

旱地农田春玉米氮素吸收利用对栽培模式的响应

张洪培^{1,2}, 陈迎迎^{1,2}, 沈玉芳^{1,2}, 李世清²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 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 杨凌 712100)

摘 要: 基于长期定位试验,选取玉米 6 个关键生育期六叶期(V6)、十叶期(V10)、吐丝期(R1)、乳熟期(R3)、蜡熟期(R5)、生理成熟期(R6),比较了高产高效栽培模式(HH)与当地传统栽培模式(LT)之间春玉米氮素吸收利用的差异。结果表明:(1) HH 模式的植株含氮量在 V6 期(39.3 g·kg⁻¹)显著高于 LT 模式(31.9 g·kg⁻¹),而在 V10 和 R1 期则显著低于 LT 模式;(2) HH 模式在各时期植株氮吸收量均显著高于 LT 模式,在 R1 期前,各器官氮素累积量大小为叶片>茎,R1 期后各器官氮素累积量大小为籽粒>叶片>茎>苞叶、穗轴;(3) 两种栽培模式下,氮素转移量和转移氮素贡献率均表现为叶片>茎>穗轴>苞叶,但 HH 模式显著高于 LT 模式;(4) HH 模式的籽粒产量(15 326 kg·hm⁻²)和氮肥偏生产力(61.30 kg·kg⁻¹)极显著高于 LT 模式,但两种模式间氮素收获指数和氮素利用率差异不显著。HH 模式可促进干物质生产和氮肥利用,是有效的黄土旱塬春玉米增产增效栽培模式。

关键词: 春玉米;旱作农田;栽培模式;生育期;氮素累积;氮利用效率

中图分类号: S513.04 **文献标志码:** A

Response of nitrogen accumulation and utilization to the cultivation mode in dryland spring maize field

ZHANG Hong-pei^{1,2}, CHEN Ying-ying^{1,2}, SHEN Yu-fang^{1,2}, LI Shi-qing²

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to improve crop yield and nitrogen use efficiency, the research on different water and nitrogen management is needed, which provide some scientific basis for the construction of the high-yield and high-efficiency spring maize cultivation system on the Loess Plateau. A long-term field experiment was designed and conducted in Changwu Agricultural and Ecological Experiment Station, and samples were taken at six key maize growing periods, namely, the 6th leaf stage (V6), the 10th leaf stage (V10), the silking stage (R1), the milk stage (R3), the dent stage (R5) and the physiological maturity stage (R6)). The study is to establish the relation of the nitrogen uptake and utilization in the high-yield and high-efficiency treatment (HH) in contrast with the local traditional treatment (LT). The results showed (1) Crop nitrogen content in HH (39.3 g·kg⁻¹) was significantly higher than in LT (31.9 g·kg⁻¹) at the V6 stage, but significantly lower at the R1 and V10 stages. (2) Nitrogen uptake at each growing stage in HH was significantly higher than that in LT, and the nitrogen accumulation in leaf was higher than that in stem before the R1 stage, while it was in the descending order of kernel > leaf > stem > bract and cob after this stage. (3) The nitrogen transfer amount and nitrogen transfer contribution rate in HH were significantly higher than those in LT, but the both management patterns showed similar trend, that is, leaf > stem > cob > bract. (4) The grain yield (15 326 kg·hm⁻²) and nitrogen partial factor productivity (PFP) (61.30 kg·kg⁻¹) in HH was significantly higher than those in LT, but there was no significant difference in the nitrogen harvest index (NHI) and nitrogen use efficiency (NUE). Consequently, the HH was effective in improving the amounts of accumulated dry matter and the nitrogen utilization. HH could be a more effective approach to improving spring-sown maize yield on the Loess Plateau.

收稿日期:2016-04-20
基金项目:国家自然科学基金(31270553,51279197);中央高校基本科研业务费专项(YQ2013009);杨凌示范区科技计划项目(2014NY-30)
作者简介:张洪培(1991—),女,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事旱作农田温室气体排放及效应方面的研究。E-mail:hpzhp1991@163.com。
通信作者:沈玉芳(1975—),女,江苏建湖人,副研究员,博士,主要研究方向为旱作农田生态系统水分养分动态过程及其环境效应。
E-mail:shenyufang@nwsuaf.edu.cn。

Keywords: spring maize; dryland; cultivation patterns; growth stage; nitrogen accumulation; nitrogen utilization efficiency

干旱是限制我国农业持续快速发展的主要因子^[1-2]。在我国北部和西北部,大约 70%的农田实行旱作雨养制度,有限的水资源严重限制了该区域的粮食单产和总产^[3]。地膜覆盖能够显著降低土壤无效蒸发,提高植株蒸腾耗水量,还可以通过改变土壤环境^[4],来影响作物对养分的吸收利用。地膜覆盖条件下土壤蒸发量较裸露地表降低 24%^[5],而集合了起垄覆膜双重作用的全膜双垄集雨沟播种植方式,对降雨的有效截获可高达 85.1%~88.7%^[6],该技术能够在持续获得作物高产的情况下维持土壤水分平衡^[7-8],这对实现旱区农业可持续发展至关重要。

氮素是作物正常生长所必需的最重要的营养元素,氮肥的大量使用对保障世界粮食安全做出了重要贡献。氮肥和有机肥相搭配可以提高春玉米氮素利用率、农学效率^[9]。氮肥利用效率表征了作物对由土壤以及肥料等提供的氮素的吸收利用能力。氮肥利用效率包括其它多个指标,每个指标的评价方法也不尽相同,主要有氮肥农学效率、氮肥生理效率、氮素表观回收率和氮肥偏生产力等^[10]。氮素吸收累积是作物产量形成的基础,理解其吸收累积规律,有助于明确在不同生长发育阶段对氮素的需求^[11]。了解春玉米氮素在不同生育期吸收累积规律是协同实现作物高产与养分高效利用的有效途径。本研究以黄土旱塬旱作春玉米农田为对象,通过田间试验,研究不同种植模式下春玉米主要生育期不同器官氮素吸收利用状况,以及不同栽培模式下土壤氮素平衡。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间定位试验位于黄土高原中南部陕甘交界处(北纬 35°12',东经 107°40',海拔 1 200 m),陕西省长武县洪家镇王东村长武农业生态试验站,该地属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水为 584 mm,年均气温为 9.1℃,全年无霜期 171 d,地下水埋深 50~80 m,属高原沟壑地貌,由塬面(占 35%)和沟壑(占 65%)两大地貌单元组成,地带性土壤为黑垆土,质地均匀疏松,是典型的旱作农业区。试验从 2009 年开始,每年 4 月份播种春玉米,9 月份收获,至本研究样品采集时,已经连续 5 年^[12-14]。本研究样品采集于 2013 年春玉米生长季,2013 年 4 月 23 日播种,9 月 12 日收获。玉米生育期期间实施定

苗、除草及追肥等田间管理措施,不进行人为灌溉。

1.2 试验设计

本试验设置两种栽培模式,高产高效栽培模式(HH):玉米品种为先玉 335,密度 85 000 株·hm⁻²(株距 24 cm),水分管理为全膜双垄沟(周年覆膜),宽窄行高低垄(宽 60 cm,高 5 cm;宽 40 cm,高 15 cm),施肥为尿素 225 kg·hm⁻²+有机肥;当地传统春玉米种植模式(LT):玉米品种为榆单 9 号,密度 48 000 株·hm⁻²(株距 42 cm),水分管理为半膜覆盖(生育期覆膜),平作,等行距(50 cm),施肥为尿素 200 kg·hm⁻²。小区面积:8 m×7 m=56 m²。有机肥采用农家牛粪,施用量 30 t·hm⁻²,C/N 比 20,含氮量为 0.28%,相当于 83 kg·hm⁻²,如果可供当季作物利用氮按 30%计,相当于增加氮素 25 kg·hm⁻²。LT 模式氮肥(含氮量为 46%的尿素为氮源)分两次施用,基肥与种肥(65%)和抽雄期追肥(35%);HH 模式氮肥分三次施用,基肥与种肥(40%),拔节期和抽雄期追肥(各 30%)。磷肥和钾肥均为一次施入,磷肥施用量 40 kg·hm⁻²,过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)为肥源,钾肥施用量 80 kg·hm⁻²,硫酸钾(含 K₂O 45%)为肥源。

生育期采样标准参考美国广泛使用的玉米生育期观测记录标准^[15],在春玉米主要生育期取样:六叶期(V6)、十叶期(V10)、吐丝期(R1)、乳熟期(R3)、蜡熟期(R5)以及完熟期(R6)。在取样区中,随机选取连续 3 株玉米,每个生育期交错选取,取植株时采取整株取样方式,所取植物样带回实验室进行各项指标测定。

地上部分生物量测定采用烘干称重法,不同生育期的分布不同,V6 和 V10 期分茎、叶两部分;R1 期分茎、叶、穗三部分;R3、R5、R6 期分茎、叶、苞叶、轴、籽粒五部分)。烘干后各部分样品测定含氮量,计算植株氮素吸收量,生育期结束,收获后计算氮肥利用效率。氮素收获指数(NHI,%)=籽粒氮素累积量/地上部氮素累积量;氮素利用效率(NUE,kg·kg⁻¹)=籽粒产量/地上部氮素累积量;氮肥偏生产力(PFP,kg·kg⁻¹)=籽粒产量/施氮量

2 结果与分析

2.1 不同栽培模式对春玉米含氮量的影响

由表 1 可以看出,两种种植模式下,春玉米植株的总含氮量呈现从高到低的发展趋势。V6 时期 HH 模式种植的春玉米植株含氮量最高,为 39.3

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,极显著高于 LT 种植模式;而在 V10 和 R1 时期,HH 模式春玉米植株含氮量却显著低于 LT 模式;R3、R5 和 R6 时期两种种植模式之间春玉米植株含氮量差异不显著。两种种植模式下,春玉米的各主要器官含氮量的变化趋势相似,均随着春玉米的生长呈现下降趋势(图 1)。春玉米叶片含氮量在 V6 时期最高($32.1\sim 40.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),随后呈现持续下降趋势,在 R6 时期含氮量下降到最低($17.7\sim 18.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$);茎秆的含氮量变化趋势与叶片相似,在 V6

时期最高($31.5\sim 37.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),在 R6 时期降低到最低($5.3\sim 6.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。苞叶、穗轴及籽粒的含氮量在 R3 时期最高,分别是 $7.2\sim 8.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $12.3\sim 13.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $28.0\sim 20.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,到 R5 时期迅速下降,到 R6 时期下降缓慢或者基本不变。总的来看,在春玉米 R1 期前,各器官的含氮量大小为叶片>茎,在 R1 期后,春玉米各器官的含氮量大小依次为叶片>籽粒>茎、苞叶、穗轴,不同的栽培模式对春玉米各器官的含氮量影响不显著。

表 1 不同栽培模式对春玉米植株含氮量的影响/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$
Table 1 Effects of different cultivation patterns on the nitrogen content of spring maize

处理 Treatment	生育期 Growth period					
	V6	V10	R1	R3	R5	R6
LT	31.9b	34.8a	19.0a	13.9a	11.4a	12.0a
HH	39.3a	24.9b	15.7b	14.3a	11.7a	11.6b

注:不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著水平达到 5%;LT—当地传统栽培,HH—高产高效栽培;下同。
Note: in the same column different letters following the means indicate significant difference at 5%; LT—local traditional treatment, HH—high-efficiency treatment; the same below.

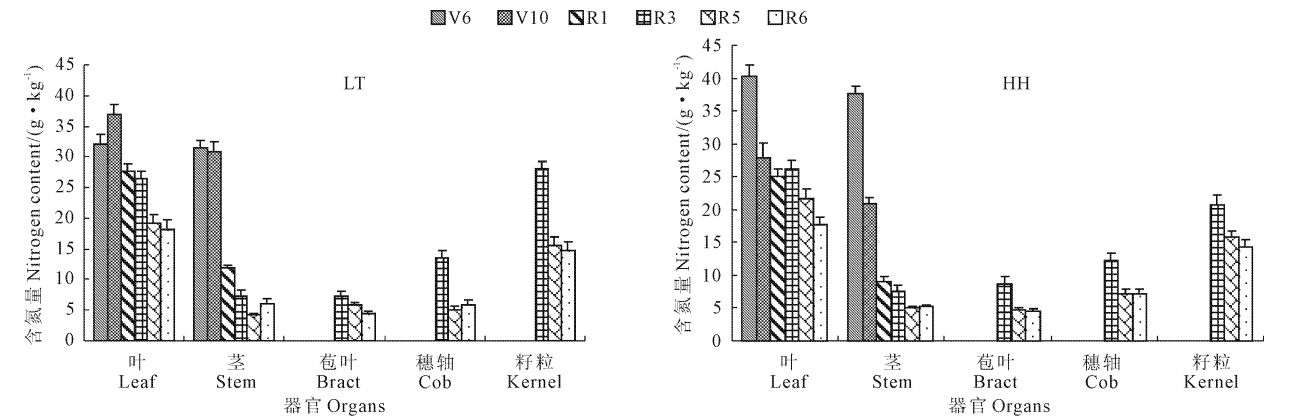


图 1 不同栽培模式对春玉米各器官含氮量的影响
Fig.1 Effect of different cultivation patterns on the nitrogen content of the spring maize organs
注:误差棒表示平均值的标准差($n=3$),下同。 Note: error bars indicate deviations of the mean ($n=3$), the same below.

2.2 不同栽培模式对春玉米生育期氮素吸收转移的影响

2.2.1 春玉米植株氮素吸收情况 从图 2 可以看出,春玉米氮素吸收量随着生育期的推进而增加。R1 时期前增加迅速,而后增加速度减慢,其增长趋势符合指数模型,HH 模式指数曲线方程为 $y = 152.9\text{Ln}(x) + 22.33$, $R^2 = 0.993$, LT 模式指数曲线方程为 $y = 108.84\text{Ln}(x) - 5.6418$, $R^2 = 0.9575$ 。
春玉米不同生育期 HH 模式的植株氮吸收量均高于 LT 模式,且均达到极显著水平,V6 时期 HH 春玉米氮素吸收量较 LT 模式高 62.5%,R1 时期春玉米氮素吸收量较 LT 高 91.5%,R6 时期春玉米氮素吸收量较 LT 高 36.8%。可见,HH 种植模式较 LT

种植模式能显著促进春玉米对氮素的吸收。

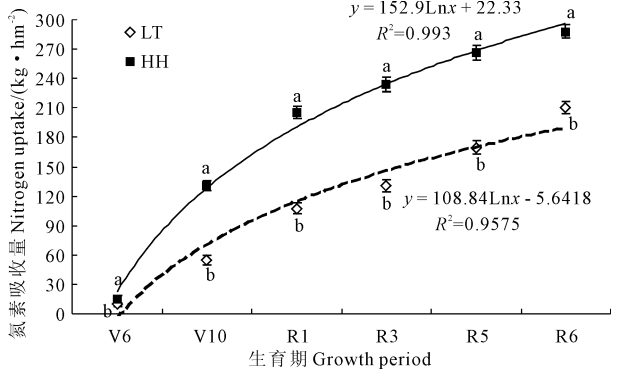


图 2 不同栽培模式对春玉米植株氮素吸收量的影响
Fig.2 Effect of cultivation patterns on the nitrogen uptake of spring maize

2.2.2 春玉米各器官氮素累积与分配 图 3 反映了不同栽培模式对春玉米各器官氮素累积与分配的影响。本试验年两种植模式下各器官氮素累积分配的规律基本一致。随着春玉米的生长,各器官氮素累积量变化有差异。叶片和茎的氮素累积量先增加后降低,在 R1 期达到最大,LT 和 HH 模式叶片氮素累积量分别为 57.91、119.15 kg·hm⁻²,但不同生育期,两个模式的叶片氮素累积量差异均达到显著水

平。R1 时期茎的氮素累积量分别是 37.03、64.92 kg·hm⁻²,差异显著。苞叶和穗轴的氮素累积量在 R3 到 R5 时期迅速下降,R5 到 R6 时期下降缓慢或者基本不变;不同处理间差异不显著。籽粒的氮素累积量 R6 时期达到最大,分别为 142.47、186.31 kg·hm⁻²,随着春玉米的生长差异越来越显著。总体看,在 R1 期前,各器官氮素累积量大小为叶片>茎,R1 期后各器官氮素累积量大小为籽粒>叶片>茎>苞叶、穗轴。

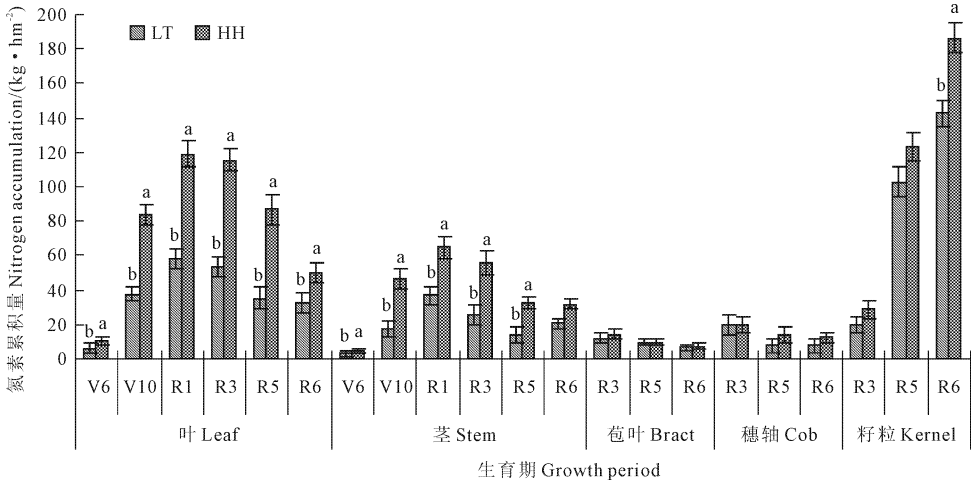


图 3 不同栽培模式对春玉米各器官氮素累积与分配的影响

Fig.3 Effect of cultivation patterns on the nitrogen accumulation and partitioning of the spring maize organs

2.2.3 春玉米各器官氮素转移和利用 如图 4 所示,两种种植模式下氮素转移量在不同植株器官不同,从高到低依次为叶片>茎>穗轴>苞叶。叶片的氮素转移量最高,LT 和 HH 模式分别为 25.32 kg·hm⁻²和 69.05 kg·hm⁻²,茎的氮素转移量分别为 16.34 kg·hm⁻²和 33.19 kg·hm⁻²,差异均显著,总的氮素转移量,LT 模式是 58.74 kg·hm⁻²,HH 模式是 116.62 kg·hm⁻²,差异极显著。转移氮素贡献率从大到小依次为叶片>茎>穗轴>苞叶;LT 和 HH 模式叶片的转移氮素贡献率分别为 17.85% 和

37.07%,差异显著;茎的转移氮素贡献率分别为 11.66%和 17.83%,处理间差异不显著。HH 模式的转移氮素贡献为 62.66%,LT 模式的为 41.42%,两者差异显著。氮素转移率各器官差异不大,两处理间的差异也不显著。

从表 2 可以看出,试验 HH 模式的籽粒产量显著高于 LT 模式;HH 和 LT 模式的氮素生理效率和氮肥偏生产力也显著高于 LT 模式;但两种种植模式的氮素收获指数和氮素利用率差异不显著。

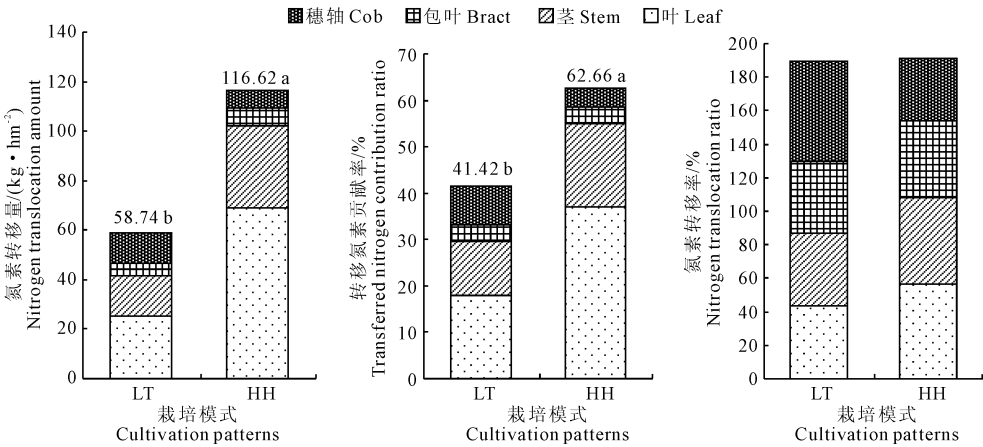


图 4 不同栽培模式对春玉米各器官氮素转移的影响

Fig.4 Effect of cultivation patterns on the nitrogen translocation of the spring maize organs

表 2 不同栽培模式对氮素利用的影响
Table 2 Effect of cultivation patterns on nitrogen utilization

处理 Treatment	籽粒产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	氮素收获指数 NHI/%	氮素利用率 NUE/(kg·kg ⁻¹)	氮素生理利用率 NPE/(kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 PFP/(kg·kg ⁻¹)
LT	11371b	67.81a	54.03a	83.45b	56.85b
HH	15326a	64.72a	53.23a	86.57a	61.30a

注:NHI—nitrogen harvest index; NUE—nitrogen use efficiency; NPE—nitrogen physiological efficiency; PEP—partial factor productivity.

3 讨论与结论

作物在不同器官含氮量不同,且受水分和养分条件的影响^[16]。本研究发现,两种栽培模式的春玉米植株总含氮量随着生育期的推进呈现从高到低的发展趋势。V6 时期 HH 模式的植株含氮量极显著高于 LT 模式;而到 V10 和 R1 时期 HH 模式植株含氮量反而显著低于 LT 模式;R3 ~ R6 时期两种模式植株含氮量差异不显著。出现这种现象,可能与这一年的气候特征有关系。2013 年苗期长武地区较往年干旱少雨,对春玉米的出苗和生长带来了影响,是导致 V6 时期 LT 模式植株含氮量下降的原因,这与银敏华等^[17]的分析相一致。试验 HH 模式的密度显著高于 LT 模式,随着玉米的生长,到作物迅速生长的营养生长阶段,HH 模式植株高的氮转移也会导致植株含氮量降低较显著。

单一增加氮肥用量,对于提高玉米产量的作用是有限的,靳立斌等^[18]提出将种植模式中其它指标改良后配合施肥,则有可能实现作物产量及 NUE 的双重提高。曹胜彪等^[19]研究也表明,提高玉米氮素施用量同时增加种植密度,可以提高玉米的籽粒产量、氮素累积总量等与产量相关的指标。但是种植密度继续升高,则有可能出现过密情况,造成玉米叶片受光不均匀,降低冠层内的透光率和叶夹角,还将导致冠层光合性能下降^[20],最终影响玉米产量^[21]。周婷婷等^[22]在渭北旱原东部陕西省合阳县的试验表明,玉米品种先玉 335 在旱作农业区的最佳密度为 82 500 株·hm⁻²。这与本试验的研究结果较一致。本试验中,LT 模式采用农户常用品种榆单 9 号种植密度为 48 000 株·hm⁻²,HH 模式则采用玉米新品种先玉 335,种植密度也升高至 85 000 株·hm⁻²,施氮量从 200 kg·hm⁻² (LT 模式)提高到 250 kg·hm⁻² 配施有机肥 (HH 模式)后,春玉米籽粒产量极显著增加。

农田覆盖地膜能截获降雨、降低水分无效蒸发,提高土壤水分利用率,最终促进玉米生长发育^[23-24]。而在此基础上,全膜双垄沟播玉米与半膜平作相比,能使作物水分利用效率得到显著提

高^[25]。起垄也能对植株的氮素吸收利用起到促进作用。本研究也发现,HH 种植模式能显著促进春玉米对氮素的吸收,且在不同器官氮素累积也表现出显著优势,对籽粒的氮素转移量和氮素转移贡献率,均表现为叶片 > 茎 > 穗轴 > 苞叶。张宏等^[26]在作物起垄种植试验中发现,冬小麦叶片和籽粒的氮素累积量显著提高。邱临静等^[27]也发现,起垄并在垄上覆膜,能提高氮素向籽粒的转移量。配合选择宽窄行 (60 cm、40 cm) 种植玉米时,收获时植株的氮素累积量比等行种植时有所增加^[28]。本研究中的高产高效 HH 栽培模式,集中了全膜双垄沟、宽窄行、有机无机肥料配施、高密度等优化措施,重点优化了水分、温度及施氮量,温度通过地表覆膜的措施加以优化,水分通过地表覆膜和起垄两个措施加以优化,并选择较佳的玉米品种和种植密度。试验分析发现,籽粒产量、植株的氮素累积量、籽粒氮素累积量、营养器官的氮素转移量及转移氮素贡献率均显著提高,氮肥偏生产力 (PFP) 和氮素生理利用率 (NPE) 也显著提高。但相较于传统 LT 模式,HH 模式对氮素利用效率 (NUE)、氮素收获指数 (NHI) 的影响不显著,这可能与 HH 模式下高密度和高施氮量有关。NUE 作为评价氮肥被作物吸收利用的常用指标,受作物品种、氮肥用量和土壤供肥能力等的综合影响^[29]。银敏华等^[17]在旱作农田进行的两年试验发现,氮素利用效率并不随着施氮量的增加而增加,施氮 160 kg·hm⁻² 时氮素利用效率最高。陈迎迎等^[14]在不同氮水平覆膜旱作春玉米试验中发现,施氮 100 kg·hm⁻² 时氮素利用效率最高。因此,不同种植模式、密度、玉米品种及施肥量等多种因素的综合影响下,如何在提高籽粒产量的同时增加氮利用效率,还需要进一步深入研究。

优化栽培模式后,还应该观测农田土壤中各营养元素尤其是氮素的变化状况,了解其亏缺情况,注意保持土壤的肥力,本研究仅仅是核算了植株带走的氮素量和肥料投入的氮素量。王激清等^[30]综合了国外养分平衡模型的优点,结合我国特有的国情,依据物质守恒定律,建立了适合我国农田生态系统的养分平衡模型:输入 = 输出 + 盈余。输入包括新

投入的化肥、播前土壤中残留的养分及土壤矿化养分;输出包括作物吸收和表现损失(氮素的损失主要是 NH_3 挥发和硝态氮淋失^[31])等;盈余则是指生育期结束后仍残留在土壤中的养分。因此,有必要对于优化后的栽培模式下土壤氮素输入项和输出项的具体情况作进一步的研究,这对于评估栽培模式的优劣具有重要的意义,也是进一步完善栽培模式的一条途径。

参 考 文 献:

[1] Shen Y J, Zhang Y C, Scanlon B R, et al. Energy/water budgets and productivity of the typical croplands irrigated with groundwater and surface water in the North China Plain[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2013, 181: 133-142.

[2] Zhu X F, Li Y Z, Li M Y, et al. Agricultural irrigation in China[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2013, 68: 147-154.

[3] Deng X P, Shan L, Zhang H P, et al. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 80: 23-40.

[4] Xie Z K, Wang Y J, Li F M. Effect of plastic mulching on soil water use and spring wheat yield in arid region of northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 75(1): 71-83.

[5] Li S X, Wang Z H, Li S Q, et al. Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dryland areas of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 116: 39-49.

[6] Zhao H, Xiong Y C, Li F M, et al. Plastic film mulch for half growing-season maximized WUE and yield of potato via moisture – temperature improvement in a semi-arid agroecosystem[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 104: 68-78.

[7] Liu C A, Zhou L M, Jia J J, et al. Maize yield and water balance is affected by nitrogen application in a film-mulching ridge – furrow system in a semiarid region of China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 52: 103-111.

[8] Liu J L, Zhan A, Bu L D, et al. Understanding dry matter and nitrogen accumulation for high-yielding film-mulched maize[J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106: 390-396.

[9] 李青军,张 炎,胡 伟,等.氮素运筹对玉米干物质积累、氮素吸收分配及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 755-760.

[10] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J, et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 87: 85-156.

[11] 孟庆锋.玉米和小麦高产与养分高效协同实现的技术途径研究[D].北京:中国农业大学,2012.

[12] 张 悦,岳善超,李 婷,等.栽培模式、施氮量对旱作春玉米农田矿质氮和产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(1): 99-107.

[13] 卜令铎.旱地春玉米高产高效栽培体系构建、评价及区域模拟

[D].杨凌:西北农林科技大学,2013.

[14] 陈迎迎,沈玉芳,白翔斌,等.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[J]. *西北植物学报*, 2013, 33(11): 2278-2285.

[15] Ritchie S W, Hanway J J, Benson G O. How a corn plant develops [J]. *Science and Technology*, 1997, (48): 1-25.

[16] 王丽梅,李世清,邵明安.水、氮供应对玉米冠层营养器官干物质和氮素累积、分配的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(13): 2697-2705.

[17] 银敏华,李援农,李 昊,等.氮肥运筹对夏玉米根系生长于氮素利用的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 129-138.

[18] 靳立斌,崔海岩,李 波,等.综合农艺管理对夏玉米氮效率和土壤硝态氮的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(11): 2009-2015.

[19] 曹胜彪,张吉旺,杨今胜,等.密度对高产夏玉米产量和氮素利用效率的影响[J]. *玉米科学*, 2012, 20(5): 106-110.

[20] 吕丽华,陶洪斌,夏来坤,等.不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性[J]. *作物学报*, 2008, 34(3): 447-455.

[21] 周卫霞,王秀萍,穆心愿,等.弱光胁迫对不同基因型玉米雌雄花发育和授粉结实能力的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(11): 2065-2073.

[22] 周婷婷,李 军,司政邦.种植密度与品种类型对渭北旱地春玉米产量和光能利用的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(11): 54-62.

[23] Liu Y, Yang S, Li S, et al. 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(4): 606-613.

[24] Sharma P, Abrol V, Sharma R K. Impact of tillage and mulch management on economics, energy requirement and crop performance in maize-wheat rotation in rainfed subhumid inceptisols, India[J]. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34(1): 46-51.

[25] 王红丽,张绪成,宋尚有,等.西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种对玉米季节性耗水和产量的调节机制[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(5): 917-926.

[26] 张 宏,周建斌,刘 瑞,等.不同栽培模式及施氮对半旱地冬小麦/夏玉米氮素累积、分配及氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 1-8.

[27] 邱临静,周春菊,李生秀,等.不同栽培模式和施肥方法对旱地冬小麦氮素吸收运转的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(3): 355-360.

[28] 张 倩,张洪生,姜 雯,等.种植方式与密度对夏玉米碳、氮代谢和氮利用效率的影响[J]. *华北农学报*, 2013, (5): 224-230.

[29] Xu G H, Fan X R, Miller A J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2012, 63(1): 153-182.

[30] 王激清,马文奇,江荣风,等.中国农田生态系统氮素平衡模型的建立及其应用[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 210-215.

[31] 邱建军,李 虎,王立刚.中国农田施氮水平与土壤氮平衡的模拟研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(8): 40-44.