

社论

迫切需要提高社会的微生物学素养

Kenneth Timmis,^{1*} Ricardo Cavicchioli,²
Jose Luis Garcia,³ Balbina Nogales,⁴ Max Chavarrfa,⁵
Lisa Stein,⁶ Terry J. McGenity,⁷ Nicole Webster,⁸
Brajesh K. Singh,⁹ Jo Handelsman,¹⁰
Victor de Lorenzo,¹¹ Carla Pruzzo,¹² James Timmis,¹³
Juan Luis Ramos Martfn,¹⁴ Willy Verstraete,¹⁵
Mike Jetten,¹⁶ Antoine Danchin,¹⁷ Wei Huang,¹⁸
Jack Gilbert,¹⁹ Rup Lal,²⁰ Helena Santos,²¹
Sang Yup Lee,²² Angela Sessitsch,²³
Paola Bonfante,²⁴ Lone Gram,²⁵ Raymond T. P. Lin,²⁶
Eliora Ron,²⁷ Z. Ceren Karahan,²⁸
Jan Roelof van der Meer,²⁹ Seza Artunkal,³⁰
Dieter Jahn¹ and Lucy Harper³¹

¹ 德国布伦瑞克工业大学微生物研究所, 德国。

² 新南威尔士大学生物技术与生物分子科学学院, 澳大利亚悉尼。

³ 西班牙国家研究委员会生物研究中心环境生物学系 (GIB) (CSIC), 西班牙马德里。

⁴ 微生物学系微生物小组, 西班牙国家研究委员会巴利阿里群岛大学 (Universitat de les Illes Balears, UIB-CSIC) 与地中海高等研究院 (Instituto Mediterraneo de Estudios Avanzados, IMEDEA), 西班牙帕尔马·马洛卡岛。

⁵ 哥斯达黎加大学 (Universidad de Costa Rica) 天然产品研究中心 (Centro de Investigaciones en Productos Naturales, CIPRONA) 化学学院 (Escuela de Quimic), 哥斯达黎加圣何塞, 与哥斯达黎加国家高科技中心 (CeNAT- CONAR) 所属之哥斯达黎加国立生物技术创新中心 (Centro Nacional de Innovaciones Biotecnologicas, CENIBiot), 哥斯达黎加圣何塞。

⁶ 艾伯塔大学生物科学系, 加拿大埃德蒙顿。

⁷ 埃塞克斯大学生物科学学院, 英国科尔切斯特。

⁸ 澳大利亚海洋科学研究所 (汤斯维尔) 与昆士兰大学澳大利亚生态基因组学中心 (澳大利亚昆士兰省布里斯班)。

⁹ 西悉尼大学霍克斯伯里环境研究所, 澳大利亚彭里斯。

¹⁰ 威斯康星大学麦迪逊分校威斯康星州探索研究所, 美国威斯康星州。

¹¹ 西班牙国立生物技术中心 (CSIC) 系统生物学计划, 西班牙马德里。

¹² 热那亚大学 (University degli Studi di Genova) 地球、环境与生命科学系 (DISTAV), 意大利。

¹³ 阿姆斯特丹自由大学雅典娜学院, 荷兰。

¹⁴ 西班牙高等科学研究委员会赛丁实验室 (Estacion Experimental del Zaidfn-CSIC), 西班牙格拉纳达。

¹⁵ 根特大学微生物生态与技术中心 (CMET), 比利时。

¹⁶ 拉德布德大学奈梅亨分校微生物学系, 荷兰。

¹⁷ 巴黎笛卡尔大学科钦研究所与法国国家健康与医学研究院 (INSERM) 合作实验室 U1016 以及科钦研究所与法国国家科研中心 (CNRS) 合作实验室 UMR8104, 法国巴黎。

¹⁸ 牛津大学工程科学系, 英国牛津。

¹⁹ 加利福尼亚大学圣地亚哥分校儿科系, 美国加利福尼亚州圣地亚哥。

²⁰ 德里大学动物学系分子生物学实验室, 印度德里。

²¹ 新里斯本大学 (Universidade Nova de Lisboa) 化学与生物技术研究所 (Instituto de Tecnologia Quimica e Biologica), 葡萄牙奥埃拉斯。

²² 韩国科学技术院 (Korea Advanced Institute of Science and Technology) 化学与生物分子工程系, 韩国大田。

²³ 奥地利技术学院 (Austrian Institute of Technology, AIT) 生物资源系, 奥地利塔尔恩。

²⁴ 都灵大学生命科学与系统生物学系, 意大利。

²⁵ 丹麦科技大学生物技术与生物医学系, 丹麦灵比。

²⁶ 新加坡国立大学微生物学与免疫学系, 新加坡。

²⁷ 特拉维夫大学分子细胞生物学与生物技术学院, 以色列。

²⁸ 安卡拉大学医学微生物学系, 土耳其。

²⁹ 洛桑大学微生物学研究所, 瑞士。

³⁰ 海达尔帕萨努穆恩培训研究医院 (Haydarpasa Numune Training Hospital) 临床微生物学系, 土耳其伊斯坦布尔。

收稿于2018年8月10日; 修订于2019年3月24日; 录用于2019年3月24日。*如需通信, 请发送电子邮件至:
kntimmis@gmail.com

©应用微生物学会与约翰威立出版有限公司 (John Wiley & Sons Ltd.) 2019年版权所有

摘要

微生物及其活动不仅广泛且深远地影响着人类乃至整个生物界的健康与福祉, 更关乎整个地球及其大气层的正常循环与运转, 对人类、整个生物界以及整个地球及其大气层总体上起着积极的作用。从总体上来看, 通过对太阳能的吸收、转化、加工和贮存, 微生物在很大程度上构成生物圈的生命维持系统。有鉴于此, 不仅个人和家庭有必要在日常生活中做决策和决定时适当考虑微生物的影响, 而且对于各级各类责任主体而言, 也有必要在社区、国家及全球层面的卫生健康评估阶段以及相关政策的规划和制定阶段适当考虑微生物的影响。然而, 与对人类影响广泛且深远的其他主题(例如金融、卫生健康及交通运输等领域, 人们对这些主题有着广泛的了解)不同的是, 普通民众以及从普通民众中选拔出来的决策者们却缺乏微生物学素养。微生物学素养包括掌握有关微生物活动的知识, 了解微生物活动对人类生活的影响以及懂得如何利用微生物为全人类造福等。与微生物活动休戚相关的决策通常不透明, 且可用信息有时也会略带成见且通常不具完整性。这些都带来了巨大的不确定性。因此, 即便是以证据为基础的“最佳”决策也时常会引致不可预知、意想不到甚至是事与愿违的结果出现。有鉴于此, 我们认为, 在整个社会中, 全民的微生物学素养不仅对于个人做出知情决策而言必不可少, 而且对于政府与企业的政策制定以及社会利益相关者在此类决策中的纳言献策都具有不可或缺的特性。与目前在中小学中开设的某些科目一样, 对重要微生物活动的理解对于帮助儿童顺利度过从童年到成年的过渡阶段至关重要, 因此必须在通识教育中掌握。微生物学素养应该成为世界公民必须掌握的知识体系的一部分。通过将微生物学知识纳入教育课程体系, 我们将有望提升全民的微生物学素养。为实现这一目标, 我们谨此提出一套基本教学理念与教学模式。这套理念与形式适用于从学龄前到高中各年龄段的学生, 它将重要的微生物及其活动对人们日常生活的影响、人类和地球面临的多项“重大挑战”(Grand Challenges)以及人类社会可持续发展及联合国可持续发展目标等内容有机联系起来。由此, 我们勉励微生物学家、微生物学学术团体以及兼具微生物学素养的专业人员参与到这项倡议中来并为这项倡议做出贡献。这些人士应不断发展和完善基本理念、开发并寻求资金以开发儿童喜闻乐见且颇富吸引力的教学工具和材料、提升该项目的影响力、并且(这一点最为重要)说服教育工作者、政策制定者, 商业领袖以及相关政府机构与非政府机构支持并全力推动这项倡议。我们必须将切实提高社会对微生物学素养的目标变成现实。

正文

微生物群落与生物群落

微生物群落几乎可以在与生物圈所有宏观生物群落(动物和植物)接触的所有物体表面上形成“第二层皮肤”。微生物皮肤构成了额外的生态生理性动态屏障, 这些屏障有效增强了地表的物理屏障与化学屏障功能(例如抵御病原体入侵的功能)。但是, 除了其屏障作用之外, 这些微生物群落还可通过多种方式与其宿主相互作用, 在提供必要功能的同时, 对其宿主合作伙伴的健康与生物学特性产生广泛且深远的影响。例如, 与植物相关的微生物有助于宿主获取包括生长所需的氮在内的必需矿物质(实际上, 如果没有微生物介导的固氮作用, 植物初级生产者将无法生产出足够的生物质来用于动物消费者的繁殖与进化)、抵御病原微生物造成的感染并产生促进植物生长的激素样化合物。植物携带的某些微生物对动物具有毒性, 因此可被植物用作抵御捕食者的防御策略。微生物还可保护宿主动物免受疾病的侵害, 促进包括牛在内的反刍动物体内的食物发酵并帮助昆虫消化食物。尽管几乎所有的宏观生物表面都被微生物群落所覆盖, 但有些宏观生物也寄生着在宿主细胞内存活的“内共生微生物”。内共生体在各类生物的生命周期中都扮演着重要的角色, 其中包括昆虫(内共生体甚至可以决定宿主昆虫的性别)、多孔生物、植物以及某些其他微生物(例如原生动)。细胞内的许多细胞器均由内共生细菌演化而来, 其中包括负责在具有光合作用能力的生物中吸收太阳能的质体, 以及在大多数生物体中负责能量生产的线粒体。生物体的微生物组成成分(即所谓的微生物群落)是该生物体身份与生态生理学的基本特征: 无菌动植物是实验室内的特殊存在, 在其发育过程中存在的缺陷导致它们无法适应环境, 因此也就无法在自然栖息地中生存。在本文中, 所谓“微生物群落”是指一个独特的微生物群落, 它占据着合理界定的生活环境且拥有独特的理化特性。因此, 该术语不仅涵盖所涉及的微生物, 而且还包括这些微生物的活动范围(Whipps等人合著, 1988年)。由微生物群落与宿主组成的整体被我们称之为生物群落。微生物群落的扰动(可导致微生态失调)可能会扰乱微生物群落与宿主的关系并破坏微生物群落有利于宿主健康的各项功能。支持这一论点的论据可参考由除草剂草甘膦引致的蜜蜂肠道内微生物群落的扰动, 此种变化导致蜜蜂对某些病原体的易感性增加(Motta等人合著, 2018年)。

人体内过半细胞由微生物组成

就细胞数量而言, 人类生物群落由50%的微生物组成(Sender等人合著, 2016年)。人体肠道微生物群落会帮助我们消化大量食物, 并以人体能够吸收和利用的形式释放其营养素, 从而为人体提供其本身无法制造的必需维生素、氨基酸及其他微量营养素并生产激素样化合物, 因此在人体内扮演着第二套内分泌系统的角色(Brown与Hazen合著, 2015年), 并同时在一系列身体疾病与精神疾病中发挥着重要的作用(Wang等人合著, 2017年; Du Toit著, 2019年)。微生物群落导致人类微生态失调的一个典型示例是抗生素诱导的肠道微生物群落扰动, 此种扰动可导致艰难梭菌大量增殖并引发伪膜性结肠炎(Bartlett著, 1979年)。至关重要的是, 我们应该认识到, 我们与微生物之间的亲密、动态且互惠互利的相互作用深刻地影响着我们从出生到死亡的各个人生阶段。这种不可分割的互惠关系在很大程度上决定了我们的健康状况、生理机能及代谢和免疫表型, 从而决定了我们的生存状态(当然, 此种互惠关系也决定了微生物群落的生存状态)。借用笛卡尔的哲学命题来解释, 即“我思故我们在”。

我们可能会因为几乎不了解因此也无法信任我们相识之人而懊恼不已，而对我们最亲密且最具影响力的朋友却一无所知。倘想拥有能最大程度提高个人幸福感的能力，我们必须理解：

- 我们的微生物伙伴正在做什么，
- 微生物活动对我们有何影响，
- 我们的行动如何影响我们的微生物伙伴及其活动，以及
- 我们应如何面向互惠互利的目标来改善与微生物群落的此种合作伙伴关系

为人类服务的微生物

微生物不仅会影响人类的健康和疾病状态，而且自远古以来就被人类所利用并服务于人类。最初，人们将微生物用于生产发酵食品与饮料（啤酒、葡萄酒及发酵乳制品）、发酵面包及粘合材料（苧麻）和保持土壤肥力（使用含固氮细菌的豆类以及微生物菌肥等）。之后，人类将微生物用于降解生活垃圾与工业废物并提供清洁饮用水，以此减少污染。特别值得一提的是，为保存食物并改善食物营养质量，人类使用微生物对食品进行发酵，并利用微生物处理人类有机废物。这些都能够改善人类生存环境与卫生状况的同时减少人类的病原体负荷，因此极大地促进了人类文明的发展、提升了人类的健康水平并延长了人类的平均寿命。

到了当代，微生物已成为新兴的生物经济的重要组成部分（例如请参阅Timmis等人合著，2017a）。巧合的是，与此同时，我们开始看到被称为第四次工业革命（4IR）的全球经济框架的颠覆性变化。除了无限制的互联、人工智能、海量传感、大数据处理、机器人技术及其他许多新兴技术外，第四次工业革命还提出了在循环经济的背景下实现商品的可持续生产、零废物、无有害排放并将一切废弃物都回收利用起来的设想（例如请参阅Nielsen著作，2017年）。微生物介导的工艺过程能够完美匹配第四次工业革命的要求，因为微生物具有能源消耗低和环境污染少等特点，故有望逐步取代目前需高温、高压、高能耗及有毒化合物的一些化学工业。此外，微生物所生产的新材料、所产生的废料及所涉及的反应物通常易于回收。因此，由微生物构成的高效生物催化体系所介导的化学转化反应，尽管以前此类技术只是对化学工艺过程的微不足道的补充，且往往侧重于生产少量高价值或高附加值的生物活性分子，目前正逐步演化成为一种真正意义上有助维持环境生态可持续性的替代性方法，即可再生原料经大规模化学转化反应生产产品的工业化应用。这一演化发展的核心是细胞工厂（主要是微生物）以及从细胞工厂中获取的酶，无论是天然细胞还是经基因重新编码改造而得的细胞。

除生物催化外，当前具有广阔发展空间与应用前景的微生物处理工艺还包括：

- 生产各种食品（酸奶、奶酪、纳豆、单细胞蛋白、巧克力、熟化香肠、泡菜及益生菌）、食品调味料（香草、酱油、泡菜、paa deak 及 soumbala）和食品补充剂（维生素、氨基酸、叶酸及益生菌），
- 生产药品（抗生素、激素及生物制剂）、疫苗、诊断与生物传感器监控系统以及个人护理产品，
- 保护和促进农作物的生长发育，
- 微生物发酵法生产各种化学制品与生物材料（生物塑料与微生物纤维素等），
- 绿色化学工程（例如微生物电化学合成技术以及以二氧化碳温室气体为化学合成原料的生物化学处理工艺等），
- 生产能源（沼气与微生物燃料电池等），
- 回收再利用自然资源（例如利用工业生物浸提法从废旧原料中回收有价金属，以取代高污染的金属热加工工艺），
- 微生物处理垃圾源及污染场地的生物修复技术，
- 对历史文化遗产（纪念碑、雕像、壁画、绘画及文献）进行生物清洗、生物修复及生物保存。

此外，随着研发深入，大量新的应用正在不断开发中，其中包括采用微生物疗法治疗因微生态失调所导致的疾病（例如伪膜性结肠炎、炎症肠病、肥胖症、糖尿病以及各种心理问题；例如 Rossen 等人合著，2015 年），利用合成生物学重编程技术对与生物技术相关的细胞和生物进行重编程，以实现高水平的生产效率与生物活性以及生态系统级生物工程等。微生物惊人的代谢多样性不断为可持续性生产大宗和特种化学品及材料提供新的机会（Lee 等人合著，2019 年）。

对于以知识为基础、以生物为中心的经济体而言，为提升自身竞争力并在可持续实践领域取得重大进展，经济体应具备三个重要的能力，即及时识别并抓住微生物工程技术新机遇的能力、准确评估收益与潜在风险的能力以及就促进微生物利用所需的行动做出基于实证的决策的能力。为此，我们有必要确保决策链中的各级各类决策者（包括作为主要利益相关者的公众）都能掌握足够的微生物学基础知识。

在掌握微生物工程技术基本知识的基础上制定政策与决策关乎人民福祉、民族未来，对于实现可持续发展和文明进步具有无可比拟的重要作用。我们未来发展的速度与方向在很大程度上取决于我们在如下领域付诸努力的多寡：

- 不懈探索未知的微生物工程技术，从而不断提升我们自身的能力，以准确预测并识别潜在的新型微生物技术的商业应用¹；
- 充分利用新型微生物工程技术来改善人类健康状态和地球生态系统的健康循环，
- 扩展并改进现代微生物工程技术应用，以及
- 设计恰当的基于实证的决策系统与资源分配系统，以激励和推进企业和个人开展专项研究、开发及商业化活动，并充分考虑利益攸关方的偏好。

微生物广泛且深远地影响着人类个人与集体的健康与福祉

微生物每时每刻都在以不同的方式影响着人类的生活，因此微生物与人类做出的许多个人决定都休戚相关。这些决定包括是（1）采用剖腹产（无菌）还是自然分娩方式（来自母体的微生物快速在婴儿体内定植；Wampach 等人合著，2018 年）；（2）是否采用母乳喂养[母乳能够提供保护性抗体，保护婴儿免受病原体的侵扰；人乳低聚糖可选择性刺激双歧杆菌增殖，被认为可以促进婴儿免疫系统的成熟和健康发展（Gomez de Agüero 等人合著，2016 年；Moossavi 等人合著，2018 年），母乳中存在母体微生物群落（Milani 等人合著，2017 年）]；（3）经常使用强效消毒剂清扫房间（减少婴儿接触多样性微生物群落的机会，而微生物群落多样化往往意味着更健康的身体状态：Finlay 与 Arrieta 合著，2016 年；Gilbert 与 Yee 合著，2016 年；Bach 著，2018 年；Sharma 与 Gilbert 合著，2018 年；甚至医院也是如此：请参阅 Caselli 著，2017 年）；（4）接种疫苗或治疗感染（Lane 等人合著，2018 年）；（5）使用含磷的家用清洁产品（Richards 等人合著，2015 年；可引发当地水域富营养化现象和有害藻华藻类频发）；（6）使用杀菌肥皂（可导致皮肤微生态失调；Gilbert 与 Yee 合著，2016 年）；（7）饲养宠物狗（促进微生物群的交换，Trinh 等人合著，2018 年；增加流域中磷的输入量，Hobbie 等人合著，2017 年）或（8）选择使用何种食物（例如牛肉的甲烷含量很高；食用牛肉和奶制品与癌症之间存在相关性，zur Hausen 等人合著，2017 年；食用其他肉类与蔬菜时应注意查明产地、保质期以及与已知风险因素之间的关联等）；（9）如何储存和烹制食物它；以及（10）房屋的通风/加湿/除湿的程度等等。

为理解上文观点，我们不妨思考一项我们乐于参与的活动，以休闲度假为例。休闲度假会使我们暴露于可致各种感染和微生物诱导型疾病的风险，而这些疾病有些会危及生命，且在日常家庭环境中并不存在或并不常见，但却可以通过如下途径致病：

- 在淡水或海水中沐浴（例如隐孢子虫、创伤弧菌及钩端螺旋体等）、在氯化程度不足的游泳池或澡池中游泳或沐浴，其中以在热水浴池中沐浴风险最高（分枝杆菌、假单胞菌、军团菌、念珠菌、毛癣菌及贾第鞭毛虫等），
- 进食未经烹煮的食物或受污染食物，尤其是海鲜（例如沙门氏菌、弧菌、出血性大肠杆菌、弯曲杆菌、李斯特菌、诺如病毒、肝炎病毒及各类寄生虫等），甚至是进食业经充分烹煮但含耐热毒素的食物亦是如此（包括致命性赤潮神经毒素与多种霉菌毒素），
- 饮用已受污染的液体（例如水与果汁等），
- 与新伴侣发生性行为（常见性传播疾病及艾滋病等），
- 所选的度假胜地正在爆发传染病疫情，其中包括黄热病、疟疾、寨卡病毒、肝炎病毒、登革热病毒、莱姆病及肺结核病等；以及
- 所选的住宿与卫生保健设施（包括游轮）存在爆发细菌或病毒感染的风险（例如环孢菌、诺如病毒、军团菌及分枝杆菌感染等）。

¹ 一项科学研究取得的新成果通常是新的发现和进展。而科学研究的组织形式则通常在纵向上具有明晰的学科层次或者在横向上表现为相关学科组成的学科群。这一现象在某种程度上阻碍了科研人员的跨学科实践与发现的能力。重要的是，为促进环境保护、维持人类健康和实现粮食安全所需的许多变革都需要以跨学科的方式建立科学研究的规划和实现机制。有鉴于微生物学的明显特点及其广泛的应用性，并考虑到微生物在地球上无所不在地影响着人类与地球的健康，因此微生物学素养将赋予研究人员更多的跨学科研究意识与实践能力。这无疑将加速人类创新型解决方案的开发与管理创新，帮助我们更快更好地应对我们当前面临的诸多重大的环境与健康挑战。

诚然，在商务旅行中我们可能会遇到类似的危险或灾害，而寻医就诊也可能会给我们带来与手术和医院相关的其他风险。

微生物活动同样会影响许多方面的战略决策与政策决策。在此类决策过程中，考量微生物活动至关重要，例如在工业生产设施中启用新的原料或产生新的废弃物、在食物中启用新原料、构建新的食品供应链、推行新的公共卫生措施，施行新的农业实践或推行旨在保护海洋生态系统免于退化和破坏的新举措。

如果我们做出的有效决策（无论是在个人层面还是在政策层面上）极有可能导致可预测的结果，那么我们就必须知晓哪些微生物活动与此类决策相关、这些微生物活动会如何影响此类决策的实施并反过来受此类决策实施的影响。此外，我们在日常生活中做出例行决定与决策时也需要对以下方面有基本了解：

- 我们的行为可导致哪些不良后果；以及
- 我们应如何修正自己的行为，以规避或减轻这些行为对我们自己和他人的负面影响。

分布广泛的微生物对整个地球生物圈的影响极其深远

微生物不仅是地球上最早期的生命形式之一（可追溯到距今大约40亿年前），而且也是地球上生命形式的未来：在人类及其他生命形式消亡之后，微生物仍将继续在地球上栖息繁衍。相比我们熟悉的可见生物，浩淼且无形的微生物世界具有更大的进化多样性和代谢多样性。微生物是海洋中的重要生命形式，约占海洋总生物量的90%。具有光合作用能力的藻类和蓝细菌是海洋浮游生物的重要组成部分，并构成海洋食物网的基础。每年，地球海洋中所有的原绿球藻和聚球藻每年要从大气中吸收100亿吨碳，相当于海洋中固碳的三分之二。在当地乃至全球范围内，微生物在生物地球化学循环中发挥着重要作用，这些生物地球化学过程从根本上影响着温室气体的产生与排放，影响着气候变化、动物、植物及人类社会的健康以及土壤和水源的质量。海洋微生物通过光合作用产生了我们呼吸需要的50%的氧气。早期的微生物默默地生存、繁衍并产生氧气，使所有耗氧生物得以进化，而臭氧层又使得生命能够从深海大规模地移居到陆地上。微生物是地球上最清洁环保的废物回收站和资源再生站。微生物无处不在，它们自身的活动时刻维持并影响着地球上所有生命体的生命质量。它们是生物圈的生命维持系统。尽管我们人类自视为地球健康的管家，但实际上在影响、调节并改变地球

活动等领域，微生物才是更强大的力量。在极端情况下：如果在养分循环中发挥关键作用的某一群系的微生物将被迫从生物圈中消逝而不能用另一群在功能上等效的同类所取代，那么我们所知的地球生命将不复存在²。就活动和规模而言，全球微生物群落是人类唯一可以依靠的盟友，它们可帮助人类消除因产业活动、集约化农业和人口过多所造成的污染排放的影响（de Lorenzo等人合著，2016年）。

² 虽然乍看之下，这一概念似乎有些牵强（如果结合下文中“所有微生物都无所不在”的其他陈述，更是如此），但值得我们深思的是：环境栖息地条件的变化（例如因全球变暖而导致的变化）可能会使微生物对原住民不利。为应对这一不利影响，原住民必须（1）迁移到更有利的栖息地，（2）适应性进化出新的属性，以更好地适应新的栖息环境，或者（3）死亡，而且如果同时受地域限制的影响，原住民还有可能会灭绝。迅速繁殖的生物最容易影响进化。但是生物圈许多环境中的微生物群系都繁殖非常缓慢。一旦环境发生骤变，则可以想象的结果是这些微生物将会消亡。如果其中任一微生物群系属于协调生物圈关键功能的一环，则还有可能会造成严重后果。就这一论点而言，Curtis（2006年）曾颇为尖锐地指出：如果最后一只蓝鲸因吞食最后一只大熊猫而窒息而死，那将引发灾难性后果，但不是世界末日。然而，如果我们因无意中误食了最后两种氨氧细胞群落（即最后一头蓝鲸和最后一只大熊猫）而导致中毒，那结果就将另当别论。这一假想此时此刻也许正在发生，而我们甚或都尚未察觉...'

我们每个人必须深刻认识到微生物在地球生态系统循环和人类健康中所发挥的关键作用，并了解微生物的作用和潜在效用，以便我们可以发展有效的合作伙伴关系并制定有效战略来携手维护地球的健康。我们眼下的当务之急是我们应该

- 了解在微生物介导的养分循环、地球功能与生物圈健康三者之间的微妙平衡，并以欣赏的眼光去看待这一平衡；以及
- 确保我们不会（哪怕是无意间）对于在生物圈功能中发挥关键作用的微生物群系产生不利影响。

控制微生物活动对于应对某些重大挑战和实现可持续发展目标至关重要

当今人类生存面临的主要挑战包括：在获取粮食、清洁水、医疗保健、教育、能源和原材料方面的不平等；持续贫困；因全球变暖而引发的海平面上升及其引致的人口稠密地的流失；以及土地荒漠化等。这些都是人类所面临的“重大挑战”（Grand Challenges）的一部分。联合国在其《可持续发展目标》中详细阐释了人类和地球的需求，以及以可持续方式满足这些需求的行动计划（可持续发展目标；联合国（2015年）《改变我们的世界：2030年可持续发展议程》。网址<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>）。《微生物生物技术》（2017年）在其近期期刊中探讨了有助于实现可持续发展目标的一系列微生物工程技术，这些技术有些正在为实现联合国可持续发展目标做出贡献，有些则已彰显出能够有所贡献的潜质，其中包括那些可以缓解随着世界人口不断增加而导致的世界粮食供给紧张局面的技术（Garcia等人合著，2017年；Trivedi等人合著，2017年）；可以减少温室气体排放、减缓全球气候进一步变暖趋势及其部分负面影响的技术；可以缓解全球污染问题的技术；可以最大限度利用可再生能源并实现世界自然资源消耗的可持续性的技术等等（例如de Lorenzo著，2017年；Verstraete与de Vrieze合著，2017年）。该期刊还探讨了微生物技术在帮助实现另一项联合国可持续发展目标领域的巨大潜力（即与新创企业、就业和财富相关的可持续经济增长和创造就业），并专题探讨了在生物经济背景下及其他语境中的微生物生物技术的应用潜力（Timmis等人合著，2017b年）。在2017年至2018年间，《微生物生物技术》期刊上陆续以《以微生物学构筑新创企业和创造就业的源头活水》的总标题发表了一系列社论，探讨了利用微生物工程技术创立新企业和创造就业机会的可能性。

在应对“重大挑战”和实现联合国可持续发展目标的漫长道路上必须施行的诸多行动都将涉及微生物过程。为将这些行动落到实处、持续深入开展专项行动并提升行动效果，我们还需制定一些重大政策决策。这就要求决策制定者了解相关的微生物活动知识，并知晓如何引导微生物活动以获得最大有益效果。

在充分考虑微生物过程基本知识的基础上制定的决策或能够预防重大灾难，甚至是全球性灾难

微生物是地球进化与生命演化的主要参与者和主要利益相关者。如果决策者未能适当认识、理解和考虑到微生物对相关过程的贡献，如果所制定的计划未能考虑到微生物在任何预期变化中可能发挥的作用，这些都将会使各级各类政策（无论是国际、国家还是地区或个人层面）的制定和实施充满风险、不够完善或缺乏有效性，而且在最坏的情况下更会适得其反。可能因政策决策的实施或缺失而受到不利影响但可防患于未然的灾难的示例包括：

抗生素耐药性危机。早在二十世纪六十年代至七十年代初期，多名领衔微生物学家就曾警告指出，由于抗生素开药过度及其非临床应用，导致抗生素耐药性的出现频率与影响范围正在呈逐渐上升势头（事实上，青霉素的发现者Alexander Fleming在1945年领取诺贝尔奖的演讲中就曾发布过类似的警告：<https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/fleming-lecture.pdf>）。这些领衔微生物学家包括Falkow（Falkow等人合著，1961年；Falkow著，1970年，1975年）、Watanabe（Watanabe著，1963年；Watanabe著，1966年）以及Levy（Levy等人合著，1976年；Levy著，1982年）等人。自此以后，许多科学家都相继发出过类似的警告，其中一些警告涉及抗生素在水产养殖中的使用（例如Cabello著，2006年），但收效甚微。时至今日，我们已将抗生素耐药性视作医学界面临的最重大挑战之一，因为抗生素耐药性导致越来越多以前能够治愈的可危及生命的感染不再能够治愈。

（http://www.wpro.who.int/entity/drug_resistance/resources/global_action_plan_eng.pdf）。据国际报告《应对全球耐药性感染：最终报告和建议》（https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf）预计，到2050年，全球抗生素耐药性问题将造成累计高达100万亿美元的全球损失，且全球每年耐药感染的死亡人数将达1000万人（值得注意的是，该报告提出的四项建议中的第一项是有必要针对特定儿童和青少年群体开展全球公众意识提升活动。奇怪的是，尽管该项活动的费用高达每年4000万至1亿美元，但基础教育并未包括在拟议活动范围之内）。尽管如此，据预计，在2010至2030年间，畜牧业与水产养殖业中抗生素的非临床使用量将增加67%

(https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf)。如果卫生主管部门、政界人士及企业领导人（以及最至关重要的公众）当初能够意识到微生物具有根据环境的变化（在此种情况下是指在环境中大规模地引入强效抗菌化合物）而迅速进化并传播新功能的能力并且因此能够理解Falkow等人发出的警告，那么我们现在所处的境况可能会截然不同。

几乎已绝种的儿科疾病卷土重来。由于疫苗接种的接受率与覆盖率降低，麻疹、百日咳和白喉等疫苗可预防疾病在此卷土重来。而这本来是完全可以避免的。这一现象反映出在实际上已经根除这些疾病的国家中，人们缺乏对疫苗相关风险和微生物学基础知识的根本了解，且人们在做个人抉择时未能以循证为基础（即“疫苗犹豫”现象）（Lane 等人合著，2018年）。

过敏症病例呈全球上升趋势。尽管我们需要严肃对待儿童时期的重度感染，但轻度感染和在环境微生物群落中的合理暴露被认为对出生后婴儿免疫系统的发育有重要作用（Bach 著，2018年）。微生物恐惧症（germaphobia）的流行以及广告活动在人群中塑造出错误认知，使人们错误认为所有微生物都具有有害性，因此必须消除所有微生物以确保安全的家庭环境。这些可能是导致当代社会免疫系统功能异常疾病人数激增的重要原因（例如过敏、哮喘、湿疹以及神经系统疾病）。事实上，近期的一项研究表明，使用强力杀菌肥皂会降低皮肤微生物群落在预防皮肤癌领域的保护性作用（Nakatsuji 等人合著，2018年）。但是，这些结果本可以避免，防范措施包括采取适当措施强化教育，提升人们对平衡卫生习惯的必要性的认识，通过采取维持健康微生物群的有效措施来减少病原体总负荷，确保健康微生物群落能够不断地为我们提供重要的生态生理功能。这些教育还应包括有效的免疫系统教育，即通过让新生儿和婴儿早期暴露于土壤和动植物中含有的多种微生物中，刺激新生儿和婴儿的免疫系统启动与发育（Finlay 与 Arrieta 合著，2016年；Gilbert 等人合著，2017年）。

温室气体危机。微生物不仅会产生而且会消耗温室气体（Cavicchioli等人合著，已提交）；因此，在减少微生物温室气体排放量的同时，增加温室气体消耗量的努力都至关重要。当考虑微生物在温室气体产生与消耗中的参与时，我们需要在了解定量测定方法的同时，认识到微生物过程中的温室气体排放与消耗可能不具线性特征的这一事实，这一点至关重要。相比人类通过燃烧化石燃料而排放二氧化碳的总量和速度，微生物和植物消化和固定温室气体的速度异常缓慢，这导致正常的物质循环呈失衡状态，因此也是二氧化碳水平迅速上升且居高不下的原因：人类的植物与微生物伙伴无法跟上人类活动的步伐与速度。温室气体排放导致全球气候变暖，并进而导致永久冻土层融化加速。当永久冻土层融化时，更多的微生物从冻土层中释放出来并产生释放出更多的甲烷与二氧化碳，从而进一步加剧了由过度消耗化石燃料所导致的全球变暖问题。

动物肉类的生产（特别是反刍动物肉类的生产）与温室气体的大量排放不可分割，这一事实早已广为人知。但肉类生产本身必须以雄厚的饲料草生产量为基础，而饲料草生产又与氮肥的使用有关。最终将被土壤微生物分解成氨和温室气体二氧化碳的尿素是农业生产中广泛使用的氮肥，其使用历史非常悠久（尽管目前正被逐步淘汰）。其他含氮肥料会导致微生物生产一氧化二氮，一种具有高臭氧损耗潜力的温室气体（当然，也会发生富营养化）：在与之毗邻的水道与水体中，径流养分诱导的有害藻华大量繁殖可导致鱼类死亡与缺氧，而政府也会相应出台旨在限制使用受影响水体的政策。显然，考虑到超出基本饮食需求的肉类生产和消费量，我们本应且仍需做出重要的个人决定与政策决策。

流入沿海水道的养分径流会导致微生物群原住民快速消耗氧气，而这反过来又促进了最低含氧区的快速扩展。在为可持续未来发展确定的9个地球环境安全界线中（包括气候变化、生物多样性丧失和臭氧层耗竭），氮循环被认为是失衡最严重的地球环境安全界线，其原因在于现如今人造肥料的施用总量已超出了所有自然过程向生物圈提供氮营养素的承受能力（Rockstrom等人合著，2009年）。目前，许多国家都在讨论限制使用此类肥料的问题，但是除了农业及其供应链的正常运作外，我们还需要养活不断增长的世界人口，并需要以地区内较贫穷人口可以承受的价格生产和供应粮食。这些都是研究和解决问题过程中的混杂因素。鼓励农民在做出决策和制定合理政策领域发挥带头作用似乎具有逻辑合理性，因为农民比其他任何人都更了解土壤氮素改良剂与农作物生产力之间的关系。然而，微生物在与氮肥相关的温室气体排放问题中所发挥的作用鲜少能成为个人和政策争辩与决策过程的主要内容。尽管如此，在这些争辩与决策过程中，我们仍必须努力确保涉及微生物作用的讨论具有意义及成效。从更广泛维度来看，最近出台的旨在限制温室气体排放的政策与决策主要涉及人工源温室气体排放量，却根本忽略了一项事实，即微生物是大量温室气体生产和排放的重要参与者，其所涉及的温室气体除二氧化碳之外，还包括一氧化二氮和甲烷。无论如何，尽管影响程度各异，但全球气候变暖对我们每个人都有影响，因此我们是全球气候变暖领域的关键利益相关者。例如，随着全球气候变暖，病原体及其媒介的全球分布都发生了改变，从而导致在从未接触过任何抗原刺激（immunologically naive）的人类与动物种群以及无防御能力的植物种群中出现疾病，并可能导致疫情蔓延。

土壤危机。土壤是地球至关重要的活皮肤。土壤为许多动植物和微生物提供了栖息地和必须的养料。这些动物与微生物介导了覆盖面甚广的生物地球化学循环过程，而这些过程反过来又决定了土壤的功能和健康状况。土壤还具有过滤功能，能够过滤地表水，使得地表水通过土壤过滤与下渗作用补给下面的含水层，为全球数十亿人提供饮用水和灌溉水。土壤含有宝贵的营养元素，其碳含量是地球大气层的三倍。但是地球上的土壤正迅速发生侵蚀，经常流到溪流、河流和海洋中，并沿途释放养分。大多数国家的表土流失速度比土壤形成速度（岩石经过风化形成土壤母质，并最终形成表土）快数十倍甚至数百倍。越来越多的极端天气事件加剧了土壤侵蚀的速度。土壤微生物在其代谢过程中产生的多糖，能够充当土壤颗粒的胶结物质，是形成土壤团粒结构及保持团粒稳定的粘接剂，因此有助增强土壤自身的抗侵蚀能力。预计在21世纪末之前，地球上的大部分农业用土地将不同程度地遭遇灾难性的土壤流失灾害，这将导致人类缺乏生产足够养活

全球人口所需粮食的农业资源和手段。此外，流失的土壤还会大量养分带入水道并污染水体，并会释放出大量的碳，反过来又会加剧全球气候变暖的趋势。倘想成功规避这场危机，决策者必须在掌握相关知识的基础上制定出针对性战略，以更好地利用微生物活动来提高土壤稳定性。为确保这一设想的实现，同样重要的是，作为关键利益相关者的世界公民必须意识到这一问题的严重性，并了解可供选用的微生物群落特征。有鉴于此，掌握微生物学知识和提高微生物学素养都至关重要。

污染物在环境各圈层和食物网中积聚。仅仅知晓微生物参与环境过程是不够的，通晓不同微生物群的作用与优势劣势至关重要。从历史上看，我们不妨大胆假设：众所周知，微生物代谢多样性将有助我们处理来自工业、家庭及医院等场所产生的所有污染物质，而无需考虑可能存在局限性。然而，尽管微生物会降解许多种类的有机物质，但有些种类的微生物代谢速度缓慢，而有些甚至极其缓慢。因此，如果有机物质代谢产物被释放到环境中的速度大于微生物对这些有机物质的生物降解能力，那么这些有机物质就会积聚并导致污染。反观被禁止生产数十年后仍然留存于地球表面的持久性有毒化学物质（例如当代食品网中的多氯联苯和二噁英）以及当前正甚嚣尘上的石化衍生塑料污染灾害，上述论点就不难理解。

如果当初所涉各方能够做到以下几点，那么当前正在困扰我们的一系列严重问题不仅具有可预见性而且在一定程度上具有可规避性（这些问题包括对终极抗生素产生药物耐药性的病原体之间的隐匿性传播、土壤侵蚀、海洋塑料垃圾污染问题及其对野生动植物健康的影响以及食物网中微塑料粒的形成与积聚）：

- 政策制定者理解微生物过程相关决策所可能产生的结果及其长期影响；并且
- 社会上更广泛的利益相关者在更早期阶段就被赋予理解当代政策风险与行为风险的能力

长期暴露于低水平生物活性物质中的暴露组及相关特殊问题

与微生物素养问题联系特别紧密的“重大挑战”之一是生物圈的生物污染与化学污染，因为人类决策既可以是引发问题的诱因（人类决策可最终促成引发污染的政策颁布与实施），又可以是解决问题的钥匙（人类可以借助减量化、修复及回收等手段，制定旨在减轻污染的政策）。在高收入国家，生物污染（特别是与都市卫星城相关的粪便污染）尽管在很大程度上能加以控制，但也可能会因为技术故障或极端天气事件而偶尔出现问题。但是在低收入国家，生物污染问题仍令人头痛不已。此外，旨在为肉类生产服务的工业化畜牧业通过产生大量的动物废料而进一步恶化了生物污染问题。这些动物废料包括数量庞大的动物粪便，而这些粪便中又栖息着富含抗生素并已对抗生素产生耐药性的微生物，包括病原体。尽管其中一些动物废料经厌氧消化池处理后变得无害，但仍有一些废料残留在周边环境并随时可能构成危害。

尽管在将新的化学制剂与新药引入市场之前通常会对其毒性与生命周期进行评估，但此类评估通常只会提供与短期内可检测到的急性毒性有关的信息，并且在大多数情况下采用标准模板阐释其评估结果。但这些化学制剂和药物可能具有的特定固有危害，却未在模板中提及。面向最直接受影响的生物开展急性毒性评估往往极具挑战性，而针对需要假以时日方才能缓慢显现的低水平慢性毒性开展的评估也同样极具挑战性。对于那些受到最直接影响的生物的急性毒性以及长期表现出来的低水平慢性毒性的评估是非常具有挑战性的。许多具有生物活性的化学物质（特别是制造业废物流中的药物制剂以及医院与家庭废弃物中的药物制剂）在极低浓度下就具有显著的生物效应，其中一些化学物质历经污水或垃圾处理设施处理之后被排放到环境中去之时，其结构和性质仍然能够保持一成不变。更有甚者，一些化学物质可能会被环境微生物群落部分降解为新的代谢物，而这些新的代谢物有可能并未被纳入环境影响评估的测定范畴，也有可能拥有着与原始化学物质不尽相同的毒性，还有可能其毒性甚至比最初进入环境的原始化学物质更高更烈。低水平长时间暴露于含有此类化学物质与代谢物的环境中可能会在种群水平上导致隐伏的恶性后果。在环境中广泛分布的化合物包括外源性雌激素（Monneret 著，2017 年）和导致授粉昆虫（例如蜜蜂）数量下降的杀虫剂（Godfray 等人合著，2015 年；Christen 等人合著，2018 年）。外源性雌激素是一种内分泌干扰物，被认为至少在在一定程度上导致人类及其他动物的生育能力下降。

另一项甚至更具挑战性的问题是，各类污染性化学物质在环境中混合在一起，而化学混合物（尤其是低水平长时间暴露）对生态环境及人类健康的影响机制与程度虽然在整体上尚不明确，但无疑影响深远。微生物不仅本身具有而且还可进化出降解多种化学混合物的能力，因此微生物通常是从环境中去除许多化学污染物的主要媒介。但是，对于另一些化学污染物，微生物可能不具备降解能力，或者说至少不具备以可观速率降解某些化学污染物的能力，特别是当微生物以极低浓度存在时，而当存在于某些复杂化学混合物中时微生物的降解能力尤其不值一提。

总而言之，尽管生物污染与化学污染问题非常复杂，并且微生物将污染物转化为无害物质的能力同样复杂，但减少现有污染的唯一途径是增进了解并合理利用与之息息相关的微生物过程。对于新型化学物质（包括借助合成微生物学生产的化学物质），负责任的设计必须包括对该物质生命周期终点的明晰定义。但是，我们需要再三强调的是：无论微生物世界存在何种局限性，在抗衡地球异常严重的污染负荷的过程中，它仍然是我们人类唯一可以依靠的媒介（de Lorenzo 等人合著，2016 年）。

我们必须认识和理解微生物的降解能力及其局限性，并使之成为制定污染控制与缓解政策的核心环节，这一点至关重要，因为此类政策最终将决定环境污染物在人群中的暴露水平。为实现以下目标，我们需要齐心协力地采取协调一致的（全球化）可持续发展政策，以便：

- 在地方、区域及全球层面上，针对环境中生物活性物质及其混合物的类型与水平等评估项，简化其识别、评估和监控

的形式与内容:

- 增进我们对生物活性物质及其混合物对地球、社区和个人健康影响机制的理解;
- 协调各方努力,从环境中清除生物活性物质及其混合物,减轻或解除其毒害作用,并减少进入食物网并在食物网中迁移的可能性;并且
- 制定措施以减少此类污染物在人群中的暴露水平。

全球互联性以及微生物对各类变化的响应

最后但仍至关重要的一点是,我们有必要着重强调地球的两项关键特征。第一项关键特征是全球互联性:地球的所有表面和大气层都籍由水、风和作为人类产品的机械供应链相互联系,这些供应链通过陆路、海路和空中运输工具移动地球表面和大气层中的大部分物质,迁移距离有时甚至长达数千公里。此种物理互联性的一个广为人知的结果是,塑料垃圾被迁移到海洋的各个地方,远离最初的废弃物堆放点,而有些污染物(例如有毒的多氯联苯,英文缩写PCB)已在极地动物体内发现,而极地离这些物质的生产和使用地点都相距极其遥远。因此,尽管我们可能认为我们有能力有效且安全地管理化学物质在其生产设施中的潜在危害,但互联与流通机制可能会在遥远的地方引发问题。生物性因子也会通过主动运动与被动运动来提升生物圈中的互联性与移动性。此种运动方式对于具有飞行能力的昆虫、鸟类和搭乘飞机旅行的人类来说可以是飞行;对于水生生物、可以在空气中或水中悬浮的种子、花粉和浮游生物以及其他生物来说可以使游泳和漂浮。2003年严重急性呼吸系统综合症(SARS)在全球的爆炸性扩散、起源于亚洲、每年爆发的流行性感冒疫情、以从埃及进口的有机葫芦巴种子为源头的德国肠出血性大肠杆菌疫情,以及因移民人口增长而导致的传染病的传播与扩散(例如摩洛哥等非洲国家中肺结核新发病例增加,以及西班牙爆发通过软蜱传播的非洲病毒疫情)等等都是生物互联性的后果示例。国际贸易在传染病病原体的传播中也起着十分重要的作用,且可能是当前因叶缘焦枯病菌(*Xylella fastidiosa*)感染引致的多种植物病害传播的原因之一。叶缘焦枯病菌是目前世界上最具毁灭性的植物致病菌之一,对农业生产、公共花园和环境构成巨大的威胁,并导致巨额经济损失。叶缘焦枯病菌与许多借助病毒介体传播的病原体都不同。后者拥有特殊的病毒介体,具有高度的宿主特异性,因此宿主范围受到限制。但是叶缘焦枯病菌则是通过一系列的植物木质部汁液为食的昆虫介体传播,因此可感染许多植物宿主。船舶压舱水是外来海洋生物入侵的主要媒介之一,在全球各地采集并卸载的船舶压舱水可能会携带新的非本地生物种群,有时甚至还会携带表征生物安全问题的危险生物种群(例如有毒藻类)。富含磷、铁和微生物的沙漠尘土随气流被运送到遥远的地方并降落到地面:来自撒哈拉沙漠的尘土经常降落在欧洲各地,并给墨西哥湾与马尾藻海的水体带来养分,从而导致藻类的大量繁殖。

正如水和空气的互联性介导了包括放射性物质在内的耐久性化学物质在整个生物圈和大气层中的分布一样,水与空气可确保几乎没有重量的微小微生物在整个生物圈和大气层中的分布。然而,与化学物质不同的是,微生物可以繁殖,机会性定植并影响有利于其栖息繁衍的任何地点。微生物的全球分布如同被封装在潘多拉盒子中的咒语:所有微生物都无处不在。一个必然的而且也许更有意义的真言是:如果微生物能够在影响某个地块的过程中获利,那么它们将在该地块上栖息并充分发挥其获利能力。

地球的第二项关键特征根植于这样一个事实,即由自然事件或人类无意或蓄意行为引起的变化通常会引发响应,有时会引发意外响应,并导致可能与预期相左的最终结果。导致意外响应的原因可能是物理化学反应,而且在通常情况下是生物学响应(尤其是微生物学响应)。因此,当我们决定必须采取某项行动时,除了通常要考虑的因素之外(包括可行性、成本以及物流与后勤保障等),我们还需要考虑这样一个事实,即微生物不会被动地去适应人为环境的重大变换(无论系出人类的有意还是无意):它们会积极响应并改变人类行动的后果(有时是正面变化,有时是负面变化)。有鉴于此,我们需要不断地自查自问:微生物活动是否直接或间接地参与了拟议进程或受到拟议进程的影响?而且,如果确实如此,微生物对拟议行动的可能或潜在响应是什么?然而,我们尚未掌握与微生物进行对话的技能,因此无从得知在我们做出变革时它们如何响应。因此,从监测和建模微生物对环境变化的具体响应机制出发开展循证预测,并谨慎行动至关重要。为了摒弃陈旧的座右铭“全球化思考、本地化行动”,我们可能会勉励人们采取本地化行动,但只有在适当考虑了地方性、区域性及全球性响应的可能性之后,方才能够采取本地化行动,因为这些响应可能导致附带后果(包括可能与拟议主题完全不同的非直观后果)。

我们地球的互联本质要求我们在采取行动之前,必须确保我们具有如下能力:

- 有能力明智而审慎评估本地化行动对邻近地区以及全球范围内微生物活动的潜在溢出效应、影响程度和相关途径;
- 有能力使用适当的方式正确地描绘影响情境并对其建模(包括作用时效与对策);
- 当我们基于保守性假设对我们预测的结果缺乏信心时,有能力审慎考量其他行动方案;并且
- 有能力监控、审查和改进各类政策,并授权地方实体采取措施,以有效预防不协调行为或偏离行为,以免因无意行为或以其他方式造成不利影响。

存在的问题

当前存在的问题在于,有关微生物及其活动的知识目前集中掌握在一小部分专家(即微生物学家)手中。诚然,一直以来,社会都在邀请专家为决策者提供建议,例如就实施新政策的成本等问题,邀请经济学家向政府提供建议。然而微生物学领域的问题在于,无所不在的微生物活动时刻直接且密切地影响着社会上每个人的日常决策。而且,尽管可通过互联网访问相关信息,但在大多数情况下,及时咨询微生物学家或询问微生物学知识的选项都不具切实可能性或不具可能性。因此,一方面,我们拥有学富五车但对任何级别的政策决策都无任何影响力的微生物学家,而在另一方面,我们还拥有因为缺乏必要关键知识而很难做出知情决策的政策制定者与决策者们。如果决策者与利益相关者都无法理解和评估

导致危机的根本原因或潜在解决方案（例如Brussow著，2017年），我们如何能够有效应对我们所面临的危机？

如果我们希望避免重复犯以前的错误，以有效规避上述类型灾难性后果的再次发生，那我们就必须掌握重要的基本信息，从而帮助我们正确理解问题、适时做出恰当选择并优化基于实证的最佳政策决策。这些必须成为我们的个体与集体知识库的重要组成部分。为有效避免日后触发可预防的灾难性事件，

- 关于微生物过程、微生物活动及其多方向相互作用和相互依赖性的基本知识不仅必须成为公众意识的一部分，而且
- 微生物过程的中级知识（*intermediate knowledge*）必须构成相关政策制定者¹技能集的一部分，并且
- 决策体系必须建立在更充分的循证标准与专家审查的基础上。

解决之道：提高社会的微生物学素养

微生物学的基本原理必须成为基础教育的一部分

当代社会的某些人群（例如教育工作者、政客、行业领袖、国家机关与国际机构的负责人等）对掌握微生物学知识的需求最为迫切，因为他们的决策比其他人的决定能够在更广泛更深层的层面对社会产生影响。然而，我们每个人每一天都会做出与微生物有关的决定并履行与微生物有关的实践。此外，对于影响人类乃至整个地球健康与福祉的重大政策与决策，我们都是利益相关者。为有效行使公民的权利并履行公民的义务，以便有能力地为决策者提供意见与建议（无论是作为选民还是利益集团的成员），我们必须具备微生物学素养。因此，当代社会迫切需要各级各类人士具备微生物学素养：微生物学素养理应成为成年人必须掌握的知识体系的一部分。

一般认为，在幼儿教育时期获得的公共知识储备和批判性评估能力对于帮助儿童顺利度过从童年到成年的过渡阶段至关重要。截至目前，母语、外语、历史、地理、时事、数学、物理、化学及生物学等知识都已被视作有助实现教育均衡性的基础课程。这也就是说：对这些课程知识的了解和掌握被视作个体成熟的重要属性，是个体就业并承担家庭相关责任所必需掌握的知识体系，有助于我们在个人生活与职业生涯中消化和处理新近获取的信息，有助于我们做出富有成效的日常决策，以指引我们度过生活的曲折与坎坷。正如Bergey于1916年所指出的那样，我们认为，与上述学科一样，对微生物及其活动的知识和理解对通识教育也至关重要。

微生物学必须成为校本课程的核心要素，因为这不仅有助于决策者充分瞭解情况，而且可确保所有其他利益相关者都能基本理解当代社会及其行为与微生物世界之间的紧密联系与相互关联。在此基础上，当代社会的利益相关者将有能力

- 为自己（以及包括子孙后代在内的其他人）做出明智的知情决定，
- 批判性地评估支持和反对决策备选方案的各项论据，从而向那些代表他们做出决策的决策者们提供明智的建议，
- 能够追究那些未根据科学理据做出正确决定的人的责任。

以个人体验为中心且适用于所有年龄段的教学理念与教学模式，以“重大挑战”和联合国可持续发展目标为教学重点

由于微生物从我们出生之日起就影响着我们的生活（实际上，它们在更早期阶段就开始对我们产生影响），因此微生物教学应始于初等教育的启蒙阶段，并且应贯穿于所有教育阶段，其目的在于赋予各级各类决策者就最佳实践做出知情决策的能力，并向年轻人和老年人提供了解此类决策依据的知识。人们必须能够理解并区分确定事项、可能事项与未知事项之间区别。人类个体必须能够做出基于证据的风险收益评估，从而使他们能够对可能带来一定风险的关键性有益行动做出决策，或者与代表他们做出此类决定的机构进行建设性的互动。此外，人们还必须清楚地知晓对未来至关重要的新知识体系的构成，以便于日后制定出最佳的循证政策。

我们设想面向幼儿园、小学、中学和高等院校开发微生物学课程，并同时开发用于高等院校师资培训的微生物学教学课程（另请参与Bergey著，1916年；Savage与Bude合著，2014年；Scalas等人合著，2017年；

<https://enviroliteracy.org/environment-society/environmental-health/microorganisms/>; <http://www.actionbioscience.org/biodiversity/wassenaar.html>, <https://schaechter.asmblog.org/schaechter/2013/04/whose-planet-is-it-anyway-1.html>）。

这些课程还应作为公共教育服务的一部分提供给公众，帮助具有微生物学素养的个体更新其知识体系，并为那些未能在学校获得指导的人提供学习基础知识和了解最新进展的良机。尽管这些课程的开发应由相关教学机构来负责，但为了促进其实施，我们提出了构成“微生物学素养框架”的一系列专题（《学校与学前班的微生物学教育：以儿童体验为中心的框架》，Timmis, K.N.等人合著，正在编写中）和一种教学模式。根据这一教学模式，教师在课程之处时引入一个与日常经验有关的简单问题，然后再以通俗易懂的语言阐释与日常生活休戚相关的微生物学基本原理、其与“重大挑战”和联合国可持续发展目标的相关性、其与生物地理圈（*biogeosphere*）过程及地球健康之间的关系以及（且更为重要的是）其对决策的影响，例如

- 父亲：今天下午我真的很想在保龄球馆吃个汉堡包，但是詹妮昨天告诉我，奶牛也是导致全球气候变暖的影响因子：这是真的吗？（温室气体、源与汇（*sources and sinks*）、瘤胃消化、甲烷排放、全球变暖、海平面上升和极端天气，它们如何影响我们，联合国可持续发展目标13[SDG-13]：应对气候变化）；
- 母亲：我们在上课时被告知Joanne罹患麻疹：为什么她不像我一样具有免疫能力？（疫苗效力、风险、相关性与因果关系、风险收益考量要素、畜群免疫、免疫的附带利益，联合国可持续发展目标3[SDG-3]：确保健康的生活方式）；
- 母亲：你总是告诉我上完厕所后要洗手，因为粪便很脏。但是粪便冲走之后会经历一个怎样的历程呢？（污水处理、粪便病原体、作为粪便病原体负荷指标与水质指标的粪便指标，联合国可持续发展目标6[SDG-6]：确保为所有人提供

环境卫生)；

- 女孩：为什么植物不能在黑暗环境中生长？（植物和具有光合作用能力的微生物捕获太阳能并产生生物质：这些生物质是构成食物网的基石；光合作用、叶绿体以及起源于早期微生物的线粒体；植物和具有光合作用能力的微生物为世界提供食物、能源、可再生化学原料、无污染、可持续发展，联合国可持续发展目标2[SDG-2]：消除饥饿；联合国可持续发展目标7[SDG-7]：确保人人获得可持续能源；联合国可持续发展目标12[SDG-12]：确保可持续生产模式）

这种方法的优点在于，在课程开始时便让学生显而易见地理解基础微生物学之于社会的相关性和重要性。

特定主题的甄选目标是

- 协助开发适当的课程，以适应在不同的社会和文化背景下不同年龄段的人士，
- 揭示受微生物生态生理活动影响的主要地球-生物圈-人类的主要过程和问题，
- 揭示这些活动对我们以及生物圈其他成员的福祉的影响机制，
- 揭示微生物活动受人类行为及其后果的影响机制，
- 阐释我们可以如何引导或利用微生物活动以实现个体、人类和整个地球的利益，并为实现联合国可持续发展目标做出贡献，
- 揭示我们在更广阔世界中的所处位置，以及我们在全球村与微生物之间的关联机制，以及我们与生物圈其他成员之间的关联机制。

微生物学素养知识框架最初将包含100个左右的以体验为中心的主题，分为人类福祉、地球、水、植物、动物、营养-食品-饮料以及生物技术等类别。不久之后，这些内容将提供免费在线阅读功能。随着时间的推移，这些主题必将得到进一步的改进和完善。

在此必须强调的是，尽管拟议主题（微生物）并非肉眼可见，但是由于微生物学是一门强调动手实验的学科，学生们可以在各级各类学校中亲自动手完成生动有趣的试验，因此以微生物为主题的教学对于儿童而言尤其富有吸引力。此外，我们还将在在线免费提供与每个主题类别相关的简单实验的建议。此外，我们还可安排学校学生外出参观商业企业（酿造业、奶酪制造业、面包生产业、发酵业等）和公共机构（废物处理厂与诊断实验室等），为学生提供亲身体验的机会，帮助学生了解这些企业与机构中的有趣微生物处理过程，但具体安排将取决于当地的具体情况。此外，我们还将在在线提供一份学生外出参观的说明性清单，并向教师提供组织建议，指导教师通过有效组织和管理，最大程度地增进学生的知识水平、兴趣和乐趣。

微生物学素养知识框架中提供的主题不应详尽无遗，其架构安排也不要求所有特定年龄组的受众都将整个知识框架的内容全盘消化和吸收。除了某些介绍性主题之外，大多数主题都具有相对独立性，因此可构成一个模块化系统，供学校根据教师的喜好以及学生的学习风格与学习目标，自由地选择并组合各类不同主题。然而，该知识框架的总体目标是让孩子们在其学校学习生涯中熟悉所有主题。

必须强调的是，创设微生物学素养知识框架的目的并非旨在通过教授微生物学学科知识和培养微生物学专业人士来提升学生的微生物学素养。相反，其目的在于为学员们针对性地提供微生物活动领域的丰富知识库，因此我们所选的微生物活动对于提升社会成员的能力以改善其日常生活、优化基于实证的政策制定机制和完善地球管理都至关重要。

而且，至关重要的是，社会各界都必须尽早意识到，将微生物视作人类宿敌的普遍偏见不仅不具正确性，而且还会引发危险的行为实践。微生物与人类并无二致：大多数微生物对人类的生活几乎没有影响或没有直接影响，许多微生物对我们非常有益，只有少数微生物会给人类带来危险。就像人类一样，导致疾病或物质恶化的坏份子普遍会获得最多的关注，因此也最广为人知。然而，我们理应将整个微生物群系描绘成人类的朋友，这一点至关重要。因为微生物不仅能够日常生活中悄无声息地为我们提供帮助，而且还可随时被调用，用于帮助我们解决重大难题（例如提高粮食产量）。尤其值得一提的是，人体内过半细胞都是由微生物组成，它们是我们最亲密的家族成员。

必须提高当代社会中全民的微生物学知识水平，以消除因微生物恐惧症而引发的有害观念和实践。这是微生物学素养行动的核心信息之一，并将在校本课程中反复强化和提及。

让我们一起行动起来！

宏观生物（动物和植物）不仅是生物圈的重要成员，而且也是人类社会和人类文明进化路径上不可或缺的组成部分，对于启迪人类心智的发展也具有促进作用。已被驯化的动植物能够为人类提供食物、纤维、织物等，并可美化我们的环境，给人类带来舒适感和愉悦感，因此有助增进人类福祉。而野生动植物，作为大自然的奇迹，有助激发人类探索自然的兴趣，并且构成维持生态系统多样性的必要条件。保护宏观生物资源是全人类的共同责任。有鉴于此，从历史上看，生物学（在本质上是动物学与植物学）一直是教育体系中的核心课程，并且是人体生物学教学和生殖教育的基础。近年来，大卫·阿滕伯勒（David Attenborough）拍摄制作的一系列大型神级电视纪录片让人们巨型生物的兴趣和欣赏度都大幅提升（<https://www.theatlantic.com/science/archive/2016/05/every-episode-of-david-attenboroughs-life-series-ranked/480678/>）。相比之下，由于微生物体型微小（大多数微生物对普罗大众而言几乎都肉眼不可见）。正所谓“眼不见、心不烦”，人们通常都不会主动关注微生物群落的动态变化，除非微生物制造出具有新闻价值的事件，例如艾滋病、埃博拉病毒及赤潮等。在通识教育中，生物圈中这一肉眼不可见的组成部分在很大程度上长期被人忽略。然

而，近年来，有关微生物群落及其对人体生物学与行为各种影响的惊人发现层出不穷，这极大提高了普罗大众对了解微生物的兴趣。尽管如此，微生物在本质上仍然是抽象的实体，不如互联网那样容易为人所理解，其难解程度与内存的工作方式相当。然而，微生物对人类社会的影响远大于互联网的影响。在互联网横空出世之前，我们依然能够繁衍生息，但是如果缺失微生物生命支持系统，我们将无法生存，人类也将不曾出现在地球发展进化史过程中。因此，在其令人惊叹的固有事实之外，微生物世界应该从虚无抽象过渡到图形感知与实物，并在人类心智中占据其应有的地位，这一点至关重要。因此，可视化辅助工具应成为扫盲班教学的核心辅助手段，而微生物艺术的蓬勃发展（例如 <https://www.bbc.com/news/uk-england-oxfordshire-45099420>）也将极大地激发人们的丰富想象力。在讨论微生物时，孩子们应该能够立即在他们的脑海中联想出微生物的样子，并想象微生物的活动与作用，这必须成为日常惯例。随着微生物从虚无抽象过渡到清晰可见，它们会变为更加真实。而孩子们也将会有其最喜爱的微生物小明星！可爱的泰迪熊和小羊羔将会与热情如火的Methano、诡计多端的Wolbo及锋芒毕露的Diatoma结伴而行。这些角色都将会有各自（拟人化）的鲜明特质，并由机敏的玩具制造商制作出来。在不久的将来，它们甚至可能在电视上成为人们最喜爱的动画片角色。

人物	发起者	微生物学家 具有一定文化素养的社会公众 交流者 传播者 教育工作者	微生物学家 交流者 传播者 教育工作者	教育工作者
可交付成果	社论 • 介绍微生物学素养的基本概念 • 阐释目标 • 阐明理由（社会需要） • 识别利益相关方	指导方针 • 扫盲主题的详细概述* • 短期、中期及长期战略 • 重要时间节点 • 资源需求与资源分配	实施指南 • 详细的（在线）学习模块 • 详尽的教学辅助工具 • 质量保证 • 持续质量改进	计划实施 • 学前班 • 持续学习中心
目标受众	微生物学家 具有一定文化素养的社会公众	教育工作者 教育部 政治家 商业领袖 投资者	教育工作者	（学龄前）儿童 其他社会成员
目标	参与 • 建议与反馈 • 共同涉及 • 概念演变 • 提升扫盲运动的效果	参与 • 建议与反馈 • （政治）承诺 • 资金支持	完成（学前）课程	建立微生物学素养

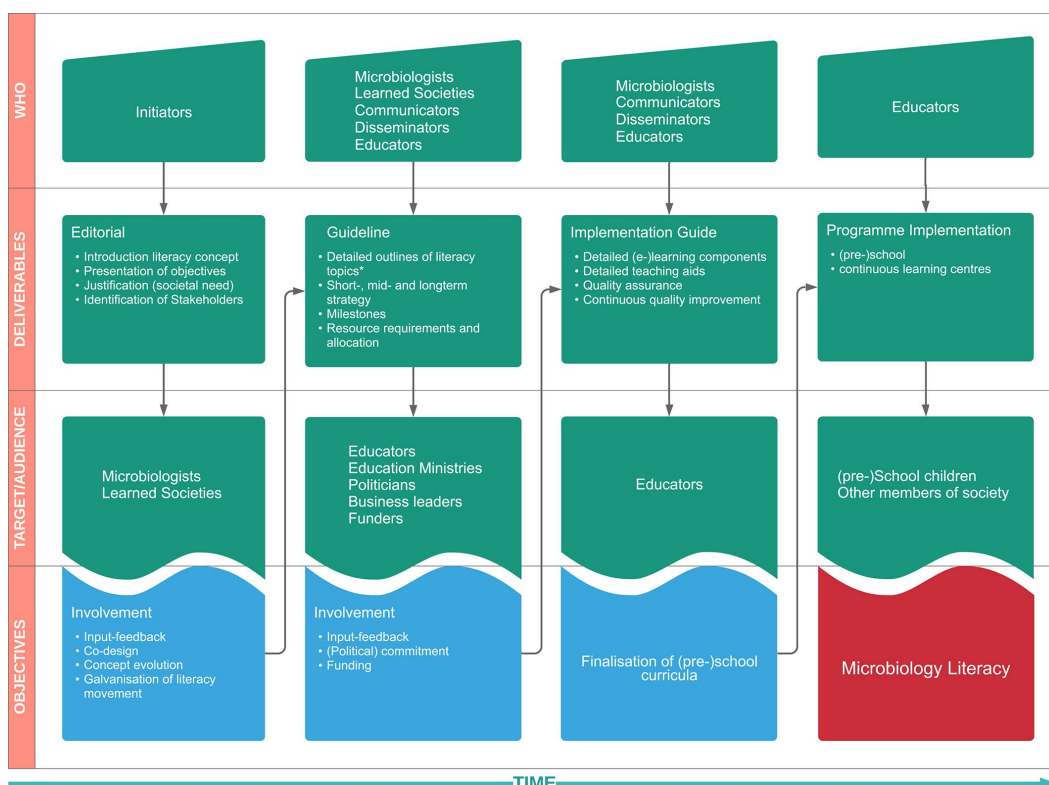


图1.微生物素养倡议。

*《学校与学前班的微生物学教育：以儿童体验为中心的框架》，Timmis, K.N.等人合著，正在编写中。

©应用微生物学学会与约翰威立出版有限公司（John Wiley & Sons Ltd.），环境微生物学，2019年版权所有

本社论的三项基本目标均列示于图1中，图1可用作将微生物学素养主题引入学校课程的路线图。

第一项基本目标是揭示社会各界在知识与能力领域的重大缺陷，这种缺陷不利于决策者针对各类个人问题与社会问题做出充分的循证决策，并展示具有微生物素养的知识社会的示例，而此种知识社会需要通过在基础教育中纳入关键的微生物学主题框架方才能够实现。

第二项基本目标是将鼓励微生物学家、掌握一定微生物学知识的社会团体以及具有微生物学素养的专业人员参与并为此项倡议并做出相应贡献，实现这一目标的方法和途径包括进一步发展和完善基本框架；为主题、视频和课堂实验贡献新思路和新素材，以及为制作必要的教学工具与教材寻找资金来源。

本社论的第三项基本目标（同时也是最重要的目标）是敦促微生物学家、掌握一定微生物学知识的社会团体、具有微生物学素养的专业人员与教育工作者、政治家、商业领袖、有关政府部门、有关非政府机构及其他组织机构建立联系并对其施加影响，以期在国际层面相关各方携手努力，并确保有关各方真正理解提高社会中全民微生物素养的紧迫性和必要性（我们都是地球和人类健康领域的利益相关者：如果未能掌握解决当前危机的基本能力，我们是否能承受得起其风险和后果？），并说服他们不断推进此项倡议向落地实施迈进。为此，我们尽可能避免在本社论中使用专业术语，以便更广泛的受众能够理解其核心要义。

致谢

本倡议以微生物学家的早期努力为基础，这些富有远见的微生物学家深刻认识到提高社会全民微生物学素养的重要性和必要性。由此，我们不仅能够有效提高了全社会对这一问题的认识，还能够创造出以学生为中心的优秀教科书和多样化教材，并将其整合到微生物学素养教学课程中去，以促进此类教学课程的完善和发展。因此这些微生物学家为提高全民微生物学素养奠定了良好的基础。

参考文献

- Bach, J.-F. (2018) The hygiene hypothesis in autoimmunity: the role of pathogens and commensals. *Nat Rev Immunol* 18: 105-120.
- Bartlett, J.G. (1979) Antibiotic-associated pseudomembranous colitis. *Rev Infect Dis* 1: 530-539.
- Bergey, D.H. (1916) The pedagogics of bacteriology. *J Bacteriol* 1:5-14.
- Brown, J.M., and Hazen, S.L. (2015) The gut microbial endocrine organ: bacterially derived signals driving cardiometabolic diseases. *Annu Rev Med* 66: 343-359.
- Brussow, H. (2017) Infection therapy: the problem of drug resistance - and possible solutions. *Micro Biotech* 10: 1041-1046.
- Cabello, F.C. (2006) Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: a growing problem for human and animal health and for the environment. *Environ Microbiol* 8: 1137-1144.
- Caselli, E. (2017) Hygiene: microbial strategies to reduce pathogens and drug resistance in clinical settings. *Micro Biotech* 10: 1979-1983.
- Christen, V., Kunz, P.Y., and Fent, K. (2018) Endocrine disruption and chronic effects of plant protection products in bees: can we better protect our pollinators? *Environ Pollut* 243: 1588-1601.
- Curtis, T. (2006) Microbial ecologists : ifs time to 'go large'. *Nat Rev Microbiol* 4: 488.
- de Lorenzo, V. (2017) Seven microbial bio-processes to help the planet. *Micro Biotech* 10: 995-998.
- de Lorenzo, V., Marliere, P., and Sole, R. (2016) Bioremediation at a global scale: from the test tube to planet Earth. *Micro Biotech* 9: 618-625.
- Du Toit, A. (2019) The gut microbiome and mental health. *Nat Rev Microbiol* 17: 196. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0163-z>.
- Falkow, S. (1970) *Antibiotics in animal feeds*. *N Engl J Med* 282: 693-694.
- Falkow, S. (1975) *Infectious Multiple Drug Resistance*. London: Pion Ltd.
- Falkow, S., Marmur, J., Carey, W.F., et al. (1961) Episomic transfer between *Salmonella typhosa* and *Serratia marcescens*. *Genetics* 46: 703-706.
- Finlay, B.B., and Arrieta, M.-C. (2016) *Let them Eat Dirt*. Vancouver, B.C., Canada: Greystone Books.
- Garcia, J.L., de Vicente, M., and Galan, B. (2017) Microalgae, old sustainable food and fashion nutraceuticals. *Micro Biotech* 10: 1017-1024.
- Gilbert, J.A., Knight, R., and Blakeslee, S. (2017) *Dirt is Good*. New York, USA: St Martin's Press.
- Gilbert, J.A., and Yee, A.L. (2016) Is triclosan harming your microbiome? *Science* 353: 348-334.
- Godfray, H.C., Blacquiere, T., Field, L.M., et al. (2015) A restatement of recent advances in the natural science evidence base concerning neonicotinoid insecticides and insect pollinators. *Proc Biol Sci* 282: 20151821.
- Gomez de Agüero, M., Ganai-Vonarburg, S.C., Fuhrer, T., et al. (2016) The maternal microbiota drives early postnatal innate immune development. *Science* 351: 1296-1302.
- Hobbie, S.E., Finlay, J.C., Janke, B.D., Nidzgorski, D.A., Millet, D.B., and Baker, L.A. (2017) Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implication for managing urban water pollution. *Proc Natl Acad Sci U SA* 114: 4177-4182.
- Lane, S., Noni, E., MacDonald, N.E., Marti, M., and Dumolard, L. (2018) Vaccine hesitancy around the globe: analysis of three years of WHO/UNICEF joint reporting form data-2015-2017. *Vaccine* 36: 3861-3867.
- Lee, S.Y., Kim, H.U., Chae, T.U., Cho, J.S., Kim, J.W., Shin, J.H., et al. (2019) A comprehensive metabolic map for production of bio-based chemicals. *Nat Catal* 2:18-33.
- Levy, S.B. (1982) Microbial resistance to antibiotics. An evolving and persistent problem. *Lancet* 2: 83-88.
- Levy, S.B., FitzGerald, G.B., and Maccone, A.B. (1976) Spread of antibiotic-resistant plasmids from chicken to chicken and from chicken to man. *Nature* 260: 40-42.
- Microbial Biotechnology. (2017) The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Micro Biotech* 10: 979-1274.

- Milani, C., Duranti, S., Bottacini, S., *et al.* (2017) The first microbial colonizers of the human gut: composition, activities, and health implications of the infant gut microbiota. *Microbiol Mol Biol Rev* 81: e00036-e00017.
- Monneret, C. (2017) What is an endocrine disruptor? *Comptes Rendus Biol* 340: 403-405.
- Moossavi, S., Miliuku, K., Sepehri, S., Khafipour, E., and Azad, M.B. (2018) The prebiotic and probiotic properties of human milk: implications for infant immune development and pediatric asthma. *Front Pediatr* 6: 197. <https://doi.org/10.3389/fped.2018.00197>.
- Motta, E.V.S., Raymann, K., and Moran, N.A. (2018) Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. *Proc Natl Acad Sci U S A* 115: 10305-10310.
- Nakatsuji, T., Chen, T.H., Butcher, A.M., Trzoss, L.L., Nam, S.J., Shirakawa, K.T., *et al.* (2018) A commensal strain of *Staphylococcus epidermidis* protects against skin neoplasia. *Sci Adv* 4: eaao4502.
- Nielsen, P.H. (2017) Microbial biotechnology and circular economy in wastewater treatment. *Micro Biotech* 10:1102-1105.
- Richards, S., Paterson, E., Withers, P.J.A., and Stutter, M. (2015) The contribution of household chemicals to environmental discharges via effluents: combining chemical and behavioural data. *J Environ Manage* 150: 427-434.
- Rockstrom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F.S., Lambin, E.F., *et al.* (2009) A safe operating space for humanity. *Nature* 461: 472-475.
- Rossen, N.G., MacDonald, J.K., de Vries, E.M., D'Haens, G. R., de Vos, W.M., Zoetendal, E.G., and Ponsioen, C.Y. (2015) Fecal microbiota transplantation as novel therapy in gastroenterology: a systematic review. *World J Gastroenterol* 21: 5359-5371.
- Savage, A.F., and Jude, B.A. (2014) Starting small: using microbiology to foster scientific literacy. *Trends Microbiol* 22: 365-367.
- Scalas, D., Roana, J., Mandras, N., *et al.* (2017) The Microbiological@mind project: a public engagement initiative of Turin University bringing microbiology and health education into primary schools. *Int J Antimicrob Agents* 50: 588-592.
- Sender, R., Fuchs, S., and Milo, R. (2016) Are we really vastly outnumbered? Revisiting the ratio of bacterial to host cells in humans. *Cell* 164: 337-340.
- Sharma, A., and Gilbert, J.A. (2018) Microbial exposure and human health. *Curr Opin Microbiol* 44: 79-87.
- Timmis, K.N., de Lorenzo, V., Verstraete, W., *et al.* (2017a) The contribution of microbial biotechnology to economic growth and employment creation. *Micro Biotech* 10: 1137-1144.
- Timmis, K.N., de Vos, W.M., Ramos, J.L., *et al.* (2017b) The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Micro Biotech* 10: 984-987.
- Trinh, P., Zaneveld, J.R., Safranek, S., and Rabinowitz, P.M. (2018) One health relationships between human, animal, and environmental microbiomes: a mini-review. *Front Public Health* 30: 235. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2018.00235>.
- Trivedi, P., Schenk, P.M., Wallenstein, M.D., and Singh, B.K. (2017) Tiny microbes, big yields: enhancing food crop production with biological solutions. *Micro Biotech* 10: 999-1003.
- Verstraete, W., and de Vrieze, J. (2017) Microbial biotechnology with major potentials for the urgent environmental needs of the next decades. *Micro Biotech* 10: 988-994.
- Wampach, A., Heintz-Buschart, J., Fritz, V., Ramiro-Garcia, J., Habier, J., *et al.* (2018) Birth mode is associated with earliest strain-conferred gut microbiome functions and immunostimulatory potential. *Nat Commun* 9: 5091.
- Wang, B., Yao, M., Lv, L., Ling, Z., and Li, L. (2017) The human microbiota in health and disease. *Engineering* 3:71-82.
- Watanabe, T. (1963) Infective heredity of multiple drug resistance in bacteria. *Bacteriol Rev* 27: 87-115.
- Watanabe, T. (1966) Infectious drug resistance in enteric bacteria. *N Engl J Med* 275: 888-894.
- Whipps, J.M., Lewis, K., and Cooke, R.C. (1988) Mycoparasitism and plant disease control 161-187. In *Fungi in Biological Control Systems*, Burge, N.M. (ed).
- Hausen, H., Bund, T., and de Villiers, E.M. (2017) Infectious agents in bovine red meat and milk and their potential role in cancer and other chronic diseases. *Curr Top Microbiol Immunol* 407: 83-116.