

表面活性剂对生菜生长及水氮运移的影响

石吉祥, 王劲松, 刘秋霞, 王 媛, 焦晓燕, 王立革*
(山西农业大学 资源环境学院, 太原 030031)

摘 要: 【目的】探究表面活性剂对土壤水氮运移和生菜产量、品质及根系生长的作用效果。【方法】以石灰性褐土为供试土壤, 选用 Hydravance™200 (湿润增效混合表面活性剂)、甲基葡糖醇聚醚-20 (保湿单一表面活性剂) 和渴以友 (水分调节混合表面活性剂) 3 种表面活性剂, 以清水灌溉为对照 (CK), 清水+Hydravance™200 (T1)、清水+甲基葡糖醇聚醚-20 (T2)、清水+渴以友 (T3) 为添加表面活性剂处理, 通过室内培养试验, 研究表面活性剂对水氮运移及其空间分布的影响; 在室内培养试验处理基础上, 设置不施氮 (N0) 和施氮 (N1) 2 个氮水平, 采用双因素设计, 共 8 个处理, 即 CKN0、T1N0、T2N0、T3N0 和 CKN1、T1N1、T2N1、T3N1, 以生菜为研究对象, 研究 3 种表面活性剂对盆栽生菜生长、品质以及氮素利用效率的影响。【结果】①室内培养试验表明: 与 CK 相比, T1、T2、T3 处理均能促进水分的横向运移, 使其在土壤中均匀分布, 降低下层 (20~30 cm) 土壤硝态氮量; ②盆栽试验表明: 与 CKN1 处理相比, T1N1 处理生菜的地上部鲜质量和 VC 量分别提高了 26.61% 和 175.61%, 氮素利用率提高了 2.10 倍 ($P<0.05$); T2N1 处理 VC 量显著提高 104.88% ($P<0.05$); T3N1 处理总根长和总体积分别提高 61.98% 和 112.90% ($P<0.05$)。与 CKN0 处理相比, T1N0 处理生菜地上部鲜质量、VC 量及硝酸盐量均显著降低, 降幅分别为 19.57%、43.84%、81.75%; T2N0 处理 VC 量和硝酸盐量分别降低了 24.66% 和 86.52% ($P<0.05$); T3N0 处理硝酸盐量降低了 68.50% ($P<0.05$), 但总根长和总体积显著提高 51.64% 和 87.18% ($P<0.05$)。【结论】3 种表面活性剂均有利于促进水氮在土壤中均匀分布, 不同氮水平条件下, 3 种表面活性剂对生菜生长、产量、品质以及氮素利用率作用效果不同。

关键词: 表面活性剂; 生菜; 水氮运移

中图分类号: S636.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023503

石吉祥, 王劲松, 刘秋霞, 等. 表面活性剂对生菜生长及水氮运移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 50-58.

SHI Jixiang, WANG Jinsong, LIU Qiuxia, et al. Effect of surfactants on lettuce growth and water and nitrogen transport in soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 50-58.

0 引言

【研究意义】在农业种植结构调整和保护农业可持续发展的背景下, 解决水资源紧缺及环境污染问题, 已成为诸多学者研究和探讨的热点, 近年来, 设施农业已逐步成为巩固脱贫攻坚及推动乡村振兴的主导产业^[1-2], 但在实际生产中, 盲目灌溉^[3]和过量施肥^[4]现象依然存在, 不仅造成水资源浪费, 降低水分利用率, 而且亦会引起氮素淋洗, 致使地下水硝酸盐量超标, 进一步引发设施土壤板结^[5]、次生盐渍化^[6-8]、土传病害频发^[9-10]等一系列土壤环境恶化问题, 且增加了生态环境污染及人体健康的潜在风险^[11-12]。为此, 提高设施农业生产中的水肥利用效率对降低设施

农业面源污染风险意义重大。【研究进展】表面活性剂包含亲水和疏水基团^[13], 在降低液体界面张力的同时, 改变了土壤水分入渗, 提高水分润湿能力^[14]。李风珍等^[15]研究发现, 在人为掺沙条件下, DY-ET100 (聚醚改性有机硅) 化学表面活性剂的亲水基团吸附位点可持留更多水分, 促进水分横向运移, 同时提高番茄 VC 量。Chaichi 等^[16]研究表明, 在砂壤土中添加由烷基糖苷、环氧乙烷/环氧丙烷嵌段共聚物等多成分混合而成的表面活性剂, 可抑制土壤水分蒸发, 使玉米水分利用率增加 9.5%。Abagandura 等^[17]在砂壤土中添加 OAC (10%油酸酯嵌段共聚物) 化学表面活性剂, 渗滤液体积减少了 52%, 提高了灌溉水利用效率。也有研究^[18]表明, 在砂土和砂质黏土中添加化学表面活性剂, 氮淋洗量降低达 37%~46%, 氮素利用率提高 61%~67%。但刘小溪^[19]研究表明, 化学表面活性剂仅降低了水分在沙土中的不饱和水力传导系数及毛管上升水, 但在粉砂土中作用效果不明显。

刘佳等^[20]研究表明, 生物 (鼠李糖脂) 和化学 (Tween 80) 表面活性剂均可提高纤维素的酶活性和

收稿日期: 2023-10-30 修回日期: 2024-03-14

基金项目: 山西省重点研发计划项目 (202102140601013); 国家重点研发计划项目 (2021YFD1901101-3)

作者简介: 石吉祥 (1999-), 女。硕士研究生, 主要从事设施农业水肥管理和植物营养方面的研究。E-mail: 1556906716@qq.com

通信作者: 王立革 (1978-), 男。副研究员, 主要从事设施农业水肥管理和植物营养方面的研究。E-mail: wanglige2008@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

微生物数量,且能更好的改善微生物细胞膜的通透性,生物(鼠李糖脂)和化学(Tween 80)表面活性剂促进了绿色木霉生产纤维素酶,同时二者均可增强纤维素酶的稳定性,防止水解过程中酶变性,有利于促进有机质降解^[21]。李果等^[22]研究发现,鼠李糖脂表面活性剂的碳链能容纳更多的多环芳烃(PAHs)分子,提高对柴油的增溶能力,有利于土壤有机污染物的修复。【切入点】综上所述,表面活性剂在生物降解和土壤修复方面已取得一定研究成果,有关水分运移方面的研究主要以砂质土壤类型为主,在非砂质土壤中的作用效果鲜见报道,且对作物生长及品质方面的研究相对较少。【拟解决的关键问题】为此,以石灰性褐土为供试土壤,研究3种表面活性剂对水氮运移及其空间分布特征影响,探究其对生菜生长、品质及氮素利用效率的影响,以期表面活性剂在设施农业生产中的应用和推广提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试作物为生菜,品种为“全能半结球生菜”,购自河南农大豫艺种业。供试表面活性剂共3种,分别为:HydravanceTM200,为湿润增效的混合表面活性剂,购自禾大化学(Croda),有效成分是脂肪醇聚醚及EO/PO嵌段聚醚的化学混合物;甲基葡糖醇聚醚-20,为保湿的单一表面活性剂,购自山东开普勒生物科技有限公司,有效成分为甲基葡糖醇聚醚;渴以友,为水分调节混合表面活性剂,购自辉得昌远东有限公司,主要成分为烷氧基化多元醇。

1.2 供试土壤

供试土壤采集于山西农业大学东阳试验基地(112°39'59"E, 37°33'20"N),土壤类型为石灰性褐土,基本理化性质为:有机质量 10.82 g/kg,全氮量 0.607 g/kg,硝态氮量 18.92 mg/kg,速效磷量 3.5 mg/kg,速效钾量 117.05 mg/kg, pH 值为 8.28, EC 值为 243.65 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

1.3 试验设计

试验设计分室内培养试验和盆栽试验,室内培养试验采用单因素随机区组设计,共设置4个处理:CK,清水;T1,清水+HydravanceTM200,配置体积分数为 2.50 $\mu\text{L}/\text{mL}$;T2,清水+甲基葡糖醇聚醚-20,配置体积分数为 2.50 $\mu\text{L}/\text{mL}$;T3,清水+渴以友,配置体积分数为 0.09 $\mu\text{L}/\text{mL}$,在每个处理中均添加质量浓度为 429 mg/L 的 KNO_3 ,每个处理3次重复。

盆栽试验采用双因素设计,分别为添加表面活性剂和氮水平2个因素,即在室内培养试验CK、T1、T2、T3处理基础上设不施氮(N0)和施氮(N1)2

个氮水平,共8个处理,分别为CKN0、T1N0、T2N0、T3N0、CKN1、T1N1、T2N1、T3N1处理,2个氮水平的施氮量分别为N0: 0 mg/cm^2 ; N1: 0.349 mg/cm^2 ,以生菜为供试作物,每个处理4次重复。

1.4 试验方法

室内培养试验于2022年12月6日进行,在圆形平底塑料桶中(ϕ : 40 cm, h : 35 cm)装入过2 mm筛的供试土壤 42.0 kg,将配好的灌溉液装入吊针式营养液袋,事先调整流速为2滴/s,将滴头固定在距土壤表面2 cm位置,保证灌溉液匀速滴入土壤中心点位置,每桶灌溉量为3 L,试验开始后每5 min用直尺过中心点测量水分横向扩散半径。

盆栽试验于2023年3月1日—5月14日进行,在盆中(ϕ : 17 cm, h : 26 cm)装入过2 mm筛的风干 8.50 kg,风干过筛后的土壤含水率为2.08%。各处理灌水量、磷肥、钾肥施用量均相同,分别在定植后23、31、43 d施肥,N0水平每次施入磷酸二氢钾和水溶性硫酸钾,其用量分别为0.028 mg/cm^2 和0.030 mg/cm^2 ;N1水平每次施入硫酸铵、磷酸二氢钾和水溶性硫酸钾,其用量分别为0.116、0.028、0.030 mg/cm^2 。试验均在山西农业大学龙城校区连栋温室进行。

1.5 样品采集

室内培养试验:灌溉结束约2 h后,采用直径为2 cm的土钻,在距中心点0、4、8、12、16 cm处按照“Y”字型分别采集0~30 cm土层土壤样品,每5 cm为1层,测定各土层土壤含水率;为保证分析样品数量,避开含水率采样点,在距中心点4、8、12、16 cm处按照“Y”字型采集0~30 cm土层土壤样品,每5 cm为1层,测定各土层土壤 NO_3^- -N量。

盆栽试验:从定植开始,每15天测定生菜株高和展幅,试验结束时,采集生菜地上部称质量记产后,将每株地上部平均分成2份,1份用于品质测定,1份用于生物量测定,同时采集根系样品,进行室内相关指标分析。

1.6 测定指标及方法

1.6.1 土壤指标测定

土壤含水率采用烘干法测定;土壤硝态氮采用流动分析仪测定;土壤有机质量采用重铬酸钾外加热法测定;速效磷采用 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用 NH_4OAC 浸提-火焰光度计法测定;土壤全氮采用凯氏定氮法测定。

1.6.2 蔬菜指标测定

生育期内采用直尺测量株高和展幅;收获时将地上部于105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青30 min后,65 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量,测定其生物量,随后将烘干的植株样品粉碎,采用凯

氏定氮法测定植株全氮；另将采集的新鲜植株样品制成匀浆，采用蒽酮比色法测定可溶性糖；采用 2,6—二氯酚酚滴定法测定 VC 量；采用紫外分光光度法测定硝酸盐量；根系分布采用 Epson Perfection V700 photo 扫描仪扫描，使用 WinRHIZO 2016 根系分析软件测定根系形态指标（根长、根体积等），烘干后测定根干质量。

根据植株全氮折算氮素利用效率，计算式为：

氮素利用效率 ($NupE$, %) = [(施氮处理地上部氮吸收量+施氮处理地下部氮吸收量) - (不施氮处理地上部氮吸收量+不施氮处理地下部氮吸收量)]/施氮量×100。

1.7 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019、SPSS 分析数据，采用 Origin 软件作图；采用 SPSS 统计软件进行方差分析，多重比较采用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 添加表面活性剂对土壤水分扩散半径的影响

表面活性剂影响土壤水分运移。由表 1 可知，灌溉后 30、60 min，添加表面活性剂的 T1、T2、T3 处理的水分扩散半径均显著高于 CK ($P<0.05$)；灌溉后 90、120 min 时，T1、T2 处理的水分扩散半径与 CK 无显著差异 ($P>0.05$)，T3 处理则显著高于 CK ($P<0.05$)；滴灌结束时 (150 min)，T1 处理土壤水分扩散半径最大，为 15.70 cm，显著高于 CK ($P<0.05$)，T2、T3 处理与 CK 无显著差异 ($P>0.05$)。整体来看，从开始灌溉到结束，添加表面活性剂各处理土壤水分扩散半径均高于 CK，说明在灌溉水中添加表面活性剂促进了水分在表层土壤中的横向运移，其中 T1、T3 处理在滴灌全过程中的水分扩散半径均高于 T2 处理，表明 T1、T3 处理促进土壤水分横向运移的作用优于 T2 处理。

表 1 各处理不同滴灌时刻土壤水分扩散半径

Tab.1 Diffusion radius at different drip irrigation times for each treatment

处理	灌溉时间/min				
	30	60	90	120	150
CK	7.81±0.44b	10.65±0.26b	12.68±0.29b	13.94±0.18b	14.82±0.54b
T1	9.24±0.17a	11.66±0.06a	13.23±0.20ab	14.53±0.13ab	15.70±0.24a
T2	9.18±0.52a	11.55±0.76a	13.05±0.49ab	14.27±0.48ab	15.56±0.43ab
T3	9.38±0.18a	11.77±0.16a	13.63±0.13a	14.62±0.22a	15.63±0.28ab

注 表中数据为平均值±标准差；不同小写字母表示各处理在 $P<0.05$ 水平上差异显著，下同。

2.2 各处理土壤水分空间分布

由图 1 可知，各处理下层土壤水分空间分布差异较大。在距中心点水平方向 0~8 cm，垂直方向 20~30 cm 土层处，CK 土壤含水率为 9.19%~17.81%，T1、T2、T3 处理土壤含水率分别为 3.44%~10.63%、2.96%~14.94%、4.88%~16.38%，土壤含水率表现为 CK>T3 处理>T2 处理>T1 处理，说明 T1、T2 处理较 CK 降低了距中心点较近的下层土壤含水率；在水平方向 16 cm，垂直方向 20~30 cm 土层区域，CK 土壤含水率为 2.87%~3.85%，T1、T2、T3 处理分别为 2.02%~2.59%、2.19%~3.77%、3.09%~4.19%，土壤含水率表现为 T3 处理>CK>T2 处理>T1 处理，T1 处理

土壤含水率最低，说明 T1 处理将水分持留在 0~20 cm 土层；从图 1 还可以看出，在距中心点水平方向 0~16 cm，垂直方向 0~15 cm 土层区域土壤中，各处理土壤含水率均较高，其中 T1、T2 处理在垂直方向 0~10 cm 土层土壤含水率明显低于 CK，随着土层深度增加，在垂直方向 10~15 cm 土层，CK 土壤含水率为 4.71%，T1、T2、T3 处理分别为 6.36%、4.81%、14.10%，土壤含水率表现为 T3 处理>T1 处理>T2 处理>CK。由此说明，添加表面活性剂处理促进了水分在 0~15 cm 土层土壤中的横向运移，使其均匀分布于上层土壤，降低了水分向下层土壤入渗，其中 T1 处理效果最佳。

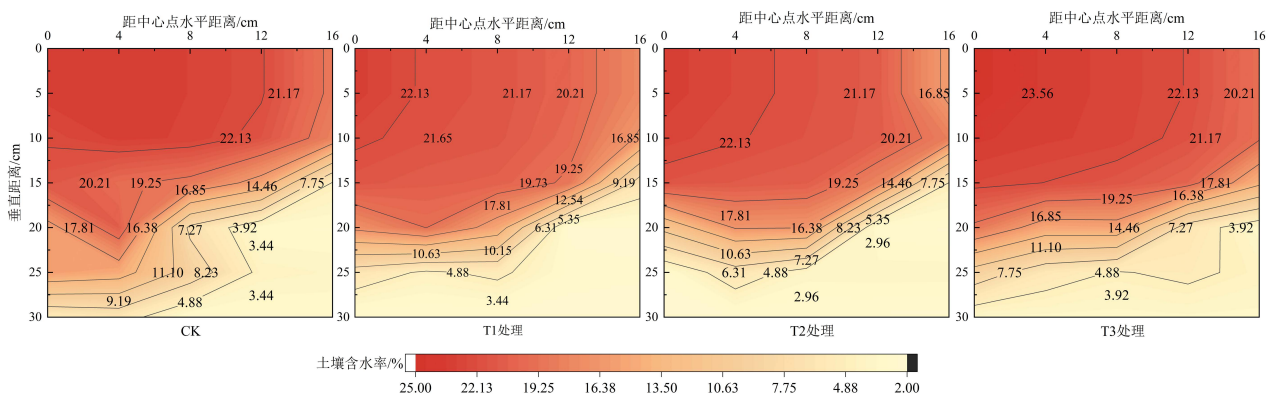


图 1 土壤含水率空间分布

Fig.1 Spatial distribution of soil water content

2.3 添加表面活性剂对土壤硝态氮空间分布的影响

硝态氮不易被土壤胶体吸附,易随水淋洗到下层土壤。由图2可知,各处理土壤硝态氮在土壤中分布不同,CK在距中心点水平方向0~8 cm、垂直方向20~30 cm土层有明显的硝态氮峰值区,硝态氮量为103.54~172.55 mg/kg,均值为138.05 mg/kg;T1、T2处理在距中心点水平方向0~4 cm、垂直方向15~25 cm土层,出现硝态氮峰值区,硝态氮量分别为37.08~81.64、26.38~55.34 mg/kg,均值为59.36、40.86 mg/kg,二者均低于CK;T3处理在距中心点水平方向0~8 cm、垂直方向20~30 cm土层出现硝态氮峰值区,硝态氮量为68.95~135.02 mg/kg,均值为101.99 mg/kg,其硝态氮量显著低于CK。从图2还可看出,CK、T1、T2处理在上层土壤也出现了硝态氮峰值区,

其中,CK是在距中心点水平方向10~16 cm、垂直方向0~5 cm土层,出现了硝态氮峰值,硝态氮量均值为77.48 mg/kg,T1、T2处理分别是在水平方向12~16 cm、垂直方向0~15 cm和水平方向12~16 cm、垂直方向0~5 cm土层中出现硝态氮峰值,T1、T2处理硝态氮量均值分别为67.40、60.03 mg/kg,且硝态氮量显著低于CK;另外CK和T3处理在距中心点水平方向8~16 cm、垂直方向15~30 cm均出现了硝态氮量较高区域,CK在该区域的硝态氮量为88.37~126.46 mg/kg,均值为107.41 mg/kg,T3处理硝态氮量为43.27~83.13 mg/kg,均值为63.20 mg/kg,显著低于CK。整体看,与CK相比,添加表面活性剂促进了硝态氮在土体的均匀分布,从而降低了硝态氮向下层土壤淋洗的风险,其中T1、T2处理优于T3处理。

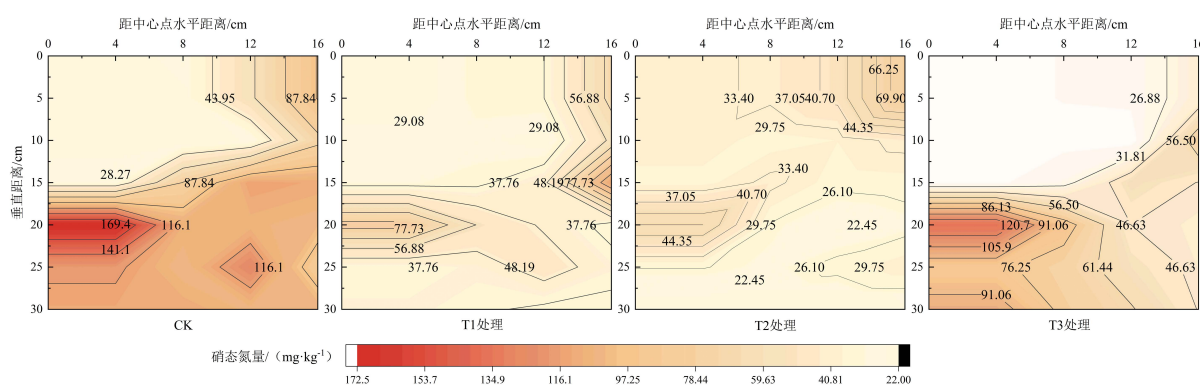


图2 土壤硝态氮空间分布

Fig.2 Spatial distribution of soil nitrate nitrogen

2.4 添加表面活性剂对生菜生长指标的影响

图3为各处理对生菜生长指标的影响。由图3可知,不施氮条件下,定植后15~60 d时,T1N0处理生菜株高与CKN0处理无显著差异($P>0.05$),但定植后75 d时,T1N0处理株高较CKN0处理显著降低了10.71%($P<0.05$),而T2N0处理和T3N0处理的株高仅在定植后30 d时有所提高;定植后45~75 d时,T1N0处理生菜展幅较CKN0处理显著降低,其中定植后75 d时,T1N0处理较CKN0处理显著降低了14.28%($P<0.05$);定植后15 d,与CKN0处理相比,T2N0处理生菜展幅显著提高了6.52%($P<0.05$),但定植后75 d时,T2N0处理生菜展幅呈下降趋势;T3N0处理生菜展幅仅在定植后15 d时提高了14.13%($P<0.05$)。在施氮条件下,与CKN1处理相比,T1N1处理全生育期中生菜株高和展幅均有所提高但差异不显著;定植后15、30 d,T2N1处理生菜株高较CKN1处理分别提高了34.00%和38.00%($P<0.05$),定植后60 d时,T2N1处理生菜展幅降低了18.47%;定植后15 d时,与CKN1处理相比,T3N1处理生菜展幅提高了16.48%,而定植后60 d时,T3N1处理生菜展幅降低了16.84%,说明T1N0处理对生菜的生长有抑

制作用,T1N1处理可促进生菜的生长,而T2N1、T3N1处理有利于促进生菜前期(定植后15 d)的生长。

2.5 添加表面活性剂对生菜产量及品质的影响

由表2可知,不施氮条件下,各处理生菜地上部鲜质量表现为T3N0处理>T2N0处理>CKN0处理>T1N0处理,其中T1N0处理较CKN0处理降低了19.57%($P<0.05$);施氮条件下,与CKN1处理相比,T1N1处理地上部鲜质量显著提高了26.61%($P<0.05$),T3N1处理较CKN1处理降低了16.18%($P<0.05$),施氮各处理地上部鲜质量表现为T1N1处理>T2N1处理>CKN1处理>T3N1处理。故添加表面活性剂Hydravance™200不施氮时(T1N0)生菜地上部鲜质量降低,而添加表面活性剂Hydravance™200施氮时(T1N1)生菜地上部鲜质量显著提高;添加表面活性剂渴以友不施氮时(T3N0)生菜地上部鲜质量增加,添加表面活性剂渴以友施氮时(T3N1)生菜地上部鲜质量显著降低。

不施氮条件下,与CKN0处理相比,T1N0、T2N0、T3N0处理生菜硝酸盐量分别降低了81.75%、86.52%、68.50%($P<0.05$),说明添加表面活性剂处理在不施氮条件下显著降低了生菜硝酸盐量。

不施氮条件下, T1N0、T2N0 处理生菜 VC 量较 CKN0 处理分别显著降低了 43.84% 和 24.66% ($P<0.05$), T3N0 处理生菜 VC 量与 CKN0 处理无显著差异; 施氮条件下, 各处理 VC 量表现为 T1N1 处理>T2N1 处理>T3N1 处理>CKN1 处理, 与 CKN1 处理相比, T1N1、T2N1、T3N1 处理生菜 VC 量提高

了 175.61%、104.88%、53.66% ($P<0.05$), 说明 Hydravance™200 和甲基葡糖醇聚醚-20 在不施氮条件下 (T1N0、T2N0) 降低了生菜 VC 量, 而施氮条件下添加表面活性剂处理均可显著提高生菜 VC 量, 其中 T1N1 处理提高 VC 量效果最佳。各处理对可溶性糖量无显著影响。

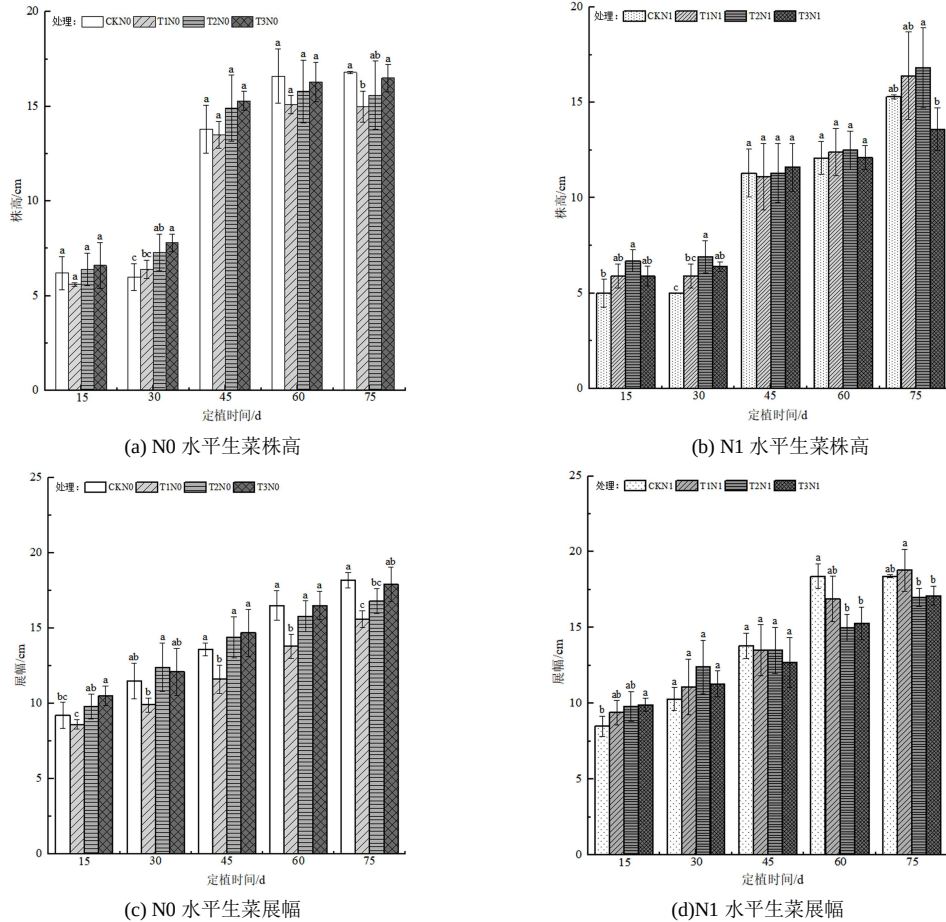


图 3 各处理生菜生长指标

Fig.3 Lettuce growth index for each treatment

表 2 不同处理生菜产量及品质

Tab.2 Effects of different treatments on yield and quality

处理	地上部鲜质量/g	硝酸盐量/(mg kg ⁻¹)	VC 量/(mg 100g ⁻¹)	可溶性糖量/%
CKN0	57.50±2.89a	1565.92±111.18a	0.73±0.08a	3.89±0.02a
T1N0	46.25±7.50b	285.75±10.16c	0.41±0.06b	4.51±0.01a
T2N0	58.75±2.50a	211.13±56.15c	0.55±0.14b	4.25±0.00a
T3N0	61.25±4.79a	493.28±24.75b	0.70±0.36a	3.25±0.01a
CKN1	56.67±2.89b	4202.67±36.33a	0.41±0.25c	4.18±0.01a
T1N1	71.75±6.24a	3980.72±270.36a	1.13±0.07a	4.81±0.01a
T2N1	57.50±6.45b	4123.42±362.52a	0.84±0.01b	4.95±0.02a
T3N1	47.50±5.00c	4368.23±375.68a	0.63±0.12b	4.79±0.02a
氮水平(N)	NS	**	**	NS
表面活性剂(S)	NS	**	*	NS
氮水平×表面活性剂(N)×(S)	**	**	**	NS

注 *和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上有显著影响, NS 表示无显著。下同。

2.6 添加表面活性剂对生菜根系分布的影响

由表 3 可知, 添加表面活性剂处理对根系分布特征有显著影响。添加表面活性剂处理生菜总根长均显著高于不添加表面活性剂处理, 但 Hydravance™200 表面活性剂和不施氮条件下的甲基葡糖醇聚醚-20 除

外。不施氮条件下, T3N0 处理生菜总根长较 CKN0 处理显著提高了 51.64% ($P<0.05$), 且直径 ≤ 0.5 mm 根长占总根长的 95.70%; 施氮条件下, 与 CKN1 处理相比, T2N1、T3N1 处理生菜总根长分别提高了 43.07% 和 61.98% ($P<0.05$), 其中直径 ≤ 0.5 mm 根

长分别占总根长的 94.03%和 94.56%，表明 T3N0、T2N1、T3N1 处理可促进生菜根系生长，且直径≤0.5 mm 根长占比较大，更有利于养分吸收。

从总根体积和根干质量分析得出，N0 水平下，T3N0 处理生菜总根体积较 CKN0 处理显著提高了 1.87 倍；N1 水平下，T2N1、T3N1 处理生菜总根体积较 CKN1 处理分别提高了 2.10 倍和 2.13 倍（ $P<0.05$ ），施氮条件下各处理生菜总根体积表现为

T3N1 处理>T2N1 处理>T1N1 处理>CKN1 处理，表明 T3N0、T2N1、T3N1 处理促进总根体积的作用效果最好。不施氮条件下，与 CKN0 处理相比，T3N0 处理生菜根干质量显著提高了 1.44 倍（ $P<0.05$ ）；施氮条件下 T3N1 处理生菜根干质量较 CKN1 处理提高了 1.52 倍，故添加表面活性剂渴以友均可提高根干质量。

表 3 各处理对生菜根系分布的影响

Tab.3 Effects of different treatments on the root distribution of lettuce

处理	$L\leq 0.5\text{mm}$	总根长/cm	总根体积/ m^3	根干质量/g
CKN0	1 125.91±258.23b	1 177.41±281.69b	0.39±0.14b	0.36±0.05b
T1N0	1 482.46±340.00ab	1 538.71±348.37ab	0.57±0.15ab	0.42±0.09ab
T2N0	1 455.21±318.71ab	1 494.42±327.20ab	0.49±0.11ab	0.47±0.13ab
T3N0	1 708.63±338.67a	1 785.38±353.50a	0.73±0.17a	0.52±0.02a
CKN1	776.94±70.44b	803.09±73.60b	0.31±0.05b	0.29±0.03b
T1N1	771.60±198.73b	812.97±206.87b	0.40±0.10ab	0.39±0.13ab
T2N1	1 080.35±81.02a	1 148.97±116.09a	0.65±0.21a	0.38±0.08ab
T3N1	1 230.08±180.69a	1 300.83±199.69a	0.66±0.20a	0.44±0.09a
氮水平(N)	**	**	NS	**
表面活性剂(S)	**	**	*	**
氮水平×表面活性剂(N)×(S)	NS	NS	NS	NS

注 L 表示根长。

表 4 氮吸收量及氮素利用效率

Tab.4 Effects of different treatments on nitrogen absorption and utilization efficiency of lettuce

处理	地上部 氮吸收量/g	地下部 氮吸收量/g	氮吸收 总量/g	$N_{upE}/\%$
CKN0	0.238±0.304a	0.006±0.005a	0.243±0.012a	-
T1N0	0.226±0.360a	0.006±0.008a	0.231±0.043 7a	-
T2N0	0.228±0.284a	0.006±0.008a	0.233±0.044a	-
T3N0	0.233±0.298a	0.007±0.011a	0.230±0.012a	-
CKN1	0.304±0.015b	0.005±0.005b	0.309±0.019b	1.752±0.222b
T1N1	0.360±0.044 4a	0.008±0.008ab	0.368±0.044a	3.619±0.318a
T2N1	0.284±0.022b	0.008±0.008ab	0.292±0.023b	1.552±0.234b
T3N1	0.298±0.020b	0.011±0.011a	0.309±0.031b	1.815±0.385b

2.7 添加表面活性剂对生菜氮吸收及氮素利用效率的影响

由表 4 可知，各处理生菜地上部氮吸收量、地下部氮吸收量和氮吸收总量在不施氮条件下无显著差异（ $P>0.05$ ），说明不施氮时添加表面活性剂对地上部氮吸收量、地下部氮吸收量以及氮吸收总量无影响。施氮条件下，T1N1 处理生菜地上部氮吸收量最高，较 CKN1 处理显著提高了 18.42%（ $P<0.05$ ），T2N1、T3N1 处理地上部氮吸收量与 CKN1 处理均无显著差异（ $P>0.05$ ），而施氮条件下各处理地下部氮吸收量表现为 T3N1 处理>T1N1 处理>T2N1 处理>CKN1 处理，其中 T3N1 处理地下部氮吸收量较 CKN1 处理提高了 2.2 倍（ $P<0.05$ ）；在氮吸收总量和氮素利用效率中，施氮条件下，T1N1 处理氮吸收总量较 CKN1 处理显著提高了 1.19 倍（ $P<0.05$ ），且 T1N1 处理的氮素利用效率最高，较 CKN1 处理显

著提高了 2.10 倍（ $P<0.05$ ），说明 T1N1 处理能促进生菜对氮的吸收，可显著提高氮素利用率。

3 讨论

3.1 添加表面活性剂对土壤水氮运移及其空间分布的影响

表面活性剂包含非极性碳氢链憎水基团和极性亲水基团^[23-24]，可增加土壤持水能力，进而影响水分运移。本研究表明，3 种表面活性剂均促进了水分的横向运移，这是因为表面活性剂施入土壤后，在疏水和氢键作用下，与土壤固液界面形成表面胶束^[25-26]，降低土壤粒子界面张力，促使水分在土壤中的横向运移，从而增大水分扩散面积，这与前人^[19-20]研究一致。从作用效果的持续性来看，添加甲基葡糖醇聚醚-20 的 T2 处理仅在灌溉初期加快了水分横向运移，因添加 HydravanceTM200（T1）和渴以友（T3）在滴灌全过程中的水分扩散半径均高于甲基葡糖醇聚醚-20（T2），表明 HydravanceTM200（T1）和渴以友（T3）在促进水分横向运移的作用优于甲基葡糖醇聚醚-20（T2），因为表面活性剂降低了土壤团聚体的稳定性，使上层土壤导水率降低，提高上层土壤持水能力^[27]，所以添加表面活性剂促使水分先运移至距中心点较远处后，再向下运移，而硝态氮易随水移动，故添加表面活性剂处理水氮空间分布更均匀，降低了硝态氮向下层迁移，这与前人^[28]研究一致。整体来看，HydravanceTM200 处理对水氮运移作用效果最好，这

可能是因为 Hydravance™200 对不饱和水力传导系数和毛管上升水有一定的影响,且有效成分中含有 EO/PO 嵌段聚醚,具有低表面张力、高分子量等特点,使表面张力显著下降,可起到长效润湿的效果,但刘小溪^[19]研究发现,在沙土中施用表面活性剂 48 h 后,表面活性剂虽对不饱和水力传导系数和毛管上升水有影响,但没有持续提高土壤水分移动,且润湿效果不显著,这可能是因为灌溉结束后,水分在土壤中再次扩散影响所致,也可能与土壤类型有关,本文只研究了 150 min 的水分运移变化,表面活性剂对水分运移的持效性及其在不同土壤类型中的作用效果还有待进一步研究与探讨。

3.2 添加表面活性剂对生菜产量、品质及根系的影响

Wolkowski 等^[29]认为施用表面活性剂玉米产量提高了 2.5 t/hm²,而李风珍等^[15]研究表明,同一土壤类型条件下,表面活性剂对番茄产量无影响。本研究发现,Hydravance™200 在不施氮条件下显著降低了生菜地上部鲜质量,而 Hydravance™200 在施氮条件下显著提高了生菜地上部鲜质量,施氮条件下添加渴以友显著降低了生菜地上部鲜质量,甲基葡糖醇聚醚-20 对生菜地上部鲜质量均无影响,这可能是因为不同作物对表面活性剂的响应不同,也可能与表面活性剂的种类、有效成分以及施氮水平有关。另外陈彬等^[30]研究表明,表面活性剂与蚯蚓粪配施显著提高了小白菜产量;而本研究也发现施氮条件下添加 Hydravance™200 表面活性剂可提高生菜地上部鲜质量。故在实际生产中,表面活性剂配施氮肥的作用效果更好。

本研究表明,施氮条件下 3 种表面活性剂对生菜中硝酸盐量无显著影响;但不施氮条件下添加表面活性剂均显著降低了生菜硝酸盐量;此外,不施氮条件下 Hydravance™200 和甲基葡糖醇聚醚-20 均显著降低了生菜 VC 量,但在施氮条件下(T1N1、T2N1)VC 量显著提高,而渴以友仅在施氮条件下提高了生菜 VC 量,说明施用表面活性剂可改善蔬菜品质,这与前人^[16, 31-32]研究一致。渴以友对生菜根系生长的作用优于 Hydravance™200 和甲基葡糖醇聚醚-20,且与施氮水平无关,这是由于表面活性剂改变了土壤团聚体结构^[33],提高土壤持水能力,促进水氮在土壤耕层均匀分布,因此提高了生菜根系体积,也可能是因为渴以友较 Hydravance™200 和甲基葡糖醇聚醚-20 对土壤微生物群落结构及其功能影响小,进而影响了根系的生长^[34-35]。

3.3 表面活性剂对氮素利用效率的影响

施氮可促进植株对氮素的吸收^[36-38],本研究中,施氮处理较不施氮处理生菜氮吸收总量显著提高,这

与王超^[39]研究一致。施氮条件下添加表面活性剂 Hydravance™200 (T1N1) 氮素利用效率较 CKN1 处理提高了 2.10 倍,这可能是因为 Hydravance™200 处理可使土壤硝态氮均匀分布,且上层土壤硝态氮量相对较高(图 2),由此降低了氮素淋洗,进而提高了作物氮素利用效率,这与前人^[18]研究一致,另外,可能是因为甲基葡糖醇聚醚-20 和渴以友表面活性剂影响了氮素同化酶活性,降低了氮素转化所致,而氮素利用效率与酶活性有关^[40],所以甲基葡糖醇聚醚-20 和渴以友对氮素利用率无显著影响。为此,表面活性剂是否会影响氮素转化酶的活性还需进一步研究。

4 结 论

1) 添加 Hydravance™200 表面活性剂有利于促进水氮在土壤中的长效运移,施氮后可提高生菜地上部鲜质量,改善生菜品质,且氮素利用效率显著提高 2.10 倍。

2) 不施氮时添加甲基葡糖醇聚醚-20 表面活性剂 VC 量和硝酸盐量分别降低了 24.66% 和 86.52%,施氮后 VC 量显著提高 104.88%。

3) 添加渴以友表面活性剂有利于促进生菜根系生长。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 刘钦. 乡村振兴战略背景下我国蔬菜产业发展分析[J]. 北方园艺, 2020(4): 142-147.
LIU Qin. Analysis of vegetable industry development under the background of rural revitalization strategy[J]. Northern Horticulture, 2020(4): 142-147.
- [2] 彭澎, 梁龙, 李海龙, 等. 我国设施农业现状、问题与发展建议[J]. 北方园艺, 2019(5): 161-168.
PENG Peng, LIANG Long, LI Hailong, et al. Status, deficiency and development suggestions of protected agriculture in China[J]. Northern Horticulture, 2019(5): 161-168.
- [3] GU L M, LIU T N, ZHAO J, et al. Nitrate leaching of winter wheat grown in lysimeters as affected by fertilizers and irrigation on the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(2): 374-388.
- [4] WANG D, LI G Y, MO Y, et al. Evaluation of optimal nitrogen rate for corn production under mulched drip fertigation and economic benefits[J]. Field Crops Research, 2018, 216: 225-233.
- [5] 陈碧华, 杨和连, 李亚灵, 等. 不同种植年限大棚菜田土壤水溶性盐分的变化特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 241-245.
CHEN Bihua, YANG Helian, LI Yaling, et al. Variation characteristics of soil water-soluble salts of large plastic house vegetable field for different cultivating years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 241-245.
- [6] 曾希柏, 白玲玉, 苏世鸣, 等. 山东寿光不同种植年限设施土壤的酸化与盐渍化[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1 853-1 859.
ZENG Xibai, BAI Lingyu, SU Shiming, et al. Acidification and salinization in greenhouse soil of different cultivating years from Shouguang City, Shandong[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1 853-1 859.

- [7] 李涛, 于蕾, 吴越, 等. 山东省设施菜地土壤次生盐渍化特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 100-110.
LI Tao, YU Lei, WU Yue, et al. Secondary salinization of greenhouse vegetable soils and its affecting factors in Shandong Province, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(1): 100-110.
- [8] 王丽娟, 孙嘉星, 韩卫华, 等. 水肥减量对土壤硝态氮和番茄产量品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 1-7.
WANG Lijuan, SUN Jiaxing, HAN Weihua, et al. The effects of reducing irrigation and fertilization on soil nitrate, yield and quality of greenhouse tomato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(3): 1-7.
- [9] 卢维宏, 张乃明, 包立, 等. 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(4): 651-658.
LU Weihong, ZHANG Naiming, BAO Li, et al. Study advances on characteristics, causes and control measures of continuous cropping obstacles of facility cultivation in China[J]. Soils, 2020, 52(4): 651-658.
- [10] 杨凡, 王建宏, 蔡毓新, 等. 设施黄瓜连作障碍灾变机制及酵素菌应用研究进展[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(7): 6-12.
YANG Fan, WANG Jianhong, CAI Yuxin, et al. Advances of disaster mechanism on cucumber continuous cropping disorder and application of enzyme microorganism[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2022, 35(7): 6-12.
- [11] TSOUVALTZIS P, KASAMPALIS D S, AKTSOGLU D C, et al. Effect of reduced nitrogen and supplemented amino acids nutrient solution on the nutritional quality of baby green and red lettuce grown in a floating system[J]. Agronomy, 2020, 10(7): 922.
- [12] 罗江宏, 李杰, 李娟, 等. 施氮水平和间断施氮对生菜生长和品质的影响[J]. 北方园艺, 2022(11): 23-30.
LUO Jianghong, LI Jie, LI Juan, et al. Effects of nitrogen application level and intermittent nitrogen application on growth and quality of lettuce[J]. Northern Horticulture, 2022(11): 23-30.
- [13] 欧阳科, 张甲耀, 戚琪, 等. 生物表面活性剂和化学表面活性剂对多环芳烃的生物降解作用研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 806-809.
OUYANG Ke, ZHANG Jiayao, QI Qi, et al. Difference of biodegradation processes of anthracene in the presence of biosurfactants and chemical surfactants[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2004, 23(4): 806-809.
- [14] MOORE D, KOSTKA S, BOERTH T, et al. The effect of soil surfactants on soil hydrological behavior, the plant growth environment, irrigation efficiency and water conservation[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2010, 58(3): 142-148.
- [15] 李凤珍, 张小梅, 梁斌, 等. 水分调节剂 DY-ET100 对番茄产量、品质及水氮在土壤中扩散的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 185-192.
LI Fengzhen, ZHANG Xiaomei, LIANG Bin, et al. Effects of water regulator DY-ET100 on tomato yield and quality and diffusion of water and nitrogen in soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 185-192.
- [16] CHAICHI M R, NURRE P, SLAVEN J, et al. Surfactant application on yield and irrigation water use efficiency in corn under limited irrigation[J]. Crop Science, 2015, 55(1): 386-393.
- [17] ABAGANDURA G O, PARK D, BRIDGES W C Jr, et al. Soil surfactants applied with ¹⁵N labeled urea increases bermudagrass uptake of nitrogen and reduces nitrogen leaching[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2021, 184(3): 378-387.
- [18] OMAR A G, DARA P, BRIDGES WILLIAM C. Surfactant and irrigation impacts on soil water content and leachate of soils and greenhouse substrates[J]. Agrosystems, Geosciences & Environment, 2021, 4(2): e20 153.
- [19] 刘小溪. 土壤表面活性剂对土壤水分特性影响的研究[J]. 水土保持应用技术, 2013(2): 6-8.
- [20] 刘佳, 袁兴中, 曾光明, 等. 表面活性剂对绿色木霉产纤维素酶影响的实验研究[J]. 中国生物工程杂志, 2006, 26(8): 62-66.
LIU Jia, YUAN Xingzhong, ZENG Guangming, et al. Experimental study on the effects of surfactants on cellulase from *Trichoderma viride*[J]. China Biotechnology, 2006, 26(8): 62-66.
- [21] SHI J G, ZENG G M, YUAN X Z, et al. The stimulatory effects of surfactants on composting of waste rich in cellulose[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2006, 22(11): 1 121-1 127.
- [22] 李果, 毛华军, 巩宗强, 等. 几种表面活性剂对柴油及多环芳烃的增溶作用[J]. 环境科学研究, 2011, 24(7): 775-780.
LI Guo, MAO Huajun, GONG Zongqiang, et al. Solubilization of diesel and polycyclic aromatic hydrocarbons by certain kinds of surfactants[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(7): 775-780.
- [23] 饶品华, 徐普利, 张文启, 等. 表面活性剂在土壤粒子上的吸附及影响因素综述[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(14): 6 542-6 545.
RAO Pinhua, XU Jingli, ZHANG Wenqi, et al. Review of adsorption of surfactants on soil particles and its effect factors[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(14): 6 542-6 545.
- [24] 魏坤昊. 表面活性剂增溶性能及强化 KMnO₄ 氧化甲苯和非效果研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2022.
WEI Kunhao. The solubilization performance of surfactants and its effect on enhancing oxidation of toluene and phenanthrene by KMnO₄[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2022.
- [25] 姚丹丹, 王辉, 田坤, 等. 土壤多环芳烃污染生物表面活性剂强化修复的研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(1): 164-170.
YAO Dandan, WANG Hui, TIAN Kun, et al. Research on biosurfactant-enhanced remediation in PAHs-contaminated soil[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(1): 164-170.
- [26] 王春晖, 李伯耿, 范宏, 等. 嵌段聚醚 HLB 值与分子结构关联的新模型[J]. 中国科技论文在线, 2008, 3(3): 189-194.
WANG Chunhui, LI Bogeng, FAN Hong, et al. New correlation model for the HLB values of ethylene oxide and propylene oxide block copolymers[J]. Sciencepaper Online, 2008, 3(3): 189-194.
- [27] 饶品华, 何明. 表面活性剂在土壤中的行为及其对土壤物理特性的影响(综述)[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2005, 23(3): 325-331.
RAO Pinhua, HE Ming. The behavior of surfactant in soils and its effect on physical characteristics of soils[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2005, 23(3): 325-331.
- [28] 陈庆华. 表面活性剂对土壤中氮磷迁移的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
CHEN Qinghua. Effect of surfactant on migration of nitrogen and phosphorus in soil[D]. Chongqing: Southwest University, 2014.
- [29] WOLKOWSKI R P, KELLING K A, OPLINGER E S. Evaluation of three wetting agents as soil additives for improving crop yield and nutrient availability[J]. Agronomy Journal, 1985, 77(5): 695-698.
- [30] 陈彬, 张颖, 王树强, 等. 蚯蚓粪与鼠李糖脂配施对小白菜和生菜产量、生长指标及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(1): 133-139.
CHEN Bin, ZHANG Ying, WANG Shuqiang, et al. Effects of vermicompost and rhamnolipid on soil enzyme activities and microbial community structure[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(1): 133-139.
- [31] 任慧勤. 一种液体土壤水分调节剂在马铃薯品种“Innovator”上的应用[C]//2015 年中国马铃薯大会论文集. 北京: 哈尔滨地图出版社, 2015: 405-408.
- [32] 王亚虹, 韩丹, 高森, 等. 表面活性剂辅助钾肥喷施对烤烟叶片润湿性能、生理指标及品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(11): 1 663-1 671.
WANG Yahong, HAN Dan, GAO Sen, et al. Effects of spraying potassium fertilizer with surfactant on wettability, physiology and quality indexes of flue-cured tobacco[J]. Chinese Journal of

- Eco-Agriculture, 2018, 26(11): 1 663-1 671.
- [33] 李彩霞, 陈津赛, 付媛媛, 等. 施氮和灌溉管理对麦田土壤团聚体组成及有机碳的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 59-64, 80.
LI Caixia, CHEN Jinsai, FU Yuanyuan, et al. Effects of nitrogen fertilization and irrigation on soil aggregation and soil organic carbon in winter wheat field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 59-64, 80.
- [34] 王凌文, 王辛男, 王宁浩, 等. 土壤异位淋洗对微生物群落结构的影响[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(S1): 139-142.
WANG Lingwen, WANG Xinnan, WANG Ninghao, et al. The influence of microbial community structure and function by ex-situ soil washing[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(S1): 139-142.
- [35] 卓鑫鑫, 刘昆, 周舟, 等. 土壤微生物对水稻根系形态活力影响的研究进展[J]. 东北农业科学, 2023, 48(2): 78-85.
ZHUO Xinxin, LIU Kun, ZHOU Zhou, et al. Research progress on the effect of soil microorganisms on root morphology and activity in rice[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(2): 78-85.
- [36] 汤明尧, 张炎, 胡伟, 等. 不同施氮水平对加工番茄养分吸收、分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1 238-1 245.
TANG Mingyao, ZHANG Yan, HU Wei, et al. Effects of different nitrogen rates on nutrition absorption, distribution and yield in tomato[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1 238-1 245.
- [37] 酒歌, 王栋, 马娇. 膜下滴灌水氮调控对甘薯品质、产量及土壤水氮分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 63-72.
JIU Ge, WANG Dong, MA Jiao. Effect of water and nitrogen transport on sweet potato quality, yield and soil water and nitrogen distribution under drip irrigation with plastic mulch[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 63-72.
- [38] 王斌, 聂督, 赵圆峰, 等. 水氮耦合对藜麦产量、氮素吸收和水氮利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 87-94.
WANG Bin, NIE Du, ZHAO Yuanfeng, et al. The effects of water-nitrogen coupling on yield, nitrogen and water use efficiency of quinoa[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(9): 87-94.
- [39] 王超. 水肥一体化对番茄生理及水氮利用效率的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
WANG Chao. Effect of water and fertilizer integration on tomato physiology and utilization efficiency of water and nitrogen[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [40] 王永亮, 吴晨瑞, 薛晓蓉, 等. 污泥热碱液对小青菜产量及氮转化酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(11): 1 768-1 779.
WANG Yongliang, WU Chenrui, XUE Xiaorong, et al. Effects of flushing alkaline thermal hydrolysis liquid to promote Brassica chinensis yield and nitrogen invertase activity mechanistic research[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(11): 1 768-1 779.

Effect of surfactants on lettuce growth and water and nitrogen transport in soil

SHI Jixiang, WANG Jinsong, LIU Qiuxia, WANG Yuan, JIAO Xiaoyan, WANG Lige*

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: 【Objective】 Surfactants are soil conditioners to improve soil water flow and reduce soil erosion. This paper investigates their impact on water-nitrogen transport in soil, as well as yield, quality and root growth of greenhouse lettuce. 【Method】 The experiment was conducted in laboratory using a calcareous cinnamon soil. The soil was amended by three surfactants: HydravanceTM200 (T1, moisturizing and synergistic surfactant mix), Methylglucosan polyether-20 (T2, moisturizing single surfactant), and IrrigAid (T3, moisture-regulating surfactant mix), separately. For each surfactant amendment, there were two nitrogen treatments: without fertilization (N0) and nitrogen fertilization (N1). Soil without amendment by any surfactant was taken as the control (CK). During the experiment, we measured the changes in soil water content and soluble nitrogen content, as well as the growth and yield of the lettuce. 【Result】 ① Compared to CK, T1, T2 and T3 enhanced the lateral movement of water in the soil, thereby leading to an even soil water distribution and a reduction in nitrate nitrogen content in the subsoil layer (20-30 cm). ② According to the pot experiment, the above-ground fresh mass and VC content of lettuce in the T1N1 treatment increased by 26.61% and 175.61%, respectively, in addition to the 2.10 times increase in nitrogen utilization efficiency ($P<0.05$). Compared to CKN1, T2N1 significantly increased VC content by 104.88%, while T3N1 significantly increased total root length and volume by 61.98% and 112.90% ($P<0.05$), respectively. In comparison with CKN0 treatment, the aboveground fresh mass, VC amount and nitrate amount of lettuce in T1N0 treatment were significantly reduced by 19.57%, 43.84% and 81.75%, respectively; T2N0 reduced VC content and nitrate content by 24.66% and 86.52% ($P<0.05$) respectively, and T3N0 reduced nitrate content by 68.50% ($P<0.05$) and increased total root length and volume by 51.64% and 87.18% ($P<0.05$) respectively. 【Conclusion】 All three surfactants increased lateral movement of water in the soil, thereby improved water and nitrogen distribution and their adsorption by lettuce roots. However, their efficiency in improving growth, yield, quality and nitrogen utilization of the lettuce depends on nitrogen fertilization.

Key words: surfactant; lettuce; water-nitrogen transport

责任编辑: 白芳芳