

不同土层土壤理化生性状与反硝化酶活性 N₂O 排放通量的相关性研究

白红英，韩建刚，赵一萍

(西北农林科技大学资源与环境学院，陕西 杨凌 712100)

摘 要: 采用田间试验方法研究了干旱半干旱地区小麦田不同土层土壤理、化、生等因素与土壤反硝化酶活性、N₂O 排放通量的相关性。结果表明,在冬小麦生育期内,0—5 cm 土层土壤硝酸还原酶活性与相应土层土壤亚硝酸还原酶活性呈显著正相关,0—5 cm,5—10 cm 土层土壤的温度与相应土层土壤硝酸还原酶活性呈显著负相关,土壤硝态氮含量和 pH 与土壤反硝化还原酶活性的相关性因土壤的不同土层而有差异;0—5 cm,5—10 cm 土层土壤含水量,0—5 cm,10—20 cm 土层土壤脲酶活性,5—10 cm 有机碳含量,硝酸还原酶活性与土壤中 N₂O 排放通量呈显著正相关;5—10 cm 土层土壤温度、pH 和 10—20 cm 土层土壤磷酸酶活性、pH 与之呈显著负相关。土壤 N₂O 的排放主要是土壤反硝化作用的结果。
关键词: 土壤反硝化还原酶活性; N₂O 排放通量; 相关性
中图分类号: X144 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 – 0267(2002)03 – 0193 – 04

Correlations Between Physical, Chemical and Biological Properties and Denitrifying Enzyme Activity, N₂O Flux in Soil Profiles

BAI Hong-ying, HAN Jian-gang, ZHAO Yi-ping
 (Collage of Resources and Environment Science, Northwestern Sci – Tech University of Agriculture & Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, P. R. China)

Abstract: The correlations between physical, chemical and biological properties and denitrifying enzyme activity, soil N₂O flux were studied by field experiments during the course of wheat growing stages in both arid and semi – arid areas. It has been indicated that there existed the positive correlations between NR activity and nitrate – N contents; NiR activity and soil pH; N₂O flux and WFPS, organic carbon contents and NR activity, urease activity. There were negative between NR activity and pH; NiR activity and nitrate – N contents; N₂O flux and the temperature of at specific depth, pH and phosphorylase activity. In addition, N₂O flux was mainly derived from denitrification.
Keywords: denitrifying enzyme; N₂O flux; correlation

N₂O 是近年全球变暖备受关注的温室气体之一,据估计其全球增温潜势值为 310(CH₄ 为 21)^[1],在平流层中转化成 NO,破坏 O₃,并且以每年平均 0.2%—0.3% (相当于大气中每年增加 (3—4.5) × 10⁹kgN) 的速度增加^[2],对未来全球气候变暖和人类生态环境质量形成了严重的威胁。土壤中 N₂O 通过反硝化和硝化、氮的同化和异化等一系列微生物过程从土壤中释放进大气,推测其中 90% 来自土壤硝化和反硝化

的生物学反应^[3]。一般认为,土壤中只有少数反硝化微生物能将 N₂O 还原为氮气,故反硝化过程以 N₂O 的产生为常见^[4]。
 硝态氮进一步还原的过程中,相继参与的 NR(硝酸还原酶: Nitrate Reductase) 和 NiR(亚硝酸还原酶: Nitrite Reductase) 可作为一个区分旱田 N₂O 产生途径的指标^[5],研究土壤因子与 NR、NiR 的活性、N₂O 排放通量之间的关系具有重要的环境学和生物学意义。目前,这方面的研究报道还十分少见,而结合作物的生育时期将土壤分层研究它们之间的关系还未见报道。本文以田间试验研究了西北干旱半干旱地区小麦

田不同土层土壤理、化、生等因素与土壤反硝化酶活性, 土壤中 N₂O 排放通量的相关性, 阐明了土壤反硝化酶活性随冬小麦生育期在不同土壤层次的变化特征和影响 N₂O 在不同土层上的产生、消耗、传输的土壤因素, 为减少 N₂O 排放通量的研究提供了理论依据。

1 材料与方法

试验设在西北农林科技大学农作 I 站(108°38'N, 35°42'E), 土壤为褐土, 基本性状如表 1 所示。

表 1 供试土壤基本性状

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil (WFPS%); soil water filled porous									
项目	有机碳 /g · kg ⁻¹	全氮 /g · kg ⁻¹	全磷 /g · kg ⁻¹	CaCO ₃ /g · kg ⁻¹	最大田间持水量 (WFPS%)	容重 /g · cm ⁻³	pH 1: 1	粘粒组成 /g · kg ⁻¹ <0. 001 mm	质地 <0. 01 mm
含量	7. 12	0. 79	0. 857	92. 6	65. 8	1. 32	7. 89	210	490
									重壤土

⁵ 次^[7]。铵态氮、硝态氮采用连续自动硝铵态氮分析仪 (CHEMAB) 测定; 亚硝态氮采用对氨基苯磺酸—甲萘胺 520 nm 比色测定; N₂O 用 GC - ECD 测定。

2 结果与分析

2. 1 冬小麦生育期不同土层土壤理、化、生性状与土

表 2 冬小麦生育期不同土层土壤理、化、生各因素与土壤反硝化酶活性的回归方程和相关系数 (n = 16)

Table 2 Regression equations and correlation coefficients between physical, chemical and biological properties and denitrifying enzyme activity in the soil profiles grown wheat

回归方程	相关系数	回归方程	相关系数
5 - NR		10 - NR	
5 - NR = - 0. 175 8* (5 - T) + 25. 533	- 0. 552*	10 - NR = - 0. 209 2* (5 - T) + 24. 365	- 0. 723* *
5 - NR = - 0. 191 5* (10 - T) + 25. 419	- 0. 591*	10 - NR = - 0. 231 4* (10 - T) + 24. 304	- 0. 786* *
5 - NR = - 0. 215 5* (20 - T) + 24. 924	- 0. 560*	10 - NR = - 0. 268 4* (20 - T) + 23. 847	- 0. 768* *
5 - NiR		10 - NR = - 20. 884* (10 - pH) + 184. 87	- 0. 541*
5 - NiR = - 0. 524 7* (5 - NO ₃ ⁻) + 25. 547	- 0. 821* *	10 - NR = 0. 175 3* (10 - NO ₃ ⁻) + 16. 277	0. 589*
5 - NiR = 113. 08* (5 - pH) - 878. 63	0. 720* *	10 - NR = 0. 462 2* (5 - NR) - 9. 403 8	0. 509*
5 - NiR = 2. 364 2* (5 - NR) - 39. 151	0. 621*	20 - NR	
		20 - NR = 13. 187* (20 - OC) + 2. 228 6	0. 558*

注: r_{0. 05} = 0. 497; r_{0. 01} = 0. 623 (“”: P < 0. 05, “*”: P < 0. 01)。

(以“5 -”, “10 -”, “20 -”分别表示 0—5, 5—10, 10—20 cm 各土层; WFPS: 水分; NH₄⁺: 铵态氮; NO₃⁻: 硝态氮; T: 温度; OC: 有机碳; T_N: 全氮; pH: 土壤酸度; NR: 硝酸还原酶; NiR: 亚硝酸还原酶)

表 2 结果表明, 在冬小麦生育期内, 0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm 土层即 0—20 cm 土层土壤的温度与 0—5 cm, 5—10 cm 土层即 0—10 cm 土层土壤的硝酸还原酶活性呈显著负相关; 而 5—10 cm 土层土壤硝态氮含量与相应土层土壤硝酸还原酶活性呈显著正相关; 土壤 0—5 cm 土层土壤 pH 与相应土层土壤亚硝酸还原酶活性呈显著正相关, 而 5—10 cm 土层

试验地每公顷施 150 kg 氮素、40 kg 磷素, 两种肥料在播种前均匀撒施, 翻入土壤, 耙平覆膜后, 用穴播机播种冬小麦, 小麦品种为 354。2000 年 10 月 27 日播种, 2001 年 6 月 1 日收获。

在冬小麦不同生育期采用田间封闭箱收集法 (closed chamber method) 原位测定 N₂O 排放通量, 每一处理重复 5 次; 为了进一步查明影响土壤反硝化酶活性和 N₂O 排放通量的各种土壤理、化、生因素, 采集 0—5、5—10、10—20 cm 土层土样测定土壤理化因素^[6], 每一处理重复 3 次; 土壤酶活性测定每一处理重复

壤反硝化酶活性之间的关系

NR 和 NiR 作为专性酶参与了土壤硝态氮的进一步还原过程, 是影响土壤反硝化过程和 N₂O 排放通量的重要生物因子^[5]。在冬小麦生育期内测定了土壤 0—5、5—10、10—20 cm 各土层反硝化酶活性和土壤理、化、生性状; 研究了它们之间的相关性(表 2)。

土壤 pH 与相应土层土壤硝酸还原酶活性呈显著负相关; 土壤 0—20 cm 土层有机碳与相应土层土壤硝酸还原酶活性呈显著正相关; 0—5 cm 土层土壤硝酸还原酶活性分别与 0—5 cm 土层土壤亚硝酸还原酶活性、5—10 cm 土层土壤硝酸还原酶活性呈显著正相关。

2. 2 冬小麦生育期不同土层土壤理、化、生性状与土

壤中 N₂O 排放通量之间的关系

土壤理、化、生性状的变化必将引起土壤中 N₂O 排放通量的变化, 研究二者之间的相关性对于农田土壤中 N₂O 减排理论具有十分重要的意义。在冬小

麦生育期内测定了土壤 0—5、5—10、10—20 cm 土层理、化、生性状及土壤中 N₂O 排放通量的变化, 研究了它们之间的相关性(表 3)。

表 3 结果表明, 在冬小麦生育期内, 0—5 cm 土层

表 3 小麦生育期不同土层土壤理、化、生性状与土壤 N₂O 排放通量的回归方程和相关系数(*n* = 16)

Table 3 Regression equations and correlation coefficients between physical, chemical and biological properties and N₂O fluxes in the soil profiles grown wheat

回归方程	相关系数	回归方程	相关系数
Flux = 0. 540 2* (5 - WFPS) - 2. 797 2	0. 641 **	Flux = 0. 529 7* (10 - WFPS) - 5. 5047	0. 522*
Flux = 1. 197 1* (5 - Ure) - 9. 066 1	0. 524*	Flux = 72. 916* (10 - OC) - 77. 533	0. 498*
Flux = 1. 541 8* (20 - Ure) - 17. 108	0. 545*	Flux = 3. 183 8* (10 - NR) - 46. 254	0. 658**
Flux = - 0. 654 8* (20 - Pho) + 65. 042	- 0. 514*	Flux = - 0. 775 2* (10 - Temp) + 31. 978	- 0. 544*
Flux = - 108. 47* (20 - pH) + 886. 52	- 0. 562*	Flux = - 110. 08* (10 - pH) + 888. 19	- 0. 589*

注: *r*_{0.05} = 0. 497; *r*_{0.01} = 0. 623(“*”: *P* < 0. 05, “**”: *P* < 0. 01; Flux; N₂O 排放通量; Urea(Urease): 脲酶; Pho(Phosphorylase): 磷酸; 其它同表 2)

含水量、脲酶活性, 10—20 cm 土层土壤脲酶活性, 5—10 cm 土层土壤含水量、有机碳含量和硝酸还原酶活性与土壤中 N₂O 排放通量呈显著正相关; 5—10 cm 土层土壤温度、pH 和 10—20 cm 土层土壤磷酸酶活性、pH 与之呈显著负相关。

田间土壤水分状况经常性的从完全饱和至接近凋萎含水量交替性的发生变化, 该变化直接影响到土壤的通气状况、可利用碳、土壤酶的活性和 N₂O 的产生、消耗、传输过程。由表 3 中冬小麦生育期内土壤中 N₂O 的通量变化与田间 0—5、5—10 cm 土层水分含量的极显著和显著相关性, 可以认为, 干旱半干旱地区冬小麦田 0—10 cm 土层含水量在冬小麦的生育期内响应于土壤中 N₂O 的排放强度。

目前的研究一般认为土壤 N₂O 的排放通量与土壤表层的温度相关性较高^[8], 从表 2、3 的试验结果可以看出, 土壤 0—20 cm 土层温度与土壤 0—10 cm 土层硝酸还原酶活性呈显著负相关, 5—10 cm 土层温度与土壤中 N₂O 的排放通量呈显著负相关。这种结果的原因可能在于, 虽然土壤反硝化过程为吸能反应^[9], 但是在干旱半干旱地区冬小麦的生育期内, 土壤表层的温度变化及这种变化所引起的土壤其他因子的相应变化, 抑制了土壤酶的活性, 进而影响到了土壤中 N₂O 的排放, 这种结果已经首先从表 2 中土壤硝酸还原酶活性与温度的负相关得到了很好的反映。它同时也说明土壤中 N₂O 的排放主要是土壤反硝化作用的结果, 因为土壤作为一种开放体系, 其中 N₂O 的非生物反应产生量是很小的。

土壤中 N₂O 排放通量与 WFPS 和温度的回归方程证实了含水量 <1%—3% 的土壤将大量吸收 N₂O 和冰雪覆盖的土壤中仍有 N₂O 的释放的观点^[10]。

土壤脲酶活性反映了土壤尿素态氮的水解强度, 而土壤磷酸酶活性则反映了土壤磷素的有效性。二者与土壤 N₂O 排放通量相关性的结果至少说明三点: (1)氮素的一次性大量供应势必增加土壤中 N₂O 的排放; (2)土壤表层尤其 0—10 cm 土层含氮素增加有助于土壤中 N₂O 的排放。(3)磷酸酶活性与土壤中 N₂O 的排放的负相关原因可能在于土壤磷素有效性的提高使氮素在土壤中的有效程度得以提高, 减少了氮素的损失; 另一方面, 磷素的亏缺很可能导致土壤中 N₂O 排放的增加。

一般认为, 土壤反硝化作用进行的土壤溶液最适酸度为 pH 7—8. 5^[11]。虽然试验 pH 测定结果在此范围之内, 但表中相关系数却表现为土壤反硝化酶活性、土壤中 N₂O 排放通量与土壤 pH 之间的显著负相关, 其原因可能在于土壤硝化和反硝化细菌及其酶的活性在土壤酸度与温度之间首先响应了土壤温度的变化。土壤酸碱度的影响已经居于次要地位。

虽然土壤反硝化作用分为同化反硝化作用(硝态氮还原为氨态氮)和异化反硝化作用(硝态氮生成分子氮及其氧化物)两类, 但是上表 5—10 cm 土层土壤硝酸还原酶活性与土壤中 N₂O 的排放通量呈显著的正相关和硝酸还原酶活性、N₂O 排放通量变化与温度之间高度一致的负相关的结果却表明, 在干旱半干旱地区冬小麦的生育期内, 土壤中 N₂O 的排放主要是土壤反硝化作用的结果, 而且可能是土壤异化反硝化作用的结果。

土壤NH₄⁺、NO₃⁻、全氮与土壤中 N₂O 排放通量之间并无显著的相关性, 但这种结果却并非表明它们之间是没有关系的, 因为土壤表层硝态氮含量与硝酸还原酶活性、亚硝酸还原酶活性是呈显著正相关的, 其

本身与土壤中 N_2O 排放通量之间不成显著相关性只能说明土壤氮素虽然有一部分充当了反硝化酶的基质和作为土壤 N_2O 产生的前体,但是其参与土壤反硝化作用的最终产物并不完全是 N_2O , 还存在着 NO 、 N_2 等一些其它痕量气体和氮素的多源利用。而土壤有机碳含量与土壤中 N_2O 排放通量之间表现为显著正相关,其原因在于它是土壤微生物的碳源和能源。

3 结论

(1)在冬小麦生育期内,0—5 cm 土层土壤硝酸还原酶活性分别与 0—5 cm 土层土壤亚硝酸还原酶活性, 5—10 cm 土层土壤硝酸还原酶活性呈显著正相关;0—5 cm、5—10 cm 土层土壤的温度与相应土层土壤的硝酸还原酶活性呈显著负相关;土壤硝态氮含量和 pH 与土壤反硝化酶活性的相关性因土壤的不同土层而有差异。

(2)在冬小麦生育期内,0—5 cm、5—10 cm 土层土壤含水量,0—5 cm、10—20 cm 土层土壤脲酶活性, 5—10 cm 有机碳含量、硝酸还原酶活性与土壤中 N_2O 排放通量呈显著正相关; 5—10 cm 土层土壤温度、pH 和 10—20 cm 土层土壤磷酸酶活性、pH 与之呈显著负相关

(3)在干旱半干旱地区冬小麦的生育期内,土壤 N_2O 的排放主要是土壤反硝化作用的结果,而且是土

壤异化反硝化作用的结果。

参考文献:

- [1] IPCC, Climate changes 1995 – The science of climate change. Contribution of Group I to second Assessment Report of the Intergovernmental panel on climate change, 15.
- [2] 任 仁. 温室气体 CH_4 的人为源及其减排的技术措施[J]. 环境导报, 2000, 4: 42 – 43.
- [3] Mosier A R, Duxbury J M, et al. Nitrous oxide emission from agric – field: Assessment and mitigation [J]. *Plant and Soil*, 1985, 250 – 260.
- [4] Robertson L A, Kuenen J G. Physiology of Nitrifying and denitrifying bacteria[A]. In: Rogers J E And Whitman WBCEDS. Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen oxides and Halo methane[C]. American Society for microbiology Washington D C. 1991: 189 – 199
- [5] 史 弈, 黄国宏. 土壤反硝化酶活性变化与 N_2O 排放的关系[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3): 329 – 331.
- [6] 李西开. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [7] Ф X 哈兹耶夫. 土壤酶活性[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [8] 郑循华. 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.
- [9] Weier K L, Doran J W, Power J f, et al. Denitrification and the dinitrogen/nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and nitrate[J]. *Soil science soc Amer*, 1993, (57): 66 – 72.
- [10] 郑循华. 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.
- [11] Н Г Кыпакоба. 袁力云 译. 反硝化作用在土壤氮素平衡中的作用[J]. 土壤学进展, 1985, (5): 8 – 13.