基于气味的分子通信系统的信道建模与实验验证

Ahmet B. Kilic，*IEEE*学生会员，Fatih E.Bilgen，*IEEE*研究生学生会员，以及Ozgur B. Akan，*IEEE*会士

arXiv:2602.01091v1 [eess.SP] 1 Feb 2026

摘要——**基于气味的分子通信（OMC）利用气味分子传递信息，有助于实现万物互联愿景。尽管如此，由于缺乏能够准确刻画粒子在多样环境中传播特性的全面信道模型，OMC系统的实际部署目前仍受到限制。现有文献探讨了分子传输的多个方面，但将理论建模与有界信道的实验验证相结合的整体方法仍不成熟。本文针对这一空白，为有界信道和无界基于气味的分子通信信道提出了数学框架。为验证所提模型的准确性，我们开发了一种新型实验测试平台，并进行了广泛的性能分析。结果表明，理论推导与实验数据之间具有很强的相关性，为未来端到端基于气味的分子通信系统的设计与分析奠定了坚实基础。**

索引词—**基于气味的分子通信（OMC）、万物互联（IoE）、信道建模、有限扩散信道、实验测试平台验证**

I. 引言

MOLECULAR子通信（MC）是指通过分子等粒子传递信息[1]。当使用气味分子传递消息时，这一过程专门称为基于气味的分子通信（OMC）。

受生物现象启发，OMC系统在传感、监测和短距离通信等万物互联应用中展现出广阔前景。然而，要实现这一潜力，根本上取决于对端到端基于气味的分子通信系统进行准确建模和分析。在此背景下，开发逼真的信道模型至关重要。

推导这些模型需要结合理论分析、仿真和实验验证。尽管已有众多研究探讨了这些方法的各种组合 [2], [3], ，但文献中仍缺乏一种针对有界信道建模的全面、整体性方法。为弥补这一空白，本研究提出了一种用于描述有界和无界信道特性的数学模型。随后，我们利用一个新颖的实验测试平台对该框架进行验证和确认。

本文其余部分安排如下：第二节介绍有界和无界信道的数学模型。第三节描述所构建的实验装置和方法。第四节分析实验结果，并评估其与第二节所推导理论模型之间的相关性。最后，第五节给出结论。

Ahmet B. Kilic、Ozgur B. Akan 任职于土耳其伊斯坦布尔 Koç 大学电子与电气工程系下一代通信中心（CXC）（电子邮箱：{ahmetkilic20、akan}@ku.edu.tr）。Fatih E. Bilgen、Ozgur B. Akan 任职于英国剑桥 CB3 0FA 剑桥大学工程系电气工程部万物互联（IoE）研究组（电子邮箱：{feb49、oba21}@cam.ac.uk）。本研究部分由安盛研究基金（Koç 大学安盛万物互联讲席）资助。

II. 系统模型

本节为端到端的基于气味的分子通信（OMC）系统建立分析框架。所提出的模型由点源发射器、空气传播信道以及作为接收器的金属氧化物（MOX）传感器构成。我们对连续时间和空间中的粒子传播进行建模，以推导有界和无界环境中的信道特性。

A. 发射器

发射器被建模为位于原点的瞬时点源。根据这一约定，控制平流-扩散方程中的源项表示为

$$S(x, y, z, t) = M\,\delta(x)\delta(y)\delta(z)\delta(t), \tag{1}$$

其中， M 表示释放分子的数量。

B. 信道冲激响应

气味分子的传播可建模为三维介质中的平流与扩散过程

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K\nabla^2 C - \nabla \cdot (\mathbf{u}C) + S, \tag{2}$$

其中， C 是时空中的浓度函数， K 是有效（湍流）扩散系数，$\mathbf{u}$ 是流速矢量， S 是源项。

1) 无界介质：在非受限情况下，假设介质在水平方向上无限延伸，在竖直方向上半无限延伸，且在 $z = -h$ 处设有完全反射的地面。流速恒定，并沿 x 轴方向，$\mathbf{u} = (u, 0, 0)$。在

瞬时释放的假设下，我们采用 [4]，中推导的闭式浓度响应，其表达式为

$$C_{\text{unb}}(x,y,z,t) = \frac{M}{8(\pi r)^{3/2}} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2+y^2}{4r}\right) \left[\exp\left(-\frac{z^2}{4r}\right) + \exp\left(-\frac{(z+2h)^2}{4r}\right)\right], \tag{3}$$

其中 h 表示源距地面的高度，且

$$r(x) = \frac{1}{u}\int_0^x K(\xi)\, d\xi. \tag{4}$$

对于恒定的湍流扩散系数，这可简化为 $r = Kx/u$。

2）有界介质：发射器位于横截面的几何中心，即 $(y, z) = (0,0)$，与式 (1) 中的源定义一致。为对方形横截面（边长为 $2l$、边界位于 $y, z = \pm l$）信道内的传播进行建模，我们在式 (1) 所定义的源项 $S(x, y, z, t)$ 作用下求解控制偏微分方程。假设沿 x 轴的风速 u 恒定，并因平流主导而忽略纵向扩散，则偏微分方程可表示为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} - K(x)\left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right) = S(x,y,z,t). \tag{5}$$

根据 [4],，通过求解满足诺伊曼边界条件的横向扩散方程，可得到有界信道冲激响应。所得浓度场表示为

$$C_{bnd}(x,y,z,t) = \frac{M}{u} a(r,y) b(r,z) \delta(t-r), \tag{6}$$

其中

$$a(r,y) = \frac{1}{2l} + \frac{1}{l}\sum_{n=1}^{\infty} e^{-(n\pi/l)^2 r} \cos\left(\frac{n\pi y}{l}\right), \tag{7}$$

并且 $b(r, z)$ 的定义与此类似。根据对称性， $b(r, z)$ 与 $a(r, y)$ 相同，只需用 z 替换 y。

C. 信道脉冲响应

迄今推导出的闭式浓度函数依赖于瞬时释放这一假设，以简化控制偏微分方程的求解。然而，实验发射器以持续时间有限的脉冲释放气味分子，其持续时间记为 T_p。由于信道在准稳态条件下运行，并被建模为线性时不变（LTI）系统，因此对这一有限持续时间释放的响应可通过对信道冲激响应进行时间叠加得到。正如我们的实验研究所观察到的，在统计平稳气流条件下，LTI 假设在期望意义上成立。因此，对于无界介质，浓度场表示为

$$C_{\text{unb}}^{(T_p)}(x,y,z,t) = \frac{1}{T_p}\int_0^{\min(t,T_p)} C_{\text{unb}}(x,y,z,t-\tau)\, d\tau, \tag{8}$$

其中， $C_{\text{unb}}(x, y, z, t)$ 表示式 (3) 中的无界信道冲激响应。类似地，对于有界介质，浓度场表示为

$$C_{\text{bnd}}^{(T_p)}(x,y,z,t) = \frac{1}{T_p}\int_0^{\min(t,T_p)} C_{bnd}(x,y,z,t-\tau)\, d\tau, \tag{9}$$

其中， $C_{bnd}(x, y, z, t)$ 是式 (6) 中给出的有界信道冲激响应。

D. 接收建模

接收器通过金属氧化物（MOX）传感器的静态灵敏度和动态动力学，将接收器位置处的环境浓度 $C_{\text{ambient}}(t)$ 映射为电压信号。稳态传感电阻遵循幂律关系 [3]

$$R_{\text{static}}(t) = R_0 \cdot 10^b \cdot [C_{\text{ambient}}(t)]^m, \tag{10}$$

其中， R_0 为参考电阻， m 和 b 为根据数据手册得出的灵敏度参数 [5]。相应的平衡输出电压通过分压器获得

$$V_{\text{static}}(t) = V_c \frac{R_L}{R_L + R_{\text{static}}(t)}, \tag{11}$$

其中， V_c 为恒定的电路电压， R_L 为负载电阻。由于吸附–解吸动力学的作用，测得的电压呈现时间滞后，因此将其建模为一阶系统

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{1}{\tau(t)}\left(V_{\text{static}}(t) - V(t)\right), \tag{12}$$

其时间常数为分段函数

$$\tau(t) = \begin{cases} \tau_{\text{rise}}, & V_{\text{static}}(t) > V(t), \\ \tau_{\text{decay}}, & V_{\text{static}}(t) \le V(t). \end{cases} \tag{13}$$

测量噪声建模为与信号相关的高斯过程

$$V_N(t) = V(t) + \mathcal{N}(0, \kappa^2 V(t)^2), \tag{14}$$

其中， κ 为噪声缩放系数。

III. 实验装置

本节介绍用于验证所提出数学模型的实验测试平台的硬件实现。实验装置由三个主要部分组成：定制发射器、可重构传播信道，以及配备金属氧化物（MOX）传感器的接收器模块。实验装置的组成如图1所示。

A. 发射器

发射器是一种定制设计的气味输送系统，能够将数字信息编码为化学信号。如图1a所示，该系统由四个独立的储液罐组成，每个储液罐均可容纳一种不同的液体溶液。这些储液罐通过电磁阀连接至一个公共输出喷嘴，电磁阀由 Arduino Uno 微控制器控制。为实现雾化，空气压缩机仅在气味释放时段提供恒定的 2 bar 气流。该压力推动液体通过喷雾喷嘴，从而形成细雾。在信道入口处产生的平均流速通过实验测得，并固定为 $\vec{u} = (5.0, 0, 0)$ m s^{-1}。通过微控制器，可以在任意时长内打开或关闭任意电磁阀，从而实现灵活的信号生成。



(a) (b) (c)

图1：E 传播信道的实验设置（a）发射器，（b）信道，以及（c）接收器。

B. 信道

传播介质可配置为模拟无界环境和有界环境，从而能够全面分析各种信道特性。

1) 无界介质：为模拟无界环境，发射器将气味分子释放到开放的实验室空间中。虽然没有立即约束气体羽流的横向或纵向物理边界，但实验装置放置在实验室桌面上。该表面充当反射地平面（$z = -h$），并在理论模型中被明确考虑。

2) 有界介质：对于有界信道实验，采用模块化有机玻璃隧道。该信道由 25×25 cm方形横截面节段构成，如图1b所示。这些节段可以相互锁合，形成长度可达2米的隧道。该装置形成了一个受限环境，其中来自壁面的反射（$y = \pm l, z = \pm l$）会显著影响浓度分布，这与针对有界传播推导的理论模型相一致。

C. 接收器

接收器单元采用两个MQ-3金属氧化物气体传感器来检测气味分子的浓度。这些传感器直接与Arduino Uno微控制器连接以进行数据采集，如图1c所示。采用该双传感器配置，旨在通过减少硬件相关故障，并借助信号平均抑制测量噪声，从而提高系统可靠性。

IV. 分析与结果

本节利用实验数据验证所提出的信道与接收器模型。首先通过校准确定系统参数，随后针对单脉冲传输、多脉冲序列以及噪声特性评估模型精度。

A. 参数选择与估计

要准确表征实验测试平台，必须仔细确定物理信道参数和接收器特性。

1) 物理参数：物理参数根据实验装置的气流状态和几何形状确定。在平均流速为 $u = 5$ m/s 的情况下，信道处于高雷诺数状态，此时传输主要由湍流混合而非分子扩散主导。因此，采用有效扩散率 $K = 0.05$ $\mathrm{m^2 s^{-1}}$ [6]。

每次传输释放约26.0 $\mathrm{cm^3}$ 乙醇。利用乙醇密度和摩尔质量 [7]，，这相当于释放量约为0.32mol。

2) 接收器校准：接收器参数根据校准测量值和数据表规格确定。参考电阻 R_0 通过将洁净空气传感器电阻 $R_{s,\,\mathrm{air}}$ 按制造商提供的低浓度截距 $\Gamma \approx 60$ [5]归一化后估算，得到$R_0 \approx R_{s,\,\mathrm{air}}/60$。传感器静态响应采用幂律关系 $R_s \propto 10^b C^m$建模。灵敏度斜率固定为 $m = -1.03$，而截距 b 则选取为与浓度为 0.4 mg/L 时的数据表参考点相匹配。

上升时间常数始终较小，非受限情况下为 $\tau_r \approx 0.05$ s，受限情况下为 $\tau_r \approx 0.23$s，表明吸附动力学迅速。相比之下，非受限实验中的衰减时间常数（$\tau_d \approx 45.0$ s）明显大于受限情况下的衰减时间常数（τ_d ≈30.0 s）。由于非受限实验是在受限实验之后连续进行的，期间未对传感器进行再生，因此这一增大归因于传感器疲劳。敏感层上残留的乙醇积累可能减缓了后续测量期间的解吸动力学。

接收器坐标（x_r，y_r，z_r）经过选择，使其在 y 轴和 $z-$ 轴上与源对齐，以最大限度地捕获信号。分析中使用的所有系统参数均汇总于表 I。

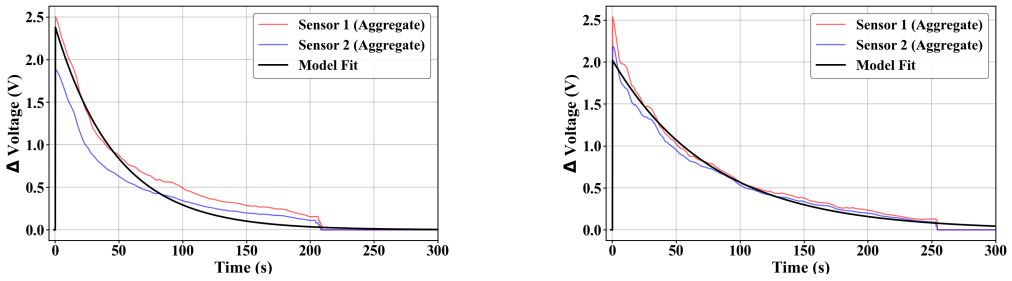
B. 单次响应

通过在有界配置和无界配置中分别传输单个 1。0 s 的乙醇脉冲，评估信道脉冲响应。图 2 将实验电压轨迹的平均值与相应的理论预测进行了比较。

在有界信道中（图 2a），响应呈现出明显的峰值，随后较快地

表 I：系统参数

参数	Sym.	值	参数	Sym.	值	参数	Sym.	数值
释放质量	M	0.32 mol	参考电阻	R_0	302.8 Ω	上升时间（无界）	τ_{rise}	0.05 秒
扩散率	K	0.05 m²/秒	灵敏度斜率	m	-1.03	上升时间（有界）	τ_{rise}	0.23 秒
流速	$\vec{u}$	(5。0，0，0) 米/秒	灵敏度截距	b	0.40	衰减时间（无界）	τ_{decay}	45.0 s
源高度	h	0.125 米	电路电压	V_c	5.0 伏	衰减时间（Bnd）	τ_{decay}	30.0 秒
接收端坐标	$\vec{r}_{rx}$	(1.10,0,0) 米	负载电阻	R_L	20 kΩ	噪声系数	κ	0.01
半宽	l	0.125 m	脉冲持续时间	T_p	1 s	-	-	-



(a) (b)

图 2：实验验证 单次响应，针对（a）有界传播环境与（b）无界传播环境 s.

回落至基线附近。这种行为表明，隧道的边界约束与定向气流共同维持了连贯的气体羽流结构；当脉冲云团的主体经过后，传感器附近的气体便能迅速消散。所提出的有界通道模型准确捕捉了这一动态过程，皮尔逊相关系数为 $r = 0.9842$，归一化均方根误差（NRMSE）为 5.40%。峰值幅度误差低于 8.56%，表明释放质量 M 和纵向扩散率 K的校准恰当。

相比之下，无界响应（图 2b）呈现出更低的峰值幅度和显著更慢的衰减尾部。这种延长的恢复过程与开放空气中不受约束的湍流扩散相一致；侧向边界的缺失导致平流梯度较低，并使稀释后的分子云在接收器周围滞留更长时间。高斯脉冲云团模型能够很好地匹配这种滞留效应，相关系数为 $r = 0.9922$，且NRMSE更低，为2.73%。较大的峰值估计误差（14.64%）归因于开放空气湍流的固有变异性：与有界管道内更为稳定的流动相比，随机涡旋波动更容易驱散气体羽流的高浓度核心。

C. 多次脉冲响应与符号间干扰

为评估连续传输条件下的符号间干扰（ISI）以及接收器的动态行为，以符号周期 $T_{sym} \in \{300, 150, 75, 30, 10\}$s传输了五脉冲序列。有界配置与无界配置的实验结果如图 3 所示。

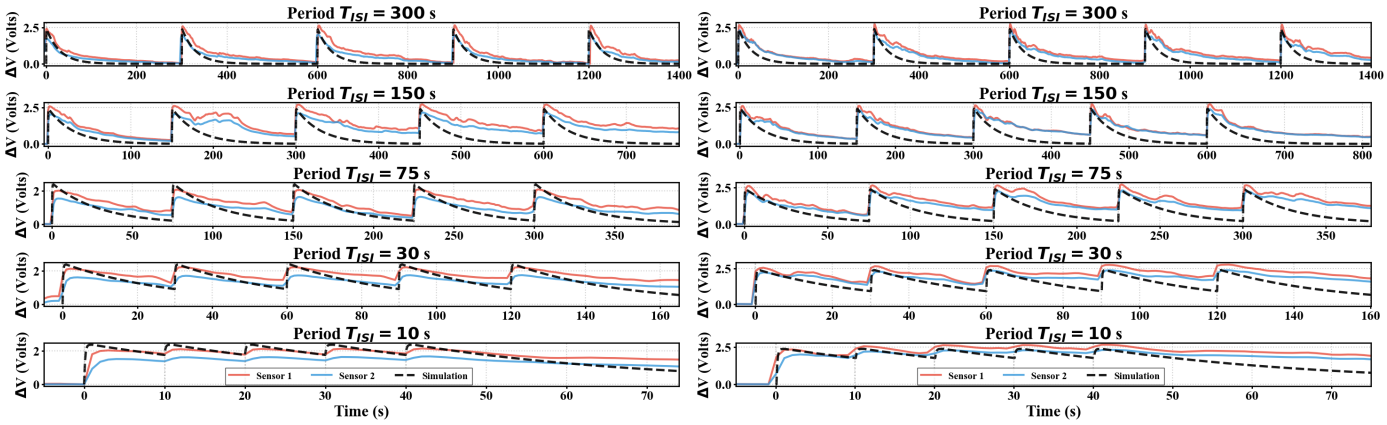
在有界信道中（图 3a），缩短符号周期 T_{sym} 会使响应从孤立脉冲显著转变为强烈的符号间干扰（ISI）。当符号周期较长（$T_{sym} = 300$s）时，传感器输出在传输之间基本会恢复至基线，模型吻合度中等，这是因为环境漂移缓慢，且符号之间的时间耦合较弱。随着 T_{sym} 减小，残余气味积累逐渐占据主导，响应呈现出明显的累积效应。这种现象是由边界诱导的气体羽流限制与传感器缓慢的解吸动力学（$\tau_{\text{decay}} \approx 30$ s）共同造成的。值得注意的是，模型准确度随着 T_{sym}减小而单调提升，相关性从 $T_{sym} = 300$ s时的 $r \approx 0.55$上升至 $T_{sym} = 10$s时的 $r = 0.97$ 以上。这表明，卷积式信道模型能够很好地捕捉高传输速率下以确定性为主的符号间干扰累积；相比之下，低速率运行更容易受到不可控环境变异的影响。

相比之下，无界信道（图 3b）在所有符号周期内的符号间干扰都显著降低。自由横向扩散有助于在连续传输之间有效消散气体羽流，即使在较短T_{sym}下也能限制基线漂移。因此，在整个符号周期范围内，模型吻合度始终较高（多数情况下为$r > 0.9$），且仅轻微受传输速率影响。无界配置中没有持续的气味积累，这表明在有界环境中，限制高速率传输的主要因素是信道限制，而非传感器动力学。

D. 噪声表征

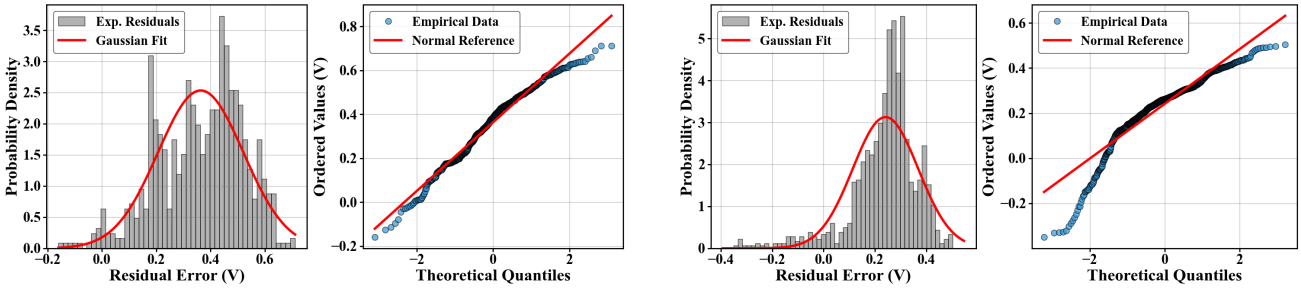
为评估接收器噪声模型的有效性，我们分析了测量值与模型预测值之间的残差，定义为 $\epsilon(t) = V_{exp}(t) - V_{model}(t)$，其中$V_{model}(t)$对应于接收器模型预测的无噪声电压 $V(t)$。图 4 展示了有界配置和无界配置下的残差分布。

对于无界信道（图 4b），残差直方图近似对称且以零为中心，符合高斯分布。相应的 Q–Q图



(a) (b)

图3：有界传播环境（a）和无界传播环境（b）下多次脉冲响应的实验验证。



(a) (b)

图4：有界传播环境（a）和无界传播环境（b）下的噪声表征 ts.

在中心分位数范围内（$\pm 1\sigma$）呈现出很强的线性，表明与正态模型吻合良好。在下尾部（分位数 < -1）观察到偏离，这表明存在湍流间歇性。高斯模型预测的是平滑的平均浓度，而瞬时湍流场中存在洁净空气团块，它们会暂时降低局部浓度，使测量信号低于模型预测值，从而产生负残差。

有界信道残差（图4a）同样呈现出明显的高斯核心，但不规则性略有增加。这种行为与反射边界引起的更复杂混合动力学一致，反射边界可能维持局部浓度变化。Q–Q图显示下尾部存在轻微偏差，这可能是羽流消散期间传感器的不对称恢复动力学所致。

总体而言，经验残差与高斯参考在大部分数据范围内高度一致，这支持在后续分析和性能评估中采用加性高斯噪声模型。

V. 结论

本文提出了一套全面的框架，用于端到端基于气味的分子通信（OMC）系统的建模与实验验证。我们推导了有界环境和无界环境中分子传播的解析表征，并明确纳入了金属氧化物（MOX）传感器的动力学。通过搭建定制的实验测试平台，我们验证了理论模型与单次和多次传输场景下的物理测量值高度相关。本研究准确刻画了信道行为、符号间干扰（ISI）和测量噪声，为未来 OMC 系统的设计与实际部署奠定了坚实基础。

参考文献

[1] O. B. Akan、H. Ramezani、T. Khan、N. A. Abbasi 和 M. Kuscu，《分子信息与通信科学基础》，*IEEE*会议录，第 105 卷，第 2 期，第 306–318 页，2017 年。[2] N. Farsad、W. Guo 和 A. W. Eckford，《桌面分子通信：通过化学信号传递文本消息》，*PLOS ONE*，第 8 卷，第 12 期，第 e82935 页，2013 年。[3] N.-R. Kim、N. Farsad、C. Lee、A. W. Eckford 和 C.-B. Chae，《经实验验证的分子通信系统信道模型》，*IEEE Access*，第 7 卷，第 81 849–81858 页，2019 年。[4] B. Unluturk 和 I. Akyildiz，《用于远距离分子通信的植物信息素信道端到端模型》，*IEEE*纳米生物科学汇刊，第 PP 卷，第 1–1 页，2016 年 11 月。[5] Pololu公司，《用于酒精检测的 MQ-3 半导体传感器（数据手册）》，Pololu，技术报告 0J310，访问日期：2026-01-29。 [在线]。网址：https://www.pololu.com/file/0J310/MQ3.pdf [6] Z. H. M. Juffry、K. Kamarudin、A. H. Adom、M. F. Miskon 和 A. N. Abdullah，《利用计算流体动力学方法研究环境温度对室内环境中气体扩散影响的理论与数值分析》，《流体力学与热科学高级研究杂志》，第 105 卷，第 1 期，第 194–209 页，2023 年。[7] 美国国家生物技术信息中心，《PubChem CID 702 化合物摘要：乙醇》，https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/ compound/Ethanol，2026 年，访问日期：2026-01-26。