

全膜双垄沟覆盖条件下不同施氮量对春玉米 氮素吸收利用及分配的影响

陈迎迎¹, 沈玉芳¹, 白翔斌¹, 岳善超¹, 李世清^{1,2*}

(1 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨陵 712100; 2 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西杨陵 712100)

摘要:通过田间试验研究了黄土旱塬旱作全膜双垄沟覆盖栽培条件下, 不同施氮量(0、100、200、250、300 及 400 kg/hm²)对春玉米氮素吸收、利用及分配的影响, 为提高春玉米氮素利用效率及合理施氮提供理论依据。结果表明: (1) 春玉米植株及籽粒含氮量、氮素累积量随施氮量增加而提高, 但当施氮量超过 250 kg/hm² 后增加效果不显著。 (2) 春玉米植株含氮量随生育期推进而降低, 但氮素累积量则随生育期推进而增加。 (3) 玉米叶片及茎+叶鞘氮素转移量及对籽粒氮素贡献量高于其他器官。 (4) 春玉米籽粒产量随施氮量增加先增加后降低, 并在施氮量为 250 kg/hm² 时产量最大(11 932 kg/hm²), 此时氮素收获指数最大(69.12%)并显著高于其余处理, 氮肥农学效率也显著高于施氮量为 300、400 kg/hm² 的处理。因此, 从春玉米产量、氮素利用角度考虑, 该试验条件下的合理施氮量为 250 kg/hm²。

关键词:黄土旱塬; 旱作春玉米; 全膜双垄沟覆盖; 施氮量; 氮素吸收利用及分配

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effect of Different Nitrogen Rates on Nitrogen Absorption and Allocation of Spring Maize in Double Ridges Mulched with Plastic Film

CHEN Yingying¹, SHEN Yufang¹, BAI Xiangbin¹, YUE Shanchao¹, LI Shiqing^{1,2*}

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A field experiment was carried out on dryland of loess plateau to study the effect of different nitrogen rates on nitrogen absorption and allocation of spring maize in double ridges mulched with plastic film. Six nitrogen rates are 0, 100, 200, 250, 300 and 400 kg/hm². The experimental results showed that: (1) The content of nitrogen and the nitrogen accumulation and kernel increased with the improvement of levels on nitrogen application, while the effect is not significant when nitrogen application exceed 250 kg/hm². (2) With the growing stage increasing, the nitrogen content of spring maize decreased while the nitrogen uptake of spring maize increased. (3) The nitrogen translocation amount and the transferred nitrogen contribution ratio of leaf and stem+sheath are higher than that of other organs. (4) With the increase of nitrogen application, the kernel yield increased firstly and then decreased. The kernel yield is the maximum when nitrogen rate is 250 kg/hm² and the kernel yield is 11 932 kg/hm². In addition, the nitrogen harvest index, nitrogen

收稿日期: 2013-06-18; 修改稿收到日期: 2013-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(31270533, 51279197); 陕西省自然科学基金项目(2012JM3010); 甘肃省农业科学院农业科技创新专项(2012GAAS15-22-4)

作者简介: 陈迎迎(1990—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事旱地作物高产高效栽培研究。E-mail: cyfxx163@.com

* 通信作者: 李世清, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤-植物氮素营养方面的研究。E-mail: sqli@ms.iswc.ac.cn

agronomic efficiency of the nitrogen level of 250 kg/hm² are higher than that of the nitrogen level of 300 and 400 kg/hm². From the consideration of spring maize yield, nitrogen utilization point of view, 250 kg/hm² is a reasonable nitrogen rate.

Key words: dryland of loess plateau; dry-land spring maize; double ridges mulched with plastic film; nitrogen rate; nitrogen absorption and allocation

氮素是作物生长发育必需的大量元素,适当增加氮肥用量,可以显著提高作物的产量^[1]。氮肥的施用量^[2]、施用时期、施用方式、不同生育期氮肥分配量^[3]及氮肥形态^[4]均显著影响作物产量及氮肥利用效率;但同时氮素利用状况也因地域情况^[5]、土壤类型^[6]及作物品种^[7]不同而异。

春玉米是中国黄土高原区重要粮食作物之一,播种面积达 190 万 hm²,占粮食作物面积的 17.9%,总产 91.4 亿 kg,占粮食总产的 30.8% 左右。在黄土旱塬旱作农业区,早春低温及干旱是限制春玉米生长发育及获得高产的主要因素。近年来,由于地膜覆盖在提高土壤温度^[8-9],减少水分地表蒸发损失等方面的突出作用,被广泛应用于黄土高原旱作玉米栽培中,不仅使过去无法栽培玉米的地区玉米播种面积大幅度增加,而且也使玉米产量显著增加^[10-12]。

过去针对地膜覆盖方式对土壤环境、作物产量、生长发育及作物对资源利用影响等方面开展了大量研究^[13-16],研究表明,全膜双垄沟覆盖显著增加了玉米的干物质积累量及产量,提高了玉米的水分利用效率,此外垄上覆膜显著促进了雨水向土壤水和作物水的转化^[17]。然而关于全膜双垄沟覆盖条件下不同施氮量对春玉米氮素吸收利用及分配的研究鲜见报道。本研究以紧凑型春玉米‘先玉 335’为供试材料,通过田间实验探讨黄土旱塬地区全膜双垄沟覆盖条件下施氮量对春玉米氮素吸收分配的影响,为提高春玉米氮素利用效率及合理施氮提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

田间试验在西北农林科技大学长武农业生态试验站进行,试验站位于黄土高原中南部陕甘交界处陕西省咸阳市长武县洪家镇王东村。北纬 35°12′,东经 107°40′,海拔 1 200 m,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水 584 mm,年均气温 9.1℃,无霜期 171 d,地下水埋深 50~80 m,属典型旱作农业区。地貌属高原沟壑区,塬面和沟壑两大地貌单元各占 35% 和 65%。地带性土壤为黑垆土,系统分

类名称为筒育干润半腐土。土体结构均匀疏松,是黄土高原沟壑区典型代表性土壤。试验地 0~20 cm 土层土壤有机质含量为 15.5 g/kg,土壤全氮含量 15.9 mg/kg,矿质氮含量 22.4 mg/kg,有效磷含量 15.9 mg/kg,速效钾含量 136.7 mg/kg, pH 为 8.4。玉米生育期降水 358.2 mm,土壤积温(GDD >10℃)为 1 502.4℃。

1.2 试验设计

本试验施氮量设 6 个水平,分别为 0、100、200、250、300 和 400 kg/hm²,处理代号依次为 N₀、N₁₀₀、N₂₀₀、N₂₅₀、N₃₀₀ 及 N₄₀₀。所有处理重复 4 次,即 24 个小区,小区面积为 56 m²,采用完全随机区组试验方案。供试玉米品种为‘先玉 335’,种植密度 85 000 株/hm²,采用宽窄行播种方式,宽行 60 cm,窄行 40 cm。全膜双垄沟周年覆盖。若休闲期降雨过少,在播种时适当补充水分,保证玉米的正常出苗。

氮肥分 3 次施入,基肥和种肥一次施入,拔节期和抽雄期分别追肥,3 次的比例为 4:3:3,氮源为含氮量 46% 的尿素。磷肥和钾肥做基肥和种肥,一次性施入。磷肥为含 P₂O₅ 12% 过磷酸钙,每公顷施 P 40 kg;钾肥为含 K₂O 45% 硫酸钾,每公顷施 K 80 kg。

于 2009 年 4 月春玉米播种开始,已开展定位试验 4 年。本研究采用 2012 年度测定结果。2012 年 4 月 22 日播种,2012 年于 9 月 5 日收获记产。期间进行定苗、除草及追肥等田间管理,农田水分来源为天然降水。分别在玉米六叶期(V₆)、十叶期(V₁₀)、吐丝期(R₁)、乳熟期(R₃)、蜡熟期(R₅)及完熟期(R₆)等 6 个时期采集植物样品。每个小区选取具有代表性的连续 3 株植株,从根部砍断,运回室内。六叶期和十叶期时,将植株按器官分为叶和茎两部分,叶鞘按茎秆处理;在吐丝期时,将植株按器官分为叶、茎及穗,叶鞘按茎秆处理;在乳熟期、蜡熟期及完熟期时,将植株按器官分为叶、茎、苞叶、穗轴及籽粒 5 部分,叶鞘按茎秆处理。各部分分别称取鲜重,然后选取部分样品在 105℃ 下杀青,在 80℃ 下烘至恒重,称干重后,用粉碎机粉碎植物样品,测植株全

氮含量。植株样品用浓硫酸-过氧化氢完全消煮后,用全自动凯氏定氮仪测定全氮。收获记产时,每个小区选取具有代表性的 10 m² 收获玉米穗称重,再从中选取具有代表性的 10 穗玉米称重,将这 10 穗玉米带回实验室脱粒烘干,称取籽粒重量及穗轴重量,确定含水量后,再计算籽粒产量。

1.3 数据处理^[5,16-18]

实验数据利用 Excel 进行整理,通过 SAS 软件进行统计分析。按照如下公式计算相关指标:

氮素累积量(kg/hm²) = 氮素含量 × 干物质质量

氮素转移量(kg/hm²) = 营养器官氮素最大累积量 - 成熟时期氮素累积量

氮素转移率(%) = (氮素转移量/氮素最大累积量) × 100%

转移氮素对籽粒的贡献率 = (氮素转移量/成熟时期籽粒氮素累积量) × 100%

氮素利用效率(kg/kg N) = 籽粒(或干物质)产量/地上部分吸氮量

氮肥农学效率(kg/kg N) = (施氮处理产量 - 不施氮处理产量)/施氮量

2 结果与分析

2.1 不同施氮量对春玉米含氮量的影响

2.1.1 植株含氮量 从表 1 可见,各处理春玉米植株含氮量在整个生育期均呈现出从高到低的发展趋势。其中,各处理春玉米植株含氮量均在 V₆ 期时最高(3.99%~3.33%);然后在 V₆ 期至 R₁ 期期间迅速降低,R₁ 期含氮量为 0.54%~1.61%;R₁ 期至 R₆

期继续降低,但下降幅度不大,R₆ 期的含氮量为 0.68%~1.16%。同时,在春玉米整个生育期期间,春玉米植株含氮量随施氮量增加而增加,并随生育期推进,不同施氮水平间差异更加明显。其中,N₁₀₀ 处理植株含氮量在 V₆ 和 V₁₀ 期与 N₀ 处理差异不显著,而进入 R₁ 期后差异达极显著水平;N₁₀₀ 植株含氮量在 V₆ 和 R₃ 期与 N₂₀₀ 处理差异不显著,而在其他生育期均显著低于 N₂₀₀ 处理,这可能是因为在生长初期春玉米氮素需要量小于土壤供氮量,同时 R₁ 期追施氮肥后土壤供氮速率超过了植株的稀释作用;施氮量大于 200 kg/hm² 处理间植株含氮量差异不显著,且除 V₁₀、R₁、R₃、R₆ 时期的 N₄₀₀ 处理外,它们也与 N₂₀₀ 处理间无显著差异。

2.1.2 器官含氮量 随着生育期推进,春玉米叶、茎+叶鞘及籽粒的含氮量降低,而苞叶和穗轴含氮量先降低后增加(表 2)。其中,叶片和茎+叶鞘的含氮量在 V₆ 期时分别为 3.44%~4.07% 和 3.10%~3.83%,至 R₁ 期迅速下降;在 R₁~R₅ 期,两者下降平缓;叶片含氮量在 R₃~R₆ 期下降程度增加,而茎+叶鞘依旧平缓下降;至 R₆ 期时,叶和茎+叶鞘含氮量分别为 0.80%~1.61% 和 0.23%~0.56%。籽粒、苞叶及穗轴含氮量在 R₃ 期时分别为 1.61%~1.67%、0.64%~0.85% 和 1.00%~1.49%;至 R₅ 期迅速下降,苞叶和穗轴含氮量下降到最低,分别为 0.42%~0.47% 和 0.57%~0.70%;至 R₆ 期时,苞叶和穗轴含氮量有所增加,分别为 0.36%~0.55% 和 0.64%~0.72%,而籽粒含氮量变化不大(0.98%~1.44%)。各处理玉米各器官的含氮量在各生育期均表现为叶片>茎+叶鞘,籽粒>穗轴>苞叶。

表 1 不同施氮量下春玉米植株含氮量随生育期的变化

Table 1 The nitrogen content of spring maize plant under different nitrogen application rates with growth period

生育期 Growth period	植株含氮量 The nitrogen content/%					
	N ₀	N ₁₀₀	N ₂₀₀	N ₂₅₀	N ₃₀₀	N ₄₀₀
V ₆	3.33 cB	3.57 bcAB	3.79 abA	3.84 abA	3.94 aA	3.99 aA
V ₁₀	1.32 cB	1.55 cB	2.16 bA	2.28 abA	2.37 abA	2.54 aA
R ₁	0.54 dD	1.01 cC	1.35 bB	1.48 abAB	1.46 abAB	1.61 aA
R ₃	0.68 dC	1.02 cB	1.08 bcAB	1.13 abcAB	1.22 abAB	1.25 aA
R ₅	0.68 cC	0.94 bB	1.09 aA	1.10 aA	1.15 aA	1.13 aA
R ₆	0.68 eD	0.83 dC	1.08 bcAB	1.06 cB	1.12 abAB	1.16 aA

注: N₀、N₁₀₀、N₂₀₀、N₂₅₀、N₃₀₀ 及 N₄₀₀ 分别表示施氮量为 0、100、200、250、300 和 400 kg/hm², 而 V₆、V₁₀、R₁、R₃、R₅ 及 R₆ 分别代表六叶期、十叶期、吐丝期、乳熟期、蜡熟期及完熟期;同行不同小写和大写字母分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平;下同。

Note: N₀, N₁₀₀, N₂₀₀, N₂₅₀, N₃₀₀ and N₄₀₀ stand for the treatments with 0, 100, 200, 250, 300 and 400 kg/hm², while the V₆, V₁₀, R₁, R₃, R₅ and R₆ indicate the growth period six-leaf stage, ten-leaf stage, silking stage, milky stage, dough stage and maturity stage, respectively; Different lowercase and uppercase letters within a row mean significant difference among treatments at the 5% and 1% level, respectively; The same as below.

表 2 不同施氮量下春玉米各器官含氮量随生育期的变化

Table 2 The nitrogen content of different organs of spring maize under different nitrogen application rates with growth period

器官 Organ	生育期 Growth period	器官含氮量 The nitrogen content of organs/%					
		N ₀	N ₁₀₀	N ₂₀₀	N ₂₅₀	N ₃₀₀	N ₄₀₀
叶 Leaf	V ₆	3.44 cB	3.72 bAB	3.89 abA	3.94 abA	4.01 aA	4.07 aA
	V ₁₀	1.66 dD	2.16 cC	2.81 bB	2.95 abAB	3.17 aA	3.19 aA
	R ₁	0.87 dC	1.95 cB	2.52 bA	2.72 abA	2.60 abA	2.81 aA
	R ₃	1.28 bB	2.18 aA	2.32 aA	2.19 aA	2.58 aA	2.69 aA
	R ₅	1.05 cC	1.63 bB	2.02 aA	1.96 aA	2.03 aA	2.01 aA
	R ₆	0.80 cC	0.90 cC	1.43 bAB	1.32 bB	1.32 bB	1.61 aA
茎+叶鞘 Stem+sheath	V ₆	3.10 cB	3.28 bcAB	3.56 abAB	3.66 abAB	3.80 aA	3.83 aA
	V ₁₀	0.82 cB	0.86 cB	1.35 bA	1.43 bA	1.46 abA	1.77 aA
	R ₁	0.28 eD	0.44 dC	0.59 cBC	0.65 bcAB	0.72 abAB	0.80 aA
	R ₃	0.24 cC	0.40 bB	0.42 bB	0.54 aAB	0.54 aAB	0.59 aA
	R ₅	0.17 dC	0.28 cBC	0.39 bcAB	0.35 bcB	0.42 abAB	0.51 aA
	R ₆	0.23 cB	0.25 cB	0.40 bAB	0.39 bAB	0.53 aA	0.56 aA
苞叶 Bract	R ₃	0.66 bA	0.64 bA	0.69 bA	0.72 abA	0.85 aA	0.78 abA
	R ₅	0.43 aA	0.44 aA	0.42 aA	0.47 aA	0.45 aA	0.45 aA
	R ₆	0.45 bAB	0.36 cB	0.50 abA	0.46 abAB	0.55 aA	0.51 abA
穗 Spike	R ₁	1.47 cC	1.93 bB	2.39 aA	2.63 aA	2.37 aA	2.39 aA
穗轴 Cob	R ₃	1.49 aA	1.15 abA	1.27 abA	1.09 bA	1.00 bA	1.19 abA
	R ₅	0.67 aA	0.57 aA	0.70 aA	0.70 aA	0.59 aA	0.60 aA
	R ₆	0.71 aA	0.64 aA	0.72 aA	0.72 aA	0.66 aA	0.69 aA
籽粒 Kernel	R ₃	1.66 aA	1.61 aA	1.65 aA	1.67 aA	1.66 aA	1.67 aA
	R ₅	1.04 cC	1.19 bBC	1.31 abAB	1.34 aAB	1.42 aA	1.39 aAB
	R ₆	0.98 cC	1.17 bB	1.40 aA	1.37 aA	1.43 aA	1.44 aA

施氮处理间比较而言,叶、茎+叶鞘及籽粒含氮量随施氮量增加而提高。在春玉米整个生育期内,各个器官含氮量在 N₄₀₀ 处理均维持在较高水平; N₂₀₀ 处理叶和茎+叶鞘的含氮量在生长前期较低,其叶、茎+叶鞘及籽粒的含氮量在生长后期与 N₂₅₀、N₃₀₀ 及 N₄₀₀ 处理差异不显著; N₂₅₀ 与 N₃₀₀ 各器官含氮量在春玉米各生育期内均差异不显著,在 R₆ 期时叶片含氮量显著低于 N₄₀₀。以上结果说明 250 kg/hm² 施氮量能够较好维持春玉米整个生育期各器官含氮量。

2.2 不同施氮量对春玉米氮素吸收量的影响

2.2.1 植株吸收量 在整个生育期内,各个处理春玉米植株氮素吸收量在 R₅ 期之前基本表现为上升趋势; R₅~R₆ 期变化因施氮量不同而异,当施氮量低于 100 kg/hm² 时下降,而高于 100 kg/hm² 时几乎持平(表 3)。各处理的最大氮素吸收量为 78.58~257.77 kg/hm², 差异极为明显。施氮量处理间比较而言,随着施氮量增加,春玉米植株氮素吸收量随之增加。其中, V₁₀ 至 R₆ 阶段, N₃₀₀ 和 N₄₀₀ 处理氮

素吸收量最大值分别为 262.63 和 257.77 kg/hm², 显著高于 N₀ 和 N₁₀₀ 处理的氮素吸收量,而与 N₂₅₀ 处理的氮素吸收量差异不显著。同时, N₂₅₀ 处理的最大氮素吸收量与 N₂₀₀ 处理的最大氮素吸收量差异也不显著,分别为 237.29 和 229.41 kg/hm²。以上结果说明 250 kg/hm² 施氮量为春玉米施氮拐点,当施氮量高于它会造成氮肥浪费,而低于它则施氮量不足。

2.2.2 器官氮素累积与分配 在整个生育期内,各处理春玉米累积的氮素在各器官中的分配受各时期生长中心的影响(表 4)。在 R₁ 期前,春玉米生长中心以营养器官为主,叶片、茎+叶鞘的氮素累积量随生育期不断增长;此后,春玉米转入生殖生长期,籽粒成为生长中心,籽粒的氮素累积量随生育期不断增加,其他器官的氮素累积量则开始下降。

在 R₆ 期时, N₂₅₀ 处理的各器官氮素累积量与 N₂₀₀ 和 N₃₀₀ 处理差异不显著,而 N₂₀₀ 处理籽粒氮素累积量显著低于 N₃₀₀ 处理。这说明施氮量 250 kg/hm² 处理在春玉米生长后期能够很好地维持各

表 3 不同施氮量下春玉米植株氮素吸收量随生育期的变化

Table 3 The nitrogen uptake of spring maize plant under different nitrogen application rates with growth stage

生育期 Growth stage	植株氮素吸收量 Nitrogen uptake of plant/(kg/hm ²)					
	N ₀	N ₁₀₀	N ₂₀₀	N ₂₅₀	N ₃₀₀	N ₄₀₀
V ₆	12.79 bcAB	11.13 cB	16.35 abA	16.15 abA	17.17 aA	17.80 aA
V ₁₀	37.73 cC	46.81 cC	91.24 bB	103.45 abAB	114.15 aAB	119.14 aA
R ₁	35.96 dC	81.29 cB	133.85 bA	157.65 abA	161.71 abA	172.90 aA
R ₃	55.94 cB	95.94 cB	164.75 bA	182.24 abA	207.62 abA	211.89 aA
R ₅	78.58 dC	141.79 cB	228.33 bA	237.29 abA	262.63 aA	247.97 abA
R ₆	67.82 eD	123.99 dC	229.41 cB	235.65 bcAB	250.62 abAB	257.77 aA

表 4 不同施氮量下春玉米各器官氮素吸收累积量随生育期的变化

Table 4 The nitrogen content of different organs of spring maize under different nitrogen application rates with growth period

器官 Organ	生育期 Growth period	器官氮素吸收累积量 The nitrogen content of different organs/(kg/hm ²)					
		N ₀	N ₁₀₀	N ₂₀₀	N ₂₅₀	N ₃₀₀	N ₄₀₀
叶 Leaf	V ₆	9.05 bcAB	7.74 cB	11.33 abA	11.04 abA	11.71 aA	12.11 aA
	V ₁₀	28.24 cB	34.63 cB	66.27 bA	74.87 abA	81.27 aA	81.97 aA
	R ₁	19.80 cC	51.96 bB	86.03 aA	99.77 aA	99.07 aA	107.07 aA
	R ₃	24.35 cC	39.54 bcBC	66.26 abAB	69.63 aAB	87.95 aA	88.46 aA
	R ₅	18.74 cC	37.27 bB	63.12 aA	61.51 aA	71.91 aA	64.30 aA
	R ₆	16.78 bB	20.36 bB	37.22 aA	37.15 aA	40.92 aA	44.92 aA
茎+叶鞘 Stem+sheath	V ₆	3.75 bBC	3.39 bC	5.03 aABC	5.11 aABC	5.46 aAB	5.68 aA
	V ₁₀	9.49 dD	12.19 dD	24.97 cC	28.58 bcBC	32.88 abAB	37.17 aA
	R ₁	11.03 dD	21.98 cCD	34.94 bBC	40.55 abAB	48.01 aAB	50.50 aA
	R ₃	11.19 cD	16.75 cCD	28.46 bBC	35.48 abAB	36.68 abAB	43.01 aA
	R ₅	6.77 dC	10.62 cdBC	17.96 bcAB	16.56 bcABC	22.09 abA	27.17 aA
	R ₆	6.91 cC	8.92 cBC	19.63 bA	18.60 bAB	25.83 abA	28.56 aA
苞叶 Bract	R ₃	3.30 dD	7.50 cCD	11.64 bBC	13.86 abAB	17.70 aA	15.36 abAB
	R ₅	2.72 bB	4.34 bB	6.73 aA	7.69 aA	7.48 aA	7.77 aA
	R ₆	1.91 bB	2.79 bB	6.41 aA	5.93 aA	6.84 aA	6.05 aA
穗 Spike	R ₁	5.13 cB	7.35 cB	12.89 bA	17.33 aA	14.64 abA	15.33 abA
穗轴 Cob	R ₃	9.82 bB	10.95 bB	22.32 aA	19.13 aA	17.40 aAB	20.84 aA
	R ₅	6.44 bB	7.03 bB	11.92 aAB	12.80 aA	11.36 aAB	11.15 aAB
	R ₆	5.07 bB	6.88 bB	10.85 aA	11.08 aA	9.92 aA	10.94 aA
籽粒 Kernel	R ₃	7.29 dC	21.21 cB	36.07 bA	44.14 abA	47.88 aA	44.22 abA
	R ₅	43.91 dC	82.52 cB	128.60 bA	138.73 abA	149.79 aA	137.57 abA
	R ₆	37.16 dC	85.03 cB	155.30 bA	162.89 abA	167.12 aA	167.30 aA

器官氮素含量,在该实验条件下是比较合适的氮肥施用量。在 V₆ 期至 R₃ 期期间,叶、茎+叶鞘氮素累积量明显高于其他器官,两者的氮素累积量最大值分别为 24.35~107.07 kg/hm² 和 11.19~50.50 kg/hm²。在生殖生长期,随生育期推进,除籽粒氮素累积量逐渐增加外,其他器官则逐渐下降,说明发生氮素转移现象。至 R₆ 期时,各器官氮素累积量大小依次为籽粒>叶>茎+叶鞘>穗轴>苞叶。

从施氮量的角度看,各器官的氮素累积量随施氮量增加而增加。叶片和茎+叶鞘氮素累积量最大

值在不施氮时(N₀)出现在 R₃ 时期,晚于施氮处理的 R₁ 时期,说明增施氮肥有助于春玉米生长前期对氮素的吸收累积。施氮肥处理在 R₁ 时期叶片和茎+叶鞘的最大氮素累积量分别为 51.95~107.07 kg/hm² 和 21.98~50.50 kg/hm²。N₂₅₀ 处理的茎+叶鞘的氮素累积量与 N₁₀₀、N₃₀₀ 和 N₄₀₀ 处理 差异均不显著,而 N₁₀₀ 处理显著低于 N₃₀₀ 和 N₄₀₀ 处理,说明对于春玉米茎+叶鞘氮素累积量而言,250 kg/hm² 是施氮量的平衡点。

表 5 不同施氮量下春玉米各器官氮素转移状况

Table 5 The nitrogen translocation among different organs of spring maize under different nitrogen application rates

指标 Character	器官 Organ	处理 Treatment					
		N ₀	N ₁₀₀	N ₂₀₀	N ₂₅₀	N ₃₀₀	N ₄₀₀
氮素转移量 Nitrogen translocation amount/(kg/hm ²)	叶 Leaf	11.46 cB	31.60 bcAB	48.81 abA	62.63 aA	58.15 aA	62.14 aA
	茎+叶鞘 Stem+sheath	4.13 bB	13.06 abAB	15.30 abAB	21.96 aA	22.18 aA	21.93 aA
	苞叶 Bract	1.39 cB	4.70 bcAB	5.22 bcAB	7.93 abA	10.86 aA	9.31 abA
	穗轴 Cob	4.75 bcA	4.07 cA	11.47 aA	8.05 abcA	7.48 abcA	9.90 abA
	总和 Total	21.72 cC	53.44 BBC	80.80 abAB	100.56 aA	98.68 aA	103.29 aA
转移氮素贡献率 Transferred nitrogen contribution ratio/%	叶 Leaf	30.84 aA	37.16 aA	31.43 aA	38.44 aA	34.80 aA	37.15 aA
	茎+叶鞘 Stem+sheath	11.09 aA	15.36 aA	9.86 aA	13.48 aA	13.27 aA	13.11 aA
	苞叶 Bract	3.74 aA	5.54 aA	3.37 aA	4.87 aA	6.50 aA	5.56 aA
	穗轴 Cob	12.78 aA	4.79 bB	7.39 bAB	4.94 bB	4.48 bB	5.92 bAB
	总和 Total	58.46 aA	62.84 aA	52.03 aA	61.74 aA	59.05 aA	61.74 aA
氮素转移率 Nitrogen translocation ratio/%	叶 Leaf	40.58 fF	60.82 bB	56.74 eE	62.76 aA	58.70 cC	58.05 dD
	茎+叶鞘 Stem+sheath	37.35 fF	59.42 aA	43.82 dD	54.13 bB	46.20 cC	43.45 eE
	苞叶 Bract	42.12 fF	62.80 aA	44.93 eE	57.22 dD	61.36 bB	60.61 cC
	穗轴 Cob	48.37 bB	37.17 fF	51.39 aA	42.08 eE	42.99 dD	47.50 cC

表 6 不同施氮量下春玉米籽粒产量及氮素吸收利用

Table 6 The yield and nitrogen absorption use of spring maize under different nitrogen application rates

指标 Character	处理 Treatment					
	N ₀	N ₁₀₀	N ₂₀₀	N ₂₅₀	N ₃₀₀	N ₄₀₀
籽粒产量 Yield/(kg/hm ²)	3781 dD	7289 cC	11063 bB	11932 aA	11653 aAB	11586 abAB
氮素收获指数 NHI (%)	54.79 fF	68.58 bB	67.69 c C	69.12 aA	66.68 dD	64.90 eE
氮素利用率 NEW(kg/kg N)	55.75 bB	58.79 aA	48.23 dD	50.63 Cc	46.50 eE	44.95 fF
氮肥农学效率 NAE(kg/kg N)	—	35.08 bB	36.41 aA	32.60 cC	26.24 dD	19.51 eE

2.3 不同施氮量对春玉米各器官氮素转移的影响

从表 5 中可以看出,各个处理的叶片氮素贡献率及氮素转移量高于其他器官,分别为 30.84%~38.44% 和 11.46~62.63 kg/hm²,其次为茎+叶鞘,再次为苞叶和穗轴。各个处理间叶、茎+叶鞘及苞叶的转移氮素贡献率没有差异。随施氮量增加,各器官氮素贡献率之和没有显著变化,而氮素转移量增加,但施氮量超过 200 kg/hm² 时增加效果不显著。

氮素转移率没有明显的变化规律。各器官氮素转移率高低因施氮量不同而有所差异。叶片氮素转移率以 N₂₅₀ 处理最高;茎+叶鞘氮素转移率以 N₁₀₀ 处理最高,其次为 N₂₅₀ 处理;苞叶和穗轴氮素转移率最高的处理分别为 N₁₀₀ 和 N₂₀₀。

2.4 不同施氮量对春玉米氮素吸收利用的影响

从表 6 中可以看出,春玉米的籽粒产量随施氮量增加而增加,当施氮量高于 250 kg/hm² 时,籽粒产量开始小幅度降低。其中,施氮处理均极显著高

于不施氮对照(N₀),施氮处理间以 N₂₅₀ 处理籽粒产量最高(11 932 kg/hm²)且显著高于 N₂₀₀ 处理,但与 N₃₀₀ 和 N₄₀₀ 处理差异不显著。同时,春玉米氮素收获指数也以 N₂₅₀ 处理最高(69.12%),并极显著高于其余处理;各施氮处理氮素收获指数均极显著高于不施氮对照。春玉米氮素利用率和氮肥农学效率的变化则与以上指标完全不同。氮素利用率以 N₁₀₀ 处理最高(58.79%),其次为 N₀ 处理(55.75%),再次为 N₂₅₀ 处理(50.63%),其余处理均低于 50%,且各处理之间均存在显著差异;春玉米氮肥农学效率随施氮量增加而减少,其中 N₂₅₀ 处理氮肥的农学效率在所有处理中居中间水平。

3 讨论与结论

不同田间管理模式作物氮素吸收利用情况不尽相同^[18]。在黄土旱塬地区水分是限制作物高产的主要因素,进而限制作物对氮素利用^[19]。地膜覆盖通过改善 0~200 cm 土层水分条件及土壤温度,有

利于玉米前期生长^[20]。全膜双垄沟覆盖能够增加玉米各生育期叶面积,提高玉米光合势、光合速率及气孔导度,改善产量构成因子^[13,21],并显著提高春玉米产量、氮素利用率及水分利用率^[18]。陈小莉等^[22]认为,覆膜条件下施用一定量的氮肥更有利于作物增产。然而高氮条件下玉米生育前期冠层内透光率较低,冠层结构较不合理,会导致生育后期叶片衰老光合性能下降,产量降低^[23]。本研究表明,在全膜双垄沟覆盖条件下,随着施氮量增加春玉米产量先增加后降低,施氮量为 250 kg/hm² 时的春玉米产量最大(11 932 kg/hm²)。

易镇邪等^[24]指出,玉米植株含氮量随着玉米的生长而降低,降低幅度明显受施氮类型及施氮量影响。本研究表明,随着春玉米生育期推进,玉米植株含氮量及各器官含氮量均下降。随着施氮量的增加,春玉米植株含氮量增加,施氮量为 250 kg/hm² 时,籽粒及各器官含氮量在整个生育期内均保持在较高水平,是相对合理的施氮量。

有研究表明^[25],在合理施氮量范围内,随施氮量增加,小麦旗叶谷酰胺合成酶活性、开花 21 d 后

旗叶内肽酶活性显著升高,但随着施氮量继续增加,旗叶谷酰胺合成酶的活性没有显著变化,籽粒产量显著降低,说明过量施氮对增加作物氮素同化和产量无益。随着供氮水平增加,春玉米氮素累积量增加,氮肥农学利用率、氮素生理效率则有降低的趋势^[26-27]。适量施氮可增加籽粒灌浆时所需氮源供给能力,增加单位面积氮素和光合产物在籽粒的贮存^[25]。本研究发现,当施氮量为 250 kg/hm² 时,春玉米的氮素累积量与施氮量为 300 和 400 kg/hm² 时氮素累积量差异不显著,但是,氮素的收获指数最大,氮肥农学效率均高于施氮量 300 和 400 kg/hm² 两个处理。同时,施氮量为 250 kg/hm² 有利于促进营养器官氮素向籽粒转移,从而提高春玉米氮素利用效率。

综上所述,施氮量 250 kg/hm² 时籽粒产量最高,且在后期维持了叶片的较高氮素含量,并有利于促进各营养器官氮素向籽粒转移,显著提高了氮素收获指数,同时氮肥利用效率较高,是本研究确定的最佳氮肥施用量。

参考文献:

- [1] WANG Y L, LIU T X, TAN J F, *et al.* Effect of N fertilization on yield, N absorption and utilization of two species of super high-yielding summer maize[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2012, **13**(2): 339—342, 374.
- [2] DUAN W X(段文学), YU ZH W(于振文), ZHANG Y L(张永丽). Effects of nitrogen fertilizer application rate on nitrogen absorption, translocation and nitrate nitrogen content in soil of dryland wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2012, **45**(15): 3 040—3 048(in Chinese).
- [3] ZHAO SH CH(赵士诚), PEI X X(裴雪霞), HE P(何 萍). Effects of reducing and postponing nitrogen application on soil N supply, plant N uptake and utilization of summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(2): 492—497 (in Chinese).
- [4] LUO F X(罗付香), LIN CH W(林超文). Effects of different nitrogenous fertilizer modality and film mulching on corn yield and soil Nitrogen Loss of Slope Land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2012, **6**(26): 11—16(in Chinese).
- [5] LÜ P(吕 鹏), ZHANG J W(张吉旺). Effects of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of summer maize under super-high yield conditions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2011, **17**(4): 852—860(in Chinese).
- [6] ZHENG W(郑 伟), HE P(何 萍). Effect of N application on nitrogen absorption and utilization of spring maize under different soil fertilities[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2011, **17**(2): 301—309(in Chinese).
- [7] WANG X H(王晓慧), CAO Y J(曹玉军), WANG Y J(王永军). Characteristics of dry matter production and nitrogen use efficiency of 37 spring maize hybrids with high-yielding potential in North of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(1): 60—68(in Chinese).
- [8] LI R(李 荣), WANG M(王 敏), JIA ZH K(贾志宽), *et al.* Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2012, **28**(2): 106—113(in Chinese).
- [9] ZHU L(朱 琳), CHEN X P(陈新平), LI SH Q(李世清). Effects of water management patterns in spring maize cultivation on the dryland soil temperature dynamics in the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2009, **42**(12): 4 396—4 402(in Chinese).
- [10] ZHAI SH, LIANG Y L, ZHANG X SH, *et al.* Effects of soil mulching on cucumber quality, water use efficiency and soil environment in

- greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, **24**(3): 65—71.
- [11] LIU Y, YANG SH J, LI SH Q. Growth and development of maize (*Zea mays* L.) in response to different field water management practices: Resource capture and use efficiency[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **150**: 606—613.
- [12] WU R M(吴荣美), WANG Y P(王永鹏), LI F M(李凤民). Effects of coupling film-mulched furrow-ridge cropping with maize straw soil incorporation on maize yields and soil organic carbon pool at a semiarid loess site of China[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(9): 2 855—2 862(in Chinese).
- [13] GAO Y H(高玉红), NIU J Y(牛俊义), YAN ZH L(闫志利). Effects of different plastic-film mulching techniques on maize (*Zea mays* L.) dry matter accumulation and yield[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国农业生态学报), 2012, **20**(4): 440—446(in Chinese).
- [14] SHEN L X(申丽霞), WANG P(王 璞), ZHANG L L(张丽丽). Degradation property of degradable film and its effect on soil temperature and moisture and maize growth[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2012, **28**(4): 111—116(in Chinese).
- [15] WANG H L(王红丽), ZHANG X CH(张绪成), SONG SH Y(宋尚有). Effects of whole field-surface plastic mulching and planting in furrow on soil temperature, soil moisture, and corn yield in arid area of Gansu Province, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(10): 2 609—2 614(in Chinese).
- [16] WANG M(王 敏), WANG H X(王海霞), HAN Q F(韩清芳). Effects of different mulching materials on soil water, temperature, and corn growth[J]. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2011, **37**(7): 1 249—1 258(in Chinese).
- [17] QIANG SH C(强生才), ZHANG H J(张恒佳), MO F(莫 非). The effects of micro-rainwater harvesting pattern and rainfall variability on water ecological stoichiometry in oat (*Avena sativa* L.) field[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(9): 2 365—2 373(in Chinese).
- [18] XU H M(徐洪敏), ZHU L(朱 琳), LI SH Q(李世清). Nitrogen absorption and allocation of spring maize on dryland of Loess Plateau in different farmland water management patterns[J]. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2010, **43**(14): 2 905—2 912(in Chinese).
- [19] ZHAI B N(翟丙年), LI SH X(李生秀). Effects of nitrogen nutrition on summer maize water use efficiency under different status of soil moisture[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science* (植物营养与肥料学报), 2005, **11**(4): 473—480(in Chinese).
- [20] WANG H L(王红丽), ZHANG X CH(张绪成), SONG SH Y(宋尚有). Effects of mulching methods on soil water dynamics and corn yield of rain-fed cropland in the semiarid area of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(8): 825—833(in Chinese).
- [21] GAO Y H(高玉红), NIU J Y(牛俊义), XU R(徐 睿). Effects of different film mulching on photosynthesis, transpiration rate and leaf water use efficiency of maize[J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2012, **21**(5): 178—184(in Chinese).
- [22] CHEN X L(陈小莉), LI SH Q(李世清), WANG R J(王瑞军). Effect of film mulching on yield and nitrogen balance of spring maize under different nitrogen and irrigation treatments in semi-arid region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science* (植物营养与肥料学报), 2007, **13**(4): 652—658(in Chinese).
- [23] LÜ L H(吕丽华), TAO H B(陶洪斌). Canopy structure and photosynthesis of summer maize under different nitrogen fertilizer application rates[J]. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2008, **41**(9): 2 624—2 632(in Chinese).
- [24] YI ZH X(易镇邪), WANG P(王 璞), TU N M(屠乃美). Responses of roots distribution and nitrogen content of summer maize to nitrogen fertilization types and amounts[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science* (植物营养与肥料学报), 2009, **15**(1): 91—98(in Chinese).
- [25] MENG W W(孟维伟), WANG D(王 东), YU ZH W(于振文). Effects of nitrogen fertilization on activities of nitrogen metabolism related enzymes and grain protein quality of wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(1): 10—17(in Chinese).
- [26] CHEN X(陈 星), LI Y J(李亚娟), FANG P(方 萍). Effects of water management patterns and nitrogen fertilizer levels on nitrogen use efficiency of rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(2): 283—290(in Chinese).
- [27] YE D J(叶东靖), GAO Q(高 强), HE P(何 萍). Effect of N application on N utilization and N balance in spring maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(3): 552—558(in Chinese).