黄奇,于冯,权伟,等.温州城市绿地的土壤呼吸特征及影响因素[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(1):79-88.
Huang Q, Yu F, Quan W, et al. Soil respiration characteristics and influencing factors in urban green spaces of in Wenzhou, China[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(1):79-88.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202308032

温州城市绿地的土壤呼吸特征及影响因素

黄奇[1,2],于冯[1,2],权伟[2,3],康华靖[1,2],应苗苗[1,2*]

(1.温州市农业科学研究院,浙江 温州 325006;2.温州市农林渔生态系统增汇减排重点实验室,浙江 温州 325006;
3.浙江安防职业技术学院,浙江 温州 325016)

摘　要:[目的]城市绿地面积逐年增加,城市绿地土壤呼吸对准确评估绿地碳源汇功能至关重要,本文旨在阐明不同绿地类型的土壤呼吸变化特征及影响因素,为实现低碳减排目标提供理论依据。[方法]本文以温州城市森林(香樟)和绿化景观(马尼拉草和银杏)为研究对象,于2021年1—12月使用静态箱—气相色谱法对城市绿地土壤呼吸速率(R_s)进行跟踪观测。[结果](1)R_s年排放量大小依次为香樟(892.01 gC·m^{-2}·a^{-1})>马尼拉草(735.30 gC·m^{-2}·a^{-1})>银杏(500.15 gC·m^{-2}·a^{-1}),且R_s年排放量与土壤有机碳含量显著正相关,与土壤容重显著负相关;(2)指数函数拟合表明,土壤温度(T)对马尼拉草、银杏和香樟R_s的月份动态变化解释能力较高,分别为57.4%、59.0%和51.1%;而土壤含水量(VWC)对香樟R_s月份动态的解释能力远高于其他2种植被,达到55.6%;且香樟R_s对T和VWC变化的敏感性高于2种绿化景观;(3)双因素模型进一步表明,VWC对预测香樟林R_s变化的重要性略高于T,而T对2个绿化景观R_s变化的重要性远高于VWC。[结论]温州城市森林土壤呼吸高于绿化景观,且月份动态受T和VWC的共同影响,绿化景观土壤呼吸主要受T影响,不同绿地R_s年排放量的差异归因于土壤的有机碳和容重差异。

关键词:城市绿地; 土壤呼吸; 植被类型; 土壤温度; 土壤含水量
中图分类号:S181.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)01-0079-10

土壤呼吸是陆地生态系统第2大碳通量,仅次于总初级生产力[1],因此土壤呼吸的微小改变都将影响碳循环,进而加剧或减缓气候变化[2]。城市承载了全球一半以上的人口[3]。近年来,城市化以前所未有的速率在全球发展。城市化加剧资源消耗,导致CO_2排放量增加,进而加剧全球气候变化[4-5]。城市化改变了土地利用覆盖,导致自然生态系统的破碎化,降低生物多样性和生态系统服务功能,最终影响区域生物地球化学循环[6]。但与此同时,城市"绿化"增加了城市内部的植被覆盖度和碳储量,部分弥补了城市化的碳排放[7]。城市绿地作为城市生态系统中唯一的负反馈系统,而且是城市生态系统中碳汇的最主要来源,有助于缓解城市区域的气候变化[8]。随着城市化进程的不断推进,城市绿地面积也迅速增加,探究城市绿地土壤呼吸对于准确评估绿地碳源汇功能至关重要[9-10]。

国内外对土壤呼吸的研究主要集中在森林、草地、农田生态系统[11-13],但是与自然生态系统不同,城市区域由于不透水地表及人类活动干扰,城市绿地土壤呼吸的变化特征及其环境因子响应近年来备受关注[14]。前期研究发现,城市绿地土壤呼吸存在明显的区域差异,如广州城市绿地土壤呼吸较高,不同植被年均土壤呼吸波动范围为5.00~6.75 μmol·m^{-2}·s^{-1}[15];福州、上海、合肥等城市绿地土壤呼吸波动范围为2.00~5.48 μmol·m^{-2}·s^{-1}[16-18];而北京、天津城市绿地土壤呼吸较低,波动范围为0.90~3.86 μmol·m^{-2}·s^{-1}[19-21]。此外,不同城市绿地土壤呼吸年均差异较大,但季节波动趋势相似,土壤呼吸最高月份为7-9月,12月和1月最低。但

收稿日期:2023-08-21　　**修回日期**:2023-11-05
基金项目:温州市基础性科研项目(S2020012);温州市农业科学研究院博士科研启动项目
作者简介:黄奇(ORCID:0000-0002-0853-9487),讲师,博士,研究方向:生态系统碳循环,E-mail:755026116@qq.com
*通信作者:应苗苗,教授,硕士生导师,E-mail: mmying0120@163.com

城市草坪并未呈现这种规律,如热带的新加坡城市草坪土壤呼吸年均值为2.43 μmol·m^{-2}·s^{-1}[22],而亚热带的杭州市和菲尼克斯市土壤呼吸年均值分别为2.00 μmol·m^{-2}·s^{-1}[23]和6.76 μmol·m^{-2}·s^{-1}[24]。温带不同城市草坪土壤呼吸年均值变化范围为2.77~9.50 μmol·m^{-2}·s^{-1},变动较大[25-27]。城市绿地土壤呼吸具有较大空间异质性,且受不同植被类型影响,这些因素导致城市绿地土壤呼吸变化规律复杂,已有研究多集中于亚热带的南部和北部,以及暖温带区域,而对于亚热带中部的研究较少。因此,本研究选取亚热带中部浙江省温州市城市森林香樟(*Cinnamomum parthenoxylon*)群落和绿化景观银杏(*Ginkgo biloba*)、马尼拉草(*Zoysia matrella*)为研究对象,分析了城市不同绿地类型土壤呼吸的变化特征,探讨城市不同绿地类型土壤呼吸对土壤温度和土壤湿度变化的响应机制,揭示不同城市绿地类型土壤呼吸变化的主要水热影响因子,以期为准确估算城市生态系统碳收支,科学规划布局城市绿地提供理论依据,使绿地生态效益最大化,加快生态城市建设。

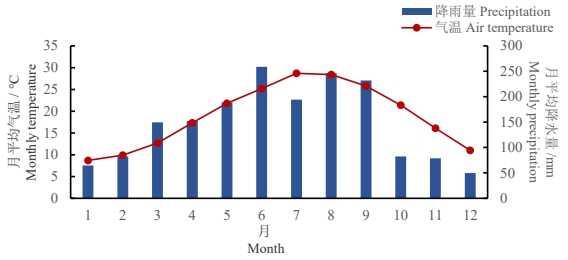
1 材料与方法

1.1 研究区概况

温州位于中亚热带季风气候区,年平均气温17.3~20.0 ℃;1月最低,平均气温4.9~11.4 ℃;7月最高,平均气温26.6~31.0 ℃(图1)。年平均降水量1023~2494 mm,2021年降水量2 021.6 mm。无霜期241~326 d,年日照数1442~2264 h[28-29]。土壤类型为红壤和黄壤。地带性植被为常绿阔叶林。温州市景山公园位于温州市区西部,公园面积315.48 hm^2,三面环城。景山公园植物种类较丰富,大部分为野生种。乔木以常绿乔木为主,落叶乔木为辅。灌木种类较少,草本以野生种和草坪地被为主。景山公园既有城市森林也有绿化景观包括草坪绿地和乔木草坪绿地,故在此研究区开展试验。绿化景观马尼拉草和银杏的灌溉方式一致,均为水车洒水灌溉,灌溉水来源为自来水。根据季节干旱程度不同,灌溉时间间隔为每周1次或每周2次。每次灌溉量约为0.94 L·m^{-2}。城市森林香樟无灌溉。

1.2 采样点设置

试验地位于温州市景山公园,城市森林选择该区域地带性植被香樟群落;绿化景观选择银杏-马尼拉草和马尼拉草坪。各样地景观如图2所示。于2021年1月,在3种典型植被类型地表各设置3个20 m×20 m样地,在每个样地中随机选取3个重复监测点。



据1981—2010年国家气象科学数据中心资料https://data.cma.cn/data/weatherBk.html

According to National Meteorological Science Data Center from 1981—2010https://data.cma.cn/data/weatherBk.html

图1 温州月均气温和月均降雨量

Fig. 1 Monthly temperature and precipitation in Wenzhou

1.3 土壤呼吸测定

于2021年1-12月每月月末晴朗无雨的1天上午08:30-11:30,采用静态箱-气相色谱法测定土壤呼吸速率(R_s),每月测定1次,全年共测定12次。每月测定前1 d将金属底座埋入土壤3 cm,同时齐地面减去地表植物,清理凋落物。监测采样时将PVC箱体(长50 cm,宽50 cm,高50 cm)扣入底座。箱内装有小风扇,将气体混合均匀。采样箱侧面设有采气管。在扣箱后于0、10、20、30 min分别用气泵抽取采样箱内气体样品200 mL存于专用铝箔气袋(德霖LB-201,大连),带回实验室后及时测定。

气体样品中CO_2浓度测定使用安捷伦GC7890b气相色谱仪,使用离子火焰检测器(FID),工作温度为200 ℃,分析使用的色谱柱是长度为2 m、60~80目的PoraPak Q(直径2 mm),工作柱温设置55 ℃,载气使用高纯氮气,流速设置30 cm^3·min^{-1}[15]。

1.4 环境因子测定

测定R_s的同时,使用土壤多参数仪(WET Sensor Kit WET-2-K1,英国)记录5 cm深度土层土壤温度(T)和体积含水率(VWC)。试验期间的大气温度、湿度使用手持式气象仪(Kestrel 5500,美国)记录[30],光合有效辐射(PAR)的测定使用照度计(Tes-1339,中国台湾)。环境因子T、VWC、



银杏-马尼拉草 *Ginkgo biloba-Zoysia matrella*　　马尼拉草 *Zoysia matrella*　　香樟 *Cinnamomum parthenoxylon*

图2　试验样地景观

Fig. 2　The landscape of sample plots

大气温度、大气湿度和光合有效辐射的测定时间与土壤呼吸气袋采样时间一致,每月测定1次,全年共测12次。

于2021年6月末测完R_s后,开展土壤样品采集和容重测定。每个监测点随机布设3处土壤样品采样点。使用断面直径38 mm,长1 m的土钻(AMS荷兰式取土钻,中国)取样。分别在每个采样点钻取0～10、10～20、20～30 cm深度的土壤各约200 g,分别装入自封袋中,及时带回室内处理,挑出其中的石块、根系、土壤动物等。总有机碳测定使用有机碳分析仪(岛津TOC-L,日本)。每个监测点随机布设1处土壤容重采样点。不同层次土壤容重使用土壤环刀法测定,采样层次设置3层,分别为0～10、10～20、20～30 cm深度。

1.5　数据处理

R_s的计算公式如下:

$$R_s=\frac{H}{V_0}\times\frac{P}{P_0}\times\frac{T_0}{T_a}\times\frac{\Delta c}{\Delta t} \tag{1}$$

式中,R_s为土壤呼吸速率($\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$);$H$为静态箱高度(m);$V_0$为标准状态下的气体摩尔体积(0.022 4 $m^3\cdot mol^{-1}$);P和T_a为样地的气压(kPa)和气温(K);P_0和T_0为标准状态下的大气压和绝对温度,分别为101.3 kPa和273.2 K;$\Delta c/\Delta t$为气体浓度的变化率($\mu L\cdot L^{-1}\cdot s^{-1}$)。

使用van't Hoff指数方程拟合R_s和T的关系:

$$R_s=ae^{bT} \tag{2}$$

式中,R_s为土壤呼吸速率($\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$),a和b为拟合参数,$T$为5 cm深度土层土壤温度。$Q_{10}$描述了土壤呼吸的温度敏感性,计算公式如下:

$$Q_{10}=e^{10b} \tag{3}$$

土壤呼吸的年碳排放量的估算公示如下:

$$R_s\text{年排放量}=R_s\times60\times60\times24\times30\times12\times12\times10^{-6} \tag{4}$$

式中,R_s年排放量为每年土壤呼吸碳排放量($gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$),$R_s$为土壤呼吸速率($\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$),数字60、60、24、30、12、12、10分别表示60 $s\cdot m^{-1}$、60 $min\cdot h^{-1}$、24 $h\cdot d^{-1}$、30 $d\cdot m^{-1}$、12 $m\cdot a^{-1}$、C元素摩尔质量12 $g\cdot mol^{-1}$和10^{-6} $mol\cdot\mu mol^{-1}$。

不同植被类型R_s差异比较使用单因素方差分析,多重检验方法选择Duncan's post-hoc法。R_s与T和VWC的相关性分析使用Pearson法,双尾检验$\alpha=0.05$。双因子拟合模型中,T和VWC对R_s的相对重要性计算使用相对权重法,通过R语言中relweights( )函数计算[31]。统计分析使用IBM SPSS 20.0和R v. 3.6.0统计软件,图形绘制使用Origin 2021和Excel 2021。

2　结果与分析

2.1　环境因子对土壤呼吸年排放量的影响

如表1所示,环境因子在不同植被类型间均有显著差异($P<0.05$)。3种植被类型中,城市森林香樟的土壤表现为T、VWC和容重最低,而有机碳

最高,呈现出土壤相对凉爽、干燥、通气和有机碳丰富的土壤特征;香樟林的大气环境气温和光照强度最低,湿度最高,呈现出相对荫蔽和湿冷的特征。绿化用地马尼拉草和银杏的土壤表现为T、VWC和容重较高,有机碳较低,呈现土壤相对高温、潮湿、不通气和缺乏有机质的特征;大气环境中温度和光照强度最高,湿度较低,呈现透光和干热的特征。

R_s年排放量依次为香樟(892.01 gC·m^{-2}·a^{-1})>马尼拉草(735.30 gC·m^{-2}·a^{-1})>银杏(500.15 gC·m^{-2}·a^{-1}),且差异显著($P<0.05$)。不同植被对R_s年排放量的影响主要通过改变土壤水分、土壤容重和土壤有机碳含量。不同植被R_s年排放量与环境因子的相关分析表明,R_s年排放量与土壤含水量、土壤容重呈极显著负相关,与土壤有机碳含量呈显著正相关(表2)。进一步使用分层的土壤有机碳和容重分析后,发现R_s年排放量与10~20 cm深的容重和20~30 cm深的容重呈极显著负相关,相关系数均为0.7左右,且只与10~20 cm土壤有机碳含量呈极显著正相关,相关系数为0.82。

表1 不同植被类型环境因子比较

Table 1 Comparison of environmental factors between different vegetation types

植被类型 Vegetation type	土壤温度/℃ Soil temperature	土壤含水量/% Soil water content	空气温度/℃ Air temperature	湿度/% Humidity	光合有效辐射/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) PAR	容重/(g·cm^{-3}) Bulk density	有机碳含量/% Organic carbon content
银杏	24.6±0.1b	47.2±1.0a	23.7±0.1b	72.1±0.5a	665.5±8.5b	1.37±0.01a	0.80±0.07c
马尼拉草	26.6±0.3a	44.8±0.7a	24.7±0.1a	67.7±1.2b	890.5±23.2a	1.27±0.02b	1.14±0.07b
香樟	20.3±0.2c	33.9±0.5b	20.7±0.4c	74.5±1.5a	192.4±18.0c	1.21±0.01c	1.43±0.06a

注:同一列中的不同字母表示不同植被间有显著差异($P<0.05$)

Note: Different letters in the same column showed significant differences at the 0.05 level among different vegetation types

2.2 不同城市绿地类型土壤温度、水分和土壤呼吸的月动态

如图3所示,绿化景观银杏和马尼拉草的R_s月变化规律基本一致,呈双峰曲线,最大值分别出现在5月和9月,而城市森林香樟R_s为单峰曲线,最大值在9月。各植被类型R_s月均值差异显著($P<0.05$),大小依次为香樟(2.39 μmol·m^{-2}·s^{-1})>马尼拉草(1.97 μmol·m^{-2}·s^{-1})>银杏(1.34 μmol·m^{-2}·s^{-1})。在8月、9月和10月,香樟的R_s均显著大于马尼拉草和银杏;在7月,香樟的R_s显著大于银杏;在4月和5月,马尼拉草的R_s显著大于香樟($P<0.05$)。在11月、12月、1月、2月、3月和6月,3种植被间没有显著差异。

绿化景观和城市森林的T基本呈单峰曲线,最大值出现在8月,最小值出现在12月(图3),且不同城市绿地T的月均值差异显著($P<0.05$),大小依次为马尼拉草(26.6 ℃)>银杏(24.6 ℃)>香樟(20.3 ℃)。马尼拉草的T在各月均显著高于香樟($P<0.05$);除1月、6月和10月外,银杏的T均显著高于香樟($P<0.05$);马尼拉草的T在1月、4月、5月、6月、7月、10月显著高于银杏($P<0.05$)。

城市森林香樟的VWC呈单峰型,最大值出现在7月,为40.5%,最小值出现在1月,为18.6%,而绿化景观VWC基本在35%至55%之间波动,最大值出现在8月,最小值出现在1月(图3)。且银杏和马尼拉草的VWC年均值(分别为47.2%和44.8%)显著大于香樟(33.9%;$P<0.05$)。除1月和4月,其余月份银杏的VWC均显著大于香樟($P<0.05$)。除4月、6月和9月,马尼拉草VWC均显著大于香樟($P<0.05$)。

2.3 土壤水热因子对土壤呼吸月动态的影响

基于线性、对数、二次曲线、三次曲线、幂函数、指数函数模型对T与R_s之间的关系进行拟合发现,指数函数拟合效果最好。如图4a所示,3种植被类型R_s均随T升高而增加,均有显著正相关关系($P<0.01$),且T对银杏、马尼拉草和香樟R_s变化解释程度分别达到59.0%、57.4%和51.1%。不同城市绿地Q_{10}值存在显著差异($P<0.05$),银杏的Q_{10}最小为2.14,香樟的Q_{10}最大为2.48,马尼拉草的Q_{10}居中为2.37,表明香樟R_s对T变化更敏感,容易随着T的升高而增加。

马尼拉草的R_s和VWC的相关关系不显著,银杏和香樟林的R_s和VWC显著相关($P<0.05$)。所以使用线性函数拟合logR_s和VWC的关系,3种

表2　土壤呼吸年排放量与环境因子的相关系数

Table 2　Pearson correlation coefficient among soil respiration and environmental factors

	土壤呼吸 Soil respiration	土壤温度 Soil temperature	土壤含水量 Soil water content	空气温度 Air temperature	湿度 Humidity	光合有效辐射 PAR	容重 Bulk density
土壤温度	−0.52						
土壤含水量	−0.85**	0.86**					
空气温度	−0.55	0.99**	0.88**				
湿度	0.08	−0.85**	−0.52	−0.84**			
光合有效辐射	−0.52	0.99**	0.86**	0.99**	−0.84**		
容重	−0.87**	0.53	0.85**	0.58	−0.18	0.52	
有机碳	0.86**	−0.62	−0.89**	−0.68*	0.27	−0.61	−0.96**

注:*表示相关系数显著($P<0.05$),**表示相关系数极显著($P<0.01$)

Note: * indicated significant correlation ($P<0.05$), ** indicated highly significant correlation($P<0.01$)

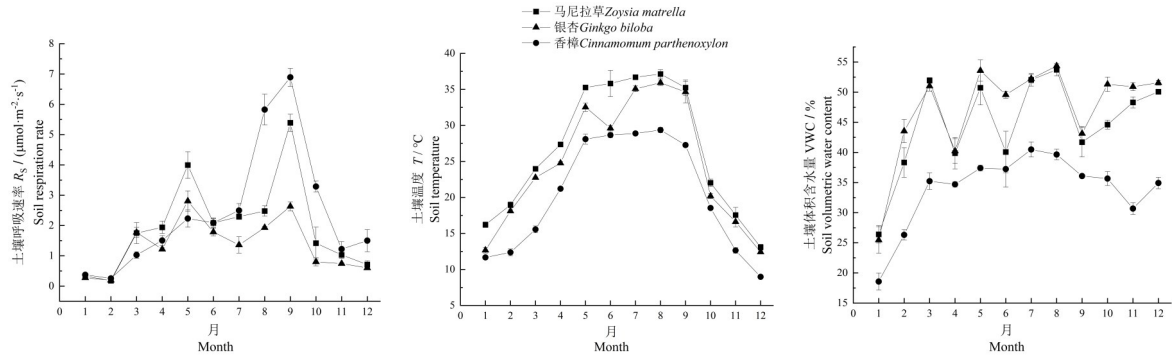


图3　3种植被的R_s、T和VWC的月变化

Fig. 3　Monthly variations of R_s, T and VWC of three vegetation types

植被类型的线性拟合结果均极显著($P<0.01$)。线性函数的拟合结果表明,VWC对香樟logR_s变化的解释程度最高,为55.6%,对银杏和马尼拉草解释程度较低,分别为23.3%和19.8%(图4b)。香樟R_s对VWC变化更敏感,容易随VWC的升高而增加。

用双因子模型(logR_s=a+b×T+c×VWC)进一步分析T和VWC对R_s的解释率。结果表明,3种植被类型利用双因子模型拟合精度均高于单因子模型,3种植被类型双因子模型的解释率分别为63.0%、63.9%和64.0%(表3)。T解释了银杏、马尼拉草R_s模型80%左右,VWC解释了银杏、马尼拉草R_s模型20%左右,表明T是银杏和马尼拉草的R_s重要的预测变量。T解释了香樟R_s模型46.4%,VWC解释了53.6%,表明对于香樟的R_s,T和VWC都是重要的预测变量,并且VWC的重要性略高于T(表3)。

3　讨论

3.1　不同植被类型对土壤呼吸年排放量的影响

本研究中城市森林香樟的R_s年排放量显著大于绿化景观马尼拉草和银杏,这与Schimel等[32]研究发现城市化引起了土壤呼吸降低相似。主要归因于香樟林的容重更小,土壤有机碳含量更高。容重小表明土壤质地更疏松,透气性好。有机质含量高表明土壤中可被矿化的碳更多。二者均有助于土壤微生物活动排放碳。尽管不同植被间,土壤呼吸与土壤含水量呈负相关关系,但不意味着土壤水分条件越好,土壤呼吸越低。推测是由于在香樟林中,植被盖度较高,较高的蒸散和截留,使得土壤含水量较低。

植被和土地利用会影响土壤理化性状,有研究认为天然植被的土壤养分含量高于人工植被[33]。这与本研究的结果相似,表现为城市森林香樟的土壤有机碳含量高于绿化景观银杏和马尼

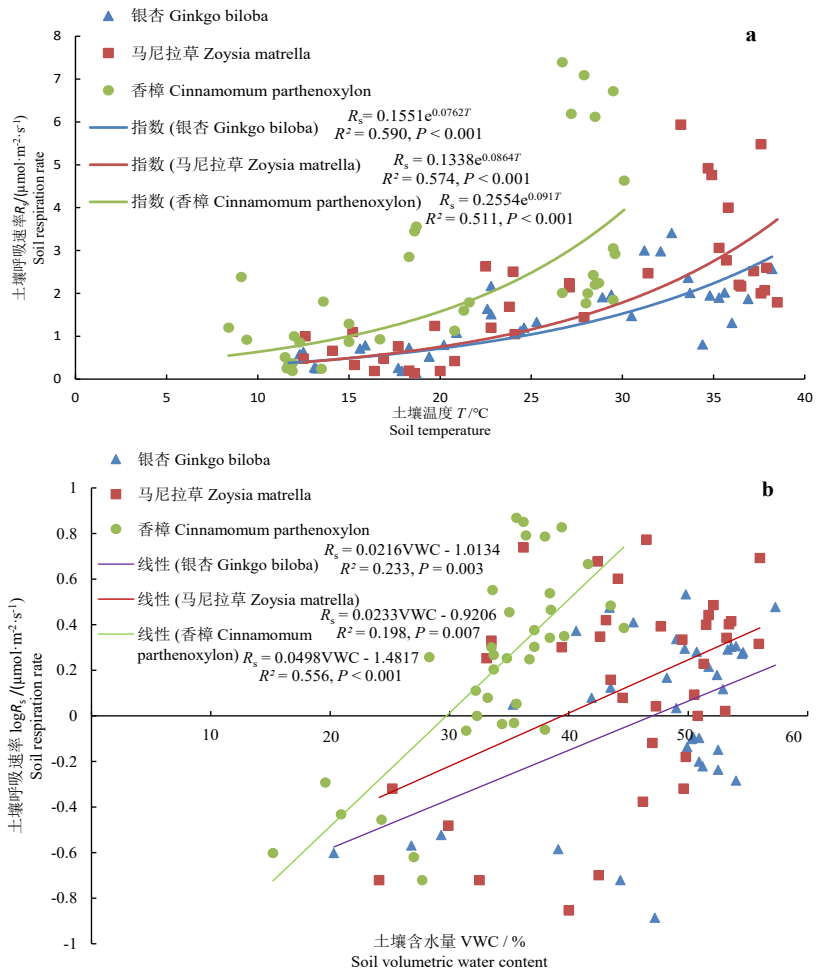


图4 不同植被类型 R_s 与 T 和 VWC 的关系

Fig. 4 Relationship of R_s with T and VWC for different vegetation types

表3 土壤温度和土壤含水量对土壤呼吸的效应

Table 3 The effects of T and VWC on soil respiration in different vegetation types

植被类型 Vegetation type	拟合模型 Regression equtation	R^2	温度权重 Temperature relative weight	含水量权重 Water relative weight
银杏	logR_s=−1.164+0.0294T+0.009 4VWC	63.0%**	78.5%	21.5%
马尼拉草	logR_s=−1.390+0.0341T+0.013 6VWC	63.9%**	79.6%	20.4%
香樟	logR_s=−1.344+0.0218T+0.032 7VWC	64.0%**	46.4%	53.6%

注:R_s为土壤呼吸速率,T为5 cm深土壤温度,VWC为土壤体积含水量,R^2为拟合系数,**表示P<0.01

Note: R_s: soil respiration; T: the temperature of soil at a depth of 5 cm; VWC: soil volumetric water content; R^2: the coefficient of determination; ** indicated P<0.01

拉草。土壤容重表现为香樟<马尼拉草<银杏,故土壤的透气性为香樟>马尼拉草>银杏。其原因可能是香樟林位于景山公园较偏僻的区域,且地表土壤极少受人为踩踏,而银杏和马尼拉草地位于公园入口,一年四季均有游客开展游憩活动,故压实地表土壤。马尼拉草土壤的容重小于银杏,可能是因为银杏种植过程中对土壤扰动大,翻动填压土壤导致,另外马尼拉草的地表植被明显比银杏茂密,有助于分担游客的踩踏压强,减缓土壤容重增加。未来的研究可以进一步细化反映不同人类活动的指标,进而为城市绿地的固碳功能提供理论支撑。

3.2　土壤呼吸的季节变化

本研究结果发现城市公园绿地3种植被类型的R_s变化趋势呈双峰或单峰曲线,这与纬度相似的福州市研究结果基本一致[34]。而不同植被R_s的最大值均出现在夏末秋季,与T峰值和植物生长旺季重合。这归因于植物在生长季有很强的光合作用,能够向根部输送更多的有机物,加上T较高,植物根系和土壤微生物活动频繁,进而促进了土壤自养呼吸和异养呼吸。本研究中3种植被类型R_s均在9月份出现最大值,而温度更高的8月其R_s较低,与天津市国槐梨树林[21]、天津市国槐银杏林[20]、上海市百慕大草坪[17]、南京市狗牙根-马尼拉草坪和疏林[35]、北京市乔木林[8]的R_s的结果相似,即R_s最大值出现的月份较T最高值月份推迟1个月。这可能是由于在8月,R_s不仅受T影响,还受土壤水分过高的抑制作用。VWC过高时会影响土壤孔隙中氧气的扩散,植物根系和微生物的活动被抑制,有机碳的分解速率降低,综合导致了土壤呼吸的下降。我国的热带和亚热带地区,受季风气候影响,大量集中降水造成土壤孔隙被雨水占据,阻碍土壤和大气气体交换,土壤呼吸作用减弱[36]。8月份马尼拉草和银杏的VWC达到53.7%和54.3%,是全年VWC最高值。香樟的VWC也达到39.7%。当VWC超过田间持水量时,土壤呼吸受到抑制[37]。

3.3　土壤温度、体积含水量对土壤呼吸季节动态的影响

土壤温度是调控土壤呼吸的重要环境影响因子,二者常用指数模型或线性模型拟合。原因在于,土壤呼吸本质上是酶促反应[38],而土壤温度可以调控酶的活性,而酶活性变化可直接或间接地影响土壤中微生物新陈代谢、根系分泌物及有机质的分解过程,最终影响土壤呼吸。与其他研究结果相似[20,39],本研究中R_s与T呈显著的指数模型,并且3种植被类型的T对R_s的解释率介于50%~60%。大多数城市绿地,拟合模型中T对R_s变化的解释率可达60%~85%[16,34,40],更有少数研究达到90%以上[41]。尽管本研究中,R_s与T呈显著指数关系,但R_s对T的变化影响仍存在季节滞后性。T相近时,除银杏外,5月的R_s均要低于9月。这可能是由于9月深层土温高于5月,使得土壤微生物异养呼吸和根系自养呼吸增加。在本研究中,马尼拉草和香樟的Q_{10}分别为2.36和2.48,接近全球Q_{10}中值2.4[42],高于中国Q_{10}均值2.26[43]。银杏的Q_{10}为2.14,低于中国Q_{10}均值[43],与上海市的银杏群落Q_{10}(2.03)接近[41]。

VWC是影响公园绿地土壤呼吸的另一重要环境因子,可通过影响土壤微生物与植物根系的生理活动、凋落物分解、土壤的通透性和CO_2扩散等调节土壤呼吸[37]。本研究中,VWC对R_s的变化的解释率较低,银杏和马尼拉草仅为20%左右。并且VWC的解释程度低于T,这与福州[16]、上海[17,41]、南京[35,40]和广州[15]城市绿地的研究结果相似。但香樟的VWC对R_s的解释率达到55.7%,甚至高于T,这与昆明城市绿地的研究结果相似[44]。可能是由于城市森林香樟覆盖度较高,遮阴作用明显,使得全年T变化范围为7.5~30 ℃,小于银杏和马尼拉草,且最高温度较银杏和马尼拉草低10 ℃。另一方面,本研究中城市森林香樟没有灌溉,土壤水分来源依赖于自然降水,表现出明显的水热同期;而绿地随干湿季节变化均有灌溉,导致VWC季节波动小于森林。人为灌溉不仅减少了VWC的季节波动,还在总体上提高了VWC均值,最终导致城市绿地的VWC对土壤呼吸季节变化的解释率远低于城市森林,土壤呼吸表现为温度调控。这与李泽霞等[45]研究结果相似,灌水量高的人工林温度对土壤呼吸的解释率明显高于灌溉量少的人工林。本研究中,水分成为限制城市森林香樟林土壤呼吸更重要的因素。

由于土壤水热条件互相作用,本研究综合了T和VWC,使用双因子指数复合模型拟合R_s的变化,解释能力均超过60%,尤其是香樟的R^2提高了8.6%。本研究中3种植被类型的水热双因子模型的解释能力均高于单因子模型,这与之前研究结果相同[15-16,39]。但也有少数研究结果表明温度水分复合模型对R_s变化的解释能力提高不显著,甚至降低解释能力[21],可能是由于不同区域环境因子,不同植被对土壤水热因子的响应趋势不同导致。本研究中,不同植被类型的复合模型对R_s解释率的提升程度也不同。还有研究认为T和植物生物量是调控R_s变化的主要因子[46]。城市绿地R_s受总磷、总钾、有效钾和真菌的积极影响[20]。当研究年际间城市森林R_s的变化时,春季降雨量和T又成为调控R_s的主要因子[19]。因此在未来的城市

绿地R_s影响因素研究中,除了要考虑土壤水热因子,还需要增加土壤化学元素、细菌真菌、植物细根生物量等植被因素和气象因素,综合探究调控城市绿地R_s的主要影响因素。本研究中,城市森林的香樟R_s的季节动态主要受T和VWC共同影响,且VWC的解释权重更大,而绿化景观银杏和马尼拉草主要受T影响。

4 结论

城市森林香樟R_s的季节动态主要受T和VWC共同影响,且VWC的解释权重更大,而绿化景观银杏和马尼拉草主要受T影响。相较于单因子模型,双因子模型的解释能力均有提高,模型为$\log R_s = a + b \times T + c \times VWC$。$R_s$年排放量为城市森林香樟(892.01 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)最高,绿化景观马尼拉草(735.30 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)居中,绿化景观银杏(500.15 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)最小,且不同植被间的差异主要受土壤有机质和土壤容重调控。

参考文献

[1]Acosta M, Darenova E, Krupková L, et al. Seasonal and inter-annual variability of soil CO_2 efflux in a Norway spruce forest over an eight-year study [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256-257: 93-103.

[2]Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48: 7-20.

[3]United Nations Department of Economic and Social Affairs. World urbanization prospects: the 2018 revision [EB/OL]. [2023-11-02]. https://population. un. org/wup/publications/Files/WUP2018-Report.pdf.

[4]Hutyra L R, Duren R, Gurney K R, et al. Urbanization and the carbon cycle: current capabilities and research outlook from the natural sciences perspective[J]. Earth's Future, 2014, 2(10): 473-495.

[5]Churkina G. The role of urbanization in the global carbon cycle [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2016, 3: 144.

[6]Liu Y B, Yao C S, Wang G X, et al. An integrated sustainable development approach to modeling the eco-environmental effects from urbanization [J]. Ecological Indicators, 2011, 11(6): 1599-1608.

[7]Zhang X X, Brandt M, Tong X W, et al. A large but transient carbon sink from urbanization and rural depopulation in China [J]. Nature Sustainability, 2022, 5(4): 321-328.

[8]Wu X G, Yuan J J, Ma S L, et al. Seasonal spatial pattern of soil respiration in a temperate urban forest in Beijing[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015,14(4): 1122-1130.

[9]陶晓,崔珺,徐俊,等.城市绿地土壤呼吸特点及影响因素[J].土壤通报, 2016, 47(1): 54-59.
Tao X, Cui J, Xu J, et al. Characteristics of soil respiration and its controlling factors in urban green-lands in Hefei, China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(1):54-59

[10]Garvey S M, Templer P H, Pierce E A, et al. Diverging patterns at the forest edge: soil respiration dynamics of fragmented forests in urban and rural areas[J].Global Change Biology, 2022, 28(9): 3094-3109.

[11]刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5437-5448.
Liu S R, Wang H, Luan J W. A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5437-5448.

[12]鲍芳, 周广胜. 中国草原土壤呼吸作用研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 713-726.
Bao F, Zhou G S. Review of research advances in soil respiration of grassland in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(6): 713-726.

[13]刘爽, 严昌荣, 何文清, 等. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 2919 - 2924.
Liu S, Yan C R, He W Q, et al. Soil respiration and it's affected factors under different tillage systems in dryland production systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(11): 2919-2924.

[14]Wu X G, Hu D, Ma S L, et al. Elevated soil CO_2 efflux at the boundaries between impervious surfaces and urban greenspaces [J]. Atmospheric Environment, 2016, 141: 375-378.

[15]吴亚华, 肖荣波, 王刚, 等. 城市绿地土壤呼吸速率的变化特征及其影响因子[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7462-7471.
Wu Y H, Xiao R B, Wang G, et al. Controlling factors of variation in soil respiration rate in urban green-space ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7462-7471.

[16]张静. 亚热带马尼拉草坪生态系统呼吸及影响因子[D]. 福州:福建师范大学, 2008: 20-21.
Zhang J. Ecosystem respiration and it's influencing factors of a subtropical manilagrass lawn [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2008: 20-21.

[17]孙倩, 方海兰, 梁晶, 等. 上海典型城市草坪土壤呼吸特征[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1572-1578.
Sun Q, Fang H L, Liang J, et al. Soil respiration characteristics of typical urban lawns in Shanghai[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(8): 1572-1578.

[18]Fu R X, Xu X N, Yu Y C, et al. Forest soil respiration response to increasing nitrogen deposition along an urban - rural gradient [J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 27: e01575.

[19]Li X H, Zha T S, Liu P, et al. Multi-year trend and interannual variability in soil respiration measurements collected in an urban forest ecosystem in Beijing, China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 316: 108877.

[20]Zhang C F, Li D S, Wei J Y, et al. Soil respiration and its responses to biotic and abiotic factors in patchy remnant forests and urban green landscapes of Tianjin, China [J]. Urban

Forestry & Urban Greening, 2020, 53: 126743.

[21]赵龙飞, 李德生, 张成芳, 等. 2种城市绿地土壤呼吸与温湿度关系[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(19): 291-295.
Zhao L F, Li D S, Zhang C F, et al. Relationship between soil respiration and temperature-moisture in two different types of urban green-space ecosystems [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(19): 291 - 295.

[22]Velasco E, Segovia E, Choong A M F, et al. Carbon dioxide dynamics in a residential lawn of a tropical city[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 280: 111752.

[23]陈丽涵,刘硕,林溢,等.城市草坪温室气体排放特征及影响因素[J].环境科学, 2023(12):6680-6691.
Chen L H, Liu S, Lin Y, et al. Characteristics and influencing factors of greenhouse fluxes from urban lawn [J]. Environmental Science, 2023(12):6680-6691.

[24]Koerner B, Klopatek J. Anthropogenic and natural CO_2 emission sources in an arid urban environment [J]. Environmental Pollution, 2002, 116: S45-S51.

[25]Bae J, Ryu Y. Spatial and temporal variations in soil respiration among different land cover types under wet and dry years in an urban park[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 167: 378-385.

[26]Kaye J P, McCulley R L, Burke I C. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems[J]. Global Change Biology, 2005, 11(4): 575-587.

[27]Shchepeleva A S, Vasenev V I, Mazirov I M, et al. Changes of soil organic carbon stocks and CO_2 emissions at the early stages of urban turf grasses' development [J]. Urban Ecosystems, 2017, 20(2): 309-321.

[28]温州市人民政府. 温州概览-自然地理[EB/OL]. (2023-03-24)[2023-10-07]. https://www.wenzhou.gov.cn/art/2023/3/24/art_1229240253_59201543.html.
Wenzhou Municipal People's Government. Wenzhou - natural geography [EB/OL]. (2023-03-24) [2023-10-07]. https://www. wenzhou. gov. cn/art/2023/3/24/art_1229240253_59201543.html.

[29]温州市统计局. 2022年温州统计年鉴[M/OL]. (2022-12-06)[2023-10-07]. https://zjjcmspublic. oss-cn-hangzhou-zwynet-d01-a. internet. cloud. zj. gov. cn/jcms_files/jcms1/web2076/site/attach/0/e4c8f45d853441edbee52996c32c626d.pdf.
Wenzhou Municipal Bureau of Statistics. Wenzhou statistical yearbook 2022[M/OL]. (2022-12-06)[2023-10-07]. https://zjjcmspublic. oss-cn-hangzhou-zwynet-d01-a. internet. cloud. zj. gov. cn/jcms_files/jcms1/web2076/site/attach/0/e4c8f45d853441edbee52996c32c626d.pdf.

[30]朱粲粲, 周忠发, 汤云涛, 等. 白云岩地区土壤呼吸日变化及其与土壤温湿度的响应关系[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 1947-1956.
Zhu C C, Zhou Z F, Tang Y T, et al. Diurnal variation of soil respiration and its response to soil temperature and humidity in the dolomite region [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(8): 1947-1956.

[31]Johnson J W. A heuristic method for estimating the relative weight of predictor variables in multiple regression [J]. Multivariate Behavioral Research, 2000, 35(1): 1-19.

[32]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.

[33]马玉红,郭胜利,杨雨林,等. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响[J]. 自然资源学报,2007, 22(1): 97-105.
Ma Y H, Guo S L, Yang Y L, et al. Influence of vegetation types on soil organic C at yangou catchment in the loess hilly-gully region[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(1): 97-105.

[34]沈健, 何宗明, 董强, 等. 环境因子对沿海防护林土壤呼吸季节动态的影响[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(6): 640 - 647.
Shen J, He Z M, Dong Q, et al. Effects of environmental factors on seasonal dynamics of soil respiration in coastal protection forests [J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(6): 640-647.

[35]徐娇. 南京城市绿地不同植被类型土壤呼吸的研究[D]. 南京:南京林业大学, 2009: 20-23.
Xu J. A study on soil respiration in different vegetation types of urban green spaces in Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009: 20-23.

[36]于珍珍,王宏轩,邹华芬, 等. 加气灌溉下红壤土呼吸速率变化及其与土壤水氧的关系[J]. 热带作物学报, 2022, 43(1): 110-118.
Yu Z Z, Wang H X, Zou H F, et al. Changes of red soil respiration rate under aerated irrigation and its relationship with soil water and oxygen[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(1): 110-118.

[37]陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 972 - 978.
Chen Q S, Li L H, Han X G, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 972-978.

[38]Baldrian P, Šnajdr J, Merhautová V, et al. Responses of the extracellular enzyme activities in hardwood forest to soil temperature and seasonality and the potential effects of climate change[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 56:60-68.

[39]严俊霞, 汤亿, 李洪建. 城市绿地土壤呼吸与土壤温度土壤水分的关系研究[J]. 干旱区地理, 2009, 32(4): 604-609.
Yan J X, Tang Y, Li H J. Soil respiration and its relations to environmental factors over three urban vegetation covers [J]. Arid Land Geography, 2009, 32(4): 604-609.

[40]张鸽香, 徐娇, 王国兵, 等. 城市3种类型人工林土壤的呼吸动态特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(3): 43-48.
Zhang G X, Xu J, Wang G B, et al. Seasonal variations of soil respiration in three different urban plantations in Nanjing [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2011, 35(3): 43-48.

[41]梁晶, 方海兰, 郝冠军, 等. 上海城市绿地不同植物群落土壤呼吸及因子分析[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(1):

22-31.
Liang J, Fang H L, Hao G J, et al. Soil respiration for different plant communities in an urban green-belt of Shanghai [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2013, 30(1): 22-31.
[42]Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1992, 44(2): 81-99.
[43]展小云, 于贵瑞, 郑泽梅, 等. 中国区域陆地生态系统土壤呼吸碳排放及其空间格局——基于通量观测的地学统计评估[J]. 地理科学进展, 2012, 31(1): 97-108.
Zhan X Y, Yu G R, Zheng Z M, et al. Carbon emission and spatial pattern of soil respiration of terrestrial ecosystems in China: based on geostatistic estimation of flux measurement [J]. Progress in Geography, 2012, 31(1): 97-108.
[44]王邵军, 王红, 李霁航. 土壤温度与水分对昆明城市绿地土壤呼吸时间动态的影响[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 306-310.
Wang S J, Wang H, Li J H. Effects of soil temperature and moisture on the temporal variations of soil respiration under forest and lawn in Kunming[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(5): 306-310.
[45]李泽霞,陈爱华,田晋华. 不同灌溉方式对侧柏人工林土壤呼吸的影响[J]. 节水灌溉, 2023(9):100-104,113.
Li Z X, Chen A H, Tian J H. Effects of different irrigation methods on soil respiration of *Platycladus orientalis* plantation [J]. Water Saving Irrigation, 2023(9):100-104,113.
[46]李熙波, 杨玉盛, 曾宏达, 等. 亚热带沟叶结缕草草坪土壤呼吸[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2096-2105.
Li X B, Yang Y S, Zeng H D, et al. Soil respiration of Zoysia matrella turfgrass in subtropics [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2096-2105.

Soil respiration characteristics and influencing factors in urban green spaces of Wenzhou, China

Huang Qi[1,2], Yu Feng[1,2], Quan Wei[2,3], Kang Huajing[1,2], Ying Miaomiao[1,2*]

(*1. Wenzhou Academy of Agricultural Sciences, Wenzhou 325006, China; 2. Wenzhou Key laboratory of Adding Carbon Sinks and Reducing Carbon Emissions of Agricultural, Forestry and Fishery Ecosystem, Wenzhou 325006, China; 3. Zhejiang College of Security Technology, Wenzhou 325016, China*)

Abstract: [Objective] With the increasing area of urban green space, understanding the soil respiration dynamics in different types of green space is crucial for accurately assessing their carbon sink functions. This study aims to elucidate the variations in soil respiration and its influencing factors in different types of urban green spaces in order to provide a theoretical basis for achieving low-carbon emission goals. [Methods] In this study, forested area with Camphor trees (*Cinnamomum parthenoxylon*) and landscaped areas with Manila grass (*Zoysia matrella*) and Ginkgobiloba (*Ginkgo biloba*) in Wenzhou were selected as the research objects. Soil respiration rates (R_s) was measured using a static chamber-gas chromatography method from January to December 2021 in Wenzhou Jingshan Park. [Results] The results showed: (1) the annual R_s emissions were ranked in the order of *Cinnamomum parthenoxylon* (892.01 gC·m^{-2}·a^{-1}) > *Zoysia matrella* (735.30 gC·m^{-2}·a^{-1}) > *Ginkgo biloba* (500.15 gC·m^{-2}·a^{-1}). The annual Rs emissions were significantly positively correlated with soil organic carbon content and significantly negatively correlated with soil bulk density; (2) Exponential function fitting showed that soil temperature (T) had a high explanatory power for the monthly dynamics of R_s in *Z. matrella*, *G. biloba*, and *C. parthenoxylon*, accounting for 57.4%, 59.0% and 51.1%, respectively; Soil volumetric water content (VWC) had a much higher explanatory power for the monthly dynamics of R_s in *C. parthenoxylon* (55.6%) compared to the other two vegetation types. *C. parthenoxylon* showed higher sensitivity to changes in both *T* and VWC compared to the two landscaped areas; (3) Two-factor models further indicated that VWC was slightly more important than *T* in predicting changes in R_s in *C. parthenoxylon*, while *T* was much more important than VWC in influencing R_s in the two landscaped areas. [Conclusion] Soil respiration in Wenzhou's urban forest was higher than in landscaped area, and the month dynamics were jointly affected by *T* and VWC. Soil respiration in landscaped areas was mainly affected by *T*. The differences in annual soil respiration emissions among different green areas were attributed to differences in soil organic carbon and bulk density.

Keywords: Urban green space, Soil respiration, Vegetation type, Soil temperature, Soil volumetric water content

(编辑:郭玥微)