区所用肥量，分别称量装袋，人工撒施。于 2006 年 6 月 18 日，每小区取 2 m^2 的冬小麦进行测产，并在测产面积的中心点用米级差分式 GPS 进行定位。各施肥小区的施肥量见表 1；试验区空间分布见图 1。

表 1　变量区与对照区的追肥量(N kg/hm^2)

Table 1　Fertilization rates of variable-rate and uniform fertilization treatments

变量区 Variable-rate	追氮量 N rate	对照区 CK	追氮量 N rate
S－01	129.25	CK－01	146.94
S－02	131.73	CK－02	146.94
S－03	158.42	CK－03	146.94
S－04	162.82	CK－04	146.94
S－05	165.43	CK－05	146.94
S－06	159.42	CK－06	146.94
S－07	128.58	CK－07	146.94
S－08	161.15	CK－08	146.94
S－09	164.95	CK－09	146.94
S－10	161.28	CK－10	146.94
S－11	148.80	CK－11	146.94
S－12	163.94	CK－12	146.94
S－13	135.81	CK－13	146.94
S－14	135.08	CK－14	146.94
S－15	135.09	CK－15	146.94
S－16	163.59	CK－16	146.94
S－17	163.94	CK－17	146.94
S－18	135.39	CK－18	146.94
S－19	135.42	CK－19	146.94
S－20	139.28	CK－20	146.94

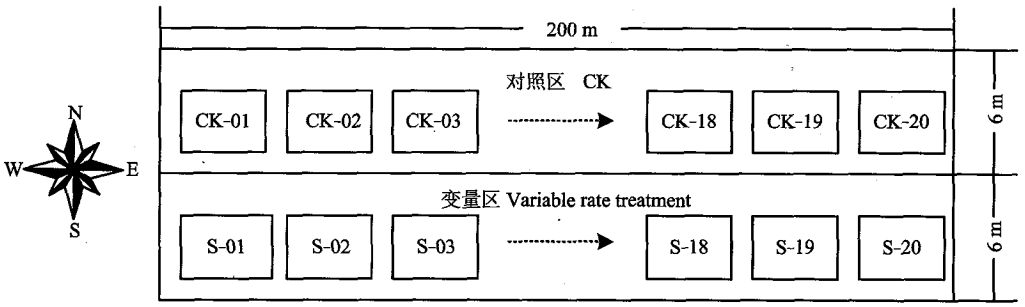

图1 试验区空间分布

Fig.1 Spatial distribution of experimental treatments

1.2 基于不同叶位 SPAD 测定值进行小麦追氮量计算方法

基于 Lukina[14]变量施肥模型的建模思路，以国家农业化信息工程技术研究中心 2002 年小汤山精准农业试验基地试验数据所建模型[15]为基础，利用 2005 年的试验数据对模型进行订正和改进，用归一化 SAPD(NDSPAD)值代替 SPAD 值，更能反映氮素在作物体内的时、空分布特征。

归一化 SPAD 值(NDSPAD)的确定：

$$NDSPAD = (SPAD_2 - SPAD_1)/(SPAD_2 + SPAD_1) \quad (1)$$

式中 $SPAD_1$ 和 $SPAD_2$ 分别是拔节期倒一叶和倒二叶 SPAD 值。

目标产量(PGY, kg/hm²)：

$$PGY = -10420NDSPAD + 5844.3 \quad (2)$$

$(r = 0.796^{**}, n = 13)$

图 2 和图 3 中看出，NDSPAD 与产量的相关性高于 $SPAD_1$ 和 $SPAD_2$ 与产量的相关性，所以模型采用了 NDSPAD 来预测产量。

总需求量的确定：

$$N = 0.058PGY - 131.08 (r = 0.822^{**}, n = 13) \quad (3)$$

用 Feekes5 SPAD 测定值计算作物已吸收量(PFNU, kg/hm²)：

$$PFNU = 312.04NDSPAD + 142.1 \quad (4)$$

$(r = 0.934^{**}, n = 13)$

确定最终施肥量(尿素 kg/hm²)：

$$化肥需要量 = (总需求量 - PFNU)/0.47/0.5 \quad (5)$$

1.3 测定项目与方法

1.3.1 SPAD 值的测定 冬小麦生育期内(4 月 13 日—5 月 30 日)在主要生育时期取无病虫害、无生理病斑、无机械损伤的叶片，用柔毛刷刷去叶片表面的泥沙及灰尘，采用日本产 SPAD-502 型叶绿素仪定期进行叶片叶绿素含量测定，测定叶位为倒一叶和倒二叶，测定部位为叶片中部[16]。由于测定部位对读数影响较大，测定部位尽量保持一致并避开叶脉，每个小区测定 20 次，取其平均值。

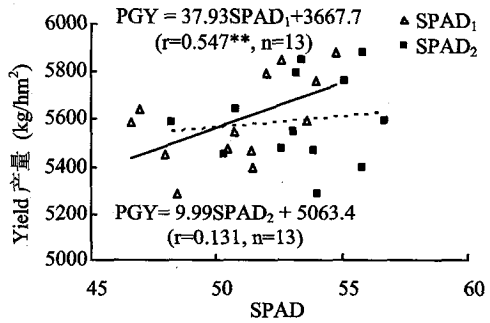

图2 2005 年冬小麦倒一叶和倒二叶 SPAD 值与产量的相关关系

Fig.2 Relationship between SPAD of the 1st and 2nd newly full expanding leaf and yield of winter wheat in 2005

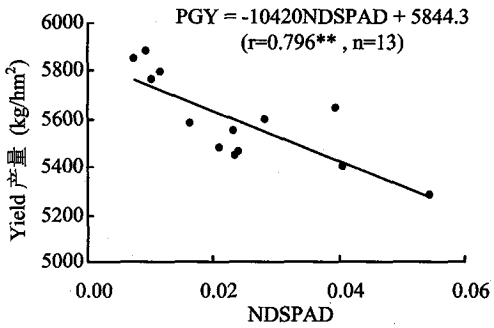

图3 2005 年冬小麦 NDSPAD 与产量得相关关系

Fig.3 Relationship between NDSPAD reading and yield of winter wheat in 2005

1.3.2 产量的测定 6 月 17 号在各小区内选择面积为 2 m² 的小麦，收获至网袋中，风干后脱粒测产。

1.3.3 子粒蛋白质含量的测定 子粒粗蛋白(14% 湿基)用近红外(NIR)谷物品质分析仪(Instalab-610, Australia)测定。

2　结果与分析

2.1　变量施肥对不同生育时期倒一叶和倒二叶 SPAD 值的影响

从图 4 可知，变量施肥之前，变量区与对照区的倒一叶的 SPAD 值和倒二叶的 SPAD 值分别是相近的(4 月 13 日)，在变量施肥之后，变量区与对照区的倒一叶与倒二叶 SPAD 值均有所增加，但变量区叶片的 SPAD 值高于对照区。从冬小麦开花之后(5 月 10 日)，植株进入衰老阶段，叶片的 SPAD 值开始下降，但变量施肥的叶片 SPAD 值仍高于对照区，说明变量施肥能保证作物在一生当中有充足的氮素供应，并且在作物的生长后期仍能维持较高的叶绿素水平，延缓作物的衰老。

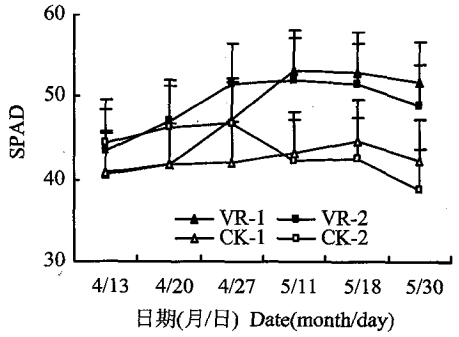

图 4　变量区与对照区不同生育时期倒一叶与倒二叶 SPAD 值的变化

Fig.4　The SPAD reading of 1st and 2nd newly full expanding leaves variability of different growth states among variable-rate and CK plots

(VR-1，VR-2，CK-1，CK-2：分别表示变量区与对照区倒一叶与倒二叶的 SPAD 值。Means SPAD reading of 1st and 2nd newly full expanding leaves in variable-rate and CK plots，respectively.)

2.2　变量施肥对冬小麦产量的影响

从小麦产量空间分布图(图 5)和表 2 看出，变量施肥的产量高于对照；变量区的空间变异明显降低。表明变量施肥后，小区各植株均得到合适的氮素供应，形成较为一致的群体长势，为光合作用提供了一个良好的基础，使更多干物质的积累成为可能，产量明显高于对照区。对照区由于施肥量均一，并没有把各个小区的长势差异充分考虑进去，导致对照区产量的差异较变量区大。

从方差分析的结果可知，$F = 6.77 > F(P = 0.013)$，crit = 4.10，说明变量施肥处理和均一施肥处理的平均产量差异达到 1.3% 的极显著水平，变量施肥处理对冬小麦产量的提高有明显的促进作用。

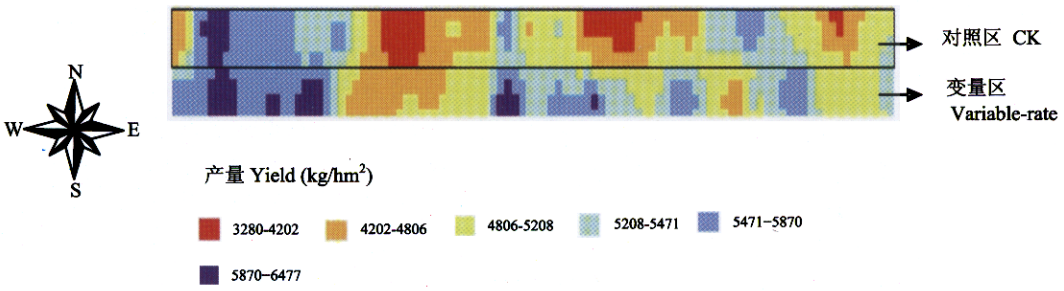

图 5　2006 年冬小麦产量空间分布图

Fig.5　Spatial distribution of the yield of winter wheat in 2006

表 2　变量区与对照区的产量、标准差和变异系数

Table 2　Mean, standard deviation and coefficient of yield in variable-rate and CK treatments

处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm²)	标准差 SD	变异系数 CV (%)	最大值 Maximum (kg/hm²)	最小值 Minimum (kg/hm²)
变量区 Variable-rate	5416.36	583.94	10.78	6476.98	4496.26
对照区 CK	4828.24	824.69	17.08	6049.40	3280.11

2.3　变量施肥对冬小麦蛋白质含量的影响

从蛋白质空间分布图(图 6)和表 3 可以得出，变量施肥处理的蛋白质含量高于对照，但变异系数低于对照。说明变量施肥处理降低了蛋白质含量的空间变异，利于蛋白质均匀度和含量的提高。

对变量区和对照区的蛋白质含量进行方差分

析，F = 8.60 > F(P = 0.0057) crit = 4.09，表明变量施肥处理与均一施肥处理的子粒蛋白质含量的差异达到1%的极显著水平。说明变量施肥在提高冬小麦品质子粒蛋白质含量方面，是一项有利的措施。

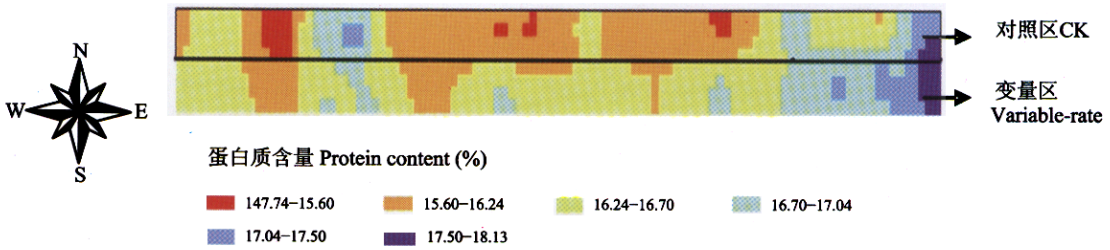

图6 2006年冬小麦子粒蛋白质含量的空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of grain protein content of winter wheat in 2006

表3 变量区与对照区的子粒蛋白质含量、标准差和变异系数

Table 3 Mean, standard deviation and coefficient of grain protein content in variable-rate and CK treatments

处理 Treatment	蛋白质含量 Protein cont. (%)	标准差 SD	变异系数 CV (%)	最大值 Maximum (%)	最小值 Minimum (%)
变量区 Variable-rate	16.79	0.42	2.49	18.13	16.24
对照区 CK	15.91	0.59	3.59	17.06	14.74

3 讨论

叶绿素计的问世为作物的氮素营养诊断提供了先进而有效的方法。Semal[17]通过两年田间试验表明，在玉米生长过程中运用相对叶绿素含量的变化可以较为准确地监测氮营养状况；利用SPAD值预测玉米产量也比用全氮作为指标准确。在生长后期，相对SPAD值和相对产量之间的关系近乎1:1。叶绿素仪可以检测到很轻微的缺氮[18]。Blackmer[19]报道，不论在供氮充足和缺乏时，玉米抽雄期穗叶SPAD值与叶片氮浓度及产量之间都有很好的相关性(r = 0.88)。Follett[20]发现，分蘖后期叶片SPAD值与小麦子粒产量、叶片全氮以及土壤无机氮之间存在正相关；Fox[11]在多点试验中也发现，小麦拔节前，第2片完全展开叶的SPAD值与组织中氮浓度之间有很好的相关性，采用叶绿素计预测氮肥对小麦的效应仅有4%的误差，远远低于全氮的20%的误差。

本试验所采用的施肥模型是根据2005年冬小麦数据进行建模，此公式的适用性还有待于进一步验证。我国幅员辽阔，冬小麦品种繁多，不同品种叶绿素计诊断指标是否应该相同，由于叶色是许多因素综合影响的结果，并不是单纯因氮含量不同而存在差异，当植物缺磷、缺钾或缺乏微量元素时，叶色也会发生变化，影响测定结果，另外测定时期和测定叶片的选择等问题都还需要进一步研究。今后尚需扩大试验示范范围，通过多点试验完善利用叶绿素计进行冬小麦变量施肥这项技术。

参考文献：

[1] 张福锁，陈新平，马文奇. "现代农业"时代谈化肥[J]. 磷肥与复肥，2003，18(1)：1-3.
Zhang F S, Chen X P, Ma W Q. Discussion on fertilizer in an era of modern agriculture[J]. Phos. Comp. Fert., 2003, 18(1): 1-3.

[2] 马旭，马成林，桑国旗，等. 变量施肥机具的设计[J]. 农业机械学报，2005，36(1)：50-53.
Ma X, Ma C L, Sang G Q *et al*. Design of variable rate fertilizer applicator[J]. Trans. Chin. Soci. Agric. Machin., 2005, 36(1): 50-53.

[3] Koch B, Khosla R, Frasier W M *et al*. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones [J]. Agron. J., 2004, 96(6): 1572-1580.

[4] Mamo M, Malzer G L, Mulla D J *et al*. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn[J]. Agron. J., 2003, 95: 958-964.

[5] Wittry D J, Mallarino A P. Comparison of uniform- and variable-rate phosphorus fertilization for corn-soybean rotations[J]. Agron. J., 2004, 96: 26 33.

[6] 薛绪掌，陈立平，孙治贵，赵春江. 基于土壤肥力与目标产量的冬小麦变量施氮及其效果[J]. 农业工程学报，2004，20(3)：59-62.
Xue X Z, Chen L P, Shun Z G, Zhao C J. Results of variable-rate nitrogen fertilization of winter wheat based on soil fertility and yield

map[J]. Trans. CSAE, 2004, 20(3): 59-62.

[7] 宋晓宇,王纪华,薛绪掌,等. 利用航空成像光谱数据研究土壤供氮量及变量施肥对冬小麦长势影响[J]. 农业工程学报, 2004,20(4): 45-49.
Song X Y, Wang J H, Xue X Z *et al*. Assessment of the influence of soil nitrogen supplies and variable fertilization on winter wheat growth condition using airborne hyperspectral image [J]. Trans. CSAE, 2004, 20(4): 45-49.

[8] 梁红霞,赵春江,黄文江,等. 利用光谱指数进行冬小麦变量施肥的可行性及其效益评价[J]. 遥感技术与应用,2005,20(5): 469-473.
Liang H X, Zhao C J, Huang W J *et al*. The feasibility and benefit evaluate of variable nitrogen fertilization application on winter wheat based on canopies spectroscopy parameters[J]. Rem. Sens. Techn. Appl., 2005, 20(5): 469-473.

[9] 张书慧,马成林,李伟,徐岩. 变量施肥对玉米产量及土壤养分影响的试验[J]. 农业工程学报,2006,22(8): 64-67.
Zhang S H, Ma C L, Li W, XU Y. Experimental study on the influence of variabe rate fertilization on maize yield and soil nutrients[J]. Trans. CSAE, 2006, 22(8): 64-67.

[10] Westcott M P, Wraith J M. Correlation of leaf chlorophyll readings and stem nitrate concentrations in peppermint[J]. Commum. Soil Sci. Plant Anal., 1995, 26(9-10): 1481-1490.

[11] Fox R H, Piekielek W P, Macneal K M. Using a chlorophyll meter to predict nitrogen fertilizer needs of winter wheat[J]. Commum. Soil Sci. Plant Anal., 1994. 25: 171-181.

[12] Wood C W, Tracy P W, Reeves D W, Edmisten K L. Determination of cotton nitrogen status with a hand-held chlorophyll meter[J]. J. Plant Nutr., 1992,15:1435-1448.

[13] Turner F T, Jund M F. Chlorophyll meter to predict nitrogen topdress requirement for semidwart rice[J]. Agron. J., 1991, 83: 926-928.

[14] Lukina E V, Freeman K W, WynnK J *et al*. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yields and plant nitrogen uptake[J]. Plant Nutr., 2001, 24: 885-898.

[15] Liang H X, Huang W J, Liu L Y *et al*. Variable rate nitrogen application algorithm based on SPAD measurements and its influence on winter wheat[J]. IGARSS' 04, 2004, 6: 4059-4062.

[16] 李志宏,刘宏斌,张福锁. 应用叶绿素仪诊断冬小麦氮营养状况的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(4): 401-405.
Li Z H, Liu H B, Zhang F S. Research of nitrogen nutrition status for winter wheat based on chlorophyll meter[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2003, 9(4): 401 405.

[17] Smeal D, Zhang H. Chlorophyll meter evaluation for nitrogen man agementincorn[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1994, 25 (9-10): 1495-1503.

[18] Schepers J S, Francis D D, Vigil M, Below F E. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1992, 23(17-20): 2173-2187.

[19] Blackmer T M, Schepers J S. Techniques for monitoring crop nitrogen statusofcorn[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1994, 25(9-10): 1791-1800.

[20] Follett R H, Follett R F. Use of a chlorophyll meter to evaluate the nitrogen status of dryland winter wheat[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1992, 23(7-8): 687-697.