



## 基于土壤氮素收支平衡的油菜氮肥推荐施用量研究<sup>[1]</sup>

宁运旺<sup>1</sup> 朱德进<sup>2</sup> 张永春<sup>1\*</sup> 汪吉东<sup>1</sup> 许仙菊<sup>1</sup> 王寅<sup>3</sup> 鲁剑巍<sup>3</sup>

(1 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏南京, 210014; 2 江苏省姜堰市农业局, 江苏姜堰, 225529; 3 华中农业大学资源与环境学院, 湖北武汉, 430070)

**摘要:** 本文以土壤氮素表观平衡作为推荐施肥依据, 研究氮素养分收获指数 (NHI) 作为油菜推荐施肥指标的可行性。我国农田氮肥施用状况表明, 在现有施肥技术下保持土壤氮素收支平衡时 NHI 为 0.863, 据此可以推荐作物的氮肥施用量。在此基础上, 于江苏省姜堰市设置了 3 点 5 个氮水平的田间试验进行验证, 结果表明: 与最高产量施氮量比较, 在保证产量变化不大的前提下 (减产 0.7%), NHI 为 0.863 时的推荐施氮量可节省氮肥 12.6%, 氮素偏生产力和农学效率分别提高 13.2% 和 10.8%。

**关键词:** 氮素收获指数 推荐施氮量 土壤养分表观平衡 油菜

对作物氮肥适宜用量实施的推荐方法很多<sup>[1-5]</sup>, 朱兆良把这些方法归纳为两类, 即通过土壤或植株测试以确定适宜施氮量的测试类方法和以田间肥料用量试验为基础的肥料效应方程类方法<sup>[6]</sup>。目前后一种方法作为农业部 2006 年 4 月发布的《测土配方施肥技术规范》中使用的方法, 在农业技术和推广领域大规模应用。

以田间肥料用量试验为基础的肥料效应方程类方法, 获得的作物推荐施肥量是一个相对概念, 与目标产量有关。通过目标产量可以计算出基于最高产量的推荐施肥量; 同时以经济效益为目标时, 可以计算出基于最佳经济效益的推荐施肥量。然而农业生产的目标是多元的, 产量、效益、品质、生态环境、可持续发展等都与施肥有非常密切的关系, 而且各目标间往往很难存在一致性, 因此追求单一目标的推荐施肥必然会影响到其它目标的实现<sup>[7]</sup>; 在以高产为目标的推荐施肥体系下, 虽然作物产量得到了保证, 但高用量的化肥投入导致肥料的生产效率降低<sup>[8]</sup>, 对生态环境造成破坏<sup>[9-12]</sup>。因此, 在当前的农业生产中, 一个兼顾作物产量和生态环境的氮肥推荐方法具有重要意义。

### 1 方法的提出

施肥的直接对象是土壤, 施肥对环境的影响与土壤密切相关。肥料是以物质 (养分) 的形式输入土壤的, 如果把土壤看成一个稳定的生态系统, 当系统中物质的输入输出保持平衡时对环境的影响最小。从施肥到作物收获这一过程, 土壤表观养分平衡可以用表 1 表示:

基金项目: 国家科技支撑计划 (2008BADA4B08, 2006BAD05B03), IPNI 国际合作项目

作者简介: 宁运旺 (1966-), 男, 安徽望江人, 学士, 副研究员, 从事植物营养研究。(Tel) 025-84391171; (Email) ningyunwang460@sian.com

通讯作者: 张永春, E-mail: yczhang66@sina.com

表1 土壤氮素养分输出输入平衡表

养分输入	养分输出
肥料养分	作物摄取养分
起始土壤养分	土壤残余养分
大气沉降、灌溉、种子带入、非生物固氮等	侵蚀、径流、渗漏、淋洗、挥发等损失

表1中, 大气沉降、灌溉、种子带入、非生物固氮等环境养分向土壤输入, 以及侵蚀、径流、渗漏或淋洗、挥发、蒸腾等土壤养分向环境输出均属于自然发生的行为, 在不施肥的自然环境中土壤养分与环境的交换假设是平衡的。理论上如果通过改进施肥技术使施肥后土壤向环境输出的养分增值为零, 在保持土壤养分平衡的条件下, 则施入的肥料养分与收获时作物摄取的养分相等; 但肥料施入土壤后打破了自然环境中的养分交换平衡, 土壤养分向环境的输出会增加, 增加量的大小取决于施肥技术: 施肥技术越高, 增加量越小。

以2004年我国农田氮素平衡状况为例(表2)<sup>[13]</sup>。土壤向环境输出的氮素为1132.8万吨, 而环境向土壤的氮素输入为625.4万吨, 因施肥使土壤氮素养分向环境的输出比环境氮向土壤的输入增加了507.4万吨, 占当年氮肥投入3702.7万吨的13.7%<sup>[13]</sup>。为保持土壤氮素平衡, 就必须使施入的肥料氮是收获时作物摄取氮的 $1/(1 - 0.137)=1.16$ 倍。因此, 用氮素养分收获指数(NHI)来评价施肥对环境影响的指标是有意义的<sup>[14]</sup>。

表2 2004年中国农田生态系统氮素平衡状况

输入项目	氮量(万吨)	输出项目	氮量(万吨)
化肥	2428.1	作物收获	1894.1
有机肥	1274.6	氮挥发	513.0
生物固氮	395.2	反硝化	242.8
灌溉	51.5	植株蒸腾	130.0
大气沉降	152.9	淋溶径流	123.5
种子输入	25.8	侵蚀	123.5
总计	4328.1	输出总计	3026.9

氮素养分收获指数NHI是指作物收获后携出的养分与施入土壤的养分量的比值:

氮素养分收获指数 $NHI = \text{作物氮素摄取总量} / \text{氮素供应量}$

$NHI=1$ 时表示作物氮素摄取总量与氮肥供应量相等, 实际由于施肥使土壤与环境间的氮素交换为负值, 因此在 $HI=1$ 时的推荐施氮量下土壤氮素处于亏缺状态。

$NHI=1/1.16$  (约为0.863) 时已考虑现有施肥技术下氮肥施入土壤后的损失, 作物收获后土壤养分可保持种植前的水平。此时的推荐施肥量可保持土壤养分平衡, 是一种可持续发展的推荐施肥量。

## 2 方法的验证

### 2.1 材料与方法

#### 2.1.1 试验材料

田间试验于2008年10月~2009年5月在江苏省姜堰市大伦镇村的农户试验地进行, 油菜品种为华双4号。试验土壤属于潮土类灰潮土亚类的勤泥土, 试验共分三组进行, 三组土壤理化性状见表3。

表3 试验土壤基本理化性状

农户	pH	有机质	全氮	碱解氮	速效磷	速效钾
		(克/公斤)		(毫克/公斤)		
1	8.18	14.86	0.81	0.95	2.60	32.90
2	8.03	12.38	0.77	0.81	8.70	29.67
3	8.26	13.40	1.17	1.05	7.36	7.03

### 2.1.2 试验设计

试验小区面积20平方米，采用随机区组设计，共设5个处理，每处理重复3次，分别为CK（不施肥）、N<sub>0</sub>PKB、N<sub>1</sub>PKB、N<sub>2</sub>PKB、N<sub>3</sub>PKB、N<sub>4</sub>PKB。其中P、K的用量分别为6公斤P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/亩和8公斤K<sub>2</sub>O/亩，硼的用量为硼砂1公斤/亩，N<sub>0</sub>~N<sub>4</sub>的用量分别为0、6、12、18、24公斤/亩。育苗移栽，每小区210株油菜。试验用肥料品种为尿素（含N 46%）、普通过磷酸钙（含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%）、氯化钾（含K<sub>2</sub>O 60%）。肥料运筹方式为基肥：氮肥60%，磷肥的全部，钾肥的62.5%，结合耕翻撒施；追肥：第一次追肥在越冬期，氮肥20%，钾肥的20%，第二次追肥在抽苔前期，氮肥的20%，钾肥的17.5%，结合松土撒施。其它田间管理措施一致。

### 2.1.3 样品采集与分析

试验收获前在一个取样重复内定点取样，每小区取地上部分油菜植株6株，装入尼龙网袋，风干考种后植株茎秆、角壳、籽粒分别留样分析。土壤和植株的养分测定采用常规分析方法<sup>[15]</sup>。

### 2.1.4 数据处理

以区域内的三个大田试验作为三个重复进行统计，采用Excel表计算数据，SPSS统计软件处理数据，LSD检验进行处理间的多重比较。

## 2.2 结果分析

### 2.2.1 基于油菜最高产量和最佳经济效益的推荐施氮量

不同施氮量对油菜籽产量的影响如表4。氮肥对油菜有显著的增产作用。施用6公斤N/亩即可获得显著的增产效果，比不施氮处理增产33.8%；施氮量达18公斤N/亩时油菜籽产量进一步显著增加，增产幅度达78.7%，并获得最高产量，继续加大施氮量，产量呈下降趋势。

通过施氮量与油菜籽产量的回归方程计算出最高产量施氮（N）量和最佳经济施氮量分别为18.8公斤/亩和16.6公斤/亩，（氮肥价格按4.25元/公斤N，油菜籽价格按3.9元/公斤）。

表4 不同施氮水平对油菜籽产量的影响

施氮水平 (公斤/亩)	籽粒产量 (公斤/亩)	增产 (%)
0	112 ± 4.6 c	
6	150 ± 7.3 b	33.8
12	190 ± 7.9 a	68.8
18	201 ± 9.7 a	78.7
24	190 ± 9.6 a	68.6

### 2.2.2 基于NHI为0.863时的推荐施氮量

建立作物氮素收获指数NHI与施氮量之间的二次函数， $y=8 \times 10^{-6}x^2 - 0.007x + 2.0973$  ( $R^2=0.9963^{**}$ )，当NHI等于1时，氮素施用量为13.6公斤N/亩；当NHI值等于0.863时，氮素施用量为16.4公斤N/亩。

表5 不同施氮水平对油菜植株氮素收获指数的影响

施氮水平(公斤/亩)	NHI
0	/
6	1.54 ± 0.05a
12	1.07 ± 0.14 b
18	0.82 ± 0.06 bc
24	0.60 ± 0.22c

### 2.2.3 几种氮肥推荐用量下油菜的生产效率比较

表6 几种氮肥推荐用量下的油菜生产效率

推荐施氮量	基于最高产量	基于最佳经济	NHI=0.863	NHI=1
1 氮素施入量(公斤/亩)	18.8	16.6	16.4	13.6
相对值	100	88.5	87.4	72.7
2 籽粒产量(公斤/亩)	198.2	197.0	196.8	191.6
相对值	100	99.4	99.3	96.7
3 氮素偏生产力(公斤/公斤)	10.6	11.9	12.0	14.0
4 氮肥农学效率(公斤/公斤)	4.6	5.1	5.1	5.8
5 氮收获指数(HI)	0.761	0.831	0.863	1.00

表6列举了油菜在几种推荐施肥方法下的生产效率。与最高产量推荐施氮量比较，NHI=0.863时的推荐施氮量在减少氮肥用量12.6%时，油菜籽粒产量仅减少0.7%，氮素偏生产力和农学效率分别提高13.2%和10.8%，而NHI=1时的推荐施氮量在节氮27.3%时，也仅减产3.3%；NHI=0.863时的推荐施氮与基于最佳经济的推荐施氮比较，产量和氮素生产效率（偏生产力、农学效率）相差很小；这表明应用NHI作为推荐施氮的指标对油菜产量几乎没有影响或影响很小，而在节省氮肥用量上有较好的效果。实际上由于产量—施氮量曲线在推荐施氮量附近时已相当平缓，少量增加或减少氮肥的施用量对产量的影响不大。

朱兆良曾提出氮肥推荐“区域平均，具体微调”的概念原则，即在一个区域内针对某一作物进行大量的田间氮肥用量试验，以最佳经济推荐施氮量的平均值作为该作物的区域平均适宜施氮量，各田块根据具体情况适当调整，2003-2004年在江苏常熟的验证结果表明，在节氮14%时水稻只减产0.7%，与本研究结果一致<sup>[6]</sup>。

## 3 方法的讨论与应用

### 3.1 NHI作为推荐施肥指标的优势

土壤除了与环境之间的物质交换外，土壤本身由于有机氮的矿化、无机氮的硝化反硝化等，可被作物利用的有效氮素经常处于不确定状态，使得土壤N<sub>min</sub>测试值与作物产量之间相关性较差<sup>[6, 16]</sup>，

因此土壤氮素平衡也一直是研究中的难点,根据土壤Nmin.测试值的推荐施肥难以有效。基于土壤氮素收支平衡,使用NHI作为推荐施肥的指标,从表观上推导土壤养分平衡,不考虑土壤内部养分的复杂变化过程,使土壤肥力从施肥到作物收获后保持稳定,既能避开土壤氮测试的难题,又符合可持续发展的要求。

施氮量与NHI之间的关系可通过田间肥料效应试验获得,利用测土配方施肥体系中的“3414”试验或其它试验结果也可以很方便地计算出基于NHI的推荐施氮量。因此具有较好的适用性和推广价值。

基于最佳经济效益的推荐施氮量在我国测土配方施肥中应用较多,在本文中与基于NHI的推荐施氮量非常接近,但基于最佳经济效益的推荐施氮量的计算(公式 $dy/dx=px/py$ )受肥料和农产品的市场价格影响<sup>[17]</sup>,存在一定的不稳定性;而采用作物养分收获指数(NHI)只与肥料的施用技术有关。

### 3.2 NHI的范围与应用

$NHI > 1$ 。收获时作物摄取的养分大于投入的养分,加上施肥增加的养分损失,土壤养分快速耗竭,不利于农业的持续发展,不推荐使用。

$NHI = 1$ 。收获时作物摄取的养分等于投入的养分,但由于施肥增加的养分损失,土壤养分处于亏缺状态,可以作为施肥量下限的参考值;鉴于我国肥料使用存在明显的区域不平衡<sup>[18, 19, 20]</sup>,在华东、华北的一些土壤养分多年盈余、流失风险较大的地区可以尝试使用。

$NHI = 0.863$ 。以2004年的施肥技术,收获时作物摄取的养分与施肥增加的养分损失之和等于投入的养分,土壤养分保持平衡,有利于农业的持续发展和降低环境风险,在大部分地区推荐使用。

$NHI < 0.863$ 。以2004年的施肥技术,收获时作物摄取的养分与施肥增加的养分损失之和小于投入的养分,土壤养分盈余;基于最高产量的推荐施氮量处于这一范围,在土地贫瘠、产量较低的西北地区推荐使用。

随着施肥技术的提高,土壤与环境间的氮素交换趋于平衡,为保持土壤养分平衡,NHI的取值逐渐向1接近。本文以油菜为试验作物,通过3点5个施氮水平的大田实验,计算了基于NHI为0.863时的推荐施氮量与基于最高产量和最佳经济效益的推荐施氮量,比较了不同推荐施氮下油菜的籽粒产量和氮肥生产效率,结果发现,与最高产量施氮量比较,NHI为0.863时的推荐施氮量在节省氮肥12.6%时只减产0.7%,氮素偏生产力和农学效率分别提高13.2%和10.8%。

#### 参考文献:

- [1] 陈新平,张福锁.通过“3414”试验建立测土配方施肥技术指标体系[J].中国农技推广,2006,22(4):36-38.
- [2] 陈新平,李志宏,王兴仁,等.土壤、植株快速测试推荐施肥技术体系的建立与应用[J].土壤肥料,1999,(2):6-10.
- [3] K.Mengel, B. H. utsch, Y. Kane.Nitrogen fertilizer application rates on creal crops according to available mineral and organic soil nitrogen [J]. Europ. J. Agronomy, 2006, (24): 343-348

- [4] Vianney Houles, Martine Guerif, Bruno Mary. Elaboration of nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendation[J]. *Europ. J. Agronomy*, 2007, (27):1-11.
- [5] Lihong Xue, Lizhang Yang. Recommendations for nitrogen fertilizer topdressing rates in rice using canopy reflectance spectra[J]. *Biosystem Engineering*, 2008, (100):524-534.
- [6] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论论议[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 1-4.
- [7] 侯彦林. 生态平衡施肥: I. 理论体系[J]. *磷肥与复肥*, 2008, 23(2): 66-70.
- [8] 金继运, 李家康, 李书田. 粮食作物对化肥的需求分析[J]. *磷肥与复肥*, 2006, 21(3): 1-5.
- [9] 朱兆良, 孙波. 中国农田面源污染控制对策研究[J]. *环境保护*, 2008, 394(48): 4-6.
- [10] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2): 265-269.
- [11] 田玉华, 尹斌, 贺发云, 等. 太湖地区稻季的氮素径流损失研究[J]. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1010-1075.
- [12] 侯彦林, 周永娟, 李红英, 等. 中国农田面源污染研究: I 污染类型区划和分省污染现状分析[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1271-1276
- [13] 王激清, 马文奇, 江荣风, 等. 中国农田生态系统氮素平衡模型的建立及其应用[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(8):210-214.
- [14] 姜甜甜, 高如泰, 夏训峰, 等. 北京市农田生态系统氮素养分平衡与负荷研究-以密云县和房山区为例[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(11): 2428—2435.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000, 25-110
- [16] 陈伦寿, 李仁岗[M]. 农田施肥原理与实践. 北京: 农业出版社, 1984, 92-95.
- [17] 陈新平, 张福锁. 可持续农业中的推荐施肥[J]. *化肥工业*, 1996, 23(3): 7-11.
- [19] 金继运. 我国肥料资源利用中存在的问题及对策建议[J]. *中国农技推广*, 2005(11): 4-6.
- [20] 王激清, 马文奇, 江荣风, 张福锁. 养分资源综合管理与中国粮食安全[J]. *资源科学*, 2008, 30(3): 415-422.

