

不同耕作模式对东北风沙土区玉米产量及氮素利用率的影响

乔云发¹, 苗淑杰¹, 陆欣春²

(1.南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081)

摘要: 研究优化集成耕作模式对东北风沙土区玉米产量、肥料氮素利用率及去向的影响, 探讨不同耕作模式下玉米产量及氮肥利用率之间的关系, 为东北风沙土区玉米生产合理耕作模式的选择提供科学依据。在东北风沙土区传统耕作模式(CT)、优化集成耕作模式 1(ITP1)和优化集成耕作模式 2(ITP2)小区内设置¹⁵N 标记微区框栽, 以 CT 处理为对照, 研究 ITP1 和 ITP2 耕作模式下玉米产量、氮肥利用率及肥料氮去向。结果表明: 2 种优化耕作模式玉米籽粒产量显著高于传统耕作模式, 分别增产 30.10% 和 15.53%。3 种耕作模式氮肥利用率介于 27.10%~35.46%, ITP1 处理和 ITP2 处理氮肥利用率分别为 35.46% 和 31.40%, 比 CT 处理分别提高了 30.85% 和 15.87%。与 CT 处理相比, ITP1 处理氮肥残留量增加 18.67%, 损失量降低 45.65%; ITP2 处理肥料氮残留量介于 ITP1 和 CT 处理之间, 差异不显著, ITP2 氮肥损失率比 CT 处理降低 24.36%, 比 ITP1 增加 39.17%。2 种优化集成耕作模式增加玉米产量, 提高氮肥利用率, 减少氮肥污染, ITP1 和 ITP2 两种优化耕作模式适合东北风沙土地区玉米种植。

关键词: 耕作模式; 玉米; ¹⁵N; 氮肥利用率; 风沙土

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)05-0205-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.030

Effects of Different Tillage Patterns on Maize Yield and Nitrogen Utilization Efficiency in Aeolian Sandy Soil of Northeast China

QIAO Yunfa¹, MIAO Shujie¹, LU Xinchun²

(1.School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Sciences & Technology, Nanjing 210044;

2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081)

Abstract: The effects of integrated tillage pattern on maize yield, utilization efficiency and direction of nitrogen fertilizer in aeolian sandy soil of northeast China were studied, and the relationships between maize yield and nitrogen utilization efficiency under different tillage patterns were discussed, which would provide scientific basis for rational tillage pattern of maize production in this region. In the aeolian sandy soil region, ¹⁵N labelled micro-plots were set up in conventional tillage (CT), integrated tillage pattern 1 (ITP1) and 2 (ITP2) treatment, and CT was taken as contrast treatment. The effects of ITP1 and ITP2 on maize yield, utilization efficiency and direction of nitrogen fertilizer were studied. The results showed that the maize grain yield significantly increased by 30.10% and 15.53% in ITP1 and ITP2 compared with that of CT, respectively. The nitrogen utilization efficiency of three tillage patterns ranged from 27.10% to 35.46%. The nitrogen use efficiency was 35.46% and 31.40% in ITP1 and ITP2, respectively, which was 30.85% and 15.87% higher than that of CT. Compared with CT, the residual nitrogen of ITP1 increased by 18.67%, and the loss rate decreased by 45.65%. The residual nitrogen of ITP2 was lower than that of ITP1, but higher than that of CT, but the difference was not significant. However, the nitrogen loss rate of ITP2 was 24.36% lower than that of CT and 39.17% higher than ITP1. Both of integrated tillage patterns increased maize yield and nitrogen use efficiency, and decreased nitrogen fertilizer pollution. Thus, ITP1 and ITP2 were potential strategies for increasing maize yield in aeolian sandy soil of northeast China.

Keywords: tillage pattern; maize; ¹⁵N; nitrogen use efficiency; aeolian sandy soil

收稿日期: 2018-09-24

资助项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项(201503116-03); 南京信息工程大学引进人才项目

第一作者: 乔云发(1975—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤生态研究。E-mail: qiaoyunfa@163.com

通信作者: 苗淑杰(1975—), 女, 博士, 主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail: miaoshujie@126.com

玉米在我国粮食生产上占有重要地位,为保障国家粮食安全,未来玉米单产年均递增 189 kg/hm²才能满足我国玉米的消费需求^[1]。施用氮肥是确保玉米稳产高产的必要条件和重要前提,为了追求高产,自 20 世纪 80 年代以来,我国玉米农田氮肥的用量逐年增加^[2-3]。氮肥的大量施用和利用率低带来一系列环境问题,已引起了人们广泛关注^[4-6]。东北风沙土地是玉米主要种植区之一,土壤沙化严重,保水保肥能力弱。目前,东北风沙土区玉米种植过程中主要是由于耕作模式不够合理导致氮肥利用率偏低,增加环境的威胁,合理耕作模式对于提高玉米产量和氮肥利用率、减轻环境压力具有重要意义^[5-8]。

关于玉米生长期间的肥料氮吸收利用及损失国内外学者进行了较多研究。徐明杰等^[9]利用¹⁵N 同位素示踪技术探讨传统和优化 2 种施肥管理方式对潮褐土区玉米氮素吸收、分配及去向的影响,传统方式¹⁵N 氮肥利用率为 20.8%,土壤残留 56.2%,损失 23.0%;优化方式氮肥去向表现为土壤残留>作物吸收>损失。Bhogal 等^[10]在英国洛桑长期试验站研究发现,施氮量为 40~200 kg/hm²时,施入氮肥有 8%~20%被下季作物吸收利用。肥料种类也影响其利用率,缓/控释肥具有肥效长、供肥能力稳定的特点,减少营养元素的损失,提高作物产量和肥料利用效率^[11-14]。除了肥料类型和施肥管理,土壤耕作等栽培措施对作物生长发育及肥料利用效率也存在较大影响^[14-17]。在黄淮海玉米

种植区,条带深松+缓释肥调控土壤的养分供应状况,实现土壤氮素供应与作物需氮的时空吻合,有助于实现玉米高产高效生态安全生产^[14]。不同管理措施对氮肥利用率及氮肥去向影响较大,完善管理措施是一个可操作性比较强的提高氮肥利用率和减轻环境污染的措施。

前人研究结果主要集中以黏/壤质土为供试土壤,研究某一农技因素对氮肥利用的影响,而以¹⁵N 示踪技术研究多项农技优化集成耕作模式对玉米氮肥利用的影响鲜见报道。因此,本文以东北风沙土为研究对象,利用¹⁵N 标记示踪方法,解析不同优化集成耕作模式下,玉米氮肥吸收利用及去向规律,探讨不同集成耕作模式下氮肥利用率,为东北风沙土地玉米耕作模式科学选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选在位于东北风沙土区的黑龙江省大庆市杜尔伯特蒙古族自治县(以下简称“杜蒙县”)农业科技园区进行(46°80′N, 124°45′E)。试验区海拔高度 132 m,年平均气温 3.1℃,≥10℃活动积温 2 600~2 800℃,无霜期 145~150 d,年均降水量 400 mm 左右,降雨主要集中在 7—9 月,春季降雨少、春风大、蒸发强、“十年九春旱”。供试土壤类型为风沙土,按耕作层次土壤剖面基本理化性质见表 1。种植制度为玉米连作,一年一熟制。

表 1 供试土壤基本理化性质

土层 深度/cm	碱解 N/ (mg·kg ⁻¹)	速效 P/ (mg·kg ⁻¹)	速效 K/ (mg·kg ⁻¹)	pH	全 N/ (g·kg ⁻¹)	全 P/ (g·kg ⁻¹)	全 K/ (g·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	容重/ (g·cm ⁻³)	颗粒组成/%		
										>0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm
0—17	54.92	5.46	93.6	8.02	0.61	0.36	25.85	9.11	1.29	70.32	11.20	18.48
17—29	47.14	3.17	68.4	8.09	0.42	0.18	25.46	7.43	1.60	71.24	7.01	21.75
29—60	16.16	2.56	52.8	8.12	0.25	0.16	26.32	4.96	1.57	74.57	6.99	18.45
60—100	16.01	2.11	45.8	8.24	0.19	0.11	25.90	2.99	1.55	80.13	4.28	15.60

1.2 试验设计

1.2.1 试验设计 以东北风沙土为供试土壤,试验设置 3 种集成耕作模式:(1)传统模式(CT);(2)优化

集成模式 1(ITP1);(3)优化集成模式 2(ITP2),详细耕作措施描述见表 2。主试验小区面积 10 m×5.6 m,小区间隔 2.1 m,3 次重复。

表 2 不同耕作模式描述

处理	耕作模式	集成农技	优化模式耕作方式
CT	传统模式	破垄夹肥+坐水播种+表层追肥	春季破垄夹肥,耕深 17 cm,坐水播种、苗带移位,拔节前期追肥施在垄台表层,同时伴有深趟土土覆盖追肥
ITP1	优化模式 1	有机肥还田+耕层扩容+间隔深松+侧向追肥	秋季施用有机肥,翻深 24 cm,春季起垄、坐水播种,夏季间隔深松追肥,深松沟 30 cm,浅松沟 24 cm,追肥施在浅松沟侧垄台上
ITP2	优化模式 2	秸秆覆盖+免耕播种+渐进深松+表层追肥	秋季秸秆还田、春季免耕播种、苗后渐近深松,松土时尽量少伤根,第 1 次深松 10 cm,第 2 次深松至 17 cm,第 3 次深松至 25 cm 同时追肥,追肥施在垄台表层土 2~3 cm 处

1.2.2 ¹⁵N 微区设置 在小区内设置¹⁵N 标记田间 土柱微区试验,前茬玉米收获后,每小区距长短边界

各 2 m 开始,沿长边方向依次划出 2 个微区(一个微区施¹⁵N 标记氮肥,另一微区施普通氮肥)位置,2 个微区间隔 2 m,播种 7 株玉米防止两微区交叉污染,用挖掘机将 70 cm×56 cm×105 cm 的铁框压入不同微区,铁框上口 5 cm 留在地表之上,防止微区内外土壤交叉污染。2017 年 5 月 9 日春季播种前在微区内取出 500 g 左右的土,过 5 mm 筛,再与做基肥的尿素和磷、钾肥混匀,模拟机器条施到微区苗带 6 cm 深处,浇水后播种,种植密度为 2 株/微区,株距 28 cm(相当于当地种植密度 5.1 万株/hm²)。施肥量:N 190 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²、K₂O 25 kg/hm²。1/2 用量尿素、过磷酸钙、硫酸钾肥作为基肥在播种时施用,1/2 用量尿素留在玉米拔节期追施。

1.2.3 供试材料 供试玉米品种为“吉农 302”。小区肥料施用普通化肥,尿素作为氮肥,过磷酸钙作为磷肥,硫酸钾作为钾肥。微区内肥料采用分析纯化学试剂,¹⁵N 标记微区施用的氮肥为上海化工研究院生产的¹⁵N 原子百分超为 19.58% 的标记尿素,另一个微区施分析纯尿素化学试剂,过磷酸钙作为磷肥,硫酸钾作为钾肥。

1.3 样品采集与测定

2017 年 10 月玉米收获期将微区内玉米全部收获,将玉米按根、秸秆和籽粒分为 3 部分,在 105 ℃ 杀青 30 min 后,75 ℃ 烘干至衡重,称烘干重。将用于分析测定的植株样品全部粉碎过 0.15 m 筛,混匀后,用于测定全氮含量和¹⁵N 原子百分超。玉米收获后,采取破坏性取土壤剖面样品,按每层 20 cm 测量微区 0—100 cm 土壤容重和采集土壤样品,每微区采 3 点同层次混匀,风干研磨过 0.15 m 筛,用于测定全氮含量和¹⁵N 原子百分超。2018 年 2 月开始土样和植物样品全氮采用凯式定氮仪测定,¹⁵N 丰度采用同位素质谱仪测定。

1.4 数据分析

土壤或植株全氮中来自标记¹⁵N 肥料中氮的比例 $f(\%)$,计算公式为:

$$f = \frac{\delta^{15}\text{N}_b - \delta^{15}\text{N}_{ck}}{\delta^{15}\text{N}_f - \delta^{15}\text{N}_{ck}} \times 100\%$$

式中: $\delta^{15}\text{N}_b$ 为试验后标记微区样品的¹⁵N 原子百分超(‰); $\delta^{15}\text{N}_{ck}$ 为试验后未标记微区样品的¹⁵N 原子百分超(‰); $\delta^{15}\text{N}_f$ 为标记尿素¹⁵N 原子百分超(‰)。

土壤或植株中来自标记¹⁵N 肥料中氮量=植株或土壤重量×植物或土壤全氮含量× f

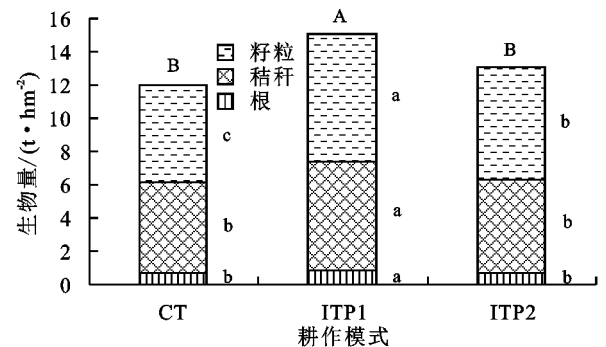
氮肥损失量=¹⁵N 标记氮肥施用量-植株吸收来自¹⁵N 标记氮肥量-¹⁵N 标记的氮肥在土壤残留量
试验数据采用 Excel 2007 和 SPSS 13 软件中的

单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同耕作模式玉米生物量及产量差异分析

由图 1 可知,虽然不同耕作模式施肥量和播种时期相同,但是玉米生物量处理间差异显著,ITP1 处理的生物量最大,为 15.05 t/hm²,分别比 CT 和 ITP2 处理的生物量增加 25.46% 和 15.11%;ITP2 处理比传统种植 CT 处理有增加趋势,但处理间差异不显著。玉米生物量由根、秸秆和籽粒 3 部分组成,从根和秸秆角度分析,ITP1 处理显著高于 IPT2 和 CT 处理,而 ITP2 和 CT 处理间差异不显著;玉米籽粒产量 3 个处理间差异显著,ITP1>ITP2>CT,ITP1 处理玉米籽粒产量最高达 7.65 t/hm²,达到当地中产田水平,CT 处理玉米产量最低,为 5.88 t/hm²;虽然 ITP2 处理玉米籽粒产量显著高于 CT 处理,ITP2 比 CT 处理增产 15.53%,但是玉米根、秸秆和生物量与 CT 处理间差异不显著。这表明 ITP1 和 ITP2 处理可以增加风沙土区玉米产量,而 ITP1 模式更适合东北风沙土区玉米种植。



注:图中不同小写字母表示不同处理相同器官生物量差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示总生物量处理间差异显著($P<0.05$)。

图 1 不同耕作模式对玉米生物量和产量的影响

2.2 不同耕作模式下玉米吸收氮的分配

由表 3 可知,不同优化集成耕作模式对玉米吸收氮量的影响与对玉米生物量影响规律相似,ITP1 处理的根和秸秆吸收氮量显著高于其他 2 个模式,而 CT 和 ITP2 处理间差异不显著;耕作模式对籽粒吸收氮量影响表现为 ITP1>ITP2>CT。玉米吸收氮在根、秸秆和籽粒中分配比例分别为 4.02%~4.75%, 33.85%~38.06%, 57.20%~61.66%。由此表明,玉米吸收氮主要分配在籽粒中,而分配在吸收器官根中很少(<5%)。与传统耕作模式 CT 相比,ITP2 处理玉米吸收氮分配到根部降低 15.34%,ITP1 处理玉米吸收氮分配到秸秆比例降低 11.05%,而分配到籽粒中比例变化不显著,这说明耕作模式主要影响氮分配到根和秸秆的比例,而对分配到籽粒中比例影响不显著。玉米吸收氮分配到不同器官比例反映了不同器官对

氮素的吸收协调能力。3 种集成耕作模式玉米直接吸收肥料中的¹⁵N 占玉米吸收总氮量的 39.02%~43.38%,处理间差异不显著,这说明耕作模式不能有

效调控玉米吸收肥料¹⁵N 能力。玉米吸收肥料¹⁵N 在根、秸秆和籽粒中分配比例与吸收全氮的分配比例相似,籽粒>秸秆>根。

表 3 玉米不同器官吸收氮量与分配

处理	吸收 N 量/(kg·hm ⁻²)			吸收 N 分配/%			吸收 ¹⁵ N 量/(kg·hm ⁻²)			吸收 ¹⁵ N 分配/%		
	根	秸秆	籽粒	根	秸秆	籽粒	根	秸秆	籽粒	根	秸秆	籽粒
CT	5.9b	47.3b	71.1c	4.75a	38.06a	57.20a	2.55b	20.62b	35.49b	4.95a	38.65a	56.40a
ITP1	7.7a	58.3a	106.2a	4.49ab	33.85b	61.66a	3.15a	22.01a	42.94a	4.50ab	34.41b	61.10a
ITP2	5.8b	50.2b	89.1b	4.02b	34.59ab	61.39a	3.09ab	21.02ab	40.75a	4.24b	35.43ab	60.33a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

2.3 不同种植模式对植株¹⁵N 当季利用率的影响

由表 4 可知,3 种不同耕作模式处理间玉米的总氮量、吸收肥料¹⁵N 量及肥料利用率存在显著差异,均以 ITP1 处理最大,传统耕作模式 CT 处理最小,ITP2 处理居中。吸氮量最多的 ITP1 处理达 172.2 kg/hm²,比 CT 和 ITP2 处理分别增加了 38.65%和 15.74%,ITP2 处理比 CT 处理增加 16.83%。3 种集成耕作模式对玉米吸收¹⁵N 肥料占玉米总吸氮量比例的影响差异不显著,平均为 40.60%,而影响吸收¹⁵N 肥料氮量,ITP1>ITP2>CT,与传统种植模式 CT 相比,ITP1 处理吸收量增加 30.83%,ITP2 处理吸收量增加 15.84%,ITP1 处理吸收增加量接近 ITP2 处理的 1 倍。氮肥利用率是评价耕作模式的重要评价指标,由表 4 可知,本研究 3 种耕作模式氮肥利率为 27.10%~35.46%,氮肥利用率最高的 ITP1 处理为 35.46%,比传统耕作模式 CT 处理利用率提高 30.85 个百分点,氮肥利用率次之是耕作模式 ITP2 处理为 31.40%。

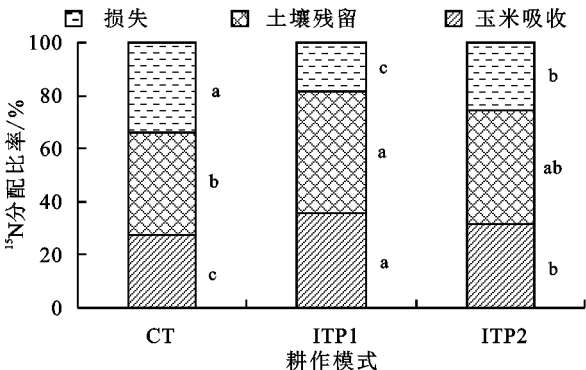
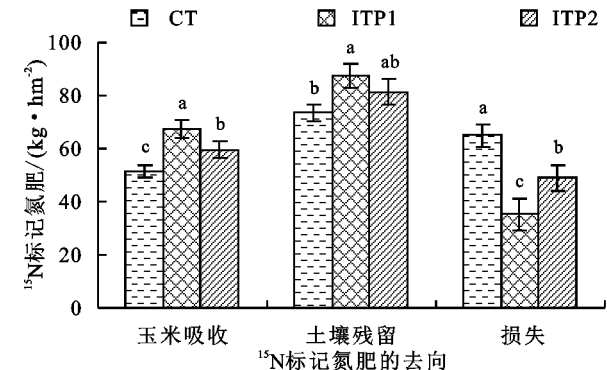
2.4 不同耕作模式下当季化肥氮的去向

农田化肥氮的去向包括玉米吸收氮、土壤残留氮和损失 3 部分。由图 2 可知,施入土壤化肥氮平均约

42%残留在土壤中,31%被当季玉米呼收利用,27%以不同形式损失,大量残留在土壤中的氮肥成为土壤氮库的重要组成部分,为下季作物提供氮素营养,这表明玉米田施氮肥主要残留在土壤中。由图 2 可知,不同优化集成耕作模式之间玉米吸收氮、土壤残留氮和损失氮表现出显著差异,ITP1 处理残留在土壤中肥料氮最多为 87.35 kg/hm²,达到施氮肥量的 45.97%,显著高于传统耕作模式 CT 处理的 73.61 kg/hm²;ITP2 模式土壤残留氮为 81.25 kg/hm²,占施氮量的 42.77%,介于 CT 和 ITP1 处理之间,与传统种植 CT 模式和集成模式 ITP1 处理间差异不显著。农田氮素的损失途径较多,对环境具有较大负面影响,传统耕作模式 CT 有近 1/3 氮肥当季损失(图 2);与传统耕作模式 CT 相比,2 种优化集成耕作模式氮肥的损失较低,分别降低了 45.65%和 24.36%。

表 4 玉米对¹⁵N 标记氮肥效率

处理	玉米总 N 量/ (kg·hm ⁻²)	¹⁵ N 吸收量/ (kg·hm ⁻²)	N 肥利用率/ %
CT	124.2c	51.50c	27.10c
ITP1	172.2a	67.38a	35.46a
ITP2	145.1b	59.66b	31.40b



注:图中不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

图 2 玉米收获后¹⁵N 标记肥料氮肥的去向

3 讨论

3.1 不同优化集成耕作模式对氮肥利用率的影响

氮是玉米生长所需的必要元素,耕作模式对玉米生长氮素的吸收利用起着重要的调控作用^[18]。因

此,本试验应用¹⁵N 标记示踪方法,研究 3 种集成耕作模式下探究肥料氮的吸收利用。本研究表明,3 种耕作模式氮肥利率在 27.10%~35.46%,这与我我国种植玉米氮肥利用率 20.9%~35%相吻合^[19-21]。ITP1

处理氮肥利用率最高为 35.46%，比传统耕作模式 CT 处理提高 30.85 个百分点，由于 IPT1 集成模式是在施用有机肥前提下，进行深翻扩容耕层有效土壤与间隔深松侧向追肥相结合。因为尿素是活性很强的氮肥，在土壤中容易移动，在氧化成铵态氮和由铵态氮转化为硝态氮等的过程中，容易发生气态或淋溶损失^[22-23]，有机肥对尿素氮肥可能起到肥际“保护”作用，延缓了尿素氮的转化过程，减少了氨挥发损失^[23-24]。间隔深松浅沟定向追肥，也在一定程度上使尿素氮侧向迁移淋溶具有一定的缓释性，有利于作物与尿素氮肥的接触时间，增加氮肥吸收利用率^[24]。同时，有机肥的施用增加风沙土有机质含量，间接影响到尿素氮肥在土壤中的转化、移动和损失过程，也有利于玉米对氮肥的吸收利用^[25-27]。耕层扩容措施使 IPT1 处理比 CT 处理耕深增加 7 cm，耕层“有效土壤”增加 40%，增加根系的分布(表 3)，缓冲耕层氮肥的损失，增加根系的吸氮量(表 3)。

集成耕作模式 ITP2 处理氮肥利用率为 31.40%，比传统耕作模式 CT 增加 15.87%。ITP2 模式是由秸秆还田+免耕播种+渐进深松+表层追肥技术集成的，东北风沙土区春风大，秸秆覆盖后减少土壤水分蒸发量，增加土壤微生物活性，增加微生物周转固定氮素，减少氮肥的直接损失，缓解玉米生长需氮与氮素供应能力不协调，提高氮肥的利用率^[28]。与传统免耕种植相比，渐进深松解决了风沙土区免耕种植拔节期以后地表土壤板结、土壤储水蓄水能力弱、地表径流严重、深松伤根的问题，保持根系的活力，提高根系对氮素的吸收能力^[8,29-30]。风沙土属于偏碱性土壤，氨挥发损失严重，表层 2~3 cm 追肥，降低氨挥发强度，减少追肥与根系接触距离，增加氮肥利用率。

3.2 不同优化集成耕作模式对玉米产量的影响

玉米生长与土壤环境因素密切相关，耕作模式可以有效调控土壤环境。本研究表明，3 个处理间玉米籽粒产量差异显著， $ITP1>ITP2>CT$ ，IPT1 处理玉米籽粒产量最高达 7.65 t/hm²，是传统耕作模式 CT 处理的 1.3 倍。由于 IPT1 是由有机肥+耕层扩容+间隔深松+侧向追肥 4 项种技术集成的模式。有机肥的施用显著改善风沙土物理性状，降低土壤容重，增加土壤孔隙度，有机肥作为土壤结构的黏结物质，促进土壤团聚体的形成，有机肥在改善土壤物理性状的同时带入大量的养分，促进玉米的生长发育^[23,29]。扩容耕层处理土壤结构较好，有效耕层土壤量增加，能够有效接纳降水，增大储水库容。由于东北风沙土区玉米拔节追肥期正是当地雨季，侧向追肥使氮素淋浴路径

发生改变，由垂直向下淋溶变为由浅松沟侧向淋溶到深松沟，增加耕层氮素存留时间和与根系接触机会，提高氮肥利用率，促进玉米生长^[30]。

集成耕作模式 ITP2 处理玉米籽粒产量介于 IPT1 和 CT 处理之间，与传统耕作模式相比，免耕措施增加土壤含水量具有显著效果，免耕+渐进深松较其他处理减少耕作次数，在春季保持了底层土壤水分，增加出苗率，中耕深松后，土层疏松，增加耕层承接降水能力，土壤水分迅速增加；而传统耕作次数较多，土壤相对板结，结构性差，不利于水分的运移^[30]。秸秆覆盖下地温虽低，但充足的氮肥供应量提高了土壤养分，改善土壤的结构，促进根系的生长^[28,31]，从而增强了玉米的生长发育，使玉米的产量高于无秸秆覆盖下传统耕作玉米的产量。与 IPT1 种植模式相比，ITP2 模式耕层有效土壤少，由于降雨后表土板结，免耕播种加剧板结，板结的耕层土壤限制玉米根系的生长，后期深松增加了接纳雨水能力，同时深松作业过程对玉米根系有一定伤害，影响玉米生长。很多研究^[25,29-31]表明，在风沙土区有机肥的培肥地力效果远好于秸秆覆盖，这是由于秸秆还田后要经历一个腐解矿化的过程，养分的释放较慢，而且还会出现矿化微生物与作物根系竞争养分的现象，集成种植 ITP2 处理玉米产量低于 IPT1 处理。

4 结 论

施入玉米田氮肥平均 31% 被当季玉米吸收利用，42% 残留在土壤中，27% 以不同形式损失。耕作模式影响玉米氮肥利用率，利用率最高的 IPT1 处理为 35.46%，比传统耕作模式 CT 处理提高 30.85%，集成耕作模式 ITP2 处理氮肥利用率次之，为 31.40%。IPT1 处理 45.97% 施氮量残留在土壤中，ITP2 模式土壤残留氮介于 CT 和 IPT1 处理之间。传统耕作模式 CT 有近 1/3 氮肥当季损失，与 CT 相比，IPT1 和 ITP2 处理氮素损失率分别降低 45.65% 和 24.36%。3 种集成耕作模式对玉米籽粒产量影响为 $ITP1>ITP2>CT$ ，IPT1 处理玉米籽粒产量最高达 7.65 t/hm²，CT 处理玉米产量最低为 5.88 t/hm²，与 CT 处理相比，IPT1 处理增产 30.01%，ITP2 处理增产 15.53%。从保护环境和增加玉米产量角度来考虑，IPT1 和 ITP2 2 种集成模式都表现出较好的环境和产量效益，IPT1 更优于 ITP2 玉米耕作模式，IPT1 和 ITP2 2 种模式适合在东北风沙土区玉米种植中推广应用。

参考文献：

[1] 戴景瑞，鄂立柱.我国玉米育种科技创新问题的几点思考[J].玉米科学，2010，18(1):1-5.

- [2] 何萍,金继运,林葆.玉米高产施肥营养生理研究进展[J].玉米科学,1998,6(2):72-76.
- [3] 杨小梅,刘树伟,秦艳梅,等.中国玉米化学氮肥利用率的时空变异特征[J].中国生态农业学报,2013,21(10):1184-1192.
- [4] Galloway J N, Hiram Levy I, Kasibhatla P S. Consequences of population growth and development on deposition of oxidized nitrogen[J]. Ambio,2020,1994:120-123.
- [5] Guo J, Liu X, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. Science, 2010, 327 (5968):1008-1010.
- [6] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2009,106(9):3041-3146.
- [7] 赵伟,梁斌,杨学云,等.长期不同施肥对小麦-玉米轮作体系土壤残留肥料氮去向的影响[J].中国农业科学,2013,46(8):1628-1634.
- [8] 乔云发,苗淑杰,陆欣春,等.不同土壤耕作方式对东北风沙土区玉米田土壤质量及产量的影响[J].水土保持通报,2018,38(3):19-23.
- [9] 徐明杰,张琳,汪新颖,等.不同管理方式对夏玉米氮素吸收、分配及去向的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):36-45.
- [10] Bhogal A, Rochford A D, Bradley R S. Net changes in soil and crop nitrogen in relation to the performance of wheat given wide-ranging annual nitrogen applications at Ropsley, UK [J]. Journal of Agricultural Science, 2000,135:139-149.
- [11] 王宜伦,李潮海,王瑾,等.缓/控释肥在玉米生产中的应用与展望[J].中国农学通报,2009,25(24):254-257.
- [12] 邵国庆,李增嘉,宁堂原,等.灌溉和尿素类型对玉米氮素利用及产量和品质的影响[J].中国农业科学,2008,41(11):3672-3678.
- [13] Ogola J B O, Wheeler T R, Harris P M. Effects of nitrogen and irrigation on water use of maize crops [J]. Field Crops Research,2002,78(2/3):105-117.
- [14] 周宝元,孙雪芳,丁在松,等.土壤耕作和施肥方式对夏玉米干物质积累与产量的影响[J].中国农业科学,2017,50(11):2129-2140.
- [15] 张总正,秦淑俊,李娜,等.深松和施氮对夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(4):790-798.
- [16] Huang G B, Chai Q, Feng F X, et al. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield, and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in arid Northwest China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2011,11(8):1286-1296.
- [17] Wang X B, Zhou B Y, Sun X F, et al. Soil tillage management affects maize grain yield by regulating spatial distribution coordination of roots, soil moisture and nitrogen status [J]. PLoS One,2015,10(6):e0129231.
- [18] 张君,赵沛义,潘志华,等.基于产量及环境友好的玉米氮肥投入阈值确定[J].农业工程学报,2016,32(12):136-143.
- [19] 李庆逵,朱兆良,于天仁.中国农业持续发展中的肥料问题[M].南京:江苏科技出版社,1998:38-48.
- [20] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [21] 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[J].土壤学报,2015,52(6):1311-1324.
- [22] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科技出版社,1992:288-303.
- [23] 杜伟,赵秉强,林治安,等.有机无机复混肥优化化肥养分利用的效应与机理研究 I.有机物料与尿素复混对玉米产量及肥料养分吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):579-586.
- [24] 刘增兵,赵秉强,林治安.腐植酸尿素氮挥发特性及影响因素研究[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1):208-213.
- [25] 赵京音,姚政,蒋小华.利用农业有机废弃物提高化学氮肥利用率的研究Ⅱ.施用农业有机废弃物对化肥氮素利用率的影响[J].上海农业学报,1999,15(1):69-72.
- [26] 钟顺清,王周琼,川上敞.草炭对土壤中尿素中氮的动态影响[J].干旱区研究,2000,17(2):65-69.
- [27] 肇溥敏,王宝申,韩英群,等.腐殖酸类物质与尿素的复合效应及其对尿酶活性的抑制[J].土壤通报,1993,24(3):135-136.
- [28] 刘超,汪有科,湛景武,等.秸秆覆盖量对农田土面蒸发的影响[J].中国农学通报,2008,24(5):448-451.
- [29] 乔云发,苗淑杰,陆欣春,等.耕作方式和有机肥对风沙土区玉米产量的影响[J].安徽农业科学,2018,46(4):124-127.
- [30] 王孟雪,张有利,张玉先.黑龙江风沙土区不同耕作措施对玉米地土壤水分及产量的影响[J].水土保持研究,2011,18(6):245-251
- [31] 田慎重,宁堂原,王瑜,等.不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J].应用生态学报,2010,21(2):373-378.