

海藻酸与控释尿素配施对小麦玉米产量及土壤养分的影响

王伟涛¹, 孟庆敏¹, 高丽超¹, 陈琪¹, 郑文魁¹,

王淳¹, 孙玲丽², 刘之广¹, 张民¹

(1. 土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院,
山东 泰安 271018; 2. 众德肥料(平原)有限公司, 山东 平原 253100)

摘要: 通过小麦玉米轮作盆栽试验, 探讨海藻酸与控释尿素配施的增产增效机制及其对土壤养分状况的影响。以氮空白(CK0)为对照, 设置常量尿素(N2A0)、常量尿素加海藻酸(N2A1)、常量控释尿素(CN2A0)、常量控释尿素加海藻酸(CN2A1)、减氮 30% 的尿素(N1A0)、减氮 30% 的尿素加海藻酸(N1A1)、减氮 30% 的控释尿素(CN1A0)、减氮 30% 的控释尿素加海藻酸(CN1A1)9 个处理。结果表明: 海藻酸与常量控释尿素配施处理(CN2A1)的小麦玉米产量最高分别为 98.22, 134.84 g/pot, 增产增收效果最好, 与常量控释尿素处理相比, 玉米显著增产 16.38% ($P < 0.05$), 氮肥利用率显著提高 17.79% ($P < 0.05$)。海藻酸与减氮 30% 控释尿素配施处理(CN1A1)较减氮 30% 控释尿素处理小麦玉米分别显著增产 15.92%, 26.05% ($P < 0.05$), 氮肥利用率也显著提高 ($P < 0.05$)。此外配施海藻酸处理较未加海藻酸处理叶片蒸腾速率、SPAD 值和叶面积指数均有所提高。海藻酸与常量控释尿素配施与未加海藻酸的处理相比, 显著增加小麦拔节期和玉米大喇叭口期的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量 ($P < 0.05$), 显著提高玉米大喇叭口期土壤速效钾含量 ($P < 0.05$)。海藻酸与控释尿素配施显著提高了土壤速效氮和钾的供应强度和容量, 促进了小麦、玉米的生长和产量的提高。

关键词: 海藻酸; 控释尿素; 小麦玉米轮作; 氮肥利用率; 土壤养分状况

中图分类号: S143.3; S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0280-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.038

Effects of Combined Application of Alginic Acid and Controlled-release Urea on Yield of Wheat and Maize, and Soil Nutrient

WANG Weitao¹, MENG Qingmin¹, GAO Lichao¹, CHEN Qi¹, ZHENG Wenkui¹,

WANG Chun¹, SUN Lingli², LIU Zhiguang¹, ZHANG Min¹

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer
Resources, College of Recourses and Environment, Shandong Agricultural University,

Taian, Shandong 271018; 2. Zhongde Fertilizer (Pingyuan) Ltd., Pingyuan, Shandong 253100)

Abstract: In this study, a pot experiment of wheat-maize rotation was carried out to explore the mechanism of increasing yield and enhancing effect, and the influence on soil nutrient status of alginate and controlled release urea application. Through the pot experiment with nitrogen blank (CK0) as the control, 9 treatments were set up: normal urea (N2A0), normal urea with alginic acid (N2A1), controlled-release urea (CN2A0), controlled-release urea with alginic acid (CN2A1), reducing nitrogen 30% of urea (N1A0), reducing nitrogen 30% of urea with alginic acid (N1A1), reducing nitrogen 30% of controlled-release urea (CN1A0), reducing nitrogen 30% controlled-release urea with alginic acid (CN1A1). The results showed that the wheat and maize yield of the treatment combined application of controlled-release urea with alginic acid (CN2A1) was the highest with 98.22 and 134.84 g/pot. Compared with the treatment of controlled-release urea, the maize yield of CN2A1 was significantly increased by 16.38% ($P < 0.05$) and the N use efficiency increased by 17.79% ($P < 0.05$). Compared with reducing nitrogen 30% of controlled-release urea (CN1A0), the yields of wheat and maize in the treatment of reducing nitrogen 30% controlled-release urea with alginic acid (CN1A1) was significantly increased by 15.92% and 26.05% ($P < 0.05$), respectively, and the N use effi-

收稿日期: 2021-04-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(41977019); 国家重点研发计划项目(2017YFD0200706)

第一作者: 王伟涛(1995—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事新型肥料研究。E-mail: 347939715@qq.com

通信作者: 张民(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤肥料研究。E-mail: minzhang-2002@163.com

ciency was significantly increased ($P < 0.05$). In addition, the leaf transpiration rate, SPAD value and leaf area index of treatments fertilized with alginic acid were increased compared with those without alginic acid. Compared with the treatments without alginic acid, the controlled-release urea combined with alginic acid significantly increased the contents of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the soil at the jointing stage of wheat and flaring stage of maize, and significantly increased the content of soil available potassium at the flaring stage of maize. Combined application of alginic acid and controlled-release urea significantly increased the supply intensity and capacity of soil available N and K, and promoted the growth and yield of wheat and maize.

Keywords: alginic acid; controlled-release urea; wheat-maize rotation; nitrogen use efficiency; soil nutrient status

海藻酸被视为一种来源广泛、效果显著的增效剂和土壤改良剂,对耕地土壤质量的提升和保护,对资源节约型的绿色农业发展具有实际意义^[1]。海藻酸具有亲水性、生物相容性和生物可降解性^[2],是目前研究最多的天然高分子聚合物之一。海藻酸是由 β -D-甘露糖醛酸(M)和 α -L-古罗糖醛酸(G)2 种单体共聚通过 1,4 糖苷键相连的线性多糖;具有高密度的羟基、羧基和半缩醛羟基等功能基团,具有提高耕地土壤保水保肥的性能。海藻酸的应用十分广泛,包括在建筑工程上,提高路面土壤弹性、提高建筑用黏土的黏结性^[3];在环境治理上,去除污泥中高价重金属^[4]、沉降泥水中的土壤颗粒;在农业生产上,改善土壤质地,提高土壤缓冲性,恢复土壤生态。海藻酸应用于农田土壤,显著影响土壤含水量、土壤全碳、氮、速效养分含量以及地上作物生理指标等^[5],进而提高作物生长和生产的潜在效益^[6]。有研究者^[7-8]利用海藻酸的这一特性制备了提高作物抗旱能力的功能型肥料。还有研究^[9]表明,海藻酸被应用到番茄育苗基质上,显著提高番茄幼苗壮苗指数 28.2%,且能显著提高干旱胁迫下番茄 SOD、POD 等酶活性,改善植物生理生态。海藻酸配施常规用量尿素可使玉米显著增产高达 35%,海藻酸复混肥对玉米产量及养分吸收利用均有显著影响^[10]。已有研究^[11-13]表明,低分子的海藻酸寡糖是一种生物刺激素,能有效刺激种子生根发芽,与对照相比发芽率提高 12.96%,还可以提高作物抗旱能力。

控释肥料养分在土壤中释放可与作物吸收相同步,显著提高肥料利用率,达到“减肥增效”的目标。控释肥料与生物刺激素等功能性物质配伍后施用,可以发挥二者的协同增效作用,尤其是在逆境条件下能进一步增强作物的抗逆能力,进一步提高产量和肥料利用率。因此,我国在“十三五”启动了国家重点研发计划“新型缓控释肥料与稳定性肥料研制”项目^[14],其目标是研制出绿色环保、价廉质高和与功能性物质配伍的新一代缓控释与稳定性肥料,提升功能型缓控释肥料对作物的促生和抗逆作用,进一步提高肥料利用率,为减肥增效提供技术支撑。控释肥料配施功能性物质能显著提

高作物产量和肥料利用率,秦瑞劼等^[15]利用控释肥料配施免疫诱抗剂,使小麦产量显著提高 14.5%,氮肥利用率显著提高 12.4 个百分点;李泽丽等^[16]采用控释肥料配施黄腐酸使小麦产量显著提高 6.4%。

本研究在控释氮肥基础上配施海藻酸,同时与未配施海藻酸处理相比较,研究其在小麦玉米轮作体系中的增产增效机制。通过盆栽试验,研究其对小麦玉米周年轮作产量、土壤养分状况以及经济效益的影响,为其在小麦玉米轮作体系上的推广应用提供理论和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

盆栽试验在山东省泰安市山东农业大学土肥资源高效利用国家工程实验室缓控释肥料试验基地(117°09′48″E,36°09′40″N)进行,该地区属温带大陆性季风型气候,雨热同期,年平均气温 13℃左右,年平均降水量 680 mm 左右。

1.2 供试材料

试验于 2019 年 10 月 19 日至 2020 年 10 月 10 日,小麦玉米周年轮作。供试盆栽土壤采自山东农业大学土肥资源高效利用国家工程实验室中心试验站田间长期定位试验的耕层土壤。土壤类型为棕壤,在中国土壤系统分类中属于普通简育湿润淋溶土。土壤的基本理化性质为:pH 为 6.85(土水比 1:2.5),有机质和全氮含量分别为 12.01,0.95 g/kg,硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾含量分别为 9.35,8.44,25.22,162.22 mg/kg。

供试小麦品种为“济麦 22”(生育期 240 天),玉米品种为“郑单 958”(生育期 103 天)。供试氮肥为尿素(含 N 46%)和树脂包膜控释尿素(含 N 45%),磷肥为重过磷酸钙(含 P_2O_5 46%),钾肥为氯化钾(含 K_2O 60%)。供试海藻酸购买于 Sigma 公司,纯度 99.8%。供试容器为陶土盆,直径 35 cm,高 40 cm。

1.3 试验设计

试验共设氮空白(CK0);常量尿素(N2A0);海藻酸与常量尿素配施(N2A1);常量控释尿素(CN2A0);海藻酸与常量控释尿素配施(CN2A1);减量 30%的尿素(N1A0);海藻酸与减量 30%尿素配施

(N1A1);减量 30%的控释尿素(CN1A0);海藻酸与减量 30%的控释尿素处理配施(CN1A1)9 个处理,具体配比见表 1,每个处理重复 3 次。模拟大田施肥量,常量尿素处理为推荐施肥量 225 kg/hm²,相当于每 666.7 m²施氮量 15 kg,种植玉米 5 555 株;因为每盆种植 1 株玉米,且盆栽施肥量加倍,因此每盆施氮量为 5.40 g。减量 30%

表 1 盆栽小麦玉米轮作的试验方案

处理	小麦				玉米			
	N/ (g·pot ⁻¹)	P ₂ O ₅ / (g·pot ⁻¹)	K ₂ O/ (g·pot ⁻¹)	2%海藻酸 溶液/mL	N/ (g·pot ⁻¹)	P ₂ O ₅ / (g·pot ⁻¹)	K ₂ O/ (g·pot ⁻¹)	2%海藻酸 溶液/mL
CK0	0	3.6	1.8	0	0	1.8	3.6	0
N2A0	5.40	3.6	1.8	0	5.40	1.8	3.6	0
N2A1	5.40	3.6	1.8	80	5.40	1.8	3.6	80
CN2A0	5.40	3.6	1.8	0	5.40	1.8	3.6	0
CN2A1	5.40	3.6	1.8	80	5.40	1.8	3.6	80
N1A0	3.78	3.6	1.8	0	3.78	1.8	3.6	0
N1A1	3.78	3.6	1.8	80	3.78	1.8	3.6	80
CN1A0	3.78	3.6	1.8	0	3.78	1.8	3.6	0
CN1A1	3.78	3.6	1.8	80	3.78	1.8	3.6	80

在试验开始前,先将土壤风干后过筛。混合均匀后以每盆风干土 19 kg 装盆,压实再将事先称好的肥料均匀地撒在盆栽土壤表面,将粉状海藻酸按照 1∶50 的比例配成浓度为 2%的海藻酸溶液(滴加少量 NaOH 加速溶解)。配施海藻酸处理的土壤按照 4 mL/kg 加海藻酸溶液(相当于加纯海藻酸 0.08 g),将 80 mL 海藻酸溶液(相当于加海藻酸 8.89 kg/(666.7 m²))用注射器均匀的喷洒到肥料表面(表 1),再用约 1 kg 土壤覆盖;施肥后在小麦季每盆播 40 粒小麦种子,在玉米季每盆播 3 粒玉米种子在出苗第 7 天后选择长势相同的苗,每盆留 1 株苗。定期浇水,除草、除虫按照常规高产栽培模式进行,整个生育期内各处理管理措施相同。

1.4 土壤样品采集与分析

为了更好地了解小麦季土壤中养分的动态的变化,在小麦苗期(肥料施入的第 21 天)、小麦拔节期(肥料施入的第 170 天,追施尿素的第 34 天)、成熟期(肥料施入的第 231 天,追施尿素的第 80 天),利用土钻采集土样,风干后过 2 mm 筛测定土壤硝态氮、铵态氮。为了更好地了解小麦农艺性状的动态变化,分别在小麦苗期、拔节期、开花期、灌浆期测定小麦 SPAD 值,在灌浆期测定株高和叶面积指数。

为了更好地了解玉米季土壤中养分动态的变化,在玉米苗期(肥料施入的第 21 天)、拔节期(肥料施入的第 45 天,追施尿素的第 14 天)、收获期(肥料施入的第 96 天,追施尿素的第 65 天),利用土钻采集土样,风干后过 2 mm 筛测定土壤硝态氮、铵态氮。为了更好地了解玉米农艺性状的动态的变化,分别在玉米苗期、拔节期、大喇叭口、吐丝期测定玉米 SPAD

值,在吐丝期测定株高、叶面积指数。

土壤硝态氮和铵态氮含量用 1 mol/L 的 KCl 浸提(土水比 1∶10),采用连续流动注射分析仪(SEAL, AA3, 德国)测定;土壤有效磷含量用 0.5 mol/L NaHCO₃浸提—钒钼黄比色法测定;土壤速效钾含量用 1.0 mol/LNH₄OAc 浸提—火焰光度计测定。植株含氮量采用 H₂SO₄—H₂O₂联合消煮,土壤全氮采用 H₂SO₄—HClO₄消煮,采用全自动凯氏定氮仪测定;土壤 pH 用土水比按 1∶2.5 的比例混合,酸度计电极法^[18]测定。

叶片净光合速率(P_n)采用便携式光合仪 LI-6400 测定,测定时间为上午 9:00—11:00;植株叶片 SPAD 值读数利用 Minolta 公司生产的 SPAD-502 型叶绿素仪测定;叶面积指数采用冠层分析仪 LAI-2200 测定。收获时分别采集秸秆和籽粒,于 105 ℃下杀青 30 min,然后 75 ℃下烘至恒重后称干重,计算生物量,磨细过筛后测定全氮含量。成熟期进行测产及考种。

1.5 数据分析方法

氮肥利用率(%)=(施氮处理氮累积量-不施氮处理氮累积量)/施氮量×100%

相关数据的处理与统计分析通过 Excel 2010 软件和 SAS 8.2 软件完成分析,ANOVA 方差分析及 Duncan 差异显著性检验,比较不同处理间在 $P<0.05$ 的显著性水平,并采用 Excel 2010 软件作图。

2 结果与分析

2.1 海藻酸与控释尿素配施对小麦玉米产量及产量构成因素的影响

由表 2 可知,在小麦增产上,与常量尿素处理

(N2A0)相比,海藻酸与常量尿素配施处理(N2A1)产量显著提高 18.41%;与常量控释尿素相比(CN2A0),CN2A1 处理的产量差异不显著($P<0.05$)。与减量普通尿素(N1A0)相比,N1A1 处理的产量显著提高 19.57% ($P<0.05$);与减量控释尿素相比(CN1A0),CN1A1 处理的产量显著提高 15.92% ($P<0.05$)。结果表明,海藻酸与其他肥料配施在小麦上具有显著的增产效果($P<0.05$);在所有处理中,CN2A1 处理的产量最高,较常规施肥处理(N2A0)显著增产 28.76% ($P<0.05$)。从产量构成因素分析,与常量尿素处理(N2A0)相比,N2A1 处理的小麦穗数显著增加了 7.87% ($P<0.05$),其他处理间差异不显著($P<0.05$)。N2A1、CN2A0、CN2A1、N1A1、CN1A1 处理的小麦千粒重分别显著增加 8.89%,22.14%,18.74%,7.51%和 9.40% ($P<0.05$),这可能是造成小麦增产的直接原因。

由表 3 可知,在玉米的增产上,与常量尿素处理(N2A0)相比,海藻酸与普通尿素配施处理(N2A1)产量显著提高 29.80% ($P<0.05$);与常量控释尿素处理(CN2A0)相比,CN2A1 处理产量显著提高 16.38% ($P<0.05$)。由表 3 可知,减量普通尿素(N1A0)相比,N1A1 处理产量显著提高 19.93% ($P<0.05$);与减量控释尿素处理(CN1A0)相比,CN1A1 处理产量显著提高 26.05%

表 3 不同处理玉米产量和产量构成因素

处理	穗长/ cm	穗行数/ 行	行粒数/ 粒	百粒重/ g	玉米产量/ (g · pot ⁻¹)	较 N2A0 增加/%
CK0	12.10d	14.12b	22.10d	20.68c	69.68f	—32.73
N2A0	14.26b	15.62a	30.21bc	25.13b	103.59c	
N2A1	13.68c	15.24a	31.18b	34.65a	134.46a	29.80
CN2A0	15.04ab	14.62ab	28.00c	33.54a	125.86b	21.50
CN2A1	16.66a	16.00a	33.50a	33.74a	134.84a	30.17
N1A0	13.15c	14.62b	29.33bc	24.85b	92.17e	—11.02
N1A1	14.15b	14.24b	30.18bc	27.19b	110.54bc	6.71
CN1A0	14.66b	14.00b	28.66c	27.72ab	101.28c	—2.22
CN1A1	14.56b	15.00a	31.58b	31.99a	127.66ab	23.24

2.2 海藻酸与控释尿素配施对小麦玉米轮作氮肥利用率的影响

海藻酸与减量控释尿素配施处理(CN1A1)的小麦氮肥利用率最高,与减量控释尿素处理(CN1A0)相比,增幅为 3.18 个百分点(表 4);与常量尿素处理(N2A0)相比,显著提高 9.77% ($P<0.05$)。从秸秆和籽粒氮吸收量的角度分析,造成氮肥利用率差异的主要原因是籽粒氮积累量差异显著($P<0.05$)。与常量尿素处理相比,CN2A0 和 CN2A1 的 2 个处理小麦籽粒氮吸收量分别显著增加 6.02%和 10.65% ($P<0.05$)。与减量尿素处理相比,N1A1、CN1A0

($P<0.05$)。这表明无论海藻酸与常规尿素配施还是与控释尿素配施都显著增加玉米产量($P<0.05$)。在所有处理中,CN2A1 处理的玉米产量最高,与常规施肥处理(N2A0)相比显著增产 30.17% ($P<0.05$),海藻酸与控释尿素配施增产幅度更大(表 3)。从产量构成因素分析,与常量尿素处理(N2A0)相比,CN2A1 处理的玉米穗长和行粒数显著提高 16.83%和 10.89% ($P<0.05$);N2A1、CN2A0、CN2A1、CN1A1 处理的玉米百粒重分别显著增加 37.88%,33.47%,34.26%,27.30% ($P<0.05$),这可能是造成玉米增产的主要和直接原因。

表 2 不同处理小麦产量和产量构成因素

处理	穗数/ (穗 · pot ⁻¹)	穗粒数/ 粒	千粒重/ g	小麦产量/ (g · pot ⁻¹)	较 N2A0 增加/%
CK0	50.25d	28.92b	34.87c	47.56e	—37.65
N2A0	63.57bc	35.88a	35.00c	76.28c	
N2A1	68.35a	35.84a	38.11b	90.32b	18.41
CN2A0	60.34c	36.62a	42.75a	95.75a	25.52
CN2A1	65.22b	36.14a	41.56a	98.22a	28.76
N1A0	60.11c	34.32a	34.25c	69.48d	—8.91
N1A1	63.35bc	35.24a	37.63b	83.08c	8.91
CN1A0	60.88c	35.31a	36.89bc	78.44c	2.83
CN1A1	65.00b	36.08a	38.29b	90.93b	19.21

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

和 CN1A1 的 3 个处理小麦籽粒氮吸收量分别显著增加 7.57%,11.35%和 7.57% ($P<0.05$)。这表明海藻酸与控释尿素配施通过提高小麦籽粒氮积累量来提高氮肥利用率。

海藻酸与减量控释尿素配施处理(CN1A1)的玉米氮肥利用率最高,与减量控释尿素处理(CN1A0)相比,增幅为 13.05% ($P<0.05$);与常量尿素处理(N2A0)相比,显著提高 24.50% ($P<0.05$)(表 5)。从秸秆和籽粒氮吸收量的角度分析,造成氮肥利用率差异的主要原因是籽粒氮积累量差异显著($P<0.05$),与常量尿素处理(N2A0)相比,N2A1、CN2A0、CN2A1 的 3

个处理玉米籽粒氮积累量分别显著提高 29.59%，9.59%，34.79% ($P<0.05$)，与减量尿素处理(N1A0)相比，N1A1、CN1A0、CN1A1 的 3 个处理玉米籽粒氮积累量分别显著提高 20.00%，9.85%，24.92% ($P<0.05$)。表明海藻酸与控释尿素配施能通过提高玉米籽粒氮积累量来提高氮肥利用率。

表 4 不同处理小麦季氮肥利用率

处理	秸秆氮吸收量/ (g·pot ⁻¹)	籽粒氮吸收量/ (g·pot ⁻¹)	氮肥利用率/ %	较 N2A0 的 增幅/%
CK0	1.20c	1.24e	0	
N2A0	1.81ab	2.16b	28.33c	
N2A1	1.89a	2.15b	29.63c	1.30
CN2A0	1.85a	2.29a	31.48bc	3.15
CN2A1	1.92a	2.39a	34.63b	6.30
N1A0	1.80ab	1.85d	32.01bc	3.68
N1A1	1.78ab	1.99c	35.19b	6.86
CN1A0	1.70b	2.06bc	34.92b	6.59
CN1A1	1.89a	1.99c	38.10a	9.77

表 5 不同处理玉米季氮肥利用率

处理	秸秆氮肥吸收量/ (g·pot ⁻¹)	籽粒氮吸收量/ (g·pot ⁻¹)	氮肥利用率/ %	较 N2A0 的 增幅/%
CK0	1.33b	2.46e	0	
N2A0	1.51a	3.65c	25.34d	
N2A1	1.52a	4.73a	45.59b	20.25
CN2A0	1.51a	4.00b	31.82d	6.48
CN2A1	1.55a	4.92a	49.61a	24.27
N1A0	1.58a	3.25d	27.58d	2.24
N1A1	1.64a	3.90bc	46.23ab	20.89
CN1A0	1.61a	3.57c	36.79c	11.45
CN1A1	1.62a	4.06b	49.84a	24.50

2.3 海藻酸与控释尿素配施对小麦灌浆期、玉米吐丝期光合和蒸腾速率的影响

小麦生理状态受植物品种、养分强度、温度、植物发育状况一系列因素的影响。在拔节期光合速率和蒸腾速率对小麦生长和籽粒养分积累具有重要作用。配施海藻酸处理较未配施海藻酸处理之间小麦灌浆期光合速率差异不显著，而蒸腾作用差异显著 ($P<0.05$)；N2A1 较 N2A0 处理蒸腾速率显著提高 21.74% ($P<0.05$)，CN2A1 较 CN2A0 处理蒸腾速率显著提高 19.23% ($P<0.05$) (表 6)，这表明在常量施肥条件下，配施海藻酸可以显著增强小麦的蒸腾作用；灌浆期是小麦养分向籽粒转移的关键时期，蒸腾作用活跃，有利于后期产量的形成。

在玉米吐丝期开始开花授粉，此时植物生理指标对玉米籽粒养分积累有重要作用。配施海藻酸处理(N2A1、CN2A1、N1A1、CN1A1)较未配施海藻酸处理(N2A0、CN2A0、N1A0、CN1A0)之间玉米吐丝期蒸腾速率差异显著 ($P<0.05$)，同理这也有利于玉米产量的形成。

表 6 不同处理小麦灌浆期和玉米吐丝期的光合和蒸腾速率
单位： $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

处理	小麦灌浆期		玉米季吐丝期	
	光合速率	蒸腾速率	光合速率	蒸腾速率
CK0	18.16c	3.54bc	22.11c	7.71c
N2A0	24.84a	3.22c	26.36ab	6.15d
N2A1	24.91a	3.92b	29.91a	9.67a
CN2A0	24.84a	3.64b	28.56a	8.06c
CN2A1	25.29a	4.34a	27.25ab	9.72a
N1A0	19.95c	3.55bc	25.24b	7.71c
N1A1	20.74c	3.42c	25.75b	8.67b
CN1A0	22.94b	3.33c	24.99b	7.64c
CN1A1	22.94b	3.32c	26.95ab	8.65b

2.4 海藻酸与控释尿素配施对小麦和玉米农艺性状的影响

SPAD 值是表征植物光合作用的重要指标 SPAD 值受植物品种、养分强度、温度、植物发育程度等一系列因素的影响；植株氮素吸收量、叶绿素含量与 SPAD 成正相关，施氮可以显著提高作物 SPAD 值 ($P<0.05$)。小麦在整个生育期内叶片的 SPAD 值呈先增高后降低再小幅度升高的趋势(图 1)。海藻酸与常量控释尿素配施处理(CN2A1)的 SPAD 值高于其他处理，并且在小麦苗期至拔节期 SPAD 值提高迅速；传统未配施海藻酸的处理 SPAD 值普遍较低。这表明减氮施肥会显著降低小麦 SPAD 值，而配施海藻酸能有效解决小麦叶片 SPAD 值的下降的问题。

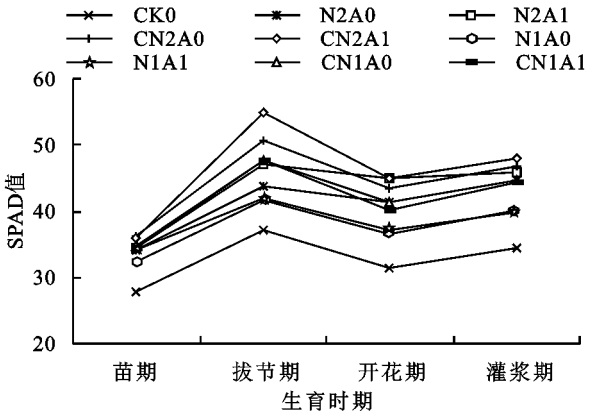


图 1 不同处理小麦各生育时期的 SPAD 值

在玉米整个生育期，SPAD 值呈先升高再缓慢降低的趋势(图 2)。在苗期至拔节期叶片 SPAD 总体上升比较迅速；在拔节期至大喇叭口期保持平稳或略有小幅上升；到吐丝期，缓慢下降。配施海藻酸处理的 SPAD 值偏高而未配施海藻酸处理的 SPAD 值偏低；并且在苗期至拔节期，配施海藻酸处理玉米叶片 SPAD 值升高迅速。表明配施海藻酸能提高玉米前期对氮素的吸收，促进叶绿素的形成。

灌浆期是小麦籽粒生长的关键时期，在小麦灌浆期，各处理小麦株高显著高于 CK0 处理，各个处理之

间差异不显著 ($P < 0.05$)。CN2A0、N2A1、CN2A1 处理的叶面积指数显著高于其他处理,与 N2A0 相比分别显著提高 16.56%,17.22%,27.15%(表 7)($P < 0.05$)。说明配施海藻酸或控释氮肥能显著提高小麦灌浆期叶面积指数。

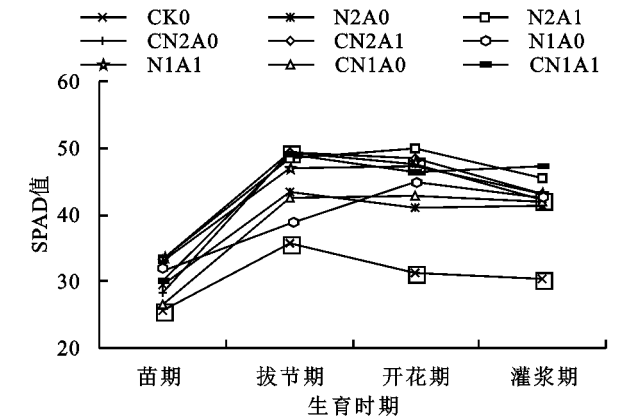


图 2 不同处理玉米各生育时期的 SPAD 值

在玉米吐丝期,施用氮肥处理显著增加了玉米的株高,其中 CN2A0、CN2A1 的 2 个处理株高显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。随着施氮量的增加,玉米叶面积指数呈上升趋势。N2A1、CN2A1 的 2 个处理叶面积指数显著高于其他处理,与 N2A0 相比显著提高 10.73%和 22.60% ($P < 0.05$)。表明控释肥料配施海藻酸能显著提高叶面积指数。

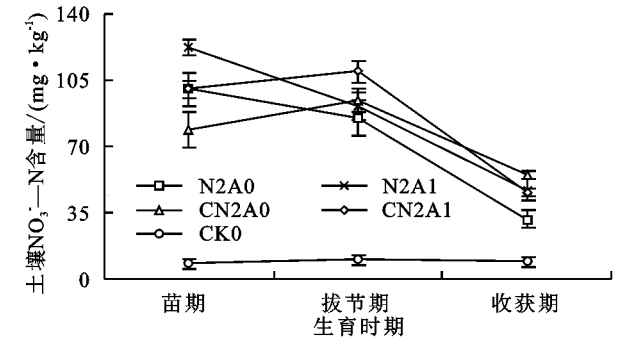


图 3 常量施氮条件下小麦不同生育时期土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量

在减氮施用尿素处理的条件下,小麦苗期海藻酸与常量尿素配施(N1A1)的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量显著提高($P < 0.05$);海藻酸与控释尿素配施(CN1A1)的土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量显著提高($P < 0.05$)(图 4)。在拔节期,各处理土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量差异不显著 ($P < 0.05$);在成熟期,控释尿素(CN1A0)处理的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量都高于其他处理($P < 0.05$)。

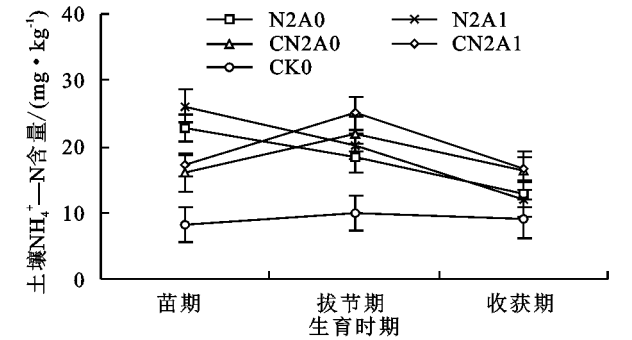
在常量尿素施肥处理条件下,在大喇叭口期,海藻酸与控释尿素配施(CN2A1)处理的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量显著高于其他处理($P < 0.05$)(图 5);玉米在大喇叭口期处于营养生长与生殖生长并进,海藻酸与控释尿素配施显著提玉米在大喇叭口期氮素的供应强度,有利于提高玉米产量;在收获期, CN2A1 处理的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量显著低于其他处

表 7 不同处理小麦灌浆期、玉米吐丝期的株高和叶面积指数

处理	小麦灌浆期		玉米吐丝期	
	株高/cm	叶面积指数	株高/cm	叶面积指数
CK0	65.16c	2.78d	139.67d	3.22d
N2A0	70.84a	3.02c	156.33bc	3.54c
N2A1	74.91a	3.52b	154.67bc	3.92b
CN2A0	72.84a	3.54b	167.00a	3.64bc
CN2A1	73.29a	3.84a	169.33a	4.34a
N1A0	69.95a	2.85cd	156.33bc	3.33cd
N1A1	70.74a	3.00c	149.33c	3.32c
CN1A0	70.94a	3.03c	153.33bc	3.55c
CN1A1	72.94a	3.02c	158.33b	3.42c

2.5 海藻酸与控释尿素配施对小麦玉米土壤速效氮变化的影响

在小麦生育期内,普通尿素与控释尿素处理在土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的变化表现不同,普通尿素处理整体呈下降趋势,控释尿素处理呈先升高后降低的趋势(图 3)。在常量施氮处理条件下,苗期 N2A1 处理的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量均显著高于 N2A0 ($P < 0.05$);CN2A1 处理的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量显著高于 CN2A0 ($P < 0.05$);在拔节期,CN2A1 处理的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。海藻酸配施常规尿素和控释尿素均能有效提高小麦苗期和拔节期土壤速效氮含量,这有利于提高小麦分蘖数进而提高小麦穗数,提高小麦产量。



理($P < 0.05$)。表明海藻酸与控释尿素配施能显著减少玉米收获期土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量,减少速效养分的盈余和淋溶损失,对于节约肥料资源和减少对环境的污染具有重要意义。

在减氮施用尿素处理条件下,在收获期,海藻酸与控释尿素配施(N1A0)处理的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量显著高于其他处理($P < 0.05$)(图 6)。可能的原因是玉米植株发育状态不佳,对土壤速效氮吸收能力受限,导致氮素盈余。

2.6 海藻酸与控释尿素配施对小麦玉米轮作土壤有效磷和速效钾含量的影响

小麦整个生育期对磷素需求量较多。随着施氮量的减少,土壤有效磷呈升高的趋势(图 7)。在小麦拔节期,N2A1 处理较 N2A0 处理土壤有效磷含量显

著增加 35.20% ($P < 0.05$); N1A1 处理较 N1A0 处理土壤有效磷含量显著增加 15.56% ($P < 0.05$); CN1A1 较 CN1A0 处理土壤有效磷显著增加 52.19% ($P < 0.05$); 表明配施海藻酸能显著活化土壤中的磷, 提高土壤有效磷含量。在小麦收获期, N1A1 处理较 N1A0 处理土壤有效磷含量显著降低 ($P < 0.05$), CN1A1 较

CN1A0 土壤有效磷显著降低 ($P < 0.05$); 其原因可能是小麦前期土壤磷素吸收较多, 导致后期土壤速效磷含量降低。小麦整个生育期对钾需求量不高, 减量尿素(N1A1)和氮空白(CK0)处理在小麦拔节期和收获期, 土壤速效钾含量均高于其他处理, 出现钾素盈余的现象。

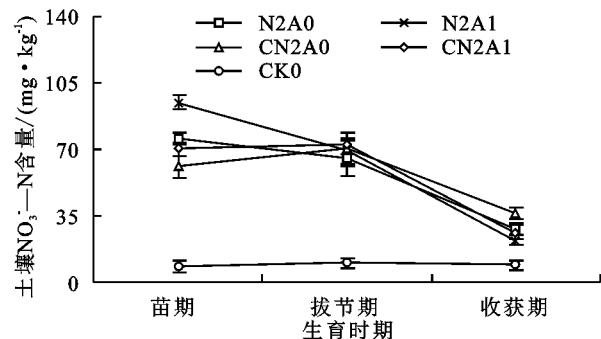


图 4 减量施氮条件下小麦不同生育时期土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量

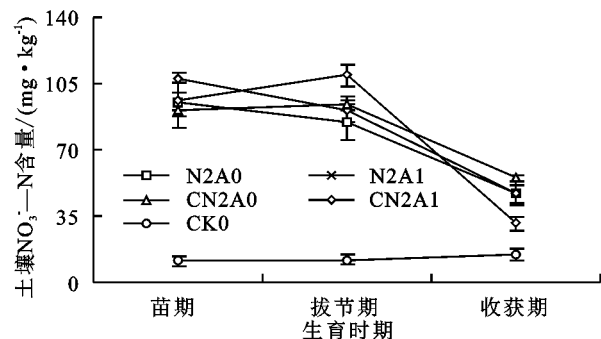


图 5 常量施氮条件下玉米不同生育时期土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量

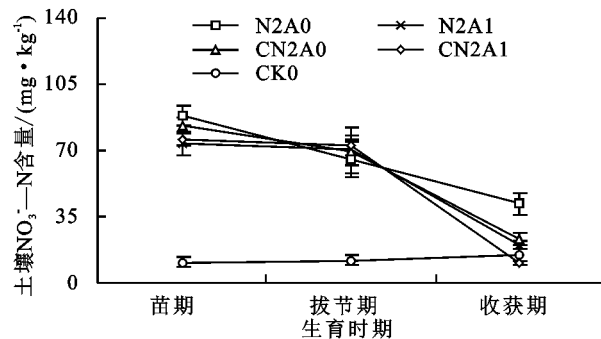


图 6 减量施氮条件下玉米不同生育时期土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量

在玉米大喇叭口期, 除氮空白以外, N2A0 处理较其他处理土壤有效磷含量显著降低(图 8); 其原因可能是玉米追肥显著影响了其土壤有效磷含量; 配施海藻酸、单施控释尿素和减量施用尿素处理均能有效提高玉米大喇叭口期的土壤有效磷含量。在玉米收获期, 配施海藻酸处理和控释尿素处理土壤速效磷含量显著降低 ($P < 0.05$), 减少了土壤速效磷的盈余。玉米整个生育期对钾素需求量较高。在玉米大喇叭口期, N2A1 处理较 N2A0 处理土壤速效钾含量显著提高 24.18% ($P < 0.05$); CN2A1 较 CN2A0 处理土壤速效钾含量显著提高 20.87% ($P < 0.05$); CN1A1 较 CN1A0 土壤速效钾含量显著提高 20.36% ($P < 0.05$)。表明配施海藻酸具有提高土壤速效钾含量的效果。在玉米收获期, 土壤 N2A1 和

CN1A1 处理土壤速效钾显著高于其他处理, 原因可能是海藻酸促进了土壤中缓效钾的活化。

3 讨论

海藻酸与常量控释尿素(CN2A1)配施在小麦和玉米轮作上增产效果最佳。从产量构成因素来看, 提高产量的主要原因是小麦千粒重和夏玉米的百粒重显著高于其他处理; 而小麦的千粒重决定于小麦灌浆期, 玉米的百粒重决定于玉米吐丝期, 配施海藻酸处理的小麦和玉米在灌浆期和吐丝期的蒸腾速率显著升高; 叶面积指数显著提高。Li 等^[19]研究了海藻酸寡糖对黄瓜幼苗的影响, 结果表明, 其显著提高了黄瓜幼苗的蒸腾作用。本研究同样表明, 海藻酸有促进

植物蒸腾速率的作用。因此海藻酸可能通过影响植物的蒸腾速率,加速植物体内的生理活动,通过叶面

积指数提高小麦玉米光合能力,进而提高小麦玉米的产量和氮素利用率。

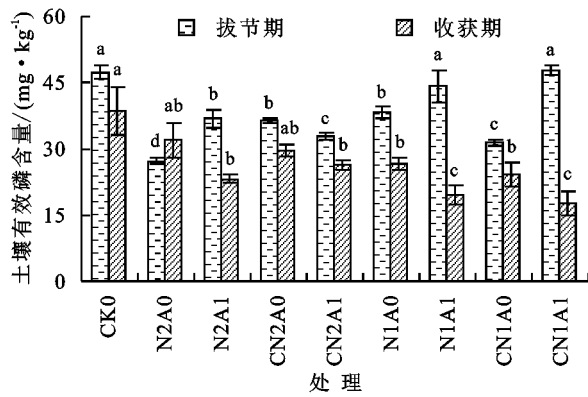


图 7 不同处理小麦不同生育时期土壤有效磷和速效钾含量

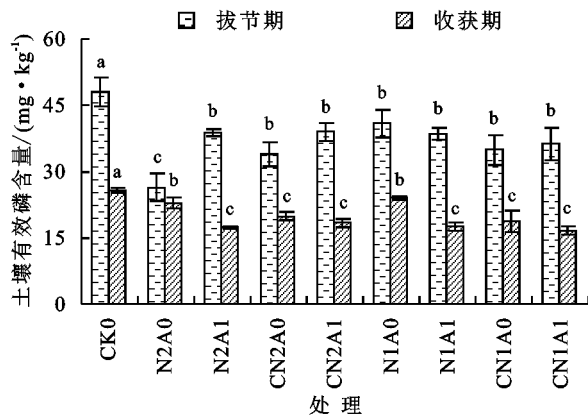
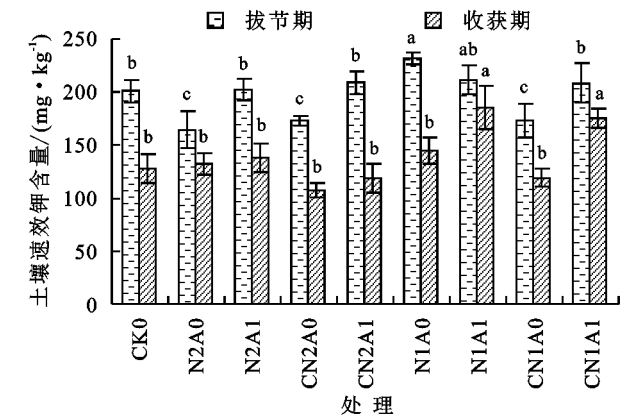


图 8 不同处理玉米不同生育时期土壤有效磷和速效钾含量

海藻酸能显著提高土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量,增加土壤有机碳库^[20]。还有研究^[21]表明,海藻酸能显著降低土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的流失和氨挥发,提高土壤对养分的保持能力。土壤胶体对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的束缚能力不强,往往易造成硝酸盐的淋失。而海藻酸具有还原性,可以显著降低尿素向硝酸盐的转化^[22],对常规尿素具有一定的缓释作用^[23]。本试验条下,海藻酸配施常规尿素和控释尿素显著提高了作物对养分的吸收强度,减少了土壤有效养分的盈余。

陈琪等^[24]对土壤有效磷的活化进行了相关研究表明,添加的功能性物质黄腐酸能促进植物根系生长,刺激植物根系分泌有机酸,进而提高土壤有效磷含量。本研究表明,海藻酸与常规尿素和控释尿素配施均能提高作物生长关键时期土壤有效磷含量,在小麦拔节期,N2A1 处理较 N2A0 处理土壤有效磷含量显著增加 35.20% ($P < 0.05$);N1A1 处理较 N1A0 处理土壤有效磷含量显著增加 15.56% ($P < 0.05$);CN1A1 较 CN1A0 处理土壤有效磷显著增加 52.19% ($P < 0.05$);在玉米大喇叭口期,配施海藻酸处理土壤磷素供应充足。

海藻酸施入土壤后可降低钾离子与其他阳离子的在溶液中比值,促进缓效钾释放出钾离子。何冰等^[25]研究表明,生物有机酸能提高土壤速效钾含量,



其机理是有机酸螯合高价金属阳离子,降低土壤溶液中高价阳离子的浓度,使土壤中钾离子释放。海藻酸属于一种糖醛酸,在玉米大喇叭口期,海藻酸与常量尿素和控释尿素配施使土壤速效钾显著提高了 24.18% 和 28.25% ($P < 0.05$)。海藻酸在玉米上的效果比小麦的效果更好,其原因可能与作物生育期的长短有关。

海藻酸对土壤环境的影响也有较多的研究^[26],海藻酸盐表现出很强的吸附性能,会把细微的黏土矿物吸附聚集到一起,减轻耕地的养分径流损失,改善土壤养分供应强度,提高土壤养分供应的容量和稳定性^[27];海藻酸也能影响土壤微生物对土壤有机质的矿质化进程,提高肥料氮的利用效率^[28]。

4 结论

与常量控释尿素处理相比,海藻酸与常量控释尿素配施处理玉米显著增产 16.38% ($P < 0.05$);氮肥利用率显著提高 ($P < 0.05$)。与减量控释尿素相比,海藻酸配施后小麦玉米均能显著增产 ($P < 0.05$),氮肥利用率显著提高 ($P < 0.05$)。此外配施海藻酸处理较未加海藻酸处理的叶片蒸腾速率、SPAD 值和叶面积指数均有升高的趋势。海藻酸与常量控释尿素配施与未配施海藻酸的处理相比,小麦拔节期土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量提升最高,玉米大喇叭口期的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$

和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量显著提高,玉米大喇叭口期土壤速效钾含量显著提高,海藻酸与控释尿素配施显著提高了土壤速效氮和钾的供应强度和容量,促进了小麦、玉米的生长和产量的提高。

参考文献:

- [1] 张桃林. 守护耕地土壤健康支撑农业高质量发展[J]. 土壤, 2021, 53(1): 1-4.
- [2] Achmon Y, Dowdy F R, Simmons C W, et al. Degradation and bioavailability of dried alginate hydrocolloid capsules in simulated soil system[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(43): e48142.
- [3] Zhao Y, Zhuang J Q, Wang Y, et al. Improvement of loess characteristics using sodium alginate[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(4): 1879-1891.
- [4] 郭成, 高翔鹏, 李明阳, 等. 海藻酸钠基吸附材料去除水中重金属离子的研究进展[J]. 过程工程学报, 2021, 21(1): 3-17.
- [5] Guilherme M R, Aouada F A, Fajardo A R, et al. Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review[J]. European Polymer Journal, 2015, 72: 365-385.
- [6] Tomadoni B, Salcedo M F, Mansilla A Y, et al. Macroporous alginate-based hydrogels to control soil substrate moisture: Effect on lettuce plants under drought stress [J]. European Polymer Journal, 2020, 137: e109953.
- [7] Wang B, Gao B, Zimmerman A R, et al. Novel biochar-impregnated calcium alginate beads with improved water holding and nutrient retention properties[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 209: 105-111.
- [8] Liu S L, Wu Q L, Sun X X, et al. Novel alginate-cellulose nanofiber-poly(vinyl alcohol) hydrogels for carrying and delivering nitrogen, phosphorus and potassium chemicals[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 172: 330-340.
- [9] Liu R Z, Jiang X L, Guan H J, et al. Promotive effects of alginate-derived oligosaccharides on the inducing drought resistance of tomato[J]. Journal of Ocean University of China, 2009, 8(3): 303-311.
- [10] 王海标, 张博, 陶静静, 等. 海藻酸复混肥对夏玉米产量及养分吸收利用的影响[J]. 农学学报, 2017, 7(10): 25-29.
- [11] Zhang C G, Wang W X, Zhao X M, et al. Preparation of alginate oligosaccharides and their biological activities in plants: A review[J]. Carbohydrate Research, 2020, 494: e108056.
- [12] 毛云飞, 郭小静, 王增辉, 等. 麦芽糖等糖类对重茬土壤改良和苹果砧木生长的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 298-304.
- [13] Liu H, Zhang Y H, Yin H, et al. Alginate oligosaccharides enhanced *Triticum aestivum* L. tolerance to drought stress[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 62: 33-40.
- [14] 杨相东, 张民. 缓/控释和稳定性肥料技术创新驱动化肥行业科技发展: 新型肥料的研制与高效利用”专刊序言[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12): 2029-2031.
- [15] 秦瑞劼, 张民, 刘之广, 等. 植物诱抗剂对尿素氮利用率和小麦产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 327-332.
- [16] 李泽丽, 刘之广, 张民, 等. 控释尿素配施黄腐酸对小麦产量及土壤养分供应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 959-968.
- [17] Peng C R, Zheng J L, Huang S, et al. Application of sodium alginate in induced biological soil crusts: Enhancing the sand stabilization in the early stage[J]. Journal of Applied Phycology, 2017, 29(3): 1421-1428.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [19] Li J Q, Wang X Y, Lin X P, et al. Alginate-derived oligosaccharides promote water stress tolerance in cucumber (*Cucumis sativus* L.)[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 130: 80-88.
- [20] 吕冬青, 张铭谷, 马玉增, 等. 黄腐酸对蒜套棉制度下棉花产量品质及土壤性状的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 167(2): 225-233.
- [21] Gadkari D. Nitrification in the presence of soil particles, sand, alginate beads and agar strands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(1): 17-21.
- [22] 张琳, 韩西红, 王海朋, 等. 海藻酸及海藻寡糖在肥料增效助剂领域的应用[J]. 种子科技, 2018, 36(10): 34-35.
- [23] Wei L, Hong T Q, Chen T H, et al. Factors influencing inhibitory effect of alginic acid on the growth rate of struvite crystals[J]. Water Air and Soil Pollution, 2019, 230(1): e10.
- [24] 陈琪, 刘之广, 张民, 等. 包膜磷酸二铵配施黄腐酸提高小麦产量及土壤养分供应强度[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1472-1484.
- [25] 何冰, 薛刚, 张小全, 等. 有机酸对土壤钾素活化过程的化学分析[J]. 土壤, 2015, 47(1): 74-79.
- [26] Guo X, Wang Y, Qin Y M, et al. Structures, properties and application of alginic acid: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 162: 618-628.
- [27] Wang B, Wan Y S, Zheng Y L, et al. Alginate-based composites for environmental applications: A critical review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2019, 49(4): 318-356.
- [28] 黄继川, 彭智平, 涂玉婷, 等. 施用海藻酸复合肥料的双季稻产量和氮磷肥料效应[J]. 热带作物学报, 2020, 41(5): 859-867.