亿方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带$PM_{2.5}$空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽，刘笑杰，李丁，孙颖琦

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年3月
第43卷 第3期
Vol.43 No.3

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第3期
2022年3月15日

目　次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第43卷 第3期 2022年3月
Vol.43, No.3 Mar., 2022

基于 Meta 分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤氨挥发的影响

赵政鑫[1,2]，王晓云[1,2]，田雅洁[1,2]，王锐[1,2]，彭青[1,2]，蔡焕杰[1,2*]
(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院，杨凌 712100；2. 西北农林科技大学中国旱区农业节水研究院，杨凌 712100)

摘要：为探明不同生产条件下中国农田土壤氨挥发对秸秆还田的响应，通过搜集已发表的试验数据，以秸秆不还田作为对照，基于 Meta 分析研究了在不同自然因素和农田管理措施条件下，秸秆还田对土壤氨挥发的影响效应．同时通过偏相关分析，找出秸秆还田条件下氨挥发损失的主要影响因素并进行量化．结果表明，秸秆还田能够减少农田土壤氨挥发损失，其减排作用随生育期累积降水量的增高而减弱，随生育期均温的增高而增强；当土壤 pH＜6 时，秸秆还田显著促进土壤氨挥发，pH≥6 时，秸秆还田会显著抑制土壤氨挥发；秸秆还田对土壤氨挥发的减排效果随土壤黏粒含量的增大而增强；当土壤全氮＜0.1% 和＞0.2% 时，秸秆还田显著抑制土壤氨挥发，当土壤全氮在 0.1%～0.2% 时，秸秆还田会显著促进土壤氨挥发；当施氮量在 60～180 $kg\cdot hm^{-2}$ 和施氮量＞240 $kg\cdot hm^{-2}$ 时，秸秆还田会显著降低土壤氨挥发量（$P<0.05$），而施氮量在 180～240 $kg\cdot hm^{-2}$ 时，秸秆还田显著促进土壤氨挥发；以翻耕或旋耕方式进行秸秆还田会显著抑制土壤氨挥发，而秸秆以覆盖方式还田对土壤氨挥发无显著影响；当秸秆 C/N＞45 时，秸秆还田会显著抑制土壤氨挥发，当秸秆 C/N≤45 时，秸秆还田会显著促进土壤氨挥发；秸秆还田对土壤氨挥发的减排作用随秸秆还田量的增高而增强；在非水田中秸秆还田对土壤氨挥发有显著抑制作用，在水田中秸秆还田对土壤氨挥发具有显著促进作用；偏相关分析结果表明，在水田中，生育期均温和土壤 pH 值是影响秸秆还田条件下土壤氨挥发的主要因素；在非水田中，施氮量和秸秆 C/N 是影响秸秆还田条件下土壤氨挥发的主要因素．可为科学合理利用秸秆实现农田氨挥发减排提供参考．

关键词：秸秆；氨挥发；减排效果；自然因素；管理措施
中图分类号：X144 **文献标识码**：A **文章编号**：0250-3301(2022)03-1678-10 **DOI**：10.13227/j.hjkx.202107086

Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis

ZHAO Zheng-xin[1,2], WANG Xiao-yun[1,2], TIAN Ya-jie[1,2], WANG Rui[1,2], PENG Qing[1,2], CAI Huan-jie[1,2*]
(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to explore the response of Chinese farmland soil ammonia volatilization to straw returning to the field under different production conditions, this study used no straw returning as a control. Through the collection of published literature test data, the Meta-analysis method was used to quantitatively study the effects of different natural factors and, under the conditions of farmland management measures, the effect of returning straw to the field on the emission reduction of soil ammonia volatilization. At the same time, through partial correlation analysis, the main influencing factors of ammonia volatilization under the condition of returning straw to the field were found, and the ammonia volatilization was quantified. The results showed that the effect of straw returning on soil ammonia volatilization decreased with the increase in accumulated rainfall during the growth period and increased with the increase in average temperature during the growth period. When the soil pH was less than 6, straw returning to the field significantly promoted soil ammonia volatilization, and when the pH was≥6, returning straw to the field significantly inhibited ammonia volatilization in the soil. The reduction effect of returning straw to the field on soil ammonia volatilization increased with the increase in soil clay content. When the total soil nitrogen content was ＜0.1% and ＞0.2%, returning the straw to the field significantly inhibited the volatilization of soil ammonia, and when the total soil nitrogen content was between 0.1% and 0.2%, returning the straw to the field significantly promoted the volatilization of ammonia from the soil. When the nitrogen application rate was 60-180 $kg\cdot hm^{-2}$ and the nitrogen application rate was ＞240 $kg\cdot hm^{-2}$, returning straw to the field significantly reduced soil ammonia volatilization ($P<0.05$), and when nitrogen application rate was 180-240 $kg\cdot hm^{-2}$, returning straw to the field significantly promoted ammonia volatilization in the soil. Returning straw to the field by plowing or rotary tillage significantly inhibited ammonia volatilization in the soil, whereas returning straw to the field in a mulching mode had no significant effect on ammonia volatilization. When the straw C/N＞45, it significantly inhibited ammonia volatilization from the soil, and when the straw C/N≤45, the straw returning to the field significantly promoted the ammonia volatilization of the soil. The reduction effect of straw returning on ammonia volatilization increased with the increase in straw-returning amount. In non-paddy fields, returning straw to the field had a significant inhibitory effect on soil ammonia volatilization, and in paddy fields, returning straw to the field had a significant effect on soil ammonia volatilization. The results of partial correlation analysis showed that in paddy fields, the average growth period and soil pH were the main factors affecting soil ammonia volatilization under the condition of returning straw to the field, and in non-paddy fields, nitrogen application rate and straw C/N were the main factors affecting the conditions. This study can provide reference for the scientific and rational use of straw to achieve ammonia volatilization emission reduction in farmland.

Key words: straw; ammonia volatilization; emission reduction effect; natural factor; management measures

收稿日期：2021-07-10；**修订日期**：2021-08-27
基金项目：国家自然科学基金项目(51879223)；国家重点研发计划项目(2016YFC0400201)
作者简介：赵政鑫(1997～)，男，硕士研究生，主要研究方向为农业水土资源高效利用，E-mail:15840121398@nwafu.edu.cn
* 通信作者，E-mail:caihj@nwsuaf.edu.cn

氨(NH_3)是一种可以参与氮循环过程的活性氮,是大气中最重要的反应性污染物,对生态系统、气候和人类健康均会产生不利影响[1~3]. 它对降水和大气颗粒物的总酸度方面起着重要作用[4],在对流层中和硫酸、硝酸形成二次无机气溶胶的主要成分硫酸铵和硝酸铵[5]是造成雾、霾的元凶[6],同时氨也是 NO 和N_2O的第二来源. 在农业生产中,土壤氨挥发是氮肥流失的主要途径之一. 据估计,全球范围内,平均有 18% 的氮肥因氨挥发而损失[7]. 因此,探究农田土壤氨挥发减排策略对提高氮肥利用率、减少环境污染具有重要意义.

秸秆还田作为保护性农业的核心措施之一,不仅能够提高土壤肥力[8],还会影响土壤的碳氮循环,对土壤氨挥发产生影响. 目前有关学者针对秸秆还田对土壤氨挥发的影响开展了大量的试验,但由于不同气候条件、土壤性质和秸秆性质等因素的差异导致土壤氨挥发对秸秆还田的响应并不一致. 秸秆还田配施氮肥可以促进土壤中的无机氮转变成有机氮,土壤有机质的分解会生成酸性物质,从而降低了土壤 pH 值,同时形成大量腐殖质,增强土壤颗粒对 NH_4^+ 的吸附作用进而抑制了土壤氨挥发[9]. 相反,有研究认为秸秆还田后,有机物质阻碍了NH_4^+-N进入土壤矿物固定位置,减少了铵的晶穴固定,并且在水田中秸秆降解过程中产生的有机基团中和了水面部分酸根离子,提高了田面水的 pH,从而促进了氨挥发[10,11]. 汪军等[10]的研究表明,小麦秸秆还田配施氮肥的土壤氨挥发较常规施氮处理增加了 20%; 徐聪[12]对麦玉轮作体系研究表明,秸秆还田配施氮肥的土壤氨挥发量要高于单施氮肥处理. 因此,为了明确土壤氨挥发对秸秆还田的响应规律,需要综合分析前人试验结果,寻找影响土壤氨挥发的主要驱动因子.

Meta 分析是一种对同类研究结果进行统计分析的方法[13]. 在农业生产上,前人借助 Meta 分析方法,以秸秆还田效应为研究对象,集中综合分析了秸秆还田对作物产量及农田温室气体排放的影响[14],而较少涉及到秸秆还田对土壤氨挥发的影响. 同时,因不同的气候条件(例如降水和气温)对土壤氨挥发的影响不同,为了明确单因素气象因素对土壤氨挥发的影响,前人对不同的气候条件分类汇总,往往以年尺度(例如年降水量及年均温)作为影响氨排放的因子[14,15],而与作物实际生育期内的气象数据(降水和气温)并不匹配,这极大地影响了研究结果的可靠性. 基于此,本文运用 Meta 分析方法以无秸秆还田作为对照,定量总结了在作物生育期内不同自然因素和农田管理措施条件下,秸秆还田对土壤氨挥发的减排效果.

本文基于 2021 年 6 月前中国农田秸秆还田的研究数据,以秸秆还田对氨挥发的影响进行了综合 Meta 分析,进一步解释了不同自然条件及农田管理措施下,秸秆还田对农田土壤氨挥发的影响,其目的是提高对农业系统中秸秆的了解以改善生产和尽量减少对环境的影响.

1　材料与方法

1.1　数据收集及筛选

采用 Meta 分析方法研究秸秆还田对土壤氨挥发的影响. 以"秸秆还田"、"麦秆还田"、"氨挥发"、"NH_3 emission"、"Straw"、"ammonia"、"ammonia volatilization"和"China"等关键词从中国知网、Google Scholar、Web of Science 和 Science of Direct 等中英文数据库检索 2021 年 6 月前发表的有关秸秆还田对中国农田土壤氨挥发影响的文献,并进行筛选. 筛选标准为:①研究地区为中国(台湾省资料暂缺)且试验细节清楚,如时间、地点、管理措施等; ②试验处理至少包括 1 组秸秆还田和不还田的处理,且其他田间试验条件一致; ③文中提供了土壤氨挥发量或 NH_3-N 等数据且样本大小及标准偏差可获得. 基于以上筛选标准,获得 47 篇有效文献,采集了 124 组数据.

1.2　Meta 分析

Meta 分析是用统计学方法对多个研究进行分析概括,以提供量化的平均效果来解决所研究问题. 将所选数据处理组与对照组一一对应,利用固定效应模型或随机效应模型计算二者关系的效应量. 固定效应模型是假设各研究来自同一总体样本,差异只是由抽样误差引起的,各研究之间的变异性很小; 随机效应模型指各研究来自不同的总体,各研究的变异性很大,即包括各研究的内部变异,每个研究都有相应的总体效应,合并效应量是多个不同总体参数的加权平均. 利用异质性检验反映所选数据效应量的变异程度,并根据异质性检验结果选用固定或随机效应模型; 利用偏倚性检验反映所选数据是否具有统计学意义.

1.2.1　效应量计算

对于每对试验结果计算相应比,即处理值与控制值的比值,并利用其自然对数变换形式来表示效应值大小[15]:

$$\ln R = \ln(X_e / X_c) \tag{1}$$

式中, R 为响应比,是秸秆还田条件下土壤氨挥发量(X_e)与不还田土壤氨挥发量(X_c)的比值.

为直观地表达秸秆还田对土壤氨挥发的促进或

减弱,利用式(2)将效应值转化为百分比的形式, I 值大于 0 则表示秸秆还田对氨挥发具有促进作用, I 值小于 0 则表示秸秆还田对氨挥发具有抑制作用.

$$I = (R - 1) \times 100\% \tag{2}$$

本研究利用 MetaWin 2.1 软件计算效应值大小和 95% 置信区间(CI)[16],需输入数据包括秸秆覆盖和不覆盖土壤氨挥发的均值、对应的标准差及样本数. 若 95% 置信区间包含 0,表示秸秆还田对土壤氨挥发无显著影响($P > 0.05$); 若 95% 置信区间都大于 0,表示秸秆还田对土壤氨挥发具有显著的促进作用($P < 0.05$),若 95% 置信区间都小于 0,表示秸秆还田对土壤氨挥发具有显著的抑制作用($P < 0.05$)[17,18].

1.2.2 异质性检验

本研究采用 I^2 统计量检验方法对数据进行异质性检验,计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^{n} w_i (E_{si}^2 - \bar{E}_s)^2 \tag{3}$$

$$I^2 = [Q - (n - 1)]/Q \tag{4}$$

式中, w_i 为第 i 组数据权重; n 为效应量个数; E_{si} 为第 i 个研究的效应量; $\bar{E}_s$ 为所有研究效应量的均值. 若 $I^2 \leqslant 50\%$ 时说明数据不存在异质性,采用固定效应模型,反之则选用随机效应模型进行分析.

1.2.3 偏倚性检验

为检验所收集文章的发表偏倚性,本研究采用漏斗图与 Egger's 法对偏倚性进行量化[19],若偏倚性检验值 $P_B > 0.05$ 则表示漏斗图对称性良好,所收集数据不存在发表偏倚性.

1.3 数据分类

将采集的数据进行统计及分类,分析的因素包括:自然因素(气象条件、土壤性质)和农田管理措施(施氮量、秸秆还田量、秸秆性质、还田方式、耕地类型). 在气象条件中,前人一般选取年尺度例如年降水量和年均温作为分析因素,但这与当季作物实际生育期内的气象数据并不相符. 因此,本文选取作物生育期累积降水量和生育期均温作为影响土壤氨挥发的气象驱动因子. 若文献中没有提供作物生育期累积降水量和均温,则通过中国气象数据网(http://data.cma.cn)下载作物生长季日尺度的降水和温度数据,并计算获得作物生育期累积降水量和均温数据,如试验站点气象数据缺失用地理位置接近、地形地貌相似和年平均降雨量及温度接近的附近站点气象数据替代. 依据文献[20],具体各数据分类情况如表 1.

表 1 数据分类

Table 1 Data classification

自然因素					农田管理措施				
气象条件		土壤性质							
生育期累积降水量/mm	生育期均温/℃	pH	性质	土壤全氮质量分数/%	施氮量/kg·hm^{-2}	秸秆还田方式	秸秆还田量/kg·hm^{-2}	秸秆 C/N	耕地类型
<400	≤10	<6	砂土	<0.1	60~120	覆盖还田	0~3 000	≤45	水田
400~600	10~15	6~8	壤土	0.1~0.15	120~180	旋耕还田	3 000~6 000	45~60	
600~800	>15	>8	黏土	0.15~0.2	180~240	翻耕还田	>6 000	>45	非水田
≥800				>0.2	240~300				

1.4 偏相关分析与多元非线性拟合

偏相关分析也称净相关分析,它在控制其他变量影响的条件下分析两变量的相关性,体现两变量相关性大小的指标为偏相关系数. 本研究采用偏相关分析分别得到秸秆还田条件下水田和非水田中土壤氨挥发量的主要影响因素,并将秸秆还田条件下的土壤氨挥发量作为因变量,主要影响因素为自变量进行多元非线性拟合,分别得到水田和非水田中秸秆还田条件下土壤氨挥发量的拟合方程.

1.5 数据处理

采用 R4.1.0 软件进行数据异质性和偏倚性检验; 使用 Metawin 2.1 软件进行 Meta 分析,使用 Origin8.0 软件绘图; 使用 SPSS 22.0 进行偏相关分析与多元非线性拟合.

2 结果与讨论

2.1 秸秆还田对土壤氨挥发的综合效应量、异质性及偏倚性检验

对所选数据分别计算综合效应量及异质性、偏倚性分析(如表 2). 结果表明, $I^2 = 0.96$,异质性检验达到显著水平,因此采用随机效应模型进行 Meta 分析. 与秸秆不还田相比,秸秆还田对土壤氨挥发的提高率为 4.71%(CI 为 2.00%~7.41%). 如图 1 所示,各数据点基本关于漏斗轴线对称,且 $P_B > 0.05$,说明结论可靠,不存在发表偏倚.

2.2 气象条件对秸秆还田条件下土壤氨挥发的影响

通过分析收集的 47 篇文献数据,本研究发现秸秆还田对土壤氨挥发的影响与试验区的气候条件密

切相关.秸秆还田通过影响土壤理化性质来影响氨挥发过程,而气候因子(例如生育期累积降水量和生育期均温)是秸秆分解的主要驱动力,因此气候因子会间接地影响土壤氨排放.

表 2 秸秆还田对土壤氨挥发的综合效应量和异质性、偏倚性检验

Table 2 Comprehensive effect size, heterogeneity, and bias of straw returning on ammonia volatilization in soil

模型	提高率/%	置信区间/%		Q	I^2	n	P_B
		下限	上限				
随机效应模型	4.71	2.00	7.41	3 310.38	0.96	124	0.64

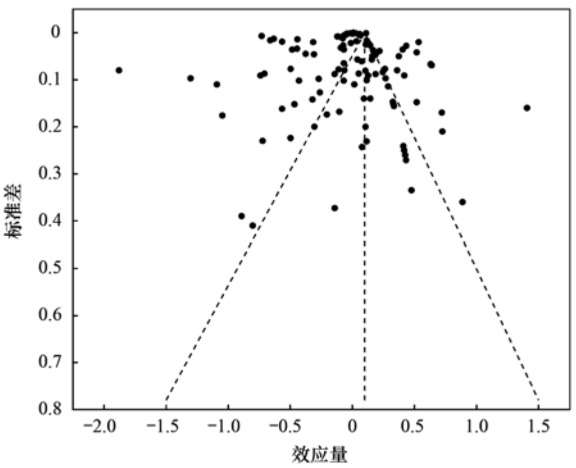


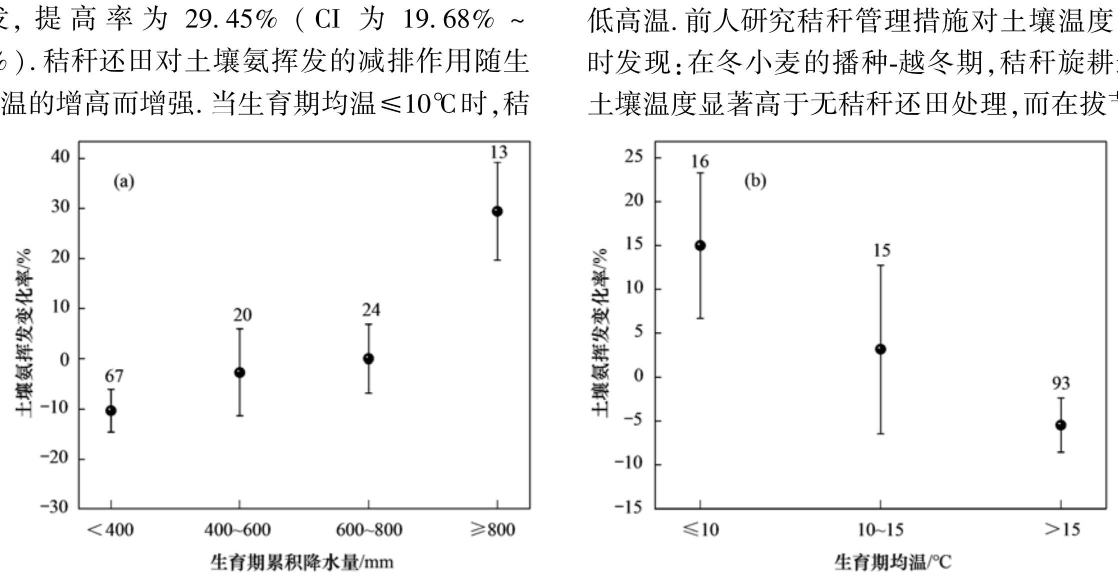
图 1 偏倚性检验漏斗图

Fig. 1 Funnel plot by publication bias test

随生育期累积降水量的增加,秸秆还田对土壤氨挥发的抑制作用减弱[图 2(a)].当生育期累积降水量 <400 mm 时,秸秆还田显著降低土壤氨挥发($P<0.05$),降低率为 10.32%(CI 为 −14.58%~−6.05%);当累积降水量在 400~600 mm 和 600~800 mm 时,秸秆还田提高土壤氨挥发但不显著,当累积降水量≥800 mm 时,秸秆还田显著提高土壤氨挥发,提高率为 29.45%(CI 为 19.68%~39.22%).秸秆还田对土壤氨挥发的减排作用随生育期均温的增高而增强.当生育期均温≤10℃时,秸秆还田会显著促进土壤氨挥发,提高率为 14.98%;生育期均温在 10~15℃时,秸秆还田会提高土壤氨挥发但效果不显著;当生育期均温 >15℃时,秸秆还田会显著抑制土壤氨挥发,降低率为 5.46%(95%置信区间为 −8.54%~−2.37%).

降水影响土壤水分,充足的土壤含水量刺激了土壤中细菌、真菌和动物等分解者群落的活动,增强了微生物代谢活动中的酶活性,加速了秸秆的分解.此外,前人研究表明,土壤中硝酸盐异化还原成铵作用(dissimilatory nitrate reduction to ammonium, DNRA)是土壤产生氨的关键步骤,且 DNRA 细菌多为兼性厌氧菌及专性厌氧菌.当土壤孔隙充满较多水时氧气含量降低,对比无秸秆还田情况,秸秆分解会使土壤缺氧情况加剧,NO_3^- 会异化还原产生更多的 NH_4^+[21].因此,当累积降水量 >800 mm 时,对比无秸秆对照,秸秆还田使土壤 NH_4^+ 浓度增大,促进土壤氨挥发.

随着作物生育期均温的增加,与无秸秆还田相比,秸秆还田降低土壤氨挥发的作用增强[图 2(b)].土壤温度深受大气温度的影响,而秸秆还田对土壤温度有调节作用,主要表现为提升低温、降低高温.前人研究秸秆管理措施对土壤温度的影响时发现:在冬小麦的播种-越冬期,秸秆旋耕还田的土壤温度显著高于无秸秆还田处理,而在拔节期-成



各散点的误差线表示 95%置信区间,X 轴线表示 $Y=0$,若误差线与 X 轴相交,表示处理和对照之间差异不显著($P>0.05$);误差线上的数字代表样本数,下同

图 2 秸秆还田在不同气候条件下对土壤氨挥发的影响

Fig. 2 Change rates of soil NH_3 emission caused by straw under different climate conditions

熟期,秸秆还田处理的土壤温度低于无秸秆还田处理; 在大气温度较高的夏大豆生育期,秸秆覆盖处理的土壤温度低于无秸秆还田处理[22]. 这说明,与无秸秆还田相比,秸秆还田导致的土壤温度的不同可能是土壤氨挥发排放产生差异的原因.

秸秆在调节土壤氨挥发过程中会起到综合效益,不仅可以通过秸秆分解增加 NH_4^+ 底物浓度促进氨挥发,也会产生抑制氨挥发的负效应. 例如,采用秸秆覆盖会减少土壤与大气接触面积,降低地表风速,进而抑制土壤氨挥发,同时,秸秆翻埋还田会增加土壤孔隙度,减少土壤中的厌氧微区,抑制土壤中 DNRA 过程,但会增加氨排放通路. 对比无秸秆对照,这种综合作用可能会导致秸秆还田抑制土壤氨排放现象的出现,而在本研究中,当生育期累积降水量 <400 mm 时和生育期均温 >15℃时,土壤氨排放均表现为秸秆还田显著小于无秸秆还田.

2.3 秸秆还田条件下土壤性质对土壤氨挥发的影响

2.3.1 土壤 pH 对秸秆还田条件下土壤氨挥发的影响

在本研究中,当 pH <6 时,秸秆还田显著提高土壤氨挥发量,提高率为 16.64% ($P<0.05$),pH 处于 6 ~ 8 和 pH >8 时,秸秆还田均会显著降低土壤氨挥发量,降低率分别为 14.16% 和 7.64% [图 3(a)].

前人针对秸秆还田后土壤 pH 变化的结论并不一致,有研究指出,秸秆还田对土壤 pH 的调节作用主要受秸秆中有机阴离子、氮含量和土壤初始 pH 值的影响[23]. 其中,土壤初始 pH 值可能极大地影响秸秆分解释放的有机化合物的缔合/解离[24],从而较为显著地影响土壤 pH 值的变化,该研究还表明,土壤 pH 升高与土壤初始 pH 呈负相关,即秸秆会使土壤 pH 值由偏酸性或偏碱性向中性转化. 而一般来说,土壤酸碱度升高会促进农田土壤氨排放[25]. 因此,这可能解释了对比无秸秆还田,在酸性土壤中添加秸秆会增加氨排放,而在中性和碱性土壤中,秸秆抑制土壤氨挥发.

2.3.2 土壤质地对秸秆还田条件下土壤氨挥发的影响

土壤黏粒含量通过影响土壤的透气性和对阳离子的吸附性来影响土壤氨排放. 在土壤质地为砂土和壤土时,秸秆还田下的土壤氨挥发比无秸秆还田时分别提高和降低了 9.73% 和 0.24%,但效果不显著,而在黏土中,秸秆还田显著抑制了土壤氨挥发,降低率为 19.17% [图 3(b)]. 黏土具有较好的吸附性且通透性较弱[26],这导致其对 NH_4^+ 具有较强的吸附作用,可以有效降低土壤液相中的 NH_4^+ 浓度,同时不利于生成的 NH_3 由土壤向空气中扩散. 另外由于黏土含氧量较低,不利于秸秆分解,因此秸秆还田对质地黏重的土壤氨挥发减排效果好于质地粗松的土壤,这一结论在前人研究中也得到证实[27].

2.3.3 土壤全氮对秸秆还田条件下土壤氨挥发的影响

当土壤全氮 <0.1% 时,秸秆还田会显著抑制土壤氨挥发,抑制率为 6.78%; 当土壤全氮为 0.1% ~ 0.2% 时,秸秆还田对土壤氨挥发有显著促进作用 [图 3(c)],当土壤全氮 >0.2% 时,秸秆还田会显著抑制土壤氨挥发,抑制率为 26.83%. 土壤全氮对秸秆还田条件下土壤氨挥发的减排效果呈现先减弱后增强的趋势. 这可能是由于秸秆分解需消耗土壤中的氮素,当氮素较低时,秸秆分解与作物争夺氮素,土壤中无机氮的固定减少,使得土壤氨挥发底物减少,故秸秆还田会抑制氨挥发; 土壤中全氮质量分数较大时会促进秸秆分解,提高土壤 pH 值,促进土壤氨挥发[28]; 当土壤全氮质量分数过高时会降低微生物和酶活性,影响秸秆分解和肥料水解,因此表现出秸秆还田抑制土壤氨挥发.

2.4 施氮量对秸秆还田条件下土壤氨挥发的影响

如图 4 所示,当施氮量在 60 ~ 120 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 120 ~ 180 $kg \cdot hm^{-2}$ 时,秸秆还田会显著降低土壤氨挥发量 ($P<0.05$),降低率为 38% 和 8.24%. 当施

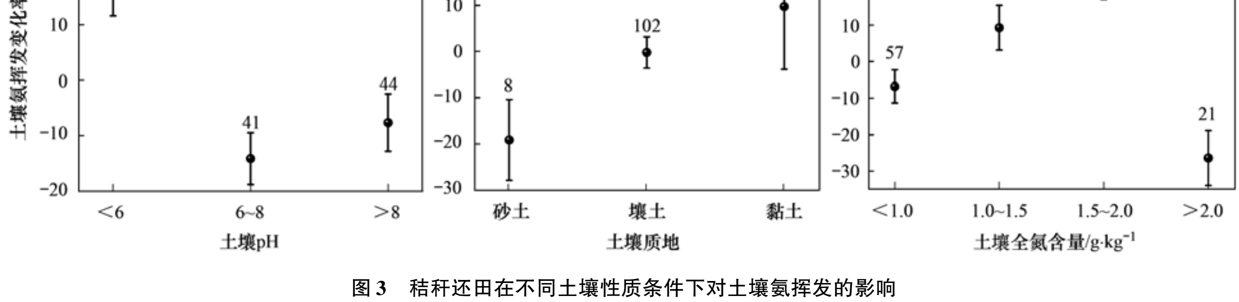


图 3 秸秆还田在不同土壤性质条件下对土壤氨挥发的影响

Fig. 3 Change rates of soil NH_3 emission caused by straw under different soil properties

肥量在 180 ~ 240 kg·hm^{-2}时，秸秆还田显著提高了土壤氨挥发（$P<0.05$），提高率为 17.14%．当施氮量 > 240 kg·hm^{-2}时，秸秆还田显著降低了土壤氨挥发，降低率为 10.11%（$P<0.05$）．随着施氮量的增加，秸秆还田对氨挥发的减排效果逐渐减弱．这是因为施肥量会影响秸秆分解速率，秸秆通常含有较高的 C/N 比，需要从外界施入一定量的活性无机氮弥补分解过程中土壤活性态氮素的供应不足，充足的无机氮才使得降解秸秆的微生物对氮素的吸收，进而维持较高的微生物活性和数量，促进秸秆的分解矿化速率[29]．施肥量较小时，秸秆分解与作物争夺土壤氮素，微生物对无机氮的净固定导致土壤 NH_4^+ 浓度降低，使得氨挥发潜力降低，故秸秆会抑制 NH_3 挥发；施肥量充足时，秸秆会充分分解，使土壤 pH 升高，利于土壤中 NH_4^+ 向 NH_3 的转化，促进 NH_3 挥发．但是当施氮量过高时反而会影响微生物自身繁殖和秸秆分解速率[30]，因此施氮量大于 240 kg·hm^{-2}时表现出秸秆还田对氨挥发促进作用减弱．

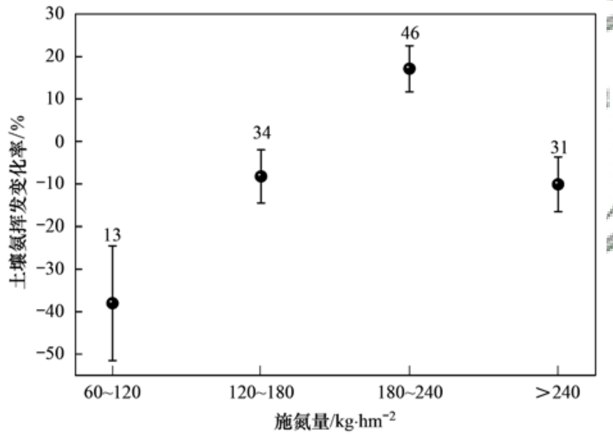


图 4　秸秆还田在不同施氮量下对土壤氨挥发的影响

Fig. 4　Change rates of soil NH_3 emission caused by straw under different N fertilizer input

2.5　不同还田方式对秸秆还田条件下土壤氨挥发的影响

秸秆还田方式包括秸秆覆盖还田、秸秆旋耕还田和秸秆翻耕还田．秸秆以覆盖的方式还田会促进土壤氨挥发但效果不显著，以旋耕和翻耕的方式还田会显著抑制土壤氨挥发（图 5），抑制率分别为 7.1%（CI 为 −12.92% ~ −1.28%）和 10.45%（CI 为 −17.26% ~ −3.64%）．

土壤耕作条件能够决定秸秆还田的深度，影响秸秆腐解率以及秸秆养分的释放[31,32]，继而影响土壤 NH_3 产生和排放过程．在旋耕还田系统中，秸秆与 5 ~ 10 cm 土壤混合；在翻耕秸秆还田时，秸秆被翻埋在 20 ~ 30 cm 土层．秸秆的腐解主要靠土壤中的微生物作用，而土壤微生物主要集中在 0 ~ 10 cm 的土层中[33]，则秸秆腐解率通常表现为旋耕秸秆还田 > 翻耕秸秆还田 > 秸秆覆盖还田．

在旋耕和翻耕条件下，对比于无秸秆还田，一方面，秸秆粉碎后，比表面积更大，进入土壤后可以吸收更多的土壤氮溶液[34]．当秸秆分解后，土壤有机质增加，土壤有机质又会吸附大量的 NH_4^+，可以在一定程度上减少土壤液相中的 NH_4^+ 含量，从而减弱了土壤氨挥发[35]；另一方面，秸秆掺入土壤后，会降低土壤容重，土壤孔隙度增加，土壤通透性增强，即使秸秆腐解产生氮素增加，因此时土壤通气性较好，有利于氮的硝化，氮素会更多地以 NO_3^- 形式存在，降低了 NH_3 的排放．

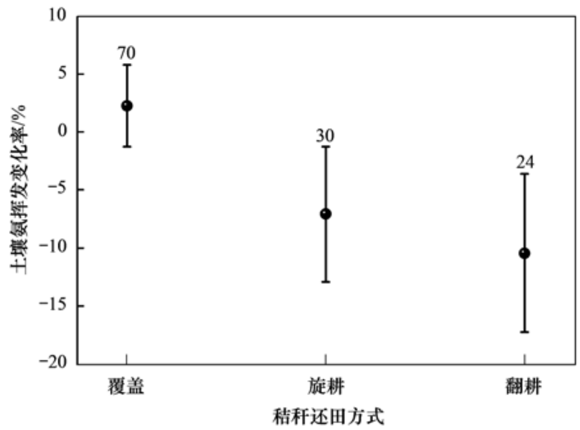


图 5　秸秆还田在不同还田方式下对土壤氨挥发的影响

Fig. 5　Change rates of soil NH_3 emission caused by straw under different straw-returning methods

2.6　不同秸秆性质与还田量对秸秆还田条件下土壤氨挥发的影响

2.6.1　秸秆 C/N 对秸秆还田条件下土壤氨挥发的影响

本研究表明，当秸秆 C/N≤45，秸秆还田显著促进土壤氨挥发，提高率分别为 15.52%，当 C/N 处于 45 ~ 60 和 C/N > 60 时，秸秆还田会显著抑制土壤氨挥发，抑制率分别为 9.21%（$P<0.05$）和 3.42%（$P<0.05$）．

秸秆还田会显著影响土壤无机氮含量，继而影响土壤氨挥发．一般情况下，当秸秆 C/N≤45 时，秸秆可以提供足够的 N 来满足土壤微生物的生长和增殖，从而导致净 N 矿化[36]，这种额外的氮供应可能会刺激氨产生过程，导致与未进行秸秆还田的相比，提高土壤氨挥发．反之，当作物残茬 C/N > 45 时，作物残茬中的 N 不能满足因秸秆提供充足碳源而诱导微生物生长所需的氮．因此，微生物将从土壤中吸收无机氮，造成净氮固定[37,38]，氨产生底物减少，因此 NH_3 排放减少．然而，添加 C/N > 60 的作物

残留物后,对土壤 NH_3 排放的抑制作用减弱[图 6(a)]. 这表明,除土壤无机氮外,添加作物残渣可能会影响非生物因素. 添加作物残渣后,微生物的生长可能消耗土壤孔隙中相当大的氧气,导致土壤通气转向厌氧条件,造成硝酸盐异化还原为铵作用加强,增大了 NH_3 排放潜力. 这可能是本研究中当 C/N > 60 时相比于 C/N 为 45 ~ 60,秸秆还田对土壤氨排放的减排效果减弱的原因.

2.6.2 秸秆还田量对秸秆还田条件下土壤氨挥发的影响

由图 6(b)可知,当秸秆还田量在 0 ~ 3 000 kg·hm⁻² 和 3 000 ~ 6 000 kg·hm⁻² 时,秸秆还田会促进土壤氨挥发,提高率为 3.79% 和 3.46% 但效果不显著; 当还田量 > 6 000 kg·hm⁻² 时,秸秆还田显著抑制土壤氨挥发,降低率为 10.90%(CI 为 -15.40% ~ -6.40%). 秸秆还田量对土壤氨挥发的抑制作用随着还田量的增大而增强. 当秸秆还田量较小时,秸秆较易分解,提高土壤中 NH_4^+ 浓度,进而对土壤氨挥发显示出促进作用[39,40]; 秸秆还田量较高时易发生分解秸秆的微生物与作物争夺土壤矿质氮的现象,使氨挥发底物减少. 同时,随着秸秆还田量的增加,土壤有机质的含量增加,有机质对 NH_4^+ 吸附能力较强,降低 NH_4^+ 浓度,从而减少 NH_3 挥发. 另一方面,秸秆还田量较大会减少肥料与大气接触面积,降低地表风速,进而秸秆还田对土壤氨挥发产生抑制作用. 所以,在本研究中与无秸秆还田相比,当秸秆还田量 > 6 000 kg·hm⁻² 时,秸秆还田对土壤氨挥发呈现出抑制作用.

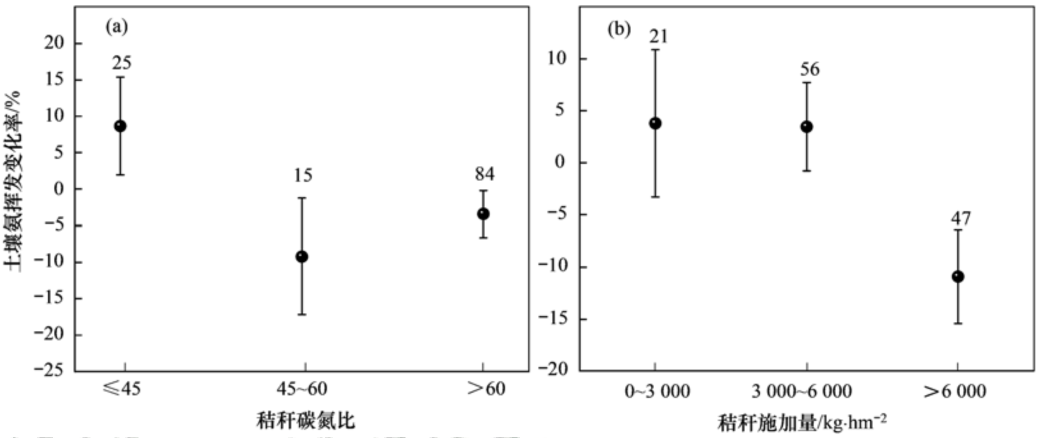


图 6 秸秆性质和施加量对土壤氨挥发的影响

Fig. 6 Change rates of soil NH_3 emission by straw application under different straw properties and quantities

2.7 不同耕地类型对秸秆还田条件下土壤氨挥发的影响

秸秆还田对不同耕地类型农田土壤氨挥发的影响程度不同(图 7). 对于非水田,秸秆还田会显著抑制农田土壤氨挥发,抑制率为 12.49%(CI 为 -16.45% ~ -8.54%). 而在水田中,秸秆还田能显著促进农田土壤氨挥发,提高率为 13.35%(CI 为 8.43% ~ 18.27%). 综上可知,秸秆还田对非水田的土壤氨挥发减排效果最好,对水田土壤氨挥发有促进作用. 秸秆还水田后,秸秆和作物阻碍了肥料下渗,导致氨挥发增加[41],汪军等[10]的研究也表明,在秸秆淹水还田初期,土壤氧化还原电位急剧下降,pH 急剧上升,进而促进了土壤氨挥发. 在旱田中,一方面秸秆配施化肥提高了尿素水解速率,缩短了土壤氨挥发时间,导致氨挥发减少,另一方面,秸秆减少了肥料与大气的接触面积,降低地表风速,从而抑制氨挥发[42].

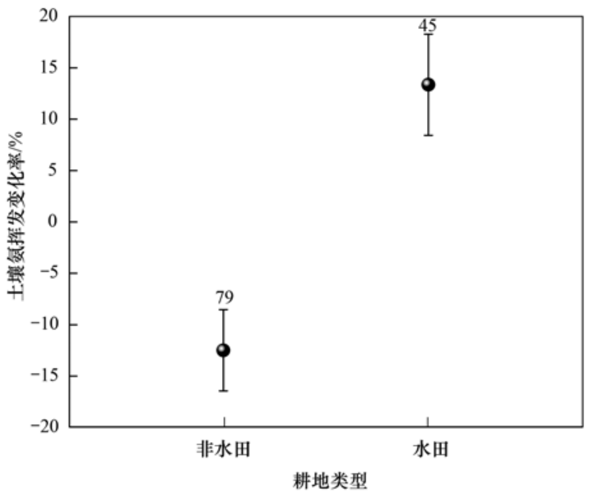


图 7 不同耕地类型秸秆还田对土壤氨挥发的影响

Fig. 7 Change rates of soil NH_3 emission caused by straw in different regions of China

2.8 秸秆还田条件下土壤氨挥发的偏相关分析与多元非线性拟合

秸秆还田对土壤氨挥发的影响受气象因素、土壤性质、田间管理措施和秸秆性质与施加量的影响. 为分析秸秆还田对土壤氨挥发影响的原因,采用偏相关分析找出主要影响因素. 由于秸秆还田对土

壤氨挥发的影响在水田和非水田中存在显著性差异，所以分别在水田和非水田条件下选取生育期累积雨量(X_1)、生育期均温(X_2)、土壤 pH 值(X_3)、土壤性质(X_4)、土壤全氮质量分数(X_5)、施氮量(X_6)、秸秆 C/N(X_7)和秸秆还田量(X_8)作为自变量，秸秆还田条件下的土壤氨挥发量(Y)作为因变量进行偏相关分析，由于秸秆还田方式无法具体量化，故在分析中暂不考虑该影响因素，结果见表 3.

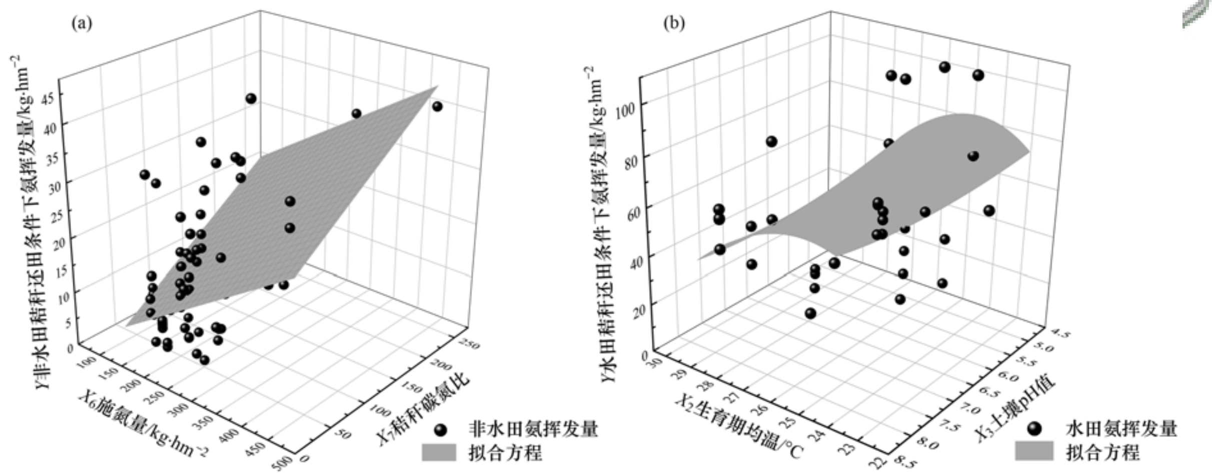
表 3　秸秆还田的土壤氨挥发量影响因子偏相关分析结果[1)]

Table 3　Partial correlation analysis results of influencing factors of soil ammonia volatilization by straw returning

项目	样本量	$X_1 \to Y$	$X_2 \to Y$	$X_3 \to Y$	$X_4 \to Y$	$X_5 \to Y$	$X_6 \to Y$	$X_7 \to Y$	$X_8 \to Y$
水田	45	0.258	−0.357*	0.295*	−0.037	0.016	0.128	0.084	0.059
非水田	79	−0.061	−0.102	−0.006	0.199	−0.147	0.312**	0.389**	0.054

1) * 表示通过 0.05 显著性检验；** 表示通过 0.01 显著性检验

在水田中，偏相关系数的绝对值大小排序为：$X_2 > X_3 > X_1 > X_6 > X_7 > X_8 > X_4 > X_5$，所以 X_2(生育期均温)和 X_3(土壤 pH 值)为影响秸秆还田条件下土壤氨挥发的主要因素；在非水田中，偏相关系数绝对值大小排序为 $X_7 > X_6 > X_4 > X_5 > X_2 > X_1 > X_8 > X_3$，所以 X_6(施氮量)和 X_7(秸秆 C/N)为影响秸秆还田条件下土壤氨挥发的主要因素. 以秸秆还田条件下的土壤氨挥发量(Y)作为因变量，偏相关分析得到的主要影响因素为自变量，通过多元非线性拟合得到水田和非水田中秸秆还田条件下土壤氨挥发量的表达式如图 8 所示. 结果表明：在非水田中，秸秆还田条件下的土壤氨挥发量(Y)与 X_6(施氮量)和 X_7(秸秆 C/N)均成正相关关系；在水田中，秸秆还田条件下的土壤氨挥发量(Y)与 X_2(生育期均温)成负相关关系，与 X_3(土壤 pH 值)成正相关关系，这与偏相关分析所得结果一致，与前人研究的结果基本一致[43,44]. 在水田中土壤氨挥发量(Y)与 X_2(生育期均温)呈现负相关关系的原因可能是由于所搜集水田作物种类单一，生育期均温变动幅度较小，另外秸秆还田条件下土壤氨挥发量的产生是一个复杂的过程，具体如何将其更准确量化有待进一步研究.



$Y = 17.441 + 0.134X_6 + 0.149X_7$
$R^2 = 0.423, P < 0.05$

$Y = 327.698 + 0.357X_2^2 - 4.382X_3^2 - 29.028X_2 + 67.058X_3$
$R^2 = 0.331, P < 0.05$

图 8　秸秆还田条件下的土壤氨挥发量(Y)与主要影响因素多元非线性拟合结果

Fig. 8　Multivariate nonlinear fitting results of soil ammonia volatilization (Y) and main influencing factors under the straw-returning condition

3　结论

(1)秸秆还田对土壤氨挥发的减排作用随生育期均温、土壤黏粒含量和秸秆还田量的增大而增强，随生育期累积降水量的增大而减弱；在酸性土壤中秸秆还田显著促进土壤氨挥发，在中性或碱性土壤中，秸秆还田会显著抑制土壤氨挥发；秸秆还田对土壤氨挥发的促进作用随土壤全氮含量和施氮量的增加呈现先增强后减弱的趋势，在土壤全氮为 0.15%～2% 和施氮量为 180～240 kg·hm^{-2}时促进作用最强；以翻耕或旋耕方式进行秸秆还田会显著抑制土壤氨挥发；利用较高 C/N 的秸秆还田对土壤氨挥发的减排效果较好；在非水田中秸秆还田对土壤氨挥发有显著抑制作用，在水田中秸秆还田对土壤氨挥发具有显著促进作用.

(2)在水田中，生育期均温和土壤 pH 值是影响秸秆还田条件下土壤氨挥发的主要因素；在非水田中，施氮量和秸秆 C/N 是影响秸秆还田条件下土壤氨挥发的主要因素，同时利用多元非线性回归得到秸秆还田条件下土壤氨挥发量与主要影响因素的拟

合方程,为量化秸秆还田条件下土壤氨挥发量提供理论依据.

参考文献:

[1] 朱影, 庄国强, 吴尚华, 等. 农田土壤氨挥发的过程和控制技术研究[J]. 环境保护科学, 2020, **46**(6): 88-96.
Zhu Y, Zhuang G Q, Wu S H, *et al*. Ammonia volatilization process and control technology of farmland Soil [J]. Environmental Protection Science, 2020, **46**(6): 88-96.

[2] 王丽波. 秸秆直接还田是农业可持续发展的需要[J]. 农机使用与维修, 2018, (4): 74.

[3] 赵睿东, 于兴娜, 侯新红, 等. 浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 3976-3984.
Zhao R D, Yu X N, Hou X H, *et al*. Establishment and spatial distribution of anthropogenic ammonia emission inventory in Zhejiang Province[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 3976-3984.

[4] Behera S N, Sharma M, Nayak P, *et al*. An approach for evaluation of proposed air pollution control strategy to reduce levels of nitrogen oxides in an urban environment[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2014, **57**(4): 467-494.

[5] Huang J Y, Xiong R N, Fang L, *et al*. Estimation of interannual trends of ammonia emissions from agriculture in Jiangsu Province from 2000 to 2017 [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2020, **13**(3): 268-273.

[6] 王艳, 段学军. 氨污染: 被忽视的雾霾元凶[J]. 生态经济, 2017, **33**(6): 6-9.

[7] Pan B B, Lam S K, Mosier A, *et al*. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: a global synthesis [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, **232**: 283-289.

[8] Zhang H L, Lal R, Zhao X, *et al*. Chapter one-Opportunities and challenges of soil carbon sequestration by conservation agriculture in China[J]. Advances in Agronomy, 2014, **124**: 1-36.

[9] Li M N, Wang Y L, Adeli A, *et al*. Effects of application methods and urea rates on ammonia volatilization, yields and fine root biomass of alfalfa[J]. Field Crops Research, 2018, **218**: 115-215.

[10] 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.

[11] Wang J, Wang D J, Zhang G, *et al*. Effect of wheat straw application on ammonia volatilization from urea applied to a paddy field[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, **94**(1): 73-84.

[12] 徐聪. 华北平原长期氮肥施用和秸秆还田下温室气体排放及氮素损失特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. 22-28.
Xu C. Characteristics of greenhouse gas emissions and nitrogen losses under long-term nitrogen fertilization and straw incorporation in the North China Plain [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. 22-28.

[13] Borenstein M, Hedges L V, Higgins J P, *et al*. Introduction to meta-analysis [M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2009.

[14] 张冉, 赵鑫, 濮超, 等. 中国农田秸秆还田土壤N_2O排放及其影响因素的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(22): 1-6.
Zhang R, Zhao X, Pu C, *et al*. Meta-analysis on effects of residue retention on soil N_2O emissions and influence factors in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(22): 1-6.

[15] 罗晓琦, 冯浩, 刘晶晶, 等. 生物炭施用下中国农田土壤N_2O排放的 Meta 分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, **25**(9): 1254-1265.
Luo X Q, Feng H, Liu J J, *et al*. Meta-analysis on farmland soil N_2O emissions under biochar application in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, **25**(9): 1254-1265.

[16] 郑凤英, 彭少麟. 生态学整合分析中两种常用效应值的实例应用比较[J]. 生态科学, 2005, **24**(3): 250-253.
Zheng F Y, Peng S L. Comparison of two effect sizes of meta-analysis commonly used in ecology[J]. Ecologic Science, 2005, **24**(3): 250-253.

[17] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(22): 7-15.
Zheng K, He J, Li H W, *et al*. Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in Northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(22): 7-15.

[18] Morgan P B, Ainsworth E A, Long S P. How does elevated ozone impact soybean? A meta-analysis of photosynthesis, growth and yield[J]. Plant, Cell & Environment, 2003, **26**(8): 1317-1328.

[19] Egger M, Smith G D, Schneider M, *et al*. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test [J]. BMJ, 1997, **315**(7109): 629-634.

[20] Sha Z P, Li Q Q, Lv T T, *et al*. Response of ammonia volatilization to biochar addition: a meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2019, **655**: 1387-1396.

[21] Wang X, Xu S J, Wu S H, *et al*. Effect of *Trichoderma viride* biofertilizer on ammonia volatilization from an alkaline soil in Northern China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **66**: 199-207.

[22] Wang W Y, Akhtar K, Ren G X, *et al*. Impact of straw management on seasonal soil carbon dioxide emissions, soil water content, and temperature in a semi-arid region of China[J]. Science of The Total Environment, 2019, **652**: 471-482.

[23] 王文林, 刘波, 韩睿明, 等. 农业源氨排放影响因素研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2016, **32**(6): 870-878.
Wang W L, Liu B, Han R M, *et al*. Review of researches on factors affecting emission of ammonia from agriculture [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, **32**(6): 870-878.

[24] Chen H H, Li X C, Hu F, *et al*. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: a meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2013, **19**(10): 2956-2964.

[25] Tang C, Yu Q. Impact of chemical composition of legume residues and initial soil pH on pH change of a soil after residue incorporation[J]. Plant and Soil, 1999, **215**(1): 29-38.

[26] Ritchie G S P, Dolling P J. The role of organic matter in soil acidification[J]. Australian Journal of Soil Research, 1985, **23**(4): 569-576.

[27] Du Y D, Cui B J, Zhang Q, *et al*. Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: a meta-analysis [J]. CATENA, 2020, **193**: 104617.

[28] 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.

[29] San Francisco S, Urrutia O, Martin V, *et al*. Efficiency of urease and nitrification inhibitors in reducing ammonia volatilization from diverse nitrogen fertilizers applied to different soil types and wheat straw mulching [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, **91**(9): 1569-1575.

[30] Fan X H, Li Y C, Alva A K. Effects of temperature and soil type on ammonia volatilization from slow-release nitrogen fertilizers [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2011, **42**(10): 1111-1122.

[31] 丁雪丽，何红波，李小波，等．不同供氮水平对玉米秸秆降解初期碳素矿化及微生物量的影响[J]．土壤通报，2008，**39**(4)：784-788.
Ding X L, He H B, Li X B, *et al*. Effect of nitrogen level on carbon mineralization and microbial biomass during initial decomposition of maize straw [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, **39**(4): 784-788.

[32] 苗峰．秸秆还田与施肥对作物和土壤的影响[D]．南京：南京林业大学，2011．32-33.
Miao F. Effect of Straw-return coupled with different nitrogen fertilizers on crop and soil properties [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011. 32-33.

[33] Chen J, Zheng M J, Pang D W, *et al*. Straw return and appropriate tillage method improve grain yield and nitrogen efficiency of winter wheat[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, **16**(8): 1708-1719.

[34] Latifmanesh H, Deng A X, Nawaz M M, *et al*. Integrative impacts of rotational tillage on wheat yield and dry matter accumulation under corn-wheat cropping system [J]. Soil and Tillage Research, 2018, **184**: 100-108.

[35] Meng X P, Guo Z Y, Yang X N, *et al*. Straw incorporation helps inhibit nitrogen leaching in maize season to increase yield and efficiency in the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2021, **211**, doi: 10.1016/j.still.2021.105006.

[36] Yang H S, Yang B, Dai Y J, *et al*. Soil nitrogen retention is increased by ditch-buried straw return in a rice-wheat rotation system[J]. European Journal of Agronomy, 2015, **69**: 52-58.

[37] Yu Y X, Tao H, Jia H T, *et al*. Impact of plastic mulching on nitrous oxide emissions in China's arid agricultural region under climate change conditions[J]. Atmospheric Environment 2017, **158**: 76-84.

[38] Vigil M F, Kissel D E. Equations for estimating the amount of nitrogen mineralized from crop residues[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, **55**(3): 757-761.

[39] Liu C Y, Wang K, Meng S X, *et al*. Effects of irrigation, fertilization and crop straw management on nitrous oxide and nitric oxide emissions from a wheat-maize rotation field in northern China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, **140**(1-2): 226-233.

[40] 夏文建，王淳，张丽芳，等．基于 DNDC 模型的双季稻体系氨挥发损失研究[J]．长江流域资源与环境，2020，**29**(9)：2035-2046.
Xia W J, Wang C, Zhang L F, *et al*. Suitability of DNDC model to simulate ammonia volatilization for double rice cropping system [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, **29**(9): 2035-2046.

[41] 杨弘．秸秆还田对农田棕壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[D]．沈阳：沈阳农业大学，2016．32-33.
Yang H. Effect of maize stalk retention on nitrous oxide emission and ammonia volatilization in arable brown soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. 32-33.

[42] Sun L Y, Wu Z, Ma Y C, *et al*. Ammonia volatilization and atmospheric N deposition following straw and urea application from a rice-wheat rotation in southeastern China[J]. Atmospheric Environment, 2018, **181**: 97-105.

[43] De Ruijter F J, Huijsmans J F M, Rutgers B. Ammonia volatilization from crop residues and frozen green manure crops [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(28): 3362-3368.

[44] 卢丽丽，吴根义．农田氨排放影响因素研究进展[J]．中国农业大学学报，2019，**24**(1)：149-162.
Lu L L, Wu G Y. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, **24**(1): 149-162.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 3

Mar. 15, 2022

CONTENTS