

不同施氮水平对青贮玉米植株氮素积累和转运的影响

王丽萍^{1,2} 白岚方^{1,2} 王天昊^{1,2} 王宵璇^{1,2} 白云鹤^{1,2} 王玉芬^{1,2}

(¹内蒙古大学生命科学学院, 010070, 内蒙古呼和浩特; ²牧草与特色作物生物技术教育部重点实验室, 010070, 内蒙古呼和浩特)

摘要 为阐明内蒙古中部地区不同施氮水平下青贮玉米植株氮素积累和转运规律,明确当地适宜青贮的玉米种植最佳施氮量,以先玉335为试验品种,设置6个氮素水平,分别为0(N0)、120(N8)、180(N12)、240(N16)、300(N20)、360kg N/hm²(N24),分析各处理在不同生育期的氮素积累转运特征以及整株产量和氮肥利用效率。结果表明,植株营养器官的氮素积累量在大喇叭口期到抽雄期达到峰值,抽雄期后,氮素逐渐由营养器官向生殖器官转运;不同氮素水平会对植株的氮素积累量产生显著影响,2018和2019年,施氮处理的氮素积累量比未施氮处理(N0)分别高出87.13%~119.34%和51.38%~68.48%;施入氮肥会增加营养器官的氮素转运量,但会不同程度地降低各器官的氮素转运率,氮素主要由茎和叶转运到籽粒中,施入氮肥可明显促进花后籽粒自身的氮素积累;施入氮肥能显著提高青贮玉米产量,2018和2019年分别为N20和N16处理产量最高,分别为31.51t和27.09t/hm²;各处理的氮肥利用率均随着施氮量的增加呈下降趋势。综合分析得出,N16处理(240kg N/hm²)为内蒙古中部呼和浩特地区较适宜的施氮水平。

关键词 青贮玉米; 先玉335; 氮素积累转运; 产量; 氮肥利用率

内蒙古是我国五大牧区之首,随着畜牧业的迅速发展,饲料需求不断增大,而青贮玉米作为牲畜饲料,具有营养价值丰富、适口性好和利用率高等特点,青贮玉米广泛种植对促进我国畜牧业的发展和缓解饲草进口压力具有积极作用^[1-3]。氮素对玉米生长发育和产量、品质形成至关重要,但过量施用氮肥不仅会造成肥料浪费,还会造成土壤养分失调、水体和大气污染等诸多环境问题,不利于植株生长。因此,进一步明确内蒙古地区青贮玉米的最佳施氮量和植株的氮素转移规律是亟待解决的问题。

我国青贮玉米发展起步较晚,起点较低^[4],种植规模远小于欧美等畜牧业发达的国家,2017年我国人均青贮面积占有量仅约为多数欧美国家的10%^[4],且欧美等发达国家对青贮玉米的研究更为丰富和系统^[5-9],而我国关于其的研究多集中在产量和品质上^[10],有关青贮玉米植株氮素积累及转移分配规律的报道相对较少。臧贺藏等^[11]研究表明,当施氮量在300kg/hm²以下时,玉米的氮素积累量随施氮量增加呈增加趋势;米娜瓦尔·艾买提等^[12]研究提出,相同施氮水平下,虽然植株氮素积累量随着生育期的推进表现为上升趋势,但青贮玉米植株

的氮含量表现为随着生育期推进而下降。刘佳敏等^[13]研究表明,在一定范围内随着施氮量增加,玉米氮素在转运过程中更多地滞留在秸秆中,很难转运至籽粒。

前人^[14]研究发现,施入氮肥对肥料利用率也有显著的影响。世界范围内玉米平均施氮量为123kg/hm²时,氮肥表观利用率为65%。在2015年时,我国玉米表观利用率平均达到34.3%,显著低于世界水平。于飞等^[14]综合分析了2004-2014年全国范围内相关研究,结果表明施氮量180~240kg/hm²是目前较适宜的施氮量范围。

为了明确青贮玉米植株氮素积累转运规律,本研究以先玉335为试验品种,设置6个施氮水平,研究不同施氮水平对玉米植株氮素积累量、转运量、转运率、氮肥利用率及产量的影响,旨在促进青贮玉米需氮量和供氮量平衡,提高氮肥利用率,对内蒙古中部地区农业生产节约成本和提高玉米产量提供理论依据及实践基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2018-2019年在内蒙古自治区农牧业科

作者简介:王丽萍,主要从事园艺方面研究, E-mail: 3199291941@qq.com

白岚方为通信作者,研究方向为作物栽培与耕作学, E-mail: 1016794601@qq.com;王玉芬为共同通信作者,主要从事作物栽培与耕作学研究, E-mail: fenwy300@163.com

基金项目:内蒙古大学校级大学生创新创业训练计划“不同氮素水平对青贮玉米植株氮素积累转运的影响(202014310)”;国家重点研发计划项目(2016YFD0300309/01)

收稿日期:2022-01-14;修回日期:2022-07-27;网络出版日期:2022-08-25

学院试验地 (111°40'E, 40°45'N, 海拔 1040m) 进行。该试验地土壤为褐壤土, 前茬作物为糜子, 属中温带大陆性季风气候, 年均气温约 7°C, 无霜期 113~134d。2018 年全年降水量 580mm, 其中 7 月份降雨频繁, 2019 年全年降水量 412mm, 2 年月平均气温均在 7 月份最高, 达 24°C。

1.2 试验设计

设 0 (N0, CK)、120 (N8)、180 (N12)、240 (N16)、300 (N20)、360kg N/hm² (N24) 6 个氮肥处理, 其中以不施氮肥 N0 作为对照 (CK), 每个处理 3 次重复, 播种密度为 75 000 株/hm², 小区面积 28m², 行距 0.6m, 区组间距 1m, 四周设置 1m 宽保护行。分别于 2018 年 5 月 4 日和 2019 年 4 月 23 日播种, 所有处理施入等量的磷肥 [138kg P/hm², (NH₄)₂HPO₄] 以及钾肥 (38.25kg K/hm², K₂O), 氮肥选用树脂包衣尿素 (含氮量约 45%), 所有肥料均作为基肥在播前施入, 后期不再追肥, 灌溉方式为滴灌。

1.3 测定指标及方法

分别在苗期、拔节期、大喇叭口期、抽雄期及收获期测定青贮玉米植株各器官 (茎、叶、苞叶、籽粒、穗轴) 全氮含量和干物质量, 收获期测定青贮产量。

1.3.1 器官干、鲜重 每个小区随机选取 3 株, 称其茎、叶、果穗、苞叶鲜重。然后将各器官置于 105°C 恒温箱中杀青 30min 后, 80°C 烘干至恒重, 称其干物质量。

1.3.2 产量 在青贮玉米籽粒乳线达到 1/2 时, 从地上部 20cm 处全株刈割。生物鲜重按小区称重, 折合成公顷产量; 生物产量测定是从各小区随机取 10 株玉米用烘箱 105°C 杀青 30min 后, 60°C 烘干至恒重, 折合成公顷产量。

1.3.3 氮素含量 用全自动凯氏定氮仪测定氮含量, 称取 0.25g 磨碎的植物器官样品于消煮管, 加入催化剂和浓硫酸混匀, 放入消煮炉, 设置时间、温度等参数, 消煮完成后冷却至室温; 打开水阀后将凯氏定氮仪接通电源, 仪器开机并自检, 放入空消化管预热; 在设置界面输入稀释液、碱液体积等参数并编号, 开始测样, 每个消煮管完成后, 手动换样; 测定结束后, 清洗仪器, 最后关掉电源和水阀。

1.4 指标计算

各器官氮素积累量 (g) = 各器官干物质量 × 各

器官含氮率 (1)

整株积累量 (g) = 各器官积累量之和 (2)

氮素积累速率 (g/d) = 氮素积累量 / 各生育阶段天数 (3)

营养器官氮素转运量 (g) = 营养器官抽雄期氮素积累量 - 营养器官成熟期氮素积累量 (4)

营养器官氮素转运率 (%) = 营养器官氮素转运量 / 营养器官抽雄期氮素积累量 × 100 (5)

花前氮素转运对籽粒氮素积累贡献率 (%) = 营养器官氮素转运量 / 成熟期籽粒氮素积累量 × 100 (6)

花后氮素同化量 (g) = 成熟期籽粒氮素积累总量 - 营养器官氮素转运量 (7)

氮素收获指数 (%) = 籽粒氮素积累总量 / 植株氮素积累总量 × 100 (8)

氮肥农学利用率 (%) = (施氮区产量 - 未施氮区产量) / 施氮量 × 100 (9)

氮肥偏生产力 (%) = 氮肥处理生物产量 / 施氮量 × 100 (10)

氮素吸收效率 (%) = 收获期氮素积累总量 / 施氮量 × 100 (11)

1.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理, 利用 IBM SPSS Statistics 25.0 进行方差分析, 利用 GraphPad Prism 8 进行绘图。

2 结果与分析

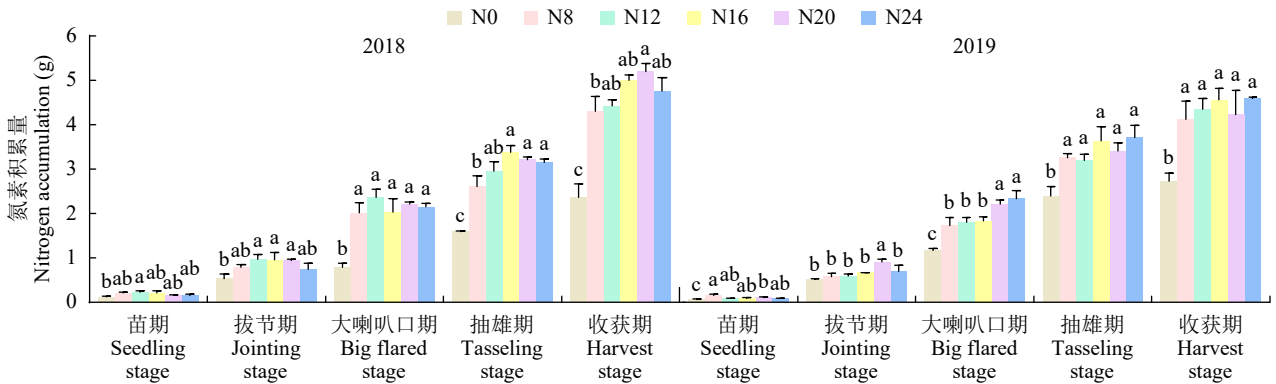
2.1 不同氮素水平对植株氮素积累量的影响

氮肥施入对玉米各生育期氮素积累具有显著影响 ($P < 0.05$) (表 1)。2018 年降雨量大, 有助于玉米干物质的形成, 因此, 2018 年玉米整株氮素积累量高于 2019 年, 而且随着生育期的延长, 各施氮处理整株氮素积累呈逐渐升高的趋势, 氮素积累量均在收获期时达到最大值, 且各施氮处理整株氮素积累量均显著高于 N0 处理, 2018 和 2019 年分别比 N0 处理高出了 87.13%~119.34% 和 51.38%~68.48%。收获期, 2018 年 N16 和 N20 处理氮素积累量较高, 分别为 5.00 和 5.20g, 2019 年 N16 和 N24 氮素积累量最高, 分别为 3.80 和 3.83g (图 1)。各处理苗期到拔节期植株氮素平均积累速率较低, 拔节期到抽雄期最高, 抽雄期后又变缓 (表 2)。

表 1 整株及各器官氮素积累量的方差分析
Table 1 Variance analysis of nitrogen accumulation in the whole plant and each organ

部位 Position	项目 Item	2018					2019				
		苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Big flared stage	抽雄期 Tasseling stage	收获期 Harvest stage	苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Big flared stage	抽雄期 Tasseling stage	收获期 Harvest stage
整株 Whole plant	F	4.04	4.55	21.07	36.59	35.58	10.81	8.16	21.41	9.73	9.15
	P	*	*	**	**	**	**	**	**	**	**
茎 Stem	F	2.40	7.70	15.67	9.91	20.40	6.02	16.69	17.52	64.25	2.52
	P	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**
叶 Leaf	F	4.88	3.40	17.41	14.24	55.51	12.30	3.06	13.41	5.84	13.27
	P	*	*	**	**	**	**	*	**	**	**
苞叶 Bract	F				22.23	8.42				9.84	1.72
	P				**	**				**	ns
果穗 Ear	F				9.91	20.41				2.18	7.08
	P				**	**				ns	**
籽粒 Grain	F					19.40					9.15
	P					**					**
穗轴 Cob	F					88.95					2.22
	P					**					ns

“*”代表 $P < 0.05$ ，差异显著；“**”代表 $P < 0.01$ ，差异极显著；“ns”代表 $P > 0.05$ ，差异不显著，下同
“*” represents $P < 0.05$, the difference is significant; “**” represents $P < 0.01$, the difference is extremely significant; “ns” represents $P > 0.05$, the difference is not significant, the same below



不同小写字母表示 0.05 水平差异显著，下同
The different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level, the same below

图 1 不同施氮水平下青贮玉米整株氮素积累量
Fig.1 Nitrogen accumulation of whole plant in silage maize under different nitrogen levels

施入氮肥对各生育期茎和收获期果穗的氮素积累产生了极显著影响 ($P < 0.01$) (2018 年苗期茎除外)，对各生育期叶和抽雄期苞叶的氮素积累产生了显著影响 ($P < 0.05$) (表 1)。

随着生育期的推进，氮素在植株茎和叶内的积累量均呈现先升高后降低的趋势 (图 2)。苗期 N8 等低氮处理有利于茎叶的氮素积累；拔节期茎叶在

N16~N20 处理下氮素积累量最高，它们分别比同年的 N0 处理高出 130%~175%和 60%~61%；大喇叭口期植株需氮量大，茎叶在 N20 和 N24 高氮处理下氮素积累量最高，但积累速率开始变缓，2018 年茎施氮处理的氮素积累量基本在该生育期达到最大值，而 2019 年茎则全部在抽雄期达到峰值；抽雄期茎在 N16 处理下明显高于其余处理，叶 2

表 2 植株各生育时期氮素平均积累速率
Table 2 The average accumulation rate of nitrogen in each growth period of the plant g/d

处理 Treatment	2018				2019			
	苗期—拔节期 Seedling- jointing stage	拔节期— 大喇叭口期 Jointing- big flared stage	大喇叭口期— 抽雄期 Big flared- tasseling stage	抽雄期— 收获期 Tasseling- harvest stage	苗期— 拔节期 Seedling- jointing stage	拔节期— 大喇叭口期 Jointing- big flared stage	大喇叭口期— 抽雄期 Big flared- tasseling stage	抽雄期— 收获期 Tasseling- harvest stage
N0	0.02	0.01	0.06	0.01	0.02	0.03	0.06	0.01
N8	0.03	0.07	0.04	0.03	0.02	0.06	0.08	0.01
N12	0.04	0.07	0.04	0.03	0.02	0.06	0.07	0.02
N16	0.04	0.06	0.10	0.03	0.02	0.06	0.09	0.01
N20	0.05	0.07	0.08	0.04	0.04	0.07	0.06	0.01
N24	0.03	0.07	0.08	0.03	0.03	0.09	0.07	0.01

年各施氮均处理明显高于未施氮处理，但各施氮处理间差异不显著；收获期茎叶在 N16~N24 处理的氮素积累量高于同生育期的 N8 和 N12 处理。整个生育期中茎 2 年的氮素积累量均在 N16 处理下最高，分别为 1.15 和 0.82g，叶 2 年的氮素积累量分别在 N16 和 N24 处理下最高，分别为 1.53 和 1.50g，且 2019 年叶在 N16 处理的氮素积累量也仅次于 N24 处理。

抽雄期苞叶氮素积累量明显高于收获期，抽雄期 N20~N24 处理高于其余各处理，2 年积累量最高，分别为 0.41 和 0.56g，表明较高的氮素水平

更有利于苞叶氮素的积累。
果穗收获期的氮素积累量远高于抽雄期，表明抽雄期到收获期，玉米果穗积累了大量氮素（图 2）。抽雄期 2 年氮素积累量最高的处理分别为 N20 和 N16，分别达到 0.36 和 0.56g；收获期各施氮处理均显著高于 N0 处理，其中 N16 和 N20 处理积累量最高，2 年各施氮处理的果穗氮素积累量分别比 N0 处理高出 86.47%~105.71%和 47.00%~61.73%。且收获期各施氮处理的籽粒氮素积累量均显著高于 N0 处理（表 3），其中 N12~N20 处理最利于籽粒氮素的积累，而穗轴的氮素积累随

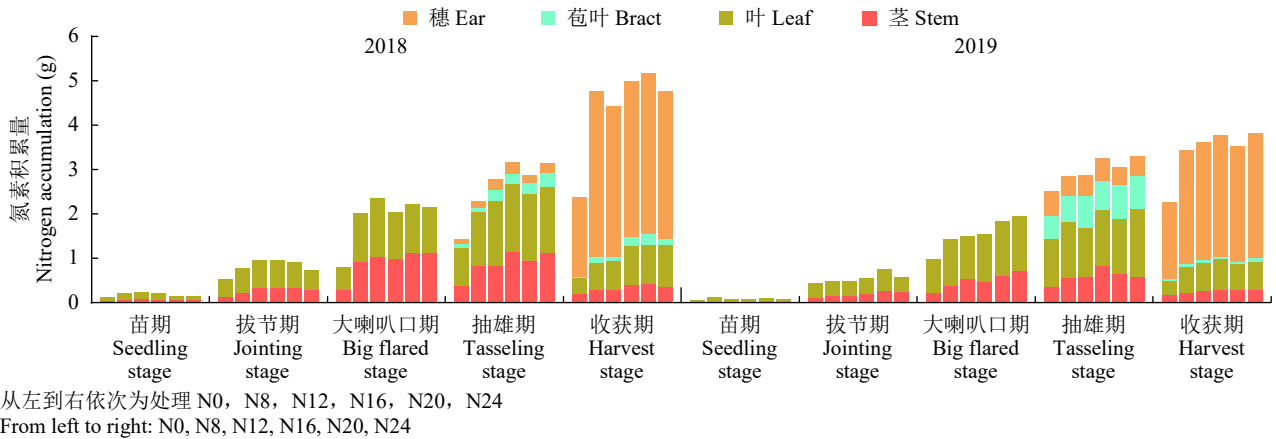


图 2 植株各器官在各生育期的氮素积累量
Fig.2 The accumulation of nitrogen in each organ of the plant at each growth stage

施氮量的增加 2 年间变化趋势不一致。
2.2 不同氮素水平对植株各器官氮素分配和转移的影响
收获期各器官的氮素分配比例整体表现为籽粒>叶>茎>穗轴>苞叶（表 3），表明器官中籽粒的氮素分配比例 2018 和 2019 年各处理的平均值分别为 70.85%和 71.49%，显著高于其他器官，

且施氮处理中 N8 和 N12 处理籽粒氮素比例较高，分别为 75.66%和 71.89%，后随着施氮量的增加，籽粒氮素分配比例逐渐降低，表明氮素水平过高，植株氮素会滞留在营养器官中，不利于向籽粒氮素的分配；叶和苞叶在 N16、N20 和 N24 处理中氮素分配比例高于其他处理；不同施氮水平对植株茎的氮素分配比例影响不显著。

表 3 不同氮素水平下氮素积累量在各器官中分配比例
Table 3 Distribution ratio of nitrogen accumulation in various organs under different nitrogen levels

年份 Year	处理 Treatment	植株氮素积累量 Plant nitrogen accumulation (g)	籽粒氮素积累量 Grain nitrogen accumulation (g)	收获期氮素在各器官的分配 Distribution ratio of nitrogen in various organs during harvest (%)				
				茎 Stem	叶 Leaf	苞叶 Bract	籽粒 Grain	穗轴 Cob
2018	N0	2.37c	1.72b	7.96a	15.53bc	1.47c	72.33ab	2.71b
	N8	4.31b	3.26a	6.72a	14.06c	1.63c	75.66a	1.94c
	N12	4.43b	3.30a	6.63a	14.77c	1.70c	74.56a	2.34b
	N16	5.01a	3.44a	7.79a	17.82ab	3.81a	68.66c	1.91c
	N20	5.12a	3.53a	8.09a	17.16bc	4.18a	68.04c	2.52b
	N24	4.54ab	3.15a	7.28a	19.77a	3.20ab	65.84c	3.71a
2019	N0	2.27b	1.65b	7.30a	13.72b	2.21a	72.57a	4.20a
	N8	3.44a	2.47a	6.52a	17.07a	1.92ab	71.07a	2.78b
	N12	3.63a	2.61a	7.34a	17.33a	1.33ab	71.89a	2.11c
	N16	3.80a	2.69a	7.66a	17.92a	1.54ab	70.53a	2.35bc
	N20	3.53a	2.53a	8.45a	16.26a	1.23b	71.55a	2.51bc
	N24	3.83a	2.73a	7.18a	17.13a	2.03ab	71.31a	2.35bc

不同小写字母表示 0.05 水平差异显著，下同
The different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level, the same below

植株营养器官转运量表现为叶>茎>苞叶（表 4），植株茎 2 年均均在 N16 处理时转运量最大，分
别比 N0 处理高出 297.02%和 177.36%，说明施入氮肥能显著增加茎的氮素转运量，且 N16 处理最有

表 4 不同氮素水平下营养器官的氮素转运状况
Table 4 Nitrogen transport status of vegetative organs under different nitrogen levels

指标 Index	年份 Year	器官 Organ	处理 Treatment					
			N0	N8	N12	N16	N20	N24
氮素转移量 Nitrogen transfer amount (g)	2018	茎	0.19c	0.54b	0.54b	0.76a	0.52b	0.76a
		叶	0.49bc	0.60ab	0.81a	0.64ab	0.62ab	0.56ab
		苞叶	0.14b	0.19ab	0.27a	0.17b	0.19ab	0.15b
		总量	0.82c	1.33b	1.62a	1.57ab	1.33b	1.47ab
	2019	茎	0.19c	0.32b	0.32b	0.53a	0.35b	0.31b
		叶	0.76ab	0.70abc	0.46c	0.58bc	0.65abc	0.85a
		苞叶	0.20d	0.36c	0.47ab	0.37bc	0.50a	0.49a
		总量	1.15c	1.38abc	1.25bc	1.48abc	1.50ab	1.65a
	2018	茎	50.61b	65.04a	64.75a	66.07a	55.34b	68.72a
		叶	57.11a	49.88ab	54.76ab	41.77abc	40.71bc	37.26cd
		苞叶	79.81a	72.79a	78.05a	47.43b	46.94b	49.62b
		整株	58.11ab	57.56ab	60.99a	51.56bc	46.57c	50.49c
氮素转运率 nitrogen transfer rate (%)	2019	茎	52.38a	58.99a	54.18a	64.66a	54.58a	53.41a
		叶	70.90a	54.32bc	41.96c	45.59bc	53.37bc	55.92b
		苞叶	80.04b	84.74ab	90.42a	86.48ab	91.90a	86.29ab
		整株	68.58a	61.20ab	56.54b	58.98b	62.26ab	61.89ab
	2018	茎	11.48cd	16.51b	16.33b	22.07a	14.81bc	24.52a
		叶	28.98a	18.49b	24.26ab	18.63b	17.47b	17.93b
		苞叶	8.20a	5.75ab	8.04a	4.90b	5.46ab	4.88b
		合计	48.66a	40.75a	48.63a	45.60a	37.74a	47.33a
	2019	茎	11.60b	13.45ab	12.18b	20.01a	14.69ab	11.44b
		叶	46.17a	28.58bc	17.89c	21.47bc	26.74bc	31.13b
		苞叶	12.31b	14.80ab	18.05a	13.84b	20.52a	17.78a
		合计	70.08a	56.83ab	48.12b	55.32ab	61.95ab	60.35ab
收获指数 Harvest index (%)	2018		72.52b	75.66a	74.56a	68.66c	68.04c	65.84c
	2019		72.57a	71.70a	71.89a	70.53a	71.55a	71.31a

利于茎氮素的转运；叶和苞叶 2018 年为 N12 处理转运量最大，2019 年分别在 N24 和 N20 处理下转运量最大，2018 年营养器官总氮素转运量为 N12>N16>N24，2019 年营养器官总氮素转运量为 N24>N20>N16，由于气候差异，2019 年对高氮处理的响应优于 2018 年，但在 N16 处理下 2 年均能达到较高的氮素转运量。结合表 3 可得，施入一定的氮肥并不一定能提高籽粒的氮素分配比例，但能显著提高植株的氮素积累量和营养器官的氮素转运量，从而能提高籽粒的氮素含量，提高产量。

氮素转运率反映了各营养器官的转运能力，茎的氮素转运率与转运量规律一致，2 年均为 N16 处理转运率最高，分别达到 66.07%和 64.66%，而 N20 和 N24 高氮处理则会降低茎的氮素转运效率；叶各施氮处理的氮素转运率普遍低于 N0 处理，所以施入氮肥会降低植株叶的氮素转运率；苞叶 2 年均 N12 处理时达到较高水平，转运率分别为 78.05%和 90.42%，总营养器官氮素转运率在各处理间差异不显著。

营养器官的氮素转运对籽粒的贡献主要体现在茎和叶中，N16 处理下茎的氮素转运对籽粒的贡献率最高；叶各施氮处理的贡献率均低于 N0 处理，但其明显高于苞叶的贡献率（表 4）。总营养器官转运对籽粒的贡献率各处理间差异不显著，且均以

N0 处理贡献率最高，这说明施入氮肥降低了营养器官转运量占籽粒氮素积累量的比例，也表明施入氮肥增加营养器官氮素转运量的同时，也增加了植株籽粒花后的氮素同化量。

2 年 N0 处理的收获指数都较高，各施氮处理随着施氮量的增加收获指数呈现先升高后降低的趋势，其中 N8 和 N12 处理的收获指数均高于同年的 N16、N20 和 N24 处理，2 年分别以 N8 和 N12 处理最高，分别为 75.66%和 71.89%，说明施氮量过高不利于提高植株的收获指数。

2.3 不同氮素水平对植株产量及氮素利用效率的影响

表 5 表明，氮肥施入对玉米植株产量和氮肥利用率产生了显著影响（ $P<0.05$ ），表明各施肥处理的生物产量显著高于 N0 处理，2 年分别在 N20 和 N16 处理下产量最高，达 31.50 和 27.09t/hm²，分别比 N0 处理高出了 56.16%和 30.03%。

2019 年不同施氮处理下的氮肥农学利用率低于 2018 年，但 2 年的变化趋势均为随着施氮量的增加而下降，其中 N12 和 N16 处理实现了较好的氮肥利用率，N16 处理 2018 年的氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥吸收效率分别为 43.65%、127.70%和 1.57%，2019 年分别为 24.08%、112.86%和 1.19%。

表 5 不同氮素水平下植株产量及氮素利用率
Table 5 Plant yield and nitrogen utilization efficiency under different nitrogen levels

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield (t/hm ²)	氮肥农学利用率 Nitrogen agronomic efficiency (%)	氮肥偏生产力 Nitrogen partial factor productivity (%)	氮肥吸收效率 Nitrogen absorption efficiency (%)
2018	N0	20.18b	—	—	—
	N8	31.46a	94.00a	262.13a	2.69a
	N12	28.18a	44.46b	156.54b	1.85b
	N16	30.65a	43.65b	127.70c	1.57c
	N20	31.51a	37.77b	105.02d	1.30d
	N24	29.96a	27.17b	83.22e	0.99e
	<i>F</i>	16.89	12.69	137.33	152.35
	<i>P</i>	**	**	**	**
2019	N0	21.31b	—	—	—
	N8	25.55a	35.32a	212.88a	2.15a
	N12	24.47ab	17.58a	135.95b	1.51b
	N16	27.09a	24.08a	112.86c	1.19c
	N20	25.71a	14.66a	85.69d	0.89d
	N24	24.69ab	9.39a	68.58d	0.80d
	<i>F</i>	2.35	1.69	65.61	43.12
	<i>P</i>	*	ns	**	**

3 讨论

3.1 青贮玉米植株氮素积累的时空变化特征

3.1.1 整株氮素积累变化规律 通过分析青贮玉米不同生育时期各器官的氮素积累发现,植物在不同的生育时期吸收氮素速率有所不同,在生长初期积累较慢,随着生育期的推进,植株氮素积累加快,营养器官的氮素积累量在大喇叭口期到抽雄期达到峰值,同时植株由营养生长向生殖生长转变,抽雄期后籽粒氮素迅速积累,而茎和叶等器官的氮素积累量则逐渐减小,氮素在植株体内发生转移。这一规律与前人^[15-17]研究一致,但是积累量的多少及快慢会受到施氮水平及其他因素的影响^[11-12,18],本研究中,不同氮素水平对植株的氮素积累量产生了显著影响,试验表明 2 年施氮处理的氮素积累量比 N0 处理分别高出 87.13%~119.34%, 51.38%~68.48%,吕广德等^[15]研究也表明,施入氮肥能显著提高玉米整株氮素积累量,罗上轲等^[19]研究认为,施氮量可显著影响玉米各生育期氮素积累量。本研究中, N16~N24 处理有利于玉米整株氮素积累,这一结论与臧贺藏等^[11]和王健等^[20]对先玉 335 氮素利用特性的研究结果一致。

3.1.2 各器官氮素积累变化规律 张经廷等^[17]研究表明,玉米茎鞘和叶片的氮素积累随施氮量的增加呈单峰曲线(240kg N/hm² 以下),本研究显示,茎和叶中氮素积累量会随施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势,与前人^[15]研究基本一致。同一植株器官在不同生育期的氮素积累量对氮素水平的响应也有差异,本研究中苗期 N8 等低氮处理利于各器官氮素积累,拔节期到大喇叭口期, N16 和 N20 处理利于茎叶的氮素积累, N24 等高氮处理则有利于苞叶氮素积累,抽雄期后 N12~N20 等处理则有利于籽粒的氮素积累,可见,多数植株器官在 N16 和 N20 处理下的氮素积累状况较好,且由于苞叶在整株中占比较小,因此综合各器官不同生育时期对氮素水平的响应表明, N16 和 N20 这 2 个处理最有利于植株氮素的积累。

3.2 不同氮素水平对青贮玉米氮素转运的影响

张经廷等^[17]研究表明,收获期氮素在各器官中的分配比例一致,受施氮水平影响不显著,其中籽粒氮素积累量最高,籽粒的氮素分配比例为 65%~70%,而本研究中可达 70%以上,差异可能由地域

和品种不同所致。前人^[21]认为,玉米各器官氮素转运量随施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势,本试验中 2018 年茎、叶、苞叶的氮素转运量与此趋势相同,但 2019 年叶和苞叶的氮素转运量为单增趋势。植株 2 年茎的氮素转运率均在 N16 处理最高,而苞叶的氮素转运率在 N0 处理最高,这表明施入氮肥会增加营养器官的氮素转运量,但会不同程度地降低各器官的氮素转运率。总的营养器官转运量和转运率在 2018 年呈单峰曲线,而 2019 年总转运量呈现单增趋势,这一年间差异可能由于 2018 年植株生长后期出现多雨天气,土壤发生淋溶,养分减少,使得 2019 年植株在高氮处理下氮素积累及转运状况更佳。

植株从营养生长向生殖生长转变时,氮素主要由茎和叶转运至籽粒^[17],在 N16 处理时 2 年茎的籽粒贡献率分别达 22.07%和 20.01%,叶在各施氮处理下的籽粒贡献率 2 年分别为 17.47%~28.98%和 17.89%~46.17%,张峰等^[22]研究认为,茎叶对籽粒的贡献率表现为随着施氮量的增加呈下降趋势,本研究中规律不明显。总的营养器官氮素转运对籽粒的贡献率在各处理间差异不显著,其中以 N0 处理最高,由于籽粒的氮素积累包括自身积累和营养器官转运两部分,因此结合施氮处理籽粒氮素积累量远高于未施氮处理的籽粒氮素积累量可知,施入氮肥还能明显促进籽粒自身的氮素积累。另外植株在 N12 处理的收获指数较高,随着施氮量的增加,收获指数呈下降趋势,说明高氮抑制了营养器官向生殖器官氮素的转运,从而降低了植株的收获指数,这与刘佳敏等^[13]和何萍等^[23]研究结果一致。

3.3 不同氮素水平对青贮玉米产量和氮素利用率的影响

氮素是玉米作物需求最大的元素之一,氮肥的施入有效地增加了土壤的营养成分,进而增强植株对土壤氮素的吸收和利用,大量研究^[24-28]表明,施入适量氮肥能显著提高植株产量,本试验中 2 年分别在 N20 和 N16 处理产量最高,分别为 31.50t/hm²和 27.09t/hm²;不管是施氮量还是产量均比甘肃兰州^[24]和河北^[25]等地区高,因此说明该地青贮玉米的种植适合较高的施氮量。另外,不同施氮水平对氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥吸收效率均产生了显著影响^[29],本试验中它们均随着施氮量的增加呈下降趋势,这与王怡针^[30]的研究结果一致。可

见过量地施入氮肥会制约植株对营养成分的吸收, 这不利于植株的生长发育, 另一方面, 从经济角度来看, 过量施入氮肥增加了成本, 甚至引发生态环境问题, 因此, 在实际生产中应综合经济效益、生态效益和社会效益合理施用氮肥, 高效利用氮肥。

4 结论

不同施氮水平会对植株的氮素积累量产生显著影响, 植株在不同生育时期对氮素的需求有所差异。综合玉米整株及各器官不同生育时期对于氮素水平的响应表明, N16 和 N20 处理最利于植株氮素积累。收获期籽粒在各器官中的氮素分配比例最高, 达 70% 以上, 施入氮肥会增加营养器官的氮素转运量, 但会不同程度降低各器官的氮素转运率, 对叶的影响最为显著。氮素转运对籽粒贡献主要体现在茎和叶中, 同时施入氮肥可明显促进籽粒自身的氮素积累, 但 N24 等高氮处理会抑制营养器官向生殖器官的氮素转运, 从而降低植株的收获指数。且施入适量氮肥能显著提高植株产量, 2018 和 2019 年分别在 N20 和 N16 处理时收获最高产量, 但氮肥利用率会随着施氮量的增加而下降, N12 和 N16 处理实现了较好的氮肥利用率。

综合比较各施氮处理不同生育期的氮素积累及转运情况, 同时考虑实际生产中获得较高产量及适当提高肥料利用率的需求, 得出 N16 处理 (240 kg N/hm²) 为内蒙古呼和浩特地区较适宜的施氮水平。

参考文献

- [1] 唐贵, 隋冬华, 武新娟, 等. 我国青贮玉米饲用化研究进展. 黑龙江畜牧兽医, 2021(9): 26-28, 33.
- [2] 张琴萍, 邢宝, 周帮伟, 等. 藜麦饲用研究进展与应用前景分析. 中国草地学报, 2020, 42(2): 162-168.
- [3] 张效梅, 乔治军, 李峰. 我国青贮玉米的研究现状及市场前景. 科技情报开发与经济, 2004(6): 76-78.
- [4] 张林, 周羽, 袁兆慧, 等. 我国青贮玉米生产现状及对策. 河南农业, 2020(35): 58-59.
- [5] Bell J F, Offer N W, Roberts D J. The effect on dairy cow performance of adding molasses sugar beet feed to immature forage maize at ensiling or prior to feeding. *Animal Feed Science and Technology*, 2007, 137(1/2): 84-92.
- [6] Celebi S Z, Demir S, Celebi R, et al. The effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) applications on the silage maize (*Zea mays* L.) yield in different irrigation regimes. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(5): 302-305.
- [7] Schröder J J, Neeteson J J, Withagen C M, et al. Effects of N application on agronomic and environmental parameters in silage maize production on sandy soils. *Field Crops Research*, 1998, 58(1): 55-67.
- [8] Abdelhadi L O, Santini F J. Corn silage versus grain sorghum silage as a supplement to growing steers grazing high quality pastures: Effects on performance and ruminal fermentation. *Animal Feed Science and Technology*, 2006, 127(1): 33-43.
- [9] Santos G T D, Modesto E C, Souza E D, et al. Replacement of corn silage with cassava foliage silage in the diet of lactating dairy cows: Milk composition and economic evaluation. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2009, 52: 259-267.
- [10] 倪印锋, 王明利. 中国青贮玉米产业发展时空演变及动因. 草业科学, 2019, 36(7): 1915-1924.
- [11] 臧贺藏, 王言景, 张杰, 等. 不同密氮模式下高产玉米品种籽粒产量与氮素利用特性研究. 华北农学报, 2017, 32(3): 196-200.
- [12] 米娜瓦尔·艾买提, 石强, 张晓宏, 等. 施氮量对复播青贮玉米产量、氮吸收利用及土壤硝态氮含量的影响. 新疆农业大学学报, 2018, 41(5): 352-357.
- [13] 刘佳敏, 汪洋, 褚旭, 等. 种植密度和施氮量对小麦—玉米轮作体系下周年产量及氮肥利用率的影响. 作物杂志, 2021(1): 143-149.
- [14] 于飞, 施卫明. 近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析. 土壤学报, 2015, 52(6): 1311-1324.
- [15] 吕广德, 米勇, 陈永军, 等. 氮肥运筹对玉米干物质及氮素积累转运和产量的影响. 玉米科学, 2021, 29(1): 128-137.
- [16] 曾子豪, 袁静超, 张水梅, 等. 氮肥一次性基施与分次施用对春玉米氮素利用的差异. 玉米科学, 2021, 29(5): 151-157, 165.
- [17] 张经廷, 刘云鹏, 李旭辉, 等. 夏玉米各器官氮素积累与分配动态及其对氮肥的响应. 作物学报, 2013, 39(3): 506-514.
- [18] 董越. 水氮互作对青贮玉米产量和水氮利用效率的影响研究. 保定: 河北农业大学, 2021.
- [19] 罗上轲, 刘婕, 叶开梅, 等. 覆膜方式与施氮量对春玉米产量、干物质和氮素积累与转运的影响. 玉米科学, 2020, 28(4): 146-154, 164.
- [20] 王健, 韩金玲, 杨敏, 等. 不同氮高效玉米品种对氮素的吸收转运和代谢研究. 核农学报, 2020, 34(12): 2800-2812.
- [21] 王泽林, 白炬, 李阳, 等. 氮肥施用和地膜覆盖对旱作春玉米氮素吸收及分配的影响. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 74-84.
- [22] 张峰, 高聚林, 王志刚, 等. 不同施氮量下高产春玉米氮素吸收、积累及利用效率的研究. 内蒙古农业科技, 2013(4): 47-49.
- [23] 何萍, 金继运, 林葆. 氮肥用量对春玉米叶片衰老的影响及其机理研究. 中国农业科学, 1998, 31(3): 66-71.
- [24] 受娜, 高玮, 沈禹颖, 等. 不同施氮量对青贮玉米产量及水分利用效率的影响. 草业科学, 2021, 38(7): 1351-1361.
- [25] 王宁, 刘玉春, 姜长松, 等. 不同灌水方式和施氮量对青贮玉米产量和水氮利用效率的影响. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(4): 20-24.
- [26] 徐韶, 桑立君. 不同的耕作方式和施氮量对辽东北地区玉米产量的影响研究. 农业技术与装备, 2020(6): 11-12.
- [27] 田晓婷. 阜新地区不同施氮量对玉米产量的影响研究. 现代农业, 2019(4): 29.
- [28] 刘志恒, 徐开未, 王科, 等. 不同施氮量对玉米产量及各器官养分积累的影响. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2018, 44(5): 573-579.
- [29] 张林, 武文明, 陈欢, 等. 氮肥运筹方式对土壤无机氮变化、玉米产量和氮素吸收利用的影响. 中国土壤与肥料, 2021, 294(4): 126-134.
- [30] 王怡针. 绿肥油菜还田时期和施氮量对玉米生长及氮肥利用的影响. 天津: 天津农学院, 2021.

Effects of Different Nitrogen Levels on Nitrogen Accumulation and Transport in Silage Maize

Wang Liping^{1,2}, Bai Lanfang^{1,2}, Wang Tianhao^{1,2}, Wang Xiaoxuan^{1,2}, Bai Yunhe^{1,2}, Wang Yufen^{1,2}

(¹College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, Inner Mongolia, China; ²Key Laboratory of Herbage and Endemic Crop Biotechnology, Ministry of Education, Hohhot 010070, Inner Mongolia, China)

Abstract To clarify the rules of nitrogen accumulation and translocation of silage maize under different nitrogen levels, and to determine the optimal nitrogen application level for silage maize in central Inner Mongolia, Xianyu 335 was taken as an example and six nitrogen levels, 0 (N0), 120 (N8), 180 (N12), 240 (N16), 300 (N20), 360kg N/ha (N24), were set. We analyzed the nitrogen accumulation and transport characteristics of each treatment at different growth stages, as well as the whole plant yield and nitrogen fertilizer utilization efficiency under different nitrogen application conditions. The results showed that the accumulation of nitrogen in plant vegetative organs reached the peak from big flared stage to tasseling stage, and nitrogen was gradually transferred from vegetative organs to reproductive organs after tasseling stage. Different nitrogen levels had significant effects on plant nitrogen accumulation. Nitrogen accumulation under nitrogen application conditions were 87.13%-119.34% and 51.38%-68.48% in 2018 and 2019, respectively, higher than that without nitrogen application treatment. Nitrogen fertilizer increased the nitrogen transport capacity of vegetative organs, however, the nitrogen transport rate of each organ was reduced to some extent. In addition, nitrogen transport contributed to grains mainly from stems and leaves, and nitrogen application significantly promoted the accumulation of nitrogen in grains after anthesis. Nitrogen application could significantly improve the yield of silage maize, and in 2018 and 2019, the N20 and N16 treatments had the highest yields of 31.51t/ha and 27.09t/ha, respectively. The nitrogen use efficiency of all treatments showed a decreasing trend with the increase of nitrogen application rate. Comprehensive analysis showed that N16 treatment (240kg N/ha) was a suitable nitrogen application level in Hohhot, Inner Mongolia.

Key words Silage maize; Xianyu 335; Nitrogen accumulation and transport; Yield; Nitrogen fertilizer utilization efficiency