

广州大学城不同绿地类型土壤碳通量特征分析^{*}

冯婷诗¹ 林敏丹² 许展颖¹ 林妙君¹ 陈小梅¹

(1. 广州大学 地理科学与遥感学院, 广东 广州 510006; 2. 广州市少年宫, 广东 广州 510170)

摘要 2018 年 7 月—2019 年 6 月采用 LI-8100A 土壤碳通量测量系统监测广州大学城内公园绿地、道路防护绿地、文教区绿地、居住区绿地、生产绿地等 5 种功能区内的 6 个绿地土壤碳通量年、日变化特征, 并测定土壤理化性质和微气候环境因子等以揭示大学城不同城市绿地利用类型土壤碳通量的时空变化特征及其影响因素。研究发现: (1) 6 个绿地土壤碳通量具有明显的年际动态变化特征 ($P < 0.05$), 均呈湿季高于干季的不规则单峰曲线; (2) 6 个绿地土壤碳通量差异显著 ($P < 0.05$), 文教区绿地、道路绿地 (中环、外环) 和生产绿地全年土壤碳通量显著高于其他绿地类型; (3) 土壤温度与全年土壤碳通量呈现极显著的正相关 ($P < 0.05$), 干季时土壤碳通量与土壤湿度呈显著负相关 ($P < 0.05$); 土壤碳通量与 0~10 cm 土壤 C、微生物总量呈正相关, 与田间持水量呈负相关。研究结果表明: 广州大学城不同类型绿地土壤碳通量对环境因子的响应存在差异, 但土壤温度是调控绿地土壤碳通量季节变化的主要因子。

关键词 城市绿地; 土壤碳通量; 土壤温度; 土壤湿度

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2022) 06-0150-09

Characteristics of Soil Carbon Flux in Different Types of Green Spaces in Guangzhou University Town

FENG Tingshi¹ LIN Mindan² XU Zhanying¹

LIN Miaojun¹ CHEN Xiaomei¹

(1. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

2. Guangzhou Children's Palace, Guangzhou, Guangdong 510170, China)

Abstract LI-8100A soil carbon flux measurement system was used to monitor the annual and daily variations of soil carbon (C) flux in six green spaces that located in five functional areas (i.e., park, road protection area, cultural and educational area, residential area, and agricultural planation area) of Guangzhou University Town from July 2018 to June 2019. Soil physical and chemical properties, as well as microclimate environmental factors, were measured to reveal potential reasons for the temporal and spatial variations of soil C flux in these urban green spaces. Results showed that: (1) the soil C flux in the six green areas exhibited significant seasonal dynamic ($P < 0.05$), and showed an irregular single-peak curve with the soil C flux being higher in wet season than in dry season. (2) The annual soil C flux was significantly different in the six green belts ($P < 0.05$), because the cultural and educational area green belt, two road green belts and agricultural green belt had significantly higher soil C flux rate than the others. (3) Soil temperature showed a significant positive correlation with soil C

^{*} 基金项目: 广东省科技计划项目 (2019A141405026), 广州大学“攀登计划”广东省科技创新战略专项 (pdjh2021b0399), 广州市科技计划 (201804010159)。

第一作者: 冯婷诗 (2000—), 女, 在读本科, 研究方向为城市土壤与生态健康, E-mail: 792899420@qq.com。

通信作者: 陈小梅 (1985—), 女, 副教授, 主要从事环境变化与生态系统过程的研究, E-mail: chxm-009@163.com。

flux within the investigation period ($P < 0.05$), whereas a significant negative correlation was observed between soil C flux and soil moisture in dry season ($P < 0.05$). Moreover, soil C flux was positively correlated with soil C and total microbial biomass C contents in 0-10 cm soil layer, and negatively correlated with water holding capacity. These results suggest that the responses of soil C fluxes in various green spaces in Guangzhou University Town to environmental factors were different, and soil temperature mainly controls the seasonal change of soil C flux in the green spaces.

Key words Urban green space; soil carbon flux; soil temperature; soil moisture

土壤碳通量是生态系统中有有机碳物质对外输出的主要途径, 是土壤向空气排放 CO_2 的关键环节^[1]。全球陆地生态系统年平均土壤碳排放估算总量为 72.6 Pg C^[2], 约是年平均燃烧化石能源所释放碳量的 8 倍^[3]。土壤 CO_2 释放研究对估算未来大气 CO_2 浓度及全球气候变化具有重要的意义。城市绿地作为城市生态系统中的重要子系统^[4], 对城市及全球的碳平衡起到促进作用。随着城市化进程加快, 城市建设用地面积快速扩张, 城市绿地类型越来越丰富, 土壤碳通量受到非生物因子和生物因子的综合影响^[5], 其中人类活动影响日益突出^[6]。因此, 弄清不同绿地类型土壤碳通量特征, 对碳中和背景下城市绿地管理具有重要意义。

目前土壤通量研究已在草原、森林、农田、湿地、荒漠等几乎所有陆地生态系统进行, 主要研究领域涉及土壤碳通量特征及其影响因素^[7-9]。近年来, 城市绿地土壤 CO_2 通量特征及其影响因素日益受到关注。陶晓等^[10]在合肥市四种不同类型城市绿地土壤研究发现城市绿地土壤呼吸夏季明显高于冬季, 且最高值出现在夏季持续降雨后。马莉在宝鸡市疏林地和草地土壤中发现它们土壤表层呼吸日动态变化为单峰曲线, 草地土壤呼吸速率大于疏林地^[11]。土壤碳通量主要影响因素是土壤温度和土壤湿度^[12-13], 且土壤碳通量与土壤温度二者之间存在着显著的相关关系, 以指数模型^[14-15]最为典型。此外, 气候、温度、降雨量、土壤特性、植被类型等也会影响不同区域城市绿地土壤碳通量的时空变化特征^[11]。城市绿地与自然生态系统的土壤碳通量存在较大差别, Schimel 等^[15]发现干旱和半干旱地区的城市化会引起土壤碳通量的下降; 罗上华等^[16]发现城市绿地的土壤碳通量比农梗土壤和天然土壤更高。前人研究主要集中在北亚热带及以北地区, 而南亚热带地区

城市绿地土壤碳通量特征的研究相对较少, 且不同区域的土壤碳通量特征研究结果不同, 土壤碳通量影响机制仍解释不清。

因此, 本研究以广州大学城绿地为研究现象, 选取公园绿地、道路防护绿地(中环、外环)、文教区绿地、居住区绿地、生产绿地五种不同功能绿地, 探讨大学城不同绿地利用类型土壤碳通量的时空变化特征, 以为低碳城市建设提供决策参考。

1 材料与方法

1.1 样地选取与设置

根据各功能区绿地的功能结构、开发利用现状以及人类活动强弱^[11], 结合实际用地情况, 本研究选取公园绿地、道路防护绿地、文教区绿地、居住区绿地、生产绿地等 5 种功能区的 6 个绿地作为研究样地(图 1)。其中, 公园绿地位于大学城中心湖公园中游客干扰频率较少的区域; 道路防护绿地设置在大学城中环道路和外环道路, 中环道路日常车流量和人流较外环大; 文教区绿地位于广州大学气象园, 此处主要用于科研与教学, 受其他因素干扰少; 居住区绿地位于广州大学菊苑生活区中的绿化地; 生产绿地位于大学城北亭村的农用地。在选定的 6 个样地各设置 3 个监测点并安置 PVC 土壤环, 使气室底座高出土壤表面 5 cm 以保证气室偏移量尽可能准确。为减少对土壤的干扰, 观测期尽量使土壤环留在原地, 而对于不能长期安置土壤环的样地, 测量前 24 h 前去安置土壤环。碳通量观测时间为 2018 年 7 月—2019 年 6 月。

1.2 样品采集与处理

2018 年 7 月, 在上述 6 个样地内各随机布置 3 个呈三角形分布的平行样点, 使用内径 5 cm 的土钻随机采集 0~10 cm、10~20 cm 两个土层的土

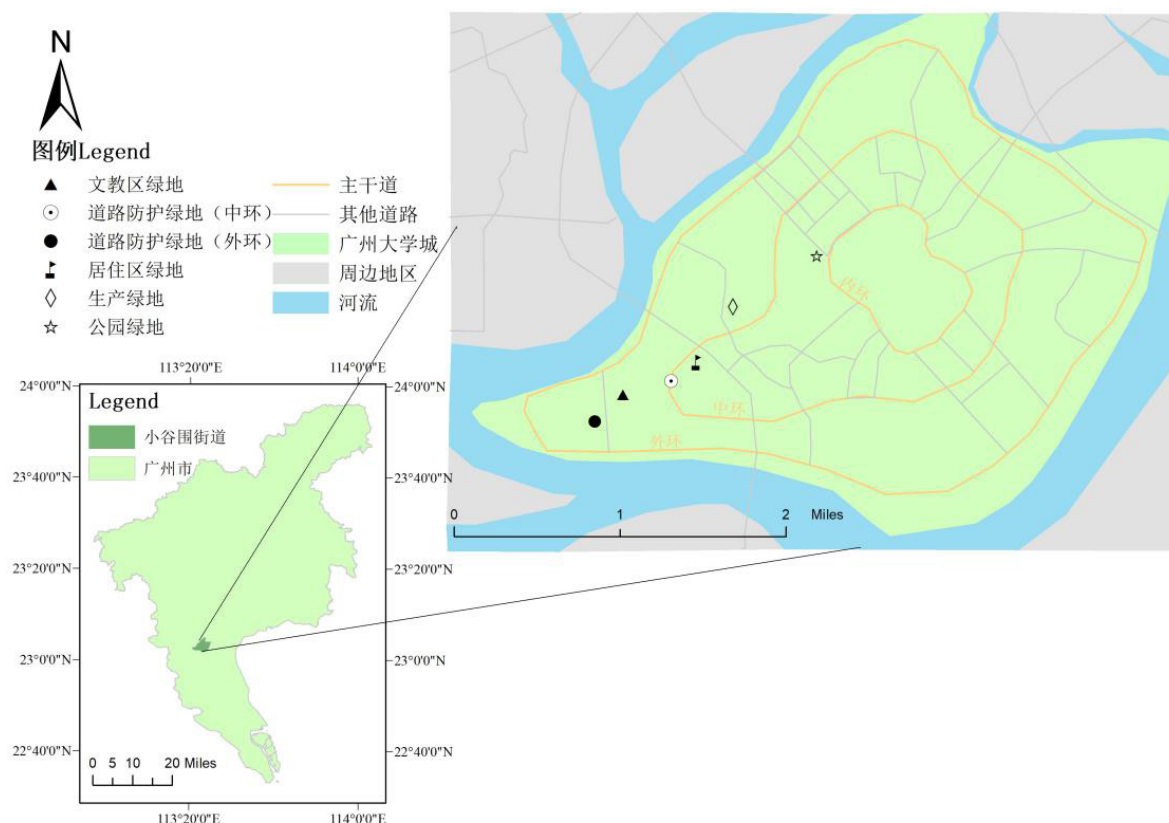


图 1 试验样地布局

Figure 1 Layout of experimental plots

壤。每个样地的土壤样品由 3 个样方同一层次的土壤样品混合而成,共采集土壤样品 12 个。将所采的新鲜土壤样品中植物的根系、残体和易见的土壤小动物等去除,过 2 mm 筛并均匀混合,选取三分之一新鲜土壤样品袋密封,并储存在 4℃ 的低温下,以供微生物生物量测定;另外三分之二进行风干,过 0.25 mm 筛后袋封保存,以供土壤总有机碳的测定。

1.3 样品测定与分析

1.3.1 土壤碳通量测定 在观测期间每月的中下旬无雨的 8:30—10:30 时段,采用土壤碳通量自动测量系统 (LI-8100A, LI-COR, USA) 观测土壤碳通量,每个测试点每次测定 3 次,并选取平均值。在干季与湿季分别选择无雨的两天的,对每个样地进行碳通量日变化的测定,每次测定从早晨 8:00 时到晚上 20:00 时,每 2 h 测定一次。每次监测之前,先清除土壤环内的凋落物以及新鲜植物的苗体,以减少地表植物释放出的 CO_2 对测定结果产生的影响,但尽量减少对土壤的干扰。

1.3.2 其他环境因子的测定 在测定土壤碳通量的同时,使用仪器自带的土壤湿度、温度传感器

测定每个样地的土壤温度和土壤湿度,并监测实验样地中的大气因子,测定时间与测定土壤碳通量的同时。使用便携气象追踪仪 (Kestrel4500, USA) 测定环境因子,如大气温度、大气相对湿度、大气压强、平均风速等。此外,对有机质的测定采用重铬酸钾外加热法,土壤微生物含量采用磷脂脂肪酸法^[17]。

1.4 数据处理

利用 Excel2019 和 SPSS23.0 进行数据统计分析。运用 Excel 软件绘制不同绿地类型碳通量、土壤温湿度的年变化、日变化趋势曲线;用单因素方差分析法 (LSD 法) 判断不同绿地类型、不同月份的土壤碳通量、土壤温度、土壤湿度之间的差异 ($P < 0.05$);利用 Pearson 相关系数对土壤碳通量与各环境因子之间进行相关分析 ($P < 0.05$)。

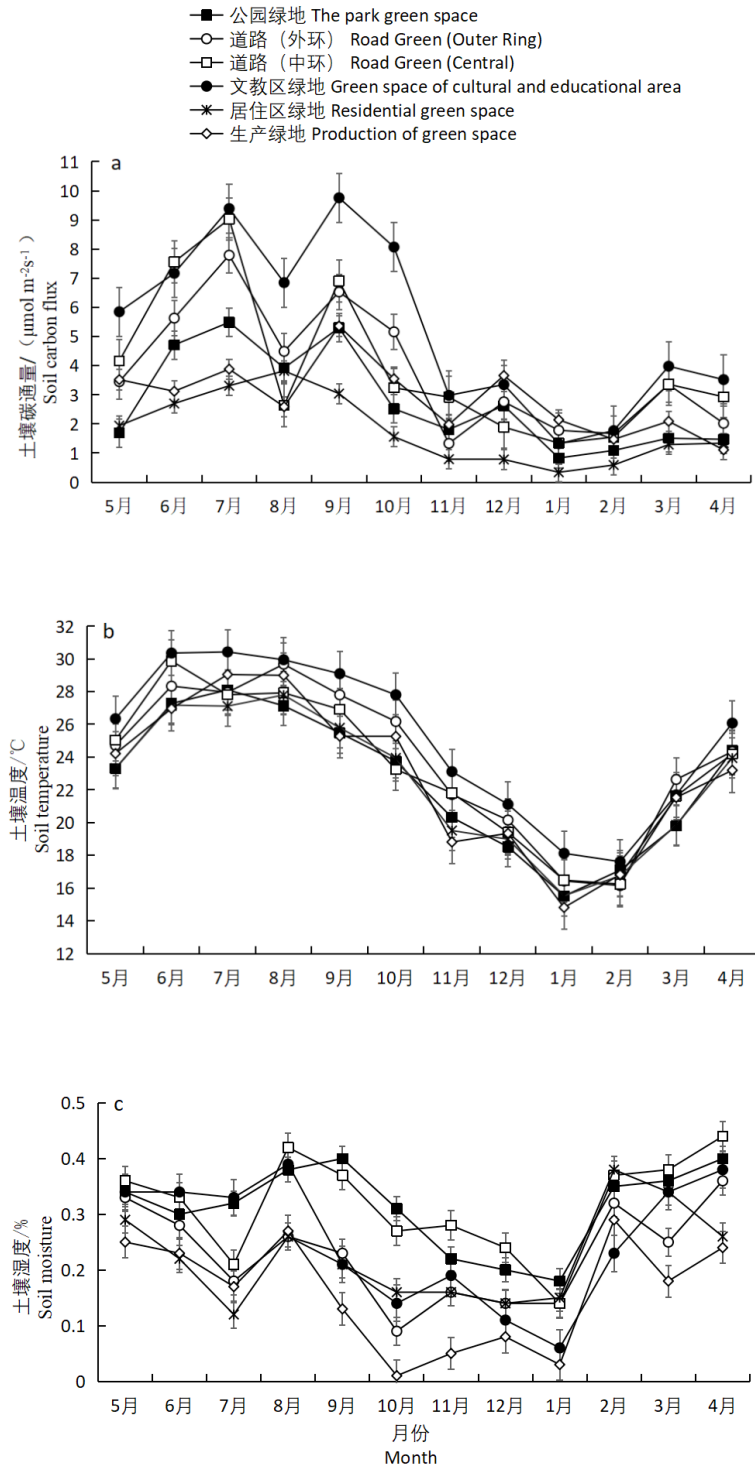
2 结果与分析

2.1 不同绿地类型土壤碳通量、温湿度年际变化

从图 2-a 中可以看出,6 个绿地土壤碳通量具有分明的年际动态变化特征 ($P < 0.05$),均呈湿季 (5 月至 10 月) 高于干季 (11 月至

次年4月)的不规则单峰曲线,且湿季土壤碳通量变化($1.94\sim 9.76\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)较干季($0.34\sim 3.98\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)明显。湿季监测期内,土

壤碳通量大约在8月份时呈现一个较低值。土壤碳通量与土壤温度、大气温度呈极显著正相关($P<0.01$,表1)。各类型绿地的土壤碳通量最大值



注：横坐标月份表示为2018年到2019年4月，误差线为标准误差。

Note: the abscissa months are from 2018 to April 2019, and the error lines are standard errors.

图2 广州大学城不同绿地类型土壤碳通量、温度和湿度年际变化

Figure 2 Interannual variation of soil carbon flux, temperature and moisture in different green space types in Guangzhou university town

出现在 7—9 月 (夏季), 从 10 月开始, 随月均温度的下降, 土壤碳通量呈现逐渐减少趋势, 次年 1—2 月 (冬季) 达到最低值 (图 2-a、2-b)。

不同类型绿地土壤碳通量的差异显著 ($P < 0.05$, 图 2-a)。受人工养护多的文教区绿地 ($5.33 \pm 2.90 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、道路绿地内环 ($3.96 \pm 2.50 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 和道路绿地外环 ($3.74 \pm 2.22 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 土壤碳通量显著高于其他绿地类型。其中受人类干扰影响最多的居住区绿地土壤碳通量 ($1.70 \pm 1.10 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 显著低于其他绿地类型。

监测期内 6 个城市绿地土壤温度在年内存在明显的季节变化 ($P < 0.05$, 图 2-b), 呈和缓的单峰曲线趋势。8 月 ($28.57 \pm 1.12 \text{ }^{\circ}\text{C}$)、7 月 ($28.40 \pm 1.16 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 和 6 月 ($28.32 \pm 1.16 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 各绿地类型土壤温度显著高于其他月份, 2 月 ($16.77 \pm 0.54 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 和 1 月 ($16.14 \pm 1.15 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 土壤温度显著低于其他月份。土壤温度与大气温度呈极显著正相关 ($P < 0.01$, 表 1), 与气压呈极显著负相关 ($P < 0.01$, 表 1)。不同绿地类型的土壤温度变化无显著差异 ($P > 0.05$)。

6 个绿地土壤湿度的年变化趋势相似 ($P > 0.05$, 图 2-b)。在 10 月至次年 1 月期间, 土壤湿度处于谷值。生产绿地的土壤湿度 ($0.16 \pm 0.10 \%$) 显著低于其他绿地类型。土壤湿度与大气相对湿度呈极显著正相关 ($P < 0.01$, 表

1), 与气压呈极显著负相关 ($P < 0.01$, 表 1)。

2.2 不同绿地类型土壤碳通量干湿季日变化特征

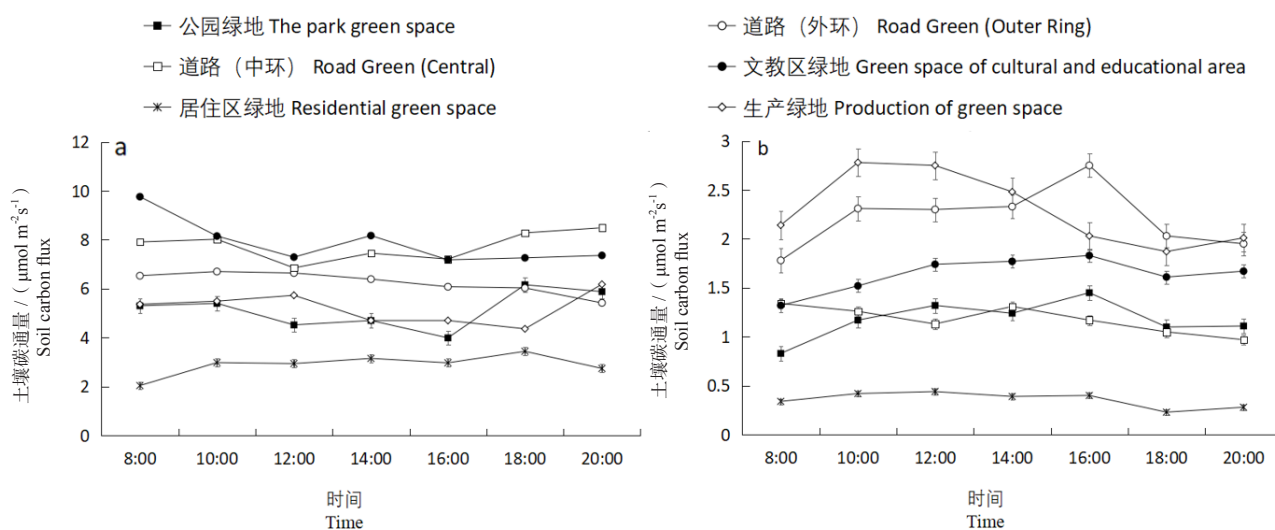
监测期内 6 个绿地土壤碳通量干湿季日变化趋势不一致, 湿季时各绿地类型的土壤碳通量 ($2.04 \sim 9.76 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 图 3-a) 明显高于干季 (图 3-b, $0.23 \sim 2.78 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)。不同绿地类型土壤碳通量在湿季和干季的日变化特征差异显著 ($P < 0.05$, 图 3)。

湿季时, 土壤的碳通量日变化没有明显的变化趋势 (图 3-a)。湿季文教区绿地 ($7.88 \pm 0.92 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 和道路中环绿地 ($7.14 \pm 0.90 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 土壤碳通量显著高于其他绿地类型。湿季土壤碳通量与土壤温度和气压呈极显著正相关 ($P < 0.01$, 表 1), 与大气温度、土壤湿度不相关 ($P > 0.05$, 表 1)。

干季时, 土壤的碳通量日变化没有明显的变化趋势 (图 3-b)。干季生产绿地 ($2.29 \pm 0.37 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 和道路外环绿地 ($2.20 \pm 0.31 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 土壤碳通量显著高于其他绿地类型。干季土壤碳通量与土壤湿度、大气相对湿度呈显著负相关 ($P < 0.05$, 表 1), 与大气温度、土壤温度不相关 ($P > 0.05$, 表 1)。湿季 ($2.89 \pm 0.43 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 和干季 ($0.35 \pm 0.07 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 居住区绿地土壤碳通量均显著低于其他绿地。

2.3 土壤碳通量与环境因子的关系

据表 1 可知, 土壤碳通量在湿季时与土壤温



注: a 图为湿季, b 图为干季。

Note: figure a shows wet season, and figure b shows dry season.

图 3 广州大学城不同绿地类型土壤碳通量日变化特征

Figure 3 Diurnal variation of soil carbon flux in different green space types in Guangzhou university town

度呈极显著正相关 ($P<0.01$), 而在干季时土壤碳通量与土壤湿度呈显著负相关 ($P<0.05$)。土壤碳通量与大气温度呈极显著正相关, 与气压呈极显著负相关 ($P<0.01$)。干湿季的大气相对湿度均与大气温度呈极显著负相关 ($P<0.01$)。

2.4 土壤理化性质分析

不同绿地类型的土壤理化性质如表 2 所示。研究表明, 公园绿地、生产绿地土壤呈酸性, 中环道路绿地、文教区绿地、居住区绿地土壤呈碱性。公园绿地和居住区绿地的土壤微生物量明显低于其他绿地。土壤碳通量与 0~10 cm 土壤 C、微生物总量呈正相关, 与田间持水量呈负相关 (表 2)。

3 结论与讨论

城市绿地土壤碳通量具有明显的季节变化, 均呈湿季显著高于干季的单峰曲线, 且土壤碳通量的最大值出现在夏季, 最小值出现在冬季 (图 2-a)。这与同类气候类型其它相关研究结果基本一致^[14,18]。土壤碳通量的季节变化主要受研究区域外部环境条件如土壤温湿度、植物的生长、土壤有机碳含量、土壤微生物活性、大气微气候因子等因素的影响。

土壤温度影响土壤碳通量的作用机制是通过调节土壤中的微生物及植物呼吸酶的活性来实现, 在一定程度上土壤气温的上升能促进植物呼吸酶

表 1 土壤碳通量与环境因子的相关分析
Table 1 Correlation analysis between soil carbon flux and environmental factors

时间 Time	指标 Index	土壤碳通量 Soil carbon flux	土壤温度 Soil temperature	土壤湿度 Soil moisture	大气温度 Atmospheric temperature	大气相对湿度 Atmospheric relative humidity	气压 Air pressure
全年 Annual	土壤碳通量		0.654	0.078	0.693	-0.149	-0.540
	土壤温度	**		0.153	0.787	-0.231	-0.741
	土壤湿度	ns	ns		0.233	0.479	-0.358
	大气温度	**	**	ns		-0.289	-0.859
	大气相对湿度	ns	ns	**	*		-0.002
	风速	ns	ns	ns	ns	*	-0.215
	气压	**	**	**	**	ns	
湿季 Wet season	土壤碳通量		0.690	0.273	-0.105	0.283	0.568
	土壤温度	**		0.050	-0.128	0.309	0.560
	土壤湿度	ns	ns		-0.057	0.125	0.080
	大气温度	ns	ns	ns		-0.728	-0.318
	大气相对湿度	ns	*	ns	**		0.321
	风速	ns	ns	ns	**	*	0.064
	气压	**	**	ns	*	*	
干季 Dry season	土壤碳通量		0.275	-0.365	0.181	-0.344	-0.022
	土壤温度	ns		0.013	0.265	-0.574	0.068
	土壤湿度	*	ns		0.010	-0.144	0.076
	大气温度	ns	ns	ns		-0.608	-0.739
	大气相对湿度	*	**	ns	**		0.204
	气压	ns	ns	ns	**	ns	

注: 上三角为相关性系数, 下三角为 p 值, 其中 * 表示差异达显著水平 ($P<0.05$); ** 表示差异达极显著水平 ($P<0.01$); ns 表示未通过显著性检验 ($P>0.05$)。

Note: the upper triangle is the correlation coefficient, and the lower triangle is the P value, where * indicates a significant difference ($P<0.05$). ** indicates that the difference was extremely significant ($P<0.01$); ns means failed significance test ($P>0.05$).

表 2 不同绿地类型土壤理化性质
Table2 Physical and chemical properties of soil in different green space types

绿地类型 Green space types	pH	田间持水量 /% Field water capacity	C/%	微生物总量 / (nmol/g) Total microbial mass
公园绿地 The park green space	5.71	0.424	1.011	22.53
道路绿地 (外环) Road Green (Outer Ring)	6.80	0.436	1.817	38.69
道路绿地 (中环) Road Green (Central)	7.28	0.457	1.037	41.23
文教区绿地 Green space of cultural and educational area	7.14	0.360	1.730	36.42
居住区绿地 Residential green space	7.53	0.383	0.995	7.38
生产绿地 Production of green space	5.80	0.426	1.254	36.89

和土壤微生物的活性^[19]。在本研究中，夏季土壤碳通量显著高于冬季，这是由于夏季时土壤温度较高，加强植物根系代谢，微生物较为活跃，促进土壤碳通量；当冬季时土壤温度较低，土壤微生物数量少、丰度小，其活跃程度也受到抑制，导致土壤碳通量下降^[20]。土壤湿度可以直接影响植被根系的生长、微生物的活性，也可以间接影响氧气和底物的扩散运输^[21]。本研究发现湿季土壤碳通量与土壤湿度不相关 ($P>0.05$)，而干季时与土壤湿度呈显著负相关 ($P<0.05$)，取代土壤温度，成为最关键的影响因子，与 Arredondo 等^[22]的研究结果一致，这是由于在干燥的季节，土壤含水量以及降水情况会限制土壤碳排放。

一般而言，土壤温度与土壤湿度共同影响土壤碳通量，解释了土壤碳通量变化的 70%~97%^[23]。本研究发现土壤碳通量变化与土壤温度的变化趋势是一致的 (图 2-a、2-b)，全年土壤碳通量与土壤温度呈现极显著正相关 ($P<0.01$)，而与土壤湿度不相关 ($P>0.05$)，与 Wei 等^[24]的研究结果一致。这表明调控广州大学城绿地土壤碳通量季节变化的主要影响因子是土壤温度。此外，城市绿地土壤的热量和水分条件通常是彼此相互影响和作用的，还伴随着多个环境因子的协同作用。

大气温度主要先作用于土壤表面，再逐步将热量传递到土壤下层，影响土壤微生物、植物根系等的碳通量，使碳通过土壤孔隙排放到大气中^[25]。本研究中大气温度与土壤碳通量呈极显著

正相关 ($P<0.01$)，这也表明了大气温度间接地影响土壤碳通量。土壤碳通量在干季时与大气相对湿度呈现显著负相关，这与赵哈林^[26]、朱宏^[27]等人的研究结果相一致。湿季监测期内，土壤碳通量大约在 8 月份时呈现一个较低值，Epron^[28]、吴亚华^[15]等人也有相似的发现，这是由于在降水频率较高，降水量、降水强度不均匀等降水格局的影响下，土壤碳通量或受抑制、或受促进、或没有影响^[28]，因而在湿季时表现出波动的趋势。

监测期内，干湿季土壤的碳通量日变化均没有明显的变化趋势，均与大气温度不相关，与胡进耀^[30]、Capek^[31]等人的研究结果不一致。土壤碳通量日变化动态特征与测定季节、土壤类型等有关，温度变化幅度对土壤碳通量作用变化产生重要影响^[25]。结合实际可知，广州大学城地处南亚热带，具有温暖多雨、温差较小等气候特征，且本研究仅在 8:00 至 20:00 时进行监测，无法说明全日昼夜大气温度对土壤碳通量的影响。

土壤碳通量是一种复杂的生物学过程，受到非生物因子和生物因子的综合影响^[9,32]。不同城市绿地类型土壤碳通量的差异显著 ($P<0.05$)，与梁晶等的研究结果相似^[33]。土壤微生物是土壤有机质和土壤养分转化和循环的动力^[34]，在一定程度上支配着通过土壤碳通量所进行的 C 释放。充足的碳源有利于土壤微生物活性及微生物量的增加^[35]，有机肥料和化学肥料的施用能够改变或增加土壤营养元素及有机碳的含量，激发土壤微

生物的活性, 提高地表根系的碳通量, 进而促进土壤 CO_2 的产生与排放^[10,36]。本研究中土壤碳通量与 0~10 cm 土壤 C、微生物总量呈正相关, 而 0~10 cm 土壤 C、微生物总量较高的文教区绿地、道路绿地(中环、外环)和生产绿地土壤碳通量显著高于其他绿地类型(表 1)。结合实际可知, 文教区绿地、道路绿地(中环、外环)有绿化养护工人进行肥料喷撒, 生产绿地有农户精心照料, 而公园绿地和居住区绿地则受人为干扰影响较大, 二者的人流量都较大, 有较为明显的土壤压实、土壤物理退化现象。这也表明定期对城市绿地进行养护有利于增加土壤碳通量。不同的土地利用方式通过对地表植被、土壤渗透性、土壤有机质含量等因子的影响间接作用于土壤碳通量^[37]。研究发现干湿季居住区绿地土壤碳通量均显著低于其他绿地, 与陶晓等^[10]的研究结果相似, 其可能是由于居住区绿地监测期内受绿化整改计划影响, 大部分时间以裸地为主, 改变了土壤微生物和根系的生活空间, 从而抑制土壤 CO_2 的产生。本研究表明, 湿季时文教区绿地和道路中环绿地土壤碳通量显著高于其他绿地类型, 而干季时生产绿地和道路外环绿地土壤碳通量显著高于其他绿地类型, 这说明时间不同, 土壤碳通量的影响因素不同, 影响因素的主成分就会有所不同^[38]。有研究表明, 土壤温度、土壤湿度等因子在时空上的变异会受植被类型、植被覆盖度不同的影响^[39-40], 而本研究在样地选取上并没有消除植被类型对土壤碳通量的影响。因此今后关于不同绿地类型土壤碳通量的研究中, 应选取相同植被类型的样地进行监测, 以便进一步研究土壤碳通量的影响机制。

本研究通过对广州大学城公园绿地、道路防护绿地(中环、外环)、文教区绿地、居住区绿地、生产绿地等 5 种不同功能绿地土壤碳通量、温湿度和土壤理化性质的测定, 研究发现: (1) 从季节尺度上看, 广州大学城绿地土壤呼吸速率具有明显时间动态节律性, 湿季和夏季时各绿地类型的土壤碳通量显著高于干季和冬季; (2) 调控广州大学城绿地土壤碳通量季节变化的主要影响因子是土壤温度, 同时伴随着多个环境因子的协同作用; (3) 广州大学城不同城市绿地类型的土壤碳通量对环境因子的响应特征存在差异。定期对城市绿地进行养护促进土壤碳通量的增加。

参考文献

- [1] SHA L Q, TERAMOTO M, NOH N J, et al. Soil carbon flux research in the Asian region: Review and future perspectives[J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2021, 77(1): 24-51.
- [2] HUANG N, WANG L, SONG X P, et al. Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover[J]. *Science Advances*, 2020, 6(41): eabb8508.
- [3] JONES M W, ANDREW R M, PETERS G P, et al. Gridded fossil CO_2 emissions and related O_2 combustion consistent with national inventories 1959–2018[J/OL]. *Scientific Data*, 2021, 8(1).<https://www.nature.com/articles/s41597-020-00779-6>.
- [4] 王保忠, 王彩霞, 何平, 等. 城市绿地研究综述[J]. *城市规划汇刊*, 2004(2): 62-68; 96.
- [5] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 778-785.
- [6] 许敏, 熊康宁, 张俞, 等. 喀斯特石漠化地区不同土地利用方式下土壤呼吸的季节动态[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(10): 2240-2247.
- [7] WANG D D, YU X X, JIA G D, et al. Variations in soil respiration at different soil depths and its influencing factors in forest ecosystems in the mountainous area of North China[J]. *Forests*, 2019, 10(12): 1081.
- [8] HOU T T, WANG Y P, GUO F X, et al. Soil Respiration Characteristics and Influencing Factors for Apple Orchards in Different Regions on the Loess Plateau of Shaanxi Province[J]. *Sustainability*, 2021, 13(9): 4780.
- [9] 崔之益, 徐大平, 杨曾奖, 等. 土壤含水量对降香黄檀树干呼吸速率、生长和氮含量的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2018, 39(2): 54-61.
- [10] 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.
- [11] 马莉. 城市疏林地与草地表层土壤呼吸及影响因素探究: 以宝鸡市为例[J]. *江西农业学报*, 2017, 29(8): 47-51.
- [12] 王小国, 朱波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1960-1968.
- [13] DAVIDSON E A, BELK E, BOONE R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 罗上华, 毛齐正, 马克明, 等. 北京城市绿地表层土壤碳氮分布特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(20): 6011-6019.
- [17] 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 等. 杉木人工林土壤微团聚体中铁铝氧化物与微生物的分布及其关系[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(1): 1-9.
- [18] 徐文娴, 卓志清, 赵从举, 等. 海口城市草坪绿地土壤 CO₂ 通量时间变化及其环境解释: 以海南师范大学南校区为例[J]. *草业科学*, 2017, 34(1): 51-58.
- [19] 白皓宇, 任柯颖. 增温对亚热带森林土壤呼吸变化的影响[J]. *园艺与种苗*, 2020, 40(2): 26-28+33.
- [20] 张鸽香, 徐娇, 王国兵, 等. 南京城市公园绿地不同植被类型土壤呼吸的变化[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(2): 274-280.
- [21] VERSEVELD C J W V , GEBERT J. Effect of compaction and soil moisture on the effective permeability of sands for use in methane oxidation systems[J]. *Waste Management*, 2020, 107: 44-53.
- [22] ARREDONDO T, DELGADO-BALBUENA J, HUBER-SANNWALD E, et al. Does precipitation affects soil respiration of tropical semiarid grasslands with different plant cover types?[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 251: 218-225.
- [23] 魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 等. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(4): 689-704.
- [24] GAO W, HUANG Z Q, YE G F, et al. Effects of forest cover types and environmental factors on soil respiration dynamics in a coastal sand dune of subtropical China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2018, 29(6): 1645-1655.
- [25] 刘合满, 曹丽花, 马和平. 土壤呼吸日动态特征及其与大气温度、湿度的响应[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 193-196; 202.
- [26] 赵哈林, 李玉强, 周瑞莲. 沙漠化对沙地土壤呼吸的影响及其对环境变化的响应[J]. *生态学报*, 2010, 30(8): 1972-1980.
- [27] 朱宏, 赵成义, 李君, 等. 干旱区荒漠灌木林地土壤呼吸及其影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(6): 856-860.
- [28] EPRON D, FARQUE L, LUCOT E, et al. Soil CO₂ efflux in a beech forest: the contribution of root respiration[J]. *Annals of Forest Science*, 1999, 56(4): 289-295.
- [29] YU C L, HUI D, DENG Q, et al. Responses of switchgrass soil respiration and its components to precipitation gradient in a mesocosm study[J]. *Plant & Soil*, 2017, 420: 105-117.
- [30] 胡进耀, 吴庆贵, 杨冬生, 等. 巴山水青冈林生态系统土壤呼吸作用及与温度的关系[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 244-248.
- [31] CAPEK P, STARKE R, HOFMOCKEL K S, et al. Apparent temperature sensitivity of soil respiration can result from temperature driven changes in microbial biomass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135: 286-293.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 彭紫薇, 焦鹏宇, 高李文, 等. 不同林龄杉木人工林土壤氮转化酶活性特征[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(2): 104-111.
- [35] LIU S, LI P, GAN W, et al. Effect of long - term fertilization on soil microbial activities and metabolism in *Paulownia* plantations[J]. *Soil Use and Management*, 2021, 38(2): 978-990.
- [36] JONES S K, REES R M, SKIBA U M, et al. Greenhouse gas emissions from a managed grassland[J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 47(2): 201-211.
- [37] 甘国渝, 陈曦, 朱海, 等. 水热耦合对不同土地利用类型土壤磷生物有效性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(4): 58-66.
- [38] 赵爽, 王邵军, 杨波, 等. 西双版纳热带森林碳循环中土壤呼吸对次生演替的响应[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(2): 12-18.
- [39] 闫宝龙, 赵清格, 张波, 等. 不同植被类型对土壤理化性质和土壤呼吸的影响[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(2): 189-195.
- [40] 闫世琦, 赵正勇, 孙冬晓. 两广地区主要森林类型的年土壤呼吸及空间分布研究[J]. *林业与环境科学*, 2021, 37(1): 1-6.