



摄影 / 谢晓文

看不见的酿酒大师

撰文 何秀萍

在人类历史的长河中，奔腾着一种看似平淡，却蕴藏无限能量的神奇液体，它改变了中国古代夏、商王朝的命运，见证了楚汉争霸的豪迈和惨烈，彰显了三国鼎立时“青梅煮酒论英雄”及“对酒当歌，人生几何？”的英雄气概，也成就了历代文人墨客的不朽之作。苏轼因“把酒问青天”，才慨叹“但愿人长久，千里共婵娟”；王维以“劝君更尽一杯酒，西出阳关无故人”，李白以“兰陵美酒郁金香，玉碗盛来琥珀光。但使主人能醉客，不知何处是他乡”寄语对朋友的离别深

情和忧思；而杜甫则以“白日放歌须纵酒”的豪情表达了闻官军收河南河北后的喜悦之情。可见，酒，犹如一个善变的精灵，时而炽烈，时而冷酷。如天使，如恶魔，浸溶到社会、政治、经济和文化各个领域。它不仅仅是一个现实的物质存在，更是人类文明传承的载体和容器。那么这种神奇的液体是如何形成的呢？

在远古时代，当剩余的食物在储存过程中发生变质腐烂时，有些会产生特殊的香气促使人们尝试食用，并逐渐被其神奇的作用所吸引，便有意地利用这种现



象，这便是酿造的雏形。尽管，目前关于酿酒的起源传说众多，有仪狄说、杜康说、黄帝说等等，但毋庸置疑的是，大自然才是酿酒过程的原生力量，而人类只是发现了酒，并逐渐模拟、改进和发展了酿酒技术。在自然界存在着

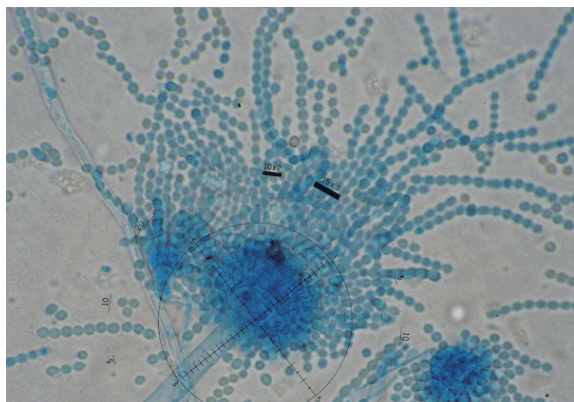
生物有上百万种，还不足实际存在的20%。它们虽然个体微小，要借助显微镜才能观测到，却是自然界物质循环和能量转换的最初引擎和核心力量。粮食和水果在储存过程中变质和腐烂正是微生物生命活动的体现，微生物才是隐身于大自然中的高明的“酿酒大师”。

在传统的白酒酿制过程中，

酒曲是白酒酿造的精华，决定着酒的品质和风味口感。酒曲是由谷物发霉形成的，研究发现酒曲中的灵魂物质是微生物。具有不同功能的微生物形成特定的群落结构，通过它们生命活动的协同，将粮食或水果中的物质转化为酒精（乙醇）及其他风味化合物，形成酒香浓郁的酒。酒曲中所繁殖的微生物的种类和数



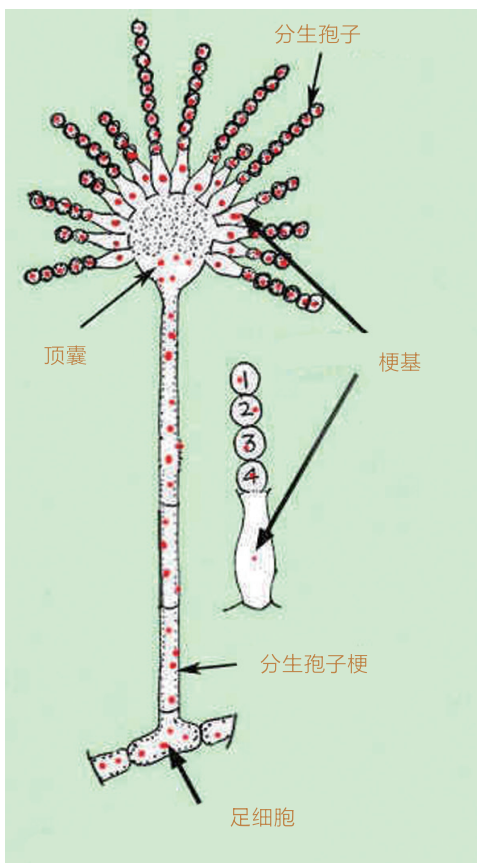
土法酿酒 摄影 / 吴晓辉



电镜下的曲霉



发霉的玉米所含的菌体主要是曲霉



曲霉结构示意图

量的差异决定了酒类的品质和风味。

糖化微生物

糖化微生物是一类可将淀粉原料转化成可发酵糖的微生物。酿酒过程中的糖化微生物主要为曲霉和根霉，它们能产生大量淀粉酶、糖化酶和蛋白酶，并分泌到细胞外的介质中，从而促进谷物或其他原料中淀粉、蛋白质等分解成单糖和氨基酸，在为其他微生物的生长和代谢提供底物和营养的同时，也产生影响酒体风味的化合物。因此糖化微生物的种类和活性将直接影响其他

微生物的种群和活性，进而影响出酒率和产品品质。北魏的贾思勰在其所著的《齐民要术》中记载了12种不同的酒曲，提出曲和“五色衣”的概念，其中的“五色衣”指的就是酒曲中不同颜色的霉菌菌丝体和分生孢子。

曲霉是天然酒曲中主要的糖化微生物，在固体培养基上能形成绒毛状、絮状或蜘蛛网状菌丝体。菌丝体可以产生大量的分生孢子梗，梗的顶端膨大成球形的顶囊，在顶囊的表面长出辐射状的初生小梗及次生小梗，小梗顶端为成串的球形分生孢子。从分生孢子梗到分生孢子的结

构合称为“孢子穗”，其形态结构和颜色等是区分不同曲霉的重要依据。酿酒中的曲霉主要是黑曲霉(*Aspergillus niger*)、红曲霉(*Monascus*)和米曲霉(*Aspergillus oryzae*)。黑曲霉的菌丝、孢子因菌株或培养环境的不同经常呈现黑、棕、绿、黄、橙、褐等各种颜色。红曲的菌种是红曲霉，它是一种耐高温、产淀粉酶和糖化酶能力强，又能发酵产酒精的霉菌。此外红曲霉能够产生酯化酶，在酒中风味物质的形成中发挥着重要作用。其菌丝初为白色，而后因菌种不同变为不同程度的红色或烟灰色。自从

宋代发现了红曲，其在酿酒中的应用为酒类品种的发展做出了极大的贡献。利用红曲霉和黑曲霉共同制造的乌衣线曲和黄衣红曲为风味各异酒类品种的酿造奠定了基础。

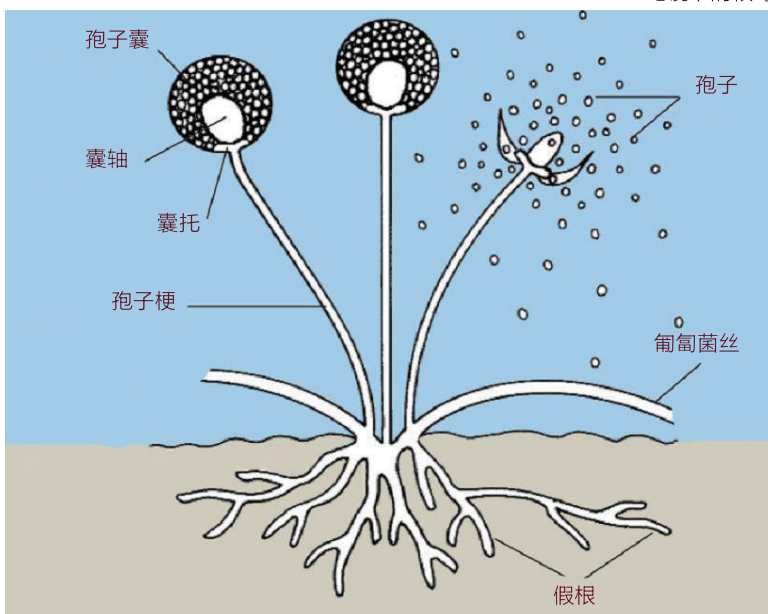
根霉主要存在于小曲酿酒之中，具有很强的淀粉酶活性，能作用于 $\alpha-1,4$ 和 $\alpha-1,6$ 糖苷键，将淀粉分解为可发酵糖。其典型特征是营养菌丝体上产生匍匐枝，在匍匐枝的节间形成特有的假根。从假根处向上丛生直立而不分枝的孢囊梗，顶端膨大形成圆形的孢子囊，囊内产生孢囊孢子。根霉也具有一定的发酵葡萄糖产乙醇能力，因此糖化和发酵可以同时进行，从而提高淀粉利用率。根霉还具有较强合成脂肪酶的能力，可以催化酒中香气物质酯类的合成，并协调酒体中醇、酸和酯的相对平衡。天然小曲中根霉的种类和数量平衡是长期自然进化和选择的结果，是独特风味产品形成的基石。随着微生物技术的发展，目前纯种根霉制成的酒曲已在酿酒中得到应用。

酵母菌

酵母菌是一大类目前已知的最小的单细胞真核微生物的总称，其中的酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)既是研究真核生物基本生命过程及其变化规律的模式生物，也是酿酒过程的灵魂。尽管人类有



电镜下的根霉



根霉结构示意图

关酿酒的记载可以追溯到公元前6000年前，但直到1680年才由安东尼-列文虎克在显微镜下观察到酵母菌的真实面目。随后通过以法国的巴斯德为代表的微生物学家们上百年的努力，最后发现我们肉眼无法看到的酿酒酵母才是给人类带来神奇液体的真正的“酿酒大师”，酒精发酵是酵母菌代谢活动的结果。1880年由荷

兰人汉森获得单细胞纯种培养的酿酒酵母菌，从而为啤酒和葡萄酒的纯种发酵奠定了基础。

酿酒酵母之所以被称为自然界的“酿酒大师”，主要源于其特有的生理和代谢特性，它是非常典型的兼性厌氧微生物，能够利用多种物质进行生长或发酵。在有氧的条件下进行有氧呼吸，将葡萄糖等碳源分解为 CO_2 和水，



酿酒酵母

供给细胞生长和代谢所需要的能量和营养；而在缺氧环境中，则将葡萄糖等碳源分解为 CO_2 和乙醇，即酒精发酵。因此淀粉类物质在糖化微生物作用下被分解为葡萄糖后，与原料中原有的葡萄糖等可发酵糖一起被酿酒酵母所吸收和利用，通过糖酵解途径转化为丙酮酸；在有氧条件下，丙酮酸进入线粒体转化为乙酰 CoA ，通过三羧酸循环最终被氧化为 CO_2 和水；在限氧或无氧条件下，丙酮酸脱羧转化为乙醛，继而在醇脱氢酶的催化下被还原为乙醇。因此，酿酒酵母是各种酒类生产中最为核心的酒化微生物，无论黄酒、白酒、啤酒，还是以葡萄酒为典型代表的各种果酒的酿造中，从葡萄糖等可发酵糖到乙醇的转化主要是由酿酒酵母完成的。

酿酒酵母的发酵特性因菌株不同而有明显差异，不同的酿酒酵母菌株在底物利用能力、乙醇及其他代谢产物的合成能力，以及环境适应能力等方面可能存在差异，导致发酵速率及发酵产物

组成成分的不同，从而赋予产品多样化的独特风味。基于纯种发酵在啤酒和葡萄酒生产中的重要性，以及酵母菌育种技术的发展，人类对昔日隐藏在自然背景中的神秘的“酿酒大师”已越来越熟悉，并对“大师”的能力寄予了更高的期望。人工干预的结果是一系列具有独特生理和代谢功能的酿酒酵母应运而生，它们或者能同时利用葡萄糖、木糖或乳

糖，或发酵速度快，或者具有耐酸、耐高温、耐高渗或（和）耐乙醇能力等，以及改变高级醇、酯类化合物、乙酸、乳酸和乙醇合成能力的酵母菌等。这些特殊酵母菌的应用不但可以提高酿酒工业生产效率，而且极大丰富了产品的风味，提高了产品品质。

除酿酒酵母外，粟酒裂殖酵母在一些特定的酿造过程中也与糖到乙醇的转化有关。此外，以汉逊酵母为主要代表的产酯酵母也是白酒风味形成的重要贡献者。产酯酵母具有氧化乙醇的能力，能够提高酒体中主要香味物质（乙酸乙酯、己酸乙酯、乳酸乙酯等）和次要香味物质（乙酸甲酯、辛酸乙酯等）含量，使酒体呈现独特的香气，因此也称为生香酵母。目前纯培养的生香活性干酵母已有商品出售，并应用于白酒生产中。

巴斯德



汉森



列文虎克



细菌

无论是通过酒曲酿造的黄酒、白酒，还是纯种发酵的果酒，尽管看起来只是一些普普通通的液体，但每一种酒都是一个天然化合物的复合体，作为“酿酒大师”的酵母菌能力无论如何超群，也无法独揽酿酒王国，不同“伙伴”的协同和配合才能成就其酿造神奇液体的梦想。一些细菌的代谢产物对黄酒、白酒或葡萄酒的香型和风味具有特殊的作用，还能克服白酒后味不足的缺点。乳酸菌(LAB)是一类能够使发酵糖类产生乳酸的革兰氏阳性细菌的总称，乳酸通过酯化反应可以产生乳酸乙酯，适量的乳酸乙酯可以使酒体产生独特的香味。醋酸菌、丁酸菌和己酸菌也是白酒酿造体系中的成员，它们能够发酵产生醋酸、丁酸和己酸，通过与乙醇反应促进相应酯类化合物的合成，使白酒香味浓郁、回味悠长。但产酸过多会导致酒酯酸化，干扰其他微生物功能的发挥，影响出酒率和酒的品质。

因此发酵体系中乳酸菌、醋酸菌、丁酸菌和己酸菌的比例和活性需要严格控制。

在葡萄酒酿造中，除酿酒酵母承担的酒精发酵过程外，还需要一个特别的酿制过程，即苹果酸—乳酸发酵(MLF)，才能获得优质的葡萄酒，特别是干红葡萄酒。MLF由乳酸菌完成，通过将发酵体系中的苹果酸脱羧转化为乳酸和CO₂，从而达到降低酸度，实现香气和风味物质平衡，改善葡萄酒风味，提高品质的目的；同时酒体中苹果酸的清除可以防止葡萄酒贮存过程中的二次发酵。具有MLF功能的乳酸菌主要有酒球菌属、明串珠菌属、乳球菌属、片球菌属和乳杆菌属，其中酒球菌属的酒类酒球菌是葡萄酒酿造中应用最为广泛的MLF菌株，它对初级酿造葡萄酒的低pH和较高浓度的乙醇和SO₂具有较好的耐受性，从而可以保持较高的MLF效率。近年来，尽管研究者利用DNA重组技术在酿酒酵母中建立了MLF途

径，但MLF效率低，存在转基因安全风险等问题，这也是限制葡萄酒一步酿造工艺应用的关键。可见，葡萄美酒的酿制至少需要两位“酿酒大师”的协同作战。

随着现代微生物学和发酵技术的发展，菌种分离和纯种培养已经是非常成熟的技术，通过纯种培养或不同微生物的配伍培养，同样可以实现淀粉原料的糖化和发酵，使发酵速率得到极大提高，工艺过程和产品质量的可控性明显提高。但与天然酒曲相比，在风味的丰富和醇厚上还有差别，这也许就是人工无法企及的自然力量的神奇。因此如何利用现代生物技术协调生产效率和产品风味品质间的矛盾依然是一个重要的研究课题。■

作者简介

何秀萍，中国科学院微生物研究所研究员，主要从事酵母菌分子遗传学和生理代谢工程研究。

(责编 桑新华)

