

文章编号: 0427-7104(2015)01-0058-09

天童山常绿阔叶林土壤呼吸的空间异质性研究: 取样数量的估算和取样方法的优化

高 杰¹, 邵钧炯¹, 何杨辉¹, 王希华², 周旭辉¹

(1. 复旦大学 教育部生物多样性与生态工程重点实验室, 生物多样性科学研究所, 上海 200433;

2. 华东师范大学 环境科学系, 上海 200062)

摘 要: 土壤呼吸是陆地生态系统碳循环中仅次于总初级生产力的第二大碳通量, 是陆地生态系统碳循环的重要组成部分. 因此准确测量土壤呼吸对于估算生态系统碳储量非常关键. 由于土壤呼吸速率在自然生态系统中具有高度的空间异质性, 因此在野外实验中通过随机取样法很难准确估算出生态系统的土壤呼吸. 探讨一套合适的野外采样方法对于评估整个陆地碳循环具有重要而又迫切的意义. 为了评估取样策略(分层取样和随机取样法)和取样个数对实际土壤呼吸估算的影响, 采用蒙特卡罗模拟法来检测随机和分层取样法的有效性. 以浙江天童亚热带常绿阔叶林为研究对象, 于 2013 年 8 月至 2014 年 1 月使用 LI-8100 土壤呼吸仪测定了不同呼吸环内的土壤呼吸速率及地下 5 cm 处的温度和水分. 运用模型估算出 10 °C 下土壤呼吸速率(R_{10}) 约为 $1.0 \mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{s}$, 温度敏感系数(Q_{10}) 约为 2.0. 二者的平均值虽然不受取样策略和个数的影响, 但其变异系数(Coefficient of Variation, CV)均随着取样个数的增加而减少, 且两种取样策略间没有明显差异. 在生长季, 分层取样法比随机取样法的精确度提高了约 16.7%, 工作量减少了约 36.4%, 非生长季则为 8.7% 和 22.2%.

关键词: 土壤呼吸; 空间变异; Q_{10} ; R_{10} ; 森林生态系统

中图分类号: Q 148

文献标志码: A

DOI: 10.15943/j.cnki.fdxh-jns.2015.01.009

土壤呼吸仅次于全球总初级生产力, 是陆地生态系统第二大碳通量^[1-2]. 土壤呼吸平均每年向大气排放的碳高达 60~110 Pg^[2-4], 是陆地碳循环中最大的碳源, 约为化石燃料释放碳的 10 倍^[5]. 土壤呼吸占整个陆地生态系统呼吸的比例高达 60%~90%^[6-7], 在全球碳循环和碳平衡中扮演着重要的角色. 土壤呼吸的微小变化都有可能引发大气 CO₂ 浓度的巨大波动^[8].

土壤呼吸是指未受扰动的土壤产生并释放 CO₂ 的所有代谢过程^[9], 主要包括根际呼吸(根呼吸和根际微生物呼吸)和异养呼吸(土壤微生物和土壤动物呼吸)^[10-12]. 土壤呼吸是一个复杂的生物学和生态学过程, 受到环境、生物和非生物等众多因子的共同作用, 在不同的时间和空间尺度上呈现出巨大的变异^[3, 13-17]. 目前, 对于土壤呼吸的研究主要集中在时间变异及其影响因子方面, 在研究中把整个土壤看作一个同质性整体, 取土壤呼吸的平均值, 并未考虑土壤和森林生态系统的空间异质性问题. 如果不考虑土壤呼吸的空间异质性就把野外小尺度测定的土壤呼吸推广到大尺度生态系统水平, 就会导致巨大的偏差, 因此, 为了精确估算生态系统的碳排放, 对土壤呼吸的空间异质性进行精确而又细致的研究显得非常有必要. 已有的关于土壤呼吸空间异质性的研究表明, 土壤呼吸的空间异质性受到土壤含水量^[18]、根系生物量^[19]、地表凋落物量^[20]、土壤微生物含量^[21]、凋落物层的厚度^[22]、土壤理化性质^[23], 以及植被组成^[24]等诸多方面影响. 在已研究的生态系统中, 土壤呼吸变异系数(Coefficient of Variation, CV)的变化幅度非常大^[25]. 土壤呼吸的变异系数在森林、草地和农田间的变化幅度为: 草地 35%^[26]; 温带森林 10%~100%^[19, 27-28]; 雨林 15%~70%^[29]; 松树种植林 21%~55%^[20, 23]; 农田 150%^[30]. 但亚热带常绿阔叶林生态系统土壤呼吸的空间变异性到底有多大? 测量土壤呼吸时放置多少个土壤呼吸环, 既可以最大程度地代表土壤呼吸平均值又可以减少测量成本? 目前为止还没有相关的研究报道.

收稿日期: 2013-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31370489)

作者简介: 高 杰(1990—), 男, 硕士研究生; 周旭辉, 男, 教授, 通讯联系人, E-mail: zxuhui14@fudan.edu.cn.

浙江天童山国家森林公园是华东地区植被保存较为完整的亚热带常绿阔叶林,对于研究亚热带森林生态系统土壤呼吸具有典型的代表意义. 本研究以天童山常绿阔叶林为研究对象,放置多个土壤呼吸环,研究在 1 个标准森林样地中(25 m×25 m)土壤呼吸的空间异质性,以及呼吸环的取样个数和取样方法.

1 材料与方法

1.1 研究地域概况

天童国家森林公园位于浙江省宁波市鄞州区,平均海拔约 300 m,最高峰太白山顶为 653.3 m. 气候湿润,雨量充沛,四季分明,是典型的中亚热带季风气候. 根据气象资料记载,这里年平均气温为 16.2℃,月平均气温最高和最低的是 7 月和 1 月,气温分别为 28.1℃和 4.2℃. 这里年平均降水量约为 1 551 mm,年蒸发量为 1 320.1 mm. 因受梅雨锋系和台风影响,降雨高峰分别出现在 5、6 月和 7、8 月,年相对湿度高达 85%. 全年日照时长达 2 010 h,无霜期为 237.8 d,≥10℃的活动积温为 5 166.2℃. 天童山属于典型的浙东低山丘陵,土壤为黄红壤,成土母质为中生代的沉积岩和部分酸性火成岩以及石英砂岩和花岗岩的残积风化物,土壤厚薄不一,一般在 1 m 左右^[31].

在这种气候条件下形成了我国东部典型的中亚热带常绿阔叶林,以木荷(*Schima superba*)、栲树(*Castanopsis fargesii*)、米槠(*Castanopsis carlesii*)和石栎(*Lithocarpus glaber*)为主要优势种,林冠郁闭度高,植被盖度在 80%~90%. 草本层主要以里白(*Hicriopteris glauca*)为优势种,乔、灌、草垂直分层明显^[31].

1.2 样地的设置及测定方法

样地的设置:在浙江宁波天童山野外研究站(海拔约 120 m 处)选择了一片树龄约 50~60 年的次生林,从中选取了 3 个立地状况和植被组成(表 1)比较相似的 25 m×25 m 的样地. 样地边界预留 2.5 m 作为缓冲区,中间 20 m×20 m 区域为实验区. 水平方向和垂直方向均每隔 5 m 放置一个土壤呼吸环,共计 25 个. 在 16 个 5 m×5 m 的方格中,随机选择 8 个在中心位置放置一个土壤呼吸环. 每个样地有 33 个土壤呼吸环,共有 3 个重复样地(图 1).

表 1 三块样地的立地状况和植被组成

Tab. 1 The site features and vegetation composition of three sampled plots

样地	立木密度 (株/hm ²)	平均胸径 ±SD(cm)	主要优势 树种和草本	坡度 (°)
一号	832	21.88±0.32	木荷、米槠、里白	18
二号	704	23.82±0.29	木荷、米槠、里白	15
三号	848	20.38±0.35	木荷、栲树、里白	16

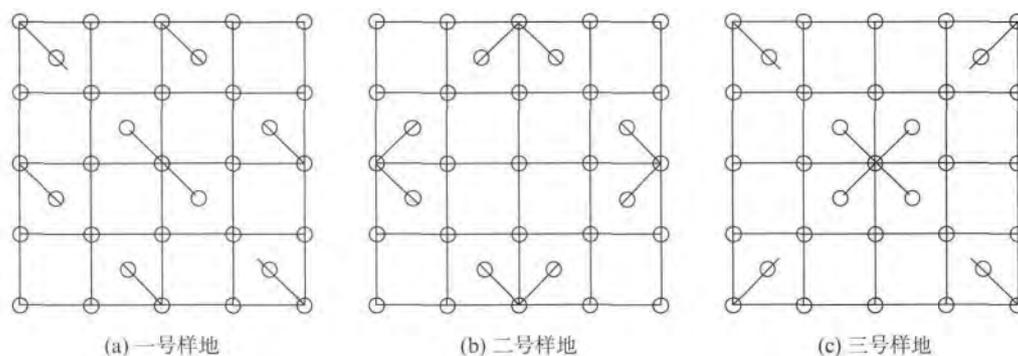


图 1 3 个样地土壤呼吸环分布图

Fig. 1 Distribution of soil collars of three sampled plots

按照一定顺序,对每个土壤呼吸环进行编号.在首次测定土壤呼吸 48 h 之前,安装内径 20 cm、高 10 cm 的土壤呼吸环,其中 5 cm 插入土壤,预留 5 cm 高出地面.剪除呼吸环内部地上部分的活植物体和其他异物,并尽量减少对土壤结构和凋落物的干扰.

土壤呼吸速率的测定:采用 LI-8100 土壤呼吸系统(LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA)测定土壤呼吸速率.在 2013 年的 8~12 月和 2014 年的 1 月,每月选取晴天或者多云天气,对每个样点进行一次测定,测定时间段大约为 9:00—15:00,每次测量时间为 90 s.如遇下雨,则至少在雨停 24 h 之后才开始测量,尽量避免降水的干扰.

土壤温度和水分的测定:在测定土壤呼吸速率的同时,利用 LI-8100 土壤呼吸系统的温度和湿度探头配件,同步测定相应的地下 5 cm 处的温度和土壤含水量.

1.3 数据处理

随机取样法:根据取样个数的需要,随机从每个样地的所有实验数据中抽取对应个数的呼吸环,计算出它们的呼吸速率平均值(R)和变异系数(CV).

Monte Carlo 分层取样法:(1)对所有土壤呼吸环进行编号,进行 3 次大规模集中测量并计算出每个土壤呼吸环前 3 次的 R 值;(2)按照 R 值由小到大(或由大到小)的顺序对呼吸环进行排序;(3)根据抽样个数的需要,对这些有序的土壤呼吸环进行分层,每一层包含的个数为总量/层数(例如,总量为 30 个,分层层数为 5 时,每层个数为 $30/5=6$ 个);(4)抽样时,每一层抽取 1 个土壤呼吸环,抽样个数即为层数(例如,分为 5 层时,即抽取 5 个样本).

用 R 语言程序(R version 3.0.2)进行模拟抽样,并绘制出相应的 R 值及其 CV 与呼吸环取样个数($N_{\text{呼吸环}}$)的关系图.由于每个土壤呼吸环的呼吸速率都对应一个温度值,因此可根据以下参数方程计算出相应的参数 R_{10} 和 Q_{10} 值^[24]:

$$R = R_{10} Q_{10}^{\frac{(T-10)}{10}}, \quad (1)$$

其中, R 表示土壤呼吸速率平均值($\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{s}$), R_{10} 表示土壤温度为 10°C 时的土壤呼吸值($\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{s}$), Q_{10} 为常量参数,表示土壤呼吸的温度敏感性, T 表示土壤深度为 5 cm 处的温度.

呼吸环取样个数的计算:根据公式(2)可以在某一指定的置信区间内估测土壤呼吸速率所需的取样呼吸环个数^[32]

$$N_{\text{呼吸环}} = \frac{CV^2 t_\alpha^2}{E^2}, \quad (2)$$

其中, CV 表示变异系数, t_α 表示在 $1-\alpha$ 置信水平下的 t 值, E 表示指定的误差范围.

2 结 果

2.1 随机取样法和分层取样法的比较

以 2013 年 8 月 28 日的测量结果为例,在不同的样地内, R 和 CV 的变化趋势相似(图 2).随机取样法预测的 R 值不受 $N_{\text{呼吸环}}$ 的影响.当 $N_{\text{呼吸环}} < 17$ 时,分层取样法预测的 R 值基本稳定且与随机取样法没有明显差异,当 $N_{\text{呼吸环}} > 17$ 后,分层取样预测的 R 值下降.两种抽样方式预测的 CV 都随着取样个数的增加而呈现出递减的趋势.当 $N_{\text{呼吸环}} < 17$ 时,分层取样方式的 CV 普遍小于随机取样法,当 $N_{\text{呼吸环}} > 17$ 后,随机取样法的 CV 又小于分层取样法.由于分层取样法计算原理的原因,当分层的层数大于样本总量的 $1/2$ 时,不具有统计代表性.因此,当取样个数 $\geq 17(33/2)$ 时,分层取样法的 R 值和 CV 均出现了异常波动,不具有代表性.

总体上,两种抽样方式预测的 R 值没有显著差异,且与 $N_{\text{呼吸环}}$ 没有明显相关性(图 3(a)).8 月份,当取样个数为 7 时,分层取样法和随机取样法对应的 CV 分别为 10% 和 12%,精确度提高了 16.7%. CV 达到 10% 时,分层取样法和随机取样法对应的取样个数分别为 7 个和 11 个,分层取样法减少了 4 个呼吸环(图 3(b)).由此可见,分层取样法比随机取样法具有明显的优势.

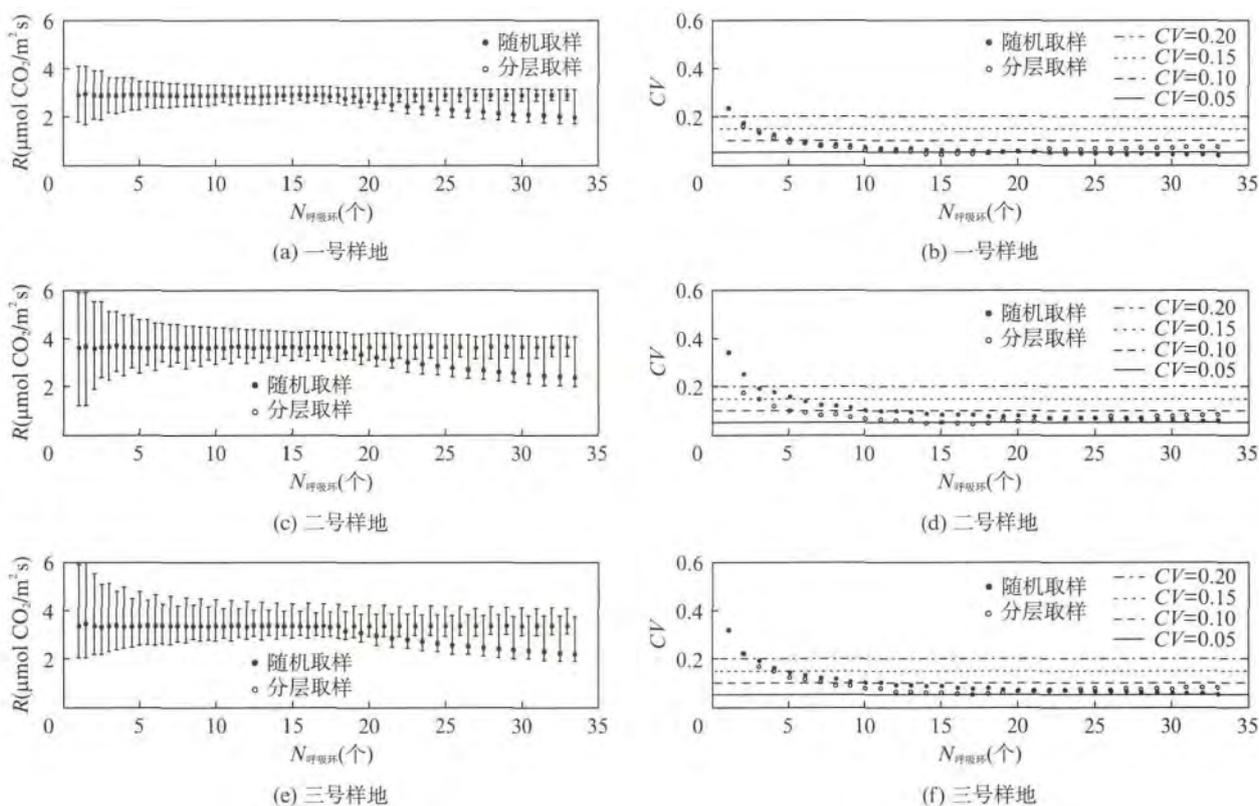


图 2 三块样地的土壤呼吸均值及其变异系数与呼吸环个数的关系

Fig. 2 Trend of mean soil respiration with CV, in relation to the number of soil collars of different sampled plots

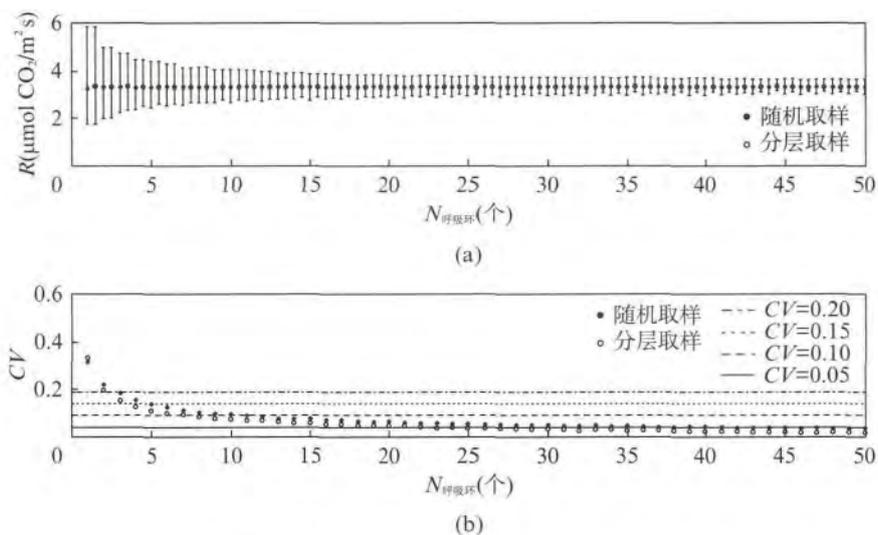


图 3 全部样地的土壤呼吸速率均值(a)及其变异系数(b)与呼吸环个数的关系

Fig. 3 Trend of mean soil respiration (a) with CV (b), in relation to the number of soil collars of all sampled plots

从生长季到非生长季, R 值呈现出明显的降低趋势(图 4, 见第 62 页), CV 呈现出明显的增加趋势(图 5, 见第 62 页). 1 月份, 当取样个数为 7 时, 分层取样法和随机取样法对应的 CV 分别为 21% 和 23%, 精确度提高了 8.70%. CV 达到 10% 时, 分层取样法和随机取样法对应的取样个数分别为 28 个和 36 个, 分层取样法减少了 8 个呼吸环. 从生长季到非生长季, 分层取样法比随机取样法的优势逐渐减小.

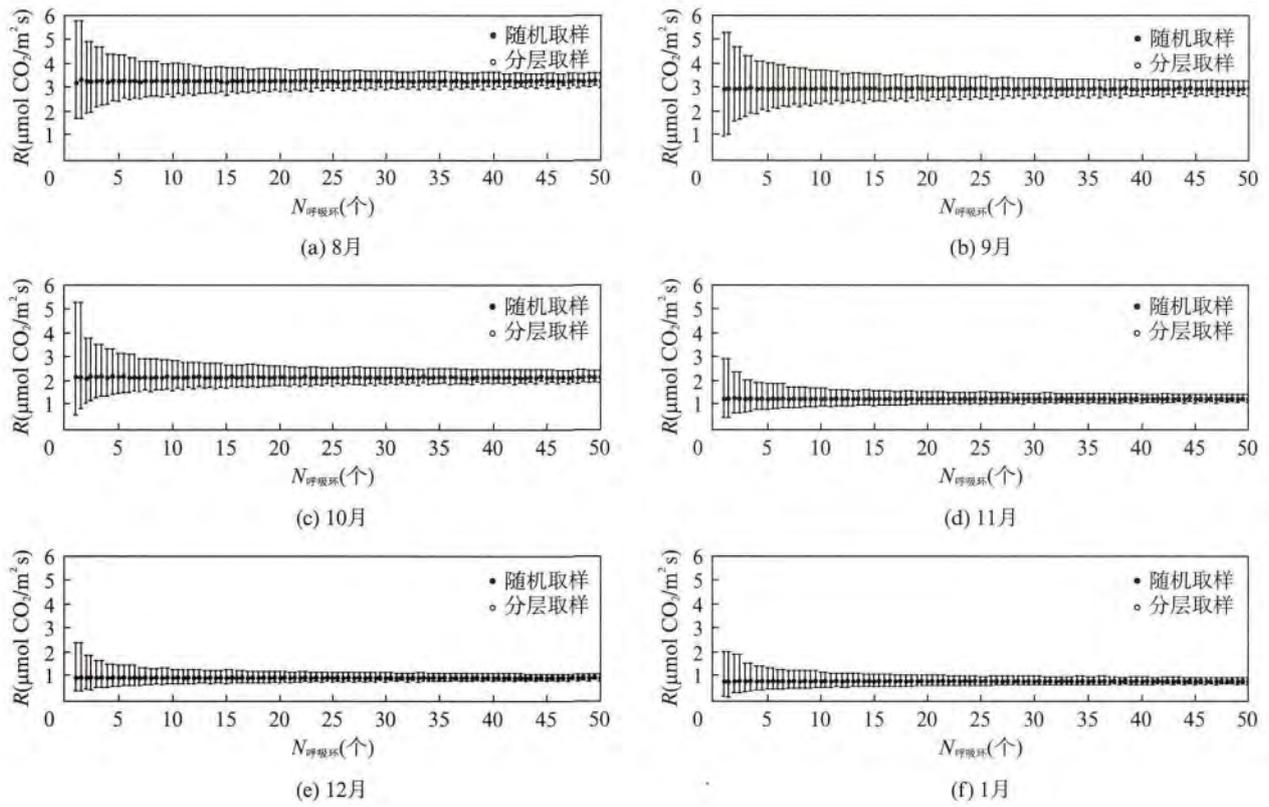


图 4 土壤呼吸均值随测量日期的变化

Fig. 4 Trend of mean soil respiration in relation to the number of soil collars in different sampling time

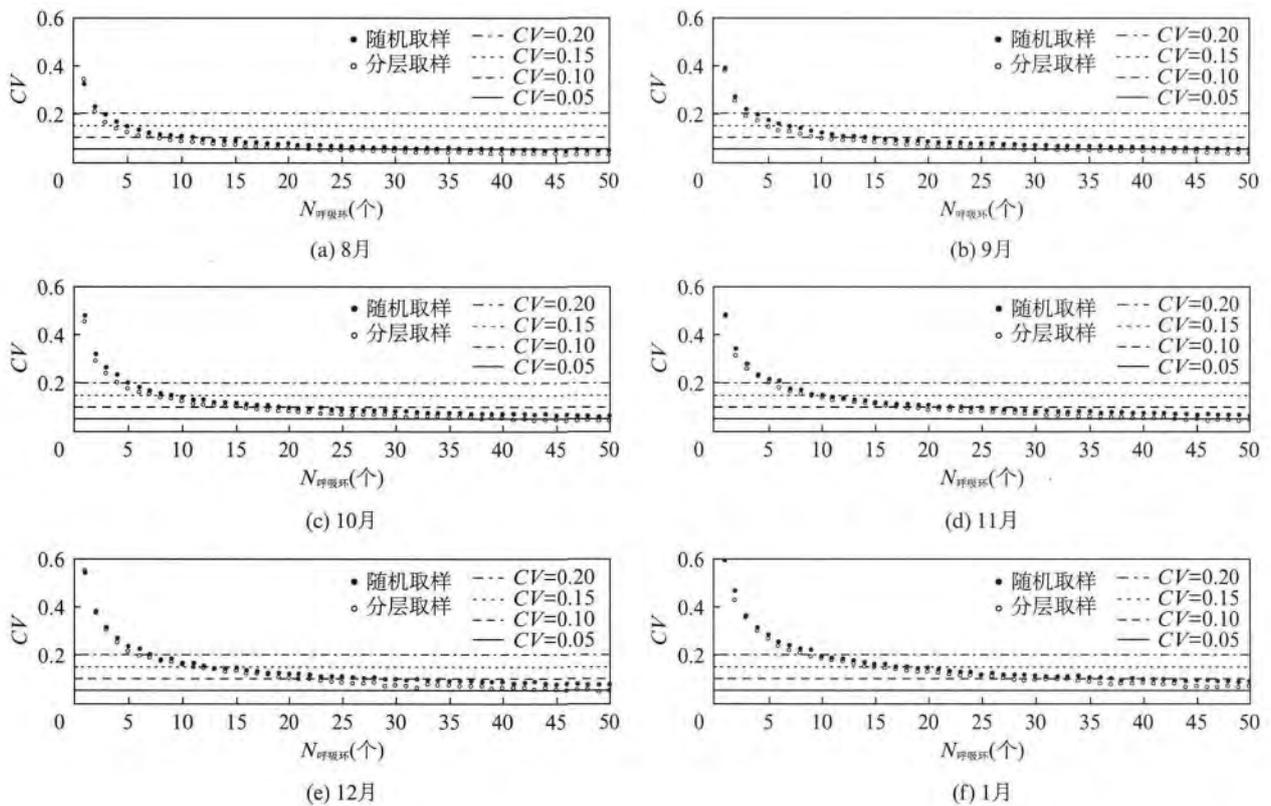


图 5 土壤呼吸均值变异系数随测量日期的变化

Fig. 5 Trend of the CV of mean soil respiration in relation to the number of soil collars in different sampling time

2.2 参数 R_{10} 和 Q_{10} 的计算

根据公式(1)推算出参数 R_{10} 的平均值约为 $1.0 \mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{s}$, 且与取样个数和取样方式没有明显的相关性(图 6(a)). R_{10} 的 CV 随着取样个数的增加呈现出减小的趋势, 两种取样方式间没有明显差异(图 6(b)). 参数 Q_{10} 的值约为 2.0, 且与取样个数和取样方式没有明显的相关性(图 6(c)), CV 随着取样个数的增加而逐渐减小, 两种取样方式间没有明显差异(图 6(d)).

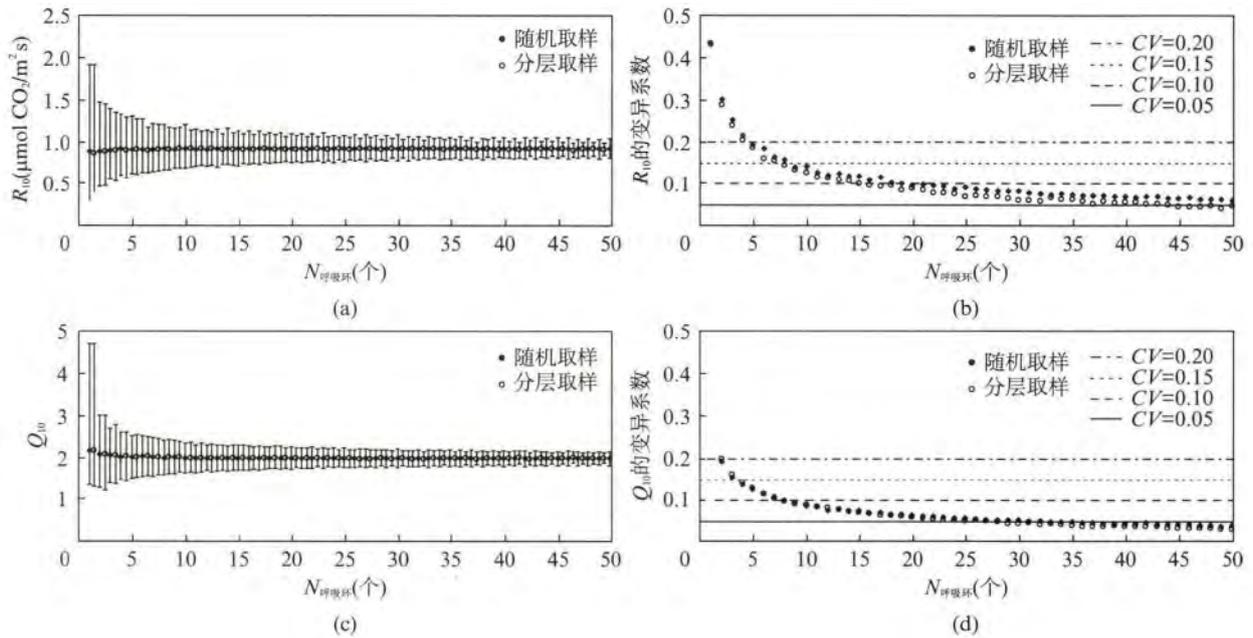


图 6 R_{10} 和 Q_{10} 的值及其变异系数与呼吸环个数的关系

Fig. 6 Trend of the parameter R_{10} and Q_{10} with CV, in relation to the number of soil collars

2.3 取样个数的计算

根据公式(2)可以计算出, 在 95% 的置信区间内, CV 达到 5%、10%、15% 和 20% 的水平所需的呼吸环的个数(表 2). 根据图 5 估算出从 2013 年 9 月到 2014 年 1 月达到 10% 的 CV 标准下所需的呼吸环个数分别为: 14、20、22、28、36 个(随机取样法), 10、16、18、21、28 个(分层取样法). 由此可见, 分层取样法更加贴近计算值.

表 2 土壤呼吸值达到 5%~20% 变异所需的取样个数(95% 置信水平)

Tab. 2 Number of sampling plots needed to estimate the mean soil respiration within 5%—20% of its actual value at 95% confidence level

测量日期	$R \pm SD(\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{s})$	CV(%)	$N_{\text{呼吸环}}(\text{个})$			
			5%	10%	15%	20%
08-02	4.09 ± 1.42	34.6	26	8	5	4
08-09	3.01 ± 1.10	36.5	29	9	5	4
08-24	3.62 ± 1.27	35.1	27	8	5	4
08-28	3.32 ± 1.11	33.3	24	8	5	4
09-13	2.99 ± 1.16	38.8	29	9	5	4
10-03	2.17 ± 0.99	45.9	44	12	7	5
11-06	1.26 ± 0.62	48.9	50	14	7	5
12-02	0.96 ± 0.53	54.8	63	17	9	6
01-03	0.81 ± 0.52	63.8	85	23	11	7

3 讨 论

土壤呼吸主要受到土壤生物区中 CO_2 产生速率的控制,同时还受到影响 CO_2 在土壤中运移的环境因子的控制^[3]. 这些环境因子和生物因子共同驱动着土壤呼吸作用的时间和空间变化. 其变化格局强烈地影响着陆地生态系统碳汇强度和大气 CO_2 浓度. 土壤呼吸在空间尺度上具有明显的异质性,特别是在森林、草原、农田和荒漠生态系统较小的空间尺度上^[23,33]. 森林生态系统土壤呼吸在不同时间尺度上具有明显的空间异质性,空间上相距很近的点之间的呼吸速率可以相差很大,同一地点间的土壤呼吸的空间变化小于同一地点的季节变化^[13]. 根据本实验结果可知,天童山亚热带常绿阔叶林土壤呼吸变异系数的变化范围为 40%~60%,处于中等变异水平. 土壤呼吸变异系数从生长季到非生长季呈现出逐渐增加的趋势(图 5). 森林生态系统中自养呼吸由粗根主导,异养呼吸由土壤有机质主导,土壤呼吸速率的空间异质性与根系有密切关系^[34]. 就单株植物而言,植物根系生物量通常呈现出一定的辐射梯度,在这个辐射梯度中,靠近植株的根系生物量大于远离植株的根系生物量,离植株越远根系呼吸速率越小^[35]. 然而在自然森林生态系统中,乔木的分布相对随机,底层草本的分布相对均匀,植物根系间的相互交错和叠加作用削弱了单株植物根系表现出的效应,从而使得土壤呼吸总体表现出来的异质性减小. 在生长季,由植物根系呼吸主导的自养呼吸对土壤呼吸的贡献较大且异质性较小,导致土壤呼吸总体空间异质性较小. 在非生长季,根呼吸量占土壤呼吸的总量的比例减小,异养呼吸所占比例较大,由于异养呼吸主要由土壤有机质和土壤理化性质等因素主导,土壤有机质和理化性质的巨大空间异质性导致了非生长季土壤呼吸的异质性增加^[36]. 另外,由于在生长季降雨量充沛导致土壤含水量较高且相对均匀,由水分引起的土壤呼吸空间异质性减少,而在非生长季降雨量较少导致土壤含水量较低且异质性增加,由水分引起的土壤呼吸空间异质性增加,导致土壤呼吸的变异系数增加^[37]. 此外,由于在非生长季乔木落叶较多,导致冠层郁闭度比生长季降低,导致地表土壤温度等性质异质性较大,从而使非生长季土壤呼吸异质性增加^[38]. 因此,为了更加准确地估算土壤呼吸值,在非生长季应该适当增加土壤呼吸环的测定个数.

根据两种取样法的分析结果可知,土壤呼吸的变异系数随着取样个数的增加,呈现出逐渐降低的趋势,且分层取样法普遍优于随机取样法(图 3). 随机取样法达到 10%的变异系数所需的呼吸环个数为生长季 11 个,非生长季 36 个;分层取样法达到 10%的变异系数所需的呼吸环个数为生长季 7 个,非生长季 28 个(图 5). 在生长季,分层取样法比随机取样法的优势更加明显. 因此,在测定大尺度的土壤呼吸时应采用分层取样法. 在同样的工作量时,测定的土壤呼吸值的精确度更加高;在同样的变异系数时,所需的工作量大大减少. 与随机取样法相比较,分层取样法具有能够使每一层的个体都有相同和独立的机会被选择到的特点^[39]. 分层的依据有很多,如植被覆盖度,坡度和微地貌以及氮的可利用性,有机层的厚度等^[21,40]. 但由于分层取样法是以土壤呼吸影响因子为基础的(如凋落物厚度、土壤微环境、根系密度等),因此具有典型的位置特异性,不能够轻易推广,且在能够较好地保持呼吸趋势的地点更有效. 因此,在采用分层取样法时,我们建议通过前期密集的土壤呼吸测定实验来确定分层依据:放置大量的土壤呼吸环(间隔 1 m 或更小),并进行 3 次及以上土壤呼吸速率的测定. 放置土壤呼吸环时,尽量包含所有会导致土壤呼吸异质性的情况:如植被覆盖、土壤微地形、凋落物厚度、与树木的距离等.

温度被认为是影响土壤呼吸的关键因素,是土壤呼吸最好的预测因子. 一般用参数 Q_{10} 和 R_{10} 来表示温度对土壤呼吸的影响. 参数 R_{10} 表示土壤温度为 10 °C 时土壤呼吸的速率,参数 Q_{10} 表示温度升高 10 °C 土壤呼吸速率升高的倍数. Q_{10} 具有较强的温度依赖性,常被用来表示土壤呼吸的温度敏感性. 参数 Q_{10} 常被认为是常数,但在不同地区不同生态系统的值不同. 全球土壤呼吸的 Q_{10} 值在 1.3~3.3 之间,中位值为 2.4^[3]. 本研究中,两种取样方法计算出参数 Q_{10} 的平均值基本相同,约为 2.0, R_{10} 约为 1.0 $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{s}$ 左右,且不随取样个数的变化而变化(图 6(a)、(c)). 参数的变异系数均随着取样个数的增加而逐渐减少,但两种取样方式之间没有显著差异(图 6(b)、(d)).

参考文献:

- [1] Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*,

- 1977, **8**(1): 51-81.
- [2] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**(1): 23-36.
- [3] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B*, 1992, **44**(2): 81-99.
- [4] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, **464**(7288): 579-582.
- [5] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-1994[J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(8): 800-812.
- [6] Janssens I A, Lankreijer H, Matteucci G, *et al.* Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests[J]. *Global Change Biology*, 2001, **7**(3): 269-278.
- [7] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, *et al.* Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems[J]. *Nature*, 2001, **414**(6860): 169-172.
- [8] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 7-20.
- [9] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. *The Botanical Review*, 1977, **43**(4): 449-528.
- [10] Kelting D L, Burger J A, Edwards G S. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(7): 961-968.
- [11] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 115-146.
- [12] Tang J, Baldocchi D D, Xu L. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale[J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(8): 1298-1304.
- [13] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(11): 1625-1635.
- [14] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, *et al.* Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy[J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(9): 851-866.
- [15] Kosugi Y, Mitani T, Itoh M, *et al.* Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, **147**(1): 35-47.
- [16] Webster K L, Creed I F, Beall F D, *et al.* Sensitivity of catchment-aggregated estimates of soil carbon dioxide efflux to topography under different climatic conditions[J]. *Journal of Geophysical Research : Biogeosciences* (2005-2012), 2008, **113**(G3).
- [17] Guangxuan H, Guangsheng Z. Review of spatial and temporal variations of soil respiration and driving mechanisms[J]. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2009, **33**(1): 197-205.
- [18] Stoyan H, De-Polli H, Bohm S, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale[J]. *Plant and Soil*, 2000, **222**(1/2): 203-214.
- [19] Hanson P J, Wullschlegel S D, Bohlman S A, *et al.* Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest[J]. *Tree Physiology*, 1993, **13**(1): 1-15.
- [20] Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, *et al.* Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation[J]. *Plant and Soil*, 1998, **205**(2): 135-146.
- [21] Scott-Denton L E, Sparks K L, Monson R K. Spatial and temporal controls of soil respiration rate in a high-elevation, subalpine forest[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, **35**(4): 525-534.
- [22] Russell C A, Voroney R P. Carbon dioxide efflux from the floor of a boreal aspen forest. I. Relationship to environmental variables and estimates of C respired[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, **78**(2): 301-310.
- [23] 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**(6): 667-677.

- [24] Khomik M, Arain M A, McCaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**(1): 244-256.
- [25] Luo Y, Zhou X. Soil respiration and the environment[M]. San Diego: Academic Press/Elsevier, 2006: 107-131.
- [26] Pol-van Dasselaar A, Corre W J, Prieme A, *et al.* Spatial variability of methane, nitrous oxide, and carbon dioxide emissions from drained grasslands[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1988, **62**(3): 810-817.
- [27] Jensen L S, Mueller T, Tate, *et al.* Soil surface CO₂ flux as an index of soil respiration in situ: A comparison of two chamber methods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**(10): 1297-1306.
- [28] Law B E, Ryan M G, Anthoni P M. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 1999, **5**(2): 169-182.
- [29] Schwendenmann L, Veldkkamp E, Brenes T. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica[J]. *Biogeochemistry*, 2003, **64**(1): 111-128.
- [30] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soil[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1994, **58**(1): 1501-1511.
- [31] 宋永昌, 王祥荣. 浙江天童国家森林公园的植被和区系[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1995: 1-44.
- [32] Adachi M, Bekku Y S, Konuma A, *et al.* Required sample size for estimating soil respiration rates in large areas of two tropical forests and of two types of plantation in Malaysia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, **210**(1): 455-459.
- [33] Franklin RB, Mills AL. Multi-scale variation in spatial heterogeneity for microbial community structure in an eastern Virginia agricultural field[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, **44**(3): 335-346.
- [34] Shibistova O, Lloyd J, Evgrafova S, *et al.* Seasonal and spatial variability in soil CO₂ efflux rates for a central Siberian Pinus sylvestris forest[J]. *Tellus B*, 2002, **54**(5): 552-567.
- [35] Epron D, Nouvellon Y, Roupsard O, *et al.* Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **202**(1): 149-160.
- [36] Rodeghiero M, Cescatti A. Spatial variability and optimal sampling strategy of soil respiration[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**(1): 106-112.
- [37] Tang J B. Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **73**(1): 183-207.
- [38] 闫美芳, 张新时, 周广胜. 同树龄杨树 (*Populus balsamifera*) 人工林的土壤呼吸空间异质性[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(6): 1378-1384.
- [39] Krebs CJ. Ecological Methodology[M]. 2nd ed. New York, USA: Addison Wesley, Longman, Inc., 1999: 620.
- [40] Saiz G, Green C, Butterbach-Bahl K, *et al.* Seasonal and spatial variability of soil respiration in four Sitka spruce stands[J]. *Plant Soil*, 2006, **287**(1/2): 161-176.

(下转第 78 页)

tuberculosis. The prediction results were validated in different ways. The results indicated that sequence-based function prediction methods achieved a relatively high accuracy. Furthermore, the combined approach outperformed the three original methods. The predicted GO annotations were further used to analyze a set of gene expression data. The functional analysis result of differentially expressed genes using predicted GO annotations indicated new possible mechanism of action of capreomycin, showing potential application value of function prediction for further biological analyses.

Keywords: gene function prediction; sequence analysis; combined approach; *Mycobacterium tuberculosis*; GO enrichment

(上接第 66 页)

Spatial Variability of Soil Respiration in Evergreen Broad-Leaf Forest: Estimation of the Number of Sampling Points Required and Optimal Sampling Strategy

GAO Jie¹, SHAO Jun-jiong¹, HE Yang-hui¹, WANG Xi-hua², ZHOU Xu-hui¹

(1. Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Institute of Biodiversity Science, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. Department of Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Soil respiration is the second largest carbon flux in the terrestrial carbon cycle after gross primary production. Therefore, a correct measurement of soil respiration is essential to evaluate an ecosystem carbon budget. However, it is difficult to correctly monitor soil respiration in natural ecosystem due to the high spatial and temporal variability of the fluxes. So, optimizing sampling strategy and the number of sampling points is urgent and significant to the carbon cycle research in terrestrial ecosystems. In order to optimize sampling strategy and the number of sampling points of soil respiration measurements, we tested the effectiveness of random and stratified sampling strategies with a Monte Carlo simulation and measured soil respiration rate in 99 soil collars (three plots) with a LI-8100 soil respiration system in a subtropical evergreen broad-leaf forest on Tiantong mountain, Zhejiang province, from August 2013 to January 2014. The results showed that the two different sampling strategies produced the same mean value of R_{10} and Q_{10} , independent of the number of collars, which were $1.0 \mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{s}$ and 2.0, respectively. The coefficient of variation of the parameters decreased with the sample size without significant difference between two different sampling strategies. Stratified sampling is an alternative to random sampling as a method to reduce the number of sampling points by 36.4% and the coefficient of variation by 16.7% in the sampling process compared to random sampling in growing season, 22.2% and 8.7% in non-growing season.

Keywords: soil respiration; spatial variability; Q_{10} ; R_{10} ; forest ecosystem