

肥料养分真实利用率计算与施肥策略*

王火焰 周健民

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要 目前人们提到的我国肥料利用率数据都是基于常规公式获得的当季肥料表观利用率的计算结果, 并由此认定我国肥料利用率比较低。本文提出养分真实利用率的计算方法, 养分真实利用率是作物吸收的养分占种植作物消耗的养分比例。养分来源既包括施用的各种肥料养分, 也包括土壤贮存的养分, 其公式为: 作物吸收的养分量 / (施肥量 - 土壤养分的盈亏量)。养分真实利用率也可采用 100% 减去养分的损失率来计算, 因各种途径未被作物吸收利用并离开耕层土壤的养分才是损失, 而贮存在耕层土壤中的养分则不能算作损失。我国耕地土壤肥力的维持和作物吸收的养分都主要来自于各种肥料, 因而养分真实利用率的计算公式, 基本等同于肥料养分真实利用率的计算公式。利用这一新的公式, 我国的肥料养分真实利用率无论是当季还是长期利用率都将远远高于当前文献报道的数据。新的算法获得的肥料养分利用率直接与肥料养分的损失率相对应, 将有利于揭示肥料对粮食生产的实际贡献率和损失率, 并推动土壤肥力的培育目标及施肥策略与养分损失率相对应, 促进施肥技术向减少肥料损失的方向发展, 而不是片面地提高目标不太明确却广泛使用的肥料表观利用率。未来大田作物的施肥量并不需要高度依赖测土施肥, 而应主要依赖于作物生长对养分的消耗量和养分损失率来确定。

关键词 肥料利用率; 损失率; 施肥技术; 氮肥; 磷肥; 钾肥

中图分类号 S143 **文献标识码** A

如何科学施肥来促进粮食增产, 提高肥料利用率, 减少肥料过量施用带来的土壤质量退化及肥料损失带来的环境污染问题是当前国家的重大需求, 也一直是农业资源与环境科学工作者的奋斗目标。肥料利用率则是衡量各种肥料施用措施是否科学高效的重要指标。一些报道认为, 我国的肥料养分利用率较低^[1], 大量的田间试验结果表明, 我国主要粮食作物氮磷的肥料平均利用率分别小于 30% 和 15%, 钾肥利用率仅在 30% 左右, 并较以前显著下降^[2]。这样的肥料利用率数据是否正确, 存在什么样的问题, 怎么进行肥料利用率的正确计算与评估? 近些年来, 已经有一些研究者对当前采用的肥料利用率的算法进行了质疑、分析和讨论^[3-9]。也有一些研究者提出了肥料利用率的新算法, 如沈善敏提出的比值法, 即施肥处理作物养分吸收量占施

肥量与对照处理养分吸收量之和的比值^[7]。田昌玉等提出了对常规的肥料利用率公式进行修正, 需要将对照处理的吸氮量乘以一个小于 1 的系数^[5]。这些方法均可以获得较常规差值法更准确也更高一些的肥料利用率。但这些方法无论是计算的理论依据, 还是实际操作都还不是十分理想。本文分析了当前肥料利用率方法存在的问题, 基于肥料养分与土壤养分转化的复杂性和不可完全区分的实际情况, 提出了与养分损失率直接对应的养分真实利用率的算法, 并论证了该算法也是肥料养分真实利用率的最佳算法。基于新算法的肥料养分真实利用率将是未来评价和优化各种施肥措施效果的重要指标, 其推广应用将使我国对肥料利用率和损失率的评估更加定量化和具有说服力, 也将促进有关养分资源高效利用技术措施的发展和应用。

* 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB127401)、公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203013)、国家自然科学基金项目(41271309)、江苏省科技支撑计划(BE2011821)和 IPNI 项目资助

作者简介: 王火焰(1971—), 男, 安徽怀宁人, 博士, 研究员, 主要从事养分高效利用机理与调控措施方面的研究。E-mail: hywang@issas.ac.cn

收稿日期: 2013-12-11; 收到修稿日期: 2013-12-31

1 目前肥料利用率计算结果存在的问题

当前普遍采用的肥料利用率公式计算的结果主要存在以下几方面的问题。

其一,不能反映肥料养分的真实利用率,结果波动很大。当前的肥料利用率反映的仅是肥料养分当季的表观利用率,易受多种因素如土壤基础肥力、施肥量、作物产量等的影响而极易变化^[10]。我国主要农作物早期的氮肥利用率在 9% ~ 72% 之间^[11],近期氮肥利用率也在 0.3% ~ 88% 之间,磷钾肥的利用率则分别在 1.7% ~ 59.3% 和 0.7% ~ 88.2% 之间^[2]。沈善敏曾怀疑无论是同位素标记法还是肥料试验的差值法都不可能获得可靠结果,并提出了一种比值法来提高肥料利用率算法的准确性^[7]。经研究检验,该比值法计算的相关研究中的氮肥利用率较常规差值法高出约 30 个百分点^[8]。田昌玉等指出无论是示踪法还是差值法计算出来的氮肥利用率结果都偏低^[6]。常规肥料利用率计算方法获得的肥料利用率偏低且不稳定的主要原因是公式中将对照处理吸收的养分量从施肥处理的吸氮量中扣除了。而这部分扣除实际上是非常不合理的,因为对照处理中的养分供应是前期施肥对土壤肥力提升的结果,主要是前期施用各种肥料的残效。以前施用肥料的残效越高,常规方法计算出来的当前肥料利用率的数值就会越低。实际上对于任何一个田块而言,施入的肥料也必然会有一个较真实的肥料利用率,这个肥料利用率即使不采取常规差值法也应该有别的多种方法进行测定或估算,无论用何种方法,只要能接近其真实值就是好方法,其值也就有更好的指示作用。肥料的真实利用率在一个相对稳定的体系中不会因作物种植的年限而发生显著变化,也不会因土壤基础肥力肥瘦有太大的变化,更不会因是否设置一个不施肥的对照处理而变化。

其二,不能提供高效施肥需要达到的最终肥料利用率目标,也难以基于该表观利用率的数值来判断施肥策略是否正确恰当。人们认为当前我国肥料利用率比较低,但最理想的状况是让肥料利用率提高到多少呢?难道是 100%?目前还没有人能回答这个问题。以图 1 为例来说明。

假设作物在不施磷肥的处理中吸磷量为每公顷 60 kg(以 P_2O_5 计,下同),每公顷施用 75 kg 磷肥

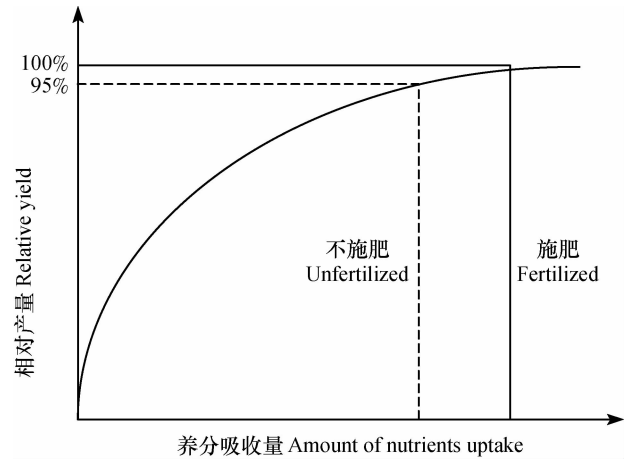


图 1 常见施肥处理的增产效应及其与养分吸收量的关系
Fig. 1 Yield-raising effect and nutrient uptake of the crop under of conventional fertilization

的处理,其吸磷量为每公顷 75 kg,经计算磷肥的利用率为 $(75 - 60) / 75 \times 100\% = 20\%$ 。这在农业生产实践中是非常普遍的现象。施用磷肥的处理,磷的径流和淋溶损失如果都不大,磷肥的投入量与带走量也基本相当,这样的施肥量可以说是最理想的可持续的高效施肥量。但其肥料利用率我们算出来仅有 20%,这样的肥料利用率还需要怎样地提高?还有必要提高吗?常规方法计算的肥料利用率如果达到 100%,施肥处理带走的养分量就等于施肥量和不施肥处理中作物耗竭的土壤养分量之和。这样的肥料利用率是不可能也不应该达到的。不可能是因为常规条件下作物吸收的养分量不可能远远超过施入的肥料量,不应该是因为 100% 的肥料利用率会导致施肥处理土壤中的固有养分将以不施肥对照处理一样的速度被耗竭,如此将会导致土壤肥力不可持续的消耗。因而当前我国的肥料利用率以磷肥为例,可能 20% 左右就是最好的肥料利用率了。但实际上不同肥料最合适的肥料利用率是多少?基于目前的肥料利用率算法没法给出确定的目标。因而目前的肥料利用率结果在生产实践上指示意义很差,甚至会带来负面的影响。基于表观利用率获得的较高肥料利用率的施肥措施和策略也可能未必是正确的或可持续的。正因如此,有人指出不能将提高肥料利用率作为确定施肥量的依据^[12],养分利用率的增减变化很可能不能说明施肥增产的本质问题^[13],也有人指出不应该追求多么高的氮肥利用率^[4]。其实我们应该追求更高的接近 100% 的肥料养分利用率,只是目前的肥料养分利用率计算方法有问题。

其三,不能准确反映肥料养分的损失率。没有被作物吸收利用的肥料养分一部分残留于土壤,另一部分则因气态、径流或淋溶被损失掉了。留在土壤中的养分未被消耗前,是培肥地力的需要,多数将被后茬作物利用。损失掉的养分因资源损失和污染环境则是当前施肥最大的危害。施到土壤中的肥料或多或少都会有一部分通过各种途径进入到周围环境中,其损失量和损失率才是我们最关心的,也是所有施肥策略和措施需要重点考虑的因素。但目前常规肥料利用率的计算结果无法反映有多少肥料养分损失掉了。如图 1 中的磷肥利用率尽管只有 20%,但可能损失极少,也可能损失稍多。我国氮肥利用率只有 30%,但损失率肯定不会有 70%,有时会很多,有时会很少,这也要依具体情况而定。有人推测我国水稻生产体系中氮肥损失率可能有 60%,旱作中有 45%,甚至高施肥量时绝大部分发生了损失^[14],这样的结果如果仅根据氮肥表观利用率来判断肯定是不准确甚至是错误的。实践中肥料表观利用率在保肥能力差的土壤上因为土壤基础肥力低而结果可能偏高,而在保肥能力强的土壤上因为基础肥力较高而可能偏低,因而表观利用率甚至可能与养分损失率相反。对于同一土壤如果土壤肥力提高了,或者土壤缓冲性能和保肥能力提高了,均会导致肥料表观利用率的下降,但并非一定表示养分的损失率上升了。正因如此,我国肥料表观利用率较以前显著下降^[2],这一结果未必能直接证明是肥料损失率上升了。如果需要准确地将肥料利用率和损失率对应起来,并有效地指导施肥实践,当前的肥料利用率计算方法是到了非改不可的时候了。

其四,不能正确评估肥料对粮食生产的实际贡献,造成人们对化肥作用的认识存在偏见和误区。基于目前的肥料利用率的算法,很多文献报道我国肥料利用率显著低于国外发达国家,肥料用量也远高于国外^[2,15-16],这其中除了我国部分设施作物大量盲目施肥外,也与我国地少人多,需要大量施肥提高作物单产有关。另一方面也可能与肥料利用率的计算方法有关。欧美等发达国家农田多数实行一年一茬,秸秆还田和有机肥施用较为普遍,土壤休闲期间秸秆等各种有机养分可以充分转化,并为下茬作物提供大量养分,这样可以大大减少化肥的用量。利用现行的肥料利用率公式,仅计算化肥的利用率,我国会明显低于发达国家,但如果能够分别计算包括秸秆、有机肥等所有养分的真实利用

率及损失率,我国一些区域和一些作物的养分利用率与国外相比未必会有目前文献中报道的差别那么大。实际上我国的肥料对农业粮食生产的贡献是巨大的,当前土壤养分肥力较几十年前有较普遍的提升^[17-21],也主要是施肥的结果。可以说施肥基本供应了各种农作物收获带走的所有的养分,并提升了土壤肥力。没有化肥就没有现代农业,中国也养活不了 13 亿人。化肥的损失对环境造成的负面影响远没有粮食增产带来的正效应突出。只是基于常规方法计算的化肥利用率结果让社会公众误认为,没有被利用的化肥均被损失或浪费掉了。因此,当前迫切需要有更准确的算法来客观正确地估算我国肥料利用率和损失率。

2 肥料养分真实利用率的计算

明确区分施入的肥料养分和土壤养分是常规肥料利用率计算的最大问题所在。肥料施入土壤后,必然会与土壤中固有的大量养分互相转化并混为一体。作物吸收的养分主要来自于根际周围的养分,包括水溶态、速效态、缓效态和通过一系列转化、活化而来的根际土壤固有的养分。而离根区较远处的养分,只有通过溶质运移到根际才能被作物吸收,距离根区越远,该比例越低。因而土壤肥力较高或者施肥效果不明显的土壤中,作物吸收的养分来自土壤固有养分的比例会高。正因如此,肥料中的养分与土壤中的养分库会不可避免地发生替代^[8],在养分固定能力较强的土壤中这种替代的比例会很高。土壤对肥料养分的这种固定和替代能力是土壤保肥能力的关键所在,也是土壤区别于砂子更适合作物生长的重要特性之一。固定的养分可以说都是有效的,让养分被土壤适度地固定也是我们培肥土壤的原因和目的。只有当土壤中固定养分的位点被适度饱和后,后续施入的养分有效性才会更高,而且在根际养分被耗竭后,固定的养分会被及时释放出来供作物吸收利用。远离根区被土壤固定的肥料养分在其完全被消耗之前,均会在后续作物种植过程中慢慢被作物吸收利用或损失掉。最新的一个¹⁵N 标记肥料长期定位试验结果表明,1982 年施入土壤的标记氮肥在其后的 30 年中被作物累计吸收 61% ~ 65%,有 8% ~ 12% 的氮流向了水体,土壤残留仍然有 12% ~ 15%,据估计土壤残留氮在今后不断被作物吸收利用或损失掉的过程还会持续至少 50 年以上^[22]。该研究结果证实

肥料氮在土壤氮中的残留时间远远超过了通常的预期^[22]。氮与磷钾相比在土壤中更易被损失掉,因而磷钾肥等其他更难损失的养分在土壤中的残效会更长,施入土壤后与土壤中的养分更是难以区分。因而评估肥料养分的真实利用率必须将土壤中的养分与肥料中的养分综合起来考虑。

无论是来自各种肥料还是土壤固有的养分,都存在一个养分的真实利用率,这一利用率可以定义为被作物吸收利用的养分占被消耗养分总量的比例。在此过程中损失掉的养分占被消耗养分总量的比例即为损失率。由于土壤是养分的重要贮库,留存在土壤中的养分不能算作损失,只有因气态、径流和淋溶等离开耕层土壤(深根作物可根据具体情况定土层厚度)的养分才算损失。

在某一时间内,无论何种条件,农田土壤-作物系统中养分变化均会满足以下公式:

$$\text{作物养分吸收量} + \text{养分损失量} = \text{外源养分量} + \text{土壤养分减少量} \quad (1)$$

$$\text{养分真实利用率} = \text{作物养分吸收量} / (\text{外源养分量} + \text{土壤养分减少量}) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{养分损失率} = \text{养分损失量} / (\text{外源养分量} + \text{土壤养分减少量}) \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{养分真实利用率} + \text{养分损失率} = 100\% \quad (4)$$

此外,在式(1)中如仅有一个参数未知,其他参数可知,则很容易地推导出未知参数值,在此基础上也可得到养分真实利用率和损失率的计算公式如下:

$$\text{养分真实利用率} = 100\% - \text{养分损失量} / (\text{外源养分量} + \text{土壤养分减少量}) \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{养分损失率} = (\text{外源养分量} + \text{土壤养分减少量} - \text{作物养分吸收量}) / (\text{外源养分量} + \text{土壤养分减少量}) \times 100\% \quad (6)$$

上述各式中的土壤养分减少量如果的确是减少了则为正值,如果是增加了则为负值,这是因为施肥或其他来源增加到土壤养分库的那部分养分如果没有被当季作物消耗掉或损失掉,则要从总养分消耗量中扣除。

与不分来源的所有养分利用率类似,真正准确的肥料利用率也应该与其损失率直接对应。肥料养分真实利用率 = 100% - 肥料养分损失率。这样才能既符合肥料真实利用率的内涵,又能让肥料利用率的结果在评价和指导施肥实践中发挥直接的判别作用。相应的肥料养分真实利用率可以定义为:肥料施入土壤后,直至消耗完之前,被作物吸收利用的肥料养分量占被消耗的肥料养分量的比例。

被消耗之前留在耕层土壤中的肥料养分,仍然为土壤养分贮库的一部分,既未损失,也未消耗。

肥料养分真实利用率的计算公式为:

$$\text{肥料真实利用率} = \text{作物吸收肥料养分量} / (\text{施肥量} - \text{土壤贮存的肥料养分量}) \times 100\% \quad (7)$$

式(7)中需要区分肥料养分与土壤养分,获得真实的肥料利用率需要采用示踪法。如果仅是一季的结果,则结果反映的是施入的肥料被当季消耗部分的真实利用率。如果要知道某一次施肥的肥料所有肥料养分被消耗完时的真实利用率和损失率,则要像 Sebilo 等那样严格地通过长期定位试验去计算其累计的真实利用率和损失率^[22]。但实际上这也行不通,因为 Sebilo 等花费了三十年的时间仍未获得最后的结果。从生产实践的角度,其实我们并不需要知道某一次施肥其肥料养分被完全消耗时的真实利用率,我们只需要知道当季被消耗的那部分肥料养分的利用率,以及以前多次不同时期施肥累计在当前土壤中的肥料养分利用率就可以了。因为当季作物吸收的养分还有相当一部分甚至是大部分是来自于以前各个时期通过施肥措施进入到土壤中的养分,这部分养分的真实利用率及其损失率反映的也主要是以前肥料养分的真实利用率和损失率。因而可以推断对于一个稳定的土壤-作物系统而言,在施肥是土壤养分主要来源的情况下,肥料真实利用率和损失率就分别等同于养分真实利用率和损失率。

因而肥料养分真实利用率的公式,是完全可以采用如下公式:

$$\text{肥料养分真实利用率} = \text{作物养分吸收量} / (\text{施肥量} + \text{土壤养分减少量}) \times 100\% \quad (8)$$

因此,肥料养分损失率 = 100% - 肥料养分真实利用率,或用下式计算:

$$\text{肥料养分损失率} = (\text{施肥量} + \text{土壤养分减少量} - \text{作物养分吸收量}) / (\text{施肥量} + \text{土壤养分减少量}) \times 100\% \quad (9)$$

上式中如果施肥和作物种植导致土壤养分总量增加,则土壤养分减少量为负值。在不施肥的土壤中,式(8)和式(9)可用来计算土壤养分的真实利用率和损失率。

一定条件下,除了施肥,土壤养分可能有其他的来源,如干湿沉降、灌溉水、侧渗和地下水,以及生物固氮等,这些来源的养分量只要能测算出其实值,假设其真实利用率和损耗率与土壤和肥料中的养分接近,就可以加入到养分总消耗量中,这样

可以更准确地计算出肥料养分的真实利用率和损失率。其计算公式为:

$$\text{肥料养分真实利用率} = \frac{\text{作物养分吸收量}}{\text{施肥量} + \text{其他源养分量} + \text{土壤养分减少量}} \times 100\% \quad (10)$$

对于深入了解肥料去向的研究而言,不同来源的养分(包括不同时期施肥残留至土壤中的养分)其真实利用率和损失率可能有所不同,但区分不同来源养分的难度极大。对于指导施肥实践而言,各种养分的平均真实利用率和损失率已经足够让人们判别各种施肥和养分管理措施的效率了。此外,如果施肥外的其他养分源贡献很小,或者其他养分来源很难监测,其贡献量和损失量也难以明确区分的情况下,也可以将其他源养分量忽略不计,即采用式(8)来作为大多数条件下肥料养分真实利用率的计算公式是比较合适的。而式(10)作为氮肥真实利用率的计算公式可能更加合适,因为有许多研究证实一些区域氮沉降在农田氮素供应中有着相当的贡献^[23-26]。

3 肥料真实利用率计算举例

从式(8)来看,较准确地测算我国肥料养分的真实利用率,需要知道土壤中养分的变化量。对于短期的一季试验而言,土壤养分变化量的测定基于目前常规方法测算的误差会很大。在较准确土壤养分变化量测定方法建立之前,我国肥料养分真实利用率还需要通过借助长期定位试验来得到较准确的计算结果。

根据文献中的数据,中国科学院南京土壤研究所河南封丘潮土长期肥料定位试验从1989年至2004年,氮磷钾化肥(NPK)处理小麦、玉米的氮肥表观利用率平均为60%^[27]。而根据肥料养分真实利用率的计算公式,27季种植共投入化肥氮: $27 \times 150 = 4\,050 \text{ kg hm}^{-2}$,土壤残留氮为 589 kg hm^{-2} ,作物吸收氮为 $3\,195 \text{ kg hm}^{-2}$,不考虑其他氮投入的情况下,已经消耗的化肥氮的真实利用率计算结果为 $3\,195 / (4\,050 - 589) \times 100\% = 92.3\%$ 。假设氮磷钾处理在此期间与不施氮的磷钾处理(PK)从其他途径(非施肥)获得了同等的氮量 890 kg hm^{-2} ^[27],则NPK处理氮肥的真实利用率为 $3\,195 / (4\,050 + 890 - 589) \times 100\% = 73.4\%$ (实为氮素利用率,但假设进入土壤的其他氮源与氮肥损失率相同,则氮肥利用率等同于氮素利用率)。由氮肥真实利用率

可以判断出无论是施氮肥还是通过其他途径(生物固氮、氮沉降、地下水氮贡献)进入土壤中的氮素最终有26.6%被损失掉了。如果NPK其他途径获得的氮素低于PK处理(通常土壤缺氮时,会激发土壤中的生物固氮以及地下水中氮的向上迁移),则该试验的氮肥利用率会高于73.4%,但最高不超过92.3%。因而氮肥真实利用率的计算结果受其他源氮量的影响很大。

同样对该长期定位的钾肥真实利用率进行计算^[28],1989—2005年16年间,NPK处理作物累计吸收钾 $3\,471 \text{ kg hm}^{-2}$,累计施钾肥 $3\,984 \text{ kg hm}^{-2}$,耕层土壤钾残留约为 462 kg hm^{-2} ,其他钾素来源忽略不计,则钾肥的真实利用率为: $3\,471 / (3\,984 - 462) \times 100\% = 98.6\%$,仅有1.4%被损失掉了(可能进入亚耕层)。而根据常规的方法计算出的钾肥利用率平均仅为 $(3\,471 - 2352) / 3\,984 \times 100\% = 28.1\%$ 。这样的利用率与报道的我国钾肥平均利用率30%非常接近^[2],但远低于钾肥的真实利用率,从钾肥的真实利用率来看,NPK处理钾肥资源是非常高效的处理,在该作物种植制度和产量水平下已经接近最理想的肥料利用率水平。但根据常规的钾肥表观利用率却无法判断28.1%的表观利用率是低了,还是已经比较理想了,也无法计算出钾肥的损失率是多少。

此外对于一些长期施肥量、产量比较稳定一致,土壤肥力基本达到平衡的农田(即土壤养分没有消长),肥料真实利用率(如磷钾肥)即为:作物养分吸收量/施肥量 $\times 100\%$,损失率即为:(施肥量 - 作物养分吸收量)/施肥量 $\times 100\%$ 。氮肥因沉降和土壤固氮的贡献如能大致评估其贡献量,只需要在施肥量中加入其他源贡献的氮量即可计算出大致的氮肥真实利用率和损失率,其结果对于评价当地肥料真实利用率和损失率,指导施肥措施的改进策略也有较好的参考作用。

4 肥料真实利用率的优点

肥料真实利用率的应用将会有以下几方面的优点:

(1)可以较准确地反映肥料养分的真实利用率和损失率。肥料养分真实利用率的结果将会比较稳定可靠,其结果无论是一季还是多季,一年还是多年不会有太大的波动,肥料真实利用率的短期测算结果和长期测算结果体现的是个体和群体的差

异,在一定的土壤作物系统中会是比较稳定的。其结果与无肥区无关,仅与被调研田块土壤保肥性能以及影响养分损失率的施肥管理措施密切相关。

(2)可以为测算我国肥料养分损失率提供另外的计算途径。我国肥料养分损失率目前没有可靠的数据,不仅化肥,有机肥、秸秆养分、肥沃土壤固有养分损失率方面的数据尤其缺乏,一般都是通过径流和淋溶试验的数据来进行估算。如果能够较准确地测定土壤养分的变化,就可以较准确地测算我国各种养分的损失率。在测定各种途径养分直接损失量比较困难的情况下,未来发展准确测定土壤养分变化的方法,结合多年定位试验来测算肥料养分损失率不失为一种更好的方法。

(3)可为各种施肥措施是否高效提供有效的评价指标。追求最高肥料真实利用率,减少损失率是所有施肥措施的最终目标之一。任何施肥措施除了增产增收外,还要让养分损失率降到最低。基于养分损失率可以准确地判断施肥对环境的负面效应,也可以判断土壤中影响养分损失的关键因素,并可以采取有效的策略来提高肥料养分真实利用率。

(4)可为肥料对粮食生产的巨大贡献提供直接的数据证据,采用新的方法计算的肥料真实利用率,可清楚地反映出肥料养分被植物吸收利用的比例。土壤中的养分除氮肥可小部分通过生物固氮和沉降获得外,其他的矿质养分绝大多数是要通过施入的肥料来补充。可以说超出长期定位试验中不施肥处理产量的部分都是肥料对作物产量的贡献,而且不施肥处理中氮沉降也有来自肥料氮挥发的贡献,因而肥料对粮食产量的贡献甚至更多。目前肥料表观利用率的下降,未必能准确说明肥料在农业生产中的贡献在下降,因为这是土壤肥力培肥后该肥料利用率计算方法得到的必然结果,是符合报酬递减规律的。土壤培肥是以前肥料投入的残留,后续肥力的维持也要有肥料的投入。肥料的作用仍然非常重要,只是更要注重适度使用肥料,未来肥料的投入量需要更多地依照肥料养分真实利用率,以及植物体内单位养分的粮食生产率来确定。

(5)为施肥科学的深入提供了新的研究思路。肥料真实利用率的计算思路明确,只有消耗掉的部分,才可以对其真实利用率和损失率进行测算,因而可以较准确地反映各种来源总养分的真实利用率。如果采用示踪法,则可以分别研究农田不同来源养分的真实利用率及其损失率。不采用示踪法,

总养分的真实利用率则基本可代表主要养分源的真实利用率,因而可以较准确地测算以某种养分源,如以单一化肥、有机肥或秸秆还田或土壤固有养分为主要养分源时的养分真实利用率。能够对各种不同来源养分的真实利用率和损失率进行较为客观的测算,将会推动养分循环和高效利用的机理研究更加深入和明确。使人们对化学肥料源以外的养分对作物产量的贡献,以及对环境污染的影响也有较清楚的认识。基于这些认识基础上的高效施肥和养分管理措施会更加具有针对性和有可持续性。

5 基于肥料真实利用率的未来施肥科学研究与施肥策略

研究和测算我国典型区域及种植制度下肥料养分真实利用率及损失率非常重要,亟待加强这方面的研究。目前我国有许多的土壤肥力监测点及肥料长期定位试验,对这些位点的样品和数据进行重新分析即可获得不同区域肥料养分真实利用率和损失率。在基本了解我国肥料和土壤养分损失率的基础上,未来可设立我国肥料养分损失率的上限指标,用于规范和指导施肥实践。同时设立土壤养分损失率的指标,用于规范不同区域不同类型作物土壤养分肥力的培育上限。

未来需要加强土壤养分变化量测定方法的研究,建立不同土壤养分变化量测定的标准方法,这是准确计算肥料养分真实利用率的基础,同时也是准确测算短期(如一季或一年)肥料养分损失率的基础,而后者是所有施肥措施需要重点关注的指标。采用目前常规的土壤养分测定方法,如全量养分或速效养分测定方法来测定土壤养分的变化,其结果均未准确。例如土壤钾素变化采用常规的速效钾或缓效钾方法均不能准确测定^[29]。土壤全量养分由于基数过高,只有在土壤养分发生较大变化的情况下其反映的变化结果才较准确。如果施肥引起的土壤短期养分变化在 $100 \sim 200 \text{ mg kg}^{-1}$ 以内,则需要建立新的土壤养分变化专用的测定方法来解决。

需要加强养分损失率的影响因素及调控措施方面的研究,如养分损失率与土壤肥力水平、作物产量、施肥量、不同肥料种类等等多种因素之间的关系研究,用于指导施肥实践。

作物体内养分利用效率方面需要提高养分的

生理效率。与肥料养分利用率类似,我国不宜采用基于肥料施入量的各种肥料生理利用率的算法,而应该是基于吸收的养分量,或相应养分损失量而计算出来的生理利用率较为合适。由于我国高强度种植条件下,与土壤已有的养分相比,新施入的肥料养分占比较高,所有的基于当季施肥量计算出来的效率均会较施肥占总养分供应比例较低的发达国家的效率低^[30]。但对应于同样的作物产量、作物养分吸收量或养分损失量作物体内的生理效率差异可能没有那么大。因而无论是肥料偏生产力(PFP)、肥料农学效率(AE)还是肥料生理利用率(PE)均没有基于消耗的总养分的偏生产力、养分农学效率和养分生理利用率更加客观。提高基于总消耗养分的各种生理效率,既需要从减少养分的损失入手,又需要提高作物吸收的养分在作物体内的利用效率。而后者主要是防止养分的奢侈吸收,尤其是不能归还农田的收获物部分养分的奢侈吸收。作物吸收单位养分获得的经济产量则是一个较好的指标,正如徐富贤等提出的将氮素稻谷生产效率(稻谷产量/成熟期地上部植株吸氮总量)作为水稻氮素利用评价指标,较其他指标会有更多的优势^[31]。

未来的农田高效施肥策略,一方面要促进粮食优质高产稳产,另一方面要尽可能地提高肥料养分真实利用率,也就是减少养分的损失率。

要尽可能地提高土壤保肥能力,如适度增加有机质可增强土壤对氮肥的固定能力^[32-33],一些土壤调理剂也会有类似的功能^[34]。土壤对各种养分的固定能力越高,养分损失率就会越小,肥料施入土壤后养分的缓冲性能和持久能力就会越强。用常规方法计算获得的表观利用率可能会越低,但肥料养分的真实利用率只会更高,如氮磷钾肥料中的磷肥,以及各种较肥沃土壤因不施肥对照处理养分充足作物生长较好,表观利用率也较不保肥的土壤低。这也是养分真实利用率较表观利用率能正确指导施肥实践的实例。

在满足作物优质高产高效的前提下,需要根据土壤保肥能力和肥料养分损失率来确定相应的施肥量和施肥策略。如果土壤对某种肥料养分的固定能力很强,损失率很低,该土壤相应养分的施用可在养分不足时一次补充到适量或足量的水平(防止收获部位的奢侈吸收即可),以后每季根据养分盈亏平衡,适量补充即可。如多数土壤中的磷肥,以及北方径流淋溶不太显著,固钾能力较强土壤上

的钾肥均可采用这种策略。而在保肥能力中等或较差的土壤上,为了保持作物的产量,施肥量接近每季作物种植消耗的养分量即可。在轮作制的情况下,由于轮作作物对养分需求量存在差异,养分分配应向需求较高的作物倾斜,周年总养分补充与消耗大致平衡即可。对于保肥能力极差、土壤基础肥力也很差的土壤(或者是某种养分如氮素),不仅要考虑补充作物相应产量消耗的养分量,还要考虑施肥方法的优化。如果施肥方法不当,还要更高的产量,必然会带来肥料养分的过量投入和损失严重,具体会表现为施肥量远超作物吸收带走的养分量,而且会使土壤肥力水平过高。因而我国多数作物施肥是否恰当高效,只需要比较一下施肥量与作物收获带走的养分量的关系即可。高效的施肥策略是在高产的条件下,保证施肥量与作物带走养分量的大致平衡(不导致土壤养分库消耗太多,也不导致土壤养分库积累过高)。因而当前我国主要农作物的施肥量并不需要测土配方施肥来确定,只需要根据作物相应产量的养分消耗量来定即可。而且施肥不仅要补充氮磷钾养分,还要包括相应土壤含量不是特别丰富的那些中微量元素。

目前我国一些农作物单产很高,养分的需求量也较高,原本相对较低产时还算肥沃的土壤相对于高产作物也可能显得较为贫瘠,因而施肥量可能会远超作物生长需要的养分量,损失量也可能较高。针对这种情况,既要控制土壤原有养分的损失率,又要控制施入肥料的损失率。土壤原有养分的损失率只能依靠降低基础肥力来实现,在基础肥力较低条件下,让施入的肥料尽可能地被作物高效吸收,实现这一目标只能依赖于未来根区施肥技术的开发和应用^[35]。

参 考 文 献

- [1] 陈同斌,曾希柏,胡清秀. 中国化肥利用率的区域分异. 地理学报, 2002, 57(5): 531—538. Chen T B, Zeng X B, Hu Q X. Utilization efficiency of chemical fertilizers among different counties of China (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2002, 57(5): 531—538
- [2] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45(5): 915—924. Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915—924
- [3] 单玉华,封克. 氮肥利用率测定方法中几个问题的探讨. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(4): 425—428. Shan Y H, Feng K. Discussion on problems in fertilizer N recovery estimation (In

- Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4 (4): 425—428
- [4] 巨晓棠,张福锁. 关于氮肥利用率的思考. *生态环境*, 2003, 12 (2): 192—197. Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2003, 12 (2): 192—197
- [5] 田昌玉,左余宝,赵秉强,等. 解释与改进差减法氮肥利用率的计算方法. *土壤通报*, 2010, 41 (5): 1257—1261. Tian C Y, Zuo Y B, Zhao B Q, et al. Interpreting and upswing of the subtraction calculating method for apparent recovery efficiency of applied nitrogen (REN) (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41 (5): 1257—1261
- [6] 田昌玉,林治安,左余宝,等. 氮肥利用率计算方法评述. *土壤通报*, 2011, 42 (6): 1530—1536. Tian C Y, Lin Z A, Zuo Y B, et al. Review on several concepts on fertilizer nitrogen recovery rate and its calculation (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42 (6): 1530—1536
- [7] 沈善敏. 关于肥料利用率的猜想. *应用生态学报*, 2005, 16 (5): 781—782. Shen S M. A conjecture on the fertilizer recovery measurement by field experiment (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (5): 781—782
- [8] 宇万太,周桦,马强,等. 氮肥施用对作物吸收土壤氮的影响——兼论作物氮肥利用率. *土壤学报*, 2010, 47 (1): 90—96. Yu W T, Zhou H, Ma Q, et al. Effect of N fertilizer on uptake of soil N by crops with special discussion on fertilizer nitrogen recovery rate (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (1): 90—96
- [9] 侯彦林. 肥效评价的生态平衡施肥理论体系、指标体系及其实证. *农业环境科学学报*, 2011, 30 (7): 1257—1266. Hou Y L. Theory system, index system of ecological balanced fertilization and demonstration for fertilizer efficiency evaluation (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30 (7): 1257—1266
- [10] 陈伦寿. 应正确看待化肥利用率. *磷肥与复肥*, 1996, 11 (4): 4—7. Chen L S. In a right view of fertilizer use efficiency (In Chinese). *Phosphate and Compound Fertilizer*, 1996, 11 (4): 4—7
- [11] 朱兆良. 农田生态系统中化肥的去向和氮素管理//朱兆良,文启孝. *中国土壤氮素*. 南京:江苏科学技术出版社, 1992: 228—245. Zhu Z L. Fertilizer fate and N management in agroecosystem//Zhu Z L, Wen Q X. *Nitrogen in soils of China* (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 228—245
- [12] 李云,张宁,邢文英. 冬小麦磷肥利用率主要影响因素的研究. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8 (4): 424—427. Li Y, Zhang N, Xing W Y. Major factors influencing phosphorus use efficiency of winter wheat (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8 (4): 424—427
- [13] 褚清河,强彦珍. 也谈中国主要粮食作物生产中中肥料利用率及其提高途径. *山西农业科学*, 2010, 38 (9): 3—8. Chu Q H, Qiang Y Z. Fertilizer use efficiency and the improving options in major crops in China (In Chinese). *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2010, 38 (9): 3—8
- [14] 巨晓棠,刘学军,邹国元,等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析. *中国农业科学*, 2002, 35 (12): 1493—1499. Ju X T, Liu X J, Zou G Y, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35 (12): 1493—1499
- [15] 张维理,林葆,李家康. 西欧发达国家提高化肥利用率的途径. *土壤肥料*, 1998 (5): 3—9. Zhang W L, Lin B, Li J K. Methods for Western European developed countries to improve chemical fertilizer use efficiency (In Chinese). *Soil and Fertilizer*, 1998 (5): 3—9
- [16] 朱东方,何建芳,陈明良. 从世界化肥结构动态看我国化肥行业发展现状. *化肥工业*, 2011, 38 (6): 1—6, 38. Zhu D F, He J F, Chen M L. Present status of growth of domestic chemical fertilizer industry from view point of trend in world chemical fertilizer structure (In Chinese). *Fertilizer Industry*, 2011, 38 (6): 1—6, 38
- [17] 俞海,黄季焜, Rozelle S, 等. 中国东部地区耕地土壤肥力变化趋势研究. *地理研究*, 2003, 22 (3): 380—388. Yu H, Huang J K, Rozelle S, et al. Soil fertility changes of cultivated land in Eastern China (In Chinese). *Geographical Research*, 2003, 22 (3): 380—388
- [18] 张桃林,潘剑君,刘绍贵,等. 集约农业利用下红壤地区土壤肥力与环境质量变化及调控——江西省南昌市郊区和余江县案例研究. *土壤学报*, 2007, 44 (4): 584—591. Zhang T L, Pan J J, Liu S G, et al. Changes in soil fertility and environmental quality in red soil region under intensive agricultural use and their control—A case study of the suburbs of Nanchang City and Yujiang County in Jiangxi Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (4): 584—591
- [19] 胡建利,王德建,孙瑞娟,等. 长江下游典型地区农田土壤肥力变化——以常熟市为例. *土壤学报*, 2008, 45 (6): 1087—1094. Hu J L, Wang D J, Sun R J, et al. Variation of soil fertility of farmlands in typical regions in the lower-reaches of the Yangtze River — A case study of Changshu County (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (6): 1087—1094
- [20] 徐志强. 辽宁省耕地土壤肥力状况及变化趋势. *辽宁农业科学*, 2012 (2): 29—33. Xu Z Q. Cropland fertility status and its changing trend of Liaoning Province (In Chinese). *Liaoning Agricultural Sciences*, 2012 (2): 29—33
- [21] 孙树荣,董文旭,胡春胜,等. 华北半干旱区农田土壤肥力变化及培肥管理对策——以山西忻府区为例. *中国农学通报*, 2012, 28 (27): 87—93. Sun S R, Dong W X, Hu C S, et al. Change in farmland soil fertility and nutrient management strategy in the semiarid regions of north China— As a case of Xinfu County of Shanxi Province (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28 (27): 87—93
- [22] Sebilo M, Mayer B, Nicolardot B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. *Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America*, 2013, 110 (45): 18185—18189
- [23] 苏成国,尹斌,朱兆良,等. 农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应. *土壤*, 2005, 37 (2): 113—120. Su C G, Yin B, Zhu Z L, et al. Gaseous loss of nitrogen from fields and wet

- deposition of atmospheric nitrogen and their environmental effects (In Chinese). *Soils*, 2005, 37(2): 113—120
- [24] 王体健, 刘倩, 赵恒, 等. 江西红壤地区农田生态系统大气氮沉降通量的研究. *土壤学报*, 2008, 45(2): 280—287. Wang T J, Liu Q, Zhao H, et al. Atmospheric nitrogen deposition in agro-ecosystem in red soil region of Jiangxi Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(2): 280—287
- [25] 崔键, 周静, 杨浩, 等. 大气氮沉降向典型红壤区农田生态系统定量输入研究. *环境科学*, 2009, 30(8): 2221—2226. Cui J, Zhou J, Yang H, et al. Quantitative input of atmospheric nitrogen to an agro-ecosystem in a typical red soil region (In Chinese). *Environmental Science*, 2009, 30(8): 2221—2226
- [26] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 2013, 494: 459—462
- [27] 蔡祖聪, 钦绳武. 华北潮土长期试验中的作物产量、氮肥利用率及其环境效应. *土壤学报*, 2006, 43(6): 885—891. Cai Z C, Qin S W. Crop yield, N use efficiency and environmental impact of a long-term fertilization experiment in fluvo aquic soil in North China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6): 885—891
- [28] 孙海霞, 王火焰, 周健民, 等. 长期定位试验土壤钾素肥力变化及其对不同测钾方法的响应. *土壤*, 2009, 41(2): 212—217. Sun H X, Wang H Y, Zhou J M, et al. Change of soil potassium fertility in long-term located field experiment and comparison of different methods to measure potassium change in soil (In Chinese). *Soils*, 2009, 41(2): 212—217
- [29] 王火焰, 朱树国, 周健民, 等. 常规方法准确测定土壤有效钾素变化可能性的探讨. *土壤通报*, 2006, 37(5): 954—960. Wang H Y, Zhu S G, Zhou J M, et al. A discussion on the possibility of accurate quantifying the variation of available K in the soils by common methods (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(5): 954—960
- [30] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1095—1103. Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095—1103
- [31] 徐富贤, 熊洪, 谢戎, 等. 水稻氮素利用效率的研究进展及其动向. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1215—1225. Xu F X, Xiong H, Xie R, et al. Advance of rice fertilizer-nitrogen use efficiency (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1215—1225
- [32] 陈义, 吴春艳, 唐旭, 等. 稻-麦轮作体系中有机氮与无机氮的去向研究. *中国农业科学*, 2010, 43(4): 744—752. Chen Y, Wu C Y, Tang X, et al. Fate of nitrogen-15 from organic and inorganic sources in rice-wheat rotation cropping system (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(4): 744—752
- [33] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 526—535. Pan J L, Dai W A, Shang Z H, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 526—535
- [34] 孙蓟锋, 王旭. 土壤调理剂的研究和应用进展. *中国土壤与肥料*, 2013(1): 1—7. Sun J F, Wang X. Advance in research and application of soil conditioner (In Chinese). *Chinese Soil and Fertilizer*, 2013(1): 1—7
- [35] 王火焰, 周健民. 根区施肥——提高肥料养分利用率和减少面源污染的关键和必需措施. *土壤*, 2013, 45(5): 785—790. Wang H Y, Zhou J M. Root-zone fertilization—A key approach to improve fertilizer use efficiency and reduce non-point pollution from the cropland (In Chinese). *Soils*, 2013, 45(5): 785—790

CALCULATION OF REAL FERTILIZER USE EFFICIENCY AND DISCUSSION ON FERTILIZATION STRATEGIES

Wang Huoyan Zhou Jianmin

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Apparent recovery efficiency (ARE) of applied fertilizers has been commonly calculated as fertilizer use efficiency in China and reported low in a number of literatures. In this paper, a new method is proposed to calculate real nutrient use efficiency (RNUE), which refers to ratio of the nutrients absorbed by plants to the nutrients depleted from the soil. The depleted nutrients may come from the nutrients originally in the soil or from the applied fertilizer. The equation for RNUE calculation could be shown as: Nutrients absorbed by plants / (nutrients from fertilization-negative balance of the soil nutrient pool). RNUE could also be calculated as the difference between 100% and nutrients loss rate. The nutrients not used by plants but depleted from the topsoil are considered lost, while the nutrients remaining in the topsoil are not. Since both the nutrients remaining in soil nutrient pool and the nutrients used by plants come mainly from fertilization, the RNUE can be suggested as the real fertilizer use efficiency (RFUE). Based on the proposed method, the RFUE will be much higher than the ARE reported in China. The loss rate of fertilizer could also be calculated if RFUE is known since

their sum is 100%. Thus calculation of RFUE could help us understand real contribution and real loss of the fertilizer in agriculture production and work out proper fertilization strategies, as well, in light of fertilizer loss rate and soil nutrient holding capacity. A proper right fertilization technique should aim to reduce loss rate of the fertilizer, instead of achieving high ARE since the meaning of high ARE is not so clear even though it has been widely used in China. Fertilizer recommendation for main field crops will not depend so much on soil testing, but rather on the knowledge of the consumption and loss rate of nutrients of the soil-crop systems in future.

Key words Fertilizer use efficiency; Loss rate; Fertilization technique; Nitrogen fertilizer; Phosphorus fertilizer; Potassium fertilizer

(责任编辑:陈德明)