

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R RS.1883-1建议书
(12/2018)

**遥感系统在气候变化
及其影响研究中的应用**

RS系列
遥感系统



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

知识产权政策（IPR）

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议中所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/zh>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

ITU-R系列建议书

（也可在线查询<http://www.itu.int/publ/R-REC/zh>）

系列	标题
BO	卫星传送
BR	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
SM	频谱管理
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和频率标准发射
V	词汇和相关问题

注：该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版
2019年，日内瓦

©国际电联2019

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

ITU-R RS.1883-1建议书

遥感系统在气候变化及其影响研究中的应用

(2011-2018年)

范围

本建议书规定了关于为气候变化研究提供星载遥感数据的导则。

关键词

卫星地球探测业务（有源）、卫星地球探测业务（无源）、卫星地球探测业务、遥感、气候变化

相关ITU-R建议书和报告

ITU-R RS.1859建议书 – 使用遥感系统收集在自然灾害或类似紧急事件中所用数据。

ITU-R RS.2178报告 – 凭借无线电频谱的重要作用和全球重要性来进行地球观测及有关的应用。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 气候变化是一种影响全人类的全球性现象；
- b) 预期地球环境的严重变化是气候变化的佐证，而后者则导致或加重了各种自然灾害；
- c) 气候变化研究内在要求的真正和谐、全球性的地球观测能力只能由星载遥感仪器或传感器来满足；
- d) 现今，此类星载遥感器存在并且在划分给卫星地球探测业务（EESS）的频段内运行；
- e) 随着时间的推移，这些星载遥感器的传感能力得到提升并且传感器的灵敏度得到增强；
- f) 这些EESS和MetSat系统对于监测和预测气候变化，监测海洋、天气和水资源，预报天气和辅助保护生物多样性等方面起着至关重要的作用，

认识到

- a) **第673号决议（WRC-12，修订版）**做出决议：1) 依旧承认地球观测应用对频谱的使用具有相当大的社会和经济价值，如附件1和附件2所述；2) 敦促主管部门注意地球观测无线电频率要求，尤其是保护相关频段内的地球观测系统；3) 鼓励主管部门在做出会对这些应用的运行产生负面影响的决策之前，考虑地球观测应用中频谱的使用和可用性的重要性，

注意到

- a) 据ITU-T第73号决议 – “信息和通信技术与气候变化”认识到，信息和通信技术（ICT）可以为减缓和适应气候变化的影响作出重大贡献，通过支持基础科学研究，信息通信技术在监测和应对气候变化方面发挥着至关重要的作用，这有助于将气候变化问题带到大众的视线并加深对未来挑战的认识；
- b) 国际电联报告《国际电联与气候变化》谈道，要加强与各联合国机构、世界银行、欧洲委员会、各国际和国内机构与组织（如气象部门、地球观测小组、EUMETSAT、欧空局（ESA）、空间频率协调小组、日本航空宇宙开发机构（JAXA）、美国国家海洋和大气局（NOAA）、美国国家航空和航天局（NASA）和Roscosmos等）、非政府组织（NGO）以及从事应对气候变化的私营部门之间的战略合作，并强调了卫星地球探测业务（EESS）在监测气候变化方面发挥的作用；
- c) ITU-RRS.2178报告全面概述了用于地球观测、空间研究和射电天文学方面的不同的无线电通信应用，并描述了它们对全球社区的社会影响和经济效益，尤其在气候变化监测与预测以及人为和自然灾害预警、监测和缓解等方面的重要性；
- d) ITU-D D-STG-SG02.24-2014报告回应了关于ICT和气候变化的ITU-D第24/2号课题，指出了气候变化造成的严重影响以及遥感在监测和了解所涉过程中的作用，

建议

- 1 各主管部门应熟悉星载遥感器在气候变化研究中的应用，并应认识到如附件1所述的重要性；
- 2 各主管部门及运营商应继续提供附件2中提到的与气候相关的环境数据；
- 3 应强调对提供关键气候观测结果的系统给予保护。

附件1

遥感系统在气候变化及其影响研究中的应用

1 引言

卫星地球探测业务（EESS）中的航天器采用相同或功能相似的设备定期提供全球的覆盖。因此，它们提供整个全球范围内真正协调一致的数据集。这些数据集往往在时间上相重叠，从而构成跨越数十年的连续数据集。虽然这些数据集未跨越数百年或上千年，但是它们依旧可以为研究气候变化者提供重要数据。

卫星是从一个单一、统一的角度来提供关于我们星球现状概貌的最佳方式。没有一种单独的仪器或航天器能够提供一张完整的图片。然而，当前同步运作并共享数据的航天器群则可以为我们提供可知的全球状况的最佳评估。极地轨道卫星上的一个仪器可以每日观测整个地球，而利用地球同步卫星上的仪器，可以持续监测位于其下方的地球球体的昼夜循环。因此，极地和地球同步环境卫星共同持续监测整个地球。

这些环境数据有两方面的用途：

- 提供观测并测量气候变化及其对星球影响的基础；
- 为气候模型提供科学合理的输入。

更好地了解包括天气、气候、海洋、土地、地质、自然资源、生态系统以及自然和人为灾害在内的地球系统对于更好地预测、适应和缓解预期的全球变化及其对人类文明的影响具有至关重要的作用。

通过卫星观测，气候科学已经取得了巨大进展。1959至1961年期间在Explorer 7卫星上搭载的辐射仪使得直接测量进入和离开地球的能量成为可能。与以往的间接测量相比，此次飞行及后续的飞行使得科学家可以更有信心地测量地球的能量平衡，并带来更加完善的气候模型。随着辐射仪的改进，这些测量获得了直接观测与重大火山爆发或厄尔尼诺—南方涛动（ENSO）等短期事件相关的地球全球能量平衡之摄动所需的精度、空间分辨率和全球覆盖。这些辐射仪直接测量经气候系统传输的赤道-地极热量、大气微量气体的温室效应以及云对地球能量平衡的影响。这些观测结果加深了我们对气候系统的理解并改进了气候模型。

从事大气研究的卫星（如AURA卫星）和支持业务气象的卫星（如欧洲的MetOp系列卫星和美国海洋与大气局（NOAA）的极轨系列卫星）每天提供关于全球大气温度、湿度的三维剖面以及与臭氧等少量大气成分有关的数据。在将这些数据输入天气预报模型的同时，它们也用来定义大气的现状并提供气候模型的短期测试。

其他地表要素由不是从事大气相关工作的航天器进行监测。例如，我们获得了以下观测结果：

- Landsat系列卫星（自1973年以来）和SPOT系列卫星（自1986年以来）几十年来一直在持续监测地表；
- Numbus-7卫星和之后的DMSP系列卫星自1978年以来一直在持续监测海冰浓度；
- ADEOS-1卫星和ADEOS-2卫星、QUIKSCAT卫星、ISS卫星上的RapidSCAT仪器以及最近OceanSat-2卫星上的OSCAT、HY-2A卫星上的KU-RFSCAT、MetOp卫星上的ASCAT自1996年以来一直在间歇性地监测海平面风；
- TOPEX/Poseidon卫星和Jason系列卫星自1992年以来一直在持续监测海平面高度和温度；以及
- SMOS卫星、Aquarius卫星和SMAP卫星自2009年以来一直在监测土壤湿度和海洋盐度。

合成孔径雷达（SAR）和无源微波观测等其他航天器和技术对描述我们星球的能力做了有用的补充，特别在观测极地地区方面（在冬季的黑暗中无法拍摄光学图像以及无法观察持续云层所掩盖的模糊表面）的能力（例如亚马孙河、中非以及各岛国）。

由于气候变化，海平面上升预计将对社会最先产生严重影响。海平面上升的原因是海洋温度上升以及冰川中的水分增加。如果格陵兰岛上的所有冰川融化，海洋将上升约7米；如果南极州的所有冰川融化，海洋将升高约70米。地球上大约40%的人口居住在距离海岸100千米的范围内，并且可能面临长期（几百至几千年）洪水的风险。世界最大的十座城市中有八座位于沿海地区。海平面仅仅涨高几米，就会对这些城市 and 所有低洼沿海地区带来严重影响。据预测，该量级的海平面上升将在下一个世纪或下两个世纪内发生。导致海平面上升的作用因素：海洋温度和聚集的冰川，都需要通过卫星仪器来测量。

2 冰或冰冻圈

气候变化和冰冻圈（冰区）研究的一个核心问题是变暖的气候将如何影响冰原。这个问题很重要，因为进入海洋的大陆冰和融水量对海平面的变化具有重大影响。在卫星出现以前，极地数据仅限于气候较温和季节在当地收集的数据。因为极地地区冬季的极夜期很长，此时无法进行可见光谱的观测，因此星载无线电仪器在此状况下变得十分有用。来自卫星、特别是配有无线电传感器的卫星的概观图像成倍地增加了极地数据的覆盖范围，且数据的获取不再受到季节的限制。

在卫星出现之前，假定认为南极和格陵兰的冰原质量平衡主要受控于冰融化和堆积速率之间的差异，且冰流入海洋的速率假定为固定不变。RADARSAT的卫星雷达图像发现：

- 1) 冰原流动速度变化很大；
- 2) 存在着复杂的冰流网络；
- 3) 由于气候变化，测量发现冰流进入海洋的速度在增加。

气候变化/全球变暖的一个标志是冰原流动（冰川和海冰）的退缩而非发展。全球冰川状况的研究表明，自20世纪70年代后期以来，冰川大量消融，特别是在20世纪80年代后期明显加速。遥感用于记录冰川范围（冰川大小）的变化和平衡曲线的位置（冰川上冬季堆积和夏季融合达到平衡的高度）。自1972年以来，卫星提供了冰川范围的光学图像。目前，SAR用于研究冰川积雪和冰融的区域，以判定气候的作用，并且还采用激光测高仪来测量冰川高度的变化。

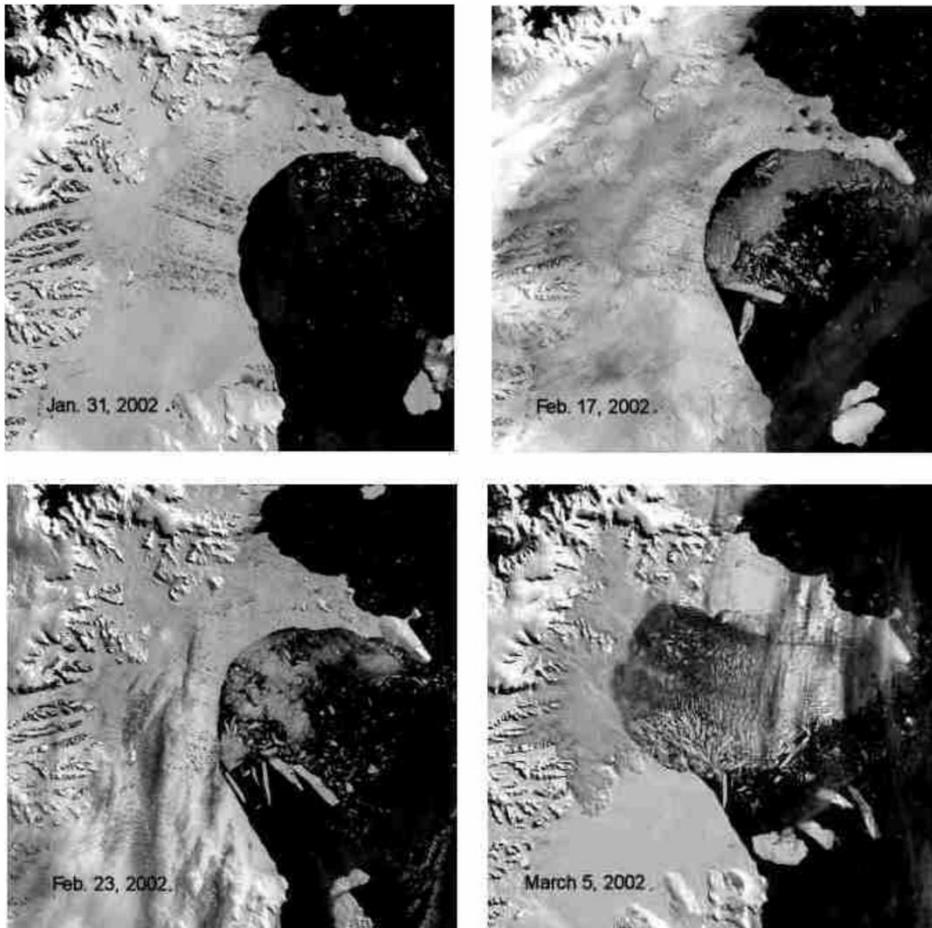
因为冰川对过去以及当前的气候变化都做出反应，因此正在开发完整的全球冰川资料库，以跟踪当前的范围以及世界冰川的变化率。全球空间陆地冰测量项目正采用ASTER卫星的数据和Landsat增强型专题绘图仪（Landsat Enhanced Thematic Mapper）来为全球约160 000个冰川登记造册。这些测量结果和由此得出的发展趋势分析是气候变化的重要指标，并例证了长期数据集对了解复杂气候系统的价值和重要性。

有源和无源星载仪器均可轻易地监测冰原。从太空观测到了南极洲大型冰原（如拉尔森B冰架）的断裂。这些断裂即使不是因为全球变暖造成的，也是后者加速使然。由于卫星图像的定期覆盖才发现的2002年南极洲拉尔森B冰架的崩裂，生动地说明了在令人惊讶的短时期内冰原所发生的变迁（见图1）。这些发现有着重大的意义：冰从大陆冰原向海洋的快速转移可导致海平面的显著升高。

南极洲冰架上的巨大裂缝也可以从太空进行监测。Copernicus Sentinel-2光学图像和 Sentinel-1雷达产品相结合的南极洲常规夏季观测结果证明了其对监测快速环境变化以及为南极洲安全问题的明智决策提供关键信息方面的巨大价值。

图 1

西南极洲拉尔森B冰架的崩塌，
2天内就有2 000 km²的冰架崩裂为小块的冰



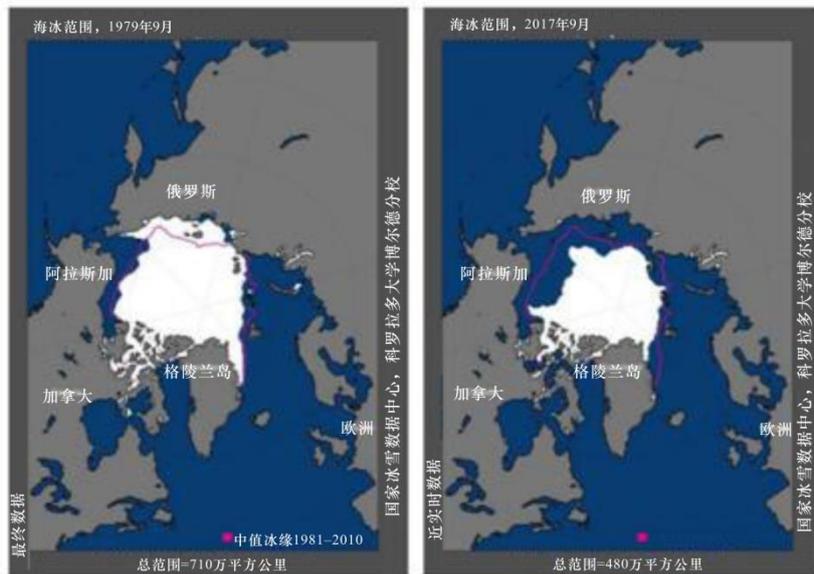
RS.1883-01

海冰是由海水形成的，无论是沿着海岸还是海底（固定冰）或漂浮在海面上（漂流冰）或堆积在一起（冰块）。冰块最重要的区域是极地冰块。由于大量水从海洋和大气中加入或移去，因此极地冰块的行为对全球的气候变化有着重要影响。自1979年以来，持续采用无源微波传感器（电子扫描微波辐射仪（ESMR）、多通道扫描微波辐射仪（SMMR）、特殊微波仪/成像仪（SSM/I）和地球观测系统—先进微波扫描辐射仪（AMSR-E））对海冰进行了监测。由于不受天气条件或亮度级的限制，因为开阔海洋和冰层覆盖海洋之间在微波辐射上存在强烈的对比，因此它们非常适于监测海冰。这些无源微波传感器35年的长期数据集使得超越海冰强烈年际变化率的发展趋势分析成为可能。自2000年以来，在北极，在过去的六年中，有四年观测到了夏季冰川量的最小值记录（见图2）。此外，最近的迹象表明，冬季冰川的范围也开始迅速缩小，可能是与更薄、范围更小的冰覆盖有关的海洋变暖所致（见图3）。每年2月的冰川范围线性缩小幅度为46 900平方千米，即每十年3%。冰（海冰和冰川）

的融化和冻结也会影响海洋盐度并将SSS与区域海平面变化联系起来。这些北极海冰缩减的观测结果与增强型高纬度变暖气候模型的预测结果相一致，后者则在很大程度上受冰反射率回馈效应（ice-albedo feedback）所驱动。与北极不同，南极海冰覆盖范围未发现明显的变化。

图 2

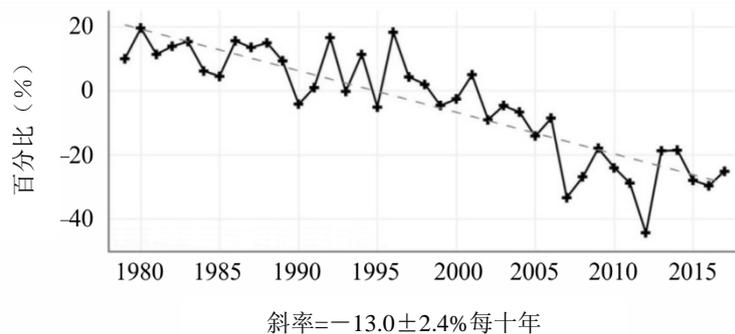
1979年9月和2017年9月的北冰洋海冰范围图
洋红色的线显示了1981年至2010年该月海冰的中值范围



RS.1883-02

图 3

1979—2017年9月海冰范围异常



RS.1883-03

在过去的几年中，越来越多的报告对海冰状况进行了预测，这些报告完全或部分基于从卫星获得的数据。例如，《北极气候影响评估》（ACIA 2005）得出结论，北极冰的持续退可能会很快导致北极出现季节性的无冰期并增加海上交通量，因为通过北冰洋的航线远远短于通过巴拿马运河或苏伊士运河的航线。不过，也有证据表明，至少在部分地区，冰覆盖的消退将伴随着更大的年际变率。

了解冰原、海冰、冰盖和冰川的变化对于了解全球气候变化并预测其影响非常重要。根据《科学》杂志的评选，“消退的冰原”及其对海平面上升的影响被确定为2006年第三个最重大的“年度突破”。鉴于预期的气候变化及与之相关的海平面上升，在未来实现全球卫星极地覆盖将满足用任何其他观测系统无法达成的重大社会需求。

3 海洋

海洋覆盖了约71%的地球表面，在数个方面对气候系统起着关键作用。它们也是气候变化的极佳指标。例如，测量海平面可作为揭示全球变暖的重要线索。

天气、气候和环境的变化对人类提出了严峻的挑战。应对这些挑战需要进一步改进天气预报，特别是中长期的预报。如果能明确预知未来10天、未来几个月或甚至下一个季节将要发生的变化，人们和各行业将可更好地应对反复无常的天气模式。应对这些挑战也意味着能更好地了解导致太平洋厄尔尼诺和拉尼娜、危险的飓风和台风以及特别是海平面不断上升等现象的全球气候因素。

只有测定世界海洋表面的各种变化并采用收集的数据来制定并运行强有力的海洋行为模型，才能发现改变天气模式背后的推动力量。结合海洋和大气模型，我们可以提供所需精度的短期和长期预报。需要结合海洋和大气模型，才能将海洋中尺度（中距离）的变化考虑在内。对于两周以上的天气预报，这种海洋和大气模型的结合变得很重要。海洋也是气候变化进程中的一个重要部分，人们广泛认为，海平面的上升可能是全球变暖的最灾难性的后果之一。

3.1 海平面温度和平均海平面上升

电视红外观测系列卫星（TIROS-N）和NOAA系列卫星上搭载的先进甚高分辨率辐射仪（AVHRR）获得的海平面温度（SST）长期记录对气候科学研究工作发挥了重要作用。现在，也可以通过无源微波仪器来测量SST。SST是全球气候变化最为重要的指标之一，是气候建模的一个重要参数。作为来自遥感的最长海洋数据记录，它有着广泛的影响。

SST记录揭示了海洋在区域和全球气候变化中的作用并显示了洋流的重要细节。地球系统80%以上的总热量存储在海洋中，且洋流在全球重新分配这些热量。通过对SST记录的发展趋势进行分析，有助于加深对重要的热带地区气候-大气反馈效应的认识，后者也是太平洋厄尔尼诺—南方涛动（ENSO）事件的成因。通过卫星对海面风、海面高度和海面温度的观测，加深了对ENSO的了解，这对区域气候和天气预报产生了深远影响。此外，密集的飓风与海面温度存在联系。因而，在海面温度和飓风预报等方面，均可从对卫星所获数据的研究中获益。

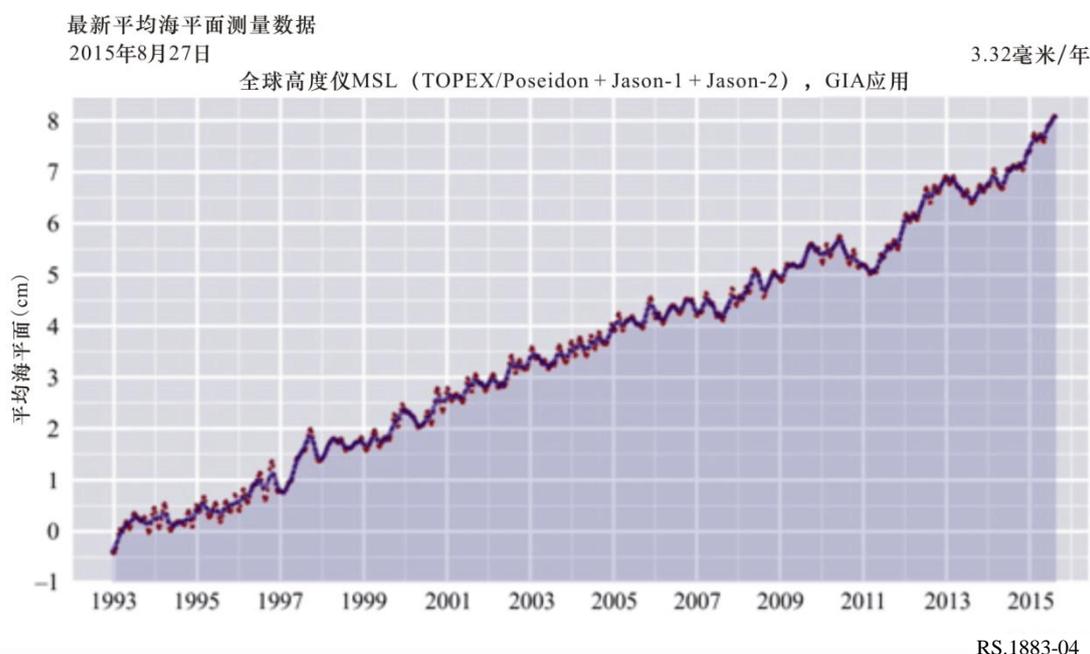
另外，SST在结合海洋与大气方面至关重要，是两者之间关于热量和水蒸气交换的一个控制性因素。对SST发展趋势的分析为全球变暖和热带地区重要的气候-大气反馈现象提供了证据，而后者也是ENSO事件的成因。这些SST观测结果与3 000 m以内海洋的原位垂直温度测量结果一起为研究海洋人为全球变暖现象提供了证据。

了解SST的增长和海平面的人为热量输入对于量化并预测海平面上升也有着重大意义。平均海平面上升可作为全球变暖的一个标志。监测该平面是测高仪的一种应用，是21世纪环境科学的重大问题之一。

很难将气候的自然变化与全球变暖的影响区分开来。已经连续15年从卫星观测中获得了平均海平面的测量数据，这些观测数据前后一致，形成了一个有关卫星观测的精确时间序列。不过，这一时期还是短暂的。而且，有必要说明自然气候变化中间杂着人为扰动。因此，只有当气候变化信号大于背后的自然变化时，才能探测到气候变化信号。探测全球气候的变化远比监测气候的区域影响要费时费力得多。

部分观测到的海平面上升是水温上升造成的。其余的情况可能源于冰川融化和大陆水量的波动。图4显示了每年约3.3 mm、即15年内约5 cm的增长。

图 4
平均海平面上升



来源：© CNES、LEGOS、CLS

不过，平均海平面上升仅仅是整个问题的一部分。海平面的上升绝不是一成不变的。在部分海域，海平面上升（某些地方一年可达20 mm），而在其他区域则会下降相当的数量。由TOPEX/JASON卫星自1993年以来观测到的这些区域性差别主要反映了几年时间内海平面的波动情况。

上升的海平面可能会淹没全球沿海地区并可能彻底淹没地势低矮的岛屿，这是关注的一个主要问题。尽管这种影响预期要在相当长的时间内（数十年或数百年）才会显现，但从卫星观测获得的地形图（如航天飞机雷达拓扑飞行任务（Shuttle Radar Topology Mission）和TerraSAR-X等的合成孔径雷达观测结果以及通过ASTER卫星的光学观测结果）可协助确定容易受到影响的地区。

海平面温度测量不仅揭示关于海洋环流（如墨西哥湾流）的重要信息，还提供关于海洋热量输入的详细信息，推动气候研究的发展。结合海洋颜色与SST观测结果可带来与海洋物理—生物耦合有关的新发现，对海洋在碳循环中的作用有着重要影响。

卫星观测提供了预测和监测海洋生物数量在作为碳容纳器方面所发挥作用的唯一手段。特别是，生物碳摄取是否根据气候变化进行变化的根本问题只能通过卫星测量来研究。它不仅需要海洋颜色的测量结果（浮游生物数量和生产效率），还需要海洋物理环境（循环和混合）的一致性空基观测、陆地-海洋交换（通过河流和潮汐湿地）以及其他风、潮汐和输入上层海洋的太阳能等因素。观测海洋物理和化学环境与海洋生物之间的联系是空间观测取得的一个重大成果。

3.2 土壤湿度和海水盐度

地下水的蒸发、渗透和补给通常通过位于地表至地下水位之间的非饱和渗流区进行。植被吸收水分的根区位于渗流区且是植被和水文系统之间的接口。植被中可用水量控制着植物的蒸腾作用和光合作用并由此控制二氧化碳封存。渗流区中的水量也直接与土壤在降水之后进行排水的能力相关。气象学和水文学中采用的土壤—植被—大气传输（SVAT）方案旨在描述地球表面的基本水分蒸发过程以及植被蒸腾作用、排水、地表径流和土壤湿度含量之间的划分。必须向SVAT模型提供渗流区中水量实际的初始数值。

当研究裸露土壤或稀疏覆盖的植被时，可根据表面土壤湿度时间序列来计算蒸发速率和径流。当研究植被覆盖表面时，需要考虑植被中的水含量（植被光学深度）。植被光学深度自身可以是一种用于监测植被动力学的非常有用的产品。

掌握全球海洋中盐的分布（盐度）及其年与年际变率对于了解海洋在气候系统中的作用至关重要。盐度在判断海洋密度并因此判断热盐环流中至关重要。海洋盐度也与海洋碳循环有关，因其在实现化学平衡中发挥着作用，后者则控制着二氧化碳的摄取和释放。因此，将海洋盐度的测量纳入到全球海洋生物地球化学模型中应有助于改善对海洋所吸收二氧化碳的估算。

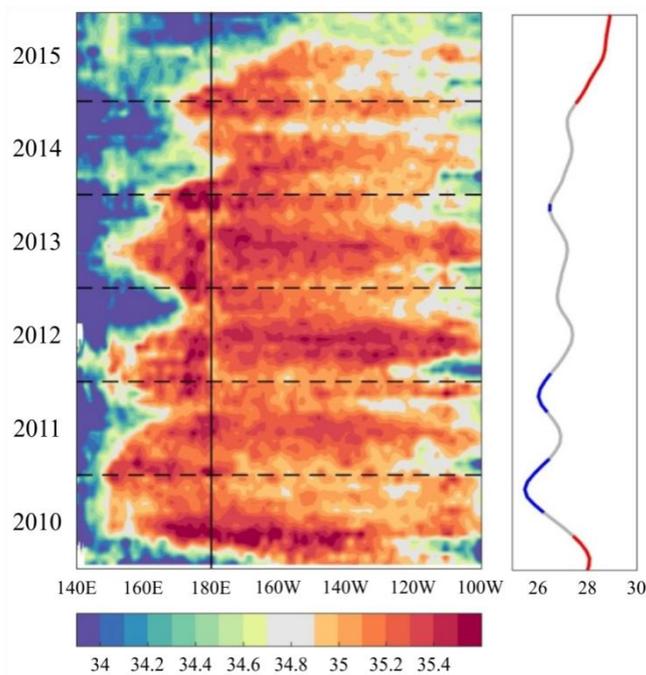
受蒸发、降水和河流径流之间平衡以及海洋动力学的控制，世界各地海洋表面的盐度各不相同。发射于2009年的SMOS卫星创造了从太空对海面盐度进行最长时间连续测量的记录。由于弱厄尔尼诺现象逐渐消失并逆转为强拉尼娜现象，该卫星于2010年初实现了对海面盐度的观测，该观测持续到2012年。随着西太平洋淡水池向东延伸，2010年初观测到赤道太平洋的盐度低于往常。当拉尼娜现象停驻时，该池向西缩回。近期，SMOS卫星在2016年厄尔尼诺现象期间发现热带太平洋内淡水增加（见图5）。

图 5

赤道盐度：2010年至2015年赤道附近（南纬2° —北纬2°）
 的平均SMOS表面盐度赤道太平洋西部的新鲜水池（如图蓝色和绿色部分显示）
 在厄尔尼诺事件期间（2010年初和2015年）向东延伸，并在拉尼娜事件期间（2010年底和2011年）缩至西部

图右侧部分：基于海面温度观测的“尼诺3.4指数”，

红色代表厄尔尼诺事件，蓝色表示拉尼娜事件



RS.1883-05

SMOS卫星的任务是与SMAP任务一起来监测土壤湿度，并与Aquarius任务一起来监测海洋盐度。

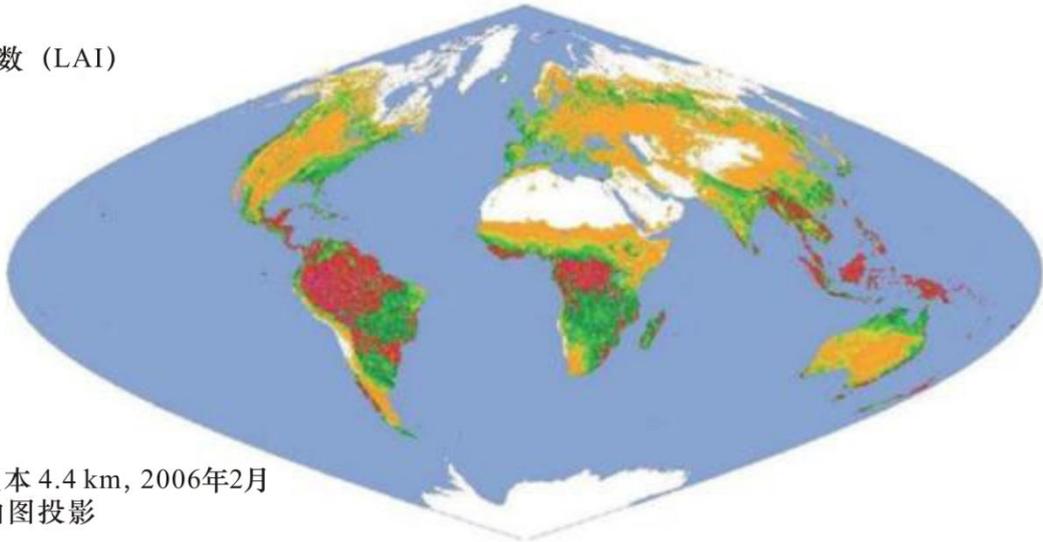
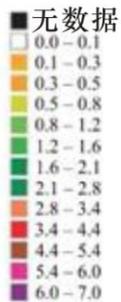
4 生物圈

对地球植被动力学实施卫星监测对了解全球生态系统如何发挥作用并对气候多样性和气候变化做出反应至关重要。利用TERRA卫星和AQUA卫星上的MODIS仪器以及SUOMI NPP卫星上的VIIRS，通过将观测扩展至生物物理领域，该观测（见图6）变得更加精确了。

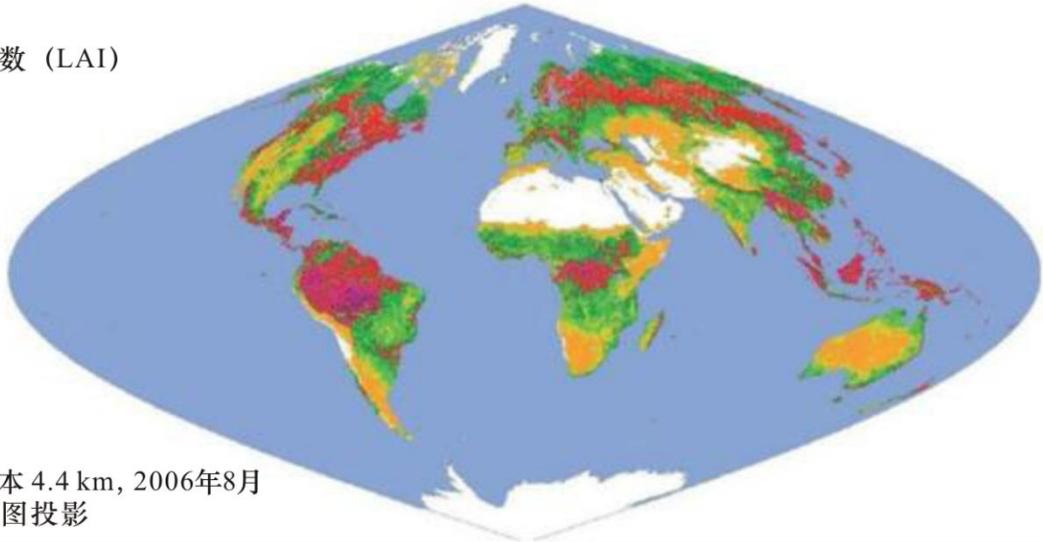
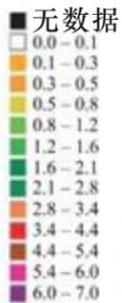
图 6

自MODIS获得的、显示植被季节变化的绿叶指数

绿叶面积指数 (LAI)

MODIS, 版本 4.4 km, 2006年2月
正弦曲线曲图投影

绿叶面积指数 (LAI)

MODIS, 版本 4.4 km, 2006年8月
正弦曲线曲图投影

RS.1883-06

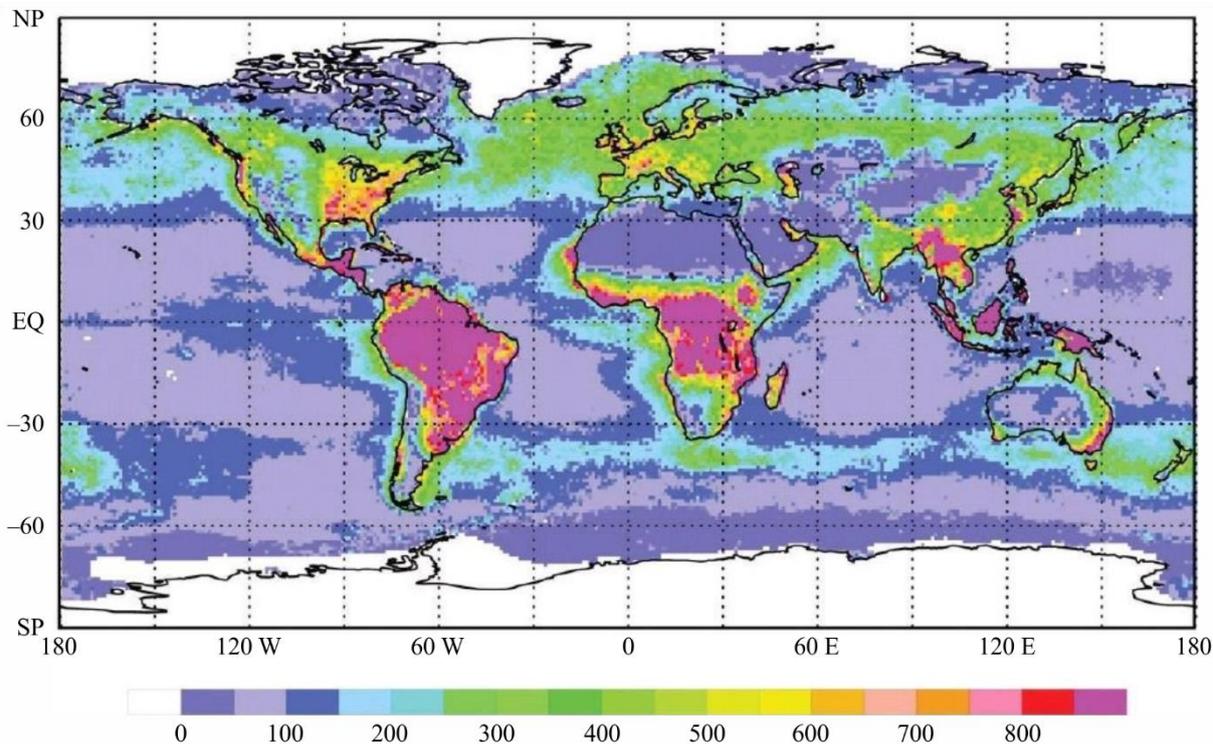
来源：《空间对地观测：前50年的科学成果》（Earth Observations from Space: the First 50 Years of Scientific Achievements），p. 75，2008年，可从以下URL下载：<http://www.nap.edu/catalog/11991.html>。

气象变化研究也得益于基于卫星的、对地球碳循环和能量波动的研究。

净初级生产力（NPP）定义为单位时间内从大气进入绿色植物的净碳流量。对NPP实施卫星观测为从根本上了解气候变化对生物圈的影响做出了非常重要的贡献。NPP受到相互作用的气候和生物控制的影响。陆地和海洋对NPP的作用几乎是相等的（见图7），但在局部层面，NPP的变动是显著的。因为浮游植物的生命周期要比陆生植物的生命周期短数个数量级（数天与数年或数十年的差别），与陆地生态系统中的植物相比，浮游植物可更快地对气候对洋流、混合以及营养物和阳光供应等的影响做出反应。因此，预计碳循环中的海洋生物（大约一半）将对气候变化做出更快的反应。

图 7

生物圈的全球年度NPP（单位为克碳/平米/年），根据综合的CASA-VGPM（垂向归纳模型）模型计算得出从CZCS传感器获得的海洋颜色输入数据为1978—1983年期间的平均值
从AVHRR传感器获得的陆地植被指数为1982—1990年期间的平均值



RS.1883-07

启用于1978年的“海岸带水色扫描仪”显示，可采用可视和近红外频段来观测海洋生产力；但是，CZCS测量在陆地是饱和的，因此无法使用。

自1978年以来，美国国家海洋和大气局（NOAA）极轨气象卫星上的AVHRR获得了每日全球观测的连续记录，探测了红色和近红外频段。现在，每日AVHRR数据集的记录已跨越25年，是有关陆地生产力、生物气候学（研究植物和动物生命周期性活动及其如何受气候季节性和年际变化影响的学科）和生态系统变化的、最长的和连续的全球可用记录，用于检测生物圈对气候变化和变异的反应。

尽管AVHRR并不是用来监测气候变化的，但校准的持续改进和再分析获得了一致性记录，用于监测和评估因气候变化和变异以及人为活动而引起的、以往和未来生物圈的反应。

关注的一个主要问题是气候变化对农业的影响。随着气候变暖，种植季节延长且北方地区变得越来越多产，而南方地区却面临酷热，变得越来越低产。几十年来，从太空对农业生产进行了持续监测。归一化的差异植被指数（NDVI）具有从-1到+1变化不等的特性，在观测到绿色植被时，值约为+1。从技术上而言，NDVI是近红外数据减去红色数据（可见光）并除以两者的和。

在过去的十年中，从AVHRR获得的NDVI数据已成为监测气候变化、评估种植季节长度和时机变化规律、监测生物圈和其他生态系统现象状态的一个关键要素。长期的NDVI记录显示，在20世纪80年代和20世纪90年代早期，其随着气候变暖而增长，但近期该趋势趋于平稳。行星NDVI（绿度）的变化与每天陆地截获的光合有源辐射和大气二氧化碳浓度变动情况有着强关联。NDVI与大气二氧化碳浓度有着强负关联，即当二氧化碳浓度为低时，NDVI为高；反之亦然。生态系统光合作用和呼吸作用中的这种时序模式说明了生物圈和大气之间的动态耦合关系。

Sentinel-2卫星的高重访频率有助于获取无云图像数据，以支持减少森林砍伐的行动。这在热带纬度地区将特别有利，因为重度云层覆盖可能会延迟获取完整的数据目录。高分辨率数据可以支持对受影响国家的洪水事件变化情况实施探测。

5 区域气候变化和人为干预

气候变化并不是一个同一性的过程 – 也就是说，地球不会整体地、均匀地升温。气候变化通常发生在区域性地区，一些地区的气候变暖程度高于其他地区，一些地区可能在短期内出现降温。

人口增加正在给地球环境带来负担。为支持这种增加而采取的许多行动都会影响当地和全球的气候，并可通过卫星仪器观察到。

一个例子发生在20世纪60年代阿姆河（Amu Darya River）转至灌溉棉花和麦田时。几十年后，曾凭借68 000平方千米面积而堪称世界第四大湖的咸海（Aral Sea），几乎彻底干涸了（见图8）。向苏联提供六分之一鱼的当地渔业破产了。随着海岸线从城镇撤退数公里，剩下的人们受到有毒沙尘暴的困扰。咸海的萎缩被称为地球上最严重的环境灾害之一。

图 8

威海的历史区域



1977年（Landsat-2卫星）



2014年（TERRA卫星上的MODIS）

RS.1883-08

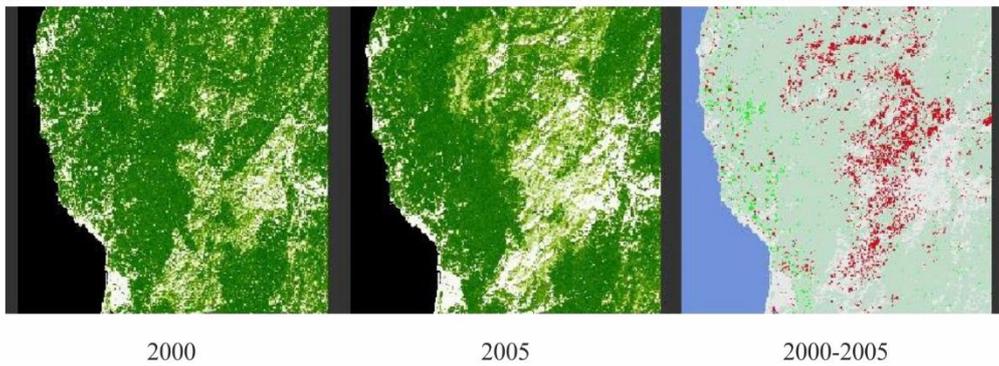
森林树木充当空气过滤器，从空气中去除二氧化碳并为我们提供氧气和水。卫星可以监测森林的健康状况和范围。在地图上标出了森林已被清除的区域（见图9）和森林已被恢复的区域（见图10）。在两幅图中都使用了Landsat卫星的数据。整体森林覆盖的长期变化会影响气候，应予以监测。

图 9
亚马孙森林的被砍伐情况



RS.1883-09

图 10
森林的乱砍滥伐及恢复
Landsat卫星采集的俄勒冈州（美国西北部）树木覆盖情况

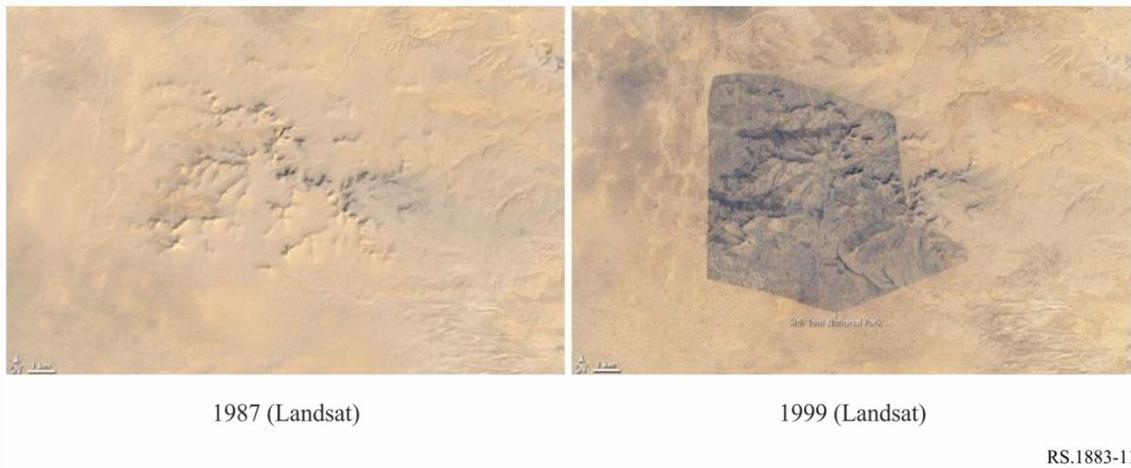


RS.1883-10

沙漠侵蚀农田不仅影响到人类居住所需的粮食供应和土地，而且因缺乏植被覆盖而导致地球反射率的变化也会影响地球的气候。农业动物放牧会严重影响环境，特别是影响沙漠。山羊可以消灭已经十分脆弱的沙漠植物，但是通过简单的做法：增加围栏圈养这些动物，可以恢复环境（见图11）

图 11

西迪图伊国家公园（突尼斯）的恢复情况



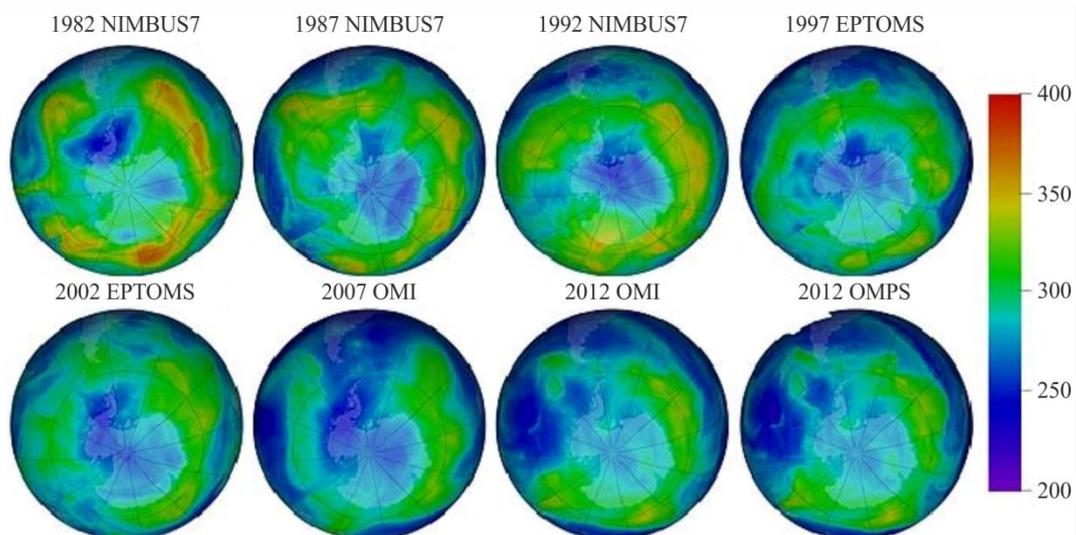
RS.1883-11

截至1987年，干旱、农业和过度放牧使该地区走向荒漠化。1993年，突尼斯建立了西迪图伊国家公园（Sidi Toui National Park），并用围栏将公园四周围了起来。到1999年，原生草原恢复了（上图为冬季所拍影像照片）。耕地转变为沙漠并非是一个不可逆转的过程。

人类还将非天然化合物引入大气中。在20世纪80年代早期，人们意识到保护我们免受太阳紫外线辐射的大气臭氧层正在萎缩。特别是，南极上空出现了臭氧层“空洞”，其大小逐年增加。首先在卫星数据中注意到这一观测结果，后来通过地面观测得到了证实。原因可追溯到原子卤素催化了对臭氧的破坏。这些卤素的主要来源是人造卤化碳制冷剂、溶剂、推进剂和泡沫发泡剂的光分解。

图 12

南极上空的臭氧分布情况



RS.1883-12

在《维也纳公约》关于臭氧层保护的氟氯化碳议定书全权代表大会（蒙特利尔，1987年）上，签署了一项议定书，以限制这些化学品的生产和使用。结果是从臭氧消耗中缓慢恢复。卫星上的仪器不断监测这种大气条件（见图12），并显示了蒙特利尔大会以及后续协议（伦敦，1990年和哥本哈根，1992年）采取之措施的效果。

人口的分布同样影响着气候，因为现在地球上一半以上的人口都生活在城市地区。人类分布的一个初步迹象来自对人口稠密地区发出的可见光的夜间观测（见图13）。

图 13

人口稠密地区灯光的夜间观测情况

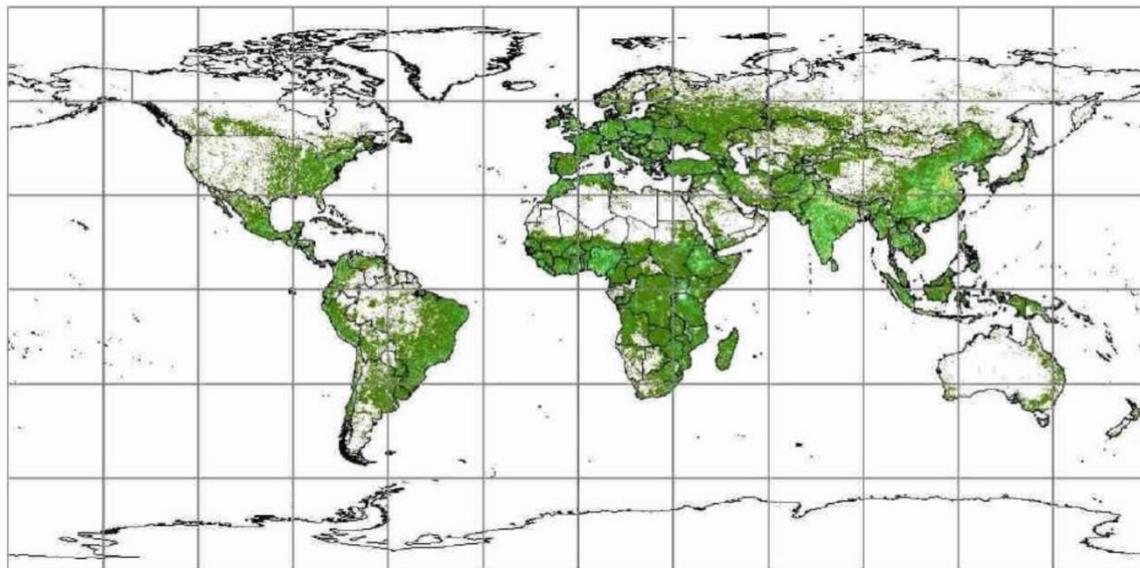


RS.1883-13

（数据来源：美国国防气象卫星）

不过，人们意识到这些观测结果导致了对发展中国家人口的低估，这些国家缺乏标志着发达国家的路灯和其他夜间照明。开发了一个新的人口模型，提高了与道路、斜坡、土地覆盖的接近度，增加了有关夜间照明观测结果的其他信息。斜坡、土地覆盖和夜间照明的数据来自卫星数据。该新的模型如下图14所示，它更好地表述了发展中国家的人口情况。

图 14
全球人口分布情况



RS.1883-14

沿海岸线居住的城市人口更容易受到海平面上升的影响。城市人口还需要集中更多的资源，如水和食物，并对当地环境造成额外的压力。与主要城市相关的热岛影响着当地和区域的气候，也定会长期影响全球的气候。

6 结论

星载传感器为我们了解地球和气候变化的影响提供了基本数据。鉴于这些仪器将继续提供重要的数据，因此应在未来对之予以保护。

附件2

主要气候变量和促成因素的观测现状

表A2-1将表A2-2中详述的所需测量结果映射到用于获得它们的技术中。所需测量结果来源于美国国家研究委员会的报告 – 《空间地球科学及应用》，美国国家学术出版社，华盛顿特区，2007年（第298-303页的表9.A.1）。该文件可从<http://www.nap.edu/catalog/11820.html>处获取。

表A2-2按照所使用的技术列出了大约在2016年（编写本附件时）以及将来所要观察的项目和提供这些测量的任务。表A2-2更新了上述美国国家研究委员会报告中提供的信息。

表A2-1

用于获取气候相关测量结果的技术

目标	技术	合成孔径雷达成像	雷达测高仪	雷达散射测量	测降水/测云雷达	GPS无线电掩星	无源微波成像仪	无源微波探测仪	激光雷达	光学成像（紫外—红外）	多光谱光学成像	红外探测仪/光谱仪	光学辐射仪	边缘测量	基于重力的测量
平流层气溶胶									X					X	
对流层气溶胶									X		X		X		
大气温廓线						X	X								
大气水廓线						X	X				X	X			
大气总水量						X	X					X			
云特性				X			X	X			X		X		
火干扰										X					
气体，其他												X			
气体，臭氧										X					
气体，跟踪控制臭氧							X					X			
冰川/海冰	X						X	X			X				X
地下水							X								X
湖面水位	X							X			X				
土地生物量											X				
土地覆盖	X										X				
叶面积指数											X				
海洋颜色											X				
海平面	X	X													
海水盐度			X			X									
海平面高度		X	X												X
海平面温度							X				X				
海风/状态			X			X									
永久冻土，积雪	X					X									
降水				X		X									
辐射平衡											X				
河流流量	X							X			X				
总的太阳辐射													X		

表A2-2

气候变化状况和变异性支持

技术	目标	测量	状况 (大约在2018年)	后续 (2018-2025年)
合成孔径雷达成像	永久冻土、季节性冻土、积雪（和雪水当量）	与微波辐射仪结合产生面积和粗糙度的组合，根据地形提供雪水当量	RADARSAT卫星上的SAR（1995，+）；TSX卫星（2007）；TDX卫星（2010）；COSMO-SkyMed卫星（2007，+）；Sentinel-1系列卫星上的C-SAR（2014，+）；HJ-1C卫星（2012）；KOMPSAT-5卫星上的COSI（2013）；ALOS-2卫星上的PALSAR-2（2014）；RISAT-1卫星上的RISAT-SAR（2012）；RISAT-2卫星上的SAR-C（2009）；METEOR-M2卫星上的S-M OBRC（2014）；Kondor-E1卫星上的SAR-10（2013）；TECSAR卫星上的X-SAR（2008）	METEOR-MP卫星上的BRLK（2021）；NovaSAR-S卫星上的S-SAR（2018）；SAOCOM-1、SAOCOM-2卫星上的SAR-L（2018）；BIOMASS卫星上的SAR-P（2020）；METEOR-MP卫星上的SAR-X（2021）；PAZ卫星上的SAR（2018）、CSG（2018，+）、RADARSAT星座（2018，+）、RISAT-1A（2019）、TSX-NG（2018）
	湖泊水位	湖泊面积		
	河流流量	湖泊、河流面积		
	土地覆盖	雷达反向散射的土地覆盖		
	海平面	海岸带面积		
	冰川、海冰、冰盖	冰面积和流量、海冰厚度（根据地形）	RADARSAT卫星上的SAR（1995，+）；TSX卫星（2007）；TDX卫星（2010）；COSMO-SkyMed卫星（2007，+）；Sentinel-1系列-1B卫星上的C-SAR（2014，+）；CRYOSAT-2卫星上的SIRAL（2010）；Sentinel-3系列卫星上的SRAL（2016，+）	RADARSAT星座（2019）；NISAR卫星上的InSAR（2021）
雷达散射测量	海况、海平面风	海平面风矢量	MetOp卫星上的ASCAT（2006，+）；HY-2A卫星上的SCAT（2011）；OceanSat-2卫星上的OSCAT（2009）；CYGNSS卫星上的DDMI（2016）；ScaSat-1卫星上的OSCAR（2016）	OceanSat-3卫星上的OSCAT（2018）以及METOP-SG-B卫星上的SCA（2020）；CFOSAT卫星上的SCAT和SWIM（2018年）；METEOR-MP、METEOR-M卫星上的SCAT（2018）；“风云三号”（FY-3）卫星上的WindRAD（2018）
	海水盐度	海平面盐度、海洋粗糙度	HY-2A卫星上的KU-RFSCAT（2011）；HY-2A卫星上的MWRI（2011）	
	海冰	海冰类型、范围		METOP-SG-A卫星上的SCA（2022）

表A2-2 (续)

技术	目标	测量	状况 (大约在2018年)	后续 (2018-2025年)
测降水雷达	降水	测降水雷达：降水率垂直剖面	GPM卫星上的DPR (2014)	
		测云雷达：小雨速率	CloudSat卫星 (2006)	
测云雷达	云特性 (位置、水滴大小、冰云晶体特性)	测云雷达：云边界、液态水的垂直分布、毛毛雨速率	CloudSat卫星 (2006)	
雷达测高仪	海平面	海平面高度	JASON系列卫星上的SSALT (2001, +); SARAL卫星上的Altika-AMU (2013); HY-2A/卫星上的RA (2011); Sentinel-3系列卫星上的SRAL (2016, +); JASON-3卫星 (2016)	SWOT卫星上的KaRIN (2020); JASON-CS/Sentinel-6卫星上的SRAL (2018, +); COMPIRA卫星上的SHIOSAI (2019)
	海洋表面、地下洋流	洋流产生的海平面高度	JASON系列卫星上的POSEIDON (2001, +); HY-2A卫星上的RA (2011); Sentinel-3系列卫星上的SRAL (2016, +)	JASON-CS/Sentinel-6卫星上的SRAL (2018, +); SWOT卫星上的KaRIN (2020)
GPS 无线电掩星	温度：垂直剖面	近地表垂直分辨率高达约0.5 km的大气温度剖面	CHAMP卫星 (2000); COSMIC/FORMOSAT-2卫星 (2006); KOMPSAT-5卫星 (2013); FY-3-C卫星 (2013); MetOp卫星 (2006, 2012); TDX卫星 (2010); TSX卫星 (2007); Megha-Tropiques卫星 (2011); OceanSat-2卫星 (2009); CYGNSS卫星上的DDMI (2016)	COSMIC-2/FORMOSAT-7卫星 (2018); “风云三号” (FY-3D、FY-3E、FY-3F) 卫星 (2016-2020); JASON-CS/Sentinel-6卫星 (2021); GRACE-FO卫星 (2018); METEOR-M-N3、METEOR-MP-N1、METEOR-MP-N3卫星 (2018); METOP-SG-A、METOP-SG-B卫星 (2022)
	水蒸气：柱量、垂直剖面	近地表垂直分辨率高达约0.5 km的水蒸气剖面		

表A2-2 (续)

技术	目标	测量	状况 (大约在2018年)	后续 (2018-2025年)
激光雷达	对流层气溶胶: 位置和特性	气溶胶浓度、大小和形状的垂直剖面	CALIPSO卫星 (2006)	EarthCare卫星上的 ATLID (2019)
	平流层气溶胶: 位置和特性	气溶胶浓度、大小和形状的垂直剖面		
	云特性 (位置、水滴大小、冰云晶体特性)	具有偏振、颗粒相位的光学薄云的上边界		
	冰川、海冰、冰盖	冰面高度	ICESat卫星上的GLAS (2003)	
	湖泊水位	水面高度		
	河流流量	激光雷达高度仪: 河流水位	ICESat卫星 (2002)	
无源微波成像仪	降水和云特性	降雨量和云液态水	GPM卫星上的GMI (2014); DMSP系列卫星上的SSM/I (1987, +); DMSP系列卫星上的SSMIS (2003, +); FY-3系列卫星上的MWRI (2008, +); Sentinel-3系列卫星上的MWR (2016, +)	DMSP卫星上的SSM/IS (2020); METOP-SG-A卫星上的MWI (2022); Sentinel-3B卫星上的MWR (2017年底)
	冰川, 海冰, 冰盖	冰川、海冰范围	DMSP系列卫星上的SSM/I (1987, +); DMSP系列卫星上的SSMIS (2003, +); GCOM-W1卫星上的AMSR-2 (2012); HY-2A卫星上的MWRI (2011)	
	雪团	雪水当量	DMSP卫星上的SSM/I (1995, +); GCOM-W1卫星上的AMSR-2 (2012)	
	地下水	除冰雪覆盖和森林茂密地区外的土壤湿度	SMOS卫星上的MIRAS (2009); SMAP卫星上的辐射仪 (2015); DMSP系列卫星上的SSM/I (1987, +); DMSP系列卫星上的SSMIS (2003, +); FY-3系列卫星上的MWRI (2008, +); SNPP卫星 (2011) 和NOAA-20卫星 (2018) 上的VIIRS	
	海水盐度	表面盐度	SMAP卫星上的SMAP辐射仪 (2015); SMOS卫星上的MIRAS (2009)	

表A2-2 (续)

技术	目标	测量	状况 (大约在2018年)	后续 (2018-2025年)
	海况、地面风	表面风速	DMSP系列卫星上的SSM/I (1987, +); DMSP系列卫星上的SSMIS (2003, +); Coriolus卫星上的Windsat (2003); GCOM-W1卫星上的AMSR-2 (2012); Meteor-M系列卫星上的MTVZA-GY (2009, +); HY-2A 卫星上的MWRI (2011)	
无源微波探测仪	温度: 垂直剖面	大气温度剖面	自1979年以来, 当前在NOAA系列卫星上的MSU (2002, +); DMSP卫星上的SSM/I (1995, +); Aqua卫星上的AMSU (2002); MetOp卫星 (2006, +); FAST-T卫星上的DFMRM; Meteor-M系列卫星上的MTVZA-GY (2009, +); FY-3系列卫星上的MWTS (2003, +); SNPP 卫星 (2011) 和NOAA-20卫星 (2018) 上的CrIS、ATMS	METOP-SG-A 卫星上的MWS、MWI (2022); METEOR-MP 卫星上的MTVZA-GY-MP (2021)
	大气水特性	大气水蒸气分布和总量	DMSP系列卫星上的SSM/I (1995, +); SNPP卫星 (2011) 和NOAA-20卫星 (2018) 上的ATMS; SARAL卫星上的Altika-RMU (2013); AQUA卫星上的AMSU (2002); NOAA 系列卫星 (1998, +); MetOp系列卫星上的AMSU-A (2006+); DMSP系列卫星上的SSM/T (1999, +); Megha-Tropiques卫星上的SAPHIR (2011); METEOR-M-1卫星上的MTVZA-GY (2009); METEOR-M -2卫星上的MTVZA-GY (2014); FY-3系列卫星 (2008, +) 和HY-2A 卫星 (2011) 上的MWRI; Sentinel-3系列卫星上的MWR (2016, +); JASON-3卫星上的AMR-2 (2016)	SWOT 卫星上的AMR (2020); JASON-CS/Sentinel-6 卫星上的AMR-C (2018); METEOR-MP 卫星上的 MTVZA-GP-MP (2021); METOP-SG-A 卫星上的MWI和MWS (2022)

表A2-2 (续)

技术	目标	测量	状况 (大约在2018年)	后续 (2018-2025年)
	水蒸气: 柱量、垂直剖面	红外、微波边缘扫描辐射仪: 对流层上层、平流层中的水蒸气层数量	Aura 卫星上的 TES、MLS (2004); Sentinel-3 系列卫星上的 MWR (2016, +)	
	控制臭氧的微量气体 (氯化氢、一氧化二氮、甲烷、水蒸气、硝酸)	微波边缘探测提供平流层臭氧的垂直剖面	Aura 卫星上的 MLS (2004)	
	海平面、亚平面温度	红外微波探测仪: 海平面温度	NOAA 系列卫星上的 AVHRR (2000, +); Aqua 卫星上的 AIRS、MODIS (2002); Terra 卫星上的 MODIS (1999); SNPP 卫星 (2011) 和 NOAA-20 卫星 (2018) 上的 VIIRS、CrIS、ATMS; GPM 卫星上的 GMI (2014); GCOM-W1 卫星上的 AMSR-2 (2012); HY-2A 卫星上的 MWRI (2011); SMOS 卫星上的 MIRAS (2009); Coriolus 卫星上的 WindSat (2003)	
多光谱光学 成像	地球辐射平衡	结合宽带辐射仪, 提供场景识别、大气顶部通量	Terra 卫星上的 MODIS、CERES (1999)、Aqua 卫星 (2002); SNPP 卫星 (2011) 和 NOAA-20 卫星 (2018) 上的 VIIRS、CERES	
	地面辐射平衡			
	对流层气溶胶: 位置和特性	提供光学深度, 在海平面和暗平面上进行一些尺寸推断	自 1981 年以来, 当前在 NOAA 系列卫星上的 AVHRR (2002, +); Terra 卫星上的 MODIS、MISR (1999); Aqua 卫星上的 MODIS (2002); SNPP 卫星 (2011) 和 NOAA-20 卫星 (2018) 上的 VIIRS;	

表A2-2 (续)

技术	目标	测量	状况 (大约在2018年)	后续 (2018-2025年)
	云特性 (位置、水滴大小、冰云晶体特性)	单个有效云层的特性。AVHRR-水汽凝结体尺寸VIRS、MODIS, 以及VIIRS-水汽凝结体相位的推断	自1981年以来, 当前在NOAA系列卫星上的AVHRR (2002, +); Terra卫星上的MODIS、MISR (1999); Aqua卫星上的MODIS (2002); SNPP卫星 (2011) 和NOAA-20卫星 (2018) 上的VIIRS;	Sentinel-5P 卫星上的 TROPOMI (2017); Metop-SG-A 卫星上的UVNS (Sentinel-5) (2020); MTG 卫星上的 UVNS (Sentinel-4) (2020)
	水蒸气柱量、垂直剖面	来自近红外水蒸气通道的柱量	Terra卫星上的MODIS (2000)、Aqua卫星 (2002)	
	地表覆盖和地表反射率 (其他地方的积雪、冰川、冰盖)	植被指数、地表反射率的推断	NOAA 系列卫星上的 AVHRR (2002, +); 大气校正光谱反射率的推断; Terra 卫星上的 MODIS (2000)、Aqua 卫星 (2002); 自1973年以来, Landsat-7、Landsat-8 卫星 (1999, 2013); SNPP 卫星 (2011) 和NOAA-20卫星 (2018) 上的VIIRS; Sentinel-2A/B (2015/2017) 上的 MSI	
	地表覆盖和地表反射率 (非积雪、冰川、冰盖)	超光谱成像: 植被类型、土地覆盖	EO-1 卫星上的Hyperion (2000)	
	湖泊、河流水位	高分辨率成像: 湖泊、河流区域	自1973年以来, Landsat-7、Landsat-8卫星 (1999, 2013);	
	陆地生物量、光合有效辐射的比例; 叶面积指数	植被指数	自1979年以来, NOAA系列卫星上的AVHRR数据 (2002, +); Terra卫星上的MODIS (2000)、Aqua 卫星 (2002); TERRA 卫星上的 MISR (1999); SeaWiFS 卫星 (1997); SNPP 卫星 (2011) 和NOAA-20卫星 (2018) 上的VIIRS; Sentinel-2A/B 卫星上的 MSI (2015/2017)	Flex 卫星上的 FLORIS (2023)

表A2-2 (续)

技术	目标	测量	状况 (大约在2018年)	后续 (2018-2025年)
	叶面积指数	高空间分辨率下的植被指数	自1973年以来, Landsat-7、Landsat-8卫星(1999, 2013); Terra卫星上的ASTER(2000); EO-1卫星上的Hyperion; SPOT系列卫星(1994, +)	Flex卫星上的FLORIS(2023)
	冰川、海冰、冰盖	区域范围	自1979年以来, NOAA系列卫星上的AVHRR(2002, +); Terra卫星上的MODIS(2000)、Aqua卫星(2002); 自1973年以来, Landsat-7、Landsat-8卫星(1999, 2013); SNPP卫星(2011)和NOAA-20卫星(2018)上的VIIRS	
	海平面、亚平面温度	海平面温度	自1981年以来, NOAA系列卫星上的AVHRR数据(2000, +); Terra卫星上的MODIS(2000)、Aqua卫星(2002); SNPP卫星(2011)和NOAA-20卫星(2018)上的VIIRS	
光学(UV-IR)成像	平流层、对流层的臭氧	紫外辐射成像仪提供对流层柱状臭氧、大气平流层臭氧的粗垂直分辨率剖面	Aura卫星上的OMI(2004); SNPP卫星(2011)和NOAA-20卫星(2018)上的OMPS	Metop-SG-A卫星上的UVNS(Sentinel-5)(2020); MTG卫星上的UVNS(Sentinel-4)(2020)
	火干扰	近红外热成像提供对火灾热点的高空间分辨率探测	自1981年以来, NOAA系列卫星上的AVHRR数据(2002, +); Terra卫星上的MODIS(2000)、Aqua卫星(2002); SNPP卫星(2012)和NOAA-20卫星(2018)上的VIIRS;	Metop-SG-A卫星上的UVNS(Sentinel-5)(2020); MTG卫星上的UVNS(Sentinel-4)(2020)

表A2-2 (续)

技术	目标	测量	状况 (大约在2018年)	后续 (2018-2025年)
光学 (UV-IR) 辐射仪/偏振计	太阳辐射总量	直接测量	SORCE卫星 (2003) ; Glory 卫星上的 TIM (2008)	
	对流层气溶胶: 位置和特性	紫外辐射仪成像仪: 光学深度、对气溶胶层吸收的一些推断	Aura 卫星上的 OMI (2004) ; SNPP 卫星 (2011) 和 NOAA-20 卫星 (2018) 上的 OMPS	
		偏振仪: 光学深度、尺寸、形状、单散射反射率		
	云特性 (位置、水滴大小、冰云晶体特性)	15 μm 探测仪、成像仪: 适用于有效单层云系统的云层压力, 甚至适用于光学薄卷云	NOAA 系列卫星上的 HIRS (2002, +) ; Terra 卫星上的 MODIS (1999) 、 Aqua 卫星上的 AIRS (2002) ; SNPP 卫星 (2011) 和 NOAA-20 卫星 (2018) 上的 CrIS	
多视角辐射仪、偏振仪		Terra 卫星上的 MISR (1999) ; 立体成像得到的云高度		
红外探测仪	控制臭氧的微量气体 (氯化氢、一氧化二氮、甲烷、水蒸气、硝酸)	提供对流层、平流层臭氧的垂直剖面	Aqua 卫星上的 AIRS (2002)	
	二氧化碳、甲烷	红外探测仪	Aqua 卫星上的 AIRS (2002) ; OCO-2 卫星观测 CO ₂ (2014)	
	甲烷	红外光谱仪: 甲烷的高精度柱浓度	Aura 卫星上的 TES (2004) ; AQUA 卫星上的 AIRS (2002)	
	水蒸气: 柱量、垂直剖面	对流层中垂直分辨率比较粗的情况下水蒸气层数量	自 1979 年以来, NOAA 系列卫星上的 HIRS 数据 (2002, +) ; SNPP 卫星 (2011) 和 NOAA-20 卫星 (2018) 上的 CrIS	
		高光谱分辨率红外辐射仪在对流层以更高的垂直分辨率提供水蒸气层数量。	Aqua 卫星上的 AIRS (2002) ; Aura 卫星上的 TES (2004) ; SNPP 卫星 (2011) 和 NOAA-20 卫星 (2018) 上的 CrIS	

表A2-2 (结束)

技术	目标	测量	状况 (大约在2018年)	后续 (2018-2025年)
边缘测量	平流层气溶胶：位置 和特性	边缘和太阳掩星测量： 气溶胶消光剖面	红外辐射仪；ERBS卫星上的SAGE II（1984-2006）；Meteor卫星上的SAGE III（2002-2006）；SciSat卫星（加拿大—美国）	
		边缘散射光：气溶胶 光学深度剖面	SNPP卫星（2011）和NOAA-20卫星（2018）上的OMPS	
基于重力的测量	冰川、海冰、冰盖	结合地形测量时的冰量		GRACE-FO (2018)
	地下水	大型地下水（需要现场辅助观测）		
	海平面、潜流	地下或正压质量位移（结合地面高度仪测量进行计算）		