

# 珠穆朗玛峰东绒布冰川新降雪中有机氯农药

王峰<sup>①</sup> 朱彤<sup>①\*</sup> 徐柏青<sup>②</sup> 康世昌<sup>②</sup>

(<sup>①</sup> 北京大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100871; <sup>②</sup> 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085)

**摘要** 报道了 2005 年 4 月 28 日珠穆朗玛峰地区东绒布冰川四个海拔高度(6500, 6300, 6100 和 5900 m, a.s.l.)新降雪样品中有机氯农药(Organochlorine pesticides, OCPs)的浓度. 这是目前海拔最高的 OCPs 观测数据报道, 为研究高海拔地区对 OCPs 的冷凝效应提供了重要数据. 样品中检出了 Hexachlorobenzene(HCB), *p,p'*-DDT 和 *p,p'*-DDD, 浓度范围分别为 44~72, 401~1560, 20~80 pg/L. *o,p'*-DDT 浓度在检出限水平, 其他目标物质浓度均低于检出限. 反向轨迹分析表明携带这些物质的气团来源于印度北部, 样品中检出的 DDTs 很有可能来源于该地区的新源排放. 浓度与海拔高度的相关性研究表明, *p,p'*-DDT 和 *p,p'*-DDD 浓度与海拔高度呈正相关, 而 HCB 浓度与海拔高度无相关性, 体现了目标物质本身物化性质、研究区域高海拔与低温环境、以及源区与采样区域的相对位置对 OCPs 浓度与海拔高度相关性的影响.

**关键词** 珠穆朗玛峰 有机氯农药 降雪 大气传输

持久性有机污染物(Persistent Organic Pollutants)的物化性质(稳定性, 半挥发性)决定了其能够迁移到远离排放源的区域. 根据 POPs 全球长距离传输(LRT)模式及理论研究<sup>[1]</sup>, 低纬度至高纬度的温度变化梯度使 POPs 倾向富集于低温的两极地区<sup>[2,3]</sup>. 而高海拔区存在着区域尺度的温度变化梯度, 亦可能是 POPs 重要的富集区域<sup>[4]</sup>. 海拔高度变化对 POPs 浓度的影响是研究高海拔区对 POPs“冷凝效应”的重要证据之一. POPs 源区与采样区域的相对位置是影响浓度随海拔梯度变化的重要因素<sup>[5]</sup>.

降雪能较高效率地将大气颗粒相与气相中的 POPs 冲刷至地表<sup>[6]</sup>, 可有效反映区域环境污染程度, 是理想的研究目标介质. 目前关于降雪中 POPs 的研究采样地点海拔均低于 4500 m, 未见有更高海拔降雪中 POPs 研究的报道.

青藏高原平均海拔超过 4000 m, 面积  $2.5 \times 10^6$  km<sup>2</sup>,

是全球最高最大的高原; 4500 m 以上年均气温低于 0 °C<sup>[7]</sup>; 位于亚欧大陆中部, 周边地区工农业生产活动频繁, 存在着强的 POPs 排放源<sup>[8]</sup>. 青藏高原季风特征明显, 并且受西风带影响, 使其很可能成为周边区域 POPs 的低温“储存库”. 目前关于青藏高原 POPs 的研究报道已初步证明青藏高原可富集周边环境中的 OCPs<sup>[8,9]</sup>. 研究青藏高原在 POPs 全球输送中的作用需要更多数据支持.

东绒布冰川南部濒临印度次大陆, 受亚洲季风影响, 可反映来自南部的污染信息. 印度为发展中农业大国, 历史上曾使用大量农药, 且目前可能仍存在已禁用农药的使用<sup>[10]</sup>. 本研究的样品来源于 2005 年 4 月底珠穆朗玛峰地区(以下简称珠峰)东绒布冰川的一次新降雪, 本文报道了迄今为止海拔最高的新降雪中 OCPs 的测量浓度, 讨论了测得 OCPs 的可能来源以及源区与沉降区域的相对位置等因素对浓度与海

拔高度相关性的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 样品采集

2005年4月28日珠峰北坡东绒布冰川(86°57'E, 28°01'N, 如图1所示)发生一次降雪。于降雪当天和第二天自高海拔至低海拔(A: 6500 m, B: 6300 m, C: 6100 m, D: 5900 m)采集四个样品。A和B样品均为降雪当天取自冰川表层, 而C和D样品则于第二天采集于冰川向低海拔延伸的冰塔林中。4个样品采集时间相差不超过24 h。样品取自2 cm厚的新降雪表层, 用丙酮和正己烷润洗过的不锈钢铲收集, 盛于500 mL密封玻璃瓶中(玻璃瓶在500℃下灼烧5 h以上, 瓶塞内侧为特富龙材质)。

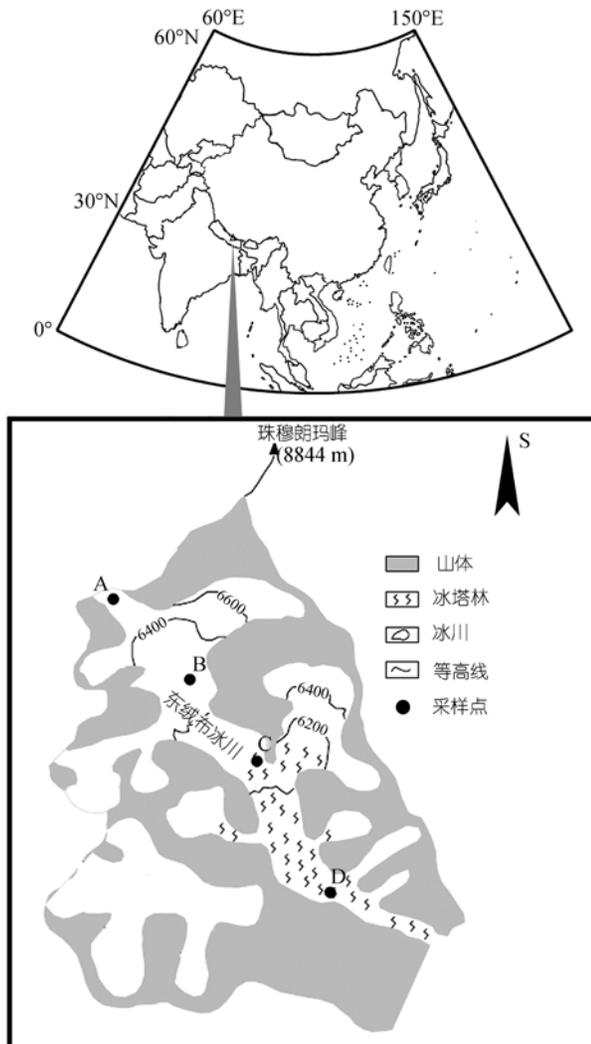


图1 珠峰地区东绒布冰川采样地点示意图

样品采集后在4℃以下低温环境中储存, 直至萃取分析。

### 1.2 试剂与标准物质

甲醇(HPLC Grade, J&K Chemical LTD, USA)用于标准溶液的配制。

OCPs混合标样(10 ng/μL, Dr. Ehrenstofer, Germany), 含α-HCH, β-HCH, γ-HCH, HCB, Heptachlor, Heptachlor-epoxide, α-endosulfan, β-endosulfan, Aldrin, Endrin, Dieldrin, *o,p'*-DDT, *p,p'*-DDT, *o,p'*-DDD, *p,p'*-DDD, *o,p'*-DDE, *p,p'*-DDE。

OCPs单标: *cis*-Chlordane, *trans*-Chlordane, α-HCH-D6, *p,p'*-DDE-D8(Dr. Ehrenstofer, 10 mg)。

### 1.3 样品萃取及分析

本研究样品前处理方式采用顶空固相微萃取(HS-SPME)。根据我们的实验结果, 对于水样中的OCPs, 顶空固相微萃取比直接浸入固相微萃取有更高的萃取效率, 可得到更低的方法定量限(Method Quantification Limitation, MQL, 定义为十倍于噪音的响应值, 见表1)。且该方法所需样品量少, 与固相萃取(SPE), 液液萃取(LLE)等方法相比, 可大大降低艰苦环境中操作的繁琐程度。

在积雪融化及样品储存过程中, 颗粒态和溶解态的OCPs在两相间已进行重新分配, 最终结果并不能反映原始的状态<sup>[4]</sup>, 因此本工作未对颗粒态和溶解态的OCPs分别进行讨论, 样品不经过滤直接进行萃取。

固相微萃取加热搅拌装置、操作手柄及萃取头均购自Supelco(USA)。萃取涂层材质为65 μm Polydimethyl-Siloxane/Divinylbenzene(PDMS-DVB)。顶空固相微萃取操作条件: 样品体积35 mL, 顶空与样品体积之比1:7, 萃取温度90℃, 搅拌速度900 rpm, 萃取时间60 min。每个样品平行分析三次。萃取完毕, 直接进样至色谱分析, 进样口热解析时间4 min。

分离分析仪器为气相色谱-离子阱质谱联用仪(Trace GC/PolarisQ, Finnigan)。色谱柱为DB5-MS(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm, J&W)。载气为高纯氦气(≥99.999%)。色谱条件为: 载气流速1 mL/min, 进样口温度250℃, 不分流进样4 min。色谱柱升温程序为: 初始温度90℃, 保持2 min, 然后以25℃/min升至225℃, 再以0.2℃/min升至227℃, 再以25℃/min升

表 1 珠峰东绒布冰川雪样中 OCPs 浓度及方法定量限(单位: pg/L)<sup>a)</sup>

化合物	A(6500 m)	B(6300 m)	C(6100 m)	D(5900 m)	MLQ			
HCB	65	72	44	60	40			
<i>p,p'</i> -DDT	1560	1410	401	470	80			
<i>p,p'</i> -DDD	80	51	20	21	20			
DDD/DDT	0.051	0.036	0.045	0.044	—			
N.D. Comp.	HCHs	<i>p,p'</i> -DDE	<i>o,p'</i> -DDT	<i>o,p'</i> -DDD	<i>o,p'</i> -DDE	Endosulfans	Chlordanes	Heptachlor
MLQ	100~200	80	40	20	30	500	50	100

a) N.D. Comp.: 低于检出限的化合物; MLQ: 方法定量限

至 260°C, 保持 5 min. 质谱条件为, 离子源温度: 250°C, 传输线温度: 280°C, 电离方式: EI, 电子能量: 70 eV, 扫描方式: MSMS, 离子阱中缓冲气流速: 3 mL/min.

#### 1.4 质量控制与保证

采样过程中伴随采样空白(MilliQ 水), 验证样品采集、运输及储存过程是否存在污染; 分析空白(MilliQ 水)用于检验萃取过程及仪器分析过程中是否会引入污染. 空白分析均未检出目标物质, 表明操作过程未受污染. 用浓度为 1 ng/L 的标准溶液检验整个分析过程中仪器响应的偏差程度, 结果显示偏差范围均保持在 20%左右. 进样口 *p, p'*-DDT 的分解率控制在 10%以内.

萃取过程中添加同位素标记的  $\alpha$ -HCH-D6 和 *p,p'*-DDE-D8(1 ng/L)作为内标物质, 以校准操作过程中的偶然误差及多次萃取后萃取头效率下降引入的误差, 使分析结果重现性保持在 10%左右. 需要特别指出的是, 在实验过程中发现 *p,p'*-DDE-D8 会引入 *p, p'*-DDE 干扰(本文未对 *p,p'*-DDE 进行讨论), 而  $\alpha$ -HCH-D6 不会引入  $\alpha$ -HCH 干扰.

## 2 结果与讨论

### 2.1 新降雪中 OCPs 的浓度

本研究的目标物质主要包括:  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -HCH; *o,p'*-DDT, -DDD, -DDE; *p,p'*-DDT, -DDD, -DDE; HCB;  $\alpha$ -,  $\beta$ -endosulfan; *cis*-, *trans*-Chlordane; Heptachlor, Heptachlor-epoxide. 在四个样品中, 检出了 HCB(44~72 pg/L), *p,p'*-DDT(401~1560 pg/L), *p,p'*-DDD(20~80 pg/L), *o,p'*-DDT 浓度在检出限范围. 其他目标物质浓度均低于检出限. 表 1 中列出了不同海拔高度检出物质的浓度, 及 HS-SPME-GC-MSMS 分析各种目标物质的方法定量限.

本研究观测到的 HCB 浓度略高于文献报道的欧

洲的一些高海拔区积雪中的含量(Colle Del Lys, Jori, Gossenkolle, Staroiesnianske, Redo, 2000~4250 m a.s.l., 2.6~37 pg/L)<sup>[12~14]</sup>. 而本次观测的  $\Sigma$  DDTs 则要远远高于上述区域积雪中的浓度(1.6~330 pg/L)<sup>[12~14]</sup>. 采样位置和时间不同, 则必然受到不同排放源的影响, 这可能是造成上述差异的主要原因. 另外, 不同的采样和萃取方法也会产生一定的影响<sup>[13]</sup>.

为阐明降雪前一段时间当地气团可能的来源途径, 利用美国 NOAA 气象资料(<ftp://www.arl.noaa.gov/pub/archives/fnl>), 通过 HYSPLIT4<sup>[15]</sup> 反向轨迹模式计算到达东绒布冰川的气团运动轨迹. 计算起始点位于距 A 点 500 和 3500 m 的上空, 分别代表边界层与自由大气气团的运移轨迹, 由降雪当天反向演算 120 h. 计算结果(图 2)表明, 在降雪前 5 天(120 h)时间内, 输送至采样区域 500 m 高度的气团起源自印度北部, 经尼泊尔到达珠峰地区, 而输送至采样区域 3500 m 高度的气团起源自阿富汗, 经巴基斯坦、印度北部、尼泊尔到达珠峰地区.

印度历史上曾大量使用 DDT, 使用总量仅次于美国<sup>[16]</sup>. 尽管印度从 1989 年开始禁止 DDT 的农业使用而仅限于卫生防疫领域, 但仍然有部分农民倾向于其价廉高效而用于农业生产, 目前印度的 DDT 年使用量仍然达 7500~10000 t 左右<sup>[10,17]</sup>. 在印度北部的 Ganges River 流域<sup>[18]</sup>, Yamuna River 流域<sup>[10]</sup> 等区域均发现了高浓度的 DDTs 残留. 我们在 2002 年 6 月珠峰地区大气观测中亦发现了比较高的 DDTs 浓度, 反向轨迹的推算结果表明其很有可能来自于印度<sup>[8]</sup>. 本研究在珠峰东绒布冰川新降雪中观测到较高的 *p,p'*-DDT 浓度, 也很可能是来源于印度北部地区. 极低的 DDD/DDT 比值(0.05 左右), 说明 DDT 进入环境的时间很短, 也证明了新源排放的贡献. 另外, 比较接近的 DDD/DDT 比值亦可说明四个采样点的降雪均来自同一气团.

目前尚无印度大气中 HCB 浓度的直接观测数据

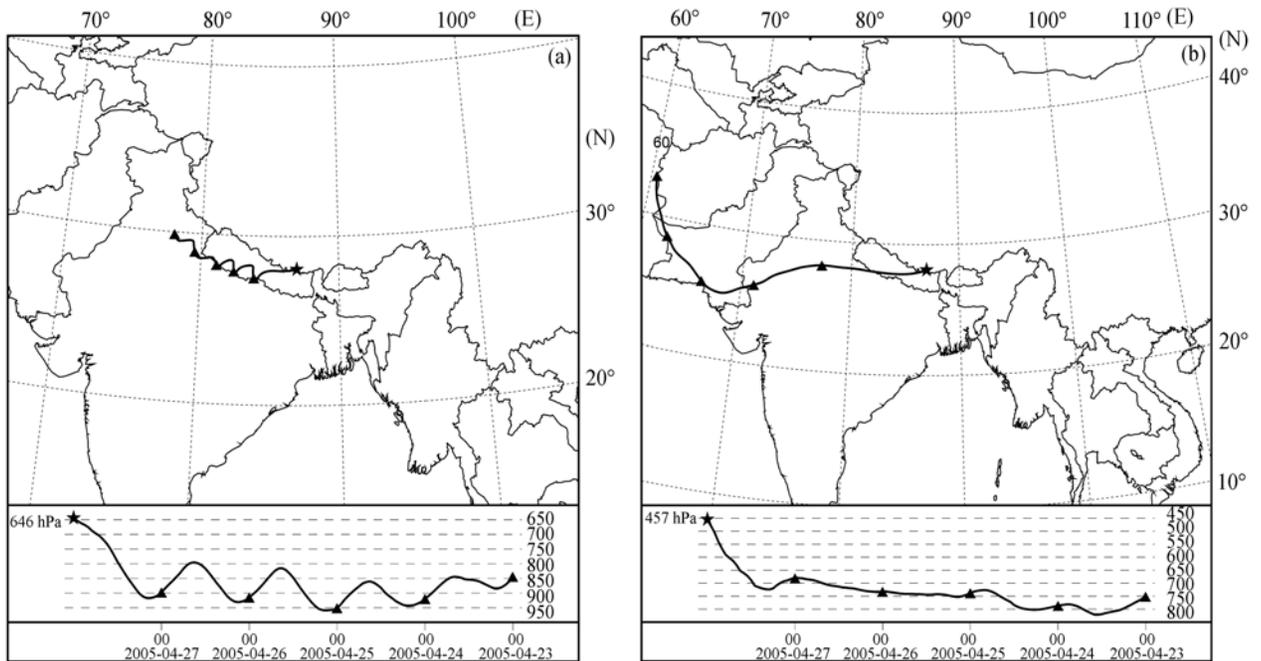


图2 采样时间东绒布冰川的气团反向轨迹示意图  
轨迹计算起始点距A点分别为500 m(a)和3500 m(b)的上空

报道. 根据EMEP<sup>[19]</sup>的模型推算结果, 2003年印度大气中HCB浓度大于 $80 \text{ pg/m}^3$ , 高于东欧地区( $40\sim 80 \text{ pg/m}^3$ )和欧洲南部及北部( $10\sim 30 \text{ pg/m}^3$ ). 这与珠峰东绒布冰川降雪中HCB浓度高于欧洲高海拔区的观测结果是一致的.

以上分析说明高海拔区的“冷凝效应”可富集周边源区POPs, 间接反映源区的信息. 携带源区POPs信息的积雪日积月累形成冰川, 通过钻取冰芯分析其中POPs浓度的时间序列, 不仅可以恢复这些信息, 而且可以探讨源区POPs的使用程度及环境残留的历史变化趋势. 借助于类似的分析方法, 我们已分析了青藏高原慕士塔格冰芯<sup>[20]</sup>、珠峰东绒布冰芯和唐古拉山中部冰芯中OCPs的浓度时间序列. 显然, 将同一区域新降雪与冰芯中POPs浓度进行比较, 会更有助于信息的提取和分析.

## 2.2 OCPs浓度与海拔高度的相关

POPs浓度与海拔高度的相关性是研究高海拔区对POPs“冷凝效应”的关键问题之一. 北美高山区不同海拔高度的大气<sup>[21,22]</sup>和降雪<sup>[4]</sup>中POPs的研究结果表明, 分子量较小, 挥发性较强的POPs(如HCB,

HCHs, 分子量较小的PCBs, PAHs等)容易传输至更高海拔, 使浓度与海拔高度呈正相关; 而对于挥发性较弱的物质(如DDTs, 分子量较大的PCBs, PAHs等)则没有明显的相关性.

由表1可以看出, 本研究中HCB浓度受海拔高度变化影响不大, 而 $p,p'$ -DDT和 $p,p'$ -DDD的浓度则与海拔高度呈正相关. 这与上述观测结果相反. 可能是三个主要因素的综合作用导致了这种与北美研究结果<sup>[4]</sup>相反的现象:

(1) 目标物质本身的物化性质: HCB饱和蒸汽压( $25^\circ\text{C}$ ,  $10^{-0.78} \text{ Pa}$ )远高于 $p,p'$ -DDT/DDD( $25^\circ\text{C}$ ,  $10^{-3.17}/10^{-3.01} \text{ Pa}$ )<sup>[23]</sup>, 分别是OCPs迁移性较强和较弱的代表性物质. 根据模式计算<sup>[24]</sup>, HCB的理论长距离传输势远( $1.1\times 10^5 \text{ km}$ ), 而 $p,p'$ -DDT的理论传输距离则要短许多(800 km). 沉降速率是影响POPs物质传输潜能的重要因素, 被定义为 $K_{\text{OA}}$ 和 $K_{\text{AW}}$ 的函数, 而后两者又是温度的函数, DDTs的沉降速率要高于HCB<sup>[25]</sup>.

(2) 研究区域的高海拔及低温环境: 采样前后一段时间内, 东绒布冰川A点(6500 m)5月份平均气温为 $-11.2^\circ\text{C}$ <sup>[1]</sup>. 青藏高原7000 m海拔以下, 四、五月份平均温度梯度为 $0.7\sim 0.8^\circ\text{C}/(100 \text{ m})$ 左右<sup>[26,27]</sup>. 由于东

1) 谢爱红, 秦大河, 任贾文, 等. 2005年5—7月珠穆朗玛峰北坡6523米气象要素变化特征. 冰芯与寒区环境联合重点实验室年报, 2005, 11: 225—231

绒布冰川(6300~6600 m)为冰雪表面,而冰塔林周边(5800~6200 m)为基岩下垫面,两者温度递减速率必然要大于上述平均值,即高海拔的 A 和 B 采样点日平均温度要低于 C 和 D 采样点 5℃左右. 极低的环境温度及较大的温度梯度,是导致目标物质环境行为差异的可能因素之一.

(3) 源区与采样区域的相对位置(即 POPs 的大气输送沉降过程): 根据降雪前一段时间的大气反向轨迹推算,携带 OCPs 的高空气团自南向北传输至东绒布冰川垭口后,继续向北部低海拔区域运移时发生沉降. 若简化该过程,相当于源区位于高海拔,目标物质由高海拔向低海拔输送. 沉降速率高的 DDTs 更容易在环境温度极低的东绒布冰川范围内发生沉降,仅有少量可以沉降到低海拔的冰塔林中,因而高海拔 DDT 浓度要高于低海拔. HCB 迁移性相对较强而降降量较小,可继续向下传输至低海拔区,因而高海拔与低海拔浓度相差不大. 根据 Alpine Glacier 不同海拔的大气 OCP 观测结果<sup>[4]</sup>,高海拔(4300 m)HCHs 和 DDTs 浓度要高于低海拔(3200 和 1600 m). 其采样期间反向轨迹分析结果表明,该污染物主要为来自法国的气团向南输送至 Alpine Glacier 所致. 本文认为,该观测结果从一定程度上也反映了源区与采样区域的相对位置对海拔高度与目标物质浓度相关性的影响.

另外,根据 Herbert 等<sup>[28]</sup>在 Troms(Norway Arctic) 现场观测的新降雪 OCPs 浓度随时间的变化, HCB, DDTs 的挥发半衰期均大于 24 h, 而本研究中 A, B 样品与 C, D 样品采样时间相差不到 24 h, 应该不是导致浓度差异的主要因素.

综上所述,可以认为目标物质本身的物化性质、极低的环境温度及源区与采样区域的相对位置(即 POPs 的大气输送沉降过程)是导致此次珠峰观测结果与北美研究结果<sup>[4]</sup>相反的主要因素. 本次研究结果亦印证了迁移性强的 HCB 等物质能通过全球尺度的输送在两极地区富集,而 DDTs 等迁移性较弱的物质则往往更倾向沉降于离源区较近的中低纬高海拔山区.

### 3 结论

本文报道了在珠峰地区东绒布冰川的新降雪样品中,检测到 HCB, *p,p'*-DDT 和 *p,p'*-DDD, 这是迄今为止海拔最高的 OCPs 观测数据报道. 反向轨迹分析表明污染物来源于印度北部,说明中低纬度高海

拔区对周边地区 POPs 的冷富集作用. 目标物质浓度与海拔高度的相关性与此前诸多研究结果相反,体现了源区与采样区域的相对位置对 OCPs 浓度与海拔高度相关性影响的重要性.

尽管印度历史上及目前存在着很大的 HCHs 使用量<sup>[29]</sup>, 本研究中未检出 HCHs 及其他有机氯农药. 这很有可能是单次降雪的偶然性造成的. 因此要反映源区整体的污染状况,需要做长期连续的观测. 由于高海拔区域环境恶劣,难以实现连续现场采样. 我们于 2005 年 5 月在珠峰地区不同的海拔高度(6500, 6300, 5800, 5000 和 4200 m, a.s.l.)放置五套大气被动采样器,一年后顺利回收. 目前亦已获得珠峰东绒布冰川中 OCPs 浓度的时间序列,将会有更全面的数据反映印度 OCPs 源区对珠峰地区环境的影响.

**致谢** 感谢 2005 年中国科学院珠峰科学考察队全体队员的热心帮助,特此致谢.

### 参 考 文 献

- 1 Wania F, Mackay D. Tracking the distribution of persistent organic pollutant. *Environ Sci Technol*, 1996, 30: 390A—396A
- 2 Macdonald R W, Barrie L A, Bidleman T F, et al. Contaminants in the Canadian Arctic: 5 years of progress in understanding sources, occurrence, and pathways. *Sci Total Environ*, 2000, 254: 93—234
- 3 Dickhut R M, Cincinelli A, Cochran M, et al. Atmospheric concentrations and air-water flux of organochlorine pesticides along the Western Antarctic Peninsula. *Environ Sci Technol*, 2005, 39: 465—470[DOI]
- 4 Blais J M, Schindler D W, Muir D C G, et al. Accumulation of persistent organochlorine compounds in mountains of western Canada. *Nature*, 1998, 395: 585—588[DOI]
- 5 Daly G L, Wania F. Organic contaminants in mountains. *Environ Sci Technol*, 2005, 39: 385—398[DOI]
- 6 Franz T P, Eisenreich S. Snow scavenging of polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in Minnesota. *Environ Sci Technol*. 1998, 32: 1771—1778[DOI]
- 7 施雅风, 主编. 中国冰川与环境——现在, 过去和未来. 北京: 科学出版社, 2000
- 8 Li J, Zhu T, Wang F, et al. Observation of organochlorine pesticides in the air of the Mt. Everest region. *Ecotox Environ Saf*, 2006, 63: 33—41[DOI]
- 9 Malanichev A, Shatalov V, Vulykh N, et al. Modeling of POP hemispheric Transport. EMAP MSC-E/CCC Technical Report 8/2002, Moscow. 2002
- 10 Singh R P. Comparison of organochlorine pesticide level in soil and groundwater of Agra, India. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2001, 67: 126—132[DOI]
- 11 Wania F, Mackay D, Hoff J T. The importance of snow scavenging of polychlorinated biphenyl and polycyclic aromatic hydrocarbon

- vapors. *Environ Sci Technol*, 1999, 33: 195—197[DOI]
- 12 Carrera G, Fernandez P, Vilanova R M, et al. Persistent organic pollutants in snow from European high mountain areas. *Atmos Environ*, 2001, 35: 245—254[DOI]
- 13 Herbert B M J, Halsall C J, Fitzpatrick L, et al. Use and validation of novel snow samplers for hydrophobic, semi-volatile organic compounds. *Chemosphere*, 2004, 56: 227—235[DOI]
- 14 Finizio A, Villa S, Raffaele F, et al. Variation of POP concentrations in fresh-fallen snow and air on an Alpine glacier (Monte Rosa). *Ecotox Environ Saf*, 2006, 63: 25—32[DOI]
- 15 Draxler R R, Hess G D. An overview of the Hysplit\_4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition. *Aust Meteorol Mag*, 1998, 47: 295—308
- 16 Li Y F, Macdonald R W. Sources and pathways of selected organochlorine pesticides to the Arctic and the effect of pathway divergence on HCH trends in biota: a review. *Sci Total Environ*, 2005, 342: 87—106[DOI]
- 17 Pandit G G, Rao A M, Jha S K, et al. Monitoring of organochlorine pesticide residues in the Indian marine environment. *Chemosphere*, 2001, 44: 301—305[DOI]
- 18 Kumari A, Sinha R K, Gopal K. Concentration of Organochlorine Pesticide Residues in Ganga Water in Bihar, India. *Environ Ecol*, 2001, 19: 351—356
- 19 EMEP. Persistent organic pollutant in the Environment. Status Report, 2005/03
- 20 李靖. 珠峰地区大气和慕士塔格冰芯中有机氯农药观测研究. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2005
- 21 Shen L, Wania F, Lei Y D, et al. Hexachlorocyclo-hexanes in the North American Atmosphere. *Environ Sci Technol*, 2004, 38: 965—975[DOI]
- 22 Shen L, Wania F, Lei Y D, et al. Atmospheric distribution and long-range transport behavior of organochlorine pesticides in North America. *Environ Sci Technol*, 2005, 39: 409—420[DOI]
- 23 Shen L, Wania F. Compilation, evaluation and selection of physical-chemical property data for organochlorine pesticides. *J Chem Eng Data*, 2005, 50: 742—768[DOI]
- 24 Beyer A, Mackay D, Matthies M, et al. Assessing long-range transport potential of persistent organic pollutants. *Environ Sci Technol*, 2000, 34: 699—703[DOI]
- 25 Beyer A, Wania F, Gouin T, et al. Temperature dependence of the characteristic travel distance. *Environ Sci Technol*, 2003, 37: 766—771[DOI]
- 26 中科院青藏高原综合科学考察队. 珠穆朗玛峰科学考察报告 1975 气象与环境. 北京: 科学出版社, 1980
- 27 中科院青藏高原综合科学考察队. 珠穆朗玛峰科学考察报告 1966—1968 气象与太阳辐射. 北京: 科学出版社, 1975
- 28 Herbert B M J, Halsall C J, Villa S, et al. Rapid changes in PCB and OC pesticide concentrations in Arctic snow. *Environ Sci Technol*, 2005, 39: 2998—3005[DOI]
- 29 Li Y F. Global technical hexachlorocyclohexane usage and its contamination consequences in the environment: from 1948 to 1997. *Sci Total Environ*, 1999, 232: 121—158[DOI]