

土地利用方式对白浆土氧化甲烷的影响

王长科^{1, 2}, 吕宪国², 蔡祖聪³, 罗 勇¹

(1. 中国气象局气候研究开放实验室、国家气候中心, 北京 100081;

2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 3. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 白浆土在不同土地利用方式下 CH_4 氧化潜力存在显著差异。天然草甸表层土氧化大气 CH_4 的潜力最大, 如果被开垦成人工林、旱田和水田, 则氧化潜力分别降低 64%、98% 和 117%。土壤透气性下降, 甲烷氧化细菌数量减少以及活性降低, 可能是土地利用方式改变后白浆土氧化 CH_4 潜力下降的主要原因。白浆土氧化大气 CH_4 潜力具有明显的垂直分异: 草甸和林地土壤氧化大气 CH_4 的潜力随着土壤深度的增加而减小; 旱田土壤中耕作层下残存的有机质含量较高的层次仍保留了较强的氧化大气 CH_4 潜力, 氧化 CH_4 速率是耕作层的 13 倍; 即使是在大气中培养, 水田土壤整个剖面仍排放 CH_4 , 最低层 CH_4 排放率最小。供试白浆土氧化大气 CH_4 速率与土壤有机碳、碱解氮和全氮含量显著正相关, 与 pH 和土壤含水量 (% WHC) 负相关。在一定的温度和水分条件下, 土壤有机碳含量是决定白浆土氧化大气 CH_4 速率的一个最重要因素。

关键词: CH_4 氧化; CH_4 排放; 土地利用; 白浆土

文章编号: 1000-0585(2006)02-0335-07

CH_4 是一种重要的温室气体, 对温室效应的相对贡献率约为 20%, 仅次于 CO_2 , 但其增温潜势却是 CO_2 的 23 倍^[1]。大气 CH_4 浓度正以每年大约 1% 的速度增加^[1]。目前减缓大气 CH_4 浓度增加的主要途径是减少向大气排放和加速大气 CH_4 的氧化。全球非淹水土壤每年大约氧化 30Tg 大气 CH_4 ^[2]。人类活动所导致的土壤氧化 CH_4 能力的降低就是大气 CH_4 浓度升高的原因之一^[3]。三江平原 (45°01'~48°28'N, 130°13'~135°05'E) 是我国最大的淡水沼泽湿地分布区, 土壤以白浆土、草甸土和沼泽土的面积为最大^[4]。对三江平原白浆土的研究主要集中在土壤本身的形态特征及物理、化学性质等^[4~6], 而有关土壤碳通量的研究较少^[7]。近 50 多年来的持续农业开发, 三江平原土地利用方式发生了很大变化。本文对不同土地利用方式下白浆土 CH_4 氧化潜力进行了初步实验研究, 目的是评估土地利用方式改变对白浆土 CH_4 氧化潜力的影响, 探讨白浆土主要理化性质与 CH_4 氧化潜力之间的关系, 并试图找出影响白浆土 CH_4 氧化的主要因素。

1 样品采集与分析

1.1 土壤样品的采集

供试土壤全部采自中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站 (133°31'E, 47°35'N)。

收稿日期: 2005-02-15; 修订日期: 2005-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40375026); 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX3-SW-NA-01); 中国气象局气候研究开放实验室课题 (CCSF2005-2-QH12, LC2004C-12)

作者简介: 王长科 (1966-), 男, 副研究员, 博士。主要从事温室气体与气候变化研究。

E-mail: wangck@cma.gov.cn

该站位于三江平原北部, 海拔高程 56m, 气候属中温带湿润季风气候, 1 月平均气温 -21.9°C , 7 月平均气温 21.5°C , 年平均气温 1.9°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年有效积温为 2300°C , 平均年降水量约 560mm, 主要集中在 6 月~9 月, 占全年降水量的 70% 以上, 无霜期为 120~125 天。土壤以白浆土占绝对优势, 其次是沼泽土。白浆土上天然生长的植被以小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*) 草甸为主, 草甸开垦成的旱田主要种植小麦和大豆, 水田种植水稻, 另外还栽种了一片兴安落叶松 (*Larix gmelini*) 人工林。

在草甸、人工针叶林、旱田和水田中根据土壤发生层采集土壤样品。将所采土样放入密封塑料取样袋中带回实验室在 4°C 下冷藏。

1.2 土壤理化性质测定

土壤含水量用烘干法测定^[8]。土壤持水量 (WHC) 的测定用重量法^[9]。土壤机械组成用岛津 RS-1000 粒度分析仪测定。

pH 值采用电位法 (水提) 测定; 土壤有机质采用重铬酸钾-外加热法测定; 全氮的测定采用半微量开氏定氮法; 铵态氮采用 KCl 浸提-蒸馏法; 硝态氮采用酚二磺酸比色法测定; 碱解氮采用碱解法测定; 土壤阳离子交换量 (CEC) 用乙酸氨交换法^[8]。

不同土地利用方式下供试白浆土表层的主要理化性质见表 1。

表 1 供试土壤表层主要理化性质

Tab. 1 Characteristics of the four studied soils (topsoil)

土地利用类型	草甸	林地	旱田	水田
含水量 (%)	43.52	15.15	27.30	56.99
含水量 (%WHC)	32.47	18.76	41.20	80.81
砂粒 (%)	16.43	10.78	15.24	5.48
粉粒 (%)	31.11	31.31	33.02	41.13
粘粒 (%)	52.46	58.91	51.74	53.43
pH	5.65	5.59	5.70	6.25
有机碳 (%)	4.73	2.63	1.76	2.20
全氮 (%)	0.42	0.25	0.23	0.23
铵态氮 (mg/kg)	6.63	17.68	22.27	18.55
硝态氮 (mg/kg)	1.58	0.90	11.85	3.95
碱解氮 (mg/kg)	410.95	295.52	246.58	238.73
C/N	11.31	10.75	7.77	8.68
CEC (cmol/kg)	30.00	13.50	18.50	20.11

1.3 室内土壤培养和气体分析

称取相当于 20g 干土的新鲜土样放入约 145mL 的广口瓶中。在称样前先将土样掰碎, 剔除较大的根系, 并尽量使土样混合均匀。密封好的样品在室温下放置 24h 以便细菌恢复。

通过取样口从瓶中抽取 1mL 气体注入气相色谱仪测定, 作为计算氧化速率的初始浓度。同时将室内空气抽入 1L 的密封气袋 (中科院大连化学物理研究所产) 中, 备用。然后每隔 4h (或 8h) 测定一次瓶中 CH_4 的浓度, 共培养 28 h。每次抽样后都将所备气袋中的 1mL 空气回灌样品瓶以维持瓶内压力不变。所有培养均在 25°C 恒温下进行, 各处理设置 3 个重复。

CH₄ 浓度用气相色谱仪 (GC-12A, Shimadzu) 检测, 分离柱填料为 Porapak Q, 柱温 80℃, 氢火焰离子化检测器 (FID) 温度 200℃。所用 CH₄ 标准气由南京分析仪器厂生产。

1.4 数据统计分析和计算

土壤氧化大气 CH₄ 的速率按下式计算:

$$r = 0.714kVC_a/W$$

式中, r 为 CH₄ 氧化 (排放) 速率, ng/g·h; k 为一级反应常数 (/h), 通过 CH₄ 浓度的自然对数对时间的线性回归求得; V 为瓶中气体体积 (mL); C_a 为大气 CH₄ 浓度, 取 1.9 μL/L; W 为干土重量 (g)。

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用方式下白浆土 CH₄ 氧化速率

在好氧条件下培养, 供试土壤表层 CH₄ 氧化过程见图 1。从图 1 可以看出, 在不同利用方式下, 白浆土表层氧化大气 CH₄ 潜力不同。

在 4 种土地利用方式下, 白浆土表层氧化大气 CH₄ 的速率分别为: 草甸 0.887 ng/g·h, 人工林 0.323 ng/g·h, 旱田 0.017 ng/g·h, 水田 -0.151 ng/g·h (图 2)。天然草甸被改造为人工林、旱田和水田后, 氧化大气 CH₄ 的速率分别降低了 64%, 98% 和 117%。Smith 等在北欧的研究结果认为, 天然土壤转变为农业用地土壤氧化速率将减少 2/3, 这与本文的研究结果非常接近^[10]。

草甸土壤氧化大气 CH₄ 速率分别与人工林、旱田、水田氧化大气 CH₄ 速率之间的 t 检验证实这种差异都十分显著 ($p < 0.01$), 说明天然草甸氧化大气 CH₄ 的潜力最大, 如果开垦成为人工林则氧化潜力降低一半以上, 如果开垦成旱田则基本丧失原有潜力, 如果变成水田, 则向大气中排放 CH₄, 由原来大气 CH₄ 的汇转变为大气 CH₄ 的源。

土壤湿度和有机物质含量在很大程度上决定着土壤氧化 CH₄ 速率^[11, 12]。天然草甸被开垦后, 被随着土地利用方式的改变, 白浆土水分状况发生变化 (例如水田土壤长期处于淹水状态), 有机质含量降低 (表 1), 土壤结构和透气性变差, 大气 CH₄ 和 O₂ 向土中的扩散发生困难。由于得不到足够的养料 (CH₄) 和氧气, 土中甲烷氧化菌的数量和活性降低, 土壤氧化大气 CH₄ 的潜力就随着降低。本实验中温度控制在土壤 CH₄ 氧化的最优范围内, 因而无法研究温度的影响。对于水分和温度状况的改变以及化肥施用对三江平原白浆土氧化 CH₄ 潜力的影响还需做进一步的研究。

2.2 白浆土氧化大气 CH₄ 速率的剖面差异

草甸土壤从上到下, 氧化大气 CH₄ 速率依次为 0.887, 0.825, 0.532, 0.060 ng/g·h (图 2), 表明草甸土壤氧化速率随着土壤深度的增加而减小, 表层为最大值。上部 3 层氧化潜力没有明显差异 (t 检验, $p > 0.05$), 但它们都显著地比最低层大 ($p < 0.05$)。

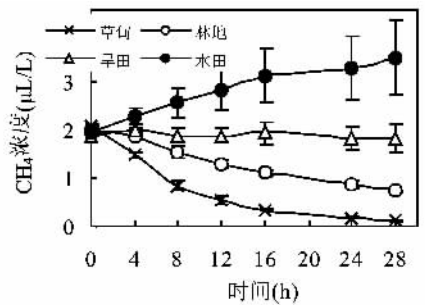


图 1 不同土地利用方式下白浆土氧化 CH₄ 过程
Fig. 1 Time course of methane oxidation in lessive under different land-use treatments

Tlustos 等研究发现英国未施肥草地土壤氧化大气 CH_4 的速率为 $0.22\text{ng/g}\cdot\text{h}$ ，是实验结果的 $1/4$ 。

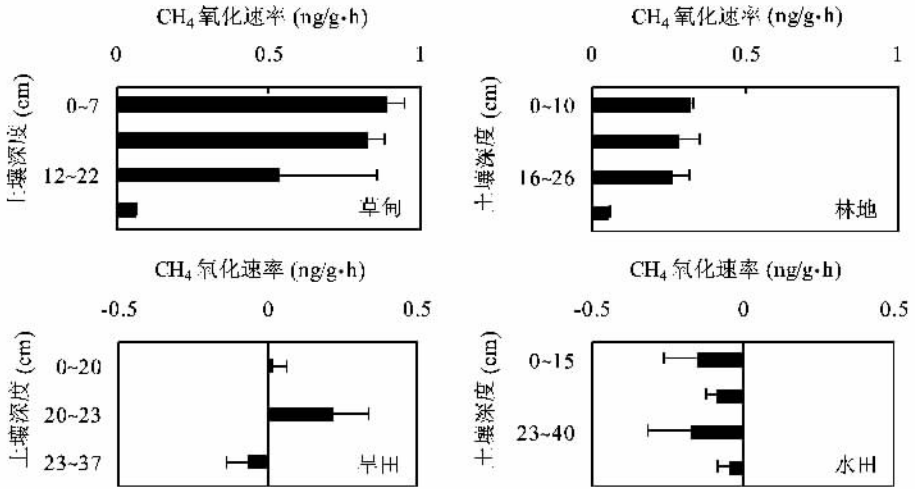


图 2 不同深度土壤氧化大气 CH_4 速率的变化

Fig. 2 Depth profiles of atmospheric CH_4 oxidation rate of four soils

林地土壤的所有层次都可以氧化大气 CH_4 ，氧化大气 CH_4 的速率随土壤深度的增加而减小（图 2）。与本研究结果相似，日本森林土壤一般也是表层土壤 CH_4 氧化速率最高^[14]。Schnell 等对美国东北部落叶松林土壤氧化大气 CH_4 的研究发现 $4\sim 8\text{cm}$ 深处土层为氧化活性最大土层，高于或低于此土层 CH_4 氧化能力迅速下降^[15]。本实验没有得到类似的结果，供试林地土壤上 3 层之间氧化潜力没有明显差异（ t 检验， $p > 0.05$ ），而最低层氧化速率只有其余 3 层的 $15\%\sim 19\%$ ，显著地比别的层小（ $p < 0.05$ ）。也就是说虽然 $0\sim 10\text{cm}$ 深处土层是氧化活性最大土层，但低于此土层 CH_4 氧化能力并没有迅速下降，而是直到 26cm 深处以下， CH_4 氧化能力才迅速下降。

旱田土壤氧化大气 CH_4 速率的剖面差异特别明显（图 2）。耕作层（ $0\sim 20\text{cm}$ ）氧化大气 CH_4 速率为 $0.017\text{ng/g}\cdot\text{h}$ ，这与英国小麦田土壤氧化大气 CH_4 速率比较接近，后者为 $0.013\text{ng/g}\cdot\text{h}$ ^[13]。亚表层（ $20\sim 23\text{cm}$ ）氧化大气 CH_4 的速率为 $0.221\text{ng/g}\cdot\text{h}$ ，在整个旱田土壤剖面中最高。残留的有机质含量较高的亚表层氧化 CH_4 速率约是耕作层的 13 倍，说明人为耕作活动降低了旱田土壤氧化大气 CH_4 的能力（图 2）。Hütsch 曾发现类似的结果，发现免耕土壤氧化 CH_4 速率是连续翻耕土壤的 $4.5\sim 11$ 倍^[16]。最低层（ $23\sim 37\text{cm}$ ） CH_4 氧化速率为 $-0.061\text{ng/g}\cdot\text{h}$ ，没有表现出吸收大气 CH_4 的潜力，反而排放 CH_4 。

水田土壤剖面中所有层次都排放 CH_4 （图 2），但 CH_4 排放速率较小。以表层土（ $0\sim 15\text{cm}$ ）为例，在相似的培养条件下（新鲜土，培养瓶中充空气），同样利用线性回归方法计算 CH_4 排放速率，同为粘壤土的采自美国 Louisiana 州的水稻土甲烷 CH_4 速率为 $37.49\text{ng/g}\cdot\text{h}$ ，而本实验所用的水田土壤仅为 $0.24\text{ng/g}\cdot\text{h}$ ，比前者小 2 个数量级^[17]。虽然培养是在好氧条件下进行的，但采样时水田淹水，供试水田土壤处于厌氧环境下，同时由于供试水田土壤质地粘重，含水量高，可能导致它们内部仍然保留有适合产甲烷菌活动的

厌氧微环境^[18], CH_4 产生率超过 CH_4 氧化率, CH_4 产生而不是 CH_4 氧化在水田土壤 CH_4 排放中起主要作用。

2.3 白浆土 CH_4 排放与土壤理化性质之间的关系

土壤 CH_4 排放是土壤中 CH_4 产生、氧化和传输过程的综合结果。土壤对 CH_4 的氧化是决定 CH_4 排放量的一个关键过程。影响土壤 CH_4 氧化过程的因素包括土壤水分、温度、质地、氮素状况、pH 值等。通过相关分析可以确定土壤理化因素对白浆土氧化大气 CH_4 潜力的影响。

相关分析显示白浆土氧化大气 CH_4 的速率与土壤有机碳、碱解氮、全氮含量显著正相关 ($p < 0.01$), 与土壤 pH 值显著负相关 ($p < 0.01$), 与含水量 (%WHC) 负相关 ($p < 0.05$) (表 2)。这个结论与其他研究的结论不一致。耿远波等发现土壤 CH_4 通量与温带草原土壤表层有机碳和全氮含量没有显著相关性^[19], 而 Singh 等的研究表明热带森林土壤吸收大气 CH_4 与土壤全 C、全 N 之间为负相关关系, 认为有机质含量高可能降低土壤空气中氧含量, 从而导致富含有机质的地点甲烷氧化减少^[20]。

表 2 CH_4 氧化速率与土壤理化性质之间的相关关系

Tab. 2 Correlation between CH_4 oxidation rates and soil physico-chemical properties incubation

土壤属性	含水量 (%)	含水量 (%WHC)	砂粒 (%)	粉粒 (%)	粘粒 (%)	pH	有机碳 (%)
相关系数 r	0.15	-0.60*	0.61*	-0.35	-0.19	-0.69**	0.78**
土壤属性	全氮 (%)	铵态氮 (mg/kg)	硝态氮 (mg/kg)	碱解氮 (mg/kg)	C/N	CEC (cmol/kg)	
相关系数 r	0.69**	-0.41	-0.19	0.71**	0.14	-0.39	

注: * 显著性水平 0.05; ** 显著性水平 0.01

为了找出影响土壤 CH_4 氧化的最重要土壤理化因素, 我们进行了逐步回归分析。白浆土氧化大气 CH_4 的速率与土壤理化性质之间的逐步回归方程为:

$$\text{MO} = 0.197\text{SOC} - 0.214 \quad (R^2 = 0.61, p < 0.05)$$

式中, MO 为 CH_4 氧化速率, SOC 为土壤有机碳。这个方程可以解释土壤氧化潜力差异的 61%。

上述方程说明, 供试白浆土氧化 CH_4 潜力决定于土壤有机碳 (有机质) 含量。归根到底, 土壤温室气体的排放或吸收只与有机质和微生物有关, 水分、温度、pH 等环境因子只是影响土壤中微生物的组成和活性, 影响有机物质的分解, 进而影响到温室气体的产生和转化^[19]。土壤甲烷氧化潜力很可能与甲烷氧化菌的生物量有关^[12]。

3 结论

(1) 天然草甸氧化大气 CH_4 的潜力最大, 如果改造成人工林则氧化潜力降低 60% 以上, 如果开垦成旱田则基本丧失原有氧化潜力, 如果改成水田, 则向大气中排放 CH_4 。被开垦后白浆土含水量 (%WHC) 改变, 有机物质含量减小, 导致的土壤透气性的下降和甲烷氧化细菌的减少, 可能是土地利用方式改变后白浆土氧化 CH_4 潜力下降的主要原因。

(2) 白浆土不同深度 CH_4 氧化速率不同: 草甸和林地土壤剖面中以表层土的速率为最大, 并随深度增加而递减; 旱田土壤剖面中耕作层下残留的有机质层氧化大气 CH_4 潜力最高, 最低层排放 CH_4 ; 水田土壤所有层次均排放 CH_4 , 最低层 CH_4 排放率最小。

(3) 在温度与水分条件一定的条件下, 决定白浆土氧化大气 CH_4 速率的最主要因素是土壤有机碳含量。土壤有机碳含量越大, 土壤氧化大气 CH_4 的潜力越大。

致谢: 丁维新、王德宣、王瑞山协助野外采样, 室内实验曾得到丁维新、贾仲君、徐华、严红和李小平等的帮助, 张玉霞、王超英、徐小锋帮助分析土壤部分理化性质, 谨致谢意。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 41.
- [2] IPCC. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 21.
- [3] Sitaula B K, Hansen S, Sitaula J I B, *et al.* Methane oxidation potentials and fluxes in agricultural soil: effects of fertilization and soil compaction. *Biogeochemistry*, 2000, 48(3): 323~339.
- [4] 杨青, 吕宪国. 三江平原沼泽湿地生态试验区土壤类型及其特点. 见: 陈刚起. 三江平原沼泽研究. 北京: 科学出版社, 1996. 15~26.
- [5] 高俊琴, 吕宪国. 毛茛苔草湿地开垦后土壤中主要营养元素垂直分异. *水土保持通报*, 2002, 22(3): 32~34.
- [6] 王世岩, 杨永兴, 杨波. 三江平原典型湿地土壤温度变化及其影响因子分析. *地理研究*, 2003, 22(3): 389~396.
- [7] 李兆富, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原小叶章湿地土壤的 CO_2 通量. *南京林业大学学报*, 2003, 27(3): 51~54.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 289.
- [9] 蔡祖聪, Mosier A R. 土壤水分状况对 CH_4 氧化, N_2O 和 CO_2 排放的影响. *土壤*, 1999, (6): 289~295.
- [10] Smith K A, Dobbie K E, Ball B C, *et al.* Oxidation of atmospheric methane in northern European soils with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink. *Global Change Biology*, 2000, 6: 791~803.
- [11] Merino A, Perez-Batallon, Mac as F. Responses of soil organic matter and greenhouse gas fluxes to soil management and land use changes in a humid temperate region of southern Europe. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 917~925.
- [12] Segers R. Methane production and methane consumption; a review of processes underlying wetland methane fluxes. *Biogeochemistry*, 1998, 41: 23~51.
- [13] Tlustos P, Willison T W, Baker J C, *et al.* Short-term effects of nitrogen on methane oxidation in soils. *Biol. Fertil. Soils*, 1998, 28: 64~70.
- [14] Ishizuka S, Sakata T, Ishizuka K. Methane oxidation in Japanese forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 769~777.
- [15] Schnell S, King G M. Mechanistic analysis of ammonium inhibition of atmospheric consumption in forest soil. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1994, 10: 3514~3521.
- [16] H tsch B W. Tillage and land use effects on methane oxidation rates and their vertical profiles in soil. *Biol. Fertil. Soils*, 1998, 27: 284~292.
- [17] Wang Z P, Zeng D, Patrick W H Jr. Characteristics of methane oxidation in a flooded rice soil profile. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 97~103.
- [18] Boeckx P, Cleemput Van O, Villaralvo I. Methane oxidation in soils with different textures and land use. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 91~95.
- [19] 耿远波, 章申, 董云社, 等. 草原土壤的碳氮含量及其与温室气体通量的相关性. *地理学报*, 2001, 56(1): 44~53.
- [20] Singh J S, Singh S, Raghubanshi A S, *et al.* Effect of soil nitrogen, carbon and moisture on methane uptake by dry tropical forest soils. *Plant and Soil*, 1997, 196: 115~121.

Effects of land-use on methane oxidation potential in lessive

WANG Chang-ke^{1,2}, LÜ Xian-guo², CAI Zu-cong³, LUO Yong¹

(1. National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China;

3. Institute of Soil Science, CAS, Nanjing 210008, China)

Abstract: Changes in land-use may affect the potential of soils to act as a sink for CH₄. Samples of lessive, one of the most important soil types in the Sanjiang Plain (45°01'–48°28'N, 130°13'–135°05'E, the largest fresh water wetland area in China), were incubated to investigate the effect of land-use change on methane oxidation in lessive. Significant differences between CH₄ oxidation rates of all topsoils were found under different land-uses. The highest CH₄ oxidation rate was found in natural meadow (dominated by *Calamagrostis angustifolia*) topsoil, but man-made larch (*Larix gmelini*) woodland, dry land (wheat or soybean), and paddy field soils reduced CH₄ uptake by 64%, 98% and 117%, respectively, compared with meadow soil. After the natural meadow was reclaimed, the soil water content (percentage WHC) changed, and the soil organic material decreased. So, the diffusiveness of CH₄ and O₂ into the soil was reduced and the number and activity of methanotrophic bacteria was inhibited. These may be the main reasons for the decrease of methane oxidation in lessives after land-use change. Atmospheric CH₄ oxidation activity under all four land uses showed a distinct vertical stratification within the soil profiles. Potential CH₄ oxidation rates apparently decreased with the depth in meadow soil and woodland soil, indicating a surface maximum for CH₄ oxidation capacity in these soils; the methane uptake rate of the buried organic layer in the dry land soil was 13 times higher than that of the plowed layer. The net productivity of methane was observed in samples of all layers of paddy soil incubated under air, indicating that they had no ability to oxidize atmospheric CH₄. Correlation analyses of methane oxidation in lessives and physico-chemical soil parameters yielded significant correlations for the concentrations of organic carbon ($r = 0.78$, $p < 0.01$), available N ($r = 0.71$, $p < 0.01$) and total N ($r = 0.69$, $p < 0.01$), but negative relationships between CH₄ uptake rates and pH ($r = 0.69$, $p < 0.01$) or water content (percentage WHC) ($r = 0.60$, $p < 0.05$) were observed. Linear regression analysis revealed that an individual chemical parameter, soil organic carbon, could be singled out as an indicator for methane oxidation capacity in lessives under certain temperature conditions.

Key words: methane oxidation; methane emission; land-use; lessive