

## 应用长期定位试验研究化肥施用的能量效率

杨军 陈新平 张福锁 王兴仁

(中国农业大学 农业部植物营养学重点开放实验室,教育部植物-土壤相互作用重点实验室,北京 100094)

**摘要** 通过 13 年的冬小麦—夏玉米—春玉米轮作体系化肥长期定位试验,分析了在北京潮土连续轮作条件下化肥施用的能量效率。能量效率主要用净能量产出和净能量产投比反映。结果表明:每季高量施入氮肥(N 270 kg·hm<sup>-2</sup>)的较高能量投入在 3 种作物上均未带来相应高的净能量产出;而适量施氮(每季作物 N 135 kg·hm<sup>-2</sup>)获得了较高的净能量产出和净能量产投比;同样,该轮作体系中适量施磷处理(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 67.5 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)比高磷处理(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 135 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)的净能量产出和净能量产投比均更高;钾肥施用的能量效率表现为春玉米>夏玉米>冬小麦,且较大程度地受到气候年型的影响。能量效率的分析可以作为评价化肥施用合理性和农业生产体系可持续性的有效工具。

**关键词** 长期定位试验;能量效率;化肥;冬小麦—夏玉米—春玉米轮作

中图分类号 S 147.2

文章编号 1007-4333(2003)03-0031-06

文献标识码 A

## Effect of mineral fertilizer application on energy efficiency in a long-term field experiment

Yang Jun, Chen Xinping, Zhang Fusuo, Wang Xingren

(Key Laboratory of Plant Nutrition, Ministry of Agriculture; Key Laboratory of Plant-Soil Interaction, Ministry of Education; China Agricultural University, Beijing 100094, China)

**Abstract** A long-term field experiment with winter wheat-summer maize-spring maize rotation system was used to study the effect of mineral fertilizer application on energy efficiency in a fluvoaquic soil in Beijing suburb from 1985 to 1997. The parameter "net energy output" and "the ratio of net energy output and input" were used to express the energy efficiency. The results showed that both of the net energy output and the ratio of net energy output and input in higher mineral N application treatment (N 270 kg·hm<sup>-2</sup>) were lower than that in lower mineral N application treatment (N 135 kg·hm<sup>-2</sup>) in each crop growing season. A rate of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 67.5 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> as mineral P fertilizer application obtained a higher net energy output and a higher the ratio of net energy output and input compared with higher P application treatment (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 135 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>). The energy efficiency by K fertilization was spring maize > summer maize > winter wheat, and was affected by weather in different years. The energy efficiency analysis could be a useful tool for the evaluation of mineral fertilizer application, and sustainability of agricultural production system.

**Key words** long-term field experiment; energy efficiency; mineral fertilizer; winter wheat—summer maize-spring maize rotation

目前我国大部分地区农业生产体系的典型特征是高投入高产出,特别是化肥的投入近 20 年来增长很快,已多有报道表明我国部分地区由于施肥过量环境受污染。过量施肥还造成能源的大量消耗,而其能否带来相应的能量产出,是关系到农业生产体系可持续性的一个重要问题。

全球不同区域农业生产体系的能量投入有显著差异。例如非洲的某些农业生产体系中化石能量的投入小于 1 GJ·hm<sup>-2</sup>,而西欧能量投入大于 30 GJ·hm<sup>-2</sup>[1]。1973 年全球能源危机以来,欧、美等加强了生态系统能量效率的研究[2,3]。目前,能量效率的分析作为衡量农业系统可承受能力等级划分的重

收稿日期:2003-01-23

作者简介:杨军,硕士研究生;陈新平,副教授,联系作者,主要从事养分资源管理研究

要工具已被广泛应用在农业生态系统的可持续研究上<sup>[4,5]</sup>。20世纪80年代开始,我国农业走上了高投入高产之路,化肥、农机、灌溉、农膜、农药等的大量投入促进了作物产量的大幅度提高,但由于物质的投入产出与能量的投入产出是两个不同的范畴,目前我国农业生产中高量的能量投入是否带来了高量的能量产出及高效的能量产投比尚不清楚。

作物生产体系中施用化肥造成的能量投入在总的能量投入中占有很大的比重<sup>[6]</sup>。因此,能量效率的研究应该可以作为衡量施肥合理性和生产体系可持续性的一个指标。目前国内主要从产量(生产力)、质量和环境角度对化肥施用的合理性进行评价,而从能量效率的角度来评价化肥施用的合理性及对农业生产可持续性的影响尚未见报道。本研究通过对13年化肥长期定位试验的连续监测,分析了冬小麦—夏玉米—春玉米轮作体系中化肥施用的能量效率,试图为评价我国农业生产中化肥施用的合理性及对农业生产体系可持续性的影响提供新的途径。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试土壤与轮作方式

试验在中国农业大学昌平试验站进行,试验站位于北京市昌平区温榆河中游,属于暖温带半湿润半干旱季风气候区,年平均气温11~12℃,降雨量600~950 mm,蒸发量2 002 mm,无霜期190~197 d。土壤为砂姜潮土,冲积母质,在60~90 cm土层内有砂姜粘土层。地下水埋深2~3 m,有时夏涝(其中1988年、1994年、1996年夏涝较严重)。该试验地于1981~1984年进行了匀地播种。据1984年试验前取0~20 cm土层土壤测定,土壤有机质13.1 g·kg<sup>-1</sup>,全氮(N)7.1 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮(N)68 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷(Olsen-P)6.1 mg·kg<sup>-1</sup>,交换性钾(NH<sub>4</sub>OAc-K)114 mg·kg<sup>-1</sup>,缓效钾(K)584 mg·kg<sup>-1</sup>。定位试验的轮作方式1985~1997年是:冬小麦(1985)—冬小麦(1986)—冬小麦(1987)—夏玉米(1987)—春玉米(1988)—冬小麦(1989)—夏玉米(1989)—春玉米(1990),以后固定的轮作方式为冬小麦—夏玉米—春玉米,即两年三熟制(每两年休闲一个冬季)。

### 1.2 试验设计

试验共10个处理,由3×3+1设计构成,即:

N<sub>0</sub>、N<sub>135</sub>、N<sub>270</sub>、P<sub>0</sub>、P<sub>67.5</sub>、P<sub>135</sub>、K<sub>225</sub>表示施N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O的水平 kg·hm<sup>-2</sup>。

采用的肥料品种为:氮肥、磷肥分别用尿素(含N 46%)和重钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%),氮、磷配施的处理用磷酸二铵(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%、含N 18%),氮不足之数用尿素补充,钾肥用硫酸钾(含K<sub>2</sub>O 50%)。

施肥及田间管理方法:全部磷、钾肥及40%氮肥作冬小麦或春玉米基肥,夏玉米不施基肥。试验地有渠灌和喷灌条件,田间管理均同大田生产。小麦生育期内灌水4次,每次灌溉量为80 mm;夏玉米一般不灌溉。收获前取样测产,小麦取样面积6 m<sup>2</sup>,玉米取样面积12 m<sup>2</sup>。秸秆不还田。

### 1.3 能量效率的计算方法

能量效率的分析方法中包括能量投入、能量产出、净能量产出、净能量产投比等<sup>[7]</sup>,净能量产出和净能量产投比越高,能量效率越高。本文有关化肥施用的能量平衡计算方法如下:

化肥施用的能量投入 = 化肥用量 × 化肥能量参数

化肥施用的净能量产出 = (施肥区籽粒产量 - 不施肥区籽粒产量) × 籽粒能量参数 + (施肥区秸秆产量 - 不施肥区秸秆产量) × 秸秆能量参数 - 化肥用量 × 化肥能量参数

化肥施用的净能量产投比 = 净能量产出 / 能量投入

各式中能量换算的参数见表1。

表1 能量效率的计算参数

Table 1 Parameters of energy efficiency		MJ·kg <sup>-1</sup>	
肥料	参数	农产品	参数
尿素	57.2	小麦籽粒	18.6
其他氮肥	47.0	玉米籽粒	18.4
磷肥	12.9	小麦秸秆	17.7
钾肥	9.9	玉米秸秆	17.7

### 1.4 作物产量

不同化肥处理的作物籽粒产量见表2。秸秆产量按不同作物的经济系数换算,其中小麦为0.55,玉米为0.5。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮肥施用的能量效率(图1)

在冬小麦生产中,氮肥施用的净能量产出均为低氮处理(N<sub>135</sub>P<sub>67.5</sub>)高于高氮处理(N<sub>270</sub>P<sub>67.5</sub>)。在全试验期的8季冬小麦中,低氮处理的净能量产出平均为86.5 GJ·hm<sup>-2</sup>,高氮处理的为78.8 GJ·hm<sup>-2</sup>。氮

表 2 不同化肥处理的作物籽粒产量  
Table 2 Crop grain yields of different fertilizer treatment

干重, kg · hm<sup>-2</sup>

作物	年份	施 N、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、K <sub>2</sub> O 的量/ (kg · hm <sup>-2</sup> )						
		N <sub>0</sub> P <sub>67.5</sub>	N <sub>135</sub> P <sub>0</sub>	N <sub>135</sub> P <sub>67.5</sub>	N <sub>135</sub> P <sub>135</sub>	N <sub>270</sub> P <sub>67.5</sub>	N <sub>270</sub> P <sub>135</sub>	N <sub>270</sub> P <sub>135</sub> K <sub>25</sub>
冬小麦	1985	1 751	4 044	5 336	5 419	5 836	5 419	5 836
	1986	2 276	1 993	4 911	5 653	4 349	5 411	5 328
	1987	1 760	1 732	4 213	4 907	4 167	4 907	4 306
	1989	3 705	5 089	6 423	6 378	5 589	4 922	3 922
	1991	5 781	5 336	6 908	6 690	6 758	5 225	5 252
	1993	1 488	1 701	5 153	6 579	5 403	8 129	7 004
	1995	1 689	1 346	5 130	5 238	5 220	5 142	4 814
	1997	2 375	1 533	5 472	6 773	6 237	6 531	6 483
夏玉米	1987	2 288	3 302	3 107	4 083	4 591	4 983	5 252
	1989	4 002	4 722	5 562	4 973	5 202	5 562	5 963
	1991	4 059	4 805	5 780	6 330	5 429	5 439	5 775
	1993	3 152	5 504	7 004	6 254	6 254	7 353	7 754
	1995	1 500	2 151	4 452	5 153	3 450	7 353	7 053
春玉米	1988	5 903	5 103	6 254	5 703	6 203	6 504	6 704
	1990	6 537	3 897	8 945	7 473	7 682	7 121	7 496
	1992	4 853	4 658	8 520	8 204	8 204	8 103	9 150
	1994	4 388	3 686	9 788	7 410	7 628	7 088	10 328
	1996	1 955	1 370	3 344	1 760	3 336	2 331	2 241

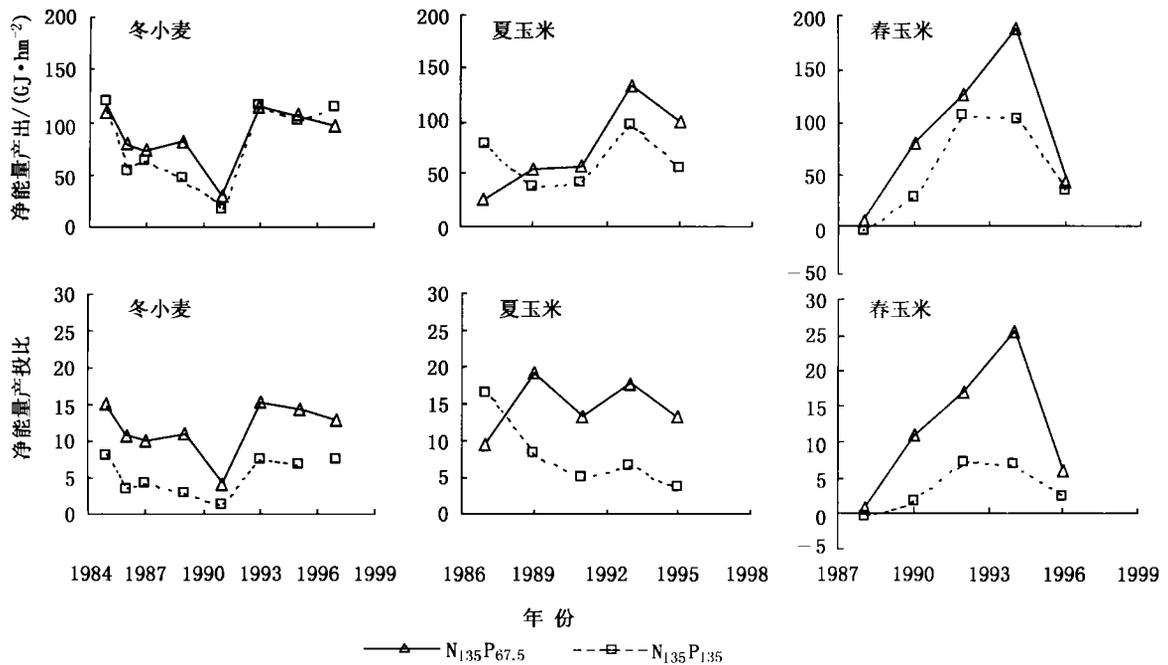


图 1 长期定位试验中氮(N)肥施用的净能量产出和净能量产投比

Fig. 1 Net energy output and the ratio of net energy out and input of N fertilization in the long-term field experiment

肥施用的净能量产投比也呈相同的趋势:低氮处理氮肥施用的净能量产投比在 8 季冬小麦中平均为 11.6,而高氮处理的仅为 5.2。不同年度间氮肥施用

的净能量产出和净能量产投比的差异与气候条件有关。

除 1987 年因夏涝减产外,夏玉米生产的结果与

冬小麦相似。低氮处理 ( $N_{135}P_{67.5}$ ) 氮肥施用的净能量产出和净能量产投比均高于高氮处理 ( $N_{270}P_{67.5}$ )。在 5 季夏玉米中,低氮处理和高氮处理氮肥施用的净能量产出分别平均为  $73.8 \text{ G} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $62.1 \text{ G} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;低氮处理和高氮处理氮肥施用的净能量产投比分别平均为 14.6 和 8.0。

在春玉米生产中得到的结果也与冬小麦、夏玉米相似。在 5 季春玉米中,低氮处理和高氮处理氮肥施用的净能量产出分别平均为  $88.0$  和  $52.8 \text{ G} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;低氮处理和高氮处理氮肥施用的净能量产投比分别平均为 11.8 和 3.5。

上述结果说明,高量氮肥处理较高的能量投入并未带来相应较高的净能量产出。

## 2.2 磷肥施用的能量效率(图 2)

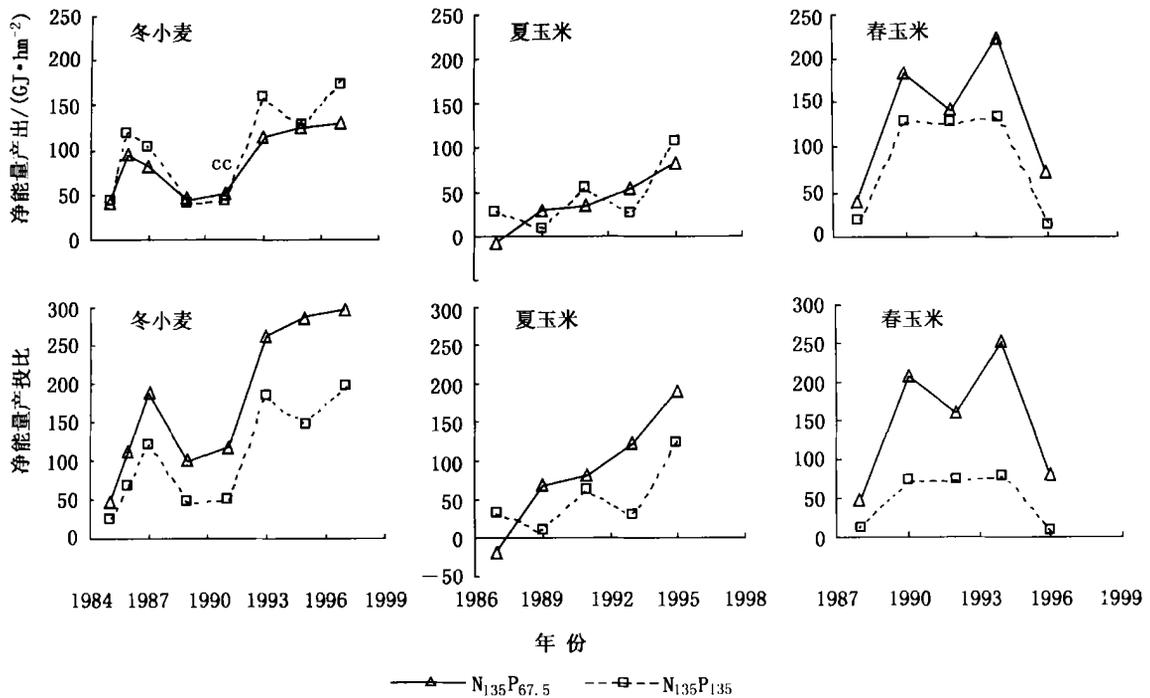


图 2 长期定位试验中磷肥 ( $P_2O_5$ ) 施用的净能量产出和净能量产投比

Fig. 2 Net energy output and the ratio of net energy output and input of P fertilization in the long-term field experiment

## 2.3 钾肥施用的能量效率(图 3)

在 3 种作物上钾肥施用的能量效率年际变化均较大。在氮、磷充分供应的基础上,冬小麦生产中钾肥施用的净能量产出和净能量产投比在冬小麦上自 1986 年起一直均为负值。夏玉米 5 季平均钾肥施用的净能量产出为  $6.9 \text{ G} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,远低于氮肥和磷肥施用的净能量产出,且在 1995 年为  $-11.9 \text{ G} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,钾肥施用的净能量产投比在 5 季夏玉米上平

均为 6.2。在春玉米生产中,施用钾肥的能量效率大大高于冬小麦和夏玉米,5 季春玉米平均净能量产出和净能量产投比分别为  $32.2 \text{ G} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 14.5。

从磷肥施用的净能量产投比来看,无论在何种作物上,低磷处理均高于高磷处理。其中,在冬小麦上,低磷处理和高磷处理磷肥施用的净能量产投比平均分别为 176.4 和 105.2;在夏玉米上,二者平均分别为 89.0 和 51.4;在春玉米上,二者平均分别为 149.5 和 48.1。

均为 6.2。在春玉米生产中,施用钾肥的能量效率大大高于冬小麦和夏玉米,5 季春玉米平均净能量产出和净能量产投比分别为  $32.2 \text{ G} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 14.5。

## 3 讨论

在一定范围内增加化肥的施用可以有效地提高作物产量,因此尽管能量投入增加了,但总能量产出的更大增加使化肥施用的净能量产出也随之增加。

这是 20 世纪中期以来“高投入高产出”模式普遍应用的主要原因。但是,由于不同类型化肥的能值有很大差异<sup>[8]</sup>,不同作物产品的能值差异也很大,因此化肥的能量效率与产量效率不一定一致。例如,一个单位尿素的能值 3 倍于一个单位小麦或玉米籽粒的能值,而一个单位磷肥或钾肥的能值比一个单位小麦或玉米籽粒的能值要低;Fodor<sup>[10]</sup>等的研究表

明,获得最大能量效率的施氮量远低于获得最大产量效率的施氮量。因此,除产量效率之外,进行能量效率的评价是有其独特的作用和意义的。

在华北平原目前大量施用化肥生产水平下,从能量效率的角度来看,在不同作物上不同种类化肥的高投入是否总是能带来高产出,是一个值得进行深入研究的问题。

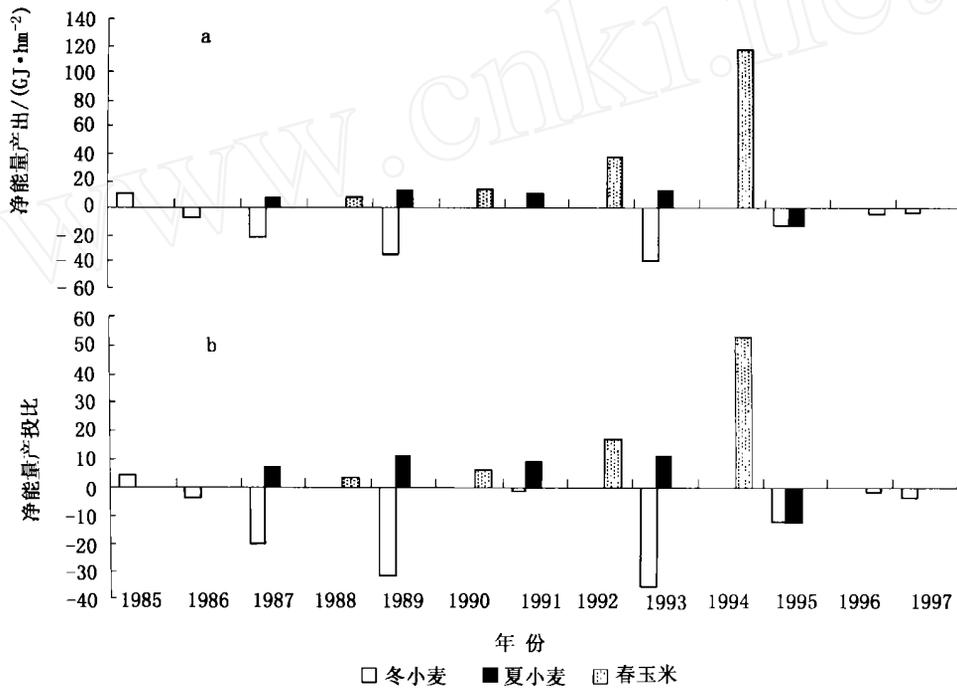


图 3 长期定位试验中钾肥(K<sub>2</sub>O)施用的净能量产出(a)和净能量产投比(b)

Fig. 3 Net energy output and the ratio of net energy out and input of K fertilization in the long-term field experiment

研究结果表明,对氮、磷肥的投入而言,适量的氮肥和磷肥投入即可获得较高的净能量产出和净能量产投比,而过高地施用氮肥和磷肥反而会造成净能量产出的下降,使化肥施用的净能量产投比下降。这一结果与 Hüsbergen 等<sup>[7]</sup>的研究一致。王兴仁等<sup>[11,12]</sup>研究表明,过高的氮肥施用不仅不能增产,还会对环境造成不良影响,而过高的磷肥施用在经济效益和资源利用效率上也是不合适的。因此,无论从能量效率的角度来说,还是从施肥的环境效应或经济效益来看,将氮肥和磷肥的施用限制在一个合理的范围内是十分重要的。而确定合理的施肥用量,协调并兼顾化肥施用的能量效率、产量效率和环境效应将依赖于推荐施肥的研究。

本试验表明,钾肥施用对农业生产体系能量效率的影响在不同作物上有很大的差异,表现为春玉米 > 夏玉米 > 冬小麦。显然,小麦和玉米间的差异

是由于 2 种作物对钾肥的敏感性差异引起的;而春玉米和夏玉米的差异则更多地是由于产量水平有差异,春玉米的产量高于夏玉米,因此要求更多的钾供应。典型的例子是 1994 年的春玉米产量最高,而该年度钾肥施用的能量效率也最高。此外,钾肥施用的能量效率在年际间波动很大,说明受到气候年型的影响较大,这与钾肥可提高作物的抗逆性有关。因此,为了提高农业生产体系的能量效率,钾肥的施用应充分考虑作物类型的差异和气候的影响。

上述研究结果和讨论说明,能量效率的研究可以作为一个有效的手段,对化肥施用的合理性和农业生产体系的可持续性进行分析。

## 参 考 文 献

- [1] Faidley L W. Energy and agriculture [A]. In: Fluck R C

- ed. Energy in Farm Production [C]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishers, 1992. 1~12
- [2] Pimentel D, Hurd L E, Bellotti A C, et al. Food Production and the Energy Crisis [J]. Science, 1973, 182:443~449
- [3] Steinhart J S, Steinhart C E. Energy use in the U S food system [J]. Science, 1974, 184:307~316
- [4] Eckert H, Breitschuh G, Sauerbeck D. Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung (KUL)-ein Verfahren zur ökologischen Bewertung von Landwirtschaftsbetrieben [J]. Agron Res, 1999, 52:57~76
- [5] Hülsbergen K J, Diepenbrock W. Die Nachhaltigkeit von Düngungssystemen dargestellt am Seehausener Düngungskombinationsversuch [C]. Arch Acker-Pfl Boden, 2001
- [6] Diepenbrock W, Pelzer B, Radtke J. Energiebilanz im Ackerbau [M]. KIBL Arbeitspapier 211. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag. 1995
- [7] Hülsbergen K J, Feil B, Biermann S, et al. A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term fertilizer trial [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001, 86:303~321
- [8] Patyk A, Reinhardt G A. Düngemittel-Energie- und Stoffstrombilanzen [M]. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg Verlag. 1997
- [9] Schiemann R. Stoff- und Energieansatz beim ausgewachsenen, vorwiegend fettbildenden Tier [A]. In: Gebhardt G ed. Tierernährung [C]. Deutscher Berlin: Landwirtschaftsverlag, 1981. 131~160
- [10] Fodor L, Cruse R M, Szabó L. Energy Balance of Nitrogen Fertilization in Sustainable Corn Production [C]. Beijing: Congress Guide and Abstracts 12<sup>th</sup> World Fertilizer Congress, 2001
- [11] 王兴仁, 张福锁, Odowski R. 石灰性潮土对氮肥连续施用的环境承受力 [J]. 北京农业大学学报, 1995, 21(增刊):94~98
- [12] 王兴仁, 李洁茹, 苏德纯, 等. 北京石灰性潮土长期轮作的磷肥合理运筹 [J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(5):43~49

## 科研简讯

### 我校研制出我国第一个具有自主知识产权的小麦化学杂交剂

我校应用化学研究所于 20 世纪 80 年代中期开始进行化学杂交剂的合成、筛选及应用技术研究。先后对合成的 7 个系列百余个新化合物进行筛选, 在 1994 年发现具有优良去雄活性的 BAU-9403 化学杂交剂。其后对 BAU-9403 的化学及合成工艺、毒理学、分析方法等进行了细致的研究, 并在北京、河北、河南、山东、江苏和陕西等地不同生态条件及不同小麦基因型上就药剂的使用时期、使用剂量等应用技术进行了多年的系统研究, 取得多项成果, 并获得了一批性状表现较好的杂交种和优势组合。毒理学研究表明, BAU-9403 原药为低毒化合物, 在植物中无残留。用化学杂交剂育种具有育种程序简单、周期短、亲本选配自由等特点。

BAU-9403 已申报中国发明专利并获授权。BAU-9403 原药及制剂均经农业部农药检定所审查批准, 获得临时登记。

BAU-9403 是我国第一个具有自主知识产权的小麦化学杂交剂, 与国外同类产品相比具有化学结构相对简单、生产成本较低和单位面积用药量较低、使用成本较低的优势。

### 一项“安全高效植物生长调节剂”科研成果通过鉴定

2003 年 3 月我校作物化学控制研究中心何钟佩教授主持完成的“安全高效植物生长调节剂 DTA-6 的应用开发及机理研究”通过了农业部鉴定。该项目开发了无公害的、具有我国自主知识产权的 DTA-6(己酸二乙氨基乙醇酯)新剂型及其复配剂, 其技术指标符合国家和行业要求, 具备了产业化条件, 为大田作物优质、高产、高效、无公害生产提供了一种新资源。

(科技处供稿)