

不同施肥和保水措施对油茶土壤 N_2O 排放的影响

王书丽, 郭晓敏, 黄立君, 袁希, 董星宇, 肖斌, 方海富, 高宇, 牛德奎, 张令

引用本文:

王书丽, 郭晓敏, 黄立君, 等. 不同施肥和保水措施对油茶土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2089–2097.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0259>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生物炭折流湿地对生活污水的净化效果

王若凡, 汪文飞, 王煜钧, 孙鹤洲, 刘傲展

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2001–2007 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0258>

化肥配施生物炭对稻田田面水氮磷流失风险影响

冯轲, 田晓燕, 王莉霞, 欧洋, 阎百兴, 符雨

农业环境科学学报. 2016(2): 329–335 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.02.017>

生物炭-化肥配施对稻田土壤氮磷迁移转化的影响

崔虎, 王莉霞, 欧洋, 阎百兴, 韩露, 李迎新, 姜珊

农业环境科学学报. 2019, 38(2): 412–421 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0515>

长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响

李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 王益, 党廷辉

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1783–1791 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0240>

小麦/玉米轮作体系中不同施肥方法下的养分淋溶排污系数测算

袁京, 李国学, 李荣花, 李宁, 杨帆

农业环境科学学报. 2015(4): 738–744 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.019>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王书丽, 郭晓敏, 黄立君, 等. 不同施肥和保水措施对油茶土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2089–2097.

WNAG Shu-li, GUO Xiao-min, HUANG Li-jun, et al. Effects of different fertilization and water retention measures on N_2O emission from *Camellia oleifera* soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(9): 2089–2097.



开放科学 OSID

不同施肥和保水措施对油茶土壤 N_2O 排放的影响

王书丽, 郭晓敏, 黄立君, 袁希, 董星宇, 肖斌, 方海富, 高宇, 牛德奎, 张令*

(江西农业大学林学院, 江西省森林培育重点实验室, 南昌 330045)

摘要: 为探究不同施肥和保水措施对油茶土壤 N_2O 排放的影响, 采用静态暗箱-气相色谱法, 设置对照 (BOCK)、氮肥 (N, $0.13 \text{ g N} \cdot \text{kg}^{-1}$)、磷肥 (P, $0.065 \text{ g P} \cdot \text{kg}^{-1}$)、氮磷肥 (NP, $0.13 \text{ g N} \cdot \text{kg}^{-1} + 0.065 \text{ g P} \cdot \text{kg}^{-1}$)、低复合保水材料 (生物炭和聚丙烯酰胺, B1, 每盆 13.65 g 炭+ 1.35 g 聚丙烯酰胺)、高复合保水材料 (生物炭和聚丙烯酰胺, B2, 每盆 27.30 g 炭+ 2.70 g 聚丙烯酰胺)、低复合保水材料和 N (NB1)、高复合保水材料和 N (NB2)、低复合保水材料和 P (PB1)、高复合保水材料和 P (PB2)、低复合保水材料和 NP (NPB1)、高复合保水材料和 NP (NPB2), 共 12 个处理, 进行不同施肥和保水措施下土壤 N_2O 排放的差异比较。结果表明, N、P 添加均显著增加土壤 N_2O 的累积排放量, NP 添加与对照无差异。施加复合保水材料抑制土壤 N_2O 的排放, 随着复合保水材料施用量的增加, 土壤 N_2O 的排放显著降低, 与对照相比, B1 和 B2 处理 N_2O 减排 50% 以上。N 添加条件下, 与对照相比, 添加复合保水材料 NB1、NB2 的 N_2O 累积排放显著降低。P 与复合保水材料无交互作用。N、P 和复合保水材料对土壤 N_2O 累积排放量具有显著作用, 在 NP 同施时, 与对照相比, 添加复合保水材料 NPB1、NPB2 的 N_2O 累积排放分别降低了 1.18%、30.69%。因此, 高复合保水材料类型的施肥措施对减少油茶土壤 N_2O 排放具有重要意义, 从而对缓解全球气候变化具有重要影响。

关键词: 氮磷施用; 生物炭; 聚丙烯酰胺; 氧化亚氮; 油茶

中图分类号: S794.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)09-2089-09 doi:10.11654/jaes.2020-0259

Effects of different fertilization and water retention measures on N_2O emission from *Camellia oleifera* soil

WNAG Shu-li, GUO Xiao-min, HUANG Li-jun, YUAN Xi, DONG Xing-yu, XIAO Bin, FANG Hai-fu, GAO Yu, NIU De-kui, ZHANG Ling*

(College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Jiangxi Key Laboratory of Silviculture, Nanchang 330045, China)

Abstract: To investigate the effects of different fertilization and water conservation measures on N_2O emissions from *Camellia oleifera* soil, tests were conducted using *Camellia* seedlings, with a static dark box-gas chromatography method, a total of 12 treatments of different fertilizer and water conservation, including control (BOCK), nitrogen fertilizer (N), phosphate fertilizer (P), nitrogen and phosphorus fertilizer (NP), composite water-retaining material (biochar and polyacrylamide, B1), high composite materials (biochar and polyacrylamide, B2), low composite materials and nitrogen fertilizer (NB1) and high composite materials and nitrogen fertilizer (NB2), low composite materials and phosphate (PB1), high composite materials and phosphate (PB2), low composite materials and high nitrogen and phosphate (NPB1), composite materials and nitrogen phosphorus (NPB2), was set to determine the difference of soil N_2O emissions. Results showed that the addition of N and P significantly increased the cumulative emissions of soil N_2O , while the addition of N and P showed no difference with the control sample. Composite water-retaining materials were applied to inhibit soil N_2O emissions. With the

收稿日期: 2020-03-11 录用日期: 2020-05-14

作者简介: 王书丽 (1993—), 女, 安徽宿州人, 博士研究生, 主要从事全球变化与土壤碳氮循环、水土保持与荒漠化防治的研究。

E-mail: sunnyshuli@163.com

*通信作者: 张令 E-mail: lingzhang09@126.com

基金项目: 江西省研究生创新专项资金项目 (YC2017-S192); 国家自然科学基金项目 (41967017, 41501317, 31760223)

Project supported: The Graduate Student Innovation Special Fund Project of Jiangxi Province (YC2017-S192); The National Natural Science Foundation of China (41967017, 41501317, 31760223)

increase of application amount of composite water-retaining materials, soil N_2O emissions were significantly reduced. Compared with the control, B1 and B2 reduced N_2O emissions by more than 50%, respectively. When N was added, compared with control, the cumulative N_2O emissions of NB1 and NB2 with composite water-retaining materials were significantly reduced, respectively. P had no interaction with the composite water-retaining material. N, P, and composite water-retaining materials had significant effects on the cumulative N_2O emissions of soil. When N and P was applied together, compared with the control, the cumulative N_2O emissions of composite water-retaining materials NPB1 and NPB2 were reduced by 1.18% and 30.69%, respectively. Therefore, the application of fertilizer with high composite water-retaining materials is of great significance in reducing the N_2O emissions of *Camellia oleifera* soil, thereby having an important impact on mitigating global climate change.

Keywords: nitrogen and phosphorus application; biochar; polyacrylamide; nitrous oxide; *Camellia oleifera*

N_2O 是地球上3大温室气体之一,其对全球变暖的贡献率约为6%^[1]。由于人类活动的影响,与工业化前相比, N_2O 同比增长了约18.2%^[2]。 N_2O 的全球变暖潜力是 CO_2 的265倍,在大气中可以持续121 a之久^[1]。土壤被认为是 N_2O 产生的重要来源,尤其是热带和酸性土壤^[3]。作为硝化和反硝化过程的中间产物或副产物^[4],很多因素会通过影响硝化和反硝化作用,包括直接因素如土壤无机氮和土壤有机碳、土壤温度^[5]、湿度^[6]、容重^[7]、pH^[8]和间接因素如土地类型^[9]、土地利用方式^[10]、土壤植被类型^[11]等,显著影响土壤 N_2O 排放。

氮、磷是植物生长的必需元素,在植物的生长过程中发挥着重要作用。氮肥(N)作为植物氮素的主要来源,其添加能够促进土壤氮素利用,不仅提高作物经济产量,还能改善作物品质^[12]。但随着N用量的增加,会使土壤 N_2O 排放急剧上升。磷是红壤地区植物生长的主要限制元素,是油茶生长和茶油品质的关键限制因子。磷肥(P)添加可提高土壤磷供应,其添加对土壤 N_2O 排放的研究显示,可能有促进作用^[13]、抑制作用^[14],或者无影响^[15]。农业对N需求量的增加是导致土壤 N_2O 排放量加大的重要原因,研究如何合理施肥对减缓土壤 N_2O 排放具有重要意义。环境因子、土壤理化性质和管理措施是影响温室气体排放的重要因素,采用合理的施肥措施是减缓温室气体排放的重要举措^[16]。生物炭是在低氧条件下经高温热解炭化产生的一种富含碳的物质^[17]。研究表明生物炭添加可以通过影响土壤的理化性质来影响土壤 N_2O 的排放,如增大土壤pH^[18]、增强土壤通气、增加土壤 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量等^[18]。施用生物炭可降低土壤平均 N_2O 排放44%~60%^[19],加强土壤碳封存^[20],提高土壤肥力^[21]。生物炭添加在农业中能够减缓土壤 N_2O 的排放,近年来受到广泛关注。Rondon等^[22]首次报道了生物炭土壤改良后土壤 N_2O 排放减少。然而,也有研

究表明,生物炭添加导致土壤 N_2O 排放的增加^[8]或者对 N_2O 排放无影响^[23],而且不同梯度的生物炭添加对土壤 N_2O 排放影响也有一定差异。石玉龙等^[24]认为施加低量生物炭($10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)能够抑制 N_2O 的排放,高量的生物炭($20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)添加反而促进了反硝化作用,增加了 N_2O 的排放。Liu等^[7]认为低量生物炭($4.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)促进 N_2O 年累积排放量增加,高量的生物炭($9\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)抑制了 N_2O 的年累积排放量。向农田土壤施用生物炭对 N_2O 的减排效果已经得到了广泛研究,但是在油茶土壤中对于 N_2O 的排放机制尚不清楚。

油茶(*Camellia oleifera*)是山茶科山茶属植物,是我国特有的重要木本油料作物,与油棕、油橄榄和椰子并称为世界4大木本食用油料树种^[25]。目前,我国油茶栽培面积约447万 hm^2 ,主要分布于长江流域以南的红壤区,江西为油茶主产区,油茶林总面积超过100万 hm^2 。在油茶果加工过程中一般把油茶壳直接丢弃,不仅造成资源浪费,也加剧环境污染。油茶壳烧制成生物炭,添加到油茶土壤中,不仅能减少环境污染,同时增加土壤肥力,实现变废为宝^[26]。江西省属于典型的亚热带季风气候,7—11月,受副热带高压的控制,水热不同期。这个阶段是油茶产果及油脂转化的关键时期,遇到长期的缺水季,林地土壤无法及时为植株提供水分,不利于油茶林的高产稳产,所以保水剂的添加对油茶生长具有重要作用。聚丙烯酰胺(Polyacrylamide)是一种线型水溶性高分子化合物,易溶于水且具有强黏结性,是现阶段应用最广泛、最具有代表性的吸水保水性树脂材料。聚丙烯酰胺可作为保水剂,同时也是土壤改良剂,能增加土壤表层间的凝聚力^[16],防止土壤板结等。聚丙烯酰胺施入土壤后,能够改善土壤结构,增强土壤渗透性,提高土壤含水量,减少 N_2O 产生需要的厌氧状态,抑制土壤 N_2O 的排放^[16],并促进植物生长。单一保水材料的施用往往容易受自身因素的制约,所以考虑使用油茶壳

生物炭和聚丙烯酰胺制作生物炭复合保水材料。针对生物炭和聚丙烯酰胺作为复合保水材料对油茶土壤温室气体排放的研究报道还较少。因此,本文以油茶苗为研究对象,探究在常规施N、施P或配施生物炭基础上添加聚丙烯酰胺改良剂条件下,不同施肥类型对油茶土壤N₂O排放的影响,通过寻求合理的施肥方式,以期对油茶土壤温室气体减排提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于江西农业大学农业科技园。所处区域位于东经115°50′10″,北纬28°45′53″,属于亚热带湿润季风气候,年平均气温在17~18℃,盛夏最高气温可达40℃以上,冬季最低气温则为-10℃;年平均降雨量在1600 mm左右,年内降水分布不均匀,降水多集中在4—6月,土壤类型为典型红壤。

1.2 试验材料

供试油茶苗为1 a生实生苗,取自江西省林业科学院。采集油茶无施肥土壤并移除石块和杂物,备用。生物炭为油茶壳烧制而成,450℃条件下隔绝空气烧制1 h,冷却1 h,加适量水和聚丙烯酰胺混合搅拌,烘干再继续打磨过筛,粒径为0.053~0.25 mm。聚丙烯酰胺购自国药集团化学试剂有限公司,为阴离子型聚丙烯酰胺,平均分子量不小于1 000万。试验所用N为NH₄NO₃,P为Na₂HPO₄。试验用土壤和生物炭的基本理化性质见表1。

1.3 试验设计

本试验为盆栽试验,每盆土质量为1.5 kg,盆高18 cm,顶部直径16 cm,底部直径11 cm。试验期为2018年4月到2018年9月。共设置12个处理,各处理随机分布,处理包括:对照组(BOCK)、N、P、氮磷肥(NP)、低复合保水材料(B1,1%,每盆13.65 g炭+1.35 g聚丙烯酰胺)、高复合保水材料(B2,2%,每盆27.30 g炭+2.70 g聚丙烯酰胺)、低复合保水材料和N(NB1)、高复合保水材料和N(NB2)、低复合保水材料和P(PB1)、高复合保水材料和P(PB2)、低复合保水

材料和NP(NPB1)、高复合保水材料和NP(NPB2)。复合保水材料与土壤拌施,氮磷肥料均匀拌水喷施。2018年4月17日油茶苗种入盆中,每隔2~3 d根据生长情况适当浇水。油茶苗生长1个月左右,6月1日进行第1次施肥,6月24日第2次施肥,7月18日第3次追肥,其中施N 0.13 g N·kg⁻¹、P 0.065 g P·kg⁻¹、NP 0.13 g N·kg⁻¹+0.065 g P·kg⁻¹,9月26日收获。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 N₂O采集

采用静态暗箱观测法。静态暗箱分为采气桶和底座,采气桶高度根据油茶苗高度由有机玻璃定制而成,桶高80 cm,底座直径为18 cm,距离桶底部高23 cm处开个小孔,使用50 mL医用注射器采气。桶外壁粘贴锡箔纸避光,桶上侧中间位置插有温度计,底座上部由水密封,保证在抽气过程中形成密闭空间。采样时把每盆油茶苗搬到底座上,每个处理3个重复。气体采集时间从5月23日开始,每隔一周采一次,在6月1日、6月24日、7月18日3次追肥后第1、3、6 d采气,再逐渐延长采气间隔时间,9月26日采气结束。每次采集气样时间为上午9:00—11:00,在扣箱后0、5、10、15 min分别抽取40 mL气体注入真空气袋,带回实验室分析。研究结束后,取土壤样品用于理化分析。

1.4.2 测定方法

N₂O排放通量:用气相色谱仪(安捷伦7890B)测定N₂O浓度,N₂O检测器为ECD(电子捕获检测器),载气为高纯N₂,尾吹气为Ar+CH₄(Ar90%,CH₄10%),尾吹气流量为2 mL·min⁻¹。检测器柱温分别是330℃和60℃。每次采集样品的同时测定箱内温度、土壤温度和土壤湿度,土壤温度和土壤湿度采用土壤三参数测量仪测定。土壤湿度是用土壤湿度计在盆栽中直接测定读数。利用每组4个样品的气体峰面积算出与采样时间的回归斜率,求得N₂O排放通量。N₂O排放通量公式为:

$$F = P \times V \times \frac{dc}{dt} \times \frac{1}{RT} \times \frac{1}{A} \times M$$

式中: F 为N₂O排放通量,μg·m⁻²·h⁻¹; P 为标准状态下

表1 试验材料的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of test materials

试验材料 Test materials	有机碳 Organic C/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	速效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	pH
土壤 Soil	13.01	1.46	1.07	1.87	1.68	5.76
生物炭 Biochar	752.87	5.13	107.68	2.15	2.52	9.49

大气压强, Pa; V 为箱的体积, m^3 ; R 为普适气体常数, $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; A 为箱底面积, m^2 ; dc/dt 为 N_2O 浓度随时间变化率; T 为采样过程中的绝对温度, K; M 为 N_2O 的相对分子质量。

N_2O 累积排放量公式:

$$E = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

式中: E 为土壤 N_2O 累积排放量, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; F 为 N_2O 排放通量, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; i 为采样次数; $t_{i+1} - t_i$ 为采样间隔天数。

土壤 pH 值: 以土水比 1:2.5 (m/V), 采用 pH 计测定 (LE438 pH, METTER TOLEDO, 上海)。将土自然风干, 过 2 mm 筛, 称取 10 g 风干土, 加 25 mL 去离子水, 振荡 0.5 h, 过滤, 静置 1 h 后进行测定。

土壤含水量: 采用烘干法测定。称取过 2 mm 筛的鲜土 10~20 g, 称取铝盒质量, 把鲜土放进铝盒里, 在烘箱里 105°C 下烘干至恒质量, 拿出冷却后立即称取质量。

土壤铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 含量: 采用 KCl 溶液浸提法, 使用 Smart Chem 200 全自动间断化学分析仪测定 (Westco Scientific Instruments, Brookfield, CT, USA)。称取过 2 mm 筛鲜土 10 g 于 100 mL 塑料瓶中, 加 KCl 溶液 50 mL, 振荡 30 min, 过滤, 取浸提液在全自动化学分析仪上测定。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据处理, SPSS 20.0 进行数据分析。采用单因素方差分析 (ANOVA) 和多重比较 (LSD Duncan) 法检验不同施肥和保水措施对油茶土壤 N_2O 累积排放量是否有显著性差异以及 N_2O 排放通量与各因子之间的关系, 数据显著性水平采用 $P < 0.05$ 。绘图利用 Origin 8.1 软件完成。图表中数据为平均值 $\pm$ 标准误。

2 结果与分析

2.1 不同处理中土壤 N_2O 排放通量和土壤含水量的关系

从表 2 可以看出, 不同因素对土壤 N_2O 排放通量和土壤含水量有显著影响。其中, 氮添加、复合保水材料添加、磷和复合保水材料的交互作用对土壤 N_2O 排放通量有极显著影响 ($P < 0.01$), 磷添加、氮和磷添加的交互作用以及氮磷和复合保水材料的交互作用对土壤 N_2O 排放通量没有影响 ($P > 0.05$)。不同因素中, 只有磷添加对土壤含水量没有显著影响 ($P > 0.05$), 其余因素均有显著影响。其中, 氮添加、复合保水材料添加、氮和复合保水材料的交互作用、磷和

表 2 N_2O 排放通量和土壤含水量与各因素之间的关系

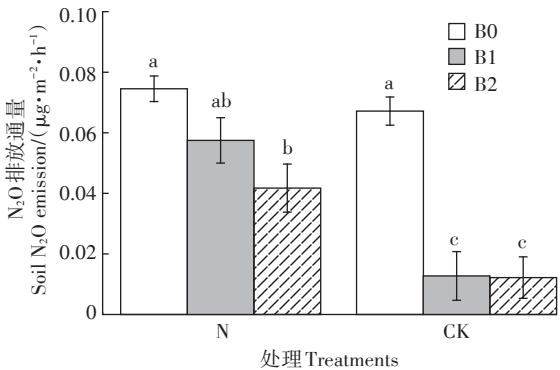
Table 2 Relationship between N_2O emission flux and soil water content with various factors

因素 Factors		土壤 N_2O 排放通量 Soil N_2O emission		土壤含水量 Soil moisture	
固定 Fixed	DF	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
N	1	28.13	<0.000 1*	61.99	<0.000 1*
P	1	1.35	0.244 9	2.32	0.128 3
B	2	27.57	<0.000 1*	169.60	<0.000 1*
N×P	1	0.21	0.647 8	5.87	0.015 6*
N×B	2	4.47	0.011 8*	5.89	0.002 9*
P×B	2	6.29	0.002 0*	19.69	<0.000 1*
N×P×B	2	1.62	0.198 5	4.54	0.011 0*
随机 Random	DF	<i>Z</i>	<i>P</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>
时间	19	5.56	<0.000 1*	35.76	<0.000 1*

注: *显著性差异, 下同。

Note: * indicates the significant difference. The same below.

复合保水材料的交互作用均对土壤含水量有极显著影响 ($P < 0.01$), 且含水量在不同取样时间的差异性显著 ($P < 0.01$)。从图 1 可看出, 不同处理下 N_2O 排放通量的大小趋势为 $\text{N} > \text{B0CK} > \text{NB1} > \text{NB2} > \text{B1} > \text{B2}$, NB2、B1、B2 与对照之间存在显著性差异, N、NB1 与对照之间无显著差异。B1 与 B2 之间无显著差异。与对照相比, N 添加处理土壤 N_2O 排放增加 11.00%, NB1、NB2、B1、B2 分别降低 14.41%、37.85%、81.04%、81.86%。添加复合保水材料处理 N_2O 排放通量显著低于对照组。从图 2 中可看出, 不同处理下土壤含水量的大小顺序是 $\text{NPB1} > \text{NPB2} > \text{NB2} > \text{PB1} > \text{NB1} > \text{B1} > \text{B2} > \text{PB2} > \text{N} > \text{B0CK} > \text{NP} > \text{P}$, 其中对照、NP、P 3 种处理之间土壤含水量没有差异, 且显著低于其他处理。施加复



不同字母代表处理间差异显著。下同

Different letters indicate significant difference among treatments. The same below

图 1 不同氮肥和保水措施对 N_2O 排放通量的影响

Figure 1 Effect of different nitrogen fertilizer and water conservation measures on N_2O emission flux

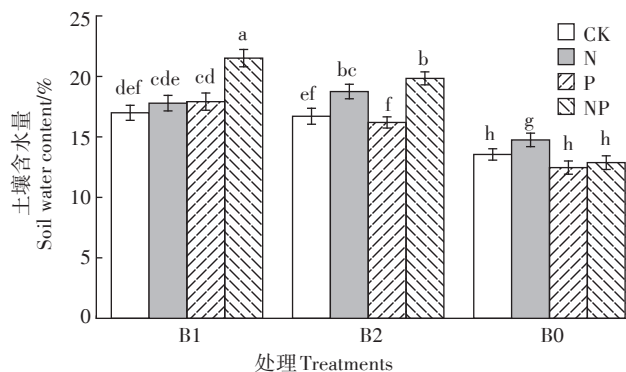


图2 不同施肥和保水措施对土壤含水量的影响

Figure 2 Effects of different fertilization and water conservation measures on soil water content

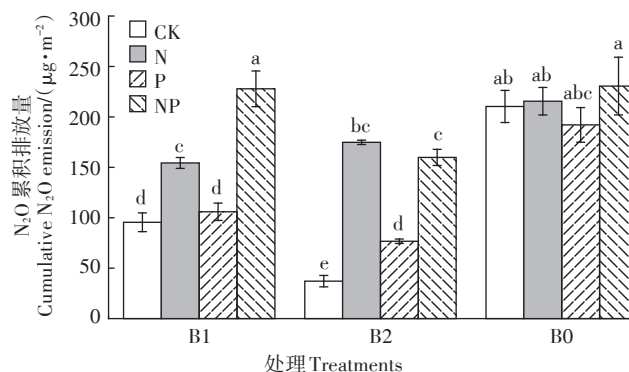
图3 不同施肥和保水措施对N₂O累积排放量的影响

Figure 3 Effects of different fertilization and water conservation measures on N₂O cumulative emissions

合保水材料处理土壤含水量显著高于不施加处理,表明添加复合保水材料对土壤保水性能有明显作用。

2.2 不同处理中N₂O累积排放量、土壤pH、土壤矿质氮的关系

由表3可见,磷和氮的交互、磷和复合保水材料的交互作用对N₂O累积排放量无显著差异($P>0.05$),其余处理均显著影响N₂O累积排放量。其中,氮、复合保水材料以及氮与复合保水材料的交互作用对N₂O累积排放量有极显著影响($P<0.01$)。由图3可见,不同处理下土壤N₂O累积排放量的大小顺序是NP>NPB1>N>B0CK>P>NB2>NPB2>NB1>PB1>B1>PB2>B2,其中NPB1和NP处理下土壤N₂O累积排放量最高,且两者之间无差异。与对照相比,N、NP和NPB1累积排放量分别增加2.49%、9.63%和8.34%,且3个处理间无明显差异;P和NB2两个处理间无明显差异;NPB2、NB1、PB1、B1、PB2、B2累积排放量分别比对照降低了24.02%、26.62%、49.62%、54.59%、63.52%、82.34%,且差异显著。B2处理下土壤N₂O累积排放量最低,显著低于B1。

氮、磷、复合保水材料和它们之间的相互作用均

对土壤NH₄⁺-N有显著影响($P<0.05$)。从表3和图4可以看出,NP处理下土壤NH₄⁺-N含量最高,对照和P处理下土壤NH₄⁺-N含量最低。氮、磷、复合保水材料和它们之间的交互作用均对土壤NO₃⁻-N有极显著影响($P<0.01$)。NPB2处理下土壤NO₃⁻-N含量最高,N和NP处理下土壤NO₃⁻-N含量次之,其余处理下土壤NO₃⁻-N含量均较低,没有显著差异。不同处理下土壤NH₄⁺-N含量的大小顺序是NP>N>NB2>B1>NPB1>PB1>NB1>NPB2>PB2>B2>P>B0CK,其中NP处理下土壤NH₄⁺-N含量显著高于其他处理。

氮和磷添加对土壤pH有极显著影响($P<0.01$),氮、磷添加下pH显著低于对照处理,复合保水材料对土壤pH有显著影响($P<0.05$),复合保水材料添加显著提高了土壤pH。其余处理均对土壤pH没有影响($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 氮磷添加对油茶土壤N₂O排放量的影响

N₂O可以通过不同的氮转化途径产生,但以硝化和反硝化作用为主。硝化和反硝化作用与NH₄⁺-N和

表3 不同处理与N₂O累积排放量、土壤矿质氮、土壤pH的关系Table 3 Relationship between different treatments and cumulative N₂O emissions, soil NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, soil pH

因素 Factors	DF	N ₂ O 累积排放量 Cumulative N ₂ O emissions		铵态氮 NH ₄ ⁺ -N		硝态氮 NO ₃ ⁻ -N		pH	
		F	P	F	P	F	P	F	P
N	1	89.59	<0.000 1*	34.89	<0.000 1*	100.14	<0.000 1*	15.26	0.001 0*
P	1	5.79	0.024 2*	5.33	0.030 0*	7.81	<0.000 1*	148.48	<0.000 1*
B	2	55.70	<0.000 1*	5.08	0.014 0*	22.43	<0.000 1*	4.56	0.021 1*
N×P	1	1.06	0.313 3	5.84	0.024 0*	4.03	<0.000 1*	3.55	0.072 2
N×B	2	12.87	0.000 2*	26.13	<0.000 1*	23.66	<0.000 1*	0.22	0.808 0
P×B	2	2.46	0.107 2	8.46	0.002 0*	4.00	<0.000 1*	1.51	0.242 3
N×P×B	2	5.33	0.012 1*	7.47	0.003 0*	4.45	<0.000 1*	0.82	0.454 2

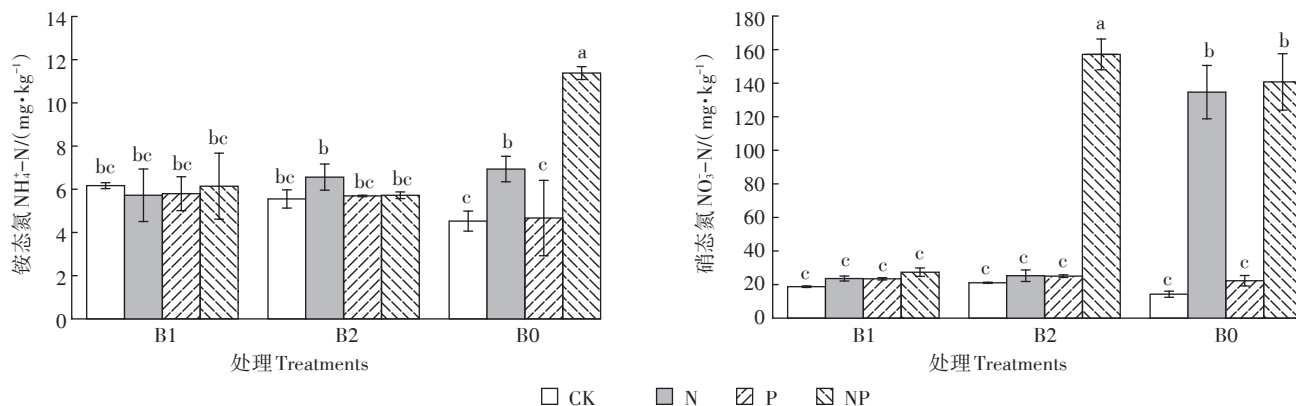
图4 不同施肥和保水措施对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的影响

Figure 4 Effects of different fertilization and water conservation measures on ammonium and nitrate nitrogen in soil

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 两种反应底物浓度有关^[23]。氮添加增加了硝化和反硝化作用的底物浓度,利于 N_2O 排放,而对照处理由于植物生长消耗了有效态氮,导致 N_2O 排放相对较少,这也与大多数研究结果一致^[2,26]。本试验结果也表明氮添加后土壤 N_2O 大量排放很大程度上是因为增加了土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。硝化作用是土壤氮循环的关键过程,其发生和速率与AOA和AOB的丰度和活性密切相关^[8]。N添加也可能通过增加AOA、AOB、*nirK*、*nirS*和*nosZ*基因丰度来促进土壤硝化作用,影响土壤氮循环^[27]。pH也会影响土壤 N_2O 的排放,在pH较低的土壤中, N_2O 的排放显著增加。本研究中氮、磷添加后土壤pH(5.46、5.19)显著低于对照处理(5.60),可能导致在酸性条件下通过影响胞质中的酶组装来抑制 N_2O 还原酶,从而对 N_2O 排放产生积极影响^[28]。

本试验中磷添加对土壤 N_2O 排放通量无影响,但促进了 N_2O 累积排放。累积排放量是排放通量随时间的积累,在时间尺度上存在增加效应,经过长时间累积, N_2O 累积排放增加。也有可能是磷添加促进了土壤氮的矿化,进而促进土壤 N_2O 的排放。磷添加后显著提高了土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,促进反硝化作用,也可以促进自养硝化作用,产生更多的 N_2O ^[15]。土壤中碳和磷等营养物质的有效性会限制土壤中异养微生物的生长和活性。磷添加可能会增加土壤中有效磷,增大土壤中异养微生物的活性,促进 N_2O 的排放;也可能通过诱导微生物对氮的需求来促进土壤有机质的分解,基质化学结构的变化会影响总氮矿化,从而影响土壤 N_2O 的排放^[29]。

土壤中氮和磷等营养物质的有效性对微生物的生长和呼吸有很强的控制作用。Wang等^[30]研究发现

在森林生态系统中,由于在湿润季节磷添加时刺激氮吸收更多的微生物生物量,氮、磷共同添加能够促进土壤 N_2O 的排放。Gao等^[2]结果表明氮、磷共施促进了杉木林的土壤 N_2O 的排放。本试验中氮、磷同时添加对土壤 N_2O 排放通量和累积排放均没有显著影响。这可能是由于植物的生长和微生物活性的增加增强了微生物的固定,导致土壤 N_2O 排放与对照相比没有显著变化^[31]。NP添加后土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 显著高于对照处理,而 N_2O 排放无显著差异,这一结果与曹登超等^[15]研究相似,一方面可能是因为土壤的无机氮含量较低,限制了硝化和反硝化过程的底物,另一方面磷肥的添加可能促进植物对氮的吸收,从而减少 N_2O 排放。

3.2 不同保水措施对油茶土壤 N_2O 排放量的影响

施加生物炭,能够促进土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 矿化和硝化作用,促进 N_2O 的排放。但在南方酸性土壤中,施用生物炭大多能降低 N_2O 的排放^[26]。可能是因为生物炭能够改善土壤通气性,限制硝化作用及厌氧条件下氮素微生物的反硝化作用,从而减少 N_2O 的排放^[9]。本试验中施加生物炭和聚丙烯酰胺能一定程度降低油茶土壤 N_2O 的排放。一方面是因为生物炭和聚丙烯酰胺本身的性质,生物炭具有较高的碳氮比,随着生物炭的添加,改善了土壤团粒结构,抑制了反硝化微生物的活性,减少 N_2O 的排放。经聚丙烯酰胺处理的土壤样品的酰胺酶活性显著高于未经处理的土壤样品,聚丙烯酰胺在酰胺酶催化下脱氨生成氨和聚丙烯酸酯,释放出的氨被微生物用作生长的氮源^[32],添加聚丙烯酰胺和生物炭提高了土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。施入土壤中的生物炭和聚丙烯酰胺可能会通过吸附作用固定土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等,潜在抑制土壤 N_2O

的排放^[16]。另一方面与生物炭和聚丙烯酰胺的添加改变土壤理化性质有关,如B2处理下的 N_2O 累积排放量较少可能与B2处理下的pH较高有关。生物炭通过调节土壤pH影响土壤 N_2O 的排放。在酸性土壤中,pH是影响细菌群落多样性、结构、相互作用和功能的关键因素,从而影响温室气体的产生^[11]。pH也被证明是预测土壤中细菌水平丰度的良好指标。pH值降低时,硝化螺旋菌减少,对氮循环产生影响,从而影响硝化作用,产生更少的 N_2O ^[9]。陈晨等^[8]研究表明,生物炭的施用提高了土壤pH,通过改变土壤的理化性质和微生物活性,显著降低 N_2O 的排放。生物炭的大量施用,增加了土壤阳离子交换量,减少了硝化作用的底物氮源,其通过 NO_3^--N 的还原过程来减弱反硝化作用,从而整体上表现为减少 N_2O 的排放。 NO_3^--N 在还原成 N_2 的过程中可能由于反硝化细菌活性降低,反硝化作用减弱而受到抑制。在本研究中,可能是土壤的反硝化作用减弱降低了土壤 N_2O 的排放。土壤水分是影响硝化微生物活性的重要因素^[33],本试验中复合保水材料在油茶盆栽试验中有一定的保水效能,添加生物炭和聚丙烯酰胺,显著增加了土壤水分含量,从而影响 N_2O 的排放。酸性土壤中,有80%的 N_2O 排放来自土壤的反硝化作用。聚丙烯酰胺是一种合成的高分子量的化合物,聚丙烯酰胺分子与土壤接触时,其内聚性将土壤颗粒和黏粒结合在一起,从而打开较大的土壤孔隙,水就会优先通过这些孔隙流动,保持水分^[34]。研究表明,随着聚丙烯酰胺用量的增加,土壤含水量会呈先上升后下降的趋势^[35],与本文中B2处理下的土壤含水量低于B1处理结果一致,可能是因为聚丙烯酰胺在土壤水分亏缺情况下效果更佳^[36]。聚丙烯酰胺在有氧和厌氧条件下均可以为土壤提供氮源,且能在有氧条件下为土壤提供碳源,促进土壤 N_2O 的排放,故在本研究中添加生物炭和聚丙烯酰胺显著降低土壤 N_2O 的排放,是生物炭起了主要作用。

3.3 施肥和保水措施对油茶土壤 N_2O 排放量的影响

本研究中NP、复合保水材料共同施加的施肥措施对油茶土壤 N_2O 累积排放有显著影响,其中NP配施B2的处理 N_2O 累积排放较低,可能是高量的生物炭和聚丙烯酰胺起主要作用。生物炭和聚丙烯酰胺能增加土壤通透性,促进氧气扩散,有利于土壤中有有机物质利用 N_2O 发生非生物反应^[37]。N配施生物炭、聚丙烯酰胺处理与对照相比显著降低土壤 N_2O 的排放。可能是因为N的施用增加了土壤微生物能源底

物浓度,而生物炭的添加增加了对矿质氮的吸收,结果表现为降低了土壤 N_2O 排放^[36]。与周自强等^[38]在生物炭添加下配施N能显著降低 N_2O 排放研究结果一致。随着复合保水材料量的增加土壤 N_2O 累积排放减少,与李露等^[39]研究中高量的生物炭($40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理下 N_2O 排放更低结果一致。可能是因为施加生物炭的含量较高,能有效限制氮素的微生物转化和反硝化作用,减少土壤 N_2O 排放。生物炭的添加在一定程度上提供了氮源,但是增加的氮源可能低于生物炭吸附的有效态氮含量。B2处理的聚丙烯酰胺的含量也相对较高,聚丙烯酰胺的活性基团可以与土壤颗粒表面的离子相互作用,进一步增加土壤对养分的固持作用,减少 N_2O 的排放^[40]。也有研究表明^[41],施加低量的生物炭($20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)对 N_2O 排放无显著影响,而高量的生物炭($40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)添加后能显著降低 N_2O 排放。说明生物炭添加对土壤 N_2O 排放的结论不一,还需要进行更深层次的研究。

4 结论

氮添加和磷添加均能促进油茶土壤 N_2O 排放,从本试验中可看出添加生物炭和聚丙烯酰胺均能显著降低油茶土壤 N_2O 排放,且随生物炭量和聚丙烯酰胺的增加减排效果更佳。与对照组相比,B1和B2处理均实现 N_2O 减排50%以上。施N后,添加复合保水材料也显著降低了土壤 N_2O 的累积排放。在NP同时,添加复合保水材料在B2水平上也显著降低了 N_2O 累积排放量。在油茶林中,选择高生物炭和聚丙烯酰胺保水措施(每盆 27.30 g 炭+ 2.70 g 聚丙烯酰胺)对于减少温室气体排放较为有益,更能达到固氮减排的效果。

参考文献:

- [1] IPCC. Synthesis Report, Climate Change 2014[R]. Cambridge: Cambridge University Press, USA, 2014.
- [2] Gao W L, Yang H, Li S G, et al. Responses of soil CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes to N, P, and acid additions in mixed forest in subtropical China [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(2):154-164.
- [3] Liu S W, Lin F, Wu S, et al. A meta-analysis of fertilizer-induced soil NO and combined $\text{NO} + \text{N}_2\text{O}$ emissions[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(6):2520-2532.
- [4] Xu X, Shi Z, Li D Z, et al. Soil properties control decomposition of soil organic carbon: Results from data-assimilation analysis[J]. *Geoderma*, 2016, 262:235-242.
- [5] Deng B L, Li Z, Zhang L, et al. Increases in soil CO_2 and N_2O emissions with warming depend on plant species in restored alpine mead-

- ows of Wugong Mountain, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(3):777-784.
- [6] Castellano-Hinojosa A, González-López J, Bedmar E J. Distinct effect of nitrogen fertilisation and soil depth on nitrous oxide emissions and nitrifiers and denitrifiers abundance[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(7):829-840.
- [7] Liu X R, Ren J Q, Zhang Q W, et al. Long-term effects of biochar addition and straw return on N₂O fluxes and the related functional gene abundances under wheat-maize rotation system in the North China Plain[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 135:44-55.
- [8] 陈晨, 许欣, 毕智超, 等. 生物炭和有机肥对菜地土壤 N₂O 排放及硝化、反硝化微生物功能基因丰度的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(5):1912-1920.
- CHEN Chen, XU Xin, BI Zhi-chao, et al. Effects of biochar and organic manure on N₂O emissions and the functional gene abundance of nitrification and denitrification microbes under intensive vegetable production[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(5):1912-1920.
- [9] Mori T, Yokoyama D, Kitayama K. Contrasting effects of exogenous phosphorus application on N₂O emissions from two tropical forest soils with contrasting phosphorus availability[J]. *Springer Plus*, 2016, 1(5):1237.
- [10] Van Lent J, Amp H, Apos, et al. Reviews and syntheses: Soil N₂O and NO emissions from land use and land-use change in the tropics and subtropics: A meta-analysis[J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(23):7299-7313.
- [11] 李超, 刘苑秋, 王翰琨, 等. 庐山毛竹扩张及模拟氮沉降对土壤 N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1):146-155.
- LI Chao, LIU Yuan-qiu, WANG Han-kun, et al. Effects of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) expansion and simulated nitrogen deposition on emission of soil N₂O and CO₂ in Lushan Mountain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1):146-155.
- [12] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2):292-304.
- WANG Jing, CHEN Yi, CAI Zu-cong, et al. Effects of long-term fertilization on key processes of soil nitrogen cycling in agricultural soil: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2):292-304.
- [13] Camenzind T, Hättenschwiler S, Treseder K K, et al. Nutrient limitation of soil microbial processes in tropical forests[J]. *Ecological Monographs*, 2018, 88(1):4-21.
- [14] Zhang W, Zhu X, Luo Y Q, et al. Responses of nitrous oxide emissions to nitrogen and phosphorus additions in two tropical plantations with N-fixing vs. non-N-fixing tree species[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(18):4941-4951.
- [15] 曹登超, 高霄鹏, 李磊, 等. 氮磷添加对昆仑山北坡高山草地 N₂O 排放的影响[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(2):165-173.
- CAO Deng-chao, GAO Xiao-peng, LI Lei, et al. Effects of nitrogen and phosphorus additions on nitrous oxide emissions from alpine grassland in the northern slope of Kunlun Mountains, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(2):165-173.
- [16] 武岩. 施肥措施对河套灌区农田氮素损失及平衡的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- WU Yan. Effects of fertilization on farmland nitrogen loss and balance in Hetao irrigation area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [17] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review[J]. *Plant and Soil*, 2010, 337(1/2):1-18.
- [18] Harter J, Weigold P, El-Hadidi M, et al. Soil biochar amendment shapes the composition of N₂O-reducing microbial communities[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 562:379-390.
- [19] Edwards J D, Pittelkow C M, Kent A D, et al. Dynamic biochar effects on soil nitrous oxide emissions and underlying microbial processes during the maize growing season[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 122:81-90.
- [20] 赵颖, 张金波, 蔡祖聪. 添加硝化抑制剂, 秸秆及生物炭对亚热带农田土壤 N₂O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(5):1023-1034.
- ZHAO Ying, ZHANG Jin-bo, CAI Zu-cong. Effects of nitrification inhibitor, crop residues, and biochar applications on N₂O emissions by subtropical agricultural soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(5):1023-1034.
- [21] van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Influence of biochars on flux of N₂O and CO₂ from Ferrosol[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7):555-568.
- [22] Rondon M, Ramíraz J A, Lehmann J. Greenhouse gas emissions decrease with charcoal additions to tropical soils[C]//Proceedings of the 3rd USDA Symposium on Greenhouse Gases & Carbon Sequestration in Agriculture and Forestry, 2005.
- [23] 李博, 李巧玲, 范长华, 等. 施用生物炭与硝化抑制剂对菜地综合温室效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(9):2651-2657.
- LI Bo, LI Qiao-ling, FAN Chang-hua, et al. Effects of biochar and nitrification inhibitor incorporation on global warming potential of a vegetable field in Nanjing, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(9):2651-2657.
- [24] 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 等. 生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(12):5333-5343.
- SHI Yu-Long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, et al. Effects of biochar and organic fertilizer on saline-alkali soil N₂O emission in the North China Plain[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12):5333-5343.
- [25] 于方明, 漆培艺, 刘可慧, 等. 锰污染土壤石灰改良对油茶生长及抗氧化酶系统的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8):1882-1890.
- YU Fang-ming, QI Pei-yi, LIU Ke-hui, et al. Effects of lime on the growth and antioxidant enzyme system of *Camellia oleifera* in manganese-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1882-1890.
- [26] Deng B L, Wang S L, Xu X T, et al. Effects of biochar and dicyandiamide combination on nitrous oxide emissions from *Camellia oleifera* field soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(4):4070-4077.
- [27] Qin S H, Wu Z S, Rasool A, et al. Synthesis and characterization of slow-release nitrogen fertilizer with water absorbency: Based on poly

- (acrylic acid-acrylic amide)/Na-bentonite[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 126(5):1687-1697.
- [28] Ouyang Y, Evans S E, Friesen M L, et al. Effect of nitrogen fertilization on the abundance of nitrogen cycling genes in agricultural soils: A meta-analysis of field studies[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018(127):71-78.
- [29] Bakken L R, Bergaust L, Liu B B, et al. Regulation of denitrification at the cellular level: A clue to the understanding of N₂O emissions from soils[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2012, 367(1593):1226-1234.
- [30] Wang F M, Li J, Wang X L, et al. Nitrogen and phosphorus addition impact soil N₂O emission in a secondary tropical forest of South China [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4:5615.
- [31] Mehnaz K R, Corneo P E, Keitel C, et al. Carbon and phosphorus addition effects on microbial carbon use efficiency, soil organic matter priming, gross nitrogen mineralization and nitrous oxide emission from soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 134:175-186.
- [32] Kang J, McLaughlin R A, Amoozegar A, et al. Transport of dissolved polyacrylamide through a clay loam soil[J]. *Geoderma*, 2015, 243-244:108-114.
- [33] 曹彦强, 王智慧, 莫永亮, 等. 施肥和淹水管理对水稻土氨氧化微生物数量的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4):1004-1011.
CAO Yan-qiang, WANG Zhi-hui, MO Yong-liang, et al. Effects of fertilization and water management on abundance of ammonia-oxidizing microorganisms in paddy soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4):1004-1011.
- [34] Phoenix G K, Booth R E, Leake J R, et al. Effects of enhanced nitrogen deposition and phosphorus limitation on nitrogen budgets of semi-natural grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(9):1309-1321.
- [35] 李远超, 许凌露, 贺宇欣, 等. 不同聚丙烯酰胺用量对加工番茄产量及土壤环境的影响[J]. 现代农业科技, 2019(21):70-74.
LI Yuan-chao, XU Ling-lu, HE Yu-xin, et al. Effect of different polyacrylamide amount on processed tomato yield and soil environment[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(21):70-74.
- [36] Nyssölä A, Ahlgren J. Microbial degradation of polyacrylamide and the deamination product polyacrylate[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, 139:24-33.
- [37] Li B, Fan C H, Zhang H, et al. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in Southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 100:10-19.
- [38] 周自强, 李露, 张恒, 等. 氮肥配施小麦秸秆生物炭对稻麦轮作土壤剖面CH₄和N₂O浓度的影响[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(3):431-438.
ZHOU Zi-qiang, LI Lu, ZHANG Heng, et al. Effects of wheat straw biochar and nitrogen amendment on methane and nitrous oxide distribution characteristics within soil profile in rice-wheat annual rotations [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2015, 38(3):431-438.
- [39] 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 不同时期施用生物炭对稻田N₂O和CH₄排放的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4):839-848.
LI Lu, ZHOU Zi-qiang, PAN Xiao-jian, et al. Effects of biochar on N₂O and CH₄ emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4):839-848.
- [40] 李亚东, 杨兰芳, 李海波, 等. 聚丙烯酸钠(SP)保水剂对不同基质氮、磷、钾、钠淋溶的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6):1445-1453.
LI Ya-dong, YANG Lan-fang, LI Hai-bo, et al. The effects of sodium polyacrylate (SP) on the leaking of N, P, K and Na in different substrates[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(6):1445-1453.
- [41] 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 氮肥与生物炭施用对稻麦轮作系统甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5):1095-1103.
LI Lu, ZHOU Zi-qiang, PAN Xiao-jian, et al. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar incorporation on methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in rice-wheat annual rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5):1095-1103.