

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.01.016

史亚平, 于海洋, 宋开付, 等. 城市污泥堆肥与氮肥配施对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及水稻重金属含量的影响. 土壤, 2020, 52(1): 113–118

城市污泥堆肥与氮肥配施对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及水稻重金属含量的影响^①

史亚平^{1,2}, 于海洋^{1,2}, 宋开付^{1,2}, 马 静¹, 徐 华^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 随着城市污泥量的日益增大, 污泥农用备受关注。本研究通过田间原位试验, 以水稻为研究对象, 观测氮肥与污泥堆肥以不同比例(1 : 0、0.75 : 0.25、0.5 : 0.5、0 : 1)配合施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放以及植物重金属累积的影响。结果表明: 随着污泥堆肥施用比例的增加, 稻田 CH₄ 排放呈线性增加($P < 0.05$, $r = 0.967$)。与施全量氮肥处理相比, 施全量污泥堆肥处理显著增加 CH₄ 排放 118% ($P < 0.05$), 而配施处理的 CH₄ 排放仅增加 30% ~ 34% ($P > 0.05$)。与 CH₄ 相反, 稻田 N₂O 排放随着污泥堆肥施用比例的增加而逐渐减少, 与施全量氮肥处理相比, 施全量污泥堆肥处理减少 N₂O 排放 39% ($P < 0.05$), 配施处理 N₂O 排放减少 29% ~ 38% ($P < 0.05$)。施全量污泥堆肥处理的温室气体排放强度(GHGI)与施全量氮肥处理相当, 而配施处理的 GHGI 比施用全量污泥堆肥处理减少 18% ~ 24% ($P < 0.05$)。各处理水稻产量无显著差异 ($P > 0.05$), 各处理稻米中重金属含量均在国家食品安全标准限值范围内。与施全量氮肥处理相比, 施全量污泥堆肥处理稻米中 Zn、Cr、Cu 含量分别增加 42% ($P < 0.05$)、103% ($P > 0.05$) 和 12% ($P > 0.05$), 而配施处理稻米中的 Zn、Cr、Cu 含量分别增加 19% ~ 27% ($P < 0.05$)、14% ~ 33% ($P > 0.05$) 和 4% ~ 7% ($P > 0.05$); Ni 在稻米中未检出; 施全量污泥堆肥处理与配施处理稻米中的 Cd 含量相当, 相对于施全量氮肥处理均增加了 33% ($P > 0.05$)。但各处理上述重金属含量均未超过食品安全标准。综合以上研究结果, 污泥堆肥与氮肥配施可作为稻田污泥堆肥推荐施用方式, 但需要监测土壤重金属积累动态。

关键词: 尿素; 污泥堆肥; 稻田; 甲烷; 氧化亚氮; 重金属

中图分类号: S511; X53 文献标志码: A

Effects of Composted Sludge Combination with Urea on Greenhouse Gases Emissions from Paddy Soil and Heavy Metals Accumulation in Plant

SHI Yaping^{1,2}, YU Haiyang^{1,2}, SONG Kaifu^{1,2}, MA Jing¹, XU Hua^{1*}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the increasing of municipal sludge, applying sludge in agriculture has been of great concern. A field experiment was conducted to investigate the effects of applying urea, composted sludge and its combination with urea on the methane and nitrous oxide emissions from paddy soils and heavy metals accumulation in soil and plant. Five treatments, i. e., no fertilization (CK), urea(U), urea and composted sludge(U+O)with a ratio of 7.5 : 2.5(U7.5O2.5), 5 : 5(U5O5), and total composted sludge(O)were installed, and the N application rate in treatments U, U+O, and O was the same(N, 240 kg/hm²). As the amount of sludge compost increased, the emission of CH₄ increased linearly($P < 0.05$, $r = 0.967$). Compared with treatment U, treatment O increased CH₄ emission by 118% ($P < 0.05$) and treatments U+O increased CH₄ emission by 30%–34% ($P > 0.05$). In contrast to the CH₄, N₂O emission reduced with the increasing composted sludge. Compared with treatment U, treatment O decreased N₂O emission by 39% ($P < 0.05$), treatment U+O decreased by 29%–38% ($P < 0.05$). Treatments U and O had the same Greenhouse Gas Intensity(GHGI). Compared with treatment O, treatment U+O decreased GHGI by 18%–24% ($P < 0.05$). The rice yield was no significant difference among the treatments. Compared with treatment U, treatment O increased Zn by 42% ($P < 0.05$), Cr by

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300105)、国家自然科学基金项目(41671241; 41571232)和中国科学院南京土壤研究所领域前沿项目(ISSASIP1652; ISSASIP1654)资助。

* 通讯作者(hxu@issas.ac.cn)

作者简介: 史亚平(1994—), 女, 安徽宣城人, 硕士研究生, 主要从事稻田温室气体排放研究。E-mail: yps@issas.ac.cn

103% ($P>0.05$), Cu by 12% ($P>0.05$) in seed, treatment U+O increased Zn by 19%-27% ($P<0.05$), Cr by 14%-33% ($P>0.05$), Cu by 4%-7% ($P>0.05$) in seed, Ni was not detected in seed. Compared with treatment U, treatments U+O and O increased Cd by 33% ($P>0.05$). The heavy metal content in seed did not exceed the national standards. The combination of sludge compost and nitrogen fertilizer can be used as the recommended method for sludge compost in paddy field. But the soil heavy metal accumulation needs to be monitored.

Key words: Urea; Composted sludge; Paddy field; Methane; Nitrous oxide; Heavy metals

随着工业的不断发展和城市污水处理效率的提高,城市污泥产量也不断增加。据统计,我国城市污泥的年产量约为 3 000 ~ 4 000 万 t^[1],污泥处理处置成了亟待解决的重要问题。城市污泥农用是污泥资源化处置的有效方法之一^[2]。我国污泥土地利用占污泥处理处置途径的 48%,其中农用占 44.83%^[3]。城市污泥经堆肥化处理后,病原菌、寄生虫卵等几乎全部被杀死,重金属含量也会降低,速效养分含量有所增加,所以将污泥经过堆肥后农用将成为我国今后较长时间内污泥无害化、资源化、减量化的最合理的方式^[4-5]。我国城市污泥堆肥中有机质含量高^[2],但是在堆肥过程中,氮素会大量损失,大大降低了堆肥的农用价值,进而限制了污泥堆肥的使用。污泥堆肥单方面施用可能达不到化肥或氮肥施用的效果,于是发展出污泥堆肥与化肥或氮肥配施的方式^[6]。研究表明,施用污泥堆肥并适当施用化学肥料以补充其所缺少的成分,可使土壤中有有机质、养分含量及作物产量增加^[7-8]。

水稻是我国三大粮食作物之一,也是温室气体排放重要源。有机肥种类和用量是影响稻田温室气体排放的重要因素。有研究表明,与单施化肥相比,单施绿肥、绿肥与化肥配施会导致稻田温室气体排放量增加^[9];猪粪粪与化肥配施相比于单施化肥会显著降低稻田的 CH₄ 和 N₂O 排放,而牛粪肥、小麦秸秆分别与化肥配施相比于单施化肥增加了稻田 CH₄ 的排放,减少了 N₂O 排放^[10]。污泥堆肥中含有大量有机质,必然会影响稻田温室气体排放,而目前关于污泥堆肥施用及其与氮肥配施对稻田温室气体排放的影

响还未见报道。

此外,污泥堆肥在堆腐发酵过程中会添加木屑、秸秆、菌剂等辅料,由于稀释作用,降低了堆肥重金属含量。并且研究发现,污泥经过堆肥处理后,Cd 含量有所降低,Cr 和 Zn 的总量也降低约 50%^[11]。但其施用于农田中可能仍会引起土壤和作物中重金属含量增加,最终危害人体健康。将污泥堆肥施于玉米田中发现土壤重金属含量大于不施肥处理,且土壤中重金属含量随着城市污泥堆肥量的增加而增加^[12];而将污泥堆肥全量施用于水稻田后发现水稻不同生育时期稻田土壤 Cu、Zn 和 Pb 含量显著增加,但水稻籽粒中重金属含量变化不大^[13]。相对于污泥堆肥全量施用,将污泥堆肥与氮肥配施,既减少了污泥堆肥的施用量,同时也满足了作物生长的营养需求,土壤及作物中重金属积累量也必然会减少,而有关这方面的研究鲜见报道。

本试验通过将不同比例的污泥堆肥和氮肥配施,研究其对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放、水稻产量以及重金属含量的影响,进而为污泥堆肥农用的安全和适宜用量提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

田间试验于 2017 年 6 月至 11 月在江苏省句容市白兔镇稻麦轮作田(31°58' N, 119°18' E)进行。供试土壤为发育于下蜀黄土的爽水性水稻土,土壤全碳含量为 11.5 g/kg,全氮含量为 1.3 g/kg。污泥堆肥的理化性质见表 1^[14]。

表 1 供试污泥堆肥的理化性质
Table 1 Physical and chemical characteristics of sludge compost

pH	TOC(g/kg)	TN(g/kg)	TP(g/kg)	碱解氮(g/kg)	TK(g/kg)	Cu(mg/kg)	Zn(mg/kg)	Cd(mg/kg)	Cr(mg/kg)	Ni(mg/kg)
6.5	308.91	27.43	26.80	2.23	6.09	323.62	1 014.76	0.43	165.40	64.76

注: TOC 为总有机碳; TN 为总氮; TP 为总磷; TK 为总钾。

1.2 试验设计

本试验在前期试验^[14]的基础上针对氮肥和污泥堆肥配施的用量增加了不同比例配施处理,共 5 个处

理,分别是:①CK:对照,尿素用量和污泥堆肥量都为 0 kg/hm²(以 N 计,下同);②U:全量氮肥处理,尿素氮施用量为 240 kg/hm²;③U7.5O2.5, 25% 的污泥堆

肥氮与 75% 的尿素氮配施，合计用氮量 240 kg/hm²；④U5O5，50% 的污泥堆肥氮与 50% 的尿素氮配施，合计用氮量 240 kg/hm²；⑤O：全量污泥堆肥处理，污泥堆肥氮 240 kg/hm²。每个处理 3 次重复。

污泥堆肥均作为基肥(按照不同处理基肥的比例)在 6 月下旬一次性施入，与 0~20 cm 原土壤混合翻施；而 U、U7.5O2.5 和 U5O5 处理氮肥施用量按基肥：分蘖肥：穗肥=2：1：1 施用(施用时间分别为 2017 年 6 月 26 日、7 月 13 日和 8 月 10 日)。其中，U7.5O2.5 处理中基肥不足的氮量用尿素补足；O 处理污泥堆肥做为基肥一次性施用，不施分蘖肥和穗肥。各处理磷肥和钾肥作为基肥一次性施用，施用量为：过磷酸钙(Ca(H₂PO₄)₂)450 kg/hm²，氯化钾(KCl)225 kg/hm²。本试验所用污泥堆肥主要以废弃有机物料混合污泥厌氧发酵而成。供试水稻为扬宁 3 号，于 2017 年 6 月 26 日移栽，11 月 1 日收获。水稻生长季田间水分管理与当地常规一致，为间歇灌溉，即前期淹水(6 月 25 日—7 月 17 日)、中期烤田(7 月 20 日—7 月 30 日)、后期干湿交替(7 月 31 日—9 月 22 日)。

1.3 测定方法及参数计算

参考文献[14]。

2 结果与分析

2.1 稻田 CH₄ 和 N₂O 排放

本试验 5 个处理稻田 CH₄ 的排放规律一致(图 1)。CH₄ 排放通量在移栽初期缓慢上升，于移栽后 22 d 左右达到第一个峰值；于烤田期间迅速降低；于复水

期间再次产生，并在移栽后 65 d 左右达到另一个峰值。CK、U、U7.5O2.5、U5O5、O 处理 CH₄ 排放的两次峰值分别为 7.33、5.61、6.73、9.52、18.80 mg/(m²·h) 和 2.57、2.31、3.33、2.94、4.77 mg/(m²·h)；CH₄ 排放通量于干湿交替期间再次降低，几乎为 0，且各处理 CH₄ 排放通量无显著差异。与 U 处理相比，O 处理 CH₄ 排放增加 118%(*P*<0.05)，而 U7.5O2.5 和 U5O5 处理 CH₄ 排放分别增加 30% 和 34%(*P*>0.05)(表 2)，即配施处理 CH₄ 排放显著小于污泥堆肥全量施用。

5 个处理的土壤氧化还原电位 Eh 也呈现一致的规律(图 2)。Eh 在水稻移栽初期至持续淹水期间都很低，处于低氧化还原电位状态(-180 ~ -146 mV)；烤田期间，土壤 Eh 迅速升高(82 ~ 227 mV)；烤田后复水时期，其值又再次降低；田面干湿交替直至排水落干期间，土壤 Eh 逐渐增加。水稻生长季 CK、U、U7.5O2.5、U5O5、O 处理 Eh 平均值分别为 -39、-39、-37、-37、-107 mV，与其 CH₄ 排放量呈显著负相关(*P*<0.05，*r*=-0.949)。

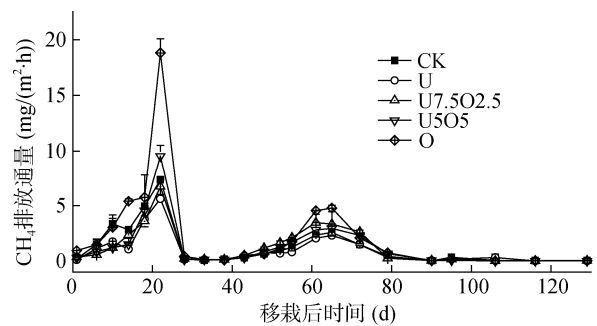


图 1 水稻生长季 CH₄ 排放通量的季节变化
Fig. 1 Dynamic variation of CH₄ flux during the rice growing season

表 2 水稻生长季 CH₄ 和 N₂O 排放量、水稻产量、综合温室效应及温室气体排放强度

Table 2 Total CH₄ emission, total N₂O emission, rice grain yield, global warming potential and greenhouse gas intensity during the rice growing season

处理	CH ₄ 排放量(kg/hm ²)	N ₂ O 排放(N, kg/hm ²)	水稻产量(t/hm ²)	综合温室(CO ₂ -eq, t/hm ²)	温室气体排放强度(CO ₂ -eq, kg/kg)
CK	35.36 ± 1.09 b	0.38 ± 0.04 c	6.40 ± 0.72 b	1.04 ± 0.02 c	0.17 ± 0.02 c
U	27.64 ± 4.81 b	5.34 ± 0.96 a	7.67 ± 0.04 a	2.91 ± 0.30 a	0.38 ± 0.04 a
U7.5O2.5	36.06 ± 1.19 b	3.81 ± 0.39 b	8.07 ± 0.02 a	2.49 ± 0.13 ab	0.31 ± 0.02 ab
U5O5	36.99 ± 4.84 b	3.32 ± 0.12 b	8.04 ± 0.02 a	2.31 ± 0.15 b	0.29 ± 0.02 b
O	60.81 ± 4.85 a	3.28 ± 0.08 b	7.63 ± 0.02 a	2.88 ± 0.09 a	0.38 ± 0.01 a

注：表中同列数据小写字母不同表示处理间差异在 *P*<0.05 水平显著，下同。

5 个处理的 N₂O 排放通量也呈现相同的变化趋势(图 3)。烤田期间，N₂O 排放通量迅速增加并达到峰值，CK、U、U7.5O2.5、U5O5、O 处理的峰值分别 168、2 859、2 555、2 163、1 956 μg/(m²·h)(以 N 计)，烤田期间的排放量分别占整个稻季的 98%、97%、98%、94%、99%；其他时期，各处理 N₂O 排

放通量均较小。与 U 处理相比，O 处理 N₂O 排放减少 39%(*P*<0.05)，而 U7.5O2.5 和 U5O5 处理 N₂O 排放分别减少 29% 和 38%(*P*<0.05)(表 2)。水稻生长季土壤中氮素的主要存在形态为 NH₄⁺-N，其含量显著高于土壤 NO₃⁻-N 含量；O 处理 NO₃⁻-N 含量峰值最大，U5O5 处理 NH₄⁺-N 含量最大；施用全量污泥堆肥以及

堆肥配施处理生长期内 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 总量大于 CK 和 U 处理(图 4)。5 个处理 N_2O 排放与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量无显著相关性($P>0.05$)。

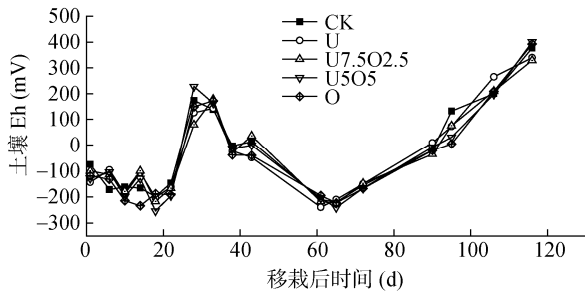


图 2 水稻生长季土壤 Eh 变化

Fig. 2 Dynamic variation of soil Eh during the rice growing season

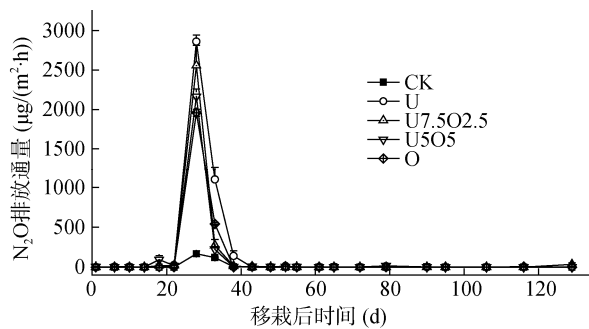


图 3 水稻生长季 N_2O 排放通量的季节变化

Fig. 3 Dynamic variation of N_2O flux during the rice growing season

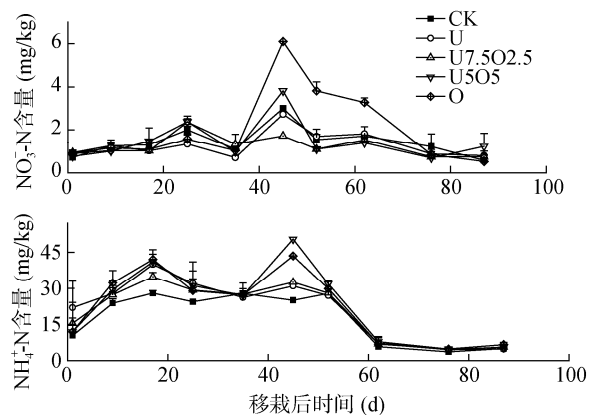


图 4 水稻生长季 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ contents in soil during the rice growing season

2.2 水稻产量、综合温室效应及温室气体排放强度

如表 2 所示, O 与 U 处理水稻产量相当, 均比 CK 高约 19%($P<0.05$); 与 U 处理相比, U7.5O2.5、U5O5 处理水稻产量都增加了 5%($P>0.05$)。与 CK 相比, 稻季施肥显著增加稻季综合温室效应(GWP)及温室气体排放强度(GHGI)($P<0.05$); U 和 O 处理 GWP 和 GHGI 相当($P>0.05$), 而相对于 U 处理, 配施污泥

堆肥与氮肥处理(U7.5O2.5、U5O5)却显著减少 GWP 14%~21%($P<0.05$)、GHGI 18%~24%($P<0.05$)。

2.3 水稻植株重金属含量

重金属在水稻植株不同部位的含量不同: Cr、Cd 含量在水稻植株各部位的顺序为秆>壳>米; Ni 含量在水稻植株各部位的顺序为壳>秆>米; Cu、Zn 含量在水稻植株各部位的顺序为壳>米>秆(表 3)。各重金属在水稻植株的累积量基本随污泥堆肥施用量增加而增加。稻米中, 相较 U 处理, U7.5O2.5、U5O5、O 处理 Cr 含量分别增加 14%、33%、106%($P>0.05$), Cu 含量分别增加 4%、7%、12%($P>0.05$), Zn 含量分别增加 19%、27%、42%($P>0.05$), Cd 含量均增加 33%($P>0.05$), Ni 含量在米中均未检出。污泥堆肥与氮肥配施处理稻米中的重金属含量均小于污泥堆肥全量施用处理($P>0.05$)。根据 GB 2762—2017《食品安全国家标准食品中污染物限量》^[15]: $\text{Cd}\leq 0.2\text{ mg/kg}$ 、 $\text{Cr}\leq 1.0\text{ mg/kg}$ 、 $\text{Ni}\leq 1.0\text{ mg/kg}$ 、 $\text{Zn}\leq 50\text{ mg/kg}$ 、 $\text{Cu}\leq 10\text{ mg/kg}$, 本试验所有处理稻米中重金属含量都在国家食品安全标准限值范围内。

3 讨论

3.1 污泥堆肥与氮肥配施对水稻产量的影响

污泥堆肥中有机物质含量较多, 它们在土壤中经过微生物的分解、转化产生大量的维生素、腐殖酸物质和激素^[16], 促进作物生长^[12]。有研究表明, 施用城市污泥复合肥在小麦和玉米生产中的增产效果优于化肥^[19-20]。污泥堆肥和氮肥配施对作物产量的影响未见报道。而大量研究表明, 有机肥(牛粪肥、紫云英+稻草、紫云英+猪粪、商品有机肥)与氮肥配施能增加土壤中有机质、各养分含量, 从而增加水稻产量, 其增产效果优于有机肥全量施用以及氮肥全量施用^[8, 19-20]。本试验中污泥堆肥与氮肥配施处理的增产效果既大于全量氮肥施用处理, 也大于全量污泥堆肥施用处理, 主要因为配施处理在污泥堆肥作为基肥一次性施用的基础上还在作物生长发育旺盛时期追施氮肥, 这一措施既为作物生长发育提供了充足的有机质, 还及时为作物的快速生长提供了充足的氮肥。

3.2 污泥堆肥与氮肥配施对温室气体排放的影响

以往大量研究表明, 施用有机肥可以促进稻田 CH_4 排放^[19-26]。有机肥不仅为土壤产甲烷菌提供丰富的产甲烷基质, 有机肥的分解还消耗淹水土壤中 O_2 、降低土壤 Eh, 为产甲烷菌的生长提供适宜的环境条件, 从而促进稻田 CH_4 的产生和排放^[25]。污泥堆肥

表 3 重金属在成熟期水稻植株不同部位的分布 (mg/kg)
Table 3 The heavy metals concentration in different parts of paddy plants

部位	处理	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd
米	CK	0.34 ± 0.08 a	-	2.75 ± 0.56 a	19.35 ± 0.60 b	0.03 ± 0.01 a
	U	0.36 ± 0.11 a	-	3.36 ± 0.17 a	18.76 ± 1.29 b	0.03 ± 0.00 a
	U7.5O2.5	0.41 ± 0.33 a	-	3.49 ± 0.24 a	22.24 ± 0.33 a	0.04 ± 0.01 a
	U5O5	0.48 ± 0.28 a	-	3.60 ± 0.27 a	23.84 ± 1.62 a	0.04 ± 0.00 a
	O	0.72 ± 0.19 a	-	3.77 ± 0.22 a	26.71 ± 0.54 a	0.04 ± 0.00 a
壳	CK	3.70 ± 1.97 a	1.04 ± 0.37 b	3.46 ± 0.34 b	25.54 ± 1.28 c	0.06 ± 0.01 a
	U	3.70 ± 0.02 b	0.91 ± 0.00 b	3.75 ± 0.05 b	28.00 ± 2.00 bc	0.07 ± 0.02 a
	U7.5O2.5	5.06 ± 1.64 a	1.49 ± 0.74 ab	4.61 ± 0.38 a	37.25 ± 6.51 b	0.06 ± 0.00 a
	U5O5	5.21 ± 0.81 a	1.47 ± 0.59 a	4.69 ± 0.41 a	35.19 ± 1.17 b	0.07 ± 0.02 a
	O	5.82 ± 0.46 a	1.86 ± 0.30 a	4.92 ± 0.19 a	40.05 ± 3.54 a	0.08 ± 0.02 a
秆	CK	12.50 ± 1.49 a	0.20 ± 0.20 b	1.96 ± 0.23 a	9.73 ± 2.52 b	0.16 ± 0.03 a
	U	15.69 ± 1.61 a	0.28 ± 0.08 b	2.02 ± 0.12 a	9.23 ± 1.42 b	0.16 ± 0.02 a
	U7.5O2.5	16.54 ± 3.43 a	0.51 ± 0.20 ab	2.33 ± 0.18 a	16.32 ± 4.37 c	0.18 ± 0.00 a
	U5O5	16.82 ± 4.60 a	0.57 ± 0.05 ab	2.60 ± 0.25 a	16.69 ± 1.13 b	0.19 ± 0.02 a
	O	19.18 ± 4.21 a	0.68 ± 0.04 a	2.63 ± 0.11 a	19.64 ± 6.54 a	0.20 ± 0.03 a

中含有大量有机质(表 1),施用后土壤 Eh 降低(图 2),促进 CH₄ 排放(表 2)。相对于污泥堆肥全量施用处理,污泥堆肥与氮肥配施处理减少了污泥堆肥施用量,稻田 CH₄ 排放量也随之减少(表 2)。

有机肥对稻田 N₂O 排放的影响较为复杂,可能与其碳氮组成及供氮能力有关^[27]。城市污泥堆肥后,其可溶性有机碳含量增高(表 1),翻耕施入稻田土壤后,导致土壤 Eh 下降,趋近于还原电位(图 2),不利于硝化细菌进行硝化作用,反而利于反硝化细菌进行反硝化作用,从而降低了 N₂O/N₂ 比率^[27,29],最终导致 N₂O 排放量的降低(表 2)。相对于污泥堆肥全量施用处理,污泥堆肥与氮肥配施处理中的氮肥可为硝化和反硝化作用提供充足的反应底物,从而增加 N₂O 的排放(表 2)。

稻田 CH₄ 与 N₂O 排放存在互为消长的关系^[27],评估农业措施时必须同时考虑对这两种温室气体的综合影响。与氮肥全量施用处理相比,污泥堆肥与氮肥配施处理 N₂O 减小的增温潜势大于 CH₄ 增加的增温潜势,总体上减少综合温室效应 14%~21%;与全量污泥堆肥施用处理相比,污泥堆肥与氮肥配施处理 CH₄ 减小的增温潜势大于 N₂O 增加的增温潜势,总体上减少综合温室效应 14%~20%(表 2)。污泥堆肥与氮肥配施既有利于增产,也有利于温室气体减排。

3.3 污泥堆肥与氮肥配施对水稻重金属含量的影响

污泥农用一直饱受争议,因为污泥中含有大量的

重金属,即使在堆肥后也不能去除^[30]。污泥堆肥施入土壤后存在一定的重金属累积风险,尤其是 Zn、Cu 等堆肥中含量较高且与土壤含量差异较大的重金属累积风险更大。大量研究表明,水稻、小麦、大麦、油菜、萝卜、青椒、青菜在施用污泥堆肥后,可食用部分中重金属含量有所增加,但均低于国家食品污染物限量值,重金属含量随污泥堆肥施用量的减少而减少^[31-33]。本研究中水稻不同部位重金属含量基本随着污泥堆肥量的增加而增加,各处理稻米的重金属含量未超过国家食品安全标准限值(表 3),这说明施用污泥堆肥短期内重金属累积风险较小,而长期施用的风险还需要进一步深入研究。此外,污泥堆肥与氮肥配施处理的风险低于污泥全量施用处理,且有利于增产与温室气体减排,值得推荐。

4 结论

污泥堆肥与氮肥配施处理,其水稻产量比全量氮肥及全量污泥堆肥施用处理高 5%($P>0.05$);在稻季不改变温室气体的季节排放趋势,相对于全量污泥堆肥施用处理减少 CH₄ 排放 39%~41%($P<0.05$),相对于全量氮肥施用处理减少 N₂O 排放 29%~38%($P<0.05$);在全观测期内,综合温室效应、温室气体排放强度均显著小于全量氮肥施用处理、全量污泥堆肥施用处理($P<0.05$)。稻米中,重金属含量随着污泥配施量的增加而增加。污泥堆肥与氮肥配施处理稻米中 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 含量均小于全量污泥堆肥

处理(Ni 未检出), 且各重金属含量都在食品安全限制标准内。

参考文献:

- [1] 梅立永, 王磊, 王胜凡, 等. 我国城市污水处理厂污泥处理方法及展望[J]. 广东化工, 2017, 44(18): 137-138.
- [2] 张文浩. 水处理技术中的污泥资源化应用[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(7): 234-235.
- [3] 彭琦, 孙志坚. 国内污泥处理与综合利用现状及发展[J]. 能源工程, 2008(5): 47-50.
- [4] 徐福银, 包兵, 胡艳燕, 等. 城市污泥堆肥资源化利用研究进展[C]//中国环境科学学会. 2015 年中国环境科学学会学术年会论文集.
- [5] 王媛. 城市污泥及其复合肥对小麦、大豆种苗生长影响的研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2014.
- [6] 王占华, 杨少华, 崔玉波. 我国污泥堆肥的土地利用现状及对策[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2005: 22: 8-9
- [7] 郭康莉, 郑江, 冀拯宇, 等. 连续施用无害化污泥堆肥对沙质潮土活性有机氮组分的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1960-1968.
- [8] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 314-324.
- [9] 朱红梅, 荣湘民, 袁正平, 等. 不同有机肥施用量对稻田甲烷排放的影响[J]. 湖南农业大学学报, 1998(5): 18-22.
- [10] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田不同种类有机肥施用对后季麦田 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1264-1268.
- [11] 林云琴, 周少奇. 城市污泥好氧堆肥过程中重金属的形态转化[J]. 生态环境学报, 2008, 17(3): 940-943.
- [12] 唐滢海. 不同秸秆污泥堆肥施用土壤-植物效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [13] 刘红江, 盛婧, 郭智, 等. 施用河道污泥对水稻和土壤重金属含量及水稻氮素利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 163-172.
- [14] 史亚平, 于海洋, 宋开付, 等. 施用城市污泥堆肥对稻田温室气体排放及重金属含量的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(12): 2352-2359.
- [15] 中华人民共和国卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
- [16] 梁丽娜, 黄雅曦, 杨合法, 等. 污泥农用对土壤和作物重金属累积及作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 81-86.
- [17] 陈同斌, 李艳霞, 金燕, 等. 城市污泥复合肥的肥效及其对小麦重金属吸收的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 643-648.
- [18] 姜城, 杨金, 陈振天, 等. 污泥、污泥复合肥农业应用的初步研究[J]. 吉林农业大学学报, 1996, 18(2): 46-50.
- [19] 彭耀林, 朱俊英, 唐建军, 等. 有机无机肥长期配施对水稻产量及干物质生产特性的影响. 江西农业学报, 2004, 268(4): 485-490
- [20] 郑信建. 有机无机肥配施对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(17): 57-59.
- [21] 李波. 不同有机无机肥配施对水稻生长及稻田温室气体排放的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [22] 马静, 徐华, 蔡祖聪. 施肥对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤, 2010, 42(2): 153-163.
- [23] Yang S S, Chang E H. Effect of fertilizer application on methane emission/production in the paddy soils of Taiwan[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 1997, 25(3): 245-251.
- [24] 吴家梅, 纪雄辉, 彭华, 等. 不同有机肥对稻田温室气体排放及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 162-169.
- [25] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响. 中国环境科学, 2003, 23(5): 552-556
- [26] Naser H M, Nagata O, Tamura S, et al. Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(1): 95-101
- [27] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [28] 杨军, 杨崇, 吕雪娟, 等. 广州地区施用不同有机肥对稻田 N_2O 排放的影响[J]. 华南农业大学学报, 1999(1): 126-127.
- [29] 马二登, 马静, 徐华, 等. 施肥对稻田 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2453-2458.
- [30] 宋志蕾. 施用污泥堆肥对土壤养分、作物产量的影响及其安全性评价[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- [31] Zhang M, Heaney D, Solberg E, et al. The effect of MSW compost on metal uptake and yield of wheat, barley and conola in less productive farming soils of Alberta[J]. *Compost. Sci. Util.*, 2000, 8(3): 224-235
- [32] 王社平, 程晓波, 姚岚, 等. 施用城市污泥堆肥对土壤和青椒重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9): 1829-1836.
- [33] 褚艳春, 葛骁, 魏思雨, 等. 污泥堆肥对青菜生长及重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(10): 1965-1970.