

高清解码“多面手”芒草



山东农业大学试验基地的芒草。陈翠霞供图

长在荒地里的芒草是一种高大的野草。尽管平平无奇不被人注意，但这种禾本科植物却是世界上最具开发潜力的木质纤维素原料作物，可以用来生产生物质燃料酒精。

山东农业大学农学院教授陈翠霞课题组破译了染色体级别的五节芒参考基因组图谱，解析了芒属植物基因进化历史，揭示了芒草中纤维素或半纤维素含量高的分子机制，为其种质利用和新品种创制提供了理论支撑。相关成果在线发表于《自然—植物》。

半年三篇高水平论文聚焦芒属

从《自然—通讯》发布芒、南荻基因组，到《自然—植物》发布五节芒基因组，《自然》子刊先后发表3种芒属植物基因组研究成果。科学家为何如此关注芒属植物？

“芒属植物是最有潜力的生物能源作物。”五节芒基因组论文的通讯作者陈翠霞告诉《中国科学报》，这类植物含有高比例木质纤维素，生长速度快、生物产量高、易繁殖、抗逆性强，可在荒草地、盐碱地、沼泽滩涂等边际土地上种植生长。

不仅如此，它用途广泛，可以固土保水、改良土壤、改善生态环境；作为可再生生物质原料，可转化为热能、电能、液体燃料等；还可用作畜禽饲草。

陈翠霞说，十余年前，受石油价格上涨的影响，欧美发达国家纷纷投入大量资金研究可再生能源，木质纤维素作物如芒草、柳枝稷等成为研究重点。近期木质纤维素作物基因组成果频出，就是十多年来不间断研究的成效。

实际上，中国是芒属植物重要起源地之一。在中国，芒属植物分布广泛，并具有丰富的遗传多样性。陈翠霞说，正是我国丰富的种质资源为他们的研究工作奠定了坚实基础。

不过，“芒属植物自交不亲和，基因组庞大、高度杂合。这给其遗传学研究带来了极大的困难和挑战。”陈翠霞说，由于芒属植物基本都是野草，生物学、细胞学和遗传学特征的知识几乎为零，十多年来，他们对其的研究可谓“白手起家”。

“揭示芒属植物基因组密码，解析其进化历程，对于了解其遗传学基础、快速有效利用及创制新种质具有重要的理论意义和应用价值。”论文作者、山东农业大学教授张宪省说。

高粱、芒草、甘蔗来自同一祖先

在物种进化过程中，基因组多倍化是植物进化和新物种产生的最重要方式之一。“这一现象在高粱、芒草和甘蔗 3 种禾本科甘蔗亚族植物中得到了充分体现。”陈翠霞说。

近年研究发现，芒属植物、高粱属植物和甘蔗属植物的基因组存在密切的关系。芒属、甘蔗的共同祖先与高粱的祖先分化后，分别经历了单次和两次基因组加倍以及染色体重排，演变成了现在的芒属和甘蔗属植物。目前，高粱和甘蔗野生种“割手密”的基因组已被破译，但芒属植物一直缺乏高质量染色体级别的参考基因组。

论文第一作者、山东农业大学副教授张国斌告诉《中国科学报》，他们对芒属植物代表性物种五节芒的基因组高深度测序数据进行分析，计算出其基因组大小为 2462.35 Mb，杂合度为 1.89%，重复序列比例为 73.42%。

考虑到五节芒基因组的复杂度，他们综合利用了二代、三代、10x Genomics 等测序方式，并通过 Hi-C 技术挂载到五节芒的 19 条染色体上，先后用遗传图谱和 BioNano 数据等进行修正和验证，并进行基因注释和转座子注释等，组装得到染色体级别的高质量参考基因组。

课题组进一步推断出 3 个物种的具体进化关系和时间。芒草、甘蔗祖先种与高粱祖先种在约 610 万至 550 万年前发生分化，而后芒草祖先种与甘蔗祖先种又在约 460 万至 430 万年前发生分化。

一方面，芒属植物在随后的 400 万年间发生了基因组多倍化和染色体重排。其中，“我们发现，五节芒的 8 号染色体是由高粱祖先种 4 号和 7 号染色体融合而来的，并找到了新融合染色体的着丝粒位置。”张国斌说，这解释了芒属植物基因组经过一次加倍之后为什么是 19 条染色体，而不是 20 条染色体。

另一方面，甘蔗属植物维持其基本染色体条数为 10 的状态长达 300 万年左右，随后经过一次染色体重排。大约 100 万年前，甘蔗祖先种连续经过两次全基因组加倍，辅以轻微的染色体重排，成为今天的甘蔗野生种。

基因资源“多面手”

有专家认为，除了作为能源植物，芒草的高抗性还有可能给同为禾本科的粮食作物如水稻和小麦等，带来丰富的基因资源。五节芒就好像一个基因资源的“多面手”。

“我们鉴定了高粱、甘蔗和五节芒中纤维素合酶 CesA/CsI 家族基因。”陈翠霞说，芒草作为能源植物，人们利用的主要是其木质纤维素，因此研究纤维素合酶非常必要。

通过比较不同生长期的五节芒，他们发现，正在伸长的茎秆组织中纤维素合酶表达水平很高。而与芒属植物所有基因的表达量相比，大部分 CesA 和部分 CsI 基因表达水平最高，这与芒属植物极高的纤维素或半纤维素含量相吻合。

长期以来，陈翠霞课题组搜集了芒、荻、南荻、五节芒等国内多个芒属代表性物种及巨芒等国外杂交种共 75 个种质资源，对它们进行二代全基因组重测序后发现，芒属植物之间存在着广泛的种间杂交。

“芒草和甘蔗可以杂交成功。”陈翠霞说，因为芒草是自交不亲和的，所以芒草属内可以实现种间杂交，甚至可以和亲缘关系近的作物发生跨属杂交。这为通过杂交培育出更优异的芒属、高粱属或甘蔗属植物品种提供了理论支持。

陈翠霞解释说，与芒草同属甘蔗亚族的高粱是国际上重要的粮食作物，甘蔗是重要的经济作物，芒草能与之杂交，就意味着其抗病、抗旱、抗涝、耐盐碱、耐贫瘠的特性很有可能成为高粱和甘蔗育种的基因资源，甚至有可能为水稻、小麦等同科粮食作物提供借鉴。

目前，他们在黄河三角洲盐碱地已开展了近 8 年的种植试验，共种植 20 多亩芒草试验材料，适应性良好，表现出优异的耐盐性。“这对于盐碱地的脆弱生态恢复、土壤改良和开发利用，乃至粮食安全和生态安全意义深远。”陈翠霞说。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41477-021-00908-y>

文章来源：中国科学报