

黄河三角洲滨海地区植物生长季大气氮沉降动态

宁 凯^{1,2,3}, 于君宝^{1,2}, 屈凡柱^{1,2,3}, 王光美^{1,2}, 管 博^{1,2}

(1.中国科学院烟台海岸带研究所,中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室,山东省海岸带环境过程重点实验室,山东烟台 264003;2.山东省海岸带环境过程重点实验室,山东烟台 264003;3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:利用 SCJ-302 型降水降尘自动采样器在植物生长季对黄河三角洲滨海湿地的大气氮沉降进行监测,对沉降物中水溶性离子、干、湿沉降氮输入量、铵态氮和硝态氮在总沉降量中的贡献率及月变化动态等分析表明:黄河三角洲植物生长季,大气干、湿沉降中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 占阴离子总量的 92% 以上,和 Na^+ 和 Ca^{2+} 占阳离子总量的 80% 以上,总 N 沉降量约为 $2\ 264.24\ \text{mg}/\text{m}^2$,且 69% 集中在降雨量较丰沛的 6~8 月。其中干沉降氮贡献率约为 32.02%,主要集中在春季。N 的湿沉降量与降雨量呈显著正线性相关($R^2=0.82$),在降雨量丰沛的 8 月,达到最大值 $675.64\ \text{mg}/\text{m}^2$ 。该地区大气干沉降的氮素形态以硝态氮为主,约占氮素输入量的 57.21%,湿沉降中以铵态氮为主,约占氮素输入量的 56.51%。植物生长季中,大气沉降中的硝态氮与铵态氮含量对表层 10 cm 土壤的月平均贡献率分别为约 31.38% 和 20.50%,可见大气氮沉降是黄河三角洲滨海区域土壤主要氮素来源之一。

关键词:大气干、湿沉降;硝态氮;铵态氮;黄河三角洲

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2015)02-0218-06

大气的干、湿沉降是陆地和海洋生态系统物质运输的重要途径之一^[1,2],大气氮素沉降是含氮化合物从大气中移出并被运至各景观表面的过程^[3]。这些来自大气中的氮素会对陆地及海洋生态系统产生深远影响^[4-12],进入到土壤-植物系统的氮素已经成为生态系统氮循环的一个重要参数^[13]。自 20 世纪 50 年代以来,国外就开展了氮沉降的相关研究,其中美国和欧洲均建立了较完整的氮沉降的监测网络^[14-17]。Zhang 等对华北平原的氮素输入进行的研究显示,北京、河北、山东共 11 个监测点年平均无机氮素沉降量为 $27\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ^[18]。Fan 等研究发现东南部的森林生态系统大气无机氮干沉降对总沉降的贡献率为 78.6%,并且铵态氮为主要的贡献者,高达 86.1%^[19]。三江平原典型湿地系统氮沉降监测结果表明植物生长季是全年氮沉降的重要时期^[20]。目前,对黄河三角洲滨海湿地地区大气氮沉降的研究相对较少,本研究依托中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站,对黄河三角洲滨海湿地生态系统的氮沉降进行初步研究,目

的在于探索滨海湿地生态系统氮干、湿沉降的组成及植物生长季氮沉降的月变化动态,氮沉降输入对湿地土壤氮素的贡献份额,为滨海湿地氮素生物地球化学循环研究、退化湿地的修复提供科学依据与数据支持。

1 监测点与采样分析方法

1.1 监测点概况

大气沉降物采集布设在中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站($118^{\circ}58'\text{E}$, $37^{\circ}45'\text{N}$)实验样地内。监测点主要植被类型为芦苇(*Phragmites australis*)和盐地碱蓬(*Suaeda salsa*),四周开阔,附近无高大建筑物。该地区属于温带大陆性季风气候,四季分明,冷热干湿界限极明显,春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽多晴天,冬季少雪干燥^[21]。年平均气温 12.1°C ,年降水量 $551.6\ \text{mm}$ 。区域内自然植被以水生植被和盐生植被为主(占 85% 以上)^[22]。

收稿日期:2014-01-25; **修订日期:**2014-04-18

基金项目:十二五国家科技支撑计划项目(2011BAC02B01)、山东省自然科学基金项目(JQ201114)和中国科学院国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划项目(Y02A071041)资助。

作者简介:宁 凯(1986-),男,博士研究生,主要从事生物地球化学研究。E-mail: kning@aliyun.com

通讯作者:于君宝,研究员。E-mail: junbao.yu@gmail.com

1.2 采样与分析

自2012年5~11月,利用SCJ-302型降水降尘自动采样器(青岛轩汇仪器设备有限公司生产)自动采集大气干、湿沉降样品,干沉降采样桶直径142 mm,该采样器灵敏度为0.05 mm/h。无降水事件时,顶盖遮挡湿沉降收集桶,进行干沉降样品收集。在降水事件发生60 s内,自动遮挡干沉降收集桶,湿沉降收集桶开始取样,固定于地面以上0.7 m处的雨量传感器(TE525 tipping bucket gauge, Texas Electronics, Texas, USA)对降水量进行监测。降水停止5 min后,顶盖遮挡湿沉降收集桶,恢复原样,继续收集干沉降样品。干沉降样品每月收集1次,湿沉降样品每次降雨过后收集1次。所有样品采用离子色谱仪(ICS3000, Dionex USA)分析滤液中的8种水溶性离子(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-}),总无机氮含量(简称总氮)估算为铵态氮与硝态氮沉降量之和。利用干湿沉降收集桶的截面积及体积,计算出单位面积干、湿沉降离子总数及氮干、湿沉降量。

监测时段内,每月采集一次表层土壤(0~10 cm),用2 mol/L的KCl浸提后,通过连续流动分析仪(Seal-Branlubbe AA3, Seal Germany)测定硝态氮、铵态氮含量。同时,采用环刀法测定土壤容重。

1.3 数据处理

采用Excel 2010软件进行基本数据的处理,图形绘制采用Origin 7.5和Excel 2010等软件完成,使用SPSS 20软件进行相关性分析,采用Pearson相关系数评价。

2 结果与讨论

2.1 沉降离子浓度及组成

干、湿沉降中阴阳离子组成见图1。可见,在黄河三角洲干湿沉降中, Na^+ 和 SO_4^{2-} 分别是最主要的阳离子和阴离子,在干沉降中, Na^+ 占阳离子数总和的71.34%,平均浓度为3.16 meq/L,其次是 Ca^{2+} 和 NH_4^+ ,分别约占总阳离子的16.24%和9.29%,3种阳离子之和占阳离子总量的95%以上,而 K^+ 和 Mg^{2+} 的含量较少。在大气干沉降中, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 含量较高,分别占总阴离子的78.9%和14.87%,平均浓度分别为3.16 meq/L和0.68 meq/L,合占总阴离子数的93.78%(图1a)。大气湿沉降中主要因阳离子的组成与干沉降类似,湿沉降中的 Ca^{2+} 和 NH_4^+ 所占比例相对于干沉降中有所增加,分别达到30.42%和14.26%,平均浓度分别为0.39 meq/L和0.16 meq/L; SO_4^{2-} 占总阴离子的77.86%(图1b)。通过对比发现,不同区域之间大气干、湿沉降中离子组成差异较大,如蔡阳阳等对北京城区大气干沉降的水溶性离子的研究以及Balestrini等对意大利北部地区大气干湿沉降的研究均显示, Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 分别是含量最丰富的阴、阳离子组分^[23,24]。而本区域大气干湿沉降中离子组成以 Na^+ 和 SO_4^{2-} 为主,其最主要的原因与黄河三角洲地区高含盐量潮土和盐土广泛分布和土壤盐碱化严重密切相关,土壤中 Na^+ 含量可达42.61 cmol/kg,占土壤阳离子总量的86.49%^[25]。

单位面积大气干、湿沉降样品的阴离子总数

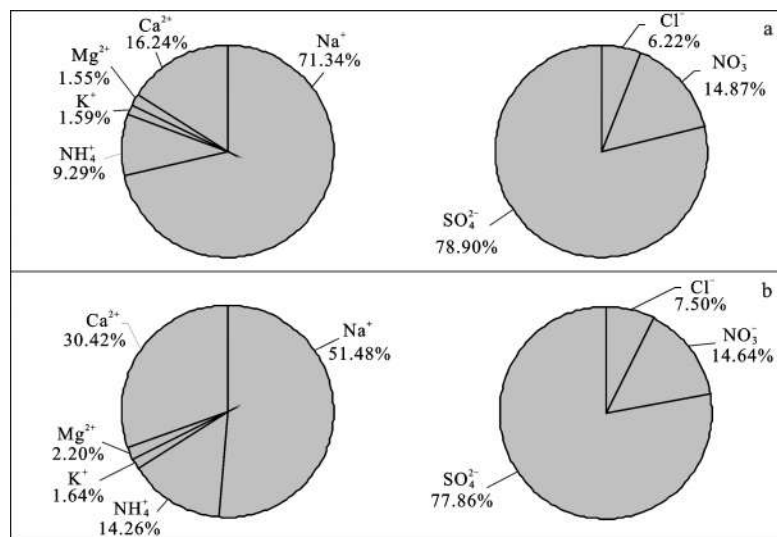


图1 大气干(a)、湿(b)沉降中水溶性离子数百分比

Fig.1 The percentage of water-soluble ionic in dry(a) and wet(b) atmospheric deposition

和与阳离子总数之间均显著相关(图2),相关系数 R^2 分别为 0.86 和 0.80。虽然大部分阴阳离子数之间的比值小于 1,即相对于总阳离子数而言,总阴离子数有一定的缺失,造成这一现象的主要原因可能是由于样品中还包含一些未测定的离子,如 F^- , Br^- 以及某些低碳链有机阴离子等^[26]。

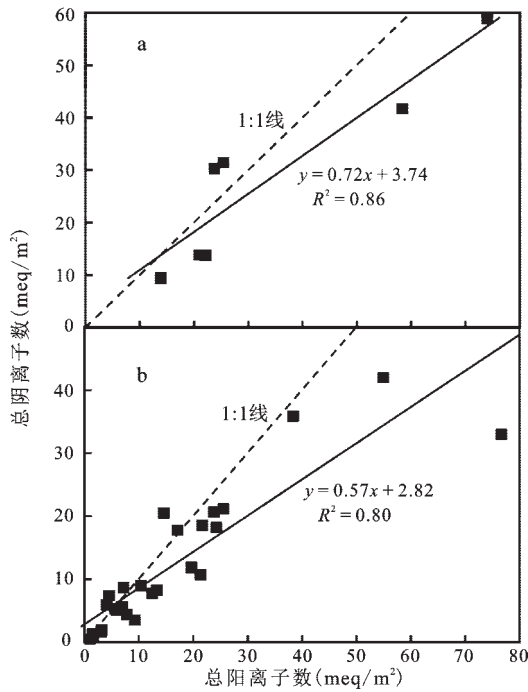


图2 大气干(a)、湿沉降(b)阴阳离子数
Fig. 2 The anion and cation numbers in dry(a) and wet(b) atmospheric depositions

2.2 干、湿沉降中硝态氮与铵态氮月动态变化

干沉降的氮素形态主要以硝态氮为主,占干

沉降氮输入量的 57.21%。石油和生物体的燃烧及氮的自然氧化(如雷击等)是大气沉降中硝态氮的主要来源,而该地区具有丰富的石油、天然气等矿产资源,采样点所在的东营市分布着胜利油田 3 个主要的采油厂,这可能是造成此地区硝态氮沉降量较高的一个重要原因。同时,采样点距海较近,受海陆风的影响,冬春季风从陆地吹向海洋,监测点附近大气氮沉降受周围的油田等工业污染影响强烈,因此,干沉降中,硝态氮含量春季高,夏、秋季较低,从表 1 以及图 3a 可看出,氮干沉降量最大值及硝态氮沉降的最大值均出现在 5 月,分别为 139.99 mg/m^2 和 113.89 mg/m^2 。Dentener FJ 等提出大气沉降中的铵态氮主要来自于肥料、土壤、家畜粪便以及植物的燃烧^[27]。随着农业活动的进行以及气温与降水的增多导致湿地铵氮挥发量增加,因此从 7 月开始,监测到干沉降中的铵态氮含量明显增多(图 3a)。

监测时段内,湿沉降中氮素主要以铵态氮形态为主,占湿沉降氮输入量的 56.51%,且湿沉降中铵态氮含量随降雨量的变化更显著(相关系数 $R^2=0.90$)。铵态氮的沉降量主要集中在降雨丰富的 6~8 月,而此期间农业活动中施肥量也较多,肥料中的铵态氮的大量施用以及高温天气加速湿地生态系统铵态氮的挥发,使得随降雨沉降土壤的铵态氮含量明显增加,在 8 月降雨量达到最大值 297.3 mm 时,湿沉降中的铵态氮含量随之达到最大值 452.24 mg/m^2 (图 3b)。而硝态氮的湿沉降量随降雨量发生的变化不如铵态氮明显。

2.3 干、湿沉降中氮沉降总量变化

研究区各月氮沉降量变化见表 1,试验期间内

表 1 大气氮沉降量的月变化
Table 1 The monthly variation of atmospheric nitrogen deposition

月份 (月)	干沉降		湿沉降		NO ₃ ⁻ -N		NH ₄ ⁺ -N		总 N 输入量 (mg/m ²)
	N 含量 (mg/m ²)	所占比例 (%)	N 含量 (mg/m ²)	所占比例 (%)	含量 (mg/m ²)	所占比例 (%)	含量 (mg/m ²)	所占比例 (%)	
5	139.99	53.68	120.79	46.32	178.55	68.47	82.23	31.53	260.78
6	103.62	27.39	274.77	72.61	242.70	64.14	135.69	35.86	378.39
7	119.84	30.04	279.03	69.96	175.42	43.98	223.44	56.02	398.87
8	111.12	14.12	675.64	85.88	280.22	35.62	506.54	64.38	786.76
9	77.70	41.99	107.34	58.01	97.72	52.81	87.32	47.19	185.03
10	91.66	60.89	58.88	39.11	77.15	51.25	73.38	48.75	150.54
11	81.00	77.98	22.88	22.02	32.37	31.17	71.50	68.83	103.87
总计	724.92	32.02	1539.32	67.98	1084.13	47.88	1180.11	52.12	2264.24

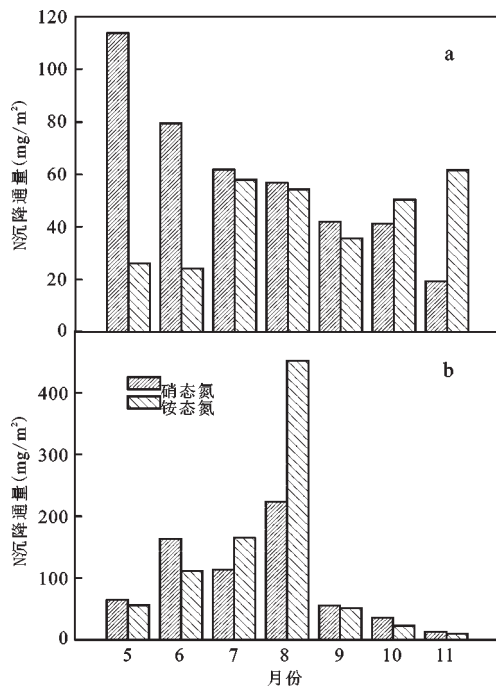


图3 硝态氮与铵态氮干(a)、湿(b)沉降的月动态变化
Fig.3 The monthly variations of NO_3^- -N and NH_4^+ -N
in dry (a) and wet (b) atmospheric depositions

大气的氮素输入主要是通过湿沉降完成,占氮素总沉降量的67.98%。黄河三角洲地区春季较强风力的作用,导致附近土壤中的元素进入空气中,又以干沉降的形式回到地面,因此5月干沉降中的氮素量较高。6~8月,随着降雨量的增加(图4),以及夏季风力较小,氮素的湿沉降贡献率逐渐增加,并在降雨量最大的8月,湿沉降总氮量达到最大值,为675.64 mg/m^2 。9月之后,降雨量急剧减少,湿沉

降的贡献率随之逐渐降低。总的来说,研究区大气氮沉降呈现出显著的季节性差异,沉降量在春夏季较大,秋季较小,这与房增国等^[28]在青岛地区以及贾钧彦等^[29]在藏东南地区的研究结果相似。进一步分析表明,降雨量与氮湿沉降量呈显著正线性相关($R^2=0.82$),即降雨量越大,氮素的湿沉降量就越多(图4)。降雨频率与氮湿沉降量的相关性不显著($R^2<0.7$)。

从干、湿沉降中氮形态的角度看,2012年5~11月干、湿沉降输入的硝态氮总量与铵态氮总量十分接近,对总沉降量的贡献率分别为47.88%和52.12%(表1)。

通过对土壤连续定位监测表明,植物生长季表层0~10 cm土壤中月平均硝态氮、铵态氮密度分别约为493.49 mg/m^2 和822.36 mg/m^2 。大气沉降的硝态氮与铵态氮对表层土壤硝态氮与铵态氮的月平均贡献率分别约为31.38%和20.50%,由此可见大气氮沉降是黄河三角洲滨海区域土壤主要氮素来源之一。

3 主要结论

1) 黄河三角洲滨海地区大气干沉降离子组成中, Na^+ 和 Ca^{2+} 占阳离子总数的87.58%, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 占阴离子总数的93.77%;湿沉降的阳离子中 Na^+ 和 Ca^{2+} 占81.90%,阴离子中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 占92.5%。

2) 研究区域氮素干沉降量主要集中在春季,其最大值约为139.99 mg/m^2 ,氮干沉降以硝态氮为主,其最大值出现在5月,为113.89 mg/m^2 。氮素

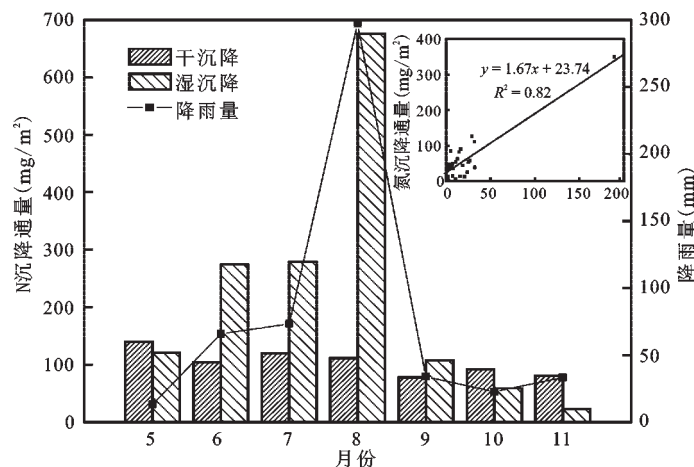


图4 氮素干、湿沉降与降雨量的关系
Fig.4 The relationship of dry and wet atmospheric nitrogen depositions with precipitation

湿沉降及铵态氮湿沉降与降雨量均呈显著正线性相关(R^2 分别为0.82, 0.90), 氮素湿沉降及铵态氮湿沉降的最大值均出现在降雨量最多的8月, 分别为675.64 mg/m²和452.24 mg/m²。

3) 黄河三角洲地区氮沉降具有明显的季节性, 其中69%集中在降雨量较丰沛的6~8月。其中湿沉降输入的氮素约占总沉降量的67.98%。

4) 大气硝态氮沉降与铵态氮沉降对表层0~10 cm土壤硝态氮与铵态氮的月平均贡献率分别为31.38%和20.50%。

致 谢: 本研究工作得到中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站的大力支持。

参考文献:

- [1] 张金良,于志刚,张 经.大气的干湿沉降及其对海洋生态系统的影响[J].海洋环境科学,1999,18(1):70~76.
- [2] Galloway J N,Townsend A R,Erisman J W,et al.Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J].Science,2008,320(5878): 889-892.
- [3] 王小治,朱建国,高 人,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.
- [4] Matson P A,McDowell W H,Townsend A R,et al.The globalization of N deposition: ecosystem consequences in tropical environments[J].Biogeochemistry,1999,46(1-3):67-83.
- [5] 肖辉林.大气氮沉降对森林土壤酸化的影响[J].林业科学,2001,37(4):111~116.
- [6] Aber J D,Nadelhoffer K J,Stuedler P,et al.Nitrogen saturation in northern forest ecosystems[J].Bioscience,1989,39(6):378~386.
- [7] Bobbink R,Hormung M,Roelofs J G M.The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation[J].Journal of Ecology,1998,86(5): 717-738.
- [8] Duce R A,LaRoche J,Altieri K,et al.Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean [J].Science,2008,320(5878):893-897.
- [9] Krupa S V.Effects of atmospheric ammonia (NH₃) on terrestrial vegetation: a review[J].Environmental Pollution,2003,124(2): 179-221.
- [10] Owens N J P,Galloway J N,Duce R A.Episodic Atmospheric Nitrogen Deposition To Oligotrophic Oceans[J].Nature,1992,357(6377):397-399.
- [11] Liu X J,Song L,He C E,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.
- [12] Goulding K W T,Bailey N J,Bradbury N J,et al.Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes[J].New Phytologist,1998,139(1):49-58.
- [13] Asman W A H,Sutton M A,Schjorring J K.Ammonia: emission, atmospheric transport and deposition[J].New Phytologist,1998,139(1):27-48.
- [14] Lamb D,Bowersox V.The national atmospheric deposition program: an overview[J].Atmospheric Environment,2000,34(11): 1661-1663.
- [15] Erisman J W,Hensen A,Mosquera J,et al.Deposition monitoring networks: what monitoring is required to give reasonable estimates of ammonia/ammonium?[J].Environmental Pollution, 2005,135(3):419-431.
- [16] Dise N B,Wright R F.Nitrogen Leaching from European Forests in Relation to Nitrogen Deposition[J].Forest Ecology and Management,1995,71(1-2):153-161.
- [17] Fenn M E,Poth M A,Aber J D,et al.Nitrogen excess in North American ecosystems: Predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies[J].Ecological Applications,1998, 8(3):706-733.
- [18] Zhang Y,Liu X J,Fangmeier A,et al.Nitrogen inputs and isotopes in precipitation in the North China Plain[J].Atmospheric Environment,2008,42(7):1436-1448.
- [19] Fan J L,Hu Z Y,Wang T J,et al.Atmospheric inorganic nitrogen deposition to a typical red soil forestland in southeastern China [J].Environmental Monitoring and Assessment,2009,159(1-4): 241-253.
- [20] 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.
- [21] 董洪芳,于君宝,孙志高,等.黄河口滨岸潮滩湿地植物-土壤系统有机碳空间分布特征[J].环境科学,2010,31(6):1594~1599.
- [22] 贺 强,崔宝山,赵欣胜,等.水盐梯度下黄河三角洲湿地植被空间分异规律的定量分析[J].湿地科学,2007,5(3):208~214.
- [23] 蔡阳阳,杨复沫,贺克斌,等.北京城区大气干沉降的水溶性离子特征[J].中国环境科学,2011,31(7):1071~1076.
- [24] Balestrini R,Galli L,Tartari G.Wet and dry atmospheric deposition at prealpine and alpine sites in northern Italy[J].Atmospheric Environment,2000,34:1455-1470.
- [25] 翁永玲,宫 鹏.黄河三角洲盐渍土盐分特征研究[J].南京大学学报(自然科学),2006,42(6):602~610.
- [26] Zhang F Z,Zhang J Y,Zhan H R,et al.Chemical composition of precipitation in a forest area of Chongqing, southwest China[J]. Water Air and Soil Pollution,1996,90(3-4):407-415.
- [27] Dentener F J,Crutzen P J.A 3-Dimensional Model Of The Global Ammonia Cycle[J].Journal of Atmospheric Chemistry,1994, 19(4):331-369.
- [28] 房增国,赵秀芬.青岛大气氮湿沉降动态变化[J].水土保持学报,2013,27(1):263~266.
- [29] 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.

Atmospheric Nitrogen Deposition During Growing Season in Coastal Zone of the Yellow River Delta

NING Kai^{1,2,3}, YU Jun-bao^{1,2}, QU Fan-zhu^{1,2,3}, WANG Guang-mei^{1,2}, GUAN Bo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai, Shandong 264003, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Wet and dry atmospheric depositions were monitored in plant growing season in coastal wetland of Yellow River Delta using SCJ-302 model automatic sampling equipment. The water-soluble ions, wet and dry atmospheric N depositions, monthly variation and the proportion of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in total nitrogen deposition were analyzed. The results showed that SO_4^{2-} and NO_3^- accounted for more than 92% of the anion numbers, Na^+ and Ca^{2+} accounted for more than 80% of the cation numbers, respectively, in wet and dry atmospheric depositions in growing season in the Yellow River Delta. The total atmospheric nitrogen deposition was about 2 264.24 mg/m^2 , and 69% of it occurred from June to August in which the precipitation was abundant. In the total atmospheric nitrogen deposition, dry atmospheric nitrogen deposition accounted for about 32.02%, and it was high in spring. The significant positive relationship between wet nitrogen deposition and precipitation was observed in the study ($R^2=0.82$). The wet atmospheric nitrogen deposition reached peak value in August (675.64 mg/m^2). In the studied area, the predominant nitrogen in dry atmospheric deposition was $\text{NO}_3^-\text{-N}$ with about 57.21% of total dry atmospheric nitrogen deposition, while the predominant nitrogen in wet atmospheric deposition was $\text{NH}_4^+\text{-N}$ with about 56.51% of total wet atmospheric nitrogen deposition. In plant growing season, the average monthly attribution rate of atmospheric deposition of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were about 31.38% and 20.50% for the contents of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in 10 cm soil layer, respectively. Therefore, the atmospheric nitrogen was one of main sources for soil nitrogen in coastal zone of Yellow River Delta.

Key words: dry and wet atmospheric deposition; $\text{NO}_3^-\text{-N}$; $\text{NH}_4^+\text{-N}$; the Yellow River Delta