

北京农业大学

資料汇编

(农业中的养分平衡和肥料需要量)

目 录

1. 低投入和高投入农业中养分循环和养分平衡表的特征
2. 为确立主要作物养分平衡的土壤和植物分析的前景和局限性
3. 特定地块的产量潜力与使用肥料的关系
4. 小麦籽粒产量对钾的反应是土壤中氮动态的函数
5. 钾肥对小麦全蚀病的影响
6. 欧洲农业的肥料投入水平和土壤的养分状况
7. 葡萄生产的养分需要
8. 森林生态系统的生物地球化学与保持和提高其生产力的关系
9. 养分的有效性、肥料的施用和农业产量
10. 西德的土壤测试和施肥建议

2

科技情报室编译

1985年5月

前 言

国际钾肥研究所 (International Potash Institute) 于1984年6月18至22日在意大利 Gardone 举行了第18届国际学术讨论会, 主题是温带农业中的养分平衡和肥料需要。会议共分五次进行, 第一组的专题是农作制中的养分平衡, 第二组是养分平衡的评价, 第三组是温带农业制中用肥料投入建立产量, 第四组是温带生态系统中的肥料需要, 第五组是生态系统中的农业生产力。各组都有一篇主题文章和若干篇论文。开会前我们通过H. Beringer教授和国际钾肥研究所负责人取得了会议论文的预印本, 据告正式的论文集出版较晚。为了使我国有关土壤、肥料、植物营养、土化分析、环保、生态等专业的同志先睹为快, 我们特征得国际钾肥研究所的同意, 将预印本中的各组主题文章和其他几篇有较大参考价值的论文译成中文 (每篇所附的多篇文献均从略)。正式论文集出版时可能有少许修改, 但据告所译各文的内容不致有大的改动。通过这些文章, 我们可以了解欧洲各国学者对于这些方面的研究工作概况及其某些独特的观点, 对于我们的有关研究工作也许是有益的。此外, 另附列了一篇李酉开同志介绍西德土壤测试与施肥建议系统的文章, 以供参考。

为了便于查对, 兹将所译各文的原作者姓名及论文题目按预印本中的顺序列下:

书名: "Nutrient Balances and Fertilizer Needs in Temperate Agriculture", the preprints for the 18th IPI-Colloquium at Gardone / Italy, from June 18 to 20, 1984.

1. A. van Diest, Characteristics of nutrient cycling and nutrient balance sheets in low-input and high-input agriculture. p. 7—31.

2. H. Beringer, Prospects and limitations of soil and plant analysis for establishing nutrient balances for major crops. p. 69—91.

3. P. B. Tinker, Site-specific yield potentials in relation to fertilizer use. p. 155—165.

4. K. Németh, Response of grain yield of wheat to potassium as a function of nitrogen dynamics in the soil. p. 175—182.

5. G. Trolldenier, Effect of potassium fertilizers on take-all of wheat. p. 183—192.

6. J. Hébert, Levels of fertilizer input and soil nutrient status in European agriculture. p. 201—224.

7. M. Fregoni, Nutrient needs in wine production. p. 269—281.

8. L. W. Overrein, Biogeochemistry of forest ecosystems in relation to maintaining or increasing their productivity. p. 283—292.

9. K. Mengel, Nutrient availability, fertilizer input and agricultural yields. p. 293—298.

我们对于国际钾肥研究所的允许翻译和热情赞助，以及对各位译者的辛勤劳动，谨致衷心的感谢。

科技情报室

1985年5月

低投入和高投入农业中养分循环和养分平衡表的特征

A. VAN DIEST (荷兰 Wageningen 农业大学、土壤学与
植物营养系；国际钾肥研究所科学委员会委员)

摘 要

对氮、磷、钾养分循环的研究表明，这三种养分的循环都可以进一步分为几个亚循环。对每一个循环来说，几个亚循环中有一个亚循环所包括的养分是与生长的作物相连接的，其它的亚循环则起着与作物对养分的竞争者的作用。在氮的情况下，微生物和大气是主要竞争者。对于磷，土壤是最重要的竞争者，微生物居第二位。对于钾，地表水和海洋与高等植物竞争，而在一定的条件下，土壤也能成为很强的竞争对手。

为了使肥料施入的养分达到最高的利用率，必须考虑在各种不同的养分循环中，满足作物尽可能有效地同其它因子竞争养分的总的生长条件。本文所举的例子清楚地表明，肥料养分回收的程度往往是生长条件质量和种植方式的函数，而不是调节到作物生长需要量所施用养分量的函数。一般说来，畜牧业中肥料养分的利用率远低于耕作农业。这与下列情况有关：在畜牧业中，利用率的计算应该把两种形式依次合算，一种是计算肥料养分在牧草中的回收程度，另一种是计算牧草中养分在牲畜及其产品中的回收程度。第一种回收率通常是高的，但第二种要低得多，这就是肥料养分在畜牧业中总的回收率低的原因。

1. 导 言

通过生态系统的养分循环是一种值得注意的现象，这是有许多原因的。首先，了解在自然生境下植被连续吸收养分到它的根系并将这些养分保留在组织中的程度是很有用的。在这方面，自然植被作为生态系统中的生命体，不得不与生态系统中的其它因子竞争这些养分。这些其它的因子是：

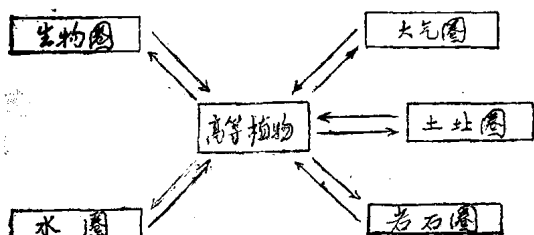


图1 以植物为中心的圈的排列，它们可以供给植物养分，也可以与植物竞争养分

- ①大气圈 ②水圈
 - ③土壤圈 ④岩石圈
 - ⑤生物圈，高等植物除外
- 生态系统中所有的因子或库，既可以成为

养分的补充者，也可以成为养分的竞争者（如图1所示）。在农学界，习惯于把高等植物放在中心位置，研究其它因子如何能够最好地成为高等植物养分的有效供应者，以及它们作为潜在竞争者的作用如何能够最有效地抑制。

作为养分的供应者或竞争者，并不是所有的因子都是同等重要的。例如，对钾来说，高等植物一点也不指望大气能成为钾的供源，同时，一点也不害怕大气会成为有效钾源的竞争者。可是，如果考虑大部分钾是以矿物的形式存在于地壳中，而这些矿物是属于岩石圈的，就有理由认为，岩石圈是最重要的钾的供源。另一方面，对氮来说，岩石圈不论是作为供源还是作为竞争者，就显得不那么重要。但是，显而易见的是，不论是作为供源还是竞争者，大气圈对于氮都是最重要的。

到目前为止，“分室”的表示方式已过分简单化了。它无法判断各分室之间是否能交互连接以及从而形成循环，高等植物在其中成为一个不一定是占据关键性位置的分室。

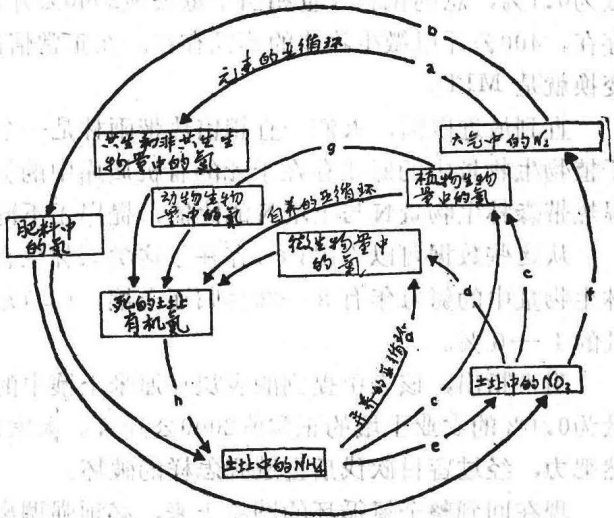
从更现实的角度来看，可以弄清楚养分循环的情况：养分从一个分室向另一个分室移动时，在许多情况下，可通过几种方式进行，而从作物生产的观点来看，通常仅有其中的一种是合乎需要的。养分多功能性的程度往往是该元素的许多内在特征的函数。氮和硫可以多种不同的化合价存在，增加了它们的多功能性。因此，在各种亚循环中，这些养分的分室数目就要比磷和钾这类只有一种化合价的养分要多。可是，下面将看到，尽管磷和钾的多功能性是有限的，但在它们所活动的循环中，其亚循环的数目大致也与多功能的氮是一样多的。

下面将对低投入和高投入农业类型中这些养分的形为进行讨论。

2. 氮 循 环

当观察氮循环时，很明显地看到，此循环实际上由三个亚循环组成。Jansson 给这些亚循环起了如下的名字：元素的循环（E）、自养的循环（A）和异养的循环（H）。图2是它们的示意图。“元素的亚循环”涉及这样一个事实，即最大的库（氮由此进入农业生态系统）是大气圈，其中氮以元素的形式存在。元素氮进入生态系统的转移可以借助于生物的

图2 氮循环再分为三个亚循环：“元素的”、“自养的”和“异养的”亚循环。图中的字母代表以下的过程：a)、 N_2 的生物固定 b)、 N_2 的工业固定 c)、植物同化作用 d)、固定作用 e)、硝化作用 f)、反硝化作用 g)、动物消费 h)、氨化作用



或工业的 N_2 固定。氮向生态系统的转移可以是极为长久的，例如氮被结合到土壤腐殖质中，但也可能是很短命的，例如氮以肥料形式引入后，在一个生长季节内就因反硝化作用而损失。不论时间有多长，氮迟早要通过反硝化作用返回到大气圈中。以其它气态形式(如 NH_3 、 N_2O 或 NO_2)返回大气圈只是暂时的，因为这些形式一旦从这些圈中跑掉，就又重新进入水圈或土壤圈。氮原子一旦返回大气，就需要经过 16×10^8 年的时间才有可能从大气中再一次暂时逃离。

第二个亚循环叫“自养的循环”，因为碳自养的高等植物对该亚循环起主要作用。该亚循环中高等植物形成的初级有机氮化合物，在氮返回土壤前部分地被动物利用，经过同样的亚循环继续它的进程或输入另一其它亚循环。从农学家的观点出发，需要在此亚循环中有氮，并且希望这部分氮不从上面所说的元素的亚循环中跑掉。

第三个亚循环叫“异养的亚循环”，因为碳异养的微生物的活动占优势。在土壤中，这些微生物往往处于有利的地位同高等植物竞争，因为与植物根进行比较(a)这些微生物与土壤非生物成份的接触更紧密；(b)这些微生物是长期存在的。当向土壤中加入高碳—低氮的有机物时，就可以明显地表现出它们的优势，当然它们的竞争能力不只限于过量碳投入的情况。在适当C/N比的有机物进入土壤时，也发生氮的微生物固定，但持续时间不长，并将伴随着矿化作用。氮肥施用后的情形也是一样。大家知道(虽然这是一种相当的失败)，氮肥施入土壤后不久，不小的一部分氮不能够以无机态的形式回收，而是似乎以有机态的形式存在于微生物体中。可是，这种固定作用发生不久以后，无机氮就又重新出现。异养的亚循环中这种氮的周转称为矿化—固定周转(MIT)”。就象氮循环中的许多步骤一样，从农学家的观点出发，MIT也有它的优点和缺点。一方面，MIT保护投入的无机氮不致由于淋洗、反硝化和 NH_3 挥发而遭损失，但在另一方面，它又影响了为获得收益而施入土壤中的氮被作物利用。

图2中被称为“死的土壤有机氮”这个分室的特征很值得注意。通向该分室的途径有四条，而离开它的途径只有一条。与大气中元素氮库相比，虽然它的容量很小，但是它组成了一个能作为自养和异养的亚循环再生器的氮贮备。如果一块耕作土壤的耕层厚20厘米，含N量为0.1%，总的化合N量相当于每公顷2000公斤，则大约可有1600公斤是以死的有机物形式存在，400公斤以微生物体的形式存在。在正常情况下，这两个库中的氮在恒定地变换，这种变换就是MIT。

直到最近以前，人们一直相信热带雨林是一个异常的生态系统，并没想在该系统中存在于植物生物量中的氮比存在于死的有机质库中的氮要多。最近发表的 Sanchez 的数据，对湿热森林生物量N与土壤N的比值，提出了不同的观点(表1)。

从这些数据可以看出(a)存在于这类森林生态系统中的氮有70—80%在表土中，(b)森林生物量中的氮每年有3—20%归还土壤，(c)每年加入土壤中的氮为这些生态系统中总氮量的1—6%。

附带指出，该表中提到的表层15厘米土壤中的氮量，在某些情况下会远远超过上述含氮量为0.1%的农业土壤的正常值2000公斤N。大家也知道，热带雨林生态系统中这种富有的自然肥力，经过盲目砍伐后会遭到怎样的破坏。

现在回到整个氮循环的图象上来，必须强调离开 NH_4^+ 的三个箭头，每一个都代表一条

表 1 亚热带一些地区原始森林生物量和土壤中的氮

地 区	土 壤	pH	森林生物量 中的氮(公斤 N/公顷)	土壤(0— 15cm)(公斤 N/公顷)	整个生态系 统中的氮(公 斤N/公顷)	土壤氮系 占总氮的 百分数	每年加入 土壤中的 氮(公斤 N/公顷)*
Manaus, Brazil	正常氧化土	3.8	3294	8906	12200	73	106
Mérida, Venezuela	热带始成土	未测	1088	4638	5726	81	57
Carare, Colombia	潮氧化土	3.3	740	1812	2551	71	141
Kade, Ghana	干淋溶土	5.2	1017	4336	5353	81	199

*通过枯枝落叶的分解

引自Sanchez, P.A., Plant and Soil, 67:91—103 (1982)

通向不同亚循环的途径。对于 NO_3 分室，同样可以说，是否有相当量的 NO_3 进入异养的亚循环，须取决于 NH_4 的有效度。如果在 NH_4 和 NO_3 之间进行选择，那么微生物更喜欢前者。这个现象对于农业实践有很重要的含义。尽管土壤能够将 NH_4 保持在交换复合体上而使 NH_4 肥的利用率提高，但是必须认识到， NH_4 比 NO_3 更易被土壤微生物固定。这也就是说，在蒸发蒸腾超过降水的生长季节，施入土壤的 NO_3 比 NH_4 更能被作物有效利用，至少 NH_4 的有效性要次于 NO_3 ，因为一部分 NH_4 被用来满足微生物对无机氮的需求。

再就 NH_4 而言，植物确实有机会同微生物竞争氮源。图3的数据很明显地说明了这个问题。图3的数据包括盆栽试验的水稻从二十种土壤上移走的氮量。土壤不施用任何氮肥，也就是说，水稻植株只能利用土壤供给的氮，其它养分通过施肥达到足量。在水稻生长期间，每周测定一次各个土壤在淹水、休闲的土样中的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量。每种土壤测得的最高值也列于图3。阴影部分表示土壤中测得的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 最高量与水稻移走的氮量之差；稀疏的阴影部分表示移走的氮量超过了存在于土壤中的最大氮量的情形；密集的阴影则与此相反。

可以看出两点：

1). 在许多土壤上，移走的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量大约为土壤中测得最高 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量的两倍。

这一发现证明生长中的植株能与微生物竞争有效氮。在没有耕作措施来刺激微生物活动的情况下尤其是如此，例如向土壤中加入富于能量的物质时。

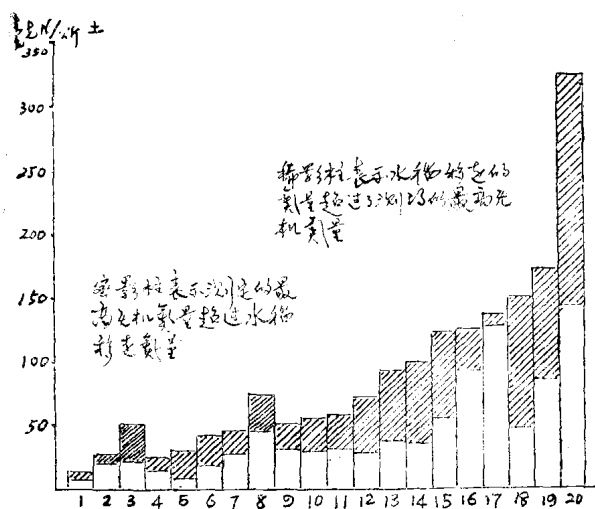


图 3 盆栽试验20种供试土壤的休闲土壤生长季节内水稻移走的有机氮的数量与测定的最高无机氮数值之差

2). 出现相反情形的土壤 (存在于土壤中的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 多于移走的氮量) 都是低产土壤。这一发现使人们提出了下面的假说, 其正确性将在本文以后的部分得到验证。

用生长条件的总质量来决定投入物能被作物利用的有效率比用投入物的数量来决定的要更多, 过去一直是用这种数量来决定作物的利用潜力的。

2.1 农业制的氮平衡表

现在回到农业生态系统中元素氮的平衡表上来, 这里有两个重要问题需要引起高度重视。

1. 氮投入物的利用率是不是取决于投入物的数量?

2. 氮投入物的利用率是不是取决于耕作和气候条件?

另一个重要问题将不予考虑。这就是氮投入物的利用率是否受土壤化学和物理性质的影响。不可否认这些性质对氮投入物的利用率确实有影响, 但与磷相比要小得多。由于版面关系, 在讨论元素氮时, 这个问题将不予考虑。

1976年在阿姆斯特丹举行了一次专题讨论会, 来自世界各地的学者报告了他们收集的有关各种生态系统中养分的投入与输出的资料。这次专题讨论会的结果发表在“农业生态系统”杂志的一个专刊中, 名为“农业生态系统中矿质养分的循环”(1977/1978), 这里就用那次专题讨论会报道的一些结果来回答上面提出的问题。

2.2 耕作制中氮的利用

图4收集的是有关耕作制的资料。在所有的这些制度中, 生物固 N_2 量对总投入的贡献小于35公斤 N /公顷或未知, 也就是说在大多数情况下是微不足道的。图中提到的消费商品农场输出物是指谷粒和根, 在蔬菜和茶叶生产中是指块茎和叶子, 而不是指遗留在田间的茎秆和作物残余物。农场的投入物主要是化肥和厩肥。由于每公顷上的投入与输出差异很大, 所以所有的数据都用对数尺度表示。

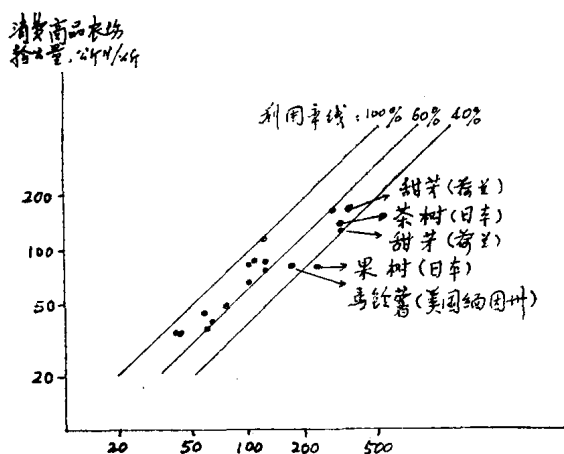


图4 消费商品初级产品中输出氮的量对没有明显生物固 N_2 的耕作农业制度中人为投入氮量作图

可以看到, 除一个点以外, 所有的点都落在40%和100%利用率线之间。施用量低的利用率比施用量高的利用率高, 但是此效应可能受生长作物的类型的影响。在利用率低于40%的情况下, 生长的作物是各类果树。代表利用率在40%和50%之间的各点是: 根系发育不良的马铃薯, 经常施用过量氮的茶树, 以及过去也经常施用过量氮的荷兰甜菜。现在荷兰种植甜菜所施用的氮量比图中表示的要低, 尤其是在甜菜加工公司和施肥建议服务机构采取措施以后。

遗憾的是, 在接受肥料氮量相对较高的作物中, 没有禾谷类作物。经过对(a)作物的产量潜力, 以及对(b)生长季节开始时存在于土壤中的无机氮量的仔细研究, 可以计算得到为了达到最佳产量所需的肥料氮量。

可以预料在这种情况下，所施氮的利用率可以是高的。

为了说明这种情形，图5给出了荷兰在土壤条件均一的三个相邻农场上进行试验的资料。土壤是海成的幼年石灰性粘壤土。三个农场的耕作制是不相同的。第一个农场的目标是通过利用尽可能多的作物保护化学剂和达到高产所需要的化肥，以期获得最高产量（蓝图农业，BPF）（标准农业之意——译者）。第二个农场的目标是尽可能利用各种自然力来控制虫害、病害和杂草，只有在自然控制手段失灵时才使用化学剂。化肥的施用也只限于不超

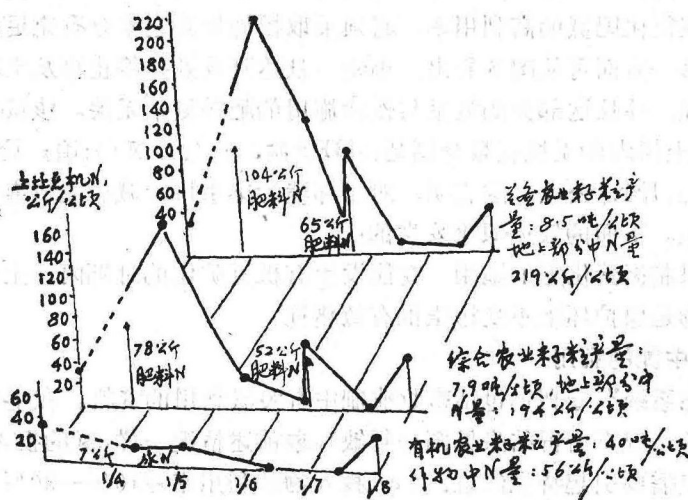


图5 投入强度不同的三个耕作农业制中，土壤无机氮在生长期间受肥料氮的投入量及冬小麦移走氮量影响的变化过程

过蓝图农业的量。因为生物的和化学的力量结合使用，所以这种类型的农场称为“综合农业”（IF）。第三个农场是根据生物动力学方法进行的有机农业（OF），其原则之一是避免使用化学肥料，严格限于用有机物的形式供给养分。1982年同时在三个农场种植冬小麦，各项生长条件由一组学生仔细监控。他们在生长期曾七次测定90厘米深的土体中的无机氮量。这些数据对后面的讨论非常重要，所以记录在图5中。OF、IF和BPF三个农场施用的化肥总氮量分别是0、130、169公斤N/公顷。肥料的分次施用量和时间均标在图中。生长季内OF地块以牛尿的形式一次施入7公斤N。

本试验在两种情况下用OF地块不施化肥氮所得的氮产量为对照产量是对的。这两种情况是：（a）三个农场土壤中的有机质含量相似，和（b）生长季开始时，三个农场土壤中（0—90厘米）的无机氮含量碰巧一致。一种情况，也就是在生长期中以牛尿形式施入7公斤N的情况，使得认为所得氮的产量仅仅来自土壤氮的假定有所减弱。如果假定OF农场收获作物中的56公斤N完全来自土壤氮，那么其它两个农场在冬小麦上施用的化肥氮的利用率的数值就可能稍低于其真值。用“差减法”计算得到的值是：

蓝图耕作制为 96%，

综合耕作制为 106%。

数值大于100%，说明有起爆效应存在，但总的结论是：在这两种耕作制中，小麦对肥料氮的利用率远远超过50%。

必须强调，三个农场上总的土壤条件对小麦的生长是很理想的，气候条件也是极为有利的，在BPF和IF耕作制中所有的养分都处于最适水平。此外，为了保护作物不受可能出现的病虫害的干扰，BPF和IF农场都采取了精心的管理措施。在这种条件下得到的肥料氮利用率可以高度地证实下列论述：

化肥氮利用率的低下，往往是由于环境条件阻止了作物对施入氮的充分利用而引起的。这就是说，为了获得化肥氮的高利用率，必须采取措施使其它养分有充足的供应。

试验讨论的另一方面可从图5看出：小麦一旦达到成熟并停止再从土壤中吸达氮，土壤无机氮就重新出现，并且这部分的氮量与作物施用的肥料氮量无关。该试验在收获期（8月3号）时，90厘米土层内的无机氮量分别是：BPF制，41公斤N/公顷；IF制，51公斤N/公顷；和OF制，34公斤N/公顷。这表明，对于环境污染来讲，减少或放弃化肥氮的使用并不一定是保险的措施。下面的叙述似乎妥当的：

不只是限制氮素化肥的施用，在能发生有机氮矿化的时期内，土壤长期栽培旺盛生长的作物是保护环境不受污染的有效措施。

2.3畜牧业制中氮的利用

“农业—生态系统”专刊也包括畜牧业制中有关氮利用的资料。在生物固定的 N_2 对氮投入没有多大贡献的情况下所得结果见图(6暂缺)。象前述情况一样，氮的投入由化肥和/或厩肥的氮组成。有两点需要引起特别注意：(a)投入物的利用率在10%—30%之间，比耕作制要低的多；(b)利用率的水平与投入量没有任何关系。

这里所报道的大部分情况，其输出物完全由肉和奶产品组成，大家知道，包含在这些输出物中的氮只是动物从饲料中吸收氮的一部分；大部分氮则以粪和尿的形式排泄掉，这部分氮的去向与农业制中其它部分的氮相比更不清楚。

值得注意的是，利用率的水平并不受投入量大小的影响。对此还不能给出一个很容易的解释，但须牢记，由于其中包括两种类型的利用率而使得情况复杂化了。首先必须注意的是，施入草地的氮被草利用的利用率，其次是牲畜所用草或干草中存留氮的利用率。“农业生态系统”专刊对前一项内容没有提供资料，所以，收集在图7中的数据大部分是从其它来源收集来的。图7中所有的数据都在55—90%利用率线之间，但不知为什么，在氮素化肥投入量远远超过荷兰为获得最佳牧草产量所建议的施肥量的情况下，得到的利用率却是最低值。英国用 ^{15}N 做的渗漏计试验发现，每年每公顷施用化肥氮250公斤N，不论下雨与否，排水造成化肥氮的损失量绝不超过0.4%；施用化肥氮每公顷500公斤N，三年中有两年由排水造成的损失在1%以下，但一个多雨年是例外，那年的损失值达到9.5%。

这些结果支持了以下的假说：在畜牧业中，化肥氮的低利用率主要是由于与牲畜消耗牧草有关的损失而引起的。一般估计牲畜吸收的氮，其中有15%用来生产奶和肉；其余的85%（大约三分之二）以尿的形式排泄掉；而这些尿中的氮有三分之二以气体形式损失掉（反硝化和 NH_3 挥发）。总计以气体形式损失的量将占施入氮量的38%左右。

图8中选自“农业生态系统”专刊上的数据，是根据估测耕作制和畜牧制中每年氮的气态损失而汇集的。在耕作制中，损失的百分率为5—30%，而在调查的畜牧制中，损失率

在30%—60%之间。后者可以对图6所示畜牧制中化肥氮利用率都较低的现象做出部分解释。

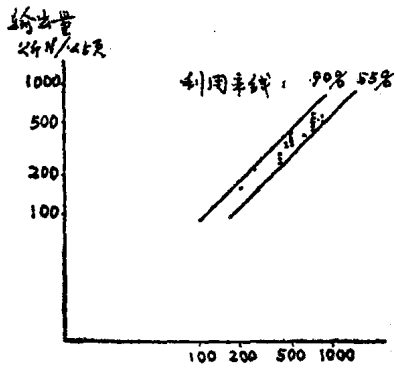


图7 牧草中的输出氮量对不放牧草原制中化肥投入氮量作图

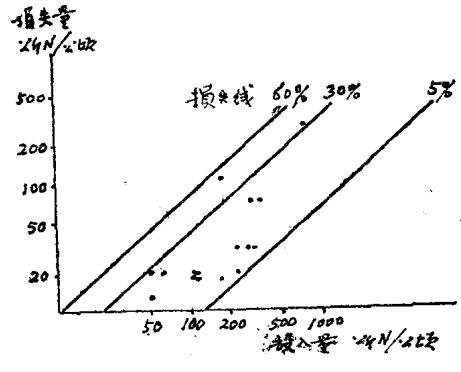


图8 耕作制(5%与30%损失线之间各点)和畜牧制(30%—60%损失线之间各点)土壤中氮的气态损失(反硝化+NH₃挥发)对氮的人为投入量作图

3. 磷 循 环

尽管自然界中磷的形为往往不被看作是循环的方式，但是我们不难构成一个与前述氮循环有些相似的磷循环，如图9所示。磷循环也可再分为几个亚循环，虽然在氮循环中所给名称不能在这里应用。这些亚循环可称之为：“植物的”、“微生物的”、“水的”和“土壤的”亚循环。

象氮一样，磷酸盐也被组合到高等植物和微生物的有机结构中，因此土壤有机质中既含有有机氮化合物，也含有有机磷化合物。在土壤中，微生物与高等植物之间也可能出现对有效无机磷的竞争，但竞争的程度往往次于对有效无机氮的竞争。由大生物和微生物构成的土壤有机磷库往往是两个陆地的亚循环中磷的重要再生器。

对于磷循环的封闭，与氮比较，人们要负更大的责任。虽然每年工业加工固定大量的氮作为肥料施用，但是天然的生物固氮量估计还比它大3—5倍。可是对于磷，陆地矿质沉积物中的磷向陆地的亚循环转运的自然过程是极为不足的，如果没有人类的影响，海底象一个可怕的陷井似的，迟早要使磷循环失去动量。当由于地壳运动使海底上升到海洋表面以上时，自然本身可以部分地解除这种窘境。然而即使如此，在形成的陆地矿质沉积物中也只有极少的磷会进入陆地的亚循环中去。矿质沉积物中磷的这种惰性当然是由于这些沉积物中存在的磷灰石的溶解度极小引起的。同样的原因，陆地矿质磷沉积物富集的另一形式，即在火山爆发时出现的岩浆物质中的磷灰石，似乎不能供应陆地的亚循环。

“土壤的”亚循环仅仅由两个分室组成，但是从农业的观点考虑，它是非常重要的。从其它亚循环进入土壤溶液中的许多磷，降到土壤的磷酸盐库内，其中一部分是活性的，

一部分是非活性的。由于这个库是活性的，它就成为作物吸收生长所需磷的贮备。由于这个库是非活性磷组成的，所以它形成一个陷阱，其中可找到以前以肥料形式加入土壤中的许多磷。只要土壤的吸收容量还未达到饱和，这个陷阱就可使化肥磷的利用率降低。可是，当吸收容量达到饱和以后，这些被吸收的磷就可以成为一个供应其它陆地的亚循环的贮备库。

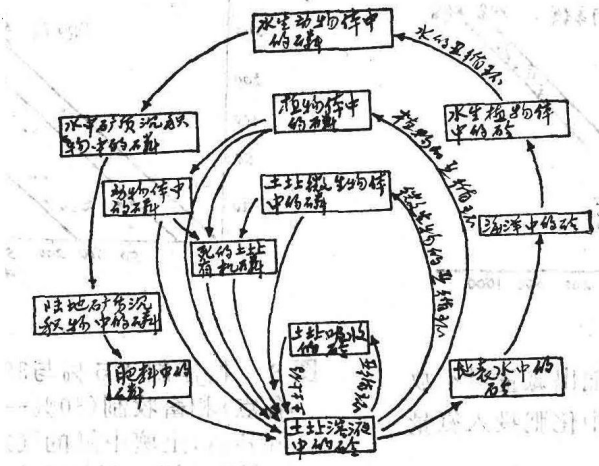


图 9 磷循环可再分为四个亚循环：
“水的”、“植物的”、“微生物的”和“土壤的”亚循环

由于大部分磷酸盐化合物的溶解度较低，在自然生态系统中几乎没有多少磷能够脱离陆地的亚循环，所以如果没有磷的消耗，这个亚循环可以持续几个世纪。损失很少部分的磷将从土壤矿物的风化中得到补偿，在图 9 的磷循环中，这部分磷也包括在土壤吸收的磷中。一旦人们开始扰乱这些自然循环，磷就会以收获产品的形式或由于侵蚀和淋失而损失。对于陆地的亚循环的更新来说，重要的是，从陆地沉积物中生产出的磷肥向这些循环中的引入。这样，水的亚循环中的磷就不再永远被保持在矿质沉积物中，而将重新进入它曾经逃脱的陆地的亚循环中去。

对农业生产潜在有效的磷灰岩沉积物的数量无限小于大气中可固定的潜在有效氮贮备库，但是已经知道的、在现有经济条件下能够开采的磷灰岩矿，在过去几十年里已明显增加了。仍然可以预见，在遥远的将来人们不可能等待下一次地壳运动将更多的海底磷灰岩沉积物上升到海洋表面以上，所以还要对海底的磷灰岩进行开采。可以期望，到那个时候从海底沉积物中得到的不仅仅只是磷，而且也有许多其它的矿物。开采其它星球上对人类有用的矿物，也不只是幻想或异想天开了。

现在我们回到当前的农业现状上来，对于磷，我们必须面对许多事实，即：

- a) 大部分磷灰岩的溶解度太小，以至不能在所有的土壤上被所有的作物成功地利用；
- b) 只有有限数量的已知沉积物可以带来收益；
- c) 收益需要有一定的能量投入，因此提高了单位磷的价格；
- d) 即使施用可得收益的磷形式，作物对磷的利用率仍然是低的令人失望。

当考虑低投入和高投入型农业的养分平衡时，尤其要注意最后一点。

3.1 耕作制中磷的利用

“农业生态系统”专刊也包括可以估算化肥磷利用率的数据。图10是耕作制中的资料。可以看到，利用率数值的变化范围很宽，利用率的大小与施用量间的关系并不很密切。所示的每个数值都值得进行单独研究，这里选取几种情况进行讨论：

美国缅因州马铃薯和法国灌溉豆类的数值代表了园艺中过量施用肥料的例子。在美国，马铃薯被当作一种园艺作物，往往过量施肥。在园艺中，肥料的价格只占总成本的很小比例，所以种植者往往施用超过需要量的肥料，甚至当土壤中已经能够很好供应这些养分时，也是如此。因此在这种环境下，利用率数值很低并不足以为奇。

在利用率接近100%的情形中，有代表巴西东南部拥有大量财产的地区的小农场，这个地区的施肥是标准措施，那里的小农场主遵守领导指示的原则，已经长期施用适量的肥料。每年投入适量的、但稳定的化肥磷，得到了较高的回收值。施用适量化肥磷的其它实例是两个生产甜菜的荷兰农场。每年化肥磷的投入量远远超过输出量，这样经过几十年以后，土壤的吸磷容量已达到饱和，足以调节磷的施用量相当于收获产品移走量的农业制。

这里必须注意，尤其是在维持量施肥的情况下，对磷肥的实际利用率与表观利用率之间的估值会出现大的差异。例如用放射性同位素估测实际利用率时，表明化肥磷对作物磷营养的实际贡献是很小的，这反映了大部分的化肥磷已与土壤中很大的活性磷库中的磷交换了位置。可是，如果用传统方法，用不施化肥磷作为对照区来估测化肥磷的利用率时，似乎化肥磷的利用率很高，而事实上化肥磷的主要作用只不过是与活性库中的磷交换了一下位置，如此释出的土壤磷就供给作物所需的磷。这种情形可用图11的上半部来表示。

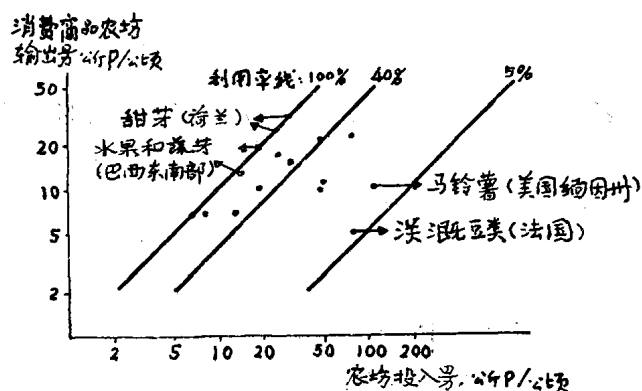


图10 初级消费商品中磷的输出量对耕作制中磷的投入量作图

化肥磷表观利用测定值与实际利用测定值之间的很大差别，成了两个学派争论的焦点，一派主张作物对磷的利用率通常是很高的，而另一派则坚持相反的观点。争论牵涉到上面所提到的化肥磷表观与实际利用率的差别，此外还有在计算利用率时是否应该考虑磷的残留效应的问题。图11的下半部表示吸收的磷少而吸收容量大的土壤，其实际利用率与表观利用率都一样低。争论也牵涉到吸收的化肥磷能否变得对后茬作物有效的问题。

如果从实用的观点考虑，此争论勿宁是一个学术性争论。确实，由于土壤中的磷既不挥发，也不溶解，所有施入的化肥磷实际上不被当季作物吸收，而将存留为下茬作物的潜在有效磷。换句话说，一个耐心的农民所施用的磷往往会得到高的回收值。可是麻烦的是，即使天生有耐性的农民，也不能总是忍耐。当发展中国家的一个小农场主在磷肥上投资时，他就

想尽快地收回成本。当他需要尽快回收时,如果听到说在很长的周期内他可以期望取得100%的回收时,对于他简直是不起作用的安慰。不必担心回收是慢还是快的农民,也就是在他的土壤上已经建立了一个很大的潜在有效磷贮备的农民,他只需知道每年施用少量磷能否保持这个大的贮备就行了。

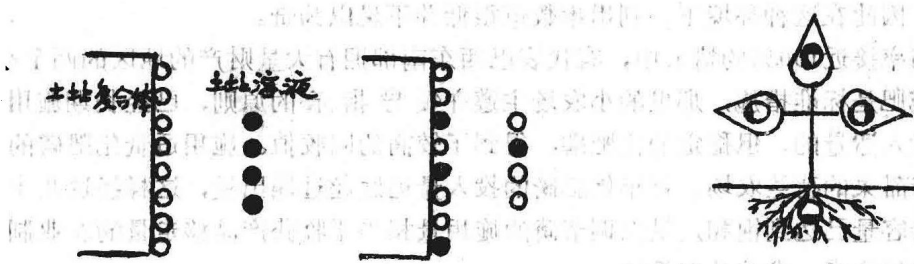
土壤磷(○)和化肥磷(●)在土壤和作物中的分配

a) 在磷吸收容量已饱和的土壤中

施用磷肥时

植物吸取磷期间

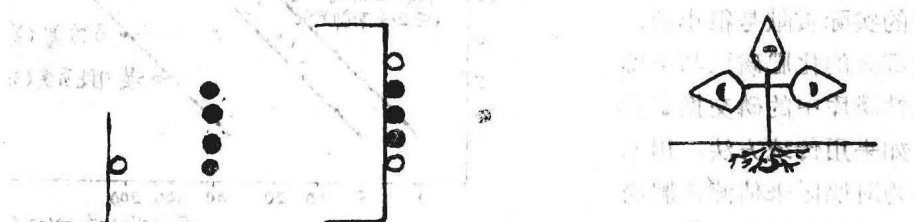
作物收获时



表观回收率: 100%

实际回收率: 25%

b) 在磷吸收容量未饱和的土壤中



表观回收率: 25%

实际回收率: 25%

图11 肥料磷加入土壤后的去向,以及由此可得的表现和实际磷肥利用率的估测值示意图。

a) 在磷吸收容量已饱和的土壤中, b) 在磷吸收容量未饱和的土壤中。

当前存在的急迫问题是,在低投入农业的发展中国家中,如何能够帮助小农场主在磷肥上的投资能够得到尽快的合理回收。可作出的建议是:

a) 条施或穴施肥料,

b) 先施入大量的磷灰岩为基础,然后每年条施或穴施少量的有收益的肥料磷进行补充,

c) 利用豆科绿肥作物,它们可以有效地利用磷灰岩,

d) 实行禾谷类和豆科作物混作,豆科作物对磷的活化能力可能对禾谷类作物有利,

e) 确保有菌根真菌的存在,它们通过与寄主植物共生,对寄主的磷营养能够有所贡献。

3.2 畜牧业制中磷的利用

图12有关畜牧业的数据表明,畜牧业中化肥磷的利用率一般低于耕作农业。与氮相反,在无畜放牧制中磷的利用率没有得到多大改善。有一种情况利用率是大于100%,给人的第一印象可能是很欣慰的,但是它代表的是一种被称为“土壤耗竭农业”的制度。土壤被强迫供给比收到的养分更多的养分。这种农业类型在美国中西部和太平洋平原上持续了将近一个世纪,最终导致一些地区变成所谓的“尘槽”。图12所示的情况来自精心收集的一个荷兰牧场在1800年前后的古老记载。那是李比希提出农作需要养分以前的时代,在那个时代这些国家(也就是现在的发达国家)的农作就是以土壤耗竭的方式进行的。

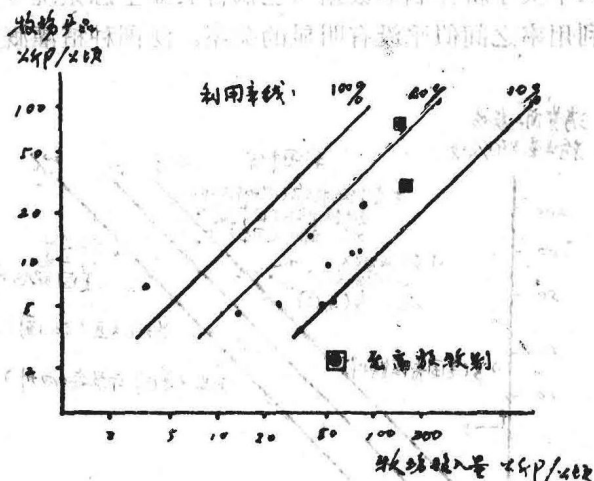


图12 动物产品中磷的输出量对畜牧业制中磷的投入量作图

4. 钾 循 环

钾循环(图13)在几个方面表现出与磷循环有某些相似点。一个很明显的区别是,有机结构中钾的缺席导致了不存在一个有微生物起作用的亚循环。但这并不意味着,在陆地的亚循环中土壤有机质不影响钾的行为。在交换性钾的保持方面,土壤有机质的作用是很重要的。

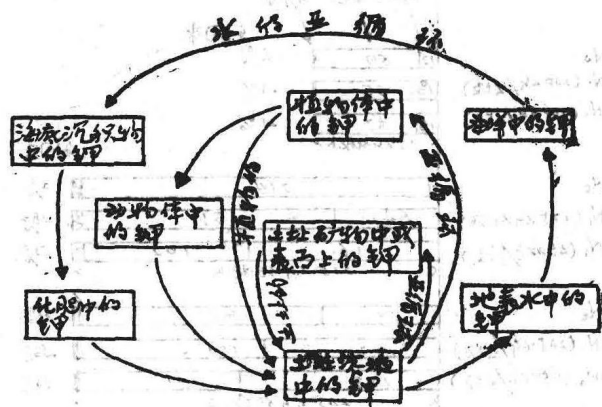


图13 钾循环再分为三个亚循环：“水的-”、“植物的-”和“土壤的”亚循环

钾的水的亚循环包括海底沉积物中钾的大量聚积。与磷相反,钾不是积聚在生物物质中而是以钾盐沉淀在缓慢蒸发的海底。象磷一样,这些海底组成了一个钾的陷阱,同样是由于人类的作用才将这部分钾作为肥料引入陆地的亚循环。

钾常常要从比磷深得多的位置开采,但钾比磷的优越之处是它的溶解度大。钾盐加工成钾肥的费用比磷便宜,因此单位钾肥的价格较低。可是,钾沉积物在各大陆的不均匀分布;使得在许多发展中国家钾肥价格相对较高。

淋洗造成的氮和磷从土壤中的损失有两个消极方面:(a)使很有用的养分从农业生态系统中损失掉,(b)损失进入了水生态系统的富营养化过程。当钾进入地表水时

从来不涉及后一方面。事实上，在水生态系统中钾从来不曾成为生长的限制因子，因此钾从土壤向地表水的转移绝不是水中不理想的生物体产量的起因。

4.1 耕作制中钾的利用

如果不必要考虑钾在环境污染中有任何作用，也有必要考虑化肥钾利用率低的原因。图14中关于耕作制的数据（也摘自农业生态系统专刊）表明利用率数值的变化很大。投入量与利用率之间似乎没有明显的关系。法国种植灌溉豆类的园艺农场的利用率仍是最低。

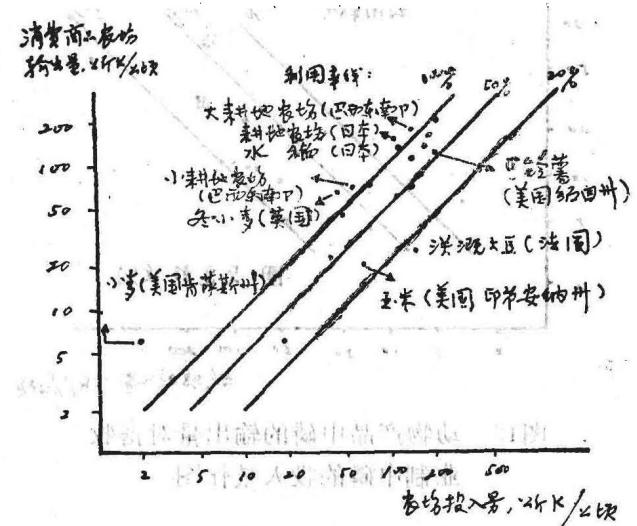


图14 初级消费商品中钾的输出量对耕作制中钾的投入量作图

力状况。

图中最高施用量之一是美国东北部地区生长的马铃薯。与谷粒不同，块茎要从土壤中移走大量的钾，所以在这种情况下，对马铃薯大量施用钾要比前述大量施磷更为敏感。因此，钾的利用率相当高（50%），淋洗造成的损失（80公斤/公顷）并不比中西部只得到马铃薯施钾量三分之一的玉米的损失量大多少。

在图13的钾循环中，“植物的”亚循环通过三个进口收到钾，通过三个出口损失钾。也就是说引入这个亚循环中的肥料可以有三个去向：（a）被作物吸收，（b）被淋洗

低投入和高投入的情况下，都有利用率超过100%的情形。最低投入量的数值代表美国大平原地区小麦耕作的情况。大约经过一个世纪没有任何化肥投入的情况以后，现在开始使用氮肥和磷肥了，但由于土壤中钾的有效性处于相对高水平，所以仍然没有施用钾肥。远东的玉米带施用钾肥。如果只有玉米籽粒运出农场而茎秆归还土壤的话，移走的钾量是很少的，即使适量的投入也远远超过输出。如图14所示，每公顷施用56公斤K，籽粒移走20公斤，淋洗损失15公斤。剩余的21公斤以交换态和非交换态的形式被保留在土壤中改善土壤的肥

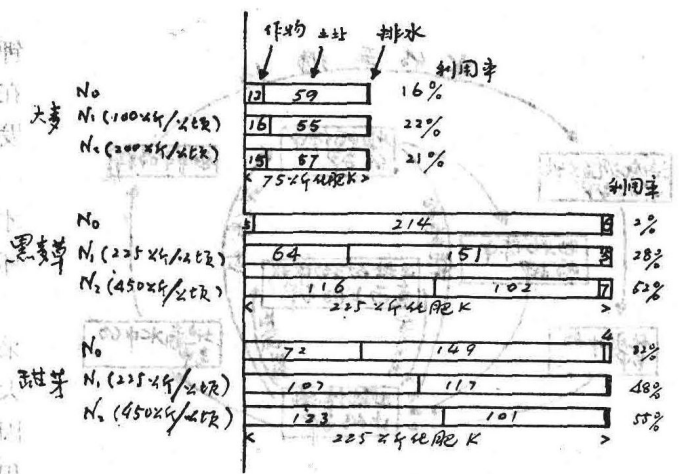


图15 受生长的作物类型和施用的化肥氮量影响的化肥钾在作物、土壤和排水间的分配。数据来自丹麦Askov的渗漏计试验

损失，(c)以交换和非交换的形式被保留下来。从农学的观点来看，理想的是施入的钾尽可能多的被作物直接利用。下面的例子将再一次表明，总的生长条件的质量决定了作物能够利用多少钾和有多少钾进入“土壤的”和“水的”亚循环。

图15是在丹麦进行的渗漏计试验结果。种植大麦时，肥料钾的利用率几乎不受施用氮量的影响。排走的水中几乎没有肥料钾，因此施入钾的大部分被土壤保留了。很明显，不管施入肥料钾的量是多少，土壤已经能够很好的供应钾，以保证作物的最适钾营养。换句话说，也就是不需要肥料钾，加入钾的大部分已消失在土壤贮备库中了。

其它的例子代表不同的情形：当不施用氮时，黑麦草对化肥钾的利用率极低。如果考虑化肥钾对于淋洗损失的贡献很小，可以得出结论，在没有氮肥的情况下，施入钾的大部分将进入“土壤的”亚循环。当施用化肥氮时，黑麦草利用化肥钾的能力大大得到改善，这可由较高的化肥钾利用率数值反映出来。黑麦草对加入量为225公斤N/公顷的反应也极为有利，而甜菜则不然。因此，当氮的施用量从225公斤N/公顷增加到450公斤N/公顷时，黑麦草对钾的利用率急剧上升，而甜菜对钾利用率的增加则不太显著。这些结果再一次表明，在有利条件下生长的作物，比生长于不利条件下的作物对养分的反应处于好得多的位置。

4.2畜牧业制中钾的利用

图16关于畜牧业中化肥钾施用的数据（也摘自农业生态系统专刊）表现出甚至比耕作制数据更分散的趋势。唯一的大于100

%的利用率数值代表着热带和亚热带的广大地区，那里粗放的畜牧业慢慢地导致土壤衰竭。利用率数值极低的两种情况都是英国的集约牧羊业，那里只有净钾投入量的2%的钾以肉和羊毛的形式输出农场。

在实行无畜放牧时得到的利用率数值（60—70%）相对较高。如表2所示，在有利的生长条件下，利用率数值往往很高。数据是苏格兰无畜放牧试验的结果，那里连续三年每年从豆科—禾本科牧草的草地刈草三次。可以看到，在不施用任何钾肥时，不但交换性的，而且非交换性的土壤钾都对作物的钾营养有贡献。在不施用氮的情况下施用钾时，养分的不平衡阻碍了作物

对施入钾的充分利用，有一些施入钾就被贮存在非交换组份中。这种情况下的利用率值是95%。当养分达到平衡状态时（氮和钾都施用），化肥钾可被作物充分利用，而且土壤钾的交换性组份可以对作物钾营养有相当大贡献。

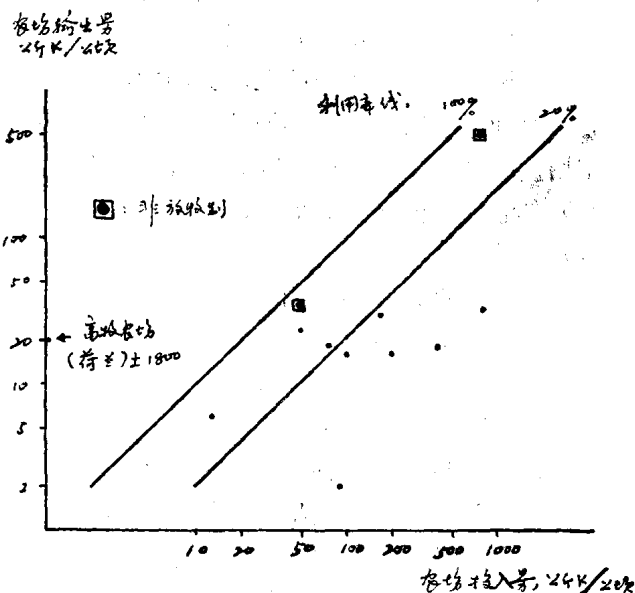


图16 动物产品中钾的输出量对畜牧业制中钾投入量作图

表2 苏格兰三年的周期内土壤钾和化肥钾对豆科—
禾本科草地钾营养的贡献。数值是三年的总和

处理*	K施用量, 公斤/公顷	牧草产量, 吨/公顷	牧草移走的K 量,公斤/公顷	从土壤可交换 组份上吸收的K 量,公斤/公顷	从土壤非交换 组份上吸收的K 量,公斤/公顷
O	0	13.4	214	179	36
N	0	22.1	265	202	64
K	370	15.6	350	11	-31**
NK	370	27.4	561	191	1

* 除氮和钾外, 其它所有的养分都以最适量供应

** 负的吸收就是得到

引自 R.G.Hemingway, J.Sci.Food Agric.14, 188—195(1963)

5. 结 论

不能被头茬作物利用的那部分投入养分的命运, 在各种养分间是不同的。对于氮, 不能被头茬作物吸收的那部分氮, 有逃回大气或地下水和地表水中去的危险。施入的氮有一部分被结合成为活的和死的土壤有机质组成分, 但是异养的亚循环中氮的迅速周转也可能使这部分加入的氮遭受挥发和淋失的危险。因此, 与其它养分相比, 对于氮不仅必须注意施用量, 而且施用时间、肥料的种类和施肥方式都必须适应于周围环境情况和期望的产量水平。如果氮的施用量适合于作物对氮的吸收容量, 那么达到高利用率的最好保证是:

- 其它养分的充分有效度,
- 水的充分有效度,
- 作物对虫害和病害的充分保护。

当达到这些条件时, 不但利用率高, 而且可以保护环境免于遭受流出物中氮的污染。

最能发挥化肥氮作用所要求的条件也可用于其它养分, 如磷和钾。对磷来说, 土壤的化学特性一方面可以防护环境的污染, 另一方面也可能造成磷肥的利用率很低。当土壤保持磷的容量远没有满足时, 这种土壤固定磷酸盐的趋势可能是得到较好利用率的可怕障碍, 也可能给农民的预算造成严重负担。可是, 在持续每年施用磷肥好多年以后, 土壤的持留容量逐渐达到饱和, 以前的负担就会变成一笔财产。那么“固定容量”也就变成“吸收容量”, 为满足作物所需要的每年施用量就可逐渐减少。设计一种方法使发展中国家的农民在第一年施用磷肥时就能获得较好的利用率, 这是农业科学家的任务, 也是对他们的一个挑战。菌根真菌在这里可能是很有用的, 比只引入这些真菌而不同时施用磷肥时可能更为有效。在后一情况下, 菌根只能为进一步掠取已被残余磷改善了土壤而效劳。

当每年施入的磷逐渐开始形成一个土壤磷的活性库时, 这种磷对改善肥料氮的利用率是很有用的。有众多的例子表明, 在施用氮肥和磷肥以后, 一个国家或一个地区的农业生产才会得到很大的改善。水稻有时应先施用氮; 在包括豆科的轮作时, 则应先施用磷。我们知道在许多情况下, 引入某一种养分会造成对其它养分的需要。养分间的交互作用在进一步提高