

小麦—玉米轮作制中氮肥效应模型的选择——经济和环境效益分析

陈新平 周金池 王兴仁 张福锁

(中国农业大学植物营养系, 北京 100094)

宝德俊

贾晓红

(河南农科院土肥所, 郑州 450002) (北京市土肥站, 北京 100024)

摘要 从经济和环境效益两个方面对描述冬小麦、夏玉米轮作制中作物产量对氮肥反应的四个施肥模型(二次型, 平方根, 二次型 + 平台, 线性 + 平台)进行了比较研究。结果表明, 不同模型的拟合程度都较高, 且拟合程度和计算的最佳产量均无显著差异, 但线性 + 平台和二次型 + 平台模型推荐的最佳施肥量大大低于二次型模型, 因而经济效益较高。研究还表明, 与二次型模型相比, 采用线性 + 平台和二次型 + 平台模型推荐的最佳施肥量, 有利于维持土壤无机氮的基本平衡(而不是显著上升!), 提高氮肥利用率, 并使小麦、玉米茎秆含氮量降低, 表现出较佳的环境效应。

关键词 氮肥, 施肥模型, 土壤残留无机氮, 氮肥利用率

中图分类号 S143.1

氮肥是我国农业生产中最重要的增产因子之一, 目前我国的氮肥用量占化肥总用量的60%以上。在华北地区, 冬小麦—夏玉米轮作是最重要的种植制度, 近年来, 这一地区的氮肥施用量有较大幅度增大, 如北京市每季作物氮肥的推荐用量常在225~300kg/hm², 而在山东恒台的一些高产田块上, 氮肥用量更高达每季作物600kg/hm²。过高的氮肥用量不仅造成了肥料的浪费和施肥经济效益下降, 同时也对生态环境带来了负效应。最近的一些调查表明, 由于过量施氮, 京、津、冀等地地下水硝酸盐污染严重^[1], 陕西省地下水硝酸盐污染问题也非常突出^[2]。因此, 在这些地区进行氮肥的合理推荐已是当务之急。

任何氮肥推荐方法的研究都离不开氮肥效应模型的选择与应用。无论在国内或国际上, 二次模型都是最为常用的描述禾谷类作物对氮肥反应的模型。然而, 近年来的一些研究表明, 这一传统的观念需要重新加以认识。Cerreto和Blackmer研究证明, 描述玉米对氮肥反应的模型应以二次 + 平台模型为优^[3]; 其他研究工作者的研究证明, 对马铃薯、蔬菜、小麦等作物而言, 亦以二次 + 平台或线性 + 平台模型拟合作物对氮肥的反应较好^[4~6]。在这些研究中, 采用线性 + 平台模型或二次 + 平台模型不仅拟合程度较好, 而且可以在产量不减的前提下有效地减少氮肥用量, 提高氮肥的经济效益, 因此, 许多学者^[7~9]在其研

究工作中都采用了线性 + 平台模型或二次 + 平台模型。

国内绝大多数的研究工作中都使用二次模型来拟合禾谷类作物对氮肥的反应,从前述研究情况来看,对这一问题有重新加以研究和评价的必要。本文以华北地区主要种植制度冬小麦—夏玉米轮作为研究对象,力图从经济和环境效应两方面研究氮肥模型的选择问题。

1 材料与方方法

田间试验于 1995~1996 年在北京昌平、顺义和河南郑州 3 点进行,3 点的土壤均为石灰性潮土,均具有灌溉条件,土壤基本理化性状见表 1。

在北京昌平、顺义两点,试验设 5 个氮水平,即每季作物施 N, 0, 90, 180, 270, 360kg/hm²,在播前和拔节期两次施用,每次各占 50%,各处理磷、钾肥用量相同,磷肥用量为冬小麦 90kg/hm² P₂O₅,夏玉米 45kg/hm² P₂O₅,钾肥用量为冬小麦 60kg/hm² K₂O,夏玉米 120kg/hm² K₂O。两点冬小麦—夏玉米品种分别为农大 95—西玉 3 号和京 411—唐抗 5 号。

表1 供试土壤基本农化性状

Table 1 Some properties of the experimental soils

试验点 Site	土壤层次 Soil layer (cm)	有机质 O.M. (g/kg)	氮		速效磷 Olsen-P	速效钾 NH ₄ Ac-K	pH (H ₂ O)
			硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)			
昌平	0~20	21.3	9.56	2.33	11.1	58.3	7.78
	20~40	13.8	3.84	2.87	12.2	49.4	8.23
	40~60	9.9	4.16	12.40	11.8	45.2	8.20
	60~80	3.4	6.91	10.90	10.2	44.3	8.29
	80~100	4.8	2.53	5.82	9.0	39.1	8.13
顺义	0~20	15.2	4.19	6.82	12.4	51.9	8.08
	20~40	12.2	3.96	6.35	14.7	53.6	8.06
	40~60	10.9	4.48	6.21	12.7	48.9	8.22
	60~80	4.9	4.67	5.90	9.8	39.1	8.02
	80~100	4.8	12.60	6.45	10.8	39.6	8.14
郑州	0~20	10.1	11.60	0.82	12.5	78.9	8.12
	20~40	8.7	10.10	3.99	14.6	68.6	7.78
	40~60	2.2	7.75	3.12	13.7	58.7	8.44
	60~80	2.4	6.66	2.84	9.7	49.8	8.44
	80~100	1.1	4.19	1.19	11.5	31.6	8.39

在河南郑州同一点上,冬小麦—夏玉米各采用两个不同的品种组合进行两个试验,一个为郑 941(冬小麦)—郑州 8 号(夏玉米),另一个为 C3011(冬小麦)—丹玉 13(夏玉米),每一品种组合设 4 个氮水平,即每季作物 0, 90, 180, 270kg/hm²,每季作物氮肥分播前和拔节期两次施用,各占 1/2。各处理磷、钾肥

用量相同,磷肥用量为冬小麦 $90\text{kg}/\text{hm}^2$ P_2O_5 , 夏玉米 $120\text{kg}/\text{hm}^2$ P_2O_5 , 钾肥用量为冬小麦 $45\text{kg}/\text{hm}^2$ K_2O , 夏玉米 $75\text{kg}/\text{hm}^2$ K_2O 。

施用的肥料为氮肥:尿素(N, 46%);磷肥:重过磷酸钙(P_2O_5 , 46%);钾肥:硫酸钾(K_2O , 50%)。每一试验均设三次重复;小区随机区组排列,各点小区面积均大于 20m^2 ,在冬小麦收获后原位定点进行夏玉米试验。

土壤无机氮(NH_4^+ , NO_3^-)测试采用 $1\text{mol}/\text{L}$ NaCl 浸提,植株全氮采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮半微量蒸馏法。

试验结果采用 SAS^[10] 软件进行处理。采用二次型、平方根、二次型 + 平台和线性 + 平台四个模型对产量结果进行拟合。

二次型模型函数式(Quad)为:

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 \quad (1)$$

式中 y 为作物产量 (kg/hm^2), x 为氮肥用量 (kg/hm^2), b_0 、 b_1 、 b_2 分别为基础产量(不施肥时产量)、线性系数和二次方系数。

平方根模型函数式(Squ)为:

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^{1/2} \quad (2)$$

式中 y 为作物产量 (kg/hm^2), x 为氮肥用量 (kg/hm^2), b_0 、 b_1 、 b_2 分别为基础产量(不施肥时产量)、线性系数和平方根系数。

二次型 + 平台模型函数式(Q + P)为:

$$\begin{aligned} y &= b_0 + b_1x + b_2x^2 \quad (x < c) \\ y &= y_p \quad (x \geq c) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 y 为作物产量 (kg/hm^2), x 为氮肥用量 (kg/hm^2), b_0 、 b_1 、 b_2 分别为基础产量(不施肥时产量)、线性系数和二次方系数, c 为氮肥用量临界值,由二次型曲线和平台直线的交点求得, y_p 为平台产量。

直线 + 平台模型函数式(L + P)为:

$$\begin{aligned} y &= b_0 + b_1x \quad (x < c) \\ y &= y_p \quad (x \geq c) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 y 为作物产量 (kg/hm^2), x 为氮肥用量 (kg/hm^2), b_0 、 b_1 分别为基础产量(不施肥时产量和线性系数, c 为氮肥用量临界值,由直线和平台的交点求得, y_p 为平台产量。

各模型最佳施肥量的计算见 Cerreto 等^[3],氮肥价格以 4.0 元/ kg 计算,冬小麦、夏玉米籽粒价格分别为 1.4 元/ kg 和 1.0 元/ kg 。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥效应模型的经济效益分析

结果表明,采用不同的施肥模型拟合冬小麦、夏玉米对氮肥的反应,决定系数 R^2 都很高,各个模型之间的拟合度 (R^2) 没有明显差异(表 2)。这说明仅就数学意义而言,这些模型都可用于拟合冬小麦、夏玉米对氮肥的反应。但是,在用平方根模型拟合时,在北京顺义点冬小麦和夏玉米及郑州-2夏玉米都出现了非典型式,非典型式的出现机率为 37.5%,

这说明用平方根模型拟合冬小麦、夏玉米对氮肥的反应存在不足之处,因此,在以下分析中该模型仅作参考,不予详细评述。

表2 不同模型的拟合度(R^2)、最佳产量及最佳施氮量

Table 2 The effect of different models on R^2 , optimum yield and optimum N rate

试验点 Site	模型 Model	冬小麦 Winter wheat			夏玉米 Summer corn			小麦+玉米 Wheat+corn	
		R^2	产量 Yield (t/hm ²)	最佳施氮量 Nopt ¹⁾ (kg/hm ²)	R^2	产量 Yield (t/hm ²)	最佳施氮量 Nopt (kg/hm ²)	产量 Yield (t/hm ²)	最佳施氮量 Nopt (kg/hm ²)
昌平	Quad.	0.47*	6.1	171	0.61**	8.2	217	14.3	389
	Squ.	0.53*	6.0	92	0.75**	7.8	144	13.9	236
	L+P	0.49*	5.9	80	0.79**	7.8	86	13.7	166
	Q+P	0.49*	5.9	80	0.79**	7.8	78	13.7	159
顺义	Quad.	0.97**	6.2	455	0.65**	5.4	208	11.6	663
	Squ.	—	—	—	—	—	—	—	—
	L+P	0.99**	5.5	255	0.48*	5.6	229	11.1	483
	Q+P	0.97**	6.2	455	0.65**	5.4	208	11.6	663
郑州 1	Quad.	0.69**	7.0	167	0.49*	6.1	170	13.1	337
	Squ.	0.75**	6.6	114	0.43*	6.1	208	12.7	322
	L+P	0.75**	6.4	90	0.53*	6.1	180	12.6	270
	Q+P	0.75**	6.4	77	0.48*	6.1	178	12.6	255
郑州 2	Quad.	0.58*	5.9	180	0.56*	7.4	226	13.3	406
	Squ.	0.56*	5.4	114	—	—	—	—	—
	L+P	0.57*	5.8	129	0.56*	7.3	168	13.1	297
	Q+P	0.57*	5.7	170	0.56*	7.4	226	13.1	396
平均	Quad.	0.68	6.3	243	0.58	6.8	205	13.1	449
	Squ.	0.61	6.0	106	0.59	7.0	176	13.0	282
	L+P	0.70	5.9	138	0.59	6.7	167	12.6	304
	Q+P	0.70	6.1	196	0.62	6.7	172	12.7	368

1) Nopt: optimal N fertilizer rate

由表2可见,对冬小麦而言,除1个非典型式外,不同模型计算得到的最佳产量间没有明显差异,而每一点中均以二次型计算而得的最佳施肥量为最高。四点平均,二次型模型计算而得的最佳施肥量为243kg/hm²,远高于线性+平台模型(138kg/hm²)和二次型+平台模型(196kg/hm²)的计算结果。对夏玉米而言,除2个非典型式外,不同模型计算得到的最佳产量也没有显著差异,而最佳施肥量则以二次型模型的结果(205kg/hm²)高于线性+平台(166kg/hm²)和二次型+平台(172kg/hm²)模型的计算结果。从整个冬小麦-夏玉米轮作期看,以二次型模型得到的产量结果比线性+平台或二次型+平台模型得到的结果略高3.54%和2.73%,但推荐施氮量则高出47.4%(144kg/hm²·a)和21.8%(80kg/hm²·a)。

表3是以线性+平台模型得到的施肥效益为基础的各模型计算的经济效益。结果表明,在大多数试验中,以其它模型推荐氮肥用量所得的施肥效益均低于线性+平台模型。

表3 以线性+平台模型为基准时不同模型推荐施氮量的施肥经济效益

Table 3 The economic profit of different models on the basis of linear plus plateau model

试验点 Site	模型 Model	冬小麦 Winter wheat (yuan/hm ²)	夏玉米 Summer corn (yuan/hm ²)	小麦+玉米 Wheat+corn (yuan/hm ²)
昌平	Quad.	-35.4	-97.2	-114.6
	Squ.	101.6	-155.2	-53.6
	L+P	0	0	0
	Q+P	-18.0	24.2	6.2
顺义	Quad.	163.8	-166.0	-2.2
	Squ.	—	—	—
	L+P	0	0	0
	Q+P	-18.0	24.2	6.2
郑州 1	Quad.	419.6	44.4	646.0
	Squ.	175.4	-179.2	-3.8
	L+P	0	0	0
	Q+P	46.4	-19.2	27.2
郑州 2	Quad.	-47.8	-182.4	-230.2
	Squ.	-504.2	—	—
	L+P	0	0	0
	Q+P	-224.0	-182.4	-406.4
平均	Quad.	125.0	-100.3	24.7
	Squ.	-75.7	-167.2	-242.9
	L+P	0	0	0
	Q+P	-31.8	-85.8	-117.6

尽管在冬小麦上使用二次模型收益高出 125.0 元/hm²,但这是多投入 104.9kg/hm²氮肥换来的,产投比为 0.3,显然是不合理的。因此,从经济角度出发,应以线性+平台模型为最优。

2.2 不同施肥模型进行氮肥推荐的环境效益

2.2.1 土壤残留无机氮

旱地土壤残留无机氮的主要形态是 NO₃⁻,过高的土壤残留无机氮会增加地下水的硝酸盐含量。不同氮肥处理对冬小麦-夏玉米轮作中 1 米土体残留无机氮的影响见图 1。当氮肥用量在 180 + 180kg/hm²或更高水平时,在冬小麦-夏玉米轮作中会造成土壤残留无机氮的大幅度升高,显示出对环境影响的不利一面;而当氮肥用量在 90 + 90kg/hm²时,土壤残留无机氮在一个轮作周期中基本平衡。由于土壤残留无机氮大幅度升高会对环境造成威胁,而显著下降又可能使后茬作物氮素供应不足,因此应以维持其基本平衡的氮肥用量为佳。显然,从总体上看,各点氮肥用量应以 90~180kg/hm² + 90~180kg/hm²为佳。

由不同施肥模型得到的最佳施氮量(表 2 结果)分析,二次模型由于最佳用量过高,会使土壤残留无机氮大幅度升高,对环境造成不良影响,而二次+平台模型的最佳用量在大多数点上似也偏高,唯有线性+平台模型对维持土壤无机氮的基本平衡最为有利。

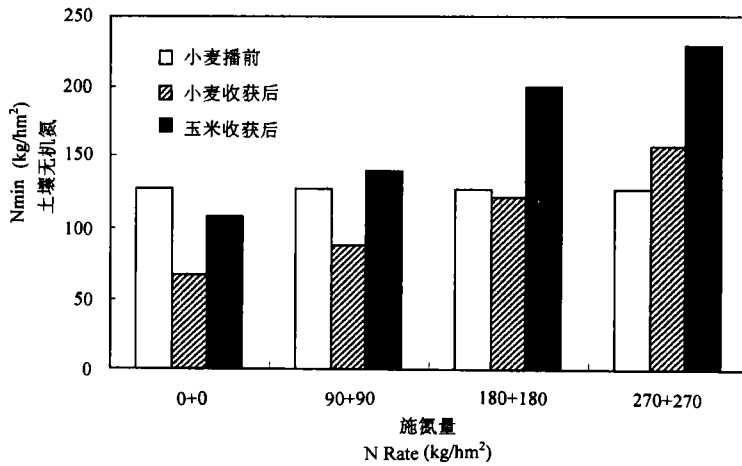


图1 不同施氮量对冬小麦夏玉米轮作制中土壤无机氮含量的影响

Fig.1 The effect of N rate on soil inorganic N at the rotation system of winter-wheat and summer corn

2.2.2 氮肥利用率 氮肥施入土壤后,除被作物吸收外,有相当一部分经淋失、反硝化、氨挥发等途径进入环境中,对生态环境造成不良影响,因此氮肥施用中一个基本的原则应是设法提高氮肥利用率。

尽管各点间由于条件不同,同一处理的氮肥利用率存在很大差异,但是一个共同的趋势是各点氮肥利用率均随施氮量的升高而下降。图2是各点冬小麦-夏玉米氮肥利用率随施氮量变化的平均结果,均可用线性函数予以描述。

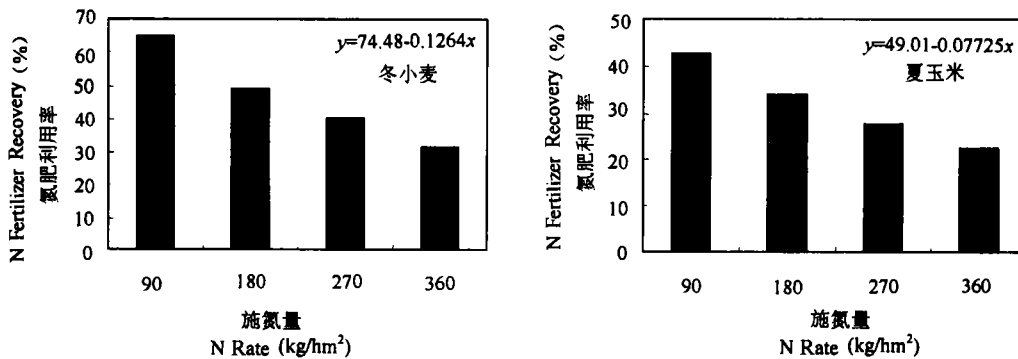


图2 氮肥用量对冬小麦夏玉米氮肥利用率的影响

Fig.2 The effect of N fertilizer rate on N recovery of winter-wheat and summer-corn

将不同模型得到的氮肥推荐用量代入函数,计算所得的氮肥利用率表明,除平方根模型外,以线性+平台模型得到的氮肥利用率最高,在冬小麦和夏玉米上分别为57.0%和36.2%,二次型+平台模型次之,为49.8%和35.7%,而二次型最低,仅43.7%和33.2%。

2.2.3 秸秆含氮量 在我国广大农村,传统的作物秸秆处理方式是将其作为柴薪或有机肥。然而,近年来由于国内经济和社会形势的变化,秸秆处理的方式也发生了变化,作物秸秆常常在田间被一把火烧掉,因此每到小麦或玉米收获时节,各地由于在田间燃烧秸

秆,到处浓烟滚滚,严重污染了环境。

在秸秆燃烧过程中,秸秆中的氮以氮氧化物(NO_x)形式进入大气,对环境造成了不良效应^[11,12]。

不同施氮处理对小麦和玉米茎秆、籽粒含氮量的影响见图3。对小麦而言,茎秆、籽粒中含氮量均随施氮量增加而显著上升,对玉米而言,茎秆含氮量随施氮量增加而显著上升,籽粒含量却基本不变。

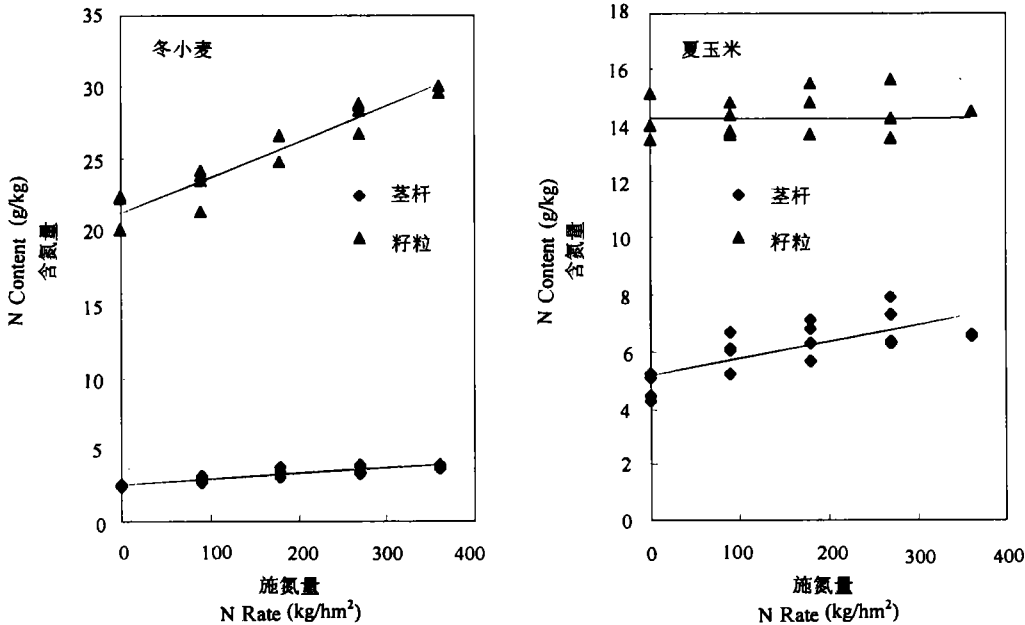


图3 氮肥用量对冬小麦夏玉米秸秆和籽粒含氮量的影响

Fig.3 The effect of N rate on straw and grain N content of winter-wheat and summer-corn

由于二次模型推荐的氮肥用量均偏高,因此由此模型推荐氮肥用量时得到的小麦、玉米茎秆含氮量也较高,分别为0.348%和0.639%,而线性+平台模型、二次+平台模型得到的小麦、玉米茎秆含氮量分别是0.308%、0.616%和0.330%、0.620%。

由此可见,使用线性+平台模型进行氮肥用量推荐,可以减少由于秸秆燃烧造成的氮氧化物向大气中的排放量。

3 讨论

在农业的可持续发展中,氮肥的管理始终是重要的一环。当前我国农业生产中部分地区氮肥过量施用的现象很突出,不仅造成经济效益下降,也对环境造成威胁。

选择更优的施肥模型来拟合作物对氮肥的反应并进行氮肥推荐,在90年代日益受到关注^[3,13],并从统计学和经济效益角度进行了研究。一个基本的结论是与传统的二次模型相比,线性+平台模型或二次+平台模型具有同样高的拟合度,可在产量不减的前提下节省氮肥用量,提高施肥的经济效益,本文的结果验证了这一结论。然而,从施肥的环境

效益方面对这一问题进行研究尚未见报道。本文通过对冬小麦-夏玉米一个轮作周期的研究,表明在对土壤残留无机氮(涉及地下水污染)、氮肥利用率及秸秆含氮量(涉及大气 NO_x 污染)的影响方面,均以线性+平台模型具有最佳的环境效益,二次+平台模型次之,二次模型最差。

作者认为,小麦、玉米等作物的氮肥效应可以用线性+平台或二次+平台模型拟合的理论基础是,当前采用的作物品种已与二十年前有很大差异,由于近二十年来有计划地筛选耐倒伏、耐肥和高产的品种,因此国内目前普遍推广应用的小麦、玉米品种在达到较高产量水平的一定施氮量范围内,并不因施氮过量而立即导致倒伏和减产,而是出现一个产量平台。当然,这一见解尚需更多的研究结果来证实。

参 考 文 献

1. 张维理,田哲旭,张宁,李晓齐. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 80~87
2. 吕殿青,同延安,孙本华, Ove Emteryd. 氮肥施用对环境污染影响的研究. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 8~15
3. Cerrato M E, Blackmer A, M. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal*, 1990, 82(1): 138~143
4. Rajendra S, Singh V P, Singh R. Evaluation of fertilizer (single nutrient) response in crops. *Crop Research Hisar*, 1991, 4(2): 188~193
5. Uhte R. Evaluation of experiments on nitrogen fertilization of vegetables by the linear response and plateau model. *Gartenbauwissenschaft*, 1990, 55(6): 247~251
6. Cruz M R, Moreno R O H, Chapman P L. Wheat yield response models to nitrogen and phosphorus fertilizer for rotation experiments in the northwest of Mexico. *Cereal Research Communications*, 1996, 24(2): 239~245
7. Westcott M, Borin M, Sattin M. Developments in on-farm plant nitrate testing for high input crops. *Proceedings of the third congress of the European Society for Agronomy, Padova University, Abano-Padova, Italy, 18~22 September 1994.* 848~849
8. Vetsch J A, Malzer G L, Robert P C *et al.* Nitrogen specific management by soil condition: managing fertilizer nitrogen in corn. *Site-specific Management for Agricultural Systems: Proceedings of Second International Conference, Minneapolis, MN, USA, March 27~30, 1994.* 465~473
9. Shafshak S E, Abd-El-Halim A A, Rosenberger J L *et al.* Stepwise regression and response curve analysis for important yield factors in maize. *Annals of Agricultural Science*, 1995, 33(2): 525~544
10. SAS Institute. *SAS User's Guide: Statistic. Verson 6.03*, Cary, NC, 1995
11. Jenkins B M, Turn S Q. Primary atmospheric pollutants from agricultural burning: emission rate determinations from wind tunnel simulations. *Paper American Society of Agricultural Engineers*, 1994, No. 946008, 28
12. Jernsawatdipong P. Agricultural sector: current situation and anticipated trends. *TEI Quarterly Environment Journal*, 1993, 1(1): 29~49
13. Bullock D G, Bullock D S. Quadratic and quadratic-plus-plateau models for predicting optimal nitrogen rate of corn: a comparison. *Agronomy Journal*, 1994, 86(1): 191~195

ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL EVALUATION ON MODELS FOR DESCRIBING CROP YIELD RESPONSE TO NITROGEN FERTILIZERS AT WINTER-WHEAT AND SUMMER-CORN ROTATION SYSTEM

Chen Xin-ping Zhou Jin-chi Wang Xing-ren Zhang Fu-suo

(Dept. of Plant Nutrition, China Agriculture University, Beijing 100094)

Bao De-jun

(Institute of Soil and Fertilizer, Henan Academy of Agricultural Science, Zhengzhou 450002)

Jia Xiao-hong

(Soil and Fertilizer Station of Beijing, Beijing 100024)

Summary

Several models (quadratic, square root, linear + plateau, quadratic + plateau) used for describing crop yield response to N fertilizer at winter-wheat and summer-corn rotation are compared. Data from four experiments which were conducted at Beijing and Henan province are used. All models fit the data equally well evaluated by using the R^2 statistic, but using linear + plateau model can reduce optimum N rate, increase economic profit of N fertilizer at the premise that crop yield don't reduce. Analyzing from environmental factor, linear + plateau model can maintain the balance of soil inorganic N, improve N fertilizer recovery, reduce crop straw N content and the emission of NO_x by straw burning. So, linear + plateau model is the most suitable model in winter-wheat and summer-corn rotation system in north of China.

Key words Nitrogen fertilizer, Fertilization model, Soil mineral nitrogen, Nitrogen recovery