

# 山地城市大气湿沉降特征——以西南山地城市万州为例

张帅\* 潘星睿 王浩铮 张鑫萍 黄承桃 张六一

重庆三峡学院; 三峡库区水环境演变与污染防治重庆市重点实验室; 三峡库区环境生态重庆市野外科学观测  
研究站

DOI:10.12238/eep.v8i2.2519

**[摘要]** 为讨论山地城市大气氮湿沉降特征以及潜在来源,本研究通过定点野外采样对典型山地城市万州的大气氮湿沉降进行监测分析,结论如下: 年降雨量为1431.05mm,夏秋季降雨高于春冬季,降水pH范围在5.88-8.42之间,夏秋季高于春冬季,未发生酸雨现象,表明大气环境质量较好。氮沉降以 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 沉降为主要贡献形态, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 和TDN为冬季沉降低, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和TDN秋季沉降高, $\text{NO}_3^--\text{N}$ 夏季沉降高。研究区的气团轨迹以短距离运输为主,湖北恩施是万州区大气氮素主要潜在来源地区。

**[关键词]** 山地城市; 氮沉降; 后向轨迹

中图分类号: S342.4 文献标识码: A

## Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Mountainous Cities: A Case Study of Wanzhou, a Mountainous City in Southwest China

Shuai Zhang\* Xingrui Pan Haozheng Wang Xinping Zhang Chengtao Huang Liuyi Zhang

Chongqing Key Laboratory of Water Environment Evolution and Pollution Prevention and Control in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Three Gorges University

**[Abstract]** To investigate the characteristics and potential sources of atmospheric nitrogen wet deposition in mountainous cities, this study conducted fixed-point field sampling and monitoring of atmospheric nitrogen wet deposition in Wanzhou, a typical mountainous city. The findings are as follows: Annual rainfall was 1431.05 mm, with higher precipitation in summer-autumn than in spring-winter. Precipitation pH ranged from 5.88 - 8.42, with higher values in summer-autumn than in spring-winter, and no acid rain occurred, indicating good atmospheric environmental quality. Nitrogen deposition was dominated by  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ . The lowest deposition fluxes of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$ , and TDN occurred in winter;  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and TDN reached their highest values in autumn, while  $\text{NO}_3^--\text{N}$  peaked in summer. Air mass trajectory analysis showed that short-distance transport was dominant in the study area, with Enshi (Hubei Province) identified as the primary potential source region of atmospheric nitrogen for Wanzhou District.

**[Key words]** mountainous cities; nitrogen deposition; backward trajectory

### 引言

人类活动极大地改变了全球氮循环。大气中的氮沉降主要源于生物质和化石燃料的燃烧,这已经导致了降水和淡水的酸化,并引发了人们对生态系统如何应对这种污染物的深入研究<sup>[1]</sup>。大气氮沉降提高了土壤中的氮含量,为植物生长提供了重要的养分,并为陆地和水生生态系统补充了氮元素,从而促进了缺氮地区的生态系统发展<sup>[2]</sup>。然而,过量的氮沉降对农业、森林、土壤和水体都产生了不利影响,甚至从物种和种群数量的角度来看,会对生物多样性构成威胁<sup>[3]</sup>。一项在亚洲开展的模型对比研究显示了我国面临的严峻形势<sup>[4]</sup>。因此,确定氮沉降对于中国污染严重的地区来说尤为重要。

国内氮沉降的研究以农田、森林生态系统为研究重点,并且对沿海等发达地区研究较多,缺乏对西南地区山地城市的研究<sup>[5]</sup>。因此本研究以典型山地城市重庆市万州区为例,探讨重庆市万州区氮沉降特征,使用后向轨迹分析法对区域氮沉降的潜在来源进行分析,为山地城市大气氮污染防治提供数据支撑。

### 1 材料和方法

1.1 研究区概况。万州区位于重庆东北部,离重庆主城区约228公里,是重庆第二大城市。万州区地处亚热带季风湿润带,年平均气温 $19.3^\circ\text{C}$ ,年降水1531.1毫米。以低山和丘陵为主要地貌,境内河流资源丰富,均属长江水系,呈现典型的西南山地特征,代表性较强。

1.2实验设计。万州城区沿长江呈狭长型分布,各区域较为分散,根据城区人口分布和位置特点,本研究设置了7个采样点,站点分别位于龙都街道(108.41° E, 30.74° N),牌楼街道(108.39° E, 30.81° N),陈家坝街道(108.38° E, 30.78° N),百安坝街道(108.45° E, 30.76° N),长岭镇(108.49° E, 30.77° N),陈家沟村(108.51° E, 30.75° N),木马山村(108.51° E, 30.76° N)。

采样时间为2021年5月-2022年4月,为期一年。在每月采样一次(每月25日进行样品采集)。降水样品的收集采用聚乙烯材质的采样桶,该采样桶内径为30厘米,高度为30厘米。采样桶设置在距离地面1.5米的位置,并且确保采样桶周围半径5米范围内不存在会干扰样品采集的高大建筑物。

利用IS128型pH计测定水样pH值,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用水杨酸分光光度法(HJ 536-200),  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用全自动流动注射分析仪,TDN采用TOC分析仪(Lotix, USA)测定。文中出现的相关图表使用Origin 2021、IBM spss27、Excel 2022、R-4.3.2软件进行计算与绘制。

## 2 结果与分析

2.1大气降雨特征。如图1,研究区降雨量在0~331.85mm之间,大气降雨年平均总量为1431.05mm,研究区地处亚热带季风性湿润气候,降雨集中在4-9月,月平均降雨最高值在9月,为308.99mm,最低值在1月,未发生降雨事件,降雨量呈现出明显的季节性特征,夏秋季降雨高于春冬季,与团队往年观察结果类似<sup>[6]</sup>。在湿季(5月-9月)的降雨量为961.08mm,占全年降雨的67.16%,干季(10月-次年4月)降雨量为469.97mm,占全年降雨量的32.84%,降雨量呈现双峰型分布趋势图。

由图1可得,全年大气降雨pH值在5.88-8.42之间,年加权平均值为7.14,介于弱酸性至弱碱性之间,并且未发生酸雨现象( $\text{pH}<5.6$ ),与往年研究相比<sup>[6]</sup>,pH在4.24~8.11之间,表明研究区酸雨情况已得到改善。

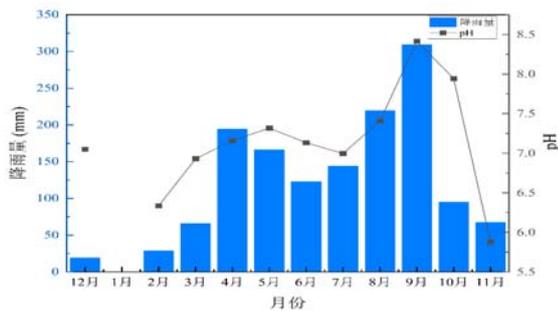


图1 降雨量与pH月变化曲线

2.2大气氮湿沉降特征。

表1 氮沉降量特征 ( $\text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ )

	min.	max.	med.	mean	standard deviation
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	8.05	22.76	12.17	12.99	4.40
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	3.37	5.86	5.30	4.78	0.89
TDN	14.05	28.34	18.52	19.03	4.29

基于研究区域采样点的监测数据(表1,图2),大气湿沉降中

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TDN沉降量分别在 $8.05 \sim 22.76 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $3.37 \sim 5.86 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 和 $14.05 \sim 28.34 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 之间,平均值分别为 $12.99 \pm 4.40 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $4.78 \pm 0.89 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 和 $19.03 \pm 4.29 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。在TDN沉降中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 沉降量在其中所占比例高达68.26%, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 沉降量占比则为25.11%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 沉降量与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 沉降量之比为2.71:1,表明研究区氮沉降是以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 沉降为主要贡献形态。TDN沉降量与我国空气重污染发达地区相差不大,珠三角<sup>[7]</sup>为 $19.5 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ ,京津冀地区为 $19.4 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。但与全球主要氮沉降热点地区相比则较高:美国( $3.0 \sim 3.5 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ ),欧洲( $6.8 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ ),还高于中国背景点( $2.1 \sim 2.7 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ )。TDN沉降量约是我国沉降量平均水平( $9.88 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ )的1.93倍,同时也超过了陆地生态系统氮沉降负荷( $10 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ ),这表明万州区降水氮污染情况较为严峻,必须高度重视大气中过量氮沉降所引发的生态效应,采取有效措施对其进行监测与管控,从而改善区域空气质量,降低氮污染对生态环境及居民健康造成的潜在风险。

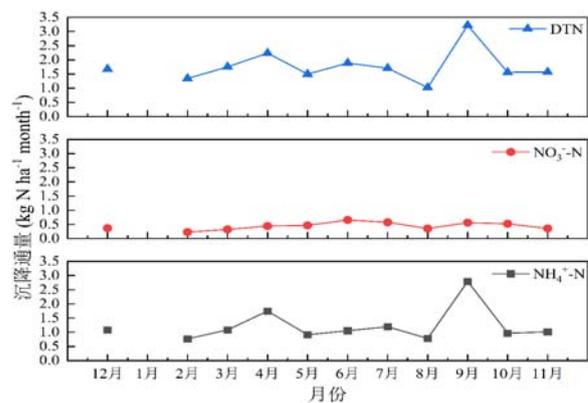


图2 大气氮沉降通量月变化曲线

由图2可知 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 沉降量在9月份最高为 $2.79 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ ,在2月份最低为 $0.77 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ , $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 沉降量在6月份最高,2月份最低分别为 $0.66 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ 、 $0.23 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ ,TDN沉降量在9月份最高为 $3.22 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ ,小值出现在8月份为 $1.02 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ ,并且氮沉降量表现出明显的季节性动态特征, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与TDN季节性表现一致为秋季>春季>夏季>冬季,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 秋季沉降量为 $4.38 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ ,占全年沉降量的34%,冬季沉降量为 $1.84 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ ,占全年沉降量的14%。TDN平均值分别为 $5.89 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ 、 $5.50 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ 、 $4.62 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ 和 $3.02 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ ,秋季沉降量占全年沉降量的31%,冬季沉降量占全年沉降量的16%, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 表现出的季节性特征与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TDN不同,为夏季>秋季>春季>冬季,分别为 $4.38 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ 、 $3.74 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ 、 $3.03 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ 和 $1.84 \text{kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ ,夏季沉降量是冬季的2.67倍。结合降雨变化来看,降雨量呈现出明显的季节性特征,夏秋季降雨高于春冬季降雨,这种季节性的显著波动,在很大程度上影响了

氮沉降量的季节性变化。秋季期间, 农业施肥活动强度增大, 肥料中的氮素在土壤中经一系列复杂的物理化学过程, 大量挥发进入大气, 这使得空气中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量显著上升, 从而造成秋季 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 沉降量的增加。而夏季, 降水事件频繁且雨量大, 大量的雨水对大气环境起到了强烈的冲刷作用。在这一过程中, 空气中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 附着在污染物的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 被雨水冲刷大量沉降至地面, 使得夏季 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 沉降量显著增多。反观冬季, 该时段降水量在全年中处于最低水平, 由于缺乏充足的降水对大气中的氮素进行冲刷, 导致大气中各类含氮物质难以通过降水沉降至地面, 这直接致使冬季的氮沉降量在四季中为最小。



图3 研究区2021.05~2022.04后向轨迹聚类分析

2.3后向轨迹分析。大气沉降中的氮浓度, 不仅受制于区域内生产生活所排放的污染物, 并且气团运动轨迹和气溶胶浓度同样对其成分含量有着显著影响。不同来源的气团会直接改变地区氮沉降格局, 众多研究表明, 来自陆地的气团通常会导致氮沉降量显著增加。基于此, 本研究运用MeteoInfo Map软件的聚类分析工具, 对2021年5月至2022年4月期间的气流轨迹, 按照传输速度和方向进行季度性聚类分析, 并根据聚类轨迹的突变变化特征进行分类(具体情况见图3)。

大气沉降内的氮浓度, 并非仅受区域内生产生活所排放污染物的制约, 气团运动轨迹以及气溶胶浓度同样会对其成分含量产生不容忽视的作用。不同来源的气团, 能够直接改变地区的氮沉降态势。大量研究成果显示, 源于陆地的气团一般会促使该地区氮沉降量大幅上升。鉴于此, 本研究借助MeteoInfo Map软件的聚类分析工具, 依据传输速率与方向, 针对2021年5月至2022年4月时段内的气流轨迹展开全年性聚类分析。

由图3可知, 万州站点气团主要来自于湖北恩施以及湖北随州, Cluster1起源于湖北东北部, 经随州, 恩施后到达万州站点, 该类轨迹占比23.08%, 仅低于Cluster4(35.68%), Cluster2与Cluster5轨迹相近但较之稍短, 从甘肃与陕西交界处出发, 途经四川东部后进入万州站点, Cluster3与Cluster2方向相反, 从广西南宁, 经过黔东南苗族侗族自治州, 从重庆南部进入万州站点。Cluster4气团轨迹最短, 但占比最大, 为35.68%, 由恩施来凤县途径咸丰县、利川市后, 从恩施与万州交界处进入站点。Cluster5气团轨迹最长, 途经城市最多, 从甘肃西北部途径酒泉, 沿甘肃与青海交界线一路直达兰州、天水、汉中后, 从四川东北部进入万

州站点, 但占比仅占5.27%为6条气团中最低。Cluster6从云南东北部出发, 经过毕节后, 向东北方向进入站点。Cluster1与Cluster4反映出万州大气活性氮输入主要来自于湖北恩施。

### 3 结论

该研究区域的年降雨量为1431.05毫米, 降雨主要集中于4月至9月, 呈现出显著的季节性特征。具体而言, 夏秋季降雨量高于春冬季。研究区域内降水的pH值介于5.88至8.42之间, 加权平均pH值为7.14, 且呈现出夏秋季高于春冬季的态势, 期间并未出现酸雨现象, 这表明研究区域的大气环境质量处于较好水平。经分析, pH值的季节性变化主要归因于冬季降水量少以及污染物排放增多的共同作用。

在氮沉降方面,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 以及TDN沉降量的平均值分别为 $12.99 \pm 4.40 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $4.78 \pm 0.89 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 和 $19.03 \pm 4.29 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。其中,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在TDN沉降量中占比达68.26%, 由此可见, 研究区域的氮沉降以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 沉降为主要形式。从时间维度来看, 秋季的氮沉降量最高, 占全年沉降量的30%以上, 而冬季的沉降量则最低。

研究区域内的气团轨迹多以短距离传输为主, 气团主要来源于湖北、贵州、重庆以及四川东北部地区。经研究发现, 湖北恩施是万州区大气氮素的主要潜在来源区域。

### [参考文献]

- [1]Bebber D P.The gap between atmospheric nitrogen deposition experiments and reality[J]. Science of The Total Environment,2021,801:149774.
- [2]Fleischer K, Rebel K T, Van Der Molen M K,等.The contribution of nitrogen deposition to the photosynthetic capacity of forests[J].Global Biogeochemical Cycles,2013,27(1):187-199.
- [3]Gao Y, Ma M, Yang T,等.Global atmospheric sulfur deposition and associated impact on nitrogen cycling in ecosystems[J].Journal of Cleaner Production,2018,195:1-9.
- [4]Ge B, Itahashi S, Sato K,等.Model Inter-Comparison Study for Asia (MICS-Asia) phase III: multimodel comparison of reactive nitrogen deposition over China[J].Atmospheric Chemistry and Physics,2020,20(17):10587-10610.
- [5]刘东辉,周宇,胡艳丽,等.南充市主城区大气氮湿沉降特征研究[J].绿色科技,2024,26(20):162-167,194.
- [6]张六一.三峡库区大气氮沉降特征、通量及其对水体氮素的贡献[D].中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院),2019.
- [7]Chen Z, Huang X, Huang C,等.High atmospheric wet nitrogen deposition and major sources in two cities of Yangtze River Delta: Combustion-related  $\text{NH}_3$  and non-fossil fuel  $\text{NO}_x$ [J]. Science of The Total Environment,2022,806:150502.

### 作者简介:

张帅(1999—),男,汉族,四川巴中人,硕士研究生,研究方向:大气氮沉降的生态效应。