

温带森林土壤消耗大气 CO 总量 及影响因素研究

董云社 彭公炳

(中国科学院地理研究所, 北京 100101)

提 要 CO 虽然不是温室气体, 但人为活动释放到大气中的 CO 可引起对流层中 CH_4 、 O_3 等温室气体含量增加, 从而间接的产生温室效应, 因此, 对全球性 CO 源和汇的研究应给予重视。本研究利用静态箱式方法, 对温带落叶森林土壤年释放 CO 进行了长时间测定, 表明该类型土壤年净消耗大气中 CO 平均强度为 $46.3 \pm 25.5 \text{ ng/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 对调节大气中 CO 浓度增加有积极意义。文中详细分析了影响土壤消耗 CO 的环境因素、土壤消耗 CO 的强度和释放温室气体 CO_2 、 CH_4 之间的关系等。

关键词 温带 森林 土壤 一氧化碳

1 引言

目前, 温室效应导致的气候变化问题已逐渐由研究二氧化碳 (CO_2) 与气候变化的焦点扩展到多种痕量气体与气候变化之间的关系研究, 实际上非二氧化碳的痕量气体在很大程度上主导着大气中的化学成份平衡、辐射平衡以及化学物质的动态变化等, 从而间接或直接的影响大气环境和气候变化。近几年来, 大气中一氧化碳 (CO) 浓度的变化已引起人们的广泛重视, 主要原因在于: 一氧化碳是大气对流层中重要的污染性物质, 其体积分数已增加到 10^{-6} 量级, 人类活动每年还要向大气中排放 $(600 \sim 800) \times 10^6 \text{ t CO}^{[1]}$; 一氧化碳在对流层中能直接与 OH 发生氧化反应, 减少对流层中 OH 浓度, 从而破坏对流层中化学反应平衡和物质平衡; 一氧化碳的光化学反应过程是对流层中温室气体臭氧 (O_3) 增加的主要途径。由此可见, 大气对流层中 CO、OH、 CH_4 有着密切的内在联系, CO 浓度的增加, 将消耗大量的 OH, 减弱 OH 消耗氧化对流层中其他化学物质的作用, 包括 O_3 、 CH_4 和一些碳氢化合物等。据报导, 人类活动排放到大气中的 CO 间接导致大气中 CH_4 浓度增加大约占 24%~37%, 如果自然界 CO 排放量增加 1 倍, 在对流层中 CO 消耗 OH, 相应的对流层 CH_4 浓度将增加 40%~50%, O_3 浓度增加 12%^[2]。所以, 人类活动排放到大气中的 CO 气体也是导致气候变化的一个重要因素。

不同生态系统与大气中 CO 之间的交换, 决定着大气中 CO 浓度的总量和变化。一般认为土壤是消耗大气中 CO 的重要场所, 年消耗总量大约为 $190 \sim 580 \text{ Tg}^{[3]}$, 但有些研究发现亚热带和热带干旱的土壤能释放 CO。本研究将讨论温带落叶森林土壤消耗

大气中 CO 的强度以及不同环境因素与土壤消耗大气中 CO 强度之间的关系。

2 实验方法

2.1 观测地点及实验设计

观测地点设在德国达姆施塔特阔叶森林内 (大约 8.7°E, 49.8°N), 树种以山毛榉和栎树为主, 树龄 80~100 a, 密度约 600 棵/hm²。森林土壤为沙质土, 表层土壤 pH 值 4.1~5.2, 自然土壤剖面自上而下可划分为枯枝落叶层 (<1 cm)、有机质层 (4 cm) 和以下的沙土层。

观测自 1990 年 10 月开始, 到 1991 年 12 月结束, CO 排放量观测有 3 种处理: 原状土壤 (包括枯枝落叶层、有机质层和沙土层); 无枯枝落叶土壤 (包括有机质层和沙土层); 扰动土壤 (取掉枯枝落叶层和有机质层以后的土壤)。观测频率每周一次, 排放量测定时间为 30~40 min。在整个观测期间内, 森林大气最低温度记录为 -0.1°C (12 月), 最高温度 29.4°C (8 月), 年降雨量大约 550 mm。每次观测均在一个均匀的小区域重新选择观测点以保证观测结果的代表性。1991 年 6~10 月, 在观测区内对不同土壤层次 (5、10、20、30、50 cm) 空气中 CO 浓度和土壤含水量变化进行了测定。

2.2 样品收集和浓度分析

气体采集箱用 8 mm 厚白色透明有机玻璃制成, 底面积为 0.5 m×0.9 m, 高 0.3 m, 箱内装有空气搅拌器 (小风扇), 温、湿、压传感器。观测时箱子插入土壤 0.1 m, 四周用土填实密封并盖住箱顶。CO 浓度在野外直接测定, 采用流速 1 L/min 的气泵将气体从取样箱抽入 -40°C 冷管, 然后流向 CO 分析仪器进样管一端, 进样管另一端与取样箱连结形成气体循环回路。CO 浓度采用气相色谱仪分析 (型号 RGA 3), 原理为氧化汞氧化 CO 形成汞气吸收紫外光。每种处理观测前和观测完毕后用 CO 标准气体标定仪器, 同时测定大气中 CO 浓度。

2.3 计算方法

CO 净排放量采用如下计算公式:

$$F = \frac{V}{A} \cdot D \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad \text{或} \quad F = H \cdot D \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t}, \quad (1)$$

其中, V 为观测箱容积, A 为观测箱包围的面积, H 为箱高, D 为箱内气体密度 ($D = n/V = p/RT$, 单位为 mol/m³, p 为箱内气体压力, T 为箱内气体温度, R 为气体常数), $\Delta m/\Delta t$ 是 CO 气体在观测箱内浓度随时间变化的直线斜率。

3 结果和讨论

CO 在温带落叶森林生态环境条件下不同处理 (原状土壤、无枯枝落叶土壤、扰动土壤) 土壤中释放量动态变化如图 1 所示。表 1 是 CO 年均净排放量、土壤 CO 生成潜力、CO 干沉降速度统计计算结果, 表明了在任何环境条件下, 该类型森林生态系统对大气中 CO 都处于一个汇的状态, 对表层枯枝落叶层的单独测定表明枯枝落叶可释放少

量的 CO，年均强度为 $6 \pm 25 \text{ ng/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。比较不同处理的测定所获得的结果，当去掉森林表层枯枝落叶层和有机质层以后，明显的改变了土壤对大气中 CO 汇的强度，证明森林表层有机物质对土壤和大气中 CO 之间的反应有着很大影响。

表 1 不同处理土壤的 CO 净排放量、生成潜力及干沉降速度

	净排放 / ($\text{ng/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	生成潜力 / ($\text{ng/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	干沉降速度 / (cm/s)
原状土壤	$-46.3 \pm 24(37)$	$27.1 \pm 18.0(37)$	0.015~0.03
无枯枝落叶土壤	$-85.5 \pm 50(34)$	$23.6 \pm 26.8(34)$	0.02~0.06
扰动土壤	$-70.9 \pm 29(34)$	$10.1 \pm 4.6(24)$	0.02~0.05
枯枝落叶	6.0 ± 25		

注：表中数据为平均值±标准偏差（观测次数）

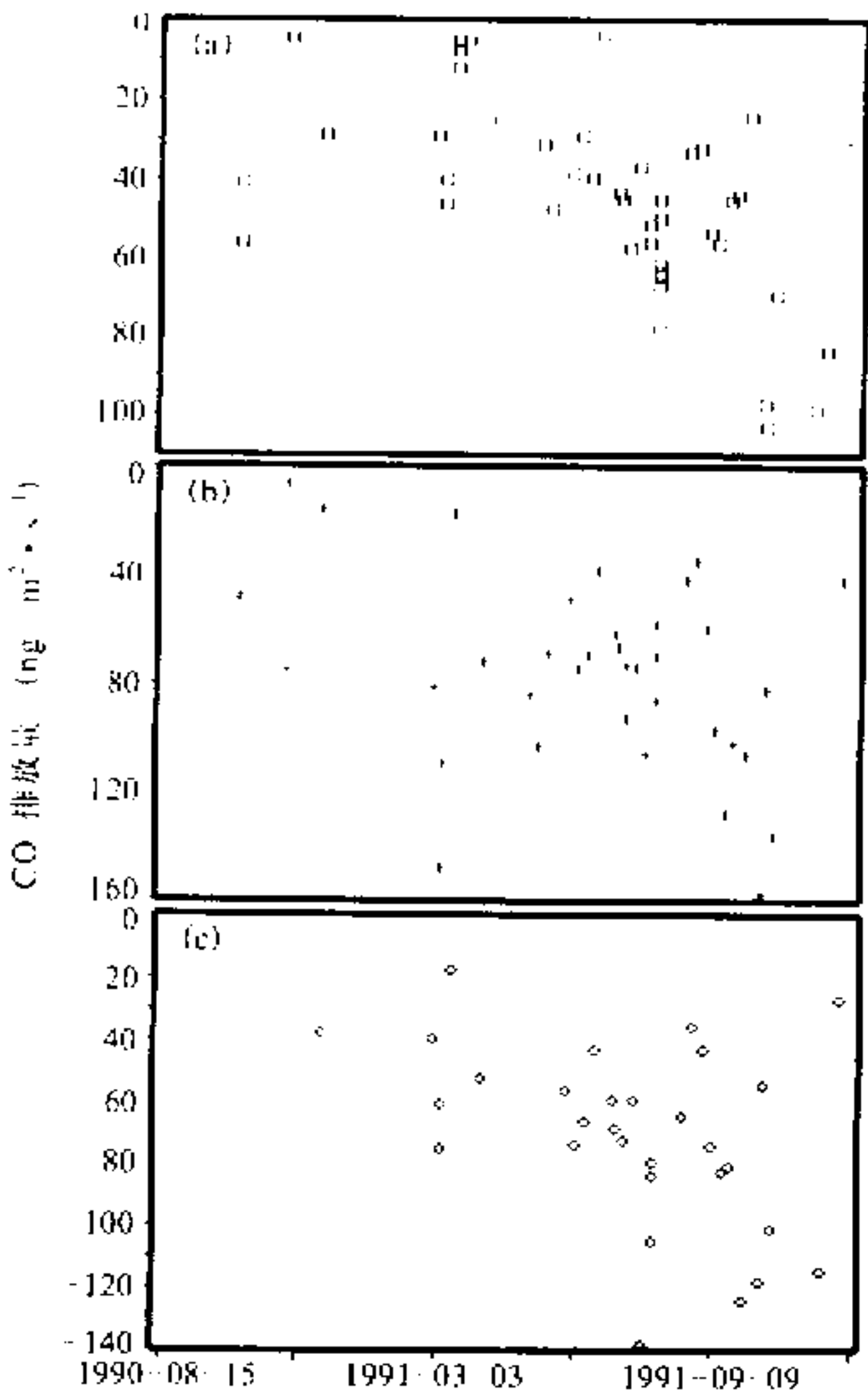


图 1 不同处理的土壤排放 CO 变化
(a) 原状土壤；(b) 无枯枝落叶土壤；
(c) 扰动土壤

3.1 原状森林土壤释放 CO 特征

原状森林土壤释放 CO 年变化规律和强度如图 1a 所示，表明了对大气中 CO 的消耗，年净消耗量为 $46.3 \pm 24.5 \text{ ng/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，较高的消耗强度在 9~12 月，同时土壤对大气中 CO 的消耗强度与大气中 CO 浓度呈正相关关系。查询目前公开发表的资料，该项研究是初次对温带森林土壤释放 CO 情况进行测定，与委内瑞拉非永久性森林土壤释放 CO $112 \text{ ng/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [4,5] 相比，温带森林土壤虽然对大气中 CO 处于一种消耗状态，但消耗强度较低，与德国非森林土壤消耗大气中 CO 结果相一致 [6]，与热带、亚热带生态系统阶段性释放 CO 结果相反 [5,7]。

3.2 不同深度土壤空气 CO 浓度变化特征

图 2 是几个具有代表性的土壤空气 CO 浓度变化剖面，显示了 CO 浓度在土壤表层急剧下降，自 5 cm 深处以下，土壤中 CO 浓度几乎接近于零。同样，Seiler 等 [3,4] 也发现报道在非森林土壤 1 cm 深处以下，土壤 CO 浓度递减到接近于零，证明 CO 在土壤中存在时间短和土壤消耗

CO 只在表层几厘米以内进行，也说明了后面将要讨论的表层有机物质对 CO 有极强的消耗潜力和深层土壤水分含量变化将对土壤消耗大气中 CO 强度不产生影响。

在观测不同深度土层 CO 浓度变化时，CH₄ 浓度在土壤中的变化也随着深度的增加而减少，但在 5 cm 深处，CH₄ 浓度减少不足 50%，这种现象说明了表层土壤存在着

大量微生物消耗 CO, 或者说在表层土壤中 CO 的氧化速度远大于 CH₄ 的氧化速度。

3.3 表层枯枝落叶和有机质层对土壤和大气中 CO 交换的影响

与其他不同类型生态系统如草地、农田等相比较, 温带落叶森林土壤表层的枯枝落叶和有机质层是整个土壤剖面的重要组成部分, 对土壤和大气中 CO₂、CH₄、N₂O 交换有重要影响^[8]。图 1b 和 c 表明, 当取掉表层有机物质后, 将改变土壤和大气中 CO 的交换速度, 取掉枯枝落叶层后, 土壤消耗 CO 的强度增加了 85%, 取掉枯枝落叶和有机质层后, 土壤消耗 CO 的强度也呈增加趋势, 增加强度为 53%。从表 1 得出, 新鲜叶子只释放少量 CO, 所以取掉表层枯枝落叶后引起的 CO 消耗强度加强, 主要原因是改变了土壤界面和大气的交换和传输环境, 枯枝落叶的存在阻碍了大气中 CO 向土壤界面的传输速度, 比较原状土壤和扰动土壤产生 CO 的强度可以得出, 森林表层有机物质层生成 CO 的速度远大于底层土壤。因此该类型生态系统表层 5 cm 以上是土壤和大气中 CO 反应的焦点, 如果改变表层有机物质结构, 将影响土壤和大气间的 CO 交换速度。

3.4 土壤水分和大气温度因素对土壤和大气中 CO 交换的影响

在观测期间内, 表层 (2~7 cm) 土壤水分含量变化范围为 7%~22%, 但土壤水分含量变化与 CO 的产生和释放均不呈相关性, 同时 CO 的干沉降速度与土壤水分含量变化也不呈相关性 (图 3)。相反, 热带和亚热带土壤产生 CO 强度与土壤水分变化有着极其灵敏的相关性^[7], 我们认为温带森林土壤水分含量偏低, 特别是测定地点为沙性土壤, 土壤保水性能较差, 土壤水分含量常年处于化学氧化有机物质和微生物活性所需要最佳水分含量的临界下限, 因此土壤水分含量的变化不能够成对土壤氧化速度和微生物活性的影响, 也就不能影响土壤和大气中 CO 的交换速度。

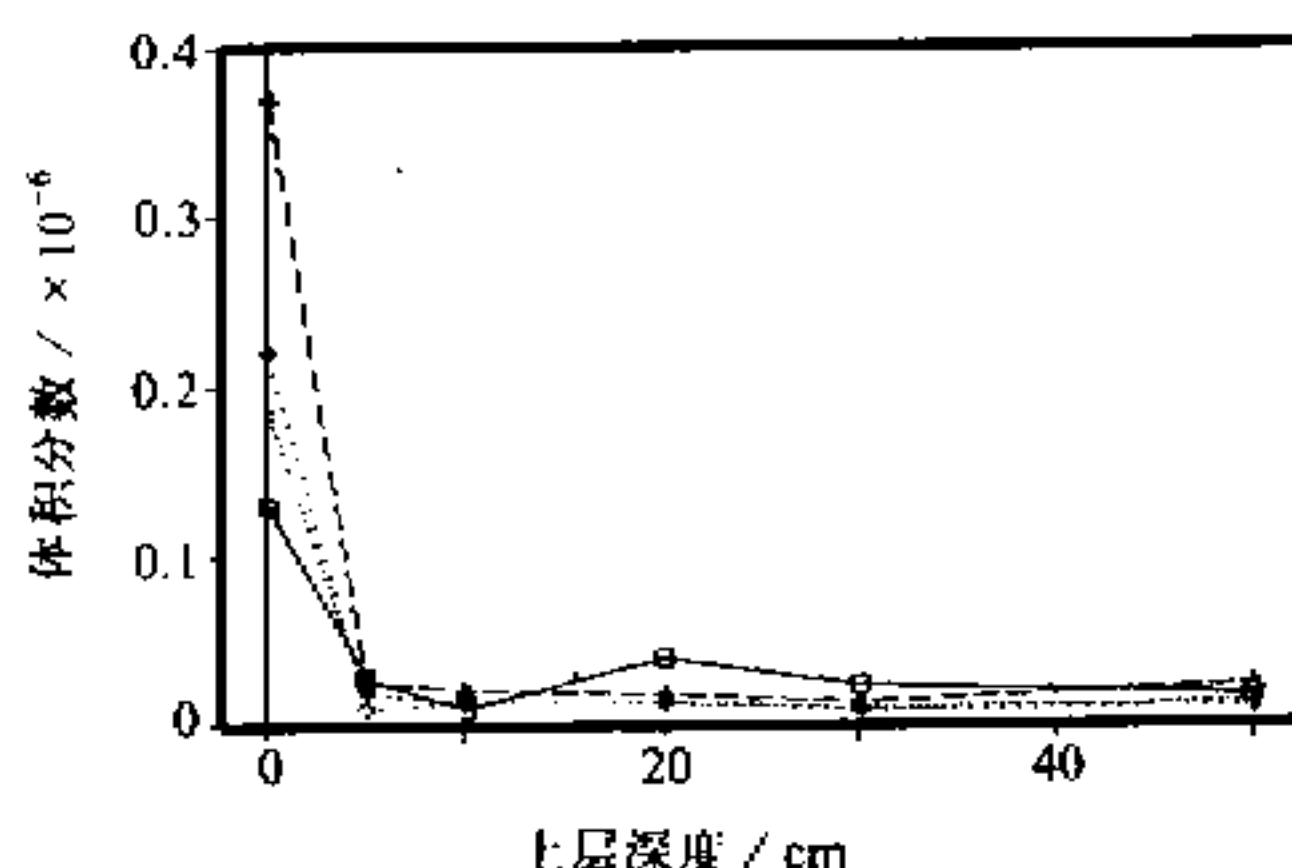


图 2 土壤剖面 CO 浓度变化及其 2~7 cm 含水量

□ 6 月 24 日, 土壤含水量 7.2%;
+ 8 月 28 日, 土壤含水量 6.8%;
◇ 9 月 18 日, 土壤含水量 12.5%;
△ 10 月 10 日, 土壤含水量 24.7%

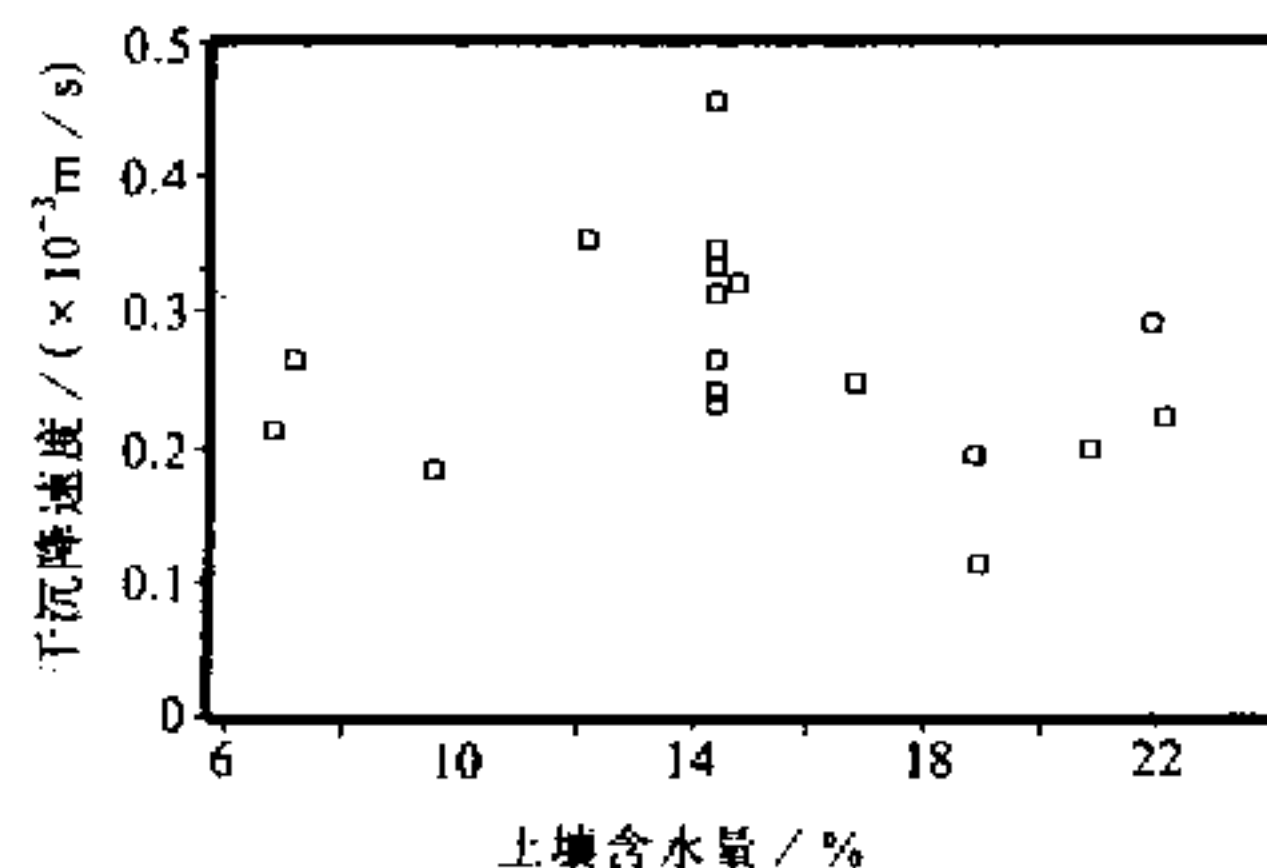


图 3 CO 干沉降速度与原状森林土壤含水量关系

图 4 描述了 CO 净排放量与大气温度变化之间的关系, 表明了温带森林土壤消耗大气中 CO 与大气温度变化不呈相关关系, 两者之间的相关性 R^2 值只达到 0.32×10^{-3} 。相反, 亚热带和热带土壤排放 CO 测定结果表明, 当土壤温度变化在 20~40°C 范围时, 土壤产生 CO 强度与温度增加有正相关关系, 同时土壤生成 CO 强度范围为 23~230 ng/m²·s⁻¹^[4,9]。本文计算温带森林土壤 CO 生成强度仅为 27 ± 18 ng/m²·s⁻¹,

我们认为这种现象的主要原因是温带森林土壤平均温度过低, 化学氧化有机物质的速度较慢。分析 CO 干沉降速度 (V_d) 与大气温度变化的关系时表明, 原状森林土壤中 CO 干沉降速度与温度增加存在着一定的联系, 当大气温度在 $0\sim 10^{\circ}\text{C}$ 时, V_d 值大约为 0.015 cm/s , 当大气温度增加到 20°C 时, V_d 值增加到 0.03 cm/s 。

此外, 在观测土壤 CO 排放量的同时, 对森林土壤排放 CO_2 、 CH_4 也进行了测定, 结果表明该类型土壤排放 CO_2 具明显的季节性变化规律, 年排放量为 2.8 kg/m^2 , 高排放量出现在夏季, 当取掉表层有机物质时, 同样对土壤和大气中 CO_2 交换产生影响, CO_2 排放量减少 25%。经比较, 土壤消耗 CO 强度与排放 CO_2 不呈相关性。但图 5 显示了土壤消耗大气中 CO 与消耗大气中 CH_4 强度呈一定的正相关, 说明了两种气体在土壤中的消耗有着相似的生物氧化过程, 似乎在土壤中存在氧化和利用 CH_4 、CO 的特殊微生物, 有些实验室研究也证明了氧化 CH_4 的微生物也有氧化 CO 的功能^[2], 这方面的研究还有待于不断深入, 最终要能更好的解释和调控大气有害气体浓度的增加。

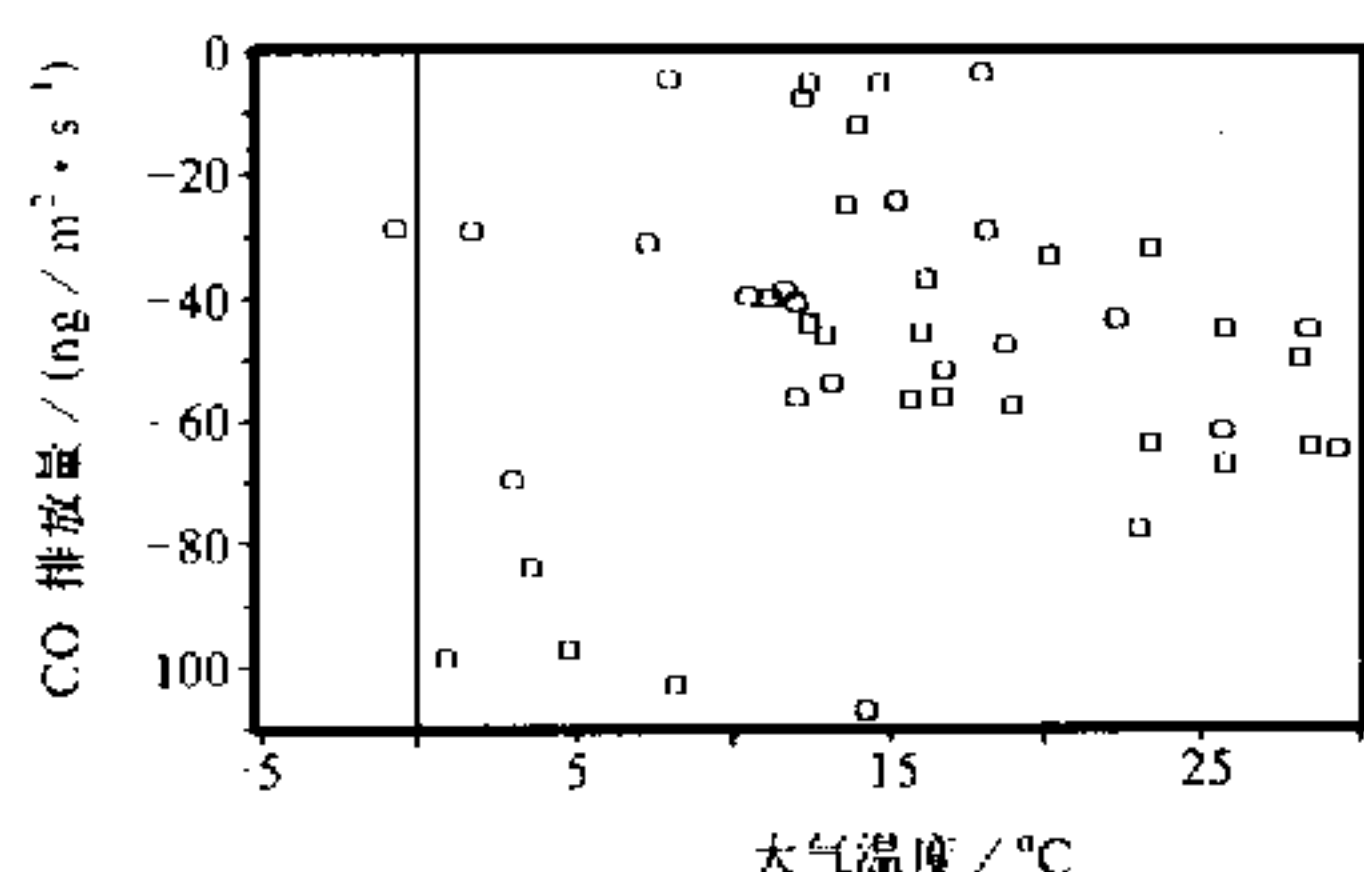


图 4 原状森林土壤 CO 排放量与大气温度变化关系

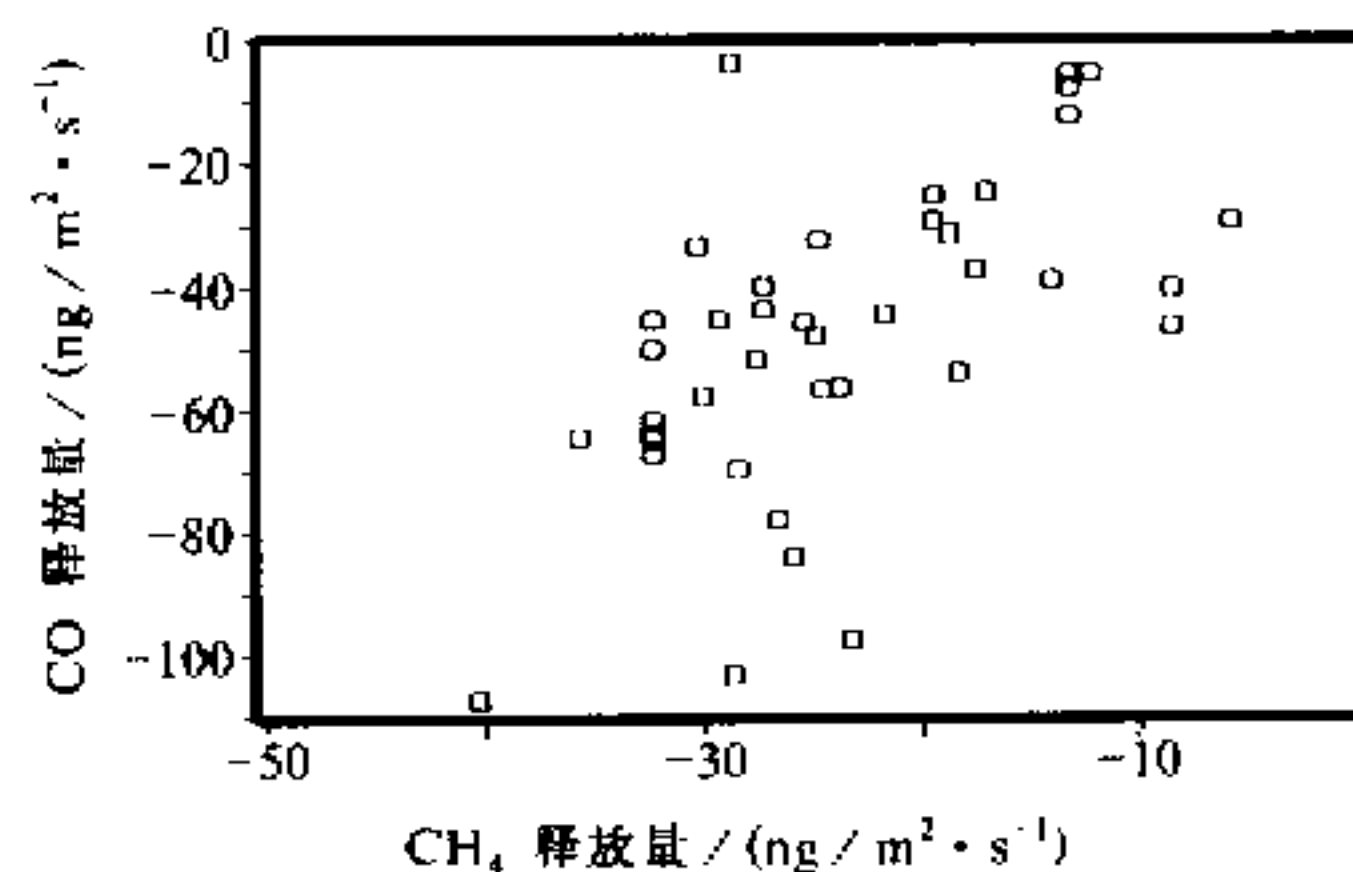


图 5 原状森林土壤释放 CO, CH_4 之间关系

4 结论

温带落叶森林土壤是大气中 CO 重要的汇, 年消耗 CO 强度为 $46.3 \pm 24.5\text{ ng/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 对保护大气环境有着重要意义。当改变森林土壤剖面结构时, 特别是取掉表层有机物质层, 将增加土壤对大气 CO 的消耗强度, 增大幅度 53%~85%, 证明森林表层有机物质影响着土壤和大气之间的气体交换和传输。森林土壤消耗大气中 CO 主要发生在表层 5 cm 以上, 深层土壤含水量变化将不影响土壤消耗 CO 的强度。温带森林土壤消耗大气中 CO 速度不呈季节性变化规律, 与大气温度变化不相关, 但与土壤氧化消耗 CH_4 速度有明显的正相关性。

致 谢 感谢德国马普化学所对此项工作的支持。

参 考 文 献

- 1 Seiler, W. and H. Giehl, 1984, The seasonality of CO abundance in the Southern Hemisphere, *Tellus*, **36B**, 219~231.

- 2 Ramanathan, V. et al., 1987, Climate-chemical interactions and effects of changing atmospheric trace gases, *Rev. Geophys.*, **25**(7), 1442~1482.
- 3 Conrad, R. and Seiler, W., 1980, Role of microorganism in the consumption and production of atmospheric carbon monoxide, *Appl. Environ. Microbio.*, **40**, 437~445.
- 4 Sanhueza, E., et al., 1994, Carbon monoxide fluxes from natural, managed, or cultivated savannah grasslands, *J. Geophys. Res.*, **99**, 16421~16434.
- 5 Scharffe, D. et al., 1990, Soil fluxes and atmospheric concentration of CO and CH₄ in the northern part of the Guayana shield, *J. Geophys. Res.*, **95**, 22475~22480.
- 6 Conrad, R. and Seiler, W., 1982, Arid soils as a source of atmospheric carbon monoxide, *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 1353~1356.
- 7 Conrad, R. and Seiler, W., 1985, Influence of temperature, moisture, and organic carbon on the flux of H₂ and CO between soil and atmosphere: field studies in subtropical regions, *J. Geophys. Res.*, **90**, 5699~5709.
- 8 董云社、彭公炳、李俊, 1996, 温带森林土壤排放 CO₂, CH₄, N₂O 时空特征, 地理学报 (1997 年增刊), 待发表.
- 9 Conrad, R., 1988, Biogeochemistry and ecophysiology of atmospheric CO and H₂, *Adv. Microb. Ecol.*, **10**, 231~237.
- 10 Bender, M. and Conrad, R., 1994, Microbial oxidation of methane, ammonium and carbon monoxide, and turnover of nitrous oxide and nitric oxide in soils, *Biogeochemistry*, **27**, 97~112.

Annual Carbon Monoxide Uptake by Temperate Forest Soils

Dong Yunshe and Peng Gongbing

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract CO soil fluxes and atmospheric concentration were measured during 14 months in a forest near Darmstadt, Germany. Using the enclosed chamber technique, fluxes measurements were made from original forest soils, disturbed forest soils (removing the forest fresh leaves and humus layer). Gas fluxes from removed leaves and humus were also measured. CO soil air concentration of different depth were obtained during the period July to December. CO was analyzed by gas chromatography based on the mercury vapour technique. Under all conditions, a net uptake of CO was observed with an average in the undisturbed forest soils of $-46.4 \pm 24.5 \text{ ng/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, which increases 85% when only the leaves were removed, and 53% when leaves and humus layer were removed. Using the net fluxes, the atmospheric level of CO, and the CO equilibrium concentrations inside the chamber, independent values for the production and consumption rates of CO in the soil, as well as dry deposition velocities (V_d), were calculated. The production of CO was independent from changes in soil moisture and temperature. The V_d values were also independent of the soil moisture, but they increase with temperature, ranging in the undisturbed soil between 0.015 cm/s and 0.03 cm/s, for change in soil temperature from 3°C to 17°C. Deposition velocities up to 0.06 cm/s were observed after the soil litter was removed. CO has a very short lifetime within the soil and the consumption of atmospheric CO occurs in the top few centimetres of soil. A relatively good correlation between the production of CO₂ and the CO V_d values, suggest that the consumption of CO by temperate forest soils is related to soil respiration process. It is also likely that some microorganism present in the forest soil consume both CO and CH₄. However, in general, CO is oxidized within the soil more rapidly than CH₄. We conclude that temperate forest are an important sink for atmospheric CO. Fresh leaves and humus material play a significant role in controlling the fluxes, and possible changes in the production of litter will likely affect the uptake rate of CO by temperate forest soils.

Key words temperate zone forest carbon monoxide soil