第30卷 第3期 干旱区资源与环境 Vol. 30 No. 3
2016年3月 Journal of Arid Land Resources and Environment Mar. 2016

文章编号: 1003 - 7578(2016)03 - 127 - 06 doi: 10.13448/j.cnki.jalre.2016.091

祁连山海北高寒草甸生态系统大气氮湿沉降动态变化特征*

祝景彬[1,2],李红琴[1,3],贺慧丹[1,3],毛绍娟[1,3],李英年[1,3]

(1. 中国科学院西北高原生物研究所,西宁 810001; 2. 中国科学院大学,北京 100049;
3. 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室,西宁 810001)

提 要: 对祁连山海北高寒草甸地区2010年和2011年大气氮湿沉降观测分析发现,海北高寒草甸地区 NH_4^+ - N、NO_3^- - N 和 TIN 湿沉降年平均浓度分别为 0.35 mg/L、0.27 mg/L 和 0.62mg/L,对应的湿沉降年总量分别为 1.78kg/hm^2、1.40kg/hm^2 和 3.19kg/hm^2。湿沉降氮浓度和湿沉降氮量年内均有明显的季节变化,湿沉降氮浓度表现出冬季高夏季低,而湿沉降氮量则为夏季高冬季低。NO_3^- - N 和 NH_4^+ - N 湿沉降浓度与降水量分别呈极显著的逆函数和幂函数负相关关系($P < 0.001$)。NO_3^- - N 和 NH_4^+ - N 湿沉降量与降水量分别呈显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.001$)的线性正相关关系。NH_4^+ - N 与 NO_3^- - N 湿沉降浓度和湿沉降量的比值与降水量均表现出弱的线性正相关关系($P < 0.10$)。海北高寒草甸地区的 NH_4^+ - N、NO_3^- - N 和 TIN 湿沉降量与世界和我国各地的农田、森林、城市相比处于低值区,而与处在大气清洁、海拔稍高的我国丽江玉龙雪山地区、西藏林芝地区相比基本相仿。

关键词: 海北高寒草甸; 大气氮湿沉降; 动态变化

中图分类号: X511 文献标识码: A

20世纪中后期以来,除大气 CO_2 浓度升高可能导致全球变暖外,大气中另一个新近出现而又令人担忧的问题是随着工业、农业的发展,人类活动使排放到大气中的含氮化合物增加,并不断向陆地和水生生态系统沉降[1],这也引起国内外研究人员的广泛关注。在欧洲和北美地区,对N沉降问题从20世纪90年代就开始长期定位研究,并逐渐形成研究网络[2]。但大多数研究主要集中在来源、数量及其化学组成等方面,且多偏重于特定区域氮沉降数量的空间变化,以及对不同生态系统的影响等。英国洛桑试验站150多年的监测数据表明[3],1855年英国大气氮素湿沉降仅为5.18kg/(hm^2·a),到1980年升高至18kg/(hm^2·a),之后随着对大气污染的控制氮素沉降量降至大约10kg/(hm^2·a)。就全球来看,目前大气氮沉降的平均值为5kg/(hm^2·a),其中工农业较为发达的欧洲为10kg/(hm^2·a)[4],北美为26kg/(hm^2·a)[5],亚洲为7kg/(hm^2·a)[6]。我国对于大气氮沉降虽进行了一定的研究,但仍比较零散,尚未系统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。就现有的研究结果看,我国大气氮沉降量在5.1~25.6kg/(hm^2·a)之间[7-10],但也有部分城市地区的氮湿沉降量高达66.00~78.42kg/(hm^2·a)[11,12],而西藏林芝等地则为4.12kg/(hm^2·a)[13],总体上看我国的氮素湿沉降量存在极大的地域性差异。

氮素是植物生长发育必不可少的营养元素之一[14]。大量证据表明,氮对于初级生产力的限制仍广泛存在于大多数自然陆地和海洋生态系统中[15,16]。青藏高原作为受人为活动影响相对较小的地区之一,是研究高寒草甸生态系统速效氮含量变化特征的理想区域。为此,文中探讨了大气氮沉降年内不同季节变化规律及与降水量等环境因子的关系。为评价青藏高原生态系统氮素含量及氮资源管理提供科学依据。

* 收稿日期: 2014 - 12 - 19; 修回日期: 2015 - 3 - 25。
基金项目: 国家自然基金项目(31300385,31270523,31070437)资助。
作者简介: 祝景彬(1989),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事全球变化生态学方面的研究。
通讯作者: 李英年,E - mail: ynli@nwipb.cas.cn

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

试验在青海海北高寒草甸生态系统国家野外科学观测研究站(海北站)进行。海北站地处青藏高原东北隅祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地(37°29′~37°45′N,101°12′~101°23′E,海拔3200~3600m)。北-西北部为高耸的冷龙岭,山脊平均海拔4600m,主峰-岗什卡峰海拔高度为5254.5m,常年积雪,并发育着现代冰川;南-东南与青海浩门农场接壤,与浩门镇(县城)和青石嘴镇直线距离分别约40km和18km;西-西南部被永安河所环绕,与门源县的皇城、苏吉滩二乡毗邻;在该站西南约15km处是平均海拔高度为4000m的达板山。该区位于亚洲大陆腹地,具有明显的高原大陆性气候,东南季风微弱。高海拔条件制约,气温极低,无明显四季之分,仅冷暖季之别,干湿季分明。(青藏高原降水量呈现由东南向西北逐渐递减全区)年平均气温-1.7℃,降水量约560mm,降水主要集中于植物生长季的5~9月,约占年降水量的80%,年平均日照时数2462.7h[17]。冷季(冬半年,11~翌年4月)气候寒冷、干燥。暖季(夏半年)气候凉爽、湿润。植被建群种为矮嵩草(*Kobresia humilis*),主要优势种为垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、异针茅(*Stipa aliena*)、麻花艽(*Gentiana straminea*)、甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)等。牧草生长低矮,群落结构简单,初级生产力低等[18,19]。平缓滩地及山地阳坡土壤多为草毡寒冻雏形土(Mat-Cryic Cambisols)、山地阴坡多分布暗沃寒冻雏形土(Mol-Cryic Cam-bisols)以及沼泽地的有机寒冻潜育土(Organic Cryic Gleysols)大量分布,土壤发育年青、土层浅薄、有机质含量丰富等特征[20]。

1.2 研究材料及方法

试验于2010年1月至2011年12月在海北站分月收集降水量。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4d,然后用去离子水淋洗6遍,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0.4μm的滤膜过滤,装入聚乙烯瓶中,记录降水量和有关气象数据,加入体积分数为0.5%的$CHCl_3$密封保存,或零下15℃冷冻保存。收集的样品短期内送至中国科学院地理科学与资源研究所分析NH_4^+-N、NO_3^--N浓度,分析采用三通道连续流动分析仪(TRACC2000)测定。

通过对原始数据分析整理,采用SPSS软件对数据资料进行分析。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,最后求解其比值[21]。

$$C=\sum_{i=1}^{n}C_iP_i/\sum_{i=1}^{n}P_i$$

式中:C为月(年)平均浓度(mg/L);i为降水次数;C_i为第i次降水中氮素的浓度(mg/L);P_i为第i次降水的降雨量(mm)。

研究时段内各形态氮沉降量的计算采用浓度与降雨量的乘积,其计算式为:

$$M=\frac{\Sigma C_i\times10^{-6}\times V_i}{A}\times10^4$$

式中:M为氮沉降量(Kg/hm^2);C_i为浓度(mg/L);V_i为湿沉降的体积(L);A为雨量器横截面积($0.0314m^2$)。

2 结果与分析

2.1 大气湿沉降氮浓度的月际变化

海北高寒草甸地区的1~12月,湿沉降NH_4^+-N的月平均浓度分布在0.18~3.89mg/L之间(表1),年平均为0.35 mg/L;最低、最高值分别出现在8月和1月,1月是8月的21.6倍。湿沉降NO_3^--N的月平均浓度分布在0.11~6.68mg/L之间,年平均为0.28mg/L;与NH_4^+-N浓度分布一样,最低、最高值也出现在8月和1月,1月湿沉降NO_3^--N浓度是8月的60.7倍。TIN浓度分布在0.29~10.57mg/L之间,年平均为0.63mg/L;同样,湿沉降TIN浓度最低的月份为8月,最高的月份为1月,1月湿沉降TIN浓度是8月的36.4倍。NH_4^+-N/NO_3^--N的变化范围为0.34~2.79。说明不同形态氮所占比例在不同月份变化较大,其中在2月份NH_4^+-N/NO_3^--N最小,9月份NH_4^+-N/NO_3^--N最大。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　海北高寒草甸 2010 ~ 2011 年不同形态氮浓度(mg/L) 的月变化

Table 1 Monthly changes of different nitrogen forms in Haibei alpine meadow in 2010 ~ 2011

指标/月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
NH_4^+ - N	3.89	1.03	0.54	0.73	0.28	0.23	0.20	0.18	0.39	0.53	2.85	1.96	0.35
NO_3^- - N	6.68	2.99	0.57	0.35	0.16	0.23	0.30	0.11	0.14	0.32	1.23	3.31	0.27
TIN	10.57	4.02	1.11	1.08	0.44	0.46	0.50	0.29	0.53	0.85	4.08	5.27	0.62
NH_4^+ - N/ NO_3^- - N	0.58	0.34	0.95	2.09	1.75	1.00	0.67	1.64	2.79	1.66	2.32	0.59	0.78

在植物生长期，气温稍高，降水丰富，降水日也多，3 ~ 10 月的月平均气温为 3.98℃，最热的 7 月为 10.42℃。3 ~ 5 月初和 9 ~ 10 月，土壤日消夜冻，土壤呼吸明显增加，特别是经过冬季"封冻"的土壤，温度略有升高将会促进土壤呼吸[18]。5 月中旬 ~ 9 月初，水热同期，地表潮湿，植被的生长增大了覆盖物，扬尘减少，虽然这期间牧民燃烧牦牛粪的数量明显下降，但在良好的水热条件下土壤呼吸、植物呼吸均明显增强；9 ~ 10 月，海北站东部区域有秸秆焚烧，期间海北站风向为东南风，秸秆焚烧一定程度增加了大气氮化物。并且，这个时期是大气雷电最易发生的时期，也增加了氮化物含量。与此同时，土壤肥料和家畜粪便中的氨态氮也会释放到大气中，从而导致 NH_4^+ - N/ NO_3^- N 多大于 1。虽然这个时期大气中含有较丰富的氮素，但在频繁降水的"冲刷"和"清洗"下，硝态氮和铵态氮的沉降浓度仍保持较低水平。

冬季 11 ~ 翌年 2 月温度极低，月平均气温 - 11.45℃，最冷的 1 月平均气温为 - 14.41℃，期间土壤完全冻结，11 月冻土深度已达到 30cm 以上，3 月达 200cm 以上。冬季不仅气候干燥，而且多大风天气，此时地面土壤表层形成了一定的干土层，地表植被由于被家畜啃食和践踏，地表覆盖物低，近似裸露，并堆积了一定量的家畜粪便物。在极低的温度环境和较厚的冻土层影响下，土壤呼吸几乎停止，仅向大气排放极少量的氮素。但是，当地牧民主要用牦牛粪煨炕、火炉取暖和烧饭，很少用到煤炭，这种情况下排出大量烟尘，会导致大气中硝态氮和铵态氮含量增加，而且前者大于后者，期间 NH_4^+ - N/ NO_3^- - N 小于 1。虽然冬季偶有降水产生，且以固体降雪为主，降雪日也很少，但 4 个月降水量仅 20.90mm，月平均仅为 5.22mm，积雪也不易下渗土壤，短时的日照后就被蒸发到大气中，对土壤表层的湿润作用和保护作用根本无法实现。此外，冬季的大风可以卷带地表土壤形成扬尘，而这些扬尘会经降水下降到地表。在冬季硝态氮和铵态氮长久维持在空气中，不易到达地表，只有发生降雪时，大气硝态氮和铵态氮才会随降水降至地面，故此时的大气氮湿沉降具有较高的浓度。

2.2　自然降水下的湿沉降氮量的季节变化

海北高寒草甸 1 ~ 12 月 NH_4^+ - N 沉降量月平均分布在 0.05 ~ 0.34kg/hm^2 之间(表 2) ，年平均为 0.15 kg/hm^2，NH_4^+ - N 沉降量的最小值和最大值分别出现在 2 月和 9 月，9 月份氮沉降量是 2 月份的 7.3 倍。NO_3^- - N 沉降量分布在 0.06 ~ 0.22kg/hm^2 之间，年平均为 0.12kg/hm^2，最小值和最大值分别出现在 4 月和 7 月，7 月份氮沉降量是 4 月份的 3.5 倍。TIN 沉降量分布在 0.17 ~ 0.34 kg/hm^2 之间，年平均为 0.27kg/hm^2，最小值和最大值分别出现在 1 月和 9 月，最大值为最小值的 2.6 倍。NH_4^+ - N/NO_3^- - N 的变化范围为 0.35 ~ 2.87，年平均为 1.27。表明不同时期 NH_4^+ - N 和 NO_3^- - N 沉降量贡献差异较大，12 月 ~ 翌年 2 月 NO_3^- - N 沉降量贡献较大，而 NH_4^+ - N 的贡献在其它月份较大。就全年来看，NH_4^+ - N、NO_3^- - N 和 TIN 湿沉降量的年总量分别为 1.78 kg/hm^2、1.40 kg/hm^2 和 3.19kg/hm^2。

表 2　海北高寒草甸 2010 ~ 2011 年不同形态氮湿沉降量(kg/hm^2) 月变化

Table 2 Monthly changes of wet deposition amounts of different nitrogen forms in Haibei alpine meadow in 2010 ~ 2011

指标/月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合计
NH_4^+ - N	0.06	0.05	0.09	0.13	0.20	0.16	0.15	0.24	0.34	0.17	0.16	0.05	1.78
NO_3^- - N	0.11	0.13	0.09	0.06	0.12	0.16	0.22	0.14	0.12	0.10	0.07	0.09	1.40
TIN	0.17	0.18	0.18	0.19	0.32	0.32	0.37	0.38	0.46	0.27	0.23	0.14	3.19
NH_4^+ - N/ NO_3^- - N	0.58	0.35	0.95	2.11	1.69	1.01	0.66	1.73	2.87	1.69	2.32	0.58	-

1 ~ 12 月，NH_4^+ - N、NO_3^- - N 和 TIN 的变化基本一致，夏秋时期高而冬春低，似乎有一定的规律，但表现比较凌乱。5 ~ 10 月 NH_4^+ - N、NO_3^- - N 和 TIN 的沉降量分别占年总量的 70%、61% 和 66%。如同在氮沉降浓度的月际变化中所述，虽然夏半年 NH_4^+ - N、NO_3^- - N 和 TIN 的沉降浓度低，但由于该期间降水丰富，其湿沉降量很高。这是因为夏半年的土壤呼吸强度加大，家畜粪便向大气中挥发的氮素增多，同时大气雷电频发，以及在 9 月中下旬主导风方向上焚烧秸秆，致使释放到大气中的氮素增多，并又通过降水沉降到地面。冬季的硝态氮湿沉降量大于秋季和春季的沉降量，这可能与当地居民取暖有关，由于这段时期

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

增加了采暖的柴薪用量，必然导致 NO_2 的排放量增加，因此使这个时期的硝态氮湿沉降量大于秋季和春季的沉降量。

2.3 大气氮湿沉降与降水量的关系

2.3.1 大气氮湿沉降浓度与降水量的关系

在调查期间海北高寒草甸地区的降水量主要集中在暖季的5～9月份，降水量为429.05mm，约占全年降水总量的84%；而冷季10月至翌年4月降水量只有79.82 mm，只占年降水的16%。特别是11月到翌年2月，降水极为稀少，只有14.25mm，仅占年降水的3%。

分析发现，NO_3^-－N沉降浓度(y)与降水量(x)呈极显著的逆函数负相关关系($y=(10.458/x)-0.035$，$R^2=0.965$，$P<0.001$；图1)，NH_4^+－N沉降浓度(y)与降水量(x)呈极显著的幂函数负相关关系($y=4.504x^{-0.655}$，$R^2=0.897$，$P<0.001$)。降水中的氮浓度不仅受到空气中氮化物含量的影响，而且还受到降雨量的影响，随着降水量增大，湿沉降中氮浓度逐渐降低。降雨中的离子主要来源于大气中气溶胶颗粒和气体的溶解，降水量越大，对气溶胶粒子的"清洗"作用越大，离子的总量虽然较多，但是大量的降水对离子的稀释作用也比较强，故呈现负相关关系，5～9月浓度较低。11～翌年2月降水极少，相应期间湿沉降浓度较高。分析还发现，湿沉降 NH_4^+－N与 NO_3^-－N浓度的比值(y)与降水量(x)出现弱的线性正相关关系($y=0.0064x+1.0951$，$R^2=0.115$，$P<0.10$)。

2.3.2 大气氮湿沉降量与降水量的关系

调查期间海北高寒草甸地区氮沉降量全年分布不均(图2)，5～9月由降水输入的TIN、NO_3^-－N、NH_4^+－N分别占各自年总输入量的58.9%、53.6%和60.5%。分析发现，NH_4^+－N、NO_3^-－N沉降量(y)与降水量(x)分别呈线性极显著和显著的正相关关系(分别有：$y=0.0016x+0.0826$，$R^2=0.605$，$P<0.001$；$y=0.0006x+0.093$，$R^2=0.296$，$P<0.05$)。NH_4^+－N与 NO_3^-－N湿沉降量的比值(y)与降水量(x)出现弱的线性正相关关系($y=0.0068x+1.0887$，$R^2=0.126$，$P<0.10$)。由此说明，该区降水的多少直接影响大气氮沉降通量的大小。

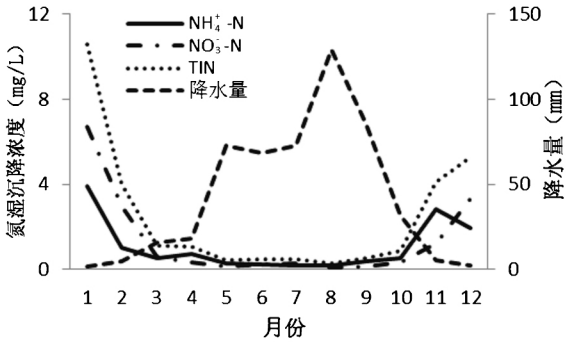

图1 海北高寒草甸2010～2011年1～12月硝态氮、氨态氮和无机氮湿沉降浓度与月降水量的关系

Figure 1 The relationship between the concentration of wet deposition of NO_3^-N, NH_4^+－N, TIN and precipitation of January～October in Haibei alpine meadow in 2010～2011

3 讨论

对大气氮沉降较为深入的研究主要集中在发达国家，国内对于氮素湿沉降的研究起步较晚，直到20世纪60年代，才陆续对近海生态系统、湖泊生态系统、森林生态系统中的氮沉降展开研究[22-23]，近20年来，我国学者对大气氮沉降对农田土壤的影响等进行了一些初步的研究，但对草地生态系统的氮沉降仍处在起步阶段。

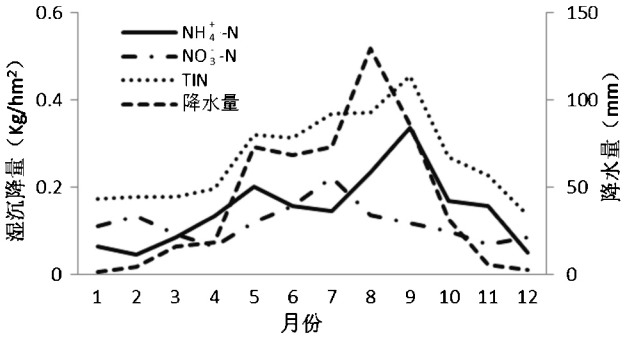

图2 海北高寒草甸2010～2011年1～12月硝态氮、氨态氮和无机氮湿沉降量与月降水量的关系

Figure 2 The relationship between the wet deposition amount of NO_3^-N, NH_4^+－N, TIN and precipitation of January～October in Haibei alpine meadow in 2010～2011

张颖等在华北平原进行两年的研究结果表明，华北平原氮素年均湿沉降大约为28kg/hm²，并指出在农田生态系统中以 NH_4^+－N的沉降为主，NH_4^+－N的沉降量是 NO_3^-－N的2倍[24]。而城市生态系统中以 NO_3^-－N的沉降为主，NH_4^+－N的沉降量是 NO_3^-－N的0.8倍[7]。刘嘉麒等对丽江玉龙雪山大气氮素沉降进行了长期观测研究，指出内陆降水背景值的湿沉降量分布在1.8～3.5 kg/(hm²·a)[25-27]。贾钧彦对西藏林芝地区的氮湿沉降观测发现，2005年为2.36kg/(hm²·a)[21]。李生秀等对黄

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

土旱源地区、关中地区的研究表明[24]，大气氮素湿沉降量分别为 14.3 ~ 29.7kg/hm^2 · a(80.2% 为 NH_4^+)、6.3 ~ 26.6kg/hm^2 · a(66.3% ~ 88.5% 为 NH_4^+)等，均达较高的水平。

海北高寒草甸地区 2010 年和 2011 年的大气氮湿沉降(无机氮)平均为 3.19kg/(hm^2 · a)，与丽江玉龙雪山地区、西藏林芝地区和云南丽江地区基本接近，与上述森林、农田、城市等国内外地区相比处在较低水平。这主要是因为，海北站地区，同丽江玉龙雪山地区、西藏林芝地区和云南丽江地区一样，区域工业污染较少，海拔较高，大气清洁，受全球气候变化影响较小有关。

文中只进行了大气氮湿沉降中无机氮的研究，大量研究表明湿沉降中有机氮也占有较大的比例。并且，干沉降也是大气氮沉降的重要组成部分，张颖等研究表明[7]，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，海北高寒草甸地区大气氮素干湿沉降实际数量可能远高于目前的数据。

大气中 NH_4^+ - N 主要来自土壤、肥料和家畜粪便中氨态氮的挥发，施肥等农事活动对其浓度影响较大[28]；大气 NO_3^- - N 一是由累积形成，另一是由工业和民用燃料燃烧及汽车尾气等产生[29]。大气氮沉降与环境因素密切相关，除了当地降水这一因素外，正如在上述结果分析的原因中所指出的一样，还与当地生活生产方式(耕地面积、秸秆焚烧、种植植物种类)、雷电、大气干洁度有关，雷电和当地居民冬季取暖都会增加大气中氮素含量；也与该地区距离市区城镇远近有关，更与该地区工业发展程度有关。目前为止，国内外对于大气氮沉降的研究主要集中在来源、数量及其化学组成等方面，且大多数研究偏重于对特定区域和特定阶段氮沉降量变化的研究。关于这些因素对于大气氮沉降的具体作用，以及这些因素间的耦合作用，有待予进一步研究。并且，以全球生态系统的尺度来考虑，大气中的氮素很有可能会通过长距离运输，由世界的其它区域而沉降到青藏高原，影响环境的质量。因此，大气氮沉降与环境的关系将会变得更加复杂。

青藏高原生态环境极为脆弱，对全球气候变化亦具有明显的敏感性、超前性和调节性。近年，基于青藏高原的重大生态地位，以及青藏高原对全球变化的响应，青藏高原研究已经成为国际生态与环境研究的一个重要方面[30-31]。但是，目前为止对于青藏高原生态系统中速效氮的研究仍然较少，通过本研究，对于完善青藏高原生态系统氮素资源管理与评价具有十分重要的科学意义，也是对全球不同生态系统大气氮沉降研究的重要参考。同时，亦可为全球变化、大气氮化物的生物地球化学行为等重大基础研究提供重要的理论依据。

4　结论

(1) NH_4^+ - N、NO_3^- - N 和 TIN 沉降浓度冬季寒冷的 11 月 ~ 翌年 2 月高，平均为 2.43mg/L、2.27mg/L 和 4.68 mg/L；夏半年及其前后的 3 ~ 10 月较低，平均为 0.36 mg/L、0.23 mg/L 和 0.59mg/L。氮湿沉降浓度具有明显的季节分布特点。年 NH_4^+ - N、NO_3^- - N 和 TIN 沉降平均浓度分别为 0.35mg/L、0.27mg/L 和 0.62mg/L。

(2) NH_4^+ - N、NO_3^- - N 和 TIN 沉降量随降水变化而有季节变化，但没有氮湿沉降浓度明显。氮湿沉降量在降水丰富的 5 ~ 10 月高，分别要占年总湿沉降量的 70%、61% 和 66%；冷季 11 月到翌年 4 月低，特别是寒冷的冬季因降水稀少而湿沉降量最低。NH_4^+ - N、NO_3^- - N 和 TIN 沉降的年总量分别为 1.78 kg/hm^2、1.4 0kg/hm^2 和 3.19kg/hm^2。

(3) 分析发现，NO_3^- - N 和 NH_4^+ - N 沉降的浓度分别与降水量呈极显著的逆函数负相关关系和极显著的幂函数负相关关系($P < 0.001$)。NO_3^- - N 和 NH_4^+ - N 沉降的输入量分别与降水量呈显著($P < 0.05$)及极显著($P < 0.001$)的线性正相关关系。进一步造成 TIN 的湿沉降浓度和湿沉降量与降水量分别呈现显著的负相关和正相关关系。而 NH_4^+ - N 与 NO_3^- - N 湿沉降浓度和湿沉降量的比值与降水量均出现弱的线性正相关关系($P < 0.10$)。

(4) 海北高寒草甸地区的 NH_4^+ - N、NO_3^- - N 和 TIN 沉降量与世界和我国各地的农田、森林、城市相比处于低值区，而与处在大气清洁、海拔稍高的我国丽江玉龙雪山地区、西藏林芝地区相比则相差无几，处于较低的水平。

参考文献

[1] Kaiser J. The other global pollutant: nitrogen proves tough to curb [J]. Science, 2001, 294 (5545): 1268 - 1269.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[2] 崔学明,樊明寿,韩鹏,海龙. 城市与草地生态系统大气氮沉降变化与特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(3):98-102.
[3] Goulding K W T, Bailey N J, Bradbury N I, et al. Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes[J]. New Phytologist,1998, 139: 49-58.
[4] Edmond K, Berserk, Outman L. The European nitrogen case[J]. Ambio, 2002, 31: 72-78.
[5] James N, Galloway J N, Aber J D, et al. The nitrogen cascade[J]. Bioscience, 2003, 53(4): 341-356.
[6] Zheng X H, Fu C B, Xu X K, et al. The a sian nitrogen cycle case study[J]. Ambio, 2002, 31: 79-87.
[7] 张颖,刘学军,张福锁,等. 华北平原大气氮素沉降的时空变异[J]. 生态学报,2006,26(6):1633-1639.
[8] 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[J]. 环境化学,2000,19(4):352~356.
[9] 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[J]. 应用生态学报,2003,14(11): 1884~1888.
[10] 王小治,朱建国,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.
[11] 侯琳,雷瑞德,王得祥,等. 秦岭火地塘天然次生油松林土壤有机碳的特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2008,36(8):156-159.
[12] 宋新章,张智婷,肖文发,等. 长白山杨桦次生林采伐林隙幼苗更新动态[J]. 林业科学,2008,44(3):13-20.
[13] 张远东,刘世荣,马姜明. 川西亚高山桦木林的林地水文效应[J]. 生态学报,2005,25(11):2940-2946.
[14] 付会芳,张兴昌. 旱地土壤氮素矿化的动力学研究[J]. 干旱区资源与环境,1997,11(1):54-58.
[15] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur?[J]. Biogeochemistry, 1991, 13(2):87-115.
[16] Le Bauer D S, Tresede K K. Nitrogen limitation of net primary pro-ductivity in terrestrial ecosystems is globally distributed[J]. Ecology, 2008, 89(2):371-379.
[17] 李英年,赵新全,曹广民,等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析[J]. 高原气象,2004,23(4): 558-567.
[18] 周兴民. 中国嵩草草甸[M]. 北京:科学出版社,2001:1-297.
[19] 周兴民,李建华. 海北高寒草甸生态系统定位站的主要植被类型及地理分布规律[C]. 高寒草甸生态系统(第1集),北京:科学出版社,1982:9-18.
[20] 乐炎舟,左克成,张金霞,等. 海北高寒草甸生态系统定位站的土壤类型及其基本特点[C]. 高寒草甸生态系统(第1集),北京:科学出版社,1982:19-33.
[21] 贾钧彦,张颖,蔡晓布,等. 藏东南大气氮湿沉降动态变化-以林芝观测点为例[J]. 生态学报,2009,29(4):1907-1913.
[22] 王巧红,宫渊波,张君. 森林生态系统对大气氮沉降的响应[J]. 四川林业科技,2006(1):19-25.
[23] 张修峰. 上海地区大气氮湿沉降及其对湿地水环境的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(6):1099-1102.
[24] 沈健林,刘学军,张福锁. 北京近郊农田大气 NH_3 与 NO_2 干沉降研究[J]. 土壤学报,2008,45(1): 165-169.
[25] 杨洁,薛虎圣,于晓岚,等. 瓦里关山降水化学特征的初步分析[J]. 环境科学学报,2000,20(4): 420-425.
[26] Galloway J N, Zhao D W, Xiong J L, et al. A cidrain: China, United States, and a remote area[J]. Science, 1987, 236: 1559-1562.
[27] 刘嘉麒. 降水背景值与酸雨定义研究[J]. 中国环境监测,1996,12(5):5~9.
[28] Levy H, Moxim W J. Fate of US and Canadian combustion nitrogen emissions[J]. Nature, 1987, 328: 414-416.
[29] Jenkinson D S. An introduction to the global nitrogen cycles[J]. Soil Use Manage, 1990, 6(2): 56-61.
[30] 常国刚. 人工增雨力助三江源生态建设[N]. 中国气象报,2006年6月8日.
[31] 时兴合,李生辰,李栋梁,等. 青海南部冬季积雪和雪灾变化的特征[J]. 气候变化研究进展,2007(1):36-40.

A dynamic changes of wet deposition of nitrogen at Haibei alpine meadow ecosystem of Qilian Mountains

ZHU Jingbin[1,2], LI Hongqin[1,3], HE Huidan[1,3], MAO Shaojuan[1,3], LI Yingnian[1,3]
(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

Abstract: The wet deposition of nitrogen in Haibei alpine meadow area of Qilian mountains in 2010 and 2011 was analyzed. The annual average concentration of NH_4^+-N、NO_3^--N and TIN were 0.35 mg/L, 0.27 mg/L and 0.62mg/L respectively. The amount of annual wet deposition of NH_4^+-N, NO_3^--N and TIN were 1.78kg/hm^2, 1.40kg/hm^2 and 3.19kg/hm^2 respectively. The concentration and amount of wet deposition of nitrogen had obviously seasonal variation. The concentration of wet deposition of nitrogen showed high in summer and low in winter, but the amount of wet deposition of nitrogen showed higher in winter and low in summer. The concentration of NO_3^--N and precipitation was extremely significant negative correlation relationship to the inverse function, and the concentration of NH_4^+-N and precipitation was extremely significant negative correlation relationship to the power function($P<0.001$). The amount of wet deposition of NO_3^--N and precipitation showed significantly linear positive correlation relationship($P<0.05$). The amount of wet deposition of NH_4^+-N and precipitation showed extremely significant linear positive correlation relationship($P<0.001$). Both the concentration and amount of the ratio of NH_4^+-N and NO_3^-N related to precipitation were weak linear positive correlation ($P<0.10$). The amounts of wet deposition of NH_4^+-N, NO_3^--N and TIN in Haibei alpine meadow area were lower than the other farmland, forests and cities of the world and our country, but were similar to Yulong snow mountain areas of LiJiang and LinZhi of Tibet.

Key words: Haibei alpine meadow; atmospheric nitrogen wet deposition; dynamic changes

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net