

科技

文摘

我国第三次珠峰高程测量结果公布在即

改变海陆格局的珠峰 有着怎样的前世今生



图/视觉中国

■白玲

我国第三次珠峰高程测量结果公布在即。珠穆朗玛峰的前世今生究竟是怎样的？一起来看8000米高峰背后的神秘历史与美丽风景。

第三极隆起

大陆碰撞改变海陆格局

喜马拉雅山脉长2500千米，平均海拔约6000米，总面积约40万平方千米，是高原隆升和大型山地的典型代表。人们通常将青藏高原和南极、北极相提并论，称为地球的“第三极”。

作为整个山系的最高地段，珠穆朗玛峰四周地形十分险峻，气象环境瞬息万变。1960年，中国登山队首次从北坡征服珠峰，揭开了现代青藏高原研究的新篇章。60年来，我国对珠峰进行了三次较为系统的科学考察，提出了青藏高原的板块构造模型，但以珠峰为代表的喜马拉雅山脉的隆升过程，还没有完全建立相关模型。

2017年，我国第二次青藏高原综合科学考察研究启动，对珠穆朗玛峰地区进行了更为系统的多学科综合考察，详细给出了大陆碰撞对海陆格局改变、大陆俯冲对高原隆升制约等过程的形成机制，揭示了高原隆升对气候环境的影响，取得了丰硕的成果。

珠峰的形成经历了一个漫长的过程，见证了地球演化历史上沧海桑田的巨变。它包括新特提斯洋的俯冲、印度和欧亚大陆的相互碰撞、印度大陆板块的深俯冲三个阶段。

在距今约3.6亿年前的远古时期，地球上仅存在两个超级大陆：一个是位于北半球的劳亚大陆，由现今北美大陆、格陵兰岛及欧亚大陆的北部组成；另一个是位于南半球的冈瓦纳大陆，包括今天的南美洲、非洲、印度、澳大利亚、阿拉伯和南极等大陆。珠峰今天的所在地曾经是广阔的大洋，类似于今天的太平洋。

当时的喜马拉雅部分，则位于印度次大陆最北缘。在恐龙称霸地球的时代（侏罗纪晚期，距今约1.5亿年），印度次大陆开始从冈瓦纳大陆分离，并持续不断地向北快速漂移。当它漂移了近1亿年后，终于成功“靠岸”，喜马拉雅部分把先期从冈瓦纳大陆分离的羌塘和拉萨地块紧紧地挤压在欧亚大陆南部，组成了青藏高原的核心（图1）。

经过20年的研究，科学家确认，印度—欧亚大陆的相互碰撞首先发生在喜马拉雅山中珠穆朗玛峰附近，初始碰撞时间约为6500万年前，此后逐渐向东两侧扩展，在缅甸和帕米尔一带的碰撞时间为5500—5000万年前。这一发现改变了之前关于初始碰撞“首先在西构造结束，而后向东扩展”的认识。

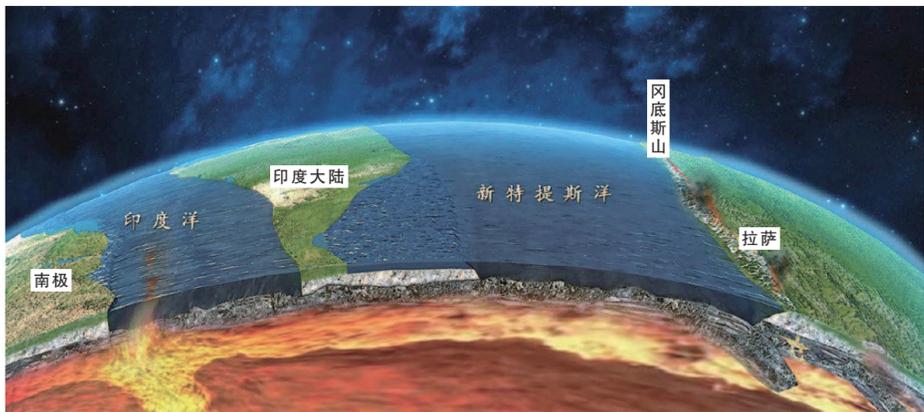


图1：喜马拉雅山的演化过程（图1、2均中国科学院青藏高原研究所供图）

喜马拉雅山脉是世界上最雄伟高大而又最年轻的山系，它逶迤绵延在青藏高原的南缘，犹如一道巨大的生态安全屏障，守护着我国的西南边陲。

屹立于喜马拉雅山脉中段的世界最高峰——珠穆朗玛峰，因其独特的自然环境和强烈的构造运动，长期以来备受各方关注。

珠穆朗玛峰的形成是印度和欧亚大陆发生强烈碰撞挤压的产物。在地球的演化历史上，曾经发生过多次大洋关闭以及大陆碰撞，而这里的碰撞所引起的地表隆起是最显著的。它塑造了高耸而广阔的喜马拉雅山，还引起了全球海陆格局、地形地貌、生物演化和气候环境的巨大变化。

揭秘深部结构：大陆俯冲控制高原生长

高山地貌的形成涉及到很多地球内部的驱动力，很大程度上取决于地下断层的性质和几何形态。

从南到北，喜马拉雅山脉被出露地表的断层分为四条不同宽度的构造单元：次喜马拉雅（海拔1000—1500米的丘陵地带，气候温暖，森林茂密）、低喜马拉雅（海拔3500—4000米，山峦重叠，青山绿水）、高喜马拉雅（海拔6000米以上，山壁耸立，冰雪覆盖）、特提斯喜马拉雅（海拔4000—5000米，山脉纵横，降雨稀少）（图2）。

人们过去普遍认为，随着印度板块像推土机一样向喜马拉雅下方不断推进，二者之间的边界断裂（主喜马拉雅逆冲断裂）在地下均

匀地向北倾斜。通过进一步观测，科学家发现，喜马拉雅山脉沿着自西到东的弧形走向并非均匀的，在东西方向上，边界断裂的形态和物质成分存在着明显的横向变化。不过，这些认识还只是基于相当有限的观测资料。

在印度—欧亚板块持续不断的挤压过程中，不断孕育和爆发着大大小小的地震。科学家通过地震台站收集信息，逐步揭开了珠峰深部结构的神秘面纱。

2015年4月25日，在珠峰以西约150千米的尼泊尔首都加德满都附近发生了8.1级地震，此后余震活动持续不断。五年来，科学家在震源区共记录到了千余次3.5级

以上的余震。得益于近距离的观测（以中国科学院青藏高原研究所和中国地震局地球物理研究所为主），使人们“看”到了更加清晰的地下深部结构图像。

在印度板块向北俯冲的挤压作用下，作为边界断裂的主喜马拉雅逆冲断裂，从南端的平缓斜坡（约5°倾角）向北逐渐过渡到更加陡峭的斜坡（约10°倾角），形成了低喜马拉雅斜坡构造。挤压作用所积累的应力在地震中得到了释放，造成加德满都盆地附近的地表发生了近1米的抬升。

不仅如此，随着俯冲深度的增加，斜坡构造的倾角向北继续增大，形成了高喜马拉雅斜坡构造（约15°—40°倾角）。俯冲倾角的增大，加快了板片向下的拖拽速率，促进了高喜马拉雅的快速隆升。

这些发现在很大程度上填补了以往观测的空白。未来的地球物理学研究将解决整个2500米板块汇聚边界不同部位的深部结构，以便更好地完善板块构造理论，揭示未来地震将在何处发生、可能有多大地震。

隆升之后的青藏高原发育有面积广阔的地表冰冻圈，以及十多条大江大河和众多湖泊，是亚洲大部分地区主要水系的发源地。消融的冰雪以喜马拉雅山源源不断地向外流淌，孕育了古老的中华文明和印度文明。

隆起的高原对生物圈的演化也有极其重要的影响，为物种的起源、分化与全球扩散创造了条件，使青藏高原成为全球山地物种形成、分化与集散的重要中心之一。青藏高原的隆升历史是联系地球深部动力学、地表抬升和气候变化三者之间耦合关系的纽带。在这里，岩石圈、水圈、冰冻圈、大气圈、生物圈和人类圈相互作用，冰川、雪山、森林、湖泊、寺庙与村庄和谐共处。

（作者系中国科学院青藏高原研究所研究员）

“海拔高度”测量 究竟有多难

重力技术在珠峰高程测量中至关重要

■孙和平

作为世界最高峰、“地球第三极”，珠峰高程测量不仅是测绘领域的大事，也是公众关注的热点。

受印度板块与欧亚板块碰撞影响，青藏高原属于全球板块运动剧烈地区之一，珠峰也处于整体隆起和漂移状态，获得珠峰隆起的具体数值一直是地球科学工作者关注的重要科学问题。同时，珠峰高程测量数据可为研究青藏高原地区板块运动、冰雪消融和环境变化等提供重要参考。精准的珠峰高程测量成果不仅是国家综合实力和科技发展水平的体现，更是国家主权的象征，具有重大国际影响和社会效益。

我国第三次珠峰高程测量使用了多种技术手段，包括水准测量、全球导航卫星系统（GNSS，主要包括美国的GPS、欧洲的伽利略、俄罗斯的格洛纳斯和我国的北斗）测量、三角高程测量、航空与峰顶重力测量，以及雪深雷达测量等。这样的安排不仅有利于不同测量手段结果间的检核，更是为了综合不同观测技术以提升高程解算结果精度。

不少公众也许会问，既然有了全新的GNSS测量，为何还需要传统的重力测量？珠峰高程测量究竟有多难？不妨让我们从头说起。

身高起算的“大地水准面”

高程可通过不同测量方式得到，包括水准测量、三角高程测量、GNSS测量技术等。但无论使用哪一种技术，重力测量对高程结果的最后确定至关重要。

要讲清楚这个问题，得从高程的基本定义出发。

何谓“高度”？比方说，一块纪念碑上刻着珠峰高度8844.43米，这是2005年我国官方发布的“珠峰高度”值。“高度”是通常的说法，或者是口语的叫法，“高度”的专业称谓是“高程”，是指地表点沿铅垂线方向到大地水准面的距离，又称“海拔高”或“正高”。

这里有一个“大地水准面”的概念。它指与平均海面重合，并延伸到大陆内部的水准面。大地水准面是高程的“起算面”或“基准面”，我们所说的“珠峰高度”就是相对于这个起算面的高度值。

大地水准面是有物理含义的。在这个参考面上，重力位是等值的，所以也称为“等位面”。也有一种说法，“高程”是相对于平均海面而言的，这就是它为什么又被称为“海拔高”的原因。

沿用至今的“国家高程基准”

目前，世界上还没有一个十分精准的全球海面模型，这使得全球高程系统的统一问题，一直是国际大地测量界的难题。各国采用区域平均海面作为基准定义“海拔高”。

我国在确定高程时，采用的是黄海平均海面作为参考面。依据这个参考面，国家测绘主管部门发布了“1985国家高程基准”，一直沿用至今。它是依据青岛验潮站1952年至1979年的海潮记录得到的海平面变化“平均值”，又称为“平均海面”。

珠峰高程就是峰顶相对于黄海平均海面的高差。传统的珠峰高度测量采用水准测量，也就是从我国青岛水准原点开始，一路向西，就像测量楼梯台阶高度那样逐段测量，一直测到珠峰，采用高程传递方法获得珠峰高度。

但这种测量方式不仅距离长，而且路径十分复杂，每次能测量的距离十分有限，这导致高程传递误差大，人力物力和时间成本十分昂贵。在极寒、地形极复杂、极度缺氧的珠峰地区，用水准测量方法直接测定珠峰高程，还不具备应有的条件。

从多次珠峰高程测量来看，采用直接水准测量与测距高程导线测量，测得的高程仅到海拔6000多米的地方，海拔更高位置的测量使用的是三角高程测量技术。

理论上的“正常重力值”

在精密水准测量中，重力测量能起到至关重要的作用。

我们知道，由于大地水准面存在起伏，导致重力位水准面也不是标准球面。在精密水准测量中，如果沿不同测量路线测量两个水准点间的高差，这会导致得到的高差结果不一致。在一个大范围区域开展精密水准

测量，如果不加入重力改正，这些测量成果不具备严密性，就没有实用价值。通过水准面上进行加密重力测量，获得水准面上的实测重力值，再利用相邻水准点重力异常值与实测高差完成重力异常改正，通过在精密水准测量数据处理中加入正常水准面不平行改正、重力异常改正（统称“重力改正”），获得最终的观测高差，用其进行水准网平差，推算水准点的高程值，这样就能确保精密水准成果的准确性、唯一性和严密性。

另外，需要注意的是，地球并不是标准球形体，而是一个近似椭球体。为方便科学研究，历史上德国科学家引入了一个理想椭球体来近似真实地球，又称为“平均椭球体”或“参考椭球体”。

这个参考椭球体包含了地球所有质量，其面上的重力可通过理论模拟获得，行业领域将这个理论模拟称为“正常重力值”。也就是说，一旦确定了椭球面上某点位置，就可以知道该点的几何坐标和正常重力值——参考椭球面是处理大地测量成果而采用的与地球大小和形状十分接近并进行定位的椭球表面。



2020珠峰高程测量登山队成功登顶后，在峰顶竖立觇标，安装GNSS天线，开展各项峰顶测量工作。新华社发

来自导航卫星的“大地高”

随着科技快速发展，全球导航卫星系统（GNSS）的成功应用，为高程测量带来革命性变化。在此次珠峰高程测量中，我国高精度北斗卫星导航定位系统发挥着主力军作用。

GNSS技术测量的是卫星到地表测点的距离。由于卫星到地心的距离可通过确定卫星轨道得知，那么就比较容易得到地表测点到参考椭球面的距离，这一距离又被称为“大地高”。

通常大地水准面与参考椭球面并不重合，两者存在一定差异，利用GNSS技术不能直接确定测点到“大地水准面”的距离，也就无法测定“高程”或者“海拔高”。

利用重力测量，能够得到珠峰地区及峰顶的重力值，在经过各种改正后（包括仪器零漂、地球固体潮、大气压力等），将峰顶重力值归算到大地水准面，我们就能够得到大地水准面的重力值。结合参考椭球面已知的“正常重力值”，就能得到大地水准面与参考椭球面之间的重力差（通常被称为“重力异常”），从而进一步计算出大地水准面与参考椭球面间的距离——在珠峰地区，这一“高程异常”大约是-25米（负值代表大地水准面在参考椭球面以下）。

“新身高”精度将达历史最佳

此次珠峰峰顶的定点重力测量和北坡1.25万平方公里的航空重力测量，将显著提升珠峰地区大地水准面的精度，为高精度的珠峰高程测量提供历史最好的海拔高程起算基准。因此，这次珠峰高程测量的精度将达“史上最高”。

简言之，珠峰高程的测量取决于两个关键因素：一个是珠峰峰顶测点位置到参考椭球面间的距离，即“大地高”；另一个是大地水准面到参考椭球面的差距，即“大地水准面差距”或“高程异常”。GNSS测量技术确定“大地高”，重力测量技术确定“高程异常”。

因此，“海拔高”实际就是“大地高”和“高程异常”之差。这就是为什么用GNSS测量高程时一定要使用重力测量的原因。

（作者系中科院院士、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研究员）