

氮肥利用率的要义及其提高的技术措施

Correct Understanding of Nitrogen Recovery Rate

巨晓棠 张福锁

(中国农业大学资源与环境学院植物营养系 北京 100094)

近几年来,无论在科技文献和媒体报道中,常常可以看到这样的内容:我国氮肥利用率只有 30%~35%——好像 65%~70% 的氮肥都跑到水里、大气中去了,以此来说明氮肥对环境的影响有多么严重;发达国家的氮肥利用率在 50% 以上,我国比发达国家的氮肥利用率低 10~20 个百分点——以此数据来说明我国氮肥损失量大、对环境的污染严重。但实际上,氮肥利用率与氮肥损失率是两码事,而且理解中还应考虑氮肥的残留率。况且,所用的都是百分数,没有一个绝对量的概念。一个简单的氮肥利用率很难反映不同农业生产水平下对氮肥的利用状况,因为氮肥利用率实际上要受到土壤——气候条件、施氮量、施氮方法和时期、作物生长中其他营养元素的供应状况以及光热水等其他因素满足情况的深刻影响,对于某一生产体系的氮肥利用状况应该用多种指标衡量,其中包括产量水平和氮肥利用、氮肥残留、氮肥损失;不仅需要用百分数表述,还需要有绝对量的概念。有鉴于目前对氮肥利用率有一些模糊的认识,长期下去会对我国氮肥的有效使用产生消极的影响,特撰文对这些问题进行讨论。

一、正确理解施氮量、产量及氮肥利用率的关系

氮肥利用率的计算方法有两种:一是差减法,二是 ^{15}N 示踪法。

$$\text{差减法氮肥利用率}(\%) = \frac{\text{施氮区作物吸氮量} - \text{不施氮区作物吸氮量}}{\text{施氮量}} \times 100$$

$$^{15}\text{N} \text{ 示踪法氮肥利用率}(\%) = \frac{\text{施氮区作物吸收肥料氮}}{\text{施氮量}} \times 100$$

一般来说,无论是以地上部累积氮或全株累积氮为基础,用示踪法计算的氮肥利用率比差减法低。显然,这是由于差减法还包括了作物因施氮肥而多吸收的土壤氮。从农学的角度来看,在评价氮肥的效果时,显然应当采用差减法的氮肥利用率。因为它反映了施用氮肥后作物氮素营养的实际提

高程度,而不管其中是否产生了表观的或真实的激发效应。当然在研究化肥氮的转化和去向时,则宜采用示踪法,以了解化肥氮的利用、残留及损失的真实情况。一般所说的氮肥利用率是指用差减法计算出来的数据,因为它比较容易获得。在田间情况下,只要设计不同的施氮水平和不施氮肥区,测定不同处理的作物吸氮量,则可以计算出氮肥利用率。

氮肥施入农田后的去向可分为 3 个部分:(1) 被作物吸收,即氮肥的当季利用率;(2) 残留在土壤中;(3) 通过不同机制和途径损失。氮肥的当季利用率是决定氮肥增产效果的主要因素。提高氮肥当季利用率的潜力则主要在于减少其施入农田后的损失。提高氮肥当季利用率的关键是确定一个合理的氮肥用量和有正确的施肥方法。

氮肥利用率由于受土壤性质、作物种类和生长期、氮肥及其他肥料的种类和施用技术以及气象条件等因素的强烈影响,因而具有很大的变幅。朱兆良先生对我国田间试验中,以成熟期地上部分累积氮量为基础,用差值法计得的几种主要作物上氮肥利用率的统计结果表明,氮肥利用率的变幅在 9%~72% 之间。就平均值而言,水稻和麦类对几种氮肥的利用率为 30%~41%。我们一般所说的氮肥利用率在 30%~35% 之间,是对整个大田平均水平而言的,但我们也必须同时考虑它的变异系数。事实上,我们对国外水稻和麦类作物上进行的大量试验结果统计表明,由于受氮肥品种、施肥时期和施肥技术等条件的影响,不同试验之间的氮肥利用率变幅也很大,各试验处理之间的平均值变动范围在 25%~83% (差减法利用率) 之间,由此看来,国外的氮肥利用率也不都是在 50% 以上。所以,我们不能简单地说是我国的氮肥利用率比国外低多少个百分点,而要充分考虑这些数据得来的条件及其变异。

氮肥利用率受施氮量的深刻影响。一般来说,随着施氮量的增加,作物产量增加,氮肥利用率显著降低。在实际生产中,可以通过少施氮肥而提高

氮肥利用率,但产量并不一定很高。就我们目前的情况,只能追求保持较高产量水平下合理的氮肥利用率,而不应该一味追求高的氮肥利用率而降低产量。例如,在我们的一个田间试验中,施氮量在 $75\text{Nkg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,氮肥利用率达到45%,产量仅有 $4\,830\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;当施氮量是 $225\text{Nkg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,尽管氮肥利用率下降到39%,但产量却达到了 $6\,078\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。就我国目前追求的高产体系来讲,只能选择后一种情况。

实际上,农业生产中氮肥利用率低、损失率高、对环境压力大是一个世界性的问题。针对这一问题,一些人少地多的发达国家,采用了改进施肥技术和方法,以及降低产量目标以减少氮肥施用量等对策。但是,我国人多地少、粮食生产的压力大,不可能采取后一种对策,必须从协调作物高产与环境保护的关系出发,寻找二者的最佳结合点;必须研究解决既能获得尽可能高的产量,又能在最大限度上减轻对环境压力的氮肥施用与氮素管理的技术及其理论。例如,欧洲国家近年来每季作物的氮肥施用量普遍降低到 $120\text{Nkg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右,而我国东部地区每季作物氮肥使用量普遍超过 $250\text{Nkg}\cdot\text{hm}^{-2}$,但我们单位面积的产量相对较高。因此,我们的氮肥利用率比它们低应当是情理之中的事。

二、氮肥残留及其对土壤氮库的补充作用;氮素损失率和损失量

一般来说,氮肥利用率是不可能无限制提高的,因为施入土壤中的氮肥总有一部分在土壤中残留,一部分发生损失。实际上、氮肥残留是不可避免的。从另一个角度来讲,无论怎么施肥,高产作物吸氮量中,吸收的土壤氮一般占50%以上,氮素残留实际上是对所消耗的土壤氮库的一种补偿,是肥料氮与土壤氮的交换作用。可以用一个田间试验的例子来说明氮肥利用、残留与损失的关系(表1)。由表中可以看出,随着施氮量的增加,作物吸收的肥料氮增加,氮肥利用率下降;氮肥残留量增加,残留率下降;损失量增加,损失率也增加。在该试验中,后两个施氮量的产量并不比前一个高,但损失量显著增加。施氮量为 $120\text{Nkg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,氮肥的残留率达到45.3%,损失率只有11.3%。由此可见,如果在合理施氮量范围内,采用适宜的氮肥施用技术,其损失量并不大。

表1 冬小麦收获期肥料氮的去向(^{15}N 结果)

处理	作物吸收 (kgN/hm^2)	氮肥 利用率 (%)	0~100cm 土壤残留 (kgN/hm^2)	土壤残 留率 (%)	作物—土 壤回收 (kgN/hm^2)	作物—土 壤回收率 (%)	损失量 (kgN/hm^2)	损失率 (%)
N120	54.4	45.3	54.3	45.3	108.7	90.6	11.3	9.4
N240	72.1	30.0	57.7	24.0	129.8	54.1	110.2	45.9
N360	83.7	23.2	75.3	20.9	159.0	44.1	201.2	55.9

进一步分析施氮量为 $120\text{Nkg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,土壤氮、肥料氮和作物吸收氮之间的关系表明,在 $148\,2\text{Nkg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的作物吸氮量中,来自于土壤的占63.5%($94\,1\text{Nkg}\cdot\text{hm}^{-2}$),来自于肥料的占36.5%($54\,1\text{Nkg}\cdot\text{hm}^{-2}$);在施入的 $120\text{Nkg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的氮肥中,有 $54\,3\text{Nkg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 残留到土壤中。实际上,在这种不施有机肥和秸秆不还田的条件下,残留的肥料氮还不如作物吸收的土壤氮多,长此下去,对土壤氮肥力是一个耗竭过程。从上面的例子可以看出,残留氮不仅是不可避免的,而且是非常必要的。根据朱兆良先生的统计,一季作物之后残留氮常占施氮量的15%~30%,旱地小麦土壤残留氮变幅可以达到7%~74%。据对国外大量的试验统计,在土壤中残留的 ^{15}N 变幅在12%~44%之间。近几年在华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系中的田间试验表明,随着施氮量的增加,产量到一定程度不再增加,但残留量显著增加。这些残留氮不一定会立即损失,只要管理得好,还会起到补充土壤氮库的作用。但土壤中残留过多的氮素、尤其是 $\text{NO}_3\text{-N}$,会对环境造成某种程度的威胁。

和氮肥利用率与残留率一样,氮肥损失率和损失量也有很大的变幅。据朱兆良先生对国内稻田生态系统中的统计,损失率的变幅可以达到3%~77%;在旱作系统中,变幅可以达到5%~72%。从已取得的大量结果的中值来看,我国农业生产中氮肥的损失率可能在30%~50%之间,其中水稻田>玉米地>小麦地,中值约为40%。但是,由于 ^{15}N 田间微区试验中没有径流损失,因此,大田生产中氮肥的损失率可能还会高一些,可以估计为45%左右。由此可见,我们平常所说的氮肥损失率是45%,只是一个整体概念,是就全国的一个估计值,其实它的变异是相当大的。据我们对国外大量试验的统计结果,肥料氮的损失率在14%~64%之间,其变异也是非常大的。现在大部分报道掩盖了这些变异,一谈起氮肥,就说损失多么大,对环境的污染有多么严重。上面所举的例子中,在施氮量为 $120\text{Nkg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,达到了比较高的产量,氮肥损失率只有10%左右,损失量也只有 $11\,5\text{Nkg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

氮肥的3个基本去向包括作物吸收、土壤残留和损失之间存在着密切的联系和竞争,而作物吸收是其中心,若提高作物的吸收能力,则由于降低了土壤中矿质氮的浓度从而减少了氮肥在土壤中的残留量和通过各种途径的损失量。由上面的分析可知,在合理施氮量范围内,只要采取有效的氮肥施用方法,氮肥的损失量并不很大;大量的氮肥损失主要发生在不合理高量施用氮肥和落后的施肥方法条件下。

三、提高氮肥利用率的技术措施

氮肥利用率是可以提高的,但我们不能采取降低氮肥施用量、降低产量、消耗土壤氮肥力的技术途径;而应追求在合理氮肥用量、高产条件下,通过技术进步而真正提高氮肥的利用率,减少氮肥的损失和向环境的扩散。从现有和长远看,提高氮肥利用率的技术措施主要有以下几个方面。

1. 确定适宜的氮肥施用量 为了满足不断增加的人口对食物的需求,我国未来对氮肥的消费量还可能增加。最根本的问题将是更有效地利用肥料氮。一般来说,随施氮量的增加,作物产量在不同氮肥力的土壤上会有不同的反应。从农户的角度考虑,产量效应曲线上应该找到经济最佳施肥量。如果施肥量超过经济最佳施肥量,边际产值将会小于边际成本,对农户将是不合算的。如果把产量与氮肥通过各种损失随施氮量的变化绘成一张图,可以清楚地看出,随施氮量的增加,氮肥通过各种途径损失的量也增加,特别是当施氮量超过经济最佳施肥量时。因此,单个田块的施氮量应控制在最佳经济施肥量以内,特别是不能超过最高产量施肥量。氮肥管理措施应同时考虑经济收益和环境问题。

我们在华北地区多年多点的氮肥试验表明,氮肥施用量的确定应采用宏观控制与微观调节的方式,即宏观控制施氮量与土壤—植株测试推荐施氮量相结合的技术路线。宏观控制施氮量是指在特定地区、一定的种植制度下,施氮量应该有一个范围,这个范围对目前农户盲目施用过量氮肥具有非常重要的指导意义。例如就华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系来说,当施氮量在 $150 \sim 220 \text{ kg N hm}^{-2}$ 时,小麦、玉米可以达到 $6 \sim 8 \text{ t hm}^{-2}$ 的产量水平;在冬小麦季可以适当多施,而夏玉米季可以适当少施,玉米季利用小麦季的残效。据我们的研究,氮肥在小麦季的损失较低,小麦收获后残留氮依然在根区,对后季玉米是有效的;但玉米季应严格控制氮肥的施用量,因为玉米季正处于高温、高湿季节,过量施入的氮肥可通过各种途径发生损失;在华北地区冬小麦/夏玉米轮作体系中,冬小麦季大部分农户的氮肥施用量超过 300 kg N hm^{-2} ,夏玉米季的氮肥施用量达到 250 kg N hm^{-2} 。实行宏观控制施氮量对氮肥用量大面积降低到适宜范围具有重要的现实意义。

我国实行一家一户的小规模经营模式,各个地块有机肥和化肥的施用历史不同,其供氮量具有很大的差异。因此,具体到某一田块到底该施多少氮肥,则可以通过土壤—植株测试进行推荐施氮,以实现氮肥的精确调控。

2. 氮肥深施 氮肥深施是目前已提出的减少氮肥损失、提高氮肥利用率的各项技术中,效果最大且较稳定的一种措施。应当承认,由于氮肥品种和施肥技术的原因,我国作物生产体系中追肥的损失是相当严重的。欧洲国家大部分采用硝酸铵作为

追肥,而我国的追肥普遍采用尿素或碳酸氢铵。研究表明,表施尿素比表施硝酸铵的氮素损失严重得多。再者,在施肥技术方面,我国农户很难做到氮肥深施或撒施后立即灌水。如在施用基肥时,碳酸氢铵或尿素撒施在地表上后,可能会需要数小时的时间才能被翻入地下;在进行追肥时,在灌水以前,就有可能使肥料在地表存留数小时。这些都可能造成氮肥的严重损失。

根据我们的研究,在北方通气良好的旱地土壤上,施入的铵态氮肥或尿素态氮肥一般在 14 天以内才能转化成硝态氮,铵态氮在没有转化成硝态氮以前,在 pH 较高的北方石灰性土壤上会产生氨气挥发出土体。研究表明,表施碳酸氢铵或尿素通过氨挥发损失可高达 50%,但当这些氮肥在深施的条件下,氨挥发损失率很容易降低到 10% 以下。在北京地区进行的研究表明,表施尿素时其损失达施入氮量的 45%~73%,施肥结合灌水时其损失为施入氮量的 2%~8%,深施或施肥后覆土其损失量仅为施入量的 5% 以下。根据华北的试验结果,碳酸氢铵或尿素深施到 8~10 厘米,可比表施的肥效高 1 倍左右。因此,深施氮肥是发挥碳酸氢铵和尿素等氮肥品种肥效的关键技术。遗憾的是在现有生产条件下,这一关键技术在中实施中大打折扣,如华北地区普遍采用的冬小麦/夏玉米轮作中,在种植冬小麦以前,由于要进行翻耕,肥料结合土壤耕作,尚能做到深施;但在春季追肥时则较难实施深施,大部分田块依然采取撒施后等雨、或撒施后灌水的方法追肥,损失严重。在夏玉米上,普遍采用的免耕播种使氮肥的施用不得不采用撒施方式;在三叶期追肥尚能做到开沟条施,但条施的质量也难以保证,靠人工条施作业非常艰苦;在十叶期追肥由于玉米已基本封行,不得不采用雨前撒施或撒施后灌水的方式,氮肥的深施得不到保障,特别是高量施氮条件下的损失严重。因此,如何在生产上实现氮肥的深施技术,有赖于耕作、农机和施肥专业的人员联合解决,使之在生产上得到切实贯彻。

我们 2000 年在北京市东北旺乡的调查表明,在整个冬小麦/夏玉米轮作体系中,农户只有冬小麦播种时实现了氮肥深施,而这次施入的氮肥仅占整个轮作周期总施氮量的 28%,大部分氮肥在返青或拔节期以撒施方式追施,有的农户在撒施后不能及时灌水,大量的氮肥可能以氨挥发形式损失。在夏玉米季,绝大部分氮肥以追施方式表施,由于夏玉米不进行灌溉,表施后滞留于土壤表面的尿素在高温、高湿条件下很快转化为 NH_3 而挥发损失。

毫无疑问,由于国外普遍采用机械化氮肥施用装置,绝大部分可以做到氮肥深施。因此,在施肥技术上(包括肥料品种、施肥方法和时期、平衡施肥,与其他生产要素配合上)比我国有所改善,在相同

施氮量条件下,其氮肥利用率相应提高。随着我国农业技术的进步,氮肥利用率会进一步提高,我国还可以适当再降低氮肥用量,从而节约氮肥资源。

因此,只要施肥量合理,施肥方法得当,氮肥的3条损失途径都可以大大降低,并不像有些人想象的65%~70%的氮肥都损失到环境中去了。

3. 平衡施肥 磷、钾和中微量营养元素的供应水平对氮素的有效利用至关重要。我国肥料发展的历史是首先使用氮肥,过去由于磷、钾肥的不足限制了氮肥作用的发挥,氮肥利用率也不很高。根据土壤和作物条件进行氮、磷、钾和中微量营养元素的配合施用是提高产量、保证品质、发挥各种肥料作用的关键措施。

4. 其他农业生产管理措施已成为氮肥发挥作用的限制因素 作物产量是众多因素的函数,只有合理调配影响作物产量的各种因素,才不至于因其他因素的限制而影响某项投资效率的发挥。氮素只是限制产量的一个因素,由于其他因素而影响氮肥作用的发挥,引起氮肥严重损失的问题在我国农业生产上越来越严重。以华北平原为例,水分和养分不足是限制作物产量的两大因素。氮肥和水分的管理必须协调,因为氮肥和水分有很大的交互作用,不仅氮素供应不足不会充分发挥水分的增产作用,水分供应不协调也会使氮素资源浪费;水分管理不当还会引起 NO_3N 的淋洗,有可能对地下水产生污染。目前,华北平原的农业生产实践大多建立在高灌水量和大量的氮肥投入的基础上,农民的灌溉往

往是经验性质的,没有一个灌溉指标,到底需要灌多少水和灌了多少水都不很清楚。生产上这样的灌溉方式,一是在湿润年份有可能造成水资源的利用率很低、水资源浪费的问题;二是在干旱年份有可能造成灌水次数或灌水量不足,影响作物产量,使投入的肥料不会发挥应有的增产效果。

总之,在农业生产体系中,我们并不是要把氮肥利用率提高到什么特定的程度,而是要尽量减少施入氮肥的损失和向环境中的迁移,最大限度地利用残留氮,保持土壤的氮肥力。笔者曾看过许多课题申请,都有将氮肥利用率提高多少个百分点的说法,其实只要减少氮肥的施用量即可达到这样的指标,而提高利用率百分点并不一定能达到高产和环境可承受的双重目标。这样的指标是没有意义的。

参考文献

- [1] 朱兆良. 农田生态系统中化肥氮的去向和氮素管理[M]. 中国土壤氮素(朱兆良、文启孝主编),江苏科技出版社,1992,37~59
- [2] 李庆逵,朱兆良,于天仁主编. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南京:江苏科技出版社,1998,38~48
- [3] 张维理,林葆,李家康. 西欧发达国家提高化肥利用率的途径[J]. 土壤肥料,1998(5),3-9
- [4] 巨晓棠,潘家荣,刘学军,张福锁,毛达如. 高肥力土壤冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素去向研究:冬小麦生长季肥料氮的去向[J]. 核农学报,2002(In press)
- [5] 李新慧. 京郊粮田土壤氮素损失机制与提高氮肥利用率技术研究[J]. 北京土壤学会简讯,1999(2),5

(责任编辑 王宏章)

科技动态

美国研制“太阳光子帆”

据英《新科学家》2002年11月2日报道:NASA正在研发一种能在宇宙空间制造捕捉太阳光子流的“太阳帆”新技术,从而使宇宙飞船具有足够的能量飞越太阳系。

NASA正在考虑设计几种轻重量的宇宙飞船结构,结构元件轻如薄纱。其材料是一种既坚韧又有弹性的仅几微米厚的聚合物,用它制造的薄片比同样的铝片轻几千倍。最初的想法是把这种聚合物片折叠起来送入轨道,然后在轨道展开。但麻省安多弗的一家航空航天公司物理科学公司的Kevin White说,NASA发现,两年前研制的两种称为CP1和CP2的聚合物,在打包和拆包时很容易起静电和破裂。现在White和他的同事John Lennhoff认为,他们已经有了解决这些问题的办法。

他们的设想是在地面上生产出整片的薄纱块,送到轨道上后将它们变成所需要的帆的形状,即一旦进入宇宙空间,迫使整块聚合物通过一排热喷嘴熔化成类似纤维的细小射流,这些射流遇到辊筒冷表面时就会变成薄的纤维片,搭接形成一张太阳帆。在实验室,这个科研小

组发现,给喷嘴加上正电荷可以更好地控制聚合物射流喷向负电极表面,这就使沉积的聚合物纤维比以前要薄几百倍。White上月在麻省内蒂克的纤维学会上的一次会议上宣布了这一研究结果。

为了正常工作,这种技术需要一个清洁环境或良好的真空条件,换句话说,细小的灰尘也会变成带电的微粒并堆积在这种材料中;而宇宙空间是高真空状态。因此Lennhoff迫切地想知道,在宇宙空间这种工艺是否可能容易实现。

现在这家公司正在研制一种机器。这种机器可以在宇宙飞船上一个固定的桅杆和悬臂上攀爬,将薄纱片搭接一起,粘成一张面积达1平方公里的复合片。

NASA兰利研究中心研究太阳帆的专家Keith Belvin说,这种新技术有很大的潜力。他说,想在轨道上生产太阳帆是一件事,而能不能实现是另一件事。他预计第一张太阳帆可能仍然会在地面上制造。

(刘先曙)