

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 24 期
Vol.30 No.24
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 30 卷 第 24 期 2010 年 12 月 (半月刊)

目 次

三江平原残存湿地斑块特征及其对物种多样性的影响	施建敏, 马克明, 赵景柱, 等 (6683)
叶片碳同位素对城市大气污染的指示作用	赵德华, 安树青 (6691)
土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响	张容娟, 布乃顺, 崔 军, 等 (6698)
缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用	董 燕, 王正银 (6707)
北京海淀公园绿地二氧化碳通量	李 霞, 孙 睿, 李 远, 等 (6715)
三峡库区消落带生态环境脆弱性评价	周永娟, 仇江啸, 王 姣, 等 (6726)
应用碳、氮稳定同位素研究稻田多个物种共存的食物网结构和营养级关系	张 丹, 闵庆文, 成升魁, 等 (6734)
基于弹性系数的江苏省能源生态足迹影响因素分析	杨足膺, 赵 媛, 付伍明 (6741)
中国土地利用多功能性动态的区域分析	甄 霖, 魏云洁, 谢高地, 等 (6749)
遮荫处理对东北铁线莲生长发育和光合特性的影响	王云贺, 韩忠明, 韩 梅, 等 (6762)
臭氧胁迫对冬小麦光响应能力及 PS II 光能吸收与利用的影响	郑有飞, 赵 泽, 吴荣军, 等 (6771)
地表覆草和覆膜对西北旱地土壤有机碳氮和生物活性的影响	谢驾阳, 王朝辉, 李生秀 (6781)
喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因子	彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等 (6787)
极干旱区深埋潜水蒸发量的测定	李红寿, 汪万福, 张国彬, 等 (6798)
灌木林土壤古菌群落结构对地表野火的快速响应	徐赢华, 张 涛, 李 智, 等 (6804)
稻田免耕和稻草还田对土壤腐殖质和微生物活性的影响	区惠平, 何明菊, 黄 景, 等 (6812)
造纸废水灌溉对黄河三角洲盐碱地土壤酶活性的影响	董丽洁, 陆兆华, 贾 琼, 等 (6821)
神农宫扁角菌蚊幼虫种群分布及其与环境因子的相关性	顾永征, 李学珍, 牛长缨 (6828)
三亚珊瑚礁水域纤毛虫种类组成和数量分布及与环境因子的关系	谭烨辉, 黄良民, 黄小平, 等 (6835)
淞江鲈在中国地理分布的历史变迁及其原因	王金秋, 成 功 (6845)
黄海中南部小黄鱼生物学特征的变化	张国政, 李显森, 金显仕, 等 (6854)
甲基溴消毒对番茄温室土壤食物网的抑制	陈云峰, 曹志平 (6862)
离子树脂法测定森林穿透雨氮素湿沉降通量——以千烟洲人工针叶林为例	盛文萍, 于贵瑞, 方华军, 等 (6872)
乡土植物芦苇对外来入侵植物加拿大一枝黄花的抑制作用	李愈哲, 尹 昕, 魏 维, 等 (6881)
遂渝铁路边坡草本植物多样性季节动态和空间分布特征	王 倩, 艾应伟, 裴 娟, 等 (6892)
古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量	孙鹏飞, 周宏飞, 李 彦, 等 (6901)
碟果虫实种子萌发对策及生态适应性	刘有军, 刘世增, 纪永福, 等 (6910)
原始兴安落叶松林生长季净生态系统 CO ₂ 交换及其光响应特征	周丽艳, 贾丙瑞, 曾 伟, 等 (6919)
五种红树植物通气组织对人工非潮汐生境的响应	伍卡兰, 彭逸生, 郑康振, 等 (6927)
亚高寒草甸不同生境植物群落物种多度分布格局的拟合	刘梦雪, 刘佳佳, 杜晓光, 等 (6935)
内蒙古荒漠草原地表反照率变化特征	张 果, 周广胜, 阳伏林 (6943)
中国沙棘克隆生长对灌水强度的响应	李甜江, 李根前, 徐德兵, 等 (6952)
增温与放牧对矮蒿草甸 4 种植物气孔密度和气孔长度的影响	张立荣, 牛海山, 汪诗平, 等 (6961)
基于 ORYZA2000 模型的北京地区早稻适宜播种期分析	薛昌颖, 杨晓光, 陈怀亮, 等 (6970)
专论与综述	
区域生态安全格局研究进展	刘 洋, 蒙古军, 朱利凯 (6980)
植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能	王 平, 盛连喜, 燕 红, 等 (6990)
农田水氮关系及其协同管理	王小彬, 代 快, 赵全胜, 等 (7001)
虫害诱导挥发物的生态调控功能	王国昌, 孙晓玲, 董文霞, 等 (7016)
土壤微生物资源管理、应用技术与学科展望	林先贵, 陈瑞蕊, 胡君利 (7029)
问题讨论	
从演化的角度评价北京市经济系统可持续发展趋势	黄茹莉, 徐中民 (7038)
基于植物多样性特征的武汉市城市湖泊湿地植被分类保护和恢复	郑忠明, 宋广莹, 周志翔, 等 (7045)
濒危兰科植物再引入技术及其应用	陈宝玲, 宋希强, 余文刚, 等 (7055)
研究简报	
实验条件下华北落叶松和白杆苗期生长策略的差异比较	张芸香, 李海波, 郭晋平 (7064)
基于源-库互反馈的温室青椒坐果时空动态模拟	马韞韬, 朱晋宇, 胡包钢, 等 (7072)
西双版纳小磨公路及其周边道路对蛇类活动的影响	孙 戈, 张 立 (7079)
温度变化对藻类光合电子传递与光合放氧关系的影响	张 曼, 曾 波, 张 怡, 等 (7087)
黄土区六种植物凋落物与不同形态氮素对土壤微生物量碳氮含量的影响	王春阳, 周建斌, 董燕婕, 等 (7092)
食细菌线虫 <i>Caenorhabditis elegans</i> 的取食偏好性	肖海峰, 焦加国, 胡 锋, 等 (7101)

缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用

董 燕^{1,2}, 王正银^{1,*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘要: 采用小麦盆栽生物试验、实验室化学分析和仪器分析方法研究了缓/控释复合肥料(SRF)对土壤氮素养分库中不同组分(微生物量氮、固定态铵、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、铵离子周转库)动态变化的影响及其与小麦吸收氮素养分的关系。结果表明,在小麦分蘖初期,SRF处理土壤微生物量氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较普通复合肥料(CCF)低,此后整个小麦生育期的土壤微生物量氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的总体变化趋势以SRF处理高于CCF处理,其中SRF处理的小麦土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较CCF处理高108.1%—271.7%;在小麦生长前期,SRF处理土壤固定态铵含量较CCF低;在小麦生长中期,SRF处理土壤固定态铵含量较CCF处理高;与CCF处理比较,SRF处理小麦土壤硝态氮含量经历先升高后降低、在生育后期又升高的趋势。在小麦生育前期,CCF处理土壤“铵离子周转库”由371.3 mg/kg降至259.1 mg/kg;SRF处理土壤“铵离子周转库”由306.5 mg/kg升至324.5 mg/kg。在小麦需氮量较高的拔节期,CCF处理土壤“铵离子周转库”与前一次之差值仅为34.18 mg/kg,而SRF处理则达到77.21 mg/kg,表明小麦生育前期SRF土壤“铵离子周转库”能够固定更多的铵离子,降低铵离子的损失;在小麦需氮量较高的时期,“铵离子周转库”则释放更多的铵离子以供小麦吸收利用。小麦生长初期CCF处理释放养分速率较快,小麦植株吸氮量高于SRF处理;生长中、后期SRF处理释放养分量较CCF处理高,此阶段小麦吸氮量以SRF > CCF。不同处理对小麦吸氮量的影响与对小麦生物量变化是基本一致的,即初期以CCF > SRF,中后期以SRF > CCF,收获期SRF处理较CCF处理分别提高小麦生物量15.32%、吸氮量13.51%。相关分析表明,小麦生物试验中SRF处理土壤微生物量氮、固定态铵以及“铵离子周转库”的动态变化与小麦吸氮量之间达到显著或极显著负相关关系($r = -0.8728^* - -0.9006^{**}$),SRF调控土壤氮素库的能力较CCF更强,能更好的协调土壤氮素养分供应与小麦氮素需求间的动态平衡和提高肥料氮素利用效率。

关键词: 缓/控释复合肥;土壤氮素库;调控作用;小麦;氮素营养

Effects of slow/controlled release compound fertilizers on the forms of soil nitrogen

DONG Yan^{1,2}, WANG Zhengyin^{1,*}

1 College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400716, China

2 National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China

Abstract: A pot experiment combined with lab work was conducted to study effects of slow/controlled-release compound fertilizers (SRF) on dynamic changes of soil N components (microbial biomass nitrogen (MN), fixed-ammonium (FN), ammonium nitrogen (AN), nitrate nitrogen (NN) and ammonium ion flux (AIF)) in relation to N uptake by wheat. Results indicated that the SRF treatment reduced amount of soil MN and AN at the early wheat growing stage compared to the common compound fertilizer (CCF) treatment but this was reversed thereafter. The amount of soil AN in the SRF treatment was 108.1% to 271.7% higher than that in the CCF treatment since the mid-stage. The SRF treatment reduced amount of soil FN at the early wheat growing stage, increased FN at the mid-growing stage, and drove NN from high to low and then back to high in the whole growing season compared to the CCF treatment. Soil AN not being timely absorbed by wheat tends to transform into soil MN or soil FN as long as supply of soil AN was adequate, while soil MN or FN tends to be

基金项目: 国家 863 计划(2004AA246020); 国家科技支撑计划项目(2007BAD87B10); 科技部农业科技成果转化资金项目(2007GB2F100266)

收稿日期: 2009-11-12; **修订日期:** 2010-09-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wang_zhengyin @ 163. com

mineralized to AN as soil available N is diminished by wheat. Thus, soil MN and FN can be regarded as N pools which can balance to some extent the N mineralization and immobilization that controls amount of AN in soil or soil AIF. At the early stage the soil AIF reduced from 371.3 mg/kg to 259.1 mg/kg in the CCF treatment but increased from 306.5 mg/kg to 324.5 mg/kg in the SRF treatment. At the elongation stage when wheat requires maximum N supply, the difference in soil AIF between the first two times was measured as only 34.18mg/kg in the CCF treatment but up to 77.21mg/kg in the SRF treatment. The change of soil AIF showed that the SRF treatment could maintain higher soil AN to meet wheat demand at the early growing stage, which could favor reducing N losses through emissions and leaching if any. During the early growing stage, N availability to wheat in the CCF treatment might be much higher than in the SRF treatment, resulting in much higher N uptake by wheat in the former than in the latter. With time, the SRF treatment released more N than the CCF treatment and this was evidenced by higher N uptake by wheat in the SRF treatment. The pattern of N uptake by wheat was in coincidence with accumulation of wheat biomass, namely CCF > SRF at the early stage and SRF > CCF at the mid-later stage. At maturity, the biomass and N uptake of wheat in the CCF treatment were 15.32% and 13.51% higher than in the SRF treatment, respectively. The fluctuated amounts of soil MN, FN and AIF in the SRF treatment were significantly and negatively correlated with amounts of N uptake by wheat ($r = -0.8728^* - -0.9006^{**}$), showing much stronger ability of the SRF in regulating soil N transformation to maintain good balances between soil N supply and crop demand and favoring improvement of N use efficiency. Therefore, compared to the common compound fertilizer, the SRF is more favorable to wheat.

Key Words: slow/controlled-release compound fertilizer; nitrogen forms; wheat; nitrogen nutrition

缓/控释肥料是一类养分释放与作物养分吸收规律相协调和肥料利用效率高的新型肥料,在农业土壤中,施用该类肥料后如何通过调控土壤氮素养分供应能力和水平从而协调和满足作物氮素营养需要一直是该领域研究的热点^[1-3]。其主要原因在于土壤的氮素状况包括氮素的含量、形态及其转化,直接影响土壤氮素的作物营养能力,这也是合理施用氮肥的重要理论依据^[4-5]。欧洲土壤学界将土壤氮素养分库定义为5个方面^[6],即土壤有机质氮库、微生物氮库、固定态铵库、 NH_4^+ -N库、 NO_3^- -N库,各种氮素库(形态)之间在土壤中互相转化,处于动态平衡,进而形成土壤的供氮特性。在施肥方面,氮肥的种类和数量直接左右着土壤氮素库(形态)的周转与平衡,进而影响到土壤氮的内循环、氮素供应能力和土壤氮素肥力水平的保持与提高,以氮素多形态为特征的缓/控释复合肥料施入到土壤中必然会明显改变和调节土壤氮素库的结构和供肥能力^[7]。基于土壤是否种植作物对缓/控释复合肥料进入土壤后的转化过程和不同形态氮在时空上的分布有着重要影响,因此研究缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用,应充分考虑缓/控释复合肥料在“土壤-作物”(体系中的变化特点^[8-9]),以合理评价该类肥料产品在农业大田应用中的生物效应、环境效益等,以期为进一步研制和生产具有养分缓释与植物吸收相协调、环境友好、氮素养分多形态组合的新型缓/控释复合肥料提供理论依据。本文拟研究以多种形态氮素(硝态、铵态、酰胺态、可溶性有机氮等)养分为特征的缓/控释复合肥料^[10]调控土壤不同形态氮素养分库的能力和对土壤氮素肥力的培育作用,特别是对土壤氮素活性库——“铵离子周转库”的影响机制,并分析土壤“铵离子周转库”对土壤铵态氮和硝态氮的动态变化规律的影响。

1 材料与方法

1.1 小麦盆栽试验

1.1.1 土壤

供试土壤为沙溪庙组紫色母岩发育的灰棕紫泥,其基本理化性质: pH 值 7.08,有机质 16.1 g/kg,土壤碱解 N、有效 P、有效 K 分别为 50.5、29.0、106.0 mg/kg,土壤固定态铵含量 182.7mg/kg。

1.1.2 肥料

西南大学研制的一种以优质有机肥为基础的有机-无机非包膜养分结构型缓/控释肥料(SRF),养分释放

期在 90d 以上,有机质含量为 15.7%。普通颗粒复合肥料(CCF)原料为尿素(N,46%)、磷酸二氢铵(N,10%;P₂O₅,44%)、氯化钾(K₂O,60%)。各肥料养分比例见表 1。

表 1 供试肥料养分含量比例

Table 1 The ratios of nutrient in fertilizer tested

处理 Treatment	N:P ₂ O ₅ :K ₂ O	代码 Code
不施氮肥 No N fertilizer	0:9:12	CK
普通复合肥料 Common compound fertilizer	12:9:12	CCF
缓/控释复合肥料 Slow release compound fertilizer	12:9:12	SRF

1.1.3 供试作物

盆栽试验所用小麦品种为绵阳 26。

1.2 试验方法

1.2.2 小麦盆栽试验

小麦盆栽试验于 2004 年 11 月 10 日至 2005 年 5 月 8 日在西南大学资源环境学院玻璃网室进行。试验采用 15cm×18cm 的塑料盆,每盆装土 2.5kg,每盆留苗 2 株,共计 60 盆。试验设 CK、CCF 和 SRF 共 3 个处理。施氮水平为 120 mg/kg。供试肥料作基肥,在装盆时一次施入。在小麦整个生育期内,管理措施完全相同,分别于 6 个生育期(分蘖初期、分蘖盛期、拔节期、孕穗期、灌浆期、收获期)以盆为单位取样,重复 3 次。测定小麦植株生物量和氮素养分吸收量,同时测定土壤铵态氮、硝态氮、微生物量氮、固定态铵含量。

1.3 测定方法

供试土壤样品基本农化性状按常规分析方法测定,植株氮素采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消化-蒸馏法,土壤铵态氮用靛酚蓝比色法、硝态氮用紫外分光光度法^[11],土壤微生物量氮采用氯仿熏蒸-淹水培养靛酚蓝比色法^[12],固定态铵采用 Silva 和 Bremer 法^[13]测定。

1.4 数据处理

采用 Excel 软件和 DPS 统计软件对试验数据进行分析处理,多重比较采用 LSD 法^[14],显著水平为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 缓释复合肥料对小麦土壤不同形态氮素的影响

2.1.1 微生物量氮(MBN)

土壤微生物量氮是土壤氮素转化的重要环节,也是土壤有效氮的重要组成部分^[15]。土壤微生物量氮的消长与土壤的供氮特征关系极为密切,只要前期有强烈的微生物固持无机氮肥过程,则中、后期势必会发生无机氮的释放过程,这一点对麦类作物生长发育过程中的氮素营养极为重要。施肥能显著影响小麦土壤微生物量氮含量^[16]。本研究结果(图 1)显示,小麦生长初期,与不施肥处理(CK)相比,普通复合肥(CCF)处理土壤微生物量氮增加 16.97 mg/kg (135.7%),这是由于 CCF 中酰胺态氮转化为铵态氮并被土壤微生物固定的结果;缓/控释复合肥(SRF)处理的土壤微生物量氮也较 CK 高,但增幅不如 CCF 处理。这是不同肥料处理对土壤前期氮素库不同的影响结果导致的,CCF 大量释放铵态氮,而受缓释剂影响 SRF 处理在这一时期土壤铵态氮含量较低,故能被土壤微生物固定的 NH₄⁺-N 数量较 CCF 低。但在分蘖初期以后,由于 SRF 处理铵态氮含量维持了较高水平,且 SRF 有机氮不断矿化出新的有效态氮,使得 SRF 处理土壤中被微生物固定的氮含量较 CCF 有非常明显的增加,而在小麦生长初期对有

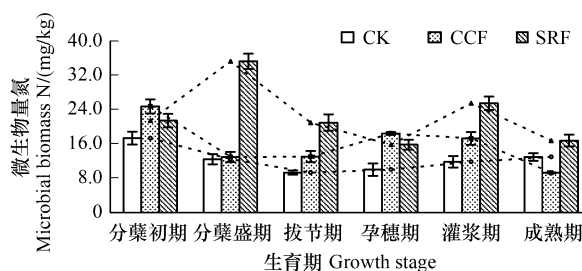


图 1 不同时期小麦土壤微生物氮含量的变化趋势

Fig. 1 Change of soil microbial biomass nitrogen in the wheat soil

效态氮固持,有利于后期土壤有效态氮的矿化^[17]。分蘖期后,随着小麦对氮素的大量需求,被微生物固定的氮分解为有效态氮,供小麦吸收利用。因此,中后期各处理土壤中微生物量氮含量逐渐降低。由图 1 可知,就小麦整个生育期而言,SRF 处理土壤的微生物量氮含量明显高于 CCF 处理,这也说明缓/控释复合肥调节土壤肥力的效果更优于普通复合肥。由此可见,供试缓/控释肥料所含有的不同氮形态(无机态氮、有机氮),使得土壤微生物固定无机氮的能力增强^[18],因此,SRF 较 CCF 更有利于提高土壤微生物量氮的库容量,从而提高其在土壤氮素循环转化过程中的调控作用并减少氮肥损失,提高肥料利用效率。

2.1.2 固定态铵

无论是有机氮肥还是无机氮肥施入土壤后有很大部分氮被土壤粘土矿物固定,但随作物生长,这些被固定的氮又有很大部分释放出来供作物吸收利用。因此,土壤中固定态铵的这种特性具有很重要的农学意义,一方面在较高水平施肥情况下,这种暂时固定可以起到缓冲作用,另一方面被固定的铵难以被硝化细菌所氧化,减少氮素损失。即粘土矿物对肥料氮的固定与后期释放,改变了土壤氮素的供应状况和肥料氮素的有效性。

本试验结果(图 2),CK 的固定态铵在小麦整个生育期变化不大,说明作物首先利用土壤中的有效态氮(铵态氮和硝态氮)而对“老固定铵”的利用能力很弱。施肥后增加的土壤固定态铵,称为“新固定铵”,是当季作物利用固定态铵的主要来源。CCF 处理和 SRF 处理的固定态铵含量较 CK 高,这与“土壤黏粒对铵离子的固定是化学过程,施肥后固定态铵迅速升高”的研究结果是一致的^[19]。与 CCF 比较,SRF 处理的固定态铵含量在小麦生长前期较低,这与 SRF 中缓释剂抑制了肥料中铵态氮的释放有关。而在小麦生长中期,SRF 处理的固定态铵含量较 CCF 处理高,这部分固定态铵能在作物生长旺盛时期释放出来供作物吸收利用。在小麦生长后期,由于当季所固定的铵被释放出来供小麦吸收利用,因此,施肥处理小麦土壤的固定态铵含量降至最低水平,与 CK 处理基本一致,也与试验前测得的土壤固定态铵含量的基础数据一致。由此可见,土壤固定态铵库参与土壤供氮调节过程,对减少氮肥施入后短期内大量气体损失,提高土壤保氮能力有重要作用;土壤对铵的固定并非是氮肥无效化过程,前期固定的氮肥可在后期被作物吸收。

2.1.3 铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)

由图 3 可知,CK 处理中小麦土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的变化呈先降低后逐渐升高的趋势。以分蘖初期土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为整个生育期最高,其后伴随小麦在生长过程中吸收土壤氮素养分而有所降低。至小麦成熟期,则 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量有所回升,这是由于土壤氮库中的有机氮矿化或者是微生物氮分解的发生,使得土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量逐渐增加,但总体变化不明显,表明未施肥处理土壤中氮的矿化作用较弱。与 CK 比较,除前期 CCF 处理的小麦土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量高于 CK 外,在小麦拔节期后降至 CK 水平,即 CCF 处理的小麦土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 经历了先升后降的过程。分蘖初期土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高(13.64 mg/kg),其后随着小麦大量吸收氮素养分,使得土壤铵态氮含量降低,在拔节期和孕穗期降至最低,但随着一部分前期被固定的土壤氮的释放,补充了有效态氮库使得后期土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量有所升高。与 CCF 处理比较,SRF 处理小麦土壤铵态氮含量的总变化趋势基本一致,但是在数量上却有很大区别。在小

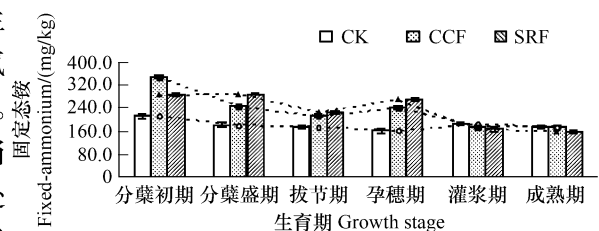


图 2 不同时期小麦土壤固定态铵含量的变化趋势

Fig. 2 Change of fixed-ammonium in the wheat soil

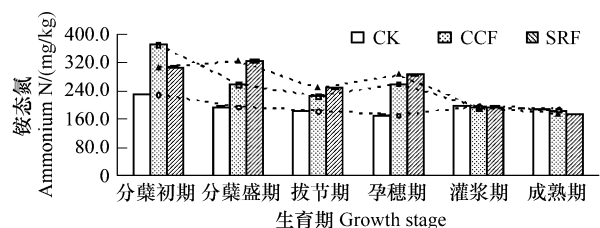


图 3 小麦土壤铵态氮含量的变化趋势

Fig. 3 Change of ammonium nitrogen in the wheat soil

麦各生育时期,SRF 处理小麦土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量明显高于 CCF 处理 108.1%—271.7%。特别是在生育前期,由于 SRF 中缓释剂的作用,延长了铵态氮的转化作用,即铵的氧化作用受到抑制,使小麦土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量保持了较高水平,为小麦提供了可被吸收利用的充足的氮素养分。同时,由于 SRF 中有机氮的矿化作用以及前期固定了较多的微生物态氮,当小麦大量需要养分时,这部分氮分解出来对有效氮库进行补充,较 CCF 提高了小麦的氮素利用能力,从而提高肥效。

2.1.4 硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)

CK 处理中小麦土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的变化呈降低趋势。以分蘖期土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量为整个生育期中较高水平,其后伴随小麦在生长过程中吸收土壤氮素养分而逐渐降低,至小麦成熟期土壤硝态氮含量没有明显变化。与 CK 比较,在小麦分蘖初期和盛期 CCF 处理的硝态氮含量明显高于 CK 处理,这是由于 CCF 中酰胺态氮分解转化的结果,表明无机复合肥料在初期为土壤累积了大量有效态养分。从小麦拔节期开始,CCF 处理土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量降至与 CK 处理一致的水平。与 CCF 处理比较,SRF 处理小麦土壤硝态氮含量经历先升高后降低,最后在生育后期又升高的趋势。在小麦分蘖期间,由于 SRF 缓释剂的作用,使土壤铵的氧化作用减弱,故 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与 CCF 处理比较保持在较低水平(低于 CCF 57.42%—55.94%);随着 SRF 中有机氮的矿化作用,补充了中后期小麦土壤氮库有效态氮的含量,而此时小麦吸氮能力减弱,则后期土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量有所回升。由此可见,CCF 处理提高前期土壤硝态氮含量,而此时小麦吸收氮量有限,来不及被作物吸收利用的这部分 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 极易随降水和灌溉流失至下层土壤或进入地下水中,降低了肥料氮素利用效率,同时增加了环境氮污染的危险。与 CCF 比较,SRF 在小麦生育前期保持相对较低的水平,降低了环境风险;而后期随着小麦吸收氮量增加,被矿物晶格和微生物固定的铵又释放出来补充了土壤有效态氮的含量(图 4)。

2.1.5 “铵离子周转库”

上述研究表明,铵离子的微生物及矿物固定与释放组成了一个动态过程,对土壤有效氮的循环和供应具有调节作用,并深刻影响土壤氮素的供应,进而影响肥料氮的利用效率。由此认为,土壤微生物量氮和固定态铵可被视作为土壤氮素养分“铵离子周转库”(图 5),当土壤铵离子浓度较高、而来不及被作物吸收利用时,可被土壤微生物量氮和固定态铵吸附储存,以减少损失;当土壤氮素供应不足以供作物养分时,这部分储存下来的铵离子重新被释放出来,供给作物吸收利用^[20]。比较于铵态氮和硝态氮而言,土壤微生物量氮和固定态铵较稳定,比较腐殖质类等有机态氮而言,这部分氮素相对“活泼”,在作物需要时能够及时释放出有效养分。因此,由土壤微生物量氮和固定态铵组成的“铵离子周转库”较铵态氮和硝态氮更能反映土壤持续供氮的能力,这对于缓/控释肥料肥效评价以及土壤氮素供应研究具有实际的指导意义。当具有多种氮素形态的缓释复合肥料^[7]进入土壤后,参与土壤氮素的内循环,有效地调控土壤各形态氮素库的周转与平衡,持续改善土壤的供氮强度(无机氮素)和容量(铵离子周转库)(图 5),促进氮素养分的高效利用。

由于小麦土壤固定态铵含量的绝对值较小麦土壤微生物量氮高出 3—5 倍,因此,作为“铵离子周转库”在培养期间的动态变化趋势与小麦土壤固定态铵含量的动态变化是一致的(图 6)。分蘖初期到拔节期,CCF

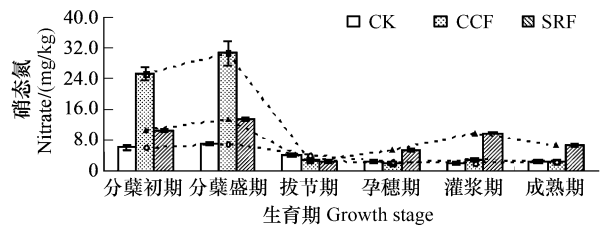


图 4 小麦土壤硝态氮含量的变化趋势

Fig. 4 Change of nitrate in the wheat soil

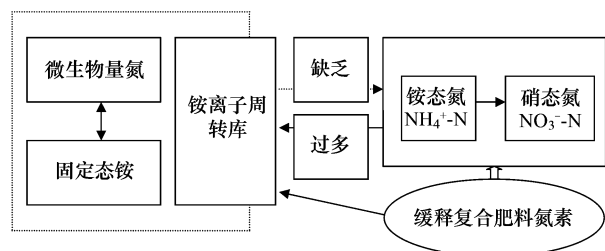


图 5 土壤各形态氮素库之间的关系和缓释复合肥料氮素的去向

Fig. 5 Relations of different form N and slow-release compound fertilizer in soil

处理和 CK 处理的土壤“铵离子周转库”变化趋势一致,呈逐渐下降的势态,表明在小麦需氮量较大的时期,先期固定的铵离子能够释放出来供给小麦生长发育。而 SRF 处理在分蘖初期至分蘖盛期,土壤“铵离子周转库”含量未表现出明显的降低趋势,反而略有上升,说明此阶段缓/控释复合肥料处理的小麦土壤氮养分含量仍然较高,能够满足此阶段小麦的氮素营养需求;此后至拔节期,则与 CK、CCF 处理变化趋势一致。孕穗期时,CCF 处理和 SRF 处理较前一时期“铵离子周转库”含量有所增加,可能是作物此阶段吸氮能力减弱,铵离子被重新固定。灌浆期和成熟期,各处理的“铵离子周转库”含量大致相当,与试验前土壤“铵离子周转库”含量相当。

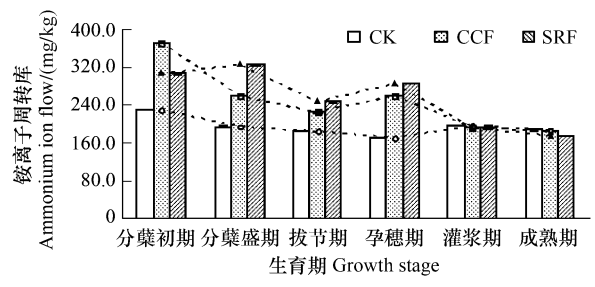


图6 土壤“铵离子周转库”的变化趋势
Fig. 6 Change of “Ammonium ion flow” in the soil

2.2 缓释复合肥料对小麦不同生育期生物产量的影响

表2显示,不同处理对小麦不同生育期植株生物产量的影响。与CK比较,施肥处理使不同阶段小麦的生物产量提高24.9%—51.3%,拔节期后直到收获期,施肥处理的提高作用达极显著。小麦生长初期(分蘖期),缓/控释复合肥料与普通复合肥料对小麦生物量的影响没有明显差异,分蘖初期时以CCF>SRF,此后随着小麦的生长,生物量以SRF>CCF。在生育中后期(孕穗期至收获期),SRF处理较CCF处理提高小麦生物量14.27%—15.32%,处理间达到5%的显著差异。这种现象表明,SRF较CCF更能持续提高土壤中的氮素养分含量,促进小麦对氮素养分的吸收利用,保证小麦的生长发育。

表2 不同肥料处理小麦生物产量干重/(g/盆)

Table 2 Effect of different treatments on yield of wheat in different stage

处理 Treatment	采样时期 Sampling Time					
	分蘖初期 Early tillering	分蘖盛期 Late tillering	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	灌浆期 Grouting stage	成熟期 Ripening stage
CK	0.485 a	1.012 a	4.857 a	5.921 a	7.567 a	39.49 a
CCF	0.535 bc	1.163 bc	6.064 b	7.705 b	10.02 b	51.93 b
SRF	0.512 c	1.298 c	7.245 bc	8.886 c	11.45 bc	59.66 c

表中不同字母表示在 $P=0.05$ 水平上差异显著

2.3 缓释复合肥料对小麦不同生育期吸氮量的影响

不同处理小麦在各生育期的吸氮量见表3。与CK比较,施肥处理均显著提高了小麦的吸氮量。分蘖初期至分蘖盛期,SRF的小麦吸氮量较CCF处理低6.803%—14.66%,其余时期则升高7.522%—13.51%,以收获期增长最大。这种现象与不同肥料对小麦生物量的影响是基本一致的,即初期以CCF>SRF,中后期以SRF>CCF。说明CCF在小麦生长初期释放养分较快,小麦氮养分含量较高;但随着SRF养分的缓慢释放,提高了中、后期小麦的养分吸收量。收获期的测定结果表明,与CCF相比,CRF处理小麦的吸氮量提高了13.51%。SRF吸氮量随时间变化的特点说明其养分在土壤中释放较CCF缓慢,能较好的协调作物吸收养分的速率,提高小麦对肥料氮素的吸收利用。

表3 不同肥料处理小麦吸氮量/(mg/盆)

Table 3 Effect of different treatments on nitrogen uptakes of wheat

处理 Treatment	采样时期 Sampling Time					
	分蘖初期 Early tillering	分蘖盛期 Late tillering	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	灌浆期 Grouting stage	成熟期 Ripening stage
CK	40.62 ± 2.929	47.77 ± 2.927	62.36 ± 3.892	67.44 ± 3.805	84.57 ± 1.484	85.62 ± 0.563
CCF	59.04 ± 2.678	95.25 ± 3.518	143.8 ± 5.610	167.5 ± 4.170	184.7 ± 7.279	200.5 ± 9.261
SRF	50.38 ± 3.018	88.77 ± 4.401	154.7 ± 8.451	180.1 ± 9.315	200.3 ± 11.33	227.6 ± 10.94

2.4 小麦生物量、吸氮量与土壤不同形态氮的关系

将小麦不同生育期的生物量、吸氮量和相应时期土壤中的各形态氮量作相关性分析(表4)发现,不同施肥处理对二者之间的相关性有明显差异。土壤不同形态氮素养分对小麦生物量的影响不明显,CK 和 CCF 处理二者之间未达到显著差异;SRF 处理中,土壤“铵离子周转库”对小麦生物量的影响达到显著负相关($r = -0.7545^*$)。小麦土壤不同形态氮与吸氮量的关系更密切:各处理的土壤硝态氮与吸氮量达到显著或极显著负相关($r = -0.8378^* - -0.9085^{**}$);CCF 处理土壤微生物量氮和固定态铵与小麦吸氮量之间没有相关关系;而 SRF 处理土壤的微生物量氮、固定态铵的动态变化与小麦吸氮量之间则达到显著负相关($r = -0.8728^* - -0.9006^{**}$)。CCF 和 SRF 处理的“铵离子周转库”与小麦吸氮量之间存在显著或极显著负相关关系($r = -0.8583^* - -0.8896^{**}$)。表明非包膜缓/控释复合肥料调控“铵离子周转库”的能力更强,即更好的协调土壤养分供应与小麦吸收养分之间的平衡。

表4 小麦生物量、吸氮量与不同形态氮的相关系数(r)
Table 4 Correlation coefficient (r) between N uptake and different N forms

指标 Index	处理 Treatment	不同形态氮养分 Different N form				
		微生物量氮 Microbial biomass N	固定态铵 Fixed-ammonium	铵态氮 Ammonium N	硝态氮 Nitrate	铵离子周转库 Ammonium ion flow
生物量 Biomass	CK	-0.0216	-0.3145	0.5397	-0.5325	-0.2765
	CCF	-0.6272	-0.5712	-0.0231	-0.4771	-0.5847
	SRF	-0.3868	-0.2756	-0.4697	-0.7315	-0.7545 *
吸氮量 N uptake	CK	-0.4558	-0.5474	0.0040	-0.9085 **	-0.5425
	CCF	-0.5828	-0.5303	-0.7112	-0.8806 **	-0.8896 **
	SRF	-0.8728 *	-0.9006 **	-0.4876	-0.8378 *	-0.8583 *

* 和 ** 分别代表 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ ($n = 6$, $r_{0.05} = 0.754$, $r_{0.01} = 0.874$)

3 结论

3.1 小麦生育前期 SRF 土壤“铵离子周转库”能够固定更多的铵离子,降低铵离子的损失;在小麦需氮量较高的时期,“铵离子周转库”则释放更多的铵离子以供小麦吸收利用,从而提高小麦对肥料氮素的吸收。这与小麦试验中 CCF 处理在小麦生长初期释放养分较快、小麦氮养分含量较高,但随着 SRF 养分的缓慢释放提高了中、后期小麦的养分吸收量的变化规律是一致的。

3.2 两种肥料对小麦吸氮量的影响与生物量是基本一致的。CCF 在小麦生长初期释放养分较快,小麦氮养分含量较高;但随着 SRF 养分的缓慢释放,提高了中、后期小麦的养分吸收量。SRF 吸氮量随时间变化的特点说明其养分在土壤中释放较 CCF 缓慢,能较好的协调作物吸收养分的速率,提高小麦对肥料氮素的吸收利用。

3.3 小麦土壤不同形态氮与植株吸氮量的关系密切,各处理土壤硝态氮与吸氮量达到显著或极显著负相关($r = -0.8378^* - -0.9085^{**}$);SRF 处理土壤微生物量氮、固定态铵的动态变化与小麦吸氮量之间达到显著负相关($r = -0.8728^* - -0.9006^{**}$)。CCF 和 SRF 处理的“铵离子周转库”与小麦吸氮量之间存在显著或极显著负相关关系($r = -0.8583^* - -0.8896^{**}$)。表明非包膜缓/控释复合肥料调控“铵离子周转库”的能力更强,即更好的协调土壤养分供应与小麦吸收养分之间的平衡。

References:

- [1] Cabrera R I. Comparative evaluation of nitrogen release patterns from controlled release fertilizers by nitrogen leaching analysis. Hort Science, 1997, 32:669-673.
- [2] Dwairi I M. Evaluation of Jordanian zeolite tuff as a controlled slow-release fertilizer for NH_4^+ . Environmental Geology, 1998, 34(1):1-4.
- [3] Yan X, Jin J Y, He P, Liang M Z. Recent Advances in Technology of Increasing Fertilizer Use Efficiency. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(2):450-459.

- [4] Allen S E. Slow-release nitrogen fertilizers, in Nitrogen in Crop Production//Hauck R D, ed. Madison: American Society of Agronomy, 1984, 195-206.
- [5] Elizabeth A G. Preplant slow ~ release nitrogen fertilizers produce similar bell pepper yields as split applications of soluble fertilizer. *Agronomy Journal*, 2000, 92: 388-393.
- [6] Stahe K, Ruch F, Gaiser T. Soil nitrogen reserves and mineralization as affected by climate, soil and land use//The terrestrial nitrogen cycle as influenced by man. *Nova Acta Leopoldina*, 1994, 288: 465-472.
- [7] Dong Y, Wang Z Y. Release characteristics of different N forms in an uncoated slow/controlled release compound fertilizer. *Scientia Agriculture Sinica*, 2007, 39(5): 960-967.
- [8] Fu J R, Zhu Y H, Jiang L N. Use of controlled release fertilizer for increase N efficiency of direct seeding rice. *Pedosphere*, 2001, 11(4): 333-339.
- [9] WalKer R F. Growth and nutritional responses of containerized sugar and Jeffrey pine seedlings to controlled release fertilization and induced mycorrhization. *Forest Ecology and Management*, 2001, 149: 163-179.
- [10] Wang Z Y, Ye X J, Ye J, Dong Y, Li H H, Yang Z M, Huang Y. A method of production of Controlled-release multi-nutrient compound fertilizer; China, 200410004492. 8. 2004-10-01.
- [11] Lu R K. Chemical Analyzing Method on Soil Agriculture. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 234-312.
- [12] Huang Y M, An S S, Qu D, Li M J. Comparison between two methods of determination soil microbial biomass nitrogen, *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 830-835.
- [13] Silva J A, Bremmer M J. Determination and isotope ratio analysis of different forms of nitrogen in soils. 5. Fixed ammonium. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1966, 30: 587-594.
- [14] Bai H Y, Xiao J Z. Experiment Research and Statistic Analysis. Beijing: World Books Print Company, 1998: 120-138.
- [15] Anderson J P E, Domash K H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. *Soil Science*, 1980, 130: 211-216.
- [16] Shen S M, Hart P B S, Powlson D S, and Jenkinson D S. The nitrogen cycle in the Broad balk wheat experiment: ^{15}N labeled residues in the soil and in the soil microbial biomass. *Soil Biology & Biochemistry*, 1989, 21: 529-533.
- [17] Jiao X G, Liang W J, Chen L J. Effects of urease/nitrification inhibitors on soil available N and microbial biomass N and on N uptake of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1903-1906.
- [18] Gouveia G, Eudoxie G. Relationship between ammonium fixations and some soil properties and effect of canon treatment on fixed ammonium release in a range of Trinidad soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33(11/12): 1751-1765.
- [19] Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Dynamics of soil fixed NH_4^+ and soil microbiomass nitrogen in the growing season of winter wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(1): 90-91.
- [20] Qiu S J, Peng P Q, Li L. Dynamics of soil microbial biomass nitrogen and fixed ammonium in reddish clayey soil during pot experiment. *Scientia Agriculture Sinica*, 2007, (3): 524-531.

参考文献:

- [1] 董燕, 王正银. 缓控释复合肥料不同形态氮的释放特性研究. *中国农业科学*, 2006, 39(5): 960-967.
- [10] 王正银, 叶学见, 叶进, 董燕, 李会合, 杨志敏, 黄云. 绿色控释多养分肥料生产方法: 中国, 200410004492. 8. 2004-10-01.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 中国农业科技出版社, 2000: 234-312.
- [12] 黄懿梅, 安韶山, 曲东, 李盟军. 两种测定土壤微生物量氮方法的比较初探. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(6): 830-835.
- [14] 白厚义, 肖俊璋. 试验研究及统计分析. 世界图书出版公司, 1998: 120-138.
- [17] 焦晓光, 梁文举, 陈利军, 姜勇, 闻大中. 脲酶/硝化抑制剂对土壤有效态氮、微生物量氮和小麦氮吸收的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1903-1906.
- [19] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦生长期土壤固定态铵与微生物氮的动态研究. *中国生态农业学报*, 2004, 12(1): 90-91.
- [20] 仇少君, 彭佩钦, 李玲, 刘强, 荣湘民. 盆栽条件下红黄泥微生物量氮和固定态铵的动态变化. *中国农业科学*, 2007, (3): 524-531.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 24 期 (2010 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 24 2010

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元