

上海城市绿地不同植物群落土壤呼吸及因子分析

梁 晶¹, 方海兰¹, 郝冠军¹, 孙 倩²

(1. 上海市园林科学研究所, 上海 200232; 2. 东北师范大学 城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024)

摘要: 用 CFX-2 开放式呼吸测定系统对上海城区 9 种植物群落进行了土壤呼吸速率的测定及其影响因子的探讨。结果表明: 9 种植物群落的土壤呼吸速率均呈明显季节变化, 土壤呼吸速率最大值出现在 6–9 月, 最小值出现在 12–3 月; 但土壤呼吸速率日变化有乔灌木较平稳, 草坪呈单峰曲线的趋势; 9 种植物群落平均土壤呼吸速率的总体差异极为显著($P<0.01$), 狗牙根 *Cynodon dactylon* 草坪最高, 为 $5.51 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 是呼吸速率最低的紫荆 *Cercis* sp. 群落的 2.76 倍; 9 种植物群落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($P<0.01$), 但地温 Q_{10} (温度系数, 温度每变化 10 °C, 呼吸速率的相对变化)值高于气温, 且 5 cm 和 10 cm 地温对土壤呼吸速率的影响较小; 土壤易变碳的大小顺序为轻组有机碳 > 微生物量碳 > 可溶性碳, 但土壤呼吸速率受土壤微生物量碳和可溶性碳的影响较大; 草坪群落二氧化碳的年释放量最大, 达到了 $33.18 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 是乔木林的 1.95 倍, 是灌木丛的 2.12 倍。图 3 表 6 参 30

关键词: 土壤学; 城市绿地; 土壤呼吸; 植物群落; 土壤温度; 土壤含水率; 易变碳; 二氧化碳

中图分类号: S714 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2012)01-0022-10

Soil respiration for different plant communities in an urban green-belt of Shanghai

LIANG Jing¹, FANG Hailan¹, HAO Guanjun¹, SUN Qian²

(1. Shanghai Institute of Landscape Gardening, Shanghai 200232, China; 2. Urban and Environmental Science College, Northeast Normal University, Changchun 130024, Jilin, China)

Abstract: The soil respiration rate of nine plant communities (*Cinnamomum camphora*, *Torreya grandis*-*Ginkgo biloba*, *Cedrus deodara*, *Ginkgo biloba*, *Osmanthus fragrans*, *Cercis* sp., *Lolium perenne*-*Cynodon dactylon*, *Zoysia japonica*, and *Cynodon dactylon*) in Shanghai City were studied with a CFX-2 Soil Respiration Chamber, and the main influential factors were identified, and the aim was to evaluate correctly soil respiration of urban soil. The digital thermometer was used to test the air temperature, the soil temperature at 5 cm depth and the soil temperature at 10 cm depth. And all data were average of three replications, and a correlation analysis was also employed. Results showed that soil respiration rates varied by season with the maximum found from June to September and the minimum from December to the following March. Daily variation in the soil respiration rate under communities of trees and bushes was generally stable; whereas a lawn had a single-peaked curve. The maximum soil respiration rates ($5.51 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) found under *Cynodon dactylon* and the minimum (2.76 times less) found under a *Cercis* sp. community. The soil respiration rate had a significant exponential correlation ($P<0.01$) with the air temperature, the soil temperature at 5 cm depth, and the soil temperature at 10 cm depth. Soil water content had an effect on soil respiration under lawns, but it had a relatively small influence on tree and bush communities. The soil labile organic carbon content was ranked in the following order: light fraction organic carbon (LFOC) > microbial biomass carbon (MBC) > dissolved

收稿日期: 2012-01-05; 修回日期: 2012-03-14

基金项目: 上海辰山植物园资助项目(G102402)

作者简介: 梁晶, 从事城市土壤质量评价与废弃物土地利用研究。E-mail: liangjing336@136.com。通信作者: 方海兰, 教授级高级工程师, 从事城市土壤质量评价与废弃物土地利用研究。E-mail: fhl_1969@126.com

organic carbon (DOC), but MBC and DOC had the greatest influence on the soil respiration rate. The maximum released quantity of CO_2 reached to $33.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ under lawns, which was 1.95 times that of trees and 2.12 times that of bushes. [Ch, 3 fig. 6 tab. 30 ref]

Key words: soil science; urban green-belt; soil respiration; plant communities; soil temperature; soil water content; labile organic carbon; CO_2

土壤呼吸是地球化学循环的重要组成部分,对土壤碳释放及大气中碳平衡起着至关重要的作用,因此受到了学术界的普遍关注。刘建军等^[1]对秦岭天然油松 *Pinus tabulaeformis* 和锐齿栎 *Quercus aliena* var. *acuteserrata* 林地土壤呼吸的季节变化及与气温、土壤温度的关系进行了研究;王光军等^[2]研究了凋落物对长沙天际岭国家森林公园马尾松林 *Pinus massoniana* 土壤呼吸的影响;严俊霞等^[3]进行了黄土高原地区柠条 *Caragana* sp. 人工林土壤呼吸的年变化及日变化研究等。目前,这些研究大多集中在郊区单一林种土壤呼吸的日变化、年变化及控制因子上^[4-5],对不同植物群落的土壤呼吸研究较少^[6],尤其是对城市绿地土壤呼吸的研究则更鲜有报道^[7]。事实上,城市绿地作为城市生态系统的重要组成部分,不仅城市绿化面积大小会影响城市的生态环境质量,而且城市不同植物群落的配置是否合理也将对城市的热岛效应及全球的碳变化具有一定的影响^[8]。众所周知,土壤在减少和增加大气二氧化碳浓度中起着重要作用,它作为大气二氧化碳的源和汇除受气温和土温的影响外,还取决于植被的类型及土壤有机质的形成和分解^[9]。由于土壤中生物、化学和物理过程之间复杂的相互作用,使不同土壤有机质成分具有不同的化学结构和分解速率。一般认为,易变碳库比稳定碳库积累速率更快,氧化成二氧化碳的风险也更大^[10],易变碳是土壤呼吸的主要驱动力^[11]。因此,本研究拟选取上海9种典型植物群落进行土壤呼吸及温度、水分和易变碳等影响因子的研究,以期正确评价城市绿地不同植物群落的土壤呼吸和易变碳特征、减缓温室效应以及改善城市小气候的生态环境提供理论依据,对揭示城市碳预算及源与汇变化具有重要科学意义。

1 研究地区自然状况

研究地点选在上海植物园和共青森林公园。上海植物园(31°08'N, 121°17'E)位于上海徐汇区,占地81.9 hm^2 ,建于1974年;共青森林公园(31°19'N, 121°32'E)位于上海杨浦区,占地面积131.0 hm^2 ,建于1982年;均是上海城区最典型的老公园,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 *Magnolia denudata*,樟树 *Cinnamomum camphora*,樱花 *Prunus serrulata*,水杉 *Metasequoia glyptostroboides*,池杉 *Taxodium ascendens* 等,灌木如木犀属的金桂 *Osmanthus fragrans* 'Thunbergii' 和银桂 *Osmanthus fragrans* 'Latifolius',红叶李 *Prunus cerasifera* var. *atropurpurea*,海棠 *Malus spectabilis*,杜鹃 *Rhododendron fortunei* 等,草本植物如葱兰 *Zephyranthes candida*,麦冬 *Liriope spicata*,黑麦草 *Lolium perenne*,高羊茅 *Festuca arundinacea* 等。该地区气候属于北亚热带季风气候区,气候温和湿润,年平均气温16.0℃左右,全年无霜期约230 d,年平均降水量为1200 mm左右。选取的9种典型城市植物群落的植被组成和土壤基本理化性质见表1。

2 研究方法

土壤呼吸速率利用CFX-2开放式呼吸测定系统进行测定。为消除地被植物地上部分对土壤呼吸的干扰,测定前剪掉呼吸室覆盖处地被植物地上部分,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,且每一种植物群落选3~5个点进行测定。从2007年12月到2008年11月,每月2次(上旬和下旬各1次)对9种植物群落进行土壤呼吸季节变化测定,测试在9:00-12:00进行;2008年5月15日到5月27日选取乔木林中的樟树群落、灌木林中的紫荆群落及草坪中的黑麦草+百慕大混播草坪分别进行了土壤呼吸日变化测定,每天7:00-18:00,测定1次 $\cdot \text{h}^{-1}$ 。

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。

分季度(2008年2月、5月、8月和11月)采集土壤表层样品(0~10 cm),每个土壤样品由3~5个取

表 1 植物群落、群落组成和土壤理化性质

Table 1 Plant communities, plant composition, physical chemical and properties of soil

群落类型		植物组成	全碳/ (mg·g ⁻¹)	全氮/ (mg·g ⁻¹)	碳/氮	pH	容重 (Mg·m ⁻³)	通气孔 隙度/%
乔木林	樟树群落	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	13.68	1.72	7.97	8.00	1.28	2.50
	香榧+银杏群落	香榧 <i>Torreya grandis</i> +银杏 <i>Ginkgo biloba</i> -罗汉松	14.56	1.52	9.58	7.91	1.24	1.71
		<i>Podocarpus macrophyllus</i> +麦冬 <i>Liriope spicata</i>						
	雪松群落	雪松 <i>Cedrus deodara</i>	25.58	1.96	13.06	7.42	1.22	2.66
灌木林	银杏群落	银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	18.86	1.30	14.47	8.02	1.22	5.78
	金桂群落	金桂 <i>Osmanthus fragrans</i>	18.48	1.29	14.34	8.43	1.30	2.86
	紫荆群落	紫荆 <i>Cercis chinensis</i> +黄山紫荆 <i>Cercis chingii</i> + 南欧紫荆 <i>Cercis siliquastrum</i>	13.10	2.36	5.54	8.09	1.37	3.57
草坪	黑麦草+百慕大 混播草坪	黑麦草 <i>Lolium perenne</i> +百慕大 <i>Cynodon dactylon</i>	16.59	1.15	14.38	8.36	1.39	2.56
	结缕草草坪	结缕草 <i>Zoysia japonica</i>	11.20	1.03	10.90	8.39	1.28	5.11
	狗牙根草坪	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	22.10	2.14	10.34	8.04	1.34	3.23

说明：+表示植物位于同一层次，-表示植物位于不同层次。

样点组成。样品带回实验室拣去石砾、植物根系和碎屑后，用四分法分成 2 份，一份过 2 mm 筛，储藏于 4 ℃冰箱中用于微生物生物量碳(MBC)的熏蒸处理和可溶性碳(DOC)的提取；另一份风干后过 2.00, 0.25, 0.15 mm 筛并储藏于密闭的塑料自封袋中用于土壤轻组碳的测定。

土壤有机质用重铬酸钾容量法(油浴外加热)；土壤全氮用酸水解蒸馏法；土壤 pH 值用酸度计法；土壤容重和孔隙度用环刀法；微生物生物量碳(MBC)用氯仿熏蒸-重铬酸钾外加热法；可溶性碳(DOC)用水土比 1：2 提取-TOC 测定仪测定；轻组有机碳用溴化钠-重液处理后重铬酸钾容量法测定。

所有数据均为 3 次重复的平均值，利用 EXCEL 2007 进行作图分析，利用 SPSS 16.0 进行统计分析。

3 结果

3.1 不同植物群落土壤呼吸速率变化

3.1.1 不同植物群落土壤呼吸速率季节动态 图 1 所示为 9 种植物群落在整个观测期间土壤呼吸速率的变化图。从图 1 中可知：9 种植物群落土壤呼吸速率有明显的季节变化，均呈单峰曲线，其最大值出现在 6~9 月，最小值出现在 12~3 月。樟树群落土壤呼吸速率为 0.73~6.43 μmol·m⁻²·s⁻¹，香榧+银杏群落为 0.72~3.64 μmol·m⁻²·s⁻¹，雪松群落为 1.05~3.86 μmol·m⁻²·s⁻¹，银杏群落为 0.99~5.58 μmol·m⁻²·s⁻¹，金桂群落为 0.92~4.43 μmol·m⁻²·s⁻¹，紫荆群落为 0.89~3.76 μmol·m⁻²·s⁻¹，黑麦草+百慕大混播草坪为 1.16~5.95 μmol·m⁻²·s⁻¹，结缕草草坪为 0.93~8.27 μmol·m⁻²·s⁻¹，狗牙根草坪为 1.21~9.27 μmol·m⁻²·s⁻¹。土壤呼吸速率的最大值出现在狗牙根草坪群落中，为 9.27 μmol·m⁻²·s⁻¹；最小值出现在樟树群落和香榧银杏群落中，分别为 0.73 μmol·m⁻²·s⁻¹ 和 0.72 μmol·m⁻²·s⁻¹。9 种植物群落土壤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，其中黑麦草+百慕大混播草坪和结缕草草坪土壤呼吸的季节变化与气温变化趋势最接近，其他植物群落土壤呼吸的季节变化均与地温的变化趋势较吻合。土壤呼吸速率的最高值和最低值分别出现在气温最高和最低的月份。可见，随气温逐渐升高，土壤呼吸速率有增大的趋势。但 5 cm 地温和 10 cm 地温的变化曲线在所有群落中几乎重叠，说明 5 cm 地温和 10 cm 地温较接近。就各植物群落土壤呼吸的平均速率而言，9 种植物群落全年土壤呼吸平均速率由小到大的顺序为紫荆群落<香榧+银杏群落<雪松群落<金桂群落<樟树群落<银杏群落<黑麦草+百慕大混播草坪<结缕草草坪<狗牙根草坪(表 2)。狗牙根草坪最高，为 5.51 μmol·m⁻²·s⁻¹，是银杏群落的 1.70 倍，是樟树群落的 2.20 倍，是最低的紫荆群落的 2.76 倍。多重比较的结果说明，各草坪之间的差异不显著，但草坪的土壤呼吸速率显著大于乔木林和灌木林，各乔木林和灌木林之间显著性差异较小。

3.1.2 不同植物群落土壤呼吸速率日动态 为了进一步研究不同群落土壤呼吸速率的变化状况，选取乔

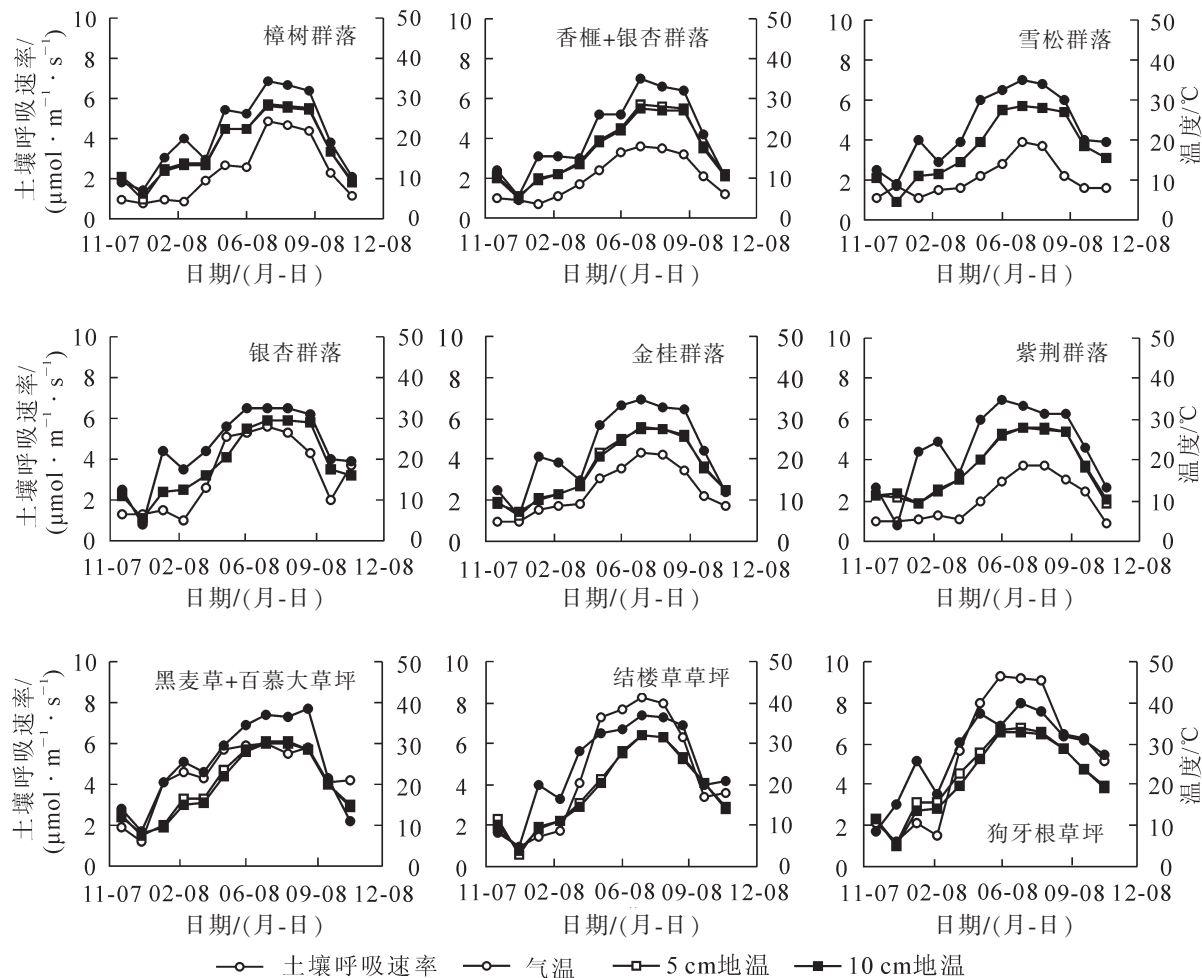


图 1 不同植物群落土壤呼吸速率、气温、5 cm 地温和 10 cm 地温季节变化

Figure 1 Seasonal variations of soil respiration rate, temperature, soil temperature at 5 cm and 10 cm depths in plant communities

木林中的樟树群落、灌木林中的紫荆群落及草坪中的黑麦草+百慕大混播草坪群落分别进行了土壤呼吸日变化测定(图 2)。从中可以发现：樟树群落和紫荆群落土壤呼吸的日变化比较平缓，樟树群落的日变化范围为 2.29~2.97 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，紫荆群落日变化范围为 1.77~2.27 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；而黑麦草+百慕大混播草坪的日变化则呈单峰曲线，范围为 3.65~7.07 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，在清晨时相对较低，之后逐步提高，14:00 左右达到了最大值，之后又逐渐减低，呼吸最大值为最小值的 1.94 倍。气温、5 cm 地温和 10 cm 地温在各植物群落中的变化趋势与土壤呼吸速率的变化趋势相一致，樟树群落和紫荆群落温度的变化平稳，黑麦草+百慕大混播草坪温度变化幅度较大。

3.2 不同植物群落土壤呼吸速率与环境因子的关系

3.2.1 不同植物群落土壤呼吸速率与温度的关系 表 3 所示为 9 种植物群落的土壤呼吸速率与气温、5 cm 地温和 10 cm 地温的相关关系。从表 3 中可以发现：不同植物群落土壤呼吸速率与气温、5 cm 地温

表 2 不同植物群落土壤呼吸多重比较

Table 2 Multi-comparison of soil respiration in plant communities		
群落类型	平均土壤呼吸速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	差异显著性($P_{0.01}$)
狗牙根草坪	5.51 ± 3.09	A
结缕草草坪	4.53 ± 2.80	AB
黑麦草+百慕大混播草坪	4.19 ± 1.55	ABC
银杏群落	3.25 ± 1.83	ABCD
樟树群落	2.51 ± 1.87	BCD
金桂群落	2.46 ± 1.21	BCD
雪松群落	2.08 ± 0.93	CD
香榧+银杏群落	2.08 ± 1.23	CD
紫荆群落	2.00 ± 1.13	D

说明：不同大写字母表示差异达到 0.01 显著水平。

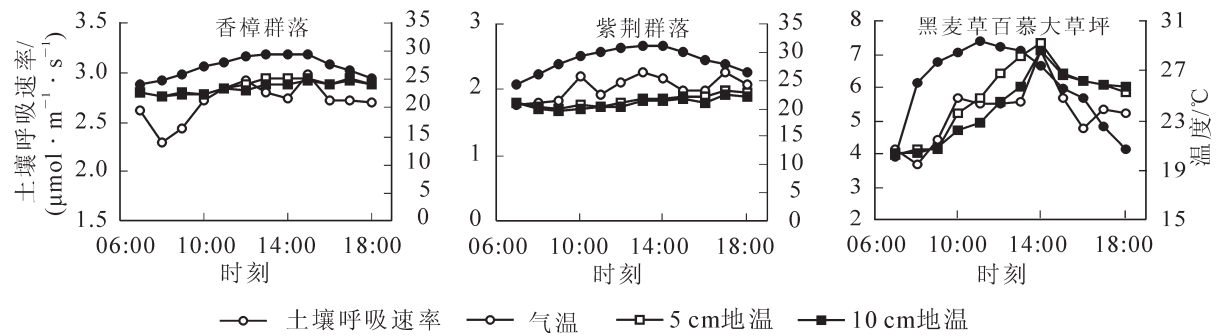


图 2 不同植物群落土壤呼吸速率、气温、5 cm 地温和 10 cm 地温日变化

Figure 2 Diurnal variations of soil respiration rate, temperature, soil temperature at 5 cm and 10 cm depths in plant communities

表 3 不同植物群落土壤呼吸速率与温度的关系

Table 3 Relationship of soil respiration rate and temperature in plant communities

群落类型	温度	$R_s = \alpha e^{bT}$	R^2	Q_{10}
樟树群落	T_a	$R_s = 0.461\ 0e^{0.069\ 9T_a}$	0.819\ 5**	2.01
	T_5	$R_s = 0.433\ 8e^{0.086\ 0T_5}$	0.892\ 7**	2.36
	T_{10}	$R_s = 0.399\ 2e^{0.091\ 2T_{10}}$	0.903\ 0**	2.49
香榧+银杏群落	T_a	$R_s = 0.573\ 9e^{0.055\ 1T_a}$	0.812\ 8**	1.73
	T_5	$R_s = 0.550\ 6e^{0.069\ 6T_5}$	0.901\ 0**	2.01
	T_{10}	$R_s = 0.519\ 8e^{0.073\ 5T_{10}}$	0.911\ 8**	2.09
雪松群落	T_a	$R_s = 0.774\ 9e^{0.039\ 2T_a}$	0.701\ 4**	1.34
	T_5	$R_s = 0.868\ 4e^{0.043\ 7T_5}$	0.716\ 2**	1.55
	T_{10}	$R_s = 0.850\ 5e^{0.044\ 8T_{10}}$	0.699\ 9**	1.56
银杏群落	T_a	$R_s = 0.665\ 2e^{0.061\ 7T_a}$	0.720\ 4**	1.85
	T_5	$R_s = 0.730\ 4e^{0.069\ 6T_5}$	0.767\ 7**	2.01
	T_{10}	$R_s = 0.726\ 0e^{0.070\ 6T_{10}}$	0.757\ 1**	2.03
金桂群落	T_a	$R_s = 0.675\ 2e^{0.052\ 2T_a}$	0.884\ 7**	1.69
	T_5	$R_s = 0.677\ 9e^{0.066\ 9T_5}$	0.929\ 1**	1.95
	T_{10}	$R_s = 0.669\ 3e^{0.068\ 0T_{10}}$	0.933\ 7**	1.97
紫荆群落	T_a	$R_s = 0.523\ 4e^{0.051\ 5T_a}$	0.743\ 2**	1.67
	T_5	$R_s = 0.452\ 2e^{0.073\ 9T_5}$	0.935\ 8**	2.09
	T_{10}	$R_s = 0.434\ 3e^{0.076\ 2T_{10}}$	0.935\ 4**	2.14
黑麦草+百慕大混播草坪	T_a	$R_s = 1.526\ 0e^{0.039\ 0T_a}$	0.654\ 0**	1.48
	T_5	$R_s = 1.491\ 2e^{0.048\ 3T_5}$	0.588\ 8**	1.60
	T_{10}	$R_s = 1.642\ 3e^{0.046\ 1T_{10}}$	0.557\ 3**	1.59
结缕草草坪	T_a	$R_s = 0.729\ 5e^{0.065\ 7T_a}$	0.891\ 8**	1.93
	T_5	$R_s = 0.861\ 5e^{0.076\ 7T_5}$	0.881\ 0**	2.15
	T_{10}	$R_s = 0.882\ 6e^{0.075\ 9T_{10}}$	0.876\ 4**	2.14
狗牙根草坪	T_a	$R_s = 0.648\ 6e^{0.068\ 8T_a}$	0.811\ 1**	1.99
	T_5	$R_s = 0.784\ 0e^{0.076\ 9T_5}$	0.891\ 4**	2.16
	T_{10}	$R_s = 0.861\ 6e^{0.075\ 9T_{10}}$	0.889\ 0**	2.14

说明： T_a 为气温， T_5 为 5 cm 地温， T_{10} 为 10 cm 地温。

和 10 cm 地温均达到了极显著相关水平($P<0.01$)。各植物群落土壤呼吸速率与 5 cm 地温和 10 cm 地温的相关性相差不大,与图 1 中 5 cm 地温和 10 cm 地温的变化趋势相一致。温度系数 Q_{10} 是常用来反映土壤呼吸对温度变化敏感性的指标,指温度每升高 10 ℃时土壤呼吸速率增加的倍数^[12]。从表 3 中的 Q_{10} 值可以发现,对同一植物群落而言,地温的 Q_{10} 值大于气温的 Q_{10} 值,如金桂群落,气温的 Q_{10} 值为 1.69,明显小于 5 cm 地温 Q_{10} 值 1.95;而且除冷暖季型混播的黑麦草+百慕大草坪外,有草坪气温的 Q_{10} 值大于其他植物群落气温 Q_{10} 值(除樟树外)的趋势。可见,不论什么植物群落,地温对其土壤呼吸速率的影响大于气温,但气温对草坪土壤呼吸速率的影响大于乔灌木。

3.2.2 不同植物群落土壤呼吸速率与水分的关系 土壤水分是影响土壤呼吸速率的重要因素之一。采用通用线性回归模型对整个研究期间的土壤水分含量和土壤呼吸速率进行相关性分析,见表 4,得知乔灌木林中除银杏群落外,土壤呼吸速率均与土壤水分含量具有明显的相关性,其中,金桂群落和雪松群落的土壤呼吸速率(R_s)与土壤水分含量的相关性达到了极显著水平($P<0.01$),紫荆群落、樟树群落和香榧银杏群落的土壤呼吸速率(R_s)与土壤水分含量的相关性达到了显著水平($P<0.05$),而草坪的土壤呼吸速率与土壤水分含量之间无明显的相关性。

3.2.3 不同植物群落土壤呼吸速率与土壤易变碳的关系 一般认为:土壤易变碳易被微生物分解,是土壤呼吸的主要驱动力^[11]。土壤易变碳可以用土壤微生物量碳、可溶性有机碳、轻组有机碳等指标来表征。不同植物群落土壤易变碳含量见表 5。从表 5 中可以得知:狗牙根草坪和黑麦草+百慕大混播草坪土壤的微生物生物量碳相对较大,大于其他乔灌木林,这与前人的研究结果一致^[13]。但结缕草草坪土壤的微生物生物量碳相对较小。就土壤可溶性碳和轻组有机碳而言,均存在草坪小于乔木林和灌木林的现象。但无论何种植物群落,土壤微生物量碳、可溶性碳和轻组碳的大小顺序均为轻组有机碳>微生物量碳>可溶性碳,且所占有机碳的比例也具有类似趋势,如雪松群落,轻组有机碳、微生物量碳和可溶性碳的平均分别为(8.82±1.32) g·kg⁻¹, (545.92±158.67) mg·kg⁻¹和(49.59±10.47) mg·kg⁻¹,所占有机碳的比例

表 4 不同植物群落土壤呼吸与土壤水分含量的关系

Table 4 Relationship of soil respiration rate and soil water content in plant communities

群落类型	$R_s = a + bw$	R^2
樟树群落	$R_s = -39.816w + 9.013\ 2$	0.398 4*
香榧+银杏群落	$R_s = -17.446w + 4.954\ 6$	0.390 6*
雪松群落	$R_s = 35.675w - 3.625\ 9$	0.618 8**
银杏群落	$R_s = -17.100w + 6.426\ 5$	0.115 0
金桂群落	$R_s = 69.626w - 13.356\ 0$	0.542 7**
紫荆群落	$R_s = -33.337w + 9.259\ 5$	0.372 0*
黑麦草+百慕大混播草坪	$R_s = -72.538w + 19.405\ 0$	0.323 5
结缕草草坪	$R_s = -28.683w + 10.840\ 0$	0.108 3
狗牙根草坪	$R_s = -43.237w + 15.768\ 0$	0.134 8

说明: R_s 为土壤呼吸速率; w 为土壤水分含量。* 表示 0.05 水平上达到显著水平, ** 表示 0.01 水平上达极显著水平。

表 5 不同植物群落土壤易变碳含量及与占有有机碳的比例

Table 5 Content of soil liable carbon and proportion of liable carbon to SOC in plant communities

群落类型	微生物生物量碳/ (mg·kg ⁻¹)	微生物生物量碳: 土壤有机碳/%	可溶性碳/ (mg·kg ⁻¹)	可溶性碳: 土壤有机碳/%	轻组有机碳/ (g·kg ⁻¹)	轻组有机碳: 土壤有机碳/%
樟树群落	598.12 ± 133.90 AB	3.66	60.87 ± 38.25 B	0.11	3.79 ± 0.60 C	27.02
香榧+银杏群落	626.68 ± 160.77 AB	3.25	85.86 ± 65.69 AB	0.06	3.86 ± 0.76 CD	26.54
雪松群落	545.92 ± 158.67 AB	1.94	49.59 ± 10.47 B	0.35	8.82 ± 1.32 E	34.48
银杏群落	476.22 ± 138.04 A	2.42	71.89 ± 36.46 B	0.10	4.99 ± 0.31 D	26.48
金桂群落	649.89 ± 172.40 B	2.70	32.07 ± 9.54 A	0.37	10.59 ± 0.38 F	57.28
紫荆群落	726.85 ± 269.56 B	3.17	110.47 ± 83.49 B	0.04	2.34 ± 0.42 AB	17.88
黑麦草+百慕大混播草坪	702.09 ± 129.40 B	3.14	33.41 ± 16.17 B	0.22	1.15 ± 0.23 A	6.90
结缕草草坪	572.50 ± 180.81 AB	4.06	39.00 ± 6.88 B	0.52	2.30 ± 0.31 AB	20.54
狗牙根草坪	792.49 ± 282.03 C	2.39	51.09 ± 19.14 B	0.18	2.87 ± 0.48 BC	12.97

分别为 34.48%，1.94%和 0.35%。

3.2.4 不同植物群落土壤呼吸速率多因子分析 为了进一步探讨上述各环境因子对不同植物群落土壤呼吸速率的影响，主成分分析结果见图 3。从图 3 中可以发现，不同植物群落土壤呼吸速率主要受两大因子的影响，第一因子可以解释土壤呼吸速率的 51.1%，主要受气温、5 cm 地温、10 cm 地温和土壤水分含量的影响；第二因子可以解释土壤呼吸速率的 20.5%，主要为土壤微生物量碳和可溶性碳。土壤轻组有机碳对土壤呼吸速率的影响较小。

3.3 不同群落土壤每年二氧化碳的释放量估算

表 6 所示为根据建立的呼吸速率与土壤温度的相关模型，以及每月土壤 5 cm 平均温度估算的二氧化碳释放量，从中可以进一步发现，各植物群落土壤二氧化碳的释放量均在 6–9 月份较大，且草坪群落全年土壤二氧化碳的平均释放量最大，为 64.69 t·hm⁻²·a⁻¹，是乔木林二氧化碳释放量(33.18 t·hm⁻²·a⁻¹)的 1.95 倍，是灌木丛二氧化碳释放量(30.41t·hm⁻²·a⁻¹)的 2.12 倍。

以上海为例：林地面积为 3 万 hm²，如果乔灌草比例按 3：1：1 种植，乔木、灌木和草坪的种植面积则分别为 1.8 万 hm²，0.6 万 hm² 和 0.6 万 hm²，然后根据乔木、灌木和草坪土壤的年平均二氧化碳释放量计算可知，乔木林二氧化碳释放量为 59.72 万 t·a⁻¹，灌木林和草坪二氧化碳释放量分别为 18.24 万 t·a⁻¹ 和 38.81 万 t·a⁻¹，二氧化碳释放量共为 116.77 万 t·a⁻¹；如果乔灌草按 1：1：3 种植，则三者的二氧化碳释放量分别为 19.91 万 t·a⁻¹，18.24 万 t·a⁻¹ 和 116.44 万 t·a⁻¹，二氧化碳释放量共为 154.59 万 t·a⁻¹。可见，增加乔木林栽植二氧化碳的释放量将减少 37.82 万 t·a⁻¹，而且仅草坪土壤二氧化碳释放量与乔灌草按 3：1：1 栽植的年总共二氧化碳释放量较为接近。

4 结论与讨论

土壤呼吸作用是全球碳循环的主要通量过程^[14]。福建格氏栲 *Castanopsis kawakamii* 天然林、格氏栲人工林和杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林土壤呼吸速率季节变化均呈单峰曲线，最大值出现在 5–6 月，最小值出现在 12–1 月^[15]。鼎湖山季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林的土壤呼吸变化为 7

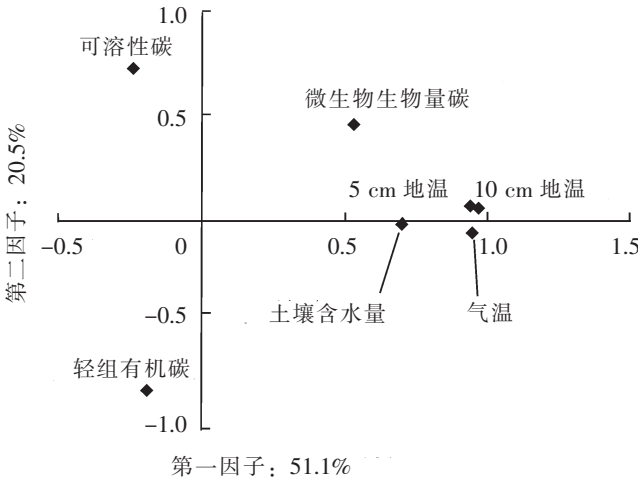


图 3 主成分分析
Figure 3 Principal component analysis

表 6 不同植物群落每月和全年土壤二氧化碳的释放量

Table 6 Monthly and annual amount of discharging CO₂ in plant communities

群落 类型	土壤二氧化碳的释放量/(t·hm ⁻² ·月 ⁻¹)												全年释放量/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	平均释放量/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月		
樟树群落	0.74	1.41	1.65	1.64	3.40	3.46	5.84	5.59	5.31	2.04	1.07	1.18	33.33	
香榧+银杏群落	0.89	1.24	1.33	1.64	2.41	2.96	4.50	4.44	4.23	2.11	1.32	1.26	28.33	33.18
雪松群落	1.22	1.62	1.64	1.87	2.30	3.28	3.44	3.40	3.24	2.23	1.97	1.57	27.77	
银杏群落	1.22	1.92	2.02	2.52	3.49	5.73	6.45	6.45	6.36	2.82	2.50	1.80	43.27	
金桂群落	1.16	1.55	1.67	1.89	3.28	4.09	4.90	4.80	4.46	2.56	1.78	1.49	33.64	
紫荆群落	1.16	1.04	1.33	1.60	2.31	3.63	4.05	4.02	3.82	1.99	1.03	1.20	27.18	30.41
黑麦草+百慕大混播 草坪	2.44	2.77	3.76	3.77	5.29	6.77	7.46	7.42	6.80	4.43	3.43	3.13	57.46	
结缕草草坪	1.24	2.08	2.36	3.18	4.99	8.16	11.35	11.18	7.39	4.63	2.88	2.37	61.79	64.69
狗牙根草坪	1.36	3.04	2.97	5.16	7.58	11.49	12.12	11.22	8.13	5.53	4.04	2.18	74.83	

月最高, 12~2月最低^[16], 与自然林地土壤呼吸的季节变化相似。本研究城市绿地不同植物群落土壤呼吸速率、气温、5 cm和10 cm地温的季节变化也均呈单峰曲线, 最大值出现在6~9月, 最小值出现在12~3月。但各植物群落土壤呼吸速率与5 cm地温和10 cm地温的相关性相差不大, 可能与5 cm地温和10 cm地温较接近有关。可见, 5 cm地温和10 cm地温均能较准确地反映对土壤呼吸速率的影响。

但是不同植物群落的日变化有所不同, 其中黑麦草+百慕大草坪土壤呼吸的日变化呈单峰曲线, 在14:00左右呼吸达到了最大值, 而樟树和紫荆群落土壤呼吸的日变化较平稳, 这与前人的研究结果相一致^[7], 说明草坪土壤呼吸速率受温度的影响较乔木和灌木的影响大。

在城市绿地不同植被群落之间, 草坪土壤呼吸速率最大, 明显大于乔木和灌木群落, 这与徐娇^[17]对南京不同群落土壤呼吸速率的研究结果相一致。Raich等^[18]也表明草地的土壤呼吸比林地大20%。多数研究表明, 土壤呼吸是一个十分复杂的土壤生态学过程, 有多种因素影响着土壤呼吸速率^[19]。本研究采用单因素关系模型进行分析, 发现土壤呼吸速率与温度关系较为密切, 且与地温的相关性优于与气温的相关性, 这与亚热带其他研究报道结果相似^[15,20]。本研究中 Q_{10} 值为1.34~2.66, 比温带森林(2.0~3.5)和草原(2.0~3.0)的 Q_{10} 值偏低^[21]。这是因为上海地区常年平均气温较高, 在15.0℃以上。当试验地温度高于15.0℃时, 温度对土壤呼吸的影响相对迟钝^[22]。进一步比较地温和气温的 Q_{10} 值也可发现, 所有植物群落中均有地温 Q_{10} 值大于气温 Q_{10} 值的现象。

一般认为, 在一定范围内土壤呼吸速率随土壤含水量的增加而增加, 但当土壤含水量超过一定阈值时, 则会抑制根系呼吸和土壤微生物的活动, 从而降低土壤呼吸作用的强度。该研究结果也表明草坪的土壤呼吸速率与土壤水分含量之间相关性不明显, 原因可能是草坪较其他群落养护精细, 有定期的自动灌溉, 土壤含水量较高, 导致土壤含水量不是限制草坪土壤呼吸的关键因子^[23]。而其他植物群落大多依赖于自然降水, 一般很少人为灌溉, 水分含量偏低, 因此水分是影响其土壤呼吸的重要因子之一。

Arunachalam^[24]报道的亚热带森林土壤的微生物生物量碳的范围为978~2 088 mg·kg⁻¹, 而本研究中土壤的微生物生物量碳值偏低, 范围为476.22~792.49 mg·kg⁻¹。这是由于城市绿地土壤有机质和养分含量较低所致。虽然土壤中轻组有机碳的含量较高, 但由于土壤呼吸速率的大小主要取决于土壤微生物, 土壤微生物活动越活跃, 土壤呼吸速率越大^[1,25], 各因子的主成分分析也表明土壤呼吸受土壤微生物量碳和可溶性碳的影响较大, 而受轻组有机碳的影响较小, 可见土壤微生物量碳和可溶性碳的大小在一定程度上可反映土壤呼吸的大小。

此外, 土壤呼吸与植被类型密切相关。一方面是乔木林和灌木林冠层的作用, 树冠对强烈的太阳直接辐射具有遮挡、吸收作用, 使周围环境降温, 同时也间接地阻止了树冠下的空气与外界空气间的交换, 使蒸发出的水汽不容易扩散出去, 导致该空间的相对湿度较高^[26]; 另一方面植被能通过土壤有机质、土壤微生物、土壤结构和根呼吸影响土壤呼吸^[18]。结缕草草坪、狗牙根草坪和黑麦草+百慕大混播草坪直接暴露在空气中, 太阳直接辐射, 并且由于草坪的枯落物和腐殖质层薄, 上海草坪土壤有机质含量普遍低^[27], 使其中的土壤易变碳容易被微生物分解^[11], 所以它们的土壤呼吸速率最大, 二氧化碳释放量也高于乔木林和灌木丛。Raich等^[18]也发现草地土壤呼吸速率比邻近森林高20%~25%。Aslam等^[28]发现土壤呼吸排放最高的是草地。吴建国等^[29]发现草地年呼吸量比针叶林和阔叶林高。此外, 本研究乔木林二氧化碳释放量(33.18 t·hm⁻²·a⁻¹)略高于刘建军等^[1]研究的秦岭天然油松 *Pinus tabulaeformis*, 锐齿栎林 *Quercus aliena* var. *acuteserrata* 土壤二氧化碳释放量, 这可能主要与城市土壤温度较高有关。

综上所述: 草坪土壤二氧化碳释放量最大, 大于乔木林和灌木林。土壤呼吸在一定程度上受土壤温度、水分和微生物量碳的影响较大。由于二氧化碳释放量越大, 城市热岛效应越明显, 同时城市热岛效应又会加速土壤有机质的分解, 土壤碳通过土壤呼吸作用分解后以二氧化碳形式释放反馈回大气圈, 进一步加剧热岛效应, 导致最终形成了恶性循环。因此在未来的绿化建设中应提高乔灌木林地的比例, 不仅可以减少二氧化碳释放、缓解城市热岛效应; 同时林地具有明显的遮阳、降温、增湿作用, 对小气候的调节能力更佳^[30]。

参考文献:

[1] 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 等. 秦岭天然油松、锐齿栎林地土壤呼吸与CO₂释放[J]. 林业科学, 2003, 39(2):

8 – 13.

LIU Jianjun, WANG Dexiang, LEI Ruide, *et al.* Soil respiration and release of carbon dioxide from natural forest of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* in qinling mountains [J]. *Sci Silv Sin*, 2003, **39** (2): 8 – 13.

- [2] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 马尾松林土壤呼吸对去除和添加凋落物处理的响应[J]. 林业科学, 2009, **45** (1): 27 – 30.

WANG Guangjun, TIAN Dalun, YAN Wende, *et al.* Respirations to litterfall exclusion and addition in *Pinus massoniana* plantation in Hunan, China [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45** (1): 27 – 30.

- [3] 严俊霞, 秦作栋, 李洪建, 等. 黄土高原地区柠条人工林土壤呼吸[J]. 林业科学, 2010, **46** (3): 1 – 8.

YAN Junxia, QIN Zuodong, LI Hongjian, *et al.* Soil respiration characters in a *Caragana* plantation in Loess plateau region [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, **46** (3): 1 – 8.

- [4] EPRON D, DANTEC V, DUFRENE E, *et al.* Seasonal dynamics of soil carbon dioxide efflux and simulated rhizosphere respiration in a beach forest [J]. *Tree Physiol*, 2001, **21**: 145 – 152.

- [5] KHOMIK M, ARAIN M, MCCAUGHEY J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixed wood forest [J]. *Agric For Meteorol*, 2006, **140**: 244 – 256.

- [6] 屈冉, 李俊生, 肖能文, 等. 土壤微生物对不同植被类型土壤呼吸速率影响的研究[J]. 华北农学报, 2010, **25** (3): 196 – 199.

QU Ran, LI Junsheng, XIAO Nengwen, *et al.* Study on the influence of soil microbial on soil respiration at various vegetations [J]. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2010, **25** (3): 196 – 199.

- [7] 孙倩, 方海兰, 梁晶, 等. 上海典型城市草坪土壤的呼吸特征[J]. 生态学杂志, 2009, **28** (8): 1572 – 1578.

SUN Qian, FANG Hailan, LIANG Jing, *et al.* Soil respiration characteristics of typical urban lawns in Shanghai [J]. *Chin J Ecol*, 2009, **28** (8): 1572 – 1578.

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

ZHOU Zhixiang, SHAO Tianyi, TANG Wanpeng, *et al.* The different urban green-land spatial patterns and their environmental effects: a case of the central district of Yichang City, Hubei Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (2): 187 – 192.

- [9] FREIBAUER A, MARK D A, SMITH P, *et al.* Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe [J]. *Geoderma*, 2004, **122**: 1 – 23.

- [10] MCLAUCHLAN K K, SARAH E H. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2004, **68**: 1616 – 1625.

- [11] SMITH V R. Moisture, carbon and inorganic nutrient controls of soil respiration at a sub-Antarctic island [J]. *Soil Biol & Biochem*, 2005, **37**: 81 – 91.

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

FANG Qiulan, SHA Liqing. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan, SW China [J]. *J Planat Eco*, 2006, **30** (1): 97 – 103.

- [13] WARDLE D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil [J]. *Soil Rev*, 1992, **67**: 321 – 358.

- [14] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus B*, 1992, **44** (13): 81 – 99.

- [15] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 中亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响[J]. 生态学报, 2005, **25** (7): 1684 – 1690.

YANG Yusheng, CHEN Guangshui, WANG Xiaoguo, *et al.* Response of soil CO₂ efflux to forest conversion in subtropical zone of China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (7): 1684 – 1690.

- [16] 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 等. 鼎湖山 3 种主要植被类型土壤碳释放研究[J]. 生态学报, 2003, **23** (8): 1673 – 1678.

YI Zhigang, YI Weimin, ZHOU Guoyi, *et al.* Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **23** (8): 1673 – 1678.

- [17] 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.

- XU Jiao. *The Study on Soil Respiration of the Different Plant Types in Nanjing* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.
- [18] RAICH J W, TUFEKCIOGLU A. Vegetation and soil respiration: correlations and control [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 71 – 90.
- [19] RAICH J W, POTTER C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1995, **35** (5): 389 – 403.
- [20] 冉景丞, 何师意, 曹建华, 等. 亚热带喀斯特森林土壤 CO₂ 排放量动态研究[J]. 贵州科学, 2002, **20** (2): 42 – 47.
RAN Jingcheng, HE Shiyi, CAO Jianhua, *et al.* A preliminary research on CO₂ release in subtropical karst forest soil [J]. *Guizhou Sci*, 2002, **20** (2): 42 – 47.
- [21] 牟守国. 温带阔叶林、针叶林和针阔混交林土壤呼吸的比较研究[J]. 土壤学报, 2004, **41** (4): 564 – 570.
MOU Shouguo. Respiration of soils under temperate deciduous, coniferous and mixed forests [J]. *Acta Pedol Sin*, 2004, **41** (4): 564 – 570.
- [22] WILDUNG R E, GARLAND T R, BUSCHBOM R L. The interdependent effect of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils [J]. *Soil Biol & Biochem*, 1975, **7** (6): 373 – 378.
- [23] LINN D M, DORAN J W. Effects of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, **48**: 1267 – 1272.
- [24] ARUNACHALAM A K. Influence of gap size and soil properties on microbial biomass in a subtropical humid forest of North-east India [J]. *Plant Soil*, 2000, **223**: 185 – 193.
- [25] 郝瑞军, 方海兰, 车玉萍. 上海典型植物群落土壤微生物生物量碳、呼吸强度及酶活性比较[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2010, **28** (5): 442 – 448.
HAO Ruijun, FANG Hailan, CHE Yuping. Comparison of microbial biomass C, respiration rate and enzyme activities under typical urban plant communities in Shanahai [J]. *J Shanghai Jiaotong Univ Agric Sci*, 2010, **28** (5): 442 – 448.
- [26] BONAN G B. The microclimates of a suburban Colorado (USA) landscape and implications for planning and design [J]. *Landscape Urban Plann*, 2000, **49**: 97 – 114.
- [27] 方海兰, 陈玲, 黄懿珍, 等. 上海新建绿地的土壤质量现状和对策[J]. 林业科学, 2007, **43** (增刊 1): 89 – 94.
FANG Hailan, CHEN Ling, HUANG Yizhen, *et al.* Current situation and strategy for the soil quality of newly-established green belts in Shanghai [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, **43** (supp 1): 89 – 94.
- [28] ASLAM T, CHOUDHARY M A, SAGGAR S. Influence of land-use management on CO₂ emissions from a silt loam soil in New Zealand [J]. *Agric Ecosys Environ*, 2000, **77**: 257 – 262.
- [29] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式土壤呼吸时间格局[J]. 环境科学, 2003, **24** (6): 23 – 32.
WU Jianguo, ZHANG Xiaoquan, XU Deying. The temporal variations of soil respiration under different land use in Liupan mountain forest zone [J]. *Chin J Environ Sci*, 2003, **24** (6): 23 – 32.
- [30] 曹丹, 周立晨, 毛义伟, 等. 上海城市公共开放空间夏季小气候及舒适度[J]. 应用生态学报, 2008, **19** (8): 1797 – 1802.
CAO Dan, ZHOU Lichen, MAO Yiwei, *et al.* Microclimate and comfortable degree of Shanghai urban open spaces in summer [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19** (8): 1797 – 1802.