

降雪对三江平原小叶章湿地系统氮输入及生态效应

周旺明^{1,2}, 王金达¹, 刘景双¹, 秦胜金^{1,2}, 王洋¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 2006年11月至2007年4月, 对降雪、地表积雪、积雪融水以及土壤(0~10 cm)渗滤液进行野外监测, 系统研究了降雪对三江平原小叶章湿地系统氮输入的影响。结果表明, 降雪中氮浓度变化明显, 其浓度受多种因素影响, 降雪中 TIN、TON 和 TN 的沉降量分别为 0.375、0.591 和 0.966 kg/hm²。地表积雪的氮库主要由地表积雪的总水量决定。积雪融水中 TIN 以 NH₄⁺-N 为主, TN 以 TON 为主; 但 NO₃⁻-N 较 NH₄⁺-N 易流失, TN 较 TON 易流失。土壤(0~10 cm)对积雪融水的 TIN、TON 和 TN 截留量分别为 1.53、0.10 和 1.63 kg/hm²。积雪融水的氮输入促进土壤微生物和植物生长, 具有明显的生态效应。

关键词: 降雪; 氮输入; 生态效应; 湿地系统; 三江平原

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2009)01-0099-06

大气氮沉降是生态系统一个重要的氮源, 其沉降量的高低直接影响生态系统的生态过程^[1]。而在寒冷季节较长的生态系统, 作为冬季降水主要形式的降雪, 以固态积雪形式存于地表, 当次年春季气温升高时迅速融化^[2,3], 使得降雪对生态系统氮输入表现为时间短、输入量大的特点。Oczkowski 等研究表明, 在春季 90 d 融化期间, 以积雪融水形式进入土壤中的营养元素, 占全年大气沉降养分输入的 39%~57%^[4]。虽然整个冬季降雪中的氮沉降量与土壤氮库(有机质层含氮为 5~50 kg/hm²)相比是可以忽略的, 但由于土壤氮库中的氮主要是腐殖质, 不能直接为生物所利用。因此, 在某些土壤有效氮供应不足的北方地区, 积雪融水中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 是一个重要的有效氮输入源。积雪融水中高浓度 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的输入, 在生长季能促进微生物转换速率和植物根系的吸收^[5]。

有关积雪中氮沉降, 国外对北方苔原和高山生态系统相关研究较多^[2~4], 而国内有关研究主要在西北地区高山生态系统^[6]。本文对三江平原沼泽小叶章湿地系统降雪中氮输入进行系统研究, 探讨其浓度变化和影响因素, 估算氮沉降量以及地表积雪与土壤之间氮素交换量, 并阐明降雪对小叶章湿地系统的生态意义。

1 研究区域及研究方法

本研究于 2006 年 10 月~2007 年 4 月在中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站草甸小叶章湿地样地进行, 详细描述见文献[7]。具体样品采集方法如下:

(1) 大气降雪样品采集方法详细描述见文献[7]。

(2) 地表积雪样品采集 将稀盐酸浸泡过的 PVC 管垂直插入地表积雪直到地面, 采集地表积雪。完整的雪柱被转移到干净的塑料袋中, 带回实验室室温融化, 融水被冰冻保存直至分析。在采集地表积雪样品的同时, 在采样点附近, 挖一个完整积雪剖面, 用 25 mL 量筒沿积雪剖面, 自下而上, 将量筒装满积雪, 在室温下融化, 其积雪融水质量(g)除以量筒体积(25 mL)可计算出地表积雪密度 (g/mL)。

(3) 地表积雪融水样品采集 在积雪融水没有与地面接触前, 用无张力托盘法, 收集积雪融水。

收稿日期: 2007-11-21

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX 2-YW-309); 国家自然科学基金资助项目 (90211003)

作者简介: 周旺明(1979-), 男, 安徽安庆人, 博士研究生, 主要从事湿地生态及氮素生物地球化学过程研究。

E-mail: zhouwangming@126.com

通讯作者: 王金达, wangjinda@neigae.ac.cn

(4) 融雪后 0~10 cm 土壤渗漏液的采集 在小叶章草甸样地, 选取 5 块 1 m × 1 m 的实验小区。由于小叶章草甸地下 0~10 cm 生物量占地下总生物量的比例达 60.14%^[8], 0~10 cm 土壤中养分对小叶章植物生长影响较大。因此, 于 10 月下旬, 在每个小区将高 12.5 cm, 直径为 7 cm PVC 管迅速插入土壤中, 取出 10 cm 土柱。在土柱底部用 10% HCl 浸泡过的密孔玻璃丝网包住, 再用管盖套住, 管盖上连接直径为 3.5 mm 硅胶管, 将 PVC 管埋回原处, 收集地表积雪融化后 0~10 cm 土壤的渗漏液(图 1)。管口离地表约 2 cm, 最小程度减少地表其它物质的进入。同时, 在各小区离土柱 30 cm 距离左右, 用相同装置做不装土柱处理, 收集地表积雪融水。积雪融化后, 立即取出塑料瓶, 将渗漏液带回实验室, 测其体积和化学性质。

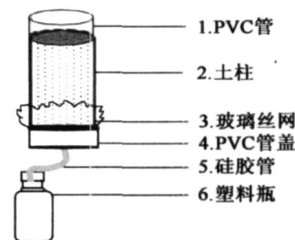


图 1 土壤渗漏收集过程示意图

Fig. 1 Sketch of extravasation and the explanation for setting

样品测定包括 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。详细方法见文献[7]。

2 结果与讨论

2.1 降雪中氮素变化

2.1.1 降雪中氮的浓度时间变化

降雪中氮素含量有明显的时间变化(图 2)。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化趋势较为相似, 在降雪初期出现峰值(分别为 0.686 和 0.359 mg/L), 其后波动降低, 并于 3 月初取得最低值(分别为 0.043 mg/L 和 0)。之后迅速上升, 于 3 月中旬浓度达最大值(分别为 1.464 和 0.472 mg/L), 峰值之后, 浓度下降。降雪中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均浓度为 0.285 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的平均浓度为 0.185 mg/L, 与西北地区降雪 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量为 0.143 mg/L 相比^[6], 三江平原降雪中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 略高。TN、TIN 和 TON 变化趋势基本一致, 在 11 月上旬和下旬达到峰值, 其中在降雪初期 TON 浓度取得最低值(0.192 mg/L)。12 月至 3 月初, TIN 变化不大, 并于 2 月中旬取得最小值(0.077 mg/L), 而 TN 和 TON 变幅较大, TN 最低值(0.348 mg/L)出现在 2 月初。3 月至 4 月, TON 浓度表现为波动上升, 并于 4 月下旬达到峰值

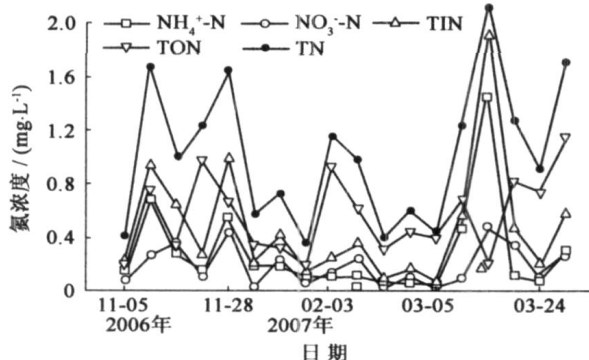


图 2 降雪中氮素浓度变化

Fig. 2 Change of nitrogen concentration in snowfall

(1.166 mg/L), 而 TN 和 TIN 于 3 月中旬取得最大值(分别为 2.140 和 1.936 mg/L), 随后迅速下降。总体而言, 在降雪初期(11 月)和降雪末期(3 月中旬至 4 月中旬)氮素含量较高, 其它时期含量较低。

降雪的化学组成决定于气团中所能捕获的有机质、雪沉降的海拔高度和降雪时期的气候条件, 人类活动也是影响降雪化学组成的一个重要因素^[5]。因此, 造成降雪中氮素含量的时间变化主要取决于以下几个因素。

人类活动。由于三江平原现已大面积开为农田, 在 10 月下旬和 3~4 月焚烧作物秸秆, 以及冬季取暖燃烧大量化学燃料。这些活动一方面产生大量的 NO_x ; 另一方面产生的大量灰尘和颗粒物, 虽然一部分由于扩散及重力作用, 以干沉降方式降落地表, 但仍有部分随降雪以湿沉降方式回到地表, 从而导致各形态氮浓度增高^[7]。风向及地理位置。该区位于三江平原东部, 由于地形作用以及处于冬季气旋活动的暖区内, 冬季多盛行西风或西南风, 春季盛行西北风^[8]。而 2 月中旬至 5 月中旬是中亚干旱、半干旱地区尘暴活动盛期, 易造成下风向地区降雪中氮含量增加^[6]。降雪强度、降雪频次和降雪温度。一般而言, 降雪中氮含量随着降雪量和降雪频次的增大而降低。但由于雪是固态形式, 不易溶解大气中氮素, 若降雪量太小, 不利于大气中氮素沉降。此外, 气温高时, 降雪中的含水量大, 湿润的降雪易吸附大气中的氮素; 而气温低时, 降雪中含水量小, 不易吸收大气中的氮素^[9]。12 月和 1 月气温较低, 降雪量只有 1.6 和 0.4 mm, 降雪频次为 3 次和 1 次, 但降雪中氮素浓度仍较低。相反, 3 月份气温回升, 虽然降雪量较大, 降雪中氮素浓度反而出现较高值。 下垫

面的影响。和其他大多数无雪无冰的陆地表面相比, 积雪表面的粗糙度非常低(0.01 cm 和 0.03 ~ 100 cm 之比), 在地表有积雪期间干沉降较低^[5]。而在降雪初期, 由于地表积雪覆盖较少, 地表灰尘等物质易进入大气, 随着降雪以干沉降方式降到地表, 增加了雪中氮的含量。

对降雪中 TIN 组成及 TN 组成来看, TIN 组成主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 占 TIN 含量平均为 59.8%; TN 组成主要以 TON 为主, TON 占 TN 含量平均为 59.44%。对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TIN、TN、TON、pH 值以及降雪量进行相关分析(数据略), 结果表明, 各形态氮浓度与降雪量成一定的负相关($p > 0.05$), 表明降雪对各形态氮的浓度有稀释作用。

2.1.2 降雪中氮沉降量的变化

$$\text{不同时段内的氮沉降量计算}^{[7]}: \text{氮沉降量}(\text{kg}/\text{hm}^2) = [(C_i \times 10^{-6} \times V_i) / A] \times 10^4 \quad (1)$$

式中 C_i 为第 i 次降雪的氮浓度, mg/L ; V_i 为第 i 次降雪时的湿沉降体积, L ; A 为采雨器横截面积, m^2 。

由上式可得出各形态氮的月沉降量, 结果表明, 各形态氮的沉降量均存在明显的月变化, 各月之间差异明显(数据略)。具体而言, 3 月份各形态氮沉降量最大, 11 月和 2 月次之, 12 月和 1 月最低。氮素沉降量由降雪中氮素浓度和降雪量决定, 相关分析表明, 降雪中氮素浓度对沉降量有一定影响, 但相关性不显著($p > 0.05$); 除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 外, 各形态氮沉降量与降雪量显著相关($p < 0.05$), 说明降雪量是氮沉降量一个重要的决定因素。逐月累加可计算出降雪中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TIN、TON 和 TN 沉降量分别为 0.220、0.155、0.375、0.591 和 0.966 kg/hm^2 , 与已有研究^[7] 结果比较可知, 降雪对全年各形态氮的沉降量贡献率达 5.53%、6.82%、5.86%、50.56% 和 12.76%。

2.2 地表积雪氮库时间变化

$$\text{不同时期地表积雪的氮库计算}^{[7]}: \text{积雪的氮库}(\text{kg}/\text{hm}^2) = (C_i \times 10^{-6} \times h \times V_i / 25) \times 10^6 \quad (2)$$

式中 C_i 为第 i 次取地表积雪的氮浓度, mg/L ; h 为积雪深度, cm ; V_i 为第 i 次取地表积雪时的 25 mL 积雪融水体积, mL 。

表 1 表明, 地表积雪深度在 4 月份之前, 一直呈增加趋势。积雪密度先减小后增加, 这主要由于在降雪初期, 降雪中的含水量较大, 随着气温降低, 降雪含水量减少, 相应密度也减小。3 月份积雪密度达最大值, 一方面是由于此时地表积雪深度较大, 增加了积雪的自身压实; 另一方面气温回升, 积雪表层融化产生的融水下渗, 形成冰层, 加大了积雪的密度^[9]。

积雪的氮素有明显的时间变化, 如表 1 所示, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TIN 都表现为先降后升, 这种变化趋势同降雪中氮素含量变化趋势相似(图 2), 说明积雪中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TIN 含量主要受降雪 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TIN 含量影响。TON 含量表现为先升后降, 这可能由于 11 月份秸秆焚烧产生的大量灰尘无法在短时间内降落地表, 在气流和重力作用下逐渐降落, 这些颗粒物含有大量有机氮^[7]。而 2 月之后, 降雪量增大同时降雪中 TON 含量较低, 对积雪中高含量的 TON 起到稀释作用。TN 含量一直降低, 这主要是由于降雪初期降雪中 TN 含量较高(图 2), 1 月份降雪中 TN 浓度较低, 而 2 月份和 3 月份降雪量较大。

表 1 积雪的总水量及氮库变化

Table 1 Change of water and nitrogen reservoir in snowpack

| 日期 | 积雪 | | | 积雪氮素含量/(mg L^{-1}) | | | | | 积雪氮库/(kg hm^{-2}) | | | | |
|--------|------------------------------|----------------------|--|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|-------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|-------|
| | 密度 (g mL^{-1}) | 积雪深度/ cm | 积雪总水量 ($\text{m}^3 \text{hm}^{-2}$) | TN | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | $\text{NO}_3^-\text{-N}$ | TIN | TON | TN | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | $\text{NO}_3^-\text{-N}$ | TIN | TON |
| 11月23日 | 0.266 | 4.0 | 10.64 | 2.280 | 0.911 | 0.651 | 1.562 | 0.718 | 0.243 | 0.097 | 0.069 | 0.166 | 0.076 |
| 1月16日 | 0.220 | 5.9 | 12.98 | 1.738 | 0.061 | 0.036 | 0.097 | 1.641 | 0.226 | 0.008 | 0.005 | 0.013 | 0.213 |
| 2月14日 | 0.194 | 26.0 | 50.44 | 1.578 | 0.195 | 0.266 | 0.461 | 1.117 | 0.796 | 0.098 | 0.134 | 0.233 | 0.563 |
| 3月29日 | 0.340 | 30.5 | 103.70 | 1.355 | 0.358 | 0.264 | 0.622 | 0.733 | 1.405 | 0.371 | 0.274 | 0.645 | 0.760 |

由积雪深度、密度和积雪中氮含量, 计算出地表积雪总水量和氮库(表 1)。地表积雪总水量从 11 月到次年 3 月表现为一直增加。积雪中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TIN 和 TN 总量表现为先降低后升高, 而 TON 总量一直增加。

将积雪各形态氮素含量、积雪总水量与各形态氮库作相关分析,结果表明,积雪氮库与积雪中氮素含量相关性不显著($p > 0.05$);与地表积雪总水量的相关系数在0.9以上,除 NH_4^+ -N外,显著相关($p < 0.05$),说明地表积雪氮库主要由地表积雪的总水量决定。而积雪的氮库大于降雪氮沉降量,也说明地表积雪除来自大气降雪外,还接受了部分大气干沉降。

2.3 积雪融水氮素变化

表2为积雪融水pH值及各氮素浓度变化。积雪融水中的pH值随着积雪融化而降低, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N和TIN浓度都表现为先增加后降低,而TON和TN则表现为先降低后增加。积雪融水中的TIN, NH_4^+ -N所占比例不断增大,这与前人研究结果相似,在积雪中氮损耗主要以 NH_4^+ -N流失为主^[11]。结果表明,积雪融化时, NO_3^- -N较 NH_4^+ -N易流失,TIN较TON易流失,淋溶作用不仅能够强烈地影响到积雪内离子的迁移作用,而且不同离子间存在淋溶择优性(preferential elution)^[10]。

表2 积雪融水pH值及氮浓度

mg/L

Table 2 pH and nitrogen concentration in snowpack melt-water

| 日期 | pH | NH_4^+ -N | NO_3^- -N | TIN | TON | TN |
|------------|------------|--------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| 2007-04-07 | 6.32 | 0.208 | 0.117 | 0.117 | 0.933 | 1.258 |
| 2007-04-09 | 6.31(0.01) | 0.288(0.05) | 0.152(0.01) | 0.440(0.04) | 0.288(0.17) | 0.728(0.23) |
| 2007-04-11 | 6.16(0.21) | 0.203(0.08) | 0.089(0.02) | 0.292(0.07) | 1.156(0.44) | 1.448(0.38) |

注:表格中值为平均值±标准差($n=2$),括号内数据为两个重复的标准差。

2.4 土壤0~10 cm对地表积雪融水的氮截留

土壤对积雪融水氮素截留量计算:截留量(kg/hm^2) = $[(C_0 \times 10^{-6} \times V_0 - C_1 \times 10^{-6} \times V_1) / A] \times 10^4$ (3)

式中 C_0 为积雪融水的氮浓度, mg/L ; V_0 为积雪融水体积, mL ; C_1 为渗漏液的氮浓度, mg/L ; V_1 为渗漏液的体积, mL ; A 为PVC横截面积, cm^2 。

如表3所示,尽管在同一研究地点,各小区塑料瓶中收集的溶液浓度差异却较大;相对而言,渗漏液的氮素浓度差异较小,其中 NO_3^- -N浓度太低而未检测出。分析表明,除TON外,地表积雪融水的氮素浓度差异显著高于渗漏液的氮素浓度($p < 0.05$, $n=5$)。积雪融水经过土柱后,各形态氮浓度都降低。TON降幅较小,而TIN降幅较大,其中 NO_3^- -N完全被土壤截留。渗漏液的pH值比积雪融水低,这主要是由于该区域土壤呈弱酸性有关(pH值为4.14~5.72)^[8]。

表3 地上输入和地下流失浓度及积雪与土壤之间氮交换量

Table 3 Concentration of surface input and subsurface loss and exchange amount of nitrogen between snowpack and soil

| 测试项目 | 地上输入/ (mg L^{-1}) | 渗漏液/ (mg L^{-1}) | 输入量/ (kg hm^{-2}) | 流失量/ (kg hm^{-2}) | 截留量/ (kg hm^{-2}) |
|--------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| pH | 6.86(0.17) | 5.69(0.05) | | | |
| NH_4^+ -N | 0.67(0.35) | 0.11(0.01) | 0.86(0.45) | 0.15(0.01) | 0.71 |
| NO_3^- -N | 0.63(0.26) | - | 0.82(0.33) | - | 0.82 |
| TIN | 1.30(0.60) | 0.11(0.01) | 1.68(0.78) | 0.15(0.01) | 1.53 |
| TON | 1.01(0.38) | 0.94(0.08) | 1.31(0.49) | 1.21(0.1) | 0.10 |
| TN | 2.32(0.43) | 1.05(0.08) | 2.99(0.55) | 1.36(0.1) | 1.63 |

注:表格中值为平均值±标准差($n=5$), - - 表示未检测出。

结合溶液体积可计算出地表积雪融化对土壤氮输入量和土壤渗漏液中氮流失量,从而得出土壤截留量(表3)。与降雪氮沉降量和表2相比,可以看出,地表积雪融化进入土壤各形态氮输入量,比降雪的各形态氮沉降量和地表积雪的各形态氮库多。Brooks等研究表明,地表积雪融化进入土壤的TIN(NH_4^+ -N和 NO_3^- -N)输入量高于大气降雪的TIN(NH_4^+ -N和 NO_3^- -N)沉降量。这主要是一方面由于地表积雪接受大气干沉降和周边地区灰尘,增加了地表积雪氮含量;另一方面,由于在积雪融化时,受积雪融水淋溶作用,地表枯落物释放大量营养物质,提高了积雪融水中各形态氮含量^[11]。从土壤截留氮的形态组成来看,TIN占TN的93.87%, NH_4^+ -N和 NO_3^- -N分别占TIN的46.41%和53.59%。说明土壤对积雪融水氮的固持以TIN为主,而且对 NO_3^- -N吸附比

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 强。虽然融雪中的 TIN 一般只占土壤中 TIN 库的 5% ~ 25%^[10], 但研究表明, 春季积雪融水和土壤溶液混合, 通过物质传递和扩散, 增加了土壤底物可利用性, 是春季微生物活性迅速增加的一个重要原因, 而春季土壤微生物活动强弱是控制土壤氮流失的主要因素^[11]。

2.5 降雪对湿地生态系统影响及生态意义

湿地生境中, 水因子(包括水深和水位波动)常常是影响湿地植物生存的主导因子, 湿地水文不仅左右着湿地的物理、化学与生物学功能和生态价值, 也对湿地发育演化和景观效益的维持起到关键性作用。已有研究表明, 冬季积雪决定次年春季湿地地表积水的水位, 由于水位变化, 直接导致生物量鲜重、含水量和烘干重差异明显($p < 0.05$)^[12]。因此, 冬季的降雪量直接决定着湿地春季水深和水位波动, 间接影响到湿地生态系统的群落结构和生物地球化学过程。而从 1981 - 2004 年年平均降水量和冬季(11月~次年4月)平均降雪量来看(图 3), 年平均降水量呈减少趋势, 但冬季的降雪量变化较小。

N^{15} 示踪研究表明, 积雪融水的矿质氮大都进入土壤无机氮库^[10]。土壤中无机氮主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为主, 土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是植物吸收的主要氮源。而三江平原地区的降雪中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TIN 沉降量分别达 0.22、0.155 和 0.966 kg/hm²。因此, 降雪是春季湿地土壤微生物和植物生长的一个重要氮源。

对淡水沼泽植物体 N/P 研究发现, $\text{N/P} < 14$, 植物生长受 N 限制; N/P 介于 14 ~ 16 之间, 则同时受 N、P 的限制; $\text{N/P} > 16$, 则受 P 限制。而小叶章 N/P 比的均值为 5.76, 说明受 N 素限制; 此外, 湿地土壤的 N/P 比介于 1.22 ~ 10.82 之间, 均值为 3.81 ± 0.50 ^[13]。降雪中 N/P 介于 5.1 ~ 38.8 之间, 平均值为 18.0 ± 11.7 ; 进入土壤的积雪融水 N/P 介于 14.2 ~ 20.7 之间, 平均值为 17.7 ± 3.3 。其 N/P 比均高于植物和土壤 N/P 比, 说明降雪中氮素输入, 改变了湿地环境的 N/P 比, 对湿地植物生长有一定的影响。

3 结 论

(1) 三江平原降雪中 TIN 以 TON 为主, TIN 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 所占比例较高; 在降雪初期和晚期氮素浓度较高, 其浓度变化受多种因素影响; 整个冬季, 降雪中 TIN、TON 和 TN 沉降量分别为 0.375、0.591 和 0.966 kg/hm²。

(2) 积雪融水中 TIN 以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, TN 以 TON 为主; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 较 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 易流失, TIN 比 TON 易淋失; 表层土壤(0 ~ 10 cm)对地表积雪融水氮截留主要以 TIN 为主, 对积雪融水的 TIN、TON 和 TN 的截留量分别为 1.53、0.1 和 1.63 kg/hm²。

(3) 降雪直接决定了次年春季湿地水深和水位波动, 影响湿地生物地球化学过程; 降雪中氮沉降是湿地植物和土壤微生物生长的一个重要氮源; 降雪中的氮沉降改变湿地环境 N/P 比, 对植物的生长有一定影响; 从而突出降雪对北方湿地生态系统的重要意义。

参考文献:

- [1] ABER J D, GOODALE C L, OLLINGER S V, et al. Is nitrogen deposition altering the nitrogen status of northeaster forests? [J]. *BioScience*, 2003, 53(4): 375 - 389.
- [2] RASCHER C M, DRISCOLL C T, PETERS N E. Concentration and flux of solutes from snow and forest floor during snowmelt in the West-Central Adirondack region of New York[J]. *Biogeochemistry*, 1987, 3: 209 - 224.
- [3] 李元寿, 王根绪, 丁永建, 等. 青藏高原高寒草甸区土壤水分的空间异质性[J]. *水科学进展*, 2008, 19(1): 61 - 67. (LI Yuan

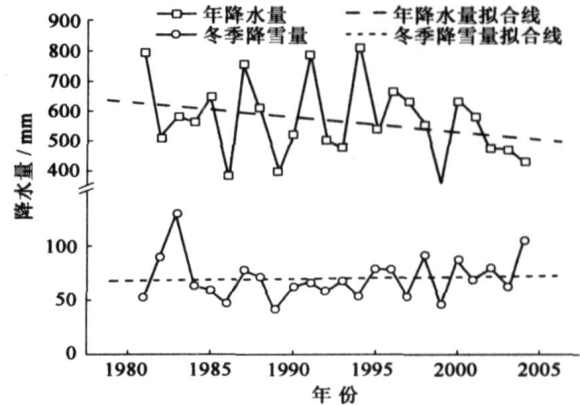


图 3 年平均降水量和冬季降雪量变化趋势

Fig. 3 Change trend in average annual precipitation and precipitation in winter

- shou, WANG Gern-xu, DING Yong-jiang, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture in alpine meadow area of the Qinghai-Xizang plateau. *Advances in water science*, 2008, 19(1): 61 - 67. (in Chinese))
- [4] AUTUMN J O, BRIAN A P, CHRISTOPHER W H, et al. The role of snowmelt and spring rainfall in inorganic nutrient fluxes from a large temperate watershed, the Androscoggin River basin (Maine and New Hampshire) [J]. *Biogeochemistry*, 2006, 80: 191 - 203.
- [5] JONES H G. Snow chemistry and biological activity: a particular perspective of nutrient cycling[J]. *Ecological Sciences*, 1991, 28: 21 - 66.
- [6] 侯书贵, 秦大河. 积雪淋溶作用对冰川雪层内主要阴、阳离子记录的影响[J]. *地理科学*, 1999, 19(6): 536 - 542. (HOU Shu-gui, QIN Da-he. The ion elution effect on the main ion profiles of the glacier snowpacks[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(6): 536 - 542. (in Chinese))
- [7] 孙志高, 刘景双, 王金达. 三江平原典型湿地系统大气湿沉降中氮素动态及其生态效应[J]. *水科学进展*, 2007, 18(2): 182 - 192. (SUN Zhi-gao, LIU Jing-shuang, WANG Jin-da. Dynamics of nitrogen in the atmospheric wet deposition and its ecological effects in typical wetland ecosystem of Sanjiang plain[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 182 - 192. (in Chinese))
- [8] 刘兴士, 马学慧. 三江平原自然环境变化与生态保育[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 94. (LIU Xing-tu, MA Xue-hui. *Natural environmental changes and ecological protection in the Sanjiang plain*[M]. Beijing: Science Press, 2002: 94. (in Chinese))
- [9] 何元庆, THEAKSTONE W H. 山地温性积雪内液体水含量的测定方法[J]. *山地学报*, 1999, 17(4): 289 - 293. (HE Yuan-qing, THEAKSTONE W H. A method for measuring liquid water content in the alpine temperate snowpack[J]. *Journal of Mountain Science*, 1999, 17(4): 289 - 293. (in Chinese))
- [10] MARK W W, PAUL D B, ARVIN M, et al. Mineral nitrogen transformations in and under seasonal snow in a high-elevation catchment in the Rocky Mountains, United States[J]. *Water resources research*, 1996, 32(10): 3161 - 3171.
- [11] BROOKS P D, WILLIAMS M W, SCHMIDT S K. Inorganic nitrogen and microbial biomass dynamics before and during spring snowmelt[J]. *Biogeochemistry*, 1998, 43: 1 - 15.
- [12] GLENN A B, KEVIN C, LUCIEL, et al. Antecedent snow conditions affect water levels and plant biomass of a fen in the southern boreal forest: Results from an experiment using mesocosms[J]. *Boreal Environment Research*, 2007, 12: 501 - 513.
- [13] 孙雪利, 刘景双, 褚衍儒. 三江平原小叶章和毛果苔草中 N 素营养动态分析[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(6): 893 - 897. (SUN Xue-li, LIU Jing-shuang, CHU Yan-ru. Nitrogen dynamics in different organs of *Calamagrostis angustifolia* and *Carex lasiocarpa* in Sanjiang plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(6): 893 - 897. (in Chinese))

Nitrogen input of snowfall in *Deyeuxia angustifolia* wetland system in Sanjiang Plain and its ecological effects^{*}

ZHOU Wang-ming^{1,2}, WANG Jin-da¹, LIU Jing-shuang¹, QIN Sheng-jin^{1,2}, WANG Yang¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to study the effect of nitrogen (N) input of snowfall on the *Deyeuxia angustifolia* wetland ecosystem in Sanjiang Plain, the snowfall, snow-pack, snow melting-water and leakage solution of soil (0 ~ 10 cm) were monitored from November 2006 to April 2007. The results show that the seasonality of the N concentration in snowfall is evident, and influenced by the manifold factors. The deposition of TIN, TON and TN in snowfall are 0.375, 0.591 and 0.966 kg/hm² in winter, respectively. The snow-pack reservoir determines the N reservoir. The NH₄⁺-N and TON are the main body of TIN and TN in the snow melting-water, respectively, but the NO₃⁻-N and TIN lose more easily than NH₄⁺-N, TON, respectively. The interceptions of TIN, TON and TN are 1.53, 0.1 and 1.63 kg/hm² by soil (0 ~ 10 cm) respectively. The nitrogen input of snow melting-water has direct ecological signification which stimulates growth of the plant and the microbe in soil.

Key words: snowfall; nitrogen input; ecological effect; marsh ecosystem; Sanjiang plain

^{*} The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 90211003).