

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0251

杨世梅, 张涛, 赵秋梅, 高小叶, 王志伟, 何腾兵. 贵阳市不同栽培草地生态系统呼吸特征及其影响因子. 草业科学, 2020, 37(11): 2211-2222.

YANG S M, ZHANG T, ZHAO Q M, GAO X Y, WANG Z W, HE T B. Factors influencing ecosystem respiration in different cultivated grassland ecosystems in Guiyang. Pratacultural Science, 2020, 37(11): 2211-2222.

# 贵阳市不同栽培草地生态系统呼吸特征及其影响因子

杨世梅<sup>1</sup>, 张涛<sup>1</sup>, 赵秋梅<sup>1</sup>, 高小叶<sup>2</sup>, 王志伟<sup>3</sup>, 何腾兵<sup>1</sup>

(1. 贵州大学农学院 / 贵州大学新农村发展研究院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州民族大学生态环境工程学院, 贵州 贵阳 550025;  
3. 贵州省草业研究所, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 城市化进程加快, 城市草地面积扩展, 其在区域碳循环中的作用越来越重要, 研究城市草地生态系统呼吸对评估城市绿化用草和低碳城市建设有重要意义。为探讨不同绿化草地生态系统呼吸速率特征及影响因子, 于2018年4月-10月使用LI-8100对贵阳市5种常见绿化草地生态系统呼吸进行原位观测。结果表明: 生态系统呼吸呈季节性变化, 平均呼吸速率白三叶(*Trifolium repens*) > 黑麦草(*Lolium perenne*) > 狗牙根(*Cynodon dactylon*) > 麦冬草(*Ophiopogon japonicus*) > 沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*); 生态系统呼吸与温度呈指数正相关关系( $P < 0.05$ ), 与含水量呈负相关关系( $P < 0.05$ ); 气温和地温 $Q_{10}$ 值分别为1.22~2.06和1.15~1.85。白三叶与黑麦草 $CO_2$ 累积排放量显著高于狗牙根、麦冬草和沿阶草( $P < 0.05$ ), 累积排放量与土壤全氮、微生物量碳、脲酶和地上生物量显著正相关( $P < 0.05$ )。表明城市绿化草地生态系统呼吸受水热和土壤养分等多因子影响, 不同草地 $CO_2$ 排放量存在差异, 在选择上可考虑低排放草地类型。

**关键词:** 绿化草地; 微生物量碳; 生态系统呼吸; 碳循环;  $Q_{10}$

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2020)11-2211-12

## Factors influencing ecosystem respiration in different cultivated grassland ecosystems in Guiyang

YANG Shimei<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>, ZHAO Qiumei<sup>1</sup>, GAO Xiaoye<sup>2</sup>, WANG Zhiwei<sup>3</sup>, HE Tengbing<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture / Institute of New Rural Development, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China;

2. College of Ecological and Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, Guizhou, China;

3. Guizhou Institute of Prataculture, Guiyang 550025, Guizhou, China)

**Abstract:** Urban grassland areas are expanding as urbanization accelerates, and their role in the regional carbon cycle is becoming increasingly important. The carbon emissions of urban grassland ecosystems hold significance for the construction of urban green spaces and low-carbon cities. We used the LI-8100 soil gas flux system to determine the ecosystem respiration (ER) and related hydrothermal factors of five common urban grassland ecosystems in Guiyang City from April to October 2018. We found that the ER showed obvious seasonal changes, with average emissions ranked as follows: *Trifolium repens* > *Lolium perenne* > *Cynodon dactylon* > *Ophiopogon japonicus* > *Ophiopogon bodinieri*. ER was positively correlated ( $P < 0.05$ ) with soil temperature at 5 cm and air temperature, but negatively correlated ( $P < 0.05$ ) with soil water content. The  $Q_{10}$  values of air temperature and soil temperature were 1.22~2.06 and 1.15~1.85, respectively. The cumulative emissions of *Trifolium repens* and *Lolium perenne* were significantly higher than those of *Cynodon dactylon*,

收稿日期: 2020-05-13 接受日期: 2020-08-25

基金项目: 贵州省教育厅项目(黔教合KY字[2017]119); 贵州省科技计划项目(黔科合服企[2018]4007-006); 贵州省自然科学基金(黔教合KY字[2017]140、[2017]1177)

第一作者: 杨世梅(1994-), 女(侗族), 贵州三穗人, 在读硕士生, 主要从事资源利用与植物保护研究。E-mail: gdyangshimei@163.com

通信作者: 何腾兵(1963-), 男(土家族), 贵州松桃人, 教授, 本科, 主要从事农业资源与环境研究。E-mail: hetengbing@163.com

*Ophiopogon japonicus*, and *Ophiopogon bodinieri* ( $P < 0.05$ ). Cumulative ER emissions were significantly positively correlated ( $P < 0.05$ ) with total soil nitrogen, aboveground biomass, soil microbial carbon, and soil urease. Our study shows that there are significant differences in  $\text{CO}_2$  emissions between different types of grasslands and that these are affected by multiple factors, such as hydrothermal conditions and soil nutrients, indicating that grass type should be taken into consideration in planning for low-carbon urban development.

**Keywords:** green grassland; microbial carbon; ecosystem respiration; carbon cycle;  $Q_{10}$

**Corresponding author:** HE Tengbing E-mail: [hetengbing@163.com](mailto:hetengbing@163.com)

工业革命以来,大气中温室气体含量不断上升, $\text{CO}_2$ 作为三大温室气体之一,对全球温室效应的贡献率高达60%<sup>[1]</sup>。陆地生态系统作为地球重要的碳库,占全球碳排放总量的5%~25%<sup>[2]</sup>,其微小的变化,将会对大气 $\text{CO}_2$ 浓度产生巨大的影响。生态系统呼吸作为陆地生态系统和大气碳循环的主要通量之一,是生态系统碳输出的主要途径。生态系统光合作用和呼吸作用是生态系统 $\text{CO}_2$ 通量的主要组成部分,是决定陆地生态系统生产力和碳循环的关键过程,而生态系统呼吸是碳输出的主要途径<sup>[3]</sup>,在维持地球表面碳平衡中发挥着重要作用<sup>[4]</sup>。在区域或样带尺度上,生态系统呼吸主要受水热因子驱动<sup>[2,5]</sup>。在土壤水分适宜环境下,一定范围内土壤温度升高可以增强微生物活性,进而促进有机质氧化分解,适宜的温度还利于植物的生长发育进而增加植被生物量,从而促进生态系统呼吸<sup>[6]</sup>。土壤含水量的增加也可促进生态系统呼吸,但当土壤含水量超过一定阈值时,导致土壤含氧量不足,凋落物分解、根呼吸和土壤微生物受到抑制,从而降低生态系统呼吸作用<sup>[7]</sup>。此外,自然环境和人为干扰等导致的土壤环境及植被变化,均会影响植物生长和土壤 $\text{CO}_2$ 转运各个环节,进而影响生态系统呼吸<sup>[8]</sup>。

随着城市化的不断推进,城市人口快速增长,导致城镇用地面积不断扩大,城市空间拓展向自然和农业生态系统蔓延,使得城市化在陆地生态系统碳循环中的影响越来越大<sup>[9]</sup>。同时城市是高能耗、高碳排的聚集地,世界大城市消耗的能源占全世界的75%,温室气体排放量占全世界的80%<sup>[10]</sup>。城市已成为节能减排、应对气候变化的主战场,建设以低碳排高效能为特征的“低碳城市”已经成为全球城市发展的共同愿景。草地作为城市绿地生态系统不可或缺的组成部分,它在提供休闲、娱乐和美学功能的同时,也具有调节、维持城市小气候中碳氧平衡、缓解城市热岛效应的生态功能<sup>[11-12]</sup>,其面积也随

着城市的扩大而不断增加。有研究认为城市草地在土层深度为0-30 cm时的土壤有机碳密度比当地天然矮草草原高出45%<sup>[9]</sup>,城市草地生态系统较高的有机碳(soil organic carbon, SOC)含量和SOC累积速率表明,草地生态系统可以成为城市生态系统中一个可观的碳汇<sup>[13]</sup>,在城市绿地和低碳城市建设中具有重要意义。目前,在城市绿化草地土壤呼吸和碳通量方面开展了大量研究<sup>[12,14-17]</sup>,但已有研究主要侧重于单一绿地生态系统<sup>[18-20]</sup>,有关不同绿化草地类型间生态系统呼吸差异及其影响因子的研究鲜有报道,开展城市不同草地类型生态系统呼吸的研究,对揭示不同草地类型生态系统呼吸及碳源汇关系、选择更具生态效益的草地类型有重要意义。

本研究以贵阳市5种常见城市园林绿化草:狗牙根(*Cynodon dactylon*)、白三叶(*Trifolium repens*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、麦冬草(*Ophiopogon japonicus*)和沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)为试验对象,通过不同绿化草地类型生态系统呼吸原位观测及水热因子和土壤理化性质分析,旨在揭示不同绿化草地生态系统呼吸速率特征及其关键影响因子,为城市绿化用草和低碳城市建设提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于贵州省贵阳市花溪区国家城市湿地公园生态系统,海拔1106 m,属于亚热带高原季风湿润气候,光照条件充足,相对湿度较大。年均降水量为1178.3 mm,主要集中在生长季6月-9月,年均温为14.9℃。土壤类型以黄壤和石灰土为主。城区常用的绿化草类型主要为狗牙根、白三叶、黑麦草、麦冬草和沿阶草等。草地人工管护水平基本一致,根据生长季天气和植被生长状况,定期人工浇水和除草,草地基本情况如表1所列。

表 1 草地基本情况  
Table 1 Basic information of grasslands

草地类型 Grassland type	株高 Plant height/cm	样地总面积 Total area of sample plot/m <sup>2</sup>	盖度 Coverage/%	经纬度 Latitude and longitude	管理措施 Management measures
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	10.04	10 012	98.32	26°26'53" N, 106°39'43" E	每年视生长情况去除其中杂草 Remove weeds every year depending on the growth situation
白三叶 <i>Trifolium repens</i>	21.88	3 704	87.27	26°26'52" N, 106°39'43" E	每年视生长情况去除其中杂草 Remove weeds every year depending on the growth situation
麦冬草 <i>Ophiopogon</i> <i>japonicus</i>	12.75	840	53.81	26°26'52" N, 106°39'47" E	每年5月人工刈割1次, 留茬3~5 cm Manually mow once a year in May, leaving 3~5 cm stubble
沿阶草 <i>Ophiopogon</i> <i>bodinieri</i>	25.09	256	61.74	26°26'51" N, 106°39'43" E	每年5月人工刈割1次, 留茬3~5 cm Manually mow once a year in May, leaving 3~5 cm stubble
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	36.49	7 103	94.88	26°26'52" N, 106°39'40" E	每年人工刈割3次, 留茬3~5 cm Manually cut 3 times a year, leaving 3~5 cm stubble

## 1.2 试验设计与观测

以贵阳市花溪区狗牙根、白三叶、黑麦草、麦冬草和沿阶草 5 种常见绿化草地为研究对象, 测定生态系统呼吸速率。每种草地选择具有代表性的 3 个区域, 安置土壤环 (内径 20 cm, 高 10 cm, 平行插入土壤 7 cm), 观测期间土壤环留在原地直至观测结束。于 2018 年 4 月 - 10 月, 使用 LI-8100 碳通量测量系统 (LI-COR, Lincoln, NE, USA) 原位测定生态系统呼吸速率, 同时通过 LI-8100 自带温湿度探针测定土壤 5 cm 温度和含水量。每月测定 3~4 次, 测定时间为 09:00 - 11:00。

生长旺盛期 (8 月) 测定生物量, 同时采集土壤样品用于各项理化指标测定。用 50 cm × 50 cm 样方框收集地上生物量, 带回实验室, 在 105 °C 烘箱中杀青 30 min 后 65 °C 烘至恒重, 称重并记录。使用内径为 5 cm 的土钻采集 0-10 cm 土样, 3 钻混合成 1 个样品, 过 2 mm 筛后均匀分为 2 份, 一份在 4 °C 冷藏保存, 用于土壤微生物量碳氮和酶活性的测定, 一份自然风干后过筛用于常规指标测定。

pH 采用水浸提 (1:2.5) - 电位法 (PHS-3C, 中国) 测定, 有机质采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定, 全氮采用凯氏定氮法 (K1100F, 中国) 测定, 碱解氮采用碱解扩散法测定, 速效钾采用火焰分光光度法 (ICE 3000, USA) 测定, 土壤微生物量碳氮采用氯仿熏蒸提取法 (Vario TOC, 德国) 测定, 土壤蔗糖酶用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定, 脲酶采用苯酚-次氯酸钠比色法 (GEN10S UV-VIS, USA) 测定, 过氧

化氢酶采用 KMnO<sub>4</sub> 滴定法测定。

## 1.3 数据分析

采用指数模型对生态系统呼吸速率和土壤 5 cm 地温、气温的变化关系进行拟合分析, 采用二次函数关系模型对生态系统呼吸和土壤含水量变化关系进行分析<sup>[21-22]</sup>, 方程如下:

$$R_e = a \times \exp(bT); \quad (1)$$

$$Q_{10} = \exp(10b); \quad (2)$$

$$R_e = c + aW_5 + bW_5^2. \quad (3)$$

式中:  $R_e$  为生态系统呼吸速率 [ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ];  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为回归参数;  $T$  为气温或 5 cm 地温 (°C);  $Q_{10}$  为生态系统呼吸的温度敏感指数, 表示温度每升高 10 °C, 生态系统呼吸升高的倍数;  $W_5$  为土壤 5 cm 深度的体积含水量 (%)。

生态系统呼吸累积排放量采用插值法进行计算, 公式如下<sup>[23]</sup>:

$$Rec = \sum_{k=1}^{n-1} Rem, k \Delta t_k. \quad (4)$$

式中:  $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$ , 为两次测定间隔的天数;  $Rec$  为生态系统呼吸总排放量;  $Rem, k$  为测量间隔  $t_{k+1} - t_k$  内的平均  $Rec$ 。

试验所得数据使用 Excel 2010 和 SPSS 21.0 进行数据整理和统计分析, 利用单因素方差分析 LSD 法检验不同绿化草地平均生态系统呼吸速率、生物量及土壤理化指标差异显著性, 所有统计的显

著性均在 0.05 水平, 生态系统呼吸与温度和含水量、累积排放量与生物量和土壤相关因子关系采用线性回归分析。作图使用 Sigmaplot 12.5。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同草地土壤理化性质特征

沿阶草地上生物量显著低于狗牙根、白三叶、麦冬草和黑麦草 ( $P < 0.05$ ); 土壤 pH 在 7.53~8.02, 均呈弱碱性, 其中狗牙根最高, 黑麦草最低; 白三叶土壤全氮、有机质和碱解氮含量最高, 且全氮含量

显著 ( $P < 0.05$ ) 高于其他 4 种草地 (表 2)。白三叶、麦冬草和黑麦草土壤微生物量碳显著 ( $P < 0.05$ ) 高于沿阶草和狗牙根, 表现为黑麦草 > 白三叶 > 麦冬草 > 沿阶草 > 狗牙根; 白三叶微生物量氮显著高于狗牙根和沿阶草; 麦冬草蔗糖酶活性最高, 为  $1.47 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 沿阶草最低, 为  $0.16 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 麦冬草显著高于狗牙根和沿阶草; 狗牙根和黑麦草过氧化氢酶活性显著 ( $P < 0.05$ ) 高于麦冬草; 白三叶、麦冬草和黑麦草土壤脲酶活性均显著 ( $P < 0.05$ ) 高于狗牙根和沿阶草 (表 2)。

表 2 不同草地地上生物量和土壤理化性质  
Table 2 Aboveground biomass and soil properties in different grasslands

指标 Parameter	草地类型 Grassland type				
	狗牙根 CD	白三叶 TR	麦冬草 OJ	沿阶草 OB	黑麦草 LP
地上生物量 Aboveground biomass/( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	1 107.20 ± 165.24a	1 315.20 ± 150.32a	1 190.40 ± 121.51a	355.73 ± 6.92b	1 323.37 ± 138.65a
容重 Bulk weight/( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1.38 ± 0.05b	1.63 ± 0.10a	1.48 ± 0.03ab	1.52 ± 0.11ab	1.50 ± 0.06ab
pH	8.02 ± 0.07a	7.94 ± 0.05ab	7.74 ± 0.07bc	7.83 ± 0.10ab	7.53 ± 0.13c
有机质 Organic matter/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	14.97 ± 0.82a	18.04 ± 1.59a	9.65 ± 1.13b	7.99 ± 0.73b	11.03 ± 1.58b
碱解氮 Available nitrogen/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	49.74 ± 0.82b	85.87 ± 13.32a	63.92 ± 5.73ab	53.52 ± 13.08b	59.21 ± 9.79ab
全氮 Total nitrogen/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.94 ± 0.06b	1.24 ± 0.04a	0.94 ± 0.08b	0.76 ± 0.05b	0.97 ± 0.14b
微生物量碳 Microbial biomass carbon/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	62.99 ± 4.58b	236.50 ± 21.74a	204.57 ± 50.70a	88.09 ± 11.15b	240.99 ± 39.62a
微生物量氮 Microbial biomass nitrogen/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	13.17 ± 1.89c	44.29 ± 2.93a	38.83 ± 21.24abc	20.73 ± 0.32b	32.95 ± 11.62abc
蔗糖酶 Invertase/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	0.32 ± 0.06b	0.56 ± 0.11ab	1.47 ± 0.23a	0.16 ± 0.03b	0.99 ± 0.27ab
过氧化氢酶 Catalase/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	1.86 ± 0.35a	1.31 ± 0.07ab	0.98 ± 0.20b	1.35 ± 0.07ab	1.56 ± 0.01a
脲酶 Urease/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	0.06 ± 0.02b	0.32 ± 0.03a	0.32 ± 0.04a	0.10 ± 0.01b	0.40 ± 0.10a

不同小写字母表示不同草地类型间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 图 2 同。

CD: *Cynodon dactylon*; TR: *Trifolium repens*; OJ: *Ophiopogon japonicus*; OB: *Ophiopogon bodinieri*; LP: *Lolium perenne*; different lowercase letters indicate significant differences between different grasslands at the 0.05 level; this is applicable for Figure 2 as well.

### 2.2 温度、含水量及生态系统呼吸速率的变化

不同草地气温和土壤温度总体呈单峰变化, 且差异不显著 (图 1)。白三叶和黑麦草生态系统呼吸速率呈双峰季节变化, 呼吸速率最大值出现在 8 月, 最小值出现在 10 月; 狗牙根、麦冬草和沿阶草则呈单峰变化, 呼吸速率最大值与最小值出现时间与温度一致。生态系统呼吸速率变化介于  $1.78 \sim 13.80 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , 其中狗牙根波动最大, 变异系数为 0.38, 白三叶变化幅度最小, 变异系数为 0.23。观测期内白三叶和黑麦草平均生态系统呼吸速率显著大

于狗牙根、麦冬草和沿阶草 ( $P < 0.05$ ), 具体表现为白三叶 > 黑麦草 > 狗牙根 > 麦冬草 > 沿阶草, 其值分别为  $9.77$ 、 $8.64$ 、 $4.58$ 、 $4.04$  和  $3.72 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$  (图 2)。

狗牙根、麦冬草、沿阶草 3 种草地类型  $\text{CO}_2$  累积排放量变化趋势相似, 测定期间累积排放量虽呈上升趋势但是变化幅度较小, 白三叶与黑麦草 2 种草地类型  $\text{CO}_2$  累积排放量变化趋势相似, 变化幅度较大; 白三叶和黑麦草  $\text{CO}_2$  累积排放量高于狗牙根、麦冬草和沿阶草 (图 3)。5 种草地类型  $\text{CO}_2$  排放主要集中在 4 月 - 8 月, 进入 9 月,  $\text{CO}_2$  排放则呈明



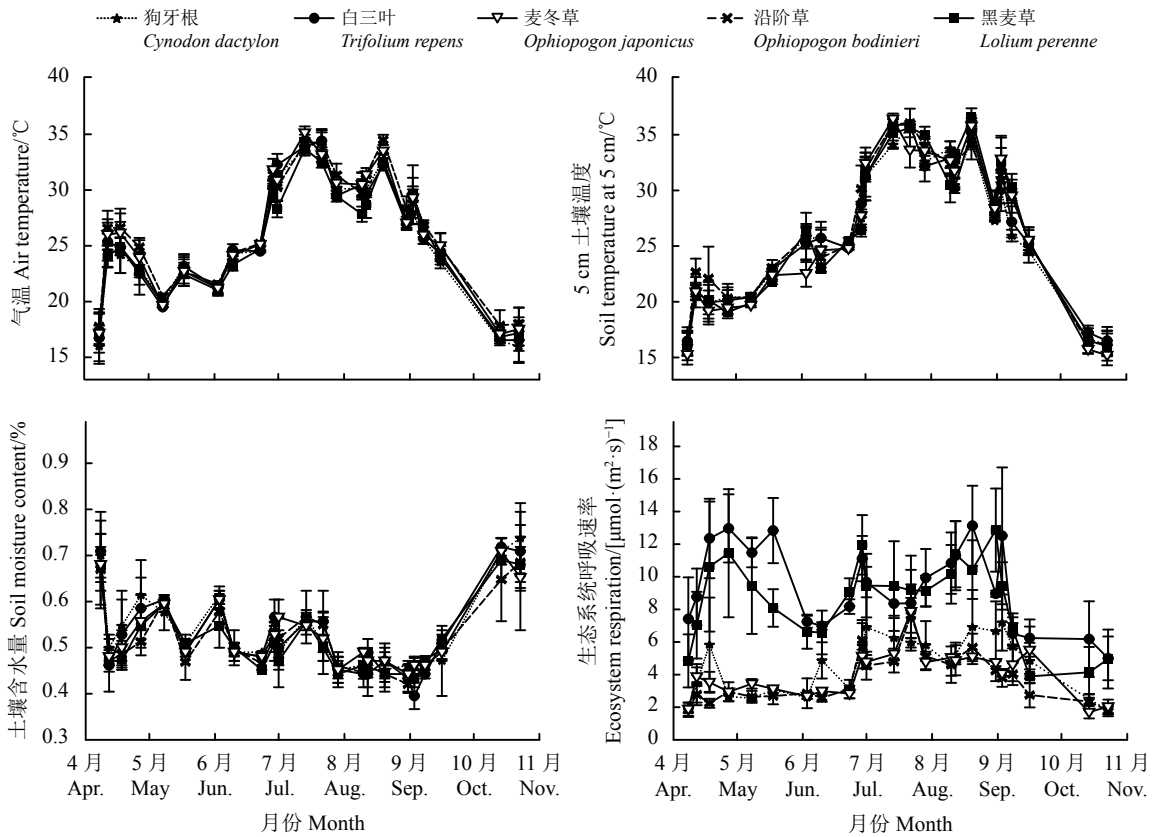


图 1 不同草地温度、水分及生态系统呼吸季节变化特征

Figure 1 Seasonal variations in temperature, soil water content, and ecosystem respiration in different grasslands

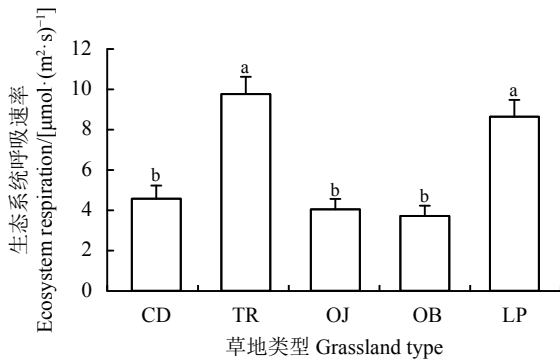


图 2 不同草地生态系统呼吸速率

Figure 2 Ecosystem respiration rate in different grassland ecosystems

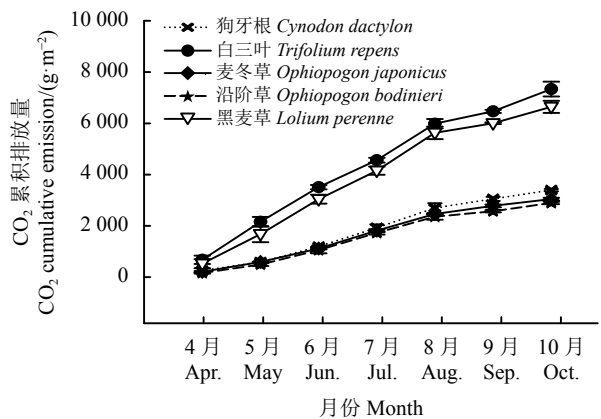


图 3 不同草地生态系统 CO<sub>2</sub> 累积排放量

Figure 3 Cumulative CO<sub>2</sub> emissions in different grassland ecosystems

显的降低趋势。白三叶 CO<sub>2</sub> 累积排放量最大, 为 7 336.45 g·m<sup>-2</sup>, 最低为沿阶草, 累积排放量为 2 890.93 g·m<sup>-2</sup>, 白三叶草地与沿阶草草地累积排放量差值达 4 445.52 g·m<sup>-2</sup>。

### 2.3 不同绿化草地生态系统呼吸速率影响因子

生态系统呼吸速率与气温和 5 cm 土壤温度呈显著的指数相关关系 ( $P < 0.05$ ), 气温对生态系统呼吸速率变化的解释程度为 8%~58%, 受气温的影

响程度沿阶草 > 麦冬草 > 狗牙根 > 黑麦草 > 白三叶 (图 4); 土壤 5 cm 温度对生态系统呼吸速率变化的解释程度为 4%~62%, 不同草地受地温影响程度与气温一致, 沿阶草受影响最大, 白三叶最低。生态系统呼吸受土壤含水量的影响低于温度, 呈显著的负相关关系 ( $P < 0.05$ ), 解释程度为黑麦草 (20%) > 麦冬草 (19%) > 白三叶 (14%) > 狗牙根 (13%) > 沿阶

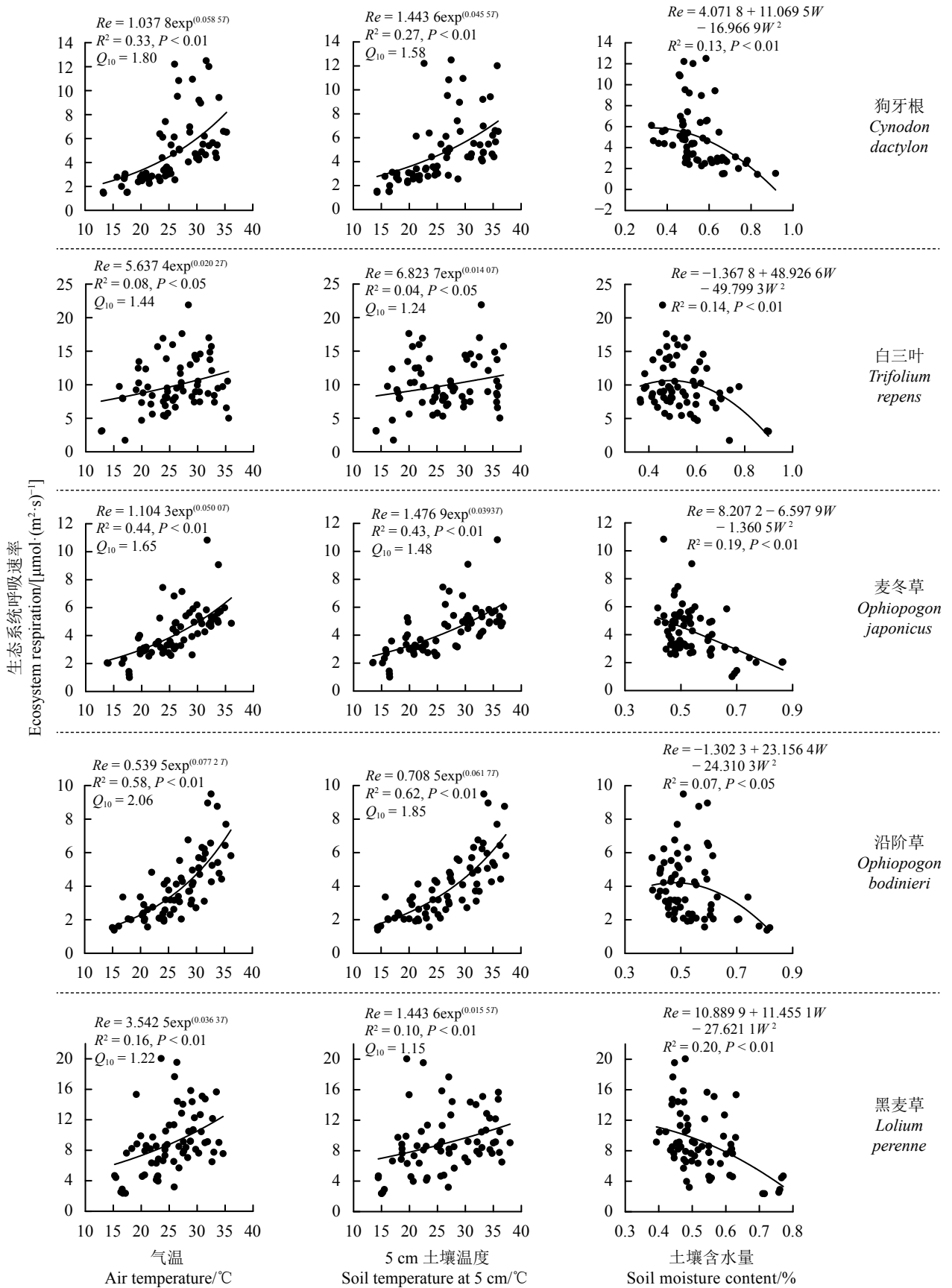


图 4 生态系统呼吸与气温、5 cm 土壤温度和土壤含水量的关系

Figure 4 Relationships of ecosystem respiration to air temperature, soil temperature at 5 cm, and soil water content

草 (7%), 表明土壤水分对黑麦草和白三叶的影响高于土壤温度。气温和地温对应  $Q_{10}$  变化范围分别为 1.22~2.06 和 1.15~1.85, 5 种草地气温  $Q_{10}$  均高于地温  $Q_{10}$ , 且各草地  $Q_{10}$  大小变化趋势一致, 表现为沿阶草 > 狗牙根 > 麦冬草 > 白三叶 > 黑麦草。生态

系统呼吸累积释放量与土壤理化性质相关性分析发现, 植被地上生物量、土壤全氮、微生物量碳和脲酶活性与生态系统呼吸累积释放量显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 解释程度分别为 25%、35%、25% 和 34% (图 5)。

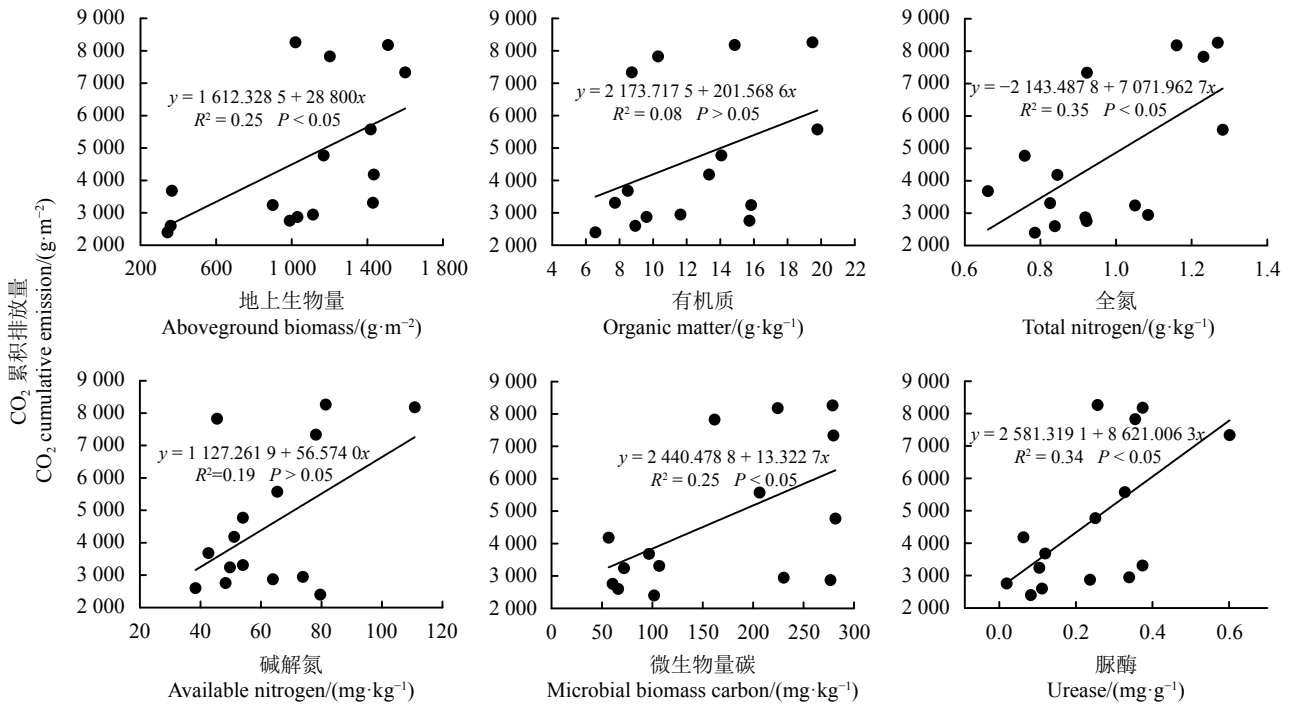


图 5 CO<sub>2</sub> 累积排放量与地上生物量和土壤因子相关关系

Figure 5 Correlations between cumulative CO<sub>2</sub> emissions and aboveground biomass and soil factors

### 3 讨论

#### 3.1 生态系统呼吸的季节变化

生态系统碳通量季节变化主要受水热因子驱动。本研究中, 5 种草地生态系统呼吸速率存在差异, 表现为白三叶和黑麦草显著高于狗牙根、麦冬草和沿阶草, 其原因可能是白三叶和黑麦草两种草地生物量、全氮、微生物量碳及脲酶活性均较高, 在它们的综合作用下, 导致了生态系统呼吸速率较高。总体来看生态系统呼吸速与土壤含水量的变化特征存在差异, 无明显规律; 白三叶和黑麦草呼吸速率受温度影响较明显, 但变化时间节点不一致, 呼吸速率存在明显的滞后性; 狗牙根、麦冬草和沿阶草对温度变化响应程度较低, 在温度变化幅度较小时呼吸速率无明显波动, 温度达到最高或最低时, 呼吸速率小范围上升或下降。5 种草地生态系统呼吸呈显著的季节变化, 但白三叶与黑麦草生态

系统呼吸速率与温度和土壤水分月变化并不一致。前人对城市草地的研究认为土壤呼吸速率呈季节性变化, 温度和水分对呼吸速率产生不同程度的影响, 呼吸速率与水分和温度变化特征基本一致<sup>[20, 24]</sup>, 在科尔沁和昭苏自然草甸的研究得出同样的结论<sup>[25-26]</sup>。由以上研究结果可以看出, 无论是栽培草地还是自然草地, 生态系统呼吸速率与温度和土壤水分变化基本保持一致。本研究中白三叶与黑麦草呼吸速率与水热月变化存在差异的原因可能是在温度与水分发生变化时, 参与生态系统呼吸的各类微生物不能同步的产生反应, 存在一定的滞后性, 且温度和水分需要在适宜的范围内才会对生态系统呼吸产生影响, 未达到或超过该阈值均无法引起生态系统呼吸速率的变化<sup>[24]</sup>。一般而言, 生态系统呼吸季节变化主要的影响因素是研究区外部环境因子的季节性改变。有研究表明, 温度和土壤水分含量季节性变化是影响生态系统呼吸的重要

因素<sup>[2]</sup>, CO<sub>2</sub> 排放通量表现出“夏季高秋季低”的季节变化规律<sup>[27]</sup>。草地类型不同, 温度对其生态系统呼吸的影响程度也可能存在明显差异, 但温度对草地生态系统呼吸的影响机制是一致的。温度主要影响土壤微生物的活性、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<sup>[14]</sup>, 当温度过高或过低, 植物生理活动、微生物与酶活性均会受到抑制, 导致生态系统呼吸减弱; 土壤含水量只有达到土壤微生物永久性萎蔫点或者超过田间持水量的情况下, 土壤含水量才会对生态系统呼吸的影响起主导作用, 而在一般情况下, 土壤含水量并不是主要决定因素<sup>[28]</sup>。

本研究 5 种草地生态系统呼吸平均速率介于 3.72~9.77  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ , 高于上海市城市草坪 1.79~3.70  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ <sup>[29]</sup>、福州亚热带城市草地 1.54~3.98  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ <sup>[30]</sup>、昆明城市绿地 1.08~7.77  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ <sup>[20]</sup> 和韩国首尔森林公园草地 0.91  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ <sup>[17]</sup> 研究结果, 与海珠湖公园草地 2.80~9.83  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ <sup>[24]</sup>、新加坡城市草坪 7.9  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ <sup>[15]</sup> 研究结果相近, 与其他城市绿化草地研究结果相比, 本研究呼吸平均速率较高的原因可能是不同区域条件下, 土壤理化性质存在较大差异, 表现为植被生长和土壤生物地球化学循环的高度异质性, 进而导致生态系统呼吸受影响程度也有所不同, 例如纬度、气候条件、海拔和地形等均对生态系统呼吸速率产生影响<sup>[6, 31-32]</sup>。在贵州省关岭县自然草地研究得出土壤呼吸速率为 0.73~1.21  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ <sup>[33]</sup>、云南省石林县 0.86~2.08  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ <sup>[34]</sup>, 与本研究相比临近自然草地土壤呼吸速率同样较低, 这可能受到人为管理因素影响较多, 在城市绿化草地管理中, 人为的适时浇水、刈割和人工去除杂草等措施草地能够更好的生长, 从而促进生态系统呼吸。本研究中 5 种草地累积排放量介于 2 891~7 336  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 陈文婧等<sup>[19]</sup> 对北京公园绿地研究得出其排放量为 3 769  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 虽在本研究结论范围内, 但总体偏低, 可能是不同研究区气候差异较大, 植物生长、凋落物分解及土壤微生物活性受到抑制, 从而导致生态系统呼吸累积排放量存在差异。

### 3.2 生态系统呼吸的影响因素

本研究中, 5 种草地生态系统呼吸受温度和水分双重驱动, 生态系统呼吸与气温和 5 cm 地温呈指

数相关。大量研究结果证实, 温度和水分都显著影响生态系统呼吸, 但因水热条件的区域差异和季节性差异, 生态系统呼吸速率存在巨大的异质性<sup>[32, 35]</sup>。例如, 在干旱的生态系统中, 生态系统呼吸与地表温度呈显著的指数增加关系, 同时受土壤含水量的显著影响<sup>[36]</sup>, 较干燥的草地生态系统呼吸与土壤温度呈负相关, 土壤温度越低, 碳排放量越大, 但与土壤水分呈正相关<sup>[37]</sup>。而在较为湿润的沼泽草甸, 增温对生态系统呼吸有显著的促进作用<sup>[6]</sup>。南京城市绿地不同植被类型和美国菲尼克斯市草坪的研究表明土壤温度是草坪土壤呼吸季节变化的主要影响因子<sup>[38-39]</sup>, 此外, 降水时长和强度也会影响生态系统呼吸<sup>[40]</sup>。科罗拉多草甸研究指出, 不同植被类型土壤呼吸受降水影响<sup>[32]</sup>, 亚热带城市绿地研究也发现, 生态系统呼吸受生长季降水量影响较大, 生态系统日平均净碳交换量与地温呈指数增加, 地温可解释 80% 以上的变异<sup>[18]</sup>。本研究区域, 年降雨达 1 000 mm, 各草地土壤含水量在 40.30%~75.77% 之间, 土壤水分充足, 所以温度成为影响生态系统呼吸的主要因子。

本研究中, 不同绿化草地生态系统呼吸存在差异, 白三叶和黑麦草生态系统呼吸累积排放量显著高于狗牙根、麦冬草和沿阶草。生态系统呼吸主要由植物呼吸和土壤微生物呼吸决定, 一方面, 植被生物量越大, 植物维持自身营养合成作用加强, 进而增加植物自养呼吸; 另一方面, 在适宜条件下, 土壤养分含量越高, 供土壤微生物分解的底物越多, 进而促进土壤异养呼吸。在河口湿地研究指出, 土壤呼吸与植被生物量、总碳和总氮之间呈显著正相关<sup>[41]</sup>, 不同草地类型间生态系统呼吸并不相同, 但随生物量和土壤微生物量碳减少而降低<sup>[35, 42]</sup>。本研究也发现, 生态系统呼吸除受到土壤水热条件影响外, 还与植被生物量和土壤全氮、微生物量碳及脲酶活性显著正相关, 表明不同绿化草地生态系统呼吸可能受水热驱动下, 多因子参与的生物地球化学循环影响。

$Q_{10}$  是衡量生态系统呼吸对温度敏感性的重要指标。通常认为  $Q_{10}$  是一个常数, 但在不同生态系统和不同区域  $Q_{10}$  值存在差异<sup>[5]</sup>。基于全球 647 套通量数据分析得出陆地生态系统呼吸  $Q_{10}$  平均值为 2.28<sup>[43]</sup>。在高纬度冻原和高海拔温度较低地区,



$Q_{10}$  值可达 2.36~4.40<sup>[25, 35, 44-46]</sup>, 表明在寒冷地区生态系统呼吸速率对温度更为敏感, 温度的微小变化都可能影响生态系统的呼吸速率; 而在温度相对较高的东部及中部地区  $Q_{10}$  值在 2 左右<sup>[30]</sup>, 低纬度地区  $Q_{10}$  值为 1.59~1.88<sup>[43]</sup>; 其生态系统的呼吸速率对温度的敏感性相对较低, 表明  $Q_{10}$  值从高纬度到低纬度逐渐降低。本研究草地 5 cm 地温  $Q_{10}$  值为 1.15~1.85, 与亚热带上海 4 种草坪 (1.60~2.66)<sup>[47]</sup>、亚热带马尼拉草坪 (1.72)<sup>[48]</sup> 和低纬度地区全球均值 (1.59~1.88)<sup>[43]</sup> 研究结果一致; 但低于亚热带海口城市草坪绿地 (2.29)<sup>[49]</sup>、暖温带北京公园绿地 (2.5)<sup>[19]</sup>。总体而言, 本研究区 5 种绿化草地对温度敏感性不高, 可能原因是观测期间平均温度较高, 温度变化幅度较小。造成生态系统呼吸速率对温度的敏感性程度不高。此外, 沿阶草  $Q_{10}$  值比黑麦草高 60.87%, 表明不同绿化草地  $Q_{10}$  存在差异,  $Q_{10}$  除受温度制约外, 还受土壤含水量及底物可利用性等因素影响, 沿阶草土壤有机质和微生物量碳均低于黑麦草, 易受养分

胁迫, 进而对温度较为敏感。

## 4 结论

1) 5 种绿化草地生态系统呼吸速率存在差异, 呈显著季节性变化, 观测期生态系统呼吸  $\text{CO}_2$  累积排放量为 2 890.93~7 336.45  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 白三叶最高 (7 336.45  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ), 沿阶草最低 (2 890.93  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )。

2) 生态系统呼吸速率除受土壤水热驱动外, 还受生物量、土壤全氮、土壤微生物碳和土壤脲酶等环境因子显著影响, 呈正相关关系。

3) 5 种绿化草地气温和 5 cm 地温  $Q_{10}$  变化范围分别为 1.22~2.06 和 1.15~1.85, 表明本研究区绿化草地对温度敏感性不高。

4) 城市绿化草地起到固碳作用, 积极作用于城市碳循环, 不同草地间  $\text{CO}_2$  排放量存在差异, 在选择上可考虑  $\text{CO}_2$  累积排放量较低的沿阶草作为贵阳城市绿化草地。

## 参考文献 References:

- [1] NAKICENOVIC N, ALCAMO J, GRUBLER A, RIAHI K, ROEHRL R A, ROGNER H H, VICTOR N. Special Report on Emissions Scenarios(SRES), A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] RAICH J W, POTTER C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 23-36.
- [3] BAO K Q, TIAN H F, SU M, QIU L P, WEI X R, ZHANG Y J, LIU J, GAO H L, CHENG J M. Stability of ecosystem  $\text{CO}_2$  flux in response to changes in precipitation in a semiarid grassland. *Sustainability*, 2019, 11(9): 2-18.
- [4] 朱先进, 于贵瑞, 王秋风, 高艳妮, 赵新全, 韩士杰, 闫俊华. 典型森林和草地生态系统呼吸各组分间的相互关系. *生态学报*, 2013, 33(21): 6925-6934.  
ZHU X J, YU G R, WANG Q F, GAO Y N, ZHAO X Q, HAN S J, YAN J H. The interaction between components of ecosystem respiration in typical forest and grassland ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21): 6925-6934.
- [5] ZHOU T, SHI P J, HUI D F, LUO Y Q. Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration ( $Q_{10}$ ) and its implications for carbon - climate feedback. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(G2): 271-274.
- [6] ZHANG T, WANG G X, YANG Y, MAO T X, CHEN X P. Grassland types and season-dependent response of ecosystem respiration to experimental warming in a permafrost region in the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 271-279.
- [7] 蒋延玲, 周广胜, 赵敏, 王旭, 曹铭昌. 长白山阔叶红松林生态系统土壤呼吸作用研究. *植物生态学报*, 2005, 29(3): 411-414.  
JIANG Y L, ZHOU G S, ZHAO M, WANG X, CAO M C. Soil respiration in broad-leaved and Korean pine forest ecosystem, Changbai Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2005, 29(3): 411-414.
- [8] 王祥, 郑伟, 朱亚琼, 关正翮, 唐高溶. 昭苏山地草甸不同土地利用方式下的土壤呼吸特征及其水热关系的比较研究. *中国草地学报*, 2017, 39(5): 76-83.  
WANG X, ZHENG W, ZHU Y Q, GUAN Z X, TANG G R. Comparative studies on soil respiration characteristics and relationship

- between water contents and temperature under different utilization ways in mountain meadow soil in Zhaosu. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(5): 76-83.
- [9] KAYE J P, MCCULLEY R L, BURKE I C. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems. *Global Change Biology*, 2005, 11(4): 575-587.
- [10] 庄贵阳. 中国经济低碳发展的途径与潜力分析. *国际技术经济研究*, 2005, 8(3): 8-12.  
ZHUANG G Y. Analysis of the path and potential of China's low carbon economic development. *Study in International Technology and Economy*, 2005, 8(3): 8-12.
- [11] LIVESLEY S J, DOUGHERTY B J, SMITH A J, LUKE D, WYLIE L J, ARNDT S K. Soil-atmosphere exchange of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in urban garden systems: Impact of irrigation, fertiliser and mulch. *Urban Ecosystems*, 2010, 13(3): 273-293.
- [12] 熊莉, 徐振锋, 吴福忠, 杨万勤, 殷睿, 李志萍, 唐仕姗, 熊海涛. 成都市两种典型草坪冬季休眠期土壤呼吸动态特征. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(2): 275-280.  
XIONG L, XU Z F, WU F Z, YANG W Q, YIN R, LI Z P, TANG S S, XIONG H T. Soil respiration of two typical urban lawns in Chengdu City during the winter dormancy period. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, 20(2): 275-280.
- [13] 李熙波, 杨玉盛, 曾宏达, 谢锦升, 朱宁. 城市草坪生态系统碳吸存研究进展. *草原与草坪*, 2009, 134(3): 79-85.  
LI X B, YANG Y S, ZENG H D, XIE J S, ZHU N. Carbon sequestration in urban turfgrass ecosystem. *Grassland and Turf*, 2009, 134(3): 79-85.
- [14] 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. *生态学杂志*, 2010, 29(2): 274-280.  
ZHANG G X, XU J, WANG G B, WU S S, RUAN H H. Soil respiration under different vegetation type in Nanjing urban green space. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(2): 274-280.
- [15] NG B J L, HUTYRA L R, NGUYEN H, COBB A R, KAI F M, HARVEY C, GANDOIS L. Carbon fluxes from an urban tropical grassland. *Environmental Pollution*, 2015, 203: 227-234.
- [16] LERMAN S B, CONTOSTA A R. Lawn mowing frequency and its effects on biogenic and anthropogenic carbon dioxide emissions. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182: 114-123.
- [17] 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. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 167: 378-385.
- [18] 王亚军, 郁珊珊. 城市绿地生态系统碳交换动态及其与环境控制因子的关系. *草业科学*, 2017, 34(5): 966-974.  
WANG Y J, YU S S. Dynamics of CO<sub>2</sub> exchange and its environmental controls in an urban green-land ecosystem in Fuzhou City. *Pratacultural Science*, 2017, 34(5): 966-974.
- [19] 陈文婧, 李春义, 何桂梅, 王小平, 查天山, 贾昕. 北京奥林匹克森林公园绿地碳交换动态及其环境控制因子. *生态学报*, 2013, 33(20): 6712-6720.  
CHEN W J, LI C Y, HE G M, WANG X P, ZHA T S, JIA X. Dynamics of CO<sub>2</sub> exchange and its environmental controls in an urban green-land ecosystem in Beijing Olympic Forest Park. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(20): 6712-6720.
- [20] 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. *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 urban forest and lawn in Kunming. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(5): 306-310.
- [21] 刘丽雯, 刘梦云, 吴健利, 赵国庆, 刘欢, 张杰, 张萌萌. 黄土台塬不同土地利用方式下土壤呼吸季节性变化及影响因素. *环境科学研究*, 2016, 29(12): 1819-1828.  
LIU L W, LIU M Y, WU J L, ZHAO G Q, LIU H, ZHANG J, ZHANG M M. Seasonal variation of soil respiration and affecting factors under different land use types in the tablelands of the Loess Plateau. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(12): 1819-1828.
- [22] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境. 北京: 高等教育出版社, 2007: 183-187.  
LUO Y Q, ZHOU X H. *Soil Respiration and Environment*. Beijing: Higher Education Press, 2007: 183-187.
- [23] ZHANG T, WANG G X, YANG Y, MAO T X, CHEN X P. Non-growing season soil CO<sub>2</sub> flux and its ontribution to annual soil

- CO<sub>2</sub> emissions in two typical grasslands in the permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 71: 45-52.
- [24] 吴亚华, 肖荣波, 王刚, 黄柳菁, 邓一荣, 陈敏. 城市绿地土壤呼吸速率的变化特征及其影响因子. *生态学报*, 2016, 36(22): 7462-7471.
- WU Y H, XIAO R B, WANG G, HUANG L J, DENG Y R, CHEN M. Controlling factors of variation in soil respiration rate in urban green-space ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7462-7471.
- [25] 陈小平, 刘廷玺, 王冠丽, 段利民, 雷慧闽, 王丹. 温度和水分对科尔沁草甸湿地净生态系统碳交换量的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(5): 1523-1534.
- CHEN X P, LIU T X, WANG G L, DUAN L M, LEI H M, WANG D. Effects of temperature and moisture on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange over a meadow wetland in the Horqin, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(5): 1523-1534.
- [26] 王祥, 朱亚琼, 郑伟, 关正翹, 盛建东. 昭苏山地草甸 4 种典型土地利用方式下的土壤呼吸特征. *植物生态学报*, 2018, 42(3): 382-396.
- WANG X, ZHU Y Q, ZHENG W, GUAN Z X, SHENG J D. Soil respiration features of mountain meadows under four typical land use types in Zhaosu Basin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(3): 382-396.
- [27] 徐坤, 吴旭东, 谢应忠, 杨菁. 干旱区不同种植年限苜蓿人工草地土壤 CO<sub>2</sub> 排放的主要影响因素. *生态环境学报*, 2013, 22(10): 1671-1677.
- XU K, WU X D, XIE Y Z, YANG J. Main factors controlling soil CO<sub>2</sub> efflux from alfalfa fields of different standing ages in an arid region. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(10): 1671-1677.
- [28] KUCERA C L, KIRKHAM D R. Soil respiration studies in tallgrass prairie in missouri. *Ecology*, 1971, 52(5): 9-12.
- [29] 常思琦, 王东启, 马燕婷, 曹琼珊, 俞琳, 陈振楼, 王建. 降雨对城市草坪温室气体源汇效应的影响. *地球与环境*, 2015, 43(6): 600-606.
- CHANG S Q, WANG Q D, MA Y T, CAO Q S, YU L, CHEN Z L, WANG J. Effects of rainfall on greenhouse gases emission from urban lawn of Shanghai city, China. *Earth and Environment*, 2015, 43(6): 600-606.
- [30] 王亚军, 郁珊珊. 城市绿地生态系统雨季土壤呼吸对降雨变化的响应. *生态环境学报*, 2018, 27(4): 625-633.
- WANG Y J, YU S S. Response of soil respiration to rainfall changes in rainy season of urban greenland ecosystems. *Ecology and Environment Sciences*, 2018, 27(4): 625-633.
- [31] GUO H, LI S E, KANG S Z, DU T S, TONG L, DIN R S. Annual ecosystem respiration of maize was primarily driven by crop growth and soil water conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2019, 272: 254-265.
- [32] KNOWLES J F, BLANKEN P D, WILLIAMS M W. Soil respiration variability across a soil moisture and vegetation community gradient within a snow-scoured alpine meadow. *Biogeochemistry*, 2015, 125(2): 185-202.
- [33] 唐夫凯, 崔明, 卢琦, 周金星, 郭红艳, 王昭艳. 喀斯特峡谷不同植被类型土壤的呼吸及其温度敏感性. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 61-68.
- TANG K F, CUI M, LU Q, ZHOU J X, GUO H Y, WANG Z Y. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different vegetation types in typical Karst Gorge Canyon. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(1): 61-68.
- [34] 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳. 季节非对称升温对喀斯特土壤 CO<sub>2</sub> 释放的影响. *环境科学*, 2018, 39(4): 1962-1970.
- TANG G Y, ZHANG C H, LIU F Y, LI K, MA Y. Effects of seasonal asymmetric warming on soil CO<sub>2</sub> release in Karst region. *Environment Science*, 2018, 39(4): 1962-1970.
- [35] 张涛, 王根绪, 杨燕, 毛天旭. 青藏高原多年冻土区不同草地类型生态系统呼吸季节差异性. *冰川冻土*, 2018, 40(6): 1255-1264.
- ZHANG T, WANG G X, YANG Y, MAO T X. The seasonal variation of ecosystem respiration in different vegetation types in the permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(6): 1255-1264.
- [36] 贾成朕. 阿拉善典型荒漠生态系统呼吸与光合动态及其影响因子研究. 呼和浩特: 内蒙古大学硕士学位论文, 2013.
- JIA C Z. Dynamics and impact factor of ecosystem respiration and photosynthesis of Alashan typical desert ecosystem. Master Thesis. Hohhot: Inner Mongolia University, 2013.
- [37] 李军祥, 曾辉, 朱军涛, 张扬建, 陈宁, 刘瑶杰. 藏北高原高寒草甸生态系统呼吸对增温的响应. *生态环境学报*, 2016, 25(10):

- 1612-1620.
- LI J X, ZENG H, ZHU J T, ZHANG Y J, CHEN N, LIU Y J. Responses of different experimental warming on ecosystem respiration in Tibetan alpine meadow. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(10): 1612-1620.
- [38] 徐娇. 南京城市绿地不同植被类型土壤呼吸的研究. 南京: 南京林业大学硕士学位论文, 2009.
- XU J. Study on soil respiration of different vegetation types in Nanjing urban green space. Master Thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.
- [39] GREEN D M, OLEKSYSZYN M. Enzyme activities and carbon dioxide flux in a sonoran desert urban ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 2002-2008.
- [40] 解欢欢, 马文瑛, 赵传燕, 乔雨, 赵宇豪, 王方圆. 祁连山亚高山草地土壤呼吸和生态系统呼吸对降雨的响应. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 2875-2882.
- XIE H H, MA W Y, ZHAO C Y, QIAO Y, ZHAO Y H, WANG F Y. Rain fall effect on soil respiration and ecosystem respiration of a subalpine meadow in Qilian Mountains. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(11): 2875-2882.
- [41] HAN G X, XING Q H, LUO Y Q, RAFIQUE R, YU J B, MIKLE N. Vegetation types alter soil respiration and its temperature sensitivity at the field scale in an estuary wetland. *PLoS One*, 2014, 9(3): e91182.
- [42] ZHAO J, TIAN L H, WEI H X, SUN F D, LI R C. Negative responses of ecosystem autotrophic and heterotrophic respiration to experimental warming in a Tibetan semi-arid alpine steppe. *Catena*, 2019, 179: 98-106.
- [43] 游桂莹, 张志渊, 张仁铎. 全球陆地生态系统光合作用与呼吸作用的温度敏感性. *生态学报*, 2018, 38(23): 8392-8399.
- YOU G Y, ZHANG Z Y, ZHANG R D. Temperature sensitivity of photosynthesis and respiration in terrestrial ecosystems globally. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(23): 8392-8399.
- [44] QIN Y, YI S H, CHEN J J, REN S L, WANG X Y. Responses of ecosystem respiration to short-term experimental warming in the alpine meadow ecosystem of a permafrost site on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 115: 77-84.
- [45] MORGNER E, ELBERLING B, STREBEL D, COOPER E J. The importance of winter in annual ecosystem respiration in the High Arctic: Effects of snow depth in two vegetation types. *Polar Research*, 2010, 29(1): 58-74.
- [46] 张智, 朵海瑞, 杨萌, 周延, 吕偲, 文力, 雷光春. 不同放牧方式下青海湖和黄河源区湖滨带高寒草原和高寒草甸生态系统呼吸研究. *湿地科学*, 2018, 16(2): 251-258.
- ZHANG Z, DUO H R, YANG M, ZHOU Y, LYU S, WEN L, LEI G C. Ecosystem respiration of alpine steppe and alpine meadow in riparian zones of Qinghai Lake and Yellow River source region under different grazing ways. *Wetland Science*, 2018, 16(2): 251-258.
- [47] 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. *生态学杂志*, 2009, 28(8): 1572-1578.
- SUN Q, FANG H L, LIANG J, QIAN X W, LIU M D, ZHANG Q F, HAO R J, HAO G J. Soil respiration characteristics of typical urban lawns in Shanghai. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(8): 1572-1578.
- [48] 张静, 杨玉盛, 曾宏达, 陈光水, 刘乐中, 李熙波, 杜紫贤. 亚热带马尼拉草坪生态系统呼吸昼夜变化研究初报. *亚热带资源与环境学报*, 2008, 3(1): 31-38.
- ZHANG J, YANG Y S, ZENG H D, CHEN G S, LIU L Z, LI X B, DU Z X. Primary study on diurnal respiration variation of subtropical manilagrass lawn ecosystem. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2008, 3(1): 31-38.
- [49] 徐文娟, 卓志清, 赵从举, 朱敏捷, 韩奇, 吴小卫. 海口城市草坪绿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量时间变化及其环境解释: 以海南师范大学南校区为例. *草业科学*, 2017, 34(1): 51-58.
- XU W X, ZHUO Z Q, ZHAO C J, ZHU M J, HAN Q, WU X W. Analysis on the temporal variation of soil CO<sub>2</sub> flux and its response to the environmental factors in Haikou urban lawn: A case study of the south campus of Hainan Normal University. *Pratacultural Science*, 2017, 34(1): 51-58.

(责任编辑 魏晓燕)