

---

# 丛书序一

---

青藏高原是地球上最年轻、海拔最高、面积最大的高原，西起帕米尔高原和兴都库什、东到横断山脉，北起昆仑山和祁连山、南至喜马拉雅山区，高原面海拔 4500 米上下，是地球上最独特的地质—地理单元，是开展地球演化、圈层相互作用及人地关系研究的天然实验室。

鉴于青藏高原区位的特殊性和重要性，新中国成立以来，在我国重大科技规划中，青藏高原持续被列为重点关注区域。《1956—1967 年科学技术发展远景规划》《1963—1972 年科学技术发展规划》《1978—1985 年全国科学技术发展规划纲要》等规划中都列入针对青藏高原的相关任务。1971 年，周恩来总理主持召开全国科学技术工作会议，制订了基础研究八年科技发展规划（1972—1980 年），青藏高原科学考察是五个核心内容之一，从而拉开了第一次大规模青藏高原综合科学考察研究的序幕。经过近 20 年的不懈努力，第一次青藏综合科考全面完成了 250 多万平方千米的考察，产出了近 100 部专著和论文集，成果荣获了 1987 年国家自然科学奖一等奖，在推动区域经济建设和社会发展、巩固国防边防和国家西部大开发战略的实施中发挥了不可替代的作用。

自第一次青藏综合科考开展以来的近 50 年，青藏高原自然与社会环境发生了重大变化，气候变暖幅度是同期全球平均值的两倍，青藏高原生态环境和水循环格局发生了显著变化，如冰川退缩、冻土退化、冰湖溃决、冰崩、草地退化、泥石流频发，严重影响了人类生存环境和经济社会的发展。青藏高原还是“一带一路”环境变化的核心驱动区，将对“一带一路”20 多个共建国家和 30 多亿人口的生存与发展带来影响。

2017 年 8 月 19 日，第二次青藏高原综合科学考察研究启动，习近平总书记发来贺信，指出“青藏高原是世界屋脊、亚洲水塔，是地球第三极，是我国重要的生态安全屏障、战略资源储备基地，



是中华民族特色文化的重要保护地”，要求第二次青藏高原综合科学考察研究要“聚焦水、生态、人类活动，着力解决青藏高原资源环境承载力、灾害风险、绿色发展途径等方面的问题，为守护好世界上最后一方净土、建设美丽的青藏高原作出新贡献，让青藏高原各族群众生活更加幸福安康”。习近平总书记的贺信传达了党中央对青藏高原可持续发展和建设国家生态保护屏障的战略方针。

第二次青藏综合科考将围绕青藏高原地球系统变化及其影响这一关键科学问题，开展西风—季风协同作用及其影响、亚洲水塔动态变化与影响、生态系统与生态安全、生态安全屏障功能与优化体系、生物多样性保护与可持续利用、人类活动与生存环境安全、高原生长与演化、资源能源现状与远景评估、地质环境与灾害、区域绿色发展途径等 10 大科学问题的研究，以服务国家战略需求和区域可持续发展。

“第二次青藏高原综合科学考察研究丛书”将系统展示科考成果，从多角度综合反映过去 50 年来青藏高原环境变化的过程、机制及其对人类社会的影响。相信第二次青藏综合科考将继续发扬老一辈科学家艰苦奋斗、团结奋进、勇攀高峰的精神，不忘初心，砥砺前行，为守护好世界上最后一方净土、建设美丽的青藏高原作出新的更大贡献！

孙鸿烈

第一次青藏科考队队长

## 丛书序二

青藏高原及其周边山地作为地球第三极矗立在北半球，同南极和北极一样既是全球变化的发动机，又是全球变化的放大器。2000年前人们就认识到青藏高原北缘昆仑山的重要性，公元18世纪人们就发现珠穆朗玛峰的存在，19世纪以来，人们对青藏高原的科考水平不断从一个高度推向另一个高度。随着人类远足能力的不断加强，逐梦三极的科考日益频繁。虽然青藏高原科考长期以来一直在通过不同的方式在不同的地区进行着，但对于整个青藏高原的综合科考迄今只有两次。第一次是20世纪70年代开始的第一次青藏科考。这次科考在地学与生物学等科学领域取得了一系列重大成果，奠定了青藏高原科学研究的基础，为推动社会发展、国防安全和西部大开发提供了重要科学依据。第二次是刚刚开始的第二次青藏科考。第二次青藏科考最初是从区域发展和国家需求层面提出来的，后来成为科学家的共同行动。中国科学院的A类先导专项率先支持启动了第二次青藏科考。刚刚启动的国家专项支持，使得第二次青藏科考有了广度和深度的提升。

习近平总书记高度关怀第二次青藏科考，在2017年8月19日第二次青藏科考启动之际，专门给科考队发来贺信，作出重要指示，以高屋建瓴的战略胸怀和俯瞰全球的国际视野，深刻阐述了青藏高原环境变化研究的重要性，希望第二次青藏科考队聚焦水、生态、人类活动，揭示青藏高原环境变化机理，为生态屏障优化和亚洲水塔安全、美丽青藏高原建设作出贡献。殷切期望广大科考人员发扬老一辈科学家艰苦奋斗、团结奋进、勇攀高峰的精神，为守护好世界上最后一方净土顽强拼搏。这充分体现了习近平生态文明思想和绿色发展理念，是第二次青藏科考的基本遵循。

第二次青藏科考的目标是阐明过去环境变化规律，预估未来变化与影响，服务区域经济社会高质量发展，引领国际青藏高原研究，促进全球生态环境保护。为此，第二次青藏科考组织了10大任务



和 60 多个专题，在亚洲水塔区、喜马拉雅区、横断山高山峡谷区、祁连山—阿尔金区、天山—帕米尔区等 5 大综合考察研究区的 19 个关键区，开展综合科学考察研究，强化野外观测研究体系布局、科考数据集成、新技术融合和灾害预警体系建设，产出科学考察研究报告、国际科学前沿文章、服务国家需求评估和咨询报告、科学传播产品四大体系的科考成果。

两次青藏综合科考有其相同的地方。表现在两次科考都具有学科齐全的特点，两次科考都有全国不同部门科学家广泛参与，两次科考都是国家专项支持。两次青藏综合科考也有其不同的地方。第一，两次科考的目标不一样：第一次科考是以科学发现为目标；第二次科考是以摸清变化和影响为目标。第二，两次科考的基础不一样：第一次青藏科考时青藏高原交通整体落后、技术手段普遍缺乏；第二次青藏科考时青藏高原交通四通八达，新技术、新手段、新方法日新月异。第三，两次科考的理念不一样：第一次科考的理念是不同学科考察研究的平行推进；第二次科考的理念是实现多学科交叉与融合和地球系统多圈层作用考察研究新突破。

“第二次青藏高原综合科学考察研究丛书”是第二次青藏科考成果四大产出体系的重要组成部分，是系统阐述青藏高原环境变化过程与机理、评估环境变化影响、提出科学应对方案的综合文库。希望丛书的出版能全方位展示青藏高原科学考察研究的新成果和地球系统科学研究的新进展，能为推动青藏高原环境保护和可持续发展、推进国家生态文明建设、促进全球生态环境保护做出应有的贡献。

姚檀栋

第二次青藏科考队队长

# 前言

青藏高原被誉为“世界屋脊”“第三极”和“亚洲水塔”，是我国乃至亚洲重要的生态安全屏障。青藏高原的人为活动强度较低，各类污染物的排放有限。但近几十年来，青藏高原及周边区域的人口快速增加，经济社会快速发展，人为排放的污染物也相应增加。毗邻地区（尤其是南亚）排放的大气污染物可通过大气环流传输并沉降至地表生态系统，从而导致青藏高原环境中各类污染物的本底浓度升高；青藏高原自身的人为活动对局地的大气、水体和土壤等环境质量也会产生一定的影响；气候变暖可能导致污染物迁移转化过程的改变，污染物的环境行为更为活跃，对生态系统和人体健康带来的风险可能会增大。因此，青藏高原的生态环境面临着人类活动和气候变化等多重压力。对青藏高原各类环境中的污染物开展全面的调查，厘清外源和内源的贡献，揭示典型污染物的迁移转化过程，评估其对生态环境和人体健康的风险，是研判青藏高原污染物现状和未来变化态势的基础，也可以支撑青藏高原生态文明建设和《中华人民共和国青藏高原生态保护法》的有效实施。

自第二次青藏高原综合科学考察研究项目启动以来，“跨境污染物调查与环境安全”专题在前期研究的基础上，对青藏高原的大气、土壤、水体、冰冻圈等环境中的污染物开展了调查，并结合前期的工作和第一手的调查资料，评估青藏高原污染物对生态环境和人体健康的风险。

本书共8章，第1章主要从国家生态环境保护和地球科学的前沿问题上，概述青藏高原污染物及其影响的考察研究意义。第2章论述跨境大气污染物（气溶胶、 $O_3$ 和有机污染物等）对青藏高原本底大气的贡献以及对生态环境的影响。第3章重点介绍城镇大气污染物和居民室内污染物现状，评估其对人体健康的影响。第4章论述土壤中典型污染物的时空分布和来源，评估其对生态环境



和人体健康的风险。第5章总结水体中典型污染物的浓度水平、时空分布和来源，评估其对生态环境和人体健康的风险。第6章讨论典型食物链中污染物的迁移转化及其对人体健康的风险。第7章介绍气候变暖背景下，冰冻圈加速消融导致的污染物“二次”释放及其潜在的生态和人体健康风险。第8章针对西藏“一江两河”地区和珠穆朗玛峰国家级自然保护区、祁连山国家级自然保护区、三江源等典型区域开展综合评估。

本书介绍的研究成果是科考队成员共同努力完成的，青藏高原台站的长期系统观测是本书的坚实基础，科考强化观测对科学问题的认识实现了进一步的提升。同时，该领域前期的成果和近期其他科研人员的成果也为本书提供了宝贵的资料和科学认知。本书的主要完成者和撰写人分别是：第1章，康世昌、王小萍、丛志远、郭军明；第2章，康世昌、陈鹏飞、龚平、丛志远、吉振明、杨俊华、胡钰玲；第3章，沈国锋、殷秀峰、康世昌、邢冉、黄天耀、李尧捷、陈鹏飞、龚平、王劲松、刘国瑞、傅建捷、杨瑞强、丛志远、邱兴华、程和发、张庆华、周悦；第4章，李潮流、王劲松、王小萍、杨瑞强、张玉兰、傅建捷、严芳萍、杨玲、杜昊霖；第5章，王小萍、任娇、王传飞、李潮流、张玉兰、杨瑞强、严芳萍、王劲松、杨玲、王莺、刘晓云；第6章，杨瑞强、张强弓、任娇、傅建捷、王小萍；第7章，黄杰、牟翠翠、康世昌、孙世威、王兆清；第8章，张强弓、张玉兰、任娇、康世昌、李潮流、胡召富、孙学军。

科考工作的开展和本书的编辑出版过程得到了第二次青藏高原综合科学考察研究“跨境污染物调查与环境安全”（2019QZKK0605）的资助，作者由衷地表示感谢。感谢中国高寒区地表过程与环境观测研究网络台站在仪器观测和后勤保障方面的大力支持，感谢国内外为大气采样和野外观测付出辛勤劳动的工作人员，同时也感谢对青藏高原科考事业给予关心、支持和帮助的所有师长和同仁。

由于时间紧迫、涉及面广，本书在写作和准备过程中难免有疏漏的地方，请读者指正，期待在未来的研究中取得更深入的认识。

《青藏高原污染物对生态环境和人体健康影响风险评估》编写委员会

2024年6月



## 摘要

青藏高原拥有独特的自然环境格局与丰富多样的生境类型，是全球生物多样性最为丰富的地区之一，也是我国重要的生态安全屏障。然而，青藏高原高寒生态环境极度敏感脆弱。环境中的污染物是影响青藏高原生态环境的重要因素，关系着高原 1300 万人口的福祉。整体上，青藏高原的人为活动强度较低，各类污染物的排放有限。由于毗邻南亚、东亚、中亚和东南亚等人口密集和污染严重的地区，同时受到季风、西风的影响，青藏高原的环境正承受着来自周边地区大气污染物跨境输入的压力。例如，周边区域排放的黑碳气溶胶正成为加速青藏高原地表升温和冰川、积雪消融的重要因子；汞、持久性有机污染物等半挥发性物质沉降到青藏高原后亦可能增加生态系统和人体健康的风险。与此同时，近年来，青藏高原人口和经济快速增长，自身的污染物排放也发生了变化。第一次青藏高原综合科学考察较少涉及外源污染物对高原环境的影响；后续科学研究开始意识到跨境污染物传输对青藏高原环境质量和生态安全具有非常重大的影响，但相关研究非常少，且仅有粗略探讨，不够系统、客观和全面。鉴于此，第二次青藏高原综合科学考察研究项目启动以来，组织实施了跨境污染物调查与环境安全研究。考察瞄准国家环境安全的长远战略问题，评估了内、外源污染物对生态环境和人体健康的影响。

第二次青藏高原综合科学考察研究项目启动以来，跨境污染物调查与环境安全专题在前期研究的基础上，对青藏高原的大气、土壤、水体、冰冻圈等环境中的污染物开展了调查。结合前期的工作和第一手的调查资料，评估青藏高原污染物对生态环境和人体健康的风险。主要认识如下：

(1) 南亚排放的大气颗粒态污染物对青藏高原的贡献最为显著，其中对大气黑碳、 $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的年均贡献量分别达到 60.0%、



38.4%、40.6%，且在冬、春和秋季贡献远高于夏季。气态污染物的跨境传输与颗粒态污染物有较大差异，南亚排放的污染物对青藏高原  $O_3$  的年均贡献为 11.4%，从南亚到达青藏高原的有机氯类污染物通量可达  $2 \sim 100 \text{ t/a}$ 。当前，南亚污染物跨境传输对青藏高原生态环境最显著的影响是加速冰川消融，直接（加速冰川消融）和间接（减少物质补给）作用对喜马拉雅山脉中部地区的冰川消融贡献达到 33.7%。青藏高原部分区域的氮沉降通量已经超出高山地区临界负荷值，表明青藏高原的脆弱生态系统面临高氮沉降的环境风险。

（2）青藏高原城镇大气环境均保持良好状况，对人体健康风险极低。然而，青藏高原城镇  $O_3$  浓度水平高，对人体健康的风险较高。青藏高原农牧区居民日常生活中对传统固体燃料依赖度高，取暖季的室内污染较为严重，人群健康风险高。同时，由于传统的生活习惯等因素，寺庙等特定场所及周边环境的大气污染和人群健康风险也应给予重视。

（3）青藏高原土壤中污染物的含量总体较低。但在一些人类活动强烈的地区土壤中的污染物含量已经出现了明显的增加，尤其是大型城市、繁忙道路周围、农田及矿区，污染物已呈现出点状发生的特征。尽管跨境污染物远源传输是一个来源，但土壤污染物浓度较高的点位主要受高原局地人类活动或母岩和自然过程的影响。整体上，青藏高原土壤污染物对生态环境和人体健康风险有限。

（4）青藏高原河流和湖泊的水质总体优良，重金属、有机污染物和微塑料的含量较低，仍属于世界上洁净的背景地区。受自然因素和人类活动的影响，局部河段和个别湖泊存在一定程度的污染，污染程度表现出明显的空间异质性，其中元素 As 和 Cd 的生态风险相对较高。

（5）青藏高原特殊的自然环境导致部分污染物的生物富集放大效应显著。青藏高原的水体汞背景浓度低而野生鱼体汞含量高，形成了“汞富集悖论”，食用西藏野生鱼类具有较高的甲基汞暴露风险。水生和陆生生态系统中均发现部分有机污染物的生物放大效应。这表明青藏高原的生态环境十分脆弱，轻微的扰动可能会造成严重的后果。

（6）对冰川和冻土快速退缩带来的污染物释放及风险进行评估，发现冰川和多年冻土中均赋存大量汞、持久性有机污染物（POPs）、微塑料等污染物，在气候变暖背景下，历史时期积累的各种污染物均在大量融出，其中，汞和 POPs 等污染物还会在食物链中显著富集，对高原生态系统和人体健康具有潜在风险。

（7）对典型区域的评估发现，西藏“一江两河”地区作为人口密集区和农业生产区，人口增长和工农业、旅游业发展对大气、土壤和水体环境造成了一定扰动。目前，这些扰动尚未导致严重的污染和生态风险。珠穆朗玛峰国家级自然保护区的环境优良，但跨境污染物和平流层入侵对该地区的生态环境造成一定的扰动。祁连山自然保护区



和三江源各类环境介质中的污染物浓度整体处于背景水平，但区内人为活动造成的局地性污染物浓度升高。

本书在第二次青藏高原综合科学考察研究任务六“人类活动与环境安全”的支持下，紧密围绕习近平总书记提出的科考核心目标和实施战略，针对青藏高原外源和内源人类活动排放的污染物，评估大气、水体、土壤中污染物和室内燃烧空气污染物的现状及其对生态环境和人体健康的风险；同时对典型食物链中污染物的迁移转化、冰冻圈污染物的释放和典型区域污染物的生态环境和人体健康风险进行评估，为我国的环境外交谈判提供话语权和主动权，为青藏高原环境保护和可持续发展提供科技支撑。



# 目 录

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| 第 1 章 青藏高原污染物及其影响的考察研究意义                           | 1  |
| 1.1 全球污染物的影响概述                                     | 2  |
| 1.2 青藏高原污染物影响评估的意义                                 | 5  |
| 第 2 章 跨境大气污染物对气候和环境的影响                             | 9  |
| 2.1 不同源区排放对青藏高原 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 的贡献 | 10 |
| 2.1.1 跨境输入对青藏高原 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的影响         | 10 |
| 2.1.2 跨境输入对青藏高原 $O_3$ 的影响                          | 15 |
| 2.2 黑碳气溶胶跨境输入及其对青藏高原的影响                            | 16 |
| 2.2.1 黑碳气溶胶向青藏高原传输的机制与不同源区的贡献                      | 16 |
| 2.2.2 黑碳气溶胶跨境输入对青藏高原气候的影响                          | 18 |
| 2.2.3 南亚黑碳气溶胶对高原极端气候的影响                            | 18 |
| 2.2.4 南亚黑碳气溶胶对青藏高原冰川消融的影响                          | 23 |
| 2.3 其他类型污染物跨境传输及对青藏高原的潜在影响                         | 25 |
| 2.3.1 持久性有机污染物跨境传输及影响                              | 25 |
| 2.3.2 含氮气溶胶对高原生态的潜在影响                              | 27 |
| 2.4 小结与展望                                          | 28 |
| 第 3 章 大气污染物对人体健康的风险评估                              | 31 |
| 3.1 城镇大气污染物对人体健康的影响                                | 32 |
| 3.1.1 大气传统污染物及人体健康风险                               | 32 |
| 3.1.2 大气中有机污染物对人体健康的影响                             | 34 |
| 3.2 居民室内燃烧源空气污染及其健康风险                              | 36 |
| 3.2.1 生活能源结构及影响因素                                  | 36 |



|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 3.2.2 不完全燃烧产物的室内污染             | 40        |
| 3.2.3 室内污染暴露的健康风险              | 42        |
| 3.3 小结与展望                      | 43        |
| <b>第4章 土壤中污染物对生态环境影响风险评估</b>   | <b>45</b> |
| 4.1 重金属分布特征及风险评估               | 46        |
| 4.1.1 重金属的空间分布特征               | 46        |
| 4.1.2 土壤重金属来源                  | 51        |
| 4.1.3 土壤重金属污染概率的空间分布特征         | 52        |
| 4.1.4 土壤重金属风险评估                | 53        |
| 4.2 有机污染物分布特征及风险评估             | 58        |
| 4.2.1 POPs 空间分布                | 58        |
| 4.2.2 POPs 风险评估                | 59        |
| 4.3 微塑料分布特征及风险评估               | 60        |
| 4.3.1 微塑料空间分布                  | 60        |
| 4.3.2 土壤微塑料风险评估                | 62        |
| 4.4 土壤污染复合评估                   | 63        |
| 4.5 小结与展望                      | 64        |
| <b>第5章 水体中污染物对生态环境影响风险评估</b>   | <b>65</b> |
| 5.1 重金属分布特征及风险评估               | 66        |
| 5.1.1 河流中重金属分布特征和风险评估          | 66        |
| 5.1.2 湖泊中重金属分布特征和风险评估          | 71        |
| 5.2 有机污染物分布特征及风险评估             | 75        |
| 5.2.1 河流中有机污染物分布特征和风险评估        | 75        |
| 5.2.2 湖泊中有机污染物分布特征和风险评估        | 77        |
| 5.3 微塑料分布特征及风险评估               | 84        |
| 5.4 小结与展望                      | 86        |
| <b>第6章 典型食物链中污染物的迁移转化与健康风险</b> | <b>89</b> |
| 6.1 重金属迁移转化与风险评估               | 90        |
| 6.1.1 草地食物链                    | 90        |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 6.1.2 农田食物链 .....                     | 91         |
| 6.1.3 水生食物链 .....                     | 92         |
| 6.2 有机污染物迁移转化与风险评估 .....              | 93         |
| 6.2.1 高原水生食物链 POPs 传递与风险 .....        | 93         |
| 6.2.2 高原陆生食物链 POPs 传递与风险 .....        | 98         |
| 6.2.3 高原居民膳食暴露及健康风险评估 .....           | 102        |
| 6.2.4 人体健康风险综合评估 .....                | 105        |
| 6.3 小结和展望 .....                       | 111        |
| <b>第 7 章 冰冻圈污染物释放风险 .....</b>         | <b>113</b> |
| 7.1 冰川污染物释放特征及潜在风险评估 .....            | 114        |
| 7.1.1 青藏高原冰川污染物特征 .....               | 114        |
| 7.1.2 青藏高原冰川污染物风险 .....               | 115        |
| 7.2 冻土污染物释放特征及潜在风险评估 .....            | 117        |
| 7.2.1 多年冻土汞 .....                     | 118        |
| 7.2.2 持久性有机污染物 (POPs) .....           | 121        |
| 7.3 小结与展望 .....                       | 123        |
| <b>第 8 章 典型区域污染物对生态环境影响风险评估 .....</b> | <b>125</b> |
| 8.1 西藏“一江两河”地区 .....                  | 126        |
| 8.1.1 西藏“一江两河”地区大气污染物 .....           | 126        |
| 8.1.2 西藏“一江两河”地区水体污染物 .....           | 127        |
| 8.1.3 西藏“一江两河”地区土壤污染物 .....           | 129        |
| 8.2 珠穆朗玛峰国家级自然保护区 .....               | 132        |
| 8.2.1 珠穆朗玛峰大气污染物 .....                | 132        |
| 8.2.2 珠穆朗玛峰国家级自然保护区雪冰和水体中污染物 .....    | 135        |
| 8.2.3 珠穆朗玛峰国家级自然保护区土壤污染物 .....        | 138        |
| 8.3 祁连山国家级自然保护区 .....                 | 140        |
| 8.3.1 祁连山大气污染物 .....                  | 140        |
| 8.3.2 祁连山水体污染物 .....                  | 142        |
| 8.3.3 祁连山雪冰中的污染物 .....                | 147        |



|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 8.3.4 祁连山土壤污染物·····   | 147 |
| 8.4 三江源·····          | 152 |
| 8.4.1 三江源大气污染物·····   | 153 |
| 8.4.2 三江源水体污染物·····   | 155 |
| 8.4.3 三江源雪冰中的污染物····· | 159 |
| 8.4.4 三江源土壤污染物·····   | 160 |
| 8.5 小结与展望·····        | 162 |
| 参考文献·····             | 165 |
| 附录 科考日志·····          | 203 |
| 附图·····               | 213 |



## 第1章

# 青藏高原污染物及其影响的 考察研究意义



环境污染物是指通过人为活动向环境中排放或释放，并对环境或人体健康产生不良影响的各种物质。其主要包括大气污染物[如二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、颗粒物、重金属、持久性有机污染物(POPs)等]、水体污染物(如营养盐、重金属、病原微生物、难降解有机物、微塑料等)、土壤污染物(如重金属、POPs、营养盐)，以及抗生素、消毒剂、塑料添加剂、激素等新污染物。这些污染物的主要来源有工业生产、燃料燃烧、交通运输、工农业生产和日常生活污水排放、工业固体废物堆放等。环境污染物通过环境介质迁移、传播，最终危害人体健康，或干扰生态系统的结构与功能。工业革命以来，人类的工农业生产与交通运输等活动向环境排放了大量污染物质。通过大气和水体的搬运传输，污染物从污染源传播到地球各个角落，形成了全人类面临的共同环境问题，并逐步演变为严重威胁人类生存与发展的全球危机(Akimoto, 2003)。

全球环境污染已经超过了地球系统容许的边界(Akimoto, 2003; Brahney et al., 2020; Immerzeel et al., 2020)。“行星边界”(planetary boundary)的概念指出，地球系统有9个关键的环境过程，其稳态条件对人类文明的存在至关重要。这些关键过程中与污染物密切相关的有气候变化、生物圈完整性、生物地球化学流(如氮、磷循环)等。当前在污染物排放的共同作用下，这些环境过程的状态已经突破或接近行星边界的安全阈值。具体而言，持续增加的温室气体排放已经使全球持续变暖、极端天气事件增多；过剩的营养物质输入威胁到地表生态系统的组成与生产力；海洋中过量的塑料垃圾也成为生物多样性丧失的重要原因。污染物挥发与迁移还会加速环境过程之间的联动，导致更加严峻的全球环境变化，威胁人类文明的可持续性。

青藏高原作为地球上海拔最高、面积最大的高原，处于全球变化和生物地球化学循环的核心敏感区，在此处开展环境污染物的调查、监测和影响评估，具有重要的科学意义和社会价值。它不仅可评估跨境污染物对这一脆弱生态系统的影响，为保护青藏高原生物多样性提供科学依据；还可以解析人为污染和气候变化对该区域冰川、冻土消融的驱动作用，预测水资源和生态效应变化；同时可以厘清污染物在高原区域的时空分布规律、环境过程和生态风险，为区域可持续发展策略的制定提供理论支撑；此外，针对城镇生活和农牧业等污染源的研究，对维护和改善本地人群健康、提高生活质量也具有实际意义。这些研究有助于评估全球变暖背景下污染物环境迁移规律和生物放大效应，为全球污染物管控政策执行提供基础数据。青藏高原偏远地区的环境中，污染物总体上处于全球背景水平，主要受到大气污染物跨境传输的影响。而青藏高原的城镇区域，随着人类活动的逐步增强，污染物浓度水平升高，对环境和人体健康带来潜在的风险。农牧区传统的生活方式也导致一定程度的室内污染，具有一定的健康风险。及时总结科学考察研究成果，评估青藏高原偏远和城镇区域污染物的气候效应、环境和人体健康风险，可以为区域可持续发展和人体健康提供科技支撑。

## 1.1 全球污染物的影响概述

大气污染物既包括二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、一氧化碳( $\text{CO}$ )、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化

物( $\text{NO}_x$ )、臭氧( $\text{O}_3$ )等气态污染物,又包括粉尘、灰霾、烟尘、微塑料等颗粒态污染物,同时还包括汞和持久性有机污染物(POPs)等气态和颗粒态共存的污染物。 $\text{CO}_2$ 排放会产生温室效应,导致全球气候变暖; $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 与大气中的水滴结合形成酸雨,危害环境(Grennfelt et al., 2020);人类过多地使用氯氟烃类化学物质,导致 $\text{O}_3$ 空洞,致使到达地面的紫外线增强,对地表生物圈产生不利的影响(Grevsmühl, 2018)。同时,高浓度对流层 $\text{O}_3$ 会损伤植被叶片,降低光合作用效率,削弱植被的生长。此外,高浓度对流层 $\text{O}_3$ 还会刺激人和动物的呼吸系统黏膜,严重时可损害肺部组织。黑碳和硫酸盐对气候分别产生正、负反馈,大气中的硝酸盐和铵盐等含氮物质的干湿沉降将极大地干预生态系统的结构和功能(Li B G et al., 2016; Stevens et al., 2018)。

各类污染物还会对人体造成损害。首要是大气污染,一定浓度水平的污染物对人体具有严重的危害,尤其是大气中细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ ),能够深入肺部并进入血液,对心血管、脑血管(中风)和呼吸系统造成影响(Brook et al., 2010)。重金属和POPs因其毒性而备受关注,甲基汞和滴滴涕(DDTs)在北极因纽特人体内被大量检出(Donaldson et al., 2010),这说明污染物严重危害了极地生态系统。采取行动减少空气污染有助于推进减缓气候变化、提升农业生产力、保护野生动物和人体健康,是实现环境与发展并重的千年发展目标的有效途径。

与空气污染类似,水污染在全球相当普遍而又严重。全世界有18亿人饮用过受污染的水,每年有30%的人因饮用受污染的水而患病(WWAP, 2023)。水体中的有害物质主要包括农药、重金属、致病微生物、各种个人护理品和药品等。水体也是很多水溶性污染物全球传输的载体。例如,有机氯农药六氯环己烷是水溶性很高的化学物质,已发现它可以从南美洲经由河流流入大西洋后再由洋流传输到加勒比海(Lohmann et al., 2012);全氟辛烷磺酸是常见的防污处理剂的主要活性成分,广泛应用于多种日常用品中,其因高水溶性,可由河流和洋流传输到南北极和全球的不同地方(Sims et al., 2022)。因此,《2021年联合国世界水发展报告》指出,保护水质、遏制水资源短缺,是实现联合国《2030年可持续发展议程》中可持续发展目标(SDGs)至关重要的步骤。

有害废水向土壤中渗透、大气污染物干湿沉降到土壤中以及固体废物在土壤表面的堆放和倾倒,导致土壤污染。土壤污染会使污染物在植(作)物体中积累。污染严重区粮食、蔬菜、水果等食物中镉(Cd)、铬(Cr)、砷(As)、铅(Pb)等重金属含量超标或接近临界值(Mahmood and Malik, 2014; Shaheen et al., 2016; Zhang X Y et al., 2015)。土壤污染明显地影响到农作物的品质以及人类食物的卫生品质。进而,污染物通过食物链富集到人体和动物体中,危害人畜健康,引发癌症和其他疾病等(Islam et al., 2018; Li D L et al., 2022)。对于各种土壤污染造成的经济损失,目前尚缺乏系统的调查资料。仅以土壤重金属污染为例,中国每年就因重金属污染而减产粮食1000多万吨(庞国芳等, 2020)。土地受到污染后,含污染物浓度较高的表土容易在风力和水力的作用下分别进入大气和水体中,再次导致大气污染、地表和地下水污染以及生态系统退化等环境问题。



此外,环境污染还和气候变化交织在一起,加剧了全球所面临的生态环境和人体健康风险。例如,具有吸光性的黑碳气溶胶在大气中具有显著的增温效应,同时通过气溶胶-边界层的相互作用改变气象条件,加剧静稳天气的形成(即边界层上层增暖、下层降温的穹顶效应)(Huang et al., 2020);而边界层内降温所导致的相对湿度增加又显著促进二次颗粒物的生成,从而加剧了地表的颗粒物污染。POPs 具有半挥发性,其受热会挥发,会通过大气环流远距离迁移。基于气温呈现的纬度梯度分布,依据 POPs 的挥发能力,挥发性强的 POPs “蚱蜢跳”的次数也较多,更易传输至高纬度极地地区,而挥发能力较弱的 POPs “蚱蜢跳”的次数也较少(Wania and Mackay, 1995),故而倾向于沉积到中纬度地区,造成 POPs 的全球蒸馏效应。POPs 的全球蒸馏效应是解释 POPs 全球传输的重要模式,并得到观测的支持(Gouin et al., 2004; Li et al., 2024)。在该模式中,环境温度是驱动 POPs 迁移的决定性因素,每上升 1℃, POPs 的挥发性会增加 10%~15%(Lamon et al., 2009)。

全球升温对冰冻圈有着显著的影响。随着持续的全球变暖,全球冰川总体处于持续退缩状态,21 世纪以来的退缩更为显著(Hock et al., 2019)。此外,全球多年冻土厚度和面积在 1975~2005 年明显减少(Shen et al., 2024; Vasiliev et al., 2020)。冰冻圈的加速消融,会导致环境的“二次污染”。在过去二十多年,北极冰川融化将历史时期沉降的 POPs 又输送回大气,导致北极大气中多种 POPs 的浓度在减排的影响下并没有显著下降(Ma et al., 2011)。在南极,30 年内企鹅体内 DDTs 的含量并没有随全球 DDTs 的禁止使用而下降,反而趋于平稳,这可能与冰川消融释放 DDTs 有关(Geisz et al., 2008)。气候变暖引起的冰川和多年冻土融化还可能加速汞的“二次释放”,增加下游水体中汞的浓度。冰川消融的同时一方面将蓄积的污染物释放回大气中,另一方面污染物也会通过水循环而迁移进入湖泊并积累在湖底沉积物中,进而使得冰川融水补给的湖泊沉积物中含有大量的污染物(Zhu et al., 2020)。

由于大气和水体传输是污染物全球传播的主要方式,欧洲乃至全球陆续建成了大气、水体多种污染物的监测网络。例如,以欧美科学家主导的全球大气被动监测计划(Global Atmospheric Passive Sampling, GAPS)、全球水生被动采样计划(Global Water Passive Sampling, GWPS)观测研究发现,全球大气中的多氯联苯、硫丹和六氯环己烷浓度正在下降(Rauert et al., 2016; Schuster et al., 2021)。这些有机污染物浓度稳定或缓慢下降的全球趋势反映了污染物从一级来源向二级来源的过渡(即这些 POPs 历史沉积的再排放)。此时,气温是污染物二次释放的主要控制因素。在全球尺度上,空气质量较差的地区主要包括印度、巴基斯坦、孟加拉国等南亚国家以及伊拉克、埃及等中东区域;同时大气 POPs 浓度的高值常常出现在热带和温带有农业活动的地区,特别是印度和非洲(Chakraborty et al., 2010; Olisah et al., 2020)。值得注意的是,在极地也发现有中等浓度的 POPs 类污染物,如六氯苯和全氟烷基化合物(Gao et al., 2020)。

在环境中稳定性高、可挥发和长距离迁移的污染物能够影响大范围的地区。由此,不仅污染物排放区域,而且偏远地区的人体和环境也是污染物的受害者(Qiu, 2013)。因此,加强国际共同参与合作,减少污染物的排放,才能有效地减轻其对全球人类健



康和生态环境的影响。为解决全球日益严峻的环境污染问题，联合国先后通过多边谈判的方式，陆续签订了《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》和《巴黎协定》，以及《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》（简称《蒙特利尔议定书》）、《控制危险废物越境转移及其处置巴塞尔公约》（简称《巴塞尔公约》）、《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》（简称《斯德哥尔摩公约》）、《关于在国际贸易中对某些危险化学品和农药采用事先知情同意程序的鹿特丹公约》（简称《鹿特丹公约》）和《关于汞的水俣公约》等多个条约。

现行的一系列国际公约和多边环境协定对全球环境污染治理发挥了重要作用。《蒙特利尔议定书》推动消耗臭氧层物质的淘汰，导致平流层臭氧浓度开始恢复；《京都议定书》实施后，发达国家温室气体排放增速明显放缓；《巴塞尔公约》的监管有效遏制了有害废物向发展中国家的转移；《斯德哥尔摩公约》也促使多种持久性有机污染物的使用与排放大幅度减少。监测数据显示，受这些公约影响，相关污染物的环境浓度出现了下降的趋势。这些确凿的事实表明，当前国际环境公约和协定框架在应对全球环境污染问题过程中发挥了重要作用（Hung et al., 2016；Kwon et al., 2020）。然而，各类新污染物的产生仍在持续，执行和管控仍面临诸多挑战，需要国际社会坚持不懈的努力，以期全面有效地控制和减轻全球环境污染的负面影响。

## 1.2 青藏高原污染物影响评估的意义

青藏高原平均海拔超过 4000 m，地域广阔（约 250 万 km<sup>2</sup>），被称为“第三极”，它代表了地球上海拔最高的地貌特征，对大气环流产生深远的热力和动力影响，影响着亚洲、北半球乃至全球的气候。青藏高原是除了南北极以外，地球上冰川分布最广泛的地区（Yao et al., 2012a），又是我国三大积雪分布中心之一，还分布着世界中低纬地区面积最大、范围最广的多年冻土区（Zou et al., 2017）。青藏高原丰富的冰冻圈水资源孕育了亚洲众多大江大河，使青藏高原成为“亚洲水塔”（Immerzeel et al., 2010）。同时，青藏高原独特的高原气候和地形地貌，孕育了非常丰富的高原冷温带生物。可以说，青藏高原作为世界上最大的高原区域，其复杂的自然环境系统和生物多样性对整个地球的环境演化和全球可持续发展发挥着不可替代的调节作用，是地球生态环境的核心之一。任何对其生态系统稳定性的威胁，都可能对整个地球环境造成重大影响。青藏高原与南极、北极等极地环境在应对环境污染方面都承担着至关重要的角色。其由于独特的地理位置和气候条件，对全球环境健康起着指示器的作用。青藏高原与南、北极的共通性在于它们都是全球环境监测和科学研究的关键区域。这些地区在环境污染评估与应对方面也面临着独特的挑战。在青藏高原，由于其高海拔和偏远的位置，污染物质的传输和扩散机制复杂，加之其生态系统的脆弱性，环境污染的影响尤其难以预测和控制。

青藏高原当地人类活动少，自身排放污染物较少（樊杰等，2015；Kang et al., 2019）。然而，青藏高原毗邻欧亚大陆人口密集、工农业迅速发展的区域。特别是



20 世纪中期以来,伴随着经济发展和人口增加,南亚有机碳、黑碳以及硫酸盐等气溶胶的排放出现了快速增长,使得该地区成为全球大气污染最为严重的区域之一(Ramanathan et al., 2005)。“大气棕色云”从南亚延伸并积聚在喜马拉雅山的南坡,可以通过印度季风和西风传输,从而到达青藏高原的腹地(Kang et al., 2019)。

最近几十年来,青藏高原气候经历了显著而快速的暖湿化。青藏高原平均气温增速超过同期全球的两倍,极端高温和极端降水事件频繁发生(陈德亮等, 2015)。分布在青藏高原不同区域的冰川正经历着不同程度的消融与退缩,冰川面积约退缩了 15%(刘时银等, 2015),多年冻土面积减少了 16%。冰川退缩之时,青藏高原的湖泊也在慢慢“扩张”,湖泊面积从 4 万  $\text{km}^2$  增加到 4.74 万  $\text{km}^2$ (Zhang G Q et al., 2014);雅鲁藏布江、印度河上游年径流量呈增加趋势(Su et al., 2016)。在气候变暖的影响下,青藏高原是地球上大气圈、水圈、冰冻圈和生物圈之间相互作用最强烈的地区,气候与生态环境复合灾害风险加大。

远距离传输到青藏高原腹地的大气气溶胶,如黑碳、棕碳和粉尘,可以使大气变暖(Ji et al., 2015)。它们沉积在冰川或积雪后,可以显著降低雪冰表面反照率并加速其融化(Kang S C et al., 2022)。大气污染和冰冻圈变化密切相关,影响着区域的水循环及水资源变化。此外,青藏高原还是珍稀野生动物的天然栖息地和高原物种基因库,是全球生物多样性和高寒特有生物多样性保护的重要区域。输入青藏高原的其他有毒污染物(如 POPs 和汞)可以通过食物链进入野生生物和人体内,威胁生态系统和人体健康(Huang et al., 2022; Ren et al., 2017b; Zhang Q et al., 2014),亟待对污染物多介质时空分布特点、食物链传递特征以及相应的危害进行综合评估。

气候变化和人为污染物的共同作用正在加剧青藏高原生态环境的脆弱性。一方面,气候变暖导致冰川冻土加速融化,释放存储的各类污染物,产生“次生污染”;融水又将污染物迁移和富集于下游水体。另一方面,生态系统的退化减少了自我调节能力,加重了污染物的积累效应。污染物沉降在冰雪表面,减小了反照率,形成正反馈再加速冰川消融。变暖的气候条件增加了脆弱的高原生态系统对外来污染的响应敏感性,两者的相互作用放大了对生态环境的负面影响,这些问题亟须重视和关注。

除远距离输送之外,青藏高原自身的农牧业、工矿活动以及迅速的城市化也不可避免地带来一定的环境污染(Feng and Li, 2021)。厘清青藏高原水土环境在多大程度上受到自然活动(气候变化)和人类活动的影响,是促进青藏高原经济社会高质量发展的重要前提。青藏高原农牧区的能源结构与其他平原地区有明显差异,超过 80% 的能源来自生物质(如畜牧粪便、秸秆、煤燃烧等),而且青藏高原气压和氧含量明显低于其他平原地区,导致生物质不完全燃烧产生二噁英等剧毒污染物(Jin et al., 2023)。因此,迫切需要对青藏高原牧民室内污染开展重点监测和人群呼吸健康风险评估。

特殊高寒环境下的青藏高原生态环境敏感且脆弱,跨境传输和本地排放的污染物增加了青藏高原生态系统的不稳定性,加重了资源环境的压力(Qiu, 2014; Immerzeel et al., 2020)。为了加强青藏高原生态保护,防控生态风险,保障生态安全,建设国家生态文明高地,促进经济社会可持续发展,实现人与自然和谐共生,2023 年

4月26日第十四届全国人民代表大会常务委员会通过了《中华人民共和国青藏高原生态保护法》。该法指出,要强化污染防治,合理布局,严格环境标准,建立健全污染防治设施,减少温室气体和环境污染排放;开展污染地块治理,防治土壤、河湖污染;加强科技支撑,开展青藏高原生态和环境保护的科学考察、监测预警等,为保护青藏高原生态环境提供决策支撑。此外,该法还提出了建立健全生态环境监测网络,开展污染防治的责任追究等内容。这些法规为青藏高原的污染防治和生态保护提供了政策依据,可依法在青藏高原区域探索出一条环境保护与民生发展相结合、环境保护与经济建设相结合的可持续绿色发展之路。“保护好世界上最后一方净土”,开展污染物对青藏高原生态环境和人体健康的影响研究至关重要。

前期的定位观测和考察研究中,科研人员从历史记录、现代特征、跨境传输机制和生态环境影响等角度,重点揭示了南亚大气污染物跨境传输对青藏高原气候变化和生态环境的影响。在此基础上,出版了《南亚大气污染物跨境传输及其对青藏高原环境影响评估报告》。该报告指出,20世纪50年代以来青藏高原大气污染物(如黑碳、汞和POPs等)呈现显著的上升趋势,表明高原受到污染物的影响逐步增加;多种观测事实表明,南亚跨境污染物对青藏高原大气气溶胶的影响最为显著;模式模拟则进一步量化了南亚污染物排放对高原大气污染物的贡献;南亚大气污染物跨境传输具有山谷传输和高空翻越(深对流)两种形式;大气污染物对青藏高原的气候变化和冰川消融带来显著的影响(康世昌等,2019);青藏高原偏远地区的污染物主要来自大气传输和沉降,其在陆地和水生生态系统中强烈的生物富集放大效应表明,高原对外源污染物输入非常敏感。此外,该报告对跨境河流水质的评估显示,青藏高原河流水质总体优良,跨境河流下游河段经过人口聚集区后受到重金属和有机污染物等的污染,给生态系统带来风险。

然而,《南亚大气污染物跨境传输及其对青藏高原环境影响评估报告》对青藏高原的一些重要问题没有涉及。该报告重点在考察南亚大气污染物传输对青藏高原的影响,但是对中亚、西亚和东亚等人类活动密集区域的重视不够。虽然近期的研究依然表明南亚是青藏高原大气污染物的主要源区,但是不可否认的是其他区域的贡献也值得重视,如我国东部和东南亚区域排放的大气污染物在夏季对高原东部的贡献不可忽视(Rai et al., 2022)。青藏高原的人口、经济和城镇在近几十年来快速发展,相应地给当地的大气、水体、土壤和生态系统带来影响,农牧区传统生物质能源的使用造成的室内空气污染更是对人体健康带来直接的影响(Xiao et al., 2015; Jin et al., 2022)。同时,随着全球对环境保护的重视,传统污染物的排放得到有效的控制,但是作为替代的新型化学物质正在被大量生产和使用(Wu et al., 2017; Jin et al., 2020),这些新型化学物质是否会成为对青藏高原生态环境造成影响的新污染物也有待评估。基于以上原因,本书聚焦高原生态环境保护和人民生活福祉提升,从大气、水体、土壤和生态系统的角度,厘清外源和内源污染物对生态环境和人体健康的影响,以便从不同的维度对高原生态环境面临的风险给出综合全面的评估,为保护青藏高原生态环境、保障人民健康、开展环境外交、推动国际合作、实现人与自然和谐共生提供科技支撑。







## 第 2 章

---

# 跨境大气污染物对气候 和环境的影响



青藏高原是全球洁净度极高的地区之一，该地区大气环流极为复杂，且有显著的时空差异。青藏高原西部地区常年受西风带控制，南部和东南部受南亚 / 西南季风和西风交替控制，而东北部受到东亚夏季风和冬季风交替影响。在大气环流影响下，南亚、中亚等周边地区排放的污染物可以跨境传输进入青藏高原并对其气候环境产生重大影响。

青藏高原常见的大气污染物包括气溶胶（及其所含的黑碳、重金属、硝酸盐、有机污染物等组分）和气体污染物 [ $O_3$ 、二氧化氮 ( $NO_2$ )、 $SO_2$ 、 $CO$ 、挥发 / 半挥发性有机污染物等]。这些污染物主要来自人类活动的直接排放或大气二次反应的产物。本章利用区域气象大气化学耦合模式（WRF-Chem）对不同源区排放污染物 [可吸入颗粒物 ( $PM_{10}$ )、 $PM_{2.5}$  和  $O_3$ ] 跨境输入青藏高原的贡献进行了量化，重点对黑碳的跨境传输及对青藏高原冰川消融和极端天气的影响进行了评估，此外，还对含氮气溶胶的沉降以及 POPs 的传输和影响进行了初步分析。

## 2.1 不同源区排放对青藏高原 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 的贡献

研究表明，受大气环流影响，南亚、中亚和东亚等区域排放的大气污染物可被传输至青藏高原（Rai et al., 2022；康世昌等，2019；Hu et al., 2022）。以往的研究主要探究了青藏高原周边不同区域排放对青藏高原黑碳气溶胶的贡献及其气候效应，但高原周边不同区域排放对青藏高原  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  和  $O_3$  的贡献尚未定量。本节采用 WRF-Chem 模式定量评估青藏高原周边不同区域排放对青藏高原  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  和  $O_3$  的贡献。模拟所用的人为源排放清单来自 3.0 版本的全球大气研究排放数据库（EDGAR-HTAP\_v3\_2018），生物质燃烧排放清单来自美国国家大气研究中心 2.5 版本的火排放清单（FINN2.5），模拟时段为 2017 年 11 月 1 日～2018 年 11 月 30 日，其中，2017 年 12 月 1 日～2018 年 11 月 30 日的模拟结果用于具体分析。

### 2.1.1 跨境输入对青藏高原 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的影响

研究表明，年尺度上南亚人为和生物质燃烧排放对青藏高原  $PM_{10}/PM_{2.5}$  的贡献为 39.4%/40.1% [图 2.1 (a)]。季节尺度上，南亚人为和生物质燃烧排放对青藏高原  $PM_{10}$  ( $PM_{2.5}$ ) 贡献的空间变化具有显著的季节变化，表现为季风前期最大，季风期最小 [图 2.2 (b)～(e) 和图 2.3 (b)～(e)]。定量地，季风前期、季风期、季风后期和冬季南亚人为和生物质燃烧排放对青藏高原  $PM_{10}/PM_{2.5}$  的贡献分别为 54.5%/54.8%、17.1%/17.3%、41.8%/43.5% 和 49.2%/50.8% [图 2.1 (a)]。总体来说，南亚人为和生物质燃烧排放对青藏高原  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的贡献相似。

分别评估南亚人为排放和生物质燃烧排放对青藏高原  $PM_{10}/PM_{2.5}$  的贡献，发现南亚人为排放对青藏高原  $PM_{10}/PM_{2.5}$  的贡献显著高于生物质燃烧排放 [图 2.2 (f)～(o) 和图 2.3 (f)～(o)]。具体而言，年尺度上南亚人为排放对青藏高原  $PM_{10}/PM_{2.5}$  的贡