arXiv:2601.00480v1 [cond-mat.soft] 1 Jan 2026

活性液滴通过化学回声定位实现自动决策

Aritra K. Mukhopadhyay†, [1] Ran Niu†, [2,*] Linhui Fu†, [2] Kai Feng, [2]Christopher Fujta, [1] Qiang Zhao, [2] Jinping Qu, 以及 Benno Liebchen[1]
[1] *Institute for Condensed Matter Physics, Technische Universität Darmstadt, Hochschulstraße 8, 64289 Darmstadt, Germany.* [2] *School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China.*（日期：2026年1月5日）

运动微生物，如细菌和藻类，将自推进、自主导航和决策等能力集于微米尺度。尽管近期突破催生了能够自推进的合成微型游动体和纳米试剂，但它们仍缺乏生物对应物所具备的功能与复杂性。本研究开创了一种机制，使合成智能体能够自主导航并做出决策，从而无需外部信号或引导，就能在复杂环境中穿越迷宫并运送货物。该机制利用活性液滴或胶体等智能体产生的化学-流体动力学信号，实现对环境的远程感知与响应，其方式类似于回声定位。我们的研究为赋予自主、可运动的合成智能体以往只有生物体才具备的功能铺平了道路。

I. 引言

自然界已经证明，制造具备功能的微型游动体是可行的，但我们目前还无法合成出这类微型游动体。例如，细菌、藻类或黏菌等运动微生物能够自主移动、做出导航决策并走出迷宫，而无需外部信号或引导 [1–10]。具备类似能力的合成智能体，要么依赖传感器、处理器和执行器等大型电子元件 [11, 12]，要么不具备自主性，依赖外部反馈控制系统 [13–17]。然而，物理学、化学和纳米技术领域的近期突破催生了新一代合成智能体，即微型游动体，它们能够在微米和纳米尺度上自推进 [18–20]。这些智能体会打破周围环境的对称性，例如在自身表面的一部分催化特定化学反应，从而在周围液体介质中产生流动，推动智能体前进 [21, 22]。这类智能体如今已广为人知，其特性也已在活性物质领域得到广泛研究 [23–28]。例如，它们有望用于运输纳米货物，并实现针对癌细胞的靶向药物递送 [29, 30]。然而，尽管合成（微型）游动体作为发动机具有革命性意义，其复杂程度和功能性仍不及生物对应物。特别是迄今为止，合成（微型）游动体仍缺乏自主做出导航决策并在无需外部信号或引导的情况下走出迷宫的能力。若能赋予合成微型游动体类似细菌寻找食物时所用的导航能力，就有望开启全新的应用领域，从环境修复 [31] 到设计满足21世纪社会核心需求的功能性活性材料 [32], 。

在本研究中，我们提出了一种通用机制，使完全合成的智能体能够自主做出导航决策并破解复杂迷宫——这种能力此前只存在于生物系统中。 [8]我们将这种机制称为化学回声定位。它利用了这样一个事实：自驱动智能体，例如自扩散胶体、液滴游动体和离子交换驱动的模块化游动体，会在其环境中产生化学浓度梯度和流体动力学流场，并利用它们实现推进。这些场在空间中缓慢衰减，并会被（远处的）墙壁、障碍物和其他智能体反射。回声携带周围环境的信息，并将其传回智能体。重要的是，与生物体不同，智能体无需复杂的信息处理即可对回声做出响应；相反，回声会引发直接的物理响应，使智能体转向特定方向。例如，我们发现，将某些液滴游动体置于复杂迷宫中时，它们自身产生的化学-流体动力学信号使其能够自动避开死胡同，并有条不紊地朝迷宫出口导航，从而自主破解迷宫（图1a）。这项研究展示了合成智能体如何在没有任何外部引导的情况下破解迷宫，为传统的化学源寻源策略提供了一种可靠的替代方案，尤其适用于外部源产生的浓度梯度可能很弱或不存在的大型迷宫，并展现了一种全新的微尺度导航方法。

* niuran@hust.edu.cn
† 这些作者对本研究的贡献相同。

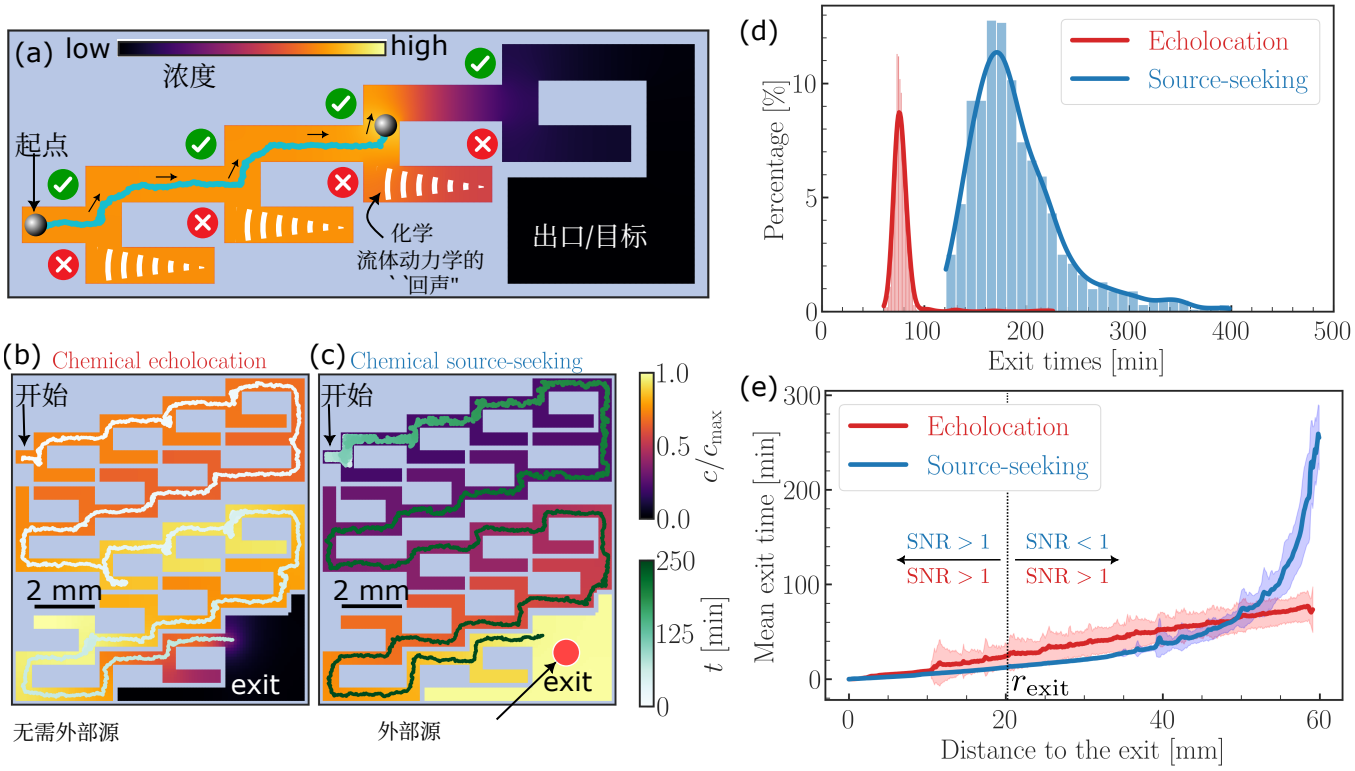

图 1. **通过化学"回声定位"进行自动决策**。(a) 化学回声定位概念示意图。智能体（灰色球体），例如液滴游动体或自扩散胶体，会产生化学（或化学-流体动力学）信号（背景颜色）；迷宫中的死胡同会对信号产生"回声"，并通过物理力有效地排斥智能体。无需源的引导或外部控制，智能体便能持续做出正确的导航决策（绿色对勾），朝目标（开放端/储液池）前进。(b) 化学回声定位策略导航的模拟轨迹（白绿色线条，颜色表示时间 t）。(c) 寻源智能体通过感知出口处外部化学源（红点）产生的化学梯度来走出迷宫的模拟轨迹（白绿色线条）。(b、c)中的背景颜色表示归一化化学浓度 $c/c_{\max}$。(d) (b)和(c)中靠近"起点"的随机初始条件下的出口时间直方图。(e) (b)和(c)中出口区域距离与平均出口时间的关系。回声定位策略的信噪比（SNR）始终大于 1，而寻源策略在远离出口处的信噪比小于 1，因此在大型迷宫中无效。参数：$D^* = 10^2$, $B^* = 2 \times 10^4$, $M^* = 0$。

我们强调，这种机制与此前利用液滴游动体和活性胶体破解迷宫的研究有着根本区别；那些研究依赖正趋化性（化学吸引）[33–38]。在那些研究中，需要外部化学信号沿浓度梯度引导智能体；如果没有这样的梯度，智能体就无法找到目标。相比之下，我们提出的新策略*(i)* 即使迷宫出口完全没有化学源，也能有效运行（见图*1a-c*）。*(ii)* 其次，即使出口距离很远，我们的方法仍然高效（见图*1e*）。总之，本研究首次证明，完全合成的游动体能够实现自动决策，从而像盘基网柄菌细胞等生物智能体一样自主导航并破解复杂迷宫 [8, 39, 40]，，但无需依赖其复杂的信息处理机制。这种机制适用于多个尺度，从厘米尺度到微米尺度，并可作为构建下一代合成智能体的核心要素，使其无需任何外部引导即可自主导航并递送药物及其他货物。

II. 模型

为展示通过化学回声定位实现自主决策，我们首先引入一个最小模型。考虑一个能够产生某些化学物质的智能体，例如催化其环境中某种反应的化学活性各向同性胶体颗粒 [19, 41]，、从内部储库释放化学物质的液滴 [42]，或将空胶束转化为充油胶束的液滴 [33, 43]。已知这些智能体表现出合成趋化性，

对其产生的相同化学场中的梯度作出响应。该响应源于不对称的表面流——胶体中的扩散渗透流 [41, 44–46] 以及液滴中的马兰戈尼流 [47–49]。因此，我们将智能体建模为能够感知其所在位置 $c(\mathbf{r}\ t$处的化学浓度场梯度 $\mathbf{r}_p$ ，并以敏感性参数 β作出响应。根据 β的符号，智能体会朝梯度方向移动（化学吸引，$\beta > 0$）或远离梯度移动（趋化排斥，$\beta < 0$）。智能体的位置 $\mathbf{r}_p$ 遵循朗之万方程演化

$$m\ddot{\mathbf{r}}_p(t) + \gamma_t \dot{\mathbf{r}}_p(t) = \beta \nabla c(\mathbf{r}_p, t) + \gamma_t \sqrt{2D_t}\ \boldsymbol{\eta}(t). \tag{1}$$

这里， m、 γ_t 和 D_t 分别表示智能体的质量、平移耗散系数和有效扩散系数。项 $\beta\nabla c(\mathbf{r}_p, t)$ 描述智能体对局部化学梯度的响应。 $\boldsymbol{\eta}(t)$ 表示均值为零、方差为单位值的高斯白噪声，用于模拟智能体所处环境中的随机涨落。化学场 $\dot{c}(\mathbf{r}\ t)$ 根据以下时变扩散方程演化，

$$\dot{c}(\mathbf{r}, t) = D_c \nabla^2 c(\mathbf{r}, t) + k_s(t)\delta\left(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s\right) \tag{2}$$

其中 D_c 是相关化学物种的有效扩散系数。除纯扩散外，该项还有效地考虑了由智能体诱导的流场所导致的化学物质平流的净效应（见补充材料）。方程 2 右侧的第二项表示化学信号以速率 $k_s(t)$ 在位于 $\mathbf{r}_s$ 的点源处产生。对于传统的寻源策略，固定源设置在迷宫 [33–38、50–52] 的出口处。相比之下，在这里，我们将智能体本身视为一个源，因此源的位置与移动智能体的位置重合，即 $\mathbf{r}_s = \mathbf{r}_p(t)$。为求解这些方程，我们开发了一种数值混合粒子-连续介质求解器，该求解器考虑了迷宫所带来的复杂边界条件，并谨慎地确保 $k_s = 0$ 的总化学浓度守恒（见补充材料）。

III. 迷宫中的自动决策

与化学源寻策略（$\beta > 0$不同，在该策略中，智能体持续朝着指定的源移动[33–38], 现在我们考虑这样的情况：$\beta < 0$ 且$\mathbf{r}_s = \mathbf{r}_p(t)$，此时智能体远离自身产生的化学物质移动，且不受任何外部源引导。为了探究智能体如何穿行迷宫，我们选定恒定的生成速率 $k_s(t) = k_0$ ，并让它进入一个由连续的 Y形交叉口组成的迷宫（图1b）。在每个交叉口，智能体都必须在死胡同和通往迷宫出口（通向开放区域或储液池的出口）的正确路径之间作出“决策”。我们将智能体置于“起点”位置（图1b）。图1b和补充视频 M1展示了一个典型智能体轨迹的动态过程。起初，智能体朝第一个交叉口移动，并很快抵达那里。在第一个交叉口，智能体短暂地转向错误路径（死胡同），但很快便调整方向，选择通往出口的正确路径（另见补充视频 M1）。同样，在后续交叉口，智能体要么直接选择正确路径，要么短暂进入错误路径后再掉头。也就是说，令人惊讶的是，在每个 Y形交叉口，智能体都会系统性地作出正确的导航决策，朝目标前进。由于这种行为完全源自智能体对作用于其表面的物理力的响应 [41], ，且没有任何外部控制，我们将这种能力称为“自动决策”。这一机制展示了纯粹的物理机制如何使合成微型游动体表现出复杂的自主行为，类似于生物系统中的行为 [8, 39, 40]。

IV. 化学回声定位

现在，让我们详细分析使智能体能够进行自动决策的机制。智能体产生的化学物质会在迷宫中扩散，并被墙壁或迷宫边界反射。在路径分岔为死胡同和开放路径的交叉口，化学物质会在死臂中累积，使死臂中的浓度高于开放臂，这本质上形成了“化学回声”（图1a）。当趋化敏感性极低（即 $|\beta|$的值较低）时，智能体的运动由扩散主导，进入任一臂的概率几乎相等。然而，如果敏感性参数足够大，智能体就能在交叉口探测到这一回声信号，从而有效地远距离识别死胡同，这类似于蝙蝠利用回声定位导航，或船只测量水深 [53], ，无需实际进入死臂。随后，智能体会远离死胡同中的高化学浓度，转向开放路径（图1a），从而做出正确的导航决策，朝出口前进。这表明了.....之间的相互作用

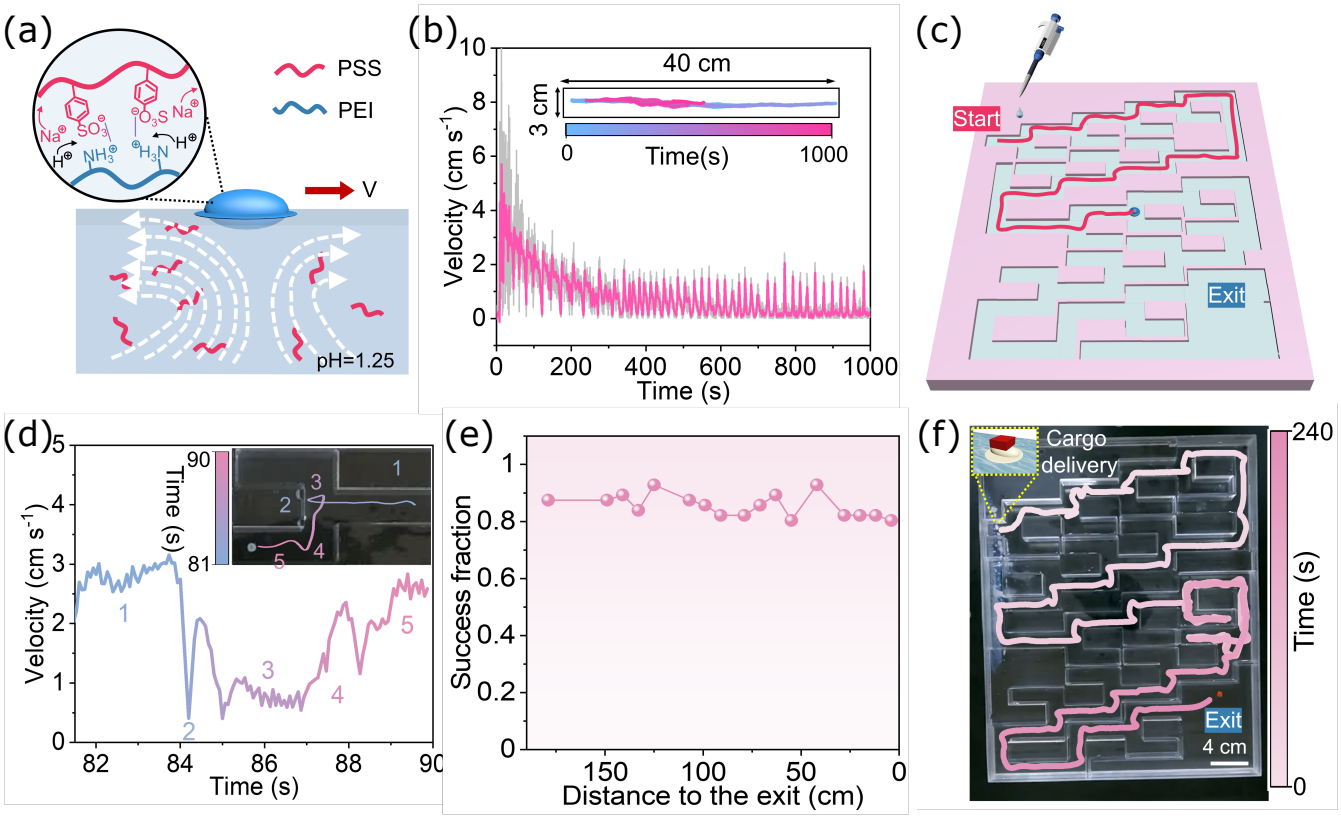

图2. **液滴游动体中自动决策的实验实现。** (a) 液滴示意图，显示释放的 PSS 不对称分布，从而导致自发对称性破缺和自推进。(b) 液滴在矩形通道中的速度。插图显示了液滴在这一受限通道中的相应轨迹。(c) 液滴在大型复杂迷宫中运动的示意图。(d) 液滴在交叉口处的速度变化。插图显示了液滴的轨迹。(e) 液滴在首次尝试时通过各交叉口的成功率（SF）与其到出口的距离之间的关系。(f) 无需外部控制即可自主输送大型货物。

化学生成、扩散和反射会形成化学回声，智能体利用合成趋化性自动循着这一回声前进，系统地做出正确的导航决策，从而走出迷宫。

此类自动决策的判据是什么？智能体有三个特征时间尺度。1）回声时间尺度，即化学信号从智能体位于交叉口时的位置传播至死胡同再返回所需的时间。该时间可估算为 $t_{\mathrm{echo}} \sim L_d^2/D_c$（见补充材料），其中 L_d是盲臂的长度。2）智能体的响应时间，定义为智能体因负趋化性而移动至下一个交叉口所需的时间，可估算为 $t_{\mathrm{response}} \sim \frac{\gamma_t D_c L_d^2}{|\beta| k_0}$（见补充材料）。这一时间尺度代表智能体必须对回声信号作出反应、以避免越过交叉口进入死胡同的时间窗口。3）扩散时间尺度，即智能体仅凭平移扩散穿越盲臂长度所需的时间，可估算为 $t_{\mathrm{diffusion}} \sim L_d^2/D_t$。要使化学回声定位发挥作用，智能体的响应时间应小于化学信号的回声时间尺度，且这两个时间尺度都应显著小于智能体的扩散时间尺度，即 $t_{\mathrm{response}} \lesssim t_{\mathrm{echo}} \ll t_{\mathrm{diffusion}}$。这对 D_c施加了上限和下限：$D_t \ll D_c \lesssim \sqrt{k_0|\beta|/\gamma_t}$。我们用于图 1 的模拟以及典型液滴游动体均满足这一判据；下文将介绍相关实验。

五、优势　　化学回声定位相较于寻源策略的优势

这种新的自动决策机制与成熟的化学源寻源策略相比如何？在这种策略中，智能体会沿着外部源产生的梯度前进（图 1c） [33–38, 50–52, 54]？为进行比较，我们在同一个迷宫中模拟了趋化性吸引剂（即 $\beta > 0$），但设置了一个化学物质

源，将其放置在靠近出口的位置 $\mathbf{r}_s$ 。该源以速率 k_0 产生化学物质（图 1c）。虽然这种机制对小型和中型迷宫有效，但对于超过一定规模的迷宫（图1c、e），它便会失效。如图 1c 所示，在这种情形下，典型智能体会在起始位置附近停留很长时间，在到达第一个交叉口前呈现扩散运动（见补充影片 M2）。它穿过最初几个交叉口时仍以扩散方式移动，直到接近出口处的源才开始加速。这种行为与化学回声定位形成鲜明对比：无论智能体距离出口多远，其平均速度都相对恒定。因此，在足够大的迷宫中，利用回声定位的智能体比寻源智能体更快到达出口，这一点可由图 1e 以及图 1b、c 中的时间色标看出。

为什么寻源智能体到达大型迷宫出口所需的时间要长得多？在二维空间中，梯度 $|\nabla c|$ 会随着与源的距离 $\sim 1/r$ 增加而 r 衰减。这种衰减会使远离出口处的信号减弱，导致智能体在行程初期表现出持续较长时间的扩散动力学，且主要受平移噪声支配（图1c）。关键在于，当信噪比低于 1 时，寻源策略便会失效；信噪比定义为信号能量与热噪声分别相对于移动智能体一个体长所需能量的比值。当智能体距离迷宫出口超过阈值距离 $r_{\text{exit}} \sim \frac{\beta k_0 \sigma}{\gamma_t D_t D_c} \approx 20$毫米时，就会发生这种情况。对于典型参数下、尺寸为毫米级的液滴游动体而言，我们的模拟采用的正是这类参数（见图1e）。与此形成鲜明对比的是，化学回声定位策略能保持恒定的信噪比 ≈ 10 ，且不受距离影响，因此能够在复杂迷宫中实现更可靠的导航（详细推导见补充材料）。

为了对两种策略的表现进行统计比较，我们分析了 10^3 每种策略下的智能体轨迹。对于每条轨迹，我们模拟了智能体的运动以及相应的化学浓度场。在每次模拟中，智能体被初始化在迷宫入口附近的随机位置，并记录其出口时间。我们的分析表明，对于图1b、c所示的迷宫，化学回声定位智能体的平均出口时间（$\approx 78.2 \pm 0.4$ 分钟）显著短于化学寻源智能体（$\approx 191 \pm 1$ 分钟）（图1d）。关键的是，总体而言，对于寻源智能体，平均出口时间几乎随其与出口的距离呈指数增长；而对于回声定位智能体，这种增长近似呈线性（图1e）。这种差异凸显了寻源策略的一个关键局限：虽然它在中小型迷宫中表现良好，例如在 [33], 最短路径为 ~ 6 毫米（≈ 60 倍于智能体直径）的迷宫中，智能体在 $\sim$ 5分钟内即可到达出口，但在更大的迷宫中，这种策略的效率会越来越低。在我们的模拟中（使用与 [33]相同的智能体参数；见补充材料），最短路径为 ~ 60 毫米（长10倍），寻源智能体的平均出口时间骤增至191分钟（长40倍）。相比之下，化学回声定位智能体在同一个大型迷宫中导航快得多，仅用 ≈ 78 分钟便到达出口；它们在每个交叉口都能做出准确判断，而无需依赖出口处的化学源。需要指出的是，尽管回声定位能够有效地帮助智能体穿越迷宫并避障，但一旦智能体足够接近目标（使信噪比远高于1），传统趋化性在最终目标捕获方面尤其有效。

VI. 液滴游动体中自动决策的实现

现在，我们展示一种化学回声定位策略的实验实现：使用由两种聚合物——聚乙烯亚胺（PEI）和聚（4-苯乙烯磺酸钠）（PSS）混合制成的水相液滴。将这些液滴置于酸性水中时，它们会从边缘开始固化，形成多孔外壳，并逐渐向周围的水溶液释放PSS（见补充材料图S2）（图2a） [42]。释放出的PSS会降低水的局部表面张力，并在液滴界面产生马兰戈尼流。这些流动推动液滴从聚合物浓度较高的区域移向较低的区域。因此，液滴表现出有效的负趋化性，会避开PSS浓度较高的区域。这种行为满足化学回声定位的关键要求：液滴如同自主智能体，既能产生化学梯度，也能对其作出响应，这与我们的模型和模拟相似。在宽度为 ≈ 8 个液滴直径的受限通道中，这些液滴会定向运动，直至抵达边界并被反弹回来（图2b）。这种行为展现了液滴在受限环境中导航的能力，这是在复杂几何结构中实现化学回声定位的一项关键特性。

我们设计了一个大型迷宫，其几何形状与图1b相同，共设有17个交叉口，并预先注入pH值为1.25的酸性水溶液（图2c）。将一滴直径为$\sim$ 4mm的PEI/PSS溶液液滴，从气水界面上方 ~ 1 cm处滴入迷宫入口。接触后，液滴开始自推进，并从外缘向内逐渐固化 [42]。在迷宫内，液滴以 $\approx 1\ \text{cms}^{-1}$($\approx 2.5$ 体长/秒）的平均速度移动（图2d）；接近交叉口时速度减慢，在开放通道中则移动得更快。高速摄像机记录的一条典型轨迹（见图3a和补充视频M3）展示了液滴高效穿行迷宫的能力：它在大多数交叉口都做出了正确选择，避开了死胡同，并在 ≈ 195 s内到达出口。我们对60滴液滴重复了该实验，并分析了出口时间的分布（图3b），估算得到平均出口时间为 $\approx 321 \pm 46$ s。重要的是，平均出口时间与到出口的距离呈线性关系（图3c），证实了液滴回声定位策略的效率，正如前一节所预测的

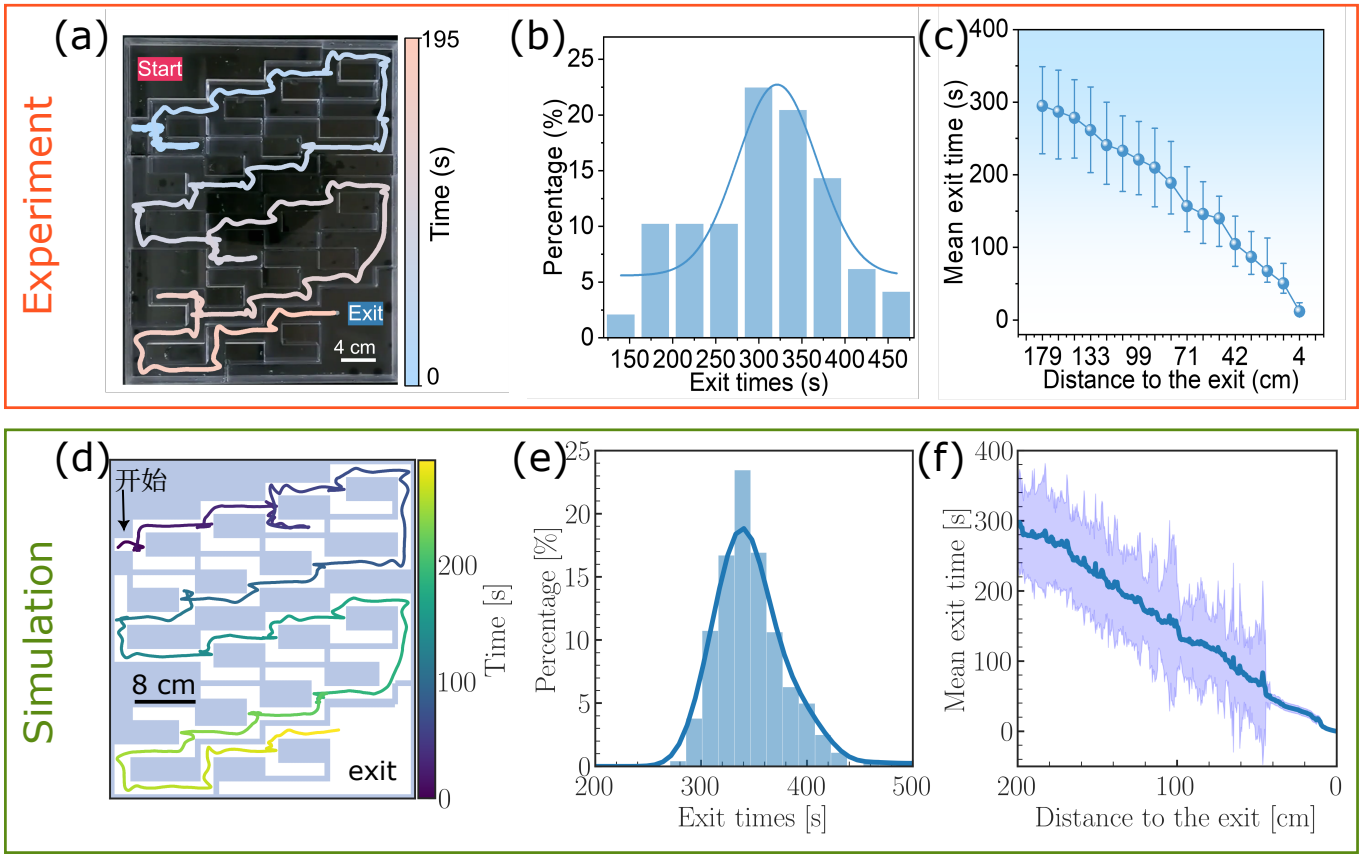

图3。**实验与模拟的比较**。液滴在迷宫中的典型轨迹，分别来自（a）实验和（d）模拟，色标表示时间。（b）实验和（e）模拟中液滴轨迹出口时间的直方图。实线为对数据进行的高斯拟合。（c）实验和（f）模拟中，液滴从不同距离到出口点的平均出口时间。c 中的误差条表示分布的第一至第三四分位数。参数：$D^* = 2 \times 10^2$、 $B^* = -8 \times 10^4$ 和 $M^* = 10^{-1}$（用于 d、e、f 图）。

。我们还分析了各交叉口的成功率，其定义为选择通往出口的正确路径的轨迹所占比例。平均成功率为 ≈ 0.8（见图2e），表明液滴在大多数交叉口都做出了正确选择。重要的是，利用粒子图像测速（PIV），我们观察到交叉口处由死胡同产生的流体动力学回流，它将液滴推向开放端（见补充材料，图S7），证实了化学-流体动力学回声机制。这种自主决策能力凸显了其在复杂路径（如血管）中实现智能货物输送的潜力。为展示这一点，我们将一片纸板和一个直径为3 mm的泡沫球作为代表性货物装载到液滴上。借助液滴的化学回声定位能力，货物分别在240 s和206 s内沿最短路径成功送达目标（图2f和图S8）。为进一步验证研究结果，我们使用从液滴实验中得出的参数进行了数值模拟（见补充材料）。结果与实验数据在定量和定性方面均高度吻合，凸显了所提出机制的稳健性和可靠性（参见图3d-f）。

VII. 参数变化与迷宫几何形状变化下的稳健性

即使在包含明显更长且更多死胡同分支的高度复杂迷宫中，化学回声定位机制仍然有效。我们设计了两种复杂的迷宫构型，其中包含较长的死胡同路径和多个分支。观察结果表明，液滴智能体能够有效利用化学回声定位避开死胡同，并成功朝出口导航，如图 4a、b（实验）和图4c、d（模拟）所示。请注意，模拟中的时间尺度略长于实验中的时间尺度。这主要是因为模型有效地表征了化学回声定位的关键效应，但未涵盖所有可能产生影响的细节

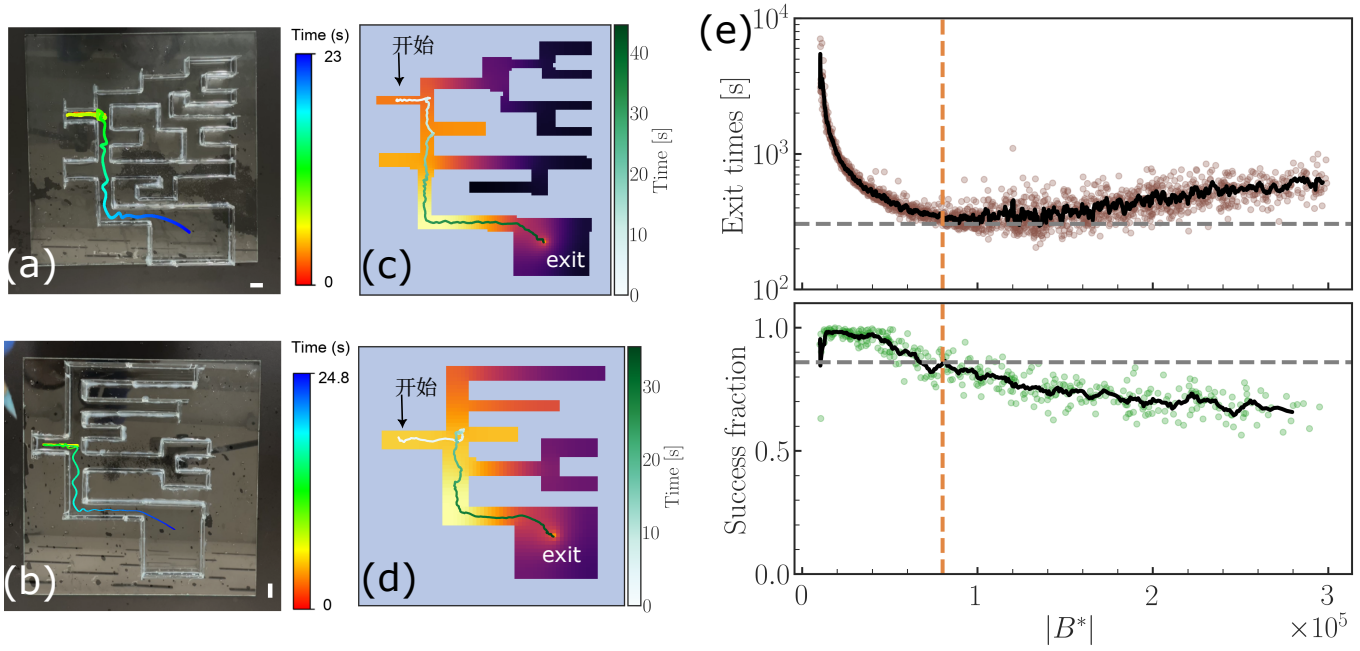

图 4. **不同迷宫几何形状和参数下化学回声定位的鲁棒性**。 (a、b) 中的实验和 (c、d) 中的模拟所示的代表性智能体轨迹，展示了智能体如何成功穿越死胡同较长且具有多个分支的复杂迷宫，凸显了基于化学回声定位的决策策略的有效性。(c、d) 面板的参数与图 3 (d-f) 相同。(c、d) 中的背景颜色表示液滴到达出口时的归一化化学浓度 $c/c_{\max}$。(e) 图 3d 所示迷宫中，液滴在不同约化趋化敏感性 B^*下的出口时间和成功率。黑色实线表示移动平均值。黑色虚线表示实验中液滴出口时间（图 3b）和成功率（图 2e）的平均值。橙色虚线表示图 $B^* = -8 \times 10^4$ 中使用的数值。参数： $D^* = 2 \times 10^2$ 和 $M^* = 10^{-1}$。

，尤其是在不同死胡同发出的化学流体动力学信号显著重叠的迷宫几何结构中。当死胡同和开放端的长度相近时，平均成功率为 75-80%；即使死胡同的长度是目标路径的两倍，成功率仍为 $\gtrsim 60\%$（见补充图 S9(a)）。同样，当死胡同臂内的可用空间相对于液滴尺寸显著增大时，化学回声定位仍然有效（见补充图 S9(b) 和 S10）。此外，改变液滴尺寸的实验表明，在很宽的通道限域范围内（通道宽度与液滴直径之比介于 $\approx$ 5-40），导航仍然稳健；只有当通道过宽（达到液滴直径的 $\gtrsim 50$ 倍），无法向开放路径形成定向回声时，导航效果才会下降（见补充图 S11）。让液滴从迷宫中的不同位置出发进行的进一步实验证实，它们能够成功导航至出口，不过起点越靠近迷宫入口，表现越可靠（见补充图 S6(a-e)）。在多个液滴从不同位置同时释放的实验中，尽管液滴偶尔会在交叉口走错方向，随后再修正路径，它们最终仍成功到达出口（见补充图 S6f）。在此类多智能体情景中，彼此重叠的化学梯度和流体动力学尾流会干扰回声定位信号，从而产生不同于单智能体导航的复杂集体行为（见补充视频 M4）。未来的研究将进一步探讨这一现象。我们还研究了液滴导航效率随趋化敏感性的变化（即 β）。理想的导航机制应同时缩短出口时间，并提高每个决策交叉口的成功概率。我们通过改变无量纲趋化敏感度（$B^* = \beta k_0/\gamma_t D_t^2$）并保持其他参数不变，进行系统模拟，使用一致代价搜索（UCS）算法量化出口时间和成功率（详情见补充材料和图 S3）。当 $|B^*|$较小时，与平移扩散（$t_{\text{response}} \gg t_{\text{echo}}$）相比，趋化响应较弱，因此交叉口处的导航决策主要受随机运动支配，导致出口时间较长（图4e）。随着$|B^*|$ 接近 $\sim 4 \times 10^4$，响应时间变得短于回声时间尺度，从而能够可靠地检测化学回声，并在交叉口作出最佳决策。这使出口时间大幅缩短，成功率升至接近 1。然而，超过这一点后，成功率开始下降，而出口时间仅略有进一步缩短。值得注意的是，在 $8 \times 10^4 < |B^*| < 1.4 \times 10^5$范围内，出口时间仍然保持

几乎保持不变，这表明通过化学回声定位高效求解迷宫存在一个最优范围。对于非常大的 $|B^*|$，液滴的响应会变得过于强烈；它会对来自多个方向的微小化学梯度作出反应，而不只是对源自死胡同的梯度作出反应，从而导致运动不规则。因此，成功率会降低；当 $|B^*|$极大时，出口时间也会延长。为了使模拟中的平均出口时间和成功率与实验观察结果相符，我们在模拟中选择了 $B^* = -8 \times 10^4$（图3d-f）。这表明，基于化学回声定位的自动决策具有很强的鲁棒性，不仅能适应参数变化，也能适应迷宫几何形状的变化。

VIII. 化学回声定位的关键要求　　与缩小尺度的潜力

我们确定了实现有效化学回声定位导航所需的两个关键条件：(i) 化学扩散率既不能过快，也不能过慢，即 $D_t \ll D_c \lesssim \sqrt{k_0}|\beta|/\gamma_t$ 如上所述；(ii) 目标必须位于迷宫的开放端，或位于较大的储液池内，以便化学物质在其中积聚而不产生强烈回声。满足条件 (i) 后，该机制可显著缩小至直径低至 ~ 100 μm的微液滴，以及其他化学-流体动力学活性粒子，例如尺寸低至 ~ 1 μm的Janus胶体（见补充材料）。使用1 mm和500 μm液滴进行的实验验证表明，它们在迷宫交叉口具有很高的决策准确率（图 S4），证实了成功的化学回声定位，与我们的预测一致。我们的分析表明，其他系统，例如气泡驱动微引擎 [55–58]或其他油滴 [59]，，也能有效利用这一导航策略（关于不同设置实现化学回声定位的潜力比较，见补充材料表 S1）。进一步缩小尺度主要受当前设置的限制。但若采用其他设置来实现更小的液滴，进一步缩小尺度在一定范围内应当可行；超过这一范围后，化学-流体动力学信号将被噪声淹没（例如，在较低的微米尺度和纳米尺度）。若要在纳米尺度实现这一机制，则需要采用其他设置，以降低智能体的阻力系数（例如，通过改变介质 [60]），或使用能以更高速率产生化学物质、或具有更强化学敏感性的智能体，以满足上述条件 (i)。展望未来，活性胶体的这些特性可在一定程度上通过表面功能化进行调控。未来，合成生物学方法也可能使人工细胞和其他类生命系统组件能够在更广泛的范围内提高化学物质的释放速率和感知能力。这些进展有望将这一原理拓展至亚微米尺度，并应用于靶向药物递送和微型机器人系统。

IX. 结论

我们的工作提出了一种通用机制，使合成智能体能够在无需任何外部引导的情况下自主做出导航决策。迄今为止，这种能力一直仅见于生物智能体和大型传感器-处理器-执行器系统（如电子机器人）。通过利用自主生成的化学-流体动力学梯度，我们证明了合成智能体（例如液滴游动体）能够利用自身产生的浓度场远程感知障碍物（迷宫中的死胡同），从而自主解决复杂环境中的导航问题，而不依赖任何外部刺激。该机制能够促进液滴在复杂迷宫环境中快速、准确地进行决策，并且随着迷宫规模增大仍表现出良好的可扩展性，为传统的化学源寻源策略提供了一种稳健的替代方案，尤其适用于大型迷宫，因为此时由外部源产生的浓度梯度可能较弱甚至不存在。更为重要的是，由于无需电子传感器-处理器-执行器组件，这种方法非常适合实现智能体的微型化。总之，这项工作为实现未来的自主机器人系统提供了关键要素；这些系统能够自主导航，并旨在满足21世纪社会在医疗保健和环境修复方面的核心需求。未来的工作可以超越本文所采用的有效模型，解析液滴在迷宫中的完整化学-流体动力学，从而深入理解其在迷宫交叉口处的精确动力学。

致谢

A.K.M. 和 B.L. 感谢德国研究联合会（DFG，德国研究基金会）通过合作研究中心“软物质系统的多尺度模拟方法”（TRR 146）项目（项目编号：233630050）提供的经费支持。R.N. 感谢中国国家自然科学基金（项目编号：22102059）的经费支持。

作者贡献

A.K.M.、R.N. 和 L.F. 对本研究的贡献相同。B.L. 发起了该项目。R.N. 和 B.L. 分别设计了实验和模拟。R.N.、L.F. 和 K.F. 开展了实验并分析了数据；A.K.M. 和 C.F. 进行了模拟并分析了数据。A.K.M. 和 R.N. 制作了可视化图表和数据展示。A.K.M.、B.L. 和 R.N. 参与撰写了论文。所有作者均讨论了研究结果。所有作者均批准了论文的最终版本。

附录A：模型与模拟方法

首先，为了缩小参数空间，我们分别将长度、时间和浓度的单位选为 $r_u = \sigma$ （智能体直径）、 $t_u = \sigma^2/D_t$ （智能体的特征平移扩散时间）和 $c_u = k_0/D_t$ （智能体在时间 t_u内产生的化学物质的量），由此得到无量纲运动方程

$$\dot{c}^*(\mathbf{r}^*, t^*) = D^*\nabla^2 c^*(\mathbf{r}^*, t^*) + \delta(\mathbf{r}^* - \mathbf{r}_s^*) \tag{A1}$$

$$M^*\ddot{\mathbf{r}}_p^* + \dot{\mathbf{r}}_p^* = B^*\nabla c^*(\mathbf{r}_p^*, t^*) + \sqrt{2}\,\boldsymbol{\eta}(t^*) \tag{A2}$$

因此，我们的系统由三个无量纲参数表征：约化化学扩散系数$D^* = D_c/D_t$、约化粒子质量 $M^* = mD_t/\gamma_t\sigma^2$以及粒子的约化趋化敏感性$B^* = \beta k_0/\gamma_t D_t^2$。在模拟中，我们对耦合方程 Eq. A1 和 Eq. A2 进行同步迭代数值积分：对 Eq. A1 采用离散空间网格尺寸为 σ 的有限差分格式，对 Eq. A1 采用时间步长为 $dt = 10^{-3}$ 的前向欧拉–丸山格式，对 Eq. A2 采用无通量边界条件（$\nabla c^* = 0$），该条件适用于迷宫所有墙壁处的化学物质。Eq. A1 中的二维函数用强度为 $1/\sigma^2$的方形网格点源近似。Eq. A2 中的梯度采用有限差分格式，在距离粒子坐标$\mathbf{r}_p^*$最近的网格点处计算。为防止智能体与迷宫壁碰撞，我们在智能体与迷宫壁之间施加了一个作用距离极短（截断距离为 σ）的Weeks-Chandler-Anderson势。

附录B：PEI/PSS溶液的制备

我们从国药集团化学试剂有限公司（中国）购得聚乙烯亚胺（PEI，支化，线性分子式：(CH2CH2NH)n，平均分子量 $\approx$ 70000，在H2O中的质量分数为50%）和盐酸。聚（4-苯乙烯磺酸钠）（PSS，平均分子量 $\approx$ 1000000）购自Sigma-Aldrich（美国）。去离子水经ULUP水纯化系统纯化，最低电阻率为18.25 mΩcm^{-1}，并用于所有实验过程。通常，将2.06 g PSS粉末和0.43 g PEI溶液（质量分数为50%）加入8.88 mL去离子水中，在磁力搅拌器上充分混合6 h，得到供后续使用的玉米黄色溶液。

附录 C：迷宫设计

我们采用铣槽法加工了由聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）制成、宽度各异的迷宫通道。通道厚 0.2 cm，深 2.0 cm。所有通道的宽度相同。迷宫包含 17 个交叉口和一个缓冲区，且所有通道的宽度保持一致。其他几何形状的迷宫则通过双组分环氧胶将所需长度的玻璃片粘到一块较大的玻璃底板上制成，并静置四天后再使用。

附录 D：数据、材料和软件可用性

数值模拟代码可在此处获取：https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/4934。补充视频可在此处获取：https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/4972。

---

[1] J. Elgeti、R. G. Winkler 和 G. Gompper，*"Physics of microswimmers—single particle motion and collective behavior: A review"* **78**, 056601 2015 ，Rep.Prog. Phys. ()。

[2] H. P. Zhang, A. Be'er, E.-L. Florin, and H. L. Swinney, *"Collective motion and density fluctuations in bacterial colonies,"* Proc. Natl. Acad. Sci. 107, 13626 (2010). [3] R. Di Leonardo, L. Angelani, D. Dell'Arciprete, G. Ruocco, V. Iebba, S. Schippa, M. P. Conte, F. Mecarini, F. De Angelis, and E. Di Fabrizio, *"Bacterial ratchet motors,"* Proc. Natl. Acad. Sci. 107, 9541 (2010). [4] S. Rombouts, A. Mas, A. Le Gall, J.-B. Fiche, T. Mignot, and M. Nollmann, *cooperative motility behaviors promote efficient predation in bacteria "* **14**, 5588 2023 *Multi-scale dynamic imaging reveals that* , 《自然通讯》 ( ). [5] T. V. Phan, R. Morris, M. E. Black, T. K. Do, K.-C. Lin, K. Nagy, J. C. Sturm, J. Bos, and R. H. Austin, *route finding and collective escape in mazes and fractals "* **10**, 031017 2020 *"Bacterial* , 《物理评论X》 ( ). [6] A. Dussutour, T. Latty, M. Beekman, and S. J. Simpson, *"Amoeboid organism solves complex nutritional challenges,"* Proc. Natl. Acad. Sci. 107, 4607 (2010). [7] M. Kramar and K. Alim, *"Encoding memory in tube diameter hierarchy of living flow network,"* Proc. Natl. Acad. Sci. 118, e2007815118 (2021). [8] L. Tweedy, P. A. Thomason, P. I. Paschke, K. Martin, L. M. Machesky, M. Zagnoni, and R. H. Insall, *corners: Cells solve mazes and respond at a distance using attractant breakdown "* **369**, 9792 2020 *"Seeing around* , Science eaay ( ). [9] T. Nakagaki, H. Yamada, and ´A. T´oth, *"Maze-solving by an amoeboid organism,"* Nature 407, 470 (2000). [10] S. Raikwar, A. Al-Kassem, N. S. Gov, A. J. Pesci, R. Jeanneret, and R. E. Goldstein, *microalgae "* **135**, 228401 2025 *Phototactic decision-making by* , Phys. Rev. Lett. ( ). [11] V. K. Bandari, Y. Nan, D. Karnaushenko, Y. Hong, B. Sun, F. Striggow, D. D. Karnaushenko, C. Becker, M. Faghih, M. Medina-S´anchez, F. Zhu, and O. G. Schmidt, , Nat Electron ( ). [12] M. Mijalkov, A. McDaniel, J. Wehr, and G. Volpe, *wireless power transfer "* **3**, 172 2020 *"A flexible microsystem capable of controlled motion and actuation by* *collective behaviors "* **6**, 011008 2016 *Engineering sensorial delay to control phototaxis and emergent* , 《物理评论X》 ( ). [13] C. L. Smart, T. G. Pearson, Z. Liang, M. X. Lim, M. I. Abdelrahman, F. Monticone, I. Cohen, and P. L. McEuen, *"Magnetically programmed diffractive robotics,"* Science 386, 1031 (2024). [14] M. A. Fernandez-Rodriguez, F. Grillo, L. Alvarez, M. Rathlef, I. Buttinoni, G. Volpe, and L. Isa, *active brownian colloids with space-dependent rotational dynamics "* **11**, 4223 2020 *Feedback-controlled* , 《自然通讯》 ( ). [15] F. A. Lavergne, H. Wendehenne, T. B¨auerle, and C. Bechinger, , Science ( ). [16] X. Wang, P.-C. Chen, K. Kroy, V. Holubec, and F. Cichos, *attractions "* **14**, 56 2023 *"Group formation and cohesion of active particles with* *visual perception–dependent motility "* **364**, 70 2019 *Spontaneous vortex formation by microswimmers with retarded* , 《自然通讯》 ( ). [17] W.-Z. Fang, T. Xiong, O. S. Pak, and L. Zhu, *"Data-driven intelligent manipulation of particles in microfluidics,"* 《先进科学》 10, 2205382 (2023). [18] W. F. Paxton, A. Sen, and T. E. Mallouk, *"Motility of catalytic nanoparticles through self-generated forces,"* Chem. – Eur. J. 11, 6462 (2005). [19] C. Bechinger, R. Di Leonardo, H. L¨owen, C. Reichhardt, G. Volpe, and G. Volpe, , Rev. Mod. Phys. ( ). [20] W. Wang, *"Open questions of chemically powered nano- and micromotors,"* 《美国化学会志》 145, 27185 (2023). [21] R. Golestanian, T. B. Liverpool, and A. Ajdari, *"Designing phoretic micro- and nano-swimmers,"* New J. Phys. 9, 126 (2007). [22] J. R. Howse, R. A. L. Jones, A. J. Ryan, T. Gough, R. Vafabakhsh, and R. Golestanian, *environments "* **88**, 045006 2016 *"Active particles in complex and crowded* *From directed propulsion to random walk "* **99**, 048102 2007 *"Self-motile colloidal particles:* , Phys. Rev. Lett. ( ). [23] S. Jahanshahi, C. Lozano, B. Liebchen, H. L¨owen, and C. Bechinger, *"Realization of a motility-trap for active particles,"* Commun Phys 3, 1 (2020). [24] C. Kaewsaneha, P. Tangboriboonrat, D. Polpanich, M. Eissa, and A. Elaissari, *properties and biomedical applications "* **5**, 1857 2013 *"Janus colloidal particles: Preparation,* , , ACS Appl. Mater. Interfaces ( ). [25] J. S. Oh, S. Lee, S. C. Glotzer, G.-R. Yi, and D. J. Pine, *"Colloidal fibers and rings by cooperative assembly,"* 《自然通讯》 10, 3936 (2019). [26] T. Zhang, D. Lyu, W. Xu, X. Feng, R. Ni, and Y. Wang, *into chiral colloidal clusters "* **14**, 8494 2023 *"Janus particles with tunable patch symmetry and their assembly* , 《自然通讯》 ( ). [27] M. De Corato, X. Arqu´e, T. Patino, M. Arroyo, S. Sanchez, and I. Pagonabarraga, , Phys. Rev. Lett. ( ). [28] A. Ziepke, I. Maryshev, I. S. Aranson, and E. Frey, *ion release: Theory and experiments "* **124**, 108001 2020 *"Self-propulsion of active colloids via* *"Multi-scale organization in communicating active matter,"* 《自然通讯》 13, 6727 (2022). [29] H. Zhang, Z. Li, C. Gao, X. Fan, Y. Pang, T. Li, Z. Wu, H. Xie, and Q. He, *active target delivery "* **6**, 9519 2021 *Dual-responsive biohybrid neurobots for* , Sci. Robot. eaaz ( ). [30] H. Chen, T. Shi, Y. Wang, Z. Liu, F. Liu, H. Zhang, X. Wang, Z. Miao, B. Liu, M. Wan, C. Mao, and J. Wei, *penetration of nanolevel drugs and micrometer-level t cells promoted by nanomotors for cancer immunochemotherapy "* *"Deep* , 《美国化学会志》 143, 12025 (2021). [31] W. Gao and J. Wang, *"The environmental impact of micro/nanomachines: A review,"* ACS Nano 8, 3170 (2014). [32] A. C. H. Tsang, E. Demir, Y. Ding, and O. S. Pak, *"Roads to smart artificial microswimmers "* **2**, , 《先进智能系统》 ( ). [33] C. Jin, C. Kr¨uger, and C. C. Maass, , 美国国家科学院院刊 ( ). 1900137 2020 *"Chemotaxis and autochemotaxis of self-propelling droplet swimmers "* **114**, 5089 2017

[34] T. Gandhi, J. Mac Huang, A. Aubret, Y. Li, S. Ramananarivo, M. Vergassola 和 J. Palacci, *"Decision-making at a t-junction by gradient-sensing microscopic agents "* **5**, 104202 2020 , 《物理评论：流体》 ()。

[35] I. Lagzi、S. Soh、P. J. Wesson、K. P. Browne 和 B. A. Grzybowski, *"Maze solving by chemotactic droplets,"*《美国化学会志》132，1198（2010年）。[36] I.-A. Pavel、G. Salinas、A. Perro 和 A. Kuhn, *"Autonomous chemotactic light-emitting swimmers with trajectories of increasing complexity "* **3**, 2000217 2021 , 《先进智能系统》 ()。

[37] P. Lovass、M. Branicki、R. T´oth、A. Braun、K. Suzuno、D. Ueyama 和 I. Lagzi, *"Maze solving using temperature-induced marangoni flow "* **5**, 48563 2015 , 《RSC进展》 ()。[38] K. Suzuno、D. Ueyama、M. Branicki、R. T´oth、A. Braun 和 I. Lagzi, *"Maze solving using fatty acid chemistry,"*《朗缪尔》30，9251（2014年）。[39] L. Tweedy 和 R. H. Insall, *"Self-generated gradients yield exceptionally robust steering cues,"*《细胞与发育生物学前沿》8（2020年），10.3389/fcell.2020.00133。[40] R. H. Insall、P. Paschke 和 L. Tweedy, *"Steering yourself by the bootstraps: How cells create their own gradients for chemotaxis "* **32**, 585 2022 , 《细胞生物学趋势》 ()。

[41] B. Liebchen 和 H. L¨owen, *"Synthetic chemotaxis and collective behavior in active matter,"*《化学研究述评》51，2982（2018年）。[42] K. Feng、J. C. Ure˜na Marcos、A. K. Mukhopadhyay、R. Niu、Q. Zhao、J. Qu 和 B. Liebchen, *"Self-solidifying active droplets showing memory-induced chirality "* **10**, 2300866 2023 , 《先进科学》 ()。[43] B. V. Hokmabad、R. Dey、M. Jalaal、D. Mohanty、M. Almukambetova、K. A. Baldwin、D. Lohse 和 C. C. Maass, *"Emergence of bimodal motility in active droplets,"*《物理评论X》11，011043（2021年）。[44] J. Deng、M. Molaei、N. G. Chisholm、T. Yao、A. Read 和 K. J. Stebe, *"Active colloids on fluid interfaces,"*《胶体与界面科学观点》61，101629（2022年）。[45] B. Liebchen 和 A. K. Mukhopadhyay, *"Interactions in active colloids,"*《物理学杂志：凝聚态物质》34，083002（2021年）。[46] A. Z¨ottl 和 H. Stark, *"Modeling active colloids: From active brownian particles to hydrodynamic and chemical fields, "*《凝聚态物理年度评论》14，null（2023年）。[47] P. Dwivedi、D. Pillai 和 R. Mangal, *"Self-propelled swimming droplets,"*《胶体与界面科学观点》61，101614（2022年）。[48] C. C. Maass、C. Kr¨uger、S. Herminghaus 和 C. Bahr, *"Swimming droplets,"*《凝聚态物理年度评论》7，171（2016年）。[49] S. Michelin, *"Self-propulsion of chemically active droplets,"*《流体力学年度评论》55，77（2023年）。[50] T.-H. Kim、S. H. Jung 和 K.-H. Cho, *"Investigations into the design principles in the chemotactic behavior of*大肠杆菌 *"*《生物系统》91，171（2008年）。[51] A. M. Reynolds, *"Maze-solving by chemotaxis,"*《物理评论E》81，062901（2010年）。[52] M. M. Salek、F. Carrara、V. Fernandez、J. S. Guasto 和 R. Stocker, *"Bacterial chemotaxis in a microfluidic t-maze reveals strong phenotypic heterogeneity in chemotactic sensitivity "* **10**, 1877 2019 , 《自然通讯》 ()。[53] C. F. Moss 和 A. Surlykke, *"Probing the natural scene by echolocation in bats,"*《行为神经科学前沿》4（2010年），10.3389/fnbeh.2010.00033。[54] A. Adamatzky、A. Chiolerio 和 K. Szaci·lowski, *"Liquid metal droplet solves maze,"*《软物质》16，1455（2020年）。[55] A. A. Solovev、S. Sanchez、M. Pumera、Y. F. Mei 和 O. G. Schmidt, *"Magnetic control of tubular catalytic microbots for the transport assembly and delivery of micro-objects "* **20**, 2430 2010 , , , 《先进功能材料》 ()。[56] S. Sanchez、A. A. Solovev、S. M. Harazim 和 O. G. Schmidt, *"Microbots swimming in the flowing streams of microfluidic channels "* **133**, 701 2011 , 《美国化学会志》 ()。

[57] W. Gao、S. Sattayasamitsathit、J. Orozco 和 J. Wang, *"Highly efficient catalytic microengines: Template electrosynthesis of polyaniline/platinum microtubes "* **133**, 11862 2011 , 《美国化学会志》 ()。

[58] Z. Lin、C. Gao、D. Wang 和 Q. He, *"Bubble-propelled janus gallium/zinc micromotors for the active treatment of bacterial infections "* **60**, 8750 2021 , 《应用化学国际版》 ()。

[59] P. Dwivedi、S. Ashraf、P. Kumar、D. Pillai 和 R. Mangal, *"Chemical interactions in active droplets,"*《化学物理学杂志》163，014901（2025年）。[60] V. Nosenko、F. Luoni、A. Kaouk、M. Rubin-Zuzic 和 H. Thomas, *"Active janus particles in a complex plasma,"*《物理评论研究》2，033226（2020年）。

活性液滴通过化学回声定位实现自动决策

Aritra K. Mukhopadhyay†, [1] Ran Niu†, [2,*] Linhui Fu†, [2] Kai Feng, [2] Christopher Fujta, [1] Qiang Zhao, [2] Jinping Qu, [2] 和 Benno Liebchen[1]
[1] *Institute for Condensed Matter Physics, Technische Universität Darmstadt, Hochschulstraße 8, 64289 Darmstadt, Germany.* [2] *School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China.*（日期：2026年1月1日）

补充信息

理论/模拟部分

Calculation of relevant timescales for chemical echolocation

为了理解在交叉口成功决策的判据，我们现在估算该系统中的相关时间尺度。将迷宫交叉口处智能体产生的化学物质从迷宫死胡同反射回来并再次到达智能体所需的时间，定义为该化学物质的回声时间尺度 t_{echo}。为计算 t_{echo}，我们考虑一个简化的系统：一个化学生成体（位于二维空间中）与一面墙相距 L_d，墙面满足无通量（反射）边界条件。利用镜像法，可以通过求解稳态方程 $D_c\nabla^2 c + k_0\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_s)=0$，得到一个没有墙、但在距离智能体 $2L_d$ 处有另一个相同源的等效系统，其解为 $c(\mathbf{r}) = -\frac{k_0}{2\pi D_c}\ln|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s| + \text{const.}$，化学梯度为$|\nabla c(\mathbf{r})| = \frac{k_0}{2\pi D_c}\left|\frac{1}{\mathbf{r}-\mathbf{r}_s}\right|$。随后，将化学物质扩散距离$2L_d$（从镜像源到智能体）所需的时间 $t_{\text{echo}} \sim \frac{(2L_d)^2}{4D_c} = L_d^2/D_c$ 计算为回声时间尺度。因子 4 来自二维情况下均方位移 $\sim 4D_c t$ 的关系。

智能体的响应时间 t_{response} 定义为：由于回声信号引发的负趋化性，智能体从交叉口当前位置移动到下一个交叉口所需的时间。该时间可计算为 $t_{\text{response}} = \frac{L_d}{v_{\text{signal}}}$，其中 $v_{\text{signal}} = (|\beta|/\gamma_t)|\nabla c|$ 是根据智能体所在位置（即距像电荷 $2L_d$ 的距离，并令 $|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s| = 2L_d$）计算出的趋化速度（由回声化学信号诱导）。由此可得$t_{\text{response}} \sim \frac{\gamma_t D_c L_d^2}{|\beta| k_0}$。智能体的扩散时间尺度定义为：仅由平移扩散导致智能体移动到距离为 L_d 的死胡同壁所需的时间，可估算为 $t_{\text{diffusion}} \sim L_d^2/D_t$。

要通过化学回声定位实现成功的自动决策，参数应满足 $t_{\text{response}} \lesssim t_{\text{echo}} \ll t_{\text{diffusion}}$，由此可得 D_c 的上限和下限：$D_t \ll D_c \lesssim \sqrt{k_0|\beta|/\gamma_t}$。

Signal-to-noise ratio

a. 寻源策略：对于化学源寻策略，粒子因朝迷宫出口处、距离智能体 r 的化学源（信号）发生正趋化而产生的漂移速度，可估算为$v_{\text{signal}} = \frac{\beta}{\gamma_t}|\nabla c| \sim \frac{\beta k_0}{\gamma_t D_c r}$（其中我们设定 $|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s| = r$）。沿浓度梯度（信号）移动智能体一个体长 σ 所需的能量为$E_{\text{signal}} = \gamma_t v_{\text{signal}}\sigma$，而热噪声使智能体移动相同距离所需的能量为 $E_{\text{noise}} = k_B T = \gamma_t D_t$。信噪比（SNR）可定义为这两种特征能量之比，即 $\text{SNR} = \frac{E_{\text{signal}}}{E_{\text{noise}}} \sim \frac{\beta k_0 \sigma}{\gamma_t D_t D_c r}$（或以无量纲单位表示，$\text{SNR} \sim \frac{B^*}{D^* r^*}$）。由于该策略仅在 SNR $>$ 1时有效，这意味着只有当智能体与迷宫出口的距离小于某个阈值时，寻源策略才有用：$r < r_{\text{exit}} \sim \frac{\beta k_0 \sigma}{\gamma_t D_t D_c}$。在图1中用于与化学回声定位策略进行比较的模拟参数下，$r_{\text{exit}} \sim 20$ 毫米。

---

* niuran@hust.edu.cn
† 这些作者对本研究的贡献相同。

b. 回声定位策略：相比之下，对于化学回声定位策略，死胡同发出的回声化学信号所诱导的智能体漂移速度为 $v_{\text{signal}} \sim \frac{\beta k_0}{\gamma_t D_c L_d}$（即，通过设定 $|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s| = 2L_d$，可得距像电荷 $2L_d$；详情参见~~上一~~节）。与寻源策略不同，漂移速度与迷宫出口的距离无关，而取决于到最近墙壁的距离 L_d；在我们的迷宫中，该距离为智能体直径的 ~ 20 倍。在这种情况下，信噪比为 SNR $\sim \frac{\beta k_0 \sigma}{\gamma_t D_t D_c L_d}$（或以无量纲单位表示为 SNR $\sim \frac{B^*}{D^* L_d^*}$），同样与迷宫出口的距离无关。对于我们为~~与图1中~~的化学源寻策略进行比较而选定的系统参数，SNR≈ 10。对于用于数值模拟液滴游动体实验的参数（即图3），SNR≈ 32。这两种情况下的信噪比均大于1，凸显了该策略的高效性。在我们的实验中（即图3，使用尺寸为 ≈ 4 毫米的PSSNa液滴），聚合物释放速率以及相应的趋化漂移速度会随时间衰减。根据实验测量结果（见图S2），我们将这种衰减建模为 $k_s(t) = k_0 e^{-t/\tau_d}$，特征时间尺度为 $\tau_d \approx 750$ 秒。由于信噪比随生成速率线性变化，因此也会以相同方式随时间衰减。该比值从初始值 $SNR \approx 32$开始，在 $t = \tau_d = 750$秒后会降至 $SNR \approx 12$。鉴于液滴的平均出口时间显著更短（≈ 321 秒），在整个导航过程中，信噪比始终远高于阈值（$SNR \gg 1$），因此即使速度不断衰减，仍能确保稳健决策。

Estimation of parameters for comparing chemical echolocation and source-seeking strategies

为了比较这些策略，即对应图1的模拟，我们采用了 [1], 中的实验参数：直径为 $\sigma \approx 100$ μm、持久时间（旋转扩散系数的倒数）为 $\tau_p \approx 20$ s 的充油液滴沿着施加的表面活性剂梯度向上移动，成功走出了迷宫。粒子的平移扩散系数根据球形粒子的有效斯托克斯-爱因斯坦关系估算为 $D_t = \sigma^2/(3\tau_p) \approx 10^{-10}\,\mathrm{m^2\,s^{-1}}$。我们使用 $m = \frac{4}{3}\pi\rho\left(\frac{\sigma}{2}\right)^3 \approx 5 \times 10^{-10}\,\mathrm{kg}$ 估算液滴质量，其中液滴密度为 $\rho = 10^3\ \mathrm{kg\,m^{-3}}$。智能体的平移扩散系数使用$\gamma_t = 6\pi\eta(\sigma/2) \approx 10^{-6}\,\mathrm{kg\,s^{-1}}$估算，其中 $\eta = 10^{-3}\,\mathrm{kg\,m^{-1}\,s^{-1}}$ 为水的动力黏度。

化学物质生成速率估算为 $k_0 = \frac{3N_s|dr_d/dt|r_d^2}{N_A r_{fm}^3} \approx 5 \times 10^{-14}\,\mathrm{mol\,s^{-1}}$，其中 $N_s = 25$ 是每个填充胶束中的表面活性剂单体数，$r_{fm} = 2.5$ nm 是胶束半径，$r_d = \sigma/2$ 是液滴半径，$|dr_d/dt| = 0.01\ \mu\mathrm{m\ s^{-1}}$ 是液滴增溶速率，而 $N_A = 6 \times 10^{23}\,\mathrm{mol^{-1}}$ 是阿伏伽德罗常数（参见 [2]的附录 B.1）。

填充胶束的扩散系数为 $\sim 10^2\ \mu\mathrm{m^2 s^{-1}}$ [2]。然而，由于扩散率较低，对于这类由马兰戈尼应力驱动的液滴和游动体，表面活性剂的平流占主导地位；研究表明，这种平流的影响可用增强扩散系数 [3–5]来建模。遵循 [3], ，我们使用 $D_c = \sigma u_0$估算有效化学扩散系数，其中 u_0 是典型的游动体速度；对于这些活性液滴，该速度大约为每秒一个体长（即直径 σ）。由此得到 $D_c \approx 10^4\ \mu\mathrm{m^2 s^{-1}}$。

利用这些数值，我们估算长度、时间和浓度单位分别为 $r_u \approx 10^{-4}$ m、$t_u \approx 10^2$ s和$c_u \approx 10^{-4}\,\mathrm{mol\,m^{-2}}$，以及无量纲参数：$D^* \approx 10^2$、$M^* \approx 10^{-5}$。最后，为了估算 β（或等价地，无量纲参数 B^*），我们设计了一个几何形状和尺寸与 [1], 相同的迷宫，并在出口处放置一个源进行模拟，使液滴的出口时间（~ 5 min）与这些液滴的出口时间相匹配，由此得到$B^* \approx 2 \times 10^4$。

对于图1所有面板对应的模拟，我们忽略了运动方程中的惯性项，因为 $M^* \approx 10^{-5}$，并采用了参数值 $B^* = 2 \times 10^4$ 和 $D^* = 10^2$。

Estimation of parameters for comparison between simulations and experiments

为了估算液滴游动体的持久时间，[6], 我们通过在大型水槽中进行实验，记录了13个液滴随时间变化的均方位移（MSD）（图S1）。水槽尺寸为110 cm × 60 cm。液滴从水槽中央释放，在到达边界之前，由 GoPro 摄像机以每秒30帧的速度记录其运动。对于自推进速度为 v_0的活性液滴，我们预计其在中间时间尺度（$\sim 2v_0^2t^2$）呈现弹道动力学，即均方位移$t < \tau_p$，并在 $t > \tau_p$ 时呈现活性扩散，其中均方位移$\sim 2v_0^2\tau_p t$ [7]。我们观察到液滴也呈现相同的行为，并通过拟合均方位移随时间的变化，估算每条轨迹的持久时间（其中一条轨迹的拟合示例见图S1）。根据所有轨迹估算出的平均持久时间为 $\tau_p = 3.41 \pm 0.03$ s。

与直径为 $\sigma = 4$毫米的 [1], 充油液滴相比，我们的液滴更大。使用上一节所述的表达式，我们估算得到 $D_t \approx 10^{-6}$ 米^2 秒$^{-1}$、$m \approx 5 \times 10^{-5}$ 千克、$\gamma_t \approx 4 \times 10^{-5}$ 千克秒$^{-1}$。

生成速率为 $k_0 \approx 10^{-11}$ 摩尔秒$^{-1}$ (见 [6]的补充材料)。我们通过考虑一个指数衰减的生成项来描述聚合物生成的衰减： $k_s(t) = k_0 e^{-t/\tau_d}$，并根据实验估算出衰减时间尺度 $\tau_d \approx 750$ 秒（见图S2）。使用上一节中有效化学扩散系数的表达式，我们估算得到 $D_c = \sigma u_0 \approx 2 \times 10^8$ 微米^2 秒$^{-1}$，其中游动体速度 u_0 为体长的15倍，即直径的15倍 σ [6] (这是由于我们的液滴具有较高的佩克莱 数 $\approx 10^7$ 所致）。

根据这些数值，我们估算出长度、时间和浓度单位分别为 $r_u \approx 4 \times 10^{-3}$ m、 $t_u \approx 10$ s 和$c_u \approx 6 \times 10^{-7}$ mol m^{-2}，并得到以下无量纲参数： $D^* = 2 \times 10^2$、 $M^* = 10^{-1}$、 $\tau^* = \tau_d D_t/\sigma^2 = 7 \times 10^1$ 和 $B^* = -8 \times 10^4$ （根据与实验中的平均出口时间和成功率最为接近的数值估算；参见正文图 3e）。

Calculation of the exit time from a point in the maze

对于每条轨迹，我们使用一致代价搜索（UCS） [8] 寻路算法计算轨迹上每个点到固定出口点的距离。该算法是 Dijkstra 算法的一种变体，采用优先队列按距离递增的顺序探索路径。对于轨迹上的每个点，该算法确定到出口的最短路径（及其长度，即距离），并记录从该点到达出口所需的时间。由此，我们获得了一组出口时间，每个时间对应一个点到出口的距离。为了确定给定距离对应的平均出口时间，我们首先汇总所有轨迹中与该距离对应的出口时间，然后计算这些汇总出口时间的平均值和标准差。

Calculation of success fraction in simulations

成功率（图3e）量化了智能体轨迹与“理想”最短路径跟随轨迹的接近程度。为计算这一指标，我们首先使用一致代价搜索算法，在迷宫中固定的起点和出口点之间生成这条理想轨迹。接下来，我们要量化智能体轨迹与理想轨迹的重合程度。为此，我们计算智能体轨迹上每个点到理想轨迹上最近点的欧几里得距离。如果距离在预先设定的容差值范围内（此处为4个智能体直径），我们就将智能体在该点花费的时间归为“成功”；否则归为“失败”（见图S3）。将总“成功”时间（即给定轨迹上所有点对应时间的总和）除以该轨迹的总出口时间，即可得到该轨迹的成功率。

Chemical echolocation in different experimental setups

为评估化学回声定位机制在本研究所用特定液滴系统以外的普遍适用性，我们分析了理论模型推导出的操作判据。如前所述，有效的回声定位要求智能体的响应时间（t_{response}）短于回声时间尺度（t_{echo}）。由此得到条件 $D_c \leq \sqrt{k_0|\beta|/\gamma_t}$。为了便于与现有文献比较（其中内在趋化敏感性 β 很少被量化），我们用较易观测的趋化平流速度（通常与自推进速度相近）来表示这一判据 u_0。我们指出，趋化平流速度可通过 $u_0 \approx \frac{|\beta|}{\gamma_t}|\nabla c|$ 估算，并代入前文推导出的特征自生成梯度（$|\nabla c| \approx \frac{k_0}{D_c \sigma}$），可得标度关系 $u_0 \approx \frac{|\beta| k_0}{\gamma_t D_c \sigma}$。因此，可行性条件可改写为内禀裸化学扩散率（$D_c$）与智能体平流强度（$\sigma u_0$）之间的比较： $D_c \lesssim \sigma u_0$。从物理上看，这代表一个佩克莱数条件（′） （── $Pe = \sigma u_0/D_c \gtrsim 1$）。这意味着，要在“回声”消散之前探测到它，智能体自生成的平流输运必须与信号化学物质的分子扩散相当或占据主导地位。表I 根据这些判据，列出了几种不同设置下化学回声定位的可行性。

Downscaling

对于非常小的主体尺寸（即智能体直径较小 σ）的智能体，其动力学处于过阻尼状态；因此，控制其动力学的相关无量纲参数只有两个：约化化学扩散系数 $D^* = D_c/D_t$和约化趋化敏感性 $B^* = \beta k_0/\gamma_t D_t^2$。平移扩散系数 $D_t \sim \sigma^{-1}$、阻力系数$\gamma_t \sim \sigma$以及产生强度 $k_0 \sim \sigma^2$ （即与智能体的表面积成正比）。趋化

表 I. 不同设置下化学回声定位的可行性。比较裸化学扩散率（D_c）与平流强度（σu_0）。当 $\sigma u_0 \gtrsim D_c$ 时，回声定位可行（即处于高 Péclet 数区域）。

设置	**尺寸** (σ) $[\mathrm{m}]$	**速度** (u_0) $[\mathrm{m\ s^{-1}}]$	**平流强度**(σu_0) $[\mathrm{m^2\ s^{-1}}]$	**裸扩散率**(D_c) $[\mathrm{m^2\ s^{-1}}]$	**预期可行性** $(\sigma u_0 \gtrsim D_c)$
PSS 液滴 [本研究]	$\sim 4\times10^{-3}$	$\sim 10^{-2}$	$\sim 4\times10^{-5}$	$\sim 10^{-11}$ **(聚合物)**	非常高
水包油液滴 [9]	$\sim 10^{-4}$	$\sim 10^{-4}$	$\sim 10^{-8}$	$\sim 10^{-10}$ **(胶束)**	非常高
卷曲 Ti/Fe/Pt 微管 [10, 11]	$\sim 5\times10^{-5}$	$\sim 2\times10^{-4}$	$\sim 1\times10^{-8}$	$\sim 10^{-9}$ **(已溶解 O_2)**	High
聚苯胺/Pt 微管 [12]	$\sim 8\times10^{-6}$	$\sim 3\times10^{-3}$	$\sim 2\times10^{-8}$	$\sim 10^{-9}$ **(已溶解 O_2)**	High
镓/锌气泡马达 [13]	$\sim 9\times10^{-6}$	$\sim 4\times10^{-4}$	$\sim 4\times10^{-9}$	$\sim 4\times10^{-9}$ （溶解的 H_2）	中等
Janus 粒子 [14–16]	$\sim 0.5-10\times10^{-6}$	$\sim 2-40\times10^{-6}$	$\sim 2\times10^{-11}$	$\sim 10^{-10}-10^{-9}$ （H_2O_2）	中等

敏感性参数对于自扩散泳Janus胶体 [17], 按 $\beta \sim \sigma$ 缩放，而对于液滴 [18]按 $\beta \sim \sigma^2$ 缩放。因此，无量纲系数随尺寸的变化为 $D^* \sim \sigma$，以及 $B^* \sim \sigma^4$ （对于自扩散泳Janus胶体）或 $B^* \sim \sigma^5$（对于液滴）。要实现成功的化学回声定位，无量纲单位下应满足 $D_t \ll D_c \lesssim \sqrt{k_0|\beta|/\gamma_t}$ 或 $1 \ll D^* \lesssim \sqrt{B^*}$。在主文图3所用的其他参数值保持不变时，尺寸为 $\sigma \sim 10^2$ μm的液滴满足这些判据。请注意，对于我们的液滴，化学佩克莱数（Pe $\approx 10^7$）远高于启动运动所需的自发对称性破缺阈值，这与上述扩散率判据一致。我们对尺寸为1 mm和500 μm的较小液滴进行了实验，这两种液滴在大多数迷宫交叉口都做出了正确决策（见图S4），证明其成功实现了化学回声定位。尺寸为1 μm、典型速度为10 μm $\mathrm{s^{-1}}$ （以及$D_c \sim 10^2\,\mu\mathrm{m^2\,s^{-1}}$、 $D_t \sim 10^{-1}\,\mu\mathrm{m^2 s^{-1}}$ [7]）的自扩散泳Janus胶体也满足相同判据，表明化学回声定位在微尺度下仍能成功实现。若要使化学-流体动力学回声定位在更小的液滴和活性胶体中有效发挥作用，就必须通过改变介质来降低智能体的阻力系数，或采用化学物质生成速率高得多、或化学敏感性更强的智能体。前一种方法的一个例子是 $1-10$ μm的Janus胶体在氩气中运动，主要依靠光泳机制；其阻力系数 γ_t 可低至 10^{-12} kg $\mathrm{s^{-1}}$ [19], 比自扩散泳胶体和液滴游动体低四到六个数量级。在一定程度上，可以通过表面功能化或使用不同类型的智能体来调节化学物质生成速率和化学敏感性；未来也许可以采用基于人工细胞和其他类生命系统组件的智能体。

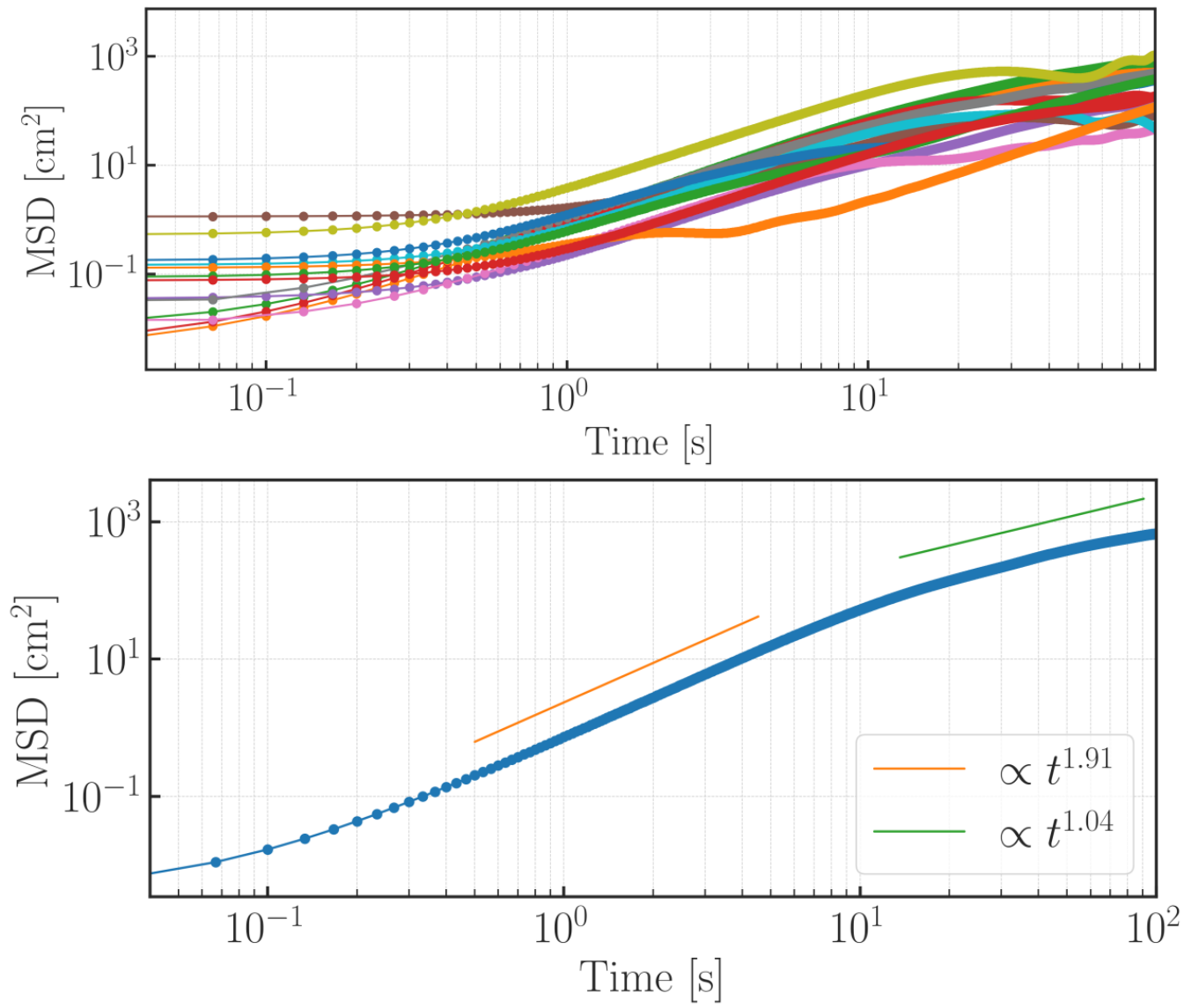

图 S1。（上图）不同液滴轨迹的均方位移（MSD）。（下图）对一条代表性轨迹进行拟合，显示其中间阶段的弹道动力学和长时间尺度下的扩散动力学。

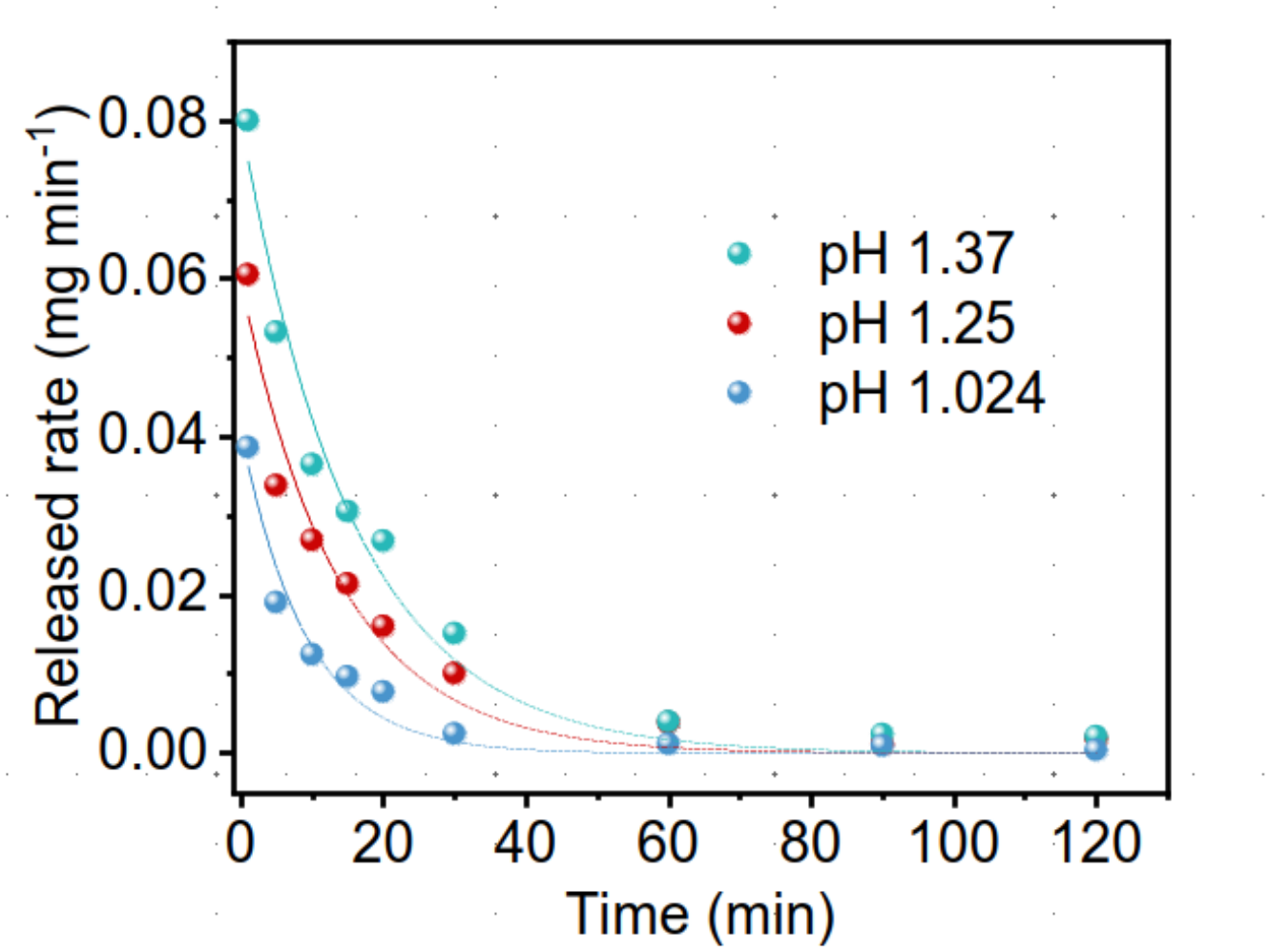

图 S2. 不同 pH值下液滴释放 PSS 的释放速率随时间的变化。释放速率拟合为 ae^{-bt} （释放质量拟合为 $\int_0^t ae^{-bt'}dt'$），实线表示拟合曲线。拟合结果为：a=0.07987 mg min^{-1}；b=0.0638 min^{-1}（pH值 1.37），a=0.05954 mg min^{-1}；b=0.0727 min^{-1}（pH值 1.25），a=0.04061 mg min^{-1}；b=0.11048 min^{-1}（pH值 1.024）。

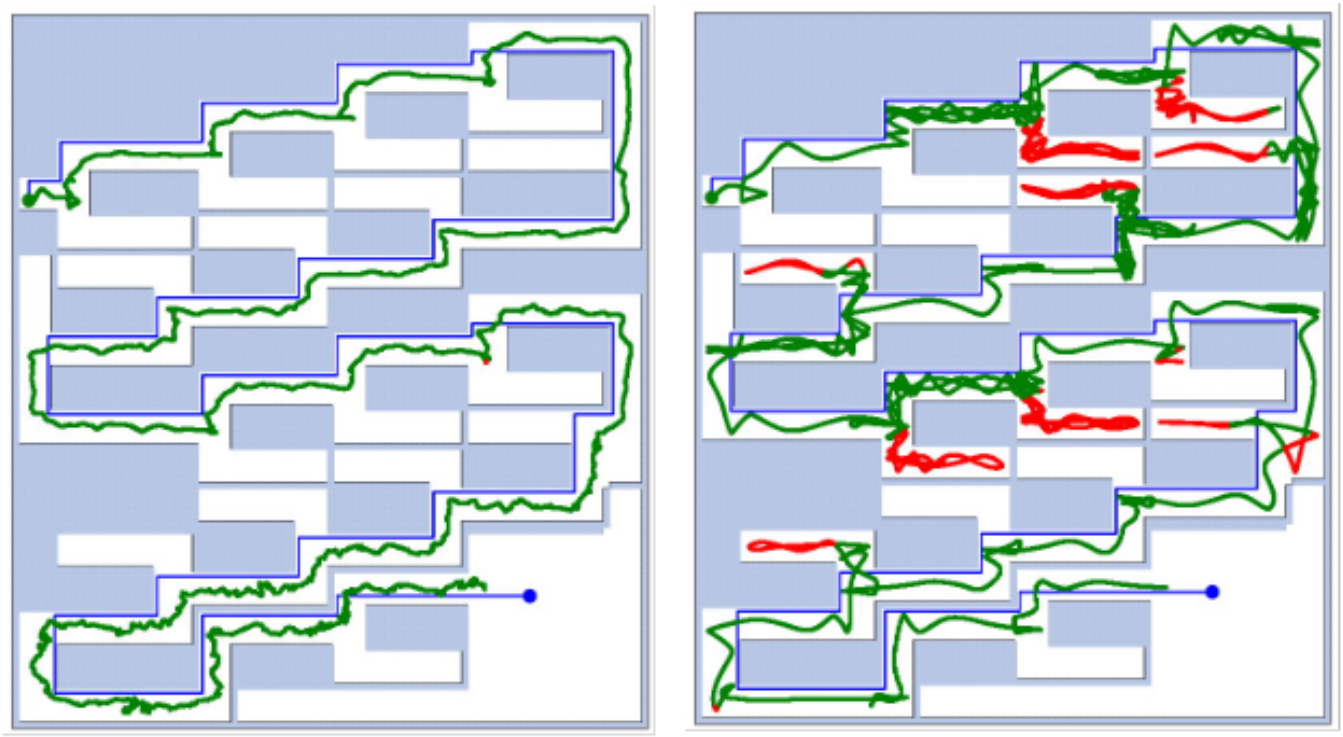

图 S3。（左图）成功率较高的轨迹，其中模拟智能体的路径（绿色线段）紧密跟随理想的一致代价搜索（UCS）轨迹（蓝线）。（右图）成功率较低的轨迹，显示出相对于理想路径更大的偏差；红色线段表示超出 4 个智能体直径距离容差的点。

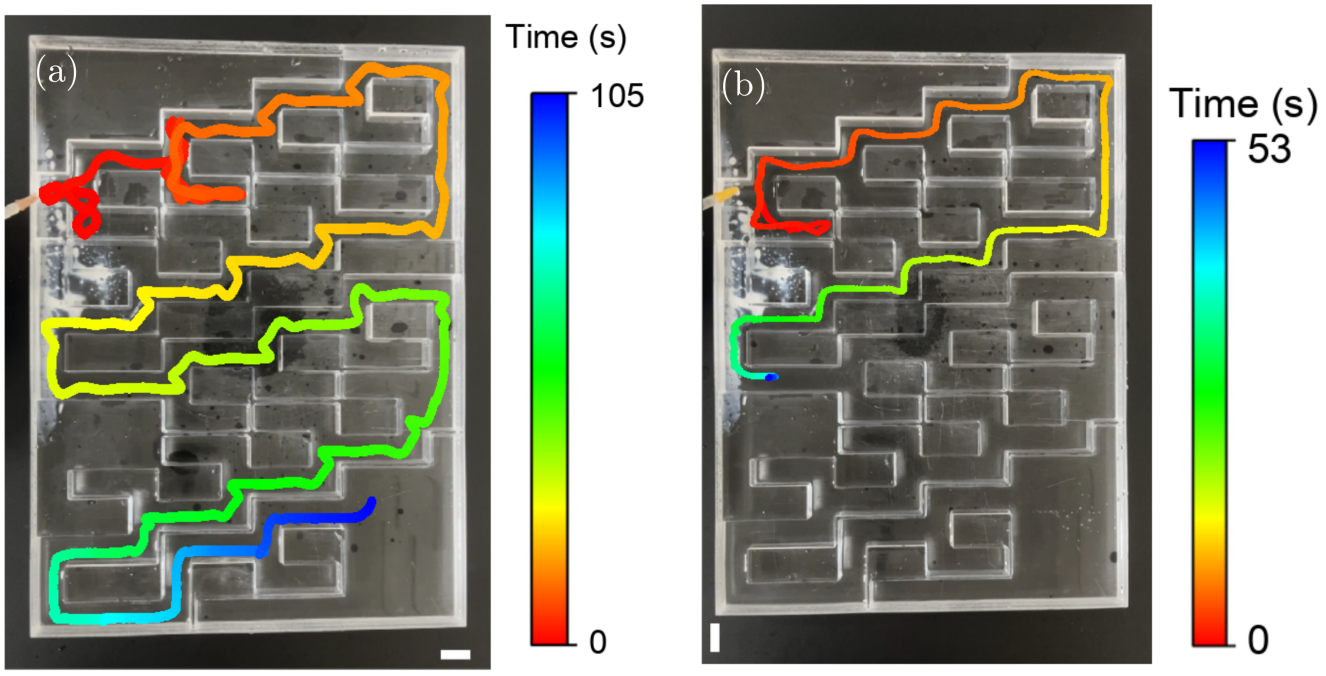

图 S4. 实验中成功在迷宫交叉口做出决策的小液滴的代表性轨迹，直径分别为 (a) 1 mm 和 (b) 500 µm。较小的 500 µm 液滴会耗尽燃料（PSS），因此在到达出口前停止。

实验部分

Recording droplet swimmer trajectories

实验中，我们首先向迷宫（长度：6.0 cm；宽度：2.0 cm；高度：3.0 cm）中注满 pH值为 1.25 的酸性溶液。将一滴 PEI/PSS溶液从迷宫的一个入口处滴下，滴落高度固定为高于气水界面 $\approx$ 1cm。为控制液滴大小，使用了不同直径的针头：直径为 500µm 的液滴使用 34G 针头；直径为 1 mm 的液滴使用 34G 针头；直径为 4 mm 的液滴使用移液管。随后，液滴在气水界面上开始自推进，同时从外缘向内缓慢固化。使用数码相机以 30 Hz 的帧率录制视频，并通过自编 Python 脚本提取液滴周长，获取每一帧中液滴的位置，据此计算液滴游动体的轨迹和速度。

Statistical analysis

从迷宫入口移动到缓冲区，即完成一次实验。为确保结果的可靠性和一致性，SF 和 TTE 的数据以多次重复实验测量的平均值“均值 $\pm$标准误”表示（n $= 60$）。标准误通过将标准差除以样本量的平方根计算得出。

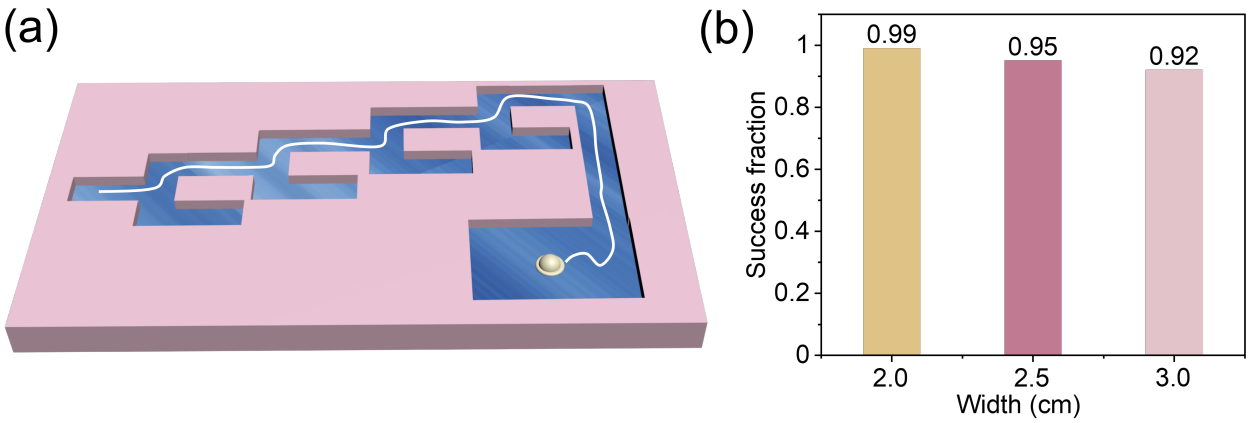

图 S5。(a) 示　意一个小　　型迷宫，其中有四个交叉口。(b) 迷宫宽度对　成功率的影响　　e.

Experiments with smaller maze

我们还使用一个包含 4 个交叉口和一个缓冲区的较小迷宫进行了实验（图 S5），以优化成功率较高的迷宫几何结构。所有通道的长度均相同。

Experiments with varying starting positions of droplets

我们进行了一系列实验，将液滴放置在迷宫内不同的初始位置（图S6(a-e)）。所有情况下，液滴都成功导航至出口。起点距离迷宫入口不太远时，导航表现更为可靠。

Experiments with multiple droplets

我们进行了多液滴实验，将多个液滴同时放置在迷宫内不同的初始位置（图S6f）。液滴通常都能成功导航至出口，展现出稳健的决策能力，但偶尔会在交叉口转错方向。未来需要进一步研究这类多液滴系统中的潜在相互作用，因为这些相互作用会影响其集体导航性能。

Measurement of flow fields generated by droplet

采用粒子图像测速（PIV）对液滴在迷宫中产生的流场进行定量分析。将炭黑纳米粉末添加到气水界面上，使其均匀分布，然后将液滴浸入酸性水中。以 30 Hz 的帧率录制视频，并据此分析流场。如（图S7）所示，死胡同产生的回流回波推动液滴移向开放端。这进一步证实了化学-流体动力学回声定位机制。

迷宫几何形状对导航性能的影响

盲臂长度的影响。为测试回声定位机制的极限，我们在一系列 Y形交叉口中模拟智能体，并系统地增加死胡同臂（L_d）相对于开放臂（L_o）的长度。如图S9a 所示，当死臂较短（~ 1.0）时，成功率最高（$L_d/L_o < 0.5$）。此时，化学“回声”会迅速在死臂中积累，并在交叉口出口方向形成强烈的排斥梯度。随着死臂变长，信号反射回交叉口所需的时间增加，

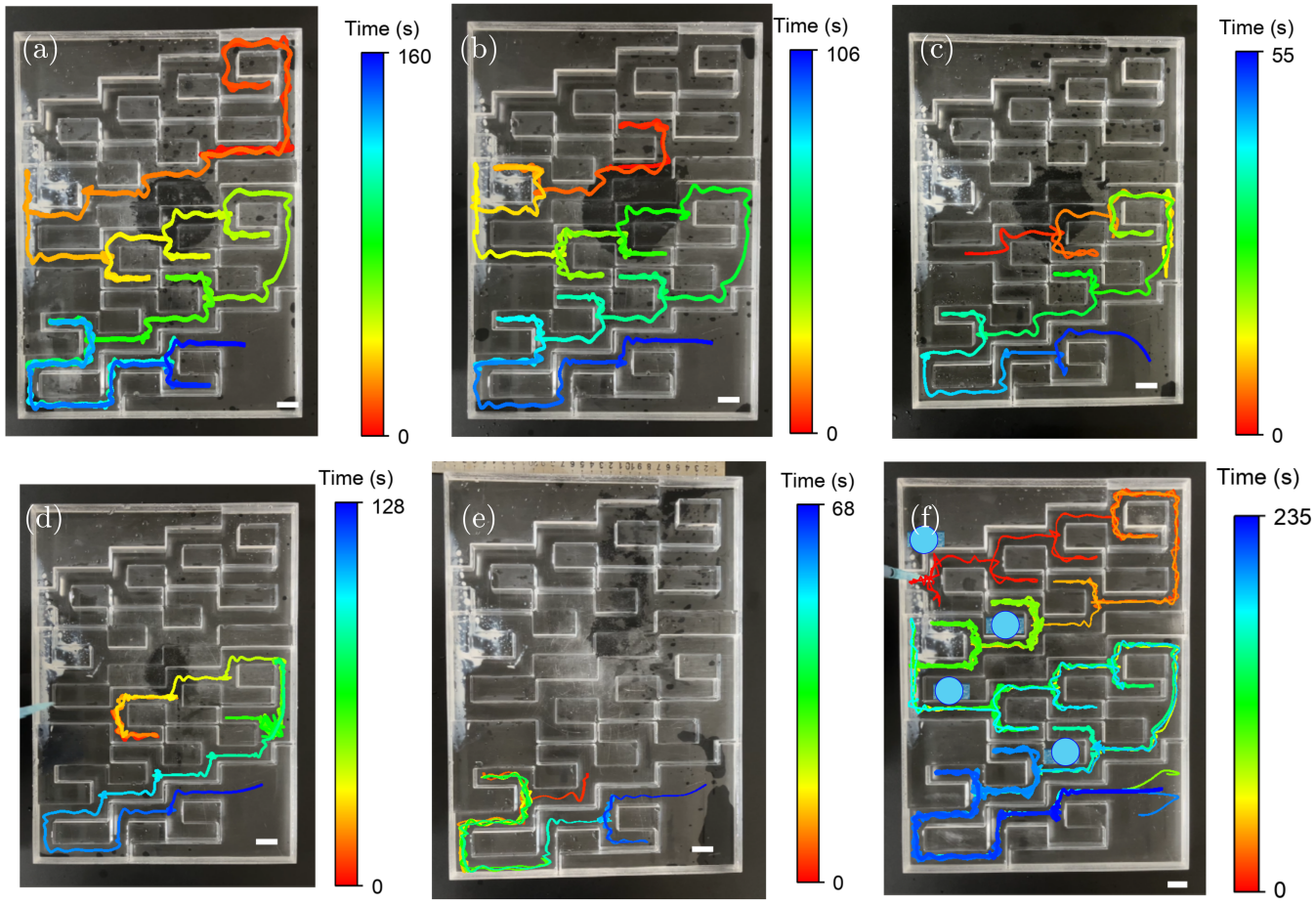

图 S6。（a–e）单个液滴从迷宫内不同起点出发的各条实验轨迹，凸显了液滴在交叉口始终能够做出一致的决策并成功避开死胡同。（f）四个液滴同时从不同位置（以青色填充圆标示）进入迷宫后到达出口的叠加轨迹。

因此，梯度的陡峭程度也随之减弱。由此，平均成功率有所下降，但仍保持较高水平（≈ 0.6），即使死臂长度达到开放路径的两倍（$L_d/L_o = 2.0$）也是如此。这表明，虽然较短的分支有助于加快决策，但回声定位机制在较长的死胡同中仍然有效。我们还通过调整迷宫尺寸，研究了迷宫内可供化学物质积累的空间对机制的影响，这实际上增大了相对于智能体的死臂面积（图S9b）。我们发现，即使死臂面积接近智能体的 2000 倍，决策可靠性（成功率 $\gtrsim 0.65$）仍能维持，这表明该机制并不局限于死臂非常小的几何结构。

我们通过在$\sigma = 4$、2、和 0.5 毫米之间改变液滴直径，在固定迷宫几何结构（通道宽度为 $W = 2$ 毫米）中对这些发现进行了实验补充。由此，我们有效地改变了死臂面积与智能体面积之比（图 S10a）。对于最大的液滴（$\sigma = 4$ 毫米），相对死臂体积较小，有利于化学物质迅速积聚并形成强烈的排斥性回声，因此成功率较高（$\approx 90\%$，见图 S10b）。相反，对于最小的液滴（$\sigma = 500$ μ米），死臂所占的相对体积显著增大（类似于模拟中的大面积情形）。尽管可用空间增大、信号积累延迟，液滴仍能成功穿过迷宫，成功率高达 $\approx 70\%$，从实验上证实，即使相对死胡同尺寸较大，该机制依然有效。我们还通过观察液滴穿行于一座包含多个死胡同的迷宫，进一步验证了这些发现；这些死胡同的长度是开放路径的 1.5–2.0 倍（图 S10c）。在十次平行试验中，液滴始终能够找到正确路径，成功率达到 100%，证实了即使面对较长的死支路，回声定位机制依然稳健。

迷宫通道宽度的影响。我们通过观察不同直径（$\sigma = 0.5$，2，4 毫米）的液滴在不同通道宽度（W）的迷宫中的轨迹，实验研究了通道宽度对迷宫的作用。这

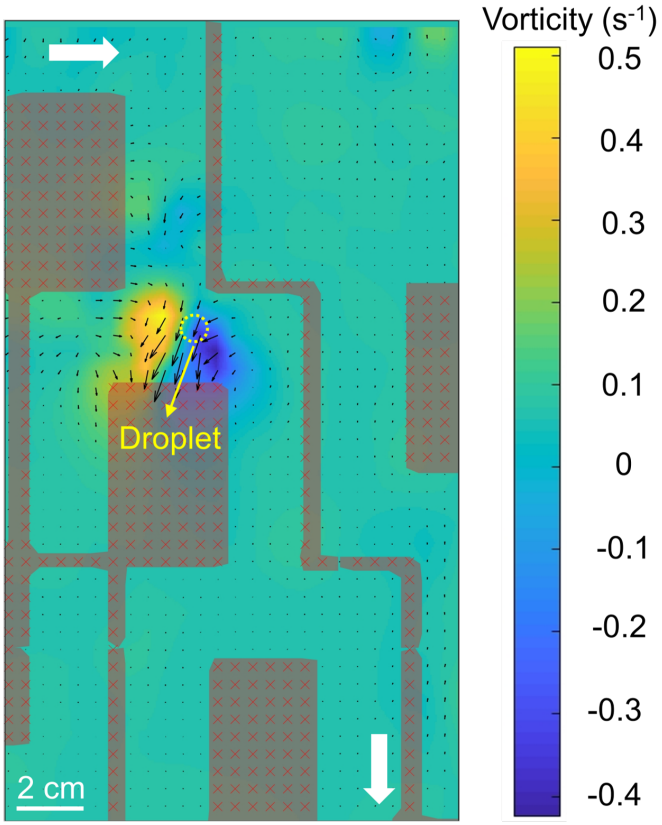

图 S7. 交叉口处液滴（黄色边框圆盘）产生的流场（黑色箭头），显示了化学-流体动力学回声的特征。灰色区域为墙壁。

使宽径比（W/σ）范围约为 5 至 50。代表性轨迹如图 S11 所示。当宽径比小于 50 时，液滴能够在迷宫中导航。在 $W/\sigma \gtrsim 50$，液滴会在通道内进行手性运动，这与我们此前对培养皿中液滴的研究结果一致 [6]，这极大地阻碍了其迷宫求解。

电影列表

1.**利用化学回声定位进行自动决策以走出迷宫**。图1a的动画版本，展示了智能体在没有任何外部源的情况下，利用化学回声定位进行自动决策以走出迷宫的模拟轨迹。2.**利用化学源寻策略走出迷宫**。图1b的动画版本，展示了智能体通过感知迷宫出口处外部源产生的化学梯度来走出迷宫的模拟轨迹。3. **液滴游动体自动决策的实验实现**。液滴游动体利用化学回声定位走出迷宫的实验轨迹（对应图3a）。4.**多个液滴游动体的集体导航**。同时释放到迷宫中的多个液滴的实验轨迹。

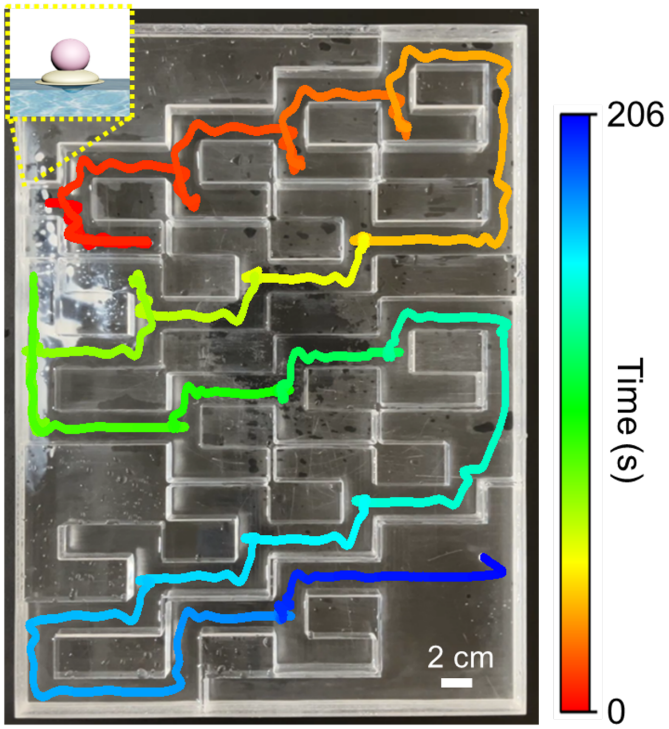

图 S8. 液滴（直径 4 mm）成功将直径 3 mm 的大块泡沫运送至迷宫出口的典型轨迹。

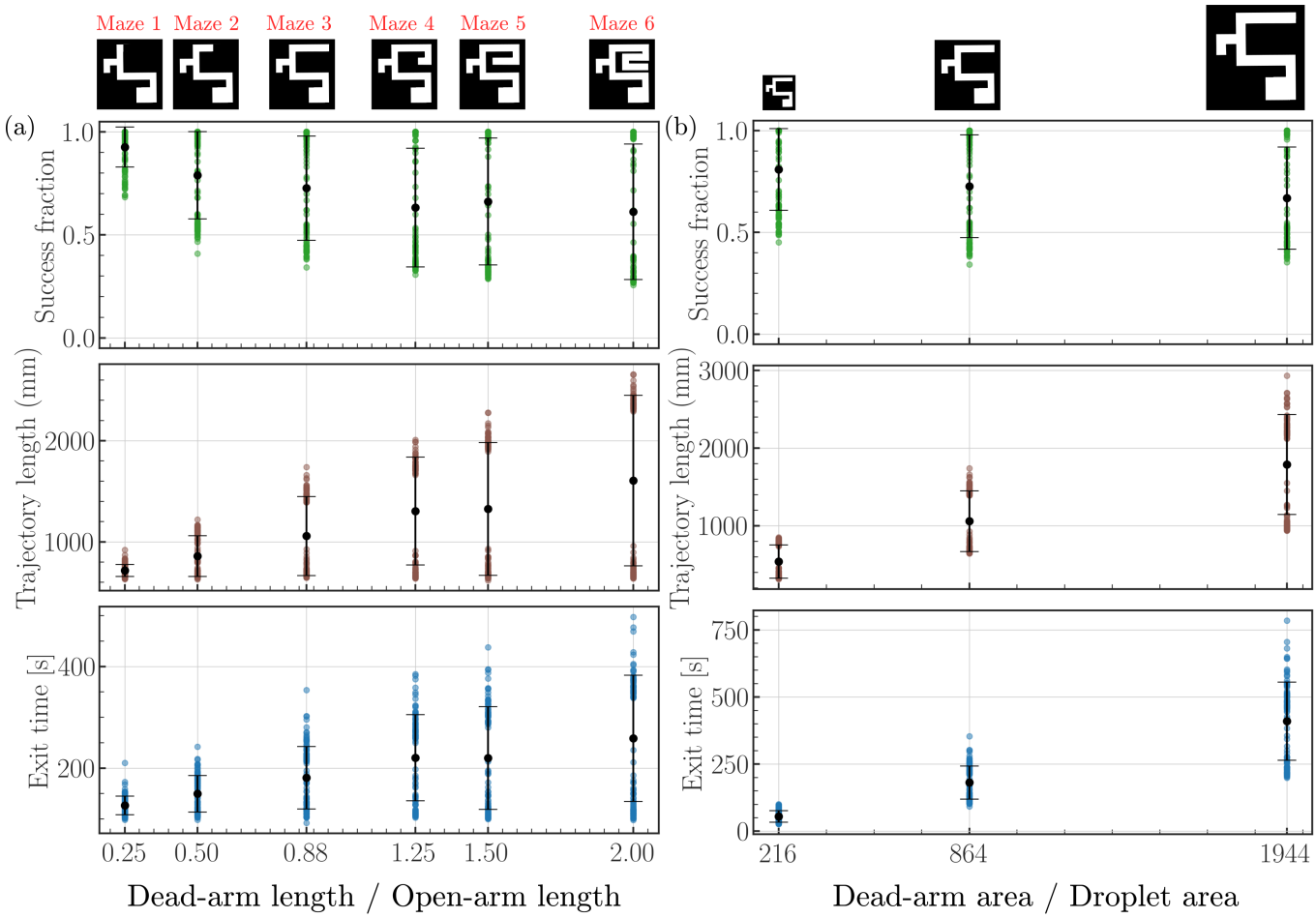

图 S9。**盲臂长度和面积对化学回声定位的影响**。（a）成功率、轨迹长度和出口时间随死端长度与开放臂长度之比的变化。数据对应于迷宫 1–6 中的模拟（上图），其中死端长度逐步增加。（b）迷宫 3 按 1、2 和 3 倍缩放后的相同性能指标（分别表示相对于智能体的迷宫尺寸增加 1 倍、2 倍和 3 倍），以死臂面积与液滴尺寸（面积）之比为函数绘制。黑点表示带标准差误差棒的平均值；彩色点表示各次模拟运行。

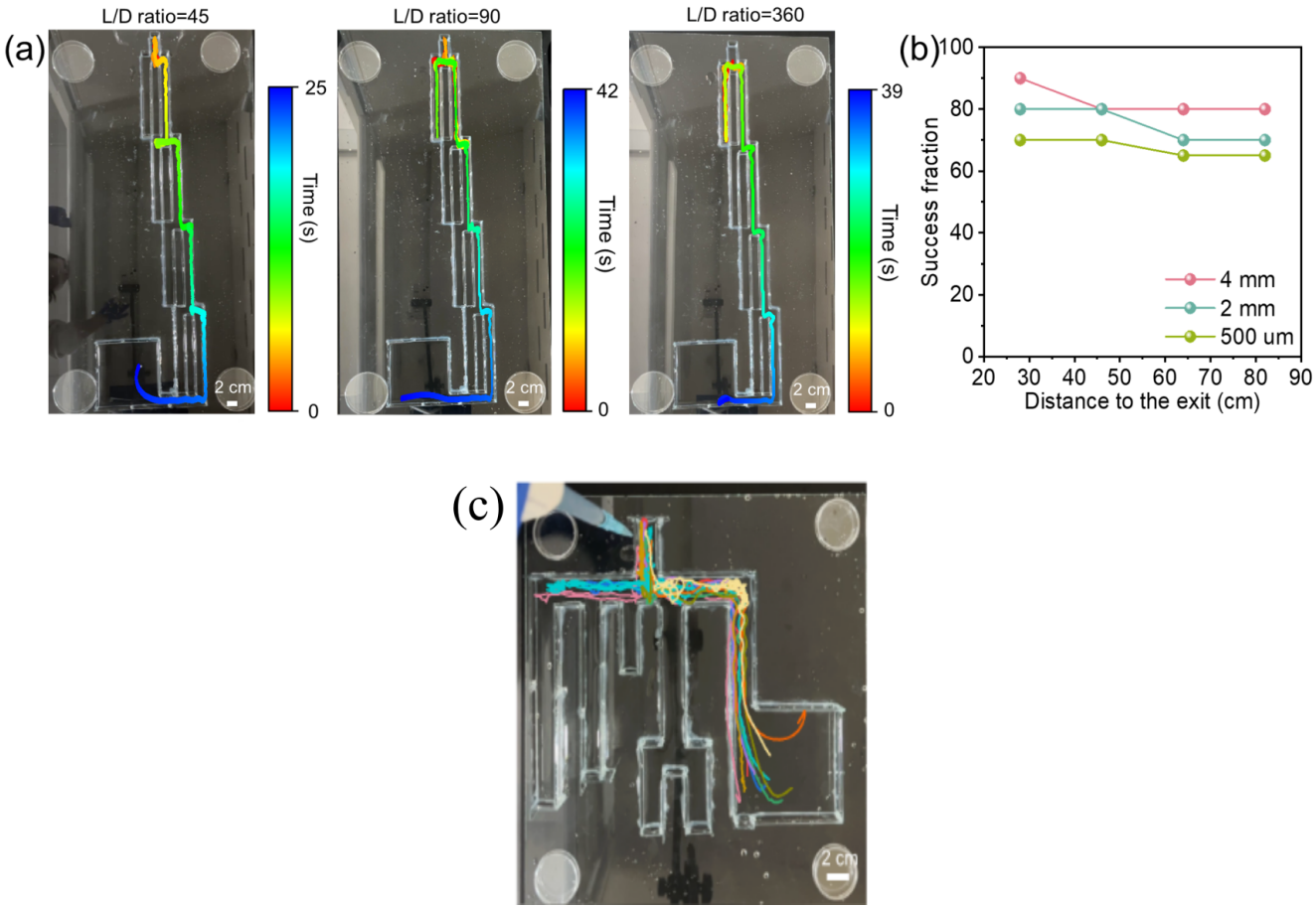

图 S10。（a）实验中不同直径液滴的典型轨迹（从左到右）：在长度为 18 cm、宽度为 2 mm 的迷宫中，直径分别为 4 mm、2 mm 和 0.5 mm。（b）不同直径液滴的成功率随到出口的距离变化的情况。（c）液滴穿行于包含多个不同长度死胡同的迷宫时的轨迹。

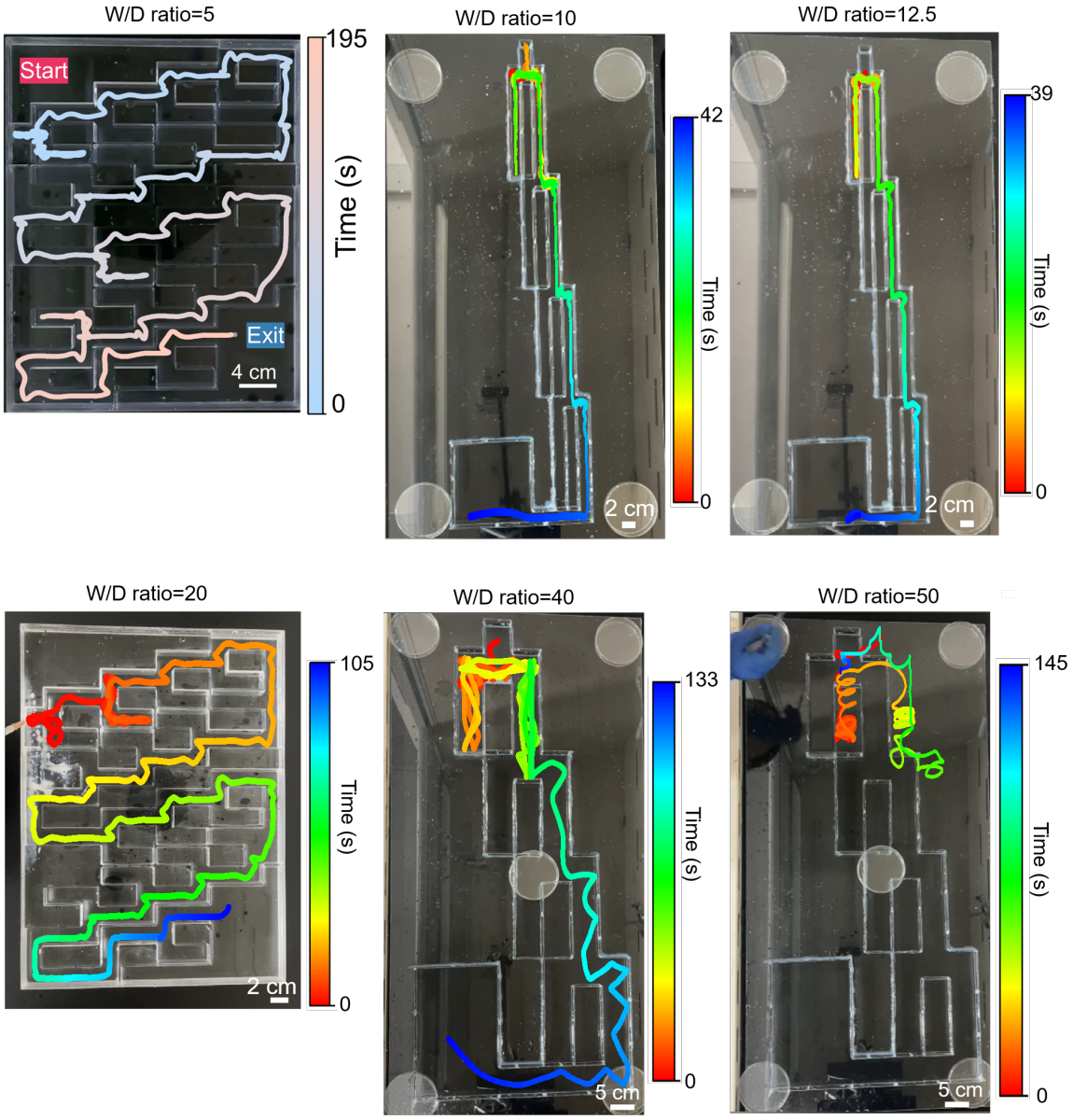

图 S11. 不同直径液滴的典型轨迹（从左至右），来自不同宽度迷宫中的实验：4 mm、2 mm 和 0.5 mm。

[1] C. Jin, C. Kr ¨ *“Chemotaxis and autochemotaxis of self-propelling droplet swimmers ”* **114**, uger 和 C. C. Maass, 《美国国家科学院院刊》（）。[2] B. V. Hokmabad、R. Dey、M. Jalaal、D. Mohanty、M. Almukambetova、K. A. Baldwin、D. Lohse 和 C. C. Maass, *“Emergence of bimodal motility in active droplets”*, 《物理评论X》11，011043（2021年）。[3] T. Bickel, *“Spreading dynamics of reactive surfactants driven by marangoni convection”*, 《软物质》15，3644（2019年）。[4] H. Kitahata 和 N. Yoshinaga, *“Effective diffusion coefficient including the marangoni effect”*, 《化学物理学杂志》148，134906（2018年）。[5] C. Gouiller、C. Ybert、C. Cottin-Bizonne、F. Raynal、M. Bourgoin 和 R. Volk, *“Two-dimensional numerical model of marangoni surfers: From single swimmer to crystallization ”* **104**, 064608 2021 , 《物理评论E》（）。[6] K. Feng、J. C. Ure ˜ *“Self-solidifying active* na Marcos、A. K. Mukhopadhyay、R. Niu、Q. Zhao、J. Qu 和 B. Liebchen, *droplets showing memory-induced chirality ”* **10**, 2300866 2023 《先进科学》（）。[7] C. Bechinger、R. Di Leonardo、H. L ¨ *“Active particles in complex and crowded* owen、C. Reichhardt、G. Volpe 和 G. Volpe, *environments ”* **88**, 045006 2016 《现代物理评论》（）。[8] A. Felner, *“Position paper: Dijkstra’s algorithm versus uniform cost search or a case against dijkstra’s algorithm”*, 《国际组合搜索研讨会论文集》2，47（2011年）。[9] P. Dwivedi、S. Ashraf、P. Kumar、D. Pillai 和 R. Mangal, *“Chemical interactions in active droplets”*, 《化学物理学杂志》163，014901（2025年）。[10] A. A. Solovev、S. Sanchez、M. Pumera、Y. F. Mei 和 O. G. Schmidt, *“Magnetic control of tubular catalytic microbots for the transport assembly and delivery of micro-objects ”* **20**, 2430 2010 , 《先进功能材料》（）。[11] S. Sanchez、A. A. Solovev、S. M. Harazim 和 O. G. Schmidt, *“Microbots swimming in the flowing streams of microfluidic channels ”* **133**, 701 2011 , 《美国化学会志》（）。[12] W. Gao、S. Sattayasamitsathit、J. Orozco 和 J. Wang, *“Highly efficient catalytic microengines: Template electrosynthesis of polyaniline/platinum microtubes ”* **133**, 11862 2011 , 《美国化学会志》（）。[13] Z. Lin、C. Gao、D. Wang 和 Q. He, *“Bubble-propelled janus gallium/zinc micromotors for the active treatment of bacterial infections ”* **60**, 8750 2021 , 《应用化学国际版》（）。[14] J. R. Howse、R. A. L. Jones、A. J. Ryan、T. Gough、R. Vafabakhsh 和 R. Golestanian, *“Self-motile colloidal particles: From directed propulsion to random walk ”* **99**, 048102 2007 , 《物理评论快报》（）。[15] S. Ebbens、M.-H. Tu、J. R. Howse 和 R. Golestanian, *“Size dependence of the propulsion velocity for catalytic janus-sphere swimmers ”* **85**, 020401 2012 , 《物理评论E》（）。[16] A. Brown 和 W. Poon, *“Ionic effects in self-propelled pt-coated janus swimmers”*, 《软物质》10，4016（2014年）。[17] B. Liebchen 和 H. L ¨owen, *“Which interactions dominate in active colloids?”*, 《化学物理学杂志》150，061102（2019年）。[18] A. Izzet、P. G. Moerman、P. Gross、J. Groenewold、A. D. Hollingsworth、J. Bibette 和 J. Brujic, *“Tunable persistent random walk in swimming droplets ”* **10**, 021035 2020 , 《物理评论X》（）。[19] V. Nosenko、F. Luoni、A. Kaouk、M. Rubin-Zuzic 和 H. Thomas, *“Active janus particles in a complex plasma”*, 《物理评论研究》2，033226（2020年）。