

提高肥料的养分利用率



T. L. 罗伯茨

美国磷钾研究院

前言

目前，业界对提高化肥养分利用率的认识度和关注度比以往任何时候都高。公众越来越认为环境中残留了过多的提供给作物生长的养分，而农场主在担忧不断上涨的化肥价格及滞涨不前的农作物价格。来自于上述这两方面的压力要求化肥工业努力去提高化肥的利用效率。然而，效率的定义可以有多种方式，因而很容易产生误解，并被故意曲解。由于侧重点不同，对效率所给出的定义也不同。站在环保角度强调的养分利用率与从农学角度或从经济角度的所强调的养分利用率差异很大。养分利用率的最大化并不总是可取的或有实际意义的。

从农学角度谈的养分利用率可以被定义为积聚在作物的农田表面以上部分的养分，或定义为整个土壤作物根系所回收的养分。从经济学角度谈的利用率是探讨通过合理的养分投入使农场收入最大化，但这不容易预测也不是总能实现，因为未来产量的增长，养分的成本，农产品的价格这些因素，在种植季节之前是未知的。从环保角度谈的养分利用率，因地制宜，只能从研究当地的环保目标（指与因残留养分而对环境产生影响的）来判断。未被农作物吸收的养分存在因养分流失于环境中产生的影响，而流失程度因养分种类、土壤特性、气候及地貌不同而异，一般来说，只有在向农田施用了超出作物生长所需养分（农学需求量）时，才会发生养分流失于环境的情况。尽管侧重点不同，但农学上的养分利用率是经济上的和环保方面要求的养分利用率的基础。当农学养分利用率提高时，经济角度及环境角度的养分利用率亦会随之改善。

养分利用率术语

养分利用率可以用不同方式表达。Mosier（于 2004 年）描述了四种常用来描述养分利用率的农学指数：产率参数（FPF，施用每公斤养分带来的作物产量，单位：公斤）；农学养分利用率（AE，施用每公斤养分带来的作物产量增加值，单位：公斤）；表观回收率（RE，施用每公斤养分中被作物吸收的量，单位：公斤）；生理利用率（PE，每公斤被作物吸收的养分所带来作物产量增长值，单位：公斤）。另外，还有一种常用来描述养分利用率的方法，就是看存在于收割作物中的养分占所施用养分的百分比。究竟采用哪一种参数或术语，才能最好地考察分析养分利用率，要看具体情况，看所能得到的数据，也要看具体工作目标是什么。Fixen（于 2005 年）作出了一份很好的归纳，举例说明了这些不同的术语可能被应用的各种情况。

为防止错误地理解及错误地判断养分利用率的情况发生，理解这些术语并

弄清具体的相关情况是十分关键的。举例来说，表 1 中给出了美国北部中部地区一个玉米田的数据，根据这同一数据有两种对养份利用率的评估，一种结论是作物氮养份的回收率为 37%（作物回收了所施氮养份的 37%）。另一种结论是收割的作物中吸取了所施氮养份的 100%。那么，哪种结论是正确的呢？

表 1 玉米种植中施用氮肥的养份利用率
(根据对美国北部中部地区 56 个玉米种植的研究)

平均最佳氮肥施用量: kg/ha	103	
作物的氮肥回收率: kg/ha	38	
作物吸收的氮养份总量: kg/ha	184	
收割的粮食中带出的氮养份*: kg/ha		103
随作物残骸返回土壤的氮养份量: kg/ha		81
作物的养份回收率 (氮养份回收量 38 公斤/施用 103 公斤氮养份): %		37
作物的养份带出率 (施用的氮养份量 103 公斤/收割的粮食中带出的氮养份量): %		100

*假定典型的氮养份收割指数为 56%

在表 1 中，所施用的氮养份仅有 37%被作物的农田表面以上部分回收，这一数字低的有些令人担忧，因而也担心环境受到破坏的危险。在假定收割的粮食中会有该作物农田表面以上部分所吸收氮养份的 56%（这是一个标准的氮养份收获指数）的前提下，那么所施用的氮养份仅有 21%（37%×56%，译者注）是被吸收到了粮食里。如此低的养份利用率马上提出一个问题：其余（79%）养份在哪里？37%的养份利用率又到底意味着什么？

在上面的数据中，以施用最佳量 103 公斤/公顷氮肥使作物在农田表面以上的部分增加吸收氮养份 38 公斤/公顷（即 103 的 37%）。施肥后玉米吸收的总氮量为 184 公斤/公顷，其中 146 公斤/公顷来自土壤本身，而 38 公斤/公顷来自所施用的肥料。收割后粮食中含的氮养份为 184 的 56%，即 103 公斤/公顷，刚好等于所施用的氮肥量。哪种说法正确呢？是所推测的 21%的回收率，即单一年度收割的粮食中所回收的氮养份，还是 100%的回收率，即假定在土壤能够长期提供氮养份的情况下，作物所吸收的总氮养份量（土壤中的氮养份加上肥料中的氮养份）。我们无法知道这个问题的答案，除非首先弄清氮养份循环周期的长期动态特征。

化肥施于土壤后，未被作物吸收那部分，会因淋溶，侵蚀，脱氮或挥发（如果是氮肥的话）而损失掉，或者也可能暂时地被土壤中的有机质固定，而在日后释放养份，这些都会影响到表观的养份利用率。Dobermann 等（于 2005 年）引入了一个术语，即系统总体效率，来同时考查所施养份对作物吸收养份的贡献度，和向土壤提供养份的贡献度。

养份利用率现状

一份近期的研究报告表明，单一年度氮养份平均回收率为 65%（对玉米），57%（对小麦）和 46%（对水稻），这一组数字是从世界各地研究机构所进行的研究性试验中得到的（2005 年 Ladha 等）。但是，在研究性实验田上得出的数据并不能准确地反映出大田种植的养份效率。大田生产及田间管理（耕作，播种，草虫控制，灌溉，收割）与研究性实验田的差异通常会导致养份利用率降低。农民所进行的大田作物种植，其氮的回收率极少超过 50%，通常要远低于 50%。有一份报告在综合分析了那些最易获取的信息后得出结论，农民所进行的田间种植中，氮的回收率为 20-30%（仅靠自然降雨）和 30-40%（灌溉条件下）。

Cassman 等（于 2002 年）分析了若干例在不同的农田种植中，氮的养份回收率（表 2）。他的报告中说，美国北部中部地区玉米种植的氮养份平均回收率为 37%；亚洲的水稻种植在灌溉条件下氮的回收率平均为 31%，但在有特殊的田间管理条件下为 40%；在印度，在恶劣气候条件下的小麦种植中，氮的回收率为 18%，但在良好气候条件时可达 49%。田间管理对养份回收率有影响，田间管理是人为控制的，但自然气候条件是无法控制的。

表 2 大田玉米、水稻和小麦种植中氮肥的回收率

作物	地区	农场数	氮肥施用量 kg/ha	氮回收率, %
玉米	美国北部中部地区	56	103	37
水稻	亚洲	179	117	31
	亚洲（特殊田间管理）	179	112	40
小麦	印度（在不利气候条件）	23	145	18
	印度（在有利气候条件）	21	123	49

表 2 数据表明，尚有提高大田种植的养份利用率的空间，尤其是氮养份。尽管提高养份利用率的重点是在氮养份，但磷养份同时也是关注点，因为磷是最难获得的养份之一，也是最稳定的无机养份。所施磷肥在第一年的养份回收率一般在低于 10%至高达 30%之间。但是，由于磷在土壤中的稳定性，并且与土壤中其他无机质的反应较慢，所以磷养份还会被后来种植的作物所吸收，因而磷养份长期回收率要高得多。目前尚无有关钾养份利用率的报告。但是，通常认为钾的养份利用率比氮和磷的要高，因为钾在绝大多土壤都是稳定的，钾既不像氮那样易挥发，也不像磷那样受固定反应的影响，钾养份施用后第一年的回收率为 20-60%。

优化养份利用率

化肥工业主张以最好的田间管理方式来取得最佳养份利用率，即在最适宜的时机，向适当的位置施用最佳量的养份。

最佳养份量：绝大多数作物都有其特定的地域性和季节性，其生长受栽培品种，田间管理方式及气候条件等因素的影响，因此，（事先）确定一个现实而合理的作物产量目标是很关键的，同时据此确定应施养份量来达到这个目标。过量或欠量施肥会导致养份利用率下降，或产量降低或农作物产品品质下降。目前测定土壤本身向作物提供养份能力的最有效的方法之一仍是土壤测定，但为了配合给出恰当的施肥建议，也需要有方便使用的刻度性数据来配合。令人遗憾的是，并非世界所有地区都有土壤测定的条件，因为某些地方很难或不可能得到那些可信赖的实验室的服务或支持，这样的实验室能采用适合于当地的土壤条件及作物品种的方法论来进行研究，还可能因为缺少与当地作物种植体系及产量目标相关联的刻度性数据。

还有其它的方法，如用省略（施某种养份）法来进行小块地试验，也被证明对确定为得到所希望的产量所应施用的化肥量是有用的（2002年，Witt 和 Doberman）。在这种省略法中，（先）要向农田施用足量的氮、磷、钾养份，以确保产量不会因所施养份不足而受限制。可以通过施用不限量的氮磷钾复合肥来确定所希望的作物产量目标值。而后通过向试验田中少施某种养份来确定该养份对产量的影响度。

例如，在一块试验田上不施氮，但施足量的磷、钾并确保作物的生长不会因缺磷、钾而受限制。比较一下施用了氮、磷、钾养份的试验田的作物产量与施用了磷、钾但未施氮养份的试验田的作物产量的差别，这个差值就是作物因氮养份欠缺而产生的差值，而这个差值应靠施氮肥来填补。除非向土壤中补充等于收到粮食中的养份及存于残余的作物枝杆中的养份，否则土壤肥力将被耗尽。

最佳施肥时机：提高养份利用率尤其是氮肥利用率，必须有更为严格的同步性，即在作物需求养份时给予其养份供给。对于氮肥而言，在作物生长期多次施肥，而不要一次大量地在种植之前施肥，是提高氮养份利用率的方法（2002年，Cassman 等）。组织测定（Tissue testing）是众所周知的评估生长中的作物对氮养份需求状态的好方法，但也有其他的诊断方法。叶绿素测量仪也被证明在微调作物生长期氮肥施用量上是有用的（1999年，Fganeis 和 Piekielek），还有，作物叶片颜色图表在指导亚洲水稻和玉米生产中分批施用氮肥方面很成功（2005年，Witt 等）。精准农业技术已引入生产中，目前已商业化，在某特定种植中，动态的氮养份探测器能连同与其匹配的可变量施肥器，自动地纠正作物的缺氮状况。

另一类使肥料中的氮养份与作物需求同步释放的方法包括使用氮稳定剂，及使用控释肥料。氮稳定剂阻止硝化作用发生，从而减缓了氮肥转化为硝酸盐（2005年，Havlin 等）。当土壤及环境条件利于硝酸盐损失时，采用稳定剂常会增加氮肥利用率。控释肥包括低溶解度复合肥和覆膜水溶性肥料。

绝大多数缓释肥料比水溶性氮肥昂贵，一直被应用于高价值的园艺作物及草皮生产中。但是，技术进步已降低了制造成本，控释肥现在也可用于玉米、小麦及其他商品粮食的生产（2005年，Blaylock 等）。最有希望在农业生产中推广应用的是聚合物包膜化肥，能设计成以控制的方式释放养份。经过处理的聚

合物包膜能控制养份释放速度，当平均温度和湿度可以被估算出时，养份的释放速度是可以预测的。

最佳施肥位置：为保证化肥的使用效率，施肥方式一直都是十分关键的。确定适宜的施肥方式如同确定最佳施肥量那样重要。有很多种施肥方式，但最常见的有表面施肥、深施，种植前施肥或种植之后施肥。种植前施肥，养份可以广泛分布。可以在田地表面以条状施肥，或在地表以下（5-20 厘米深）以条状施肥。种植后施肥，通常仅限于氮肥，方式可以是追肥，也可以是地表下面侧施。通常，条状施肥的养份回收率较高，因为养份与土壤接触面较小，这可以减少因淋溶和固定反应而引起的养份损失的机会。选择哪种施肥（位置）方式取决于作物品种及土壤条件，这些因素对养份的吸收和获取性有影响。

植物养份很少单独起作用。不同养份之间的相互反应是很重要的，因为缺少某一养份会制约其他养份的利用。大量研究表明，氮与其他养份（主要是磷和钾）的相互作用会影响作物产量和氮的利用率。例如，印度基于大量，多地区的农田试验所给出的数据表明了平衡施肥对增加作物产量和提高氮利用率十分重要。

表 3. 平衡施肥对作物产量的作用及氮的农学效率（印度，1996 年）

作物	产量, 吨/公顷			农学效率, 公斤粮食/公斤氮		
	控制	仅施氮肥*	加上磷钾	仅施氮肥	加上磷钾	增加量
水稻 (多雨季节)	2.74	3.28	3.82	13.5	27.0	13.5
水稻 (夏季)	3.03	3.45	6.27	10.5	81.0	69.5
小麦	1.45	1.88	2.25	10.8	20.0	9.2
珍珠稗	1.05	1.24	1.65	4.7	15.0	10.3
玉米	1.67	2.45	3.23	19.5	39.0	19.5
高粱	1.27	1.48	1.75	5.3	12.0	6.7
甘蔗	47.2	59.0	81.4	78.7	227.7	150.0

* 施用氮肥量：40 kg N/ha （粮食作物），150 kg N/ha （甘蔗）

充足地和平均地施用化肥养份是提高氮肥利用率最常用的做法之一，对发达国家及发展中国家都是如此。最近有一份报告，是基于在中国，印度和北美 241 个地点，多年进行的实验而总结的，该报告说，氮、磷、钾平衡施肥，第一年平均增加养份回收率达 54%，相比较之下，仅施氮肥，养份回收率仅为 21%（2005 年，Fixen 等）。

高效的并不一定意味着实效

提高养份利用率是与农业相关各界共同的目标，而在科学家和农学家的帮助下，化学工业正在帮助农民实现这一目标。但是，不能仅为追求养份利用率而牺牲实效性。只要牺牲（不追求）产量，就可以得到高得多的养份利用率，但那样做在经济上行不通，农民无法接受，还有环境因素。Dibb 于 2000 年巧妙地描述了产量、养份利用率与环境的关系，他举了一个假设的例子来说明。在图 1 中，

是一条典型的产量回报率曲线，在该曲线较低的那部分，产量非常低，因为没有施用养份，但养份利用率非常高。在产量低的时候，养份利用率高，因为仅施用任何少量的养份都会产生一个大的产量上的回报。假如养份利用率是所追求的唯一目标，这条曲线较低部分这里就已经实现了。

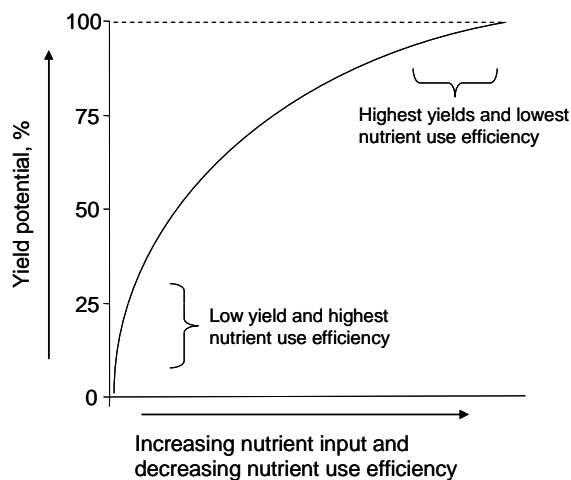


图 1. 作物产量回报率与化肥养份利用率的关系(根据 Dibb 于 2000 年的报告).

(译者注：图 1 中，纵坐标为作物产量增加潜力，横坐标表示增加养份投入量但养份利用率随之降低。图中曲线较低部分文字为：低产量但养份利用率最高。图中较高部分的文字为：最高的作物产量但最低的养份利用率。)

然而，这会牵涉到严重的环境问题。作物生长状态差，在农田中的残留物相应减少，这会降低保护土壤免于风沙和洪水侵蚀的能力，并且植于土壤的根系也少，而根系能产生土壤有机质。顺着图中这条回报曲线上移，尽管增长速度较慢，但产量持续增长，而养份利用率降低，但降低的程度是由所采取的施肥量，施肥时机、施肥位置等田间管理方法及土壤、气候等自然条件决定的。

Fixen 于 2006 年进一步阐述了养份利用率与实效性之间的关系，他提出，养份利用率的值取决于它是否能够满足施用养份所要追求的目标。这些目标包括：给作物提供经济上最佳量的养份，使从土壤中流失的养份最少，还有要对持续保持土壤肥力及其他的土壤品质指标有帮助。Fixen 举了两个例子。图 2 给出的是一组从加拿大萨斯切温长期的小麦种植研究得到的数据。在这项研究中单一年度磷肥回收率高达 30%，然而这种做法没有实效性，因为小麦的产量被牺牲了。

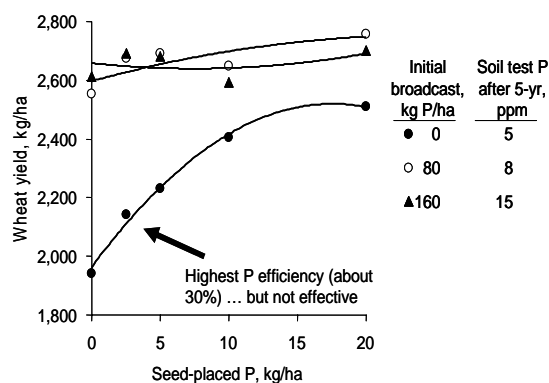


图 2. 磷肥的养份利用率与小麦产量的关系(根据 Wagner 等的报告, 1986 年).

(译者注: 图 2 中, 纵坐标为小麦产量, 公斤/公顷, 横坐标为随种子一起施用的磷养份量, 公斤/公顷。图 2 中, 箭头下面的文字为: 最高的磷养份利用率(约 30%), 但无实效, 无实际意义。)

他举的第二个例子是美国俄亥俄州玉米种植研究, 通过土壤测定研究不同钾养份量和不同氮养份量情况下的结果。降低氮的施用量至低于其最佳值时, 可以大大提高钾的养份利用率。或者, 当土壤测定钾养份量为最佳时, 施用最佳量的氮也可以提高产量和利用率。这两种途径都可以提高氮的利用率, 但从满足产量目标来看, 第二种做法是最具实效性, 最有实际意义的。

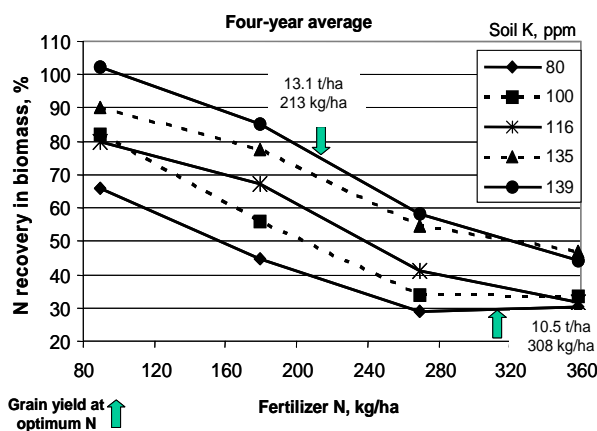


图 3. 充足的钾养份使氮的养份利用率提高 (根 Johnson 等的报告, 1997 年).

总之, 提高养份利用率是一具有重大意义的目标, 也是化肥工业和农业面临的重大课题。在实现提高所施养份的利用率的过程中, 有许多机遇, 还有许多方法可以采用。但是, 我们必须以谨慎的态度对待, 提高化肥利用率绝不能以损害农民的经济利益, 及危害环境为代价。要明智地施用化肥, 采用最佳田间管理方式, 在适宜的时机, 以适宜的量将化肥施到适宜的位置, 既要追求作物高产, 也要追求养份的高效利用, 这样才能利于农民, 利于社会, 并利于环境。