

西藏林芝大气有机氮沉降

邵 伟¹, 张 颖², 宋 玲², 贾钧彦¹, 刘学军^{2,*}, 蔡晓布^{1,*}

(1. 西藏农牧学院资源与环境系, 林芝 860000; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 2005~2007 年, 利用雨量器在西藏林芝地区定点采集雨样, 研究了该地区降雨中有机氮浓度、沉降量的月、季动态变化。结果表明: 西藏林芝地区雨水有机氮月均浓度和沉降量分别为 0.21 mg/L 和 0.50 kg/hm²。不同月份比较, 监测期内, 2006 年 7、8 月份有机氮浓度平均为 1.26 mg/L, 明显高于其它年份同时期水平。2007 年各月有机氮浓度在 0.15~0.53 mg/L 之间, 变化幅度较小。不同季节内, 有机氮浓度差异不大, 春、夏季较高, 浓度变化受降雨量影响较小。有机氮湿沉降量与降雨量呈线性正相关, 3a 的相关系数分别为 0.46 ($p=0.019$)、0.69 ($p=0.001$)、0.77 ($p=0.001$)。各月沉降量差异较大, 2006 年 6、7 两个月有机氮输入量明显偏高, 月均达到 1.32 kg/hm², 2007 年有机氮沉降主要集中在 6、7、9 月份 3 个月。四季有机氮沉降量与降雨量呈线性正相关, 相关系数 0.99 ($p=0.01$)。四季中, 夏季沉降量最高, 为 0.93 kg/hm², 占全年的 46%。在整个监测期内, 有机氮占雨水总氮的比例平均为 62%, 是大气氮沉降的重要组成部分。

关键词: 氮沉降; 有机氮; 降雨; 西藏

文章编号: 1000-0933(2009)10-5586-06 中图分类号: X171 文献标识码: A

Atmospheric organic nitrogen deposition in Linzhi area, Tibet

SHAO Wei¹, ZHANG Ying², SONG Ling², JIA Jun-Yan¹, LIU Xue-Jun^{2,*}, CAI Xiao-Bu^{1,*}

1 Department of Resources and Environmental Sciences, Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi 860000, China

2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5586~5591.

Abstract: Atmospheric nitrogen (N) deposition has been paid more and more attention due to the rapid increase of anthropogenic reactive N emissions. However, the information on atmospheric N deposition, especially the organic N deposition in Tibetan region, is still scarce. This paper reports the inputs and temporal variations of atmospheric organic N deposition in Linzhi area of Tibet from 2005 to 2007.

Monthly volume-weighted concentrations of organic N varied from 0.15 to 0.53 mg/L and was 0.21 mg/L on average. Significantly higher concentrations were found in July and August in 2006, which were up to 1.26 mg/L. In different seasons, organic N concentrations were higher in spring and summer, while lower in autumn and winter. Monthly averaged organic N deposition was 0.50 kg/hm². Positive relationships between organic N deposition and precipitation in every rain event can be fitted by linear equations ($r=0.46-0.77$) in the three monitoring years. And relationship between organic N deposition and precipitation in different seasons can be fitted by a power equation ($r=0.99$). Large part of the organic N deposition was concentrated in the summer time, June and July, 2006 and June, July and September, 2007. Averaged deposition in summer is 0.93 kg/hm², accounting for 46% of the whole year's deposition. Generally, organic N deposition accounted for 62% of the total N deposition in the whole monitoring period, which can not be neglected as an important composing of atmospheric nitrogen.

基金项目: 国家科技支撑计划重点资助项目(2007BAC06B04); 西藏自治区科技厅资助项目(2007-自然基金-25); 国家自然科学基金资助项目(40771188, 21021612, 40761015); 中英合作项目(DELPH64)

收稿日期: 2008-06-06; 修订日期: 2009-05-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caitw21@sohu.com; liu310@cau.edu.cn

Key Words: nitrogen deposition; organic nitrogen; rainfall; Tibet

大气氮沉降是全球氮循环的重要组分。湿沉降的氮主要有铵态氮、硝态氮及少量可溶性有机氮^[1]。大气氮沉降为陆地和海洋生态系统提供了丰富的营养元素,但过量的氮沉降将使一些敏感的生态系统发生一系列变化,如造成一些河口、海口和江湖水域富营养化,森林和草地生态系统净生产力增加、森林土壤酸化和森林生产力衰退^[2]。沉降到生态系统的有机氮化合物可经过多种途径进入到该系统的氮素生物地球化学循环中^[3]。在缺氮的生态系统中,有机氮沉降可以增加土壤生物量及土壤有机物质的积累,雨水中部分可溶性有机氮可以被生物利用,从而提高生态系统的初级生产力。在氮饱和的生态系统中,有机氮沉降,不会再起到营养作用,反而会加速陆地生态系统氮流失^[4]。大气沉降中的过量生物活性有机氮还可导致生态系统种群和结构的变化,如有害藻类的大量繁殖^[4]。

目前,大气氮素沉降的全球平均值为 $5 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[5],其中欧洲为 $10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[6],亚洲为 $7 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[7],有机态氮平均占 36.1%^[3],雨水有机氮沉降平均为 $3.2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[3],这些来自大气环境中的氮素沉降已经或即将对陆地及水生生态系统产生深远的影响^[8]。

青藏高原被称为地球第三极,在全球环境变化中具有重要的生态地位。作为青藏高原主体的西藏地区有关氮沉降方面的数据极少,有机氮沉降的研究尚为空白。本文报道了藏东南林芝地区雨水有机氮沉降的初步结果,以期进一步认识高原生态系统中的氮素循环,为探清有机氮沉降对高原生态环境的影响提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 监测点概况

该试验站位于西藏自治区东南部八一镇,尼洋河中下游宽谷区,年平均气温 $7 \sim 16^\circ\text{C}$,无霜期 170 d 左右,年降水量 700 ~ 800 mm 且集中在 5 ~ 9 月份,全年太阳总辐射 $5\,460 \sim 7\,530 \text{ MJm}^{-2}$,具干湿季分明、雨热同期等气候特点。沉降收集选在西藏高原生态研究所内($N\,29^\circ39'.907'$, $E\,94^\circ26'.643'$),海拔 3008 m,场地开阔、平坦,地表有植被覆盖,周围无大型障碍物、无典型污染源,使收集的雨样具有一定代表性。

1.2 取样方法

2005 年 5 月起在监测点安装雨量器收集雨水。雨量器由一个直径 20cm 的圆筒、漏斗及储水瓶组成,储水瓶位于圆筒内部,上接漏斗,雨水可直接流入,漏斗筒口呈内直外斜的刀刃形,可防止雨水溅出。漏斗口平时用帕拉膜(parafilm)封好,只在降雨时打开,雨后用雨量杯及时收样并计算降雨量,雨量器、雨量杯事先用去离子水冲洗干净。样品充分混匀后用 $0.4 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤,置于聚乙烯瓶内, -15°C 密封冷冻保存。

1.3 样品分析

运用差减法计算雨样中有机氮的含量。将每次收集的雨样分成两等分,一份利用连续流动分析仪(TRACE2 000)测定样品铵态氮和硝态氮浓度,无机氮浓度与降雨量乘积即为无机氮沉降量;另一份利用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮。在 $120 \sim 124^\circ\text{C}$ 条件下,过硫酸钾分解产生的原子态氧将雨水中的有机物氧化分解,同时将含氮化合物的氮元素转化为硝酸盐,测定得出总氮(DTN)含量^[9]。有机氮(DON)含量即为相应总氮与无机氮(DIN)的差值^[3]。所有样品均在收集后 3 ~ 6 个月内分析测定完毕。

2 结果与讨论

监测期内,林芝地区大气有机氮月均沉降量 $0.50 \text{ kg}/\text{hm}^2$,浓度 $0.21 \text{ mg}/\text{L}$,月总沉降量在 $0.01 \sim 1.89 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 之间,平均 $0.65 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。2007 年雨水有机氮总沉降量为 $2.01 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,浓度 $3.28 \text{ mg}/\text{L}$,与已报道的一些地区相比(表 1),林芝地区有机氮沉降量偏低,2007 年的有机氮沉降量是太湖流域的 46%,是北京地区的 44%,略低于亚马孙平原,高于美国的哈弗森林。与太湖地区相比,2007 年全年林芝地区降雨量为 628.4 mm,太湖地区年降雨量 980.5 mm^[10],林芝地区雨水有机氮沉降量是太湖地区的 46%,有机氮占总氮比例,林芝地区为 46%,太湖地区为 17%,前者有机氮对总氮的贡献率远高于后者。近年,全球大气氮素沉降迅猛增加,亚洲的中国、印度已成为全球氮沉降集中分布区之一^[17],林芝地区大气有机氮沉降会对高原森林

生态系统产生怎样的影响已成为不容忽视的问题。

表 1 不同地区有机氮湿沉降对比

Table 1 Wet Deposition of Atmospheric Organic Nitrogen in different areas

地点 Site	监测周期 Monitoring periods	输入量 Input (kg / hm ²)		文献来源 Reference
		有机氮 DON	总氮 DTN	
国内西藏 林芝 Linzhi Tibet	2007-01 ~ 2007-10	2.01	4.12	本研究 This study
太湖 Taihu Lake	2002-06 ~ 2003-05	4.40	25.7	[10]
河北 曲州 Quzhou Hebei	2005-05 ~ 09	3.40	14.4	[11] ①
北京 东北旺 Dongbeiwang Beijing	2005-05 ~ 09	4.61	32.5	[11] ①
国外		输入量 Input (kg / (hm ² ·a))		
美国 盖恩斯维尔 Gainesville U. S. A	—	5.0	8.5	[12]
巴西 亚马孙平原 Amazon Basin Brazil	—	2.45	6.03	[13]
美国 哈佛森林 Harvard Forest U. S. A	—	0.60	9.20	[14]
美国 刘易斯区 Lewes, DE U. S. A	—	8.70	47	[15,16]

2.1 有机氮浓度

2.1.1 有机氮浓度差异

2005 年(6 ~ 10 月)、2006 年(5 ~ 12 月)以及 2007 年全年共收集降水 179 次,各月有机氮浓度主要集中在 0.60 mg / L 以下(图 1)。2005 年 6 ~ 10 月浓度基本呈逐月上升趋势,至 10 月份达到最大。降雨量较高的 6 ~ 9 月份有机氮浓度差距不大,变化幅度较小,最低浓度出现在 2 月份。3a 中,相同月份间浓度变化较大,2006 年 6、7、8 月份与其他两年同时期相比,有机氮浓度极高,相当于其它两年同时期的 2 ~ 4 倍,但对西藏林芝地区 3a 内有机氮总体水平没有显著影响。对太湖地区的氮沉降研究表明^[10],NO₃⁻-N 浓度与降雨量呈负相关;有报道称,三江平原典型湿地系统降雨与各形态氮呈较弱负相关^[18]。与上述地区不同的是,林芝地区有机氮浓度变化受降雨量影响不大,2007 年相关系数为 -0.13,并没有明显的变化趋势可循。图 1(a)可见,3a 相同时段,有机氮沉降量最大值出现时间并不统一,分别出现在 10、8、9 月份,并且 2007 年最大值相对较低,是 2005、2006 年的 40%、30%。

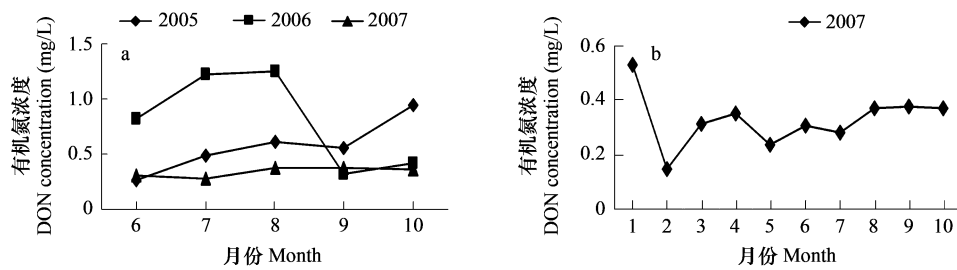


图 1 雨水中有机氮月平均浓度变化

Fig. 1 Variation of monthly organic N concentration

2.1.2 有机氮浓度月变化

图 1(b)表明,2007 年全年有机氮浓度变化幅度不大,月平均浓度为 0.32 mg/L,3 ~ 8 月的浓度均位于 0.2 ~ 0.4 mg/L 之间,1 月份有机氮浓度最大,2 月份最小,2 月份有机氮浓度是 1 月份的 28%。4、8、9、10 月份有机氮浓度基本持平。

2.1.3 有机氮浓度季节变化

春(3 ~ 5 月份)、夏(6 ~ 8 月份)、秋(9 ~ 11 月份)、冬(12 ~ 翌年 2 月份)进行雨水有机氮分季统计表明(图 2),2007 年,春、夏、秋、冬四季有机氮浓度分别为 0.90 mg/L、0.95 mg/L、0.75 mg/L、0.68 mg/L,季节差

① 郑利霞. 华北平原雨水有机氮的定量研究. 中国农业大学硕士学位论文,2006

异不大,相对稳定。铵态氮和硝态氮季节变化较大,秋季浓度最低。其中,铵态氮浓度变化与有机氮类似,夏、春季高,硝态氮浓度最高出现在春季。同一季节内,铵态氮、硝态氮浓度差距不大且最大值均为 0.21 mg/L。图 2 还显示,冬季各形态氮浓度标准偏差均较大,尤其是有机氮,表明其冬季浓度变化幅度较大。整体而言,各季节有机氮浓度明显高于无机氮,秋季差距最大,铵态氮、硝态氮浓度仅分别为 0.21 mg/L、0.18 mg/L,该季无机氮浓度是有机氮的 52%。关于浓度的季节变化,不同地区研究结果不同,美国东北部地区雨水有机氮浓度春季最高,夏季最低^[19]。大西洋中部海岸则与本研究结果相近,春夏季浓度高,冬季最低^[16]。

2.2 有机氮沉降量

2.2.1 有机氮沉降量与降雨量关系

西藏林芝地区降雨主要集中在 6~9 月份,有机氮沉降也集中在此时段内。研究表明(图 3),西藏林芝地区有机氮沉降量与降雨量呈线性正相关,3a 同时段(6~10 月份)的相关系数分别为 0.46($p=0.019$)、0.69($p=0.001$)、0.77($p=0.001$),2006、2007 年 6~10 月达到极显著水平,平均相关系数为 0.64,相关系数愈来愈高,是否说明随着时间的推移,该地区有机氮沉降量受降雨量影响愈来愈显著,还需长期观测。2007 年相关数据显示,雨水有机氮沉降量与降雨频次呈乘幂型正相关($R^2=0.86$)。

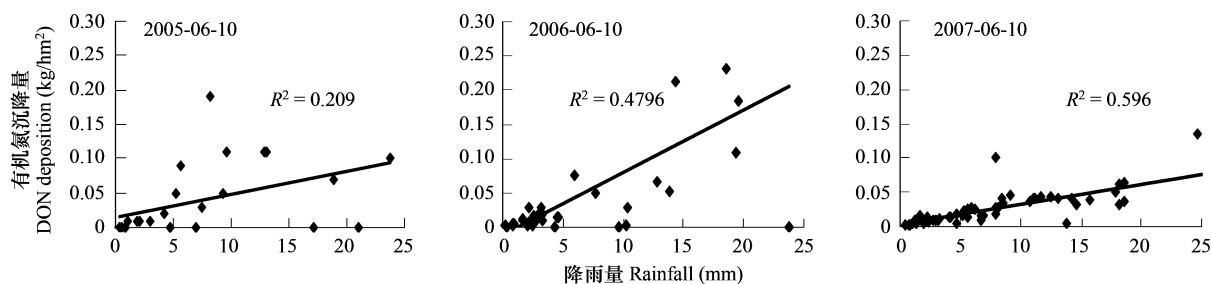


图 3 降雨量对大气有机氮素沉降的影响

Fig. 3 Relationship between rainfall and organic N deposition

2.2.2 有机氮沉降量差异

2006 年 6~10 月有机氮输入量变化幅度很大(图 4),7 月份的沉降量为 1.47 kg/hm²,是全部监测期 23 个月的最大值,6、7 两个月份有机氮输入量平均达到 1.32 kg/hm²,是其它月份平均水平的 3.3 倍,7 月份过后,月沉降量迅速下降,10 月份降至 0.23 kg/hm²。2007 年 10 月沉降量最小,仅为 0.03 kg/hm²,2005 年同时期的沉降量是其 15.7 倍。图 4 表明,3a 相同时段,有机氮月沉降量最大值出现时间不同,2005 年为 8 月,2006 年为 7 月,2007 年则为 9 月。

2.2.3 有机氮月变化

对 2007 年湿沉降不同形态氮、不同月份沉降量进行比较(图 5),有机氮沉降 2.01 kg/(hm²·a),略低于无机氮的 2.12 kg/(hm²·a)。氮沉降主要集中在 6、7、9

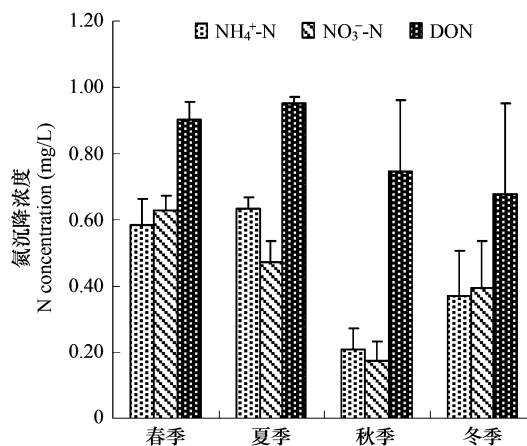


图 2 2007 年氮沉降浓度季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of N Concentration in 2007

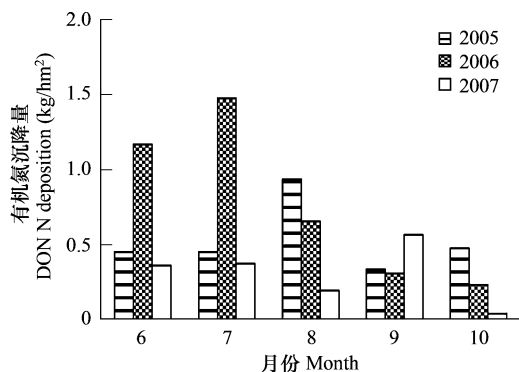


图 4 相同时段内有机氮沉降量

Fig. 4 Organic N Deposition in the same period

月份,这3个月的有机氮沉降占全年的64%;总氮沉降占全年的63%。有机氮月沉降量在0.01~0.57 kg/hm²之间,9月份有机氮沉降量最高,占全年的28%。无机氮沉降在0.02~0.57 kg/hm²之间,其中,铵态氮平均占55%。6、7月份各形态氮沉降量都较高,主要是由于降雨量大引起的。沉降量较低的1、2、10月份,有机氮沉降占全年的3%,全氮仅占全年的1%。

2.2.4 有机氮季节变化

有机氮沉降量季节差异明显(表2),夏季最大,秋季次之,而春冬季节较低。2007年夏季有机氮沉降为0.93 kg/hm²,占全年有机氮沉降量的46%,而冬季有机氮沉降量仅占0.01%。夏季的有机氮沉降量是冬季的46.5倍,差距悬殊,但各季节有机氮占总氮的比例却很接近。分析表明,四季有机氮沉降量与降雨量呈线性正相关,相关系数0.99($p=0.01$)。与有机氮相同,无机氮沉降量最大值也出现在夏季,占全年无机氮沉降量的57%。其中,铵态氮占无机氮沉降量的55%,硝态氮占45%。与有机氮相比,秋季无机氮沉降量仅为有机氮的47%,其它季节均高于后者,全年二者基本持平。

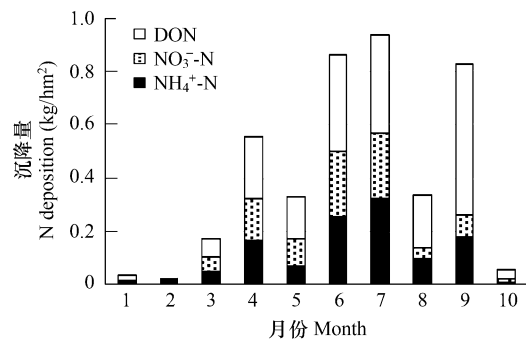


图5 2007年不同形态氮沉降量
Fig. 5 N deposition of different modality in 2007

表2 2007年不同形态氮季节输入变化
Table 2 Seasonal variation of N deposition from precipitation

季节 Season	降雨量 (mm) Precipitation	输入量 Input (kg/hm ²)					DIN/ DON	DON/ DTN
		NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	DIN	DON	DTN		
春季 Spring	155.4	0.29	0.31	0.60	0.46	1.06	1.30	0.43
夏季 Summer	305.7	0.67	0.53	1.20	0.93	2.13	1.29	0.44
秋季 Autumn	159.0	0.18	0.10	0.28	0.60	0.88	0.47	0.68
冬季 Winter	8.3	0.01	0.02	0.03	0.02	0.05	1.50	0.40
全年 All-year	628.4	1.15	0.96	2.11	2.01	4.12	1.05	0.49

夏季,农事活动较为频繁,春小麦开始追肥,施氮量增加,部分氨气挥发至大气中。生物本身也可通过直接或间接的方式向大气排放有机氮^[3],如气温升高,当地森林生态系统能量转换和物质循环旺盛,大量植物、土壤腐殖质向大气中直接挥发有机态氮等。此外,各种花粉随降雨沉降也是林芝地区大气有机氮的主要来源。而该时期降雨频次高、雨量大,使得大气氮湿沉降比较彻底,导致雨水中无机、有机氮含量高于其它季节。

2.2.5 有机氮沉降占总氮的差异

图6显示,6~10月份,有机氮沉降量增加,总氮随之增加,有机氮占总氮的比例维持在一个较高的水平,

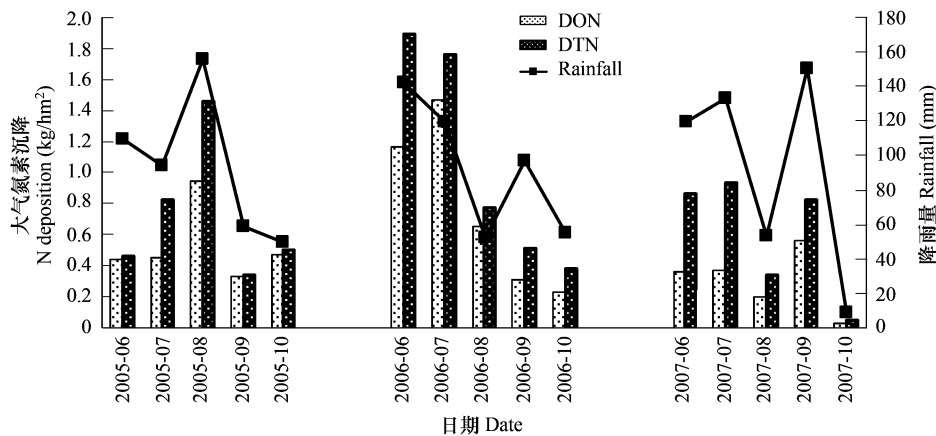


图6 有机氮、总氮沉降及降雨量随时间变化
Fig. 6 Temporal variation of rainfall, organic N and total N deposition

当降雨锐减,有机氮沉降量相应减少,总氮也随之减少,但有机氮占全氮的比例维持在原水平,各月有机氮占总氮的比例差异较大,并且不受降雨影响。张颖等^[20]对中国有机氮沉降的研究表明,2005~2006年,西藏林芝地区湿沉降有机氮占总氮的72%,郑利霞^[3]总结国外研究结果表明,不同区域湿沉降中有机氮占总氮的比例为6%~84%。2005年6~10月林芝地区有机氮沉降量占总氮的81%,2006年同时段该比率为70%,2007年降至54%,平均为68%,整个监测期内该比率为62%,与上述结论基本吻合。

3 结语

西藏林芝地区有机氮沉降表现出一定的时间差异性。各月沉降量变化较大,7月份最高,平均为0.77 kg/hm²。同时有机氮沉降存在一定的季节变化,夏秋季较高,春冬较低,冬季各形态氮浓度离散程度较大,这是降水、气温、风速等多种复杂因素综合作用的结果。有机氮沉降量与降雨量呈线性正相关,与降雨频次呈幂型正相关。有机氮占总氮的比例长

期维持在较高水平,平均达62%。由于缺乏有效、统一的测量方法,人们对有机氮沉降的研究远不及无机氮。本研究表明,在人类干预较少、以森林生态系统为主的西藏林芝地区,雨水中有有机氮的含量占总氮的半数以上。因此,加强对大气有机氮沉降的研究对于准确定量大气氮沉降及其生态意义极具重要性。

References:

- [1] Su C G, Yin B, Zhu Z L, *et al.* Gaseous loss of nitrogen from fields and wet deposition of atmospheric nitrogen and environmental effects. *Soil*, 2005, 37 (2): 113—12.
- [2] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, Seitzinger S P, Howarth R W, Cowling E B, Cosby B J. The nitrogen cascade. *BioScience*, 2003 53: 341—356.
- [3] Zheng L X, Liu X J, Zhang F S. Atmospheric deposition of organic nitrogen: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3828—3834.
- [4] Nixon S W. Coastal eutrophication: A definition, social causes and future consequences. *Ophelia*, 1995, 41: 199—220.
- [5] Galloway J N, Dentener J F, Capone G D, *et al.* Nitrogen cycles: past, present and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70: 153—226.
- [6] Egmond K, Bresser T, Bouwman L. The European nitrogen case. *Ambio*, 2002, 31: 72—78.
- [7] Zheng X H, Fu C B, Xu X K, *et al.* The Asian Nitrogen Cycle Case Study. *Ambio*, 2002, 31: 79—87.
- [8] Matson P A, McDowell W H, Townsend A R, *et al.* The globalization of N deposition: ecosystem consequences in tropical environments. *Biogeochemistry*, 1999, 46: 67—83.
- [9] Chinese environment protection criterion compilation — Water Quality Analysis. Beijing Chinese Criterion Press, 2001.
- [10] Wang X Z, Zhu J G, G R, *et al.* Dynamics and ecological significance of nitrogen wet-deposition in Taihu Lake region — taking Changshu Agro-ecological Experiment Station as an example. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1616—1620.
- [11] Zhang Y, Liu X J, Fangmeier A, *et al.* Nitrogen inputs and isotopes in precipitation in the North China Plain. *Atmospheric Environment* 2008, 42: 1436—1448.
- [12] Hendry C D, Brezonik P L. Chemistry of precipitation at Gainesville. *Florida Environmental Science and Technology*, 1980, 14: 843—849.
- [13] Williams M R, Mealeck J M. Solute export from forested and partially deforested catchments in the central Amazon. *Biogeochemistry*, 1997, 38: 67—102.
- [14] Currie W S, Aber J D, McDowell W H, *et al.* Vertical transport of dissolved organic C and N under long-term N amendments in pine and hardwood forests. *Biogeochemistry*, 1996, 35: 471—505.
- [15] Russell K M, Galloway J N, Macko S A, *et al.* Sources of nitrogen in wet deposition to the Chesapeake Bay Region. *Atmospheric Environment*, 1998, 32: 2453—2456.
- [16] Scudlark J R, Russell K M, Galloway J N, *et al.* Organic nitrogen in precipitation at the Mid-Atlantic U. S. Coast: methods evaluation and preliminary measurement. *Atmospheric Environment*, 1998, 32: 1719—1728.
- [17] Twonsend A R, Braswell B H, Holland E A, *et al.* Spatial and temporal patterns in terrestrial carbon storage due to deposition of fossil fuel nitrogen. *Ecological Applications*, 1996, 6: 804—814.
- [18] Sun Z G, Liu J S, Wang J D. Dynamics of nitrogen in the atmospheric wet deposition and its ecological effects in typical wetland ecosystem of Sanjiang Plain. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 182—192.
- [19] Keene W C, Montag J A, Maben J R, *et al.* Organic nitrogen in precipitation over eastern North America. *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 4529—4540.
- [20] Zhang Y, Zheng L X, Liu X J, *et al.* Evidence for organic N deposition and its anthropogenic sources in China. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 1035—1041.

参考文献:

- [1] 苏成国,尹斌,朱兆良,沈其荣.农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应. *土壤*, 2005, 37 (2): 113—120.
- [3] 郑利霞,刘学军,张福锁.大气有机氮沉降研究进展. *生态学报*, 2007, 27(9): 3828—3834.
- [9] 中国环境保护标准汇编——水质分析. 北京:中国标准出版社, 2001.
- [10] 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. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1616—1620.
- [18] 孙志高,刘景双,王金达.三江平原典型湿地系统湿沉降中氮浓度及沉降量初步研究. *水科学进展*, 2007, 18(2): 182—192.