

水溶性树脂包膜控释肥料肥效期快速检测方法研究

戴建军^{1,2}, 樊小林², 喻建刚², 刘芳², 张桥²

(¹东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; ²华南农业大学资源与环境学院肥料与平衡施肥研究室, 广州 510642)

摘要:【目的】探索和建立 80℃ 高温下的快速检测方法(高温短期淋洗法), 预测水溶性树脂包膜控释肥料在 25℃ 常温下的肥效期。【方法】采用常温静水溶出试验和高温淋洗的方法, 并对常温 25℃ 与高温 80℃ 下供试肥料达到相同养分释放率所需时间进行相关分析。【结果】树脂包膜控释肥料累积释放曲线都呈二次曲线, 相关系数 r 均大于 0.995。随着温度的升高供试控释肥料养分释放加快。利用常温 25℃ 与高温 80℃ 高温短期淋洗达到相同养分释放率所需时间的回归方程, 并结合 80℃ 的释放曲线方程, 可以快速而准确地预测这种包膜控释肥料在常温下养分释放率达到 75% 所需要的时间, 即肥效期。两种树脂包膜控释肥料 Trincote 1 和 Trincote 2 肥效期的预测值与实测值相对误差只有 0.3%~6.9%。【结论】采用高温短期淋洗法可以在数小时内比较准确、迅速地预测控释肥料的肥效期, 与传统的静水溶出率法或土柱淋溶法相比, 结果更准确, 而且大大缩短了检测时间。该方法可作为树脂包膜控释肥料肥效期或养分释放期的快速检测方法。

关键词: 控释肥料; 树脂包膜; 肥效期; 快速检测方法

Longevity of Controlled Release Modified Resin Fertilizer

DAI Jian-jun^{1,2}, FAN Xiao-lin², YU Jian-gang², LIU Fang², ZHANG Qiao²

(¹College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030; ²Fertilizer and Balanced Fertilization Research Laboratory, College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642)

Abstracts: 【Objective】The study establish the rapid method to test and predict the longevity of CRFs coated by water soluble resin by use of the short-period leaching under high temperature. 【Method】Still pure water dissolving incubation and high temperature drip washing were used to study the pattern of the nutrients release of the CRFs. The regression equations of periods required to reach the same cumulative release rates between 25℃ and 80℃. 【Result】Patterns of cumulative nutrients release curve would fit to one factor quadric regression equation at each given temperatures, and all of relative co-efficient was bigger than 0.995. With the temperature increasing, nutrients release of the CRFs increased. The longevity of resin coated CRFs could be predicted by use of both the cumulative nutrients release equation at 80℃ and the regression equation of release time needed to reach the same cumulative release rates between 25℃ and 80℃. There were only 0.3% to 6.9% relative errors between the tested longevity and predicted one. 【Conclusion】In conclusion, the longevity of resin coated CRFs could more quickly and precisely be predicted by use of the high temperature short-term leaching method than that of the normal differential release rate. The longevity of resin coated CRF could be rapidly and precisely predicted in a few hours by application of the high temperature short-term leaching method.

Key words: Controlled release fertilizer (CRF); water soluble resin coating; Longevity of CRF; Rapid test method

0 引言

【研究意义】自 20 世纪 50 年代控释肥料问世以来, 人们即开始致力于控释肥料肥效期或养分释放检

测方法的研究。但至今还未有统一的国际标准^[1]。【前人研究进展】传统的方法通常采用 25℃ 静水溶出率试验, 并以达到 75% 累积释放率时所需的天数作为这种控释肥料的肥效期 (Longevity)^[2]。例如, 日本 Chisso-

收稿日期: 2006-07-04; 接受日期: 2007-01-17

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD10B02)、国家自然科学基金(39870433, 30270769)、广东省科国际科技计划(C50406)

作者简介: 戴建军(1968-), 男, 江苏丹徒人, 副教授, 博士, 研究方向为植物营养与肥料。E-mail: daijianjun@126.com。通讯作者樊小林(1958-), 男, 陕西三原人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 研究方向为肥料与平衡施肥。E-mail: xlfan@scau.edu.cn

Asahi 肥料公司以释放 75% (25℃) 作为聚合物包膜肥料 Nutricote、Meister 的评价标准^[1]。但是这种方法检测时间冗长, 不适宜商品控释肥料质量的快速检测, 也不适于企业生产控释肥料在线质量检测。【本研究的切入点】高分子包膜控释肥料的养分释放率主要受温度影响, 提高温度, 可使肥料中养分释放率成倍增加^[3,4]。为此, 笔者曾经研究报道了高温下快速检测控释肥料肥效期的工作^[5]。但是温度过高时, 会造成有些不耐高温的控释肥料膜层的破裂, 从而造成控释肥养分的非正常释放, 影响包膜控释肥料肥效期预测预报结果的准确性。另外该高温快速检测仍然采用静水溶出法, 对于肥效期更长的控释肥料而言还不够理想。

【拟解决的关键问题】本文在前期研究的基础上, 采用高温淋洗法, 从 50℃ 到 90℃ 多个温度下筛选最佳检测温度, 并对最佳检测温度下的养分释放率与常温(25℃) 下达到相同释放率所需时间的相关性进行研究, 探讨用高温淋洗的快速检测法预测 25℃ 常温下肥效期的可行性, 为建立控释肥料肥效期快速、准确的检测方法提供可靠的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以星王复合肥 (22-6-12) 为核心自制的水溶性树脂包膜控释肥料 Trincote 1 (包膜材料用量 80 g·m⁻² 核心表面) 和 Trincote 2 (包膜材料用量 100 g·m⁻² 核心表面) 为供试肥料。星王复合肥 (22-6-12) 中的氮源为铵态氮和硝态氮。

1.2 试验方法

1.2.1 控释肥料肥效期测定 将供试肥料 12.500 g 放入 1 mm 孔径的指形网袋中, 重复 3 次, 放置于盛有 250.00 ml 纯水的容器中, 在 (25±0.5)℃ 的恒温箱培养。每周分别测定培养液电导率, 电导率量程为 0~199 ms·cm⁻¹ 的 Orion 105A 型电导率仪测定。测定前将网袋取出, 把培养液摇匀后测定。之后用 100 ml 纯水冲洗肥料, 然后用吸水纸吸干网袋表面液体, 再置于装有 250 ml 纯水另一容器继续培养, 以待下一次测定。溶出率达到 75% 以上时停止测定。用标准曲线法测定包膜控释肥料静水溶出率^[5,6]。

1.2.2 高温淋洗试验 将供试肥料 5.000 g 分别放入 (50±0.5)℃、(60±0.5)℃、(70±0.5)℃、(80±0.5)℃ 和 (90±0.5)℃ 梨形分液漏斗中, 下面用 250 ml 容量瓶承接淋洗液, 各肥料重复 3 次。控制淋洗液流速为每 15 min 250 ml, 每 250 ml 为一个样点, 测定一次

电导率, 连续淋洗 6 h。

1.2.3 最佳检测温度的确定及最佳检测温度下的快速检测 根据上述结果, 分别绘制 50℃、60℃、70℃、80℃ 和 90℃ 等温度下养分释放率曲线, 并比较这些高温下的释放曲线与常温下的曲线。最佳检测温度的选择标准为: ①高温下释放曲线的形状与常温相似; ②在短期淋洗下的释放率最大; ③高温下不出现非正常释放 (肥料包膜无破裂、肥料无结块等现象)。

在确定的最佳检测温度下进行高温淋洗试验, 操作方法同 1.2.2, 只是每 30 min 取样, 并淋洗至累积释放率达 75%。

1.2.4 控释肥料的电导率标准曲线测定 称取上述供试肥料 12.500 g, 研钵研碎, 用蒸馏水冲洗, 全部转入 250 ml 容量瓶中, 定容摇匀, 过滤后保存, 此为肥料的标准母液。以此母液稀释配制肥料浓度分别为 0、0.002%、0.004%、0.006%、0.008%、0.01%、0.02%、0.04%、0.06%、0.08% 和 0.10% 的溶液, 以电导率为自变量 x , 肥料实际含量 (%) 为因变量 y , 进行回归分析, 得出电导率与肥料含量 (%) 的相关曲线方程。利用此回归方程再计算实测电导率下的养分浓度及养分释放曲线方程^[6]。

1.2.5 常温与高温下释放率相等之时间的回归分析 以最佳检测温度下养分累积释放率达 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%、70% 和 75% 时所需时间为 x , 以 25℃ 下养分释放率达相同量所需时间为 y 进行回归分析, 建立两者的一元二次回归方程。

2 结果与分析

2.1 控释肥料养分释放特征曲线和肥效期

25℃ 供试包膜控释肥料养分释放曲线见图 1。结果表明, 在 25℃ 下供试包膜控释肥料 Trincote 1 和 Trincote 2 释放曲线均呈二次曲线 (表 1)。Trincote 1 和 Trincote 2 的二次回归曲线的相关系数 r 都大于 0.993, 均达到极显著水平, 二者达到 75% 释放率的时间分别为 280 d 和 353 d。

2.2 供试包膜控释肥料最佳快速检测温度的确定

50℃、60℃、70℃ 和 80℃ 下, 供试包膜控释肥料养分释放曲线如图 2-a 和 2-b 所示。结果表明随着温度的升高, 供试包膜控释肥料养分释放加快。但是, 在 50℃ 和 60℃ 下, 由于取样时间只有 6 h, 供试包膜控释肥料释放显得很慢, 释放曲线形状接近直线。而常温下 (图 1) 取样时间较长, 为二次曲线。随着温

表 1 25℃下供试包膜控释肥料养分累积释放率曲线方程
Table 1 The regression equations of cumulative nutrients release rate from controlled release fertilizer at 25℃

供试控释肥料 CRF tested	回归曲线方程 Regression equations	相关系数 Correlation coefficient	<i>n</i>
Trincote 1	$y = -0.0006x^2 + 0.3929x + 11.855$	0.9972**	41
Trincote 2	$y = -0.0006x^2 + 0.3954x - 0.7084$	0.9989**	51

x 为培养天数, *y* 为累积释放率(%)

x stands for day of incubation and *y* for cumulative nutrients release rate (%)

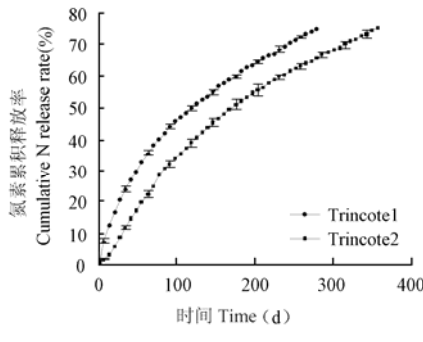


图 1 25℃条件下供试包膜控释肥料 Trincote 1 和 Trincote 2 的养分释放曲线

Fig. 1 The cumulative release rate curves of Trincote 1 and Trincote 2 CRFs at 25℃

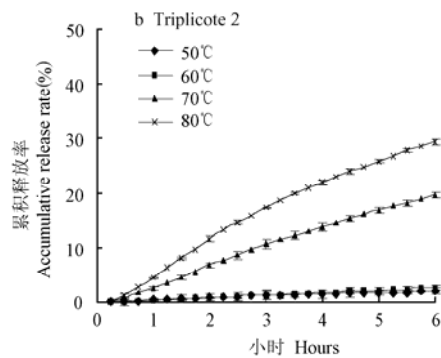
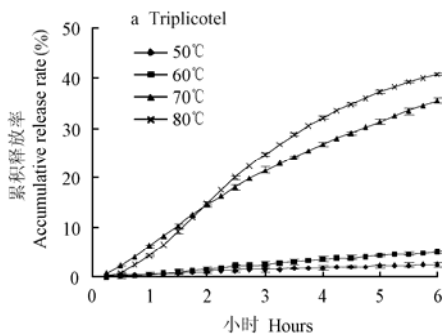


图 2 50℃, 60℃, 70℃, 80℃下供试包膜控释肥料 Trincote 1 和 Trincote 2 养分释放曲线

Fig. 2 The cumulative nutrients release curves of Trincote 1 and Trincote 2 at 50℃, 60℃, 70℃ and 80℃, respectively

表 2 80℃下供试包膜控释肥料 Trincote 1 和 Trincote 2 养分累积释放率曲线方程

Table 2 The regression equations of cumulative release rate of Trincote 1 and Trincote 2 at 80℃

供试控释肥料 CRF tested	检测时间 Test duration (h)	回归曲线方程 Regression equation	相关系数 Co-relation coefficient
Trincote 1	16.5	$y = -0.2208x^2 + 8.1228x - 0.0361$	0.9959**
Trincote 2	24.0	$y = -0.0809x^2 + 4.9021x + 2.0528$	0.9982**

x 为释放时间(小时); *y* 均为累积释放率(%). *n* 均为 24, 各温度下释放率(%)为 3 次重复的平均值

x stands for hours of incubation; *y* stands for cumulative nutrients release rate (%). *n* is equals to 24 for both Trincote 1 and Trincote 2. Each datum is average of 3 replication

度的升高, 释放率增大, 但是当达到 90℃时, 供试肥料发生不规则释放或非规律释放。而 80℃时不仅释放率最大, 释放曲线形状与常温下的相似(都是二次曲线), 并无非常规释放。因此 Trincote 1 和 Trincote 2 的最佳快速检测温度为 80℃。

2.3 常温与高温下达到相同累积释放率所需时间的回归分析及肥效期预测

表 2 列出了 80℃下供试包膜控释肥料 Trincote 1 和 Trincote 2 养分累积释放率达 75% 的累积释放曲线方程。从表 2 可知, 80℃下的释放曲线也为二次曲线, 曲线方程的相关系数 *r* 值均在 0.995 以上, 达到极显著水平。

根据 25℃常温下养分释放曲线查得养分释放率达 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%、70% 和 75% 时所需的时间(*d*); 同理根据表 2 的回归方程也可以分别获得供试控释肥料 Trincote 1 和 Trincote 2 在 80℃下 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%、70% 和 75% 时所需的时间(*h*)。将这两者数据进行回归分析, 即得 Trincote 1 和 Trincote 2 在 25℃下累积释放率所需时间(*d*)与 80℃高温下相应累积释放率所需时间(*h*)的回归方程(表 3)。

表 3 25℃ 常温与 80℃ 高温达到相同累积释放率所需时间的回归方程

Table 3 The regression equations of release time (hour) reached to the same cumulative release rate between 25℃ and 80℃

供试控释肥料 CRF tested	检测期 Test duration (h)	控释肥料释放时间回归方程 Regression equation of release time	相关系数 Co-relation coefficient
Trincote 1	16	$y = 0.2841x^2 + 12.333x - 0.0423$	0.9994**
Trincote 2	24	$y = 0.1015x^2 + 12.226x + 4.1799$	0.9999**

y 为 25℃ 所需时间 (h), x 为 80℃ 所需时间 (h)

y stands for hours of incubation at 80℃ and x for hours of incubation at 25℃

结果表明, 25℃ 常温与 80℃ 高温下达到相同累积释放率所需时间之间呈极显著正相关。由此可见, 利用 80℃ 高温淋洗至累积释放率达 75% 的测定方法可以预测常温下控释肥料的肥效期, 即通过上述时间回归方程并结合 80℃ 的释放曲线方程, 可以预测这种包

膜控释肥料养分释放率达到 75% 所需要的时间, 即该控释肥料的肥效期。表 4 列出了实测与用上述方法预测的供试控释肥料 Trincote 1 和 Trincote 2 的肥效期。结果表明, 采用这种高温淋洗方法预测肥效期比较准确, 相对误差只有 0.3%~1.1%。

表 4 肥效期的实测值与预测值对比

Table 4 Comparison of the measured and the predicted longevity for the CRF studied

供试控释肥料 CRF tested	肥效期实测值 Longevity measured (d)	肥效期预测值 Longevity predicted (d)	与实测相差 Difference (d)	相对误差 Relative error (%)
Trincote 1	280	283.0	-3.0	1.1
Trincote 2	353	354.1	-1.1	0.3

2.4 常温与高温短期淋洗法的相关分析及肥效期预测

上述结果说明, 利用 80℃ 高温淋洗法可以比较准确的预测包膜控释肥料养分释放率达到 75% 所需要的时间, 即该控释肥料的肥效期, 但是该预测方法所需的时间仍然偏长 (16~24 h)。也就是说, 在一个工

作日以内仍然不能完成控释肥料肥效期的检测。为此, 笔者以 80℃ 高温淋洗 6 h 为快速检测时间, 研究 6 h 高温淋洗累积释放曲线与常温累积释放曲线相关关系, 并利用此相关关系进行肥效期的快速预测。表 5 列出了供试肥料 Trincote 1 和 Trincote 2 养分累积释放率曲线方程。

表 5 80℃ 下供试包膜控释肥料 Trincote 1 和 Trincote 2 养分累积释放率曲线方程

Table 5 The regression equation of cumulative nutrients release of Trincote 1 and Trincote 2 respectively at 80℃

供试控释肥料 CRF Tested	检测期 Test duration (h)	回归曲线方程 Regression equation	相关系数 Co-relation coefficient	累积释放率 Cumulative release rate (%)
Trincote 1	6	$y = -0.6933x^2 + 12.033x - 5.7468$	0.9970**	40.73
Trincote 2	6	$y = -0.411x^2 + 7.7288x - 2.3752$	0.9996**	29.40

各温度下回归曲线方程中 x 为释放时间(h), y 均为累积释放率(%), n 均为 24。各温度下释放率(%)为 3 次重复的平均值

x stands for hours of incubation. y stands for cumulative nutrients release rate (%). n is equals to 24 for both Trincote 1 and Trincote 2. Each datum is average of 3 replication

从表 5 可知, 80℃ 下淋洗 6 h 的释放曲线为二次曲线, 曲线方程的相关系数 r 值均在 0.996 以上, 达到极显著水平。同 2.3, 根据表 5 的回归方程可以分别获得供试控释肥料 Trincote 1 和 Trincote 2 在 80℃ 下达 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%、70% 和 75% 累积释放率时所需的时间 (h), 将 25℃ 下达到相同累积释放率时所需的时间 (d) 两者数据进行回归分析, 即得 Trincote

1 和 Trincote 2 在 25℃ 下累积释放率所需时间 (d) 与 80℃ 高温下相应累积释放率所需时间 (h) 的回归方程 (表 6)。

表 6 表明, 25℃ 常温与 80℃ 高温短期淋洗下达到相同累积释放率所需时间之间呈极显著正相关。因此, 利用表 6 中的回归方程, 即利用 80℃ 高温短期淋洗的方法同样可以预测常温下控释肥料的肥效期 (表 7)。表 7 列出了实测与用上述 80℃ 高温、6 h 方法预测的

表 6 25℃ 常温与 80℃ 高温短期淋洗法达到相同累积释放率所需时间的回归方程

Table 6 The regression equations of release time (hour) reached to the same cumulative release rate between 25℃ and 80℃ by use of short-term leaching method

供试控释肥料 CRF Tested	检测期 Test period (h)	控释肥料释放时间回归方程 Regression equation of release time	相关系数 Co-relation coefficient
Trincote 1	6	$y = 0.2805x^2 + 14.681x - 14.328$	0.9995**
Trincote 2	6	$y = 0.0844x^2 + 11.924x + 4.9888$	0.9999**

y 为 25℃ 所需时间 (天), x 为 80℃ 所需时间 (h)

y stands for hours of incubation at 25℃ and x for hours of incubation at 80℃

表 7 肥效期的实测与短期淋洗法预测对比

Table 7 Comparison of the longevity of the measured and the predicted by short-term leaching method

供试控释肥料 CRF Tested	预测方法 Method predicting	肥效期实测值 Longevity measured (d)	肥效期预测值 Longevity predicted (d)	与实测相差 Difference (d)	相对误差 Relative error (%)
Trincote 1	6 h 预测值 Predicted in 6 hours	280	299.4	-19.4	6.9
Trincote 2	6 h 预测值 Predicted in 6 hours	353	354.0	-1.0	0.3

供试控释肥料 Trincote 1 和 Trincote 2 的肥效期。

由表 7 结果可知, 用 80℃ 短期淋洗对 Trincote 1 和 Trincote 2 进行肥效期预测, 结果相对误差为 0.3%~6.9%, 对于农用肥料来说, 能够达到肥效期预测要求: 检测时间只用 6 h, 大大缩短了测定时间。

3 讨论

肥效期 (Longevity) 是包膜缓释肥料的一个重要质量指标。对肥效期的检测, 传统方法是在规定时间内 (标注的肥效期), 静水中释放率达到 75% (25℃), 或者用微分溶出率粗略推算出肥效期 (天数), 即肥效期 = (75% - 初期溶出率) / 微分溶出率。这种方法误差很大。要想用一种方法来推导肥效期, 必须设法提高温度加快肥料溶出, 因此, 本试验对溶出温度进行了筛选, 选定 80℃ 作为供试控释肥料的检测温度。

Trenkel^[1]在总结有关缓释和控释肥养分缓慢或控制释放的释放率和释放时间的研究中, 提出了作为缓释肥和控释肥应具备的 3 个具体标准, 测定缓释肥料在 25℃ 水中的溶出率来说明其性能。其缺点是检测时间太长, 不能适应大规模工业生产中在线快速检测。更重要的是, 这些标准并没有规定肥效期的检测方法。

许多学者^[7-9]利用控释肥料养分释放数学模型方法预测包膜肥料的养分释放。Fredman^[10]和 Al-Zahran^[11]则分别提出了控释肥料的释放模型。Gandeza 等^[12]对包膜肥料在田间释放规律进行同位素

示踪法研究, 发现在温度 10~30℃ 间释放累积氮量与天数的关系可用一元二次方程描述, 同时, 释放累积氮量可用温度或气温积温作自变量的一元二次方程预测。数学模型预测法可以快速预测包膜肥料的养分释放速率, 因此, 这种方法也将是控释肥料在线生产质量检测的方法之一。

笔者对自制包膜控释肥料进行了常温和高温下静水溶出率释放的测定, 筛选适合的温度, 即在此温度下既能缩短检测时间, 又不致于造成非常规释放。研究结果证明 80℃ 是比较合适的快速检测温度。选定合适的检测温度后, 即对该控释肥料在被检测的温度下的释放曲线进行研究, 获得其在数小时内 (6 h) 的累积释放曲线, 在较短的时间内比较准确地推算出该包膜肥料的肥效期。这种方法预测准确, 简便快捷, 检测时间短, 适用于市场上的控释肥料商品质量的快速检测和企业生产中控释肥料的在线质量检测。但对于其它释放曲线更复杂的包膜肥料肥效期的预测, 还有待进一步研究。

4 结论

通过对自制包膜控释肥料常温静水溶出和高温淋洗的研究, 探讨了控释肥料快速检测方法。试验结果说明, 随着温度升高, 包膜控释肥料养分释放加快, 80℃ 比较适合供试包膜控释肥料的快速检测。25℃ 常温与 80℃ 高温达到相同累积释放率所需时间之间呈

极显著的二次曲线关系, 利用这种关系可以在较短的时间内用高温的释放率预测常温的释放率及肥效期。采用这种方法可以在数小时内比较准确地预测控释肥料的肥效期, 简便快捷, 与传统方法相比极大地缩短了时间, 为控释肥料生产的在线快速检测提供了新的备选方法。

References

- [1] 李菡萍, 许秀成, 王好斌. 国内外缓释控释肥料标准概况. 磷肥与复肥, 2005, 20(6): 41-42.
Li D P, Xu X C, Wang H B. Review on the standards of slow controlled release fertilizer at home and abroad. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2005, 20(6): 41-42. (in Chinese)
- [2] Trenkel M E. *Controlled-Release and Stabilized Fertilizers in Agriculture*. Paris: International Fertilizer Industry Association, 1997: 11.
- [3] 陈剑慧, 曹一平, 许涵, 房增国, 毛达如. 有机高聚物包膜控释肥氮释放特性的测定与农业评价. 植物营养与肥料学报, 2002, 8: 44-47.
Chen J H, Cao Y P, Xu H, Fang Z G, Mao D R. Appraisal of nitrogen releasing characteristics of organic polymer coating controlled release fertilizer. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8: 44-47. (in Chinese)
- [4] 张民, 杨越超, 宋付朋, 史衍玺. 包膜控释肥料研究与产业化开发. 化肥工业, 2005, 32(2): 7-12.
Zhang M, Yang Y C, Song F P, Shi Y X. Study and industrialized development of coated controlled release fertilizers. *Journal of Chemical Fertilizer Industry*, 2005, 32(2): 7-12. (in Chinese)
- [5] 戴建军, 樊小林, 喻建刚, 吴飞龙. 热固性树脂包膜控释肥料肥效期的快速预测方法. 植物营养与肥料学报, 2006, 12: 431-436.
Dai J J, Fan X L, Yu J G, Wu F L. The method of quickly predicting longevity of controlled release fertilizer coated with thermoset resin. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12: 431-436. (in Chinese)
- [6] 戴建军, 樊小林, 梁有良, 孙丽霞. 应用电导法测定肥料溶液浓度标准曲线的校验研究. 磷肥与复肥, 2005, 20(4): 15-17.
Dai J J, Fan X L, Liang Y L, Sun L X. Study on calibration of standard regression curve of fertilizer solution concentration by conductivity method. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2005, 20(4): 15-17. (in Chinese)
- [7] Hara Y. Application of the Richards function to nitrogen release from coated urea at a constant temperature and relationships among the calculated parameters. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46: 683-691.
- [8] 杨相东, 曹一平, 江荣风, 张福锁. 几种包膜控释肥氮素释放特性的评价. 植物营养与肥料学报, 2005, 11: 501-507.
Yang X D, Cao Y P, Jiang R F, Zhang F S. Evaluation of nutrients release feature of coated controlled release fertilizer. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11: 501-507. (in Chinese)
- [9] Hara Y. Estimation of nitrogen release from coated urea using the Richards function and investigation of the release parameters using simulation models. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46: 693-701.
- [10] Friedman S P, Mualem Y. Diffusion of fertilizers from controlled-release sources uniformly distributed in soil. *Fertilizer Research*, 1994, 39: 19-30.
- [11] Al-Zahrani S M. Controlled-release of fertilizers: modeling and simulation. *International Journal of Engineering Science*, 1999, 37: 1299-1307.
- [12] Gandeza A T, Shoji S, Yamada I. Simulation of crop response to polyolefin coated urea I. Field dissolution. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55: 1462-1467.

(责任编辑 李云霞)