

耕层土壤 N_2O 排放与温度及土壤深度依变性

白红英¹, 张一平², 孙 华¹, 张清雨¹, 张善红¹

(1 西北大学 城市与资源学系, 陕西 西安 710127; 2 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】揭示耕层不同深度土壤 N_2O 的排放机制, 为农田土壤 N_2O 减排和预测提供科学依据。【方法】利用室内模拟试验, 研究了西北地区冬小麦孕穗期、开花期和成熟期原状土壤, 在相应田间水热条件下(温度: 15, 20, 25 $^{\circ}\text{C}$; 含水率: 14.50%, 18.70%), 不同深度(5, 10, 15, 20 cm)耕层土壤 N_2O 的排放特征。【结果】土壤 N_2O 平均排放通量与土样 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ (底物)含量有关, 孕穗期(15 $^{\circ}\text{C}$)土样, 因其 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量较高(10.09 mg/kg), 故 N_2O 平均排放通量亦较大。在一定土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量范围(3.18~4.12 mg/kg), 不同深度土样的 N_2O 平均排放通量与水热条件关系密切。孕穗期(15 $^{\circ}\text{C}$), 较深土样 N_2O 平均排放通量明显下降, 其 N_2O 平均排放通量表观滞留率显著增加, 含水率较高土样表现更为突出; 随着温度的升高(20, 25 $^{\circ}\text{C}$), 较深土样 N_2O 平均排放通量明显升高, 含水率较高土样增加明显, 不同深度土样 N_2O 平均排放通量几乎呈线性增加, 其 N_2O 平均排放通量表观滞留率明显减少。在孕穗期(15 $^{\circ}\text{C}$)水肥较充足的条件下, 耕层土样 N_2O 排放主要来自 5~15 cm 土层; 随温度升高, 较深土样对 N_2O 排放的贡献则更为突出。【结论】全球气候变暖将促使较深层次土壤中的 N_2O 逸出地面, 排入大气。

【关键词】 N_2O 排放通量; 温度依变性; 土壤深度; 表观滞留率

【中图分类号】 S153

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)11-0201-06

Temperature and depth's dependences on N_2O emission in the cultivated layer soil

BAI Hong-ying¹, ZHANG Yi-ping², SUN Hua¹, ZHANG Qing-yu¹, ZHANG Shan-hong¹

(1 Department of Urban and Resource Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China;

2 College of Resources and Environment Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The research studied the mechanism of soil N_2O emission at different depths to offer scientific bases for reducing farmland N_2O discharge flux. 【Method】 Soil samples from a wheat field were analyzed to study the characteristics of soil N_2O emission under the filed hydrothermal conditions in a lab (temperature: 15, 20, 25 $^{\circ}\text{C}$, soil moisture: 14.50%, 18.70%, soil depths: 5, 10, 15, 20 cm). 【Result】 The average soil N_2O flux was closely related to soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content. Due to the higher $\text{NO}_3^- - \text{N}$ (10.09 mg/kg), soil N_2O flux at the booting stage maintained a high level even at a lower temperature (15 $^{\circ}\text{C}$). When soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content was in a certain range (3.18—4.12 mg/kg), soil hydro-thermal conditions would control soil N_2O emission at different depths. When soil temperature was low at 15 $^{\circ}\text{C}$, soil N_2O flux in the deeper layer decreased obviously, and retention rate increased significantly, especially for the soils with high moisture. N_2O flux from deeper soil increased obviously as soil temperature increased, N_2O flux from different depths increased linearly and retention rate decreased significantly. At booting stage (15 $^{\circ}\text{C}$) with a good soil moisture and fertility, soil N_2O flux was mainly from 5—15 cm layers. More N_2O was released from

* [收稿日期] 2009-08-31

[基金项目] 国家科技基础性工作专项重点项目(2007FY110800); 教育部科技重点项目(209123); 陕西省自然科学基金资助项目(2006D05)

[作者简介] 白红英(1962—), 女, 陕西凤翔人, 教授, 博士, 主要从事土壤环境化学和全球变化生态学研究。

E-mail: hongyingbai@163.com

deeper soil as soil temperature increased. 【Conclusion】 Global warming increases N_2O emission from deeper soil.

Key word: N_2O flux; soil temperature dependence variability; soil depth; apparent retention rate

全球变暖已成为不争的事实,已引起了国际社会的广泛关注。 N_2O 作为重要的温室气体之一,在大气中寿命长达 114 年^[1];另外,其还参与大气中许多光化学反应,破坏大气臭氧层^[2-4]。根据政府间气候变化专业委员会(IPCC)第 4 次评估报告,大气中 N_2O 浓度已从工业化前约 270 uL/m^3 增加到 2005 年的 319 uL/m^3 ^[1]。农田生态系统是重要的 N_2O 排放源,每年农业土壤排放的 $\text{N}_2\text{O-N}$ 约为 $3.3 (0.6 \sim 14.8) \text{ Tg}$,占人类活动排放总量的 46% ^[5]。

目前,关于农田生态系统中土壤 N_2O 排放及其影响因子的研究较多^[6-12],对土壤不同层次 N_2O 浓度的测定结果表明,不同土层中 N_2O 浓度为 $60 \sim 150 \text{ cm} > 30 \text{ cm} > 10 \text{ cm}$,深层土壤 N_2O 的主要来源是土壤的反硝化作用^[13]。但土壤中产生的 N_2O 并不能全部逸出地面,由于土壤吸收、阻滞、反硝化作用等的影响,只有少量 N_2O 排放进入大气,而耕层土壤受农事活动、施肥等因素的影响,已成为 N_2O 排放的主要场所^[6-10],其不同深度的水热条件、作物根系活性、微生物状态、土壤性状等均有差异,必然会对土壤 N_2O 的生成、排放产生影响。探明不同深度耕层土壤 N_2O 产生、运移等排放机制,有助于对农田土壤 N_2O 排放进行针对性的调控,但目前尚缺乏这方面的研究。本试验以西北地区冬小麦不同生育期土壤为研究对象,借助室内模拟试验,观测了相应田间水热条件下,不同深度耕层原状土壤 N_2O 排放的特征,旨在揭示不同小麦生长期、不同深度土壤 N_2O 的排放机制,为农田生态系统 N_2O 排放的预测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

土样来源于西北农林科技大学农作一站常规耕作的冬小麦田,播种时,以含 N 46% 的尿素为氮源,磷肥为含 P_2O_5 12% 的普通过磷酸钙,将氮肥(N, 225 kg/hm^2)和磷肥(P_5O_2 , 150 kg/hm^2)作基肥,一次施入耕层,混合均匀。于每年 10 月中旬播种小麦,次年 06-03 左右收获。整个生育期不进行人为灌水。于小麦播种后次年 4 月至 6 月初,分别采集小麦生长旺盛期(孕穗期、开花期和成熟期)耕层原状土壤。

1.2 试验设计

室内培养试验设温度、水分、土层深度(对应的是培养土柱高)3 个因子:温度设 3 个水平,分别为小麦孕穗期、开花期和成熟期对应的田间平均温度,分别为 $15, 20, 25 \text{ }^\circ\text{C}$;水分设 2 个水平,分别为试验区田间最大持水量的 $65\% (W_1)$ 和 $85\% (W_2)$,相应土壤含水率分别为 14.50% 和 18.70% ;为观测不同深度土壤产生 N_2O 逸出土表的比例,并保持土壤上下层的连续性,特设计培养土柱高为 $5, 10, 15$ 和 20 cm 4 个水平;共计 24 个处理,每处理重复 3 次。

1.3 试验方法

于小麦孕穗期、开花期和成熟期,用直径 7 cm ,长度为采集土样深度的一组特制不锈钢环刀,取 $0 \sim 5, 0 \sim 10, 0 \sim 15$ 和 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 原状土壤 3 组,将原状土壤湿度调节至设计的 2 个含水率后,与环刀一起置于密封的玻璃容器内,环刀上部开放,下端用带微孔的盖子盖好,内有双层滤纸,密闭玻璃容器,置于对应田间平均温度($15, 20, 25 \text{ }^\circ\text{C}$)的培养箱中培养。培养后,每隔 24 h 用 2 mL 注射器取样 1 次,用于 N_2O 释放量的测定,每次取样之后,打开容器口 30 min 左右以平衡容器内气压,重新密闭培养,重复上述试验直至培养后 10 d 。 N_2O 测定及 N_2O 排放通量的计算均采用文献[10]的方法。

2 结果与分析

2.1 小麦不同生育期不同深度土样 N_2O 的排放特征

表 1 为 2 种水分条件下,小麦不同生育期不同深度土样的 N_2O 排放通量。图 1~3 分别为小麦孕穗期、开花期和成熟期土样 N_2O 平均排放通量随土样深度的变化情况。从表 1 可以看出,在 2 种水分条件下,小麦孕穗期土样 N_2O 排放通量均最高,成熟期次之,开花期最小。

2.1.1 孕穗期 由图 1 可知,在小麦孕穗期,培养温度为 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,在 2 种水分条件下,不同深度土样 N_2O 排放特征具有差异。当土壤含水率为 14.50% 时,各深度土样间虽然土壤质量不同,但其 N_2O 排放通量差异不显著($P=0.089 > 0.05$),表明土壤中产生的 N_2O 并未全部逸出土表; $0 \sim 5 \text{ cm}$ 土样因土层薄,土壤质量小, N_2O 平均排放通量最低,而其他 3 个土柱 N_2O 平均排放通量表现为 $0 \sim 10 \text{ cm} > 0 \sim$

15 cm>0~20 cm,与土样深度变化呈相反的顺序,放通量贡献率较大。
这表明在此条件下,5~10 cm 土层土壤对 N₂O 排

表 1 小麦不同生育期不同深度土样的 N₂O 排放通量
Table 1 N₂O flux from different depths at different growth stages μg/(m²·h)

培养 温度/℃ Temperature	土壤 含水率/% Moisture	土样 深度/cm Soil depth	采样时间/d Time					
			1	2	3	4	7	10
15 (孕穗期 Booting stage)	14.50	0~5	1.20	3.60	8.80	4.32	3.16	2.16
		0~10	7.50	10.93	28.20	18.39	13.32	3.08
		0~15	9.00	13.90	20.86	11.29	12.37	10.37
		0~20	4.10	24.88	19.80	6.26	8.55	1.56
	18.70	0~5	12.10	27.50	16.10	11.85	6.85	2.06
		0~10	12.70	65.10	62.60	48.25	74.57	9.99
		0~15	16.30	44.87	97.60	98.67	148.96	15.11
		0~20	7.40	7.56	10.60	18.76	27.38	8.48
20 (开花期 Blooming stage)	14.50	0~5	1.60	1.78	2.04	1.28	0.94	-0.32
		0~10	2.94	2.35	2.11	2.41	1.56	-0.21
		0~15	2.57	3.24	4.84	4.52	4.22	1.10
		0~20	2.34	4.93	10.10	8.89	6.94	2.27
	18.70	0~5	2.36	2.92	2.36	1.37	0.96	0.02
		0~10	4.94	6.11	2.11	2.43	1.04	0.63
		0~15	2.56	6.72	4.84	3.19	3.62	1.42
		0~20	6.27	7.55	10.10	2.57	2.24	0.98
25 (成熟期 Maturing stage)	14.50	0~5	0.28	1.27	1.53	1.38	2.31	0.24
		0~10	1.50	1.92	1.80	1.47	1.90	0.11
		0~15	2.31	2.50	3.72	4.90	5.54	2.18
		0~20	4.64	7.24	8.15	11.08	9.51	8.16
	18.70	0~5	0.50	1.91	1.77	3.90	5.60	0.47
		0~10	15.10	3.62	3.84	4.97	3.72	0.19
		0~15	13.28	3.75	4.28	12.40	13.84	5.95
		0~20	20.81	9.47	12.14	15.17	12.89	12.48

由图 1 还可知,当土壤含水率为 18.70%时,各深度土样间 N₂O 平均排放通量差异显著($P=0.010\ 3$),各土柱 N₂O 平均排放通量表现为 0~15 cm>0~10 cm>0~20 cm>0~5 cm,0~20 cm 土

样 N₂O 平均排放通量仍较小,这表明在较低温度(15℃)、水肥较充足的条件下,耕层土壤排放的 N₂O 主要来自 5~15 cm 土层,这与田间研究结果一致^[14]。

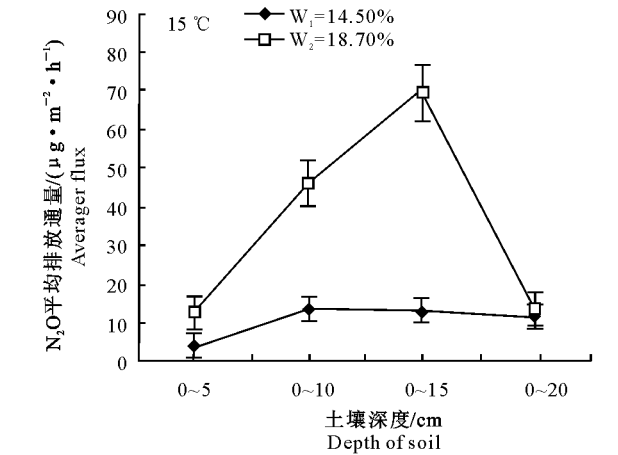


图 1 小麦孕穗期土样 N₂O 排放通量随土层深度的变化
Fig. 1 N₂O average flux with soil depth at booting stage

2.1.2 开花期和成熟期 研究发现,拔节期一开花期是小麦营养吸收率增长最快的时期,至开花期氮

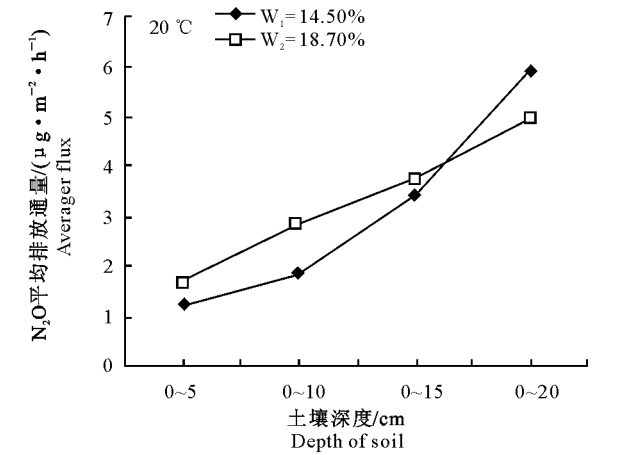


图 2 小麦开花期土样 N₂O 排放通量随土层深度的变化
Fig. 2 N₂O average flux with soil depth at blooming stage

吸收量已达总吸收量的 71.97%^[15],此时土壤中的速效氮急剧减少,反应底物 NO₃⁻-N 不足,引起土壤

N₂O 排放通量减少。小麦开花期和成熟期土样培养温度分别为 20 和 25 ℃,与孕穗期土样(土壤 NO₃-N 含量为 10.09 mg/kg)相比,其土壤 NO₃-N 含量均较低,分别为 4.12 和 3.18 mg/kg。由图 2、图 3 及表 1 可知,无论是随着土样深度的增加还是培养时间的延长,小麦开花期和成熟期土样 N₂O 排放通量变化幅度均较小,即在黄土性土壤中,当速效态氮含量差异较大时,反应底物 NO₃⁻-N 含量成为 N₂O 排放的决定因素。小麦开花后,一方面小麦对氮仍有少量吸收,但吸收量减少;另一方面随着温度的升高,微生物活性增强,土壤-大气界面气体交换动力增加,有利于 N₂O 的生成和逸出^[16-17]。因此,与小麦开花期土样相比,小麦成熟期土样 N₂O 排放明显增多,表明在反应底物含量相近的情况下,温度决定着土壤 N₂O 的排放量(表 1)。

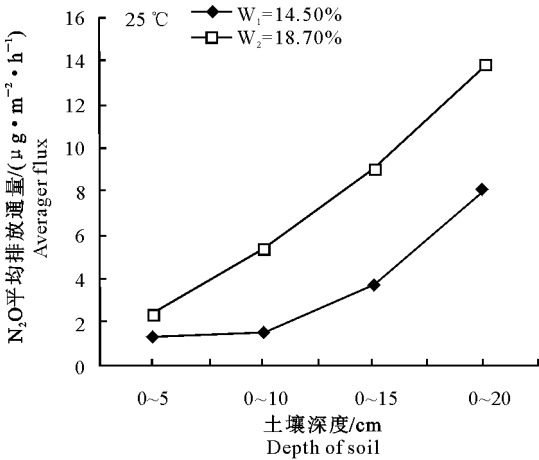


图 3 小麦成熟期土样 N₂O 排放通量随土层深度的变化
Fig. 3 N₂O average flux with soil depth at maturing stage

2.2 不同土壤水分条件下土样 N₂O 排放的温度、深度依变性

在 2 种水分条件下,小麦开花期和成熟期土样 N₂O 平均排放通量,均随土样深度的增加而增大;且相同水分条件下,当温度从 20 ℃升高至 25 ℃时,随着土样深度的增加,土样 N₂O 平均排放通量增幅更为明显,并未出现如孕穗期土壤 N₂O 排放通量减少的反常现象(图 2 和图 3)。因此本研究认为,20 ℃为供试土壤较深土样 N₂O 排放递增的转折温度,而 15~20 ℃为供试土壤较深土样 N₂O 由排放滞留到排放递增的过渡温区。

2.2.1 土壤含水率为 14.50% 当土壤含水率为 14.50%时,小麦开花期和成熟期不同深度土样 N₂O 平均排放通量差异极显著($P<0.01$ 和 $P<0.001$),且以上 2 个小麦生育期土样 N₂O 平均排放

通量($\bar{Y}$)与土样深度(h)间皆呈显著的指数函数关系。

小麦开花期土样: $\bar{Y}=0.684e^{0.534h}(r=0.998)$,
$$\frac{d\bar{Y}}{dh}=0.534\bar{Y}.$$
 (1)

小麦成熟期土样: $\bar{Y}=0.493e^{0.671h}(r=0.974)$,
$$\frac{d\bar{Y}}{dh}=0.671\bar{Y}.$$
 (2)

由式(1)和式(2)可见,小麦开花期和成熟期土壤中,单位深度土样 N₂O 平均排放通量($d\bar{Y}/dh$)均为 $\bar{Y}$ 的函数,且随 $\bar{Y}$ 值的增大而增加,在一定 $\bar{Y}$ 值下, $d\bar{Y}/dh$ 为定值,与土样深度无关。这是由于在小麦开花期和成熟期,土样培养时温度已达硝化及反硝化作用较适宜的温度,而其土样含水率为供试土壤田间持水量的 65% ($W_1=14.50\%$),具有利于 N₂O 排放的土壤孔隙空间和通道,因而产生的 N₂O 量与排出的 N₂O 量比较协调,故 $d\bar{Y}/dh$ 与土样深度无关,而仅取决于土样本身排放的 $\bar{Y}$ 值,即土柱产生的 N₂O 量越多,排放的 N₂O 也越多。比较小麦开花期和成熟期单位深度土样 N₂O 平均排放量的“深度系数”($d\bar{Y}/dh$ 与 $\bar{Y}$ 的比值),成熟期土样(0.671)>开花期土样(0.534),这与成熟期土样培养温度较高(25 ℃)有关,较高温度导致了硝化和反硝化作用及 N₂O 热扩散性的增强。

2.2.2 土壤含水率为 18.70% 土壤含水率为 18.70%时,小麦开花期各深度土样 N₂O 平均排放通量差异不显著($P=0.1347$),而小麦成熟期各深度土样 N₂O 平均排放通量差异极显著($P=0.0007$),以上 2 个小麦生育期土壤 N₂O 平均排放量与土样深度的拟合方程为:

小麦开花期土样:
$$\bar{Y}=1.510+2.258 \ln h(r=0.980),$$
$$\frac{d\bar{Y}}{dh}=2.258/h.$$
 (3)

小麦成熟期土样:
$$\bar{Y}=-1.935+3.808h(r=0.993),$$
$$\frac{d\bar{Y}}{dh}=3.808.$$
 (4)

与土壤含水率为 14.50%时相比,土壤含水率为 18.70%时,N₂O 在土体中排放逸出的空间和通道减少,对 N₂O 的滞留作用增强。小麦开花期土样培养温度为 20 ℃,N₂O 的产出量及热扩散性较成熟期(25 ℃)降低,尚不能完全抵消随土样深度增加而增大的对 N₂O 排放阻滞作用,因而其单位深度土样 N₂O 平均排放通量($d\bar{Y}/dh$)仍与土样深度有关,

且与其呈反比,即随着土样深度的增加 $d\bar{Y}/dh$ 减少。小麦成熟期土样培养温度达 25 ℃,N₂O 的产出量和热扩散性已显著增强,能抵消随土样深度增加而增大的对 N₂O 排放阻滞作用,因而其单位深度 N₂O 平均排放通量($d\bar{Y}/dh$)与土样深度无关,且在不同土样深度下均为定值(3.808)。

3 讨 论

本研究中,小麦孕穗期较深土样(0~20 cm) N₂O 平均排放通量低于 0~15 cm 土柱,按常理随着土柱的升高土壤质量也随之增加,其 N₂O 排放量也应高于或至少等于 0~15 cm 土柱,这一反常现象不但出现在 2 种水分条件下,而且表现在整个培养过程中,表明在密闭培养环境下这种现象真实存在。出现这一现象的主要原因可能是,较深土样中 N₂O 产生后,其释放所经途径相对较长,受阻滞作用增大所致。当土壤温度较低时(15 ℃),N₂O 热扩散性又较差,因而显著影响 N₂O 的快速排放,在密闭的培养环境中,导致 N₂O 在土体中滞留,被土壤进一步吸收或直接还原为 N₂,特别是当土壤中底物充足,生物活性较强时,这种强还原性会显现出来,假如这个试验土样上方余留的空间足够大,甚至接近开放空间,深层土样的 N₂O 滞留现象不明显。与低温(15 ℃)处理相比,培养温度较高(20,25 ℃)处

理相同深度土样并未出现这种现象,从而证实了此判断的合理性。

为了从数量上更明确地表征土样深度对 N₂O 排放阻滞作用的大小,本研究对表观滞留率参数进行了计算。由于 0~5 cm 土层薄,N₂O 易于向大气扩散,可视为对 N₂O 扩散基本无阻滞作用和滞留现象,因此 3 个小麦生育期(对应 15,20,25 ℃ 3 种温度)土样,均以相应生育期 0~5 cm 土样作为计算其他深度土样 N₂O 排放滞留率的基础。首先求出不同处理 0~5 cm 土样单位干土 N₂O 平均排放通量 $y_{5\text{ cm}}[(\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}))/\text{g}]$ 和各深度土样干土质量 $G(\text{g})$,则各深度土样 N₂O 平均排放通量理论值 $\bar{Y}_{\text{理}} = y_{5\text{ cm}} \times G$,被土体滞留的 N₂O 平均排放通量 $\bar{Y}_{\text{滞}} = \bar{Y}_{\text{理}} - \bar{Y}_{\text{测}}$,N₂O 平均排放通量滞留率 $\bar{Y}_{\text{率}}(\%) = \bar{Y}_{\text{滞}} / \bar{Y}_{\text{理}} \times 100\%$ 。

由于本计算是以 0~5 cm 土样为基础,加之不同深度土样作物根系残留物、微生物状况以及土壤结构和容重等均有差异,因此所得 N₂O 平均排放通量滞留率是诸多因素综合影响的总体表现,故将其称之为土样 N₂O 平均排放通量表观滞留率。由表 2 可见,随着土样深度的增加,除小麦成熟期土壤含水率为 14.50%土样外,其他处理土样的 N₂O 平均排放通量表观滞留率均增大,这与实际情况相符。

表 2 小麦不同生育期不同深度土样的 N₂O 平均排放通量表观滞留率
Table 2 Apparent retention rate of average N₂O flux from different depths at different growth stages %

土样深度/cm Soil depth	孕穗期(15 ℃) 含水率/% Booting stage		开花期(20 ℃) 含水率/% Blooming stage		成熟期(25 ℃) 含水率/% Maturing stage	
	14.50	18.70	14.50	18.70	14.50	18.70
0~10	1.08	10.44	62.53	57.41	68.42	44.74
0~15	62.98	38.67	70.03	75.63	66.71	57.94
0~20	82.56	93.44	70.63	81.80	56.62	63.20

由表 2 还可知,2 种水分条件下,0~20 cm 土样 N₂O 平均排放通量表观滞留率均随温度的升高而降低,表明温度对较深土样 N₂O 热扩散有明显影响。在开花期(20 ℃)和成熟期(25 ℃)2 种水分条件下,0~10 和 0~15 cm 土样 N₂O 平均排放通量表观滞留率也基本上随着温度的升高而降低。在小麦孕穗期(15 ℃),0~10,0~15 cm 土样 N₂O 平均排放通量表观滞留率数据均偏低。因为当土壤含水率为 14.50%和 18.70%时,小麦孕穗期土样 N₂O 排放通量比开花期和成熟期土样相应深度分别高 3.7~9.4 倍及 7.8~18.9 倍,必然导致其滞留率降低。

以上结果表明,温度不仅决定着土壤 N₂O 的产

生量,而且还决定了其逸出土壤的能量大小,只有当 N₂O 分子达到一定能级时,才能克服能障迅速排出土表,即较深土壤 N₂O 排放存在温度依变性。在密闭环境中,深层土壤中 N₂O 的滞留现象明显,但实际上农田是一个高度开放的生态系统,一旦温度适宜,土壤中的 N₂O 分子在获得一定能量后会源源不断地逸出地面,进入大气。全球气候变暖将促使更深层次土壤中产生的温室气体排放,导致温室效应进一步加剧。

4 结 论

(1)土壤 N₂O 平均排放通量大小与土样 NO₃⁻-N 底物含量有关,虽然孕穗期土样培养温度较低(15

℃),但由于土样 NO_3^- -N 含量较高,故 N_2O 平均排放通量较大。在一定土壤 NO_3^- -N 底物含量范围(3.18~4.12 mg/kg),不同深度土样 N_2O 平均排放通量大小则与水热条件关系更为密切。

(2)在小麦孕穗期(15℃),较深土样 N_2O 平均排放通量明显下降,其 N_2O 平均排放通量表观滞留率显著增加,特别是含水率较高土样表现更为明显。至小麦开花期和成熟期,随着温度的升高,较深土样 N_2O 平均排放通量明显升高,随着土壤质量的增加,不同深度土样 N_2O 平均排放通量几乎呈线性增加, N_2O 平均排放通量表观滞留率明显减少。

(3)在低温(15℃)、水肥充足的条件下,耕层土样 N_2O 排放主要来自 5~15 cm 土层,而当土壤含水率为 14.50%和较高 NO_3^- -N 条件下, N_2O 排放贡献率以 5~10 cm 土层最大;随着温度升高,较深土样对 N_2O 排放的贡献更为突出。全球气候变暖将促使较深层次土壤中的 N_2O 逸出地面,排入大气。

【参考文献】

- [1] IPCC. Climate changes 2007: the scientific basis [M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007
- [2] Delgado J A, Mosier A R. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux [J]. J Environ Qual, 1999, 25(6): 1105-1111.
- [3] Chang C, Cho C M, Janzen H H. Nitrous oxide emission from long-term manured soils [J]. Soil Sci Soc Am J, 1998, 62: 677-682.
- [4] IPCC. Radiative forcing of climate changes [M]. Geneva: WMO/UNEP, 1994.
- [5] Velthof G L, Kuikman P J, Oenema O. Nitrous oxide emission from soils amended with residues [J]. Nutr Cyc Agroecosyst, 2002, 62: 249-261.
- [6] 蔡祖聪. 尿素和 KNO_3 对水稻土无机氮转化过程和产物的影响——无机氮转化过程 [J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 239-245.
Cai Z C. Effects of urea and KNO_3 on processes and products of inorganic nitrogen transformation in paddy soils I: Processes of inorganic nitrogen [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 239-245. (in Chinese)
- [7] 徐 华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和质地对稻田 N_2O 排放的影响 [J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 499-505.
Xu H, Xing G X, Cai Z C, et al. Effect of soil water regime and soil texture on N_2O emissions from rice paddy field [J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4): 499-505. (in Chinese)
- [8] 黄 耀, 焦 燕, 宗良纲, 等. 土壤理化性质对麦田 N_2O 排放影响的研究 [J]. 环境科学学报, 2002, 22(5): 598-601.
Huang Y, Jiao Y, Zong L G, et al. N_2O emission from wheat cultivated soil as influenced by soil physicochemical properties [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(5): 598-601. (in Chinese)

- [9] 丁 琦, 白红英, 李西祥, 等. 作物对黄土性土壤氧化亚氮排放的影响效应——根系与土壤氧化亚氮排放研究 [J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2823-2831.
Ding Q, Bai H Y, Li X X, et al. The effects of crop on N_2O emission from loess soil: Roots and N_2O emission from soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 2823-2831. (in Chinese)
- [10] 雒新萍, 白红英, 路 莉, 等. 黄绵土 N_2O 排放的温度效应及其动力学特征 [J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1226-1233.
Luo X P, Bai H Y, Lu L, et al. The effect of temperature and moisture on N_2O flux kinetics from loessial soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1226-1233. (in Chinese)
- [11] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 温度对旱田土壤 N_2O 的影响研究 [J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 1-8
Xu W B, Liu W P, Liu G S. Effect of temperature on N_2O emissions from sub-tropical upland soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(1): 1-8. (in Chinese)
- [12] 陈书涛, 黄 耀, 郑循华, 等. 轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子 [J]. 中国农业科学, 2005, 38(10): 2053-2060.
Chen S T, Huang Y, Zheng X H, et al. Nitrous oxide emission from cropland and its driving factors under different crop rotations [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(10): 2053-2060. (in Chinese)
- [13] 梁东丽, 吴庆强, 李生秀, 等. 黄土性土壤剖面不同层次 N_2O 浓度的原位监测 [J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1421-1427.
Liang D L, Wu Q Q, Li S X, et al. In-situ measurement of N_2O concentration from profile of loess soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1421-1427. (in Chinese)
- [14] 白红英, 韩建刚, 张一平. 农田温室气体 N_2O 释放的水热效应机理初探 [J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 724-726.
Bai H Y, Han J G, Zhang Y P. Mechanism of N_2O emission relying on humidity and temperature from soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(6): 724-726. (in Chinese)
- [15] 党廷辉, 蔡贵信, 郭胜利, 等. 黄土高原旱塬土冬小麦系统中尿素氮去向及增产效果 [J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 199-204.
Dang T H, Cai G X, Guo S L, et al. Fact of and crop response to nitrogen applied to winter wheat growing on heilu soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(2): 199-204. (in Chinese)
- [16] 邹国元, 张福锁, 陈新平, 等. 农田土壤硝化-反硝化作用与 N_2O 的排放 [J]. 土壤与环境, 2001, 10(4): 273-277.
Zou G Y, Zhang F S, Chen X P, et al. Nitrification-denitrification and N_2O emission from arable soil [J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(4): 273-277. (in Chinese)
- [17] 徐文彬, 洪业汤, 陈旭辉, 等. 未来气候变化对旱田生态系统 N_2O 释放的潜在影响 [J]. 中国环境科学, 1999, 19(5): 387-391.
Xu W B, Hong Y T, Chen X H, et al. The potential effects of climate changes in future on N_2O emission from agricultural soil [J]. China Environmental Science, 1999, 19(5): 387-391. (in Chinese)