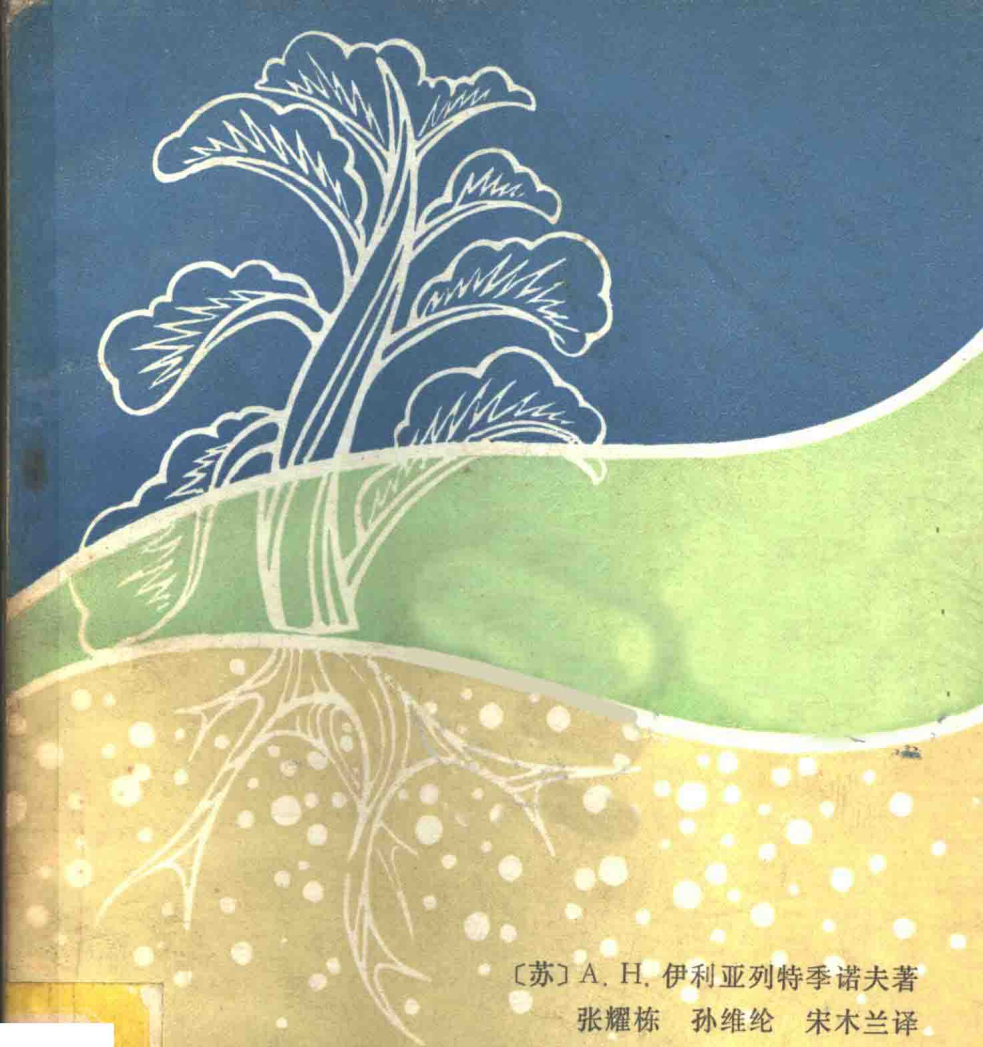




〔苏〕A. H. 伊利亚列特季诺夫著

张耀栋 孙维纶 宋木兰译

丁瑞兴校

氮化合物在土壤中的转化

含氮化合物在土壤中的轉化

【苏】A. H. 伊利亚列特季诺夫 著

张耀栋 孙维纶 宋木兰 译

丁瑞兴 校

农业出版社

МИКРО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ АЗОТСО-
ДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ В ПОЧВЕ

А. Н. ИЛЯЛЕТДИНОВ

Издательство «НАУКА» Казахской ССР
АЛМА АТА. 1976

含氮化合物在土壤中的转化

〔苏〕 А. Н. Ильялетдинов 著

张耀栋 孙维纶 宋木兰 译

丁瑞兴 校

* * *

责任编辑 陈菁华

农业出版社出版 (北京朝内大街130号)

新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 7.75印张 171千字

1985年12月第1版 1985年12月北京第1次印刷

印数 1--2,400册

统一书号 16144·3056 定价 1.60元

序 言

参与土壤物质循环的化学元素中，氮素占有特殊的位置。氮素的转化过程虽可能有纯化学反应，但大部分是通过微生物途径来实现的。氮素与碳素不同，后者在有机化合物组成中可氧化成二氧化碳，并挥发到大气中去；而氮素往往处在同一个循环中。当含氮有机化合物矿化时，大量的碳素以二氧化碳的形态释放出来，而氮则留于微生物细胞质的组成里，并不断的循环变化，即蛋白质的破坏和重新形成。Harmsen (1964) 曾采用科学转义词“土壤氮素的矿化-固定化的循环”。这类转化实为铵形态的转化，称作“持续的内循环”。

借助含氮有机化合物的矿化作用释放的氮素，是供给植物生存必需元素的主要途径之一。无论是土壤和肥料的矿质态氮，还是为微生物所固定的大气分子态氮，均会通过这一途径。

该元素的另一循环是铵被微生物氧化成硝酸盐（硝化作用），以及硝酸盐还原成氨或分子态 N_2 （反硝化作用）。这就是氮素转化的氧化-还原或硝化-反硝化途径。

研究土壤、植物残体和肥料的氮素转化过程，与研究自生和共生微生物固定大气中氮的规律性不同，在国内土壤微生物学方面的文献中未作应有的阐明。

随着农业生产的强化而伴随矿质肥料的广泛使用，研究

该问题，在学术上和实际应用上的意义都正在增长。生产和施入土壤的矿质肥料在不断增加，苏联 1970 年以矿质肥料形式用于农业上的氮为 380 万吨，施用有机肥料（厩肥）而进入土壤中的氮为 250 万吨（Мишустин，1972）。借助氮素肥料的广泛使用，才能保证本国粮食作物以及其他作物产量的进一步增长。至 1980 年苏联预计生产矿质肥料 1270 万吨（按纯氮计算），那时土壤氮素平衡将是正值。

矿质肥料在提高栽培作物生产率的同时，实质上影响着土壤的生机，可促进生物学平衡。而且，氮素作为化学元素，在土壤微生物的作用下，引起各种各样的转化。本著作的目的是，根据收集到的文献资料以及我们本身的试验材料，总结近年来所积累的关于土壤有机物质和植物残体的矿化作用，以及土壤肥料中氮素微生物转化的研究结果的报道。主要注意到含氮有机物质的矿化作用和硝化作用，后者是引起土壤有效态氮积累的过程。相反，氮的固定作用和反硝化作用使植物有效氮素减少。

了解土壤氮素的微生物转化规律，方能在科学的基础上探索提高和保持土壤肥力的途径，防止有机物质与氮素的损失。

目 录

序言

第一章 植物和土壤起源的含氮有机物质的矿化作用

和胡敏化作用..... 1

土壤中植物残体的矿化作用 4

能矿化植物残体的微生物..... 6

在氮素矿化作用和固定作用过程中碳氮比的意义12

含氮量高的植物物质的分解.....15

植物原料的矿化作用与湿度的关系24

植物残体被微生物分解时植物 毒物质的形成.....39

土壤有机物质的矿化作用及其胡敏化作用48

土壤有机氮化合物的矿化作用与温度变化的关系52

土壤有机物质分解 特性与水气状况的关系58

土壤腐殖物质积累和分解的规律性90

第二章 硝化作用103

自养菌的硝化作用104

有机物质对硝化细菌的影响107

铵离子对 *Nitrobacter* 菌株氧化亚硝酸盐的影响109

土壤条件对土壤中硝化作用速度的影响113

交换性铵和固定态铵的硝化作用.....120

金属离子对硝化作用的影响125

化学物质对硝化作用的抑制作用.....127

异养菌的硝化作用.....132

第三章 土壤中矿质态氮的固定作用	141
微生物同化有效性有机物质时的氮素固定作用	144
微生物分解土壤和植物起源的有机物质时的氮素固定作用	147
土壤翻压稿秆时的氮素固定作用	150
土壤施用纤维素和稿秆时的固氮作用	162
氮素固定作用与土壤水分和通气程度的关系	168
固定态氮的再矿化作用	176
某些元素对氮素固定作用的影响	182
第四章 土壤氮素的损失	185
反硝化作用	188
硝酸盐还原的化学机制	190
反硝化细菌	194
反硝化细菌对有机质的需要	196
反硝化细菌与氧的关系	202
反硝化作用与 pH 值和温度变化的关系	213
土壤中嫌气还原过程的持续性	215
非生物性的氮素损失	217
氨从土壤中的挥发	217
在酸性环境中, 亚硝酸盐分解引起的氮素损失和亚硝酸盐与铵的 相互作用	227
亚硝酸与氨基酸及土壤有机质作用时氮的损失	231
土壤氮素的淋失	233
测定土壤中氮素平衡的意义	236
结论	239

第一章 植物和土壤起源的含氮有机物质 的矿化作用和胡敏化作用

含氮有机物质是供给植物氮素最重要的来源，因此，保持土壤中有机物质含量的稳定水平是当代农业生产的主要问题之一。

土壤有机物质是以生物起源为基础的。И. В. Тюрин (1965) 将其分为活的和死的有机物质。前者有植物根、微生物和土壤动物；后者为腐殖物质。所有这些形态在发生上是相互联系着的。对微生物和土壤动物的发育以及对腐殖质来说，植物的根及其地上残体是碳和氮的原始给源。腐殖质是组成土壤有机物质的基础，其含量变动于每公顷 40 吨（南方灰钙土）到 300 吨（肥沃黑钙土）的范围内。

植物根系占第二位：一年生栽培植物有 3—4 吨干物质；多年生自然植被和栽培植被 10—15 吨；森林植被 20—30 吨。腐殖质与根重之比在腐殖质丰富的肥沃黑钙土中为 40—50，处于森林下面的贫瘠灰化土则为 2。

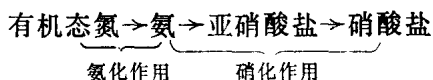
微生物和各种无脊椎动物占第三位，根据 И. В. Тюрин (1965) 的意见，微生物体的最高含量可达 0.5—0.7 吨/公顷。这些数值在最缺乏腐殖质的土壤中（例如灰钙土）约为腐殖质的 1%，最高为 2%；而在腐殖质含量中等或高的土壤中仅占千分之几。

对植物营养来说，在很大程度上，氮比碳更为重要，因氮要在有机物质矿质化之后方成为可吸收的形态。此外，氮素积累量的大小又取决于腐殖质的积累，而腐殖质一般含氮5—6%。因此，腐殖物质形态碳的积累与土壤中有机氮的积累直接相关。在矿化过程中，土壤有机物质的碳、氮部分不均等地被氧化，每释放5—6重量单位腐殖质的氮，就有100重量单位的土壤有机物质被分解。土壤中全氮储存量及矿化速度在颇大程度上可作为判断土壤潜在肥力的指标。

众所周知，矿质态氮在植物营养中起着重要作用。关于植物在无菌条件下吸收氨基酸和简单的脂肪族胺类的能力，正如Harmsen和Van Schreven (1955)论述的那样，意见并不一致。很多研究者对此持怀疑态度。相反，无人对高等植物同化游离的矿质态氮，首先是氨(比硝酸盐的利用要快)的能力引起疑问(Турчин, 1964; Прянишников, 1965; Александрова, 1966)。

因而，氮素的有效化和可给性的概念是与它的有机形态的矿化过程密切相关的。关于有机态氮矿化过程的一般概念在上世纪最后十年就形成了。在这方面，С. Н. Виноградский (1952)曾作出了非常宝贵的贡献。他指出，在地球表层，氮素的整个转化过程中微生物起着独特的作用。

有机态氮矿化过程包括下列几个阶段：



有关有机态氮的矿化作用已由М. М. Кононова(1951, 1963)、Э. Рассел(1955)、Harmsen、Van Schreven(1955)、Harmsen (1964)、Kolenbrander (1965)、Bartholomew (1965)和И. В. Тюрин等编著成最详细的综合报告及

论著。我们简要地叙述关于战前土壤微生物学者在研究土壤有机质和植物残体的分解规律、氮素释放及其为微生物转化方面所得出的主要结论。

在研究土壤中氮素微生物转化的某些历史时期内，研究者有时对这一个，有时对那一个观点表现了较高的兴趣。在本世纪初（20年代以前）对硝化作用的研究给以较多的注意，而对氨化作用则未加重视。因为，在那时候硝酸盐被认为是作物最好的氮素来源。自Д. Н. Прянишников的经典著作发表以后，不少学者及实践家了解到铵态氮在作物营养中的作用，并出现了许多关于氨化作用和该元素矿化作用方面的工作。在那时候所确立的一系列基本原理至今仍有着它的现实性。第二次世界大战以后，特别在苏联，土壤微生物学者对研究固氮过程给予了极大的关注，而使土壤和肥料氮素转化的研究受到了影响，因此，当总结这些问题的学术资料时，常常需要凭借外国的试验材料。

通过大量的工作确定，有机物质矿化速度和从中释放氮素的速度，首先取决于被分解的有机物质中碳与氮之比（C:N），只要原料的C:N等于或低于20:1，便有矿质态氮的释放。高于上述C:N的植物原料中有二氧化碳释放出来，而所有矿化的氮能迅速地以有机氮形式来构成正在发育的微生物细胞。

硝化作用规律的研究表明，亚硝酸盐在进行这种过程的土壤中的积累是很弱的或者根本不存在。这说明了硝化作用第二阶段的速度要比第一阶段快。在休闲的土壤中，矿质态氮含量是冬季低；而春季及夏季前半期迅速增长；到秋季则降到冬季的水平。在栽培作物的土壤上，矿质态氮的第二个最低限出现于夏季的中期，即在作物生长盛期。收割后进入积

累的第二個高限。一致認為，冬季的最低限，是由于在濕潤氣候下，氮素強烈淋溶和低温對礦化過程的抑制所造成的。在春季，土壤中氮素的迅速增長，可解釋為由于嚴寒對局部的土壤“滅菌”所引起的有機物質移動性的提高及其對微生物有效性的增加。在生長植物的土壤中，氮素含量的減少決定于兩個原因：第一，為植物所吸收；第二，為依靠根系的含碳分泌物和腐爛根茬而大量發育的根際微生物區系所固定。

本章將討論含氮物質礦化作用研究中的兩個主要方面：植物起源的蛋白質礦化作用和土壤有機物質，特別是它的易水解部分的礦化作用。

土壤中植物殘體的礦化作用

每年有大量的有機物質隨落葉及死去的植物進入土壤。在闊葉林中每年落葉重量約有 1—2 噸，針葉林為 3—9 噸，熱帶林可達 40—60 噸 (Burgess, 1965; Shamot 等人, 1968; Visser, 1969)。對土壤微生物群體的發育有積極影響的植物根系及其分泌物乃是土壤大量的有機物質的來源。

植物根系對土壤生命表現出很大的影響。它們分泌出大量的有機化合物和二氧化碳，后者是微生物分解有機化合物而生成的。當評價土壤中兩種 CO_2 來源的比重時，研究者之間的意見是分歧的。許多人認為 30—70% 的二氧化碳產物來自根系的活動；Billes, Cortes, Lossaint (1971) 則認為土壤中 70% 的二氧化碳產生于微生物的生命活動，一年約為 15.6 噸/公頃。

據 И. В. Тюрин (1965) 的見解，由有機物質氧化釋放的能量為微生物所利用的系數不超過 20%。由于分解過程

数倍于微生物细胞物质的合成，因而土壤有机物质的含量会降低。如果说含碳化合物因氧化成二氧化碳而消失，那末大部分氮素则进入含有微生物生物残体的土壤腐殖质组成中去。

植物残落物分解的第一阶段，是以释放二氧化碳的形式而引起大量碳的损耗；氮素为微生物所吸收，此时，未发现矿质态氮的存在。碳素以 CO_2 形式的损失一直延续到 C 与 N 之比接近于 10:1 的水平时为止。此后，矿化过程就会伴随着从蛋白物质中释放出铵来。

微生物分解植物成分中的蛋白物质是在细菌、真菌、放线菌的蛋白分解酶的作用下开始水解。各种氨基酸是水解的产物，部分氨基酸经脱氨基释放出氨，故这过程称为蛋白质的氨化作用。

“氨化作用”这一术语来自法文 “ammonisation”，在上世纪 90 年代第一次为 Эмил Маршел 所运用。他认为，大部分白霉菌具有将蛋白质转变为氨的能力，在一定条件下它们在氨化作用中起着重大的作用（Буткевич, 1957）。他进一步证明，当蛋白物质被低等植物有机体破坏时，氨的形成不是呼吸过程的结尾，而是其开始。

在分解有机氮化物时，氨的积累与介质中糖类的存在呈严格的线性关系。如果没有糖类，则微生物强烈地利用蛋白物质作为碳及能量物质的来源，而氧化氨基酸的氮素残留物会以氨的形态积累起来。如果在介质中存在糖类，则蛋白质在很少程度上被利用，而使氨的积累急剧减少，有时甚至完全停止。所以，氨及硝酸盐的累积仅仅在可给态糖类不足的条件下才有可能。熟悉这些规律性及及早确定翻压植物体等有机肥料对农作物产量的影响是很重要的。

借助微生物酶的水解和脱羧基作用，将蛋白质降解成氨

基酸及胺，是土壤蛋白质分解第一阶段。这些产物能继续为氨基转移酶和脱氨基酶系统分解成铵。这些铵能暂时地或长期地为粘土矿物和木质素所固定，从而在进一步分解中成为稳定的物质。但大部分生成的铵可为高等植物吸收和被微生物同化。多数氨基酸易为土壤微生物区系所矿化，因此，它们在土壤中的含量是极低的。

由微生物分解氨基酸而释放的铵可能在木质素的降解或氧化过程中用来合成腐殖质，亦可被硝化细菌所氧化。

能矿化植物残体的微生物

植物残体的氨化作用是由复杂的微生物群体来实现的，并在分解过程中不断改变其组成(Мишустин, Тимофеева, 1944; Красильников, Никитина, 1945; Калниньш, 1948; Рыбалкина, Кононенко, 1957)。氨化作用在不同环境条件(通气、湿度、温度、pH等)下均能进行，不过是由不同种或亚种微生物所引起的。因此，这一过程较为普遍，比起土壤中其他氮素的转化反应来，它能在更宽的环境因素范围内完成。

土壤微生物种群在数量上的“激增”开始于有机残体施入土壤的初期(1—2周)。在有机物质旺盛分解的初期阶段之后，由于可给态养分来源的消耗及难分解化合物的积累而转入缓慢阶段。

在好气条件下，新鲜植物残体上最初发育的是无芽孢菌类型的微生物，其中有 *Bacterium* 和 *Pseudomonas* 等属。一般可把它们划为微嗜氮性，即在植物残体分解初期本身有满足最低氮量的能力。众所周知，非豆科植物的新鲜残体有着宽的碳氮比，需氮微生物不能使它们矿化，因为在分解植物的地方，氮素受到生物固定作用。И. Л. Клевенская(1971)

曾指出, 接种于新鲜植物原料上的微嗜氮微生物, 其中有很多如 *Pseudomonas*, *Bacterium* 等属的无芽孢细菌, 主要矿化有机质的碳素部分, 缩小被分解物的碳氮比例。

然后, 随着碳氮比的缩小, 在微生物群落中, 芽孢杆菌 (*Bac. cereus*, *Bac. mycoides*, *Bac. megaterium*, *Bac. mesentericus* 等) 以及许多放线菌和真菌开始占优势 (Минустин, Тимофеева, 1944; Klevenskaya, 1972)。据 В. В. Судаков 和 С. М. Ерменсон 的观察 (1970), 从开始分解的第 8 天到 70 天止, 微生物数量达到最高峰, 也是植物残体矿化作用最活跃的时期。此后 (包括下一个春季), 微生物数量显著地减少下来。

在分解初期, 无芽孢细菌占优势, 并逐渐为芽孢杆菌所代替。随后出现放线菌; 真菌是很少的, 但在分解初期也占有一定的百分比。在豌豆稿秆分解的第一阶段, 色素 (暗色) 类型的 *Pseudomonas* 属的无芽孢细菌占主要地位 (Малышев, 1974), 在稿秆翻压后的秋季它们就发育起来。第二年夏季, 腐生性生物的数量急剧减少, 而芽孢杆菌的数量增加。芽孢杆菌繁殖的初期阶段, 占优势的是 *Bac. mycoides*。它不利用矿质氮, 因而在施有大量新鲜植物残体的土壤中亦能较好地发育起来。其后, 当土壤中含氮物质分解并有矿质氮累积时, 善于利用矿质氮的芽孢杆菌 *Bac. megaterium* 和 *Bac. mesentericus* 便占优势。

埃及学者 Taha, El-Damaty 和 Mahmoud (1969) 在观察苜蓿残体翻压入土壤后的微生物活动时指出, 此种环境对腐败细菌的发育显示出有益的作用。在对照区和在施无机肥料的地段上, 芽孢细菌发育较好, 占微生物总量的 15%; 其次是施尼罗河河泥的土壤占 9.1%。在翻压苜蓿的土壤中

发现芽孢杆菌的数量最少，只占5%。由此可得出结论：芽孢杆菌是在有机物质分解的后期才活跃起来的。

当有机体分解时，显微型真菌（Микроскопических грибов）发生质的更替。据 Ж. У. Мамутов, И. А. Чулаков 和 Р. М. Карабалаева (1968) 的研究，在春季，自苜蓿翻压后，在富含分解可给态有机物质的原料上，*Mucor* 和 *Trichoderma* 占多数；而到秋季，当在土壤中留下植物残体的难分解部分时，*Penicillium* 和 *Aspergillus* 属真菌的发育可增强。Sinha 和 Sharma (1961) 指出，在翻压绿肥 (*Crotolaria funcea*) 的条件下，真菌大量发育起来，它们吸收硝酸盐，把此种绿肥转化成有机态氮，从而干扰了通常的硝化作用进程。根据 А. В. Малышев (1974) 观察，在豌豆秆分解初期，有 *Aspergillus* 属的真菌大量繁殖，而后它们为 *Trichoderma* 和部分 *Penicillium* 所更替。

在嫌气条件下，氨化作用是由一系列芽孢和无芽孢细菌 (*Bac. putrificus*, *Bac. sporogenes*) 所引起的。不同种类的蛋白质专一地影响着微生物区系的质的组成。酪蛋白、植物性清蛋白、真菌 *Mucor* 和酵母的蛋白能刺激分枝杆菌的发育；麦蛋白、动物性清蛋白和 *Mycobacterium alvium* 的蛋白则可刺激芽孢杆菌的发育 (Путяткина, 1966)。

自植物有机物质施入土壤后，真菌、细菌和放线菌的数量明显地增长 (Lockett, 1938)。在施过三叶草残体的土壤中，微生物数量比施用黑麦的要多，而后者硝酸盐的积累比前者为少（分别为 11.5 和 6.2 毫克/100 克土）。翻压幼嫩植物比施用老熟的更能促进微生物的大量繁殖。据观察，最高数量的真菌出现于布置试验后的第 20 天，而细菌和放线菌在第 5 天就已达到最高数量。在施幼嫩黑麦的土壤中可找出

许多纤维分解细菌，而施幼嫩三叶草的土壤中则要少些。

植物原料的组成决定着参加该物质分解过程的微生物类型。从施黑麦鲜草的土壤中可分离出 *Penicillium*, *Mucor*, *Fusarium* 和 *Trichoderma* 等。当翻压老熟黑麦时，分离出来的主要是 *Penicillium*。在施幼嫩三叶草的土壤中，占优势的是 *Aspergillus* 属的真菌，而当开花的及老熟的三叶草分解时，则 *Thamnidium* 和 *Cunninghamella* 等属的真菌占多数。

Stevenson (1962) 报道，由植物残体正在分解的土壤中发现，这些植物残体施后 7—10 天微生物的活性最强。培养到第 25 天，细菌的数量仍然超过对照，因此，甚至在可给态物质耗尽后，发酵性微生物区系仍保存着活力和较多的数量。不过其活性相对变小，亦即自开始分解后经 25 天，明显地降低了脱氢酶的活性，乙醇、氨基酸和有机酸的形成以及内生呼吸作用（Эндогенное дыхание）亦显著减弱。作者确定了内生呼吸作用与植物残体上的细菌发育之间的相关关系。三叶草残体显著地增强乙醇、氨基酸和有机酸等三种基质上的代谢活性。苜蓿、亚麻和小麦残体对此类活性只有微弱的增强，而猫尾草甚至有抑制作用。

当苜蓿残体分解时，通气对微生物区系的发育有很大的影响（Kubista, 1969）。对放线菌来说，通气是一个制约因素，在不通气的处理下，它们实际上是发育不起来的。在所有各处理中（无论是通气的，还是不通气的），膨润土能刺激正在分解苜蓿残体的微生物区系的发育。

我们仔细研究了生长于里海沿岸孟噶施拉克（Мангышлак）半岛附近的海藻有机物分解时微生物数量的变化（Илья-летдинов, Мендешев, 1971）。藻类的生物体主要是由蛋

白质和多糖类物质组成，因此，它们的矿化作用进行得非常快。

藻类施于土壤第一个月初期就已明显地促使氨化微生物的发育。培养到第10天，它们的数量达到400万个菌体，而在同一时期，对照处理不超过50万个菌体，至第一个月末期，无论在施有机物质的处理中，或在对照处理中，氨化细菌数量都有减少；经二个月，两者的菌数已趋于同一水平；当培养到第70天，在试验的或对照的处理中其量相应为500万和300万个菌体；然后，它们的发育逐渐减慢，到第120天试验结束时，氨化细菌数在对照土壤中为30万个，在有机物质丰富的土壤中为95万个菌体。

看来，藻类施入土壤能引起真菌的旺盛生长。它们参与可给态有机残体的矿化作用，故其在土壤中的发育颇似生长在琼脂培养基上的氨化细菌的繁殖。在原土中，头10天数量并不多，约10万个菌体；到试验的第一个月末，它们的生命活动仍表现得很弱。施有藻类的土壤，培养10天后，真菌的数量有了增长，但经一个月，其量急剧下降。这可能是因为随着藻类生物体的分解，某些真菌生长抑制剂被分离出来的缘故。这符合于一些作者关于藻类体内形成抑制物质的报道（Большев, 1968; Blunden等, 1968; Горюнова等, 1969）。到第二个月末，尽管在对照土壤中的菌数很少，真菌数量又有了增加。到第70天，施藻类生物体的处理中，真菌数达到80万个，然后又开始下降。到试验结束时，对照器皿中的真菌数多于施藻类的土壤。

我们对无芽孢细菌和真菌在施藻类生物体土壤中的发育动态的观察结果符合于大家知道的情况，即在植物残体分解早期阶段，首先发育的是能很好利用可给态有机物质的微生