

秋茄红树林湿地土壤呼吸昼夜变化及其温度敏感性

卢昌义¹, 金亮^{1*}, 叶勇¹, 叶功富²

(1. 厦门大学 环境与生态学院, 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005;

2. 福建省林业科学研究院, 福建 福州 350012)

摘要: 采用 LI-8100 全自动土壤 CO₂ 通量测定系统于 2010 年 7 月和 10 月及 2011 年 1 月和 4 月分别对九龙江口秋茄 (*Kandelia candel*) 红树林湿地土壤呼吸的昼夜变化进行测定. 结果表明, 10 月和 4 月的土壤呼吸速率昼夜变化表现为单峰型, 日最高值出现在 14:00, 最低值出现在 00:00; 而 7 月和 1 月的昼夜变化则显示出不同的趋势, 最大值分别出现在 10:00 和 08:00 而最低值分别出现在 22:00 和 04:00, 样地土壤呼吸速率的日均值出现在 06:00—10:00. 指数回归分析显示, 秋茄红树林湿地土壤呼吸速率变化与土壤温度呈极显著的正相关 ($p < 0.01$), 5 cm 层土壤的温度变化可以解释秋茄红树林湿地土壤呼吸速率变化的 74.4%.

关键词: 红树林湿地; 秋茄; 土壤呼吸; 土壤温度; 昼夜变化

中图分类号: X 171.1

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2012)04-0793-05

自工业革命以来, 由于石化燃料的大量使用和土地利用变化原因, 大气中温室气体的浓度不断增加, 从而引发了全球变暖等一系列全球生态环境问题. 全球变暖是人类面临的主要环境问题, 其中 CO₂ 是最重要的温室气体, 它对全球变暖的贡献率达 60% 以上^[1]. 陆地碳循环是全球碳循环中最重要的环节, 涉及问题最多、也最复杂, 因此, 陆地生态系统作为最可能的未知碳汇所在地成为目前研究的热点. 湿地既是陆地上重要的有机碳库, 又是多种温室气体的源和汇, 尽管湿地面积仅占全球陆地面积的 2%, 但其碳储量却高达 2.4×10^{11} t, 约占地球陆地碳总量的 10%, 因此湿地碳循环对全球气候变化有重要作用^[2-4].

土壤呼吸是全球碳循环的主要通量之一, 其大小仅次于初级生产力^[5-6], 主要是由微生物分解土壤有机质和根呼吸组成^[7]. 土壤呼吸作为一个复杂的生物学过程, 不仅受到气温、土壤温度、降水、土壤含水量、凋落物以及土壤碳、氮含量等非生物因子的影响, 而且还受到植被类型、叶面积指数(LAI)、根系生物量等生物因子和人类活动的综合影响^[8]. 现有的研究对湿地土壤呼吸作用的研究大多集中在淡水沼泽湿地^[9-12], 而对我国分布最广和面积最大的滨海湿地研究较少, 制约着陆地碳收支的准确评估. 本研究选取了我国亚热带滨海地区较为典型的秋茄 (*Kandelia candel*) 红树

林湿地作为研究对象, 测定不同季节昼夜间的土壤呼吸速率和土壤温度, 研究昼夜间的温度变化可能对土壤呼吸速率造成的影响, 以及不同季节土壤呼吸日变化的模式和 Q_{10} 值, 有助于探索滨海湿地土壤的呼吸作用对整个红树林植物系统碳循环的全面状况和调控作用, 从而了解红树林在碳循环方面对全球气候变化所做的贡献及对气候变化的响应机制.

1 研究地概况和研究方法

1.1 研究地概况

试验样地位于福建省九龙江口南岸的红树林区, 紧邻龙海市浮宫镇草埔头村 (117°55'E, 24°24'N). 该区属亚热带海洋性季风气候, 年平均气温 21 °C, 极端最高气温 35~39 °C, 出现在 7—8 月, 极端最低气温 -1~1 °C, 出现在 1—2 月, 年均降水量 1 371 mm, 年均相对湿度 86%, 年均日照时数 272 h, 无霜期 231~366 d.

试验样地为 1986 年人工恢复的秋茄纯林, 郁闭度为 84%, 平均高度为 5.9 m, 林带宽度约为 30 m, 沿江岸呈长条带状分布, 处于高中潮地带, 林带与邻接的光滩高程相差约 50 cm. 此外在秋茄林边缘地带分布有少量的桐花树 (*Aegiceras corniculatum*)、木榄 (*Bru-guiera gymnorhiza*) 和红海榄 (*Rhizophora stylosa*) 等红树植物. 九龙江口红树林湿地所属的潮汐类型为较规则的半日潮, 样地位于高中潮带, 每月的小潮期间

收稿日期: 2011-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41176092, 41076049)

* 通信作者: jin2033573@163.com

样地不会被潮水淹没. 样地的土壤特征见表 1.

表 1 研究区域秋茄林湿地土壤特征

Tab. 1 Soil parameters in the studied *K. candel* wetland

林分	土壤含水率/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	有机碳/ (g · kg ⁻¹)	pH
24 年生秋茄林	412.62	0.81	13.27	7.15

1.2 研究方法

在 30 m × 15 m 的标准地按 S 型设置 12 个土壤环, 选择林地的空隙地布设, 每次提前 1 d 埋设土壤环, 在埋设土壤环的同时尽可能不扰动地表的凋落物. 经 24 h 的平衡后, 土壤呼吸速率恢复到土壤环放置前的水平, 从而避免了由于安置气室对土壤扰动而造成的短期内呼吸速率的波动^[11]. 土壤环直径为 20 cm, 高度为 10 cm, 露出土壤表面 2~3 cm.

土壤呼吸速率测定采用动态密闭气室红外 CO₂ 分析法 (IRGA), 测定仪器为 LI-8100 全自动土壤 CO₂ 通量测量系统 (LI-Cor, Lincoln, Nebraska USA). 于 2010 年 7 月和 10 月及 2011 年 1 月和 4 月 (分别代表夏季、秋季、冬季和春季) 分别选择一天测定样地未淹没状态下土壤呼吸的昼夜变化动态. 除秋季试验进行时夜间 20:00—22:00 有阵雨外, 其他试验日均为晴

天. 每隔 2 h 测定土壤呼吸速率, 取每时段 12 个土壤环测出的土壤呼吸的平均值作为该时段的平均土壤呼吸速率, 再根据不同时段 CO₂ 释放速率, 计算出一天土壤呼吸的平均值. 地下 5 cm 层的土壤温度用 Li-8100 自带的温度探针测定.

采用模型 $R = ae^{bT}$ 研究土壤温度和土壤呼吸的关系^[13-14], 土壤呼吸的温度敏感性用 Q_{10} 值 ($Q_{10} = e^{10b}$) 表示. 公式中 R 为土壤呼吸速率, a 、 b 为给定参数, T 为 5 cm 处的土壤温度. 土壤呼吸速率变异系数用 CV ($CV = \frac{S}{x} \times 100\%$) 表示, 其中 S 为标准差, x 为平均数. 数据用 SPSS 16.0 做统计分析, 所有统计的显著性水平均为 0.05.

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸速率的日动态

秋茄红树林湿地土壤呼吸的日动态具有一定的波动性, 不同季节测定的昼夜变化, 土壤呼吸的高低峰值出现的时间及形式也不相同 (图 1). 4 月和 10 月土壤呼吸速率的昼夜变化较为相似, 都表现为单峰型, 最高值出现在 14:00, 最低值出现在 00:00. 而 7 月和 1 月土壤呼吸速率则呈现出不同的变化趋势, 最高值分别

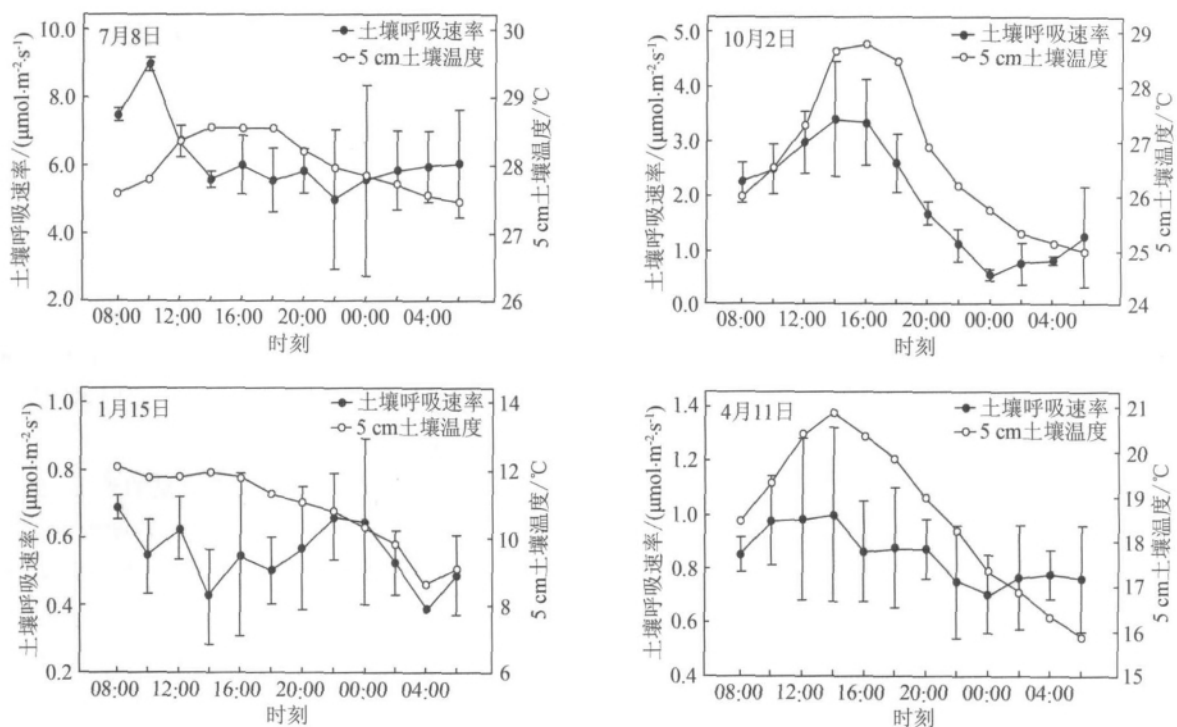


图 1 不同季节土壤呼吸日变化动态 (垂直线条为标准误差 $n=12$)

Fig. 1 Diurnal variations of soil respiration in different season (Vertical bars indicate the standard errors of mean $n=12$)

出现在 10:00 和 08:00,而最低值则分别出现在 22:00 和 04:00. 样地土壤呼吸速率的日均值出现在 06:00—10:00.

由图 1 可知,土壤呼吸的强度 7 月和 10 月明显高于 1 月和 4 月,较大值集中在 7 月,此时土壤温度达到最大值,降水少,且为秋茄营养生长高峰期,根系呼吸作用加强,同时土壤生物活动旺盛,土壤呼吸日平均速率达到 $6.18\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;夏季过后由于温度开始降低,植物根部呼吸作用变小,土壤生物活动开始逐步减弱,导致土壤呼吸强度变弱,最低值出现在 1 月,平均呼吸速率为 $0.55\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$.

秋茄红树林湿地土壤呼吸速率的昼夜变化幅度 10 月最大,变异系数达到 53.35%,其他各月变化幅度较小,且差异不大,变异系数分别为:7 月,17.06%;1 月,17.14%;4 月,11.73%. 10 月变化幅度较大的原因是,2010 年 10 月 2 日夜間 20:00 时段的阵雨导致该时段的 5 cm 层土壤温度急剧下降,土壤呼吸强度迅速减弱,从而使得昼夜变化幅度高达 53.35%.

2.2 CO₂ 日释放量比较

根据各月土壤呼吸速率昼夜动态特征计算出日平均值,根据单位转换求得各月的 CO₂ 日释放量,并同时计算了 06:00—18:00 和 18:00—06:00 的 CO₂ 释放量(表 2). 秋茄红树林湿地 CO₂ 日释放量 7 月最高,1 月最低,各月白天的 CO₂ 释放量均高于夜间.

表 2 秋茄红树林土壤呼吸 CO₂ 日释放量

Tab.2 CO₂ emission from soil respiration in *K. candel*

月份	CO ₂ 日释放量/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)		
	00:00—24:00	06:00—18:00	18:00—06:00
7	25.05	14.34	10.71
10	7.76	5.14	2.62
1	1.94	0.98	0.96
4	3.23	1.74	1.49

2.3 土壤温度对土壤呼吸速率的影响

秋茄林湿地地下 5 cm 层的土壤温度与土壤呼吸具有较相似的变化趋势(图 1). 7,10,1 和 4 月各月的土壤平均温度分别为 28.01,26.68,10.88 和 18.58℃.

将不同月份的土壤温度和土壤呼吸的日变化分别进行指数回归分析,发现只有 4 月和 10 月的土壤呼吸速率与土壤温度呈显著的正相关($p<0.05$),而 1 月

和 7 月无显著相关性($p>0.05$)(表 3). 秋茄林湿地土壤呼吸的 Q_{10} 值大小顺序为:10 月>1 月>4 月>7 月. 将所有月份的土壤温度和土壤呼吸数值进行指数回归分析,结果如图 2 所示,秋茄红树林湿地的土壤呼吸和土壤温度的相关性极显著($p<0.01$),土壤温度可以解释土壤呼吸速率变化的 74.4%,可见,土壤温度对土壤呼吸的影响显著, Q_{10} 值为 3.42.

表 3 土壤呼吸速率昼夜变化与土壤温度相关性分析

Tab.3 Correlation coefficient of soil respiration rate during daytime to soil temperature

日期	回归方程	R^2	Q_{10}	p
2010-07-08	$y=26.797e^{-0.053x}$	0.008	0.59	>0.05
2010-10-02	$y=e^{0.354x}$	0.635	34.47	<0.05
2011-01-15	$y=0.288e^{0.157x}$	0.132	4.81	>0.05
2011-04-11	$y=0.319e^{0.051x}$	0.131	1.70	<0.05

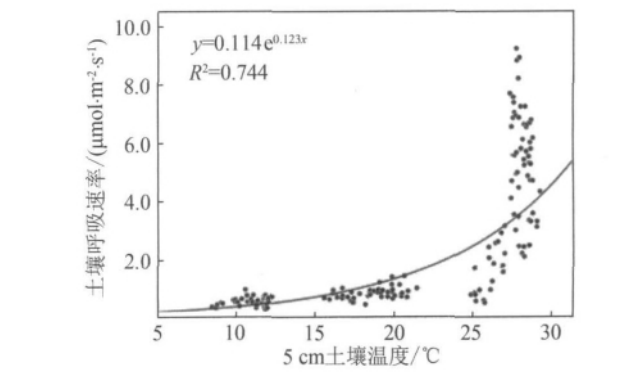


图 2 土壤呼吸与土壤温度的关系
Fig.2 Relationship between soil respiration rate and soil temperature

3 讨 论

本研究中秋茄红树林湿地土壤呼吸、CO₂ 释放量的日动态和季节动态的情况与大多研究结论相似. 聂明华等^[12]研究发现长江口潮滩土壤呼吸速率呈明显的季节变化特征,土壤呼吸速率的高值区出现在最热的夏季,并于 7—8 月出现排放峰值,随着气温和土壤温度的降低,土壤微生物的活性减弱,土壤呼吸速率也逐渐减小,并于次年初春季节的 3 月份测定到土壤呼吸速率的最小值;孔雨光等^[15]研究发现苏北淤泥质海岸杨树和水杉林地土壤呼吸速率季节变化均近似单峰曲线,最大值均出现在 7 月份,最小值分别出现在 4 月份和 11 月份;宋长春等^[16]指出湿地土壤呼吸强度主要与植物生长状况相关,土壤呼吸最大值出现在 6—7

月;谢艳兵等^[11]对盘锦湿地研究发现植物的生长情况和温度是土壤呼吸季节变化的主要影响因子,其最高值出现在 7—8 月,正好为芦苇营养生长高峰期.杨青和吕宪国^[9]在三江平原沼泽湿地进行土壤呼吸观测时发现,不同时期测定的土壤呼吸强度的高低峰值出现的时间不同.Chimner 等^[17]研究发现科罗拉多亚高山湿地在自然条件下 CO₂ 土壤释放量最高值出现在初夏土壤温度上升期,秋季 CO₂ 释放量开始下降.

秋茄红树林湿地不同季节的土壤呼吸变化显著,夏季土壤呼吸明显高于其他季节,可能是受土壤温度等环境因素季节变化的宏观调控.夏季土壤温度受气温的影响,温度升高激发了土壤微生物活性,土壤生物活动旺盛,同时夏季秋茄红树林内底栖动物的种类和密度达到最高值^[18],此时又正逢植物生长的旺盛期,根系呼吸作用加强.此后,土壤温度开始回落,所以夏季土壤呼吸大于其他季节.土壤呼吸速率的昼夜变化主要受温度影响,但不同季节中土壤呼吸速率和土壤温度往往不是同步发生的,特别是在植物生长的高峰期(夏季),而短时间、昼夜和季节尺度上温度与土壤呼吸速率之间的关系有着不同的表现形式,因此有必要在不同时间尺度上对土壤呼吸速率与土壤温度的关系进一步研究,以探明土壤呼吸速率与土壤温度之间的关系细节.

本研究利用土壤呼吸速率与土壤温度之间的指数 Q₁₀ 模型进行分析,发现秋茄红树林湿地夏季的 Q₁₀ 值最低,这与国内外一些学者得出的研究结果相似^[19-21].但是秋季 Q₁₀ 值远远高于其他季节,这是由于测量当天夜间的降雨导致 5 cm 层土壤温度短时间急剧下降,由于土壤温度短时间内变化幅度较大,导致土壤呼吸速率的昼夜变化幅度高达 53.35%,从而使得秋季的 Q₁₀ 值偏高.

参考文献:

- [1] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263 (5144): 185-190.
- [2] 王德宣, 宋长春, 王跃思, 等. 若尔盖高原泥炭沼泽湿地 CO₂ 呼吸通量特征[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 880-883.
- [3] Hirota M, Tang Y H, Hu Q W, et al. The potential importance of grazing to the fluxes of carbon dioxide and methane in an alpine wetland on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(29): 5255-5259.
- [4] 刘子刚. 湿地生态系统碳储量和温室气体排放研究[J]. 地理科学, 2004, 24(5): 634-639.
- [5] Raich J, Schlesinger W. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus, 1992, 44: 81-99.
- [6] Schlesinger W, Andrews J. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48: 7-20.
- [7] Lundegardh H. Carbon dioxide evolution and crop growth[J]. Soil Science, 1927, 23: 417-453.
- [8] Boone R D, Naderhofer K J, Canary J D, et al. Rots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Nature, 1998, 396: 570-572.
- [9] 杨青, 吕宪国. 三江平原湿地生态系统土壤呼吸动态变化的初探[J]. 土壤通报, 1999, 30(6): 254-256.
- [10] 宋长春, 王毅勇, 闰百兴, 等. 沼泽湿地垦殖前后土壤水热条件变化与碳、氮动态[J]. 环境科学, 2004, 25(3): 168-172.
- [11] 谢艳兵, 贾庆宇, 周莉, 等. 盘锦湿地芦苇群落土壤呼吸作用动态及其影响因子分析[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(4): 53-58.
- [12] 聂明华, 刘敏, 侯立军, 等. 长江口潮滩土壤呼吸季节变化及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2010, 31(4): 824-831.
- [13] Adachi M, Bekku Y S, Rashidah W, et al. Differences in soil respiration between different tropical ecosystems[J]. Applied Soil Ecology, 2006, 34: 258-265.
- [14] Jabro J D, Sainju U, Stevens W B, et al. Carbon dioxide flux as effected by tillage and irrigation in soil converted from perennial forages to annual crops[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(4): 1478-1484.
- [15] 孔雨光, 张金池, 王因花, 等. 苏北淤泥质海岸典型防护林地土壤呼吸及其温度敏感性[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4084-4093.
- [16] 宋长春, 王毅勇. 湿地生态系统土壤温度对气温的响应特征及对 CO₂ 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 625-629.
- [17] Chimner R A, Cooper D J. Influence of water table levels on CO₂ emissions in a *Colorado subalpine* fen: an insitu microcosm study [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35: 345-351.
- [18] Chen G C, Ye Y, Lu C Y. Changes of macro-benthic faunal community with stand age of rehabilitated *Kandelia candel* mangrove in Jiulongjiang Estuary, China [J]. Ecological Engineering, 2007, 31: 215-224.
- [19] Chen H, Harmon M E, Griffiths R P, et al. Effects of temperature and moisture on carbon respired from decomposing woody roots [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 138: 51-64.
- [20] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variation in a young ponderosa pine plantation

in northern California [J]. Global Change Biology, 2001, 7: 667-677.

[21] 张静, 杨玉盛, 曾宏达, 等. 亚热带马尼拉草坪生态系统

呼吸昼夜变化研究初报 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2008, 1(3): 31-38.

Diurnal Variation of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity
in *Kandelia candel* Mangrove Wetland

LU Chang-yi¹, JIN Liang^{1*}, YE Yong¹, YE Gong-fu²
(1. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Fujian Academy of Forestry Science, Fuzhou 350012, China)

Abstract: The diurnal variation of soil respiration was studied by Li-8100 at *Kandelia candel* mangrove wetland in Jiulongjiang Estuary on 8 July, 2 October in 2010 and 15 January, 11 April in 2011, respectively. Similar pattern was found in the diurnal variation of soil respiration on 2 October and 11 April with the maximum values at 14:00 and the minimum at 00:00. The diurnal pattern on 8 July and 15 January was completely different, the maximum values appeared at 10:00 and 08:00 and minimum at 22:00 and 04:00, respectively. The daily mean values of soil respiration appeared between 06:00 to 10:00. There was a significantly positive correlation between soil respiration and soil temperature at 5 cm depth ($p < 0.01$). The exponential model indicated that soil temperature at 5 cm depth could explain 74.4% of soil respiration in *K. candel* mangrove wetland.

Key words: mangrove wetland; *Kandelia candel*; soil respiration; soil temperature; diurnal variation

• 简 讯 •

厦门大学 2011 年度专利申请与授权统计表

单位	申请量				授权量			
	总数	发明	实用新型	外观设计	总数	发明	实用新型	外观设计
物理与机电工程学院	98	69	27	2	57	32	23	2
化学化工学院	98	98			45	44	1	
生命科学学院	40	39	1		9	8	1	
海洋与环境学院	17	15	2		22	21	1	
材料学院	47	47			53	52	1	
信息科学与技术学院	36	34	2		7	6	1	
建筑与土木工程学院					1	1		
医学院	6	4	2		6	5	1	
药学院(生物医学研究院)	9	9			1	1		
公共卫生学院	12	11	1					
能源研究院	7	6	1					
萨本栋微米纳米科学技术研究院	2	2						
计算机信息与网络中心	2		2		1		1	
合计	374	334	38	2	202	170	30	2

厦门大学科技处