

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值	王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)
2015年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征	张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)
北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用	邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)
基于实测的建筑类涂料挥发性有机物 (VOCs) 含量水平及组分特征	高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)
2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析	王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)
北京市大气环境 PM _{2.5} 和 PM ₁ 及其碳质组分季节变化特征及来源分析	樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)
南京春季北郊地区大气 PM _{2.5} 中主要化学组分及碳同位素特征	周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)
热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物	马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)
杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系	王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)
基于远程通讯技术的混动公交车 SCR 系统运行及 NO _x 排放特征	杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)
基于环境风险排序的流域优先污染物筛选	李奇锋, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)
重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)
黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征	宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)
脱甲河水系 N ₂ O 关键产生过程及氮素来源探讨	赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)
生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响	王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)
黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复	史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)
城市黑臭水体的吸收特性分析	丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)
岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化	范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)
防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征	林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)
基于 ¹⁵ N和 ¹⁸ O的农业区地下水硝酸盐污染来源	盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)
垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征	彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)
铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为	梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)
基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制	张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)
AAO 工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性	李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)
抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除	李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)
磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧铁氨氧化菌对废水氨氮去除的影响	刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)
海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能	杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)
低温下 A ² /O-BAF 反硝化除磷脱氮特性	黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)
O ₃ -BAC 深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析	张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)
基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析	吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)
3 种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响	温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)
硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制	张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)
包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析	杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)
中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析	尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)
典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价	马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)
秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响	黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)
不同肥料施用对设施蔬菜地 NH ₃ 挥发和 N ₂ O 排放的影响	山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)
施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响	田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)
长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响	王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)
典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征	陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)
凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制	陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)
天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果	刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)
水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响	万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)
窖水中微生物降解污染物的关键细菌	杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)
砷氧化菌对胡敏酸络合 As(Ⅲ) 的氧化作用	李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)
海域高温油田 1 株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制	杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)
1 株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Zobellella</i> sp. B307 的分离及脱氮特性	白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岍然 (4793)
1 株镰刀菌属 KY123915 的分离及其对 17β-雌二醇的降解特性	吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)
氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响	李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)
林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析	任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)
DEP 对蚯蚓抗氧化酶系的影响及 DNA 损伤	平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)
生活垃圾焚烧灰灰矿物学特性及重金属分布	李建陶, 曾鸣 (4834)
《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)	

黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征

宋蕾¹, 田鹏¹, 张金波², 金光泽^{1*}

(1. 东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040; 2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

摘要: 为了监测黑龙江凉水国家级自然保护区的大气氮沉降水平, 在 2015 年生长季用干湿沉降采集器连续观测了大气氮湿沉降和颗粒物干沉降量, 并在非生长季用自制观测桶观测了大气混合氮沉降量。结果表明: ① 该区 2015~2016 年度大气氮沉降总通量(生长季湿沉降+颗粒物干沉降以及非生长季混合沉降)为 $12.93 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 其中无机氮沉降总通量为 $8.27 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 为 1.3; 有机氮沉降总通量为 $4.66 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 占全氮比例为 36.0%。② 生长季(湿沉降+颗粒物干沉降)和非生长季(混合沉降)氮沉降总量分别为 $11.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别占全年氮沉降总通量的 88.3% 和 11.7%。③ 生长季氮湿沉降总量为 $9.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占生长季氮干湿沉降总量的 81.3%, 且与降水量显著正相关($R^2 = 0.87$, $P < 0.001$); 生长季颗粒物干沉降总量为 $2.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占生长季干湿沉降总量的 18.7%。该区氮湿沉降量受降水量影响明显, 且在全国属于中等水平, 存在一定的环境风险, 当地在生活生产过程中应注意环境保护与水质监测。

关键词: 黑龙江凉水国家级自然保护区; 颗粒物干沉降; 湿沉降; 无机氮沉降; 有机氮沉降

中图分类号: X517 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4490-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201801215

Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve

SONG Lei¹, TIAN Peng¹, ZHANG Jin-bo², JIN Guang-ze^{1*}

(1. Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. School of Geography Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: To investigate the nitrogen deposition status in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve, a G78 nitrogen deposition collector was used to monitor dry particulate nitrogen deposition and wet nitrogen deposition during the growing season in 2015, and a bucket was used to monitor bulk nitrogen deposition during non-growing season. The results showed that: ① Total nitrogen deposition (wet nitrogen deposition + dry particulate nitrogen deposition during the growing season and bulk deposition during the non-growing season) was $12.93 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, inorganic nitrogen deposition was $8.27 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ with $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio of 1.3; organic nitrogen deposition was $4.66 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, which was equivalent to 36.0% of the total nitrogen deposition. ② Total nitrogen deposition in the growing season (wet + dry particulate deposition) and non-growing season (bulk deposition) were $11.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $1.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ respectively, which account for 88.3% and 11.7% of the total nitrogen deposition respectively. ③ Total wet nitrogen deposition during the growing season was $9.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, contributing to 81.3% of the total nitrogen deposition in the growing season, and was positively correlated with precipitation ($R^2 = 0.87$, $P < 0.001$); total dry particulate nitrogen deposition in the growing season was $2.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was 18.7% of the total nitrogen deposition in growing season. Wet nitrogen deposition in this region is moderate compared with other regions in China, and is significantly affected by precipitation. There is a potential risk of environmental pollution in this region. Thus, environmental protection and water quality monitoring are required in the process of production.

Key words: Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve; dry particulate deposition; wet deposition; inorganic nitrogen deposition; organic nitrogen deposition

氮沉降是氮素输入到陆地生态系统的重要方式, 适量的氮沉降能够提高生态系统的养分供应, 有利于植物生长^[1,2], 而一旦沉降量超过了生态系统的临界负荷, 会引起生态系统负面效应, 如土壤酸化、生物多样性降低、氮损失增加^[3~5]。工业革命以来, 人类活动包括化石燃料的燃烧和化肥的使用等产生了大量的活性氮, 而大约 60% 的活性氮又以干湿沉降的形式返回到陆地和水生生态系统中, 导致全球氮沉降量提高了 2.5 倍^[6,7]。中国的大气混合氮沉降量也已经由 1980 s 的 13.2

$\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 增加到 2000 s 的 $21.1 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[8]。Dentener 等^[9]的研究表明, 受人类活动干扰较小的海洋及沿海地区的氮沉降量极低, 大约只有 $0.1 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 而在经济发达人口众多的地区, 尤其是西欧、北美、东南亚以及中国华北地区的氮沉降量极高^[10], 已经超过了 60

收稿日期: 2018-01-24; 修订日期: 2018-04-13

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2014CB953803)

作者简介: 宋蕾(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为碳氮循环过程及其机制, E-mail: zbyz0912sl@163.com

* 通信作者, E-mail: taxus@126.com

$\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 人类活动对大气氮沉降的影响十分明显. 不同地区的氮沉降量及氮素组成存在着较大的差异^[11], 因此开展大气氮沉降通量的监测, 明确特定地区的氮沉降特征, 不仅有利于该地区氮素循环研究及生态系统安全评估的进行, 还可为大尺度的氮沉降量及氮收支的估算提供基础数据.

传统的湿沉降采集方法通过采集器完全暴露在空气中收集降水实现样品的被动采集, 但由于样品中易混入大气颗粒物和气体干沉降, 导致采集的样品实际为湿沉降和部分干沉降的混合沉降样品, 因而通常被定义为混合沉降. 而主动采样方法可以消除干沉降对湿沉降的干扰, 并收集部分颗粒物干沉降, 提高了湿沉降观测的准确性^[12]. 此外, 我国对大气氮沉降的观测多集中在华北和南部地区, 而对东北地区的观测较少^[13~15], 黑龙江凉水国家级自然保护区作为东北地区重要的森林生态定位研究站, 其大气氮沉降量却未被报道. 本研究用干湿沉降采集器主动采样, 连续监测该区的大气氮颗粒物干沉降量和湿沉降量, 并观测氮沉降中不同形态氮素的组成特性, 有利于进一步探讨氮沉降对该区生态系统的影响, 以期对小兴安岭乃至东北森林生态系统氮循环的研究提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究点位于黑龙江省伊春市带岭区的黑龙江凉水国家级自然保护区($47^{\circ}10'50''\text{N}$, $128^{\circ}53'20''\text{E}$), 系小兴安岭南部达里带岭支脉东坡, 距城镇中心 26 km, 人烟稀少. 带岭区依托于当地的自然资源, 主要发展林下产业和以种植豆类、玉米为主, 蔬菜、蓝莓等为辅的农业. 该保护区气候类型为温带大陆性季风气候, 冬季漫长且寒冷干燥, 夏季雨热同期, 年平均气温 -0.3°C , 年平均降水量 676 mm, 降水集中在 6~8 月, 积温 $2\,200 \sim 2\,600^{\circ}\text{C}$, 无霜期 100~120 d, 积雪期 130~150 d. 保护区为典型的低山丘陵地貌, 海拔 280~707 m, 森林覆盖率 96%, 有原始成过熟林 $4\,100\text{ hm}^2$, 红松 (*Pinus koraiensis*) 面积占其中的 80%.

1.2 样品采集

生长季(5~10 月)样品采集点设置在黑龙江凉水国家级自然保护区的气象观测场内, 无人干扰. 采样仪器为 G78 干湿沉降采集器(New Star Environmental LLC, USA). 该仪器长宽高分别为 $52\text{ cm} \times 101\text{ cm} \times 128\text{ cm}$, 有两个容积为 11.4 L 的收

集桶用于收集大气干湿沉降, 有一个挡板、梳状传感器和驱动系统. 传感器能够恒温加热, 具有较强的灵敏性和抗干扰性, 可以实现对降雨状况的准确判断. 在无雨天气, 传感器关闭, 挡板位于湿沉降收集桶上方密封收集桶, 干沉降收集桶则完全暴露在空气中用以收集干沉降颗粒物; 降水时(雨量 $\geq 0.4\text{ mm}$), 传感器自动感应降水, 处于打开状态, 通过驱动系统使挡板移动到干沉降收集桶上方并将桶密封, 湿沉降收集桶可以实现降水样品的收集; 降水停止 10 min 后, 挡板移回湿沉降收集桶上方密封收集桶, 干沉降收集桶可以继续干沉降样品的收集. 仪器的上述运行过程需要稳定的电力供应.

干湿沉降采集器于 2015 年 4 月 30 日放至观测场并开始通电运行, 此后每半个月采集一次(7、8 月为一个月采集一次)干沉降收集桶中的样品, 样品采集用湿法收集. 用 596 mL 的纯净水充分冲洗干沉降收集桶使样品完全溶于水中, 取适量溶液于洁净的 100 mL 聚乙烯瓶中, 冻存. 湿沉降样品在每次降水的次日清晨(06:30~07:30)采集, 同时记录降水量, 装入 100 mL 聚乙烯瓶中, 冻存. 连续降雨时, 若在规定时间内未降雨, 则取样; 若降雨, 则延至第 2 d 取样, 此类事件发生频率不高.

由于非生长季(11 月~次年 4 月)气温低, 干湿沉降采集器不能正常工作, 氮沉降样品用直径为 30 cm 高 100 cm 的不锈钢圆桶收集, 由于圆筒较高, 不存在积雪超过桶高的现象. 2015 年 10 月 31 日, 为减小冬季供暖对采样结果的影响, 在距离气象观测场两侧较远的森林空旷处分别放入 1 个圆桶, 2016 年 4 月底采集样品作为降雪融水, 并记录降水量. 此部分样品为该时段干沉降和湿沉降的混合样即混合沉降.

1.3 样品测定

所有样品解冻后, 用流动分析仪(Skalar, Breda, Netherlands)测定其全氮(TN)、铵态氮(NH_4^+)、硝态氮(NO_3^-)、亚硝态氮(NO_2^-)的质量浓度, 无机氮(TIN)的质量浓度为 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 的质量浓度之和, 可溶性有机氮(DON)的质量浓度为 TN 与 TIN 的质量浓度之差.

1.4 数据分析

干湿沉降量的计算方法如下:

$$\text{颗粒物干沉降量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \frac{\sum c_i \times V}{A \times 100}$$

式中, c_i 为第 i 湿法采集样品中氮浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), V 为每次采集时所用纯净水体积(596 mL), A 为干沉降收集桶的底面积(m^2), 100 为单位转换系数.

$$\text{湿沉降量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) = (\sum c_i \times P_i)/100$$

式中, c_i 为第 i 次降水中氮浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), P_i 为第 i 次的降水量(mm), 100 为单位转换系数.

用回归分析确定湿沉降量与降水量的关系, 用 Pearson 相关性分析确定各形态氮沉降通量及降水量间的关系. 绘图与统计分析用 Origin 9. 3 和 SPSS 22. 0 完成.

2 结果与分析

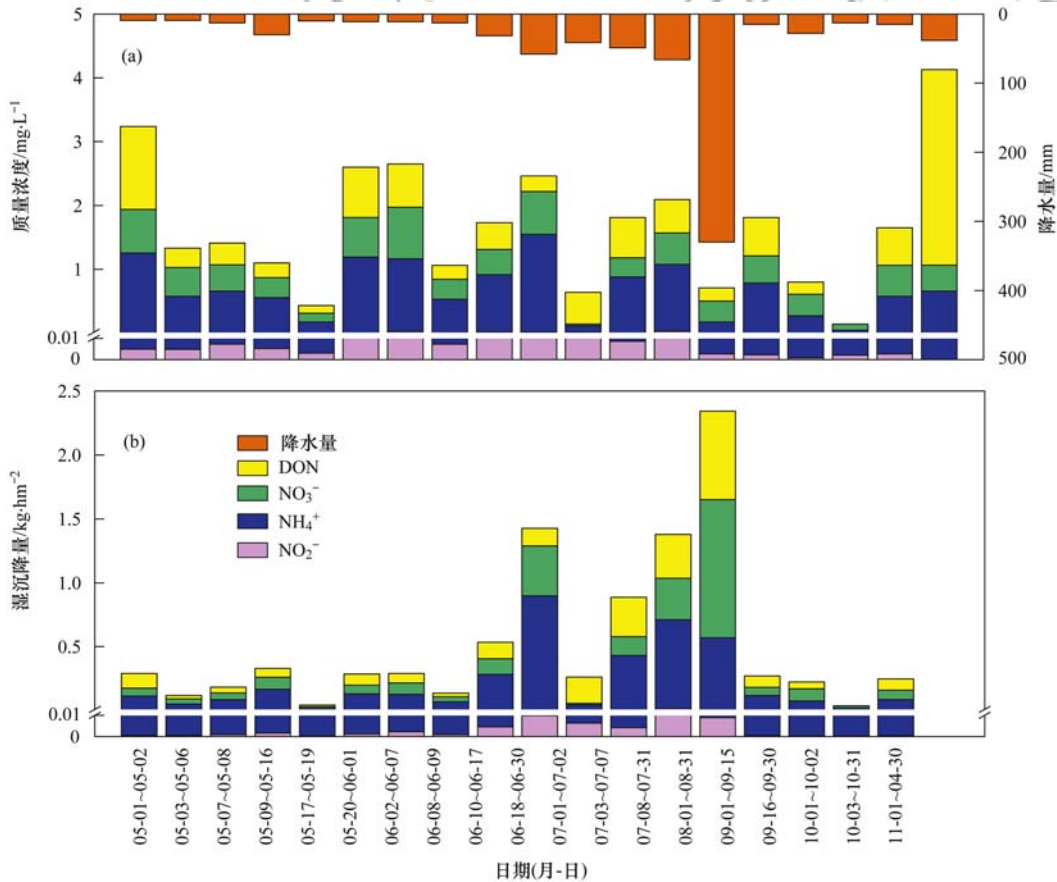
2.1 大气氮沉降

观测期内, 各月份湿沉降样品中(5~10月) TN 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 DON 质量浓度的变化范围分别为 $0.14\sim3.24$ 、 $0.04\sim1.53$ 、 $0.02\sim0.81$ 、 $0\sim1.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其各自的平均质量浓度分别为 1.54 、 0.68 、 0.41 、 $0.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^- 质量浓度极低, 平

均为 $0.009\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 其中, TN 质量浓度的最高值出现在降水量较低的5月, 最低值出现在降水量最大的8月. 非生长季混合沉降样品即降雪融水中(11月~次年4月) TN 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 DON 质量浓度分别为 4.13 、 0.66 、 0.41 、 0 、 $3.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图1).

TN 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 DON 在各月份的湿沉降量变化范围分别为 $0.02\sim2.34$ 、 $0.02\sim0.89$ 、 $0.01\sim1.08$ 、 $0\sim0.69\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, NO_2^- 沉降量很低, 平均约为 $0.003\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图1). 全年降水量为 790 mm , 生长季降雨量为 752 mm , 非生长季降雪量为 38 mm , 生长季降水量达到了全年降水量的 95.2% , 其中7、8月的降水量达到了全年降水量的 61.5% , 其氮湿沉降量也较大, 占整个生长季湿沉降量的 52.5% (图1). 生长季湿沉降总量与降水量之间存在极显著的正相关关系(图2).

观测期内, 各形态氮不同月份的颗粒物干沉降量变化范围比湿沉降量变化范围小, TN 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 DON 的干沉降量分别在 $0.06\sim0.45$ 、 $0.02\sim$



11-01~04-30 为降雪, 其余时间段为降雨, 降雪融水中混合了颗粒物干沉降

图1 监测期降水量、降水中氮质量浓度及湿沉降量

Fig. 1 Precipitation, nitrogen concentration in precipitation, and wet nitrogen deposition during monitoring period

0.16、0.02 ~ 0.14、0.03 ~ 0.25 kg·hm⁻² 范围内变化, NO₂⁻ 沉降量极小, 几乎为 0. 其中, 5 月的干沉降量最大, 为 0.62 kg·hm⁻², 7 月的干沉降量最小, 为 0.19 kg·hm⁻² (图 3).

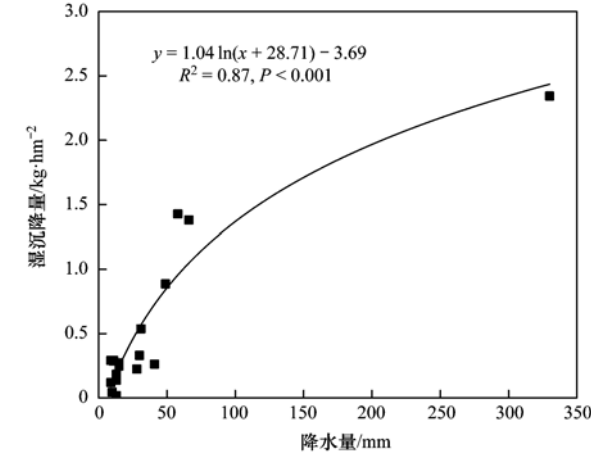


图 2 氮湿沉降量与降水量相关性分析

Fig. 2 Correlation between wet nitrogen deposition and precipitation

本研究区大气氮沉降总通量(生长季湿沉降 + 颗粒物干沉降以及非生长季混合沉降)为 12.93 kg·(hm²·a)⁻¹, 其中生长季(湿沉降 + 颗粒物干沉

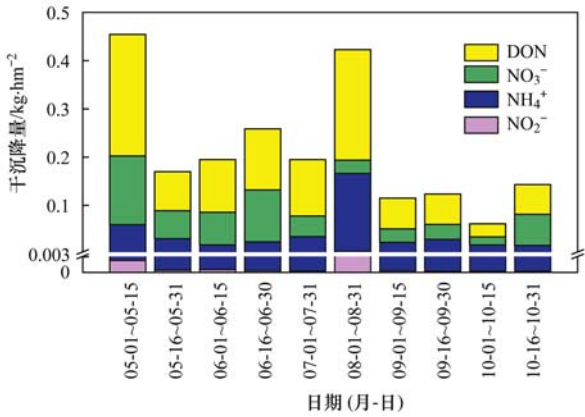


图 3 监测期颗粒物干沉降量

Fig. 3 Dry particulate nitrogen deposition during the monitoring period

降)、非生长季(混合沉降)氮沉降总量分别为 11.42 kg·hm⁻²和 1.51 kg·hm⁻², 分别占全年氮沉降总通量的 88.3%和 11.7%; 生长季氮湿沉降和干沉降总量分别为 9.28 kg·hm⁻²和 2.14 kg·hm⁻², 分别占该时段氮沉降总量的 81.3%和 18.7% (表 1). NO₂⁻ 沉降量极小, 其全年沉降量仅为 0.06 kg·hm⁻², 因此并未在表 1 中列出.

表 1 生长季、非生长季及全年大气氮沉降量/kg·hm⁻²

Table 1 Nitrogen deposition in growing season, non-growing season and the whole year/kg·hm⁻²

项目	TN	TIN	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	DON
干沉降	2.14	1.01	0.41	0.59	1.13
生长季					
湿沉降	9.28	6.77	3.92	2.78	2.51
干 + 湿沉降	11.42	7.78	4.33	3.37	3.64
非生长季					
混合沉降	1.51	0.49	0.32	0.16	1.02
全年					
氮沉降	12.93	8.27	4.65	3.53	4.66

2.2 大气氮沉降组成

全年大气氮沉降(生长季湿沉降 + 颗粒物干沉降以及非生长季混合沉降)中的 NH₄⁺/NO₃⁻ 为 1.3, 非生长季混合沉降的 NH₄⁺/NO₃⁻ 为 2.0, 生长季干 + 湿沉降沉降的 NH₄⁺/NO₃⁻ 为 1.3, 生长季湿沉降的 NH₄⁺/NO₃⁻ 为 1.4, 生长季干沉降的 NH₄⁺/NO₃⁻ 为 0.7 (表 1). 生长季的湿沉降中, NH₄⁺/NO₃⁻ 的变化范围为 0.41 ~ 4.07, 其中 8、10 月的 NH₄⁺/NO₃⁻ 较小, 7 月的 NH₄⁺/NO₃⁻ 较大(图 1); 干沉降中, NH₄⁺/NO₃⁻ 在不同月份的变化范围为 0.22 ~ 5.84, 其中 8 月的 NH₄⁺/NO₃⁻ 最大, 其余月份的 NH₄⁺/NO₃⁻ 较小(图 3).

全年大气氮沉降的 DON 沉降量在 TN 中的比例为 36.0%, 非生长季混合氮沉降中 DON 所占比

例为 67.5%, 生长季干 + 湿沉降中 DON 所占比例为 31.9%, 生长季湿沉降中 DON 所占比例为 27.0%, 生长季干沉降中 DON 所占比例 52.8% (表 1). 生长季湿沉降中, DON 占 TN 的比例变化范围较大, 为 0 ~ 40.1% (图 1); 干沉降中, DON 沉降量所占比例在各月份的变化范围较小, 为 43.4% ~ 54.2% (图 3); 各形态氮素全年的氮沉降通量之间存在一定的相关性, 各无机态氮均与 TN 显著正相关, 而 DON 与各无机态氮关系不显著, 降水量仅与 NO₃⁻ 通量存在极显著的正相关关系(表 2).

3 讨论

3.1 大气氮沉降及其组成

本研究中, 黑龙江凉水国家级自然保护区 2015

表 2 各形态氮沉降通量及降水量间的相关性¹⁾

Table 2 Correlations with the different forms of nitrogen deposition and precipitation

	TN	TIN	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	DON	降水量
TN	1						
TIN	0.954 **	1					
NH ₄ ⁺	0.897 **	0.939 **	1				
NO ₃ ⁻	0.837 *	0.888 **	0.663	1			
NO ₂ ⁻	0.826 *	0.841 *	0.925 **	0.550	1		
DON	0.719	0.477	0.454	0.411	0.469	1	
降水量	0.725	0.695	0.442	0.897 *	0.460	0.514	1

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

~2016 年度氮沉降总通量(生长季湿沉降 + 颗粒物干沉降以及非生长季混合沉降)为 $12.93 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ (表 1), 如果按照生长季湿沉降量占干 + 湿沉降的 81.3% 计算, 则保护区本年度湿沉降总通量为 $10.51 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 颗粒物干沉降总通量为 $2.42 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 中国氮湿沉降通量的变化范围为 $9.88 \sim 13.9 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 平均水平约为 $10.0 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ [16], 则本保护区湿沉降总通量在全国范围内属于中等水平. 同时, 根据各形态氮生长季干湿沉降比例可以计算出 NH_4^+ 、 NO_3^- 、DON 的湿沉降通量分别为 4.22 、 2.92 、 $3.22 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 其中 NH_4^+ 、 NO_3^- 的湿沉降通量均高于西欧 [$3.96 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 、 $2.34 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 和美国 [$1.08 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 、 $1.28 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 的平均水平 [17]. 当前, 对无机氮沉降的研究是十分普遍的, 而有机氮沉降的相关报道并不多见, 本研究区的无机氮沉降通量为 $8.27 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 低于我国森林生态系统混合氮沉降的平均水平 [$14.0 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] [18], 有机氮沉降通量为 $4.66 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 也低于全国有机氮湿沉降的平均水平 [$6.84 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] [19].

氮沉降中人类活动产生的 NH_4^+ 主要来源于动物粪便以及农业施肥所排放的 NH_3 , 而 NO_3^- 则主要来源于交通工具、电厂以及工厂化石燃料燃烧所释放的 NO_x , $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 可以一定程度上反映氮素的来源, 当 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- > 1$ 时表明该区工业并不发达, 生产方式以农业为主, 反之, 则表明生产方式以工业为主 [20~22]. 本研究的大气氮沉降中 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 为 1.3 (表 1), 表明本保护区产业以农业为主, 这符合当地的实际情况, 同时也与我国大气氮沉降中以 NH_4^+ 为主的现状一致 [23,24]. 同时, 8、10 月湿沉降的 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 较小 (图 1), 可能是由于 8 月为本保护区的旅游和实习旺季, 汽车尾气的排放增多, 而 10 月开始供暖, 产生了较多的 NO_x , 从而

导致大气中 NO_3^- 含量增多, 反映出了人类活动对氮沉降的影响. 但是, Pan 等 [25] 通过测定在北京城区采集的气溶胶中 $^{15}\text{NH}_4^+$ 的丰度, 发现非农业生产在霾天气是 NH_3 的重要来源, 通过同位素分析解析沉降氮的来源在本区未来的大气氮沉降研究中十分必要. 此外, 本研究中, DON 占全年大气氮沉降总量的比例为 36.0% (表 1), 与 Zhang 等 [26] 在我国以北部平原为主的 15 个观测点的观测结果相近 (30%), 略高于本研究湿沉降中 DON 在全氮中所占比例 (27.0%), 却远低于干沉降中 DON 所占比例 (52.8%), 这与湿沉降量较高有关, 表明湿沉降在氮沉降中的重要地位, 但 DON 的地位也不容忽视. 而 DON 与无机氮的关系不显著表明了该区有机氮和无机氮的来源并不一致, 孢子、花粉、细菌的传播, 植物的分解可能是 DON 的重要来源 [27, 28].

3.2 大气氮沉降评估

根据 Pan 等 [10] 的研究, 中国北部地区的湿沉降在氮沉降 (湿沉降 + 颗粒物干沉降) 中所占比例大致在 76~84% 范围内, 这与本研究中湿沉降所占比例 81.3% 一致. 湿沉降量与降水量间有较大的正相关关系 ($R^2 = 0.87$, $P < 0.001$, 图 2), 表明降水量的变化会对本区的氮沉降量有较大影响. 根据贺伟等 [29] 对东北地区 45 年的降水和温度趋势的研究结果, 本研究地存在全年降水量减少温度增加、夏季降水量减少、冬季降水量增多的变化趋势, 则保护区的湿沉降量预计会呈现出与降水量一致的变化趋势, 全年湿沉降减少, 冬季湿沉降增多, 生长季氮沉降量所占比例下降. 本研究中, 生长季氮沉降量较高 ($11.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 占全年氮沉降量的 88.3% (表 1), 有利于为植物生长提供养分 [30], 而在生长季初期, 植物和微生物对养分的竞争较为激烈, 在不出现反复冻融的情况下, 冬季增加的湿沉降量在冰雪融化时能够及时供给于植物和微生物

物,减小竞争^[31, 32]。此外,在 Solinger 等^[33]的研究中,降水中 DON 质量浓度与温度显著正相关,那么随着本研究地温度的升高,湿沉降中 DON 质量浓度预计会有所增加;而本研究中大气 NO_3^- 通量与降水量呈显著的正相关(表 2),随着降水量的减少,大气氮沉降中 NO_3^- 通量预计也将下降。以上可能的变化趋势最终将导致大气中氮沉降组成(无机氮和有机氮比例)发生一定变化。同时,本研究中降水较多的月份干沉降量较低、湿沉降量较高,降水较少的月份干沉降量较高,而湿沉降量较低,干湿沉降呈现出一种此消彼长的变化状态(图 1 和图 3),说明降水量的变化预计也会改变干湿沉降在大气氮沉降中的分配比例,湿沉降的主导地位可能会有所下降。

实际上, NH_3 、 NO_2 、 HNO_3 等气体干沉降也是大气氮沉降的重要组成部分^[10, 34]。而本实验所观测的干沉降仅为颗粒物干沉降,因此本实验观测的氮沉降通量 $[12.93 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ 低估了实际大气氮沉降量。若根据 Xu 等^[15]所报道的东北地区混合沉降占大气氮总沉降比例为 46% 计算,则本保护区实际大气氮沉降通量为 $22.6 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,已经超过了东北某些地区经验上的氮临界负荷值 $[20 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ ^[35],具有一定的环境风险。此外,非生长季样品只在次年初春取样,实测的降雪量将因升华蒸发被低估,而由于冬季温度极低, NH_4^+ 挥发、有机氮降解等过程造成的氮损失较小,会使实测的氮质量浓度略有升高,因此,非生长季混合沉降可能被低估,但是低估量可以忽略^[36]。降水中 TN 质量浓度的平均值为 $1.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最高时能达到 $3.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 1),已经超过了地表水环境质量标准 GB 3838-2002 中对工业区及人体非直接接触的娱乐区用水的标准值($1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。因此,本地区需要重视当地的氮沉降状态,及时采取措施避免氮沉降量的升高,并注意生活用水的质量监测和净化。本地区依托于该保护区以及附近林场,正在大力发展旅游业和林下产业,当地在发展经济的同时应当注意环境保护,采用绿色清洁能源,减少污染物排放,保护森林资源。

4 结论

(1) 黑龙江凉水国家级自然保护区 2015 ~ 2016 年度大气氮沉降总通量(生长季湿沉降 + 颗粒物干沉降以及非生长季混合沉降)为 $12.93 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,其中无机氮沉降总通量为 8.27

$\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 为 1.3,农业生产是主要的无机氮来源;有机氮沉降总通量为 $4.66 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,占全氮比例为 36.0%,有机氮来源与无机氮不一致。

(2) 该区生长季氮沉降总量(湿沉降 + 颗粒物干沉降)为 $11.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,非生长季的氮沉降总量(混合沉降)为 $1.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别占全年氮沉降总通量的 88.3% 和 11.7%。生长季氮湿沉降总量和颗粒物干沉降总量分别为 $9.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $2.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,各占生长季干湿沉降总量的 81.3% 和 18.7%;湿沉降量与降水量显著正相关。该区湿沉降量在全国属于中等水平,且降水对当地的氮沉降有重要影响。

(3) 该区的氮沉降水平存在一定的环境风险,且该区降水中氮质量浓度较高,当地在生活生产过程中应注意环境保护与水质监测。

参考文献:

- [1] Schulte-Uebbing L, de Vries W. Global-scale impacts of nitrogen deposition on tree carbon sequestration in tropical, temperate, and boreal forests: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(2): e416-e431.
- [2] Binkley D, Högberg P. Tamm Review: Revisiting the influence of nitrogen deposition on Swedish forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, **368**: 222-239.
- [3] 杨涵越,张婷,黄永梅,等.模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1900-1907.
Yang H Y, Zhang T, Huang Y M, et al. Effect of stimulated N deposition on N_2O emission from a *Stipa krylovii* steppe in Inner Mongolia, China[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1900-1907.
- [4] 曾清苹,何丙辉.应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3590-3597.
Zeng Q P, He B H. Effect of nitrogen deposition on soil microbial community structure determined with the PLFA method under the masson pine forest from Mt. Jinyun, Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3590-3597.
- [5] Greaver T L, Clark C M, Compton J E, et al. Key ecological responses to nitrogen are altered by climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2016, **6**(9): 836-843.
- [6] Lamarque J F, Kiehl J T, Brasseur G P, et al. Assessing future nitrogen deposition and carbon cycle feedback using a multimodel approach: Analysis of nitrogen deposition[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, **110**(D19): D19303.
- [7] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: Past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, **70**(2): 153-226.
- [8] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, **494**(7438): 459-462.
- [9] Dentener F, Drevet J, Lamarque J F, et al. Nitrogen and sulfur

- deposition on regional and global scales: A multimodel evaluation [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, **20**(4): GB4003.
- [10] Pan Y P, Wang Y S, Tang G Q, *et al.* Wet and dry deposition of atmospheric nitrogen at ten sites in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(14): 6515-6535.
- [11] Hunová I, Kurfürst P, Stráník V, *et al.* Nitrogen deposition to forest ecosystems with focus on its different forms [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 791-798.
- [12] 张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 等. 被动采样法表征降水离子浓度和通量的局限性 [J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(5): 684-690. Zhang G Z, Pan Y P, Tian S L, *et al.* Limitations of passive sampling technique of rainfall chemistry and wet deposition flux characterization [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(5): 684-690.
- [13] 王杰飞, 朱潇, 沈健林, 等. 亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2264-2272. Wang J F, Zhu X, Shen J L, *et al.* Atmospheric ammonia/ammonium-nitrogen concentrations and wet and dry deposition rates in a double rice region in subtropical China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2264-2272.
- [14] 袁磊, 李文周, 陈文伟, 等. 戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4142-4146. Yuan L, Li W Z, Chen W W, *et al.* Characteristics of nitrogen deposition in Daiyun mountain national nature reserve [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4142-4146.
- [15] Xu W, Luo X S, Pan Y P, *et al.* Quantifying atmospheric nitrogen deposition through a nationwide monitoring network across China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(21): 18345-18360.
- [16] Zhao Y H, Zhang L, Chen Y F, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition to China: A model analysis on nitrogen budget and critical load exceedance [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **153**: 32-40.
- [17] Holland E A, Braswell B H, Sulzman J, *et al.* Nitrogen deposition onto the United States and western Europe: Synthesis of observations and models [J]. *Ecological Applications*, 2005, **15**(1): 38-57.
- [18] Du E Z, Jiang Y, Fang J Y, *et al.* Inorganic nitrogen deposition in China's forests: Status and characteristics [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **98**: 474-482.
- [19] Zhang Y, Song L, Liu X J, *et al.* Atmospheric organic nitrogen deposition in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **46**: 195-204.
- [20] Wu S P, Dai L H, Wei Y, *et al.* Atmospheric ammonia measurements along the coastal lines of Southeastern China: Implications for inorganic nitrogen deposition to coastal waters [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **177**: 1-11.
- [21] Zhan X Y, Yu G R, He N P, *et al.* Nitrogen deposition and its spatial pattern in main forest ecosystems along north-south transect of eastern China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, **24**(2): 137-146.
- [22] 宋欢欢, 姜春明, 宇万太. 大气氮沉降的基本特征与监测方法 [J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(2): 599-610. Song H H, Jiang C M, Yu W T. Basic features and monitoring methodologies of atmospheric nitrogen deposition [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(2): 599-610.
- [23] Sheng W P, Yu G R, Jiang C M, *et al.* Monitoring nitrogen deposition in typical forest ecosystems along a large transect in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(1): 833-844.
- [24] Wang H B, Yang F M, Shi G M, *et al.* Ambient concentration and dry deposition of major inorganic nitrogen species at two urban sites in Sichuan Basin, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 235-244.
- [25] Pan Y P, Tian S L, Liu D W, *et al.* Fossil fuel combustion-related emissions dominate atmospheric ammonia sources during severe haze episodes: Evidence from ^{15}N -stable isotope in size-resolved aerosol ammonium [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(15): 8049-8056.
- [26] Zhang Y, Zheng L X, Liu X J, *et al.* Evidence for organic N deposition and its anthropogenic sources in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(5): 1035-1041.
- [27] McKenzie R M, Özel M Z, Cape J N, *et al.* The import and export of organic nitrogen species at a Scottish ombrotrophic peatland [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2015, **12**(1): 515-554.
- [28] Song L, Kuang F H, Skiba U, *et al.* Bulk deposition of organic and inorganic nitrogen in southwest China from 2008 to 2013 [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **227**: 157-166.
- [29] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961-2005 年东北地区气温和降水变化趋势 [J]. *生态学报*, 2013, **33**(2): 519-531. He W, Bu R C, Xiong Z P, *et al.* Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(2): 519-531.
- [30] Eastaugh C S, Pötzelsberger E, Hasenauer H. Assessing the impacts of climate change and nitrogen deposition on Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Austria with BIOME-BGC [J]. *Tree Physiology*, 2011, **31**(3): 262-274.
- [31] Zhao Q, Chang D, Wang K, *et al.* Patterns of nitrogen export from a seasonal freezing agricultural watershed during the thawing period [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 442-450.
- [32] 苟小林, 吴福忠, 杨万勤, 等. 季节性冻融格局变化对高山森林土壤氮素淋溶损失的影响 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(2): 439-448. Gou X L, Wu F Z, Yang W Q, *et al.* Effect of changes in seasonal freeze-thaw pattern on nitrogen loss from leaching in the alpine forest soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(2): 439-448.
- [33] Solinger S, Kalbitz K, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic carbon and nitrogen in a Central European deciduous forest [J]. *Biogeochemistry*, 2001, **55**(3): 327-349.
- [34] Wu Y C, Zhang J P, Liu S L, *et al.* Nitrogen deposition in precipitation to a monsoon-affected eutrophic embayment: Fluxes, sources, and processes [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **182**: 75-86.
- [35] Liu X J, Duan L, Mo J M, *et al.* Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2251-2264.
- [36] 李华, 蔡体久, 盛后财, 等. 凉水自然保护区雪化学特征分析 [J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(2): 107-110, 165. Li H, Cai T J, Sheng H C, *et al.* Characteristic analysis on snow chemistry in Liangshui nature reserve [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, **22**(2): 107-110, 165.

CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM _{2.5} , PM ₁ and Their Carbonaceous Components in Beijing	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM _{2.5} in the Northern Suburb of Nanjing in Spring	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO _x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ¹⁵ N and ¹⁸ O Isotope Technique	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamnox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A ² /O-BAF at Low Temperatures	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O ₃ -BAC and Analysis of Consortium Structure	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH ₃ and N ₂ O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(<i>Comammox Nitrospira</i>) in a Neutral Paddy Soil	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China: Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17 β -estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Lincomycin Mycelia Dreg with Manure	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)