arXiv:2611.32966v1 [cs.MA] 24 Nov 2026

通过信息素协同实现真实地形上的运河网络形成：多智能体协同

Jordan Kennedy[1], Federico Oliva[2], Amir Degani[2],Karen-Lee Bar Sinai[3],和 Nare Karapetyan[1]

摘要——**在非结构化户外环境中作业、会改造地形的机器人群，必须在动态变化不确定、通信不可靠且全局信息不完整的情况下进行协同。信息素协同提供了一种去中心化的替代方案，使智能体能够通过持久的环境改造进行间接协同；然而，这种方法在真实景观的大尺度地形构建中的应用仍鲜有探索。受海狸运河建造的启发，我们提出一种用于多智能体系统的最简间接协同框架：去中心化的智能体依据局部湿度线索行动、挖掘地形，并通过闭合的智能体—环境反馈循环相互作用。该框架将智能体与真实数字高程模型（数字高程模型）上的季节性水文过程相结合。在一片面积为$862\,\mathbf{m}\times1167\,\mathbf{m}$的区域内，我们针对智能体数量和水文消退速率开展了 110 次模拟。模型生成了涌现式的类运河网络，其形态随环境约束而呈现可预测的变化。通过与实地标注的参考网络进行不受对齐方式影响的形态评估，我们确定了能够重现运河关键特征的参数区间；失败案例则揭示了过度沟渠化和碎片化现象。这些结果表明，通过环境反馈，简单的局部地形改造行为即可生成合理的景观尺度结构，为研究去中心化地形构建和仿生群体协同提供了一个最简框架。**

I. 引言

多智能体系统日益被部署于户外环境 [1] 中，在这些环境中，条件不断变化，通信可能不可靠，且全局地图可能不可用。在此类条件下，集中式规划往往不切实际，因此促使人们采用受通信约束的去中心化方法 [2]。其中一种策略是信息素协同 [3]，即智能体通过修改共享环境 [4]来间接协调。这一原则启发了众多群体机器人学系统，而其中的核心挑战在于解释：连贯的大尺度结构如何能够从局部反应性交互中涌现 [5]。

自然系统为这一过程提供了一些启示。海狸（加拿大海狸）修建水坝和运河，在没有全局规划或明确协调的情况下，改变了整片景观的水文状况 [6], [7]。海狸并非按照预先设定的网络进行修建，而是各自响应

[1]Jordan Kennedy 和 Nare Karapetyan 就职于伍兹霍尔海洋研究所（WHOI），地址：美国马萨诸塞州伍兹霍尔，邮编 02543{jordan.kennedy, nare.karapetyan}@whoi.edu[2]Federico Oliva 和 Amir Degani 就职于以色列理工学院土木与环境工程系，以色列海法，邮编 3200003federico.oliva.it@gmail.com, adegani@technion.ac.il[3]Karen-Lee Bar Sinai 就职于哈佛大学设计研究生院景观建筑学院，美国马萨诸塞州剑桥，邮编 02138kl barsinai@gsd.harvard.edu



图 1. **挖掘海狸机器人**。在所提出的间接协同框架下运行的智能体（彩色标记）的概念性部署。背景图像根据研究地点一处活跃的海狸筑坝复合体的无人机影像重建。

当地环境条件；与此同时，它们持续不断的改造又会改变未来的环境条件，进而影响后续行为。随着时间推移，这种代理体与环境之间的反馈会形成广泛的运河网络，即便海狸离开后，这些网络仍会长期留存 [8]，因此海狸是间接协同地形构建的绝佳范例。

受这一过程启发，我们探究一种同样简约的机制能否生成类运河景观结构（图 1）。我们聚焦于海狸景观工程的一个组成部分：由水文驱动的运河网络形成过程。我们既不对海狸完整的行为模式进行建模，也不声称运河形态仅由其行为产生。相反，我们提出一个范围更窄的生成性问题：去中心化的地形改造智能体能否仅凭局部湿度线索和持续存在的挖掘痕迹，在真实地形上生成类运河网络？

为研究这一问题，我们构建了一个闭环智能体—环境框架，其中环境线索是水，以根据汇水面积和季节性退水推导出的动态湿度掩膜表示。智能体的动作是挖掘，以累积地形降低表示，并在多个模拟年份中持续保留。每个模拟年结束时，经过改造的地形都会反馈至水文模型，从而形成一个智能体—环境反馈回路，其中

挖掘可以在多年时间尺度上强化排水通道。

本研究的主要贡献如下：

1) **一种用于去中心化地形改造的精简间接协同框架**，其中挖掘与季节性

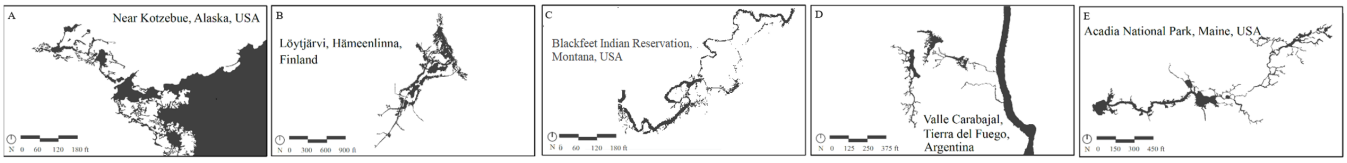


图2. **海狸筑坝复合体**。全球不同生态系统和湿地类型中海狸筑坝复合体运河的人工标注轨迹：(A) 美国阿拉斯加州科策布附近／冻土融化苔原；(B) L¨oytj¨arvi（H¨ameenlinna），芬兰／森林流域湖泊；(C) 美国蒙大拿州黑脚族领地／大平原源头溪流及代表性模拟地点；(D) 阿根廷火地岛卡拉瓦哈尔谷／高海拔亚南极泥炭地和森林；(E) 美国缅因州阿卡迪亚国家公园／东部落叶林一级溪流。这些示例展示了运河网络在不同景观中的广泛分布；本研究仅将地点C用于定量模型评估。地图绘制：Gabriel Garon。

水文在真实地形上构成闭合的智能体—环境循环。2) **一种景观尺度仿真流程**，将去中心化挖掘与年度水文重新计算相结合，基于一米分辨率的数字高程模型开展运河形成研究。3) **一种与对齐方式无关的形态评估流程**，用于量化模拟生成的运河网络与实地标注的运河网络之间的相似度，同时评估智能体数量和水文退水的影响。

II. 相关工作

A. 信息素协同与群体机器人学

信息素协同将环境视为协调的主动媒介：智能体改变周围环境，而这些改变随后引导未来行为，从而在没有集中控制的情况下形成集体组织 [3], [4]。群体机器人学通过积木、表面标记等实体痕迹，以及信息素场和数字梯度等虚拟基底，实现了这一原理，从而支持分布式探索、路径形成和建造 [9], [5]。

先前基于信息素协同的建造系统表明，局部规则能够通过环境痕迹协调机器人群体。然而，在许多情况下，所需的最终结构是预先指定的：智能体在局部进行协调，但目标形态由外部规定。TERMES系统[5],例如展示了仿白蚁机器人如何在没有显式智能体间通信的情况下，建造用户指定的三维结构，而扩展印迹协调进一步表明，环境能够存储信息，从而提升系统的稳健性和并行性 [10]。多机器人挖掘领域的相关研究则探讨了面向目标地形的协作式地形改造，包括行星基础设施准备，以及针对用户指定地形剖面的去中心化土方作业算法 [11], [12]。相比之下，本模型不给智能体提供所需的运河地图或目标地形。运河形态通过反馈生成：智能体读取水文线索，在局部改造地形，随后作用于这一过程产生的新水文场。

B. 海狸行为与运河形成

海狸作为生态系统工程师受到广泛研究，关于水坝选址和蓄水动力学的研究也十分深入，而景观尺度上的地貌效应也已有大量研究 [6], [7]。尽管运河作为持久的水文基础设施，能够汇集水流、扩大觅食范围，并在群落更替后仍清晰可见 [8] （图2），但运河的建造受到的关注较少。这种持久性使运河成为研究语义构造型信息素协同的理想模型：信号是一种持久的地形改造，能够塑造未来的移动路径。

真实的运河网络反映了多种相互作用的过程，包括海狸活动、季节性水文、沉积作用、植被、扰动、河岸侵蚀，以及群落弃置或重新占据。本模型从这一复杂系统中抽取出一种机制：通过反复进行循水挖掘来强化排水路径。该简化模型检验了仅凭局部湿度线索和持续的地形改造，是否能够产生类似运河的形态。

实地调查 [13]表明，环境线索会影响建造活动的时间与位置，同时水文条件和现有运河也会产生影响；这些因素共同构成主要的行为驱动因素。本文将这些观察结果形式化为一种由水体线索驱动、基于同一研究系统真实地形数据的迹激过程。实地标注的运河网络并不被视为需要精确重建的因果记录，而是作为形态基准。通过分支长度、曲折度、方向、分支密度和分形维数，对模拟网络与观测网络进行比较。因此，二者的不匹配表明，运河形态的哪些方面可能需要引入额外机制，例如寻植行为、泥沙输运、风暴扰动或水坝—池塘反馈。

III. 问题陈述

给定一个由网格化环境图层表示的真实景观，分散式挖掘智能体能否仅利用局部湿度线索、无需全局规划，生成具有持久性的运河网络，并使其空间结构类似于观测到的海狸运河系统?

核心假设是行为性的。海狸不会设计运河，而是会对动态水文线索作出反应：季节性洪水使湿润度集中在排水廊道沿线，智能体追踪这些湿润单元，反复经过则会切割地形。这种切割继而使后续水流更加集中，延长既有廊道沿线的湿润时间，并在未来季节重新吸引智能体。因此，运河网络被视为智能体与水文相互作用在景观尺度上留下的残留，而非有意设计的产物。

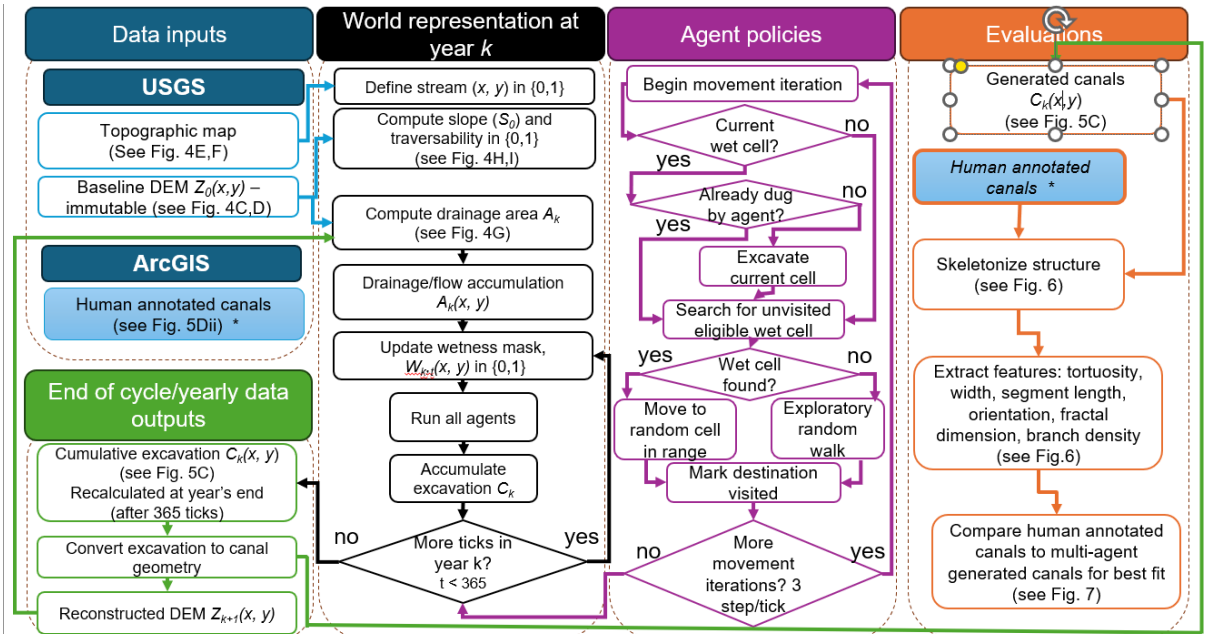


图 3. **闭环智能体—环境模型**。 每个模拟年 k 由 365 个时步 t组成。在每个时步，湿润度场 $W_{k,\,t}(x,\ y) \in \{0,1\}$ 使用排水调制的对数衰减进行更新，$W_{k,\,t} = f(t;\ r,\ A_k)$。在这个季节性退缩的湿润边界中，汇水区较大的单元 $A_k(x,\ y)$保持湿润的时间更长；智能体每年从溪流开始，并感知 $\{W_{k,t}, A_k, S_0\}$，其中 S_0 根据基准地形 Z_0 计算一次后保持不变。当一个单元 $S_0(x,\ y) \le \theta_{\max}$ 时，该单元可通行；当它同时满足可通行且湿润时，则为候选目的地。智能体移动到相邻的候选单元；当没有候选单元可用时，它们会探索可通行单元，直到遇到候选单元。每次访问候选单元都会增加一个挖掘增量 δ。在年份 k 中累积的挖掘量 ΔC_k会被加入累积挖掘场，使得 $C_{k+1} = C_k + \Delta C_k$。年份结束时，$k$，$C_{k+1}$ 被转换为饱和半球形挖掘半径，以便从基准地形 Z_0确定性地重建高程表面 Z_{k+1}。随后，在 Z_{k+1} 上重新运行水文地形分析，以计算更新后的汇水面积场 A_{k+1}。

为检验这一假设，模型必须基于真实地形运行，而非抽象网格。我们以蒙大拿州西北部一处研究地点的1米分辨率数字高程模型为基础进行模拟，以汇流累积量作为主要水文代理指标，并利用季节性退水生成智能体追踪的退缩湿润边界。智能体仅依据严格局部的信息行动：它们感知附近的湿润度，不进行交流，并在追踪水流时挖掘所经过的单元。规则集刻意保持精简，以探明仅凭局部湿润度追踪与持续地形改造，如何形成类运河结构（图1）。

我们开发了这一模拟，将其作为一个简化的生成式试验平台，用于识别受海狸启发的智能体反复沿着湿润排水廊道移动并加以强化时，何处可能出现类似运河的景观改造。长期目标是为景观管理与恢复情景提供支持；在这些情景中，海狸重新引入、共存规划或仿生地形改造机器人都需要预测寻水挖掘可能重塑场地的位置。

IV. 拟议框架

拟议框架由四个组成部分构成：(i) 数字环境构建，(ii) 环境线索表征，(iii) 去中心化智能体行为，以及 (iv) 年度地形与水文更新，以闭合智能体—环境反馈回路（图 3）。

A. 数字环境构建

该模拟以真实景观的数字化表征为基础，空间分辨率为 1m × 1m。数字高程模型（DEM）取自美国地质调查局国家地图，而溪流几何数据则根据美国地质调查局地形数据提取，用于确定智能体初始化位置。植被质量指数由国家农业影像计划（NAIP）影像提取；汇水面积则根据数字高程模型计算，以近似表示持久性地表水流路径。

所有栅格数据集均已重新投影至统一的坐标参考系统，并重采样至统一的 1 m × 1m 栅格（图 4）。由于不一定总能获得时间匹配的数据集，因此图层选取自两年的获取时间窗口；考虑到持续海狸景观改造的十年尺度，这样的时间窗口是合适的。由此生成的栅格图层构成仿真环境，供智能体和水文模型共同使用。

B. 环境表示与湿润度线索模型

仿真环境表示为一组配准栅格图层，这些图层定义在公共网格上，每个 (x,y) 单元格的大小为 1 m × 1 m。模拟按 Y年度周期推进，周期索引为 $k = 1$、……、Y。每个年度周期由 $T = 365$ 模拟时步组成，时步索引为 $t = 1$、…… …、T。基础地形为不可变的数字高程模型，定义为 Z_0。不断演变的地貌状态包括：

- A_k：汇水面积；
- $W_{k,\,t}$：二值湿润度掩膜；
- C_k：累积挖掘场；
- Z_k：地形高程（侵蚀数字高程模型）。

地形坡度 S_0 仅计算一次，并作为掩膜应用，将智能体限制在流域内直至模拟结束。

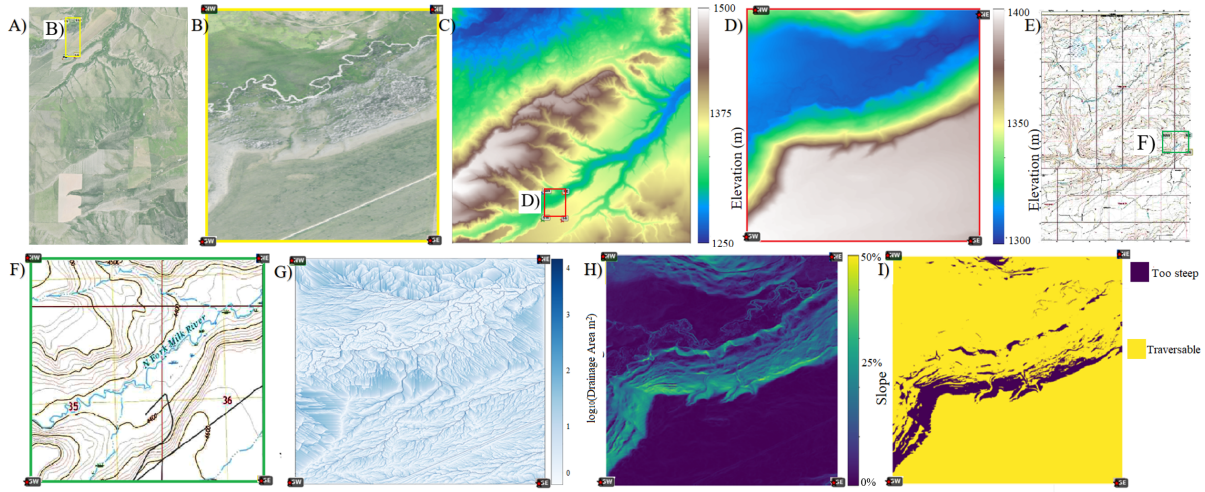


图 4. **构建数字世界**。（A）从美国地质调查局下载 NAIP 正射影像（GeoTIFF），（B）裁剪至用户定义的感兴趣区域（经纬度边界）。（C）从美国地质调查局下载数字高程模型（DEM），（D）裁剪至相同的模拟域。（E）使用人工标注的美国地质调查局地形图描绘河流网络，并（F）裁剪至相同的模拟域。（G）根据数字高程模型计算汇水面积（流量累积），以表示排水网络。（H）从数字高程模型推导坡度，并（I）通过阈值处理生成用于代理体移动的二值可通行性掩膜。坐标：西北 = (-113.132491°, 48.932230°)，西南 = (-113.132491°, 48.921931°)，东南 = (-113.121137°, 48.921931°)，东北 = (-113.121137°, 48.932230°)

汇水面积栅格 A_k 和地形高程 Z_k 每个年度周期更新一次，而湿润度掩膜 $W_{k,\ t}$ 和智能体状态则在每个时步演变。湿润度掩膜是智能体的主要行为线索。模型不显式模拟水深、流量、地下水交换、泥沙输运或池塘动态，而是将汇水面积用作持续地表水可用性的一级近似指标。在季节性水位消退期间，汇水面积较大的栅格单元会保持湿润更长时间，而汇水面积较小的单元则更早干涸。在模拟年内的每个时步，湿润度掩膜通过对汇水面积进行阈值处理来定义：

$$W_{k,t}(x,y) = \begin{cases} 1, & A_k(x,y) \geq A_{\mathrm{crit}}(t), \\ 0, & A_k(x,y) < A_{\mathrm{crit}}(t). \end{cases} \tag{1}$$

季节性阈值为

$$A_{\mathrm{crit}}(t) = 10^{\log_{10}(A_{\min}) + r\frac{\log(t+1)}{\log(T+1)}[\log_{10}(A_{\max}) - \log_{10}(A_{\min})]}, \tag{2}$$

其中，$A_{\min}$ 和 $A_{\max}$ 分别为域内最小和最大的汇水面积值，$r \in [0,1]$ 为消退速率参数。随着 A_{crit} (t) 在一年中逐渐增大，湿润区域会从大范围饱和的低地收缩至高排水廊道。消退速率参数 r 被视为实验方案参数，而非常数。

C. 智能体行为

每个智能体都遵循一种局部、无记忆的追踪水源策略，包括搜索、导航和挖掘（图 3）。每个年度周期开始时，智能体初始化于河道网格单元上。在每个模拟时步中，智能体最多执行 $v = 3$ 次单格微移动。每次微移动时，智能体感知感知半径 p 内的网格单元，并构建候选集

$$\mathcal{C} = \{(x,y) : W_{k,t}(x,y) = 1,\ S_0(x,y) \leq \theta_{\max}\}, \tag{3}$$

其中 $\theta_{\max} = 30°$ 为最大可通行坡度。当在感知半径内检测到一个或多个湿润可通行单元时，智能体会朝某个候选单元移动，而不考虑汇水面积。如果未检测到湿润单元，智能体会在可通行单元范围内进行随机游走，直到检测到湿润单元。

目标不会在不同时间步之间保留。相反，每次微移动时都会重新计算候选集，使智能体能够随着湿润度消退，或更高排水量的湿润单元进入感知范围而改变方向。如果未检测到候选湿润单元，智能体便会在相邻的可通行单元中随机探索一步。

当代理体占据一个湿润可通行单元时，就会发生挖掘。在当前实现中，挖掘以基于访问的活动增量表示，而非时间分辨的挖掘过程。

$$C_k(x,y) \leftarrow C_k(x,y) + \delta, \tag{4}$$

其中，$\delta = 0.05\mathrm{m}$为等效深度挖掘增量。挖掘不会产生额外的停留时间成本；该计数器表示累积活动强度，而非字面意义上的瞬时沉积物移除。智能体没有记忆，不进行通信，也不具备全局感知。协调仅通过共享访问动态湿度掩膜和挖掘场而产生。

D. 年度周期与半球侵蚀算子

在每个年度周期结束时，累积挖掘量会转化为运河几何形状，并重建新的侵蚀表面Z_k ，随后在该表面上重新计算水文。这就闭合了反馈回路：挖掘降低地形，降低后的地形汇集排水，汇集的排水延长湿润度，而持续的湿润度又会在之后的年份重新吸引智能体。运河横截面近似为半球形凹陷。累积挖掘量

计数器通过饱和函数转换为渠道半径：

$$R_k(x,y) = R_{\max}\left(1 - e^{-\lambda C_k(x,y)}\right). \tag{5}$$

此处， $R_{\max}$ 限制每个侵蚀核的半径和深度，而 λ 控制累积挖掘量接近这一上限的速度。这种缩放可减少过度侵蚀，但多个侵蚀核叠加后，累积深度可能超过 $R_{\max}$。$R_{\max}$ 值根据研究地点测得的最大河流宽度估算得出。较低的 λ 值会减缓渠道生长，在概念上可防止地形以不切实际的速度加深和拓宽。这些参数不会在代理体移动过程中使用；它们仅用于根据累积挖掘场重建被刻蚀的数字高程模型。对于此处报告的所有结果， $R_{\max} = 6m$ 和 $\lambda \approx 1/R_{\max} = 1/6$。给定半径场 R 和不可变的基准地形 DEM Z_0，以单元格（i， j）为中心的半球对欧氏距离为 d 的相邻单元格（p， q）所产生的侵蚀深度为

$$\Delta z_{(i,j)\to(p,q)} = \begin{cases} \sqrt{R_k(i,j)^2 - d^2}, & d \le R_k(i,j), \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{6}$$

所有活跃单元格产生的贡献叠加后，第 k 年的侵蚀数字高程模型为

$$Z_k(x,y) = Z_0(x,y) - \sum_{\{(i,j):R_k(i,j)>0\}} \Delta z_{(i,j)\to(x,y)}. \tag{7}$$

由于 Z_k 是根据不可变的 Z_0 和累积挖掘场 C_k重建的，因此侵蚀不会在各个年度周期中被反复施加。

E. 年度水文重算

侵蚀后，使用 Z_k结合洼地处理的D8流向算法重新计算汇水面积，该过程通过Landlab的FlowAccumulator和DepressionFinderAndRouter组件实现 [14]。更新后的场 A_{k+1} 定义了下一个年度周期的湿润条件，而可通行性仍由固定的坡度场 S_0定义。在下一年开始前，更新后的场将写回仿真环境。

V. 实现

该模拟器使用Python实现，使用Mesa[15] 进行智能体调度和行为执行，并使用Landlab [14] 进行年度水文重算。在每个年度周期内，Mesa智能体读取当前的湿润度掩膜，执行移动和挖掘，并更新共享的挖掘场；随后，Landlab载入侵蚀数字高程模型，并为下一年重新计算汇水面积。可通行性仍由固定的基准地形坡度场 S_0 定义。

模拟器载入CSV世界表示，并执行 Y 年度周期。每年，它会写入三个主要输出：

- 累积挖掘场 C_k，记录迄今为止每个单元格的等效深度挖掘活动。
- 派生的半径场 R_k，通过饱和函数根据 C_k 计算得出，并用于生成侵蚀表面。
- Z_k侵蚀数字高程模型，表示传递给 Landlab 进行水文重新计算的修改后的景观。

C_k 与 R_k 之间的分离是有意为之：保留累积挖掘场可将智能体行为与渠道几何模型解耦，从而能够在后处理中调整饱和参数 $R_{\max}$ 和 λ ，而无需重新运行完整模拟。所有输出均依据输入坐标参考系和网格进行了地理参考。

VI. 实验

A. 设置

所有模拟均使用相同的基础景观、年度周期、移动规则和挖掘规则。每次运行持续$Y = 10$ 个年度周期，每个周期包含 $T = 365$ 个时间步，代表十年累积活动。固定行为参数设置为：移动速度为每时间步 $v = 3$ 个单元，感知半径为 $p \sim U$（1、2）个单元，最大可通行坡度为 $\theta_{\max} = 30°$ ，基于访问次数的挖掘增量为$\delta = 0.05$米。每次运行均生成年度挖掘量、半径和侵蚀数字高程模型输出。

模拟包含三类参数。行为参数定义代理体如何移动和挖掘：速度v、感知半径 p和挖掘增量 δ。环境驱动力由退缩率 r控制，它决定湿润度从大范围饱和的洪泛平原单元向高排水廊道收缩的速度。几何转换参数定义如何将累积挖掘转化为渠道形态： $R_{\max}$ 设定渠道半径的最大允许值， λ 则控制重复到访时渠道半径接近该值的速度。

我们不将 r 解读为实测干燥速率，而是将其视为水文约束强度的无量纲指数。低值表示洪泛平原广大区域持续湿润，而高值表示湿润区域迅速收缩至高排水廊道。同样，智能体数量 N 被解读为挖掘能力，而非个体动物的直接计数：低 N 表示重复通行有限，而高 N表示挖掘压力较大。我们针对智能体数量和退缩率进行了全面的参数扫描：

- Agent count $N \in \{2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25\}$
- Recession rate $r \in \{0.1, 0.2, \ldots, 1.0\}$

产生 $11 \times 10 = 110$ 次模拟运行（图 5)

VII. 运河结构分析

为比较模拟和标注的运河网络而无需精确的空间重叠，我们采用了与对齐无关的形态学分析（图6）。我们使用Zhang-Suen细化将二值运河掩膜缩减为单像素宽的中心线 [16]，并移除作为标注噪声的小型连通分量。在每个骨架上，我们识别端点（度数为 = 1）和交汇点（度数为 $\geq$ 3），并追踪像素

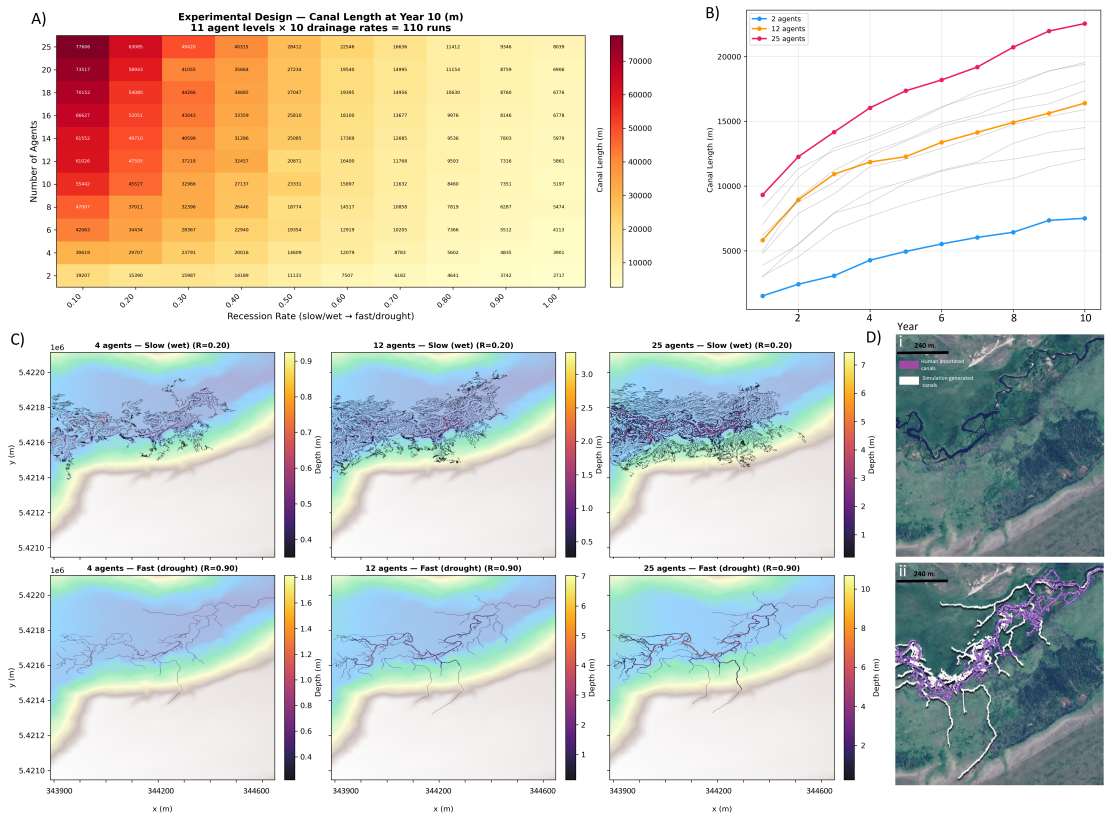


图 5. **不同水文状况和智能体数量下涌现的运河形态（10年模拟）**。**A**）六种参数组合：缓慢退水（$r = 0.20$）下，智能体数量为 $N = 4$、12、25；快速退水（$r = 0.90$）下，智能体数量为 $N = 4$、12、25。所有模拟均使用相同的 1 m 数字高程模型、10 个模拟年、每年 365 步、移动速度为 3 个网格/时步、挖掘增量为 $\delta = 0.05$m 、 1–2 个网格的扩展感知半径、可通行性阈值 $\theta_{\max} = 30°$，以及固定的运河半径转换参数。**B** ）固定 r 时，10 年间的运河长度轨迹示例。**C** ）10 年后的重建运河深度场（单位：m；坐标轴单位：通用横轴墨卡托投影 m），主河道以红色表示，涌现的运河以深色调表示。在缓慢退水（$r = 0.20$）条件下，网络随智能体数量（ N）增加而扩展并变得更加密集；在快速退水（$r = 0.90$）条件下，挖掘集中于更少、更长的廊道，增加智能体数量（ N）主要会加深并延伸主支流。各面板的色标不同。**D**）*i*) 研究地点影像；*ii*) 以白色显示的模拟运河叠加在人工作业标注的紫色运河之上。

路径以定义运河段，并提取长度、曲折度（路径长度除以直线距离）、方向和宽度。宽度通过沿骨架对原始运河掩膜的距离变换进行采样来估算。

随后，我们计算了用于捕捉与海狸运河系统相关结构特性的网络级描述指标：骨架总长度、线段数量、分支密度、平均宽度、平均曲折度和盒计数分形维数[17]。这些描述指标概括了范围、分支复杂性、河道几何形态、弯曲度和尺度结构。我们使用 Wasserstein-1距离 [18]量化模拟网络与标注网络在宽度、线段长度和曲折度分布上的相似性。我们使用 Kolmogorov–Smirnov统计量[19]评估方向差异。该统计量只能检测模拟运河网络与标注运河网络在方向对齐方面的总体差异；我们不将其解释为运河路径的完整方向统计模型。我们使用相对误差比较标量描述指标，包括分支密度和分形维数。我们对逐项指标距离进行归一化，并将其合并为综合形态评分；数值越低表示结构一致性越高，且不受空间配准影响。该综合评分可作为参数扫描中对参数区间进行排序的简洁诊断指标，但并非旨在成为运河网络相似性的通用或唯一最优度量。因此，我们分别报告每个组成指标。模型解释基于逐项指标分解和综合排名。

VIII. 结果

A. 不同水文状况下的涌现式运河形成

在 110 次十年模拟中，代理体反复追踪逐渐退缩的湿润边界，由此形成了类运河结构。挖掘优先沿着持续存在的湿润廊道累积，随着时间推移，代理体不断强化相同的低洼路径，使挖掘向源头方向延伸。形成的形态随退水机制和智能体数量呈现系统性变化。在缓慢退水($r \leq 0.3$)条件下，湿润度广泛存在于谷底，形成宽阔的移动边界，其中有许多局部等效的湿润单元。挖掘活动较为分散：代理体将精力分散到略微湿润的路径上，形成辫状、浅切割的特征，而非清晰的运河廊道。在这种机制下，增加智能体数量会加大总挖掘量，却无法改善运河形态。在快速退水

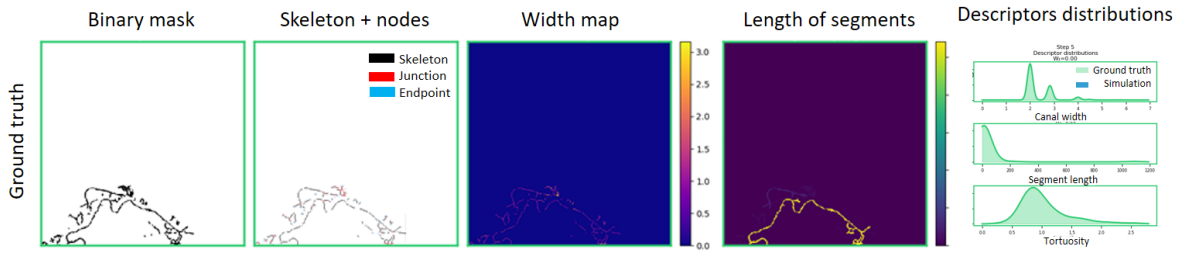


图6. **对齐不变形态分析。** 流程：（1）二值沟渠掩膜；（2）包含交汇点（红色）和端点（蓝色）的中心线骨架；（3）沿骨架采样距离变换，计算宽度（半径，m）；（4）按线段长度着色的连通分量；（5）归一化宽度（实线）和长度（虚线）分布及其 Wasserstein-1距离。

($r \geq 0.7$)条件下，湿润度迅速收缩至高排水廊道，形成狭窄且受到强约束的湿润边界。

沟渠化变得更有针对性：智能体集中到更少的路径上，形成主干廊道和分支模式，与观测到的运河网络更加吻合。智能体数量控制着廊道的连续性；数量过少会形成碎片化网络，数量过多则会导致主排水通道之外出现过度密集的沟渠化。

B. 与实地标注的参考网络进行比较

我们将模拟生成的运河与根据 RGB 图像得到的实地标注运河参考网络进行了比较。由于该参考网络体现了多个历史过程累积作用的结果，我们不将这种比较解读为对观测地点的精确重建，而是将其作为评估基准，用于判断简化后的水流追踪挖掘规则能否在与观测运河相同的结构空间内再现运河形态。要实现精确重建，还需对历史上的群体位置、洪水事件、沉积物填充、植被分布和坝—池塘动力学进行建模，而这些内容不在当前模型的研究范围内。

相反，我们将该标注用作定量形态学基准。比较的目的是检验简化的循水挖掘规则生成的运河网络，是否落在与观测到的运河相同的结构空间内，而非复现其精确的空间排列。因此，评估侧重于基于形态且不受对齐方式影响的描述指标，而非精确的空间重叠程度。

C. 模拟运河网络的几何验证

在包含 110 次运行的参数扫描中，表现最佳的配置为 $N = 2, r = 0.80$，综合形态学得分为 0.138；得分越低，表示与参考网络越吻合（图 7）。在测试的各个方案中，该次运行对参考网络的运河宽度和河段长度分布的复现最为接近。其分形维数误差为 0.121，分支密度误差为 0.109，表明模拟网络捕捉到了尺度结构和分支强度。

主要的剩余不匹配是曲折度，平均 Wasserstein距离为 0.68。这表明，仅靠湿润度追踪无法完全再现实地测绘的运河的弯曲度，或许还需要其他机制来解释更精细尺度的路径几何。

模型的失效也可以通过定量指标识别。表现最差的配置 $N = 18, r = 0.30$ 产生了过多分支，其分支密度误差约为表现最佳的运行结果的十倍。这种失效模式对应于过度沟渠化：缓慢退水使湿润度广泛分布于谷底，导致智能体挖掘出许多约束较弱的路径，而不是汇聚成稀疏的排水对齐网络。

综合数值比较支持图 7 所示的视觉模式：只有当水文退水机制强烈约束湿润边界，且智能体数量足够少以避免过度挖掘时，才会出现逼真的运河形态。

IX. 讨论与结论

A. 湿润度约束组织挖掘

在该模型中，退缩率 r 控制湿润度掩膜从广泛的洪泛平原饱和区向高排水廊道收缩的速度。它应被理解为环境约束强度的指标，而不是经过校准的实地干燥速率。较低的 r会保留大量可用的湿润单元，从而导致弥散式挖掘和过度分支的网络。较高的 r 会缩小候选集，迫使代理体汇聚到更少的、与排水方向一致的路径上，并形成更清晰的主干廊道和向源头方向的延伸。因此，当行为线索场受到足够的空间约束，从而集中重复挖掘时，运河形态会得到改善。

这一结果支持一种模型特定的机制：水文约束能够组织基于迹信息素的挖掘。但这并不意味着退水机制单独决定真实的海狸运河形态。在真实景观中，湿润度会与植被、坝与池塘布局、沉积作用、洪水扰动、群体规模以及既有运河痕迹相互作用。在所测试的参数扫描范围内，形态评分对退水机制的敏感度高于对智能体数量的敏感度，这表明湿润度线索的结构会强烈影响挖掘是变得弥散还是形成运河化。

B. 智能体数量控制挖掘能力

智能体数量是挖掘能力参数，而不是对个体动物的直接普查。智能体数量过少

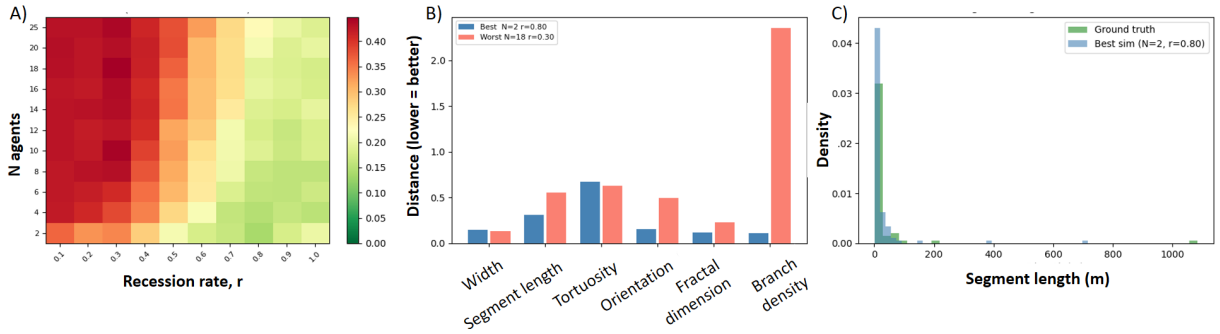


图 7. **几何形状比较——模拟与真实情况（GT）**。**A**）综合几何评分（数值越低， = 越接近 GT）。**B**）各指标细分：最佳与最差表现。各面板的颜色刻度均经过标准化，以便直接比较运河深度。**C**）线段长度分布。

会产生断裂或切入程度不足的廊道，而适度增加则能改善廊道的连续性。然而，超过某一阈值后，运河密度会变得不切实际：网络填满空间，分支过度，并延伸至核心排水通道之外。这种失效模式表明，最大化挖掘强度或空间覆盖范围并不一定能再现自然的运河形态。

C. 局限性与启示

在这项单地点研究中，模型经过了刻意简化。智能体仅对局部湿润度、汇水面积和坡度作出响应，而湿润度场充当的是行为线索，而非完整的水动力模拟。水文状况每年重新计算，从而捕捉季节性景观记忆，但不涉及年内水流动力学、泥沙输运或经过校准的水域范围。本研究并非旨在重现海狸景观工程的全部复杂性，而是提供一个最简框架，用以研究持续的环境改造如何协调去中心化的地形改造代理体。

从机器人学的角度来看，这一研究将地形改造重新界定为一种环境介导的建造问题：大尺度结构并非源自预先设定的蓝图，而是在智能体与景观的相互作用中涌现。

致谢

本研究部分经费由伍兹霍尔海洋研究所（WHOI）通过拉德·索恩原住民知识计划、卡拉万研究员项目和科学投资计划（ISP）提供；此外，哈佛大学绿色建筑、城市与设计研究生院教师研究基金也为本研究提供了支持。作者感谢 Justin Werfel、William Boles 和 Ben Witzel 提供意见。

参考文献

[1] L. F. Oliveira、A. P. Moreira 和 M. F. Silva，《森林机器人学进展：最新研究综述》，机器人学，第 10 卷，53，2021 年 2，页码 p. .[2] N. Karapetyan、K. Benson、C. McKinney、P. Taslakian 和 I. Rekleitis，《已知环境下高效的多机器人覆盖》，载于 *2017* 年 *IEEE/RSJ* 智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。IEEE，2017 年，第 1846–1852 页。

[3] P.-P. Grass´e，《Bellicositermes natalensis 和 Cubitermes sp. 的巢穴重建与个体间协调。印迹协调理论：对筑巢白蚁行为的阐释尝试》，社会性昆虫，第 6 卷，第 1 期，第 41–80 页，1959 年。[4] G. Theraulaz 和 E. Bonabeau，《印迹协调简史》，人工生命，第 5 卷，第 2 期，第 97–116 页，1999 年。[5] J. Werfel、K. Petersen 和 R. Nagpal，《设计受白蚁启发的机器人建造团队的群体行为》，《科学》，第 343 卷，第 6172 期，第 754–758 页，2014 年。[6] R. J. Naiman、C. A. Johnston 和 J. C. Kelley，《海狸对北美溪流的改变》，生物科学，第 38 卷，762，1988 年 11，753 期，页码 –。[7] R. E. Brazier、A. Puttock、H. A. Graham、R. E. Auster、K. H. Davies 和 C. M. Brown，《海狸：自然界的生态系统工程师》，*Wiley* 跨学科评论：水，第 8 卷，第 1 期，文章编号 e1494，2021 年。[8] B. P. Grudzinski、H. Cummins 和 T. K. Vang，《海狸运河及其环境影响》，物理地理学进展：地球与环境，第 44 卷，第 2 期，第 189–211 页，2020 年。[9] K. H. Petersen、N. Napp、R. Stuart-Smith、D. Rus 和 M. Kovac，《群体机器人建造综述》，科学机器人学，第 4 卷，第 28 期，文章编号 eaau8479，2019 年。[10] J. Werfel 和 R. Nagpal，《群体建造中的扩展印迹协调》，*IEEE* 智能系统，第 21 卷，第 2 期，第 20–28 页，2006 年。[11] J. Thangavelautham 等，《面向月球应用的自主多机器人挖掘》，*Robotica*，第 35 卷，第 12 期，第 2330–2362 页，2017 年。[12] Ericland 等，《简单土方作业机器人群体的二维建造规划》，自主机器人，2025 年。[13] J. Kennedy、H. McCreery、A. Jones、D. Spotted Horse、C. Chen、E. Fairfax 和 J. Werfel，《环境线索影响海狸筑坝复合体中建造活动的时间与地点》，*bioRxiv*，文章编号 2024.10.21.619304，2024 年。[14] D. E. Hobley、J. M. Adams、S. S. Nudurupati、E. W. Hutton、N. M. Gasparini、E. Istanbulluoglu 和 G. E. Tucker，《借助 Landlab 进行创造性计算：用于构建、耦合和探索地表动力学二维数值模型的开源工具包》，地表动力学，第 5 卷，第 1 期，第 21–46 页，2017 年。[15] J. Kazil、D. Masad 和 A. Crooks，《利用 Python 进行基于代理体的建模：Mesa 框架》，载于 社会、文化与行为建模：第 *13* 届国际会议，*SBP-BRiMS 2020*。Springer，2020 年，第 308–317 页。[16] T. Y. Zhang 和 C. Y. Suen，《一种用于细化数字图案的快速并行算法》，*ACM* 通讯，第 27 卷，第 3 期，第 236–239 页，1984 年。[17] B. B. Mandelbrot，自然界的分形几何。纽约：W. H. Freeman，1982 年。[18] C. Villani，最优输运：从过去到现在。柏林：Springer，2009 年。[19] F. J. Massey，《用于拟合优度检验的柯尔莫哥洛夫–斯米尔诺夫检验》，美国统计学会杂志，第 46 卷，第 253 期，第 68–78 页，1951 年。