东北农业科学 2025,50(3):62-71
Journal of Northeast Agricultural Sciences DOI: 10.16423/j.cnki.1003-8701.2025.03.009

固氮鱼腥藻生长规律及其对苗期玉米生长和土壤养分的影响

李龙溪,林雪松,徐博玮,杨 娜,王 群,刘淑霞*
(吉林农业大学资源与环境学院,长春 130118)

摘 要:开发绿色高效的微生物肥料,缓解玉米生长对氮素的需求与施用氮肥带来的环境污染之间的矛盾,对促进作物生长和绿色农业发展具有重要意义。本研究以玉米品种雨禾9为试材,开展肥料单因素盆栽试验。结果表明,当50%藻肥替代尿素(T_3处理)时,玉米地上部干重较对照提高125%,与全量尿素处理无显著差异,可替代50%尿素实现等效供氮。鱼腥藻能增加土壤无机氮、全氮含量和氮素累积量,提高土壤pH,改善土壤结构并增加有机质含量,其中T_3处理碱解氮含量最高,T_2处理(全藻肥)土壤有机质含量提升至71.65 g/kg,较对照提高39.56%。藻肥还能显著提高土壤脲酶、过氧化氢酶和硝酸还原酶活性。因此,固氮鱼腥藻藻肥在促进玉米生长和改善土壤肥力方面潜力显著,可作为有效的微生物肥料。

关键词:固氮鱼腥藻;氮素;玉米;肥效;生物肥料
中图分类号:S142+.5 **文献标识码**:A **文章编号**:2096-5877(2025)03-0062-10

Growth Pattern of Nitrogen-fixing *Anabaena azotica* and Its Effect on Seedling Maize Growth and Soil Nutrients

LI Longxi, LIN Xuesong, XU Bowei,YANG Na, WANG Qun, LIU Shuxia*
(*College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun* 130118, China)

Abstract: Developing green and efficient microbial fertilizers is crucial for addressing the contradiction between nitrogen demand in maize growth and environmental pollution from nitrogen fertilizer application, thereby promoting crop growth and green agriculture. A single-factor pot experiment with fertilizer was carried out using Yuhe9 maize as the test material. The results showed that when 50% algal fertilizer replaced urea (T_3 treatment), the above-ground dry weight of maize increased by 125% compared with that of the control, which was not significantly different from that of the full urea treatment, and it could replace 50% urea to achieve equivalent nitrogen supply. *Anabaena azotica* can increase soil inorganic nitrogen, total nitrogen content and nitrogen accumulation, improve soil pH, improve soil structure and organic matter content, with the highest alkaline dissolved nitrogen content in T_3 treatment, and soil organic matter content in T_2 treatment (full algal fertilizer) was elevated to 71.65 g/kg, which was 39.56% higher than the control. Algal fertilizer also significantly increased soil urease, catalase and nitrate reductase activities. Therefore, nitrogen-fixing *Anabaena azotica* algal fertilizer has significant potential in promoting maize growth and improving soil fertility, and is an effective microbial fertilizer.

Key words: *Anabaena azotica*; Nitrogen; Maize; Fertility; Biological fertilizer

国家统计局关于2024年粮食产量数据的公告显示,玉米是占全国粮食总产量41.74%的战略作物,其产量稳定性直接关系国家粮食安全。在“藏粮于地、藏粮于技”战略指引下,我国玉米产量近十年增长4 515.26万吨,但传统高产模式过度依赖氮肥投入,当前玉米种植体系氮肥利用率偏低[1-3],过量施用导致土壤酸化、面源污染等问题频发[4]。在此背景下,开发具备固氮和促生功能的绿色高效微生物肥料,以解决玉米生长过程中对氮素的需求与施用氮肥带来的环境污染之间的矛盾,对促进作物生长具有重要意义。人们在

收稿日期:2025-04-22
基金项目:国家重点研发计划项目子课题(2023YFD2300403-2);吉林省大学生创新创业训练计划国家级项目(202310193061)
作者简介:李龙溪(2003-),男,在读本科,从事土壤改良与植物营养调控研究。
通信作者:刘淑霞,E-mail: liushuxia2005824@163.com

早期就发现某些藻类具有固氮的生物学特性,并开始自觉地去认识、利用固氮蓝藻为农业生产服务[5]。多项研究已证实,藻类生物肥料的施用能够减少化学肥料的用量,提高肥料利用率。如ATZORI等[6]发现两种大型藻类(*Chaetomorpha sp.*和*Cystoseira sp.*)处理的植物对氮和磷的吸收效率较高,具有在不使用合成肥料的情况下,作为作物生长基质的潜力。此外,藻类生物肥还能够提升土壤肥力,改善土壤结构。刘淑芳等[7]用蛋白核小球藻、四尾栅藻和卷曲鱼腥藻液体肥对盆栽黄瓜灌根发现,土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量及土壤脲酶和蔗糖酶活性均有不同程度的提高。孔德柱等[8]发现施用固氮鱼腥藻的土壤含氮量在90 d后可以提高4.16倍,维持在0.075%左右。张宁等[9]发现微藻处理后的椰枣幼苗叶长增加,叶片细胞的渗透调节能力增强。玉米施用生物肥料不仅能够减少化肥用量,提高氮、磷肥料利用率,还可增加玉米生物量、提高玉米产量[10-11]。但目前针对藻类生物肥与化肥配施对玉米苗期尤其是三叶一心期的研究尚不充分,这一阶段的长势对后期管理和产量具有决定性影响[12]。针对传统尿素等氮肥的局限性,本研究通过盆栽试验探讨了固氮鱼腥藻替代部分尿素对玉米生长发育、氮素吸收与利用及其对土壤养分和酶活性的影响,旨在评估蓝藻作为生物肥料的应用潜力,以期为优化玉米氮源和土壤养分管理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　供试藻种

鱼腥藻(*Anabaena* sp. FACHB-82)购于中国科学院淡水藻种库。

1.2　形态观察

采用灭菌的BG11培养基(pH 7.1),选择500 mL锥形瓶,每瓶装液量300 mL,在35 ℃恒温光照培养室中培养[13],光照强度:30 000 lx;光暗周期12 h/12 h,每天摇藻一次。培养7 d后,取一滴培养液,滴加至清洁载玻片上,盖上盖玻片,用显微镜观察。

1.3　生长曲线的测定

固氮鱼腥藻在培养过程中会分泌多糖而出现团聚和贴壁现象,所以D值和细胞计数法研究藻的生长状况并不适合,采用称重法进行鱼腥藻生长曲线的测定[8]。选取100个500 mL三角瓶,每瓶装300 mL BG11培养基,接种量为培养基总体积的10%。每3 d取样,将培养基倾倒在滤纸上抽滤分离藻细胞和培养基,滤纸连同藻细胞在70 ℃烘箱中干燥至恒重后,迅速放入自封袋防潮,冷却后称重,滤纸抽滤前后质量差即为鱼腥藻干重。

1.4　盆栽试验设计

2024年在吉林农业大学资源与环境学院科研基地温室内开展盆栽试验,供试玉米品种为雨禾9。供试土壤为黑钙土,土壤基本化学性质见表1。用桶深35 cm,直径30 cm的圆柱形塑料桶。每桶装土15 kg,供试土壤取自田间耕作层,桶底部铺一层鹅卵石和纱布作为过滤层,防止盆底滞水,塑料桶内部沿桶边缘插入一根PVC管用于灌水。2024年8月8日将肥料与土壤混匀后装桶,每桶播入经过挑选大小基本一致的饱满籽粒5粒,采用五点法进行播种,出苗后5 d,定苗1株,培养45 d,每个处理重复3次。桶体初始灌水使土壤含水率达最大田间持水率,采用重量法补充水分维持土壤含水率在田间最大持水率的70%[14]。

试验分为5个处理:所有肥料均作基肥1次性施用,氮磷钾肥分别选用尿素(N 46%),过磷酸钙(P_2O_5 12%)、氧化钾(K_2O 60%)。只改变氮肥和藻肥用量,所有处理磷钾肥分别施用12.53 g和2.08 g,藻肥处理用培养30 d成熟的固氮鱼腥藻藻液,藻液含藻量0.43 g/L,将藻离心浓缩至1 L(1LBG11含0.25 g纯氮)进行浇灌,具体如表2所示。

1.5　测定项目及方法

1.5.1　固氮鱼腥藻氮含量测定

将藻液置于台式低速离心机中去除藻体(4 000 r/min离心15 min),将鱼腥藻离心后用纯净水反复冲洗3遍。将鱼腥藻放到滤纸上烘干后粉碎,采用凯氏定氮法测定含氮量[15],并设置

表1　土壤基本理化性质

Table 1 The basic physical and chemical characteristics of soils

pH	有机质/g·k^{g-1} Organic matter	全氮/g·k^{g-1} Total N	全磷/g·k^{g-1} Total P	全钾/g·k^{g-1} Total K	有效磷/mg·k^{g-1} Available P	速效钾/mg·k^{g-1} Available K
8.82	18.20	1.32	0.49	18.30	13.20	104

表2 试验设计

Table 2 Experimental design

处理 Treatment	施肥量/g·盆$^{-1}$ Amount of fertilizer applied			
	氮肥用量(N) Nitrogen fertilizer use	磷肥用量(P_2O_5) Amount of phosphate fertilizer	钾肥用量(K_2O) Potassium fertilizer usage	藻肥用量 Algal fertilizer dosage
CK	0	12.53	2.08	0
T_1	3.54	12.53	2.08	0
T_2	0	12.53	2.08	26.40
T_3	1.77	12.53	2.08	12.90
T_4	1.77	12.53	2.08	3.03
T_5	1.77	12.53	2.08	1.40

空白对照。

1.5.2 指标测定

玉米生长至三叶一心期(苗期)时,分别收获植株的茎、叶、根部样品和根部土壤样品。将植株剪断,分别在105 ℃下杀青30 min,于80 ℃烘箱内烘干至恒重,即为干重,并计算根冠比;叶片的SPAD值使用SPAD-502叶绿素仪测定[16];茎粗使用游标卡尺测定;株高、叶长和叶宽使用直尺测定,计算得到叶面积[17];玉米茎叶氮含量、根部氮含量和玉米整株氮含量使用凯氏定氮法测定[15];整株氮累积量为整株干重与其含氮量之积[18]。

1.5.3 土壤理化性质

土壤pH使用pH计测定(水土比为2.5∶1)。有机质采用重铬酸钾氧化法-外加热法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;铵态氮测定采用靛酚蓝比色法;硝态氮用紫外可见分光光度计测定[15];土壤过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定[19];土壤脲酶采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定[20];土壤硝酸还原酶采用试剂盒测定。

1.6 数据处理

试验数据采用Excel 2016软件进行计算处理,采用SPSS 26.0进行95%水平上的数据差异显著性分析,用LSD法比较处理间在$P<0.05$水平上的差异显著性,利用Origin 2022绘制图。

2 结果与分析

2.1 固氮鱼腥藻的生长规律

图1是培养7 d后的固氮鱼腥藻的光学显微镜照片。从图片中可以观察到,鱼腥藻呈现出典型的细长丝状形态,这些丝状体是由多个细胞连接而成的链状结构。每个细胞具有圆柱形,两端平滑,细胞壁较薄,内部含有颗粒状的细胞质。其形成特殊的结构——异形胞(heterocysts),这些结构是固氮过程的核心,内含固氮酶,能够将大气中的氮气转化为植物可吸收的氨,对生态系统中氮循环起到关键作用[21]。固氮鱼腥藻的生长曲线如图2所示。固氮鱼腥藻生长速度较慢,需要30 d左右进入成熟期。该藻在生长过程中伴随大量胞外多糖(EPS)产生,并团聚在一起。EPS有助于细胞适应外部环境,具有保持水分、降低蒸发的作用[22]。肥效试验所用的蓝藻肥料是培养30 d的固氮鱼腥藻,此时该藻种活性和干重都比较高,藻肥的鱼腥藻含氮量为6.3%(干重),培养30d的鱼腥藻干重为0.129 g/300 mL。

图1 固氮鱼腥藻形态观察

Fig. 1 Morphological observation of *Anabaena azotica*

2.2 固氮鱼腥藻对苗期玉米植株生长的影响

2.2.1 对苗期玉米地上部生长的影响

由表3可知,与CK处理相比,所有处理组的叶长、叶宽和叶面积都有增加。其中,T_1处理组叶面积增长最为显著,比对照提高75.23%,表明尿素处理对促进玉米叶片生长具有显著效果。同时,T_3处理组也表现出显著的促进作用,叶面积提

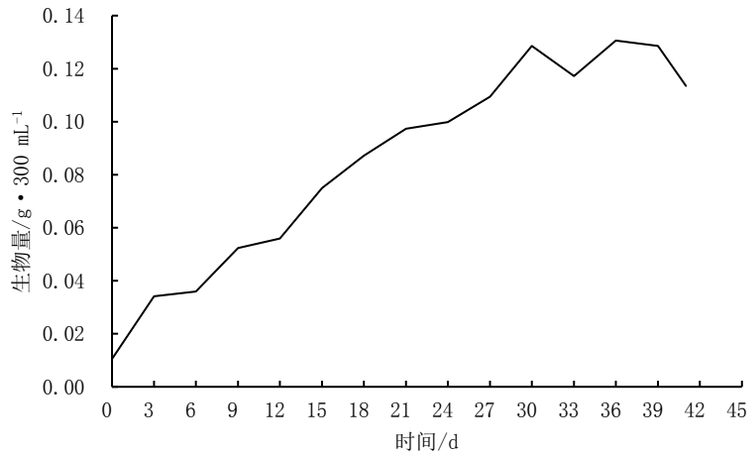


图2　固氮鱼腥藻的生长曲线

Fig. 2 Growth curves of *Anabaena azotica*

表3　不同处理对苗期玉米地上部生长的影响

Table 3 Effect of different treatments on above-ground growth of maize at the seedling stage

处理 Treatment	叶长/cm Leaf length	叶宽/cm Leaf width	叶面积/cm² Leaf area	茎粗/cm Stem diameter	株高/cm Plant height	SPAD
CK	32.57±2.5b	1.57±0.06c	51.11±5.60c	7.31±0.05d	58.27±5.14b	16.44±1.21b
T_1	40.10±0.85a	2.23±0.12ab	89.56±5.20a	11.25±0.19a	69.57±3.88a	31.33±3.06a
T_2	40.40±1.71a	1.97±0.21b	79.61±11.08ab	10.54±0.45bc	66.00±2.00a	28.93±2.38a
T_3	34.83±3.64b	2.37±0.15a	82.69±13.02ab	10.90±0.45abc	71.43±1.01a	31.31±2.63a
T_4	34.00±2.65b	2.17±0.15ab	73.43±3.11b	10.96±0.59ab	69.50±2.00a	31.03±2.60a
T_5	36.47±1.85ab	1.97±0.06b	71.65±1.48b	10.33±0.28c	66.37±5.19a	30.90±1.99a

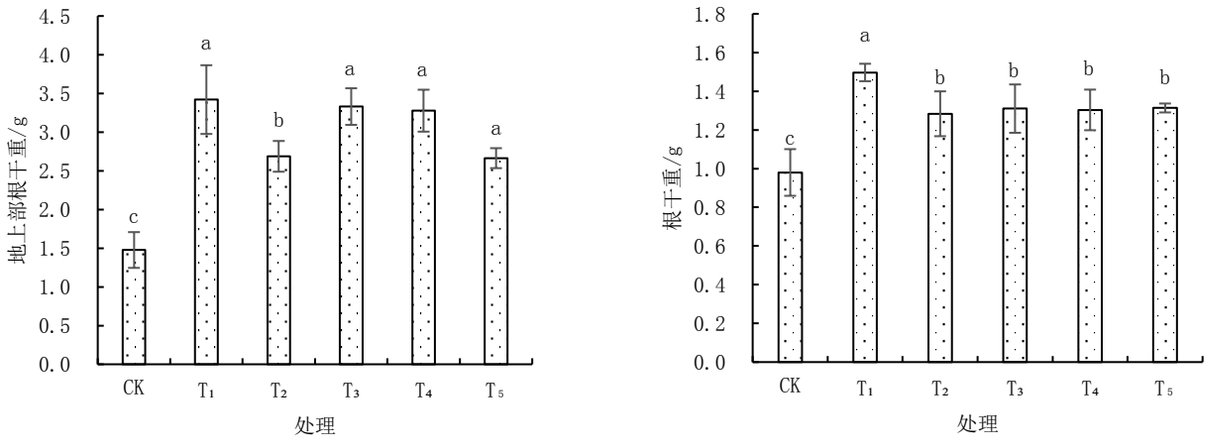
注:不同小写字母表示显著差异(P<0.05),没有字母或相同字母表示无显著差异(P>0.05),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference (P<0.05); no letter or same letters mean no significant difference (P>0.05), the same below.

高61.79%,与T_1处理组相比无显著性差异(P<0.05),说明藻肥在一定程度上可以替代尿素作为氮源。在茎粗和株高方面,T_1处理组同样展现出显著的促进效果,茎粗达到11.25 cm,株高为69.57 cm,这些指标均显著高于对照组。这可能与尿素处理促进植物细胞的分裂和伸长有关。T_3处理组在茎粗和株高方面的提升效果也较为显著,分别达到10.90 cm和71.43 cm,进一步证实了藻肥的潜在替代作用。SPAD值作为衡量植物叶绿素含量的重要指标,反映了植物的光合作用能力。试验结果显示,T_1和T_3处理组的SPAD值分别比对照提高90.57%和90.45%,差异显著。表明尿素和藻肥处理均能显著提高玉米的光合作用能力,从而促进其生长。

2.2.2　对苗期玉米干重的影响

不同处理苗期玉米植株地上部和根干重结果见图3。不同处理间玉米地上部和根系的干重表现不同,不同施肥处理苗期玉米植株地上部干重顺序依次为:T_1>T_3>T_4>T_5>T_2>CK,且随着施生物藻肥量的增加,玉米植株干重持续增加,所有施用藻肥的处理中,施用50%藻肥处理(T_3)的玉米地上部干重最高,达到3.33 g,但与T_1、T_4无显著性差异;不同施肥处理根干重变化趋势中,所有施藻肥处理玉米根干重显著高于CK处理。由图4可知,不同施氮处理苗期玉米植株根冠比依次为:CK>T_5>T_2>T_1>T_4>T_3,相比于CK,施用藻肥和尿素使苗期玉米根冠比降低,这可能是由于在氮素供应不足的情况下,玉米通过调节其根系的生长来更有效地寻找和吸收氮肥。因此,藻肥可以作为尿素的部分替代品,满足玉米在干重积累过程中对氮素的正常需求。



注：不同小写字母不同表示差异显著（$P<0.05$），下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$), the same below.

图3 不同处理下苗期玉米干物质的积累

Fig. 3 Dry matter accumulation of maize at the seedling stage under different treatments

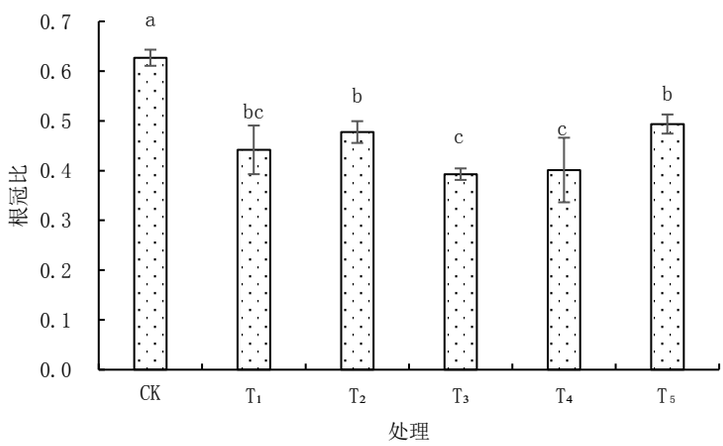


图4 不同处理下苗期玉米的根冠比

Fig. 4 Root-shoot ratio of maize at seedling stage under different treatments

2.3 固氮鱼腥藻对苗期玉米植株氮素积累量的影响

表4为不同处理对植株地上部和地下部全氮含量的影响。在所有处理中，CK处理的地上部全氮含量最低，为1.62%，T_1处理的含量最高，达到2.72%，但与T_2、T_3和T_4处理无显著性差异，表明施用藻肥和化肥都有助于提高植株地上部的氮含量。T_3处理的植株地下部全氮含量最高，达到

表4 不同处理下苗期玉米植株的氮含量和氮素利用效率

Table 4 Nitrogen content and nitrogen use efficiency of seedling maize plants under different treatments

处理 Treatment	氮含量/% Nitrogen content		整株氮累积量/g Whole plant nitrogen accumulation
	地上部Stem	地下部Root	
CK	1.62±0.21c	1.29±0.11d	3.58±0.22d
T_1	2.72±0.33a	2.18±0.21a	12.41±0.78a
T_2	2.41±0.24ab	1.74±0.15c	8.69±0.90c
T_3	2.70±0.20a	2.20±0.12a	11.78±1.48ab
T_4	2.43±0.34ab	2.08±0.09ab	10.61±0.44b
T_5	2.23±0.27b	1.84±0.04bc	8.38±0.91c

2.20%,显著高于CK处理,提高70.54%,表明T_3处理促进了玉米根部对氮的吸收和积累。CK的根部全氮含量最低,为1.29%。T_2处理的根部全氮含量也相对较低,为1.74%,表明仅施用藻肥对玉米根部氮吸收的促进作用有限。同时,在一定范围内施用氮肥和藻肥均可以提高整株氮累积量,T_1处理最高,显著高于CK处理,提高246.65%,但与T_3处理无显著性差异。

2.4　固氮鱼腥藻对苗期玉米土壤肥力的影响

2.4.1　对苗期玉米土壤pH、全氮、碱解氮和有机质含量的影响

由表5可知,各处理的土壤pH以T_2处理最高,且显著高于对照组CK和其他处理,提高0.024 1个单位,T_1处理的pH值最低,显著低于CK和其他处理,T_3和T_4处理的pH值相近,均显著低于T_2处理,但与CK处理无显著差异,使用藻肥处理的土壤pH均有提高,pH从高到低的顺序为T_2>T_3>T_4>T_5>CK>T_1,这表明藻肥有助于缓解土壤酸化。

表5　不同处理下土壤pH、全氮、碱解氮和有机质含量

Table 5 Soil pH, total nitrogen, alkaline dissolved nitrogen and organic matter content under different treatments

处理 Treatment	pH	全氮/g·kg^{-1} Total nitrogen	碱解氮/mg·kg^{-1} Alkaline nitrogen decomposition	有机质/g·kg^{-1} Organic matter
CK	7.88±0.06c	0.90±0.020d	31.10±0.65c	51.34±1.55e
T_1	7.78±0.03d	1.02±0.01bc	33.54±0.21b	54.36±0.22d
T_2	8.07±0.03a	1.02±0.02bc	34.42±0.69b	71.65±2.05a
T_3	7.95±0.02b	1.06±0.03ab	38.62±0.92a	69.95±1.02a
T_4	7.93±0.02bc	1.10±0.08a	33.23±0.99b	66.20±0.90b
T_5	7.89±0.05c	0.98±0.04c	31.32±0.60c	62.08±0.99c

与CK处理相比,土壤全氮在不同施肥处理下均有显著提升,T_1、T_2、T_3、T_4、T_5处理全氮含量分别比对照显著提高13.33%、13.33%、17.78%、22.22%、8.89%;不同施肥处理之间比较,T_4处理全氮含量与T_3处理无显著差异,但显著高于T_1、T_2和T_5处理,全氮含量从高到低的顺序为T_4>T_3>T_2=T_1>T_5>CK。

所有施肥处理的碱解氮含量均高于CK处理,其中T_5处理略高于CK处理,T_1、T_2、T_3、T_4处理碱解氮含量分别比对照显著提高7.85%、10.68%、24.18%、6.85%;不同施肥处理组之间比较,T_3处理碱解氮含量最高,与其他处理均差异显著。T_1、T_2与T_4的碱解氮含量差异不显著,但与其他处理存在显著差异,从高到低的顺序为T_3>T_2>T_1>T_4>T_5>CK。

与CK处理相比,不同施肥处理下均显著提升了有机质含量。不同施肥处理之间比较,T_2处理的有机质含量最高,为71.65 g/kg,比对照提高39.56%,显著高于T_1、T_4、T_5。T_3处理与T_2处理无显著性差异,但显著高于其他处理,有机质含量从高到低的顺序为T_2>T_3>T_4>T_5>T_1>CK,使用藻肥处理的土壤有机质含量均显著高于T_1处理和CK处理,这表明施用藻肥可以显著提高土壤有机质。

2.4.2　固氮藻肥对玉米苗期土壤无机氮含量的影响

由表6可知,所有施肥处理的土壤铵态氮(NH_4^+-N)含量显著高于CK,T_2处理最高,达到12.05 mg/kg,增幅为1.94%。不同施肥处理之间,T_3、T_4和T_5处理的NH4$^+$-N含量均高于T_1,分别增加9.01%、6.82%、6.05%,均无显著性差异,说明施用藻肥与化肥在提高土壤铵态氮含量方面功效相近。从各试验处理土壤硝态氮(NO_3^--N)含量可知,T_1处理的土壤NO_3^--N含量达到70.09 mg/kg,显著高于其他处理;T_3、T_4和T_5处理的含量分别达到43.07、30.49、34.08 mg/kg,高于CK和T_2处理。说明施用化肥能有效提升土壤中的NO_3^--N水平,利于作物在生长过程中氮素的积累。土壤无机氮(Nmin)为土壤NH4$^+$-N与NO_3^--N之和。不同施肥处理土壤矿化的Nmin含量变化特点与土壤NO_3^--N含量的变化基本相似,这主要是受土壤NO_3^--N含量较高的影响所致。

2.5　固氮鱼腥藻对苗期玉米土壤酶活性的影响

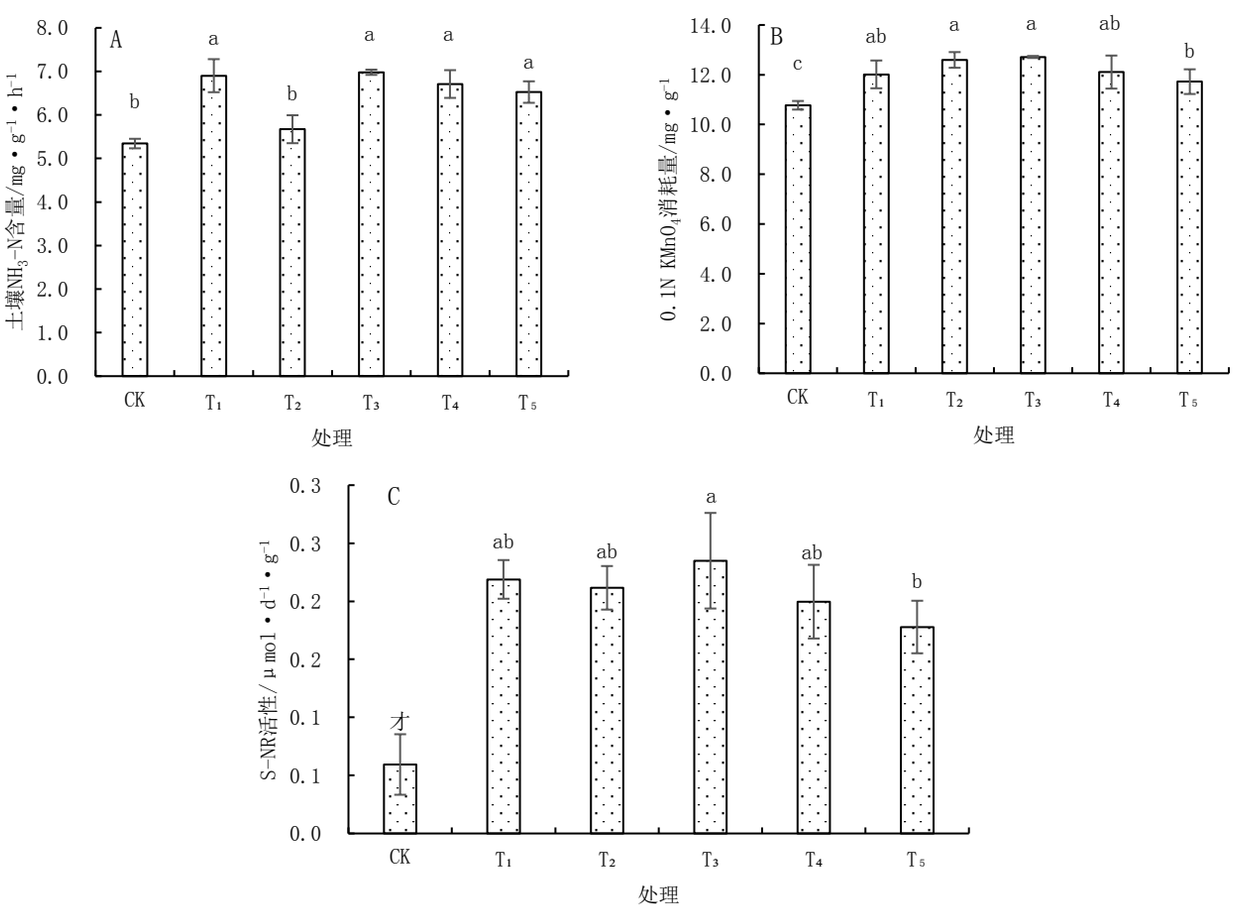
不同处理玉米苗期土壤脲酶活性的变化趋势为T_3>T_1>T_4>T_5>T_2>CK(图5A),其中T_1、T_3、T_4、T_5处理与CK相比分别显著提高29.21%、30.71%、25.66%、22.28%,但T_2与CK处理相差不大,表明独施用藻肥(T_2处理)对提升土壤脲酶活性的作用

表6 不同处理下土壤铵态氮、硝态氮和无机氮含量

Table 6 Soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and inorganic nitrogen contents under different treatments

处理 Treatment	铵态氮/mg·kg^{-1} Ammonium nitrogen	硝态氮/mg·kg^{-1} Nitrate nitrogen	无机氮 Inorganic nitrogen
CK	4.10±0.39c	14.87±3.66d	18.97±3.46d
T_1	7.77±0.58b	70.09±17.82a	77.85±18.40a
T_2	12.05±1.74a	19.97±3.45cd	32.02±2.00cd
T_3	8.47±0.97b	43.07±4.42b	51.54±5.13b
T_4	8.30±0.94b	30.49±8.05bcd	38.79±8.59bc
T_5	8.24±0.20b	34.08±3.75bc	42.32±3.80bc

有限，而单独施用尿素和藻肥与尿素配施均能够不同程度提升土壤脲酶活性。在玉米苗期，所有施肥处理土壤过氧化氢酶活性均显著提高（图5B）。不同处理土壤过氧化氢酶活性表现为T_3>T_2>T_4>T_1>T_5>CK，与CK处理相比，T_1、T_2、T_3、T_4、T_5处理土壤过氧化氢酶活性分别比对照显著提高11.51%、16.90%、18.01%、12.44%、8.82%。其中T_2和T_3处理显著高于T_5处理，增幅为7.42%~8.45%，说明使用藻肥对土壤过氧化氢酶活性提升效果在一定程度上受其施用量的影响。不同处理较CK土壤硝酸还原酶活性均有所增加（图5C），其表现趋势为T_3>T_1>T_2>T_4>T_5>CK，其中T_3处理显著高于T_5处理，提高27.78%，但与T_1、T_2、T_4处理无显著性差异。这说明藻肥有利于提升土壤硝酸还原酶活性。



注：土壤脲酶、过氧化氢酶、硝酸还原酶活性分别用土壤NH_3-N含量、0.1N $KMnO_4$消耗量、S-NR活性表示。

Note: Soil urease, catalase, and nitrate reductase activities are expressed as soil NH_3-N content, 0.1N $KMnO_4$ consumption, and S-NR activity, respectively.

图5 不同处理土壤脲酶、过氧化氢酶和硝酸还原酶活性

Fig. 5 Soil urease, catalase and nitrate reductase activities under different treatments

3　讨　论

3.1　鱼腥藻和尿素配施提高苗期玉米植株干重和氮素积累量

氮素不仅是植物生长发育的必需营养元素,而且需求量在各类矿质营养元素中居首位[23]。氮素对作物的生长、产量形成、抗逆性、资源利用效率及生态环境等方面的影响已被广泛报道[24-26]。固氮鱼腥藻可通过异形胞进行固氮作用,从而为作物提供氮素。本研究发现:使用鱼腥藻可明显提高玉米幼苗干重,所有使用藻肥处理中,T_3处理的干重提升最多,并与T_1处理无显著性差异,说明藻肥可以代替部分尿素来促进植物生长,这与孔德柱等[8]研究结果一致。张馨月等[27]研究发现不施氮处理的根冠比显著高于施氮处理,在本研究中,T_3处理的植株根冠比最低,而CK的根冠比最高,这可能与在氮素较少的情况下,植物寻找氮源的补偿效应有关[28]。本研究结果表明,施用鱼腥藻能够显著提升玉米植株根部、茎部和叶片的全氮含量,以及整体的氮素累积量。尤其在与50%尿素配合施用的情况下,玉米植株的氮素累积量实现134.08%~229.05%的增长,其中T_3处理效果最显著。这一结果接近于全量尿素施用的处理(T_1),表明鱼腥藻能够在一定程度上替代尿素,有效固定氮素并促进植物吸收。这一结果与RENUKA等[29]的研究相似,他们发现施用含微藻的配方肥料能显著提高小麦的根、芽和谷粒中的氮、磷、钾含量。

3.2　鱼腥藻和尿素配施提高土壤养分

土壤对作物生长至关重要,为作物的生长提供必需的N、P、K等矿物质营养元素。本研究发现,与CK处理相比,T_2处理的全氮、碱解氮、有机质分别增加了19.90%、10.68%、39.56%,其原因可能是藻肥施入土壤后,在土壤表面形成生物结皮,能够促进土壤团粒结构的形成,进一步改善土壤结构、提高土壤有机质含量[30]。同时,本试验中T_2处理的铵态氮含量最高,这进一步说明鱼腥藻作为一种固氮蓝藻,具有独特的生物固氮能力,能够在其生长过程中将大气中的氮气转化为植物可利用的铵态氮,从而增加土壤中的氮素含量,提高土壤肥力,这与刘淑芳等[7]研究结果相似。本研究还发现微生物肥料与化肥配施能小幅提高土壤pH,同CK相比,T_2处理的土壤pH值提高0.024 1个单位,这可能与鱼腥藻生长过程中产生的碱性代谢产物有关,有效提升土壤的pH值,从而有效缓解土壤酸化的问题[31]。因此,综合比较土壤养分指标变化发现,施用50%尿素+50%藻肥能更有效地提高土壤肥力,缓解土壤酸化及有效解决长期施用尿素造成的土壤pH偏低问题。NOSHEEN等[32]通过探究不同微生物肥料作用机制发现:微生物肥料与化肥配施比单一添加化肥更能显著改善土壤理化性状,这与本研究结果相符。

3.3　鱼腥藻和尿素配施提高土壤酶活性

已有研究表明,使用微生物肥料可提高土壤酶活性,促进植物生长[33]。本研究中,藻肥替代化肥等氮量施入,对土壤脲酶、过氧化氢酶、硝酸还原酶活性的提升均表现出一定的促进作用。等氮施肥条件下,土壤脲酶活性表现为:T_3>T_1>T_4>T_5>T_2>CK处理,T_2处理的土壤脲酶活性低于其他施肥处理,这是因为其他处理施用藻肥的同时施用了尿素,为脲酶提供反应底物,从而提高土壤中脲酶活性。土壤过氧化氢酶活性表现为:T_3>T_2>T_4>T_1>T_5>CK处理,其中T_2处理较T_1处理明显提高,这是因为过氧化氢酶主要存在于微生物体内和微生物分泌物中,施用藻肥增加了土壤有机质含量,提高了微生物活性和数量,进而提升了土壤过氧化氢酶活性[34]。土壤硝酸还原酶活性表现为:T_3>T_1>T_2>T_4>T_5>CK处理,本研究中藻肥部分替代化肥处理提高了土壤中硝酸还原酶的活性。宋玉珍[35]的研究结果与本试验一致,施用微生物肥料利于提高土壤硝酸还原酶活性,高纪超等[36]的研究也证实了这一点。土壤脲酶、过氧化氢酶、硝酸还原酶活性均表现为T_3处理最高,这说明鱼腥藻可协助尿素对土壤酶活性的提高起到一定的促进作用。鱼腥藻肥料具有固氮功能的同时,作为一种有机肥料,含有丰富的有机质和营养元素,这些成分可以促进土壤的微生物活动,进而提高土壤的相关酶活性[37]。

4　结　论

固氮鱼腥藻肥料在促进玉米幼苗生长和土壤养分改善方面具有显著作用。通过T_3处理,即鱼腥藻与尿素配施,不仅实现了氮素的有效替代,还显著提升了土壤的生物化学性质和关键土壤酶活性,证明其在促进土壤微生物代谢和维持生态系统平衡方面的重要性。因此,鱼腥藻肥料作为一种具有生态友好和可持续性的微生物肥料,有望在农业生产中发挥重要作用,为作物生长和土壤健康提供新的解决方案。

参考文献：

[1] 刘艳香，姜春玲，张晓英.我国氮肥的施用现状及对策[J].农业开发与装备，2021(10)：101-102.
LIU Y X, JIANG C L, ZHANG X Y. Present situation and countermeasures of nitrogen fertilizer application in China[J]. Agricultural Development and Equipment, 2021(10): 101-102. (in Chinese)

[2] 巨晓棠，谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报，2014，20(4)：783-795.
JU X T, GU B J.Present situation, problems and trends of nitrogen fertilizer application in farmland in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(4): 783-795. (in Chinese)

[3] 李岚涛，任丽，尹焕丽，等.施氮模式对玉-麦周年轮作系统产量和氮吸收利用的影响[J].中国生态农业学报，2019，27(11)：1682-1694.
LI L T, REN L, YIN H L, et al. The influence of nitrogen application patterns on the yield and nitrogen uptake and utilization of the maize-wheat rotation system[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2019, 27(11): 1682-1694. (in Chinese)

[4] 孙志梅，武志杰，陈利军，等.农业生产中的氮肥施用现状及其环境效应研究进展[J].土壤通报，2006，37(4)：782-786.
SUN Z M, WU Z J, CHEN L J, et al. Present situation of nitrogen fertilizer application in agricultural production and its environmental effect research progress[J]. Soil Bulletin, 2006, 37(4): 782-786. (in Chinese)

[5] 常锋毅，潘晓洁，沈银武，等.藻类在农业生产中的资源化利用[J].华中农业大学学报，2014，33(2)：139-144.
CHANG F Y, PAN X J, SHEN Y W, et al. Resource utilization of algae in agricultural production[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(2): 139-144. (in Chinese)

[6] ATZORI G, NISSIM W G, RODOLFI L, et al. Algae and Bioguano as promising source of organic fertilizers[J]. Journal of Applied Phycology, 2020, 32(6): 3971-3981.

[7] 刘淑芳，吕俊平，冯佳，等.施用微藻对黄瓜生长及土壤质量的影响[J].山西农业科学，2016，44(9)：1312-1315，1319.
LIU S F, LYU J P, FENG J, et al. Effects of applying microalgae on cucumber growth and soil quality[J]. Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(9): 1312-1315, 1319. (in Chinese)

[8] 孔德柱，张树峰，周玉生，等.固氮鱼腥藻在小麦和西红柿上的肥效[J].江苏农业科学，2016，44(10)：499-502.
KONG D Z, ZHANG S F, ZHOU Y S, et al. Fertilizer efficiency of nitrogen-fixing ANABAENA on wheat and tomato[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(10): 499-502. (in Chinese)

[9] 张宁，吴丰漫，张婷芊，等.不同种类的微藻肥对椰枣幼苗生长的影响[J].热带作物学报，2024，45(12)：2563-2573.
ZHANG N, WU F M, ZHANG T Q, et al. Effects of different microalgae fertilizers on the growth of date palm seedlings[J]. Tropical Crop Journal, 2024, 45(12): 2563-2573. (in Chinese)

[10] 张文丽，万雨欣，徐伟慧，等.促生菌种组合提高玉米根际土壤有益微生物基因丰度及促生效应研究[J].植物营养与肥料学报，2024，30(2)：394-405.
ZHANG W L, WAN Y X, XU W H, et al. Study on the combination of growth-promoting strains to improve the gene abundance of beneficial microorganisms in maize rhizosphere soil and its growth-promoting effect[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(2): 394-405. (in Chinese)

[11] 曹晓冬.生物肥料在玉米田应用效果初探[J].农家参谋，2019(2)：38.
CAO X D. Preliminary study on the application effect of biological fertilizer in corn field[J]. Farm Expert, 2019(2): 38. (in Chinese)

[12] 赵霞，杨豫龙，王浩然，等.玉米苗期氮、磷、钾养分吸收利用效率研究[J].玉米科学，2019，27(4)：154-161，166.
ZHAO X, YANG Y L, WANG H R, et al. Study on absorption and utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium in maize seedling stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(4): 154-161, 166. (in Chinese)

[13] 肖湘玥，韩雯睿，于晓涵，等.鱼腥藻响应温度胁迫的形态及生理策略[J].河南师范大学学报(自然科学版)，2024，52(1)：135-143.
XIAO X Y, HAN W R, YU X H, et al. Morphological and physiological strategies of *Anabaena* in response to temperature stress [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2024, 52(1): 135-143. (in Chinese)

[14] 梁硕硕，房琴，闫宗正，等.水分调控降低盐分对夏玉米的影响[J].中国生态农业学报，2018，26(9)：1388-1397.
LIANG S S, FANG Q, YAN Z Z, et al. Effect of water regulation and reducing salt on summer maize[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2018, 26(9): 1388-1397. (in Chinese)

[15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京：中国农业出版社，2010：30-165.
BAO S D .Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2010: 30-165. (in Chinese)

[16] 张灵鑫，李秉昌，张敏，等.强筋小麦物质积累和产量形成对春季滴灌量的响应[J].麦类作物学报，2024，45(2)：1-8.
ZHANG L X, LI B C, ZHANG M, et al. Response of matter accumulation and yield formation of strong gluten wheat to drip irrigation in spring[J]. Journal of Cereal Crops, 2024, 45(2): 1-8. (in Chinese)

[17] 吕丽华，赵明，赵久然，等.不同施氮量下夏玉米冠层结构及光合特性的变化[J].中国农业科学，2008，41(9)：2624-2632.
LYU L H, ZHAO M, ZHAO J R, et al. Changes of canopy structure and photosynthetic characteristics of summer maize under different nitrogen application rates[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(9): 2624-2632. (in Chinese)

[18] 杜保见，郜红建，常江，等.玉米苗期氮素吸收利用效率差异及聚类分析[J].玉米科学，2014，22(6)：67-73.
DU B J, GAO H J, CHANG J, et al. Difference and cluster analysis of nitrogen absorption and utilization efficiency in maize seedling stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2014, 22(6): 67-73. (in Chinese)

[19] 张文婕，杨莉莉，王金花，等.三种抗生素与铜复合污染对

土壤过氧化氢酶活性的影响[J].农业资源与环境学报,2020,37(1):135-143.
ZHANG W J, YANG L L, WANG J H, et al. Effects of combined pollution of three antibiotics and copper on catalase activity in soil[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(1): 135-143. (in Chinese)

[20] 胡朋成,尹娟,魏小东,等.不同水氮处理对马铃薯品质及土壤脲酶活性的影响[J].江苏农业科学,2022,50(6):87-92.
HU P C, YIN J, WEI X D, et al. The effects of different water and nitrogen treatments on the quality of potatoes and soil urease activity[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(6): 87-92. (in Chinese)

[21] INOMURA K, DEUTSCH C, MASUDA T, et al. Quantitative models of nitrogen-fixing organisms[J]. Computational and Structural Biotechnology Journal, 2020, 18(58): 3905-3924.

[22] 张巍,冯玉杰.固氮蓝藻在盐碱化土地生态修复中应用的研究进展[J].土壤,2008,40(4):510-516.
ZHANG W, FENG Y J. Research progress on application of nitrogen-fixing cyanobacteria in ecological restoration of saline-alkali land[J]. Soil, 2008, 40(4): 510-516. (in Chinese)

[23] MA J, CHEN T, LIN J, et al. Functions of nitrogen, phosphorus and potassium in energy status and their influences on rice growth and development[J]. Rice Science, 2022, 29(2): 166-178.

[24] SOUALIOU S, DUAN F, LI X, et al. Nitrogen supply alleviates cold stress by increasing photosynthesis and nitrogen assimilation in maize seedlings[J]. Journal of Experimental Botany, 2023, 74(10): 3142-3162.

[25] DUAN F, WEI Z, SOUALIOU S, et al. Nitrogen partitioning in maize organs and underlined mechanisms from different plant density levels and N application rate in China[J]. Field Crops Research, 2023, 294: 108874.

[26] 姜春霞,刘化涛,张伟,等.减量施氮对鲜食玉米产量、氮素利用及土壤硝态氮含量的影响[J].中国土壤与肥料,2022(12):61-67.
JIANG C X, LIU H T, ZHANG W, et al. The effects of reduced nitrogen application on the yield, nitrogen utilization and soil nitrate nitrogen content of sweet corn[J]. Chinese Soil and Fertilizer,2022(12): 61-67. (in Chinese)

[27] 张馨月,王寅,陈健,等.水分和氮素对玉米苗期生长、根系形态及分布的影响[J].中国农业科学,2019,52(1):34-44.
ZHANG X Y, WANG Y, CHEN J, et al. The effects of water and nitrogen on the growth, root morphology and distribution of corn seedlings during the seedling stage[J]. Chinese Agricultural Sciences, 2019, 52(1): 34-44. (in Chinese)

[28] 武永军,沈玉芳,颜秦峰,等.缺氮复氮处理对玉米根系生长、根系活力、硝态氮及氨基酸含量的影响[J].西北农业学报,2012,21(12):61-64.
WU Y J, SHEN Y F, YAN Q F, et al. The effects of nitrogen-deficient compound nitrogen treatment on the root growth, root vitality, nitrate nitrogen and amino acid contents of corn[J]. Northwest Journal of Agriculture, 2012, 21(12): 61-64. (in Chinese)

[29] RENUKA N, PRASANNA R, SOOD A, et al. Exploring the efficacy of wastewater-grown microalgal biomass as a biofertilizer for wheat[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(7): 6608-6620.

[30] 任梦楠.藻菌生物结皮对土壤水肥保持及作物生长的影响[D].天津:天津农学院,2018.
REN M N.Effects of biological crust of algae on soil water and fertilizer conservation and crop growth[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural College, 2018. (in Chinese)

[31] 张涛,王大伟,邵雷军,等.一种鱼腥藻QDHP-044及其应用[P].中国:CN202410859831.8, 2024-10-15.
ZHANG T, WANG D W, SHAO L J, et al. Anabaena QDHP-044 and application thereof[P]. China: CN202410859831.8, 2024-10-15. (in Chinese)

[32] NOSHEEN S, AJMAL I, SONG Y. Microbes as biofertilizers, a potential approach for sustainable crop production[J]. Sustainability, 2021, 13(4): 1868.

[33] 陈婷,韩士群,周庆.巢湖藻-草-泥堆制有机肥对土壤性质的影响[J].土壤,2018,50(5):910-916.
CHEN T, HAN S Q, ZHOU Q. Effect of organic fertilizer made from algae-grass-mud in Chaohu Lake on soil properties[J]. Soil, 2018, 50(5): 910-916. (in Chinese)

[34] 马志良,赵文强,刘美.高寒灌丛生长季根际和非根际土壤多酚氧化酶和过氧化氢酶活性对增温的响应[J].应用生态学报,2019,30(11):3681-3688.
MA Z L, ZHAO W Q, LIU M.Response of polyphenol oxidase and catalase activities in rhizosphere and non-rhizosphere soils of alpine shrubs to warming[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3681-3688. (in Chinese)

[35] 宋玉珍.微生物肥料在松嫩平原盐碱地造林中的应用研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2009.
SONG Y Z. Study on application of microbial fertilizer in afforestation of saline-alkali land in Songnen Plain[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2009. (in Chinese)

[36] 高纪超,李强,朱平,等.长期化肥有机替代对黑土氮转化相关酶活性的影响[J].土壤通报,2024,55(1):140-148.
GAO J C, LI Q, ZHU P, et al. The impact of long-term organic substitution for chemical fertilizers on the enzymatic activities related to nitrogen transformation in black soil[J]. Soil Bulletin, 2024, 55(1): 140-148. (in Chinese)

[37] DASH D P, AJAY K, MANISH S K, et al. Cyanobacterial (unicellular and heterocystous) biofertilization to wetland rice influenced by nitrogenous agrochemical[J]. Journal of Applied Phycology, 2016, 28(6): 3343-3351.

(责任编辑:王　昱)