

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源..... 林秋菊,徐娇,李梅,王玮,史国良,冯银厂 (2505)

南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析..... 杨笑影,曹芳,林煜棋,章炎麟 (2519)

西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征..... 黄舍舍,王羽琴,李升苹,陈庆彩 (2528)

新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响..... 刘会斌,迪丽努尔·塔力甫,王新明,张潇潇,王威,阿布力克木·阿不力孜,买里克扎提·买合木提,刘伟 (2536)

长秋季生物质燃烧对PM_{2.5}中WSOC吸光性的影响..... 孟德友,曹芳,翟晓瑶,张世春,章炎麟 (2547)

2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源..... 王倩 (2555)

南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析..... 曹梦瑶,林煜棋,章炎麟 (2565)

郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析..... 任义君,马双良,王思维,于世杰,李一丹,张瑞芹,尹沙沙 (2577)

上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献..... 韩婷婷,李颖若,邱雨露,何迪,王焱,马志强 (2586)

北京市餐饮业大气污染物排放特征..... 孙成一,白画画,陈雪,翟翼飞,高启天,何万清,聂磊,石爱军,李国傲 (2596)

北京市农业机械排放因子与排放清单..... 王凯,樊守彬,亓浩云 (2602)

北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化..... 李贝贝,黄玉虎,毕晓辉,刘李阳,秦建平 (2609)

基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析..... 张颖蕾,崔希民 (2617)

环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟..... 张毅,马艳飞,宋帅,吕永龙,张盛,吴强 (2625)

岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析..... 周石磊,孙悦,苑世超,彭瑞哲,刘世崇,岳奇丞,张航,王周强,李再兴,罗晓 (2635)

“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析..... 李悦昭,陈海洋,孙文超 (2646)

伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价..... 姜时欣,翟付杰,张超,王蒙蒙,单保庆 (2653)

典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析..... 赵然,韩志伟,申春华,张水,涂汉,郭永丽 (2664)

沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响..... 陈洁,许海,詹旭,许笛,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,康丽娟 (2671)

丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素..... 李胜男,陈豪宇,彭华,李芸君,朱坚,简燕,纪雄辉 (2679)

胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用..... 王振方,韩子玉,王梦雪,马逸驰,王婷,王丽卿,张玮 (2688)

不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较..... 桑雨璇,杨珈乐,熊怡,尹文博,汪华,王和云 (2698)

过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用..... 张帅,李大鹏,丁玉琴,徐楚天,许鑫澎,孙培荣,赵哲豪,黄勇 (2706)

基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例..... 王亚楠,祝伟,祁新华,范水生 (2714)

不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径..... 张杰,梅宁,刘孟浩,叶雪松,李冬 (2727)

高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5..... 李立,吴丽颖,董正玉,王霖,张倩,洪俊明 (2736)

Fe-cyclam/H₂O₂体系催化降解罗丹明B机制..... 余雨清,陈翔宇,蔡权华,黄歆珏,陈曼 (2746)

微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO₂-NTs为光阳极..... 卢忆,周海珊,彭瑞建,叶杰旭,陈建孟,宋爽,张士汉 (2754)

缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性..... 陈凡雨,徐仲,尤宏,柳锋,李之鹏,陈其伟,韩红卫 (2762)

HRT对改良式A²/O-BAF反硝化除磷脱氮的影响..... 赵凯亮,刘安迪,南彦斌,梁利民,王云霞,陈永志 (2771)

重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化..... 孙琪,赵白航,范飒,周邦磊,李玉琪 (2779)

异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素去除及重金属和盐度的影响..... 王萌萌,曹刚,张迪,冯乃亮,潘涌璋 (2787)

火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替..... 薛嘉俊,张绍青,张立秋,李淑更,姚海楠,耿忠轩,李鸿,刘晓玲 (2796)

游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响..... 沈琛,张树军,彭永臻 (2805)

死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰..... 苏宇傲,刘宏波,毛秋燕,张慧旻,张衍,刘和 (2812)

中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价..... 陈文轩,李茜,王珍,孙兆军 (2822)

土壤环境质量预警体系构建与应用..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿 (2834)

不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系..... 毛霞丽,邱志腾,张爽,沈倩,章明奎 (2842)

长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征..... 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,祝贞科,袁红朝,葛体达,吴金水 (2852)

生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响..... 黄洋,郭晓,胡学玉 (2861)

基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价..... 肖冰,薛培英,韦亮,刘成程,高培培,樊利敏,杜佳燕,刘文菊 (2869)

重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素..... 胡青青,沈强,陈飞,尹炳,邹宏光,庄红娟,张世文 (2878)

新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果..... 陈兆进,李英军,邵洋,林立安,徐鸽,陈彦,田伟,姚伦广,韩辉 (2889)

三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征..... 李丽娟,李昌晓,陈春桦,杨治华,陈雪梅 (2898)

滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布..... 张宇,左剑恶,王丝可,Alisa Salimova,李爱军,李玲玲 (2908)

模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响..... 王愉琬,马安周,种国双,谢飞,周汉昌,刘国华,庄国强 (2918)

水肥气耦合对温室番茄土壤N₂O排放及番茄产量的影响..... 商子惠,蔡焕杰,陈慧,孙亚楠,李亮,朱艳,王晓云 (2924)

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用..... 尚誉,杨丰隆,宁夏,董轶茹,桑楠 (2936)

海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价..... 汪慧娟,旷泽行,周贤,覃晓青,黄洪辉 (2942)

春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析..... 贺玉晓,李珂,任玉芬,王思琪,方文颖 (2951)

热解温度和时问对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估..... 蔡朝卉,楚沉静,郑浩,罗先香,李锋民 (2963)

长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)..... 蒋自然,金环环,王成金,叶士琳,黄艳豪 (2972)

《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697,2713,2811)

水肥气耦合对温室番茄地土壤 N₂O 排放及番茄产量的影响

商子惠^{1,2}, 蔡焕杰^{1,2*}, 陈慧^{1,2}, 孙亚楠¹, 李亮^{1,2}, 朱艳^{1,2}, 王晓云¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为揭示水肥气耦合对温室番茄地土壤 N₂O 排放的影响, 提出适宜的温室番茄增产减排措施, 采用静态暗箱-气相色谱法监测土壤 N₂O 的排放, 分析水肥气耦合条件下土壤温度、灌溉水利用效率(WFPS)、NO₃⁻-N、O₂ 含量的变化规律以及 N₂O 排放的影响机制. 加气条件下设两个灌水水平 0.6 W 和 1.0 W (分别代表亏缺 40% 灌溉和充分灌溉, W 代表充分灌水时的灌水量) 和 3 个施氮水平 (120、180 和 240 kg·hm⁻², 分别代表低、中和高氮, 以 50% F、75% F 和 F 表示, 其中 F 为当地推荐施氮量), 以不加气充分灌溉 (O 为加气灌溉, CK 为常规滴灌) 条件下 3 种施肥水平为对照, 共 9 个处理. 结果表明, 充分灌溉 (W2F1O、W2F2O 和 W2F3O) 的 N₂O 累积排放量较亏缺灌溉 (W1F1O、W1F2O 和 W1F3O) 处理平均增加了 55.7% ($P < 0.05$); 高氮条件下 (W1F3O、W2F3O 和 W2F3CK) 土壤 N₂O 排放较中氮和低氮平均增大 13.4% 和 43.8% ($P < 0.05$), 充分灌溉条件下加气处理 (W2F1O、W2F2O 和 W2F3O) 较相应不加气处理 (W2F1CK、W2F2CK 和 W2F3CK) N₂O 排放平均增加 11.2% ($P < 0.05$). 加气、施氮量和灌水量的增加可增加番茄产量和单产 N₂O 排放量. 高氮处理番茄产量和单产 N₂O 排放量较中氮处理分别增加了 12.5% ($P < 0.05$) 和 3.9% ($P > 0.05$), 高氮处理番茄产量和单产 N₂O 排放量较低氮处理显著增加了 30.4% 和 9.6% ($P < 0.05$), 加气充分灌溉较加气亏缺灌溉处理番茄产量和单产 N₂O 排放量分别显著增加了 29.7% 和 18.7% ($P < 0.05$), 加气处理 (W2F1O、W2F2O 和 W2F3O) 较不加气处理产量 (W2F1CK、W2F2CK 和 W2F3CK) 平均增加了 10.4% ($P < 0.05$), 单产 N₂O 排放量增加但不显著. 灌水量增加、施肥量降低、加气均可显著增大肥料偏生产力, 减小灌溉水分利用效率 (IWUE). 综合考虑 N₂O 累积排放量、作物产量、氮肥利用效率、IWUE 和单产 N₂O 排放量, 得出加气低氮充分灌溉为较优的管理模式. 本研究结果为温室番茄的增产减排提供了一定的参考.

关键词: 温室气体 (GHG); 水肥气耦合; N₂O 排放; 排放控制; 加气灌溉

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2924-12 DOI: 10.13227/j.hjck.201910056

Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N₂O Emission and Yield in Greenhouse Tomato

SHANG Zi-hui^{1,2}, CAI Huan-jie^{1,2*}, CHEN Hui^{1,2}, SUN Ya-nan¹, LI Liang^{1,2}, ZHU Yan^{1,2}, WANG Xiao-yun¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Water and Soil Engineering, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To reveal the effect of water, fertilizer, and gas coupling on soil N₂O emissions in greenhouse tomato soil and suggest appropriate measures for increasing yield and reducing N₂O emissions, static chamber-gas chromatography was used to study the effects of soil N₂O emissions. The variation laws of soil temperature, water-filled pore space (WFPS), NO₃⁻-N content, and O₂ content and the influence mechanism of N₂O emission under the condition of water-fertilizer-gas coupling were analyzed. Aerated conditions comprised two water levels, 0.6 W and 1.0 W (representing 40% deficit irrigation and full irrigation, W represents when sufficient irrigation water was available), and three nitrogen levels (120 kg·hm⁻², 180 kg·hm⁻², and 240 kg·hm⁻², representing low, medium, and high nitrogen, respectively, with 50%F, 75%F, and F, F is the recommended amount of nitrogen application locally). Three levels of fertilization were used as controlled unaerated full irrigation (O representing aeration, and CK representing conventional drip irrigation). Nine treatments were designed in the experiment. The results showed that the tomato field cumulative emission of N₂O under full irrigation (W2F1O, W2F2O, and W2F3O) increased by an average of 55.7% compared with the corresponding treatment at W1 level ($P < 0.05$). The N₂O emissions of W1F3O, W2F3O, and W2F3CK fields significantly increased by 13.4% and 43.8% compared with medium nitrogen W1F2O, W2F2O, and W2F2CK and low nitrogen W1F1O, W2F1O, and W2F1CK treatments, respectively ($P < 0.05$). Compared with the corresponding unaerated full irrigation, the emissions (W2F1O, W2F2O, and W2F3O) significantly increased by 11.2% ($P < 0.05$). Aeration, the increase of nitrogen rate, and irrigation amount resulted in the increment of tomato yield and yield-scaled N₂O emissions. Compared with medium nitrogen, the yield and yield-scaled N₂O emission of high nitrogen treatment increased by 12.5% ($P < 0.05$) and 3.9% ($P > 0.05$), respectively. Compared with low nitrogen treatment, the yield and yield-scaled N₂O emission of high nitrogen treatment increased by 30.4% and 9.6% ($P < 0.05$), respectively. The yield

收稿日期: 2019-10-09; 修订日期: 2020-01-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400200); 国家自然科学基金项目(51309192)

作者简介: 商子惠(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为节水灌溉理论与新技术, E-mail: shangzihui2019@163.com

* 通信作者, E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

and yield-scaled N₂O emissions of aerated full irrigation significantly increased by 29.7% and 18.7%, respectively, compared with aerated deficient irrigation. Compared with unaerated irrigation treatment, the yield under aerated treatment increased by 10.4% ($P < 0.05$), and the yield-scaled N₂O emission increased by 3.9% ($P > 0.05$). Under the conditions of increasing irrigation water, decreasing fertilizer application, and aeration, partial factor productivity, and irrigation water use efficiency (IWUE) can be significantly increased. After comprehensive consideration of cumulative N₂O emissions, tomato production, nitrogen fertilizer utilization efficiency, IWUE, and yield-scaled N₂O emission, it can be concluded that aerated low nitrogen full irrigation is an optimal management mode. The results provide reference for increasing yield and reducing emissions of greenhouse tomato.

Key words: greenhouse gas (GHG); coupling of water, fertilizer, and gas; N₂O emissions; emission control; aerated irrigation

大气中温室气体浓度呈逐渐递增趋势,由此导致的全球温度升高和臭氧层破坏已成为全球关注的重要环境问题. N₂O 是大气中重要的温室气体^[1], 不仅会破坏臭氧层^[2,3],也会导致温室效应,Stocker 等^[4]指出 N₂O 的增温潜能达 CO₂ 的 298 倍和 CH₄ 的 12 倍. 农田生态系统是全球 N₂O 排放的一个重要来源^[5],据估计 10 年后全球土壤 N₂O 的排放量将增加 35%~60%^[6]. 中国蔬菜产业近年来发展迅猛,是农田生态系统 N₂O 排放的重要部分,设施菜地种植面积分别占蔬菜和农作物面积的 18% 和 4.61%^[7]. 设施菜地施肥量高且灌水次数频繁,被认为是 N₂O 的重要排放源^[8].

土壤 N₂O 排放受多种因素共同作用^[9],水肥气是影响土壤 N₂O 排放的主要因子,土壤 WFPS、氮素和溶氧量等改变均会影响土壤 N₂O 排放. 陈慧等^[10]的研究发现,土壤含水量增大导致土壤中含氧量改变,土壤通气性改变,土壤硝化和反硝化作用条件改变,影响土壤 N₂O 排放. 杜娅丹等^[11]的研究发现,施氮显著增加了土壤 N₂O 排放,可能由于施氮后土壤中氮底物浓度增加,微生物活性及数量增多影响土壤硝化反硝化作用. Chen 等^[12]的研究发现,加气灌溉导致土壤通气性增强,促进了土壤 N₂O 排放. 目前研究大多揭示了水、肥、气单因子或两因子耦合条件下农田土壤 N₂O 排放特征,但关于水肥气三者耦合设施菜地土壤 N₂O 排放特征及其影响机制仍不明确,缺乏系统性的分析. 不同施肥量或者相同施肥量,不同施肥次数和施肥时间,灌水和加气频率改变均会影响土壤 N₂O 排放. 前人研究多集中在水肥对 N₂O 排放的影响,结合产量与 N₂O 排放研究较少,本研究结合产量与 N₂O 排放,提出一种水肥气耦合条件下增产减排措施.

番茄是我国西北部温室主要作物,具有高产和易盈利性等特点^[13]. 本文以番茄为供试作物,研究水肥气耦合对番茄产量、土壤 N₂O 排放及土壤特性的影响;分析土壤环境变化与土壤 N₂O 排放的响应关系;优化水肥气组合方案,结合产量提出适宜的增产减排措施,以期为设施菜地水肥气管理模式的优化及 N₂O 减排提供支持.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2018 年 4 月 2 日至 7 月 9 日在西北农林科技大学日光温室开展(北纬 34°20', 东经 108°24', 海拔高度 521 m). 土壤类型为壤土,干容重和田间持水量(体积分数)为 1.35 g·cm⁻³ 和 32.1%, 土壤全氮、全磷和全钾质量分数分别为 1.86、1.38 和 20.23 g·kg⁻¹,有机质质量分数 9.51 g·kg⁻¹,pH 值 7.65. 试验番茄品种为金鹏 14-2. 试验期间的气象数据由温室内自动气象站(Hobo, Onset Computer Corp, USA)收集,气象数据见图 1.

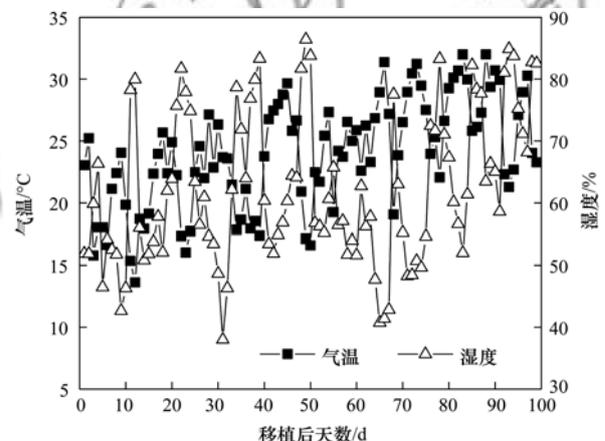


图 1 温室番茄全生育期气温和湿度动态

Fig. 1 Temperature and humidity dynamics during tomato growing cropping season in greenhouses

1.2 试验材料与设计

番茄定植日期为 2018 年 4 月 2 日(3 叶 1 心至 4 叶 1 心). 同时将土壤浇透底水,提高番茄幼苗成活率. 为防止水分向外侧渗,定植后 6 d 覆上薄膜并用塑料薄膜将垄与垄之间隔开. 番茄全生育期时长 99 d,生育期划分为苗期(04-10~04-20)、开花坐果期(04-21~05-11)、果实膨大期(05-12~06-14)和成熟期(06-15~07-09).

本试验于加气条件下设两个灌水水平(0.6 W 和 1.0 W, 分别代表亏缺 40% 灌溉和充分灌溉, W 代表充分灌水时的灌水量)和 3 个施氮水平(120、180 和 240 kg·hm⁻², 分别代表低、中和高肥, 以 50%F、75%F 和 F 表示, 其中 F 为当地常规施氮

量),对照处理为不加气充分灌溉 50%F、75%F 和 F. 共 9 个处理(表 1),各处理 3 次重复,灌水方式为地下滴灌,滴头埋深和间距分别为 15 cm 和 35 cm. 各小区种植番茄 11 株,番茄株距 35 cm.

表 1 试验处理描述¹⁾

处理	灌水水平	施氮量/kg·hm ⁻²	灌水方式
W1F1O	0.6W	120	加气
W2F1O	1.0W	120	加气
W2F1CK	1.0W	120	不加气
W1F2O	0.6W	180	加气
W2F2O	1.0W	180	加气
W2F2CK	1.0W	180	不加气
W1F3O	0.6W	240	加气
W2F3O	1.0W	240	加气
W2F3CK	1.0W	240	不加气

1) W 为充分灌水时的灌水量, W2 为充分灌溉, W1 为亏缺灌溉; F3 为高氮, F2 为中氮, F1 为低氮; O 为加气灌溉, CK 为常规滴灌

由放置在温室内的 E601 型蒸发皿测得的蒸发量计算灌水量. 采用公式(1)计算:

$$W = A \times E_{\text{pan}} \times K_{\text{cp}} \quad (1)$$

式中, W 为每次灌溉水量, L; A 为每个滴头控制的小区灌溉面积, m², 本试验中为 0.14 m² (0.35 m × 0.4 m)^[14]; E_{pan} 为蒸发皿测定的蒸发量, mm; K_{cp} 为蒸发皿系数 1.0.

加气设备采用文丘里计 (Mazzei 287 型), 安于灌水毛管首部, 进出水口处均安装压力表, 分别位于文丘里前端和毛管末端. 调节管道阀门, 控制进出口压力差 0.08 MPa, 排气法测定进气量占灌水量的 17%^[15].

此外, 施肥采用液压比例施肥泵装置控制. 本试验中采用基肥和追肥两种方式, 基肥为复合肥料 (N-P₂O₅-K₂O, 总养所占质量分数 ≥ 45%, 其中氮、磷、钾质量分数各为 15%), 氮肥、磷肥和钾肥各 30 kg·hm⁻²; 追肥采用水溶肥 (N 12%-P₂O₅ 8%-K₂O 40%), 于定植后第 26、52、67 和 82 d 进行追肥, 施氮比例为 1:2:2:2. 各处理先施肥后灌水, 灌水量为总灌水量减去施肥所需水量. 灌水施肥方案如表 2 所示.

表 2 番茄生育期灌水施肥量

灌溉日期(年-月-日)	移植后天数 /d	2 次灌水期间蒸发量/mm	灌水量/L		施肥量 ¹⁾ /kg·hm ⁻²		
			0.6W	1.0W	F1	F2	F3
2018-04-17	16	14.2	1.19	1.99			
2018-04-23	22	16.4	1.38	2.30			
2018-04-27	26	5.2	0.44	0.73	12.86	21.43	30.00
2018-05-01	30	10.0	0.84	1.40			
2018-05-05	34	11.3	0.95	1.58			
2018-05-10	39	4.8	0.40	0.67			
2018-05-14	43	9.0	0.76	1.26			
2018-05-18	47	9.1	0.76	1.27			
2018-05-23	52	6.1	0.51	0.85	25.71	42.86	60.00
2018-05-27	56	7.7	0.65	1.08			
2018-05-30	59	6.2	0.52	0.87			
2018-06-01	61	5.3	0.45	0.74			
2018-06-04	64	5.4	0.45	0.76			
2018-06-07	67	12.3	1.03	1.72	25.71	42.86	60.00
2018-06-13	73	12.5	1.05	1.75			
2018-06-16	76	8.1	0.68	1.13			
2018-06-19	79	3.7	0.31	0.52			
2018-06-22	82	7.9	0.66	1.11	25.71	42.86	60.00
2018-06-28	88	7.7	0.65	1.08			
2018-07-03	93	8.2	0.69	1.15			
2018-07-07	97	7.4	0.62	1.04			

1) 试验中只施入基肥和在番茄移植后 26、52、67、82 d 进行追肥, 其他时间并未施肥

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤 N₂O 采集

气样采集方法为静态暗箱法, 箱体及底座的材料为 6 mm 厚的聚氯乙烯, 暗箱的长宽高及底座的长宽均为 25 cm, 为使取样具有代表性, 静态箱体顶部装有风扇, 使气体搅动均匀. 各小区选取中央 2 株

番茄, 将底座插入土壤 5 cm 深, 非取样时底座覆上方形地膜, 取样时将之移除. 气样采集时, 将静态箱置于底座 3 cm 深的凹槽上, 为防止箱内气体与外部交换, 将凹槽注水密封. 定植后 5~7 d 采集一次, 追肥后气体采集频率提高, 灌水施肥后平均 2~3 d 采集一次. 将三通阀安装于 50 mL 注射器上, 用于气体

采集,上午 10 点开始,每 10 min 采集一次,每次取气 30 mL,各小区均采集 4 次,并在 3 d 内进行气体浓度分析.去除奇异点,保证各小区 4 个气样浓度值随时间的线性回归系数 $R^2 \geq 0.90$.静态暗箱顶部装配好温度计,采气时读取箱内温度,以计算各小区气体排放通量.

N₂O 浓度采用安捷伦气相色谱仪(Agilent Technologies 7890A GC System,美国)分析测定,气体排放通量^[16]为:

$$F = \rho h \frac{273}{273 + T} \cdot \frac{dc}{dt} \quad (2)$$

式中, F 为 N₂O 气体排放通量, $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; ρ 为标准状态下气体密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; h 为暗箱高度, m; $\frac{dc}{dt}$ 为气体浓度变化率, $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; T 为暗箱内温度, $^{\circ}\text{C}$.

番茄全生育期土壤 N₂O 累积排放量为:

$$R = 24 \sum_{i=1}^n \frac{F_i + F_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i) \quad (3)$$

式中, R 为土壤 N₂O 累积排放量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $(t_{i+1} - t_i)$ 为相邻两次测定间隔天数, d; i 为第 i 次测定; n 为测定总次数.

1.3.2 土壤充水孔隙度(water-filled pore space, WFPS%)和土壤温度

每次取气同时(除移植后 85 d),利用土钻在小区静态箱附近取 0~20 cm 土壤,用烘干法测定土壤含水率,WFPS 为:

$$\text{WFPS} = \theta_m \cdot \frac{\rho_b}{1 - (\rho_b/2.65)} \quad (4)$$

式中, θ_m 为土壤质量含水率,%; ρ_b 为土壤容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 2.65 为土壤密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

取土时,采用曲管式地温计(河北省武强红星仪表厂)同步监测土壤 5 cm 深度处温度.地温计安插在箱体底座附近.

1.3.3 土壤硝态氮质量分数

番茄移植后第 2、3、4、5、8、9、11、12、14 和 16 次取气时用土钻采集小区 3 点土样,深度至 20 cm,混匀,用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提,连续流动分析仪(Auto Analyzer 3AA3, Germany, 0.001AUFS)测定土壤 NO₃⁻-N 含量.土壤 NO₃⁻-N 质量分数计算公式如下:

$$M = 1000 \cdot C \cdot V/W \quad (5)$$

式中, M 为待测样品硝态氮质量分数($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C 为待测样品的硝态氮值($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V 为待测样品提取液的体积(0.05 L); W 为待测样品质量(5 g).

1.3.4 土壤氧气含量

连接光纤式氧气测量仪(Fiber-Optic Oxygen

Meter Firesting O₂)和氧气敏感探针(Robust Oxygen Miniprobe),一周左右测定一次土壤氧气含量^[17].

1.3.5 番茄产量和灌溉水利用效率(irrigation water use efficiency, IWUE)

果实成熟后各小区标记 5 株,收获时用 1/100 天平分株称取果实质量,取平均值作为该处理的单株果重,并依此计算亩产.灌溉水利用效率计算公式为:

$$\text{IWUE} = 100Y/I \quad (6)$$

式中, IWUE 为灌溉水利用效率, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, Y 为作物产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, I 为灌溉定额, mm.

1.3.6 氮肥利用效率(nitrogen use efficiency, NUE)

氮肥利用效率($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)为作物产量和施氮量的比值,采用如下公式计算^[18]:

$$\text{NUE} = Y/N \quad (7)$$

式中, N 为施氮量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

1.3.7 单产 N₂O 累积排放量(yield-scaled N₂O intensity, Y-S_{N₂O})

单产 N₂O 累积排放量表示为土壤 N₂O 累积排放量与作物产量的比值,计算公式如下:

$$Y-S_{N_2O} = R/Y \quad (8)$$

式中, $Y-S_{N_2O}$ 表示单产 N₂O 累积排放量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.4 数据处理与分析

采用 SPSS Statistics 22 进行数据显著性和相关性分析,用 Origin Pro 2017 绘图.

2 结果与分析

2.1 水肥气耦合条件下土壤 N₂O 排放特征

整个番茄生长季各处理土壤 N₂O 排放通量变化规律基本一致,均为施氮后排放通量最高,其后逐渐降低(图 2). N₂O 排放通量变化范围为 $4.5 \sim 151.41 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 施肥引起 N₂O 峰值出现,番茄整个生长季中共出现 4 次峰值,分别出现在番茄移植后第 28、54、69 和 84 d. 土壤 N₂O 排放通量主峰值出现在番茄移植后第 28 d,以 W2F3O 处理最高,为 $151.41 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,较 W1F1O、W2F1O、W2F1CK、W1F2O、W2F2O、W2F2CK、W1F3O 和 W2F3CK 处理分别增加了 197.1%、165.3%、180.3%、168.7%、113.3%、127.7%、159.1% 和 115.7% ($P < 0.05$),灌水和施肥对峰值影响显著.土壤 N₂O 排放通量次峰值出现在番茄移植后第 84 d,以 W2F3O 处理最高,为 $95.32 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,较 W1F1O、W2F1O、W2F1CK、W1F2O、W2F2O、W2F2CK、W1F3O 和 W2F3CK 处理分别增加了 371.9%、179.6%、168.2%、315.2%、138.3%、

161.5%、234.5%和116.8% ($P < 0.05$), 灌水和施肥对峰值影响显著. 番茄移植后第54和69 d 峰值的范围为 $38.33 \sim 78.3 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 仍以 W2F3O 处理最高, 但与其他处理差异不显著.

相同施氮水平下, 加气充分灌溉 (W2O) 处理土壤 N_2O 排放通量均值较加气亏缺灌溉 (W1O) 处理土

壤 N_2O 排放通量均值增加了 58.1% ($P < 0.05$). 相同灌水水平下, 加气高肥 (F3O) 处理土壤 N_2O 排放通量均值较加气中肥 (F2O) 和低肥 (F1O) 处理土壤 N_2O 排放通量均值分别增加了 16.1% 和 42.9% ($P < 0.05$), 加气充分灌溉 (W2O) 处理 N_2O 排放通量均值较对照处理 (W2CK) 增加了 10.73% ($P > 0.05$).

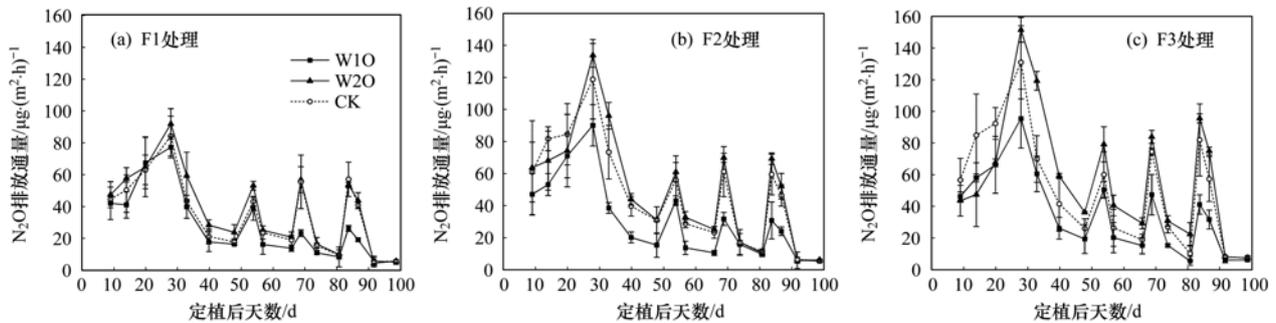


图2 水肥气耦合条件下 N_2O 排放通量

Fig. 2 N_2O emission fluxes under coupling condition of water, fertilizer, and gas

番茄生育期内各处理 N_2O 累积排放量在 $0.59 \sim 1.24 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 间变化 (表 3). 施氮量增加 N_2O 累积排放量显著增加 ($P < 0.05$), F3 水平下, W1F3O、W2F3O 和 W2F3CK 处理的 N_2O 累积排放量较 F2 水平下各相应处理分别增大了 16.6%、16.2% 和 7.3% ($P < 0.05$), 较 F1 水平下各相应处理分别增大 29.2%、53.0% 和 49.1% ($P < 0.05$), 故 F3 水平下 N_2O 累积排放量较 F2 平均增加 13.4%, 较 F1 平均增加 43.8%. 充分灌溉较亏缺灌溉 N_2O 累积排放量显著增加 ($P < 0.05$). W2O 条件下, F1、F2 和 F3 的 N_2O 累积排放量较 W1O 条件下各相应处理分别增大了 38.5%、64.5% 和 64.0% ($P < 0.05$), 平均增加了 55.7%. 加气处理较不加气处理 N_2O 累积排

放量增加, 处理 W2F1O 和 W2F2O 的 N_2O 累积排放量较 W2F1CK 和 W2F2CK 处理分别增大 12.4%、6.4%, 但差异不显著; 处理 W2F3O 的 N_2O 累积排放量较 W2F3CK 处理 N_2O 累积排放量显著增加 15.3%. 故 W2 水平下加气处理 N_2O 累积排放量较不加气处理平均增加 11.2% ($P < 0.05$). 各处理整个生育期内土壤 N_2O 各阶段累积排放量情况如下: 开花坐果期 > 果实膨大期 > 苗期 > 成熟期, 分别占全生育期土壤 N_2O 总累积排放量的 44.8%、28.5%、18.6% 和 8.4%. 番茄苗期, 施肥和加气的单因子及其耦合作用对土壤 N_2O 排放产生显著影响 ($P < 0.05$); 番茄开花坐果期, 灌水和施肥的单因子及其耦合作用对土壤 N_2O 排放产生显著影响 (P

表3 水肥气耦合模式下温室番茄土壤 N_2O 各阶段排放量¹⁾/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

Table 3 N_2O emission in different growth stages under the coupling condition of water, fertilizer and gas from greenhouse tomato/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

处理	苗期	开花坐果期	果实膨大期	成熟期	N_2O 排放总量
W1F1O	0.13c	0.27c	0.15e	0.038e	0.59d
W2F1O	0.15bc	0.34c	0.25c	0.07c	0.79c
W2F1CK	0.14bc	0.29c	0.22c	0.06cd	0.72c
W1F2O	0.15bc	0.29c	0.16de	0.04de	0.65d
W2F2O	0.18ab	0.50b	0.30b	0.09bc	1.06b
W2F2CK	0.20a	0.45b	0.27bc	0.08c	0.99b
W1F3O	0.15bc	0.34c	0.20cd	0.06cde	0.75c
W2F3O	0.15bc	0.58a	0.39a	0.12a	1.24a
W2F3CK	0.21a	0.46b	0.30b	0.10b	1.07b
灌水 W	1.86	64.35**	107.80**	62.48**	224.00**
施氮 F	6.82**	22.69**	16.70**	14.59**	65.88**
加气 O	4.99*	12.29	12.77**	4.58*	17.84**
W × F	0.78	5.59*	4.14*	2.72	9.69**
W × O	0	0	0	0	0
F × O	3.72*	1.02	3.35	0.61	1.44
W × F × O	0	0	0	0	0

1) 各列数值后字母不同表示处理间存在差异显著 ($P < 0.05$), * ($P < 0.05$) 和 ** ($P < 0.01$) 表示存在不同程度显著差异

<0.05); 番茄果实膨大期, 灌水、施肥和加气的单因子及其水肥耦合作用对土壤 N_2O 排放产生显著影响 ($P < 0.05$); 番茄成熟期, 灌水、施肥和加气的单因子作用对土壤 N_2O 排放影响显著 ($P < 0.05$). 全生育期, 灌水、施肥、加气和水肥耦合对土壤 N_2O 排放影响显著 ($P < 0.05$), 对土壤 N_2O 累积排放量的影响表现为: 灌水 $>$ 施氮 $>$ 加气 $>$ 水肥耦合.

2.2 土壤 N_2O 排放影响因子分析

2.2.1 N_2O 排放影响因子动态变化

番茄整个生育期土壤温度变化范围为 $17.7 \sim 32.3^\circ\text{C}$ [图 3(a) ~ 3(c)], 变化与大气温度变化相似, 整体呈现升高的趋势 (图 1). 而移植后第 33、54、69 和 92 d 出现下降, 这与气温下降密切相关.

此外, 番茄生长季中, 各处理 WFPS 呈波动性变化且变化趋势一致, 整体呈现逐渐降低的规律 (表 4); 这主要由春夏季气温逐渐升高 (图 1), 土壤蒸发较大引起. 各处理 WFPS 在 $29.13\% \sim 55.38\%$ 范围内变化 [图 3(d) ~ 3(f)]. 土壤 NO_3^- -N 变化趋势 [图 3(g) ~ 3(i)] 与 N_2O 排放通量 (图 2) 趋势较一致; 而土壤 O_2 含量与 WFPS 呈此消彼长的关系, 土壤含水量越高土壤 O_2 含量越低 [图 3(j) ~ 3(l)]. 方差分析表明, 番茄生长季中, 灌水、施肥和加气对土壤 5 cm 深度处温度均无显著影响 ($P > 0.05$). W20 处理的 WFPS 显著大于 W10 处理的 WFPS ($P < 0.05$), 增幅为 7.4% ; 而加气 and 施氮量对 WFPS 无显著性影响 ($P > 0.05$). 番茄整个生育期不同处理 NO_3^- -N 变化

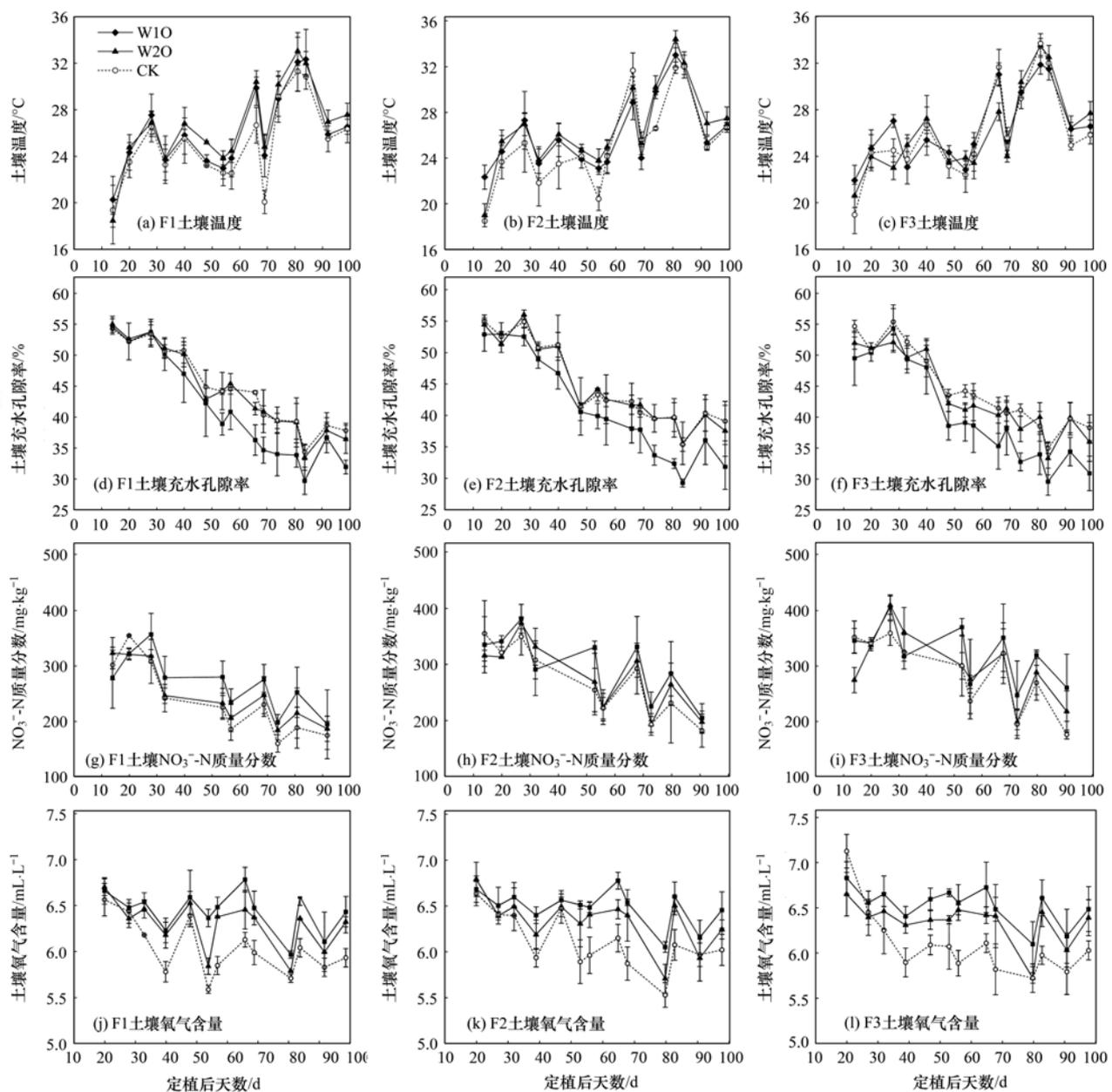


图 3 不同水肥气条件下番茄土壤温度、土壤水填充孔隙率、土壤 NO_3^- -N 质量分数和土壤氧气含量的动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of soil water-filled pore space, temperature, nitrate content, and oxygen content in tomato under different water, fertilizer, and aeration conditions

趋势一致,受施氮时间与作物吸收氮肥的影响,施肥后 NO_3^- -N质量分数明显上升,施氮量增加土壤 NO_3^- -N质量分数显著增加($P < 0.05$),F3处理 NO_3^- -N质量分数较F2和F1处理分别增加了8.0%和20.7%;灌水和加气对 NO_3^- -N质量分数无显著性差异($P > 0.05$).W10处理较W20处理土壤氧气含量增大了2.61%($P < 0.05$),施肥对土壤 O_2 含量无显著影响.充分灌水条件下加气处理较不加气处理土壤氧气含量增大了4.21%($P < 0.05$).

2.2.2 土壤 N_2O 排放与影响因子间关系

去除施氮灌水后的4次 N_2O 排放通量峰值可知,土壤 N_2O 排放通量与WFPS呈指数正相关($P < 0.05$),相关系数为0.729,从回归方程知土壤 N_2O 排放通量随WFPS增大呈指数增长趋势, R^2 为0.72(图4).说明土壤水分的变化解释了土壤 N_2O 排放量的72%;土壤 N_2O 排放通量与土壤5 cm深度处温度间呈指数负相关关系,相关系数达到-0.539,且函数关系的 R^2 为0.29(图4),说明土壤温度的变化解释了土壤 N_2O 排放量的29%;土壤 N_2O 排放通量与土壤 NO_3^- -N质量分数间呈指数正相关关系,相关系数为0.723,且函数关系的 R^2 为0.80(图4),说

明土壤质量分数的变化解释了土壤 N_2O 排放量的80%;土壤 N_2O 排放通量与土壤 O_2 体积分数间呈指数正相关关系,相关系数为0.346,且函数关系的 R^2 为0.26(图4),说明土壤 O_2 体积分数的变化解释了土壤 N_2O 排放量的26%.由图4综合分析可知,土壤 N_2O 排放受多种因子影响,且 N_2O 排放量对 NO_3^- -N质量分数相关性最高,变化最敏感.

2.3 水肥气耦合对温室番茄产量的影响及综合评价

施氮、灌水和加气显著增加番茄产量($P < 0.05$,表4),F3处理番茄产量较F2和F1处理分别增加了12.5%和30.4%.W20较W10处理番茄产量平均增加了29.7%($P < 0.05$).W20较W2CK处理产量增加了10.4%($P < 0.05$).

施氮增加IWUE增大,氮肥利用效率减小.F3处理番茄IWUE较F2和F1处理分别增加了11.1%和30.4%($P < 0.05$).F1处理番茄氮肥利用效率平均值分别较F2和F3处理增加了18.5%和53.3%($P < 0.05$).W20较W10处理IWUE降低了28.5%($P < 0.05$),氮肥利用效率增加了29.9%($P < 0.05$);加气处理较不加气处理番茄IWUE和氮肥利用效率分别增加了10.4%($P < 0.05$)和10.0%

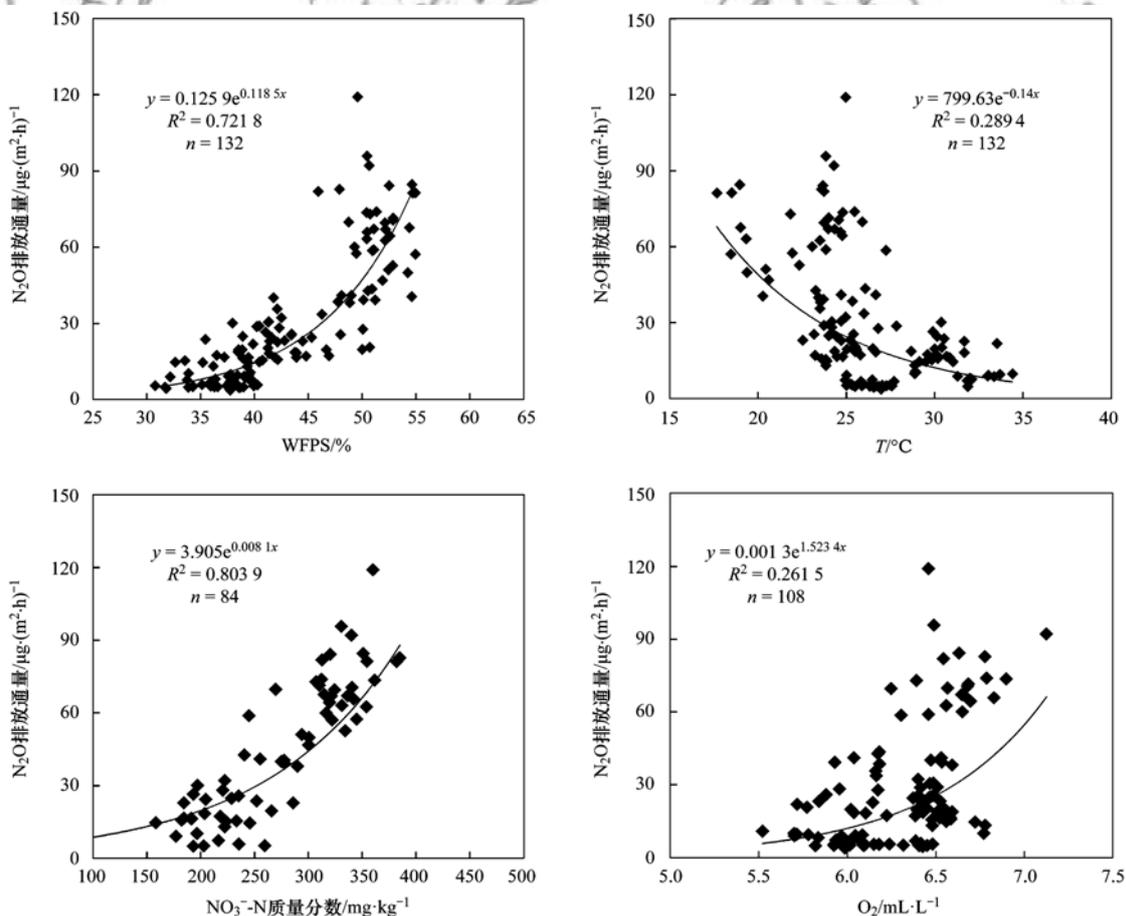


图4 水肥气耦合不同模式下土壤 N_2O 排放量与WFPS、 T 、 NO_3^- -N和 O_2 的关系

Fig. 4 Relationship between soil N_2O emission flux and WFPS, T , NO_3^- -N, and O_2 under different modes of water, fertilizer, and gas coupling

($P < 0.05$).

灌水、施氮和加气对单位产量 N₂O 排放量产生正影响, W2O 较 W1O 处理单产 N₂O 排放量平均增加了 18.7% ($P < 0.05$), F3 处理番茄单产 N₂O 排放量平均值较 F2 处理增加 3.9% ($P > 0.05$), 较 F1 处理增加了 9.6% ($P < 0.05$), W2O 处理较 W2CK 处理番茄单产 N₂O 排放量平均增加但不显著.

番茄产量及 N₂O 排放受各指标影响, 单一指标并不能全面反映番茄产量及 N₂O 排放机制. 各指标

间既有一定的重叠, 又不可替代, 需要结合相关指标建立番茄产量及 N₂O 排放的综合指标体系, 得出一种增产减排的最佳方案. 综合考虑, 本研究采用熵权法进行效果评价, 结果表明(表 4), 指标综合评价从高到低排列顺序为 W2F1O > W2F1CK > W2F2O > W1F1O > W2F2CK > W2F3O > W1F2O > W2F3CK > W1F3O. 因此, 综合考虑产量、N₂O 累积排放量、氮肥利用效率、IWUE 和单产 N₂O 排放量, 本研究推荐加气低氮充分灌溉处理(W2F1O)为较优的水肥气一体化灌溉方案.

表 4 水肥气耦合番茄产量与 N₂O 排放及其相关影响因素¹⁾

Table 4 Yield and N₂O emission of water, fertilizer, and gas coupled tomato and their related influencing factors

处理	N ₂ O 累积排放量 /kg·hm ⁻²	产量 /t·hm ⁻²	氮肥利用效率 /kg·kg ⁻¹	灌溉水分利用效率 /kg·(hm ² ·mm) ⁻¹	单产 N ₂ O 排放量 /mg·kg ⁻¹	综合得分	排序
W1F1O	0.59d	42.63f	355.23c	39.34bc	13.73b	98.14	4
W2F1O	0.79c	57.00d	474.48a	31.52e	13.95b	125.79	1
W2F1CK	0.72c	52.13e	434.39b	28.86f	13.80b	115.35	2
W1F2O	0.65d	52.01e	288.92e	48.00a	13.06b	85.96	7
W2F2O	1.06b	63.46bc	352.58c	35.14de	16.76a	100.27	3
W2F2CK	0.99b	58.99cd	327.74d	32.66def	17.00a	93.48	5
W1F3O	0.75c	55.51de	231.30f	51.23a	13.70b	74.27	9
W2F3O	1.24a	74.36a	309.85e	41.17b	16.63a	93.37	6
W2F3CK	1.07b	64.23b	267.62e	35.56cd	16.70a	81.09	8
权重系数	0.23	0.14	0.23	0.21	0.19		
灌水 W	1.86	64.35**	107.80**	62.48**	224.00**		
施氮 F	6.82**	22.69**	16.70**	14.59**	65.88**		
加气 O	4.99*	12.29	12.77**	4.58*	17.84**		
W × F	0.78	5.59*	4.14*	2.72	9.69**		
W × O	0	0	0	0	0		
F × O	3.72*	1.02	3.35	0.61	1.44		
W × F × O	0	0	0	0	0		

3 讨论

3.1 水肥气耦合对温室番茄土壤 N₂O 排放的影响

温室番茄整个生育期 N₂O 平均排放通量和累积排放量分别为 27.05 ~ 58.19 μg·(m²·h)⁻¹ 和 0.59 ~ 1.24 kg·hm⁻², 本试验番茄整个生育期出现 4 次 N₂O 排放高峰, 分别为施基肥和追施氮肥并灌水后, 施基肥后土壤中氮素含量增多, 番茄幼苗时期根系较小, 植株尚未发育成熟, 氮素需求量较少, 土壤中微生物吸收氮素较多. 初春温室内温度和湿度较好, 利于土壤硝化反硝化过程的进行, 因此有大量 N₂O 释放, 这与张仲新等^[19]的结果相一致; 追肥时期为开花坐果期及果实膨大期, 大量的养分于番茄植株生长及果实的膨大中被消耗, 因此降低了土壤氮素以 N₂O 形式排放的损失. 施氮增加了硝化反硝化反应底物, 灌水后微生物数量和种类增多, 导致 N₂O 排放增加. 雷宏军等^[20]的研究发现, 低湿度灌水处理下施肥后 N₂O 排放峰值时间早于高湿度处理. 本试验 N₂O 排放峰值出现在灌水施肥后 2 d, 由

于测定频次不高, 在后期试验增加 N₂O 排放测定频次, 进一步明确 N₂O 排放机制.

灌水影响土壤通气性和氮素的转化, 改变硝化反硝化反应条件, 进而影响土壤 N₂O 的产生和向大气中的扩散^[21]. 本试验中, 充分灌溉较亏缺灌溉显著增加了 N₂O 排放量(表 4), 与前人研究结果一致^[22,23]. 有研究发现, WFPS 低于一定阈值时, 土壤 N₂O 排放通量与 WFPS 呈正相关, WFPS 达到 70% 时, 土壤 N₂O 排放通量值最大^[24]. WFPS 较低时硝化细菌活性增强, 硝化作用是土壤 N₂O 排放的主要原因, WFPS 较高时反硝化细菌活性增强, 反硝化作用是土壤 N₂O 排放主要原因^[25], 试验中 WFPS 多处于 35% ~ 56%, 未超过 70% (图 4), 因此土壤 N₂O 排放主要来自硝化反应. 土壤含水量低时氧气含量高, 硝化反应活动强, 但 N₂O 作为中间产物产量小, 随灌水水平提高, 反硝化速率加快与硝化反应同时进行, 产生较多 N₂O. 充分灌溉处理土壤 WFPS 处于 40% ~ 60% 的时长较亏缺灌溉长, 土壤 N₂O 排放高于亏缺灌溉. 本试验只设置两个灌水水平, 均对土壤

N_2O 排放影响呈正相关,考虑减排在以后的试验中可以设置较多的梯度水平,进一步研究 N_2O 排放与 WFPS 的关系.

灌水和施氮是影响 N_2O 排放的重要因素^[26],基质含量影响 N_2O 气体排放,施氮影响土壤 NO_3^- -N 含量,进而影响 N_2O 排放. 本研究表明,土壤 N_2O 累积排放量随氮肥施入量增大而增大,与杨岩等的结果一致^[27],可能是由于施氮提供了充足的氮源,引起土壤温度、湿度和 NO_3^- -N 等的变化,硝化和反硝化作用增强, N_2O 累积排放量增大. 过量施氮后,肥料偏生产力降低,植物不能吸收的氮素进入土壤,底物浓度增加,土壤 N_2O 排放增大^[28]. 研究发现,不施氮和施氮量小时,温度和湿度影响土壤 N_2O 排放较大,而施氮量高时对土壤 N_2O 排放影响较大的是无机氮^[29],当施氮量大于作物最大需氮量时, N_2O 累积排放量与氮肥施用量呈指数正相关^[30]. 因此适当控制氮肥投入,可以减少 N_2O 的损失.

加气灌溉精准向作物根系附近土壤输送水气混合物,增强土壤通气性,缓解了地下滴灌的植物根系缺氧情况^[31],氧气是硝化反应底物之一,氧气含量减少硝化速率降低,因此加气灌溉促进土壤 N_2O 排放. 本研究发现 W2F3O 处理土壤 N_2O 累积排放量较 W2F3CK 土壤 N_2O 累积排放量显著增加 15.3%. 陈慧等^[32]的研究发现,亏缺灌溉加气较不加气处理显著增加了 N_2O 排放,充分灌溉加气较不加气处理 N_2O 排放增加不显著. 与本试验加气均增加了 N_2O 排放,产生部分差异的原因可能是本试验水肥气结合,高施氮为土壤硝化、反硝化作用提供充足的底物,同时加气可以有效改善土壤通气性,增加 O_2 含量,促进与硝化作用相关的微生物繁殖,因此高施氮后加气处理较不加气处理 N_2O 累积排放量显著增加.

3.2 温室番茄土壤 N_2O 排放与各影响因子之间关系

N_2O 是含氮物质在土壤中进行硝化和反硝化作用的产物^[33], N_2O 排放的主要影响因素包括 WFPS、 O_2 和 NO_3^- -N 等^[34]. 前人研究发现 N_2O 排放与 WFPS 呈指数或线性相关^[35-37], N_2O 排放峰值 WFPS 大多出现在 60%^[38]. 王改玲等^[39]的研究发现 WFPS 处于 20%~40% 时,硝化反应速率随 WFPS 增大而增大,且 WFPS 增大至 60% 时硝化反应速率降低. 本试验中 WFPS 在 29.13%~55.38% 变化, N_2O 排放与 WFPS 呈指数正相关 ($P < 0.05$, 图 4). 土壤温度影响根系呼吸、相关酶和微生物活性,而较高的土壤温度导致土壤的矿化作用增强^[40],影响 N_2O 排放. 大量研究指出 N_2O 排放和温度呈指数正相关^[41],但本试验发现温度和 N_2O 排放通量呈显著负相关

(图 4),主要可能由于土壤 N_2O 排放与温度的关系受施肥和灌水量的影响^[42],试验区域不同,测定时间不同,土壤水分含量影响地温的变化,而且 4~7 月温室整体呈现上升的趋势, N_2O 排放整体呈现下降趋势,因此得出不同结论. 施氮后土壤 NO_3^- -N 含量显著增多,有利于反硝化速率的提高,促进 N_2O 排放^[43]. 土壤 NO_3^- -N 质量分数较低时, N_2O 排放增加较缓, NO_3^- -N 质量分数较高时, N_2O 排放急剧增加,可能由于过量的氮源不能被作物有效吸收,以 N_2O 形式损失,说明有效地控制氮源可以减少土壤 N_2O 累积排放量. 氧气作为硝化反应的控制条件之一,氧气含量影响土壤微生物数量和酶活性,酶和微生物影响土壤硝化和反硝化等反应,影响 N_2O 排放^[44]. 加气灌溉导致土壤中氧气含量显著上升,利于更多好氧微生物参加硝化过程^[45],土壤中相关微生物活性提高,土壤 N_2O 排放增多^[46].

3.3 水肥气耦合对番茄产量的影响

作物产量受水肥气共同影响,水肥气通过影响根系氧气状态及叶片中的酶^[47]等共同影响植株的光合作用,影响作物产量. 本试验灌水显著增加了氮肥利用效率,降低了水分利用效率,增加了番茄产量. 邢英英等^[48]的研究发现灌水水平由 0.5 增大至 1.0,番茄产量显著增大,水分利用效率显著减小. 可能由于适宜水分条件下有利于提高气孔导度,利于提高微生物群落稳定性^[49],前人研究表明,灌水量和施肥量的增加导致番茄产量显著增加,但灌水施肥量超过一定范围后产量逐渐降低^[50],即氮素与水分用量过高或过低均不利于番茄产量增加.

施肥较灌水对提高番茄的产量和水分利用率影响更强^[51]. 试验中施氮显著提高了番茄产量和水分利用效率,适量增施氮肥能改善植物养分吸收累积和分配,促进根系对水分的吸收,提高植株净光合速率,增加产量^[52]. 前人研究发现番茄产量与灌水量和施肥量正相关^[53],水肥交互对番茄产量影响显著. 王鹏勃等^[54]的研究发现综合作物产量、氮肥利用效率等因素,中肥 (51 470 mg) 和中水 (120 L) 处理为最优处理. 本试验中充分灌水施氮 240 $kg \cdot hm^{-2}$ 处理番茄产量最大,结果不同的原因可能是因为加气、番茄种植品种、施肥方式及土壤性质 (有机质、速效钾和 pH 值) 等方面的差异也一定程度影响产量.

加气较不加气处理显著增加了番茄产量, IWUE 和 NUE 增加,但不显著. 加气灌溉对番茄生长和产量主要原因可能是加气灌溉减轻了根区的缺氧状况,在灌水的同时更有利于根系呼吸,促进根冠部生长,提高作物产量.

4 结论

(1) 灌水显著增加温室番茄地土壤 N₂O 排放和番茄产量. 加气条件下充分灌水较亏缺灌水 N₂O 累积排放量、产量、氮肥利用效率和单产 N₂O 排放量分别增大 55.7%、29.7%、29.9% 和 18.7% ($P < 0.05$), IWUE 降低了 28.5% ($P < 0.05$).

(2) 施肥显著增加温室番茄地土壤 N₂O 排放, F3 处理较 F2 处理番茄产量、IWUE 和氮肥利用效率分别增加了 12.5%、11.1% 和 18.5% ($P < 0.05$), 较 F1 处理分别增加了 30.4%、30.4% 和 53.3% ($P < 0.05$). F3 处理番茄单产 N₂O 排放量平均值较 F2 处理增加了 3.9% ($P > 0.05$), 较 F1 处理增加了 9.6% ($P < 0.05$).

(3) 加气显著增加温室番茄地土壤 N₂O 排放, 加气处理较不加气处理 N₂O 累积排放量、产量、IWUE 和氮肥利用效率分别增加 11.2%、10.4%、10.4% 和 10.0% ($P < 0.05$), 单产 N₂O 排放量增加但不显著.

(4) 综合考虑作物 N₂O 累积排放量、产量、肥料偏生产力、IWUE 和单产 N₂O 排放量, 结合环境效益与经济效益, 本研究推荐加气低氮充分灌溉为较优的管理模式.

参考文献:

- [1] 肖乾颖, 黄有胜, 胡廷旭, 等. 施肥方式对紫色土农田生态系统 N₂O 和 NO 排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 203-213.
Xiao Q Y, Huang Y S, Hu T X, *et al.* Effects of fertilization regimes on N₂O and NO emissions from agro-ecosystem of purplish soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 203-213.
- [2] Krause H M, Thonar C, Eschenbach W, *et al.* Long term farming systems affect soils potential for N₂O production and reduction processes under denitrifying conditions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 114: 31-41.
- [3] Kanter D, Mauzerall D L, Ravishankara A R, *et al.* A post-kyoto partner: considering the stratospheric ozone regime as a tool to manage nitrous oxide [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences the United States of America, 2013, 110(12): 4451-4457.
- [4] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [A]. In: Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, *et al.* (Eds.). Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 465-570.
- [5] 黄容, 高明, 黎嘉成, 等. 秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4694-4704.
Huang Y, Gao M, Li J C, *et al.* Effect of straw residues in combination with reduced fertilization rate on greenhouse gas emissions from a vegetable field [J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4694-4704.
- [6] 石将来. 地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放影响及减排措施研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [7] 江雨倩. 滴灌施肥对设施菜地土壤 N₂O 和 NO 排放的影响及其减排贡献[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [8] Yan H L, Xie L Y, Guo L P, *et al.* Characteristics of nitrous oxide emissions and the affecting factors from vegetable fields on the North China Plain [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 144: 316-321.
- [9] 赵佳琪. 造林与间伐对东北温带弃耕地土壤温室气体排放的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- [10] 陈慧, 李亮, 蔡焕杰, 等. 加气条件下土壤 N₂O 排放对硝化/反硝化细菌数量的响应[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 303-311.
Chen H, Li L, Cai H J, *et al.* Response of soil N₂O fluxes to soil nitrifying and denitrifying bacteria under aerated irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 303-311.
- [11] 杜娅丹, 张倩, 崔冰晶, 等. 加气灌溉水氮互作对温室芹菜地 N₂O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 127-134.
Du Y D, Zhang Q, Cui B J, *et al.* Effects of water and nitrogen coupling on soil N₂O emission characteristics of greenhouse celery field under aerated irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(16): 127-134.
- [12] Chen H, Hou H J, Wang X Y, *et al.* The effects of aeration and irrigation regimes on soil CO₂ and N₂O emissions in a greenhouse tomato production system [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(2): 449-460.
- [13] Hou H J, Chen H, Cai H J, *et al.* CO₂ and N₂O emissions from Lou soils of greenhouse tomato fields under aerated irrigation [J]. Atmospheric Environment, 2016, 132: 69-76.
- [14] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉下气候因子和土壤参数对土壤呼吸的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 223-232.
Zhu Y, Cai H J, Song L B, *et al.* Effects of climatic factors and soil parameters on soil respiration under oxygation conditions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 223-232.
- [15] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉改善温室番茄根区土壤通气性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 163-172.
Zhu Y, Cai H J, Song L B, *et al.* Oxygation improving soil aeration around tomato root zone in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 163-172.
- [16] Adviento-Borbe M A A, Haddix M L, Binder D L, *et al.* Soil greenhouse gas fluxes and global warming potential in four high-yielding maize systems [J]. Global Change Biology, 2007, 13(9): 1972-1988.
- [17] 朱艳, 蔡焕杰, 侯会静, 等. 加气灌溉对番茄根区土壤环境和产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 157-162.
Zhu Y, Cai H J, Hou H J, *et al.* Effects of aerated irrigation on root-zone environment and yield of tomato [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(5): 157-162.
- [18] 雷宏军, 刘欢, 刘鑫, 等. 水肥气一体化灌溉对温室辣椒地土壤 N₂O 排放的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 262-270.
Lei H J, Liu H, Liu X, *et al.* Effects of oxyfertilization on soil N₂O emission under greenhouse pepper cropping system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 262-270.

- [19] 张仲新, 李玉娥, 华璐, 等. 不同施肥量对设施菜地 N_2O 排放通量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(5): 269-275.
Zhang Z X, Li Y E, Hua L, *et al.* Effects of different fertilizer levels on N_2O flux from protected vegetable land [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, **26**(5): 269-275.
- [20] 雷宏军, 杨宏光, 刘欢, 等. 水肥气耦合滴灌番茄地土壤 N_2O 排放特征及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(11): 95-104.
Lei H J, Yang H G, Liu H, *et al.* Characteristics and influencing factors of N_2O emission from greenhouse tomato field soil under water-fertilizer-air coupling drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(11): 95-104.
- [21] Huang S H, Pant H K, Lu J. Effects of water regimes on nitrous oxide emission from soils[J]. Ecological Engineering, 2007, **31**(1): 9-15.
- [22] Du Y D, Niu W Q, Gu X B, *et al.* Water-and nitrogen-saving potentials in tomato production: A meta-analysis [J]. Agricultural Water Management, 2018, **210**: 296-303.
- [23] 王晓云, 蔡焕杰, 李亮, 等. 亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2413-2425.
Wang X Y, Cai H J, Li L, *et al.* Effects of water deficit on greenhouse gas emission in wheat field in different periods [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2413-2425.
- [24] Sanchez-Martín L, Mejjide A, Garcia-Torres L, *et al.* Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, **137**(1-2): 99-107.
- [25] 张光亚, 方柏山, 闵航, 等. 设施栽培土壤氧化亚氮排放及其影响因子的研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23**(1): 144-147.
Zhang G Y, Fang B S, Min H, *et al.* N_2O fluxes from greenhouse soil and its influence factors [J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2004, **23**(1): 144-147.
- [26] 曹文超, 宋贺, 王娅静, 等. 农田土壤 N_2O 排放的关键过程及影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(10): 1781-1798.
Cao W C, Song H, Wang Y J, *et al.* Key production processes and influencing factors of nitrous oxide emissions from agricultural soils [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, **25**(10): 1781-1798.
- [27] 杨岩, 孙钦平, 李吉进, 等. 不同水肥处理对设施菜地 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, **19**(2): 430-436.
Yang Y, Sun Q P, Li J J, *et al.* Effects of different fertilizer and irrigation levels on N_2O emission from greenhouse vegetable lands [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, **19**(2): 430-436.
- [28] 谢海宽, 江雨倩, 李虎, 等. 北京设施菜地 N_2O 和 NO 排放特征及滴灌优化施肥的减排效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(4): 591-600.
Xie H K, Jiang Y Q, Li H, *et al.* N_2O and NO emissions from greenhouse vegetable fields and the mitigation efficacy of the optimized fertigation in Beijing [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2019, **25**(4): 591-600.
- [29] 周龙, 龙光强, 汤利, 等. 综合产量和土壤 N_2O 排放的马铃薯施氮量分析[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(2): 155-161.
Zhou L, Long G Q, Tang L, *et al.* Analysis on N application rates considering yield and N_2O emission in potato production [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(2): 155-161.
- [30] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2094-2098.
Jiao Y, Huang Y, Zong L G, *et al.* Impact of different levels of nitrogen fertilizer on N_2O emission from different Soils [J]. Environmental Science, 2008, **29**(8): 2094-2098.
- [31] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉对番茄植株生长、产量和果实品质的影响[J]. 农业机械学报, 2017, **48**(8): 199-211.
Zhu Y, Cai H J, Song L B, *et al.* Impacts of oxygation on plant growth, yield and fruit quality of tomato [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, **48**(8): 199-211.
- [32] 陈慧, 侯会静, 蔡焕杰, 等. 加气灌溉温室番茄地土壤 N_2O 排放特征[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(3): 111-117.
Chen H, Hou H J, Cai H J, *et al.* Soil N_2O emission characteristics of greenhouse tomato fields under aerated irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(3): 111-117.
- [33] 山楠, 赵同科, 毕晓庆, 等. 适宜施氮量降低京郊小麦-玉米农田 N_2O 排放系数增加产量[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(22): 163-170.
Shan N, Zhao T K, Bi X Q, *et al.* Suitable nitrogen application reducing N_2O emission and improving grain yield in wheat-maize crop rotation system in Beijing suburb [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(22): 163-170.
- [34] Takeda H, Takahashi N, Hatano R, *et al.* Active N_2O emission from bacterial microbiota of Andisol farmland and characterization of some N_2O emitters [J]. Journal of Basic Microbiology, 2012, **52**(4): 477-486.
- [35] Du Y D, Gu X B, Wang J W, *et al.* Yield and gas exchange of greenhouse tomato at different nitrogen levels under aerated irrigation [J]. Science of the Total Environment, 2019, **668**: 1156-1164.
- [36] Zhang M, Fan C H, Li Q L, *et al.* A 2-yr field assessment of the effects of chemical and biological nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions and nitrogen use efficiency in an intensively managed vegetable cropping system [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, **201**: 43-50.
- [37] Weslien P, Rütting T, Kasimir-Klemmedtsson Å, *et al.* Carrot cropping on organic soil is a hotspot for nitrous oxide emissions [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, **94**(2-3): 249-253.
- [38] Gao B, Ju X T, Su F, *et al.* Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: A two-year field study [J]. Science of the Total Environment, 2004, **472**: 112-124.
- [39] 王改玲, 陈德立, 李勇. 土壤温度、水分和 NH_4^+ -N 浓度对土壤硝化反应速度及 N_2O 排放的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2010, **18**(1): 1-6.
Wang G L, Chen D L, Li Y. Effect of soil temperature, moisture and NH_4^+ -N concentration on nitrification and nitrification-induced N_2O emission [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, **18**(1): 1-6.
- [40] 张倩, 牛文全, 杜娅丹, 等. 加气灌溉对不同施氮水平的设施甜瓜土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, **30**(4): 1319-1326.
Zhang Q, Niu W Q, Du Y D, *et al.* Effects of aerated irrigation on CO_2 and N_2O emission from protected melon soils under different nitrogen application levels [J]. Chinese Journal of

- Applied Ecology, 2019, **30**(4): 1319-1326.
- [41] Chen H, Hou H J, Hu H W, *et al.* Aeration of different irrigation levels affects net global warming potential and carbon footprint for greenhouse tomato systems [J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, **242**: 10-19.
- [42] 姚志生, 郑循华, 周再兴, 等. 太湖地区冬小麦田与蔬菜地 N₂O 排放对比观测研究[J]. *气候与环境研究*, 2006, **11**(6): 691-701.
Yao Z S, Zheng X H, Zhou Z X, *et al.* Nitrous oxide emission from winter wheat and vegetable fields in the taihu region: a comparison case study [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, **11**(6): 691-701.
- [43] Riya S, Min J, Zhou S, *et al.* Short-term responses of nitrous oxide emissions and concentration profiles to fertilization and irrigation in greenhouse vegetable cultivation [J]. *Pedosphere*, 2012, **22**(6): 764-775.
- [44] 李元, 牛文全, 张明智, 等. 加气灌溉对大棚甜瓜土壤酶活性与微生物数量的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, **46**(8): 121-129.
Li Y, Niu W Q, Zhang M Z, *et al.* Effects of aeration on rhizosphere soil enzyme activities and soil microbes for muskmelon in plastic greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, **46**(8): 121-129.
- [45] 胡继杰, 朱练峰, 胡志华, 等. 土壤增氧方式对其氮素转化和水稻氮素利用及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(1): 167-174.
Hu J J, Zhu L F, Hu Z H, *et al.* Effects of soil aeration methods on soil nitrogen transformation, rice nitrogen utilization and yield [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(1): 167-174.
- [46] 李发东, 杜锬, 张秋英, 等. 华北平原农田 N₂O 排放通量的高频动态观测[J]. *中国生态农业学报*, 2018, **26**(2): 195-202.
Li D F, Du K, Zhang Q Y, *et al.* High-frequency dynamic observation of N₂O emission flux from cropland in the North China Plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, **26**(2): 195-202.
- [47] 张国红, 眭晓蕾, 郭英华, 等. 施肥水平对日光温室番茄光合生理的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2006, **37**(3): 317-321.
Zhang G H, Sui X L, Guo Y H, *et al.* Effect of Fertilization levels on the photosynthetic physiology of tomato in helio-greenhouse [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006, **37**(3): 317-321.
- [48] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, **48**(4): 713-726.
Xing Y Y, Zhang F C, Zhang Y, *et al.* Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, **48**(4): 713-726.
- [49] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(10): 82-90.
Li J M, Pan T H, Wang L H, *et al.* Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(10): 82-90.
- [50] 袁宇霞, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥灌水下限和施肥量对温室番茄生长、产量和生理特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, **31**(1): 76-83.
Yuan Y X, Zhang F C, Zhang Y, *et al.* Effects of irrigation threshold and fertilization on growth, yield and physiological properties of fertigated tomato in greenhouse [J]. *Agricultural Research in The Arid Areas*, 2013, **31**(1): 76-83.
- [51] 于贤磊, 窦超银, 孟维忠, 等. 大棚滴灌水肥一体化对番茄生长和产量的影响[J]. *北方园艺*, 2017, (17): 7-13.
Yu X L, Dou C Y, Meng W Z, *et al.* Effects of fertigation application on growth and yield of tomato in greenhouse [J]. *Northern Horticulture*, 2017, (17): 7-13.
- [52] 王虎兵, 曹红霞, 郝舒雪, 等. 温室番茄植株养分和光合对水肥耦合的响应及其与产量关系[J]. *中国农业科学*, 2019, **52**(10): 1761-1771.
Wang H B, Cao H X, Hao S X, *et al.* Responses of plant nutrient and photosynthesis in greenhouse tomato to water-fertilizer coupling and their relationship with yield [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, **52**(10): 1761-1771.
- [53] 虞娜, 张玉龙, 张玉玲, 等. 灌溉和施肥对温室番茄产量和品质影响效应的研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2009, (4): 31-35.
Yu N, Zhang Y L, Zhang Y L, *et al.* Study on effect of irrigation and fertilization on yield and fruit quality of greenhouse tomato [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2009, (4): 31-35.
- [54] 王鹏勃, 李建明, 丁娟娟, 等. 水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, **48**(2): 314-323.
Wang P B, Li J M, Ding J J, *et al.* Effect of water and fertilizer coupling on quality, yield and water use efficiency of tomato cultivated by organic substrate in bag [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, **48**(2): 314-323.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-qing, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)