

不饱和土壤 CH₄ 的吸收与氧化

李 俊¹, 同小娟², 于 强¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 北京林业大学资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 不饱和土壤是已知唯一的 CH₄ 生物壑。综述了不饱和土壤 CH₄ 的吸收、氧化过程及其影响因素。不饱和土壤中 CH₄ 氧化的临界浓度低, 因而甲烷氧化菌可氧化大气 CH₄ 并将其当作唯一的碳源和能源。土壤 CH₄ 吸收率与土壤湿度通常呈负相关关系。土壤湿度过高, 大气 CH₄ 和 O₂ 向土壤中扩散受阻; 或土壤湿度过低引起水分胁迫均导致甲烷氧化菌活性下降。NH₄⁺ 对土壤中 CH₄ 氧化的抑制作用可归结为 NH₃ 和 CH₄ 在甲烷单氧酶水平上的竞争、由氧化作用向硝化作用的转移以及 NH₄⁺ 氧化生成的 NO₂⁻ 的毒性。NH₄⁺ 对 CH₄ 氧化的抑制作用与土壤有效氮含量成正比。各类氮肥对 CH₄ 氧化抑制作用: 化肥 > 有机肥; 铵态氮肥 > 尿素。NO₃⁻ 对 CH₄ 氧化没有抑制效应。阳离子代换量 (CEC) 高的土壤 NH₄⁺ 对 CH₄ 氧化的抑制作用轻。CH₄ 氧化菌对大气 CH₄ 的高亲和力及 CH₄ 氧化所需较低的活化能导致其温度系数 Q₁₀ 较小。地温较低时, 土壤氧化 CH₄ 的能力随温度升高而升高。当地温高于 CH₄ 氧化的最佳温度时, CH₄ 氧化菌难以与硝化细菌及其它微生物竞争利用土壤空气中的 O₂, 导致其活性降低。甲烷氧化菌对 pH 值变化不敏感。团粒结构较好的壤土可保护 CH₄ 氧化菌免受干扰。未受干扰的森林土壤 CH₄ 氧化率的峰值一般出现在亚表层 (5~10cm)。由于耕作破坏了表土结构, 农田土壤的 CH₄ 氧化率在耕层以下才有较大增加。耕地、草地和森林土壤的平均 CH₄ 吸收率分别为 0.28, 0.52 和 1.51 mg/(m² · d)。植物吸收氮素养分可减轻 NH₄⁺ 对土壤 CH₄ 氧化菌的抑制作用。维持与提高农业土壤氧化 CH₄ 潜力的重要措施包括免耕、施硝态氮肥和/或有机肥。

关键词: 甲烷氧化; 甲烷吸收; 不饱和土壤; 土壤水分; 土壤氮素; 土壤结构

Methane uptake and oxidation by unsaturated soil

LI Jun¹, TONG Xiao-Juan², YU Qiang¹ (1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 2. *School of Resources and Environmental Studies, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 141~147.

Abstract: Unsaturated soils are the only known biogenic sinks of CH₄. In this paper we summarized the CH₄ oxidizing process in unsaturated soil and its influent factors. Methanotrophs can use atmospheric methane as the only source of carbon and energy because of the low critical concentration for methane oxidation. In General, CH₄ absorption rate is inversely proportional to soil moisture. The activity of methanotrophs becomes small if the transfer of CH₄ and O₂ from atmosphere to soils is prevented when soil moisture is over high, or water stress occurs at low soil moisture conditions. The inhibitory effect of NH₄⁺ on CH₄ oxidation can be attributed to its competition with CH₄ for O₂ by the methane monooxygenases, the transfer of oxidation to nitrification and the toxicity of NO₂⁻ produced. The inhibitory effect of NH₄⁺ on CH₄ oxidation is proportional to available nitrogen. Chemical fertilizers are stronger than manures, and ammonium are stronger than urea in inhibiting CH₄ oxidation. NO₃⁻ has no inhibitory effect on CH₄ oxidation. High cation exchange capacity (CEC) can alleviate the inhibitory effect of NH₄⁺ on CH₄ oxidation. The high affinity of methanotrophs to atmospheric CH₄ and low activation energy for CH₄ oxidation leads to a small coefficient of temperature (Q₁₀). When soil temperature is low, the ability of CH₄ oxidation by soils is proportional to soil temperature. When soil temperature is higher than the optimal value, the activity of methanotrophs will decrease because

基金项目: 国家 973 计划资助项目 (2002CB412501); 中国科学院知识创新工程重大资助项目 (KZ-CX-SW-01-01B-12)

收稿日期: 2003-11-22; **修订日期:** 2004-07-09

作者简介: 李俊 (1969~), 男, 北京人, 副研究员, 主要从事农业生态学与温室气体研究。E-mail: lijun@igsnr.ac.cn

Foundation item: National Key Basic Research and Development Program (No. 2002CB412501); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZ-CX-SW-01-01B)

Received date: 2003-11-22; **Accepted date:** 2004-07-09

Biography: LI Jun, Associate professor, mainly engaged in agroecology and greenhouse gases. E-mail: lijun@igsnr.ac.cn

it is difficult for methanotrophs to compete with nitrifiers and other microbes for the limited O_2 in soil air. Methanotrophs are very insensitive to pH value. Good granular structure of soil favors the activity of CH_4 -oxidizing bacteria from being disturbed. The peak of CH_4 -oxidizing rate in the undisturbed forest soil is usually in sub-topsoil (5~10cm). In farm soil, CH_4 -oxidizing rate increases obviously under the depth of farming layer (25cm) because tillage destroys the structure of topsoil. The average CH_4 absorption rates of farmland, grassland and forest soil are 0.28, 0.52 and 1.51mg/(m²·d), respectively. The absorption of N by plants can alleviate the inhibitory effect of NH_4^+ on CH_4 -oxidizing bacteria. No-tillage, the use of nitrate fertilizer and (or) organic fertilizer favor CH_4 oxidation in farm soil.

Key words: methane oxidation; methane uptake; unsaturated soil; soil moisture; soil nitrogen; soil structure

文章编号:1000-0933(2005)01-0141-07 中图分类号:S154.1 文献标识码:A

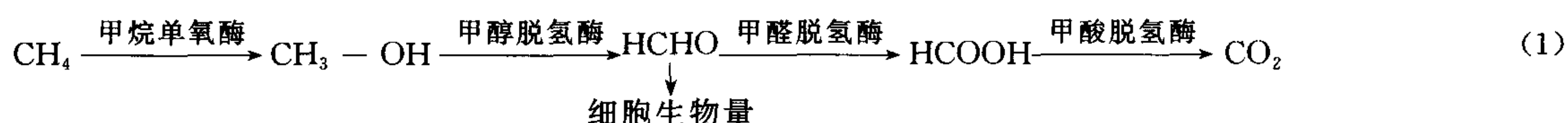
甲烷(CH_4)是大气中含量仅次于 CO_2 和 CFCs 的温室气体,其辐射增温效应是 CO_2 的 20~30 倍^[1,2]。在对流层, CH_4 被氧化生成其它温室气体(CO 和 CO_2),其温室效应被进一步放大。少量 CH_4 被输送到平流层,对 O_3 层起到了间接的破坏作用^[3,4]。对极地冰芯的研究表明:工业革命前大气中甲烷的浓度约为 0.6~0.8 μ l/L^[5]。受人类活动影响,大气 CH_4 的浓度不断升高。20 世纪 70~80 年代大气 CH_4 浓度的年增长率达 1%左右^[1],到 20 世纪 80 年末增幅变缓,1992 年甚至出现了负增长,其原因还不清楚^[6]。目前地表大气中 CH_4 的平均浓度为 1.7 μ l/L,北半球比南半球平均高出 0.14 μ l/L,季节波动为 0.03 μ l/L^[6]。

IPCC^[5]估计,全球大气 CH_4 的源总量为 525Tg/a,其中自然源约占 30%,人为源约占 70%。自然源以湿地土壤为主,还包括海洋、淡水、白蚁和野生反刍动物等。人为源包括家养反刍动物、稻田、城市固体废弃物和污水处理、生物体燃烧、化石燃料开采过程中的泄露等。其中家养反刍动物和稻田约占全部 CH_4 源的 15%~40%,因而农业是主要的人为源。据估计,全球大气中消耗的 CH_4 为 470Tg/a,其中透气土壤吸收的 CH_4 为 30Tg/a^[5]。土壤是已知唯一的 CH_4 生物壑。大气 CH_4 浓度的增长是由于人类活动增加了 CH_4 源的同时也减弱了其土壤壑的缘故。 CH_4 的土壤壑虽然相对较小,但如果没有它,大气 CH_4 浓度的增长率将是现在的 1.5 倍^[7]。

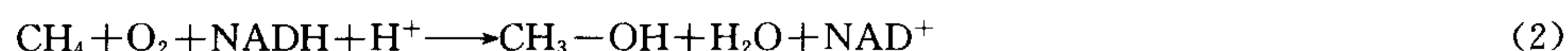
Harriss 等^[8]最早发现大气 CH_4 被排水后的湿地土壤氧化。此后在森林^[9,10]、草原^[11,12]、苔原^[13]和沙漠^[14]都观测到土壤对 CH_4 的吸收作用。许多研究表明,农业活动对土壤氧化 CH_4 的能力有负面影响^[15~21]。本文综述了不饱和土壤(透气土壤)中 CH_4 的吸收、氧化过程及其影响因素,并在此基础上探讨了增加土壤 CH_4 吸收的途径。

1 土壤中 CH_4 的氧化过程

在有氧条件下,土壤中的甲烷氧化菌可氧化 CH_4 并将其当作唯一的碳源和能源。土壤 CH_4 氧化的过程如下^[23]:



甲烷单氧酶(methane monooxygenases, MMOs)作为甲烷氧化菌关键的酶,对底物的专一性极低,可与许多化合物进行代谢反应。甲烷氧化菌氧化 CH_4 的途径与氨氧化菌氧化 NH_3 非常相似^[22]。甲烷单氧酶催化如下两个过程:



虽然甲烷氧化菌氧化 NH_3 的速率比硝化菌要低两个数量级,但迄今为止所有被调查的甲烷氧化菌(如: *Methylobacter albus*, *Methylosinus trichosporium*)都可把 NH_3 氧化为 NO_2^- ^[23]。 NH_3 对 CH_4 氧化的抑制作用对农田、草地和森林土壤中的甲烷氧化菌有重要的生态学意义。

2 影响土壤吸收、氧化 CH_4 的因子

2.1 大气与土壤空气中的 CH_4 浓度

Heipieper 和 de Bont^[24]发现,当空气中 CH_4 浓度小于 1 μ l/L 时,草地土壤仍能吸收 CH_4 。空气 CH_4 浓度升高,土壤 CH_4 吸收也随之增加,且农田土壤 CH_4 吸收的增加量大于森林和草原土壤^[25]。研究表明,无 CH_4 氧化发生时的土壤空气 CH_4 浓度并不为零,即土壤氧化 CH_4 存在一个临界浓度^[26]。Bender 和 Conrad^[27]推测土壤中存在两类甲烷氧化菌:一类在高浓度 CH_4 (>40ml/m³)下生长,对 CH_4 的亲合力低,其临界浓度高;另一类在与大气 CH_4 浓度相近的条件下生长,对 CH_4 的亲合力高,其临界浓度低。第一类甲烷氧化菌主要存在于湿地和稻田土壤中,以土壤内部产生的高浓度 CH_4 为底物。旱地土壤(不饱和土壤)则以第二类甲烷氧化菌为主,其氧化 CH_4 的临界浓度通常小于大气 CH_4 的浓度,因而这些甲烷氧化菌可以靠消耗大气 CH_4 为生。对于高亲和力的甲烷氧化细菌种群目前了解得还不很清楚^[28]。

土壤氧化 CH_4 的临界浓度可随环境条件的改变而发生变化。一般土壤在高浓度 CH_4 下培养一段时间其临界浓度会有所升

高。长年施用大量铵态氮肥, 土壤氧化 CH_4 的临界值可能升得很高, 需在很高的 CH_4 浓度下(如高于 $1000\mu\text{l/L}$)培养几天才可恢复氧化 CH_4 的能力^[29], 对于野外常年暴露于大气 CH_4 中的透气土壤来说这是不可能的。

2.2 土壤水分与氧的有效性

不同的土壤类型和土地利用方式, 不同的土壤湿度范围, CH_4 氧化率与土壤湿度的关系可能会有所不同。热带森林和大草原土壤对 CH_4 的吸收在旱季最大, 在雨季则很低^[30,31]。土壤 CH_4 吸收率与土壤湿度通常呈负相关关系^[10,32~34]。而沙漠土壤甲烷吸收率则与土壤湿度呈正相关^[14]。

甲烷氧化菌的活性通常受氧的有效性限制^[35]。甲烷氧化菌消耗 CH_4 的能力一般超过 CH_4 由大气向土壤中扩散的潜力^[36], 因而土壤中气体扩散的速率成为 CH_4 氧化的调节因子^[10,37,38]。由于气体扩散速率在液相中比在气相中慢得多, 土壤水分含量成为 CH_4 氧化的主要影响因素。水分胁迫限制了土壤对 CH_4 的吸收^[39]。因为土壤湿度过低影响微生物活性, 从而影响对 CH_4 的氧化^[36]。土壤湿度较低时, 土壤 CH_4 吸收率随土壤湿度增加而上升。当土壤湿度超过田间持水量后, 由于大气 CH_4 和 O_2 向土壤中扩散受阻, 甲烷氧化菌活性开始下降^[40,41], 土壤 CH_4 的吸收率随土壤湿度增加而降低。

在土壤有机质含量较高的土壤铵化作用进行很快^[42], 即便土壤湿度低时也是如此。但较干的土壤 NH_4^+ 的硝化需要很长时间, 结果导致 NH_4^+ 在土壤中积累^[43], 从而抑制了 CH_4 的氧化。表土干湿交替大大抑制了 CH_4 氧化^[53]。此外, 施肥常常降低土壤水势, 也可能导致表层土壤 CH_4 的吸收率的下降^[43]。

2.3 土壤氮素

Mac Donald 等^[44]观测到森林每年 46kg/hm^2 的 N 沉降输入增加了土壤 NH_4^+-N 含量, 使土壤 CH_4 壑的强度降低了 50%。受施肥和 N 的干湿沉降影响, 表土的 NH_4^+ 含量高于亚表层土壤, 使表层 CH_4 的氧化受到抑制^[45,46]。 NH_4^+ 对 CH_4 氧化的抑制作用与土壤有效氮含量或施肥量成正比^[47~49]。各类肥料对土壤 CH_4 吸收抑制作用的大小顺序是: 铵态氮肥 > 尿素 > 硝态氮肥^[50,51]。施入 NH_4Cl 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和尿素后, 土壤 CH_4 氧化立即被抑制了 80%~96%。即使土壤 NH_4^+ 浓度几乎降为零, CH_4 氧化仍被抑制了 20%^[52]。长期施用粪肥提高了土壤有机质含量, 土壤微生物的生物量增加, 甲烷氧化菌的数量也相应增加, 从而抵消了粪肥中 N 素对 CH_4 氧化的抑制作用^[53], 使其抑制效果低于同等含 N 量的化肥。 NO_3^- 对 CH_4 氧化没有抑制效应^[20]。不仅如此, 硝态氮肥减轻土壤酸化还可能对 CH_4 氧化菌有利^[53]。Reay 等^[54]发现, 在温度、水分适宜的条件下, 硝酸盐含量高的林地土壤没有或只有很低的氧化 CH_4 的能力。这可能不是由于 NO_3^- , 而是盐分过高所致。 CH_4 氧化菌对渗透势很敏感。由于盐分的加入降低了水势, 明显抑制了 CH_4 的氧化^[52]。根据土壤类型, K⁺ 能或多或少地从粘粒表面和内部改变 NH_4^+ 的有效性, 这种内源 NH_4^+ 的直接效果是抑制了 CH_4 的氧化^[55]。土壤阳离子代换量(CEC)高时, 施用大量的 NH_4^+ 对 CH_4 氧化仅有微弱的影响。反之, 在低 CEC 的土壤, 少量的 NH_4^+ 也会强烈抑制 CH_4 氧化^[56]。

NH_4^+ 对土壤中 CH_4 氧化的抑制作用可归结为 NH_3 和 CH_4 在甲烷单氧酶水平上的竞争、由氧化作用向硝化作用的转移以及 NH_4^+ 氧化生成的 NO_2^- 的毒性^[29,57]。 NH_3 和 CH_4 氧化相互排斥。由于甲烷单氧酶对底物的专一性极低^[22], 施入土壤的 NH_4^+ 立即被甲烷单氧酶氧化, 直到 NH_4^+ 被消耗殆尽, CH_4 氧化才得以开始^[52]。长期施用 NH_4^+ 使土壤氧化 CH_4 的能力完全丧失^[29]。 NH_4^+ 的抑制效应一般不完全可逆。但腐殖土(humisol)中 NH_4^+ 的抑制效应则完全可逆^[58]。据推测, 甲烷氧化菌从抑制效应中恢复过来的能力取决于 NH_4^+ 的浓度和有效作用时间, 腐殖土具有极高的自然硝化率, CH_4 氧化菌可能被很好地保护起来从而免受 NH_4^+ 的影响。

NO_2^- 是 CH_4 氧化菌氧化 NH_4^+ 的最终产物, 它比 NH_4^+ 能更有效地抑制 CH_4 氧化^[52,59], 其抑制时间也更长。施入 NH_4^+-N 的大约 65% 被土壤颗粒吸收, 而 NO_2^- 则完全留在土壤溶液中, 可更直接地对微生物造成毒害^[52]。 NO_2^- 对 CH_4 氧化的抑制作用在加入的 NH_4^+ 进行硝化作用后仍然持续^[29]且变得不可逆转。但在 CH_4 浓度高于 100ml/m^3 时此抑制作用可被消除^[60]。 NH_4^+ 和尿素对 CH_4 氧化的抑制效应主要不是通过 NO_2^- , 因为 NO_2^- 产生后立即被氧化而很少在土壤中累积^[52]。

2.4 土壤 pH 值

Van der Weerden 等^[61]发现, 在玉米田长年施 N 肥降低了土壤 pH 值从而抑制了土壤 CH_4 的氧化。苜蓿作绿肥也可引起土壤 pH 值的显著下降, 土壤酸化导致 CH_4 氧化量的减少。与产甲烷细菌相比, 甲烷氧化菌对 pH 值变化的忍耐性更强^[58]。Dörr 等^[62]分析了中欧约 50 个点的实验资料, 发现 CH_4 吸收与土壤 pH 值没有关系。由于各地土地利用方式和农业管理措施不同, 土壤吸收 CH_4 的适宜 pH 范围也会有所不同。在温带和亚北极地区的泥炭土壤甲烷氧化菌消耗 CH_4 的最适 pH 值为 5.0~6.5^[58]。森林土壤中甲烷氧化菌的最适 pH 值为 5.8, 当 pH 值为 6.8~7.0 时则丧失了活性^[63]。在草地土壤, 当 pH 值从 6.3 降至 5.6 时, CH_4 吸收率降低了近一半; pH 值为 4 时 CH_4 吸收率仅为 pH 值为 6 时的 1/4; 在更低的 pH 值下 CH_4 吸收完全被抑制^[19]。Mac Donald 等^[64]采用分子生态学方法揭示了嗜酸的甲烷氧化菌可存在于 pH 值小于 4.7 的泥炭土中。实验表明, 水溶液中 NH_3 的浓度主要取决于 pH 值: pH 值 < 6 时, NH_4^+ 占 100%; pH 值为 9.25 时 NH_4^+ 和 NH_3 各占 50%; pH 值 > 12 时就只有

NH₃ 了。由于 NH₃ 同 CH₄ 竞争甲烷单氧酶的活性部分, pH 值从中性变为碱性使 NH₃ 的抑制 CH₄ 氧化的能力增强^[65,66]。

生活在土壤微小团粒中的 CH₄ 氧化菌可在其周围形成了 pH 值或 O₂ 的梯度^[67]。土块的 pH 值并不一定反映微生物活动所处的环境条件。无论土壤 pH 值如何, 细胞内的 pH 值应接近中性, 并在酶水平上调控各种比率^[68]。这可能是甲烷氧化菌对 pH 值变化不敏感的一个重要原因。

2.5 土壤温度

Sitaula 等^[47]发现在挪威森林平均温度低于 1℃ 的土壤中仍有大量的 CH₄ 氧化菌存在。森林土壤中的 CH₄ 氧化菌在 -5~10℃ 时受温度变化影响, 在 10~20℃ 时则不随温度变化。森林土壤 CH₄ 氧化率与 0~10℃ 地温成正比^[48]。10~20℃ 时各种土壤平均 CH₄ 吸收率为常数^[69]。森林土壤 CH₄ 吸收日变化不显著^[70,71], 但季节变化明显: 夏天高, 冬天低, 春、秋介于二者之间^[70,72]。日平均土壤 CH₄ 吸收率随土壤温度增加而线性增加^[32]。

温度对 CH₄ 氧化的影响可用温度系数 Q₁₀ 来表征。Crill 等^[50]测得泥炭土 CH₄ 氧化的 Q₁₀ 为 1.27~2.25; 类似地, Dunfield 等^[73]计算得到的 Q₁₀ 为 1.40~2.10。CH₄ 氧化菌对温度的敏感性不如产甲烷细菌^[73], 这主要是因为 CH₄ 氧化菌对大气 CH₄ 的亲合力高且 CH₄ 氧化所需活化能较低导致其温度系数 Q₁₀ 较小的缘故^[74]。当大气 CH₄ 和 O₂ 扩散进入土壤的速率等于土壤中 CH₄ 和 O₂ 消耗的速率时, 此时的土壤温度就是 CH₄ 氧化的最佳温度。当地温高于最佳温度时, 由于 CH₄ 氧化菌难以与利用 O₂ 能力更强的硝化细菌和其它微生物竞争利用土壤空气中的 O₂, 使得土壤中 CH₄ 氧化菌的繁殖和活性降低^[74], 土壤氧化 CH₄ 的能力也随之下降。

2.6 土壤质地与结构

CH₄ 氧化菌在团粒结构较好的壤土中可保护自己免受干扰; 而在沙质土壤中则易失去其高活力的生态位。沙土易受干扰影响, 与壤土和粘土相比, 撂荒后土壤 CH₄ 氧化的恢复也较快^[53]。土壤有机层阻隔了大气 CH₄ 或 O₂ 向土壤中 CH₄ 氧化菌的扩散^[70]。在未受干扰的森林土壤, CH₄ 浓度随深度下降很快, 表层 0~5cm 土壤 CH₄ 浓度从 1.7 降至 1.0 μl/L^[59,75]。由于表层土壤 NH₄⁺ 含量较高, CH₄ 氧化菌活性受到抑制^[76], 因而土壤 CH₄ 氧化率的峰值通常出现在亚表层 (5~10cm)^[24, 42, 55, 75~78], 25cm 以下土层则基本没有 CH₄ 氧化活性^[76]。但也有研究表明, 由于耕作破坏了表土结构, 使得农田土壤 CH₄ 氧化率在耕层深度 (25cm) 以下才有较大增加^[42]。在土豆地, 垄的 CH₄ 吸收最大, 其次是未压实的土壤, 而压实的土壤则有显著的 CH₄ 排放^[79]。

2.7 植被覆盖与土地利用方式

不同的植被覆盖与土地利用方式对土壤 CH₄ 吸收有很大影响。耕地、草地和森林土壤的平均 CH₄ 吸收率分别为 0.28、0.52 和 1.51 mg/(m²·d)^[53]。植物吸收大量养分可把包括 CH₄ 氧化菌在内的土壤微生物从 NH₄⁺ 等底物的有害影响中部分解救出来^[53]。木本植物的生物量一般大于草本植物, 其吸收土壤养分的量也通常大于草本植物, 这可能是森林土壤的平均 CH₄ 吸收率大于草原土壤的原因之一。靠近城市或城市中的林地土壤 CH₄ 吸收率低, 其原因是空气污染造成有机质分解和养分循环变慢。空气污染 (特别是 O₃) 对树叶造成伤害, 降低了树叶的分解率, 其结果是从凋落物到土壤中 CH₄ 氧化菌种群的物质流中的 C/N 比下降^[80], 而 C/N 比与土壤 CH₄ 吸收率呈正相关关系^[81]。森林和草地变为农田土壤 CH₄ 的净吸收降低主要是由耕作和施 N 肥引起的。实验表明: 多年种植的冬黑麦田土壤 CH₄ 吸收率高于多年种植的玉米田。这可能不是由于植物生长本身的影响, 而是施用不同的杀虫剂的结果^[82]。

3 维持与提高土壤 CH₄ 吸收率的途径

维持与提高农业土壤氧化 CH₄ 潜力的重要措施包括: 免耕^[42]、施硝态氮肥^[20]和/或有机肥^[83]。保持土壤 CH₄ 氧化率最好的方法是免耕^[84]。Kessavalou 等^[85]发现免耕地的 CH₄ 吸收率高于耕过的地块。免耕 15a 后, 土壤 CH₄ 吸收率比连续耕作、同等施 N 量的地块高了 4.5 到 11 倍^[42]。但也有的耕地撂荒后土壤 CH₄ 氧化率仍然很低。这表明停止耕作和施 N 肥后 CH₄ 氧化的恢复是一个缓慢过程。

在农田只施硝态氮肥可阻止土壤 CH₄ 壑进一步减小。但这同时也带来了其他相关环境问题: 如无氧条件下, NO₃⁻ 在反硝化过程中生成了同样是温室气体的 N₂O。当然, N₂O 也可由透气土壤中 NH₄⁺ 的硝化产生。其次, NO₃⁻ 容易被淋溶到地下污染源, 特别是在秋冬当作物吸收 N 素较少无法阻止 N 淋溶发生的时候。假如由于各种原因要施用尿素或铵态氮肥, 建议在被犁过的土壤进行表施, 这样大气 CH₄ 的吸收不会受到过多的妨碍。在免耕地应避免将铵态氮肥和尿素施于土壤 5~15cm 深, 那里是 CH₄ 氧化潜力最大的地方^[53]。施用有机肥虽然也抑制土壤 CH₄ 的氧化, 但其抑制作用远小于铵态氮肥和尿素。我国向来有施有机肥的传统, 在增加产量的同时如何提高土壤 CH₄ 的吸收率, 这方面还有很大的潜力可挖。

References:

- [1] Blake D R, Rowlands F S. Continuing worldwide increase in tropospheric methane, 1978 to 1987. *Science*, 1988, **239**:1129~1131.
- [2] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science*, 1990, **248**:1217~1219.

- [3] Lelieveld J, Crutzen P J, Bruhl C. Climate Effects of atmospheric methane. *Chemosphere*, 1993, **6**:739~768.
- [4] Milich L. The role of methane in global warming: where might mitigation strategies be focused? *Global Environ. Change*, 1999, **9**:179~201.
- [5] IPCC. In: Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, *et al.* Eds., *The Science of Climate Change*. Contribution of working group I to the Second Assessment Report of IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [6] Dlugokencky E J, Steele L P, Lang P M, *et al.* The growth rate and distribution of atmospheric methane. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1994, **9**:17021~17043.
- [7] Duxbury J M. The significance of agricultural sources of greenhouse gases. *Fertil. Res.*, 1994, **38**:151~163.
- [8] Harriss R C, Sebacher D L, Day F P. Methane flux in the Great Dismal Swamp. *Nature*, 1982, **297**:673~674.
- [9] Steudler P A, Bowden R D, Melillo J M, *et al.* Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soil. *Nature*, 1989, **341**:314~316.
- [10] Adamsen A P S, King G M. Methane consumption in temperate and subarctic forest soils: rates, vertical zonation, and responses on water and nitrogen. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1993, **59**:485~490.
- [11] Mosier A, Schimel D, Valentine D, *et al.* Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature*, 1991, **350**:330~332.
- [12] Mosier A, Valentine D, Schimel D, *et al.* Methane consumption in the Colorado short grass steppe. *Mitt Dtsch. Bodenkdl. Ges.*, 1993, **69**:219~226.
- [13] Whalen S C, Reeburgh W S. Consumption of atmospheric methane by tundra soils. *Nature London*, 1990, **346**:160~162.
- [14] Striegl R G, McConnaughey T A, Thorstenson D C, *et al.* Consumption of atmospheric methane by desert soils. *Nature*, 1992, **357**:145~147.
- [15] Born M, Dorr H, Levin I. Methane consumption in aerated soil of the temperate zone. *Tellus*, 1990, **42B**:2~8.
- [16] Keller M, Mitre M E, Stallard R F. Consumption of atmospheric methane in soils of Central Panama: effects of agricultural development. *Global Biogeochem. Cycles*, 1990, **4**:21~27.
- [17] Hansen S, Maehlum J E, Bakken L R. N₂O fluxes in soil influenced by fertilization and tractor traffic. *Soil Biol. Biochem.*, 1993, **25**:621~630.
- [18] Ojima D S, Valentine D W, Mosier A R. Effect of land use change on methane oxidation in temperate forest and grassland soils. *Chemosphere*, 1993, **26**:675~685.
- [19] Hütsch B W, Webster C P, Powlson D S. Methane oxidation as affected by land use, soil pH and nitrogen fertilization. *Soil Biol. Biochem.*, 1994, **26**:1613~1622.
- [20] Willison T W, Webster C P, Goulding K W T, *et al.* Methane oxidation in temperate soil-effective of land use and the chemical form of nitrogen-fertilizer. *Chemosphere*, 1995, **30**:539~546.
- [21] Dobbie K E, Smith K A. Comparison of CH₄ oxidation rates in woodland, arable soils. *Soil Biol. Biochem.*, 1996, **28**:1357~1365.
- [22] Hanson R S, Hanson T E. Methanotrophic bacteria. *Microbiol. Rev.*, 1996, **60**:439~471.
- [23] Bedard C, Knowles R. Physiology, biochemistry, and specific inhibitors of CH₄, NH₄⁺, and CO oxidation by methanotrophs and nitrifiers. *Microbiol. Rev.*, 1989, **53**:68~84.
- [24] Heipieper H J, de Bont J A M. Methane oxidation by Dutch grassland and peat soil microflora. *Chemosphere*, 1997, **35**(12):3025~3037.
- [25] Chan A S, Parkin T B. Methane oxidation and production activity in soils from natural and agricultural ecosystems. *J. Environ. Qual.*, 2001, **30**:1896~1903.
- [26] King G M. Ecological aspects of methane oxidation in a Dynamics. *Adv. Microbiol. Ecol.*, 1992, **12**:431~468.
- [27] Bender M, Conrad R. Kinetics of CH₄ oxidation in oxic soils. *Chemosphere*, 1993, **26**:687~696.
- [28] Bender M, Conrad R. Kinetics of CH₄ oxidation in oxic soils exposed to ambient air or high CH₄ mixing ratios. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 1992, **101**:261~270.
- [29] Nesbit S P, Breitenbeck G A. A laboratory study of factors influencing methane uptake by soils. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 1992, **41**:39~54.
- [30] Singh J S, Raghubanshi V S, Reddy V S, *et al.* Methane flux from irrigated paddy and dryland rice fields, and from seasonally dry tropical forest and savanna soil of India. *Soil Biol. Biochem.*, 1998, **30**(2):135~139.
- [31] Fernandes S A P, Bernoux M, Cerri C C, *et al.* Seasonal variation of soil chemical properties and CO₂ and CH₄ fluxes in unfertilized and P-fertilized pastures in an Ultisol of the Brazilian Amazon. *Geoderma*, 2002, **107**:227~241.
- [32] Peterjohn W T, Melillo J M, Steudler P A, *et al.* Responsible to trace gas fluxes and N available to experimentally elevated soil temperatures. *Ecological Applications*, 1994, **4**(3):617~625.
- [33] Lessard R, Rochette P, Topp E, *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes from poorly drained adjacent cultivated and forest sites. *Can. J. Soil Sci.*, 1994, **74**:139~146.

- [34] Xu H, Chen G, Huang G, *et al.* Factors controlling N_2O and CH_4 fluxes in mixed broad-leaved/Korean pine forest of Changbai Mountain. *China. J. Forestry Res.*, 1999, **10**(4):214~217.
- [35] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *Eur. J. Soil Biol.*, 2001, **37**:25~50.
- [36] Striegl R G. Diffusional limits to the consumption of atmospheric methane by soils. *Chemosphere*, 1993, **26**:1~4.
- [37] Potter C S, Davidson E A, Verchot L V. Estimate of global biological controls and seasonality in soil methane consumption. *Chemosphere*, 1996, **32** (11):2219~2246.
- [38] Bradford M A, Ineson P, Wookey P A, *et al.* Role of CH_4 oxidation, production and transport in forest soil CH_4 flux. *Soil Biology Biochemistry*, 2001, **33**:1625~1631.
- [39] Kammann C, Grünhage L, Jäger H-J, *et al.* Methane fluxes from differentially managed grassland study plots: the important role of CH_4 oxidation in grassland with a high potential for CH_4 production. *Environmental Pollution*, 2001, **115**:261~273.
- [40] Czepiel P M, Crill P M, Harriss R C. Environmental-factors influencing the variability of methane oxidation in temperate zone soil. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1995, **100**:9359~9364.
- [41] Le Mer J, Escoffier S, Chessel C, *et al.* Microbiological aspects of methane emission by a ricefield soil from Camargue (France) 2. Methanotrophy and relate microflora. *Eur. J. Soil Biol.*, 1996, **32**:71~80.
- [42] Hütsch B W. Tillage and land use effects on methane oxidation rates and their vertical profiles in soil. *Biol. Fertil. Soils*, 1998b, **27**:284~292.
- [43] Schnell S, King G M. Responses of methanotrophic activity in soils and cultures to water stress. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1996, **62**:3203~3209.
- [44] Mac Donald J A, Skiba U, Sheppard L J, *et al.* The effect of nitrogen deposition and seasonal variability on methane oxidation and nitrous oxide emission rates in an upland spruce plantation and moorland. *Atmos. Environ.*, 1997, **31**:3693~3706.
- [45] Conrad R. Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H_2 , CO, OCS, N_2O , and NO). *Microbiol. Rev.*, 1996, **60**:609~640.
- [46] Amaral J A, Knowles R. Inhibition of methane concentration in forest soil and cultures of methanotrophs by aqueous forest soil extracts. *Soil Bio. Biochem.*, 1997, **29**:1713~1720.
- [47] Sitaula B K, Bakken L R, Abrahamsen G. CH_4 uptake by temperate forest soil ~effect of N input and soil acidification, *Soil Bio. Biochem.*, 1995, **27**:871~880.
- [48] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M, *et al.* Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. *Global Biogeochem. Cycles*, 1995, **9**:1~10.
- [49] Kravchenko I, Boeckx P, Galchenko V, *et al.* Short-and medium-term effects of NH_4^+ on CH_4 and N_2O fluxes in arable soils with a different texture. *Soil Biol. Biochem.*, 2002, **34**:669~678.
- [50] Crill P M, Martikainen P J, Nykanen H, *et al.* Temperature and fertilization effects on methane oxidation in a drained peatland soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1994, **26**:1331~1339.
- [51] Veldkamp E, Weitz A M, Keller M. Management effects on methane fluxes in humid tropical pasture soils. *Soil Biol. Biochem.*, 2001, **33**:1493~1499.
- [52] Hütsch B W. Methane oxidation in arable soil as inhibited by ammonium, nitrate, and organic manure with respect to soil pH. *Biol. Fertil. Soils*, 1998a, **28**:27~35.
- [53] Hütsch B W. Methane oxidation in non-flooded soils as affected by crop production -invited paper. *European Journal of Agronomy*, 2001b, **14**:237~260.
- [54] Reay D S, Radajewski S, Murrell J C, *et al.* Effects of land-use on the activity and diversity of methane oxidizing bacteria in forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, 2001, **34**:1613~1623.
- [55] King G M, Schnell S. Effects of ammonium and non-ammonium salt additions on methane oxidation by *Methylosinus trichosporium* OB3b and Maine forest soils. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1998, **64**:253~257.
- [56] DeVisscher A, Boeckx P, Van Cleemput O. Interaction between nitrous oxide formation and methane oxidation in soil: Influence of cation exchange phenomena. *J. Environ. Qual.*, 1998, **27**:679~687.
- [57] Castro M S, Peterjohn W T, Melillo J M, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on the fluxes of N_2O , CH_4 , and CO_2 from soils in a Florida slash pine plantation. *Can. J. Forest. Res.*, 1994, **24**:9~13.
- [58] Dunfield P, Knowles R. Kinetics of methane oxidation by nitrate, nitrite and ammonium in a humisol. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1995, **61**:3129~3135.
- [59] Schnell S, King G M. Mechanistic analysis of ammonium inhibition of atmospheric methane consumption in forest soils. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1994, **60**:3514~3521.
- [60] King G M, Schnell S. Effect of increasing atmospheric methane concentration on ammonium inhibition of soil methane consumption.

Nature, 1994, **370**:282~284.

- [61] Van der Weerden T J, Scherlock R R, Williams P H, *et al.* Nitrous oxide emissions and methane oxidation by soil following cultivation of two different leguminous pastures. *Biol. Fertil. Soils*, 1999, **30**:52~60.
- [62] Dörr H, Katruff L, Levin I. Soil texture parameterization of the methane uptake in aerated soils. *Chemosphere*, 1993, **26**:697~713.
- [63] Amaral J A, Ren T, Knowles R. Atmospheric methane are consumption by forest soils and extracted bacteria at different pH values. *J. Environ. Microbiol.*, 1998, **64**:2397~2402.
- [64] Mac Donald I R, Hall G H, Pickup R W, *et al.* Methane oxidation potential preliminary analysis of methanotrophs in blanket bog peat using molecular ecology techniques. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 1996, **21**:197~211.
- [65] Mengel K. *Ernährung und stoffwechsel der Pflanze*. 6. Auflage. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1984.
- [66] Russell E W. *Russel's soil conditions and plant growth*. 11. Ausgabe, Hrsg. Wild A. Longman Scientific & Technical, UK, 1988.
- [67] Bender M, Conrad R. Effect of CH₄ concentrations and soil conditions on the induction of CH₄ oxidation activity. *Soil Biochem.*, 1995, **27**:1517~1527.
- [68] Gullledgeh J, Schimel J P. Low-concentration kinetics of atmospheric CH₄ oxidation in soil and mechanism of NH₄⁺ inhibition. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1998, **64**:4291~4298.
- [69] Chapman S J, Kanda K I, Tsuruta H. Minami Influence of temperature and oxygen availability on the flux of methane and carbon dioxide from wetlands; a comparison of peat and paddy soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1996, **42**(2):269~277.
- [70] Steinkamp R, Butterbach-Ball H, Papen H. Methane oxidation by soils of an N limited and N fertilized spruce forest in the Black Forest, Germany. *Soil Biol. Biochem.*, 2001, **33**:145~153.
- [71] Maljanen M, Martikainen P J, Aaltonen H, *et al.* Short-term variation in fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in cultivated and forested organic boreal soils. *Soil Biol. Biochem.*, 2002, **34**:577~584.
- [72] Sun X. CH₄ emission flux of forest soils in lower mountain area, Beijing. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, **9**(3):173~176.
- [73] Dunfield P, Knowls R, Dumont R, *et al.* Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils-response to temperature and pH. *Soil Biol. Biochem.*, 1993, **25**:321~326.
- [74] Ding W, Cai Z. Effect of temperature on atmospheric CH₄ oxidation in soils. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, **22** (3):54~58.
- [75] Prieme A, Christensen S. Seasonal and variation of methane oxidation in a Danish spruce forest. *Soil Biol. Biochem.*, 1997, **29**:1165~1172.
- [76] Liang Z, Shi Y, Wang C, *et al.* Methane Oxidation in Soil Profiles of Broad-Leaved/ Korean Pine Mixed Forest in Changbai Mountain. *Journal of the Graduate School of Chinese Academy of Sciences*, 2004, **121** (11):71~77.
- [77] Roslev P, Iverson N, Henriksen K. Oxidation and assimilation of atmospheric methane by soil methane oxidizers. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1997, **63**:874~880.
- [78] Saari A, Martikaainen P J, Ferm A, *et al.* Methane oxidation in soil profiles of Dutch and Finnish coniferous forests with different soil texture and atmospheric nitrogen deposition. *Soil Biol. Biochem.*, 1997, **29**:1625~1632.
- [79] Ruser R, Flessa H, Schilling R, *et al.* Soil compaction and fertilization effects on nitrous oxidation and methane fluxes in potato fields. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, **62**:1587~1595.
- [80] Goldman M B, Groffman P M, Pouyat R V. CH₄ uptake and N available in forest soils along an urban rural gradient. *Soil Biol. Biochem.*, 1995, **27**(3):281~286.
- [81] Tanai N, Takenaka C, Ishizuka, S, *et al.* Methane flux and regulatory variables in soils of three equal-aged Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) forest in central Japan. *Soil Bio. Biochem.*, 2003, **35**:633~641.
- [82] Hütsch B W. Methane oxidation in soils of two long-term fertilization experiments in Germany. *Soil Biol. Biochem.*, 1996, **28**:773~782.
- [83] Hütsch B W, Webster C P, Powlson D S. Long term effects of nitrogen fertilization on methane oxidation in soil of the broadbalk wheat experiment. *Soil Biol. Biochem.*, 1993, **25**:1307~1315.
- [84] Ball B C, Scott A, Paker J P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil & Tillage Research*, 1999, **53**:29~39.
- [85] Kessavalou A, Doran J W, Mosier A R, *et al.* Greenhouse gas fluxes following tillage and wetting in a wheat-fallow cropping system. *J. Environ. Qual.*, 1998b, **27**:1105~1116.

参考文献:

- [72] 孙向阳. 北京低山森林土壤中 CH₄ 排放通量的研究. *土壤与环境*, 2000, **9**(3):173~176.
- [74] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对土壤氧化大气 CH₄ 的影响. *生态学杂志*, 2003, **22**(3):54~58.
- [76] 梁战备, 史奕, 王琛瑞, 等. 长白山阔叶红松林不同深度森林土壤氧化 CH₄ 研究. *中国科学院研究生院学报*, 2004, **21**(1):71~77.