

胶粘控释肥的载体材料对玉米生长和土壤酶活性的影响

丁 洪^{1,2}, 李世清², 张玉树¹, 颜明娟¹, 唐丽娜³, 陈顺辉³

(1.福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350013; 2.黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.福建省烟草农业科学研究所, 福州 350001)

摘 要:以多种天然、半天然和合成高分子有机物以及无机矿物质作为复合载体材料,研究开发出一种胶粘控释肥料。为了研究复合载体材料对土壤环境的效应,采用土壤盆栽和实验室培养的方法研究载体材料对玉米生长、生理生化活性和土壤酶活性的影响。结果表明,载体材料处理的玉米生长和生理生化活性与对照处理相比略有促进作用,但差异不显著;对土壤转化酶、脲酶具有明显的激发效应,正常用量下对过氧化氢酶、磷酸酶没有明显的不利影响,但过高用量会出现抑制作用。胶粘控释肥料与常规肥料相比,可促进玉米生长、提高产量和养分利用率,生物量干重提高 8.9%,氮钾养分利用率分别提高 11.1%和 5.1%,均达显著水平。载体材料的施用对环境不会产生不利影响,而且胶粘控释肥料表现出明显的提高养分利用率和增产效果。

关键词:载体材料;胶粘控释肥料;玉米;生物量;生理生化活性;土壤酶

中图分类号:S145.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)01-0137-06

Influences of Carrier Materials Used in Gel-based Controlled Release Fertilizer on Growth of Maize and Activities of Soil Enzymes

DING Hong^{1,2}, LI Shi-qing², ZHANG Yu-shu¹, YAN Ming-juan¹, TANG Li-na³, CHEN Shun-hui³

(1.Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Science, Fuzhou 350013, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3.Fujian Institute of Tobacco Agricultural Science, Fuzhou 350001, China)

Abstract: A gel-based controlled release fertilizer was developed with complex carrier materials and conventional fertilizers, the complex carrier materials were consisted of natural, semi-natural and synthetic organic macromolecule matters and mineral matters. Pot cultural and incubation experiences were conducted in net house and laboratory respectively to study the effects of the complex carrier materials on growth and physiological-biochemical properties of maize and activities of soil enzyme for purpose of environment. The results showed that carrier materials applied to soil could slightly promote growth and physiological-biochemical properties of maize compared with blank treatment, significantly stimulated invertase and urease activities in soil, and had no adverse influence on catalase and phosphatase activities under normal application amount, however, inhibited their activities under higher application amount. The gel-based controlled release fertilizer applied could greatly improve growth and nutrient use efficiency of maize, the biomass increased by 8.9%, the use efficiencies of nitrogen and potassium of the fertilizer improved by 11.1% and 5.1% ($P < 0.05$) respectively compared with conventional fertilizer. In conclusion, the carrier materials used in the gel-based controlled release fertilizer did not appeared adverse influence on soil environment, and the fertilizer showed significant benefit to improving yield and nutrient use efficiency in maize crop.

Keywords: carrier material; gel-based controlled release fertilizer; maize; biomass; physiological and biochemical property; soil enzyme

收稿日期:2011-05-06

基金项目:黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金课题(10501-291);福建省科技厅重大科技项目(2002N002);福建省发改委产业技术开发项目(闽发改投资[2007]877);中国烟草总公司福建省公司科技项目(2007059)

作者简介:丁 洪(1965—),男,江西安福人,博士后,研究员,主要从事新型肥料、农业面源污染和氮、碳生物地球化学循环方面的研究。

E-mail:hongding@china.com

应用控释肥料能减少肥料养分流失、氨挥发、硝化反硝化和温室气体排放^[1-4],减少肥料对环境的污染,提高肥料养分,还因减少施肥次数而降低劳动强度和生产成本,因而控释肥料成为肥料研究与发展的热点。控释肥料一般有 3 种类型:一是通过化学分解释放养分的控释肥料(如尿素甲醛、聚磷酸盐);二是包膜(裹)控释肥料;三是基质配制组成的载体型(胶粘型)控释肥料^[5]。然而,包膜和基质载体材料的选用对包膜和基质载体型控释肥料的发展至关重要,选用的材料应具有控释效果好、价格低廉、环境友好等特点。材料的环境友好可以直接通过对材料的降解性、毒性和污染性等方面加以研究,也可以通过材料对作物生长、土壤酶等方面的影响间接反映出使用材料的环境的安全性^[6]。

我们采用天然、半天然和合成的有机高分子材料以及无机矿物等材料,复合成载体材料用以研制出一种胶粘控释肥料(专利公开号 201010580961.6)。本文在盆栽试验和实验室土壤培养试验条件下,研究了胶粘控释肥料中应用的胶粘材料对玉米生长、生理生化活性和土壤酶活性的影响以及胶粘材料的环境安全性,为胶粘控释肥料的研究与应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 盆栽试验

盆栽试验在福建省农业科学院土壤肥料研究所网室进行。供试土壤为水稻土,土壤有机质含量为 $22.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效氮 $135.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $11.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $38.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、pH5.09,玉米品种为“农大 3138”。

供试肥料为常规肥料尿素(含 N46%)、磷酸二铵(含 P_2O_5 46%、N18%)、氯化钾(含 K_2O 60%)和硫酸钾(含 K_2O 50%),NPK 养分比例为 14:8:8;胶粘控释肥 70# 的 NPK 也为同样比例,且肥料组成与常规肥料相同。试验用的胶粘材料是按照胶粘控释肥料 70# 的制作过程先制成颗粒,再研磨成粉末,过 1 mm 筛后施用。

试验设 4 个处理,即 CK、胶粘材料、常规肥料、胶粘控释肥 70#,每处理 10 次重复,共 40 桶。每桶装风干土 7 kg,CK 为不添加任何物质,胶粘材料处理为施入胶粘材料 $6.62 \text{ g} \cdot \text{桶}^{-1}$,常规肥料和胶粘肥料 70# 两个处理采用等养分比例和等养分量,每桶施用量均为纯 N 2.1 g、 P_2O_5 1.2 g、 K_2O 1.2 g;胶粘肥料和常规肥料均为基肥一次性施入。肥料与 7 kg 土充分混合后加

水 2 500 mL,使土壤水分饱和,7 d 后每桶播种 4 粒,出苗后间苗,每桶留 1 株。2006 年 5 月 7 日播种,在 7 月 10 日(抽雄期)取样 1 次,8 月 18 日收获。2 次取样时分别测定其硝酸还原酶、叶片可溶性蛋白质和叶片叶绿素含量。

1.2 培养实验

培养实验土壤为菜园土,有机质含量为 $31.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效氮 $135.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $58.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $87.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、pH5.69。胶粘材料设 5 个水平,即 CK、0.1、0.5、1.0、 $2.0 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,每处理取样 4 次重复,每次取样 20 瓶,分 4 个不同时间段取样,共 80 瓶。采用 250 mL 广口瓶,每瓶装 100 g 半风干土,分别与不同量的胶粘材料混合均匀,然后按田间持水量的 80%加水,每瓶加水 20 mL,置于 25 ℃生化培养箱中培养。瓶口用透气性封口膜封口。分别在第 10、25、40 d 和 55 d 取样。

1.3 测定方法

土壤理化性质和植株养分含量测定采用常规方法,根系体积采用排水法,叶面积为长×宽×0.76^[7],叶绿素含量采用乙醇丙酮浸提比色法^[8],可溶性蛋白质采用考马斯亮兰法^[9],过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法,转化酶采用硫代硫酸钠滴定法^[10],脲酶采用奈氏比色法,磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法^[11]。

1.4 数据处理

采用 SPSS13.0 和 Excel2003 统计软件进行统计与方差分析。

2 结果与分析

2.1 胶粘材料对玉米生长的影响

胶粘材料对土壤环境的影响可以通过多种形式表现出来,也可以通过对作物生长和生理生化活性的影响来体现。从表 1 可以看出,胶粘材料处理与对照相比,在抽雄期和成熟期玉米植株的高度和茎围都有显著增加,而叶片数、有效叶面积、根体积和侧根数等性状两个处理间没有明显差异。施肥处理后这些农艺性状有明显改善,而控释肥料又要优于常规肥料处理。

表 2 显示,施胶粘材料处理与空白对照对比,不论是在抽雄期还是在成熟期,玉米的地上部、地下部(根)和植株总生物量都无显著差异,但表现略有增加趋势。施肥大大促进玉米的生长,极显著增加干物质积累量;施用控释肥料又比常规肥料增产显著,成熟期干物质质量增加 8.9%。这表明胶粘材料对玉米植株

表 1 不同处理对玉米农艺性状的影响

Table 1 Effects of gel-based materials and gel-based controlled release fertilizer on agronomic characteristics of maize at different growth stages

	处理	株高/cm·株 ⁻¹	茎围/cm·株 ⁻¹	有效叶片数/片·株 ⁻¹	有效叶面积/cm ² ·株 ⁻¹	根系体积/cm ³ ·株 ⁻¹	侧根数/条·株 ⁻¹
抽雄期	CK	100.5 ± 1.9bB	2.4 ± 0.2dC	7.8 ± 1.0bA	2 715.4 ± 194.7bB	44.6 ± 6.1cB	14.8 ± 0.5bB
	胶粘材料	112.2 ± 6.4aAB	2.8 ± 0.1cB	7.8 ± 1.0bA	2 724.7 ± 192.1bB	41.8 ± 3.4cB	15.5 ± 2.6bAB
	常规肥	121.3 ± 8.4aA	3.4 ± 0.1bA	9.3 ± 0.5aAB	3 739.5 ± 287.9aA	55.8 ± 7.7bAB	15.8 ± 2.1bAB
	控肥 70#	121.0 ± 7.0aA	3.6 ± 0.1aA	9.0 ± 0.8aA	3 732.6 ± 284.9aA	67.9 ± 8.6aA	19.5 ± 1.3aA
成熟期	CK	152.8 ± 21.7bA	2.8 ± 0.2bB	4.3 ± 0.5bB	982.8 ± 393.9bB	56.0 ± 9.7bB	19.0 ± 2.4bC
	胶粘材料	156.0 ± 9.2abA	3.2 ± 0.1abAB	4.3 ± 0.5bB	1 005.4 ± 137.1bB	58.0 ± 6.1bB	20.3 ± 1.9bBC
	常规肥	167.0 ± 14.2abA	3.4 ± 0.2aA	8.0 ± 0.0aA	2 653.5 ± 274.6aA	108.0 ± 3.6aA	26.5 ± 3.7aBC
	控肥 70#	181.0 ± 17.0aA	3.6 ± 0.4aA	8.0 ± 0.0aA	2 694.9 ± 341.7aA	113.3 ± 19.3aA	29.3 ± 4.1aA

注:不同大、小写字母分别表示不同处理间差异达 1%、5%显著水平,下同。
Note: Different capital and small letters mean significant at 0.01 and 0.05 levels among different treatments, respectively, and the same symbol was used for other tables.

表 2 不同处理对玉米生物量的影响(g·株⁻¹)

Table 2 Effects of gel-based materials and gel-based controlled release fertilizer on biomass of maize at different growth stages(g·plant⁻¹)

处理	抽雄期			成熟期		
	地上部干重	地下部干重	总生物量干重	地上部干重	地下部干重	总生物量干重
CK	30.8±5.4bB	7.9±1.2bAB	38.7±6.6bB	48.2±9.9cC	12.0±1.2bB	60.2±10.5cB
胶粘材料	32.5±2.1bB	7.3±0.5bB	39.8±2.5bB	49.6±2.7cC	13.3±2.9bB	62.9±1.5cB
常规肥	43.2±1.5aA	8.5±0.7aAB	51.7±1.0aA	91.2±3.0bB	21.1±1.7aA	112.3±4.6bA
控肥 70#	43.1±2.0aA	9.5±0.7aA	52.6±1.7aA	103.6±3.8aA	18.7±1.3aA	122.3±4.0aA

生长没有负面影响。白质含量、叶绿素含量、植株 NPK 养分积累量等均无明显差异(见表 3~表 5),胶粘材料对玉米植株的生理生化作用不会产生不利影响。施用常规肥料和控释肥料处理玉米植株的生理生化活性都显著优

2.2 胶粘材料对玉米植株生理生化指标的影响

从植株生理活性方面的表现来看,胶粘材料处理与对照相比,叶片中硝酸还原酶活性、可溶性蛋

表 3 不同处理对玉米叶片硝酸还原酶活性和可溶性蛋白质含量的影响

Table 3 Effects of gel-based materials and gel-based controlled release fertilizer on nitrasiase activity and soluble protein content in maize leaf at different growth stages

处理	硝酸还原酶活性测定/μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹		叶片可溶性蛋白质含量/mg·g ⁻¹	
	抽雄期	成熟期	抽雄期	成熟期
CK	63.7±17.4bB	16.5±7.4bB	10.5±2.9bB	10.1±1.1bB
胶粘材料	63.0±14.2bB	18.0±5.0bB	11.1±5.6bB	10.9±1.4bB
常规肥	138.1±26.1aA	73.7±17.7aA	16.6±0.6aA	14.1±0.5aA
控肥 70#	151.3±34.7aA	77.5±19.0aA	16.4±2.2aA	14.9±0.6aA

表 4 不同处理对玉米叶片叶绿素的影响(mg·g⁻¹鲜重)

Table 4 Effects of gel-based materials and gel-based controlled release fertilizer on chlorophyll content in maize leaf at different growth stages(mg·g⁻¹FW)

处理	抽雄期				成熟期			
	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素总量	类胡萝卜素	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素总量	类胡萝卜素
CK	1.70±0.03cB	0.50±0.03bB	2.20±0.04bB	0.94±0.04cB	1.02±0.02bB	0.30±0.03bB	1.31±0.04bB	0.60±0.02bB
胶粘材料	1.73±0.07cB	0.52±0.02bB	2.21±0.11bB	0.95±0.02cB	1.02±0.05bB	0.30±0.01bB	1.33±0.04bB	0.60±0.01bB
常规肥	2.73±0.21aA	0.80±0.07aA	3.53±0.27aA	1.40±0.11aA	2.41±0.07aA	0.68±0.03aA	3.09±0.10aA	1.27±0.02aA
控肥 70#	2.52±0.15bA	0.75±0.05aA	3.27±0.19aA	1.28±0.07bA	2.42±0.19aA	0.75±0.09aA	3.17±0.07aA	1.27±0.09aA

表 5 不同处理对玉米养分积累量及养分利用率的影响

处理	抽雄期/g·株 ⁻¹			成熟期/g·株 ⁻¹			养分利用率/%		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
CK	0.320±0.05cB	0.070±0.01aA	0.262±0.04cC	0.328±0.03cC	0.131±0.02bB	0.396±0.07cB			
胶粘材料	0.339±0.02cB	0.071±0.01aA	0.265±0.02cC	0.348±0.03cC	0.139±0.01bB	0.440±0.04cB			
常规肥	0.923±0.03bA	0.074±0.00aA	0.820±0.07bB	1.219±0.06bB	0.240±0.01aA	1.149±0.03bA	42.8	9.6	63.7
控肥 70#	0.984±0.05aA	0.077±0.01aA	0.962±0.02aA	1.486±0.08aA	0.251±0.02aA	1.234±0.03aA	53.9	9.7	68.8

于胶粘材料与空白对照,而且控释肥料处理又比常规肥料处理效果好,特别是氮、钾养分积累量显著增加。

2.3 胶粘材料对土壤酶活性的影响

土壤酶活性的变化也是胶粘材料对环境影响的主要指示之一,是土壤微生物活性的直接反应。从表 6 可以看出,添加胶粘材料培养 10 d 土壤中转化酶的活性随着胶粘材料的增加而增加,25 d 和 40 d 时处理间没有明显差异,培养到 55 d 又显示增加趋势,且胶粘材料添加量 2 g·100 g⁻¹ 处理的酶活极显著高于其他处理。由此可见,胶粘材料对转化酶不仅没有抑

制作用反而具有一定的激活作用。

由表 7 可见,土壤脲酶活性是随胶粘材料添加量的增加而显著提高,直到培养 55 d 后各处理间酶活性才无显著差异,这表明胶粘材料不但不会抑制土壤脲酶活性,反而具有显著的促进作用。

胶粘材料对过氧化氢酶活性略有降低趋势,除培养 25 d 时添加量达 2 g·100 g⁻¹ 时酶活性会出现显著抑制外,其他处理间无显著差异(表 8)。

胶粘材料对磷酸酶活性的影响则有所不同(表 9),培养 10 d 内随着胶粘材料添加量的增加磷酸酶的活性降低,但这种影响随培养时间的延长而呈减弱

表 6 不同胶粘材料用量对转化酶活性的影响(0.1 mol·L⁻¹Na₂S₂O₃,mL·g⁻¹)
Table 6 Effect of gel-based materials on soil invertase activity(0.1 mol·L⁻¹Na₂S₂O₃,mL·g⁻¹)

胶粘材料用量/g·100 g ⁻¹	10 d	25 d	40 d	55 d
0	0.37±0.17bB	1.31±0.09aA	1.52±0.18aA	0.99±0.10bB
0.1	0.39±0.10bB	1.19±0.25aA	1.61±0.11aA	0.94±0.08bB
0.5	0.46±0.14bAB	1.22±0.07aA	1.45±0.11aA	1.00±0.18bB
1.0	0.54±0.04abAB	1.41±0.24aA	1.47±0.09aA	1.13±0.22bB
2.0	0.68±0.09aA	1.44±0.08aA	1.51±0.23aA	1.51±0.11aA

表 7 不同胶粘材料用量对脲酶活性的影响(NH₃-N,mg·g⁻¹)
Table 7 Effect of gel-based materials on soil urease activity(NH₃-N,mg·g⁻¹)

胶粘材料用量/g·100 g ⁻¹	10 d	25 d	40 d	55 d
0	40.0±5.5dD	32.0±6.2cB	18.4±3.2cB	17.2±1.2aA
0.1	46.2±3.4cCD	31.5±5.0cB	19.7±1.8bcB	18.8±2.8aA
0.5	49.9±0.5cC	36.9±4.1cB	20.5±1.5bcB	23.1±6.2aA
1.0	60.4±5.1bB	48.8±5.6bA	26.8±1.6bB	25.2±4.2aA
2.0	79.0±1.9aA	59.6±6.1aA	38.0±9.2aA	19.3±9.3aA

表 8 不同胶粘材料用量对过氧化氢酶活性的影响(0.1 mol·L⁻¹KMnO₄,mL·g⁻¹)
Table 8 Effect of gel-based materials on soil catalase activity(0.1 mol·L⁻¹KMnO₄,mL·g⁻¹)

胶粘材料用量/g·100 g ⁻¹	10 d	25 d	40 d	55 d
0	1.18±0.05aA	1.27±0.04aAB	1.28±0.05aA	0.62±0.02aA
0.1	1.16±0.09aA	1.29±0.07aA	1.26±0.07aA	0.59±0.03aA
0.5	1.09±0.09aA	1.27±0.08aAB	1.27±0.06aA	0.55±0.04aA
1.0	1.09±0.04aA	1.32±0.07aA	1.24±0.04abA	0.55±0.03aA
2.0	1.06±0.08aA	1.10±0.13bB	1.15±0.08bA	0.30±0.15bB

表 9 不同胶粘材料用量对磷酸酶活性的影响(P_2O_5 , $mg \cdot 100 g^{-1}$ 土)Table 9 Effect of gel-based materials on soil phosphatase activity soil(P_2O_5 , $mg \cdot 100 g^{-1}$ soil)

胶粘材料用量/ $g \cdot 100 g^{-1}$	10 d	25 d	40 d	55 d
0	129.4 $\pm$ 5.0aAB	90.9 $\pm$ 3.8aA	130.2 $\pm$ 10.7aA	128.1 $\pm$ 6.4aA
0.1	135.5 $\pm$ 6.4aA	97.4 $\pm$ 5.8aA	130.6 $\pm$ 10.0aA	132.8 $\pm$ 6.6aA
0.5	117.4 $\pm$ 5.4bBC	96.0 $\pm$ 9.7aA	133.2 $\pm$ 8.9aA	131.1 $\pm$ 5.9aA
1.0	110.2 $\pm$ 5.7bC	94.6 $\pm$ 10.4aA	125.6 $\pm$ 4.5aA	108.8 $\pm$ 5.9bB
2.0	72.7 $\pm$ 8.2cD	77.6 $\pm$ 8.8bB	116.7 $\pm$ 3.6bA	82.1 $\pm$ 10.0cC

趋势,培养 25 d 后,用量在 $0.5 g \cdot 100 g^{-1}$ 以下对酶活性无明显影响,但用量达 $1.0 g \cdot 100 g^{-1}$ 以上对磷酸酶活性会产生显著抑制。

另外还发现,培养土壤中添加 $2.0 g \cdot 100 g^{-1}$ 胶粘材料时,培养 25 d 后有 2 瓶长霉,35 d 又有 4 瓶长霉,到 55 d 取样时再出现 3 瓶长霉,其中 1 瓶变得发黑。这是由于该处理有机质含量高导致菌类大量繁殖所致,这也间接反映出胶粘材料对土壤微生物不会产生不利影响。

3 讨论

控释材料的选用与研究开发是控释肥料发展的关键技术之一,控释材料应具有控释效果好、价格低廉、易获得和对环境友好的特点。胶粘控释肥料的载体材料一般是选用具有较强胶粘性的有机材料。在胶粘控释肥料研制中,有选用单一品种有机物作为其载体材料^[12-14],也有用多种有机物复合作为载体材料^[3,15]。胶粘载体材料的选材范围也较为广泛,包括各种天然、半天然和合成的有机高分子材料,为胶粘控释肥料的发展提供了丰富的材料基础。

控释材料的作用效果是控释肥料的核心问题,优良的材料及其合理组合可对肥料的养分释放起到理想的效果。胶粘控释肥料的研究已有一些报道,但尚无商业化产品的实际应用,进展也比包膜肥料慢,材料和工艺仍是其发展的主要限制因素。本项目研发的胶粘控释肥料表现出采用的多种材料显示出较好的控释作用,比常规肥料明显地促进作物生长,提高产量和养分利用率^[16-17]。这显示出进一步发展胶粘控释肥料的可行性和有效性。

控释肥料大量和长期施用后其控释材料是否对环境产生影响是人们非常关注的问题,控释材料易降解和对环境无污染是控释肥料推广应用的必要条件。评价材料环境安全性方法很多,通过对控释材料的降解性以及作物生长和土壤酶活性影响的研究分析,也可以对材料的安全性进行检验^[6]。综合本研究的整

个试验显示,不论从盆栽试验玉米生长发育来看,还是从实验室土壤酶活性变化来观察,胶粘材料对作物生长的土壤环境均无不利影响。因为生物和酶活性是土壤环境质量的重要指示指标,其变化直接反映出土壤环境的变化。

4 结论

选用天然、半天然和合成的有机高分子材料进行复配后作为胶粘控释肥料的胶粘载体材料,不仅具有较好控制胶粘控释肥料的养分释放、增加作物产量和提高养分利用率之效应,还表现出环境友好性。胶粘材料的应用对作物的生长和生理生化活性以及土壤酶活性无负面影响,甚至具有一定的促进作用。本研究结果可为今后的相关研究提供参考依据。

参考文献:

- [1] Entry J A, Sojka R E. Matrix-Based fertilizers reduce nutrient leaching while maintaining kentucky bluegrass growth[J]. *Water, Air, Soil Pollution*, 2010, 207: 181-193.
- [2] 胡小凤, 王正银, 孙倩倩, 等. 缓释复合肥料在不同 pH 值紫色土中氨挥发特性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 100-103.
HU Xiao-feng, WANG Zheng-yin, SUN Qian-qian, et al. Characteristics of ammonia volatilization of slow release compound fertilizer in different pH values of purple soils[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(6): 100-103.
- [3] 丁 洪, 王跃思, 秦胜金, 等. 控释肥对土壤氮素反硝化损失和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 1015-1019.
DING Hong, WANG Yue-si, QIN Sheng-jin, et al. Effects of controlled release fertilizers on nitrogen loss by denitrification and N_2O emission[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 1015-1019.
- [4] 李方敏, 樊小林, 刘 芳, 等. 控释肥料对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2170-2174.
LI Fang-min, FAN Xiao-lin, LIU Fang, et al. Effects of controlled release fertilizers on N_2O emission from paddy field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2170-2174.
- [5] Abedi-Koupai J, Varshosaz J, Mesforoosh M. Controlled release of microcapsule fertilizer using ethylene vinyl acetate polymer[C]. XVIth International Conference on Bioencapsulation, Dublin, Ireland. Sept 4-6, 2008. Wall newspaper No.78. 1-4.

- [6] 马军伟, 黄普乐, 丁伟华, 等. CA 肥料膜物质对小麦产量及土壤酶活性的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28(4): 369-372.
- MA Jun-wei, HUANG Pu-le, DING Wei-hua, et al. Effects of coating material of CA fertilizers on wheat yield and soil enzyme activities[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric. & Life Sci.)*, 2002, 28(4): 369-372.
- [7] Wolfe D W, Henderson D W, Hsiao T C, et al. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize: II. Photosynthetic decline and longevity of individual leaves[J]. *Agronomy Journal*, 1988, 80(6): 865-870.
- [8] 沈其伟. 测定水稻叶绿素含量的混合液提取法[J]. 植物生理学通讯, 1998(3): 62-64.
- SHEN Qi-wei. Measurement of chlorophyll content of rice by extraction method from mixture liquid[J]. *Bulletin of Plant Physiology*, 1998(3): 62-64.
- [9] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LI He-sheng. Principal and technique of physiological-biochemical experiments of plant[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [10] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 267-268, 272-273.
- ZHOU Li-kai. Soil enzymology[M]. Beijing: Science Press, 1987: 267-268, 272-273.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究方法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 296-297, 312-313.
- GUAN Song-yin. Soil enzymology and its research methods[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 296-297, 312-313.
- [12] Otey F H, Trimmell D, Westhoff R P, et al. Starch matrix for controlled release of urea fertilizer[J]. *J Agric Food Chem*, 1984, 32(5): 1095-1098.
- [13] Du Changwen, Zhou Jianming, Wang Huoyan, et al. A preliminary study on natural matrix materials for controlled release nitrogen fertilizers[J]. *Pedosphere*, 2004, 14(1): 45-52.
- [14] 黄建林, 王德汉, 刘承昊, 等. 载体尿素的研制及其释放机理研究初探[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 451-45.
- HUANG Jian-lin, WANG De-han, LIU Cheng-hao, et al. Study on the development of slow release carrier urea and its release mechanism[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(3): 451-453.
- [15] 史春余, 王汝娟, 梁太波, 等. 番茄专用基质缓释肥料研制及其生物学效应[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 80-84.
- SHI Chun-yu, WANG Ru-juan, LIANG Tai-bo, et al. Preparation of special matrix-based fertilizer for tomatoes and its biological effects[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(4): 80-84.
- [16] Ding Hong, Zhang Yushu, Qin Shenjing, et al. Effects of ¹⁵Nitrogen-labeled gel-based controlled-release fertilizer on dry-matter accumulation and the nutrient-uptake efficiency of corn[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42(13): 1594-1605.
- [17] 张玉树, 丁 洪, 卢春生, 等. 控释肥料对花生产量、品质以及养分利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 700-706.
- ZHANG Yu-shu, DING Hong, LU Chun-sheng, et al. Effect of controlled release fertilizers on the yield and quality of peanut and nutrient use efficiency[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 700-706.