

不同施氮量对高粱产量及植株养分积累的影响

倪玉琼¹, 张强¹, 曹方琴², 杨琳³

(1. 黔东南州农业技术推广站, 贵州 凯里 556000; 2. 黄平县农技站, 贵州 黄平 556100; 3. 贵州大学农学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要:利用控制性的大田试验栽培技术,连续 2 a 采用氮的添加试验,研究了不同施氮量(CK、低氮 LN、中氮 MN、高氮 HN)对高粱(*Sorghum bicolor*)产量及植株养分积累的影响。结果表明:施氮处理下高粱植株株高、根长、叶面积指数、茎粗、地上和地下生物量均高于对照,随着氮浓度的增加,高粱植株生长各指标以中水平施氮(MN)处理下达到最大,说明施氮能够促进高粱的生长,但氮肥在高用量时可能会产生轻微抑制作用;施氮对高粱植株叶绿素、可溶性蛋白和可溶性糖含量均有明显的促进作用,不同施氮处理下高粱叶绿素 a 和 b、可溶性糖和可溶性蛋白含量呈先增加后减小的趋势,说明施氮能够促进高粱叶片叶绿素合成;高粱植株不同部位的碳、氮、磷和钾积累量表现出较大的差异,穗部的碳、氮、磷和钾积累量最高,其次是叶片,根部碳、氮、磷和钾积累量最低,其中不同部位的碳、氮、磷和钾积累量均表现为 MN>HN>LN>CK,由此表明了施氮能够增加高粱碳、氮、磷和钾的积累量;施氮对高粱植株养分的影响表现为一定程度的增加效应,随施氮量的增加高粱植株养分呈先增加后降低的趋势,表明了高粱植株在一定程度上对养分的累积作用,其增幅随施氮量的增加而增加。Pearson 相关性分析表明,施氮量与株高、茎粗、单株叶面积、单株干重、籽粒产量、穗数和千粒重呈现出显著性相关关系,由此表明,施氮量与高粱主要性状以及养分吸收息息相关,在高粱高产高效栽培中起着重要的作用。

关键词:施氮量; 高粱; 产量; 养分积累

中图分类号:S143; S514; Q945 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2016)05-0095-05

Effect of Different Nitrogen Concentrations on *Sorghum bicolor* Yield and Nutrient Accumulation

NI Yuqiong¹, ZHANG Qiang¹, CAO Fangqin², YANG Lin³

(1. Qiandongnan Agricultural Technology Extension Station, Kaili, Guizhou 556000, China; 2. Huangping Agricultural Technology Extension Station, Huangping, Guizhou 556100, China; 3. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Two consecutive years of field experiments were used to study the effect of nitrogen concentration on *Sorghum bicolor* yield and nutrient accumulation to different nitrogen addition levels: control (CK), low nitrogen (LN), medium nitrogen (MN), high nitrogen (HN). The results indicated that the *Sorghum bicolor* height, root length, leaf area index, stem diameter, the ground and underground biomass were higher than CK, which showed the sequence: MN>HN>LN>CK, and illustrated that nitrogen addition could promote the growth of *Sorghum bicolor*, but high nitrogen addition may cause the slight inhibition. Nitrogen concentration promoted *Sorghum bicolor* chlorophyll, soluble protein and soluble sugar contents, which first increased and then decreased, which suggested that nitrogen concentration could promote the synthesis of chlorophyll. The carbon, nitrogen, phosphorus and potassium accumulation of different parts of *Sorghum bicolor* had the significantly difference which showed the order: spike>leaf>root, and different parts of the carbon, nitrogen, phosphorus and potassium accumulation decreased in the order: MN>HN>LN>CK, which showed that nitrogen concentration could increase the plant nutrient accumulation. The plant nutrient of *Sorghum bicolor* first increased and then decreased with nitrogen addition, which suggested that nitrogen concentration could increase the plant nutrient accumulation. Correlation analysis showed that the nitrogen concentration had the significant correlation with plant height, stem diameter, leaf area per plant, dry weight per plant, grain numbers per spike and grain yield, which indicates that nitrogen is closely related to *Sorghum bicolor* growth, and played an important role in high-yield cultivation.

Keywords: nitrogen concentration; *Sorghum bicolor*; yield; nutrient accumulation

高粱(*Sorghum bicolor*)是全球农业生态系统的重要农作物,也是我国重要的粮食作物之一,具有抗逆性强、抗旱、抗涝、耐盐碱和瘠薄、光合效率高、产量高、营养丰富、生态适应性广等特点,对我国的经济和农业的发展具有重要的现实意义^[1-2]。高粱在许多国家不仅用作最主要的粮食和养殖业重要的饲料,而且还是必不可少的工业原料,因而高粱种植业在许多国家的农业生产和国民经济中占有非常重要的地位^[3]。当前人类的大量活动加剧了全球大气中含氮化合物和生态系统固氮量,而我国已成为全球第三大氮沉降区^[4-5]。氮素作为农作物所需的基本元素,是影响农业生产和农业经济的重要因素^[6]。其中施氮是控制和调节农作物元素平衡的一项重要措施,自然条件下研究施氮对农作物产量及养分积累的影响显得非常重要,不仅可以加深对其产量、生态适应、生产潜能的系统认识,而且为其高产优质技术栽培提供理论依据^[7]。鉴于此,笔者在自然条件下连续2 a采取氮的人工添加试验,研究和探讨不同施氮量对高粱产量及植株养分积累的影响,从而揭示高粱对氮素的响应机制,对指导高粱的生产和合理区划布局具有很好的参考作用,也为我国高粱的高效生产和发展提供一定的借鉴作用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

高粱是黔东南酿酒业的主要原料,在农业生产中属于小作物,所占比例不大,呈点状零星分布,从海拔300 m的东部地区到海拔1 100 m的西北部地区都有种植;在海拔600~900 m范围内种植点较为密集,随海拔的增高和降低,种植点逐渐减少。高粱的水平分布差异不大,山区、河谷多于平坝地,灌溉条件好的地区少于干旱较重地区,主产区在黔东南的西北地区。试供高粱品种为“晋杂23”,由贵州大学生产和提供,待高粱种子安全贮存半年度过休眠期,挑选籽粒饱满、无病虫害、大小均匀、色泽一致的种子保存以备。

地点选择在黄平县旧州镇草绿村南庙五组杨正华农户责任田,面积0.233 hm²,土壤类型为潮沙泥,海拔658 m,平均 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温4 780 $^{\circ}\text{C}$,平均温13.3 $^{\circ}\text{C}$,年降雨量1 126.7 mm,年日照时数1 156.3 h,无霜期285 d,土壤肥力中上等,前作西瓜。土壤肥力状况:有机质为36.9 g/kg,全N为2.179 g/kg,有效P为9.1 mg/kg,速效K为113.0 mg/kg,pH值5.5。

1.2 研究方法

根据高粱基本生理特性和同类的控制施氮试验

设置3个施氮水平(NH₄NO₃)和1个对照:低施氮量[LN,10 g/(m²·a)],中施氮量[MN,20 g/(m²·a)]和高施氮量[HN,30 g/(m²·a)],以无施氮量为对照[CK,0 g/(m²·a)],采用裂区试验设计。2013年、2014年每年的4月中下旬播种,苗床选择在水源方便,背风向阳,土质沙性的土壤中进行。播种前将种子进行筛选、晒种、温水浸泡1 d并催芽,播种于事先整理好的苗床上,苗床宽1.2 m,播种后盖一层细土,浇透水盖上薄膜,待出苗后揭膜。于5月中下旬采取双株带土移栽,移栽前田块翻犁和耙平,然后施入施氮量,翻耕使施氮量与土壤充分混合,除施氮量用量不同外,各处理氮、磷、钾肥作基肥,用量为0.279 kg/m² NH₃HCO₃,0.251 kg/m² P₂O₅,0.154 kg/m² K₂O,移栽好后浇定根水。每个处理设置5个重复(共20个小区),每个小区面积5 m×6 m=30 m²,每个小区间距20 cm,四周留1.0 m以上保护行。高粱移栽行距设置为32 cm,窝距33 cm,每窝移栽苗2株,保证每666.7 m²株数达12 000株以上。全生育期无人工灌溉,试验期间采取当地的管理措施(大田管理措施),适时进行病虫草害防治。高粱整个生长期期间,定时定点做好苗情考查,收割前进行理论测产。

1.3 测量指标

1.3.1 高粱生长指标的测定 每个处理选取10株长势一致的高粱植株,在生长期前期(6月中旬—8月中旬)每10 d卷尺和游标卡尺测量其株高和茎粗(精确到0.01 cm);在每个小区选取3株(尽量均一)高粱植株,通过人工壕沟挖掘法取根系,同时剪取地上部分测定干重(65 $^{\circ}\text{C}$,48 h),根系带回实验室过40目筛冲洗后,用镊子拉直两端测定单株根系总长度(根长为筛选出的活根),并且在STD 1600根系扫描仪下扫描,WinRHIZO 4.2软件计算高粱根系总根长,然后在65 $^{\circ}\text{C}$ 烘干后测定其干重(精确到0.001 g)另外,每个小区随机采取10个高粱新鲜叶片,湿润滤纸包夹带回实验室后用扫描仪测定其叶面积,然后将其烘干后测定其干重(65 $^{\circ}\text{C}$,48 h)。

在高粱生长期(8月中旬),每个小区随机采取足够多高粱上、中、下部的的新鲜叶片混合,一部分洗净65 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘干,粉碎后过1.5 mm筛,元素分析仪测定叶片全碳和全氮含量(Element,德国),钒钼黄吸光光度法测定叶片全磷含量;叶片全钾采用火焰光度计法;叶片除去叶脉研磨混合,以80%丙酮溶液浸提24 h,分光光度计下比色分析并计算出叶绿素a,b值(CCM-200叶绿素仪);考马斯亮蓝—G250染色法测定可溶性蛋白;蒽酮比色法测定可溶性糖^[8]。

1.3.2 高粱产量及构成的测定 在高粱不同的生育

期每小区普查 50 株,计算基本苗数、有效穗数、每穗粒数和千粒重,进行理论测产,并在 10 月 31 日全育期实际收产,晒干后称干质量,并且计算籽粒产量。

1.4 数据处理与分析

数据采用 Excel 和 DPS 进行数据统计和相关分析,每个特征值用平均值±标准误差表示(mean±SE),Duncan 新复极差法($p<0.05$ 和 $p<0.01$ 置信水平)检验数据的差异显著性。由原始数据拟合得到的多元回归关系经统计学检验得到拟合度参数 R^2 ,并检验相关系数的显著性,Pearson 相关系数分析的方法分析施氮量与高粱植株主要性状相关关系。

2 结果与分析

2.1 不同施氮量对生长期高粱植株生长特性的影响

由表 1 可知,不同施氮处理的高粱株高、根长、叶面积指数、茎粗、单株地上和地下生物量均高于对照,施氮对高粱植株的生长均具有明显的促进作用,其中高粱生长各指标大致表现为 $MN>HN>LN>CK$,以中水平施氮处理下高粱生长各指标达到最大。与对照相比,随着施氮量的增加,LN,MN 和 HN 植株高分别增加了 8.46%,39.69%和 23.04%,根长分别增加了 16.09%,61.62%和 42.90%,叶面积指数分

别增加了 14.07%,16.97%和 3.27%,茎粗分别增加了 12.47%,41.29%和 31.82%,单株地上生物量分别增加了 9.62%,31.45%和 24.16%,单株地下生物量分别增加了 2.04%,16.98%和 14.81%,其中以根长的变化幅度最大。

2.2 不同施氮量对高粱植株叶片生理特性的影响

由图 1 可知,不同施氮处理的高粱叶片叶绿素 a 和 b 含量、可溶性糖、可溶性蛋白含量均高于对照,大致表现为 $MN>HN>LN>CK$,以中水平不同施氮处理下高粱植株叶片生理特性达到最大。随施氮量的增加,高粱植株叶片叶绿素 a 和 b 含量呈一致的变化趋势,MN 显著高于其他处理($p<0.05$),LN 与对照差异并不显著($p>0.05$);不同施氮处理下高粱植株叶片可溶性蛋白含量与对照差异并不显著($p>0.05$);MN 和 HN 可溶性糖含量显著高于对照和 LN ($p<0.05$),LN 与对照差异并不显著($p>0.05$)。与对照相比,随着施氮量浓度的增加,LN,MN 和 HN 植株叶片叶绿素 a 含量分别增加了 20.00%,93.33%和 60.00%,叶绿素 b 含量分别增加了 33.33%,133.33%和 100.00%,可溶性蛋白分别增加了 3.93%,8.13%和 5.66%,可溶性糖分别增加了 50.00%,216.67%和 250.00%。其中以可溶性糖的变化幅度最大。

表 1 不同施氮量对生长期高粱生长特性(单株)的影响

处理	株高/cm	根长/cm	叶面积指数	茎粗/mm	单株地上生物量/ (g/株)	单株地下生物量/ (g/株)
CK	41.75±5.23d	23.24±3.56c	11.02±2.18b	4.65±0.56c	123.78±23.15d	62.31±15.02b
LN	45.28±4.89c	26.98±2.14b	12.57±1.09a	5.23±0.89b	135.69±35.08c	63.58±9.58b
MN	58.32±3.21a	37.56±4.09a	12.89±0.85a	6.57±0.78a	162.71±19.24a	72.89±16.78a
HN	51.37±5.08b	33.21±3.57ab	11.38±1.74b	6.13±1.23a	153.69±21.36b	71.54±11.47a

注:同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$),下表同。

2.3 不同施氮量对高粱产量及构成的影响

由表 2 可知,不同施氮处理的高粱穗数、穗粒数、穗长、穗粗、千粒重和产量均高于对照,大致表现为 $MN>HN>LN>CK$,表明了施氮能够增加高粱产量,以中水平施氮处理下高粱产量及构成达到最大。MN 高粱穗数、穗粒数、穗长、穗粗和千粒重与 HN 差异并不显著($p>0.05$),显著高于 LN 和 CK,LN 高粱穗数、穗粒数、穗长、穗粗和产量与对照差异并不显著($p>0.05$)。与对照相比,随着施氮量的增加,LN,MN 和 HN 穗数分别增加了 2.86%,8.73%和 4.35%,穗粒数分别增加了 6.35%,15.77%和 12.57%,穗长分别增加了 1.58%,14.58%和 13.57%,穗粗分别增加了 0.40%,15.94%和 17.00%,千粒重分别增加了 4.74%,13.67%和 12.70%,产量分别增加了 2.45%,13.72%和 11.93%,其中以根长的变化幅度最大。

2.4 不同施氮量对高粱植株养分积累的影响

从表 3 可以看出,在收获期,施氮对高粱不同部位的碳、氮、磷和钾积累量有明显的影响。植株不同部位的碳、氮、磷和钾积累量表现出较大的差异,穗部的碳、氮、磷和钾积累量最高,其次是叶片,根部碳、氮、磷和钾积累量最低。其中不同部位的碳、氮、磷和钾积累量均表现为 $MN>HN>LN>CK$,由此表明了施氮能够增加高粱碳、氮、磷和钾的积累量。

2.5 施氮量与高粱植株主要性状相关关系

Pearson 相关分析结果(表 4)表明,施氮量与高粱主要性状均呈现出显著性相关关系。施氮量与株高、茎粗、单株叶面积、单株干重、籽粒产量、穗数和千粒重呈现出显著性相关关系,其中,施氮量与株高回归方程为 $y=3.24x+135.91(R^2=0.9528)$,与茎粗回归方程为 $y=-2.36x+46.32(R^2=0.8735)$,与单株叶面积回归方程为 $y=1.689x^2-52.37x+1523.43$

($R^2=0.9102$),与单株干重回归方程为 $y=-8.36x+456.31$ ($R^2=0.6539$),与籽粒产量回归方程为 $y=158.2x+1596.7$ ($R^2=0.8324$),与穗数回归方程为 $y=3625.3x+45623.6$ ($R^2=0.6947$),与千粒重回归方程为 $y=-0.2156x+36.98$ ($R^2=0.7738$)。由此表明,施氮量在高粱高产高效栽培中起着非常重要的作用。

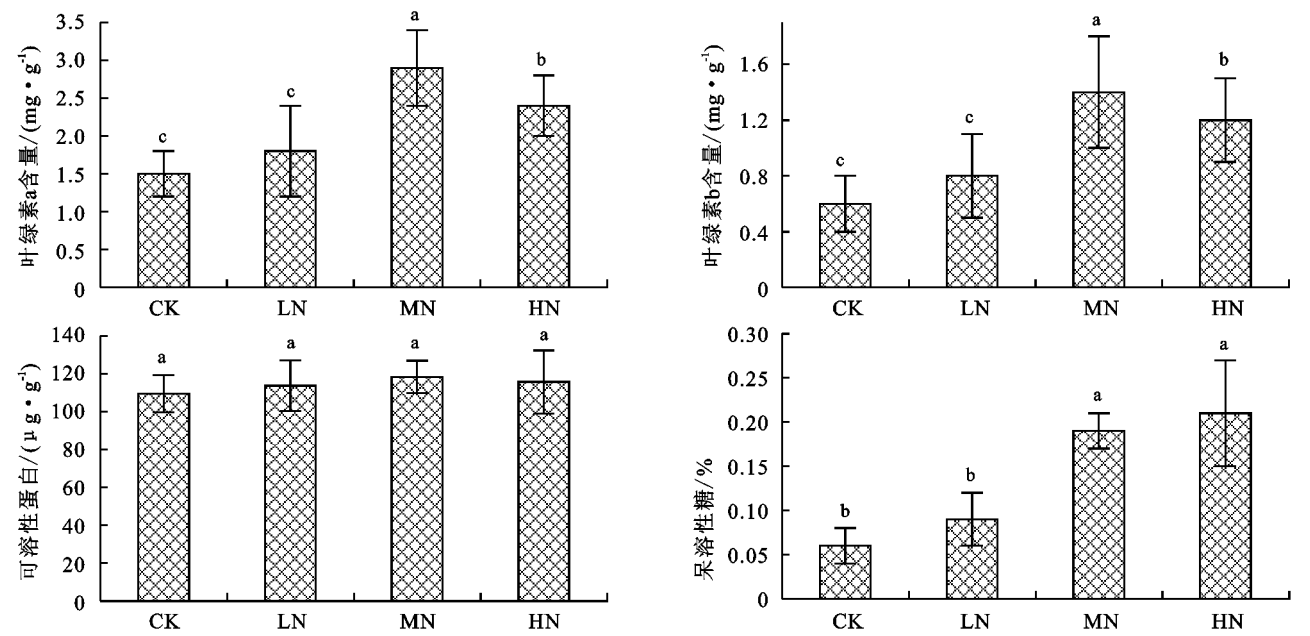


图 1 不同施氮量对高粱植株生理特性的影响

表 2 不同施氮量对高粱产量及构成的影响

处理	穗数/ 10 ⁴ hm ²	穗粒数/ (粒/穗)	穗长/cm	穗粗/cm	千粒重/g	产量/ (kg·hm ⁻²)
CK	30.12±3.12b	25.37±4.38b	24.76±2.12b	15.12±1.52b	43.24±6.23c	403.9±32.5c
LN	30.98±2.85ab	26.98±2.17b	25.15±3.41b	15.18±2.03b	45.29±5.31b	413.8±27.1bc
MN	32.75±2.14a	29.37±3.56a	28.37±3.56a	17.53±1.89a	49.15±3.15a	459.2±39.4a
HN	31.43±3.46ab	28.56±4.02a	28.12±2.98a	17.69±2.79a	48.73±2.78a	452.1±28.0b

表 3 不同施氮量对高粱植株养分积累的影响

		kg/hm ²			
项目	处理	碳积累量	氮积累量	磷积累量	钾积累量
穗部	CK	1563.4±253.4c	76.4±12.3d	6.8±1.2c	51.7±8.9c
	LN	1829.7±325.1b	92.5±16.4c	7.2±1.6c	65.3±7.3b
	MN	2698.3±198.6a	123.7±21.4a	13.2±2.4a	83.5±11.5a
	HN	2543.7±223.7a	108.3±26.5b	11.7±2.3b	79.2±13.4a
叶片	CK	856.3±56.9b	62.7±9.8c	5.2±0.9c	32.7±5.3d
	LN	915.4±28.7b	89.6±16.2b	6.3±1.1c	49.2±4.2c
	MN	1569.1±44.3a	113.7±14.1a	9.7±2.5a	69.8±6.9a
	HN	1423.5±59.1a	115.9±23.8a	8.3±1.8b	63.7±7.8b
根部	CK	602.6±69.3d	46.3±8.5d	3.8±0.8b	25.9±2.7c
	LN	685.3±56.7c	59.8±7.2c	4.1±0.9b	36.7±5.2b
	MN	952.7±59.2a	79.2±6.3a	4.6±1.0ab	48.9±6.8a
	HN	913.8±63.7b	65.1±7.7b	4.9±0.8a	47.3±5.1a

表 4 施氮量与高粱植株主要性状相关关系

项目	回归方程	R ²	p 值	F 值	自由度 n
株高	$y=3.24x+135.91$	0.9528	0.000**	56.32	30
茎粗	$y=-2.36x+46.32$	0.8735	0.001**	53.89	30
单株叶面积	$y=1.689x^2-52.37x+1523.43$	0.9102	0.000**	54.18	30
单株干重	$y=-8.36x+456.31$	0.6539	0.004**	42.37	30
籽粒产量	$y=158.2x+1596.7$	0.8324	0.001**	52.07	30
穗数	$y=3625.3x+45623.6$	0.6947	0.004**	45.13	30
千粒重	$y=-0.2156x+36.98$	0.7738	0.003**	49.36	30

3 讨论与结论

高粱生长发育受叶片光合特性、生理代谢和光合产物代谢的共同影响,本研究中连续 2 a 施氮试验表明(表 1)施氮能够促进高粱植株的生长,而随着施氮量的增加,高粱植株生长各指标以中水平施氮量(MN)达到最大,说明了施氮能够促进高粱的生长,但施氮量过高可能会产生轻微抑制作用。

本研究的结果表明(图 1),施氮对高粱植株叶绿素、可溶性蛋白和可溶性糖含量均有明显的促进作用,随着施氮量的增加,高粱叶绿素 a 和 b、可溶性糖和可溶性蛋白含量呈先增加后减小趋势,说明施氮能够促进高粱叶片叶绿素合成。叶绿素是光合作用的物质基础和光敏化剂,在光合作用过程中起着接受和转换能量的作用,其含量的增加有助于光合作用的进行^[9-10]。本试验中施氮处理后高粱 Chl a 和 Chl b 含量增加可能是一种保护性反应,增加捕光色素复合体中天线色素的比例,促进对光能的吸收与转化能力,为光合补偿生长提供物质和能量基础,也增强对弱光的利用率,这与前人的研究结果一致^[11-13],这同时也说明了高粱能够在光照不足的情况下增加对光能的利用效率,这可能与高粱自身的抗逆性和生理生化特性的差异有关,而高水平施氮可能会造成高粱叶绿素含量降低等,从而影响生育后期物质合成能力^[12]。本研究发现氮素能够改善高粱产量及构成,施氮处理下高粱产量差异较明显,并且明显高于对照,随着氮素的增加高粱产量及构成有着明显的提高,综合比较可知,以中水平施氮处理下高粱产量和品质最高,高水平施氮可能导致高粱自身碳、氮代谢的失衡^[14]。

高粱产量构成因素包括穗数、穗粒数和千粒重,而大田高粱籽粒产量的形成是穗数、穗粒数、千粒重共同作用的结果^[14]。本研究结果表明,随着施氮量的增加,单位面积有效穗数呈增加趋势,而单穗粒数和千粒重显著降低。这主要是由于施氮后期高粱植株之间在水分、养分和空间等方面形成生长性竞争,最终导致穗粒数和千粒重相应下降。高粱产量形成受到诸如品种、气候、栽培措施等多种因素的影响^[15]。在一定环境下,氮肥是影响作物生产最重要因素之一,合理施氮可构建良好的群体结构,获得适宜的光合面积,减少漏光损失,提高光能利用效率,是作物实现高产的必要条件^[12]。

施氮在农业生产上的应用效应已经引起越来越多的关注,本研究中施氮量对高粱植株养分的影响表

现为一定程度的增加效应(表 3),随施氮量的增加高粱植株养分呈先增加后降低趋势,表明了高粱植株在一定程度上对养分的累积作用,其增幅随施氮量的增加而增加。氮肥具有较大的比表面积,通过表面催化活性促进小的有机分子聚合形成土壤有机质,提高土壤的保肥性能,通过激发效应促进土壤有机质的分解而提高植株养分含量^[13,16]。中水平施氮处理下高粱植株养分各指标达到最大,主要是由于氮素引起了高粱根区土壤 pH 的降低,从而促进了养分的吸收和利用,但施氮量较高时,可能造成高粱植株对养分的吸收性降低。此外,高粱在生长过程中需要大量营养元素,仅靠土壤提供是远远不够的,还需外界营养物质的输入,除了吸收和利用土壤中的养分外,养分的固定和淋洗作用也是值得考虑的因素^[13,16]。因此,在高粱的高产栽培过程中需合理控制施氮量,从土壤肥力、高粱类型、施氮水平以及管理措施等多方面因素加以综合考虑,并且在生产实践中应合理施用和调节其他元素以保证养分平衡。

参考文献:

- [1] Paterson A H, Bowers J E, Bruggmann R, et al. The *Sorghum bicolor* genome and the diversification of grasses[J]. *Nature*, 2009, 457(7229): 551-556.
- [2] Sanchez A C, Subudhi P K, Rosenow D T, et al. Mapping QTLs associated with drought resistance in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) [J]. *Plant Molecular Biology*, 2002, 48(5/6): 713-726.
- [3] Hattori T, Inanaga S, Araki H, et al. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor* [J]. *Physiologia Plantarum*, 2005, 123(4): 459-466.
- [4] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, 494 (7438): 459-462.
- [5] Liu X, Duan L, Mo J, et al. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2251-2264.
- [6] Fischer G, Shah M, Tubiello F N, et al. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990—2080 [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, 360 (1463): 2067-2083.
- [7] Hirel B, Le Gouis J, Ney B, et al. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(9): 2369-2387.

- 水土保持研究,2009,16(1):121-125,130.
- [7] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬.黄土高原森林植被水土保持机理研究[J].林业科学,2001,37(5):140-144.
- [8] 王云琦,王玉杰,张洪江,等.重庆缙云山几种典型植被枯落物水文特性研究[J].水土保持学报,2004,18(3):41-44.
- [9] 韩路,王海珍,吕瑞恒,等.塔里木河上游不同森林类型枯落物的持水特性[J].水土保持学报,2014,28(1):96-101.
- [10] 张金慧.从王茂沟治理典型看黄丘一副区小流域综合防治体系建设[J].人民黄河,1993(9):20-23.
- [11] 冯国安,郑宝明.陕北王茂沟流域综合治理的启示[J].人民黄河,1998(1):18-20.
- [12] 宋轩,李树人,姜凤岐.长江中游栓皮栎林水文生态效益研究[J].水土保持学报,2001,15(2):76-79.
- [13] 张洪江,程金花,余新晓,等.贡嘎山冷杉纯林枯落物储量及其持水特性[J].林业科学,2003,39(5):147-151.
- [14] 程良爽,宫渊波,关灵,等.山地森林—干旱河谷交错带不同植被枯落物水文效益研究[J].中国水土保持,2009(12):36-39,68.
- [15] 韩同吉,裴胜民,张光灿,等.北方石质山区典型林分枯落物层涵蓄水分特征[J].山东农业大学学报:自然科学版,2005,36(2):275-278.
- [16] 李学斌,陈林,田真,等.荒漠草原典型植物群落枯落物蓄积量及其持水性能[J].水土保持学报,2011,25(6):144-147.
- [17] 蒋积荣,牛赞,苗毓鑫.不同森林类型枯落物水文生态功能对比研究:以甘肃祁连山和云南元阳梯田水源林为例[J].防护林科技,2015(12):4-7.
- [18] 梁文俊,丁国栋,周美思,等.冀北山地油松和落叶松林下枯落物的水文效应[J].水土保持通报,2012,32(4):71-74.
- [19] 张国华,张展羽,左长清,等.红壤坡地不同类型梯田的水土保持效应[J].水利水电科技进展,2007,27(2):77-80.
- [20] 焦菊英,王万中.黄土高原水平梯田质量及水土保持效果的分析[J].农业工程学报,1999(2):65-69.
- [21] 张焜,张洪江,程金花.重庆四面山 4 种类型天然林枯落物水文效应[J].东北林业大学学报,2013,41(3):43-45.
- [22] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰,等.油松根系形态分布的分形分析研究[J].水土保持通报,2007,27(1):47-50,54.
- [23] 魏晓霞,李良,孙旭,等.塞罕坝地区几种林下枯落物持水特性研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2010,31(3):41-45.
- [24] 王丹丹.晋西黄土高原不同植被覆盖下的土壤抗冲性研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [25] 李荣桓,李磊,戴雷,等.北京山区不同林分类型枯枝落叶层持水性能的研究[J].安徽农业科学,2010,38(3):1636-1639.
- [26] 刘成功,万志兵,李燕,等.不同林龄无患子人工林枯落物的持水性[J].西南林业大学学报,2015,35(4):46-52.
- [27] 伍飞舟,杨卓,牛健,等.黄土高原丘陵沟壑区土地利用与水土保持措施的变化特征[J].水土保持研究,2010,17(2):10-14,19.
- [28] 刘秀萍,陈丽华,陈吉虎.刺槐和油松根系密度分布特征研究[J].干旱区研究,2007,24(5):647-651.

~~~~~

(上接第 99 页)

- [8] 张志良.植物生理学试验指导[M].北京:高等教育出版社,1990.
- [9] 叶子飘,于强.光合作用对胞间和大气  $\text{CO}_2$  响应曲线的比较[J].生态学杂志,2009,28(11):2233-2238.
- [10] 马富举,李丹丹,蔡剑,等.干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响[J].应用生态学报,2012,23(3):724-730.
- [11] 闫慧,吴茜,丁佳,等.不同降水及氮添加对浙江古田山 4 种树木幼苗光合生理生态特征与生物量的影响[J].生态学报,2013,33(14):4226-4236.
- [12] 宗宁,石培礼,宋明华,等.模拟放牧改变了氮添加作用下高寒草甸生物量的分配模式[J].自然资源学报,2012,27(10):1696-1707.
- [13] 张晓文,邢世岩,吴岐奎,等.氮添加对银杏幼林土壤有机碳化学组成及土壤微生物群落的影响[J].林业科学,2014,50(6):115-124.
- [14] 王浩,焦晓燕,王劲松,等.不同氮肥水平下生物炭对高粱苗期生长及有关生理特性的影响[J].华北农学报,2014,29(6):195-201.
- [15] 林仕欣,高承芳,刘远,等.添加绿汁发酵液和山梨酸对“大力士”饲用甜高粱青贮品质的影响研究[J].中国农学通报,2012,28(17):33-36.
- [16] 林贵刚,赵琼,赵蕾,等.林下植被去除与氮添加对樟子松人工林土壤化学和生物学性质的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1188-1194.