

国外农业科技资料 (32)

土壤养分和施肥

沈阳农学院科技情报室

1981. 6

目 录

- 一、用放射性碳追踪到的有机肥料在土壤中的命运..... (1)
- 二、土壤和肥料中氮素的气态损失..... (31)
- 三、关于豆科作物共生固氮的某些观点..... (38)
- 四、土壤微生物和植物根在磷循环中的作用..... (44)
- 五、生草灰化土和淋溶生草碳酸盐土中肥料磷素转化的研究 (57)
- 六、苗圃施肥..... (64)
- 七、钒对农作物产品质量的影响..... (76)
- 八、田间测定土壤盐渍度不同方法的比较..... (81)

用放射性碳追踪到的有机肥料

在土壤中的命运

Hans E. Oberländer

一、序 言

大家普遍承认，在温带地区以及热带干旱地区和湿润亚热带地区中，有机质在土壤生产力上起着重要作用，是无机肥料不可缺少的支援因素。众所周知，土壤有机质的效益，主要是由于它的“间接作用”（对土壤的物理—化学性质有良好的影响）。但是，在最近廿年，由于 Blanchet、Chaminade、Christeva、Flaig、Hernando、Saalbach 以及许多别的研究家的研究工作，有机质的“直接作用”（促进植物的生理过程），也逐渐受到人们的注意了。然而，应该清楚地知道，当需用的无机肥料获得足量供应时，土壤有机质作为植物养分的来源来说，其重要性则是次要的。因此，维持适量水平的土壤有机质以及适当施用无机肥料，就被认为是提高作物产量和改进作物品质的重要因素。所以，在这个肥料施用研讨会上，对粪肥的传统形态和时新形态在维持土壤有机质水平上的作用的某些近代知识，进行一番探讨是适宜的。

曾有人常常提出这样的见解，认为作物收获后遗留在土壤中的残茬，其数量多得足以弥补有机质由于矿质化作用所造成的损失。根据这种见解，毋需施加有机肥料就可维持土壤腐殖质的适当水平，应用 Welt (1963) 导出的方程式也许能检验这个假设的确实性。他推算过，在中欧的条件下，对于腐殖质含量低于2.5%，而其年矿化率低于2%的土壤来说，包含有60%的谷类作物的轮作，其作物残茬每年合计约为1.8吨/公顷时，就可以使土壤有机质得失两抵。然而，由于在这个地区的许多土壤中，腐殖质的含量，有时甚至连腐殖质的矿化率都超过上述的限值，此外还由于纯谷物农作每年留给土壤的残茬总有不多过1.4吨/公顷的明显趋势，因之，施加有机肥料是最明智的。认为施用较大剂量的无机肥料就可以得到较多的作物残茬的这种假设，是没有充分证据的，因为产量的增加并不反映作物残茬按比例的增加。Kohnlein和 Vetter (1953) 在检验了10种作物后指出，三叶草产量提高98%，残茬只增加22%；玉米产量提高64%，残茬只增加19%；而小麦增产39%，残茬数量并不因之有任何提高。考虑到这些发现，无论是用 Welte公式或根据示踪物试验所作出的推算都导致这样一个结论（一个至少是对中欧正确的结论）：凡是只凭增施无机肥料以提高作物产量来保持土壤有机质的任何作法都是极其冒险的投机。所以，施用有机肥料乃是不可缺少的预防措施。

几个世纪以来，腐熟（分解）的厩肥曾经是欧洲的传统有机肥料。如果正确地积造时，这种肥料乃是家畜粪便和畜尿湿润了褥草混合物，经过注意压成层、密封堆积成紧实粪堆并盖顶防护，待其腐熟而得的最后产物。但是，随着工业化的发展，由于农业人口外流，致使农业工人的缺乏逐渐成为小麦产区中家畜饲养业发展的限制因素；而谷物耕种，则多亏机械化的发展，未受耕种人手不足的妨碍。这种现状以及出售剩余畜产品上的困难，就诱使这些地区的农民缩减甚至放弃家畜饲养业，而主要地或完全地经营谷物栽培。这事态的发展，导致腐熟（分解）厩肥的严重短缺，甚至像中欧某些地区，导致这种厩肥从农场中完全消失。

在畜牧业作为一项额外进益的有利来源而仍然得到提倡的地区，则有一种趋势，要把堆积新鲜粪肥使之腐熟这样的繁重过程，代之以用水把粪便从畜圈直接冲洗出去，或者把畜尿导入密闭容器中加以收集，在嫌气条件下贮存备用这样一种简易过程。这种过程，在德语国家中被称之为“冲洗清除粪便（Schwemmen mistung）”，它节约劳动费用三分之二，它使在传统堆腐过程中正常发生的有机质和氮的损失减半！这样所得到的产物（家畜粪便、尿液、少量的褥草和水分数量不定的混合物）就是一种未腐熟（未分解）的液肥或半液肥（Schwemmist），具有适当的C/N（15:1），而通常的（腐熟的）厩肥，其C/N为25:1。另一个节约劳力的清除畜便的方法，就是无褥草圈畜：这种特殊的圈畜法可以免掉撒铺褥草，并可以得到未分解的半液肥，在德语的高山地区称这种肥料为“Gülle”（家畜粪便、尿液和数量不定的水分之混合物）。无褥草圈畜法曾经长期地被草地农民所应用，因为他们缺少秸秆。这种方法越来越多地被谷物农民采用，以阻断耗费劳力的“秸秆链”（Straw chain）——康拜因收割后从田地中搬走，作为褥草撒铺于畜舍，而后加以清除作为肥料集成粪堆，最后以腐熟厩肥的形态归还田地。

产粮区畜牧业的减缩，加上无褥草圈畜法的推广，就产生了清除秸秆的问题。由于对秸秆没有需求，在康拜因收割后，它就遗留在田地上，付之一炬，似乎是处理秸秆的适宜办法，因之曾长期地被运用。虽然我们不应销毁富能物质，但是，如果土壤有机质的水平能另想办法加以恢复的话，则焚烧秸秆还情有可原；可是，如果厩肥的供应有限，甚或是不可能的话，则焚烧秸秆就真正是浪费了农民的富能资源。因此，明明白白的解决办法，就是把未处理的秸秆立即归还给土壤，而不是按照费力的“秸秆链”将之搬来搬去，使其变成分解的厩肥。在翻埋未分解的秸秆相伴而来的各种困难，例如氮的固定、谷物病害的传播蔓延以及种子发芽受阻等，由于用适当的措施已成功地得到解决，这种翻埋未腐烂的秸秆作为秸秆肥的办法，实际上已经广泛实施了多年乃至二、三十年了。然而，就象有关文献中的广泛讨论所表明的一样，持赞同和反对见解的双方迄今仍各执己见，未能协调一致。

为了更有效地施用秸秆肥，可以配合施用液化的无褥草粪肥（所谓的“Kombinierte Gullerei”措施），或者配合施绿肥（这是一种恢复土壤有机质广泛实施的方法。但是，仅限于在主作物生产间隙期雨量充沛和温度适宜的地区应用）。

所有一切取代腐熟厩肥的物质，如液体和半液体圈粪（有褥草和设有褥草的）、秸秆肥和绿肥，其特点就是：它们都未经受什么腐烂过程，所以含有大量的易分解性物质。因此，关于长期施用这些物质是否会使土壤有机质得到与施用传统厩肥所获得的同样的稳定性，就成为长期辩论的问题。

由联合国粮农组织（FAO）和国际原子能机构（IAEA）联合召开的两个盛会的成就，证明了同位素示踪物质的应用大大地促进了这个问题的研究。的确，均匀标记放射性碳

(^{14}C) 的有机肥料的应用, 比之用非标记物质所进行的常规试验具有极大的优越性。

在本文中, 将从一些用 ^{14}C 标记的有机肥料在耕地和非耕地土壤上进行的涉及上述问题的实验室、盆钵和田间试验的几个研究中, 选取一些资料作一评述。对英国洛桑试验站、德国波恩大学以及奥地利维也纳联邦农业化学实验站在田间条件下所进行的一些试验将作为特别重点来讨论。

下列几方面将依次加以讨论:

1. 有机肥料在土壤中的分解;
2. 有机肥料转变为腐殖物质;
3. 肥料碳在田间的保持和累积。

但是, 对于与增施未分解的有机肥料相伴发生的农业经济、肥料定位深施、作物生产、植物毒性以及植物病理学诸问题的讨论, 则不在本文的讨论范围之内。

二、试验方法的原理

(一) 概 说

在用常规方法探究有机肥料在土壤中的分解和转化时, 施肥和不施肥小区的碳含量之间、和从这些小区中分离的有机质级份的碳含量之间的差异, 就被作为衡量土壤中所存在的肥料衍生碳的尺度。在此姑且不管新施的有机肥料对土壤中早已存在的有机质的分解作用所发生的影响(这是以后要讨论的复杂问题), 这种方法的重大困难, 就是对现行耕作制以通常剂量施用有机肥料的各个小区在含碳量之间的统计学显著差的检验。例如, 当一个含有20毫克碳/克土的土壤, 以相当于2,000公斤碳/公顷的剂量施肥时, 每克土壤得到的碳量为0.63毫克。但是, 过了几个月后, 由于矿化作用, 这个碳量就下降到0.22毫克左右(相当于土壤碳的1%)。要用常规分析法检出含碳量上的这种微小差异, 几乎是不可能的, 因为可以检出的最小差异(95%的差异显著平准)大约为每克土壤0.5毫克碳。在常规的田间试验中, 这些困难可以用下列方法的任何一个加以克服:

(1) 将肥料的施用量提高到十倍于通常耕种所用的剂量, 这样, 碳量的有效差异就可以检出了。当然, 这是一个极不寻常的土壤——肥料比。

(2) 持续几十年地重复施用常量的有机肥料, 直至每年的土壤碳增量的总和成为易于检出的数量。例如, 在著名的德国哈尔“黑麦长期连作(Ewiger Roggenbau)”中, 每公顷每年施用厩肥2,000公斤, 经过70年的连续施用后, 每克土壤的含碳量的增量结果为4.2毫克。

(二) ^{14}C 标记的有机肥料的制备

用放射性碳(^{14}C)均匀地标记的有机肥料的应用, 就使得克服差示法(differential method)的困难成为可能。例如, 我们现在能够在仅仅施用一次不高于现行耕种制所施用的剂量的有机肥后, 对其矿化作用过程和转化作用过程就能作出统计学上有效的说明。此外, 还能够检出在新施用的有机肥料的影响下, 土壤原有的有机质的分解作用的加速程度;

可是,这种影响只有在少数情况下才表现得颇为显著。

要给有机肥料均匀地标记上 ^{14}C ,在技术上的困难是显而易见的。主要步骤是给那些直接作为绿肥或秸秆肥应用的植物标记 ^{14}C ,或者给那些用来喂饲家畜的植物标记 ^{14}C ,使生产标记粪便以制备厩肥。要对植物标记上放射性碳,唯一的方法就是将植物在有利于光合作用的条件下暴露在富含 $^{14}\text{CO}_2$ 的大气环境中。凡是把长成的植株关在密闭透明容器中,如塑料棚下进行标记时,其延续时间都不能超过几个小时,这是由于环境条件不适宜。所以,用这种短暂过程处理的植株,它的所有有机物质就不是均匀地标记了的:光合作用和代谢作用的最初产物,如单糖、氨基酸等受到的标记程度最高;而聚合的贮存物质(如蛋白质、多糖等)则只受到微弱的标记;至于骨架物质,如木质素则几乎未被标记。利用这种不均匀标记的植物来研究有机肥料的转化作用,就会导致对高聚物的最初的重要分解过程作出偏低的估计,因为这些物质的放射性比强很低。这又会导致对土壤中实际发生的过程作出错误的解释。因此,关于用非均匀标记的有机肥料所进行的研究工作,不在本文考虑之列。

要给植物均匀地标记上 ^{14}C ,就只有把植物从发芽直到收获都置于含有恒定放射性比强的 $^{14}\text{CO}_2$ 的大气环境中才有可能。要达到这个目的,就得把植物种在通过调节温度、湿度和养分供应而给植物提供最适环境条件的严密封闭的生长室(Growth Chamber)中,这个生长室装有给植物供应 $^{14}\text{CO}_2$ 的自动调节装置。直至最近,用于这方面的气密生长室,还没有进行商业性的制造。但是,已有一些对此感兴趣的科学家进行了建造。例如,在美国、大不列颠、德国和丹麦的几家研究所中已建有这种生长室。Zeller等人曾对一些比较老的生长室作过简要的描述。他们在设计和建造设在奥地利维也纳的联邦农业化学试验站中的生长室时,采用了这些较老的生长室的一些十分确定了的原理。Oberlander和Roth使用了这个生长室。经过七年,他们在该室中分别栽培了13茬作物,包括青玉米或成熟玉米或者小麦,获得大约20公斤的总干物重(表1)。所有作物都是以 ^{14}C 来作均匀标记,其中之一还附加标记了 ^{15}N 。从表2的近似分析数据可以确证,标记物质在植物物质和所制备的肥料中是均匀分布的。

表 1 生长室中 ^{14}C 标记植物的产物

批 次	植 物 种 类	株 龄 (日)	收获总植株的干重 (克)	总植株的放射性比强 (^{14}C 微克/克C)
A (1)	青 玉 米	80	99	108
B (1)	"	53	473	110
C (1)	春小麦、青	35	209	92
D (1)	" "	28	154	99
E (1)	春小麦、成熟	100	875	171
F (1)	" "	169	3673	233
G (1)	青 玉 米	48	992	98
H (1)	"	59	1723	278
I (1)	春小麦、青	35	483	203
J (1)	" "	38	373	126
K (2)	春小麦、成熟	169	2300	183
L (2)	" "	318	4720	31
M (8)	" "	189	4321	124 (4)

(1) Oberlander和Roth的资料

(2) Roth未发表的资料

(3) Oberlander和Roth的资料

(4) 用14.88% ^{15}N 原子附加标记

从分析结果的近似值显示出来的标记物
在肥料各级分中的均匀分布状况

表 2

肥 料 级 分	标 记 碳 (微克 ^{14}C /克碳)				标 记 氮 (^{15}N 原子%)
	绿肥 ^(3,6)	秸秆肥 ^(4,7)	厩肥 ⁽⁷⁾	秸秆肥 ^(5,8)	
全 肥	110±7	221±16	32±1	125±2	14.9±0.1
热酒精—苯 (1:2) 溶性物	105	212	35	116	15.3
热酒精—苯 溶性物	114	205	34	118	14.9
冷 KOH (17%) 溶性物	108 (2)	(1)	(1)	(1)	(1)
“ “ 不溶物	116	(1)	(1)	(1)	(1)
热 HCl (2%) 溶性物	(1)	230	29	121	14.4
冷 H_2SO_4 (72%) 水解物	116 (2)	217	24	126	14.3 (2)
未水解的残渣	115	227	32	125	14.3

(1) 未测 (2) 以差值计算 (3) 用表 1 B 批玉米制备 (4) 用表 1 E 批小麦和 F 批小麦 (1:1) 混合制备 (5) 用表 1 M 批小麦制备 (6) Roth 等资料 (7) Zeller 等资料 (8) Danneberg 和 Roth 资料

最近, 一间由厂商建造的、具有精密结构的生长室, 在德国波恩大学农业化学研究所安装起来了, 并由 Sauerbeck 和 Johnen 成功地启用。

生产标记厩肥, 除了是一种颇耗资金的事外, 还会遇到各种几乎是威慑性的困难。为了生产足够数量的标记饲草, 就需要上述专用的巨型生长室; 在处理这样大量的放射性物质上, 又有一些放射性防护问题发生。为了确保用制备的饲草稳妥地喂养家畜以获得尽可能均匀标记的肠内容物, 还必须有兽医人员的协助。在许多日子中, 自始至终要把家畜排泄物收集到装甲容器中, 这又免不了有兽医卫生和放射防护问题的发生。由于在腐熟过程中把家畜粪便与标记褥草混合以及粪肥的贮存都需要作某些控制, 以安全清除发酵气体产物, 所以, 标记厩肥的整个制备过程必须限定在特殊装备的畜舍内进行。

Sauerbeck 是用标记的植物物质喂饲老鼠而制得均标记的肥料模拟物质的第一个人。Zeller 等在兽医人员的监督下, 用几乎 6 公斤的均匀标记的干玉米和小麦植株喂饲一头牛, 并在控制条件下分别收集粪尿。将适当数量的粪尿和具有同样放射性比强的均匀标记的褥草混合, 经过三个月的腐熟期后, 他们得到了含水量为 82%、C/N 比为 16 的产物 68 公斤。这种最终产物在各方面都类似腐熟厩肥。它的均匀标记程度有如表 2 的近似分析数据所示。

^{14}C 标记肥料试验的特点

由于标记粪肥不易制备, 所以对这些物质在土壤中的转化 (turnover) 的研究, 主要是在实验室内用模拟试验来进行的。因此, 土壤—肥料混合物是放在玻璃容器中于恒温下加以培育。给容器通以恒湿的无 CO_2 的气流; 由于微生物活动, 混合物中所产生的二氧化碳总量 $(\text{CO}_2)_{\text{sm}}$, 包括从粪肥产生的标记二氧化碳 $(\text{CO}_2)_{\text{m}}$ 和从土壤产生的未标记的二氧化碳 $(\text{CO}_2)_{\text{s}}$ 。把这些二氧化碳通过吸收溶液加以吸收。对吸收溶液进行化学分析和辐射度分析 (radiometric analysis) 就测得总二氧化碳 $(\text{CO})_{\text{sm}}$ 的放射性比强 $*A_{\text{sm}}$ 。当这两个来源的二氧化碳混合在一起时, 则来自肥料的二氧化碳的放射性比强 $*A_{\text{m}}$ 对总二氧化碳的放射性比强之比, 反比例于肥料二氧化碳量对总二氧化碳量之比:

$$\frac{{}^*A_m}{{}^*A_{s,m}} = \frac{(\text{CO}_2)_{s,m}}{(\text{CO}_2)_m} \quad (1)$$

于是来自肥料的二氧化碳量 $(\text{CO}_2)_m$ 为:

$$(\text{CO}_2)_m = \frac{{}^*A_{s,m}}{{}^*A_m} (\text{CO}_2)_{s,m} \quad (2)$$

而来自土壤的二氧化碳量 $(\text{CO}_2)_s$ 为:

$$(\text{CO}_2)_s = (\text{CO}_2)_{s,m} \left(1 - \frac{{}^*A_{s,m}}{{}^*A_m}\right) \quad (3)$$

这种方法可以给人们提供有关有机肥料分解速率和新施用的有机肥料对土壤原有的有机物质所发生的任何影响的知识。但是,如果所探求的是关于遗留在土壤中的有机肥料内部的转化知识的话,而土壤——肥料混合物的总碳量和放射性碳量又增加以测定了的话,则式(2)和式(3)可以分别用C值代替 CO_2 值来进行校准。从而得:

$$C_m = \frac{{}^*A_{s,m}}{{}^*A_m} C_{s,m} \quad (4)$$

$$C_s = C_{s,m} \left(1 - \frac{{}^*A_{s,m}}{{}^*A_m}\right) \quad (5)$$

现在应用的湿烧和干烧的定碳法很多。其中之一,是以干烧和测定 CO_2 吸收溶液的导电性为基础的,有如Koch和Malissa所描述。这个方法曾被证明对于大批土壤样本和腐殖质样本的分析是特别有效的;本文作者的实验室,就采用它通过计数器端面窗(end-window)或液体闪烁计数法进行连续定碳。

刚开始研究标记性有机肥料在土壤中的腐殖化作用时,土壤有机质分组方法的一些缺点就暴露出来了。为了把腐殖化的土壤物质和有机肥料中未腐殖化的成分分离开来,曾制定了许多浸提方法。但是,在这些浸提剂中,没有一种是堪以选来作出分明的分离的。所以,在用这些浸提剂分离腐殖化物质时,从有机肥料中总有可察觉数量的,在这方面的行为上与腐殖物质部分相似的非腐殖化成分,与已腐殖化了的物质一同被浸提出来。因此,即使从用来制备绿肥的完全未腐熟的植物之质也能分离出“腐殖质级分”来,就不是奇怪的事情了,而是这类试验的极其共同的特点。所以标记的有机肥刚与土壤混合,腐殖化作用还没有发生时,在腐殖质级分中就可检出可观数量的放射活性标记物(见图9与图10)。此外,Sauerbeck和Fuhr以及Oberlander和Roth发现,有机肥无论是单独进行分级或者与土壤混合后分级,标记碳在各个级分中的分配模式都是不同的(表3)。与标记的单独有机肥比较,从混以土壤的标记有机肥提取到的“非腐殖物质”标记较弱,而“腐殖物质”则标记较强,这大概是由于土壤——肥料混合物中有些标记的低分子化合物被土壤腐殖质胶体吸附的缘故。因此,腐殖质级分中的标记碳的表观值,未必是施用的有机肥的腐殖化作用的证据。

标记的土壤——肥料混合物分级方法的这种缺点,决不是反应用标记肥料的论据,它只证明早期作者的下述推测,即认为在腐殖质化学中的分组分级方法并不得到化学上的均质的级分,得到的而是对某一浸提剂具有相同行为的各种化学物质的混合物。为了评述和克服这些困难,人们曾献出很大努力;但是本文作者倒与Jenkinson有同感,觉得要有完美的有效分离法也许是根本不可能的。

表 3

在用“腐殖质浸提剂”处理标记的新鲜绿肥
所得的各级分中, 标记碳的百分分配状况

肥 料 级 分	绿 肥 物 质			
	油 菜 茎 叶 (1)		玉 米 茎 叶 (2)	
	纯 绿 肥	混 土	纯 绿 肥	混 土
非腐殖物质	15.6	12.5	21.1	14.4
“胡敏酸”与“富里酸”	26.9	33.1	2.1	5.2
不溶性残渣	27.5	54.4	73.4	78.6
损失量			3.4	1.8

(1) 引自Sauerbeck Führ, 用热的1.34N Na_3PO_4 和热的0.5N NaOH 连续浸提。

(2) 引自Oberlander和Roth, 用热酒精—水和冷的0.1M $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 连续浸提。

然而, 可以这样设想: 腐殖质级分中标记的不稳定性杂质是随时间的进展而逐渐分解消失的, 最后腐殖质级分的标记程度就成为有机肥料在土壤中实际腐殖化的可靠指标。

在实验室条件下的封闭系统内进行的培育试验, 是具有高度严谨性的, 因为环境的影响能够保持很恒定。但是, Birch观察到, 干湿交替可以使土壤有机质的分解发生间歇性的加强。这个观察结果叫我们在解释恒定环境条件下所获得的结果时要持谨慎态度。Sauerbeck通过使容器中的土壤干湿交替而获得可观程度的“室外条件”。但是, 对于实用农业来说, 凡是正确的结论都只能来自田间条件下的试验。由于标记有机肥料数量有限, 就只好进行室外盆钵试验了。在这方面进行开拓性研究工作的是Jenkinson, 他把标记的黑麦草加到土壤里去, 并将混合物置于埋在土壤里的专用盆钵中, 保持几年不种作物。Führ和Sauerbeck则用秸秆肥在不种作物和种上作物的条件下进行了类似的室外试验, Sauerbeck和Führ并继续这些试验, 以研究不同作物轮作的影响。

然而, 更多的与田间实际发生的过程有关的知识, 则是从真正农作条件下的田间试验得来的。自不待言, 由于标记有机肥料的供应数量有限, 这种试验的小区面积就大受限制, 从而带来一些严重的麻烦, 如明显的边行效应 (edge effect), 由于从有限的面积中重复采样而使表土下沉, 不能应用普通型号的耕作机具等等。尽管有这些缺点和不足, Zelles等人还是开始了用 ^{14}C 标记的有机肥料进行小规模田间试验, 并由Oberlander和Roth贯彻执行; 最近还增加了从重标记 (^{14}C , ^{15}N) 秸秆肥的小区。在这个试验中, 像下述的大量困难已经得到克服, 例如在制备足供六个处理四次重复 (小区面积为 1.5M^2) 需用的标记有机肥料的大量放射性碳的处理, 由于在小规模的小区中不大可能重复采样而需要使土样均一的问题, 以及由于标记物质在土壤中的显著稀释、稀释程度并与时俱增的情况下 ^{14}C 辐射度检定困难。

三、田间条件下获得的结果

(一) 有机肥料在土壤中的分解

(1) 分解的速率和程度 (extent)

在农学家中, 认为绿肥和未腐熟的秸秆在土壤中分解迅速而且彻底者, 大有人在。这种

观点是以带有上述缺陷的常规田间试验结果为根据的。

由于同位素的发现和 ^{14}C 均匀标记的植物物质的生产，我们就可以很精密地在田间研究有机肥料在好几年间的分解作用。有些研究家一致认为，分解作用开始时的速率是高的，一年后，逐渐降至很低的程度（图3及图4）。它表明，不管气候条件如何，所施用的绿肥或秸秆肥的碳留在土壤中的数量，一年后约为30%，二年后约为25%，三年后仍有18%。这些观察得自温度变动缓和且雨量分布均匀的地区，如英格兰的东南部和德国的西北部；同时还得自温度变动剧烈而又具有长期旱季的地区，如奥地利。在奥地利，秸秆的分解作用，第一年进行得略为缓慢些（图4）。所有这些结果是颇出人意料的，它们竟与上述的在农学界中的普遍看法大相径庭。

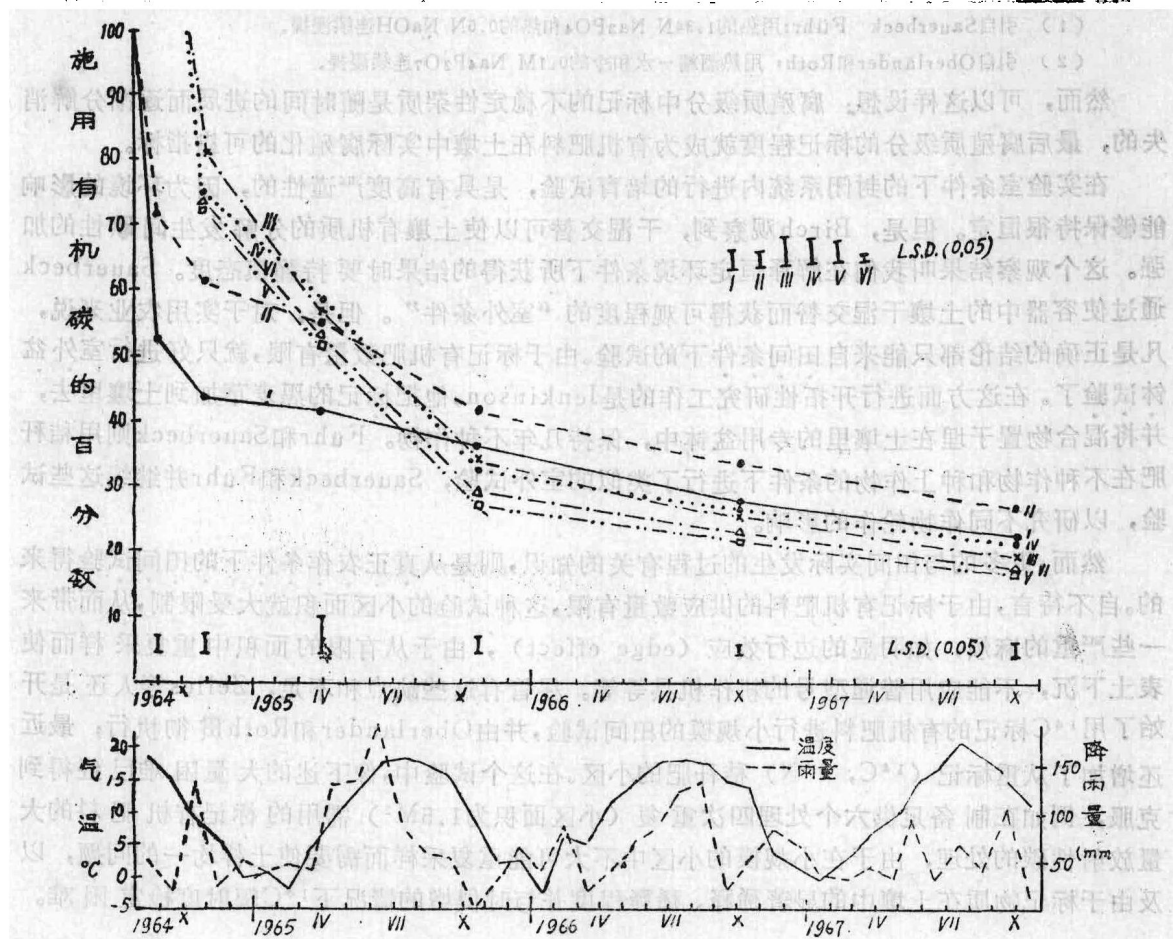


图3 ^{14}C 标记的绿肥在田间（绝对休闲）土壤中的分解
（土壤中所存在的标记碳以施用标记碳的百分数表示）

- I 新鲜绿肥、棕壤
- II 风干绿肥、棕壤
- IV 风干绿肥、黑土
- V 风干绿肥、棕壤、绿肥施用量为II的5倍
- VI 为II+600公斤N/公顷

处理间的L.S.D.如横轴上的线段

采样间的L.S.D.如左上角的线段

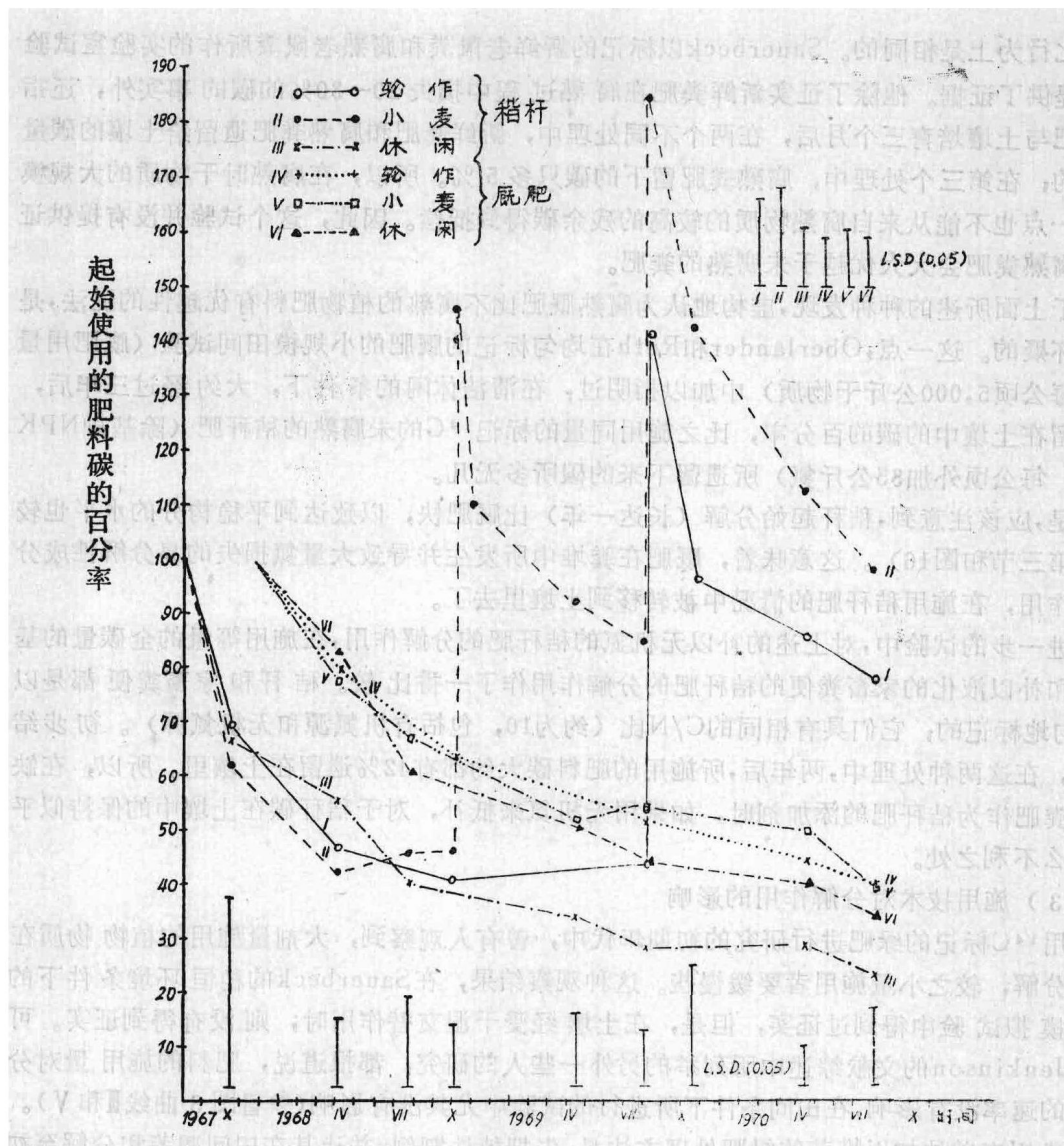


图4 在小规模的田间试验中秸秆肥和厩肥（二者均标记以 ^{14}C ）的分解作用
（土壤中所存在的标记碳以开始时所施用的标记碳的百分数表示）

小麦小区每年施以秸秆肥。

轮作小区三年两次施以秸秆肥。

休闲小区于开始时施用秸秆肥。

厩肥处理各小区均只于开始时施用。

（2）腐熟物质和未腐熟物质的行为

对于仍兼营家畜饲养业的谷物农作地区来说，具有特别意义的是，施用无褥草的新鲜厩肥能比施用腐熟厩肥节约大量劳动力。但是，广泛地存在着这样一种见解，认为施用充分腐熟的厩肥更好些，因为这种厩肥含有大量的在腐熟过程中所形成的稳定性腐殖物质。持这种看法的人，无视由于堆腐过程中的矿化作用而必然引起的有机物质的损失。于是，问题产生了：放弃费力的粪堆制备，把新鲜粪肥施到田间从而使整个微生物分解过程转移到土壤里去，这样做是否明智呢？要作出肯定的回答，就必须有证据证明新鲜粪肥和腐熟粪肥在土壤

中的转化行为上是相同的。Sauerbeck以标记的新鲜老鼠粪和腐熟老鼠粪所作的实验室试验给这事提供了证据。他除了证实新鲜粪肥在腐熟过程中损失20—30%的碳的事实外，还指出，粪肥与土壤培育三个月后，在两个不同处理中，新鲜粪肥和腐熟粪肥遗留给土壤的碳量是相等的；在第三个处理中，腐熟粪肥留下的碳只多5%。所以，在腐熟时干物质的大规模损失，一点也不能从来自腐熟物质的较高的残余碳得到抵偿。因此，这个试验并没有提供证据证明腐熟粪肥会大大优越于未腐熟的粪肥。

鉴于上面所述的种种发现，虚构地认为腐熟厩肥比不腐熟的植物肥料有优越性的说法，是颇值得怀疑的。这一点，Oberländer和Roth在均匀标记的厩肥的小规模田间试验（厩肥用量相当于每公顷5,000公斤干物质）中加以指明过：在清洁休闲的条件下，大约经过三年后，厩肥遗留在土壤中的碳的百分率，比之施用同量的标记 ^{14}C 的未腐熟的秸秆肥（除基础NPK用量外，每公顷外加35公斤氮）所遗留下来的碳所多无几。

但是，应该注意到，秸秆起始分解（长达一年）比厩肥快，以致达到平稳构分的水平也较快（见第三节和图16）。这意味着，厩肥在粪堆中所发生并导致大量氮损失的易分解性成分的腐解作用，在施用秸秆肥的情况中被转移到土壤里去了。

在进一步的试验中，对上述的补以无机氮的秸秆肥的分解作用，在施用等量的全碳量的基础上，和补以液化的家畜粪便的秸秆肥的分解作用作了一番比较。秸秆和家畜粪便都是以 ^{14}C 均匀地标记的；它们具有相同的C/N比（约为10，包括有机氮源和无机氮源）。初步结果表明，在这两种处理中，两年后，所施用的肥料碳大约都有42%遗留在土壤里。所以，在缺乏动物粪肥作为秸秆肥的添加剂时，如果用无机氮来抵补，对于秸秆碳在土壤中的保持似乎并无什么不利之处。

（3）施用技术对分解作用的影响

在用 ^{14}C 标记的绿肥进行研究的初期年代中，曾有人观察到，大剂量施用的植物物质在土壤中分解，较之小量施用者要缓慢些。这种观察结果，在Sauerbeck的稳恒环境条件下的一系列模拟试验中得到过证实，但是，在土壤经受干湿交替作用时，则没有得到证实。可是，在Jenkinson的文献综述中所列举的另外一些人的研究，都报道说，肥料的施用量对分解作用的速率没有影响，在田间条件下所进行的试验中尤其没有影响（参看图3曲线Ⅲ和Ⅴ）。

长期以来曾被加以推荐的绿肥处理方法是：先把植株割倒，并让其在田间凋萎和分解至初步干燥（incipient drying），然后才翻埋入土。新鲜植株立即翻埋入土时，可能引起氮的突然骤增，对种子萌发有害。如果下茬作物不能适当推迟播种时，为了避免有害的作用，令植株先行分解，看来似乎是合理的。但是，在地面上进行缓慢的预干燥，也曾被作为一种提高有机物质对土壤微生物分解作用的抵抗力的措施来加以倡导。Oberländer和Roth试图验证这个假设。他们确实发现，当绿肥物质先加以温和预干燥一些日子，其在土壤中的分解作用就比较缓慢些（参看图3的曲线Ⅰ和Ⅱ）；但是，在预处理中，植物已经损失了35%的碳。对预干燥的绿肥在土壤中分解时所节省的碳和在预干燥时所损失的碳之差额进行测算后，得到的结论是：只有快速干燥才有可能获得碳的净节余。

关于在标记有机肥的分解作用上，氮所施预的影响，现在几乎还没有什么结果可资利用。在Sauerbeck的室内试验（在干湿交替条件下进行）中，N（以 NH_4NO_3 形态施入）的影响，对富氮（0.36%）土壤来说几乎为零；对缺氮（0.05%）土壤来说，则是可观的。加入的氮素促进了秸秆的分解，最初几个星期的促进作用较往后为大。Oberländer和Roth在田间

条件下以标记绿肥加氮（每公顷600公斤氮）进行的试验，亦得到相似结果（参看图3的曲线Ⅲ和Ⅵ）。

（4）土壤因子的影响

土壤因子在对绿肥分解作用上的影响是微小得惊人的。不管是土壤有机质含量也好，或土壤pH也好（除非pH低于5），在这方面都不发生什么作用；强酸性土壤能延缓绿肥的分解作用，有为Jenkinson的标记的黑麦草绿肥试验所指出的一样。但是，土壤的机械组成（土粒大小分配）则有所影响。所施入的物质的分解作用，随着土壤粘粒含量的增加而延缓，但是并不成比例。Jenkinson认为，机械组成在这方面的效应，部分地是由于砂质土壤的淋失作用较大；部分地是由于粘土可能防止施入的有机物质的矿化作用。Oberländer和Roth在化学成分上和土粒大小分配上都无太大差别的两种土壤从事标记绿肥的研究时，也未发现这两种土壤在碳的保持数量上有任何差异（参看图3的曲线Ⅲ和Ⅳ）。

（5）耕种的影响

目前，从英国、德国和奥地利以标记的有机肥所进行的长期耕种试验（以研究植被对分解作用的影响）中，获得了一些有用的资料。Jenkinson发现，在草地条件下，一年后绿肥留给土壤的碳为39%，而在清洁休闲时则仅为28%。Sauerbeck和Führ在他们研究标记的秸秆肥在根实作物轮作、谷类作物轮作和在清洁休闲下的转化时，也得到相似的结果。在根实作物和在清洁休闲的条件下，第一年中物质的分解较之在谷类作物的条件下为快，但是，两年后，这种差异就消失了。因之，在考虑到持久作用时，这种差异似乎并不是重大的。

Oberländer和Roth未能证实上述结果；他们在轮作（糖甜菜——冬小麦——春大麦）、连作春小麦和清洁休闲对标记的秸秆肥第一年分解的影响之间，并未检验出有什么显著的差异（由于轮作小区和连作小麦小区重复施用标记秸秆肥，致使在以后无法继续再与只于开始时一次施肥的休闲小区相比较）。然而，他们对耕种措施对标记肥分解的影响则整整跟踪研究了三年，可是，发现处理之间的差异等于零（见图4的曲线Ⅳ至Ⅵ）。

Jenkinson以及Sauerbeck和Roth在就休闲促进有机肥的初期分解作用上，都提出了颇不同的解释。但是，由于这种效应并不持久，本文作者认为，作物对有机肥料的矿化作用过程的影响不应过份强调。

（6）“激发作用（Priming action）”

当¹⁴C标记的植株开始成为可资利用之物时，一种可能由于施用易分解性有机肥而发生的生物学效应，就曾受到很多的注意，比耕种措施受到的注意多得多。这种生物学效应就是“激发作用（Priming action, effect excitateur, Zündwirkung）”。早在几十年以前，Zöhnis就曾认为，当易分解性的有机肥施入土壤里去时，可能促使土壤中早已存在的“原来的”有机物质分解，尽管这种效应可以袭用颇为麻烦的方法加以测定，但是，只有在同位素技术引入应用后，才可能获得确凿的实证。根据这些试验，提出了这样一些见解，认为施用易分解性有机肥可能弊多利少，因为这种有机肥会使土壤丧失其稳定性有机物质的贮备。

测定土壤中的激发作用，就免不了要在施用肥料的起始效应停止后，对原来的未标记碳遗留在施肥土壤中的和遗留在未施肥土壤中的数量之间的极微小差异加以测定。由于这种差异的数量级，是与土壤碳测定上的分析误差是同级的，因此，要在标记肥料的田间试验中检定激发作用，就并不是可能的。所以，所有有关这方面的知识，我们都是从测定在实验室内培育的施肥土壤所释放出来的CO₂引导出来的。图5所示，为未施肥土壤所释放的（CO₂），

如何由于施入易分解性有机肥而提高，以致竟达到 $(CO_2)'_s$ 的数量的。差量 $\Delta(CO_2)_s$ 是由于激发作用所产生的增量。从有机肥料所产生的 $(CO_2)_M$ ，在用不标记的肥料所进行的传统试验中被过高地估计了。由此可见，同位素技术的优越性是十分明显的。

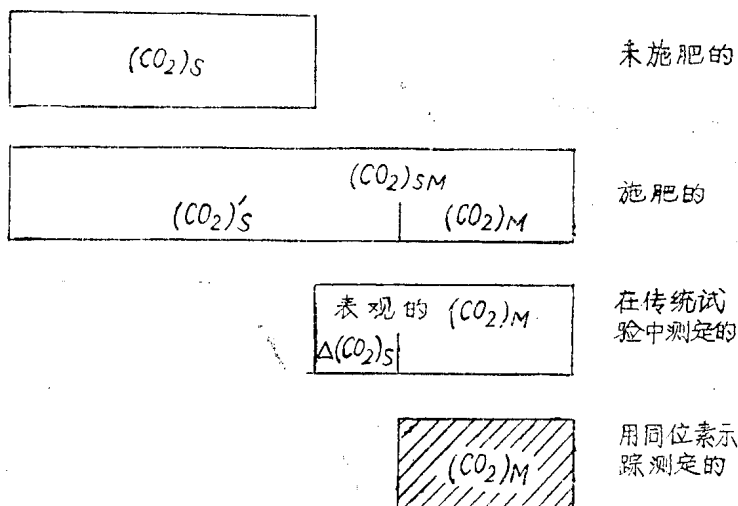


图5 “激发作用”图解

$(CO_2)_s$ 来自不施肥的土壤。

$(CO_2)'_s$ 来自施用新鲜有机肥后原有土壤的有机质。

$(CO_2)_M$ 来自有机肥。

$(CO_2)_{sM}$ 来自整个土壤—有机肥混合物。

$\Delta(CO_2)_s$ 来自原有的土壤有机物质，是 $(CO_2)_s$ 的超额，由于“激发作用”所致。

这种激发作用在农业生产实际中是否具有什么重大意义，仍有待研究。对这个课题作过评述的一些作者一致指出，只有在大约20年前应用同位素技术的初期研究工作者才观察到巨大的效应；但是，在大量的近期研究工作中，则未有报告报导过其效应有如初期工作中所发现的那么严重。这是否是由于技术有了逐渐改善的缘故呢，还不清楚。Jenkinson论证过有些表现的激发效应可能是由于诸如这样一些试验误差而来的，例为应用非均匀标记的有机肥、 $^{14}CO_2$ 与土壤碳酸盐交换以及由于新鲜有机物质所诱发的土壤微生物区系的改变等等。如果这些误差的来源设法加以排除，则激发作用的原因可能就在于能触发微生物孢子的萌发，从而形成活细胞，导致出现较高的呼吸作用。由于微生物酶随后就大量产生，原来的稳定态腐殖物质因酶的作用而崩析可能性就增长了；还有可能是，植物物质分解作用的一些新鲜产物可以使得原来的土壤有机物质更易分解，酶促反应的不断增加就导致腐殖物质发生适当的降解，

Sauerbeck对1946年以来发表在文献中的有关激发作用的资料进行了核算，他发现在所检验过的每个试验（仅有一个例外）中，土壤中原来的碳由于激发作用而矿化的数量，都从以稳定形态最后遗留在土壤中的肥料碳的数量得到补偿甚至有余。他在以干湿交替处理模拟田间条件的室内试验中发现，在每次再湿润后的一个短暂的时间内，激发作用都有显著的增强。但是，即使在这些条件下，由于施用有机肥料的作用，土壤碳被矿化的数量也从未多于以稳定形态在土壤中保有肥料碳的数量。他断定，只要稍为提高有机肥料的常年施用量，就

不难避免碳平衡突然出现紊乱。在本文作者看来，激发作用似乎成了学究式的无休止的议题，但是，它确实决不是反对在田间增加施用未分解有机肥的理由。

(二) 有机肥料向腐殖物质的转化作用

对有机肥料在恢复土壤有机质上的作用的任何评价，都不能把问题限制在考查肥料碳在土壤中是否有遗留和遗留多少上，而必须进而研究肥料转化为稳定态腐殖物质的过程，大家都深知，土壤有机质的高分子腐殖化的组份（德语称之为“Dauerhumus”）是腐殖质的“间接作用”，即它对土壤物理性质和化学性质产生影响的源泉。既然这是有机质在土壤生产力上产生有利效应的主要因素，所以，主要地以肥料转化为土壤中腐殖物质的程度为根据来评定肥料的价值，就是顺理成章的了。

对于以标记有机肥做的研究在这方面所获得的结果，由于第二章第三章中所评述的理由，应该谨慎地加以解释。以标记物质进行的许多研究都表明，在腐殖化和未腐殖化构分之间是不可能完整分离的。因为，举凡土壤有机质的级分划分，都是定出适宜的化学上的界域。主要的困难是有机肥料高分子组份，特别是木质素与胡敏酸级分一起发生的某些共同溶提作用。这种作用就木质素含量低的物质（如绿肥）来说是比较无紧要的，但是，对于秸秆或厩肥来说则是值得重视的。然而，应该记得，当共同溶提出来的不稳定的杂质被分解时，这些缺点就不那么重要了。

有些研究家在实验室试验中当施入的标记物质进行分解作用时，对标记原子在土壤有机质各个级分中的分配状况作了研究。Simonart和Mayaudon以及Mayaudon和Batistic都这样做了。他们从标记的植物中把各种组分分离出来，然后施入土壤里去以研究其腐殖化作用的生物化学。但是，从田间条件下的试验得到的有用结果，为数还是很有限的。

有机肥料的非腐殖质组份这一级份是步趋整体物质的一般分解模式的。图6所作的系列为从土壤分离出的乙醇—水溶性级份，而该土壤曾在田间条件下施用过标记的青玉米秸秆作为肥料（参阅图3）。以前，在关于酸溶性非腐殖物质的实验室试验中，就曾经获得过相同的结果。

不溶于“腐殖质溶提剂”的级份被称为胡敏素，并被认为包含有颇具惰性的胡敏酸——粘粒复合体。在标记的绿肥物质刚刚施用之后，这一级份的标记本应为零，而后即应与时俱增。但是，在图7所示的试验中，情况却相反。这些曲线并不反映胡敏素——粘粒复合体的形成，倒是反映着肥料的污染组份，大概是纤维素的分解。

关于定期地从土壤溶提出的胡敏酸和富里酸级分所出现的标记情况，不同的作者提供了不同的描绘。Sauerbeck和Fuhr在这两种级分中，不论它系得自绿肥或秸秆肥，都发现其标记作明显的平稳下降。起始时期中的降低，暗示着共同溶提的非腐殖物质的分解；在后期，标记的降低，自然就可能是由肥料所形成的腐殖物质中不太稳定的部分的分解。应用热的氢氧化钠液作为溶提剂时，也可能导致一个初期的高标记。因为大家都知道，这种溶提剂由于同时溶提出非腐殖质化合物而产生高分子的臃象。

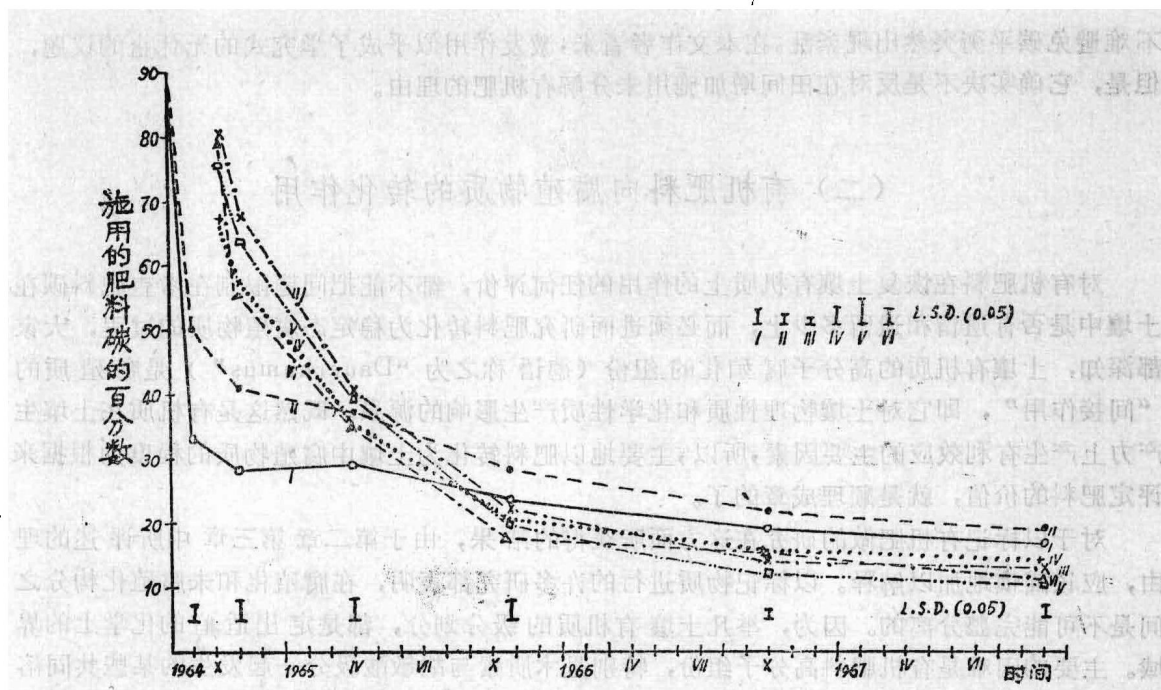


图6 在两种施用 ^{14}C 标记的青玉米绿肥的土壤中，标记的非腐殖质级份（溶在乙醇和水中）的分解作用（级份的标记碳以所施用的标记的肥料碳的百分率表示）。

详细注释见图3

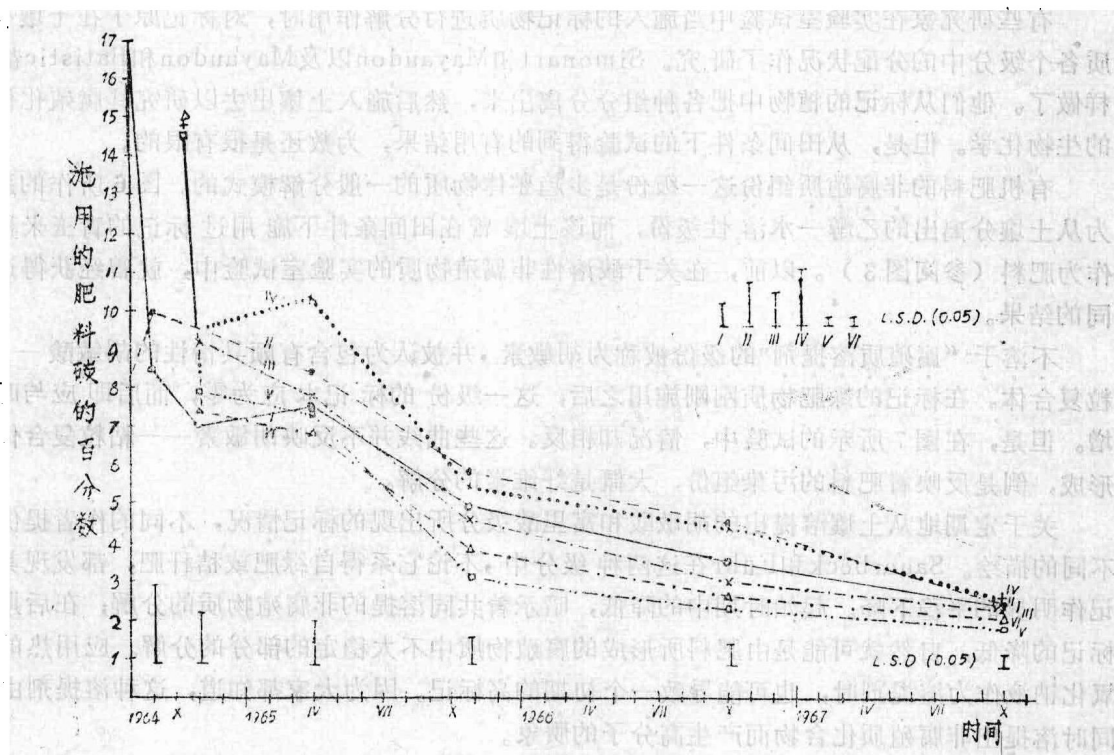


图7 在两种施用 ^{14}C 标记的青玉米绿肥的土壤中，标记的不溶性残渣（用焦磷酸钠不能溶提的）的分解作用。（级份的标记碳以所施用的标记肥料碳的百分率表示）。

详细注释见图3。

由于选用一个比较温和一些的、尽管不是那么完全彻底的溶提剂（即焦磷酸铋），Oberlander和Roth似乎能够早在起始时期就探查出绿肥胡敏酸的形成（图8）。作者指出：过程开始时进行得颇快，一个月后就形成了可观数量的标记胡敏酸，其后几个月，标记的级份达到最大值，而后开始以平稳而极缓慢的速率下降。有些作者甚至证实起始期更为短促：在堆肥中，只需10天， ^{14}C 标记的胡敏酸级份就达到饱和；在土壤中， ^{14}C 和 ^{15}N 标记的胡敏酸甚至在24小时后即达到最大值。这些示踪物试验所显示的腐殖物质的形成是迅速得颇出人意料的，它们是有悖于农业化学中的传统见解的。

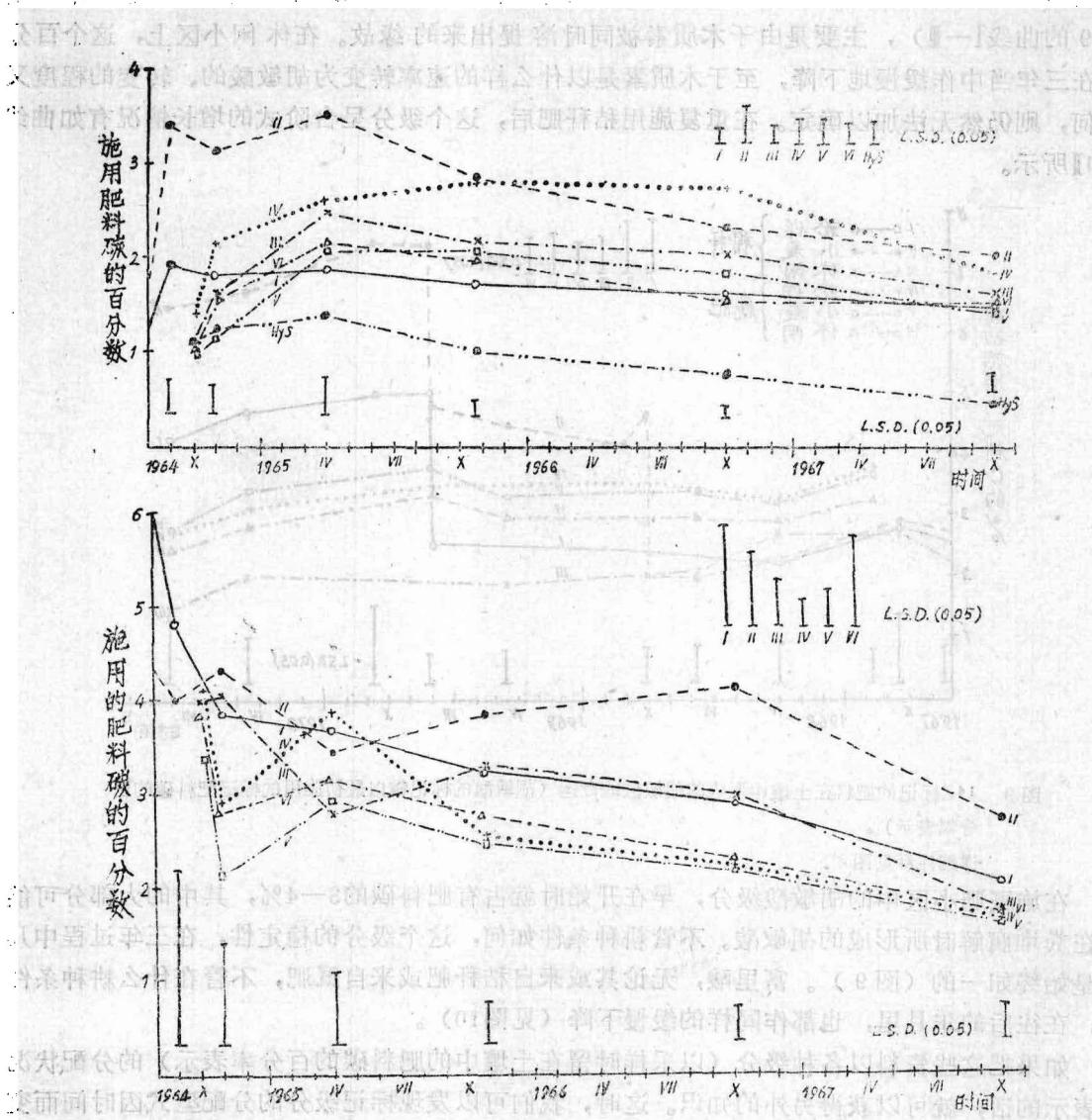


图8: ^{14}C 标记的绿肥在土壤中形成的胡敏酸（上）和富里酸（下）的命运。

HyS=吉马多美朗酸

详细注释见图3