

土壤乙烯产生和氧化的研究进展

徐星凯¹, 袁 斌^{1, 2}, 王跃思¹, 杨剑虹²

(1. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029;
2. 西南农业大学资源与环境学院, 重庆 400716)

摘要: 乙烯作为植物生长调节素及挥发性有机气体影响着植物生长和大气环境质量。有关土壤源乙烯产生和氧化特征, 已发表的文献偏重实验室过程研究, 很少涉及野外观测实验; 陆地生态系统中土壤源乙烯行为有可能影响到植物生长及区域大气环境, 大气环境变化(如水热状况和氮/酸沉降等)势必引起陆地土壤理化和生物学特性发生改变, 进而影响土壤源乙烯产生和氧化过程。根据以前出版的文献, 就土壤理化性质及外源碳氮施加、土壤微生物和重金属行为等对影响土壤乙烯产生和氧化作了详细综述, 并简要阐述根际土壤乙烯产生和氧化以及不同土地利用方式对土壤乙烯产生和氧化的影响。指出应加强大气氮/酸沉降对典型林地土壤乙烯产生和氧化的影响机制以及不同土地利用方式下土壤乙烯产生和氧化的原位观测等方面的研究; 同时也应关注不同成熟林型及森林演替不同阶段土壤理化和生物学特性跟乙烯产生和氧化的关联, 明确土壤微生物(如细菌和真菌等)对此的相对贡献程度, 利于丰富陆地土壤乙烯产生和氧化等有关科学认识, 寻求适宜措施减少陆地土壤源乙烯产生潜势。

关键词: 土壤; 乙烯; 产生和氧化; 根际; 土地利用方式; 大气环境

文章编号: 1000-0933(2005)12-3354-04 **中图分类号:** S181 **文献标识码:** A

Ethylene production and oxidation in soils: a review

XU Xing-Kai¹, YUAN Bin^{1, 2}, WANG Yue-Si¹, YANG Jian-Hong² (1. State Key Laboratory of Atmosphere Boundary Layer Physics and Atmosphere Chemistry, Institute of Atmosphere Physics, CAS, Beijing 100029; 2. College of Resource and Environment, Southwest Agricultural University, Chongqing 400716). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3354~ 3358

Abstract Ethylene (C₂H₄) as a phytohormone and one of volatile organic compounds can affect plant growth and the quality of atmospheric environment. Literature published shows that there are plenty of laboratory-based processes studies in the field of soil ethylene production and oxidation. However, field measures are still limited so far. The behavior of soil borne ethylene in terrestrial ecosystems may affect plant growth and atmospheric environment. The variations of atmospheric environment such as status of precipitation and temperature, and nitrogen and acid depositions, may induce a change in the soil physical and chemical and biological properties, thereby affecting the process of soil borne ethylene production and oxidation. This paper fully summarizes, based on previous publications, the effects of soil physical and chemical properties, C and N amendments, soil microorganisms and heavy metals on soil C₂H₄ production and oxidation. It also concisely describes the C₂H₄ production and oxidation in the rhizosphere soil and under different land uses. It has been proposed that some scientific researches should be intensified in the future such as the effects of acid and nitrogen depositions on the C₂H₄ production and oxidation in typical forest soils, and *in situ* measures of soil C₂H₄ production and oxidation under different land uses. The interaction should attract attention between the ethylene production and oxidation in soils, and soil physical and chemical and biological properties under different mature forests and during forest successions, and the relative contribution of soil microorganisms to the C₂H₄ production and oxidation is involved. These associated studies can improve human's scientific understanding about the ethylene production and oxidation in terrestrial soils, and are beneficial to obtaining effective methods which can reduce production

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20477044); 中国科学院“百人计划”资助项目

收稿日期: 2005-05-08; **修订日期:** 2005-11-10

作者简介: 徐星凯(1969~), 男, 博士, 研究员, 主要从事陆地生态系统氮碳行为和大气环境研究. E-mail: xingkai_xu@yahoo.com.cn

Foundation item: the National Natural Science Foundation of China (No. 20477044) and the Hundred Talents Project from the Chinese Academy of Sciences

Received date: 2005-05-08; **Accepted date:** 2005-11-10

Biography: XU Xing-Kai, Ph.D., Professor, mainly engaged in the behavior of N and C in terrestrial ecosystems and atmospheric environment

potentials of ethylene in terrestrial soils

Key words: soil; ethylene; production and oxidation; rhizosphere; land uses; atmospheric environment

除植物^[1]和微生物^[2]产生乙烯外, 人类活动(如垃圾填埋、生物和化石燃料的不完全燃烧、工业生产等)是大气中乙烯的主要来源^[3]。清洁大气中乙烯含量通常低于 $5 \text{ nl} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[3], 由于燃烧化石燃料可导致城市大气中乙烯含量超过 $50 \text{ nl} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[4]。在近地层大气中乙烯及其光化学反应产生的二次气溶胶, 可能严重影响植被的生长发育。同时在对流层中乙烯通过对抑制甲烷的降解而对温室效应有所贡献^[5]。可见, 如何抑制大气环境中反应性碳素(如乙烯)的浓度增加应是一个重要的全球性环境问题。陆地生态系统(如森林)中土壤和植被均能产生和吸收乙烯, 对大气环境中乙烯的行为起着重要调节作用。大气环境变化(如水热状况和氮/酸沉降等)势必引起陆地土壤理化和生物学特性发生变化, 从而影响土壤乙烯产生和氧化过程; 过量的乙烯存在可能影响到农作物生长和森林的持续经营。因此, 正确认识土壤源乙烯产生和氧化机制以及主要影响因子, 将有助于寻求合理措施减少陆地土壤乙烯产生潜势。本文就此进行综述, 有助于深入开展相关研究。

1 土壤乙烯产生和氧化的机理

多数学者认为土壤乙烯产生是纯生物过程^[2,6], 已被证实土壤细菌^[7]、真菌^[8]和放射菌^[9]等均可利用碳源产生乙烯。Cook 和 Smith^[10]认为细菌是乙烯主要合成者; Lynch^[11]则认为真菌是乙烯主要合成者。可见, 土壤乙烯产生的微生物具有广谱性, 主要优势微生物可能因不同生境而有所变化。目前有两条土壤微生物合成乙烯途径被证实: (1) 蛋氨酸经过 4-甲硫基-2-丁酮酸(KMBA)合成乙烯^[12]; (2) α -酮戊二酸(KGA)的转化合成乙烯^[9]。施加适量 KMBA 可促进土壤乙烯合成, 而经消毒的土壤未见明显差异, 这说明经 KMBA 合成乙烯是生物过程^[13]。温度可影响土壤微生物对乙烯产生过程^[13]。施加 KMBA 的土壤, 乙烯产生的最优温度在 $30 \sim 35$ ^[13], 而施加氨基环丙烷羧酸后, 土壤乙烯产生的最优温度为 50 左右^[14]。因此, 不同环境条件下土壤产生乙烯的最优温度可存在差异。在大田实验中, 在 $5 \sim 30$ 范围内乙烯产生量(y)与土壤温度(x)成指数关系^[15], $y = 4.39 \exp(0.136x)$, $r = 0.76$ 。除温度效应外, 土壤理化属性也将影响土壤微生物合成乙烯潜势。

在有氧条件下乙烯能被土壤微生物氧化^[16,17]。分支杆菌属、诺卡氏菌属、多环式芳香族化合物分解菌等均能将乙烯作为生长原料^[18]; 甲烷氧化细菌和硝化细菌也能协同氧化乙烯^[19]。土壤乙烯氧化存在两条动力学方程, 这显示土壤中可能存在至少两类微生物种群影响乙烯氧化^[20]。一种分支杆菌属细菌曾被从土壤中分离出来^[17], 这一种群细菌被认为可能在低乙烯浓度的土壤中起氧化乙烯作用^[20]。不同土地利用及土壤理化属性可能影响到乙烯氧化微生物的活性和优势群落。

2 土壤乙烯产生和氧化的影响因子

2.1 碳素形态及剂量

研究表明土壤乙烯产生随有机质含量增加而增加。在采用 $1000 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙炔抑制乙烯氧化, 土壤中乙烯的产生量(y)与有机质含量(x)的关系式为 $y = 0.44x - 0.31$, 相关系数 0.61 ^[21]。土壤乙烯产生量与外源有机物尤其是葡萄糖的添加有很大关联。当添加等量碳(相当于每克土壤 1 mg L^{-1} 蛋氨酸)时土壤乙烯平均产生量: 非蛋白质氨基酸 > 蛋白质 = 醇类 = 氨基酸 > 糖类 = 有机酸 > 维生素^[22]; 添加氨基环丙烷羧酸(ACC)后土壤乙烯产生量甚至高达 $2882.0 \text{ nmol C}_2\text{H}_4/\text{kg 土}/14\text{d}$ ^[23]。添加玉米秸秆可促进土壤乙烯产生^[24]。因此, 土壤微生物产生乙烯所依赖的有机碳素具有广谱性。有机物料及其降解的中间产物能为微生物活动提供所需的碳和增殖的能量, 利于土壤微生物产生乙烯^[23]; 土壤碳素状况及生物有效性可影响乙烯产生。Tang 和 Miller^[25]发现在土壤中施加新鲜家禽粪便和堆肥均能促进乙烯的产生, 而前者乙烯产生量明显高于后者, 这与堆肥中总有机碳及活性低分子碳含量低有关。

有机质丰富的土壤具有较高乙烯氧化能力。在起始乙烯浓度为 $20 \mu\text{l L}^{-1}$ 、土壤水势为 -3 kPa 时, 土壤微生物的乙烯氧化率(y)与有机质含量(x)关系式为: $y = 28.81x - 71.97$, $r = 0.77$, $p < 0.05$ ^[22]; Cornforth^[26]曾报道土壤氧化乙烯能力随有机质含量增加而增加。然而, 添加外源碳, 如葡萄糖和蛋氨酸, 可明显抑制土壤氧化乙烯的能力。这可能是有机碳添加后, 加强土壤呼吸作用而使 O_2 分压下降, 导致乙烯氧化被抑制; 同时代谢产物也可能参与乙烯氧化抑制过程^[21]。

2.2 氮素形态及剂量

施加 $\text{NO}_3^- \text{ N}$ 可抑制不同底物添加后土壤乙烯产生^[13,14]。Smith^[27]认为 NO_3^- 能平衡土壤的氧化还原电位, 从而抑制乙烯合成主要微生物(如厌氧菌)的活性; 另外, $\text{NO}_3^- \text{ N}$ 及其反硝化过程的中间产物 NO_2^- 和 NO 等对微生物及乙烯合成酶活性可能具有一定毒性, 具体原因有待研究。Nazli 等^[13]研究表明, 向经 KMBA 处理的土壤中添加 NH_4NO_3 , 乙烯产生随 N 量的增加而逐渐减少, 降幅可达 $2100 \text{ nmol C}_2\text{H}_4/\text{kg 土}$ 。目前 $\text{NH}_4^+ \text{ N}$ 对土壤乙烯产生的影响机制仍不明确。

$\text{NH}_4^+ \text{ N}$ 对土壤乙烯氧化的影响有不同报道。在 $0 \sim 100 \mu\text{g NH}_4^+ \text{ N g}^{-1}$ 范围内, 云杉林土壤乙烯氧化速率因 N 施用量增加而增加, 当施用量增至 $500 \mu\text{g} \cdot \text{N} \cdot \text{g}^{-1}$ 土时, 乙烯氧化率呈轻微下降, 但仍高于对照; 然而, 落叶林土壤乙烯氧化率则随 $\text{NH}_4^+ \text{ N}$ 施放量增加而降低^[16]。土壤中 NH_4^+ 的硝化过程及其中间产物(如 NO_2^-), 可能影响乙烯氧化微生物的活性, 不同土壤可能呈现

差异,相关机理目前仍不清晰。部分学者初步认为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 加入缩小了土壤 C-N ,改变微生物生境,最终导致乙烯氧化率增加^[16]。在低剂量 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($< 10\mu\text{g NO}_3^-\text{-N g}^{-1}$)作用下,土壤乙烯氧化速率无明显差异,但是当施用量增至 $100\mu\text{g NO}_3^-\text{-N g}^{-1}$ 土时,土壤乙烯氧化却显著抑制,甚至云杉林土壤出现乙烯净排放^[16]。因此, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 对土壤乙烯氧化的影响机制可能具有差异。

2.3 土壤水分状况

在渍水厌氧条件下,土壤乙烯产生率大于氧化率可呈现净排放,致使土壤中乙烯浓度可达 $1000\sim 5000\text{nl}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[28],甚至高达 $10000\text{nl}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[29];并且草地和耕地土壤具有明显差异^[28]。Zenchmeister-boltenstern和Nikodin (1999)^[22],利用 $1000\mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙炔抑制乙烯氧化技术,研究奥地利林地、草地和耕地土壤在不同水分状况时乙烯产生量,发现大部分土壤乙烯产生率在水势 -100kPa 和 -30kPa 时几乎相同,在 -3kPa 或 0kPa 时出现显著增加,最大产生率可达 $145.5\text{pmol C}_2\text{H}_4\text{ g}^{-1}\text{土 h}^{-1}$ 。在有外源碳干扰时,土壤水分状况将深刻影响到微生物乙烯产生。添加葡萄糖和蛋氨酸的土壤,在 0kPa 水势时乙烯产生量明显低于 -100kPa 和 -5kPa 时^[21],这可能与土壤微生物利用外源碳合成乙烯需要氧气参与有关^[13,30]。

在起始乙烯浓度为 $20\mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,林地、草地和耕地土壤在不同水分状况下的乙烯氧化率呈现以下规律^[22]:在 -100 至 -30kPa 范围内,土壤乙烯氧化速率随水势的增加而增加,在水势为 -30kPa 时多数土壤乙烯氧化率达到最大;然而,当水势超过 -30kPa 时,土壤乙烯氧化速率随水势的增加急剧降低,在完全淹水时土壤乙烯氧化率趋于0。不同土地利用类型可影响水分状况对土壤乙烯氧化的效应,林地和草地土壤乙烯氧化对水分状况均较为敏感^[22]。

2.4 土壤通气状况和深度

土壤在有氧和厌氧条件下均能产生乙烯。如前所述,乙烯前体物KMBA合成乙烯需要 O_2 。然而,土壤乙烯产生却经常在厌氧条件下被观测到^[21,22,27]。发酵过程中乙烯前体物的生成^[24]以及需氧菌的缓慢生长^[11]可能是厌氧条件下土壤乙烯积累的原因。Jackel等^[20]研究了德国落叶林地不同剖面土壤的乙烯生成潜势,发现在 28h 的缺氧培养后,乙烯产生量随土层深度的增加而逐渐减少; $0\sim 2\text{cm}$ 矿质土壤乙烯产生量最多, $> 4\text{cm}$ 土壤却明显下降。

目前所见到的报道均认为土壤乙烯氧化是个需氧微生物过程。当土壤中 O_2 浓度为 $2\sim 5\text{ml}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,乙烯氧化开始被抑制^[26];在乙烯起始浓度为 $30\mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,有氧条件下氧化率(约 $110\text{pmol C}_2\text{H}_4\text{ g}^{-1}\text{土 h}^{-1}$)约为厌氧条件下乙烯产生的50倍^[26]。在有氧条件下不同土地利用方式将影响土壤乙烯氧化:落叶林地土壤 $>$ 草地土壤 $>$ 耕地土壤^[22],这可能与不同土壤的有机质含量、水分状况、通气性以及微生物优势菌种差异有关。土壤剖面层次将影响乙烯氧化特征。Jackel等^[20]报道 $2\sim 8\text{cm}$ 土层森林土壤有较大氧化乙烯的潜势;然而,近期研究发现这种亚表层土壤乙烯氧化特性将随林地地表凋落物厚度、不同林型和土壤属性等而发生变化。

2.5 金属元素种类及浓度

多数金属元素(如 Mn(II) 、 Cu(II) 、 Ni(II) 等)施加,在低浓度($\leq 1.0\text{mg/kg}$)时可促进乙烯产生;高浓度($> 10\text{mg/kg}$)时却显示显著抑制作用^[31]。然而, Hg(II) 和 Mo(VI) 在低浓度时可抑制乙烯产生; Co(II) 和 As(III) 在高浓度($\geq 100\text{mg/kg}$)时仍可促进乙烯产生^[31]。金属元素对土壤产生乙烯的影响机制,被认为是一种复杂的交互作用,它们抑制土壤产生乙烯,可能是对微生物的毒性作用(如 Hg(II));也可能是影响催化活性,如 As(III) 具有很强的生物毒性却在高浓度时也促进乙烯产生。金属元素影响土壤乙烯产生有生物和化学两方面作用。Arshad和Frankenberger^[31]将2种土壤经 121°C 高压消毒,加入不同浓度 Fe(II) ,在 30°C 振荡(100r/min)培养 7d ,结果显示 Fe(II) 浓度 $\geq 100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,明显促进高压消毒土壤的乙烯产生;Smith等^[32]也报道 Fe(II) 浓度在 $100\sim 1000\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时能促进高压消毒土壤乙烯产生。由此可见,土壤中乙烯产生可能存在化学过程,相关机理仍不明确。目前仍未见文献报道金属元素及剂量对土壤乙烯氧化的影响。

2.6 土壤pH和质地

土壤质地影响乙烯产生,质地细的土壤乙烯产生量多,乙烯产生量与土壤粘粒含量的相关性可达显著水平,这是因为质地细的土壤富含有机质^[21,22]。土壤乙烯产生量(y)与土壤pH(x)呈负相关^[21,25],关系式为: $y = 495 - 62.3x$, $r = 0.539$ ^[31]。这可能是酸性土壤更利于乙烯合成的微生物生长^[33],在酸性森林土壤中,以真菌为主的微生物可能是乙烯主要生产者^[21];同时,酸性土壤易积累腐殖质^[21]及 Fe^{2+} ^[22],可能关系到土壤乙烯的产生。目前很少报道土壤pH和质地对林地乙烯氧化的影响。

3 减少土壤乙烯产生的对策

根际环境具有丰富乙烯合成的微生物种类^[34],根的分泌物已证实能促进土壤乙烯的产生^[23]。田间实测结果发现乙烯在休耕地浓度为 $31\sim 375\text{nl}\cdot\text{L}^{-1}$,平均可达 $207\text{nl}\cdot\text{L}^{-1}$,而在种植玉米和大豆的土壤中乙烯浓度为 $8\sim 136\text{nl}\cdot\text{L}^{-1}$,平均只有 $38\text{nl}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[15];同时受伤的根系可促进乙烯在土壤中积累^[15]。因此,根际微生物对控制土壤中乙烯浓度动态起着重要作用。这样,如何提高根际土壤微生物乙烯氧化或抑制乙烯产生,将在一定程度上有利于作物或树木根系的生长。目前有关土壤源乙烯产生和氧化,仅仅偏重于实验室过程研究;对于如何减少土壤乙烯产生的对策很少涉及,这里我们仅仅根据土壤乙烯产生和氧

化特征及影响因子进行初步推断。适宜的水分管理和腐熟化的有机物料施用,可能减少土壤源乙烯产生途径;不同方式的轮作或间作,提高田间农作物根系的氧化能力,从而增加根际环境微生物乙烯氧化或减少乙烯产生潜势。对于自然生态系统林地,地表富含有机质及适宜的水分状况和酸性条件等,均利于森林表层土壤微生物产生乙烯,这些可能影响到森林持续有效经营;况且大气氮/酸沉降胁迫可能是引起森林发生退化的主要原因。因此,有必要弄清大气氮/酸沉降胁迫时林地土壤理化和生物学特性的变化以及与土壤乙烯产生的关联,以便采取适宜措施(如施用石灰等),改变林地土壤微生物生境,减少土壤源乙烯产生的潜势。文献报道针叶林土壤的乙烯产生率明显高于其它类型土壤,尤其在水分适宜的条件下^[21, 29, 35]。为此,适宜的树种选择或针阔混交林可能利于减少林地表层土壤源乙烯产生潜势。

4 研究展望

根据目前土壤源乙烯产生和氧化仅仅偏重于实验室过程研究,以及乙烯行为与陆地生态过程的关联性,下述内容应该加强:(1)林地土壤理化性质(pH、矿化组成和氧化物等)及生物学特性(微生物数量和活性等)对大气酸/氮沉降具有较高敏感性,这些可能影响到乙烯产生和氧化过程。目前两者的关联性仍不清楚,值得深入研究,利于寻求适宜措施减少林地土壤源乙烯产生潜势。(2)不同成熟林型及森林演替不同阶段表层土壤属性与乙烯行为是否存在关联性,利于阐述森林土壤源乙烯产生和氧化驱动机制;(3)土壤源乙烯产生的微生物具有广谱性,不同土地利用类型土壤中各种微生物(如细菌和真菌等)的贡献程度如何;(4)金属元素对土壤乙烯产生和氧化的影响机制,以及土壤源乙烯在厌氧条件下生物和化学合成的相关机理;(5)应深入开展不同土地利用方式下土壤源乙烯产生和氧化的原位观测,利于丰富相关过程的科学认识。

References

- [1] Abeles F B, Morgan P W and Saltweit Jr M E. *Ethylene in Plant Biology*, 2nd edn. Academic Press Inc., San Diego, 1992
- [2] Weingart H, Volksch B and Ullrich M S. Comparison of ethylene production by *Pseudomonas syringae* and *Ralstonia solanacearum*. *Phytopathol.*, 1999, **89**: 360~ 365
- [3] Sawada S and Totsuka T. Natural and anthropogenic sources and fate of atmospheric ethylene. *Atmos. Environ.*, 1986, **20**: 821~ 832
- [4] Abeles F B, Craker L E, Forrence L E, et al. Fate of air pollutants: removal of ethylene, sulfur dioxide and nitrogen dioxide by soil. *Science*, 1971, **173**: 914~ 916
- [5] Logan J A, Prather M J, Wofsy S C, et al. Tropospheric chemistry: a global perspective. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**: 7210~ 7254
- [6] Fukuda H, Fujii T and Ogawa T. Microbial production of C₂-hydrocarbons, ethane, ethylene and acetylene. *Agric. Biol. Chem.*, 1984, **48**: 1363~ 1365
- [7] Primrose S B. Ethylene-forming bacteria from soil and water. *J. Gen. Microbiol.*, 1976, **97**: 343~ 346
- [8] Ilag L and Curtis R W. Production of ethylene by fungi. *Science*, 1968, **159**: 1357~ 1358
- [9] Fukuda H, Ogawa T and Tanase S. Ethylene production by microorganisms. *Adv. Microbial Physiol.*, 1993, **35**: 275~ 306
- [10] Cook R J and Smith A M. Influence of water potential on production of ethylene in soil. *Can. J. Microbiol.*, 1977, **23**: 811~ 817
- [11] Lynch J M. Effect of antibiotics on ethylene production by soil microorganisms. *Plant Soil*, 1983, **70**: 415~ 420
- [12] Ince J E and Knowles C J. Ethylene formation by cell-free extracts of *Escherichia coli*. *Arch. Microbiol.*, 1986, **146**: 151~ 158
- [13] Nazli Z H, Arshad M and Khalid A. 2-Keto-4-methylthiobutyric acid-dependent biosynthesis of ethylene in soil. *Biol. Fertil. Soils*, 2003, **37**: 130~ 135
- [14] Frankenberger Jr W T and Phelan P J. Ethylene biosynthesis in soil. I. Method of assay in conversion of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid to ethylene. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985, **49**: 1416~ 1422
- [15] Otani T and Aen N. Ethylene and carbon dioxide concentrations of soils as influenced by rhizosphere of crops under field and pot conditions. *Plant Soil*, 1993, **150**: 255~ 262
- [16] Rigler E and Zechmeister-Boltenstern S. Oxidation of ethylene and methane in forest soils-effect of CO₂ and mineral nitrogen. *Geoderma*, 1999, **90**: 147~ 159
- [17] De Bont J A M. Oxidation of ethylene by soil bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek Journal of Microbiology and Serology*, 1976, **42**: 59~ 71
- [18] Ginkel C G van, Welten H G J and Bont J A M de. Oxidation of gaseous and volatile hydrocarbons by selected alkene-utilizing bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1987, **53**: 2903~ 2907
- [19] Bedard C and Knowles R. Physiology, biochemistry, and specific inhibitors of CH₄, NH₄⁺, and CO oxidation by methanotrophs and nitrifiers. *Microbiol. Rev.*, 1989, **53**: 68~ 84
- [20] Jackel U, Schnell S and Conrad R. Microbial ethylene production and inhibition of methanotrophic activity in a deciduous forest soil. *Soil Biol. Biochem.*, 2004, **36**: 835~ 840

- [21] Zechmeister-Boltenstern S and Smith K A. Ethylene production and decomposition in soils *Biol Fertil Soils*, 1998, **26**: 354~ 361.
- [22] Zechmeister-Boltenstern S and Nikodin L. Effect of water tension on ethylene production and consumption in montane and low land soils in Austria *Eur. J. Soil Sci* , 1999, **50**: 425~ 432.
- [23] Arshad M and Frankenberger Jr W T. Ethylene accumulation in soil in response to organic amendments *Soil Sci Soc Am. J.* , 1990, **54**: 1026~ 1031.
- [24] Lynch J M and Harper S H T. Role of substrates anoxia in the accumulation of soil ethylene *Soil Biol Biochem* , 1980, **12**: 363~ 368.
- [25] Tang Tianjia and Miller D M. Ethylene production in anaerobically incubated soils amended with poultry litters *Soil Sci* , 1993, **156**: 186~ 192.
- [26] Cornforth I S. The persistence of ethylene in aerobic soils *Plant Soil*, 1975, **42**: 85~ 96.
- [27] Smith A M. Ethylene in soil biology. *Ann. Rev. Phytopathol* , 1976, **14**: 53~ 73.
- [28] Dowdell R J, Smith K A, Cress R, *et al*. Field studies of ethylene in the soil atmosphere—equipment and preliminary results *Soil Biol Biochem.* , 1972, **4**: 325~ 331.
- [29] Jackson M B. Ethylene and responses of plants to soil waterlogging and submergence *Ann. Rev. Plant Physiol* , 1985, **36**: 145~ 174.
- [30] Fukuda H, Takabashi M, Fujii T, *et al*. Ethylene production from L-methionine by *Cryptococcus albidus* *J. Ferment Bioeng.* , 1989, **67**: 173~ 175.
- [31] Arshad M and W T Frankenberger Jr. Effects of soil properties and trace elements on ethylene production in soil *Soil Sci* , 1991, **151**: 377~ 386.
- [32] Smith A M, Milkou P J and Morrison W L. Soil ethylene production specifically triggered by ferrous iron. In: Loutit M W and J A R Miles eds *Microbial Ecology*. Springer-Verlag, Berlin, 1978. 329~ 336.
- [33] Babiker H M and Pepper I L. Microbial production of ethylene on desert soils *Soil Biol Biochem.* , 1984, **16**: 559~ 564.
- [34] Arshad M and W T Frankenberger Jr. Biosynthesis of ethylene by *Acremonium falciforme* *Soil Biol Biochem.* , 1989, **21**: 633~ 638.
- [35] Hartmans S, De Bont J A M and Harder W. Microbial metabolism of short-chain unsaturated hydrocarbons *FEMS Microbiol. Rev.* , 1989, **63**: 235~ 264.