

# 典型沙源区水库大气氮干、湿沉降污染特征研究

卢俊平<sup>1</sup>, 马太玲<sup>1,2\*</sup>, 张晓晶<sup>1</sup>, 刘廷奎<sup>1</sup>, 于淑玉<sup>1</sup>

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018; 2.三亚学院管理学院,海南 三亚 572000)

**摘要:**为研究典型沙源区水库大气氮干、湿沉降污染特征及其对水域氮素污染的贡献,以京蒙沙源区大河口水库库区为研究区,于2014年沿水库岸边布设12个大气氮沉降监测站点,采集干、湿沉降样本,测定干、湿沉降TN质量浓度,计算全年各月大气TN干、湿沉降通量和年入库TN污染负荷量。结果表明,研究区大气干、湿沉降季节差异显著( $P<0.05$ ):全年各月TN干沉降通量变化范围为116.31~382.02 kg·km<sup>-2</sup>,主要集中在春季4月和秋季10月,最大TN干沉降通量出现在春季风沙最为严重的4月,其值为382.02 kg·km<sup>-2</sup>;湿沉降通量变化范围为0.73~195.53 kg·km<sup>-2</sup>,主要集中在夏季(6—8月),最大TN湿沉降通量出现在降水量最大的8月,其值为195.53 kg·km<sup>-2</sup>。大气氮沉降以干沉降为主,全年月平均TN干沉降通量是湿沉降通量的2.9倍,且TN湿沉降通量与降水量变化呈显著正相关( $R^2=0.9613$ )。同入库河流径流TN污染负荷对比,2014年大气TN沉降入库污染负荷量为7.15 t,占同年滦河和吐力根河两条河流入库TN污染负荷的19.91%。

**关键词:**沙源区;大河口水库;总氮;干沉降;湿沉降

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)12-2357-07 doi:10.11654/jaes.2015.12.015

## Reservoir Pollution by Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Typical Sand Area

LU Jun-ping<sup>1</sup>, MA Tai-ling<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Xiao-jing<sup>1</sup>, LIU Ting-xi<sup>1</sup>, YU Shu-yu<sup>1</sup>

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. School of Management, Sanya University, Sanya 572000, China)

**Abstract:** The water pollution caused by dry and wet deposition of atmospheric nitrogen has aroused wide concerns. In this study, Dahekou Reservoir, located in Beijing and Inner Mongolian sand source area, was chosen to quantify the contribution of dry and wet deposition of atmospheric nitrogen to reservoir pollution in sand area. The effects of different seasons on deposition fluxes were also compared. Results showed that the highest cumulative TN of dry deposition and wet deposition appeared in April and August, which was 382.02 kg·km<sup>-2</sup> and 195.53 kg·km<sup>-2</sup>, respectively. Dry deposition was the main form of the atmospheric nitrogen deposition. The monthly mean TN dry deposition flux was 2.9 folds of the monthly mean wet deposition flux. The wet TN deposition increased with increasing rainfall. In 2014, the atmospheric TN deposition contributed 7.15 t to Dahekou Reservoir, accounting for 19.91% of TN loads combined from Luan river and Tuligen river during the same period.

**Keywords:** sand source areas; Dahekou Reservoir; total nitrogen; dry deposition; wet deposition

随着世界各地工农业的快速发展,全球水库(湖泊)水环境急剧恶化,引起国内外学者的高度关注,部分学者对造成水污染的氮营养盐源展开了深入研究<sup>[1]</sup>,前期研究点主要侧重于入库(湖泊)河流和农业面源

氮营养盐的输入,而忽略了大气氮沉降的贡献率<sup>[2-3]</sup>。直到20世纪50年代国外学者才开始了有关大气氮沉降的研究,并率先认识到大气氮素沉降对水生生态系统污染的严重性<sup>[4-6]</sup>。Paerl等<sup>[7]</sup>研究发现,美国东部海岸河口和墨西哥东部海湾大气氮沉降量占总氮负荷的10%~40%;Duce<sup>[8]</sup>指出,某河水中新输入的氮大约有20%来源于大气;Winchester等<sup>[9]</sup>的调查显示,北佛罗里达州12处水域大气氮素干、湿沉降通量与河水中总溶解氮通量接近;Tarnay等<sup>[10]</sup>研究得出,美国塔

收稿日期:2015-05-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51369020);内蒙古自然科学基金资助项目(2012MS0614)

作者简介:卢俊平(1977—),男,内蒙古呼和浩特人,副教授,主要从事水环境修复与水污染防治研究。E-mail:ljpcau@163.com

\*通信作者:马太玲 E-mail:nmg-hippo@163.com

霍湖大气氮沉降通量为  $2.9\sim 11.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 是近 50 年引起湖水水质下降的主要诱因; Morales 等<sup>[11]</sup>发现, 大气氮沉降对委内瑞拉 Maracaibo 湖氮污染贡献竟然高于周围排污水。我国学者针对境内湖泊、水库、海洋特定时期大气含氮化合物沉降对水体污染贡献的定量研究也逐年增多<sup>[12-18]</sup>。

大河口水库 ( $42^{\circ}13'19.17''\text{N}$ ,  $116^{\circ}38'4.00''\text{E}$ ) 于 1995 年 8 月建成, 位于锡林郭勒盟浑善达克沙地京蒙沙源区腹地、多伦县境内的滦河干流上, 水域面积  $17.262 \text{ km}^2$ , 主要受吐力根河和滦河入库地表径流补给, 是一座以供水发电为主, 兼具农业灌溉和水产养殖等功能的中型水库。沙源区风沙输移量大, 扬沙和沙尘暴天气频繁出现, 水库周边分布有半流动沙丘、撂荒地、荒草地、干盐湖以及春、冬季裸露的耕地, 受当地气候特征及环境特征影响, 大气氮营养盐沉降成为水库大气氮沉降的重要来源<sup>[19]</sup>。

在对水环境的影响因素研究中, 大气氮干、湿沉降作用不可忽视, 大气沉降研究的重要性已逐渐凸显。研究沙源区水库大气氮干、湿沉降污染特征, 分析氮沉降通量及污染负荷变化规律, 对于认识大气氮沉降对水库氮污染的贡献、控制沙源区水库水体富营养化具有重要意义。为此, 本项研究于 2014 年 1—12 月环大河口水库周边布置大气干、湿沉降观测站点, 进行了为期一年的干、湿沉降样本采集和室内分析测试工作, 进而计算沙源区大河口水库大气氮干、湿沉降通量和入库污染负荷比率, 研究大气氮干、湿沉降污染特征及其对水库水体富营养化的贡献。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点的布设

在环大河口水库周边布设 12 个大气干、湿沉降监测站点, 分别为  $\text{JC}_1$ 、 $\text{JC}_2$ 、 $\text{JC}_3$ 、 $\text{JC}_4$ 、 $\text{JC}_5$ 、 $\text{JC}_6$ 、 $\text{JC}_7$ 、 $\text{JC}_8$ 、 $\text{JC}_9$ 、 $\text{JC}_{10}$ 、 $\text{JC}_{11}$ 、 $\text{JC}_{12}$ 。每个监测站点放置 3 个大气沉降采集器。监测点详细布置方案及地理位置见图 1。

### 1.2 样品收集与测试

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》(GB/T 153580.2—1992)和《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ/T 193—2005)进行<sup>[4]</sup>。采集器为内径 150 mm 的标准玻璃缸, 置于高出地面 1.5 m 处的铁架中, 采集器口安设不锈钢网罩以防鸟类活动的干扰。

干沉降采集: 将大气干沉降采集器放置在监测站点采样架上, 收集大气干沉降 (每次取样后在采集器内加入少量乙二醇水溶液, 防止冰冻并抑制微生物和藻类生长)。降水前将采样器用盖密封, 降水结束后立即打开。每月最后 1 d 收集采集器中的样品。

湿沉降采集: 在每次降水开始 5~10 min 后, 由常驻大河口水库管理站的研究人员负责在大气沉降监测站点采样架上放置湿沉降采集器, 降水结束后从采集器中收集降雨或降雪样品, 并将湿沉降采集器收回。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。

每月将干、湿降尘样品带回试验室测定滤液中 TN 质量浓度, 同时记录大气干沉降采集器内液体体

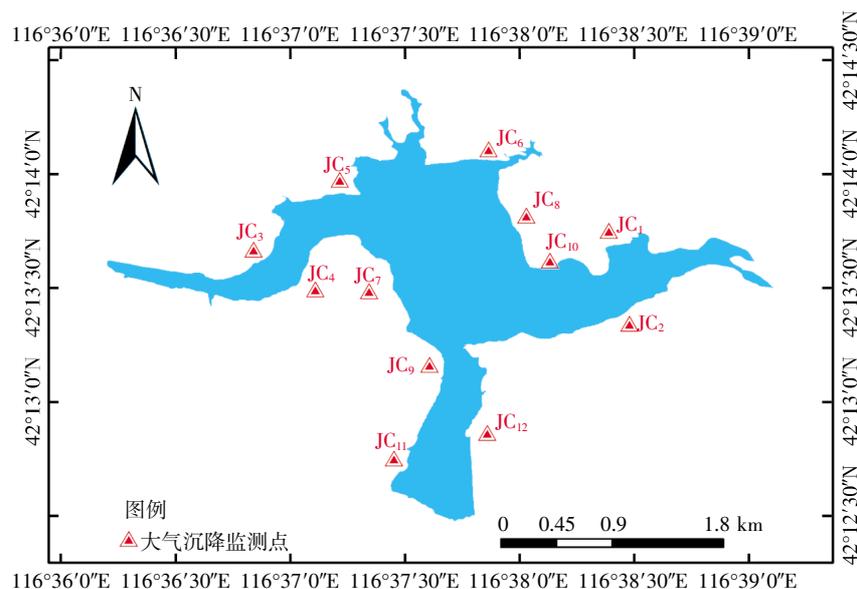


图 1 大河口水库大气沉降监测点布设方案

Figure 1 Layout scheme of atmospheric deposition monitoring points in Dahekou Reservoir area

积。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)》<sup>[20]</sup>中的A类方法进行,测定方法为碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法。

### 1.3 研究方法

根据2014年全年各月大气干、湿沉降监测点收集的干、湿沉降液体体积及其样品中TN含量,结合各站点大气干、湿沉降采集器个数(每站点3个)、采集器面积,分别用公式(1)和公式(2)计算2014年全年各月大河口水库大气TN干、湿沉降通量。此外,在滦河、吐力根河入库口监测断面分别设置水质监测点L和T,每月监测水体TN浓度,结合大河口水库管理站提供的两河入库径流资料,按公式(3)估算河流径流入库TN污染负荷量。

干沉降通量计算公式:

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

式中: $F_d$ 为大气TN月干沉降通量, $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$ ;  $k_d$ 为换算系数,无量纲,取值 $10^{-3}$ ;  $C$ 为收集液中TN的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $V$ 为收集液体积,L;  $S$ 为采集器面积, $0.018 \text{ m}^2$ ;  $k_d/S=56.59 \times 10^{-3} \text{ m}^{-2}$ ;  $f$ 为采样时间系数, $\text{d}^{-1}$ 。

湿沉降通量计算公式:

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

式中: $F_w$ 为大气TN月湿沉降通量, $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$ ;  $k_w$ 为单位换算系数,无量纲,取值 $10^{-3}$ ;  $C_i$ 为雨或雪中TN质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $V_i$ 为采集雨(雪)水的体积,L;  $S$ 为采集器面积, $0.018 \text{ m}^2$ ;  $h$ 为月降水量,mm;  $n$ 为月降雨(雪)次数。

河流径流入库TN负荷计算公式:

$$M = \rho_i \times Q_i \times 3600 \times 24 \times n_i \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中: $M$ 为每月河流径流入库TN负荷量,t;  $\rho_i$ 为TN浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $Q_i$ 为月平均入库断面径流量 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $n_i$ 为每月天数,d。

## 2 结果与讨论

### 2.1 大气TN干、湿沉降通量

根据对各监测点大气TN干、湿沉降监测数据统计分析,取得大气TN干、湿沉降通量统计结果(表1)。由表1可见,2014年观测期内,大河口水库大气TN总沉降通量变化范围为 $131.98 \sim 436.82 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ ,平均值为 $239.65 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ ,与太湖TN总沉降通量( $248 \pm 27$ ) $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$ 接近,低于杭州北里湖TN总沉降通量 $421.3 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ <sup>[21-22]</sup>。2014年各月大气TN干沉降

表1 大河口水库大气TN干、湿沉降通量和总沉降通量统计结果  
Table 1 Atmospheric dry, wet and total deposition fluxes of nitrogen in Dahekou Reservoir area

项目	TN 沉降通量/ $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$		
	干沉降	湿沉降	总沉降
最小值	116.31	0.73	131.98
最大值	382.02	195.53	436.82
平均值	177.51	62.14	239.65
标准差	74.56	63.61	91.00
变异系数	0.42	1.02	0.38

通量变异系数为0.42,湿沉降通量变异系数为1.02。由此可见,大气TN干沉降通量值年内各月相对变异小,而湿沉降通量受年内各月降水分配极不均匀的影响,变异特征相当显著。

### 2.2 大气TN干、湿沉降通量变化特征

根据2014年全年各月大气干、湿沉降监测站点收集的干、湿沉降液及其TN质量浓度,结合各站点采集器个数(每站点3个)、采集器面积及每月降水量,计算2014年全年各月大气TN干、湿沉降通量。大河口水库2014年1—12月大气TN干、湿沉降通量随时间变化曲线见图2。

由图2可见,大气TN干、湿沉降通量季节性差异特征显著。除了7、8月份外,全年其他各月TN干沉降通量均明显高于湿沉降通量。年内大气TN干沉降通量变化曲线出现两次峰值,分别为春季4月和秋季10月,4月份大气TN干沉降通量值全年最高,为 $382.02 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ ,是年平均值 $177.51 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ 的2.2倍。这主要归因于春秋季节处于沙尘暴频发期,受大风天气的影响,研究区内大量含氮矿物质组分的裸露耕地、沙地和干盐湖底泥,随风沙输移沉降于水库及周边区域;春秋季节研究区主导风向为西风,且正值农

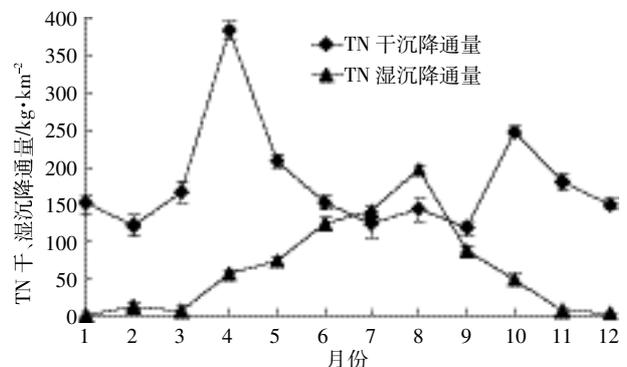


图2 大气TN干、湿沉降通量月变化曲线  
Figure 2 Monthly change curves of wet and dry deposition fluxes of atmospheric total nitrogen in Dahekou Reservoir area

田化肥使用的峰值期,水库西部区域大面积马铃薯种植基地施肥过程中的高氨氮挥发物质随风输移,并与气溶胶颗粒结合,最终形成大气氮沉降;另外,水库周边牛羊养殖基地畜禽粪便中氨的挥发也是大气 TN 沉降通量增大的主要诱因之一。陈能汪等<sup>[23]</sup>在关于九龙江流域氮的源汇时空模式与机理初探研究中也提出了同样观点。

图 2 还表明,大气 TN 湿沉降通量变化曲线最高值出现在降水量最大的 8 月份,湿沉降通量峰值为  $195.53 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ ,为年平均值  $62.14 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$  的 3.1 倍。形成此现象的主要原因是降水量的季节变化。

根据 2014 年各月大气 TN 干、湿沉降通量统计结果,确定各月大气 TN 干、湿沉降通量比例关系,绘制大气 TN 干、湿沉降通量比例月变化曲线见图 3。

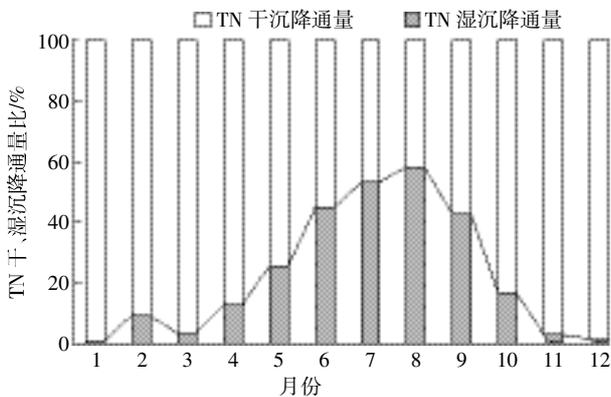


图 3 大气 TN 干、湿沉降通量比例

Figure 3 Monthly variation of dry and wet deposition flux proportion of atmospheric TN in Dahekou Reservoir area

由图 3 可见,从年内分配来看,1—6 月大气 TN 沉降以干沉降为主,干沉降通量占总沉降通量的 55.26%~99.52%。7—9 月大气 TN 沉降以湿沉降为主,大气 TN 湿沉降通量占总沉降通量的 53.15%~58.03%。10—12 月大气 TN 沉降以干沉降为主。全年大气 TN 沉降以干沉降为主,月平均干、湿沉降通量分别占总沉降通量的 74.07%和 25.93%,干沉降通量占总沉降通量的比例是湿沉降的 2.9 倍,与太湖梅梁湾地区 TN 平均干沉降通量占 26.1%、湿沉降通量占 73.9%的研究结论不同<sup>[24]</sup>。显然,这与我国南北方气候差异显著有关,北方地区常年干旱少雨,植被覆盖度低,地表沙土裸露,春、秋季节风沙大,易产生沙尘暴,且冬季采暖燃烧矿物燃料易产生挥发物,含氮矿物质的沙尘、粉尘沉降于地面或水域,造成研究区大气 TN 干沉降通量较高;而南方地区气候湿润,年内降水量

大且集中,大气中吸附的氮、磷物质被雨水冲刷至地面,导致南方地区湿沉降通量明显高于干沉降通量。

### 2.3 大气 TN 湿沉降通量与降水量关系

有研究表明,大气 TN 干、湿沉降通量的高低与年内各月降水量的分配密切相关<sup>[18,25]</sup>。大河口水库大气 TN 月湿沉降通量与降水量变化曲线见图 4。

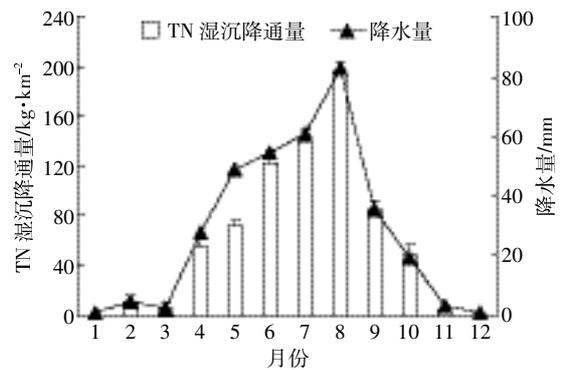


图 4 大气 TN 月湿沉降通量与降水量的关系曲线

Figure 4 Relationship between monthly wet deposition flux of TN and monthly precipitation in Dahekou Reservoir area

由图 4 可见,TN 湿沉降通量随时间变化规律与降水量各月分配规律基本吻合,最低值出现在降水量最小的 1 月份,最高值出现在降水量最大的 8 月份。主要由于 1 月份受西伯利亚寒流的影响为全年降水量最小月,随着季节的更替,气温的升高,8 月份雨季降水量骤增,加之水库周边农牧民主要以畜牧业和种植业为主,8 月份农业活动最强,农田施肥过程中的含氮营养盐随高温挥发或随扬尘进入大气环境,最终通过降水冲刷降落至地面及水域。

本研究还发现,大气 TN 湿沉降通量随降水量的增大而有规律地增大(图 5),二者呈显著线性正相关关系( $R^2=0.9613$ )。

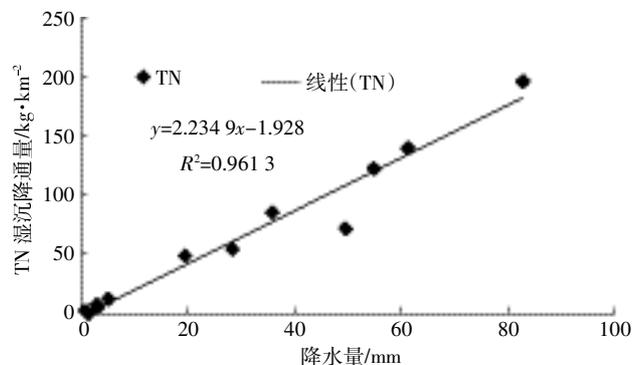


图 5 大气 TN 湿沉降通量与降水量散点图

Figure 5 Scatter plot of atmospheric wet TN deposition flux and precipitation in Dahekou Reservoir area

## 2.4 大气 TN 干、湿沉降入库污染负荷分析

采用 2014 年 1—12 月大河口水库大气 TN 总沉降通量,结合水库各月水面面积,可估算大气 TN 沉降入库污染负荷量,结果见表 2。

为了与河流入库 TN 污染负荷量进行对比,明确大气沉降对水库的 TN 污染贡献,根据 2014 年各月吐力根河、滦河入库断面的 TN 浓度监测值,结合同期大河口水库管理站提供的两河入库径流资料,估算河流径流入库 TN 污染负荷量,结果见表 3。

由表 2 和表 3 可见,2014 年通过大气沉降输入大河口水库 TN 的负荷量为 7.15 t;同年两河入库 TN 负荷总量为 35.88 t,其中滦河入库 TN 负荷量 27.32 t,吐力根河入库 TN 负荷量 8.56 t。大气 TN 沉降污染负荷占河流径流入库 TN 污染负荷的 19.91%,占总负荷量的 16.62%,成为大河口水库氮营养盐输入的主要途径之一,表明对大河口水库水体富营养化具有一定的贡献。这一结论与 Paerl 等<sup>[26]</sup>对北美和西欧近海水域关于大气输入水体的氮素占河道水体氮素输入量的 20%~40%的研究结论比较接近,与我国学者杨龙元关于太湖大气 TN 年平均沉降占 TN 总负荷 48.8%的研究结论有一定差异<sup>[17]</sup>。其原因在于太湖地处我国

气候湿润区,空气中水汽含量大,有助于气溶胶对空气中游离  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{HNO}_3$  的吸附、聚集增大和沉降。相反,大河口水库受沙尘天气的影响,上空区域虽然气溶胶粒子含量丰富,但因空气干燥,能够吸附空气中游离  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{HNO}_3$  的气溶胶颗粒难以聚集增大,而最后形成沉降<sup>[27]</sup>。此外,大气 TN 沉降负荷占河流径流输入负荷比重在不同地区出现差异,还与研究区人类农业活动的强弱、气候降雨分布特征和沿河道局地工业污染源的分布、排污水平等因素密切相关。

为了进一步对比大气和河流两种途径对水库氮污染的贡献,并了解各自的变化规律,根据表 2 和表 3,得到两种不同途径的 TN 贡献率变化规律(图 6)。

由图 6 可见,2014 年两种途径入库氮污染负荷随季节呈现规律的变化趋势。春季(3—5 月)受风沙和干燥气候的影响,大气氮沉降贡献率明显增大,尤其是风沙严重的 4 月份,大气氮沉降污染负荷量达到全年最高值 1.13 t,占当月入库氮污染负荷总量的 42.98%。夏秋季(7—10 月)降水强度和降水量大幅增加,河流径流量也随之骤增,水库周边土壤中的氮素随降水产生的地表径流汇入水库,河流径流对水库氮

表 2 2014 年大气 TN 沉降入库污染负荷量估算结果

Table 2 Estimated results of TN pollution load of Dahekou Reservoir from atmospheric deposition in 2014

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
沉降通量/ $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$	150.9	132.0	170.7	436.8	278.0	275.1	261.7	336.9	202.2	295.4	184.6	151.5	—
面积/ $\text{km}^2$	2.33	2.52	2.36	2.58	2.66	2.73	2.16	2.41	2.89	2.33	2.31	2.40	—
TN 负荷量/t	0.35	0.33	0.40	1.13	0.74	0.75	0.57	0.81	0.59	0.69	0.43	0.36	7.15

表 3 2014 年河流径流入库 TN 污染负荷量估算结果

Table 3 Estimated results of TN pollution loads of Dahekou Reservoir from runoff in 2014

月份	时间/d	滦河			吐力根河			两河入库 TN 总负荷量/t
		径流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	入库 TN 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN 负荷量/t	径流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	入库 TN 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN 负荷量/t	
1月	31	0.055	3.68	0.54	0.029	3.01	0.23	0.77
2月	28	0.05	3.45	0.42	0.027	2.69	0.18	0.60
3月	31	0.071	3.63	0.69	0.031	2.48	0.21	0.90
4月	30	0.103	4.21	1.12	0.034	4.21	0.37	1.49
5月	31	0.126	9.2	3.11	0.038	8.50	0.87	3.98
6月	30	0.108	5.23	1.46	0.037	5.23	0.50	1.96
7月	31	0.118	11.43	3.61	0.052	10.60	1.48	5.09
8月	31	0.166	8.71	5.99	0.047	8.53	1.55	7.54
9月	30	0.181	9.14	4.29	0.054	10.75	1.51	5.80
10月	31	0.183	13.46	4.27	0.051	12.33	1.17	5.44
11月	30	0.101	5.21	1.36	0.034	3.65	0.32	1.68
12月	31	0.067	2.57	0.46	0.031	2.21	0.18	0.64
合计				27.32			8.56	35.88

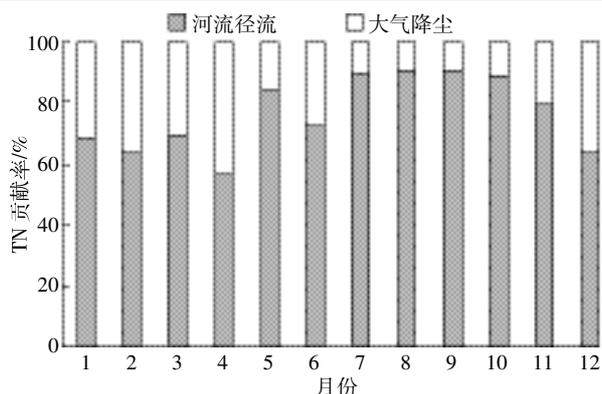


图6 两种不同途径 TN 贡献率月变化规律

Figure 6 Monthly variation of contribution rates of two nitrogen loading paths to TN loads of Dahekou Reservoir

污染负荷贡献率上升至 72.38%~90.26%,成为夏季水库氮输入的最主要途径。秋季(9—11月)气温降低,风沙扬尘天气增多,降水量减少,河流径流量逐月降低,河流径流氮输入对水库氮输入的贡献率降低,大气氮沉降入库污染负荷贡献率逐渐上升。冬季(12—2月),水库进入冰封期,入库水系滦河、吐力根河径流量达到全年最低水平,河流径流对水库氮污染负荷贡献率降低至 63.98%~68.79%,但由于该时段大气沉降受水库冰面覆盖阻隔的影响,当季不会对水库的氮营养盐产生直接影响,因而河流径流氮输入是冬季冰封期水库氮营养盐的最主要来源。

### 3 结论

(1)受干旱半干旱沙源区多风少雨典型气候特征的影响,大河口水库大气 TN 沉降通量以干沉降为主,全年 TN 干沉降通量变化范围为 116.31~382.02  $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$ ,平均值为 177.51  $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$ ;TN 湿沉降通量变化范围为 0.73~195.53  $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$ ,平均值为 62.14  $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$ 。全年月平均 TN 干沉降通量是湿沉降通量的 2.9倍。

(2)受季风和年内降水分配极不均匀等气候条件的影响,大气 TN 干沉降主要集中在春季 4 月和秋季 10 月,尤以风沙最严重的 4 月为甚,其值为 382.022  $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$ 。大气 TN 湿沉降主要集中在夏季(6—8月),与降水量变化呈明显的正相关,最大 TN 湿沉降出现在降水量最大的 8 月,其值为 195.53  $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$ 。

(3)2014 年通过大气沉降输入大河口水库的 TN 污染负荷量为 7.15 t,占同期滦河和吐力根河入库 TN 污染负荷的 19.91%,占 TN 总负荷量的 16.62%。大河口水库大气干沉降中 N 营养盐输入对水库水体

富营养化的贡献及其带来的水环境问题不容小视。

### 参考文献:

- [1] 吴雅丽,许海,杨桂军,等.太湖水体氮素污染状况研究进展[J].湖泊科学,2014,26(1):19-28.  
WU Ya-li, XU Hai, YANG Gui-jun, et al. Progress in nitrogen pollution research in Lake Taihu[J]. *Lake Sciences*, 2014, 26(1): 19-28.
- [2] 顾冬梅,邓开宇,李太谦,等.杭州北里湖大气沉降研究[J].安全与环境工程,2013,20(1):36-40.  
GU Dong-mei, DENG Kai-yu, LI Tai-qian, et al. Study on the atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus in Beili Lake of Hangzhou[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2013, 20(1): 36-40.
- [3] 刘涛,杨柳燕,胡志新,等.太湖氮磷大气干湿沉降时空特征[J].环境监测管理与技术,2012,6(24):20-24.  
LIU Tao, YANG Liu-yan, HU Zhi-xin, et al. Spatial-temporal features of atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus to the Lake Taihu[J]. *Environmental Monitoring and Control Technology*, 2012, 6(24): 20-24.
- [4] 宋欢欢,姜春明,宇万太,等.大气氮沉降的基本特征与监测方法[J].应用生态学报,2014,25(2):599-607.  
SONG Huan-huan, JIANG Chun-ming, YU Wan-tai, et al. Basic features and monitoring methodologies of atmospheric nitrogen deposition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 599-607.
- [5] Goulding K W T, Bailey N J, Bradbury N J, et al. Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes[J]. *New Phytologist*, 1998, 139(1):49-58.
- [6] Kim T W, Lee K, Naiiar R G, et al. Increasing N abundance in the Northwestern Pacific Ocean due to atmospheric nitrogen deposition[J]. *Science*, 2011, 334(6055):505-509.
- [7] Pearl H W, Dennis R L, Whitall D R. Atmospheric deposition of nitrogen: Implications for nutrient overenrichment of coastal waters[J]. *Estuaries and Coasts*, 2002, 25(4):677-693.
- [8] Duce R A. The impact of atmospheric nitrogen, phosphorus, and iron species on marine biological productivity[M]//Buat-Menard P. The role of air-sea exchange in geochemical cycling. Springer Netherlands, 1986:497-529.
- [9] Winchester J W, Escalona L, Fu J M, et al. Atmospheric deposition an hydrogeologic flow of nitrogen in northern Florida Watersheds[J]. *Geochim Cosmochim ACTA*, 1995(11):2215-2222.
- [10] Tamay L, Gertler A W, Blank R R, et al. Preliminary measurements of summer nitric acid and ammonia concentrations in the Lake Talloe Basin air-shed for dry deposition of atmospheric nitrogen[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 113:145-153.
- [11] Morales J A, Albormoz A, Socorro E. An estimation of nitrogen and phosphorus loading by wet deposition over lake Maracaibo, Venezuela [J]. *Water, Air, Soil Pollut*, 2001, 128:207-221.
- [12] 鲁如坤,史陶钧.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 Ru-kun, SHI Tao-jun. The content of plant nutrients of precipita-

- tion in Jinhua district of Zhejiang Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1979, 16(1):81-84.
- [13] 常运华, 刘学军, 李凯辉, 等. 大气氮沉降研究进展[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6):972-979.  
CHANG Yun-hua, LIU Xue-jun, LI Kai-hui, et al. Research progress in atmospheric nitrogen deposition[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(6):972-979.
- [14] 王金杰, 张克荣, 吴川, 等. 汉江上游金水河流域氮湿沉降[J]. 环境科学, 2014, 35(1):66-72.  
WANG jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, et al. Wet deposition of atmospheric nitrogen of the Jinshui watershed in the upper Hanjiang River[J]. *Environment Science*, 2014, 35(1):66-72.
- [15] 倪婉敏, 朱蕊, 张建英. 大气氮湿沉降对青山湖富营养化的影响[J]. 环境化学, 2012, 31(5):631-635.  
NI Wan-min, ZHU Rui, ZHANG Jian-ying. Wet deposition of atmospheric nitrogen and its eutrophic effect on Qingshan Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(5):631-635.
- [16] 陈能汪, 洪华生, 张璐平. 九龙江流域大气氮湿沉降研究[J]. 环境科学, 2008, 29(1):38-46.  
CHEN Neng-wang, HONG Hua-sheng, ZHANG Luo-ping. Wet deposition of atmospheric nitrogen in Jiulong River watershed[J]. *Environment Science*, 2008, 29(1):38-46.
- [17] 杨龙元, 秦伯强, 胡维平. 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 Long-yuan, QIN Bo-qiang, HU Wei-ping. The atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus nutrients in Taihu Lake[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, 38(2):104-110.
- [18] 余辉, 张璐璐, 李焕利. 太湖氮磷营养盐大气湿沉降特征及入湖贡献率[J]. 环境科学研究, 2011, 24(11):1210-1219.  
YU Hui, ZHANG Lu-lu, LI Huan-li. Atmospheric wet deposition characteristics of nitrogen and phosphorus nutrients in Taihu Lake and contribution to the Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(11):1210-1219.
- [19] 卢俊平, 刘廷玺, 马太玲, 等. 沙源区水库氮磷营养盐时空分布与相关性分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(4):81-84.  
LU Jun-ping, LIU Ting-xi, MA Tai-ling, et al. Temporal and spatial distribution characteristics and correlative analysis of nitrogen and phosphorus in sand source region reservoir[J]. *Yellow River*, 2015, 37(4):81-84.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic China. The analytic methods of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: Environmental Science Press of China, 2002.
- [21] 蒋瑶, 夏品华, 薛飞, 等. 贵州百花湖水库水体透明度的时空变化及影响因子[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(1):199-202.  
JIANG Yao, XIA Pin-hua, XUE Fei, et al. Spatial-temporal changes of the water transparency and their influencing factors in Baihua Reservoir in Guizhou[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2013, 41(1):199-202.
- [22] Cole J J, Caraco N F, Likens G E. Short-range atmospheric transport: A significant source of phosphorus to an oligotrophic lake[J]. *Limnol Oceanogr*, 1990, 35(6):1230-1237.
- [23] 陈能汪, 洪华生, 张璐平, 等. 九龙江流域氮的源汇时空模式与机理初探[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4):830-838.  
CHEN Neng-wang, HONG Hua-sheng, ZHANG Luo-ping, et al. Preliminary results concerning the spatio-temporal pattern and mechanism of nitrogen sources and exports in the Jiulong River watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(4):830-839.
- [24] 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 Shui-jing, YANG Long-yuan, HU Wei-ping. Atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during optimal algal growth period in northern Lake Taihu[J]. *Environment Pollution and Control*, 2009, 31(4):5-10.
- [25] 刘冬碧, 张小勇, 巴瑞先. 鄂西北丹江口库区大气氮沉降研究[J]. 生态学报, 2015, 35(10):1-12.  
LIU Dong-bi, ZHANG Xiao-yong, BA Rui-xian. Atmospheric nitrogen deposition in Danjiangkou Reservoir area of northwest Hubei[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(10):1-12.
- [26] Pearl H W, Whittall D R. Anthropogenically-derived atmospheric nitrogen deposition, marine eutrophication and harmful algal bloom expansion: Is there a Link[J]. *Ambio*, 1999, 28:307-311.
- [27] 王志辉, 张颖, 刘学军, 等. 黄土区降水降尘输入农田土壤中的氮素评估[J]. 生态学报, 2008, 28(7):3295-3301.  
WANG Zhi-hui, ZHANG Ying, LIU Xue-jun, et al. Dry and wet nitrogen deposition in agricultural soils in the Loess area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7):3295-3301.