arXiv:2601.08099v1 [cs.ET] 13 Jan 2026

平菇菌丝中定向电尖峰、爆发与信息传播：采用星形电极阵列记录

Andrew Adamatzky[a]

[a]非常规计算实验室，英格兰西部大学，英国布里斯托尔

摘要

已有大量研究在多种真菌和实验情境中报告了真菌菌丝体的电活动，但其空间组织和传播仍未得到充分表征。本研究考察了定殖于木屑基质上的平菇（*Pleu-rotus ostreatus*）菌丝中电势动态的时空结构。我们使用八通道星形差分电极阵列记录电信号，该阵列可对定殖基质中央区域周围进行角分辨率测量。我们分析了尖峰统计、爆发行为、通道间相关性以及基于事件的传播延迟。结果显示，尖峰频率和振幅存在显著的方向异质性，呈现簇集爆发动态，通道间存在部分且局部的耦合，并且不同空间扇区之间存在可重复的传播模式。电爆发更倾向于从特定方向发起，并以从秒到分钟乃至小时不等的特征延迟招募其他区域。这些发现支持这样一种解释：真菌菌丝体是一种空间延展的可兴奋介质，能够进行缓慢、分布式的电信号传导和信号整合。

关键词：真菌电生理学、菌丝体、电尖峰、爆发动态、可激发介质、分布式信号传递

1. 引言

在多种真菌及基质中，均观察到了电势波动和类尖峰事件 [15, 13, 1, 2, 4, 6, 3,

电子邮箱：andrew.adamatzky@uwe.ac.uk（Andrew Adamatzky）

7]。此类活动与多种生理过程有关，包括生长、营养物质运输、环境感知，以及对机械或化学扰动的响应 [10, 12, 11, 9, 5, 14, 8]。尽管真菌电信号传导的存在已得到充分证实，但大多数研究依赖单个电极或线性电极排列进行记录，因此难以深入了解电动力学的空间组织。

了解真菌电活动是否具有空间结构、方向性组织，或能够在菌丝网络中传播，对于理解其功能意义至关重要。如果电信号在局部产生且彼此不相关，它们可能仅反映局部生理过程。反之，可重复出现的空间相关性和传播模式则表明，网络中存在分布式信号传递与协调。

本文通过记录平菇（平菇）菌丝体的电活动来探讨这一问题。我们采用星形电极排列，在已定殖基质的中心区域周围提供角分辨率。这种几何结构无需预设线性优选轴，即可对尖峰活动、爆发行为、耦合和传播进行方向性分析。我们报告了方向性结构化尖峰放电、簇状爆发、空间区域之间的部分耦合，以及电活动在菌丝网络中的缓慢传播的证据。

2. 材料与方法

实验使用已定殖平菇（平菇 ）菌丝体的木屑基质（Urban Farm-It, 英国）。记录时，基质已完全定殖且代谢活跃。本文所述实验期间未施加外部机械、化学、热或光学刺激。因此，所有记录均代表稳定环境条件下菌丝网络的自发电活动。

将十六个电极插入已定殖基质，并以星形几何结构径向排列（图1）。选择星形电极几何结构，是为了在不对系统施加偏好的线性方向的情况下，对电活动进行空间分辨分析。与线性或基于网格的电极排列不同，后者会在测量中隐含地偏向某一轴向；星形几何结构则能覆盖已定殖基质中央区域周围的各个角度。这种配置能够检测方向性

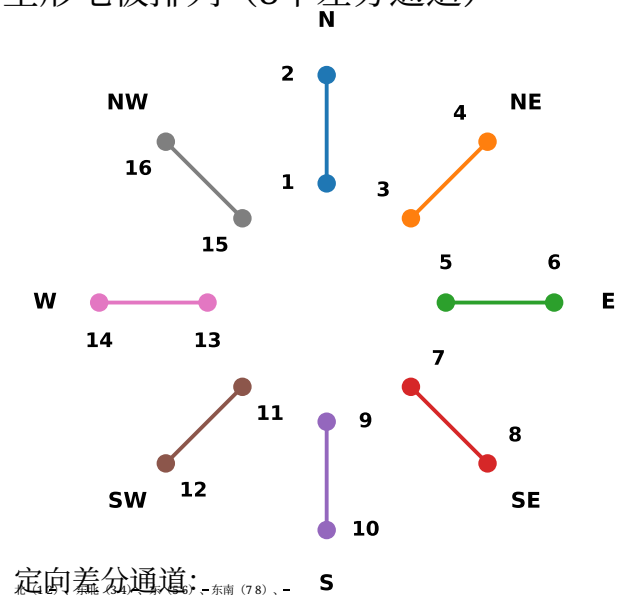

图1：用于电记录的电极排列示意图。8个差分记录通道（1–8）设置在平菇定殖的基质中的固定位置。这些通道构成有序的空间阵列，可比较相邻和非相邻电极之间的尖峰起始时间。该配置可检测时间延迟以及电活动沿菌丝网络的定向传播。

菌丝网络中电信号的不对称性、扇区特异性活动以及各向异性传播。星形几何结构还便于直接比较位于距中心相近径向距离处的相邻通道和非相邻通道，从而减少由电极间距造成的混杂效应。通过同时记录多个方向的信号，该排列能够区分局部耦合、定向传播和全局同步。这对于真菌系统尤为重要，因为其中的生长和信号传输可能沿着基质内异质且动态演化的路径进行。

将这些电极两两配对，形成沿罗盘方向排列的八个差分记录通道：北（1–2）、东北（3–4）、东（5–6）、东南（7–8）、南（9–10）、西南（11–12）、西（13–14）和西北（15–16）。采用差分记录可抑制共模噪声，并突出菌丝体内部产生的局部电势差。

使用 Pico ADC-24 高分辨率数据记录仪（Pico Technology，英国圣尼奥茨）记录电势差。ADC-24 采用电隔离差分输入和 24 位模数转换器，具有很强的抗噪能力，且能够稳定地进行长期记录。差分通道的输入阻抗约为 2 MΩ，在所用测量范围内的偏移误差为数十微伏。信号以每秒一个样本的速率采样。数据记录仪内部每秒进行多次测量，并存储其平均值，从而降低高频噪声，同时保留缓慢的生理动态。

连续记录持续较长时间，最长达五天，并对三个独立记录时段的数据进行了分析。原始数据从 Pico软件环境导出后，在离线状态下进行处理。

数据分析使用 Python 编写的自定义脚本完成。数值处理依托 NumPy 和 SciPy 等标准科学计算库，数据处理与可视化则使用 pandas 和 Matplotlib。所有分析均基于去趋势信号进行，以去除缓慢的基线漂移，同时保留瞬态电信号。

基于各通道内的信号离散度，采用自适应阈值法检测电脉冲。尖峰定义为超过通道特定阈值的连续偏移；该阈值高于基线一个固定倍数的信号离散度，且偏移持续至少数十秒。检测到的尖峰根据其发生时间和峰值振幅进行表征。分析尖峰序列以计算脉冲计数、脉冲间间隔以及振

幅分布。通过将尖峰分组成簇来识别爆发行为，各簇之间由超过固定时间间隔的静息间隔分隔，从而识别电活动序列。

使用归一化后的去趋势信号计算皮尔逊相关系数，以量化通道间耦合。通过相关矩阵评估方向性通道间电协调的空间结构。为分析电活动传播，在选定的参考通道中识别爆发起始点，并在预先设定的时间窗口内测量其他通道中随后出现的第一个尖峰的延迟。通过多个爆发事件的中位数值汇总传播延迟，并根据已知采样率直接换算为实际时间进行解读。

3. 结果

从平菇定殖基质上记录的电信号显示，所有通道均存在丰富多样的尖峰活动。图2展示了不同通道记录的原始电信号代表性示例。尖峰表现为偏离基线的缓慢、大振幅波动，发生时间尺度从几分钟到几小时不等；但其时间模式和形态在不同通道间存在显著差异。有些通道表现为相对孤立的尖峰，彼此间隔较长的静默期；另一些通道则出现密集尖峰簇，或长时间的活动增强期。不同通道的尖峰振幅、持续时间和波形形状也各不相同，表明已定殖基质内部的局部动力学具有异质性。尖峰行为的多样性促使我们开展下文所述的定量分析，以表征单个尖峰、尖峰序列以及通道间的时空关系。

3.1. 尖峰活动的方向异质性

电尖峰活动在整个菌丝网络中呈现出显著的方向异质性。将所有记录时段的数据汇总后发现，不同方向通道之间的尖峰率相差超过一个数量级。某些方向始终表现出较高的尖峰活动，而另一些方向的活动较弱或几乎沉寂，表明电兴奋性具有显著的空间各向异性。

图3 显示了各方向通道的平均尖峰率（每分钟事件数），该数值取所有实验的平均值，误差条表示

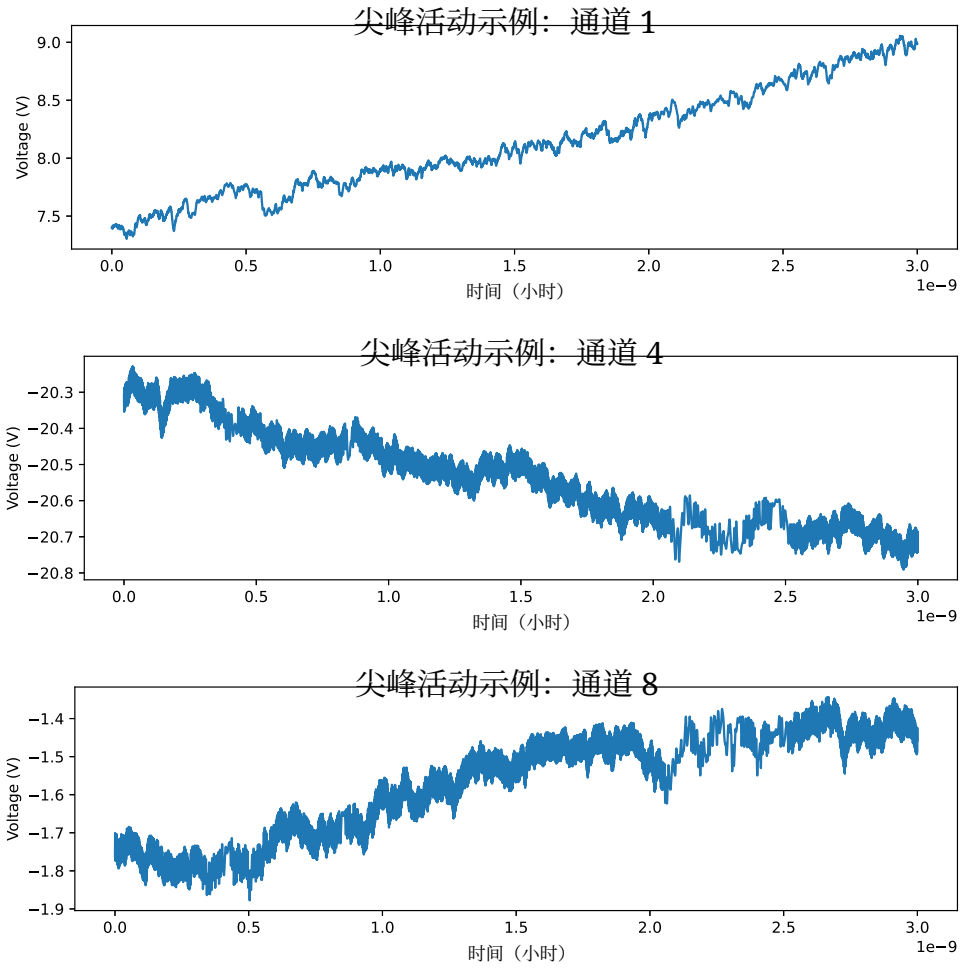

图 2：不同通道记录到的电尖峰活动示例。每个面板分别显示通道 1、4 和 8 在一个具有代表性的六小时窗口内记录的原始电势。尖峰表现为缓慢、振幅较大的波动，发生时间尺度从分钟到小时不等。各通道之间的时间差异展现了电活动的时空结构。

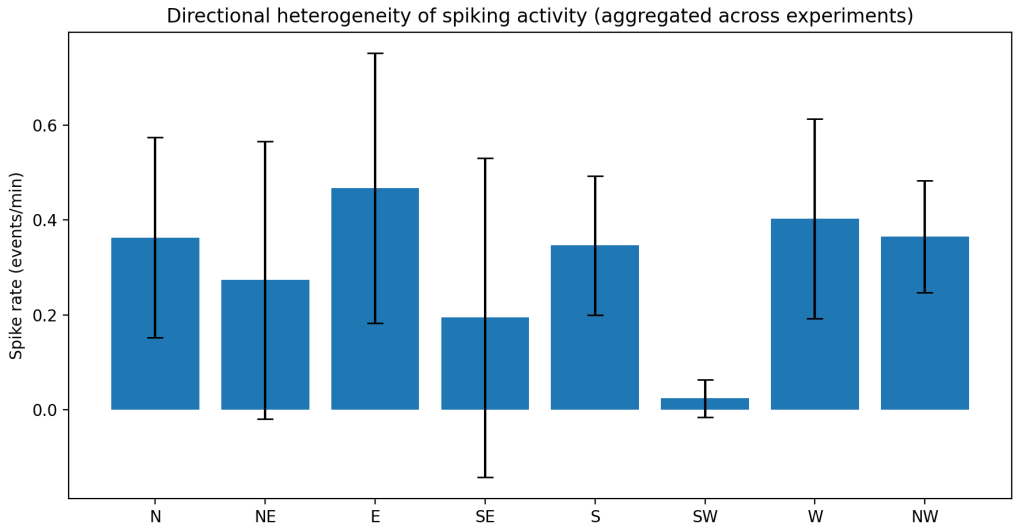

图3：按方向通道统计的平均尖峰率（事件/分钟），汇总所有记录时段的数据。误差条表示实验之间的标准差。电尖峰表现出显著的各向异性，不同方向之间存在数量级差异，并且会话间变异性较大。

会话间变异性。该分布显示，活跃程度极高的方向与低活跃度扇区之间存在明显分离。值得注意的是，若干方向表现出持续升高的尖峰率，而另一些方向对总体电活动的贡献则极小。相对较大的标准差表明，最活跃方向的具体位置可能因记录时段而异，这说明电活跃区域会动态重构，而非遵循固定的空间模式。

同一数据以极坐标形式表示于图4中，突出了尖峰活动的角向结构。尖峰率并未形成均匀的圆形分布，而是呈现出与电活动偏好方向相对应的明显瓣状结构。这种极坐标表示强调，菌丝体内的电信号传导并非各向同性，而是沿着具有空间偏向性的通路组织。

重要的是，尽管汇总了多次独立记录的数据，观察到的异质性仍然存在，这表明方向各向异性是该系统的一项稳定特征，而非单次实验造成的假象。与此同时，各次记录之间的差异意味着活动空间模式并非静态不变，而是会随时间调整，这与重新……相一致，

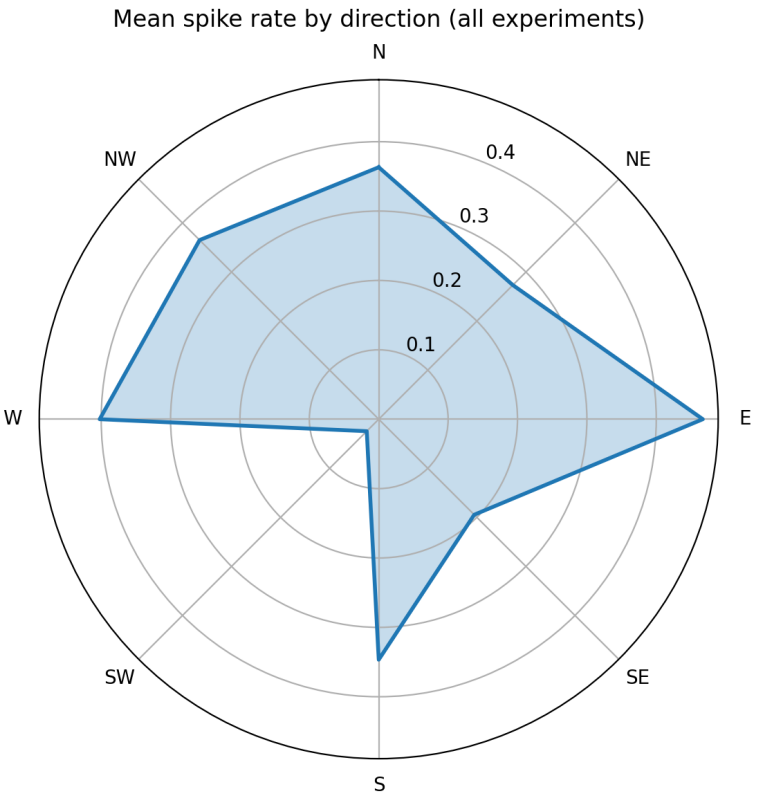

图4：所有实验汇总的各方向平均尖峰率极坐标表示。星形电极布置揭示了菌丝网络中电活动显著的角向各向异性。

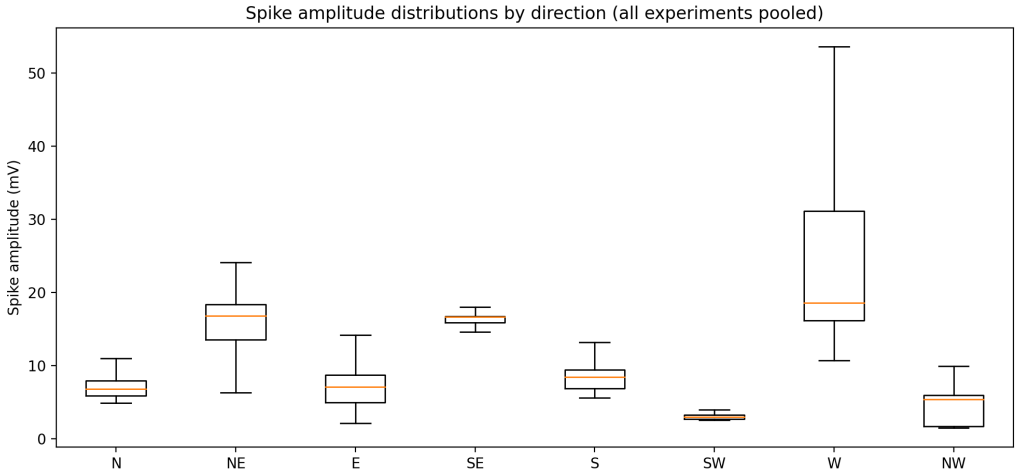

图5：汇总所有记录时段后，按方向划分的尖峰振幅分布。不同方向的振幅统计存在显著差异，表明菌丝网络的不同空间区域处于不同的电生理状态。

菌丝网络内生理状态、运输通路或局部兴奋性的组织方式。

总之，这些结果表明，平菇菌丝中的电尖峰具有空间结构，并且依赖于方向。星形电极配置能够通过解析活动中的角度差异来检测这种异质性，揭示出一个由动态可重构的活跃区域构成的分布式电系统，而非均一或全局同步的信号传递系统。

3.2. 尖峰振幅与爆发动态

电尖峰振幅的变化范围很广，从几毫伏到数十毫伏不等，偶尔还会出现超出此范围的事件。汇总所有记录时段后可以发现，不同方向通道的振幅分布存在显著差异，如图5所示。有些方向的振幅分布相对集中，以低振幅尖峰为主；而另一些方向的分布则更为宽广，上尾明显，表明偶尔会出现高振幅事件。

尖峰振幅的总体分布图6呈重尾特征，大多数事件集中在低至中等毫伏范围内，少数大型事件却对分布上端贡献 disproportionately

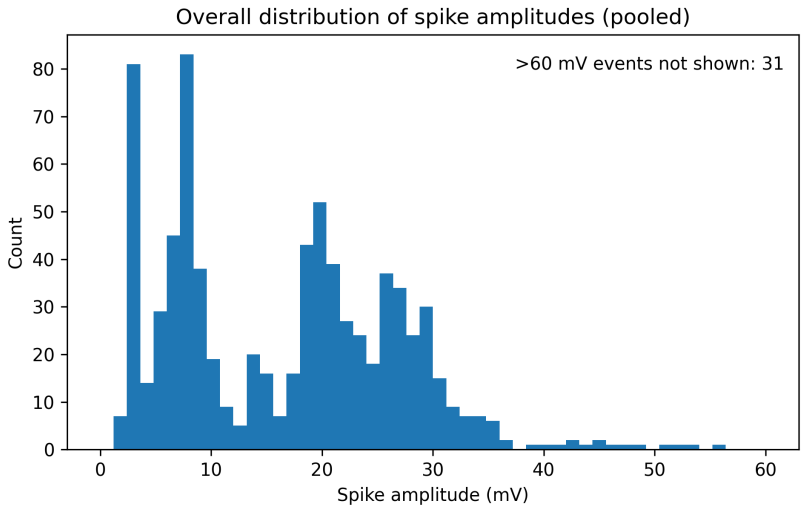

图 6：汇总所有实验后的尖峰振幅总体分布。该分布具有重尾特征，大多数事件处于低至中等毫伏范围内，少数高振幅尖峰达到几十毫伏，甚至超过一百毫伏。

。值得注意的是，一些尖峰频率总体较低的方向仍产生了高振幅尖峰，这表明存在罕见但强烈的电活动发作，而非持续的振荡行为。

尖峰时序呈现出显著的非均匀性。尖峰间隔分析（图 7）显示，短间隔事件较为集中，同时伴有长得多的间隔，这与相互独立的随机尖峰放电不一致。相反，尖峰在时间上呈簇集分布，形成由持续数分钟的静息期分隔的爆发。这种时间组织模式在多个通道和记录时段中均有观察到。

通过将尖峰归入由较长间隔分隔的序列，对爆发行为进行了量化。每次爆发中的尖峰数量变化很大，且不同方向之间存在差异（图 8），表明爆发组织模式具有空间异质性。爆发持续时间同样涵盖广泛范围，从短暂的瞬态事件到持续许多分钟的长序列（图 9）。这种变异性是远离稳态平衡运行的可兴奋系统的典型特征。

综合来看，振幅统计和时间聚集表明，真菌电活动既非均一，也非随机。相反，它由异质的尖峰放电事件构成，这些事件组织成爆发，其

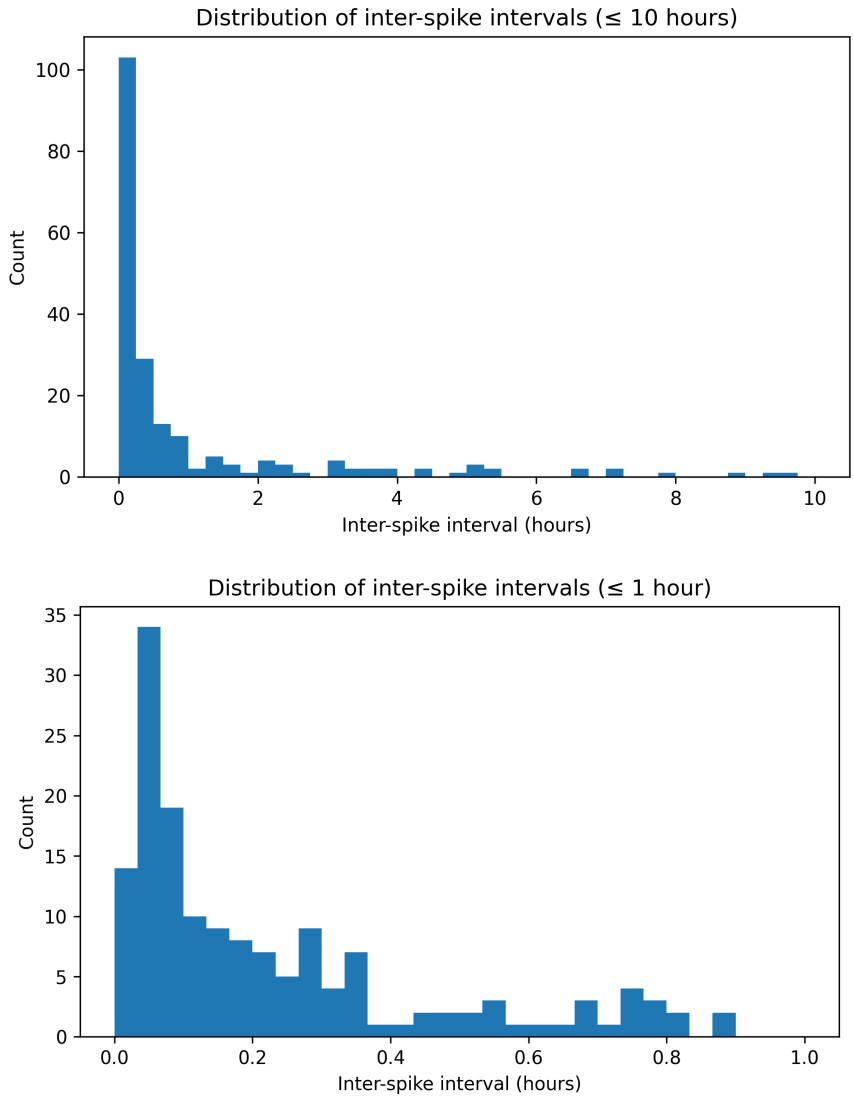

图 7：汇总所有实验和通道后得到的尖峰间隔（ISI）分布，展示了多个时间尺度。上图：将 ISI 分布限制在最长 10 小时以内，突出显示亚小时至数小时时间尺度上典型 ISI 的结构。下图：将 ISI 分布限制在最长 1 小时以内，解析短时间尺度的尖峰时序，并表明即使是最短的 ISI，其时间尺度也处于分钟量级，而非秒级。

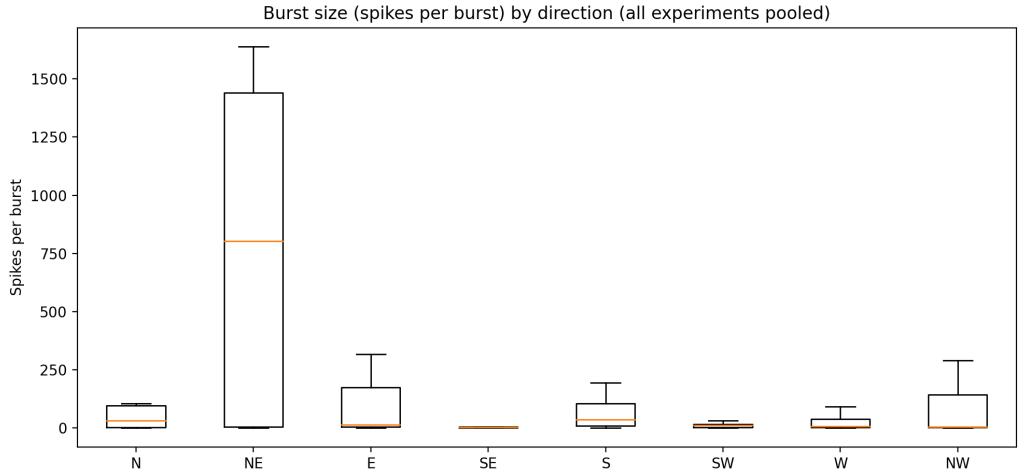

图 8：按方向统计的脉冲串大小（每个脉冲串中的尖峰数量），汇总所有实验结果。尖峰聚集成序列，其间由静息间隔分隔；不同空间扇区的脉冲串大小存在显著差异。

大小和持续时间取决于菌丝网络内的空间位置。这些发现进一步支持了这样一种解释：菌丝体是一个分布式可兴奋介质，能够产生具有间歇性且空间结构化的电信号。

3.3. 通道间相关性

为量化记录位点之间的耦合，我们计算了八个通道所记录电信号之间的成对相关系数。相关性分析显示，这些通道之间存在部分且受空间约束的耦合，而非全局同步。

通道间相关矩阵如图 10所示。较高的相关系数集中在矩阵对角线附近，对应于有序阵列中的相邻通道。相比之下，相距较远的通道对表现出微弱或可忽略的相关性。未观察到所有通道之间均具有较高相关性的模式，表明不存在全系统范围的振荡活动。

为更直接地考察耦合对空间位置的依赖性，我们分析了相关系数随通道间距的变化 $|i-j|$。如图11所示，平均相关系数随通道间距增加而系统性下降。相邻通道表现出最强的

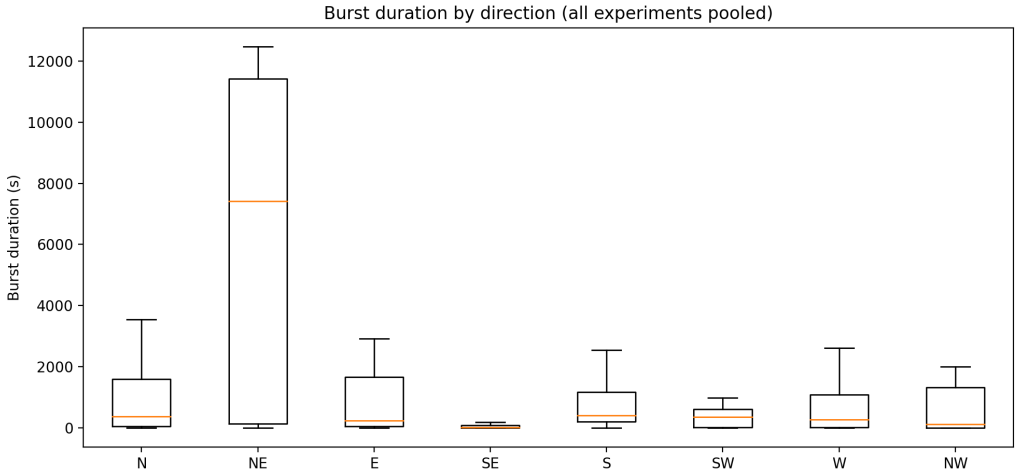

图9：按方向统计并汇总所有实验结果的爆发持续时间（秒）。爆发持续时间从短暂的瞬态事件到持续许多分钟的延长序列不等，与可兴奋动力学而非纯粹的随机动力学相一致。

耦合，而距离较远的通道对则呈现出明显较弱的相关性。这种随距离增加而衰减的现象，与共模噪声或全局波动不符，因为后者产生的相关性在很大程度上不受空间间距影响。

总体而言，这些结果表明，平菇定殖基质中的电活动具有局部协调性，并受到沿电极阵列的空间组织约束。观察到的相关结构支持这样一种解释：电信号通过菌丝网络传播，主要与邻近区域相互作用，而不是使整个系统同步。

3.4. 电脉冲爆发的传播

基于事件的传播分析显示，起源于一个空间区域的电爆发之后，其他方向会出现具有特征延迟的尖峰活动。通过测量参考通道中爆发活动开始与其他通道检测到的第一个后续尖峰之间的时间差，对传播进行了量化；所使用的已知采样率为1 Hz。

汇总所有记录时段后，传播延迟的中位数跨越数个数量级，从几秒到数个

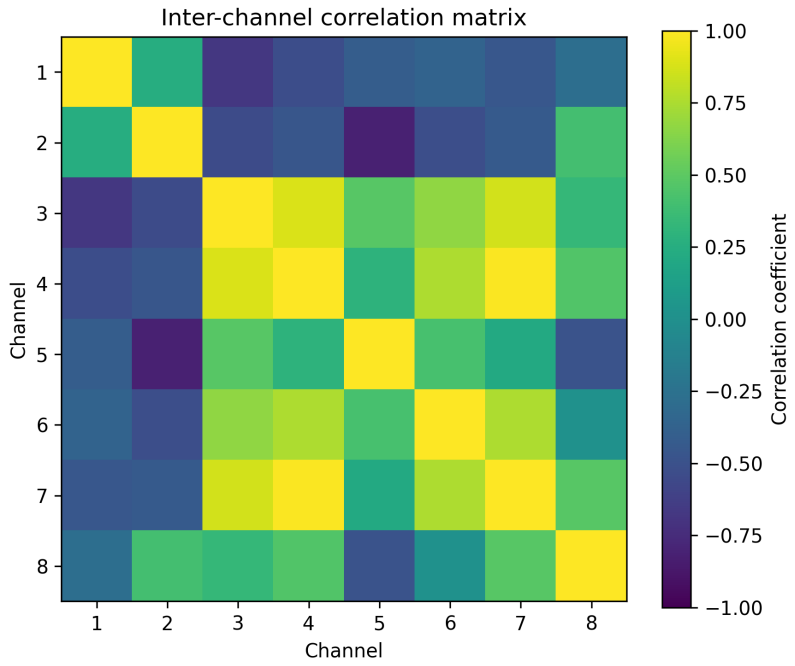

图10：在八通道阵列上记录的电活动的通道间相关矩阵。颜色表示成对相关系数。较高的相关性集中在对角线附近，对应相邻通道；而距离较远的通道对则表现出较弱或可忽略的相关性。不存在普遍较高的相关性，表明缺乏全局同步。

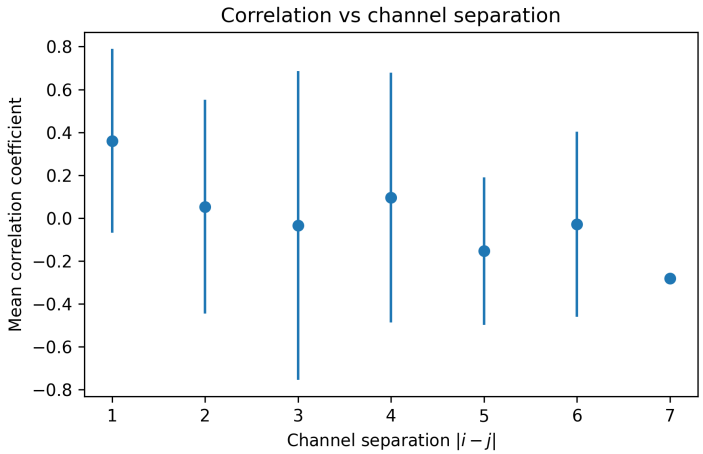

图11：通道间相关系数均值随通道间距的变化$|i-j|$。通道间距离越大，相关性越弱，表明受空间组织限制的电活动存在局部耦合。误差条表示通道对之间的标准差。

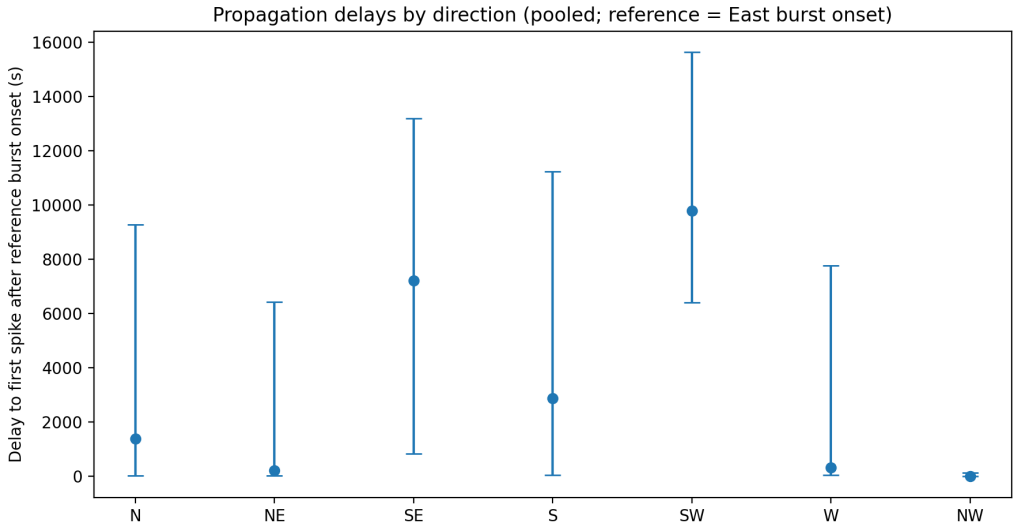

图12：汇总所有实验的基于事件的传播延迟。数据点表示从参考通道（东）的爆发起始到各方向上第一个后续尖峰的中位延迟（秒）；误差条表示四分位距。募集发生在从数秒到数千秒的时间尺度上，表明生理传播较为缓慢。

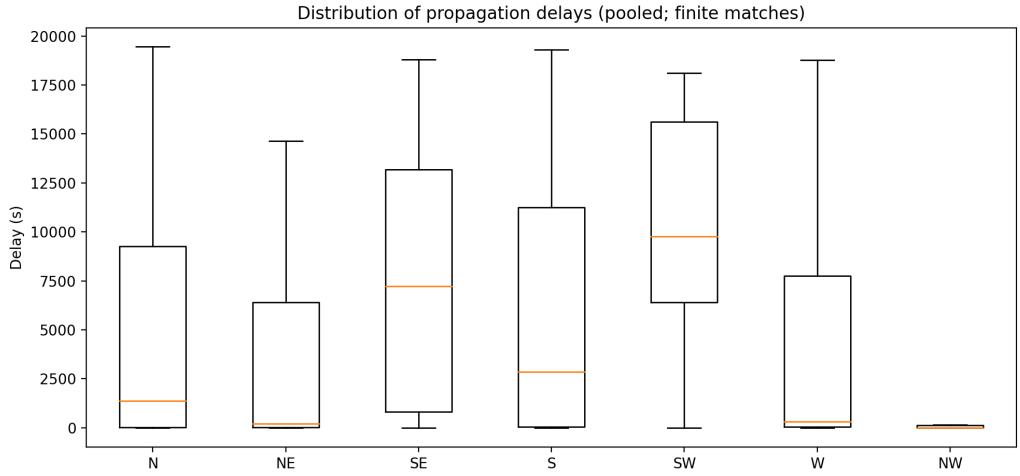

图13：所有实验汇总后的传播延迟分布（仅包括有限的匹配事件）。延迟分布范围宽且呈重尾，反映了可激发介质特有的募集时序变异性。

千秒（图12）。在某些方向上，爆发起始后几秒内便发生近乎同步的募集，这与较强的局部耦合或共同的生理状态相符。相比之下，其他方向则表现出延迟响应，延迟时间长达数十分钟至数小时，表明电募集存在较弱的耦合或间接通路。

传播延迟的完整分布（图13）范围宽且呈重尾，不同事件之间存在显著差异。这种分布与沿固定通路进行的快速类神经元传导不符，反而表明，菌丝网络中的信号传播受缓慢的状态依赖过程支配。这些时间尺度与由生长动力学、离子通量或代谢重构介导的生理性传播相符，而非快速的可激励波传递。

传播中的方向性结构在中位延迟的极坐标表示中尤为突出（图14）。募集时序呈现强烈的各向异性：某些方向响应迅速，而另一些方向则表现出较长的延迟。这种角度依赖性表明，菌丝体内存在电影响的优选通路，其形成受到网络架构和生理异质性的影响。

并非所有爆发事件中都能均匀地观察到传播。在给定方向上，参考爆发之后出现可检测活动的比例

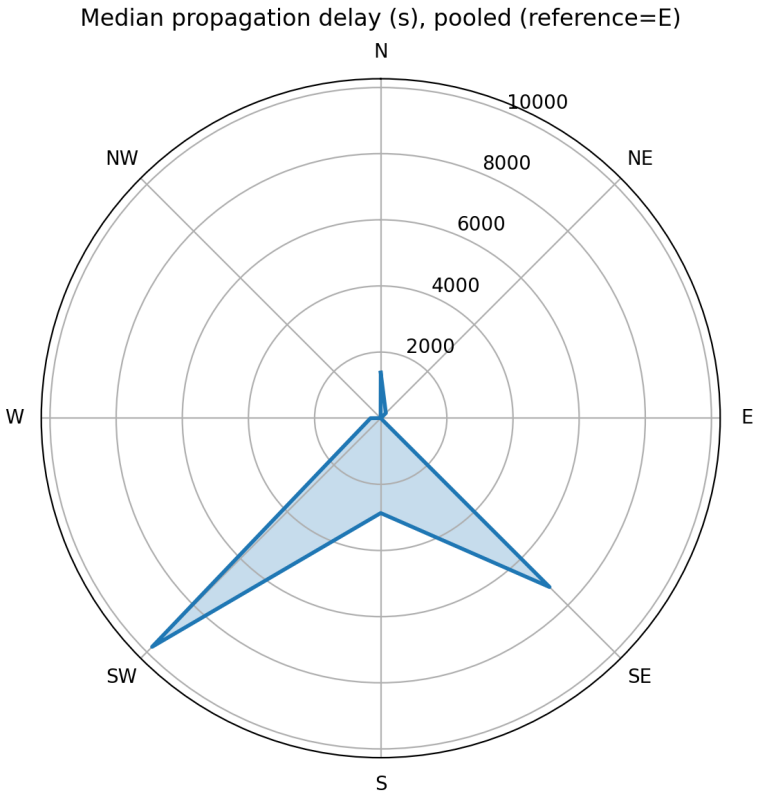

图14：极坐标传播图，显示汇总所有实验后，各方向相对于东通道爆发起始的中位募集延迟（秒）。角向结构的不均匀性表明电募集存在定向通路。

（匹配率）在不同通道之间差异显著（见图15）。匹配率较低的方向可能对应网络中耦合较弱或活动较稀疏的区域，而匹配率较高则表明募集更为可靠。

尽管在单次记录过程中，传播模式具有可重复性，但将不同记录过程的数据合并后，这些模式便有所不同，反映出主导通路随时间发生变化。总体而言，这些结果表明，电活动通过缓慢、具有空间结构且依赖状态的过程在菌丝网络中传播，这与分布式生理信号传导相符，而非类似神经系统的快速传递。

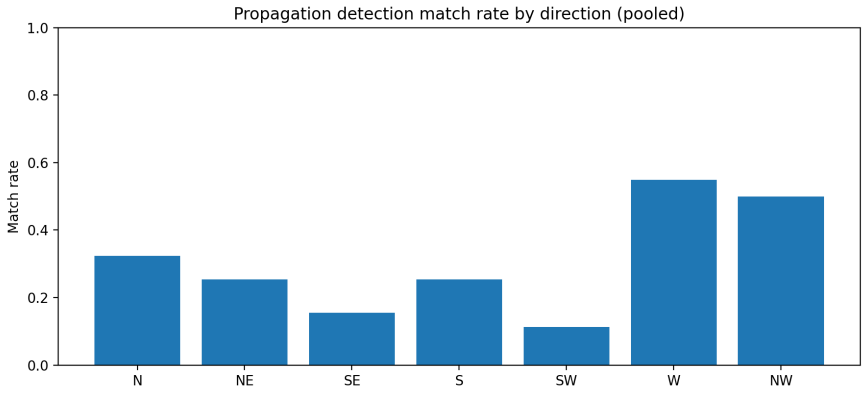

图15：汇总所有实验后，按方向统计的传播检测匹配率。匹配率是指参考爆发起始点之后，在分析窗口内沿给定方向至少出现一次尖峰的比例，可作为耦合强度的操作性指标。

4. 讨论

结果表明，平菇菌丝中的电活动在空间上并非均一，在时间上也并非随机，而是呈现出结构化的尖峰放电、爆发、部分耦合和定向传播。缺乏全局同步，加上存在结构化相关性和延迟募集，表明这些现象并非源于环境噪声或电极不稳定性等伪影。

尖峰活动的方向异质性表明，菌丝体的不同区域处于不同的生理状态。这种各向异性可能反映了菌丝密度、营养物质可用性、运输通路或代谢需求的潜在差异。重要的是，这些空间不对称性在较长时间内持续存在，表明其代表稳定的功能组织，而非短暂波动。

爆发动态进一步支持将菌丝体视为一种可兴奋介质。可兴奋系统自然会呈现簇集响应，其间由不应期隔开。在真菌网络中，这类爆发可能对应协调运输事件、代谢切换或内源性信号传导。在整体活动较弱的通道中出现罕见的高振幅尖峰，表明存在间歇性强募集，而非连续振荡。

相关性分析表明，电耦合主要局限于局部。

相邻空间区域之间的相关性强于相距较远的区域，这与信号传递受菌丝索的物理连通性及局部离子环境限制相一致。基于事件的传播分析进一步揭示了这一图景，显示远处区域会在数分钟至数十分钟的时间尺度内缓慢募集。

星形电极几何形状对于揭示这些空间特征至关重要。与线性或稀疏电极排列不同，角度分辨率能够检测方向偏倚、局部耦合和非均匀传播。这种空间分辨方法对于推动研究从对真菌电活动的描述性观察迈向机制层面的理解至关重要。

尽管本研究并未将神经或认知功能归因于真菌电信号传导，但观察到的动态特性展现了与分布式信息处理相关的性质，包括兴奋性、信号传播、时间整合和自适应重构。这些发现支持人们持续探索真菌作为生物混合传感和非常规计算的活体基质，并借此理解缺乏集中式控制的生物系统中的协调。

5. 结论

通过使用星形差分电极阵列，并以每秒一个样本的频率进行记录，我们表明平菇菌丝的电活动具有方向性结构，以爆发为基础，呈部分相关性，并能够在空间扇区间缓慢传播。电爆发会在不同时间尺度上招募不同区域，特征延迟从几秒到几分钟乃至几小时不等，这支持了一种分布式慢速协调模型，而非快速集中式控制。这些结果表明，真菌菌丝体是一种空间延展的可兴奋系统，并为未来有关真菌生理学、生物混合传感和非常规信息处理的研究奠定了基础。

致谢

本项目获得了欧盟 Horizon 2020 研究与创新计划 FET OPEN“挑战当前思维”项目的资助，资助协议编号为 No858132。

参考文献

[1] Andrew Adamatzky。关于平菇粉红平菇尖峰放电行为的研究。《科学报告》，8(1):7873，2018年。[2] Andrew Adamatzky。源自真菌电尖峰活动的真菌语言。《英国皇家学会开放科学》，9(4):211926，2022年。[3] Matteo Buffi、Julia M Kelliher、Aaron J Robinson、Diego Gonzalez、Guil- laume Cailleau、Justine A Macalindong、Eleonora Frau、Silvia Schintke、Patrick SG Chain、Claire E Stanley 等。真菌中的电信号传导：过去与现在的挑战。《*FEMS*微生物学评论》，49:fuaf009，2025年。[4] Mohammad Mahdi Dehshibi 和 Andrew Adamatzky。真菌的电活动：尖峰检测与复杂性分析。《生物系统》，203:104373，2021年。[5] Xuebin Feng、Mengyu Zhu、Jin Xu、Wenqing Yin 和 Fei Hu。脉冲电场诱导丝状真菌跨膜电压的影响因素分析。《微生物》，7(9):307，2019年。[6] Yu Fukasawa、Daisuke Akai、Takayuki Takehi 和 Yutaka Osada。真菌菌丝体中的电完整性与持续一周的振荡。《科学报告》，14(1):15601，2024年。[7] Yu Fukasawa、Daisuke Akai、Takayuki Takehi、Daiki Takahashi 和 Yutaka Osada。野外两种外生菌根真菌子实体之间的电信息流。*bioRxiv*，页码 2025–09，2025年。[8] Yu Fukasawa、Daisuke Akai、Masayuki Ushio 和 Takayuki Takehi。降雨事件后双色蜡蘑中的电位。《真菌生态学》，63:101229，2023年。[9] NAR Gow 和 BM Morris。电真菌。《苏格兰植物学杂志》，47(2):263–277，1995年。[10] Neil AR Gow。真菌中的跨菌丝电流。《微生物学》，130(12):3313–3318，1984年。[11] Neil AR Gow。真菌菌丝的生长与电流之间的关系。《生物学通报》，176(2S):31–35，1989年。

[12] Franklin M Harold、Darryl L Kropf 和 JohnH Caldwell。为什么真菌会驱动电流通过自身？实验真菌学，9(3):3–86，1985年。[13] S Olsson 和 BS Hansson。真菌菌丝体中发现的类动作电位活动对刺激敏感。*Naturwissenschaften*，82(1):30–31，1995年。[14] Neil Phillips、Antoni Gandia 和 Andrew Adamatzky。真菌对含水量变化的电响应。真菌生物学与生物技术，10(1):8，2023年。[15] Clifford L Slayman、W Scott Long 和 Dietrich Gradmann。菌丝真菌粗糙脉孢菌中的“动作电位”。*Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Biomembranes*，426(4):732–744，1976年。