

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

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

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例	李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较:以夏玉米季为例	范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例	
吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例	项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例	王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)
甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖晋翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)
不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)
《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)	

青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量的观测

吴建国, 周巧富

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 以静态箱采集气体和气相色谱分析气体浓度方法, 测定分析了青海南部高原积雪期和生长季高寒草甸土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量。结果表明在积雪集中期的 3 月 3 日和 4 日, 积雪深度为 9~10 cm 时, 土壤 CO₂ 通量为 1.33 g·(m²·h)⁻¹、N₂O 通量为 0.21 mg·(m²·h)⁻¹、CH₄ 通量为 -0.19 mg·(m²·h)⁻¹; 在积雪末期的 4 月 30 日, 积雪深度在 8~9 cm 时, 土壤 CO₂ 通量为 4.70 g·(m²·h)⁻¹、N₂O 通量为 0.24 mg·(m²·h)⁻¹、CH₄ 通量为 -1.23 mg·(m²·h)⁻¹; 积雪深度小于 4 cm 时, 土壤 CO₂ 和 N₂O 通量较低或为负值, 土壤 CH₄ 通量为负值且绝对值较小。土壤 CO₂ 和 N₂O 通量与积雪深度呈正相关、土壤 CH₄ 通量与积雪深度呈负相关 ($P < 0.05$), 土壤 CO₂ 与 CH₄ 通量及 CH₄ 与 N₂O 通量间呈负相关、土壤 CO₂ 与 N₂O 通量间呈正相关。土壤 CO₂ 和 N₂O 通量在生长季较高、在积雪末期其次、在积雪集中期较低; 土壤 CH₄ 通量为负值, 其绝对值在生长季和积雪末期较大。结果说明积雪改变将影响青藏高原高寒草甸土壤温室气体通量。

关键词: 积雪; 土壤温室气体; 通量; 气候变化; 高寒草甸; 青藏高原

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2914-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.08.012

Soil CO₂, CH₄ and N₂O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons

WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu

(Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: To understand the fluxes of soil greenhouse gases from Alpine meadows on the Qinghai-Tibet plateau during non-growing season, a static chamber method was used to sample gases of soil CO₂, CH₄ and N₂O from alpine meadow on the plateau of Southern Qinghai province during snow cover period, and gas chromatography was used to analyze concentrations of these gases. The results showed that soil CO₂ flux was 1.33 g·(m²·h)⁻¹, soil CH₄ flux was -0.19 mg·(m²·h)⁻¹, and soil N₂O flux was 0.21 mg·(m²·h)⁻¹ when the snow depth was 9-10 cm on March 3 and 4 during the prevalence period of snow cover; soil CO₂ flux was 4.70 g·(m²·h)⁻¹, and soil N₂O flux was 0.24 mg·(m²·h)⁻¹, and soil CH₄ flux was -1.23 mg·(m²·h)⁻¹ when the snow depth was 8-9 cm on April 30 during the end period of snow cover. And soil CO₂ and N₂O fluxes were low or negative, soil CH₄ flux was negative and its absolute value was low when the snow depth was less than 4 cm during snow cover period. In addition, soil CO₂ or N₂O flux was positively correlated with the snow depth, and soil CH₄ flux was negatively correlated with the snow depth ($P < 0.05$). Additionally, soil CO₂ or N₂O flux was negatively correlated with CH₄ fluxes, and soil CO₂ was positively correlated with soil N₂O flux. In addition, soil CO₂ flux was the highest during the growing season, followed by the end period of snow cover, and it was the lowest during the prevalence period of snow cover; soil N₂O flux was high during the growing season, followed by the end period of snow cover, and it was the lowest during the prevalence period of snow cover; soil CH₄ flux was negative, and its absolute value was higher during the growing season than other seasons, and it was the lowest during the prevalence period of snow cover. The results suggested that the change in snow cover would influence the fluxes of soil greenhouse gases from alpine meadow on the Qinghai-Tibet plateau.

Key words: snow cover; soil greenhouse gases; flux; climate change; alpine meadow; Qinghai-Tibet Plateau

准确确定土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量及其影响因素, 是科学认识气候变化对陆地生态系统温室气体源/汇功能影响的关键。在高海拔地区, 生态系统温室气体通量季节差异明显, 生长季生物活动强烈, 被认为温室气体排放的主要时段, 非生长季生物活动较弱, 被认为是温室气体排放弱及忽略的时段^[1]。然而, 在中高纬度和高海拔地区却观测到积雪覆盖下土壤 CO₂ 排放量占全年 15%~50%^[2]、占夏季碳积累量的 25%~90%^[3], 并且积雪减少后

土壤冻结使生长季土壤碳分解速率降低^[4]、减少约占全年的 63%^[5], 使生长季积累的碳在非生长季被排放。同时, 在非生长季节也观测到积雪覆盖土壤中 CH₄ 和 N₂O 通量明显^[6]。其原因, 目前认为与积

收稿日期: 2015-12-04; 修订日期: 2016-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173085); 国家科技支撑计划项目(2012BAC19B06)

作者简介: 吴建国(1971~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为温室气体监测和气候变化影响与适应, E-mail: wujg@cras.org.cn

雪覆盖土壤中水热要素、微生物属性和有机质分解有关^[7]。事实上,南北半球高海拔区域在非生长季有大片土地被积雪所覆盖,一些区域无雪期仅有 2~3 个月,低纬度积雪期虽短但却能融化和再生多次,仅北半球就约有 40% 生态系统受积雪影响^[8],这些积雪的分布、厚度和持续期影响着土壤温度、冻融、有机质分解和微生物活性^[7],成为非生长季影响土壤温室气体排放的重要因素。气候变化将使高海拔和中高纬度地区非生长季缩短、永久性和不稳定积雪厚度、融雪期和冻融改变,进而将使陆地生态系统温室气体源/汇功能改变^[9]。因此,在分析高海拔地区生态系统温室气体排放对气候变化响应中,非生长季土壤温室气体通量及其对积雪变化响应无疑是不容忽视的重要内容。

在国际上,对积雪变化下高海拔地区森林、草地和湿地土壤温室气体通量及其与积雪变化关系测定分析广泛展开^[6,10,11],这些研究还集中在高纬度地区,对其它地区的观测分析还不充分。在我国,对森林、草地^[12~14]、农田和湿地土壤温室气体通量及其环境关系也开展了许多观测分析^[15],但还主要集中在生长季温室气体通量测定,对积雪期土壤温室气体通量观测研究还不多^[16]。

青藏高原是积雪分布集中区域,高寒草甸是广泛分布的生态系统。在这些地区,积雪是影响高寒草甸生态系统功能的重要因素。虽然对高寒草甸土壤温室气体通量已有过研究报道^[17,18],但就积雪及非生长季土壤温室气体通量的观测研究还不多。为此,本研究选择青海南部高原的高寒草甸,测定分析积雪集中期、积雪末期和生长季土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量特征,以期为进一步认识高海拔地区非生长季土壤温室气体的排放规律提供一定的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

2011 年在青海省玉树的巴塘草原附近,选择典型的高寒草甸(嵩草属等为优势种)生态系统为研究对象,在地势平坦的地段设立研究区(32°50.638'N, 97°03.844'E)。研究区海拔在 3 900~4 200 m,大气压为 63.22 kPa,平均气温约 2℃,年降水量约 407.1 mm,最大风速 20.1 m·s⁻¹;积雪期一般有 3~5 个月,主要集中在 2~5 月初。植被主要由高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、玉树嵩草(*Kobresia yushuensis*)、高山早熟禾(*Poa alpine*)、黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、甘肃马先蒿(*Pedicularis*

kansuensis)和垂穗鹅冠草(*Roegneria nutans*)等组成。土壤为高寒草甸土,土层厚度在 40~60 cm,土壤有机碳含量在 20~60 g·kg⁻¹、全氮含量在 2~5 g·kg⁻¹。

1.2 积雪与其它环境因子观测

在 2011 年 12 月,建立雪栅栏(高 1.5 m,长 20 m),在雪墙背风向设立 5 个梯度,即离墙 0、5、10、15 和 20 m 处布设样方(大小为 2 m×2 m),在观测样地内布设仪器,进行积雪和水热要素观测,地表温度、薄雪下温度用地温计测定、箱内温度用气温计测定、厚的积雪下温度用 TM222 型便携式数字温度计测定。利用 Dynamet 自动气象站监测气候要素,包括气温、降水、风速等;用测雪尺对积雪深度进行测定,积雪深度达 5 cm 以上时,用手提称雪器对积雪密度或雪压进行监测(5 cm 间隔),用 Snow Fork 积雪分析仪测定积雪的密度和液态水含量。

1.3 土壤温室气体采集和分析

根据气候数据记录,观测地在 3 月为积雪集中期(降雪日数多、积雪期长、积雪稳定、融化慢),在 4 月底为积雪末期(降雪日数少、积雪期短、融化快),5~9 月为生长季。为了比较积雪期和生长季土壤温室气体通量的差异,在 2012 年积雪集中期的 3 月、积雪减少期的 4 月和生长季的 7 月进行土壤温室气体采集分析。为了比较积雪集中期和积雪末期不同积雪深度下土壤温室气体通量的差异,在雪墙背侧按照厚(积雪深度 7 cm 以上)、中等厚(积雪深度 4~6 cm)、薄(积雪深度 4 cm 以下)、无积雪类型选择测定样方,由于积雪深度空间分布不均匀,在积雪集中期,积雪深度厚选择 3 个样方、积雪深度中等厚选择 6 个样方,其它积雪深度下和无积雪各选择 4 个样方;在积雪末期,无积雪选择 4 个样方,其它各选择 3 个样方。在积雪期,在阴面和半阴面积雪稳定,辐射强度相对弱,所以只在阴面和半阴面选择样方取样。在生长季,由于太阳辐射强、气温高,使采样箱上使箱内气温升高幅度大,所以在阴面和阳面各选择 4 个样方。

积雪集中期的 3 月 3 日上午降大雪,17:00~19:30 时在选择的样方内采集气体;3 月 4 日在 09:00~19:40 时在选择的样方内采集气体。积雪末期的 4 月 30 日在 10:00 时前降小雪,在 10:50~18:00 时在选择的样方内采集气体。在生长季的 7 月 27 日,由于中午到下午 17:00 时太阳辐射强,所以选择在 08:50~10:00 时在选择的样方内采样。为了减少不同积雪深度下采样时间差异对温室气体通量

造成的影响,在不同积雪深度样方内保持同步采样.

采集气体以静态箱方法,采集箱以不透光的有机玻璃做成(长×宽×高为40 cm×40 cm×40 cm,壁厚2 mm,装有把气体混匀的风扇、及采样的采气口).采集气样时,为了减少对积雪的破坏,把采集箱基座插进雪被到地面,与地面接触四周用土密封,以防止漏气.在安装好采集箱后的0、15、30、45和60 min用70 mL注射器在采集箱安装有三通阀的采气口进行气体采集,采集后立即注入大连化工厂生产的气体采样袋(100 mL).采集完第二天把样品从青海玉树经西宁空运到北京,送回北京林业大学公共分析测试中心实验室以安捷伦气相色谱仪(Agilent 7890A)在24 h内完成测定分析,具体方法见文献[13,19].

1.4 通量计算和分析

气体通量表示单位面积单位时间观测箱内该气体质量的变化,一般正值表示气体从土壤排放到大气,负值表示气体从大气流向土壤或土壤消耗吸收大气中该气体.利用以下公式计算不同温室气体通量,具体见文献[19]:

$$F = \frac{M_r \times p}{22.41 \times R \times T} \times \frac{\Delta m}{\Delta t} \times h$$

式中, F 为温室气体排放通量, M_r 为相对分子质量(其中 CO_2 为44.01, N_2O 为44.01, CH_4 为16.04), p 为箱内气压, R 为理想气体常数[8.31 J·(K·mol)⁻¹], T 为箱内温度(箱内气温加上273.15K),22.41为标准气体的体积, h 为采集箱的高度, $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ 为气体浓度变化率.

利用IBM SPSS Statistics 21软件,以LSD检验方法检验不同积雪深度下各土壤温室气体通量差异,以线性相关和回归分析方法分析温室气体排放通量与积雪深度的关系.

2 结果与分析

2.1 积雪集中期土壤温室气体排放通量

在积雪集中期的3月3日和3月4日,气温、地表温度、雪下温度、采集箱内温度差异较大,其中气温变化剧烈、深的积雪深度温度较高,并随时间变化(表1).

表1 在积雪集中期观测日的气温和积雪下温度及积雪密度

Table 1 Air temperature and temperature under snow cover and snow density during the prevalence period of snow cover

日期	时间	气温/℃	地表温度/℃	雪下温度 ¹⁾ /℃	薄雪温度/℃	箱内温度/℃	积雪密度/g·cm ⁻³
3月3日	17:30	-15	-8.5	-11	-11	-9	1.3~2.3
	18:30	-18	-8.5	-11	-11	-11	1.3~2.3
	19:30	-19	-8.5	-11	-11	-11	1.3~2.3
3月4日	09:00	-15	-8.5	-12	-12	-11	0.7~1.6
	11:00	0	-8.5	-1	-1	-2	0.7~1.6
	13:00	8	-8.5	-1	-1	-3	0.7~1.6
	15:00	7	-8.5	-1	-1	-4	0.7~1.6
	17:00	-15	-8.5	-1	-1	-2	0.7~1.6
	19:00	-12	-8.5	-1	-1	-1	0.7~1.6

1)雪下温度为平均值

不同积雪深度下,土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量不同($P<0.05$)(表2).积雪深度为0 cm,土壤 CO_2 和 N_2O 通量为负,土壤 CH_4 通量较低;积雪深度为2~3 cm时,土壤 CO_2 通量仍为负值,土壤 CH_4 通量和 N_2O 通量较低;积雪深度为4~6 cm时,土壤 CO_2 通量为正值但较低,土壤 CH_4 通量为负值,土壤 N_2O 通量较低;积雪深度为9 cm以上时,土壤 CO_2 和 N_2O 通量较高,土壤 CH_4 通量为负值.总体上,积雪深度在9 cm以上时,土壤 CO_2 和 N_2O 通量相对较高, CH_4 通量为吸收态(表2).

土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量与积雪深度变化相关性不同(图1).土壤 CO_2 通量与积雪深度呈正相

关性($r=0.57, P<0.05$),土壤 N_2O 通量与积雪深度也呈正相关性($r=0.70, P<0.05$),土壤 CH_4 通量与积雪深度呈负相关性($r=-0.68, P<0.05$).

3种土壤温室气体排放通量存在一定相关性,土壤 CO_2 通量与 CH_4 通量呈负相关($r=0.12, P>0.05$),土壤 CO_2 通量与 N_2O 通量呈现正相关($r=-0.24, P>0.05$);土壤 CH_4 通量与 N_2O 通量呈负相关性($r=-0.96, P<0.01$).

2.2 积雪末期土壤温室气体的通量

积雪末期的4月30日,气温、地表土壤温度、积雪表面温度差异较大(表3).气温变化剧烈,在积雪深度为9cm时,雪下温度较高(表3).积雪密

表 2 积雪集中期不同积雪深度下土壤温室气体通量¹⁾

Table 2 Fluxes of soil greenhouse gases under different snow depth during the prevalence period of snow cover							
积雪深度 /cm	CO ₂ 通量 /g·(m ² ·h) ⁻¹	sd	CH ₄ 通量 /mg·(m ² ·h) ⁻¹	sd	N ₂ O 通量 /mg·(m ² ·h) ⁻¹	sd	样本数
0	-1.78a	0.09	0.05a	0.01	-0.02a	0.01	4
2~3	-1.05b	0.24	0.18b	0.01	0.07b	0.01	4
4~6	0.30c	0.02	-0.03c	0.05	0.17c	0.03	6
9~10	1.33d	0.40	-0.19d	0.06	0.21d	0.06	3

1) sd 是标准差; 列中标有不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

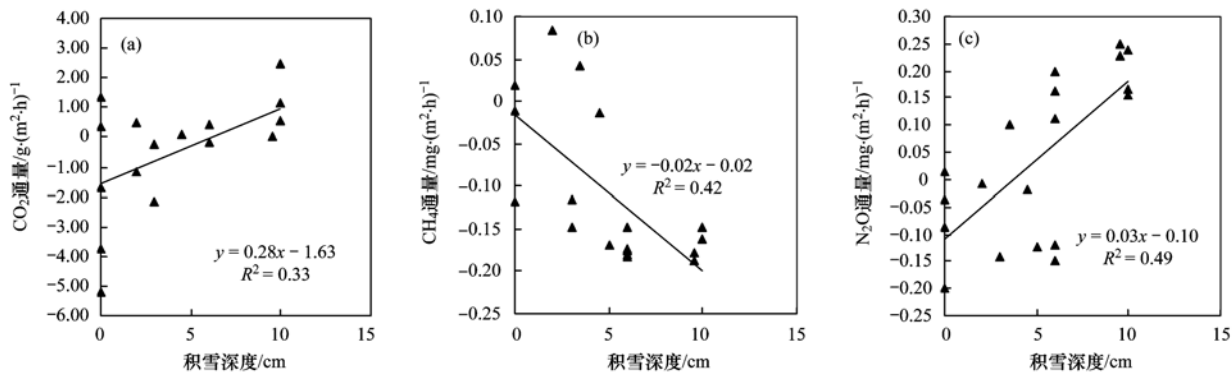


图 1 积雪集中期土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量与积雪深度的关系

Fig. 1 Relationship between soil CO₂, CH₄ or N₂O flux and snow depth during the prevalence period of snow cover

表 3 4 月 30 日气温和积雪下温度及积雪密度

Table 3 Air temperature and temperature under snow cover and snow density on April 30					
时间	气温/℃	地表温度/℃	雪下温度/℃	箱内温度/℃	积雪密度/g·cm ⁻³
10:30	0	10	-2	13	0.6~1.2
12:30	9	18	-1	21	0.6~1.2
14:30	10	14	-2	28	0.6~1.2
16:30	8	12	-1	14	0.6~1.2
18:30	0	6	-3	10	0.6~1.2

度比积雪盛期小(表 1 和表 3)。

在积雪末期的 4 月 30 日,不同深度积雪下土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量差异较大 ($P < 0.05$) (表 4)。积雪深度为 0 cm 时,3 种温室气体通量都为负值;积雪深度为 2~3 cm 时,土壤 CO₂ 和 N₂O 通量为正且较低,土壤 CH₄ 为吸收态;积雪深度为 4~5 cm 时,土壤 CO₂ 通量仍较低,土壤 CH₄ 为吸

收态,土壤 N₂O 通量也较低;积雪深度为 6~7 cm 以上时,土壤 CO₂ 通量相对较高,土壤 CH₄ 通量为吸收态,土壤 N₂O 通量较低;积雪深度在 8~9 cm 时,土壤 CO₂ 和 N₂O 通量相对较高、CH₄ 为吸收态(表 4)。总体上,积雪深度为 8~9 cm 时,土壤 CO₂ 和 N₂O 通量较高,土壤 CH₄ 为吸收态且其绝对值较大。

表 4 4 月 30 日不同积雪深度下土壤温室气体排放通量¹⁾

Table 4 Fluxes of soil greenhouse gases under different snow depth on April 30							
积雪深度 /cm	CO ₂ 通量 /g·(m ² ·h) ⁻¹	sd	CH ₄ 通量 /mg·(m ² ·h) ⁻¹	sd	N ₂ O 通量 /mg·(m ² ·h) ⁻¹	sd	样本数
0	-0.78a	0.18	-0.14a	0.03	-0.05a	0.01	4
2~3	1.00b	0.16	-0.55b	0.05	0.01b	0.01	3
4~5	1.16b	0.18	-0.56 b	0.02	0.02b	0.01	3
6~7	2.47c	0.22	-0.81c	0.05	0.13c	0.01	3
8~9	4.70d	0.26	-1.23d	0.11	0.24d	0.01	3

1) sd 是标准差,列中标有不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量与积雪深度呈现不同的关系(图 2)。土壤 CO₂ 通量与积雪深度呈正相

关($r = 0.96, P < 0.001$),土壤 CH₄ 通量与积雪深度呈负相关性($r = -0.81, P < 0.05$),土壤 N₂O 通量

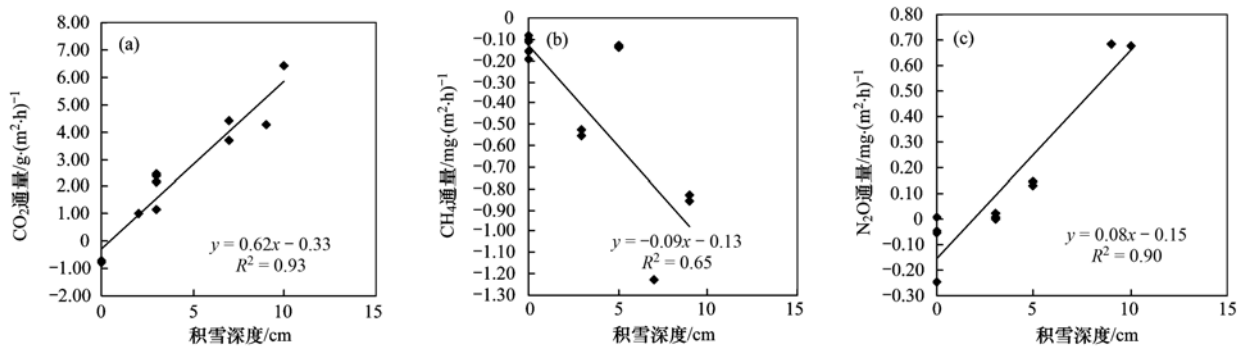


图2 积雪末期土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量与积雪深度的关系

Fig. 2 Relationship between soil CO₂, CH₄ and N₂O flux and snow depth at the end period of snow cover

与积雪深度呈正相关性($r = -0.95, P < 0.001$).

土壤 CO₂ 与 CH₄ 通量呈负相关性($r = -0.33, P > 0.05$), 土壤 CO₂ 与 N₂O 通量呈现正相关($r = 0.67, P < 0.05$); 土壤 CH₄ 与 N₂O 通量呈现负相关($r = -0.10, P > 0.05$).

2.3 生长季土壤温室气体的通量

在生长季, 气温、地表土壤温度、箱内温度差异较大, 并且气温、地表温度和箱体内温度都呈随着时间变化的趋势(表 5).

在生长季的 7 月 27 日, 土壤 CO₂ 通量较高, 土壤 CH₄ 为吸收态, 土壤 N₂O 通量较低, 在阳面比阴面要高(表 6).

表 5 7 月 27 日生长季温度状况/℃

Table 5 Temperature condition on July 27/℃

时间	气温	地表温度	箱内温度
08:30	11	12	23
10:30	19	18	22
12:30	27	16	25
14:30	24	23	27
16:30	22	17	28
18:30	7	28	21

在积雪集中期、积雪末期和生长季, 土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量差异较大, 土壤 CO₂ 和 N₂O 通量在生长季较高、积雪末期其次、积雪集中期较低; 土壤 CH₄ 为吸收态, 其绝对值在生长季和积雪末期较大、积雪集中期较小(表 7).

表 6 生长季土壤温室气体通量

Table 6 Fluxes of soil greenhouse gases in growing season

观测点	CO ₂ /g·(m ² ·h) ⁻¹	sd	CH ₄ /mg·(m ² ·h) ⁻¹	sd	N ₂ O /mg·(m ² ·h) ⁻¹	sd	样本数
阴面	19.16	4.32	-0.32	0.12	0.08	0.03	4
阳面	28.29	5.86	-0.72	0.23	0.37	0.01	4

表 7 生长季和积雪期土壤温室气体通量比较¹⁾

Table 7 Comparison of fluxes of soil greenhouse gases in growing season and snow cover period

时期	CO ₂ /g·(m ² ·h) ⁻¹	CH ₄ /mg·(m ² ·h) ⁻¹	N ₂ O/mg·(m ² ·h) ⁻¹	温度/℃
积雪集中期	-1.78 ~ 1.33	-0.19 ~ 0.18	-0.02 ~ 0.21	-15 ~ 0
积雪末期	-0.78 ~ 4.70	-1.23 ~ -0.14	-0.05 ~ 0.24	0 ~ 10
生长季	19.16 ~ 28.29	-0.72 ~ -0.32	0.08 ~ 0.37	6 ~ 22

1) 数据是综合了表 2、表 4 和表 6 得到

3 讨论

本研究表明, 在积雪期高寒草甸土壤温室气体排放通量明显. 这与在高海拔和高纬度地区观测到的积雪覆盖下土壤温室气体通量结果总体一致. 如 1994 ~ 1997 年在加拿大魁北克东南农田和森林中测定发现, 冬季积雪下土壤 N₂O 和 CO₂ 排放通量较高, 其中农田土壤 N₂O 通量比森林土壤中高、而土

壤 CO₂ 通量差异不大, 冬季农田土壤中 N₂O 是生长季的 2 ~ 4 倍^[20]; 1993 ~ 1994 年在美国科罗拉多州 Niwot Ridge 进行的积雪试验表明, 积雪覆盖土壤 CO₂ 和 N₂O 通量与土壤冻结程度和积雪期有关, 积雪期延长使土壤 CO₂ 和 N₂O 通量增加^[10]; Fahnestock 等^[21] 1996 年在美国阿拉斯加北测定北极苔原雪盖下土壤 CO₂ 浓度发现, 积雪覆盖下土壤中 CO₂ 浓度比大气中要高, 积雪较深的河岸土壤

CO_2 通量最高, 积雪较薄的草地土壤中最低^[21]; Welker 等^[2] 观测北极湿草和干苔原中温室气体排放发现, 冬季积雪深度增加使苔原土壤 CO_2 通量增加^[2]. 但 Decker 等^[7] 在芬兰东部进行积雪对土壤 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 通量影响研究发现, 冷季扫除积雪后土壤 CO_2 和 CH_4 通量变化不大, 土壤冻融促进 N_2O 排放, 原因是冬季土壤 N_2O 和 CO_2 气体在土壤中积累, 春季土壤解冻后释放, 冬季土壤中 CH_4 浓度较低、解冻后升高.

积雪下土壤温室气体通量与土壤微生物活动和养分及冻融影响等有关. 1993 ~ 1994 年在美国科罗拉多 Niwot Ridge 进行的积雪试验表明, 积雪深度增加产生保温效果使土壤微生物活动得以持续^[10]; 在加拿大北极低苔原增雪试验表明, 冬季较深积雪的保温效果使土壤微生物活性提高、有机物分解加速, 并使土壤可溶性碳对微生物生长和活性限制加剧, 可溶性氮积累增加, 真菌和细菌生长加快, 冬末积雪加深使土壤中微生物氮含量增加, 但使溶解有机氮和氮库及细菌数量降低, 真菌质量和菌丝长度却没有变化, 但使可溶性碳对土壤微生物生长的限制加剧, 磷素对微生物呼吸限制降低, 真菌质量和菌丝长度响应养分变化比细菌质量或丰富度响应程度高, 积雪深度增加使晚冬土壤微生物的营养库增加、微生物群落生理功能改变^[21]. 在冬季, 土壤微生物群落适应了低温条件^[23], 并获得前秋季植物凋落物和根系死亡供应的碳^[24,25]. 在冬季, 深而持续积雪覆盖土壤中微生物活性较高^[26,27], 薄而间断性积雪覆盖土壤中微生物活性较低^[28,29]. 在春季土壤冻融期, 土壤 N_2O 通量最大, 土壤中铵浓度高促进硝化作用, 相对高温促进土壤中反硝化作用^[30,31]. 薄雪下土壤频繁冻融使土壤 CO_2 通量增加^[32,33], 使土壤中 N_2O 脉冲排放^[34]. 积雪深度减少对土壤有机质分解和呼吸可能产生影响, 但对凋落物分解的影响却不大^[35].

土壤 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 通量随积雪深度不同而变化^[10,36]. 本研究表明, 土壤 CO_2 和 N_2O 通量与积雪深度呈正相关、土壤 CH_4 通量与积雪深度呈负相关性; 当积雪深度超过 9cm 时, 土壤 CO_2 和 N_2O 通量较高, 土壤 CH_4 通量为吸收态. 积雪持续期和积雪密度都可能影响土壤温室气体通量^[1~4,6]. 积雪作为临时保温层足以使冬季土壤温度保持相对较高. 不过, 积雪深度超过 5cm, 积雪才具有明显保温功能, 反之, 却起降温作用^[8,16]. 另外, 积雪末期气

温比积雪集中期要高, 土壤冻结程度较弱, 积雪密度变小(表 1 和表 3), 也使积雪末期的温室气体通量比积雪集中期要高. 连续积雪覆盖使土壤保持相对高的温度, 并使土壤冻融频率降低^[7]. 土壤低温和冻融影响具有生物有效性的液态水含量与时间^[29], 进而影响土壤碳和氮循环过程^[37]. 在冬季薄而间断的积雪覆盖使土壤温度、有效液态水和微生物活性较低, 使植物根系死亡率和土壤氮浸出率较高^[29,35,38]. 深且持续积雪覆盖使土壤中温度、有效液态水和微生物活性较高, 但土壤中氮浸出率较低^[37]. 在美国新罕布什尔州哈伯德布鲁克的试验林发现, 土壤 N_2O 通量在积雪期的 11 月和融雪期的 3 ~ 4 月为负, 土壤 CO_2 通量在 1 月为负值^[39]. 本研究发现, 积雪深度小于 4cm 时, 土壤 CO_2 和 N_2O 通量较低或为负值. 这可能因为用注射器抽取采样箱中气体, 减少采样箱内气体量, 低温下土壤中 CO_2 和 N_2O 气体产生少不能补充采样箱内减少气体, 致使采样箱气体浓度变化为负值. 另外, 低温下雪盖和土壤中所结冰粒也可能对土壤 N_2O 和 CO_2 气体产生陷阱效应^[40], 也致使采样箱内气体浓度变化为负值.

积雪深度改变后土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量变化不同. 如 Filippa 等^[36] 在美国科罗拉多州 Niwot 岭发现, 春季积雪融化使土壤 N_2O 排放达到高峰, 然后下降, 土壤 CO_2 通量却无此趋势; Groffman 等^[39] 在美国新罕布什尔州哈伯德布鲁克阔叶林发现, 积雪深度减薄使土壤冻结, 土壤 CO_2 和 CH_4 通量季节变化明显, 土壤 N_2O 通量却无明显季节变化, 冬季土壤 N_2O 通量增加、 CH_4 吸收减少; Merbold 等^[41] 在瑞士亚高山草地观测发现, 积雪覆盖下土壤 CO_2 、 CH_4 通量随冬季延长而下降, 但土壤 N_2O 通量却无此变化. 土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量对积雪变化响应差异与不同气体产生和消耗过程、参与代谢的微生物区系和酶等都有关系. 土壤 CO_2 通量主要受土壤有机质分解过程、土壤微生物矿化及植物根系呼吸影响. Monson 等^[28] 在 Rocky 山亚高山森林中发现, 土壤 CO_2 通量最大增幅出现在冬末融雪和雪密度增加期, 积雪融化下土壤 CO_2 增加约 6 倍, 这些变化主要由融雪水中微生物对土壤温度升高的响应引起; Aanderud 等^[42] 在温带落叶林研究发现, 积雪和除雪下土壤 CO_2 通量对湿度变化敏感度增加, 积雪深度增加且温度在 0°C 以上, 土壤 CO_2 通量对温度变化敏感, 积雪变化伴随土壤 CO_2 通量变化,

土壤真菌和细菌群落结构改变; Ohkubo 等^[43]在日本北部发现,积雪达 30cm 以上,土壤 CO_2 浓度保持稳定, CO_2 通量与积雪深度或土壤冻结深度关系不显著,因为 CO_2 排放低; 积雪变薄使土壤冻结深度增加、有效碳供应减少、土壤 CO_2 通量减少^[44]. 土壤 N_2O 主要产生于土壤硝化和反硝化过程^[45], 这些过程受土壤理化性质(有机质含量、pH、容重、质地等), 以及土壤温度、湿度、 O_2 及碳氮底物供应能力、植物生长等影响^[45]. Yanai 等^[46]在日本北部观测发现, 冬春转换期土壤 N_2O 排放与最大土壤冻结深度相关, 当土壤冻结深度大于 0.15 m, 土壤 N_2O 受影响较大, 没达最大冻结深度, 融雪对土壤 N_2O 影响不明显; Morse 等^[47]在美国新罕布什尔州哈伯德布鲁克长期生态研究站测定北方阔叶林土壤发现, 土壤反硝化过程损失氮超过全年大气氮沉降量的一半, 反硝化过程受海拔和季节的影响, 高海拔和融雪过程中土壤氮反硝化速率较高, 这些过程受融雪期土壤湿度影响较大; Schimel 等^[48]在北极干石楠和湿润垫状冻原观测发现, 秋和冬季积雪覆盖的垫状植被冻原土壤净 N 矿化率较高, 解冻期固持作用其次, 自然积雪覆盖下土壤氮素矿化只在秋季明显, 冬季积雪覆盖增加土壤氮素净矿化和硝化过程明显; 冬末雪盖加深, 干石楠土壤净氮矿化率增加, 薄的积雪下土壤温度低限制土壤氮素矿化; Jusselme 等^[49]在法国阿尔卑斯山亚高山草原发现, 尽管土壤冻结, 但冬季与氮代谢相关土壤微生物活动发生变化, 其中嗜冷微生物群落变化明显, 冬季积雪减薄或无积雪下土壤中硝化和反硝化细菌数量较高, 积雪深度改变促进土壤中营养物质释放, 增加了嗜冷细菌丰度和活性, 冬季较厚和持续积雪使土壤温度在 0°C 以上, 限制了土壤微生物的氮素营养. 土壤 CH_4 通量与土壤氧化大气 CH_4 过程有关, 且受该气体生产和消费过程、扩散影响因素和氮循环的影响, 这种气体主要由甲烷专性氧化酶催化完成^[50], 受到许多因素影响^[6,8]. 土壤 CH_4 通量受积雪变化影响主要发生在积雪融化期, 且与土壤氮循环过程相关^[39]. 减少积雪覆盖使温带森林土壤 CH_4 吸收率增加, 但并未使土壤冻结或氮循环加速, 增强大气到土壤中 CH_4 扩散和氧化活性, 这可能影响土壤 CH_4 通量^[39,51]. Merbold 等^[41]在瑞士亚高山草地观测认为, 影响土壤 CO_2 、 CH_4 通量的主要为土壤表面温度和雪水平衡, 但 N_2O 通量却难以用土壤和积雪因素解释.

土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 都与土壤有机质分解和微生物活动及环境条件影响有关, 不同温室气体通量间存在相关^[52]. 土壤 CO_2 涉及生物和非生物因素, 受土壤有机质稳定性和 C、N 有效性的影响; 土壤 CH_4 通量受土壤中碳和氮相互作用影响, 需要厌氧条件、相对低的氧化还原电位、底物等, 甲烷氧化菌受主要底物和有效 N 的影响; 硝化和反硝化作用是土壤中 N_2O 生成的两个最主要微生物过程, 土壤 N_2O 厌氧脱氮过程主要是由有效碳源驱动, 需要厌氧条件和 NO_3^- -N 作为底物, N_2O 是硝化过程中间产物, 需要氧条件和 NH_4^+ -N 为底物, 土壤水分状况、温度、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量、有机质、pH 等都影响土壤 N_2O 通量. 这些不同温室气体通量都受土壤碳氮相互作用的影响^[53]. Sitaula 等^[54]发现云杉林土壤 N_2O 释放速率与硝化速率呈正相关, 与 pH 值呈负相关, 土壤 CH_4 吸收率与硝化速率呈负相关. 本研究表明, 积雪覆盖下土壤 CO_2 与 CH_4 通量及 CH_4 与 N_2O 通量间为负相关性、土壤 CO_2 与 N_2O 通量为正相关性, 反映了土壤中 CO_2 与 N_2O 及 CH_4 过程联系^[52].

积雪期不但影响非生长季节的温室气体排放, 也影响生长季土壤温室气体通量. Blankinship 等^[55]总结了全球积雪试验结果发现, 积雪深度减少处理使夏季土壤 CO_2 通量减少了 35%, 土壤 N_2O 通量却增加了 3 倍. 本研究表明, 土壤 CO_2 通量在生长季较高、积雪末期其次、积雪集中期较低; 土壤 N_2O 通量在生长季较高、积雪末期其次, 积雪集中期较低; 土壤 CH_4 为吸收态, 其绝对值在生长季和积雪末期较大、积雪集中期较小(表 7). 这与生长季和积雪期的环境条件差异有一定关系(表 1、表 3 和表 5). 意味着尽管生长季土壤温室气体排放通量较高, 但积雪期土壤中温室气体排放过程也是不容忽视的过程^[8].

需要强调的是, 生长季植物通过光合作用积累碳, 但在积雪期却只有分解过程, 所以在分析生态系统碳汇功能方面需要考虑非生长季的过程^[56]. 另外, 随着气候变化, 青藏高原的积雪期和厚度、及生长季的长短都将可能改变, 这将使土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量改变, 进而将影响到高寒草甸温室气体源/汇的功能. 意味着在分析高寒草甸温室气体源/汇功能特征中, 积雪变化的影响是一个不容忽视的重要因素.

需要指出的是, 本研究只是进行了积雪变化下土壤温室气体排放的初步分析, 许多机制需要进一

步研究. 另外, 本研究进行的积雪覆盖土壤温室气体通量的观测分析还可能存在一些误差, 包括阳光照射引起采样箱温度升高、及土壤性质局部的差异、采集和分析气体过程的误差等, 这需要在以后研究中改进完善. 尽管如此, 本研究初步明确了积雪变化对高寒草甸土壤温室气体通量影响的一些特征, 能为相关研究提供一定的参考.

4 结论

(1) 积雪深度超过 5 cm, 积雪变化对高寒草甸土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量影响明显. 在积雪集中期和积雪减少期, 积雪深度在 9 ~ 10 cm 时, 土壤 CO₂ 和 N₂O 通量较高、CH₄ 通量为吸收态; 在积雪深度小于 4 cm 时, 土壤 CO₂ 和 N₂O 通量较低或为负值, 土壤 CH₄ 通量为吸收态、其绝对值较小.

(2) 在积雪期, 高寒草甸土壤 CO₂ 和 N₂O 通量与积雪深度呈正相关性、土壤 CH₄ 通量与积雪深度呈负相关性 ($P < 0.05$). 另外, 土壤 CO₂ 与 CH₄ 通量及 CH₄ 与 N₂O 通量间呈负相关, 土壤 CO₂ 与 N₂O 通量呈正相关.

(3) 高寒草甸积雪期土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量不容忽视. 高寒草甸土壤 CO₂ 和 N₂O 通量在生长季较高、在积雪末期其次、在积雪集中期较低; 土壤 CH₄ 通量为吸收态, 绝对值在生长季和积雪末期较大、在积雪盛期较小.

(4) 未来气候变化引发积雪变化将对高寒草甸土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量产生一定的影响.

参考文献:

- [1] Pumpanen J, Ilvesniemi H, Perämäki M, *et al.* Seasonal patterns of soil CO₂ efflux and soil air CO₂ concentration in a scots pine forest: comparison of two chamber techniques [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(3): 371-382.
- [2] Welker J M, Fahnestock J T, Jones M H. Annual CO₂ flux in dry and moist Arctic tundra: field responses to increases in summer temperatures and winter snow depth [J]. *Climatic Change*, 2000, **44**(1-2): 139-150.
- [3] Monson R K, Lipson D L, Burns S P, *et al.* Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition [J]. *Nature*, 2006, **439**(7077): 711-714.
- [4] Öquist M G, Laudon H. Winter soil frost conditions in boreal forests control growing season soil CO₂ concentration and its atmospheric exchange [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(12): 2839-2847.
- [5] Muhr J, Borken W, Matzner E. Effects of soil frost on soil respiration and its radiocarbon signature in a Norway spruce forest soil [J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(4): 782-793.
- [6] Maljanen M, Kohonen A R, Virkajärvi P, *et al.* Fluxes and production of N₂O, CO₂ and CH₄ in boreal agricultural soil during winter as affected by snow cover [J]. *Tellus B*, 2007, **59**(5): 853-859.
- [7] Decker K L M, Wang D, Waitea C, *et al.* Snow removal and ambient air temperature effects on forest soil temperatures in northern Vermont [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**(4): 1234-1242.
- [8] Jones H G, Pomeroy J W, Walker D A, *et al.* Snow ecology, an interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems [M]. Cambridge, United Kingdom, New York, USA: Cambridge University Press, 2001.
- [9] IPCC. Summary for policymakers [A]. In: Field C B, Barros V R, Dokken D J, *et al.* (Eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge. United Kingdom, New York, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [10] Brooks P D, Schmidt S K, Williams M W. Winter production of CO₂ and N₂O from alpine tundra: environmental controls and relationship to inter-system C and N fluxes [J]. *Oecologia*, 1997, **110**(3): 403-413.
- [11] Sommerfeld R A, Mosier A R, Musselman R C. CO₂, CH₄ and N₂O flux through a Wyoming snowpack and implications for global budgets [J]. *Nature*, 1993, **361**(6408): 140-142.
- [12] 董云社, 章申, 齐玉春, 等. 内蒙古典型草地 CO₂, N₂O, CH₄ 通量的同时观测及其日变化 [J]. *科学通报*, 2000, **45**(3): 318-322.
- [13] 王跃思, 纪宝明, 黄耀, 等. 农垦与放牧对内蒙古草原 N₂O、CO₂ 排放和 CH₄ 吸收的影响 [J]. *环境科学*, 2001, **22**(6): 7-13.
- [14] 牟长城, 程伟, 孙晓新, 等. 小兴安岭落叶松沼泽林土壤 CO₂, N₂O 和 CH₄ 的排放规律 [J]. *林业科学*, 2010, **46**(7): 7-15.
- [15] 李平, 郎漫, 徐向华, 等. 不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4321-4328.
- [16] 赵亮, 徐世晓, 伏玉玲, 等. 积雪对藏北高寒草甸 CO₂ 和水汽通量的影响 [J]. *草地学报*, 2005, **13**(3): 242-247.
- [17] 金会军, 程国栋, 徐柏青, 等. 青藏高原花石峡冻土站高寒湿地 CH₄ 排放研究 [J]. *冰川冻土*, 1998, **20**(2): 172-174.
- [18] 赵拥华, 赵林, 武天云, 等. 冬春季青藏高原北麓河多年冻土活动层中气体 CO₂ 浓度分布特征 [J]. *冰川冻土*, 2006, **28**(2): 183-190.
- [19] 王明星. 大气化学 [M]. 北京: 气象出版社, 1999. 40-42.
- [20] van Bochove E, Jones H G, Bertrand N, *et al.* Winter fluxes of greenhouse gases from snow-covered agricultural soil: intra-annual and interannual variations [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, **14**(1): 113-125.
- [21] Fahnestock J T, Jones M H, Brooks P D, *et al.* Winter and early spring CO₂ efflux from tundra communities of northern Alaska [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103**(D22): 29023-29027.
- [22] Buckeridge K M, Grogan P. Deepened snow alters soil microbial

- nutrient limitations in arctic birch hummock tundra[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, **39**(2): 210-222.
- [23] Lipson D A, Monson R K, Schmidt S K, *et al.* The trade-off between growth rate and yield in microbial communities and the consequences for under-snow soil respiration in a high elevation coniferous forest[J]. *Biogeochemistry*, 2009, **95**(1): 23-35.
- [24] Scott-Denton L E, Rosenstiel T N, Monson R K. Differential controls by climate and substrate over the heterotrophic and rhizospheric components of soil respiration[J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(2): 205-216.
- [25] Nowinski N S, Taneva L, Trumbore S E, *et al.* Decomposition of old organic matter as a result of deeper active layers in a snow depth manipulation experiment[J]. *Oecologia*, 2010, **163**(3): 785-792.
- [26] Mariko S, Bekku Y, Koizumi H. Efflux of carbon dioxide from snow-covered forest floors[J]. *Ecological Research*, 1994, **9**(3): 343-350.
- [27] Elberling B. Annual soil CO₂ effluxes in the High Arctic: the role of snow thickness and vegetation type[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(2): 646-654.
- [28] Monson R K, Burns S P, Williams M W, *et al.* The contribution of beneath-snow soil respiration to total ecosystem respiration in a high-elevation, subalpine forest[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, **20**(3): GB3030.
- [29] Öquist M G, Sparman T, Klemetsson L, *et al.* Water availability controls microbial temperature responses in frozen soil CO₂ production[J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(11): 2715-2722.
- [30] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, *et al.* Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-Arctic heath tundra mesocosms[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(4): 641-654.
- [31] Koponen H T, Martikainen P J. Soil water content and freezing temperature affect freeze-thaw related N₂O production in organic soil[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, **69**(3): 213-219.
- [32] Elberling B, Brandt K K. Uncoupling of microbial CO₂ production and release in frozen soil and its implications for field studies of Arctic C cycling[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(2): 263-272.
- [33] Hirano T. Seasonal and diurnal variations in topsoil and subsoil respiration under snowpack in a temperate deciduous forest[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**(2): GB2011.
- [34] Müller C, Kammann C, Ottow J C G, *et al.* Nitrous oxide emission from frozen grassland soil and during thawing periods[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, **166**(1): 46-53.
- [35] Bokhorst S, Metcalfe D B, Wardle D A. Reduction in snow depth negatively affects decomposers but impact on decomposition rates is substrate dependent[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **62**: 157-164.
- [36] Filippa G, Freppaz M, Williams M W, *et al.* Winter and summer nitrous oxide and nitrogen oxides fluxes from a seasonally snow-covered subalpine meadow at Niwot Ridge, Colorado[J]. *Biogeochemistry*, 2009, **95**(1): 131-149.
- [37] Brooks P D, Grogan P, Templer P H, *et al.* Carbon and nitrogen cycling in snow-covered environments[J]. *Geography Compass*, 2011, **5**(9): 682-699.
- [38] Hardy J P, Groffman P M, Fitzhugh R D, *et al.* Snow depth manipulation and its influence on soil frost and water dynamics in a northern hardwood forest[J]. *Biogeochemistry*, 2001, **56**(2): 151-174.
- [39] Groffman P M, Hardy J P, Driscoll C T, *et al.* Snow depth, soil freezing, and fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in a northern hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(9): 1748-1760.
- [40] Goodroad L L, Keeney D R. Nitrous oxide emissions from soils during thawing[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1984, **64**(2): 187-194.
- [41] Merbold L, Steinlin C, Hagedorn F. Winter greenhouse gas fluxes (CO₂, CH₄ and N₂O) from a subalpine grassland[J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(5): 3185-3203.
- [42] Aanderud Z T, Jones S E, Schoolmaster Jr D R. Sensitivity of soil respiration and microbial communities to altered snowfall[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **57**: 217-227.
- [43] Ohkubo S, Iwata Y, Hirota T. Influence of snow-cover and soil-frost variations on continuously monitored CO₂ flux from agricultural land[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **165**: 25-34.
- [44] Schindlbacher A, Jandl R, Schindlbacher S. Natural variations in snow cover do not affect the annual soil CO₂ efflux from a mid-elevation temperate forest[J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(2): 622-632.
- [45] Williams E J, Hutchinson G L, Fehsenfeld F C. NO_x and N₂O emissions from soil[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, **6**(4): 351-388.
- [46] Yanai Y, Hirota T, Iwata Y, *et al.* Accumulation of nitrous oxide and depletion of oxygen in seasonally frozen soils in northern Japan-Snow cover manipulation experiments[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(9): 1779-1786.
- [47] Morse J L, Durán J, Groffman P M. Soil denitrification fluxes in a northern hardwood forest: the importance of snowmelt and implications for ecosystem N budgets[J]. *Ecosystems*, 2015, **18**(3): 520-532.
- [48] Schimel J P, Bilbrough C, Welker J M. Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(2): 217-227.
- [49] Jusselme M D, Saccone P, Zinger L, *et al.* Variations in snow depth modify N-related soil microbial abundances and functioning during winter in subalpine grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **92**: 27-37.
- [50] Conrad R. Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO)[J]. *Microbiology*

- and Molecular Biology Reviews, 1996, **60**(4): 609-640.
- [51] Borken W, Davidson E A, Savage K, *et al.* Effect of summer throughfall exclusion, summer drought, and winter snow cover on methane fluxes in a temperate forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(6): 1388-1395.
- [52] 王艳芬, 马秀枝, 纪宝明, 等. 内蒙古草甸草原 CH₄ 和 N₂O 排放通量的时间变异[J]. 植物生态学报, 2003, **27**(6): 792-796.
- [53] Gärdenäs A I, Ågren G I, Bird J A, *et al.* Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions-from molecular to global scale[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(4): 702-717.
- [54] Sitaula B K, Bakken L R. Nitrous oxide release from spruce forest soil: relationships with nitrification, methane uptake, temperature, moisture and fertilization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, **25**(10): 1415-1421.
- [55] Blankinship J C, Hart S C. Consequences of manipulated snow cover on soil gaseous emission and N retention in the growing season: a meta-analysis[J]. Ecosphere, 2012, **3**(1): 1-20.
- [56] 伍星, 刘慧峰, 张令能, 等. 雪被和土壤水分对典型半干旱草原土壤冻融过程中 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(19): 5484-5493.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-nu, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《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8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 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