

# 不同栽培模式下旱作春玉米产量 及土壤水氮动态变化

吕楠<sup>1,3</sup>, 张聪<sup>1,3</sup>, 李红兵<sup>1,2</sup>, 张岁岐<sup>1,2</sup>

(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 杨凌 712100;  
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;  
3. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为探讨黄土塬区玉米高产高效栽培模式及其环境效应,通过为期2 a的田间定位实验,研究了黄土塬区旱作春玉米不同栽培模式土壤水分时空变化特征、产量与水分利用效率以及硝态氮、铵态氮累积及其剖面分布的变化。试验设传统栽培模式(T1)、化肥有机肥高密度超高产模式(T2)、化肥有机肥中密度高产高效模式(T3)共3个处理,以郑单958为供试品种,测定了春玉米关键生育期土壤含水量,并于收获后测定实际产量和0~100 cm土层硝态氮、铵态氮含量。结果表明:土壤含水量变化受降雨影响较大,2017年生育期降雨量为374.2 mm,是干旱年,玉米不仅能有效吸收中上层(0~120 cm)土壤水分,又不造成下层(120~200 cm)土壤水分的亏缺;2018年生育期降雨量为490.8 mm,是丰水年,各生育期0~60 cm土层土壤含水量变化大,60~200 cm土层土壤含水量基本维持稳定。T2模式在60~80、80~100 cm土层硝态氮累积量高,淋溶现象明显,铵态氮含量无明显变化;2017年在60~80、80~100 cm土层T2模式硝态氮累积量分别比T3高8.2%、76.4%,2018年在60~80、80~100 cm土层T2模式硝态氮累积量分别比T3高50.3%、129.3%,施肥过多,随降雨入渗硝态氮淋溶到土壤深层。硝态氮累积量与春玉米产量显著相关,硝态氮是决定玉米产量的重要因素。2017年栽培模式T2和T3产量分别比T1高55.4%、64.4%,WUE分别高46.9%、55.9%,2018年栽培模式T2和T3产量分别比T1高49.7%、31.2%,WUE分别高58.9%、40.4%,均达到显著水平。化肥有机肥中密度高产高效模式(T3)既能保证高产、高WUE又能保证较少的硝态氮淋溶,减少环境污染,是该地区值得推广的旱作春玉米栽培模式。

**关键词:**高产高效栽培;土壤含水量;硝态氮;铵态氮;春玉米;产量

**中图分类号:**S513 **文献标志码:**A

## Dynamic changes in soil water and nitrogen and yield of rainfed spring maize under different cultivation systems

LU Nan<sup>1,3</sup>, ZHANG Cong<sup>1,3</sup>, LI Hongbing<sup>1,2</sup>, ZHANG Suiqi<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to explore the high-yield and high-efficiency cultivations of maize and its environmental effects on the Loess Plateau, we studied the characteristics of spatial-temporal dynamics in soil moisture, yield and water use efficiency, accumulation and profile distribution of nitrate and ammonium nitrogen in different cultivation systems of spring maize on Loess Plateau through a two-year field positioning experiment. Three treatments including farmers' practice (T1), high-density and super-high-yield with chemical fertilizer and organic fertilizer (T2), medium-density, high-yield and high-efficiency mode with chemical fertilizer and organic fertilizer (T3) were carried out with Zhengdan 958 as cultivar. We determined soil water content during the critical growth period. The actual

yield, nitrate and ammonium nitrogen content in 0~100 cm soil layer were measured after harvest. The results showed that the changes in soil water content was greatly affected by rainfall. The rainfall in 2017 was 374.2 mm, which was a dry year. In this situation, maize could not only efficiently use water in 0~120 cm soil layers, but also don't cause soil water deficit in lower level (120~200 cm). The rainfall in 2018 was 490.8 mm, which was a wet year, the soil water content in 0~60 cm layer changed greatly in each growth period, and the soil water content in 60~200 cm layer remained stable. Compared to T1 and T3, the nitrate accumulation under T2 treatment in 60~80 and 80~100 cm soil layer was higher and leaching was obvious. In 2017, the accumulation of nitrate under T2 treatment was 8.2 and 76.4% higher than that in 60~80 cm and 80~100 cm soil layers under T3 treatment, respectively. In 2018, the accumulation of nitrate in 60~80 cm and 80~100 cm soil layers with T2 treatment was 50.3% and 129.3% higher than that with T3, respectively. Excessive fertilization leads to leaching of nitrate nitrogen into deep soil due to rainfall infiltration. Nitrate accumulation was significantly correlated with spring maize yield and nitrate was an important determining factor for maize yield. In 2017, the yield of T2 and T3 was 55.4%, and 64.4%, and WUE was 46.9% and 55.9% higher than that of T1, respectively. In 2018, the yield of T2 and T3 was 49.7% and 31.2% and WUE was 58.9% and 40.4% higher than that of T1, respectively. In conclusion, T3 treatment not only ensured high yield and high water use efficiency, but also reduced nitrate nitrogen leaching, mitigated environmental pollution, which could be helpful for increasing grain yield and WUE of dryland maize in semi-arid regions.

**Keywords:** high yield and high efficiency cultivation; soil water content; nitrate nitrogen; ammonium nitrogen; spring maize yield

土壤水分不足、养分利用效率低是黄土塬区农业可持续发展的主要限制因素。为了促使黄土塬区农业生产效率得到有效提升,依据水肥利用总体规划要求进行作物高产高效水肥管理模式的探究具有重要意义<sup>[1]</sup>。据统计,2006—2010年中国共涌现出159块 $15\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上的玉米超高产田,多数超高产田种植密度处于 $67\ 500\sim 97\ 500\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,平均施氮量达到 $485.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[2]</sup>,超高产纪录多在高密度和高氮投入条件下获得的<sup>[3]</sup>。适度密植和增施肥料是当前玉米高产的主要途径<sup>[4]</sup>,但过高水肥投入增加生产成本,降低生产效益,并造成环境污染<sup>[5-6]</sup>。在黄土高原旱作农业区,农田用水仅为自然降雨,因此有效结合覆盖、增加种植密度、化肥配施有机肥、合理追肥等形成不同栽培模式均可提高旱地玉米水分利用效率和产量,但是有效结合这些栽培管理措施并实现农学输出与环境保护双赢仍存在一定难度<sup>[7]</sup>。前人研究多集中在单或双因素对春玉米产量和土壤水氮动态的影响方面,但通过对覆盖方式、种植密度、氮肥运筹等多项栽培技术集成与优化研究尚少。研究表明,栽培模式对旱地春玉米产量及养分利用效率有显著影响<sup>[8]</sup>,通过优化栽培模式或者综合农艺措施,可以显著提高作物产量和资源利用效率<sup>[9]</sup>。农田污染主要来源于矿质氮的淋失,矿质氮主要包括硝态氮和铵态氮,是植物吸收的主要氮素形态,也是植物

营养氮素研究的主要切入点<sup>[10]</sup>。近年来因农田不合理施肥造成土壤硝态氮淋溶而引起地下水污染已成为一个全球关注的问题<sup>[11]</sup>。关于硝态氮、铵态氮在土壤中的运移或积累特征已进行了大量研究。刘顺国等<sup>[12]</sup>研究表明,施用有机肥和化肥都能提高土壤硝态氮、铵态氮含量;此外,苗艳芳等<sup>[13]</sup>研究认为,旱地土壤铵态氮和硝态氮累积特征与作物产量之间具有相关性。本试验在广泛调研黄土塬区旱作春玉米种植区农民种植习惯的基础上设置优化栽培模式,比较研究了不同栽培模式土壤水分和硝铵态氮变化,分析了产量和水分利用效率提高的原因,旨在为黄土塬区旱地春玉米持续高产高效栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在中国科学院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长武县洪家镇王东村,北纬 $35^{\circ}12'$ ,东经 $107^{\circ}40'$ ,海拔 $1\ 200\text{ m}$ ,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水 $577\text{ mm}$ ,年均气温 $9.1^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 $171\text{ d}$ ,地下水埋深 $50\sim 80\text{ m}$ ,属典型旱作农业区;农作物以一年一熟小麦、玉米为主。春玉米试验土壤为黑垆土,土质地比较好,物理化学结构均匀、土壤孔隙多,透气性较好,有机质含量为 $12.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.79\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、

速效磷  $9.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾  $129 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤溶液弱碱性, pH 值为 8.3, 土壤容重为  $1.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 田间持水量为 22.4%。2017 年和 2018 年玉米生育期降雨量分别为 374.2、490.8 mm, 按降水年型划分, 2017 年是干旱年, 2018 年为丰水年。月平均气温和降雨量变化见图 1。

## 1.2 试验设计

长期定位施肥试验从 2011 年开始, 本试验于 2017—2018 年进行。基于之前的研究, 采用了 3 种栽培模式的试验设计, 结合黄土塬区旱作春玉米栽培的特点, 旨在通过施肥量和施肥时间的调控、有机肥配施和密度调整措施的相互配合, 提高产量的同时, 降低化肥投入, 提高有机肥的利用价值和土壤的持续生产力, 最终降低环境成本, 实现经济效益、社会效益和生态效益的共赢。

本试验共设 3 个处理, 分别为: T1, 传统栽培模式; T2, 化肥有机肥高密度超高产模式; T3, 化肥有机肥中密度高产高效模式。供试品种为郑单 958。试验采用随机区组分布, 面积为  $36 \text{ m}^2$  ( $4.8 \text{ m} \times 7.5 \text{ m}$ ), 三次重复。半膜平覆, 宽窄行 ( $40 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ ) 栽培, 宽行覆膜, 窄行种植玉米。所用氮肥为含氮

量 46% 的尿素和有机肥 (腐熟牛粪, N 含量为  $20.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 磷肥为含  $\text{P}_2\text{O}_5$  12% 的过磷酸钙, 钾肥为含  $\text{K}_2\text{O}$  51% 的硫酸钾。具体种植方式与管理措施见表 1。玉米生长按时间苗、除草及追肥等田间管理, 农田水分来源为天然降水。

## 1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤水分测定 春玉米播前、拔节期 (V6)、吐丝期 (VT)、乳熟期 (R3)、蜡熟期 (R5)、成熟期 (R6), 在小区内采取 0~200 cm 土样, 0~100 cm 土层每 10 cm 土层取样, 100~200 cm 土层每 20 cm 土层取样。用烘干法测定土壤含水量, 并计算各生育期土壤储水量。

1.3.2 土壤容重测定 土壤容重测定采用环刀法, 每个小区随机选点, 三次重复, 于 2018 年收获后用体积为  $100 \text{ cm}^3$  的环刀分别取 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层土样, 立即密封并烘干称重, 计算土壤容重。

$$\text{土壤容重} (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}) = \text{烘干土样重} / \text{环刀体积}$$

1.3.3 土壤硝态氮和铵态氮的测定 在播前和收获后分别取 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层土样。土壤硝态氮、铵态氮采用  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

表 1 春玉米不同种植方式与管理措施

Table 1 Different planting methods and management measures of spring maize

处理 Treatment	密度/ (株 · hm <sup>-2</sup> ) Density/(plant · hm <sup>-2</sup> )	底肥 The base fertilizer				追肥(N) Top dressing/(kg · hm <sup>-2</sup> )			覆膜 Film mulching
		N (kg · hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg · hm <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> O (kg · hm <sup>-2</sup> )	OM (t · hm <sup>-2</sup> )	V6	VT	R2	
T1	49500	225							不覆膜 No film
T2	90000	180	225	225	75	135	135		覆膜 Film mulching
T3	82500	150	150	150	52.5	112.5	75	37.5	覆膜 Film mulching

注: OM 代表有机肥, V6、VT、R2 分别代表玉米拔节期、吐丝期和灌浆期。

Note: OM represents organic fertilizer; V6, VT and R2 represent jointing, silking and filling stages of maize, respectively.

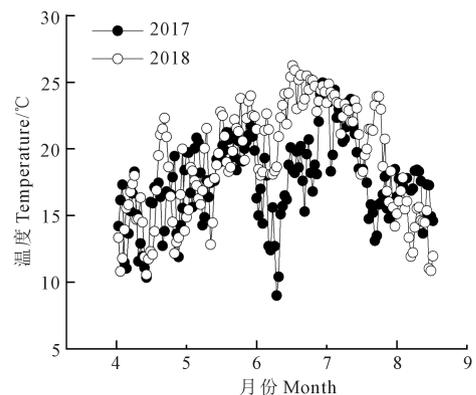
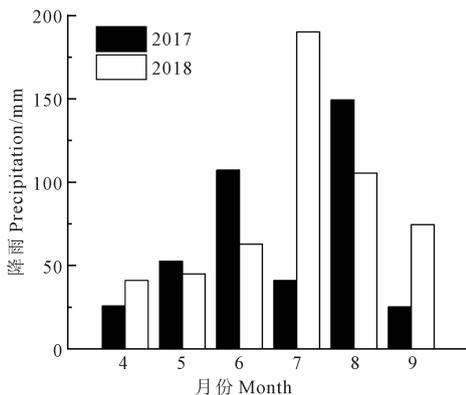


图 1 玉米生育期降雨分布和温度变化

Fig.1 Rainfall distribution and temperature change during maize growth period

KCL 浸提(新鲜湿土 5.00 g;浸提液 50 ml),震荡 1 h 后过滤,浸提液冷藏保存或立即用流动分析仪测定土壤硝态氮和铵态氮含量。

1.3.4 产量测定 分别在各小区选择中心两行去除边际效应植株,选取 30 株玉米穗称总重,然后挑选 10 颗均匀的玉米穗,称重记录重量,放入网袋最后进行具体的构成因素的测定。测定穗数、千粒重、穗行数、穗粒重、行粒数等指标,并进行籽粒产量的计算。

### 1.3.5 相关指标计算

(1) 土壤剖面不同土层内硝态氮、铵态氮含量

$$\text{NO}_3^- - \text{N} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{\text{待测液测定值} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) \times \text{浸提液体积} (\text{mL})}{[\text{土壤质量} (\text{g}) \times (1 - \text{土壤含水量})]}$$

$$\text{NH}_4^+ - \text{N} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{\text{待测液测定值} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) \times \text{浸提液体积} (\text{mL})}{[\text{土壤质量} (\text{g}) \times (1 - \text{土壤含水量})]}$$

(2) 土壤剖面不同土层内硝态氮累积量

$$\text{土壤硝态氮累积量} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{土层厚度} (\text{cm}) \times \text{土壤容重} (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \times \text{硝态氮含量} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) \times 10 / 100$$

(3) 其他指标

$$\text{土壤含水量} (\%) = \frac{\text{土样湿重} - \text{烘干干重}}{\text{烘干干重} - \text{盒重}} \times 100\%$$

$$\text{土壤储水量} = \text{土壤体积含水量} (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}) \times \text{土层厚度} (\text{cm}) \times 10$$

$$ET = P_i + \Delta SWS$$

式中,  $ET$  是作物耗水量 (mm),  $P_i$  是生育期降水量 (mm),  $\Delta SWS$  播前、收后土壤储水量差值 (mm)。

$$\text{水分利用效率} (WUE) = Y / ET$$

式中,  $Y$  为作物产量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),  $ET$  为作物耗水量 (mm)。

## 1.4 数据处理

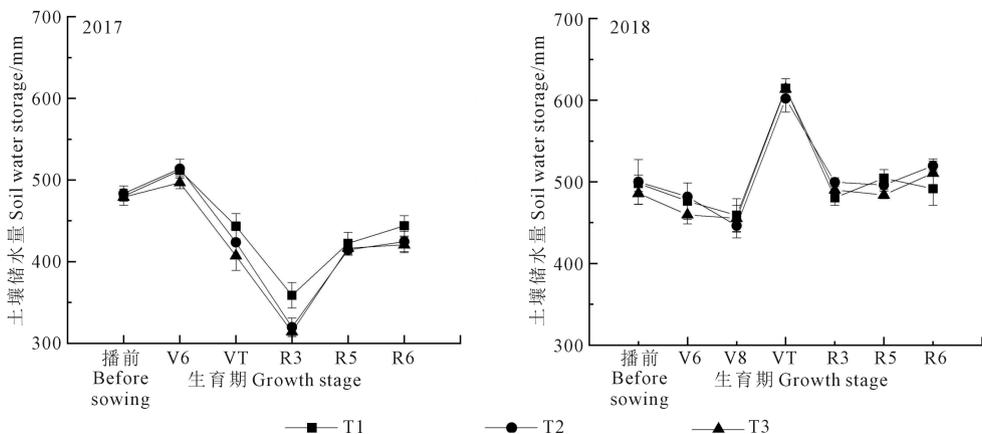
数据整理采用 Microsoft excel 2007; 数据方差、相关性分析采用 SPSS (Version 14.0 for Windows); 采用 Origin 8.0 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米不同栽培模式下土壤水分的时空变化

2.1.1 0~200 cm 土层土壤储水量(SWS) 随生育期的动态变化,不同栽培模式旱作春玉米土壤储水量变化如图 2 所示,因两年降雨量差异大,土壤储水量随生育期推移变化规律不同,但不同处理间土壤储水量随时间推移变化趋势一致,各处理间存在不同程度的差异,这与玉米生育期和当年降雨量有关。2017 年从播种到拔节期(V6)降雨 147.2 mm,占整个生育期降雨的 39.3%,此阶段玉米耗水量小,不同处理 SWS 均缓慢增加,但无显著差异;从拔节期~吐丝期是玉米营养生长阶段,对土壤水分的利用增强,气温升高,蒸发蒸腾作用强,而且降雨少,所以 SWS 急剧下降;吐丝期~乳熟期玉米已经进入生殖生长阶段,玉米生长旺盛,灌浆需要消耗大量水分,而此时降雨少,因此 SWS 显著降低,乳熟期(R3)T2、T3 土壤储水量分别为 319.8、314.1 mm,分别比处理 T1 低 39.1、44.8 mm,而且达到显著水平 ( $P < 0.05$ );乳熟期后,玉米吸水能力下降,气温降低,蒸发蒸腾作用减弱,SWS 增加。各处理间无显著差异,但各生育期 T2、T3 土壤储水量均小于 T1,说明覆膜、增加种植密度、施肥等综合效应促进了玉米植株旺盛生长,消耗了更多土壤水分。

而 2018 年从播种到大喇叭口期,降雨量少,耗水量大,SWS 降低,但大喇叭口期~吐丝期间降雨 187.4



注: V6-拔节期; V8-大喇叭口期; VT-吐丝期; R3-乳熟期; R5-蜡熟期; R6-成熟期。

Note: V6-jointing stage; V8-bell stage; VT-silking stage; R3-milking stage; R5-kernels dented stage; R6-maturity stage.

图 2 不同栽培模式土壤储水量随玉米生育期的变化

Fig. 2 Changes in soil water storage under different cultivations with maize growth period

mm, 占整个生育期降雨的 38.2%, 因此 SWS 急剧增加; 从吐丝期~乳熟期, SWS 变化趋势与 2017 年一致, 均急剧下降; 在玉米蜡熟期和成熟期, 各处理 SWS 基本维持稳定。总体来说, 由于 2018 年降雨多, 各生育期 SWS 高于 2017 年。2017 年降雨主要在营养生长期和生殖生长期后期, 因此玉米生长中期消耗更多土壤水分, 导致收获后 0~200 cm 土层 SWS 比播种时平均低 39.9 mm; 2018 年降雨主要集中在大喇叭口期到吐丝期, 其他生育期雨水分布均匀且降雨量大, 收获后 SWS 略高于播前。

2.1.2 不同生育时期水分在土壤剖面的分布 春玉米土壤水分垂直动态变化与施肥、生育期及当季降雨密切相关。2017 年春玉米 0~200 cm 土层土壤含水量的垂直变化规律见图 3。春玉米拔节期, 各处理 0~60 cm 土层土壤含水量随深度加深而下降, 60~120 cm 土层土壤含水量随深度加深而增大, 120~200 cm 土层土壤含水量随深度加深而降低。

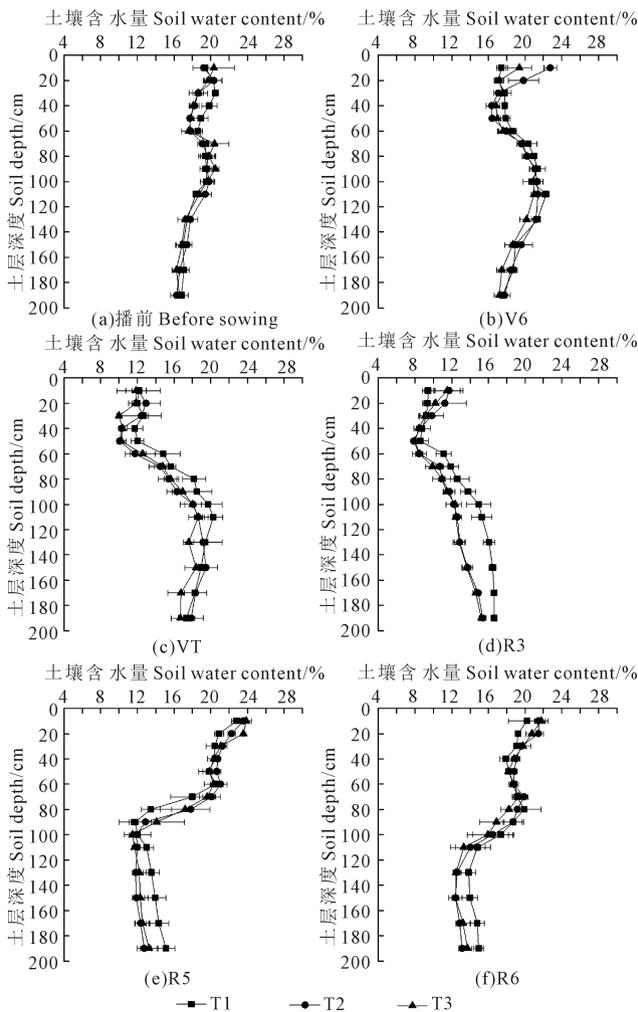


图 3 2017 年玉米不同生育期 0~200 cm 土层土壤含水量  
Fig.3 Soil water content in 0~200 cm soil layer in different growth periods of maize in 2017

吐丝期和乳熟期变化规律类似, 春玉米生长旺盛, 蒸腾强烈, 水分代谢活跃, 相比拔节期, 0~50 cm 土层土壤含水量迅速减小, 50~200 cm 土层土壤含水量随土层深度加深而增大。春玉米蜡熟期和成熟期受到强降雨的影响, 0~60 cm 土层含水量增大, 由于深层土壤水分对浅层的补给作用, 各处理 100~200 cm 土层含水量均低于播前。总体来说, 生育期的变化对土壤含水量具有明显的影响。随着生育期的变化, 中上层土壤(0~120 cm)含水量变化较大, 下层土壤(120~200 cm)各生育期含水量基本保持稳定。说明玉米生长既可以有效吸收中上层土壤水分, 又不造成下层土壤的水分亏缺。

2018 年降雨多于 2017 年, 7 月和 9 月降雨量分别比 2017 年高 149.2、47.2 mm。经过较长的冬季休闲期, 不同栽培模式下播前(图 4a)土壤水分无明显差异。拔节期(图 4b), 随着土层深度的加深, 各处理 0~50 cm 土层土壤含水量下降, 50~100 cm 土层土壤含水量增加, 100~200 cm 土层土壤含水量略有

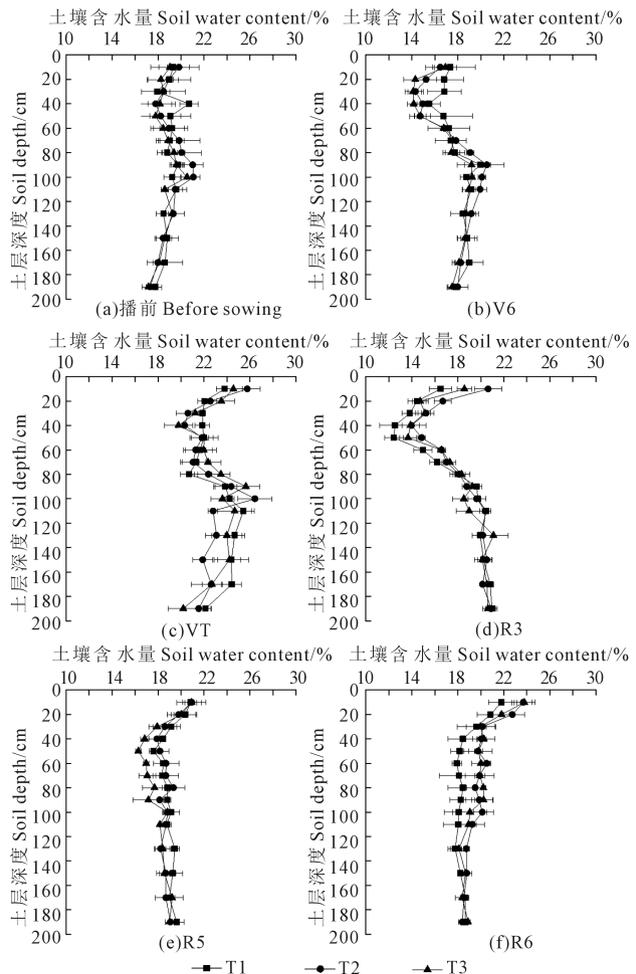


图 4 2018 年玉米不同生育期 0~200 cm 土层土壤含水量  
Fig.4 Soil water content in 0~200 cm soil layer in different growth periods of maize in 2018

下降。由于受到强降雨的影响,吐丝期(图 4c)0~200 cm 土壤含水量显著增加,其垂直变化规律与拔节期一致。乳熟期(图 4d)春玉米生长旺盛,蒸腾强烈,水分代谢活跃,0~50 cm 土层土壤含水量迅速减小,50~200 cm 土层土壤含水量随土层深度增加而增加。乳熟期~蜡熟期(图 4e)有 87.6mm 降雨,表层土壤含水量增大,0~50 cm 土层土壤含水量随深度增加而减少,50~200 cm 土层土壤含水量基本维持稳定。成熟期(图 4f)与蜡熟期变化规律基本一致。总体来说,土壤含水量变化受降雨影响较大,上层土壤(0~50 cm)含水量变化较大,100~200 cm 土层土壤含水量基本维持稳定;玉米生长主要吸收 0~60 cm 土层土壤水分,故 0~50 cm 土层土壤含水量变化较大。相比 2017 年(干旱年份),丰水年由于降水足够利用,中层土壤含水量变化较小。

## 2.2 不同栽培模式下 0~100 cm 土层土壤矿质氮的时空变化

### 2.2.1 不同栽培模式 0~100 cm 土层土壤硝态氮含量的变化

不同栽培模式对春玉米收获后 0~100 cm 土层硝态氮含量的影响如图 5 和图 6 所示。因为本试验地已经进行了连续 6 a 的长期定位试验,2017 年播前硝态氮含量已达到 11.86~49.87 mg·kg<sup>-1</sup>,0~20 cm 土层模式 T2 和 T3 硝态氮含量显著高于 T1( $P<0.05$ ),80~100 cm 土层 T2 与 T1、T3 无显著差异。收获后随土层深度的增加硝态氮含量增加,模式 T2、T3 0~100 cm 土层硝态氮含量动态变化基本一致,均在 40~60 cm 土层达到最大值,之后逐渐减小;其中模式 T2 80~100 cm 土层硝态氮含量又增多,可能因为模式 T2 80~100 cm 土层播前硝态氮含量已达到 48.87 mg·kg<sup>-1</sup>,而且施肥过多,随降雨入渗硝态氮淋溶到土壤深层。相同土层不同栽培模式,硝态氮含量从高到低都是 T2>T3>T1,说明随施氮量增加,硝态氮含量增加,除 60~80 cm 土层外,其它土层 T2 模式硝态氮含量均显著高于 T1、T3 模式( $P<0.05$ )。

除 0~20 cm 土层外,2018 年春玉米播前模式 T2 硝态氮含量显著高于 T1、T3 模式( $P<0.05$ ),收获后 T2、T3 各土层硝态氮含量显著高于 T1,模式 T2 60~80、80~100 cm 土层硝态氮含量显著高于 T1、T3;由于 2018 年生育期降雨多,相比 2017 年硝态氮累积下移,60~80 cm 土层硝态氮含量最高,80~100 cm 土层模式 T2 有淋失风险。

### 2.2.2 不同栽培模式 0~100 cm 土层铵态氮含量的变化

2017 年不同栽培模式对春玉米收获后 0~100 cm 土层铵态氮含量的影响如图 7 所示。各处

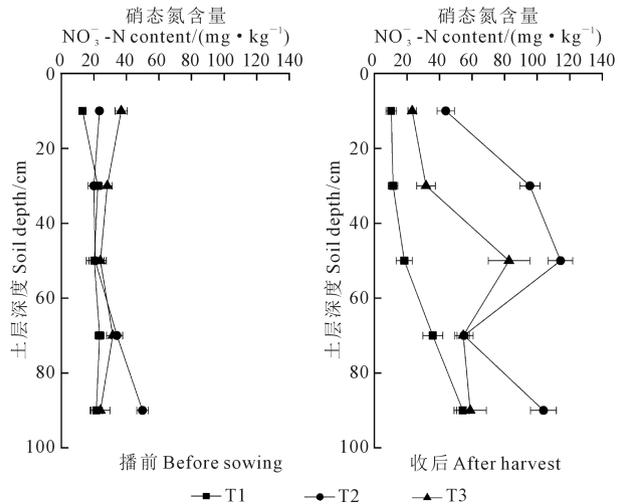


图 5 2017 年玉米不同栽培模式 0~100 cm 土层土壤剖面硝态氮含量

Fig.5 Nitrate content in 0~100 cm soil profile under different cultivations of maize in 2017

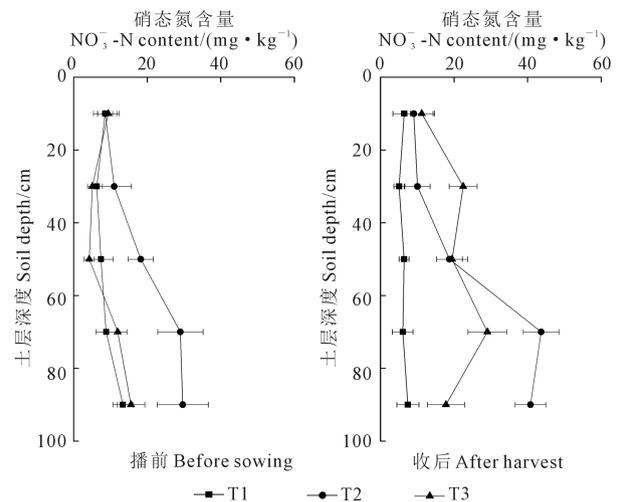


图 6 2018 年玉米不同栽培模式 0~100 cm 土层土壤剖面硝态氮含量

Fig.6 Nitrate content in 0~100 cm soil profile under different cultivations of maize in 2018

理在 0~100 cm 土层铵态氮含量变化趋势基本一致,均在 0~20 cm 土层铵态氮含量最高,且随土层深度的增加而逐渐下降,但降低幅度不同。收获后,相同土层铵态氮含量相比,不同处理在 0~20、20~40 cm 土层铵态氮含量高低基本一致,从高到低依次为 T3>T2>T1,说明不同栽培模式下,0~40 cm 土层铵态氮含量变化也随施氮量增加而增加;但 40~60、60~80、80~100 cm 土层铵态氮含量高低出现波动,且各处理间无显著差异。

2018 年不同栽培模式对春玉米收获后 0~100 cm 土层铵态氮含量的影响如图 8 所示。收获后铵态氮含量显著低于播前,但各处理间无显著差异,

说明玉米吸收利用铵态氮,但由于土壤胶体对  $\text{NH}_4^+$  吸附大,而且铵态氮极易转化,因此变化不明显。

**2.2.3 不同栽培模式 0~100 cm 土层硝态氮积累量的变化** 春玉米收获后不同土层硝态氮积累量如表 2 所示,长期施用有机肥和氮肥对硝态氮积累的影响均达到显著水平,2017 年各土层不同栽培模式硝态氮积累量从高到低依次为  $\text{T2} > \text{T3} > \text{T1}$ , 0~20 cm 土层硝态氮积累量在统计学上差异不显著,但硝态氮积累量与其它土层变化一致,施氮量增加,硝态氮积累量随之增加。模式 T2、T3 0~60 cm 土层硝态氮积累量分别占 61.48%、54.81%,模式 T1 硝态氮积累量占 30.81%。可见,栽培模式 T2、T3 使大部分硝态氮积累在 0~60 cm 土层,防止硝态氮淋溶到土壤下层;栽培模式 T1 使大部分硝态氮积累在 60~

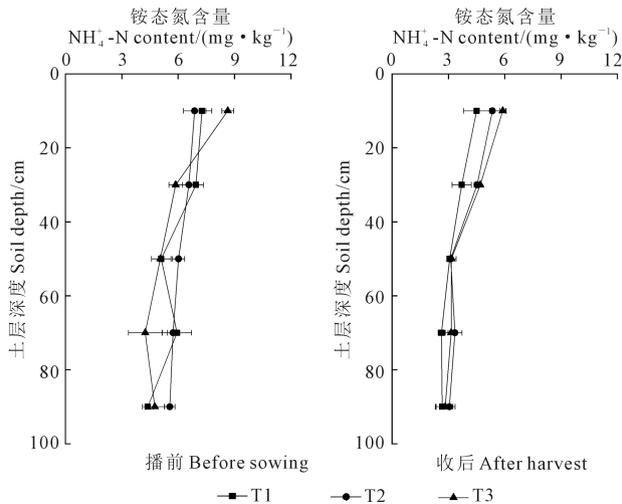


图 7 2017 年玉米不同栽培模式 0~100 cm 土层土壤剖面铵态氮含量

Fig.7 Ammonium nitrogen content in 0~100 cm soil profile under different cultivations of maize in 2017

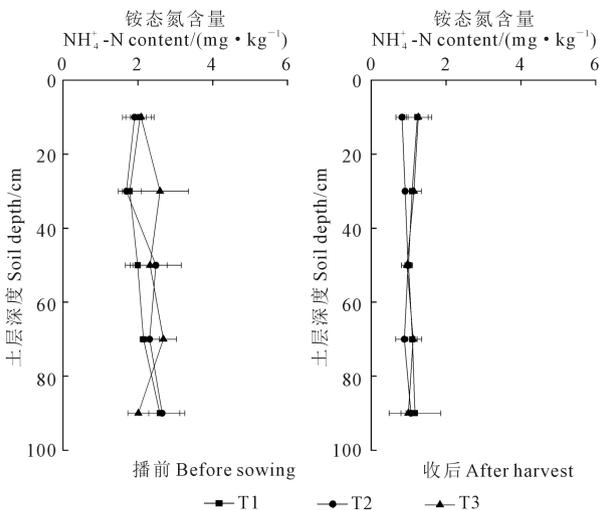


图 8 2018 年玉米不同栽培模式 0~100 cm 土层土壤剖面铵态氮含量

Fig.8 Variations of ammonium nitrogen content in 0~100 cm soil profile under different cultivations of maize in 2018

100 cm 土层,容易造成环境污染。2018 年 T2、T3 各土层硝态氮积累量均大于 T1, 0~20, 20~40 cm 土层 T3 硝态氮积累量显著高于 T2、T1, 40~60 cm 土层无显著差异, 60~80, 80~100 cm 土层 T2 硝态氮积累量显著高于 T1、T3, T2 处理有明显的硝态氮淋失。说明在丰水年,硝态氮更容易向土壤深层淋失。

### 2.3 硝态氮积累量与玉米产量的关系

为确定硝态氮对春玉米产量的贡献,计算了 0~100 cm 土层的硝态氮积累量,拟合了春玉米收获后硝态氮积累量与产量的关系(图 9)。可以看出,两个生长季内 0~100 cm 土层硝态氮积累量与春玉米产量均呈显著正相关,可见,土壤硝态氮是决定春玉米产量的重要因素。但两年有明显的年际差异,2018 年硝态氮积累量与产量相关性大于 2017 年。

### 2.4 不同栽培模式下玉米产量、耗水量和水分利用效率的变化

不同栽培模式对籽粒产量、耗水量和 WUE 的影响如表 3 所示。2017 年研究结果显示,与栽培模式 T1 相比, T2、T3 籽粒产量分别提高 55.4%、64.4%,差异显著; T2、T3 处理生育期耗水量(ET)显著高于 T1,相比 T1, T2、T3 处理 ET 分别提高 5.7%、5.4%; WUE 分别提高 46.9%、55.9%,均达到显著水平。2018 年 T2、T3 处理产量分别比 T1 高 49.7%、23.8%, T2、T3 处理耗水量都小于 T1,差异不显著; T2、T3 处理水分利用效率相较 T1 分别高 58.9%、40.0%,且差异达到显著水平。两年试验结果均显示 T2 和 T3 处理籽粒产量、WUE 显著高于 T1 栽培模式,说明合理的栽培模式和肥料管理投入能显著提高籽粒产量。2017 年 T3 模式产量和 WUE 最高,2018 年 T2 模式产量和 WUE 最高, T2 处理施肥量大于 T3,丰水年水肥利用协调,因此产量更高。

表 2 玉米收获后不同土层土壤硝态氮积累量/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

		Table 2 Nitrate accumulation in different soil layers after maize harvest				
年份 Year	处理 Treatment	土层深度 Soil depth/cm				
		0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
2017	T1	27.29a	30.20b	48.56b	94.71b	143.50b
	T2	115.65a	252.14a	301.95a	145.35a	274.28a
	T3	61.28a	83.73ab	218.42ab	144.16ab	155.47ab
2018	T1	17.04ab	13.32b	16.91a	15.98c	19.60b
	T2	23.85ab	26.51b	49.43a	115.27a	107.65a
	T3	29.62a	59.33a	51.34a	76.70b	46.95b

注:不同字母表示在  $P < 0.05$  水平上不同处理间差异显著。下同。

Note: Different letters within each column mean significant differences at  $P < 0.05$  level. The same as below.

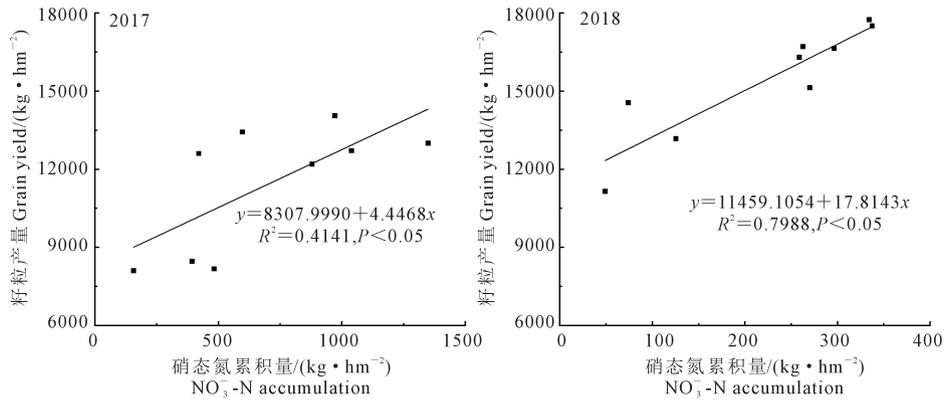


图 9 0~100 cm 土层土壤硝态氮积累量与春玉米产量的关系

Fig.9 Relationships of  $\text{NO}_3\text{-N}$  accumulation in 0~100 cm soil layers with spring maize yield

表 3 不同栽培模式下玉米产量、生育期耗水量和水分利用效率的变化

Table 3 Variations of grain yield, water consumption and WUE in different cultivations

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield $/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	耗水量 Water consumption $/\text{mm}$	水分利用效率 Water use efficiency $/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1})$
2017	T1	8130b	404.71ab	20.14b
	T2	12637ab	427.21a	29.59a
	T3	13362a	426.71a	31.39a
2018	T1	12963c	503.37a	25.75b
	T2	19409a	477.09a	40.93a
	T3	16045b	471.94a	36.04a

### 3 讨论

农田土壤水分的运移受到降雨、覆盖、施肥方式、种植密度等多种因素的影响。本试验基于当地传统栽培模式(T1),结合上述多种因素形成了2种高产高效栽培模式:化肥有机肥高密度超高产模式(T2)、化肥有机肥中密度高效高产模式(T3)。2017年0~200 cm 土层土壤储水量均低于传统栽培模式T1,但除去乳熟期外其它生育期均无显著差异;而且处理T2、T3生育期耗水量、产量和WUE均显著高于T1。黄土高原旱作春玉米农田土壤剖面水分动态报道较多,有研究认为玉米耗水量和耗水深度随产量提高而增加,高产导致深层土壤水分过耗,土壤贮水量亏缺<sup>[14]</sup>。本试验在2017年从拔节期到乳熟期连续无效降水 $\leq 10$  mm 超过20 d,属于中度干旱<sup>[15]</sup>,而此时玉米植株生长旺盛、籽粒灌浆,耗水量大,气温升高,蒸腾蒸散作用强,因此土壤储水量急剧下降,后期随降雨的增多土壤储水量也增多。T2、T3土层土壤储水量低于T1,也可能是地膜覆盖、施肥方式和种植密度等因素引起土壤水分运

移、水肥协同效应、作物根系分布及其吸水特性差异所致,需要进一步研究<sup>[16]</sup>。孙仕军等<sup>[17]</sup>研究认为,雨养条件下,裸地玉米种植密度对土壤储水区含水量分布影响表现为:高密度时,地表下20~40 cm 土层土壤水分变化最大,低密度时变化最小;玉米生长期内干旱无雨时段,土壤剖面含水率在20~40 cm 土层处消耗最多,该深度为根部的主要储水和耗水区间。在整个玉米生育期,0~200 cm 土层土壤含水量受降雨和生育期影响较大,0~60 cm 土层土壤水分变化最大,说明根系主要吸收0~60 cm 土层土壤水分;从乳熟期到成熟期,下层(120~200 cm)土壤含水量显著降低,说明玉米生长大量消耗了土壤上层水分,还通过巨大的蒸腾拉力使下层土壤中的水分向上移动,阻止降雨入渗<sup>[18]</sup>。水分状况、施肥方式和覆膜对玉米的生长发育和耗水规律的影响最终反映在水分利用效率和产量上<sup>[19]</sup>。两年试验结果均显示T2、T3处理产量和WUE均显著高于T1,可见覆膜、施肥、增加种植密度等综合效应可显著提高籽粒产量和水分利用效率,尤其是在干旱年份化肥有机肥中密度高产高效模式(T3)能更好地利用土壤水和降水,提高水分利用效率从而实现高产。

长期施用有机肥或化肥及其配施均能提高土壤各土层硝态氮、铵态氮含量及其积累量<sup>[10]</sup>。已有研究表明,硝态氮含量随施氮量的增加而增加,长期高施氮量处理的硝态氮在土壤深层的含量及累积明显增加<sup>[20]</sup>。本试验结果表明,随着施氮量的增加,硝态氮含量增加,2017年0~60 cm 土层硝态氮含量显著增加,0~40 cm 土层铵态氮含量增加,两年试验结果表明各土层的硝态氮积累量均增加。处理T2、T3大部分硝态氮积累在0~60 cm 土层,处理T1大部分硝态氮积累在60~100 cm 土层,可能是因

为地膜覆盖增加表层土硝态氮累积,降低深层土硝态氮累积<sup>[21]</sup>。施用有机肥可滞缓硝态氮向土壤深层淋溶,而化学氮肥较有机肥容易淋失,但施肥对铵态氮向土壤深层迁移趋势的影响不明显<sup>[22]</sup>。随种植年限增加,施氮对土壤硝态氮残留的影响逐渐增加<sup>[10]</sup>。本试验经过 6 a 的长期施肥,2017 年播前硝态氮、铵态氮含量高,经过两季作物生长、肥料投入后,硝态氮积累量显著增加,铵态氮含量无明显变化;可能是因为作物生长后期,地膜覆盖提高土温,促进了土壤氮素矿化,而作物需氮量少,导致硝态氮在 0~100 cm 土层累积<sup>[21]</sup>。施肥对铵态氮向土壤深层迁移趋势的影响不明显,王少平等<sup>[23]</sup>也认为,与硝态氮相比,铵态氮更易被土壤吸附,它只有在特定条件如土壤水分接近饱和的情况下借助下渗流的驱动才可能在土壤剖面中随水迁移。2017 年 80~100 cm 土层模式 T2 硝态氮含量显著高于其他处理,淋溶现象明显,硝态氮含量达到 103.89 mg·kg<sup>-1</sup>,污染深层土壤;2018 年 T2 处理 60~80,80~100 cm 土层硝态氮累积量达到 115.27、107.65 kg·hm<sup>-2</sup>,占 0~100 cm 土层硝态氮含量的 69%,硝态氮淋失现象明显。这是由于 T2 处理投入高量氮肥和有机肥,超过作物的吸收量,造成土壤硝态氮的累积<sup>[24]</sup>。模式 T3 硝态氮含量与模式 T1 无显著差异,淋溶现象不明显,但其籽粒产量显著高于模式 T1,其硝态氮含量整体上较低,淋溶现象不明显,与低投入的模式 T1 没有显著差异。说明模式 T2 虽然高产,但氮肥投入量较高,造成土壤硝态氮淋溶增加,而在 T3 模式下,能有效控制土壤硝态氮淋溶,又能保证春玉米产量。T3 种植模式对提高粮食产量,氮素利用,减少环境污染有良好的效果。

本研究发现,不同深度土壤硝态氮积累量与早作春玉米产量均具有一定相关关系,硝态氮是决定夏玉米产量的重要因素<sup>[10]</sup>。这说明不同土层深度的硝态氮可作为春玉米直接吸收利用的有效氮素。而铵态氮积累量与春玉米产量无关,这可能是由于玉米对硝态氮的吸收量大于铵态氮的吸收量<sup>[25]</sup>。此外,有些研究认为土壤的硝态氮数量占铵态氮和硝态氮总量的 90% 以上,在反应土壤供氮特性方面与两者之和的趋势完全一致<sup>[26-27]</sup>。2018 年硝态氮积累量与产量的相关系数明显高于 2017 年,可能与两年降水不同有关。2018 年降水较多且各生育期分配均匀,由于玉米的生长未受到水分的限制,氮素供应是限制产量的主要因素,不同土层的硝态氮均发挥了充分作用。2017 年拔节期到乳熟期降雨少,受到中度干旱胁迫,籽粒产量因水分缺乏表现

出与硝态氮累积量不同的变化趋势<sup>[13]</sup>。总之,合理的施肥配比及合理的有机无机肥配施可以降低土壤硝态氮、铵态氮的积累及淋溶,有利于提高作物产量,维持农田土壤生态系统的稳定性,促进农业可持续发展及保护地下水资源<sup>[10]</sup>。

## 4 结 论

研究表明,不同深度土壤硝态氮积累量与春玉米产量均具有正相关关系,硝态氮是决定春玉米产量的重要因素。相较传统栽培模式(T1),化肥有机肥中密度高产高效栽培模式(T3)无论在干旱年份,还是丰水年春玉米均能获得高产和高的水分利用效率。化肥有机肥高密度超高产栽培模式(T2)施肥量超过作物吸收利用,0~100 cm 土层土壤硝态氮积累量高,淋溶趋势明显。T3 栽培模式既能保证高产、高 WUE 又能保证较少的硝态氮淋溶,是本试验的最优栽培模式。

## 参 考 文 献:

- [1] 王飞,李霞,王秀康,等.黄土塬区水肥利用效率的影响因素分析[J].现代农业科技,2018,(22):196.
- [2] 任昊,程乙,刘鹏,等.不同栽培模式对夏玉米根系性能及产量和氮素利用的影响[J].中国农业科学,2017,50(12):2270-2281.
- [3] 陈国平,高聚林,赵明,等.近年我国玉米超高产田的分布、产量构成及关键技术[J].作物学报,2012,38(01):80-85.
- [4] 陈传永,侯玉虹,孙锐,等.密植对不同玉米品种产量性能的影响及其耐密性分析[J].作物学报,2010,36(7):1153-1160.
- [5] Presterl T, Seitz G, Landbeck M, et al. Improving nitrogen use efficiency in European maize estimation of quantitative genetic parameters [J]. Crop Science, 2003, 43:1259-1265.
- [6] Zhang W F, Cao G X, Li X L, et al. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers [J]. Nature, 2016, 537 (7622): 671-674.
- [7] 王小林.黄土塬区玉米高产高效栽培生理生态基础研究[D].杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2016.
- [8] 张仁和,胡富亮,杨晓钦,等.不同栽培模式对旱地春玉米光合特性和水分利用率的影响[J].作物学报,2013,39(9):1619-1627.
- [9] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs [J]. Nature, 2014, 514(7523):486-489.
- [10] 南镇武,刘树堂,袁铭章,等.长期定位施肥土壤硝态氮和铵态氮积累特征及其与玉米产量的关系[J].华北农学报,2016,31(2):176-181.
- [11] 张云贵,刘宏斌,李志宏,等.长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究[J].植物营养与肥料学报,2005,11(6):711-716.
- [12] 刘顺国,汪景宽.长期地膜覆盖对棕壤剖面中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 动态变化的影响[J].土壤通报,2006,37(3):443-446.
- [13] 苗艳芳,李生秀,扶艳艳,等.旱地土壤铵态氮和硝态氮累积特征及其与小麦产量的关系[J].应用生态学报,2014,25(4):1013-1021.