

生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放及小青菜产量的影响

刘楚桐, 陈松岭, 邹洪涛, 叶旭红, 陈春羽, 雷洋, 张玉龙

引用本文:

刘楚桐, 陈松岭, 邹洪涛, 等. 生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放及小青菜产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 677-684.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0658>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

包膜/抑制剂联合调控对农田土壤N₂O排放和氨挥发的影响

巴闯, 杨明, 邹洪涛, 蒋一飞, 王丹蕾, 陈松岭, 虞娜, 张玉玲

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1291-1299 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1538>

稻草还田下添加DCD对稻田CH₄、N₂O和CO₂排放的影响

王国强, 常玉妍, 宋星星, 朱思明, 毛艳玲

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2431-2439 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0877>

化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响

杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 闫颖, 刘鸣达, 谢桂先

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2443-2450 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0416>

不同改良剂对旱地苹果园温室气体排放的影响

李钊, 刘帅, 丁艳宏, 孙文浩, 高晓东, 赵西宁

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 227-236 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0846>

除草剂对茶园土壤尿素态氮转化和温室气体排放的影响

王峰, 陈玉真, 吴志丹, 江福英, 翁伯琦, 尤志明

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1649-1657 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1422>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘楚桐, 陈松岭, 邹洪涛, 等. 生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放及小青菜产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 677–684.

LIU Chu-tong, CHEN Song-ling, ZOU Hong-tao, et al. Effects of coated urea inhibitor encapsulated by bio-based film on soil greenhouse gas emission and *Brassica chinensis* yield[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(3): 677–684.



开放科学 OSID

生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放及小青菜产量的影响

刘楚桐, 陈松岭, 邹洪涛*, 叶旭红, 陈春羽, 雷洋, 张玉龙

(沈阳农业大学土地与环境学院/农业农村部东北耕地保育重点实验室/土肥资源高效利用国家工程实验室, 沈阳 110161)

摘 要:为研究生物基包膜氮肥对土壤温室气体排放及小青菜(*Brassica chinensis*)产量的影响,采用密闭式静态箱-气相色谱法测定盆栽试验条件下施用不同类型包膜尿素对土壤温室气体的排放特征,探究不同类型包膜尿素对土壤温室气体排放综合增温潜势(GWP)、排放强度(GHGI)及小青菜产量的影响。结果表明:抑制型尿素(I)、生物基包膜尿素(CRU)、生物基包膜抑制型尿素(CIRU)能够显著降低 N_2O 、 CO_2 、 CH_4 3种温室气体的累积排放量。与普通尿素(U)相比,处理I、CRU和CIRU的 N_2O 累积排放量显著降低了20.79%~79.52%, CO_2 的累积排放量显著降低了46.53%~62.24%, CH_4 的累积排放量显著降低了25.38%~30.11%。与处理U相比,处理I、CRU和CIRU的GWP分别显著降低了40.44%、60.66%和65.02%;温室气体GHGI与GWP呈现出同样的趋势,处理I、CRU和CIRU分别显著降低了26.32%、70.53%和78.95%。与其他处理相比,处理CIRU具有最优的温室气体减排效果。处理CIRU的小青菜产量最高,为 $1\,960.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较处理U显著增产68.00%。研究表明,生物基包膜抑制型尿素在提高小青菜产量的同时还可以减少菜地温室气体排放及氮素气态损失。

关键词:生物基包膜抑制型尿素;生化抑制剂;温室气体减排;综合增温潜势;小青菜产量

中图分类号:S634.3;S154.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)03-0677-08 doi:10.11654/jaes.2020-0658

Effects of coated urea inhibitor encapsulated by bio-based film on soil greenhouse gas emission and *Brassica chinensis* yield

LIU Chu-tong, CHEN Song-ling, ZOU Hong-tao*, YE Xu-hong, CHEN Chun-yu, LEI Yang, ZHANG Yu-long

(School of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/Key Laboratory of Cultivated Land Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110161, China)

Abstract: To explore the effects of a coated urea inhibitor encapsulated in a bio-based film on greenhouse gas (GHG) emissions, the cumulative emissions, global warming potential (GWP), and emission intensity (GHGI) were determined through static box-gas chromatography in a pot experiment, and the yield of *Brassica chinensis* was simultaneously measured. Our results indicated that cumulative emissions of GHGs (N_2O , CO_2 , and CH_4) from the treatments using coated urea inhibitor (I), a bio-based coated urea (CRU), and a urea inhibitor encapsulated by a bio-based film (CIRU) were significantly reduced. Compared with that of conventional urea (U), the cumulative N_2O emissions of treatment I, CRU, and CIRU were significantly reduced by 20.79%~79.52%, CO_2 emissions by 46.53%~62.24%, and CH_4 emissions by 25.38%~30.11%. The GWP under treatments I, CRU, and CIRU were significantly lower than that under U

收稿日期:2020-06-11 录用日期:2020-11-25

作者简介:刘楚桐(1995—),女,辽宁抚顺人,硕士研究生,从事农田温室气体减排研究。E-mail:liuchutong1995@126.com

*通信作者:邹洪涛 E-mail:zouhongtao2001@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(32072677);辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC1905010);辽宁省重点研发计划项目(2019JH2/10200004)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (32072677); Liaoning Revitalization Talents Program (XLYC1905010); The Key R&D Program Project of Liaoning Province (2019JH2/10200004)

by 40.44%, 60.66%, and 65.02%, respectively. The trend of GHGI was the same as that of GWP. The GHGI under treatments I, CRU, and CIRU were significantly lower than that under U by 26.32%, 70.53%, and 78.95%, respectively. CIRU had a greater effect on GHG emission reduction than the other treatments. In terms of *B. chinensis* yield, CIRU resulted in the highest yield ($1\,960.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$). The CIRU was 68.00%, which was significantly higher than that under the U treatment. Thus, coated inhibitor urea encapsulated by bio-based film could reduce the emission of GHGs and partial loss of nitrogen, protect the environment, and increase production. This provides a new method for the development of agriculture in China.

Keywords: bio-based coated urea; biological inhibitor; greenhouse gases emission reduction; global warming potential;

Brassica chinensis yield

氮肥在提高粮食产量方面具有十分重要的作用。在农业生产中,高氮肥投入现象十分明显。据统计,我国耕地面积仅占世界耕地总面积的9%,但是氮肥消耗量却占世界氮肥总消耗量的三分之一^[1]。大量的氮素施入土壤中后,只有一部分被作物直接吸收利用,其他大部分通过挥发、地表径流和地下淋溶等方式损失,导致氮肥利用率很低,仅为30%~50%^[2-3]。同时,氮肥的不合理施用还造成了一系列土壤、环境及资源问题^[4-5]。农田作为温室气体产生的重要途径,其所产生的温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)占人类活动所产生温室气体总量的10%~20%^[6],这不仅造成了严重的温室效应,同时也破坏了臭氧层^[7],威胁人类健康^[8-9]。此外,有研究表明, N_2O 和 CH_4 的增温潜势远高于 CO_2 ,在百年尺度下, N_2O 和 CH_4 的增温潜势分别是 CO_2 的265倍和28倍^[10]。因此,在保证作物产量的同时减少氮素气态损失是亟需解决的环境问题。

包膜氮肥是以尿素为核心,表面包裹微水溶性的有机高分子材料或无机盐类,通过表面膜的阻滞作用,减缓或控制内部肥料的释放,使氮素的释放与作物对氮素的吸收相一致。包膜氮肥的施用对于减少农田氮素气态损失、提高肥料利用率具有十分重要的意义,是当前化肥领域研究的重点。但是Linqvist^[11]等基于大数据Meta分析结果表明,尿素颗粒进行物理包膜未能显著促进作物对氮素的吸收而增加产量,反而会产生负效应。此外,常见的包膜尿素价格高昂,包膜材料难以降解,易在环境中造成二次污染,这些问题也成为制约其推广的重要因素^[12-13]。有研究表明,将普通尿素与生化抑制剂结合制备抑制型尿素,是众多农田管理措施中既能减少温室气体排放又能增加作物产量的最有效措施^[14-18]。硝化抑制剂可以调控土壤氮素的迁移转化,延长铵态氮在土壤中停留的时间,有效减少氮素损失和提高氮素利用率,脲酶抑制剂是抑制脲酶作用于线型酰胺C—N键的水解酶活性,主要影响施入土壤后尿素的水解速率^[19],两

种抑制剂共同作用可增强抑制效果^[20]。孙爱文等^[21]研究表明,施用添加生化抑制剂的抑制型氮肥较普通氮肥处理显著增加了玉米百粒质量和产量。Yang等^[22]对全球不同玉米区施用硝化抑制剂的试验进行了Meta分析,发现肥料中添加硝化抑制剂可显著降低 N_2O 排放,减少 NO_3^- -N淋溶损失,同时显著增加产量和经济效益。但是抑制型尿素却不能控制养分的溶出过程,且其效果极易受到环境因素的干扰^[23]。巴闯等^[24]研究表明,抑制剂涂层尿素后包膜,制备成包膜抑制型尿素能够减少49%的 N_2O 排放量和45%的氨挥发量。宋以玲等^[25]研究表明,包膜抑制型尿素能够提高玉米的产量以及籽粒品质。因此,采用对环境友好、材料来源广泛,且具有优异疏水性能的包膜材料与生化抑制剂联合,实现物理与化学双重调控,从而提高氮肥利用率,减少氮素损失及对于环境的污染是当今研究的热点及重点。

目前,我国生物基包膜氮肥的研究主要集中在新型生物基膜材料研发及生物基包膜氮肥养分释放等方面,但将其与抑制剂结合、并探究其在温室气体减排方面的研究还鲜有报道。因此,本研究以前期制备的生物基包膜氮肥为基础,同时分别以3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)和正丁基硫代磷酰三胺(NBPT)作为脲酶抑制剂和硝化抑制剂,制备生物基包膜抑制型尿素,并采用小青菜盆栽试验测定其对生长期土壤温室气体排放及小青菜产量的影响,明确所制备菌渣基生物包膜抑制型尿素对农田温室气体减排的效果,以期为我国新型氮肥的研发、应用及农田温室气体减排提供新的理论和试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤

供试土壤取自沈阳农业大学后山科研基地0~20 cm耕层土壤,土壤类型为典型棕壤。取土后,自然风

干,压碎,剔除根系、石砾,过2 mm筛备用。盆栽试验地点为沈阳农业大学后山科研大棚内。供试土壤pH为6.75,有机质含量为20.46 g·kg⁻¹,碱解氮含量为111.44 mg·kg⁻¹,速效磷含量为21.53 mg·kg⁻¹,速效钾含量为137.57 mg·kg⁻¹。

1.1.2 供试材料

(1)供试肥料:普通尿素,氮素含量为46.4%;过磷酸钙,P₂O₅含量为12%;硫酸钾,K₂O含量为50%。

(2)供试抑制剂:3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)和正丁基硫代磷酰三胺(NBPT)用量均为肥料总氮含量的1%^[26]。

(3)主要供试包膜材料:废弃菌渣、丙三醇、聚乙二醇、正己烷、多苯甲基多异氰酸酯、纳米二氧化硅及1H,1H,2H,2H-全氟癸基三乙氧基硅烷(FAS)。

(4)供试作物:小青菜(*Brassica chinensis*),品种为苏州青。

1.2 新型肥料的制备

1.2.1 抑制型尿素的制备

将2~4 mm的尿素置于流化床包衣机中,预热至50~60℃,将抑制剂溶液通过蠕动泵雾化后与肥料均匀混合,反应约10 min。

1.2.2 生物基包膜尿素的制备

将360 mL聚乙二醇和40 mL丙三醇加入到带有电动搅拌器、回流冷凝管和控温装置的反应釜内,加热至100℃,再加入过60目筛的菌渣80 g和浓硫酸12 mL,升温至165℃,反应1 h后冷却至室温,取出液化菌渣基多元醇,密封备用。

将500 g普通尿素置于转鼓包衣机中,转速为50 r·min⁻¹,50~60℃预热,将5 g纳米改性包膜液($n_{\text{菌渣基多元醇}}:n_{\text{NCO}}=1:1$;纳米二氧化硅用量为菌渣基多元醇用量的2%)加入包衣机中,固化10 min,此时包膜厚度为1%,重复7次,制备包膜厚度为7%左右的生物基包膜抑制型尿素。随后,将50 g所制备的生物基包膜尿素置于含1%FAS的正己烷溶液中组装1 h,取出60℃烘干备用。

1.2.3 生物基包膜抑制型尿素的制备

所用尿素为1.2.1中制备的抑制型尿素,包膜方法同1.2.2。

1.3 盆栽试验

试验所用陶瓷盆高35 cm、内径25 cm。每盆装风干土10 kg,将盆埋入大棚内土地中,并使盆内土壤表面与地面平齐。

试验处理及肥料用量:(1)不施氮肥处理CK,磷

肥51.67 g、钾肥5.20 g;(2)施用普通尿素处理U,普通尿素11.30 g、磷肥51.67 g、钾肥5.20 g;(3)施用抑制剂涂层尿素处理I,抑制型尿素11.56 g、磷肥51.67 g、钾肥5.20 g;(4)施用生物基包膜尿素处理CRU,生物基包膜尿素12.09 g、磷肥51.67 g、钾肥5.20 g;(5)施用生物基包膜抑制型尿素处理CIRU,生物基包膜抑制型尿素12.38 g、磷肥51.67 g、钾肥5.20 g。每个处理重复3次,盆栽试验中肥料用量为N 0.52 g·kg⁻¹、P₂O₅ 0.62 g·kg⁻¹、K₂O 0.26 g·kg⁻¹。所用氮磷钾肥均作基肥,于播种前1 d一次性施入,生长过程中不再追肥。实验开始后第4 d出苗,第12 d间苗。小青菜生育期内,定期补充水分,使土壤含水量保持在55%左右。

1.4 土壤温室气体的采集与测定

温室气体采用密闭式静态箱法采集。密闭式静态箱分为箱体和底座两部分,材质均为有机玻璃。箱体长40 cm、宽40 cm、高60 cm;底座长宽同箱体一致,高为25 cm,埋入土壤中约8 cm,整个小青菜生长期不再移动,底座与盆之间的裸露土壤用地膜覆盖。箱体顶部插有温度计,以便记录箱内温度。每次采集气体时均用水密封底座凹槽,以保证密闭的采样环境。

于试验开始后的第1、5、9、13、17、23、29、35、41 d采集气体样品。采样时间从早上8:00开始,每个处理采集4次,采样间隔为10 min,采样的同时记录箱内实时温度,每次采集气体50 mL,并用注射器注入真空气袋中密封保存。采样结束后立即将样品带回实验室用气相色谱仪(安捷伦7890B)测定,测定过程所用参数参考文献[27]。

计算公式:

$$F = \rho \times H \times (\Delta c / \Delta t) \times 273 / (273 + T) \times 60$$

式中: F 为温室气体排放通量,mg N·m⁻²·h⁻¹或mg C·m⁻²·h⁻¹; ρ 为标准状态下气体的密度,g·L⁻¹; H 为箱体实际高度,m; $\Delta c / \Delta t$ 为箱体中气体的排放速率,μL·L⁻¹·min⁻¹; T 为箱内温度,℃。

温室气体排放累积量计算公式:

$$C = \sum_{i=1}^n (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

式中: C 为温室气体累积排放量,mg N·m⁻²或mg C·m⁻²; F 为温室气体排放通量,mg N·m⁻²·h⁻¹或mg C·m⁻²·h⁻¹; i 为第*i*次采集气体; n 为采集的总次数。

1.5 土壤样品的采集与测定

试验前测定土壤样品基础理化性质。试验开始后,于第15、30、45 d采集土壤样品,从每盆中随机取

4份以获得复合土样。将土壤样品充分混合,手动去除所有可见的植物残余物及杂质,于4℃冰箱中保存用于土壤铵态氮和硝态氮的测定。

1.6 植物样品的测定

小青菜于第45 d收获,用游标卡尺及直尺测量株高,称质量并计算产量。

1.7 数据分析

试验数据用SPSS 19.0和Excel 2013进行统计分析,采用Origin做图。

1.8 综合增温潜势和温室气体排放强度

综合增温潜势(GWP): $GWP=28 \times f_{CH_4} + 265 \times f_{N_2O} + f_{CO_2}$
式中:28和265分别为在100 a尺度上,单位分子的 CH_4 和 N_2O 的增温潜势为 CO_2 倍数。 f_{CH_4} 、 f_{N_2O} 和 f_{CO_2} 分别为整个小青菜生育期气体排放累积量, $kg\ CO_2 \cdot hm^{-2}$ 。

温室气体排放强度(GHGI): $GHGI=GWP/Y$
式中: Y 为单位面积小青菜的产量, $kg \cdot hm^{-2}$ 。

2 结果与分析

2.1 生物基包膜抑制型尿素对土壤无机氮含量的影响

不同施肥处理下各时期土壤铵态氮含量如图1(a)所示。在第15 d时,处理U的铵态氮含量最高,为 $6.623\ mg \cdot kg^{-1}$,显著高于其他处理,较处理I、CRU与CIRU分别高出19.27%、25.12%、32.15%。第30 d时,处理CIRU的铵态氮含量最高,为 $6.642\ mg \cdot kg^{-1}$,显著高于处理U,但是与处理CRU差异不显著。在第45 d时,与处理U相比,处理CIRU和CRU的铵态氮含量分别显著高出72.81%和70.34%,但两者间差异不显著。

不同施肥处理下土壤硝态氮含量如图1(b)所示。第15 d时,各个施肥处理的硝态氮含量均显著高

于处理CK,其中处理U的硝态氮含量最高,为 $18.768\ mg \cdot kg^{-1}$ 。第30 d时,处理CIRU的硝态氮含量最高,为 $20.702\ mg \cdot kg^{-1}$,处理CRU的硝态氮含量低于处理CIRU,但是两者间差异未达到显著水平;而处理U的硝态氮含量则显著低于处理CIRU和CRU。第45 d时,各处理间硝态氮含量规律与30 d时相一致,其中,处理CIRU的硝态氮含量最高,为 $21.07\ mg \cdot kg^{-1}$,与处理CRU间差异不显著,但显著高于其他3个处理;此外,处理I的硝态氮含量较30 d时有所下降,但与处理U的差异不显著。这表明所制备的生物基包膜尿素及生物基包膜抑制型尿素能够有效延长养分释放时期,可以在小油菜的整个生长期内供应充足的养分。

2.2 生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放的影响

2.2.1 对温室气体排放动态变化的影响

如图2(a)所示,在整个小青菜生长期,各处理的土壤 N_2O 排放通量均高于CK处理。I处理于第5 d出现第1个排放高峰,为 $0.01\ mg\ N \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$,于第23 d出现第2个排放高峰,为 $0.13\ mg\ N \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$,而且在整个生长期 N_2O 排放通量一直处于较高水平。U处理的 N_2O 排放通量在第9 d开始明显上升,到第29 d出现峰值,为 $0.18\ mg\ N \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 。与U处理相比,CRU处理在第23 d前, N_2O 排放动态趋势均比较平稳,第23 d出现排放高峰,为 $0.07\ mg\ N \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 。CIRU处理在整个小青菜生长期, N_2O 排放动态趋势均比较平稳,未出现明显峰值,且显著低于U处理。

各处理的 CO_2 排放通量变化规律如图2(b)所示。施肥后的5 d内,各处理的 CO_2 排放通量均呈现下降的趋势。各处理的 CO_2 排放通量峰值均出现在第10~30

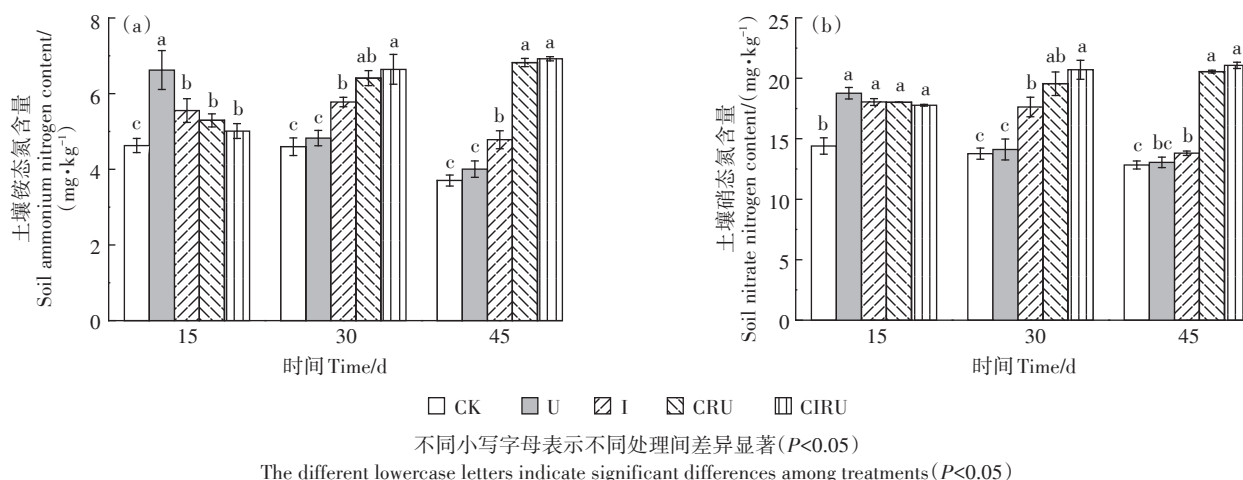


图1 不同施肥处理下各时期土壤无机氮含量

Figure 1 Dynamic changes of soil inorganic nitrogen content in different fertilization treatments and stages

d之间,其中,处理U的 CO_2 排放通量在第13 d达到了 $268.88 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。处理CIRU的峰值也出现在第13 d,为 $61.91 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,较处理U相比显著减少了76.97%。在第30 d之后,除了处理U出现第2个峰值以外,其余处理均呈现平稳释放的趋势。

各处理的 CH_4 排放通量动态变化如图2(c)所示。各个施肥处理的 CH_4 排放通量均呈现大致相同的趋势。施肥后15 d内,各个施肥处理的 CH_4 排放通量均有下降的趋势。第17~35 d相继出现 CH_4 的排放峰,其中处理U的峰值最高,达到了 $0.06 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,处理CIRU的峰值出现在第23 d,为 $0.026 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。第35 d后,各个施肥处理的 CH_4 排放均呈现下降趋势。

2.2.2 对温室气体累积排放量、GWP及GHGI的影响

如表1所示,在小青菜整个生育期内,各个处理的 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 累积排放量大小顺序均呈:U>I>CRU>CIRU>CK。与处理U相比,处理CIRU、CRU和I的 N_2O 累积排放量显著降低了79.52%、67.71%和20.79%, CO_2 累积排放量显著降低了62.24%、59.32%和46.53%, CH_4 累积排放量显著降低了30.11%、27.88%和25.38%。处理CIRU的减排潜力优于处理CRU及I,其与管理CK的 N_2O 和 CO_2 的累积排放量无显著差异,表明生物基包膜与抑制剂联合使用能够实现养分溶出与其在土壤中转化双段调控。

小青菜生育期不同施肥处理温室气体GWP和GHGI的估算结果如表1所示。在所有处理中,以处理CK的GWP最低,说明施用氮肥会提高GWP。各施肥处理的GWP大小顺序为U>I>CRU>CIRU。同时,处理I、CRU、CIRU与处理U相比,GWP分别显著降低了40.44%、60.66%、65.02%。综合小青菜产量来看,各个施肥处理的温室气体GHGI依旧与GWP呈现出相同的趋势,处理I、CRU、CIRU与处理U相比,温室气体GHGI显著降低了26.32%、70.53%、78.95%。

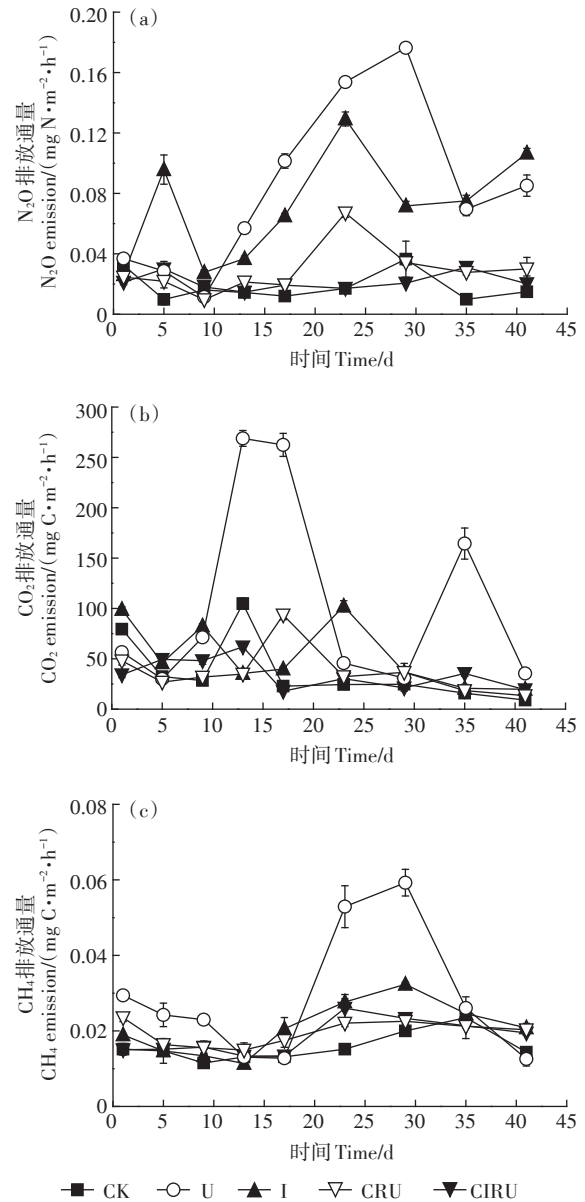


图2 不同施肥处理下温室气体排放通量动态变化

Figure 2 Dynamic changes of greenhouse gas emission fluxes under different fertilization treatments

表1 不同处理对温室气体累积排放量、综合增温潜势及排放强度的影响

Table 1 Effects of different treatments on greenhouse gas emissions, warming potential and greenhouse gas intensity

处理 Treatments	N_2O 累积排放量 Total cumulative emission of $\text{N}_2\text{O}/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-2})$	CO_2 累积排放量 Total cumulative emission of $\text{CO}_2/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-2})$	CH_4 累积排放量 Total cumulative emission of $\text{CH}_4/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-2})$	GWP/ ($\text{kg CO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$)	GHGI/ ($\text{kg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	17.74d	32 218.06d	14.83c	373.89d	0.47c
U	90.82a	86 715.17a	25.61a	1 107.50a	0.95a
I	71.94b	46 367.52b	19.11b	659.66b	0.70b
CRU	29.33c	35 277.00c	18.47b	435.66c	0.28d
CIRU	18.60d	32 745.90d	17.90b	387.37d	0.20e

注: 同列不同小写字母分别表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$. The same below.

处理 CIRU 的 GWP 及 GHGI 最小,且产量呈现最高的状态(表2)。

表2 不同施肥处理对小青菜产量及增产率的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on yields and rate of growth

处理 Treatments	株高 Plant height/cm	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	增产率 Rate increase/%
CK	9.61c	791.00±8.08e	
U	9.73c	1 166.67±28.67c	
I	11.18b	945.00±35.92d	-19.00
CRU	12.44ab	1 564.50±10.10b	34.10
CIRU	13.14a	1 960.00±4.04a	68.00

2.3 对小青菜产量的影响

本试验中,处理 CK 的小青菜产量显著低于施肥处理的产量。各施肥处理的产量排序为 CIRU>CRU>U>I。其中,处理 CIRU 和处理 CRU 的产量较处理 U 相比有显著的增高,分别增产了 68.00%、34.10%。而处理 I 的产量显著低于其他施氮处理,为 945.00 kg·hm⁻²,较处理 U 减产了 19.00%。

3 讨论

3.1 生物基包膜抑制型尿素对温室气体 N₂O、CO₂、CH₄排放的影响

N₂O 是硝化作用与反硝化作用的产物。当尿素施入土壤后,其在脲酶作用下水解生成铵态氮,铵态氮的大量累积不仅推进了氨挥发进程,还能够促进硝化-反硝化作用,并产生 N₂O 排放到大气中。在本试验中,相比于处理 CK,施氮处理的 N₂O 排放量显著提高,这表明施用氮肥会增加 N₂O 的排放,这与李鑫等^[28]的研究一致。同时,进行生物基包膜的尿素要比普通尿素(U)及抑制型尿素(I)的 N₂O 减排效果好,这与朱永昶等^[29]研究结果一致。处理 CRU 与处理 CIRU 相比,N₂O 排放出峰较早,同时累积排放量也显著增多,这可能是因为生化抑制剂与生物基包膜结合后能够实现养分从溶出到在土壤中转化的双段调控,当膜内养分与抑制剂通过膜间孔隙进入土壤后,脲酶抑制剂和硝化抑制剂进一步抑制尿素水解进程及硝化作用,同时通过小青菜整个生育期内土壤铵态氮和硝态氮的变化趋势也可以看出普通尿素的养分释放较快,而处理 CIRU 则随着小青菜的生长而逐渐释放养分,从而降低了 N₂O 的排放与累积量。巴闯等^[24]曾将包膜与抑制剂相结合作用于玉米盆栽,结果表明包膜与抑制剂相结合能够减少 49.00% 的 N₂O 排放量。

Royer 等^[30]认为,在农田生态系统中,施肥是影响 CO₂ 排放的主要因素。施用氮肥能够明显增加土壤 CO₂ 的排放,不施氮处理的 CO₂ 排放累积量要显著低于各个施氮处理并降低 GWP,这与王艳群等^[31]的研究一致。同等施氮水平下,处理 U 的 CO₂ 累积排放量要高于处理 I 46.53%,说明普通尿素与抑制剂配施能够显著降低 CO₂ 的排放,其原因是 NBPT 等硝化抑制剂能够延缓硝化作用,降低土壤 pH。但是,抑制型尿素受环境影响较大,抑制时间较短,因此限制了其发展。处理 CRU 与处理 CIRU 在整个小青菜生育期内的 CO₂ 累积排放量均呈较低水平,较处理 U 分别减少了 59.32%、62.24%,这是因为包膜尿素能够使养分释放更加符合作物生长规律,减少了土壤中不能被作物利用的氮素,既不能为微生物活动提供充足的养分,同时又增大土壤的 C/N,抑制微生物的呼吸作用,从而降低土壤 CO₂ 的排放^[32]。

土壤活性有机碳含量及土壤的 C/N 是决定土壤产生 CH₄ 能力的核心因素。本研究中,各个施氮处理的 CH₄ 累积排放量较处理 CK 增加了 20.70%~72.69%,是因为施用氮肥增加了土壤中外源氮的介入,从而促进土壤中有机质的分解,显著提高了 CH₄ 的排放。小青菜生育期内,处理 I、CRU 及 CIRU 的 CH₄ 累积排放量均显著低于处理 U,这是因为包膜尿素或者生化抑制剂能够有效延缓尿素的释放,并且在土壤中留存更多的养分,从而促进了甲烷氧化菌活性,并且它们对于 CH₄ 排放的降低效果大于增强效应^[33]。

综上,生物基包膜抑制型尿素能够延迟气体排放达到峰值的时间,显著减少温室气体的排放,说明对尿素进行物理包膜能够有效延缓养分的溶出过程,使养分的释放更加符合作物生长需肥曲线,而 DMPP 和 NBPT 则能够抑制土壤中氨氧化微生物活性及脲酶活性,延缓尿素水解和氨氧化过程,降低硝酸盐淋溶及反硝化损失。可见,生物基包膜与抑制剂配合施用,能够有效提升对温室气体的减排效果,对控制尿素水解、提高氮素利用率更有效。

3.2 生物基包膜抑制型尿素对温室气体 GWP、GHGI 及小青菜产量的影响

合理使用氮肥能够显著增加小青菜产量、减少农田温室气体的排放。本研究中,生物基包膜抑制型尿素能够显著降低 GWP,这是因为生物基包膜和添加生化抑制剂能够增加土壤氮的生物有效性和作物对氮的吸收,减少养分流失,显著减少温室气体的排放,

从而起到减排的作用,这与郝小雨等^[34]的研究结果一致。就产量而言,生物基包膜抑制型尿素能够显著增加小青菜的产量,这可能是因为生物基包膜和生化抑制剂相结合也可以提高氮肥利用率,进一步提升包膜肥料的减排效果,实现尿素从溶出到在土壤中转化的双端调控,从源头上控制氮素的损失,使尿素养分释放更加符合作物生长规律,从而提高作物产量。温室气体GHGI兼顾了作物产量和GWP,是现阶段低碳农业的评价指标。生物基包膜抑制型尿素的温室气体GHGI显著低于其他处理,这使其在显著降低3种温室气体的累积排放量的同时增加了小青菜的产量。

4 结论

(1)生物基包膜抑制型尿素能够有效减少温室气体的排放,与普通尿素相比,其 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 排放量分别减少了79.52%、62.24%和30.11%,综合增温潜势及温室气体排放强度分别降低了65.02%和78.95%。

(2)生物基包膜抑制型尿素能够有效延缓养分释放,在小青菜整个生长期都能够供应较高的铵态氮和硝态氮,可显著提高小青菜产量。

(3)综合考虑温室气体的综合增温潜势及不同施肥处理下的温室气体排放强度,生物基包膜抑制型尿素是值得推介的一种新型肥料。

参考文献:

- [1] 卢艳艳,宋付朋.不同包膜控释尿素对农田土壤氨挥发的影响[J].生态学报,2011,31(23):7133-7140. LU Yan-yan, SONG Fu-peng. Effects of different coated controlled release urea on soil ammonia volatilization in farmland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7133-7140.
- [2] Wang Q, Dong F P, Dai J, et al. Recycled-oil-based polyurethane modified with organic silicone for controllable release of coated fertilizer[J]. *Polymers*, 2019, 11(3):454.
- [3] Henning S W, Branham B E, Mulvaney R L. Response of turfgrass to urea-based fertilizers formulated to reduce ammonia volatilization and nitrate conversion[J]. *Biology & Fertil of Soils*, 2013, 49:51-60.
- [4] Babar A, 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.
- [5] 曾后清,朱毅勇,王火焰,等.生物硝化抑制剂——一种控制农田氮素流失的新策略[J].土壤学报,2012,49(2):382-388. ZENG Hou-qing, ZHU Yi-yong, WANG Huo-yan, et al. Biological nitrification inhibitor: A new strategy for controlling nitrogen loss from farmland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(2):382-388.
- [6] Smith D M, Cusack S, Colman A, et al. Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model[J]. *Science*, 2007, 317(5839):796-799.
- [7] Alcamo J, Puig D, Metz B, et al. The emissions gap report 2014: A UNEP synthesis report[R]. New York: United Nations Environment Programme, 2014.
- [8] Syakila A, Kroeze C. The global nitrous oxide budget revisited[J]. *Greenhouse Gas Measurement & Management*, 2011, 1(1):17-26.
- [9] Liu X, Ju X, Zhang F, 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.
- [10] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [11] Linquist B A, Liu L J, Kessel C V, et al. Enhanced efficiency nitrogen fertilizers for rice systems: Meta-analysis of yield and nitrogen uptake [J]. *Field Crops Research*, 2013, 154:246-254.
- [12] 杜杰,杜昌文,申亚珍,等.碳纳米管/水基聚合物纳米复合材料包膜控释尿素的研制[J].功能材料,2015,46(19):148-152. DU Jie, DU Chang-wen, SHEN Ya-zhen, et al. Preparation of multi-walled carbon nanotubes/waterborne polyacrylate nanocomposites for coated controlled release urea[J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 46(19):148-152.
- [13] 王素萍,李小坤,鲁剑巍,等.控释尿素与尿素配施对油菜籽产量、经济效益和土壤无机氮含量的影响[J].中国油料作物学报,2013,35(3):295-300. WANG Su-ping, LI Xiao-kun, LU Jian-wei, et al. Effects of combined application of urea and controlled-release urea on yield, profits of seed and soil inorganic nitrogen[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2013, 35(3):295-300.
- [14] Ding W X, Yu H Y, Cai Z C. Impact of urease and nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions from fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2011, 47(1):91-99.
- [15] 王斌,李玉娥,万运帆,等.控释肥和添加剂对双季稻温室气体排放影响和减排评价[J].中国农业科学,2014,47(2):314-323. WANG Bin, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effect and assessment of controlled release fertilizer and additive treatments on greenhouse gases emission from a double rice field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2):314-323.
- [16] 赵自超,韩笑,石岳峰,等.硝化和脲酶抑制剂对华北冬小麦-夏玉米轮作固碳减排效果评价[J].农业工程学报,2016,32(6):254-262. ZHAO Zi-chao, HAN Xiao, SHI Yue-feng, et al. Effect of nitrification and urease inhibitor on carbon sequestration and greenhouse gas emissions in winter wheat and summer maize rotation system in north China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(6):254-262.
- [17] Enio M, Mara G, Melissa W, et al. Agronomic performance of rice to the use of urease inhibitor in two cropping systems[J]. *Revista Ciéncia Agrônômica*, 2013, 44(3):594-603.
- [18] 武志杰,石元亮,李东坡,等.稳定性肥料发展与展望[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1614-1621. WU Zhi-jie, SHI Yuan-liang, LI Dong-po, et al. The development and outlook of stabilized

- fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*, 2017, 23(6): 1614–1621.
- [19] 李莉, 李东坡, 武志杰, 等. 脲酶/硝化抑制剂对尿素氮在白浆土中转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 646–650. LI Li, LI Dong-po, WU Zhi-jie, et al. Effect of urease/nitrification inhibitors on transformation of urea-N in albic soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 646–650.
- [20] 徐星凯, 周礼恺, Cleemput O V. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对植稻土壤中尿素N行为的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(10): 1682–1686. XU Xing-kai, ZHOU Li-kai, CLEEMPUT O V. Effect of urease/nitrification inhibitors on the behavior of urea-N in the soil planted to rice [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10): 1682–1686.
- [21] 孙爱文, 石元亮, 尹宏斌, 等. 硫脲对脲酶活性和尿素氮转化的试验初报[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 554–557. SUN Ai-wen, SHI Yuan-liang, YIN Hong-bin, et al. Effect of thiourea on urease activities and transformation of urea-N[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(6): 554–557.
- [22] Yang M, Fang Y T, Sun D, et al. Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: A meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2016, 1(6), 22075.
- [23] Zaman M, Saggar S, Blennerhassett J D, et al. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(6): 1270–1280.
- [24] 巴闯, 杨明, 邹洪涛, 等. 包膜/抑制剂联合调控对农田土壤 N_2O 排放和氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1291–1299. BA Chuang, YANG Ming, ZOU Hong-tao, et al. Combined effects of coating/inhibitors on N_2O emission and ammonia volatilization in farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1291–1299.
- [25] 宋以玲, 贺明荣, 张吉旺, 等. 硝化抑制剂型包膜肥料对玉米生理特性、产量、品质的影响[J]. 河北科技师范学院学报, 2015, 29(1): 6–11. SONG Yi-ling, HE Ming-rong, ZHANG Ji-wang, et al. Effects of nitrification inhibitor fly ash coated slow release fertilizer on physiological characteristics yield and quality of maize[J]. *Journal of Hebei Normal University of Science & Technology*, 2015, 29(1): 6–11.
- [26] 俞巧钢, 陈英旭. DMPP对稻田田面水氮素转化及流失潜能的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9): 124–130. YU Qiao-gang, CHEN Ying-xu. Influences of nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate on nitrogen transformation and potential runoff loss in rice fields[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(9): 124–130.
- [27] 朱晓晴, 安晶, 马玲, 等. 秸秆还田深度对土壤温室气体排放及玉米产量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(5): 977–989. ZHU Xiao-qing, AN Jing, MA Ling, et al. Effects of different straw returning depths on soil greenhouse gas emission and maize yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(5): 977–989.
- [28] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 99–104. LI Xin, JU Xiao-tang, ZHANG Li-juan, et al. Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 99–104.
- [29] 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 Yong-chang, LI Yu-e, QIN Xiao-bo, 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.
- [30] Royer L, Angers D, Chantigny M, et al. Dissolved organic carbon in runoff and tile-drain water under corn and forage fertilized with hog manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(3): 855–863.
- [31] 王艳群, 彭正萍, 马阳, 等. 减氮配施氮转化调控剂对麦田 CO_2 和 CH_4 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1657–1664. WANG Yan-qun, PENG Zheng-ping, MA Yang, et al. Reduction of nitrogen fertilizers combined with N conversion control additives influences CO_2 and CH_4 emissions in winter wheat field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1657–1664.
- [32] 周玉玺, 翟晓芳, 孙浩然, 等. 控释氮肥配施对不同覆盖旱作农田 CO_2 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2429–2438. ZHOU Jun-xi, ZHAI Xiao-fang, SUN Hao-ran, et al. Effects of controlled-release urea on CO_2 emission from dry farmland under different mulching patterns[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(10): 2429–2438.
- [33] Linquist B A, Borbe M A A, Pittelkow C M, et al. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis[J]. *Field Crops Research*, 2012, 135: 10–21.
- [34] 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): 29–40. HAO Xiao-yu, ZHOU Bao-ku, MA Xing-zhu, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on greenhouse gas emissions from maize field in black soil[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(11): 29–40.