

上海典型城市草坪土壤呼吸特征*

孙倩^{1,2} 方海兰^{2**} 梁晶² 钱秀苇² 刘鸣达¹ 张庆费² 郝瑞军² 郝冠军²

(¹ 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110161; ² 上海市园林科学研究所, 上海 200232)

摘要 采用 CFX-2 开放式呼吸测定系统测定了上海城区百慕大、黑麦草-百慕大混播、结缕草和狗牙根 4 种典型草坪的土壤呼吸速率。结果表明 4 种草坪的土壤呼吸速率均呈明显季节变化, 最大值出现在 7—8 月, 最小值出现在 12 月—翌年 1 月, 4 种草坪土壤呼吸平均速率依次为百慕大草坪 < 黑麦草-百慕大混播草坪 < 结缕草草坪 < 狗牙根草坪, 其中百慕大草坪的土壤呼吸速率变化范围为 $0.13 \sim 2.25 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 黑麦草-百慕大混播草坪为 $1.16 \sim 5.95 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 结缕草草坪为 $0.93 \sim 8.27 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 狗牙根草坪为 $1.21 \sim 9.27 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。4 种草坪的土壤呼吸速率与气温、5 cm 地温和 10 cm 地温均呈极显著指数相关, 百慕大草坪和黑麦草-百慕大混播草坪的日变化均呈单峰曲线, 与气温、5 cm 地温和 10 cm 地温的日变化趋势一致, 4 种草坪土壤呼吸对温度的敏感性指数即 Q_{10} 值为 $1.60 \sim 2.66$ 。除结缕草外, 其他草坪的土壤呼吸速率与土壤含水率相关性不显著, 草坪的呼吸特征与其生长习性直接相关, 而冷暖季混播草坪 Q_{10} 值小, 对提高城市生态景观和环境质量有积极作用。

关键词 土壤呼吸; 城市草坪; 温度; Q_{10} ; 土壤含水率

中图分类号 X171.4 S143 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2009)08-1572-07

Soil respiration characteristics of typical urban lawns in Shanghai. SUN Qian^{1,2}, FANG Hai-lan², LIANG Jing², QIAN Xiu-wei², LIU Ming-da¹, ZHANG Qing-fei², HAO Rui-jun², HAO Guan-jun² (¹ College of Land and Environmental Sciences, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; ² Shanghai Institute of Landscape Gardening, Shanghai 200232, China). Chinese Journal of Ecology 2009 28(8):1572-1578.

Abstract: By using CFX-2 Soil Respiration Chamber, the soil respiration characteristics of four typical urban lawns (*Cynodon dactylon* × *C. transadlensis*, mixture lawn with *Lolium perenne* and *C. dactylon* × *C. transadlensis*, *Zoysia japonica*, and *C. dactylon*) in Shanghai were studied. An obvious seasonal change was observed in the soil respiration rate, with the maximum in July – August and the minimum in December – next January. The average soil respiration rate of the lawns was in the order of *C. dactylon* × *C. transadlensis* < mixture lawn with *L. perenne* and *C. dactylon* < *Z. japonica* < *L. perenne*, being $0.13 \sim 2.25$, $1.16 \sim 5.95$, $0.93 \sim 8.27$, and $1.21 \sim 9.27 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. The soil respiration rate had a significant exponential correlation with air temperature and with the soil temperature at depths 5 cm and 10 cm. The diurnal patterns of the soil respiration rate of *C. dactylon* × *C. transadlensis* and of mixture lawn with *L. perenne* and *C. dactylon* × *C. transadlensis* could be expressed as one-humped curve, and the variation trends were similar to those of air temperature and the soil temperature at depths 5 cm and 10 cm. The sensitivity of the four lawns soil respiration to temperature (Q_{10} value) was from 1.60 to 2.66. For the lawns except *Z. japonica*, no significant relationship was found between soil respiration rate and soil moisture content. The soil respiration characteristics of the lawns had a close relationship to the growth habit of grass. The Q_{10} value of the mixture lawn with cold-warm-season turf grass was relatively smaller, which would be beneficial to the improvement of urban ecological landscape and environmental quality.

Key words: soil respiration; urban lawn; temperature; Q_{10} ; soil moisture content.

* 上海市建设委员会资助专项(ZX050205)。

** 通讯作者 E-mail: fhl_1969@126.com

收稿日期: 2008-11-17 接受日期: 2009-03-24

土壤呼吸作为全球碳循环的一个主要流通环节,使土壤碳以 CO₂ 的形式流向大气圈(Raich & Schlesinger 1992, Schlesinger & Andrews 2000)。据估计,全球土壤每年向大气释放碳量 68 ~ 100 Pg,是化石燃料燃烧排放碳量的 10 倍以上(Watson *et al.*, 2000),即使土壤呼吸发生微小变化大气中 CO₂ 浓度也会有明显改变(Janssens *et al.*, 2001),因此研究土壤呼吸对探讨全球变暖及其对未来人类生存环境的影响具有十分重要的意义(杨玉盛等 2004)。

目前,中国关于不同生态系统土壤呼吸的研究报道较多,但主要集中在森林或天然草原土壤的呼吸特征及其影响因子,而有关城市土壤呼吸的研究报道很少(Raich & Tufekcioglu 2000)。城市绿地面积虽狭小,却有吸热降温、遮光吸尘、增湿蕴水、吸收 CO₂ 等重要功能,对缓解城市热岛效应和调节城市生态环境质量具有重要作用(蔺银鼎 2003, 周志翔等 2004, 陈燕等 2005)。草坪是城市绿地的重要组成部分,草坪覆盖面积是评价城市建设水平的重要标志之一(刘自学和陈光耀, 2004; 陈仕贵等, 2007)。关于城市绿地草坪对温度、湿度、CO₂ 通量、风速等小气候调节作用的报道已有不少(唐鸣放和白雪莲 2001, 王修信等 2007)。鉴于土壤呼吸的重要性以及为进一步了解草坪对城市小气候环境的调节作用,本文以上海植物园和共青森林公园 2 处上海典型中心绿地为对象,并选择其中 4 种典型的草坪类型进行土壤呼吸特征研究,为进一步了解城市草坪土壤呼吸的变化规律,为正确评价草坪土壤的呼吸特征,减缓温室效应以及草坪的合理建植提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点设在上海植物园和共青森林公园。其中上海植物园(121°17'N, 31°8'E)位于上海徐汇区,占地 81.86 hm²,建于 1974 年;共青森林公园(121°32'N, 31°19'E)位于上海杨浦区,占地面积 131 hm²,建于 1982 年,这 2 座公园均是上海城区最典型的人造老公园,植物种类丰富,常见的华东地带园林植物乔木如广玉兰(*Magnolia grandiflora*),白玉兰(*M. denudata*),香樟(*Cinnamomum camphora*),樱花(*Prunus serrulata*),水杉(*Metasequoia glyptostroboides*),池杉(*Taxodium ascendens*)等,灌木如金桂(*Osmanthus fragrans thunbergii*),银桂(*O. fragrans*

var. *latifolius*),红叶李(*Prunus cerasifera* var. *atro-purpurea*),海棠(*Malus spectabilis*),杜鹃(*Rhododendron fortunei*)等,以及葱兰(*Zephyranthes candida*),麦冬(*Liriope spicata*),黑麦草(*Lolium perenne*)和高羊茅(*Festuca arundinacea*)等草本植物。该地区属于北亚热带季风气候区,温和湿润,年平均温度 16℃左右,全年无霜期约 230 d,年平均降雨量在 1200 mm 左右。

1.2 研究方法

选取上海植物园中的矮生百慕大(*Cynodon dactylon* × *C. transadlensis*)草坪以及黑麦草(*Lolium perenne*)和矮生百慕大(*C. dactylon* × *C. transadlensis*)的混播草坪,共青森林公园中的结缕草(*Zoysia japonica*)草坪和狗牙根(*C. dactylon*)等 4 种草坪为研究对象。矮生百慕大是狗牙根的杂交种,矮生百慕大草坪和结缕草坪为暖季型草坪,这 2 种草坪在上海的秋末和早春(约每年 11 月末—翌年 3 月初)基本枯黄,绿色生长停止,而狗牙根草坪虽属暖季型草坪,但因其生长相对旺盛,加上有少量杂草的混入以及上海为暖冬等原因,这部分草坪在冬季也能保持部分绿色生长。而黑麦草和矮生百慕大草混播草坪,四季常绿,在冬季绿色最为葱翠。以上 4 种草坪均是典型的人工精细养护的草坪,从建园起始就开始种植,期间根据需要进行草坪的翻新或草籽点播,其土壤的基本理化性质见表 1。

1.3 测定与分析方法

在每一块草坪内选择典型样地(1 m × 1 m),采用 CFX-2 开放式呼吸测定系统进行土壤呼吸速率测定。为消除草坪地上部分对土壤呼吸的干扰,测定前剪掉呼吸室覆盖处地上的草坪部分,并确保呼吸室与土壤紧密结合不可漏气,待呼吸室内气体交换平衡后记录数据,3 次重复。2007 年 12 月—2008 年 10 月,每月 2 次(上旬和下旬各 1 次)对 4 种草坪进行土壤呼吸季节变化的测定,采样在 9 :00—12 :00 进行。考虑到不同季节草坪生长存在很大差

表 1 4 种草坪土壤的基本理化性质
Tab.1 Soil physical chemical properties for four laws

草坪类型	全碳 (mg · g ⁻¹)	全氮 (mg · g ⁻¹)	pH	容重 (g · cm ⁻³)	孔隙度 (%)
百慕大草坪	9.26	0.84	8.70	1.59	1.81
黑麦草-百慕大混播草坪	16.59	1.15	8.36	1.39	2.56
结缕草草坪	11.20	1.03	8.39	1.28	5.11
狗牙根草坪	22.10	2.14	8.04	1.34	3.23

异,为详细研究草坪土壤呼吸的日变化,选择各种草坪均有绿色生长的 2008 年的 3、4 和 5 月进行,对其中的黑麦草-百慕大混播草坪和百慕大草坪进行土壤呼吸日变化的测定,每天测定时间 7:00—18:00,每 1 h 测定 1 次。

在测定土壤呼吸的同时,利用数字式瞬时温度计在样点附近测量地表气温、5 cm 地温和 10 cm 地温,并在测定后于呼吸室覆盖处采集 0~10 cm 土壤用烘干法测定土壤含水率。

1.4 数据处理

不同草坪土壤呼吸速率的差异性检验以及和其它因子之间的相关性检验采用 SPSS 13.0 统计分析软件进行分析,所有图采用 EXCEL 2003 绘制。

2 结果与分析

2.1 草坪土壤呼吸速率的季节变化

从图 1 可知,4 种草坪土壤的呼吸速率均呈明显的季节变化,土壤呼吸速率的最大值出现在 7—8 月,最小值出现在 12—翌年 1 月。其中百慕大草坪土壤的呼吸速率变化范围为 0.13~2.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,黑麦草混播草坪为 1.16~5.95 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,狗牙根草坪为 1.21~9.27 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

s^{-1} ,结缕草草坪为 0.93~8.27 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。总体上,4 种草坪全年土壤呼吸平均速率由小到大的顺序为百慕大草坪<黑麦草-百慕大混播草坪<结缕草草坪<狗牙根草坪,其中黑麦草-混播草坪、结缕草草坪和狗牙根草坪三者差异不显著,但与百慕大草坪均存在极显著差异($P<0.01$)。且 4 种草坪土壤的呼吸速率的季节变化与气温、5 cm 地温和 10 cm 地温的变化趋势相似(图 1),土壤呼吸速率的最高值和最低值分别出现在温度最高和最低的月份,可见,随着温度的逐渐升高,土壤呼吸速率逐渐变大。

草坪类型不同,其土壤呼吸的季节变化有所差异。其中百慕大草坪土壤的呼吸速率在观测期间一直最小,尤其在冬季,百慕大草坪土壤呼吸基本为零,在 12—翌年 4 月,黑麦草-百慕大混播草坪土壤的呼吸速率最大,而在 5—8 月,狗牙根草坪土壤的呼吸速率最大,其次为结缕草。几种草坪土壤呼吸的季节差异可能与其生长习性有关,除黑麦草外其他草坪均为暖季型草坪,它们生长的最适温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ ~35 $^{\circ}\text{C}$,从 5 月起上海温度变化适宜其生长,暖季型草坪土壤呼吸速率随着温度升高有加快趋势。而黑麦草-百慕大混播草坪由于黑麦草是冷季

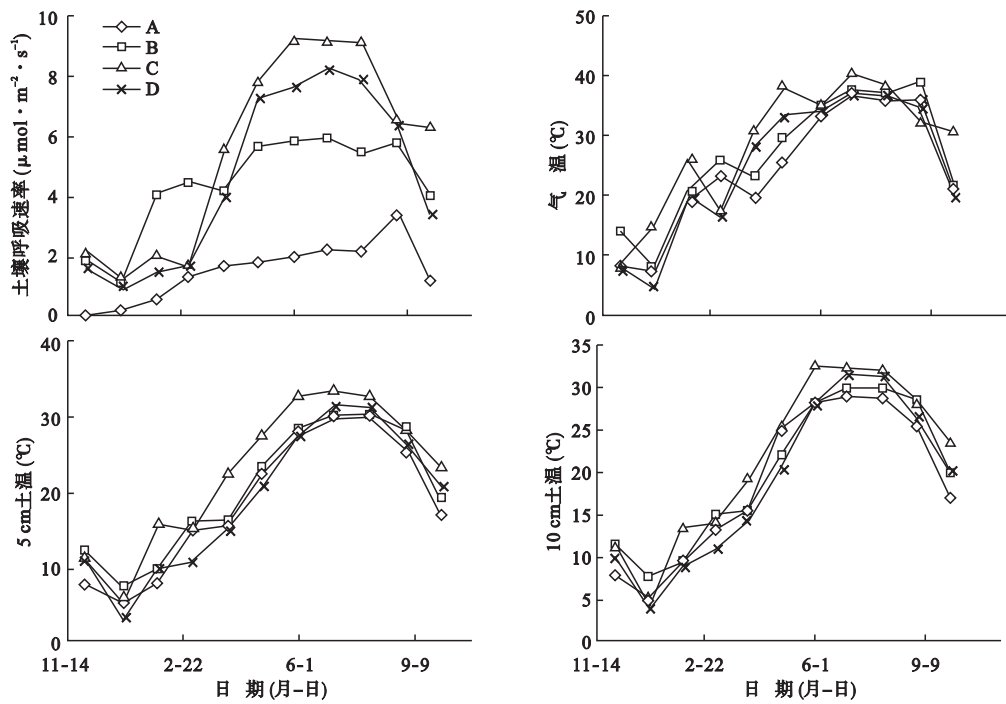


图 1 4 种草坪土壤呼吸速率、气温、5 cm 地温和 10 cm 地温季节变化

Fig.1 Seasonal variations of soil respiration rate, temperature, and soil temperature at 5-cm and 10-cm depths in four kinds of lawn

A)百慕大 B)黑麦草-百慕大 C)狗牙根 D)结缕草。

型草坪 ,其最适宜的生长温度是 15 ℃ ~ 25 ℃ ,在 12—翌年 4 月百慕大草坪生长减弱甚至停止 ,但黑麦草生长旺盛 ,相应土壤呼吸速率也高 ,到了 5 月以后 ,黑麦草的生长受到抑制 ,但混播的百慕大已开始生长 ,其土壤呼吸速率随温度升高而升高的趋势变缓。相对其他草坪而言 ,黑麦草-百慕大混播草坪一年生长期内的土壤呼吸速率基本维持在一个相对平衡水平。

2.2 草坪土壤呼吸速率的日动态变化

由图 2 可看出 ,百慕大草坪和黑麦草-百慕大混播草坪土壤呼吸速率日变化动态为单峰曲线 ,且 3 个月的变化规律大致相同 ,即在清晨时相对较低 ,之后逐步提高 ,12 :00—15 :00 左右达到最大值 ,之后又逐渐降低。

日变化范围的大小反映了 2 种草坪不同月份的土壤呼吸速率日变化范围存在差异。其中百慕大草坪土壤呼吸速率 3 月的日变化范围为 1.12 ~ 1.90

$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,4 月为 1.50 ~ 2.02 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,5 月为 1.70 ~ 2.84 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其大小顺序为 3 月土壤呼吸速率 < 4 月土壤呼吸速率 < 5 月土壤呼吸速率。黑麦草-百慕大混播草坪 3 月的土壤呼吸速率日变化范围为 3.82 ~ 8.26 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,4 月为 5.08 ~ 12.20 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,5 月为 3.65 ~ 7.07 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,大小顺序为 3 月土壤呼吸速率 < 5 月土壤呼吸速率 < 4 月土壤呼吸速率。2 种草坪不同月份土壤日呼吸速率的变化也可能与草坪生长习性有关 ,到了 5 月随着上海温度的升高 ,冷季型黑麦草的生长受到抑制 ,其土壤呼吸的速率反而比 4 月低。

从图 2 可以看出 ,黑麦草-百慕大混播草坪的土壤呼吸速率明显高于百慕大草坪($P < 0.01$)。除了草坪植被组成、土壤微生物活性以及土壤物理和化学特性的不同外 (Adachi *et al.* , 2006) ,人为干扰也是造成 2 种草坪呼吸差异的原因之一。从表 1 可

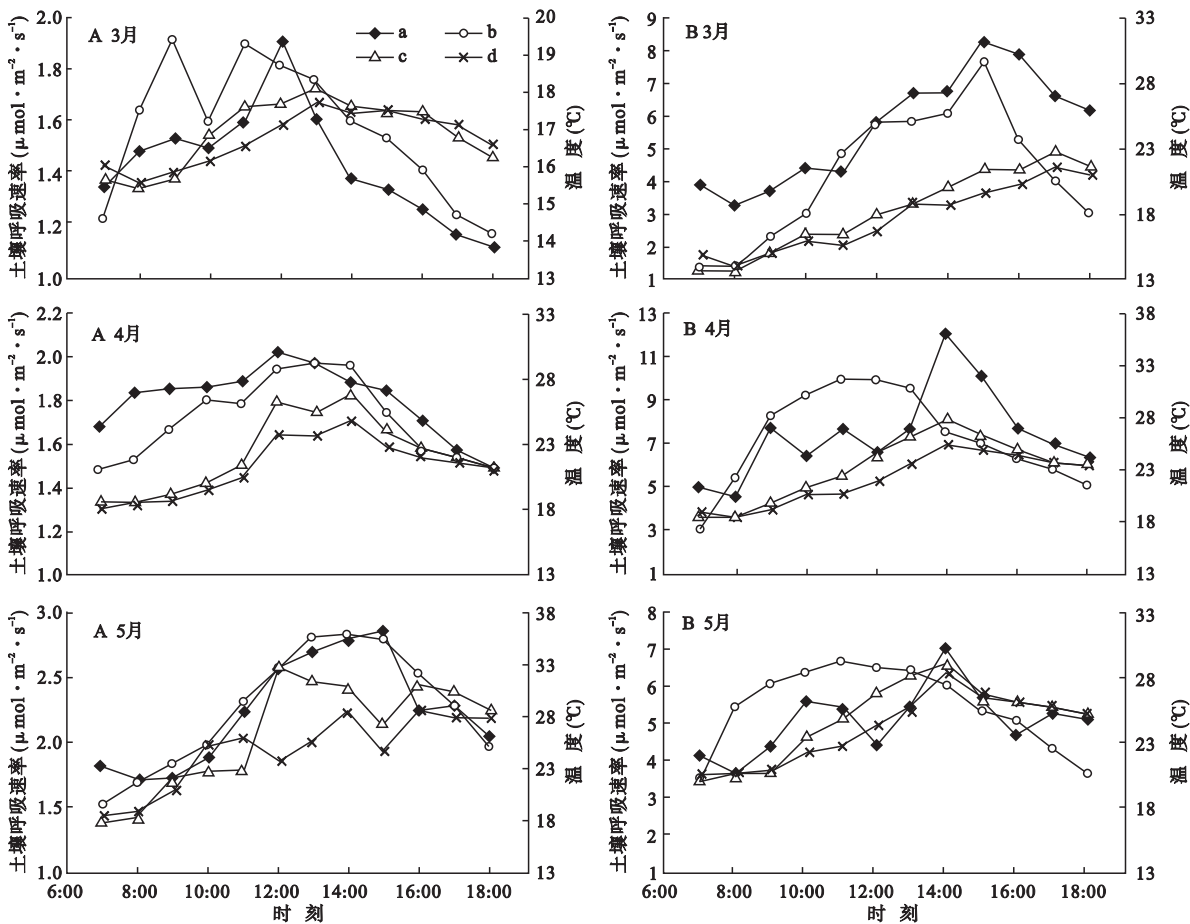


图 2 2 种草坪土壤呼吸速率、气温、5 cm 地温和 10 cm 地温日变化

Fig.2 Diurnal variations of soil respiration rate , temperature , and soil temperature at 5-cm and 10-cm depths in two kinds of lawn

a. 土壤呼吸速率 ; b. 气温 ; c. 5 cm 地温 ; d. 10 cm 地温 ; A. 百慕大 ; B. 黑麦草-百慕大。

知,百慕大草坪的土壤容重高达 $1.59\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,因为是开放性的草坪,受人为严重践踏,可能影响草坪根系生长进而降低其呼吸速率。

由图 2 还可看出 2 种草坪 3 个月内气温、5 cm 地温和 10 cm 地温的日变化也呈单峰曲线,变幅在 $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 16.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,与土壤呼吸速率日变化的趋势基本一致,其中百慕大草坪的气温、5 cm 地温和 10 cm 地温分别是 3 月 < 4 月 < 5 月;而黑麦草-百慕大混播草坪的气温、5 cm 地温和 10 cm 地温分别是 3 月 < 5 月 < 4 月。这与国内草原群落日变化趋势相似,均与温度的日变化有着较好的一致性,但同时也受到其他因子的较大影响(刘立新等 2007)。如 2 种草坪出现土壤呼吸最大值的时间不同,百慕大草坪在 3 和 4 月的最大土壤呼吸速率出现在 12:00 左右,比最高气温或地温出现时间提前,到 5 月最大土壤呼吸速率推迟到 15:00 左右,与最高温度出现的时间基本一致。而黑麦草趋势相反,在 3 月最大呼吸速率出现在 15:00 左右,与最高温度出现的时间基本一致,之后最大呼吸速率时间相对提前,4、5 月出现在 14:00 左右。草坪土壤日呼吸最大值出现时间不一致也可能和草坪生长习性有关,百慕大草坪是典型的暖季型草坪,在 3、4 月气温还未到其最适宜的生长温度,其最大土壤呼吸速率出现时间比最大温度出现时间早,而到 5 月最大呼吸速率和最高温度出现的时间基本一致,而黑麦草是典型的冷季型草坪,在 3 月最大呼吸速率和最高温度出现的时间基本一致,当 4、5 月天气逐渐回暖,随着温度的升高,黑麦草的生长反而受到抑制,相应其土壤呼吸也降低,因此出现了最大呼吸速率的时间比最大温度出现时间提前。由此可见,草坪类型不同其最大呼吸速率出现的时间也不同。

2.3 草坪土壤呼吸速率与温度的关系

土壤温度是影响土壤呼吸的主要环境因素,一般认为土壤呼吸速率与温度之间存在较明显的指数关系,其中 $R_s = \alpha e^{\beta T}$ 是应用较多的指数模型之一,式中 R_s 为土壤呼吸速率; T 为温度($^{\circ}\text{C}$); α 为土壤温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的土壤呼吸速率; β 为温度敏感系数(Raich & Potter,1995)。

由表 1 可看出 4 种草坪的土壤呼吸速率(R_s)与气温、5 cm 地温和 10 cm 地温的相关性均达到了极显著水平($P < 0.01$),说明土壤呼吸作用随温度的升高而增加,温度变化分别解释了不同草坪观测期间土壤呼吸速率变化的 57% ~ 92%。草坪类型

不同,和不同温度之间相关系数大小也不同,其中百慕大草坪、黑麦草-百慕大混播草坪以及狗牙根草坪土壤的呼吸速率与气温之间的相关系数最大,而结缕草草坪的土壤呼吸速率与 5 cm 地温之间的相关系数最大。这与一些研究得出的土壤呼吸与 5 cm 地温(刘惠等,2007)或 10 cm 地温(周存宇等,2005)关系最显著的结果有一定差异,但与草原的研究结果一致(陈全胜等,2004)。究其原因一方面可能与草坪枯落物和腐殖质层薄且附着在地表面有关,另一方面也可能和上海土壤有机质含量普遍低有关(方海兰等,2007)。

Q_{10} 是常用的反映土壤呼吸对温度变化敏感性的指标,指温度每升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时土壤呼吸速率增加的倍数(房秋兰和沙丽清,2006)。从表 2 可以看出,草坪类型不同,其土壤呼吸对温度的敏感程度也不同。其中百慕大草坪气温、5 cm 地温和 10 cm 地温的 Q_{10} 值分别为 2.46、2.60 和 2.66;黑麦草-百慕大混播草坪气温、5 cm 地温和 10 cm 地温的 Q_{10} 值分别为 1.60、1.62 和 1.60;狗牙根草坪气温、5 cm 地温和 10 cm 地温的 Q_{10} 值分别为 1.94、2.19 和 2.16;结缕草草坪气温、5 cm 地温和 10 cm 地温的 Q_{10} 值分别为 1.99、2.19 和 2.16。2 种暖季型草坪土壤呼吸的 Q_{10} 在 1.99 ~ 2.66,而混播草坪的 Q_{10} 只有 1.6,说明暖季型草坪对温度敏感性相对较高,而混播草坪由于有冷暖 2 种草坪类型适宜在不同的季节生长,降低了温度对其生长影响,相应也降低温度对其呼吸速率影响。由此可见,通过草坪建植方式的人

表 2 草坪土壤呼吸与温度的关系
Tab. 2 Relationship between soil respiration and temperature in lawn

草 坪		$R_s = \alpha e^{\beta T}$	R^2	Q_{10}
百慕大草坪	T_a	$R_s = 0.1207e^{0.0899T}$	0.7899	2.46
	T_5	$R_s = 0.1736e^{0.0956T}$	0.7140	2.60
	T_{10}	$R_s = 0.1661e^{0.0977T}$	0.7157	2.66
黑麦草-百慕	T_a	$R_s = 1.1744e^{0.0467T}$	0.7917	1.60
	T_5	$R_s = 1.4912e^{0.0483T}$	0.6123	1.62
	T_{10}	$R_s = 1.5734e^{0.0468T}$	0.5688	1.60
大混播草坪	T_a	$R_s = 0.7018e^{0.0664T}$	0.9012	1.94
	T_5	$R_s = 0.8047e^{0.0786T}$	0.9025	2.19
	T_{10}	$R_s = 0.8403e^{0.0772T}$	0.8904	2.16
狗牙根草坪	T_a	$R_s = 0.6347e^{0.0689T}$	0.8172	1.99
	T_5	$R_s = 0.7319e^{0.0783T}$	0.9173	2.19
	T_{10}	$R_s = 0.8197e^{0.0768T}$	0.9081	2.16

T_a : 气温 T_5 : 5 cm 土温 T_{10} : 10 cm 土温 R_s : 土壤呼吸速率 T : 温度($^{\circ}\text{C}$) α : 土壤温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的土壤呼吸速率 β : 温度敏感系数 R^2 : 相关系数。

表3 草坪土壤呼吸与土壤含水率的关系
Tab.3 Relationship of soil respiration and soil water content in lawn

草坪	$R_s = a + bw$	R^2
百慕大草坪	$R_s = -8.1928w + 2.7311$	0.1430
黑麦草-百慕大混播草坪	$R_s = -73.886w + 19.612$	0.3320
狗牙根草坪	$R_s = -57.031w + 19.356$	0.1709
结缕草草坪	$R_s = -90.067w + 25.142$	0.4532 *

R_s : 土壤呼吸速率; w : 土壤湿度; a 和 b 为参数; R^2 : 相关系数, * $P < 0.05$ 。

为改变,可以降低温度对其土壤呼吸速率的影响。

2.4 草坪土壤呼吸速率与水分的关系

采用通用线性回归模型($R_s = a + bw$, 式中 R_s 为土壤呼吸速率; w 为土壤湿度; a 和 b 为参数), 对整个研究期间的土壤含水率和土壤呼吸进行相关性分析(表3), 得知结缕草草坪土壤的呼吸速率(R_s)与土壤含水率的相关性达到了显著水平($P < 0.05$), 而其他3种草坪土壤的呼吸速率与土壤含水率之间均无明显的相关性。

3 讨 论

3.1 城市草坪土壤呼吸的特征

上海4种典型草坪的土壤呼吸速率具有明显的季节和日变化趋势, 这与其他不同区域的自然植物群落的土壤呼吸特征的研究结果是一致的(常宗强等 2005; 王小国等 2007)。虽然土壤呼吸最大值或最小值出现的季变化或日变化的具体时间在不同研究地、不同土地利用方式或植被类型上有所不同, 但和已有研究报道的土壤呼吸速率与当地气温、5 cm 地温和 10 cm 地温的日变化趋势相似并呈明显指数相关的研究结果相一致(黄承才等, 1999; 周志田等 2002), 说明温度对人工草坪土壤呼吸的影响机制和对自然群落的相一致。

不同的植被类型, 土壤呼吸也有所不同, 不同植被之间土壤呼吸存在明显差异(杨晶等 2004; 向珊珊等 2008), 可能4种草坪均属于草本植物, 虽然土壤呼吸速率存在差异, 即全年由小到大依次为百慕大草坪 < 黑麦草-百慕大混播草坪 < 结缕草草坪 < 狗牙根草坪, 但除百慕大草坪外, 其他3种草坪的土壤呼吸没有显著差异。造成百慕大草坪和其他3种草坪土壤呼吸速率的差异可能受到土壤本身性质的影响。从表1可知道, 由于百慕大草坪是开放式草坪, 受到人为的严重践踏, 因此其碳、氮含量及容重、pH 等理化性质明显要比其他3种土壤差, 其土壤呼吸也最低, 而狗牙根草坪的碳、氮含量及 pH 等理化

性质是4种草坪中最好的, 其土壤呼吸相对也最高。张东秋等(2005)也总结指出, 土壤呼吸受土壤性质影响, 当土壤碳和氮含量高时, 其土壤呼吸相对也会增强。由此可见, 在城市中, 人为践踏等人为因素干扰了土壤理化性质进而影响其土壤的呼吸速率。

全球土壤呼吸的 Q_{10} 一般在 2.0 ~ 2.4, 平均值为 2.0, 高纬度地区大于低纬度地区(刘绍辉等, 1998)。本研究中, 4种草坪土壤呼吸的 Q_{10} 值在 1.60 ~ 2.66, 比温带森林(2.0 ~ 3.5)和草原(2.0 ~ 3.0)的 Q_{10} 值偏低(牟守国 2004), 这可能是上海地区常年平均气温在 15 °C 以上所致, 而已有研究表明, 当试验地温度高于 15 °C 时, 温度对土壤呼吸的影响减弱(Wildung *et al.*, 1975), 因此, 在上海地区温度对土壤呼吸的影响相对迟钝。

有研究表明, 土壤含水量对土壤呼吸速率的影响较为复杂, 当土壤含水量低时, 土壤呼吸和土壤含水量呈显著相关(Maier & Kress 2000), 在接近田间持水量一定范围内, 土壤呼吸最高, 而在饱和或永久萎蔫含水量时, 土壤呼吸作用停滞(Davidson *et al.*, 2000)。只有在干旱地区或半干旱地区及土壤含水量过饱和的情况下, 温度和土壤水分才共同影响土壤呼吸作用(杨晶等 2004)。本研究得出, 除结缕草草坪外, 其他3种草坪土壤的呼吸速率与土壤含水率相关性不显著, 可能是不同实验地土壤含水量不同所造成的。一般在自然气候尤其是降雨量小的地区, 土壤呼吸速率与其含水率相关性显著(常宗强等 2005; 周存宇等 2005), 而上海草坪土壤呼吸速率和土壤含水量相关性不显著的原因可能有二: 一是在城市绿地中草坪是养护最为精细、耗水量最大的绿地类型, 草坪土壤含水量相对较高, 同时草坪本身也有很好的保湿作用(王修信等 2007), 这可能是城市草坪土壤呼吸受含水量影响迟钝的主因; 二是上海常年雨水丰富, 土壤水分充足, 所以土壤含水量不是土壤呼吸的主要限制因子。

3.2 城市草坪的生长习性和建植方式对土壤呼吸的影响及其应用意义

从4种草坪土壤的呼吸特征可看出, 除温度等主因外, 草坪生长习性和建植方式也是影响其土壤呼吸的重要因子, 虽然4种草坪土壤呼吸的日、季变化趋势基本一致, 但日最高呼吸速率出现时间、不同月份之间呼吸速率变化程度还是有一定差异的, 特别对温度的敏感程度即 Q_{10} 值差异明显。其中百慕大和结缕草等暖季型草坪的土壤呼吸季节性变化

大,受温度影响大, Q_{10} 值相对大;黑麦草-百慕大混播草坪不但全年土壤呼吸量总体较小且季节变化也小, Q_{10} 值也相对较小。而土壤呼吸对温度的敏感性在很大程度上决定着全球气候变暖对土壤净释放 CO_2 的影响程度(Boone *et al.*, 1998), Q_{10} 值越大,在全球气候变暖条件下, CO_2 释放量也越大(向珊珊等, 2008)。这在温室效应显著的城市小环境中影响也更明显,因为城市气温相对高, Q_{10} 越大越有利于 CO_2 的释放。通过对上海城区不同草坪的土壤呼吸特征研究也表明,暖季型单一性草坪比混播草坪对温度更敏感,可能释放更多的 CO_2 。因此可以利用不同草坪生长习性和混播技术应用来降低草坪的 Q_{10} ,减少 CO_2 的释放,而且混播草坪还能保持四季常绿,生态景观效果也更佳(Murray, 1988; 朱明等, 2002)。

由此可见,混播草坪的人工合理建植不但能美化城市景观,还可减少土壤呼吸的季节变动,减少温度对其影响和 CO_2 释放,增强草坪调节小气候和缓解温室效应的能力,对维持城市生态环境质量有积极作用,也值得在城市管理中进行推广应用。

参考文献

常宗强,史作民,冯起,等. 2005. 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. 应用生态学报, **16**(9): 1603-1606.

陈燕,将维楣,徐敏,等. 2005. 城市规划中绿化布局对区域气象环境影响的数值试验研究. 地球物理学报, **48**(2): 265-274.

陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 2004. 土壤呼吸对温度升高的适应. 生态学报, **24**(11): 2649-2655.

陈仕贵,黄璜,杨知建,等. 2007. 应用草坪生态系统于城市生态建设的思考. 草业科学, **24**(6): 76-79.

方海兰,陈玲,黄懿珍,等. 2007. 上海新建绿地的土壤质量现状和对策. 林业科学, **43**(增刊1): 89-94.

房秋兰,沙丽清. 2006. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸. 植物生态学报, **30**(1): 97-103.

黄承才,葛滢,常杰,等. 1999. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究. 生态学报, **19**(3): 324-328.

蔺银鼎. 2003. 城市绿地生态效应研究. 中国园林, (11): 36-38.

刘惠,赵平,林永标,等. 2007. 华南丘陵区不同土地利用方式下土壤呼吸. 生态学杂志, **26**(12): 2021-2027.

刘立新,董云社,齐玉春,等. 2007. 内蒙古锡林河流域土壤呼吸的温度敏感性. 中国环境科学, **27**(2): 226-230.

刘绍辉,方精云,清田信. 1998. 北京山地温带森林的土壤呼吸. 植物生态学报, **22**(2): 119-126.

刘自学,陈光耀. 2004. 城市草坪绿地与人类保健. 草业科学, **21**(5): 80-81.

牟守国. 2004. 温带阔叶林、针叶林和针阔混交林土壤呼吸的比较研究. 土壤学报, **41**(4): 564-570.

唐鸣放,白雪莲. 2001. 城市草坪的生态热效益. 重庆环境科学, **23**(1): 14-15.

王小国,朱波,王艳强,等. 2007. 不同土地利用方式下

土壤呼吸及其温度敏感性. 生态学报, **27**(5): 1960-1968.

王修信,胡玉梅,刘馨,等. 2007. 城市草地的小气候调节作用初步研究. 广西师范大学学报(自然科学版), **25**(3): 23-27.

向珊珊,王国兵,罗治建,等. 2008. 次生栎林和人工松林土壤呼吸对温度敏感性的室内模拟. 生态学杂志, **27**(8): 1296-1301.

杨晶,黄建辉,詹学明,等. 2004. 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比较. 植物生态学报, **28**(3): 318-325.

杨玉盛,董彬,谢锦升,等. 2004. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应. 生态学报, **24**(3): 583-591.

张东秋,石培礼,张宪洲. 2005. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. 地球科学进展, **20**(7): 778-785.

周存宇,周国逸,王迎红,等. 2005. 鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸的研究. 北京林业大学学报, **27**(4): 23-27.

周志田,成升魁,刘允芬,等. 2002. 中国亚热带红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤 CO_2 排放规律初探. 资源科学, **24**(2): 83-87.

周志翔,邵天一,唐万鹏,等. 2004. 城市绿地空间格局及其生态效应. 生态学报, **24**(2): 187-192.

朱明,李建龙,宋子健,等. 2002. 亚热带城市绿地草坪质量评价标准及其应用初探. 中国草地, **24**(5): 40-44.

Adachi M, Bekku YS, Rashidah W, *et al.* 2006. Differences in soil respiration between different tropical ecosystems. *Applied Soil Ecology*, **34**: 258-265.

Boone RD, Nadelhoffer KJ, Canary JD, *et al.* 1998. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, **396**: 570-572.

Davidson EA, Verchot LV, Cattaneo JH, *et al.* 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, **48**: 53-69.

Janssens IA, Lankreijer H, Matteucci G, *et al.* 2001. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, **7**: 269-278.

Maier CA, Kress LW. 2000. Soil CO_2 evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability. *Canadian Journal of Forest Research*, **30**: 347-359.

Murray JJ. 1988. Future lawns may be green all year. *UAS Today*, **116**(4): 15.

Raich JW, Potter CS. 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, **9**: 23-36.

Raich JW, Schlesinger WH. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, **44**: 81-99.

Raich JW, Tufekcioglu A. 2000. Vegetation and soil respiration: Correlations and control. *Biogeochemistry*, **48**: 71-90.

Schlesinger WH, Andrews JA. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, **48**: 7-20.

Watson RT, Noble IR, Bolin B, *et al.* 2000. Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Wildung RE, Garland TR, Buschbom RL. 1975. The interdependent effect of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **7**: 373-378.

作者简介 孙倩,女,1983年生,硕士研究生。主要从事生态环境研究。E-mail: sikasun@163.com
责任编辑 李凤芹

