肥料养分利用率的计算、现状和趋势

Paul Fixen, Frank Brentrup, Tom Bruulsema, Fernando Garcia, Rob Norton, Shamie Zingore
刘迎夏 译　赵蓉蓉 校
（国际植物营养研究所北京办事处）

摘要：评价作物生产体系时，养分利用率（NUE）是一个极为重要的概念，受施肥管理、土壤－水分管理和作物－水分管理的影响很大。施用养分的目标是通过提供经济合理的养分需求，同时使田间养分流失最小化，以提高作物种植体系的整体表现。通过养分利用率评价种植体系对养分利用的部分作用，但不是全部的效果。因此，整个作物体系优化的目标必须同时包括生产力和养分利用率。本章中，我们提出了粮食作物采用推荐的管理措施条件下特定的养分利用率；然而，这些养分利用率基准最好设置在适宜的种植制度、土壤、温度和管理环境条件下。全球养分利用率的时间变化趋势因地区而异。对于氮、磷和钾而言，偏因子养分平衡（作物收获所移走养分与施肥中所含养分之比）和偏生产力（单位施用某种养分的作物产量）在非洲、北美、欧洲和欧盟 15 国有上升趋势，而在拉丁美洲、印度和中国则有下降趋势。虽然基于时间因子可将全球区域分为两组，但是每组趋势背后仍存在很大的可变性因素。许多管理方式和环境因素（包括植物水分状态）的交互作用影响养分利用率。同时，植物养分状况也以类似的方式显著影响水分利用率。这些关系在本书中其他章节有详细介绍。

养分利用率的定义和重要性

满足社会对食物的需求是全球性的挑战，最近的调查报告显示：全球作物需求自 2005–2050 年将增加 100–110%（Tilman 等，2011）。据估计，2000–2050 年，世界粮食需求将增加 60%（联合国粮农组织，2009），其他研究预测粮食需求将在 30 年内翻一番（Glenn 等，2008），相当于每年的增长率维持在 2.4% 以上。持续满足粮食需求是一项巨大的挑战，尤其是与历来粮食产量趋势相比，近半个世纪以来一直呈线性增加（联合国粮农组织，2009）。如何提高养分利用率和水分利用率（WUE）已被列为当今最重要和艰巨的研究课题（Thompson，2012）。

养分利用率是评估作物生产体系的一个非常重要的概念，很大程度上受肥料管理、土壤－水和植物－水关系的影响。当农田管理者努力满足社会对食物、纤维和燃料日益增长的需求时，养分利用率表征了从作物种植体系损失到环境中的养分的潜在可能性。测定养分利用率不是测定养分损失，因为养分可能被固定在土壤中，所以养分利用率相对较低的种植体系不一定对环境有害，相反地，养分利用率较高的体系不一定对环境无害。我们将在本章后面提供这些情况的例子，来阐明为什么必须在一个已知的环境中解释养分利用率的测定。

可持续养分管理必须快速有效地实现预期的经济、社会和环境效益。随着养分成本的增加，更加突出养分高效利用的重要性，然而越高产的作物移走养分量越大，这就意味着需要投入更多的养分，系统中就有养分损失的风险。以可承受的价格为社会提供足够数量和质量的食物，就要求生产成本保持在较低水平，同时需要提高生产力以满足预期要求。因此，生产力和养分利用率都必须增加。这些因素都刺激肥料企业努力推广肥料最佳管理措施的方法，例如 4R 养分管理策略，强调施肥应该选用正确的肥料品种、正确的施肥量、正确的位置和正确的时间（IPNI，2012b），或者肥料产品管理计划（Fertilizers Europe，2011）。这些方法考虑了经济、社会和环境多重因素，对可持续农业系统至关重要，因此为特定的养分利用率指标提供了合适的背景条件。

养分利用率表面上是一个简单的术语。然而，由于潜在养分来源（土壤、肥料、粪便、大气（大气沉降）等）的多样性以及影响作物养分需求的多种因素（作物管理、遗传学、天气），有意义并且具有实用性地定义养分利用率这一概念相当复杂。同时，各种不同的养分利用率表达形式也进一步限定了这一概念的表达，因为那些表达式受限于数据的可用性，而不是能够做出合理解释的数据。

养分利用和养分利用率的目标

养分利用的目标是通过为作物提供经济上的最佳养分来增加种植体系的整体性能，并通过提升土壤肥力或者其他土壤质量因子使田间养分损失最小化，从而支持农业可持续性发展。养分利用率仅体现了种植体系的部分性能，

但不是所有性能（Mikkelsen 等，2012）。提高养分利用率最有意义的方面就是提升种植体系的整体性能。

因此，在不降低生产力或不影响未来生产潜力增加的前提下提高养分利用率的管理措施可能是最有意义的。如果单一追求改善养分利用率降低了当前或未来生产力，那么对脆弱的土地的种植需求可能会增加。脆弱的土地通常是养分利用率较低的系统，对水分的利用率也较低。与此同时，随着养分施用量增加至最优，作物生产力会持续增加，但增速下降，养分利用率通常也会下降（Barbieri 等，2008）。养分利用率下降的程度取决于肥料种类、施肥时间、施肥位置因素、其他栽培技术以及土壤和气候条件。

养分利用率表达式的预期用途和可用数据

最恰当的养分利用率表达方式取决于被提问的问题，并且通常取决于所研究的时空尺度上可靠数据的有效性。对植物育种者或遗传学家来说，研究的尺度可能小到个体植株；而就政策目的、教育家或市场营销人员而言，研究的尺度可能大至一个国家或多个国家。研究的话题可能集中于单季或几十年的种植体系中单一的管理措施或产品。可用的数据可能相对完整，涉及密集型研究项目中所有主要的养分输入和特定的养分损失，或仅限于养分管理者通常可获得的数据。

众多的表达式和测定方法已经进化到可以满足不同研究背景的需求，并且通常都被称为“养分利用率”。为了更恰当地解释养分利用率，必须说明所使用的特定方法。

养分利用率的常用测定方法及其应用

Dobermann（2007）撰写了一篇关于测定和计算养分利用率的优秀综述。表 1 总结了 Dobermann 定义的常用养分利用率术语，以及它们的应用与局限。同时列出了每个术语主要解决的问题和典型用法。

偏生产力（PFP）是一个简单地描述生产效率的表达式，以单位施用某种养分的作物产量来计算。有养分输入和产量记录的农场都可以很容易地算出偏生产力，如果养分输入量和作物产量的统计数据是可靠且可用的，地区和国家水平的偏生产力也很容易可以算出来。然而，由于作物所需的养分和水分不同，所以偏生产力的数值随不同种植体系的作物而不同。如果基于作物鲜重，那么单作和轮作之间的对比尤其困难，因为这些差异很大程度上取决于作物含水量（例如，马铃薯和谷物）。因此，种植体系不同的地区很难用这个指标比较。

农学效率（AE）以单位施用某种养分的作物籽粒产量增量来计算。它更准确地反映了施肥对生产的直接影响，并且直接与经济收益相关。农学效率的计算需要不施肥情况下的产量信息，因此只有在农场实施了不施肥处理的田块时才能得到。如果使用一年的试验数据，而不是长期试验数据来计算，那么施入肥料的农学效率通常会被低估，因为施肥对下茬作物有残留影响。预估肥料对作物产量的长期贡献需要长期试验。

偏因子养分平衡（PNB）是养分回收率最简单的表达形式，为单位养分输入与养分移走的比值（即“移走和利

表 1 养分利用率的常用术语及其应用（Dobermann, 2007 之后）

术语	计算公式 *	解决的问题	典型应用
偏生产力	PFP=Y/F	相对于养分输入来说，该种植体系的生产效率？	衡量趋势的一个长期指标。
农学效率 **	$AE=(Y-Y_0)/F$	通过养分输入，生产力提高了多少？	作为施入养分对生产力影响的短期指标。也用作基于缺素区产量养分推荐的输入数据。
偏因子养分平衡	$PNB=U_H/F$	施入养分与从系统移走养分的关系？	衡量趋势的一个长期指标；结合土壤肥力信息时更有用。
表观回收率 **	$RE=(U-U_0)/F$	施入养分中作物吸收了多少？	作为种植体系养分损失潜力和获取管理措施效率的指标。
内在利用效率	IE=Y/U	植物将从所有来源获得的养分转化为经济产量（籽粒等等）的能力？	在育种项目中评估基因型；粮食作物中氮的内在利用效率值通常在 30–90，55–65 之间更佳。
生理效率 **	$PE=(Y-Y_0)/(U-U_0)$	植物将从施入肥料品种获得的养分转化为经济产量的能力？	研究评估了栽培品种与其他栽培技术之间的养分生理效率；值通常在 40–60 之间。

*Y= 施肥情况下作物收获的产量；Y_0= 未施肥情况下的产量；F= 养分施入量；U_H= 作物收获部分的养分含量；U= 施肥条件下作物地上部生物量中养分总吸收量；U_0= 未施肥条件下作物地上部生物量中养分吸收量；表中未列出单位，因为这些表达式都是以质量为基础的比率，所以它们的标准形式都是无单位的。磷和钾要么以元素表示（常见于科学文献中），要么以氧化物表示，如 P_2O_5 或 K_2O（常见于工业）。

** 由于施入养分的残留效应，短期缺素区经常导致长期的农学效率、表观回收率或生理效率被低估。

用”之比）。也有少数报道为“输出减去输入”。粮食生产者可以在地区或国家水平测定或预估偏因子养分平衡。假设偏因子养分平衡接近 1，表明土壤肥力维持在一个稳定状态。然而，由于偏因子养分平衡计算的是部分平衡，养分移走过程如侵蚀和淋洗过程中的养分不包含在内，所以把偏因子养分平衡 等于 1 作为衡量土壤肥力可持续性的指标可能会令人误解，尤其是在基础土壤肥力较低、投入与产出低的地区，如撒哈拉以南的非洲地区。而且，偏因子养分平衡的计算中也很少包括所有养分输入，因此术语中以“偏因子”作为修订。除了肥料外，生物氮固定、可回收的粪肥养分、生物污泥、灌溉水和大气都是养分的来源。偏因子养分平衡的数值远低于 1，说明养分输入远超过了养分移走，表明超出移走部分的养分损失可以避免，因此需要提高养分利用率（Snyder and Bruulsema，2007）；然而，可获取的数值取决于特定的种植体系和土壤类型。偏因子养分平衡大于 1 说明作物收获移走的养分比施入的肥料和粪肥还多，相当于养分的“土壤矿化”。如果已知土壤中的有效养分含量高于推荐值，可能需要分析上述的情况。然而，在土壤养分浓度处于或低于推荐值，偏因子养分平衡大于 1 的情况一定是不可持续的（Brentrup and Palliere，2010）。由于资金流和市场状况的影响，个体农场的偏因子养分平衡在短期内可能会出现大幅波动，尤其是 P 和 K。因此，对多年偏因子养分平衡的长期评估更为有用。

表观养分回收率（RE）是养分利用率表达式中较为复杂的一种，通常定义为施用单位某种养分的作物地上部养分吸收量增量，通常是科学家研究作物养分反应时首选的养分利用率表达式。像农学效率一样，只有在田块进行过缺素处理的情况下才能测量，除此之外，还需要测定作物的养分浓度。像农学效率一样，如果只计算一年的数据时，往往会低估长期的表观养分回收率。

养分内在效率（IE）被定义为地上部吸收单位养分所生产的籽粒产量。它随基因型、环境和管理措施的变化而变化。养分内在效率高表明养分缺乏。养分内在效率低表明由于其他胁迫（其他养分缺乏、干旱胁迫、高温胁迫、矿物毒性、虫害等）导致内部养分转化性较差。

生理效率（PE）被定义植物施用某种养分所生产的籽粒产量增量与地上部养分吸收增量的关系。像农学效率和表观养分回收率一样，测定生理效率需要缺素处理的田块，还需要测定作物的养分浓度，生理效率广泛应用于科学研究。

养分利用率的应用和基准

多数情况下，评估任何一种管理措施时，使用多种养分利用率很有帮助，能更好地了解和量化作物对施入养分的反应。各种不同的指标应同时使用。通常，评算的农学效率最高时，施肥量也最低，这与偏因子养分平衡高有关。最近的研究发现，通过基因修饰如磷饥饿耐受基因有助于水稻获取更多土壤磷（IRRI，2012），将增加收获时作物的偏生产力和磷移走量。这样的发现对农民具有很大的短期价值，可以在土壤磷素较低的水平下应用。但是，如果施入的磷小于移走水平，则会发生土壤磷素耗竭（PNB 大于 1）。因此，即使有这种遗传变化，为了系统的可持续性也必须获得恰当的偏因子养分平衡。尽管每个养分利用率概念都可以用于描述施肥效率，但对养分管理的完整分析还应包括其他的养分利用率概念，粮食产量、施肥量和当地的土壤肥力（Olk 等，1999）。例如，在土壤速效

表 2 粮食作物（主要指玉米、水稻和小麦）常规的养分利用率水平（采用推荐的管理方法时，当前土壤速效磷和有效钾含量在推荐范围内）

测定项	氮	磷（P_2O_5）	K（K_2O）	解释
偏生产力（千克籽粒 / 千克养分）	40–90	100–250 （45–110）	75–200 （60–165）	较低水平表明土壤反应较低或养分施用过量，而较高水平表明养分供应可能限制了生产力。
农学效率 *（千克籽粒 / 千克养分）	15–30	15–40 （7–15）	8–20 （7–15）	较低水平表明变化管理措施可以增加作物反应或降低输入成本。
回收率 *（%）	40–65	15–25	30–50	较低水平表明变化管理措施可以提高效率或养分在土壤中的累积。
偏因子养分平衡 ** （千克养分 / 千克养分）	0.7–0.9	0.7–0.9	0.7–0.9	较低水平表明变化管理措施可以提高效率或增加土壤肥力。较高水平表明土壤肥力可能有所下降。

* 基于第一年的反应。

** 输入包括肥料、施入的粪肥养分和来自灌溉水的养分。

*** 作者根据已发表文献中的报告值选择范围，并遵循该地区推荐措施的常规水平进行最佳判断。应尽可能根据当地的研究和经验进行相应的调整。

磷低的情况下，施磷量低的土壤中磷的农学效率可能非常高；然而，在这种条件下，磷素的偏因子养分平衡可能远高于 1，耗竭了本身已经很低的土壤磷库，如图 8 所示。在这种情况下，农学效率较高的地块磷肥施用量低，尽管比不施用磷肥要好，但仍然不是最佳管理措施（BMP）。

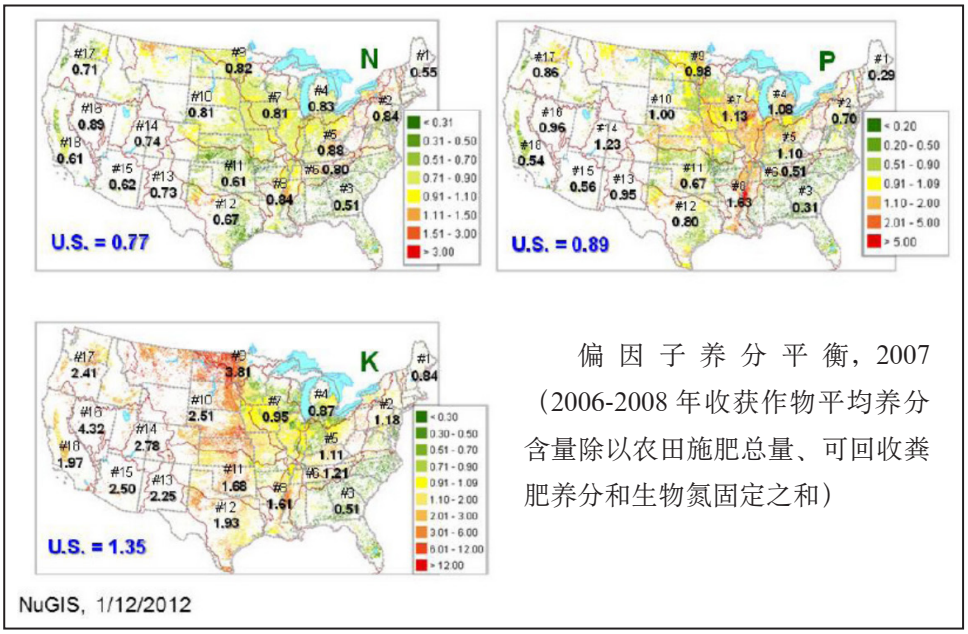
本章将阐述主要的养分利用率测定和趋势存在的巨大变异及其主要影响因素。通过确定研究领域相关的养分利用率的测定项目、为这些测定项目收集数据，进而为评价收集的数据建立基准，来促进养分管理方法的改善。基准应设置在适当的种植体系、土壤、气候和管理环境下，并充分了解测定养分利用率的计算方法。然而，本章的重点是为解释养分利用率测定提供通用的准则。表 2 为粮食作物氮、磷和钾最常见的养分利用率测定项提供广义的指导准则。这些基准应该基于当地的研究和经验水平做出适当的调整。

不同尺度下的养分利用率

表 1 中的养分利用率术语可以预估全球尺度以及个别小范围单一田块的养分利用率。延展性是养分利用率指标不可或缺的属性，因为它使当地的管理措施与较大地域尺度带来的影响之间的联系更加清晰。然而，评估特定地点的准确性和可靠性随尺度的增加而降低。在任何情况下，这些预估都取决于用于计算的数据质量。如偏生产力等简单的指标相比回收率和生理效率等复杂的指标更容易，以下是在不同尺度应用养分利用率术语的具体示例。

地区尺度

表 3 预估了全球各地区粮食作物的氮素偏生产力和偏因子养分平衡（按照施氮量从低到高的顺序）。地区间这两个效率的测定差异很大，在非洲和东欧 / 中亚施氮量最低的地区出现两个最高值。这些地区的平均产量最低，并且偏因子养分平衡值远大于 1，表明土壤中含有从有机质矿化而来的氮，并且该地区的种植体系是不可持续的（豆类轮作中产生了大量的氮素的影响除外，并且偏因子养分平衡或偏生产力值不考虑豆科作物固氮）。



偏因子养分平衡，2007（2006-2008 年收获作物平均养分含量除以农田施肥总量、可回收粪肥养分和生物氮固定之和）

图 1 美国流域地区的偏因子养分平衡（IPNI，2012a）

表 3 全球各地施氮作物的偏生产力和偏因子养分平衡及平均施氮量和作物产量

地区	施氮量（千克 / 公顷）	粮食作物（吨 / 公顷）	籽粒氮 *（千克 / 公顷）	偏生产力（千克籽粒 / 千克氮）	偏因子养分平衡（千克籽粒氮 / 千克氮）
撒哈拉以南非洲	9	1.1	17	122	1.8
东欧、中亚	25	2.1	32	84	1.3
大洋洲	48	1.9	29	40	0.59
拉丁美洲	55	2.9	44	53	0.79
南亚	58	2.4	36	41	0.62
东南亚	65	3.2	48	49	0.74
西亚、北非	68	2.3	35	34	0.51
亚洲东北部（日本、南韩）	89	6.1	92	69	1.03
北美	112	5.1	77	46	0.68
西欧	113	5.5	83	49	0.73
东亚（中国、越南、朝鲜人民共和国）	155	4.8	72	31	0.46
全球	70	3.1	47	44	0.66

* 假定粮食籽粒 15 千克氮 / 吨。

1999–2002/03 年间施氮量和粮食产量，Dobermann 和 Cassman2005 年报道。

表 3 中的值代表非常大区域的平均值，具有较大变异性。撒哈拉以南的非洲地区（SSA），平均偏因子养分平衡极高，国家间具有很大的差异性，通常东部数值较高，而大陆中部和西部数值较低（Smaling 等，1997）。我们也必须认识到撒哈拉以南的非洲地区不同国家之间农场偏因子养分平衡的高度变异性。表 3 的总体数据显示，可以获取良好资源的农场通常偏因子养分平衡值小于 1（养分输入超过移走），而资源量较少的农场则大于 1（Zingore 等，2007）。获取较少资源的农场通常更多地依赖豆科作物固氮，表 3 中没有体现这一效应。东亚是氮输入量最高的地区，而偏因子养分平衡（0.46）最低。这表明保持生产力的同时提高养分利用率的潜在可能性。在如此大尺度下，表 3 中其他地区之间的差异可能是由于一系列复杂因素引起的，包括作物轮作、土壤特性、气候、政府政策和管理强度。

一个国家偏因子养分平衡的区域差异说明了这一系列复杂因素对养分利用率的影响。例如，美国流域地区偏因子养分平衡的变化呈现出一定可预测的趋势（图 1）。图 1 中的偏因子养分平衡值没有表 3 中的 “偏”，因为图 1 中的偏因子养分平衡值包括氮固定和施用的粪肥养分。氮、磷和钾的偏因子养分平衡范围通常在美国东南部较低（3 区），由于该地区结构粗糙、土壤有机质含量较低，所以蓄水能力和阳离子交换能力非常低。该地区大多生产经济作物，其中多为养分利用率低的作物。另一个极端情况出现在美国的西半部，由于土壤基础钾素含量普遍较高，偏因子养分平衡水平极高，导致对钾肥没有反应。在解释区域尺度上养分利用率的数据时，需要考虑这些因素。

农场或田块尺度

偏生产力和偏因子养分平衡可为种植者提供有用信息，也可为有输入和输出记录的农场计算用。图 2 显示了巴西农场每公顷农田和每吨粮食的肥料用量趋势，并说明了农场尺度通常可用的数据。在这种情况下，尽管每公顷肥料用量增加，但随着农作物产量的增加，偏生产力也增加（图中为其倒数，每吨作物产量的氮磷钾用量千克）。种植体系农艺措施的改良可显著影响养分利用率，当增加养分量时，施肥量、作物产量和偏生产力也会同时增加（“可持续集约化”）。

偏生产力和偏因子养分平衡指标都不考虑土壤固有的养分供应；因此它们不能充分反映肥料提供养分的真实效率。农学效率、表观回收率和生理效率可以很好的估算施入养分的短期养分利用率，但是农场通常没有这些指标需要的数据。

传统上对照区或缺素区仅限于研究设置，但如果种植者有兴趣，也可以在农场设置。建立常年对照区（同一地区多年不施肥，这反映了施入养分对生产力和土壤质量的长期贡献）和年际对照区（可以评估单作对施用养分的影响）是有价值的。但由于低产和收获产品质量不一致的原因，对照区对种植者来说成本昂贵，所以这样的农场研究最好在合作组织中进行。是养分匮乏地区建立对照区重要的限制条件，如撒哈拉以南的非洲地区。此外，在整个产区进行农场研究结果的共享比单次观察的更有意义。

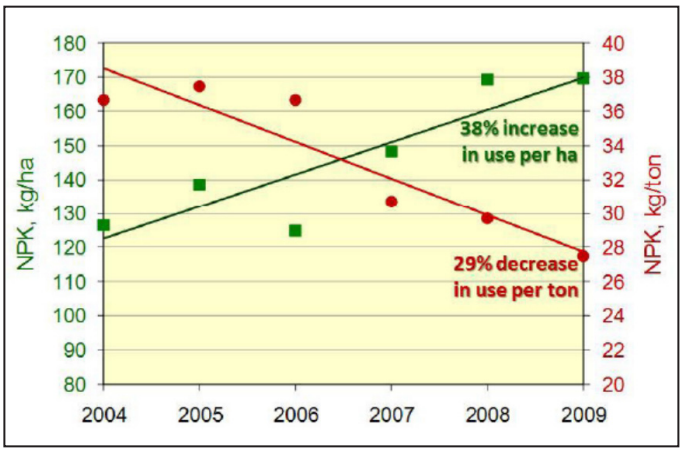


图 2 巴西马托格罗索州伊蒂基拉附近的农场，每公顷农田和每吨作物产量的肥料用量的变化（L.Prochnow，个人交流，2012）。

研究区域尺度

研究小区通常提供施肥和未施肥小区作物收获时养分吸收和移走的完整数据补充，可以计算所有常见的养分利用率（表 1）。由于每个术语解决不同的问题，且具有不同的解释，所以研究报告通常包括多个养分利用率表达式的测定（Dobermann，2007）。中国水稻、小麦和玉米等多个田间试验的养分利用率测定结果如表 4 所示，中国三大地区的小麦田间试验总结如表 5 所示。区域尺度上小麦数据显示，由于气候、土壤特性和种植体系的差异，同一国家地区间养分利用率存在巨大差异。

在相同措施下，从试验站研究小区估算的养分利用率值通常大于农民大田生产的养分利用率值（Cassman 等，2002；Dobermann，2007）。研究小区与整个大田之间肥料措施、耕作、播种、病虫害管理、灌溉和收获的规模不同导致了这些差异。

研究小区回收率的测定通常通过表 1 所述的差减法计算来完成。氮素回收率的另一种方法是使用 ^{15}N 同位素作为肥料中的示踪剂，以确定肥料中提供的养分被作物吸收

表 4 2002–2006 年中国田间试验平均产量反应和养分利用率（Jin，2012）

作物	养分	试验数	平均施肥量（千克 / 公顷）	增产率（%）	农学效率 AE（千克 / 千克）	回收率（%）
水稻	N	51	187	40	12	25
小麦	N	30	181	43	11	36
玉米	N	70	219	38	12	31
水稻	P	62	41	13	26	10
小麦	P	39	52	24	21	16
玉米	P	71	49	15	26	15
水稻	K	67	122	21	11	25
小麦	K	51	100	18	8	26
玉米	K	84	118	17	13	32

表 5 基于 2000–2008 年中国三大地区小麦试验最佳处理的养分利用率表达式对比（Liu 等，2011）

地区	养分	观测数 **	平均施肥量（千克 / 公顷）	偏生产力 ***（千克 / 千克）	农学效率 AE（千克 / 千克）	回收率（%）	偏生产力 PNB****（千克 / 千克）
华北 NC	N	122–210	199	38（518）	9.5	35.2	1.10
长江下游 LY	N	60–155	220	34（234）	11.3	48.1	0.81
西北 NW	N	13–34	169	37（108）	6.5	17.0	0.70
平均 Avg	N	195–363		36（860）	9.8	37.9	0.95（0.73）
华北 NC	P	46–137	56	142（506）	23.0	17.8	1.07
长江下游 LY	P	26–51	47	146（220）	18.4	25.9	0.91
西北 NW	P	11–40	47	142（108）	7.0	7.4	0.43
平均 Avg	P	83–223		143（834）	19.2	19.0	0.96（0.81）
华北 NC	K	70–374	111	71（481）	7.6	23.7	1.67
长江下游 LY	K	26–69	96	76（234）	8.3	34.2	1.73
西北 NW	K	14–77	70	66（102）	4.2	30.0	2.73
平均 Avg	K	110–517		72（817）	7.2	27.0	1.82（0.60）

* 华北 NC：温带气候，冬小麦 - 玉米年际轮作；长江下游 LY：温带、亚热带湿润气候，主要稻麦轮作；西北 NW：大陆性气候，春小麦连作体系；

** 农学效率 AE、回收率 RE 和偏因子养分平衡 PNB 观测数范围；

*** 括号中 PFP 的观测数；

**** 由籽粒和秸秆移走量除以施肥量计算，括号中只包括籽粒移走。中国平均 44% 的小麦秸秆养分还田。

的比例。这两种方法通常是相关的；然而，由于 ^{15}N 通过微生物介导的土壤过程循环，所以 ^{15}N 方法确定的回收率通常低于差减法估计（Cassman 等，2002）。在土壤中用示踪剂测定回收率通常比在植物中更有用，特别针对研究长期效应。Ladha 等人（2005）总结了几项研究的结果，其中 ^{15}N 用于估算五种后续作物的氮素回收率，报告范围为 5.7–7.1%，第一季除外。在第一个生长季，总回收率为 35–60%。

氮素养分利用率的现状和趋势

氮素养分利用率的现状

Ladha 等人（2005）对 93 项已发表研究小区的测定养分利用率进行了深入的综述（表 6）。该综述评价了玉米、小麦和水稻养分利用率表达式的主要趋势。玉米和水稻的偏生产力和农学效率一般高于小麦，至少部分原因是因为小麦籽粒含氮量较高。不同区域和作物的回收率值差异很大，第 10 个百分位数值为 0.2，第 90 个百分位数值为 0.9（籽粒加秸秆）。数值范围大多取决于研究中土壤、气候和管理条件的差异。55% 的总体平均回收率与其他发表的文献相吻合，Smil（1999）和 Sheldrick（2002）等人预估的全球回收率值分别为 50 和 57%，Ladha 等人（2005）总结了美国和加拿大的回收率值分别为 56%（Howarth 等，2002）和 52%（Janzen 等，2003）。

如前所述，生产领域中测定的养分利用率通常小于研究小区，如表 6。Cassman 等（2002）举例说，四个亚洲国家主要水稻产区农民施氮的平均回收率为 0.31（179 个农场），而田间特定管理（112 个农场）的回收率为 0.40，管理良

好的田间试验的回收率为 0.50–0.80。Balasubramanian 等（2004）报道，现行耕作方式下，粮食作物中氮素回收率为 0.17–0.33，研究小区为 0.25–0.49，研究小区最大值为 0.55–0.96。在印度，恶劣天气条件下，种植小麦的 23 个农场的回收率平均值为 0.18；而在良好天气条件下，21 个农场的平均回收率为 0.49（Cassman 等，2002）。

无论试验是在农场还是在试验站，高产粮食体系的农学效率往往比低产系统更高。这并不令人惊讶，因为高产作物养分需求较高，使其比低产作物更有可能利用超过未施肥土壤的养分供应能力。这增加了施肥作物与未施肥作物的产量差异。此外，具有较快养分积累速率的作物具备降低产区养分损失的潜力。如图 3 数据集，是由世界各地的粮食养分利用率的总结组成，氮素农学效率的变异性中大约三分之一可以简单地由粮食平均产量来解释。数据集的产量变化是由于气候、种植体系、土壤特性和系统管理等众多因素造成的。

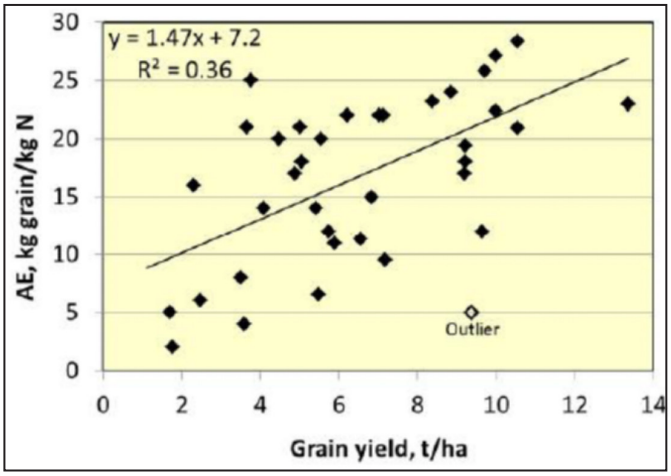


图 3 农场和试验站试验的养分利用率总结中施肥处理的产量水平对特定氮素农学效率的影响（n=37；数据来源：Dobermann，2007；Ladha 等，2005；Lester 等， 2010；Liu 等，2011；Iowa State U. Agronomy Extension，2011；Norton，R.M.，根据澳大利亚长期 NxP 试验的数据 –Dahlen，个人交流，2011；Singh 等，2007）。

氮素养分利用率的趋势

不同区域和种植体系间的养分利用率存在相当大的变异性，时间趋势上也有很大变异性。农业密集型国家 – 如美国、德国、英国和日本 – 养分利用率增加是基于不断增加的作物产量和长期保持不变甚至有所下降氮用量（Dobermann 和 Cassman，2004）。然而，这些国家

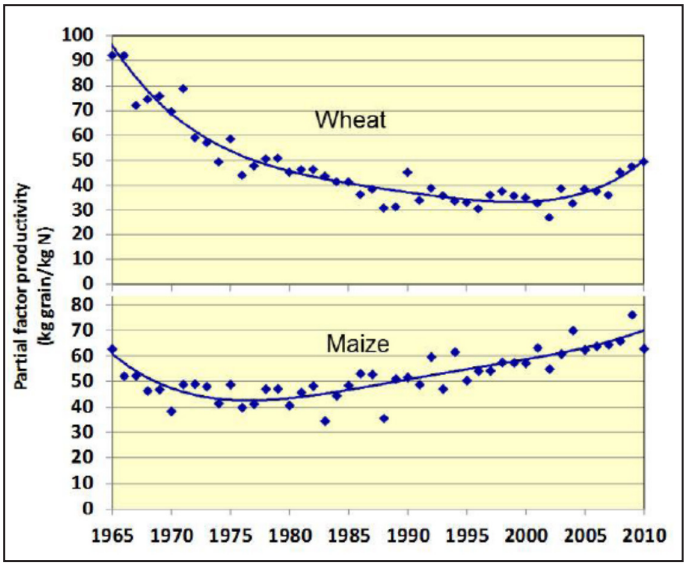


图 4 美国 1965-2010 年间玉米和小麦肥料氮素偏生产力（摘自 USDA-ERS 和 USDA-NASS，2011）。

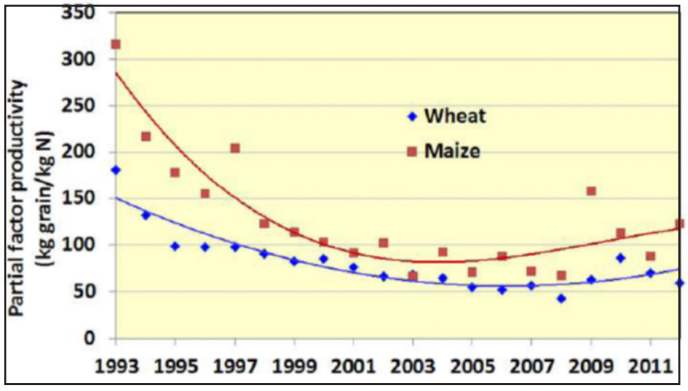


图 5 1993 年至 2011 年阿根廷玉米和小麦的肥料氮素偏生产力（改编自 Garcia 和 Salvagiotti，2009）。

表 6 Ladha 等整理全球各地的玉米、小麦和水稻研究小区进行的 93 篇已发表研究中氮素的常见养分利用率值

作物或地区	观测数 *	平均施肥量（千克 / 公顷）	偏生产力 **（千克/千克）	农学效率 **（千克/千克）	回收率 **（%）	生理效率 **（千克/千克）
玉米	35–62	123	72 (6)	24 (7)	65 (5)	37 (5)
小麦	145–444	112	45 (3)	18 (4)	57 (4)	29 (4)
水稻	117–187	115	62 (3)	22 (3)	46 (2)	53 (3)
非洲	2–24	139	37 (11)	14 (6)	63 (5)	23 (3)
欧洲	12–69	100	50 (6)	21 (9)	68 (6)	28 (6)
美洲	119–231	111	50 (5)	20 (7)	52 (6)	28 (8)
亚洲	161–283	115	54 (3)	22 (2)	50 (2)	47 (3)
平均 / 总量	411		52 (2)	20 (2)	55 (2)	41 (3)

* 养分利用率指标的观测数范围。

** 见表 1 中每个术语的定义；括号中的值为平均值的相对标准差（SEM/mean*100）。

表 7 1987-2007 年伊利诺斯州和蒙大拿州氮素偏因子养分平衡情况（IPNI，2012a）						
州名	主要种植体系	年际偏因子养分平衡 *				
		1987	1992	1997	2002	2007
伊利诺斯州	玉米－大豆	0.71	0.76	0.76	0.86	0.87
蒙大拿州	小麦	1.35	1.33	1	1.04	1.01
*（收获移走）/（肥料氮 + 回收的粪肥氮 + 生物氮固定）						

的种植体系随着时间变化很大。了解养分利用率趋势的整个体系背景对于正确解释这些趋势至关重要。美国玉米和小麦氮素偏生产力的趋势比较证明了这一点（图 4）。1975–2005 年玉米的偏生产力增加了约 50%，而小麦的偏生产力同期下降了 30%，但 2005–2010 年增加了 30%。玉米偏生产力的增加主要是基于遗传学和作物、土壤和养分管理的改善，30 年间使产量提高了 80%以上。偏生产力的净效益在过去 25 年以 0.9 千克籽粒 / 千克 N 的增长率线性增长，。

那么，同一国家种植者获得技术和创新能力的途径相同，为什么小麦生产却没有出现相似的趋势？答案可能在于玉米和小麦主产区种植、耕作和施肥历史的差异。小麦主产区正从耕作和休耕时以土壤有机质矿化为主要氮源的管理系统向保护或建立土壤有机质的少耕、更集约化的系统转型（Clay 等，2012）。在转型期间，由于土壤有机氮的开采减少，小麦生产变得更加依赖肥料作为氮源，这导致表观偏生产力和偏因子养分平衡的下降（接近 1）。伊利诺斯州（玉米占主导地位）和蒙大拿州（小麦占主导地位）之间偏因子养分平衡的比较显示，过去 20 年来蒙大拿州氮平衡一直处于下降趋势，已不能保持过去较高的氮平衡，而伊利诺斯州有缩小氮平衡差距的可能性（表 7）。最近，小麦偏生产力的趋势已经逆转，可能与导致玉米系统偏生产力增加的因素相同（图 4）。

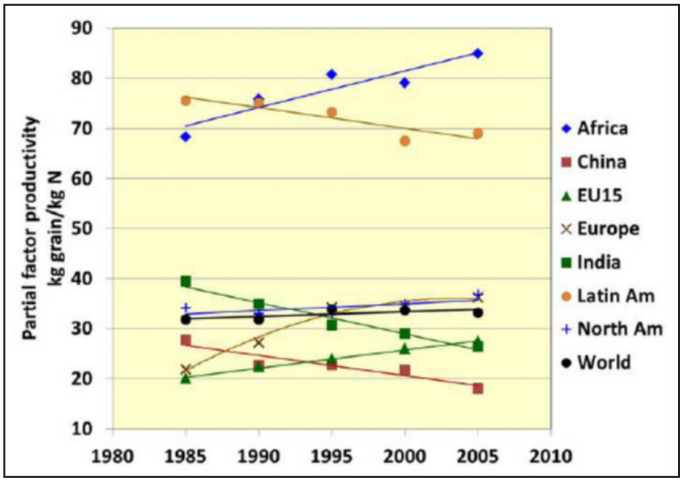


图 6 全球各地氮素的偏生产力，1983-2007。

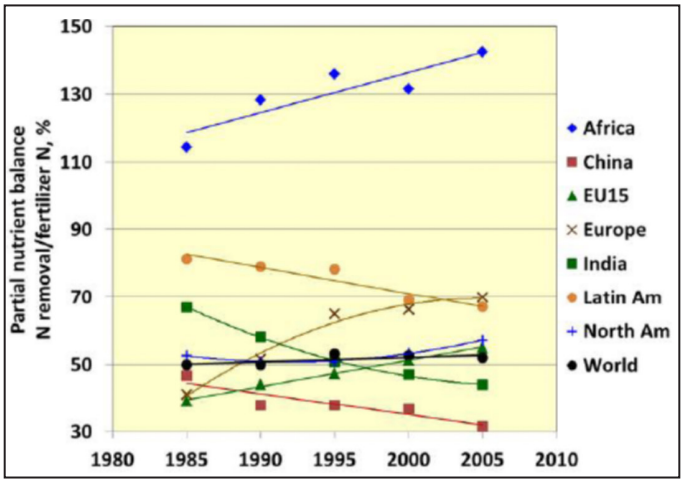


图 7 全球各地氮素的偏因子养分平衡，1983-2007。

在农业普遍处于集约化的国家，偏生产力往往呈下降趋势，因为尽管产量也在增加（收益递减），但氮肥用量的增长速度高于作物产量。阿根廷的小麦和玉米就属于这种情况（图 5）。如上述美国小麦的例子，偏生产力的这种下降往往伴随着更加可持续的偏因子养分平衡关系，即土壤养分矿化程度的减少。如果氮平衡不包括生物氮固定，且轮作中豆类的种植随时间变化，则这种转变可能会引起错误的认识。

描绘一幅全球养分利用率的区域趋势图需要一种系统的方法，这就意味着所有区域都按照一致的规则方法预估养分利用率。我们使用这种方法描绘出了氮（图 6–7）、磷和钾的趋势图（图 11–14）。这些数字显示了 1983–2007 年养分利用率的趋势，每个点代表 5 年的平均值。数据的有效性（粮农组织，2012；IFA，2012）限制了预估偏生产力和偏因子养分平衡这两个指标。对于养分投入，仅考虑无机肥料消耗，不包括家畜粪肥、大气沉降、生物氮固定和城市废物。粮农组织数据库中的作物包括 38 种水果和蔬菜、9 种粮食作物、9 种油料作物、6 种豆类作物、5 种根类或块茎作物和 5 种其他作物。不包括饲料作物，其中有青贮玉米、苜蓿和其他干草等。在严重限制牲畜饲养的地区，这部分可能是生产力和养分移走的主要部分。例如，美国苜蓿和“其他干草”中的磷素占全国磷素移走总量的比例超过 15%，其中所含钾素占全国钾素移走总量的比例超过 40%（PPI / PPIC / FAR，2002）。然而，饲料作物中所含养分将作为动物粪肥还田，但由于饲料作物作为输出、粪肥作为投入都不包括在这些养分利用率的预估中，所以

多数情况下，在这个广泛的区域尺度引入的误差不会很大。由于输入预估部分不包括生物氮固定，偏因子养分平衡计算也不包括豆类氮移走量。这可能使具有更多豆类轮作的地区偏因子养分平衡估计偏高。收获作物的养分含量是基于文献值或研究试验数据（J.Kuesters（Yara），个人交流，2012）。

在这 25 年间，全球偏生产力和偏因子养分平衡水平已显示出小幅度的增长。地区间氮素偏生产力的时间趋势在多数情况下与偏因子养分平衡类似，但全球不同区域间的趋势明显不同（图 6 和图 7）。1985 年非洲和拉丁美洲出现迄今为止最高的偏生产力和偏因子养分平衡值，但两地区呈相反趋势。偏生产力数据显示，这两个地区的单位施氮量都有极高的生产力。然而，非洲的偏因子养分平衡值过高，这表明非洲更加依赖非肥料资源来平衡氮的作物移走，这种状况不稳定且不可持续。相反，拉丁美洲的单位氮素生产力保持非常高的水平，同时也实现了可持续的养分平衡。

总体来说，非洲、北美、欧洲和欧盟 15 国的偏因子养分平衡和偏生产力有上升的趋势，而拉丁美洲、印度和中国有下降的趋势。值得注意的是，过去十年欧洲的偏因子养分平衡似乎已经稳定在 70% 左右，而拉丁美洲、印度和中国的偏因子养分平衡在 25 年间则以相同的速度下降。

磷素和钾素养分利用率的趋势

土壤特性的影响和前茬作物管理带来的典型残留效应决定了磷素和钾素的养分利用率关系。施氮对当季作物有诸多好处，并且氮素的回收也主要发生在施肥当季。而由于磷素和钾素对土壤肥力的影响，施肥后对土壤的好处主要发生在随后的几年（Syers 等，2008）。对磷素和钾素的养分利用率的现状和长期趋势的合理评估需要考虑这些残留效应。如果当前偏因子养分平衡保持不变，在当前土壤肥力状况和表征未来的土壤肥力状态相关的偏因子养分平衡的背景下通常能很好的解释磷素和钾素的短期农学效率、回收率和偏生产力。

养分效率的测定受施入养分量和土壤肥力的影响很大。图 8 中总结的磷素数据来自南美洲锥状地区农民田块的研究。所有田间测试的速效磷都低于临界值，所以作物对施入磷素的反应是值得期待的。施磷量低的农学效率最高，该地区大豆种植体系通常施磷量最低（10 公斤/公顷）。这一用量导致偏因子养分平衡平均为 1.85，土壤磷素水平随时间出现耗竭－不可持续的情况，但好于不施磷肥的情况。较高的施磷用量导致了较低的农学效率值，但偏因子养分平衡值小于 1，土壤磷素将保持不变或随时间增加。这些数据说明了评估磷素管理时需要考虑多个养分利用率指标的重要性。

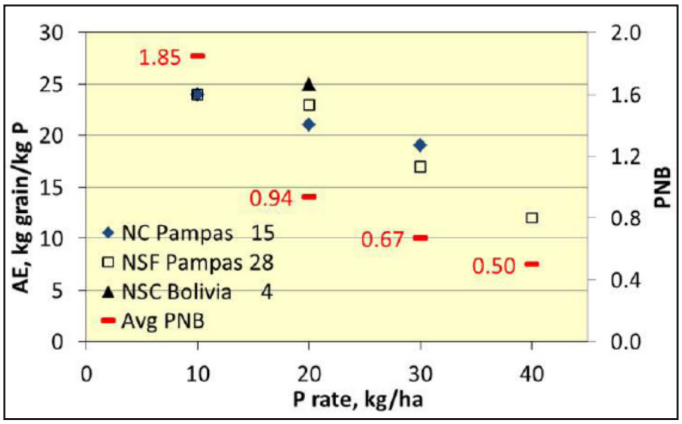


图 8 磷素用量对南美洲锥状地区大豆农学效率和偏因子养分平衡的影响（改编自 Ferrari 等，2005; H.Fontanetto，pers. comm. 和 Terrazas 等，2011）。图例中每个组的数字表示田间试验的数目（n）。

阿根廷的小麦试验表明土壤磷素肥力对农学效率和回收率的影响（图 9）。当土壤肥力远低于临界水平时，会得到非常高的农学效率和回收率，并随着土壤肥力的增加而迅速下降。可持续性与施入量接近移走量、土壤肥力维持在临界水平附近时观察到的农学效率和回收率中间值有关。

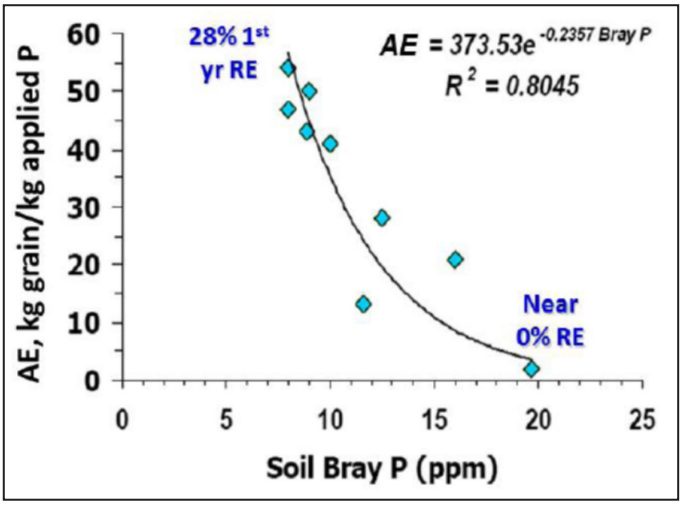


图 9 阿根廷小麦试验中土壤肥力对磷肥农学效率的影响（Garcia，2004）。

在亚洲进行的田间试验的第一年回收率表明，按照磷肥推荐量施用时，该地区特定的磷素回收率接近 25%（表 8）。这些研究结果主要集中于磷素固定能力差的土壤，且气候和管理适宜。Dobermann（2007）指出，虽然研究结果中的平均回收率值是相似的，但回收率值从 0 到近 100% 变化很大，不过 50% 的数据都在 10–35% 的范围内。预计这种变异性是由于上述土壤肥力和肥料用量的影响。

区域综合数据可用于评估磷素利用现状及其对土壤肥力时间趋势的影响，并测试磷素平衡对土壤肥力的影响。国际植物营养研究所（IPNI）对北美私立与公立土壤测试实验室 2005–2010 年作物进行的土壤测试结果进行了总结。从图 10 中可以看出 12 个玉米带五年间土壤中等磷素含量的变化与同期偏因子养分平衡的关系。偏因子养分平衡高于 0.94 时导致土壤磷素含量下降，磷素平衡亏缺最严重的州土壤磷素含量显著下降。这些数据表明，长期偏因子养分平衡是衡量非磷素固定土壤磷素肥力的未来指向一个非常好的指标。通常对于施用磷素具有高吸附或“固定”能力的含磷量低的氧化土和火山灰土，土壤磷含量与偏因子养分平衡的关系可能会不同；这类土壤中，最初需要相当低的偏因子养分平衡来增加土壤磷素肥力，直到满足高亲和力吸附位点。具有大量游离碳酸钙的土壤，通过沉淀反应固定了溶液中的磷素，例如澳大利亚南部，但也有在增加土壤肥力时磷肥的有效性仍然很低的例外（McLaughlin，2012）。

生产力在过去五年（2003–2007 年）中接近每公斤磷素生产 195 公斤作物，偏因子养分平衡接近 70%。在区域上，非洲在偏生产力和偏因子养分平衡方面与其他所有地区明显不同。1983–1987 年间，非洲、印度和中国的偏因子养分平衡水平几乎相当，都在 90% 左右，然而经过 25 年，情况则完全相反，偏因子养分平衡在非洲翻了一番，达到 180% 以上，而中国和印度下降到约 50%。非洲的偏因子养分平衡值表明土壤磷的过度矿化，而中国和印度的偏因子养分平衡值则表明应该不断增加土壤磷素含量。这些数字并没有考虑到当地磷矿石的施用，但没有证据表明这很重要。非洲直接把磷矿石作为肥料施用的可靠信息很少，但各种信息来源表明即使施用磷矿石，本身施用量也很低。以国家尺度来说，平均施用量低于 0.5 公斤 / 公顷，即使在施用量最高的国家，也表明磷矿石中磷素的贡献不大。

一般来说，非洲、北美、欧洲和欧盟 15 国磷素的偏因子养分平衡和偏生产力有上升趋势，而拉丁美洲、印度和中国有下降趋势，正如氮素所示。这些养分利用率估

表 8 亚洲水稻、小麦和玉米田间试验中来自无机肥料的磷素和钾素的平均回收率值。显示的值是指推荐肥料量或目前农民习惯的水稻施肥量（Dobermann，2007; Liu 等，2006）

作物、地区或管理	田间试验数目	时间段	磷素回收率（%）	钾素回收率（%）
* 亚洲水稻；农民习惯	179	1997–1998	24	38
* 亚洲水稻；因地制宜的管理	179	1997–1999	25	44
印度小麦	22	1970–1998	27	51
中国小麦	744	1985–1995	22	47
中国玉米	592	1985–1995	24	44

* 中国、印度、印度尼西亚、菲律宾、泰国和越南。

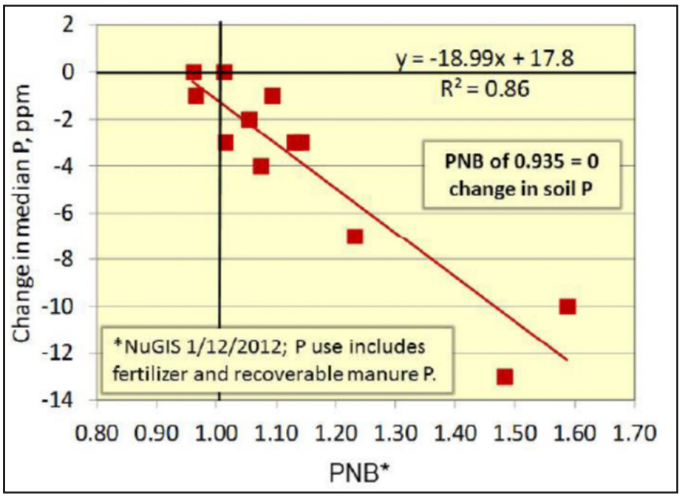


图 10 2005–2009 年与偏因子养分平衡有关的 12 个美国玉米带州土壤中等磷素水平的变化（更新自 Fixen 等，2010）。

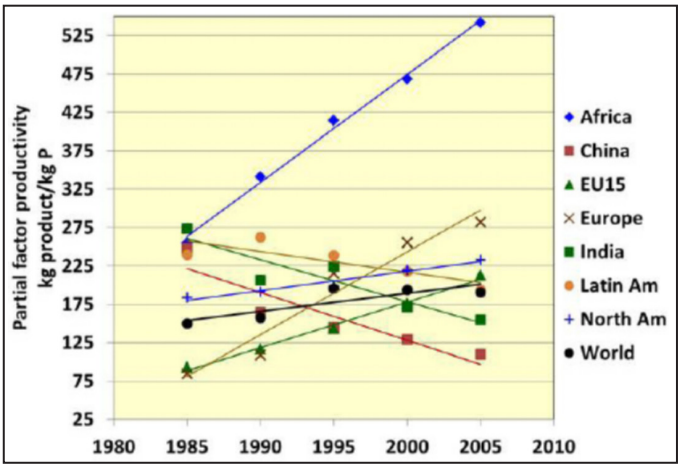


图 11 全球各地磷素的偏生产力，1983–2007。

磷素的世界各地养分利用率区域趋势图采用与氮素相同的方法（图 11–12）。与氮素一样，全球磷素的偏生产力和偏因子养分平衡在过去 25 年间有所增加，其中偏

算中没有考虑粪肥投入对不同地区的影响差异很大这一情况，在对比养分利用率表达的绝对值时应予以牢记。时间趋势的差异（线的斜率）可能更可靠。

钾素利用率的信息比氮素或磷素更有限。部分原因是由于钾素的环境友好特性，其利用效率主要由农学或

经济学因素驱动。导致对钾素有效利用的研究和教育的提高的支持较少。一般认为，除了一些强固性粘土外，钾素的第一年回收率高于磷素。施用钾素的第一年回收率已有报道，在 20%–60% 的范围内（Baligar 和 Bennet，1986）。Dobermann(2007) 总结了 1998 年之前在亚洲进行的田间试验的平均回收率，其范围为 38–51%（表 8）。Jin（2012）总结了 2002–2006 年在中国进行的粮食作物田间试验，采用缺素小区设计，得出钾素的回收率在 25–32% 范围内，平均农学效率值为 8–12(表 4)。在中国中北部地区冬小麦田间试验的一组最新情况，钾素的回收率值偏高，在 34–44% 的范围内，但农学效率值仍在 8–10 范围内（表 9；He 等，2012）。研究人员指出，较低的农学效率可能是由于施钾量超过了个别地点或年份的最佳土壤钾素供应量。Dobermann(2007) 提出，10–20 的钾素农学效率水平是作物在可用钾储量低的土壤上的合理目标。

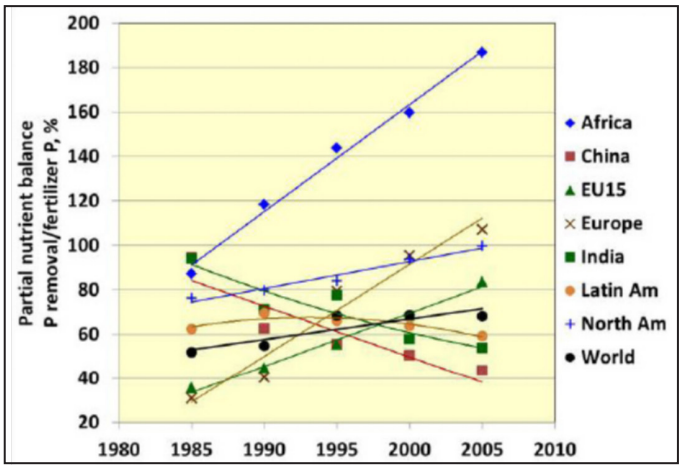


图 12 全球各地磷素的偏因子养分平衡，1983–2007。

钾素的全球各地养分利用率区域趋势图采用与氮素和磷素相同的方法（图 13–14）。与氮素和磷素一样，全球钾素的偏生产力和偏因子养分平衡在这 25 年中有所增加，偏生产力在过去五年（2003–2007 年）达到每公斤钾素生产接近 145 公斤作物，偏因子养分平衡接近 140%。在全球范围内，非饲料作物在这 5 年间移走的钾素比商品肥施入钾素还多 40%。从区域来看，25 年间中国的偏因子养分平衡变化最大，移走钾素比施入钾素多了 5 倍以上，偏因子养分平衡接近 100%，也就是钾素移走量与施钾量相当。对于非洲来说，偏生产力和偏因子养分平衡在 25 年间显著增加，2003–2007 年间偏因子养分平衡表明作物移走量是施钾量的 6 倍之多。

一般来说，非洲、北美、欧洲和欧盟 15 国钾素的偏因子养分平衡和偏生产力有上升趋势，而拉丁美洲、印度和中国有下降趋势，正如氮素和磷素的情况一样。在这些养分利用率估算中，饲料作物生产和钾素移走对不同地区的影响差异很大的情况不予考虑，在对比养分利用率表达的绝对值时应予以牢记。时间趋势的差异（线的斜率）可能更可靠。

表 9 中国中北部冬小麦三个田间试验中来自无机肥料中的钾素养分利用率。2007–2009 年的平均值（He 等，2012）

省份	平均值（千克 K/ 公顷）	回收率（%）	农学效率（千克 / 千克 K）
河北	81	43	10.2
山东	75	44	9.9
山西	100	34	8.1

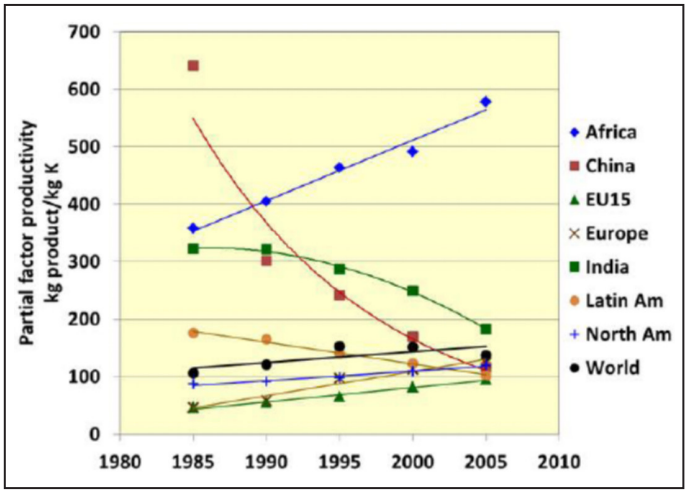


图 13 全球各地钾素的偏生产力，1983-2007。

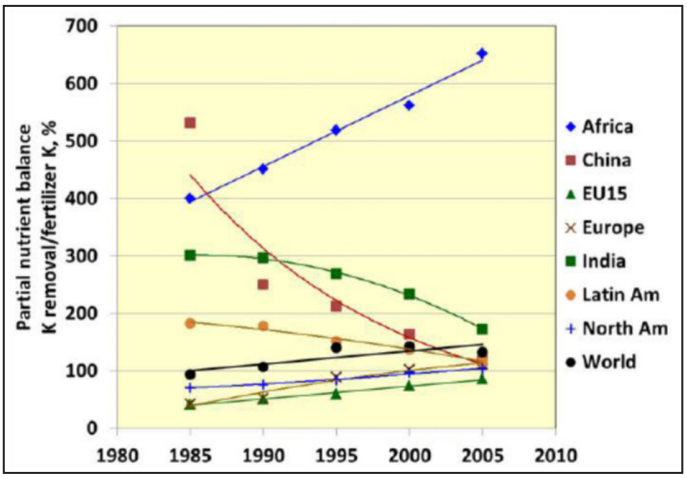


图 14 全球各地钾素的偏因子养分平衡，1983-2007。

养分利用率、水分利用率及展望

许多管理和环境因素相互作用会影响养分利用率，包括植物水分状况。以类似的方式，植物养分状况可以显著影响水分利用率（WUE）。本书的其余部分将探讨这两个关键的作物生长因子之间的相互作用。通过养分管理可以提高水分利用效率（Hatfield 等，2001），然而在干旱环境中平衡开花前后生长以确保足够的水分储存供给籽

粒十分重要（van Herwaarden 等，1998）。养分有效性影响地上部生物量、冠层覆盖（减少土壤蒸发）、作物残留生物量、土壤中的养分动力学，从而改善作物生长和水分利用率（Maskina 等，1993；Halvorson 等，1999；Norton 和 Wachsmann，2006）。足够的养分供应可以改善多种作物的水分利用率（Smika 等，1965；Corak 等，1991；Campbell 等，1992；Varvel，1994；Payne 等，1995；Davis and Quick，1998；Correndo 等，2012）。

加拿大春小麦蒸渗仪控制试验的数据提供了在一定氮素水平范围内养分利用率测定值与水分利用率之间关系的范例（图 15）。该研究包括雨养（dry）和灌溉（irr）处理，并显示出水分状态对氮素产量反应的极大影响和由此产生的农学效率和偏因子养分平衡。图 15 的下图显示，水分缺乏显著降低了所有氮素水平的农学效率和偏因子养分平衡，但是在较低的氮素水平下，氮肥利用效率下降幅度明显更大。图 15 中的上图显示，旱地和灌溉处理中水分利用率随氮素增加都有所改善。灌溉处理的产量和水分利用率的表观最佳氮素量较低，反映了下图中所示的灌溉处理的养分利用率更高。

我们编写这一章更加巩固了前面提到的观点即养分利用的目标是提高种植体系的整体性能。图 15 中的数据说明，尽管养分利用率通常随着氮用量的增加而降低，但是在达到最佳氮用量之前，水分利用率和产量同时增加提高了整个体系性能。水分和作物养分的有效利用都需要特定体系下的最佳管理。

种植体系性能的持续改善是可持续集约化的根本目标。这种改善是每个农民对每个地块管理变化的结果。许多提高效率和生产力的养分管理技术和措施已然存在，在本书的其他章节也有描述，但很多未被充分利用。展望未来，制定针对特定的养分、土壤和种植制度并且易被农民确定的，适合当地的养分利用率指标的指导准则是十分必要的。这样的指导准则将有助于农民确定要测定的内容，以及最需要改进的地方，并且易于改进。指导准则将有助于确定管理方式的变化对体系性能的需求和影响。

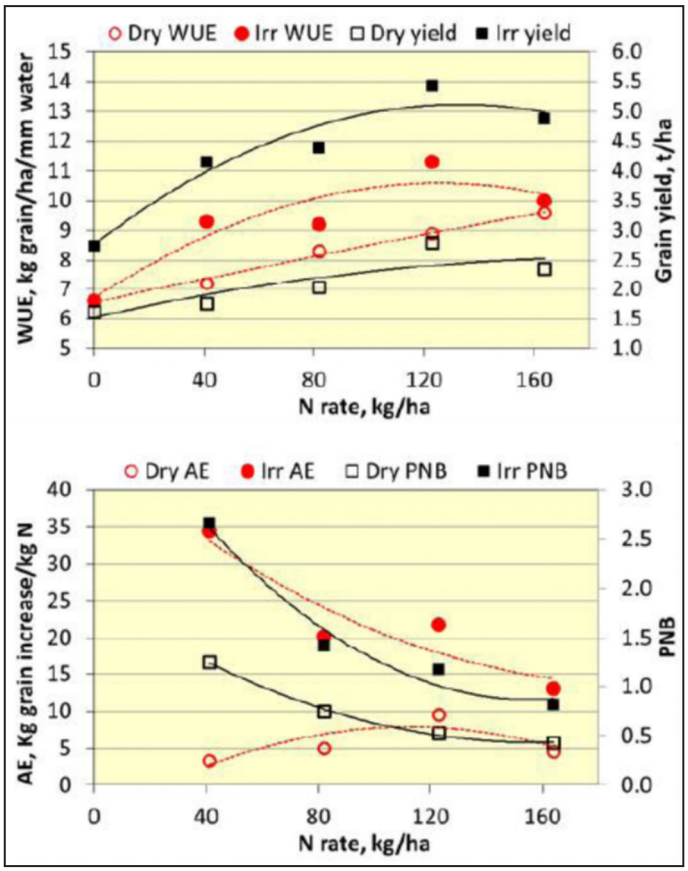


图 15 加拿大萨斯喀彻温省蒸渗仪控制试验的水分状况及氮肥施用对春小麦产量、水分利用率和氮素利用率的影响（改编自 Krobel 等，2011 和 Krobel 等，2012，基于 Campbell 等，1977a，b 的原始数据，）。