

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

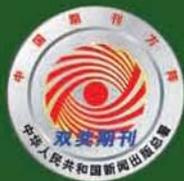
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

2015年北京市两次红色预警期间PM<sub>2.5</sub>浓度特征 ..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM<sub>2.5</sub>变化特征对气象因素的响应 ..... 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)

兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)

南京北郊冬季PM<sub>2.5</sub>中芳香酸的测定及来源解析 ..... 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)

海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 ..... 孔亚文, 盛立芳, 刘寿, 李秀镇 (2443)

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 ..... 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)

重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 ..... 温艳茹, 王建力 (2462)

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析 ..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)

河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例 ..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)

亚热带典型岩溶溪流水气界面CO<sub>2</sub>交换通量变化过程及其环境影响 ..... 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 荧光光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)

华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价 ..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 ..... 张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)

输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 ..... 昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)

卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 ..... 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)

岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 ..... 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)

哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 ..... 孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)

降水对泃河水质和水体微生物的影响 ..... 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对磷酸盐的响应 ..... 王振翔, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)

布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 ..... 景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邹义萍, 樊静静 (2577)

化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 ..... 蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)

活性炭负载Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>活化过一硫酸盐降解金橙G ..... 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)

碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学 ..... 张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)

碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 ..... 邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)

铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究 ..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)

Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究 ..... 陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑伟 (2625)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 ..... 刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)

基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究 ..... 鲍林林, 陈婉秋 (2639)

异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 ..... 李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)

基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 ..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)

NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 ..... 汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 ..... 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)

拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 ..... 颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX<sub>2</sub>的筛选及脱氮特性 ..... 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)

焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 ..... 徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)

浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 ..... 戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)

磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 ..... 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 ..... 赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)

三峡库区消落带N<sub>2</sub>O排放及其影响因素 ..... 李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N<sub>2</sub>O排放研究 ..... 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)

冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 ..... 易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀娟, 木志坚 (2738)

藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 ..... 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 ..... 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)

水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 ..... 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)

减磷施肥有机肥对紫色土早坡地磷素流失的消减效应 ..... 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)

水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 ..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)

组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较 ..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)

生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 ..... 商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)

热处理天然褐铁矿制备γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及其NH<sub>3</sub>-SCR活性探究 ..... 徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)

《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

# 藏东南色季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析

罗东霞<sup>1</sup>, 张淑娟<sup>2</sup>, 杨瑞强<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 环境化学与生态毒理学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084)

**摘要:** 2012 年 8 月采集了藏东南色季拉山阴坡和阳坡的土壤样品, 测定了其中多环芳烃和有机氯农药 (包括六六六和滴滴涕) 的污染含量. 土壤中  $\sum_{16}$  PAHs 的含量范围为 99.3 ~ 1984 ng·g<sup>-1</sup>, 平均值为 1017 ng·g<sup>-1</sup>; HCHs 和 DDTs 的含量分别为 0.37 ~ 2.07 ng·g<sup>-1</sup> (平均值为 1.15 ng·g<sup>-1</sup>) 和 0.70 ~ 43.9 ng·g<sup>-1</sup> (平均值为 9.87 ng·g<sup>-1</sup>), 均远高于青藏高原中部及西部土壤中相应污染物的含量, PAHs 甚至可高达两个数量级. 阳坡  $\alpha$ -HCH 和 DDTs 的浓度随着海拔升高, 而阴坡 HCHs 和 DDTs 的浓度随着海拔降低或无显著变化. 阴坡土壤 PAHs 随海拔无升高或降低的变化趋势, 而阳坡土壤 PAHs 的浓度在低海拔处呈现较高浓度, 可能是存在局部污染源的排放. PAHs 的组成以较轻组分 (2 和 3 环) 为主, 平均占总含量的 85% 以上, 说明研究区域的 PAHs 主要来自大气远距离传输源. PAHs 的特征单体比值表明生物质和化石燃料的低温燃烧是色季拉山 PAHs 的主要来源, 同时阴坡也可能受到石油泄漏的影响. 较低的  $\alpha/\gamma$ -HCH 比值表明, 研究区域的 HCHs 主要是历史工业品 HCHs 和林丹共同输入的结果.  $p,p'$ -DDE/ $p,p'$ -DDT 和  $o,p'$ -DDT/ $p,p'$ -DDT 的比值显示, 研究区域 DDTs 主要是由历史工业品 DDTs 和三氯杀螨醇共同贡献所致. 根据研究区域污染物的浓度特征和藏东南的气象条件可知, 研究区域的污染主要受印度季风的影响.

**关键词:** 藏东南; 有机氯农药; 多环芳烃; 土壤; 海拔; 来源

中图分类号: X132; X833 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2745-11 DOI: 10.13227/j.hjcx.2016.07.043

## Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau

LUO Dong-xia<sup>1</sup>, ZHANG Shu-juan<sup>2</sup>, YANG Rui-qiang<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Soils were collected from Shergyla Mountain shade slope and south-facing slope in southeast Tibetan Plateau (TP) in August 2012 and they were measured for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides (OCPs) (including HCHs and DDTs). The concentrations of  $\sum_{16}$  PAHs ranged from 99.3 to 1984 ng·g<sup>-1</sup> dw, with a mean value of 1017 ng·g<sup>-1</sup> dw. HCHs and DDTs in soils samples were in the range of 0.37-2.07 ng·g<sup>-1</sup> dw (mean 1.15 ng·g<sup>-1</sup> dw) and 0.70-43.9 ng·g<sup>-1</sup> dw (mean 9.87 ng·g<sup>-1</sup> dw), respectively. The concentrations of all measured compounds were much higher than those in central or western TP, and the PAHs concentration was even up to two orders of magnitude. The concentrations of  $\alpha$ -HCH and DDTs in south-facing slope increased with altitude, but HCHs and DDTs in shade slope had no significant correlation with altitude. There was no consistent increasing or decreasing trend of PAHs in shade slope with altitude, and the concentrations of PAHs in south-facing slope showed a higher value in lower altitude, indicating the existence of local pollution emissions. The PAHs profile was dominated by lighter constituents (2 & 3-ring accounted for higher than 85%), inferring that the PAHs in the study area were largely influenced by long range atmospheric transport (LRAT) of pollutants. The special diagnostic ratios of PAHs suggested that PAHs were mainly produced by low temperature combustion of biomass and fossil fuels, except that two sampling sites of shade slope had been possibly influenced by oil residue. The relatively low ratios of  $\alpha/\gamma$ -HCH inferred HCHs in the research area was the result of the combined contribution of the historical technical HCHs and Lindan. The ratios of  $p,p'$ -DDE/ $p,p'$ -DDT and  $o,p'$ -DDT/ $p,p'$ -DDT indicated DDTs were from the combined contribution of the historical technical DDTs and dicofol. According to the profile of PAHs, HCHs and DDTs and the meteorological conditions of Shergyla Mountain, the transport of PAHs and OCPs in the study area was mainly influenced by the Indian Monsoon.

**Key words:** southeast Tibetan Plateau; OCPs; PAHs; soil; altitude; source

收稿日期: 2015-12-20; 修订日期: 2016-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21277167, 21577164)

作者简介: 罗东霞 (1992 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境化学, E-mail: dxluo\_st@rcees.ac.cn

\* 通讯联系人, E-mail: rqyang@rcees.ac.cn

持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs), 是一类具有高毒性、难降解、生物蓄积性和半挥发性, 对人体健康和环境具有严重危害的天然或人工合成的有机污染物质. POPs 具有持久性和半挥发性, 使得其可长时间存在于环境中并通过水、大气或者其他介质全球迁移, 目前各国研究者已经在世界范围内检测到了 POPs 的分布, 甚至是人烟稀少的青藏高原<sup>[1,2]</sup>、两极地区<sup>[3-5]</sup>、远海<sup>[6]</sup>等地. 而高纬度或高海拔地区 (尤其是离人类活动比较近的高海拔山区), 由于其温度低, 常常成为 POPs 类化合物的蓄积储存区<sup>[7]</sup>.

本研究选取有机氯农药 (organochlorine pesticides, OCPs) 和多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 作为研究对象. OCPs 是历史上最早最大规模使用过的高效广谱杀虫剂, 虽已禁用, 但在环境中仍然具有较大的残留量. PAHs 广泛分布于环境各介质中, 而环境中的 PAHs 主要是由化石燃料等的不完全燃烧、汽车尾气排放等人为活动产生的<sup>[8]</sup>, 被认为是人类活动影响自然环境的良好指示剂<sup>[9]</sup>.

青藏高原总面积 250 万 km<sup>2</sup>, 平均海拔 4 000 ~ 5 000 m, 常年低温, 素有“世界屋脊”和“第三极”之称. 由于高原特殊的地理环境, 当地工农业生产活动相对稀少, 本地污染排放相对较小. 青藏高原周边国家与地区, 尤其是印度和中国, 曾在历史上大量生产与使用过有机氯农药, 而且人口急剧膨胀正在快速工业化, 煤和石油等化石燃料的燃烧、汽车尾气排放、垃圾焚烧等人为活动将释放大量 PAHs 等污染物到地表和大气环境中. 而高原的气候呈明显的季节性分布, 冬季受西风环流的影响, 夏季受控于

印度季风<sup>[10]</sup>, 尤其是藏东南, 在印度季风的影响下, 降雨充沛, 植被繁茂. 因此, 青藏高原周边国家与地区环境是青藏高原潜在的污染源, 青藏高原是研究 POPs 大气长距离传输的天然实验室, 并可为 POPs 的全球迁移提供参考信息.

土壤是环境中污染物的重要蓄积库, 大气中的 POPs 可通过干湿沉降作用进入土壤, 植被叶片也可吸收大气中的 POPs 并将 POPs 通过叶片的凋落迁移至土壤. 另外, POPs 在大气-土壤之间不断地进行分配, 土壤中的 POPs 可形成二次污染源. 本文选取藏东南色季拉山林下土壤为研究对象, 主要目的是: ①研究色季拉山 PAHs 和 OCPs 的含量及分布特征; ②探求影响色季拉山 POPs 分布的因素; ③解析色季拉山 POPs 的主要来源.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

2012 年 8 月于藏东南林芝县境内色季拉山 (29°10'N ~ 30°15'N, 93°12'E ~ 95°35'E) 采集了土壤样品, 阴坡 (背风坡) 8 个, 阳坡 (迎风坡) 7 个, 采样信息见图 1 和表 1. 每个样品由采样点位周围 30 m 范围内至少 6 个子样混合组成. 样品采集好之后用铝箔包裹好冷藏运输至实验室. 土壤样品经过冷冻干燥后用研磨磨细为 80 目, 保存在 -20℃ 的冰箱, 直到测样分析.

### 1.2 材料与试剂

二氯甲烷和正己烷等有机试剂均为农残级, J. T. Baker 公司生产. 硅胶: Merck 公司生产, 在 550℃ 下活化 12 h 后用浓硫酸配置成 30% (质量分数) 的酸性硅胶或者用超纯水配置成 3% (质量分数) 的去活硅胶. 弗罗里土: Sigma-Aldrich 公司生

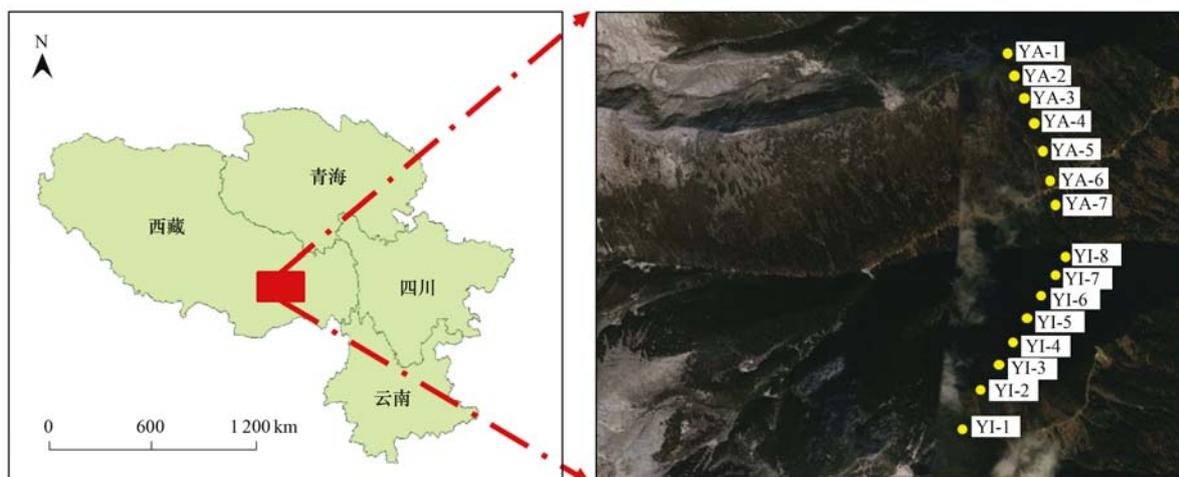


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Geographic location of sampling sites

产,在 180℃ 下活化 16 h 待用. 氧化铝: Sigma-Aldrich 公司生产,在 450℃ 下活化 20 h 后用 2% (质量分数)的超纯水去活. 无水硫酸钠: 天津津科精细化工研究所生产,在 550℃ 下活化 6 h.

多环芳烃标准溶液 [美国 EPA 16 种优控 PAHs: 萘、苊烯、苊、芴、菲、蒽、荧蒽、芘、苯并(a)蒽、䓛、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽、苯并(ghi)芘]、氘代回收标溶液(包括萘-d<sub>8</sub>、苊烯-d<sub>10</sub>、菲-d<sub>10</sub>、䓛-d<sub>12</sub>、芘-d<sub>12</sub>这 5 种氘代多环芳烃)以及内标溶液(二氟联苯)均购自 AccuStandard 公司. 有机氯农药混标溶液(包括  $\alpha$ -HCH、 $\beta$ -HCH、 $\gamma$ -HCH、 $\delta$ -HCH、 $p, p'$ -DDD、 $p, p'$ -DDE、 $o, p'$ -DDE 和  $p, p'$ -DDT)购自 AccuStandard 公司,而  $o, p'$ -DDD 和  $o, p'$ -DDT 购自德国 Agusburg Dr. Ehrenstorfer Laboratities. 回收标十溴联苯(PCB209)和 2,4,5,6-四氯间二甲苯(TCmX)及内标物八氯萘(OCN)购自德国 Agusburg Dr. Ehrenstorfer Laboratities.

表 1 采样点信息和土壤总有机碳含量

Table 1 Information of sampling site and total organic carbon for soils (TOC)

采样点	编号	海拔/m	土壤总有机碳/%
阴坡	YI-1	4 500	6.25
	YI-2	4 400	9.60
	YI-3	4 300	8.23
	YI-4	4 200	9.84
	YI-5	4 100	5.30
	YI-6	4 000	6.84
	YI-7	3 900	6.51
	YI-8	3 800	9.11
阳坡	YA-1	4 400	9.63
	YA-2	4 300	12.36
	YA-3	4 200	7.14
	YA-4	4 100	8.23
	YA-5	4 000	8.10
	YA-6	3 900	3.87
	YA-7	3 800	3.60

### 1.3 样品前处理

#### 1.3.1 多环芳烃

取 2 g 土样与 10 g 无水硫酸钠混匀后,加入回收率指示物氘代多环芳烃 100 ng,用加速溶剂萃取仪(DIONEX ASE 350)萃取,萃取溶剂为二氯甲烷-正己烷(1:1,体积比)的混合溶剂,萃取温度为 100℃,萃取压力为 1 500 psi,循环次数为 3 次. 萃取液经旋转蒸发器浓缩至 2 mL,并过硅胶-氧化铝复合柱(从上至下依次为 6 g 3% 的去活硅胶 + 4 g 2% 的去活氧化铝 + 5 g 无水硫酸钠)净化,再先后用 10

mL 正己烷与 50 mL 二氯甲烷:正己烷(2:3,体积比)的溶液进行洗脱. 将上述洗脱液浓缩后转移至 K-D 瓶中,用高纯氮气缓慢浓缩至 0.2 mL,并转移至进样瓶,定容至 0.5 mL. 仪器分析前加入进样内标二氟联苯(200 ng).

#### 1.3.2 有机氯农药

同样的取 2 g 土样与 10 g 无水硫酸钠混匀后,加入回收率指示物 PCB209 和 TCmX 各 10 ng,萃取方法同上. 萃取液旋转蒸发器浓缩至 2 mL,并过酸性硅胶-弗罗里土复合柱(从下至上依次为 6 g 30% 的酸性硅胶 + 6 g 弗罗里土 + 5 g 无水硫酸钠)净化,洗脱及后续操作同 PAHs 净化过程. 仪器分析前加入进样内标八氯萘(10 ng).

### 1.4 仪器分析

#### 1.4.1 多环芳烃

PAHs 的定量分析采用安捷伦 7890-5975 型气相色谱-质谱仪(GC-MS),配有 EI 源. 色谱柱为 DB-5MS(30 m × 0.25 mm × 0.25  $\mu$ m);载气为高纯氮气,流速为 1.2 mL·min<sup>-1</sup>;进样口温度:280℃;进样量:1  $\mu$ L,不分流进样模式;升温程序为 60℃ 保持 2 min,再以 6  $^{\circ}$ C·min<sup>-1</sup>的速率升至 300℃,并保持 10 min;离子源和四级杆的温度分别为 300℃ 和 180℃;定量分析选用选择离子模式(SIM),并用内标法定量.

#### 1.4.2 有机氯农药

样品中有机氯农药的分析采用安捷伦 Agilent 7890 气相色谱,检测器为 Ni<sup>63</sup>  $\mu$ ECD. 采用不同极性的两根色谱柱分别测定,以得到更好的定性结果,提高检测结果的准确度,色谱柱分别为 DB-5(60 m × 0.25 mm i. d × 0.25  $\mu$ m)和 DB-1701(60 m × 0.25 mm i. d × 0.25  $\mu$ m);载气为高纯氮气,载气流速为 1.2 mL·min<sup>-1</sup>,氮气尾吹;进样量为 1  $\mu$ L,不分流进样;升温程序为 80℃ 保持 1 min,然后以 4  $^{\circ}$ C·min<sup>-1</sup>的速率升至 230℃,最后以 25  $^{\circ}$ C·min<sup>-1</sup>的速率升至 280℃,并保持 10 min;进样口及检测器温度分别为 250℃ 和 300℃.

### 1.5 质量控制

实验过程中保证严格的质量控制. 每 7 个样品加一个实验室空白及一个平行样测定. 空白中可以检出萘,但含量均远低于样品中的含量. 样品添加标的平均回收率分别为:萘-d<sub>8</sub>(84.7% ± 7.1%),苊烯-d<sub>10</sub>(74.4% ± 5.5%),菲-d<sub>10</sub>(81.3% ± 7.4%),䓛-d<sub>12</sub>(81.9% ± 4.3%),芘-d<sub>12</sub>(98.1% ± 13.2%),TCmX(83.6% ± 6.1%),PCB209(74.9%

$\pm 4.8\%$ )。PAHs 测样 2 份的相对标准偏差是  $8.54\% \pm 8.51\%$ , OCPs 测样 2 份的相对标准偏差为  $5.45\% \pm 6.75\%$ 。多环芳烃与有机氯农药的方法检出限(3 倍信噪比)范围分别为:  $0.11 \sim 0.97 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $0.01 \sim 0.07 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。样品的最终含量经空白扣除后,再用回收率校正。

### 1.6 土壤总有机碳

土壤总有机碳含量(TOC)的测定采用 Elementar vario TOC 分析仪,氧气助燃,测定温度为  $950^\circ\text{C}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PAHs 和 OCPs 的含量水平

如表 2 所示,色季拉山林下土壤中  $\sum_{16} \text{PAH}$  的含量范围为  $99.3 \sim 1984 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 平均值为  $1017 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。本研究森林土壤中  $\sum_{16} \text{PAH}$  的含量远高于青藏高原西部<sup>[11]</sup>、中部<sup>[12]</sup>、青藏高原中部-青海<sup>[13]</sup>以及意大利中部阿尔皮斯山,稍高于藏东南<sup>[14]</sup>、长白山<sup>[15]</sup>、大王岭高原生态区<sup>[16]</sup>以及加拿

大西部山区<sup>[17]</sup>土壤 PAHs 含量,与波兰圣十字山土壤中 PAHs 的含量相似,但低于欧洲塔特拉山脉土壤 PAHs 含量。同时本研究色季拉山土壤中  $\sum_{15} \text{PAHs}$  (除去 NAP) 的含量范围为  $79.9 \sim 435 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  (平均值位  $176.1 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ), 低于奥地利森林土壤 PAHs 含量<sup>[18]</sup>。多环芳烃各单体中,除萘以外,菲、芴和芘为丰度最大的 3 种单体,它们分别占  $\sum_{15} \text{PAHs}$  总量的 35.7%、23.6% 及 13.4%, 而大分子量的单体所占比重较小。

HCHs 和 DDTs 的含量分别为  $0.37 \sim 2.07 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  (平均值为  $1.15 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 和  $0.70 \sim 43.9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  (平均值为  $9.87 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )。本研究色季拉山森林土壤 HCHs 的含量高于青藏高原中部和东部湖泊流域<sup>[19]</sup>、卧龙自然保护区<sup>[20]</sup>、珠穆朗玛峰<sup>[21]</sup>、欧洲山脉<sup>[22, 23]</sup>及南美洲秘鲁安第斯山脉<sup>[24]</sup>土壤含量,与藏东南<sup>[14]</sup>、青藏高原东部<sup>[25]</sup>、加拿大洛矶山脉优鹤国家公园<sup>[26]</sup>的含量相似,但低于加拿大瑞佛史托克山地<sup>[26]</sup>土壤含量。DDTs 的含量低于青藏高原中部<sup>[13]</sup>、青藏高原东部<sup>[19, 25]</sup>及珠穆朗玛峰<sup>[21]</sup>土

表 2 本研究和其他高山环境土壤中 PAHs、HCHs 及 DDTs 的含量<sup>1)</sup>/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Concentrations of PAHs, HCHs and DDTs in soils samples from this study and other remote mountain areas/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

采样地点	采样年份	PAHs	HCHs	DDTs
本研究	2012	99.3 ~ 1984(1017) <sup>a</sup>	0.37 ~ 2.07(1.15) <sup>d</sup>	0.70 ~ 43.9(9.87) <sup>e</sup>
藏东南 <sup>[14]</sup>	2010	201 ± 126 <sup>a</sup>	0.40 ± 0.95 <sup>d</sup>	2.85 ± 4.00 <sup>e</sup>
青藏高原中部及东部 <sup>[19]</sup>	2007	194 ± 196 <sup>a</sup>	0.31 ± 0.22 <sup>d</sup>	0.07 ± 0.06 <sup>g</sup>
阿里(青藏高原西部) <sup>[11]</sup>	2010	1.6 ~ 9.4 <sup>b</sup>		
青藏高原中部 <sup>[12]</sup>	2010	0.43 ~ 26.7 <sup>a</sup>		
青藏高原 <sup>[27]</sup>	2011	56.3 ± 45.8 <sup>a</sup>		
西藏-青海 <sup>[13]</sup>	2005 ~ 2006	51.8 ± 38.5 <sup>a</sup>	0.329 ± 0.818 <sup>d</sup>	0.467 ± 0.741 <sup>e</sup>
青藏高原东部 <sup>[25]</sup>	2006		0.39 ~ 4.56 <sup>d</sup>	0.15 ~ 6.69 <sup>f</sup>
长白山,中国 <sup>[15]</sup>	2009	38.5 ~ 444 <sup>a</sup>		
大王岭高原生态区,中国 <sup>[16]</sup>	2013	93.9 ~ 802(252.3) <sup>a</sup>		
卧龙自然保护区,中国 <sup>[20]</sup>	2005		0.15 ~ 1.35 <sup>d</sup>	0.34 ~ 3.15 <sup>f</sup>
珠穆朗玛峰 <sup>[21]</sup>	2005		N. D	0.385 ~ 6.06 <sup>e</sup>
加拿大西部山区 <sup>[17]</sup>	2004	2 ~ 789(167) <sup>a</sup>		
比利牛斯山,欧洲 <sup>[28]</sup>	1993, 1994, 2001	770 <sup>c</sup>		
塔特拉山脉,欧洲 <sup>[28]</sup>	2004	1900 <sup>c</sup>		
圣十字山,波兰 <sup>[29]</sup>	1996	13 ~ 1905 <sup>a</sup>		
阿尔皮斯山,意大利中部 <sup>[30]</sup>	2007	6.1 ~ 80.3(20) <sup>a</sup>		
奥地利森林 <sup>[18]</sup>	1993	68 ~ 1342(210) <sup>b</sup>		
优鹤,加拿大西部 <sup>[26]</sup>			0.0030 ~ 7.87(1.08) <sup>d</sup>	
瑞佛史托克,加拿大西部 <sup>[26]</sup>			0.57 ~ 4.37(2.87) <sup>d</sup>	
比利牛斯山,欧洲 <sup>[22]</sup>	1993 ~ 1994		0.08 ~ 0.19(0.14) <sup>d</sup>	1.7 ~ 3.4(2.55) <sup>f</sup>
塔特拉山脉,欧洲 <sup>[22]</sup>	2001		0.28 ~ 0.49(0.38) <sup>d</sup>	4.5 ~ 13(8.75) <sup>f</sup>
泰德峰,西班牙 <sup>[23]</sup>			0.001 ~ 1 <sup>d</sup>	0.01 ~ 40 <sup>f</sup>
安第斯山脉,秘鲁 <sup>[24]</sup>	2004		<0.01 <sup>d</sup>	0.02 ~ 1.65 <sup>e</sup>

1) a 表示 16 EPA PAHs; b 表示 15 种多环芳烃(16 EPA PAHs-萘); c 表示 16 种多环芳烃(16 EPA PAHs-萘 + 六苯并苯); d 表示  $\alpha$ -HCH、 $\gamma$ -HCH、 $\delta$ -HCH、 $\beta$ -HCH 的和; e 表示  $o,p'$ -DDT、 $p,p'$ -DDT、 $o,p'$ -DDD、 $p,p'$ -DDD、 $o,p'$ -DDE、 $p,p'$ -DDE 的和; f 表示  $o,p'$ -DDT、 $p,p'$ -DDT、 $p,p'$ -DDD、 $p,p'$ -DDE 的和; g 表示  $o,p'$ -DDT、 $p,p'$ -DDT、 $p,p'$ -DDE 的和; N. D 表示低于检出限,下同

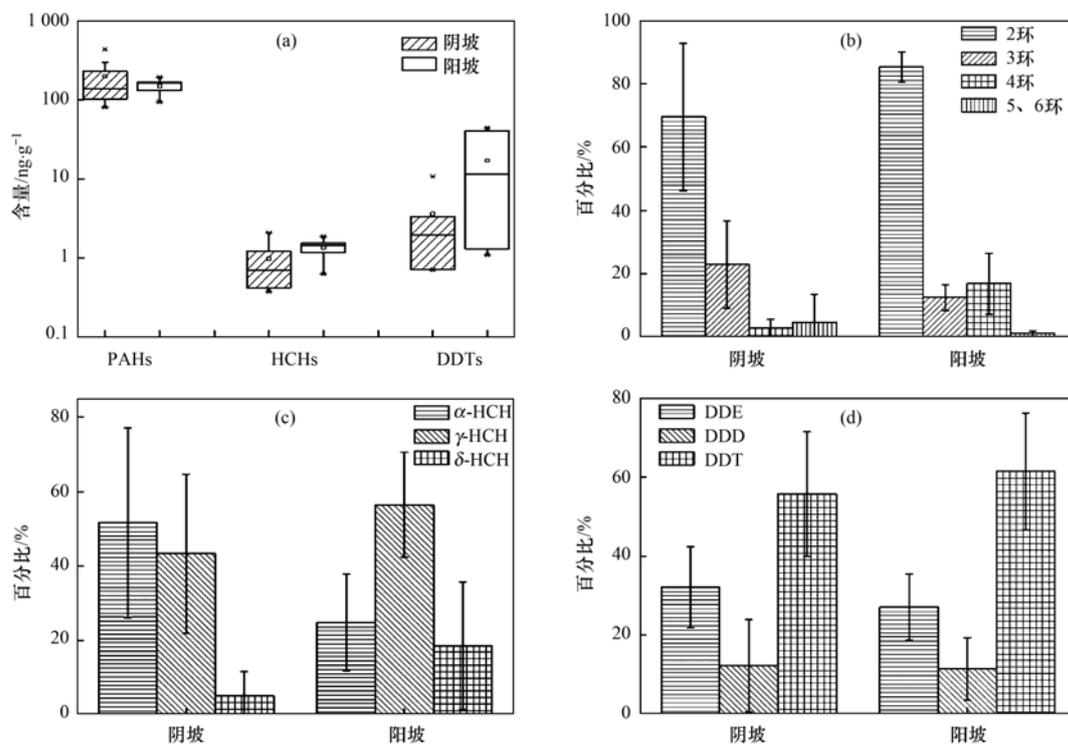
壤含量,而与藏东南<sup>[14]</sup>土壤含量相当.  $\sum_4$  DDT (*o,p'*-DDT、*p,p'*-DDT、*p,p'*-DDD、*p,p'*-DDE)的含量范围为 0.64 ~ 41.6 ng·g<sup>-1</sup> (平均值位 9.18 ng·g<sup>-1</sup>),高于卧龙自然保护区<sup>[20]</sup>及欧洲比利牛斯山<sup>[22]</sup>土壤含量,与欧洲塔特拉山脉<sup>[22]</sup>及泰德峰<sup>[23]</sup>土壤含量相似.

## 2.2 对比色季拉山阴坡和阳坡 PAHs 和 OCPs 的组成及空间分布特征

从图 2(b)可以看出色季拉山阴坡和阳坡土壤  $\sum_{16}$  PAH 中 2 环和 3 环化合物占总重量的 85% 以上,而大分子量的 5 环和 6 环化合物所占比例很小(小于 5%),表明挥发性强的 PAHs 更易通过大气远距离传输迁移至偏远地区. 图 3(a)和 3(b)分别为色季拉山阴坡和阳坡  $\sum_{15}$  PAHs 的含量分布,可以看出在阴坡 YI-5 ~ 8 和阳坡 YA-4 ~ 7 土壤  $\sum_{15}$  PAHs 的分布趋势较一致,且均在 YI-6 和 YA-5 出现较大的 4 环化合物. 但是阴坡  $\sum_{15}$  PAH 主要以 3 环化合物为主,4 环化合物含量很小(除 YI-6 点),YI-6 处高含量的 4 环化合物主要来源于蕈的贡献,而阳坡  $\sum_{15}$  PAHs 不仅含有大量 3 环化合物,

也含有大量的 4 环化合物, YA-5 处高含量的 4 环化合物主要来源于蕈,且阴坡 5 ~ 6 环 PAHs 的百分含量高于阳坡,说明阴坡和阳坡 PAHs 可能具有不同的污染来源,也可能是阳坡温度较高较低质量的 PAHs 挥发所致.

色季拉山阴坡和阳坡土壤 HCHs 的主要单体是  $\alpha$ -HCH 和  $\gamma$ -HCH,  $\beta$ -HCH 和  $\delta$ -HCH 的含量较低,这一结果和 Zhu 等<sup>[31]</sup>关于色季拉山大气 HCHs 的研究结果一致,但阳坡土壤 HCHs 的含量高于阴坡,如图 2(a)所示. 从图 2(c)可以看出,色季拉山阴坡和阳坡土壤中 HCHs 的组分存在差异,虽然阴坡和阳坡均以  $\alpha$ -HCH 和  $\gamma$ -HCH 为主,但是阴坡中  $\alpha$ -HCH 的百分含量稍高于  $\gamma$ -HCH 的含量,而阳坡中  $\gamma$ -HCH 的百分含量远高于  $\alpha$ -HCH 的含量. 图 3(c)和 3(d)为阴坡和阳坡 HCHs 的空间分布图,从中可以看出,阴坡 HCHs 的最大值出现在 YI-5 处,该点两侧采样点 HCHs 的含量逐渐降低,且 YI-1 和 2 两点  $\gamma$ -HCH 相对于  $\alpha$ -HCH 的含量显著低于阴坡其他采样点,说明阴坡 YI-1 ~ 2 采样点 HCHs 来源可能不同于 YI-3 ~ 8; 阳坡 HCHs 的最大含量在 YA-2,且  $\alpha$ -HCH 与  $\gamma$ -HCH 的含量和沿着 YA-2 ~ 7 一直在降低, $\alpha$ -HCH 与  $\gamma$ -HCH 含量比沿着 YA7 ~ 1 增大,这可能是因为



2 环 PAHs: 萘; 3 环 PAHs: 苊烯、苊、芴、菲、蒽; 4 环 PAHs: 荧蒹、芘、苯并(a)蒽、䈷; 5 环 PAHs: 苯并(b)荧蒹、苯并(k)荧蒹、苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽; 6 环 PAHs: 茚并(1,2,3-cd)芘和苯并(ghi)芘,下同

图 2 色季拉山土壤阴坡和阳坡 PAHs 和 OCPs 的含量及单体百分比特征

Fig. 2 Concentrations and composition of PAHs and OCPs in soils from shade and south-facing slopes of Shergyla Mountain

YA-7 附近有  $\gamma$ -HCH 的污染源,或者是高海拔 YA-1 长时间残留的  $\gamma$ -HCH 转化为了  $\alpha$ -HCH,亦或者是  $\gamma$ -HCH 在光照的作用下降解了. 综上可知,色季拉山阴坡和阳坡 HCHs 的来源可能存在差异,同时光照也可能影响 HCHs 的组分.

研究区域色季拉山阴坡和阳坡土壤 DDTs 的主要单体为 *o,p'*-DDT、*p,p'*-DDT、*p,p'*-DDE,且阴坡和阳坡 DDTs 的组成较一致,其中 DDT 的百分比含量最高,DDE 次之,DDD 的百分比含量最低,如图 2 (d) 所示,但色季拉山阳坡土壤 DDTs 的含量明显高于阴坡土壤含量,如图 2(a) 所示. 图 3(e) 和 3(f) 是阴坡和阳坡 DDTs 的空间分布,从中可以看出阴坡 DDTs 和阳坡 DDTs 的空间分布完全不同,阴坡 DDTs 的最大含量值出现在 YI-6 处,DDTs 的含量沿着 YI-8 ~ 1 先增大后降低;而阳坡 DDTs 的最大值

出现在 YA-2 处,DDTs 的含量沿着 YA-7 ~ 2 增大,可能是地形或者污染源影响了 DDTs 在色季拉山阴坡和阳坡的分布.

### 2.3 PAHs 和 OCPs 随 TOC 及海拔的梯度变化

POPs 具有亲脂性,且众多的研究论述了 TOC 可以影响 POPs 的分布<sup>[32]</sup>. 表 1 显示研究区域 TOC 的含量为 3.6% ~ 12.36%,其中阴坡土壤 TOC 含量为  $7.71\% \pm 1.71\%$ ,阳坡土壤 TOC 含量为  $7.56\% \pm 3.10\%$ . 图 4 为色季拉山阴坡和阳坡 POPs 与 TOC 的线性回归分析,显示阴坡土壤 POPs 含量和 TOC 含量在  $P < 0.05$  的水平上无显著相关性(6 环 PAHs 除外),而阳坡土壤 OCPs 和 5、6 环 PAHs 的含量与 TOC 的含量在  $P < 0.05$  的水平上显著相关.

目前各国研究者已经在全球偏远地区检测到了 POPs 的存在<sup>[1, 33 ~ 38]</sup>. Blais 等<sup>[39]</sup>对加拿大西部落基

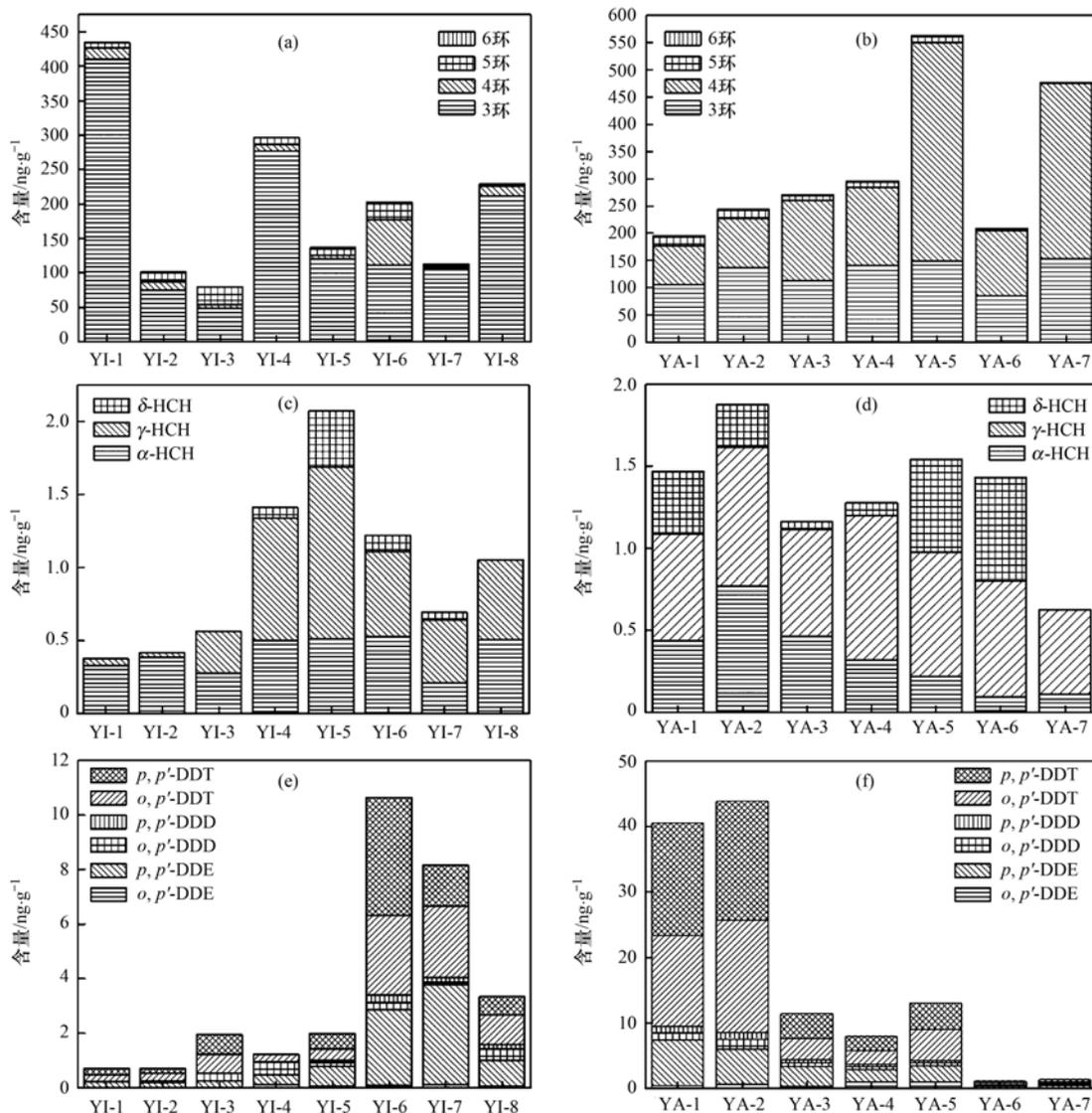


图 3 色季拉山阴坡和阳坡土壤中污染物的含量分布及组成

Fig. 3 Concentrations and components of PAHs and OCPs in shade slope and south-facing slope soils of Shergyla Mountain

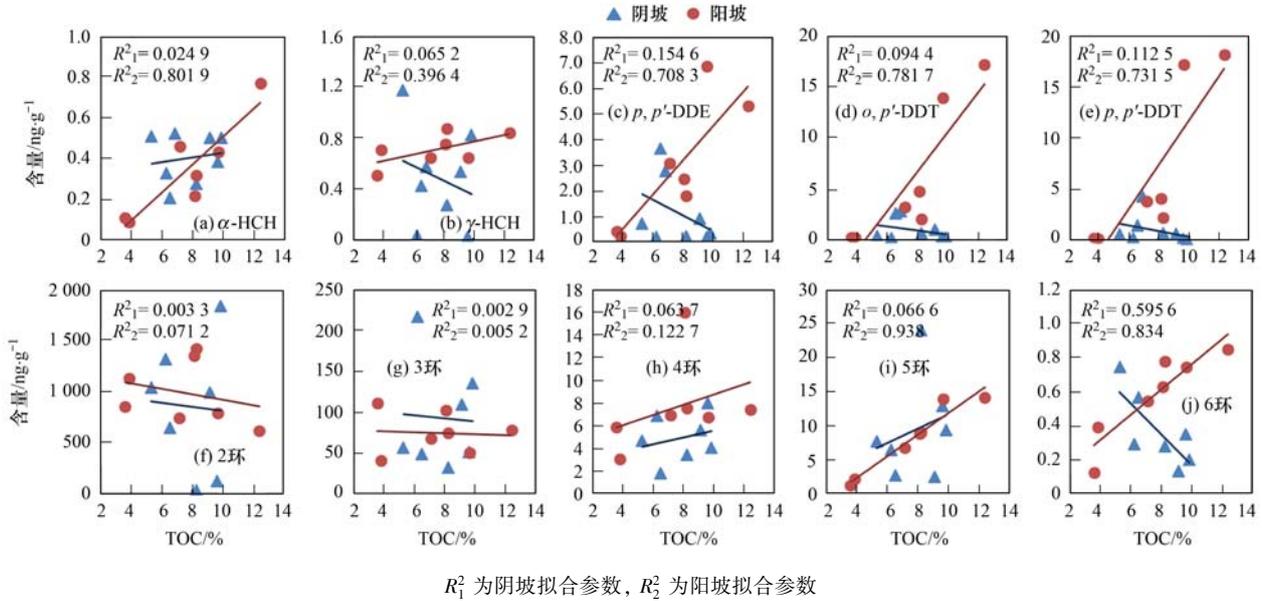


图4 阴坡和阳坡 OCPs 和 PAHs 与 TOC 的相关性

Fig. 4 Correlation between the concentrations of OCPs and PAHs in shade slope and south-facing slope soils and TOC of sampling sites

山脉雪样 POPs 的研究论证了“高山冷捕获效应”的存在,随后的众多研究<sup>[40-46]</sup>证实 POPs 具有“逆海拔”<sup>[7]</sup>分布现象. 且众多研究发现高山独特的季风环境<sup>[2, 47]</sup>、森林覆盖<sup>[48]</sup>、雾和降雨、地形<sup>[41]</sup>等都有可能影响 POPs 在高山中的分布特征.

图5为色季拉山阴坡和阳坡 POPs (TOC 校正)与海拔的线性回归分析. 从中可以看出,阳坡土壤 α-HCH 和 DDTs 类化合物含量随着海拔的升高而升高,并且与海拔在  $P < 0.05$  的水平上呈显著相关性,而阳坡土壤 γ-HCH 的含量随海拔升高而降低,这可能是环境中的 γ-HCH 在光的作用下较容易降

解<sup>[49]</sup>或者长时间残留的 γ-HCH 转化为了 α-HCH 所致;而阴坡土壤 HCHs 和 DDTs 的含量随着海拔的升高含量降低,并且 HCHs 和 DDTs 与海拔并无显著相关性,色季拉山阴坡和阳坡 OCPs 随海拔的这种不同分布可能是由于阴坡和阳坡的地形或污染物来源不同. 色季拉山阴坡和阳坡土壤 PAHs 随海拔的变化均差异较大. 阳坡低质量的 PAHs (2 和 3 环)随着海拔的升高含量降低,高质量的 PAHs (5 和 6 环)随海拔的升高含量升高,并且 5 环 PAHs 与海拔在  $P < 0.05$  的水平上显著相关. 阴坡土壤中 4 和 5 环 PAHs 随着海拔的升高而升高,但相关性不显

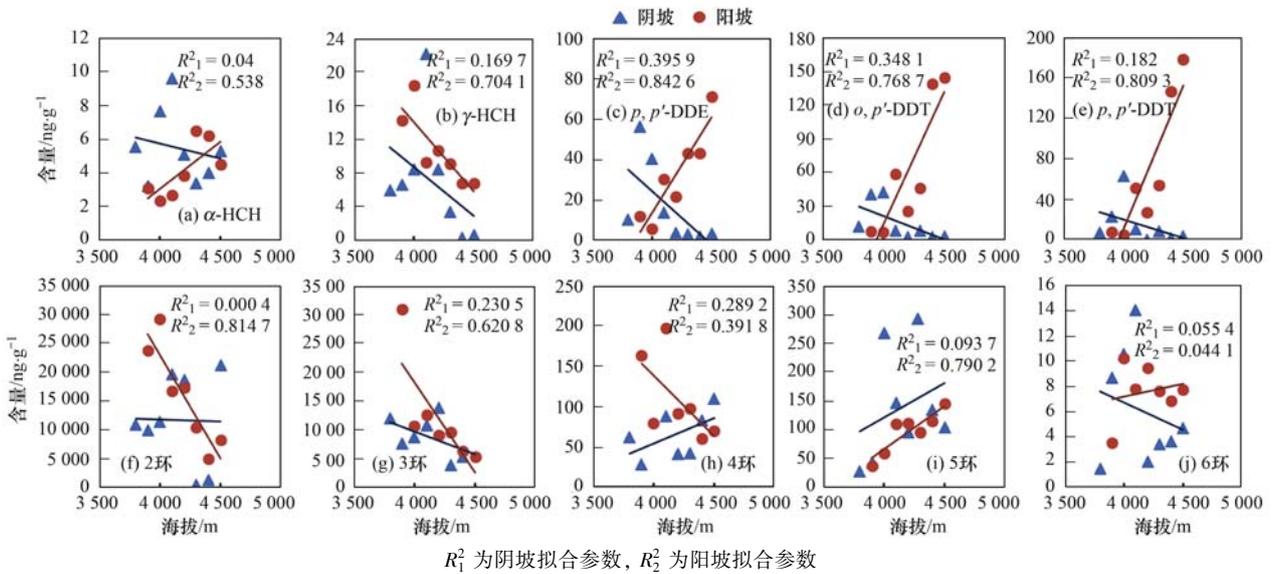


图5 阴坡和阳坡 OCPs 和 PAHs 随海拔的分布

Fig. 5 Distribution pattern of OCPs and PAHs in shade slope and south-facing slope soils with altitude of sampling sites

著,其余化合物[苯并(k)荧蒽和苯并(a)芘除外]随着海拔稍有降低.值得注意的是强致癌化合物苯并(a)芘(BaP)含量在色季拉山阴坡和阳坡均随着海拔的升高而升高.

综上所述,TOC 和海拔在一定程度上可以影响色季拉山阴坡和阳坡 POPs 的分布,同时污染源、地形及光照等影响因子对污染物分布的影响不可忽略.

2.4 来源解析

POP 的特征单体比值一定程度上可以指示 POP 的来源、使用历史或环境行为. PAHs 的主要来源是化石燃料、生物质燃烧等的不完全燃烧. 燃料种类的不同和燃烧条件的差异包括燃烧温度、氧气含量和通风条件等都会造成不同 PAHs 组成特征. 因此,PAHs 的组成特征可以用来识别 PAHs 的来源. 此外,特定燃料燃烧产生特定的 PAHs 比值,PAHs 比值是鉴定 PAHs 来源快捷而有效的途径.

有研究指出 FLT 相对于 PYR 稳定,当 FLT/PYR 大于 1 指示燃烧来源,当 FLT/PYR 小于 1 指示石油残留来源<sup>[50]</sup>. 阳坡各采样点 FLT/PYR 的值均大于 1,说明阳坡 PAHs 主要来源于燃烧. 阴坡采样点 YI-2 和 YI-6 的 FLT/PYR 小于 1,可能是受到了石油残留的影响,阴坡其余各采样点 FLT/PYR 均大

于 1. Yunker 等<sup>[51]</sup>总结出了 PAHs 的 3 类来源以及相应临界比值. 天然石油源: [FLT/(FLT + PYR) < 0.4, IcdP/(IcdP + BghiP) < 0.2]; 石油燃烧源: [FLT/(FLT + PYR) 0.4 ~ 0.5, IcdP/(IcdP + BghiP) 0.2 ~ 0.5]; 生物质燃烧源(草、木材、煤): [FLT/(FLT + PYR) > 0.5, IcdP/(IcdP + BghiP) > 0.5], 如图 6(d) 所示,可以推断研究区域阳坡和阴坡大部分采样点 PAHs 主要来源于生物质和石油的不完全燃烧,但是阴坡少数采样点则有石油源的影响.

有机氯农药特征单体的比值通常用来区分农药的输入种类和输入时间等信息. 工业品 HCHs 中 4 种单体所占比例分别为  $\alpha$ -HCH (60% ~ 70%),  $\beta$ -HCH (5% ~ 12%),  $\gamma$ -HCH (10% ~ 15%),  $\delta$ -HCH (6% ~ 10%),  $\alpha/\gamma$ -HCH 的比值介于 5 ~ 7 之间<sup>[25, 52, 53]</sup>. 由于其对生态环境以及人类健康所产生的负面影响,工业 HCHs 陆续被各国禁止使用. 随后, $\gamma$ -HCH 含量高达 99% 以上的林丹<sup>[53]</sup>代替工业 HCHs 在农业中大量使用,因此环境中  $\alpha/\gamma$ -HCH 值能较好地反映 HCHs 的来源情况. 一般来说,当  $\alpha/\gamma$ -HCH 的比值小于 3 时表示有大量林丹的使用. 本研究色季拉山阴坡和阳坡土壤中,除阴坡高海拔处的两个点外, $\alpha/\gamma$ -HCH 的比值均明显小于 3,如图 6(a) 所示,说明阴坡和阳坡 HCHs 的来源的确存在

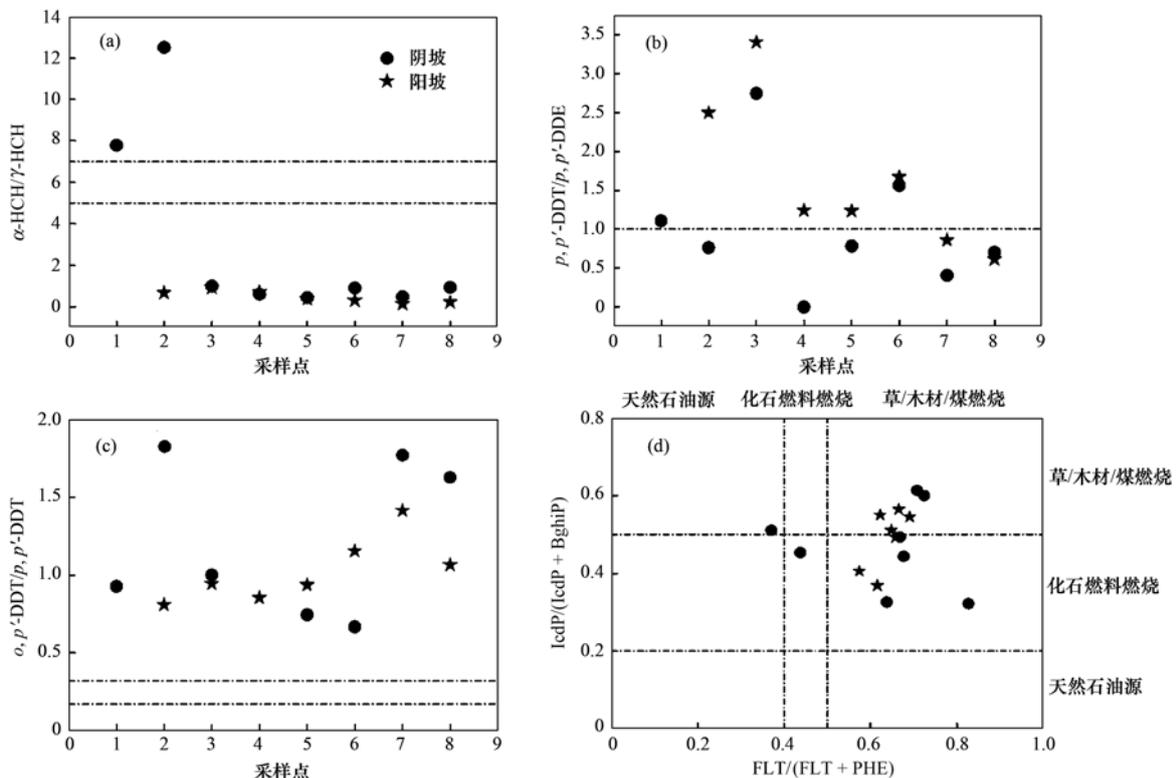


图 6 HCHs、DDTs 和 PAHs 的特征单体比值

Fig. 6 Special diagnostic ratios of HCH, DDTs and PAHs in the sampling site

差异,且研究区域的 HCHs 主要来自于历史上工业品 HCHs 和林丹大量使用,是二者的共同输入所致。

已有研究表明,DDT 会在环境中逐步降解为更稳定的 DDD(厌氧产物)和 DDE(有氧产物),利用 DDT 与其降解产物的比值可以反映 DDTs 排放在环境中的“新旧”,其中  $p,p'$ -DDT/ $p,p'$ -DDE 的比值小于 1,表示 DDTs 是历史使用源, $p,p'$ -DDT/ $p,p'$ -DDE 的比值大于 1,说明研究区域有 DDTs“新”源的输入。本研究中 DDT 主要通过有氧降解,降解为  $p,p'$ -DDE。如图 6(b)所示,色季拉山阳坡大部分采样点  $p,p'$ -DDT/ $p,p'$ -DDE 大于 1,说明阳坡 DDTs 受“新”源的影响,而阴坡大部分采样点  $p,p'$ -DDT/ $p,p'$ -DDE 小于 1,说明阴坡 DDTs 主要来源于“旧”源<sup>[25]</sup>。

尽管 DDTs 已经在大部分国家(包括中国)禁用多年,但 DDT 仍然作为三氯杀螨醇的媒介物进行生产,特别是 2002 年世界卫生组织准许 DDTs 在一些疟疾高发的热带国家(如印度等南亚国家)使用,以保障公共卫生健康。工业品 DDTs 中含有约 15%  $o,p'$ -DDT 和 85%  $p,p'$ -DDT(两者比值介于 0.17 ~ 0.23)<sup>[20, 54]</sup>,三氯杀螨醇中  $o,p'$ -DDT 的含量高于  $p,p'$ -DDT,两者比值约为 7<sup>[20]</sup>,而本研究中  $o,p'$ -DDT/ $p,p'$ -DDT 的比值远高于工业品 DDTs 中的 0.23,如图 6(c),可推断研究区域有三氯杀螨醇的输入。综上可知研究区域 DDTs 是历史工业品 DDTs 和三氯杀螨醇共同贡献的结果。

PAHs 中 2 ~ 3 环低质量的化合物为主要成分,且研究区域三氯杀螨醇及“新”DDTs 的存在,说明研究区域有 POPs 类污染物的输入,而且很可能是大气远距离源的输入。青藏高原气候呈季节性变化,夏季受印度季风的影响(6 ~ 9 月),冬季则受控于西风环流(11 月 ~ 次年 3 月),气候呈明显的暖湿季和干冷季。本研究区域色季拉山位于藏东南,受显著的印度季风影响,降雨丰富,森林繁茂。而印度次大陆在历史上曾大量地生产与使用 OCPs,至今为了防止疟疾仍有使用<sup>[55]</sup>,并且印度次大陆正在快速城镇化与工业化,PAHs 等以工业产品或者副产品大量释放在了环境中。这些在印度次大陆环境中存在的高含量的 HCHs、DDTs 和 PAHs 等污染物会随着印度季风迁移传输至研究区域,并在低温的研究区域沉降富集。

### 3 结论

本研究通过分析青藏高原色季拉山阴坡和阳坡

土壤中多环芳烃和有机氯农药的污染水平,发现藏东南色季拉山 PAHs 和 OCPs 污染较严重。通过对比阴坡和阳坡 PAHs、HCHs 和 DDTs 的组成和空间分布,发现色季拉山阴坡和阳坡 PAHs、HCHs 和 DDTs 的污染源存在差异,且 TOC、海拔及地形影响 PAHs 和 OCPs 在空间上的分布。污染源解析进一步证实阴坡和阳坡存在污染源的差异,且通过特征单体比值分析,发现研究区域 PAHs 主要来自于生物质和化石燃料的不完全燃烧;OCPs 除受历史使用工业品 HCHs 和 DDTs 的影响外,还存在林丹、三氯杀螨醇等农药产品的贡献。最后结合当地的气候条件和污染物的单体特征,可知研究区域的污染物主要来自印度季风从印度次大陆的大气远距离输送。

### 参考文献:

- [1] Wang X P, Yao T D, Cong Z Y, *et al.* Gradient distribution of persistent organic contaminants along northern slope of central-Himalayas, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **372**(1): 193-202.
- [2] Gong P, Wang X P, Sheng J J, *et al.* Variations of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in atmosphere of the Tibetan Plateau: role of the monsoon system [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44** (21-22): 2518-2523.
- [3] Abakumov E V, Lodygin E D, Gabov D A, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons content in Antarctica soils as exemplified by the Russian polar stations [J]. *Gigiena I Sanitariia*, 2014, (1): 31-35.
- [4] Xiao H, Shen L, Su Y S, *et al.* Atmospheric concentrations of halogenated flame retardants at two remote locations: the Canadian high Arctic and the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **161**: 154-161.
- [5] Becker S, Halsall C J, Tych W, *et al.* Changing sources and environmental factors reduce the rates of decline of organochlorine pesticides in the Arctic atmosphere [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(9): 4033-4044.
- [6] Castro-Jiménez J, Berrojalbiz N, Pizarro M, *et al.* Organophosphate ester (OPE) flame retardants and plasticizers in the open Mediterranean and Black Seas atmosphere [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48** (6): 3203-3209.
- [7] Weiss P, Lorbeer G, Scharf S. Persistent organic pollutants in remote Austrian forests: altitude-related results [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 1998, (S1): 46-52.
- [8] Zhu Y D, Yang Y Y, Liu M X, *et al.* Concentration, distribution, source, and risk assessment of PAHs and heavy metals in surface water from the Three Gorges reservoir, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2015, **21** (6): 1593-1607.
- [9] Ma W L, Qi H, Baidron S, *et al.* Implications for long-range

- atmospheric transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in Lhasa, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(8): 5525-5533.
- [10] Molnar P, England P, Martinod J. Mantle dynamics, uplift of the tibetan plateau, and the indian monsoon [J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, **31**(4): 357-396.
- [11] He Q S, Zhang G X, Yan Y L, *et al.* Effect of input pathways and altitudes on spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in background soils, the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(14): 10890-10901.
- [12] Yuan G L, Wu L J, Sun Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of the central Tibetan Plateau, China: distribution, sources, transport and contribution in global cycling [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **203**: 137-144.
- [13] Tao S, Wang W T, Liu W X, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in surface soils from the Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, **13**(1): 175-181.
- [14] Yang R Q, Zhang S J, Li A, *et al.* Altitudinal and spatial signature of persistent organic pollutants in soil, lichen, conifer needles, and bark of the southeast Tibetan Plateau: implications for Sources and Environmental Cycling [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(22): 12736-12743.
- [15] Zhao X G, Kim S K, Zhu W H, *et al.* Long-range atmospheric transport and the distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in Changbai Mountain [J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 289-294.
- [16] Shi B F, Wu Q L, Ouyang H X, *et al.* Distribution and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils and leaves from high-altitude mountains in southwestern China [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, **43**(6): 1942-1952.
- [17] Choi S D, Shunthirasingham C, Daly G L, *et al.* Levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in Canadian mountain air and soil are controlled by proximity to roads [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(12): 3199-3206.
- [18] Weiss P, Lorbeer G, Scharf S. Regional aspects and statistical characterisation of the load with semivolatile organic compounds at remote Austrian forest sites [J]. *Chemosphere*, 2000, **40**(9-11): 1159-1171.
- [19] 谢婷, 张淑娟, 杨瑞强. 青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2680-2690.
- [20] Zheng X Y, Liu X D, Liu W J, *et al.* Concentrations and source identification of organochlorine pesticides (OCPs) in soils from Wolong Natural Reserve [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(5): 743-751.
- [21] Wang X P, Yao T D, Cong Z Y, *et al.* Distribution of persistent organic pollutants in soil and grasses around Mt. Qomolangma, China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, **52**(2): 153-162.
- [22] Grimalt J O, van Drooge B L, Ribes A, *et al.* Persistent organochlorine compounds in soils and sediments of European high altitude mountain lakes [J]. *Chemosphere*, 2004, **54**(10): 1549-1561.
- [23] Ribes A, Grimalt J O, García C J T, *et al.* Temperature and organic matter dependence of the distribution of organochlorine compounds in mountain soils from the subtropical Atlantic (Teide, Tenerife Island) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(9): 1879-1885.
- [24] Tremolada P, Villa S, Bazzarin P, *et al.* POPs in mountain soils from the Alps and Andes; suggestions for a 'precipitation effect' on altitudinal gradients [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2008, **188**(1-4): 93-109.
- [25] Xing X L, Qi S H, Zhang Y, *et al.* Organochlorine pesticides (OCPs) in soils along the eastern slope of the Tibetan Plateau [J]. *Pedosphere*, 2010, **20**(5): 607-615.
- [26] Daly G L, Lei Y D, Teixeira C, *et al.* Pesticides in western Canadian mountain air and soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(17): 6020-6025.
- [27] Wang S, Ni H G, Sun J L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from the Tibetan Plateau, China: distribution and influence of environmental factors [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013, **15**(3): 661-667.
- [28] Grimalt J O, van Drooge B L, Ribes A, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon composition in soils and sediments of high altitude lakes [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **131**(1): 13-24.
- [29] Migaszewski Z M. Determining organic compound ratios in soils and vegetation of the Holy Cross Mts, Poland [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, **111**(1-4): 123-138.
- [30] Tremolada P, Parolini M, Binelli A, *et al.* Seasonal changes and temperature-dependent accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in high-altitude soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(14): 4269-4277.
- [31] Zhu N L, Schramm K W, Wang T, *et al.* Environmental fate and behavior of persistent organic pollutants in Shergyla Mountain, southeast of the Tibetan Plateau of China [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **191**: 166-174.
- [32] Zheng X Y, Liu X D, Jiang G B, *et al.* Distribution of PCBs and PBDEs in soils along the altitudinal gradients of Balang Mountain, the east edge of the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **161**: 101-106.
- [33] Daly G L, Wania F. Organic contaminants in mountains [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(2): 385-398.
- [34] Yuan G L, Qin J X, Li J, *et al.* Persistent organic pollutants in soil near the Changwengluozha glacier of the Central Tibetan Plateau, China: their sorption to clays and implication [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **472**: 309-315.
- [35] Wang X P, Gong P, Zhang Q G, *et al.* Impact of climate fluctuations on deposition of DDT and hexachlorocyclohexane in mountain glaciers: evidence from ice core records [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(2): 375-380.

- [36] Holma-Suutari A, Ruokojärvi P, Laaksonen S, *et al.* Persistent organic pollutant levels in semi-domesticated reindeer (*Rangifer tarandus* L.), feed, lichen, blood, milk, placenta, foetus and calf [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **476-477**: 125-135.
- [37] Lohmann R, Belkin I M. Organic pollutants and ocean fronts across the Atlantic Ocean: a review [J]. *Progress in Oceanography*, 2014, **128**: 172-184.
- [38] Messing P G, Farenhorst A, Waite D T, *et al.* Air concentrations of currently used herbicides and legacy compounds in the Canadian prairies, subarctic, and arctic [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 2014, **49**(5): 338-343.
- [39] Blais J M, Schindler D W, Muir D C G, *et al.* Accumulation of persistent organochlorine compounds in mountains of western Canada [J]. *Nature*, 1998, **395**(6702): 585-588.
- [40] Shen L, Wania F, Lei Y D, *et al.* Hexachlorocyclohexanes in the north American atmosphere [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(4): 965-975.
- [41] Lavin K S, Hageman K J. Contributions of long-range and regional atmospheric transport on pesticide concentrations along a transect crossing a mountain divide [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(3): 1390-1398.
- [42] Shunthirasingham C, Wania F, MacLeod M, *et al.* Mountain cold-trapping increases transfer of persistent organic pollutants from atmosphere to cows' milk [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(16): 9175-9181.
- [43] Grimalt J O, Fernandez P, Berdie L, *et al.* Selective trapping of organochlorine compounds in mountain lakes of temperate areas [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(13): 2690-2697.
- [44] Gong P, Wang X P, Li S H, *et al.* Atmospheric transport and accumulation of organochlorine compounds on the southern slopes of the Himalayas, Nepal [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **192**: 44-51.
- [45] Aston L S, Seiber J N. Fate of summertime airborne organophosphate pesticide residues in the Sierra Nevada mountains [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, **26**(6): 1483-1492.
- [46] Villa S, Vighi M, Maggi V, *et al.* Historical trends of organochlorine pesticides in an Alpine glacier [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2003, **46**(3): 295-311.
- [47] Fernández-González R, Yebra-Pimentel I, Martínez-Carballo E, *et al.* Atmospheric pollutants in fog and rain events at the northwestern mountains of the Iberian Peninsula [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **497-498**: 188-199.
- [48] Liu X, Li J, Zheng Q, *et al.* Forest filter effect versus cold trapping effect on the altitudinal distribution of pcbs: a case study of Mt. Gongga, eastern Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(24): 14377-14385.
- [49] Sheng J J, Wang X P, Gong P, *et al.* Monsoon-driven transport of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls to the Tibetan Plateau: three year atmospheric monitoring study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(7): 3199-3208.
- [50] Sicre M A, Marty J C, Saliot A, *et al.* Aliphatic and aromatic hydrocarbons in different sized aerosols over the mediterranean sea: occurrence and origin [J]. *Atmospheric Environment*, 1987, **21**(10): 2247-2259.
- [51] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(4): 489-515.
- [52] Iwata H, Tanabe S, Ueda K, *et al.* Persistent organochlorine residues in air, water, sediments, and soils from the lake baikal region, Russia [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, **29**(3): 792-801.
- [53] Niu L L, Xu C, Xu Y, *et al.* Hexachlorocyclohexanes in tree bark across Chinese agricultural regions: spatial distribution and enantiomeric signatures [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(20): 12031-12038.
- [54] Xu Y, Zhang G, Li J, *et al.* Long-range atmospheric transport of persistent organochlorinated compounds from south and mainland south-eastern Asia to a remote mountain site in south-western China [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, **13**(11): 3119-3127.
- [55] Yadav I C, Devi N L, Syed J H, *et al.* Current status of persistent organic pesticides residues in air, water, and soil, and their possible effect on neighboring countries: a comprehensive review of India [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **511**: 123-137.

## CONTENTS

Concentration Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in Beijing During Two Red Alert Periods .....	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM <sub>2.5</sub> Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing .....	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollution Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City .....	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM <sub>2.5</sub> from the Northern Suburb of Nanjing in Winter .....	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea .....	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang .....	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing .....	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors .....	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing .....	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO <sub>2</sub> Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China .....	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China .....	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing .....	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period .....	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River .....	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River .....	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin .....	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms .....	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes .....	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands .....	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine .....	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation .....	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes .....	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode .....	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process .....	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation .....	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process .....	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water .....	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing .....	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter .....	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation .....	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics .....	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX <sub>2</sub> from Sea Water .....	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater .....	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges .....	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA) .....	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions .....	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N <sub>2</sub> O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N <sub>2</sub> O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments .....	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter .....	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau .....	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China .....	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir .....	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field .....	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil .....	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil .....	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism .....	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH <sub>3</sub> .....	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行