植物营养与肥料学报 2002,8(1):16~21
Plant Nutrition and Fertilizer Science

# 包膜控释肥养分释放特性评价方法的研究进展

杜建军，廖宗文，宋波，朱兆华
(华南农业大学新肥料资源研究室,广东广州 510642)

**摘要**:控释肥已成为国内外肥料研究的热点,但是评价控释肥养分释放特性的方法研究相对滞后,至今没有较为完善的方法和统一的测试标准。本文综述了包膜控释肥养分释放特性的现有评价方法:水中(或溶液)溶出率法、土壤溶出率法、扩散率法、渗透率法、电超滤法和同位素示踪法等;评述了各种方法的优缺点及改进途径;并展望了今后评价方法的研究方向。

**关键词**: 包膜控释肥; 养分释放; 评价方法
**中图分类号**:TQ449.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2002)01-0016-06

# Progress on evaluation methods for nutrient release characteristic of coated controlled release fertilizers

DU Jian-jun, LIAO Zong-wen, SONG Bo, ZHU Zhao-hua
(*College of Resou. and Envir., South China Agric. Univ., Guangzhou 5610642, China*)

**Abstract**: Controlled release fertilizers (CRFs) have become a hotspot in fertilizer research in both domestic and abroad, but the researches in evaluation methods for nutrient release characteristic of CRFs are relatively backward. Up to now, there has not been perfect method and unified testing standard. This paper reviewed the present evaluation methods: water (or solution) dissolution rate method, soil dissolution rate method, infiltrate method, permeability method, isotopic tracer method and electroultrafiltration method , analyzing the merit, the shortcoming and the improving way of them and prospecting the direction of the evaluation methods in the future.

**Key words**: coated controlled release fertilizers; nutrient release; evaluation methods

控释肥自 50 年代问世以来,几乎和控释肥生产同步,人们即开始致力于控释肥控释性能评价方法的研究。1962 年 Oertli 和 Lunt[1,2]以水和磷酸盐缓冲溶液连续浸提树脂包膜肥料以测定养分溶出率,开创了这方面研究的先河。以后,许多学者都在这方面进行了探索。研究不但包括实验室评价控释肥养分释放特性的简便测试法,而且在预测田间控释规律方面也有所涉及。但由于各种控释肥控释材料、控释途径、控释机理不同,至今没有一个统一的、完善的、标准的评价方法可供依循。本文根据我们近几年的研究实践及其他研究者的资料,对控释肥养分释放特性的评价方法作一些探讨。

## 1 控释肥养分释放特性的评价方法

### 1.1 水中(或溶液)溶出率法

用水或一定浓度的盐溶液浸提包膜控释肥,以计算一定时间内养分的溶出量,是评价包膜控释肥养分释放特性的常用方法。欧洲标准委员会(Comitè Eauopéen de Normalisation, CEN)规定缓释肥料(TC260/WG4/TFsrf)在水中(25℃)养分释放速率 24h 不大于 15%;28d 不超过 75%;在规定时间内至少有 75%被释放[3]。Blouin 等[4]1971 年提出的 7d 溶出率法则是硫包膜尿素(sulfur-coated urea, SCU)和聚合物包膜尿素(polymer-coated urea)控释性能的常用测定方法[5,6]。该法是将 50g 肥料样品没入 250mL 水中(肥水比为 1:5,温度为 25℃左右),7d 内,每天测定尿素浓度而确定

**收稿日期**:2000-07-28
**基金项目**:国家自然科学基金项目(39870433);芭田基金项目(BJ2000-01)资助。
**作者简介**:杜建军(1966—),男,陕西商州人,讲师,在读博士生,主要从事新型肥料开发及植物营养机理方面的研究。

养分释放速率。而日本对包膜肥料则采用初级溶出率法和微分溶出率法来评价缓释性能[7]。方法是称取 12.5g 肥料样品，加入 250mL 水（肥水比为 1∶20），于 30℃ 恒温箱中放置 24h，测定浸取滤液中铵态氮，水溶性磷和水溶性钾的含量。初级溶出率即溶解的养分量占肥料中全量养分的百分含量。若把肥料样品按同样的肥水比例在 30℃ 恒温箱中放置 7d(168h)，测定溶出的养分量，即可得到第 2 至第 7d 之间的养分每天平均溶出率，即微分溶出率：

$$\text{微分溶出率}(\%)=\left(\frac{\text{累积养分溶解量}}{\text{试样中养分含量}}\times 100-\text{初级溶出率}\right)\times\frac{1}{\text{放置天数}-1} \quad (1)$$

初级溶出率是反映那些包膜不完整的肥料粒子数量，显然，包膜不完整的粒子越多，初级溶出率就越大，而初级溶出率高的包膜肥料有可能引起作物烧苗或早期疯长，通常要求初级溶出率不大于 40%。而微分溶出率是评价包膜完整的肥料粒子，为平均每天释放总养分的百分率。大多数聚合物包膜的缓释肥料微分溶出率为 0.25%/d～2.5%/d。假如某种包膜肥料初级溶出率为 25%，微分溶出率为 0.25%/d，这种肥料理论上可维持 301d 养分才能全部溶出；如微分溶出率为 2.5%/d，则 31d 养分全部溶出[8,9]。事实上，多年来众多控释肥生产企业致力于建立评价肥料性能的快速测定方法，例如美国 Scotts 公司、Puresell 工业公司，以色列 Haifa 化学公司以肥料养分在水中（21℃）释放 80% 作为聚合物包膜肥料 Osmocote、Polyon、Multicote 的评价标准；而日本 Chisso-Asahi 肥料公司则以释放 75%（25℃）作为聚合物包膜肥料 Nutricote、Meister 的评价标准[10]。中国郑州乐喜施肥料公司则以肥料浸入水中不同时间观察尚存有核心（通常为尿素）的颗粒数目作为评价 Luxuriance（钙镁磷肥包裹）和 Luxacote（Luxecote）（均为二价金属磷酸盐包裹）的生产在线控制标准，以 48h 水中（25℃）溶出率小于 60% 作为企业标准[8]。

以上是静态水中溶出率法，可见该方法没有考虑土壤水分实际上是各种养分离子的盐溶液，而且随着养分溶出，盐分浓度增大，必然会影响养分离子通过包膜的迁移，肥料养分溶解后必然会引起溶液 pH 的变化。Oertli 和 Lunt[1,2]用含 0.005mol/L 的 NaCl 磷酸盐缓冲液于 21℃ 下连续 9 周浸提含 10g 不同树脂包膜厚度的 KCl 肥料，并以滤过 $CO_2$ 的空气通气以搅拌溶液（防止 $CO_2$ 溶入），每周更换浸提液并测定释放出的钾量。结果表明，钾的释放速率受包膜厚度影响很大，对应薄、中、厚膜释放 50% 钾分别需要 1 周、2 周、5 周左右的时间。熊又升等[11]将巴氏滤液管置于高 20cm，直径 2cm 圆柱状玻璃管中，制成一个封闭式自动连续过滤系统，将肥料置于该系统中，模拟水田，上端进水，将肥料浸入水中，下端收集滤液，检测一定时间滤液中养分含量，测定了薄厚不同的两种包膜肥料的养分溶出率，得到了满意的效果。段平[12]亦尝试了沙柱法。这些方法可以克服静态水浸法所需时间长、重复次数多、不同浸提时间所得结果不是同一样品及溶液浓度对释放速率的影响等缺点。水浸法在评价膜厚度变化的包膜效能方面可以达到较为满意的效果，但是所得结果外推至另一厚度时缺乏理论依据。以某种盐的缓冲溶液作为浸提剂虽然较以水作浸提剂更接近实际，但在浸提剂选择，溶液与肥料的比例问题上还有待进一步探讨。

肥料浸入水或某种盐的缓冲溶液中测得的养分释放速率和释放期远不能代表控释肥对作物表现出的供肥速率和肥效期。例如国内开发的涂层尿素、多元长效涂层化肥、长效碳铵在水中 2～20min 内全部溶解，但实际肥效可达 90d 甚至更长。这是因为溶解的肥料养分除少部分被作物直接吸收利用外，大部分则在土壤中会发生一系列物理、化学和生物学变化，各种形态的养分之间建立起动态平衡，较长时间地供给作物逐渐利用。因此，肥料肥效期总是远远大于肥料养分在水或溶液中的释放期。鉴于此，一些学者引入土壤因子来评价控释肥的养分释放特性。

### 1.2　土壤溶出率法

早先把土壤因子引入控释肥评价方法也是 Oertli 和 Lunt[1,2]，他们把一种用克里利姆（krilium）土壤改良剂处理过的壤土 1kg 与 30g 树脂包膜肥料混匀，装入一长 60cm、内径 5cm 的垂直玻璃管中，玻璃管底部装一些玻璃绵，通过玻璃绵过滤。连续 10 周，每次分别用 50mL 蒸馏水和 2% 或 0.5% 的甲醛溶液（开始为 2%，以后为 0.5%，主要目的在于杀死土壤微生物）淋洗土壤肥料混合物，收集淋滤液并测定其中的养分含量。Patel 和 Sharma[13]用类似方法用蒸馏水淋洗土柱，培养时间长达 17 周，评价了 14 种包膜肥料养分的释放特性。应用土柱淋洗法的最大缺点是土柱长短影响土壤的持水量，较短土柱单位容积持水量一般大于较长土柱[14]。Holcomb[14]提出的方法则可克服这个缺点，在装有泥炭-蛭石等体积混合物的容器底部放置一个毛细管垫子，每次淋洗只使混合物被水饱和，而不产生淋出液，这样肥料中释放的养分离子通过扩散作用进入垫子（垫子被水饱和），定期挤压垫子以提取并测定养分含量。Holcomb 测定了 Osmcote（14-6.3-11.6）中钾的释放速率，所得结论与 Oertli 和 Lunt 观察的结果相似，肥料养分释放服从直线方程：

$$Y=2.12+0.69X \text{（Holcomb 方法）} \quad (2)$$

$$Y=1.29+1.38X \text{（Oertli 和 Lunt 方法）} \quad (3)$$

此法的最大好处是设备简单易得，不需特殊设备，而且可以估算通过扩散作用迁移的钾量。侯翠红[15]用类似装置测定了 Osmcote（13-12.92-15.29）肥料中钾的溶出率，进一步拓展到 Luxecote（18-6-12）肥料中氮素的测定，并与水中溶出率法进行了比较，得到 2 种方法下氮素释放的回归模型：

$$\text{水中溶出率法：}Y=\exp(-1.9651+0.43\ln X) \quad r=0.9945 \quad (4)$$

$$\text{土壤溶出率法：}Y=\exp(-2.4716+0.3458\ln X) \quad r=0.9974 \quad (5)$$

式中，Y 为肥料中氮溶出率，%；X 为 溶出时间，d。可见，2 种方程的形式是相同的，说明水中溶出率和土壤溶液溶出率之间存在着某种关系。令(4)、(5)式中 Y 值相等，得到水中溶出时间 $X_{水}$(h)和土壤溶出时间 $X_{土}$(d)之间的关系：

$$X_{土}=4.3227X_{水} \quad (6)$$

且发现对其它系列 Luxecote 肥料也存在类似的关系。这 2 种关系的建立,对实际测定带来了很大的方便,即对同一类肥料,通过测定水中溶出率就可通过一定转换关系得到肥料在某种土壤中的溶出率,从而大大缩短了土壤溶出率的测定时间。

模拟土壤与实际土壤仍有区别,因此 Paramasivam 等[16,17]利用土柱以间歇淋溶-干燥(培养)方式模拟田间条件比较了 Meister、Poly-S(聚合物包硫尿素)和 Osmocote 的养分释放及淋溶特性。我们按照田间耕层实际容重建造土拄,以模拟雨水连续五周淋溶,评价不同控释肥在土壤中的养分释放与淋溶特性,其结果与盆栽试验一致[18]。尽管如此,土柱淋溶法仍局限在实验条件下,与田间土壤条件仍有很大的差距。一些学者[19~21]采用肥包法,将肥料(或与沙子混合后)装入尼龙网袋并埋在土壤中,过一段时间取一些颗粒分析其中的养分含量以确定养分释放速率。这种方法的困难在于如何确定合适的网袋大小,装入肥料的多少及肥包在土壤中的分布;肥料在网袋中会破裂,甚至粉化无法挑出,因而试验误差较大。

### 1.3 扩散和渗透率法

Hauke[22]曾把包膜肥料养分释放描述为二个阶段:第一阶段包括水蒸气分子通过膜的扩散过程及其在肥料颗粒内部形成饱和溶液;第二阶段是在包膜肥料颗粒内部形成压力,并导致膜的破裂或破膜溶液的外流,包膜肥料的这种养分释放模式已经得到许多学者的支持[23~25]。Gambash[24]则进一步认为,水蒸气通过膜的扩散进入肥料颗粒内部是肥料养分释放的速度决定步骤。基于这一认识,Gambash 等设计了一种以重量法测定水蒸气扩散量的方法,评价包膜肥料的控释性能。方法是取 10~30 粒肥料颗粒放在已称重的滤纸上,然后把肥料连同滤纸放入一底部盛水上部被水蒸气饱和的用干燥器改装的容器中,定期称量肥料颗粒及滤纸重量,根据重量变化来确定养分的释放速率。这一方法所得的结果与测定土壤-肥料混合物中养分释放速率所得结论是一致的。该法的优点是对评价肥料颗粒的单个行为特别有效。Kobayashi、Fujisawa 和 Hanyu 等[26~31]用类似装置研究了树脂型包膜肥料养分释放速率及释放机制,并给出了相应的释放模型。用该释放模型预测此类肥料的溶出率与实测结果也是吻合的。

Zhang Minchu[25]则根据扩散理论测定肥料养分的渗透率和渗透活化能来评价聚合物包膜尿素。其理论依据是以水为介质的包膜肥料内外可以看作是一个二相扩散系统。在这个系统中,包膜内外一边是肥料,一边是纯水,由于膜内外水势不同,导致水分由膜外进入膜内以溶解尿素,而溶解的尿素分子通过扩散作用释放到膜外。系统中尿素的表观扩散率可以表述为[32,33]:

$$J=\frac{KmD(C_1-C_2)}{L} \quad (7)$$

式中,J 是溶质(尿素)通过膜的通量,$g\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$;Km 是一无量纲分配系数,即扩散平衡时膜固相溶质浓度与溶液中溶质浓度之比;D 为溶质通过包膜的扩散率,$g\cdot cm^2\cdot h^{-1}$;$C_1$ 和 $C_2$ 是膜内外溶质浓度,$g\cdot cm^{-3}$;L 为包膜厚度,cm。由于 Km 与 D 的乘积被定义为渗透率(P),因此,(7)式可以改写为:

$$J=\frac{P(C_1-C_2)}{L} \quad (8)$$

尿素易溶于水,且溶解度随温度升高而升高。假设包膜内层表面为尿素分子所饱和,外表面尿素分子浓度为零,则内外表面浓度差即可算得。L 可通过扫描电镜测得。如果通过实验测得尿素通过包膜的通量(J),则渗透率可以通过(8)式求得。

不同温度渗透活化能($E_p$)可以通过 Rogers[34]提出的式子求得:

$$P=P_0\exp(-E_p/RT) \quad (9)$$

式中,P 和 $P_0$ 是不同温度下的渗透率,R 和 T 分别为气体常数和绝对温度。知道 2 种温度下的渗透率,便可以通过(9)式求得 $E_p$ 值;反过来,知道 $E_p$ 值和某一温度下的渗透率,便可以计算一定温度范围内任一温度下的渗透率。

Zhang Minchu 设计了一简单装置完成了上述测定:一盛水容器底部连接垂直的塑料的细管,管子底部连有过滤网筛,肥料置于其上,由上而下的流水使肥料样品溶解,但不致使溶解的尿素分子在肥料颗粒表面累积(可认为是零),定期称量肥料重量,根据差减法即可得到不同时间单位面积的扩散通量,然后再进一步求其它参数。测定、计算结果表明,不同膜厚度(8.8 和 14.7μm)肥料渗透率和渗透活化能有较大差异,且随温度升高差异越明显。研究还表明两种膜厚度的肥料养分释放服从对数曲线:

$$Y=16.51+7.99\log X \quad r=0.94\ (薄膜,12℃) \quad (10)$$

$$Y=3.00+2.20\log X \quad r=0.77(厚膜,12℃) \quad (11)$$

$$Y=21.00+9.73\log X \quad r=0.86(薄膜,31℃) \quad (12)$$

$$Y=4.39+2.12\log X \quad r=0.61(厚膜,31℃) \quad (13)$$

式中,Y 为肥料释放量,$mg\cdot cm^{-2}$;X 为溶出时间,h。显然,肥料的这种养分释放模式与前述研究又有所不同。通过计算渗透率预测养分释放速率并与 7d 养分溶出率法比较,结果显示,对于厚膜肥料养分 100%溶出仅需 100h,而 7d 溶出率法测定,溶解 20%就需 168h。其差异的根源在于 7d 溶出率法仅是一定性方法,因为应用该法在溶解肥料过程中浸提液浓度不断增加,致使养分由膜内向膜外的扩散驱动力随时间延长不断降低。当然,扩散率法假定肥料颗粒表面养分浓度为零,这种情况在土壤中是不存在的。进一步应用该方法的下一步工作就是寻求不同温度、水分等土壤条件下肥料颗粒表面养分浓度的测定方法,以对肥料在土壤条件下的释放速率作出预测。

### 1.4 电超滤法

电超滤(electroultrafiltration,EUF)技术研究土壤有效养分已为人们所熟悉。近年来一些研究者把该技术应用于评价控释肥控释性能[35~37]。Diez 等[38]确定了 EUF 用于控释肥评价的工作条件为 EUF-N Ⅰ:30min,200V,20℃,15mA;EUF-N Ⅱ:5min,400V,20℃,40mA 和 5min,400V,

20℃，150mA。Vallejo 等[36]对木素包膜尿素研究后指出 EUF-NⅠ可以表征养分释放的数量，而 EUF-NⅡ则与包膜的稳定性有关。EUF-NⅠ和 EUF-NⅡ均随膜厚度的增加而下降，它们的值与水中溶出率模型中速度常数高度相关。生物试验表明，黑麦草吸氮量、氮素淋失量和可溶性氮（吸收＋淋失）均与 EUF-NⅠ、EUF-N（Ⅰ＋Ⅱ）达显著或极显著的相关性，而与 EUF-NⅡ均达极显著水平的相关性，说明利用 EUF 技术不仅可以提供肥效的方面的信息，而且可以反映氮素淋失情况，是一个值得深入研究的方法。

### 1.5　同位素示踪法

Gandeza 和 Shoji 等[21,39,40]应用肥包方法和$^{15}$N 标记技术研究了 POCU-70（polyolefin-coated urea，聚烯烃包膜尿素，70 表示 25℃时肥料在水中释放 80％氮素所需天数）在田间条件下氮素释放特性和玉米吸收利用的关系。结果表明，10～30℃范围内 POCU 累积释放氮量与时间、气温或土壤积温的关系可用一元二次方程表示：

$$CNR = a + b(day) + c(day)^2 \quad (14)$$

$$CNR = a + b(CT) + c(CT)^2 \quad (15)$$

式中 CNR 为累积氮素释放率，％；day 为时间，d；CT 为空气或土壤积温，℃；a、b、c 为常数。POCU 施入土壤后开始氮素释放较快，但随着时间的推移释放率逐渐降低，大约在 126d 或气温积温达到 2300℃时（成熟期），累积释放率达到 80％。另一方面，玉米对氮素的吸收曲线则呈典型的“S”型曲线，证明 POCU 释放的氮素可以满足玉米整个生育期的需求，相应的氮素回收率达到 60％以上。以$^{15}$N 标记的 POCU-S100 也表明，水稻成熟时氮累积释放率达 87％，N 素回收率达到 79％[39]。Kaneta 等[41]得到的结论与此类似。同位素示踪法是一种能较真实反映田间实际情况的好方法，目前用该方法研究控释肥养分释放特性的报道还比较少，主要原因是同位素标记控释肥成本很高，而且需要特殊仪器，一般普通实验室难以完成。

## 2　存在问题及展望

目前控释肥养分释放特性评价一般采用水中溶出率法，但这一方法由于受浸提液浓度不断增加的影响，使养分释放受到影响，只能算是一种定性方法。Shaviv[10]认为控释氮肥水中溶解 80％养分所需时间并不能提供足够信息以调控氮素营养，从而减少氮素损失对环境的影响。应该把肥料在水中溶出率和在水、土壤中的溶出曲线结合起来评价。理想的溶出曲线应该是直线和“S”型曲线的结合型。这样的释放模式不存在释放开始时的“爆裂式释放”（burst）和释放后期“拖尾作用”（tailing effect），且与植物吸收养分的模式吻合。另外，这一方法也因不同研究者所选用的肥水比及温度条件不同，结果难以比较，因此，对同一类型的控释肥测定条件应统一。实践证明，水中溶出率表现差的肥料其土壤溶出率和实际肥效并不一定差，因此不宜简单地以此作为评价控释肥养分释放特性的唯一标准或主要标准。但水中溶出率法因操作简单，不需特殊仪器设备，对于控释性能初评和生产在线质量控制是可以考虑的。今后在这方面的研究应注意针对不同类型肥料确定相应的测试条件，并进行与土壤溶出率和田间肥效之间的相关研究，以使这一方法更加完善、准确。

严格的同位素示踪技术用于控释肥性能评价目前还十分稀少，但这一方法和扩散率法、电超滤法因其准确、可靠，有望成为控释肥评价的较好方法。因此，这方面的研究有待加强。

不同控释肥由于控释材料、控释工艺途径和控释机理（物理、化学、生物化学）不同，其养分释放速率和模式及受环境因素影响的程度不一样，评价方法也应有所不同。例如，包膜肥料和脲醛类肥料（UF，IBDU 等）的评价方法应加以区分[42]；添加硝化抑制剂和脲酶抑制剂的肥料评价则要考虑更多的生物因素；包膜核心速溶性肥料和微速溶性肥料由于溶解性不同，对植物的有效性有差异，就不能用同一溶出率标准等。若把一种方法套用在不同类型的控释肥上，所得结论势必与实际情况大相径庭。因此，建立适应不同材料、不同控释材料和机理的控释肥评价方法势在必行。

目前控释肥评价方法多限于实验室测定或模拟研究，各种方法因采用的介质、仪器不同，所得结论存在不同程度的差别，难以相互比较，缺乏统一的评价标准，而且未考虑“肥-土-作物”系统中土壤、作物对控释肥养分释放的影响。因为土壤是一个非均质体，液、固、气三相共存，土体内强烈的物理、化学和生物过程必然影响到肥料中养分的释放和释放出的养分的形态、有效性。在种植作物的条件下，作物根系与施肥点之间形成养分浓度梯度，肥料颗粒内外养分浓度梯度也会因作物吸收而加大，故养分释放必然加快。因此，今后应加强实验室或模拟研究测试法与田间作物吸收的相关研究以建立准确、快速预测田间养分释放规律的方法和相关模型。

## 参 考 文 献：

[1] Oertli J J and Lunt O R. Controlled release of fertilizer minerals by incapsulating membranes: Ⅰ. Factors influencing the rate of release[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1962, 26: 579-583.

[2] Lunt O R and Oertli J J. Controlled release of fertilizer minerals by incapsulating membranes: Ⅱ. Efficiency of recovery, influence of soil moisture, mode of application, and other consideration related to use[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1962, 26: 584-587.

[3] Trenkel M E. Contrelled-Release and Stabilized Fertilizers in agriculture [M]. International Fertilizer Industry Association, Paris, 1997. 11.

[4] Blouin M, Rindt W and Moore O. Sulfur-coated fertilizers from controlled release: pilot plant production [J]. J. Agric. Food Chem., 1971. 19:801-808.

[5] Christianson C B. Factors affecting N release of urea from reactive layer coated urea[J]. Fert. Res., 1988, 16:273-284.

[6] Salman O A. Polymer coating on urea pills to reduce dissolution rate [J]. J. Agric. Food Anal., 1988, 13: 793-802.

[7] 山添文雄，越野正义，藤井国博，等（韩辰极，付玉振，陈国绥，等译）. 肥料分析方法详解（修订版）[M]. 北京：化学工业出版社，

1983,483-486.

[8] 许秀成,李茵萍,王好斌. 包裹型缓释/控制释放肥料专题报告. 第一报 概念区分及评判标准[J]. 磷肥与复肥,2000,15(3):1-6.

[9] 徐和昌,柯以侃,郭立新,等. 几种缓释肥料包膜的性质和分析方法[J]. 中国农业科学, 1995,28(4):72-79.

[10] Shaviv A. Plant response and environmental aspects as affected by rate and pattern of nitrogen release from controlled release N fertilizers[A]. *In*: Van Cleemput *et al* (eds.). Progress in Nitrogen Cycling Studies[C]. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1996. 285-291.

[11] 熊又升,张行峰, 熊桂云,等. 包膜缓释肥料养分释放速率评价方法的探讨[J]. 磷肥与复肥, 1999,14(1):21-22.

[12] 段 平. 缓效多营养包硫尿素氮溶出速率的实验研究[J]. 磷肥与复肥, 2000,15(2):21-22.

[13] Patel A J and Sharma G C. Nitrogen release characteristics of controlled-release fertilizers during a four months soil incubation[J]. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 1977, 102(3):364-367.

[14] Holcomb E J. A technique for determining potassium release from a slow release fertilizer[J]. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 1981, 12:271-277.

[15] 侯翠红. 控制释放肥料养分释放特性的研究[J]. 磷肥与复肥, 1998,13(4):6-8.

[16] Paramasivam S and Alva A K. Nitrogen recovery from controlled-release fertilizers under intermittent leaching and dry cyclings[J]. Soil Sci., 1997a, 162:447-453.

[17] Paramasivam S and Alva A K. Leaching of nitrogen forms from controlled-release nitrogen fertilizers[J]. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 1997b, 28:1663-1674.

[18] 朱兆华. 氨氧化木质素(AOL)的肥效及其氮素控释机理研究[D]. 华南农业大学硕士学位论文, 2000.

[19] Sanvant N K. A technique for predicting urea release from coated urea in wetland soil[J]. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 1982,13: 793-802.

[20] Attoe O J, Rasson F L and Dahnke W C *et al*. Fertilizer release from packets and its effect on tree growth[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1970, 34:137-142.

[21] Gandeza A T, Shaoji S and Yamada I. Divisions-8-fertilizer management and technology. Simulation of crop response to polylefin-coated urea: Ⅰ. Field dissolution[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991,55:1462-1467.

[22] Hauke R D. Synthetic slow-release fertilizers and fertilizer amendments[A]. *In*: Goring CAI and Hamaker JW (eds.). Organic Chemicals in the Soil Environment[C]. Marcel Dekker Publ., New York, 1972, Vol. 2.

[23] Kochba M, Gambash S and Avnimelech Y. Studies on Slow-release fertilizers: Ⅰ. Effects of temperature, soil moisture and water vapor pressure[J]. Soil Sci., 1990,149:339-343.

[24] Gambash S, Kochba M and Avnimelech Y. Study on slow-release fertilizers: Ⅱ. A method for evaluation of nutrient release rate from slow-releasing fertilizers[J]. Soil Sci., 1990, 150(1):446-450.

[25] Zhang M, Nyborg M and Ryan JT. Determining permeability of coatings of polymer-coated urea[J]. Fert. Res., 1994, 38:47-51.

[26] Kobayashi A, Fujisawa E and Hanyuu T. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizers and its estimation by kinetic methods. 1. Effect of water vapor pressure on nutrient release [J]. Jap. J. Soil Sci. Plant Nutr. ,1997a, 68:8-13.

[27] Kobayashi A, Fujisawa E and Hanyuu T. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizers and its estimation by kinetic methods. 2. Release of nutrients affected by the permeability of water vapor through coating material[J]. Jap. J. Soil Sci. Plant Nutr., 1997b, 68:14-22.

[28] Kobayashi A, Fujisawa E, Kubo S *et al*. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizers and its estimation by kinetic methonds. 3. An improved simulation model for nutrient release from coated urea with gaussian correction[J]. Jap. J. Soil Sci. Plant Nutr., 1997c, 68:487-492.

[29] Fujisawa E, Kobayashi A and Hanyuu T. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizers and its estimation by kinetic methods. 4. Relation between release of nitrogen from resin-coated urea and water vapor pressure in saturated salt solutions[J]. Jap. J. Soil Sci. Plant Nutr., 1998a, 69:555-560.

[30] Fujisawa E, Kobayashi A and Hanyuu T. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizers and its estimation by kinetic methods. 5. Effect of soil moisture level on release rates resin-coated mixed fertilizer[J]. Jap. J. Soil Sci. Plant Nutr., 1998b, 69:582-589.

[31] Hanyuu T, Kobayashi A and Fujisawa E. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizers and its estimation by kinetic methods. 6. Release of constituent compounds from resin-coated compound fertilizers[J]. Jap. J. Soil Sci. Plant Nutr., 1999, 70:117-122.

[32] Burnette R R. Theory of mass transfer[A]. *In*: Robinson J and Lee VHL(eds.) Controlled drug delivery: fundamentals and application[C]. Marcel Dekker, Inc., New York, 1987. 95-138.

[33] Fan L T and Singh S K. Controlled Release, A quantitative treatment[M]. Sprinrger-Verlag, New York, 1989. 49-61.

[34] Rogers C E. Structure factors governing controlled-release[A]. *In*: Paul D R and Harris F W(eds). Controlled release polymeric formulation[C]. ACS Symposium Series, Washington, 1976. 15-25.

[35] Cartagena M C, Diez J A, Aallejo A *et al*. Evaluation and classification of coated slow-release nitrogen fertilizers by means of electroultrafiltration in an integrated system[J]. Agrc. Med., 1993, 123: 122-127.

[36] Vallejo A, Cartagena M C, Rodrfguez D *et al*. Nitrogen availability of soluble and slow-release nitrogen fertilizers as assessed by electroultrafiltration[J]. Fert. Res., 1993, 34:121-126.

[37] Garcia C, Garcia L, Vallejo A *et al*. Forecasting by laboratory tests of nitrogen leached and absorbed in soil plant system with urea-based controlled-release fertilizers coated with lignin [J]. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 1998, 29: 2479-2491.

[38] Diez J A, Cartegna M C, Vallejo A *et al*. Establishing the solubility kinetics of N in coated fertilizers of slow-release by means of electroultrafiltration[J]. Agrc. Med., 1991, 121:291-296.

[39] Shoji S, Gandeza A T, Kimum K. Simulation of response to polyolefin-coated urea: Ⅱ Nitrogen uptake by corn[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55:1468-1473.

[40] Shoji S and Kanno H. Use of polyolefin-coated fertilizers for increasing fertilizer efficiency and reducing nitrate leaching and nitrous oxide emissions[J]. Fert. Res., 1994, 39:147-152.

[41] Kaneta Y and Tsutiya K. Relationship between variation of weather and recovery rate of rice plants in non-tillage culture by single application of fertilizer in nursery boxes[J]. Jap. J. Soil Sci. Plant Nutr., 1997,68:112-115.

[42] Hall W L. New methology for slow-release fertilizers[C]. Book of Abstracts, 218th ACS National Meeting, New Orleans, 1999.