

藏东南大气氮湿沉降动态变化 ——以林芝观测点为例

贾钧彦¹, 张 颖², 蔡晓布^{1,*}, 刘学军^{2,*}

(1. 西藏农牧学院资源与环境学院, 西藏林芝 860000; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要:利用量雨器和湿沉降收集仪在藏东南通过 2a 的试验, 研究了该区大气氮素沉降的浓度、沉降量以及季节变化规律。结果表明:藏东南大气氮素湿沉降(无机氮)为 $1.33 \sim 3.05 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 平均值为 $2.36 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 降水中铵态氮和硝态氮的平均浓度分别为 0.36 mg/L 和 0.10 mg/L , $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$ 接近 4。各形态氮月均浓度之间差别较大, 具有明显的季节性, 其中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 月均浓度动态变化明显, 5、6、7 月份浓度较高 ($>0.5 \text{ mg/L}$), $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 12 月份浓度 (0.49 mg/L) 为全年最高; 氮浓度的季节变化, 以春冬较高, 夏秋季较低, 离散程度以春季最大。降水量与各形态氮沉降呈一定幂型负相关, 相关系数为 $0.705, 0.641$, 分别达到 0.006 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) 和 0.019 ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) 的显著水平。氮月沉降以 5~6 月份最高, 占全年的 32.3%; 氮季沉降以夏季所占比例最高, 约占 50%, 冬季最低 (2%~3%)。

关键词:藏东南; 大气氮沉降; 湿沉降

文章编号: 1000-0933(2009)04-1907-07 中图分类号: X517 文献标识码: A

A dynamic changes of wet deposition of nitrogen in southeast Tibet: taking Linzhi experiment station as an example

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

1 Department of resource and Environment, Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi 860000, China

2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1907~1913.

Abstract: Atmospheric nitrogen (N) deposition, as both a component of acid deposition and a nutrient source, is of increasing interest. Most research on N deposition mainly focuses on sensitive natural ecosystems such as forests and in developed countries. Information on N deposition in important ecosystems such as the Qinghai-Tibet Plateau is scarce. Although we might expect less impact from anthropogenic deposition compared with other regions of China, the ecological environment there is fragile. A study of atmospheric N input in this region would not only indicate N deposition in remote areas of high altitude, but also provide a scientific basis for understanding the N cycle in such natural ecosystems.

The research was carried out at the Ecology Research Institute, Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, in a typical forest ecosystem of southeast Tibet. Rain and snow samples were collected and analysed and N concentration and deposition calculated for 2005 and 2006. Annual wet deposition of inorganic N averaged $2.36 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$. Volume-weighted concentrations of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ were 0.36 mg/L and 0.10 mg/L , respectively, and varied throughout the year. Higher values of N concentration in rain were found in winter and spring, while lower values were found in summer and autumn. Both the $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ deposition significantly decreased with the increased precipitation (p ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) = 0.006 , p ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) = 0.019), and N concentrations significantly increased with precipitation, fitting a power

基金项目: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(20577068); 国家科技支撑重点资助项目(2007BAC06B04)

收稿日期:2007-12-25; **修订日期:**2008-06-23

致谢:英国洛桑实验站 Keith Goulding 教授润色英文摘要, 特此致谢。

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

equation ($p < 0.05$). N deposition was highest; the lowest value was found in winter (only 2%–3% of total annual deposition). NH_4^+ -N was the dominant species in wet deposition, comprising 81.1% of total wet inorganic N deposition.

Key Words: Southeast Tibet; atmospheric nitrogen deposition; wet deposition

近百年来,随着工业、农业的发展,人类的活动,使得排放到大气中含氮化合物急增,大气氮沉降成比例增加,引起国内外研究人员的广泛关注。英国洛桑试验站 150 多年的监测数据表明^[1],1855 年英国大气氮素湿沉降仅为 $5.18 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,到 1980 年升高至 $18 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,之后随着对大气污染的控制氮素沉降量降至大约 $10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。就全球范围来看,目前大气氮沉降的平均值为 $5 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[2],其中欧洲为 $10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[3],北美 $26 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[4],亚洲为 $7 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[5]。我国大气氮沉降量在 $5.1 \sim 25.6 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 之间^[6-9],但从全国范围来看,大气氮沉降尤其是干沉降的通量尚未系统的监测,氮素干湿沉降总量可能被大大低估。即便如此,这些报道的氮沉降量也将给我国陆地和水生生态系统带来巨大的挑战。我国对于大气氮沉降虽然进行了一定的研究,但还比较零散,尚未建立类似于美国的全国沉降研究网络,因而这在很大程度上制约着我国大气氮沉降的研究进度。

青藏高原被称为除北极、南极之外的地球第三极,对全球气候变化具有很大影响。作为受人为活动影响极少的地区之一,青藏高原是研究大气氮素沉降背景值的理想区域。对该地区大气氮素湿沉降的研究,不仅代表了偏远地区,特别是人类活动较弱地区的氮素湿沉降,而且也是对人类活动影响氮素湿沉降进行比较研究的理想地区,因此研究结果具有一定的科学价值。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

本研究以林芝县为例,在西藏农牧学院生态所(站)进行。该试验站位于西藏自治区东南部林芝县尼洋河中下游宽谷区,海拔 3008m,地形呈北高南低的走势,受印度洋、太平洋暖流影响,形成了林芝地区特殊的热带湿润和半湿润气候,该区年平均气温 $7 \sim 16^\circ\text{C}$,无霜期 170 d 左右, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 2272°C ,年总降水量 $600 \sim 800 \text{ mm}$,4~10 月份约占 92.4%,全年太阳总辐射 $5460 \sim 7530 \text{ MJm}^{-2}$,具有干湿季分明、日较差大等显著的气候特点。该地区现有耕地面积 $1.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$,草场面积 $2.91 \times 10^5 \text{ hm}^2$,林地面积 $2.64 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、森林覆盖率 46.09%;经济以发展特色农牧业、生态旅游业和藏药业为主,是受人为活动影响较小的地区之一。

1.2.1 采样方法

试验自 2005-6~2006-12 在西藏农牧学院生态所试验点收集雨样。在实验室的洁净实验台内,将采雨器,聚乙烯瓶先用 1:5 的 HCl 浸泡 4 d,然后用去离子水淋洗 6 遍,(用洁净塑料袋包好,备用),采雨器平时用塑料袋扎好口,只在降水(包括降雨,降雪)之前打开,降水后马上采样。将样品取回实验室后,先用 $0.4 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤,装入聚乙烯瓶中,记录降雨量和有关气象数据,加入体积分数为 0.5% 的 CHCl_3 密封保存,或零下 15°C 冷冻保存。

1.2.2 样品的测定

NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 浓度采用三通道连续流动分析仪(TRACE2000)测定,所有样品均在收集后 3 个月内于中国农业大学资源与环境学院重点实验室测定。

1.2.3 数据处理

通过对原始数据认真分析整理,采用 DPS 软件对数据资料进行相关性、方差、标准差分析。降水中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 的月平均浓度利用加权平均表示,然后根据如下公式计算出各种形态之间的月(年)平均浓度(C),然后求解其比值。全年氮沉降量采用实际收集降雨的平均浓度与年降雨量求得:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

式中, C 为年平均浓度, i 为降水次数, C_i 为第 i 次降水中氮素的浓度, P_i 为第 i 次降水的降雨量。

2 结果

2.1 降水氮浓度及其动态变化

2.1.1 氮浓度的分布特征

2005 年 6 ~ 10 月、2006 年 5 ~ 12 月试验点共收集 79 次降雨资料, 仅 1 次降雨中出现氨浓度过高 (6.66 mg N/L, 经重复测定分析, 样品在采集过程中受到污染) 作异常值处理未在本文中讨论。就 2a 中 78 次降雨资料的分析结果表明 (图 1), 藏东南的降雨中 NH_4^+ -N 的浓度主要集中在 0.40 mg/L 以下, 平均浓度为 0.36 mg/L, NO_3^- -N 浓度主要集中在 0.20 mg/L 以下, 平均浓度为 0.10 mg/L, NH_4^+ -N/ NO_3^- -N 接近于 4。氮浓度与华北平原、黄淮海、华南地区相比平均减小一个数量级^[6,7,10~13], 这充分说明与当地工农业发展水平是密切相关的。

2.1.2 氮浓度的月变化

两年共计 13 个月的测定结果表明 (图 2), NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 浓度以 6、7、8、12 月份较高, 且两者变化基本一致。2005 年 7、8 月中 NH_4^+ -N 浓度变化不大, 集中在 0.35 mg/L 左右, 9、10 月份降低到 0.10 mg/L 以下; NO_3^- -N 浓度相对稳定, 保持在 0.10 mg/L 以下, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 在 7 月份出现了峰值, NO_3^- -N 浓度与其他月份达到了 0.01 的极显著水平。2006 年 5 月 NH_4^+ -N 浓度为 0.66 mg/L, 取得了最大值, 随后各月份中 NH_4^+ -N 浓度逐渐降低至 0.20 mg/L; NO_3^- -N 浓度变化不大, 在 10 月份后升至 0.10 mg/L 以上, 在 12 月份出现峰值 (0.49 mg/L), 与其它月份达到了 0.05 的显著水平。就对 TIN 而言 (图 2), 显然 NH_4^+ -N 是 TIN 的主要组成部分, 其浓度变化直接受到 NH_4^+ -N 浓度的影响, 与 NH_4^+ -N 浓度变化极为相似; NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 浓度在年内分别出现两次高值, 但年份间差异较大。

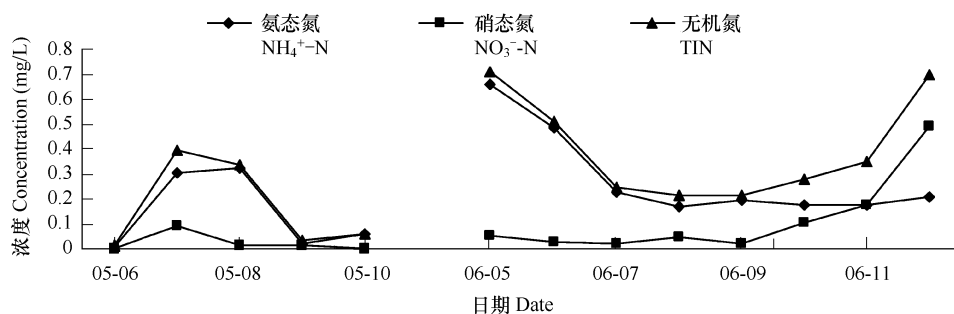


图 2 不同月份雨水氮浓度的变化

Fig. 2 Monthly variation of N concentration from precipitation in 2005 and 2006

2.1.3 氮浓度的季度变化

虽然西藏大气环境中 N 浓度总体偏低, 但季节间浓度则具有较大差异。表 1 汇总了该区春季、夏季、秋季和冬季降水中各形态氮浓度的处理结果, 数据显示, 各形态氮浓度均存在明显的季节变化, 其中 NH_4^+ -N 浓度大小顺序依次为春季 > 夏季 > 冬季 > 秋季; NO_3^- -N 浓度大小为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季; 而 TIN 浓度表现为春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季。总体而言, 各形态氮浓度以冬、春较高, 夏、秋季较低, 春季较高的氮浓度主要与期间的温度、耕作、施肥等气候条件和农业活动有关, 以及相对较多降水的淋洗作用有关; 冬季降水中的氮浓度高于其它季节主要是由于含氮气体长时间在大气中的积累, 降水量较少的结果; 夏季、秋季主要与较多的降

水稀释作用有关,但夏季 NH_4^+ -N 浓度较高,秋、冬季 NO_3^- -N 浓度较大。

表 1 不同形态氮的浓度的季节变化

Table 1 Seasonal variation of N concentration from precipitation

氮浓度 N concentration (mg/L)		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
NH_4^+ -N	范围 Extent of variation	0.173 ~ 1.621	0 ~ 1.341	0.018 ~ 0.578	0.204 ~ 0.208
	均值 average ($\pm$ S. D)	0.443 $\pm$ 0.340	0.251 $\pm$ 0.248	0.131 $\pm$ 0.101	0.206 $\pm$ 0.003
NO_3^- -N	范围 Extent of variation	0 ~ 0.332	0 ~ 0.403	0 ~ 0.622	0.361 ~ 0.619
	均值 average ($\pm$ S. D)	0.053 $\pm$ 0.064	0.026 $\pm$ 0.035	0.043 $\pm$ 0.054	0.490 $\pm$ 0.182
TIN	范围 Extent of variation	0.173 ~ 1.638	0 ~ 1.388	0.018 ~ 1.200	0.565 ~ 0.828
	均值 average ($\pm$ S. D)	0.496 $\pm$ 0.434	0.277 $\pm$ 0.266	0.174 $\pm$ 0.237	0.697 $\pm$ 0.186

为了能够表达该区每次降水中各形态氮的浓度的不一致性,通常采用标准差来反映这种离散程度,降水越小,浓度离散程度越大,由表 1 可知,各形态氮浓度的标准差在各季节差异很大,其中 NH_4^+ -N、TIN 均表现为春季 > 夏季 > 冬季 > 秋季; NO_3^- -N 表现为冬季 > 夏季 > 春季 > 秋季。具体来说,各形态氮浓度的标准差均以春季较高,其值为四季均值的 1.44 ~ 2.21 倍,春季 NH_4^+ -N 浓度的标准差要比秋冬这两季高出几倍甚至百倍,其它各形态氮浓度的标准变化不大。以上结果表明,春季各形态氮浓度的离散程度最大,说明此间各形态氮浓度的离散性是多种复杂因素综合作用的结果; NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 浓度标准差的季节变化也证明其来源的差异。

2.1.4 氮浓度的年变化

本研究中 2005 年大气氮沉降 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TIN 浓度分别为 0.16、0.07、0.24 mg/L,2006 年 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TIN 浓度分别为 0.37、0.11、0.48 mg/L。相比 2a 的氮浓度,2006 年远大于 2005 年,由于试验时间有限,也不能说氮沉降就有逐年增加的趋势,这也可能是降水来源不同引起的,尚待进一步研究。

2.2 湿沉降氮量及其动态变化

2.2.1 氮沉降量与降雨量的关系

受降雨量的影响,藏东南地区 5 ~ 10 月份降雨占年降水 83%,而同期由降雨输入的氮素占总输入量的 80%。氮素沉降的输入量与降雨量呈乘幂型正相关(图 3),相关系数为 0.705、0.641,分别达到 0.006 (NH_4^+ -N) 和 0.019 (NO_3^- -N) 的显著水平,说明该区降水多少直接影响着大气氮沉降通量的大小。

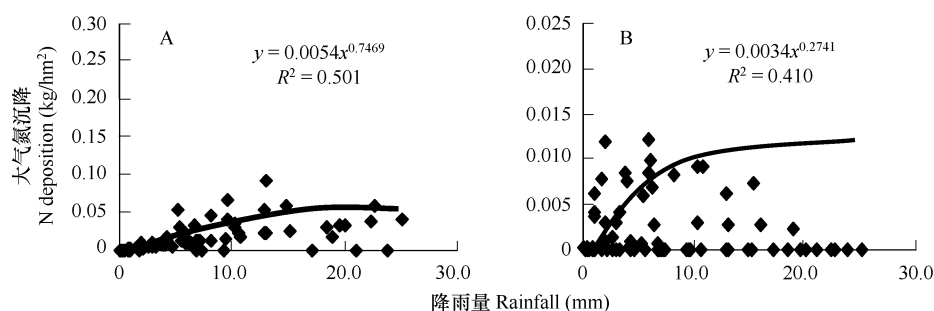


图 3 降雨量对大气氮素沉降的影响

Fig. 3 Relationship between rainfall and nitrogen deposition

A. 氨态氮(NH_4^+ -N); B. 硝态氮(NO_3^- -N)

2.2.2 氮沉降量月变化

由图 4 可以看出,氮沉降随降雨量变化而变化。5 ~ 8 月份氮沉降量较大,其它月份差异较小。5 月份沉降量最大,为 1.04 kg/hm²,与沉降最小月 12 月份 0.005 kg/hm²,两者达到了 0.01 的显著水平。2006 年 6 ~ 9 月份沉降量大小与 2005 年呈反向变化,达到了显著水平,说明 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TIN 含量是多种因素的影响

结果。

各形态氮沉降量均存在明显的月变化, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TIN(总无机氮)的沉降量在 1a 中均出现 2 次较为明显的峰值,分别出现在 5~6 月份、8~9 月份,数量上 5~6 月份的沉降量最大, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TIN 沉降量(两年的均值)分别达到了 0.695、0.057、0.752 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 8~9 月份第 2 次峰值已达到了 0.290、0.224、0.514 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,两次峰值含量分别占了全年含量的 34.3%、23.5%,而在其它各月均相对较低,出现 2 次明显峰值的原因主要与相应时期氮浓度、降雨量的大小关系最为密切。

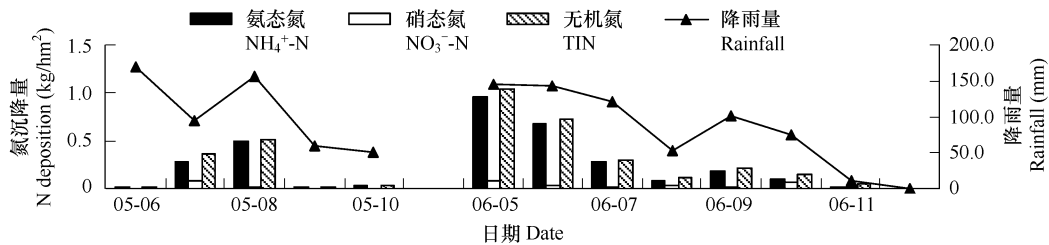


图 4 不同月份氮沉降及其与降水之间的关系(2005~2006 年)

Fig. 4 Monthly variation of N deposition from precipitation in 2005 and 2006

2.2.3 氮沉降量的季变化

由于温度、降水的季节变化,从而使得氮沉降在季度变化上的巨大差异,季度降雨量与无机氮沉降量的百分比关系,见表 2,说明降雨量与氮沉降量有极强的正相关性,相关系数为 0.99,达到了 0.01 的极显著水平,雨水较多的季节所占有氮沉降数量也较大,特别是雨水较多的夏季,氮沉降量几乎占全年沉降量的一半,这与国内外的诸多研究极为相似^[6,9,11,13~15]。

表 2 季度降雨量与氮沉降量的百分比关系

Table 2 Distributions of the precipitation and N deposition in different seasons

年份 Year	季度 Season	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
2005	降雨量 Rainfall (%)	26.16	57.01	14.79	2.04
	氮沉降 N deposition(kg/hm^2)	24.64	68.33	3.54	3.43
2006	降雨量 Rainfall (%)	30.80	41.92	25.11	2.17
	氮沉降 N deposition (kg/hm^2)	43.93	36.90	15.46	3.71

2.2.4 氮沉降量年变化

本研究中,2005 年林芝大气湿沉降量为 1.72 kg/hm^2 ,2006 年为 3.05 kg/hm^2 ,平均值为 2.36 kg/hm^2 。在年内以 5~10 月份 6 个月的输入量较高,占全年氮素输入量的 72.3%~84.9%。湿沉降中铵态氮占绝对优势(图 4),占湿沉降氮素总量的 74.7%~89.2%,平均 81.1%,硝态氮占 25.3%~10.7%,平均 18.9%, $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$ 大于国内同类研究的值^[6,7,9]。就各形态氮的相关性而言, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 TIN 具有很强的相关,相关系数(r)为 0.703,显著水平($p < 0.05$),但随着汽运业、城市建设的加快, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 所占的比重将很可能进一步加大。

3 讨论

(1) 研究区大气湿沉降与国内外大气氮沉降的差异 据美国大气沉降网 20 年来的观测报道,通过氮素湿沉降(雨水)的数量为 3~15 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[4];欧洲绝大部地区氮沉降超过 10 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[3];国内 20 多年来的研究亦发现由雨水带入农田的氮量(湿沉降)一般在 15~20 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[6,8]。而该研究区内由降水输入的无机氮约为 2.36 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其沉降量较国内外的平均水平减小了近 10 倍^[5],即使与同类地区的青海(3.01 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)、云南丽江(2.56 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)相比也略低,与刘嘉麒等对丽江玉龙雪山大气氮素沉降长期研究,测得的内陆降水背景值(1.8~3.5 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)非常接近^[16~18]。

(2) 大气氮沉降浓度、氮沉降量、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 季节变化规律 大气湿沉降浓度季节差异明显,春、冬季降氮沉降浓度较高,原因主要与生长季和非生长季的人类活动、降水强度及频次、风向、地理位置以及 NO_x 自然排放有关。氮沉降量的季节性差异主要与相应时期降水中各形态氮的月均浓度和降雨量有关。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 季节变化,一方面反映了对 TIN 贡献的大小,同时也可在一定程度上说明两者来源上的差异。

(3) 研究区大气氮来源 由于藏东南特殊的地形地貌,四周多山,阻隔着气流的顺畅运动,特别是在湿季容易形成局部降水,在此情况下,农田氮肥施用、动植物残体腐烂挥发的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和城市交通运输业排放的 NO_x 对降水中的氮素形态组成有较大影响。但是夏季当地也受到太平洋、印度洋暖流的影响,大量水汽也会越过色季拉山,为该区带来较大的降水,从而被海洋型降水所影响。

(4) 由于本试验只进行湿沉降中无机氮的研究,大量研究证明湿沉降中有机氮也占有相当大的比例^[6-8,10-13,19];另外,大气氮沉降中干沉降的量也不容忽视,张颖等研究表明^[6],与氮素混合沉降相比,湿沉降输入的氮素只占前者的 73%,说明干沉降也是大气氮素沉降的一个主要部分。如果考虑到湿沉降中有机氮、干沉降中气溶胶和气态氮的输入,藏东南大气氮素干湿沉降实际数量可能远高于目前的数据,若依据一些研究折算成混合氮沉降量^[6,8,20,21],该区域的沉降值为 $2.71 \sim 6.04 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,该数值对于西藏这一生态脆弱的内陆生态区可能是一笔非常丰厚的外援氮输入,这是否会导致该地区森林和草原生态系统生产力物种多样性的改变,尚需深入研究。

References:

- [1] Goulding K W T, Bailey N J, Bradbury N I, *et al.* Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes. *New Phytol*, 1998, 139: 49—58.
- [2] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio*, 2002, 31(2): 64—71.
- [3] Egmond K, Bresser T, Ouwman L. The European nitrogen case. *Ambio*, 2002, 31: 72—78.
- [4] James N, Galloway J N, Aber J D, *et al.* The nitrogen cascade. *BioScience*, 2003, 53(4): 341—356.
- [5] Zheng X H, Fu C B, Xu X K, *et al.* The Asian Nitrogen Cycle Case Study. *Ambio*, 2002, 31: 79—87.
- [6] Zhang Y, Liu X J, Zhang F S, *et al.* Spatial and temporal variation of atmospheric nitrogen deposition in North China plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1633—1699.
- [7] Zhang J L, Yu Z G, Zhang J, *et al.* Wet deposition (precipitation) of major elements at two sites of Northwestern Yellow Sea. *Environmental Chemistry*, 2000, 19(4): 352—356.
- [8] Su C G, Yin B, Zhu Z L, *et al.* Ammonia volatilization loss of nitrogen fertilizer from rice field and wet deposition of atmospheric nitrogen in rice growing season. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1884—1888.
- [9] Wang X Z, Zhu J G, Gao 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.
- [10] Zhang X F. Atmospheric nitrogen wet deposition and its effects on wetland water environment of Shanghai area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(6): 1099—1102.
- [11] Liu C L. Nutrient elements in wet deposition (precipitation) from the Yellow Sea and the East China Sea regions. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(3): 26—30.
- [12] Zhou G Y, Yan J H. The influences of regional atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2002—2012.
- [13] Liu X J, Ju X T, Zhang Y, *et al.* Nitrogen deposition in agroecosystems in the Beijing area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 113: 370—377.
- [14] Sun Z G, Liu J S, Wang J D. Study on Nitrogen concentration and deposition amount in wet deposition in typical wet land ecosystem of Sanjiang plain. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2007, 23(1): 114—123.
- [15] Wang X M, Yang L Y, Qin B Q, *et al.* Sources of inorganic nitrogen in wet deposition in Taihu Lake in spring. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2006, 45(4): 93—97.
- [16] Yang J, XUE H H, YU Xiao L, *et al.* The preliminary study on chemical characteristics of precipitation at Mt. Waliguan. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(4): 420—425.

- [17] Galloway J N, Zhao D W, Xiong J L, *et al.* Acidrain: China, United States, and a remote area. *Science*, 1987, 236:1559—1562.
- [18] Liu J Q. Research on precipitation background value and definition of acid rain. *Environmental Monitoring in China*, 1996, 12 (5):5—9.
- [19] Cornell S E, Rendell A, Jickells T D. Atmospheric inputs of dissolved organic nitrogen to the ocean. *Nature*, 1995, 376:243—246.
- [20] Li S Q, Li S X. Nitrogen added to ecosystems by wet deposition in Guanzhong area, Shaanxi. *Agro-environmental Protection*, 1999, 18(3):97—101.
- [21] Cornell S E, Jickells T D, Cape J N, *et al.* Organic nitrogen deposition on land and coastal environments: A review of methods and data. *Atmosphere Environment*, 2003, 37:2173—2191.

参考文献:

- [6] 张颖,刘学军,张福锁,等. 华北平原大气氮素沉降的时空变异. *生态学报*, 2006, 26(6):1633~1699.
- [7] 张金良,于志刚,张经,等. 黄海西部大气湿沉降(降水)中各元素沉降通量的初步研究. *环境化学*, 2000, 19(4):352~356.
- [8] 苏成国,尹斌,朱兆良,等. 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气氮的湿沉降. *应用生态学报*, 2003, 14(11):1884~1888.
- [9] 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.
- [10] 张修峰. 上海地区大气氮湿沉降及其对湿地水环境的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(6):1099~1102.
- [11] 刘昌岭,陈洪涛,任宏波,等. 黄海及东海海域大气湿沉降(降水)中的营养元素. *海洋环境科学*, 2003, 22(3):26~30.
- [12] 周国逸,闫俊华. 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. *生态学报*, 2001, 21(12):2002~2012.
- [14] 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. *农业系统科学与综合研究*, 2007, 23(1):114~123.
- [15] 王雪梅,杨龙元,秦伯强,等. 春季太湖水域无机氮湿沉降来源初探. *中山大学学报*, 2006, 45(4):93~97.
- [16] 杨洁,薛虎圣,于晓岚,等. 瓦里关山降水化学特征的初步分析. *环境科学学报*, 2000, 20(4):420~425.
- [18] 刘嘉麒. 降水背景值与酸雨定义研究. *中国环境监测*, 1996, 12(5):5~9.
- [20] 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. *农业环境保护*, 1999, 18(3):97~101.