

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.04.007

水碳联合管理对稻田浅层土壤N₂O浓度剖面分布规律的影响

俞湾青¹,杨士红^{1,2},祁苏婷¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院,江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:为揭示不同水碳管理对稻田土壤 N₂O 浓度产生的影响,将控制灌溉技术与秸秆还田、有机肥施用相结合,采用微电极技术,观测不同水碳管理模式下稻田土壤 N₂O 浓度剖面分布特征。结果表明,施肥后 1~6 d 内,控灌稻田土壤不同深度 N₂O 浓度小于常灌稻田,施肥后第 8 天开始,控灌稻田土壤不同深度 N₂O 浓度均显著大于常灌稻田($p<0.05$),且 2 种碳管理模式规律基本一致;秸秆还田和有机肥施用对控灌稻田土壤浅层(0~1 cm) N₂O 浓度无显著影响,但在较深处(1~3 cm),秸秆还田 N₂O 浓度显著大于施用有机肥($p<0.05$),2 种碳管理模式对常灌稻田 N₂O 浓度的影响无明显规律;控灌模式配施有机肥 N₂O 浓度小于其他模式,施加分蘖肥后,CM(控灌+有机肥管理)处理 N₂O 浓度均值较 CS(控灌+秸秆还田管理)、FM(常灌+有机肥管理)处理分别小 35.1% 和 24.8%,差异显著($p<0.05$),CM 处理略小于 FS(常灌+秸秆还田管理)处理,施加穗肥后,CM 处理 N₂O 浓度均值较 CS、FS、FM 处理分别小 45.5%、33.7% 和 18.8%,差异显著($p<0.05$)。

关键词:土壤 N₂O 浓度;稻田土壤;水碳管理;秸秆还田;有机肥;水分管理;微电极技术

中图分类号:S154.1; S511 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)04-0335-07

Effects of water and carbon managements on profile distribution of N₂O concentration in paddy shallow soil

YU Wanqing¹, YANG Shihong^{1,2}, QI Suting¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To reveal the effect of different water and carbon managements on the N₂O production in the paddy soil, a combined water-saving irrigation with the straw returning and organic fertilizer application was adopted to observe the profile distribution characteristics of N₂O concentration in paddy soil with the micro-level technology under different water and carbon managements. Results show that within 1-6 days after fertilization, N₂O concentration in the controlled irrigation paddy soil is lower than the conventional irrigated soil in different depth, from 8 day the controlled irrigation paddy soil is significantly higher than the conventional irrigated soil ($p<0.05$), and the law is basically same under two carbon managements. N₂O concentration in the shallow layer (0-1 cm) of the controlled irrigation paddy soil is not significantly affected by the straw returning and the organic fertilizer application, while in the deeper depth (1-3 cm), the straw returning is significantly higher than the organic fertilizer application ($p<0.05$). The effect of two carbon managements on N₂O concentration in the conventional irrigation paddy soil is not obvious. N₂O concentration of organic fertilizer application under the controlled irrigation is lower than others, after the tiller fertilizer, the mean concentration of N₂O in CM is 35.1% and 24.8% lower than it in CS and FM ($p<0.05$), and CM is slightly lower than FS. After the panicle fertilizer, the mean concentrations of N₂O are CM is 45.5%, 33.7% and 18.8% lower than CS, FS and FM ($p<0.05$).

基金项目: 国家自然科学基金(51879076,51579070);江苏省水利科技项目(2018065)

作者简介: 俞湾青(1997—),女,硕士研究生,主要从事节水灌溉与农田生态效应研究。E-mail: 987873238@qq.com

通信作者: 杨士红,教授。E-mail: ysh7731@hhu.edu.cn

引用本文: 俞湾青,杨士红,祁苏婷.水碳联合管理对稻田浅层土壤 N₂O 浓度剖面分布规律的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):335-341.

YU Wanqing, YANG Shihong, QI Suting. Effects of water and carbon managements on profile distribution of N₂O concentration in paddy shallow soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(4): 335-341.

Key words: N₂O concentration; paddy soil; water and carbon managements; straw returning; organic fertilizer; water managements; micro-level technology

大量研究表明,稻田是 N₂O 主要排放源^[1-2],而水碳管理是影响稻田 N₂O 排放的重要因素^[3-4]。一般认为,控制灌溉会促进稻田 N₂O 排放^[5-6],因为控制灌溉稻田频繁的干湿交替导致土壤通气状况的频繁变动,造成了 N₂O 的大量排放^[7-8]。黄国宏等^[9]研究发现,土壤中 N₂O 的产生和排放主要决定于土壤水分含量, N₂O 排放随土壤含水量的增加而增加;侯会静等^[10]研究发现,土壤充水孔隙率为 78.1%~85.3%时,稻田土壤 N₂O 排放通量最大。传统土壤碳管理模式包括施用有机肥和秸秆还田,均能有效提高土壤有机碳含量,但也会引起稻田温室气体排放的变化。关于碳管理对稻田 N₂O 排放的研究结论并不完全一致,Li 等^[11]研究发现,麦秸还田使得稻田 N₂O 排放量减少了 19%~42%,但也有研究表明秸秆还田显著提高了土壤 N₂O 排放量^[12];夏仕明等^[13]研究发现施用有机肥可以显著降低 N₂O 的排放,但李平等^[14]研究表明氮肥配施有机肥较单施化肥能增加稻田 N₂O 的排放量。已有研究大多是将水分与碳管理分开,研究其对稻田 N₂O 排放的影响,关于水碳管理下 N₂O 浓度的研究较少。基于此,本文开展水碳联合调控试验,采用微电极技术,测定稻田土壤 N₂O 浓度分布,分析水碳联合管理对稻田土壤剖面 N₂O 浓度的影响,以期对南方地区稻田温室气体减排与水土资源可持续利用提供科学依据。

1 试验条件与方法

1.1 试验条件

试验区位于河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室昆山试验研究基地(34°63'21"N,121°05'22"E)。试验区属亚热带南部季风气候区,年平均气温 15.5℃,年降水量 1097.1 mm,年蒸发量 1365.9 mm,日照时数 2085.9 h,平均无霜期 234 d。当地习惯稻麦轮作,土壤为潴育型黄泥土,耕层土壤质地为重壤土,0~18 cm 土层土壤有机质质量比为 21.71 g/kg,全氮质量比为 1.79 g/kg,全磷质量比 1.4 g/kg,全钾质量比为 20.86 g/kg, pH 值为 7.4,0~30 cm 土壤密度为 1.32 g/cm³。

1.2 试验方法

试验设置 2 种灌溉方式:常规灌溉(简称常灌),记为 F;控制灌溉(简称控灌),记为 C;2 种肥料管理方式:秸秆还田管理(记为 S)与有机肥管理(记为 M)。试验共设置 4 个处理,分别为 CS(控灌+秸秆还田管理)、CM(控灌+有机肥管理)、FS(常灌+秸秆还田管理)、FM(常灌+有机肥管理),相应各处理下 N₂O 浓度分别记为 c_{CS} 、 c_{CM} 、 c_{FS} 和 c_{FM} ,每个处理设 3 次重复,共设 12 个小区,每个小区面积为 35 m²(5 m×7 m),各小区之间用深入田下 1 m 的 PVC 板相隔,防止小区间水分交换。

试验选用的水稻品种为南粳 46 号,水稻秧苗于 2018 年 6 月 25 日移栽,株距为 13 cm×25 cm,每穴定 3~4 株,10 月 27 日收割,稻田生育期为 125 d。水稻控灌模式在返青期田面保留浅薄水层,之后各生育期实行无水层水分管理,以根层土壤水分作为控制指标^[15];水稻常灌模式除分蘖后期排水晒田和黄熟期自然落干,其余生育期田面保留 3~5 cm 水层。施肥管理根据当地农民的习惯施肥方法和施肥量进行。6 月 19 日基肥施用复合肥 525 kg/hm²(N、P₂O₅、K₂O 的质量分数分别为 16%、12%和 17%)、尿素 225 kg/hm²(N 的质量分数不低于 46.2%);7 月 11 日和 8 月 6 日分别施用分蘖肥和穗肥,均为尿素(N 的质量分数不低于 46.2%),施用量分别为 150 kg/hm²和 120 kg/hm²。秸秆还田管理采用前茬小麦秸秆(有机碳质量比为 441 g/kg),粉碎后还田,还田量为 3 000 kg/hm²;有机肥管理采用石家庄冀田生物科技有限公司供应的腐熟鸡粪(水分质量分数为 23%,氮质量比为 16.3 g/kg,有机碳质量比为 261 g/kg,P₂O₅质量比为 15.4 g/kg,K₂O 质量比为 20.7 g/kg),施用量为 7 500 kg/hm²。秸秆和有机肥投放时间均与基肥施用时间相同,施用之后翻地,使之与耕作层土壤混合均匀。

1.3 观测项目与方法

土壤剖面 N₂O 浓度采用 N₂O-NP 微电极(丹麦,Unisense)进行测定。N₂O 微电极是一种电流型微电极,电流的产生是微电极极端物质的电化学氧化或还原作用所致,并且与待测物质的浓度成一定比例,从而可将物质的浓度转化为电流信号输出,由主机 Microsensor Multimeter 收集,并通过软件 Sensor Trace PRO V.3.1.3 在计算机中自动读取。微电极平台如图 1 所示。

施加分蘖肥、穗肥后第2天、第4天、第6天、第8天采集各小区土样,取样深度为0~20 cm。土样自然风干、粉碎后过2 mm筛,分别装入自封袋备用。微电极试验开始前,称取同处理3份等量土样拌制成土柱,静置一夜后28℃恒温培养7 d(容器为内径3.5 cm、外径4.5 cm、高度6 cm的透明柱状体)。控灌处理将风干土壤水分调节到80%饱和含水率(微电极试验前,分别取各处理自封袋中土样,采用烘干法测定土壤含水率,从而计算拌制80%饱和含水率土柱所需水量);淹灌处理土壤表层保持薄水层。

土壤剖面 N₂O 浓度测定试验设计:取土柱中心剖面进行测定,测30 mm深,步距为1.5 mm,共测22个点,每点停14 s,测8 s。以土壤-空气(溶液)界面为零基准面,向下为正,向上为负。

1.4 数据分析

用Excel 2013 初步分析数据并建立数据库,绘制相关图表。数据方差分析与显著性差异分析用SPSS 22 完成,采用LSD 法作多重比较分析(差异显著性水平为 $p=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 水管理模式对稻田土壤 N₂O 浓度的影响

2.1.1 秸秆还田下稻田土壤 N₂O 浓度对水管理的响应

分析施肥后不同水管理模式下秸秆还田稻田土壤 N₂O 浓度分布(图2和图3)可以发现,施加分蘖肥和穗肥后总体规律一致,施肥后1~6 d内,基本呈现上层土壤(0~1 cm) $c_{CS} < c_{FS}$,而较深层土壤(1~3 cm)则相反;施肥后第8天开始, c_{CS} 均显著大于 c_{FS} ($p < 0.05$)。

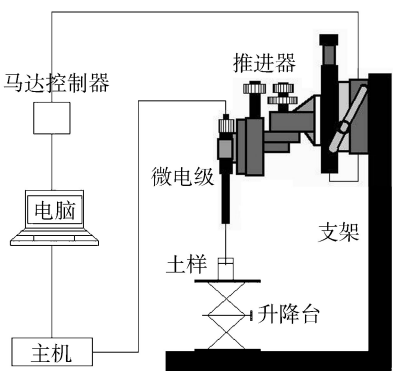


图1 微电极平台
Fig.1 Micro-level platform

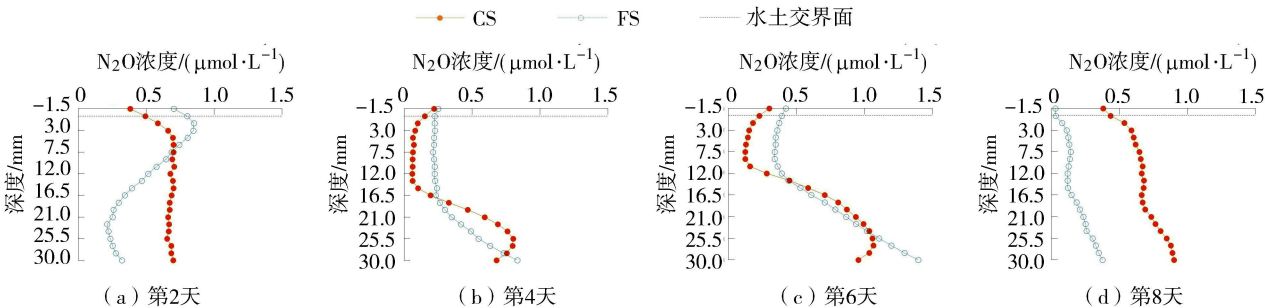


图2 施加分蘖肥后秸秆还田稻田土壤 N₂O 浓度分布

Fig.2 Distribution of N₂O concentration in straw returning paddy soil after tiller fertilizer

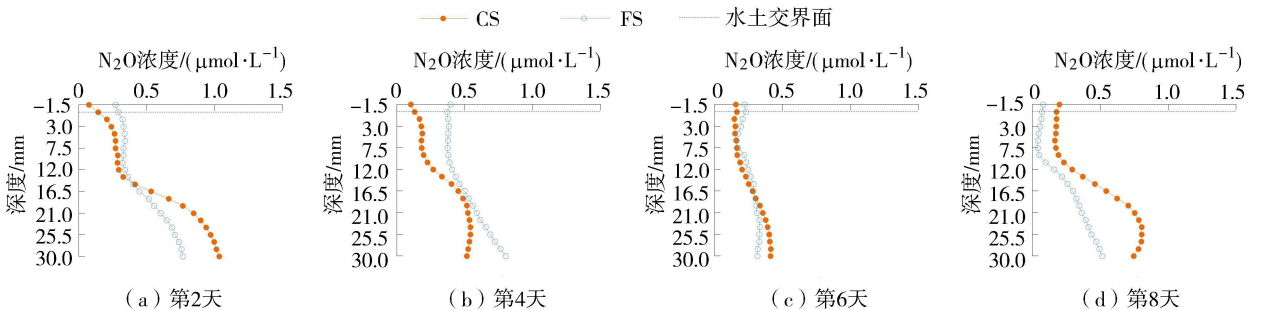


图3 施加穗肥后秸秆还田稻田土壤 N₂O 浓度分布

Fig.3 Distribution of N₂O concentration in straw returning paddy soil after panicle fertilizer

施加分蘖肥后第2天,0~7.5 mm: $c_{CS} < c_{FS}$; 7.50~30 mm: $c_{CS} > c_{FS}$;第4天、第6天, $c_{CS} < c_{FS}$ 变为 $c_{CS} > c_{FS}$ 转折点在深度16.5 mm和13.5 mm处,但 c_{CS} 出现最大值后呈现减小趋势,而 c_{FS} 持续增大,分别在28.5 mm和24.0 mm后出现 $c_{CS} < c_{FS}$;第8天, c_{CS} 均值较 c_{FS} 大286%,差异显著($p < 0.05$)。

施加穗肥后第2天、第6天,转折点分别在深度15.0 mm和18.0 mm处,转折点以上, $c_{CS} < c_{FS}$;转折点以

下, $c_{CS} > c_{FS}$; 第4天, c_{CS} 均值较 c_{FS} 小 44.3%, 差异显著 ($p < 0.05$); 第8天, c_{CS} 均值较 c_{FS} 大 94.1%, 差异显著 ($p < 0.05$)。

2.1.2 有机肥施用下稻田土壤 N₂O 浓度对水分管理的响应

分析施肥后不同水分管理模式下有机肥施用稻田土壤 N₂O 浓度分布(图4和图5)可以发现, 施加分蘖肥和穗肥后总体规律一致, 施肥后第2天, 上层和深层土壤(0~1 cm, 2~3 cm) $c_{CM} < c_{FM}$, 中层土壤(1~2 cm) 则相反; 施肥后第4天、第6天 c_{CM} 均显著小于 c_{FM} ($p < 0.05$); 施肥后第8天开始, c_{CM} 显著大于 c_{FM} ($p < 0.05$)。

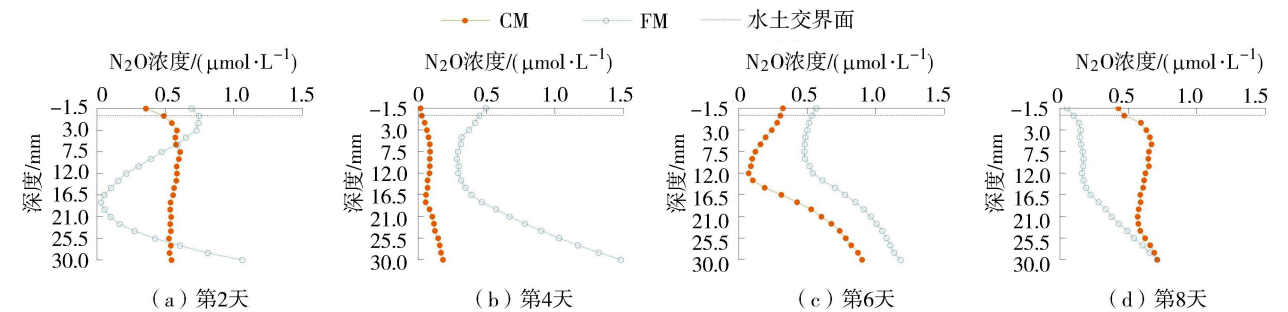


图4 施加分蘖肥后有机肥稻田土壤 N₂O 浓度分布

Fig.4 Distribution of N₂O concentration in organic fertilizer paddy soil after tiller fertilizer

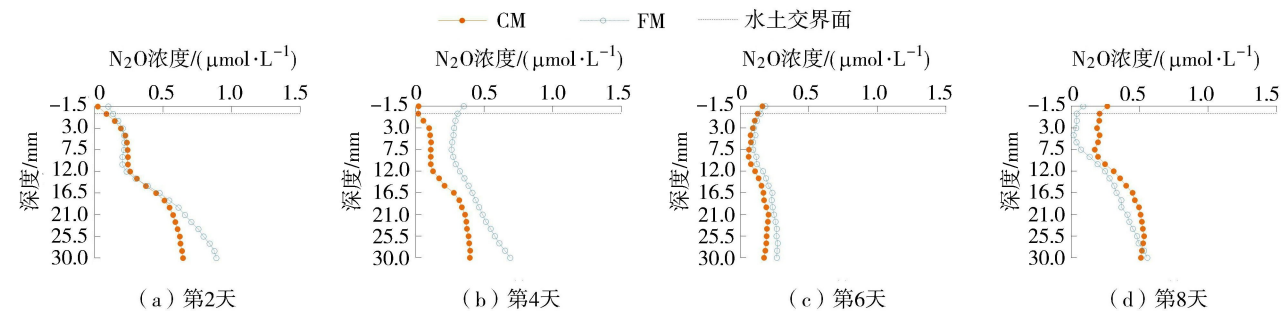


图5 施加穗肥后有机肥稻田土壤 N₂O 浓度分布

Fig.5 Distribution of N₂O concentration in organic fertilizer paddy soil after panicle fertilizer

施加分蘖肥后第2天, 先呈现 $c_{CM} < c_{FM}$, 随深度增大, $c_{CM} > c_{FM}$, 转折点在 6.0 mm 处, 但 c_{FM} 出现最小值后持续增大, 27.0 mm 后出现 $c_{CM} < c_{FM}$; 第4天、第6天, c_{CM} 均值较 c_{FM} 分别小 54.9% 和 86.8%, 差异显著 ($p < 0.05$); 第8天, c_{CM} 均值较 c_{FM} 大 108%, 差异显著 ($p < 0.05$)。

施加穗肥后第2天, 在深度小于 15.0 mm 处 c_{CM} 与 c_{FM} 较接近, 大于 15.0 mm 处, 出现 $c_{CM} < c_{FM}$; 第4天、第6天, c_{CM} 均值较 c_{FM} 分别小 87.0% 和 35.2%, 差异显著 ($p < 0.05$); 第8天, c_{CM} 均值较 c_{FM} 大 35.4%, 差异显著 ($p < 0.05$)。

2.2 碳管理模式对稻田土壤 N₂O 浓度的影响

2.2.1 控制灌溉稻田土壤 N₂O 浓度对不同碳管理的响应

分析施肥后不同碳管理模式下控灌稻田土壤 N₂O 浓度剖面分布(图6和图7)可以发现, 控灌稻田土壤

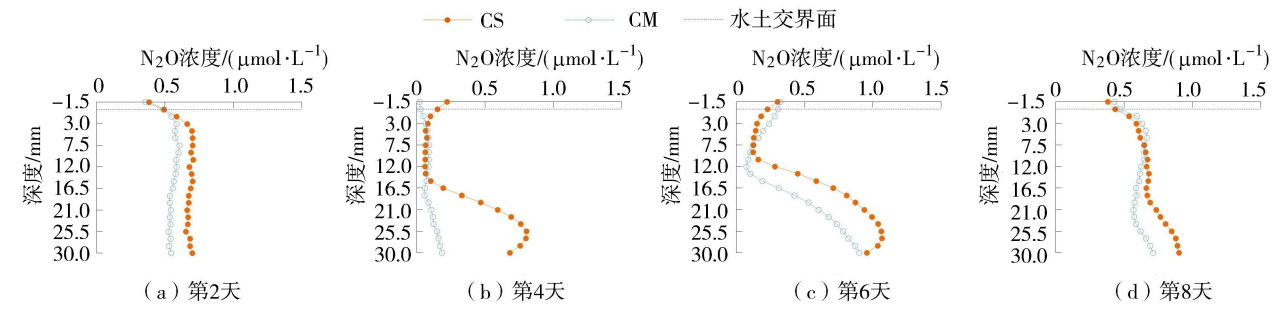


图6 施加分蘖肥后控灌稻田土壤 N₂O 浓度分布

Fig.6 Distribution of N₂O concentration in controlled irrigation paddy soil after tiller fertilizer

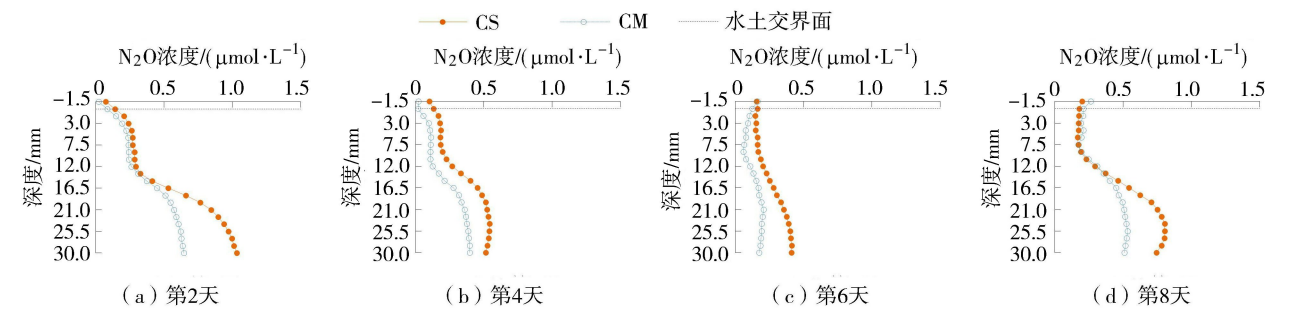


图 7 施加穗肥后控灌稻田土壤 N₂O 浓度分布

Fig. 7 Distribution of N₂O concentration in controlled irrigation paddy soil after panicle fertilizer

浅层(0 ~ 1 cm) 秸秆还田和有机肥施用对 N₂O 浓度无显著影响($p>0.05$),但在较深处(1 ~ 3 cm), c_{CS} 显著大于 c_{CM} ($p<0.05$)。

施加分蘖肥后第 2、4、6、8 天分别在深度 4.5 mm、15.0 mm、12.0 mm、9.0 mm 以上相差不大($p>0.05$),这些点以下, c_{CS} 均值较 c_{CM} 分别大 22.8%、416%、51.6% 和 21.8%,差异显著($p<0.05$),两者在深度 30.0 mm、25.5 mm、16.5 mm、25.5 mm 处相差最大, c_{CS} 较 c_{CM} 分别大 0.156 μmol/L、0.654 μmol/L、0.398 μmol/L 和 0.228 μmol/L。

施加穗肥后第 2、4、6、8 天在深度 15.0 mm 以上 c_{CS} 与 c_{CM} 相差不大($p>0.05$),在 15.0 mm 以下, c_{CS} 均值较 c_{CM} 分别大 49.1%、43.4%、96.8% 和 45.8%,差异显著($p<0.05$),两者在深度 30.0 mm、15.0 mm、30.0 mm 和 24.0 mm 处相差最大, c_{CS} 较 c_{CM} 分别大 0.388 μmol/L、0.190 μmol/L、0.238 μmol/L 和 0.282 μmol/L。

2.2.2 常规灌溉稻田土壤 N₂O 浓度对不同碳管理的响应

分析施肥后不同碳管理模式常灌稻田土壤 N₂O 浓度剖面分布(图 8 和图 9)可以发现,在常灌条件下,施加分蘖肥后, c_{FS} 基本小于 c_{FM} ,这与控灌条件下呈现规律相反;施加穗肥后,秸秆还田和有机肥施用对常灌稻田 N₂O 浓度无显著影响($p>0.05$)。

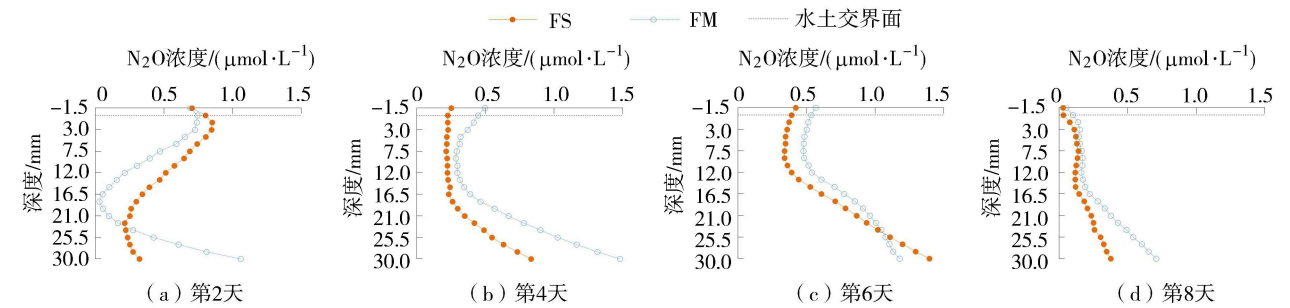


图 8 施加分蘖肥后常灌稻田土壤 N₂O 浓度分布

Fig. 8 Distribution of N₂O concentration in conventional irrigation paddy soil after tiller fertilizer

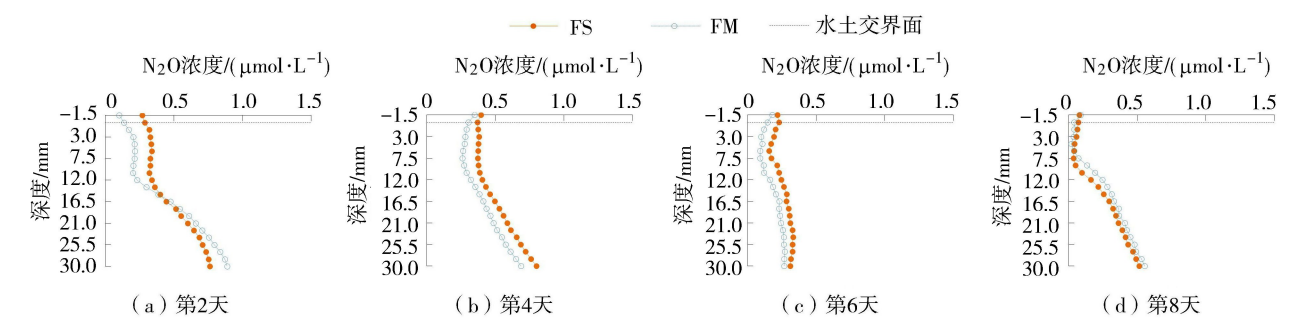


图 9 施加穗肥后常灌稻田土壤 N₂O 浓度分布

Fig. 9 Distribution of N₂O concentration in conventional irrigation paddy soil after panicle fertilizer

施加分蘖肥后,除在第 2 天深度小于 24.0 mm 及第 6 天深度大于 24.0 mm 处 $c_{FS}>c_{FM}$,其余均呈现为 $c_{FS}<c_{FM}$ 。第 2、4、6、8 天分别在深度 30.0 mm、30.0 mm、15.0 mm、30.0 mm 处相差最大, c_{FM} 均值较 c_{FS} 大

0.739 μmol/L、0.646 μmol/L、0.176 μmol/L 和 0.334 μmol/L。

施加穗肥后,在第2天深度小于15.0 mm处及第4天和第6天 $c_{FS}>c_{FM}$;而在第2天深度大于15.0 mm处及第8天 $c_{FS}<c_{FM}$,且各天 c_{FS} 与 c_{FM} 较为接近,无显著差异($p>0.05$)。

2.3 水碳联合管理对稻田土壤 N₂O 浓度均值影响

由表1可知,施加分蘖肥后, c_{CS} 、 c_{CM} 、 c_{FS} 、 c_{FM} 均值分别为 0.555 μmol/L、0.411 μmol/L、0.416 μmol/L 和 0.513 μmol/L, c_{CM} 均值较 c_{CS} 、 c_{FM} 分别小 35.1% 和 24.8%, 差异显著($p<0.05$), c_{CM} 略小于 c_{FS} ($p>0.05$)。施加穗肥后, c_{CS} 、 c_{CM} 、 c_{FS} 、 c_{FM} 均值分别为 0.401 μmol/L、0.275 μmol/L、0.368 μmol/L 和 0.327 μmol/L, c_{CM} 均值较 c_{CS} 、 c_{FS} 、 c_{FM} 分别小 45.5%、33.7% 和 18.8%, 差异显著($p<0.05$)。

不同水碳联合管理模式,施加分蘖肥后,稻田土壤 N₂O 浓度均值 $c_{CS}>c_{FM}>c_{FS}>c_{CM}$;施加穗肥后,稻田土壤 N₂O 浓度均值 $c_{CS}>c_{FS}>c_{FM}>c_{CM}$,控灌模式下秸秆还田 N₂O 浓度最高,控灌模式下施用有机肥 N₂O 浓度最低,常灌下的2种碳管理模式位于两者之间,水碳管理模式对 N₂O 浓度的影响存在交互作用^[16]。

3 讨 论

试验中施肥后1~6 d内,控灌稻田土壤 N₂O 浓度在不同深度多次出现小于常灌稻田,这与已有研究不一致。这是由于施肥后1~6 d内,土壤中 N₂O 的产生更加受氮肥施用的影响,且常灌稻田对肥料的响应更明显,导致出现常灌稻田土壤 N₂O 浓度大于控灌稻田;施肥后第8天开始,控灌稻田土壤不同深度 N₂O 浓度均大于常灌稻田,此时肥料的作用逐渐减小,水分成为影响 N₂O 产生的主导因素。

肥料是影响稻田 N₂O 排放的重要因素^[3-4],本研究发​​现控灌稻田在土壤较深处(1~3 cm), $c_{CS}>c_{CM}$;常规灌溉稻田无明显规律。秦晓波等^[17]研究发现,早稻田施加有机肥 N₂O 排放大于秸秆还田处理,两者差异不显著,而晚稻田秸秆还田处理 N₂O 排放远大于有机肥施用。这与本研究发现存在一定差异,但碳管理对 N₂O 产生的影响本身是一个复杂的问题,受土壤含水量、土壤类型、肥料施用、土壤 C/N 等多种因素的影响,且不同的试验设计,试验条件都会对结论造成影响。

本研究更多的关注 N₂O 浓度分布特征,而已有研究多是关于 N₂O 排放,稻田 N₂O 排放是温度、氧气、反应底物浓度和传输过程交互作用的结果^[18]。浓度一定程度上可以反映排放,但存在一定差异,研究表明常灌稻田 N₂O 排放较低^[5-6],但本研究发现,在施肥后1~6 d内,多次出现常灌稻田 N₂O 浓度大于控灌稻田。这是因为淹水条件导致产生的 N₂O 的扩散受阻,停留在土壤中以至于被进一步还原成 N₂^[19]。因此,N肥的施用是 N₂O 产生的基础,水分是影响 N₂O 排放的主要因素^[20]。

4 结 论

- a. 施肥后1~6 d内,控灌稻田土壤在不同深度出现 N₂O 浓度小于常灌稻田,施肥后第8天开始,控灌稻田土壤不同深度 N₂O 浓度均显著大于常灌稻田($p<0.05$),且2种碳管理模式规律基本一致。
- b. 控灌稻田土壤浅层(0~1 cm),秸秆还田和有机肥施用对 N₂O 浓度无显著影响($p>0.05$),但在较深处(1~3 cm), c_{CS} 显著大于 c_{CM} ($p<0.05$);但两种碳管理模式对常灌稻田 N₂O 浓度的影响无明显规律。
- c. 控灌模式下秸秆还田 N₂O 浓度最高,控灌模式下施用有机肥 N₂O 浓度最低。施加分蘖肥后, c_{CM} 均值较 c_{CS} 、 c_{FM} 分别小 35.1% 和 24.8%, 差异显著($p<0.05$), c_{CM} 略小于 c_{FS} ($p>0.05$);施加穗肥后, c_{CM} 均值较 c_{CS} 、 c_{FS} 、 c_{FM} 分别小 45.5%、33.7% 和 18.8%, 差异显著($p<0.05$)。

参考文献:

[1] USSIRI D, LAL R. Soil emission of nitrous oxide and its mitigation[M]. Netherlands: Springer, 2013.

表1 不同水碳联合管理模式下稻田土壤 N₂O 浓度均值

Table 1 Average N₂O concentration in paddy soil under different water and carbon managements

施肥 时期	N ₂ O 浓度均值/(μmol · L ⁻¹)			
	CS	CM	FS	FM
分蘖肥	0.555±0.025a	0.411±0.015b	0.416±0.018b	0.513±0.019a
穗 肥	0.401±0.015a	0.275±0.002c	0.368±0.010ab	0.327±0.014b

注:平均值±标准误差,同行不同小写字母表示在0.05水平下差异显著。

- [2] 侯会静, 杨雅琴, 韩正砥, 等. 节水灌溉的稻田温室气体排放研究综述[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(16): 19-24. (HOU Huijing, YANG Yaqin, HAN Zhengdi, et al. Greenhouse gas emission in paddy fields under water-saving irrigation: a review[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(16): 19-24. (in Chinese))
- [3] SHAH A, LAMERS M, STRECK T. N₂O and CO₂ emissions from South German arable soil after amendment of manures and composts[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75:427.
- [4] ABBASI N A, MADRAMOOTOO C A, ZHANG Tiequan, et al. Nitrous oxide emissions as affected by fertilizer and water table management under a corn-soybean rotation[J]. Geoderma, 2020, 375:114473.
- [5] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 水分管理影响稻田氧化亚氮排放研究进展[J]. 土壤, 2009, 41(1): 1-7. (LI Xianglan, XU Hua, CAI Zucong. Effect of water management on nitrous oxide emission from rice paddy field: a review[J]. Soils, 2009, 41(1): 1-7. (in Chinese))
- [6] XU Ying, GE Junzhu, TIAN Shaoyang, et al. Effects of water-saving irrigation practices and drought resistant rice variety on greenhouse gas emissions from a no-till paddy in the central lowlands of China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 1043-1052.
- [7] MAZZA G, AGNELLI A E, ORASEN G, et al. Reduction of global warming potential from rice under alternate wetting and drying practice in a sandy soil of northern Italy[J]. Italian Journal of Agrometeorology, 2016, 2(2): 35-44.
- [8] BARUAH A, BARUAH K K, GORH D, et al. Effect of organic residues with varied carbon-nitrogen ratios on grain yield, soil health, and nitrous oxide emission from a rice agroecosystem[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2016, 47(11): 1417-1429.
- [9] 黄国宏, 陈冠雄, 韩冰, 等. 土壤含水量与 N₂O 产生途径研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 53-56. (HUANG Guohong, CHEN Guanxiong, HAN Bing, et al. Relationships between soil water content and N₂O production[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(1): 53-56. (in Chinese))
- [10] 侯会静, 杨士红, 徐俊增, 等. 水稻控制灌溉对稻田 N₂O 排放的影响机理研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(4): 443-448. (HOU Huijing, YANG Shihong, XU Junzeng, et al. Influence mechanism of controlled irrigation on N₂O emissions from paddy fields[J]. Sci Sin Tech, 2015, 45(4): 443-448. (in Chinese))
- [11] LI Xianglan, MA Jing, YAO Yunjun, et al. Methane and nitrous oxide emissions from irrigated lowland rice paddies after wheat straw application and midseason aeration[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2014, 100(1): 65-76.
- [12] 冯珺珩, 黄金凤, 刘天奇, 等. 耕作与秸秆还田方式对稻田 N₂O 排放、水稻氮吸收及产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(8): 1250-1259. (FENG Junheng, HUANG Jinfeng, LIU Tianqi, et al. Effects of tillage and straw returning methods on N₂O emission from paddy fields, nitrogen uptake of rice plant and grain yield [J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(8): 1250-1259. (in Chinese))
- [13] 夏仕明, 陈洁, 蒋玉兰, 等. 稻田 N₂O 排放影响因素与减排研究进展[J]. 中国稻米, 2017, 23(2): 5-9. (XIA Shiming, CHEN Jie, JIANG Yulan, et al. Advances in nitrous oxide emission and its reduction in rice field[J]. China Rice, 2017, 23(2): 5-9. (in Chinese))
- [14] 李平, 郎漫, 李森, 等. 不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2360-2367. (LI Ping, LANG Man, LI Miao, et al. Short-term effects of different fertilization treatments on greenhouse gas emissions from northeast black soil[J]. Environmental Science, 2018, 39(5): 2360-2367. (in Chinese))
- [15] 彭世彰, 徐俊增. 水稻控制灌溉理论与技术[M]. 南京: 河海大学出版社, 2011.
- [16] 王孟雪. 东北寒地稻作水氮互作的温室气体排放特征研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [17] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. 中国农业气象, 2006, 27(4): 273-276. (QIN Xiaobo, LI Yu'e, LIU Keying, et al. Effects of different fertilization treatments on N₂O emission from rice fields in Hunan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2006, 27(4): 273-276. (in Chinese))
- [18] WILLIAMS E J, HUTCHINSON G L, FEHSENFELD F C. NO_x and N₂O Emission from Soil[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1992, 6(4): 351-388.
- [19] 王强盛. 稻田种养结合循环农业温室气体排放的调控与机制[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(5): 633-642. (WANG Qiangsheng. Regulation and mechanism of greenhouse gas emissions of circular agriculture ecosystem of planting and breeding in paddy[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(5): 633-642. (in Chinese))
- [20] 李香兰, 徐华, 曹金留, 等. 水分管理对水稻生长期 N₂O 排放的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6): 703-707. (LI Xianglan, XU Hua, CAO Jinliu, et al. Effect of water management on N₂O emission in rice-growing season[J]. Soils, 2006, 38(6): 703-707. (in Chinese))