

# 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 <sub>2.5</sub> 和 PM <sub>1</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>x</sub> 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 .....                                            | 李奇峰, 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 <sub>2</sub> 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δ <sup>15</sup> N和δ <sup>18</sup> O的农业区地下河硝酸盐污染来源 .....           | 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 <sup>2</sup> /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 <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> 挥发和 N <sub>2</sub> 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) |                                                         |

# 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

(西南大学地理科学学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715)

**摘要:** 以重庆市远郊的丰都雪玉洞流域为研究对象, 利用气象站和大气氮沉降仪获取 2015 年 7 月~2017 年 12 月的大气降水、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  等数据, 通过  $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$  比以及气团后向轨迹模拟探讨了流域大气无机氮湿沉降来源。结果表明: ①在观测期内, 流域 DIN 总沉降通量为  $21.37 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 单位面积沉降通量为  $14.25 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 其中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  分别为  $7.72 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  和  $6.53 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 分别占 DIN 湿沉降量的 54% 和 46%; ②DIN 湿沉降通量和浓度表现出明显的季节变化, 春夏季 DIN 湿沉降量比秋冬季节高 50%, 而秋冬季湿沉降的 DIN 浓度比春夏季高 30%; ③ $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$  介于 0.29~2.27 之间, 雨季(4 月~9 月)  $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N} > 1$ , 旱季(10 月~次年 3 月)  $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N} < 1$ , 表明流域雨季 DIN 湿沉降主要来源农业源, 旱季主要来源于城市源; ④流域雨季主要受东南风的影响, 大气湿沉降的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  来源于当地与流域东南方向的农业源, 旱季主要受西南风影响, 大气湿沉降的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  来源于流域西南方向的重庆市区和涪陵等城市源。

**关键词:** 氮湿沉降; 铵态氮; 硝态氮; 雪玉洞流域; 来源分析

中图分类号: X517 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4479-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711053

## 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, HU Liu-chan, ZENG Ze, LÜ Xian-fu

(Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** Xueyu Cave watershed is located in Fengdu County in the outskirts of Chongqing, where rainfall events were monitored continuously from July 2015 to December 2017. We explored the variation of mass concentration of atmospheric dissolved inorganic nitrogen ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and  $\text{NO}_3^--\text{N}$ ), and quantitatively calculated its wet deposition fluxes, then the sources of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and  $\text{NO}_3^--\text{N}$  were tracked using the Xueyu cave air mass backward trajectory model. The results showed that: ①During the monitoring period, the average annual dissolved inorganic nitrogen (DIN) deposition in the watershed was  $14.25 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , of which  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and  $\text{NO}_3^--\text{N}$  were  $7.72 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  and  $6.53 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , accounting for 54% and 46% of DIN wet precipitation, respectively, and indicating that  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  is the dominant species, followed by  $\text{NO}_3^--\text{N}$ ; ②DIN wet deposition flux and concentration showed marked seasonal changes. The DIN wet deposition flux in spring and summer was 50% higher than that in autumn and winter, while the DIN concentration of wet deposition in autumn and winter was 30% higher than those in spring and summer. ③ $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$  was between 0.29 and 2.27, and  $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N} > 1$  during the rainy season (April to October) and  $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N} < 1$  during the dry season (November to March), indicating that the main sources of DIN wet deposition results from agricultural activities in the rainy season, and urban contributions in the dry season. ④In the study area, the southeastern winds are dominant in the rainy season but southwestern winds are dominant in the dry season. These determine the sources of DIN wet deposition (agricultural or urban).

**Key words:** nitrogen wet deposition;  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ;  $\text{NO}_3^--\text{N}$ ; Xueyu Cave watershed; source analysis

工业革命后, 由于化石燃料的大规模使用、工业、农业活动的日益频繁<sup>[1,2]</sup>, 以及商品贸易的全球化发展<sup>[3]</sup>, 使得  $\text{N}_\text{r}$  排放量远远超于工业化之前<sup>[4]</sup>. 全球人为  $\text{N}_\text{r}$  的排放量在 1860 年仅为 15 Tg, 1995 年为 100 Tg, 2005 年上升到 187 Tg<sup>[5]</sup>, 2010 年已达到 210 Tg<sup>[2]</sup>.

与此同时, 我国  $\text{N}_\text{r}$  排放量在过去 30 年里也迅猛增长, 目前已经跃居世界第一, 年均  $\text{N}_\text{r}$  排放量高达 22.42 Tg<sup>[1,6,7]</sup>. 自 1980~2010 年我国的煤炭使用量和汽车数量分别增加了 3.2 和 20.8 倍,  $\text{NO}_x$

的排放量则由 6 Tg 增加到 15 Tg, 氮肥使用量由 12 Tg 增加到 35 Tg<sup>[8]</sup>, 仅 2010 年我国化肥使用量远远超过了北美 11.1 Tg 和欧盟 10.9 Tg 的使用量, 占世界总产量的 30% 以上<sup>[9]</sup>, 如此高的  $\text{N}_\text{r}$  排放量导致我国已经成为世界三大氮沉降热点地区之

收稿日期: 2017-11-06; 修订日期: 2018-03-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502306); 国家自然科学基金项目(41472321); 重庆市自然科学基金项目(CSTC2016JCYJYS0003, CSTC2017JCYJ-YSZX004)

作者简介: 段世辉(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为资源环境与 GIS 应用, E-mail: 1789935451@qq.com

\* 通信作者, E-mail: jiangyj@swu.edu.cn

首<sup>[10~12]</sup>, 沉降通量为 $[39.9 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ , 其中西南地区的沉降通量为 $[37.8 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ , 仅次于华北 $[56.2 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ 和东南地区 $[41.7 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ <sup>[13]</sup>; 而西南地区是全球三大碳酸盐岩连片分布区之一, 为典型的生态脆弱区<sup>[14]</sup>, 氮沉降不但对岩溶生态系统产生显著的影响, 还会影响到岩溶地质过程<sup>[15, 16]</sup>. 目前, 西南地区开展了一些氮沉降相关的研究, 并获得了一些认识, 但主要集中于城市和典型农业区地区<sup>[9, 17~19]</sup>, 而针对远郊区研究很少, 这对于评估氮沉降的岩溶生态环境与地质过程的影响远远不足. 因此, 本文以重庆市远郊的丰都县雪玉洞岩溶流域为研究对象, 利用气象站和氮沉降仪获取 2015 年 7 月~2017 年 12 月的气象降水以及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 等数据, 定量评估大气无机氮湿沉降通量, 并通过 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 比、流域气团后向轨迹模拟来探讨流域大气无机氮湿沉降的来源, 以期为生态系统碳-氮耦合过程与生态环境效应研究提供基础数据, 同时也为我国大气氮沉降强度和时空分布与长期变化趋势积累基础数据.

## 1 研究区概况

雪玉洞流域位于重庆市东北的丰都县包鸾镇,  $29^\circ 43' 20'' \text{N} \sim 29^\circ 47' 00'' \text{N}$ ,  $107^\circ 43' 0'' \text{E} \sim 107^\circ 47' 13'' \text{E}$ (图 1), 长江上游一级支流龙河峡谷左岸, 地处川东平行岭谷方斗山背斜西北翼, 流域面积为  $13.1 \text{ km}^2$ , 距离丰都县主城约  $19.4 \text{ km}$ , 距离工业重镇涪陵  $47 \text{ km}$ , 距离重庆市中心约  $185 \text{ km}$ . 流域气候为典型亚热带湿润季风气候, 年均气温为  $16.5^\circ \text{C}$ , 年均降水量为  $1100 \text{ mm}$ , 降雨集中于雨季 4~9 月, 大气降水是流域地下水的唯一补给来源; 区内植被为亚热带常绿阔叶林和灌木, 土壤为黄壤, 土层厚度约为  $0 \sim 50 \text{ cm}$ ; 土地利用包括林地和耕地(旱地), 其中林地面积为  $10.7 \text{ km}^2$ , 占流域面积的  $81.7\%$ , 旱地面积为  $2.4 \text{ km}^2$ , 占流域面积的  $18.3\%$ ; 流域内常住人口约 500 人, 居住分散, 无污染工业; 该区著名旅游景点雪玉洞被称为中国最美的六大洞穴之一, 具有极高的观赏价值和科考价值, 为国家 4A 级风景旅游区.

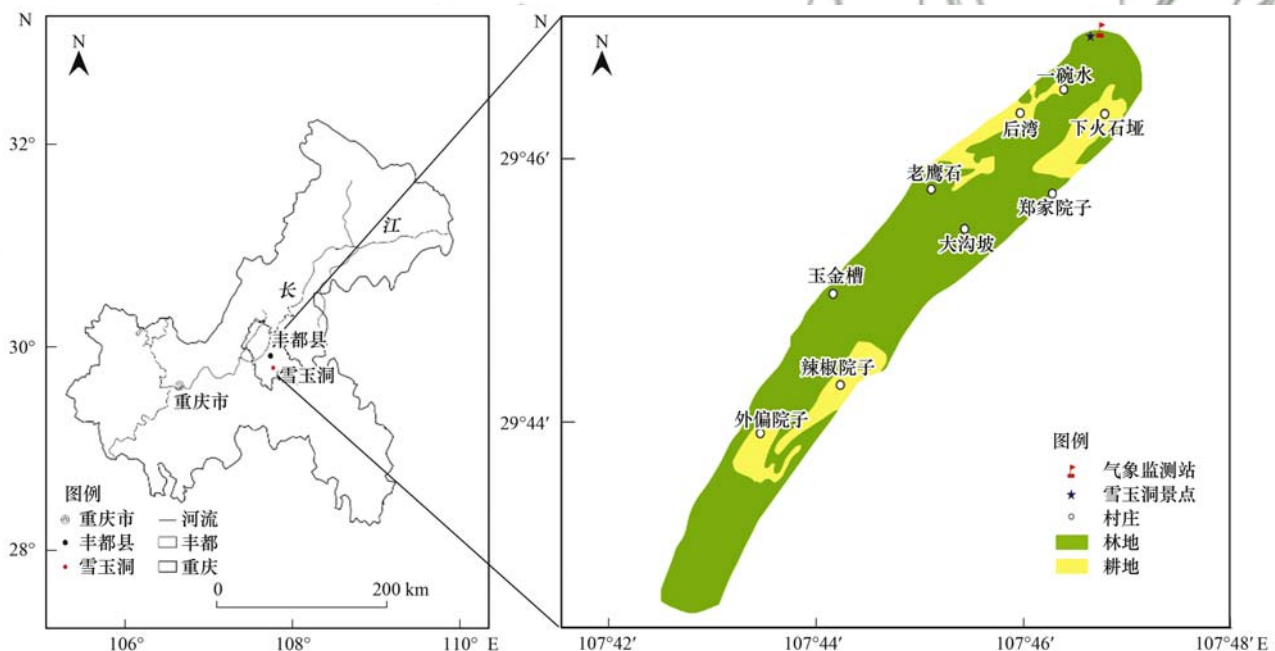


图 1 雪玉洞流域土地利用方式以及气象、大气氮沉降监测站

Fig. 1 Land use, weather, and atmospheric N wet deposition monitoring stations in the Xueyu Cave watershed

## 2 采样方法

### 2.1 样品采集与处理

雨水的收集使用青岛崂山电子仪器总厂有限公司生产的 SYC-3 型降水降尘自动采样器收集, 仪器启动检测下限为  $0.2 \text{ mm}$ , 当降雨开始时, 采样器会自动打开收集装置对降雨进行收集(若为降雪则需

待雪融化成水后自动感应收集)雨停后  $5 \text{ min}$  就立即封盖, 雨样自动保存于仪器的冰箱中( $4^\circ \text{C}$ ). 降雨量则用天津气象仪器厂有限公司生产的 DAVIS Vantage Pro2 型自动气象监测站进行实时监测, 每  $15 \text{ min}$  记录一次数据, 雨量检测下限为  $0.2 \text{ mm}$ . 仪器均安装在距雪玉洞景点约  $250 \text{ m}$  的行政大楼三楼楼顶, 每月取样后对仪器进行清扫并及时除去动

物排泄物和枯枝落叶等。

采样前,先将沉降仪采集箱内白天和夜晚模式所接的雨水混合,并用力摇晃,使其充分混合。 $\text{NH}_4^+$  用美国 HACH 公司生产的 DR850 水质仪来检测,精度分别为  $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^-$  用瑞士 Metrohm 公司生产的 761 型离子色谱仪测定,精度为  $0.001 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,所有测试分析在岩溶环境重庆市重点实验室完成。由于  $\text{NH}_4^+$  的化学稳定性较差,所以为保证数据的准确性,每次采样时,均先现场测定  $\text{NH}_4^+$  的浓度,  $\text{NO}_3^-$  的稳定性较好,所以先用雨水将采样瓶润洗 3 次(以避免污染水样)采集 50 mL,用 Parafilm 封口膜密封,在 12 h 内送至实验室在  $4^\circ\text{C}$  的低温下保存,直到测样前取出。为了避免二次污染,样品采集过后,将雨水收集桶带走用纯水清洗并 3 次用 5% 硝酸溶液浸泡 1 d,再用纯水洗 3 次,烘干过后再使用。由于采样间隔较长(1 月 1 次),为保证样品中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的精确性,每次采样过后,换雨水收集桶时,在桶里放入 0.1 g HgCl<sub>2</sub>,以减小微生物和长时间保存的影响。

## 2.2 数据分析

氮湿沉降量计算:

$$D_{\text{wp}} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \times P_i}{100}$$

式中,  $D_{\text{wp}}$  为总氮湿沉降量 ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),  $c_i$  为第  $i$  月的氮质量浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),  $P_i$  为  $i$  月的降雨量 (mm), 100 为单位转换系数。

由于 2016 年 7、8 月的降水和实验数据缺乏(研究区的桥被龙河上游泄水冲垮),所以降水量数据参考研究区 2011~2015 年 7、8 月的降水占全年百分比的平均值,  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度数据则参考文献[16]和本文于 2017 年 7、8 月实验数据的平均值计算得出,可能会导致 2016 年氮沉降量有所偏差。

## 2.3 气团后向轨迹模拟

本文采用混合型单粒子拉格朗日综合轨迹 HYSPLIT 软件和全球数据同化系统 GDAS 气象数据来模拟降雨的气团后向轨迹([https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_traj.php](https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php))。模拟前将 24 h 内非连续性降雨雨量  $< 5 \text{ mm}$  的自动舍弃,轨迹的起始时间按照国际标准时间选取(研究区降水起始时间前推 8 h),降水相对应的湿沉降气团轨迹的起始时间尽可能选择靠近该次湿沉降过程中间同时强度最大的时刻,每隔 6 h 计算一次,每个气团轨迹的后

推时间为 120 h,高度分别设置为 3 000 m 和 500 m。

数据相关统计分析用 Windows Origin 9.0, 图表的绘制采用 Windows Origin 9.0 和 Corel DRAW X4 来处理。

## 3 结果与分析

### 3.1 氮沉降量动态分析

#### 3.1.1 氮沉降量年变化

在观测期间,2015 年下半年降水中 DIN 湿沉降量为  $6.34 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (表 1), 2016 年为  $14.70 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 2017 年为  $13.79 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 2017 年沉降量较 2016 年下降了 6.2%。由于 2015 年只测定了 7~12 月的氮沉降量,9 月之后便没有农业活动,所以  $\text{NH}_4^+$ -N 沉降量相对偏低。全年湿沉降中,  $\text{NH}_4^+$ -N 比重由 2016 年的 55% 下降至 2017 年的 53%, 但仍然是主要沉降形式,  $\text{NO}_3^-$ -N 比重则由 45% 上升至 47%, 2017 年  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 沉降量较 2016 年均有所下降,分别降低了  $0.70 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $0.21 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。研究区降雨量及不同形态氮湿沉降量降如图 2, 从中可知,降雨量和  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 沉降量的时间分布很不均匀,研究期间  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 和 DIN 沉降量分别介于  $0.15 \sim 1.91$ 、 $0.23 \sim 1.22$  和  $0.46 \sim 3.13 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 这与降雨量有关,研究区多年平均降雨量为 1 100 mm,以 6 月和 9 月最多,单月降雨量最高可达到 204 mm,占全年降雨的 19%,而 11 月和 12 月降雨量最少,不及全年降雨量的 5%,所以造成  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 沉降量峰值出现在 6 月,最低值略有差异,但主要集中在冬半年,且监测过程中月降雨量与不同形态氮沉降量均为正相关(图 3,  $n=30$ ,  $P>0.05$ ),说明氮湿沉降与降雨量密切相关。

#### 3.1.2 氮沉降量季节变化

根据重庆地区的降水量和热量差异,分别定义春(3 月~5 月)、夏(6 月~8 月)、秋(9 月~11 月)、冬(12 月~次年 2 月)这 4 个季节。研究过程中不同形态氮沉降量的季节性波动很大(表 2),春夏季沉降量比秋冬季高 50%。不同形态氮沉降量夏季  $>$  春季  $>$  秋季  $>$  冬季,即夏季最高,冬季最低。 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 和 DIN 年均夏季沉降量分别是  $3.11$ 、 $2.26$  和  $5.37 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,占全年沉降总量的 39%、35% 和 37%。年均冬季沉降量最低,分别是  $1.33$ 、 $1.16$  和  $2.49 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,仅占全年的 17%、18% 和 17%。

$\text{NO}_3^-$ -N 和 DIN 夏季沉降量几乎是冬季的 2 倍,

表 1 无机氮湿沉降量年变化

Table 1 Annual variation of DIN wet deposition flut

| 年份   | 降雨量<br>/mm | 沉降量/kg·hm <sup>-2</sup>         |                                 |       | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/DIN |    |
|------|------------|---------------------------------|---------------------------------|-------|-------------------------------------|----|
|      |            | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | DIN   | /%                                  | /% |
| 2015 | 534        | 2.80                            | 3.54                            | 6.34  | 44                                  | 56 |
| 2016 | 1 093      | 8.06                            | 6.64                            | 14.70 | 55                                  | 45 |
| 2017 | 1 066      | 7.36                            | 6.43                            | 13.79 | 53                                  | 47 |
| 平均值  | 1 080      | 7.71                            | 6.54                            | 14.25 | 54                                  | 46 |

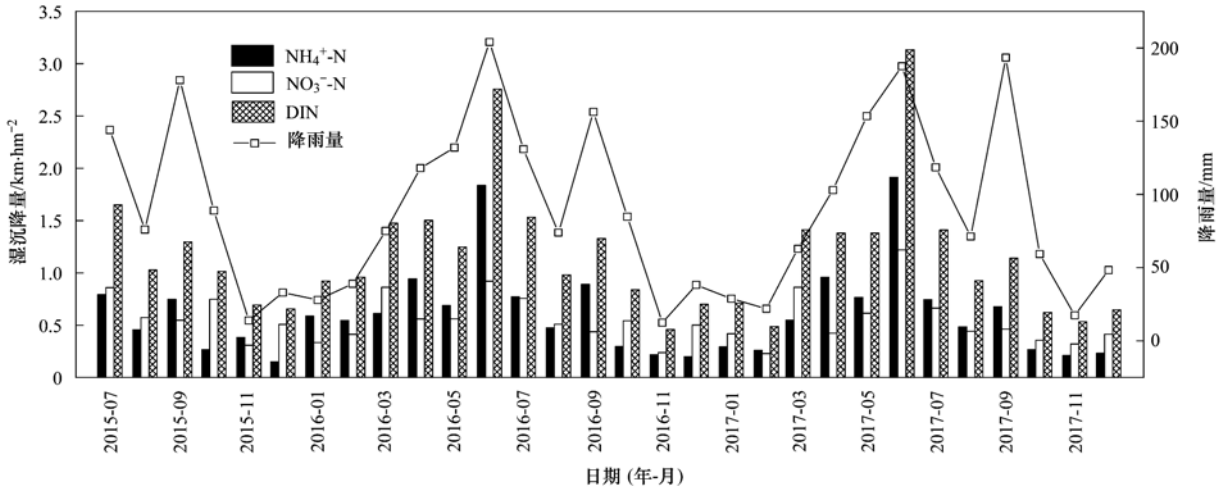


图 2 降雨量及无机氮湿沉降量变化

Fig. 2 Variations in precipitation and DIN wet deposition flut

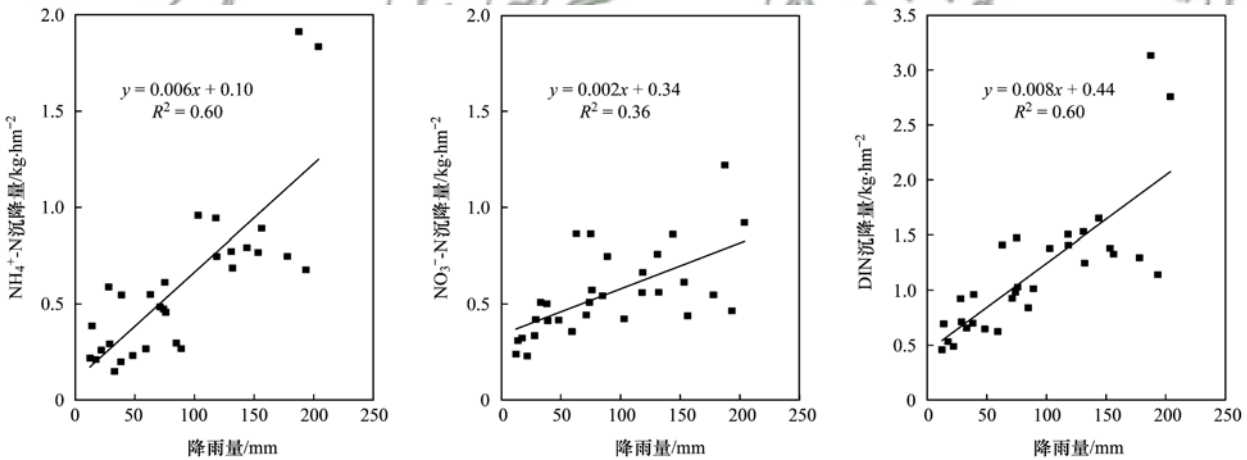


图 3 降雨量与无机氮湿沉降量相关性

Fig. 3 Correlations between rainfall and DIN wet deposition flut

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N略高此倍数. 这与降雨量和当地农业活动有关, 由前文可知氮沉降量与降雨量显著正相关(图3), 夏季降雨量为全年最高几乎是冬季的4倍(表2), 可能造成夏季沉降量高于冬季. 夏季为农作物主要生长期, 此期间, 由于作物生长需要不定期施肥, 但研究区农业生产、管理相对分散, 农民施用化肥仅按照自己的主观经验, 缺乏科学指导, 同时夏季气温较高, 氮肥挥发速率加快, 导致夏季NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的沉降量偏高.

此外, 秋季降水量虽然远远高于冬季, 但是氮

沉降量却相近, 可能是因为秋季虽然降雨量多, 但农业活动强度降低, 大部分农作物均已成熟, 导致挥发到大气中的氮浓度降低. 雪玉洞流域属于典型的河谷地貌, 冬季大气层结稳定, 污染物难以扩散, 所以易随着雨水沉降, 致使秋冬季节氮沉降通量接近.

3.2 氮浓度动态分析

3.2.1 氮浓度年变化

在2015~2017年间, 雪玉洞流域NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和DIN浓度变化范围分别为为0.35~2.75、

表 2 不同形态无机氮湿沉降量的季节变化

Table 2 Seasonal variations in different forms of DIN wet deposition flux

| 时间       | 降雨量/mm | 沉降量/kg·hm <sup>-2</sup>         |                                 |      |
|----------|--------|---------------------------------|---------------------------------|------|
|          |        | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | DIN  |
| 2016 年冬季 | 105    | 1.33                            | 1.25                            | 2.58 |
| 2016 年春季 | 325    | 2.24                            | 1.98                            | 4.23 |
| 2016 年夏季 | 409    | 3.08                            | 2.19                            | 5.27 |
| 2016 年秋季 | 254    | 1.41                            | 1.22                            | 2.63 |
| 2017 年冬季 | 99     | 0.78                            | 1.06                            | 1.85 |
| 2017 年春季 | 319    | 2.27                            | 1.90                            | 4.17 |
| 2017 年夏季 | 377    | 3.14                            | 2.33                            | 5.47 |
| 2017 年秋季 | 270    | 1.15                            | 1.14                            | 2.30 |

0.28 ~ 2.21 和 0.59 ~ 4.96 mg·L<sup>-1</sup> (见表 3)。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度月平均值分别是 0.85、0.97 和 0.78 mg·L<sup>-1</sup>，NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度月平均值分别是 1.04、0.89 和 0.84 mg·L<sup>-1</sup>，DIN 月平均浓度分别是 1.89、1.87 和 1.61 mg·L<sup>-1</sup>，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度有所波动，先升高后降低，而 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 DIN 浓度则持续下降中，与沉降通量的

年际变化一致，这可能是由于“十二五”规划后，为响应国家节能减排政策的号召，当地政府对能源管控力度加大所致。研究区 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 DIN 浓度最低值均高于 0.24 mg·L<sup>-1</sup>，皆大于水体富营养化阈值(0.20 mg·L<sup>-1</sup>)<sup>[20]</sup>，所以大气氮湿沉降可能对雪玉洞流域的地表水体造成潜在污染。

表 3 无机氮湿沉降月均浓度年变化

Table 3 Variations of monthly mean concentration of DIN wet deposition

| 年份   | 降雨量/mm | 浓度/mg·L <sup>-1</sup>           |      |                                 |      |             |      |
|------|--------|---------------------------------|------|---------------------------------|------|-------------|------|
|      |        | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N |      | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N |      | DIN         |      |
|      |        | 范围                              | 月平均值 | 范围                              | 月平均值 | 范围          | 月平均值 |
| 2015 | 534    | 0.45 ~ 2.75                     | 0.85 | 0.31 ~ 2.21                     | 1.04 | 0.73 ~ 4.96 | 1.89 |
| 2016 | 1093   | 0.35 ~ 2.10                     | 0.97 | 0.28 ~ 1.93                     | 0.89 | 0.85 ~ 3.70 | 1.87 |
| 2017 | 1066   | 0.35 ~ 1.21                     | 0.78 | 0.24 ~ 1.85                     | 0.84 | 0.59 ~ 2.46 | 1.61 |

观测期间降雨量以及湿沉降氮浓度变化如图 4 所示，降水中各种形态氮浓度存在显著的月均差异，最高值和最低值的出现时间并不一致。总体而言，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 DIN 浓度最低值并不是出现在降雨量最多的 6 月，而是 9 月，平均值为 0.45、0.28 和 0.72 mg·L<sup>-1</sup>，最高值出现在 11 月，平均值为 2.02、2.00 和 3.90 mg·L<sup>-1</sup>，这可能与降雨量、人类活动强度有关，不同于 6 月农业活动强烈且气温高，9 月农作物基本成熟，再无农业活动，挥发到大气中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 不及 6 月强烈，且 9 月为全年降雨的次高值，雨水洗脱作用强，所以各种

形态的氮浓度很低，而 11 月降雨急剧减少，不及全年降雨的 5%，大气中污染物积累多，滞留时间久，致使雨水中氮浓度很高。

3.2.2 氮浓度季节变化

根据表 4 可知，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 DIN 浓度均是秋冬季明显高于春夏季，秋冬季氮浓度比春夏季高 30%，这与陈能汪等<sup>[21]</sup>对九龙江流域大气氮湿沉降的研究结果相一致。这可能是由于雨季降水集中，占全年降水的 75% ~ 78%，雨水对大气中水溶性的含氮化合物(如气态 NH<sub>3</sub> 和 HNO<sub>3</sub>，颗粒态 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)的冲刷和洗脱作用强<sup>[22]</sup>，而秋冬季

表 4 不同形态氮浓度季节变化

Table 4 Seasonal variations in concentrations of different N compounds

| 时间       | 降雨量/mm | 浓度/mg·L <sup>-1</sup>           |                                 |      |
|----------|--------|---------------------------------|---------------------------------|------|
|          |        | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | DIN  |
| 2016 年冬季 | 105    | 4.02                            | 3.57                            | 7.59 |
| 2016 年春季 | 325    | 2.14                            | 2.05                            | 4.19 |
| 2016 年夏季 | 409    | 2.13                            | 1.72                            | 3.85 |
| 2016 年秋季 | 254    | 2.68                            | 2.85                            | 5.53 |
| 2017 年冬季 | 99     | 2.67                            | 3.35                            | 6.02 |
| 2017 年春季 | 319    | 2.30                            | 2.18                            | 4.48 |
| 2017 年夏季 | 377    | 2.33                            | 1.83                            | 4.16 |
| 2017 年秋季 | 270    | 2.01                            | 2.69                            | 4.70 |

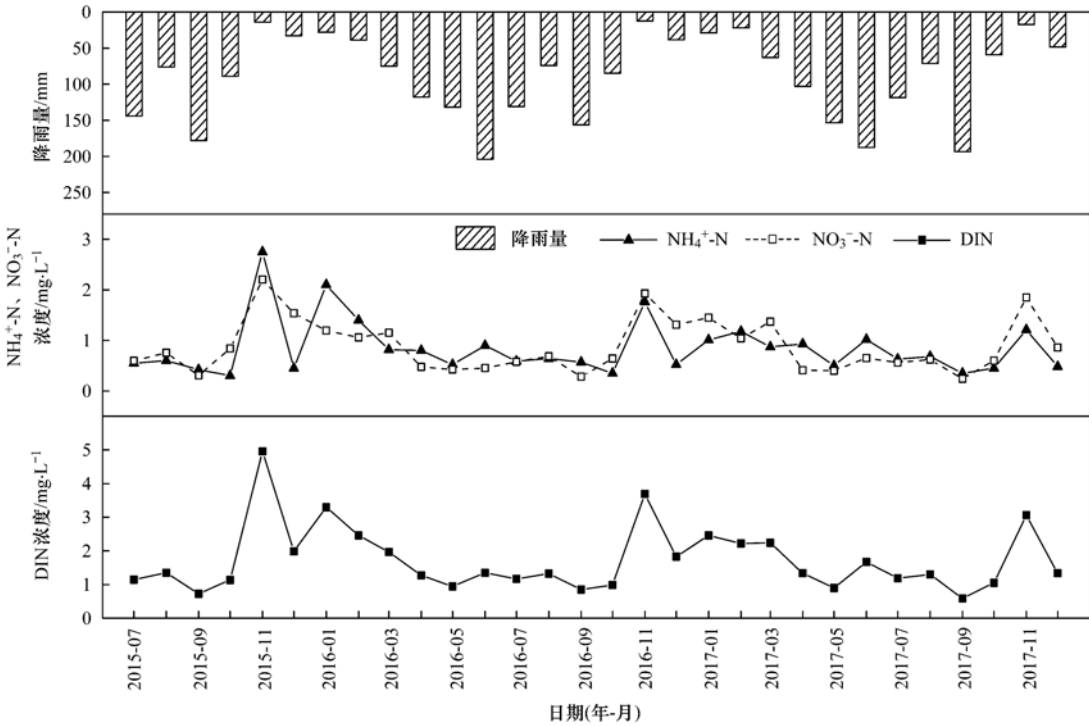


图4 降雨量及无机氮湿沉降浓度变化

Fig. 4 Variations of rainfall and DIN wet deposition concentration

节降雨总量虽较小,但具有持续时间久、频率高的特点,雨滴比表面积大,对人类生产生活输入大气中的水溶性含氮化合物具有很强的吸附作用,所以污染物易随着雨水沉降,致使秋冬季节氮质量浓度偏高。

4 讨论

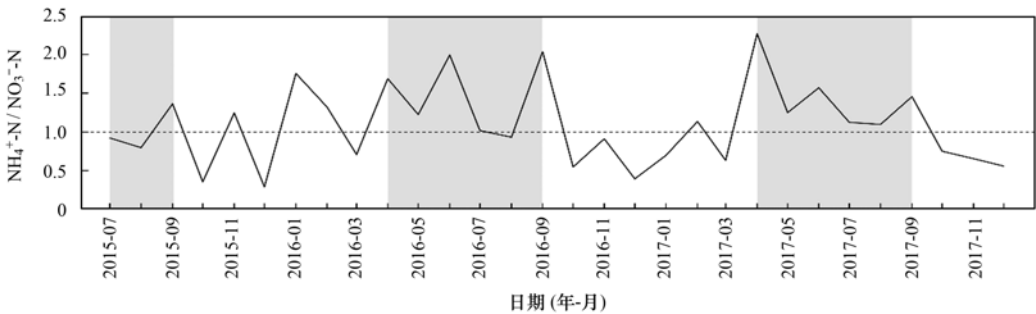
4.1 不同形态氮素来源分析

已有研究表明,降雨中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 主要来源于人畜粪便和农业氮肥挥发到大气中的氨气随降雨沉降以及土壤微生物分解含氮有机物<sup>[23, 24]</sup>,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 则主要来源于闪电、土壤微生物的反硝化过程、化石燃料及生物体的燃烧<sup>[25, 26]</sup>。因此,大气湿沉降中

$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的比值可以很好地区别氮素来源,当 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N} > 1$ 时,说明主要来自于农业源,反之则来自于工业和交通源<sup>[9, 18]</sup>。

4.1.1  $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与大气无机氮湿沉降来源

本研究期间,大气湿沉降中 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 比值如图5所示,  $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 比值介于0.29 ~ 2.27之间,2015、2016和2017年平均值分别为0.79、1.21和1.14,由于2015年仅收集了研究区下半年(7~12月)的雨水,9月之后便无农业活动,所以 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 比值偏低,但从2016和2017年 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 比值可看出,研究区大气湿沉降是农业源主导型。但在不同时间,氮浓度的主导排放源并不一致,存在显著变化,雨季为农业源,旱



灰色部分为雨季,白色部分为旱季

图5 雪玉洞流域大气无机氮湿沉降 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 比的月变化

Fig. 5 Monthly variations of  $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$  in DIN wet deposition in the Xueyu Cave watershed

季为工业或交通源。

雨季(4~9月),  $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N} > 1$ , 这与重庆地区农业活动周期一致<sup>[27]</sup>, 3月开始播种玉米、蔬菜等作物, 4月上旬种植水稻, 5月种植油菜, 除却4月中旬集中施肥外, 不同作物生长期视长势对其间隔性地锄草和施肥, 同时雨季气温较高, 一方面氮肥很容易挥发到空气中, 另一方面家禽家畜排泄物以及人类生活废水的排放也会加剧大气中  $\text{NH}_3$  的浓度<sup>[15,28]</sup>。而旱季(10月~次年3月),  $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N} < 1$ , 可能是因为进入冬季, 气温较低, 附近农村和景点加剧了电、蜂窝煤和秸秆柴薪等的使用量, 所以致使  $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$  比值低于 1。

#### 4.1.2 交通源污染分析

雪玉洞景点虽为国家AAAA级旅游景点, 但由于旅游宣传不到位, 且旅游设施单一化, 游客地域承接能力弱, 所以年均接待游客量(表征汽车尾气以及化石燃料燃烧所引起的交通污染)远远低于九寨沟景点, 而 Qiao 等<sup>[29]</sup>对九寨沟景点由旅游活动

对大气氮湿沉降贡献部分的量化后发现, 九寨沟氮湿沉降来自旅游活动的贡献很小, 更大程度上易受污染物的远距离输送影响。研究期间雪玉洞降雨量、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度和游客接待量如图6所示, 2015年共接待游客102 897人, 月均接待游客8 575人。2016年7月19日由于龙河上游泄水造成到达景点的必经桥被冲毁, 7、8月雪玉洞停业, 9月开始用船只接送游客, 景点恢复正常, 一直持续到2017年7月, 雪玉洞完全停业修桥。从图6可以看出, 2016年7月~2017年6月间, 游客量较2015年同期有所下降,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度亦有所下降, 但是2017年7月之后, 雪玉洞景点未曾接待游客,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度并未明显下降, 9~11月还呈现显著升高的状态, 且结合游客量与  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度相关性[图7(a)], 发现雪玉洞游客量与雨水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度并无相关性, 由此推断旅游活动所带来的交通源污染对雪玉洞  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的贡献很小, 还存在有其他主导性污染源的输入。

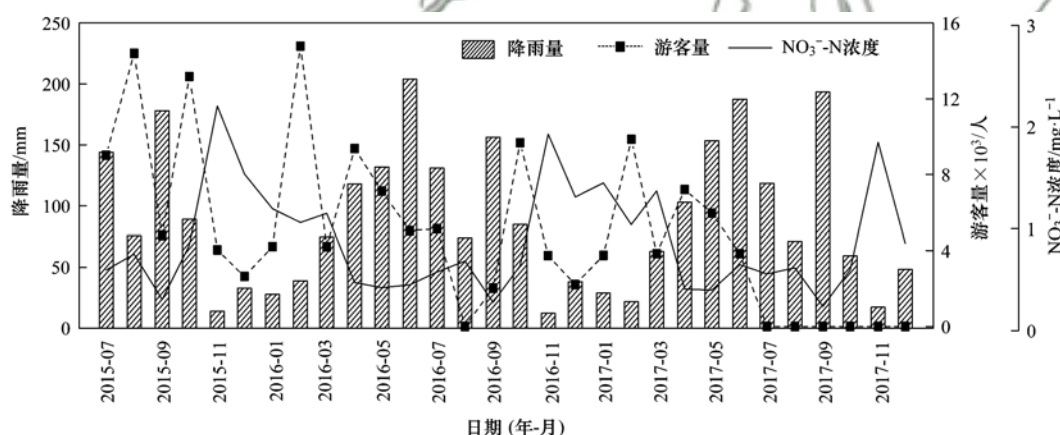


图6 降雨量、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度与游客量变化

Fig. 6 Variations in precipitation,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , and tourists

由图7(b)和7(c)可知,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度与降雨量成显著负相关( $P > 0.05$ ,  $R^2 = 0.78$ ),  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与降雨量成中等负相关( $P > 0.05$ ,  $R^2 = 0.43$ ), 表明  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的变化极大程度上与降雨量有关, 受到雨水稀释作用显著, 所以推断雨水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量极有可能与降雨来源地有关<sup>[30]</sup>, 而  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度则更易受到降雨稀释和人为源排放两个因素的共同作用。

#### 4.1.3 气团后向轨迹分析

有关研究表明<sup>[2]</sup>,  $\text{NO}_x$  在空中可发生化学反应和光化学反应, 而且可随着干湿沉降进入到陆地和水生生态系统, 它在大气层中的滞留时间仅有 1~2

d, 但平均迁移距离甚至可以跨越大洲, 影响到不同国家<sup>[1, 10]</sup>。为了进一步确定雨水中的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的潜在来源, 特别是污染物的跨区域运输, 使用 HYSPLIT 软件分别模拟高空 3 000 m 和低空 500 m 高度的气团后向轨迹。由于研究期间降雨量并无显著变化, 故只选取了 2015 年 7 月~2016 年 6 月的降雨进行模拟, 共得到 59 次模拟结果。

如图8所示, 2015年7月~2016年6月, 低空和高空对流层气流轨迹有显著差异: 500 m 高度的气流主要来自偏东方向, 东南占 32%, 东部占 24%, 东北占 19%, 3 000 m 高度的气流主要来自西南方向, 共占全年的 58% (表5)。可见, 西南风和偏东风对全年降雨有显著作用。为明确旱雨季降雨

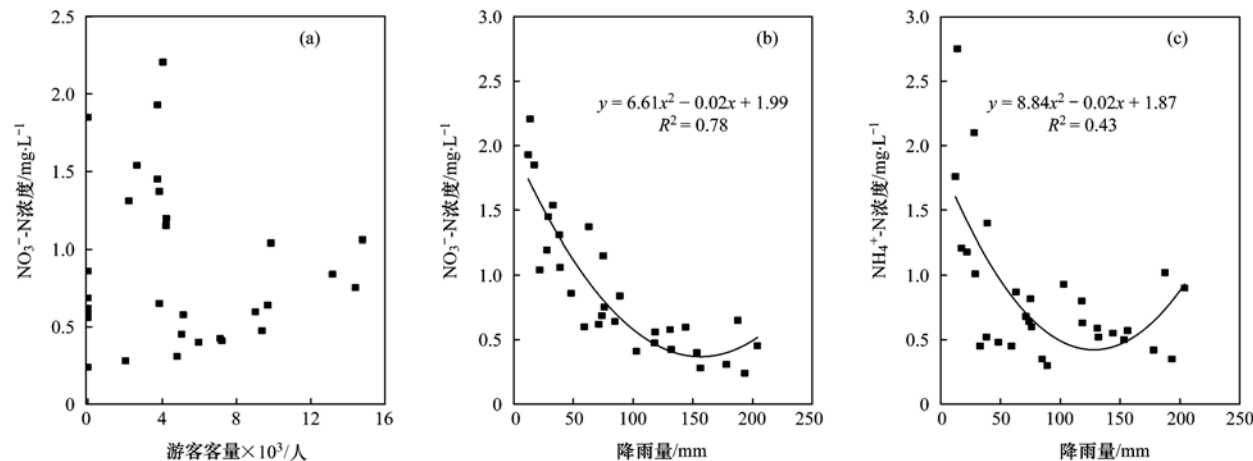


图 7 游客量与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, 降雨量与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度相关性

Fig. 7 Correlations between tourists and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, rainfall and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration

的来源,对研究区降雨形成的主导风向进行区分(图9).在旱季22场降雨中,高空西南风占63%,低空东北风、西北风占27%和23%.雨季37场降雨中,高空西南风占44%,低空东南风、东风占46%和27%.即旱季降雨主要来自高空西南风(63%),低空气流的贡献较弱,而雨季降雨主要来自低空东风和东南风(73%),高空气流贡献不及低空显著,这可能与行星风带的季节性移动以及重庆市独特的地理位置有关.

雨季(4~9月),由于行星风带北移,夏季风逐渐活跃,并由东南沿海向内陆发展.重庆市处于我国地势第二级阶梯的前缘,东南部有八面山、武陵山中低山区,所以东南季风沿山地爬升,易形成降

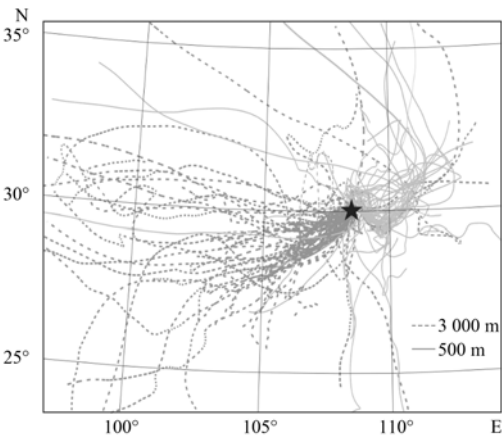


图 8 2015-07~2016-06 不同高度气团轨迹来源

Fig. 8 Sources of various height air mass trajectories in 2015-07-2016-06

表 5 2015-07~2016-06 不同高度气流来源占比

Table 5 Proportion of air mass sources in 2015-07-2016-06

| 高度/m  | 气流来源方向占比/% |    |    |    |   |    |    |    | 总计/% |
|-------|------------|----|----|----|---|----|----|----|------|
|       | 北          | 东北 | 东  | 东南 | 南 | 西南 | 西  | 西北 |      |
| 500   | 2          | 19 | 24 | 32 | 5 | 3  | 5  | 10 | 100  |
| 3 000 | 3          | 5  | 2  | 3  | 2 | 58 | 17 | 10 | 100  |

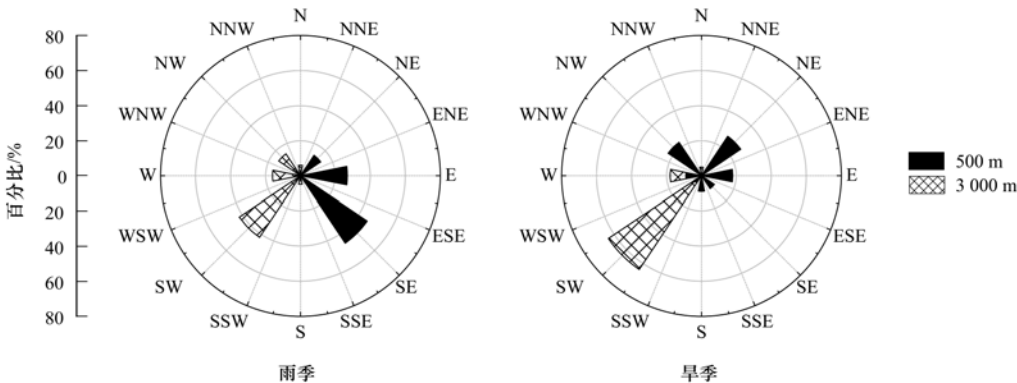


图 9 旱雨季不同高度气流来源的变化

Fig. 9 Variations in airflow sources at different heights during dry and rainy season

雨。旱季(10月~次年3月),行星风带随着太阳直射点南移,受青藏高原阻挡,西风带分为南北两支,北支沿新疆-河西走廊南下,加强了西北风,但受秦岭、大巴山天然屏障的阻挡,导致对重庆降雨影响很小。南支则先南下后沿缅甸-云南北上,形成西南季风。而研究区处于东北-西南走向川东平行岭谷大地貌格局内,使得西南风可以长驱直入,甚至可以到达重庆市最北端,沿大巴山区爬升,形成降雨。

东南季风经秀山、酉阳、彭水、黔江等地后到达雪玉洞,由于地形所限,这些区域经济发展以农业为主,因此随东南季风而来的农业 $\text{NH}_4^+$ -N,会对研究区降雨产生影响。而西南风途经重庆市区、涪陵等工商业发达区,且涪陵距离丰都仅47 km,是

重庆市东部人流、物流的交通枢纽,乌江榨菜、太极集团、娃哈哈、川东造船厂等百强企业均在此设立工厂,工业和交通业发展排放的大量 $\text{NO}_x$ (2001~2009年 $\text{NO}_3^-$ -N年均沉降量为 $10.08 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )<sup>[31]</sup>会随着西南风顺势而下,对下游地区湿沉降产生一定影响。

故雪玉洞流域旱季在西南风作用下会受到重庆、涪陵城市源污染物长距离输送的影响,造成湿沉降中 $\text{NO}_3^-$ -N沉降量偏高。雨季除却当地农业活动外,还会受到随东南风而来的东南部农业区 $\text{NH}_4^+$ -N的影响。

4.2 本研究结果与其他结果相比较

本文与其它地区的研究结果对比见表6。

表6 本研究结果与其他研究结果比较

Table 6 Comparison between the results of this study and the other researchs

| 日期(年-月)         | 地点     | 土地利用方式 | 沉降量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ |                    |       | 文献   |
|-----------------|--------|--------|-------------------------------------|--------------------|-------|------|
|                 |        |        | $\text{NH}_4^+$ -N                  | $\text{NO}_3^-$ -N | DIN-N |      |
| 2015-07~2017-12 | 丰都雪玉洞  | 农林交错   | 7.71                                | 6.54               | 14.25 | 本研究  |
| 2000-01~2009-12 | 重庆万州   | 农、工、商业 | 22.00                               | 7.57               | 29.57 | [31] |
| 2004-11~2005-10 | 江西鹰潭   | 农田     | 19.99                               | 7.02               | 27.01 | [32] |
| 2008-08~2013-12 | 四川盐亭   | 旱作农田   | 10.44                               | 6.25               | 16.69 | [9]  |
| 2010-04~2011-05 | 四川九寨沟  | 林地     | 1.29                                | 1.39               | 2.68  | [33] |
| 2011-04~2012-03 | 广州北郊   | 农林交错   | 13.88                               | 6.56               | 20.44 | [34] |
| 2012-05~2012-10 | 重庆缙云山  | 农林交错   | 7.58                                | 4.04               | 11.49 | [35] |
| 2013-01~2014-12 | 重庆黔江   | 农田     | 9.48                                | 2.37               | 11.84 | [36] |
| 2014-01~2015-12 | 青海西宁城郊 | 农田、住宅  | 7.60                                | 6.20               | 13.80 | [22] |
| 2015-01~2016-12 | 四川崇州近郊 | 农田集约区  | 18.82                               | 8.71               | 26.53 | [18] |
| 2015-01~2016-12 | 四川崇州近郊 | 农林交错   | 13.34                               | 7.04               | 20.38 | [18] |
| 2016-01~2016-12 | 重庆万州   | 农、工、商业 | 13.15                               | 4.35               | 17.50 | [27] |
| 2016-01~2016-12 | 重庆高阳   | 农业     | 5.89                                | 2.74               | 8.6   | [27] |
| 2016-01~2016-12 | 重庆大德乡  | 农业     | 8.82                                | 3.34               | 12.16 | [27] |

由表6可见,本研究农林交错下垫面上大气无机氮年均湿沉降量为 $14.25 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,低于重庆万州2001~2009年的氮湿沉降量,而与其2016年氮湿沉降量接近,且雪玉洞流域氮湿沉降从2015~2017年也逐渐呈下降态势,可能是由于“十二五”规划中当地政府对国家节能减排政策的大力响应所致。本文大气 $\text{NH}_4^+$ -N和DIN湿沉降量远低于农林交错或农田下垫面的江西鹰潭、广州北郊、四川盐亭、四川崇州近郊等地,但是 $\text{NO}_3^-$ -N的沉降量却相当,这与研究区虽然是远郊,但却长期受到涪陵、重庆等经济发达地区高 $\text{NO}_3^-$ -N污染物的输送有关,而广州北郊可能是处于亚热带,雨量充沛,导致大气氮湿沉降量输入偏大。四川九寨沟、重庆高阳、缙云山氮沉降量均低于本研究可能是因为九寨沟降雨量偏少,土地利用方式以天然林地为主;重庆高阳县沉降仪收集点远离工业污染区,附近并无畜牧业,

家庭饲养业亦十分少;而缙云山则是仅监测了雨季的大气氮湿沉降,所以沉降量低于本研究。青海西宁近郊属于半干旱气候,年降雨量不足400 mm,且大气氮干沉降所占比重较大,所以湿沉降与本文研究结果接近。

前人研究表明,DON(溶解有机氮)与人类活动有十分密切的关系,我国DON占TDN(总溶解氮)比例多集中在17%~30%范围内<sup>[13, 37~42]</sup>,西南地区的湿沉降占混合沉降的比例介于45%~76%<sup>[9, 27, 30, 43]</sup>,基于本研究中DIN湿沉降通量为 $14.25 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ,可推断DON湿沉降通量介于 $2.92\sim6.11 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ,TDN湿沉降通量介于 $17.17\sim20.36 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ,混合沉降通量则介于 $25.48\sim41.71 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ,远超出水生系统、脆弱陆地生态系统的最适宜范围 $[5\sim10 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}]$ 和森林生态系统的氮关键负荷阈值

$[10 \sim 20 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]^{[44, 45]}$ , 如果研究区氮沉降仍以此速度持续下去的话, 流域将会受到氮饱和的风险, 氮沉降可能会成为影响该地区环境的重要问题之一, 对地表河流和森林生态系统造成一定的潜在危害。

## 5 结论

(1) 研究期间, 大气湿沉降中  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和 DIN 浓度平均值分别为 0.87、0.92、1.79  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 年均湿沉降通量为 14.25  $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  是主要沉降形式占 54%,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  占 46%。

(2) 降雨量与大气氮湿沉降量呈正相关, 与氮浓度负相关, 氮沉降量夏秋季高于秋冬季, 氮浓度冬春季高于春夏季。

(3) 流域大气无机 N 湿沉降中  $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$  比值介于 0.29 ~ 2.27 之间, 雨季  $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N} > 1$ , 大气无机湿沉降主要来自于农业源, 旱季  $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N} < 1$ , 大气无机湿沉降主要来自于城市源。

(4) 雨季降雨主要来自东风和东南风(73%), 旱季降雨主要来自西南风(63%), 所以雪玉洞雨季除受到当地农业活动影响外, 还可受到重庆东南农业区  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  输送的影响, 旱季主要受到重庆、涪陵等工业区  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  输送的影响。

(5) 雪玉洞流域 DIN 年均湿沉降通量为 14.25  $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 大气混合沉降通量介于 25.48 ~ 41.71  $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 可能会使周边林地和水域面临“氮饱和”的风险, 加之研究区可受到来自重庆主城和涪陵区的城市源污染,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  沉降量高于相似土地利用方式下的其他区域, 所以控制该区域大气氮污染和沉降应综合考虑从其他区域着手。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Fowler D, Pyle J A, Raven J A, *et al.* The global nitrogen cycle in the twenty-first century: introduction[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, **368**(1621): 20130165.
- [3] Oita A, Malik A, Kanemoto K, *et al.* Substantial nitrogen pollution embedded in international trade[J]. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(2): 111-115.
- [4] Zhang Y B, Xu W, Wen Z, *et al.* Atmospheric deposition of inorganic nitrogen in a semi-arid grassland of Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2017, **9**(6): 810-822.
- [5] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, **320**(5878): 889-892.
- [6] 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.
- [7] Shi Y L, Cui S H, Ju X T, *et al.* Impacts of reactive nitrogen on climate change in China[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 8118.
- [8] Liu X J, Zhang Y, Han W X, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, **494**(7438): 459-462.
- [9] Kuang F H, Liu X J, Zhu B, *et al.* Wet and dry nitrogen deposition in the central Sichuan Basin of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **143**: 39-50.
- [10] Geddes J A, Martin R V. Global deposition of total reactive nitrogen oxides from 1996 to 2014 constrained with satellite observations of  $\text{NO}_2$  columns[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(16): 10071-10091.
- [11] van Grinsven H J M, Bouwman L, Cassman K G, *et al.* Losses of ammonia and nitrate from agriculture and their effect on nitrogen recovery in the European Union and the United States between 1990 and 2050[J]. *Journal of Environment Quality*, 2015, **44**(2): 356-367.
- [12] Vet R, Artz R S, Carou S, *et al.* A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **93**: 3-100.
- [13] 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): 12345-12360.
- [14] 李阳兵, 邵景安, 王世杰, 等. 岩溶生态系统脆弱性研究[J]. *地理科学进展*, 2006, **25**(5): 1-9.
- [15] Li Y B, Shao J A, Wang S J, *et al.* A conceptual analysis of karst ecosystem fragility[J]. *Progress in Geography*, 2006, **25**(5): 1-9.
- [15] 张远瞩. 外源酸(硫酸、硝酸)对岩溶碳循环的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [15] Zhang Y Z. Effects of allogenic acids (sulfuric acid and nitric acid) on Karst carbon cycle[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [16] 胡刘婵, 蒋勇军, 曾思博, 等. 岩溶关键带 C-N 耦合循环与碳酸盐岩风化——以重庆雪玉洞观测站为例[J]. *第四纪研究*, 2017, **37**(6): 1251-1261.
- [16] Hu L C, Jiang Y J, Zeng S B, *et al.* C-N coupling cycle and carbonate weathering in Karst critical zone: a case study from Chongqing Xueyudong observatory[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, **37**(6): 1251-1261.
- [17] 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.
- [18] Deng O P, Zhang S R, Deng L J, *et al.* Wet nitrogen deposition across the urban-intensive agricultural-rural transect of a small urban area in southwest China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(8): 7866-7874.
- [19] 申彬你. 三峡库区腹地大气氮湿沉降研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2017.

- [20] 张修峰, 李传红. 大气氮湿沉降及其对惠州西湖水体富营养化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(1): 16-19.  
Zhang X F, Li C H. Wet deposition of atmospheric nitrogen and its eutrophication effect on Xihu Lake, Huizhou City [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, **16**(1): 16-19.
- [21] 陈能汪, 洪华生, 张珞平. 九龙江流域大气氮湿沉降研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 38-46.  
Chen N W, Hong H S, Zhang L P. Wet deposition of atmospheric nitrogen in Jiulong River watershed [J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 38-46.
- [22] 许稳, 金鑫, 罗少辉, 等. 西宁近郊大气氮干湿沉降研究[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1279-1288.  
Xu W, Jin X, Luo S H, *et al.* Dry and bulk nitrogen deposition in suburbs of Xining City[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1279-1288.
- [23] Schlesinger W H. On the fate of anthropogenic nitrogen [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, **106**(1): 203-208.
- [24] Jenkinson D S. An introduction to the global nitrogen cycle[J]. Soil Use and Management, 1990, **6**(2): 56-61.
- [25] Boyer E W, Goodale C L, Jaworski N A, *et al.* Anthropogenic nitrogen sources and relationships to riverine nitrogen export in the northeastern U. S. A. [J]. Biogeochemistry, 2002, **57-58**: 137-169.
- [26] Duce R A, Liss P S, Merrill J T, *et al.* The atmospheric input of trace species to the world ocean [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1991, **5**(3): 193-259.
- [27] Leng Q M, Cui J, Zhou F W, *et al.* Wet-only deposition of atmospheric inorganic nitrogen and associated isotopic characteristics in a typical mountain area, southwestern China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **616-617**: 55-63.
- [28] 陈义, 唐旭, 杨生茂, 等. 杭州稻麦菜轮作地区大气氮湿沉降[J]. 生态学报, 2009, **29**(11): 6102-6109.  
Chen Y, Tang X, Yang S M, *et al.* Atmospheric N wet deposition in Hangzhou region under rice-wheat-vegetable cropping system [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, **29**(11): 6102-6109.
- [29] Qiao X, Du J, Kota S H, *et al.* Wet deposition of sulfur and nitrogen in Jiuzhaigou National Nature Reserve, Sichuan, China during 2015-2016: possible effects from regional emission reduction and local tourist activities [J]. Environmental Pollution, 2018, **233**: 267-277.
- [30] Wang H B, Shi G M, Tian M, *et al.* Wet deposition and sources of inorganic nitrogen in the Three Gorges Reservoir Region, China [J]. Environmental Pollution, 2018, **233**: 520-528.
- [31] 鲁群岷, 赵亮, 李莉, 等. 三峡库区降水化学组成及时空变化特征[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(6): 1682-1689.  
Lu Q M, Zhao L, Li L, *et al.* Chemical composition of precipitation and its spatiotemporal variations in the Three Gorges Reservoir Region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(6): 1682-1689.
- [32] 王体健, 刘倩, 赵恒, 等. 江西红壤地区农田生态系统大气氮沉降通量的研究[J]. 土壤学报, 2008, **45**(2): 280-287.  
Wang T J, Liu Q, Zhao H, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition in agroecosystem in red soil region of Jiangxi province [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, **45**(2): 280-287.
- [33] Qiao X, Xiao W Y, Jaffe D, *et al.* Atmospheric wet deposition of sulfur and nitrogen in Jiuzhaigou National Nature Reserve, Sichuan Province, China [J]. Science of the Total Environment, 2015, **511**: 28-36.
- [34] 林兰稳, 肖辉林, 刘婷琳, 等. 广州东北郊大气氮湿沉降动态及其与酸雨的关系[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(2): 293-297.  
Lin L W, Xiao H L, Liu T L, *et al.* Dynamics of wet atmospheric nitrogen deposition and the relation to acid rain in the northeast suburb of Guangzhou [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, **22**(2): 293-297.
- [35] 孙素琪, 王云琦, 王玉杰, 等. 缙云山大气氮湿沉降组成及其变化特征[J]. 北京林业大学学报, 2013, **35**(4): 47-54.  
Sun S Q, Wang Y Q, Wang Y J, *et al.* Composition and temporal variation of atmospheric nitrogen wet deposition in Jinyun mountain, southwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, **35**(4): 47-54.
- [36] 王祥炳, 黄晓容, 张永江, 等. 黔江区大气降水组分变化趋势及化学特征研究[J]. 绿色科技, 2015, (10): 253-255.  
Wang X B, Huang X R, Zhang Y J, *et al.* Research on the trend and chemical characteristics of atmospheric precipitation in Qianjiang district [J]. Journal of Green Science and Technology, 2015, (10): 253-255.
- [37] Zhang Y, Song L, Liu X J, *et al.* Atmospheric organic nitrogen deposition in China [J]. Atmospheric Environment, 2012, **46**: 195-204.
- [38] Cornell S E. Atmospheric nitrogen deposition: revisiting the question of the importance of the organic component [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(10): 2214-2222.
- [39] 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.
- [40] Liu X Y, Xiao H W, Xiao H Y, *et al.* Stable isotope analyses of precipitation nitrogen sources in Guiyang, southwestern China [J]. Environmental Pollution, 2017, **230**: 486-494.
- [41] Li J, Fang Y T, Yoh M, *et al.* Organic nitrogen deposition in precipitation in metropolitan Guangzhou city of southern China [J]. Atmospheric Research, 2012, **113**: 57-67.
- [42] Shi J H, Gao H W, Qi J H, *et al.* Sources, compositions, and distributions of water-soluble organic nitrogen in aerosols over the China Sea [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, **115**(D17): D17303.
- [43] 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.
- [44] Krupa S V. Effects of atmospheric ammonia ( $\text{NH}_3$ ) on terrestrial vegetation: a review [J]. Environmental Pollution, 2003, **124**(2): 179-221.
- [45] 樊后保, 黄玉梓. 陆地生态系统氮饱和和对植物影响的生理机制[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2006, **32**(4): 395-402.  
Fan H B, Huang Y Z. Ecophysiological mechanism underlying the impacts of nitrogen saturation in terrestrial ecosystems on plants [J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2006, **32**(4): 395-402.

## 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 <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>x</sub> 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 <sup>15</sup> N and <sup>18</sup> 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 <sup>2</sup> /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 <sub>3</sub> -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 <sub>3</sub> and N <sub>2</sub> 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 $\beta$ -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)                                          |