

# 农田生态系统大气氮、硫湿沉降通量的观测研究

崔键<sup>1, 2</sup>, 周静<sup>2</sup>, 杨浩<sup>1\*</sup>

1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210046; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008

**摘要:** 2007年10月至2008年9月, 借助自动降雨收集器(APS-2A)及自动气象观测站(VSALA-M52), 在中国科学院红壤生态实验站(江西鹰潭)农田区内定位采集雨水样本, 探讨了大气氮、硫湿沉降特征, 估算了大气氮、硫的湿沉降向农田生态系统的输入通量。结果表明, 雨水中氮、硫素的月质量浓度变异较大, 全氮(T-N)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和硫(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S)的月质量浓度, 即 $\rho(\text{T-N})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 和 $\rho(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})$ 分别为1.09~7.84、0.64~6.25、0.34~1.83和0.95~7.64 mg·L<sup>-1</sup>, 均与降水呈负相关, 其中 $\rho(\text{T-N})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})$ 与降水的相关性达到比较显著水平( $n=11$ ,  $p<0.10$ )。湿沉降月通量 $F(\text{T-N})$ 、 $F(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $F(\text{NO}_3^--\text{N})$ 和 $F(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})$ 分别为1.06~7.84、0.64~6.25、0.17~1.54和1.22~9.15 kg·hm<sup>-2</sup>, 均与降水呈正相关, 其中 $F(\text{T-N})$ 、 $F(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $F(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})$ 与降水的相关性均达到显著水平( $n=11$ ,  $p<0.05$ )。季节上, 雨水氮、硫浓度及湿沉降氮、硫通量均呈冬春>夏秋的特性。湿沉降向农田生态系统输入N 35.94 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>和S 45.93 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 其中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的年沉降通量为22.92 kg·hm<sup>-2</sup>, 占湿沉降氮总量的63.75%。

**关键词:** 大气氮沉降; 大气硫沉降; 湿沉降; 农田生态系统

**中图分类号:** 131.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5906(2009)06-2243-06

大气氮、硫沉降已经成为一个普遍的自然现象, 并随人类活动特别是快速的工业化和农业活动的频率加快而增加<sup>[1-2]</sup>。Streets等<sup>[3]</sup>在亚洲地区的研究指出, 2002年我国NO<sub>x</sub>和NH<sub>3</sub>的排放量分别达11.4和13.6 Tg。目前, 我国已成为居美国和欧洲之后的第三大氮沉降国<sup>[4-5]</sup>。

湿沉降输入的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>是补偿农田生态系统氮、硫元素损失重要途径之一<sup>[5-6]</sup>。然而, 过量的大气氮、硫输入也将引发酸雨、土壤酸化、作物减产等一系列生态环境问题<sup>[7-8]</sup>, 已引起广泛的关注<sup>[9-10]</sup>。目前, 大气氮湿沉降研究主要集中在欧美等发达国家和地区<sup>[1-3, 9]</sup>, 下垫面多集中在林地、水域等上<sup>[11-12]</sup>。由于传统观点影响及研究多以无机态氮估算氮沉降年通量, 大气湿沉降向农田生态系统的输入氮的数量和作用尚未引起足够的重视<sup>[13-14]</sup>, 关于大气硫沉降研究比较成熟, 主要集中在沉降模拟及预警<sup>[15-16]</sup>。此外, 由于对大气氮、硫污染认知的的时间差异, 以往对湿沉降研究, 多集中在单因子氮或硫的沉降通量<sup>[13-16]</sup>上, 对区域氮、硫元素的复合沉降研究报道相对较少。本文以我国南方典型红壤区农田为下垫面, 探讨大气氮、硫湿沉降特征, 估算大气氮、硫湿沉降通量, 以期探索该红壤区土壤酸化机理及氮、硫资源的综合利用与管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

采样地点位于中国科学院红壤生态试验站(江西鹰潭, 116°55' E, 28°12' N)的自动气象观测场(VSALA-M52, 芬兰)内。该站地处中亚热带地区, 气候温和, 光照充足, 雨量充沛, 干湿季节明显。站内水田、旱地面积分别占站区总面积的50%和25%, 土壤为第四纪红黏土发育的红壤, 主要种植作物为花生和水稻。站区附近无大的污染源。

### 1.2 样品采集与分析

利用APS-2A降雨降尘自动采样器(天虹湖南公司)定位采集雨水样品, 采集时段为2007年10月-2008年9月。

雨水中氮素的质量浓度 $\rho_N$ , 包括全氮、铵态氮和硝态氮质量浓度( $\rho(\text{T-N})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ ), 分别采用碱性过硫酸钾消化-紫外比色法(GB 11894-1989)、靛酚蓝比色法(GB 8538-1995)和紫外比色法(GB 7480-1987)测定; 雨水中硫素的质量浓度 $\rho(S, \text{SO}_4^{2-}-\text{S})$ 采用比浊法进行室内分析测定。

### 1.3 数据计算与统计分析

湿沉降通量可表示为:  $F_{N,S} = P_t \times \rho_{N,S} / 100$ , 式中 $F_{N,S}$ 代表湿沉降氮或硫通量(kg·hm<sup>-2</sup>),  $P_t$ 代表降水量(mm),  $\rho_{N,S}$ 代表雨水氮或硫素的质量浓度

**基金项目:** 中国科学院知识创新领域前沿项目(ISSASIP0730); 中国科学院知识创新工程项目(KSCXI-YW-09-08); 中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-Y417)

**作者简介:** 崔键(1980年生), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境与生态。E-mail: cuijianx@163.com

\*通讯作者, E-mail: yanghao@njnu.edu.cn

**收稿日期:** 2009-10-20

( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。一年四季采用气象划分,即春(3-5月)、夏(6-8月)、秋(9-11月)、冬(12-1月)。2007年11月因降雨少且分散,收集的水样不足做氮、硫指标分析,故该月降雨缺失 $\rho_{\text{N}}$ 、 $\rho_{\text{S}}$ ,秋季降雨 $\rho_{\text{N}}$ 、 $\rho_{\text{S}}$ 及 $F_{\text{N}}$ 、 $F_{\text{S}}$ 是根据9月和10月的数值计算而得。

数据统计应用 SAS9.0 软件中的邓肯新复极差法和线性相关法,采用 Originpro 7.5 软件制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 雨水氮、硫素的质量浓度

表1和表2分别为监测年内研究区雨水中 $\rho_{\text{N}}$ 、 $\rho_{\text{S}}$ 的月和季变化。降雨中 $\rho(\text{T-N})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 各月间的差异较大,分别为1.09~7.84、0.58~6.25和0.26~1.83  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中, $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 月均浓度分别为2.26、0.95  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,均高于2006年孙本华等<sup>[17]</sup>和2008年王体健等<sup>[18]</sup>在本研究区农田下垫面上的结果(0.63和0.43  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.89和0.73  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )及2008年Fan等<sup>[19]</sup>在本研究区附近林地下垫面上的结果(0.56~0.70和0.30~0.49  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。降雨中 $\rho(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 为0.95~7.64  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,这与杨浩明<sup>[16]</sup>及张明等<sup>[20]</sup>在该研究区的结果接近

表1 监测年内月降雨量(mm)及雨水中氮、硫的质量浓度( $\rho_{\text{N}}$ 、 $\rho_{\text{S}}$ ,/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )

Table 1 Monthly rainfall and mass concentration of nitrogen and sulfur in precipitation during study period (2007.10-2008.09)

日期	降雨量	$\rho(\text{T-N})$	$\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$	$\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$	$\rho(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$
2007-10	21.4	4.96	2.99	1.63	5.72
2007-11	14.0	/	/	/	/
2007-12	62.2	5.65	2.93	2.17	7.46
2008-01	100.0	4.04	2.25	1.83	5.72
2008-02	74.2	2.30	1.30	1.01	3.23
2008-03	174.8	2.75	2.05	0.76	3.10
2008-04	284.2	2.76	2.20	0.54	3.22
2008-05	138.0	1.81	1.24	0.61	1.54
2008-06	265.2	1.79	0.58	0.40	3.71
2008-07	152.8	1.09	0.77	0.26	0.95
2008-08	61.2	2.62	2.26	0.56	3.75
2008-09	25.4	7.71	6.31	0.65	6.59
均值	114.5	3.41	2.26	0.95	4.09
标准差	87.2	1.90	1.49	0.61	1.96

表2 监测年降雨量(mm)、雨水中氮、硫质量浓度( $\rho_{\text{N}}$ 、 $\rho_{\text{S}}$ ,/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的季节变化及其差异性分析

Table 2 Duncan analysis, seasonal rainfall and mass concentration of nitrogen and sulfur in precipitation

	降雨量	$\rho(\text{T-N})$	$\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$	$\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$	$\rho(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$
春	199.0 Aa <sup>a)</sup>	2.44 ABb	1.83 Ab	0.64 Ab	2.62 Ab
夏	159.7 Aa	1.83 Bb	1.20 Ab	0.41 Ab	2.80 Ab
秋	20.3 Ab	6.34 Aa	4.65 Aa	1.14 Aab	6.16 Aa
冬	78.8 Aab	4.00 ABab	2.16 Ab	1.67 Aa	5.47 Aab

<sup>a)</sup>表中同一列字母为邓肯差异比较水平,其中小写字母表示5%显著水平,大写字母表示1%显著水平。

(0.24~7.77  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。进一步对月降雨量及其对应降雨中 $\rho_{\text{N}}$ 、 $\rho_{\text{S}}$ 分析表明, $\rho_{\text{N}}$ 、 $\rho_{\text{S}}$ 均与降雨量成负相关,其中 $\rho(\text{T-N})$ 与降雨量间相关性达到显著水平( $n=11$ ,  $p=0.046<0.05$ ), $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 均与降雨量间相关性达到比较显著水平( $n=11$ ,  $p=0.074<0.10$ ;  $p=0.096<0.10$ ), $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 与降雨量间无显著相关( $n=11$ ,  $p=0.263>0.10$ )。

季节上,雨水中 $\rho_{\text{N}}$ 、 $\rho_{\text{S}}$ 呈秋冬高于春夏(如表2)。 $\rho(\text{T-N})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 和 $\rho(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 的峰值(6.34、4.65、6.16  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )均出现在秋季,且均与春夏间差异显著( $n=11$ ,  $p<0.05$ ),而与冬季间的差异不显著,这恰与降雨量的季节特征相反。监测年降雨量春夏高于秋冬,其谷值(20.3 mm)在秋季,且与春夏间的差异显著( $n=11$ ,  $p<0.05$ ),而与冬季间无明显差异。而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的峰值(1.67  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )出现在冬季,与秋季间差异不显著,而与春夏间的差异显著( $n=11$ ,  $p<0.05$ )。

### 2.2 大气湿沉降氮、硫的通量

监测年内,研究区大气湿沉降 $F_{\text{N}}$ 、 $F_{\text{S}}$ 的月季变化如图1。由图1可知,湿沉降 $F_{\text{N}}$ 、 $F_{\text{S}}$ 月变异较大,其中 $F(\text{T-N})$ 、 $F(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 、 $F(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 和 $F(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 为1.06~7.84、0.64~6.25、0.17~1.54和1.22~9.15  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,这与月降雨量有关。此结果与梅雪英和张秀峰<sup>[21]</sup>对上海地区近6年(1998—2003)湿沉降氮素特征研究结果相似。相关性分析表明, $F(\text{T-N})$ 和 $F(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 与月降雨量间均呈极显著正相关( $n=11$ ,  $p=0.003<0.01$ ;  $p=0.002<0.01$ ), $F(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 与月降雨量间呈显著正相关( $n=11$ ,  $p=0.026<0.05$ ), $F(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 的月通量与降雨量间无显著相关( $n=11$ ,  $p=0.113>0.10$ )。

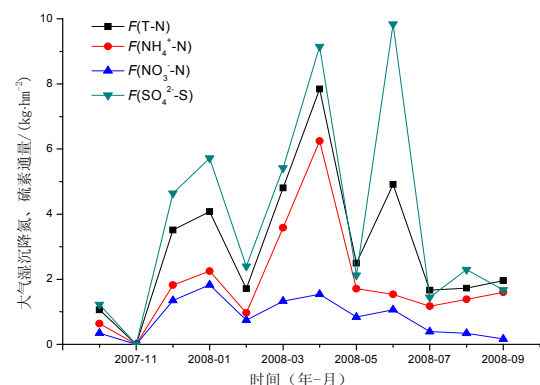


图1 监测年大气湿沉降氮、硫月通量

Fig.1 Monthly fluxes for wet-deposition nitrogen and sulfur

由图1也可知,大气湿沉降 $F_{\text{N}}$ 、 $F_{\text{S}}$ 年变化趋势基本一致, $F(\text{T-N})$ 和 $F(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 峰值(7.84和6.25  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )均出现在4月, $F(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 的峰值(9.84

kg·hm<sup>-2</sup>) 在 6 月出现。季节上, 大气湿沉降  $F_N$ 、 $F_S$  均呈冬春高于夏秋, 其中  $F(T-N)$ 、 $F(NH_4^+-N)$  和  $F(SO_4^{2-}-S)$  均以春季最高, 而这与农事活动和气象条件有关。笔者在研究区旱地上对尿素的挥发试验发现, 4-6 月  $NH_4^+-N$  的挥发量占肥料氮的 0.74%~2.24%, 挥发时间持续 14-17 d<sup>[22]</sup>。而本研究 4 月为研究区种植花生及早稻的时间, 氮肥、硫肥及有机肥的施用而引起  $NH_4^+-N$  的挥发量增加和空气中硫素的增加。4-6 月为研究区雨季, 累积降水量 (687.4 mm) 占全年的 50.0%。秋冬季为研究区农闲季节, 且 9-11 月为旱季, 降水平均为 20.3 mm, 空气中氮、硫的质量浓度较高, 故冬春季降水携带较多的氮、硫素。4-6 月降水多且肥料用量多而频繁, 造成本研究区大气湿沉降  $F(T-N)$  和  $F(NH_4^+-N)$  峰值出现在 4 月,  $F_N$ 、 $F_S$  峰值在春季出现。

监测年内, 大气湿沉降  $F(T-N)$ 、 $F(NH_4^+-N)$ 、 $F(NO_3^--N)$  和  $F(SO_4^{2-}-S)$  的总量分别为 35.94、22.92、9.95 和 45.93 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。其中,  $F(NH_4^+-N)$  的总量及  $F(NH_4^+-N)$  与  $F(NO_3^--N)$  的总量 (32.87 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 分别占大气湿沉降 T-N 的 63.75% 和 91.45%, 表明大气湿沉降以  $NH_4^+-N$  和无机态氮为主。此外, 大气湿沉降氮量仍低于我国南方地区氮临界负荷 (40 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup><sup>[5]</sup>) 而湿沉降硫量却远超过临界负荷 (32 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup><sup>[5]</sup>)。可见, 大气湿沉降氮、硫的输入将对该区农田生态系统产生重要影响。

### 3 讨论

本研究监测年内, 大气湿沉降向典型红壤区农

田生态系统输入 T-N、 $NH_4^+-N$  和  $NO_3^--N$  之和、 $NH_4^+-N$ 、 $NO_3^--N$  及  $SO_4^{2-}-S$  的年总通量分别为 35.94、32.87、22.92、9.95 和 45.93 kg·hm<sup>-2</sup>。孙本华等<sup>[17]</sup>于 2003 年 2 月至 2004 年 1 月对本研究区农田大气氮湿沉降研究得到 T-N、 $NH_4^+-N$  和  $NO_3^--N$  的年通量分别为 24.04、7.15 和 4.85 kg·hm<sup>-2</sup>, 王体健等<sup>[18]</sup>于 2004 年 12 月至 2005 年 11 月也对本研究区农田大气氮湿沉降进行了研究, 结果表明 T-N、 $NH_4^+-N$  和  $NO_3^--N$  的年通量分别为 30.7、12.3 和 14.1 kg·hm<sup>-2</sup>。本研究农田下垫面上大气硫湿沉降量接近于 Xu 等<sup>[23]</sup>于 2000 和 2002 年在本研究区附近林地下的研究结果 (40.05 和 44.78 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 而高于杨浩明等<sup>[16]</sup>于 1998 年 11 月至 1999 年 10 月在本研究区农田下垫面上的研究结果 (17.2 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)。可见, 大气湿沉降向本研究区农田生态系统定量输入氮和硫的量有逐年递增的趋势。本研究区大气氮湿沉降年总量高于其他地区农田下垫面上的<sup>[10,16,24-25]</sup>, 如表 3。周国逸等<sup>[26]</sup>和向仁军等<sup>[27]</sup>对林地下垫面的研究表明, 大气湿沉降向林地输入 T-N 38.4、24.39~28.34 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 该值与本文结果相当。他人<sup>[7,28,30-32]</sup>关于湿地、水域和草地下垫面大气氮湿沉降量的研究结果差异较大, T-N、 $NH_4^+-N$  和  $NO_3^--N$  的量分别为 6.52~28.07、3.98~18.99、2.27~16.12 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 均低于本文结果。本文大气硫湿沉降量远低于江苏常熟农田下垫面上的 (109.5 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup><sup>[16]</sup>) 而高于林地和湿地下垫面上的 (26.85~30.53<sup>[27]</sup>和 33.9 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup><sup>[29]</sup>)。

表 3 不同下垫面上大气湿沉降氮、硫年通量的研究结果

Table 5 Study results on wet deposition fluxes for atmospheric nitrogen and sulfur in different surfaces

kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>

时间	地点	下垫面	$F(T-N)$	$F(NH_4^+-N)$	$F(NO_3^--N)$	$F(SO_4^{2-}-S)$	数据来源文献
1998-11—1999-10		农田				17.2	[19]
2003-02—2004-01	江西鹰潭	农田	24.04	7.15	4.85		[17]
2004-12—2005-11		农田	30.7	12.3	14.1		[21]
2001-04—2002-03	江苏常熟	农田				109.5	[19]
2001-06—2003-05	江苏太湖	农田	27.0	12.8	9.4		[10]
1990—1992	陕西乾县	农田	15.59-30.07 <sup>b)</sup>	10.34-26.62	2.78-5.25		
1992-05—1994-05	陕西澄县	农田	7.89-8.60 <sup>b)</sup>	6.28-7.43	1.17-1.61		[24]
1994	陕西杨凌	农田	16.46 <sup>b)</sup>	12.28	4.18		
1999—2004	中国农业大学农场	农田		15.5-27.2	8.6-11.8		[25]
2000, 2002	江西鹰潭	林地				40.05, 44.78	[23]
1998—1999	广东鼎湖山	林地	38.4 <sup>b)</sup>				[26]
2001—2003	湖南蔡家塘	林地	24.39-28.34 <sup>b)</sup>	15.33-18.99	9.35-16.12	26.85-30.53	[27]
2004-07—2005-06		湿地	6.52 <sup>b)</sup>	3.98	2.27		[28]
2005-05—2006-04	黑龙江佳木斯	湿地				33.9	[28]
2004—2005	福建九龙江	水域	8.5-11.2 <sup>b)</sup>				[7]
2000—2004	广东惠州西湖	水域	16.26 <sup>b)</sup>				[30]
2002-07—2003-06	江苏太湖周边	水域	28.07	14.59	6.32		[31]
1994-12—1995-11	吉林长岭腰井子	草地	11.35 <sup>b)</sup>				[32]

<sup>b)</sup>T-N 的沉降量仅为  $NH_4^+-N$  和  $NO_3^--N$  的沉降量的和。

如前所述,典型红壤区农田下垫面上,大气湿沉降氮量相对林地、湿地、水域等下垫面而言偏大。这与本研究区远离工业污染区,主要受施肥及气象条件影响有关。氮肥施用过量 and 肥料的不合理利用,导致大量氮素以  $\text{NH}_3$  形式挥发到大气中,是降雨中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的浓度偏高及氮沉降量偏大的重要因素。据研究,氮肥在施用过程中排放  $\text{NH}_3/\text{N}$  为  $60.70 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ <sup>[33]</sup>,全球范围内 50% 的  $\text{NH}_3$  来自畜禽生产<sup>[34]</sup>。此外,本研究区处于中亚热带,雨量充沛,也是大气湿沉降氮量输入偏大的一个重要原因。另据笔者对大气湿沉降向本研究区牧草马唐-蔬菜冬萝卜生态系统输入氮量的气象要素分析表明,除降雨量外,风向、空气相对湿度、降雨频率是主导大气湿沉降氮素月变化的气象因子<sup>[35]</sup>。

#### 4 结论

经过为期 1 a (2007-10—2008-09) 对典型红壤农田生态系统大气氮、硫湿沉降的观测,得出大气湿沉降向农田生态系统输入的氮、硫元素的状况,具体如下:

(1) 研究区降雨中氮、硫元素的质量浓度月变异较大,  $\rho(\text{T-N})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$  和  $\rho(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})$  分别为  $1.09\sim 7.84$ 、 $0.64\sim 6.25$ 、 $0.34\sim 1.83$  和  $0.95\sim 7.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 呈秋冬>春夏季节特性。

(2) 研究区大气湿沉降氮、硫总量分别为  $\text{N } 35.94 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $\text{S } 45.93 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 其中大气氮湿沉降以  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  为主,占氮素总沉降的 63.75%。大气氮、硫湿沉降通量呈冬春>夏秋的季节特性,其中  $\text{T-N}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{SO}_4^{2-}-\text{S}$  沉降量均以春季最高,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  则以冬季最高。

(3) 研究区大气氮、硫湿沉降特征,与降雨的关系密切,雨水氮、硫素质量浓度与降水呈负相关,氮、硫湿沉降通量与降水呈正相关。其中,  $\rho(\text{T-N})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})$  与对应月降水量间相关性达到比较显著水平 ( $n=11, p<0.10$ );  $F(\text{T-N})$ 、 $F(\text{NH}_4^+-\text{N})$  和  $F(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})$  与对应月降雨量间相关性均达到显著水平 ( $n=11, p<0.05$ )。

(4) 相对前人在本研究区大气湿沉降氮、硫年通量结果,大气氮、硫湿沉降向该区农田生态系统的输入量有逐年递增趋势。与林地、湿地和水域等下垫面相比,该区农田下垫面上大气湿沉降输入氮量相对较高,可能与农事活动及气象条件相关。

#### 参考文献:

[1] KAISER J. The other global pollutant: nitrogen proves tough to curb[J]. Science, 2001, 294: 1268-1269.  
[2] GALLOWAY J G, DENTENER F J, CAPONE D G, et al. Nitrogen cycles: past, present and future[J]. Biogeochemistry, 2004, 70: 153-226

[3] STREETS D G, BOND I C, CARMICHAEL G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108: 8809.  
[4] GALLOWAY J N, COWLING E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change[J]. Amibio, 2002, 31(2): 64-71.  
[5] KIM J Y, GHIM Y S, LEE S B, et al. Atmospheric deposition of nitrogen and sulfur in the Yellow Sea region: Significance of long-range transport in east Asia[J]. Water, Air, Soil Pollut, 2009, Doi 10.1007/s11270-009-0072-2.  
[5] 段雷, 郝吉明, 叶雪梅, 等. 中国土壤风化速率的初步研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(增刊): 1-7.  
DUAN Lei, HAO Jiming, YE Xuemei, et al. Study on weathering rate of soil in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(Sup): 1-7.  
[6] 王小治, 朱建国, 高人, 等. 太湖地区氮素湿沉降动态及生态学意义: 以常熟生态站为例[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1616-1620.  
WANG Xiaozhi, ZHU Jianguo, GAO Ren, et al. Dynamics and ecological significance of nitrogen wet-deposition in Taihu Lake region-Taking Agro-Ecological Experiment Station as an example[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(9): 1616-1620.  
[7] 陈能汪, 洪华生, 张珞平. 九龙江流域大气湿沉降研究[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 38-46.  
CHEN Nengwang, HONG Huasheng, ZHANG Luping. Wet deposition of atmospheric nitrogen in Jiulong River watershed[J]. Environmental Science, 2008, 29(1): 38-46.  
[8] 许亚宣, 段宁, 柴发合, 等. 中国硫沉降数值模拟[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5): 1-10.  
XU Yaxuan, DUAN Ning, CHAI Fahe, et al. Numerical simulation of sulfur deposition in China[J]. Research of Environmental Science, 2006, 19(5): 1-10.  
[9] VITOUSEK P K, ABER J D, HOWARTH R, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. Ecological Applications, 1997, 7(3): 737-750.  
[10] 胡倩, 张世秋, 吴丹. 美国和欧洲氮氧化物控制政策对中国的借鉴意义[J]. 环境保护, 2007, 5A: 74-78.  
HU Qian, ZHANG Shiqiu, WU Dan. Control policy on nitrogen oxides in American and Europe and its reference meanings[J]. Environmental Protection, 2007, 5A: 74-78.  
[11] JENNIFER A, GAO Y. Atmospheric nitrogen deposition to the Mullica River-Great Bay Estuary[J]. Marine Environmental Research, 2007, 64: 590-600.  
[12] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林植物的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1891-1900.  
LI Dejun, MO Jiangming, FANG Yunting, et al. Impact of nitrogen deposition on forest plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(9): 1891-1900.  
[13] WEIGEL A, RUSSOW R, KORSCHENSCHENS M. Quantification of airborne N-input in long-term field experiments and its validation through measurements using  $^{15}\text{N}$  isotope dilution[J]. Journal of Plant Nutr Soil Sci, 2000, 163: 261-265.  
[14] PRYOR S C, BARTHELMIE R J, CARREIRO M. Nitrogen deposition to and cycling in a deciduous forest[C]//Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production and Environmental Protection: Proceeding of the 2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy. The Scientific World, 2001, 1(S2): 245-254.

- [15] 权建农, 张晓山, 段宁, 等. 中国西南和华南地区硫沉降数值模拟[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 326-332.  
QUAN Jiannong, ZHANG Xiaoshan, DUAN Ning, et al. Numerical modeling of sulfur deposition in south and southwest China[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(2): 326-332.
- [16] 杨浩明, 王体健, 程炜, 等. 华东典型地区大气硫沉降通量的观测和模拟研究[J]. 气象科学, 2005, 23(6): 560-568.  
YANG Haoming, WANG Tijian, CHENG Wei, et al. Observation and numerical studies on atmospheric sulfur deposition over typical regions of east China[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2005, 23(6): 560-568.
- [17] 孙本华, 胡正义, 吕家琰, 等. 江西鹰潭典型丘陵农业区氮湿沉降的动态变化[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(10): 118-192.  
SUN Benhua, HU Zhengyi, LV Jialong, et al. Dynamic changes of wet nitrogen deposition in a typical hilly agricultural area in Yingtan, Jiangxi[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forest: Nature Science Edition, 2006, 34(10): 118-122.
- [18] 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 Tijian, LIU Qian, ZHAO Hen, et al. Atmospheric nitrogen deposition in agroecosystem in red soil region of Jiangxi province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(2): 280-287.
- [19] FAN J L, HU Z Y, WANG T J, et al. Atmospheric inorganic nitrogen deposition to a typical red soil forestland in southeastern China[J]. Environ Monit Assess, 2009, 159: 241-253.
- [20] 张明, 王体健, 张艳, 等. 农田生态系统大气硫沉降通量的观测研究[J]. 气象科学, 2003, 23(3): 263-272.  
ZHANG Ming, WANG Tijian, ZHANG Yan, et al. Observational study on atmospheric sulfur deposition to farmland[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2003, 23(3): 263-272.
- [21] 梅雪英, 张秀峰. 上海地区氮素沉降及其对农业生态系统的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 16-18.  
MEI Xueying, ZHANG Xiufeng. Nitrogen in wet deposition in Shanghai area and its effects on agriculture ecosystem[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(1): 16-18.
- [22] 周静, 崔键, 王国强, 等. 春秋红壤旱地氨挥发对氮施用量、气象因子的响应[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 499-507.  
ZHOU Jing, CUI Jian, WANG Guoqiang, et al. Ammonia volatilization in relation to N application rate and climate factors in upland red soil in spring and autumn[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 499-507.
- [23] XU CK, HU Z Y, CAI Z C, et al. Atmospheric sulfur deposition for a red soil broadleaf forest in southern China[J]. Pedosphere, 2004, 14(3): 323-330.
- [24] 李世清, 李生秀. 陕西关中湿沉降输入农田生态系统中的氮素[J]. 农业环境保护, 1999, 18(3): 97-101.  
LI Shiqing, LI Shengxiu. Nitrogen added to ecosystems by wet deposition in Guanzhong area in Shanxi[J]. Agro-Environment Protection, 1999, 18(3): 97-101.
- [25] LIU X J, JU X T, ZHANG Y, et al. Nitrogen deposition in agroecosystems in the Beijing area[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 370-377.
- [26] 周国逸, 严俊山. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2002-2012.  
ZHOU Guoyi, YAN Junshan. The influences of regional atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(12): 2002-2012.
- [27] 向仁军, 柴立元, 张龚, 等. 湖南蔡家塘森林小流域氮和硫的输入输出特征[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1372-1378.  
XIANG Renjun, CAI Liyuan, ZHANG Gong, et al. Input-output dynamics of nitrogen and sulfur in Caijiatang forested catchment in Hunan Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(8): 1372-1378.
- [28] 孙志高, 刘景双, 王金华. 三江平原典型湿地系统大气湿沉降中氮素动态及其生态效应[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 182-192.  
SUN Zhigao, LIU Jingshuang, WANG Jinhua. Dynamics of nitrogen in the atmospheric wet deposition and its ecological effects in typical wetland ecosystem of Sanjiang plain[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(3): 182-192.
- [29] 李新华, 刘景双, 朱振林. 三江平原小叶章湿地系统硫的输入及输出动态[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 1743-1747.  
LI Xinhua, LIU Jingshuang, ZHU Zhenlin. Dynamics of sulfur input and output to the *Calamagrostis angustifolia* wetland system in Sanjiang Plain[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5): 1743-1747.
- [30] 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 Xiufeng, LI Chuanhong. Wet deposition of atmospheric nitrogen and its eutrophication on Xihu Lake, Huizhou City[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(1): 16-19.
- [31] 宋玉芝, 秦伯强, 杨元龙, 等. 大气氮沉降向太湖水生生态系统输送氮的初步估算[J]. 湖泊科学, 2005, 17(3): 226-230.  
SONG Yuzhi, QIN Boqiang, YANG Yuanlong, et al. Primary estimation of atmospheric wet deposition of nitrogen to aquatic ecosystem of Lake Taihu[J]. Journal of Lake Science, 2005, 17(3): 226-230.
- [32] 李玉中, 祝亭成, 姜世成. 羊草地生态系统干湿沉降氮输入量的动态变化[J]. 中国草地, 2000, 2: 24-27.  
LI Yuzhong, ZHU Tingcheng, JIANG Shicheng. Nitrogen deposition in *Leymus chinensis* grassland of Songnen Plain[J]. Grassland of China, 2000, 2: 24-27.
- [33] 王振刚, 宋振东. 湖北省人为源氨排放的历史分布[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(1): 70-71.  
WANG Zhengang, SONG Zhendong. Emission of Ammonia sourced from human activities in Hubei province[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 28(1): 70-71.
- [34] 彭焕伟, 沈亚欧. 畜禽生产中氨的危害及防治措施[J]. 饲料工业, 2005, 26(13): 55-59.  
PENG Huanwei, SHEN Yaou. Harm of the ammonia and its prevention and control[J]. Feed Industry, 2005, 26(13): 55-59.
- [35] 周静, 崔键, 王国强, 等. 红壤旱地氮湿沉降特征及其对红壤旱地马唐-冬萝卜生态系统氮素平衡的贡献[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1714-1718.  
ZHOU Jing, CUI Jian, WANG Guoqiang, et al. Characteristic of nitrogen wet deposition and its contribution to nitrogen balance of the graze-vegetable rotation ecosystem in upland red soil[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(6): 1714-1718.

## Observations of the input for atmospheric wet-deposition of nitrogen and sulfur into Agro-ecosystem

CUI Jian<sup>1,2</sup>, ZHOU Jing<sup>2</sup>, YANG Hao<sup>1</sup>

1. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

**Abstract:** Atmospheric nitrogen and sulfur deposition, especially for atmospheric wet deposition has led to changes in agro-ecosystems from nitrogen/sulfur limited to nitrogen/sulfur saturated. Rainwater samples were collected by ASP-2 automatic sampler and rainfall was recorded by automatic weather station on an event basis in an agro-ecosystem at Red Soil Ecological Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, in the suburb of Yingtan city, Jiangxi Province during Oct. 2007-Sep. 2008 period. Based on these data, characteristics of atmospheric wet-deposition nitrogen and sulfur were studied and its input to the agro-ecosystem were estimated. The results were showed that monthly mass concentration for total nitrogen(T-N),  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$  in rainwater,  $\rho(\text{T-N})$ ,  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ ,  $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$  and  $\rho(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$  ranged from 1.09~7.84, 0.58~6.25, 0.26~1.83 and 0.95~7.64  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. The monthly mass concentration for nitrogen and sulfur all had negative correlations with corresponding rainfall. Moreover, the correlative level of  $\rho(\text{T-N})$ ,  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$  and  $\rho(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$  reached significance ( $n=11$ ,  $p<0.10$ ). Monthly wet-deposition fluxes for (T-N),  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and  $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ ,  $F(\text{T-N})$ ,  $F(\text{NH}_4^+\text{-N})$ ,  $F(\text{NO}_3^-\text{-N})$  and  $F(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$  were the respective ranges of 1.06~7.84, 0.64~6.25, 0.17~1.54 and 1.22~9.15  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , which all had positive correlations with corresponding rainfall. Because of these, the correlative level of  $F(\text{T-N})$ ,  $F(\text{NH}_4^+\text{-N})$  and  $F(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$  reached marked significance ( $n=11$ ,  $p<0.05$ ). For seasonal characteristic, there were higher in autumn and winter than spring and summer for mass concentration of nitrogen and sulfur in rainwater and higher in winter and spring than summer and autumn. Inputs of wet-deposition nitrogen and sulfur to the agro-ecosystem were 35.9 and 45.93  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , respectively.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  input was 22.92  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , accounting for 63.75%.

**Key words:** atmospheric nitrogen deposition; atmospheric sulfur deposition; wet deposition; agro-ecosystem