

耕作措施对华北地区冬小麦田 N₂O 排放的影响

黄光辉, 张明园, 陈阜, 张海林^{*}

(中国农业大学农学与生物技术学院农业部/农作制度重点开放实验室, 北京 100193)

摘要: 为研究不同耕作措施对冬小麦田 N₂O 排放的影响以及探明 N₂O 排放季节性波动的原因, 该研究选取河北栾城县中国科学院农业生态系统试验站不同耕作处理下冬小麦田为研究对象, 利用静态箱法测定翻耕秸秆还田 (CT)、旋耕秸秆还田 (RT) 和免耕秸秆还田 (NT) 下冬小麦田 N₂O 的排放。结果表明, 耕作初期 72 h 翻耕、旋耕及免耕处理 N₂O 排放总量分别为 3.83、10.27、10.55 mg/m²。秸秆还田条件下, 不同耕作措施冬小麦田 N₂O 季节排放总量为: CT>RT>NT。CT、NT 处理下 N₂O 排放通量与 0~20 cm 各层次土壤温度呈极显著正相关。CT、NT 处理表层 0~5 cm 土壤 N₂O 排放通量与土壤充气孔隙度显著性负相关。NT 处理土壤具有较高的 C/N 比, 可能有利于减少 N₂O 的排放。因此, 华北冬小麦田采用 NT 能有效减少 N₂O 排放。

关键词: 排放控制, 温室气体, 土壤, N₂O, 耕作, 碳氮比, 充水孔隙度, 充气孔隙度

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.02.028

中图分类号: S512.1⁺1, S157.4⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-02-0167-07

黄光辉, 张明园, 陈阜, 等. 耕作措施对华北地区冬小麦田 N₂O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 167-173.
Huang Guanghui, Zhang Mingyuan, Chen Fu, et al. Influences of tillage methods on N₂O emission from winter wheat field in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 167-173. (in Chinese with English abstract)

0 引言

气候变暖使温室气体减排成为研究和关注的焦点。氧化亚氮 (N₂O) 作为大气中主要的温室气体之一, 其体积分数已由 1750 年的 270×10⁻⁹ 上升到 2005 年的 319×10⁻⁹, 相比工业化前提高了 18%^[1]。而农业土壤作为 N₂O 的重要排放源之一, 其排放的 N₂O 约占人类活动所排放的 60%^[2]。当前中国对 N₂O 排放的研究较多, 但大部分集中在土壤质地、施肥、温度、pH 值、水分等对 N₂O 排放的影响^[3-6], 关于不同耕作措施对 N₂O 排放的影响, 目前研究依然较少, 同时缺乏耕作措施对 N₂O 排放通量、土壤水分、土壤温度及土壤物理结构变化影响的综合分析^[7-8]。

免耕因其减少燃料消耗、降低生产成本及减少土壤侵蚀等优点而得到广泛推广^[9-10]。免耕条件下 N₂O 排放一直是研究热点, 却始终存在争议。Six 等^[11]认为免耕初期土壤 N₂O 释放量高于翻耕; 而 Ussiri 等^[12]研究得出, 长期免耕相比凿式犁耕作和铧式犁耕作, 能显著减少 N₂O 的排放。本研究基于不同耕作措施 6 a 定位试验的基础上, 对华北冬小麦田土壤 N₂O 的排放及土壤温度和水分变化进行了连续监测, 综合分析了土壤温度、土壤充水孔隙度、土壤充气孔隙度等影响 N₂O 排放的因素, 以对不同

耕作措施下华北冬小麦田 N₂O 排放情况做出进一步的评价, 旨在为减少华北冬小麦田温室气体排放选择合理的耕作方式提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验点概况

试验于 2001 年在河北省石家庄市中国科学院栾城生态试验站进行, 该站海拔高度 50.1 m, 年平均气温 12.2℃, 年均降水量 480.7 mm, 属于暖温带半湿润季风气候, 代表太行山前平原小麦-玉米一年两熟农业区。试验地土壤类型为潮褐土, 耕层土壤质地为粉壤土, 土壤理化性质^[13]如表 1。

表 1 冬小麦田土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties of winter wheat field

土层/ cm	全氮 质量分数/ %	碱解氮 质量分数/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 质量分数/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 质量分数/ (mg·kg ⁻¹)	有机质 质量分数/ %
0~10	0.074	37.95	115	62.90	1.28
10~20	0.064	30.58	90	39.62	1.24
20~30	0.045	27.99	65	23.32	0.99

试验设 3 个处理, 每个处理 3 次重复, 重复的面积为 0.1 hm²。各处理田间作业: 1) 翻耕 (CT): 玉米收获后, 秸秆粉碎全量还田, 撒施化肥, 旋耕机旋耕一遍 (耕深 8 cm, 粉碎秸秆和破除根茬), 机械翻耕一遍 (耕深约 18 cm), 耧平整后, 播种小麦。2) 旋耕 (RT): 玉米收获后, 秸秆粉碎全量还田, 撒施化肥, 旋耕机旋耕两遍 (耕深 8 cm, 粉碎秸秆和破除根茬), 播种小麦。3) 免耕 (NT): 玉米收获后, 玉米秸秆直立分布于农田中, 采用免耕播种机一次性完成秸秆粉碎、施肥、播种及镇压作业。各耕作处理小麦、玉米秸秆均采用全量还田, 翻耕、旋耕

收稿日期: 2010-04-11 修订日期: 2010-09-16

基金项目: 国家“十一五”支撑计划项目 (2006BAD15B01, 2007BAD89B08); 公益性行业 (农业) 科研专项 (200803028, 200903003)

作者简介: 黄光辉 (1987-), 男, 安徽省池州市人, 主要从事土壤耕作与农田生态研究。北京 中国农业大学农学与生物技术学院, 100193。

Email: jerryhgh1987@126.com

*通信作者: 张海林 (1973-), 男, 内蒙古牙克石市人, 副教授, 博士, 主要从事土壤耕作与农田生态研究。北京 中国农业大学农学与生物技术学院, 100193。Email: hailin@cau.edu.cn

和免耕小麦秸秆年还田量分别约为 10 900、9 100 和 7 700 kg/hm²；各处理玉米秸秆年还田量约为 13 700 kg/hm²。

各处理使用同一冬小麦品种并采用相同的肥水管理措施。冬小麦品种为科农 9204。冬小麦施基肥为磷酸二铵、尿素，施肥量分别为 450、150 kg/hm²，冬小麦在拔节期时追肥一次，施用尿素 300 kg/hm²。分别在冬小麦越冬前、返青期、拔节期和抽穗期采用喷灌浇水，每次灌水 600 m³/hm²。本试验于 2006 年 10 月 5 日粉碎玉米秸秆，整地播种，并完成气体采集与土壤理化指标的测定。试验期间每日平均气温和降水量变化如图 1。

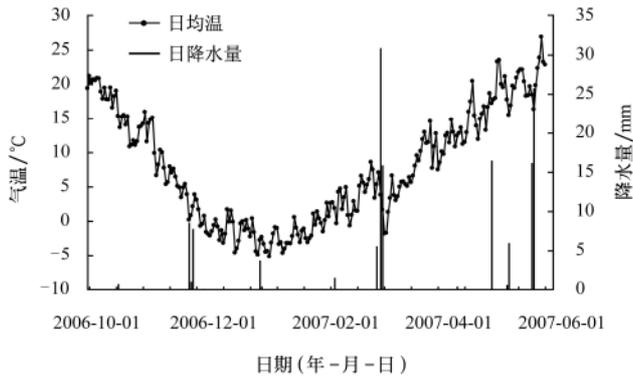


图 1 冬小麦生育期降水量与日平均温度

Fig.1 Precipitation and daily mean air temperature in winter wheat growth stage

1.2 气体采集与分析

采用静态箱-气相色谱法测定冬小麦田 N₂O 排放通量。采样箱用有机玻璃制成，横截面积为 30 cm×30 cm，高 60 cm。采样箱底座埋入土中 5 cm 并固定于作物行间。采样时，将采样箱垂直罩在底座上并加水密封，防止箱内与大气之间发生气体交换。采样时打开箱内顶部风扇，保证箱内气体均匀混和，在盖箱瞬间及之后的 10、20 和 30 min 使用 50 mL 注射器从箱内抽取气体。

为观测耕作初期 N₂O 排放通量变化特征，在耕作后 72 h 内，每隔 2 h 测定一次。整个冬小麦生育期，除播种后 55~155 d 内每 20 d 测定 1 次，其他时间每隔 10 d 测定 1 次，每次测定均在 9:00-10:00 完成。

气体测定使用 HP6890N 型色谱仪，测定温度为 200℃，柱型为 Porpak Q 柱，柱温 70℃。排放通量由箱中气体浓度随时间的变化率计算得出，通量计算方程^[14]为

$$F = \frac{h \times M_w \times T_{st}}{M_v \times (T_{st} + T)} \cdot \frac{dc}{dt}$$

式中， F 为排放通量，mg/(m²·h)； dc/dt 为箱内痕量气体随时间的变化率，10⁻⁹ min⁻¹； h 为采样箱高，m； M_w 为痕量气体的摩尔质量，g/mol； T_{st} 为标准状态下的温度，273.2℃； M_v 为痕量气体的摩尔体积，L/mol； T 为测定时的土壤温度，℃。

1.3 土壤理化指标测定与计算方法

土壤温度：在气样采集的同时，采用铜-康铜热电偶分别在地面下 2.5、5、10 和 20 cm 处测定土壤温度，每隔 10 min 测定 1 次，30 min 进行平均，使用数据采集仪

自动记录^[15]。

土壤质量含水率：在气样采集的同时，采用烘干法分别测定 0~5、5~10 和 10~20 cm 土层的土壤质量含水率。以下指标测定土壤深度均与此相同。

土壤有机碳含量：采用重铬酸钾氧化外加热法^[16]。

土壤全氮含量：采用半微量凯式定氮法^[16]。

土壤体积质量：在测定气体排放的同时采用环刀法测定土壤体积质量。

土壤体积含水率=土壤质量含水率×土壤体积质量。

土壤充水孔隙度 (WFPS) = 土壤体积含水率/总孔隙度^[5]，单位：%。

土壤充气孔隙度=土壤总孔隙度-体积含水率^[17]，单位：%。

1.3 数据分析

采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件进行试验数据分析。采用 LSD 方法对试验数据进行方差分析和显著性测验。作图采用 SigmaPlot 11.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施下 N₂O 排放特征

2.1.1 耕作初期 N₂O 排放特征

秸秆还田条件下，不同耕作方式农田土壤 N₂O 在耕作初期具有相同的排放规律，均呈脉冲型排放。耕作 16 h 后出现排放高峰，排放峰值表现为 NT>RT>CT (图 2)，但处理之间差异不显著。在耕作 24 h 后，翻耕、旋耕及免耕 N₂O 排放总量分别为 7.14、10.09 和 10.86 mg/m²。在耕作 72 h 后，翻耕 N₂O 排放变化较大，而旋耕和免耕变化较小，3 种耕作方式累积排放量分别为翻耕 3.83 mg/m²，旋耕 10.27 mg/m²，免耕 10.55 mg/m²，其中，翻耕与旋耕、免耕处理间差异达到 5% 显著水平。

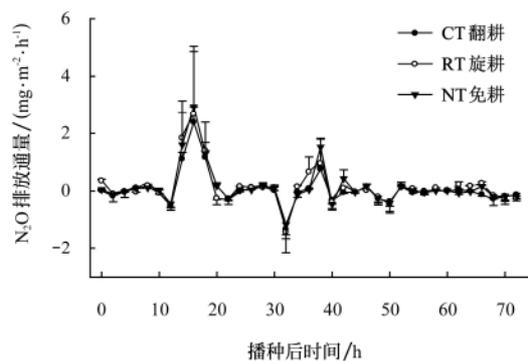


图 2 耕作初期不同耕作措施下 N₂O 排放规律

Fig.2 Temporal variability of N₂O fluxes with different tillage methods shortly after tillage

耕作措施会扰动土壤结构，改变土壤孔隙状况。不同耕作方式对土壤扰动层次不同 (表 2)。翻耕的深度在 18 cm 左右，旋耕为 8 cm 左右，而免耕仅在表层 0~5 cm 范围内有少量的机械扰动。耕作后，翻耕土壤 0~20 cm 总孔隙度增大；旋耕土壤 0~10 cm 总孔隙度增加；但免耕由于在播种时对土壤的扰动作用，深度为 5 cm，因此，0~5 cm 土壤总孔隙度有所增加。耕作初期 N₂O 排放出

现免耕较高、翻耕较低的情况，分析可能是由于翻耕处理将肥料部分翻埋入深层土壤，而免耕处理下肥料大部分施用在表层 0~5 cm 土壤，表层丰富的秸秆和肥料为土壤微生物提供了丰富的 C、N 源，同时表层 0~5 cm 土壤总孔隙由于机械扰动而增大（表 2），形成有利于 N₂O 排放与扩散的土壤通气状况，造成免耕处理下 N₂O 排放较高。

表 2 耕作前后不同耕层土壤总孔隙度的变化

Table 2 Changes of soil total porosity of different layers before and after tillage

处理	耕作前土层/cm			耕作后土层/cm		
	0~5	5~10	10~20	0~5	5~10	10~20
翻耕CT	0.46a	0.44a	0.42a	0.62a	0.55a	0.55a
旋耕RT	0.51a	0.47a	0.41a	0.60ab	0.52a	0.39b
免耕NT	0.48a	0.43a	0.41a	0.55b	0.45b	0.42b

注：a, b, c, d 代表 LSD ($P < 0.05$) 水平差异显著性，CT—翻耕；RT—旋耕；NT—免耕，下同。

2.1.2 冬小麦生育期 N₂O 排放特征

冬小麦生育期内，不同耕作措施 N₂O 排放呈现相同的变化趋势（图 3）。除越冬期（播种后 45~165 d）外，均是大气 N₂O 排放的源，翻耕、旋耕和免耕冬小麦田 N₂O 呈现脉冲型排放。在冬小麦播种期和拔节期前的施肥，造成 N₂O 的排放增加，其中以拔节期翻耕处理 N₂O 峰值最高，为 0.27 mg/(m²·h)。冬小麦生育期 N₂O 排放总量以旋耕最高、翻耕次之、免耕最低，分别为 134.47、113.65 和 69.51 mg/m²，其中翻耕、旋耕与免耕处理间差异达到 5% 显著水平，这可能与翻耕、旋耕下土壤较为疏松，并且旋耕下施肥主要分布在表土层有关。同时，降水和灌溉对 N₂O 排放有一定的影响。在降水和灌溉之后，各处理 N₂O 排放均呈增加趋势。

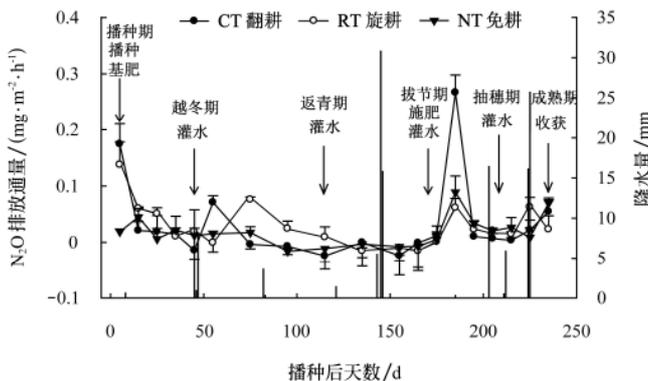


图 3 不同耕作措施下冬小麦生育期 N₂O 排放通量与降雨量
Fig.3 Precipitation and N₂O emission of winter wheat field with different tillage methods in the wheat growing season

2.2 冬小麦田 N₂O 排放的土壤理化因素

2.2.1 农田土壤温度变化

不同耕作处理 0~20 cm 土层平均温度表现出相似的变化趋势，即先下降后上升（图 4）。在播种后 75~135 d，土壤温度低于 0℃。翻耕、旋耕处理土壤温度在冬小麦播种后 95 d 达到最低，而免耕处理土壤温度在播种后 115 d

达到最低。在土壤温度低于 0℃ 时，各处理土壤 N₂O 排放通量均表现为负排放。播种 155 d 之后，随着土壤温度回升，各处理土壤 N₂O 排放通量由负排放转为正排放。这可能主要是由于过低的温度降低了微生物的活性，并抑制了 N₂O 产生过程，随着温度升高，微生物代谢活动增强，导致 N₂O 排放的增加。

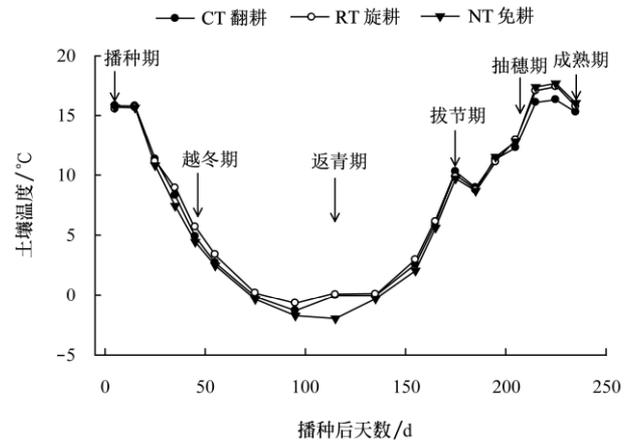


图 4 不同耕作措施下冬小麦田 (0~20 cm) 土壤平均温度变化特征

Fig.4 Dynamics of average soil temperature with different tillage methods in the layer(0-20 cm) of winter wheat field

通过剔除肥料施用引起的 2 个 N₂O 脉冲释放峰值，对不同耕作措施冬小麦田 N₂O 排放与地温的相关分析表明（表 3），翻耕与免耕处理下 N₂O 排放通量与各层次地温呈现极显著正相关关系，而旋耕处理与 2.5 cm 和 5 cm 地温亦达到极显著正相关关系。从不同层次土壤温度与各处理 N₂O 排放的线性模拟可以看出，翻耕条件下土壤 N₂O 排放与地温的相关程度最高。翻耕、免耕处理下农田 N₂O 排放通量在 20 cm 的地温模拟要好于 2.5、5 和 10 cm 的模拟值，而旋耕条件下农田 N₂O 排放通量与 2.5 cm 地温模拟值最好。

表 3 不同耕作措施下冬小麦田 N₂O 排放通量与各土层地温相关性分析及模拟

Table 3 Correlation analysis and simulation equations between N₂O emission fluxes and soil temperature in different soil depths under different tillage of winter wheat field

土层/cm	处理	相关系数	线性方程	决定系数 R ²
2.5	翻耕 CT	0.750**	y = 0.0017x - 0.0098	0.5626
	旋耕 RT	0.698**	y = 0.0028x - 0.0075	0.4876
	免耕 NT	0.673**	y = 0.0019x + 0.0004	0.4530
5	翻耕 CT	0.733**	y = 0.0022x - 0.0115	0.5366
	旋耕 RT	0.620*	y = 0.0023x - 0.0020	0.3843
	免耕 NT	0.631**	y = 0.0018x - 0.0005	0.3980
10	翻耕 CT	0.742**	y = 0.0023x - 0.0126	0.5500
	旋耕 RT	0.651**	y = 0.0025x - 0.0048	0.4235
	免耕 NT	0.678**	y = 0.0022x - 0.0031	0.4597
20	翻耕 CT	0.752**	y = 0.0024x - 0.0154	0.5655
	旋耕 RT	0.622*	y = 0.0025x - 0.0058	0.3865
	免耕 NT	0.691**	y = 0.0024x - 0.0068	0.4772

注：采样数 n=17, *p<0.05, **p<0.01.

2.2.2 土壤充气孔隙度

秸秆还田条件下, 翻耕、旋耕和免耕冬小麦田土壤充气孔隙度(WFPS)呈现相同的季节性变化, 不同处理WFPS表现为 $NT > RT > CT$, 且各处理间差异均达到5%显著水平(图5)。整个冬小麦生育期内, N_2O 排放随灌溉、降水引起的WFPS变化而起伏。冬小麦播种后115 d内, 各耕作处理 N_2O 排放通量随WFPS增加而减少。而从播种后175 d开始, N_2O 的排放与WFPS的变化表现出相近的趋势。

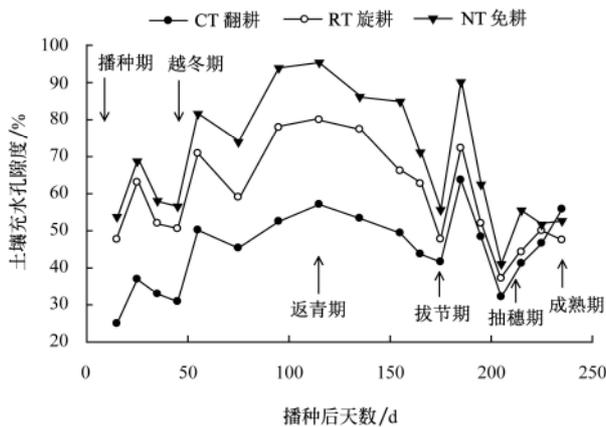


图5 不同耕作措施下冬小麦田(0~20 cm)土壤充气孔隙度变化特征

Fig.5 Dynamics of water filled porosity space under different tillage methods in the layer(0~20 cm) of winter wheat field

在 N_2O 排放通量达到最高的时期, CT、RT 和 NT 的WFPS 分别为: 63.66%、72.26%及 90.13%。通过各处理WFPS 与土壤 N_2O 排放通量比较, 冬小麦播种后115 d内, 各处理WFPS 与 N_2O 排放通量呈负相关, 但只有NT 达到显著水平, 相关系数为-0.798; 在冬小麦播种后115 d到收获期内, 各处理WFPS 与 N_2O 排放通量在5%水平上呈显著正相关, CT、RT 及 NT 相关系数分别表现为0.797、0.822 和 0.894。二者的相关分析结果表明, WFPS 变化较为剧烈时, 更有利于土壤 N_2O 的排放。

2.2.3 土壤充气孔隙度

土壤孔隙分布状况是影响反硝化速率的主要因素^[18], 而充气孔隙度对反硝化反应的速率有很大的影响^[19]。在剔除施肥引起的2个 N_2O 脉冲释放峰值的基础上, 通过比较可以看出, 各耕作处理表层0~5 cm 土壤充气孔隙度与 N_2O 排放均表现为负相关, 这与表层土壤较为疏松, 大孔隙分布较多有关(表4)。表层土壤通气状况较好, 有利于 O_2 和 N_2O 的扩散, 且表层土壤含水量较低, N_2O 主要是通过硝化作用产生。随着充气孔隙度增大, 则可能因为硝化作用的彻底反应而减少 N_2O 的产生。因此, 翻耕0~20 cm、旋耕0~5 cm 及免耕0~5 cm 土壤充气孔隙度与 N_2O 排放呈负相关, 这与不同耕作措施对土壤的扰动程度不同有很大关系。其中, 由于翻耕深度在18 cm 左右, 翻耕在0~5 cm、5~10 cm 相关分析达到显著水平, 而免耕在0~5 cm 达到极显著负相关。在5~20 cm, 相关性分析显示, NT 与 RT 表现为正相关,

特别是NT 处理, 达到极显著正相关, 这可能是因为在5~10 cm、10~20 cm, RT、NT 土壤充气孔隙度较小, 土壤中主要分布小孔隙且孔隙由于没有受到机械扰动而表现出良好的连续性, 有利于反硝化作用的彻底反应。

表4 不同耕作措施下 N_2O 排放通量与各层次充气孔隙度的相关分析

Table 4 Correlation analysis of N_2O emission fluxes and soil air-filled porosity under different tillage layers

处理	土壤耕层/cm		
	0~5	5~10	10~20
翻耕 CT	-0.785**	-0.696*	-0.452
旋耕 RT	-0.210	0.585	0.498
免耕 NT	-0.661**	0.644**	0.657**

注: 采样数 $n=17$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

2.2.4 土壤 C/N 比

秸秆还田条件下, 不同耕作方式土壤 C/N 比差异在0~5 cm、5~10 cm 达到5%显著水平, 而在10~20 cm, CT 与 NT 差异不显著(表5)。不同处理各层次土壤 C/N 比分布在12 到18 的范围内, 总体表现为 $CT < RT < NT$ 。相对于翻耕和旋耕, 免耕土壤固碳能力更强^[20]。从年均秸秆还田总量来看, 免耕低于翻耕和旋耕, 但免耕条件下土壤 C/N 比却显著高于翻耕、旋耕, 这可能是由于翻耕、旋耕下土壤有机碳分解较快, 同时, 翻耕、旋耕处理通过机械作用将更多的氮肥翻埋进深层的土壤, 减少了氮肥的分解损失。而微生物对土壤中 C、N 的利用有一定的比例范围, 如果 C/N 比值变大, 则引起微生物对 N 源的争夺利用, N 素利用就比较充分, 从而减少了硝化反硝化过程的中间产物 N_2O 的生成。Toma Y 等研究认为, N_2O 排放与 C/N 比显著相关, N_2O 累积排放量随着 C/N 比的降低而增加^[21]。

表5 不同耕作措施下各层次土壤 C/N 比

Table 5 C:N ratio of different soil layers under different tillage methods

处理	土壤耕层/cm		
	0~5	5~10	10~20
翻耕 CT	13.58c	13.89c	14.43a
旋耕 RT	14.91b	16.89b	12.76b
免耕 NT	15.71a	17.74a	14.46a

3 讨论

3.1 不同耕作措施下 N_2O 排放特征

农田土壤 N_2O 排放受到土壤含水率、土壤碳氮含量、土壤通气状况等各种因素的影响, 并通过微生物参与的硝化-反硝化作用而生成。耕作初期 N_2O 排放特征显示, NT 和 RT 土壤 N_2O 排放显著高于 CT, 这与 NT 和 RT 施肥较浅有很大的关系。秸秆粉碎后为微生物提供了丰富的碳源, 而机械扰动增大了表层土壤总孔隙度, 有利于 O_2 的扩散, 同时该时期的土壤湿度和温度均有利于 N_2O 的产生和释放。翻耕处理则将肥料部分翻入土壤深层,

隔绝了空气, 且深层土壤微生物含量较少, 不利于 N₂O 的形成。

冬小麦生育期 N₂O 排放特征表明, 在华北冬小麦田采用秸秆还田免耕技术措施, 可以有效降低土壤 N₂O 排放, 这与 Six 和 Elmi 研究结果相同。Six 等^[11]研究认为免耕土壤 N₂O 释放在初期会高于常规耕作, 但随时间推移会逐渐减少。而 Elmi 等^[22]研究结果指出, 免耕相对于常规耕作, N₂O 排放量相近, 甚至显著 ($p \leq 0.05$) 低于常规耕作。

冬小麦田土壤水分状况主要受到降雨和灌水的影响, 而土壤含水率影响土壤中 O₂ 浓度的变化, 调节 N₂O 的生成、扩散及消耗。土壤含水率对 N₂O 产生及排放的影响主要是通过影响土壤通气状况, 并进一步影响到 O₂ 的消耗和土壤中 N₂O 从产生部位向大气中的扩散。一般情况下, N₂O 排放随土壤含水率的变化而变化, 土壤含水率增加, N₂O 排放增大。因为降雨后, 水分充满土壤孔隙, 加大了厌氧环境并使反硝化作用加强, N₂O 也随之大量产生并排放出土壤^[5]。降雨和灌溉可以促进土壤 N₂O 的排放, 可能是因为旱地土壤的间歇性灌溉或降水, 促进反硝化作用的进行, 因而增加了土壤 N₂O 的排放。郑循华等^[5]研究认为, 降雨引起的麦田 N₂O 排放峰值一般出现在降雨过程结束后的第 2 天, 以后逐渐降低到降雨前的水平, 这与本文的研究结果较为一致。

3.2 土壤理化特性与 N₂O 排放

土壤温度对微生物的代谢活动有重要影响, 并通过影响其硝化和反硝化反应速率来影响 N₂O 的排放^[23]。本试验得出, 不同耕作处理各层次土壤温度与 N₂O 排放通量的相关性并不相同, 翻耕秸秆还田下土壤温度与 N₂O 排放通量相关性最好, 这可能是因为翻耕土壤孔隙度较高, 土壤含水率适宜, 有助于硝化和反硝化反应的发生。谢军飞等^[24]研究认为, 冬小麦 N₂O 排放通量随着土壤温度的升高在不同程度上有一定的增加; 亦有研究表明, N₂O 排在土壤含水率适宜的一定温度范围内, N₂O 排放通量与温度呈正相关^[25], 这与本文的研究相符。

本文研究得出, 免耕土壤充气孔隙度显著高于翻耕和旋耕土壤。免耕相对于常规耕作, 更有利于保持土壤水分^[26]。据郑循华等^[5]报道, 在稻田系统 WFPS 在 84%~86% 时, N₂O 排放最强; 也有研究指出, 免耕 WFPS > 70% 时, 可以通过彻底的反硝化反应形成 N₂, 从而免耕土壤为 N₂O 的汇^[27]。本研究中 N₂O 排放最高时期, CT、RT 和 NT 土壤充气孔隙度分别为 63.66%、72.26% 及 90.13%, 整个生育期 NT 处理 N₂O 排放通量最低, 可能与反硝化反应程度有关。

土壤充气孔隙度对 N₂O 的产生和扩散都有很重要的影响。本试验将不同耕作措施土壤充气孔隙度与土壤 N₂O 排放进行相关性分析, 秸秆还田条件下, CT、RT 和 NT 表层 0~5 cm 土壤充气孔隙度与 N₂O 排放通量呈负相关, 其中, CT、NT 呈极显著负相关。有研究认为, 充气孔隙度影响气体扩散率, 通过土壤含水率影响土壤充气孔隙度, 最终影响 N₂O 的排放, N₂O 排放速率与土壤充气孔隙度呈显著负相关^[28], 这与本文研究结果相近。而 NT

处理 5~20 cm 土壤充气孔隙度与 N₂O 排放呈极显著正相关, 这可能与不同层次土壤孔隙大小分布不同, 以及 NT 深层土壤孔隙连续性较好有关。Wollersheim 等^[19]指出, 随着土壤充气孔隙度的降低, 反硝化作用增强, 这可能影响 NT 深层土壤反硝化作用的反应程度。

本试验中 NT 处理具有较高的 C/N 比, 这可能有利于减少 N₂O 的排放。Nishina 等^[29]认为, 土壤 C/N 比通过控制 N 矿化速率来调节 N₂O 的排放, 其研究结果显示土壤 C/N 比与 N₂O 排放呈显著负相关, 不管是硝化还是反硝化过程, C/N 比对 N₂O 的排放都具有负面影响。本研究的各耕作处理土壤 C/N 比分布在 12 到 18 之间, 黄耀等^[30]研究认为, 在土壤 C/N 比小于 20 时, C/N 越低, N₂O 的排放越高; 土壤 C/N 越接近 20, N₂O 的排放则应越低, 这与本文研究结果一致, 即 C/N 越低, N₂O 排放越高。不过, 本研究仅为连续 5 年的耕作试验, 对于 NT 的长期效应仍需要进一步研究。

4 结 论

1) 耕作初期 72 h 翻耕、旋耕及免耕处理 N₂O 排放总量为: 翻耕 < 旋耕 < 免耕。不同耕作措施对土壤总孔隙度的影响不同, 从而影响 N₂O 的生成与排放。耕作初期 N₂O 排放特征表明, 免耕处理下施肥较浅, 增加了 N₂O 的排放。

2) 秸秆还田条件下, 除越冬期 (播种后 45~165 d) 外, 翻耕、旋耕和免耕均是大气 N₂O 排放源。冬小麦生育期 N₂O 排放特征表明, 秸秆还田条件下, 免耕有助于减少 N₂O 排放。降雨和灌溉对于 N₂O 的产生具有促进作用。

3) 秸秆还田条件下, 土壤充气孔隙度对 N₂O 排放有一定的影响, 通过相关性分析, 在冬小麦播种后 175 d 内, NT 处理下土壤充气孔隙度与 N₂O 排放通量在 1% 水平上达到极显著负相关, 而在冬小麦播种后 175 d 到收获期内, 各处理下土壤充气孔隙度与 N₂O 排放通量在 5% 水平上达到显著正相关。各处理不同层次土壤温度与 N₂O 的排放呈显著正相关。各处理土壤表层 0~5 cm 充气孔隙度与 N₂O 排放呈负相关, 其中 CT 处理 0~10 cm 和 NT 处理 0~5 cm 层次土壤充气孔隙度与 N₂O 排放显著负相关, 而 NT 处理 5~20 cm 土壤充气孔隙度与 N₂O 排放呈极显著正相关。NT 处理提高了土壤 C/N 比, 可能有利于减少 N₂O 的排放。

[参 考 文 献]

- [1] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radioactive forcing[M]//Climate change 2007: The physical science basis, contribution of working group I to the Fourth assessment report of panel on climate change Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.
- [2] IPCC. Agriculture[M]//Climate Change 2007: Mitigation of climate change, contribution of Working Group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press. Cambridge,

- United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.
- [3] 王风, 白丽静, 张克强, 等. 粒径对冻融过程中加氮灌溉土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 69—73.
Wang Feng, Bai Lijing, Zhang Keqiang, et al. Effects of particle sizes on the N_2O emission of soil irrigated with nitrogen in freezing and thawing process[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 69—73. (in Chinese with English abstract)
- [4] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 143—148.
Qin Xiaobo, Li Yu'e, Liu Keying, et al. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(7): 143—148. (in Chinese with English abstract)
- [5] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N_2O 产生与排放的影响[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3): 273—279.
Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi, et al. Impact of soil humidity on N_2O production and emission from a rice-wheat rotation ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(3): 273—279. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 552—556.
Jiang Jingyan, Huang Yao, Zong Lianggang. Influence of water controlling and straw application on CH_4 and N_2O emission from rice field[J]. China Academy of Sciences, 2003, 23(5): 552—556. (in Chinese with English abstract)
- [7] 赵建波, 迟淑筠, 宁堂原, 等. 保护性耕作条件下小麦田 N_2O 排放及影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 196—200.
Zhao Jianbo, Chi Shujun, Ning Tangyuan, et al. Study of N_2O emission and its affecting factors in wheat fields of conservation tillage[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(3): 196—200. (in Chinese with English abstract)
- [8] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 等. 冬季耕作制度对农田氧化亚氮排放的贡献[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 49—52.
Xiong Zhengqin, Xing Guangxi, Tsuruta H, et al. Nitrous oxide emissions from agricultural soils as affected by winter cropping system[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2002, 25(4): 49—52. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 北美保护性耕作及对中国的意义[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 335—340.
Yang Xueming, Zhang Xiaoping, Fang Huajun, et al. Conservation tillage systems in North America and their significance for China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(2): 335—340. (in Chinese with English abstract)
- [10] 秦红灵, 高旺盛, 马月存, 等. 免耕条件下农田休闲期直立作物残茬对土壤风蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 66—71.
Qin Hongling, Gao Wangsheng, Ma Yuecun, et al. Effect of standing crop stubble on soil erosion by wind under no-tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 66—71. (in Chinese with English abstract)
- [11] Six J, Ogle S M, Breidt F J, et al. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term[J]. Global Change Biology, 2004, 10(2): 155—160.
- [12] Ussiri D A N, Lal R, Jarecki M K. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(2): 247—255.
- [13] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作措施对华北农田 CO_2 排放影响及水热关系分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 47—53.
Zhang Yu, Zhang Hailin, Chen Jikang, et al. Effects of different tillage practices on CO_2 emission fluxes from farmland in North China Plain and the analysis of soil temperature and moisture[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 47—53. (in Chinese with English abstract)
- [14] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1998, 15(4): 569—579.
- [15] Ren T, Larney F J, McGinn S M, et al. Soil temperature regimes as influenced by rotation, tillage and row spacing for winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(5): 52—60.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 107—108, 147—148.
- [17] Jabro J D, Sainju U, Stevens W B, et al. Carbon dioxide flux as affected by tillage and irrigation in soil converted from perennial forages to annual crops[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(4): 1478—1484.
- [18] Parry S, Renault P, Chenu C, et al. Denitrification in pasture and cropped soil clods as affected by pore space structure[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(4): 493—501.
- [19] Wollersheim R, Trolldenier G, Beringer H. Effect of bulk density and soil water tension on denitrification in the rhizosphere of spring wheat (*Triticum vulgare*)[J]. Biology and Fertility of Soils, 1987, 5(3): 181—187.
- [20] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. Geoderma, 2004, 123(1/2): 1—22.
- [21] Toma Y, Hatano R. Effect of crop residue C:N ratio on N_2O emissions from gray lowland soil in Mikasa, Hokkaido, Japan[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(2): 198—205.
- [22] Elmi A, Mehdi B, Madramootoo C, et al. Long-term effect of conventional and no-tillage production systems on nitrous oxide fluxes from corn field in Southwestern Quebec[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2009, 5(3): 238—246.
- [23] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5): 1—5.

- Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi, et al. Impact of soil temperature on field N₂O production and emission[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(5): 1–5. (in Chinese with English abstract)
- [24] 谢军飞, 李玉娥. 土壤温度对北京旱地农田 N₂O 排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2005, 26(1): 7–10.
Xie Junfei, Li Yu'e. Effect of Soil Temperature on N₂O emission in upland farm of Beijing[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, 26(1): 7–10. (in Chinese with English abstract)
- [25] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 CH₄ 和 N₂O 排放[J]. *大气科学*, 1997, 21(2): 231–237.
Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi, et al. CH₄ and N₂O emissions from rice paddy fields in southeast China[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1997, 21(2): 231–237. (in Chinese with English abstract)
- [26] López M V, Arrúe J L, Sánchez-Girón V. A comparison between seasonal changes in soil water storage and penetration resistance under conventional and conservation tillage systems in Aragon[J]. *Soil and Tillage Research*, 1996, 37(4): 251–271.
- [27] Elmi A A, Madramootoo C, Hamel C, et al. Denitrification and nitrous oxide to nitrous oxide plus dinitrogen ratios in the soil profile under three tillage systems[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38(6): 340–348.
- [28] McTaggart I P, Akiyama H, Tsuruta H, et al. Influence of soil physical properties, fertiliser type and moisture tension on N₂O and NO emissions from nearly saturated Japanese upland soils[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3): 207–217.
- [29] Nishina K, Takenaka C, Ishizuka S. Relationship between N₂O and NO emission potentials and soil properties in Japanese forest soils[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(1): 203–214.
- [30] 黄耀, 焦燕, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对麦田 N₂O 排放影响的研究[J]. *环境科学学报*, 2002, 22(5): 598–602.
Huang Yao, Jiao Yan, Zong Lianggang, et al. N₂O emission from wheat cultivated soils as influenced by soil physicochemical properties[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(5): 598–602. (in Chinese with English abstract)

Influences of tillage methods on N₂O emission from winter wheat field in North China Plain

Huang Guanghui, Zhang Mingyuan, Chen Fu, Zhang Hailin^{*}

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University; Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, Beijing 100193, China)

Abstract: To determine the effects of tillage practice on N₂O emission from winter wheat field and the cause of seasonal emission variation in the emission, a field experiment was carried out at Luancheng Agroecosystem Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, in Hebei province. The experimental design consisted of conventional tillage (CT), rotary tillage (RT) and no tillage (NT) treatments. The N₂O emissions were measured in the winter wheat growing season with the static close chamber method. The results showed that, during 72 hours after seeding, the N₂O cumulative emission of CT, RT and NT were 3.83, 10.27 and 10.55 mg/m², respectively. Under the condition of straw returning, the seasonal cumulative N₂O emission of winter wheat field demonstrated as CT>RT>NT. The N₂O emission significantly positively correlated with soil temperature at 0–20 cm soil layer under CT and NT treatment, while negative correlation was found between the N₂O emission and soil air-filled porosity at 0–5 cm soil layer. With a higher C/N ratio in soil treatment, NT was more likely to reduce the emission of N₂O. Generally, NT would be a better choice to reduce the N₂O emission effectively in the Northeast Plain.

Key words: emission control, greenhouse gases, soils, N₂O, tillage, C/N ratio, water-filled porosity space, air-filled porosity