

成都市两种典型草坪冬季休眠期土壤呼吸动态特征*

熊莉¹ 徐振锋¹ 吴福忠¹ 杨万勤^{1**} 殷睿¹ 李志萍¹ 唐仕姗¹ 熊海涛²

¹四川农业大学生态林业研究所, 林业生态工程重点实验室 成都 611130

²四川农业大学农学院 成都 611130

摘要 为向城市草坪的冬季管理提供科学依据, 向城市生态系统的碳收支评估提供基础数据, 研究了成都市最具代表性的两种城市草坪——沟叶结缕草草坪和麦冬草坪冬季土壤呼吸速率的动态变化及其影响因素。结果表明: 沟叶结缕草草坪和麦冬草坪整个冬季土壤呼吸速率分别在 $1.20\text{--}3.17\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 和 $0.85\text{--}2.43\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 范围波动, 且土壤呼吸动态均呈“V”型曲线, 先降低后升高; 冬季两种草坪土壤呼吸速率与土壤理化性质和植物生长习性有关; 休眠期土壤呼吸速率主要受土壤温度调控, 与土壤水分相关性不大; 而双因素回归分析表明, 温度和水分共同可解释土壤呼吸的75%–84%; 沟叶结缕草草坪土壤呼吸温度敏感性(Q_{10})比麦冬草坪高41.85%。可见, 两种草坪冬季休眠期土壤呼吸速率均较高, 冬季土壤碳排放与草种选择有关。图5 表3 参32

关键词 土壤呼吸; 城市草坪; 沟叶结缕草; 麦冬; Q_{10}

CLC S154.1 : TU985.12+3

Soil respiration of two typical urban lawns in Chengdu City during the winter dormancy period*

XIONG Li¹, XU Zhenfeng¹, WU Fuzhong¹, YANG Wanqin^{1**}, YIN Rui¹, LI Zhiping¹, TANG Shishan¹ & XIONG Haitao²

¹Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

²College of Agriculture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract Understanding of wintertime soil respiration dynamics in urban lawn provides not only important scientific basis for city administration, but also basic data for evaluating urban ecosystem carbon budget. As yet, little information is available on it. This study measured the dynamics of soil respiration rate in winter in the *Zoysia matrella* lawn and *Ophiopogon japonicus* lawn, two typical urban lawns in Chengdu City, and analyzed the influencing factors. The results showed that wintertime soil respiration rate was $1.20\text{--}3.17\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ and $0.85\text{--}2.43\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ in the *Z. matrella* lawn and *O. japonicus* lawn, respectively. The weekly variations of soil respiration were characterized by a “V” curve pattern, i.e., firstly decreasing and then increasing. Wintertime soil respiration rate was dependent on soil organic matter, bulk density, plant biomass, and plant growth regime in two lawns. Soil respiration rate was controlled by soil temperature more than soil moisture over the dormant period. Double factor regression analysis indicated that soil temperature and moisture could explain 75–84% of the soil respiration. The soil temperature sensitivity (Q_{10}) of soil respiration in *Z. matrella* lawn was 41.85% higher than in *O. japonicus* lawn. In conclusion, soil respiration rates of two typical subtropical urban lawns were higher during the winter dormant period, and selection of turfgrass could affect soil carbon release in urban green space.

Keywords soil respiration; urban lawn; *Zoysia matrella*; *Ophiopogon japonicus*; Q_{10}

土壤呼吸是碳素由陆地进入大气的最主要途径, 与全

球气候变化密切相关^[1], 其精确测定对探讨全球变暖及其对未来生存环境的影响具有十分重要的意义^[2]。城市草坪作为陆地生态系统的一个重要组成部分, 是全球碳循环中的一个重要贮存库。随着城市化进程的加快, 城市草坪面积迅速扩展, 其对区域碳循环中的作用也越来越重要, 研究城市草坪土壤呼吸对评估城市生态系统的碳收支, 以及减少全球碳收支的不确定性和预测未来气候变化具有重要意义^[3]。

城市草坪具有美化环境、净化空气、缓解城市热岛效应和调节小气候等生态效应, 因此城市草坪土壤呼吸日益受到关注。已有研究报道, 城市草坪土壤呼吸速率很高^[4–5], 并在城市碳循环和碳收支中具有重要作用^[6]。长期以来, 国内外土壤呼吸研究主要集中在森林、苔原、草地和农田等其他非城

收稿日期 Received: 2013-07-27 接受日期 Accepted: 2013-11-18

*国家自然科学基金项目(31170423, 31200474, 31270498)、国家“十二五”科技支撑计划(2011BAC09B05)、四川省杰出青年学术与技术带头人培育项目(2012JQ0008, 012JQ0059)和中国博士后科学基金(2013M540714, 2012T50782)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31170423, 31200474, 31270498), the Sci-tech Pillar Project of the Twelfth Five-year Plan of China (2011BAC09B05), the Sichuan Science Fund of China for Distinguished Young Scholars and Technical Leadership (2012JQ0008, 012JQ0059), and the Post-doctoral Science Foundation of China (2013M540714, 2012T50782)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: scyangwq@163.com)

市生态系统^[2,7-8],而对城市草坪土壤呼吸的研究甚少;并且过去绝大多数工作也往往忽略了冬季土壤呼吸的研究^[9-10].然而,近年来的研究发现冬季土壤呼吸是生态系统呼吸的重要组成部分,对气候变化更为敏感^[11].相比其他生态系统,城市草坪土壤呼吸过程更为复杂,除受温度和水分调控外,还可能受到土壤理化性质、草坪草的生理生长、不同植被类型以及人类活动等因素的影响^[1,12-14],但其具体影响机制还不清楚,亟待深入研究.

鉴于此,本研究选取成都平原两种典型的城市草坪,沟叶结缕草(*Zoysia matrella*)草坪和麦冬(*Ophiopogon japonicus*)草坪为研究对象,动态监测两种草坪冬季休眠期土壤呼吸速率,同步监测土壤温度和水分等环境因子,分析两种草坪土壤呼吸速率动态特征、差异和主要调控因子,分析土壤呼吸对温度的敏感性,旨在揭示冬季草坪土壤呼吸速率的特征及其影响因子,一方面为城市草坪的管理提供理论依据,另一方面为评估城市生态系统碳收支提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究地概况

本研究选择草坪位于四川省成都市温江区四川农业大学校内.该地区属亚热带湿润季风气候,年均温为15.8℃,最冷月为1-2月,月均温为5.2℃,最热月7-8月,月均温为25.2℃,极端最低温和极端最高温分别为-3.3℃和39.9℃,年平均相对湿度83%.冬春少雨,夏秋多雨,年均降水量约1124.6mm.晴天少,多雾,日照率在24%-32%之间,年均日照数为1042-1412h.试验地一种草坪植被为暖季型的禾本科多年生沟叶结缕草,地下根茎发达,耐贫瘠和践踏,但在成都每年的冬季(约每年11月末至翌年3月初)易枯黄,植物生长基本停止;另一种草坪植被为暖季型的百合科多年生常绿草本植物麦冬,须根较粗壮,稍耐寒,在冬季仍能保持植物生长.因此,均被广泛用作中国亚热带城市园林绿化的草种.结缕草草坪和麦冬草坪建坪年龄约为2年,草坪人为管理措施主要包括:在建坪当年施加适当的基肥,之后未追肥;结缕草草坪和麦冬草坪每年采用便携式割草机修剪分别约为5-8次和3-5次,留茬高度约4cm,修剪碎屑及时运走,干旱时进行适当的人工浇水.

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 于2012年11月在结缕草草坪和麦冬草坪内选取植被覆盖和生长均一的地方分别建立3个20m×20m的样方,每个样方内随机设5个重复,两种草坪的其他环境因素均较为一致.

1.2.2 土壤呼吸与土壤温、湿度测定 土壤呼吸通量采用Li-8100土壤碳通量自动测量系统(Li-Cor Inc., NE, USA)测定.在每次测定前一天,每个样方内随机布置5个PVC环(直径20cm,高6cm,平行地表插入土壤约3cm).同时将PVC环内的绿色植物齐地剪除,以避免地上植物呼吸,并尽可能地不扰动地表凋落物.土壤呼吸的测定从2012年11月初开始到2013年3月底,每周观测一次,每次测定在09:00-14:00完成.测定土壤呼吸的同时,土壤5cm深度的温度和水分(体积含水量,%)分别采用Li-8100自带温度探针和水分传感器观测.另外,试验地1.5m处空气温度用纽扣式温度传感器

(DS1921-F5#, Maxim/Dallas Semiconductor Inc., USA)连续监测,每1h记录一次数据.土壤呼吸指数模型, $R_s = a \times e^{b \times T}$, $Q_{10} = e^{10 \times b}$.公式中, R_s 和 T 分别为土壤呼吸速率和土壤温度, a 和 b 都是拟合参数, Q_{10} 为土壤呼吸速率对温度的敏感性.土壤呼吸双因素模型 $R_s = ae^{bT}w^c$ 反映土壤温度和水分对土壤呼吸的交互作用,该公式中 R_s 和 T 含义同上, w 为土壤体积含水量(%), a 、 b 、 c 均为常数^[15].

1.2.3 生物量、土壤有机质、容重和孔隙度测定 在两种草坪PVC环附近分别随机布设5个0.2m×0.2m生物量取样样方,将样方草坪冠层部分平地剪掉,并采集0-20cm土壤处的根系,分别带回实验室洗净,在80℃下烘72h后称重,计算地上生物量和地下生物量;同时采集该样方处0-20cm的土样,带回实验室自然风干过筛后采用重铬酸钾容量法测定;土壤容重和孔隙度采用环刀法采集该样方附近的土样测定.

1.2.4 数据分析 采用Student-*t*检验两种草坪的土壤有机质、容重、孔隙度和地上及地下生物量的差异性;采用重复测量方差分析(Repeated measures ANOVA)比较处理之间土壤温度、水分和土壤呼吸差异性;采用Pearson相关系数评价5cm土壤体积含水量和土壤呼吸的相关关系;采用非线性回归分析土壤温度和水分对土壤呼吸的综合影响.所有统计分析均采用SPSS 11.0完成.

2 结果与分析

2.1 冬季样地空气温度与两种草坪土壤温度和水分的动态变化

试验样地整个冬季两种草坪5cm处日均土壤温度与日均大气温度变化趋势基本一致,均表现为先下降后上升的趋势,且存在显著变化($P < 0.01$;图1).相比草坪土壤温度,空气温度波动幅度更大,并均在1月上旬达到最低值.整个冬季试验期间结缕草草坪和麦冬草坪土壤温度变化幅度分别为3.39-16.32℃和2.19-16.79℃,平均值分别为10.08℃和9.90℃.此外,在试验后期,麦冬草坪土壤温度较高于结缕草草坪土壤温度,但统计分析表明两种草坪土壤温度的差异未达到显著水平.

与土壤温度不同,两种草坪土壤水分在整个研究期间总体上均呈缓慢下降趋势(图2),而在试验后期沟叶结缕草草坪土壤水分却迅速下降.沟叶结缕草草坪和麦冬草坪土壤水分分别在10%-30%和21%-31%之间波动,动态变化明显.同一测定时期沟叶结缕草草坪土壤水分明显低于麦冬草坪土壤水分,但是差异不显著($P > 0.05$).研究期间,麦冬草坪土壤水分平均高于沟叶结缕草草坪土壤水分的11.96%.

2.2 两种草坪冬季休眠期土壤呼吸的动态变化

在试验期间,两种草坪冬季休眠期土壤呼吸速率变化跟5cm土壤温度一致并呈“V”型曲线,且动态变化显著($P < 0.01$),表现为土壤呼吸速率在试验初期迅速下降,之后呈缓慢下降趋势,并均在次年1月降到最低值,之后呈上升趋势(图3).沟叶结缕草草坪和麦冬草坪冬季土壤呼吸速率分别在1.20-3.17 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和0.85-2.43 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 范围波动.在试验前期,两种草坪土壤呼吸速率差异达到显著水平($P < 0.05$),之后随着温度的回升差异却不明显($P > 0.05$;图3).整个冬季沟叶结缕草草坪土壤呼吸速率平均高于麦冬草坪土壤呼吸速率的25.1%.

表1 成都市两种草坪土壤呼吸与温度的指数回归模型

Table 1 Exponential regression model of soil and temperature in the two lawns of Chengdu City during the winter

草坪类型 Lawn	<i>a</i>	<i>b</i>	Q_{10}	<i>N</i>	<i>P</i>	R^2
结缕草草坪 <i>Z. matrella</i> lawn	0.811 (0.056)	0.117 (0.012)	3.22 (0.18)	48	< 0.001	0.815
麦冬草坪 <i>O. japonicus</i> lawn	0.571 (0.064)	0.082 (0.010)	2.27 (0.23)	48	< 0.001	0.697

数值表示为平均数 (标准偏差)。

Values are mean (standard deviation).

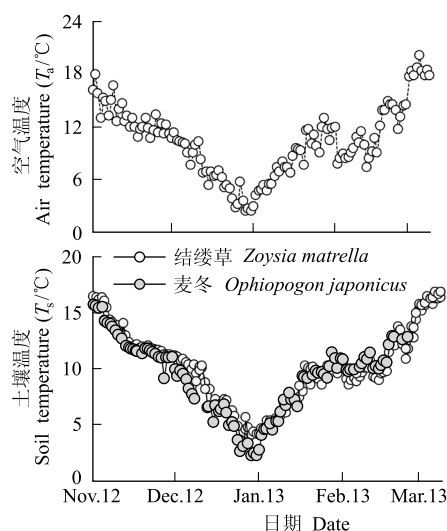


图1 成都市两种草坪日均土温和日均气温变化。

Fig. 1 Dynamics of daily soil temperature and air temperature in the two lawns of Chengdu City.

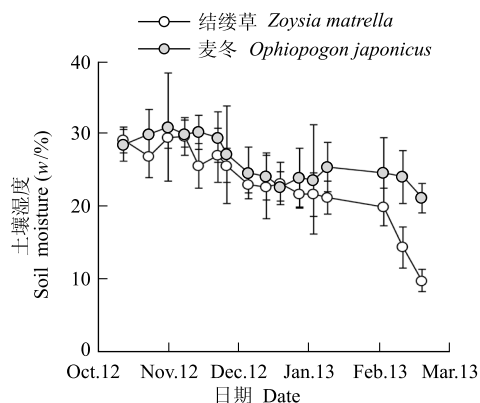


图2 成都市两种草坪土壤水分变化。

Fig. 2 Dynamic of soil moisture in the two lawns of Chengdu City.

2.3 两种草坪冬季休眠期土壤呼吸与土壤温度和水分的关系

单因素回归分析表明,两种草坪土壤呼吸速率与5 cm土壤温度之间都存在显著指数关系 ($P < 0.001$; 表1, 图4)。5 cm土壤温度可以解释沟叶结缕草草坪冬季休眠期土壤呼吸变异的82%,而麦冬草坪土壤呼吸速率变异只有70%源自5 cm土壤温度 ($P < 0.01$; 表1)。沟叶结缕草草坪冬季土壤呼吸的温度敏感性 (Q_{10}) 也高于麦冬草坪 ($P < 0.05$)。沟叶结缕草草坪和麦冬草坪的 Q_{10} 分别为3.22和2.27 (表1)。相关分析表明,两种草坪冬季土壤呼吸速率和5 cm土壤水分之间都没有显著线性关系 ($P > 0.05$; 图5)。

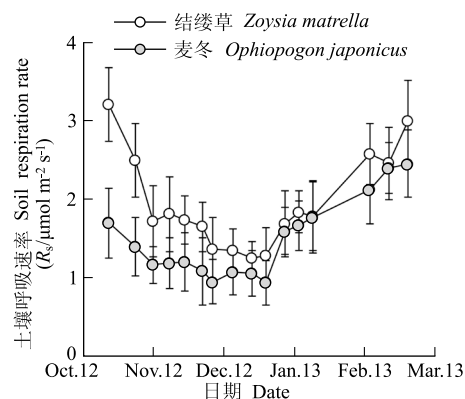


图3 成都市两种草坪冬季休眠期土壤呼吸变化。

Fig. 3 Variations of soil respiration in the two lawns of Chengdu City during the winter.

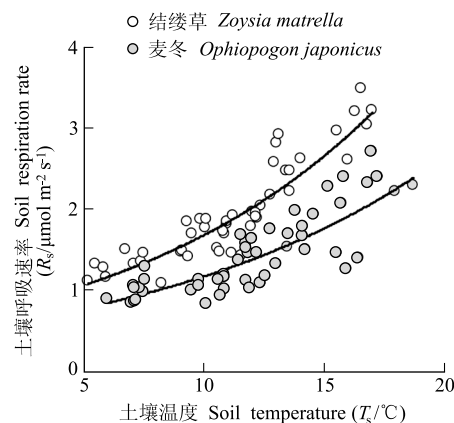


图4 成都市两种草坪冬季休眠期土壤呼吸与土壤温度的关系。

Fig. 4 Relationship between soil respiration and soil temperature in the two lawns of Chengdu City during the winter.

由于单独将土壤容积含水率与土壤呼吸做拟合方程相关性不高,而从模型类型的角度,指数-幂函数模型拟合效果更好,故采用双因素关系模型 ($R_s = ae^{bT}w^c$) [15]。由表2可以看出,两种草坪的土壤温度、水分共同解释了土壤呼吸速率变化的76%-84% ($P < 0.001$),明显高于单独分析土壤温度、土壤水分与土壤呼吸速率之间的相关性 (图4, 图5)。

2.4 两种草坪生物量和土壤物理性质

由表3可知,两种草坪生物量和土壤理化性质具有不同特征。麦冬草坪土壤容重比沟叶结缕草草坪土壤容重大11.4%,而孔隙度比沟叶结缕草草坪低11.1% (表3);麦冬草坪的土壤有机质含量显著高于结缕草草坪 ($P < 0.01$; 表3)。此外,分析表明,两种草坪地上生物量呈现极显著差异 ($P < 0.01$; 表3),而地下生物量差异不明显 ($P > 0.05$; 表3)。麦冬

草草坪地上和地下生物量分别比沟叶结缕草草坪低86.7%和2.3% (表3)。

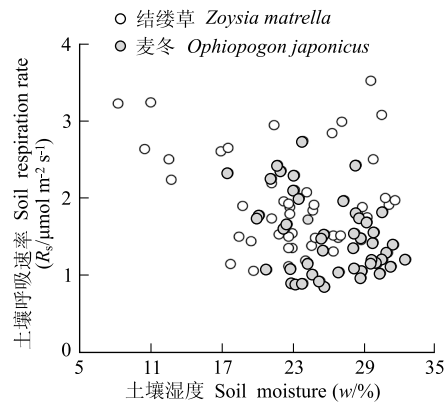


图5 成都市两种草坪冬季休眠期土壤呼吸与土壤水分的关系。
Fig. 5 Relationship between soil respirations with soil moisture in the two lawns of Chengdu City during the winter.

表2 成都市两种草坪土壤呼吸与土壤温度及土壤水分的复合关系方程
Table 2 Combined relationships between soil respiration and soil temperature/moisture in the two lawns of Chengdu City during the winter

草坪类型 Lawn	回归方程 Regression equation	N	R ²	P
结缕草坪 <i>Z. matrella</i> lawn	$R_s = 0.628e^{0.097T_w - 0.003}$	48	0.842	< 0.001
麦冬草坪 <i>O. japonicus</i> lawn	$R_s = 0.152e^{0.099T_w - 0.256}$	48	0.755	< 0.001

3 讨论

3.1 冬季休眠期两种草坪土壤呼吸动态特征

本研究发现,成都市两种草坪冬季休眠期土壤呼吸速率的变化规律基本一致,均呈明显的“V”型曲线。而亚热带草坪^[3]、温带草地^[16]以及其他自然植物群落的土壤年呼吸季节动态特征呈单峰曲线^[17-18],与本研究结果有所不同。这主要可能是由于冬季低温的气候特点所导致的。两种草坪整个冬季土壤呼吸速率均表现为先降低后升高的变化特征,这主要是因为土壤呼吸是一个受生物和非生物因素综合调控的复杂过程^[19]。初冬,随着温度降低,降雨也减少,植物生理代谢活动迅速减弱,有机质矿化分解和微生物活性受到抑制,土壤呼吸呈下降趋势;冬末,随着气温回升,植物及土壤微生物代谢活动逐渐加强,土壤呼吸速率增加。此外,本研究中,冬季休眠期两种草坪土壤呼吸的最大值与李熙波等研

表3 成都市两种草坪土壤有机质、容重、孔隙度、地上和地下生物量

Table 3 Soil organic matter, bulk density, porosity, above ground and below ground biomass in the two lawns of Chengdu City during the winter

草坪类型 Lawn	有机质 Organic matter (w/g kg ⁻¹)	容重 Bulk density (ρ/g cm ⁻³)	孔隙度 Porosity (P/%)	地上生物量 Above ground biomass (ρ/g m ⁻²)	地下生物量 Below ground biomass (ρ/g m ⁻²)
结缕草草坪 <i>Z. matrella</i> lawn	11.41 (0.38)	1.58 (0.09)	41.60 (2.99)	400.15 (60.21)	618.00 (187.07)
麦冬草坪 <i>O. japonicus</i> lawn	29.43 (0.69)	1.76 (0.08)	36.98 (1.06)	53.15 (17.00)	604.43 (89.68)
P	<0.001	0.068	0.065	<0.001	0.732

数值表示为平均数 (标准偏差)。
Values are mean (standard deviation).

究的亚热带沟叶结缕草草坪夏季最高土壤呼吸速率^[3]相当,说明了本研究中两种城市草坪冬季休眠期具有较高的土壤呼吸速率,并进一步证实了城市草坪冬季土壤呼吸速率在今后的研究中不可忽视。

3.2 冬季休眠期两种草坪土壤呼吸的主要调控因子

温度是影响土壤呼吸的一个非常重要的环境因子^[12, 20],且本研究发现成都平原两种草坪冬季休眠期土壤呼吸动态特征同样受土壤温度动态变化所调控。单因素回归分析表明,两种草坪土壤呼吸与土壤温度均呈显著指数关系,其中结缕草草坪土壤温度可以解释土壤呼吸82%的变化,麦冬草坪土壤温度可以解释土壤呼吸70%的变化,其他相关研究表明土壤温度可以解释草坪土壤呼吸77%-80%的变异^[1],与本研究结果相似。同时也表明,草坪类型不同,温度对其的影响程度也可能存在明显差异,但温度对草坪土壤呼吸的影响机制是一致的。温度主要通过影响土壤微生物的活性和有机质的分解,以及植物的生长和植物根系的生命代谢活动,从而影响土壤呼吸^[1]。

土壤水分是影响土壤呼吸的另一关键环境因子,对土壤呼吸的影响较为复杂,有研究表明,当土壤水分过高或过低时,才会显著影响土壤呼吸速率^[21-22]。本研究发现两种草坪土壤呼吸速率与土壤水分关系均不显著 ($P > 0.05$)。李熙波等人也发现沟叶结缕草草坪土壤呼吸与土壤水分没有明显的相关关系^[3]。而孙倩等研究却指出上海沟叶结缕草草坪土壤呼吸速率与土壤水分之间呈显著线性正相关^[9]。一方面可能是因为上海和四川气候类型不同,从而在一定程度上可能影响土壤水分对沟叶结缕草草坪土壤呼吸的调控作用的强弱;另一方面可能是因为结缕草冬季基本处于休眠期,生长活动相对停止,对水分的需求不大,土壤呼吸受土壤水分变化的影响可能被其他因子的影响或系统误差所掩盖。此外,两种草坪土壤呼吸与水分均无显著相关还可能是因为城市绿地中草坪养护精细,含水量大,草坪水分相对较高,且草坪本身也有很好的保湿作用^[23],其土壤呼吸受水分影响较迟钝,单独分析两种草坪土壤呼吸与水分之间的线性回归不能解释水分对土壤呼吸的影响。而双因素回归模型表明,温度和水分交互作用对两种草坪的土壤呼吸速率有显著影响 ($P < 0.001$),并可解释其变化的75%-84%。有研究表明,用复合关系函数预测土壤呼吸,可避免用指数函数在土壤水分低时对土壤呼吸的高估和土壤水分过高时低估^[24]。由此可见,成都平原两种草坪土壤呼吸受土壤温度和水分的综合影响,且温度是最主要调控因子。

Q_{10} 值是衡量土壤呼吸对温度变化响应敏感程度的一个

重要指数^[25],与气候变暖密切相关, Q_{10} 值的微小变化就可能导致对土壤呼吸评价发生很大变化,从而使土壤碳估算产生重大误差,对预测未来气候变化下的土壤碳平衡具有重要意义^[26]。本研究中,两种草坪土壤呼吸的 Q_{10} 存在一定程度的差异,结缕草草坪的 Q_{10} 比麦冬草坪高41.85%,与张鸽香等人研究南京城市公园绿地不同植被类型土壤呼吸的结果^[1]类似,说明植被类型可能影响土壤呼吸对温度的敏感性。有研究表明植被群落的土壤温度敏感性(Q_{10})越大,在全球气候变暖情景下,土壤可能会释放较多的 CO_2 ^[27],这在一定程度上说明麦冬草坪在未来气候变暖的情境下可能更有利于提高城市生态景观和环境质量。此外,本研究还发现,亚热带两种草坪冬季休眠期 Q_{10} 值为2.3-3.2,和温带草原(2.0-3.0)相似,Raich和Schlesinger发现全球 Q_{10} 的中值为2.4,高纬度地区大于低纬度地区^[28]。说明 Q_{10} 值存在相当大的空间变异,这可能与土壤理化性质、不同植被类型以及人为干扰等因素改变了土壤微环境有关^[26],也可能是因为四川季节变化明显,温度对土壤呼吸的影响相对敏感。

3.3 冬季休眠期两种草坪土壤呼吸速率差异

土壤 CO_2 通量主要是自养根系呼吸(包括根围附近自养微生物种群)与异养微生物呼吸贡献的总和^[29]。冬季休眠期,土壤微生物呼吸是土壤呼吸的主体,占土壤总呼吸的90%^[16],并驱动土壤矿化分解和养分循环。有研究表明,植被类型不同,其土壤呼吸也有所不同,不同植被类型之间土壤呼吸存在明显差异^[13]。本研究中,两种草坪植被均属草本植物,而冬季休眠期两种草坪土壤呼吸存在明显的差异,特别是在试验前期差异显著。这可能主要与土壤特性、植被生长习性、土壤水热条件等因素对土壤微生物和根呼吸产生不同程度的影响有关。首先,麦冬草坪土壤容重较大,孔隙度较小,造成土壤通气性不佳,阻碍了 CO_2 扩散,氧气含量明显降低,抑制了土壤呼吸的主要生物化学过程和微生物活性,同时阻碍了根系的穿插能力和伸长生长,抑制了幼苗的生长与建立,进而使土壤有机质分解过程与微生物和根系呼吸均受到抑制^[30]。这与庞学勇等研究露营对城市公共绿地土壤呼吸的影响结果^[29]相似。其次,草坪总生物量与土壤呼吸强度密切相关^[3]。地上生物量的高低可决定植物光合产物向地下根系和土壤输入有机碳的多少^[31-32],进而影响根系微生物底物的有效性和根系的伸长生长,而麦冬草坪地上生物量显著低于结缕草草坪,这在一定程度上降低了土壤呼吸速率。另外,在试验后期,两种草坪土壤呼吸速率差异不明显。这一方面可能是与植被生长习性有关。麦冬比结缕草生长期长,休眠期短,且四季常绿,而结缕草在日均气温10℃以下叶和茎就会枯黄,整个冬季基本处于休眠状态,因此麦冬草坪经过一个冬季的生长变化可使地上和地下生物量均增加,这可在一定程度上提高土壤呼吸速率。另一方面,麦冬草坪土壤有机质含量显著高于结缕草草坪,实验后期,由于地上生长缓慢,土壤呼吸主要来自异养微生物呼吸,那么高的碳底物数量可能有利于土壤碳排放。此外,麦冬草坪土壤温度和水分在试验后期均高于结缕草草坪,为根系呼吸和微生物的代谢活动提供了良好的水热条件,促进有机质分解,提高底物有效性,从而提高了土壤呼吸速率。

综上所述,成都市冬季休眠期两种典型城市草坪土壤

呼吸速率具有一致的变化规律,均呈“V”型曲线,表现为先下降后升高的变动趋势;两种草坪土壤呼吸速率主要受到土壤温度的调控,而与土壤水分关系不明显,但二者的交互作用对土壤呼吸有显著影响。由于温度、水分、土壤有机质、容重、生物量、植物生长习性等因素不同,冬季休眠期结缕草草坪土壤呼吸速率和土壤呼吸温度敏感性(Q_{10})明显高于麦冬草坪。由此可见,城市草坪土壤碳排放可能与草种选择以及人工管理有关,利用不同草坪生长习性进行合理的人工管理可在一定程度上降低 Q_{10} ,减少 CO_2 的释放。尽管这些结果的机制还有待进一步研究,但为深入认识冬季土壤呼吸这一生态过程提供了一定的科学依据。

参考文献 [References]

- 张鸽香,徐娇,王国兵,武珊珊,阮宏华. 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 [Zhang GX, Xu J, Wang GB, Wu SS, Ruan HH. Soil respiration under different vegetation type in Nanjing urban green space [J]. *Chin J Ecol*, 2010, **29** (2): 274-280]
- 杨玉盛,董彬,谢锦升,陈光水,高人,李灵,王小国,郭剑芬. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应[J]. 生态学报, 2004, **24** (3): 583-591 [Yang YS, Dong B, Xie JS, Chen GS, Gao R, Li L, Wang XG, Guo JF. Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (3): 583-591]
- 李熙波,杨玉盛,曾宏达,谢锦升,陈光水,朱宁,马书国. 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 XB, Yang YS, Zeng HD, Xie JS, Chen GS, Zhu N, Ma SG. Soil respiration of *Zoysia matrella* turfgrass in subtropics [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31** (8): 2096-2105]
- Pouyat R, Groffman R, Yesilonis I, et al. Soil carbon pool and flux in urban ecosystems [J]. *Environ Pollut*, 2002, **116** (1): 107-118
- Green DM, Olesyszyn M. Enzyme activities and carbon dioxide flux in a Sonoran Desert urban ecosystem [J]. *Soil Sci Soc Am*, 2002, **66** (6): 2002-2008
- Kaye JP, McCulley RL, Burke IC. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems [J]. *Global Change Biol*, 2005, **11** (4): 575-587
- 李凌浩,王其兵,白永飞,周广盛,邢雪荣. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子[J]. 植物生态学报, 2000, **24** (6): 680-686 [Li LH, Wang QB, Bai YF, Zhou GS, Xing XR. Soil respiration of a *Leymus chinensis* grassland stand in the Xilin river basin as affected by overgrazing and climate [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2000, **24** (6): 680-686]
- 陈述悦,李俊,陆佩玲,王迎红,于强. 华北平原麦田土壤呼吸特征[J]. 应用生态学报, 2004, **15** (9): 1552-1560 [Chen SY, Li J, Lu PL, Wang YH, Yu Q. Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15** (9): 1552-1560]
- 孙倩,方海兰,梁晶,钱秀苇,刘鸣达,张庆费,郝瑞军,郝冠军. 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 HL, Liang J, Qian XW, Liu MD, Zhang QF, Hao RJ, Hao GJ. Soil respiration characteristics of typical lawns in Shanghai [J]. *Chin J Ecol*, 2009, **28** (8): 1572-1578]
- 王妮,汪涛,彭书时,方精云. 冬季土壤呼吸:不可忽视的地气 CO_2 交换过程[J]. 植物生态学报, 2007, **31** (3): 394-402 [Wang W, Wang T, Peng SS, Fang JY. Review of winter CO_2 efflux from soils: a key process of

- CO₂ exchange between soil and atmosphere [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2007, **31** (3): 394-402]
- 11 熊沛, 徐振锋, 林波, 刘庆. 岷江上游华山松林冬季土壤呼吸对模拟增温的短期响应[J]. 植物生态学报, 2010, **34** (12): 1369-1376 [Xiong P, Xu ZF, Lin B, Liu Q. Short-term response of winter soil respiration to simulated warming in a *Pinus armandii* plantation in the upper reaches of the Minjiang River, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34** (12): 1369-1376]
 - 12 Luo YQ, Wan SQ, Hui DF, Wallace LL. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. [J]. *Nature*, 2001, **413**: 622-625
 - 13 杨晶, 黄建辉, 詹学明, 李鑫, 杜丽华, 李凌浩. 农牧交错区不同植物群落土壤呼吸的日动态观测与测定方法的比较[J]. 植物生态学报, 2004, **28** (3): 318-325 [Yang J, Huang JH, Zhan XM, Li X, Du LH, Li LH. The diurnal dynamic patterns of soil respiration for different plant communities in the agro-pastoral ecotone with reference to different measuring methods [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2004, **28** (3): 318-325]
 - 14 Pengthamkeerati P, Motavalli PP, Kremer RJ, Anderson SH. Soil carbon dioxide efflux from a claypan soil affected by surface compaction and application of poultry litter [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2005, **109**: 75-86
 - 15 金冠一, 赵秀梅, 郭依秋. 太岳山油松人工林干湿交替时期土壤呼吸特征[J]. 应用与环境生物学报, 2012, **18** (6): 904-910 [Jin GY, Zhao XH, Guo YQ. Dynamics of soil respiration during alternate drying-wetting period in *Pinus tabulaeformis* plantation of the Taiyue mountain, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **18** (6): 904-910]
 - 16 Zhou XH, Wan SQ, Luo YQ. Source components and interannual variability of soil CO₂ efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem [J]. *Global Change Biol*, 2007, **13** (4): 761-775
 - 17 常宗强, 史作民, 冯起, 苏永红. 黑河流域山区牧坡草地土壤呼吸的时间变化及水热因子影响[J]. 应用生态学报, 2005, **16** (9): 1603-1606 [Chang ZQ, Shi ZM, Feng Q, Su YH. Temporal variation of soil respiration on sloping pasture of Heihe River basin and effects of temperature and soil moisture on it [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16** (9): 1603-1606]
 - 18 王小国, 朱波, 王艳强, 郑循华. 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): 1960-1967 [Wang XG, Zhu B, Wang YQ, Zhen XH. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27** (5): 1960-1967]
 - 19 刘保新, 汪金松, 康峰峰, 尚宝山, 赵秀梅. 太岳山油松人工林土壤呼吸对抚育强度的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2012, **18** (1): 17-22 [Liu BX, Wang JS, Kang FF, Shang BS, Zhao XH. Response of soil respiration in *Pinus tabulaeformis* to tending intensities in the taiyue mountain, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **18** (1): 17-22]
 - 20 唐正, 尹华军, 周晓波, 卫云燕, 刘庆. 夜间增温和施肥对亚高山针叶林土壤呼吸的短期影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, **18** (5): 713-721 [Tang Z, Yi HJ, Zhou XB, Wei YY, Liu Q. Short-term effects of night warming and nitrogen addition on soil respiration of subalpine coniferous, western Sichuan, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **18** (5): 713-721]
 - 21 Davidson EA, Verchot LV, Cattanio JH, Ackerman IL, Carvalho JEM. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 53-69
 - 22 Maier CA, Kress LW. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability [J]. *Can J For Res*, 2000, **30**: 347-359
 - 23 王修信, 胡玉梅, 刘馨, 高凤飞, 朱启疆. 城市草地的小气候调节作用初步探究[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2007, **25** (3): 23-27 [Wang XX, Hu YM, Liu X, Gao FF, Zhu QJ. Microclimatic modification of urban grassland in Beijing [J]. *J Guangxi Norm Univ: Nat Sci Ed*, 2007, **25** (3): 23-27]
 - 24 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 李洪建. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2009, **29** (12): 6366-6376 [Yan JX, Qin ZD, Zhang YH, Li HJ. Effect of soil temperature and moisture on soil CO₂ efflux in *Pinus tabulaeformis* forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (12): 6366-6376]
 - 25 Ohashi M, Gyokusen K, Saito A. Contribution of root respiration to total soil respiration in Japanese cedar artificial forest [J]. *Ecol Res*, 2000, **15**: 323-333
 - 26 周萍, 刘国彬, 薛莲. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J]. 草业学报, 2009, **18** (2): 184-193 [Zhou P, Liu GB, Xue S. Review of soil respiration and the impact factors on grassland ecosystem [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2009, **18** (2): 184-193]
 - 27 向珊珊, 王国兵, 罗治建, 阮宏华, 张增信, 奕以玲. 次生林和人工林土壤呼吸对温度敏感性的室内模拟[J]. 生态学杂志, 2008, **27** (8): 1296-1301 [Xiang SS, Wang GB, Luo ZJ, Liu X, Zhang ZX, Yi YL. Sensitivity of soil respiration to temperature in a *Quercus variabilis* secondary forest and a *Pinus taeda* plantation in north subtropical area of China: a laboratory simulation [J]. *Chin J Ecol*, 2008, **27** (8): 1296-1301]
 - 28 Raich JW, Schlesinger WH. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Telus*, 1992, **44**: 81-89
 - 29 庞学勇, 丁建林, 吴福忠, 王红梅, 吴宁, 包维楷. 避灾露营对城市公共绿地土壤呼吸的短期影响[J]. 生态学报, 2008, **28** (12): 5584-5891 [Pang XY, Ding JL, Wu FZ, Wang HM, Wu N, Bao WK. The short-term effect of field camping on soil CO₂ efflux in urban grassland [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (12): 5584-5891]
 - 30 郑俊骞, 孙艳, 韩寿坤, 张浩. 土壤紧实胁迫对黄瓜根系呼吸代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24** (3): 741-746 [Zheng JX, Sun Y, Han SK, Zhan H. Effects of soil compaction stress on respiratory metabolism of cucumber root [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24** (3): 741-746]
 - 31 Ma Z, Wood CW, Bransby DI. Carbon dynamics of subsequent to establishment of switch grass [J]. *Biomass Bioenergy*, 2000, **18** (2): 93-104
 - 32 Craine FM, Wedin DA. Determinants of growing season soil CO₂ flux in a Minnesota grassland [J]. *Biogeochemistry*, 2002, **59** (3): 303-313