植物营养与肥料学报 2005,11(3):357-362
Plant Nutrition and Fertilizer Science

控释氮肥对大白菜产量和品质的影响及其机理研究

王为木，史衍玺*，杨守祥，冯海艳
（山东农业大学资源与环境学院，山东泰安 271018）

摘要：田间试验研究了控释氮肥不同品种及不同用量对大白菜产量和品质的影响，并从养分释放、包膜特性等方面探讨其作用机理。结果表明，控释氮肥能显著提高大白菜产量和品质。与同期追施等氮量尿素相比，施用控释氮肥可使大白菜产量提高8.2%～16.8%；莲座末期功能叶和收获期球叶 NO_3^--N 含量分别降低14.3%～39.9%和12.1%～21.4%，收获期球叶 Vc 含量平均提高24.8%。控释氮肥用量减半后，大白菜产量及叶片 NO_3^--N 与 Vc 含量都未受到显著影响。研究证实，由于控释氮肥中的氮素是缓慢地释放出来，在大白菜生育前期施用，仍能较充分满足生育中后期株体对氮素的需求，控释期不同的两个氮肥品种混合施用较单一施用的效果更好。不同控释氮肥品种氮素释放特征的差异与肥料包膜的厚度、膜断面及表面孔隙状况不同有关。

关键词：控释氮肥；大白菜；养分释放特征；包膜形态
中图分类号：S145.5；S634　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2005)03-0357-06

Effects of controlled-release nitrogen fertilizers on yield and quality of Chinese cabbage and their related mechanisms

WANG Wei-mu, SHI Yan-xi*, YANG Shou-xiang, FENG Hai-yan
(*College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China*)

Abstract: The effects of different controlled-release nitrogen fertilizers (CRNFs) supply on yield and quality of Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. var. *pekinensis*) were studied in field experiment. Relationship between nitrogen release from CRNFs and nitrogen uptake by Chinese cabbage, and the characteristics of fertilizer coat were also discussed. The results showed that the yield of Chinese cabbage was significantly increased by 8.2%—16.8% with CRNFs application, compared to the urea supply. Vc content in the head leaves at harvest stage was 1.80 mg/kg at average with CRNFs application, 24.8% higher than that of urea treatment. NO_3^--N contents were significantly decreased by CRNFs treatments, which were 14.3%—39.9% lower in rosette leaves at rosette stage and 12.1%—21.4% in head leaves at harvest stage, compared to urea treatment. The yields, NO_3^--N content and Vc content of Chinese cabbage leaf were almost changeless when CRNFs were half supplied. It was confirmed that nitrogen was released slowly and continuously from the inner part of CRNF granules. When CRNFs were applied at early stage, nitrogen was still supplied at medium and later stage for Chinese cabbage. The characteristics of nitrogen release of CRNF were apparently determined by thickness of granule coat, number and diameter of pores on coat surface.

Key words: controlled-release nitrogen fertilizer; Chinese cabbage; characteristic of nitrogen release; state of coat

大白菜（*Brassica campestris* L. var. *pekinensis*）是我国重要的冬令蔬菜，施用氮肥增产效果明显[1]。

收稿日期：2004-04-06　　**修改稿收到日期**：2004-10-18
基金项目：农业部948科技引进项目(971053)资助。
作者简介：王为木(1972—)，男，山东日照人，博士，讲师，主要研究方向是农业生物环境，现在河海大学现代农业工程系工作。* 通讯作者

但在生产中,菜农为片面追求高产而大量过量施用氮肥,使大白菜品质显著降低,甚至造成 NO_3^- -N 的过量积累而影响人体健康[2]。氮肥的过量施用还降低肥料的利用率,造成氮素的大量流失,给土壤和水体带来严重的污染问题[3-4]。在保证产量和品质提高的前提下,减少肥料施用量已成为我国蔬菜生产的重要任务。

自 20 世纪 80 年代,国外控释肥已成为新型肥料的研究热点[5],并进行了大量的控释肥农用效果评价研究[6-7]。国内自本世纪初也开展了控释肥研制与农用效果评价的研究。通过对水稻[8]、小麦[9]、蔬菜[10-11]的肥效试验以及控释肥养分释放试验[12]表明,该类肥料由于减缓养分释放速率,缓慢持续地供应作物需求,从而在减少施肥用量和次数的基础上,保证对作物的养分需求,减少肥料损失,提高肥料利用率。为探讨控释肥对大白菜生长效应,通过田间试验,研究了控释氮肥对大白菜产量和品质的影响,并从养分吸收与供应相互关系以及包膜的形态特征的角度探讨其作用机理,以期为大白菜施肥提供依据。

1 材料与方法

试验选用的控释肥是由山东农业大学肥料研究所研制的两种包膜型控释氮肥,属有机聚合物包膜类控释肥。其中 CRNF1 设计控释期限为 75d,含氮量为 37.8%; CRNF2 设计控释期限为 100d,含氮量为 37.4%。供试大白菜品种为合抱型 81-5。

1.1 大白菜肥效试验

于 1999 年 8 月至 11 月在山东农业大学农场蔬菜园进行。试验地土壤有机质含量为 9.8 g /kg,碱解氮 77.20 mg/kg,速效磷(Olsen-P)17.26 mg/kg,速效钾 68.0 mg/kg。试验设 9 个处理,重复 3 次,顺序排列,具体方案见表 1。大白菜播前所有处理均基施 P_2O_5 225 kg/hm^2(过磷酸钙),K_2O 200 kg/hm^2(氯化钾)。8 月 15 日播种,行距 60cm,株距 40cm,及时疏苗。幼苗末期(9 月 6 日)定苗,每穴留一株,并进行施肥试验。方法是将肥料分施于白菜垄两侧离根 15cm 处,每处理 6 株,施后覆土盖严。除处理 3 尿素在幼苗末期(9 月 6 日)和结球初期(10 月 3 日)分两次施用,用量各占 50%外,其它处理均一次施入。苗期控制灌水,进行蹲苗; 莲座期每 7～8d 灌水一次,结球期每 5～6d 灌水一次,保持土壤相对含水量在 80%～85%左右。按常规措施进行病虫防治。

在大白菜莲座末期(10 月 3 日)分莲座叶软叶、莲座叶中肋和中心球叶采样,测定 NO_3^- -N 含量。11 月 22 日收获,每处理选取其中 4 株,称重,以平均单株重计产。取 2 株的叶球,用不锈钢刀纵切取四分之一,将软叶切碎混匀,立即取样分别用水杨酸比色法及 2,6—二氯靛酚滴定法测定 NO_3^- -N 和 Vc 含量[13],重复 3 次。

表 1 大白菜田间肥料试验方案

Table 1 Scheme of the field experiment on Chinese cabbage

编号 Code	施 N 量 N rate (g/plant)	处理 Treatments
1	0	CK
2	5.0	尿素(一次施)Urea(supplied once)
3	5.0	尿素(两次施)Urea(supplied twice)
4	5.0	CRNF1
5	2.5	CRNF1
6	5.0	CRNF2
7	2.5	CRNF2
8	5.0	1/2CRNF1 + 1/2CRNF2
9	2.5	1/2CRNF1 + 1/2CRNF2

1.2 控释氮肥养分释放试验

准确称取 2g 控释氮肥若干份,装入尼龙网袋(网孔 0.25cm^2),加入适量湿润细土与之混匀,于田间埋入距大白菜主根 20cm 土壤中,埋深 15cm,覆土压实。与肥料试验同期(9 月 6 日)布置。每隔 5d(后期每隔 10d)取出 3 个网袋,于实验室将肥料颗粒与土壤分离,用蒸馏水冲洗干净,压碎后 60℃下烘干称重,根据残余肥料质量计算氮素释放量,公式为:

$$y(\%) = (m - m1)/m \times 100\%$$

式中 m 为施入土壤前肥料重量(2g),m1 为施入土壤后又取出烘干后的肥料重量。

1.3 控释氮肥包膜形态结构的观察

将控释氮肥的包膜剥离,用蒸馏水漂洗,滤纸吸干,再用尖嘴镊子小心将膜分成 < 1m^2 的小片,制成观测样品。在样品表面用离子散射仪喷涂一层合金,用日本产 JEM-1200EX 型电镜扫描观察膜形态结构,并拍照。

2 结果与分析

2.1 控释氮肥对大白菜产量的影响

表 2 看出,施用氮肥大白菜产量都极显著增加。与尿素一次追施(处理 2)相比,施等氮量控释氮肥(处理 4、6、8)增产率达 8.2%～16.8%,达显著或极

显著差异水平；控释氮肥用量减半时(处理 5、7、9)，仍增产 6.3%～14.8%，除处理 5 外，差异显著，但全量和半量控释氮肥处理，产量之间没有明显差异。表明在减少一半氮肥用量的情况下，施用控释氮肥仍能获得较高的大白菜产量。尽管控释氮肥处理与尿素分次追施处理(处理 3)大白菜产量间无显著差异，但由于减少一次施肥作业，节省劳力，提高了经济效益。

表 2　控释氮肥对大白菜产量的影响

Table 2　Effect of CRNFs on the marketable yield of Chinese cabbage

处理号 Treatment No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
产量 Yield (g/plant)	3062.8 Cd	3525.5 Bc	3851.6 ABb	3812.9 ABb	3746.6 ABbc	4013.4 ABab	3918.8 ABab	4117.0 Aa	4046.4 Aab

注：不同大小写字母分别表示处理间差异达 1%或 5%显著水平，下同。

Note: Different capital and small letters mean very significant at1% and 5% levels, respectively, same as follows.

2.2　控释氮肥对大白菜 NO_3^--N 含量的影响

NO_3^--N 含量的高低是评价蔬菜品质好坏的重要指标之一。两个取样时期不同施氮处理大白菜体内 NO_3^--N 含量(表 3)看出，莲座末期大白菜莲座叶中肋 NO_3^--N 含量最高，其次为莲座叶软叶，含量最低的是球叶叶片，说明莲座叶是莲座末期至结球初期大白菜体内 NO_3^--N 积累的主要部位。

表 3　控释氮肥对大白菜叶中硝态氮含量的影响(mg/kg)

Table 3　Effects of CRNFs on NO_3^--N content in Chinese cabbage leaf

处理号 Treatment No.	莲座末期 Late rosette stage			收获期球叶 Head leaf at harvest
	莲座叶中肋 Rosette main leaf veins	莲座叶软叶 Rosette soft leaf	球叶叶片 Head leaf	
1	394.50 E de	190.38 EF ef	37.75 F f	138.27 D e
2	601.38 A a	349.44 A a	91.32 AB a	194.06 AB b
3	492.82 B b	326.88 AB ab	64.00 DE de	216.10 A a
4	425.94 CD c	299.63 B b	95.56 A a	166.72 C cd
5	432.69 C c	259.25 C c	87.25 AB ab	136.97 D e
6	406.75 DE d	210.12 DE de	72.19 CD cd	170.58 BC c
7	362.28 F f	165.75 F f	56.50 E e	157.61 CD cd
8	392.44 E e	233.38 CD cd	81.13 BC bc	152.52 CD de
9	371.25 F f	217.62 DE e	55.13 E e	110.17 E f

张振贤等[14]研究认为，大白菜结球初期的功能莲座叶中养分元素的浓度能较好地反映植株的营养状况，进而表征土壤供应养分的情况。本试验施氮处理中，莲座叶中 NO_3^--N 含量最高的是施全量尿素处理，为 601.38 mg/kg(中肋)和 349.44 mg/kg(软叶)，都极显著高于控释氮肥处理及对照。除 CRNF1 处理的中肋外，全量控释氮肥处理莲座叶 NO_3^--N 含量都显著或极显著高于半量处理；处理 7 的莲座叶以及处理 9 的软叶中 NO_3^--N 含量显著低于对照处理。说明苗期施用控释氮肥，尤其是用量减半，在不降低产量的情况下，对降低莲座末期大白菜莲座叶中 NO_3^--N 含量具有显著效果。这可能是控释氮肥缓慢释放出氮素，减少大白菜的过量吸收；也可能是大白菜生物量增加引起的稀释作用的结果。在相同施氮量情况下，CRNF1 对降低 NO_3^--N 含量的效果较差，这可能与其控释时间较短有关。

表 3 还看出，与莲座末期相比，收获期大白菜球叶中 NO_3^--N 含量升高了 1～2 倍。追施尿素(处理 2,3)仍维持较高水平，为 194.06 mg/kg 和 216.1 mg/kg。CRNF2 由于控释时间长，在大白菜生长后期保持较充足的氮素供应，球叶中 NO_3^--N 含量略高于同氮量 CRNF1 处理。CRNF1 与 CRNF2 混合施用时，氮素释放能较好地同大白菜氮素吸收相吻合，氮素在大白菜体内同化作用完全，使游离的 NO_3^--N

含量降低,仅为 152.52 mg/kg; 氮量减半时 NO_3^- -N 含量只有 110.17 mg/kg,分别显著低于等氮量的 CRNF1 和 CRNF2 处理。

2.3 控释氮肥对大白菜 Vc 含量的影响

与对照(CK)处理相比,收获期不同处理大白菜叶球中 Vc 含量,控释氮肥处理提高 0.64 ~ 4.82 mg/kg,平均 1.87 mg/kg,增幅为 26.0%; 与尿素一次追施(处理 2)相比, Vc 含量平均提高 1.80 mg/kg,增幅为 24.8%。比较控释氮肥不同品种和用量处理,两种控释氮肥混合施用对提高 Vc 含量的效果最好(图 1)。说明施用适量氮肥能提高大白菜球叶中 Vc 含量,控释氮肥的效果优于普通尿素。

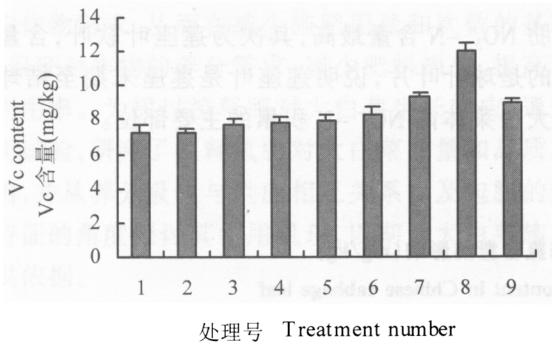

图 1 控释氮肥对收获期大白菜叶中维生素 C 含量的影响

Fig.1 Effect of CRNFs on Vc content in Chinese cabbage leaves at harvest stage

2.4 控释氮肥养分释放特征与大白菜氮素吸收规律的关系

据张振贤等[14]研究认为,大白菜对氮素的吸收呈单 S 曲线。发芽期到幼苗期氮素吸收量很小,进入莲座期吸收量猛增,一直持续到结球中期,以后又逐渐减少。吸收速率为单峰曲线,高峰出现在结球初期。本试验看出,控释氮肥田间养分累积释放曲线呈近抛物线型(图 2)。前期由于地温较高,释放速率较快,累积释放量大; 后期由于气温降低,释放速率减慢。大白菜收获时,CRNF1 的累积氮素释放量占总施氮量的百分数(累积释放比率)为 82.38%,混合控释氮肥为 77.44%,而 CRNF2 仅为 72.36%。从图 2 中看出,控释氮肥前期累积释放比率大于大白菜累积吸收比率,42d 以后,大白菜进入结球期,累积吸收比率超过释放比率。尽管如此,从大白菜产量结果可以看出,在大白菜生长的中后期仍有较好的氮素供应。

大白菜氮素吸收曲线可用 Logistic 方程很好地拟合: $y = 102.8/(1 + 84.7e^{-2.168x})$, $r = 0.9923^{**}$; 而控释氮肥养分释放曲线用抛物线方程拟合的相关性更好,其中 CRNF1 为: $y = -0.0191x^2 + 2.5504x - 3.4354$, $R^2 = 0.9955^{**}$; CRNF2 为: $y = -0.0089x^2 + 1.7269x - 3.0814$, $R^2 = 0.9944^{**}$; 两种控释肥混合为: $y = -0.0141x^2 + 2.1445x - 3.2609$, $R^2 = 0.997^{**}$。

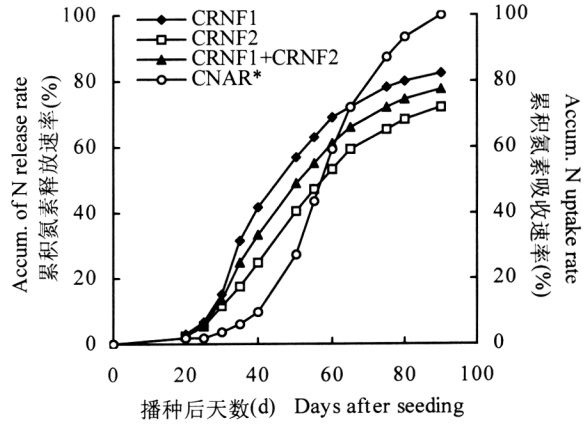

图 2 控释氮肥养分累积释放特征与大白菜氮素累积吸收规律的关系

Fig.2 Relation between nitrogen release of CRNFs and nitrogen uptake of Chinese cabbage

(* CNAR:数据引自文献[14] Data from reference[14])

2.5 控释氮肥包膜的形态特征

本试验所用控释氮肥属有机聚合物包膜类控释肥,是将膜材料溶于有机溶剂后在流化床反应器中喷涂在肥料颗粒表面形成膜,通过调节膜的物质组成(添加剂)和膜的厚度来控制氮素的释放[15]。膜材料和膜厚度都可使包膜的微观形态表现出一定的特征,在评价控释氮肥的控释性能方面具有重要意义。

图 3 为控释氮肥包膜的纵断面电镜扫描照片。图中看出,整层膜是由许多具有网格状孔隙结构的亚层构成。每一亚层的孔隙与相邻亚层的孔隙相联结,成为水汽分子和养分物质扩散出入膜的通道。CRNF1 的膜较薄,亚层上的孔隙直径较大,而 CRNF2 的膜较厚,亚层上的孔隙较多,但直径明显小于 CRNF1。较厚的膜和小的孔径加长了物质出入膜的距离,也增大了扩散过程中的阻力,所以 CRNF2 的控释时间长于 CRNF1。

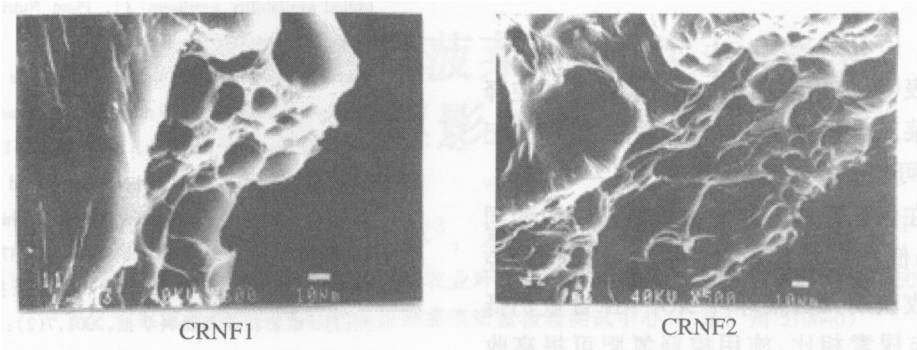

图 3　控释氮肥包膜的纵断面形态

Fig.3　Vertical section of the coats of different CRNFs

控释氮肥在养分释放前包膜的表面形态结构(图 4)看出,两种控释氮肥的膜表面光滑,较均匀地分布着近圆形的孔隙。比较后可以发现,CRNF1 包膜表面单位面积上的孔隙数量多于 CRNF2,前者孔隙的平均直径为 4.34 μm(n = 20, S = 2.75),后者的平均直径为 3.23 μm(n = 18, S = 1.38),前者比后者大 1.11 μm 左右。这可能是 CRNF1 养分释放较快的另一原因。

养分释放后控释氮肥膜表面形态见图 5。与释放前相比,两种控释氮肥包膜的表面略变粗糙,孔隙的边缘更为清晰圆滑,这可能是膜中的副料部分溶解脱落后造成的。统计结果表明,CRNF1 膜上孔隙的平均直径为 4.49 μm(n = 15, S = 1.97),CRNF2 为 3.61 μm(n = 16, S = 1.38),比释放前的平均孔径略有增大,但差异不显著(CRNF1: $t = 0.13 < t_{0.01}(33) = 2.73$; CRNF2: $t = {}_{0.54} < t_{0.01}(30) = 2.75$)。出现上述现象的原因可能是养分物质和副料物质分子溶出时对孔隙壁的物理磨损作用,而有机聚合物分子本身的结构和理化性质在养分释放前后没有发生变化。

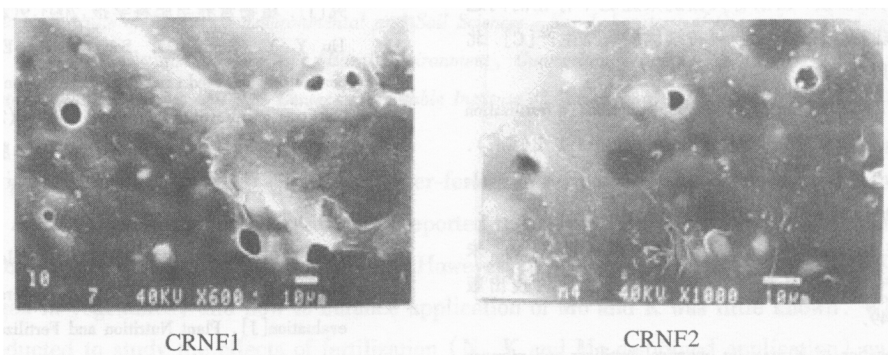

图 4　养分释放前控释氮肥包膜表面形态特征

Fig.4　Configuration of coat surface of CRNFs before the nutrient release

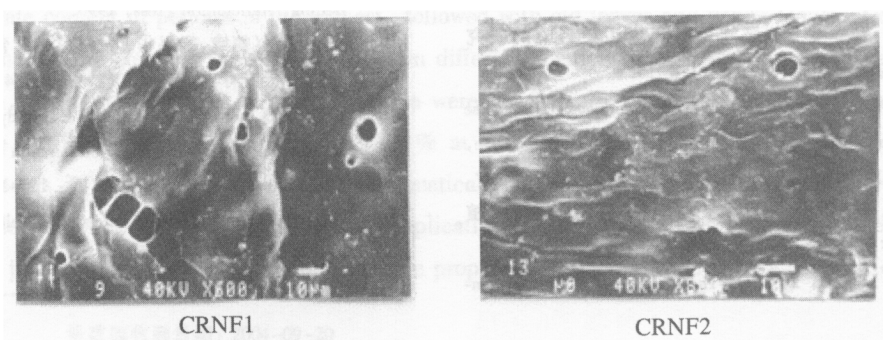

图 5　养分释放后控释氮肥包膜表面形态特征

Fig.5　Configuration of coat surface of CRNFs after the nutrient release

3 结论

试验结果表明,与尿素相比,施用等氮量的控释氮肥可使大白菜产量提高8.2%～16.8%,控释氮肥用量减半时仍可提高大白菜产量6.3%～14.8%。施用控释氮肥在保证莲座末期大白菜氮素供应的同时,可以显著降低莲座功能叶的 NO_3^- -N 含量。控释氮肥处理的收获期大白菜球叶 NO_3^- -N 含量仍低于尿素处理;与尿素相比,施用控释氮肥可提高收获期大白菜球叶 Vc 含量;两种控释氮肥混施,降低 NO_3^- -N 含量和提高 Vc 的效果更加显著。

控释氮肥田间氮素释放曲线为抛物线形,在大白菜生育后期仍有部分氮素供应,与一次施用尿素相比,更好地满足了大白菜对氮素的需求。两种控释氮肥是通过肥料颗粒包膜的厚度、孔隙数量和孔径大小等因素决定其氮素控释期限,而包膜材料自身的理化性状在养分释放前后没有变化。

参考文献:

[1] 刘宜生. 中国大白菜[M]. 北京:中国农业出版社,1998.
Liu Y S. Chinese cabbage[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998.

[2] 马文奇,毛达如,张福锁. 山东省大棚蔬菜施肥中存在的问题及对策[A]. 李晓林. 平衡施肥与可持续优质蔬菜生产[C]. 北京:中国农业出版社,2000. 41-47.
Ma W Q, Mao D R, Zhang F S. Problems and solutions in fertilization of greenhouse vegetable in Shandong province[A]. Li X L(Ed.). Balance fertilization and continuable production of high-grade vegetable [C]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 41-47.

[3] 朱兆良. 农业生态系统中的化肥氮的去向和氮素管理[A]. 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[C]. 南京:江苏农业科技出版社,1992. 213-249.
Zhu Z L. Translocation of nitrogen in chemical fertilizer and nitrogen management in agroecosystem[A]. Zhu Z L, Wen Q X(Eds.). Soil nitrogen in China [C]. Nanjing: Jiangsu Agricultural Science and Technology Press, 1992. 213-249.

[4] 吕殿青,同延安,孙本华. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(1):8-15.
Lu D Q, Tong Y A, Sun B H. Study on effect of nitrogen fertilizer use on environment pollution[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(1): 8 15.

[5] 何绪生,李素霞,李旭辉,吕殿青. 控效肥料的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(2):97-106.
He X S, Li S X, Li X H, Lu D Q. The progress of studies on controlled availability fertilizers[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(2): 97-106.

[6] Shaviv A, Mikkelsen R L. Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation—A review[J]. Fertilizer Research, 1993, 35: 1-12.

[7] Shoji S, Kanno H. Use of polyolefin-coated fertilizers for increasing fertilizer efficiency and reducing nitrate leaching and nitrous oxide emission[J]. Fertilizer Research, 1994, 3:147-152.

[8] 符建荣. 控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2001,7(2):145-152.
Fu J R. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and N recovery[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001,7(2): 145-152.

[9] 王新民,李见云,侯彦林,等. 简栽冬小麦施用控释氮肥增产效应的研究[J]. 中国生态农业学报,2004,12(1):102-104.
Wang X M, Li J Y, Hou Y L *et al*. Study on effect of enhancing yield of winter wheat by applying tow kinds of controlled release nitrogen fertilizer[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2004,12(1): 102-104.

[10] 黄云,廖铁军,向华辉. 控释氮肥对辣椒的生理效应及利用率研究[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(4):414-418.
Huang Y, Liao T J, Xiang H H. Study on physiological effect and fertilizer utilization rate of controlled release nitrogen fertilizer for pepper[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(4): 414-418.

[11] 胡莹莹,张民,宋付朋. 控释复肥中磷素在马铃薯上的效应研究[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(2):174-177.
Hu Y Y, Zhang M, Song F P. Effects of phosphorus in controlled released compound fertilizer on potato growth[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(2): 174-177.

[12] 杜建军,廖宗文,毛小云,等. 控/缓释肥在不同介质中的氮素释放特性及其肥效评价[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(2):165-169.
Du J J, Liao Z W, Mao X Y *et al*. N release characteristics of controlled/slowed release fertilizer on different media and its effects evaluation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(2): 165-169.

[13] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 北京:农业出版社,1990.
Nanjing Agricultural University. Soil agrochemistry analysis [M]. Beijing: Agricultural Press, 1990.

[14] 张振贤,赵德婉,梁书华. 大白菜矿质营养吸收与分配规律研究[J]. 园艺学报,1993,20(2):150-154.
Zhang Z X, Zhao D W, Liang S H. Study on law of absorption and distribution of mineral nutrient elements in Chinese cabbage[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1993, 20(2): 150-154.

[15] Christiansen C B. Factors affecting N release of urea from reactive layer coated urea[J]. Fertilizer Research, 1988, 16: 273-284.