

杨 苏, 叶雪峰, 章 欢, 等. 褐煤腐殖酸用量对玉米生长及黄河故道潮土养分含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 905-910.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.04.014

褐煤腐殖酸用量对玉米生长及黄河故道潮土养分含量的影响

杨 苏^{1,2}, 叶雪峰¹, 章 欢³, 李辉信¹, 张永春², 艾玉春², 汪吉东²

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部江苏耕地保育科学观测实验站, 江苏 南京 210014; 3. 江苏大学农业装备工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 腐殖酸具有培肥土壤, 促进作物生长和养分吸收的作用, 褐煤中腐殖酸含量高, 近年来备受关注。探究褐煤腐殖酸用量对作物生长及潮土养分含量的影响对明确褐煤腐殖酸的增产潜力, 提高褐煤腐殖酸资源利用效率具有重要意义。本研究采用盆栽试验方法, 在施用氮、磷、钾肥的基础上, 设置 5 个褐煤腐殖酸用量, 分别为 CK (0 g/kg)、F1 (10 g/kg)、F2 (20 g/kg)、F3 (40 g/kg) 和 F4 (80 g/kg)。结果表明, 褐煤腐殖酸施用可显著增加玉米产量、干物质量和养分吸收量。随施用量的增加, 玉米植株对氮、磷、钾的吸收量呈先上升后下降的趋势, F2 处理吸收量最大。与 CK 相比, 当施用量 ≥ 10 g/kg 时, 玉米苗期总根长显著增加 ($P < 0.05$), 当施用量达到 20 g/kg 时, 根总投影面积显著增加。褐煤腐殖酸显著增加土壤有机质、全氮和速效钾含量 ($P < 0.05$), 降低速效磷和 pH, 其中施用量 20 g/kg (F2 处理) 对全氮和速效钾的增幅最大。综上所述, 褐煤腐殖酸用量为 20 g/kg 时对玉米生长和潮土培肥效果最佳, 可获得最大的经济效益。

关键词: 褐煤腐殖酸; 潮土; 玉米根系; 土壤养分; 养分吸收量

中图分类号: S158 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)04-0905-06

Effects of lignite humic acid on corn growth and nutrient content in fluvo-aquic soil along the Yellow River

YANG Su^{1,2}, YE Xue-feng¹, ZHANG Huan³, LI Hui-xin¹, ZHANG Yong-chun², AI Yu-chun², WANG Ji-dong²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Scientific observing and Experimental Station for Farmland Conservation (Jiangsu), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 3. College of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Humic acid can improve soil fertilizer, promote crop growth and nutrient absorption. The content of humic acid in lignite is high, which has attracted much attention in recent years. Exploring the effects of lignite humic acid on crop growth and nutrient content in fluvo-aquic soil is of great significance to clarify the yield-increasing potential of lignite humic

acid and improve the utilization efficiency. In this study, five treatments were set up in the pot experiment. Based on the application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers, lignite humic acid with the contents of 0 g/kg (CK), 10 g/kg (F1), and 20 g/kg (F2), 40 g/kg (F3) and 80 g/kg (F4) was applied. The results showed that the application of lignite humic acid could significantly increase maize yield, dry matter weight and nutrient uptake. With the increase of the application rate, the absorption of

收稿日期: 2019-12-10

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(17)-1001]; 国家重点研发计划项目 (2018YFD0800301); 江苏省重点研发计划项目 (BE2019378)

作者简介: 杨 苏 (1994-), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事土壤修复与养分均衡的研究。 (E-mail) 2017103075@njau.edu.cn

通讯作者: 李辉信, (E-mail) huixinli@njau.edu.cn

nitrogen, phosphorus and potassium increased first and then decreased, and the absorption amount in F2 treatment was the largest. Compared with the control, the total root length of corn at seedling stage was significantly increased ($P < 0.05$) when the application rate of lignite humic acid was not less than 10 g/kg. When the application amount reached 20 g/kg, the tail root projection area increased significantly. Lignite humic acid significantly increased the contents of soil organic matter, total nitrogen and available potassium ($P < 0.05$), and decreased available phosphorus content and pH. Moreover, the increasing extent of total nitrogen and available potassium was largest in F2 treatment. In summary, the treatment of 20 g/kg lignite humic acid has the best effect, and can the treatment the maximum economic benefits.

Key words: lignite humic acid; fluvo-aquic soil; maize root; soil nutrient; nutrient uptake

绿色生态农业是可持续农业发展的重要途径。腐殖酸是生态农业和无公害农业中常用的有机肥料之一。腐殖酸能够提高肥料效应,赵凤亮等^[1]研究结果表明,施用腐殖酸类肥料,能降低氮素淋失量,提高氮素利用率。腐殖酸也有良好的促根效应,梁太波等^[2]认为施用腐殖酸提高了根系活力和干物质积累量,使玉米增产 61.29%。褐煤中腐殖酸含量高,具有较好的开发利用价值^[3],能改善土壤理化性质,增加土壤养分含量,提高肥料利用率,促进作物生长发育,提高出苗率和作物产量的作用。腐殖酸自身的活性官能团具有酸性、阳离子交换能力、络合及吸附分散能力^[4],可减少化肥用量^[5-6]。腐殖酸施用对作物生产发挥着重要的作用,但过量或不合理地施用则会引发土壤次生盐渍化、酸化、土壤养分失调等障碍问题^[7],并产生一系列的环境污染问题^[8],腐殖酸用量因土壤类型不同而不同。陈伏生等在风沙土上的研究结果显示,风化煤腐殖酸能显著提升土壤的有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量,降低土壤 pH 值^[9]。MORA 等^[10]研究了低质量浓度(5 g/L)和高质量浓度(100 mg/L)的褐煤腐殖酸对黄瓜生长的影响,结果发现,100 mg/L 腐殖酸具有较好的促根效果。薛超群等^[11]认为腐殖酸用量为 120 kg/hm²时对植烟土壤培肥效果最佳。王帅等^[12]认为,施用 33~66 kg/hm²腐殖酸保水剂可有助于玉米生长生育及产量的提高。但对于有机质含量低、土壤结构差、保水保肥能力弱的潮土,施用褐煤腐殖酸对玉米生长及培肥的效果如何还有待进一步研究。

玉米是中国主要的粮食作物,也是黄河故道地区种植的主要作物^[13]。根系是植物吸收养分和水分的重要器官,也是物质同化、转化或合成的场所,苗期玉米的根系形态可间接影响植物的生长发育和产量^[14-16]。土壤是作物生存的根本,可为植物提供生长所必需的营养物质,其肥力水平的高低可直接影响作物长势和产量,安江勇等^[17]对玉米品种黔单

24 的研究结果表明,玉米产量随肥料施用量增加呈抛物线变化,当施肥量增加超过肥料最大效应值,其养分吸收量反而减小,因此将土壤和作物作为一个整体,探究外源褐煤腐殖酸施用对玉米生长及土壤养分的影响具有重要意义。

本试验通过设置 5 个褐煤腐殖酸用量,探究其对玉米苗期根系性状、干物质质量、养分吸收量及土壤理化性状的影响,以期找出玉米高产稳产和土壤培肥的最佳褐煤腐殖酸用量,为褐煤腐殖酸的高效化利用及玉米的养分调控提供理论参考。

1.1 试验设计

本试验为盆栽试验,供试土壤为潮土,由江苏省盐城市滨海县界牌镇三坝村黄河湾绿色科技有限公司(北纬 33°43',东经 119°37')提供,基地地处北温带,气候温和,地势较高,降雨充沛,雨热同季,常年平均气温 14.1 ℃,平均降雨量为 942.6 mm。

盆栽土壤选取 0~20 cm 表层土壤,自然风干后去除大的石块、土块及植物残体备用。试验共设置 5 个处理,以只施氮、磷、钾肥为对照(CK),其他处理均在施用氮、磷、钾肥的基础上施用 10 g/kg 褐煤腐殖酸(F1)、20 g/kg 褐煤腐殖酸(F2)、40 g/kg 褐煤腐殖酸(F3)、80 g/kg 褐煤腐殖酸(F4),每个处理 6 个重复,共 30 个盆钵,其中 3 个重复用于测定玉米苗期根系形态,另外 3 个重复用于土壤养分含量及植株养分吸收量的测定。每个盆钵(高 35 cm,直径 40 cm)装风干土 20 kg,基肥一次性施用复合肥 24 g,追施氮肥 2 次,用量均为总氮用量的 30%。所用腐殖酸为褐煤腐殖酸,有机质 415 g/kg,全氮 3.53 g/kg,全磷 10.89 g/kg,全钾 1.36 g/kg, pH 值 4.95,褐煤腐殖酸的施用方式为混施。种植玉米品种为燕禾金号,试验开始前每盆选取大小一致、籽粒饱满的 4 粒玉米种子,于 2018 年 7 月 2 日在江苏省农业科学院温室进行试验,玉米出苗后(7 月 8 日)进行间苗,保证每盆有一棵玉米植株,每盆插入一根注水

管,防止加水时水力冲击对土壤结构造成破坏,每 7 d 采用称质量法补水 1 次,使土壤含水量保持在田间最大持水量的 60%,于 7 月 30 日采用完全破坏性取样测定玉米苗期根系形态,于 10 月 16 日采用完全破坏性取样,测定玉米产量、植株生物量、地上部分养分吸收量、地下部分养分吸收量及土壤养分含量。供试土壤有机质 4.42 g/kg,全氮 0.18 g/kg,全磷 0.42 g/kg,有效磷 2.63 mg/kg,全钾 21.20 g/kg,速效钾 63.30 mg/kg,pH 值 8.58。

1.2 测定方法

用卷尺测定玉米株高,株高为玉米叶尖到根基部的垂直距离;玉米收获时,将地上部、地下部分开,在 105 ℃ 下杀青 30 min,75 ℃ 烘干至恒质量,用称质量法称地上、地下部干质量。植株养分含量测定,取烘干后的样品磨碎过 100 目筛, $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,用半微量凯氏定氮法测定全氮,钒钼黄比色法测定全磷,火焰光度计法测定全钾,根系形态采用 Epson Perfection V850 Pro 根系扫描仪测定。

植株养分吸收量=植株养分含量×植株干物质量

1.3 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2003 和 Origin 9.0 软件对数据进行分析 and 作图,采用 SASS 9.1 统计软件 Duncan's 法进行处理间差异显著性检验 ($P<0.05$)。

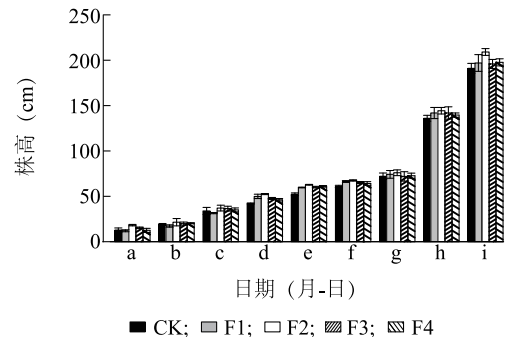
2 结果与分析

2.1 褐煤腐殖酸施用量对玉米株高的影响

褐煤腐殖酸能显著增加玉米株高,随培养时间的延长,玉米株高增长速率呈现先慢后快的趋势(图 1),在 7 月 9 日至 8 月 10 日处于慢速增长阶段,之后增长速率呈上升的趋势。在所有处理中,F2 处理玉米生长最快,其次为 F4、F3、F1 处理,CK 玉米生长最慢。经过 99 d 的培养,F2 处理株高达到 208.9 cm,比 CK 高 18.1 cm。

2.2 褐煤腐殖酸施用量对玉米苗期根系的影响

在植物生长过程中,褐煤腐殖酸对根系生长的刺激作用是其对植物产生刺激作用的最初动力^[2]。施用褐煤腐殖酸会增加玉米的总根长、总投影面积(表 1),但增幅因褐煤腐殖酸施用量的不同而有所差异。总体而言,F4 处理对玉米根系的促进效果最优,与 CK 相比,总根长、总投影面积和总表面积显著增加,但与 F2 相比无显著差异,从经济效益角度考虑,认为潮土腐殖酸用量为 20 g/kg(F2 处理)的整体效应最佳。



CK(对照):只施氮、磷、钾肥;F1、F2、F3、F4 分别为在施用氮、磷、钾肥的基础上施用 10 g/kg 褐煤腐殖酸、20 g/kg 褐煤腐殖酸、40 g/kg 褐煤腐殖酸、80 g/kg 褐煤腐殖酸。a:07-09;b:07-12;c:07-17;d:07-22;e:07-27;f:08-03;g:08-10;h:09-10;i:10-16。

图 1 不同培养期的玉米株高

Fig.1 Plant height of maize in different culture periods

表 1 不同处理对玉米苗期根系的影响

Table 1 Effects of different treatments on maize root at seedling stage

处理	总根长 (cm)	总投影面积 (cm ²)	总表面积 (cm ²)	最长根长 (cm)
CK	201±3.4c	12.9±0.06c	23.1±0.11b	44.6±0.97b
F1	204±0.1ab	12.9±0.15bc	23.4±0.17ab	48.0±0.82ab
F2	206±3.5ab	13.0±0.06ab	23.5±0.52ab	53.3±4.19a
F3	211±3.1a	13.0±0.08ab	23.8±0.09ab	49.7±1.89ab
F4	212±2.9a	13.2±0.04a	24.0±0.06a	49.3±2.06ab

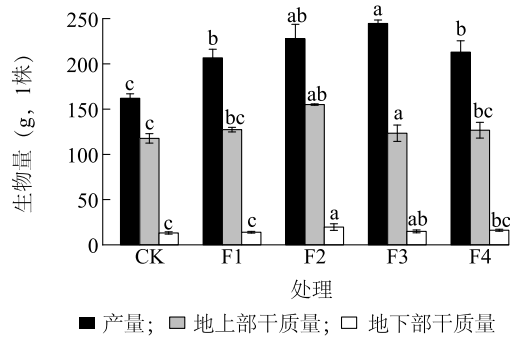
CK、F1、F2、F3、F4 见图 1 注。同一列中不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平。

2.3 褐煤腐殖酸施用量对玉米产量和地上部、地下部生物量的影响

褐煤腐殖酸施用会使玉米产量增加 27.2%~50.6%,地上部干质量增加 5.12%~32.50%,地下部干质量增加 6.10%~50.45%,且产量和植株干质量随褐煤腐殖酸施用量的增加呈先上升后下降的趋势,在褐煤腐殖酸施用量为 40 g/kg 时玉米产量达到最大值,但与 F2 处理无显著差异(图 2)。在褐煤腐殖酸施用量为 20 g/kg 时地上部和地下部干质量达到最大值。

2.4 褐煤腐殖酸施用量对玉米植株养分吸收的影响

褐煤腐殖酸可显著增加植株的氮、磷、钾吸收量,且随褐煤腐殖酸施用量的增加,植株对养分的吸收量呈先上升后下降的趋势。从图 3 可以看出,玉米植株对钾的吸收量最大,其次是氮,对磷的吸收量

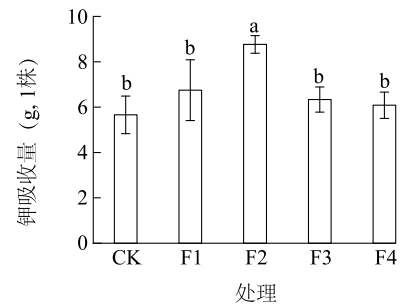
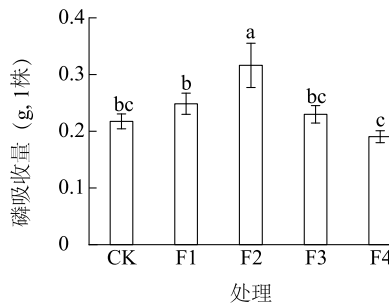
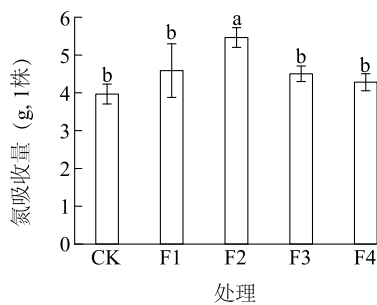


CK、F1、F2、F3、F4 见图 1 注。

图 2 玉米产量和植株干质量

Fig.2 Yield and dry matter weight of maize

最小。通过对褐煤腐殖酸不同施用量的对比发现,玉米植株对于氮、磷、钾的吸收量,在褐煤腐殖酸用量为 20 g/kg 时达到最大值,分别比 CK 高 37.5%、45.4% 和 54.8%。



CK、F1、F2、F3、F4 见图 1 注。

图 3 玉米植株养分吸收量

Fig.3 Nutrient uptake of corn plants

表 2 褐煤腐殖酸施用量对土壤基本理化性质的影响

Table 2 Effects of lignite humic acid on soil basic physical and chemical properties

编号	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	pH
CK	6.03±0.27c	0.27±0.01c	26.92±1.98abc	215±8.64b	56.95±2.82a	8.01±0.028a
F1	8.36±0.34b	0.34±0.11a	29.43±1.63ab	234±6.65ab	54.71±3.23a	7.84±0.033ab
F2	9.72±0.26a	0.35±0.03a	31.70±4.27a	242±7.03a	46.67±1.48bc	7.80±0.086ab
F3	10.18±0.38a	0.33±0.05ab	23.14±3.16bc	244±8.96a	51.15±0.49ab	7.69±0.147bc
F4	10.61±0.67a	0.31±0.06b	19.62±0.62c	221±1.70ab	43.24±1.89c	7.48±0.025c

CK、F1、F2、F3、F4 见图 1 注。

3 讨论

本试验探究不同用量腐殖酸对玉米生长及土壤养分含量的影响,结论如下:针对黄河故道地区有机质含量较低的潮土,推荐褐煤腐殖酸施用量为 20

2.5 褐煤腐殖酸施用量对土壤养分的影响

从表 2 可以看出,褐煤腐殖酸的施用会显著增加土壤有机质、全氮和速效钾含量。土壤基本理化性质对褐煤腐殖酸施用量有不同响应,其中土壤有机质含量随褐煤腐殖酸施用量的增加呈增加的趋势,但处理 F2、F3、F4 差异不显著。土壤全氮、速效钾的含量随褐煤腐殖酸施用量的增加呈先增加后降低的趋势,而土壤有效磷含量和土壤 pH 会随褐煤腐殖酸施用量的增加呈下降的趋势。土壤全氮、碱解氮含量在褐煤腐殖酸施用量为 20 g/kg 时达到最大值。土壤速效钾含量在褐煤腐殖酸施用量为 40 g/kg 时达到最大值,比 CK 高 13.49%。土壤有机质含量则在褐煤腐殖酸用量为 80 g/kg 时达到最大值 (10.61 g/kg),4 种用量褐煤腐殖酸使土壤 pH 值降低的范围为 2.24%~6.62%,处理 F3、F4 的 pH 值显著低于 CK。

g/kg,显著增加土壤有机质、全氮和速效钾含量,培肥效果最佳。玉米产量及养分吸收量随腐殖酸施用量的增加呈先增大后减小的趋势,玉米植株对氮、磷、钾的养分吸收量在腐殖酸施用量为 20 g/kg 时达到最大值,而产量在施用量为 40 g/kg 时达到最大

值,但与施用量为 20 g/kg 差异不显著。因此,综合考虑培肥增产效果及经济效益,褐煤腐殖酸施用量为 20 g/kg 效益最佳。

褐煤腐殖酸含有多种官能团,对作物生长发育及体内代谢具有刺激作用,在农田生态系统上具有极大的应用潜力。于广武等^[18]通过 4 个试验点研究了施用腐殖酸生物有机和无机生态肥对玉米生长发育的影响,结果表明施用褐煤腐殖酸肥料处理均促进了玉米植株健壮生长,株高增高 4.4~7.0 cm。这与本研究结果中褐煤腐殖酸施用使玉米植株增加的研究结论相似。褐煤腐殖酸作为生态农业中常用的肥料,与化肥组合施用能够活化土壤中多种矿质元素,改良土壤,提高肥效,促进作物对养分的吸收利用,提高肥料利用率。氮、磷、钾为作物生长发育必需的大量元素,在作物体内的吸收、同化和运输会影响作物的生长发育^[19]。施用褐煤腐殖酸会增加作物对土壤养分的吸收,腐殖酸对植株生长的促进作用与腐殖酸用量密切相关,添加量过高会导致营养过剩,对养分的吸收利用率下降^[20]。本研究结果显示,褐煤腐殖酸用量为 20 g/kg 时玉米植株养分吸收量达到最大值,超过该用量,养分吸收率呈现下降的趋势。这是由于褐煤腐殖酸与生长素作用类似,表现为低浓度促进高浓度抑制。也可能是由于褐煤腐殖酸具有良好的促根效果,褐煤腐殖酸会促进分生组织细胞分裂,增强其代谢活性^[21]。

此外,褐煤腐殖酸超分子结构中含有类生长素的物质,这些物质可接近植物细胞和细胞外的受体,增加质子泵的活力,促进植株对养分的吸收^[4-22],但对根表面积和体积无显著影响,这可能与培养试验(盆钵及土壤体积)条件有限有关。

腐殖酸具有增氮、解磷、固钾等土壤培肥作用。随腐殖酸施用量的增加,土壤中的有机质含量呈逐渐增加的趋势,而全氮、碱解氮和速效钾含量呈先增加后降低的趋势,速效磷和 pH 呈降低的趋势。这与周鑫斌等^[23]、张继舟等^[24]的研究结果相似,原因一方面由于腐殖酸在土壤酸碱度、阳离子交换量、养分含量等方面更符合土壤自身的需求^[25],另一方面腐殖酸含有有机大分子团,能活化多种被土壤固定的养分元素,促进微生物大量繁殖,加速腐殖酸中有机态养分的释放,提高土壤有机质和速效养分含量^[26],同时也能为植物的生长发育提供可利用的微生物来增强土壤养分转化^[27]。但速效磷含量降低

与刘红恩等^[28]的结果不同,刘红恩认为在尿素中添加腐殖酸可显著增加土壤中速效磷的含量,这可能与供试土壤类型有关,本试验采用的土壤类型为潮土,土壤结构差,易漏水漏肥,浇水时可能会导致土壤磷的流失,降低土壤速效磷含量。靳志丽等^[29]认为土壤养分的增加与腐殖酸用量有关,在一定范围内,有机质随腐殖酸用量的增加而增加,而土壤中有效磷含量下降可能是因为腐殖酸中的官能团与土壤中磷离子结合成络合物,促进了作物对有效磷的吸收,固定态磷释放速率变化不大所致。另外腐殖酸类型不同也会造成结果差异,刘红恩等^[28]所用腐殖酸为腐殖酸尿素,氮含量高,而本研究用的是褐煤腐殖酸,有机质含量高,而氮和钾含量较低。对于腐殖酸降低土壤 pH,裴瑞杰等^[30]也对此做出了合理的解释,他们认为腐殖酸与化肥结合,其官能团能促进酸性离子释放,起到缓冲作用^[32],降低 pH 使其适宜玉米生长需求。

参考文献

- [1] 赵凤亮,李 虹,曹彦圣,等.施用腐植酸肥对氮素淋失及油菜生长的影响[J].热带作物学报,2015,36(7):1197-1200.
- [2] 梁太波,王振林,刘兰兰,等.腐殖酸钾对生姜生长、钾素吸收及钾肥利用率的影响[J].水土保持学报,2008(1):87-90,139.
- [3] 顾 鑫,任翠梅,杨 丽,等.煤炭腐植酸对土壤盐碱性及玉米灌浆期干物质积累的影响[J].黑龙江农业科学,2018(8):31-34.
- [4] CANELLAS L P. Chemical composition and bioactivity properties of size-fractions separated from a vermicompost humic acid[J]. Chemosphere: Environmental Toxicology and Risk Assessment, 2010,78(4):457-466.
- [5] 袁 亮,赵秉强,林治安,等.增值尿素对小麦产量、氮肥利用率及肥料氮在土壤剖面中分布的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(3):620-628.
- [6] 程 亮,张保林,王 杰,等.腐植酸肥料的研究进展[J].中国土壤与肥料,2011(5):1-6.
- [7] 高 伟,朱静华,李明悦,等.有机无机肥料配合施用对设施条件下芹菜产量、品质及硝酸盐淋溶的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):657-664.
- [8] 袁丽金,巨晓棠,张丽娟,等.设施蔬菜土壤剖面氮磷钾积累及对地下水的的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(1):14-19.
- [9] 陈伏生,曾德慧,陈广生,等.风沙土改良剂对白菜生理特性和生长状况的影响[J].水土保持学报,2003,17(2):152-155.
- [10] MORA V N, BACAICOA E, ANGEL-MARIA Z, 等.腐植酸对黄瓜植株生长的影响涉及与硝酸盐浓度有关的细胞分裂素、多胺、矿质营养素浓度在植株根系和芽中的变化[J].腐植酸,2012(2):29-39.

- [11] 薛超群, 奚家勤, 王建伟, 等. 腐殖酸用量对土壤微生物数量和烟叶香气品质的影响[J]. 烟草科技, 2014(3): 71-75.
- [12] 王 帅, 姚 凯, 陈殿元, 等. 腐殖酸保水剂用量对白浆土养分及玉米产量性状的影响研究[J]. 玉米科学, 2018, 26(1): 149-153.
- [13] 杨慧莲, 王海南, 韩旭东, 等. 我国玉米种植区域比较优势及空间分布——基于全国18省1996-2015年数据测算[J]. 农业现代化研究, 2017, 38(6): 921-929.
- [14] 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(4): 1-15.
- [15] 王宜伦, 白由路, 王 磊, 等. 基于养分专家系统的小麦-玉米推荐施肥效应研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(22): 4483-4492.
- [16] CALVO P, NELSON L, KLOPPER J W. Agricultural uses of plant biostimulants[J]. Plant & Soil, 2014, 383(1/2): 37-41.
- [17] 安江勇, 肖厚军, 秦 松, 等. 不同施肥量对贵州高产玉米养分吸收、生物性状、产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(3): 73-79.
- [18] 于广武, 李晓冰, 鞠丽娟, 等. 腐植酸生物有机无机生态肥对玉米生育性状及产量的影响[J]. 腐植酸, 2016(4): 22-25.
- [19] 赵 营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006(5): 622-627.
- [20] CANELLAS L P, OLIVARES F L, OKOROKOVAFAÇANHA A L, et al. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots[J]. Plant Physiology, 2002, 130(4): 1951-1957.
- [21] ZANDONADI D B, CANELLAS L P, FAÃ § ANHA A R. Indolacetic and humic acids induce lateral root development through a concerted plasmalemma and tonoplast H⁺ pumps activation[J]. Planta, 2007, 225(6): 1583-1595.
- [22] WANG G S, HSIEH S T, HONG C S. Destruction of humic acid in water by UV light - Catalyzed oxidation with hydrogen peroxide[J]. Water Research: A Journal of the International Water Association, 2000, 34(15): 3882-3887.
- [23] 周鑫斌, 段学军. 不同土壤熟化措施对土壤微生物量碳的影响[J]. 山西农业科学, 2003(2): 33-36.
- [24] 张继舟, 袁 磊, 马献发. 腐植酸对设施土壤的养分、盐分及番茄产量和品质的影响研究[J]. 腐植酸, 2008(3): 19-22.
- [25] 胡明芳, 田长彦, 王 平, 等. 黑液腐殖酸液体肥料对棉花生长及土壤理化性质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 195-199.
- [26] 吕金东, 习利群. 腐植酸复合肥在桉树栽培中的应用[J]. 江西林业科技, 2006(S1): 14-20.
- [27] 钟哲科, 杨慧敏, 白瑞华, 等. 氮改性褐煤的特性及其在退化土壤造林中的应用研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 213-216.
- [28] 刘红恩, 张胜男, 刘世亮, 等. 腐植酸尿素对冬小麦产量、养分吸收利用和土壤养分的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(7): 944-952.
- [29] 靳志丽, 刘国顺, 聂新柏. 腐殖酸对土壤环境和烤烟矿质吸收影响的研究[J]. 中国烟草科学, 2002(3): 15-18.
- [30] 裴瑞杰, 王俊忠, 冀建华, 等. 腐殖酸肥料与氮肥配施对土壤理化性质的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(19): 331-334.

(责任编辑: 陈海霞)