

氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响

银敏华¹ 李援农¹ 李昊² 徐袁博¹ 周昌明¹ 张天乐¹

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学经济管理学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 基于2季夏玉米田间试验,对比研究了尿素(纯氮0、80、160、240 kg/hm²,基追比为2:3;记为N0、N80、N160、N240)和控释氮肥(纯氮0、60、120、180、240 kg/hm²,一次性基施;记为K0、K60、K120、K180、K240)运筹对夏玉米根系生长、产量及土壤硝态氮分布和氮素吸收利用的影响。结果表明,施用尿素和施用控释氮肥的夏玉米整根各参数均表现为随施氮水平的提高呈先增加后减小的趋势。其中处理N160和处理K120的根系各项指标较高,且根长比根表面积和产量的拟合效果更优,更能反映不同氮肥运筹间产量的差异。与尿素相比,控释氮肥各处理土壤硝态氮累积量与作物需肥规律吻合较好,收获后0~200 cm土层硝态氮含量变幅较小,且硝态氮峰值所在土层深度较浅。2种氮肥中,处理N160与处理K120的籽粒产量、氮收获指数和氮素利用效率较高。其中处理K120的节肥增效潜力显著,其2季夏玉米平均氮收获指数和氮素利用效率分别较处理N160提高5.38%和4.96%,是适宜的氮肥运筹方式。

关键词: 夏玉米; 氮肥运筹; 根系生长; 硝态氮; 产量; 氮素利用效率

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0129-10

Effects of Nitrogen Application Rates on Root Growth and Nitrogen Use of Summer Maize

Yin Minhua¹ Li Yuannong¹ Li Hao² Xu Yuanbo¹ Zhou Changming¹ Zhang Tianle¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Field experiments (2013 and 2014) were carried out to improve nitrogen use efficiency and decrease nitrate nitrogen leaching for summer maize. Two nitrogen fertilizers, including urea (with nitrogen application rates of 0, 80, 160 and 240 kg/hm², 40% of nitrogen fertilizer was applied as basic and 60% of it was top dressed at bell stage; namely N0, N80, N160 and N240) and controlled-release fertilizer (with nitrogen application rates of 0, 60, 120, 180 and 240 kg/hm², all applied as basic fertilization; namely K0, K60, K120, K180 and K240) were chosen to investigate the effects of different nitrogen application rates on root growth, yield, nitrogen absorption and nitrogen use efficiency of summer maize and nitrate nitrogen distribution in soil. The results showed that characteristic parameters of summer maize root at filling stage presented a trend of increase and then decreased along with the improvement of nitrogen application rate for both of the two nitrogen fertilizers. The characteristic parameters of summer maize root were higher in N160 of the urea treatments and higher in K120 of the controlled-release fertilizer treatments than those of the other treatments. In addition, compared with root surface area, total root length and yield had higher correlation. This meant that root length of summer

收稿日期: 2015-09-11 修回日期: 2015-10-02

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503105)和国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100504)

作者简介: 银敏华(1988—),女,博士生,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: 15109217864@163.com

通信作者: 李援农(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术及3S技术应用研究,E-mail: liyuannong@163.com

maize played an important role in yield improvement under different nitrogen application rates. Furthermore, the nitrate nitrogen accumulation of the controlled-release fertilizer treatments agreed much better with the plant requirement for nitrogen than that of the urea treatments. In contrast to urea treatments, nitrate nitrogen content of the controlled-release fertilizer treatments had less variation and the maximum nitrate nitrogen content was shallower in 0 ~ 200 cm soil layer at harvest. Among the two nitrogen fertilizers treatments, N160 and K120 had greater yield, nitrogen harvest index and nitrogen use efficiency than other treatments. And K120 was potential in saving fertilizer and increasing efficiency, which could averagely increase nitrogen harvest index by 5.38% and improve nitrogen use efficiency by 4.96% compared with N160 in two years. In conclusion, the nitrogen application rate of treatment K120 was appropriate for summer maize cultivation in Guanzhong Region, Shaanxi Province.

Key words: summer maize; nitrogen application rates; root growth; nitrate nitrogen; yield; nitrogen use efficiency

引言

氮是限制农业生态系统生产力最为重要的营养元素,增加氮肥施用量可提高农田氮素供应水平,然而作物产量与土壤含氮量并非成正相关关系。当土壤供应量高于作物需求量时,会限制植株生长,降低肥料利用率,造成资源浪费,甚至导致环境污染^[1-3]。合理进行氮肥运筹既能满足作物的养分需求,又可避免养分流失,是调节土壤-作物系统氮素循环与平衡的重要措施。

如何在保证作物产量和品质的同时,进行氮肥优化管理,以实现节本增效和环境友好的有机统一是农业可持续发展的必然要求。关于尿素施用效应的研究表明,随着施氮量的增加,玉米籽粒产量、植株氮素累积和氮肥利用效率均呈先增加后减小的趋势^[4];施氮量一定时,拔节期追肥可提高营养器官中氮素向籽粒的运转,而拔节期和开花期追肥则有利于氮素在籽粒中的累积^[5]。适宜的施氮量与追肥时期的耦合效应可实现夏玉米产量和品质的同步提升^[6],且土壤硝态氮淋溶大幅度降低^[7]。在此基础上配施有机肥可有效协调土壤氮、磷、钾养分平衡,改善土壤理化性状,提高土壤养分有效性^[8-9]。近年来,新型缓控释氮肥因其养分释放速率与作物需肥规律高度吻合,一次性基施可满足全生育期生长需求,同时具有养分利用率高、省工省肥和环境友好等多重优点而备受关注。研究发现,与尿素相比,控释氮肥和缓释氮肥独特的养分释放模式,尤其是在节水条件下,其控盐和增产效果显著^[10]。施用控释氮肥的水稻功能叶叶绿素含量和超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性较施用尿素显著提高,可有效延缓叶片衰老^[11]。缓释氮肥条件下,硝酸还原酶活性高峰期持续时间长且主要集中在作物生长中后期,有利于小麦的氮素代谢和产量形

成^[12]。

以上有关氮肥运筹的研究主要集中于不同施氮量、基追比例、追肥时期和氮肥类型等对作物生长及氮素在土壤中的分布、运移和在植株内的吸收、分配等方面,关于缓控释氮肥的田间应用主要以水稻^[11,13-14]为主,而较少涉及不同尿素和缓控释氮肥施用量对作物生长及氮素吸收利用的系统比较。关中平原是陕西省重要的粮食生产基地,玉米产量占全省总产量的60%以上,且主要依靠大量施用氮肥实现高产。本文基于2季夏玉米田间试验,通过横向、纵向对比尿素(基追比为2:3)和控释氮肥(一次性基施)运筹对夏玉米根系生长、产量及土壤硝态氮分布和氮素吸收利用的影响,旨在探究该区夏玉米合理的氮肥运筹模式,为控释氮肥的大面积推广应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2013年和2014年6—10月在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室试验站进行。该区位于108°24'E、34°20'N,海拔高度521 m,全年无霜期210 d,年均降水量632 mm,主要分布在7—9月份,年均蒸发量1500 mm。土壤质地为中壤土,1 m土层平均田间持水量23%~25%,凋萎含水率8.5%(均为质量含水率),平均干容重1.40 g/cm³。耕层土壤(0~25 cm)基础肥力(质量比)为:有机质11.18 g/kg,全氮0.94 g/kg,全磷0.60 g/kg,全钾14.10 g/kg,速效磷25.22 mg/kg,速效钾131.97 mg/kg。2季夏玉米生育期降水量分别为269.5 mm和355.3 mm,0~200 cm土层平均初始硝态氮含量分别为12.26 mg/kg和12.87 mg/kg。

1.2 试验设计

供试玉米品种为“漯单9号”。试验用氮肥分

为尿素(含 N 质量分数 $\geq 46\%$)和树脂膜控释氮肥(含 N 质量分数 $\geq 42\%$),其中尿素设 4 个施氮水平(纯 N),即 0(N0)、80(N80)、160(N160)、240 kg/hm²(N240),基追比为 2:3,追肥在大喇叭口期进行(分别为 2013 年 7 月 27 日和 2014 年 7 月 24 日);树脂膜控释氮肥设 5 个施氮水平(纯 N),即 0(K0)、60(K60)、120(K120)、180(K180)、240 kg/hm²(K240),于播前一次施入。各处理磷肥(过磷酸钙,P₂O₅质量分数 $\geq 16\%$)120 kg/hm²(纯 P₂O₅)和钾肥(硫酸钾,K₂O 质量分数 $\geq 50\%$)60 kg/hm²(纯 K₂O)全部做基肥。其他管理措施同一般高产田。试验共 8 个处理(不施氮处理共用),每个处理重复 3 次。行距 60 cm、株距 30 cm,小区面积 20 m²(4 m $\times$ 5 m),随机区组排列(2 季夏玉米同一小区施氮量固定)。试验区周围布设 2 m 保护带。2013 年 6 月 17 日播种,10 月 10 日收获;2014 年 6 月 15 日播种,10 月 11 日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系测定

于夏玉米灌浆期(分别为 2013 年 9 月 12 日和 2014 年 9 月 16 日)各处理随机选取代表性植株 3 株进行根系样品采集。使用根钻在植株正下、左侧(正南)15 cm、右侧(正北)15 cm 以 20 cm 为间隔取样至 100 cm 深度。样品清洗干净后分层装袋。使用 EPSON Perfection V700 型根系扫描仪进行根系扫描,WinRHIZO Pro 软件进行根系分析,得出相应土层的根长、根表面积和根体积等参数。随后干燥至质量恒定得到根系干质量。

1.3.2 植株全氮测定

于夏玉米主要生育期(苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期)及收获后采集植株样品,经干燥粉碎后过 80 目筛,采用凯氏定氮仪(FOSS 2300 型)测定植株全氮含量。

1.3.3 土壤硝态氮测定

于夏玉米播种前、收获后(0~100 cm 每 10 cm 取 1 个土样,100~200 cm 每 20 cm 取 1 个土样)及主要生育期(0~100 cm 每 10 cm 取 1 个土样)分层测定土壤硝态氮含量。取土位置为小区中央相邻两株玉米的中间区域。土样经风干后过 2 mm 筛,称取 5 g 土样,用 50 mL 氯化钾溶液(2 mol/L)浸提,震荡 0.5 h 后过滤,使用流动分析仪(AutoAnalyzer-III,德国 Bran + Luebbe 公司)测定。硝态氮累积量计算式为

$$M = \frac{CHB}{10}$$

(1)

式中 M ——土壤硝态氮累积量,kg/hm²

C ——土壤硝态氮含量,mg/kg
 H ——土层深度,cm
 B ——土壤干容重,g/cm³

1.3.4 测产

夏玉米成熟后采用 1 m²样方人工脱粒测产,换算成单位面积产量(kg/hm²)。

1.3.5 相关指标计算公式

分别计算各处理的氮素利用效率^[15]和氮收获指数^[16],其计算式为

$$N_{UE} = \frac{Y}{T_{NA}}$$

(2)

$$N_{HI} = \frac{G_{NA}}{T_{NA}}$$

(3)

其中

$$T_{NA} = D_M N_C$$

(4)

式中 T_{NA} ——植株氮素累积量,kg/hm²

D_M ——植株干物质质量,kg/hm²

N_C ——植株含氮率,%

N_{UE} ——氮素利用效率,kg/kg

Y ——夏玉米籽粒产量,kg/hm²

N_{HI} ——氮收获指数,%

G_{NA} ——籽粒氮素累积量,kg/hm²

1.4 数据分析

分别采用 Excel 2010 和 DPS 7.05 进行数据整理与统计分析,方差分析使用最小显著差异法(LSD)进行($P < 0.05$),使用 Origin 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 氮肥运筹对夏玉米根系生长的影响

2.1.1 氮肥运筹对根系特征参数的影响

根系形态除与作物品种、土壤类型和土壤水分状况有关外,还与土壤养分含量和分布紧密相关。灌浆期是作物产量形成的关键时期。不同氮肥运筹对夏玉米灌浆期整根特征参数的影响如表 1 所示。由表 1 分析知,2 季夏玉米中施用尿素和施用控释氮肥的夏玉米整根各参数均表现为随施氮水平的提高呈先增加后减小的趋势,说明一定范围内提高施氮水平可促进根系生长,而施氮过量则会导致氮素供过于求,无法为植株吸收利用,甚至阻碍作物生长。施用尿素时,处理 N160 的根系各指标较高,与处理 N0 和 N240 相比,其 2 季夏玉米平均总根长分别增加 74.77% 和 18.77%,平均根表面积分别增加 87.13% 和 34.44%,平均根体积分别增加 58.60% 和 17.28%,平均根质量分别增加 95.05% 和 29.34%。施用控释氮肥时,处理 K120 的整根各指标均较高,且与处理 N160 相比,二者无显著差异。

表 1 不同氮肥运筹夏玉米灌浆期整根特征参数

Tab.1 Characteristic parameters of summer maize root at filling stage under different nitrogen application rates		2013 年				2014 年			
氮源	处理	总根长/cm	根表面积/cm ²	根体积/cm ³	根质量/g	总根长/cm	根表面积/cm ²	根体积/cm ³	根质量/g
尿素	N0	5 001.22 ^f	1 182.07 ^e	44.41 ^e	5.02 ^e	4 618.60 ^e	1 011.79 ^e	43.68 ^e	4.88 ^e
	N80	6 032.78 ^d	1 409.82 ^d	54.82 ^d	6.91 ^d	5 834.14 ^d	1 358.00 ^d	53.72 ^d	5.71 ^d
	N160	8 456.71 ^a	2 099.82 ^a	70.39 ^a	9.79 ^a	8 355.69 ^a	2 005.56 ^a	69.32 ^a	9.52 ^a
	N240	7 118.03 ^c	1 503.06 ^c	60.22 ^c	7.55 ^c	7 036.81 ^c	1 550.56 ^c	58.91 ^c	7.38 ^c
控释氮肥	K0	5 001.22 ^f	1 182.07 ^e	44.41 ^e	5.02 ^e	4 618.60 ^e	1 011.79 ^e	43.68 ^e	4.88 ^e
	K60	5 478.77 ^e	1 449.91 ^d	53.22 ^d	7.35 ^e	5 647.11 ^d	1 376.54 ^d	52.57 ^d	5.55 ^d
	K120	8 521.63 ^a	2 112.87 ^a	69.98 ^a	9.63 ^a	8 399.54 ^a	2 041.97 ^a	67.68 ^{ab}	9.44 ^a
	K180	7 891.26 ^b	1 798.08 ^b	67.45 ^b	8.55 ^b	7 662.05 ^b	1 713.23 ^b	64.19 ^b	8.84 ^b
	K240	7 611.90 ^b	1 594.82 ^c	61.08 ^c	7.99 ^{bc}	7 378.69 ^{bc}	1 581.59 ^c	53.61 ^d	7.65 ^c

注:同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著,下同。

2.1.2 氮肥运筹对根系垂直分布的影响

氮肥运筹不仅能调控根系生长发育,同时会影响根系在土层中的垂直分布。不同氮肥运筹下各土层根长占 0~100 cm 土层总根长的比例如图 1 所示。由图 1 分析知,2 个夏玉米生长季,施

用尿素和施用控释氮肥各处理土层根长占总根长的比例表现为随土层深度的增加,土层根长比例逐渐减小,且随施氮量的增加,浅层根长比例提高,而深层根长比例降低,表现为高氮营养浅根化趋势。

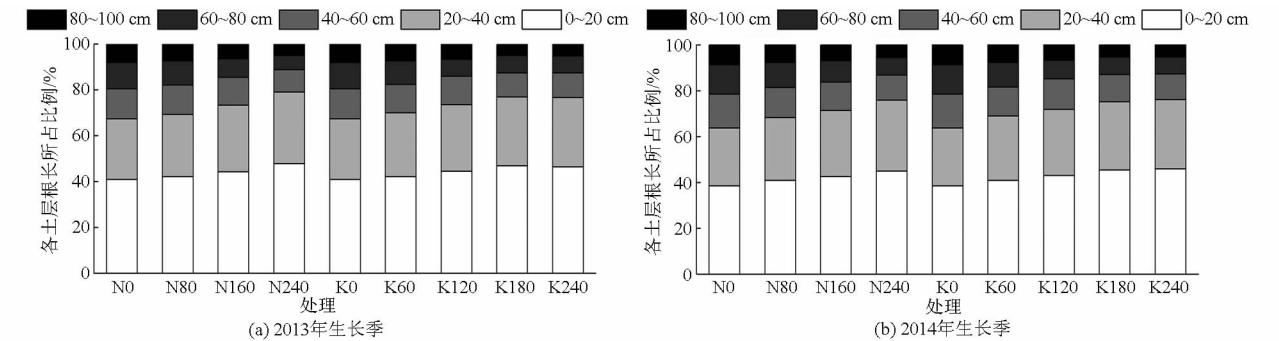


图 1 不同氮肥运筹夏玉米灌浆期各土层根长占 0~100 cm 土层总根长的比例
Fig.1 Root length ratio at each layer in 0~100 cm soil layer at filling stage of summer maize under different nitrogen application rates

2013 年生长季,各处理 0~40 cm 土层根长占 0~100 cm 土层总根长的 67.36%~79.03%。其中不施氮处理最小,处理 N240、K180 和 K240 较大;各处理 40~80 cm 土层根长占 0~100 cm 土层总根长的 16.05%~24.53%,其中不施氮处理最大,而处理 N240、K180 和 K240 较小;各处理 80~100 cm 土层根长所占 0~100 cm 土层总根长比例的规律与 40~80 cm 土层类似。处理间各土层根长所占比例的变幅在 0~40 cm 土层最大,达 11.67%,其他土层为 3.19%~5.16%。可见,夏玉米约 70% 的根长集中分布在 0~40 cm 土层,且土壤供氮不足会促使根系向剖面深处延伸。

2014 年生长季,不同处理各土层根长占 0~100 cm 土层总根长比例的变化规律与 2013 年生长季基本一致。

2.2 氮肥运筹对植株氮素累积的影响

植株氮素累积与植株干物质质量密切相关,随着

干物质的累积,氮素在植株体内不断增加^[17]。2 季夏玉米不同氮肥运筹对夏玉米主要生育期地上部氮素累积的影响如图 2 所示。由图 2 分析知,2 种氮素各处理均表现为随生育期推进,植株氮素累积量不断增加,且不施氮处理的氮素累积量始终低于施氮处理。

苗期阶段,施用尿素条件下,处理间氮素累积量在 29.03~59.01 kg/hm²之间;而施用控释氮肥时处理间氮素累积量相对较小,为 29.03~52.14 kg/hm²。这与 2 种氮肥的养分释放特性有关。拔节期施用尿素各处理进行追肥,期间植株营养生长旺盛,处理间氮素累积量大幅度提高,平均为苗期氮素累积量的 1.27 倍。此后,施用尿素各处理的氮素累积速率较施用控释氮肥处理趋于平缓。这主要是由于尿素为速溶性氮肥,易通过挥发、径流和渗漏等途径散失,使得植株可吸收利用的氮素减少,从而制约作物生长及养分累积;而控释氮肥氮素释放与植株需求高

度统一,一次性基施便可满足植株整个生育期对氮素的需求。统计分析表明,到成熟期时,处理 N160 与处理 K120 的植株氮素累积量无显著差异,而处

理 K240 的植株氮素累积量显著高于处理 N240 ($P<0.05$)。可见,与尿素相比,控释氮肥的氮素有效性较高。

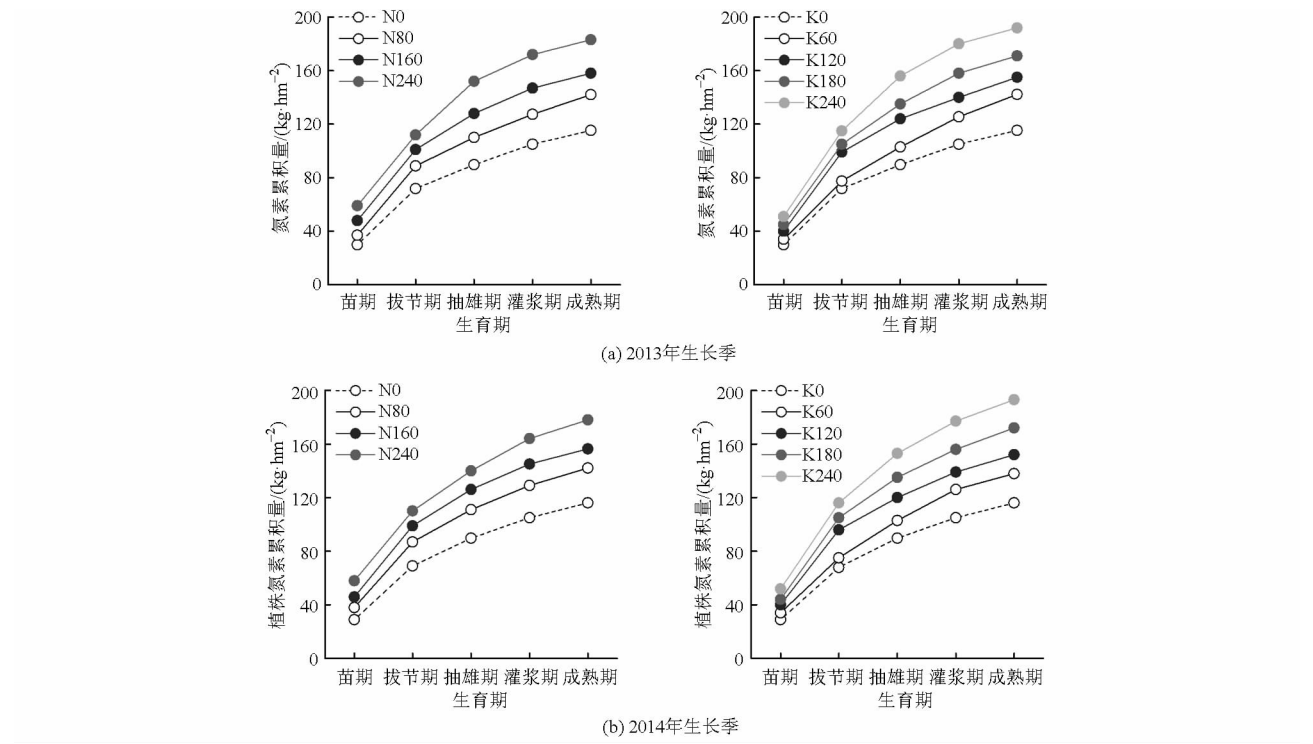


图 2 不同氮肥运筹对植株氮素累积动态的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen application rates on dynamic nitrogen accumulation of summer maize plants

2.3 氮肥运筹对土壤硝态氮的影响

2.3.1 土壤硝态氮的时间变化特征

土壤硝态氮是作物生长最为重要的氮素形态,根系吸收利用与土壤水分状况均会影响土壤硝态氮含量。图 3 为不同氮肥运筹下夏玉米主要生育期 0 ~ 100 cm 土层土壤硝态氮累积量的变化。由图 3 分析知,不同氮肥运筹夏玉米生育期内土壤硝态氮累积量呈倒 V 型变化,即苗期、拔节期和抽雄期较高,而播前、灌浆期和收获后较低。

2013 年生长季,播前处理间土壤硝态氮累积量略有差异,之后,与施氮处理相比,不施氮处理的土壤硝态氮累积量均较低,且低于播前基础累积量。施用基肥可显著提高各处理苗期土壤硝态氮累积量,且随施氮量增加,提高幅度增大。在拔节期,施用尿素处理经追肥后其土壤硝态氮累积量仍低于苗期。产生这一现象的原因与夏玉米生长规律和土壤养分运移有关。一方面拔节期正值夏玉米营养生长旺盛时期,植株对养分尤其是速效养分的需求量大;另一方面随着雨季来临,土壤硝态氮向较深层运移加剧。而控释氮肥由于其养分释放规律与作物需肥特征高度统一,各处理土壤硝态氮累积量在苗期和拔节期较尿素处理低,而抽雄期较尿素处理高。到灌浆期,控释氮肥各处理土壤硝态氮累积量为

96.54 ~ 369.76 kg/hm²,而尿素各处理土壤硝态氮累积量则为 96.54 ~ 322.34 kg/hm²,平均提高 22.11%。收获后,控释氮肥各处理平均土壤硝态氮累积量较尿素各处理高 22.67%。可见,与尿素相比,控释氮肥能大幅度提高夏玉米生长中后期 0 ~ 100 cm 土层土壤硝态氮含量,从而为夏玉米生殖生长提供充足的养分。

2014 年生长季,受夏玉米生长中后期强降水的影响,处理间抽雄期、灌浆期和收获后土壤硝态氮累积量均较 2013 年大幅度降低,但施用控释氮肥处理的土壤硝态氮累积量仍高于施用尿素处理。

2.3.2 土壤硝态氮的空间分布特征

为了进一步了解不同氮肥运筹对土壤硝态氮的影响,对收获后各处理硝态氮在土壤剖面上的分布(图 4)进行分析,发现 2 个夏玉米生长季,不同氮肥运筹夏玉米收获后 0 ~ 200 cm 土层土壤硝态氮整体呈 S 型分布,且与尿素相比,施用控释氮肥各处理土壤硝态氮含量变幅较小。

0 ~ 50 cm 土层平均土壤硝态氮含量表现为处理 K120 较处理 N160 提高 23.17%,处理 K240 较处理 N240 提高 30.33%;50 ~ 100 cm 土层平均土壤硝态氮含量表现为处理 K120 较处理 N160 提高 2.62%,处理 K240 较处理 N240 提高 5.02%;而 100 ~

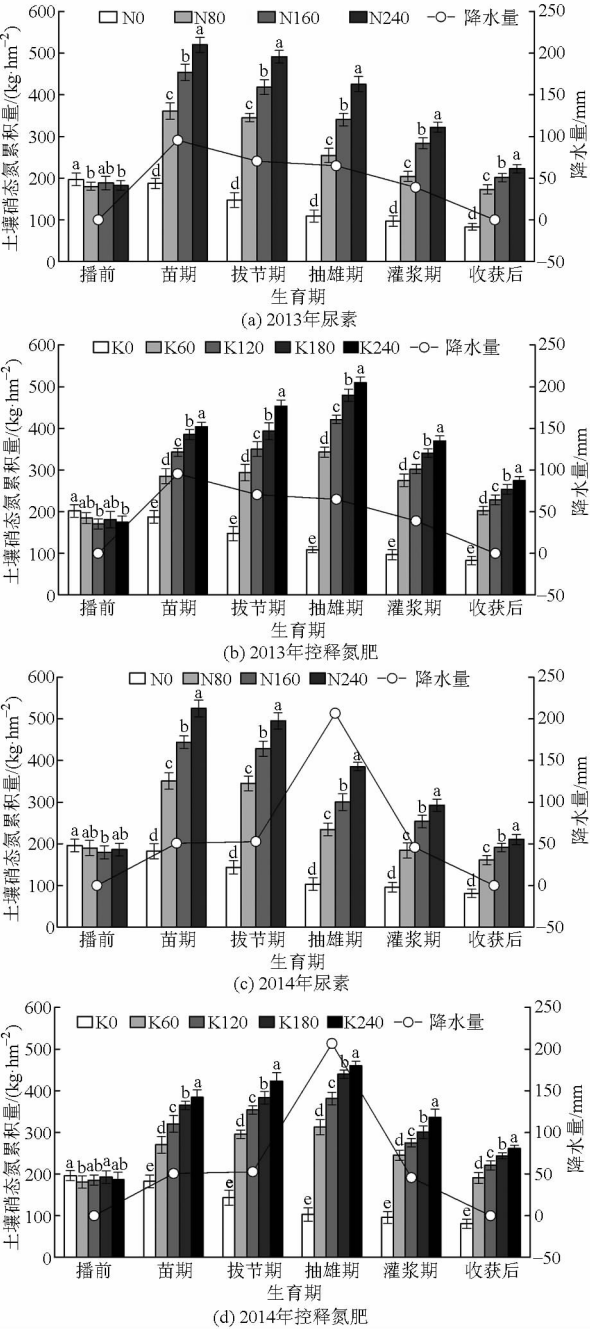


图3 不同氮肥运筹对0~100 cm 土层土壤硝态氮累积的影响

Fig.3 Effects of nitrogen application rates on nitrate nitrogen accumulation in 0 ~ 100 cm soil layer

200 cm 土层平均土壤硝态氮含量则有所不同,表现为处理 K120 较处理 N160 减少 37.42%,处理 K240 较处理 N240 减少 35.51%。

不同氮源作用下除土壤硝态氮平均含量差异较大外,另一显著特点是土壤硝态氮峰值所在土层深度不同。其中 2013 年夏玉米生长季,施用尿素各处理(N80、N160 和 N240)的土壤硝态氮峰值分别出现在 100、100、120 cm 土层处;而施用控释氮肥各处理(K60、K120、K180 和 K240)的土壤硝态氮峰值则分别出现在 60、70、80、100 cm 土层处。与 2013 年

相比,2014 年生长季各处理土壤硝态氮峰值均有所加深。这主要与夏玉米生育期内降水分布有关。

2.4 氮肥运筹对夏玉米产量及氮素利用的影响

不同氮肥运筹对夏玉米产量、氮收获指数和氮素利用效率的影响如表 2 所示。由表 2 分析知,施用尿素和施用控释氮肥各处理籽粒产量、氮收获指数和氮素利用效率均表现为随施氮水平的提高,各指标值显著增加,当施氮量超过一定范围后反而有所降低。施用尿素条件下,处理 N160 的籽粒产量、氮收获指数和氮素利用效率最高,其 2 季夏玉米平均值分别较处理 N0 提高 47.35%、17.94% 和 8.23%,较处理 N240 提高 5.14%、3.44% 和 20.74%。施用控释氮肥条件下,处理 K120 的籽粒产量、氮收获指数和氮素利用效率最高,且与处理 N160 相比,二者平均籽粒产量无显著差异,而平均氮收获指数和平均氮素利用效率分别提高 5.38% 和 4.96%。可见,控释氮肥较优的养分释放特性,可更有效地促进植株氮素吸收,提高氮素向籽粒的运转,从而实现氮素的高效利用。

2.5 产量与根系、植株氮累积和氮收获指数间的相关关系

为了探究不同氮肥运筹下夏玉米产量差异产生的原因,分别对根长、根表面积、植株氮累积和氮收获指数与产量进行相关性研究(图 5)。由图 5 分析知,施用 2 种氮素条件下,夏玉米籽粒产量与氮收获指数、根长总和和根表面积之间具有较好的一元线性关系,且相关性均达到显著水平;而籽粒产量与植株氮累积量间的关系则表现为抛物线型,即一定范围内植株氮素累积的增加有利于产量的形成,当氮素累积达到一定程度后反而会导致产量下降。与根表面积相比,根长与产量的拟合效果较优,说明根长更能反映不同氮肥运筹夏玉米产量间的差异。

4 组相关关系中,产量与氮收获指数在尿素和控释氮肥处理间差异较大。与尿素相比,获得一定目标产量时,施用控释氮肥可实现较高的氮收获指数,即有较大比例的植株氮素转移到籽粒中。

3 讨论

3.1 氮肥运筹对作物根系生长的影响

根系是作物吸收营养物质的主要器官。不同氮肥运筹的土壤氮素有效性不同,从而影响作物根系生长、形态及其分布特征。前人关于氮素供应对作物根系生长的研究表明,一定范围内增加施氮量可促进根系生长,而施氮过量则会对根系产生负作用^[18]。适宜的施氮量能更好地协调作物根系与冠

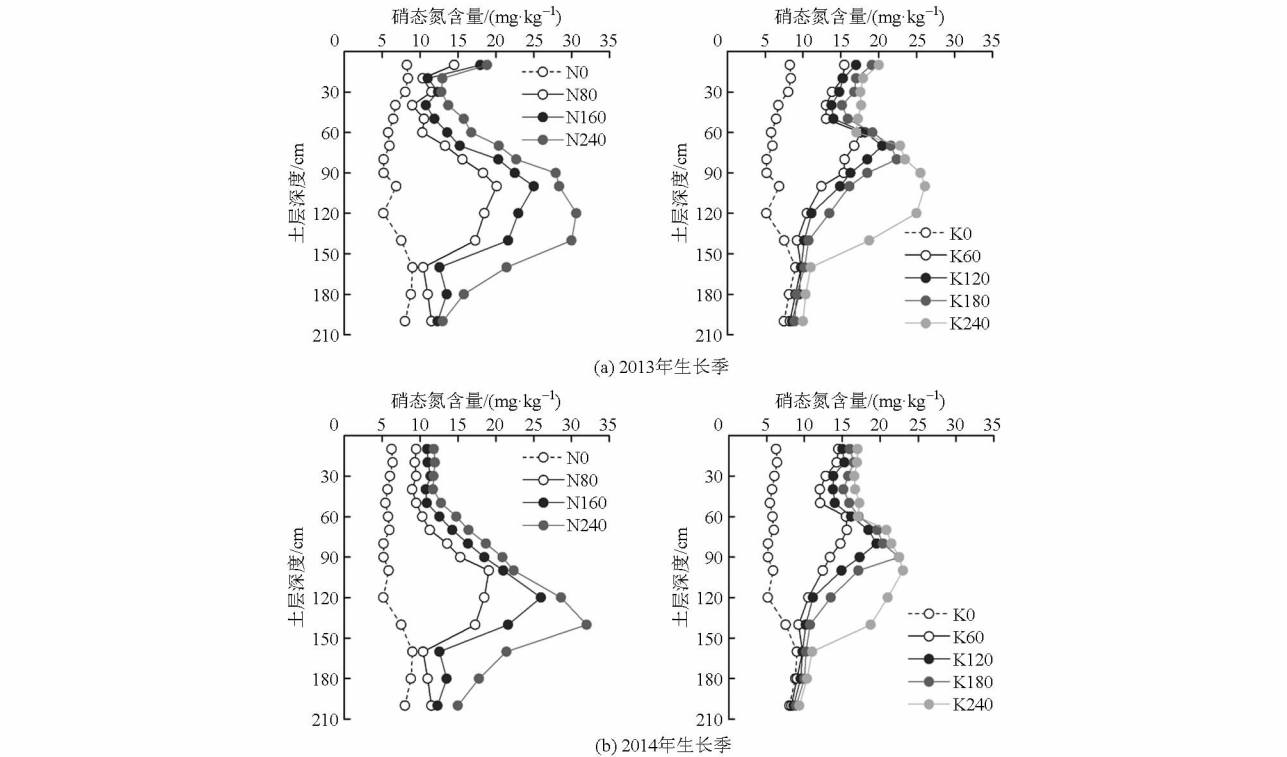


图 4 不同氮肥运筹对收获后 0 ~ 200 cm 土层土壤硝态氮分布的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen application rates on nitrate nitrogen distribution in 0 ~ 200 cm soil layer at harvest

表 2 氮肥运筹对夏玉米产量及氮素利用的影响

氮源		2013 年			2014 年		
处理		籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	氮收获指数/ %	氮素利用效率/ (kg·kg ⁻¹)	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	氮收获指数/ %	氮素利用效率/ (kg·kg ⁻¹)
尿素	N0	7 271 ^d	60.13 ^e	63.08 ^d	7 152 ^d	58.94 ^e	61.66 ^d
	N80	9 413 ^c	65.28 ^d	65.02 ^c	9 150 ^c	64.35 ^d	64.44 ^c
	N160	10 710 ^{ab}	70.32 ^b	67.56 ^{bc}	10 542 ^{ab}	70.11 ^b	67.44 ^b
	N240	10 182 ^{bc}	68.83 ^c	55.46 ^e	10 031 ^b	66.93 ^c	56.35 ^e
控释氮肥	K0	7 271 ^d	60.13 ^e	63.08 ^d	7 152 ^d	58.94 ^e	61.66 ^d
	K60	9 692 ^c	65.97 ^d	68.11 ^b	9 380 ^c	64.25 ^d	67.97 ^b
	K120	10 980 ^a	73.86 ^a	70.81 ^a	10 774 ^a	74.12 ^a	70.88 ^a
	K180	10 523 ^b	71.05 ^b	61.56 ^{de}	10 041 ^b	70.83 ^b	58.38 ^e
	K240	9 332 ^c	69.43 ^{bc}	48.64 ^f	9 470 ^c	67.49 ^c	49.04 ^f

层的功能关系^[19],且氮素对根系的效应与灌水量有关,灌水量较低和中等时,根系各参数随施氮量的增加先增大后减小;而灌水量较高时则随施氮量的增加呈下降趋势^[20]。在本研究中,施用尿素和施用控释氮肥的夏玉米整根特征参数均表现为随施氮水平的提高先增加后减小。可见,作物根系生长存在合理施氮量,且与土壤水分状况密切相关^[21]。不同氮肥类型也会影响作物根系生长。郑圣先等^[22]研究表明,一定施氮量条件下,施用控释氮肥较施用尿素可显著提高杂交水稻生长后期的根长和根长密度。本研究也发现,与处理 N160 相比,处理 K120 在减少氮肥用量 25% 的条件下,二者灌浆期根系参数值无显著差异。根系发达与否直接影响植株对水肥的

吸收能力,最终影响作物产量的形成。有研究表明,根长尤其是直径小于 2 mm 的根长与产量呈显著相关关系^[18,23]。本试验对根系与产量的相关性研究也发现,与根表面积相比,根长与产量的拟合效果较优,对产量的影响较大。

3.2 氮肥运筹对作物氮素吸收及土壤硝态氮累积的影响

作物氮素吸收是土壤氮循环的重要组成部分。植株根系形态和土壤氮素分布是影响作物氮素吸收的主要因素。赵营等^[24]研究表明,夏玉米播种后 20 ~ 45 d 和 58 ~ 85 d 2 个阶段植株氮素累积量之和占总累积量的 60% ~ 90%,是夏玉米需肥关键期。姜涛等^[6]研究发现,玉米大喇叭口期到籽粒形成期

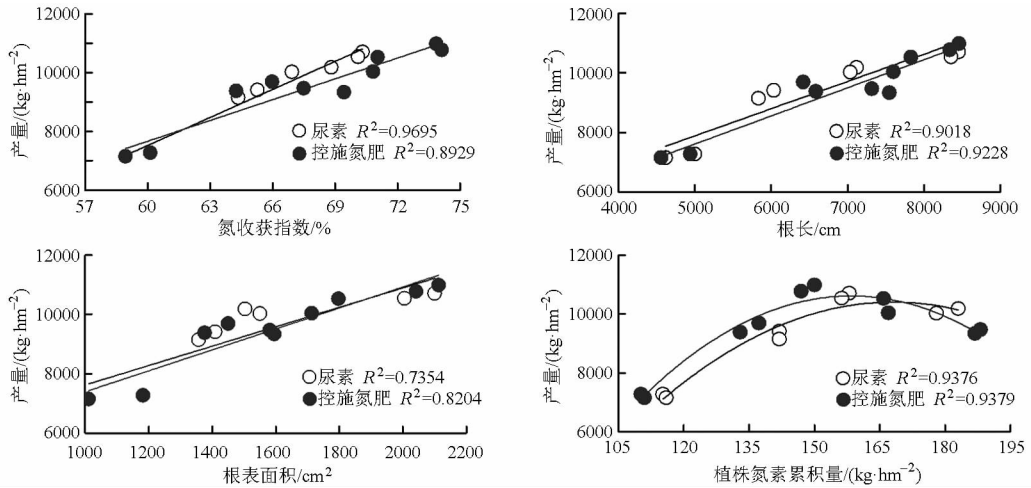


图 5 产量与根系、植株氮累积和氮收获指数间的相关关系

Fig. 5 Relationships of yield with root, plant nitrogen accumulation and nitrogen harvest index

是植株氮素吸收强度最大的时期,也是产量形成的重要时期。该时期追肥可促进植株生长及雌穗分化,同时有利于提高光合作用,延长叶片功能期。本研究结果表明,2种氮素类型下,随生育期推进,植株氮素累积量不断增加,其中拔节期各处理植株氮素累积最多,对氮素的需求量最大。施氮量相同时,施用控释氮肥较施用尿素可显著提高植株成熟期氮素累积量,从而提高土壤氮素向植株的转移。这与彭玉等^[25]和张小翠等^[26]的结论一致。

硝态氮在土壤中的分布因氮肥运筹不同而差异较大。研究表明,适当减少施氮量和增加追肥比例均可在一定程度上降低土壤硝态氮的深层渗漏损失^[27]。与尿素相比,控释氮肥的氮素可更及时地被作物吸收,从而减少氮素损失机会^[28]。本研究发现,施用尿素各处理土壤硝态氮累积量从苗期到成熟期呈逐渐减小的趋势,其中拔节期尽管追肥,但由于植株吸收和氮素淋溶等原因其硝态氮累积量仍低于苗期;而控释氮肥各处理土壤硝态氮累积量与作物需肥规律高度吻合,表现为拔节期和抽雄期较高,而灌浆期后逐渐减小。进一步对各处理收获后0~200 cm土层土壤硝态氮分布进行分析发现,与尿素相比,施用控释氮肥各处理土壤硝态氮含量变幅较小,且硝态氮峰值所在土层深度较浅。尿素各处理中,处理N240在200 cm土层处土壤硝态氮含量仍较高,而控释氮肥各处理的硝态氮含量在200 cm土层处无显著差异,且作物生育期内降水越集中,高氮处理氮素下渗越严重。在陕西关中地区冬小麦、夏玉米轮作的耕作制度中,夏玉米生育期正值雨季(降水量占全年的60%~70%),降水频率高且强度大,极易导致土壤硝态氮向较深层淋洗,对地下水环境造成潜在威胁,导致氮素转变为环境污染物质。考虑到农田生态环境的稳定和农业的可持续发展,

在生产实践中,应减少速效氮肥的使用量,或增施有机肥或以缓控释氮肥代替速效氮肥,以培肥土壤,提高地力,降低农田环境污染,实现节能增效与环境友好的协调统一。

3.3 氮肥运筹对作物产量及氮素利用效率的影响

氮素只有被作物充分吸收,才能降低其在土壤中的残留,进而减少一系列环境污染;只有被作物充分利用,减少奢侈累积,才能使单位氮素形成更多的经济产量,从而实现增产高效的目的。本研究结果表明,夏玉米的籽粒产量、氮收获指数和氮素利用效率与施氮量并非呈正相关关系,而是存在一个较优值。其中施用尿素条件下,处理N160的籽粒产量、氮收获指数和氮素利用效率较高;而施用控释氮肥条件下,处理K120的籽粒产量、氮收获指数和氮素利用效率较高,且与处理N160相比,其平均氮收获指数和平均氮素利用效率分别提高5.38%和4.96%。这与栗丽等^[29]得出夏玉米籽粒吸氮量、氮肥回收效率和氮肥农学效率均随施氮量增加呈先增加后减小的趋势以及卢艳丽等^[28]和黄丽娜等^[30]得出与尿素相比,控释氮肥可在减少施氮量的条件下仍能实现较高产量的结论一致。可见,控释氮肥具有显著的高产增效潜力,同时可减少环境污染,有利于农业的持续高效发展。目前,价格高是限制控释氮肥推广应用的一个主要障碍,且关于控释氮肥的施用效应尚缺乏较为系统的定量评价。

4 结论

(1)施用尿素和施用控释氮肥的夏玉米根系各参数均表现为随施氮水平的提高呈先增加后减小的趋势。其中处理N160和处理K120的根系各项指标较高,且二者无显著差异。随施氮量的增加,浅层根长比例提高,而深层根长比例降低,表现为高氮营

养浅根化趋势。且与根表面积相比,根长与产量的拟合效果较优,更能反映不同氮肥运筹间产量的差异。

(2)随生育期推进,植株氮素累积量不断增加。与尿素相比,控释氮肥各处理苗期氮素累积量较小,随后累积速率加快。到成熟期时,处理 N160 与处理 K120 的氮素累积量无显著差异。

(3)施用尿素各处理土壤硝态氮累积量从苗期到成熟期呈逐渐减小的趋势,而施用控释氮肥各处理土壤硝态氮累积量则与作物需肥规律高度吻合,拔节期和抽雄期较高,灌浆期后逐渐减小。与尿素相比,控释氮肥各处理收获后 0 ~ 200 cm 土层土壤硝态氮含量变幅较小,且硝态氮峰值所在土层深度

较浅。

(4)处理 N160 与处理 K120 的籽粒产量、氮收获指数和氮素利用效率均较高,且与处理 N160 相比,处理 K120 可在不显著影响籽粒产量的基础上,使平均氮收获指数和平均氮素利用效率分别提高 5.38% 和 4.96%。

(5)综上所述,处理 N160 与处理 K120 在促进夏玉米根系生长、植株氮素吸收、增产高效和减少硝态氮淋溶等方面效果显著。且与处理 N160 相比,处理 K120 可在减少氮肥用量 25% 的条件下获得相同的产量($P > 0.05$),在陕西关中地区夏玉米种植中推广意义重大,但其稳定性和持续性还有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 HODGE C A, NECULAI N P. Pollution control in fertilizer production [M]. New York: CRC Press, 1994.
- 2 YANG S H, PENG S Z, XU J Z, et al. Effects of water saving irrigation and controlled release nitrogen fertilizer managements on nitrogen losses from paddy fields [J]. Paddy Water Environment, 2015, 13(1): 71 – 80.
- 3 岳文俊,张富仓,李志军,等. 水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 88 – 96, 119.
YUE Wenjun, ZHANG Fucang, LI Zhijun, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake of muskmelon and nitrate accumulation in soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 88 – 96, 119. (in Chinese)
- 4 吕鹏,张吉旺,刘伟,等. 施氮时期对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1099 – 1107.
LÜ Peng, ZHANG Jiawang, LIU Wei, et al. Effects of nitrogen application dates on yield and nitrogen use efficiency of summer maize in super-high yield conditions [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17(5): 1099 – 1107. (in Chinese)
- 5 吴光磊,郭立月,崔正勇,等. 氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5128 – 5137.
WU Guanglei, GUO Liyue, CUI Zhengyong, et al. Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5128 – 5137. (in Chinese)
- 6 姜涛. 氮肥运筹对夏玉米产量、品质及植株养分含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 559 – 565.
JIANG Tao. Effects of nitrogen application regime on yield, quality and plant nutrient contents of summer maize [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(3): 559 – 565. (in Chinese)
- 7 UENOSONO S, ONO S. Short- and long-term effects of rice straw application on nitrogen uptake by crops and nitrogen mineralization under flooded and upland conditions [J]. Plant and Soil, 2003, 251(2): 291 – 301.
- 8 徐明岗,李冬初,李菊梅,等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3133 – 3139.
XU Minggang, LI Dongchu, LI Jumei, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3133 – 3139. (in Chinese)
- 9 周伯瑜,杨子江. 论有机肥料在农业生态系统中的地位和作用[J]. 生态学杂志, 1992, 11(3): 53 – 55.
ZHOU Boyu, YANG Zijiang. Role and function of organic fertilizer in agroecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology, 1992, 11(3): 53 – 55. (in Chinese)
- 10 史海滨,赵倩,田德龙,等. 水肥对土壤盐分影响及增产效应[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(3): 252 – 257.
SHI Haibin, ZHAO Qian, TIAN Delong, et al. Effects of water and fertilizer on soil salinity and yield increase [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(3): 252 – 257. (in Chinese)
- 11 聂军,郑圣先,戴平安,等. 控释氮肥调控水稻光合功能和叶片衰老的生理基础[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(3): 255 – 261.
NIE Jun, ZHENG Shengxian, DAI Ping'an, et al. Regulation of senescence and photosynthetic function of rice leaves by controlled release nitrogen fertilizer [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2005, 19(3): 255 – 261. (in Chinese)
- 12 王海红,宋家永,贾宏昉,等. 肥料缓施对小麦氮素代谢及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(7): 335 – 336.
WANG Haihong, SONG Jiayong, JIA Hongfang, et al. Effects of slow-release fertilizer on nitrogen metabolism and yield of wheat [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(7): 335 – 336. (in Chinese)
- 13 徐明岗,孙小凤,邹长明,等. 稻田控释氮肥的施用效果与合理施用技术[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 487 – 493.
XU Minggang, SUN Xiaofeng, ZOU Changming, et al. Effects and rational application of controlled-release nitrogen fertilizer in paddy field of southern China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2005, 11(4): 487 – 493. (in Chinese)

- 14 蒋曦龙,陈宝成,张民,等.控释肥氮素释放与水稻氮素吸收相关性研究[J].水土保持学报,2014,28(1):215-220.
JIANG Xilong, CHEN Baocheng, ZHANG Min, et al. Study on the correlation between nitrogen release dynamics of controlled-release fertilizer and nitrogen uptake of the rice [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 215-220. (in Chinese)
- 15 邢英英,张富仓,张燕,等.膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J].农业工程学报,2014,30(21):70-80.
XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 70-80. (in Chinese)
- 16 LOFFER C M, RAUCH T L, BUSCH R H. Grain and plant protein relationships in hard red spring wheat [J]. Crop Science, 1985, 25(3): 521-524.
- 17 KANG J G, MARC W, IERSEL V. Nutrient solution concentration affects shoot: root ratio, leaf area ratio, and growth of sub-irrigated salvia (*Salvia splendens*) [J]. Hort Science, 2004, 39(1): 49-54.
- 18 黄高宝,张恩和,胡恒觉.不同玉米品种氮素营养效率差异的生态生理机制[J].植物营养与肥料学报,2001,7(3):293-297.
HUANG Gaobao, ZHANG Enhe, HU Hengjue. Eco-physiological mechanism on nitrogen use efficiency difference of corn varieties [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2001, 7(3): 293-297. (in Chinese)
- 19 姜琳琳,韩立思,韩晓日,等.氮素对玉米幼苗生长、根系形态及氮素吸收利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):247-253.
JIANG Linlin, HAN Lisi, HAN Xiaori, et al. Effects of nitrogen on growth, root morphological traits, nitrogen uptake and utilization efficiency of maize seedlings [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17(1): 247-253. (in Chinese)
- 20 刘世全,曹红霞,张建青,等.不同水氮供应对小南瓜根系生长、产量和水氮利用效率的影响[J].中国农业科学,2014,47(7):1362-1371.
LIU Shiquan, CAO Hongxia, ZHANG Jianqing, et al. Effects of different water and nitrogen supplies on root growth, yield and water and nitrogen use efficiency of small pumpkin [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(7): 1362-1371. (in Chinese)
- 21 刘小刚,张岩,程金焕,等.水氮耦合下小粒咖啡幼树生理特性与水氮利用效率[J].农业机械学报,2014,45(8):160-166.
LIU Xiaogang, ZHANG Yan, CHENG Jinhuan, et al. Biochemical property and water and nitrogen use efficiency of young arabica coffee tree under water and nitrogen coupling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 160-166. (in Chinese)
- 22 郑圣先,聂军,戴平安,等.控释氮肥对杂交水稻生育后期根系形态生理特征和衰老的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(2):188-194.
ZHENG Shengxian, NIE Jun, DAI Ping'an, et al. Effect of controlled release nitrogen fertilizer on the morphological and physiological characteristics and senescence of root system during late growth stages of hybrid rice [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2006, 12(2): 188-194. (in Chinese)
- 23 漆栋良,胡田田,吴雪,等.适宜灌水施氮方式利于玉米根系生长提高产量[J].农业工程学报,2015,31(11):144-149.
QI Dongliang, HU Tiantian, WU Xue, et al. Rational irrigation and nitrogen supply methods improving root growth and yield of maize [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 144-149. (in Chinese)
- 24 赵营,同延安,赵护兵.不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(5):622-627.
ZHAO Ying, TONG Yan'an, ZHAO Hubing. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2006, 12(5): 622-627. (in Chinese)
- 25 彭玉,孙永健,蒋明金,等.不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质和氮素吸收、运转及分配的影响[J].作物学报,2014,40(5):859-870.
PENG Yu, SUN Yongjian, JIANG Mingjin, et al. Effects of water management and slow/controlled release nitrogen fertilizer on biomass and nitrogen accumulation, translocation, and distribution in rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(5): 859-870. (in Chinese)
- 26 张小翠,戴其根,胡星星,等.不同质地土壤下缓释尿素与常规尿素配施对水稻产量及其生长发育的影响[J].作物学报,2012,38(8):1494-1503.
ZHANG Xiaocui, DAI Qigen, HU Xingxing, et al. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on rice output and growth in soils of different textures [J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(8): 1494-1503. (in Chinese)
- 27 周顺利,张福锁,王兴仁.土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏Ⅱ.夏玉米[J].生态学报,2002,22(1):48-53.
ZHOU Shunli, ZHANG Fusuo, WANG Xingren. The spatio-temporal variations of soil NO_3^- -N and apparent budget of soil nitrogen Ⅱ. summer maize [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(1): 48-53. (in Chinese)
- 28 银敏华,李援农,谷晓博,等.氮肥运筹对夏玉米氮素盈亏与利用的影响[J].农业机械学报,2015,46(10):167-176.
YIN Minhua, LI Yuannong, GU Xiaobo, et al. Effects of nitrogen application rates on nitrogen surplus and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 167-176. (in Chinese)
- 29 栗丽,洪坚平,王宏庭,等.施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1358-1365.
LI Li, HONG Jianping, WANG Hongting, et al. Effects of nitrogen application and irrigation on soil nitrate accumulation, nitrogen balance and use efficiency in summer maize [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2010, 16(6): 1358-1365. (in Chinese)
- 30 黄丽娜,刘俊松.我国缓/控释肥发展现状及产业化存在的问题[J].资源开发与市场,2009,25(6):527-530.
HUANG Li'na, LIU Junsong. Development status of Chinese slow/controlled release fertilizers and the problems in its industrialization [J]. Resource Development & Market, 2009, 25(6): 527-530. (in Chinese)