

伊犁河谷大气氮湿沉降特征研究——以首府伊宁市为例

张伟, 余婷, 何娇, 刘忠权* (新疆伊犁职业技术学院农业工程学院, 新疆伊宁 835000)

摘要 为研究伊宁市大气氮素湿沉降的变化特征, 2020年5月—2021年4月进行采样, 并定量分析大气氮沉降各形态组分的变化特征。结果表明, 伊宁市年平均总氮湿沉降量为 6.15 kg/hm^2 , 其中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 湿沉降量为 1.33 kg/hm^2 , $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 湿沉降量为 2.78 kg/hm^2 , 可溶性有机氮(DON)湿沉降量为 2.04 kg/hm^2 ; 无机活性总氮(TIN)湿沉降量占总氮(TN)比例为 66.83%, DON 占 TN 比例为 33.17%。湿沉降量与降雨量呈显著正相关, 湿沉降量在春季、冬季较高, 占全年总湿沉降量的 59.02%。伊宁市氮湿沉降量接近西部干旱地区氮沉降临界负荷 $4 \sim 10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。因此, 该地区水体富营养化及陆地生态系统(如草原、森林)的安全问题需要得到关注。

关键词 大气氮; 湿沉降; 变化特征; 伊犁河谷; 伊宁市

中图分类号 X51 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)17-0066-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.17.016



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Yili River Valley—Taking Yining City as an Example

ZHANG Wei, YU Ting, HE Jiao et al (School of Agricultural Engineering, Xinjiang Yili Vocational and Technical College, Yining, Xinjiang 835000)

Abstract In order to study the variation characteristics of atmospheric nitrogen wet deposition in Yining City, sampling was carried out from May 2020 to April 2021, and the variation characteristics of various forms and components of atmospheric nitrogen deposition were quantitatively analyzed. The results showed that the total nitrogen (TN) deposition were 6.15 kg/hm^2 , of which nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) deposition was 1.33 kg/hm^2 , ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) deposition was 2.78 kg/hm^2 , and soluble organic nitrogen (DON) deposition was 2.04 kg/hm^2 . Inorganic total nitrogen (TIN) deposition accounted for 66.83% of TN, DON accounted for 33.17% of TN. Wet deposition flux was positively correlated with rainfall. Wet deposition flux was higher in spring and winter, accounting for 59.02% of total N deposition. The wet N deposition in Yining City was close to the critical nitrogen deposition load of $4 \sim 10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ in western arid areas. Therefore, the eutrophication of water bodies and the safety of terrestrial ecosystems (such as grasslands, forests) in the region need to be concerned.

Key words Atmospheric nitrogen; Wet deposition; Variation characteristics; Yili River Valley; Yining City

大气氮沉降是指大气中的各种活性氮通过干、湿沉降等形式从大气中清除的过程。氮沉降具有双面效应, 氮作为植物生长的必需营养元素, 早期能为植物生长供应所需氮素营养, 但是随着沉降量超越自然临界负荷后又可连锁诱发诸如土壤酸化、水体富营养化、生物多样性减退等负面效应, 社会经济也因此蒙受巨大损失, 甚至直接威胁人类的健康^[1-3]。随着人类活动干扰加剧, 如矿物燃烧、化学氮肥的施用以及畜牧业的规模化发展使得向大气中排放的活性氮激增, 大气氮素沉降也相应快速增加。随着我国经济的快速发展, 大气活性氮的排放量快速增加, 到 2010 年已高达 56 Tg ^[4]。

新疆是我国干旱区的主体, 属典型的山地-绿洲-荒漠生态系统, 而伊犁河谷作为干旱区绿洲生态系统受人为因素影响严重, 人口由 2000 年的 208 万增长至 2020 年的 284 万, 由此估计通过大气沉降带入的氮素等养分数量将明显增加, 但由于缺乏系统的沉降资料目前还难以对其生态效应进行全面评价。伊宁市作为伊犁河谷最大的城市, 也是国家“一带一路”沿线支点城市。因此, 开展伊宁市大气氮湿沉降监测, 有利于为评价我国干旱区绿洲(伊犁河谷)环境养分的输入数量和时空分布规律提供数据支持。

1 资料与方法

1.1 研究区域概况

伊宁市位于新疆西北边陲, 地处伊犁

河谷盆地中央, 地理坐标为 $43^\circ 50' \sim 44^\circ 09' \text{ N}$, $80^\circ 04' \sim 81^\circ 29' \text{ E}$ 。伊宁市属北温带大陆性气候, 年均气温 $10.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 年均降水量 235 mm , 农业生产以种植业、畜牧养殖为主。伊宁市作为伊犁州直首府, 现有总人口 54.75 万, 是国家“一带一路”沿线支点城市, 也是北疆重要城市。

1.2 样品采集 该研究采用雨水采集法, 是使用 SDM6 固定雨量器(包括不锈钢漏斗和玻璃瓶)手动收集每次降水, 并用 25 mm 雨量筒(最小刻度 0.1 mm)记录降雨量。每次降水取全过程样, 如有连续降水过程, 则 08:00—次日 08:00 为一次样品。降水样品充分混匀后立即用 50 mL 干净的聚乙烯瓶储存, 并暂时在 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境中存放。

1.3 样品分析与数据处理 每个收集的样品用 $0.45 \text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 用 AA3 连续流动分析仪测定, TN 经过硫酸钾氧化后, 紫外分光光度法测定。湿沉降量计算公式如下:

$$C_w = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

$$D_w = \frac{P_t \times C_w}{100} \quad (2)$$

式(1)中, C_w 是一段时期内 n 个降水样本计算的平均浓度 (mg/L); C_i 是第 i 次单个样本浓度 (mg/L); P_i 是第 i 次降雨量 (mm)。式(2)中, D_w 为湿沉降量 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; P_t 为一段时期内所有降水的总量 (mm); 100 为单位转换系数。

湿沉降总氮(TN)包括无机活性总氮(TIN)和可溶性有机氮(DON), TIN 是 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 之和; DON 采用差减法, $\text{DON} = \text{TN} - \text{TIN}$ 。通过 Excel 对原始数据进行分析, 采用

基金项目 新疆维吾尔自治区重大专项(2020B01006); 伊犁职业技术学院 2020 年度科研项目(2020002)。

作者简介 张伟(1986—), 男, 山东阳谷人, 讲师, 硕士, 从事生态环境治理与建设方面的研究。* 通信作者, 副教授, 硕士, 从事植物资源研究。

收稿日期 2021-10-31

SPSS 软件对数据进行相关统计。

2 结果与分析

2.1 大气氮湿沉降浓度特征分析 采样期间,伊宁市共降水 58 次,年降水量为 236.71 mm。对大气氮湿沉降所有样品中无机活性氮 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 进行分析,从图 1 可以看出,伊宁市大气氮湿沉降中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 的浓度大部分分布在 2.00 mg/L 以下,分别占总次数的 82.75%、67.24%。总体上看, NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 的年平均浓度分别为 0.57、1.17 mg/L,最大值分别为 5.04、6.94 mg/L,最小值分别为 0.04、0.29 mg/L,说明 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 在浓度分布范围上变化较大,可能除了受排放源季节影响外,还与连续降水冲刷造成浓度持续降低有关。

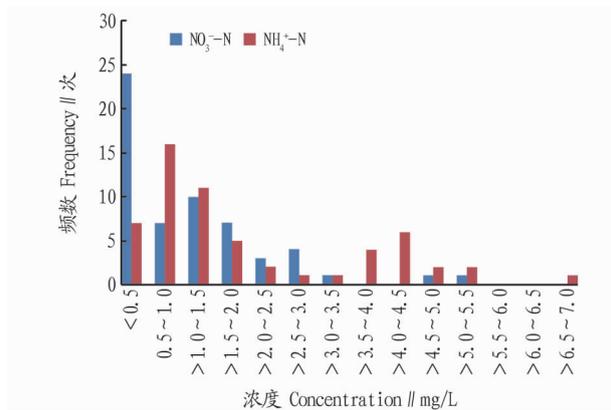


图 1 无机活性氮浓度的频数分布

Fig. 1 Frequency distribution of inorganic active nitrogen concentration

降水中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 的浓度以及 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N 值关系如图 2 所示,该研究期间 NO_3^- -N 月均浓度为 0.34~1.16 mg/L,月均浓度均低于 NH_4^+ -N 月均浓度; NH_4^+ -N 月均浓度为 0.49~2.45 mg/L,月均浓度变化较大,其中 4—7 月份都高于 1.79 mg/L。 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N 值为 1.46~3.98,从全年变化来看,3—8 月份比值均大于 2,考虑 3 月底开始当地雪水逐渐融化,开始春耕生产至 8 月份都是农忙季节,该时期以 NH_4^+ -N 排放源为主导较为明显。

由图 3 可知,TN 月均浓度为 1.10~4.42 mg/L,最低值出现在 9 月份;DON 月均浓度为 0.05~1.85 mg/L,最低值出现在 4 月份。从整个监测时间来看, NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、DON、TN 平均浓度分别为 0.57、1.17、0.86、2.60 mg/L。从季节变化分析湿沉降变化特征,从图 4 可以看出,TN 浓度为 1.95~3.35 mg/L,其中春夏季节浓度明显高于秋冬季节;DON 浓度为 0.56~1.31 mg/L,春季浓度高于其他季节; NO_3^- -N 浓度为 0.45~0.82 mg/L,夏季和冬季浓度高于春季和秋季; NH_4^+ -N 浓度为 0.78~1.78 mg/L,春季和夏季浓度明显高于秋季和冬季。

2.2 大气氮湿沉降量特征分析 从图 5 可以看出,湿沉降无机氮组分 NO_3^- -N 月均沉降量为 0.04~0.21 kg/hm²,年均沉降量为 1.33 kg/hm²; NH_4^+ -N 月均沉降量为 0.07~0.36 kg/hm²,年均沉降量为 2.78 kg/hm²;DON 月均沉降量

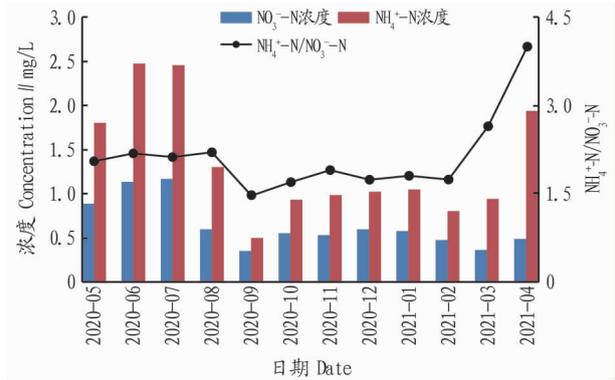


图 2 2020 年 5 月—2021 年 4 月无机活性氮月均浓度变化以及 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N 值月变化

Fig. 2 The monthly average concentration change of inorganic reactive nitrogen and the monthly change of NH_4^+ -N/ NO_3^- -N value from May 2020 to April 2021

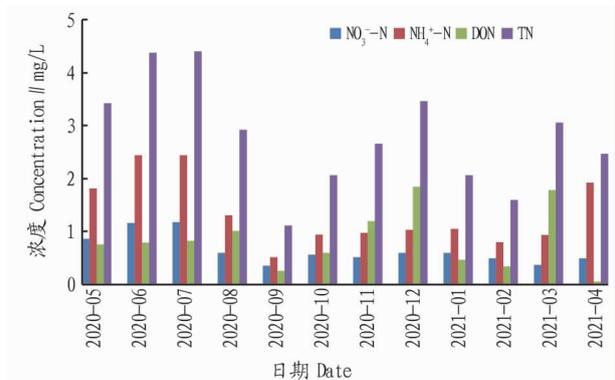


图 3 2020 年 5 月—2021 年 4 月不同形态氮浓度的月变化

Fig. 3 Monthly variation of nitrogen concentration in different forms from May 2020 to April 2021

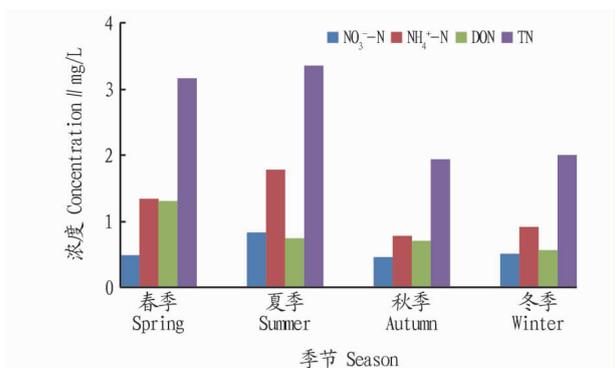


图 4 不同形态氮浓度的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of nitrogen concentration in different forms

为 0.01~0.63 kg/hm²,年均沉降量为 2.04 kg/hm²;TN 月均沉降量为 0.16~1.09 kg/hm²,年均沉降量为 6.15 kg/hm²。从季节分布来看(图 6),降水主要集中在春季和冬季,占全年降水量的 61.41%; NO_3^- -N 沉降量以冬季最高(0.42 kg/hm²),秋季最低(0.20 kg/hm²); NH_4^+ -N 沉降量以秋季最低(0.35 kg/hm²),春季最高(0.86 kg/hm²),是秋季的 2.46 倍;DON 沉降量以春季最高(0.76 kg/hm²),冬季次

之(0.52 kg/hm²),2个季节沉降量为全年的66.76%;TN沉降量以春季最高(1.94 kg/hm²),秋季最低(0.89 kg/hm²)。总体上大气氮沉降量从大到小依次为春季[1.94 kg/(hm²·a)]>冬季[1.69 kg/(hm²·a)]>夏季[1.63 kg/(hm²·a)]>秋季[0.89 kg/(hm²·a)]。

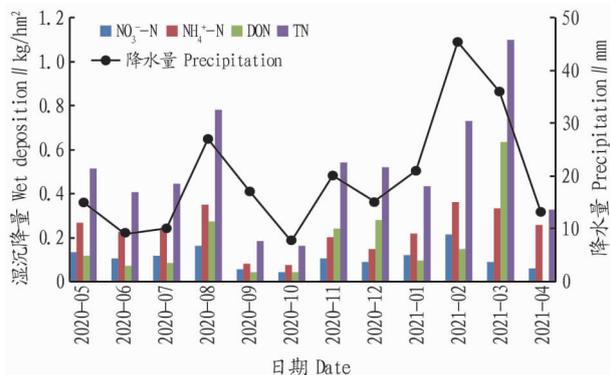


图5 2020年5月—2021年4月各形态氮湿沉降量和降水量的月变化

Fig.5 Monthly variation of nitrogen wet deposition of different forms and precipitation from May 2020 to April 2021

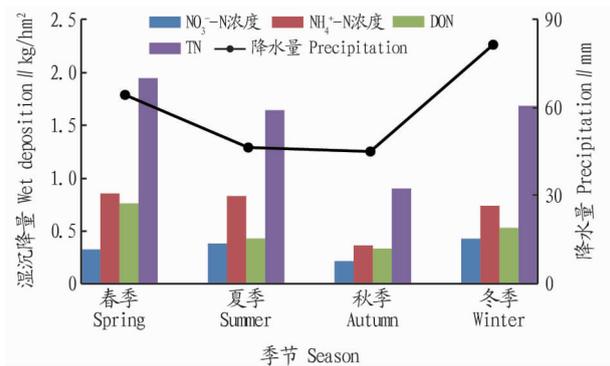


图6 各形态氮湿沉降量和降水量的季节变化

Fig.6 Seasonal variation of nitrogen wet deposition of different forms and precipitation

Liu等^[13]的研究按照氮湿沉降(NO_3^- -N、 NH_4^+ -N湿沉

降)在全国范围沉降通量的大小划分为高、中、低3个沉降区,新疆属于低沉降区[$<15 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]行列。该研究中伊宁市2020年5月—2021年4月TN湿沉降量为 $6.15 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,与低沉降区划分值相符。从表1可以看出,与国内其他城市相比,TIN年沉降量高于西藏林芝县[$2.36 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$],与乌鲁木齐市[$6.0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]相近,低于其他东部城市。这是由于经济发达地区人口稠密,也是工农业相对发达和氮肥的高投入地区,因此活性氮的排放显著高于西部欠发达地区^[14]。但是从氮沉降的不同形态浓度来看, NO_3^- -N质量浓度为 $0.57 \text{ mg}/\text{L}$,高于林芝县($0.10 \text{ mg}/\text{L}$),是乌鲁木齐市浓度的57.00%、太原市的4.42%; NH_4^+ -N质量浓度为 $1.17 \text{ mg}/\text{L}$,高于林芝县($0.36 \text{ mg}/\text{L}$),是乌鲁木齐市浓度的90.00%、太原市的32.50%。从以上结果比较来看,伊宁市与乌鲁木齐市相比,在交通运输、工业化规模方面差距较大。

氮沉降和富营养化临界负荷估算表明^[15],我国已有约15%的土地超过临界负荷,威胁到了生态系统健康。研究发现我国的氮沉降临界负荷总体上呈现东高西低的走向,新疆氮沉降临界负荷为 $4 \sim 10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[7,16-18]。该研究TN湿沉降量为 $6.15 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,说明研究区域氮沉降已经接近临界负荷上限。

伊宁市大气氮湿沉降量在不同形态所占质量分数由大到小依次为 NH_4^+ -N(45.20%)>DON(33.17%)> NO_3^- -N(21.63%),可见DON是氮素湿沉降的重要组成部分。但是现有的研究多集中于降水中无机氮的定量^[19],对于有机氮的定量研究较少。事实上,这部分氮素在大气氮沉降中占有相当大的比例,张海霞等^[20]研究发现有机氮在氮湿沉降量中所占比例最大。从表1可以看出,DON浓度与沈阳市监测结果接近,但是沉降量仅占沈阳市的30.96%,说明两地间降水量差距较大。

2.3 大气氮湿沉降与降雨的相关性分析 对伊宁市大气氮湿沉降的各形态氮每个月沉降量和降水量进行相关性分析,结果发现(表2),各形态的氮沉降量与降水量均呈显

表1 该研究和全国其他城市大气氮湿沉降各形态的比较

Table 1 Comparison of various forms of atmospheric nitrogen wet deposition between this study and other cities in China

监测点 Monitoring point	时间 Time	浓度 Concentration//mg/L				湿沉降量 Wet deposition//kg/(hm ² ·a)					文献来源 Literature resources
		NO_3^- -N	NH_4^+ -N	DON	TN	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	TIN	DON	TN	
伊宁市 Yining City	2020—2021	0.57	1.17	0.86	2.60	1.33	2.78	4.11	2.04	6.15	该研究
沈阳市 Shenyang City	2012	0.87	1.57	0.82	3.26	7.02	12.56	19.58	6.59	26.17	[5]
太原市 Taiyuan City	2016—2017	12.90	3.60			31.00	9.00	40.00			[6]
太原市远郊 Outer suburbs of Taiyuan	2016—2017	1.30	1.60			6.00	8.20	14.20			[6]
西宁市城郊 Xining Suburbs	2014—2015	1.80	2.20			6.20	7.60	13.80			[7]
林芝县 Nyingchi County	2005—2006	0.10	0.36			0.45	1.91	2.36			[8]
乌鲁木齐市 Urumqi	2009—2010	1.00	1.30			2.40	3.60	6.00			[9]
乌鲁木齐城郊 Suburbs of Urumqi	2009—2010	1.00	2.20			2.60	6.20	8.80			[9]
重庆 Chongqing	2002—2016					8.76	20.33	29.09			[10]
山东惠民 Shandong Huimin	2003—2004	1.33	2.51			7.85	15.81	23.60			[11]
河北曲周 Hebei Quzhou	2003—2004	1.63	3.26			7.62	15.90	23.60			[11]
北京 Beijing	2010—2014	2.30	2.90					31.10			[12]
郑州 Zhengzhou	2010—2014	1.90	2.30					32.50			[12]

著正相关($P < 0.05$), $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 之间沉降量呈极显著正相关($P < 0.01$), DON 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 沉降量均呈正相关, TN 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 DON 沉降量均呈极显著正相关($P < 0.01$)。

表 2 各形态氮湿沉降量和降水量的相关系数

Table 2 The correlation coefficient of nitrogen wet deposition of various forms and precipitation

因子 Factor	降水 Precipitation	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	DON	TN
降水 Precipitation	1				
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	0.77**	1			
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	0.69**	0.85**	1		
DON	0.57*	0.33	0.44	1	
TN	0.76**	0.70**	0.80**	0.88**	1

注: ** 表示极显著相关($P < 0.01$), * 表示显著相关($P < 0.05$)

Note: ** means extremely significant correlation ($P < 0.01$), * means significant correlation ($P < 0.05$)

3 讨论

根据已有的研究^[21-23]证明, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要来源于农业化肥和畜禽养殖造成的氨挥发, 另外, 机动车在低速行驶时, 燃油燃烧不完全也会有氨的排放; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要来源于化石燃料燃烧和汽车尾气排放; DON 主要来源于以生物释放、扬尘和大气化学反应为主的自然源与以工业生产、化肥及化石燃料燃烧和生物质能燃烧为主的人为源。不同形态氮沉降量所占比例不同, TIN 湿沉降量为 $4.11 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 在 TN 中占 66.83%, 说明无机活性氮是氮沉降的主要形态。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 湿沉降量为 $2.78 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 在 TIN 中占 67.64%, 说明在当地农牧业占主要地位, 农业施肥量大或畜牧养殖量大。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 值在湿沉降中可以用来表示农业和工业活动对氮沉降的相对贡献^[24-25], 该研究中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 值为 2.05, 说明研究区域氮沉降以农业来源排放的氮沉降为主。伊宁市作为一座旅游城市, 工业化程度低, 并且所处的伊犁河谷是以农牧业为主, 所以来自农业源的氨氮所占比例较高。该研究中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 值 > 1 , 与伊宁市发展状况相一致。

该监测点研究区域湿沉降存在季节性差异, 总体上春季 $>$ 冬季 $>$ 夏季 $>$ 秋季。3 个季节的沉降量明显高于秋季, 其原因有几个方面: 一是春夏季节是伊犁河谷作物种植、畜牧生产的季节, 肥料的大量施用、畜牧养殖造成大量活性氮的挥发; 二是湿沉降通量与降水量呈显著正相关, 冬季、春季较大降水使沉降量增长; 三是冬季伊犁河谷燃煤供暖, 化石燃料燃烧及城市机动车交通拥堵造成活性氮排放量明显增长; 四是从沉降浓度来看, 春夏季节浓度较高, 经过 2 个季节雨水冲刷使秋季浓度下降, 以及秋季庄稼成熟收获后, 农田开始处于闲置状态, 导致沉降通量降低。

4 结论

(1) 在监测期内, 伊宁市大气氮湿沉降中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 DON 、 TN 平均浓度分别为 0.57、1.17、0.86、2.60 mg/L 。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度峰值集中在 5—7 月份, 秋季浓度明显低于其他 3 个季节; DON 浓度在春季和冬季较高。从沉降量来看, TN 沉降量为 $6.15 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 低于东

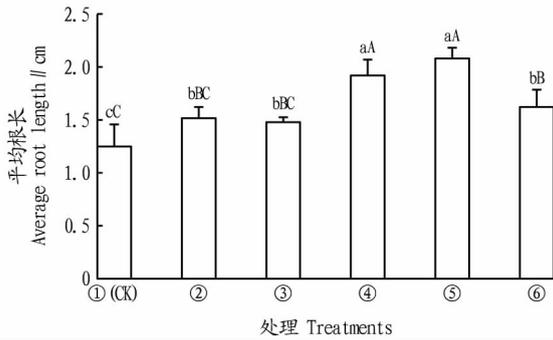
部省份监测结果。 TIN 占 TN 沉降量的 66.83%, 说明氮沉降是以无机活性氮为主。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 是 TIN 沉降量中的主要组成部分, 所占比例为 67.64%。在已有的氮沉降相关研究中, 对 DON 沉降量分析较少, 但是在该研究中发现 DON 占 TN 沉降量的 33.17%, 说明 DON 在氮沉降中也占有一定的比例。在研究大气氮沉降的相关研究中, 加强对 DON 的研究是很有必要的。

(2) 大气氮湿沉降量与降水量的相关性分析表明, 不同形态的氮沉降量均与降水量呈显著正相关($P < 0.05$), $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 之间沉降量呈极显著正相关($P < 0.01$)。降水量增长, 湿沉降量随之增长, 降水量集中在冬季、春季, 氮沉降量呈春季高于夏秋季。

(3) 伊犁河谷位于新疆西北, 生态系统脆弱, 该研究 TN 湿沉降量为 $6.15 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 如果再将氮素干沉降量计算在内, 总的沉降量已接近或超过了新疆氮沉降临界负荷值 $4 \sim 10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。因此, 该地区水体富营养化及陆地生态系统(如草原、森林)的安全问题需要得到关注, 建立与完善大气氮沉降长期监测系统势在必行。

参考文献

- [1] LU X K, MAO Q G, GILLIAM F S, et al. Nitrogen deposition contributes to soil acidification in tropical ecosystems[J]. *Global change biology*, 2014, 20(12): 3790–3801.
- [2] LIU X J, DUAN L, MO J M, et al. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview[J]. *Environmental pollution*, 2011, 159(10): 2251–2264.
- [3] SUN Y L, ZHUANG G S, TANG A A, et al. Chemical characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in haze-fog episodes in Beijing[J]. *Environmental science & technology*, 2006, 40(10): 3148–3155.
- [4] CUI S H, SHI Y L, GROFFMAN P M, et al. Centennial-scale analysis of the creation and fate of reactive nitrogen in China (1910–2010) [J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2013, 110(6): 2052–2057.
- [5] 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[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(3): 741–747.
- [6] 梁亚宇, 李丽君, 宋志辉, 等. 太原地区大气氮湿沉降变化特征[J]. *地球与环境*, 2019, 47(4): 405–411.
- [7] 许稳, 金鑫, 罗少辉, 等. 西宁近郊大气氮干湿沉降研究[J]. *环境科学*, 2017, 38(4): 1279–1288.
- [8] 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.
- [9] LI K H, LIU X J, SONG W, et al. Correction: Atmospheric nitrogen deposition at two sites in an arid environment of central Asia[J]. *PLoS One*, 2013, 8(6): 1–9.
- [10] 侯思宇, 于兴娜, 龚克坚, 等. 重庆市大气降水污染及其沉降特征[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(10): 4100–4107.
- [11] 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.
- [12] XU W, LUO X S, PAN Y P, et al. Quantifying atmospheric nitrogen deposition through a nationwide monitoring network across China[J]. *Atmospheric chemistry and physics*, 2015, 15(21): 12345–12360.
- [13] LIU X J, SONG L, HE C N, et al. Nitrogen deposition as an important nutrient from the environment and its impact on ecosystems in China[J]. *Journal of arid land*, 2010, 2(2): 137–143.
- [14] 刘文竹, 王晓燕, 樊彦波. 大气氮沉降及其对水体氮负荷估算的研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(5): 88–93, 101.
- [15] ZHAO Y H, ZHANG L, CHEN Y F, et al. Atmospheric nitrogen deposition to China: A model analysis on nitrogen budget and critical load exceedance[J]. *Atmospheric environment*, 2017, 153: 32–40.
- [16] ZHAO Y, DUAN L, LARSSON T, et al. Simultaneous assessment of deposition effects of base cations, sulfur, and nitrogen using an extended critical load function for acidification[J]. *Environmental science & technology*, 2007, 41(6): 1815–1820.



注:不同大、小写字母表示处理间在 0.01 和 0.05 水平差异显著

Note: Different large and small letters indicate significant differences between treatments at the levels of 0.01 and 0.05

图 4 不同浓度 IBA 对河桦“热杜拉”平均根长的影响

Fig. 4 Effects of different concentrations of IBA on the average root length of *Betula nigra* 'Dura Heat'

度的提高,插条生根率、生根数、根总长以及平均根长均出现下降,特别是 5 000 mg/kg IBA 处理(处理⑥)相较于 3 000 mg/kg 处理(处理④),其插条生根率、生根数、根总长和平均根长均出现了极显著下降,这说明高浓度的 IBA 对插条生根区造成伤害,抑制愈伤组织与不定根的形成^[11]。因此,适合河桦“热杜拉”扦插生根的 IBA 处理浓度以 3 000 mg/kg

为好。

参考文献

- [1] 宋晓东,张杰,贾纯仁,等.白桦扦插繁殖试验[J].辽宁林业科技,1999(3):1-3.
- [2] 陈叶平,赵颖,徐嘉科,等.河桦扦插繁殖试验[J].山东林业科技,2014,44(1):34-36.
- [3] 姜玉东,熊佑清,张军民.不同生根粉浓度对 5 种木本植物插穗萌发和生根的影响[J].中国农学通报,2021,37(14):52-58.
- [4] 唐欣,屈克红,胡长玉.激素和扦插基质对高山杜鹃插穗生根状态的影响[J].安徽农业科学,2018,46(32):43-45,48.
- [5] AMRI E. The effect of auxins (IBA, NAA) on vegetative propagation of medicinal plant *Bogunnia madagaseariensis* (Desv.) J. H. Kirkbr & Wiersema[J]. Tanzania journal of natural and applied sciences, 2011, 2(2): 359-366.
- [6] BASHIR M A, ANJUM M A, CHAUDHRY Z, et al. Response of *Jobba (Simmondsia chinensis)* cuttings to various concentrations of auxins [J]. Pakistan journal of botany, 2009, 41(6): 2831-2840.
- [7] RANA R S, SOOD K K. Effect of cutting diameter and hormonal application on the propagation of *Ficus roxburghii* Wall. through branch cuttings [J]. Annals of forest research, 2012, 55(1): 69-84.
- [8] 詹亚光,杨传平,金贞福,等.白桦插穗生根的内源激素和营养物质[J].东北林业大学学报,2001,29(4):1-4.
- [9] KOCHHAR S, SINGH S P, KOCHHAR V K. Effect of auxins and associated biochemical changes during clonal propagation of the biofuel plant-*Jatropha curcas* [J]. Biomass and bioenergy, 2008, 32(12): 1136-1143.
- [10] HUSEN A. Clonal propagation of *Dalbergia sissoo* Roxb. and associated metabolic changes during adventitious root primordium development [J]. New forests, 2008, 36(1): 13-27.
- [11] 王书胜,单文,张乐华,等.基质和 IBA 浓度对云锦杜鹃扦插生根的影响[J].林业科学,2015,51(9):165-172.

(上接第 69 页)

- [17] 余倩,段雷,郝吉明.中国酸沉降:来源、影响与控制[J].环境科学学报,2021,41(3):731-746.
- [18] UNECE. Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends [R]. 2004.
- [19] CORNELL S E. Atmospheric nitrogen deposition: Revisiting the question of the importance of the organic component [J]. Environmental pollution, 2011, 159(10): 2214-2222.
- [20] 张海霞,赵亚伟,王小剑.邯郸市大气氮干湿沉降通量及其特征[J].环境污染与防治,2019,41(11):1329-1334.
- [21] 苏成国,尹斌,朱兆良,等.农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应[J].土壤,2005,37(2):113-120.

(上接第 107 页)

按地形分类,古国槐在浅山区分布最多,丘陵区长势最好,多数古国槐分布于浅山区村落建设用地上,可见人为管理保护是古树生长的关键因子;济源土壤多为褐土,用地类型土壤成分差异不大,对古国槐长势总体影响小,但是可以看到水肥和光照的差异也会影响古国槐的胸(地)围、株高和冠幅。国槐喜光喜湿润,阳坡和河边分布更多的古国槐,另外古国槐多生长在地势较平缓的地方,海拔高度集中在 900 m 以下,400~<600 m 最适合古国槐生长。

古国槐的形成是很多环境因子的共同结果,国槐是适应能力很强的乡土树种,即便是在个别较差环境中,仍可以成长为百年古树,可见国槐耐贫瘠、耐干旱、抗性强,是很顽强的乡土树种,适合于济源荒山造林、乡村美化和城市绿化。

古树名木是人类宝贵的财富,现有的保护措施不足以使许多衰弱和濒危的古国槐恢复生机,因此还要不断加强古国

- [22] 石金辉,高会旺,张经.大气有机氮沉降及其对海洋生态系统的影响[J].地球科学进展,2006,21(7):721-729.
- [23] PAN Y P, TIAN S L, LIU D W, et al. Fossil fuel combustion-related emissions dominate atmospheric ammonia sources during severe haze episodes: Evidence from ¹⁵N-stable isotope in size-resolved aerosol ammonium [J]. Environmental science & technology, 2016, 50(15): 8049-8056.
- [24] ZHAN X, YU G, HE N, et al. Inorganic nitrogen wet deposition: Evidence from the North-South Transect of Eastern China [J]. Environmental pollution, 2015, 204: 1-8.
- [25] ZHU J X, HE N P, WANG Q F, et al. The composition, spatial patterns, and influencing factors of atmospheric wet nitrogen deposition in Chinese terrestrial ecosystems [J]. Science of the total environment, 2015, 511: 777-785.

槐的养护复壮技术的研究和应用^[10]。

参考文献

- [1] 全国绿化委员会.全国绿化委员会关于进一步加强古树名木保护管理的意见[J].国土绿化,2016(2):8-10.
- [2] 刘鹏,徐立,吴盛德,等.湖北省城区古树资源现状及保护对策[J].南方林业科学,2019,47(2):35-40.
- [3] 李程,罗鹏,邓秀秀,等.古树名木生长状况与环境因子关系研究:以浙江省古樟树为例[J].中南林业科技大学学报,2015,35(11):86-93.
- [4] 周小娟,孙毅宁,刘杰.郑州市城区国槐生长与健康状况调查[J].安徽农业科学,2021,49(12):129-132,136.
- [5] 周亚爽,蒋泽军.河南省古树名木资源调查分析[J].绿色科技,2021,23(1):129-132,135.
- [6] 国家林业局.古树名木普查技术规范:LY/T 2738—2016[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [7] 任军战,张向锋,琼琼洁,等.济源古林区分布分析与应用[J].林业科技通讯,2021(10):101-103.
- [8] 周奥.武汉市中心城区古树名木的现状与保护研究[D].武汉:湖北大学,2021.
- [9] 任军战,琼琼洁,彭颖,等.济源市乔木林资源变化分析[J].林业科技通讯,2020(4):51-54.
- [10] 王守龙,原佩剑.济源市古树名木种质资源调查分析与保护意见[J].安徽农业科学,2019,47(12):134-135,138.