

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

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.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气 PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季 PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面 O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程 NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾琰杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁 (GO-nFe ⁰ /WMF) 对水中Cr(VI) 的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动 ANAMMOX 运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流 CO ₂ 及 CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土 N ₂ O 排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤 Cd 环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤团聚体结构以及 Cd 含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施 2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011) 《环境科学》征稿简则 (3084) 信息 (3174, 3185, 3391)	

控释尿素对黄河故道沙性潮土 N_2O 排放的影响

姜右锦^{1,2}, 袁俊吉², 丁维新², 刘阳¹, 张松林^{1*}

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 建立田间原位试验, 采用静态箱-气相色谱法, 研究了常规尿素及其与硫包膜和聚氨酯包膜控释尿素配施(比例分别为30%:70%、50%:50%和70%:30%)对黄河故道沙性潮土玉米生长季氧化亚氮(N_2O)排放的影响。研究发现:常规尿素处理 N_2O 排放量(以N计,下同)为 $1.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,排放系数为0.38%;与之相比,配施30%、50%和70%硫包膜尿素处理的 N_2O 排放量分别降低了1.12%、22.5%和11.2%,排放系数下降2.63%~26.3%。相反,配施聚氨酯包膜尿素处理增加 N_2O 排放量 $0.02 \sim 0.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中70%聚氨酯包膜尿素处理增幅最大,达到23.0%。回归分析表明,各处理 N_2O 排放通量与10 cm处土温、土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量呈极显著正相关($P < 0.01$),而与土壤孔隙含水量和溶解性有机碳含量无显著关系。与常规尿素相比,50%常规尿素+50%硫包膜控释尿素处理玉米产量略有增加,而30%常规尿素+70%硫包膜尿素处理稍微降低了玉米产量,但不显著($P > 0.05$)。因此,控释肥减缓土壤 N_2O 排放以及对作物产量的影响主要受控于包衣材料。

关键词: 控释肥; N_2O 排放; 玉米; 产量; 潮土

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3402-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911169

Effects of Controlled-Release Urea Application on N_2O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil

JIANG You-jin^{1,2}, YUAN Jun-ji², DING Wei-xin², LIU Yang¹, ZHANG Song-lin^{1*}

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: A field experiment was conducted in maize-cultivated sandy loam soil in the old flooded area of the Yellow River to evaluate the responses of N_2O emissions to application of different type of controlled-release urea. An inorganic N fertilizer was applied at $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ during the maize season. Urea was applied alone and in combination with sulfur-coated urea (SCU) or polyurethane-coated urea (PCU) at N ratios of 30%:70%, 50%:50%, and 70%:30%, respectively. Cumulative N_2O emission under urea treatment alone (CN) was $1.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ with a N_2O emission factor of 0.38%. In comparison to CN, 70% urea + 30% SCU, 50% urea + 50% SCU, and 30% urea + 70% SCU treatments reduced N_2O emission by 1.12%, 22.5%, and 11.2%, respectively. In contrast, application of urea in combination with PCU (with the proportion varied from 30%-70%) increased N_2O emission by $0.02 \sim 0.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ compared with the CN, while 30% urea + 70% PCU treatment showed a 23.0% increase. Regression analysis showed that N_2O flux was significantly ($P < 0.01$) correlated with soil temperature at 10 cm depth and concentrations of soil NH_4^+-N and NO_3^--N in all the treatments, but not with soil moisture or dissolved organic carbon concentration. Compared with the CN, the 50% urea + 50% SCU and 50% urea + 50% PCU treatments slightly, but not significantly, increased the maize yield, whereas the 30% urea + 70% SCU treatment showed a reduction effect. Overall, the mitigation effect of controlled-release urea on N_2O emission may primarily depend on its coating material and application rate.

Key words: controlled-release urea; N_2O emissions; maize; yield; sandy loam soil

氧化亚氮(N_2O)是一种重要的温室气体,其全球增温潜势大约是 CO_2 的 265 倍^[1]。在全球人为排放源中,农业土壤是大气 N_2O 最为重要的来源^[2],氮肥施用则是 N_2O 排放的关键驱动因素^[3]。大量研究表明,超过 55% 的氮肥在农田生态系统中未被作物吸收^[4],这导致大量氮素在土壤中累积以及可以通过硝化和反硝化过程产生 N_2O ^[5~7] 等其他途径损失。因此,减少氮肥用量和提高氮素利用率是减缓农田 N_2O 排放的重要途径。

控释肥通过调控氮素释放速率,实现肥料养分的供应与植物吸收达到基本一致,从而减少养分损失,提高作物产量和氮素利用率^[8]。但是,控释肥施

用对土壤 N_2O 排放影响的研究结果不尽一致。有研究表明,控释肥施用明显减少氮肥诱导的 N_2O 直接排放,也减少因氮素淋溶或随地表径流流失而造成的 N_2O 间接排放^[9~11]。相反,有研究发现施用控释肥并不影响 N_2O 排放,甚至增加了 N_2O 排放^[12, 13]。控释肥对土壤 N_2O 排放的影响可能受控

收稿日期: 2019-11-19; 修订日期: 2020-01-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200304); 国家自然科学基金项目(41701297); 江苏省农业科技自主创新资金重点项目(CX(17)1001); 江苏省自然科学基金项目(BK20171105)

作者简介: 姜右锦(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤碳氮循环和温室气体排放, E-mail: jiangyoujin2013@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangsonglin65@163.com

释肥种类、与尿素配比、气候条件、土壤类型和耕作方式等的影响^[14]。因控释肥养分的缓释性,难以满足作物前期生长对养分的需求,为实现保证作物产量和减少对环境的污染,基肥采用控释肥与尿素配施是最有效的方法^[15, 16]。目前有关控释肥与尿素配施对玉米季 N₂O 排放的研究在国内外鲜见报道。因此,本文以黄河故道沙性潮土为研究对象,建立田间原位试验,监测夏玉米生长季尿素及其与不同种类控释肥以不同比例配施对土壤 N₂O 排放的影响,以期氮肥合理运筹、降低环境负效

应等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间原位试验于 2018 年在江苏省盐城市滨海县界牌镇(33°33'N, 120°02'E)进行。试验地区属于暖温带-亚热带过渡的湿润季风气候区,年平均气温 14.1℃,年平均降水量 950 mm,土壤类型为废黄河冲积物发育的沙性潮土,耕层(0~20 cm)土壤基本理化性质见表 1。

表 1 土壤(0~20cm)基本理化性质
Table 1 Soil properties of the 0-20 cm layer

项目	pH	有机碳/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
参数值	8.70±0.02	2.91±0.11	0.32±0.01	0.62±0.01	21.7±0.01	13	25	62

田间试验设置 8 个处理,分别为:①不施氮对照(CK)、②常规尿素(CN)、③30% 硫包膜尿素+70% 尿素(30% SCU)、④50% 硫包膜尿素+50% 尿素(50% SCU)、⑤70% 硫包膜尿素+30% 尿素(70% SCU)、⑥30% 聚氨酯包膜尿素+70% 尿素(30% PCU)、⑦50% 聚氨酯包膜尿素+50% 尿素(50% PCU)、⑧70% 聚氨酯包膜尿素+30% 尿素(70% PCU)。氮肥用量为 270 kg·hm⁻²,控释肥与尿素比例以氮计。氮肥分 2 次施入,除 70% SCU 和 70% PCU 处理外,基追比为 1:1。磷和钾肥用量分别为 90 kg·hm⁻²(以 P₂O₅ 计,过磷酸钙)和 60 kg·hm⁻²(以 K₂O 计,硫酸钾),与包膜尿素作为基肥一次性施入,追肥为常规尿素(表 2)。每个处理重复 3 次,小区面积为 4.2 m×5 m,采用随机区组排列。硫包膜尿素含氮量为 29%,由沃夫特复合肥有限公司提供;聚氨酯包膜尿素含氮量 44%,由北京市农林科学院植物营养与资源研究所提供。

表 2 施肥方案
Table 2 Experimental fertilization scheme

处理	基肥/kg·hm ⁻²				追肥/kg·hm ⁻²
	普通尿素	控释尿素	磷	钾	
对照(CK)	0	0	90	60	0
常规尿素(CN)	135	0	90	60	135
30% SCU ¹⁾	54	81	90	60	135
50% SCU	0	135	90	60	135
70% SCU	0	189	90	60	81
30% PCU ²⁾	54	81	90	60	135
50% PCU	0	135	90	60	135
70% PCU	0	189	90	60	81

1) SCU 表示硫包膜尿素; 2) PCU 表示聚氨酯包膜尿素,下同

1.2 样品采集与分析

土壤 N₂O 排放通量采用静态箱-气相色谱法测

定。采样箱体与底座均由不锈钢制成,采样箱尺寸为 30 cm×20 cm×20 cm,底座(60 cm×25 cm×15 cm,槽深 3 cm)中间设有内框(10 cm×10 cm×8 cm),用于种植玉米 1 株,将底座埋入土壤使槽底与土壤表面齐平。

气体样品于 2018 年 6 月 8 日至 2018 年 9 月 23 日采集,采样频率为每周 2 次,采样时间固定在上午 08:00~11:00。预先向采样箱底座凹槽内注水 2~3 cm,然后盖上采样箱,在盖箱后 0、10、20 和 30 min 分别用 50 mL 注射器采集气体样品,注入已抽真空的钢化玻璃瓶,同时记录箱内温度。N₂O 浓度用安捷伦气相色谱仪(Agilent 7890, Santa Clara, USA)测定,色谱柱为 80/100 目 porapak Q 填充柱,柱长 2 m,柱径 2 mm,柱温 55℃,载气为氦甲烷(95% Ar+5% CH₄),流速为 55 mL·min⁻¹,电子捕获检测器(ECD)温度为 350℃。N₂O 标准气体购自国家标准物质中心。

同步采集耕层土壤样品,放置于 4℃ 保温箱中带回实验室,用于测定无机氮(NH₄⁺-N、NO₃⁻-N)和溶解性有机碳(DOC)等。土壤无机氮由 2 mol·L⁻¹ KCl 提取(土水比 1:5),用 SAN++ 流动注射分析仪(SAKLAR, Breda, Holland)测定。DOC 用纯水提取(土水比 1:2.5),25℃ 下恒温振荡 30 min,在 4℃ 下以 7 000 r·min⁻¹ 离心 5 min,上清液过 0.45 μm 滤膜(Whatman, Clifton, USA),用岛津碳氮分析仪测定(TOC Vcph, Shimadzu, Kyoto, Japan)。

1.3 辅助指标测定

在气体样品采集的同时,用便携式电子温度计(JM624,天津今明仪器有限公司)测定 10 cm 处土壤温度。用便携式土壤测墒仪(MPM-160B,北京中

仪远大自动化技术有限公司)测定 5 cm 处体积含水量(WVC). 采用如下公式计算土壤孔隙含水量(WFPS):

$$\text{WFPS} = \frac{\text{WVC}(\%) }{1 - (\text{BD}/2.65)} \times 100\% \quad (1)$$

式中, BD 为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), 2.65 为假定的土壤颗粒密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

1.4 数据计算与分析

N_2O 排放通量计算公式为:

$$F = \rho \times \frac{V}{S} \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T} \times 60 \quad (2)$$

式中, F 为 N_2O [以 N 计, $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$] 通量, ρ 为标准状态下 N_2O 密度($1.25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), V 是密闭箱有效体积(m^3), S 为底座面积(m^2), dc/dt 表示单位时间内密闭箱内 N_2O 浓度变化量, T 为密闭箱内平均气温($^{\circ}\text{C}$). 30 min 内采集的 4 个气体样品浓度与时间之间的线性相关系数, $R^2 > 0.90$ 视为有效.

N_2O 累积排放量($E_{\text{N}_2\text{O}}$, 以 N 计, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 的计算公式为:

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \times 10^{-5} \quad (3)$$

式中, F 为 N_2O 排放通量 [$\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]; i 表示第 i 次采样; $t_{i+1} - t_i$ 表示两个相邻测定日期的间隔时间(d); n 为总的测定次数.

N_2O 排放系数(N_2O 排放量占施入氮量的比例)的计算公式为:

$$\text{EF} = \frac{E_{\text{fertilizer}} - E_{\text{control}}}{N_{\text{applied}}} \times 100\% \quad (4)$$

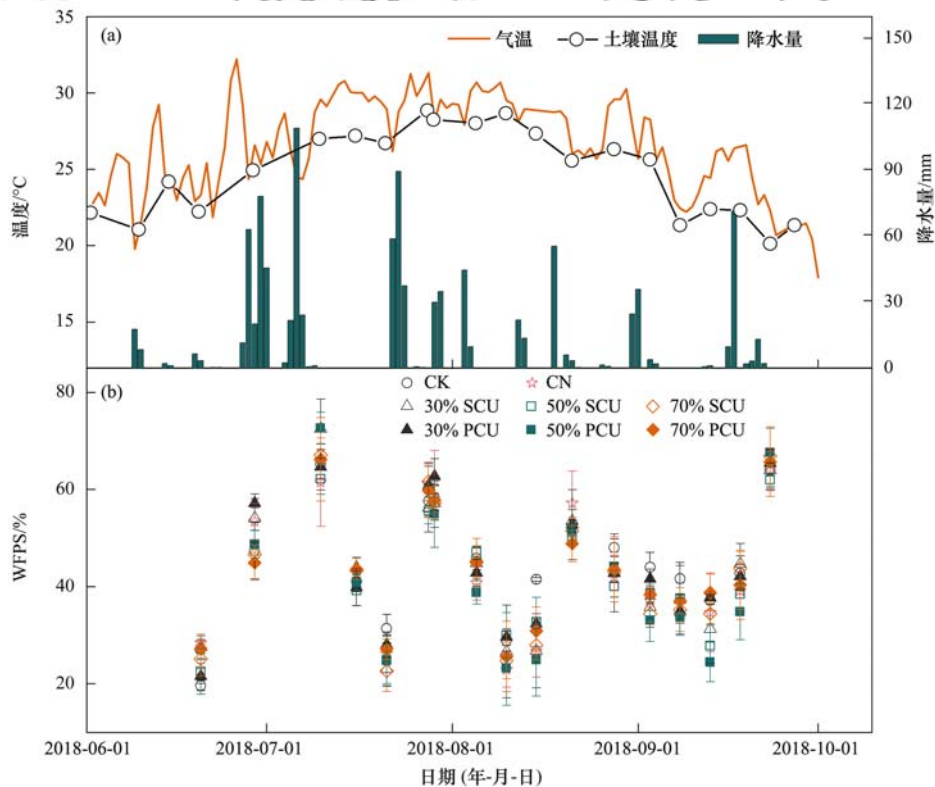
式中, EF 为 N_2O 排放系数(%); $E_{\text{fertilizer}}$ 为施氮处理 N_2O 排放量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); E_{control} 为对照处理 N_2O 排放量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); N_{applied} 为总施氮量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

数据用 SPSS 20.0 软件包 (SPSS Inc, Chicago, USA) 进行分析. 不同处理间作物产量、 N_2O 累积排放量等的差异用单因素方差分析进行分析. N_2O 排放通量与土壤无机氮、DOC 和其它辅助指标间的关系用多元回归分析确定, 并进行 F 检验.

2 结果与分析

2.1 环境要素

2018 年玉米季, 大气温度变化在 $18.2 \sim 32.2^{\circ}\text{C}$ 之间, 平均为 26.0°C [图 1(a)]. 土壤 10 cm 处温度平均为 25.4°C , 总降水量为 956 mm, 最大日降雨量出现在 7 月 6 日, 为 109 mm. 各处理土壤 WFPS 变化范围为 $22.6\% \sim 72.5\%$, 处理间差异不显著 [图 1(b)].



SCU 表示硫包膜尿素; PCU 表示聚氨酯包膜尿素, 下同

图 1 试验区气温、降雨量、10 cm 土壤温度和土壤孔隙含水量(WFPS)的动态变化

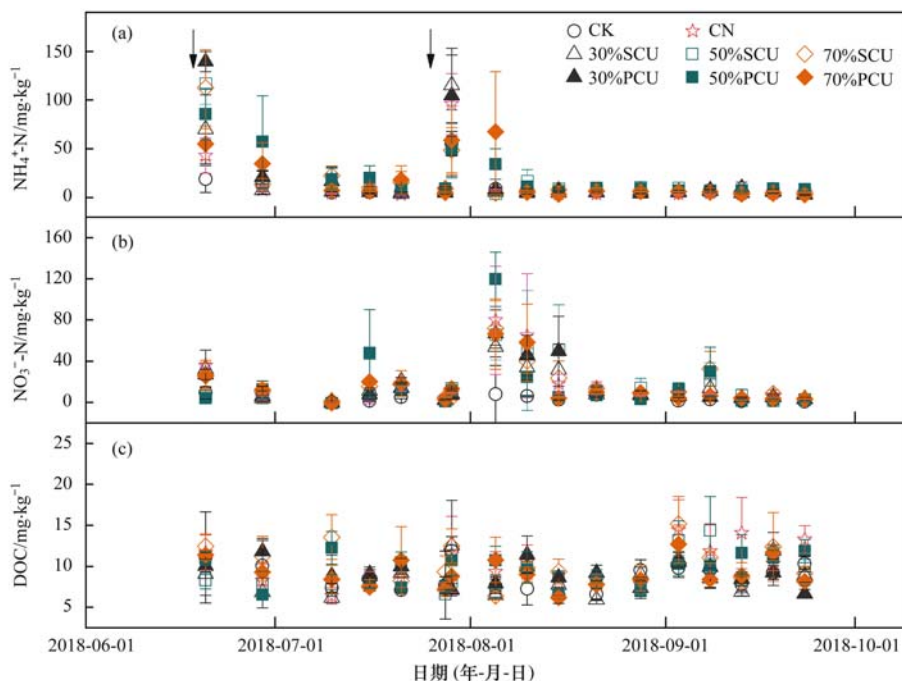
Fig. 1 Temporal dynamics of air temperature, precipitation and soil temperature at 10 cm depth and the soil water-filled pore space (WFPS) in the test area

2.2 土壤无机氮和 DOC 含量的动态变化

在整个玉米生长季,各施氮处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈现明显的动态变化特征.施肥后土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量迅速上升,随后逐渐下降[图 2(a)],处理间未出现显著差异.基肥施用后 1 d,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量达到峰值.除 30% PCU 处理($120 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,以 N 计)外,控释肥与尿素配施处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量峰值为 $70.5 \sim 112 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,低于 CN 处理($118 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).追肥后,各施肥处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量变化与基肥类似,但 PCU 处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量高于 SCU 处理. CN 处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均含量为 $17.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,SCU 处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量低于 CN 处理 $1.21\% \sim 5.77\%$,而 PCU 处理高于 CN 处理 $6.12\% \sim$

11.7% .

施肥后土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量也逐渐上升[图 2(b)].追肥 7 d 后,CN 处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量达到峰值($70.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).与 CN 处理相比,30% SCU、50% SCU 和 70% SCU 处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别降低了 26.9%、26.1% 和 13.3%,而 30% PCU、50% PCU 和 70% PCU 处理则分别增加了 16.9%、12.5% 和 36.0%. CN 处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量平均为 $15.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,30% SCU 和 50% SCU 处理比 CN 处理分别减少 $0.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,PCU 处理则高于 CN 处理 $0.87 \sim 4.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.玉米季不同处理土壤 DOC 含量无显著差异,平均值变化在 $8.64 \sim 10.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间[图 2(c)].



图中黑色箭头为施肥日期,下同

图 2 土壤无机氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)和溶解性有机碳(DOC)动态变化特征

Fig. 2 Dynamics of soil inorganic nitrogen($\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$) and DOC concentrations

2.3 N_2O 排放通量

各处理 N_2O 排放通量呈现明显的季节变化(图 3),基肥和追肥施用后均出现明显的 N_2O 排放峰,持续 1~2 周.施基肥后 1 d,土壤 N_2O 排放通量迅速上升,CN 处理 N_2O 通量为 $151 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,显著高于控释肥处理.施肥处理基肥施用 10 d 后 N_2O 通量达到峰值,其中 CN 处理为 $377 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,硫包膜处理为 $318 \sim 398 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,聚氨酯包膜处理为 $591 \sim 597 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$.追肥 1 d 后,CN 处理达到峰值[$405 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$],硫包膜和聚氨酯包膜尿素处理 N_2O 排放峰值则出现在追肥后 7 d,为 $216 \sim 270 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$.

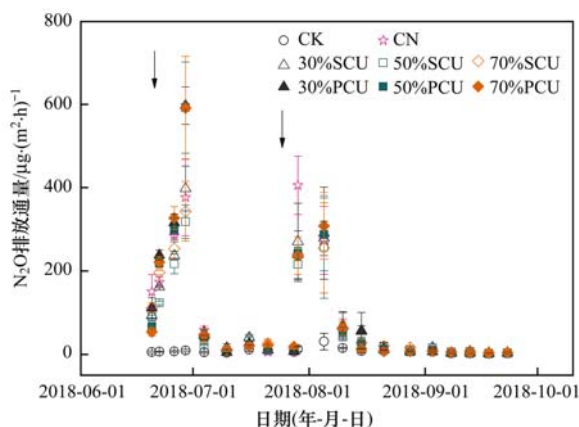


图 3 不同处理土壤 N_2O 排放通量

Fig. 3 Soil N_2O emission fluxes of different treatments

回归分析表明,CK 处理 N₂O 排放通量与气温、土壤温度、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量呈极显著正相关 ($P<0.01$; 表3). 硫包膜尿素处理 N₂O 排放通量与气温和土壤温度呈显著正相关,与其他环境因子则无显著关系. 聚氨酯包膜尿素处理 N₂O 排放通量与

气温、土壤温度和 NO₃⁻-N 含量呈显著正相关,与 NH₄⁺-N 含量呈极显著正相关. 整合 8 个处理数据分析发现,N₂O 排放通量与气温、土壤温度、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量均呈极显著正相关 ($P<0.01$),但与 WFPS 和 DOC 无显著关系.

表 3 N₂O 排放通量与环境因子的关系¹⁾
Table 3 Relationship between N₂O flux and environmental factors

处理	空气温度	土壤温度	WFPS	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	DOC
对照 (CK)	0.642 **	0.681 **	-0.223	0.630 **	0.694 **	-0.026
常规尿素 (CN)	0.513 *	0.436	0.131	0.652 **	0.263	-0.062
30% SCU	0.547 *	0.509 *	0.078	0.455	0.082	-0.019
50% SCU	0.545 *	0.461 *	0.203	0.489	0.312	-0.409
70% SCU	0.721 *	0.565 *	0.155	0.323	0.13	-0.243
30% PCU	0.514 *	0.677 *	0.088	0.523 *	0.648 **	-0.25
50% PCU	0.552 *	0.483	0.123	0.874 **	0.494	-0.216
70% PCU	0.528 *	0.442	0.038	0.725 **	0.545 *	0.131
全部处理	0.400 **	0.476 **	0.079	0.548 **	0.39 **	-0.133

1) * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$

2.4 N₂O 累积排放量和排放系数

玉米季,CK 和 CN 处理 N₂O 累积排放量分别为 0.17 kg·hm⁻²和 1.78 kg·hm⁻²(表4). 与 CN 相比,30% SCU、50% SCU 和 70% SCU 处理分别降低了 N₂O 排放量 1.12%、22.47% 和 11.23%,而尿素+聚氨酯包膜尿素处理则增加 N₂O 排放量 1.12%~23.0%. CN 处理的 N₂O 排放系数为

0.38%,硫包膜尿素处理降低了 N₂O 排放系数,其中 50% SCU 处理仅为 0.28%,低于 CN 处理 26.3%;相反,聚氨酯包膜尿素处理 N₂O 排放系数则略高于 CN 处理.

双因素方差分析表明,玉米季控释肥类型显著影响 N₂O 累积排放量(表5; $P<0.05$). 肥料类型与梯度设置均对玉米产量没有显著影响.

表 4 玉米季 N₂O 累积排放量、N₂O 排放系数、产量和单位产量 N₂O 排放量系数¹⁾
Table 4 Cumulative N₂O emission, N₂O emission factor of applied N, and yield-scale N₂O emission factor

处理	N ₂ O 累积排放量 /kg·hm ⁻²	N ₂ O 排放系数 /%	玉米产量 /kg·hm ⁻²	单位产量 N ₂ O 排放系数 /g·kg ⁻¹
对照 (CK)	0.17 ± 0.02c	—	1 726 ± 353c	0.10 ± 0.01c
常规尿素 (CN)	1.78 ± 0.23ab	0.38 ± 0.03ab	8 430 ± 479ab	0.21 ± 0.03ab
30% SCU	1.76 ± 0.15ab	0.37 ± 0.03ab	8 381 ± 142ab	0.20 ± 0.02ab
50% SCU	1.38 ± 0.27b	0.28 ± 0.07b	8 679 ± 360ab	0.16 ± 0.03b
70% SCU	1.58 ± 0.09b	0.33 ± 0.02b	7 940 ± 472b	0.19 ± 0.01ab
30% PCU	2.04 ± 0.13a	0.46 ± 0.04a	8 765 ± 374ab	0.24 ± 0.02a
50% PCU	1.80 ± 0.14ab	0.39 ± 0.03ab	9 225 ± 453a	0.21 ± 0.02ab
70% PCU	2.19 ± 0.20a	0.47 ± 0.04a	8 724 ± 451ab	0.25 ± 0.02a

1) 不同小写字母表示处理间差异达显著水平 ($P<0.05$); “—”表示文章中没有相关数据

表 5 肥料类型和配施梯度对 N₂O 累积排放量和作物产量的双因素方差分析¹⁾
Table 5 Two-factor ANOVA of the effects of fertilizer types and application gradients on the cumulative N₂O emissions and crop yield

项目	df	N ₂ O 累积排放			产量		
		SS	F	P	SS	F	P
肥料类型	1	0.81	14.65	0.002	991 350.44	2.15	0.169
梯度设置	2	0.15	2.80	0.101	1 636 375.01	3.54	0.062
肥料类型 × 梯度设置	2	0.20	0.37	0.700	126 581.92	0.27	0.765
误差	12	0.55	—	—	461 669.43	—	—

1) “—”表示文章中没有相关数据; SS 为离均差平方和

2.5 控释氮肥对玉米产量和单位产量 N₂O 排放系数的影响

不施氮肥处理玉米产量仅为 1 726 kg·hm⁻². 施

氮显著增加了玉米产量, CN 处理达到为 8 430 kg·hm⁻². 与 CN 相比, 50% SCU 以及所有 PCU 处理一定程度增加了玉米产量, 增幅分别为 2.96% 和

3.49%~9.43%, 但不显著 ($P > 0.05$).

CK 处理单位产量 N_2O 排放系数为 $0.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著低于控释氮肥处理单位产量 N_2O 排放系数 $0.16 \sim 0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($P < 0.05$). 与 CN 处理相比, SCU 处理单位产量 N_2O 排放系数下降了 4.76%~23.8%, 以 50% SCU 降幅最大. PCU 处理的单位产量 N_2O 排放系数与 CN 处理的相同或略高.

3 讨论

3.1 控释氮肥对 N_2O 排放的影响

氮肥是诱发农田 N_2O 大量排放最为重要的因素^[17]. 与常规尿素处理相比, 硫包膜尿素处理降低了 N_2O 排放, 与朱永昶等^[18]的研究结果一致. N_2O 排放对肥料的响应主要取决于作物与土壤微生物对有效氮素利用的竞争^[19]. SCU 施用导致肥料氮素缓慢释放, 使得土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量均低于 CN 处理 (图 2), 且释放量变化不大, 限制了土壤硝化和反硝化微生物利用肥料氮产生 N_2O , 降低了 N_2O 排放峰值, 说明 SCU 可以有效实现养分在玉米生长季的缓慢释放和供应. 更为重要的是, 肥料中加入的硫可能提高了土壤氧化能力, 抑制了反硝化菌活性和酶的合成, 减少了反硝化过程产生 N_2O ^[20]. 相反, 聚氨酯包膜尿素处理增加了 N_2O 排放. 在本研究中, PCU 处理的 N_2O 排放通量与土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量呈极显著正相关关系 (表 3). 在 N_2O 排放高峰期, PCU 处理土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量与 CN 处理相当或者更高, 而土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量相对较低, 表明聚氨酯包膜尿素并没有减缓尿素氮的释放, 相反聚氨酯包膜材料的保水特性可能会促进硝化和反硝化作用, 增加 N_2O 排放^[21].

有研究表明, 控释肥对 N_2O 排放的影响与控释肥的类型有关. 包膜控释肥在养分外层包裹一层包膜材料, 可以有效防止肥料迅速地溶解, 不同控释肥种类受养分释放机制的不同, 导致养分释放速率不同, 因此土壤中氮素浓度不同, 从而使 N_2O 排放量不同^[9]. 包膜尿素对土壤 N_2O 排放的影响因肥料类型以及与尿素配比而异, 本研究在相同施氮量条件下, 70% SCU 与 70% PCU 处理 N_2O 累积排放量呈显著差异, 也验证了肥料类型显著影响了 N_2O 的排放 (表 5). Jiang 等^[22]的研究显示, 在夏玉米土壤中施用化学改性或生物改性的缓释尿素 (如添加尿素甲醛、双氰胺或者氢醌等) 减少了 N_2O 排放, 而通过物理改性的缓释尿素 (如用 Ca-Mg-P 包膜、聚合物包膜以及硫包膜的尿素) 增加了 N_2O 的排放. Hyatt 等^[23]的研究指出, 施用聚氨酯包膜尿素减少了 N_2O

排放. 纪洋等^[15]的研究表明, 施氮量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 水平上, 尿素与控释肥比例为 4.5:5.5 配施的综合温室效应最小, 也是稻田控释肥的最佳施用方式. 本研究中通过双因素方差分析, N_2O 的累计排放量与控释肥与尿素配施比例没有显著关系, 但 50% SCU 处理减少了 22.47% N_2O 排放. 有研究证明, 控释肥中氮素释放速率是影响 N_2O 排放最为重要的因素^[24,25]. Zebarth 等^[26]的研究指出, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的有效性是影响 N_2O 排放量的主要因素. 本研究中 PCU 所溶出的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量高于 SCU, 说明 PCU 氮素释放速率可能高于 SCU.

本研究结果表明, 与单施常规尿素相比, 配施硫包膜尿素可以有效减少 N_2O 排放, 聚氨酯包膜尿素则在一定程度上增加 N_2O 排放.

3.2 N_2O 排放的影响因素

土壤温度和水分是影响控释肥释放氮素的两个关键因素^[27]. 土壤温度通过影响微生物生长和活性来影响硝化和反硝化作用产生 N_2O , 在一定温度范围内 N_2O 排放随土壤温度升高而升高^[28]. 土壤水分通过改变土壤通气性以及影响底物供应和微生物活性等改变 N_2O 的产生速率. 回归分析发现 (表 3), N_2O 排放通量与土壤温度显著正相关 ($P < 0.01$), 而与土壤水分含量无关 ($P > 0.05$), 表明在黄河故道沙性土壤温度对 N_2O 排放起着更为重要的作用. Hopkins 等^[29]的研究发现, 土壤温度是控制 PCU 氮素释放速率的主要因素, 随着温度的升高, 氮素释放速率增加, 土壤 N_2O 排放通量随温度升高而增加. 衣文平等^[30]的研究发现, 当土壤含水量高于田间持水量 40% 时, 养分释放仅受温度的影响. 在本研究中, 施肥后降水量丰富, 使得控释肥氮素释放较少受土壤含水量的影响, 可能屏蔽了水分的效应, 相反随着温度升高控释肥氮素释放速率加快, 促进 N_2O 排放.

有研究表明, 在土壤 $\text{pH} > 6.0$ 时, 控释肥可以更大幅度地减少 N_2O 的排放^[31], 在微碱性土壤条件下, 低的有机质含量将会限制反硝化过程的碳源供应, 将可能导致 N_2O 排放减少, 与本研究施用 SCU 结果一致. 通常情况下, 硝化与反硝化速率在一定 pH 范围内随着 pH 升高而逐渐升高. 尽管施肥在一定程度上降低了土壤酸性, Jiang 等^[22]的研究发现施用尿素可以为硝化过程提供底物, 增强碱性土壤硝化微生物活性, 促进 N_2O 排放. Wang 等^[32]的研究认为 PCU 中氮的缓慢释放可能维持了硝化与反硝化的持续氮源. 本研究区的土壤质地为砂质潮土, 且碱性土壤在施用氮肥后, 为土壤 N_2O 排放提

供能量来源以及 PCU 的排放速率可能会因土壤的曝气条件而发生显著变化^[25],从而导致 PCU 处理的 N₂O 排放高与 CN 处理.

3.3 控释氮肥施用对玉米产量的影响

控释氮肥施用的目的是实现肥料氮素供应与作物需求的高度匹配,从而提高氮肥利用率和作物产量,减少氮素损失^[33].大量研究表明,施用控释肥增加了作物产量^[34~36],但是不同种类控释肥对作物的增产效果存在差异.魏海燕等^[37]的研究表明,缓释肥类型对不同穗型水稻产量呈现脲甲醛>树脂包衣缓控释肥>硫包衣换空缓释肥.卢艳丽等^[38]的研究表明,在冬小麦和夏玉米轮作系统中,缓控释肥提高玉米产量 18.3%.在本研究中,50% SCU 和所有 PCU 处理玉米产量比 CN 处理增加 2.96%~9.43% (表 4),说明控释尿素与常规尿素合理配比能够一定程度实现氮素供应与作物需求的匹配,但是没有达到显著水平,可能与高的氮肥用量有关.因此,针对土壤特性,寻找最佳氮肥用量是下一阶段研究的重点,以挖掘控释尿素的增产潜力.

4 结论

(1)玉米季潮土 N₂O 排放通量呈明显的季节变化,在施肥后 8~10 d 出现排放高峰值.与 CN 处理相比,30% SCU、50% SCU 和 70% SCU 降低 N₂O 排放量 1.12%~22.5%,50% SCU 处理效果最优.相反,PCU 处理增加了 N₂O 排放.

(2)施肥处理 N₂O 排放量与气温、10 cm 土温、土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量呈显著正相关,表明温度通过影响控释肥中氮素释放速率,进而导致不同种类控释肥处理 N₂O 排放量出现差异.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Syakila A, Kroeze C. The global nitrous oxide budget revisited[J]. Greenhouse Gas Measurement and Management, 2011, 1(1): 17-26.
- [3] Porre R J, Van Groenigen J W, De Deyn G B, et al. Exploring the relationship between soil mesofauna, soil structure and N₂O emissions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 96: 55-64.
- [4] Amon-Armah F, Yiridoe E K, Jamieson R, et al. Comparison of crop yield and pollution production response to nitrogen fertilization models, accounting for crop rotation effect[J]. Agroecology and Sustainable Food Systems, 2015, 39(3): 245-275.
- [5] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, et al. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2003, 83(2): 111-124.
- [6] 胡腾, 同延安, 高鹏程, 等. 黄土高原南部旱地冬小麦生长期 N₂O 排放特征与基于优化施氮的减排方法研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(9): 1038-1046.
- [7] Hu T, Tong Y A, Gao P C, et al. N₂O emission characteristics and mitigation methods in South Loess Plateau under rain-fed winter wheat conditions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(9): 1038-1046.
- [8] 纪洋, 刘刚, 马静, 等. 控释肥施用对小麦生长期 N₂O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 526-534.
- [9] Ji Y, Liu G, Ma J, et al. Effect of controlled-release fertilizer (CRF) on nitrous oxide emission during the wheat growing period[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3): 526-534.
- [10] Suter H, Lam S K, Walker C, et al. Nitrogen use efficiency for pasture production-impact of enhanced efficiency fertilisers and N rate[A]. In: 'Proceedings of the 17th ASA Conference', 20-24 September 2015, Hobart, Australia [C]. Victoria: Australian Society of Agronomy, 2015.
- [11] 张婧, 李虎, 朱国良, 等. 控释肥施用对土壤 N₂O 排放的影响——以华北平原冬小麦/夏玉米轮作系统为例[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7624-7635.
- [12] Zhang J, Li H, Zhu G L, et al. Effect of controlled-release fertilization on nitrous oxide emission: a case study of a wheat-maize rotation system in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(22): 7624-7635.
- [13] Wu Y Z, Li Y, Fu X Q, et al. Effect of controlled-release fertilizer on N₂O emissions and tea yield from a tea field in subtropical central China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(25): 25580-25590.
- [14] Maharjan B, Venterea R T. Nitrite intensity explains N management effects on N₂O emissions in maize[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 66: 229-238.
- [15] Sistani K R, Jn-Baptiste M, Lohan N, et al. Atmospheric emissions of nitrous oxide, methane, and carbon dioxide from different nitrogen fertilizers[J]. Journal of Environment Quality, 2011, 40(6): 1797-1805.
- [16] Venterea R T, Maharjan B, Dolan M S. Fertilizer source and tillage effects on yield-scaled nitrous oxide emissions in a corn cropping system[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40(5): 1521-1531.
- [17] Akiyama H, Morimoto S, Hayatsu M, et al. Nitrification, ammonia-oxidizing communities, and N₂O and CH₄ fluxes in an imperfectly drained agricultural field fertilized with coated urea with and without dicyandiamide[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(2): 213-223.
- [18] 纪洋, 于海洋, 徐华. 控释肥与尿素配合施用对稻季土壤 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(9): 1494-1500.
- [19] Ji Y, Yu H Y, Xu H. Effect of controlled-release fertilizer and its combined application with urea on CH₄ and N₂O emissions in rice soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(9): 1494-1500.
- [20] Lemonte J J, Jolley V D, Summerhays J S, et al. Polymer coated urea in turfgrass maintains vigor and mitigates nitrogen's environmental impacts[J]. PLoS One, 2016, 11(1): e0146761.
- [21] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 氮肥管理措施对黑土玉米田温室气体排放的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3227-3238.
- [22] Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on greenhouse gas emissions from maize field in black soil[J]. China Environmental Science, 2015, 35(11): 3227-3238.

- 3227-3238.
- [18] 朱永昶, 李玉娥, 秦晓波, 等. 控释肥和硝化抑制剂对华北春玉米 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(7): 1421-1428.
- Zhu Y C, Li Y E, Qin X B, *et al.* Effects of controlled release fertilizer and nitrification inhibitor additions on nitrous oxide emissions from spring maize field in Northern China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(7): 1421-1428.
- [19] Kim D G, Hernandez-Ramirez G, Giltrap D. Linear and nonlinear dependency of direct nitrous oxide emissions on fertilizer nitrogen input: a meta-analysis [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, **168**: 53-65.
- [20] Zhang J B, Cai Z C, Cheng Y, *et al.* Denitrification and total nitrogen gas production from forest soils of eastern China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(12): 2551-2557.
- [21] Feng J F, Li F B, Deng A X, *et al.* Integrated assessment of the impact of enhanced-efficiency nitrogen fertilizer on N_2O emission and crop yield [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, **231**: 218-228.
- [22] Jiang X J, Hou X Y, Zhou X, *et al.* pH regulates key players of nitrification in paddy soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **81**: 9-16.
- [23] Hyatt C R, Venterea R T, Rosen C J, *et al.* Polymer-coated urea maintains potato yields and reduces nitrous oxide emissions in a minnesota loamy sand [J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, **74**(2): 419-428.
- [24] 赵维, 蔡祖聪. 氮肥品种对亚热带土壤 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2009, **46**(2): 248-254.
- Zhao W, Cai Z C. Effects of N fertilizers on N_2O emissions from subtropical soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, **46**(2): 248-254.
- [25] 宋梓璇, 李虎, 李建政, 等. 控释肥对东北春玉米产量和土壤氮挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(10): 2342-2349.
- Song Z X, Li H, Li J Z, *et al.* Effect of controlled-release fertilizer on the yield and soil ammonia volatilization of spring maize in northeast China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(10): 2342-2349.
- [26] Zebarth B J, Snowden E, Burton D L, *et al.* Controlled release fertilizer product effects on potato crop response and nitrous oxide emissions under rain-fed production on a medium-textured soil [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, **92**(5): 759-769.
- [27] Akiyama H, Uchida Y, Tago K, *et al.* Effect of dicyandiamide and polymer coated urea applications on N_2O , NO and CH_4 fluxes from Andosol and Fluvisol fields [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2015, **61**: 541-551.
- [28] Smith K A, Thomson P E, Clayton H, *et al.* Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils [J]. Atmospheric Environment, 1998, **32**(19): 3301-3309.
- [29] Hopkins B G, Rosen C J, Shiffler A K, *et al.* Enhanced efficiency fertilizers for improved nutrient management: potato (*Solanum tuberosum*) [J]. Crop Management, 2008, **7**(1), doi:10.1094/CM-2008-0317-01-RV.
- [30] 衣文平, 孙哲, 武良, 等. 包膜控释尿素与普通尿素配施对冬小麦生长发育及土壤硝态氮的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(3): 687-693.
- Yi W P, Sun Z, Wu L, *et al.* Effects of coated controlled release urea combined with conventional urea on winter wheat growth and soil NO_3^- -N [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, **22**(3): 687-693.
- [31] Azeem B, Kusaari K, Man Z B, *et al.* Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer [J]. Journal of Controlled Release, 2014, **181**: 11-21.
- [32] Wang W J, Reeves S H, Salter B, *et al.* Effects of urea formulations, application rates and crop residue retention on N_2O emissions from sugarcane fields in Australia [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, **216**: 137-146.
- [33] Geng J B, Ma Q, Chen J Q, *et al.* Effects of polymer coated urea and sulfur fertilization on yield, nitrogen use efficiency and leaf senescence of cotton [J]. Field Crops Research, 2016, **187**: 87-95.
- [34] Gao X, Li C L, Zhang M, *et al.* Controlled release urea improved the nitrogen use efficiency, yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) on silt loamy soil [J]. Field Crops Research, 2015, **181**: 60-68.
- [35] Yang Y C, Zhang M, Li Y C, *et al.* Controlled Release urea improved nitrogen use efficiency, activities of leaf enzymes, and rice yield [J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, **76**(6): 2307-2317.
- [36] Zhang S G, Shen T L, Yang Y C, *et al.* Controlled-release urea reduced nitrogen leaching and improved nitrogen use efficiency and yield of direct-seeded rice [J]. Journal of Environmental Management, 2018, **220**: 191-197.
- [37] 魏海燕, 李宏亮, 程金秋, 等. 缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J]. 作物学报, 2017, **43**(5): 730-740.
- Wei H Y, Li H L, Cheng J Q, *et al.* Effects of slow/controlled release fertilizer types and their application regime on yield in rice with different types of panicle [J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, **43**(5): 730-740.
- [38] 卢艳丽, 白由路, 王磊, 等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, **17**(1): 209-215.
- Lu Y L, Bai Y L, Wang L, *et al.* Efficiency analysis of slow/controlled release fertilizer on wheat-maize in North China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, **17**(1): 209-215.

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohe Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)