

农业生产实践对土壤微生物质量的影响

作者:

里昂内尔·朗雅尔 (Lionel RANJARD)，法国国家农业、食品与环境研究所 (INRAE) 高级科学家，任职于勃艮第-弗朗什-孔泰 INRAE 中心的农业生态学联合研究单位 (UMR Agrécologie)，法国第戎。



长期以来被忽视的土壤，如今被公认为一个活的生态系统，甚至被视为地球上最重要的生物多样性储存库。通过这种生物多样性，土壤提供了支撑我们社会根本结构的生态系统服务。然而，与许多其他生态系统一样，过去几十年来，土壤承受着日益加剧的压力，其主要驱动因素是人为活动，尤其是农业。在过去三十年间，科学研究开发出了强大的新工具，用以探测并揭示这一广阔地下世界的作用。如今，我们终于可以直面一个在所有生态系统中都引起共鸣的问题，土壤是否正在经历第六次物种大灭绝？如果是，那么驱动因素是什么，这些损害能否被修复？

1. 土壤：服务于社会的生态系统

地质学家认为，土壤是地壳表面非常薄的一层，深度从几厘米到几十厘米不等。

土壤学家认为，土壤是地球上最不均匀、结构最复杂的环境基质。它由矿物

颗粒（沙、粉砂、黏土）组成，这些颗粒聚集形成大小、形状和稳定性各异的团聚体。

对于生态学家而言，土壤是一个相对较新的研究对象，因为他们大约在六十年前才开始对其产生真正的兴趣。长期以来不重视土壤的原因，一方面在于土壤基质的复杂性和难以触及，另一方面无疑也因其生物多样性平常且不易见的特性。此外，土壤常被等同于墓地或废物处理场，这严重损害了它的文化形象和社会形象。

然而，生态学家重新燃起的兴趣，加上我们在生物体鉴定能力方面的技术和方法学重大进步，使得近几十年来关于土壤生物学和生态学的知识几乎呈指数级增长。

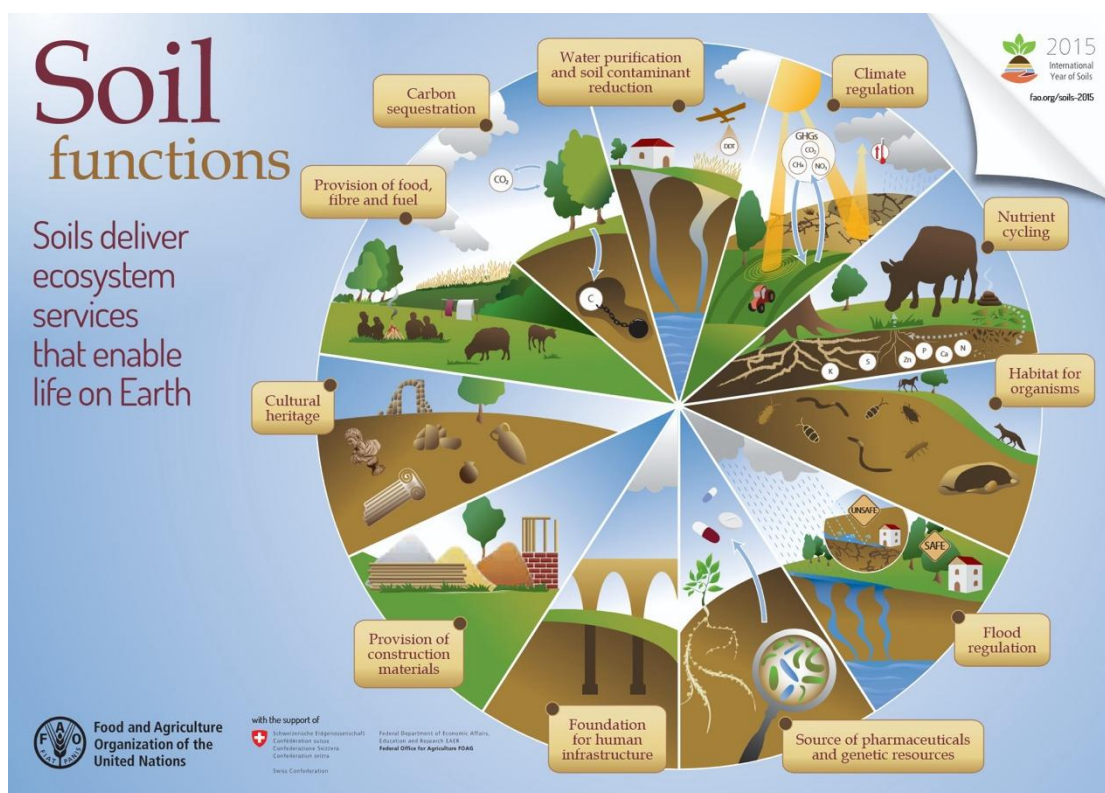


图 1. 土壤提供的生态系统服务[图片来源：联合国粮农组织，2015 年；许可协议：CC BY-NC-SA 3.0]

这些新知识的积累，使人们不再将土壤只视为粮食生产或建筑的无生命介质，而是将其视为一个生态系统。该生态系统承载了地球上近 60% 的生物多样性^{[1][2]}。

这种生物多样性对于提供我们社会发展、调控和可持续性所必需的生态系统服务至关重要（图 1）。除了在支撑基础设施和粮食生产方面发挥关键作用外，

土壤还深度参与调节气候和水循环，以及对环境污染的缓解。

2. 土壤的微生物质量

2.1. 土壤中生命的重要性与丰富度

土壤生物多样性在很大程度上是不可见的，但其生物量相当可观，每公顷可达 2.5 至 10 余吨，具体取决于土壤类型以及与土地利用相关的管理措施。这一数量与地表生物（植物、大型生物）的生物量相当。然而，土地使用者对这些地下生命仍然知之甚少。

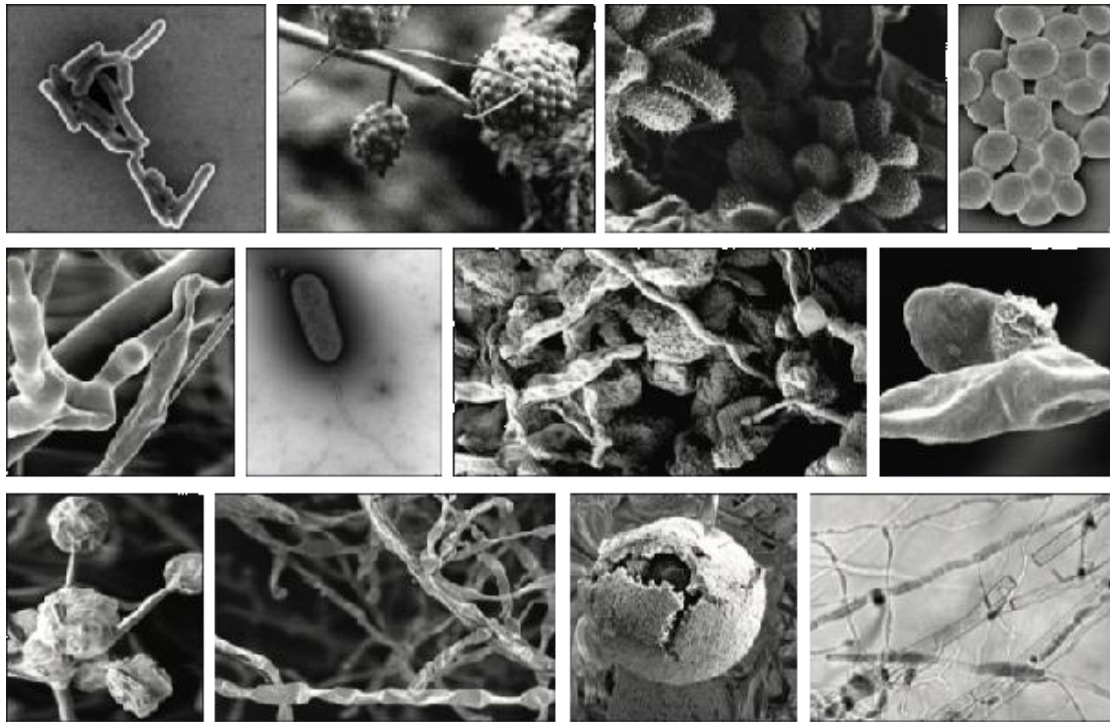


图 2. 土壤细菌和微观真菌的电子显微镜图像[图片来源：© INRAE Dijon，已获授权]

在丰富的土壤生物多样性中，微生物是微小的生物体（<10 微米），因此肉眼无法看见（图 2）。在土壤中，可以区分出两大类微生物：

- **细菌和古菌：**单细胞原核微生物，即细胞不含细胞核。
- **真菌：**真核微生物，即细胞含有细胞核），可以是单细胞（酵母）或多细胞。多细胞真菌以菌丝体形式存在。通常所说的“蘑菇”实际上仅指那些能形成临时性子实体、且在地表或土壤中可见的真菌。

2.2. 微生物：虽小但对地球生命至关重要

微生物是土壤中最微小的生命体，无论在分类学上还是功能上，它们都是数量最多、多样性最丰富的类群。凭借对环境变化非凡的遗传适应能力，微生物无一例外地已经定殖于地球上所有的土壤中。

据估计，每克土壤中的微生物多样性包括 100 万种细菌和 10 万种真菌（图 2）。

除遗传多样性外，这些微生物群落还占土壤活生物量的很大一部分，每公顷碳量可达数吨，相当于同一面积上放牧约十头奶牛所对应的生物量！这一巨大财富使微生物在生物界中占据了特殊地位，它们是一个遗传资源库。这堪称一份真正的遗产。

2.3. 微生物在生态系统中的关键功能角色

微生物的巨大多样性，也体现了它们对土壤生态系统功能与服务的显著贡献，主要包括以下几个方面：

- 微生物群落有助于生态系统的支撑和调节服务，这主要得益于它们在碳、氮、磷、硫等主要元素的生物地球化学循环中所发挥的作用。
- 例如，微生物负责氮循环中的多种转化过程，包括大气氮固定、氨化作用、硝化作用和反硝化作用。
- 有机质的矿化作用是碳循环的核心过程，主要由微生物完成。微生物将复杂的有机分子转化为矿物元素，其中一部分可被植物直接吸收利用。
- 由于微生物具有代谢灵活性，它们也在污染物，如金属、多环芳烃、农药等的降解和迁移中发挥作用。
- 此外，某些微生物还对植物健康与生长具有重要影响，例如通过形成共生关系或引发某些病害。

2.4. 土壤生物多样性下降对土壤质量的影响

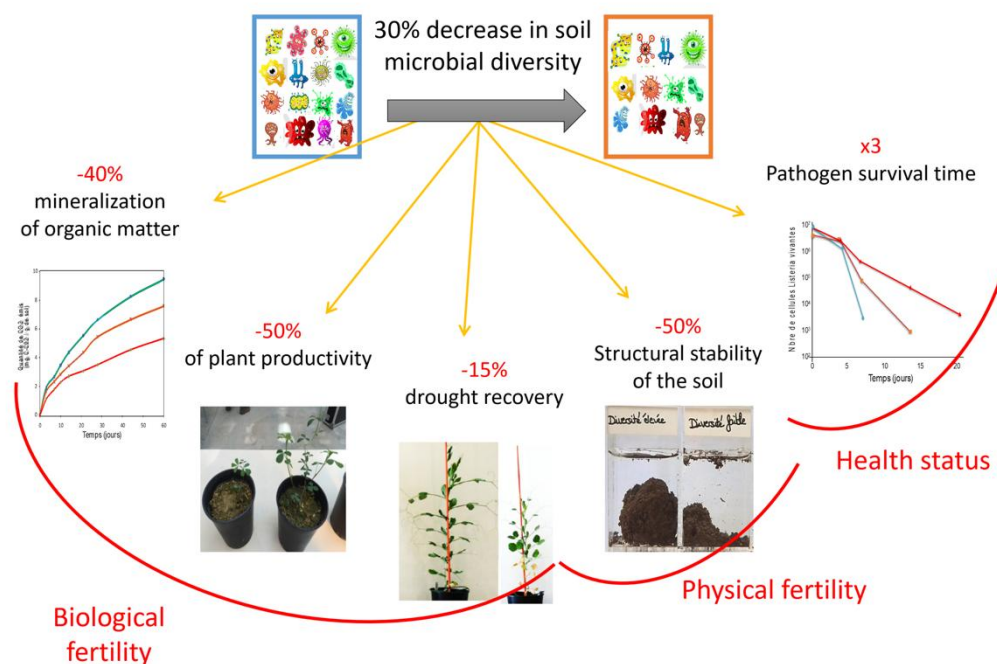


图 3. 土壤微生物多样性下降与土壤介导的生物功能受损之间关系的实验验证[图片来源：© PA Maron & L Ranjard, CC 许可]

法国国家农业、食品与环境研究所（INRAE）第戎研究中心的一个研究团队在 2010 年至 2025 年间开展了一系列实验研究[3]。这些实验证明，当土壤的微生物多样性降低 30% 时（图 3）[4]，会出现以下现象：

- 土壤矿化有机质的能力下降 40%，从而导致其自然肥力显著丧失；
- 在此土壤上种植的作物，如苜蓿、小麦、番茄等的营养生长减半；
- 土壤结构稳定性丧失 50%：其抗侵蚀能力和持水能力均被削弱；
- 植物在水胁迫后的恢复能力降低（下降 15%）；
- 外源性病原体及机会性病原体的存活率提高两倍，即变为原来的三倍，原因是这些病原体不再被土壤微生物群的屏障效应所消除。

3. 法国土壤微生物名录

3.1. 微生物多样性空间分布图的绘制策略

近二十年来，科学家利用分子工具研究土壤微生物的丰富度与多样性。这些工具依赖于从土壤中直接提取的 DNA 进行鉴定。得益于大规模测序（高通量测序）技术的最新进展，如今已能够解析土壤中极其丰富的微生物多样性。

这些工具已应用于法国土壤质量监测网络（RMQS）中超过 2200 个样点的样本。这些样点遍布法国全境[5][6]。相关研究实现了以下目标：

- 测量微生物生物量：该指标来源于土壤 DNA 提取量，可用来评估土壤中存在的微生物数量。得益于在构筑物建设和运行期间的创新设计和严格监管，业已证明为罗纳河开发的三大目标（发电、航运、农业灌溉）所建设的设施至少在半个世纪内都能稳健运行，哪怕是在洪水期间。在环境方面，自 19 世纪末为促进航运第一次对罗纳河进行调整以来，罗纳河开发对环境的影响从未中断。
- 对土壤 DNA 进行大规模测序，提供微生物分类群多样性的信息。
- 法国土壤微生物生物量、细菌多样性及真菌多样性的全国分布图（图 4）显示，这些参数存在显著的地理差异[7]。对这些分布图的详细分析使研究者能够：
- 证明微生物群落的分布在空间上具有异质性，但在国家尺度上仍呈现出一定的生物地理分布特征。
- 在全国范围内识别并排序影响土壤微生物群落丰富度和多样性的环境参数。在该尺度上，局部参数，如土壤类型、土地利用方式比全局参数，如气候、地貌具有更大的影响力[8][9]。
- 证明某些土地利用方式，尤其是农业管理措施会导致微生物群落丰富度下降，并引起其多样性和组成发生显著变化。
- 发现每个细菌和真菌分类群由于特定的生态属性，均表现出独特的空间分布特征。

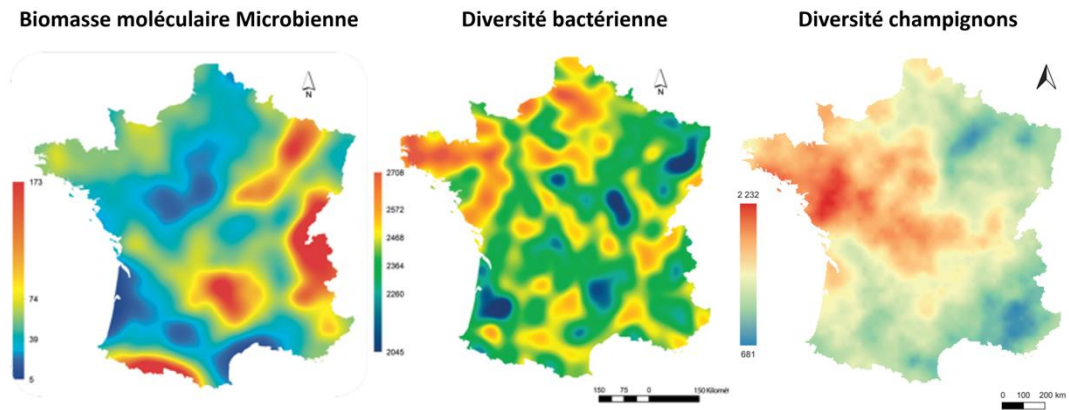


图 4. 法国土壤微生物生物量、细菌多样性和真菌多样性全国分布图[图片来源：根据参考文献[5][6]改编，CC 许可]

3.2. 影响微生物生物量的因素

土壤质地（砂、粉砂和黏土的含量）、pH 值以及土壤有机质的数量与碳氮比质量是影响微生物分子生物量分布的主要参数。这些特征决定了土壤承载微生物的能力，包括栖息地和养分资源两方面。

按土地利用类型比较微生物生物量，结果表明：

- 草地和森林下的土壤所承载的微生物数量多于耕地作物或葡萄园、果园下的土壤。
- 在农业土壤中，微生物生物量较低可归因于多种农业管理措施，例如：（i）缺乏永久性植被覆盖，如轮作中不种植覆盖作物、无草覆盖的葡萄园；（ii）耕作；（iii）偏施化学肥料而减少有机物料投入；（iv）施用农药等生物杀灭剂。

所有这些措施都会导致土壤微生物栖息地被破坏，或养分资源枯竭（土壤有机碳数量与质量下降），在某些情况下还会造成微生物的毒性污染（如重金属、农药、抗生素、多环芳烃等）。

3.3. 微生物多样性与地理区域

土壤细菌多样性全国分布图显示出显著的区域差异：

- 某些半径约 100 公里的地理区域内细菌分类群数量较高（图中以红色显示）；
- 另一些区域内分类群数量较低（图中以蓝色显示）（见图 4B）。

在该尺度上，与之前对微生物生物量的观察结果类似，气候和地貌的影响较弱。更为详细的统计研究表明，观察到的细菌多样性变化受土壤类型（包括 pH 值、质地和碳氮比）的影响。这些参数反映了土壤容纳多种栖息地的能力，从而能够支撑多种不同的生物。

然而，比较微生物生物量分布图与生物多样性分布图可以发现，生物量和生物多样性均丰富的地理区域并不一定重合，例如法国东北部。因此，微生物生物量高并不必然意味着土壤生物多样性高，反之亦然。

3.4. 干扰与土地利用的影响

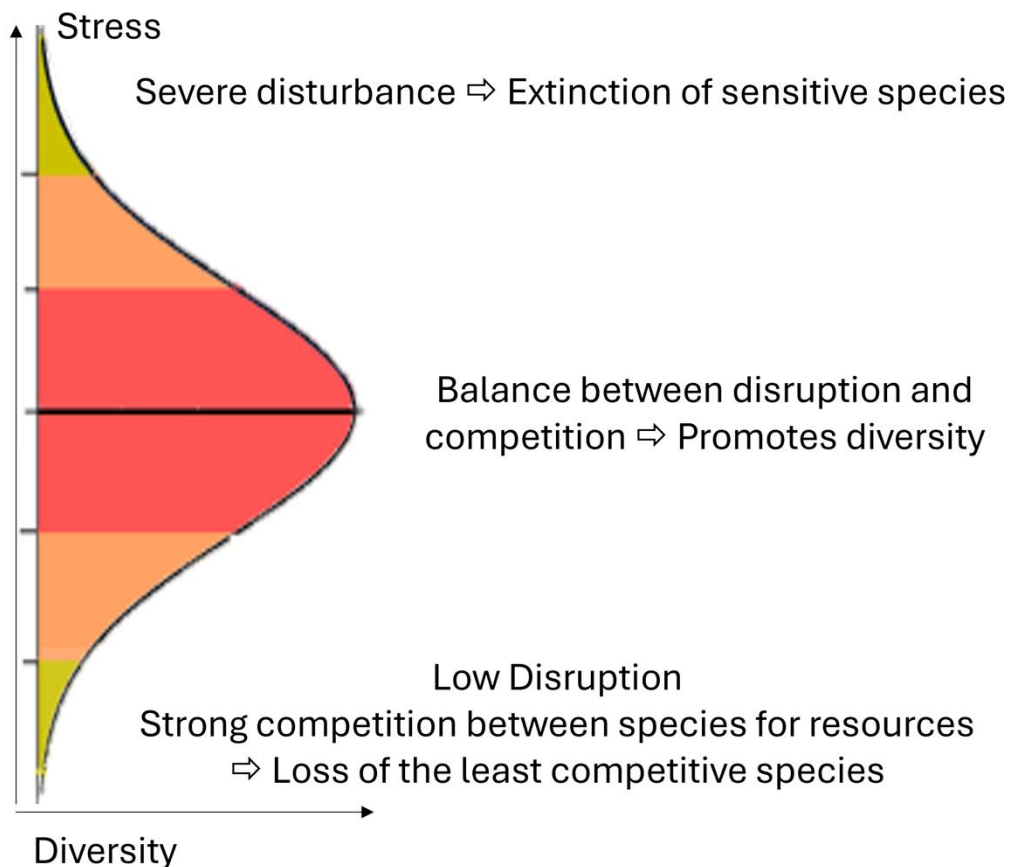


图 5. 中度干扰理论示意图，该理论提出，中等水平的干扰，既不太强也不太弱可使局部物种多样性达到最高。[图片来源：作者绘制]

细菌多样性也受到土地利用的强烈影响。草地和森林土壤代表自然或半自然

生态系统，与农业或葡萄园土壤相比，其多样性水平最低。

这一现象可以用中度干扰这一生态学概念来解释。该理论认为，生态系统的多样性水平与其所受干扰的强度有关，在中等程度干扰的系统中多样性达到最高（图 5）。

因此，森林和草地土壤所属的生态系统受干扰程度较低，基本没有人类活动，因而细菌多样性较低。

相反，农业和葡萄园土壤，通常经历多种农业干预措施，对应于受干扰程度较高的系统，其细菌多样性也较高。

3.5. 干扰与土地利用的影响

最后一幅分布图涉及真菌多样性（图 4C）。图中显示，有些地理区域分类群丰富度较高（图中红色区域，半径约 250 公里），而另一些区域则贫乏得多（蓝色区域）（图 4C）。与前面的分布图不同，可以明显看出土壤类型和气候的影响。

事实上，与微生物生物量和细菌多样性不同，真菌多样性高度依赖于法国不同气候类型，如海洋性、地中海性、山地性、大陆性特有的温度和降水条件（图 6）。

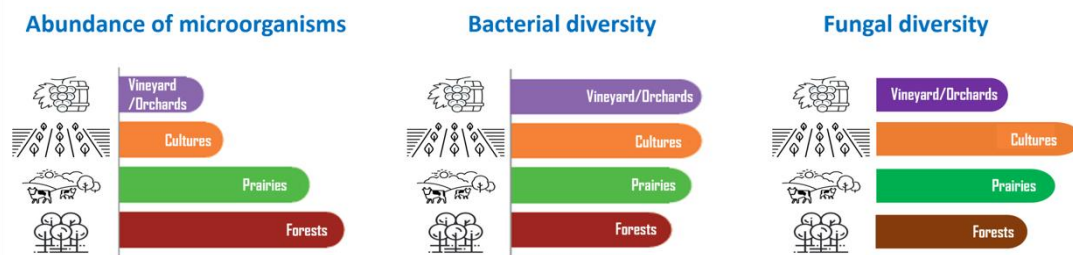


图 6. 土地利用方式对微生物丰富度和多样性的影响 [图片来源：作者绘制，数据来源于细菌和真菌分布图集，CC 许可]

土地利用同样起着重要作用。与细菌类似，农业系统，尤其是耕地中的真菌多样性通常较高，而在未受干扰的生态系统（森林和草地土壤）中较低。

然而，葡萄园土壤是一个例外，其真菌多样性显著下降，这很可能是由于葡

萄种植中高强度的干扰措施（机械化、重度耕作、地表覆盖不足以及为保护葡萄而施加的大量植保压力）所致[10]。

3.6. 干扰与土地利用的影响

法国全国土壤微生物空间分布图绘制工作实现了以下目标：

- 标准化微生物群落的分子鉴定工具，并推动其大规模应用；
- 将这些工具转化为可操作的土壤微生物质量指标。

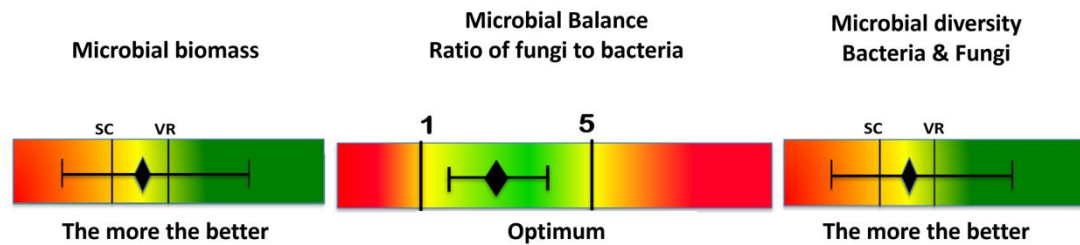


图 7. 土壤微生物质量的多项指标 RV：参考值。CS：临界阈值，低于该值则土壤不再具有正常功能。微生物生物量和多样性指标的值越高越好；而微生物平衡状态则表现为每 100 个细菌对应 1 至 5 个真菌的最优比例。[图片来源：作者绘制，CC 许可]

基于所收集的全国数据，研究者建立了土壤微生物生物量和生物多样性的参考体系。这些体系进一步用于构建数学模型，能够根据每个新采样土壤的理化性质来预测其参考值（RV）。同时，研究还定义了一个临界阈值（CT，图 7），设定为参考值的-30%。该阈值基于多样性稀释实验，当微生物多样性丧失 30%时，土壤生物功能出现衰退。这些微生物生物指示指标已被国家生物多样性观测站和法国生物多样性办公室（OFB）认定为首批国家级土壤生物质量指标[11][12][13]。

目前，这些生物指示指标正通过农民直接参与的参与式研究项目引入农业领域，其目的在于：

- 提高农民在农业生态转型背景下对自身土壤微生物质量问题的认识；
- 使他们能够自行评估其耕作措施对土壤微生物质量的影响及可持续性。
- 此外，为了制定有关土壤健康的欧洲和国家法规，这些生物指示工具已转移至私营分析实验室和咨询公司：

- 开发用于评估生产系统的可操作诊断工具；
- 定义新的环境标签。

4. 城市区域乡村地区的土壤质量

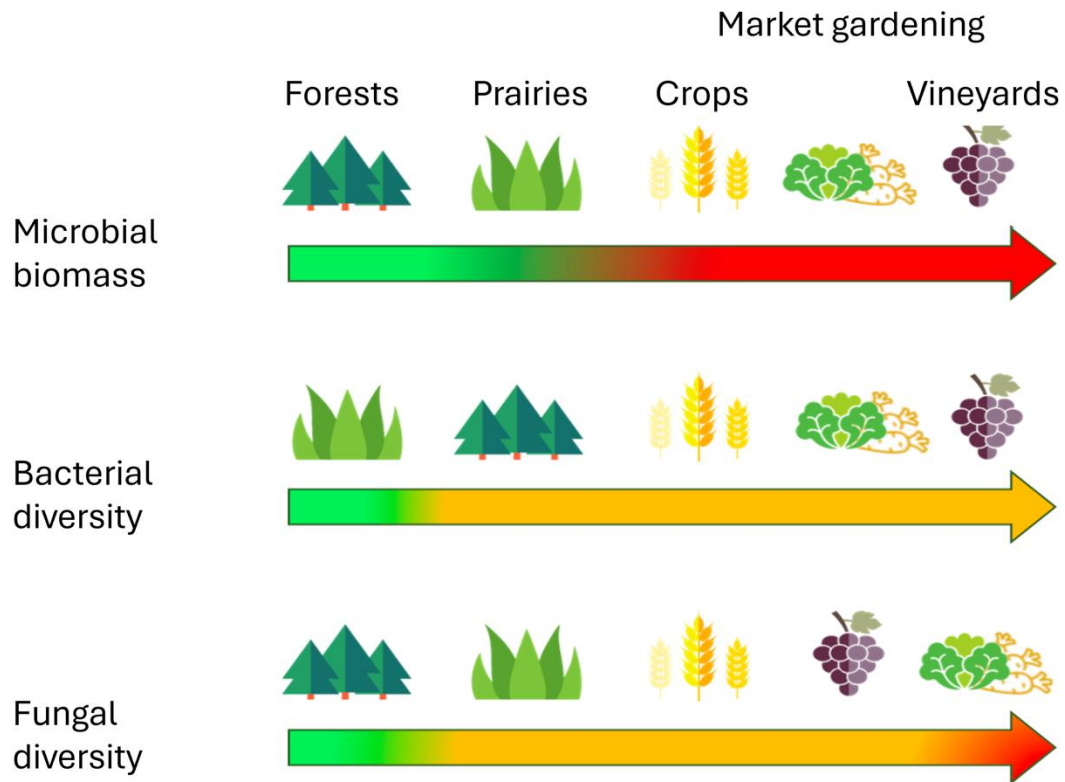


图 8. 土地利用格局对第戎都市圈土壤微生物质量的影响（红色：强烈影响，显著改变微生物参数；橙色：中度影响，适度改变微生物参数；绿色：影响很小或无影响。）[图片来源：作者绘制，CC 许可]

一项区域层面的研究使我们能够更精确地识别和排序影响乡村土壤中微生物群落及其功能的各类环境过滤因子，并明确其重要性[14]。

主要结果证实了在全国层面已观察到的若干趋势（图 8）：

- 农业管理措施对微生物生物量具有强烈影响，对细菌多样性影响则为中度。
- 就这些微生物参数而言，不同类型的主要农业系统（耕地、葡萄园、商品菜园）之间没有明显差异。
- 相比之下，真菌多样性在不同系统中的响应存在差异（图 8）：

- 对耕地和葡萄种植影响为中度；

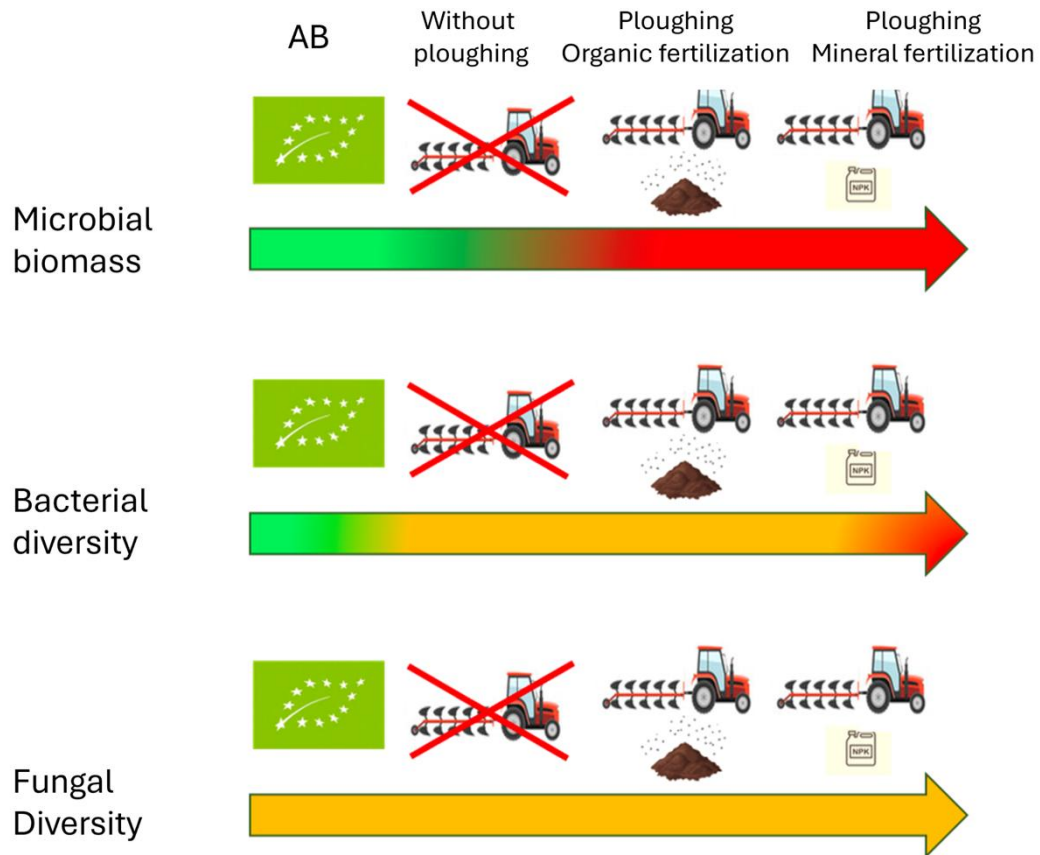


图 9. 农业生产方式对第戎都市圈土壤微生物质量的影响（红色：强烈影响，显著改变微生物参数；橙色：中度影响，适度改变微生物参数；绿色：影响很小或无影响。）[图片来源：作者绘制，CC 许可]

商品菜园系统中土壤真菌敏感性较高，很可能是由于该系统中管理措施的集约化程度较高，高强度耕作与快速且频繁的轮作相结合，破坏大团聚体，从而损害真菌的栖息地。

对耕地系统农业管理措施的更详细分析证实，耕作的集约化、配合施用矿质肥料以及使用化学农药，会导致土壤微生物质量显著恶化（图 9）。

5. 葡萄栽培措施对土壤质量的影响

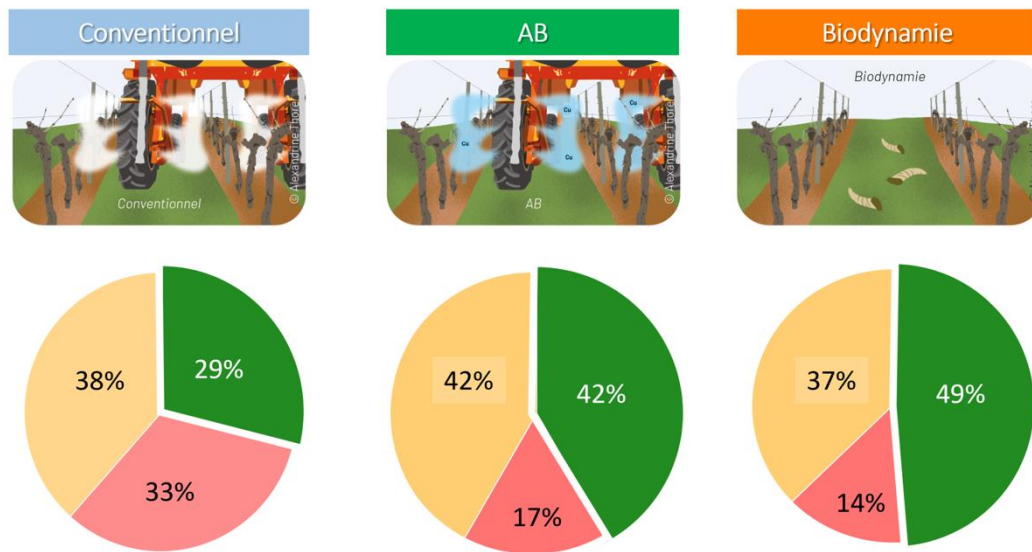


图 10. 不同生产方式下葡萄园土壤微生物质量评估百分比表示被归类为绿色（微生物状况良好）、橙色（不临界但需监测）和红色（微生物状况差）的地块比例。[图片来源：作者绘制，CC 许可]

一项由研究人员与法国三个主要葡萄酒产区的酿酒师共同参与的参与式项目（显示，土壤微生物质量在以下转变中显著改善：

- 从常规葡萄栽培转向有机葡萄栽培；
- 从有机葡萄栽培转向生物动力法葡萄栽培（图 10）。

由于所建立的酿酒师网络中不同生产方式的代表性良好，这一趋势十分稳健。该结果进一步支持了以下观点：农业生态实践能够可持续地促进土壤生命（图 10）。

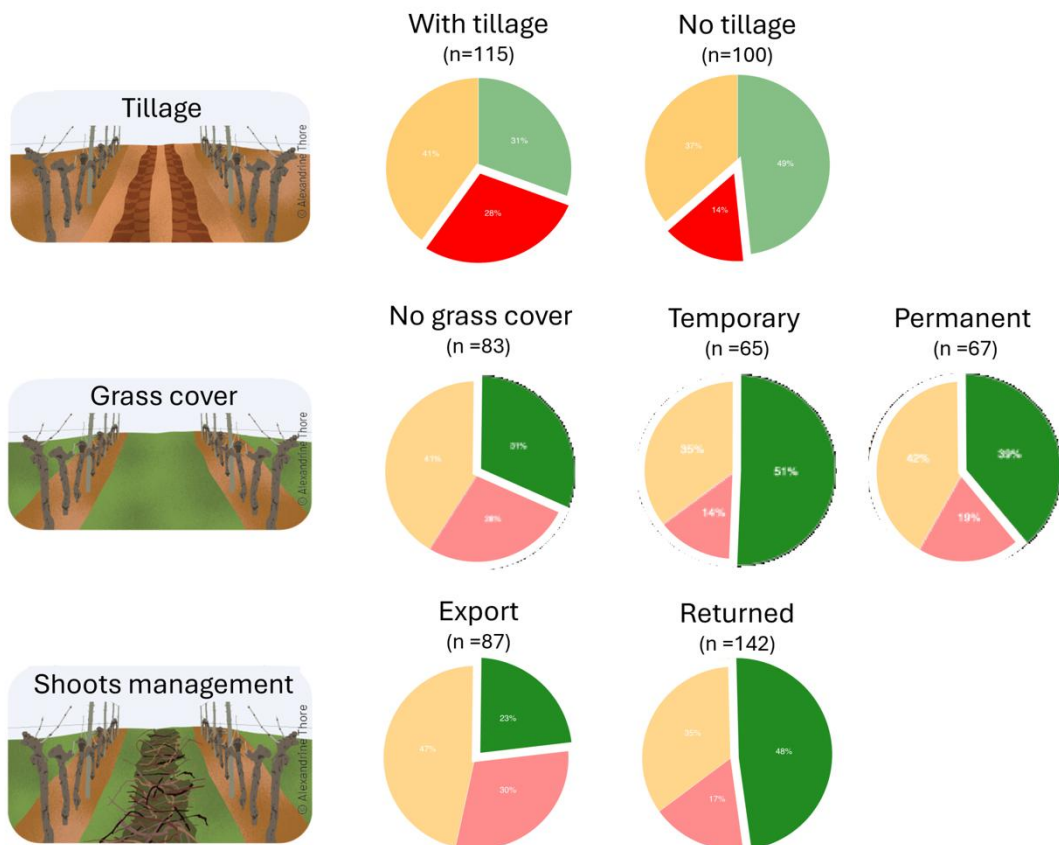


图 11. 不同土壤管理措施下葡萄园土壤微生物质量评估，百分比表示被归类为绿色（微生物状况良好）、橙色（不临界但需监测）和红色（微生物状况差）的地块比例。[图片来源：作者绘制，CC 许可]

除了整体生产方式外，我们还分析了某些土壤管理措施的影响：

- 各种形式的土壤耕作（培土/去培土、松土、犁耕等）对微生物质量均有负面影响。
- 相比之下，生草覆盖措施被证明颇为有益，且当生草为多年生且物种多样时，其效果更为显著。

一个特别创新的发现涉及葡萄枝条的处理，与将枝条移出地块相比，将其还田可显著改善土壤微生物质量（图 11）[15]。

6. 总结

- 过去三十年来，土壤生态学研究在深化我们对土壤生物多样性、作用及对土

地利用方式敏感性的认识方面取得了重大进展。

- 土壤不仅是植物生产的无生命介质，更是一个活的生态系统，为我们的社会提供众多服务。
- 土壤是地球上主要的生物多样性储库，承载了全球 60% 的生物多样性。
- 在土壤生物中，微生物是数量最多、多样性最丰富的类群。
- 法国是第一个完成全国土壤微生物空间分布图绘制的国家。
- 农业土壤的微生物质量低于草地和森林土壤。
- 在农业土壤管理措施中，耕作和农药使用对土壤微生物质量的危害最大。
- 相反，最有益的措施是维持长期、多样化的植被覆盖以及使用有机改良剂。

致谢

感谢以下各位科学家为本研究项目的知识产出与传播所做出的贡献：

S Dequiedt, PA Maron, S Terrat, C Zappellini, N Chemidlin-Prévost Bouré, W Horrigue, B Karimi, C Djemiel, C Jolivet, A Bispo, N Saby。

注释与参考文献

封面图片：[Lionel Ranjard 摄]

[1] <https://www.ipbes.net/news/Media-Release-Global-Assessment-Fr>

[2] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/qanda_23_3637

[3] Team BioCom de l'UMR Agroécologie de Dijon – <https://umr-agroecologie.dijon.hub.inrae.fr/>

[4] Maron P.A. & Ranjard L., 2019. La qualité écologique des sols. Editions Technique de l'Ingénieur. GE1051 (in French).

[5] Karimi B, Terrat S., Dequiedt S., Chemidlin N., Maron P.A. & L Ranjard. 2018. Atlas Français des bactéries du sol. Ed. Biotope, Ed. du Muséum (in French).

[6] Djemiel C, Dequiedt S., Terrat S., Maron P.A. & L Ranjard. 2024. Atlas Français des champignons du sol. Ed. Biotope, Ed. du Muséum (in French).

[7] Dequiedt S., Karimi B., Chemidlin Prévost-Bouré N., Terrat S., Horrigue W., Djemiel C., Lelievre M., Nowak V., Wincker P., Jolivet C., Saby N.P.A., Arrouays D., Bispo A., Feix I., Eglin

- T., Lemanceau P., Maron P.A. & Ranjard L. – 2020 – Le RMQS au service de l'écologie microbienne des sols français, *Étude et Gestion des Sols*, 27 :51-71 (in French).
- [8] Terrat S, S Dequiedt, N Saby, W Horrigue, M Lelievre, V Nowak, J Tripied, T Regnier, C Jolivet, D Arrouays, P Wincker, C Cruaud, B Karimi, A Bispo, PA Maron, N Chemidlin Prévost-Bouré, L Ranjard*. 2017. Mapping and Predictive Variations of Soil Bacterial Richness across French National Territory. *PlosOne* 12(10): e0186766
- [9] C Djemiel, S Dequiedt, W Horrigue, A Bailly, M Lelièvre, J Tripied, C Guillaud, S Perrin, G Comment, N Saby, C Jolivet, L Boulone, A Bispo, A Pierart, P Wincker, C Cruaud, P-A Maron, S Terrat and L Ranjard*. 2024. Unravelling biogeographical patterns and environmental drivers of soil fungal diversity across France. *Soil* 10,251-273. <https://doi.org/10.5194/soil-10-251-2024>
- [10] This work has therefore provided France with the first national maps of the abundance and diversity of bacteria in its soils. These original findings have been made available to the general public (citizens, students, farmers, teachers, policy-makers, etc.) through the publication of the 'French Atlas of Soil Bacteria' (2018) and the 'French Atlas of Soil Fungi' (2024), original natural history works with no international equivalent (in French).
- [11] <https://ofb.gouv.fr/>
- [12] <http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/evolution-de-la-biomasse-microbienne-des-sols-en-metropole>
- [13] <http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/evolution-de-la-biodiversite-bacterienne-des-sols>
- [14] A Christel, N Chemidlin-Prevost Bouré, S Dequiedt, N Saby, F Mercier, J Tripied, G Comment, J Villerd, C Djemiel, A Hermant, M Blondon, L Bargeot, E Matagne, W Horrigue, PA Maron, L Ranjard. 2024. Differential responses of soil microbial abundance, diversity and interactions to land use intensity at a territorial scale. *Scien Tot Environ* 906:167454 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167454>
- [15] C Zappellini, S Dequiedt, J Tripied, W Horrigue, P Barré, V Masson, M Madouas, A Mathé, JP Gervais, PA Maron, L Ranjard*. 2025. Ecological impact of conventional, organic and biodynamic viticultural systems and associated practices on soil microbiota in various French territories. *Agric Ecosyst Environ* 392-109748 <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109748>