

不同肥力农田玉米产量构成差异及 施肥弥补土壤肥力的可能性

刘海涛, 李保国*, 任图生, 胡克林

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:【目的】农田基础土壤肥力和肥料的投入共同决定着农田的养分供应以及影响作物的生长与产量。明确不同肥力土壤和低肥力农田增施氮肥对玉米生长及产量形成的影响差异,是科学评价土壤培肥和施肥的基础。【方法】本研究设置两个玉米田间试验,试验一选取三块具有基础肥力和产量差异的农田,按土壤肥力由高到低依次命名为农田 A、B 和 C,采用完全统一施肥管理;试验二在土壤肥力水平最低的农田 C 上设置了常规施氮量 N 210 kg/hm²,以及在此基础上拔节期增施 N 40 和 80 kg/hm² 共 3 个处理。测定了各农田土壤基础性质,以及 0—20 cm 土层硝态氮含量,调查了不同生育期玉米的干物质和叶面积,产量和产量构成。【结果】不同肥力水平农田中土壤的潜在矿化氮量与产量的相关性最好。不同肥力水平农田的土壤硝态氮含量没有显著性差异;低肥力农田增施氮肥处理在拔节期施肥后土壤中的硝态氮含量要大幅度高于常规施肥处理,在抽雄期该差异达到最大值,然后逐步降低。不同肥力水平农田的玉米产量、每公顷穗数、穗粒数、千粒重均随土壤肥力升高而显著增加,其中肥力最高的农田 A 的玉米产量、每公顷穗数、穗粒数和千粒重较肥力最低的农田 C 分别高 20.3%、5.7%、5.2% 和 7.8%。低肥力农田 C 在拔节期增施氮肥显著提高了产量、每公顷穗数和穗粒数,对千粒重影响很小,同时降低了收获指数。其中增施氮肥 80 kg/hm² 处理较常规施氮处理的产量、公顷穗数和穗粒数显著分别增加了 17.1%、9.2% 和 4.6%,收获指数降低了 8.2%。【结论】高肥力土壤能够持续矿化出更多的无机氮供玉米利用,通过全面提升玉米每公顷穗数、穗粒数和千粒重来提升产量。低产田在拔节期增施氮肥能够大幅度提高拔节期至抽雄期土壤的硝态氮含量,提高每公顷穗数和穗粒数,进而增加作物产量,但通过增施肥料得到的产量依然达不到高肥力农田的产量水平,而且降低了收获指数。因此,培肥土壤是实现玉米高产高效的基础。

关键词: 土壤基础肥力; 潜在矿化氮; 硝态氮; 玉米; 产量

中图分类号: S158.3; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2016)04-0897-08

Dissimilarity in yield components of maize grown in different fertility fields and effect of nitrogen application on maize in low fertility fields

LIU Hai-tao, LI Bao-guo*, REN Tu-sheng, HU Ke-lin

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: 【Objectives】Crop yields are affected by both soil fertility and fertilizer application. Thus it is necessary to evaluate the productivity under different soil fertility conditions and fertilizer application. 【Methods】Two field experiments were conducted consecutively in three years. Three fields with different basic fertility and yield levels were selected which named field A, B and C, and the soil fertility sequence was field A > B > C. Same crop management practice was applied in the three fields. Three nitrogen treatments were designed in field C with the lowest soil fertility. The treatments included conventional treatment (nitrogen application 210 kg/hm²), and the treatments with 40 kg/hm² and 80 kg/hm² more nitrogen input at the jointing stage of maize. Nitrate contents at 0–20 cm soil layers, biomass accumulation and LAI at critical growth stages, yield and its components, and soil basic properties were measured. 【Results】Permanent mineral nitrogen had the highest correlation coefficient with maize yield compared with other soil properties. There were no significant differences of the nitrate contents in fields with different fertility. The nitrate contents in the treatments with more nitrogen input were significantly higher than that

收稿日期: 2015-05-18 接受日期: 2016-03-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2009CB118607)资助。

作者简介: 刘海涛(1986—), 男, 浙江丽水人, 博士, 主要从事农业资源高效利用研究。Tel: 028-84796435, E-mail: liuht1986@163.com

* 通信作者 E-mail: libg@cau.edu.cn

in the conventional treatment in the field C at the jointing stage, and the nitrate content difference was greatest at the tasseling stage. The yield, ears numbers, kernel numbers per ear and thousand kernel weight were all increased as the soil fertility promoted. The yield, ear numbers, kernel numbers per ear and thousand kernel weight in field A were 20.3%, 5.7%, 5.2% and 7.8% higher than those in field C. When more nitrogen was input in the lower soil fertility field, the yield, ear numbers, kernel numbers per ear were increased, while the harvest index was decreased. The yield, ear numbers, kernel numbers per ear and harvest index in the treatment with 80 kg/hm² more nitrogen input were 17.1%, 9.2%, 4.6% and -8.2% higher than those in the conventional treatment in the field C. **[Conclusions]** More mineral nitrogen used for maize uptake was mineralized, and the yield was promoted through the increase of ear numbers, kernel numbers per ear and thousand kernel weight in the higher soil fertility field. The methods of input more nitrogen at the jointing stage can significantly increase the soil nitrate contents from the jointing stage to tasseling stage, which was helpful to the ear growth in the lower soil fertility field. So the yield was promoted through the increase of ear numbers and kernel numbers per ear. However, the yield still cannot reach the level of the high fertility field, and harvest index was decreased. What is more, environmental pollution risk was increased when the soil nitrate content was increased. Generally, both soil basic fertility improvement and optional fertilizer input should be considered for high yield maize cultivation.

Key words: soil basic fertility; potential mineral nitrogen; nitrate nitrogen; maize; yield

土壤基础肥力和通过施肥补充的养分共同保障了作物对养分的需求。研究表明,在华北潮土区,土壤基础肥力和施肥对玉米产量的贡献率分别为54%和46%^[1]。随着肥料的普遍使用,通过增加肥料投入量带来的产量提高效果更加有限,随之带来的一系列氮肥浪费和氮素污染环境等问题出现^[3]。通过提高土壤基础肥力、提高土壤养分供应能力可在提高产量的同时,保证肥料的高效利用。因此研究对比不同基础土壤肥力水平下和不同施肥量情况下玉米的生长和产量形成特征对玉米高产的土壤-肥料综合调控具有重要的指导意义。

目前基于不同土壤基础肥力条件和不同肥料处理对应的作物生长和产量研究不多。赵俊晔等^[4]在土壤肥力不同的两块高产田上研究得出,较高土壤肥力条件下,获得最高小麦产量和蛋白质含量所需施氮量较低。张铭等^[5]在江苏淮北麦区高、中、低三种肥力土壤上研究表明小麦的产量和氮素利用效率均随着土壤肥力的增加而增加。张军等^[6]研究了江苏淮北稻区不同地力上的施氮量对超级稻产量及干物质生产的影响,高地力农田在各个生育期都有相对应较好的群体质量,包括适宜的叶面积指数、合理的茎蘖动态、较高的群体颖花量及花后干物质的积累。另外大部分相关研究主要涉及不同施肥耕作栽培制度下土壤基础养分和产量的动态变化。例如,刘恩科等^[7]研究发现,玉米产量和土壤有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾等肥

力指标呈正相关。农田高的氮供应条件能够促进干物质积累,提高叶面积,促进穗的生长,提高穗粒数和粒重,最终提高产量^[8]。以上研究对不同土壤基础肥力条件下玉米的生长和产量构成涉及较少,同时缺乏对高土壤肥力和肥料投入对玉米产量的促进机制进行对比。本研究选取了华北平原鲁中玉米产区三块具有不同肥力水平,且存在产量差异的农田,采用统一的管理模式,用以明确基础肥力差异对玉米生长和产量构成的影响。同时在基础肥力条件最差的农田设置在当地常规生产习惯施肥量下增加肥料投入量的试验,用于对比高基础养分和肥料投入对玉米产量的促进机制差异。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验点位于山东省泰安市山东农业大学农学试验站(北纬 36°09'37",东经 117°09'18",海拔 130 m)。试验地主要种植制度为:小麦-玉米轮作,该地区为粮食高产区。土壤母质为河相冲积物,土壤类型为冲积始成土。泰安属于温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温 13℃。7 月份气温最高,平均 26.4℃;1 月份最低,平均 -2.6℃。年平均降水量 697 mm,主要集中在 7 月至 9 月。

表 1 为 2010 年至 2012 年 6 月至 9 月的降雨量。气象数据来源于距离试验地 1 km 的气象站。2010 年、2011 年和 2012 年 6 月至 9 月降雨量分别

为 489、607 和 342 mm,2011 年最多,2012 年最少。2010 年的降雨主要集中在 8 月(227 mm)和 9 月份(122 mm),6 月(46 mm)和 7 月(94 mm)相对不足,而 2012 年降雨集中在 7 月(211 mm)。

表 1 2010 至 2012 年 6 月到 9 月月平均降雨量 (mm)

Table 1 Monthly precipitation from June to September in 2010–2012

年份 Year	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sep.
2010	46	94	227	122
2011	39	192	166	210
2012	16	211	53	62

表 2 不同肥力农田土壤剖面 0—20 cm 土壤基础养分含量和机械组成

Table 2 Soil basic properties and particle components at 0–20 cm soil layers in field A, B and C

农田 Field	砂粒 Sand (g/g)	粉粒 Silt (g/g)	粘粒 Clay (g/g)	OM (g/kg)	TN (g/kg)	PMN (mg/kg)	Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
高肥力农田 A High fertility field A	0.30 b	0.58 a	0.12 ab	13.3 a	1.12 a	18.6 a	66.1 a	121.7 a
中肥力农田 B Middle fertility field B	0.39 a	0.55 a	0.06 b	9.9 b	0.77 b	14.3 a	26.6 b	83.3 b
低肥力农田 C Low fertility field C	0.31 b	0.49 a	0.19 a	10.8 b	0.82 b	5.1 b	15.6 c	85.8 b

注(Note): OM—土壤有机质 Organic matter; TN—全氮含量 Total N content; PMN—潜在矿化氮 Potential mineral N. 数据后不同字母表示同一年份处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters mean significant differences among the treatments in the same year ($P < 0.05$).

在每块试验地中设置三个重复小区,每个小区长 10 m,宽 3 m,其中 3 m × 3 m 区域作物测产区域,剩余区域为取样区域。三个农田处理采用完全一致的田间管理,试验于 2009 年 10 月初种植冬小麦开始至 2012 年 9 月底收获夏玉米结束,共计三季冬小麦和夏玉米。按照当地农民常规方式进行田间管理。冬小麦播种时间为 10 月上旬,收获时间为 6 月中旬。耕作方式为深耕,秸秆还田。冬小麦在耕地前施入底肥 N 84 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 75 kg/hm²,对应肥料分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾,在拔节期追肥 N 126 kg/hm²;夏玉米每年 6 月下旬播种,9 月下旬收获,品种为郑单 958,行距 60 cm,密度为每公顷 66000 株。耕作方式为免耕。夏玉米仅拔节期一次性撒施尿素 210 kg/hm²。2011 和 2012 年夏玉米播种前浇水 75 mm,2010 年没有浇水。

实验二,在 2010 季玉米试验结束后,根据 A、B 和 C 农田的产量情况和基础性质测定结果,在产量最低,土壤肥力相对最差的 C 农田设置了三个氮水

1.2 试验设计

本研究共设置两个试验,试验一,选取了试验站范围内具有不同基础土壤肥力,且具有产量差异的三块农田作为试验处理,各块农田面积均大于 300 m²,为方便论述,按照农田基础肥力自高到低将各农田依次命名为 A、B 和 C 农田。

三块农田的基础养分含量和机械组成如表 2 所示,在三块农田中,A 农田的粉粒含量最高,B 农田的砂粒含量最高,C 农田的粘粒含量最高。A 农田的有机质、全氮、潜在矿化氮、有效磷和速效钾含量均高于 B 和 C 农田。C 农田的潜在矿化氮和有效磷含量在三块农田中最低,显著低于 A、B 农田对应含量。

平试验,分别为常规的施肥处理,在常规施氮量 210 kg/hm² 下增施氮 40 和 80 kg/hm² 处理,两个增施氮肥处理分别命名为 C + N40 和 C + N80。增施氮量根据农田 A、B 和 C 之间的耕层潜在矿化氮量差异计算而来。施用氮素肥料为尿素,小麦季随底肥施入,玉米季在拔节期撒施。

1.3 测定项目和方法

在 2010 年玉米收获后,用直径为 4 cm 的土钻在取样小区里取 0—20 cm 土样 3 钻,将土样混合均匀,风干,过 2 mm 筛,用于测定基础性质,机械组成,有机质、全氮、有效磷、速效钾。机械组成采用吸管法测定,土壤有机质采用外热源法测定;土壤全氮采用半微量开氏法测定。土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗吸光度法。速效钾为 1.0 mol/L NH₄OAc 浸提—火焰光度法。土壤无机氮含量每个关键生育期测定一次,用土钻取 0—20 cm 土壤鲜样,1 mol/L 的 KCl 溶液浸提,用流动分析仪(SEAL XY-2 SAMPLER)测定。土壤潜在矿化氮采用好气培养法测定,取两份相同质量 15 g

风干土样,一份直接用 1 mol/L 的 KCl 溶液浸提测定无机氮含量,另一份用蒸馏水浸湿后,在 35°C 下恒温培养 14 天后浸提测定土壤的无机氮含量,通过好气培养过的土样无机氮含量减去未培养的土样无机氮含量计算得出土壤潜在矿化氮^[12]。

地上部干物质的测量,在小区内选取代表大多数玉米生长情况的植株 5 棵,切碎,在 105°C 下杀青 1 小时,然后在 75°C 下烘干至恒重,烘干重量通过植株密度转化为单位面积的干物质质量。叶面积指数的测定,在作物的不同生育期分别取 5 株代表性的植株,在植株原位量取每个叶片的长度和宽度,通过长×宽×校正因子 0.75 计算每个叶片面积,进一步计算每株的叶面积,再通过植株密度转化为叶面积指数。玉米的地上部干物质和叶面积指数分别在拔节期、抽雄期、乳熟期和完熟期四个时期测定。干物质的积累速率用相邻两个干物质测定时期的干物质质量之差除以两次取样间隔天数来获得。在玉米成熟后,先数预定 3 m×3 m 区域内的玉米穗数,将所有玉米穗人工收获,晒干(含水量约为 14%),脱粒,称重,计算玉米的产量,再取出 1000 粒测定玉米千粒

重。通过产量、穗数和粒重进一步计算出穗粒数。收获指数为产量与完熟期干物质质量的比值。

本研究数据分析,不同处理之间的比较用 SPSS17.0 软件采用 LSD 多重比较法。

由于小麦为分蘖植物,土壤肥力差异和增施肥料对小麦生长和产量构成的影响与玉米有所不同,同时为了使文章更加简练,本研究主要分析讨论玉米部分。

2 结果与分析

2.1 土壤硝态氮含量动态

由于旱地土壤无机氮中的铵态氮含量很低,因此本文仅对硝态氮含量进行分析讨论。不同肥力农田和低肥力农田增施氮肥处理 0—20 cm 土壤在不同生育期的硝态氮含量如图 1 所示,A、B 和 C 农田之间的硝态氮含量没有显著性差异。C 农田增施氮肥则显著提高了土壤硝态氮含量,尤其是施肥后的拔节期和抽雄期对应的硝态氮含量差异最大。其中在 2011 年和 2012 年抽雄期,C+N80 处理较常规施肥处理,土壤硝态氮含量分别高出 196% 和 227%。

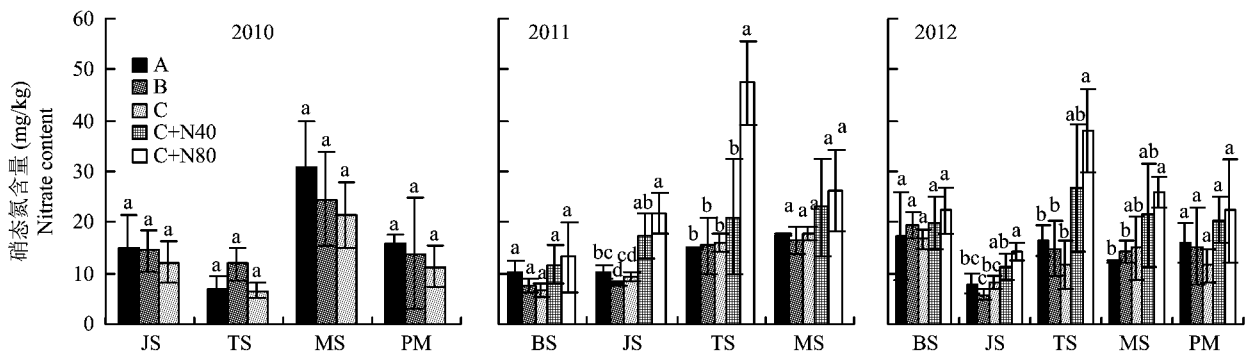


图 1 低肥力农田增施氮肥处理玉米不同生育期表层土壤硝态氮含量

Fig. 1 Nitrate contents in 0–20 cm soil layer at different growth stages of maize under different treatments in the field C with low fertility

[注 (Note): BS—播种前 Before sowing; JS—拔节期 Jointing stage; TS—抽雄期 Tasseling stage; MS—乳熟期 Milk stage; PM—完熟期 Physiological maturity; 柱上不同字母表示同一生育期处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters above the column mean significant differences among the treatments at the same stage ($P < 0.05$).]

2.2 玉米产量和产量构成

不同肥力农田和低肥力农田增施氮肥处理的玉米产量和产量构成要素如表 3 所示。各农田产量在所有年份大小依次为 A 农田 > B 农田 > C 农田,三块地三年年均产量分别为 9116、8465 和 7576 kg/hm²,农田 A 分别较 B 和 C 高 7.7% 和 20.3%。2011 年和 2012 年农田 C 常规处理,处理 C+N40 和 C+N80 年均产量分别为 7713、8606 和 9029

kg/hm²。C+N40 和 C+N80 处理产量较农田 C 常规处理分别提高了 11.6% 和 17.1%。最高施氮量 C+N80 处理产量低于 A 农田水平,该处理 2011 年和 2012 年玉米产量分别较 A 农田低 8.1% 和 5.5%。

农田 A、B 和 C 之间每公顷穗数没有显著差异,穗粒数整体高低依次为 A > B > C,2010 年的穗粒数低于 2011 年和 2012 年,这与 2010 年玉米播前

未灌溉且六、七月份降水量低造成大喇叭口期干旱有关。农田 C 增施氮肥显著提高了每公顷穗数,2012 年 C + N80 处理每公顷穗数为 7.11×10^4 个,高出常规施肥处理的 19.0%;2011 年,C + N80 处理穗粒数达到 465 粒,提高了 7.4%。三块农田千粒重大小依次为 A > B > C,2010 年、2011 年和 2012 年,农田 A 的千粒重分别 304.3 g、293.3 g 和 334.7 g,均显著高于农田 C 对应的 281.5 g、273.6

g 和 309.8 g,农田 B 介于两者之间。农田 C 增施氮肥处理的千粒重增加并不明显。2010 年由于遭遇干旱,收获指数相对偏低,其中农田 A 最低,仅为 0.494,农田 C 最高为 0.538。2011 年和 2012 年气候条件正常,农田 A、B 和 C 之间的收获指数差异不大。农田 C 增施氮肥则显著降低了收获指数,2011 和 2012 年 C + N80 处理收获指数分别 0.495 和 0.50,两年平均比农田 C 常规施肥处理低 8.2%。

表 3 不同肥力农田和低肥力农田增施氮肥处理玉米产量构成和收获指数

Table 3 Yield components and harvest index in different fertility fields and the high nitrogen treatment in the field with lower fertility

处理 Treat.	产量(kg/hm ²) Yield			穗数(×10 ⁴ /hm ²) Ear numbers			穗粒数 Kernel number per ear			千粒重(g) 1000-kernel weight			收获指数 Harvest index		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
农田 A Field A	7983 a	9056 a	10308 a	6.75 a	6.63 a	6.72 ab	389 a	467 a	458 a	304 a	293 a	335 a	0.494 a	0.54 a	0.542 ab
农田 B Field B	7678 a	8282 abc	9434 ab	6.19 a	6.37 a	6.44 ab	406 a	450 a	456 a	305 a	289 ab	322 ab	0.519 a	0.552 a	0.553 a
农田 C Field C	7300 a	7538 c	7888 c	6.67 a	6.37 a	5.97 b	391 a	433 a	426 a	282 b	274 b	310 b	0.538 a	0.550 a	0.538 ab
C + N40		8039 bc	9173 ab		6.70 a	6.39 ab		418 a	456 a		287 ab	316 b		0.516 ab	0.520 ab
C + N80		8322 ab	9736 ab		6.37 a	7.11 a		465 a	433 a		281 ab	318 b		0.495 b	0.500 b

注(Note): 同列数据后不同字母表示同一年份处理间差异显著($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments in the same year ($P < 0.05$).

2.3 干物质积累和叶面积指数

由图 2 可知,在各个年份整个生育期玉米干物质质量大小依次为农田 A > B > C,农田 A 在成熟期干物质质量介于 16166 和 19033 kg/hm² 之间,农田 B 介于 14797 和 17067 kg/hm² 之间,农田 C 介于 13566

和 14653 kg/hm² 之间。农田 C 增施氮肥提高了各个时期玉米的干物质质量,2011 年和 2012 年,C + N40 处理成熟期干物质质量分别为 15586 和 17643 kg/hm²,C + N80 处理成熟期干物质质量分别为 16798 和 19467 kg/hm²,其中 C + N80 处理已接近 A 农田

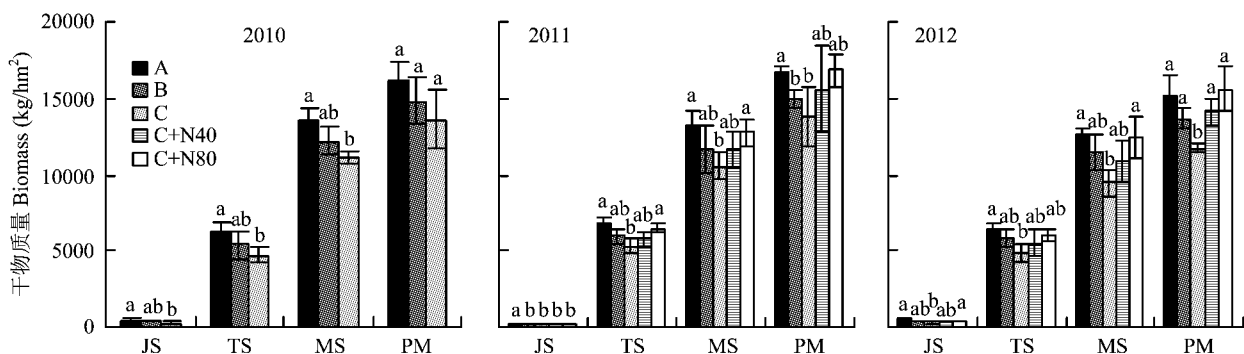


图 2 不同肥力农田和低肥力农田增施氮肥处理玉米不同生育期干物质重

Fig. 2 Biomass at different growth stages of maize in different fertility fields and the nitrogen treatments in the low fertility field

[注(Note): JS—拔节期 Jointing stage; TS—抽雄期 Tasseling stage; MS—乳熟期 Milk stage; PM—完熟期 Physiological maturity; 柱上不同字母表示同一生育期处理间差异显著 Different letters above the column mean significant differences among the treatments in the same stage ($P < 0.05$).]

水平。

不同年份玉米不同时期的干物质积累速率大小均为农田 A > B > C, 农田 C 增施氮肥处理提高了各个时期的干物质积累速率(图 3)。从玉米出苗至乳熟期, 低肥力农田 C 增施氮肥处理的玉米干物质积

累速率略低于高肥力农田 A 的干物质积累速率; 在乳熟期至成熟期, 前者反而高于后者, 2011 年和 2012 年 C + N80 处理乳熟至成熟期的干物质积累速率分别为 144.8 和 188.1 kg/(hm² · d), 较 A 农田分别高出 14.2% 和 22.7%。

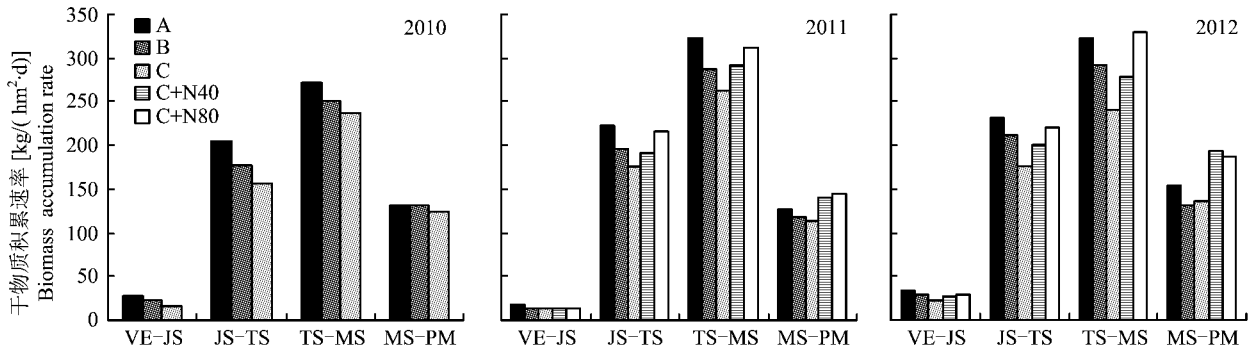


图 3 不同肥力农田和低肥力农田增施氮肥处理玉米不同生育时期干物质积累速率

Fig. 3 Biomass accumulation rates at different maize growth stages of maize in different fertility fields and the nitrogen treatments in the field with low fertility

[注 (Note): VE—播种前 Before sowing; JS—拔节期 Jointing stage; TS—抽雄期 Tasseling stage; MS—乳熟期 Milk stage; PM—完熟期 Physiological maturity.]

由图 4 可知, 玉米在抽雄期叶面积指数达到最大值, 农田 A 最大叶面积指数介于 4.58 和 4.7 之间, 农田 B 介于 4.18 和 4.23 之间, 农田 C 介于 3.79 和 3.88 之间。在所有年份以及整个玉米生育期, 玉米叶面积指数大小依次为农田 A > B > C。增施氮肥显著提高了农田 C 玉米的叶面积指数, 但还未达到农田 A 的水平。以抽雄期为例, C + N80 处理 2011 年和 2012 年叶面积分别为 4.20 和 4.39, 分别比对应农田 C 常规施肥处理高 8.1% 和 26.4%, 但分别比对应农田 A 低 8.7% 和 5.1%。

3 讨论

3.1 不同基础肥力农田的土壤性质和硝态氮含量动态特征

农田土壤基础肥力很大程度上影响着农作物的生长和最终产量^[1]。粉粒含量、有机质、全氮、潜在矿化氮、Olsen-P 以及速效钾均与产量呈正相关 (r 分别为 0.991、0.644、0.735、0.993、0.920、0.786), 其中粉粒含量和潜在矿化氮与产量的相关系数最高; 籽粒含量与产量呈负相关 ($r = 0.628$)。

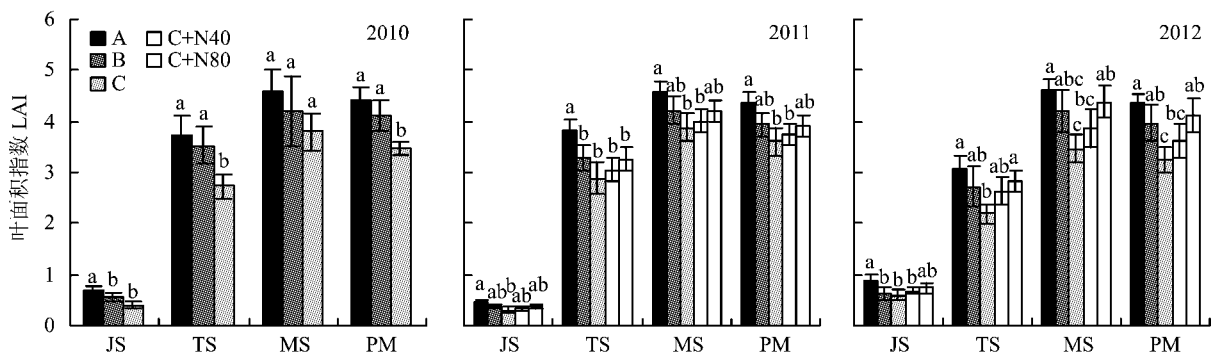


图 4 不同肥力农田和低肥力农田增施氮肥处理玉米不同生育期叶面积指数

Fig. 4 Leaf area index (LAI) at different growth stages of maize in different fertility fields and the nitrogen treatments in the low fertility field

[注 (Note): JS—拔节期 Jointing stage; TS—抽雄期 Tasseling stage; MS—乳熟期 Milk stage; PM—完熟期 Physiological maturity. 柱上不同字母表示同一生育期处理间差异显著 Different letters above the bars mean significant differences among the treatments at the same stage ($P < 0.05$).]

本研究三块农田,农田 A 具有高的有机质,全氮以及速效钾含量与农田 A 高的产量保持一致,但是这些性质并不能很好反映农田 B 和 C 的产量水平,这与农田的颗粒组成差异密切相关。研究表明,由于砂性土壤能促进土壤有机质的矿化,因此质地偏砂的土壤对应的土壤有机质、全氮含量较低,质地偏粘的土壤对应的有机质、全氮含量偏高^[14]。农田 B 土壤质地偏砂,农田 C 土壤质地偏粘,导致农田 B 有机质和全氮含量低于农田 C。研究表明华北平原地区 Olsen-P 高于 10 mg/kg 时,土壤磷并不是限制土壤肥力的主要因子^[16]。本研究中最底的农田 C 其 Olsen-P 也高达 15.6 mg/kg,尽管 Olsen-P 与产量呈正相关,本文不认为 Olsen-P 含量的差异造成了各农田产量的差异。华北地区潮土潜在矿化氮一般不超过 20 mg/kg^[17],且土壤矿化氮与产量相关性很好^[18]。本研究中三块农田均在这个范围内,潜在矿化氮最能直接反映农田的供氮能力,因此潜在矿化氮可能是造成本研究三块农田产量差异的最关键因子。本研究中试验二的增施氮量也是根据耕作层矿化氮量差异而确定的,即通过增施氮肥来弥补低肥力农田与高肥力农田矿化氮量的差异。实验二中低地力农田增施氮肥显著提升了产量也明确了低肥力农田土壤氮素供应能力不足。

硝态氮含量直接反映旱作农田土壤的氮素水平。由于各农田投入的氮肥量一致,同时农田 A 玉米产量高,生物量大,玉米从土壤中的吸氮量也较大,农田 A 高的土壤矿化氮与高的玉米吸氮量相互抵消,因此使得各农田之间硝态氮含量没有显著差异。在低肥力 C 农田上增施氮肥显著提高了土壤中的硝态氮含量,提高了土壤的氮素水平,从而有利于玉米的生产力形成,这部分结果与大量的肥料试验一致^[4]。然而高的硝态氮含量无疑会增加硝态氮淋失的风险,容易造成环境污染^[3]。

3.2 不同基础肥力水平农田的玉米生产力特征

高土壤肥力和增施肥料对玉米生长和产量的促进效果是不一样的。本研究中,高肥力农田各产量要素公顷穗数、穗粒数和千粒重均高于低肥力农田,其中农田 A 的三年平均公顷穗数、穗粒数和千粒重分别较农田 C 高出 5.7%、5.2% 和 7.8%。各农田之间的肥力差异与潜在矿化氮紧密相关,土壤氮矿化过程随时进行,即高肥力农田土壤在任何时刻都具有更高的氮素供应能力,因而高土壤肥力对产量构成的促进更加全面。增施肥料主要通过增加公顷穗数和穗粒数来增加产量,其中 C + N80 处理

两年平均公顷穗数、穗粒数和千粒重相比农田 C 常规施肥处理高 9.2%、4.6% 和 2.7%。从土壤硝态氮含量变化可以看出,在施肥后的两个时期拔节期至抽雄期,C + N80 处理的土壤硝态氮含量要远高于农田 C 常规施肥处理,这两个时期正是玉米穗发育形成的时期,因此使得 C + N80 处理具有较高的公顷穗数和穗粒数,到了灌浆成熟期,肥料的效应减弱,土壤中的硝态氮含量差异减弱,因此 C + N80 处理对应的千粒重增加程度较小。张军等在类似的不同土壤肥力和氮肥处理水稻试验研究认为,高肥力农田对应的穗数和穗粒数显著高于低肥力农田,但千粒重差别不大;而对应的肥料处理中,随着氮肥投入增加,穗数和穗粒数随着肥料的增加显著,而千粒重反而降低^[6],该结论与本文结论略有不同,但趋势是一致的。这种不同可能与水稻是分蘖作物,穗数对养分更加敏感有关。

高的土壤基础肥力农田在整个生育季都具有高的干物质积累速率。增施氮肥处理在施肥后的生育时期拥有高的干物质积累速率,同时在施肥前的时期也拥有高的干物质积累速率,这与前季肥料在土壤中的残留后效有关^[4,19]。在成熟期,不同肥力水平农田的常规施肥处理对应的干物质积累速率均明显小于增施氮肥处理,这可能与过多施用氮肥,使得玉米贪青晚熟有关^[20]。从收获指数上看,不同肥力水平农田常规施肥处理的收获指数相对稳定,其中 2010 年受干旱胁迫除外,干旱降低了收获指数。C 农田增施氮肥处理的收获指数随着施氮量增加而下降,可见增施氮肥会导致玉米贪青晚熟,导致成熟期积累的干物质并没有完全转移到籽粒上来,从而降低了收获指数。

4 结论

高基础肥力农田通过持续矿化出更多的氮素来提高土壤供氮能力,通过全面提升玉米的公顷穗数、穗粒数和千粒重来提升产量。增施氮肥的措施则通过提高了土壤的硝态氮含量来提高土壤供氮能力,该措施主要通过提升公顷穗数和穗粒数来增加产量,但产量依然达不到高养分农田的水平,同时会造成玉米贪青晚熟,降低收获指数。虽然通过肥料管理能够弥补农田土壤肥力水平低造成的产量偏低,但两者对产量的促进作用是有区别的,与此同时,增施肥料造成土壤硝态氮含量增加会增加环境风险,因此玉米高产过程中,应更多考虑改善农田基础肥力,同时结合良好的肥料管理。

参考文献:

- [1] 马常宝, 卢昌艾, 任意, 等. 土壤地力和长期施肥对潮土区小麦和玉米产量演变趋势的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 796-802.
Ma C B, Lu C A, Ren Y, *et al.* Effect of soil fertility and long-term fertilizer application on the yields of wheat and maize in fluvo-aquic soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(4): 796-802.
- [2] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778-783.
- [3] Hu C, Saseendran S A, Green T R, *et al.* Evaluating nitrogen and water management in a double-cropping system using RZWQM [J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(1): 493-505.
- [4] 赵俊晔, 于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 815-822.
Zhao J Y, Yu Z W. Effects of nitrogen rate on nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N under different fertility condition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 815-822.
- [5] 张铭, 蒋达, 缪瑞林, 等. 不同土壤肥力条件下施氮量对稻茬小麦氮素吸收利用及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(1): 135-140.
Zhang M, Jiang D, Liao R L, *et al.* Effects of N application rate on nitrogen absorption, utilization and yield of wheat under different soil fertility after rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(1): 135-140.
- [6] 张军, 张洪程, 戴其根, 等. 淮北不同地力水平麦茬田上施氮量对超级稻产量形成的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2297-2305.
Zhang J, Zhang H C, Dai Q G, *et al.* Effects of nitrogen application rate on the yield and yield formation of super rice in rice-wheat double cropping system under different levels of soil fertility in Huaibei region [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(10): 2297-2305.
- [7] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 789-794.
Liu E K, Zhao B Q, Hu C H, *et al.* Effects of long-term nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer applications on maize yield and soil fertility [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5): 789-794.
- [8] Ciampitti I A, Vyn T J. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages [J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(1): 2-18.
- [9] Derby N E, Steele D D, Terpstra J, *et al.* Interactions of nitrogen, weather, soil and irrigation on corn yield [J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(5): 1342-1351.
- [10] Lemcoff J, Loomis R. Nitrogen and density influences on silk emergence, endosperm development and grain yield in maize (*Zea mays L.*) [J]. *Field Crops Research*, 1994, 38(2): 63-72.
- [11] Halvorson A D, Mosier A R, Reule C A, Bausch W C. Nitrogen and tillage effects on irrigated continuous corn yields [J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(1): 63-71.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis (3rd edition)* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] 李菊梅, 王朝辉, 李生秀. 有机质、全氮和可矿化氮在反映土壤供氮能力方面的意义[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 232-238.
Li J M, Wang C H, Li S X. Significance of soil organic matter, total N and mineralizable nitrogen in reflecting soil N supplying capacity [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 232-238.
- [14] Hassink J. Effects of soil texture and structure on carbon and nitrogen mineralization in grassland soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1992, 14(2): 126-134.
- [15] Hassink J, Bouwman L A, Zwart K B, *et al.* Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota and C and N mineralization in grassland soils [J]. *Geoderma*, 1993, 57(1): 105-128.
- [16] 朱安宁, 张佳宝, 李立平, 冯杰. 华北平原潮土速效N、P、K的空间分布及时间变化[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4): 32-37.
Zhu A N, Zhang J B, Li L P, Feng J. Spatio-temporal variability of available N, P and K in Ochnic Aquic Cambosols in North China Plain [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(4): 32-37.
- [17] 王帘里, 孙波. 温度和土壤类型对氮素矿化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 583-591.
Wang L L, Sun B. Effects of temperature and soil type on nitrogen mineralization [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 583-591.
- [18] Nyiraneza J, N'Dayegamiye A, Chantigny M H, Laverdiere M R. Variations in corn yield and nitrogen uptake in relation to soil attributes and nitrogen availability indices [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(1): 317-327.
- [19] 王春阳, 周建斌, 郑险峰, 李生秀. 不同栽培模式对小麦-玉米轮作体系土壤硝态氮残留的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 991-997.
Wang C Y, Zhou J B, Zheng X F, Li S X. Effects of different cultivation methods on soil residual nitrate under winter wheat-summer maize cropping system [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6): 991-997.
- [20] Borrell A, Hammer G, Van Oosterom E. Stay-green: A consequence of the balance between supply and demand for nitrogen during grain filling? [J]. *Annals of Applied Biology*, 2001, 138(1): 91-95.
- [21] Pommel B, Gallais A, Coque M, *et al.* Carbon and nitrogen allocation and grain filling in three maize hybrids differing in leaf senescence [J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 24(3): 203-211.