

赵龙飞,李德生,张成芳,等. 2 种城市绿地土壤呼吸与温湿度关系[J]. 江苏农业科学,2019,47(19):291-295.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.19.065

2 种城市绿地土壤呼吸与温湿度关系

赵龙飞,李德生,张成芳,陈鑫童,赵亮玉

(天津理工大学环境科学与安全工程学院,天津 300384)

摘要:以天津市 2 种城市绿地国槐梨树林(GL)和国槐银杏林(GY)的土壤为研究对象,通过测定绿地生长季土壤呼吸速率,分析了土壤呼吸和土壤温度、土壤湿度之间的关系。结果表明:(1)城市绿地土壤呼吸速率的日变化多呈现单峰型,峰值于 14:00—18:00 出现,而在 8 月和 10 月日动态呈现非单峰型;(2)土壤呼吸速率季节动态呈现出单峰趋势,GY 和 GL 分别在 7 月和 8 月达到土壤呼吸速率最大值,分别为 2.26 ± 0.19 、 $2.46 \pm 0.27 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,2 种城市绿地土壤呼吸均值均为 $2.51 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,但变幅不同;(3)城市绿地土壤呼吸速率与深度 10 cm 处土壤温度(T_{10})间的关系以二次模型拟合最好,而与深度 5 cm 处土壤湿度(M_5)间的关系以指数模型拟合最好;(4)对土壤呼吸速率和 T_{10} 、 M_5 之间的关系进行多元线性拟合,相关系数达 0.70 以上,表明多元线性模型能更好地解释 T_{10} 和 M_5 对土壤呼吸的协同作用。

关键词:城市绿地;土壤呼吸;土壤温度;土壤湿度

中图分类号: S153 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)19-0291-04

土壤呼吸是大气 CO_2 的主要来源和土壤碳库唯一的输出途径,是影响陆地生态碳循环和碳平衡乃至全球气候变化的一个至关重要的生物学过程^[1]。城市绿地(城市中各种草地、耕地、公园绿地以及林地等)作为陆地生态系统的重要组成部分,是温室气体重要的源和汇。随着城市化面积的不断扩大,土壤碳排放越来越受到生态学家的关注^[2-3]。土壤呼吸受植被类型、树种、土壤温湿度以及地形地貌等多种因素的影响^[4-5]。前人对土壤呼吸的研究多集中在农业、高寒、森林等区域^[5-6],而对城市绿地生态系统进行的研究较少。因此,阐明统一气候区内具有不同树种的城市绿地土壤呼吸特征及其影响因素,可为预测城市绿地生态系统土壤碳排放和不同时间尺度下城市绿地的碳源-汇功能提供有力证据,对全球气候的变化和碳平衡研究具有重要意义。

天津市城市绿化广泛使用的树种为国槐(*Sophora japonica* Linn.),其对城市绿地土壤碳循环具有举足轻重的作用。因此,本研究选择 2 种国槐的优势树种,以典型城市绿地为研究对象,利用便携式土壤碳通量全自动分析仪(ACE)测量城市绿地生态系统的土壤碳排放量及其影响因子,分析 2 种城市绿地环境因子与土壤呼吸的相关关系,以期在城市景观规划过程中合理布局城市绿地以及更好地探索土壤碳排放量与其影响因素间的关系提供科学依据。

收稿日期:2018-07-18

基金项目:国家自然科学基金(编号:41303057);天津市应用基础与前沿技术研究计划(编号:14JCYBJC2300);天津市大学生创新创业训练计划(编号:201710060049)。

作者简介:赵龙飞(1993—),女,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事环境与城市生态研究。E-mail:lf_cici@163.com。

通信作者:李德生,博士,教授,主要从事城市环境与城市生态教学及科研工作。E-mail:deszli@tjut.edu.cn。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于天津市西青区(117.132°~117.136°E,39.56°~39.64°N),该区气候为暖温带半湿润大陆性季风气候,干湿季节分明,冬、夏季长,春、秋季短,寒暑交替明显,全年平均气温为 11.6℃,7 月均温为 26℃,全年平均无霜期为 184 d,日均气温>0℃天数的有 271 d,日均气温大于 10℃天数的有 199 d,年均降水量为 584.6 mm,年内 50%的降水日和 75%以上的降水量集中于夏季,植物生长季为 5—10 月。天津市西青区总面积是 545 km²,林地面积达到 120.6 km²,苗圃地面积为 6.9 km²,率先建设为国家级生态区,全区绿化率高达 41%。2 种城市绿地概况见表 1。

1.2 测定方法

1.2.1 土壤呼吸的测定 选择研究区面积均为 20 m×40 m 的国槐梨树林(GL)和国槐银杏林(GY),每个城市绿地布设 3 个监测点,在第 1 次土壤呼吸速率测定的前 1 d,将钢圈(直径 30 cm,高 8 cm)砸入离树干约 0.5 m 的土内,钢圈砸入土内 5 cm 且与土体之间无缝隙。开始试验前 2 h 将钢圈内植物齐根剪去,待干扰平衡后,安装便携式土壤碳通量全自动分析仪(ACE,英国 ADC 生物科学有限公司生产)。在 2017 年 5—10 月上旬(植物的生长初期、中期、末期)对土壤呼吸速率进行测定,土壤日呼吸速率测定时间为 08:00 至次日 08:00,每次测定保证 24 h 连续监测,仪器每 30 min 测定 1 组数据,间隔 30 min 后自动监测下组数据。用于分析季节变化的数据是 2 种绿地当日多个时间点观测的土壤呼吸速率的平均值。

1.2.2 土壤指标的测定 在监测土壤呼吸速率的同时,利用便携式土壤碳通量自动分析仪(ACE)自身携带的温度、湿度探头测定深度为 10 cm 处土壤的温度(T_{10})和 5 cm 处土壤的湿度(M_5)。

表 1 2 种城市绿地概况

城市绿地	绿化年份	主要树种	郁闭度	土壤有机质含量 (g/kg)	土壤 pH 值	土壤容重 (g/m ³)	土壤总氮含量 (g/kg)
国槐梨树林	2007	国槐, 梨树 (<i>Pyrus</i>)	0.55	24.06 ± 0.03	7.59 ± 0.12	1.39 ± 0.08	0.13 ± 0.05
国槐银杏林	2007	国槐, 银杏 (<i>Ginkgo biloba</i> L.)	0.62	26.57 ± 0.08	7.64 ± 0.17	1.31 ± 0.05	0.11 ± 0.02

1.3 数据处理与分析

试验数据用 Excel 整理后, 采用 SPSS 21 软件分析土壤呼吸速率与土壤温湿度的相关性, 显著性差异水平设定为 0.05, 并用 Origin 9.64 进行绘图。

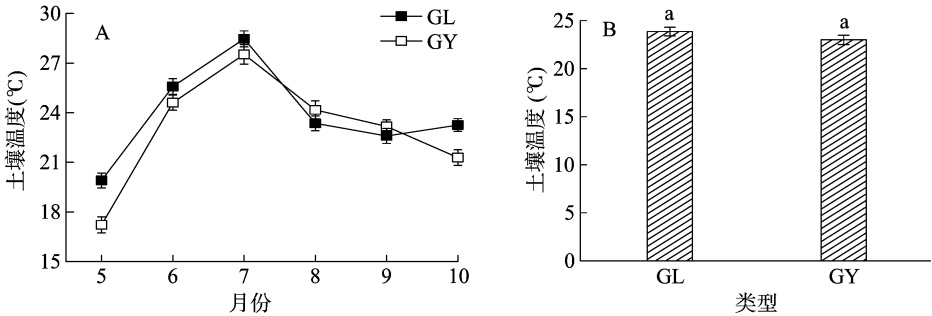
2 结果与分析

2.1 2 种城市绿地环境因子的变化

2 种城市绿地的 T_{10} 生长季变化趋势基本相同, 呈现出明显的单峰趋势; T_{10} 均于 7 月达到最高水平, 之后逐渐下降 (图

1-A)。GL 和 GY 的 T_{10} 变化范围分别为 19.9 ~ 28.5、17.2 ~ 27.5 °C, 生长季的平均 T_{10} 分别为 23.8、23.0 °C, GL > GY, 但两者差异不显著 (图 1-B)。

2 种城市绿地 M_5 生长季变化趋势差异性明显, GY 的 M_5 在 5、6、10 月明显比 GL 高, 且 GY 的 M_5 在 5 月和 8 月较高, 呈现双峰动态趋势; 而 GL 的 M_5 在 8 月最高, 之后持续下降, 为单峰趋势 (图 2), GL、GY 的 M_5 变化范围分别为 19.6% ~ 49.4%、32.6% ~ 51.7%, M_5 的均值 GY > GL。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同
图1 城市绿地 T_{10} 的季节变化(A)和均值(B)

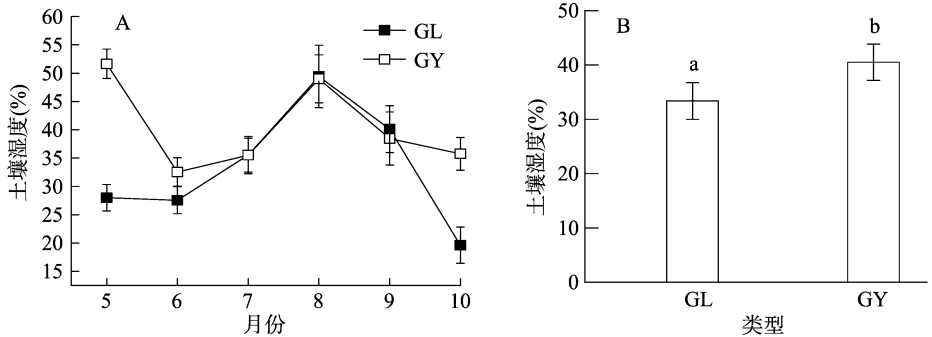


图2 城市绿地 M_5 的季节变化(A)和均值(B)

2.2 2 种城市绿地土壤呼吸速率特性

2.2.1 2 种城市绿地土壤呼吸速率的日变化 从图 3 可知, 2 种城市绿地土壤呼吸速率日动态变化具有明显的季节性。天津市城市绿地土壤呼吸速率日变化主要表现为: 在未受干扰月份 [GL (5-7 月、9 月)、GY (6-10 月)], 土壤呼吸速率日动态均呈单峰型, 且土壤呼吸速率的最小值均出现在 02:00—11:00, 最大值出现在 14:00—18:00; 而在 8、10 月, GL 土壤呼吸速率动态变化较为紊乱且无明显规律, 但日间土壤呼吸速率明显高于夜间; 在温度最低的 5 月, GY 土壤呼吸速率在 0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 附近变化。整个生长季土壤呼吸速率日变化幅度除 5 月份为 GL > GY 外, 6—10 月日变化幅度均为 GY > GL, 且日变化幅度均表现为日间大于夜间。显著分析显示, GL 和 GY 土壤呼吸速率日变化在 5、7、9、10 月差异显著 ($P < 0.05$), 而在 6、8 月差异不显著。

2.2.2 2 种城市绿地土壤呼吸速率的季节变化 2 种城市绿地土壤呼吸速率季节变化呈现出单峰变化趋势 (图 4)。5 月份, 气温较低同时 T_{10} 也较低, 导致 GL 和 GY 植物生长缓慢且土壤中微生物活动不够活跃, 因此土壤呼吸速率较低, 5 月 GY 较高的 M_5 也导致该点土壤呼吸速率值几乎为零。6—7 月, 随着外界气温的逐渐升高, 土壤温度也较大地提高, 在此期间, 绿地植物生长旺盛且微生物活跃, 土壤中根系和微生物呼吸强烈, 2 种城市绿地土壤呼吸速率快速上升。GY 土壤呼吸速率在 7 月达到最大值, 为 $(2.26 \pm 0.19) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 而 GL 土壤呼吸速率最大值则出现于 8 月, 为 $(2.46 \pm 0.27) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 9 月土壤呼吸速率逐渐下降。2 种城市绿地整个生长季土壤呼吸速率变化范围为 0.01 ~ 2.46 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 且 2 种城市绿地间土壤呼吸速率的季节变化差异不明显。

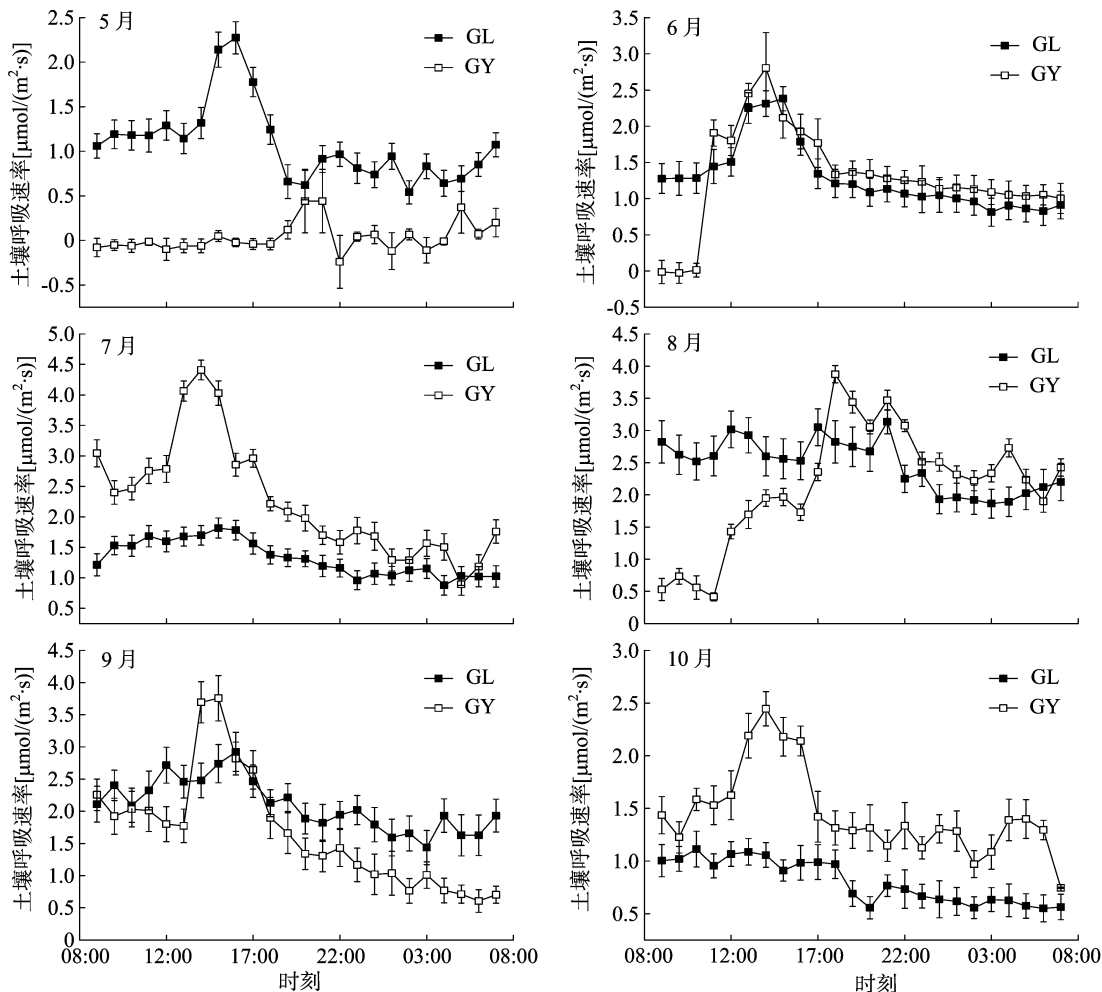


图3 2种城市绿地土壤呼吸速率每月的日动态变化

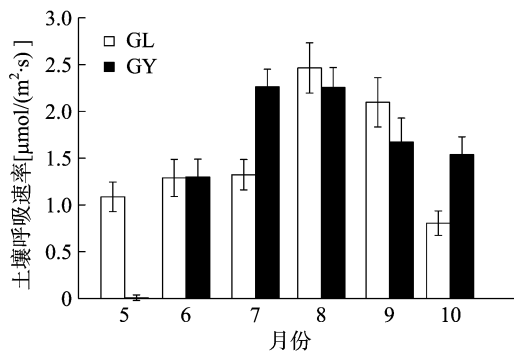


图4 2种城市绿地土壤呼吸速率的季节动态变化

2.3 土壤温湿度对土壤呼吸的影响

为了进一步探讨城市绿地土壤呼吸与土壤温度、湿度的关系,国内外的学者利用线性方程、二次方程和指数方程的模型等多种方法拟合。本研究将 T_{10} 、 M_5 和土壤呼吸速率进行模型拟合,筛选出拟合度最佳的方程,即 R^2 最大的曲线模型。由表 2 可以看出,二次曲线方程对土壤呼吸速率与 T_{10} 之间关系解释最好,但 GL 生长季土壤呼吸速率与 T_{10} 之间的相关关系不显著,而 GY 土壤呼吸速率与 T_{10} 极显著相关。指数曲线方程能更好地解释 2 种城市绿地土壤呼吸速率与 M_5 之间的关系。

表 2 T_{10} 、 M_5 对土壤呼吸速率的影响

y	x	绿地	拟合曲线方程	r^2
土壤呼吸速率	T_{10}	GL	$y = -13.645 + 1.265x - 0.026x^2$	0.126
	T_{10}	GY	$y = -11.175 + 0.931x - 0.016x^2$	0.774 **
	M_5	GL	$y = 0.464 + e^{0.033x}$	0.711 **
	M_5	GY	$y = 117.724 + e^{-0.121x}$	0.289 **

注: **、* 分别表示极显著($P < 0.01$)、显著($P < 0.05$)相关。下表同。

土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸速率均有影响,尤其是在植物生长季最为明显,为进一步探讨土壤温度和湿度对土壤呼吸速率的协同影响,对土壤呼吸速率和土壤温度、

湿度之间的关系进行多元线性拟合,结果(表 3)显示,多元线性曲线能更好地解释土壤呼吸与土壤温度和土壤湿度之间的关系。

表 3 T₁₀和 M₅ 对土壤呼吸的协同影响

y	x ₁	x ₂	城市绿地	拟合曲线方程	R ²
土壤呼吸速率	T ₁₀	M ₅	GL	$y = -0.012x_1 + 0.050x_2 + 0.130$	0.706 **
			GY	$y = 0.223x_1 + 0.017x_2 - 4.290$	0.732 **

2.4 2 种城市绿地对土壤呼吸的影响

GL 和 GY 生长季土壤呼吸速率具有明显的季节性变化(图 4),呈现出单峰变化趋势。由表 4 可知,5—10 月 GL 和 GY 的土壤呼吸速率平均值分别为(1.51 ± 0.20)、(1.51 ± 0.18) μmol/(m² · s),变化范围以及变化幅度(土壤呼吸速率最大值与最小值之差)分别为 0.81 ~ 2.46 μmol/(m² · s),1.45 μmol/(m² · s)和 0.01 ~ 2.26 μmol/(m² · s),2.25 μmol/(m² · s)。这表明土壤呼吸速率受到生物因子影响随着季节的变化而变化,因此土壤呼吸速率呈现明显的季节性变化规律。此外,城市绿地中植物的凋落物数量及分解率、土壤中根系和微生物呼吸、土壤状况均会影响土壤呼吸。

表 4 2 种城市绿地 5—10 月的平均土壤呼吸速率比较

城市绿地	土壤呼吸速率[μmol/(m ² · s)]	
	均值	标准差
GL	1.51	0.20
GY	1.51	0.18

3 讨论与结论

本研究中,2 种城市绿地土壤呼吸速率日动态呈现出非单峰型和单峰型 2 种变化趋势。土壤呼吸未受干扰时呈现出单峰型,这与陈骥等的研究结果^[5]一致。在土壤温度较低和土壤湿度出现极端现象的影响下,土壤呼吸速率动态变化较为紊乱且无明显规律,呈现非单峰型^[5,7]。本研究中,未受干扰月份的土壤呼吸峰值于 14:00—18:00 出现。这主要因为土壤碳排放量的日动态规律主要受到日气温变化影响,研究表明,土壤呼吸的日变化和气温、地表的温度呈显著相关性^[8],1 d 中外界温度在 14:00 达到最高值,但土壤呼吸的最大值有时会出现滞后现象,这主要因为此时土壤温度并未出现与气温一致的高峰值,而是滞后于气温^[9]。土壤呼吸对土壤温度响应速度较快,因此在该时段呼吸速率出现最大值。5 月土壤呼吸速率日变化幅度为 GL > GY,6—10 月日变化幅度总体表现为 GY > GL,这可能受到绿地郁闭度和林下植被覆盖率的影响,GL 郁闭度较低,日间光照通过林间空隙照射到地表,导致 GL 日间地表土壤温度变化幅度小,使得土壤微生物活动和根系呼吸在日间的变化幅度较低,因此土壤呼吸速率的日变化幅度较小。2 种城市绿地土壤呼吸速率日变化幅度均为日间大于夜间,这是因为日间温度较高,土壤根系呼吸和微生物活动都较活跃^[10-11]。5—10 月,2 种城市绿地土壤呼吸速率随季节变化均呈现出单峰的变化趋势,其变化主要受土壤温度和湿度的影响,这与前人的研究结果^[12]一致。植物生长初期,气温和 T₁₀均较低,使土壤微生物活动受限,GL 和 GY 植物生长缓慢导致土壤呼吸速率较低,且 GY 的 M₅ 较高导致其 5 月份土壤呼吸速率几乎为零。植物生长中期,较高的气温与土壤温度导致绿地植物生长旺盛和微生物活动活跃,土壤中根系和微生物呼吸强烈,2 种城市绿地土壤呼吸速

率快速上升,GY 和 GL 分别在 7 月和 8 月达到呼吸速率最大值^[13-14]。植物生长季 2 种城市绿地土壤呼吸均值相等,但整个生长季变化幅度不同。

许多研究表明,温度是土壤呼吸速率的主要影响因素之一^[15-16],但本研究中 GL 土壤呼吸速率与 T₁₀无显著相关性,而与 M₅ 显著相关,其原因可能是生长季 GL 的土壤温度不再是土壤呼吸速率的限制因素,而水分则对其影响显著^[17]。GY 土壤呼吸速率与土壤温度和湿度显著相关,受到土壤温度和湿度的同时影响,这与 Frank 等的研究结果^[18]一致。通常情况下,土壤温度和土壤湿度相互影响,并共同影响土壤呼吸强度^[18-19],尤其在植物生长季最为明显。为更好地解释土壤温度和土壤水分对土壤呼吸的协同作用,对土壤呼吸速率和土壤温度、湿度之间的关系进行多元线性拟合,相关系数达到 0.70 以上。这表明多元线性模型能更好地解释土壤呼吸速率与土壤温度和土壤湿度之间的关系,也表明 T₁₀和 M₅ 是影响天津市城市绿地生长季土壤呼吸的主要环境因素。

土壤呼吸速率不仅仅是植物根系和土壤微生物生命活动的体现,还是全球生态系统功能上的重要过程^[20],通过对城市生态系统土壤呼吸速率及与之相关的环境因子的测定,能够为全球变暖背景下气候变化和全球碳循环研究提供科学依据。

参考文献:

[1]Schlesinger W H,Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry,2000,48(1):7-20.

[2]郁珊珊,王 浩,王亚军. 福州市绿地生态系统光合特性及土壤呼吸研究[J]. 江苏农业科学,2016,44(6):483-488.

[3]吴亚华,肖荣波,王 刚,等. 城市绿地土壤呼吸速率的变化特征及其影响因子[J]. 生态学报,2016,36(22):7462-7471.

[4]闫美芳,张新时,周广胜. 不同树龄杨树(*Populus balsamifera*)人工林的土壤呼吸空间异质性[J]. 生态学杂志,2013,32(6):1378-1384.

[5]陈 骥,曹军骥,魏永林,等. 青海湖北岸高寒草甸草原非生长季土壤呼吸对温度和湿度的响应[J]. 草业学报,2014,23(6):78-86.

[6]Liu Y,Wan K Y,Tao Y. Carbon dioxide flux from rice paddy soils in central China:effects of intermittent flooding and draining cycles[J]. PLoS ONE,2013,8(2):1-8.

[7]陈 亮,刘子亭,韩广轩,等. 环境因子和生物因子对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(6):1795-1803.

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

[9]秦 娟,上官周平. 白榆/刺槐不同林型生长季土壤呼吸速率的变化特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(6):91-98.

[10]Peng S S,Piao S L,Wang T,et al. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China[J]. Soil Biology and Biochemistry,2009,41(5):1008-1014.

胡福田,周红军,徐 华,等.微波预处理法制备茶粕基有机药肥工艺研究[J].江苏农业科学,2019,47(19):295-298.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.19.066

微波预处理法制备茶粕基有机药肥工艺研究

胡福田¹,周红军¹,徐 华¹,周新华¹,戴修纯²

(1.仲恺农业工程学院化学化工学院,广东广州 510225;2.广州市农业科学研究院,广东广州 510308)

摘要:以油茶饼粕为原材料,采用微波预处理法,以水作提取溶剂,通过单因素试验研究液固比、温度、时间和 pH 值对油茶饼粕中茶皂素、蛋白质提取率的影响,并采用正交试验确定最佳提取工艺条件。结果表明,在液固比为 7 mL : 1 g,浸提时间为 2.5 h、pH 值为 10、浸提温度为 65 ℃时,茶皂素的提取率可达 13.93%,蛋白质提取率可达 6.92%。

关键词:油茶饼粕;茶皂素;蛋白质;微波;浸提工艺

中图分类号:S141.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)19-0295-04

为了减轻化学农药和化肥造成的污染,实现 2020 年农药化肥零增长的目标,植物源有机药肥的研究与开发成为当前热点^[1-4]。茶粕中含有 12%~18% 茶皂素、7%~12% 蛋白质以及氨基酸、多糖等物质,是一种非常有市场与应用前景的植物源有机药肥^[5-7]。在实际生产中,茶粕基本上是直接被使用,有效成分利用率低,药效、肥效差。因此,亟需将茶粕有效成分提取出来使用,以提高其利用率,增强其药效和肥效。但一般用热水浸提茶粕时,茶皂素浸提率低^[8],且水性茶粕提取液性能不稳定,茶粕中的水解酶可导致茶皂素水解沉淀^[9],茶粕中的霉菌易引发浸提液霉变腐败变质,这是限制其作为药肥使用的技术难题。

微波具有热效应和非热效应等多种特性。微波热效应可

导致细胞内的极性物质尤其是水分子吸收微波能,使胞内温度迅速上升,水汽化后将细胞膜和细胞壁冲破,形成微小的孔洞,使表面出现裂纹,此时胞外溶剂容易进入细胞内,溶解并释放出胞内物质^[10-11];微波非热效应则可杀菌除酶。本研究先用微波预处理茶粕粉末来破壁杀菌除酶,再通过热水浸提制备茶粕基植物源有机药肥,以期茶粕综合利用提供新的途径。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

油茶饼粕由广东省梅州市梅江区富强客家特产经营部提供,茶皂素标准样品购于上海博蕴生物科技有限公司。生化试剂牛血清蛋白为标准样品;酒石酸钾钠、五水硫酸铜、碘化钾、氢氧化钾、盐酸、无水乙醇、硫酸、香草醛均为分析纯。

所用仪器为 PHS-3C 型数显精密酸度计、RE-85Z 型旋转蒸发器、HH-1 型电热恒温水浴锅、DGG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱、DZG-6020 型真空干燥箱、VIS-7200 型紫外可见分光光度计、G8023CSL-K 3 型微波炉(格兰仕)、

收稿日期:2018-07-03

基金项目:广东省科技计划(编号:2014A020208127、2017A04045053);广东省农业厅科技计划(编号:2017LM4177)。

作者简介:胡福田(1968—),男,博士,副教授,主要从事精细化工类和农副产品综合利用研究。E-mail:hftian2002@163.com。

[11]刘绍辉,方精云.土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J].生态学报,1997,17(5):19-26.

[12]Wildung R E, Garland T R, Buschbom R L. The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1975, 7(6):373-378.

[13]Almagro M, López J, Querejeta J I, et al. Temperature dependence of soil CO₂ efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(3):594-605.

[14]Zhang Q, Lei H M, Yang D W. Seasonal variations in soil respiration, heterotrophic respiration and autotrophic respiration of a wheat and maize rotation cropland in the North China Plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 180:34-43.

[15]Gaumont-Guay D, Black A T, Griffis T, et al. Influence of temperature and drought on seasonal and interannual variations of soil, bole and ecosystem respiration in a boreal aspen stand[J].

Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 140(1/2/3/4):203-219.

[16]Khomik M, Arain A M, McCaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 140(1/2/3/4):244-256.

[17]Oechel W C, Vourlitis G L, Hastings S J, et al. Acclimation of ecosystem CO₂ exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming[J]. Nature, 2000, 406(6799):978-978.

[18]Frank A B, Liebig M A, Hanson J D. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(9):1235-1241.

[19]李凌浩,王其兵,白永飞,等.锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究[J].植物生态学报,2000,24(6):680-686.

[20]陈全胜,李凌浩,韩兴国,等.水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响[J].植物生态学报,2003,27(2):202-209.