

# 环境科学

# ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.11
第41卷 第11期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第11期
2020年11月15日

# 目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第11期2020年11月
Vol.41, No.11 Nov., 2020

# 氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响

张薇, 倪邦, 许秀春, 杨轩, 孟凡乔*
(中国农业大学环境与资源学院, 农田土壤污染防控与修复北京市重点实验室, 北京 100193)

**摘要**: 氨挥发是农田作物生产中氮肥损失的主要途径之一,对空气质量有重要影响. 为研究我国北方地区化肥类型、施用数量、施氮时期以及采样方法等因素对夏玉米季氨挥发的影响,本研究收集了 1980 ~ 2018 年发表的北方地区夏玉米生产中氨挥发的研究文献,并对数据进行统计分析. 结果发现,随着化肥施氮量的增加,氨挥发总量呈指数型增长,净氨挥发量呈幂函数型增长. 基肥/追肥施氮量为 1/1 时,追肥期氨挥发总量和净氨挥发量显著高于基肥期($P < 0.05$),氨挥发总量分别约占总生育期的 58.4% 和 41.6%. 随着施氮量的增加,激发效应先表现为负效应后逐渐转变为正效应,转折点施氮量为 297 $kg \cdot hm^{-2}$. 采用抽气法与海绵法测定的氨挥发量存在显著差异($P < 0.01$),且抽气法测定数据更为稳定. 施用缓释尿素相较于普通尿素可降低氨挥发约 20% ~ 50%. 我国北方夏玉米生产中,合理控制追肥期施氮量更有助于减少氨挥发,且高氮肥条件下抽气法比海绵法更适合于氨挥发的测定.

**关键词**: 夏玉米; 氨挥发; 激发效应; 施肥时期; 采样方法
**中图分类号**: X171 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)11-5176-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202002113

# Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China

ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, YANG Xuan, MENG Fan-qiao*
(Beijing Key Laboratory of Prevention, Control and Restoration of Farmland and Soil Pollution, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract**: Ammonia volatilization is one of the major paths of nitrogen (N) loss and may exert a substantial impact on air quality. This study aims to explore the effects of nitrogen (N) fertilizer types, fertilization rate, and application timing and gas collection method on $NH_3$ volatilization during the maize season in Northern China. This study collected the publications on the $NH_3$ volatilization from maize farming which were conducted in Northern China from 1980 to 2018, and undertook a systematic analysis. The study found that with the increase of N rate, the total and net $NH_3$ volatilization at the basal and topdressing fertilization stages increased at exponential and power function, respectively. When the ratio of basal/topdressing N rate was 1/1, the total and net $NH_3$ volatilization during the topdressing stage (58.4% of the whole season emission) was significantly higher than that in the basal fertilization stage (41.6%) ($P < 0.05$). The priming effect first showed a negative effect and then gradually turned into a positive effect with the increase of N rate. Due to the positive priming effect, the net $NH_3$ volatilization, without considering the priming effect, was overestimated under the conventional N application ( > 297 $kg \cdot hm^{-2}$). There is a significant difference between the $NH_3$ volatilization measured by the venting method and the sponge absorption method, and the data from the venting method are more stable ($P < 0.01$). Compared with conventional urea, slow-release urea may reduce $NH_3$ volatilization by 20% to 50%. Control fertilizer N rate at the topdressing stage is more efficient in reducing the $NH_3$ volatilization from maize production in Northern China, and the venting method is more suitable for the quantification of $NH_3$ volatilization than the sponge absorption method under a high rate of fertilizer N.

**Key words**: summer maize; ammonia volatilization; priming effect; fertilization stage; gas collection method

农业生产中,化学肥料对于提高粮食产量具有重要作用. 在所有必须营养元素中,氮素是限制植物生长和产量的首要因素[1]. 改革开放以来,中国化肥施用量逐年增加, 2018 年中国氮肥施用量为2 065万 t,为 1980 年的 2.2 倍[2]. 不断增加的氮肥数量和不合理的施用方法也增加了氮素损失和环境污染的风险[3]. 我国的氮肥利用效率较低,常规氮肥利用率约为 35%[4]. 氮肥施入农田土壤后,大部分损失于环境中,农田氮肥的损失率在 33.3% ~ 73.6% 之间,平均总损失率为 60%[5]. 氨挥发是氮肥损失的主要途径之一,土壤中氨($NH_3$)在气压差的作用下向大气中扩散造成氨挥发[6~8],增加氮肥损失[9]. 此外,进入到大气中的氨能以沉降方式返回陆地和海洋生态系统[10],过量的氨沉降可引起土壤酸化、水体富营养化和生物多样性降低等诸多生态环境问题. 氨作为空气中二次颗粒物(如 $PM_{2.5}$)的重要组成部分,与人体呼吸系统健康也有密切联系[11, 12].

华北地区是中国重要的粮食产区,普遍存在氮肥过量施用的问题[13]. 有研究发现,肥料品种和土壤性状特别是酸碱条件是决定氨挥发量高低的重要

**收稿日期**: 2020-02-17; **修订日期**: 2020-05-11
**基金项目**: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800605, 2016YFD0800104)
**作者简介**: 张薇(1995 ~ ),女,博士研究生,主要研究方向为面源污染与农田元素循环,E-mail:595131156@qq.com
* 通信作者,E-mail:mengfq@cau.edu.cn

因素，华北平原钙质土壤 pH 值约为 7.5 ~ 8.5，主要使用尿素或碳酸氢铵作为氮肥，有利于氨挥发过程的发生[14]. 夏玉米是华北地区主要的粮食作物，2016 年中国夏玉米总种植面积达3 676万 $hm^2$，其中华北地区约占全国 30.8%[2]. 目前华北地区典型冬小麦-夏玉米双季种植体系中，化学氮肥年施用量可达 550 ~ 600 $kg \cdot hm^{-2}$，冬小麦季和夏玉米季的平均氨挥发量分别占施氮量的 19.4% 和 24.7%，其中夏玉米种植季节雨热同期，气温高且施肥集中，加上华北地区土壤普遍呈碱性，该地区土壤氨挥发处于较高水平[14]，是氮素的主要损失途径[15]. 氮肥深施、采用新型肥料、秸秆还田和使用土壤调理剂是减少氨挥发损失的重要措施，是目前国内外研究的重点[16~20]. 这些研究多集中于原位测定和氮平衡测算，尚缺针对不同时期（基肥期与追肥期）、不同采集方法（抽气法、海绵法）和不同肥料类型的整合研究. 本文通过对华北地区夏玉米生产中氨挥发田间试验的系统研究，分析化学氮肥施用量、施肥时期和氮肥类型对于氨挥发的影响，比较不同采气方法之间差异，以期为提高华北地区氮肥利用效率和降低环境污染提供科学依据.

## 1　材料与方法

### 1.1　研究区域概况

考虑到农业生产种植制度、生产管理措施、气候和土壤条件等因素的相似性，本研究以华北平原为核心连同山西南部和陕西中部等地作为研究区域. 主要包括北京、天津、河北、河南、山东和山西南部等省市. 该区地处暖温带，气候温和，年平均气温为 8 ~ 20℃，年降水量为 400 ~ 900 mm[21]，土壤类型以褐土和石灰性潮土为主，土壤有机质和土壤肥力处于低、中水平[22].

### 1.2　文献收集

本文查阅中国知网等数据库中 1980 年以来已经公开发表的、我国北方地区夏玉米氨挥发的研究论文，从中获取夏玉米生产过程中的化肥施氮量、各施肥时期施氮量、氨挥发量以及氨挥发采集方法等相关数据. 所采用的文献应满足：① 田间试验在本研究划定区域内进行；② 作物类型为夏玉米；③ 气体收集采用海绵法[13]或抽气法[23]；④ 施肥为当地农民常规方式，即肥料类型排除有机肥，耕作方式排除深耕和免耕等试验处理；⑤ 试验应设置 3 或 3 个以上重复.

筛选后符合条件的有 28 篇文献共 99 组数据，来自全国 8 个省份的 14 个试验点（表 1），其中包括海绵法 21 篇文献，71 组数据；抽气法 7 篇文献，28 组数据. 根据收集文献的施氮量范围将数据分为两组，即常规处理（施氮量 > 250 $kg \cdot hm^{-2}$）与优化减氮处理（施氮量为 50 ~ 250 $kg \cdot hm^{-2}$）.

**表 1　研究获取的文献数及处理分类**

Table 1　Volumes of literature obtained in this study and distributions of test sites

| 样本类型 | 文献数（样本数 $n$） |
|---|---|
| 地区 | 河北省 10（37）、山东省 8（25）、北京市 4（18）、陕西省 2（3）、河南省 1（2）、山西省 1（2）、甘肃省 1（2）和内蒙古自治区 1（10） |
| 采样方法 | 海绵法 21（71）和抽气法 7（28） |
| 施氮量 | 常规施氮量（55）和优化施氮量（20） |

### 1.3　数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 进行回归方程的拟合与作图，运用 SPSS 20 进行回归分析与 T 检验. 对于没有设置空白对照（不施氮肥）的试验，本研究对海绵法和抽气法两种采样方法的空白处理氨挥发量进行平均，即去除高于平均值 3 倍和低于平均值 1/3 后所有样本的平均值，以此平均值代替未设空白对照试验的氨挥发量.

本研究中，氨挥发总量为夏玉米季氨挥发累积量，净氨挥发量为夏玉米季施氮引起的氨挥发累积量. 氮肥施入土壤以后，会导致原有土壤氮矿化的增加，称为激发效应[24,25]. 本研究对是否考虑激发效应对于净氨挥发量的影响进行了估算.

不考虑激发效应的净氨挥发量见式（1）：

$$A_1 = N_x - N_0 \tag{1}$$

式中，$A_1$ 为不考虑激发效应的净氨挥发量，$N_0$ 为不施氮肥的土壤氨挥发总量，$N_x$ 为施氮量 $x$ 下的土壤氨挥发总量，单位均为$kg \cdot hm^{-2}$.

氨气在土壤表面挥发，导致土壤表面的气态氨浓度降低，使得液态氨向气态氨转化的作用不断进行，这一平衡遵循亨利定律[26]：

$$NH_3(g) = K_H \times NH_3(aq) \tag{2}$$

式中，$NH_3(g)$ 为气态氨浓度，$NH_3(aq)$ 为土壤溶液中氨浓度，$K_H$ 为亨利常数（无量纲）.

因此默认土壤条件下，施氮量与来自化肥氮的氨挥发之间的关系视为正比例函数，即考虑激发效应的净氨挥发量见式（3）：

$$A_2 = k \times x \quad (0 < k < 0.088\,9) \tag{3}$$

式中，$A_2$ 为来自化肥氮的氨挥发量，即考虑激发效应的净氨挥发量，$x$ 为施氮量，$k$ 为氮肥转化为释放氨的转化系数［当 $k = 0.088\,9$ 时，$A_2 = k \times x$ 为图 1（a）中 $y = 5.544\,9e^{0.005\,9x}$ 的一条切线，由于 $A_2$ 为氨挥发总量的一部分，故 $k < 0.088\,9$］.

根据本研究拟合的夏玉米化肥施氮量与氨挥发

总量的关系[图 1(a):$y = 5.5449e^{0.0059x}$],$y$(氨挥发总量)与 $A_2$(来自化肥的氨挥发量)相减即得到施加氮肥后来自土壤本身的氨挥发量,其与施氮量之间的近似关系为:

$$A_s = 0.0004x^2 - (k + 0.0155)x + 6.8249 \quad (4)$$

$A_s$ 再与不施肥时土壤的氨挥发量相减即得到激发效应所产生的氨挥发量(施氮肥引起的来自土壤本身的氨挥发量)与施氮量之间的近似关系:

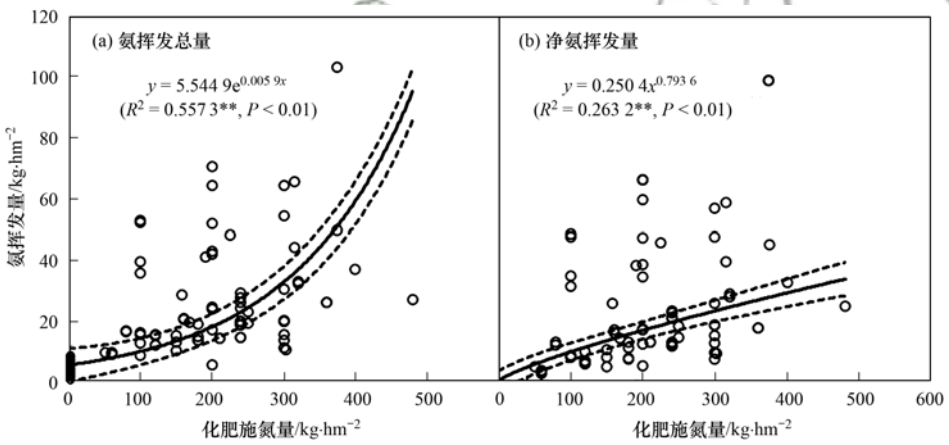
$$A_p = 0.0004x^2 - (k + 0.0155)x \quad (5)$$

式中,$A_s$ 为施氮肥后来自土壤本身的氨挥发量,$A_p$ 为来自激发效应的氨挥发量,$x$ 与 $k$ 意义同上.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同化肥施氮量对土壤氨挥发的影响

本研究发现,目前研究区域内(样本数 $n = 75$)夏玉米季化肥施氮量范围为 50 ~ 480 kg·hm$^{-2}$,常规施氮处理($n = 55$)的平均施氮量为(331 ± 47) kg·hm$^{-2}$,平均氨挥发总量为(34.8 ± 22.7) kg·hm$^{-2}$,平均净氨挥发量为(30.6 ± 22.2) kg·hm$^{-2}$,占化肥施氮量的平均比例为(9.18 ± 6.38)%. 优化减氮处理(施氮量为 50 ~ 250 kg·hm$^{-2}$,$n = 20$)的平均施氮量为(166 ± 60) kg·hm$^{-2}$,平均氨挥发总量为(20.5 ± 15.3) kg·hm$^{-2}$,平均净氨挥发量为(18.2 ± 15.0) kg·hm$^{-2}$,占化肥施氮量的平均比例为(11.7 ± 10.5)%. 对化肥施氮量与相应的氨挥发总量进行拟合发现,氨挥发总量和净氨挥发量均随化肥施氮量的增加而显著增加,其中氨挥发总量呈指数型增长($y = 5.5449e^{0.0059x}$,$P < 0.01$)[图 1(a)],而净氨挥发量呈幂函数增长($y = 0.2504x^{0.7936}$,$P < 0.01$)[图 1(b)].




实线为趋势拟合线,虚线为 95% 置信区间线

**图 1 夏玉米季氨挥发总量和净氨挥发量与化肥施氮量之间的关系**

Fig. 1 Relationship between total $NH_3$ volatilization, net $NH_3$ volatilization, and chemical N rate during the summer maize season

### 2.2 不同施肥时期氨挥发量比较

综合已有研究发现,研究区域夏玉米季基肥期的施氮量为 40 ~ 200 kg·hm$^{-2}$($n = 38$),平均施氮量为(96.2 ± 43.6) kg·hm$^{-2}$,氨挥发总量平均为(9.19 ± 6.62) kg·hm$^{-2}$;净氨挥发量平均为(6.28 ± 6.39) kg·hm$^{-2}$,占基肥期化肥施氮量的(7.06 ± 9.03)%. 追肥期施氮量为 40 ~ 300 kg·hm$^{-2}$($n = 43$),平均施氮量为(112 ± 59) kg·hm$^{-2}$,氨挥发总量平均为(14.9 ± 10.0) kg·hm$^{-2}$;净氨挥发量平均为(11.1 ± 9.1) kg·hm$^{-2}$,占追肥期化肥施氮量的(11.7 ± 9.6)%(图 2).

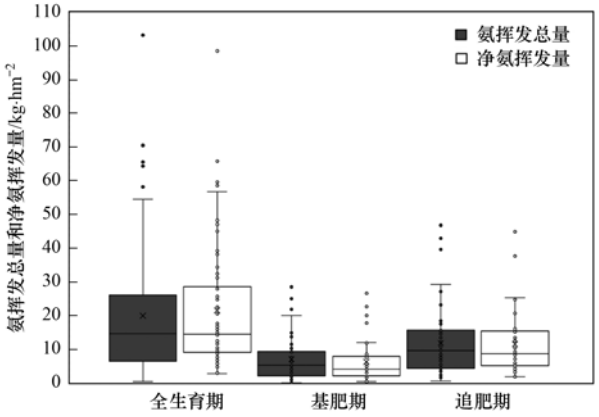
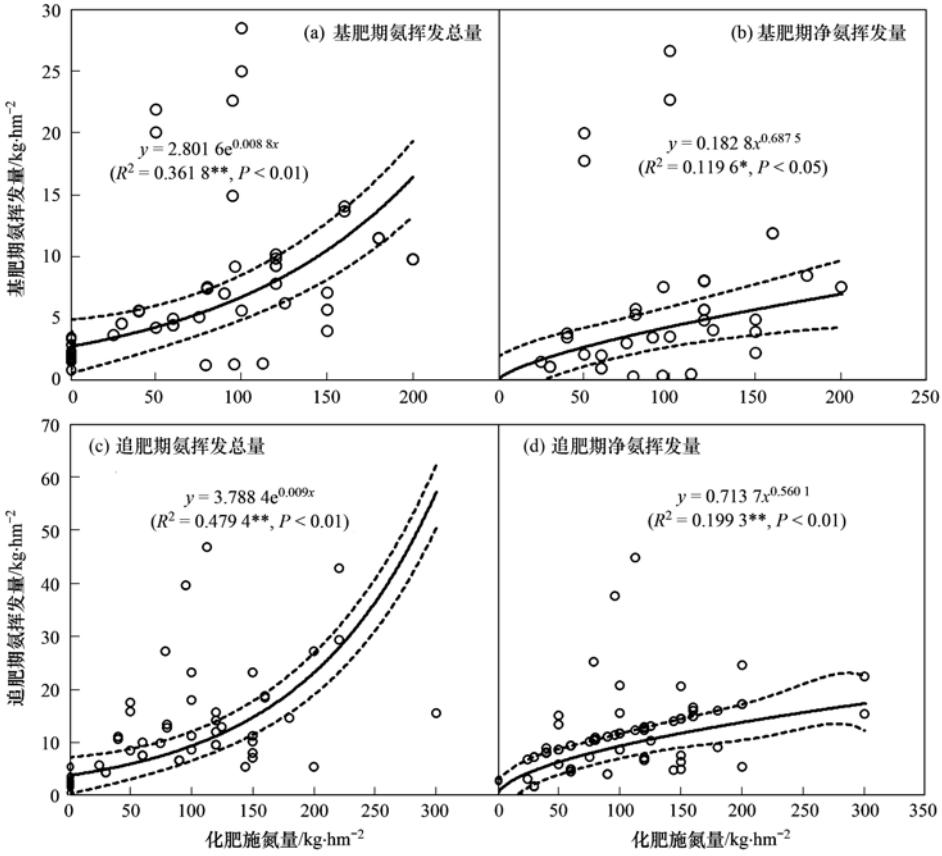



**图 2 夏玉米季基/追肥时期氨挥发总量与净氨挥发量**

Fig. 2 Total and net $NH_3$ volatilization at the basal/topdressing fertilization stages during the summer maize season

对基肥期和追肥期的氨挥发量进行拟合发现,氨挥发总量和净氨挥发量均随化肥施氮量的增加而显著增加. 氨挥发总量与化肥施氮量的回归方程均为指数函数,即基肥期 $y = 2.8016e^{0.0088x}$($P < 0.01$)[图 3(a)],追肥期 $y = 3.7884e^{0.009x}$($P < 0.01$)[图 3(c)]. 净氨挥发量与化肥施氮量的回归方程均为幂函数,基肥期 $y = 0.1828x^{0.6875}$($P < 0.05$)[图 3(b)],追肥期 $y = 0.7137x^{0.5601}$($P < 0.01$)[图 3




实线为趋势拟合线，虚线为95%置信区间线

**图3　夏玉米基/追肥时期氨挥发总量和净氨挥发量与化肥施氮量的关系**

Fig. 3　Relationship between total $NH_3$ volatilization, net $NH_3$ volatilization and chemical N rate at basal/topdressing fertilization stages during the summer maize season

(d)]. 无论基肥期还是追肥期，随着施氮量的增加夏玉米季氨挥发总量增加量越来越大，而净氨挥发量则呈现了近似值线的幂函数关系，增加量变化非常小.

## 2.3　不同采样方法对夏玉米氨挥发量的影响

本研究发现，夏玉米季海绵法样本和抽气法样本的中位数高度基本一致，但抽气法样本的上下限明显小于总样本与海绵法样本(图4). 海绵法样本

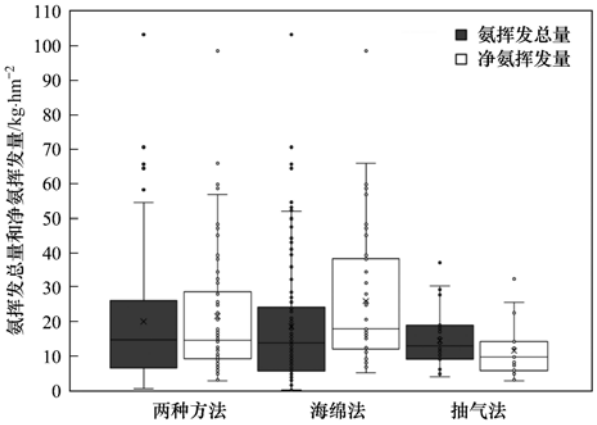


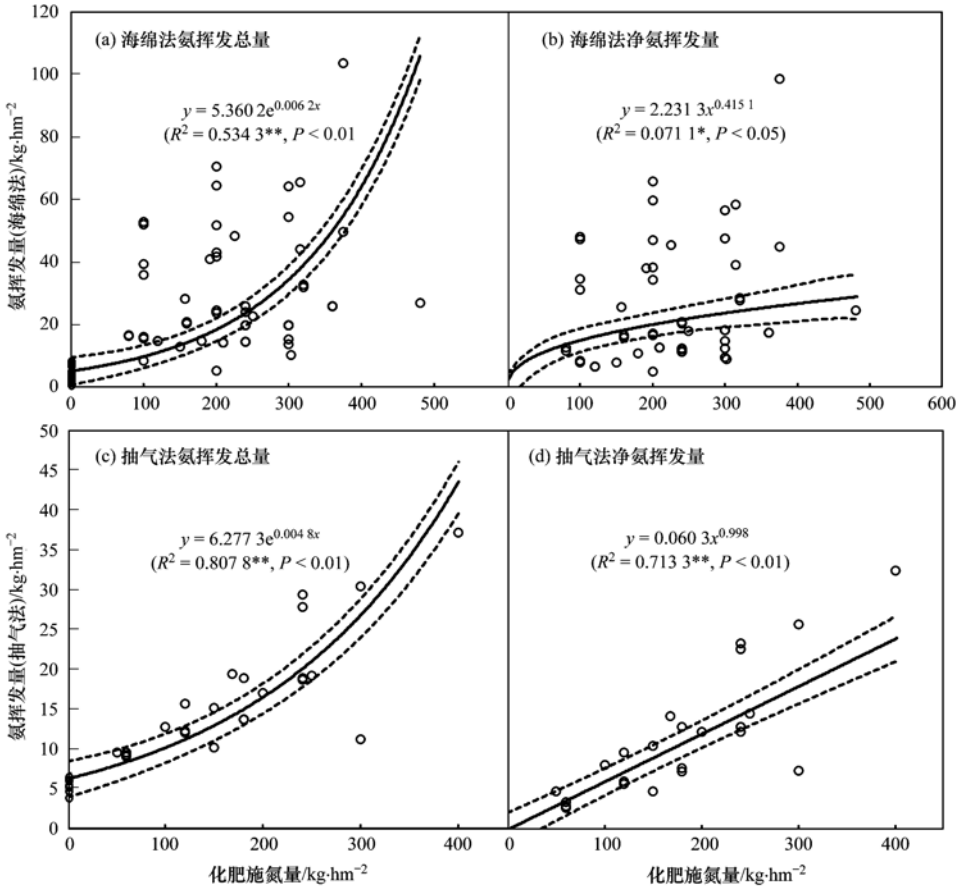

**图4　夏玉米季海绵法/抽气法测定的氨挥发总量与净氨挥发量**

Fig. 4　Total and net $NH_3$ volatilization determined by sponge absorption method/venting method during the summer maize season

中，常规施肥处理和优化减氮处理的平均化肥施氮量分别为(329 ± 46) kg·hm$^{-2}$ ($n = 35$)和(169 ± 57) kg·hm$^{-2}$ ($n = 17$)，平均氨挥发总量分别为(35.4 ± 23.1) kg·hm$^{-2}$和(24.4 ± 15.3) kg·hm$^{-2}$，平均净氨挥发量分别为(30.7 ± 23.4) kg·hm$^{-2}$和(19.6 ± 15.8) kg·hm$^{-2}$，分别占化肥施氮量的(12.5 ± 11.3)%和(9.28 ± 6.73)%. 抽气法样本中常规施肥处理和优化减氮处理的平均化肥施氮量分别为(333 ± 57) kg·hm$^{-2}$ ($n = 20$)和(155 ± 67) kg·hm$^{-2}$ ($n = 3$)，平均氨挥发总量分别为(26.2 ± 13.4) kg·hm$^{-2}$和(15.6 ± 5.7) kg·hm$^{-2}$，平均净氨挥发量分别为(21.8 ± 12.9) kg·hm$^{-2}$和(9.93 ± 5.84) kg·hm$^{-2}$，分别占化肥施氮量的(6.36 ± 3.39)%和(6.33 ± 1.98)%.

对两种采样方法获得的氨挥发量进行独立样本的T检验，发现两种采样方法存在显著差异($P < 0.01$). 对海绵法和抽气法样本的化肥施氮量与相应的氨挥发量分别进行拟合发现，氨挥发总量和净氨挥发量均随化肥施氮量的增加而显著增加，与不同施肥时期对氨挥发的影响结果类似，两种采样方法的氨挥发总量与化肥施氮量之间的拟合关系均为

指数函数(海绵法:$y = 5.360\,2e^{0.006\,2x}$, $P < 0.01$; 抽气法:$y = 6.277\,3e^{0.004\,8x}$, $P < 0.01$)[图 5(a)和 5(c)]; 抽气法净氨挥发量与化肥施氮量之间的拟合关系则为幂函数($y = 0.060\,3x^{0.998}$, $P < 0.01$)[图 5(d)],海绵法为指数函数,但增长趋势较缓($y = 2.131\,3x^{0.415\,1}$, $P < 0.05$)[图 5(b)].




实线为趋势拟合线,虚线为 95% 置信区间线

**图 5 夏玉米季采用海绵法/抽气法测定的氨挥发总量和净氨挥发量与化肥施氮量的关系**

Fig. 5 Relationship between total $NH_3$ volatilization, net $NH_3$ volatilization determined by sponge absorption method/venting method, and chemical N rate during the summer maize season

## 3 讨论

### 3.1 夏玉米季的土壤氨挥发

本研究表明,随施氮量的增加夏玉米各施肥时期氨挥发总量和净氨挥发量均增加(图 1),这与王秀斌等[27]和马银丽等[28]随着施氮量增加氨挥发损失量显著增加的研究结果一致. Chen 等[29]的整合研究表明夏玉米季氨挥发量与施氮量呈线性关系,但本研究结果中,施氮量与氨挥发量之间呈指数关系[图 1(a)],这说明施氮量增加到一定程度后,再增加氮肥施用呈现出氮盈余(surplus)快速增加,作物不再能吸收,因而氨挥发量呈更快速率增加,这个研究结果在另外的研究中也得到证实[30]. 另外,造成不同研究模拟方程出现差异,也可能与采样方法有关[31],Chen 等[29]数据筛选条件为采用微气象法或风洞法测得的氨挥发量,与本研究所选择方法不同.

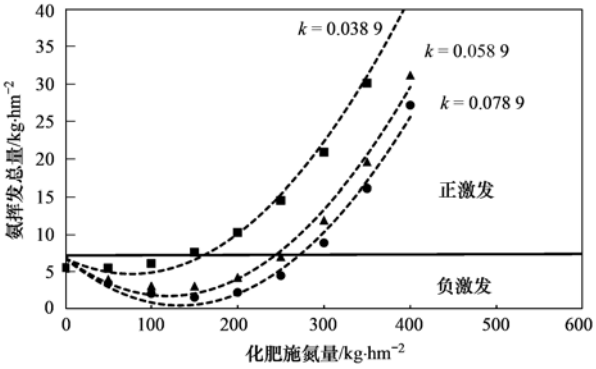
本研究发现,基肥期氨挥发总量明显小于追肥期,且基肥期氨挥发总量的上下限明显小于追肥期(图 2),当化肥施氮量的基/追肥比例为 1∶1时,基肥期与追肥期的氨挥发总量占比分别为 41.6% 和 58.4%,说明在施氮量相同的情况下,追肥期氨挥发损失更多,与前人研究的结果一致[32],这主要是由于研究区域内基肥的常见施肥方式是通过播种机将肥料与种子同时翻入土中,与表层土充分混合,一方面肥料被土壤吸附,活动范围减小,氨挥发被抑制;另一方面有利于作物快速吸收,使土壤中 $NH_4^+$ 浓度降低,氨挥发强度减小. 基肥时期,北方温度较低,也是造成氨挥发量相对较低的一个重要原因[33]. 王激清等[34]通过对全国10 000多个农户的调查发现,我国夏玉米氮肥投入基追比为 1∶1.43,说明我国夏玉米季追肥期氨挥发具有更大排放潜力.

### 3.2 化肥氮投入对土壤氨挥发的激发效应

有研究表明,施用无机氮肥后,非标记土壤氮的

矿化或作物由土壤中吸收的非标记氮较不施肥对照增加，这一现象被认为是由于无机氮肥的施用加速了土壤有机氮的分解，被称为激发效应[35]. 通过式(4)对来自土壤的氨挥发的估算发现，随着施氮量的增加激发效应先表现为负效应后逐渐转变为正效应，转折点施氮量为 297 kg·hm$^{-2}$. 刘少文等[36]认为外源添加物对土壤 C/N 比的影响可能是土壤氮激发效应作用的关键. 外加氮肥促进土壤氮的矿化，从而产生正激发[37]，同时也有可能促进微生物的固持，从而产生负激发[38].

本研究中，氨挥发总量与化肥施氮量的拟合曲线[图 1(a)]斜率逐渐增大，说明化肥氮的投入可能引起了土壤氮的加速释放. 净氨挥发量随施氮量增加增幅较少，可能与土壤的激发效应有关. 在以往研究中，计算土壤净氨挥发时往往忽略了氮肥对土壤氨挥发的激发效应，故算得的净氨挥发可能被高估或低估. 根据式(5)可知，当施氮量 $x > 2\,500k + 38.75$（$k$ 为转化系数）时，外加氮肥导致正激发效应的产生，反之则产生负激发效应(图 6).



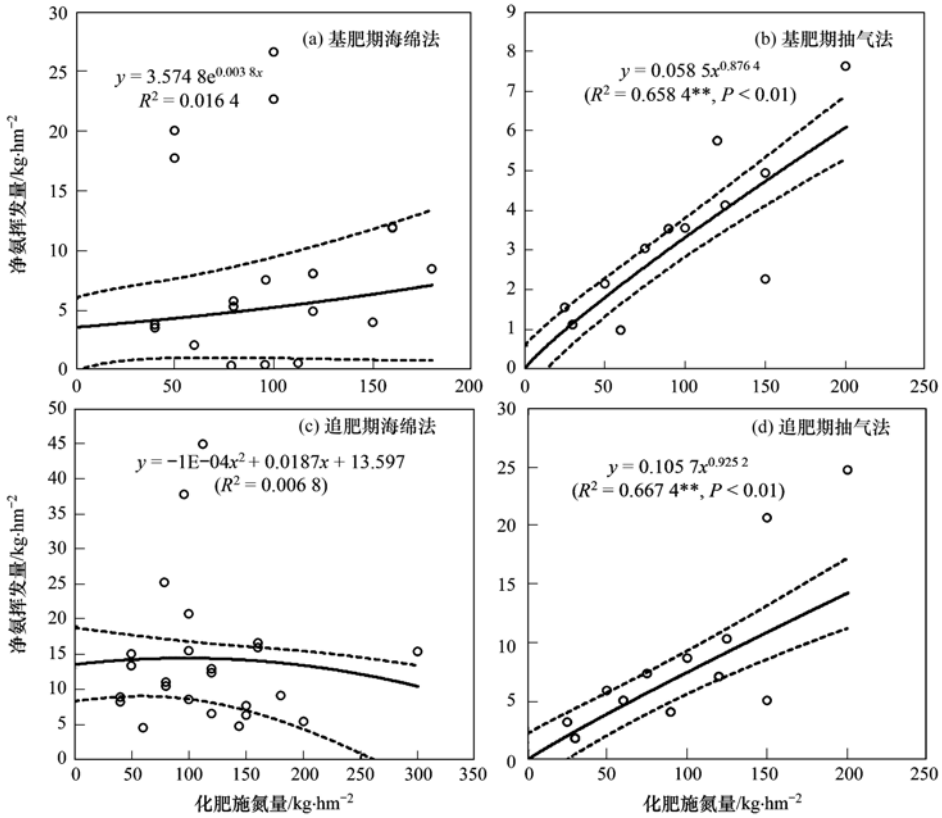

$k$ 为氮肥转化为释放氨的转化系数

**图 6　$k$ 值不同时土壤正/负激发效应的示意**

Fig. 6　Diagram of positive/negative priming effect of soil with different $k$ values

### 3.3　不同采样方法对监测氨挥发数量的影响

海绵法和抽气法获取的氨挥发数量样本的中位数高度基本一致，但抽气法样本的上下限明显小于总样本与海绵法样本，说明 3 个样本的氨挥发量总体在同一水平，但抽气法样本氨挥发数据浮动较小，更为稳定(图 4)，这与吴艳香[39]所做的土柱试验所得结果一致，其研究还发现氨挥发水平较高时抽气法略高于海绵法，较低时，海绵法略高于抽气法. 根据海绵法和抽气法测定氨挥发的拟合方程(图 7)，计算得出施氮量为 205 kg·hm$^{-2}$左右时，两方法测定的氨挥发量相当，即当施氮量低于 205 kg·hm$^{-2}$时，海绵法测定的氨挥发量比抽气法高，反之则低.




实线为趋势拟合线，虚线为 95% 置信区间线

**图 7　夏玉米季基/追肥时期海绵法/抽气法测定的净氨挥发量与相应化肥施氮量之间的关系**

Fig. 7　Relationship between net $NH_3$ volatilization of base/topdressing fertilization stages determined by sponge absorption method/venting method and chemical N rate during the summer maize season

这是由于所用样本中的抽气法均采用硼酸吸收-稀酸滴定法,酸碱滴定法灵敏度较低,且易受空气中酸性颗粒的干扰,导致测定结果偏低,当田间氨挥发量较低时常导致无法准确测定,重复间变异性也非常大[40]. 此外,在田间高温环境下,长时间曝气过程中也会导致混合指示剂灵敏度降低[41]. 随着施氮量的增加两方法测定的氨挥发总量也逐渐增大,但海绵法测定的净氨挥发则逐渐趋于不变(图 7),这可能是由于在施肥量较大时海绵吸收氨挥发达到饱和状态所致,故采用海绵法时应考虑海绵法的吸收阈值,当施肥量较高时优先选择抽气法.

本试验中,常规施氮处理海绵法和抽气法测得土壤氨挥发总量均值分别为 35.4 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 26.2 $kg \cdot hm^{-2}$ 占施氮量的 10.7% 和 7.72%; 优化施氮处理海绵法和抽气法测得的氨挥发总量均值分别为 24.4 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 15.6 $kg \cdot hm^{-2}$ 占施氮量的 16.0% 和 11.1%,优化施氮的绝对损失量较常规处理低,但相对损失量高,说明施肥量大小对氨挥发损失率有一定影响. 李贵桐等[42]用微气象学法(梯度扩散法)以及苏芳等[43]利用风洞法对华北平原冬小麦-夏玉米的实际生产的研究同样得到氨挥发损失比例随施氮量降低而增加的结果.

### 3.4 缓释肥料对氨挥发的影响

对来自 4 篇文献中 9 组相同施氮量下常规尿素与缓释尿素的对比分析发现,夏玉米季施用控释尿素的氨挥发累积损失量、氨挥发损失率均显著低于施用普通尿素处理($P < 0.05$)(图 8)[44~47],且随施氮量的降低而减少. 在施氮量为 180 ~ 300 $kg \cdot hm^{-2}$ 时,施用缓释尿素相较于普通尿素可降低氨挥发约 20% ~ 50%,氨挥发损失率可降低约 45% ~ 75%. Grant 等[48]的研究认为这是由于控释尿素施用后,氮的释放速度可较好地与作物各生长期对氮素养分的需求速度相同步,增加氮素的利用率,减少氮素养分的损失. 这一结果与孙祥鑫等[49]和卢艳艳[50]的研究结果相似,即控释尿素与普通尿素相比,在降低氨挥发损失上具有较大优势.

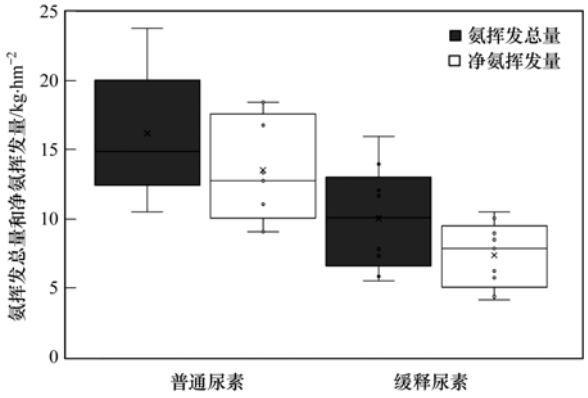



**图 8 夏玉米季普通尿素/缓释尿素的氨挥发与净氨挥发量比较**

Fig. 8 Comparison of accumulative and net $NH_3$ volatilization from urea/slow-release urea during the summer maize season

## 4 结论

华北地区夏玉米生产中,氨挥发总量随化肥施氮量的增加呈指数函数形式增加,净氨挥发量则呈幂函数形式增加,且追肥期氨挥发总量明显高于基肥期. 常规氮肥水平下,净氨挥发量占化肥施氮量的平均比例为 9.18%,而在优化氮肥水平下,该比例为 11.7%. 随着施氮量的增加,激发效应先表现为负效应后逐渐转变为正效应,转折点施氮量为 297 $kg \cdot hm^{-2}$. 夏玉米季施氮量低于 205 $kg \cdot hm^{-2}$ 时,海绵法测定量低于抽气法,而在高于该施氮水平时,海绵法高于抽气法. 在华北地区,缓释尿素比普通尿素能够有效降低氨挥发损失.

**参考文献:**

[1] 陆景陵. 植物营养学(上册)[M]. (第二版). 北京: 中国农业大学出版社, 2003.

[2] 国家统计局. 中国统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.

[3] 曹寒冰, 王朝辉, 师渊超, 等. 渭北旱地冬小麦监控施氮技术的优化[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(19): 3826-3838.
Cao H B, Wang Z H, Shi Y C, *et al*. Optimization of nitrogen fertilizer recommendation technology based on soil test for winter wheat on Weibei Dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, **47**(19): 3826-3838.

[4] 范会, 姜姗姗, 魏荧, 等. 农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮($NH_3$ 和$N_2O$)减排效果比较: 以夏玉米季为例[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2906-2913.
Fan H, Jiang S S, Wei Y, *et al*. Assessment of gaseous nitrogen ($NH_3$ and $N_2O$) mitigation after the application of a range of new nitrogen fertilizers in summer maize cultivation [J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2906-2913.

[5] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的"4R"理论与工程实践——源头减量技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(5): 881-888.
Xue L H, Yang L Z, Shi W M, *et al*. Reduce-retain-reuse-restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: source reduction technology [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(5): 881-888.

[6] 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.

[7] 李欠欠, 李雨繁, 高强, 等. 传统和优化施氮对春玉米产量、氨挥发及氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(3): 571-579.
Li Q Q, Li Y F, Gao Q, *et al*. Effect of conventional and optimized nitrogen fertilization on spring maize yield, ammonia volatilization and nitrogen balance in soil-maize system [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, **21**(3): 571-579.

[8] 赵自超. 华北平原优化农作条件下作物生产和温室气体减排研究[D]. 北京：中国农业大学，2017. 91.
Zhao Z C. Crop production and greenhouse gas mitigation through optimized farming practices in Northern China Plain [D]. Beijing：China Agricultural University，2017. 91.

[9] 朱兆良，文启孝. 中国土壤中的氮[M]. 南京：江苏科技出版社，1992. 171-185.

[10] 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)：888-892.

[11] 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.

[12] Sutton M A，Oenema O，Erisman J M，*et al*. Too much of a good thing[J]. Nature，2011，**472**(7342)：159-161.

[13] 王朝辉，刘学军，巨晓棠，等. 北方冬小麦/夏玉米轮作体系土壤氨挥发的原位测定[J]. 生态学报，2002，**22**(3)：359-365.
Wang Z H，Liu X J，Ju X T，*et al*. *In situ* determination of ammonia volatilization from wheat-maize rotation system field in North China[J]. Acta Ecologica Sinica，2002，**22**(3)：359-365.

[14] 董文旭，胡春胜，陈素英，等. 保护性耕作对冬小麦-夏玉米农田氮肥氨挥发损失的影响[J]. 中国农业科学，2013，**46**(11)：2278-2284.
Dong W X，Hu C S，Chen S Y，*et al*. Effect of conservation tillage on ammonia volatilization from nitrogen fertilizer in winter wheat-summer maize cropping system[J]. Scientia Agricultura Sinica，2013，**46**(11)：2278-2284.

[15] Ju X T，Xing G X，Chen X P，*et al*. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2009，**106**(9)：3041-3046.

[16] 周玉玲，侯朋福，李刚华，等. 两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响[J]. 环境科学，2019，**40**(8)：3746-3752.
Zhou Y L，Hou P F，Li G H，*et al*. Effect of two soil synergists on ammonia volatilization in paddy fields [J]. Environmental Science，2019，**40**(8)：3746-3752.

[17] Rochette P，Angers D A，Chantigny M H，*et al*. Ammonia volatilization and nitrogen retention：how deep to incorporate urea? [J]. Journal of Environmental Quality，2013，**42**(6)：1635-1642.

[18] 汪军，王德建，张刚，等. 麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较[J]. 环境科学，2013，**34**(1)：27-33.
Wang J，Wang D J，Zhang G，*et al*. Comparing the ammonia volatilization characteristic of two typical paddy soil with total wheat straw returning in Taihu Lake Region[J]. Environmental Science，2013，**34**(1)：27-33.

[19] Li Q Q，Yang A L，Wang Z H，*et al*. Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest China[J]. Field Crops Research，2015，**175**：96-105.

[20] Li Q Q，Cui X Q，Liu X J，*et al*. A new urease-inhibiting formulation decreases ammonia volatilization and improves maize nitrogen utilization in North China Plain[J]. Scientific Reports，2017，**7**(1)，doi：10.1038/srep43853.

[21] 国家气象中心. 中国地面累年值年值数据集(1981-2010 年)[EB/OL]. http://data.cma.cn/site/index.html，2010-07-30.

[22] 陆景陵，陈伦寿，曹一平. 科学施肥必读[M]. 北京：中国林业出版社，2008.

[23] Tian G M，Cao J L，Cai Z C，*et al*. Ammonia volatilization from winter wheat field top-dressed with urea[J]. Pedosphere，1998，**8**(4)：331-336.

[24] 李紫燕. 黄土高原典型土壤有机氮矿化及铵态氮对土壤氮素激发效应的研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2006. 92.
Li Z Y. Study on the priming effect caused by ammonium and mineralization of organic nitrogen in the typical soils on loess plateau[D]. Yangling：Northwest A & F University，2006. 92.

[25] Stanford G. Evaluation of ammonium release by alkaline permanganate extraction as an index of soil nitrogen availability [J]. Soil Science，1978，**126**(4)：244-253.

[26] 朱炎，杨金忠. 土壤氨挥发研究及氮素转化运移数值模拟[J]. 水利学报，2010，**41**(3)：286-293.
Zhu Y，Yang J Z. Study of ammonia volatilization and numerical simulation of nitrogen transport and transformation in soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2010，**41**(3)：286-293.

[27] 王秀斌，周卫，梁国庆，等. 优化施肥条件下华北冬小麦/夏玉米轮作体系的土壤氨挥发[J]. 植物营养与肥料学报，2009，**15**(2)：344-351.
Wang X B，Zhou W，Liang G Q，*et al*. Effect of optimized nitrogen application on ammonia volatilization from soil in winter wheat-summer corn rotation system in Northern China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science，2009，**15**(2)：344-351.

[28] 马银丽，吉艳芝，李鑫，等. 施氮水平对小麦-玉米轮作体系氨挥发与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报，2012，**21**(2)：225-230.
Ma Y L，Ji Y Z，Li X，*et al*. Effects of N fertilization rates on the $NH_3$ volatilization and $N_2O$ emissions from the wheat-maize rotation system in North China Plain [J]. Ecology and Environmental Sciences，2012，**21**(2)：225-230.

[29] Chen X P，Cui Z L，Fan M S，*et al*. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature，2014，**514**(7523)：486-489.

[30] 山楠. 京郊小麦-玉米轮作体系氮素利用与损失研究[D]. 保定：河北农业大学，2014.
Shan N. Nitrogen utilization and loss in winter wheat-summer maize rotation system of Beijing Suburb[D]. Baoding：Hebei Agricultural University，2014.

[31] 上官宇先，师日鹏，李娜，等. 垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素[J]. 环境科学，2012，**33**(6)：1988-1993.
Shangguan Y X，Shi R P，Li N，*et al*. Factors influencing ammonia volatilization in a winter wheat field with plastic film mulched ridges and unmulched furrows [J]. Environmental Science，2012，**33**(6)：1988-1993.

[32] 杨晓云，杨虎德. 不同施肥条件下北方夏玉米农田土壤氨挥发研究[J]. 干旱区资源与环境，2016，**30**(11)：137-142.
Yang X Y，Yang H D. Soil ammonia volatilization under the different fertilization in summer corn farmland in North China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，2016，**30**(11)：137-142.

[33] 李宗新，王庆成，刘开昌，等. 不同施肥模式下夏玉米田间土壤氨挥发规律[J]. 生态学报，2009，**29**(1)：307-314.
Li Z X，Wang Q C，Liu K C，*et al*. Law of field soil ammonia volatilization in summer maize under different fertilizer patterns [J]. Acta Ecologica Sinica，2009，**29**(1)：307-314.

[34] 王激清，马文奇，江荣风，等. 我国水稻、小麦、玉米基肥和追肥用量及比例分析[J]. 土壤通报，2008，**39**(2)：329-333.
Wang J Q，Ma W Q，Jiang R F，*et al*. Analysis about amount and ratio of basal fertilizer and topdressing fertilizer on rice，

wheat, maize in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, **39**(2): 329-333.

[35] Jenkinson D S, Fox R H, Rayner J H, *et al*. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen--the so-called 'priming' effect[J]. Journal of Soil Science, 1985, **36**(3): 425-444.

[36] 刘少文, 殷敏, 褚光, 等. 土壤氮激发效应及其微生物机理研究进展[J]. 中国水稻科学, 2019, **33**(4): 303-312.
Liu S W, Yin M, Chu G, *et al*. Research progress of soil nitrogen priming effect and its microbial mechanisms [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2019, **33**(4): 303-312.

[37] 沈善敏. 无机氮对土壤氮矿化与固定的影响——兼论土壤氮的"激发效应"[J]. 土壤学报, 1986, **23**(1): 10-16.
Shen S M. The effect of mineral nitrogen on the minieralization and immobilization of soil nitrogen[J]. Acta Pedologica Sinica, 1986, **23**(1): 10-16.

[38] 李世清, 李生秀. 淹水培养条件下铵态氮肥对土壤氮素的激发效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, **7**(4): 361-367.
Li S Q, Li S X. Priming effect of ammonium nitrogen fertilizer on soil nitrogen under waterlogged condition[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, **7**(4): 361-367.

[39] 吴艳香. 土壤氨挥发方法优选及不同 pH 值的影响[J]. 贵州科学, 2017, **35**(5): 85-90.
Wu Y X. Optimization of ammonia volatilization testing methods and effects of pH value on ammonia volatilization[J]. Guizhou Science, 2017, **35**(5): 85-90.

[40] 周伟, 田玉华, 曹彦圣, 等. 两种氨挥发测定方法的比较研究[J]. 土壤学报, 2011, **48**(5): 1090-1095.
Zhou W, Tian Y H, Cao Y S, *et al*. A comparative study on two methods for determination of ammonia volatilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, **48**(5): 1090-1095.

[41] Kissel D E, Brewer H L, Arkin G F. Design and test of a field sampler for ammonia volatilization[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, **41**(6): 1133-1138.

[42] 李贵桐, 李保国, 陈德立. 大面积冬小麦夏玉米农田土壤的氨挥发[J]. 华北农学报, 2002, **17**(1): 76-81.
Li G T, Li B G, Chen D L. Ammonia volatilization from large field planted with winter wheat and summer maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2002, **17**(1): 76-81.

[43] 苏芳, 丁新泉, 高志岭, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥的氨挥发[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(3): 409-413.
Su F, Ding X Q, Gao Z L, *et al*. Ammonia volatilization from nitrogen fertilization of winter wheat-summer maize rotation system in the North China Plain[J]. China Environmental Science, 2007, **27**(3): 409-413.

[44] 王文岩, 董文旭, 陈素英, 等. 连续施用控释肥对小麦/玉米农田氮素平衡与利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(S2): 135-141.
Wang W Y, Dong W X, Chen S Y, *et al*. Effect of continuously applying controlled-release fertilizers on nitrogen balance and utilization in winter wheat-summer maize cropping system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(S2): 135-141.

[45] 赵斌. 不同控释复合肥对夏玉米产量和品质影响的生理机制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.
Zhao B. Physiological mechanisms of different controlled release compound fertilizers influencing on yield and quantity of summer maize[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2007.

[46] 谢迎新, 刘园, 靳海洋, 等. 施氮模式对砂质潮土氨挥发、夏玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. 玉米科学, 2015, **23**(2): 124-129.
Xie Y X, Liu Y, Jin H Y, *et al*. Effects of nitrogen application patterns on ammonia volatilization, summer maize yield and nitrogen use efficiency in sandy loam fluvo-aquic soil[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, **23**(2): 124-129.

[47] 周丽平, 杨俐苹, 白由路, 等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(6): 1449-1457.
Zhou L P, Yang L P, Bai Y L, *et al*. Comparison of several slow-released nitrogen fertilizers in ammonia volatilization and nitrogen utilization in summer maize field[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, **22**(6): 1449-1457.

[48] Grant C A, Wu R, Selles F, *et al*. Crop yield and nitrogen concentration with controlled release urea and split applications of nitrogen as compared to non-coated urea applied at seeding[J]. Field Crops Research, 2012, **127**: 170-180.

[49] 孙祥鑫, 李东坡, 武志杰, 等. 持续施用缓/控释尿素条件下水田土壤 $NH_3$ 挥发与 $N_2O$ 排放特征[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(6): 1901-1909.
Sun X X, Li D P, Wu Z J, *et al*. Characteristics of ammonia volatilization and nitrous oxide emission from a paddy soil under continuous application of different slow/controlled release urea [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(6): 1901-1909.

[50] 卢艳艳. 控释尿素对玉米农田土壤氨挥发、氮素残留与利用及其平衡的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
Lu Y Y. Effects of controlled-release urea on ammonia volatilization and nitrogen residual and balance in corn farmland [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2011.

**HUANJING KEXUE** Vol. 41 No. 11
Environmental Science (monthly) Nov. 15, 2020

# CONTENTS