

白而精彩？从阿尔卑斯山到北极的雪地上，微塑料随处可见

梅勒妮·博格曼^{1*}、索菲娅·穆策尔¹、塞巴斯蒂安·普里普克¹、矿山b·特克曼

1、于尔格·特拉舍尔²、贡纳尔·格尔德茨¹

版权所有2019作者，
保留部分权利；独家
授权美国促进协会
科学。对美国政府原
始工程没有权利。根
据知识共享属性非商
业许可4.0分发。

微塑料(MPs)无处不在，甚至在北极也盛行相当数量；然而，在通往北方的道路上存在着巨大的知识差距。为了评估大气输送是否起了作用，我们分析了来自弗雷姆海峡浮冰的雪样本。作为对比，我们调查了来自偏远地区的雪样本(瑞士阿尔卑斯山)和人口稠密(不来梅、巴伐利亚)的欧洲遗址。多磺酸粘多糖通过傅里叶变换3红外光谱鉴定

对21个样本中的20个进行成像。北极雪的三氧化二锑浓度明显较低(0至 14.4×10^{-3} N升)

比欧洲的雪(0.19×10^{-3} 至 154×10^{-3} N升)多，但仍然很大。聚合物组成变化很大，

但是油漆、橡胶、聚乙烯和聚酰胺总体上占主导地位。大多数颗粒都在最小尺寸范围内，表明大量颗粒低于 $11 \mu\text{m}$ 的检测极限。我们的数据突出表明，大气迁移和沉积可能是多磺酸粘多糖值得进一步研究的显著途径。

正式介绍

塑料污染是一个日益引起环境关注的问题，因为2015年(1)的年生产量已经增加到3.8亿吨，预计年废物产量将增加到未来30年34亿MT(2)。许多国家仍然在—高效的废物管理和水处理系统允许泄漏到环境中(3)，而乱丢垃圾的行为加剧了泄漏。假设一切照旧，管理不当的塑料废物可能会增加两倍，从2015年的6000万吨增加到9900万吨，到2060年达到1.55亿吨到2.65亿吨(4)。此外，塑料的设计经久耐用。因此，它会在环境中长时间存在。因此，塑料污染物无处不在也就不足为奇了，据报道，它们来自城市中心附近的环境、陆地和淡水环境，以及偏远无人岛的海岸、海面、水柱和深海海底(5)。塑料污染物也达到了

极地包括北极海滩(6)、海冰(7)、水柱(8)、海面(9–12)和海底(13)。在光、机械磨损、波浪和温度波动的影响下，塑料碎片变成更小的颗粒，称为微塑料

当达到小于5毫米的尺寸时，出乎意料的是，在全球范围内，北极表层水含有最高浓度的多氯联苯，尽管它们位置偏远(14)。此外，正如一项时间序列研究(13)所强调的那样，过去15年来，北极深海海底的垃圾数量大幅增加。这刺激了进一步的研究，揭示了深海弗雷姆海峡(15)和北极海冰(16)沉积物中的多磺酸粘多糖含量非常高，这引发了一个问题：“这些多磺酸粘多糖是如何到达这么远的北方的？”

一种可能性是空中运输，因为在东莞市的大气沉降物中发现多氯联苯的研究数量仍然有限

(中国)和德黑兰(17, 18)。在法国，一场降雨后，大气沉降物中的多氯联苯浓度增加了五倍，这表明湿沉降可能是多氯联苯到达地球表面的途径

(19)包括海洋。尽管对气载塑料的研究有限，但考虑到在多磺酸粘多糖研究中必须采取的预防措施，以降低气载多磺酸粘多糖的污染风险，其重要性是显而易见的(20)。此外，空气中的多氯联苯代表了迄今为止很大程度上被忽视的接触人类和野生动物的途径，因为这些颗粒可能通过吸入而被吸收(21)。雪是各种杂质的载体，并通过干沉降在地面上起到过滤器的作用(22, 23)。在这里，我们对沉积在弗雷姆海峡和斯瓦尔巴特群岛浮冰上的雪进行了采样，以评估大气沉降物是否是议员们进入北极环境的途径。为了能够与北极以前的研究进行比较，采用了协调的自动傅里叶变换红外成像分析(15、16、24、25)。北极仍然被广泛认为是地球上最后的原始环境之一。为了验证这一观点，我们还评估了北欧(不来梅市、赫里戈兰岛)和阿尔卑斯山(达沃斯、茨楚根、巴伐利亚)更多城市附近的积雪中的MP浓度，以进行比较(图1)。

结果

除一个雪样品外，在所有雪样品中都发现了多磺酸粘多糖和微纤维，范围分别为 0.02×10^{-3} 至 154×10^{-3} 牛顿·升⁻¹和 0.043×10^{-3} 至 10.2×10^{-3} 牛顿·升⁻¹(图2和表S1)。多磺酸粘多糖占过滤颗粒的0–88%(平均12%)。然而，由于应用的分析管道，无法确定纤维的材料类型。因此，纤维数量包括合成纤维和天然纤维。然而，我们提出了纤维浓度，以便与以前发表的主要报道纤维的研究进行比较。

不同位置的光纤和中压数量

6.9×10^{-3} 牛·升⁻¹，样品中检测到最高量

巴伐利亚2号(154×10^{-3} N升⁻¹)，其次是海利格兰2号(17.6×10^{-3} N升⁻¹)和浮冰9号(14.4×10^{-3} N升⁻¹)(图1, A和B，

¹平均浓度为 $9.8 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{L}^{-1}$ (东南)时出现急性心肌梗塞

德国不来梅港Handelshafen 12。WSL冰雪研究所

SLF雪崩研究所，瑞士达沃斯大街11号，7260。

*对应作者。Email: melanie.bergmann@awi.de

这些作者作为共同第一作者对本工作做出了同等贡献。

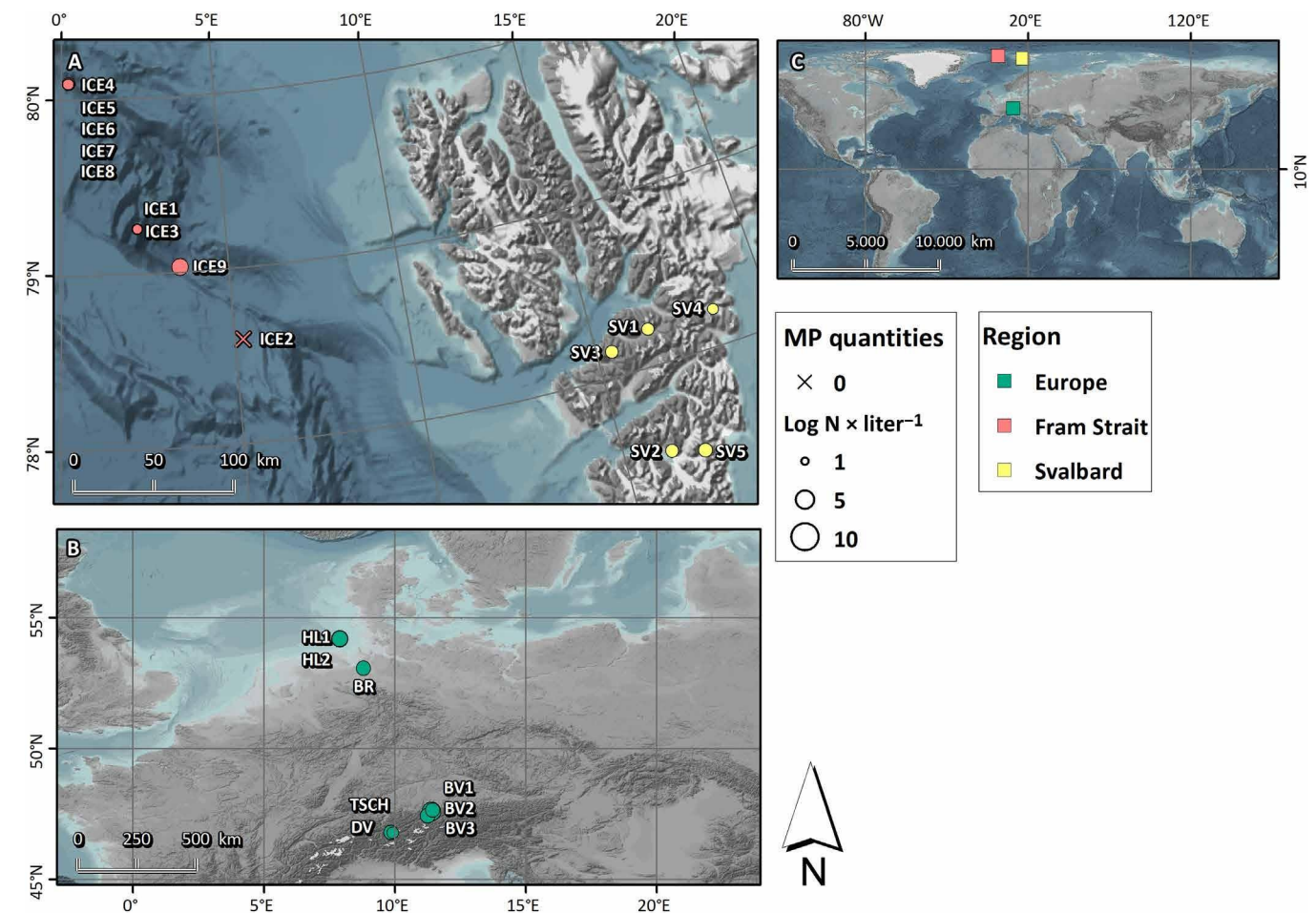


图1. 雪的取样位置图。北极采样点(冰、浮冰; SV, 斯瓦巴)和(B)在欧洲(HL, HeligolandBR, 不来梅; 巴伐利亚BV; TSCH, TschuggenDV, 达沃斯)。(三)各地概况。圆圈的大小反映了对数尺度下的MP颗粒数量。

和桌子S1)。来自欧洲的雪包含的多磺酸粘多糖($24.6 \times 18.6 \times 10^3$ 牛顿·升¹)比来自浮冰的样品要多得多(曼-惠特尼U检验: $W = 54$, $P = 0.011$)。尽管如此, $1.76 \pm 1.58 \times 10^3$ 牛·升¹的平均值对于像北极这样的偏僻地区来说还是很大的。图3显示了来自不同位置的多磺酸粘多糖和纤维的图像。浮冰9具有比其他北极雪样品高得多的MP浓度, 这引起了采样期间或所用直升机潜在污染的担忧。排除该值后, 平均值降至 $0.18 \pm 0.07 \times 10^3$ 牛·升¹。尽管如此, 我们认为这一高水平不太可能是由于污染, 因为清漆(检测到的主要聚合物类型)不是所用设备的一部分, 并且在浮冰3号、不来梅、阿尔卑斯山和直升机场(未使用直升机)的样品中也大量存在。此外, 浮冰9样本是在可能受直升机湍流影响的区域之外采集的。因为在强风时期($18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 表S2), 我们测试了MP丰度是否与风速相关, 但没有发现显著的相关性(斯皮尔曼秩相关检验: $\rho = 0.06$, $P = 0.80$)。然而, 风向可能起了作用, 因为强劲的东风可能从邻近的沙丘或大陆输送了颗粒。

在浮冰4 (10.2×10^3 牛顿·升¹)的雪中检测到最大数量的纤维, 其次是直升机场2 (2.75×10^3 牛顿·升¹)

10^3 N升^{-1})和巴伐利亚3 ($2.57 \times 10^3 \text{ N升}^{-1}$) (图1, A和B, 表S1)。然而, 总的来说, 欧洲的雪比北极浮冰的样品含有更多的纤维(平均值为 $1.431 \pm 0.325 \times 10^3$ 牛顿·升¹) (曼-惠特尼U检验: $W = 96$, $P = 0.024$), 鉴于它们的偏远性, 其平均值仍然很高 ($1.38 \pm 1.10 \times 10^3$ 牛顿·升¹)。同样, 可以认为浮冰4中异常高的纤维数量可能是由于污染。排除它将导致较低的平均值 ($0.28 \pm 0.095 \times 10^3$ 牛·升¹)。然而, 我们认为这是不太可能的, 因为浮冰样本5至8是由同一个人在同一浮冰上采集的, 因此这些样本的污染应该同样高。纤维丰度和风速之间没有显著的相关性(斯皮尔曼秩相关检验: $\rho = 0.17$, $P = 0.45$)。纤维丰度与MP丰度呈正相关(斯皮尔曼秩相关检验: $\rho = 0.62$, $P = 0.002$)。

多磺酸粘多糖和纤维的尺寸

检测到的多磺酸粘多糖的大小在11和475 μm 之间, 所有检测到的多磺酸粘多糖中有80% $\leq 25 \mu\text{m}$, 所有粒子中有98%小于100 μm 。总体而言, 粒子的数量随着大小的增加而减少(图2C), 在最小的可检测大小类别中没有达到渐近线。表S2包括单个样本的大小分布。

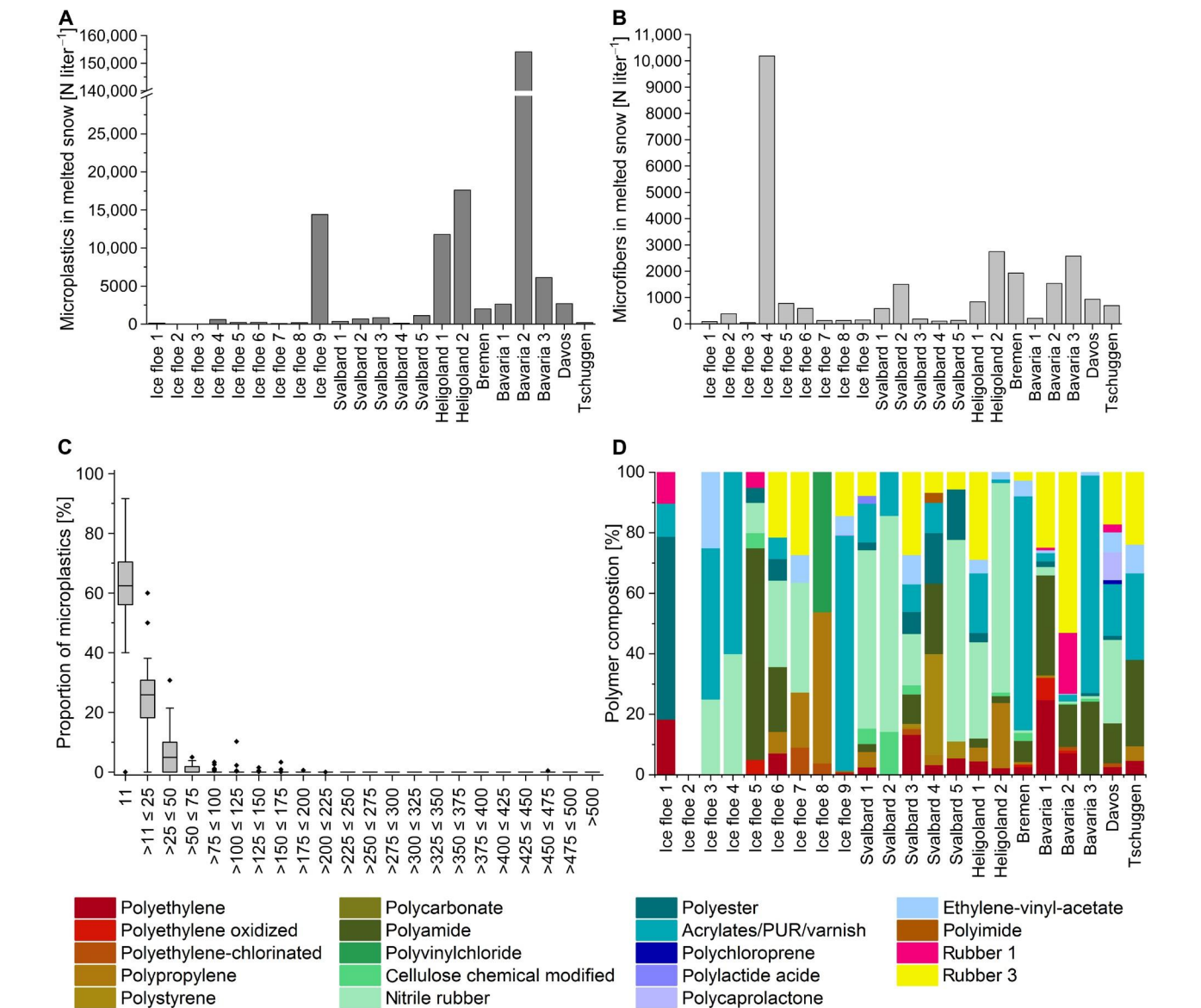


图2。在从欧洲到北极的不同地点收集的雪样本中检测到的粒子。(一)不同位置傅里叶变换红外光谱记录的MP颗粒数量。(B) 在不同位置检测到的微纤维浓度(注意,未发现聚合物)。(三)从所有雪样中提取的不同大小等级的混合粒子数比例的盒须图。方框的上下边界分别表示第75个和第25个百分点。框内的线表示中间值,误差线(m)表示第90个和第10个百分点,黑钻石表示异常值。在不同位置通过傅里叶变换红外光谱确定的聚合物的相对组成。

纤维的长度在65和14, 314 m.之间,而97%的纤维最大长度为5毫米,31%的纤维短于500 m.。一般来说,纤维显示出长度越来越短的趋势,但在最低尺寸等级中不饱和(图S1)。即使不包括两种最大的欧洲纤维(14, 314和13, 704 m),欧洲纤维也比北极雪的纤维长得多(曼-惠特尼u检验:W = 13, 723, P = 0.0001)。表S3包括单根纤维的尺寸信息,标明其原产地。

材料成分

在天然和合成颗粒总量中,多磺酸粘多糖所占比例最高的是来自浮冰1的雪(88%),其次是

巴伐利亚2号(67%)和浮冰9号(37%)(表S2)。欧洲和北极雪的MP粒子比例无显著差异(曼-惠特尼U检验:W = 170, P = 0.59)。成分变化很大,每个样品总共发现19种不同的聚合物类型,范围在2种(浮冰4)和12种(巴伐利亚2)之间(图2D和表S1)。与北极(平均为5.14±0.79)样品相比,欧洲(平均为8.63±0.80)样品中的聚合物数量显著增加(曼-惠特尼U检验:W = 123, P = 0.013)。丙烯酸酯/聚氨酯/清漆/清漆(以下简称清漆)出现频率最高(17个样品),其次是丁腈橡胶(16个样品)、聚乙烯(PE)、聚酰胺和3型橡胶(13个;三元乙丙橡胶)。欧洲样品的聚合物组成

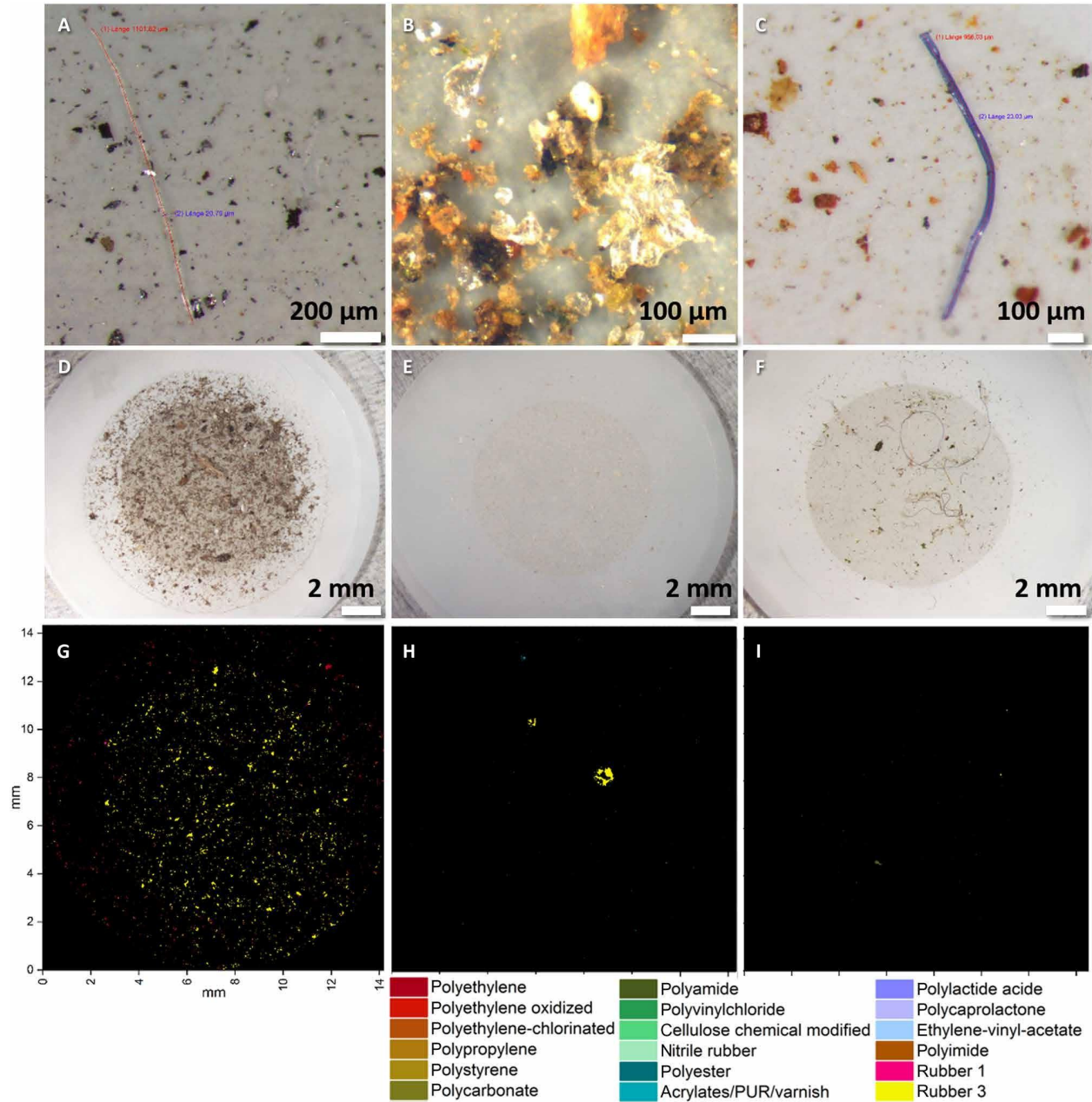


图3。在雪中发现的议员照片。(svalbard 4号的聚苯乙烯纤维(长度, 1101 μm); (b)来自直升机场聚丙烯颗粒(直径256 μm); (C)来自浮冰8的聚氯乙烯纤维(长度, 956 μm)。请注意,这两种特殊的纤维可以通过傅里叶变换红外光谱进行分析,因为它们恰好位于过滤器的平面上。(D至F)氧化铝过滤器,带有浓缩雪样。在傅里叶变换红外光谱测量和自动分析之后相应的聚合物依赖的假彩色图像。(D和G)巴伐利亚2:议员最多的样本;(E和H)浮冰 MPs 第三多的样本;(F和I)不来梅:样品具有中间MP号,但有许多纤维(照片编号:S. Mützel, Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum Für Polar-und Meereforschung)。

而北极则有显著的不同[多变量方差分析:伪 $F = 2.43$, $P = 0.006$]。欧洲和北极样品的聚合物组成差异为67%,主要是因为欧洲样品中聚酰胺、清漆、3型橡胶、丁腈橡胶、乙烯-醋酸乙酯和聚乙烯的含量高得多。相比之下,聚苯乙烯、聚氯乙烯、聚碳酸酯、聚乳酸和聚酰亚胺只出现在北极雪中。

其他粒子

在雪中检测到的其他颗粒占总颗粒的22%至100%(表S2),包括甲壳质、木炭、煤、动物毛皮、植物纤维和沙子。除了煤以外,所有这些在欧洲雪中的含量都要高得多(曼-惠特尼U检验: $W = 114$, $P = 0.0015$),这也解释了在它们的组成中发现的显著差异(PERMANOVA:伪 $F = 7.75$, $P = 0.001$)。分配给“植物纤维”和“动物毛皮”的粒子对46%的不同贡献最大[相似百分比(SIMPER)]。

讨论

这项研究首次提供了议员们对雪污染的数据。雪中的MP浓度非常高，表明大气受到了严重污染。在穿过大气层的过程中，雪与空气中的颗粒和污染物结合，最终沉积在地球表面，这种现象被称为“清除”(22)。我们的数据显示，在欧洲和北极，扫气是多磺酸粘多糖进入陆地和海洋环境的重要途径。根据每年的降雪数据，我们估计弗雷姆海峡的年平均月降水量为 8.8 ± 7.9 牛顿·米² (0至72牛顿·米²)，斯瓦尔巴德群岛为 1.4 ± 0.4 牛顿·米² (0至2牛顿·米²)，以及66阿尔卑斯山 60.1 牛米² (0至308牛米²)。然而，应当指出，鉴于数据的多变性，这些估计具有很大的不确定性。

大量网状点粒子和微纤维

尽管欧洲的甲基溴水平(0.191×10^{-3} 至 154×10^{-3} 牛顿·升⁻¹)明显高于北极雪(0至 14.4×10^{-3} 牛·升⁻¹)，鉴于大面积样本的高可变性和稀疏分布，得出的结论必须谨慎对待。一些可变性可能是由于来自北极的雪不像所有欧洲雪样品(瑞士雪除外)那样是新沉积的，并且可能在未知的一段时间内暴露于二次干沉积的空气传播颗粒(23)。尽管如此，考虑到北极与人口稠密的源头地区之间的距离，在北极雪中发现的较低浓度并非不常见。与法国和东莞的郊区或人口密度较低的地点相比，人口密集的城市大气沉降物中的甲基苯酚浓度也始终较高(18, 26)。Dehghani等人

(17)记录的多磺酸粘多糖在每克干燥粉尘3至20 N的范围内来自德黑兰。然而，由于湿法沉积是一种比干法沉积更有效的运输方式(27)，并且使用了不同的方法，因此数量不能直接比较。这同样适用于记录在东莞干沉降物中的主成分分析(31至43牛米²天⁻¹) (18)。最高的MP浓度出现在巴伐利亚雪中。因为我们在一条乡村公路旁采集了这个样本，所以交通可能会起到一定的作用

就汽车排放而言，沉降的多磺酸粘多糖通过汽车扩散，随后通过降雪清除。实验表明，大量大小相似的硫化锌颗粒被放置在道路上，并被汽车卷入漩涡(28)。虽然该样品中最丰富的聚合物类型，橡胶类型1和3，指出汽车轮胎是一个潜在的来源，但由于目前在检测特定橡胶类型方面的方法限制，无法得出明确的结论。尽管如此，在不来梅市的一条街道上，积雪中的议员人数(约568, 000名居民)只是中等水平(2×10^{-3} 牛顿·升⁻¹)。这可能是由于在交通流量较低的周日收集了新沉积的雪，因此颗粒分散性较低。相比之下，巴伐利亚的样本是在汽车流量较高的周一采集的。Lonati等人(29)报告称，由于交通流量减少导致颗粒分散性降低，米兰周末的细颗粒排放减少了20%。北海岛赫里戈兰的雪排在第二和第四位(17.6×10^{-3} N升⁻¹)，考虑到它只有大约1200人居住，汽车被禁止，这是意想不到的。尽管总的来说多氯联苯含量和风速之间没有显著的相关性，但是在采样之前和采样期间盛行的强东风($18 \text{米} \cdot \text{s}^{-1}$)可能已经将多氯联苯从该岛的沙丘环境中驱散，并且可能还从海水或大陆中输送颗粒。在一个样本中检测到最低的欧洲议员浓度

来自瑞士阿尔卑斯山(0.19×10^{-3} 牛·升⁻¹)。这可以被认为背景污染，因为该场地既不是城市，也不靠近交通。

北极雪中的多氯联苯含量仍然很高，第三高浓度(14.4×10^{-3} 牛顿·升⁻¹)来自浮冰。浮冰9和其他浮冰样品之间的震级差异是显著的。在进一步了解大气MP污染之前，我们只能推测大气MP污染可能在时间和空间上都是可变的，导致大气MP通过雪脱落的差异很大。当地的风力条件可能会起作用。此外，一旦海冰在春季破裂，北极浮冰经常被转座漂流从北极中部带到南部(即弗雷姆海峡)(13, 16)。在它们的漂移过程中，它们可能会遇到携带不同量的中压的不同气团，这可能会导致观察到的差异。尽管如此，不管确切的原因是什么，考虑到地理位置的偏远，这是意想不到的，并提出了一个问题“这一切从何而来？”可想而知，空中的MPs是由船只和风在当地散发或分散的。来自海参崴地区的雪含有海洋来源的颗粒，包括海胆、藻类和软体动物壳(30)。然而，大多数粒子可能来自更遥远的地区。为了揭示这一问题，我们利用了北极野生动物体内高浓度的汞的路径知识。质量平衡方法表明，通过雪的湿沉降是汞进入北冰洋的主要途径(31)。三条主要的运输路线导致汞在北极的积聚：(一)冰岛低压和北美高压从北美和西欧输送气团(40%)；(二)阿留申低压从北太平洋和东亚输送气团(25%)；(三)西伯利亚高压将东欧和西伯利亚气团(15%)输送到北极(31)。与汞一样，多氯联苯可能从城市地区向四面八方远距离吹到北极，导致北极大气中多氯联苯含量出乎意料地高。在北大西洋涛动的高阶段，这种情况可能会加剧(32)。即使是大的矿物颗粒($\leq 450 \text{ }\mu\text{m}$)也可以通过快速水平输送、湍流、对流系统中的抬升和颗粒的电悬浮等机制从撒哈拉输送到3500公里以外的北大西洋(33)。据估计，柳树和松树(10至200 μm)的花粉仅用了5天(34天)就从西欧被运送到海拔3000米的北极地区。

北极海冰和深海沉积物中多氯联苯含量的比较

不幸的是，将我们对大气颗粒物的研究结果与之前的大气颗粒物或北极海水颗粒物的数据进行直接比较是不可能的，因为后两者主要涉及纤维(见“纤维丰度”一节)，或者使用不同的方法得出更低的数值(9、10、35)。然而，我们可以将北极浮冰的结果与之前北极海冰和深海沉积物中多磺酸粘多糖的数据进行比较(15, 16)，也可以研究空气中的多磺酸粘多糖是否是这些隔间的来源。这些研究使用了相同的统一分析方法，因此与我们的方法具有可比性。北极海冰中的多氯联苯浓度在 1.1×10^{-3} 至 12×10^{-3} 牛顿·升⁻¹之间，相对于邻近海水(16)而言，多氯联苯倾向于以100倍的系数浓缩颗粒，深海沉积物中的多氯联苯浓度在 0.04×10^{-3} 至 3.46×10^{-3} 牛顿·升⁻¹之间(15)。给定类似或更高水平的来自浮冰的雪(0至 14.4×10^{-3} 牛顿·升⁻¹)，似乎它们可能对多磺酸粘多糖有贡献

海冰也会随着时间下沉到海底。通过雪沉积在浮冰上的多磷酸粘多糖可通过雪变质作用(即压实)直接嵌入海冰基质中,或者通过释放到融化池中并随后重新冻结。到达这些基质的另一个途径可以是在海冰形成之前或期间,通过湿沉积到海洋表面。一旦进入海水,多磷酸粘多糖可能会沉入海底。与深海沉积物相比,浮冰雪中的聚合物成分似乎更类似于海冰。例如,清漆是这两种球体中最常见和最丰富的聚合物类型之一,但在沉积物中不太重要。尽管如此,丁腈橡胶和聚酰胺在浮冰雪、深海沉积物和海冰中都很重要,因此这些聚合物可能已经从大气转移到海冰和海底。

中压尺寸

多磷酸粘多糖在雪中的大小分布出乎意料地类似于在北极海冰和深海沉积物中发现的多磷酸粘多糖大小(15, 16)。在所有这些球体中检测到的大多数多磷酸粘多糖都在最小的尺寸范围内(11 μm)。通过扫描电子显微镜观察,东莞大气沉降物中的MP颗粒揭示了风化迹象,因此蔡等人(18)假设大气降解是通过碰撞和摩擦动力学以及大气中较高的辐射和氧气水平导致的化学风化进行的。这可能会使碎片变得更小。事实上,在最小的尺寸范围内没有尺寸饱和,这意味着在尺寸类别中可能有更多的粒子低于我们当前的检测极限。此外,较小的颗粒更有可能被气团拾取和运输。不管是什么原因,我们的结果可能低估了MP的数量,这也是在以前的研究中得出的结论(15, 16, 36)。这突出了对小颗粒进行量化的必要性,以便对蒙特利尔议定书的污染进行现实的评估。大多数研究目前集中在大小大于200到300 μm 的粒子上。

纤维丰富

所有的雪样都含有 0.043×10^{-3} 至 0.043×10^3 的纤维 $10.2 \times 10^3 \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$,浮冰4的雪中浓度最高,其次是不来梅的雪。虽然不知道这些是合成聚合物的比例,但我们的纤维浓度比之前巴黎附近室外和室内环境的报告至少高4到7个数量级(中位数,分别为0.0009和0.0054 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$) (36)。东莞的纤维和MP-abundance与巴黎的样品在同一数量级(18)。这种巨大的差异可能是由于方法上的差异和潜在机制的差异,即干沉降和湿沉降。Dris等人(19)报告说,在一次降雨后,大气颗粒物的水平要高五倍,雪清除气溶胶粒子的效率比雨高50倍(22)。不管是什么原因,北极偏远地区积雪中纤维的高含量是值得注意的,而不来梅市区的高含量并不令人惊讶。纤维和MP浓度之间的正相关可能表明它们来自相似的来源。在巴黎附近检测到的纤维中有33%是聚合物,而东莞的纤维中有23%是由塑料制成的(18, 36)。如果我们研究中28%(这两个值的平均值)的纤维也是聚合物,那么这将会增加 0.012×10^{-3} 至 $2.86 \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$,总中压负荷为 0.029×10^{-3} 至 $156.86 \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。然而,这一假设必须谨慎对待,因为我们样本中天然纤维的比例可能与城市地区不同。

聚合物成分

样品的聚合物组成变化很大,即使在位置非常接近的地方,例如来自同一浮冰的浮冰4至浮冰8。清除颗粒取决于雪晶体大小、颗粒大小、风速、空气湿度和雪的强度(22, 37),这只是可能影响聚合物组成的许多因素中的几个。北极海冰和深海沉积物中也报告了不同的聚合物成分(15, 16)。每个样品中发现的聚合物类型的数量在巴伐利亚最高(12种),这并不罕见,因为这也是具有最高多磷酸粘多糖丰度的样品,并且在一条乡村道路旁边取样,在该道路上,定居的多磷酸粘多糖可能受到交通的分散。与中国(4)和法国(3)(18, 26)的大气沉降物相比,本研究中每个样品和所有样品中检测到的聚合物类型的数量(19)要高得多。这可能是由于湿沉降清除效应和方法上的差异,因为以前的结果是基于视觉预选颗粒的分析,只考虑大于50 μm 的颗粒,这些颗粒也大多是纤维。

清漆是最常见的,也是五种最丰富的聚合物类型之一。在冰芯和深海沉积物中也检测到了这种物质,尽管频率较低(15, 16)。这反映了聚合物基清漆在车辆、船舶、风力涡轮机、水产养殖和建筑等表面保护涂层中的广泛应用。建筑部门约占欧洲塑料转换器需求的20%(38)。多磷酸粘多糖可能在建筑工地施工期间,通过风雨对涂层表面的磨损或在处理建筑垃圾时释放出来(39)。未来的研究需要量化这种来源的重要性和途径。三种不同类型的橡胶是第二常见和最丰富的聚合物。它们可能作为轮胎的磨损产物或作为屋顶结构中常用的极其耐用的合成橡胶屋顶膜(3型橡胶,三元乙丙橡胶)进入环境。密封垫圈(1型橡胶、密封橡胶)、电缆和鞋底的磨损可能是橡胶的进一步来源,其中一些属于德国最常见的多磷酸粘多糖来源(39)。虽然北极海冰含有很少的橡胶颗粒,但在深海沉积物(15, 16)中也发现了它,在那里丁腈橡胶是最常见和最丰富的聚合物之一。由于它非常耐各种温度,以及耐油、汽油和其他化学物质,它被广泛用于海上石油平台和汽车行业的软管、密封件、O型圈、合成革、索环、电缆护套和传动带

航空工业。

聚酰胺(包括尼龙)是五种最常见和最丰富的多磷酸粘多糖之一。法国的一个家庭和大气沉降物也报告了这种情况(36)。聚酰胺广泛用于合成纤维、汽车应用、渔业、船帆、牙刷、包装和地毯。它在欧洲比在北极雪中更普遍。然而,聚酰胺在大西洋和北极表层水和深海沉积物中含量丰富(9、10、15、16、35、40)。因此,在聚酰胺向北极的运输中,大气运输以外的途径可能发挥更重要的作用。

同样,在两个浮冰样本中,聚乙烯的含量也很低,但在北极海冰和大西洋表层水域(9、16、35、40)中检测到的聚合物类型最多,在大多数欧洲样本中普遍存在,在东莞(18)和一个法国家庭(36)的大气沉降物中也是如此。同样,在向北极的大气输送中,大气输送以外的机制可能更为重要。

表1 . 积雪取样活动的细节。AWI, 阿尔弗雷德-魏格纳研究所。亥姆霍兹-曾特朗富尔极地和米斯福松; SLF达沃斯, 世界雪与雪崩研究所。				
样本区域经度	普	纬度 E	巡航日期采样器风速	
浮冰1北极79.2576_2.3121_PS99_2_07_2016年7月3_1	浮冰2北极78.5926_5.2376_PS99_2_02_2016年7月6	浮冰3北极79.2576_2.3121_PS99_2_30_2016年6	(m/s	
月9-10浮冰4北极80.0934_0.2253_PS10_斯瓦尔巴特群岛1北极78.2118_16.5511_Aemelire_2018年3月10日公民1_3	斯瓦尔巴特群岛2北极77.5107_16.2567_Aemelire_2018年3月14日公民2	斯瓦尔巴特群岛3北极78.1433_15.4215_Aemelire_2018年3月14日公民6	斯瓦尔巴特群岛4北极78.2091_18.4517_Aemelire_2018年3月16日公民2_德国53.0675_8.7931_2018年2月25日AWI_2_5	
巴伐利亚州1阿尔卑斯山47.6505_11.4335_2018年3月19日公民2_5	巴伐利亚州2阿尔卑斯山47.5837_11.3921_2018年3月19日公民2_5	巴伐利亚州3阿尔卑斯山47.4367_11.2587_2018年3月19日公民2_5	茨楚根阿尔卑斯山46.78444444467	

健康影响

多磺酸粘多糖和微纤维在雪中的高浓度突出了大气作为空气中多磺酸粘多糖和微纤维来源的重要性。通过这种途径，多磺酸粘多糖可能会进入土壤和水生环境，从而进入食物链。在人口密集的地区，清除街道上的积雪并将其“运走”是一种常见的做法。我们的结果表明，应该明智地选择这些位置，以避免污染敏感区域。此外，雪中的议员已经脱离大气层，因此可以被视为空中议员污染的一个指标。这与人类和动物健康相关，尤其是在有人居住的欧洲地区，那里的居民可能会吸入空气中的多磺酸粘多糖和纤维。然而，尽管我们知道在室内食物制备和进餐过程中，海鲜的空气污染超过了最初的MP浓度(41)，但出人意料的是，关于空气中MPs的吸入风险的研究很少。据推测，只有最小尺寸的MP部分被吸入到深肺中，而长度超过5 μm、直径小于3 μm、长径比为3：1的颗粒经受咳嗽或粘液纤毛清除(21)，使得它们最终进入胃肠道。然而，在肺组织(包括癌)中检测到多磺酸粘多糖和其他长度达135 μm的纤维，挑战了这一概念(42, 43)。肺组织中的多磺酸粘多糖可能会持续很长时间，因为它们在体液中是持久的(21)。长期吸入多磺酸粘多糖，尤其是与

吸附或添加化学品(17)，可能导致健康风险，包括呼吸道刺激、过敏性肺炎、炎症、纤维化和遗传毒性(21)。保利等人(42)提出，多磺酸粘多糖可能被认为是增加肺癌风险的候选药物，尤其是对不吸烟者。从欧洲大陆到北极的积雪样本中检测到的高浓度多氯联苯表明空气污染严重，并强调迫切需要重点研究空气中多氯联苯对人类和动物健康的影响。

从欧洲大陆到北极的雪中的显著浓度表明大气中存在大量的多磺酸粘多糖，这起初令人困惑。然而，众所周知，雪或者吸收气溶胶，或者在包含污染物的气溶胶核周围形成，例如来自车辆排气微粒(44)。此外，从地球表面排放的灰尘、大气、陆地表面和水域之间的沉积和扩散可能会促进多磺酸粘多糖(18)的运输，但需要进行研究来验证这一点。一个悬而未决的问题是，水生环境是否是大气中多氯联苯的来源，例如在蒸发和风暴事件期间。这也可以解释为什么在像北极这样僻静无人居住的地区，多磺酸粘多糖和纤维的浓度很高。另一种解释是由风系统带来的长程飘移，从城市带来人为的粒子。大尘粒从撒哈拉到北大西洋的距离为3500公里(33)。这类似于我们的北极点和欧洲之间的距离，就风力运输而言，这恰好是最重要的路径

水银到北极。我们的结果强调了迄今为止被忽视的议员们进入北冰洋的途径，北冰洋是一个已经受到气候危机影响的生态系统。

材料和方法

研究地点

在2015年至2017年期间，在研究破冰船“极地船尾”号的三次考察中，船载直升机或小艇访问了在北极弗雷姆海峡漂流的五块浮冰(图1A和表1)。用一个预先清洗过的杯子、一个钢勺或一个汤勺对表面的雪进行取样，然后转移到由聚氯乙烯、聚乙烯或玻璃制成的容器中(详见S2表格)。2018年3月，公民科学家在斯瓦尔巴德群岛的不同地点采集了五个样本(图1A和表1)，他们正通过滑雪斗(Aemalire项目)进行陆地考察。市民们接受了污染预防的指导，并配备了协议表格、预冲洗的2升不锈钢容器(Ecotanca)、一个瓷杯、一个钢勺和一个汤勺用于取样。

2018年2月，新沉积的雪表面用勺子从来梅市的停车场转移到玻璃罐中(图1B和表1)。只拍摄了表面的雪，在汽车表面留下了一层薄薄的雪。一个月后，在赫里戈兰岛，用汤勺从后院收集了新沉积的表层雪，旁边是阿尔弗雷德·魏格纳研究所校园前的人行道(图1B和表1)，避开了土壤和底面。在瑞士阿尔卑斯山，用勺子在茨楚根周围的雪原和达沃斯村收集表面积雪(图1B)。这场雪是在取样前两天(2018年3月7日)下的。在巴伐利亚阿尔卑斯山(德国)，市民用钢勺从三个不同的地方将刚落下的表层雪转移到用自来水预冲洗过的玻璃罐中(图1B和表1):样品1在乡村小路旁边采集，样品2在乡村小路和湖泊旁边采集，样品3在附近有人类活动的绿色区域采集。所有团队都徒手工作，设备用Milli-Q水、自来水或雪冲洗。除了巴伐利亚的样品，玻璃罐密封带来的潜在样品污染被一张锡箔最小化。样品保持冷冻状态，但在运输至直升机场或实验室的过程中会解冻。

污染预防和程序空白

所有取样的人员都被指示逆风放置，并徒手在他们面前取样未受干扰的雪，以避免污染。如果没有另外说明，所有实验室器皿都是由玻璃或不锈钢制成的，在使用前用清水彻底冲洗。所有基于聚合物的物品(如瓶盖和过滤器支架)都是由聚四氟乙烯制成的，这种聚合物在当前的傅里叶变换红外成像设置下无法检测到(25)。空气中的颗粒由实验室的集尘箱(DB1000，过滤前的G4，HEPA-H14最终过滤，Q = 950 m³ 3小时1，梅克林霍夫-吕夫特技术公司)过滤，用于颗粒分选和傅里叶变换红外光谱分析。所有过滤步骤都是在层流柜中进行的(斯堪拉夫福尔图娜公司，实验室)。人们穿着棉质实验室外套和衣服，以减少合成纺织品的污染。

为了说明塑料样品容器可能造成的污染，实验室制作了两个程序空白

通过在聚氯乙烯和聚乙烯容器中填充毫当量水，并在20℃下储存4天，以模拟冷冻和解冻过程。为了评估来自用过的自来水和密封在盖子上的树脂的巴伐利亚雪样本的可能污染，一个类似的玻璃罐装满了自来水，并由市民科学家冷冻。所有空白样品的处理方式与雪样相同。对于塑料容器，进行了多达三次的傅里叶变换红外成像，因为发现获得可靠结果的数量少，这代表了甲基溴污染的程度。在现场取样期间，没有取得空白。通过将空白样品中检测到的多磷酸粘多糖量转换为样品体积，对空白样品中测定的多磷酸粘多糖量进行了校正(表S2)。根据融化的雪的体积计算每个样品每升的颗粒数。程序空白中的聚合物类型、丰度和多磷酸粘多糖尺寸可在表S4中获得。聚乙烯容器中的空白容器装有256牛·升1，主要由聚乙烯组成。聚氯乙烯烧瓶中装有308牛·升1，其中大部分是聚丙烯和聚氯乙烯。用自来水预冲洗过的玻璃罐含有最高数量的MP (27, 243牛·升1)，聚合物类型多样，主要是聚乙烯和橡胶类型1和3。为了解决关于可能污染的所有结果的不确定性，不确定性的传播按照注释S1所述进行计算(45)。

检测(MP)颗粒的分析程序经过三次高空扭转后，FlowCam(美国斯卡伯勒流体成像技术公司)对每个样品的等分试样[10毫升:1毫升样品(融化的雪)稀释9毫升毫当量]进行了三次分析，以可视化和量化颗粒浓度和尺寸，从而确定潜在的区域覆盖范围。在此评估的基础上，将特定体积的样品过滤到氧化铝过滤器上(直径= 25毫米;孔径, 0.2 μm;阳极氧化, Whatman, 德国)。这一步骤对于避免过滤器的粒子过载至关重要，因为粒子过载会导致傅里叶变换红外辐射对后续测量的完全吸收以及最终粒子计数的误差。尽管采取了这种预防措施，但八个雪样品的膜在过滤过程中被堵塞，因此被停止，并记录过滤后的体积。

在干燥器中干燥2天后，将过滤器放在FTIR显微镜的氟化钙窗口上，并拍摄概览图像(×40倍放大)。过滤器上的粒子由Hyperion 3000 FTIR显微镜进行分析，该显微镜配有焦平面阵列(FPA)检测器，该检测器具有64 × 64个检测器元件，并连接到TENSOR 27光谱仪(德国Bruker Optics GmbH)。使用OPUS 7.5软件(布鲁克光学)进行测量时，使用了一个可见光物镜(×4倍放大)和一个红外物镜(×3.5倍放大)以及3600至1250cm⁻¹的红外范围。20 × 20焦平面阵列(14.1×14.1毫米)的测量区域包括整个样品过滤器表面，并产生400个单个场的测量值。测量是由一个3.5倍红外物镜以透射模式进行的，每场32次扫描，无宁滨，分辨率为8厘米1，允许在约4.5小时内探测到低至11 μm的粒子。

纤维检测

由于在傅里叶变换红外光谱图像分析过程中颗粒分析管道的设计，纤维目前还不能通过

这种自动化方法。然而，为了能够与以前的研究进行比较，使用体视显微镜(×8放大倍数；奥林巴斯SZX16)。每个过滤器的纤维总数外推至1升融化的雪。从样品结果中减去空白中发现的纤维总数(n = 83)。此外，使用CellSens显微成像工具(×8至×32放大倍数；德国奥林巴斯)。

数据分析

傅里叶变换红外成像数据被自动处理(24)。简而言之，测量文件中的每个光谱通过两个库搜索进行分析，以使用适应性数据库设计来确认聚合物的身份(25)。图书馆可下载(<https://link.springer.com/article/10.1007/s00216-018-1156-x>)。识别的每个像素都存储有其位置、分析质量，最后，将聚合物类型分配到一个文件中，该文件基于Python进行图像分析

3.4脚本和SimpleITK函数(24)。这种方法能够识别、量化和确定所有聚合物颗粒的大小，同时排除人为偏差(24)。为了降低粒度分布的复杂性，并与以前的研究进行比较，MP颗粒被划分为不同的粒度等级。

所有的统计比较都是基于非参数统计(曼-惠特尼U检验，Minitab 18，Statistica 13)。我们测试了采样日风速和MP数量之间的斯皮曼等级相关性，以及MP和纤维浓度之间的相关性(Minitab 18P > 0.05)。欧洲和北极样品的聚合物成分通过多元分析进行比较

6.1.16 基于聚合物类型(46)的第四根转换数据的布雷-柯蒂斯相似性。PRIMER-e的SIMPER程序用于评估哪种聚合物类型导致了差异。

使用弗雷姆海峡[200千克米² (47)]、斯瓦尔巴德群岛[450千克米² (48)]和达沃斯[500千克米² (49)]的年平均降雪量作为通过雪的大气颗粒物和纤维沉积速率的暂定估计值，对采样区域的年大气颗粒物和纤维沉降量进行了计算。不来梅和赫里戈兰没有包括在内，因为这些地区的降雪是短暂的。融雪样品的密度假设为水密度(1千克升⁻¹)。

补充材料

本文的补充材料见<http://advances.sciencemag.org/cgi/full/5/8/eaax1157/DC1>图S1。在北极和欧洲雪中发现的微纤维的长度频率(%)。注意S1。关于可能污染的结果不确定性传播的计算。
S1桌。在雪样品中检测到的多磺酸粘多糖、纤维、聚合物类型和其他颗粒的浓度。
S2桌。在雪样本中检测到的多磺酸粘多糖、纤维、聚合物类型和其他粒子的浓度，以及大小、频率分布和元数据。
S3桌。在北极和欧洲雪样中测量的纤维数量、大小和颜色。S4桌。空白样品中检测到的多磺酸粘多糖的浓度、组成和大小。

参考文献和注释

1. R. 所有塑料制品的生产、使用和命运。
Sci. Adv. 3, e1700782 (2017)。
2. K. 《什么是废物2.0:到2050年固体废物管理全球快照》(城市发展，世界银行，2018年)。
3. J.Jambeck, Geyer, Wilcox, Siegler, m.佩里曼, Andrady, Narayan, K. 法律，塑料废物从陆地输入海洋。科学347, 768 - 771(2015)。

4. 长度《全球塑料废物产生和处置的未来情景》。
Palgrave Commun. 5, 6 (2019)。
5. 米(meter的缩写)) 博格曼, 《海洋垃圾:塑料污染的海洋变化》。
Nature 544, 297 (2017)。
6. 米(meter的缩写)) 公民科学家揭示:海洋垃圾污染北极海滩, 影响野生动物。
Mar. Pollut. 扯淡。125, 535 - 540 (2017)。
7. R. 奥巴马, 萨德里, 王永庆, 基亚顿, 贝克, 汤普森, 全球变暖释放了冻结在北极海冰中的微塑料遗产。地球未来2, 315 - 320(2014)。
8. B.e. Grsvik, T. Prokhorova, E. Eriksen, P. Krivosheya, P. A. Horneland, D. Prozorkevich, 巴伦支海海洋垃圾评估, 挪威-俄罗斯联合生态系统调查的一部分。前面。3月Sci. 5, 72 (2018)。
9. A. 《北极水域的微塑料:第一个》
表面和表面下样品中颗粒的报告值。*Sci.* 代表5, 14947 (2015)。
10. 长度D. K. Kanhai, K. Gårdfeldt, O. Lyashevskaya, M. Hassellö, R. C. Thompson, I. O'Connor, 北极中央盆地地下水中的微塑料。*Mar. Pollut.* 扯淡。130, 8 - 18 (2018)。
11. 米(meter的缩写)) 北极巴伦支海和弗雷姆海峡浮游人为垃圾的观测。*Polar Biol.* 39, 553 - 560 (2016)。
12. A. Cózar, E. Martí, C. M. Duarte, j. Garcia-de-Lomas, E. van Seville, T. J. Ballatore, 动词(verb的缩写)M. Eguiluz, J. I. González-Gordillo, M. L. Pedrotti, F. Echevarria, R. Troublè, X. Irigoien, 北冰洋是温盐环流北大西洋分支中漂浮塑料的死角。*Sci. Adv.* 3, e1600582 (2017)。
13. 米(meter的缩写)) 在豪斯加滕天文台, 北极深海底部的海洋垃圾继续增加并向北方扩散。《深海资源》第一部分第120、88 - 99页(2017年)。
14. A. 海洋环境微纤维污染:全球模式和微粒起源的多样性。环境。波洛特。237, 275 - 284 (2018)。
15. 米(meter的缩写)) 博格曼, 维兹伯格, 克伦彭, 洛伦茨, 普里普克, 泰克曼, 格迪斯, 北极深海沉积物中微量塑料的高含量。环境。Sci. 科技。51, 11000 - 11010 (2017)。
16. I. Peeken, S. Primpke, B. Beyer, j.居特曼, C. Katlein, t.克伦彭, m. 博格曼, 长度北极海冰是微型塑料重要的时间汇和运输工具。纳特。社区。9, 1505 (2018)。
17. 南伊朗德黑兰大都会, 沉积城市灰尘中的微塑料污染。环境。Sci. 波洛特。第24、20360-20371(2017)号决议。
18. 长度蔡, 王, 彭, 詹, 陈, 东莞市大气沉降物中微塑料特征:初步研究和初步证据。环境。Sci. 波洛特。第24、24928-24935(2017)号决议。
19. R. 德里斯, 加斯佩里, 罗彻, 萨阿德, 雷诺, 塔辛, 微塑料污染在城市地区:大巴黎的案例研究。环境。化学。12, 592 - 599 (2015)。
20. 长度伍达尔, 格温内特, 帕克, 汤普森, 罗宾逊, 帕特森, 使用法医学方法将环境污染降至最低并识别海洋沉积物中的微纤维。*Mar. Pollut.* 扯淡。95, 40 - 46 (2015)。
21. J. 加斯佩里, 赖特, 德里斯, 科勒德、曼丁、盖鲁阿切、朗罗伊、F. 《空气中的微塑料:我们在吸入它吗? 柯。指点江山。环境。Sci. 健康1, 1 - 5(2018)。
22. 南赵, 于, 何建华, 尹, 王, 典型河谷型城市降水对云下气溶胶粒子的清除作用。*Atmos. 环境*。102, 70 - 78 (2015)。
23. J. 《雪中悬浮粒子》。J. Glaciol. 39, 239 - 244 (1993)。
24. 南使用焦平面阵列(FPA) FTIR显微技术和图像分析的微塑料分析的自动化方法。肛门。方法9, 1499 - 1511(2017)。
25. 南自动化参考数据库设计
基于傅里叶变换红外光谱的微塑料样品分析。
肛门。生物酒精。化学。410, 5131 - 5141 (2018)。
26. R. 大气沉降物中的合成纤维:环境中微塑料的来源? *Mar. Pollut.* 扯淡。104, 290 - 293 (2016)。
27. 米(meter的缩写)) 北太平洋大气矿物粒子的沉积。J. Atmos. 化学。3, 123 - 138 (1985)。
28. G. 答:塞梅尔, 由汽车和卡车交通引起的沥青路面上的颗粒再悬浮。*Atmos. 环境*。7, 291 - 309 (1973)。
29. G. 米兰周末和工作日良好的颗粒物数据的交通排放的作用。*Atmos. 环境*。40, 5998 - 6011 (2006)。
30. K. 俄罗斯远东城市积雪中作为潜在过敏化合物的空气传播生物粒子。《免疫研究》, 2014年第7期(2014年)。
31. 页(page的缩写)M. Outridge, R. W. Macdonald, F. Wang, G. A. Stern, A. P. Dastoor, 《北冰洋表的质量平衡清单》。环境。化学。5, 89 - 111 (2008)。
32. 南埃克哈特, a. 斯托尔, s. 贝尔, n. 斯皮钦格, p. 詹姆斯, c. 福斯特, c. 勇克, t.

瓦格纳，
单位北大西洋涛动控制着向北极的空气污染输送。Atmos. 化学. Phys. 3, 1769 -
1778(2003)。

33. 米 (meter的缩写)) 范德多, p . 克尼珀茨, P. Zschenderlein, R. Giles Harrison, j-b . w . Stut, 《巨型矿物尘埃粒子的神秘长程飘移》。Sci. Adv. 4, eaau2768 (2018)。

34. D.——卢梭、杜泽、艾蒂安、卡姆邦、乔利、费里尔、舍温, 《北极快速变化的空气轨迹的花粉记录》。J. Geophys .Res. Atmos. 109, D06116 (2004)。

35. 南莫甘娜、吉格利奥蒂、埃斯特韦斯-卡尔瓦尔、斯蒂芬斯、维克佐雷克、多伊尔、J. 《北极的微塑料:格陵兰岛东北部亚表层水和鱼类样本的案例研究》。环境。波洛特。242, 1078 - 1086 (2018)。

36. R. 室内和室外环境中包括微塑料在内的纺织纤维的首次概述。环境。波洛特。221, 453 - 458 (2017)。

37. 长度于晏, 薄风波, 南亚星, 丁文伟, 张志中, 大气的清除中国昌吉雪中的颗粒物。Global NEST J. 20, 471 - 476 (2018)。

38. 塑料绳, 塑料-事实2018 (塑料绳, 2018)。

39. J. Bertling, R. Bertling, L. Hamann, Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik . Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lsungssantsetze, Empfehlungen, (Frauenhofer-Institut für Umwelt, - Sicherheits-und Energetechnik UMSICHT, 2018)。

40. K. Enders, R. Lenz, C. A. Stedmon, T. G. Nielsen, marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ 在大西洋的丰度、大小和聚合物组成及其模拟的垂直分布。Mar. Pollut . 扯淡。100, 70 - 81 (2015)。

41. A. I . 卡塔里诺, v . 马克西亚, W. G . 桑德森, R. C . 汤普森, T. B . 亨利, 低水平野生贻贝中微量塑料的含量表明, 与膳食期间通过家庭纤维沉降物接触相比, 人类摄入微量塑料的可能性极小。环境。波洛特。237, 675 - 684 (2018)。

42. J. Pauly, S. J. Stegmeier, H. A. Allaart, R. T. Cheney, P. J. Zhang, A. G. Mayer, R. J. Streck, 人体肺组织中发现的吸入性纤维素和塑料纤维。癌症流行病。生物公园。Prev. 7, 419 - 428 (1998)。

43. J. C. Pimentel, R. Avila, a . g . Louren co, 合成纤维引起的呼吸道疾病: 一种新的职业病。胸部30, 204 - 219 (1975)。

44. Y. Nazarenko, S. Fournier, U. Kurien, R. B. Rangel-Alvarado, O. Nepotchatykh, P. Seers, 页 (page的缩写) 答: Ariya, 雪在汽油动力汽车气体和颗粒排放污染物的命运中的作用。环境。波洛特。223, 665 - 675 (2017)。

45. 米 (meter的缩写)) Haave, C. Lorenz, S. Primpke, G. Gerdts, 沉积物中小微塑料讲述的不同故事——挪威城市受试者中微塑料浓度的首次报告。Mar. Pollut . 扯淡。141, 501 - 513 (2019)。

46. 米 (meter的缩写)) 安德森, 华盛顿特区, 沃尔什, 坡莫诺瓦, 阿诺西姆和曼特尔面对面测试
异质离散: 你在测试什么零假设? Ecol. Monogr. 83, 557 - 574 (2013)。

47. J.-C. Gallet, I. Merkouriadi, G. E. Liston, C. Polashenski, S. Hudson, a . rsel, S. Gerland, 在挪威青年海冰 (N-ICE2015) 考察期间, 斯瓦尔巴德以北极海冰上的春季雪况。J. Geophys .Res. Atmos. 122, 10820 - 10836 (2017)。

48. J.-G. Winther, O. Bruland, K. Sand, S. Gerland, D. Marechal, B. Ivanov, P. Gø owacki, 米 (meter的缩写)) 《斯瓦尔巴特群岛的雪研究——概述》。极地研究22, 125 - 144 (2003)。

49. C. 马蒂, GCOS从瑞士的11个站点收集数据。SLF雪与雪崩研究所。doi:10.16904/15 (2017)。

致谢:我们感谢主要的科学家和工作人员以及

房车极地号游轮 (PS93. 2、PS99. 2、PS107和PS108), 以及直升机机组人员。我们感谢南flgel (GEOMAR); J. Hagemann, M. Huchler, M. Kaess, J. Lemburg, N. Lochthofen, J. 卢德苏韦特、拉普、肖尔兹和斯普克 (AWI); 施内贝利和贾吉 (SLF达沃斯); 和K. Mützel和K. Woher (公民)对雪进行取样。斯瓦尔巴特群岛的雪是由米勒 (RIS编号:10992) 在公民科学项目伊梅尔里收集的。我们感谢m • 埃格和三位匿名审稿人, 他们的评论改进了手稿的早期版本。本出版物是阿尔弗雷德-魏格纳-亥姆霍兹研究所极地和海洋研究所的Eprint ID 49092。资助: 这项工作得到了德国联邦教育和研究部的支持 (BASEMAN项目——确定欧洲水域微塑料分析的基线 and 标准; BMBF • 格兰特03F0734A) 和亥姆霍兹协会的“变化地球系统中的极地和海岸”项目为亥姆霍兹协会资助的FRAM项目 (北极海洋研究前沿) 污染观测站做出贡献。作者贡献: M. B . 和G. G . 设计了这项研究。S. M . 和S. P . 分析了雪样本。S. P . 和M. B. T . 提供了数字。通用汽车公司和通用汽车公司进行了统计测试。M. B. T . , J. T . , M. B . 取样。M. B . 在所有合著者的参与下撰写了手稿。利益冲突: 作者声明没有利益冲突。数据和材料的可用性: 评估论文结论所需的所有数据都在论文和/或补充材料中。所有数据都通过https://doi.org/10.1594/泛大陆号另外存储在泛大陆号仓库中。所有的样本、分析、出版物和数据所有权都不受取样雪的各个国家的法律约束或任何种类的限制。

2019年2月22日提交
2019年7月3日接受
发表于2019年8月14日10.1126/sciadv. aax1157

引用: m . 博格曼, S. Mützel, S. Primpke, M. B. Tekman, J. Trachsel, G. Gerdts, White and妙? 从阿尔卑斯山到北极的雪地上, 微塑料随处可见。Sci. Adv. 5, eaax1157 (2019)。

白而精彩？从阿尔卑斯山到北极的雪地上，微塑料随处可见

梅勒妮·博格曼、索菲娅·穆策尔、塞巴斯蒂安·普里普克、米娜·泰克曼、于尔格·特拉舍尔和贡纳尔·格尔德茨

Sci Adv 5 (8), eaax1157.

DOI:

10.1126/sciadv.aax1157

文章工具<http://advances.sciencemag.org/content/5/8/eaax1157>

supplementary <http://advances.sciencemag.org/content/Suppl/2019/08/12/5.8.eaax1157.DC1>
材料

引用

这篇文章引用了45篇文章，其中6篇你可以免费访问
<http://advances.sciencemag.org/content/5/8/eaax1157#BIBL>

PERMISSIONS<http://www.sciencemag.org/help/reprints-and-permissions>

本文的使用受服务条款的约束

《科学进展》(ISSN 2375-2548)由美国科学促进会出版，地址:DC华盛顿西北纽约大街1200号，邮编:20005。标题《科学进展》是美国汽车协会的注册商标。

版权所有2019作者，保留部分权利；独家授权美国科学促进会。对美国政府原始工程没有权利。根据知识共享属性非商业许可4.0分发。