

不同温度和土壤含水量对土壤呼吸的影响^{*}

易志刚 蚁伟民 周丽霞 丁明懋

(中国科学院华南植物研究所 广州 510650)

摘要: 在实验室条件下研究了温度和含水量对土壤呼吸的影响, 结果表明温度对土壤呼吸的影响大于土壤含水量对土壤呼吸的影响, 土壤呼吸速率随温度的增加而增加, 温度与土壤呼吸的相关性较好 ($r^2=0.68\sim 0.79$)。不同植被类型土壤呼吸对温度的敏感程度不同。土壤呼吸在低温 ($10\sim 30^\circ\text{C}$) 条件下对温度不敏感 ($Q_{10}=1.27\sim 1.63$), 在高温 ($30\sim 40^\circ\text{C}$) 条件下变化较大 ($Q_{10}=1.93\sim 2.23$)。土壤含水量对土壤呼吸影响较小, 土壤呼吸随含水量的增加而略有增加。土壤呼吸受温度和含水量的共同控制。

关键词: 土壤呼吸; 温度; 湿度

The Influence of Different Temperature and Soil Water Content on Soil Respiration

YI Zhi-Gang YI Wei-Min ZHOU Li-Xia DING Ming-Mao

(South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: The influence of soil temperature and moisture on soil respiration rates in laboratory condition was studied in this paper. The influence of temperature on soil respiration was greater than that of soil moisture. Soil respiration rate increased with increasing temperature. The correlation between soil respiration rate and temperature is better ($r^2=0.68\sim 0.97$). The sensitivity of soil respiration to temperature varied with vegetation types. Soil respiration is more sensitive to high temperature ($30\sim 40^\circ\text{C}$) than to low temperature ($10\sim 30^\circ\text{C}$). The Q_{10} values under low temperature or high temperature were $1.27\sim 1.63$ or $1.93\sim 2.23$. Soil moisture has little influence on soil respiration. Soil respiration rate increased with increasing soil moisture slightly. The results showed that soil respiration was influenced by both the temperature and soil moisture together, and the correlation between soil respiration rate and the temperature and moisture together, ($r^2=0.83\sim 0.90$) is stronger than the correlation between the soil respiration and the temperature alone ($r^2=0.68\sim 0.79$).

Keywords: Soil respiration; Temperature; Soil water content

CO_2 是主要温室气体之一, 在过去的几个世纪里其浓度不断地增加, 导致了全球变化^[1]。土壤是 CO_2 重要的源和库, 在调节大气 CO_2 浓度中起重要作用^[2]。土壤呼吸是生态系统碳循环的重要组成部分, 是全球碳循环的一个主要流通过程, 全球由陆地生态系统向大气排放的 C 量为 $50\sim 75\text{Pg C}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[3], 远远高于由燃料燃烧而释放的 CO_2 ($5.2\text{Pg C}\cdot\text{a}^{-1}$)^[4]。

* 中国科学院知识创新资助项目 (KZCX2-407); 国家自然科学基金资助项目 (30170192)。

了解土壤呼吸在不同条件下的变化情况以及土壤和大气圈之间 CO₂ 的交换动态,对于构建区域痕量气体模型,了解在全球变化下痕量气体的流动状况非常重要。许多有关土壤呼吸的结果显示,土壤呼吸速率与土壤温湿度之间有强烈的相关性。温度是影响土壤呼吸的主要因子,但土壤含水量也同时影响土壤呼吸速率,一般认为土壤呼吸受两者的共同影响^[5-8]。

土壤温度和湿度与诸多环境因子有关,并随着立地生态条件的改变而发生变化,所以在野外进行温度和土壤含水量对土壤呼吸影响的研究比较困难。因此,本研究在实验室内控制土壤温湿度的情况下,观测了温度和土壤含水量对土壤呼吸的影响。

1 实验材料和方法

1.1 土壤样品的采集

所有供试样品均取自鼎湖山自然保护区,该区位于东经 112°35', 北纬 23°08', 在广东省中部。属丘陵区,山体海拔高度一般在 400~600m,最高峰鸡笼山为 1 000.3m。鼎湖山地处热带和亚热带的过渡区,属季风南亚热带湿润气候,年平均气温 21℃,年降水量为 1 927.3mm,相对湿度达 80% 以上^[9]。土壤类型主要为赤红壤、黄壤和山地灌丛草甸土^[10]。自然植被有南亚热带常绿阔叶林、沟谷雨林、常绿阔叶林、针阔叶混交林、针叶林、河岸林、稀树灌丛和灌木草丛^[11],本研究选取其中的三种有代表性的林型:南亚热带常绿阔叶林、针阔叶混交林和针叶林的土壤样品作为研究对象(表 1)。于 2001 年 7 月底在每个实验地内随机采样 7 个点,采土深度为 0~15cm、重约 1kg,土壤装在封口袋内,并在袋口塞上棉花,带回实验室。自然风干后过 2mm 筛,去除土壤中的根和石块,每个点称取 500g 土混合均匀,放在 4℃ 冰箱中备用。

表 1 实验地概况

Table 1 The description of experiment plots

代号 Code	植被类型 Vegetation type	海拔高度 Ele. (m)	土壤特征 Soil properties			
			土壤类型 Soil type	pH	有机碳 Organic C (%)	NH ₄ -N (mg/kg)
A	南亚热带常绿阔叶林 Monsoon evergreen broad-leaf forest	270~300	赤红壤 Lateritic red earth	3.76	3.89	23.401
B	针阔叶混交林 Mixed forest	200~240	赤红壤 Lateritic red earth	3.80	2.68	23.715
C	松林 Pine forest	70~80	赤红壤 Lateritic red earth	4.04	2.33	28.877

1.2 土壤样品分析

1.2.1 土壤含水量的测量

从备用土中称取 20g 左右的土壤,放在铝盒内,于 105℃ 的烘箱中烘干至恒重,计算土壤含水量。每个样品重复 3 次。

1.2.2 土壤呼吸速率的测量

准确称取 100g 土壤置于 1 000ml 的广口瓶内,将土壤含水量分别调至 15%, 20%,

25%, 30%, 静置 12~24h, 使土壤水分扩散均匀。准确量取 1mol/L 的 NaOH 10ml 于 30ml 左右的小烧杯中, 放在广口瓶的土壤上面, 并在 NaOH 烧杯的旁边放一个盛 10ml 自来水的小烧杯 (防止碱液蒸发), 广口瓶用胶塞塞严, 每组实验均设置一个放有同样碱液和水, 但没有土壤的广口瓶作为空白对照。分别在 10℃, 20℃, 30℃, 40℃ 的恒温条件下培养 24 小时, 培养结束后, 取出盛碱液的小烧杯, 用蒸馏水将碱液洗至 100ml 的容量瓶中并定容, 然后准确吸取 10ml 此溶液于 150ml 的三角瓶中, 加入 10ml 蒸馏水, 2ml 1mol/L BaCl₂ 溶液和 4 滴酚酞指示剂, 摇匀, 随即用 0.05mol/L 的 HCl 滴定, 根据以下公式计算土壤呼吸的速率:

$$SR = \frac{N \times (L_0 - L_1) \times 10 \times 44 \times 1000}{2 \times 100}$$

公式中 SR——土壤呼吸速率($\mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ soil} \cdot \text{d}^{-1}$); N——盐酸的浓度(0.05mol/L); L₀——空白对照消耗的盐酸体积(ml); L₁——样品消耗的盐酸体积(ml)。

实验中每个土壤含水量做四种温度下的土壤呼吸速率测量, 每组重复 3 次。

2 实验结果与分析

2.1 土壤呼吸与温度的关系

关于土壤呼吸速率与温度的关系, 温带森林生态系统中有许多实验证明, 土壤呼吸速率与温度之间有很好的相关性^[4,5,12,13]。本文结果也显示出温度与土壤呼吸速率密切相关 (图 1)。

从图 1 中可以看出, 在低温 (10~30℃ 条件) 下, 土壤呼吸速率较低, 三种植被类型分别是 42~119、22~130、17~118 $\mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ soil} \cdot \text{d}^{-1}$, 高温 (30~40℃) 条件下土壤呼吸速率较高, 分别为 156~225、170~217、144~209 $\mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ soil} \cdot \text{d}^{-1}$ 。Q₁₀是衡量土壤呼吸速率随温度变化快慢的一个指标, 本实验中低温 (10~30℃) 条件下的 Q₁₀ 值 (表 2) 与已有报道的 2.0~3.9 相比偏低^[6,12,14~17]。主要是由于上述这些研究大多在温带森林土壤中进行, 年平均气温和土壤温度较低, 土壤呼吸速率对温度很敏感, 而本实验在南亚热带森林生态系统中进行, 年平均气温和土壤温度较高, 与温带森林生态系统相比, 土壤呼吸对温度敏感程度较差。

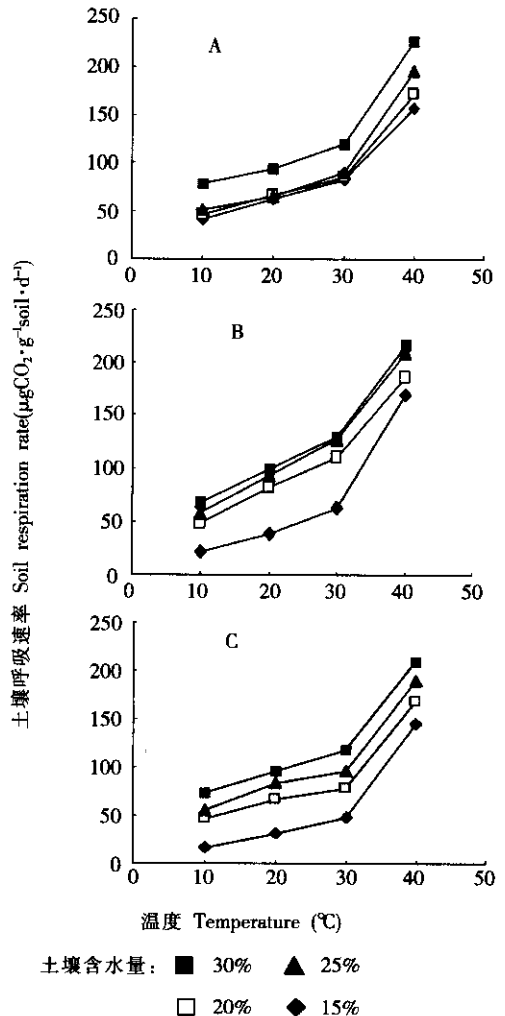


图 1 不同温度条件下土壤呼吸速率

Fig. 1 Soil respiration rate at different temperature

表 2 不同温度条件下的 Q_{10} 值

Table 2 Q_{10} at different temperature

植被类型 Vegetation types	温度变化范围 Range of temperature (°C)	Q_{10}
A	10~20	1.34
	20~30	1.31
	30~40	1.99
B	10~20	1.63
	20~30	1.40
	30~40	1.93
C	10~20	1.51
	20~30	1.27
	30~40	2.23

2.2 土壤呼吸与土壤含水量的关系

有关土壤呼吸与土壤含水量的关系，虽然在野外进行了许多实验，但得到的结果相差较远。一般的研究认为，在土壤含水量不成为限制因子，即不是在极端干旱和潮湿的条件下，土壤呼吸速率与土壤含水量成正比^[6,18,19]。de Jong 利用土壤表层 0~15cm 进行实验发现，随土壤含水量的增加，土壤呼吸量增加 25%~30%^[19]。Kucera and Kirkham 研究发现，当土壤含水量太高，或当土壤淹水的条件下，CO₂ 释放速率显著下降^[20]。研究表明当土壤含水量接近土壤最大持水量的 66.3% 时，土壤呼吸速率最大^[21]。

本研究结果 (图 2) 表明，在同一温度条件下，土壤呼吸速率随湿度的增加而递增。但亚热带常绿阔叶林在土壤含水量较低的条件，土壤呼吸速率随土壤含水量增加的幅度较小，当土壤含水量超过 25% 时，呼吸速率增加幅度较大；马尾松林土壤呼吸速率随湿度的增加而上升，但上升较缓慢；针阔叶混交林中情况恰好与亚热带常绿阔叶林相反，在土壤含水量较低的条件，土壤呼吸速率随土壤含水量增加速率较快，但当含水量超过 20% 时，土壤呼吸速率随土壤含水量增加幅度较小。这种

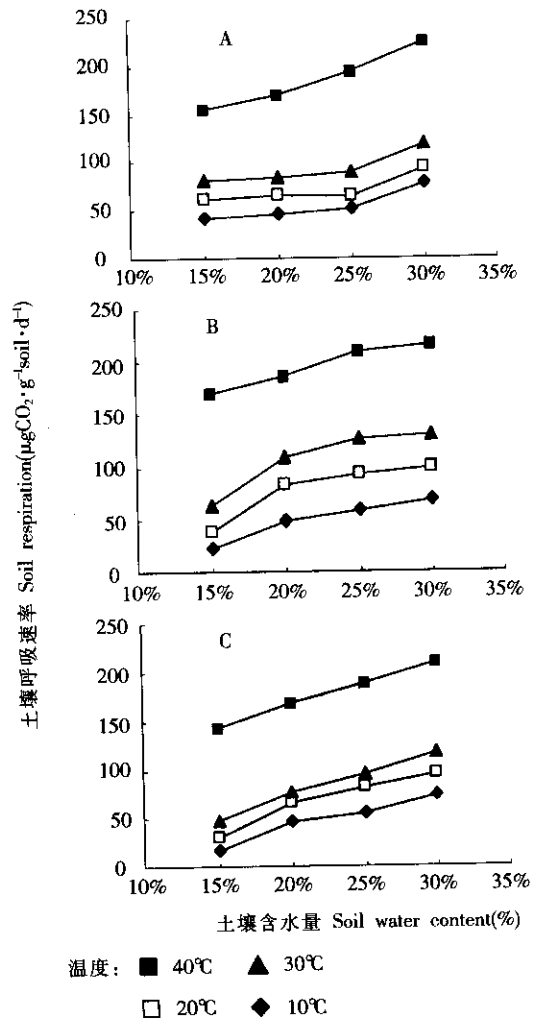


图 2 不同土壤含水量条件下土壤呼吸速率

Fig. 2 Soil respiration rate at different soil water content

变化趋势可能与不同森林土壤微生物、土壤有机质和土壤理化性质有关，还可能与不同植被类型地形条件和林内小气候有关。

2.3 温湿度的共同作用

温度和土壤含水量并不是作为一个单一的因子而影响土壤呼吸速率的，而是受两者的共同影响。Bowden 等在实验室控制温度和湿度的条件下，进行了一系列试验，其结果经多元回归分析表明，土壤呼吸与温湿度的拟合程度高于土壤呼吸与温度单因素的拟合程度^[6]。本研究表明，土壤呼吸速率与温度和土壤含水量两者的相关系数 (r^2) 均比土壤呼吸速率与温度单因子的相关系数高 (表 3, 表 4)，结果与温带森林土壤的研究结果相一致^[4,15,22-24]，也与全球范围内森林土壤的研究结果相一致^[14]。

表 3 土壤呼吸与温度和土壤含水量线性回归方程

Table 3 Line regression equations between soil respiration and temperature/soil water content

植被类型 Vegetation type	回归方程 Regression equation	r^2	显著性 p
A	$SR = -64.93 + 4.18 \times T + 276.55 \times H$	0.83	<0.0001
B	$SR = -90.69 + 4.69 \times T + 361.27 \times H$	0.90	<0.0001
C	$SR = -99.44 + 4.04 \times T + 461.2 \times H$	0.86	<0.0001

表 4 土壤呼吸与温度线性回归方程

Table 4 Line regression equations of soil respiration-temperature

植被类型 Vegetation type	回归方程 Regression equation	r^2	显著性 p
A	$SR = -2.71 + 4.18 \times T$	0.75	<0.0001
B	$SR = -9.41 + 4.69 \times T$	0.79	<0.0001
C	$SR = -5.80 + 4.04 \times T$	0.68	<0.0001

由图 3 可以看出，在一定的温度 (10~40℃) 和土壤含水量 (15%~30%) 范围内，随温度和土壤含水量的增加，土壤呼吸速率增加，但随温度增加的幅度比随土壤含水量的增加幅度明显大，说明土壤呼吸速率主要受温度的影响，而受土壤湿度的影响较

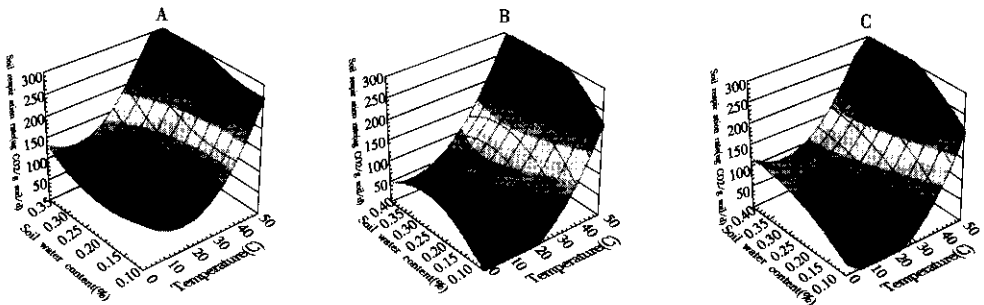


图 3 不同温湿度条件下 CO₂ 通量多元回归模型

Fig. 3 Multiple polynomial regression models of temperature and moisture to predict CO₂ fluxes

小。

3 结论

根据以上结果可以看出,在相同温度和土壤含水量条件下,不同植被类型中土壤呼吸速率不同,这种差异主要与土壤有机碳含量和土壤微生物等立地有关;土壤呼吸速率受温度的影响比湿度大,且土壤呼吸速率随温度的增加而增加,不同温度对土壤呼吸速率的影响不同,低温条件下变化较小,高温条件下变化较大;温度和土壤含水量不是作为单一因子影响土壤呼吸的,土壤呼吸受两者的共同影响。

参 考 文 献

- [1] Prather M, Derwent R, Ehhalt D, Fraser P, Sanhueza E and Zhou X. Radiative forcing of climate Change: Other gases and atmospheric chemistry. In Climate Change 1995: The Science of Climate Change, eds J T Houghton, L G Meira Filho, B A Callander, N Harris, A Kaltenberg and Kmarshell, Cambridge University Press, Cambridge. 1996, pp. 86~103
- [2] Mooney H A, Vitousek P M and Matson P A. Exchange of materials between terrestrial ecosystem and the atmosphere. *Science*, 1987, 238: 926~932
- [3] Watson R T, Rodhe H, Oeschger H and Siegenthaler U. Greenhouse gases and aerosols. In Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. eds J T Houghton, G J Jenkins and J J Ephraums. Cambridge University Press, Cambridge. 1990, pp. 1~40
- [4] Fernandez I J, Son Y, Kraske C R, et al. Soil dioxide characteristics under different forest types and after harvest. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 1115~1121
- [5] Peterjohn W J, Melillo J M, Steudler P A, Newkirk K M, Bowles F P and Aber J D. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures. *Ecological Application*, 1994, 4: 617~625
- [6] Bowden R D, Newkirk K M and Rullo G M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 10: 1591~1597
- [7] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. *生态学报*, 1997, 17 (5): 469~476
- [8] 黄承才, 葛滢, 常杰等. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究. *生态学报*. 1999, 19: 324~328
- [9] 黄展帆, 范征广. 鼎湖山的气候. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1982, (1): 11~16
- [10] 何金海, 陈兆其, 梁永天. 鼎湖山自然保护区之土壤. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1982, (1): 25~38
- [11] 王铸豪等. 鼎湖山自然保护区的植被. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1982, 1: 77~141
- [12] Grill P M. Seasonal patterns of methane uptake and carbon dioxide release by a temperate woodland soil. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, 5: 319~334
- [13] Yavitt J B, Fahey T J and Simmons J A. Methane and carbon dioxide dynamics in a northern hardwood ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59: 796~804
- [14] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relation to vegetation and climates. *Tellus*, 1992, 44B: 81~99
- [15] Hanson P J, Wullschlegel S D, Bohlman S A, and Todd D E. Seasonal and Topographic patterns of forest

- floor CO₂ efflux from an upland oak forest. *Tree Physiology*, 1993, 13: 1~15
- [16] Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and systematics*, 1977, 8: 51~81
- [17] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent of confounded factors controlling soil respiration in a temperate hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217~227
- [18] Wiant H V. Influence of moisture content on "soil respiration" . *Journal of Forest*, 1967, 65: 902~903
- [19] De Jong E, Schappert H J V and Macdonald K B. Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soil as affected by management practices and climate. *Canadian Journal of Soil Science*, 1974, 54: 299~307
- [20] Kucera C and Kirkham. D Soil respiration study in tall grass prairie in Missouri. *Ecology*, 1971, 52: 912~915
- [21] Tesarova M and Gloser J. Total CO₂ output from alluvial soils with two types of grassland communities. *Pedobiologia*, 1976, 16: 364~372
- [22] Vogt K A, Edmond R L, Antos G C, et al. Relationships between CO₂ evolution , ATP concentrations and decompositions in four ecosystem in Washington. *Oikos*, 1980, 35: 72~79
- [23] Dörr H and Münnick K O. Annual variations in soil respiration in selected areas of the temperate zone. *Tellus*, 1987, 39B: 114~121
- [24] Weber M G. Forest soil respiration after cutting and burning in mature aspen ecosystem. *Forest Ecology and Management*, 1990, 31: 1~14