

艺术家绘制的食双星概念图 图片来源：ESO

# 我的天文巡天生涯之变星

□ 孙国佑

## 一、变星：宇宙中闪烁的恒星密码

在人类仰望星空的漫长历史中，恒星曾被视为永恒不变的光点。直到16世纪，法布里修斯发现米拉变星（鲸鱼座 $\alpha$ ）的亮度周期性起伏，才揭开了变星世界的神秘面纱。变星，即亮度随时间发生周期性或非周期性变化的恒星，其变化背后蕴含着恒星内部物理过程、双星相互作用乃至恒星演化的奥秘。

变星的亮度变化幅度从难以察觉到超过10星等，时间尺度从毫秒到数年不等。这种变化并非表面的“闪烁”，而是由深刻的物理机制驱动。当两颗恒星的轨道平面与地球视线接近时，相互遮挡形成食双星的光变曲线；恒星内部压力与引力失衡引发脉动变星的周期性膨胀收缩；恒星表面黑子活动或形状不规则导致自转变星的亮度调制；而致密天体吸积伴星物质则造就了X射线变星的高能辐射现象。

在现代天文学研究中，变星被誉为“宇宙的心电图”，它不再仅仅是亮度变化的恒星样本，更能通过亮度的韵律，向人类传递恒星内部活动与星系演化的关键信息。凭借独特的物理特性，不同类型的变星成为了探索宇宙的重要工具。造父变星的周光关系是测量宇宙距离的“标准烛光”，食双星是精确研究恒星质量与半径的天然实验室，天琴座RR型变星则是追溯银河系结构、还原星系形成历史的重要探针。

## 二、变星的分类图谱：从光变曲线到物理本质

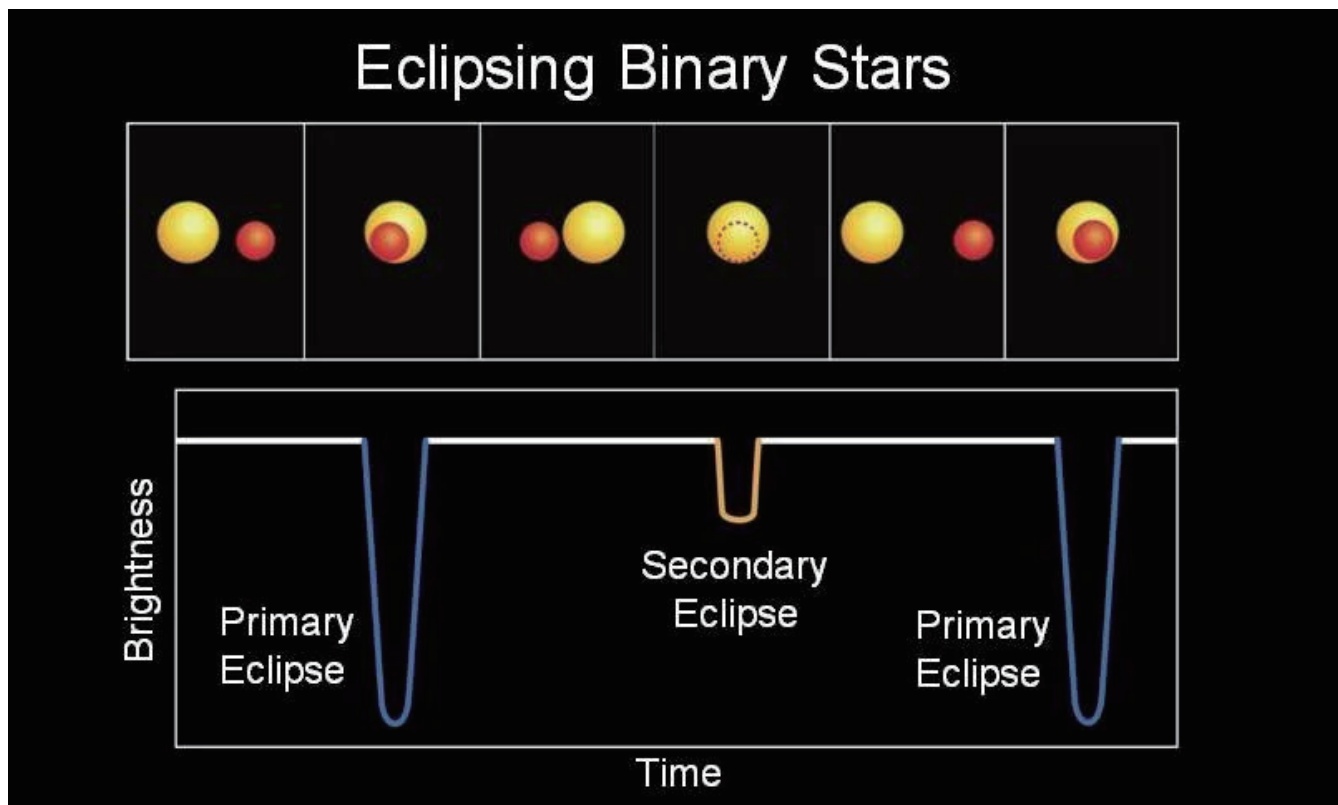
变星并非单一现象，其亮度变化的表象之下，隐藏着截然不同的物理机制。对变星进行科学分类，是理解其内部结构、演化阶段和相互作用的关键钥匙。目前广泛采用的标准分类体系主要依据《变星总表》（GCVS）及国际变星索引数据库（VSX）。

### 2.1 食双星

食双星亮度变化由双星系统几何构型主导，非恒星自身物理性质改变。当两颗恒星轨道平面与地球视线近乎平行时，会周期性相互遮挡（即“掩食”），导致观测到的系统亮度规则周期性下降。

### 2.2 脉动变星

这类变星的亮度变化源于恒星大气外层周期性膨胀与收缩。恒星脱离主序、进入赫罗图不稳定带时，内部电离区能量吸收与释放失衡，打破引力与辐射压的流体静力学平衡，外层大气先因辐射压膨胀，后因引力收缩，通过改变恒星半径与有效温度，引发亮度周期性起伏。



食双星的示意图：两颗互相绕转的恒星由于周期性的相互遮挡而发生亮度变化。

图片来源：NASA

### 2.3 自转变星

自转变星的亮度变化由恒星自转调制，根本原因是表面亮度不均或投影面积变化，具体分三类：一是强磁场导致元素分布不均形成明暗斑；二是表面有大尺度黑子/亮斑；三是高速自转呈椭球状致投影面积变化。这些不均区域或面积变化的截面交替朝向地球，使总光流量周期性起伏，光变周期即自转周期，是研究恒星表面活动、磁场等的关键窗口。

### 2.4 爆发变星

这类变星的亮度变化源于恒星或其系统突发性的、非周期或准周期性的能量释放事件。其特点是短时间内亮度急剧增加后缓慢衰减。爆发机制主要有：表面剧烈活动、晚期壳层热核闪、双星质量转移不稳定、年轻恒星体（YSO）吸积爆发或物质抛射，是研究恒星形成、晚期演化等的重要对象。

### 2.5 X射线变星

这类天体在X射线波段亮度变化显著，核心机制是致密天体（中子星/黑洞）吸积伴星物质。伴星气体被剥离形成吸积盘，物质坠落时引力势能转热能，释放强X射线。X射线亮度变化主要源于三点：吸积率不稳定、轨道运动导致视线遮挡、致密天体自身旋转，是研究极端物理条件下物质行为的重要手段。

### 2.6 激变变星

激变变星囊括超新星、新星、亮红新星等剧烈爆发类型，因其已在往期详述，本文不再展开。它们共同以巨量物质抛射或热核反应点燃宇宙烟火，在恒星演化终章绽放最耀眼的光芒。

## 三、巡天之路：从数据海洋到新变星发现

### 3.1 变星启蒙

2009年，我参与了星明天文台的银河系新星搜寻项目。在那段时间里，我发现了一些亮度变化极为剧烈的天体。起初，我误以为它们是新星，但随着进一步的学习和资料查阅，我才意识到，这些天体其实是脉动变星的一种，叫米拉变星。

这是我第一次真正接触到变星。我将这一发现上报至国际变星索引数据库（VSX），并获得了认可，这也成为了国内天文爱好者发现的第一颗新变星。然而，回头来看，那时的我对变星的理解还非常浅显，上报的内容也极不规范。我仅仅证明了该天体存在显著的亮度变化，却未能提供变星研究中所必需的关键参数，比如变星的分类、周期、振幅、亮度区间、历元时刻等等。

正是这次经历，让我第一次知晓变星巡天这一领

域的存在。但也正是从那一刻起，我开始意识到，真正的变星发现远不止看到亮度变化这么简单。如何系统地搜寻变星？如何计算光变周期？如何获得各类参数？这些问题，当年的我根本无从着手。

这段经历虽然略显稚嫩，却成为我深入变星世界的重要启蒙。它不仅点燃了我对变星研究的兴趣，也让我第一次体会到天文观测与数据分析之间的巨大鸿沟。

### 3.2 解决发现变星的主要问题

意识到当年的不足后，我开始沉下心来梳理变星发现的核心痛点。没有可靠的测光数据支撑、无法精准计算光变周期、关键参数（如分类、极大极小时间）缺失、上报流程不规范。这些问题像一道道关卡，挡住了从发现亮度变化到完整变星研究的路。而攻克这些关卡的过程，其实也是一段工具与数据不断升级的递进之路。

◎ 第一步：测光数据获取——从“不得已的选择”到“便捷的公开资源”

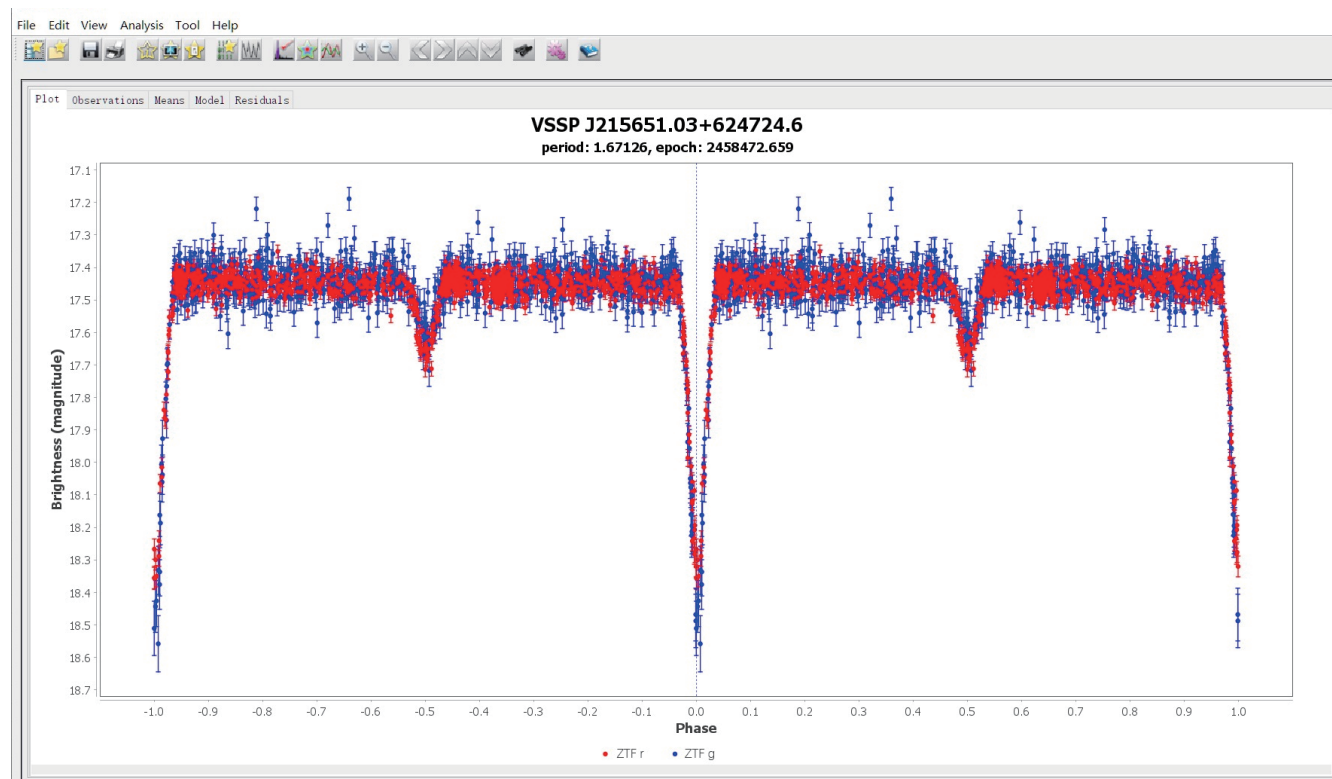
要研究变星，第一步就得拿到能用于分析的光变数据。早期的我没有现成的公开数据可用，只能靠自己处理自有数据（即自己或团队观测获取的原始图像），这时CMunipack成了唯一的选择，倒不是它有多完美，而是当时Windows平台上，能稳定处理天文

图像、提取光变曲线的软件寥寥无几。但CMunipack仅能输出目标星于参考星之间的亮度星等差，我还需手动查星表，获得参考星的星等，再用Excel算真实星等，流程繁琐。这种手动处理加自有数据的模式效率极低，直至接触ZTF（兹维基暂现源巡天）公开数据才彻底改变。ZTF数据量大且提前抽取光变曲线，省去原始图像测光步骤。数据经专业校准，可靠性远胜自有数据，无需担心校准出错或手动匹配标准星，可将精力聚焦参数分析，而非数据获取。

◎ 第二步：周期计算等问题的突破——从“多软件拼凑”到“VStar一站式解决”

周期是变星的身份证，但早期的我连算出一个可靠周期都要走很多弯路。那时我还没找到高效工具，只能用多款周期计算软件拼凑着算，过程充满了妥协。更麻烦的是画图，当时还没能获得专业的天文制图工具，只能用Excel或Origin这类通用软件画相位图，不仅过程繁琐效果也不理想。

这种算周期靠拼凑、画图靠通用软件的日子，直到找了更强大更全面的软件VStar后才结束。VStar简直是变星分析神器，导入数据后能自动扫描周期，生成的功率频率图，会标注出功率最高的周期，功率越高可信度越强。它还能直接画相位图，支持手动调整周



VStar软件界面

期和历元时刻，以前用多款软件才能完成的工作，现在VStar一个就能搞定，效率提升了数倍。

◎ 第三步：规范上报——从“粗糙提交”到“标准化流程”

早期上报变星时，虽然参数算全了，但流程还是很粗糙。比如坐标用的是自己观测时的定位数据，精度不够。画图用的Origin做的相位图，线条生硬，因为历元时刻不准还导致曲线不对称。好在那次最终通过了VSX审核，但也让我意识到规范的重要性。

后来随着工具升级，我慢慢整理出了标准化上报流程。坐标优先用Gaia DR3数据，相位图必须用VStar画，确保曲线对称、获得准确的历元时刻和星等极大值极小值区间等。这段从凑合用工具到用对工具、从自有数据到公开数据的过程，其实就是我攻克难题的过程。早期的那些笨拙尝试虽然麻烦，却让我摸清了变星分析的每一个细节。而后期VStar和ZTF的出现，不是替代了早期的努力，而是让那些曾经的不得已，变成了如今的高效精准。正是这种递进，让我在变星发现之路上真正步入了正轨。

### 3.3 团队力量：VSSP项目的崛起

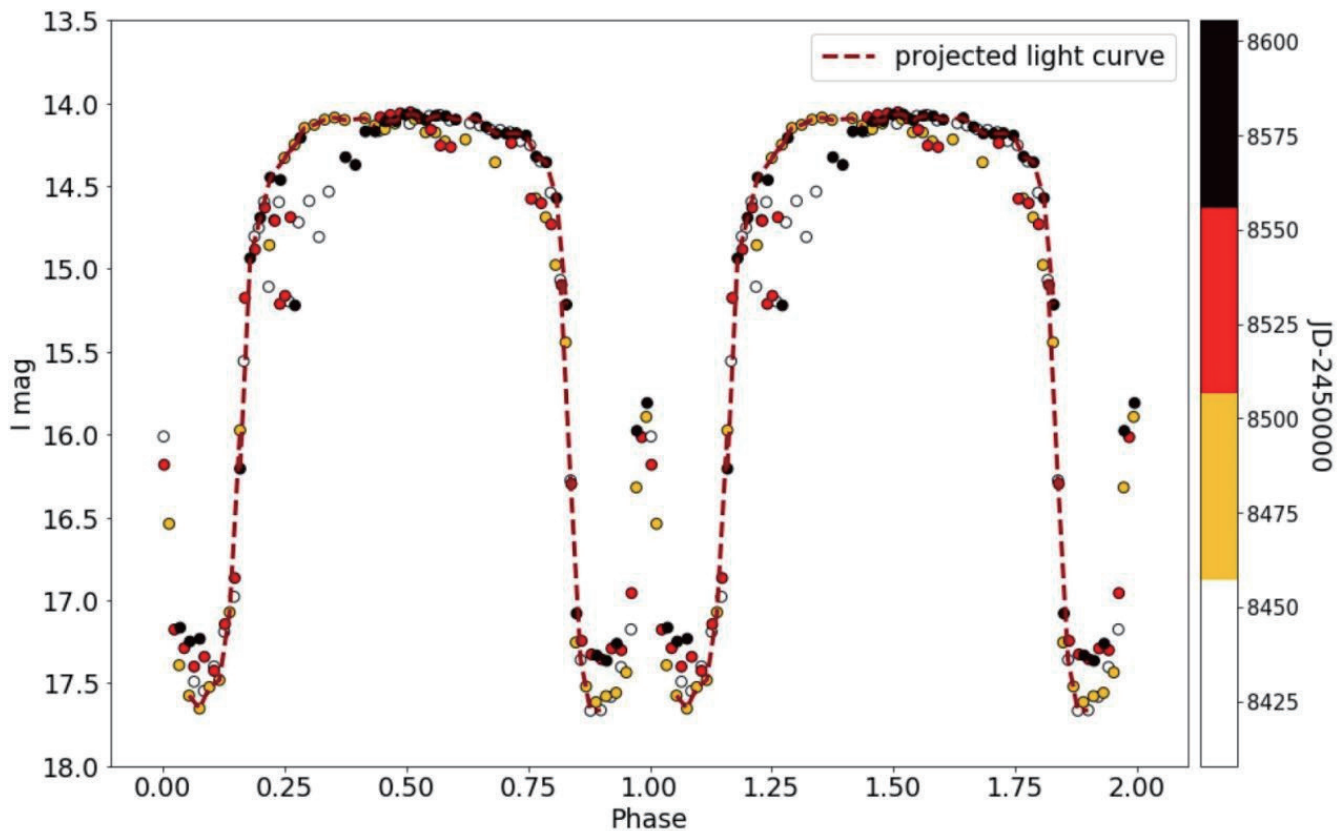
随着发现量的持续增加，单人作战的局限性愈

发凸显——数据处理的吞吐量不足、候选体验证的视角单一、复杂天体的分析深度有限，这些瓶颈让我深刻意识到，变星研究的规模化突破，必然依赖团队的协同力量。2015年，我联合星明天文台的几位骨干成员，正式启动“变星搜寻项目”（VSSP, Variable Star Search Program）。

VSSP的起步建立在星明天文台的技术积淀之上。作为国内唯一从事业余巡天的天文台，星明天文台当时已拥有多台远程控制观测设备，积累了海量自有观测数据，这为VSSP提供了最初的“原料库”。但团队成立之初便确立了“开放融合”的定位。不局限于自有数据，而是主动对接全球顶尖巡天项目，逐步整合TESS（凌日系外行星巡天卫星）的空间测光数据、ASAS-SN（全天自动超新星搜寻）的地面广域数据，以及ZTF的高时间分辨率暂现源数据。这种数据整合能力成为VSSP的核心竞争力。截止到2025年10月，VSSP团队已发现新变星五百多颗，成为国际上最活跃的变星研究团队之一。

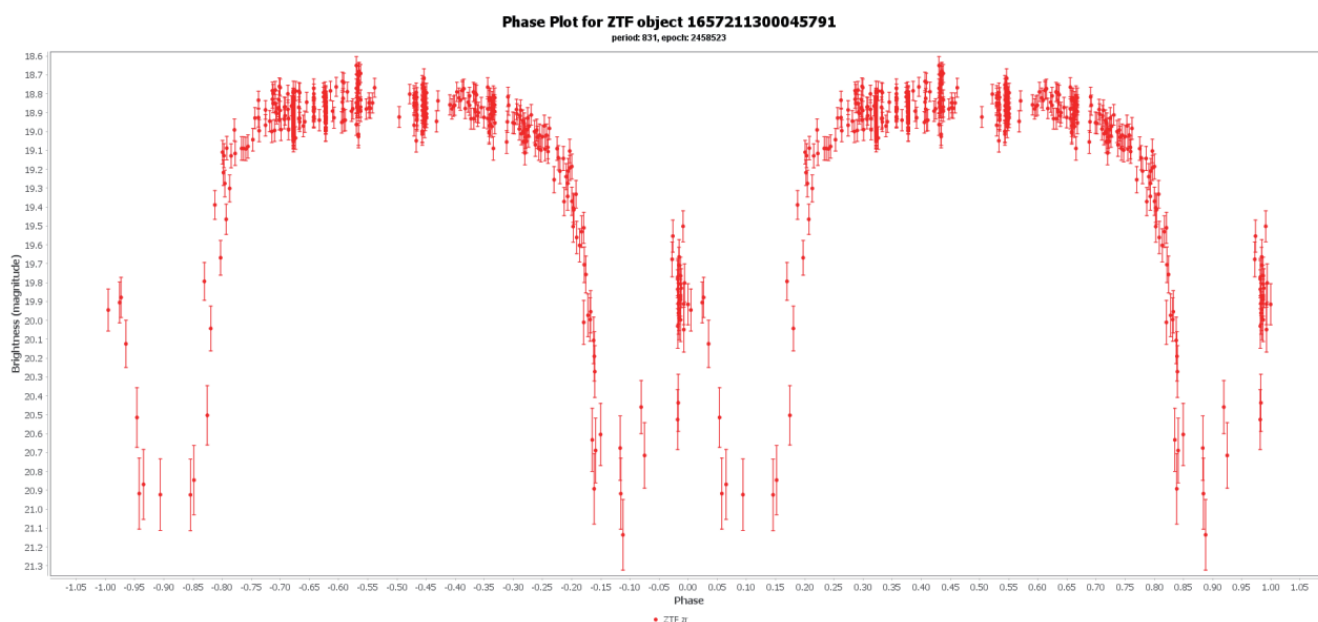
### 3.4 重大发现：E-DO变星与新类型的突破

在我与团队的天文巡天生涯中，最令人兴奋的莫过于发现全新类型的天体。2024年6月，我们通过星



KH 15D的相位图。

图像来源：Aleezah Ali/University of Washington



VSSP J060413.69+300728.8 相位图，

图源：星明天文台

明天文台VSSP变星搜寻项目在分析ZTF公开历史数据时，发现了一颗编号为VSSP J060413.69+300728.8的奇特变星，它位于SH 2-241星云边缘区域。这颗变星显示出831天的超长周期，在每个周期中约有40%的时间处于变暗阶段，更为独特的是在变暗阶段中心附近出现了一个明显的凸起特征，亮度短暂增加后又继续变暗，这种光变模式与已知的所有变星类型都不相符。我们排除了米拉变星、武仙座AM型变星和大陵型变星等可能性，即使它与太阳系内天体掩星产生的中心闪类似，但持续时间之长排除了太阳系天体的可能性。困惑之中，团队成员赵经远联想到清华大学祝伟副教授团队2022年报道的类似KH 15D的系统，这是一个被星周盘掩食的双星系统。对比光变曲线后，我们发现这颗变星与KH 15D在掩食中心呈现类似的增亮特征，KH 15D的星周盘模型能够很好地解释我们的观测结果。星周盘与双星轨道平面成一定角度，随着盘的缓慢摆动，逐渐遮挡和露出恒星，产生长时间掩食和中心闪现象。我们将这一发现上报至VSX，经过与管理员Sebastián Otero先生多次沟通，最终创建了E-DO这一全新的变星分类，意为被星周盘掩食的天体，这使得食变星家族从传统的大陵型、天琴座 $\beta$ 型和大熊座W型三大类型扩展出第四大类型，为变星研究开辟了新领域。这类被星周盘掩食的变星对于研究行星形成过程具有重要意义，因为星周盘中的颗粒可能是行星形成的起点，KH 15D就被誉为理解行星形成的“罗塞塔石碑”。我们的发现为这类特殊天体增添了新成员，

为研究星周盘的构造和演化提供了新的样本。

#### 四、总结：从业余到专业的跨越

在数十年的变星巡天事业中，我累计发现包括激变变星在内的新变星千余颗，覆盖数十个子类型，这一成果也让我跻身世界上发现变星类型最多的业余天文学家行列。

这些发现的价值远不止于数量，它们既极大丰富了全球变星数据库，为天文学基础研究提供了不可或缺的观测数据支撑。更能通过深度分析，帮助我们更清晰地揭示恒星的内部结构、演化轨迹与星系动力学特性。

值得欣慰的是，在我的带动与影响下，国内越来越多天文爱好者开始投身变星搜寻与研究领域。如今，除VSSP团队外，国内其他爱好者团队发现的变星数量已达数百颗，形成了变星研究的国内热潮。

这份由热爱点燃的探索热情，让我对变星巡天事业的未来充满更多期待。我由衷希望，未来能有更多人无论是怀揣好奇的青少年、初涉天文领域的研究者，还是始终保有星空情怀的普通人，能加入到变星搜寻与研究的队伍中来。期待更多人能与我们一同仰望星空、探寻未知，让个体的热爱汇聚成群体的力量，推动中国变星研究，也让更多人在与宇宙的对话中，感受天文学研究的独特魅力与价值。■

(责任编辑 李时雨)