

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.037

一次性施肥模式对覆膜夏玉米产量与氮素利用的影响

周昌明¹ 李援农² 陈朋朋²

(1. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045;

2. 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)

摘要: 采用垄沟全降解膜覆盖种植, 设置氮肥一次性根区穴施(N1)、一次性沟内条施(N2)、传统一次性全田撒施(N3)以及不施肥对照处理(CK)4种施肥方式, 开展2015—2016年两年大田试验, 探究垄沟全膜覆盖种植方式下一次性施肥模式对夏玉米产量和干物质、氮素累积以及氮素吸收利用的影响。结果表明, 3种一次性施肥处理模式下, 夏玉米秸秆、籽粒干物质质量均高于CK处理, 且N1处理下2年平均籽粒干物质质量较N3、N2分别增加14.75%、4.98%; N1处理下氮素吸收速率均高于N2、N3处理, 在出苗-拔节期、拔节-大喇叭口期与N2、N3差异显著; 夏玉米成熟期氮素累积量从高到低依次为N1、N2、N3, 不同处理下夏玉米氮素阶段累积量变化趋势均表现为在拔节-大喇叭口期、吐丝-灌浆期较多; N3、N2、N1处理比CK对照2年平均增产30.23%、44.16%、54.65%, 且一次性穴施(N1)处理产量高于N2、N3处理, 比N3处理2年平均增产18.75%; N1处理下氮肥偏生产力2年平均比值比N2、N3提高7.28%、18.75%, 氮肥表观利用率2年平均比值比N2、N3提高30.61%、88.28%。垄沟全膜覆盖种植方式下, 一次性根区穴施(N1)有利于氮素在土壤耕作层的集中, 提高夏玉米对氮素的利用效率, 促进夏玉米干物质的累积和产量的提高。本研究可为干旱半干旱地区降解地膜全覆盖种植方式下有效施肥、减少氮肥污染以及提高肥料利用效率等提供科学依据。

关键词: 夏玉米; 施肥模式; 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(2020)10-0329-09

OSID:



Effects of Single Application of Fertilizer on Yield and Nitrogen Utilization of Mulching Summer Maize

ZHOU Changming¹ LI Yuannong² CHEN Pengpeng²

(1. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

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

Abstract: In order to reveal the effects of biodegradable film mulching with one-time fertilization on the yield and nitrogen use efficiency of summer maize, a field experiment was carried out in 2015 and 2016. Four treatments were designed, including one-time root zone fertilization (N1), one-time furrow fertilization (N2), one-time whole field fertilization (N3) and no fertilizer control treatment (CK). The results showed that the straw dry matter and grain dry matter mass under the three kinds of one-time fertilization treatments were all higher than that under CK control treatment, and the average grain dry matter mass under N1 treatment was increased by 14.75% and 4.98% compared with that under N3 and N2 respectively. The nitrogen absorption rate under N1 treatment was higher than that under N2 and N3 treatments, and there were significant differences between N2 and N3 during seedling stage to jointing stage and jointing stage to big trumpet stage. The nitrogen accumulation in summer maize ripening stage arranged from high to low was N1, N2 and N3. Compared with CK control, the yield under N3, N2 and N1 treatments was increased by 30.23%, 44.16% and 54.65% on average, respectively, and the yield under N1 treatment was higher than that under N2 and N3 treatments, and the average yield was

收稿日期: 2020-01-13 修回日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51979235)和江西省教育厅科技计划项目(GJJ170302)

作者简介: 周昌明(1986—),男,讲师,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhouchangminglove1@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

increased by 18.75% compared with that under N3 treatment. The average nitrogen fertilizer partial productivity under N1 treatment was increased by 7.28% and 18.75% compared with that under N2 and N3, respectively, and the average apparent nitrogen utilization rate under N1 was increased by 30.61% and 88.28% compared with that under N2 and N3, respectively. Above all, one-time root zone fertilization treatment (N1) was advantageous to the concentration of nitrogen in soil plough horizon, which can improve the efficiency of nitrogen utilization in summer corn, and promote dry matter accumulation and yield of summer maize. It can also provide scientific basis and theoretical value for effective fertilization, reduction of nitrogen fertilizer pollution and improvement of fertilizer utilization efficiency under the cultivation mode of fully covered plastic film degradation in arid and semi-arid areas.

Key words: summer maize; fertilization patten; yield; nitrogen use efficiency

0 引言

垄沟全覆盖栽培技术是我国干旱半干旱地区一项重要的栽培技术^[1-2]。田间垄沟全覆盖地膜不仅能减少土壤水分的无效蒸发损失,改变作物生长的水、气、热、肥环境,促进产量的增加^[3],而且还能利用垄沟的坡度优势汇集降水,将无效降水转化为有效降水,提高了作物对降水资源的利用效率^[4]。

随着垄沟全覆盖机械相关技术的研究与发展^[5-8],垄沟全覆盖种植技术能够有效改善和解决干旱地区水资源供应不足的问题,但在全覆膜条件下施肥却成为新的问题。为探索夏玉米一次性施肥技术,前人做了相关试验与研究。王宜伦等^[9]研究发现,夏玉米苗期一次性开沟条施缓/控释氮肥的植株氮素累积量比常规2次施氮提高了6%~7%,产量提高了3%~4%。刘晓伟等^[10]研究发现,根区一次性施氮的产量比常规施氮显著增产24.5%。姜超强等^[11]研究发现,一次性根区穴施尿素能够替代当前的分次施肥,实现作物高产、稳产,对化学氮肥减量施用、提高肥料利用率具有很大的潜力和空间。也有研究认为,在农业生产过程中,采用一次性施肥方式会造成氮肥的利用效率低下,前期氮量供应过多、后期氮素供应不足,对产量的提升效果并不显著,再加上夏玉米生育期一般高温多雨,氮肥一次性施入可能会造成挥发淋溶等损失^[12-14]。张美微等^[15]研究发现,在相同施氮量条件下,使用免耕深松分层施肥技术的玉米干物质累积量、产量及氮肥利用效率均显著高于传统施肥技术。综上,只要施肥深度合理、施肥位置得当、离作物根区位置适宜,一次性施肥效果优于传统分次施肥,而采用氮肥一次性全田撒施,不考虑作物与氮肥之间的吸收利用关系,其效果低于传统分次施肥。目前,很多研究都采用缓释氮肥来达到一次性施肥的效果^[16-18],虽然可有效提高肥料利用率,但我国的缓控释肥发展尚处于起步阶段,且成本较高,推广比较困难。因此,研究全膜垄沟覆盖下施用普通氮肥和一次性施肥模

式对发展地膜覆盖技术、提高夏玉米产量以及降低后期追肥成本等具有重要意义。

本研究通过田间试验比较氮肥一次性根区穴施(N1)、一次性沟内条施(N2)、一次性全田撒施(N3)以及不施肥对照处理(CK)4种施肥方式的效果,研究垄沟全膜覆盖种植方式下一次性施肥模式对夏玉米生长和氮素运移、累积以及夏玉米对氮素吸收利用效率的影响,旨在为干旱半干旱地区地膜覆盖条件下合理施肥、提高肥料利用效率和夏玉米产量等提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于2015年6—11月和2016年6—11月在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室的灌溉试验站进行。试验站位于陕西杨凌(108°24'E,34°20'N,海拔521 m),多年平均蒸发量为1510 mm左右,年平均降水量约为632 mm(主要集中在7—9月),夏玉米生育期近5年平均降水量为301.9 mm,其中2015年和2016年夏玉米生育期平均降水量分别为283.9、299.0 mm。试验地土壤为中壤土,耕作层土壤容重为1.35 g/cm³,田间土壤持水率为22.5%(质量含水率),0~40 cm表层基础土壤平均养分为:有机质质量比11.23 g/kg、碱解氮质量比74.51 mg/kg、速效磷质量比24.67 mg/kg、速效钾质量比133.20 mg/kg、全氮质量比0.93 g/kg、全磷质量比0.60 g/kg、全钾质量比14.0 g/kg、pH值约为7.8。

1.2 供试材料

2年供试作物为夏玉米“漯单9号”,该品种根系发达、出苗率高,由河南金囤种业有限公司生产。试验所用降解膜为环保型生物降解膜(杨凌瑞丰环保科技有限公司生产),主要由30%淀粉、50%PCL(聚己内酯)及其他助剂组成,膜宽100 cm、厚0.008 cm,使用寿命较长,100 d左右开始降解并出现细小裂痕,可保障夏玉米整个生育期的覆盖效果。

所用钾肥为农业用硫酸钾,氧化钾(K_2O)质量分数大于等于 51.0%;供试磷肥为过磷酸钙,有效 P_2O_5 质量分数大于等于 16.0%;供试氮肥为尿素,总氮质量分数大于等于 46.4%,肥料均在当地农资化肥点购买。

1.3 试验设计

试验处理均采用连垄全降解膜覆盖,除了施肥方式不同外,其他农业耕作措施均相同。试验共设置了 4 种不同的施肥方式,分别为:不施肥处理(CK)、一次性根区穴施(N1)、一次性沟内条施(N2)、一次性全田撒施(N3)。每个处理 3 次重复,随机区组排列。小区面积 20 m^2 ($4\text{ m} \times 5\text{ m}$),南北走向,小区内均起垄种植,垄高 25 cm,垄宽 60 cm,于 2015 年 6 月 18 日和 2016 年 6 月 17 日按照行间距 60 cm、株间距 28 cm 进行覆盖种植,每行 18 株夏玉米,一共 6 行,共 108 株夏玉米,每平方米种植 6 株夏玉米(用于产量计算),小区四周均设有保护行。根据当地多年施肥经验,肥料施用量为氮肥 180 kg/hm^2 、磷肥 60 kg/hm^2 、钾肥 80 kg/hm^2 。

所有小区的磷肥、钾肥处理相同,均在起垄播种前一次性均匀施入土壤表层,再经过耕整地后均匀混于 0~40 cm 耕作层。氮肥施用方法:CK 不作氮肥处理;N3 处理的氮肥与磷肥、钾肥施入方法一致,在播种前一次性全部施入土壤表层,每个小区施入尿素 646.5 g;N2 处理在小区起垄后,在偏离沟中心玉米种植行 12 cm 左右处人工开沟进行条施尿素,条深 10 cm,每条施入尿素 107.5 g,一共施 6 条;N1 处理在小区起垄后,在对应种植玉米位置偏离 12 cm 处进行穴施尿素,穴深 10 cm,每穴施入尿素 6 g,一共 108 穴。所有小区在种植施肥完成后再进行垄沟全降解膜覆盖,薄膜四周用土压实,保护降解膜以防风雨天气对降解膜的破坏。出苗后及时放苗和间苗,除了施肥方式与传统夏玉米种植方式不同外,其他田间管理均与当地大田处理一致。

1.4 指标测定与方法

(1) 夏玉米生育期

以全田 50% 的植株达到各生育时期标准的日期为各生育时期的记载标准。本试验夏玉米平均生育期为:播种-出苗期 8 d,出苗-拔节期 24 d,拔节-大喇叭口期 14 d,大喇叭口-吐丝期 14 d,吐丝-灌浆期 25 d,灌浆-成熟期 24 d,全生育期一共 109 d。

(2) 夏玉米干物质量、含氮量

分别在夏玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期、灌浆期以及成熟期采集夏玉米地上部样品,分为叶、茎及果穗 3 部分存于档案袋,每个处理选 3 株,称完鲜质量后放入干燥箱在 105°C 杀青 0.5 h, 75°C

恒温干燥至质量恒定,用电子天平称量干物质量。所有植物样品均干燥后粉碎,并过 0.5 mm 筛,在阴凉干燥处密闭保存,测量时,植物样品用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,并用流动分析仪测定各部分全氮含量并折算植株含氮量。

(3) 夏玉米籽粒含水率、产量

在夏玉米成熟期取具有代表性的果穗样品,手工脱粒,取果穗中部籽粒,采用直接干燥法进行籽粒含水率的测定,每个处理取 5 份样品,重复 3 次,以平均值作为籽粒含水率。成熟期每个小区收获内侧 4 行测产,根据质量均值法取有代表性的 12 穗样穗进行自然风干、脱粒、称量,得到籽粒产量。

(4) 夏玉米氮肥利用率计算

氮肥偏生产力(PFP, kg/kg) 计算公式为

$$PFP = Y/N \quad (1)$$

式中 Y ——产量, kg/hm^2

N ——施氮量, kg/hm^2

氮肥表观利用效率(AUE, kg/kg) 计算公式为

$$AUE = (N_i - N_0)/N \quad (2)$$

式中 N_i ——施肥区夏玉米氮素累积量, kg/hm^2

N_0 ——对照区夏玉米氮素累积量, kg/hm^2

氮肥农学利用效率(NUE, kg/kg) 计算公式为

$$NUE = (Y_i - Y_0)/N \quad (3)$$

式中 Y_i ——施肥区夏玉米籽粒产量, kg/hm^2

Y_0 ——对照区夏玉米籽粒产量, kg/hm^2

氮肥生理利用效率(NPE, %) 计算公式为

$$NPE = (Y_i - Y_0)/(N_i - N_0) \times 100\% \quad (4)$$

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据整理;采用 SPSS 19 进行试验数据统计分析,方差分析使用最小显著差异(Least-significant difference, LSD)法进行;采用 OriginPro 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥方式对夏玉米产量及构成因子的影响

表 1 为不同施肥处理对夏玉米产量及构成因子的影响。由表 1 可知,4 种处理下夏玉米 2 年平均籽粒含水率处于 30.10%~32.60% 之间,N2、N1 处理籽粒含水率较高,与 CK 差异显著($P < 0.05$),N3 处理籽粒含水率略低于 N2、N1 处理,3 种施肥处理间籽粒含水率差异不显著。3 种一次性施肥模式(N3、N2、N1)下的夏玉米平均产量、穗粒数和百粒质量均高于 CK 对照处理,除了 N3 处理百粒质量与 CK 对照差异不显著外,其他差异均达到显著水平($P < 0.05$)。N3、N2、N1 处理较 CK 对照 2 年平均增产 30.23%、44.16%、54.65%,穗粒数 2 年平均增

加25.21%、32.06%、39.42%，百粒质量2年平均增加3.12%、7.37%、9.69%。3种一次性施肥处理中，一次性穴施(N1)处理产量高于N2、N3处理，与N3差异显著($P < 0.05$)，较N3处理2年平均增产

18.75%，N1与N2处理差异不显著。综合而言，施肥处理有助于夏玉米生长及产量的增加，垄沟全覆盖条件下一次性穴施(N1)与一次性条施(N2)增产幅度较为显著。

表1 不同施肥处理对夏玉米产量及其构成因子的影响

Tab.1 Effects of different fertilization treatments on yield and its components of summer maize

年份	处理	籽粒含水率/%	穗粒数	百粒质量/g	平均产量/(kg·hm ⁻²)	增产率/%
2015	CK	30.10 ^b	422.95 ^c	27.56 ^b	6993.90 ^c	
	N3	31.02 ^{ab}	529.56 ^b	28.42 ^{ab}	9030.11 ^b	29.11
	N2	31.91 ^a	558.53 ^{ab}	29.59 ^a	9916.10 ^a	41.78
	N1	32.54 ^a	589.68 ^a	30.23 ^a	10695.57 ^a	52.93
2016	CK	30.17 ^b	424.34 ^c	27.64 ^b	7016.95 ^c	
	N3	31.22 ^{ab}	540.51 ^b	28.74 ^{ab}	9216.85 ^b	31.35
	N2	32.35 ^a	579.13 ^{ab}	29.83 ^a	10281.82 ^{ab}	46.53
	N1	32.60 ^a	604.93 ^a	30.75 ^a	10972.16 ^a	56.37

注：同列不同小写字母表示处理间差异达显著水平($P < 0.05$)，下同。

2.2 不同施肥方式对干物质质量的影响

图1(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)，下同)为不同施肥处理对夏玉米秸秆干物质质量、籽粒干物质质量的影响。由图1可知，3种一次性施肥处理下的夏玉米秸秆干物质质量、籽粒干物质质量均高于CK对照处理，且差异显著($P < 0.05$)。N3、N2、N1处理的2年平均秸秆干物质质量较CK对照增加了14.40%、14.07%、15.30%；2年平均籽粒干物质质量较CK对照增加了10.88%、21.20%、27.23%。在3种一次性施肥处理中，N3、N2、N1处

理下的秸秆干物质质量无显著差异，平均干物质质量达到了6.47~6.54 t/hm²。3种一次性施肥处理下夏玉米籽粒干物质质量差异显著($P < 0.05$)，N3、N2、N1处理2年平均籽粒干物质质量分别为9.89、10.81、11.34 t/hm²，其中N1处理夏玉米籽粒干物质质量累积最多，2年平均籽粒干物质质量较N3、N2处理增加了14.75%、4.98%。总的来说，3种一次性施肥处理均能促进夏玉米秸秆干物质质量和籽粒干物质质量的累积，其中一次性穴施氮肥(N1)累积量最高，效果更为显著。

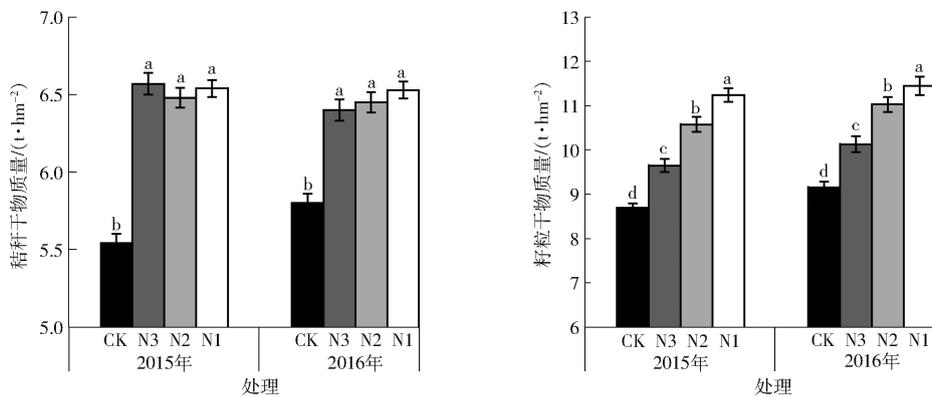


图1 不同处理对夏玉米秸秆干物质质量和籽粒干物质质量的影响

Fig.1 Effect of different treatments on straw and grain dry matters of summer maize

2.3 不同生育期植株氮素累积变化

表2为不同施肥处理对夏玉米不同生育期植株体内氮素累积变化的影响。由表2可知，3种一次性施肥方式下的夏玉米氮素累积量在不同生育期均高于CK对照处理，其中成熟期氮素累积量差异最大，N1、N2、N3处理下2年氮素累积量较CK对照平均增加52.0%、74.9%、97.8%，增加幅度大且差异显著($P < 0.05$)。对3种一次性施肥方式而言，在吐丝期之前，N1、N2处理下的氮素累积量高于N3

处理，2年氮素累积量在吐丝期分别较N3处理提高22.34%、26.49%，且差异显著($P < 0.05$)；N1与N2处理之间差异不显著，在灌浆期后N1与N2处理之间的差异才开始达到显著水平。在成熟期，氮素累积量从高到低依次为N1、N2、N3，其中N1比N2、N3氮素累积量2年平均增加30.2%和11.9%。

2.4 夏玉米氮素阶段累积量及阶段吸收速率

表3为不同施肥处理对夏玉米不同生育期2年平均氮素阶段累积量、吸收速率的影响。由表3可

表 2 夏玉米不同生育时期氮累积量的变化

Tab.2 Effects of different treatments on N accumulation at different growth stages of summer maize

年份	处理	kg/hm ²				
		拔节期	大喇叭口期	吐丝期	灌浆期	成熟期
2015	CK	11.43 ^c	31.67 ^c	40.71 ^c	61.49 ^d	71.19 ^d
	N3	13.67 ^b	46.52 ^b	53.81 ^b	80.36 ^c	107.72 ^c
	N2	16.94 ^a	54.38 ^a	67.57 ^a	95.15 ^b	122.77 ^b
	N1	17.81 ^a	56.06 ^a	68.95 ^a	102.47 ^a	139.70 ^a
2016	CK	14.29 ^c	32.19 ^c	42.61 ^c	63.59 ^d	73.26 ^d
	N3	17.49 ^b	45.85 ^b	67.27 ^b	98.29 ^c	111.84 ^c
	N2	21.95 ^a	54.74 ^a	80.56 ^a	119.04 ^b	129.95 ^b
	N1	22.63 ^a	59.85 ^a	84.20 ^a	125.28 ^a	146.15 ^a

知,不同处理下夏玉米氮素阶段累积量变化趋势大体相同,均表现为在拔节-大喇叭口期、吐丝-灌浆期较多,出苗-拔节期、灌浆-成熟期次之,大喇叭口-吐丝期最少的变化趋势。以拔节-大喇叭口期为例,N3、N2、N1处理的夏玉米2年平均氮素阶段累积量分别为30.60、35.11、37.74 kg/hm²,均高于CK对

照处理下的19.07 kg/hm²,且差异显著($P < 0.05$),但4种处理下氮素阶段累积量占总量比例却比较接近,均处于26.40%~27.87%之间,说明不同施肥处理对夏玉米氮素阶段累积量影响较大,但对夏玉米吸氮关键时期以及所占比例影响较小。通过N3、N2、N1处理下的全生育期氮素吸收速率可知,同等量的氮肥,施入方式不同,夏玉米在不同生育期对氮素的吸收速率不同,N1、N2处理下的氮素阶段吸收速率在灌浆期前均高于N3处理,且差异显著($P < 0.05$),灌浆期-成熟期N2与N3处理差异不显著。N1处理下夏玉米氮素阶段吸收速率在出苗-拔节期、拔节-大喇叭口期、大喇叭口-吐丝期与N2差异不显著,而在吐丝-灌浆期、灌浆-成熟期与N2差异显著($P < 0.05$)。说明不同施肥处理在前期对作物的吸收速率影响较大,氮素在夏玉米根区的分布量不同,穴施氮肥更容易向作物根区提供氮素。而均匀撒施,氮素分布太过分散,氮素大多处于作物根区之外很难被作物所吸收利用,所以N3处理下的氮

表 3 夏玉米氮素阶段累积量及阶段吸收速率

Tab.3 Accumulation and uptake rate of summer maize plant N at different growth stages

指标	处理	出苗-拔节期	拔节-大喇叭口期	大喇叭口-吐丝期	吐丝-灌浆期	灌浆-成熟期	全生育期
阶段累积量/(kg·hm ⁻²)	CK	12.86 ^c	19.07 ^c	9.73 ^c	20.87 ^d	9.69 ^c	72.23 ^d
	N3	15.58 ^b	30.60 ^b	14.36 ^b	28.79 ^c	20.45 ^b	109.78 ^c
	N2	19.45 ^a	35.11 ^a	19.51 ^a	33.03 ^b	19.26 ^b	126.36 ^b
	N1	20.22 ^a	37.74 ^a	18.62 ^a	37.30 ^a	29.05 ^a	142.93 ^a
占总量比例/%	CK	17.80	26.40	13.48	28.90	13.42	100
	N3	14.19	27.87	13.08	26.22	18.63	100
	N2	15.39	27.79	15.44	26.14	15.25	100
	N1	14.15	26.40	13.03	26.10	20.33	100
阶段吸收速率/(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	CK	0.54 ^c	1.36 ^c	0.70 ^c	0.83 ^d	0.40 ^c	0.71 ^d
	N3	0.65 ^b	2.19 ^b	1.03 ^b	1.15 ^c	0.85 ^b	1.08 ^c
	N2	0.81 ^a	2.51 ^a	1.39 ^a	1.32 ^b	0.80 ^b	1.24 ^b
	N1	0.84 ^a	2.70 ^a	1.33 ^a	1.49 ^a	1.21 ^a	1.40 ^a

素阶段吸收速率显著低于N2、N1处理。

2.5 植株茎叶果氮素累积量

图2为不同施肥处理对夏玉米茎叶果氮素累积量的影响,由图2可知,随着夏玉米生育期的进行,各处理下的夏玉米氮素累积量表现为逐渐增加的趋势,其中在吐丝期夏玉米体内氮素主要累积于茎、叶部位,其中叶片所占比例为58.31%~62.37%,为主要的氮素累积部位。进入灌浆期后,夏玉米体内氮素逐渐开始向果穗部位累积,最后在成熟期达到最大,且氮素累积量在体内分布由大到小依次为:果、叶、茎,果穗氮素累积占总量的比例为67.68%~69.52%,说明后期进入生殖生长阶段后,养分的累积部位逐渐从叶片向果穗转移。与CK对照相比,

N3、N2、N1处理下的夏玉米各部位氮素累积量均显著提高,且差异显著($P < 0.05$)。在3种一次性施肥处理中,N1处理下的茎叶果氮素累积高于N2、N3处理。以灌浆期为例,N1处理下茎氮素累积量比N3、N2分别提高了3.96%、17.42%,叶氮素累积量提高了7.36%、26.59%,果氮素累积量提高了6.25%、31.86%。

2.6 不同施肥处理对夏玉米氮肥利用效率的影响

表4为不同施肥处理对夏玉米氮肥利用效率的影响,由表4可知,3种一次性施肥处理下2年氮肥生理利用率无显著差异。综合2年试验表明,N1处理下的夏玉米氮肥农学利用率最高,平均为21.27 kg/kg,N2处理次之,平均为17.19 kg/kg,N3

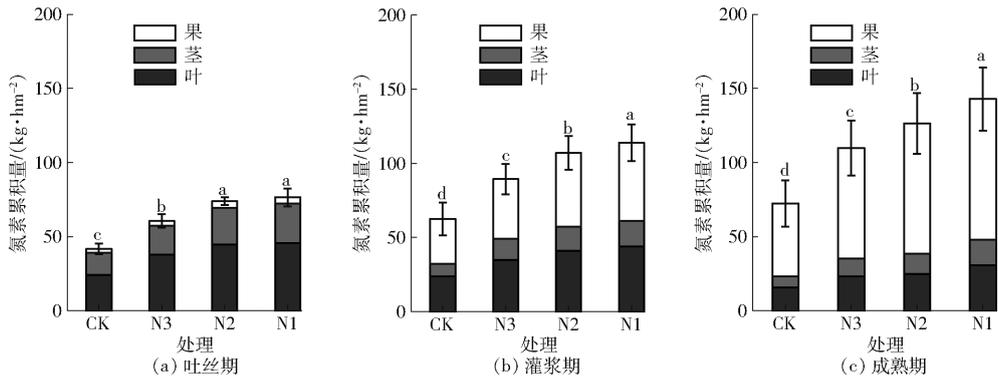


图2 夏玉米各器官氮素累积与分配

Fig. 2 Accumulation and distribution of plant N in various organs

处理下的氮肥农学利用率最低,平均为 11.77 kg/kg,且 3 种处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。N1 处理下的氮肥偏生产力、表观利用率也均高于 N2、N3 处理,其中氮肥偏生产力 2 年平均较 N2、N3 提高 7.28%、18.75%;氮肥表观利用率 2 年平均较 N2、N3 提高 30.61%、88.28%。可见,同等量施肥条件下,施肥方式或者施肥区域不同,对夏玉米的氮肥利用效率差异不同,一次性穴施氮肥更能有效地促进夏玉米氮肥利用效率的提高。

表 4 不同施肥处理对夏玉米氮肥利用效率的影响

Tab. 4 Effects of different treatments on N fertilizer use efficiency of summer maize

年份	处理	氮肥表观 利用率/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	氮肥农学 利用率/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	氮肥生理 利用率/ %	氮肥偏生 产力/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
2015	N3	20.29 ^c	11.31 ^c	55.75 ^{ab}	50.17 ^c
	N2	28.65 ^b	16.23 ^b	56.66 ^a	55.09 ^b
	N1	38.06 ^a	20.56 ^a	54.03 ^b	59.42 ^a
2016	N3	21.43 ^c	12.22 ^c	57.03 ^a	51.20 ^c
	N2	31.49 ^b	18.14 ^b	57.59 ^a	57.12 ^b
	N1	40.49 ^a	21.97 ^a	54.26 ^b	60.96 ^a

3 讨论

3.1 不同施肥方式对夏玉米氮素累积的影响

植株体内氮素含量的累积直接关系到氮肥利用效率的高低,提高氮素累积量可促进作物正常生长发育以及产量和品质的提高^[19-21]。姜超强等^[11]研究发现,一次性根区穴施尿素提高了氮肥在耕层土壤的集中度,降低了氮素释放速度,达到缓控释肥的效果,其中一次性穴施的植株氮素累积量与传统追肥的无显著差异。葛均筑等^[22]研究发现,一次性施肥显著降低了春玉米生育前期氮素累积量,生育中后期玉米养分累积速率加快,成熟期氮素累积量差异不显著。本研究发现,3 种一次性施肥方式下的夏玉米氮素累积量在不同生育期均高于 CK 对照处

理,其中一次性穴施处理下植株体内氮素累积量显著高于条施和一次性撒施,与姜超强等^[11]研究结论一致。

通过对夏玉米整个生育阶段氮素累积量和吸收速率的研究发现,穴施下夏玉米氮素累积量和吸收速率要显著高于条施、撒施,其中在吐丝-灌浆期、灌浆-成熟期穴施与条施差异显著,这与葛均筑等^[22]的研究结论不一致,可能原因在于两地的降雨量和种植方式不同,前人很多的研究都没有进行覆盖处理,且降水量较大,这种情况下氮素的淋溶效果会增大,氮素挥发和向深层渗漏量会增加,从而导致后期氮素供应不足,穴施和条施与 CK 对照无显著差异。本研究在垄沟全覆盖条件下进行,地膜在土壤表层形成了一层分隔膜,将土壤耕作层水、气、热环境与土壤表层环境分隔开,不仅可减少土壤水分无效蒸发、氮素挥发,而且还能有效避免降雨直接对土壤氮素进行淋溶损失。特别是穴施和条施,水分汇集到沟中会从种植行出苗破膜处流下去,间接减少了对土壤氮素的冲刷和淋洗,而作物氮素累积量与根区附近氮素的供应有很大的关系,穴施对作物根区提供的氮素高于条施和撒施,因此在整个生育期不同施肥区域对氮素的累积量产生不同影响。

本研究进一步对夏玉米不同部位的吸氮量做了相关分析,吐丝期夏玉米体内氮素主要累积于茎、叶两个部位,其中叶片所占比例为 58.31% ~ 62.37%,为主要的氮素累积部位。进入灌浆期后,果穗氮素累积量占总量的比例为 67.68% ~ 69.52%。其中拔节期至大喇叭口期和吐丝期至灌浆中期是夏玉米两个氮素吸收关键时期,这与王宜伦等^[23]研究结论一致。这说明随着夏玉米的生长发育,生长中心不断转移,导致氮素分配中心分异,也是导致器官养分含量和数量变化的主要原因。

3.2 不同施肥方式对夏玉米产量及氮肥利用效率的影响

如何提高肥料利用率、促进作物产量的提高是当前农业发展和环境保护迫切需要解决的问题^[24]。

一次性施肥相对传统分次施肥具有减少劳动投入、提高生产效率的优势^[25-27]。孙旭东等^[28]研究发现,一次性全田施撒尿素较不施氮相比可以显著提高玉米产量,其中夏玉米郑单 958 和登海 605 一次性施用尿素较 CK 处理 2 年平均增产 18.9% 和 19.4%。本研究发现,3 种一次性施肥模式下的夏玉米产量、穗粒数和百粒质量均高于 CK 对照处理,增产效果显著,其中一次性全田施撒处理下夏玉米增产幅度(30.23%)略高于前人研究^[28],这个差异可能与种植方式和地区气候有一定的关系,但最终增产效果一致。

姜超强等^[11]研究发现,一次性根区穴施比一次性条施夏玉米增产 9.8%,得出优化施肥位置的根区一次性施氮能够实现作物增产的结论。本研究发现,一次性穴施(N1)比一次性全田撒施(N3)处理 2 年平均增产 18.75%,但与一次性条施(N2)处理差异不显著。这与前人结论不同,可能原因在于种植方式的不同。前人很多研究都是在田间土壤裸露的情况下开展不同施肥的试验^[11],且条施和穴施氮肥的集中程度不一样将会造成氮肥与土壤接触面不同,全田撒施下氮肥与土壤的接触面最大,其次是条施氮肥,接触面最小的是穴施。接触面越大,氮素稀释放的速率也就越高,后期对作物供应的氮素量也就越少,从而导致作物对氮素的吸收量减少。本研究耕作层均采用连垄全覆盖种植方式,一次性条施的氮肥和一次性穴施的氮肥均存在于偏离沟种植中心 12 cm 处,且都属于根区施肥,氮肥利用效率较高,虽然穴施产量高于条施,但产量差异未达到显著水平。此外,可能与施肥深度也有一定的关系,前人很多研究的施肥深度在 12 cm 左右,也有研究采用不同的深度^[15,29],本试验施肥深度是在 10 cm 左右,而夏玉米生长过程中根系不断生长,施肥位置太深会造成前期根系吸氮困难,施肥太浅会导致后期氮素供应不足。使氮肥的释放范围与作物根系生长范围耦合是提高氮肥利用效率,促进作物氮素吸收最为理想的方式。施肥深度与夏玉米根系生长的关系、使氮素向深层迁移的速率与根系生长的速率一致还需要更进一步的研究和探讨。

提高氮肥利用效率、探究最佳的施肥方式是当前减少氮肥污染、保护环境亟待解决的主要问题。有关研究结果表明一次性施肥氮肥表观利用率高达 49.8 g/kg^[30];一次性穴施氮肥表观利用率可达 50.1~58.9 g/kg^[18]。本试验 N1、N2、N3 处理下氮

肥表观利用率 2 年平均值分别为 39.28、30.07、20.86 kg/kg,低于前人的研究结果^[11,30]。可能原因在于施肥量的不同,前人的结论均在施氮量为 240、300 kg/hm²的高氮水平下获得,而本试验施氮水平为 180 kg/hm²,为当地多年经验施肥量。施肥量是目前公认的影响肥料利用率的最主要因素,在一定范围内提高氮肥施用量能有效提高作物产量和氮肥利用效率,但众多的研究表明,避免过量施肥可以显著提高肥料利用率。依据报酬递减律,过量施用的肥料不一定增产,且难以被作物吸收,也更容易损失^[24],因此,在不同的地区、不同的品种以及不同的种植方式下,能够提高肥量利用效率,保证产量不降低,氮肥污染最小的适宜施氮量需进一步研究。

4 结论

(1)采用一次性施肥模式对夏玉米干物质质量的大田试验表明,3 种一次性施肥处理模式下的夏玉米秸秆干物质质量、籽粒干物质质量均高于 CK 对照处理,N1 处理下夏玉米籽粒干物质质量累积最多,2 年平均籽粒干物质质量较 N3、N2 增加了 14.75%、4.98%。

(2)在吐丝期之前,N1、N2 处理下的氮素累积量高于 N3 处理,2 年氮素累积量在吐丝期分别比 N3 处理提高了 22.34%、26.49%;在成熟期,氮素累积量从高到低依次为 N1、N2、N3,其中 N1 比 N2、N3 氮素累积量 2 年平均增加 30.2% 和 11.9%;N1 处理下氮素吸收速率均高于 N2、N3 处理,且在前期的出苗-拔节期、拔节-大喇叭口期与 N2、N3 差异显著;N1 处理下的茎、叶、果中氮素累积高于 N2、N3 处理。

(3)对产量和氮肥利用效率而言,N3、N2、N1 处理比 CK 对照 2 年平均增产 30.23%、44.16%、54.65%;3 种一次性施肥处理中,一次性穴施(N1)处理产量高于 N2、N3 处理,比 N3 处理 2 年平均增产 18.75%;N1 处理下的夏玉米氮肥农学利用率最高,N1 处理下氮肥偏生产力 2 年平均值较 N2、N3 提高 7.28%、18.75%,氮肥表观利用率 2 年平均值较 N2、N3 提高 30.61%、88.28%。

(4)在垄沟全降解膜覆盖种植方式下,一次性穴施(N1)有助于夏玉米产量的提高和干物质的累积,同时能够有效改善氮素的释放环境,提高作物对氮素的利用效率,可为干旱半干旱地区一次性施肥提供参考依据。

参 考 文 献

[1] 李来祥,刘广才,杨祁峰,等.甘肃省旱地全膜双垄沟播技术研究与应用进展[J].干旱地区农业研究,2009,27(1):

114 - 118.

LI Laixiang, LIU Guangcai, YANG Qifeng, et al. Research and application development for the techniques of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows in dry land [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(1):114 - 118. (in Chinese)

- [2] 李荣, 王敏, 贾志宽, 等. 渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2):106 - 113.
- LI Rong, WANG Min, JIA Zhikuan, et al. Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(2):106 - 113. (in Chinese)
- [3] ASHRAFUZZAMAN M, HALIM M A, ISMAIL M R, et al. Effect of plastic mulch on growth and yield of chilli (*Capsicum annum* L.) [J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2011, 54(2): 321 - 330.
- [4] 李荣, 侯贤清, 王晓敏, 等. 北方旱作区沟垄二元覆盖技术研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1314 - 1322.
- LI Rong, HOU Xianqing, WANG Xiaomin, et al. Research progress on the dual-mulching of ridge and furrow technology in dry farming regions of northern China: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4): 1314 - 1322. (in Chinese)
- [5] 戴飞, 赵武云, 张锋伟, 等. 玉米全膜双垄沟残膜回收机作业性能优化与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(18):50 - 60.
- DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, et al. Optimization and experiment of operating performance of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(18): 50 - 60. (in Chinese)
- [6] 付宏, 王常瑞, 靳聪, 等. 农机部件数字化设计软件平台 AgriDEM 开发[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(7): 1 - 9.
- FU Hong, WANG Changrui, JIN Cong, et al. Development of digital design software platform AgriDEM for agricultural machinery parts [J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(7): 1 - 9. (in Chinese)
- [7] MUSTAFA U, CHRIS S, JOHN M F. Discrete element modelling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field conditions [J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 160: 140 - 153.
- [8] 戴飞, 宋学锋, 赵武云, 等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(2):49 - 56, 77.
- DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(2):49 - 56, 77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190206&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.006. (in Chinese)
- [9] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(15):3151 - 3158.
- WANG Yilun, LI Chaohai, TAN Jinfang, et al. Studies on plant nitrogen accumulation characteristics and the effect of single application of base fertilizer on super-high-yield summer maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15):3151 - 3158. (in Chinese)
- [10] 刘晓伟, 王火焰, 朱德进, 等. 氮肥施用方式对水稻产量以及氮、磷、钾养分吸收利用的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2017, 40(2): 203 - 210.
- LIU Xiaowei, WANG Huoyan, ZHU Dejin, et al. Effect of N fertilization method on rice yield and N, P and K uptake and use efficiency [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2017, 40(2): 203 - 210. (in Chinese)
- [11] 姜超强, 王火焰, 卢殿君, 等. 一次性根区穴施尿素提高夏玉米产量和养分吸收利用效率[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(12): 146 - 153.
- JIANG Chaoqiang, WANG Huoyan, LU Dianjun, et al. Single fertilization of urea in root zone improving crop yield, nutrient uptake and use efficiency in summer maize [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(12): 146 - 153. (in Chinese)
- [12] HELLEBRAND H J, SCHOLZ V, KERN J. Fertilizer induced nitrous oxide emissions during energy crop cultivation on loamy sand soils [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(36):8403 - 8411.
- [13] 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/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 88 - 96.
- 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/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2):88 - 96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150214&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.014. (in Chinese)
- [14] 笪亚玲, 王朝辉, 周玲, 等. 不同养分投入的各品种小麦产量及养分效率差异研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(9):91 - 98.
- ZAN Yaling, WANG Zhaohui, ZHOU Ling, et al. Use efficiency of different winter wheat cultivars response to different nutrient inputs [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(9):91 - 98. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120918&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.018. (in Chinese)
- [15] 张美微, 乔江方, 谷利敏, 等. 不同土层氮肥配施方式对夏玉米生长发育及氮肥利用的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(20):66 - 70.
- ZHANG Meiwei, QIAO Jiangfang, GU Limin, et al. Influence of nitrogen fertilizer combined application in different soil layers on growth development and nitrogen use of summer maize [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(20):66 - 70. (in Chinese)
- [16] 王文岩, 董文旭, 陈素英, 等. 连续施用控释肥对小麦/玉米农田氮素平衡与利用率的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(增刊2):135 - 141.

- WANG Wenyan, DONG Wenxu, CHEN Suying, et al. Effect of continuously applying controlled-release fertilizers on nitrogen balance and utilization in winter wheat-summer maize cropping system[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp. 2): 135-141. (in Chinese)
- [17] 谢春生, 唐拴虎, 徐培智. 一次性施用控释肥对水稻植株生长及产量的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2006, 12(2): 177-182.
- XIE Chunsheng, TANG Shuanhu, XU Peizhi. Effects of single basal application of controlled-release fertilizers on growth and yield of rice [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(2): 177-182. (in Chinese)
- [18] 徐秋明, 曹兵, 牛长青, 等. 包衣尿素在田间的溶出特征和对夏玉米产量及氮肥利用率影响的研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 357-359.
- XU Qiuming, CAO Bing, NIU Changqing, et al. Nutrient release characteristics of coated urea under field condition and influence on summer corns yield and nitrogen utilization efficiency[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3): 357-359. (in Chinese)
- [19] 易镇邪, 王璞, 陈平平, 等. 氮肥类型对夏玉米氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2008, 14(3): 472-478.
- YI Zhenxie, WANG Pu, CHEN Pingping, et al. Effect of different types of nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization of summer maize (*Zea mays* L.) [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(3): 472-478. (in Chinese)
- [20] 蔡红光, 米国华, 张秀芝, 等. 不同施肥方式对东北黑土春玉米连作体系土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2012, 18(1): 89-97.
- CAI Hongguang, MI Guohua, ZHANG Xiuzhi, et al. Effect of different fertilizing methods on nitrogen balance in the black soil for continuous maize production in Northeast China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(1): 89-97. (in Chinese)
- [21] 周宝元, 孙雪芳, 丁在松, 等. 土壤耕作和施肥方式对夏玉米干物质积累与产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2129-2140.
- ZHOU Baoyuan, SUN Xuefang, DING Zaisong, et al. Effect of tillage practice and fertilization on dry matter accumulation and grain yield of summer maize (*Zea mays* L.) [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 2129-2140. (in Chinese)
- [22] 葛均筑, 展茗, 赵明, 等. 一次性施肥对长江中游春玉米产量及养分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2013, 19(5): 1073-1082.
- GE Junzhu, ZHAN Ming, ZHAO Ming, et al. Effects of single basal fertilization on yield and nutrient use efficiencies of spring maize in the Middle Reaches of Yangtze River[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(5): 1073-1082. (in Chinese)
- [23] 王宜伦, 李潮海, 王瑾, 等. 缓/控释肥在玉米生产中的应用与展望[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 254-257.
- WANG Yilun, LI Chaohai, WANG Jin, et al. Application and prospect of slow/controlled release fertilizers in maize production [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(24): 254-257. (in Chinese)
- [24] 王火焰, 周健民. 根区施肥——提高肥料养分利用率和减少面源污染的关键和必需措施[J]. 土壤, 2013, 45(5): 785-790.
- WANG Huoyan, ZHOU Jianmin. Root-zone fertilization: a key and necessary approach to improve fertilizer use efficiency and reduce non-point source pollution from the cropland [J]. Soils, 2013, 45(5): 785-790. (in Chinese)
- [25] LIU Xiaowei, WANG Huoyan, ZHOU Jianmin, et al. Effect of nitrogen root zone fertilization on rice yield, uptake and utilization of macronutrient in lower reaches of Yangtze River, China [J]. Paddy Water Environ., 2017, 15(3): 625-638.
- [26] 高强, 李德忠, 汪娟娟, 等. 春玉米一次性施肥效果研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(4): 125-128.
- GAO Qiang, LI Dezhong, WANG Juanjuan, et al. Effects of single fertilization for spring maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(4): 125-128. (in Chinese)
- [27] 张婧, 夏光利, 李虎, 等. 一次性施肥技术对冬小麦/夏玉米轮作系统土壤 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 195-204.
- ZHANG Jing, XIA Guangli, LI Hu, et al. Effect of single basal fertilization on N₂O emissions in wheat and maize rotation system [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(1): 195-204. (in Chinese)
- [28] 孙旭东, 孙许, 董树亭, 等. 包膜尿素施用时期对夏玉米产量和氮素积累特性的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2179-2188.
- SUN Xudong, SUN Hu, DONG Shuting, et al. Effect of coated-urea application times on yield and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 2179-2188. (in Chinese)
- [29] 姜超强, 卢殿君, 王世济, 等. 夏玉米普通尿素一次施肥位点优化研究[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(12): 67-74.
- JIANG Chaoqiang, LU Dianjun, WANG Shiji, et al. Research on placement site of urea single application in summer maize [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(12): 67-74. (in Chinese)
- [30] 战秀梅, 李亭亭, 韩晓日, 等. 不同施肥方式对春玉米产量、效益及氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2011, 17(4): 861-868.
- ZHAN Xiumei, LI Tingting, HAN Xiaori, et al. Effects of nitrogen fertilization methods on yield, profit and nitrogen absorption and utilization of spring maize [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17(4): 861-868. (in Chinese)