

京蒙沙源区水库大气氮沉降变化特征及源解析

卢俊平^{1,2}, 张晓晶^{1,2}, 刘廷玺^{1,2*}, 张文瑞^{1,2}, 刘禹^{1,2} (1.内蒙古农业大学土木与水利建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 以京蒙沙源区大河口水库为研究对象, 于2017年1月~12月对水库周围布设的12个大气沉降监测站点收集样品144个, 测定大气干、湿沉降物中TN浓度, 计算大气总氮干、湿沉降通量, 分析大气TN干、湿沉降污染特征及季节性变化特征。另选取水库周边不同典型地块, 布设14个采样点采集样品76个, 测定土壤 $\delta^{15}\text{N}$ -TN含量水平, 解析水库大气氮沉降主要来源, 并借助HYSPLIT4气团后向轨迹模型分析各季节不同类型气团输移营养盐对大河口水库的影响。结果表明: 水库全年大气TN干沉降通量变化范围为122.44~425.64 $\text{kg}/(\text{km}^2\cdot\text{month})$, 平均值为200.83 $\text{kg}/(\text{km}^2\cdot\text{month})$; 湿沉降通量变化范围1.23~188.89 $\text{kg}/(\text{km}^2\cdot\text{month})$, 平均值为66.33 $\text{kg}/(\text{km}^2\cdot\text{month})$ 。大气总氮年沉降通量为3205.9 $\text{kg}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$, 约为全国氮沉降平均水平(790 $\text{kg}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$)的4.06倍。从沉降类型上来看, 大气沉降主要以干沉降为主, 占沉降总量的75.17%, 湿沉降占总沉降通量的24.83%。大气氮干沉降通量表现为春、秋季明显高于夏、冬季节, 湿沉降通量春、夏季明显高于秋、冬季节的季节性变化规律。通过对典型地块 $\delta^{15}\text{N}$ -TN同位素数据分析, 表明夏季有71.4%的大气沉降样品来源于不可分辨的混合源输入, 春、秋、冬季大河口水库超过45%的样品来源于沙地, 另一大污染源为研究区周围的耕地。运用HYSPLIT4后向轨迹模型证明, 从蒙古国入境的气团对研究区污染物大气输移影响较大, 冬季采暖期间的大气污染和春季频繁发生的沙尘暴是造成北方沙区水体春季水环境变差的因素之一。

关键词: 大河口水库; 沙源区; 沉降通量; 源解析; 氮

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)03-1034-11

Variation characteristics and source analysis of atmospheric nitrogen deposition flux on a reservoir in sand source areas of Beijing-Inner Mongolia. LU Jun-ping^{1,2}, ZHANG Xiao-jing^{1,2}, LIU Ting-xi^{1,2*}, ZHANG Wen-rui^{1,2}, LIU Yu^{1,2} (1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Water Resources Protection and Utilization Key Laboratory, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China). *China Environmental Science*, 2021,41(3): 1034~1044

Abstract: Taking Dahekou reservoir in the sand source areas of Beijing and Inner Mongolia as research area. From January to December 2017, 144 samples were collected from 12 atmospheric deposition monitoring sites along the reservoir shore to determine the concentration of total nitrogen (TN) in dry and wet deposition. Then the dry and wet deposition fluxes of TN were calculated and the pollution characteristics and seasonal variation characteristics were analyzed. A total of 76 soil samples and 14 sampling points were collected from different typical plots around the reservoir. In addition, the soil $\delta^{15}\text{N}$ -TN content level was measured and the main sources of atmospheric nitrogen deposition were analyzed. Furthermore, based on HYSPLIT4 air mass backward trajectory model, the influence of different types of air mass on Dahekou Reservoir was analyzed. The results show that the annual variation of atmospheric TN dry deposition flux in the reservoir ranged from 122.44 to 425.64 $\text{kg}/(\text{km}^2\cdot\text{month})$, with an average value of 200.83 $\text{kg}/(\text{km}^2\cdot\text{month})$; the wet deposition flux varied from 1.23 to 188.89 $\text{kg}/(\text{km}^2\cdot\text{month})$, with an average value of 66.33 $\text{kg}/(\text{km}^2\cdot\text{month})$; the annual average nitrogen deposition was 3205.9 $\text{kg}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$, which was about 4.06 times of the national average level of nitrogen deposition (790 $\text{kg}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$). In terms of sedimentary types, dry deposition accounts for 75.17% of total deposition and wet deposition accounted for 24.83% of total deposition. Atmospheric nitrogen dry deposition fluxes were significantly higher in spring and autumn than summer and winter, and wet deposition fluxes in spring and summer were significantly higher than that of autumn and winter. Typical plots of $\delta^{15}\text{N}$ -TN data analysis showed that 71.4% of the atmospheric deposition samples in summer came from unresolved mixed source inputs, and more than 45% of the samples from Dahekou Reservoir in spring, autumn and winter come from sandy land, the major source of pollution was the cultivated land around the study area. Using the HYSPLIT4 backward trajectory model, it was proved that Mongolia's air mass entering into the study area had a greater impact on the atmospheric transport of pollutants. The air pollution during heating period of winter and frequent dust storms in spring were one of the factors leading to the deterioration of the spring water environment in the northern sand area.

Key words: Dahekou reservoir; sand source areas; deposition fluxes; source analysis; nitrogen

收稿日期: 2020-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51669023, 51869021)

* 责任作者, 教授, txliu1966@163.com

内蒙古是中国西北华北重要的沙尘暴源区,大气沉降不仅影响环境空气质量,而且对沙源区水环境也产生严重影响.大气沉降不仅是维系初级生产力所需营养物质的主要途径,更是陆地和海洋生态环境新增和外来污染物的主要输入方式,是地球物质循环的重要途径之一^[1].伴随着社会经济快速发展,人类活动过程中化学氮肥的广泛使用、化石燃料消耗量的急剧增加,导致全球氮素沉降呈现显著增加的态势^[2-4].不断向陆地和水生生态系统沉降的氮磷营养盐,会改变生态系统生产力,对植物生长有一定促进作用^[5-6],但是当大气沉降携带的氮磷物质组份浓度和比重过高,会导致受纳水体表层酸碱度值与营养盐结构产生变化,从而引起水体酸化、生态系统多样性丧失等一系列严重的生态问题,甚至可能引发水华等负面效应^[7-8].因此,大气氮磷沉降及其造成的生态环境影响问题逐渐引起世界各国学者、公众的重点关注^[9-11].

欧美洲等一些较发达的国家,较早就开始了对大气干、湿沉降方面的监测研究.1843年,Goulding等^[12]率先在英国建成了世界上第一个大气氮沉降试验站.1977年,欧洲的大气氮沉降监测网络(EMEP)落成.1980年,美国大气沉降监测计划(NADP)开始实施.1990年,加拿大的大气与降雨监测网站(CAPMON)也相继投入使用,形成了大气氮沉降观测研究网络,主要研究如何应用模型模拟不同生态系统的大气氮沉降量和沉降负荷^[13-14].全球大气氮沉降量伴随着人类社会经济的发展,呈现逐年增加的趋势,受到诸多学者的关注和研究.Galloway等^[15]研究表明,19世纪60年代大气氮沉降量仅为31.6Tg/a,到20世纪90年代中后期,大气氮沉降总量达到了103Tg/a,预计到21世纪50年代全球大气氮沉降总量将接近195Tg/a.中国作为继北美、欧洲之后的全球三大氮沉降集中区,对大气氮沉降的研究始于20世纪70年代.国内鲁如坤等^[16]最早开启了大气氮沉降研究进程,国内众多学者随后陆续开始对农田^[17]、森林^[18]、草地^[19]等各类生态环境的大气氮磷沉降展开一系列相关研究工作.近几年,部分学者在对湖库水体富营养化成因进行深入调查后,发现大气氮素沉降对水生态系统恶化发挥着不可忽视的作用,并相继展开深入分析.诸如Moline等^[20]收集了欧洲和北美42个不同地区的非生产性湖泊的化学数据和浮游植物生物量数据,并将这

些数据与这些地区的无机氮(N)沉降进行了比较,表明欧洲和北美大片地区无机氮的沉降增加导致湖泊无机氮浓度升高,且无机氮浓度的升高导致了浮游植物的富营养化和生物量的增加.Elser等^[21]讨论了大气氮沉降驱动下的N:P化学计量变化和营养盐限制.认为持续的氮沉降在磷限制的低磷浮游植物与富磷浮游动物消费者之间会产生化学计量失衡,可能导致较高营养水平的产量减少.Xu等^[22]评估了长江流域不同反应性N(Nr)排放源对总DIN大气氮沉降的相对贡献.结果表明在流域范围内,与牲畜(11%)、工业(13%)、发电厂(9%)、运输(9%)和其他(18%)相比,化肥使用(40%)是主要来源.陈春强等^[23]利用WRF-CMAQ模型研究发现,典型沙尘和灰霾过程中,中国近海TIN干沉降通量均值分别为6.77,3.01mgN/(m²·d),是晴朗天的6.84,3.04倍.国内外众多学者以往的研究重点集中于我国南部海洋、海湾及沿海海域地区,研究热点为大气氮磷时空分异规律、沉降通量、污染特征、污染贡献和环境效应等,并取得了显著进展,而对于北方内陆水库(湖泊)大气氮磷沉降主要污染来源及不同季节大气气团转移轨迹至今鲜有报道.尤其对分布于沙源区的水库水体受风沙等极端气候作用下,水体水环境氮磷污染来源研究不足,污染成因认识不清.本研究在对沙源区水库大气氮干、湿沉降污染特征及季节变化特征进行深入分析的基础上,旨在通过借助HYSPLIT4后向轨迹模型,解析研究区大气氮沉降的主要污染来源,以期为京蒙沙源区水库氮污染防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况及采样点的布设

大河口水库(42°13'19.17"N,116°38'4.00"E)位于内蒙古锡林郭勒盟多伦县境内滦河干流.水库水域面积为17.26km²,东侧的吐力根河和西侧的滦河是水库的主要2条补给河流.水库水深2.30~14.10m,水流流速为0.05~0.13m/s.根据1953~2017年多伦县气象站统计资料,该地区多年平均年降水量为384.9mm,2017年多伦县全年降水量377.7mm,其中6~8月份降水量为252mm,约占全年降水量的三分之一.年主导风向以西南风和西风为主,多年平均最大风速20.3m/s,历年实测最大风速28m/s(1997年6

月 10 日),风向为 WNW;全年以 WSW 方向的风平均风速最大,为 5.0m/s,扬沙和沙尘暴天气频繁出现,年扬沙日数为 3.7d.水库周边范围内分布有大面积的沙地、撂荒地、荒草地、林地、耕地等典型地块及煤化工企业.大河口水库受当地气候特征及环境特征影响已经呈现出富营养化状态,前期研究表明大

气氮磷等营养盐干湿沉降是致使大河口水库呈现富营养化的主要成因之一^[24].

根据大河口形状及周边污染源分布特征,在大河口水库周边布设 12 个大气干、湿沉降监测站点.每个监测站点放置 3 个大气沉降采集器.监测站点布置方案见图 1.

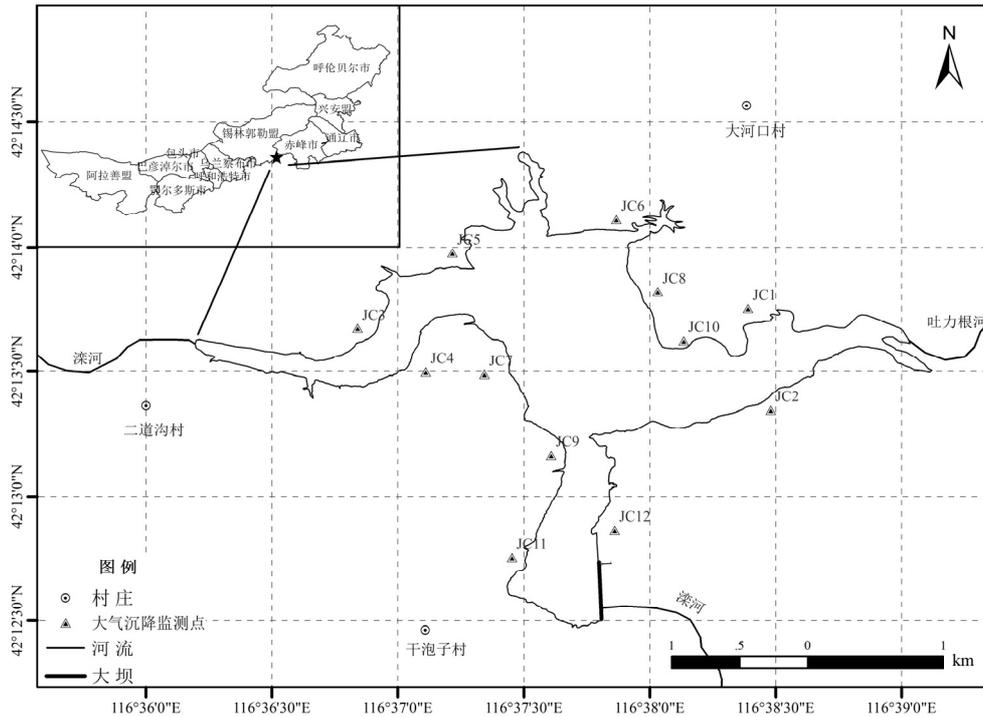


图 1 大河口水库大气沉降监测点布设

Fig.1 Layout scheme of atmospheric deposition monitoring points in the Dahekou Reservoir

1.2 样品采集与分析

1.2.1 大气沉降样品采集与测试 大气氮干、湿沉降物采集参照《大气降水样品的采集与保存标准》^[25]、《环境空气质量自动监测技术规范》^[26]和《环境空气降尘的测定(重量法)》^[27]进行.采集器为自行研制并已申请发明专利的大气干湿沉降自动采集装置(内径 150mm 的标准玻璃缸 2 个,置于高出地面 1.5m 处的铁架中,由自控感应装置控制干、湿沉降玻璃缸盖自动切换)^[28].根据全年各月大气干、湿沉降监测点收集的干、湿沉降重量(或体积)及样品中 TN 含量,结合各站点大气干、湿沉降采集器个数、采集器面积,分别用式(1)和式(2)计算全年各月大气 TN 干、湿沉降通量.

干沉降采集:每月月初干沉降标准玻璃缸处于敞开状态,降水发生瞬间采集器通过安装的雨滴感

应装置自动将采样器干沉降玻璃缸用盖密封,降水结束后又立即打开.每月最后 1d 收集采集器中干沉降玻璃缸中的样品.

干沉降通量计算公式如下:

$$F_d = \frac{k_d \cdot C \cdot V}{f \cdot S} = \frac{56.59 \cdot C \cdot V}{f} \quad (1)$$

式中: F_d 为大气 TN 月干沉降通量, kg/km^2 ; k_d 为换算系数,无单位, $k_d=10^{-3}$; C 为收集液中的 TN 质量浓度, mg/L ; V 为收集液体积, L ; S 为采集器面积, 0.018m^2 ; $k_d \cdot S=56.59 \times 10^{-3}\text{m}^2$; f 为采样时间系数, d^{-1} , $f=t/24$; t 为样品收集的时间.

湿沉降采集:在每次降水开始后,由感应器和驱动装置将湿沉降标准玻璃缸自动打开,降水结束后从采集器中收集降雨或降雪样品.每月记录湿沉降采集次数和降水量.降水量采用翻斗式雨量计自动

记录.

湿沉降通量计算公式如下:

$$F_w = \sum_{i=1}^n \frac{k_w \cdot C_i \cdot V_i}{S} = \sum_{i=1}^n k_w \cdot C_i \cdot h \quad (2)$$

式中: F_w 为大气 TN 月湿沉降通量, $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{month})$; k_w 为单位换算系数,无单位, $k_w=10^{-3}$; C_i 为雨或雪水中 TN 质量浓度, mg/L ; V_i 为采集雨、雪水的体积, L ; S 为采集器面积, 0.018m^2 ; h 为月降水量, mm ; n 为月降水(雪)次数.

大气干、湿沉降中总氮含量分析参照《水和废水监测分析方法(第四版)》中的 A 类方法进行, TN 测定采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法^[29]. 为保证数据的有效性和精确度, TN 含量测定做空白样平行对照检测, 每个样品均进行 2 组平行测试, 取 2 组均值作为检测值. 检测值的精密度和准确度的允许偏差参照标准方法中的水质监测实验室质量控制指标.

1.2.2 研究区周边土壤采集与检测 根据研究区土地利用类型, 将大河口水库周边土地划分为旱地、林地、沙地、草地、采矿用地等典型地块, 每次在典型地块 3 个不同位置距土壤表层以下 1cm 处采集样品. 取样频率为每季度一次. 所有样品均委托中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 选用 Isoprime100-EA 仪器进行上机检测 $\delta^{15}\text{N}$ -TN 值. 采样点布设见表 1.

表 1 水库周边典型地块采样点布设

Table 1 Layout of sampling points of typical plots around the reservoir

序号	采样点编号	土地类型	序号	采样点编号	土地类型
1	WF1	旱地	8	WF8	林地
2	WF2	旱地	9	WF9	其它草地
3	WF3	旱地	10	WF10	采矿用地
4	WF4	沙地	11	WF11	其他林地
5	WF5	采矿用地	12	WF12	人工牧草地
6	WF6	旱地	13	WF13	灌木林
7	WF7	旱地	14	WF14	其他林地

1.3 气团后向轨迹分析

利用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的气团后向轨迹模型(HYSPLIT-4)和全球数据同化系统(GDAS)气象数据, 对大河口水库地区 2017 年 1 月~12 月不同季节做 48h 后向轨迹分析, 分别绘制

500m、1000m 和 1500m 高度的后向轨迹, 用以反映大气团运移轨迹和解析污染物的输送过程及来源.

2 结果与讨论

2.1 大气总氮干、湿沉降通量及变化特征

2.1.1 大气总氮干、湿沉降通量统计分析 根据对大河口水库周边布设的 12 个监测点进行为期 1 年的 TN 干、湿沉降监测分析数据, 计算得到大河口水库 TN 沉降通量. 统计结果见表 2.

表 2 大河口水库大气氮干湿沉降通量和总沉降通量统计结果

Table 2 Deposition amounts of atmospheric nitrogen in Dahekou reservoir

项目	TN 大气沉降通量 $[\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{month})]$		
	干沉降	湿沉降	总沉降
最大值	425.64	188.89	487.76
最小值	122.44	1.23	145.63
平均值	200.83	66.33	275.42
标准偏差	88.53	66.37	114.36
变异系数	0.44	1.00	0.42

由表 2 可见, 大河口水库全年大气 TN 干沉降通量变化范围为 122.44~425.64 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{month})$, 平均值为 200.83 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{month})$. 湿沉降通量变化范围 1.23~188.89 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{month})$, 平均值为 66.33 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{month})$. 全年各月大气总氮干、湿沉降通量变异系数分别为 0.44 和 1.00. 水库周边受年内降水分配不均的影响, 大气总氮湿沉降通量与干沉降相比变异特征更为显著. 从沉降类型上分析, 大气总氮沉降主要以干沉降为主, 为 2409.9 kg/km^2 , 占总沉降通量的 75.17%; 湿沉降通量为 796.0 kg/km^2 , 占总沉降通量的 24.83%. 2017 年研究区沙尘天数 6d, 沙尘暴集中在春季 4 月份, 月大气总氮干沉降通量为 425.64 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{month})$, 分别是春季 3 月份、5 月份风沙前后大气总氮干沉降通量的 2.41 倍和 2.13 倍. 与我国其他湖、库大气总氮干湿沉降通量对比, 受北方地区常年降雨稀少, 春秋季节风沙较大的季风气候影响, 表现出大河口水库大气氮干沉降通量高于北里湖、无锡太湖, 湿沉降通量低于北里湖和太湖的特征^[30-31](表 3). 虽然下垫面条件、实验方法和测定方案存在的差异性对数据的可比性会产生一定影响, 但是本研究成果足以表明北方沙源区的大气氮干

沉降通量相当可观,对大河口水库水体富营养化的贡献不容忽视.见表 3.

表 3 全国部分湖泊、水库大气氮干、湿沉降通量对比

Table 3 Comparison of dry and wet atmospheric nitrogen deposition fluxes of some lakes and reservoirs

研究区	TN 沉降通量[kg/(km ² ·month)]		时间	地区	文献来源
	干沉降	湿沉降			
北里湖	71.8~271.9	144.3~421.5	2010-02~2010-11	杭州	[30]
太湖	26.2~150.4	47~247.3	2007-05~2007-11	无锡	[31]
岗南水库	17.7~134.7	9.9~386.8	2015-07~2016-06	石家庄	[1]
大河口水库	122.44~425.64	1.23~188.89	2017-01~2017-12	多伦县	本研究

2.1.2 大气总氮干、湿沉降通量季节性变化特征 Galloway 等^[15]研究表明,就全球范围来看,大气氮沉降均值为 5kg/(hm²·a),目前我国大气氮素湿沉降通量平均达到 8.85Tg/a^[32].大河口水库大气总氮沉降通量为 3205.9kg/(km²·a),远远超出了生态系统大气氮沉降饱和度的临界点 2500kg/(km²·a)^[33],约为全国氮沉降平均水平(790kg/(hm²·a))的 4.06 倍,证明大河口水库研究区已经成为高氮沉降区.与国内其他地区湖库大气总氮年沉降通量相比(表 4),大河口水库总氮年沉降通量高于太湖、滇池、珠江口研究区,低于太湖地区.同时对比中还发现,太湖与太湖梅梁湾两个不同研究区的大气总氮年沉降通量分别为 4538kg/(km²·a)和 2652~3300kg/(km²·a),说明大气沉降通量存在地区差异.同一地区 2017 年大河口水库的大气总氮沉降通量为 3205.9kg/(km²·a),是 2014 年该研究区大气总氮年沉降通量 2875.82kg/(km²·a)的 1.1 倍^[24],且湿沉降通量与降水量的关系为 $y=2.2349x-1.928$,呈线性正相关关系($R^2=0.9613$).这说明大气氮沉降通量除了与地区气候、环境条件有关外,还与年份间的环境、降雨量、采样点周边的环境有密切的关系^[5].与国外其它地区的大气氮年沉降通量相比(表 3),大河口水库仍处于较高水平,大气总氮年沉降通量分别是西班牙高山湖泊、加拿大阿尔伯特塔窄湖、欧洲北海湾的 3.4,7.6 和 3.4 倍.由此可见,中国作为全球大气氮沉降三大集中区,大气沉降作用对地表水体营养盐赋存水平、水生态环境及水体富营养化的贡献应引起格外重视.

大气氮沉降通量在不同月份、不同季节及不同生态条件下会受到来源、降雨、风速和风向等不同因素的影响.2017 年 1 月~12 月大河口水库大气氮干、湿沉降通量随季节变化较为显著(图 2).

表 4 国内外部分湖泊、水库大气氮沉降对比

Table 4 Comparison of atmospheric nitrogen deposition of some lakes and reservoirs

研究区	总氮沉降通量 [kg/(km ² ·a)]	国家/地区	文献来源
大河口水库	3205.9	中国	本研究
太湖	4538	中国	[34]
太湖梅梁湾	2652~3300	中国	[31]
滇池	1363.4	中国	[35]
杭嘉湖	4950.74~5585.80	中国	[5]
珠江口	3588	中国	[36]
高山湖泊	949.2	西班牙	[37]
阿尔伯特塔窄湖	420.0	加拿大	[38]
北海湾	950	欧洲	[39]

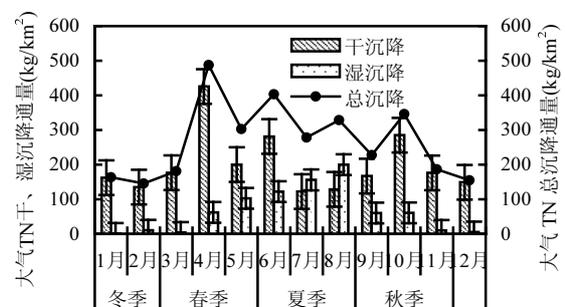


图 2 大河口水库大气 TN 干湿沉降通量

Fig.2 Wet and dry deposition flux of atmospheric nitrogen in Dahekou reservoir

由图 2 可见,大河口水库春(3~5 月)、夏(6~8 月)、秋(9~11 月)和冬(12 月~翌年 2 月)四季大气 TN 干沉降通量分别为 802.35,532.34,628.67,446.54kg/km².春、秋季节的大气氮干沉降通量明显高于夏、冬季节,这与研究区气候条件与农业生产活动密切相关.根据多伦县气象站统计资料,2017 年该地区平均风速为 3.3m/s,年主导风向为 WSW 风,出现频率为 12.8%,观测期全年以春、秋季节风速最大(如 4 月平均风速为 4.4m/s)、春季最小风速为 3.4m/s,最大为

6.0m/s,大风扬沙天数出现了 6d.大风天气下水库周边裸露的耕地、沙地、干盐湖底泥极易起尘,引起空气中颗粒物含量骤增,有助于含氮颗粒物的运移,增加大气氮沉降的输入.此外,大河口水库地处浑善达克沙地腹地和农牧养殖区、种植区,被大面积的风沙源区、养殖基地、农耕区包围,秋季在为农田作物追肥及施用农药等人为活动的影响下,部分氮肥和农药会随着风沙携带进入空气中,促使大气氮干沉降通量增加.夏季受降雨量及降雨频率的增多,空气中颗粒物含量骤减,干沉降通量为 532.34kg/km²,分别低于春、秋季节干沉降通量 802.35kg/km² 和 628.67kg/km²;冬季休耕期大气总氮干沉降通量降低至 446.54kg/km²,干沉降主要来源于多伦县城采暖期居民及供热公司作物秸秆和煤化石燃料燃烧排放的烟尘、粉尘颗粒通过大气扩散远距离输移.从大

气总氮湿沉降各季变化特征分析,水库春、夏、秋、冬四季大气 TN 湿沉降通量分别为 169.22,478.05, 131.46,17.27kg/km²,春、夏季大气总氮湿沉降通量明显高于秋、冬季节,约占全年沉降总量的 81.32%.与王小治等^[40]对太湖地区的大气氮沉降进行研究得出大气氮湿沉降输入以溶解态氮为主,且存在春夏高于秋冬季节的变化特征的结论相吻合.归因于研究区降雨量年内分配极不均匀,年降水 70%~80%集中在汛期春、夏两季,多以暴雨形式出现,暴雨有利于大气氮沉降进入水体,导致氮沉降量偏大.且受夏季高温的影响,畜禽粪便中氮素容易挥发,上述原因均会导致大气中氨氮升高,进而影响大气中氮素沉降量^[41].另据研究报道,由雷电作用产生的氮素也是导致湿沉降含氮量偏高的原因之一^[42].

2.2 大气氮沉降稳定同位素源解析

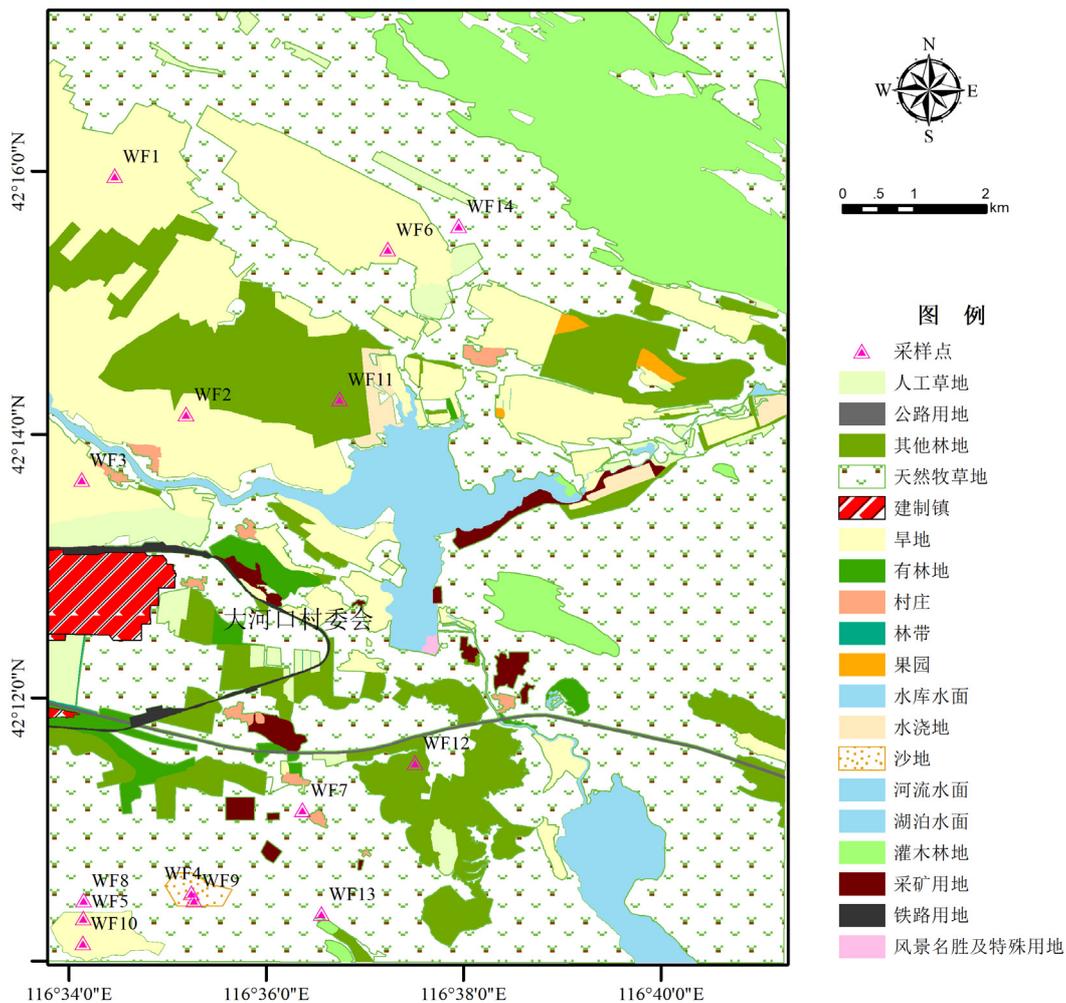


图3 大河口水库周边典型地块采样点布置

Fig.3 Layout of sampling points of typical plots around Dahekou reservoir

2.2.1 典型地块土壤 δ¹⁵N-TN 特征值域确定 通过对研究区周边风沙污染源进行现场调查,大河口

水库周边易起尘的土地类型有旱地、水浇地、沙地、林地、草地、采矿地、脱硫土堆场等。本次大气氮沉降污染源解析重点在辐射水库的周边半径为 15km 范围内,选择 14 个典型地块进行土壤样品采集和 $\delta^{15}\text{N}$ -TN 分析测试。布点方案见图 3。

2017 年 1~12 月,按照春、夏、秋、冬季节,分别对研究区内 14 个不同典型地块进行样本采集,共采集样本个数 76 个。测定样品中的 $\delta^{15}\text{N}$ -TN 值并进行数据汇总分析。详见表 5。

表 5 研究区典型地块 $\delta^{15}\text{N}$ -TN 值统计
Table 5 Statistic on the value of $\delta^{15}\text{N}$ -TN in every representative block

土壤类型	样本个数 (n)	最小值(‰)	最大值(‰)	平均值(‰)	$\delta^{15}\text{N}$ -TN 值域
旱地	20	5.29	7.52	6.12	5.29~7.52
水浇地	16	4.13	5.27	4.67	4.13~5.27
沙地	12	7.02	7.38	7.22	7.02~7.38
林地	10	0.49	5.60	3.03	0.49~5.60
草地	10	4.69	7.32	5.84	4.69~7.32
脱硫土	8	28.15	37.21	36.45	28.15~37.21

研究区土地利用类型不同,土壤中的 $\delta^{15}\text{N}$ -TN 值也各不相同。旱地土壤中 $\delta^{15}\text{N}$ -TN 平均值为 6.12‰,最小值 5.29‰,最大值 7.52‰;水浇地中 $\delta^{15}\text{N}$ -TN 最小值为 4.13‰,最大值为 5.27‰,平均值为 4.67‰。水浇地与旱地土地利用类型均为耕地, $\delta^{15}\text{N}$ -TN 的范围值却不尽相同,出现差异性的原因可能为农田管理水平不一造成。张煜等^[43]研究证实,与不施肥相比,农田中施用有机肥均能增加土壤中 $\delta^{15}\text{N}$ 值;沙地中 $\delta^{15}\text{N}$ -TN 值域区间较小,值域范围为 7.02‰~7.38‰,平均值为 7.22‰;林地中 $\delta^{15}\text{N}$ -TN 值偏低,最小值仅为 0.49‰,最大值为 5.6‰,平均值为 3.03‰。草地中 $\delta^{15}\text{N}$ -TN 最小值为 4.69‰,最大值为 7.32‰,平均值为 5.84‰。脱硫土因加工工艺等因素 $\delta^{15}\text{N}$ -TN 值域极大,最小值为 28.15‰,最大值为 37.12‰,平均值为 36.45‰。

2.2.2 大气氮沉降稳定同位素源解析 由表 5 可见,不同典型地块 $\delta^{15}\text{N}$ -TN 值域范围交集较为严重,其中以沙地、林地、水浇地交集最为严重。根据研究区不同地块土壤中 $\delta^{15}\text{N}$ -TN 值域范围,对研究区大气氮干沉降分春、夏、秋、冬季节进行源解析(图 4、表 6)。

表 6 大气沉降不同季节输入源所占百分比

Table 6 The percentage of atmospheric dust input source in different seasons

源划分	指标	季节总个数(n)			
		春季 (40)	夏季 (28)	秋季 (40)	冬季 (40)
可分辨的沙地 ($<4.1\text{‰}$)	数据个数	16	4	18	14
	百分比(%)	(40%)	(14.2%)	(45%)	(35%)
不可分辨的混合源 (林地、沙地、草地 等)($4.5\text{‰}\sim 7.4\text{‰}$)	数据个数	20	20	15	21
	百分比(%)	(50%)	(71.4%)	(37.5%)	(52.5%)
可分辨的旱地 $>7.4\text{‰}$	数据个数	2	0	4	2
	百分比(%)	(5%)	(0)	(10%)	(5%)

由图 4 和表 6 可见,不同季节大气氮干沉降来源差异性较大。春季的干沉降的主要来源为可识别的沙地,有 40% 的样品来自于沙地;不可识别的混合源(沙地、林地、旱地、水浇地、草地)所占比例为 50%,结合实际情况,春季受季风气候影响,风力较大,旱地、水浇地这一时期基本处于裸露状态,且这一时期农业活动逐渐复苏,农耕过程土壤密实度下降,呈蓬松状态,受风力作用更容易被带入大气中,而草地整体植被覆盖性要高于其他地块,因此,结合研究区实际,春季沉降的主要来源为沙地、耕地(旱地、水浇地)。夏季有 71.4% 的大气氮沉降样品来源于不可分辨的混合源输入,具体分析夏季研究区植物覆盖率达到全年最高,但受耕地人为活动的影响、研究区降雨量与蒸发量不对等与耕地这一时期土壤结构等特点较其它地块更容易被带入大气中。因此,综合分析夏季研究区大气氮沉降主要来源于位于水库正北及西北方向,距离水库周围约 2.57km 处的耕地,总面积约 14.58km²。秋季大气氮干沉降样品中 45% 来源于西南方向距离水库约 4.9km,面积约为 0.31km² 范围内可识别的沙地,10% 来源于可识别的旱地,不可分辨的混合源占总样品数的 37.5%,秋季大气沉降主要来源为沙地。冬季大气沉降中 35% 来源于可分辨沙地,不可识别的混合源为 52.5%。冬季研究区风向主要以西北风为主,可结合多伦县大河口水库周边土地利用类型图,可以看出水库西北方向主要以草地、沙地为主。因此,综合气象、地理等资料,冬季大气氮沉降主要来源于沙地与草地。

研究区春、夏、秋、冬四季干沉降的主要来源略有差异,春、秋、冬季受气象条件、气候特征及研究区地形等一系列因素的影响,干沉降的主要来源

为沙地,超过 35%的样品来源于沙地,另一主要污染源为研究区周围的耕地.

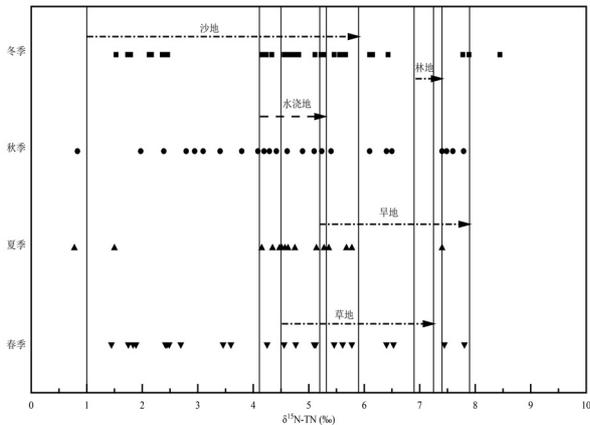


图 4 大气干沉降样中 $\delta^{15}\text{N}$ 分布

Fig.4 Distribution of $\delta^{15}\text{N}$ in atmospheric dry dust-fall

2.3 HYSPLIT4 后向轨迹模型溯源

HYSPLIT4(后向轨迹模型)是由美国国家海洋

大气研究中心空气资源实验室(NOAA)开发的一款软件,该模型较挪威大气研究所开发的 FLEX-PART6.2 模型和美国环境保护署开发的 CALPUFF5.8 模型有更好性能.HYSPLIT4 模式在输送、扩散和沉降过程方面考虑得较为完整,模拟时间精度最高可精确到小时,在国内外被广泛应用于分析污染物来源及确定传输路径等,是目前研究区域大气污染输送影响的常用方法之一^[44].为了进一步追踪扬沙天气氮降尘的远程来源地区,将大河口水库设为中心研究点(116°38'4.00"E,42°13'19.17"N),以2017年1~12月为模拟时段,以每日00:00(UTC)为后推起始时间,利用 HYSPLIT 模式模拟气流移动48h 的后向轨迹.考虑到边界层的扩散和混合,分别以500m、1000m和1500m高度的后向轨迹来反映大河口水库研究区云下气团的来源.模拟结果按季节表示,结果见图5.

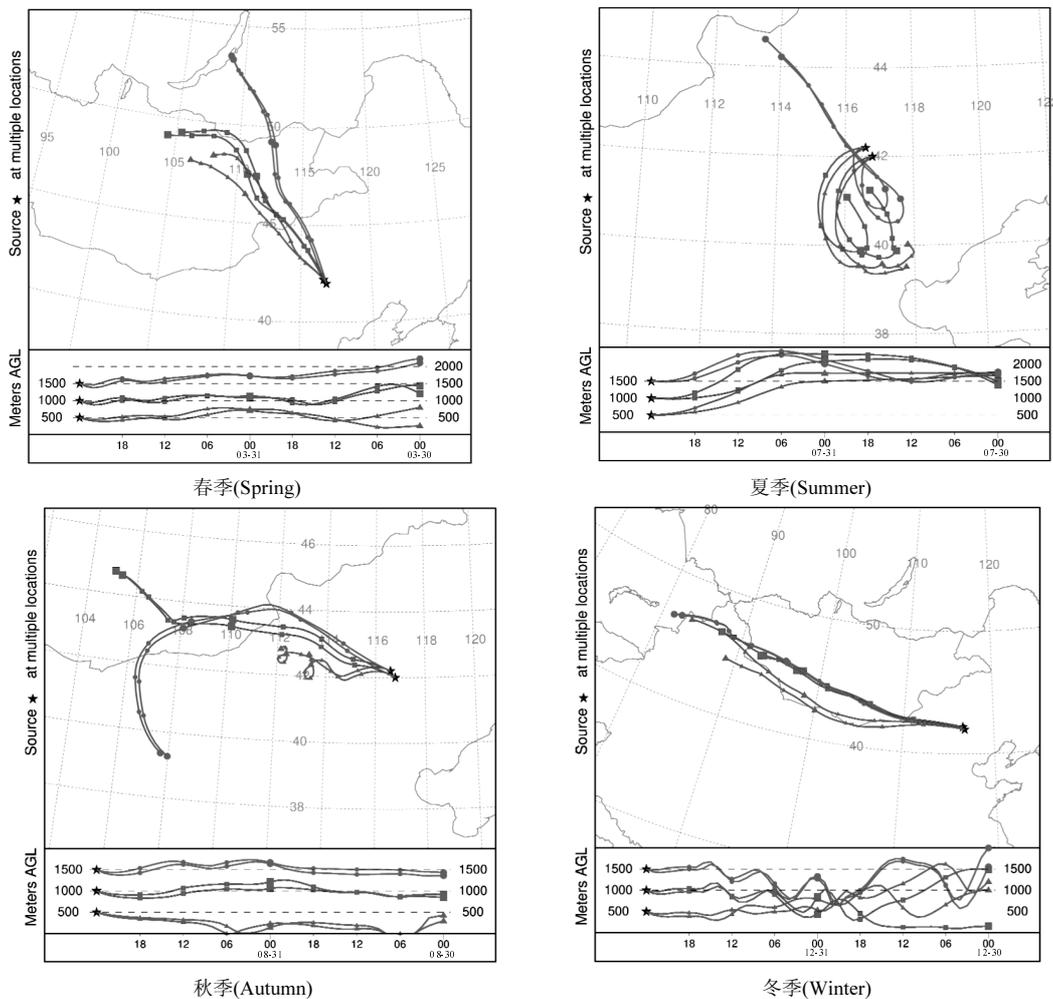


图 5 气团后向轨迹

红色、蓝色、绿色曲线分别代表地面以上 500、1000、1500m 高度的气团轨迹

2017年春季(3~5月),研究区发生了较为严重的扬沙天气,在海拔500m和1500m高度条件下模拟48h后向轨迹可见,1500m高空气团从蒙古国入境我国北部,与减弱的黄海高压之间极易形成东北—西南向的气流辐合带.在变性极地大陆气团控制之下,地面增热迅速,降水稀少,多会发生大风或沙尘暴天气.大风携带着岩石风化、土壤、火山喷发的尘埃等天然源和矿物质燃烧、汽车尾气等人为污染源通过远距离的大气输移对大河口水库水体富营养化产生重要影响.同时,500m低空气团自我国正北方向而来,速度较快,强烈的气团活动可以将浑善达克沙地沙子、农区耕地土壤、牧区动物粪便局地卷入气团中近距离扩散至大河口水库,增加水体中氮、磷营养盐浓度.与北方春季气团运移轨迹不尽相同,王雪梅等^[45]用气团后向追踪法研究了太湖流域春季的大气环流特征,发现太湖流域春季的成雨气团多数来源于我国西北地区和西南方孟加拉湾上空.夏季(6~8月),由于南方热带海洋气团来的晚退的早,研究区主要受境外蒙古低压控制,风速较小,表现为大气降尘主要以湿沉降为主,且大气粉尘及气溶胶主要源于多伦县及附近区域的交通运输、汽车尾气、建筑施工扬尘、工业生产烟尘以及其他人类活动排放的大气污染物等人为污染源近距离输送.秋季(9~11月),正值冷暖气团的交替时期,东南和西南海洋性季风气团和局地蒸发水汽的影响作用较强烈,无论是500m低空气团还是1500m高空气团运动轨迹变化均较大,活动较为频繁,大风和风沙天气较多.高浓度的风沙尘在长距离传输过程中会与遇到的气态或颗粒态污染物发生混合、交汇等相互作用,最终以干沉降方式或者经雨水淋滤、冲刷作用以湿沉降方式进入地表水体或土壤.冬季(12~2月),蒙古高压成为研究区的基本气压系统,气团由西北向东南方向运移,地面和高空均盛行西北风.12月份多次出现了高浓度降尘,由48小时后向轨迹可见,处于500m低空气团来源于蒙古国境内的蒙古大沙漠,移动速度较慢;而1500m高空气团自塔吉克斯坦北部穿越蒙古国中部、我国内蒙古锡林郭勒一带而来,移动速度较快.冬季我国北方及靠近我国北方的蒙古、塔吉克斯坦等国的风沙携带和夹裹的营养盐对水库的贡献也不容小视.杨龙元^[34]研究也认为,我国西北地区冬季采暖期间的大气污染和春季频繁发生的沙尘暴也是造成北方

沙区水体春季水环境变差的因素之一.

3 结论

3.1 大河口水库全年大气总氮总沉降通量为3205.9kg/(km²·a),约为全国氮沉降平均水平(790kg/(hm²·a))的4.06倍,水库研究区已经成为高氮沉降区.从沉降类型上看,大河口水库大气沉降主要以干沉降为主,占总沉降总量的75.17%,通量为2409.9kg/km²;湿沉降占24.83%,通量为796.0kg/km².与国内其它地区湖库大气总氮沉降通量相比大河口水库总氮沉降通量高于太湖、滇池、珠江口研究区,低于太湖地区.

3.2 大气总氮干、湿沉降通量随季节变化特征较为显著.2017年春、夏、秋、冬大气总氮干沉降通量分别为802.35kg/km²、532.34kg/km²、628.67kg/km²和446.54kg/km².春、秋季节明显高于夏、冬季节,约占全年大气干沉降通量总量的59.38%;湿沉降通量表现为春、夏季明显高于秋、冬季,约占全年湿沉降总量的81.32%.这与研究区内季节性降水分配不均、春秋季节风沙大、土地开发利用类型、农业生产活动、工业生产活动密切相关.

3.3 不同季节大气总氮干沉降来源差异性较大.春、秋季节大河口水库有40%~45%的干沉降样品主要来源为可识别的沙地;夏季大气氮沉降主要来源于耕地,总面积约14.58km².冬季大气氮沉降主要来源于沙地与草地.不同季节气团运移携带着岩石风化、土壤、火山喷发的尘埃等天然源和矿物质燃烧、汽车尾气等人为污染以大气干、湿沉降方式进入地表水体,对北方地表水环境发生变化起到了至关重要的影响作用.

参考文献:

- [1] 赵宪伟,李 橙,杨 晶,等.岗南水库上游流域大气氮干湿沉降研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018,16(5):115-121.
Zhao X W, Li C, Yang J, et al. Dry and wet deposition of nitrogen in the upstream basin of Gangan Reservoir [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018,16(5):115-121.
- [2] 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.
- [3] 王骏飞,刘宁锴.大气氮沉降机制及其生态影响研究进展 [J]. 污染防治技术, 2018,31(6):17-21.
Wang J F, Liu N K. Research progress on mechanisms of atmospheric nitrogen deposition and its ecological impact [J]. Pollution Control

- Technology, 2018,31(6):17-21.
- [4] 王欢博,石光明,田 密,等.三峡库区大气活性氮组成及干沉降通量[J]. 中国环境科学, 2018,38(1):44-50.
Wang H B, Shi G M, Tian M, et al. Characteristics of chemical components and dry deposition of reactive nitrogen in the Three Gorges Reservoir Region [J]. China Environmental Science, 2018, 38(1):44-50.
- [5] 王江飞,周柯锦,汪小泉,等.杭嘉湖地区大气氮、磷沉降特征研究[J]. 中国环境科学, 2015,35(9):2754-2763.
Wang J F, Zhou K J, Wang X Q, et al. Atmospheric nitrogen and phosphorous deposition in Hangjiahu area [J]. China Environmental Science, 2015,35(9):2754-2763.
- [6] 陈法锦,陈淳青,周凤霞,等.湛江湾大气湿沉降中营养盐的研究[J]. 中国环境科学, 2017,37(6):2055-2063.
Chen F J, Chen C Q, Zhou F X, et al. Nutrients in atmospheric wet deposition in the Zhanjiang Bay [J]. China Environmental Science, 2017,37(6):2055-2063.
- [7] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. Nature, 2013,494(7438):459-462.
- [8] Bobbink R, Hicks K, Galloway J, et al. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis [J]. Ecological Applications, 2010,20(1):30-59.
- [9] 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.
- [10] Xu W, Zhao Y H, Liu X J, et al. Atmospheric nitrogen deposition in the Yangtze River basin: spatial pattern and source attribution [J]. Environmental Pollution, 2018,232:546-555.
- [11] 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.
- [12] Goulding K W T, Bailey N J, Bradbury N J, et al. Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes. New Phytologist, 1998,139:49-58.
- [13] Hellsten S, Dragosits U, Place C J, et al. Modeling the spatial the spatial distribution of ammonia emissions in the UK [J]. Environmental Pollution, 2008,154(3):370-379.
- [14] Fagerli A A S W. Trends of nitrogen in air and precipitation: model results and observations at EMEP sites in Europe, 1983-2003 [J]. Environmental Pollution, 2008,154(3):448-461.
- [15] Galloway J N, Cowling E B, Seitzinger S P, et al. Reactive nitrogen: Too much of a good thing? [J]. Ambio, 2002,31(2):60-63.
- [16] 鲁如坤,史涛钧.金华地区降雨中养分含量的初步研究[J]. 土壤学报, 1979,16(1):81-84.
Lu R K, Shi T J. The content of plant nutrients of precipitation in Jinhua district of Zhejiang Province [J]. Acta Pedologica Sinica, 1979, 16(1):81-84.
- [17] 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 agrecosystem in red soil region of Jiangxi province [J]. Acta pedologica sinica, 2008,45(2):280-287.
- [18] 樊建凌,胡正义,周 静,等.林地大气氮沉降通量观测对比研究[J]. 中国环境科学, 2013,33(5):786-792.
Fan J L, Hu Z Y, Zhou J. et al. Comparative study on the observation of atmospheric nitrogen deposition in a forestland [J]. China Environmental Science, 2013,33(5):786-792.
- [19] 岳 平,宋 韦,李凯辉,等.天山中部巴音布鲁克高寒草原大气无机氮沉降[J]. 应用生态学报, 2014,25(6):1592-1598.
Yue P, Song W, Li K H, et al. Inorganic N deposition in the Bayinbuluk alpine grassland of the central Tianshan mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014,25(6):1592-1598.
- [20] Moline J, Harichaux P, Baudouin J, et al. Atmospheric nitrogen deposition has caused nitrogen enrichment and eutrophication of lakes in the northern hemisphere [J]. Global Change Biology, 2006,12(4): 635-643.
- [21] Elser J J, Andersen T, Baron J S, et al. Shifts in lake N: P stoichiometry and nutrient limitation driven by atmospheric nitrogen deposition. [J]. Science, 2009,326(5954):835-837.
- [22] Xu W, Zhao Y, Liu X, et al. Atmospheric nitrogen deposition in the Yangtze River basin: Spatial pattern and source attribution [J]. Environmental Pollution, 2018,232(1):546-555.
- [23] 陈春强,张 强,关晓东,等.沙尘和灰霾期间中国近海大气氮沉降通量估算[J]. 中国环境科学, 2019,39(6):2596-2605.
Chen C Q, Zhang Q, Guan X D, et al. Atmospheric nitrogen deposition fluxes during dust and haze events over China seas [J]. China Environmental Science, 2019,39(6):2596-2605.
- [24] 卢俊平,马太玲,张晓晶,等.典型沙源区水库大气氮干、湿沉降污染特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2015,34(12):2357-2363.
Lu J P, Ma T L, Zhang X J, et al. Reservoir pollution by dry and wet deposition of atmospheric nitrogen in typical sand area [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015,34(12):2357-2363.
- [25] GB/T13580.2-1992 大气降水样品的采集与保存[S].
GB/T13580.2-1992 Collection and preservation of the wet precipitation sample [S].
- [26] HJ/T193-2005 环境空气质量自动监测技术规范[S].
HJ/T193-2005 Automated methods for ambient air quality monitoring [S].
- [27] GB/T15265-94 环境空气降尘的测定[S].
GB/T15265-94 Ambient air-determination of dustfall-gravimetric method [S].
- [28] 张晓晶,卢俊平,马太玲,等.一种沙源区干湿降尘自动采样器[P]. 中国: ZL201610324106.6,2018-06-08.
Zhang X J, Lu J P, Ma T L, et al. An automatic sampler for dry wet dust fall in sand source area [P]. China Patent: ZL201610324106.6, 2018-06-08.
- [29] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration of China. Water and waste water monitoring and analysis method [M]. Beijing:China Environmental Science Press, 2002.
- [30] 李太谦.大气氮沉降对杭州北里湖的影响[D]. 苏州:苏州科技学院, 2011.
Li T Q. Effects of atmospheric nitrogen deposition on Beili lake in Hangzhou [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2011.

- [31] 翟水晶,杨龙元,胡维平.太湖北部藻类生长旺盛期大气氮、磷沉降特征 [J]. 环境污染与防治, 2009,31(4):5-10.
Zhai S J, Yang L Y, Hu W P. Atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during optimal algal growth period in northern Lake Taihu [J]. Environment Pollution and Control, 2009,31(4):5-10.
- [32] Lu C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007,112(D22):D22S05.
- [33] Fan Houbao, Huang Yuzi. Ecophysiological mechanism underlying the impacts of nitrogen saturation in terrestrial ecosystems on plant [J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2006,32(4):395-402.
- [34] 杨龙元,秦伯强,胡维平,等.太湖大气氮、磷营养元素干湿沉降率研究 [J]. 海洋与湖沼, 2007,38(2):104-110.
Yang L Y, Qin B Q, Hu W P. et al. The atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus nutrients in TaiHu Lake [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007,38(2):104-110.
- [35] 任加国,贾海斌,焦立新,等.滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 [J]. 环境科学, 40(2):582-589.
Ren J G, Jia H B, Jiao L X. et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus formation in atmospheric deposition in Dianchi Lake and their contributions to Lake Loading [J]. Environmental Science, 40(2): 582-589.
- [36] 樊敏玲,王雪梅,王 茜,等.珠江口横门大气氮、磷干湿沉降的初步研究 [J]. 热带海洋学报, 2010,29(1):51-56.
Fan M L Wang X M, Wang Q. et al. Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus into the Hengmen of Pearl River Estuary [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010,29(1):51-56.
- [37] Morales-Baquero R, Pulido-Villena E, Reche I. Atmospheric inputs of phosphorus and nitrogen to the southwest Mediterranean region: Biogeochemical responses of high mountain lakes [J]. Limnology and Oceanography, 2006,51(2):830-837.
- [38] Shaw R D, Trimbee A M, Minty A, et al. Atmospheric deposition of phosphorus and nitrogen in central Alberta with emphasis on Narrow Lake [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1989,43(1/2):119-134.
- [39] Hertel O, Skjoth C A, Frohn L M, et al. Assessment of the atmospheric nitrogen and sulphur inputs into the North Sea using a Lagrangian model [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2002, 27(35):1507-1515.
- [40] 王小治,尹微琴,单玉华,等.太湖地区湿沉降中氮磷输入量-以常熟生态站为例 [J]. 应用生态学报, 2009,20(10):2487-2492.
Wang X Z, Yin W Q, Shan Y H, et al. Nitrogen and phosphorus input from wet deposition in Taihu Lake region: a case study in Changshu agro-ecological experimental station [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009,20(10):2487-2492.
- [41] Messenger M L, Lehner B, Grill G, et al. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach [J]. Nature Communications, 2016,7:13603.
- [42] Kinzig A P, Socolow R H. Human impacts on the nitrogen cycle [J]. Physics Today, 1994,47(11):24-31.
- [43] 张 煜,张 琳,吴文良,等.内蒙农牧交错带地区土地利用方式和施肥对土壤碳库的影响,土壤学报, 2016,53(4):930-941.
Zhang Y, Zhang L, WU W L, et al. Impact of land use and fertilization measures on soil C stock in farming-grazing Interlacing zone of Inner Mongolia, China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(4):930-941.
- [44] 王 茜.利用轨迹模式研究上海大气污染的输送来源 [J]. 环境科学研究, 2013,26(4):357-363.
Wang Q. Study of air pollution transportation source in Shanghai using trajectory model [J]. Research of Environmental Sciences, 2013,26(4): 357-363.
- [45] 王雪梅,杨龙元,秦伯强,等.太湖流域春季降水化学组成及其来源研究,海洋与湖沼, 2006,37(3):249-255.
Wang X M, Yang L Y, Qin B Q, et al. Chemical composition and origin of spring rainwater in Taihu lake [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2006,37(3):249-255.

作者简介: 卢俊平(1977-),男,内蒙古呼和浩特人,副教授,博士,主要从事河湖水库水环境修复与水污染防治技术研究.发表论文 30 余篇.