

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.036

赵宏飞, 王晓凌, 曹佳伟, 等. 异养氨氧化细菌对旱地玉米的产量和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 363-371.

ZHAO Hongfei, WANG Xiaoling, CAO Jiawei, et al. Effects of heterotrophic ammonia-oxidizing bacteria on yield and water use efficiency of dryland maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 363-371.

异养氨氧化细菌对旱地玉米的产量和水分利用效率的影响

赵宏飞, 王晓凌, 曹佳伟, 于浩, 周里桔, 田诗诗

(河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471000)

摘要: [目的] 为探究接种异养氨氧化细菌(HAOB)对旱地玉米产量和水分利用效率的影响。[方法] 在干旱易发地区进行为期 2 年的田间试验, 以 HAOB 菌株 S2_8_1 为试验菌株, 玉米为植物材料, 设置接种 HAOB 菌株不灌溉(DI)、不灌溉对照(DCK)、接种 HAOB 菌株灌溉(WI)、灌溉对照(WCK) 4 个处理。[结果] 旱地玉米接种 HAOB 菌株后根际土壤硝化速率和光合速率增强, 显著促进玉米生长及产量提高($p < 0.05$)。DI 和 WI 2 个处理各时期的地上生物量和收获期的产量均显著高于 DCK 和 WCK, 特别是在 DI 处理中。在降雨不足的 2022 年和降雨充裕的 2023 年, DI 的玉米产量均超过 DCK 和 WCK 2 个处理, 与 DCK 的玉米产量相比提高 24.98% 以上, 在 2023 年, DI 的产量甚至与 WI 相当, 超出 WCK 的产量 11.29% 以上。HAOB 菌株提高水分利用效率, DI 的水分利用效率相比 DCK 提高 4.84% 以上, WI 相比 WCK 提高 3.06% 以上。DI 和 WI 相比, 根际土壤硝化速率接近, 产量上也很接近, 但 DI 不需要灌溉且具有更高的水分利用效率。[结论] 将 HAOB 菌株应用到旱地农业中提高玉米产量是一个有效的方法, 为旱地农业发展提供新的技术路径和研究方向。

关键词: 异养氨氧化细菌; 玉米; 产量; 水分利用效率; 根际土壤硝化速率

中图分类号: S513; S154.39

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)06-0363-09

Effects of Heterotrophic Ammonia-oxidizing Bacteria on Yield and Water Use Efficiency of Dryland Maize

ZHAO Hongfei, WANG Xiaoling, CAO Jiawei, YU Hao, ZHOU Liju, TIAN Shishi

(College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of inoculating heterotrophic ammonia-oxidizing bacteria (HAOB) on yield and water use efficiency of dryland maize. [Methods] A two-year field experiment was conducted in a drought-prone area using HAOB strain S2_8_1 as the test strain and maize as the plant material. Four treatments were set up, inoculation with HAOB strain without irrigation (DI), non-irrigated control (DCK), inoculation with HAOB strain with irrigation (WI), and irrigated control (WCK). [Results] Inoculation with the HAOB strain enhanced the nitrification rate in the rhizosphere soil and the photosynthetic rate of dryland maize, significantly promoted maize growth and increased the yield ($p < 0.05$). The above-ground biomass at different stages and the yield at harvest in the DI and WI treatments were significantly higher than those in the DCK and WCK treatments, especially in the DI treatment. In both the drier 2022 and the wetter 2023, maize yields in the DI treatment exceeded those in the DCK and WCK treatments by at least 24.98%; in 2023, the yield of the DI treatment was comparable to that of the WI treatment, exceeding that of WCK by more than 11.29%. Additionally, inoculation of HAOB improved the water use efficiency of maize, with DI showing at least a 4.84% increase compared to DCK, and WI showing at least a 3.06% increase compared to WCK. The nitrification rates in the rhizosphere soil and the yields of DI and WI were similar, but DI did not require irrigation and had a higher water use efficiency. [Conclusion] The application of HAOB strains in

收稿日期: 2024-08-19

修回日期: 2024-10-18

录用日期: 2024-10-26

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-12-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(U1304326); 河南省自然科学基金项目(242300421242)

第一作者: 赵宏飞(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事氨氧化细菌作为菌肥的研究。E-mail: zhf23228@163.com

通信作者: 王晓凌(1975—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事植物生理和农业生态研究。E-mail: wangxl@haust.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

dryland agriculture is an effective method for improving maize yield, and it can provide a new technological pathway and research direction for the development of dryland agriculture.

Keywords: heterotrophic ammonia-oxidizing bacteria; maize; yield; water use efficiency; rhizosphere soil nitrification rate

Received: 2024-08-19

Revised: 2024-10-18

Accepted: 2024-10-26

Online(www.cnki.net): 2024-12-09

旱地农业是我国主要的农业生产方式之一。旱作农业是指在降水量偏少又缺乏灌溉条件下开展的农业生产活动,农作物生长需要的水分主要来自土壤水分和田间集蓄雨水^[1]。我国北方的大部分农业耕地是旱地,旱地耕地面积占全国耕地总面积的近一半,粮食产量占全国粮食产量的近四成^[2]。我国旱地地域广阔、资源丰富,是重要的农业生产基地,但农业生产力低并且不稳定。因此,深入研究旱地农业并推动其发展具有重要意义。

氮素在促进旱地作物生长和提高产量方面至关重要。作为植物必需的大量元素,氮素不仅是光合作用的重要营养因子,也是影响植物生长和产量的主要因素^[3]。有研究^[4-6]表明,硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)能够提高花生、紫花苜蓿、苜蓿菜等作物的产量。为提高旱地作物的产量,通常采用施肥、覆膜、土壤耕作和充气灌溉等方法^[7-10]。这些方式不仅增加作物对氮素的吸收,也是作物产量提高的重要原因之一。施肥改变硝化细菌的生长环境和相关酶的底物浓度;覆膜可以提高土壤温度和含水率,增强硝化细菌的活性;耕作改变土壤的理化性质,增加土壤养分含量,促进硝化细菌的活动;充气滴灌则能提高硝化细菌的丰度。这些方法通过硝化细菌增强土壤的硝化作用。硝化作用是土壤中重要的氮素转化过程之一,可以将铵态氮转化为硝态氮^[11-12],它产生的硝态氮是土壤氮素的重要来源。因此,硝化细菌通过硝化作用在旱地农业中起到重要作用。

氨氧化细菌(AOB)作为亚硝化细菌,参与并完成氨氧化作用,氨氧化作用(也称亚硝化作用)是硝化过程中必不可少的步骤,同时也是其限速反应^[13]。异养氨氧化细菌(HAOB)是AOB中的异养型,参与异养硝化,异养硝化是HAOB在有机物质作为原料的情况下,HAOB将 NH_4^+ 氧化成亚硝酸盐的过程^[14]。近年来,接种微生物作为一种可行技术,已被广泛应用于农业中^[15]。AOB是土壤硝化作用中的关键细菌,在农业生产中具有很大的应用潜力。然而,目前对AOB的研究主要集中在土壤中的分布、对土壤氮循环的影响等方面^[16-17],AOB在农业中应用的研究较少。因此,如果能够证明将HAOB接种到旱地作物中,在雨养条件下的大田中能增强土壤硝

化作用,从而提高作物产量和水分利用效率,对于旱地农业发展具有重要意义。

玉米是我国北方旱地主要种植的作物,因此本研究选择玉米作为试验材料。通过将从本地土壤中提取出来的HAOB菌株S2_8_1接种到种植玉米的土壤中,测量玉米生物量、叶片光合速率、根际土壤硝化速率和水分利用效率等指标,研究HAOB在旱地土壤中的效果,在仅依赖雨水的情况下对玉米产量和水分利用效率的影响。该研究旨在提高旱地玉米产量和水分利用效率,为旱地农业发展提供新的方向。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究选用1株HAOB菌株为测试菌株,命名为S2_8_1,该菌株属于根瘤菌科、剑菌属,保藏于中国典型培养物保藏中心(中国,武汉,武汉大学),其保藏编号为CCTCC No: M2021374。培养S2_8_1的培养基组成为: CH_3COONa 0.5 g、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g、 NaH_2PO_4 0.25 g、 $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g、 CaCO_3 5.0 g、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5 g、 KH_2PO_4 0.75 g、蒸馏水 1 L。接种S2_8_1菌株时,培养物的细菌浓度约为 2.1609×10^9 菌落形成单位/升(cfu/L)。试验在河南科技大学农业实验基地进行,基地位于中国河南省洛阳市会盟镇($34^\circ 83' \text{N}$, $112^\circ 43' \text{E}$)。该试验地点位于中国半湿润和干旱易发地区。该地区的局部气候为年平均气温 14.2°C ,每年无霜期为210天,每年日照时间2204h。年平均降水量600mm,60%的降雨时间发生在每年的6—9月。0—20cm土层土壤中有有机质13.2g/kg,全氮0.81g/kg,有效磷13.2mg/kg,速效钾125.4mg/kg,土壤pH为8.2。

1.2 试验设计

2022年和2023年的6月初播种(2022年6月7日和2023年6月10日),9月底收获(2022年9月27日和2023年9月30日)。试验材料选用的玉米品种是“郑单958”,该品种抗旱性强,适应性好,被广泛应用于农业生产。玉米田试验的前茬作物是冬小麦。冬小麦收获后,在播种前进行浅耕,并通过施肥机以 $850 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的施肥量均匀施用复合肥(N:P:K, 23:10:6)到试验田中,各处理施肥方式和施肥量相同。预试验结果表明,添加空白培养基不会对试验结

果产生明显影响,所得的数据结果与对照接近。正式试验包括4个处理组:(1)接种HAOB菌株不灌溉(DI);(2)不灌溉对照(DCK);(3)接种HAOB菌株灌溉(WI);(4)灌溉对照(WCK)。

每个处理组重复3次,共种植12个地块。每个地块占地100 m²,长20 m,宽5 m,地块随机排列。玉米行间距为60 cm,株间距为22.2 cm,种植密度为75 000株/hm²。发芽后大约7天,将含有S2_8_1菌株的100 mL培养物引入每株玉米的根部,接种于DI和WI的土壤中。DCK和WCK则分别接受100 mL的水。

由于2022年玉米生长期降雨较少,而2023年玉米生长期降雨量较多,所以对需要灌溉处理的地块,2022年灌溉2次(6月22日和8月20日),2023年灌溉1次(6月23日)。灌溉方式采用地表水滴灌,每次40 mm。其他田间管理程序,如除草、害虫防治和化学防治,在所有处理中均一致的。

试验各个阶段的具体日期:播种期(2022年6月7日,2023年6月10日),育苗期(2022年6月26日和2023年6月27日),开花期(2022年7月27日,2023年7月26日),灌浆期(2022年8月24日和2023年8月26日),收获期(2022年9月27日,2023年9月30日)。这些确定的生长日期适用于下文所述的所有后续测量和分析。

1.3 指标测定与数据分析

1.3.1 土壤湿度 在作物周期的各个阶段,包括播种期、育苗期、开花期、灌浆期和收获期,通过采集不同深度的土壤,并测量烘干前后的重量来评估土壤水分水平。这些评估以20 cm的深度间隔进行,直到160 cm。

1.3.2 生物量、光合速率、蒸腾速率和气孔导度 在育苗期、开花期、灌浆期和收获期4个阶段,从每个地块随机选取2株玉米,视为1个重复,每个处理共3个重复。使用LI-6400光合作用分析仪于上午10:30开始测量这些植株的光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)。之后,将植株砍断,保存地上部分,并挖出根部。根部从土壤中挖出来后风干数日,以除去水分。使用干净的刷子刷去根部所有的土壤颗粒并收集。这个过程重复5~10次,直到所有微小的土壤颗粒从根部剥离。这些根际土壤用于土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和土壤硝化速率的测量。

将植株地上部分(包括砍断植株后仍留在土壤中的地上部分)在105 °C下处理0.5 h,使其停止生物生长。随后,在75 °C下干燥72 h,以测定干质量,即地上部分总的干物质质量。

1.3.3 根际土壤硝化速率和土壤全氮含量 土壤中的 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量分别使用吡啶酚蓝法和苯酚二

磺酸比色法^[18]测定。将从玉米根部收集的根际土壤样品水分保持在60%田间持水量置于25 °C下培养7天,将培养前后根际土壤 NO_3^- 含量的差值除以7天,得到日均根际土壤净硝化速率。在玉米播种前和收获后,采集各处理0—20 cm土层样品,采用硫酸—催化剂消解—凯氏定氮法^[18]测定土壤全氮含量。

由于收获阶段叶片几乎干燥,严重影响了 P_n 、 T_r 、 G_s 和根际土壤硝化作用的测量数据的可靠性,因此这几个指标只有育苗、开花和灌浆3个阶段的数据。

1.3.4 产量和水分利用效率 在收获阶段,从每个地块随机选取40 m²采样地块(长10 m,宽4 m),并在其中随机选择20穗玉米,确定每穗粒数和千粒重。随后,将该地块收获的所有玉米穗进行脱粒和风干处理,同时除玉米穗外的其他地上部分如茎叶也进行风干处理。然后,测量风干谷物的重量。收获指数(HI)根据风干谷物的重量与所有收获的总重量的比值计算得出。

各处理玉米生育期的水分消耗量(WU)通过蒸散量确定,作物的耗水量计算方法为:

$$WU = RP + SW_p - SW_h \quad (1)$$

式中:RP为作物生育期降水量(mm); SW_p 为种植时储存的土壤水分量(mm); SW_h 为收获时土壤水分量(mm)。

水分利用效率(WUE)计算方法为:

$$WUE = \frac{Y}{WU} \quad (2)$$

式中:WUE为水分的利用效率[kg/(hm²·mm)];Y为粮食产量(kg/hm²);WU为玉米生育期耗水量(mm)。

1.3.5 数据分析 使用SPSS 22.0软件进行数据分析,并用Origin 2022软件绘图。图形和表格中的值均用平均值表示,并采用单因素方差分析和Duncan检验($\alpha = 0.05$)对试验各项指标进行分析。

2 结果与分析

2.1 玉米生长季节月降雨量和不同阶段土壤储水量

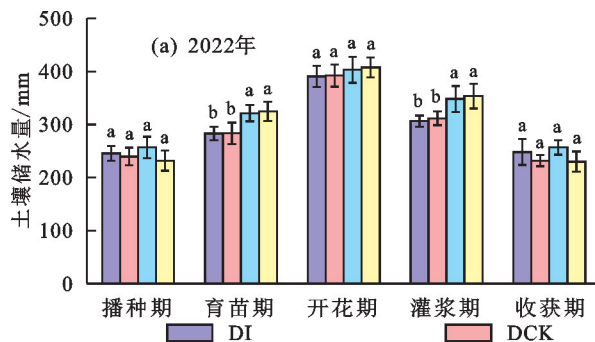
由图1可知,2022年降雨不足。在玉米生长季中,除7月降雨量高于往年平均降雨量外,其他月份均低于往年平均值,特别是9月,降雨量不足往年的20%。总降雨量比往年平均值低约24%。2023年则降雨充足,除6月降雨量略低于往年平均值外,其他月份均高于往年平均值,总降雨量比往年平均值高约29%。

降雨量、灌溉和玉米生长均导致土壤储水量的变化。由图2可知,由于在播种和收获阶段没有灌溉,且玉米未种植或已经成熟,基本只受降雨量影响,因此2022年和2023年这2个阶段的4个处理土壤储水量接近,无显著性差异。在灌溉到玉米成熟之前的

这段时期,由于灌溉的影响,2022 年的育苗期和灌浆期及 2023 年的育苗期,灌溉处理组(WI、WCK)的土壤储水量均显著高于未经灌溉处理组(DI、DCK)。由于 2023 年 7 月和 8 月降雨量充足,随着时间的推移,灌溉的影响逐渐减少,因此,2023 年玉米开花期和灌浆期的土壤储水量各处理间差异并不显著。同样,2022 年玉米开花期的土壤储水量因 7 月的高降雨量各处理组间无显著差异。由此可见,降雨量是影响土壤储水量的主要因素。

2.2 生物量、光合速率、蒸腾速率和气孔导度

由图 3 可知,随着玉米的生长,2022 年和 2023 年的玉米生物量整体呈上升趋势。在育苗期,无论是 2022 年还是 2023 年,由于玉米仍处于幼苗阶段,生物量差距不大,4 个处理的生物量非常接近,无显著差异。在开花、灌浆和收获阶段,2022 年和 2023 年 WI 处理的生物量最高,DCK 处理的生物量最低。相较于 2022 年,在降雨充足的 2023 年,各处理间的生物量差异减小,但仍存在显著差异。表明水分是影响



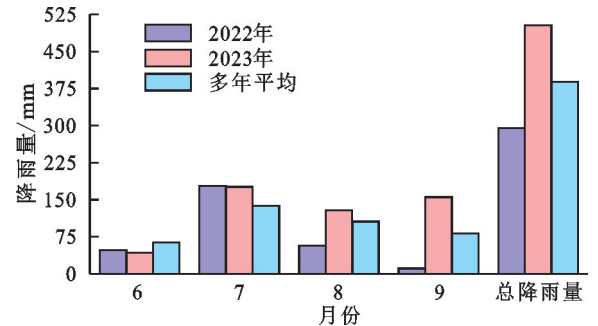
注:DI、DCK、WI 和 WCK 分别为接种 HAOB 菌株不灌溉、不灌溉对照、接种 HAOB 菌株灌溉和灌溉对照;同一时期图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 2 2 年间各处理各个时期 0—160 cm 土层土壤储水量

Fig. 2 Soil water storage in 0—160 cm soil layer in various periods and treatments during two years

由表 1 可知,在 2022 年和 2023 年,接菌处理(DI 和 WI)在育苗期、开花期和灌浆期净光合速率上相近,无显著差异。未接菌处理(DCK 和 WCK)在除 2022 年的育苗期外,各时期净光合速率接近,无显著差异,表明灌溉对玉米净光合速率的影响较小。在 2022 年和 2023 年,除 2023 年的开花期,接菌处理和 WCK 不存在显著差异外,接菌处理在各时期净光合速率上均显著高于未接菌处理,与未接菌处理相比,接菌处理的净光合速率在 2022 年 3 个时期分别提高 9.5%, 7.5% 和 12.7% 以上,在 2023 年分别提高 9.5%, 3.9% 和 9.9% 以上,表明 HAOB 菌株对提高玉米光合速率有显著促进效果。各处理在蒸腾速率和气孔导度的变化规律与净光合速率一致,接种 HAOB 的 DI 和 WI 处理在这 2 个指标上均优于未接菌的 DCK 和 WCK,蒸腾速率和气孔导度更高。

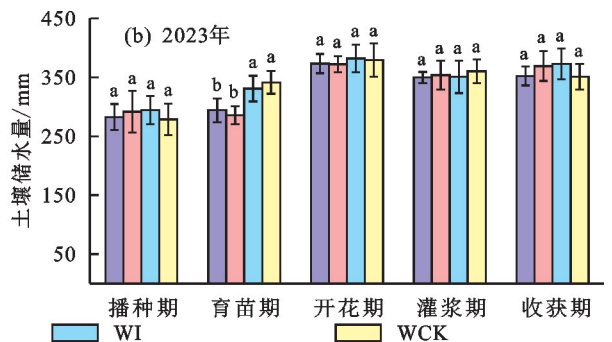
玉米生物量的重要因素。2022 年和 2023 年,DI 和 WI 处理在各阶段的生物量无显著差异。而在除育苗期的其他 3 个时期,DI 处理的生物量显著高于 DCK,除灌浆期和 2022 年的收获期,也显著高于 WCK,说明 HAOB 菌株对玉米生长有显著促进效果,能减轻水分不足对玉米生长的不利影响。



注:多年平均是多年的月平均降雨量;总降雨量是玉米生长季节的总降雨量。

图 1 玉米生长季节月降雨量

Fig. 1 Monthly rainfall during maize growing season



2.3 根际土壤硝化速率与土壤全氮含量

由表 2 可知,在 2022 年和 2023 年,接菌处理在育苗期、开花期和灌浆期的根际土壤硝化速率显著高于未接菌处理,与未接菌处理相比,接菌处理的根际土壤硝化速率在 2022 年 3 个时期分别至少提高 32.29%, 71.7% 和 56.25%,在 2023 年分别至少提高 30.92%, 42.05% 和 40.6%。说明 HAOB 菌株显著提高根际土壤的硝化速率。除 2023 年的育苗期外,2022 年和 2023 年的其他 2 个阶段,DI 的根际土壤硝化速率均高于 WI,并且在 2022 年的 3 个阶段中,DI 与 WI 的根际土壤硝化速率存在显著差异。而 DCK 和 WCK 之间的根际土壤硝化速率无显著差异,数值接近。说明 HAOB 能够在依赖雨水作为主要水分来源的环境中生存并发挥作用,无需额外灌溉。由表 2 可知,不同阶段和处理的根际土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的变化无明显规律,说明

接菌和灌溉处理对其影响较小或没有影响。在 2022 年和 2023 年,各处理在同一时期的全氮含量没有明显差异。播种前土壤全氮含量较高主要是由于播种前施肥;玉米收获后,灌溉处理(WI 和 WCK)的土壤全氮含量略低于未灌溉处理(DI 和 DCK),可能是因

为灌溉促进土壤有机氮的分解,释放更多的无机氮被玉米吸收利用。播种前和收获后,灌溉组内和未灌溉组内的土壤全氮没有差异,说明 HAOB 通过提高根际土壤硝化速率产生的硝态氮大部分被玉米吸收利用。

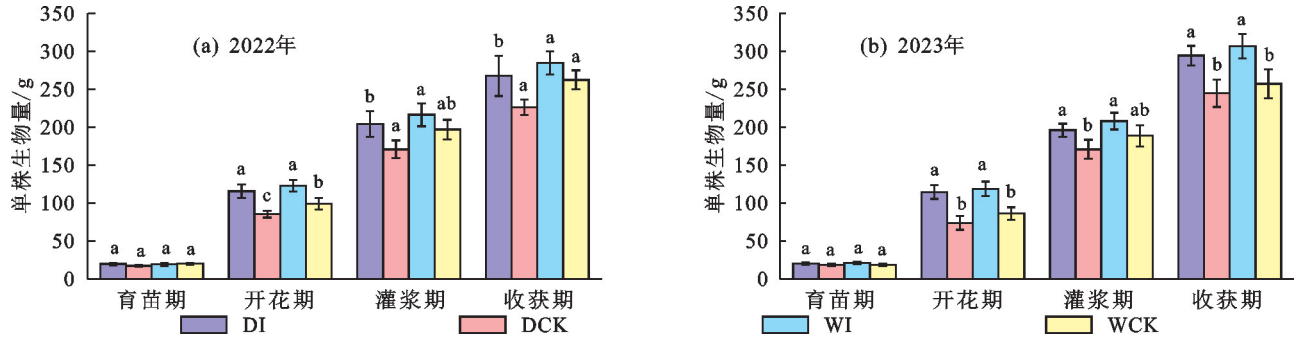


图 3 2 年间各处理各个时期的玉米地上生物量

Fig.3 Aboveground biomass of maize in various periods and treatments during two years

表 1 不同处理各时期的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度

Table 1 Net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance in various periods and treatments

年份	指标	生长时期	DI	DCK	WI	WCK	F-Value		
							灌溉	接菌	灌溉×接菌
2022	净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$)	育苗期	44.87±1.85a	37.15±1.36c	46.31±0.87a	40.97±2.62b	4.88	30.11	1.33
		开花期	51.78±1.16a	44.73±1.82b	52.34±2.79a	47.98±1.28b	2.01	17.99	1.54
		灌浆期	44.26±2.64a	39.06±1.38b	44.30±1.95a	39.26±2.41b	0.44	1 820.44 *	0.01
	蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$)	育苗期	8.72±0.36ab	7.52±0.44c	9.01±0.40a	8.16±0.40bc	7.06	34.31	0.57
		开花期	9.68±0.43ab	8.66±0.38c	9.86±0.25a	9.12±0.28bc	5.22	39.51	0.50
		灌浆期	8.76±0.35a	7.78±0.37b	8.91±0.33a	7.83±0.36b	4.00	424.36 *	0.06
	气孔导度/ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$)	育苗期	0.41±0.04a	0.24±0.03b	0.45±0.05a	0.31±0.02b	10.00	84.64	0.60
		开花期	0.54±0.04ab	0.43±0.03c	0.56±0.03a	0.49±0.04bc	4.00	20.25	1.07
		灌浆期	0.40±0.03a	0.29±0.02b	0.42±0.02a	0.30±0.05b	9.00	529.00 *	0.09
2023	净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$)	育苗期	46.22±1.45a	41.62±2.27b	47.70±0.99a	42.20±2.15b	5.24	125.94	0.19
		开花期	52.36±2.16ab	49.13±2.45b	53.95±1.41a	50.38±1.66b	69.77	400.00 *	0.02
		灌浆期	47.36±1.93a	41.8±1.56b	48.46±1.45a	43.08±1.37b	174.83 *	3 693.94 *	0.01
	蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$)	育苗期	8.95±0.33ab	8.27±0.36c	9.14±0.40a	8.36±0.24bc	7.84	213.16 *	0.07
		开花期	9.87±0.33ab	9.41±0.30b	10.11±0.22a	9.57±0.33ab	25.00	156.25	0.05
		灌浆期	9.11±0.39ab	8.25±0.29c	9.26±0.35a	8.49±0.35bc	18.78	328.01 *	0.05
	气孔导度/ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$)	育苗期	0.44±0.03a	0.37±0.01b	0.46±0.03a	0.37±0.03b	1.00	64.00	0.44
		开花期	0.55±0.03ab	0.48±0.02c	0.60±0.05a	0.52±0.02bc	81.00	225.00 *	0.07
		灌浆期	0.45±0.04a	0.34±0.03b	0.49±0.03a	0.37±0.03b	49.00	529.00 *	0.08

注:表中数据为平均值±标准差(n=3);同行不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$);*表示 $p < 0.05$ 。下同。

2.4 产量和水分利用效率

由表 3 可知,2023 年各处理的玉米产量均高于 2022 年,与 2023 年有更多的降雨有关,充足的水分促进玉米的生长和产量提高。同一年中,DCK 和 WCK 的比较也表明水分对玉米产量有很大影响。2022 年和 2023 年,接菌处理的玉米产量均高于未接菌处理,且 DI 的玉米产量高于同年 WCK 的产量,与 DCK 的产量相比,DI、WI、WCK 在 2022 年分别提高 30.76%,40.02%和 22.90%,在 2023 年分别提高 24.98%,26.34%和 12.30%。表明接种 HAOB 能够

提高玉米产量,并减轻水分不足对玉米产量的影响。由表 3 可知,无论是 2022 年还是 2023 年,接菌处理在穗粒数、千粒重和收获指数(HI)上均高于未接菌处理,与 DCK 的收获指数相比,DI、WI、WCK 在 2022 年分别提高 4.08%,4.34%和 2.31%,在 2023 年分别提高 4.21%,3.66%和 2.00%。其他 3 个处理与 DCK 相比收获指数提高比例远低于产量的提高比例,表明 HAOB 菌株不仅提高玉米产量,还促进玉米植株的整体生长。

表 2 不同处理各时期的土壤硝化速率、土壤铵态氮含量、土壤硝态氮含量和土壤全氮含量

Table 2 Soil nitrification rate, soil ammonium nitrogen content, soil nitrate nitrogen content and total soil nitrogen content in various periods and treatments

年份	指标	生长时期	DI	DCK	WI	WCK	F-Value		
							灌溉	接菌	灌溉×接菌
2022	硝化速率/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	育苗期	2.82±0.15a	1.82±0.12c	2.54±0.15b	1.92±0.14c	0.23	19.25	5.08
		开花期	3.08±0.25a	1.39±0.06c	2.73±0.21b	1.59±0.11c	0.07	26.35	7.36*
		灌浆期	2.23±0.18a	1.12±0.07c	1.75±0.12b	1.05±0.07c	1.81	19.88	9.05*
	NH_4^+ -N 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	育苗期	14.90±1.08a	14.41±1.14ab	12.71±0.88b	13.71±0.71ab	3.81	0.12	1.76
		开花期	14.14±0.93a	12.32±1.01a	13.43±0.76a	13.54±1.07a	0.07	0.79	3.09
		灌浆期	13.16±0.91b	15.85±0.77a	13.53±0.88b	14.28±0.87ab	0.38	3.14	3.85
	NO_3^- -N 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	育苗期	17.69±0.81ab	16.25±0.76b	18.97±1.20a	17.32±1.29ab	114.43	196.85*	0.03
		开花期	15.36±1.29a	15.33±1.17a	14.60±1.06a	15.74±0.95a	0.09	0.88	0.81
		灌浆期	20.29±1.19a	21.49±1.69a	18.69±1.23a	20.22±1.52a	73.96	66.91	0.04
	全氮含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	播种期前	0.91±0.05a	0.91±0.04a	0.91±0.03a	0.90±0.04a	1.00	1.00	0.02
		收获期后	0.83±0.03a	0.83±0.04a	0.80±0.03a	0.81±0.03a	25.00	1.00	0.07
	2023	硝化速率/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	育苗期	3.81±0.28a	2.83±0.21b	4.02±0.32a	2.91±0.18b	4.62	246.49*
开花期			2.99±0.22a	1.95±0.10b	2.77±0.25a	1.72±0.13b	729.00*	15 625.00**	0.01
灌浆期			3.03±0.23a	1.77±0.10b	2.77±0.18a	1.97±0.16b	0.02	19.70	5.22
NH_4^+ -N 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		育苗期	15.08±0.55a	13.53±0.99a	13.87±1.01a	15.28±1.21a	0.03	0.002	6.97*
		开花期	12.65±0.67ab	13.72±0.90a	11.48±0.70b	12.66±1.04ab	462.94*	474.12*	0.01
		灌浆期	13.21±0.73a	12.55±0.87ab	11.36±0.87b	13.25±1.01a	0.20	0.23	6.38*
NO_3^- -N 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		育苗期	16.38±1.37a	18.98±1.38a	18.01±1.25a	17.03±1.30a	0.01	0.21	5.44*
		开花期	12.72±0.67a	12.86±0.81a	12.31±0.67a	12.16±1.16a	13.39	0.001	0.10
		灌浆期	15.66±0.81b	17.58±1.16ab	15.64±0.89b	18.15±1.43a	0.89	57.67	0.21
全氮含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		播种期前	0.95±0.04a	0.96±0.03a	0.96±0.04a	0.95±0.05a	0	0	0.17
		收获期后	0.80±0.03a	0.81±0.03a	0.78±0.04a	0.78±0.04a	25.00	1.00	0.06

注：* 和 ** 分别表示 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 。

由表 3 可知,对比相同处理的耗水量和水分利用效率发现,2022 年到 2023 年同处理的耗水量增加,而水分利用效率降低。是因为 2023 降雨量更多,导致水分利用效率随耗水量的增加而降低。DI 与 DCK 及 WI 和 WCK 的水分利用效率对比,在 2022 年分别提高 8.69% 和 3.65%,在 2023 年分别提高 4.84% 和 3.06%。尽管耗水量接近,但接菌处理的水分利用效率更高,说明 HAOb 菌株能够提高玉米的水分利用效率。DI 和 WI 的水分利用效率相比,在 2022 年和 2023 年分别提高 5.31% 和 1.64%,说明 HAOb 在不灌溉条件下更能提高水分利用效率。

3 讨论

本研究中,HAOb 在旱地雨养条件下促进玉米的生长,提高产量和水分利用效率。在 2022 年和 2023 年,从开花期到收获期,DI 的地上生物量明显高于 DCK 和 WCK。在收获期,DI 的产量同样表现出色,与 DCK 相比,DI 的产量至少提高 24.98%,甚至高于灌溉处理的 WCK。尤其在降水充裕的 2023 年,DI 的产量比 WCK 高 11.29%,与 WI 产量接近。在水分利用方

面,DI 与 DCK 和 WCK 相比提高至少 4.70%。与 WI 相比,DI 有更低的用水量和更高的用水效率,且二者在产量上差距不大。表明 DI 更适合旱地农业,在不灌溉的情况下仍能保持高产。

HAOb 增强土壤的硝化作用。与未接菌处理相比,接菌处理根际土壤的硝化速率提高至少 30.92%。硝化速率的提高为玉米提供更多硝态氮,极大促进玉米的生长和产量。有研究^[19-21]表明,硝态氮能够提高玉米幼苗的生物量和根膜的稳定性,增加产量,减轻密度对玉米生长的影响。本研究中,HAOb 接种到玉米后,在玉米根系分泌物的影响下定殖在玉米根部,与玉米形成共生关系,通过增强硝化作用促进玉米的生长,与前人^[22]在盆栽试验中,接种 HAOb 促进旱后复水玉米的生长并提高水分利用效率的研究结果一致。然而,由于研究是在盆栽中进行,存在多种限制。盆栽土壤中的高营养水平会减弱玉米内部对营养物质的竞争。盆栽空间有限,限制玉米特别是根系的生长,也无法支撑玉米的整个生长期,因此无法测量到玉米整个生长期的数据。导致盆栽试验的结果不能完全反映接种 HA-

OB 对玉米的影响。本试验在大田自然条件下进行,玉米生长不受空间限制,并测量玉米 2022 年和 2023 年整个生长期

长期的数据,更能反映 HAOB 菌株对玉米的影响。结果还表明,接种 HAOB 能提高玉米的最终产量。

表 3 不同处理各时期玉米的产量和水分利用效率

Table 3 Maize yield and water use efficiency in various periods and treatments

年份	处理	穗粒数	千粒重/g	产量/ (kg·hm ⁻²)	收获 指数/%	耗水量/ mm	WUE/(kg·h ⁻¹ · m ⁻² ·mm ⁻¹)	降雨量占耗 水量比例/%
2022	DI	529.45±30.91a	244.12±12.92a	9 693.89±757.12ab	42.82±2.60a	291.30±12.7b	33.27±1.95a	100.92±4.51a
	DCK	493.92±47.12a	200.13±15.89b	7 413.55±450.95c	38.74±2.30a	301.61±9.94b	24.58±1.29c	97.42±3.27a
	WI	543.56±26.84a	253.40±15.42a	10 380.47±378.01a	43.08±2.03a	371.43±13.92a	27.96±0.97b	79.12±3.01b
	WCK	505.56±23.27a	240.30±16.65a	9 111.46±423.76b	41.05±2.69a	375.58±13.54a	24.31±1.92c	78.24±2.78b
	灌溉	108.15	2.56	5.56	1.58	625.76	1.23	244.57*
	接菌	881.28*	3.42	12.32	8.96	5.51	6.00	2.80
	灌溉×接菌	0.004	3.07	2.79	0.53	0.18	7.55*	0.43
2023	DI	541.43±41.76a	265.66±19.53a	10 855.54±499.00a	44.70±2.65a	413.37±15.49bc	26.29±1.75a	116.96±4.46ab
	DCK	498.52±47.56a	231.96±18.41b	8 686.15±316.31b	40.49±3.23a	405.36±17.67c	21.45±1.05b	119.31±5.32a
	WI	537.35±42.27a	272.28±14.41a	10 973.92±857.09a	44.15±1.92a	445.05±14.67ab	24.65±1.65a	108.60±3.65bc
	WCK	513.77±30.00a	252.51±15.36ab	9 754.17±523.56b	42.49±2.58a	451.79±23.75a	21.59±0.22b	107.11±5.81c
	灌溉	0.33	3.80	1.56	0.33	28.05	0.71	28.59
	接菌	11.83	14.74	12.74	5.31	0.01	19.73	0.05
	灌溉×接菌	0.17	0.50	1.99	0.70	0.49	1.37	0.47

接种 HAOB 是提高土壤水分利用效率的有效措施。本研究表明,在相同灌溉条件下,接菌处理显著提高水分利用效率,即使是接受灌溉的 WI 与未灌溉的 DCK,WI 较 DCK 在 2022 年提高 3.38%,在 2023 年提高 3.2%。已有研究^[23]表明,增加氮肥用量能够促进作物对水分的吸收和提高作物的水分利用效率。此外,氮素还能够影响植物根系的生长。植物根系是活跃的吸收和合成器官,其生长状况和活力直接影响地上部分的生长。已有研究^[24-25]表明,植物根系吸收硝态氮后,有利于根系侧根数目和长度的增加,而铵态氮则抑制根系的生长,但当 2 种氮素浓度过高时,均抑制植物根系的生长发育。接种 HAOB 增加玉米的根际土壤硝化速率,为玉米提供更多硝态氮,可能是 HAOB 提高玉米水分利用效率的原因之一。

光合作用是绿色植物合成有机物、维持生命的重要途径,增强光合速率对于提高作物生物量和产量至关重要。本研究中,与未接菌处理相比,接菌处理在 2022 年和 2023 年的育苗期、开花期和灌浆期均表现出更高的光合速率,这是接菌处理具有更高的生物量和产量的原因之一。接菌处理后光合速率的增加与 HAOB 增加玉米对硝态氮吸收有关。氮素能提高植物叶片中叶绿素含量及光合作用相关酶的浓度和活性,叶片氮含量的高低直接或间接地影响植株的光合速率^[26-27]。许楠等^[28]研究发现,在种植桑树中适量增加硝态氮用量可以提高叶片的光合能力;唐忠厚等^[29]研究表明,在铵态氮、硝态氮和酰胺态氮配施中,硝态氮促进菘蓝光合作用的效果更显著。

在旱地农业生产中,常在作物生长期多次追施氮肥以提高产量。传统氮肥肥效短,需要多次追肥,不仅增加劳动力消耗,还因长期和过量施肥导致土壤理化性质恶化^[30]。本研究中,HAOB 在玉米整个生长期都发挥作用。自接种 HAOB 后,接菌处理的根际土壤硝化速率和净光合速率均高于未接菌处理,使 DI 和 WI 的生物量、产量和水分利用效率均超过 DCK 和 WCK。与传统氮肥相比,HAOB 长期有效,只需在苗期一次性接种,节省劳动力。接种 HAOB 不仅能提供硝态氮,也不会对土壤理化性质造成破坏,还能提高作物的水分利用效率,节省水资源并减少劳动力消耗。因此,本研究不仅证明接种 HAOB 技术的可行性,还表明 HAOB 在旱地农业中具有很大潜力。未来可以考虑通过接种 HAOB 为作物提供硝态氮,部分替代氮肥,从而减少氮肥的使用。今后的研究将以施肥量为变量,探索 HAOB 与氮肥的最佳比例,以及其是否能有效减少氮肥施用量,降低氮肥对土壤的破坏,最大限度发挥 HAOB 在农业生产中的作用。

4 结论

(1) HAOB 菌株在旱地雨养条件下显著提高玉米产量。HAOB 显著增强土壤的硝化作用,产生的 NO₃⁻ 提高玉米的光合速率,促进其生长并增加产量。因此,与 DCK 和 WCK 相比,DI 在 2022 年和 2023 年从开花期到收获期的地上生物量和收获期的产量上均更高。

(2) HAOB 在提高玉米水分利用效率方面发挥重要作用。使得在降水不足的 2022 年,DI 的产量仍

高于 WCK,降低干旱缺水对产量的影响;在降水充裕的 2023 年,玉米产量能与 WI 持平。

在旱地雨养条件下,给玉米接种 HAOB 菌株是提高产量的有效方法。接种 HAOB 的玉米无需灌溉,仅依赖雨水即可保持高产。

参考文献:

- [1] 龚道枝,郝卫平,王庆锁,等.中国旱作节水农业科技进展与未来研发重点[J].农业展望,2015,11(5):52-56.
GONG D Z, HAO W P, WANG Q S, et al. Advances of dryland agriculture research in China and its outlook [J].Agricultural Outlook,2015,11(5):52-56.
- [2] 许竹青,刘冬梅,冯浩.旱地农业科技创新的进展、问题与启示[J].科技中国,2022,(12):31-34.
XU Z Q, LIU D M, FENG H. The progress, problems and enlightenment of technological innovation in dryland agriculture [J]. Science and Technology China, 2022, (12):31-34.
- [3] QIQIGE S, JIA L G, QIN Y L, et al. Effects of different nitrogen forms on potato growth and development [J].Journal of Plant Nutrition,2017,40(11):1651-1659.
- [4] 郑永美,冯昊,吴正锋,等.氮肥调控对土壤供氮特征及花生氮素吸收利用的影响[J].中国油料作物学报,2016,38(4):481-486.
ZHENG Y M, FENG H, WU Z F, et al. Effect of nitrogen fertilizer regulation on soil nitrogen supplying characteristics and utilization efficiency of nitrogen in peanut[J].Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2016,38(4):481-486.
- [5] 王子杰,朱玲,刘文涛,等.添加硝态氮、铵态氮对紫花苜蓿苗期饲用品质的影响[J].草学,2021(6):28-34.
WANG Z J, ZHU L, LIU W T, et al. Effects of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen additions on forage quality of alfalfa at seedling stage [J]. Journal of Grassland and Forage Science,2021(6):28-34.
- [6] 陈芳玲,王倡宪.铵态氮与硝态氮不同配比对苜蓿菜产量与品质的影响[J].中国农学通报,2024,40(10):29-34.
CHEN F L, WANG C X. Effects of different ratios of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen on yield and quality of sonchus arvensis[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2024,40(10):29-34.
- [7] LI C, WANG X S, GUO Z K, et al. Optimizing nitrogen fertilizer inputs and plant populations for greener wheat production with high yields and high efficiency in dryland areas [J].Field Crops Research,2022,276:e108374.
- [8] 王秀康,邢英英,李占斌.覆膜和施氮肥对玉米产量和根层土壤硝态氮分布和去向的影响[J].中国农业科学,2016,49(20):3944-3957.
WANG X K, XING Y Y, LI Z B. Effect of mulching and nitrogen fertilizer on maize yield, distribution and fate of nitrogen in root layer [J]. Scientia Agricultura Sinica,2016,49(20):3944-3957.
- [9] 龙潜,董士刚,朱长伟,等.不同耕作模式对小麦—玉米轮作下潮土养分和作物产量的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):167-174.
LONG Q, DONG S G, ZHU C W, et al. Effects of different tillage modes on soil nutrient and crop yield under wheat-maize rotation system in the fluvo-aquic soil[J].Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(4):167-174.
- [10] DU Y D, ZHANG Q, CUI B J, et al. Aerated irrigation improves tomato yield and nitrogen use efficiency while reducing nitrogen application rate[J].Agricultural Water Management,2020,235:e106152.
- [11] SHEN J P, ZHANG L M, DI H J, et al. A review of ammonia-oxidizing bacteria and *Archaea* in Chinese soils [J].Frontiers in Microbiology,2012,3:e296.
- [12] 张苗苗,王伯仁,李冬初,等.长期施加氮肥及氧化钙调节对酸性土壤硝化作用及氨氧化微生物的影响[J].生态学报,2015,35(19):6362-6370.
ZHANG M M, WANG B R, LI D C, et al. Effects of long-term N fertilizer application and liming on nitrification and ammonia oxidizers in acidic soils[J].Acta Ecologica Sinica,2015,35(19):6362-6370.
- [13] AI C, LIANG G Q, SUN J W, et al. Different roles of rhizosphere effect and long-term fertilization in the activity and community structure of ammonia oxidizers in a calcareous fluvo-aquic soil[J].Soil Biology and Biochemistry,2013,57:30-42.
- [14] MATSUNO T, HORII S, SATO T, et al. Analysis of nitrification in agricultural soil and improvement of nitrogen circulation with autotrophic ammonia-oxidizing bacteria [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2013,169(3):795-809.
- [15] 张敏硕,赵英男,杨威,等.微生物菌剂对张北冷凉坝上地区马铃薯产量、品质及活化土壤磷钾的效果[J].水土保持学报,2019,33(3):235-239.
ZHANG M S, ZHAO Y N, YANG W, et al. Effects of microbial inoculant on potato yield, quality and its activation of soil P and K in Zhangbei area [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(3):235-239.
- [16] ZHANG L X, GUAN Y T, JIANG S C. Investigations of soil autotrophic ammonia oxidizers in farmlands through genetics and big data analysis[J].Science of the Total Environment,2021,777:e146091.
- [17] ZHANG Q, CHEN M, LENG Y F, et al. Organic substitution stimulates ammonia oxidation-driven N₂O emissions by distinctively enriching keystone species of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in tropical arable soils[J].Science of the Total Environment,2023,872:e162183.
- [18] 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.
LU R K. Methods of soil agrochemical analysis[M].Beijing: China Agriculture Sciencetech Press,2000.
- [19] 薛艳芳,张慧,夏海勇,等.不同氮素形态供应对玉米幼苗生物量和氮素累积的影响[J].玉米科学,2016,24(6):

- 126-130.
XUE Y F, ZHANG H, XIA H Y, et al. Effect of different N forms on the dry weight and N accumulation of maize seedlings[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(6):126-130.
- [20] 李春春,高玉红,郭丽琢,等.氮素形态对比对玉米氮素积累及转运的影响[J]. *玉米科学*, 2018, 26(1):134-141.
LI C C, GAO Y H, GUO L Z, et al. Effects of different forms and ratios of nitrogen on nutrient accumulation and transfer of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(1):134-141.
- [21] WANG P, WANG Z K, SUN X C, et al. Interaction effect of nitrogen form and planting density on plant growth and nutrient uptake in maize seedlings[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(5):1120-1129.
- [22] WANG X L, SUN R H, WU D, et al. Increasing corn compensatory growth upon post-drought rewatering using ammonia-oxidising bacterial strain inoculation[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256:e107066.
- [23] 王子豪,尹光华,谷健,等.浅埋滴灌水钾氮互作对春玉米水分利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4):316-324.
WANG Z H, YIN G H, GU J, et al. Effects of water, nitrogen and potassium interaction on water use efficiency of spring maize under shallow-buried drip irrigation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4):316-324.
- [24] 乔云发,苗淑杰,韩晓增.氮素形态对大豆根系形态性状及释放 H⁺ 的影响[J]. *大豆科学*, 2006, 25(3):265-269.
QIAO Y F, MIAO S J, HAN X Z. Effects of nitrogen forms on the root morphology and proton extrusion in soybean[J]. *Soybean Science*, 2006, 25(3):265-269.
- [25] 刘爱忠,董合林,裴亮只,等.氮素形态对不同钾效率基因型棉花钾素吸收利用及根系形态的影响[J]. *新疆农业科学*, 2017, 54(6):998-1007.
LIU A Z, DONG H L, PEI L Z, et al. Effects of nitrogen forms for different cotton genotypes on the potassium absorption and utilization and root morphology[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, 54(6):998-1007.
- [26] HEBERLING J M, FRIDLEY J D. Invaders do not require high resource levels to maintain physiological advantages in a temperate deciduous forest[J]. *Ecology*, 2016, 97(4):874-884.
- [27] DINÇ E, CEPPI M G, TÓTH S Z, et al. The chl a fluorescence intensity is remarkably insensitive to changes in the chlorophyll content of the leaf as long as the chl a/b ratio remains unaffected[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2012, 1817(5):770-779.
- [28] 许楠,张会慧,朱文旭,等.氮素形态对饲料桑树幼苗生长和光合特性的影响[J]. *草业科学*, 2012, 29(10):1574-1580.
XU N, ZHANG H H, ZHU W X, et al. Effects of nitrogen form on seedling growth and its photosynthetic characteristics of forage mulberry [J]. *Pratacultural Science*, 2012, 29(10):1574-1580.
- [29] 唐忠厚,李洪民,张爱君,等.甘薯叶光合特性与块根主要性状对氮素供应形态的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6):1494-1501.
TANG Z H, LI H M, ZHANG A J, et al. Responses of nitrogen supply forms on leaf photosynthetic characteristics and root characters of sweetpotato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(6):1494-1501.
- [30] 李瑞.化肥减施对设施蔬菜土壤性质及关键污染因子的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
LI R. Effects of chemical fertilizer reduction on soil properties and key pollution factors of greenhouse vegetables [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
- (上接第 362 页)
- [22] YANG F, DU Q, SUI L, et al. One-step fabrication of artificial humic acid-functionalized colloid-like magnetic biochar for rapid heavy metal removal[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 328:e124825.
- [23] 曾凤美,孙思佳,孙恩惠,等. Fe/La 定向修饰凹凸棒土稻壳基颗粒成型生物炭:磷酸盐吸附行为与机制[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(7):279-289.
ZENG F M, SUN S J, SUN E H, et al. Fe/La directed modification of rice hull-based particles to form biochar: Phosphate adsorption behavior and mechanism[J]. *Journal of Environmental Science*, 2022, 42(7):279-289.
- [24] 赵维彬,王松,刘玲玲,等.生物炭改良盐碱地效果及其对植物生长的影响研究进展[J]. *土壤通报*, 2024, 55(2):551-561.
ZHAO W B, WANG S, LIU L L, et al. Effect of biochar amendment on saline-alkaline soil amelioration and plant growth: A literature review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(2):551-561.
- [25] 王岩,周鹏,白立伟,等.生物炭和 AM 真菌配施对连作辣椒生长和土壤养分的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(10):1600-1608.
WANG Y, ZHOU P, BAI L W, et al. Effects of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of continuous cropping pepper and soil nutrient status [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(10):1600-1608.
- [26] WU S L, FU W, RILLIG M C, et al. Soil organic matter dynamics mediated by arbuscular mycorrhizal fungi-an updated conceptual framework [J]. *The New Phytologist*, 2024, 242(4):1417-1425.