

DOI: 10.5846/stxb201408031549

周旺明, 郭焱, 朱保坤, 王晓雨, 周莉, 于大炮, 代力民. 长白山森林生态系统大气氮素湿沉降通量和组成的季节变化特征. 生态学报, 2015, 35(1): 0158-0164.

Zhou W M, Guo Y, Zhu B K, Wang X Y, Zhou L, Yu D P, Dai L M. Seasonal variations of nitrogen flux and composition in a wet deposition forest ecosystem on Changbai Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 0158-0164.

长白山森林生态系统大气氮素湿沉降通量和组成的季节变化特征

周旺明¹, 郭焱^{1,2}, 朱保坤³, 王晓雨^{1,2}, 周莉¹, 于大炮¹, 代力民^{1,*}

1 森林与土壤生态国家重点实验室, 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 东北师范大学环境学院, 长春 130117

摘要: 2009—2010 年期间, 利用雨量计收集法在长白山森林生态系统定位站开展定位观测, 分析降水中氮素浓度, 研究了该区域大气氮素湿沉降通量和组成的季节变化特征。结果表明, 各形态氮素月均浓度之间差别较大, 具有明显的季节性; 其降水中浓度主要受降水量和降水频次的影响。全年氮素湿沉降中 TN、TIN 和 TON 的沉降量分别为 27.64 kg N hm⁻² a⁻¹、11.05 kg N hm⁻² a⁻¹ 和 16.59 kg N hm⁻² a⁻¹, TON 为沉降主体, 占 60.02%; 其大气氮沉降量主要由降水量和降水中氮素浓度共同决定。该地区氮湿沉降量已处于我国中等水平, 考虑到氮素的干湿沉降比例, 本区域的年氮沉降量已接近或超过本区域的营养氮沉降临界负荷, 存在一定的环境风险。该地区生长季(5—10 月)的氮沉降量(16.59 kg N hm⁻² a⁻¹)占全年氮沉降量的比例达到 73.20%。生长季的氮沉降对于促进植物生长直接生态意义重大, 而非生长季的氮沉降对于大量补充次年植物生长初期所需养分的间接生态意义明显。

关键词: 氮沉降; 湿沉降; 季节变化; 森林生态系统; 长白山

Seasonal variations of nitrogen flux and composition in a wet deposition forest ecosystem on Changbai Mountain

ZHOU Wangming¹, GUO Yan^{1,2}, ZHU Baokun³, WANG Xiaoyu^{1,2}, ZHOU Li¹, YU Dapao¹, DAI Limin^{1,*}

1 State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130117, China

Abstract: In the last 150 years, human activities such as fossil fuel usage and centralized agricultural schemes have resulted in the emission of large amounts of reactive nitrogen. Most of this reactive nitrogen falls to the ground via wet deposition as precipitation or dust fall. Nitrogen deposition plays a key role in the nitrogen biogeochemical cycles. Hence, quantification of nitrogen deposition in different areas is important for eco-security assessment. The Changbai Mountain region is a typical temperate forest in China; however, data regarding nitrogen deposition in this region are scarce. Investigation of nitrogen deposition in the Changbai Mountain region can provide a scientific basis for understanding nitrogen cycling in similar natural ecosystems. We conducted our present study at the Changbai Mountain Research Station of Forest Ecosystems. During 2009—2010, we collected rain and snow samples by using a rain gauge. We analyzed the concentrations

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAD22B04); 国家自然科学基金(30900208)

收稿日期: 2014-08-03; 修订日期: 2014-11-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lmdai@iae.ac.cn

of total nitrogen (TN), inorganic nitrogen (TIN), and total organic nitrogen (TON). We evaluated seasonal variations in nitrogen deposition fluxes and composition. We showed that the average nitrogen concentrations varied from month to month and were higher in winter than in summer. The amount and frequency of precipitation were the main impact factors. We observed monthly variations in TN and TIN. TON accounted for the highest proportion of TN (30.03—92.88%), whereas NO^{-3} was the dominant form of TIN. The values of TN, TIN, and TON were $27.64 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $11.05 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, and $16.59 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively. The amount of nitrogen deposition varied according to the amount of precipitation and the nitrogen concentration of this precipitation. Our results indicate that nitrogen deposition in the Changbai Mountain region has reached a moderate level compared with other parts of China. However, according to the proportions of wet and dry nitrogen deposition, total nitrogen deposition has approached or even exceeded the critical load of nutrient nitrogen deposition, and this poses an environmental risk. The nitrogen deposition during the growing season (May to October) accounted for 73.20% of the annual nitrogen deposition, namely, $16.59 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, and was important for stimulating plant growth. Nitrogen deposition during the non-growing season can replenish the nutrition required by plants at the start of the next growing season and therefore should also be considered.

Key Words: nitrogen deposition; wet deposition; seasonal variation; forest ecosystem; Changbai Mountain

工业革命以来,化石燃料的使用和农业的集约化生产程度的提高,使得人类向大气中排放的含氮化合物急剧增加,而其中70%—80%的氮素会通过沉降方式返回地表^[1-3]。因此,大气氮沉降不仅是去除大气中含氮污染物的有效手段,也是氮素生物地球化学循环的重要环节^[4-6]。

作为生态系统一个重要的氮源^[4,7],其大气氮沉降不仅可以为植物生长提供必需的养分,且过量的氮沉降会引起土壤酸化、水体富营养化和生物群落结构改变等生态环境问题^[8-9]。据估计,全球每年沉降到各类生物群系的活性氮达43.47 Tg,沉降到海洋表面的活性氮达27 Tg^[10]。而且已有研究表明,中北美、西欧和亚洲的中国、印度已成为全球氮沉降的三大集中分面区^[11]。因此,明确不同区域氮沉降量对于研究该地区氮素循环及区域生态安全具有重要意义^[12-13]。

通过一年的定位监测数据,研究了长白山森林生态系统氮素湿沉降通量和组成的季节变化,不仅有利于进一步了解长白山森林生态系统的氮素循环,还为探讨氮沉降对该区域的生态影响提供了基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

监测地点位于中国科学院长白山森林生态系统定位站气象观测场,该气象观测场位于二道白河镇西北角,距离公路约1 km,周边为林地,监测地点距离林缘约50 m。该地区属于典型的大陆性气候,无霜期短、冰冻期长;年平均温度为 2.80°C ;年均降雨量为600—900 mm,并且70—80%集中在6月至9月。

1.2 样品采集

于2009年11—2010年10月期间采集湿沉降样品包括降雨及降雪。在实验室内,将聚乙烯瓶(80 ml)先用1:5的稀HCl溶液浸泡7d,然后用去离子水清洗后,在洁净的工作台上凉干,用洁净塑料袋包好备用。在气象场内,设置固定采集样点,用2个直径为30 cm、深度为20 cm圆桶做为采雨器,采雨器平时用塑料袋扎好。在每次降水前,布置好采雨器,当降水结束后,收集采雨器中的降水并带回实验室。样品充分混合后用 $0.4 \mu\text{m}$ 滤膜过滤,置于聚乙烯瓶中, -15°C 密封冷冻保存。同时详细记录气象站的降水量等数据。

1.3 测定项目及方法

将收集到的大气降水及时带回实验室测定其 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TN浓度。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂光度法, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用酚二磺酸光度法,总氮(TN)采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度计法^[14]。总无机氮(TIN)采用加和

法,即 $TIN = NH_4^+-N + NO_3^- - N$;总有机氮(TON)采用差减法,即 $TON = TN - TIN$ 。

1.4 数据处理

研究时段内的氮沉降量 (kg/hm^2) = $[\sum (C_i \times 10^{-6} \times V_i) / A] \times 10^4$, 式中 C_i 为第 i 次降水的氮浓度 ($mg\ N/L^2$), V_i 为第 i 次降水的体积(L), A 为采雨器横截面积。

用 Excel 2007 处理数据,运用 Origin 9.0 软件对数据进行作图和计算,运用 SPSS18.0 软件对数据进行相关分析。

2 研究结果

2.1 大气降水氮浓度季节变化

长白山降水中不同形态氮浓度的季节变化明显(图1)。 NH_4^+-N 和 $NO_3^- - N$ 浓度在冬季12月和1月含量最高,分别达到 $1.43mg/L$ 和 $1.188\ mg/L$ 。由于6月雨季的到来,降水中的 NH_4^+-N 和 $NO_3^- - N$ 的浓度降低,其中 NH_4^+-N 浓度在9月达到最低值($0.12\ mg/L$)。从全年来看,在冬季的12月和1月含量最高,春季较高,而在夏季含量较低。降水中的 TIN 含量变化趋势由 NH_4^+-N 和 $NO_3^- - N$ 浓度决定,而 NH_4^+-N 和 $NO_3^- - N$ 浓度全年变化趋势相似,因此, TIN 的变化趋势与 NH_4^+-N 和 $NO_3^- - N$ 浓度变化趋势基本相同。

降水中 TN 和 TON 的浓度变化趋势基本相同,在11月至1月期间浓度较高,并于1月达到峰值,其浓度分别为 $6.082\ mg/L$ 和 $3.621\ mg/L$ 。随着夏季降水增加,浓度降低,5月至8月 TN 和 TON 含量分别在 2.087 — $2.741\ mg/L$ 和 0.792 — $1.674\ mg/L$ 之间;而10月降水中 TN 和 TON 的含量较高,其浓度值分别为 $5.380\ mg/L$ 和 $4.282\ mg/L$ 。

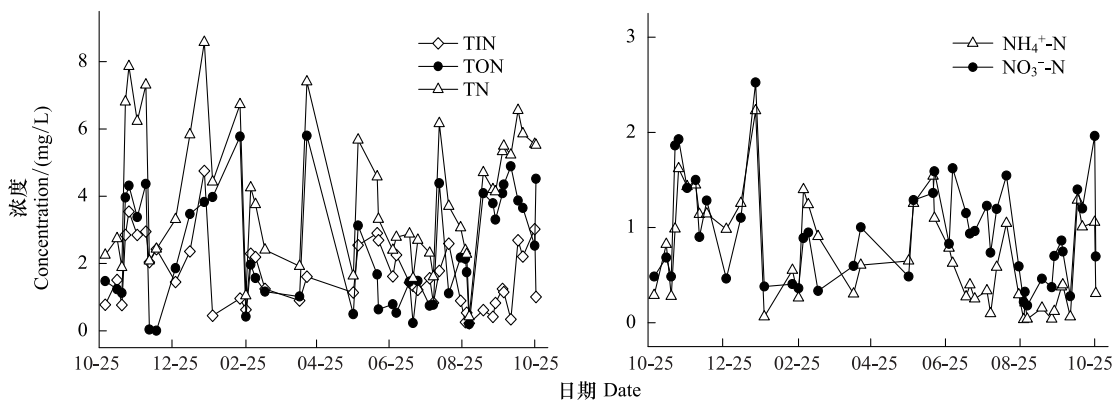


图1 降水中不同形态氮含量季节变化

Fig.1 Variation of concentration of different nitrogen forms

2.2 降水中各形态氮的分布特征

研究时段内各月 TIN 和 TN 组成变化差异较大(图2)。从 TIN 组成来看, $NO_3^- - N$ 所占比例在4—10月比例较高,其中在7月所占比例最高;而 NH_4^+-N 所占比例最高值出现在3月。TIN 占 TN 的比例在夏季(5—7月)较高,而在秋季(9—10月)比例较低。

对各月 NH_4^+-N 、 $NO_3^- - N$ 、TIN、TON 和 TN 平均浓度进行了相关分析(表1)。就各形态氮浓度的相关关系而言, NH_4^+-N 与 $NO_3^- - N$ 和 TIN 均具有很强的正相关($P < 0.01$)。此外, TON 与 TN 显著相关,表明 TON 对于 TN 组成的贡献较高。

2.3 大气降水及氮沉降量变化特征

各形态氮的沉降量均存在明显的月变化,其在各月间差异明显(图3)。 NH_4^+-N 、 $NO_3^- - N$ 和 TIN 的两次明显峰值分别出现在11月和7月,其中以7月的沉降量最大。而 TON 和 TN 有3次峰值,分别在11、4、7月。11、4、7月的 TN 沉降量对全年氮沉降量贡献率分别为 8.21% 、 12.70% 和 22.11% , 共占全年的

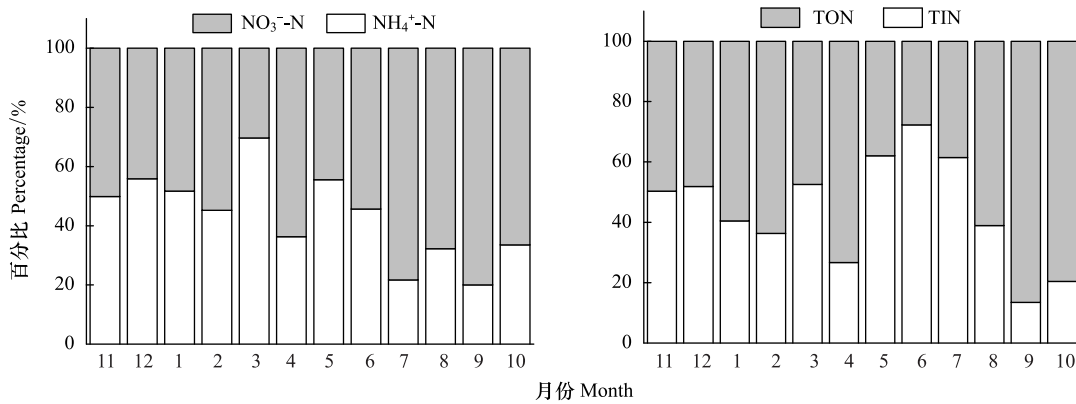


图2 TIN 和 TN 月均浓度的组成

Fig.2 Composition of monthly average concentration of TIN and TN

43.02%。而在此期间 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的总沉降量占全年 TIN 的贡献率分别为 10.33%、8.47% 和 33.99%。全年 TN 沉降量为 $27.64 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, TIN 和 TON 的沉降量分别为 $11.05 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $16.59 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, TON 为沉降主体, 占 60.02%。TIN 中 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的比例达 1.867, TIN 中以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为主。考虑当地气候条件, 将 5 月至 10 月划为生长季, 而 11 月至次年 4 月划为非生长季, 则生长季氮沉降量为 $16.59 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 占全年氮沉降量的比例达到 73.20%。

表 1 各形态氮浓度的相关系数矩阵

Table 1 Correlation of the concentration of different nitrogen forms

	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	TIN	TON	TN
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	1				
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.508	1			
TIN	0.91**	0.819**	1		
TON	-0.112	-0.032	-0.059	1	
TN	0.3	0.393	0.389	0.897**	1

**表示在 $P < 0.01$ 水平上显著, *表示在 $P < 0.05$ 水平上显著 ($n = 12$)

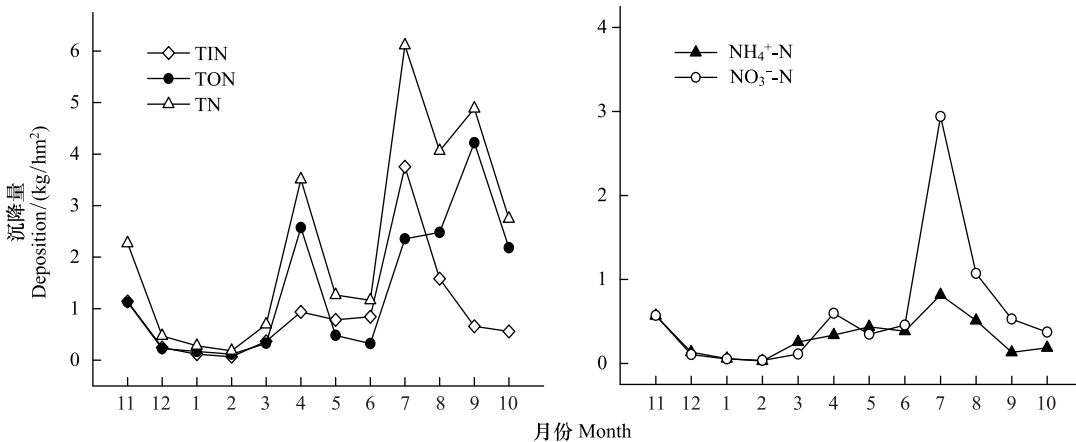


图3 各月氮沉降量变化

Fig.3 Change of nitrogen deposition amount of every month

导致各形态氮沉降量出现明显峰值的原因主要与相应时期降水中各形态氮的月均浓度和降雨量的大小有关(图 1, 图 4, 表 2)。因此, 虽然各形态氮的月均浓度在 7 月均较低, 但沉降量均出现峰值, 主要是由于该月的降水量较大有关(图 4)。

3 讨论

已有研究表明, 不同时间的气象因子, 如温度、相对湿度和降水量等, 是影响大气氮湿沉降季节变化的重要因素^[15]。Torsten 等报道澳大利亚中部针阔混交林内 TIN 浓度和沉降量主要受到降水量的影响^[16]。

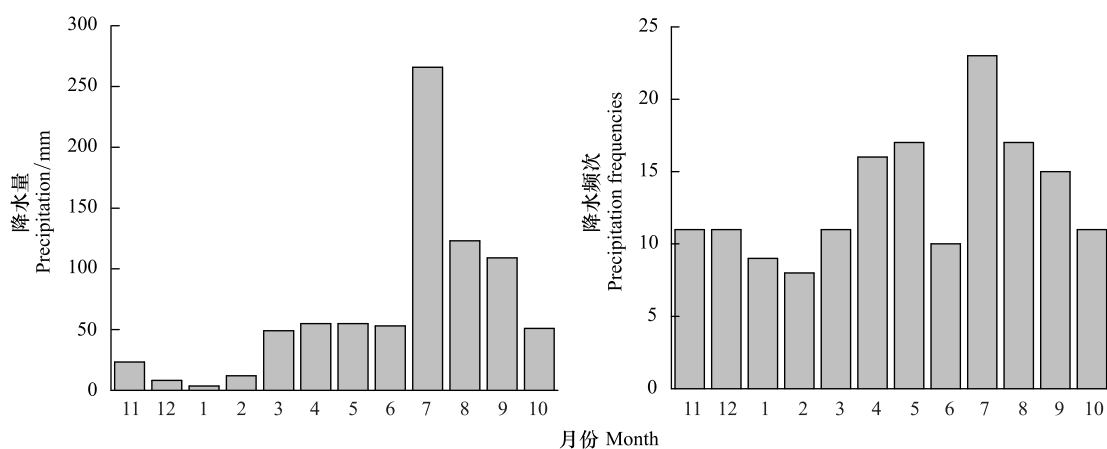


图4 监测期间大气降水量及降水频次

Fig.4 Precipitation and frequency of monthly precipitation during the supervised period

Stephan 等发现德国南部森林穿透雨中 TON 有明显的季节性变化,并且 TON 浓度与温度呈显著性正相关关系 ($R^2=0.58$)^[17]。本研究结果表明,长白山地区降水中氮素浓度存在明显的季节变化,夏季降水中氮素浓度较低,秋冬季降水中氮素浓度较高(图 1)。这主要是由于夏季的降水量和降水频次较高(图 4),不仅对降水中氮素有稀释作用,而且对大气中氮素具有较强的清除作用^[18];而东北地区冬季取暖会燃烧更多的石化燃料,是导致冬季降水中氮素浓度较高的一个重要因素^[19]。

表 2 各形态氮沉降量与降水之间的相关性

Table 2 Correlations with the deposition of different forms nitrogen and precipitation

	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TIN	TON	TN	降水量	降水次数
NH ₄ ⁺ -N	1						
NO ₃ ⁻ -N	0.818 **	1					
TIN	0.889 **	0.991 **	1				
TON	0.233	0.447	0.412	1			
TN	0.607 *	0.804 **	0.785 **	0.888 **	1		
降水量 Precipitation	0.796 **	0.951 **	0.946 **	0.646 *	0.917 **	1	
降水次数 Precipitation frequencies	-0.472	0.121	-0.256	-0.172	-0.272	0.875 **	1

* 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$

本研究中 TIN、TON 和 TN 的沉降量分别为 11.05、16.59 kg N hm⁻² a⁻¹和 27.64 kg N hm⁻² a⁻¹。而韩琳等研究了该地区 2007 年和 2008 年的生长季期间(4—9 月)大气湿氮沉降,结果表明其大气氮湿沉降量分别为 17.9 kg N hm⁻² a⁻¹和 15 kg N hm⁻² a⁻¹^[20],与本研究结果有一定的差异。其主要原因一方面是由于本研究监测时期为全年,另外由于 2007、2008 和 2010 年的降水量分别为 755.5、509 和 810.3 mm,而大气氮湿沉降量与降水量关系显著(表 2)。本研究中 TIN 沉降量与 Torsten 等人报道的澳大利亚森林 TIN 湿沉降量(9.1—16.6 kg N hm⁻² a⁻¹)相似^[16],却低于德国南部森林 TIN 湿沉降量(13.3—27.7 kg N hm⁻² a⁻¹)^[21]和我国南方森林 TIN 湿沉降量(26.2 kg N hm⁻² a⁻¹)^[22]。Lu 和 Tian(2007)研究表明,中国过去 20 年的氮湿沉降通量平均值为 9.88 kg N hm⁻² a⁻¹,最大值为 62.25 kg N hm⁻² a⁻¹^[23],该地区氮湿沉降量在我国处于中等水平。假如按干沉降占总沉降比例为 30%—60%来估算^[24-25],则长白山地区年干湿氮沉降量达 39.48—69.09 kg N hm⁻² a⁻¹。根据郝吉明等研究结果,东北地区氮沉降营养临界负荷值约为 56 kg N hm⁻² a⁻¹^[26]。因此,本区域的年氮沉降量已接近或超过本区域的营养氮沉降临界负荷,存在一定的环境风险效应。

大气降水不仅对植物的生长有着直接和间接的生态意义,且降水量的多寡在一定程度上反映了氮沉降量的高低(表 2),从而间接影响氮素的生物地球化学过程^[27]。已有研究表明,大气氮沉降量呈增加趋势^[13],但

长白山地区自 1958 年以来,年降水量总体表现为降低趋势(图 5),表明该地区有可能存在由于降水量减少而导致年氮湿沉降量的降低。由于长白山地区非生长季降水量表现为弱的增加趋势(图 5),且秋冬季节降水中氮素含量较高(图 1),可能会增加非生长季降水中氮沉降量。长白山地区位于中高纬度,冬季降水主要是以降雪形式,以固态积雪形态存在于地表,在次年春季气温升高时会迅速融化,使得冬季降雪对生态系统氮素输入表现为时间短、输入量大的特点^[28-29]。已有研究表明,积雪融水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 大都进入土壤无机氮库^[30],土壤中无机氮是植物吸收的主要氮源^[31]。该地区非生长季(11 月—次年 4 月)降水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 沉降量达 $1.39 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $1.48 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,且与年降水量变化趋势相比,非生长季降水量表现为弱的增加趋势(图 5)。因此,该地区非生长季氮湿沉降量是生态系统一个重要的有效氮输入源,为植物生长氮素的需求提供了保证。

4 结论

(1)长白山地区降水中湿沉降中各形态氮月均浓度之间差别较大,具有明显的季节性。各月 TIN 和 TN 组成变化差异较大,TN 组成中以 TON 为主(30.03%—92.88%),TIN 组成中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 比较略高。降水量与各形态氮浓度均呈较弱的负相关($P>0.05$)。

(2)长白山地区 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TIN、TON 和 TN 的年沉降量分别为 3.85 、 7.20 、 11.05 、 $16.59 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $27.64 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。TN 中以 TON 为主,TON 占 TN 的 60.02%。TIN 以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为主,占 TIN 的 65.12%。该地区氮湿沉降量已处于我国中等水平,考虑到氮素的干湿沉降比例,本区域的年氮沉降量已接近或超过本区域的营养氮沉降临界负荷,存在一定的环境风险。

(3)生长季氮沉降量为 $16.59 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,占全年氮沉降量的比例达到 73.20%。生长季的氮沉降对于促进植物生长直接生态意义重大,而非生长季的氮沉降对于大量补充次年植物生长初期所需养分的间接生态意义明显,其生态作用不容忽视。

参考文献(References):

- [1] 李德军,莫江明,方运霆,彭少麟, Gundersen P. 氮沉降对森林植物的影响. 生态学报, 2003, 23(9): 1891-1990.
- [2] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney, J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. Science, 2008, 320(5878): 889-892.
- [3] Jia Y L, Yu G R, He N P, Zhan X Y, Fang H J, Sheng W P, Zuo Y, Zhang D Y, Wang Q F. Spatial and decadal variations in inorganic nitrogen wet deposition in China induced by human activity. Science Report, 2014, 4, Article number: 3763, doi: 10.1038/srep03763.
- [4] Aber J D, Goodale C L, Ollinger S V, Smith M L, Magill A H, Martin M E, Hallett R A, Stoddard J L. Is nitrogen deposition altering the nitrogen status of northeastern forests?. BioScience, 2003, 53(4): 375-389.
- [5] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, Lin P. Dissolved organic carbon and nitrogen in precipitation, throughfall and stemflow from *Schima superba* and *Cunninghamia lanceolata* plantations in subtropical China. Journal of Forestry Research, 2005, 16(1): 19-22.
- [6] 盛文萍,于贵瑞,方华军,刘允芬,胡中民. 离子树脂法测定森林穿透雨氮素湿沉降通量——以千烟洲人工针叶林为例. 生态学报, 2010, 30(24): 6872-6880.
- [7] Fang Y T, Gundersen P, Vogt R D, Koba K, Chen F S, Chen X Y, Yoh M. Atmospheric deposition and leaching of nitrogen in Chinese forest ecosystems. Journal of Forest Research, 2011, 16(5): 341-350.
- [8] 陈能汪,洪华生,张珞平. 九龙江流域大气氮湿沉降研究. 环境科学, 2008, 29(1): 38-46.

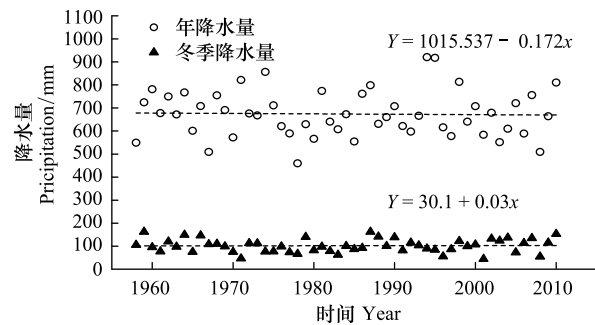


图 5 年平均降水量及冬季降水量变化趋势
Fig. 5 Change trend in average annual precipitation and precipitation in winter

- [9] Liu X J, Duan L, Mo J M, Du E Z, Shen J L, Lu X K, Zhang Y, Zhou X B, He C E, Zhang F S. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2251-2264.
- [10] Parel H W. Coastal eutrophication in relation to atmospheric nitrogen deposition: Current perspectives. *Ophelia*, 1995, 41(1): 237-259.
- [11] Fan J L, Hu Z Y, Wang T J, Zhou J, Wu C Y H, Xia X. Atmospheric inorganic nitrogen deposition to a typical red soil forestland in southeastern China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 159(1/4): 241-253.
- [12] 梁婷, 同延安, 林文, 乔丽, 刘学军, 白水成, 杨宪龙. 陕西省不同生态区大气氮素干湿沉降的时空变异. *生态学报*, 2014, 34(3): 738-745.
- [13] Liu X J, Zhang Y, Han W X, Tang A H, Shen J L, Cui Z L, Vitousek P, Erisman J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F S. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学出版社, 2000: 308-322.
- [15] Lohse K A, Hope D, Sponseller R, Allen J O, Grimm N B. Atmospheric deposition of carbon and nutrients across an arid metropolitan area. *Science of the Total Environment*, 2008, 402(1): 95-105.
- [16] Berger T W, Untersteiner H, Schume H, Jost G. Throughfall fluxes in a secondary spruce (*Picea abies*), a beech (*Fagus sylvatica*) and a mixed spruce-beech stand. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(3/4): 605-618.
- [17] Solinger S, Kalbitz K, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic carbon and nitrogen in a Central European deciduous forest. *Biogeochemistry*, 2001, 55(3): 327-349.
- [18] 宋欢欢, 姜春明, 宇万太. 沈阳市区降水中氮素的组成及季节变化. *生态学杂志*, 2014, 33(3): 741-747.
- [19] Yu W T, Jiang C M, Ma Q, Xu Y G, Zou H, Zhang S C. Observation of the nitrogen deposition in the lower Liaohe River Plain, Northeast China and assessing its ecological risk. *Atmospheric Research*, 2011, 101(1/2): 460-468.
- [20] 韩琳. 碳氮干扰对温带森林土壤碳氮主要过程影响的实验研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009: 30-31.
- [21] Rothe A, Huber C, Kreutzer K, Weis W. Deposition and soil leaching in stands of Norway spruce and European Beech: Results from the Högwald research in comparison with other European case studies. *Plant and Soil*, 2002, 240(1): 33-45.
- [22] Du C Y, Zeng G M, Zhang G, Tang L, Li X D, Huang D L, Huang L, Jiang Y M. Input-output budgets for inorganic nitrogen under acid rain in a subtropical evergreen mixed forest in central-south China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2008, 190(1/4): 171-181.
- [23] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D22), doi: 10.1029/2006JD007990.
- [24] Liu X J, Ju X T, Zhang Y, He C E, Kopsch J, Zhang F S. Nitrogen deposition in agroecosystems in the Beijing area. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 113(1/4): 370-377.
- [25] Huang P, Zhang J B, Zhu A N, Xin X L, Zhang C Z, Ma D H. Atmospheric deposition as an important nitrogen load to a typical agroecosystem in the Huang-Huai-Hai Plain. 1. Measurement and preliminary results. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(20): 3400-3405.
- [26] 郝吉明, 齐超龙, 段雷, 周中平. 用 SMB 法确定中国土壤的营养氮沉降临界负荷. *清华大学学报: 自然科学版*, 2003, 43(6): 849-853.
- [27] Goulding K W T, Bailey N J, Bradbury N J, Hargreaves P, Howe M, Murphy D V, Poulton P R, Willison T W. Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes. *New Phytologist*, 1998, 139(1): 49-58.
- [28] Oczkowski A J, Pellerin B A, Hunt C W, Wollheim W M, Vörösmarty C J, Loder T C. The role of snowmelt and spring rainfall in inorganic nutrient fluxes from a large temperate watershed, the Androscoggin River Basin (Maine and New Hampshire). *Biogeochemistry*, 2006, 80(3): 191-203.
- [29] 周旺明, 王金达, 刘景双, 秦胜金, 王洋. 降雪对三江平原小叶章湿地系统氮输入及生态效应. *水科学进展*, 2009, 20(1): 99-104.
- [30] Williams M W, Brooks P D, Mosier A, Tonnessen K A. Mineral nitrogen transformations in and under seasonal snow in a high-elevation catchment in the Rocky Mountains, United States. *Water Resources Research*, 1996, 32(10): 3161-3171.
- [31] Geatz G W, Needelman B A, Weil R R, Megonigal J P. Nutrient availability and soil organic matter decomposition response to prescribed burns in Mid-Atlantic Brackish Tidal Marshes. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(5): 1852-1864.