

陕北典型农区大气干湿氮沉降季节变化*

魏 样¹ 同延安^{1**} 段 敏¹ 乔 丽² 田红卫³ 雷小鹰⁴ 马文娟¹

(¹ 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100 ;² 陕西省气象局, 西安 710014 ;³ 榆阳区气象局, 陕西榆林 719000 ;
⁴ 洛川县气象局, 陕西延安 727400)

摘 要 为了研究大气通过干湿沉降输入到农田土壤的氮通量, 2007 年 6 月至 2008 年 5 月在陕西榆林和洛川两地进行了为期一年的观测试验. 结果表明: 榆林和洛川地区大气总无机氮沉降通量分别为 22.17 和 16.95 kg · hm⁻² · a⁻¹, 湿沉降分别占 95.1% 和 90.4%, 干沉降分别占 4.9% 和 9.6%, 两个地区氮沉降均以湿沉降为主. 总无机氮沉降中, NO₃⁻-N 分别为 12.22 和 9.24 kg · hm⁻² · a⁻¹, 分别占总无机氮沉降量的 55.1% 和 54.5%. 由于污染水平、气象条件、下垫面特性等的差异, 总无机氮沉降中, 湿沉降量和 NO₃⁻-N 沉降量均是榆林地区大于洛川地区.

关键词 陕北 大气氮沉降 湿沉降 干沉降

文章编号 1001-9332(2010)01-0255-05 **中图分类号** Q143 **文献标识码** A

Atmospheric dry and wet nitrogen deposition in typical agricultural areas of North Shaanxi.
WEI Yang¹, TONG Yan-an¹, DUAN Min¹, QIAO Li², TIAN Hong-wei³, LEI Xiao-ying⁴, MA Wen-juan¹ (¹College of Resources and Environmental Sciences, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Shaanxi Provincial Meteorological Bureau, Xi'an 710014, China; ³Yuyang Meteorological Bureau, Yulin 719000, Shaanxi, China; ⁴Luochuan Meteorological Bureau, Yan'an 727400, Shaanxi, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(1): 255-259.

Abstract : To investigate the farmland soil nitrogen input from atmospheric dry and wet deposition, a 1-year observation was conducted in the Yulin and Luochuan areas of North Shaanxi Province from June 2007 to May 2008. The total inorganic nitrogen (TIN) deposition in Yulin and Luochuan was 22.17 and 16.95 kg · hm⁻² · a⁻¹, among which, wet deposition accounted for 95.1% and 90.4%, while dry deposition accounted for 4.9% and 9.6%, respectively, illustrating that the nitrogen deposition in both Yulin and Luochuan was mainly come from wet deposition. In the TIN deposition, the amount of nitrate in Yulin and Luochuan was 12.22 and 9.24 kg · hm⁻² · a⁻¹, accounting for 55.1% and 54.5%, respectively. The amount of wet deposition and the percentage of nitrate in TIN deposition were higher in Yulin than in Luochuan, because of the differences in pollution level, weather condition, and underlying surface characteristics.

Key words : North Shaanxi; atmospheric nitrogen deposition; wet deposition; dry deposition.

大气氮素沉降是含氮化合物从大气中移出并被运至各种景观表面的过程, 包括干沉降和湿沉降^[1]. 20 世纪中叶以来, 随着矿物燃料的燃烧、化学氮肥的生产和使用以及畜牧业的迅猛发展等, 人类活动向大气中排放的活性氮化合物激增, 大气氮素沉降也呈迅速增加的趋势. 据估计, 全球每年沉降到陆地生态系统的活性氮达 4.35 × 10¹⁰ kg^[2]. Skeffin-

gton^[3]估计, 1986 年通过大气沉降输入到欧洲中部和低海拔国家的氮达 18 ~ 22 kg · hm⁻²; 西班牙和地中海东部国家为 5 ~ 6 kg · hm⁻². Salahi 等^[4]监测 Tehran 地区的湿沉降结果表明, NO₃⁻-N 的量超过 30 kg · hm⁻² · a⁻¹. 瑞士的氮沉降在 22 ~ 51 kg · hm⁻² · a⁻¹^[5]. 在我国, 广东鼎湖山自然保护区的降水氮沉降量达 35.57 ~ 38.4 kg · hm⁻² · a⁻¹^[6-7]. 庄亚辉等^[8]研究表明, 海河流域 1990 年的氮沉降为 42.6 kg · hm⁻² · a⁻¹. 张修峰^[9]对上海地区大气氮

* 国家自然科学基金项目(40675006)和教育部博士点基金项目资助.
* * 通讯作者. E-mail : tongyanan@nwsuaf.edu.cn
2009-03-25 收稿, 2009-11-01 接受.

湿沉降进行研究的结果表明,上海地区大气氮湿沉降年均输入量为 $58.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 对于农作物而言,获得氮素的主要途径有施肥、灌溉水、生物固氮、大气沉降等. 因此研究大气氮沉降的动态变化规律对农业生产实践中合理调控氮的供应具有重要的指导意义和应用价值. 陕西省位于我国东部湿润区与西部干旱区的交界处,水土流失严重,沙尘暴经常发生,生态环境较为脆弱^[10],尤其在陕西北部更为严重. 所以研究陕北地区大气氮沉降及其对生态系统的影响显得尤为重要. 但除了 1990—1994 年李世清等^[10]对陕西关中地区大气湿沉降输入农田生态系统的氮素进行了研究之外,之后再无其他相关报道. 为此,本试验选择陕西榆林和洛川作为观测地点,以大气氮干湿沉降为研究对象,对大气氮素通量的动态变化规律进行了研究,以期为该地区农田氮素资源综合管理提供一定的参考依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区自然概况

研究地点为陕西省榆林市($38^{\circ}10'48''\text{ N}$, $109^{\circ}28'12''\text{ E}$)和洛川县($35^{\circ}45'36''\text{ N}$, $109^{\circ}25'12''\text{ E}$)两地. 榆林地区平均海拔 1300 m,年均气温 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降雨量 400 mm,无霜期 150 d,属暖温带和温带半干旱大陆性季风气候;洛川地区平均海拔 1072 m,年均气温 $9.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降雨量 622 mm,无霜期 167 d,属温带半湿润大陆性季风气候. 榆林市位于陕西省最北部,地处陕甘宁蒙晋五省(区)接壤地带,北部为风沙草滩区,南部为黄土丘陵沟壑区. 洛川县位于陕西省延安市南部,属渭北黄土高原沟壑区,是黄土高原面积最大、土层最厚的塬区. 榆林观测点位于榆阳区气象局,洛川观测点位于洛川县气象局,观测时段为 2007 年 6 月至 2008 年 5 月.

1.2 样品采集与分析

利用武汉天虹智能仪表厂生产的 APS-2A 型降水降尘自动采样器进行干湿沉降样品的采集. 该仪器为微电脑自动控制,可对降水降尘自动采集,其对

降水的灵敏度为 $0.2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨量,湿沉降收集桶直径为 300 mm,干沉降收集桶直径为 150 mm.

湿沉降样品于每次发生降水的次日 8 :00—9 :00 收集,采集时将雨水摇匀,测量总体积后取 50 ml 样品. 干沉降收集时在收集桶内加入 70 ml 乙二醇和 100 ml 蒸馏水的混合液,用来保证桶内湿润,避免再次起尘和抑制细菌繁殖. 干沉降样品于每月第 1 天 8 :00 收集,为上个月的干沉降. 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,并蒸发浓缩至 50 ml. 干湿沉降样品均于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存待测. 采用 AA3 型连续流动分析仪测定样品中 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 含量,总无机氮沉降量即为 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 沉降量之和.

1.3 数据处理

采用 Excel 2003 软件处理数据和制图.

2 结果与讨论

2.1 榆林和洛川地区氮沉降

2.1.1 干湿沉降比例 榆林和洛川地区氮沉降通量见表 1. 在 2007 年 6 月至 2008 年 5 月一年的观测期内,榆林和洛川地区总无机氮沉降通量分别为 22.17 和 $16.95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中氮湿沉降分别占总量的 95.1% 和 90.4%,氮干沉降分别占总量的 4.9% 和 9.6%.

王志辉等^[11]研究表明,杨凌 2006 年的氮湿沉降通量为 $19.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,干沉降通量为 $1.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;洛川氮湿沉降通量为 $11.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,干沉降通量为 $1.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. 在江西鹰潭农田生态系统中,大气总无机氮沉降通量为 $31.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中氮湿沉降为 $26.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,占总沉降量的 84.1%;氮干沉降为 $5.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,占总沉降量的 15.9%^[12]. 而 Goulding^[13]在英国东南部的 4 个地点观测到的氮总沉降量为 $35\sim40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中干沉降为 $22\sim26\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,湿沉降为 $9\sim12\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. 相比之下,英国东南部大气氮沉降以干沉降为

表 1 榆林和洛川两地大气氮沉降通量
Tab.1 Nitrogen deposition flux in Yulin and Luochuan

地点 Site	降雨量 Rainfall (mm)	氮沉降通量 Nitrogen deposition flux ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)				总无机氮沉降 Total inorganic nitrogen deposition
		湿沉降 Wet deposition	干沉降 Dry deposition	$\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	$\text{NH}_4^{+}\text{-N}$	
榆林 Yulin	379	21.08	1.09	12.22	9.95	22.17
洛川 Luochuan	545	15.33	1.62	9.24	7.71	16.95

主,而本研究中榆林和洛川两地湿沉降占大气总无机氮沉降的绝大部分。湿沉降通量与降水密切相关,而干沉降通量主要与下垫面类型、局地气象要素有关,因此污染水平、气象条件、下垫面特性等的差异可能是造成两地氮沉降差异的主要原因。

从表 1 可以看出,观测期内榆林地区降雨量为 379 mm,氮湿沉降通量为 $21.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,洛川地区降雨量为 545 mm,氮湿沉降通量为 $15.33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。黄土旱塬地区乾县试验点的部分试验结果表明,降雨年输入氮量为 $14.3 \sim 29.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [14]。陕西关中地区各试验点降雨年输入氮量为 $6.3 \sim 26.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [10]。北京地区大气氮湿沉降量平均为 $32.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,山东惠民和河北曲周两地为 $23.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [15]。大连地区氮湿沉降量为 $22.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [16]。在江西分宜县大冈山林场的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林和马尾松(*Pinus massoniana*)林中,降雨输入的氮分别为 60.6 和 $57.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [17]。相比而言,榆林和洛川地区随降雨输入的氮沉降量较小。张颖等 [15] 在华北平原的研究结果表明,氮素的沉降量与降雨量呈乘幂型正相关,所以各地降雨量的不同可能是导致这一现象产生的一个重要原因。

2.1.2 各形态氮素比例 榆林和洛川两地氮沉降中, NO_3^- -N 沉降量分别为 12.22 和 $9.24 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,分别占总量的 55.1% 和 54.5% ; NH_4^+ -N 沉降量分别为 9.95 和 $7.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,分别占总量的 44.9% 和 45.5% 。本试验结果与王志辉等 [10] 在洛川地区的研究结果(NO_3^- -N 占 69% , NH_4^+ -N 占 31%)基本一致,即总无机氮沉降中, NO_3^- -N 沉降量大于 NH_4^+ -N 沉降量。

华北平原在 2003—2004 年氮素沉降量平均为 $28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中 NH_4^+ -N 占 67% , NO_3^- -N 占 33% [15]。湖南韶山蔡家塘氮输入量为 $24 \sim 28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中 NH_4^+ -N 为主要部分,占总氮输入量的 $62\% \sim 67\%$ [18]。一般而言,大气氮沉降中 NH_4^+ -N 主要来自农业活动,如土壤、肥料和家畜粪便中 NH_4^+ -N 的挥发 [19],而 NO_3^- -N 主要来自工业污染等。榆林和洛川两地位于陕西省北部,与关中地区以及我国重要的商品粮基地—华北平原相比,农业活动不发达,农田土壤化肥的投入量相对较少,因此 NH_4^+ -N 损失小于其他各地,从而导致大气 NH_4^+ -N 沉降量较小。

2.2 榆林和洛川地区氮湿沉降月动态变化

榆林和洛川地区氮素湿沉降月动态变化见图 1,观测期内榆林地区氮素湿沉降受降雨量的影响显著,主要集中在降雨比较丰富的 6—10 月,这一时期的降雨量为 319 mm,对应的无机氮沉降量为 $18.04 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占整个观测期总无机氮沉降量的 85.6% 。月无机氮沉降量峰值出现在降雨最为丰富的 10 月,为 $7.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而在降雨量相对较少的 2007 年 11—12 月以及 2008 年 1—5 月,氮素沉降量明显下降。从图 1 还可以看出, NH_4^+ -N 沉降也主要集中在降雨丰富的 6—10 月,而每年的 6—10 月正是该地农田土壤施肥最多的时期,铵态氮肥的大量施用加上高温天气加速了 NH_4^+ -N 的挥发损失,继而随降雨沉降至农田生态系统。

洛川地区 2007 年 7、9 和 10 月 3 个月的降雨量较大,占整个观测期内总降雨量的 70% ,其无机氮沉降量也较大,为 $11.63 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占整个观测期内氮湿沉降量的 75.8% 。与榆林地区相似,洛川地区大气氮湿沉降量在 2007 年 7、9 和 10 月这 3 个月较大与这几个月降雨量有着密切的关系。在降雨最为丰富的 9 月,氮湿沉降量出现峰值,为 $5.88 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从图中还可以看出,2007 年 7 月和 9 月 NH_4^+ -N 沉降量较大,分别为 2.40 和 $2.04 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 1)。

2.3 榆林和洛川地区氮干沉降月动态变化

榆林和洛川地区氮干沉降月动态变化见图 2。在观测期内,榆林地区氮干沉降通量仅为 $1.09 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,在总无机氮沉降中占有的份额较小。各月份氮沉降总体变化规律不明显,但除 2007 年 9 月和 10 月外大气干沉降均以 NO_3^- -N 为主,相比而言, NH_4^+ -N 沉降量较小,说明这一时期来自农业活动的氮素较少。榆林市位于陕西省最北部,在黄土高原和毛乌素沙漠的交界处,由于地理原因该地区农业不发达,因此大气 NH_4^+ -N 沉降量较少;另外该地区蕴含丰富的矿产资源,尤其是煤炭、石油、天然气、岩盐等,对这些矿产资源的开发利用必然导致严重的工业污染问题,这也是榆林地区 NO_3^- -N 沉降量较大的主要原因。从图 2 还可以看出,氮干沉降量最大值以及 NO_3^- -N 最大沉降值均出现在 2008 年 4 月,分别为 0.28 和 $0.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

在观测期内,洛川地区由降尘带入的总无机氮沉降量为 $1.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中 NO_3^- -N 为 $1.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, NH_4^+ -N 为 $0.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。与榆林地区相比,洛川地区由降尘带入土壤中

的沉降氮无论是 NO_3^- -N 还是 NH_4^+ -N 均较大. 王志辉等^[10]在 2006 年的研究结果表明,洛川地区由降尘带入的总无机氮沉降量为 $1.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,与其相比,本研究结果稍大. 本试验中,洛川地

区在 2007 年 7—10 月的氮干沉降量较小,这一时期雨水较多,从而对干沉降氮产生了一定的冲刷作用,直至 11 月,随着降雨量的减少,干沉降氮出现了逐渐增大的趋势(图 2).

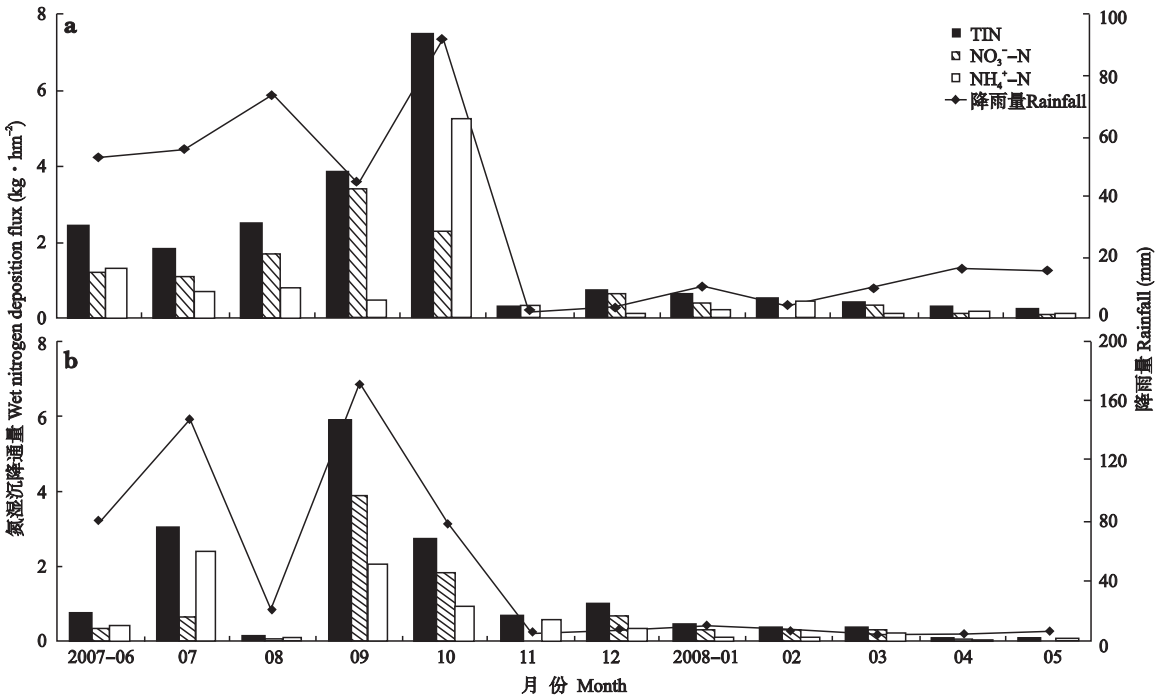


图 1 榆林(a)和洛川(b)地区氮湿沉降月动态变化
Fig.1 Monthly variations of wet nitrogen deposition in Yulin (a) and Luochuan (b).
TIN :Total inorganic nitrogen. 下同 The same below.

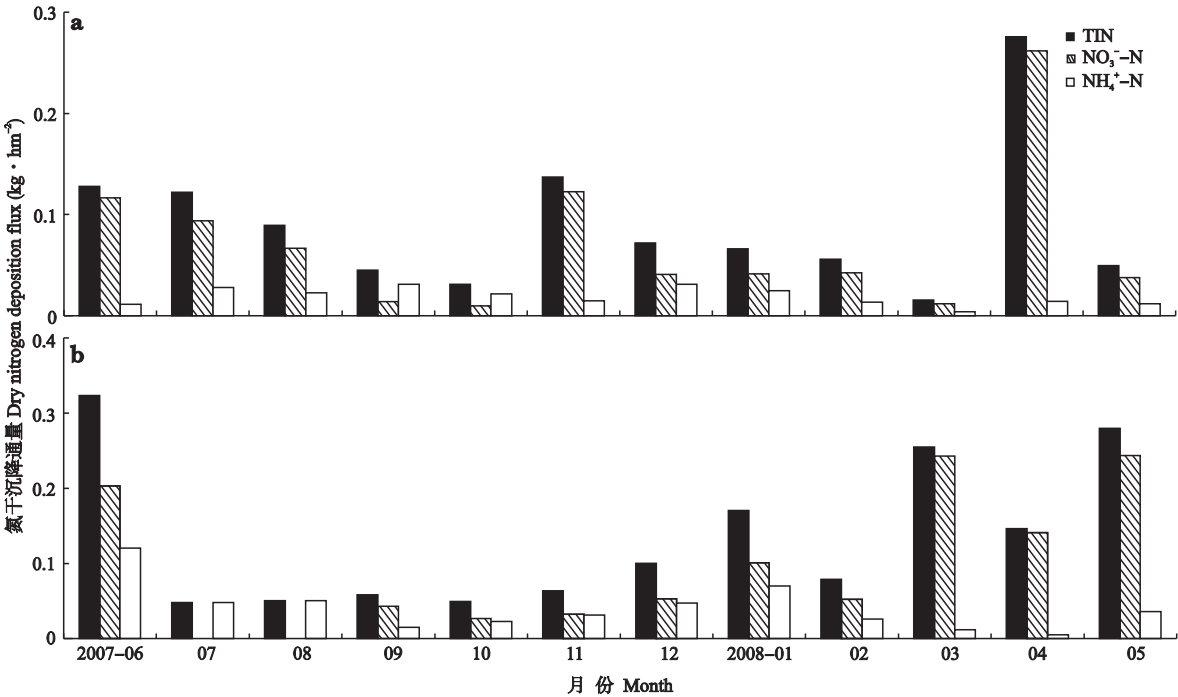


图 2 榆林(a)和洛川(b)地区氮干沉降月动态变化
Fig.2 Monthly variations of dry nitrogen deposition in Yulin (a) and Luochuan (b).

3 结 语

2007 年 6 月至 2008 年 5 月, 榆林和洛川地区氮沉降均以湿沉降为主, 分别占总无机氮沉降量的 95.1% 和 90.4%。氮湿沉降量与降雨量有着密切的关系, 在降雨比较丰富的月份, 氮湿沉降量较大。榆林地区氮干沉降规律不明显, 而洛川地区在降雨较多的月份, 氮干沉降量较小。榆林和洛川两地氮沉降中, NO_3^- -N 沉降量分别为 12.22 和 9.24 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 分别占总无机氮沉降量的 55.1% 和 54.5%; NH_4^+ -N 分别为 9.95 和 7.71 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 分别占总无机氮沉降量的 44.9% 和 45.5%。

在一年的观测期内, 榆林和洛川地区的总无机氮沉降量分别为 22.17 和 16.95 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。目前, 随着大气氮沉降量的不断增加, 大气氮沉降已经成为农田生态系统一项稳定的氮输入源, 起到补给氮供应和补偿氮损失的重要作用^[20]。因此有必要开展农田生态系统氮素平衡研究, 以确定大气沉降在氮素输入中的相对贡献, 对作物推荐施肥起到一定的指导作用。然而大气氮沉降除了无机氮外还包括一定量的有机氮, 因此, 今后将进行有机氮沉降方面的监测研究, 从而进一步准确定量大气氮沉降输入。

致谢 本试验榆林、洛川的干湿沉降样品分别由榆阳气象局和洛川气象局工作人员采集, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] Xiao H-L (肖辉林). Effect of atmospheric nitrogen deposition on forest soil acidification. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2001, **37**(4): 111–117 (in Chinese)
- [2] Holland EA, Dentener FJ, Braswell BH, et al. Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets. *Biogeochemistry*, 1999, **46**: 7–43
- [3] Skeffington RA. Accelerated nitrogen inputs – A new problem or a new perceptive? *Plant and Soil*, 1990, **128**: 1–11
- [4] Salahi A, Geranfar S, Korori SAA. Nitrogen deposition in the Greater Tehran Metropolitan Area. *The Scientific World*, 2001, **1**: 261–265
- [5] Fluckiger W, Braun S. Nitrogen deposition in Swiss forests and its possible relevance for leaf nutrient status, parasite attacks and soil acidification. *Environmental Pollution*, 1998, **102**: 69–76
- [6] Huang Z-L (黄忠良), Ding M-M (丁明懋), Zhang Z-P (张祝平), et al. The hydrological processes and nitrogen dynamics in a monsoon evergreen broad-leaved forest of Dinghushan. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1994, **18**(2): 194–199 (in Chinese)
- [7] Zhou G-Y (周国逸), Yan J-H (闫俊华). The influences of regional atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems. *Acta Ecologica*

Sinica (生态学报), 2001, **21**(12): 2002–2012 (in Chinese)

- [8] Zhuang Y-H (庄亚辉), Li C-S (李长生), Gao Z-M (高拯民). The Elements Cycle in Compound Ecosystem. Beijing: China Environmental Science Press, 1995 (in Chinese)
- [9] Zhang X-F (张修峰). Atmospheric nitrogen wet deposition and its effects on wetland water environment of Shanghai area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(6): 1099–1102 (in Chinese)
- [10] Li S-Q (李世清), Li S-X (李生秀). Nitrogen added to ecosystems by wet deposition in Guanzhong Area in Shaanxi. *Agro-Environmental Protection* (农业环境保护), 1999, **18**(3): 97–101 (in Chinese)
- [11] Wang Z-H (王志辉), Zhang Y (张颖), Liu X-J (刘学军), et al. Dry and wet nitrogen deposition in agricultural soils in the Loess area. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(7): 3295–3301 (in Chinese)
- [12] Wang T-J (王体健), Liu Q (刘倩), Zhao H (赵恒), et al. Atmospheric nitrogen deposition in agroecosystem in red soil region of Jiangxi Province. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(2): 280–287 (in Chinese)
- [13] Goulding KWT. Nitrogen deposition to land from the atmosphere. *Soil Use and Management*, 1990, **6**: 61–63
- [14] Li S-X (李生秀), Cun D-G (寸待贵), Gao Y-J (高亚军), et al. Mineral nitrogen introduced into soil by precipitation on Loess dryland. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 1993, **11**(suppl.): 83–92 (in Chinese)
- [15] Zhang Y (张颖), Liu X-J (刘学军), Zhang F-S (张福锁), et al. Spatial and temporal variation of atmospheric nitrogen deposition in North China Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(7): 3295–3301 (in Chinese)
- [16] Jiang X-L (姜秀玲), Shi K (史锐). An initial study on wet deposition of nitrogen in Dalian. *Urban Environment & Urban Ecology* (城市环境与城市生态), 2007, **20**(6): 25–27 (in Chinese)
- [17] Ma X-H (马雪华). Effects of rainfall on the nutrient cycling in man-made forests of *Cunninghmya lanceolata* and *Pinus massoniana*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1998, **9**(1): 15–20 (in Chinese)
- [18] Xiang R-J (向仁军), Chai L-Y (柴立元), Zhang G (张恭), et al. Input-output dynamics of nitrogen and sulfur in Caijiatang forested catchment in Hunan Province. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2006, **26**(8): 1372–1378 (in Chinese)
- [19] Dentener FJ, Crutzen PJ. A three-dimensional model of the global ammonia cycle. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1994, **19**: 331–369
- [20] Wang X-Z (王小治), Zhu J-G (朱建国), Gao R (高人), 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* (应用生态学报), 2004, **15**(9): 1616–1620 (in Chinese)

作者简介 魏 样, 女, 1984 年生, 硕士研究生。主要从事大气氮沉降及其生物有效性研究。E-mail: weiyang1120@163.com

责任编辑 张凤丽

