



战略文章

编辑日期：2026 年 10 月 23 日

当灯光更亮，经济却从画面中消失

卫星能否在统计数据公布前读懂沙特经济？

The Satellite's Economic Illusion: What Nighttime Lights Can—and Cannot—Reveal About Saudi Arabia

****导语：****斋月期间，一座城市可以变得更亮，生产率却未必翻倍。一边是捕捉生活痕迹的卫星影像，另一边是试图衡量其价值的经济数字；二者之间，新的科学正在形成，新的误解也随之而来。本文从一个已有文献记录的沙特信号出发，最终落到一项专为这个问题设计的计算实验：卫星何时带来我们原本没有的信息，何时只是让我们更加确信一个错误的故事？

1. 机器看见“经济节庆”的那个夜晚

在大语言模型（Large Language Models; LLMs）成为每场会议的话题之前，美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration; NASA）的研究人员就在追问一个看似朴素的问题：为什么某些城市会在一年中特定几周变得更亮？他们跟踪搭载于苏奥米国家极轨伙伴卫星（Suomi National Polar-orbiting Partnership; Suomi NPP）上的可见红外成像辐射仪套件（Visible Infrared Imaging Radiometer Suite; VIIRS）数据，把传感器看到的景象，与卫星内部并不存在的社会日历进行对照。

2014年，NASA公布了一项醒目的结果：在团队的分析中，包括利雅得和吉达在内的沙特城市，斋月期间的亮度大约上升了 60%至100%；完整科学研究于2015年发表。沙特并非一个无法解释的运行例外。Miguel O. Román和Eleanor C. Stokes发现，中东城市的季节性灯光模式与社会和宗教实践相呼应，就像美国部分地区的灯光模式与圣诞节和新年庆祝活动相呼应一样。研究没有声称国内生产总值翻倍。它说的是一件更准确、也更有意思的事：城市有自己的习惯，而这些习惯会在天空留下光子印记 [S01S02](#)。

不妨做一个思想实验：某机构斥巨资建立了一套吞入卫星影像（Satellite Imagery）的经济预测系统，系统发现照明上升了80%。如果它不了解社会日历、本地照明的性质和活动时段的变化，就可能极有把握地报告产出激增。报告看起来很现代，仪表板色彩悦目，图表或许还精确到小数点后好几位。但这些小

数不会告诉我们：模型读懂了灯，却忘了开灯的人。

公平地说，斋月确实也带来真实的经济活动。餐饮、市场、交通和酒店业都可能改变经营方式。但灯光增幅并不等于这些活动所创造价值的增幅。科学上的区别不在“经济事件”与“文化事件”之间，而在被测量的现象与需要可检验统计关系才能成立的推断量之间。在一个活动会在白昼与夜晚之间重新分配的社会里，忽略文化首先可能是一项数据工程错误，而后才是知识面的欠缺。

据沙特通讯社（Saudi Press Agency; SPA）转述，沙特统计总局（General Authority for Statistics; GASTAT）记录的2026年朝觐者总数为 1,707,301 人，其中 1,546,655 人来自境外 [S03](#)。这是对短期内大规模人口流动的官方计数，却不能让我们在未实际处理那些日期的数据时，推断麦加灯光或经济发生了多大变化。沙特现实由此提供了一项潜在自然实验（Natural Experiment）：有记录的社会变量、明确的地点和时间，以及一个可以检验的卫星假设，而不是一个可以预先宣布的结论。

2. 卫星曾经如何修正统计误差

要理解这一思路的吸引力，可以回到J. Vernon Henderson、Adam Storeygard和David N. Weil的研究。三人在2012年发表于《美国经济评论》（American Economic Review）的论文《从太空衡量经济增长》（Measuring Economic Growth from Outer Space）中，提出结合两个来自不同制度体系的指标：国民账户（National Accounts）与夜间灯光（Nighttime Lights）。前者来自一套收集产出、价格和交易信息的人类制度，后者来自观测特定光谱波段辐射的传感器。其价值不在于后者永远真实、前者总是可疑，而在于两者有时会犯下不同类型的错误 [S04](#)。

如果一个国家的企业调查薄弱、非正规活动覆盖不足，影像或许能独立提示城市聚居区在哪里扩张、用电量在哪里上升。但这里的“独立”是一项有条件的方法论假设。统计误差与卫星误差可能重叠，冲突可能同时影响二者，灯光也可能响应一项并未创造新生产价值的公共照明政策。因此，这篇论文并未授权人们用夜景图替代GDP；它研究的是，在了解误差性质及其边界时，如何改善测量。

世界银行（World Bank）后来发表《从太空衡量季度经济增长》（Measuring Quarterly Economic Growth from Outer Space），研究了2013年第二季度至2020年第四季度不同经济体组别的数据。研究发现，若忽略共同时间效应，灯光变化与产出变化的直接时间相关可能很弱，甚至在统计上不显著；纳入这些效应后，关系才有所改善。研究还建立了处理测量误差的框架，并指出发达经济体与发展中经济体的灯光—GDP关系并不相同 [S05](#)。

营销者不会喜欢这个结果。更顺耳的说法是：“灯越亮，产出越高。”而研究真正说明的是：城市之间的相关性是一回事，解释某一座城市在某一个月的变化是另一回事。模型可以准确区分大型工业城市与昏暗村庄，却在回答“这座工业城市本季度产出是否增加”时失败。它记住了财富的外观，却未必学会了活动如何变化。

3. 图表标题没有写出的物理学

日夜波段传感器（Day/Night Band; DNB）接收来自地表及其周边的可见光和近红外光。这句短话背后藏着复杂的区分。光可能来自商铺门面、街道或工厂，也可能来自燃气火炬（Gas Flare）、火灾、船只，或云层反射的月光。传感器不是企业会计；它认识的是辐亮度（Radiance）——一种有单位、可由仪器校准的物理量。除非我们用独立测量证明某种关系，否则它并不认识“收入”“工资”或“利润”[S06](#)。

NASA的“黑色大理石”（Black Marble）系统通过艰苦的科学处理来应对这个问题。其每日产品VNP46A2并非一张未经处理的传感器图片。它校正月光、大气，以及通过双向反射分布函数（Bidirectional Reflectance Distribution Function; BRDF）描述的照明和反射方向几何；同时提供数据质量和最新高质量观测图层，并区分经过处理的照明值与因观测缺失而由算法填补的数值 [S06S07](#)。

该产品的一个像素（Pixel）约为500米见方。这种空间分辨率看不到一个银行账户，也看不到一台正在运行的电脑。即使在半公里范围内，市场外墙也会与旁边的道路、停车场、公共照明，以及经济权重很小的其他光源混在一起。相机同样无法提供另一种经济分辨率：两家相邻工厂创造同等价值，但其中一家夜间用光更多，这一差别无法由画面直接给出。

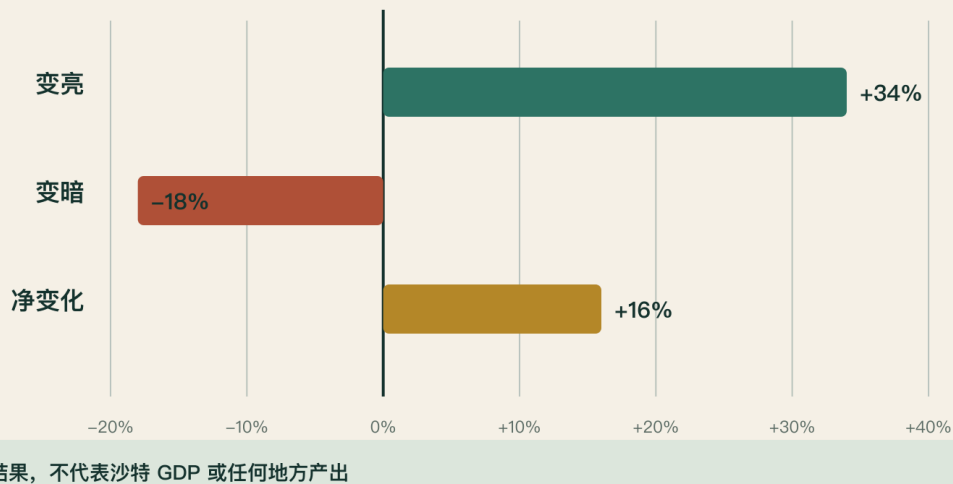
卫星产品中有一个很能说明问题的图层，名为“最新高质量检索”（Latest High-Quality Retrieval）。若云层遮挡某夜的观测，或读数没有通过质量门槛，处理流程可能使用最近一次可靠测量，或采用时间缺口填补（Temporal Gap-Filling）模型。某个数值标注为今天，并不总意味着它是今天新取得的光子观测。它可能源于早先观测与公开过滤规则。若我们声称能发现昨夜发生的意外，这一区别至关重要。区分当下信号与填补信号不是技术脚注，而是亲历事件的证人与描述该地日常习惯的人之间的区别 [S07](#)。

4. 2026年的一项研究：地球同时变亮，也同时变暗

2026年4月8日，Tian Li及其同事在《自然》（Nature）发表《卫星影像揭示人类夜间活动波动加剧》（Satellite Imagery Reveals Increasing Volatility in Human Night-time Activity）。团队利用每日夜间影像和连续变化检测（Continuous Change Detection）方法，研究2014至2022年人工照明的波动。全球结果并不是一条平稳上升的直线：部分地区的增亮量相当于基准总亮度的34%，另一些地区的变暗量相当于18%，最终全球净增幅为16% [S08](#)。

全球夜间灯光平衡，2014—2022

相对于 2014 年基线的全球夜间辐亮度变化



2014至2022年全球人工照明变化的分解

图1. 根据2026年《自然》研究，相对于2014年水平的全球人工照明变化构成。这些百分比不是GDP增长率，下降也不都意味着经济收缩。来源：[S08](#)。

比最终数字更重要的是两个方向背后的原因。有些地区因城市扩张或家庭电气化而变亮；有些地区因能源效率提高、过度照明受到限制，或旧灯具被发光二极管（Light-Emitting Diode; LED）替换而变暗；还有些地区因战争、危机或停电陷入黑暗。影像告诉我们每种情况的视觉结果，却不告诉我们其经济或道德性质。相同颜色可能同时描述一个改善照明的国家和一个生产受阻的国家。不能用同一种颜色判定一个经济体的命运。

这里还存在一个光谱问题。灯具更换会改变光的组成，而传感器对每种波长（Wavelengths）的响应并不相同。有关光污染（Light Pollution）的研究讨论了卫星记录与人类观察者所见之间的差异，也考虑到LED照明光谱变化可能产生的作用 [S09](#)。这并不意味着每一次卫星观测到的下降都由灯具造成；它说明，即使一个地方的社会功能未变，照明技术变化也可能改变我们与该指标之间关系的校准方式。

5. 一张地图上的三种经济

设想三个沙特街区：我不给它们编造名称，也不声称掌握任何测量。第一个街区里，一家服务企业把纸面流程改为软件，在现有办公室内完成更多工作。更好的组织和知识提高了增加值（Value Added），街区灯光却可能毫无变化。第二个街区新开了一座拥有明亮外立面和宽阔停车场的商业综合体，观测到的灯光骤增，但商铺入住率与盈利能力仍未知。第三个街区把路灯换成更高效的系统，向上逸散的光减少，地面服务反而改善。

卫星可能讲出三个与这些街区经济相反的故事：生产率提高之处显得停滞，商业可行性尚未证实之处显得增长，服务效率改善之处显得收缩。这个例子完全是假设性的，却说明为什么必须先定义目标，再选择指标。如果我们要了解通电聚居区延伸到哪里，灯光很有用；如果要了解软件和服务创造的增加值，它并不完整；如果要了解照明服务能否安全持续，就需要把它与电力和服务数据并用，而不是用它替代后者。

沙特经济又一次重排了问题。石油和天然气可能因火炬燃烧留下辐射，但石油产值并不是根据火焰上方升起的光计算的。电信、金融科技和计算等行业可以创造不断增长的价值，却无需在每个工作周期增设灯具。与此同时，宗教旅游、社会习俗和营业时段会塑造夜晚与劳动之间的季节性关系。仅在地图上识别位置还不够；必须识别灯光在该位置承担什么功能。

这不是放弃卫星遥感的理由，而是认真使用它的理由。无法区分信号类型的人，得到的不会是经济情报，只是一座配有快速加法器的影像库。

6. 不会一次成形的经济数字

2026年7月30日，GASTAT发布该年第二季度快速估算（Flash Estimate）。其网站显示，实际国内生产总值（Real Gross Domestic Product; Real GDP）同比下降 4.8%。这是一个在特定日期发布的初步估算，不能脱离时间看待，也不能在未控制季节调整、基期定义和参考年份的情况下与其他季度比较 S10。引用它不是为了诊断沙特经济，而是为了说明统计学家都熟悉的问题：官方数字描述的是已经结束的时期，在数据收集和整理之后才出现，并可能在后续修订中改变。

有些经济学家希望在7月报告到达之前了解7月活动。这就是即时预测（Nowcasting）的任务。它既不是对遥远年份的预言，也不是试图证明统计机构错了，而是对最终数据尚未公布的当前量作出估计，并明确记录估计时可用的信息。悖论在于，卫星影像在采集时间上领先，却未必在分析可用时间上领先。有些产品需要处理和审查，有些会填补观测缺口，而发布更快的经济变量可能已经先一步到达。

因此，我建议为每项卫星估计分别附上四个日期或描述，而不是把它们揉成一个“今日更新”标签：采集时间、处理后数据可用时间、预测发布时间，以及目标数据版本（Data Vintage）。如果我们用每项统计的最终修订值和当时尚不可用的处理后影像，对十年数据进行模型测试，我们完成的可能是事后重建，而不是对当时真正可知信息的诚实模拟。

这种错误叫作数据泄漏（Data Leakage），而且极为隐蔽。它不会在指标中塞入明显谬误，只会让当时尚不存在的信息提前进入决策室。事后一切结果都显得漂亮。如果可以在比赛结束后修改预测，街坊里的算命先生也会成为天才。

7. 模型从一扇新窗口得到了什么？

有一个简单方法可以推翻许多夸大的说法。不要问“灯光是否与活动相关”，而要问：**与已经可用的传统数据相比，灯光能否改善对活动的估计？**这就是它的增量预测价值（Incremental Predictive Value）。如果模型已经知道汇总销售变化、用电量和部分已发布的生产指标，加入卫星影像后仍未降低

样本外误差，那么我们只是增加了一个技术层，并没有获得对决策有用的信息。

回答这个问题，需要尊重时间顺序的实验。先用当时可用的传统数据构建基准模型，再构建一个同时看到这些数据与灯光指标的模型。每个模型都只用当时已经可用的过去进行训练，预测统计尚未出现的时期，然后推进到下一时期并重复。这样的滚动起点评估（Rolling-Origin Evaluation）能减少一种诱惑：拿未来训练模型，再分析一个已经知道结局、被重新排列的过去。

模型可以采用简单的正则化回归（Regularised Regression）、动态因子模型（Dynamic Factor Model），或更复杂的概率模型。复杂性不是保证。在较短的月度序列中，深度模型可以记住几十个季节与地区差异，在见过的数据上给出漂亮预测，却在未见过的未来挣扎。任何新模型只有在与公平而简单的基准比较、固定每个变量的发布日期，并阻止未来信息穿过训练—测试边界后，才有资格被称为智能。

8. 一项小实验揭示理解上的巨大损失

本文运行了一项预先说明的研究模拟。它没有使用沙特经济数据，也没有下载真实卫星场景；它生成了180个合成月份，其中包含潜在经济活动、当月即可获得的传统经济指标，以及一个同时含有活动信息和季节噪声的灯光指标。我们假定真实活动值延迟两个月才可获得。在合成月份116，我们改变了照明技术或政策，使灯光指标下降4个点，但活动不会因此下降。数字、噪声和随机种子均在研究文件中公开，可重新运行。这是实验室，不是一段被隐藏的沙特历史 [S13](#)。

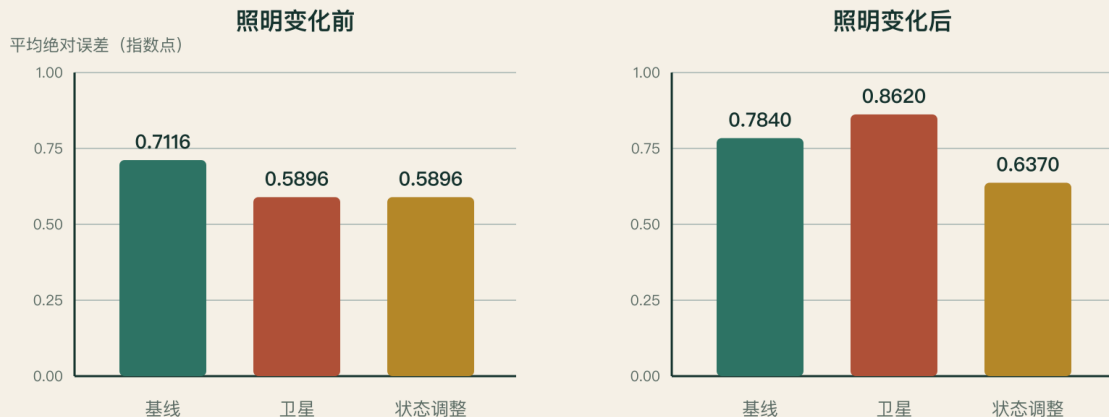
测试从合成序列第65个月开始，使用遵守目标发布滞后的扩展训练窗口。我们比较三个模型：仅用传统指标和过去活动的模型；传统指标加灯光的模型；以及只被告知照明政策或技术在某个日期发生变化的模型。最后一个模型事先不知道影响的数值大小，而是从变化后逐步积累的观测中学习。在所有模型中，平均绝对误差（Mean Absolute Error; MAE）都以合成活动指数点计，而不是沙特GDP增长的百分点。

合成测试阶段	传统模型	加入灯光但不理解变化	加入灯光且知道变化发生
照明变化前，51次估计	0.712	0.590	0.590
照明变化后，63次估计	0.784	0.862	0.637

第一阶段，灯光增加了有用信息并降低误差。第二阶段，当灯光与活动的关系发生变化时，同一个指标却变成负担：天真使用它的模型比传统模型表现更差。识别照明制度变化的模型随后重新从信号中取得价值。这些结果完全取决于合成假设和单一随机种子。它们既不估计这种现象在沙特出现的频率，也不证明第三个模型永远有效。对114次合成估计的实验，并不是对114个真实月份的国家研究。

照明变化前后的合成回测

合成潜在活动目标的平均绝对误差；越低越好



完全合成的模拟；没有沙特观测值或实测预测准确度。

合成模拟中照明技术变化前后三个模型的误差比较

图2. 计算机生成模拟中三个模型的平均绝对误差。该图不描述沙特经济或真实卫星数据。代码、输入和训练日期保存在随附文件中 [S13](#)。

更重要的悖论是：增加一个变量，可能让全序列平均误差略有下降，却让后期年份表现恶化。因此，仅看全国平均值可能掩盖指标有效性的逆转。为了展示禁止出现的数据泄漏，我们创建了一个合成版本，把未来卫星读数的35%混入当前指标。本次运行中它并未改善表现。但无论结果如何，教训相同：违反信息先后顺序的预测在方法上都是无效的。表现差不能免除作弊，准确率高也不能为它辩护。

9. 当文化成为方程中的变量，而不是引言中的一段话

“季节调整”一词掩盖了一处分歧：有人把每个月想象成可以互换，另一些人则知道社会会重新分配时间。斋月按照伊斯兰历在公历月份间移动，朝觐的公历日期每年也不同，节日和季节活动并不总在同一位置。算法可能学会“8月是明亮月份”，却在斋月逐年移动时失败。因此，模型需要与真实季节对应的时间变量，不能只用月份编号；同时还要把具有真实经济价值的季节效应，与纯粹视觉效应分开。

这并不是要求用节日名称淹没模型，而是要求检验假设。有些地区只需调整日照时长和多云夜晚；另一些地区加入社会日历后才会减少误差。居民区灯光提供的信息可能少于访客消费。只有依照预先规定的分析规则进行样本外测试，才能作出判断。

在沙特，这个细节可能成为本地研究优势。全球数据能观测辐亮度，却未必包含关于生活节律、街区功能边界、休闲餐饮和交通习惯变化，以及朝觐与副朝季节的精确知识。为这些机制构建恰当变量的研究者，可以形成对全球数据的原创阿拉伯语与沙特解释，而不是买下一张影像，再把城市名字贴上去。

10. 多传感器的诱惑：证人更多，证词仍不一致

可见光并不是空间观测的边界。哨兵1号系统的合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar; SAR）可以在夜间、透过云层探测地表变化，但仍受雷达传感自身条件与限制约束 [S11](#)。其他信号还包括来自船舶自动识别系统（Automatic Identification System; AIS）的汇总航行数据、城市活动影像，以及二氧化氮（NO₂）等气体浓度指标。然而，证人数量增加，并不会让证词变得相同。

雷达记录的是电磁后向散射（Electromagnetic Backscatter），它受表面粗糙度、观测角度、湿度和材料构成影响，并不代表建筑内发放的工资总额。船舶航线不等于所载货物数量，识别装置关闭也不能证明船只消失。气体浓度既受某些排放影响，也受天气影响。把不同物理过程塞进同一个软件字段，制造虚假的经济共识，在科学上是错误的。

这些差异反而能支持定性情报。如果某物流区灯光稳定，而有记录的船舶活动下降，我们可以追问：第一项指标是否看不见某一类商业放缓？如果港口汇总活动变化、且有记录的卡车流量上升，观测系统可以检验这些证据是否相容。指标冲突可能是值得理解的丰富科学结果，而不是应当埋进“多模态融合”（Multimodal Fusion）一词下的错误。

最关键的保障，是不要以经济分析为名绘制敏感关键基础设施地图，也不要吧数据连到可识别的设施。按行业和地区汇总，已经足以建立有用的经济假设，无需把观测系统变成一份运营目标空间指南。

11. 从会看的望远镜，到能证伪自己的实验室

本文为沙特观测体系提出的是一个具体项目，而不是一家负责囤积影像的新机构。它的研究名称是卫星信号价值实验室（Satellite Signal Value Laboratory）。第一天做的不是推出完整国家指数，而是开展几十项结果可以被证伪的小实验。

第一项实验关注部分地区的非石油活动汇总指标，前提是存在官方汇总数据。研究者把月度灯光测量与观测质量图层、在可得时记录的照明更换事件、社会日历，以及处于正确历史版本的传统经济指标结合起来。他们公布估计发布时间，把增强模型的误差与简单经济基准比较，并在不同年份和季节重复测试。如果指标未能改善表现，这仍是一项有用结果：它指出哪些地方不值得投资新影像。

第二项实验在港口或地区层面研究贸易与物流活动，使用汇总海事指标和适当影像。目标不是识别单艘船只，而是追问：与已发布贸易指标相比，遥感是否更能发现流量变化？第三项实验比较不同类型的经济区域：创造近乎不可见价值的服务区、与物质能源消耗关系更紧密的工业区，以及受宗教或旅游季节影响的区域。若预测能力在这些类别之间不同，让模型适应地点功能，可能比训练一个吞入一切的庞大国家模型更有价值。

究竟该监测什么？不是新闻稿里一行“准确率98%”。我们要看到未来测试中预测误差减少多少，这一改善在照明技术变化后是否稳定，影像比经济数字早到多少天，高质量观测夜晚占比多少，地区间差异如何，以及不确定区间的实际覆盖率是否经过评估。错误必须与成功一样充分披露。

12. 承认边界的信息，才有战略价值

围绕这个问题可以形成一整套经济活动，但它不会只像卫星影像行业。产品可以包括：维护时点数据存储的工具、感知来源链的影像处理、在独立未来时期运行的时间序列回测引擎、检测指标与目标量之间关系断裂的系统，以及明确说明知识边界的经济整合方法。

企业或许能由此向地区数据薄弱或发布缓慢的国家输出服务。成功不应以处理了多少影像、在互动地图上给多少国家着色来衡量，而应看它们能否在决策者原本会知道真相的日期之前，改善一项具体决策。如果这些产品在数据丰富的经济体中没有增量预测价值，更适合的市场可能是监测城市扩张、识别停电，或在缺乏详细统计的地方观察活动的空间变化。这些是不同的研究市场，不应塞进同一个主张。

沙特可以把公共空间数据视为可输出国家分析方法的原料。这样的行业需要懂光学、数据、经济学和人工智能的专家，知道物理学从哪里开始，经济论证在哪里结束；也需要本地专家解释，为什么某段时期城市生活从白天移向夜晚，为什么更好的照明工程反而让卫星看到更少的光，以及为什么有些价值不留清晰的热学或光子痕迹。

真正令人振奋的，不是承诺让我们“看见一切”。那只是穿上新设备名称的旧幻觉。令人期待的是学会影像不意味着什么，再设计实验，找出它真正能承载的意义。科学进步并不始于第一张让部长或投资者眼花缭乱的图表，而始于第一个诚实告诉他们的结果：这个信号没有帮到我们；或者，它在这里有效、在那里无效；或者，它曾经有效，却在灯具改变后失效。

13. 路灯无法捕捉的经济

如果从太空给利雅得铺上一张半公里网格，我们会得到数以百万计的地表、灯光与时间关系。其中没有任何一项自带生产率定义，也没有无偿劳动清单、在小公寓里设计的软件价值，或装满货物的港口与灯火通明的港口之间的区别。但网格包含真实物理观测，不是任何机构能在新闻稿中凭空造出的，因此值得认真对待。

空间经济中最天真的说法也许是：“卫星不会说谎。”卫星并不承担我们所期待的那种真话义务，因为它一开始就没有提供经济证词。光子穿过镜头、校准和校正算法，然后由人类把它们放入一个含有自选目标与假设的模型。观测可能完全正确，却回答了错误的问题。

当2030年到来、沙特拥有更广泛的传感与分析层时，真正的领导力问题不会是屏幕上能点亮多少城市，而是：在哪些类型的决策中，这些信号让我们更早知道了真实情况？又有什么证据表明，没有它们，我们原本会判断错误？

这就是在轨道上拥有一只眼睛，与在地面上建立一种研究心智之间的距离。

文章来源与可核查材料

1. NASA, *The Lights of Ramadan and Eid al-Fitr*, 2015. <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/the-lights-of-ramadan-and-eid-al-fitr-84923/>
2. Miguel O. Román and Eleanor C. Stokes, *Holidays in Lights: Tracking Cultural Patterns in Demand for Energy Services*, *Earth's Future* 3 (2015), 182 – 205. <https://doi.org/10.1002/2014EF000285>
3. Saudi Press Agency, *GASTAT: Total Number of Pilgrims for Hajj 2026 Reaches 1,707,301*, 2026. <https://www.spa.gov.sa/en/N2599493>
4. J. Vernon Henderson, Adam Storeygard and David N. Weil, *Measuring Economic Growth from Outer Space*, *American Economic Review* 102(2), 2012, 994 – 1028. <https://doi.org/10.1257/aer.102.2.994>
5. World Bank, *Measuring Quarterly Economic Growth from Outer Space*, 2022. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/692011641480491613/pdf/Measuring-Quarterly-Economic-Growth-from-Outer-Space.pdf>
6. NASA Goddard Space Flight Center, *Black Marble Product Description*. <https://viirsland.gsfc.nasa.gov/Products/NASA/BlackMarble.html>
7. NASA, *Black Marble User Guide, Collection 2.0*, 2024, sections on temporal gap-filling and product quality flags. https://viirsland.gsfc.nasa.gov/PDF/BlackMarbleUserGuide_Collection2.0.pdf
8. Tian Li et al., *Satellite Imagery Reveals Increasing Volatility in Human Night-time Activity*, *Nature* 652 (2026), 379 – 386. <https://doi.org/10.1038/s41586-026-10260-w>
9. Salvador Bará and José J. Castro-Torres, *Diverging Evolution of Light Pollution Indicators*, author manuscript, 2024. <https://arxiv.org/abs/2409.13111>
10. General Authority for Statistics, *GDP: Flash Estimate Q2/2026*, published 30 July 2026. <https://www.stats.gov.sa/en/search-publication?category=publication&delta=4&q=الناتج+المحلي+الإجمالي>
11. *Synthetic Vintage-Aware Backtest*, version 1.0. See [analysis/reproduce.py](#), [data/backtest_metrics.csv](#) and independent companion.
12. European Space Agency, *Sentinel-1 Mission*. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1

****制作说明：****这篇调查研究文章依据已发表来源和有记录的合成分析撰写。它不声称通过卫星直接测量沙特经济增长，也未使用机构私有数据；本文尚未经过独立科学同行评审。