

基于光谱指数的夏玉米氮肥调控效应研究

李国强¹,张素青²,胡峰¹,吴士文³,郑国清^{1*},张建涛¹,周萌¹,寇彩霞⁴

(1. 河南省农业科学院 农业经济与信息研究所,河南 郑州 450002;

2. 河南职业技术学院 信息工程系,河南 郑州 450046;

3. 中国科学院 南京土壤研究所 土壤环境与污染修复重点实验室,江苏 南京 210008;

4. 延津县农业科学研究所,河南 延津 453200)

摘要:为实现夏玉米对氮肥的高效利用,依据养分平衡原理,利用光谱无损监测技术,构建了夏玉米氮肥调控模型,并对比分析了变量施肥和传统施肥对植株氮积累量、氮肥利用效率、产量及经济效益的影响。结果表明,与传统施肥区相比,变量施肥区植株氮积累量提高2.67%,平均产量提高67.53 kg/hm²,经济收入提高148.6元/hm²,但植株氮积累量和产量的变异系数分别降低了3.84个百分点和7.27个百分点;变量施肥区的氮肥利用率、氮肥农学效率、氮肥偏生产力、氮素吸收量分别提高了11.82个百分点、3.95 kg/kg、9.76 kg/kg、0.43 kg/t;变量施肥区尿素投入1285.42元/hm²,比传统施肥区节约388.49元/hm²。建立的氮肥调控模型有助于提高夏玉米氮肥利用效率,达到氮素效率和产量协同提高的目的。

关键词:夏玉米;光谱指数;变量施肥;氮肥调控模型

中图分类号:S513;S143.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-3268(2015)09-0156-05

Study on Nitrogen Fertilizer Regulation Effect Based on Spectral Index of Summer Maize

LI Guoqiang¹,ZHANG Suqing²,HU Feng¹,WU Shiwen³,ZHENG Guoqing^{1*},
ZHANG Jiantao¹,ZHOU Meng¹,KOU Caixia⁴

(1. Agricultural Economy & Information Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Department of Information Engineering, Henan Polytechnic College, Zhengzhou 450046, China; 3. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. Yanjin Institute of Agriculture, Yanjin 453200, China)

Abstract:To coordinately increase both grain yield and nitrogen use efficiency of maize, the nitrogen recommendation model for maize was developed with nondestructive hyperspectral technology based on the theory of nutrient balance, and the plant nitrogen accumulation, nitrogen use efficiency, grain yield and economic benefit in variable-rate zone were compared with those in uniform-rate zone in Yanjing county. The results showed that relative to those in uniform-rate zone, plant nitrogen accumulation, grain yield and economic benefit in variable-rate zone increased by 2.67%, 67.53 kg/ha, 148.6 RMB/ha, respectively. However, coefficient of variation of plant nitrogen accumulation and yield in variable-rate zone reduced by 3.84 and 7.27 percent points, respectively. Nitrogen use efficiency, nitrogen agronomic efficiency, nitrogen partial factor productivity, absorbed nitrogen amount in variable-rate zone increased by 11.82 percentage points, 3.95 kg/kg, 9.76 kg/kg and 0.43 kg/t, respectively. Urea cost in variable-rate zone was 1285.42 RMB/ha, 388.49 RMB/ha lower than that in uniform-rate zone. The nitrogen recommendation

收稿日期:2015-05-06
基金项目:河南省科技成果转化计划项目(132201110031);河南省重大科技专项(121100110900)
作者简介:李国强(1984-),男,河南林州人,副研究员,博士,主要从事农业信息技术研究。E-mail:gqli@hnagri.org.cn
* 通讯作者:郑国清(1964-),男,河南淅川人,研究员,博士,主要从事农业信息技术研究。E-mail:zgqzx@hnagri.org.cn

model for maize could improve nitrogen use efficiency, further achieving the goal of improving the nitrogen use efficiency and yield synergistically.

Key words: summer maize; spectral index; variable fertilization; nitrogen recommendation model

我国玉米生产中氮肥施用量持续增加,氮素利用效率总体低下,导致生态环境污染严重^[1-2]。因此,氮肥的科学运筹和精确调控,有助于确保作物产量和品质目标,提高氮肥利用效率、降低生产成本、减少地下水污染^[3-4]。长期以来,国内外学者围绕氮肥运筹技术开展了大量的研究,先后建立了基于土壤肥力、比色卡和 SPAD 值、光谱指数、遥感影像以及作物模型的氮肥管理技术。基于土壤硝态氮测试的小麦^[5]和玉米^[6]氮素实时管理技术不能根据作物实时长势来变量施肥,且土壤养分测试工作量较大,时效性较差;基于 SPAD 值的实地氮肥管理技术由于叶绿素计依据单叶营养信息,测量值不稳定,且难以准确反映群体生长状况;而基于光谱指数的实时氮肥管理技术将施氮决策与作物实时长势相结合,有利于实现作物精确定量化施肥管理。Lukina 等^[7]利用作物归一化植被指数 (NDVI) 和当季预估产量 (INSEY),建立了小麦施氮优化算法 (nitrogen fertilization optimization algorithm, NFOA)。宋晓宇等^[8]、梁红霞等^[9]也基于 NFOA 算法,分别利用地面光谱和航空成像光谱数据,建立了冬小麦拔节期追肥模型。Teal 等^[10]和 Tubaña 等^[11]先后利用 NFOA 算法,实现了玉米生育中期追氮量的估算。赵福刚^[12]基于 NFOA 算法建立了吉林省玉米氮营养诊断追肥模型。Dellinger 等^[13]、Barker 等^[14-15]、Kitchen 等^[16]和 Scharf 等^[17]基于主动式光谱监测数据,利用相对反射率算法和二次加平台模型,实现了玉米拔节期变量追氮管理。综上所述,基于光谱数据的氮肥调控算法主要有 NFOA 法和相对反射率法。前者考虑了不同肥力水平下作物产量,但没有

考虑中后期土壤供氮能力^[18],因此施氮量估算存在一定偏差。后者将众多管理措施的混杂效应进行标准化,未考虑土壤、降雨量等环境因素^[16]。为此,本研究综合考虑作物实时信息、土壤供氮状况等因素,拟构建一种新的夏玉米氮肥调控模型,并与传统施肥方式进行对比,以检验其应用效果,最终为玉米生产中的氮肥运筹提供技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验设计

本试验于 2013 年玉米生长季,在河南省延津县农业科学研究所试验地 (E114°12'、N35°111') 进行。前茬为冬小麦,土壤类型为潮土。碱解氮含量 40.58 ~ 88.35 mg/kg,全氮含量 0.73 ~ 1.08 g/kg,有机质含量 9.2 ~ 17.9 g/kg,速效磷含量 2.76 ~ 32.29 mg/kg,速效钾含量 251.19 ~ 496.98 mg/kg。供试玉米品种为郑单 958,种植密度为 8.25 万株/hm²,2013 年 6 月 14 日播种,9 月 25 日收获。

试验地南部为变量施肥区,北部为传统施肥区,各 30 个地块,每块面积 17 m × 17 m。选择邻近地块设置氮肥空白区,小区面积同施肥区地块。变量施肥区的氮肥于播前和大喇叭口期分次施入,施氮量由夏玉米氮肥调控模型计算得出,各地块的硝态氮含量及施氮量见表 1。传统施肥区的氮肥于播前施入,各地块的施氮量均为 350 kg/hm²。氮肥空白区施氮量为 0 kg/hm²。播前每地块均一次性施入 P₂O₅ 72 kg/hm² 和 K₂O 78 kg/hm²。生长期间按常规管理模式统一管理。

表 1 变量施肥区土壤硝态氮含量、播前施氮量和大喇叭口期追氮量

地块编号	硝态氮含量/(mg/kg)		施氮量/(kg/hm ²)		地块编号	硝态氮含量/(mg/kg)		施氮量/(kg/hm ²)	
	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	播前	大喇叭口期		0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	播前	大喇叭口期
1	11.35	2.91	66.56	141.94	16	1.12	0.75	97.93	263.33
2	9.90	3.61	68.06	113.19	17	0.51	0.39	96.22	223.22
3	20.73	38.76	52.08	57.58	18	0.03	0.20	93.75	227.69
4	13.33	1.93	63.98	54.62	19	0.95	0.83	98.12	263.19
5	6.31	3.83	76.54	152.22	20	1.36	0.48	78.15	298.13
6	7.06	2.24	78.92	127.88	21	1.95	0.71	95.95	188.94
7	1.80	1.41	94.42	248.27	22	4.53	1.04	88.52	195.47
8	1.58	1.76	94.05	189.48	23	4.99	0.96	87.61	157.29
9	3.45	1.54	89.93	211.11	24	2.22	0.07	96.99	218.19
10	5.82	13.33	52.10	51.52	25	3.51	0.40	92.80	118.70
11	13.01	4.35	58.25	112.05	26	1.83	0.56	96.65	234.85
12	2.49	2.38	90.05	219.76	27	1.59	1.27	95.33	222.61
13	3.24	12.32	61.35	132.03	28	1.12	1.16	96.84	227.46
14	14.25	9.35	41.60	136.75	29	1.67	0.51	97.17	264.64
15	1.27	0.63	77.87	296.17	30	1.60	1.04	95.94	241.25

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤硝态氮 于播前,每小区按 0~20 cm 和 20~40 cm 取土,采用酚二磺酸比色法^[14]测定硝态氮含量。

1.2.2 光谱数据 采用 MSR-16R 型多光谱便携式辐射计(美国 Cropscan 公司)测量冠层光谱。仪器波段为 460~1 260 nm,有 16 个波段,仪器视场角为 31°。于夏玉米大喇叭口期,选择晴朗无云的天气,测量各小区玉米冠层光谱反射率,测量时间为 10:00—14:00(太阳高度角大于 45°)。测量时探头垂直向下,距冠层垂直高度约 1 m。每个小区测量 3 点,每点重复 3 次,取平均值作为该小区的光谱测量值。

1.2.3 氮含量及产量 于拔节期、大喇叭口期和成熟期,选择有代表性的植株样品 20 株,按器官分开,在 105℃杀青 30 min,再在 75℃下烘干至恒质量,称质量并记录,粉碎后采用凯氏定氮法测定各器官氮含量。于成熟期,各小区内收获 20 株进行测产和考种。

1.3 相关指标计算方法

氮肥利用率=(施氮区地上部吸氮量-空白区地上部吸氮量)/施氮量×100%

氮肥农学效率(kg/kg)=(施氮区籽粒产量-空白区籽粒产量)/施氮量

氮肥偏生产力(kg/kg)=施氮区产量/施氮量

氮素吸收量(kg/t)=植株地上部分氮素养分积累量×1 000/产量。

2 结果与分析

2.1 夏玉米氮肥调控模型的构建

借鉴 Lukina 等^[7]建立的小麦调控模型、凌启鸿等^[19]和陈青春等^[18]建立的水稻调控模型,基于养分平衡原理,根据土壤供氮量、目标产量需氮量和植株实时氮积累量三者的差值,实现夏玉米播前和大喇叭口期施氮量的估算,夏玉米氮肥调控模型如下。

(1)播前施氮量计算

$$NB = \frac{ND - NS}{NUE} \times 0.3 / FNC \tag{1}$$

式中,NB 为播前施氮量(kg/hm²);ND 为目标需氮量(kg/hm²);NS 为土壤供氮量(kg/hm²);NUE 为氮肥利用率,取 0.5;FNC 为肥料氮含量;0.3 为基肥比例。

玉米目标需氮量:

$$ND = GYT \times \frac{ND_h}{100} \tag{2}$$

$$GYT = AY \times (1 + 10\%) \tag{3}$$

式中,GYT 为目标产量(kg/hm²);AY 为当地前 3 a 平均产量;ND_h 为 100 kg 籽粒吸氮量,取 2.15 kg。土壤供氮量:

$$NS = H \times \rho b \times C / 0.1 \tag{4}$$

式中,NS 取 0~20 cm 和 20~40 cm 土层硝态氮积累量之和;H 为土层厚度(cm);ρb 为土壤容重(g/cm³);C 为土壤硝态氮含量(mg/kg);0.1 为换算系数;经测定 0~20 cm 土层土壤容重为 1.4 g/cm³,20~40 cm 土层为 1.5 g/cm³。

(2)大喇叭口期追氮量计算

$$NR = \frac{ND - PNA - NS \times k}{NUE} / FNC \tag{5}$$

式中,NR 为追氮量;PNA 为地上部植株氮积累量(kg/hm²);k 为后期土壤供氮占土壤总供氮量的比例,取 0.7;NUE 取 0.5。

玉米地上部植株氮积累量:

$$PNA = [0.658\ 2 \times RVI(950,670) - 1.976\ 4] \times \frac{10\ 000}{1\ 000} (R^2 = 0.884\ 7) \tag{6}$$

$$RVI(950,670) = R_{950} / R_{670} \tag{7}$$

式中,RVI(950,670)为玉米大喇叭口期的比值植被指数;R₉₅₀、R₆₇₀分别为 950、670 波段的光谱反射率。

2.2 不同施肥区播前土壤硝态氮积累量的比较分析

变量施肥区土壤硝态氮积累量为 29.75 kg/hm²,变异系数为 87.11%,而传统施肥区土壤硝态氮积累量为 23.89 kg/hm²,变异系数为 69.32%(表 2)。可见,变量施肥区和传统施肥区的土壤肥力空间分布不均。

表 2 播前 0~40 cm 土层硝态氮积累量的统计特征值

处理	最大值/ (kg/hm ²)	最小值/ (kg/hm ²)	平均值/ (kg/hm ²)	标准差	变异系 数/%
变量施肥	75.57	5.23	29.75	25.92	87.11
传统施肥	75.57	8.41	23.89	16.56	69.32

2.3 不同施肥区地上部植株氮积累量的比较分析

由表 3 可知,氮肥调控前,于拔节期和大喇叭口期,变量施肥区地上部植株氮积累量的变异系数分别为 24.78% 和 20.29%,而传统施肥区的变异系数分别为 18.84% 和 17.28%。氮肥调控后,成熟期变量施肥区地上部植株氮积累量变异系数为 14.83%,而传统施肥区为 18.67%。可见,成熟期变量施肥区地上部植株氮积累量变异系数明

显下降。变量施肥区地上部植株氮积累量均值为 237.53 kg/hm²,而传统施肥区为 231.35 kg/hm²。

表 3 夏玉米地上部植株氮积累量统计特征

处理	生育时期	最大值/(kg/hm ²)	最小值/(kg/hm ²)	平均值/(kg/hm ²)	标准差	变异系数/%
变量施肥	拔节期	75.14	21.58	47.61	11.80	24.78
	大喇叭口期	175.76	80.48	130.31	26.44	20.29
	成熟期	296.80	181.81	237.53	35.22	14.83
传统施肥	拔节期	70.86	33.82	52.28	9.85	18.84
	大喇叭口期	169.48	81.29	130.47	22.54	17.28
	成熟期	305.11	161.74	231.35	43.20	18.67

2.4 不同施肥区氮肥利用效率的比较分析

变量施肥区的氮肥利用率、氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮素吸收量均高于传统施肥区(表 4)。其中,变量施肥区的氮肥利用率比传统施肥区高出 11.82 个百分点,氮肥农学效率提高 3.95 kg/kg,氮肥偏生产力提高 9.76 kg/kg,氮素吸收量提高 0.43 kg/t。

表 4 夏玉米地上部吸氮量及氮肥效率比较

处理	氮肥利用率/%	氮肥农学效率/(kg/kg)	氮肥偏生产力/(kg/kg)	氮素吸收量/(kg/t)
变量施肥	43.34	16.21	41.23	21.44
传统施肥	31.52	12.26	31.47	21.01

表 5 夏玉米籽粒产量和经济效益比较

处理	最高产量/(kg/hm ²)	最低产量/(kg/hm ²)	平均产量/(kg/hm ²)	变异系数/%	产量收入/(元/hm ²)	尿素投入/(元/hm ²)	节本增效/(元/hm ²)
变量施肥	12 809.40	9 340.70	11 080.89	8.04	24 377.9	1 285.42	537.09
传统施肥	12 808.41	7 585.43	11 013.36	15.31	24 229.3	1 673.91	

3 结论与讨论

氮肥施用增加了玉米产量,但过量施氮并没有表现出产量的进一步提高。过量施入氮肥会增加土壤中硝态氮累积量^[20],增加硝态氮发生淋洗的危险性。如何做到既经济又能发挥最大的产量效应,是作物高产合理施肥中亟需解决的问题之一^[21]。变量施肥技术是根据作物实际需要,基于科学施肥方法,确定对作物的变量投入^[22-23],而氮肥推荐算法是实现实时实地变量施肥的核心技术。NFOA 法和相对反射率法是施氮量估算中研究较多的 2 种。(1) NFOA 法。该算法^[7,24]主要依据作物的 NDVI 预测作物当时氮吸收量和潜在产量,并根据产量与籽粒含氮量的关系确定总需氮量,然后通过总需氮量减去已吸氮量确定最终施氮量。Teal 等^[10]、Tubaña 等^[11]将 NFOA 算法改进后,用于玉米 V7—V9 生育阶段氮肥追施。(2) 相对反射率法,即利用不缺氮区和缺氮区测定的光谱数据构建相对反射率,以表示增施肥料的潜在可能性。Dellinger 等^[13]、Barker 等^[14-15]利用主动光谱仪 Crop Circle

2.5 不同施肥区产量及经济效益的比较分析

将夏玉米产量和经济效益分析结果列于表 5。由表 5 看出,变量施肥区玉米平均产量、最高产量、最低产量比传统施肥区分别提高 67.53 kg/hm²、0.99 kg/hm²、1 755.27 kg/hm²,且产量变异系数降低 7.27 个百分点。按照市场价格行情,尿素为 2.2 元/kg、玉米收购价为 2.2 元/kg 计算,变量施肥区产量收入 24 377.9 元/hm²,比传统施肥区增加 148.6 元/hm²,而变量施肥区尿素投入为 1 285.42 元/hm²,比传统施肥区节省尿素投入 388.49 元/hm²。

ACS-210,选用绿色归一化植被指数(GNDVI),构建 $rGNDVI = GNDVI_{\text{observed}} / GNDVI_{N\text{-reference}} \circ rGNDVI \geq 1.00$ 时,表示不需要追氮, $rGNDVI < 1.00$ 时,表示需要追氮。然后,利用二次加平台模型估算追氮量。Holland 等^[25]首先构建充裕指数(sufficiency index, SI) = $VI_{\text{sensed crop}} / VI_{\text{reference}}$,之后建立追氮量与充裕指数的氮肥响应函数,以此估算施氮量。

与 NFOA 法和相对反射率法相比,在本研究的氮肥调控模型中,玉米地上部植株氮积累量由玉米大喇叭口期比值植被指数 RVI(950,670)估算得出,土壤供氮量利用经验模型估算得出。该氮肥调控模型量化了夏玉米生育后期土壤供氮量,提高了模型精准性,进一步缩小了施氮量的估算偏差。

Ferguson 等^[26]发现,与传统均匀施肥相比,变量施肥区玉米总施肥量和产量均无显著差异,而 Koch 等^[27]则发现采用变量施肥技术,节省氮肥 6%~46%、增加净收益 112.7~183.1 元/hm²。本研究结果表明,与传统施肥区相比,变量施肥区氮肥利用率提高 11.82 个百分点,产量提高 67.53 kg/hm²,节省氮肥 388.49 元/hm²。变量施肥区籽粒产量与传统

施肥区无显著性差异,与 Ferguson 等^[26]的结论基本一致。但变量施肥区平均施氮量为 268.77 kg/hm²,比传统施肥区减少 81.23 kg/hm²,节省尿素投入 388.49 元/hm²,同时产量收入 24 377.9 元/hm²,比传统施肥区增加 148.6 元/hm²。

本研究构建的氮肥调控模型不仅有助于提高玉米整个生育期吸氮量,也缩小了田块间植株氮积累量差异,但本模型还需要通过不同生态点、生产力水平和品种类型的进一步检验和验证。本研究使用的是被动式光谱传感器,而主动式光谱传感器对环境光的日变化不敏感,更适合安装在施肥机等农机具上。在配备计算机处理和变量施肥控制器后,可实现光谱传感和施肥一体化作业。因此,下一步研究将结合主动式光谱传感器的特点,改进氮肥推荐算法,实现农机和农艺的结合。

参考文献:

- [1] 张鑫,安景文,邹晓锦,等. 不同施肥模式对玉米产量及土壤硝态氮的影响[J]. 河南农业科学,2012,41(2):41-44.
- [2] 武继承,杨永辉,康永亮,等. 氮磷配施对玉米生长和养分利用的影响[J]. 河南农业科学,2011,40(10):68-71.
- [3] 李国强,吴士文,郑国清,等. 基于冠层反射光谱的夏玉米叶片氮积累量估测[J]. 中国农学通报,2014,30(3):85-90.
- [4] 吴大付,张伟,孙夏耘,等. 麦玉两熟区施氮对地下水硝酸盐含量的影响[J]. 河南农业科学,2008(10):63-67.
- [5] 叶优良,黄玉芳,刘春生,等. 氮素实时管理对冬小麦产量和氮素利用的影响[J]. 作物学报,2010,36(9):1578-1584.
- [6] 隽英华,汪仁,孙文涛,等. 基于土壤硝态氮测试的春玉米氮肥实时监控技术[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(5):1248-1256.
- [7] Lukina E, Freeman K, Wynn K, *et al.* Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake[J]. Journal of Plant Nutrition, 2001, 24(6):885-898.
- [8] 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.
- [9] 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):13-17.
- [10] Teal R, Tubana B, Girma K, *et al.* In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(6):1488-1494.
- [11] Tubaña B, Arnall D B, Walsh O, *et al.* Adjusting midseason nitrogen rate using a sensor-based optimization algorithm to increase use efficiency in corn[J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31(8):1393-1419.
- [12] 赵福刚. 玉米冠层光谱氮营养诊断追肥模型的研究[D]. 长春:吉林农业大学,2007.
- [13] Dellinger A E, Schmidt J P, Beegle D B. Developing nitrogen fertilizer recommendations for corn using an active sensor[J]. Agronomy Journal, 2008, 100(6):1546-1552.
- [14] Barker D W, Sawyer J E. Using active canopy sensors to quantify corn nitrogen stress and nitrogen application rate[J]. Agronomy Journal, 2010, 102(3):964-971.
- [15] Barker D, Sawyer J. Using active canopy sensing to adjust nitrogen application rate in corn[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(4):926-933.
- [16] Kitchen N R, Sudduth K A, Drummond S T, *et al.* Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization[J]. Agronomy Journal, 2010, 102(1):71-84.
- [17] Scharf P C, Shannon D K, Palm H L, *et al.* Sensor-based nitrogen applications out-performed producer-chosen rates for corn in on-farm demonstrations[J]. Agronomy Journal, 2011, 103(6):1683-1691.
- [18] 陈青春,蒋锋,刘鹏飞,等. 作物追氮模型的研究进展[J]. 仲恺农业工程学院学报,2012,25(1):67-70.
- [19] 凌启鸿,张洪程,戴其根,等. 水稻精确定量施氮研究[J]. 中国农业科学,2005,38(12):2457-2467.
- [20] 孙占祥,邹晓锦,张鑫,等. 施氮量对玉米产量和氮素利用效率及土壤硝态氮累积的影响[J]. 玉米科学,2011,19(5):119-123.
- [21] 隽英华,汪仁,孙文涛,等. 施氮模式对春玉米养分累积特性的影响[J]. 核农学报,2011,25(1):143-148.
- [22] 张书慧,马成林,李伟,等. 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.
- [23] 于合龙,陈桂芬,毕春光. 玉米精准施肥数据库建模研究[J]. 玉米科学,2008,16(4):184-188.
- [24] Raun W R, Solie J B, Johnson G V, *et al.* Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(4):815-820.
- [25] Holland K H, Schepers J S. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn[J]. Agronomy Journal, 2010, 102(5):1415-1424.
- [26] Ferguson R B, Hergert G W, Schepers J S, *et al.* Site-specific nitrogen management of irrigated maize: Yield and soil residual nitrate effects[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(2):544-553.
- [27] Koch B, Khosla R, Frasier W M, *et al.* Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones[J]. Agronomy Journal, 2004, 96(6):1572-1580.