

引文格式: 白胜军, 徐灵颖, 辛佳, 等. 不同施肥处理下盆栽土壤通气性的变化[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(6): 1073–1078. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202301021](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202301021)

不同施肥处理下盆栽土壤通气性的变化^{*}

白胜军^{1,2}, 徐灵颖^{2**}, 辛佳^{2,3}, 钱成宇^{2,4}, 权玲², 张文太^{1**}

(1. 新疆农业大学 资源与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 江苏常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站, 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008; 3. 东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江哈尔滨 150030; 4. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南昆明 650201)

摘要:【目的】阐明不同施肥处理下土壤通气性的动态变化。【方法】以江苏南京设施菜地土壤为研究对象, 对比盆栽试验条件下不施肥(CK)以及施用常规尿素(T_1)、腐植酸尿素(T_2)、商品有机肥(T_3)、有机肥+常规尿素(T_4)处理的土壤氧气体积分数差异。【结果】各处理间的容重差异不显著, 具体表现为 $T_1 > T_3 > CK > T_2 = T_4$ 。相较于CK处理, T_1 、 T_2 和 T_3 处理可显著提高土壤氧气体积分数, 分别增加了7.07%、6.53%和3.20%。生育期内不同肥料处理的土壤氧气体积分数变化趋势不同; 各处理的土壤氧气体积分数在白天呈上升趋势, 但到达峰值的时间存在明显差异。【结论】施肥类型会显著影响土壤氧气含量, 施用腐植酸尿素在土壤容重和土壤平均氧气体积分数方面的表现较佳。

关键词: 肥料; 生菜; 氧气体积分数; 动态监测

中图分类号: S152.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2023)06-1073-06

Aeration Change of Potting Soil under Different Fertilization Treatments

BAI Shengjun^{1,2}, XU Lingying², XIN Jia^{2,3}, QIAN Chengyu^{2,4}, QUAN Ling², ZHANG Wentai¹

(1. College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Changshu National Agro-Ecosystem Observation and Research Station, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 4. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] To examine the dynamic changes of soil aeration under different fertilization treatments. [Methods] The soil of greenhouse vegetable field in Nanjing, Jiangsu Province was taken as the research object, the differences of soil oxygen volume fraction among no-fertilizer (CK), normal urea (T_1), humic acid urea (T_2), organic manure (T_3), and organic manure+urea (T_4) in the pot experiment were compared. [Results] The bulk density among these treatments were non-significant difference as followed: $T_1 > T_3 > CK > T_2 = T_4$. Compared with CK treatment, T_1 , T_2 and T_3 treatment

收稿日期: 2023-01-31 修回日期: 2023-12-06 网络首发日期: 2023-12-29

*基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(BE2022311); 国家自然科学基金项目(32202608); 心连心院士研究基金(2020320104000637)。

作者简介: 白胜军(1998—), 男, 山东德州人, 在读硕士研究生, 主要从事农田土壤改良研究。

E-mail: 1972076906@qq.com

**通信作者 Corresponding authors: 徐灵颖(1993—), 女, 浙江台州人, 博士, 助理研究员, 主要从事农田养分良性循环研究。E-mail: xulingying@issas.ac.cn; 张文太(1984—), 男, 山东冠县人, 博士, 教授, 主要从事土壤地理学研究。E-mail: zwt@xjau.edu.cn

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20231229.1547.003>



significantly increased soil oxygen volume fraction by 7.07%, 6.53%, and 3.20%, respectively. The variation trend of soil oxygen volume fraction in different fertilizer treatments was different during the growth period, and the soil oxygen volume fraction increased during the day, but the peak time was different.

[Conclusion] The type of fertilization will significantly affect the soil oxygen volume fraction, and the application of humic acid urea is better in terms of soil bulk density and soil average oxygen volume fraction.

Keywords: fertilization; lettuce; oxygen volume fraction; dynamic monitoring

氧气作为土壤气体的重要组成部分，在作物生长过程中起重要作用^[1]。设施蔬菜高度集约、过量水肥的生产模式常造成土壤板结(压实)，土壤通气性降低，严重时甚至会诱发低氧胁迫^[2]，抑制根系对养分的吸收^[3]，进而导致减产。研究认为：土壤中氧气体积分数达到15%才能满足作物正常生长^[4]；当土壤中氧气体积分数降到5%以下，作物根系就会停止发育^[5]。可见，土壤氧气含量是土壤通气性能的重要指标，对保障作物健康生长、确保粮食安全具有重要意义。

国内外关于土壤通气性的研究多集中于水肥耦合加气灌溉改善土壤理化性质、提高作物产量和水分利用效率等方面^[6-9]，而有关肥料影响土壤通气性的研究主要集中于团聚体^[10-11]、容重^[12]和孔隙度^[13]等指标，如侯毛毛等^[14]对比了生物有机肥和化肥施用对土壤容重和孔隙度的影响，结果表明生物有机肥处理更有利于提高土壤孔隙度。田间试验表明：相较于化肥和不施肥处理，长期施用有机肥可以提高土壤通气性，改善土壤结构^[13]。有研究认为：新型肥料研发有利于绿色农业生产高质量发展^[15-16]，其中化肥配施腐植酸是重要的新型肥料研发方向。腐植酸因具有丰富的羧基、酚羟基、羟基等官能团结构，具有较好的离子交换能力，对土壤结构稳定性、水气渗透能力等均具有调节作用^[17]，还能提高作物产量，改善作物品质^[18]。刘艳等^[19]研究发现：腐植酸肥料能够显著增加土壤水稳定性团聚体含量，提高其稳定性，降低土壤容重，改善土壤结构。然而，由于受测定技术所限，腐植酸肥料能否在短期内提高设施土壤通气性目前尚不清楚，不同施肥处理下土壤中氧气动态变化差异也鲜有报道。基于此，本研究以土壤氧气体积分数为出发点，以生菜为指示作物，分析不同施肥处理下土壤氧气体积分数的日、季节变化差异，为水、肥、气的精准调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与肥料

供试土壤采自江苏省南京市溧水区高塘村(N31°39'，E119°1')处于转化期的设施菜地土壤，前期为水稻田。土壤类型为黄棕壤，质地为粉砂壤土。采集0~20 cm的耕层土壤，风干，过2 mm筛，混匀备用，土壤养分性质为：有机碳含量7.01 g/kg，全氮含量0.59 g/kg，碱解氮含量65.48 mg/kg，有效磷含量4.82 mg/kg，速效钾含量111.00 mg/kg。供试化肥为河南心连心化学工业集团股份有限公司提供的普通尿素(含N 45.60%)和腐植酸尿素(含N 42.80%，腐植酸含量2.70%)；供试有机肥为当地商品有机肥，主要成分为鸡粪，含N 1.20%，有机碳含量15.09%。

1.2 盆栽试验设计

盆栽试验在中国科学院南京土壤研究所温室进行，供试作物为生菜(*Lactuca sativa* var. *ramosa*)。盆栽桶为圆形，高25 cm，直径22 cm。采用随机区组布置盆栽，试验周期为2021年4月—2022年3月，重复3茬，每茬收获后休耕20 d。控制各处理施氮量一致(180 kg/hm²)，设置不施尿素(CK)以及施用常规尿素(T₁)、腐植酸尿素(T₂)、有机肥(T₃)、45%有机肥+55%常规尿素(T₄，与当地常规一致)共5个处理，每个处理4个重复。施用磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)、钾肥为氯化钾(含K₂O 60%)，均购自当地农资公司，用量分别为180和280 kg/hm²。除CK不施氮肥外，其余处理氮磷钾用量一致。每个花盆装土约3.5 kg(风干基计)，土壤容重1.30 g/cm³，播种前一次性施肥，后续2茬种植前不翻耕以避免土壤扰动，肥料与盆土混合均匀。施肥后管理按照一般设施蔬菜种植规范执行，菜苗长到15~20片叶视为收获。试验结束后，在植株茎秆横向距离约5 cm处采集100 cm³环刀样品，用于容重分析。

1.3 指标测试与分析

连续种植两季后观测土壤结构指标, 包括氧气体积分数和容重。(1) 土壤氧气体积分数: 采用光纤微氧传感器 (OXY4-mini, 德国 Presens 公司) 测定^[20]。第1季播种前(2021年4月3日)将测氧探针埋设于距植株茎秆横向距离5 cm、深10 cm的土壤中, 后续播种收获均未对探针进行扰动。测定尺度包括日步长和全生育期。针对全生育期土壤氧气体积分数测定, 从播种开始每隔5 d于12:30测定氧气体积分数, 每个处理测定3次, 直至收获; 在临近收获期(2022年2月23日—3月2日)进行日步长的土壤氧气体积分数监测, 每15 min测定1次, 测量时静置5 min, 待数据稳定自动保存后手动更换到下一连接探头继续测量。(2) 土壤容重: 采用称重法测定^[21], 并取相同处理的4次重复进行统计。

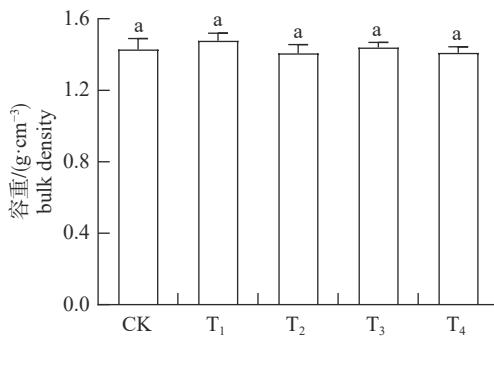
1.4 数据分析

采用Excel 2013和SPSS 19.0进行数据处理与分析; 采用GraphPad Prism 9.0作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理的土壤容重与氧气体积分数

由图1可知: 不同处理间的土壤容重无显著差异。T₁处理的平均土壤容重最大, 为1.48 g/cm³; 其次是T₃处理, 为1.44 g/cm³; 然后是CK处理, 为1.43 g/cm³; 以T₂和T₄处理容重最低, 为1.41 g/cm³。种植初期土壤容重为1.30 g/cm³, 说明种植3茬生菜后土壤容重增加, 而腐植酸尿素(T₂)



注: CK, 不施氮肥, T₁, 常规尿素, T₂, 腐植酸尿素, T₃, 有机肥, T₄, 45% 有机肥+55% 常规尿素; 不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: CK, no nitrogen fertilizer, T₁, normal urea, T₂, humic urea, T₃, organic fertilizer, T₄, 45% organic fertilizer+55% urea; different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$).

和有机肥+尿素配施(T₄)处理更有利于降低土壤容重, 提高通气性。由图1还可知: 相较于CK处理, T₁、T₂和T₃处理可显著提高土壤氧气体积分数, 分别增加了7.07%、6.53%和3.20%; 且T₄处理与CK处理间无显著差异。

2.2 土壤氧气体积分数随生育期的变化规律

由图2可知: 整体上, 生育期内T₁和T₂处理的土壤平均氧气体积分数最高, 分别为18.85%和17.50%; 其次是T₃和T₄处理, 分别为14.95%和13.31%; CK处理最低, 为12.75%。各处理间的变化趋势明显, 其中, CK处理的波动变化最明显, 峰值出现在1月2日、1月27日和2月11日, 分别为12.14%、14.90%和14.57%; T₁和T₂处理变化趋势较为一致, 从播种期到收获期, T₁处理的土壤氧气体积分数从16.82%缓慢上升至19.68%, T₂处理从12.68%上升至18.85%; T₃和T₄处理的土壤氧气体积分数均呈先升后降又缓慢回升的变化趋势。

2.3 土壤氧气体积分数的日变化规律

由图3可知: 不同处理间的土壤氧气含量日动态变化整体趋势较一致。T₁和T₂处理的平均氧气体积分数最高, 分别为19.68%和19.55%; T₃和T₄处理次之, 分别为14.88%和13.61%; CK处理最低, 为11.93%。土壤氧气体积分数日变化大致可划分为4个时间段: 0:00—5:30、5:30—13:00、13:00—18:00和18:00—0:00。0:00—5:30阶段, 各处理的土壤氧气体积分数均呈下降趋势。5:30—13:00阶段, 除CK处理

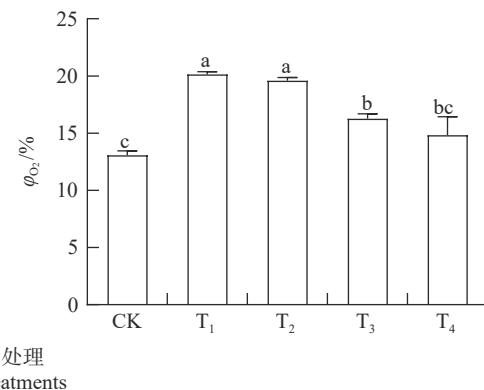


图1 不同处理土壤容重和氧气体积分数差异

Fig. 1 Differences of soil bulk density and oxygen volume fraction under different treatments

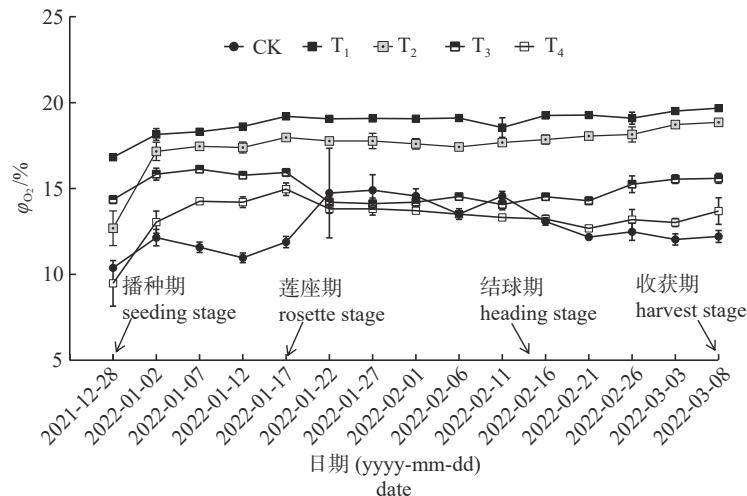


图2 不同处理土壤氧气体积分数随时间的动态变化

Fig. 2 Dynamic change of soil oxygen volume fraction over time for different treatments

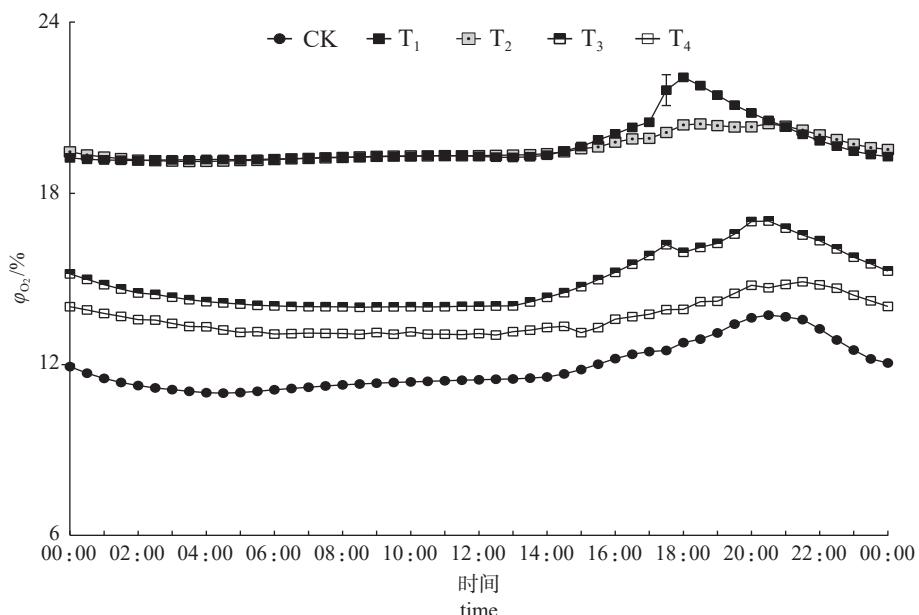


图3 不同处理土壤溶解氧体积分数的日动态变化

Fig. 3 Diurnal dynamic change of soil oxygen volume fraction under different treatments

外，其他处理的土壤氧气体积分数基本保持不变。13:00—18:00阶段，各处理的土壤氧气体积分数呈增加趋势。18:00—0:00阶段，CK、T₃和T₄处理的土壤氧气体积分数均呈先升高后降低的趋势，分别在21:00、20:30和21:30达到峰值，分别为13.67%、17.03%和14.90%；而T₁和T₂处理的土壤氧气体积分数在约18:00达到峰值，18:00—0:00阶段呈下降趋势。综合来看，相较于有机肥以及有机肥+尿素配施处理，施用尿素和腐植酸尿素会影响土壤氧气体积分

数，导致其峰值提前。

3 讨论

土壤中氧气体积分数达到15%才能满足作物呼吸作用的需求^[4]。本研究表明：相较于不施肥(CK)处理，施用肥料可显著提高土壤氧气体积分数，增加幅度为3.20%~7.07%。这与谷晓博等^[22]对不同施氮量下冬油菜土壤氧气量的研究结果有所不同，其研究表明旺盛期不同施氮量土壤氧气浓度不存在明显差异，这可能是由于该研究

采用覆膜处理, 能够保水保墒, 对土壤和大气之间的气体交换存在阻碍作用, 弱化了施肥量对土壤通气性的影响。尿素和腐植酸尿素对土壤氧气体积分数的增加效果显著高于商品有机肥以及有机肥+尿素配施处理, 土壤氧气体积分数最高达20.13%, 这与前人“有机肥更有利提高土壤通气性”的研究结论^[23]相悖。由于氧气测量仪测定的是表层土壤和大气不断交换部分的氧气体积分数, 其变化主要由作物根系/土壤微生物呼吸以及土壤孔隙分布决定。本研究显示: 腐植酸尿素和有机肥+尿素配施处理的土壤容重最小, 说明有机碳源(如腐植酸、有机肥)和化学氮肥(尿素)组合更有利于增加土壤总孔隙度。LUAN等^[24]研究也发现: 有机无机配合能够显著增加土壤孔隙, 提高土壤保水性和通气性。此外, 本研究还显示: 尿素处理的土壤容重最大, 且土壤氧气体积分数较高, 由于其总孔隙度较低, 所以其高氧气体积分数可能主要是由于作物根系/土壤微生物有氧呼吸作用减慢。这一结果暗示了传统尿素处理会降低土壤通气性, 作物/土壤微环境退化, 进而影响作物生长。与传统尿素不同, 有机肥处理的容重略高于CK处理, 且土壤氧气体积分数较低, 这可能是以下2个因素共同作用的结果: (1)有机肥投入量难以在短期内快速改善土壤团聚结构, 对土壤容重和氧气体积分数的改良效率较低^[25]; (2)有机肥增加了土壤微生物活性, 有机质分解过程中土壤呼吸作用增强, 使得土壤环境氧气消耗, 氧气体积分数下降。因此, 从土壤容重和氧气体积分数的结果综合来看, 腐植酸尿素处理更有利于提高土壤通气性, 改善栽培土壤微环境。

叶类蔬菜(本研究指生菜)属于生育期短的作物, 需要保肥、透水、通气的环境才能满足生长需求。本研究的肥料处理均在同一氮、磷、钾用量梯度, 而供试土壤质地相对比较黏重, 故推测合理的土壤通气性(土壤氧气体积分数)是保障作物生长的首要前提^[26]。在叶菜幼苗期(2021年12月28日—2022年1月2日), 各处理土壤氧气体积分数均出现不同程度上升。由于土壤硝化作用需要充足的氧气供应^[27], 所以土壤氧气增加可以间接表明该时期土壤硝态氮含量增加, 以供应生菜吸收氮素, 形成正向反馈, 蔬菜根系进入地下, 提高了耕层的氧气体积分数。成熟期至收获期(2022年2月11日—2022年3月8日), CK处

理氧气体积分数下降, 可能是由于不施肥土壤活性有机氮残留较少, 需要通过微生物分解转化有机态氮和固定态铵来维持作物生长, 大量氧气消耗导致该时期氧气体积分数明显下降; 然而, 在这一时期, T₁和T₂处理的土壤氧气体积分数无显著上升趋势, 与T₃和T₄处理的变化趋势明显不同, 这可能与肥料氮形态影响土壤养分供应有关。T₁和T₂处理施用的是尿素类氮肥, T₃和T₄处理的有机肥虽然也是以等氮形式投入, 但其形态主要为有机态氮, 在作物吸收利用过程中需要更多能量消耗, 与土壤周边的空气交换更为频繁。此外, 土壤氧气与外界温度变化关系显著^[28], 本研究发现: 0:00—5:30土壤氧气体积分数逐渐下降, 这是由于5:30—6:00是一天中土壤温度最低的时间^[29], 随着温度下降土壤氧气体积分数减小; 白天随着气温上升, 土壤水分蒸发增加氧气向土壤的扩散, 使得土壤氧气体积分数逐渐增加^[30]。在日动态变化中, 不同施肥处理的氧气体积分数达到最大峰值的时间存在明显不同, 但均在18:00之后, 这是由于土壤具有保温功能, 土壤温度变化存在滞后性^[31]; 此外, 不同施肥处理对土壤保温保墒的作用效果存在差异, 导致土壤氧气体积分数峰值不同。本研究只分析了不同肥料处理在一次施肥背景下土壤氧气体积分数的变化趋势, 但蔬菜实际生产的肥料用量大, 施肥次数多, 后续研究需综合考虑施肥次数和施肥量等的影响。

4 结论

相较于施用有机肥以及有机肥+尿素配施, 施用腐植酸尿素可显著提高土壤氧气体积分数, 且土壤容重低。不同处理的土壤氧气体积分数在生育期内的变化并不一致, 除苗期外, 尿素和腐植酸尿素的土壤氧气体积分数平缓上升, 而有机肥以及有机肥+尿素配施处理下土壤氧气体积分数呈明显波动。土壤氧气体积分数在白天呈明显上升趋势, 但其达到峰值的时间受肥料类型的影响。

[参考文献]

- [1] 郭益昌, 庄舜尧, 胡昱彦, 等. 埋管通气对雷竹林土壤氧气体积分数的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(1): 69. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2020.01.009.

- [2] 崔冰晶,牛文全,杜娅丹,等.施氮和加气灌溉对黄瓜根区土壤环境及产量的影响[J].节水灌溉,2020(4): 27. DOI: [10.3969/j.issn.1007-4929.2020.04.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-4929.2020.04.006).
- [3] XU L Y, YU Q B, WANG M Y, et al. Soil mineral nitrogen regulation by a novel porous material in structurally degraded soils[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(14): 6285. DOI: [10.1002/jsfa.11977](https://doi.org/10.1002/jsfa.11977).
- [4] 张甘霖,朱阿兴,史舟,等.土壤地理学的进展与展望[J].地理科学进展,2018,37(1): 57. DOI: [10.18306/dlkxjz.2018.01.007](https://doi.org/10.18306/dlkxjz.2018.01.007).
- [5] 朱令,邓世鑫,雷璐嘉,等.竖管通气对覆盖栽培雷竹生长的影响[J].中国农学通报,2023,39(5): 55.
- [6] 雷宏军,胡世国,潘红卫,等.土壤通气性与加氧灌溉研究进展[J].土壤学报,2017,54(2): 297. DOI: [10.11766/trxb201607060270](https://doi.org/10.11766/trxb201607060270).
- [7] 商子惠,蔡焕杰,陈慧,等.水肥气耦合对温室番茄地土壤N₂O排放及番茄产量的影响[J].环境科学,2020,41(6): 2924. DOI: [10.13227/j.hjkx.201910056](https://doi.org/10.13227/j.hjkx.201910056).
- [8] 吴现兵,白美健,李益农,等.水肥耦合对膜下滴灌甘蓝根系生长和土壤水氮分布的影响[J].农业工程学报,2019,35(17): 110. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2019.17.014](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2019.17.014).
- [9] 叶林,赵霞,纳学伟,等.水肥耦合对日光温室厚皮甜瓜光合速率及产量的影响[J].北方园艺,2016(1): 34. DOI: [10.11937/bfyy.201601009](https://doi.org/10.11937/bfyy.201601009).
- [10] YANG L, DU L L, LI W J, et al. Divergent responses of *phoD*- and *pqqC*- harbouring bacterial communities across soil aggregates to long fertilization practices[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 228: 105634. DOI: [10.1016/j.still.2023.105634](https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105634).
- [11] 李玮,陈欢,曹承富,等.不同施肥模式对砂姜黑土团聚体特征及有机碳的影响[J].中国农学通报,2019,35(32): 64.
- [12] 杨颖楠,黄明斌.长期不同施肥处理对不同土层土壤水力性质的影响[J].水土保持通报,2022,42(1): 56. DOI: [10.13961/j.cnki.stctb.2022.01.008](https://doi.org/10.13961/j.cnki.stctb.2022.01.008).
- [13] WANG W P, ZHANG Y F, Li H. Quantification of soil structure via synchrotron X-ray tomography after 22 years of fertilization[J]. European Journal of Soil Science, 2021, 72(5): 2115. DOI: [10.1111/ejss.13108](https://doi.org/10.1111/ejss.13108).
- [14] 侯毛毛,陈竞楠,杨祁,等.暗管排水和有机肥施用下滨海设施土壤氮素行为特征[J].农业机械学报,2019,50(11): 259. DOI: [10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.029](https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.029).
- [15] 郝胜磊,蔡廷瑶,冯小杰,等.新型肥料对全球三大粮食作物产量和土壤生物学活性影响的Meta分析[J].植物营养与肥料学报,2021,27(9): 1496. DOI: [10.11674/zwyf.2021062](https://doi.org/10.11674/zwyf.2021062).
- [16] 于国宜,孔令聪,张亮,等.不同新型肥料对小麦光合特性、冠层结构及产量的影响[J].作物杂志,2022(4): 193. DOI: [10.16035/j.issn.1001-7283.2022.04.027](https://doi.org/10.16035/j.issn.1001-7283.2022.04.027).
- [17] 张水勤,袁亮,林治安,等.腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4): 1065. DOI: [10.11674/zwyf.16255](https://doi.org/10.11674/zwyf.16255).
- [18] 杨雪,高倩,蔡林志,等.新型肥料施用对马铃薯生长和产量及品质的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2022, 48(5): 550. DOI: [10.13331/j.cnki.jhau.2022.05.007](https://doi.org/10.13331/j.cnki.jhau.2022.05.007).
- [19] 刘艳,唐亚福,杨越超,等.大颗粒活化腐植酸肥对苹果土壤团聚体和有机碳的影响[J].应用生态学报,2022, 33(4): 1021. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202204.012](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202204.012).
- [20] 臧明,雷宏军,潘红卫,等.增氧地下滴灌改善土壤通气性促进番茄生长[J].农业工程学报,2018, 34(23): 109. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2018.23.013](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2018.23.013).
- [21] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [22] 谷晓博,李援农,黄鹏,等.种植方式和施氮量对冬油菜产量与水氮利用效率的影响[J].农业工程学报,2018, 34(10):113. DOI:[10.11975/j.issn.1002-6819.2018.10.014](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2018.10.014).
- [23] WANG M Y, XU S X, YANG J Z, et al. The effect of organic and conventional management practices on soil macropore structure in greenhouse vegetable production[J]. European Journal of Soil Science, 2021, 72(5): 2133. DOI: [10.1111/ejss.13106](https://doi.org/10.1111/ejss.13106).
- [24] LUAN H A, GAO W, HUANG S W, et al. Partial substitution of chemical fertilizer with organic amendments affects soil organic carbon composition and stability in a greenhouse vegetable production system[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191: 185. DOI: [10.1016/j.still.2019.04.009](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.009).
- [25] XU L Y, WANG M Y, SHI X Z, et al. Effect of long-term organic fertilization on the soil pore characteristics of greenhouse vegetable fields converted from rice-wheat rotation fields[J]. Science of the Total Environment, 2018, 631/632: 1243. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.03.070](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.070).
- [26] 史艺杰,王美艳,徐胜祥,等.太湖流域典型设施蔬菜地土壤结构特征研究[J].土壤,2020,52(5): 1050. DOI: [10.13758/j.cnki.tr.2020.05.025](https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2020.05.025).
- [27] 程云生.土壤空气研究概况[J].土壤学报,1965(3): 344.
- [28] 张静,刘娟,陈浩,等.干湿交替条件下稻田土壤氧气和水分变化规律研究[J].中国生态农业学报,2014, 22(4): 408. DOI: [10.3724/SP.J.1011.2014.31093](https://doi.org/10.3724/SP.J.1011.2014.31093).
- [29] 余跑兰,孙永明,吴艳,等.地表覆盖对茶树冻害及茶园地温时空变化的影响[J].河南农业科学,2022, 51(3): 65. DOI: [10.15933/j.cnki.1004-3268.2022.03.008](https://doi.org/10.15933/j.cnki.1004-3268.2022.03.008).
- [30] BOUSKILL N J, RILEY W J, ZHU Q, et al. Alaskan carbon-climate feedbacks will be weaker than inferred from short-term experiments[J]. Nature Communication, 2020, 11(1): 5798. DOI: [10.15485/1670465](https://doi.org/10.15485/1670465).
- [31] 闫翠侠,杨国亮,李典鹏,等.生物炭对干旱区绿洲农田土壤呼吸的影响[J].中国农业气象,2018, 39(9): 575. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6362.2018.09.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6362.2018.09.003).

责任编辑: 何馨成