
QB期刊 滑动窗口两两比较：AI新方法精准绘制新冠病毒变异株“适应性景观”

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/38472.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

QB期刊 滑动窗口两两比较：AI新方法精准绘制新冠病毒变异株“适应性景观”。论文标题：A data-driven sliding-window pairwise comparative approach for the estimation of transmission fitness of SARS-CoV-2 variants and construction of the evolution fitness landscape

期刊：Quantitative Biology

作者：Md Jubair Pantho, Richard Annan, Landen Alexander Bauder, Sophia Huang, Letu Qingge, Hong Qin

发表时间：13 May 2025

DOI：10.1002/qub2.70003

微信链接：[点击此处阅读微信文章](#)

新冠病毒（SARS-CoV-2）的持续变异是疫情防控与预测的最大挑战之一。科学家亟需一种能够精准量化不同变异株传播力差异，并描绘其进化轨迹的工具。然而，传统方法如基本再生数（ R_0 ）无法区分具体变异株，系统发育分析又受限于序列相似性高、存在地理采样偏差等问题，导致对病毒进化动态的把握时常滞后。

近日，Quantitative Biology期刊发表美国田纳西大学Hong Qin教授团队的重磅研究 A data driven sliding window pairwise comparative approach for the estimation of transmission fitness of SARS CoV 2 variants and construction of the evolution fitness landscape，提出了一种名为差异种群增长率（DPGR）的数据驱动新方法。该方法像一台高精度比较仪，通过滑动时间窗口和两两直接比较，成功量化了从Alpha到Omicron等主要关切变异株（VOCs）的相对传播适应性，并首次构建了直观展示其进化竞争的适应性景观图。该方法计算简洁、对数据采样偏差不敏感，为实时监测病毒进化、预测优势毒株更替提供了强大新工具。

A data-driven sliding-window pairwise comparative approach for the estimation of transmission fitness of SARS-CoV-2 variants and construction of the evolution fitness landscape

Md Jubair Pantho¹ | Richard Annan² | Landen Alexander Bauder¹ |
Sophia Huang³ | Letu Qingge² | Hong Qin^{1,4}

全文概要

本研究提出了一种名为差异种群增长率 (DPGR) 的数据驱动新方法, 用于量化新冠病毒变异株间的相对传播适应性。该方法基于滑动时间窗口内两两毒株比例对数的线性变化, 利用毒株互为内参以抵消采样偏差, 并能通过数学传递性比较非共流行毒株。应用该方法分析全球基因组数据发现, 奥密克戎 (Omicron) 相对于德尔塔 (Delta) 的传播优势存在显著地域差异, 并成功揭示了奥密克戎亚系间的竞争格局。基于所有两两比较结果, 本研究首次构建了新冠病毒主要变异株的进化适应性景观三维图谱, 直观展现了从Alpha到Omicron的渐进式适应进化。DPGR方法原理简洁、稳健, 为实时监测病毒进化动态和预测未来优势毒株提供了有力工具。

发明测速仪——核心方程如何工作

研究团队的核心洞察是: 当两个病毒株在同一人群中竞争时, 它们数量比值的对数会随时间线性变化。这一规律被凝练为核心方程:

$$\log_{10} \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = (g_1 - g_2)t + C = \text{DPGR}_{1,2} \cdot t + C$$

方程解释:

- N1和 N2代表两个变异株的种群数量。
- g1和 g2是它们各自的增长率。
- 方程左边是两者数量之比的对数, 右边是时间 tt 的线性函数。
- 斜率 $(g_1 - g_2)$ 即为 DPGR值, 它直接量化了变异株1相对于变异株2的每日净增长优势。DPGR > 0

表示变异株1占优，反之则变异株2占优。

- 常数 CC 包含了两个种群增长可能存在的初始时间差（滞后期）。

这个方程就是测速仪。其中，斜率 DPGR 的值直接告诉我们，毒株1每天比毒株2快增长多少（图1）。正斜率代表毒株1占优，负斜率则相反。它的妙处在于，通过比较比值而非绝对数量，天然抵消了许多数据采集中的系统性误差。

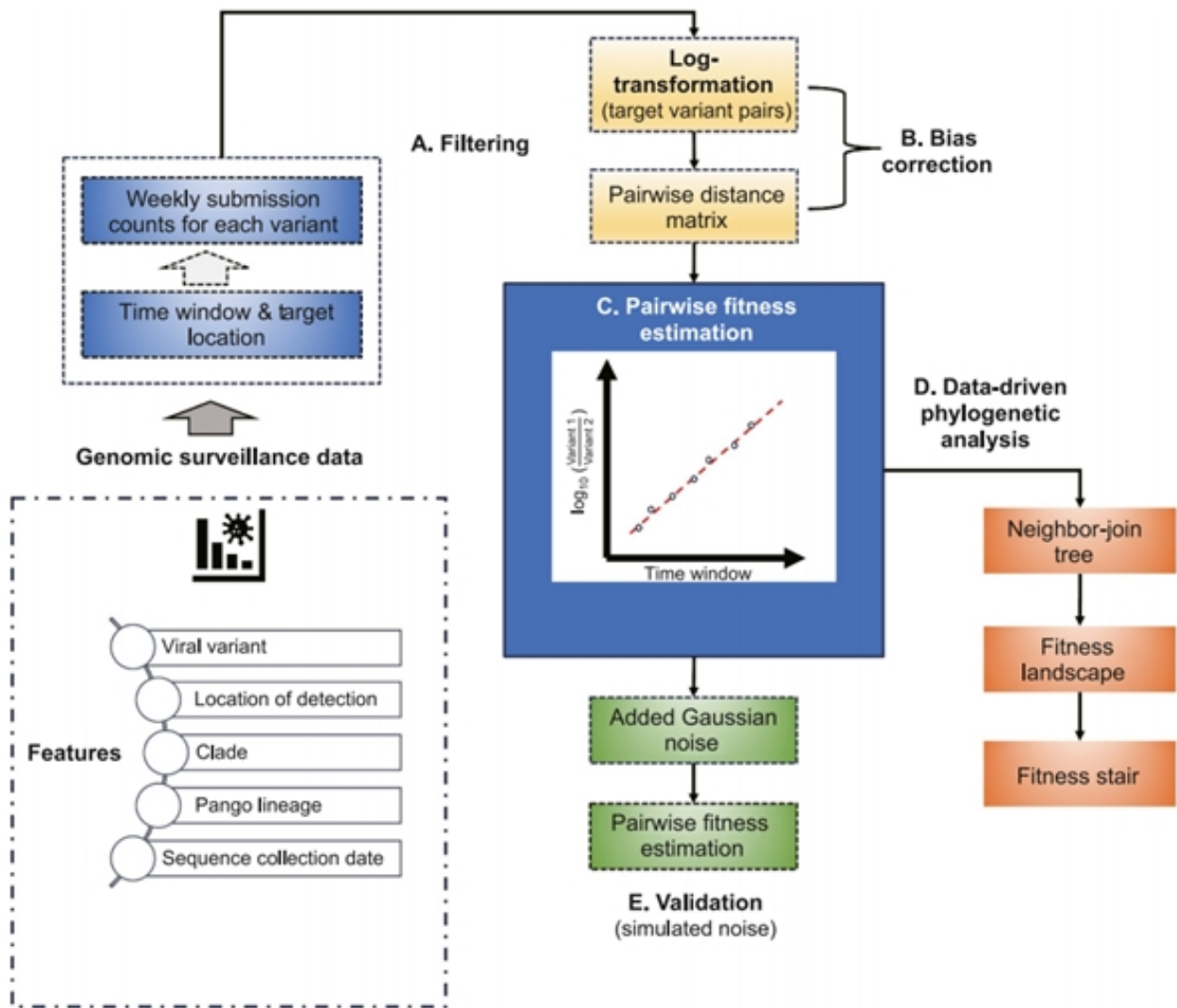


图1：DPGR测速仪工作原理。左半部分展示两个变异株N1和N2随时间的模拟增长曲线；右半部分展示同一时间段内， $\log_{10}(N1/N2)$ 的比值如何形成一条完美的直线，其斜率即为DPGR值。

方法延伸：用数学桥梁连接历史与现在

研究的一个巧妙之处在于利用了对数运算的传递性，构建了比较非共流行毒株的数学桥梁：

$$DPGR_{a,b} = DPGR_{a,c} + DPGR_{c,b}$$

公式解释：

- 即使变异株A和B从未在同一时期大规模流行（缺乏直接比较数据），只要它们都与第三个变异株C有过共同流行期，就可以通过C作为桥梁，间接计算出A相对于B的适应性差异。
- 这解决了监测数据中的一个重大难题——如何比较像Alpha和Delta这样在不同时期占主导的变异株。

全球测速报告——地理差异一目了然

将这把测速仪应用于全球基因组数据，可立刻获得病毒传播速度的全球快照。研究重点测量了Omicron取代Delta这场关键赛事。

如图2所示，Omicron的扩张速度并非全球一致。它在土耳其的扩张势头（DPGR=0.1）最为迅猛，意味着相对日增长优势高达10%；而在美国（DPGR=0.008）则缓和得多。这张速度地图直观揭示了病毒传播受地域免疫背景、防控措施等复杂因素影响。

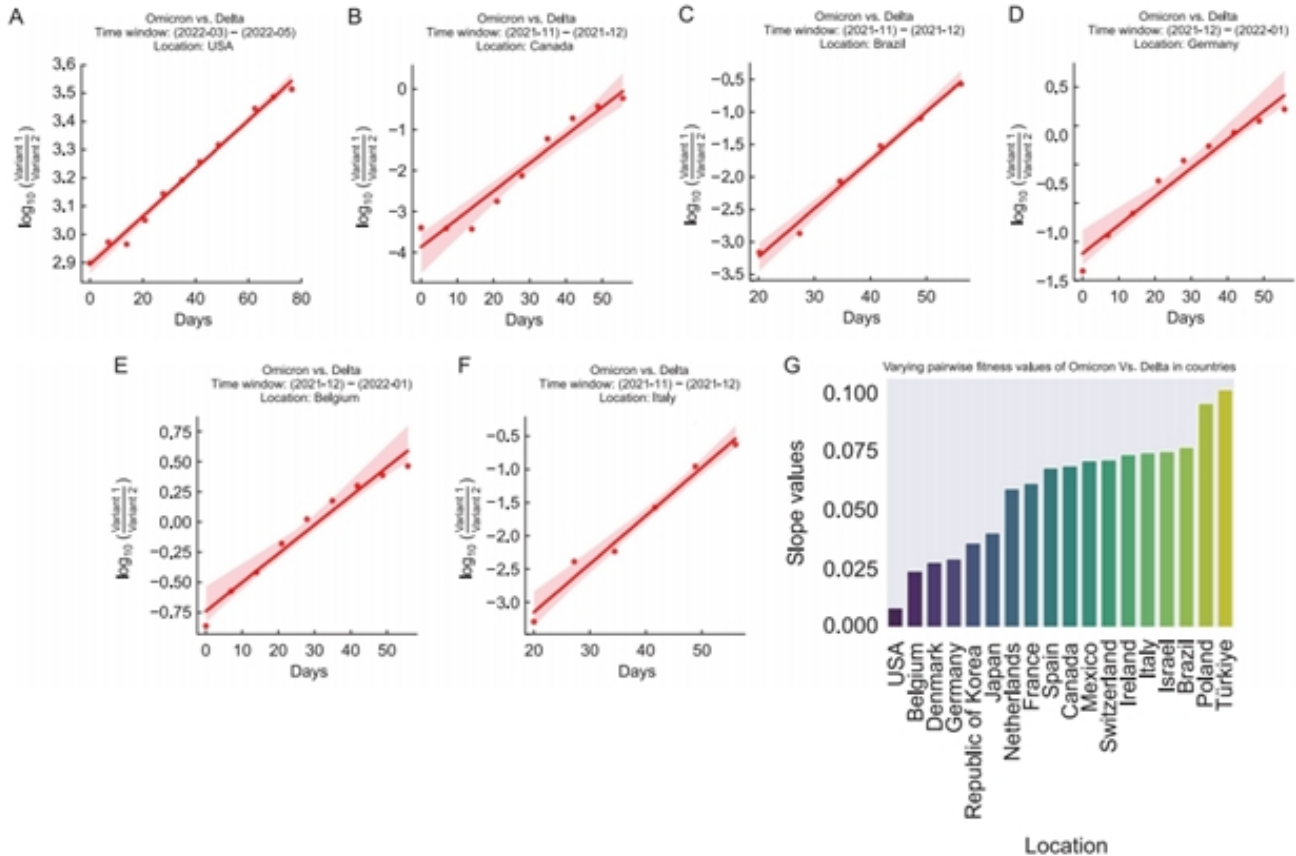


图2：Omicron全球取代速度排行榜。世界地图或条形图，以不同颜色或柱高代表各国DPGR值，例如土耳其标为最高的红色柱/深色区域，美国标为较低的蓝色柱/浅色区域。

绘制进化地形图——看见无形的选择压力

单个比赛的测速结果固然重要，但进化的全景更为壮观。研究团队将所有主要变异株（Alpha, Beta, Delta, Omicron）两两之间的DPGR值，转化为进化距离，并构建了一幅前所未有的三维适应性景观图。如图3所示，这幅地形图将抽象的进化优势变得一目了然。图中，Omicron变异株稳稳占据了最高峰，表明其相对于所有早期变异株拥有最强的传播适应性。Delta等则位于山腰，而最初的Alpha位于山谷。整幅图生动刻画了病毒为提升传播力而进行的适应性攀登，宏观展现了进化趋势。

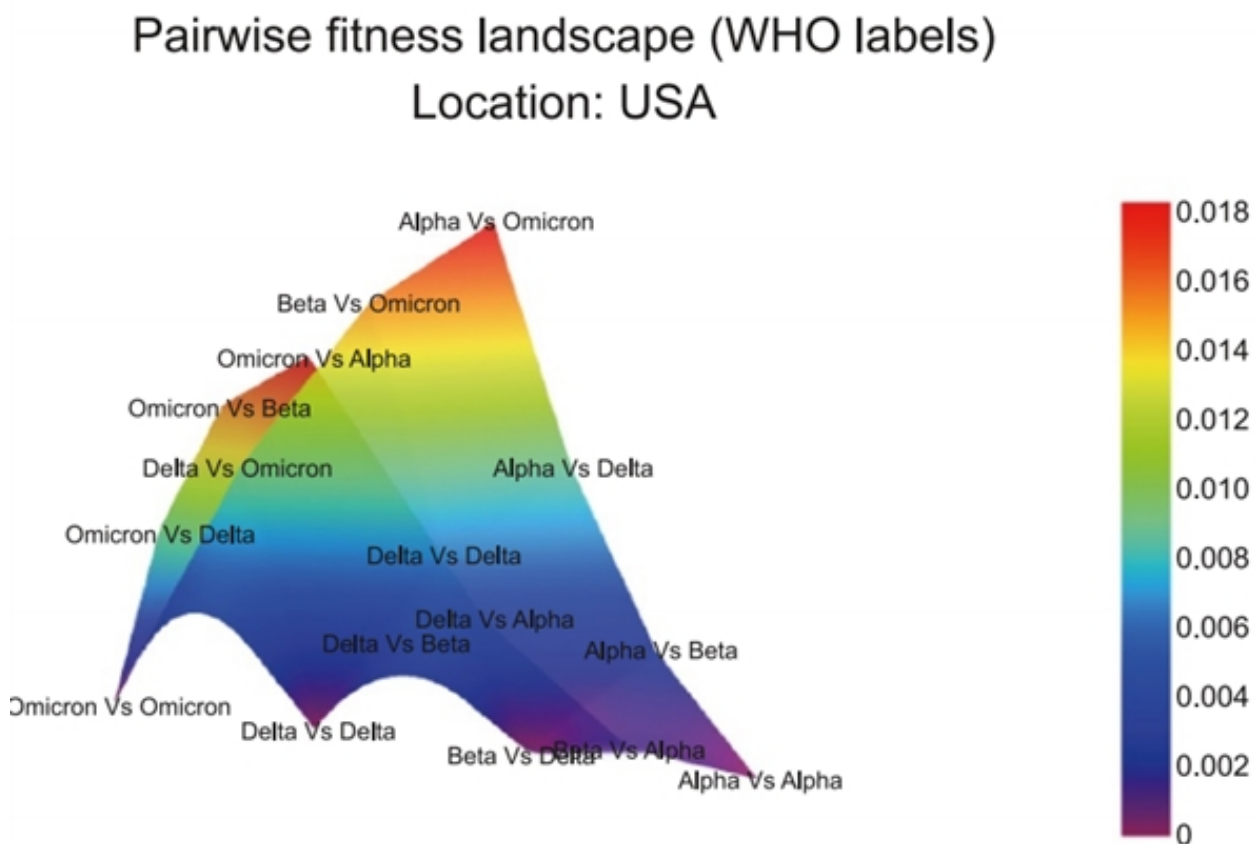


图3：飞鸟形适应性景观图

洞察家族内斗——亚系竞争精细呈现

DPGR的精度足以解析同一变异株家族内部的激烈竞争。图4的热力图清晰显示，BA.5（作为行或列）相对于其他所有亚系（BA.1, BA.2, BA.4）的DPGR值均为显著的正数。这精确量化了BA.5的全面竞争优势，解释了其为何能成为全球主导亚系。

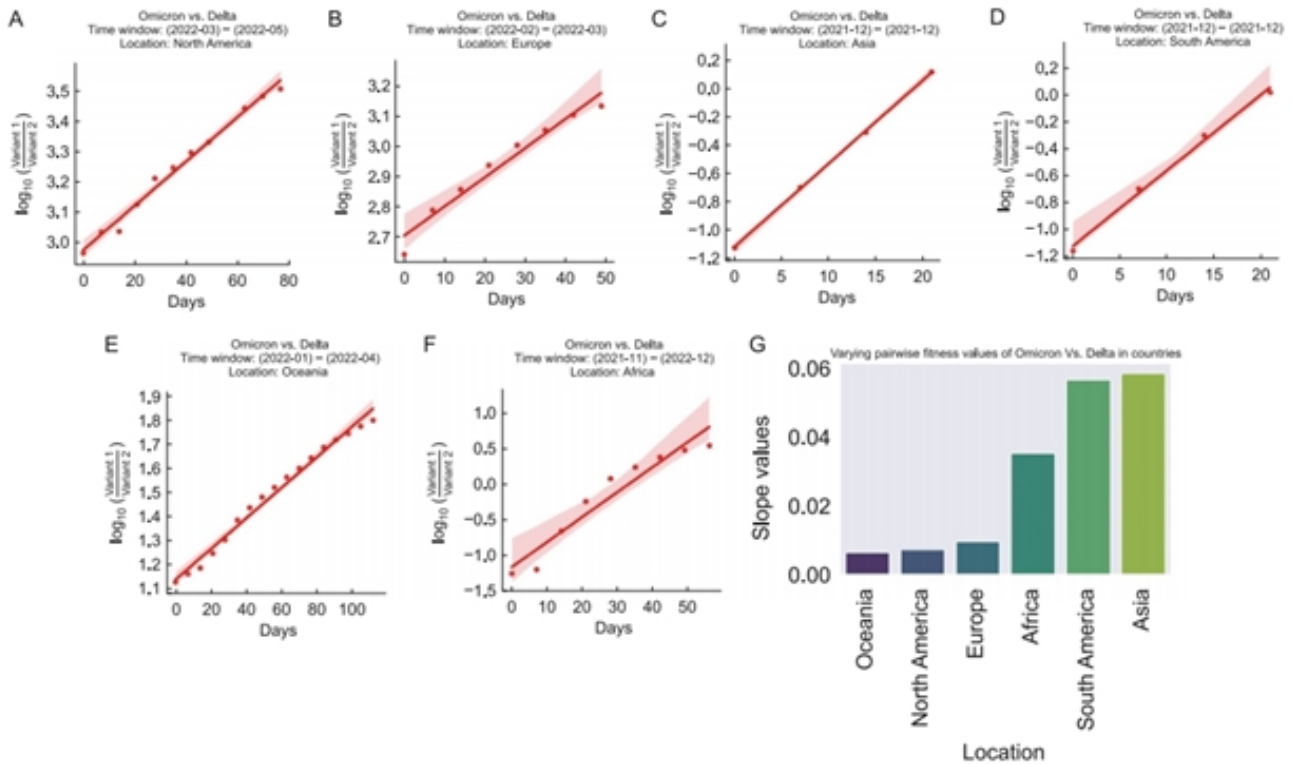


图4：Omicron亚系竞争格局（热力图/趋势图）

总结

DPGR方法通过一个核心方程（测速仪）和一套可视化图谱（地形图与热图），构建了一套从微观比较到宏观洞察的完整工具体系。它兼具数学的简洁之美与结果的直观之效。

未来，这套工具可直接用于监测流感等其他变异快速的病原体。更重要的是，将DPGR测得的适应性优势与基因组数据结合，可以逆向定位驱动这些优势的关键基因突变，从而真正实现从观测进化到预测进化的跨越。

这项研究为我们装备了更精良的仪器，以丈量进化之路，绘制变异之图，从而在下一次疫情竞赛中，能够更早地看懂局面，预见方向。

QB期刊介绍

Quantitative Biology (QB) 期刊是由清华大学、北京大学、高教出版社联合创办的全英文学术期刊。QB主要刊登生物信息学、计算生物学、系统生物学、理论生物学和合成生物学的最新研究成果和前沿进展，并为生命科学与计算机、数学、物理等交叉研究领域打造一个学术水平高、可读性强、具有全球影响力的交叉学科期刊品牌。

《前沿》系列英文学术期刊

由教育部主管、高等教育出版社主办的《前沿》（Frontiers）系列英文学术期刊，于2006年正式创刊，以网络版和印刷版向全球发行。系列期刊包括基础科学、生命科学、工程技术和人文社会科学四个主题，是我国覆盖学科最广泛的英文学术期刊群，其中12种被SCI收录，其他也被A&HCI、Ei、MEDLINE或相应学科国际权威检索系统收录，具有一定的国际学术影响力。系列期刊采用在线优先出版方式，保证文章以最快速度发表。

中国学术前沿期刊网

<http://journal.hep.com.cn>



来源：Quantitative Biology

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发