

黄土区降水降尘输入农田土壤中的氮素评估

王志辉¹, 张颖², 刘学军², 同延安^{1,*}, 乔丽³, 雷小鹰⁴

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国农业大学, 北京 100094;
3. 陕西省气象局, 西安 710014; 4. 洛川县气象局, 727400)

摘要:随着人类活动引起大气活性氮的急剧增加, 大气氮沉降亦明显增加, 由此引发的各生态系统的响应也逐渐表现出来。研究黄土区氮沉降, 对农业生态系统的氮素循环与平衡提供一定的数据支持, 同时为农民科学合理施肥提供依据, 为研究氮沉降的环境生态效应和生物有效性提供科学支撑。用 APS-2A 型降水降尘自动采样器对陕西杨凌和洛川地区 2006 ~ 2007 年的降水降尘输入氮总量、月动态变化及各形态 N 的贡献率进行了监测与分析。结果显示杨凌点 2006 年总降雨量为 507.8 mm, 总 N 沉降通量为 20.6 kg/(hm²·a), 其中 N 湿沉降通量为 19.1 kg/(hm²·a), 占 93%; 降尘输入的 N 通量为 1.5 kg/(hm²·a), 占 7%。总 N 沉降通量中 NO₃⁻-N 为 7.3 kg/(hm²·a), 占 36%。洛川点 2006 年 6 月 ~ 2007 年 5 月总降雨量为 579.5 mm, 总 N 沉降通量为 12.7 kg/(hm²·a), 其中 N 湿沉降通量为 11.4 kg/(hm²·a), 占 90%; 降尘输入 N 的通量为 1.2 kg/(hm²·a), 占 10%。总 N 沉降通量中 NO₃⁻-N 为 8.7 kg/(hm²·a), 占 69%。两个点 N 沉降通量和氮素形态的差异在很大程度上反映了活性 N 主要来自人为活动, 即农业生产排放的活性 N。

关键词: N 沉降; 陕西; 降尘输入 N; 湿沉降 N; 大气沉降 N

文章编号: 1000-0933(2008)07-3295-07 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Dry and wet nitrogen deposition in agricultural soils in the Loess area

WANG Zhi-Hui¹, ZHANG Ying², LIU Xue-Jun², TONG Yan-An^{1,*}, QIAO Li³, LEI Xiao-Ying⁴

1 College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China

2 China Agricultural University, Beijing 100094, China

3 Weather Bureau of Shaanxi Province, Xi'an 710014, China

4 Weather Bureau of Luochuan County, 727400, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3295 ~ 3301.

Abstract: With rapid rise of human activities induced active atmospheric nitrogen, the atmospheric nitrogen deposition has increased significantly, and consequently response of the ecosystems has gradually become obvious. The study of the impact of nitrogen deposition on agricultural ecosystems can supply the basic support for the N cycling and budget calculation and guide farmers applying N fertilizer scientifically and reasonably. Furthermore, it is expected that the study will provide basal support for in-depth research on the environmental effect and bio-availability of nitrogen deposition. Atmospheric precipitation and N deposition were collected in a one-year period (from 2006 to 2007) in Yangling and Luochuan County in Shaanxi Province respectively using APS-2A model automatic sampling equipment. Total nitrogen, monthly variation and the proportion of various types of nitrogen were monitored and analyzed. The results showed that the rainfall in Yangling in

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40675006)

收稿日期: 2007-10-04; 修订日期: 2008-04-01

作者简介: 王志辉(1983 ~), 男, 山西省长治市人, 硕士生, 主要从事大气氮沉降及其生物有效性研究。E-mail: wang_zhi_hui_1983@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tongyanan@nwsuaf.edu.cn

致谢: 本试验洛川的干湿沉降样品由洛川气象局工作人员采集, 在此表示感谢。

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40675006)

Received date: 2007-10-04; **Accepted date:** 2008-04-01

Biography: WANG Zhi-Hui, Master candidate, mainly engaged in atmospheric N and its biological validity. E-mail: wang_zhi_hui_1983@qq.com

2006 was 507.8 mm and the total nitrogen was 20.6 kg/(hm²·a) in which wet deposition account for 93% with the amount of 19.1 kg/(hm²·a). The remaining parts of the total nitrogen came from the dry deposition with the amount of 1.5 kg/(hm²·a). Nitrate rate was 7.3 kg/(hm²·a), accounting for 36% of total nitrogen. The rainfall in Luochuan from June 2006 to May 2007 was 579.5 mm and the total nitrogen deposition flux was 12.7 kg/(hm²·a). Wet deposition of N reached at 11.4 kg/(hm²·a) which accounted for 90% of total nitrogen. On the contrast, the dry deposition was 1.2 kg/(hm²·a), accounting for 10%. 69% of total N deposition fluxes was nitrate with the amount of 8.68 kg/(hm²·a). The differences of N deposition flux and nitrogen forms largely reflect the N resource was come from the agricultural production by the human activity in the regions of Yangling and Luochuan.

Key Words: nitrogen deposition; dry deposition; wet deposition; Shaanxi Province; atmospheric deposition

大气 N 沉降包括湿沉降(降雨和降雪)和干沉降。沉降中的 N 主要有 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和有机氮 3 种形态^[1]。空气中 NO₃⁻-N 主要来自石油和生物体的燃烧及雷击过程^[2],且迁移距离很大,可达几千公里以上^[3], NH₄⁺-N 主要来自土壤、肥料和家畜粪便中 NH₃ 的挥发^[4],NH₃ 在空气中迁移距离较小(<100 km)^[5]。近年来,随着工业化程度不断提高,矿物燃料大量使用,排放到大气中的 NO_x 不断增加导致大气 N 湿沉降的强度、影响范围持续增加^[6]。有研究表明,中北美、西欧和亚洲的中国、印度已经成为全球 N 沉降的三大集中分布区^[7]。据估计,全球每年沉降到陆地生态系统的活性 N 达 43.47 T g^[8]。湿沉降向土壤输入的确态氮和铵态氮是补偿农田生态系统 N 素损失的重要途径之一^[9]。自 20 世纪 50 年代以来国外就开展了 N 沉降的相关研究。美国国家大气沉降监测网络(National Atmospheric Deposition Program/National Trends Network, NADP/NTN)于 1978 年开始监测每周降水的化学组成,其监测点已达 200 多个^[10]。欧洲监测和评价项目(European Monitoring and Evaluation Programme, EMEP)建立于 20 世纪 70 年代末,其中包括湿沉降氮含量及其沉降量的监测^[11]。West 总结了荒漠地区的 N 年湿沉降量大约为 2.9~6.1 kg/hm²。而国内该领域的研究始于 70 年代末^[12],李玉中^[13]等对吉林省羊草草原干湿沉降 N 输入量进行了研究,得出该地无机 N 的年际沉降量约为 11.4 kg/hm²。张修峰^[14]对上海地区大气 N 湿沉降进行了研究,得出上海地区大气 N 湿沉降年均输入量为 58.1 kg/hm²,相当于 124.5 kg/hm² 尿素。张颖等^[15]对华北平原大气 N 素沉降的时空变异进行了研究,得出北京大气 N 素沉降为 32.5 kg/(hm²·a)。陕西省位于东部湿润与西部干旱的交界处,水土流失严重,沙尘暴经常发生,生态环境较为脆弱,所以研究大气 N 沉降及其对生态系统的影响显得尤为重要。陕西地区 1990~1994 年李世清等对关中地区大气湿沉降输入农田生态系统的 N 素进行了研究,此外再无报道。本试验在关中地区和陕西中北部分别设杨凌和洛川两个采样点,采集两地的降尘和降水样品。通过分析,确定不同沉降方式对 N 输入的贡献、降水降尘中不同形态的 N 含量、年内随时间的动态变化,研究不同地区的人类活动对 N 沉降的影响,氮沉降对农业生态系统的影响及对施肥的指导意义,给研究黄土区 N 沉降对其他生态系统的影响提供数据支持。

1 研究地点与研究方法

1.1 研究地点

杨凌区位于陕西关中平原腹地,海拔 520 m 左右,年均降水量 632 mm,分布不均,主要集中在 7、8、9 三个月,冬春易旱,年均气温 12.9℃,年蒸发量 1400 mm,属半湿润易旱地区。洛川县位于陕西省延安市南部,属渭北黄土高原沟壑区,温带半湿润大陆性季风气候,海拔 1072 m;平均气温 9.2℃,年降水量 622 mm,无霜期 167 d,是黄土高原面积最大、土层最厚的塬区。

杨凌采样点位于国家黄土肥力与肥料效益监测基地内,洛川采样点位于洛川县气象站内。

1.2 样品采集与分析

大气干湿沉降样品采集设备为武汉天虹智能仪表厂生产的 APS-2A 型降水降尘自动采样器,该仪器用微

电脑自动控制,运行可靠,能保证所采水样的真实性。当有降雨时该仪器自动收集雨水并关闭降尘的收集,降水完成 10 min 后自动关闭雨水的收集并打开降尘的收集,对降水的灵敏度为 0.2 mm/h 雨量,湿沉降收集桶直径为 300 mm,降尘收集桶直径为 150 mm。

试验从 2005 年 9 月和 2006 年 6 月开始分别对杨凌和洛川两地设点采样。降水的采集为每次发生降水的次日 8:00~9:00,采集时将雨水摇匀,测量总体积后取 50 mL 样品。降尘收集时在桶内加入 70 ml 的乙二醇和 100 ml 水的混合液,用来保证桶内湿润,避免再次起尘,抑制细菌繁殖。于每月第一天早 8:00 收集降尘,为上个月的降尘量。降尘采集时,用蒸馏水多次冲洗沉降桶,将样品与洗液一并倒入收集容器中,并浓缩定容至 50 ml。降尘降水样品都于 4℃ 保存待测。用连续流动分析仪测定样品中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量,将一月中每次降雨的 N 沉降量相加得本月 N 湿沉降量。总 N 沉降量为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 沉降量的加和。

需要指出的是,通过重力沉降,与植物、建筑物或地面相碰撞而被捕获得过程,统称为干沉降。重力沉降仅对直径大于 10 μm 的颗粒是有效的。本试验条件下所收集的降尘的粒径一般大于 30 μm 。

2 结果与讨论

2.1 杨凌地区降雨及 N 沉降通量

杨凌地区 2006 年的降雨量及 N 沉降通量见表 1。杨凌地区 2006 年总降雨量为 507.8 mm,总 N 沉降通量为 20.6 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其中 N 湿沉降通量为 19.1 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,占 93%,降尘输入 N 通量为 1.50 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,占 7%。而江西鹰潭^[16]大气沉降向林地输入的 N 为 82.8 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,干沉降占到了 67%。九龙江流域^[17]大气 N 干沉降总量为 3.4~7.6 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。Poor 等^[18]对美国佛罗里达州 Tampa 湾河口地区干湿沉降的研究表明,该区沉降 N 通量平均为 $7.3 \pm 1.3 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其中湿沉降的贡献率为 56%,干沉降贡献率为 44%。Woodmansee 测定了北美西部从半干旱到半湿润地区 7 个地点干湿沉降 N 输入量,湿沉降 N 输入量变动范围在 1.5~7.5 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 之间,干沉降在 0.5~2.5 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。相比之下,杨凌地区通过降尘输入的 N 明显低于上述地区。这和西北地区干燥的空气有一定关系,江西鹰潭和美国 Tampa 湾河口地区都属于较湿润地区,空气中水汽的含量可能直接影响了气溶胶对空气中游离的 NH_3 、 NO_2 、 HNO_3 的吸附、聚集增大和沉降。而西北地区虽然受沙尘天气的影响,空气中气溶胶粒子含量丰富,但由于空气干燥,能够吸附空气中游离的 NH_3 、 NO_2 、 HNO_3 的气溶胶颗粒难以聚集增大而最后形成沉降,因此 N 通过降尘而收集的量较少,多数 NH_3 、 NO_2 、 HNO_3 随空气流向东部或者在降雨时随雨沉降。

表 1 杨凌和洛川两地大气 N 沉降通量

Table 1 Nitrogen deposition flux in Yangling and Luochuan County

地点 Sites	降雨量 Rainfall (mm)	通量 Nitrogen deposition flux ($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)				总 N 沉降通量 ($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) Total nitrogen deposition
		降尘输入 N Dry deposition	N 湿沉降 Wet deposition	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	
杨凌 Yangling	507.8	1.5	19.1	12.9	7.3	20.6
洛川 Luochuan	579.5	1.2	11.4	4.0	8.7	12.7

2.2 杨凌地区 N 沉降中各形态 N 素的比例

杨凌地区 2006 年的 N 沉降中各形态 N 素含量见表 1。2006 年总 N 沉降通量中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 7.3 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,占 36%; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 12.9 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,占 64%。

2.3 洛川地区降雨量及 N 沉降通量

洛川地区 2006 年 6 月至 2007 年 5 月降雨量及大气 N 沉降总量见表 1。监测时间内洛川地区总降雨量为 579.5 mm,总 N 沉降通量为 12.7 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其中降尘输入 N 总量为 1.2 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,占 10%;N 湿沉降总量为 11.4 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,占 90%。总 N 中, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 沉降通量为 8.7 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,占 69%; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 沉降通量为 4.0 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,占 31%。

湖南韶山蔡家塘^[19]2001~2003年N的输入通量为24~28 kg/(hm²·a),主要为NH₄⁺-N,占62%~67%;江西鹰潭地区^[16]林地总N沉降为82.8 kg/(hm²·a),其中NH₄⁺-N贡献65%,NO₃⁻-N贡献26%,有机氮贡献9%。江苏省常熟生态站^[1]湿沉降TN年均输入量为27.0 kg/hm²,湿沉降中以NH₄⁺-N为主,占47.6%,其次是NO₃⁻-N,占35.1%,有机氮占17.4%。李世清等^[20]1991~1994年对杨凌本地,及乾县和澄城三地的湿沉降研究得出,三地湿沉降年输入农田系统的N素为6.3~26.6 kg/hm²,其中以铵态氮为主,占66.3%~88.5%。比较两地区与其它地区不同形态N的贡献率,杨凌点NH₄⁺-N贡献较多,这与各地研究结果基本相同,洛川点则以NO₃⁻-N为主。比较发现洛川点NO₃⁻-N的沉降量并不比其他各地少,原因是该区NH₄⁺-N含量相对较少,说明该区农业相对不发达,施肥量少导致N素以NH₃的形式挥发较少,或者由于降雨较少,空气中的NH₃容易被风带至其它地方沉降。杨凌地区和关中地区12a前相比,NO₃⁻-N所占的比率略有上升。12a时间,陕西经济有了长足的发展,上述现象是应该存在的。试验唯显不足的是没有对有机氮进行测定,以至于无法进行全部形态N的比较。

2.4 杨凌地区N湿沉降月动态变化

杨凌地区2006年N湿沉降月动态变化见图1。杨凌地区降雨和大气N湿沉降主要集中在6~9月份,这个时期的降雨量为351 mm,占全年降雨量的69%,6~9月份N沉降总量为15.3 kg/hm²,占全年N沉降的80%。随着降雨量的增加,总N和NH₄⁺-N,NO₃⁻-N的沉降通量都明显增加。2006年1~2月无降雨或降雨很少,N湿沉降也很少,3~5月份有降雨但量偏少,N湿沉降通量为0.4~0.9 kg/hm²,进入夏季后降雨增多,N湿沉降量也成倍增加,为1.8~7.7 kg/hm²,且NH₄⁺-N沉降量的增加要比NO₃⁻-N等增加更明显,9月以后随降雨量的减少N湿沉降量也迅速减少,但秋初9月份还有相当量的沉降。N的湿沉降量主要取决于每一时间段的施肥量和降雨量的多少,当施肥量大,存在一定的降雨,这段时间内N的湿沉降量就较大^[21]。6月份正是当地群众收麦后给早秋作物追施N肥时期,7、8、9月三月份是当地群众给晚秋作物(糜、谷)追施N肥时期,10月份又是小麦播种的时期。这5个月,施肥量较大,温度较高^[20],所以N沉降量尤其是NH₄⁺-N的沉降量最大,这能说明上述的月动态变化。总体来说这个时期氮素的大量沉降可以返还一定的氮素给土壤,利于农田氮素的保持。但这部分氮的有效性也可能取决于这个时期降雨的分布,在当季作物收获前或在下一季作物播种前后降雨较多,都有利于大气氮沉降进入土壤。

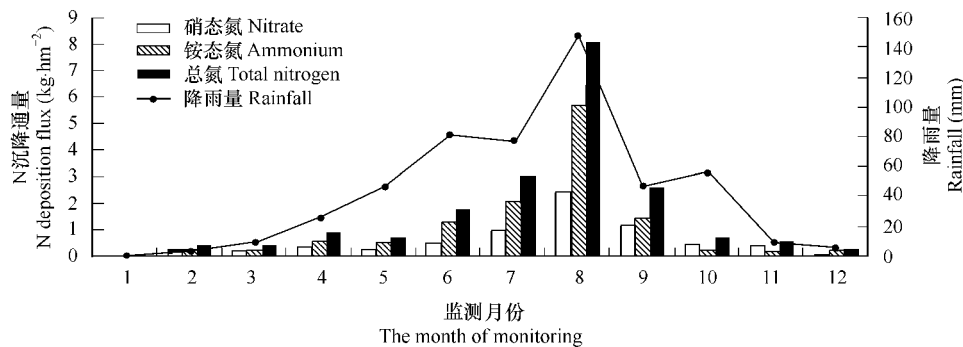


图1 杨凌地区2006年N湿沉降月动态变化

Fig. 1 Wet nitrogen deposition in Yangling in 2006

比较杨凌地区1994^[20]年与2006年N沉降(表2)发现,2006年的降雨量比1994年多128.3 mm,且1994年的降雨和N湿沉降分布较均匀(图2),但也出现了3个峰值,分别是4月、6~7月和10月份,而2006年降雨主要集中在6~9月份(图1)。总N沉降量也有所增加,但相比降雨量的增加要小,为2.67 kg/(hm²·a),且对增长部分贡献最大的是NO₃⁻-N,增长2.74 kg/(hm²·a),铵态氮反而下降了0.07 kg/(hm²·a)。

2.5 洛川地区N湿沉降月动态变化

洛川地区监测时期内N湿沉降月动态变化见图3。洛川地区N湿沉降通量随降雨量的变化非常明显,且

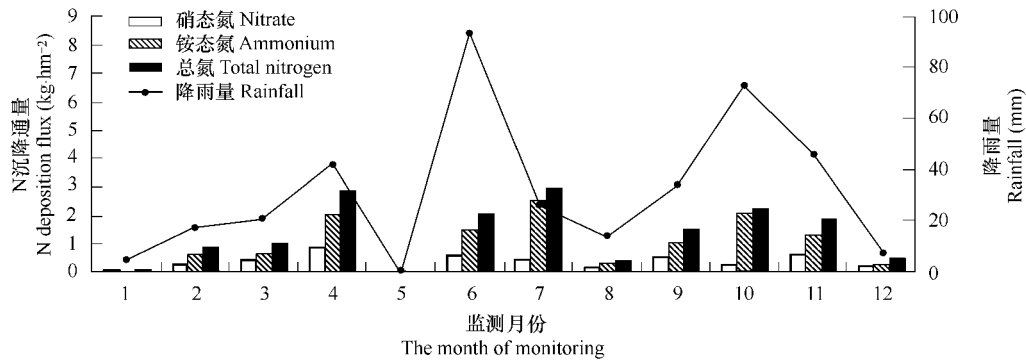


图2 杨凌地区 1994 年 N 湿沉降月动态变化^[20]

Fig. 2 Wet nitrogen deposition in Yangling in 1994

变化趋势与杨凌地区基本相似,降雨集中在 6~9 月份,这个时期的降雨量为 517 mm 占到全年降水的 89%,这个时期 N 湿沉降量为 9.1 kg/hm²,占到监测时期氮湿沉降的 72%。N 湿沉降量峰值出现在 7 月份,为 5.1 kg/hm²。9 月份以后随着降雨的减少,N 湿沉降量也明显减少。这种情形一直持续到来年 5 月份,氮湿沉降量都很少。其变化规律和杨凌地区相似。

表 2 杨凌地区 1994^[20] 年与 2006 年降雨量及 N 湿沉降比较

Table 2 The comparison of wet nitrogen deposition and rainfall in 1994 and 2006, Yangling

年份 Year	降雨量 Rainfall (mm)	NO ₃ ⁻ -N (kg/(hm ² ·a))	NH ₄ ⁺ -N (kg/(hm ² ·a))	T-N kg/(hm ² ·a)
1994 ^[20]	379.5	4.2	12.3	16.5
2006	507.8	6.9	12.2	19.1

1994 年数据摘自李世清,李生秀发表的论文:陕西关中湿沉降输入农田生态系统中的氮素 The date of 1994 was quoted from Nitrogen added to ecosystems by wet deposition in Guanzhong Area in Shaanxi of Li Shiqing, Li Shengxiu

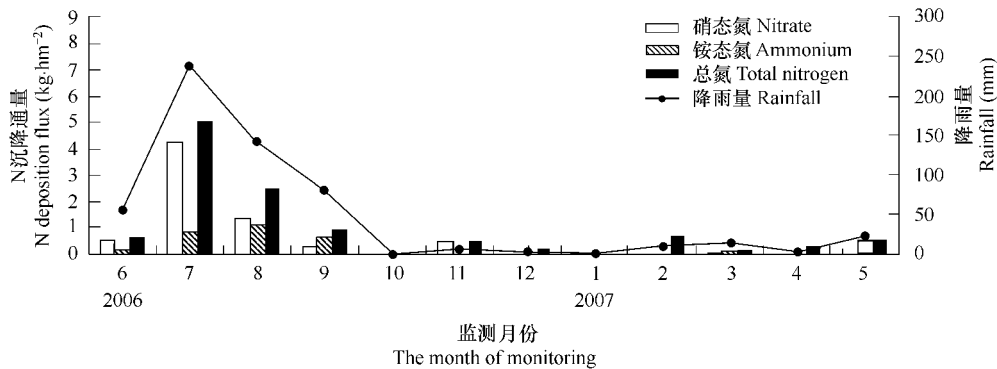


图3 洛川地区 2006 年 6 月至 2007 年 5 月 N 湿沉降月动态变化

Fig. 3 Wet nitrogen deposition in Luochuan County

2.6 杨凌地区 N 降尘月动态变化

杨凌地区 2006 年降尘输入 N 月动态变化见图 4。降尘在总 N 沉降中的比例比较低,1~3 月份由于干旱少雨且有数次的沙尘天气,致使降尘中氮量比其它月份要多,4~5 月份有了一定的降水但仍较少,不过对大气中的氮已经有了明显的淋洗。降雨主要集中在 6~9 月份,这段时间内降尘输入 N 明显减少,保持了 0.01~0.03 kg/hm² 的较低水平,10 月份以后又迅速回升至 0.04~0.09 kg/hm²。下图所示,上半年明显比下半年降尘输入 N 多,除上述原因外,也可能是前后采样方法不同所致(前半年采用干法收集,后半年加入 70 ml 乙二醇和 100 mL 蒸馏水混合的湿法收集,前者无法抑制微生物繁殖)。降尘中各型态 N 含量差异非常明显,硝

态氮所占的比率较大,除 3 月和 12 月份反常外(分别占 41% 和 39%),其它月份在 60% ~ 80% 之间,平均 70%。铵态氮 3 月和 12 月份分别占 59% 和 61%,其它月份在 20% ~ 40% 之间,平均为 30%。陈能汪等^[17]对九龙江流域 N 的干沉降进行了研究,发现干沉降中 N 的 3 种主要形态铵 N、硝 N 与有机氮分别占总沉降量的 31%、24% 和 45%。

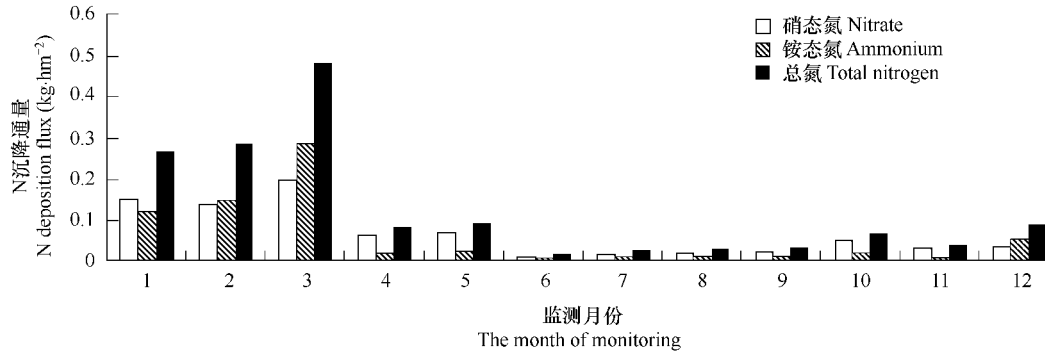


图 4 杨凌地区 2006 年 N 降尘月动态变化

Fig. 4 Dry nitrogen deposition in Yangling in 2006

2.7 洛川地区 N 降尘月动态变化

洛川地区监测时期内降尘输入 N 月动态变化见图 5。图 5 所示 N 降尘总体变化规律不太明显,但发现 2006 年 6 ~ 11 月中以 NO_3^- -N 沉降为主, NH_4^+ -N 保持了较低水平,说明在这期间的空气质量较好,来自农业的氮素少;12 月到 2007 年 5 月 NO_3^- -N 沉降骤然下降,几乎接近至零沉降,而 NH_4^+ -N 的沉降量却相当可观,可能的原因是在这期间风大,沙尘天气多所致。目前,大气 N 沉降的研究主要集中于欧美地区^[22],我国在这方面仅有少量分散的观测,且主要集中在雨水 N 含量的测定^[23],大气 N 干沉降报道较少,少量也只涉及 N 干沉降总量,并未有详尽报道。本试验只分析了杨凌地区和洛川地区一年的降尘,但两个地区都没有表现出明显的规律性,这可能是观测时间短的缘故,亦或是受影响的因素较多,使降尘输入 N 的过程较复杂所致,有待进一步监测研究。

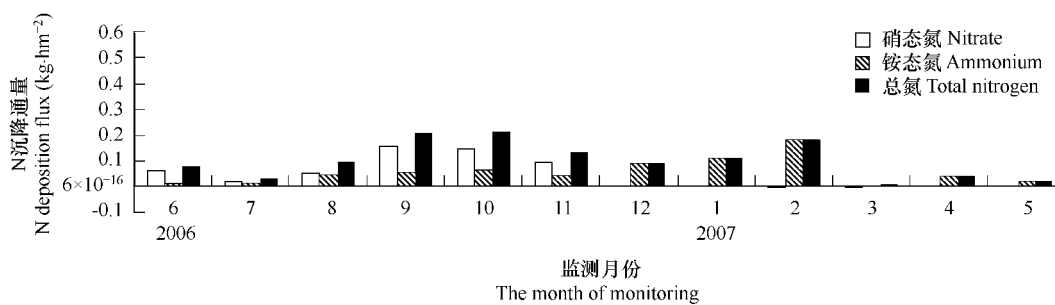


图 5 洛川地区 N 降尘月动态变化

Fig. 5 Dry nitrogen deposition in Luochuan County

3 小结

杨凌地区 2006 年总降雨量为 507.8 mm,总 N 沉降通量为 $20.6 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,相当于 51 kg 尿素。洛川地区 2006 年 6 月 ~ 2007 年 5 月总降雨量为 579.5 mm,总氮沉降通量为 $12.8 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,相当于 32 kg 尿素。这部分输入到农田的 N 应该得到足够的重视。两地都以湿沉降为主,湿沉降月动态变化表现为和降雨同步出现在 6 ~ 9 月份,降尘输入 N 规律不太明显。 NO_3^- -N 都有相当量的沉降, NH_4^+ -N 沉降杨凌地区要明显高于洛川地区说明杨凌地区农业施肥量和 NH_3 的挥发量要高于洛川。两地氮沉降总量与东部地区相比较少,这可能是由于西部地区干旱少雨、农业欠发达所致。

References:

- [1] Wang X Z, Zhou 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.
- [2] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric Chemistry and Physics*. New York: Wiley, 1998. 1326.
- [3] Aneja V P, Murray G M, Southerland J. Atmospheric nitrogen compounds: Emissions, transport, transformation, deposition and assessment. *Environ Man*, 1998, (4): 22—25.
- [4] Comeau S E, Jickells T D, Cape J N, *et al.* Organic nitrogen deposition on land and coastal environments: A review of methods and data. *Atmos Environ*. 2003, 37: 2173—2191.
- [5] Asmna W A H, Van Jaarsveld J A. A variable resolution transport model applied for NHX in Europe. *Atmos Environ*, 1992, 26(A): 445—464.
- [6] Galloway J N. Acid deposition perspectives in time and space. *Water Air Soil Pollut*, 1995, 85: 15—24.
- [7] 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.
- [8] Holland E A, Dentene F J R, Braswell B H, *et al.* Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets. *Biogeochemistry*, 1999, 46: 7—43.
- [9] Haynes R J. Origin. Distribution and cycling of nitrogen in terrestrial ecosystems. In: Hanynnes R J ed. *Mineral nitrogen in plant-soil system*. Acatem. Academic Press Inc, USA. 1986. 1—51.
- [10] Lamb D, Bowersox V. The national atmospheric deposition program: an overview. *Atmospheric Environment*, 2000, 34: 1661—1663.
- [11] Erisman J W, Hensen A, Mosquera J, *et al.* deposition monitoring networks: What monitoring is required to give reasonable estimates of ammonia/ammonium? *Environmental Pollution*, 2005, 135:419—431.
- [12] Zhang J L, Yu Z G, Zhang J. Wet and dry deposition and its influences on marine ecosystem. *Marine Environmental Science*, 1999. 18(1): 70—76.
- [13] Li Y Z, Zhu T C, Jiang S C. Nitrogen Deposition in *Leymus chinensis* Grassland of Songnen Plain. *Grassland of China*, 2000, 2: 24—27.
- [14] 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.
- [15] Zhang Y, Liu X J, Zhang F S, Ju X T, Zou G Y, Hu K L. Spatial and temporal variation of atmospheric nitrogen deposition in North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1633—1639.
- [16] Fan J L, Hu Z Y, Zhuang S Y, Zhou L, Zhou J, Wang T J, Liu C Y. Observation of atmospheric nitrogen deposition into forestland. *China Environmental Science*, 2007, 27(1): 7—9.
- [17] Chen N W, Hong H S, Xiao J, Zhang L P, Wang J P. Dry deposition of atmospheric nitrogen to Jiulong River watershed in southeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2602—2607.
- [18] Poor N, Pribble R, Greening H. Direct wet and dry deposition of ammonia, nitric acid, ammonium and nitrate to the Tam-pa Bay Estuary, FL, USA. *Atmospheric Environment*, 2001(35): 3947—3955.
- [19] Xiang R J, Chai Liyuan, Zhang G, Zhang X L, Zeng M. Input-output dynamics of nitrogen and sulfur in Caijiatang forested catchment in Human Province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(8): 1372—1378.
- [20] Li S Q, *et al.* Nitrogen Added to Ecosystems by Wet Deposition in Guanzhong Area in Shaanxi. *Agro-environmental Protection*, 1999, 18(2): 97—101.
- [21] Su C G, *et al.* Ammonia volatilization los 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.
- [22] Wright R F, Rasmussen L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects. *Forest Ecology and Management*, 1998, 10(11-3): 1—7.
- [23] 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, 2(112): 2002—2012.

参考文献:

- [1] 王小治, 朱建国, 高人, 宝川靖和. 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.
- [12] 张金良, 于志刚, 张经. 大气的干湿沉降及其对海洋生态系统的影响. *海洋环境科学* 1999, 18(1): 70—76.
- [13] 李玉中, 祝廷成, 姜世成. 羊草草地生态系统干湿沉降氮输入量的动态变化. *中国草地*, 2000, 2: 24—27.
- [14] 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.
- [15] 张颖, 刘学军, 张福锁, 巨海棠, 邹国元, 胡克林. 华北平原大气氮素沉降的时空变异. *生态学报*, 2006, 26(6): 1633—1639.
- [16] 樊建凌, 胡正义, 庄舜尧, 周静, 王体键, 刘翠英. 林地大气氮沉降的观测研究. *中国环境科学*, 2007, 27(1): 7—9.
- [17] 陈能汪, 洪华生, 肖健, 张璐平, 王吉苹. 九龙江流域大气氮干沉降. *生态学报*, 2006, 26(8): 2062—2067.
- [19] 向仁军, 柴立元, 张恭, 张西林, 曾梅. 湖南蔡家塘森林小流域氮和硫的输入输出特征. *环境科学学报*, 2006, 26(8): 1372—1378.
- [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.
- [21] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 沈其荣. 稻田氮肥的氮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.
- [23] 周国逸, 闰俊华. 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, 2(112): 2002—2012.