

南方红壤区 3 年生茶园土壤呼吸特征

尤志明^{1*}, 吴志丹¹, 江福英¹, 王峰¹, 王义祥², 张磊¹, 翁伯琦²

(1. 福建省农业科学院茶叶研究所, 福建 福安 355015; 2. 福建省农业科学院农业生态研究所, 福州 350013)

摘要: 为探讨南方红壤区茶园的土壤呼吸特征, 采用 LI-Cor8100 开路式土壤碳通量测定系统观测 3 年生茶园系统的土壤呼吸速率, 对茶园土壤呼吸速率的季节变化和在茶行尺度上的空间异质性进行了研究。结果表明, 茶园土壤呼吸速率的月动态变化呈明显的单峰曲线特征, 峰值出现在 8 月; 茶园土壤呼吸速率的月动态变化与温度呈极显著相关($P < 0.01$), 土壤 10 cm 的温度能够解释茶园不同观测区域土壤呼吸速率月动态变化的 67.79% ~ 88.52%; 用指数方程计算的茶园不同观测区域土壤呼吸 Q_{10} 值为 1.58 ~ 1.86。在茶行尺度上, 茶园土壤呼吸速率存在明显的空间异质性, 土壤呼吸速率通常在距离茶树基部较近的位置较高; 根系生物量能够解释茶园土壤呼吸速率在茶行尺度上空间变异的 82.68%。因此, 根系分布的空间差异是造成茶园土壤呼吸速率空间异质性的主要原因。

关键词: 茶园; 土壤呼吸; 土壤温度; Q_{10} 值; 空间异质性

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2013.03.001

Soil Respiration Characteristics of 3-year-old Tea Garden from Red Soil Region in South China

YOU Zhi-ming^{1*}, WU Zhi-dan¹, JIANG Fu-ying¹, WANG Feng¹, WANG Yi-xiang², ZHANG Lei¹, WENG Bo-qi²

(1. Tea Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fu'an 355015, China; 2. Agriculture Ecology Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract: In order to understand soil respiration characteristics of tea garden from Red Soil Region in South China, soil respiration rate in a 3-year-old tea garden were investigated with LI-Cor8100 open soil carbon flux system from January to December in 2011. The seasonal variation and spatial heterogeneity of soil respiration rate were studied. The results showed that monthly dynamic changes of soil respiration rate in the tea garden correlated significantly with temperature ($P < 0.01$). Soil temperature at 10 cm depth could explain 67.79% – 88.52% of monthly dynamic changes of soil respiration at four observation areas in the tea garden. The Q_{10} value of soil respiration derived from the exponential equation at different observation areas in tea garden ranged from 1.58 to 1.86. There was obvious spatial heterogeneity for soil respiration at tea line scale in tea garden, the soil respiration rate was higher close to tea tree base. The spatial variation of root biomass could explain 82.68% of spatial heterogeneity of soil respiration rate. So, the difference in spatial distribution of roots was main reason for spatial heterogeneity of soil respiration rate.

Key words: Tea garden; Soil respiration; Soil temperature; Q_{10} value; Spatial heterogeneity

收稿日期: 2012-09-07

接受日期: 2013-01-16

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-23); 福建省公益类科研院所基本科研专项(2010R1014-2; 2011R1014-5)资助

作者简介: 尤志明(1964~), 男, 研究员, 主要从事作物栽培与环境生态研究。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: youzm@faas.cn

大气中 CO₂ 浓度的持续升高对全球气候变化起着极其重要的作用,而土壤是大气 CO₂ 主要的源和汇,对大气 CO₂ 浓度的调控起着关键作用^[1-3]。土壤呼吸作为陆地生态系统碳循环的流通途径之一,其作用十分重要^[4]。陆地生态系统中,土壤呼吸主要有 3 个方面的特征:土壤呼吸强度、时间变异性和空间异质性^[5]。土壤呼吸作为一个复杂的生物学过程,受到多种因素的作用,凡是能够影响植物根系和土壤微生物活动的生态因子都会导致土壤呼吸速率的变化,如温度、湿度、植被、土壤养分等,土壤温度是土壤呼吸速率日动态和月动态变化的主要驱动因子^[6-7];另外,有研究表明一个区域内部或者不同区域间的土壤呼吸作用在不同尺度上存在着空间异质性^[8-9]。在目前的研究报告中,主要采用随机方法设置土壤呼吸作用的观测样地,通过取观测样地的土壤呼吸作用平均值,来消除某一植被类型或生态系统土壤呼吸作用的空间异质性^[9]。估算生态系统土壤呼吸平均速率必须剖析生态系统内部土壤呼吸作用的空间异质性,如果不考虑空间差异就把实际观测的土壤呼吸作用程序化到生态系统层面,将会导致很大的偏差。

国内外对陆地生态系统土壤呼吸进行了大量研究,且主要集中于森林生态系统、草地生态系统和农田生态系统^[8,10-11],但对受到强烈人为干扰的茶园地生态系统研究较少^[12]。中国是全球最大的茶叶生产国,现有茶园面积为 1.849×10^6 hm²,茶叶产量达 1.359×10^6 t,均居全球首位,茶园生态系统是我国陆地生态系统的重要组成部分。据此,本文依据茶园土壤呼吸作用周年定位观测数据,研究茶园土壤呼吸的季节变化规律和在茶行尺度上的空间异质性,探讨其影响因素,为今后茶园土壤呼吸观测样点的选择和茶园生态系统的碳平衡研究提供参考。

1 试验地概况

试验地位于福建省福安市社口镇福建省农业科学院茶叶研究所 2 号山,处于东经 119.57°、北纬 27.22°,海拔为 89 m,年均降雨量为 1646 mm,年无霜期达 285 d,年平均气温为 19.3℃,属中亚热带季风气候。地处丘陵坡地,系花岗岩风化坡积的粘壤质红壤,坡度为 8°~13°,梯宽约 8 m。于 2009 年 3 月改种植茶(*Camellia sinensis*)‘茗科 1 号’品种,东

西走向双条行双株种植,行距 150 cm,列距 40 cm,株距 30 cm。茶园每年施 N 150 kg hm⁻²、P₂O₅ 75 kg hm⁻²、K₂O 75 kg hm⁻²,分为基肥(占总量的 40%,于 12 月上旬施用)、催芽肥(占总量的 30%,于 3 月上旬施用)、夏茶追肥(占总量的 15%,于 6 月下旬施用)和秋茶追肥(占总量的 15%,于 8 月下旬施用),肥料种类为复合肥[K₂SO₄ 型, N : P₂O₅ : K₂O = 15 : 15 : 15 (m/m/m)]和尿素;肥料施用位置为茶树种植区域,施用方法为撒施后覆土。2011 年茶园植被覆盖度约 65%,茶树树高 42 cm,每株树冠幅平均达 2029 cm²。用常规方法^[13]测定供试土壤主要理化性状,茶园 0~20 cm 土层的 pH 值为 3.76,有机碳含量为 14.05 g kg⁻¹,全氮含量为 1.23 g kg⁻¹,碱解氮含量为 163.58 mg kg⁻¹,有效磷含量为 60.75 mg kg⁻¹,速效钾含量为 106.4 mg kg⁻¹,C/N 为 11.42。

2 材料和方法

2.1 土壤呼吸及环境因子测定

在试验茶园里随机选取 3 m × 3 m 的观测样地 3 块,每块样地在茶行不同位置设置 4 个观测区域(图 1),分别为 S1(列间)、S2(株间)、S3(行间靠茶行位置)、S4(行间靠茶行中线位置),观测样点分别在 4 个区域内随机选择。

采用 LI-Cor 8100 开路式土壤碳通量测定系统连接 20 cm 短期呼吸室,测定茶园土壤呼吸速率。为减少对土壤的扰动,在测定的前一天齐地剪去测定点杂草,将 PVC 环(内径为 20 cm)插入土壤 3~5 cm 深处,在测定过程中位置保持不变。于 2011 年的每个月选择至少 3 d 以上在上午 9:00~11:00 观测^[14],取平均值作为该月土壤呼吸速率值。为避免施肥过程中开沟覆土等措施对土壤呼吸速率的影响,试验观测时间至少与施肥时间间隔一周以上。

各观测样点土壤温湿度由 LI-Cor 8100 携带的探针进行同步测定,探针插入土壤 10 cm 深处,测量 10 cm 深处的土壤温度和体积含水量。每次呼吸室关闭时自动记录的初始大气相对湿度、大气温度和 CO₂ 浓度,作为周围近地表大气的相对湿度、温度及 CO₂ 浓度。

2.2 根系生物量及土壤性质指标测定

在全年土壤呼吸观测结束后(2011 年 12 月下

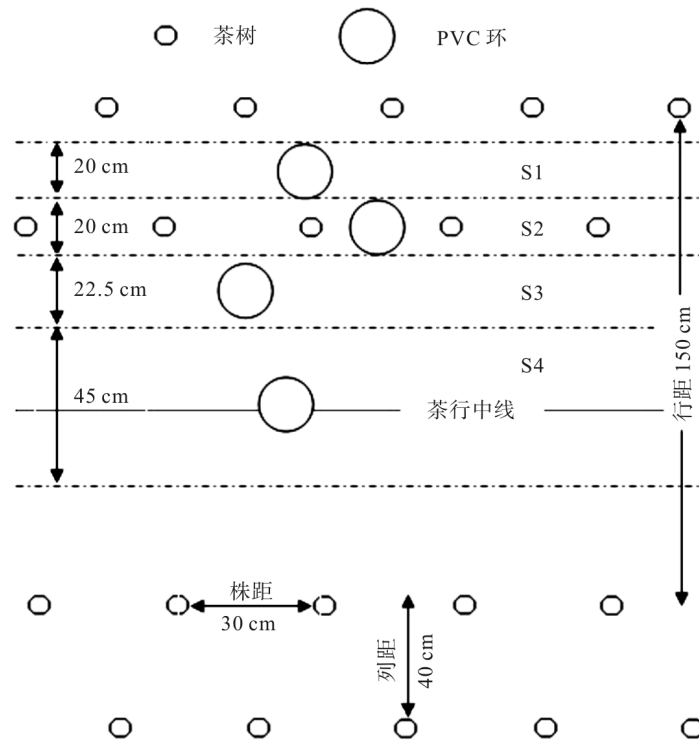


图1 测定样点位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement positions

旬),用与PVC环等同的土钻取出每个测定区域的土壤圆柱(直径为20 cm,深度为20 cm),放入网眼为1 mm的网兜中冲洗土壤,挑出根系,用滤纸吸干水后称重。同时用直径为3 cm土钻取各测定区域的土壤样品,取样深度为0~20 cm,土壤风干过筛,采用重铬酸钾氧化法^[13]测定土壤有机碳含量,采用凯氏定氮法^[13]测定土壤全氮含量,碱解氮含量采用碱解扩散法^[13]测定;土壤速效磷含量采用0.05 mol L⁻¹ HCl-0.025 mol L⁻¹ (1/2H₂SO₄)法^[13]测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度法^[13]测定。

2.3 统计分析

运用相关分析方法分析各观测区域平均土壤温度、土壤湿度、大气湿度、大气CO₂浓度和大气温度与其测定平均土壤呼吸强度的关系;以及根系生物量、土壤性质指标与年均土壤呼吸强度的关系。用指数模型 $SR = R_0 \times e^{bT}$ (其中,SR为土壤呼吸速率,T为10 cm深处的土壤温度,R₀为土壤温度0℃时的土壤呼吸速率,b是温度反应常数)来模拟土壤呼吸速率与土壤温度的关系,Q₁₀值为土壤温度敏感性指数,表示温度每升高10℃,土壤呼吸速率

变化的倍数,计算公式为: $Q_{10} = e^{10b}$ (b是温度反应常数)。

所有统计分析均在DPS6.85软件中进行,用Excel 2003软件作图。

3 结果和分析

3.1 土壤呼吸速率的月动态及季节差异

茶园各观测位置的土壤呼吸速率的月动态变化规律基本一致,均呈明显的单峰曲线特征(图2)。4-8月,随着土壤温度的升高,土壤呼吸速率逐渐升高,并在8月份达到全年最大值(2.10~3.21 μmol m⁻²s⁻¹);之后,随着土壤温度的下降,土壤呼吸速率逐渐降低,最低值出现在1-2月份(0.58~0.88 μmol m⁻²s⁻¹),3、4月份仍保持在较低水平。

茶园各观测区域土壤呼吸速率表现出明显的季节差异(图3)。春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)、冬季(12月至翌年2月)茶园不同观测位置的土壤呼吸速率平均值分别为0.92~1.50 μmol m⁻²s⁻¹、1.78~2.71 μmol m⁻²s⁻¹、1.09~2.08 μmol m⁻²s⁻¹和0.68~1.03 μmol m⁻²s⁻¹。可见,夏季的土壤呼吸速率最高,秋季次之,冬季最低。

3.2 土壤呼吸速率在茶行尺度上的空间异质性

在茶行尺度上,茶园土壤呼吸速率存在明显的空间异质性(图2~4)。各样点的年平均土壤呼吸速率分别是:S1为 $1.54 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (变幅为 $0.79 \sim 2.52 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、S2为 $1.83 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (变幅为 $0.88 \sim$

$3.21 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、S3为 $1.38 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (变幅为 $0.58 \sim 2.16 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)和S4为 $1.12 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (变幅为 $0.60 \sim 2.10 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)。各观测位置的土壤呼吸速率和变幅均表现为 $S2 > S1 > S3 > S4$,距离茶树基部较近的位置具有相对较高的土壤呼吸速率。

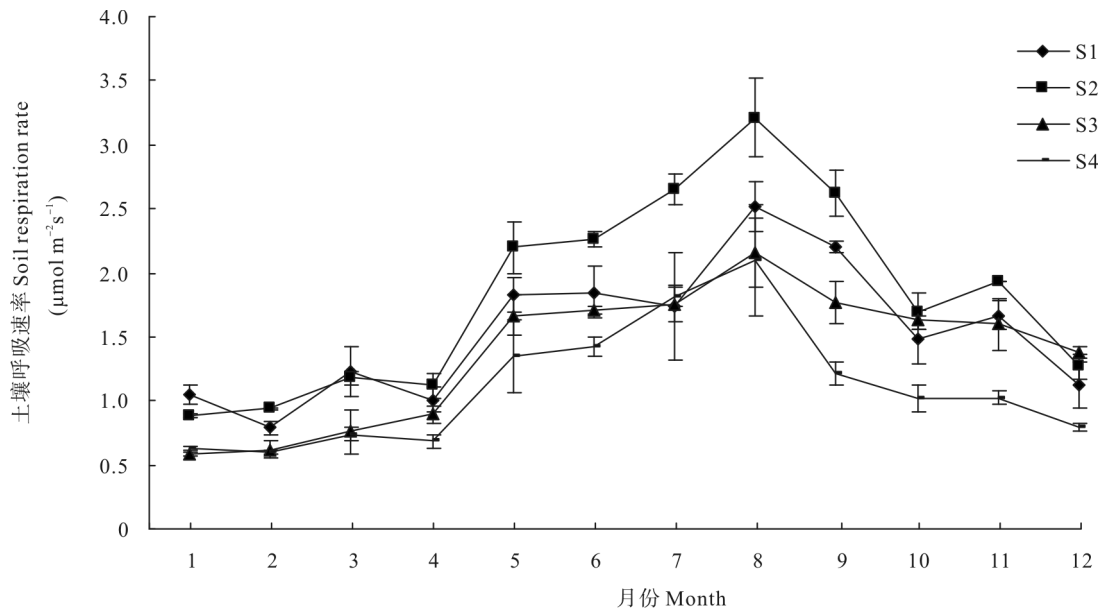


图2 土壤呼吸速率的月动态变化。S1: 列间;S2: 株间;S3: 行间靠茶行位置;S4: 行间靠茶行中线位置。以下图、表同。

Fig. 2 Monthly dynamic changes in soil respiration rate at four measurement positions. S1: Between columns; S2: Between plants; S3: Between lines near plants; S4: Between lines near middle line of plants. The same is following Tables and Figures.

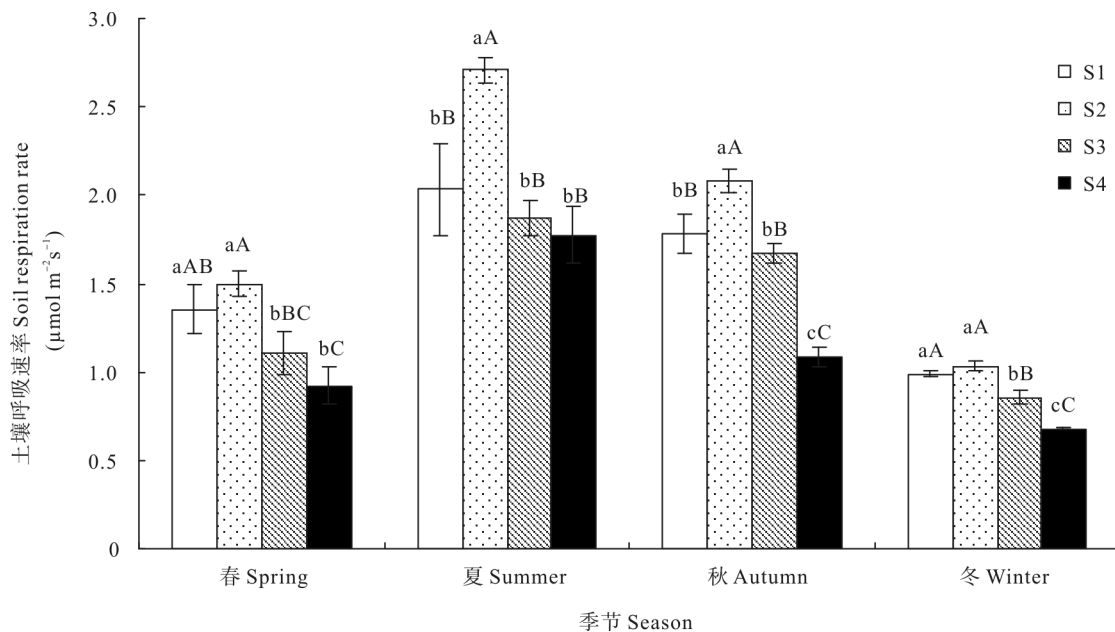


图3 土壤呼吸速率的季节动态变化。同一季节柱上不同小写和大写字母分别表示差异显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)。

Fig. 3 Seasonal changes in soil respiration rate at four measurement positions. Different small and capital letters above column in the same season indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

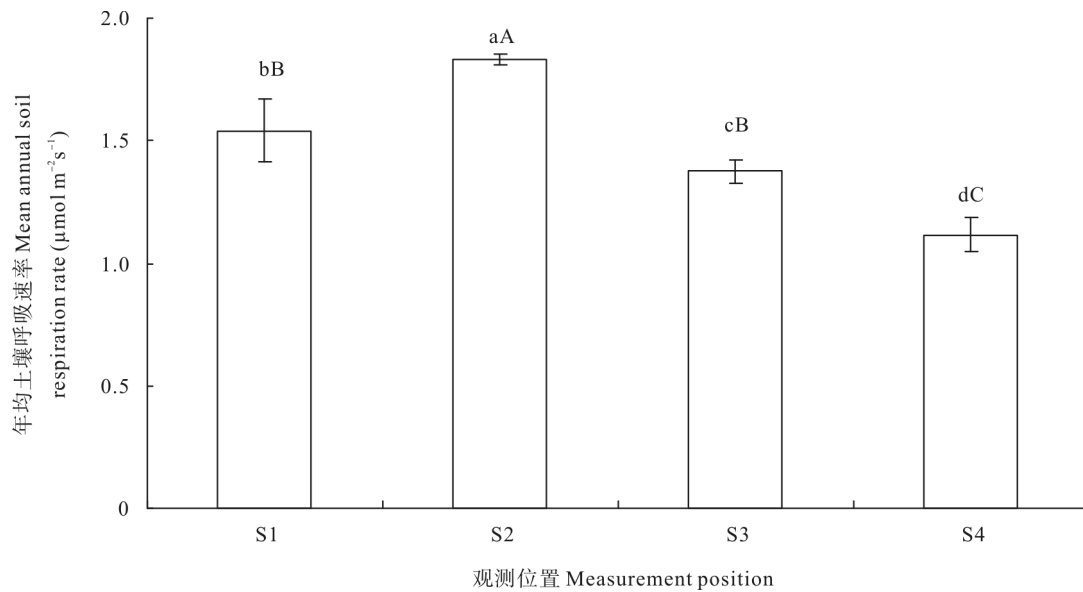


图4 年均土壤呼吸速率的空间异质性。柱上不同小写和大写字母分别表示差异显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)。

Fig. 4 Spatial heterogeneity of annual mean soil respiration rates at four measurement positions. Different small and capital letters above column indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3.3 土壤呼吸与环境因子的关系

3.3.1 土壤呼吸速率与环境因子的相关性

土壤温度、土壤含水量、大气温度、湿度、 CO_2 浓度等都是导致土壤呼吸速率变化的重要环境因子^[15]。将各月测定的土壤呼吸速率和相应的环境因子进行相关分析,结果表明(表1),不同观测位置土壤10 cm深处的温度与土壤呼吸速率的相关关系为0.85~0.95,相关性均达到极显著水平($P < 0.01$);大气温度与土壤呼吸速率的相关系数为0.72~0.83,相关关系达极显著水平($P < 0.01$),说明土壤温度(尤其是土壤10 cm深处的温度)是引起茶园土壤呼吸速率月动态变化的主要决定因子。在本试验观测条件下,土壤呼吸速率与土壤含水量、大气湿度、 CO_2 浓度的相关关系较弱,均没有达到显著

水平($P > 0.05$)。

3.3.2 土壤温度对土壤呼吸的影响

土壤温度是土壤呼吸最重要的影响因子^[16],目前普遍用指数方程($SR = R_0 \times e^{bT}$)来描述温度与呼吸的关系^[6,17]。从图5可见,指数方程能较好模拟茶园土壤呼吸速率与土壤10 cm深处温度的关系($P < 0.01$),在茶园不同观测位置中,土壤10 cm深处温度能解释土壤呼吸速率月动态变化的67.79%~88.52%。

基础呼吸 R_0 值和温度敏感性指数 Q_{10} 值是反映土壤呼吸速率温度依赖性的两个重要变量。从表2数据可以看出,茶园不同位置的基础呼吸 R_0 值在0.35~0.61 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之间,表现为 $S1 > S2 > S3 > S4$;茶园不同观测位置的 Q_{10} 值在1.58~1.86

表1 不同观测位置土壤呼吸速率与环境因子的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between soil respiration and environment factors at different measurement positions

观测位置 Measurement position	土壤10 cm深处温度 Soil temperature at 10 cm depth	土壤湿度 Soil moisture	大气湿度 Air moisture	大气 CO_2 浓度 Air CO_2 concentration	大气温度 Air temperature
S1	0.89**	0.14	-0.03	0.31	0.79**
S2	0.95**	0.20	0.16	0.33	0.83**
S3	0.85**	0.33	0.28	0.43	0.72**
S4	0.90**	0.24	0.10	0.19	0.79**

$n = 12$, $r_{0.05} = 0.576$, $r_{0.01} = 0.708$; **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$ 。

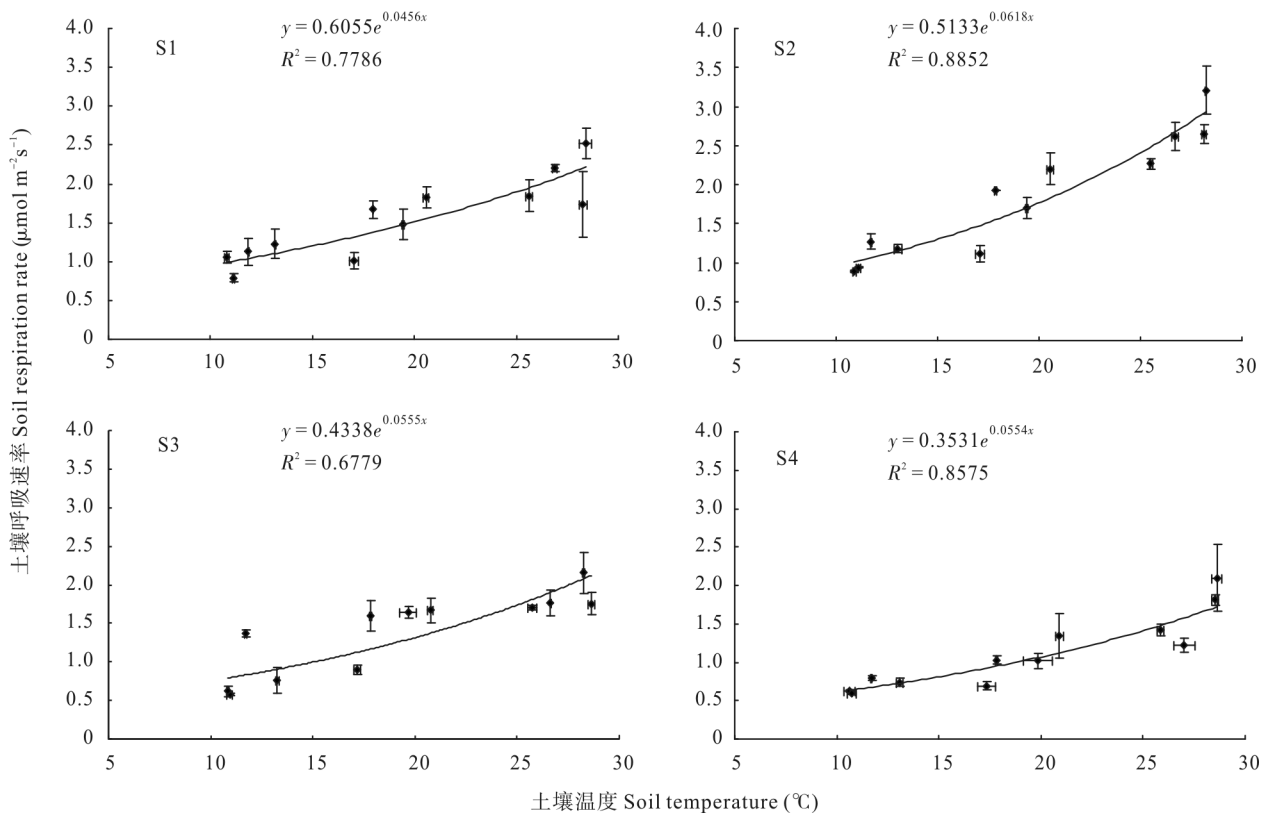


图 5 不同观测位置土壤呼吸速率与土壤温度的关系

Fig. 5 Relationship between soil respiration rate and soil temperature at different measurement positions

表 2 土壤呼吸速率温度依赖性的模拟参数

Table 2 Parameters of exponential relationship between soil respiration and soil temperature at four measurement positions

观测位置 Measurement position	R_0	b	Q_{10}	R^2	n
S1	0.61	0.0456	1.58	0.7786	12
S2	0.51	0.0618	1.86	0.8852	12
S3	0.43	0.0555	1.74	0.6779	12
S4	0.35	0.0554	1.74	0.8575	12

之间,表现为 $S2 > S3 \geq S4 > S1$ 。

3.4 影响茶园土壤呼吸速率空间异质性的因素

3.4.1 根系生物量、土壤性质指标的空间差异

茶树的种植管理模式造成了茶树根系分布和土壤性质在茶行尺度上具有明显的不一致性(表 3)。根系生物量和土壤有机碳含量呈现一定的辐射梯度,高值出现在距离茶树基部较近的位置(S2),低值出现在距离茶树基部较远的位置(S4);而茶园土壤养分指标(全氮、碱解氮、有效磷、有效钾)则随着施肥区域向外扩散,在茶行尺度上的空间分布均表现为 $S1 > S2 > S3 > S4$; C/N 比表现为 $S4 > S3 > S2 > S1$ 。

3.4.2 影响茶园土壤呼吸空间异质性的因素

用相关分析方法分析各观测点根系生物量、土壤性质指标与年均土壤呼吸速率的关系。结果表明,在茶行尺度上年均土壤呼吸速率与根系生物量呈极显著的正相关($r = 0.91, P < 0.01; n = 12, r_{0.01} = 0.708$);而与土壤有机碳、全氮、有效氮、有效磷、有效钾和 C/N 比的相关系数分别为 0.49、0.55、0.43、0.21、0.42 和 -0.42,相关关系不显著($P > 0.05; n = 12, r_{0.05} = 0.576$)。

通过回归分析发现,各观测位置茶树根系生物量与年均土壤呼吸速率呈极显著的线性相关($P < 0.01$)(图 6)。茶树根系生物量能够解释茶园土壤呼吸速率在茶行尺度上空间变异的 82.68%。

表 3 茶园根系生物量和土壤养分的空间异质性

Table 3 Spatial heterogeneity of root biomass and soil nutrients at four measurement positions

	观测位置 Measurement position			
	S1	S2	S3	S4
根系生物量 Root biomass (g m ⁻²)	696.11 ± 111.38bB	1507.67 ± 289.63aA	476.99 ± 26.97bBC	56.79 ± 12.02cC
有机碳 Organic carbon (g kg ⁻¹)	15.07 ± 0.81aA	15.24 ± 0.78aA	14.43 ± 2.06aA	13.47 ± 0.941aA
全氮 Total N (g kg ⁻¹)	1.43 ± 0.10aA	1.31 ± 0.07abAB	1.23 ± 0.16bAB	1.12 ± 0.09bB
碱解氮 Alkali-hydrolyzed N (mg kg ⁻¹)	245.25 ± 15.05aA	173.35 ± 2.85bB	151.85 ± 17.95bcB	141.45 ± 5.65cB
有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	102.90 ± 30.8aA	73.80 ± 19.00aA	64.30 ± 30.20aA	63.25 ± 38.75aA
速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	159.60 ± 13.70aA	77.40 ± 10.30bB	55.15 ± 5.15cBC	46.60 ± 3.40cC
C/N	10.55 ± 0.17cC	11.63 ± 0.03bB	11.76 ± 0.19bAB	12.09 ± 0.08aA

同行数据后不同小写和大写字母分别表示差异显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)。

Data followed different small and capital letters within row indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

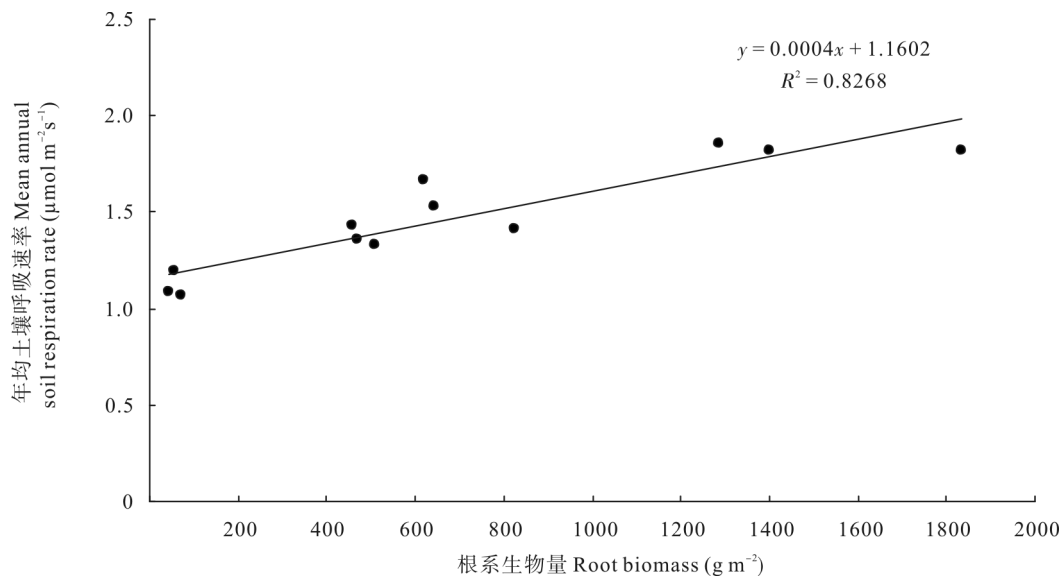


图 6 年均土壤呼吸速率与茶树根系生物量的线性关系

Fig. 6 Linear relationships between annual mean soil respiration rate and root biomass

4 结论和讨论

4.1 茶园土壤呼吸速率的时间变化格局

土壤呼吸速率在不同月份表现出明显的变化格局,大多数土壤呼吸速率最高值出现在夏季,最低值出现在冬季。吴建国等^[18]的研究表明,六盘山林区几种土地利用方式下土壤呼吸速率月动态均表现为在 5 至 8 月逐渐增加,在 9 至 10 月逐渐下降;Mo 等^[19]研究表明鼎湖山热带成熟森林夏季土壤呼吸速率是冬季的两倍。不同类型生态系统土壤呼吸速率的季节变化曲线各有差异,通常概括为:单峰型、双峰型和多峰型^[20-21]。本研究结果表明,茶

园土壤呼吸速率呈明显的单峰曲线特征,和同纬度地区的森林生态系统^[21]、经济林生态系统^[22-23]等的研究结论相一致。许多研究表明,土壤呼吸速率季节性变化格局的出现一般是由于土壤温度的变化引起的^[24],也有可能是土壤温度和湿度共同作用的结果^[17,23]。在本研究中,温度的变化是茶园土壤呼吸速率发生时间变化格局的主要驱动因素。

4.2 土壤温湿度对茶园土壤呼吸速率的影响及其 Q₁₀值

本研究结果表明,指数方程能较好模拟土壤呼吸速率与土壤 10 cm 深处温度的相互关系($P <$

0.01)。在茶园不同观测位置中,土壤温度能解释土壤呼吸速率变化的 67.79% ~ 88.52%,此结论与多数研究结果相吻合。黄承才等^[25]的研究表明,中亚热带东部 3 种主要木本群落[青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)常绿阔叶林、毛竹(*Phyllostachys edulis*)林和茶园]土壤呼吸速率与地温均呈极显著的指数相关,可作为土壤呼吸的模型,进行土壤呼吸速率和呼吸量的估算;李雅红等^[26]的研究表明,西天目山毛竹林土壤呼吸速率与土壤温度呈现显著的指数相关,土壤温度可以解释土壤呼吸速率变化的 94.09%。土壤呼吸不仅受到土壤温度的影响,土壤湿度过高或过低也将成为土壤呼吸强度的重要限制因素。黄斌等^[27]的研究表明,当气温上升后,土壤温度不再是土壤微生物活动的限制因子,影响土壤呼吸速率的主要是土壤水分状况;Akinremi 等^[28]的研究表明,在一些半干旱地区的作物生长季内,土壤水分是控制土壤呼吸速率的重要因素;当土壤含水量大于 38% 时,土壤含水量与鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸速率呈负相关^[29];在东北不同林分中,当土壤含水量低于 20% 时,湿度成为土壤呼吸速率的限制性因子^[30]。本研究试验样地地处中亚热带,气候温暖湿润,雨量充足且降水频率较大,样地的土壤含水率较高,土壤含水量与土壤呼吸速率的相关关系不显著,说明土壤含水量不是茶园土壤呼吸的限制因素。

温度敏感性指数 Q_{10} 值是呼吸总量定量估计中必不可少的参数^[31]。本研究结果表明,茶园不同观测位置的 Q_{10} 值在 1.58 ~ 1.86 之间,低于 Raich 等^[32]报道的全球 Q_{10} 值(2.4),亦低于中国不同气候带人工林土壤呼吸的平均 Q_{10} 值(2.09)^[33],与黄承才等^[26]研究的中亚热带茶园土壤呼吸 Q_{10} 值(1.75)相当。该现象可能与茶园的耕作有关,林地开垦成茶园后,土壤大团聚体含量下降和轻组有机碳大量损失,而轻组有机碳比全碳更能反映由于土地利用变化导致有机碳损失的敏感程度^[34-35]。

4.3 茶园土壤呼吸在茶行尺度上的空间异质性及影响因素

在人工林和农田生态系统中,由于植株空间布局的规律性,应考虑植株的空间格局对土壤呼吸作用的影响^[8]。本研究在茶行尺度上选择 4 个观测位置探讨茶园土壤呼吸速率的空间差异,结果表明茶园土壤呼吸速率高值通常出现在距离茶树基根

部较近的位置。这种生态系统内部土壤呼吸速率的空间异质性在以前的一些研究中曾被报道,如玉米田土壤较高的呼吸速率值出现在靠近玉米(*Zea mays*)植株的地方^[8];桉树人工林的中断线附近的土壤呼吸速率值比行间要高^[36]。因此,估算茶园生态系统土壤呼吸碳通量,必须顾及土壤呼吸速率的空间异质性,如果不考虑土壤呼吸作用的空间差异就把实际观测数据程序化到生态系统层面,将会导致很大的偏差。

土壤呼吸速率空间异质性可能是根系生物量、植株凋落物的空间格局和小尺度上土壤温度、湿度、养分含量等理化性质差异而造成的。根据韩广轩等^[8]的研究结果,在玉米生长过程中,测定位置和根系生物量的分布是影响土壤呼吸作用空间分布格局的关键因素,而土壤湿度、土壤有机质、全氮和碳氮比对土壤呼吸作用的空间异质性影响不显著;Stoyan 等^[37]利用统计学方法分析了 2 m² 尺度上白杨(*Populus alba*)林和小麦(*Triticum aestivum*)地中土壤呼吸的空间异质性,认为是根系生物量和植株凋落物的空间格局造成的;Maestre 等^[38]认为小尺度上的土壤湿度和土壤温度的差异性质导致了土壤呼吸的空间异质性。在本试验中,茶树根系生物量能够解释茶园土壤呼吸速率在茶行尺度上空间变异的 82.68%。

综上所述,本文阐明了茶园土壤呼吸速率的季节动态和在茶行尺度上的空间差异,探讨了茶园土壤呼吸速率的主要影响因素。本文所研究的是初投产茶园,测定时间也较短,揭示的规律还有待于长期定位监测的进一步验证。

参考文献

- [1] Wu Z M, Zeng Q B, Li Y D, et al. A preliminary research on the carbon storage and CO₂ release of the tropical forest soil in Jianfeng Island, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 1997, 21(5): 416-423.
吴仲民, 曾庆波, 李意德, 等. 尖峰岭热带森林土壤C储量和CO₂排放量的初步研究 [J]. *植物生态学报*, 1997, 21(5): 416-423.
- [2] Sánchez M L, Ozores M J, López M J, et al. Soil CO₂ fluxes beneath barley on the central Spanish plateau [J]. *Agri For Meteo*, 2003, 118(1/2): 85-95.
- [3] Conant R T, Dalla-Betta P, Klopatek C C, et al. Controls on soil respiration in semiarid soils [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, 36(6): 945-951.
- [4] Luo Y, Zhou X. *Soil Respiration and the Environment* [M].

- London: Elsevier, 2006: 17–28.
- [5] 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 Soil*, 1998, 205(2): 135–146.
- [6] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature [J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, 33(2): 155–165.
- [7] Atkin O K, Edwards E J, Loveys B R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming [J]. *New Phytol*, 2000, 147(1): 141–154.
- [8] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, et al. Spatial heterogeneity of soil respiration and contribution of root respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural field [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, 27(12): 5254–5260.
- 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献 [J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 5254–5260.
- [9] Zhou G S, Jia B F, Han G X, et al. Toward a general evaluation model for soil respiration (GEMSR) [J]. *Sci Chin Ser C Life Sci*, 2008, 51(3): 254–262.
- [10] Sotta E D, Meir P, Malhi Y, et al. Soil CO₂ efflux in a tropical forest in the central Amazon [J]. *Glob Change Biol*, 2004, 10(5): 601–617.
- [11] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, et al. Soil respiration and its influencing factors at grazing and fenced typical *Leymus chinensis* Steppe, Nei Monggol [J]. *Environ Sci*, 2005, 26(6): 1–7.
- 贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 等. 放牧与围栏羊草草原土壤呼吸作用及其影响因子 [J]. *环境科学*, 2005, 26(6): 1–7.
- [12] Wu Z D, Li Y S, Wang Y X, et al. Effects of human activities on soil carbon storage and soil respiration [J]. *Chin J Trop Agri*, 2008, 28(1): 84–91.
- 吴志丹, 李跃森, 王义祥, 等. 经营措施对土壤碳储量和碳通量的影响 [J]. *热带农业科学*, 2008, 28(1): 84–91.
- [13] Nu R K. *Soil Agricultural Chemistry Analysis* [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000: 146–196.
- 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法* [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146–196.
- [14] Xie J S, Yang Z J, Zeng H D, et al. Relationship between soil respiration and soil properties during the revegetation of eroded red soil in subtropics of China [J]. *J Fujian Coll For*, 2009, 29(4): 320–325.
- 谢锦升, 杨智杰, 曾宏达, 等. 侵蚀红壤植被恢复过程中土壤呼吸与土壤性质的关系 [J]. *福建林学院学报*, 2009, 29(4): 320–325.
- [15] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, et al. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest [J]. *Plant Soil*, 2003, 255(1): 311–318.
- [16] Luo Y, Wan S, Hui D, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature*, 2001, 413(6856): 622–625.
- [17] Jiang Y, Wang B, Wang Y R, et al. Soil respiration in subtropical forests and model simulation of its relationships with soil temperature and moisture content [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21(7): 1641–1648.
- 姜艳, 王兵, 汪玉如, 等. 亚热带林分土壤呼吸及其与土壤温湿度关系的模型模拟 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1641–1648.
- [18] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. The temporal variations of soil respiration under different land use in Liupan Mountain Forest Zone [J]. *Environ Sci*, 2003, 24(6): 23–32.
- 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式土壤呼吸时间格局 [J]. *环境科学*, 2003, 24(6): 23–32.
- [19] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, et al. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China [J]. *Glob Change Biol*, 2008, 14(2): 403–412.
- [20] Wang C, Yang Z J, Chen G S, et al. Characteristics of soil respiration in *Phyllostachys edulis* forest in Wanmulin Natural Reserve and related affecting factors [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, 22(5): 1212–1218.
- 王超, 杨智杰, 陈光水, 等. 万木林保护区毛竹林土壤呼吸特征及影响因素 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(5): 1212–1218.
- [21] Shi Z, Wang J S, He R, et al. Seasonal variation and temperature sensitivity of soil respiration under different plant communities along an elevation gradient in Wuyi Mountains of China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, 19(11): 2357–2363.
- 施政, 汪家社, 何容, 等. 武夷山不同海拔植被土壤呼吸季节变化及对温度的敏感性 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2357–2363.
- [22] Fan S H, Xiao F M, Wang S L, et al. Soil respiration of moso bamboo plantation in Huitong, Hunan Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, 29(11): 5971–5977.
- 范少辉, 肖复明, 汪思龙, 等. 湖南会同林区毛竹林地的土壤呼吸 [J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 5971–5977.
- [23] Fang Q L, Sha L Q. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and Rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan, SW China [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2006, 30(1): 97–103.
- 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸 [J]. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 97–103.
- [24] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, et al. Responses of soil respiration to the coordinated effects of soil temperature and biotic factors in a maize field [J]. *J Plant Ecol*, 2007, 31(3): 363–371.
- 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米地土壤呼吸作用对土壤温度和生物因子协同作用的响应 [J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 363–371.

- [25] Huang C C, Ge Y, Chang J, et al. Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid subtropical zone, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, 19(3): 324–328.
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 [J]. *生态学报*, 1999, 19(3): 324–328.
- [26] Li Y H, Jian H, Yuan F Y, et al. Soil respiration and its regulating factors in the *Phyllostachys edulis* forest of west Tianmu Mountain, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, 30(17): 4590–4597.
李雅红, 江洪, 原焕英, 等. 西天目山毛竹林土壤呼吸特征及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2010, 30(17): 4590–4597.
- [27] Huang B, Wang J G, Gong Y S, et al. Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2006, 25(1): 156–160.
黄斌, 王敬国, 龚元石, 等. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1): 156–160.
- [28] Akinremi O O, McGinn S M, McLean H D J. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in barley and fallow plots [J]. *Can J Soil Sci*, 1999, 79(1): 5–13.
- [29] Zhou C Y, Zhou G Y, Wang Y H, et al. Soil respiration of a coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan Mountain, Guangdong Province [J]. *J Beijing For Univ*, 2005, 27(4): 23–27.
周存宇, 周国逸, 王迎红, 等. 鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(4): 23–27.
- [30] Zhang X Q, Wang W J, Zu Y G, et al. The difference between different components of soil respiration in several types of forests in northeastern China [J]. *J NE For Univ*, 2005, 33(2): 47–73.
张宪权, 王文杰, 祖元刚, 等. 东北地区几种不同林分土壤呼吸组分的差异性 [J]. *东北林业大学学报*, 2005, 33(2): 47–73.
- [31] Wang W J, Wang H M, Zu Y G, et al. Characteristics of root, stem, and soil respiration Q_{10} temperature coefficients in forest ecosystems [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2005, 29(4): 680–691.
王文杰, 王慧梅, 祖元刚, 等. 林木非同化器官与土壤那个呼吸的温度系数 Q_{10} 值的特征分析 [J]. *植物生态学报*, 2005, 29(4): 680–691.
- [32] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, 44(2): 81–99.
- [33] Wang C, Huang R, Yang Z J, et al. Dynamic changes of soil respiration in *Citrus reticulata* and *Castanea henryi* orchards in Wanmulin Nature Reserve, Fujian Province of east China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, 23(6): 1469–1475.
王超, 黄蓉, 杨智杰, 等. 万木林保护区柑橘和椎栗园土壤呼吸的比较 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1469–1475.
- [34] Mao Y L, Yang Y S, Xing S H, et al. Effects of land use change on light fractions of organic carbon in soil water-stable aggregates [J]. *J Fujian Agri For Univ (Nat Sci)*, 2008, 37(5): 532–537.
毛艳玲, 杨玉盛, 邢世和, 等. 土地利用变化对土壤水稳定团聚体轻组有机碳的影响 [J]. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2008, 37(5): 532–537.
- [35] Mao Y L, Yang Y S, Zou S Q, et al. Effects of land use on soil organic carbon in aggregates of hilly red soil in subtropical China [J]. *J Mount Sci*, 2007, 25(6): 706–713.
毛艳玲, 杨玉盛, 邹双全, 等. 土地利用变化对亚热带山地红壤团聚体有机碳的影响 [J]. *山地学报*, 2007, 25(6): 706–713.
- [36] Epron D, Nouvellon Y, Rouspard O, et al. Spatial and temporal variations of soil respiration in a *Eucalyptus* plantation in Congo [J]. *For Ecol Manage*, 2004, 202(1/2/3): 149–160.
- [37] Stoyan H, De-Polli H, Böhm S, et al. Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale [J]. *Plant Soil*, 2000, 222(1/2): 203–214.
- [38] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO_2 efflux in a Mediterranean semiarid steppe [J]. *Appl Soil Ecol*, 2003, 23(3): 199–209.