

DOI: 10.5846/stxb202005021087

赵青, 刘爽, 陈燕菲, 吴承祯, 范海兰, 林勇明, 李健. 武夷山不同林龄甜槠林土壤呼吸特征及影响因素. 生态学报, 2021, 41(6): 2326–2338.

Zhao Q, Liu S, Chen Y F, Wu C Z, Fan H L, Lin Y M, Li J. Soil respiration characteristics and influencing factors of *Castanopsis eyrei* forest in different forest ages in Wuyi Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2326–2338.

武夷山不同林龄甜槠林土壤呼吸特征及影响因素

赵 青^{1,2}, 刘 爽^{1,2}, 陈燕菲^{1,2}, 吴承祯^{3,4}, 范海兰^{1,2}, 林勇明^{1,2}, 李 健^{1,2,*}

1 福建农林大学林学院, 福州 350002

2 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福州 350002

3 福建省生态产业绿色技术重点实验室, 南平 354300

4 武夷学院生态与资源工程学院, 南平 354300

摘要:为揭示中亚热带常绿阔叶林群落优势种—甜槠天然林不同林龄林下土壤呼吸 (Soil respiration, R_s) 差异及影响因素, 采用 LI-8100 开路式土壤碳通量系统对武夷山自然保护区不同林龄 (18、36、54、72 a) 天然甜槠林进行了 1 年的野外原位测定。结果表明: (1) 不同林龄甜槠林 R_s 季节动态呈现明显的单峰趋势, 林龄对冬季 R_s 影响并不显著 ($P>0.05$), 秋季 18 a 甜槠林 R_s 与其他 3 种林龄差异显著 ($P<0.05$), 林龄对土壤含水率的季节变化没有显著影响 ($P>0.05$); (2) 不同林龄甜槠林 5 cm 深土壤温度与 R_s 拟合 R^2 明显高于土壤含水率与 R_s 拟合 R^2 , 随着林龄增大, R_s 温度敏感性指数 Q_{10} 值呈上升趋势, 依次为 1.551、1.589、1.640、1.664, 且 54、72 a 甜槠林 R_s 温度敏感性指数 Q_{10} 值显著高于 18、36 a ($P<0.05$); (3) 土壤含水率与 5 cm 深土壤温度共同解释了 R_s 变异的 86%—90.3%; 0—60 cm 土层根系生物量与 5 cm 深土壤温度共同解释了 R_s 变异的 88.3%—91.8%, 由此可见, 生物因子与非生物因子双因素拟合可以更好地解释不同林龄 R_s 差异。在对未来森林植被土壤呼吸及碳汇功能进行研究时, 应在考虑林龄及季节差异的基础上, 加强对生物因子的测定。

关键词:武夷山自然保护区; 甜槠; 林龄; 土壤呼吸

Soil respiration characteristics and influencing factors of *Castanopsis eyrei* forest in different forest ages in Wuyi Mountain

ZHAO Qing^{1,2}, LIU Shuang^{1,2}, CHEN Yanfei^{1,2}, WU Chengzhen^{3,4}, FAN Hailan^{1,2}, LIN Yongming^{1,2}, LI Jian^{1,2,*}

1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Key Laboratory of Forest ecosystem process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, China

3 Key Laboratory for Eco-Industrial Green Technology of Fujian Provincial, Nanping 354300, China

4 College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, China

Abstract: Soil respiration, as an important ecological process of material cycle and energy flow in forest ecosystem, is one of the main fluxes in the global carbon cycle, and plays an important role in the global carbon cycle and carbon balance. There are many factors that affect forest soil respiration, mainly non-biological factors such as soil temperature, water content and air temperature, etc. However, with different climatic zones and forest types, forest age has an important impact on carbon storage and carbon distribution in forest ecosystems, and there is also great uncertainty of the impact on soil respiration. In this paper, soil carbon flux system LI-8100 was used to measure soil respiration and its components in *Castanopsis eyrei* forests (18 a, 36 a, 54 a, and 72 a) of different forest ages in Wuyishan Nature Reserve. Meanwhile, soil

基金项目:福建农林大学科技创新专项基金项目 (CXZX2016052, CXZX2018122); 福建农林大学林学高峰学科建设项目 (71201800705)

收稿日期:2020-05-02; **网络出版日期:**2021-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianli@fafu.edu.cn

temperature of 5 cm depth and soil water content were simultaneously measured. The results showed that: (1) the seasonal dynamics of soil respiration in *Castanopsis eyrei* forests with different forest ages presented a single peak trend, and the effect of forest age on soil respiration in winter was not significant ($P>0.05$). The soil respiration in 18 a *Castanopsis eyrei* forests in autumn was significantly different from that of the other three forest ages ($P<0.05$), and the forest age had no significant effect on the seasonal changes of soil water content ($P>0.05$). (2) Fitting R^2 of soil temperature of 5 cm depth and soil respiration in different forest age *Castanopsis eyrei* forest was significantly higher than fitting R^2 of soil water content with soil respiration. With the increase of forest age, the Q_{10} value of soil respiration temperature sensitivity index showed an upward trend, which was 1.551, 1.589, 1.640 and 1.664 in turn, while the Q_{10} value of soil respiration temperature sensitivity index of 54 a and 72 a *Castanopsis eyrei* forest was significantly higher than that of 18 a and 36 a *Castanopsis eyrei* forest ($P<0.05$). (3) Soil water content and soil temperature of 5 cm depth together explain 86%—90.3% of soil respiration variation. The root biomass of 0—60 cm soil layer and soil temperature of 5 cm depth jointly explain 88.3%—91.8% of soil respiration variation. Thus it can be seen that the two-factor fitting of biological factor and abiotic factor can better explain the soil respiration variation of different forest ages. When studying the soil respiration and carbon sink function of forest vegetation in the future, the determination of biological factors should be strengthened on the basis of considering the difference of forest age and season.

Key Words: Wuyishan Nature Reserve; *Castanopsis eyrei*; age of stand; soil respiration

土壤作为陆地生态系统中最大的碳库,包含 2000 Pg 土壤无机碳及 1500 Pg 土壤有机碳^[1]。全球尺度上,每年土壤通过呼吸作用释放出的 CO_2 约为化石燃料燃烧释放 CO_2 的 10 倍以上^[2],土壤呼吸 (Soil respiration, R_s) 产生的微小变化都可能对大气中 CO_2 浓度、全球碳平衡产生极大的影响^[3]。森林作为陆地生态系统的主体,其 R_s 占总呼吸的 69%,森林 R_s 变化直接影响着全球碳循环的动态变化^[4],已成为陆地生态系统碳循环过程和全球气候变化研究的热点问题之一。

R_s 受气温、降水、土壤质地、植被类型、人类活动等多种因素的综合影响^[5-8],其中林龄因素作为影响林下植被生物量、凋落物量的重要因素,对气温、土壤温度、生物量等非生物、生物因素的响应均存在差异性。随着林龄的增大,森林物种组成、群落结构、动植物的丰富度都会发生变化^[9-10],不同林龄植被群落生产力、年凋落量、生物量积累不同,进而影响森林生态系统的碳排放和碳循环过程^[11]。Ewel 等关于热带森林 R_s 研究表明,随着林龄增大, R_s 随之增大^[12];Saiz 在对不同林龄北美云杉 R_s 研究表明, R_s 随林龄增大,呈先减小后保持稳定的趋势^[13];王娟等对不同林龄锐齿栎林 R_s 研究表明, R_s 变化与林龄的关系并不显著^[14]。由此可见,林龄对 R_s 动态变化影响的研究结果仍存在较大的不确定性。

武夷山自然保护区是我国中亚热带常绿阔叶林保存较为完好的代表性区域^[15],甜槠林作为武夷山自然保护区常绿阔叶林群落的优势种之一^[16],在中亚热带森林生态系统碳平衡中占有重要的地位^[17]。因此,探究甜槠天然林 R_s 随林龄变化特征及其影响机制,对于准确评估本区域森林生态系统碳收支及碳循环具有重要的意义。目前关于该区域甜槠林研究主要集中在甜槠林群落结构特征^[18]、生物量^[19]、凋落物^[20]、养分循环^[21]等方面,其 R_s 研究主要在探究温度、水分等非生物因素对 R_s 日动态的影响,土壤温度在非生物因素中对 R_s 日变化的影响最大^[22]。生物因子特别是植物根系通过“生物泵”的形式向地下生态系统转移 C,是土壤 C 输入的主要途径^[23],然而在不同年龄序列上植物根系对 R_s 的调节机制研究相对较少,而随着土壤水分、温度的改变势必会影响植物根系分布、根系呼吸的组成,进而对土壤呼吸产生影响。以武夷山自然保护区 4 个年龄阶段天然甜槠林 (18、36、54、72 a) 为研究对象,旨在探究 (1) 甜槠林 R_s 及其组分随季节变化趋势; (2) 探究影响 R_s 的主要因素,特别是生物因素随林龄的变化趋势及其与 R_s 间的响应。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样地设置

研究地点位于武夷山自然保护区内(27°33'N, 117°27'E)。该地区位于武夷山脉北部, 平均海拔 1200 m, 主峰为黄岗山, 海拔 2158 m。气候属典型的亚热带季风气候, 年均气温 18.1℃, 年降水量在 2000 mm 左右, 年相对湿度为 82%—85%, 无霜期为 252—272 d^[24]。区内现存世界同纬度面积最大、保存最完整的中亚热带森林生态系统, 地带性植被为亚热带常绿阔叶林, 分布在海拔 400—1100 m 处, 且绝大部分为天然林和天然更新次生林, 壳斗科为构成森林群落的主要建群种、优势种。区内土壤垂直分布规律显著: 海拔 700 m 以下为红壤、700—1100 m 为黄红壤、1100—1900 m 为黄壤、1900 m 以上为山地草甸^[18-19]。

实验区样地位于武夷山自然保护区生态定位站以东的甜槠林群落内, 海拔高度为 700 m, 群落内甜槠林生物量中各层次所占比例大小依次为: 乔木层>凋落层>灌木层>草本层, 群落的 shannon-Wiener 多样性指数为 3.814, Simpson 指数为 0.908, 盖度在 90% 以上。为评估不同林龄甜槠林对土壤呼吸的影响, 本研究采用空间代时间法^[25], 以甜槠天然林 4 个林龄等级(18、36、54、72 a)为研究对象, 甜槠林林分年龄由森林管理经营记录结合树木每木检尺获得, 同时测定各林龄甜槠林的叶面积指数、树高、胸径、相对密度等指标(表 1)。为尽量避免气候、土壤类型的差异, 确保 R_s 差异原因为林龄的差别, 研究设定每个林分之间的距离小于 10 km。

林下植被概况: 72 a 甜槠林胸径最大, 冠层郁闭度最高, 林分密度为 1189 株/hm², 乔木层组成种类主要为青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)、木荷(*Schima superba*)、石栎(*Lithocarpus glabra*)、南岭栲(*Castanopsis fordii*), 同时混生光叶石楠(*Photinia glabra*)、山杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、山矾(*Symplocos sumuntia*)等树种。灌木层主要树种有冬青(*Ilex chinensis*)、细枝柃(*Eurya loquaiana*)等, 草本层较稀疏主要由淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等构成; 相较于 72 a 甜槠林, 54 a 甜槠林胸径、林分冠层郁闭度明显变小, 林分密度为 1231 株/hm², 冠层覆盖度为 56%, 乔木层组成种类主要为木荷(*Schima superba*)、马尾松(*Masson pine*)、山杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、冬青(*Ilex chinensis*)等, 灌木层主要为肿节少穗竹(*Oligostachyum oedogonatum*)、马银花(*Rhododendron ovatum*)、宜兴苦槠(*Pleiblastus yixingensis*); 草本层群落物种主要由里白(*Diplopterygium glaucum*)、鸡血藤(*Spatholobus suberectus* Dunn)等草本植物构成; 36 a 甜槠林林分密度为 1279 株/hm², 冠层覆盖度为 48%, 林下有较多的灌木、草本类植物, 多为小叶赤楠(*Syzygium grijsii*)、桃叶石楠(*Photinia prunifolia*)、赤楠(*Syzygium buifolium*)、香槟杜鹃(*R. champinican*)等; 18 a 甜槠林胸径最小, 林分密度为 1478 株/hm², 冠层覆盖度为 39%, 伴生树种多为木荷(*Schima superba*)、马银花(*Rhododendron ovatum*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)、鹿角杜鹃(*Rhododendron latoucheae*)等树种, 高大乔木少。

在 4 种不同林龄(18、36、54、72 a)甜槠天然林内各选择生长发育好、受人为影响小、且立地条件相似的 3 块 20m×20m 样方作为固定样地, 共计 12 块样地, 进行土壤呼吸及环境因素测定。

表 1 研究区样地概况

Table 1 Basic condition of study plots (Mean±SE)

林龄 Age of stand/a	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	坡向 Aspect	坡度 Slope/°	叶面积指数 Leaf area index/(m ² /m ²)	相对密度 Relative density/%	冠层覆盖度 Canopy cover/%	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)
18	6.35±1.03d	7.73±0.68d	东南	25	4.03±0.72c	45.35±3.53a	39±2a	1478a
36	15.31±0.93c	11.19±1.57c	东南	22	5.35±1.58b	28.93±1.78b	48±5b	1279b
54	23.74±1.55b	14.47±1.74b	东南	22	8.62±1.35a	17.26±1.93c	56±4c	1231bc
72	34.22±2.43a	16.20±1.32a	东南	20	8.71±2.23a	9.89±0.85d	71±7d	1189c

DBH: 胸径 Diameter at breast height; 不同小写字母表示不同林龄间差异显著($P<0.05$)

1.2 土壤呼吸及相关环境因子测定

2017 年 3 月在每个样地中心位置为起点呈 Z 字形随机设置 5 个高 10 cm, 直径为 20 cm 的 PVC 土壤呼吸圈, 将 PVC 土壤呼吸圈一头削尖, 嵌入地表深度为 5 cm, 且保证实验阶段土壤圈测定位置不变。在 2017 年 3 月—2018 年 2 月每月下旬选取 3d 采用土壤碳通量系统 (LI-8100, LI-COR) 进行 24 h 连续测定 (时间一般从当日 9:00—11:00 间开始到次日满 24 h), 每隔 2 h 测定一次, 每次测定 3 min, 重复测定 3 次, 测定土壤月、季节 (2017 年 4 月, 春季; 2017 年 7 月, 夏季; 2017 年 10 月, 秋季; 2018 年 1 月, 冬季) 呼吸速率。为避免土壤、根系、凋落物对测量结果的影响, 在每月测定前 1d 将土壤圈内植被、凋落物及其他杂物取去除, 用于观测土壤总呼吸速率 (R_s)。同时选用壕沟法, 将土壤进行挖沟断根处理用于测定土壤各组分呼吸速率。挖沟法具体为: 在每个样方附近预先设置 1 m×1 m 样方作为土壤异养呼吸观测点, 在土壤呼吸速率测定前 5 个月, 即 2016 年 10 月在样方四周挖掘深度 1 m, 宽度 60 cm 环形壕沟, 将 1 m×1 m 石棉网放入所挖壕沟, 用 4 块 1 m×1 m 石棉网将样方围住, 防止植被根系向外伸长, 5 个月后植物根系断死测定土壤异养呼吸值就会比较精确。土壤总呼吸 (R_s) 与异养呼吸 (R_H) 之差为土壤自养呼吸 (R_A)。土壤温度、含水量采用 LI-8100 自带温度、含水量探头 (ML2x) 进行同步测定, 测定深度均为 5 cm。

1.3 凋落物及根系生物量测定

在各调查样地内随机设置 5 个 1 m×1 m 的凋落物收集框, 收集框为孔径为 1 mm 的尼龙网制成的方口盘, 网底距地面 0.5 m, 于研究时段每月下旬收集 1 次凋落物。将收集的凋落物按叶、枝、繁殖器官、果称鲜重后带回实验室在 85℃ 恒温箱中烘干至恒重, 由于干/鲜重比值计算出含水率, 最后换算出各月单位面积内凋落物产量 (图 1)。

根系生物量测定采用土钻法及全根挖掘法进行取样^[26], 每月下旬与土壤呼吸测定同步。在每个土壤呼吸圈附近用 5 cm 直径的根钻随机钻取土芯, 共钻取 10 个, 采集 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 三层垂直土层土芯, 将采集的土芯分层混合装袋, 带回实验室用筛孔为 20 目筛网在水中反复清洗, 用游标卡尺测量检出细根 (根径 ≤ 2 mm), 粗根 (根径 > 2 mm), 风干后称鲜重, 然后烘干至恒重。

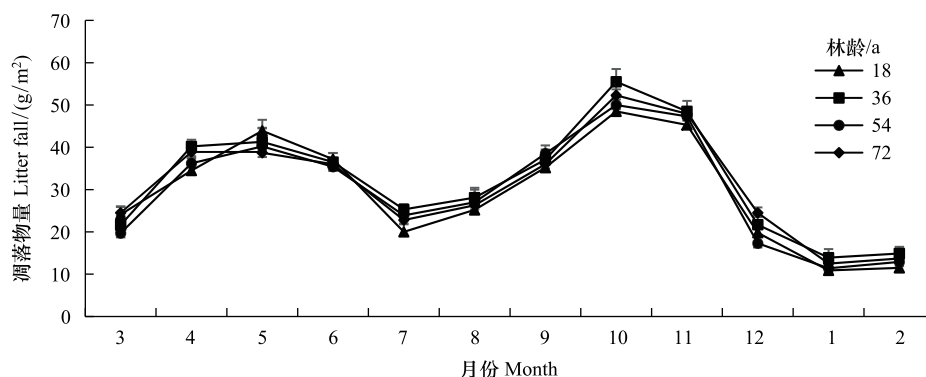


图 1 不同林龄甜槠天然林凋落物年动态

Fig.1 Annual dynamics of monthly litter in *Castanopsis eyrei* forests with different forest ages

1.4 数据处理

实验期间相邻 3 d 所测数值相差不大, 因此将测定前 2 d 的土壤呼吸速率、5 cm 深土壤温度、土壤含水量数据平均成 1 d, 进行土壤呼吸速率与土壤温湿度模型拟合, 第 3 天数据作为实测样本对所建模型进行验证。利用 SPSS 19.0 软件进行数据分析, Excel 2010 进行数据的统计、前期计算以及作图。

1.5 模型构建

土壤呼吸与土壤温度、土壤含水量之间单因素模型选用常见的经验模型: 分别采用指数、线性、对数、幂指数、二次曲线模型进行拟合, 用线性模型、指数模型、非线性模型来拟合土壤温度、土壤含水量对土壤呼吸的共同影响, 线性模型进行土壤各层细根生物量与土壤呼吸速率拟合。

$$Rs = ae^{bX} \quad Q_{10} = e^{10b} \tag{1}$$

$$Rs = a^X + b \quad Rs = a \ln(X) + b \quad Rs = a X^b \quad Rs = aX + b X^2 + c \tag{2}$$

$$Rs = ae^{bT} W^c \quad Rs = a + bT + cW \quad Rs = a(T \times W) + b \tag{3}$$

$$Rs = a + b X_2 + cT \tag{4}$$

式中, R_s 为土壤呼吸速率($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), X 分别可带入 5 cm 深土壤温度($^{\circ}\text{C}$)、土壤含水量(%) 进行计算, T 为 5 cm 深土壤温度($^{\circ}\text{C}$), W 为土壤含水量(%); X_2 为 0—60 cm 土层细根生物量(t/hm^2); a, b, c 为拟合参数; Q_{10} 值为土壤呼吸的温度敏感性指数,指土壤温度每升高 10°C 时土壤呼吸速率的变化值。

均方根误差(RMSE):表示模型的预测精度(实际值和模型预测值之差),值越小,模型精度越高。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}} \tag{5}$$

式中, n 为样本个数, y_i 为实测值, $\bar{y}$ 为预测值。

2 结果与分析

2.1 不同林龄甜槠林土壤呼吸特征及影响因素研究

4 种林龄甜槠林 R_s 季节变化呈明显的单峰趋势(图 2),表现为在夏季(6、7 月)最高,冬季最低(12、1 月),如 36 a 甜槠林在 6 月份达到一年中达到 R_s 最大值 $7.18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,72 a 甜槠林在 7 月份达到一年中 R_s 最大值 $7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。18、36、54、72 a 甜槠林 R_s 季节变化范围(及年平均值)为 $1.54\text{—}6.35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($3.54 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 $2.33\text{—}7.18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($4.32 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 $2.21\text{—}6.89 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($3.95 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 $1.98\text{—}7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($4.01 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), R_s 季节变化与林龄大小无关。由表 2 可知,不同林龄甜槠林异养呼吸速率占总呼吸的比例比较大,秋季土壤异养呼吸占总呼吸的比例在四个季节最高。

表 2 不同林龄甜槠林土壤呼吸速率、5 cm 深土壤温度、土壤含水量季节变化

Table 2 Seasonal changes of soil respiration rate, soil temperature at 5 cm depth and soil water content in *Castanopsis eyrei* forests with different forest ages (Mean±SE)

		林龄	春季	夏季	秋季	冬季
		Age of stand/a	Spring	Summer	Autumn	Winter
土壤呼吸速率 Soil respiration rate/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	R_H	18	2.71±0.68 (69.49%)	3.87±0.41 (67.66%)	2.20±0.43 (73.22%)	1.04±0.14 (63.41%)
	R_S	18	3.90±0.96c	5.72±0.63d	3.00±0.55c	1.64±0.26c
	R_H	36	3.45±0.59 (71.8%)	4.86±0.23 (70.32%)	2.64±0.90 (75.21%)	1.48±0.20 (68.78%)
	R_S	36	4.81±0.84ab	6.91±0.24a	3.51±1.20b	2.16±0.35ab
5 cm 深土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth/ $^{\circ}\text{C}$	R_H	54	3.20±0.73 (69.57%)	4.50±0.22 (67.91%)	2.52±0.61 (69.77%)	1.23±0.17 (58.85%)
	R_S	54	4.6±0.93b	6.27±0.24c	3.60±0.73ab	2.09±0.23b
	R_H	72	3.30±0.49 (72.03%)	4.55±0.32 (69.13%)	2.61±0.49 (70.12%)	1.44±0.08 (69.79%)
	R_S	72	4.77±0.69a	6.78±0.44b	3.72±0.65a	2.26±0.13a
土壤含水量 Soil water content/%		18	14.37±1.86a	24.98±1.24a	22.77±1.30a	11.56±1.11a
		36	12.31±2.20b	22.75±1.36b	19.89±2.38b	9.06±1.17b
		54	12.29±1.99b	22.32±1.14b	19.78±1.35b	9.25±1.92b
		72	12.87±1.34b	21.77±1.16b	18.93±1.79b	9.08±1.48b
		18	33.00±2.41a	21.70±1.70a	27.10±1.93a	26.33±1.74a
		36	31.63±2.67a	21.87±1.33a	27.63±1.51a	27.83±1.95a
		54	32.88±2.65a	22.61±0.98a	27.53±2.56a	28.62±1.20a
		72	32.43±2.31a	23.77±0.52a	27.10±2.20a	27.97±1.36 a

R_s : 土壤总呼吸 Soil respiration; R_H : 土壤异养呼吸 Soil heterotrophic respiration; 不同小写字母表示同一季节不同林龄之间 R_s 差异显著 ($P < 0.05$), 括号内百分比表示土壤异养呼吸占总呼吸的比例

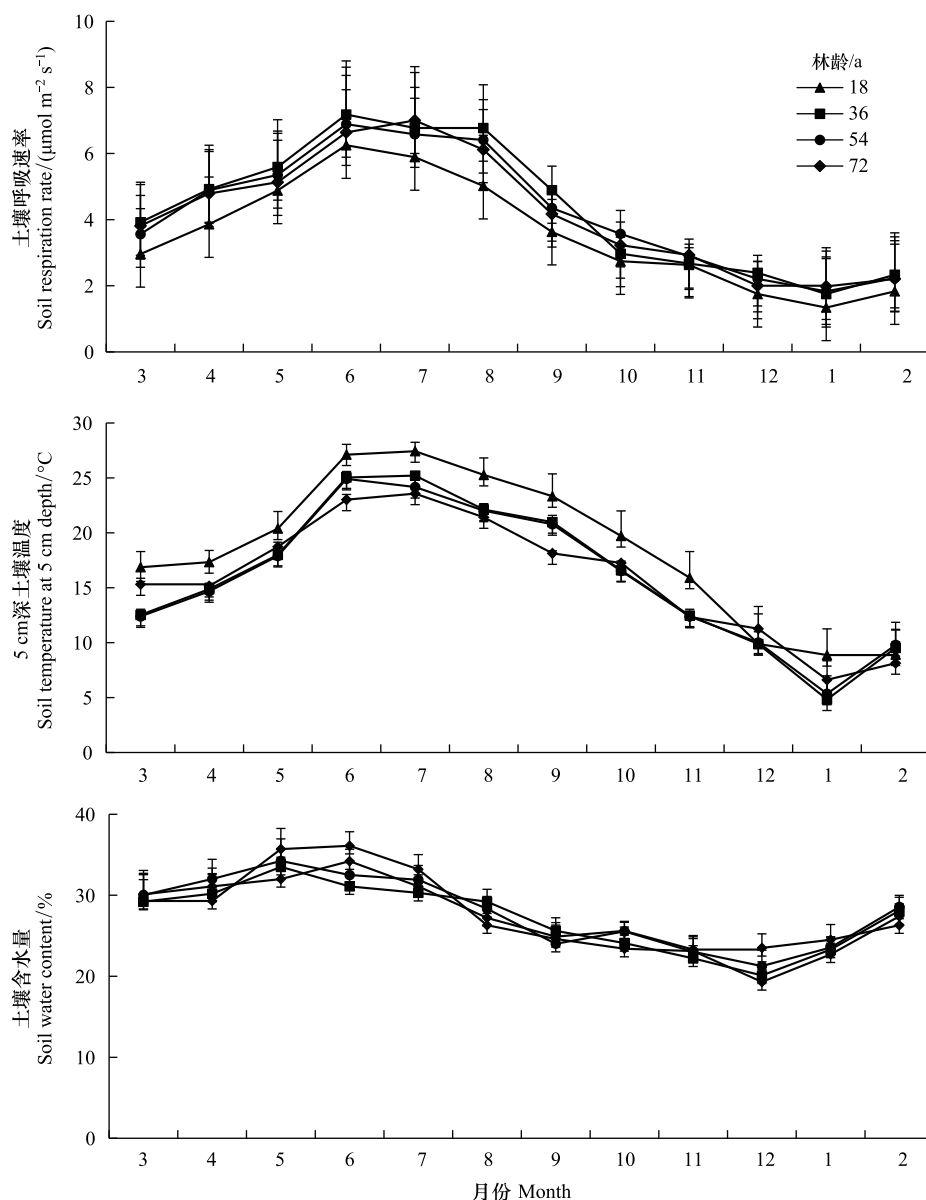


图2 不同林龄甜槠林总土壤呼吸速率、5 cm 深土壤温度、土壤含水量月变化动态

Fig.2 Monthly changes of total soil respiration rate, soil temperature at 5 cm depth and soil water content in *Castanopsis eyrei* forests with different forest ages

不同林龄甜槠林土壤温度变化与 R_s 变化趋势一致,土壤含水量在6月达到最高值,12月为最低值。方差分析表明(表2),林龄对冬季 R_s 影响不显著($P>0.05$),秋季18 a 甜槠林土壤呼吸速率值与其余3种林龄差异显著($P<0.05$),4种林龄甜槠林土壤春季含水量高于秋季,很可能是因为武夷山自然保护区雨季集中在春夏季,秋冬季相对较少。18 a 甜槠林土壤温度与其余3种林龄差异显著($P<0.05$),林龄对土壤含水率并没有显著影响($P>0.05$)。

2.2 模型建立

2.2.1 土壤温度与土壤呼吸单因子模型

为探究温度、水分与土壤呼吸速率之间的关系,采用土壤温度与 R_s ,土壤含水量与 R_s 进行指数、线性、对数、幂指数、二次曲线模型拟合(表3)。

结果表明,18 a 甜槠林所有拟合方程的 R^2 均达到 0.80 以上,其中二次曲线模型拟合(0.826)结果最好,在拟合方程的选取上,二次函数方程更为复杂,拟合 R^2 仅比幂指数大 0.005,差距不明显,幂指数模型为 18 a 甜槠 R_s 预测的最佳模型;36 a 甜槠林所有模型拟合 R^2 均大于 0.80,对数模型拟合程度(0.840)最好,为 36 a 甜槠 R_s 预测的最佳模型;54 a 甜槠林指数模型拟合 R^2 (0.852)最好,成为 54 a 甜槠 R_s 预测的最佳模型;72 a 甜槠林二次曲线模型拟合 R^2 (0.862)最好,但拟合 R^2 仅比线性模型拟合 R^2 高 0.002,为了方便计算,线性模型成为 72 a 甜槠 R_s 预测的最佳模型。

表 3 5 cm 深土壤温度与土壤呼吸速率拟合方程

Table 3 Fitting equation of soil temperature at 5 cm depth and soil respiration rate

林龄 Age of stand/a	模型 Model	回归方程 Regression equation	R^2	Q_{10}	P
18	指数	$R_S = 7.577e^{0.037 T}$	0.809	1.551±0.348b	<0.01
	线性	$R_S = 3.706T+4.416$	0.818		
	对数	$R_S = 12.514\ln(T)+2.943$	0.803		
	幂指数	$R_S = 6.756T^{0.761}$	0.821		
	二次	$R_S = 4.993T-0.169T^2+2.317$	0.826		
36	指数	$R_S = 2.768e^{0.040 T}$	0.818	1.589±0.191b	
	线性	$R_S = 4.959T-6.241$	0.839		
	对数	$R_S = 21.883\ln(T)-15.754$	0.840		
	幂指数	$R_S = 1.275T^{1.650}$	0.826		
	二次	$R_S = 10.755T-0.606T^2-18.855$	0.822		
54	指数	$R_S = 1.413e^{0.064 T}$	0.852	1.640±0.115a	
	线性	$R_S = 0.259T+0.133$	0.848		
	对数	$R_S = 3.360\ln(T)-4.752$	0.824		
	幂指数	$R_S = 0.398T^{0.853}$	0.818		
	二次	$R_S = 0.097T+0.005T^2+1.240$	0.829		
72	指数	$R_S = 4.137e^{0.265 T}$	0.854	1.664±0.253a	
	线性	$R_S = 3.693T-1.330$	0.860		
	对数	$R_S = 14.623\ln(T)-5.463$	0.844		
	幂指数	$R_S = 2.961T^{1.076}$	0.824		
	二次	$R_S = 1.872T+0.202T^2+2.168$	0.862		

不同小写字母表示不同林龄间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2.2 土壤含水量与土壤呼吸单因子模型

表 4 为土壤含水量与 R_s 模型拟合方程。结果表明,甜槠林四种林龄土壤含水量与 R_s 模型拟合结果小于 5 cm 深土壤温度与 R_s 之间模型拟合 R^2 。18、36、54、72 a 甜槠林土壤含水量与 R_s 拟合的最佳模型分别为指数、幂指数模型(0.532)、指数模型(0.481)、指数模型(0.518)、线性模型(0.523)。

根据拟合结果,虽然温度是影响甜槠各林分 R_s 的主要原因,但湿度因素作用仍不可忽略, R_s 动态变化是土壤温度、土壤水分共同作用的结果,因此需将二者共同引入方程进行模拟,提高 R_s 的精确性。

2.2.3 土壤温度、土壤体积含水量与土壤呼吸速率多因素模型及预测

表 5 为土壤温度、土壤含水量与 R_s 双因素模型拟合结果。从拟合效果来看,18 a 甜槠林中 R_2 模型拟合 R^2 (0.877)最高,36 a 甜槠林中 R_1 模型拟合 R^2 (0.871)最高,与土壤温度、 R_s 最佳单因子拟合模型相比, R^2 略有提高,但差距不明显;54 a 甜槠林中 R_2 模型拟合 R^2 (0.901)最高,72 a 甜槠林中 R_2 模型拟合 R^2 (0.903)最高。3 种拟合模型 R^2 较土壤含水量与 R_s 拟合方程提高明显,可见,湿度因素对甜槠林 R_s 作用不明显,温度因子是影响甜槠林 R_s 的关键因子,但湿度因子的加入也提高了模型的准确性。

表 4 土壤含水量与土壤呼吸速率拟合方程

Table 4 Fitting equation of soil water content and soil respiration rate

林龄 Age of stand/a	模型 Model	回归方程 Regression equation	R^2	P
18	指数函数	$R_s = 0.420e^{0.078 W}$	0.532	<0.05
	线性函数	$R_s = 0.260W - 3.262$	0.517	
	对数	$R_s = 6.970\ln(W) - 19.120$	0.488	
	幂指数	$R_s = 0.004W^{2.106}$	0.532	
	二次	$R_s = 0.700W - 0.0080W^2 - 9.083$	0.467	
	指数函数	$R_s = 0.658e^{0.069 W}$	0.481	
36	线性函数	$R_s = 0.285W - 3.271$	0.473	
	对数	$R_s = 7.515\ln(W) - 20.264$	0.438	
	幂指数	$R_s = 0.011W^{1.826}$	0.425	
	二次	$R_s = 0.723W - 0.008W^2 - 8.993$	0.441	
	指数函数	$R_s = 0.604e^{0.068 W}$	0.518	
	线性函数	$R_s = 0.269W - 3.273$	0.511	
54	对数	$R_s = 7.327\ln(W) - 20.080$	0.478	
	幂指数	$R_s = 0.008W^{1.858}$	0.468	
	二次	$R_s = 0.138W + 0.002W^2 - 1.497$	0.433	
	指数函数	$R_s = 0.301e^{0.093 W}$	0.502	
	线性函数	$R_s = 0.385W - 6.442$	0.523	
72	对数	$R_s = 10.959\ln(W) - 32.073$	0.428	
	幂指数	$R_s = 0.001W^{2.631}$	0.447	
	二次	$R_s = 1.303W - 0.016W^2 + 2.631$	0.478	

表 5 5 cm 深土壤温度、含水量与土壤呼吸速率拟合方程

Table 5 Fitting equations of soil temperature at 5 cm depth, soil water content and soil respiration rate (Mean±SE)

林龄 Age of stand/a	R_1					R_2					R_3			
	$R_s = ae^{bTW^c}$					$R_s = a + bT + cW$					$R_s = a(T \times W) + b$			
	a	b	c	R^2	RMSE	a	b	c	R^2	RMSE	a	b	R^2	RMSE
18	0.307±	0.050±	0.464±	0.860	0.361	-1.357±	0.204±	0.051±	0.877	0.283	0.006±	0.648±	0.859	0.326
	0.415	0.031	0.454			1.151	0.047	0.061			0.001	0.443		
36	2.700±	0.041±	-0.058±	0.871	0.335	2.454±	0.191±	-0.038±	0.861	0.373	0.005±	2.168±	0.840	0.332
	4.363	0.010	0.529			1.923	0.050	0.095			0.001	0.360		
54	0.168±	0.029±	0.823±	0.883	0.285	-0.859±	0.135±	0.106±	0.901	0.305	0.005±	1.841±	0.890	0.347
	0.192	0.007	0.363			1.106	0.028	0.049			0.002	0.303		
72	0.155±	0.040±	0.806±	0.869	0.311	-2.039±	0.188±	0.129±	0.903	0.257	0.007±	1.419±	0.895	0.262
	0.240	0.009	0.485			1.678	0.037	0.071			0.001	0.376		

18、36、54、72 a 甜槠林实测值与预测值误差范围分别为:±1.5 μmol m⁻² s⁻¹、±1.5 μmol m⁻² s⁻¹、±1 μmol m⁻² s⁻¹、±2 μmol m⁻² s⁻¹。总体来看 36 a 预测效果最好,其次为 18 a。同时可以看出,用双变量预测模型预测 R_s 时,可以克服单变量指数模型在土壤温度较高时对土壤呼吸速率值的高估以及土壤水分较高时对 R_s 的低估。

2.3 不同林龄甜槠林细根生物量分布及其与土壤呼吸速率关系

4 种林龄甜槠林细根生物量季节变化基本趋势大致为:夏季>秋季>春季>冬季(图 4)。四个季节中,0—20cm、20—40cm 土层细根生物量均为 36 a 甜槠林最大,这与 R_s 最大值出现在 36 a 甜槠林中具有相似表现。甜槠林根系总生物量随林龄的增大而增加(图 5),其中粗根生物量变化趋势与根系生物量变化趋势相同,细根生物量随林龄的增大呈单峰趋势,表现为从 18 a 起,甜槠林细根生物量开始增加,到 36 a 达到细根生物量最大值,而后细根生物量逐渐降低。甜槠林细根生物量在 0—20cm 处最大(图 6),表明甜槠林细根主要集中在表层土壤。

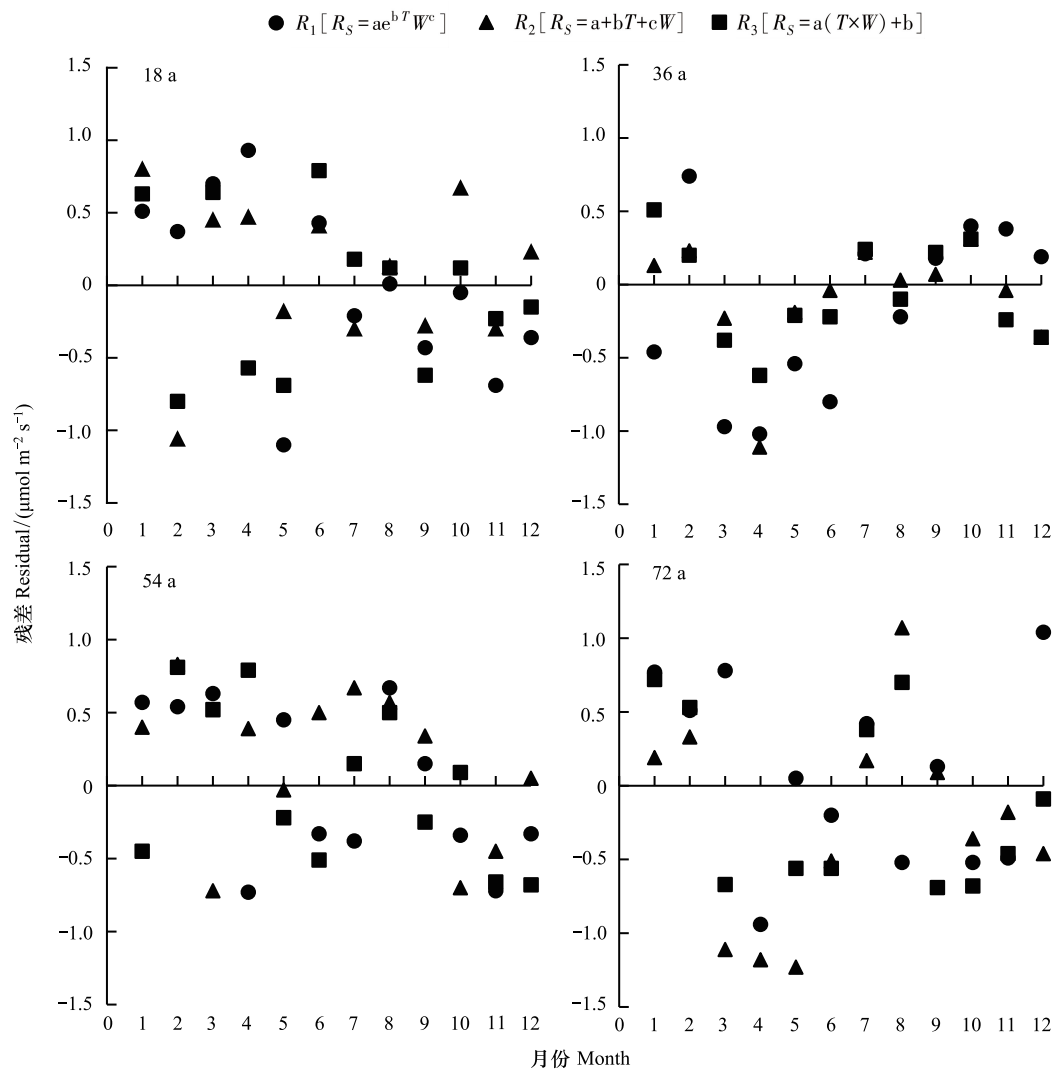


图3 不同林龄甜槠林土壤呼吸速率拟合残差值

Fig.3 Fitting residual difference of soil respiration rates in *Castanopsis eyrei* forests with different stand ages

R_s 与各林龄甜槠林不同土层细根生物量相关性如表6所示,除18 a甜槠林外,其余3种林龄甜槠林各土层细根生物量与土壤呼吸速率拟合 R^2 均在0.60以上,36 a甜槠林各土层细根生物量与 R_s 在四种林龄中拟合最好。0—20 cm土层细根生物量对土壤呼吸速率的解释率54 a(70.2%)、72 a(70.4%)高于20—40 cm土层细根生物量对土壤呼吸速率解释率54 a(65.1%)、72 a(63.1%),36a甜槠林0—20 cm、40—60 cm土层细根

表6 不同林龄甜槠林各土层深度细根生物量与土壤呼吸速率表线性关系

Table 6 Linear Relationship between Fine Root Biomass and Soil Respiration Rate in Different Soil Layers of <i>Castanopsis eyrei</i> Forest							
林龄 Age of stand/a	土层深度 Soil depth/cm	拟合方程 Fitting equation	R^2	林龄 Age of stand/a	土层深度 Soil depth/cm	拟合方程 Fitting equation	R^2
18	0—20	$R_s = 3.868X - 0.337$	0.465	54	0—20	$R_s = 4.017X - 1.719$	0.702
	20—40	$R_s = 8.683X + 0.810$	0.594		20—40	$R_s = 6.058X + 0.693$	0.651
	40—60	$R_s = 21.714X + 0.143$	0.551		40—60	$R_s = 14.738X + 0.733$	0.704
36	0—20	$R_s = 3.195X - 3.461$	0.713	72	0—20	$R_s = 5.683X - 3.545$	0.704
	20—40	$R_s = 5.874X - 0.380$	0.719		20—40	$R_s = 7.417X - 0.412$	0.631
	40—60	$R_s = 7.614X + 1.429$	0.684		40—60	$R_s = 15.829X + 0.742$	0.661

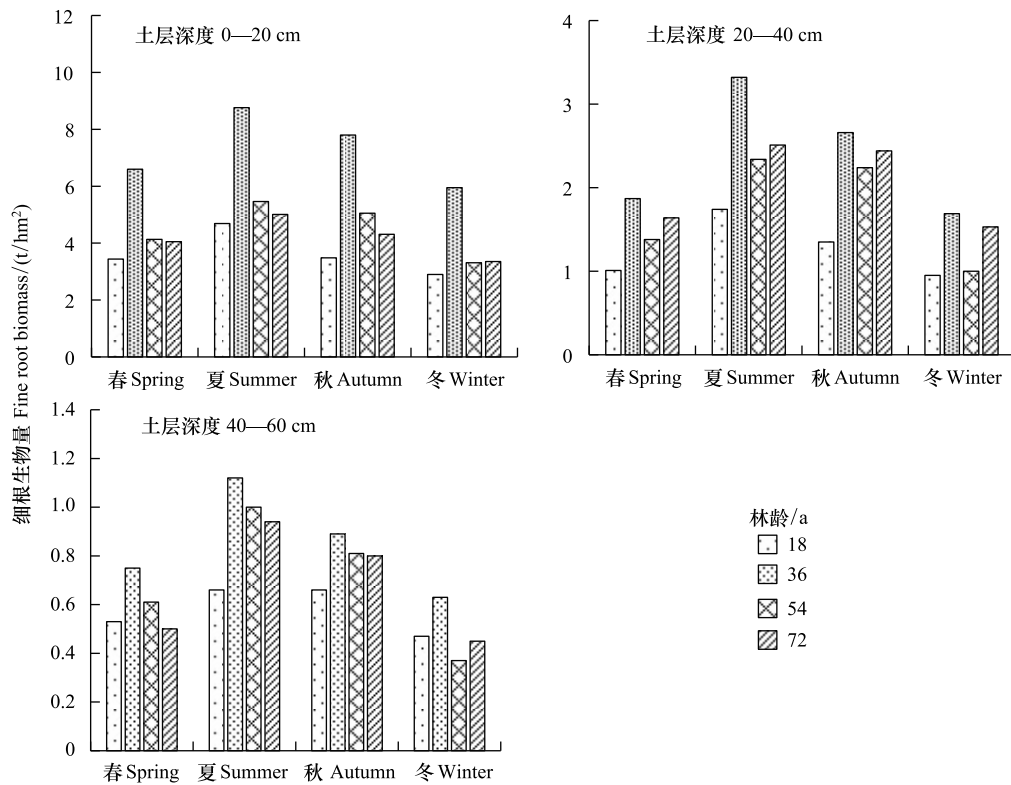


图4 不同林龄甜槠林不同土层深度根系生物量季节变化

Fig.4 Seasonal changes of root biomass in *Castanopsis eyrei* forests with different forest ages and different soil depth

生物量对土壤呼吸速率解释率相差不大。0—60 cm 土层根系生物量与 5 cm 深土壤温度可共同解释了 R_s 变异的88.3%—91.8%,高于 5 cm 深土壤温度、含水量与 R_s 的拟合值(表 7)。

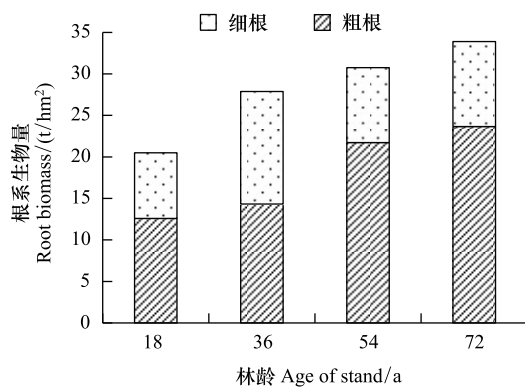


图5 不同林龄甜槠林根系生物量

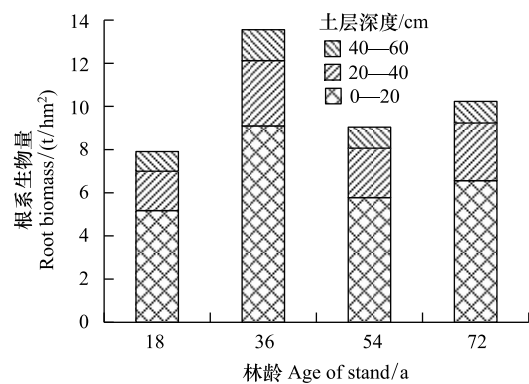
Fig.5 Root biomass of *Castanopsis eyrei* forests in different forests

图6 不同林龄甜槠林细根生物量垂直分布

Fig.6 Vertical distribution of fine root biomass of *Castanopsis eyrei* forests in different forests

3 讨论与结论

3.1 不同林龄甜槠天然林土壤呼吸速率变化及其主要驱动因子

本研究表明 4 种林龄甜槠天然林 R_s 呈单峰型曲线,表现为夏季(6、7 月)最高,冬季最低(1 月),且与土壤

温度具有一致的季节变化特征,这与亚热带森林 R_s 研究结果一致^[22,27],可能与研究区内,不同林龄间气温、降水量等气候条件基本相同,土壤温度、土壤含水量季节变化模式也基本相同有关。不同林龄甜槠林 R_s 变化与季节因素无关 ($P>0.05$),这与韩营营对不同林龄白栎天然林 R_s 研究结果一致^[28]。相比之下,橡树林随林龄增加 R_s 降低^[29],山杨人工林也呈相同的趋势^[30],这表明随温度带不同、树种不同、微环境不同,林龄对 R_s 的响应可能存在差异。不同林龄甜槠林秋季土壤异养呼吸占总呼吸的比重最高,可能与研究区秋季气温开始降低,自养呼吸占总呼吸的比例下降(表 2),同时凋落物增加(图 1)为土壤动物、微生物提供了大量的碳底物^[31],微生物分解凋落物释放 CO_2 增多有关。

表 7 5 cm 深土壤温度、0—60 cm 细根生物量与土壤呼吸速率线性关系

Table 7 Linear relationship between soil 5 cm temperature, 0—60 cm fine root biomass and soil respiration rate

林龄 Age of stand/a	拟合方程 Fitting equation	R^2	F	P
18	$R_s = 2.318 + 1.708X_2 + 3.469T$	0.883	33.998	<0.01
36	$R_s = -1.730 + 1.124X_2 + 0.128T$	0.918	50.695	
54	$R_s = -0.644 + 0.865X_2 + 0.183T$	0.894	37.754	
72	$R_s = -0.983 + 0.944X_2 + 0.215T$	0.886	34.905	

土壤温度被认为是解释不同林龄 R_s 差异的一个重要因素。本研究中 4 种林龄甜槠天然林 R_s 与土壤温度间存在极显著的指数关系 ($P<0.01$),土壤温度可以解释不同林龄甜槠林 R_s 的 80.26%—86.22% 变异,不同林龄甜槠林土壤温度对 R_s 的影响显著高于土壤含水量的影响,表明在该区域中土壤温度是影响 R_s 的关键因子,这与中亚热带常绿阔叶林的研究结果一致^[32]。随着林龄的增加,一方面甜槠天然林乔木层植物个体、密度增大,林分郁闭度和密度通过影响植被林下光照对土壤温度产生影响^[33]。4 种林龄中,18 a 甜槠林 5 cm 深土壤温度明显高于其他 3 种林龄 ($P<0.05$),这可能是因为 18 a 甜槠林冠层盖度较低(表 1),而冠层盖度高低直接影响了土壤表面可接收的太阳辐射^[34],使得土壤温度、土壤有机碳密度、微生物根系呼吸产生差异,进而影响 R_s 变化,前人研究表明冠层盖度与土壤温度间存在极显著关系,且在土壤较为干旱时,冠层盖度对 R_s 的影响最大^[35]。另一方面,凋落物分解产生的土壤有机质是有机碳补充的重要来源,随着林龄的增大,植被凋落物量不断增多^[31],促进了土壤有机碳的积累,为微生物呼吸提供了底物,使得 R_s 增大。36 a 甜槠林土壤呼吸速率最高,这可能是因为 36 a 甜槠林林下凋落物丰富,冠层盖度较 18 a 甜槠林高,但 5 cm 深土壤温度较 54、72 a 甜槠林低,很可能通过增加凋落物产量对根系、微生物呼吸产生影响,进而影响 R_s 。

Q_{10} 值是用来表征 R_s 对温度变化的敏感性指标,众多研究表明, Q_{10} 值随时空变化存在差异^[36-37]。本研究结果表明,不同林龄甜槠林 Q_{10} 值在 1.551—1.664 之间,这处在亚热带森林土壤呼吸 Q_{10} 值(1.56—2.39)范围中^[38]。72、54 a 甜槠林 Q_{10} 值显著高于 36、18 a 甜槠林 Q_{10} 值,且与土壤温度变化呈负相关关系,表现为 Q_{10} 值在高温下较低,低温下较高,表明低温地区植被土壤呼吸对温度变化更为敏感,这与前人研究结果一致^[23,38]。结果表明 54、72 a 甜槠林 Q_{10} 值显著高于 18、36 a 甜槠林,这与韩营营等^[28]、YU 等^[33] 研究结果一致,但与于舒^[39] 对不同林龄油松次生林 Q_{10} 值随林龄的增加而降低不一致。这些结果都强调了林龄因素对 Q_{10} 值的影响,因此,在不考虑林龄因素的影响下,土壤温度与 R_s 的拟合估计值可能会低估或高估于实测值。

本研究中,土壤含水量仅可以解释甜槠林 R_s 变异的 42%—54%,可见,研究区内甜槠林湿度因子对 R_s 的影响较小。这与相关学者研究结果不一致,刘鹏等表明当土壤含水率大于 8% 时, R_s 与土壤含水率无显著相关关系^[40];刘宝等在对 3 种林龄闽楠林 R_s 研究发现土壤含水率与 R_s 之间不存在显著线性相关关系 ($P>0.05$)^[41]。本研究中土壤含水量与 R_s 间相关关系拟合程度不高,很可能是因为研究区中有丰富的降水,土壤含水量高,湿度因素不是该区域的限制因素,但也发现 54、72 a 甜槠林较 36 a 甜槠林土壤含水量高时, R_s 有所降低,表明随着林龄增加有机质积累量增大,土壤容重降低,持水能力增高时,可能会抑制土壤根系呼吸^[42],使得 R_s 降低,但其阈值需要进一步确认。湿度因子与土壤呼吸间的关系复杂,很难单独分析水分对 R_s 的影

响,一般而言,湿度较小的地区如干旱半干旱地区,土壤湿度与 R_s 拟合较好,温湿度双因素拟合对 R_s 解释性及预测性更强^[43]。

3.2 不同林龄甜槠林根系生物量变化及其对土壤呼吸的影响

本研究表明随着甜槠林林龄的增长,根系生物量(细根+粗根)呈增大趋势,0—60 cm 细根生物量表现为随林龄增大,呈先增加后减小的趋势。影响细根分布因素一方面与树种、土壤物理性质(通气性)、土壤水分等有关^[44];另一方面,土壤温度随土层的改变也是导致细根主要分布于土壤表层的重要原因^[45],0—20 cm 土壤表层温度条件适宜,通气性好,有机质含量高,适宜土壤动物及微生物的生长和代谢,细根生物量多分布于此层。李帅锋等^[46]研究不同林龄思茅松人工林根系生物量认为,由于群落结构、物种组成变化,思茅松细根生物量随林龄增大而减小。本研究结果与此结论不同,36 a 甜槠林细根生物量在0—20 cm 土层占比最大,随着林龄增大细根生物量占比逐渐减小,这可能是由于36 a 甜槠林林下植被凋落量大,表层营养丰富,利于细根生长,随着林龄增大,细根向深处生长需要一定的时间;同时,36 a 甜槠林的林下植被相较于54、72 a 甜槠林植被生长好,表层土壤养分含量高,因而细根生物量大。土壤各层次细根生物量的分布差异反映出土壤资源有效性的变化情况^[46],森林土壤资源有效性的变化会直接导致地下碳分配格局的改变,进而影响 R_s 的动态变化。

不同林龄甜槠林不同深度土层细根生物量与 R_s 拟合结果表明, R_s 与各层土壤根系生物量呈线性正相关关系,除18 a 甜槠林外,其余三种林龄各土层细根生物量与 R_s 拟合 R^2 均在0.60以上,表层土壤(0—20 cm)细根生物量是引起地下根系生物量差异的主要原因。相关研究表明,亚热带常绿阔叶林根系呼吸速率与细根生物量呈极显著相关关系^[47],夏季适宜的环境因子促进细根生物量生长,使得土壤呼吸速率与细根生物量达到最大值^[48]。本研究表明试验区内0—60 cm 土壤细根生物量、土壤温度与 R_s 拟合高于土壤温度、含水量与 R_s 拟合值,土壤根系生物量相较于土壤含水量对甜槠林 R_s 影响更大。

R_s 具有明显的时空异质性,在空间上彼此接近的同种植被,测定的土壤呼吸速率都可能存在很大的差异。本研究分析了武夷山自然保护区4种不同林龄甜槠林 R_s 的年际变化及影响 R_s 的生物、非生物因子,由于本实验仅在同一海拔、同一立地条件对不同林龄甜槠林进行土壤呼吸研究,因此所得结果与武夷山自然保护区甜槠林立地特异性有关。本研究强调了甜槠林 R_s 中林龄的作用,指出在对未来森林植被土壤呼吸及碳汇功能研究时,应考虑林龄及生物因子的影响。

参考文献(References):

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 23-36.
- [3] Burton A J, Pregitzer K S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine. *Tree Physiology*, 2003, 23(4): 273-280.
- [4] 潘辉,黄石德,洪伟,林捷,朱洪如.相思人工林土壤呼吸及残差呼吸的季节格局. *福建林学院学报*, 2011, 31(4): 309-314.
- [5] 曹诗瑜,郭全恩,南丽丽,刘海建,康发云.5种不同植被下的土壤呼吸特征及其影响因素. *甘肃农业科技*, 2018, (11): 32-36.
- [6] 张丽华,陈亚宁,赵锐锋,李卫红.温带荒漠中温度和土壤水分对土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2009, 33(5): 936-949.
- [7] 熊平生.陆地生态系统土壤呼吸的影响因素研究综述. *中国土壤与肥料*, 2017, (4): 1-7.
- [8] 王新源,李玉霖,赵学勇,毛伟,崔夺,曲浩,连杰,罗永清.干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展. *生态学报*, 2012, 32(15): 4890-4901.
- [9] 牛莉平,许嘉巍,靳英华,尹海霞,王媛林,刘羽霞,张英洁.温带森林不同演替阶段下的土壤 CO_2 排放通量昼间变化. *生态学报*, 2017, 37(8): 2673-2683.
- [10] 常云妮,钟全林,程栋梁,徐朝斌,胡波,张治.闽西北地区不同林龄常绿阔叶混交林物种多样性比较. *生态环境学报*, 2013, 22(6): 955-960.
- [11] De Kovel C G F, van Mierlo A E M, Wilms Y J O, Berendse F. Carbon and nitrogen in soil and vegetation at sites differing in successional age. *Plant Ecology*, 2000, 149(1): 43-50.
- [12] Ewel K C, Cropper Jr W P, Gholz H L. Soil CO_2 evolution in Florida slash pine plantations. I. Changes through time. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(4): 325-329.
- [13] Saiz G, Byrne K A, Butterbach-Bahl K, Kiese R, Blujdea V, Farrell E P. Stand age-related effects on soil respiration in a first rotation Sitka

- spruce chronosequence in central Ireland. *Global Change Biology*, 2006, 12(6): 1007-1020.
- [14] 王娟, 尤业明, 黄雪蔓, 张建亮. 锐齿栎林年龄序列土壤呼吸组分特征研究. *广西植物*, 2016, 36(10): 1205-1213.
- [15] 方燕鸿. 武夷山米槠、甜槠常绿阔叶林的物种组成及多样性分析. *生物多样性*, 2005, 13(2): 148-155.
- [16] 胡正华, 钱海源, 于明坚. 古田山国家级自然保护区甜槠林优势种群生态位. *生态学报*, 2009, 29(7): 3670-3677.
- [17] 张治, 钟全林, 程栋梁, 徐朝斌, 胡波, 常云妮. 闽西北地区不同龄组常绿阔叶混交林生态系统碳储量结构特征. *生态环境学报*, 2014, 23(2): 203-210.
- [18] 郎飞. 武夷山甜槠天然林群落结构及碳储量研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2013.
- [19] 任引, 彭丹, 潘俊忠, 洪志猛, 叶功富. 不同时空尺度下武夷山甜槠林物种多样性与生物量的动态关系. *林业科学*, 2010, 46(8): 33-38.
- [20] 林益明, 何建源, 杨志伟, 刘初翎, 林鹏, 李振基. 武夷山甜槠群落凋落物的产量及其动态. *厦门大学学报: 自然科学版*, 1999, 38(2): 280-286.
- [21] 陈仁华. 武夷山甜槠林群落养分循环的研究. *江西农业大学学报*, 2005, 27(2): 195-198.
- [22] 江华, 叶功富, 黄义雄, 高伟, 林捷, 郎飞. 武夷山天然甜槠林生态系统土壤呼吸日变化及影响因子研究. *海南师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 26(1): 75-79.
- [23] Yin H J, Li Y F, Xiao J, Xu Z F, Cheng X Y, Liu Q. Enhanced root exudation stimulates soil nitrogen transformations in a subalpine coniferous forest under experimental warming. *Global Change Biology*, 2013, 19(7): 2158-2167.
- [24] 杨众家. 甜槠天然林群落结构特征研究. *安徽农业科学*, 2009, 37(11): 5221-5222.
- [25] 杨惠滨, 国庆喜. 地形与竞争因子对红松胸径与年龄关系的影响. *生态学报*, 2016, 36(20): 6487-6495.
- [26] 韩畅, 宋敏, 杜虎, 曾馥平, 彭晚霞, 王华, 陈莉, 苏樑. 广西不同林龄杉木、马尾松人工林根系生物量及碳储量特征. *生态学报*, 2017, 37(7): 2282-2289.
- [27] 周文嘉, 石兆勇, 王妮. 中国东部亚热带森林土壤呼吸的时空格局. *植物生态学报*, 2011, 35(7): 731-740.
- [28] 韩营营, 黄唯, 孙涛, 陆彬, 毛子军. 不同林龄白桦天然次生林土壤碳通量和有机碳储量. *生态学报*, 2015, 35(5): 1460-1469.
- [29] Tedeschi V, Rey A, Manca G, Valentini R, Jarvis P G, Borghetti M. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after coppicing. *Global Change Biology*, 2006, 12(1): 110-121.
- [30] Zhao X, Li F D, Zhang W J, Ai Z P. Contribution of aboveground litter to soil respiration in *Populus davidiana* Dode plantations at different stand ages. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(6): 1000-1012.
- [31] Yan J H, Wang Y P, Zhou G Y, Zhang D Q. Estimates of soil respiration and net primary Production of three forests at different Succession stages in South China. *Global Change Biology*, 2006, 12(5): 810-821.
- [32] Lou Y S, Li Z P, Zhang T L. Carbon dioxide flux in a subtropical agricultural soil of China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2003, 149(1/4): 281-293.
- [33] Yu K Y, Yao X, Deng Y B, Lai Z J, Lin L C, Liu J. Effects of stand age on soil respiration in *Pinus massoniana* plantations in the hilly red soil region of Southern China. *CATENA*, 2019, 178: 313-321.
- [34] Ma Y C, Piao S L, Sun Z Z, Lin X, Wang T, Yue C, Yang Y. Stand ages regulate the response of soil respiration to temperature in a *Larix principis-rupprechtii* plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 184: 179-187.
- [35] 刘任涛, 柴永青, 徐坤, 杨明秀, 朱凡. 荒漠草原区柠条固沙人工林地地表草本植被季节变化特征. *生态学报*, 2014, 34(2): 500-508.
- [36] Gullledge J, Schimel J P. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in interior Alaska. *Ecosystems*, 2000, 3(3): 269-282.
- [37] 付雨龙, 郭超, 白璐. 太岳山不同林型的土壤呼吸特征及温度敏感性. *东北林业大学学报*, 2013, 41(11): 78-82.
- [38] Zheng Z M, Yu G R, Fu Y L, Wang Y S, Sun X M, Wang Y H. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: a trans-China based case study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(7): 1531-1540.
- [39] 于舒, 韩海荣, 康峰峰, 赵金龙, 立天宇, 高晶, 宋小帅. 去除凋落物对不同林龄油松次生林土壤呼吸的影响. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(7): 122-130.
- [40] 刘鹏, 贾昕, 杨强, 查天山, 王奔, 马景永. 毛乌素沙地油蒿灌丛生态系统的土壤呼吸特征. *林业科学*, 2018, 54(5): 10-17.
- [41] 刘宝, 吴文峰, 何盛强, 林思祖, 林开敏. 不同林龄闽楠林土壤呼吸与碳储量研究. *森林与环境学报*, 2018, 38(4): 431-438.
- [42] Almagro M, López J, Querejeta J I, Martínez-Mena M. Temperature dependence of soil CO₂ efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3): 594-605.
- [43] 富利, 张勇勇, 赵文智. 荒漠-绿洲区不同土地利用类型土壤呼吸对温湿度的响应. *生态学杂志*, 2018, 37(9): 2690-2697.
- [44] 袁渭阳, 李贤伟, 张健, 荣丽, 杨渺, 潘燕. 不同年龄巨桉林土壤呼吸及其与土壤温度和细根生物量的关系. *林业科学*, 2009, 45(11): 1-8.
- [45] 王娜, 沈雅飞, 程瑞梅, 肖文发, 杨邵, 郭燕. 三峡库区马尾松细根生产和周转及其影响因子. *应用生态学报*, 2017, 28(12): 3827-3832.
- [46] 李帅锋, 贾呈鑫卓, 杨利华, 钟华, 黄小波, 郎学东, 刘万德, 苏建荣. 林龄对思茅松人工林根系生物量的影响. *林业科学研究*, 2018, 31(2): 26-33.
- [47] 刘宝, 王民煌, 余再鹏, 林思祖, 林开敏. 中亚热带天然林改造成人工林后土壤呼吸的变化特征. *林业科学*, 2019, 55(4): 1-12.
- [48] 杨福春, 郭炳桥, 孙俊, 范瑞瑞, 孙蒙柯, 陈晓萍, 郭英荣, 袁荣斌, 程林, 钟全林, 程栋梁. 武夷山不同海拔黄山松根系生物量季节变化特征. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(6): 1117-1121.