

有机-无机复合材料胶结包膜肥料的研制及评价^{*}

肖 强^{**} 王甲辰 左 强 张 琳 刘宝存 赵同科 邹国元 徐秋明

(北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097)

摘 要 应用水基成膜法制备 4 种有机-无机复合胶结包膜材料,利用圆盘造粒机制备其胶结包膜肥料(B2、PS、F2、F2F),并对其性质进行了测定.性能测试结果表明:胶结包膜肥料成粒率、抗压强度和成膜性由好至差均为 B2 > PS > F2 > F2F.土柱淋洗试验结果表明:B2 氮素累积溶出曲线最平缓;48 d 内氮素累积溶出率表现为:54.65%(B2) < 56.16%(PS) < 59.47%(F2) < 63.12%(F2F).玉米田间试验结果表明:与等量 NPK 化肥配施处理相比,4 种有机-无机复合材料胶结包膜肥料处理的玉米产量均有所提高,其中 B2 处理的增产效果最显著($P < 0.05$),其玉米产量和肥料利用率分别提高了 19.72% 和 20.30%,F2F 处理差异不显著,PS 和 F2 处理效果居中且前者好于后者.

关键词 水基成膜 有机-无机复合材料 胶结 包膜

文章编号 1001-9332(2010)01-0115-06 中图分类号 S145.6 S147.5 文献标识码 A

Development and evaluation of fertilizers cemented and coated with organic-inorganic materials. XIAO Qiang, WANG Jia-chen, ZUO Qiang, ZHANG Lin, LIU Bao-cun, ZHAO Tong-ke, ZOU Guo-yuan, XU Qiu-ming (Institute of Plant Nutrition & Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2010 21(1): 115-120.

Abstract: Four kinds of organic-inorganic cementing and coating materials were prepared by a coating method using water as the solvent, and the corresponding cemented and coated fertilizers (B2, PS, F2, and F2F) were produced by disc pelletizer. The tests on the properties of these fertilizers showed that the granulation rate, compression strength, and film-forming rate were B2 > PS > F2 > F2F. Soil column leaching experiment showed that the curve of accumulated nitrogen-dissolving rate was the gentlest for B2. In 48 days, the accumulated nitrogen-dissolving rate was in the order of B2, 54.65% < PS, 56.16% < F2, 59.47%, < F2F, 63.12%. Field experiment showed that compared with the same application amount of NPK, all the test fertilizers had better effects on corn yield, among which, B2 was the best, with the corn yield and fertilizer use efficiency increased by 19.72% and 20.30%, respectively. The yield-increasing effect of other test fertilizers was in the order of PS > F2 > F2F.

Key words: a coating method using water as the solvent; organic-inorganic complex materials; cementation; coating.

目前世界上氮肥的当季利用率较低($< 50\%$)^[1],损失的肥料绝大部分经淋溶随水进入地下和江河,不仅造成了巨大的经济损失,还造成了大气层、水体、土壤等环境污染.为了解决现有化肥养分利用率低的问题,人们开始研制缓控释肥料.缓控释肥料是通过缓释和控释技术,使肥料氮素缓慢

释放达到与作物需肥规律相接近的一类肥料,缓控释肥料能显著地提高氮素利用率,增加作物产量^[2-3],但是缓控释肥料也存在一定的缺点.包膜肥料是目前缓控释肥料的主要品种,其缺点是成本高,包膜材料难降解,施入土壤易造成二次污染,主要原因是采用了有机材料作溶剂与包膜材料,且研制的设备耗能大^[4].为了突破包膜肥料的瓶颈问题,本文采用水基成膜法来研制胶结包膜肥料^[5-6].水基成膜法是以水为溶剂,通过对材料的筛选与配伍,采用物理、化学改性技术,利用圆盘造粒机研制而成.

^{*}北京市科技新星计划 B 类项目(2008B38)、北京市农林科学院青年基金项目 and 北京市科委多功能肥料/基质研究与开发项目(d0706004040431)资助.

^{**} 通讯作者. E-mail: xqiang1978@163.com

2009-03-30 收稿, 2009-11-04 接受.

采用这种方法研制成的肥料成本低、所需设备简单、易于筛选出可生物降解的胶结包膜材料,如果再进一步提升其缓控释效果,则其推广应用前景巨大,将对我国的农业增产、农民增收、环境改善具有重要的推动作用。但是,目前国内外采用该方法进行肥料研制的研究还鲜见报道。因此,本文采用水基成膜法初步研制出了4种有机-无机复合材料胶结包膜缓释肥料,并对其性质进行了检测,研究了他们的氮素溶出速率及生物学效果,以期为缓控释肥料新领域的开发及推广应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

化肥原料为尿素(含N 46%)、磷酸一铵(含 P_2O_5 44%,含N 10%)和氯化钾(含 K_2O 57%)。胶结包膜材料分别采用丙烯酸酯类复合材料(B2)、废弃PS复合材料(PS)、不饱和聚酯复合材料(F2)和腐殖酸类复合材料(F2F)作为主要原料,以水为溶剂,通过加入表面活性剂、乳化剂等助剂研制而成。养分含量:N 20%、 P_2O_5 10%、 K_2O 10%。

1.2 肥料制作流程

工艺流程图见图1。造粒机圆盘倾角 45° ,转速 $35\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,时间30 min,刮刀位置与水平方向呈

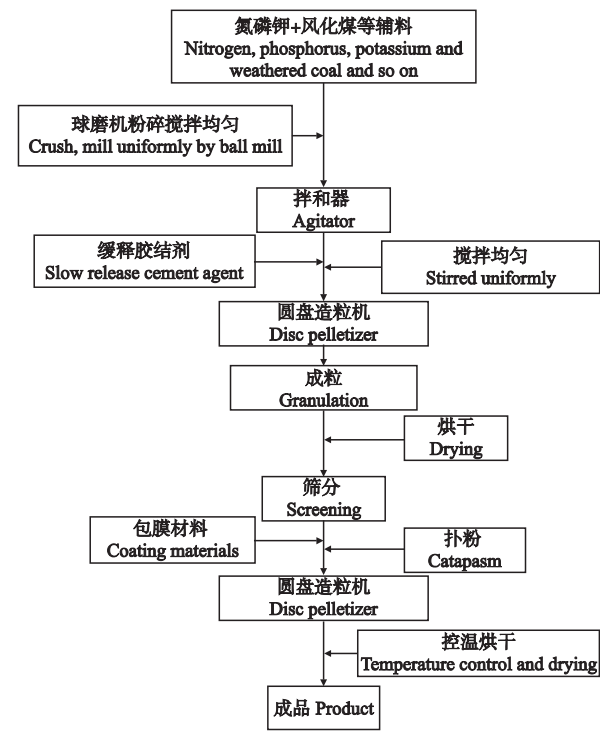


图1 胶结包膜肥料造粒工艺流程图
Fig. 1 Flow chart of preparation of felted and coated fertilizers.

60° 。由于本试验研制的包膜剂本身具有较强的粘度,所以对于同一种包膜肥料所用粘结剂和包膜剂相同。考虑到性价比,粘结剂用量为1%~1.5%,包膜剂用量为0.8%~1.2%,一次性包膜,制备单层包膜缓释复合肥。制备得到的样品装袋备用。

1.3 有机-无机复合材料胶结包膜型缓/控释肥料性质测试

1.3.1 成粒率 将制得的每种有机-无机复合材料胶结包膜缓/控释肥料称量并分别过2 mm、4 mm、10 mm筛网,对每一粒级的肥料颗粒称量并计算其质量百分比。

1.3.2 肥料颗粒抗压强度 每种有机-无机复合材料胶结包膜缓/控释肥料均采用2~4 mm粒径的颗粒。随机取50粒最接近球形的样品,用KC-1A型颗粒强度测定仪(江苏省姜堰市分析仪器厂生产)分别测定其抗压强度,取其平均值作为该种样品颗粒的抗压强度,单位为每粒N(牛)。

1.4 电镜观察

制备好的包膜肥料,于 80°C 烘干后,将肥料样品的完整颗粒样和肥料颗粒剖面样粘在电镜观测载样板上,肥料颗粒剖面向上,用离子溅射仪在观察样品表面喷涂金一钼粉,然后用日立S-570型扫描电镜扫描观察,并保存其成像图。

1.5 土柱淋洗氮素溶出率试验

试验土壤取至中国农业科学院昌平试验基地,该基地土壤属潮土土类,褐潮土土属,土壤质地为粉砂壤土。土壤耕层有机质 $16.42\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 8.11,全氮 $0.69\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $0.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效氮 $76.43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $4.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效钾 $90.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,容重 $1.27\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。试验方法:淋洗管(砂芯型号:G3)下端砂芯上平铺一层面积与砂芯面积相同的定量滤纸,取上述土壤100 g置于淋洗管下端,用足够量的蒸馏水湿润土柱(2~3次),使土柱达到饱和,晃动土柱,使土面平整,待淋洗管下端不流水后,静置24 h。然后将2.00 g缓释肥料放在饱和的土柱上面,轻晃土柱,使肥料铺平,再将20 g土壤放在肥料上面,土面上再放一层滤纸,铺平。用6 ml蒸馏水湿润肥料上面的20 g土柱(根据试验所得6 ml水恰好使20 g土柱饱和),静置2 h,然后用20 ml蒸馏水淋洗土柱,并收集滤液,取样时间为2、4、8、13、18、24、30、36、42、48 d。每次收集滤液前向容器中滴加1滴浓硫酸,并定容至100 ml。测定滤液中N、P、K含量。同时作空白试验。

1.6 玉米田间试验

玉米田间试验在中国农业科学院昌平试验基地进行,土壤性质同 1.5. 玉米品种为中单 8578. 供试肥料为包膜缓/控释肥 B2、PS、F2、F2F 和普通 NPK 化肥配施(简称 NPK),并设无肥处理作为对照(CK),共 6 个处理. 随机区组排列,小区面积 30 m². 4 种有机-无机复合材料胶结包膜肥料的施用量均为 N 180 kg · hm⁻²、P₂O₅ 90 kg · hm⁻²和 K₂O 90 kg · hm⁻²,普通 NPK 化肥成分为尿素、磷酸一铵和氯化钾,施用量与胶结包膜肥料相同. 2006 年 6 月 11 日开始播种玉米,10 月 18 日收获.

2006 年 10 月 18 日玉米收获后采集土样,取样深度为 0 ~ 160 cm,每 20 cm 为一层,每个小区取 3 个样点,土样不混合. 称取 12 g 新鲜土样过 2 mm 筛,放入 200 ml 塑料瓶中,加入 100 ml 2 mol · L 的 KCl 溶液,振荡 1 h,过滤,滤液冷冻保存^[7]. 测定前解冻,采用连续流动分析法(TRACCS-2000 Continuous Flow Analytical ,CFA)测定滤液中的硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)含量.

1.7 数据处理

采用 SPSS 11.5 软件对数据进行处理和统计分析,采用 Microsoft Excel 软件作图.

2 结果分析

2.1 有机-无机复合材料胶结包膜肥料的性质

2.1.1 成粒率 肥料制备过程中,每种肥料所施用的粘结剂与包膜剂种类不同,因此,包膜剂的性能不仅影响到成膜的优劣,也影响肥料养分相互粘结的强弱,进而影响肥料成粒率. 肥料行业一般把制造的肥料颗粒均匀度作为衡量造粒好坏的标准之一,并且一般采用 2 ~ 4 mm 颗粒作为成品. 从表 1 可以看出 4 种包膜材料成粒率各不相同,2 ~ 4 mm 成粒率分别为 64. 28% (B2) > 58. 37% (PS) > 50. 42% (F2) > 47. 36% (F2F),说明 4 种包膜材料的粘结性能表现为 B2 > PS > F2 > F2F. 以下试验的分析均采

用 2 ~ 4 mm 肥料颗粒样品进行. 在进行测试前,将肥料存放 3 周,因为水溶性材料无论是胶结还是包膜,均有一个固化过程,放置 1 周,固化率为 40% ~ 45%,放置 2 周,固化率为 65% ~ 75%;放置 3 周,固化率为 90% 左右.

2.1.2 颗粒抗压强度 肥料抗压强度体现了其硬度,硬度大利于肥料的运输和施用. 4 种包膜肥料抗压强度范围为 6. 31 ~ 14. 15 N,其强度大小表现为: B2 > PS > F2 > F2F,说明 4 种材料的胶结性和硬性为 B2 > PS > F2 > F2F(表 1).

2.1.3 电镜观察 由图 2a 可以看出,4 种包膜肥料的成膜性各不相同. F2F 的成膜厚度不均匀,有明显的隆起和较大的孔隙,膜质地较为疏松. F2 成膜效果好于 F2F,成膜厚度较均匀,无明显隆起,膜质地较为致密,但有细孔. PS 和 B2 成膜情况明显好于 F2,膜厚度均匀,无孔隙,质地致密.

进一步放大膜结构(图 2b,2000 倍)发现 4 种肥料成膜差异更加明显. F2F 膜凸凹不平,不光滑,反光效果差,有孔洞;F2 的情况好于 F2F,膜表面较平整和光滑,但是厚薄不一;PS 的膜比 F2 光滑;B2 效果最好,膜表面光滑无缝,密实,厚薄均一,说明 B2 材料的胶结包膜性能最好. 4 种包膜肥料的成膜性在表面光滑度、膜厚度及均匀度和质地密度上的差异与 4 种包膜材料的性质有关.

2.2 有机-无机复合材料胶结包膜肥料的氮素溶出速率

土柱淋洗是目前检测缓控释肥料养分溶出速率的一个较普遍的方法,与其他方法相比,该方法能更接近于田间实际条件下肥料养分的释放规律. 从图 3 可以看出,等量 NPK 化肥配施处理氮素溶出率曲线接近于 L 型,氮素基本在第 3 ~ 8 天完全溶出;4 种有机-无机复合材料胶结包膜肥料氮素溶出都表现出一定的缓释性,曲线形状接近于 S 型. 至第 48 天,5 种肥料处理的氮素累积溶出率分别为: 54. 65% (B2) < 56. 16% (PS) < 59. 47% (F2) <

表 1 胶结包膜肥料的成粒率和抗压强度
Tab.1 Granulation rate and compression strength of felted and coated fertilizers

处 理 Treatment	成粒率 Granulation rate (%)				抗压强度 Compression strength (N · granule ⁻¹)
	<2 mm	2 ~ 4 mm	4 ~ 10 mm	>10 mm	
F2F	4. 67 ± 0. 64a	47. 36 ± 2. 14c	33. 71 ± 1. 27b	14. 26 ± 2. 16a	6. 31 ± 0. 30d
F2	6. 41 ± 0. 76a	50. 42 ± 2. 57bc	29. 32 ± 3. 37b	13. 85 ± 2. 80a	8. 74 ± 1. 07c
PS	6. 11 ± 0. 66a	58. 37 ± 4. 29ab	23. 27 ± 1. 56a	12. 25 ± 1. 80a	11. 32 ± 1. 16b
B2	5. 59 ± 0. 66a	64. 28 ± 2. 91a	20. 46 ± 2. 19a	9. 67 ± 1. 05a	14. 15 ± 0. 37a

同列不同字母表示差异达 5% 显著水平. Different letters in the same column meant significant difference at 0. 05 level. 下同 The same below.

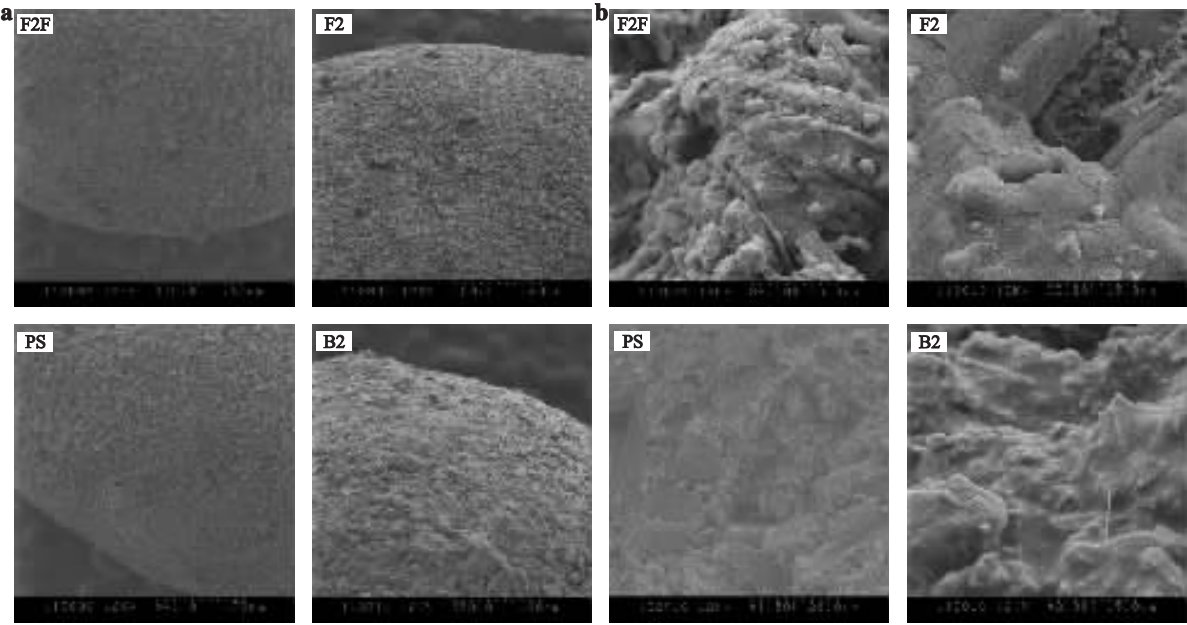


图2 胶结包膜肥料表面(a)和微观(b)扫描电镜成像图
Fig.2 Surface (a) and microcosmic (b) of SEM image of felted and coated fertilizers.

63. 12%(F2F) < 76. 17%(NPK). 氮素累积溶出率达到 50% 所需的时间分别为 : 42 d 左右(B2)、36 d 左右(PS)、30 d 左右(F2)、18 ~ 24 d(F2F)、5 d 左右(NPK), B2 比 NPK 延长 37 d 左右. 从氮素累积溶出率曲线可以看出 , B2 肥料的曲线最平缓 , 其次依次为 PS、F2 和 F2F. 说明 4 种包膜肥料的氮素缓释性均不同程度地好于等量 NPK 化肥处理 , 其优劣顺序为 : B2 > PS > F2 > F2F.

2.3 玉米对有机-无机复合材料胶结包膜肥料的氮素利用率

由表 2 可以看出 , 施肥处理与未施肥处理相比 , 玉米增产均达极显著水平 , 说明等量 NPK 化肥配施

处理和有机-无机复合材料胶结包膜肥料对玉米均有增产作用. 4 种有机-无机复合材料胶结包膜肥料处理玉米产量均高于等量 NPK 化肥配施处理 , 但是 4 种包膜肥料增产幅度各不相同. 其中 , B2 肥料增产效果最显著 , 比等量 NPK 化肥配施处理产量提高 19. 72% ; F2F 肥料增产效果最差 , 虽高于等量 NPK 化肥配施处理 , 但未达到显著水平 ; PS 和 F2 增产效果居中且前者好于后者.

4 种有机-无机复合材料胶结包膜肥料处理下玉米对氮素的利用率高于等量 NPK 化肥配施处理 ; B2 氮素利用率最高 , 为 58. 25% , 比等量 NPK 化肥处理提高了 20. 3% ; F2F 效果较差 , 为 38. 96% , 略高于等量 NPK 化肥处理 ; PS 和 F2F 介于其中. 说明 4 种有机-无机复合材料胶结包膜肥料与等量 NPK 化肥配施处理相比 , 均不同程度地提高了玉米对氮

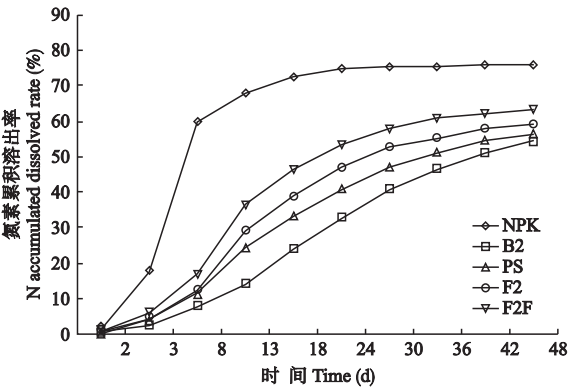


图3 胶结包膜肥料在土柱中的氮素累积溶出率
Fig.3 Nitrogen accumulated dissolved rate of felted and coated fertilizers in soil columns.

表2 不同肥料处理玉米籽粒产量及氮素利用率
Tab.2 Corn grain yield and nitrogen use efficiency under different fertilizer treatments

处 理 Treat- ment	产 量 Grain yield (kg · hm ⁻²)	增产率 Yield-increasing rate (%)	氮素利用率 Nitrogen use efficiency (%)
CK	2607 ± 241e		
NPK	4836 ± 252d	—	37. 95 ± 6. 25c
B2	5789 ± 196a	19. 72	58. 25 ± 7. 27a
PS	5596 ± 150ab	15. 72	54. 77 ± 6. 44a
F2	5302 ± 265bc	9. 65	50. 19 ± 7. 25ab
F2F	5029 ± 253cd	4. 00	38. 96 ± 6. 70bc

素的利用率. 目前国内外玉米对缓/控释肥料的氮素利用率范围一般是 55% ~ 80%^[8-9], 本试验所研制的有机-无机复合材料胶结包膜肥料中, B2 肥料氮素利用率在此范围内, PS 接近于此范围, F2 虽显著高于等量 NPK 化肥配施处理, 但氮素利用率不在此范围内, 而 F2F 肥料氮素利用率与等量 NPK 化肥配施处理差异不显著.

2.4 不同肥料处理土壤剖面硝态氮淋溶特征

硝态氮是土壤氮素淋溶的主要形式. 不同种类肥料对土壤硝态氮含量及其空间分布有显著影响. 虽然不同肥料处理下硝态氮含量均随土壤剖面的加深而下降, 但不同处理的土壤硝态氮含量及峰值出现的深度均存在明显差异. 从图 4 可以看出, 对照处理(CK)土壤硝态氮含量最低, 各土层都不超过 6 mg · kg⁻¹. 在 0 ~ 80 cm 土层, 普通 NPK 化肥配施处理土壤硝态氮含量低于 B2、PS 和 F2 处理, 而高于 F2F 处理; 在 80 ~ 160 cm 土层, 普通 NPK 化肥配施处理硝态氮含量均高于其他处理. 说明普通 NPK 化肥配施处理硝态氮向下淋溶的强度大于有机-无机复合材料胶结包膜肥料. 已有研究认为, 硝态氮下移至 100 cm 以下或更深的土层可能是夏玉米轮作体系中氮肥的主要损失途径^[10]. 有机-无机复合材料胶结包膜肥料土壤硝态氮峰值出现在 0 ~ 60 cm 土层, 其中 B2 和 PS 处理峰值出现在 40 ~ 60 cm 土层, 分别为 14.13 mg · kg⁻¹ 和 13.66 mg · kg⁻¹, 100 cm 以下土层硝态氮含量降至 0 ~ 3 mg · kg⁻¹; 而 F2 和 F2F 处理土壤硝态氮峰值则上升到 0 ~ 20 cm 土层, 分别为 10.38 mg · kg⁻¹ 和 10.20 mg · kg⁻¹. 从作物根系分布和需肥特点来看, B2 和 PS 的氮素溶出规律比 F2 和 F2F 更符合作物需求.

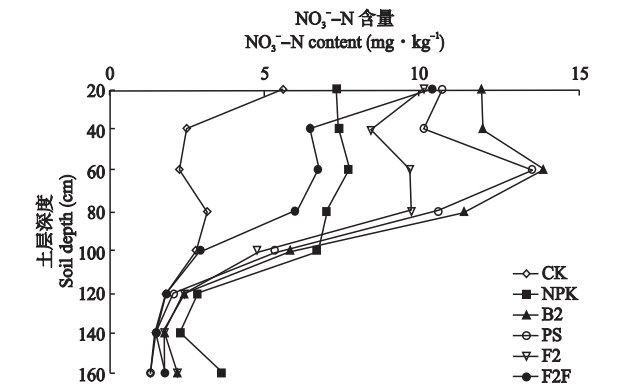


图 4 施肥对土壤剖面硝态氮含量的影响
Fig.4 Effect of fertilization on NO₃⁻-N content in soil profiles.

3 讨论与结论

4 种有机-无机复合材料胶结包膜肥料的包膜特征存在很多差异. 这种差异一方面与所用包膜材料的特性有着密切关系, 在胶结剂和包膜剂用量相同的情况下, 胶结力越大, 分子间引力和物质本身拉伸强度越大, 结合物质越紧密、牢固, 物质表面越光滑, 包膜效果越好; 另一方面也与反应的环境条件等有关, 如温度、pH 及搅拌程度等^[11-13].

土柱淋洗试验表明, 在 48 d 内 4 种包膜肥料养分释放量范围为 54.65% ~ 63.12%, 一般认为养分释放 80% 以上为释放完全. 肥料在土柱淋洗条件下养分释放的时间与大田中所需时间有一个倍数的关系^[14], 因此, 可以估计 4 种胶结包膜缓控释肥料养分释放期约在 70 ~ 80 d 以上, 与玉米的生育期接近. 这与韩燕来等^[15]的研究结果相似.

农田土壤硝酸盐淋失是导致地下水硝酸盐污染的主要原因^[16], 本文田间试验表明 4 种有机-无机复合材料胶结包膜肥料处理都不同程度地提高了玉米的氮素利用率, 降低了硝态氮在 0 ~ 160 cm 土体中的浓度. 但同时可以看出, 本文所研制的胶结包膜肥料氮素利用率均小于 60%, 与国内外的其他一些研究结果还存在一定差距^[7], 下一步研究应该在保证低成本、环境友好的基础上进一步提高缓控释效果.

另外, 试验结束后将肥料取出、风干并切开, 发现肥料只剩一层空壳, 无弹性, 稍微用力一碾, 空壳即破碎(如果是层膜, 有弹性, 不会破碎, 而是裂开或裂成小块膜). 根据经验分析, 这层物质主要为磷酸一铵的填料, 对其进行测定, 发现其不含氮磷钾养分. 这个现象说明, 本文所研制的包膜肥料养分是从微孔缓慢释放出去的, 而不是膜层破裂导致养分的释放, 包膜材料已溶解于水中, 导致微孔逐渐增多, 养分通过微孔缓慢释放. 肥料养分完全溶出后包膜材料几乎没有残留, 这与 Kochba 等^[10]的膜层破裂养分溶出理论相矛盾, 而与熊又升等^[11]的养分通过膜的微孔隙通道扩散而出的理论相似.

参考文献

[1] Wang H-F (王红飞), Wang Z-Y (王正银). Advance and evaluation methods of slow or controlled release fertilizers. *Guangdong Chemistry Industry* (广东化工), 2005, **32** (8): 86-90, 15 (in Chinese)
[2] Xie Y-D (谢银旦), Yang X-D (杨相东), Cao Y-P (曹一平). Evaluation of determination methods for nu-

- trient release characteristics of coated controlled release fertilizer under soil land water incubation conditions. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2007, **13**(3): 491–497 (in Chinese)
- [3] Wang X-F (王向峰), Liu S-Q (刘树庆), Ning G-H (宁国辉). Study on the N utilization ratio and the control result of new slow controlled release fertilizers. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2006, **21** (suppl.): 38–41 (in Chinese)
- [4] Long J-R (龙继锐), Ma G-H (马国辉), Zhou J (周静). Status and prospect of controlled release fertilizer. *Crop Research* (作物研究), 2006, **20**(5): 514–521 (in Chinese)
- [5] Xiao Q (肖强), Zhang F-D (张夫道), Wang Y-J (王玉军), *et al.* Effects of slow/controlled release fertilizers felted and coated by nano-materials on nitrogen recovery and loss of crops. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2008, **14**(4): 779–785 (in Chinese)
- [6] Xiao Q (肖强), Zhang F-D (张夫道), Wang Y-J (王玉军), *et al.* Effects of slow/controlled release fertilizers felted and coated by nano-materials on crop yield and quality. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2008, **14**(5): 951–955 (in Chinese)
- [7] Liu H-B (刘宏斌), Li Z-H (李志宏), Zhang Y-G (张云贵), *et al.* Characteristics of nitrate distribution and accumulation in soil profiles under main agro-land use types in Beijing. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2004, **37**(5): 692–698 (in Chinese)
- [8] Ju X-T (巨晓棠), Liu X-J (刘学军), Zou G-Y (邹国元), *et al.* Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2002, **35**(12): 1493–1499 (in Chinese)
- [9] Masatoshi O, Naomichi M, Susumu H, *et al.* Effects of nitrogen in coated fertilizers on field vegetables. *Hokkaidouritsu Nougyou Shikenjou Shuhou*, 1999, **76**: 16–26
- [10] Kochba MS, Avnimelech Y. Studies on slow release fertilizers. I. Effects of temperature, soil moisture, and water vapor pressure. *Soil Science*, 1990, **149**: 339–343
- [11] Xiong Y-S (熊又升), Chen M-L (陈明亮), Xiong G-Y (熊桂云). Study on detection method of nutrient release rate of coated controlled release fertilizer. *Journal of Huazhong Agricultural University* (华中农业大学学报), 2000, **19**(5): 42–45 (in Chinese)
- [12] Chen Q (陈强), Zhang W-Q (张文清), Lü W-J (吕伟娇), *et al.* Study on biodegradable chitosan coating materials of fertilizers. *Polymeric Materials Science & Engineering* (高分子材料科学与工程), 2005, **21** (3): 290–293 (in Chinese)
- [13] Liu B-L (刘白玲). Study on biodegradability of PVA. *Vinylon Communication* (维纶通讯), 2005, **25**(4): 5–12 (in Chinese)
- [14] Xiao Q (肖强). Preparation and Evaluation of Organic-inorganic Complex Materials Felted and Coated Slow/controlled Release Fertilizers. PhD Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007 (in Chinese)
- [15] Han Y-L (韩燕来), Zhao S-C (赵士诚), Wang Y-L (王宜伦), *et al.* The nitrogen release character of the coated fertilizer ZP and its effect on summer maize. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2006, **37** (3): 530–532 (in Chinese)
- [16] Zhang Q-Z (张庆忠), Chen X (陈欣), Shen S-M (沈善敏). Advances in studies on accumulation and leaching of nitrate in farming soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(2): 233–238 (in Chinese)

作者简介 肖强,男,1978年生,博士.主要从事缓控释肥料与面源污染研究. E-mail: xqiang1978@163.com

责任编辑 张凤丽
