

## 混合创新: 打造新型人造肉

David L. Kaplan<sup>1\*</sup> 和 David Julian McClements<sup>2</sup>

<sup>1</sup>塔夫茨大学, 生物医学工程系 (美国, 马萨诸塞州, 梅德福)

<sup>2</sup>马萨诸塞大学, 食品科学系 (美国, 马萨诸塞州, 阿默斯特)

少年审稿人



ATHARV

年龄: 12

全球许多人爱吃肉, 但传统肉类生产方式会消耗大量土地、水资源和能源, 并对环境造成破坏。科学家正致力于探索植物、真菌、昆虫及培养动物细胞等替代蛋白源, 寻找更可持续的膳食蛋白质供给方案。这些原料在口感、营养和成本方面各有优劣, 通过对它们进行科学配比, 研究人员能够创造出风味更佳、营养更均衡且环境影响更小的混合型食品。目前, 混合食品仍面临成本较高、安全检测要求以及消费者接受度等挑战。若能解决这些问题, 混合食品有望以更可持续的方式满足不断增长的人口需求, 从而改变食品的未来发展格局。

### 蛋白质背后的困境

你有没有吃过素肉汉堡、燕麦奶或植物基鸡块? 这些产品旨在替代肉类、牛奶和鸡蛋等传统动物性食品。人们选择植物基食品的原因多种多样, 包括健康考量、环境保护以及动物福利等。动物性食品通常富含蛋白质——这种重要营养素能帮助人体增强肌肉、修复身体并维持健康。虽然动植物食品中都含有蛋白质, 但目前全球多数地区仍以肉类作为最主要的蛋白质来源。

过度依赖动物蛋白会对环境造成巨大负担。养殖动物会消耗大量土地、水资源和能源, 并产生包括温室气体在内的有害污染物, 加剧气候变化。为开辟牧场或种植饲料而砍伐森林则会破坏生态系统, 迫使野生动物失去栖息地。此外, 动物密集饲养容易导致疾病传播和抗生素滥用, 继而引发人类健康问题 [1]。随着人口增长和肉类消费量持续上升, 要在不损害地球的前提下满足所有人的营养需求将变得愈发困难。

## 有哪些替代蛋白源?

是否存在一种更理想的蛋白质获取方式——既能满足人类需求, 又对健康、动物和地球更友好? 科学家们正在研究从植物、真菌、昆虫乃至特殊培养罐中培育的动物活细胞中提取**替代蛋白** (图 1) [2]。其中一些替代蛋白已应用于市售食品, 另一些仍处于研发阶段。

### 植物

植物是最为人熟知的替代蛋白源。大豆、豌豆、鹰嘴豆和燕麦等许多植物天然含有蛋白质, 可加工成富含**植物蛋白**的素肉汉堡、鸡块或香肠等肉类替代品。虽然部分植物基产品口感尚佳且易于购买, 但多数在风味、质地或营养上仍与真肉存在差距。此外, 它们的生产常需大量添加剂和复杂加工工艺, 一些消费者会觉得这类食品不太健康。

### 真菌

提到真菌, 你或许会联想到披萨上的蘑菇或林间生长的菌类。但地上可见的子实体仅是冰山一角, 地下交织着名为**菌丝体**的微小网状结构, 这些丝状体在土壤或其他基质中蔓延, 帮助真菌吸收养分。

科学家在名为**生物反应器**的大型培养罐中培育菌丝体, 通过精准控温控氧使其快速生长。由此获得的菌丝体可被做成素肉汉堡、鸡块或香肠, 其天然纤维结构与耐嚼特性带来高度近似肉类的口感。菌丝体也富含蛋白质、纤维及多种维生素和矿物质。知名品牌 Quorn™ 已运用菌丝体生产市售无肉产品。不过, 真菌风味仍与肉类有差异, 常需与其他成分调配以提升适口性。

### 细胞培养肉

**细胞培养肉**是“真正”的肉类, 但无需饲养和屠宰动物。科学家通过活检或细针从鸡、牛、猪或鱼身上提取少量细胞 (不伤害动物), 置于生物反应器中, 在精准配比的营养液与受控环境下培养。随着时间的推移, 这些细胞不断增殖形成动物组织。细胞培养肉含有许多种与传统肉类相似的蛋白质、脂肪和营养成分, 能提供同等健康益处, 其烹饪方式和风味也

#### 替代蛋白 (Alternative Proteins)

来自非传统渠道而非养殖动物的蛋白质, 如植物、真菌、昆虫或培养罐中培育的细胞。

#### 植物蛋白 (Plant Proteins)

存在于植物性食物中的蛋白质, 如大豆、豌豆、鹰嘴豆和燕麦。

#### 菌丝体 (Mycelium)

真菌的丝状结构, 通常在地下生长, 也可在培养罐中培育, 然后用于制作类肉食品。

#### 生物反应器 (Bioreactor)

在受控条件下培养细胞或微生物以生产食品原料或其他有用产品的大型容器。

#### 细胞培养肉 (Cultivated Meat)

在培养罐中由动物细胞培育而成的肉类, 无需饲养或屠宰动物。

图 1

替代蛋白可从植物、昆虫、菌丝体、微生物及培养动物细胞中获取。根据目标食品类型, 这些替代蛋白原料会接受机械加工 (如在专用设备中进行塑形、混合或压制成饼状或块状), 或者在称为生物反应器的受控大型培养罐中培育。通过组合不同蛋白源, 可制成混合肉类产品。

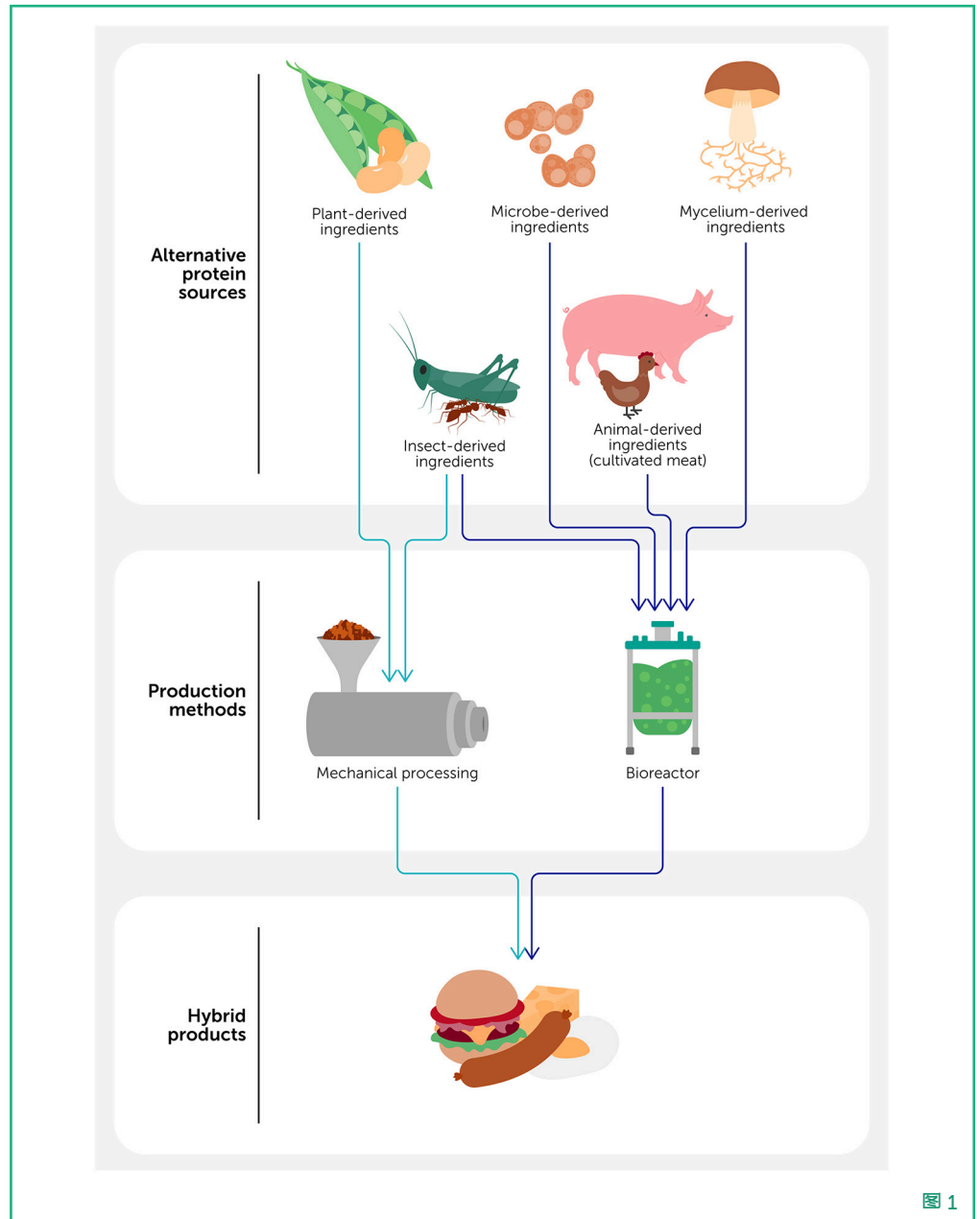


图 1

接近真肉。目前, 细胞培养肉生产成本仍十分高昂, 尚未大规模普及。少数国家已批准其上市销售, 但在大多数地区仍处于测试和研发阶段。

## 微生物

科学家还致力于利用细菌、酵母菌及特定真菌等微生物生产替代蛋白。这些微生物可像真菌和动物细胞一样在生物反应器中培养。通过"精密发酵"技术, 科学家可"指挥"微生物生产有益的食品成分, 如蛋白质、维生素或天然风味物质。例如, 部分植物基汉堡的红色源自酵母菌在精密发酵过程中产生的蛋白质。这些成分常被用于改善植物基食品的口感、质

### 精密发酵 (Precision Fermentation)

通过指挥微生物在受控培养罐中生产特定成分 (如蛋白质或维生素) 的过程。



地或营养。目前, 大规模生产仍面临难度与成本挑战, 但其在优化肉类替代品方面具有重要潜力。

## 昆虫

虽然听起来有些奇特甚至令人不适, 但全球许多地区的人早就有食用蟋蟀、蝗虫或黄粉虫等昆虫的传统。事实上, 超过 20 亿人口将昆虫纳入日常饮食 [3]。昆虫富含蛋白质, 许多种类还含有健康脂肪、纤维及重要维生素和矿物质。与传统畜禽相比, 昆虫更易养殖, 所需土地、水源和饲料更少, 温室气体排放量也大幅降低。主要挑战在于, 许多人、尤其是西方国家民众对食用昆虫存在心理障碍。为此, 企业常将昆虫磨成粉末混入食品中以降低视觉冲击力。目前, 昆虫蛋白粉已被添加到能量棒、意大利面甚至汉堡混合料中。部分科学家正在探索采用类似细胞培养肉的生产方式——在生物反应器中培育昆虫细胞, 这有望降低成本并提升应用便利性。

## 混合食品: 为何要组合搭配?

每种替代蛋白都有其优势, 但单一来源均不完美。植物基产品通常成本较低且适合大规模生产, 但其口感和质地往往与真肉存在差距; 培养肉风味逼真却生产成本高昂; 菌丝体虽具肉感质地, 但风味较强且与肉类差异较大; 昆虫蛋白营养丰富且**可持续**, 但尚未被广泛接受。

如果我们将各类替代蛋白的优点相结合呢? 这正是**混合食品**背后的理念——通过组合不同替代蛋白创造出的新型食品 (图 1) [4]。例如, 科学家可将植物蛋白与少量培养肉混合, 在提升风味和营养的同时控制成本; 或将菌丝体与植物成分结合, 制作出口感更佳、添加剂更少的素肉汉堡 (图 2)。甚至部分传统肉制品也在向混合食品转型: 一些企业通过用植物蛋白或昆虫粉替代部分肉类, 降低香肠或汉堡中的肉含量。这样既能减少环境影响, 又能保留肉食爱好者喜爱的风味。

### 可持续 (Sustainable)

以保护环境并确保资源能够世代延续的方式利用资源。

### 混合食品 (Hybrid Food Products)

通过混合不同蛋白源制成的新型食品, 旨在优化风味、口感、营养和可持续性。

图 2

(A) 通过混合结冷胶 (源自微生物精密发酵) 与蛋白 (源自菌丝体发酵) 制成的简易混合产品, 其外观类似豆腐块。添加适当调味剂与色素后, 这类混合物可用于制作人造肉。(B) 该混合产品在显微镜下的图像, 其中蛋白质被染为绿色, 多糖类糖分被染为蓝色。

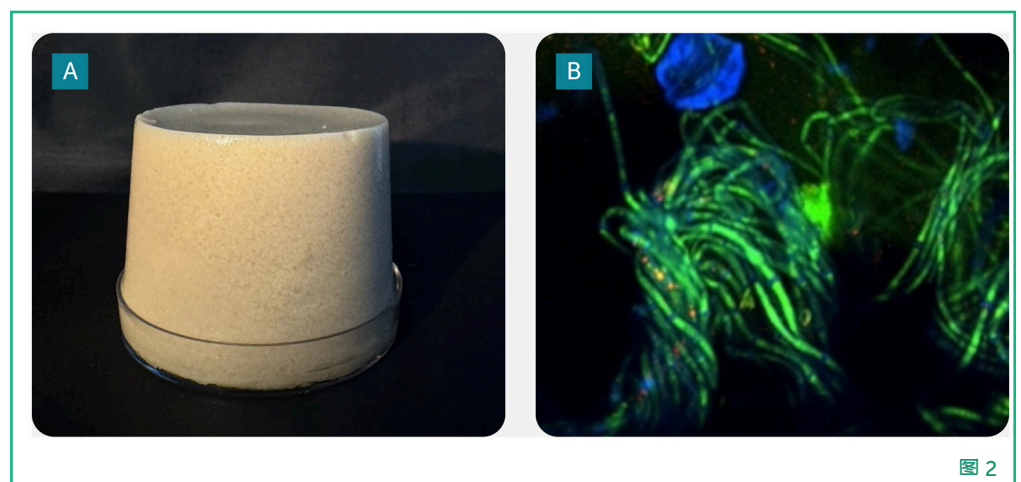


图 2

## 优质混合食品需要具备哪些要素？

设计混合食品比较棘手, 科学家必须综合考虑风味、营养、质地、安全性及消费者接受度。通过合理配比原料, 他们正逐步推进食品改良。以下是科学家设计新型混合食品时最关注的几个维度 (图 3)。

图 3

设计混合肉类产品时, 必须综合考虑多重因素: 包括食品特性 (是否具有类肉结构及良好的烹饪表现)、感官属性 (如质地、香气与风味)、营养成分 (与真肉相近), 还要能通过安全检测, 确保产品对人体无害。

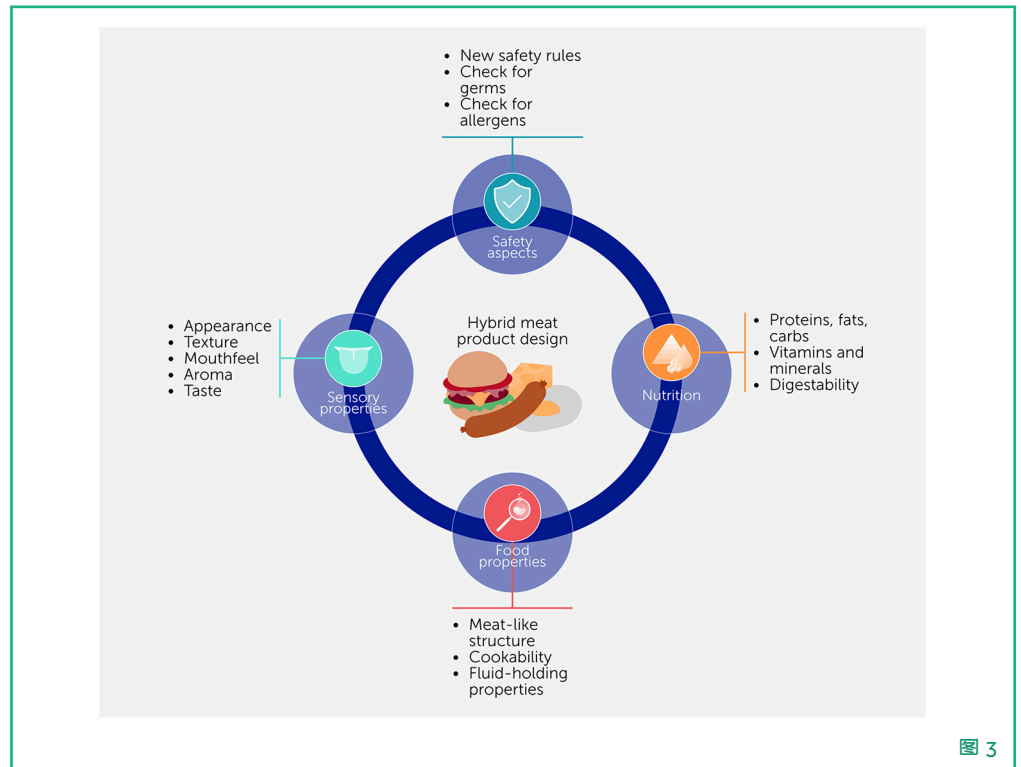


图 3

## 美味不怪异

即使某种食品对环境更友好, 若气味怪异、口感软烂或色泽味道不正常, 人们恐怕也不愿食用。因此, 科学家高度重视食品的感官属性——包括视觉、嗅觉、味觉与口感体验。植物基原料有时会带苦味或“豆腥味”, 昆虫蛋白可能产生颗粒感或较强气味, 培养肉和菌丝体虽能改善风味或质地但生产难度较大。通过精确配比混合成分, 科学家力求最大限度模拟真肉的口感和风味, 目标是创造出美味到让人们忘记这是人造肉的混合食品。

## 营养健康

蛋白质固然重要, 但并非人体唯一所需营养素。优质的混合食品还应提供充足的维生素、矿物质与健康脂肪。真肉富含铁、锌和维生素 B12 等营养素, 部分植物基产品在这方面存在不足, 因此科学家需审慎平衡原料配比。另一个值得关注的问题是, 某些肉类替代品属于超加工食品, 含有大量添加剂, 经过加工后严重脱离原始形态。这类加工过程有时会降低

食品健康度。混合食品以培养细胞或菌丝体等更接近肉类的成分替代其他添加剂, 减少额外调味剂或黏合剂的用量, 从而缓解这一问题。

## 让人愿意食用

即使混合食品兼具美味、健康与安全, 仍需通过最后一道考验: 人们是否愿意食用? 这取决于成本、便利性以及大众对新食品的接受度。有人乐于尝试植物基或实验室培育的肉类, 也有人心存疑虑, 尤其是听到"昆虫"二字时。已接受这类食品的消费者可以帮助宣传, 提升他人的尝试意愿。食品企业正通过优化包装、广告宣传和食谱研发, 引导公众逐渐接受这些新产品。当前, 许多公司将目标客群聚焦于"弹性素食者"——即仍食用肉类但愿意减少摄入的人群。

## 从构想到现实

打造优质的肉类替代品并非易事。混合食品展现出巨大潜力, 但仍面临重重挑战。

培养肉与发酵蛋白等原料的生产成本高昂, 若定价过高将难以吸引消费者。科学家正致力于降低成本, 同时提升产量, 以满足数百万人的需求。目前, 混合食品仅能小批量生产, 但要产生真正的影响, 企业需大幅增产, 而且必须在不过度消耗资源或不损害环境的前提下实现。安全性同样至关重要。任何新型食品上市前都必须经过严格检测, 确保其无害健康, 包括微生物、过敏原及可能阻碍营养吸收物质的筛查。对于混合食品, 科学家还需确保不同成分的组合不会产生新问题。安全审查很有必要, 但可能延缓产品上市进程。

长远来看, 混合食品有望以更低的生态压力满足不断增长的人口需求。实现这一愿景需要科学界、产业界与社会各界的协同努力。未来食品或许与传统食品形态不同, 但这可能才是正确的发展方向!

## 致谢

本文由 Susan Debad 博士编辑, 她毕业于美国马萨诸塞大学医学院晨兴生物医学科学研究生院, 现任 SJD 咨询公司科学撰稿人/编辑。插图由 Somersault18:24 制作。DM 的研究资金来自美国农业部, 通过国家食品与农业研究所(项目编号: 2020-03921、2022-09185 和 2021-05678) 和马萨诸塞农业实验站(项目编号: MAS00559), 以及非营利智库好食品研究所(2022 年度) 予以资助。DK 的研究资金来自美国农业部, 通过国家细胞农业研究所(项目编号: 2021-05678)、能源高级研究计划局(ARPA-E), 以及非营利智库好食品研究所和非营利基金会新丰收予以资助。资助机构未参与研究设计、数据收集与分析、结果解读、本文撰写或发表决策过程。

## AI 人工智能工具使用声明

本文中所有图表附带的替代文本 (alt text) 均由 Frontiers 出版社在人工智能支持下生成。我们已采取合理措施确保其准确性，包括在可行情况下经由作者审核。如发现任何问题，请随时联系我们。

## 原文

Kaplan, D. L. 和 McClements, D. J. 2025. 基于混合替代蛋白的食品: 构建更健康、可持续的食品供应体系. *Front. Sci.* 3:1599300. doi: 10.3389/fsci.2025.1599300

## 参考文献

1. McClements, D. J., and Grossmann, L. 2022. *Next-Generation Plant-based Foods: Design, Production, and Properties: Plant-Based Foods*. New York, NY: Springer Scientific.
2. Banach, J. L., Van Der Berg, J. P., Kleter, G., Van Bokhorst-Van De Veen, H., Bastiaan-Net, S., Pouvreau, L., et al. 2023. Alternative proteins for meat and dairy replacers: food safety and future trends. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 63:11063–80. doi: 10.1080/10408398.2022.2089625
3. Govorushko, S. 2019. Global status of insects as food and feed source: a review. *Trends Food Sci. Technol.* 91:436–45. doi: 10.1016/j.tifs.2019.07.032
4. Grasso, S., and Goksen, G. 2023. The best of both worlds? Challenges and opportunities in the development of hybrid meat products from the last 3 years. *Lwt-Food Sci. Technol.* 173:114235. doi: 10.1016/j.lwt.2022.114235

线上发布: 2026 年 2 月 13 日

编辑: Robert T. Knight

科学导师: Priyank Jaiswal

引用: Kaplan DL 和 McClements DJ (2026) 混合创新: 打造新型人造肉. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2025.1665786-zh

英文原文: Kaplan DL and McClements DJ (2025) Mixing Our Way to a New Kind of Meat-Less "Meat". *Front. Young Minds* 13:1665786. doi: 10.3389/frym.2025.1665786

利益冲突声明: 作者声明本研究不涉及任何潜在商业或财务关系。

版权 © 2025 © 2026 Kaplan 和 McClements. 这是一篇依据 [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#) 条款发布的开放获取文章。根据公认的学术惯例，在注明原作者和版权所有者，及在标明本刊为原始出处的前提下，允许使用、传播、复制至其他平台。如违反以上条款，则不得使用、传播或复制文章内容。



## 少年审稿人

**ATHARV, 年龄: 12**

一位充满好奇心与想象力的 12 岁少年, 热爱星辰、故事与科学, 还喜欢书籍、手工和宇宙奥秘。性格沉静又勇于探索, 善于思考又不失童趣, 始终以澄澈目光与创意头脑探索世界。无论是描绘巨龙、设计纸飞机, 还是解读星座图谱, 这位年轻的梦想家总能将奇思妙想与逻辑思维相结合, 在魔法与意义之间找到平衡, 从夜空中汲取灵感, 在每项微小发现里收获喜悦。

## 作者

**DAVID L. KAPLAN**

David Kaplan 是塔夫茨大学生物医学工程系的特聘教授。其实验室致力于生物材料、组织工程与细胞农业研究, 旨在改善人类、动物及环境健康。他从教学与学生互动中汲取灵感, 同时也受树木、自然、人文及周围非凡世界的启发。热爱在山间、平原和地下洞穴中徒步。\*[david.kaplan@tufts.edu](mailto:david.kaplan@tufts.edu)

**DAVID JULIAN MCCLEMENTS**

McClements 博士是马萨诸塞大学食品科学系的特聘教授。作为一名食品科学家, 他运用物理学、化学、生物学及工程学知识, 构建更健康、可持续的食品体系, 致力于通过食品结构设计与纳米技术调控食品的外观、口感、风味及在人体内的代谢。闲暇时喜爱徒步、阅读与弹吉他。



中文翻译由下列单位提供  
Chinese version provided by

