

土壤水分状况对 CH_4 氧化, N_2O 和 CO_2 排放的影响

蔡祖聪

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

Arvin R. Mosier

(USDA/ARS, P. O. Box 671, Collins, CO 80522, USA)

摘 要 实验室培育试验表明, 土壤氧化 CH_4 , 排放 N_2O 和 CO_2 的最佳水分含量不同。水稻土氧化 CH_4 的最佳水分含量显著高于半干旱草地土壤, 均接近于土壤环境常年水分含量。水稻土 N_2O 排放量随着水分含量的下降而增加, 半干旱草地土壤则随着水分含量的下降而减少, 表明背离土壤环境常年水分含量越远, N_2O 的排放量越大。因而, CH_4 氧化和 N_2O 排放对土壤水分含量的反应呈极显著的负相关性。 CO_2 排放的最佳水分含量接近或高于 CH_4 氧化的最佳水分含量。

关键词 土壤水分; CH_4 氧化; N_2O 排放; CO_2 排放

陆地生态系统对大气温室气体浓度变化起着非常重要的作用。土壤的水分状况是土壤排放或吸收大气温室气体的决定因素之一。众所周知, 淹水土壤向大气排放 CH_4 , 但排水良好的草地、森林等土壤氧化大气 CH_4 ; 土壤的 N_2O 排放量在很大程度上取决于土壤水分状况和水分状况的变化频率; 土壤水分状况也是影响土壤有机质分解速率和 CO_2 排放量的重要因素。

淹水条件下, 土壤生成 CH_4 , 但土壤中存在的氧化微域具有氧化土壤生成的 CH_4 , 减少 CH_4 排放量的功能。稻田土壤生成的 CH_4 平均有 80% 被根际和水土界面的氧化区域所氧化, 仅有 20% 排放到大气中^[1]。草地、森林土壤对大气 CH_4 的氧化是在土壤比较干燥的条件下进行的, 一般土壤含水量在持水量的 15~40% 时具有最大的氧化能力^[2~4]。稻田土壤氧化的主要是土壤中生成的 CH_4 , 因此 CH_4 的浓度很高, 且通常在淹水条件下进行。稻田土壤氧化高浓度 CH_4 的最佳水分状况是否不同于旱地土壤尚无深入的研究。稻田的 CH_4 排放与 N_2O 排放存在着明显的相互消长关系。稻田烤田时, CH_4 排放量显著减少, 但烤田期间的 N_2O 排放量增加^[5,6]。根据作者所掌握的资料, 土壤 CH_4 与 N_2O 排放的关系至今未报道, 本文报道土壤水分对水稻土和半干旱草地土壤不同水分状况对 CH_4 氧化、 N_2O 和 CO_2 排放的影响及其相互关系。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤分别采自江苏省锡山市水稻土, 江西省鹰潭市水稻土和美国科罗拉多州半干旱草地土壤。锡山市水稻土一年二熟, 一水一旱, 冬季以种植冬小麦为主, 土壤排水条件好, 一年中淹水时间不足 4 个月。鹰潭市水稻土采自丘陵坡底, 一年二熟水稻, 冬季休闲, 受侧渗水影响, 土壤排水条件较差, 常年处于淹水状态。美国科罗拉多州半干旱草地土壤为自然

土壤，无施肥历史。该土壤已进行过大量的原位 CH₄ 氧化和 N₂O 排放测定^{7,8}。水稻土采样时处于淹水状态。样本采集后略经风干备用，分析土壤基本性质，草地土壤用新鲜土样分析基本性质，结果列于表 1。

表 1 供试土壤的基本性质

编号	采样地点	利用方式	有机碳	全氮 Total	NO ₃ ⁻ - N *	NH ₄ ⁺ - N *	粘粒
			C, mg/ g	N, mg/ g	μg/ g	μg/ g	%
XS	锡山市	水稻/ 小麦	15. 5	1. 41	4. 43	1. 53	
YT	鹰潭市	水稻	25. 0	2. 22	11. 2	10. 2	21. 9
CO	科罗拉多	自然草地	11. 0	1. 2	12. 4	1. 08	13

* 1mol/ L KCl 提取。

1.2 培育试验

称相当于干土重的土样 29g 置于容积为 470ml 的广口玻璃瓶中，根据实验要求，分别加入蒸馏水或在通风条件下 25℃风干至不同水分含量，结果列于表 2。表 2 中标准差为 0 者通过加蒸馏水达到的，非为 0 者则通过风干获得。拧紧带有硅橡胶塞的瓶盖。预备试验表明，水稻土不具备氧化大气 CH₄ 的能力，但对高浓度 CH₄ 的氧化能力远大于草地土壤。研究水稻土氧化 CH₄ 的能力的主要目的是揭示其氧化土壤中生成的 CH₄ 能力，而不是氧化大气 CH₄ 的能力，故注入纯 CH₄ 将二个水稻土的瓶内空气 CH₄ 浓度提高到约 2000μl/ L。对草地土壤关注的是其氧化大气 CH₄ 的能力，为便于研究把瓶内 CH₄ 浓度提高至约 5μl/ L。瓶内注入 CH₄ 后，即刻用带有阀门的注射器，注入 5ml 空气，然后抽取 5ml 气体，测定 CH₄，N₂O 和 CO₂ 浓度，作为实际起始浓度。在

表 2 培育时的土壤水分含量

土壤		水分含量, %WHC *				
XS	95±0	71±0	60±0. 7	44±1. 1	27±1. 4	
YT	95±0	81±0	59±0. 6	45±0. 3	28±1. 8	
CO	61±0	50±0	40±0	27±0. 1	20±0. 2	

* WHC: 土壤持水量。

25℃恒温室中培育 72 小时后，再次抽取 5ml 瓶内气体测定 CH₄，N₂O 和 CO₂ 浓度，以观察土壤对 CH₄ 的氧化量，N₂O 和 CO₂ 排放量。每一处理重复 3 次。

1.3 分析方法

气体样品 CH₄，N₂O 和 CO₂ 浓度用气相色谱测定，分别用 FID 和 ECD 作检测器^[7]。用 1mol/ L KCl 提取 NO₃⁻ 和 NH₄⁺，土水比为 1 5。用氮分析仪分析 NO₃⁻ 和 NH₄⁺。为便于比较，土壤水分含量用土壤持水量(Water—holding capacity, WHC)的百数表示。土壤持水量的测定方法如下：把过 20 目筛的土样置于用棉球塞住的漏斗中，加去离子水浸泡 2 小时，加盖，除去棉塞，让水分自由下渗，放置过夜后，测定土壤重量含水量作为土壤持水量。其它项目用常规方法分析测定。

2 结果与讨论

2.1 土壤水分对 CH₄ 氧化的影响

从总体上看，采自锡山市的水稻土(XS)氧化 CH₄ 的能力大于采自鹰潭市的水稻土(YT)，且对土壤水分含量的反应也不同(图 1a, b)。土壤 XS 在 72 小时内的 CH₄ 氧化量可以用抛物线方程拟合(R²=0. 9392, p<0. 01)。根据拟合曲线可以算出，氧化 CH₄ 的最佳土壤水分含量约为 71%WHC。土壤 YT 的 CH₄ 氧化量随着土壤水分含量的提高而呈指数增加(R²=0. 9392, p<0. 01)。当土壤水分含量低于 60%WHC 时，土壤的 CH₄ 氧化量很小；

当土壤水分含量高于 60%WHC 时, CH₄ 氧化量迅速增加, 与土壤 XS 形成显明的对照。

半干旱草地土壤的 CH₄ 氧化量与水分含量的关系也可以用抛物线方程拟合 ($R^2=0.9076$, $p<0.01$, 图 1 c), 但是其氧化 CH₄ 的最佳含水量明显低于二个水稻土。根据拟合方程计算, 半干旱草地土壤氧化 CH₄ 的最佳含水量为 19%WHC。Mosier 等^[7] 野外原位测定的结果表明, 该土壤氧化大气 CH₄ 的最佳水分含量为土壤持水孔隙(WFPS)的 15%。虽然用最大持水量的百分数表示的土壤水分含量与用持水孔隙的百分数表示的土壤含水量不是等同的, 但二者应该是非常接近的。可以看出, 野生测定结果与实验室结果非常接近。表明, 土壤氧化 CH₄ 的最佳水分含量是一个比较稳定的数值, 而不随实验方法不同而有很大的变化。

Gulledge 和 Schimel^[2] 研究了 5 种阿拉斯加能够氧化大气 CH₄ 的土壤, 其中包括 2 种湿地土壤, 发现如果用 WHC 表示土壤含水量, 5 种土壤的土壤水分含量与 CH₄ 氧化速率之间的关系都可以抛物线方程拟合。Whalen 和 Reeburgh^[3] 对 3 种氧化大气 CH₄ 的土壤进行的研究结果也表明, 土壤水分含量(用 WHC 表示)与 CH₄ 氧化速率之间的关系均可以用抛物线方程拟合。这些结果都与本实验中土壤 XS 和土壤 CO 的结果相一致。Gulledge 和 Schimel^[2] 发现 5 种土壤氧化大气 CH₄ 的最佳含水量介于 20~40% WHC, 与这些土壤原位环境典型的土壤含水量一致。他们总结其他作者的研究结果也表明, 土壤氧化大气 CH₄ 的最佳水分含量都在 25~45%WHC 之间。他们认为, 虽然进一步增加土壤水分含量可以减少微生物的水分胁迫, 但因为 CH₄ 扩散受到限制, 因而抑制 CH₄ 氧化。这一解释暗示着, CH₄ 扩散速度是土壤水分含量高于 25~45% WHC 时, CH₄ 氧化速率受到限制的主要因素。

本实验结果表明供试水稻土氧化 CH₄ 的最佳含水量远大于已有的报道结果。采自常年处于淹水状态的鹰潭水稻土(YT), CH₄ 氧化量随着土壤含水量的增加而增大, 在土壤含水量大于 90%WHC 时仍未出现最大氧化量。由此说明, 水稻土氧化 CH₄ 的最佳含水量不同于氧化大气 CH₄ 的土壤。Whalen 和 Reeburgh^[3] 发现 2 种旱地森林土壤氧化大气 CH₄ 的最佳含水量分别为 21 和 27%WHC, 但 1 种沼泽土壤氧化 CH₄ 的最佳含水量为 50%WHC, 显著高于旱地森林土壤。在本实验中, 采自锡山市以一水一旱轮作的水稻土其氧化 CH₄ 的

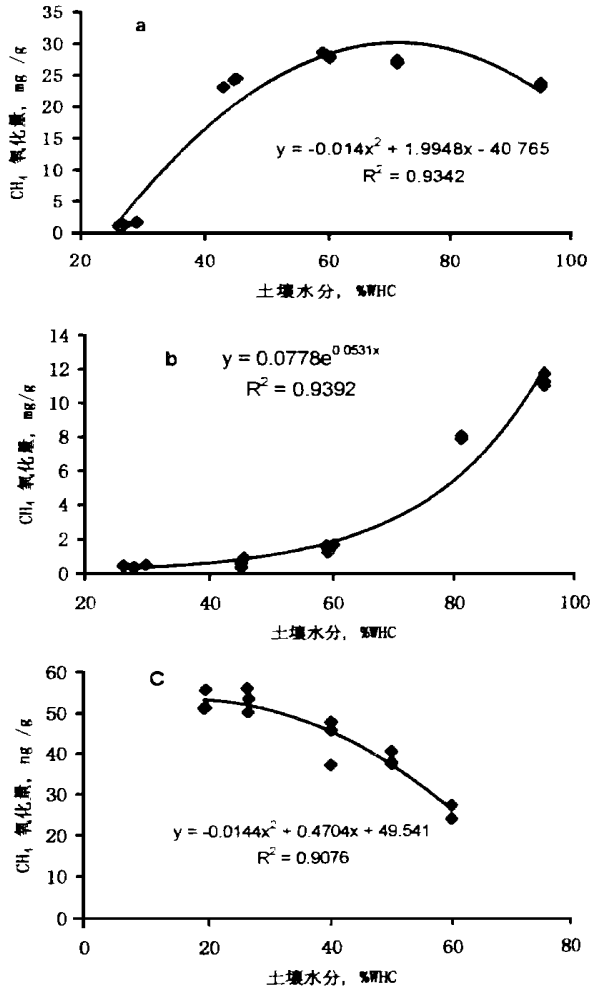


图 1 在 25℃下培育 72 小时, 土壤水分含量对 CH₄ 氧化的影响。a, 土壤 XS; b, 土壤 YT, c, 土壤 CO

最佳土壤水分含量显著低于常年淹水的采自鹰潭市的水稻土。这些结果均说明, 土壤所处的环境常年水分状况是决定其氧化 CH_4 最佳水分含量的主要因素。土壤的常年水分含量越高, 氧化 CH_4 的最佳水分含量也越大。这也与 Gullledge 和 Schimel^[2] 所报道的土壤氧化 CH_4 的最佳水分含量接近于土壤原位环境的典型水分含量相一致。比较二个水稻土的结果可以看出, 即使在土壤水分含量大于 60%WHC 的条件下继续增加时, 土壤 YT 的 CH_4 氧化量不但未减少, 反而显著增加(图 1b)。由此可见, 导致这一现象的原因可能是甲烷氧化微生物对环境适应的结果, 而非如 Gullledge 和 Schimel^[2] 所认为的土壤高水分含量条件下, CH_4 氧化速率受 CH_4 扩散的抑制。

2.2 土壤水分含量对 N_2O 排放的影响

从表 1 可以看出, 虽然 2 种水稻土都有很长的施用氮肥的历史, 但土壤 XS 的无机 N 含量反而低于从未有过施肥历史的半干旱草地土壤 CO。土壤 YT 仍含有大量的 NH_4^+ , 但 NO_3^- 含量与土壤 CO 相近。在实验室条件培育 72 小时后, 2 个水稻土中无机 N 含量较大的土壤 YT 排放较多的 N_2O 。而实验土壤水分含量范围内, 土壤 YT 排放的 N_2O (N, 下同) 平均为 $2.13 \pm 0.67 \text{ ng/g}$, 而土壤 XS 平均为 $1.24 \pm 0.48 \text{ ng/g}$ 。但是, 从表 1 可知, 半干旱草地土壤 CO 的无机 N 含量($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ 为 $13.5 \mu\text{g/g}$) 高于水稻土 XS ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ 为 $0.6 \mu\text{g/g}$), 但其排放的 N_2O (平均 $0.58 \pm 0.27 \text{ ng/g}$) 不足水稻土 XS 的一半。显然, 这二类土壤产生 N_2O 的机理可能存在很大的差异。

土壤水分含量对 N_2O 排放量的影响模式在水稻土和半干旱草地土之间有明显的差异(图 2)。总体上, 水稻土排放 N_2O 随着土壤水分含量的增加而下降(图 2a, b)。水分含量为 $27 \pm 1.4\%$ WHC 时土壤 XS 的 N_2O 排放量显著高于其它土壤水分含量, 但进一步提高水分含量并未进一步显著降低 N_2O 排放量。土壤水分含量与 N_2O 排放量之间的关系可以用抛物线方程拟合 ($R^2 = 0.6799$, $p < 0.01$, 图 2a)。

土壤 YT 的 N_2O 排放量随着水分含量的下降而呈指数下降 ($R^2 = 0.8815$, $p < 0.01$)。这一结果表明, 当水稻土排水落干时, 土壤可能会有相当数量的 N_2O 排放到大气中。相反, 半干旱草地土壤的 N_2O 排放量随着土壤含水量的增加而呈直线增加 ($R^2 =$

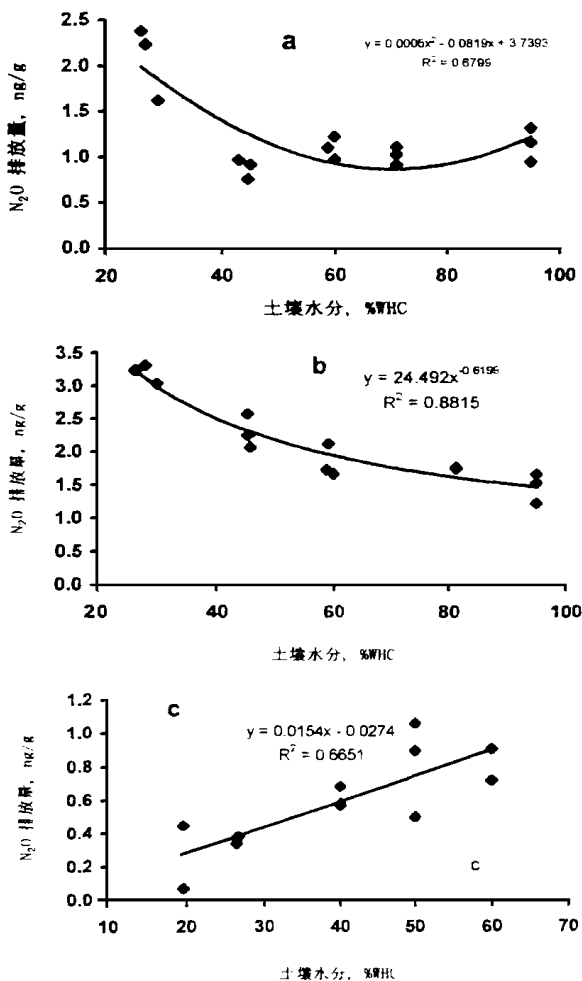


图 2 在 25°C 下培育 72 小时, 土壤水分含量对 N_2O 排放的影响。A, 土壤 XS, b, 土壤 YT, c, 土壤 CO

0.6651, $p < 0.01$, 图 2c), 与原位测定结果相一致^[7]。Mosier 等^[7] 分析该土壤原位测定土壤温度在 15 °C 以上的 N₂O 排放量与用 WFPS 表示的土壤水分含量也呈直线关系。

由此可见, 不同类型的土壤, N₂O 排放量不但与无机 N 含量的关系不同, 对土壤水分含量的响应曲线也不相同。导致这些差异的机理有待进一步研究。

2.3 土壤水分含量对 CO₂ 排放的影响

虽然 3 个土壤样本的土壤有机碳含量相差较大, 土壤 YT 的有机碳含量远高于土壤 XS 和土壤 CO (表 1), 但在实验土壤水分含量范围内, 它们排放的 CO₂ 量并无显著差异。土壤 XS 的 CO₂ (C, 下同) 平均排放量为 $25.8 \pm 5.2 \mu\text{g/g}$, 土壤 YT 为 $24.9 \pm 7.9 \mu\text{g/g}$, 土壤 CO 为 $23.7 \pm 5.7 \mu\text{g/g}$ 。从图 3 可以看出, 水稻土 CO₂ 排放量与土壤水分含量的关系曲线一致, 随着土壤水分含量的增加而增加, 均可以用半对数方程拟合。土壤 XS 的相关系数 R^2 为 0.5988, 土壤 YT 的 R^2 为 0.5589, 均达到极显著水平。半干旱草地土壤 CO₂ 排放量与土壤水分含量的关系则显然不同于水稻土, 其关系曲线呈抛物线, 可以用抛物线方程拟合 ($R^2 = 0.5411$, $p < 0.01$)。根据拟合方程可以算出, 半干旱草地土壤排放 CO₂ 的最佳水分含量为 47% WHC, 显著高于氧化 CH₄ 的最佳水分含量 (19% WHC)。这一结果与 Gullledge 和 Schimel^[2] 对阿拉斯加 5 种土壤的研究结果相似, 即土壤排放 CO₂ 的最佳水分含量高于氧化 CH₄ 的最佳水分含量。

CO₂ 排放量常作为土壤微生物活性的量度。从实验结果可以看出, 水稻土的微生物活性随着土壤水分含量的提高而增大。从图 3a, b 的拟合方程的斜率可以看出, 提高土壤水分含量更有利于长年淹水的土壤 YT 提高微生物活性。显然这与水稻土的水分环境有关。对于处于半干旱地区的草地土壤, 绝大多数时间土壤水分含量低于 40% WFPS^[7], 当土壤水分含量高于 47% 时, 土壤微生物的活性不但不进一步增加, 反而具有下降的趋势 (图 3c)。这一结果充分说明, 处于不同水分环境的土壤, 其微生物所需的最佳水分含量是不相同的, 且与环境条件相一致。

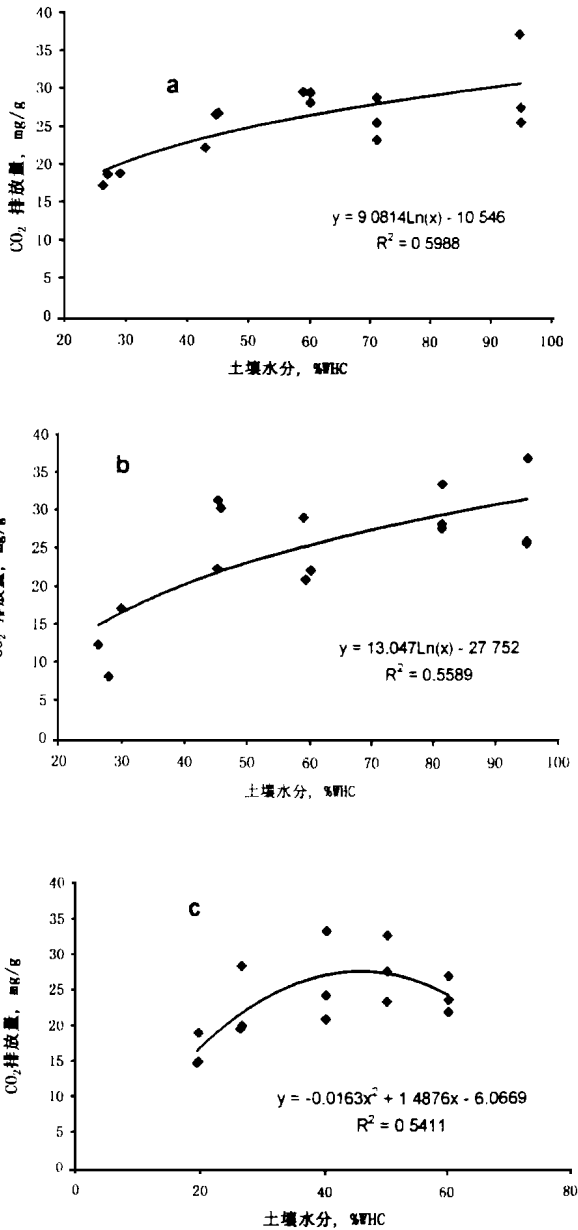


图 3 在 25 °C 下培育 72 小时, 土壤水分含量对 CO₂ 排放的影响。A, 土壤 XS; b, 土壤 YT; c, 土壤 CO

2.4 土壤 CH₄ 氧化量、N₂O 和 CO₂ 排放的相互关系

上述分析表明, 土壤 CH₄ 氧化、N₂O 和 CO₂ 排放与土壤水分含量的关系是各不相同的。表 3 给出了不同的土壤水分含量条件下的土壤 CH₄ 氧化量、N₂O 和 CO₂ 排放量的线性相关系数。无论是水稻土, 还是半干旱草地土壤, CH₄ 氧化量与 N₂O 排放量之间均存在极显著的负相关关系。在培育时加入铵态 N, 抑制土壤对 CH₄ 氧化, 增加 N₂O 排放, 使土壤 CH₄ 氧化量与 N₂O 呈负相关关系^[9]易于理解。在野外原位条件下, 施用铵态 N 肥增加 N₂O 呈负相关关系^[9]是易于理解。在野外原位条件下, 施用铵态 N 肥增加 N₂O 排放和减少大气 CH₄ 氧化已有大量报道, 这甚至被认为是大气 CH₄ 浓度持续增加的原因之一^[1]。但是, 导致本实验结果的原因显然与导致上述结果的原因不同。在本实验中, 土壤氧化 CH₄ 和排放 N₂O 所需的土壤水分含量不同是二者之间呈负相关的主要因素, 这与稻田土壤 CH₄ 排放通量与 N₂O 排放通量之间呈消长关系相似^[2-6]。水稻土低的土壤水分含量有利于 N₂O 的排放, 但不利于 CH₄ 的氧化(图 1a, b 和图 2a, b)。相反, 对于半干旱草地, 低的土壤水分含量有利于 CH₄ 的氧化, 但不利于 N₂O 排放(图 1c 和图 2c)。

表 3 25℃培育 72 小时土壤 CH₄ 氧化量、N₂O 和 CO₂ 排放量相互之间的线性相关系数

因素	XS		YT		CO	
	N ₂ O	CO ₂	N ₂ O	CO ₂	N ₂ O	CO ₂
CH ₄	-0.885 **	0.745 **	-0.707 **	0.535 *	-0.749 **	-0.498
CO ₂	-0.695 **		-0.800 **		0.358	

*: 显著性水平为 5%; **: 显著性水平为 1%。

在水稻土中 CH₄ 氧化量与 CO₂ 排放量之间呈显著或极显著的正相关关系。从土壤的 CH₄ 氧化量和 CO₂ 排放量的数量比较可以看出(图 1a, b 和图 3a, b), CH₄ 氧化成 CO₂ 是土壤排放的 CO₂ 的主要来源之一。另一方面, 水稻土氧化 CH₄ 和排放 CO₂ 都需要较高土壤水分含量。表 3 结果表明, 半干旱草地土壤 CH₄ 氧化量与 CO₂ 排放量之间无显著的线性相关性。导致这一结果的原因首先是在数量上 CH₄ 氧化对 CO₂ 的贡献很小(图 1c 和图 3c)。其次, 它们所要求的土壤水分含量不同。当土壤水分含量较低时, CH₄ 的氧化量随着水分含量的增加而下降, 但 CO₂ 排放量增加。在这一水分含量范围, 它们之间应该呈负相关关系。当土壤水分含量大于 CO₂ 的最佳排放量时, CH₄ 氧化量与 CO₂ 排放量同步下降, 这时它们之间应呈正相关关系。所以, 半干旱草地土壤不同水分含量条件下的 CH₄ 氧化量与 CO₂ 排放量之间不呈线性关系, 但有极显著的抛物线关系(图 4)。

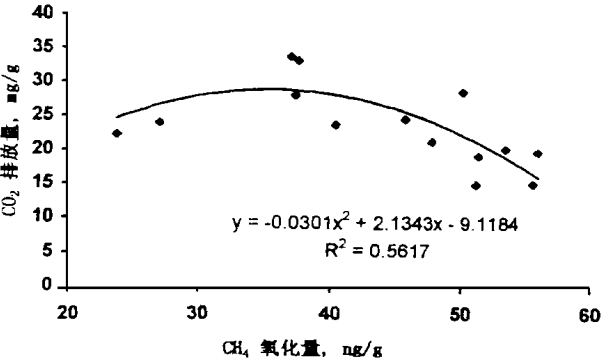


图 4 半干旱草地土壤 CH₄ 氧化量与 CO₂ 排放量之间的关系

之间应该呈负相关关系。当土壤水分含量大于 CO₂ 的最佳排放量时, CH₄ 氧化量与 CO₂ 排放量同步下降, 这时它们之间应呈正相关关系。所以, 半干旱草地土壤不同水分含量条件下的 CH₄ 氧化量与 CO₂ 排放量之间不呈线性关系, 但有极显著的抛物线关系(图 4)。

水稻土的 N₂O 排放量与 CO₂ 排放量之间呈极显著的负相关关系(表 3)。比较图 2 和图 3 可以看出, 低的土壤水分含量有利于 N₂O 的排放, 但不利于 CO₂ 的排放, 这导致了它们之间的负相关关系。但是半干旱草地土壤 N₂O 排放量与 CO₂ 排放量之间既不存在线性相关性(表 3), 也不存在抛物线关系。

(下转第 298 页)

已发育成水耕人为土(水稻土)。

在土壤发生分类制中的黄棕壤和黄褐土,而在土壤系统分类制中根据粘化层或粘磐层的有无分别属淋溶土纲和雏形土纲。这样划分在应用上也有实际意义。

1997 年 11 月某日,先天晚上下过中雨,中美土壤学家数十人到南京东郊宁镇公路东侧,考察由下蜀黄土发育的土壤,发现黄土岗地顶部、坡上先天挖好的土壤剖面坑内都有 10cm 至 20cm 的积水,但岗前低平地的土壤剖面坑内反而没有积水。究其原因,岗地土壤都有透水性极弱的粘磐层,而低平地的土壤却无粘磐层,只有透水性较好的雏形层。按土壤系统分类前者为粘磐湿润淋溶土,后者为饱和湿润雏形土,属于两个土纲。按土壤发生分类前者为粘磐黄褐土,后者为黄褐土性土,属于同一土类。

粘磐湿润溶淋溶土由于紧密且透水性极弱的粘磐层,不利于果树和其他树木根系生长,特别是“上位粘磐”影响更大。同时土坑内积水也会影响苗木的成活率,故应开沟排水、“深挖坑”和“高培土”,使地表水及时排走,以免滞水渍苗。而饱和湿润雏形土因无粘磐层,而有透水性较好的雏形层,故有利于苗木生长。由此可见,二者提高到土纲一级加以区分具有实际意义。

参 考 文 献

- 1 中国土壤系统分类课题组. 中国土壤系统分类(修订方案). 科学出版社, 1995
- 2 史学正, 陈志诚, 张俊民. 富铁土、淋溶土和雏形土划分的理论依据. 土壤学报, 32[增刊(1)]: 11~20
- 3 [美]康奈尔大学农学系编(赵其国、龚子同、曹升赞、熊国炎译). 美国土壤系统分类检索. 科学出版社, 1985
- 4 全国土壤普查办公室. 中国土壤分类系统. 农业出版社, 1993



(上接第 294 页)

总结上述结果可以看出,长期处于不同水分环境下的土壤,它们氧化 CH_4 和排放 N_2O 、 CO_2 所需的土壤水分含量不同,并无固定的模式。总体上,与环境常年水分含量接近的土壤水分含量也是土壤氧化 CH_4 的最佳水分含量,而排放 CO_2 的最佳水分含量接近或高于常年水分含量。相反,不同于土壤环境常年水分含量的土壤水分含量有利于 N_2O 的排放。

参 考 文 献

- 1 蔡祖聪. 氮肥施用与大气甲烷循环. 见: 黄昌勇, 谢正苗, 徐建明主编. 土壤化学研究与应用. 中国环境科学出版社, 1997, 7~14
- 2 J. Gullledge and J. P. Schimel, Soil Biol. Biochem., 1998, 30: 1127~1132
- 3 S. C. Whalen and W. S. Reeburgh, Soil Biol. Biochem., 1996, 28: 1271~1281
- 4 P. F. Dunfield, E. Topp, Biogeochem., 1995, 29: 199~222
- 5 Z. Cai, G. Xing, X. Yan, H. Xu, H. Tsuruta, K. Yagi and K. Minami, Plant and Soil, 1997, 196: 7~14
- 6 K. F. Bronson, H. U. Neue, U. Singh and E. B. Abao, Jr., Soil Sci. Soc. Am. J., 1997, 61: 981~987
- 7 A. R. Mosier, W. J. Parton, D. W. Valentine, D. S. Ojima, D. S. Schimel, and J. A. Delgado, Global Biogeochem. Cycles, 1996, 10: 387~399
- 8 A. R. Mosier, W. J. Parton, D. W. Valentine, D. S. Ojima, D. S. Schimel, and O. Heinemeyer, Global Biogeochem. Cycles, 1997, 11: 29~42
- 9 P. Boeckx, O. van Cleemput, van O. Cleemput, J. Environ. Quality, 1996, 69: 75~86