高利,王术,籍强,等.耕作与施氮对玉米氮代谢关键酶及生长的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(5):27-40.
Gao L, Wang S, Ji Q,et al.Effects of tillage and nitrogen application on key enzymes of nitrogen and growth in maize[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(5):27-40.
**doi**: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202503002

# 耕作与施氮对玉米氮代谢关键酶及生长的影响

高利[1],王术[2*],籍强[3],白向历[1],田惠[1]

(1.辽东学院 种子科学与工程系,辽宁 丹东,118003;2.沈阳农业大学 农学院,辽宁 沈阳,110866;
3.辽宁宏硕种业科技有限公司,辽宁 丹东,118003)

**摘　要**:[目的]本文旨在探讨不同耕作方式与施氮量对玉米氮代谢关键酶活性、根系生长、氮素利用效率和产量的影响,为玉米高效栽培提供科学依据。[方法]于2023-2024年连续2年开展大田定位试验,通过设置翻耕、免耕、深松这3种耕作方式和0、100、200、300 kg/hm$^2$这4种施氮量共12个处理,研究不同耕作方式与施氮量对土壤全氮含量、碱解氮含量、硝酸还原酶活性(NRA)、谷氨酰胺合成酶活性(GSA)、根长、根系活力、氮素利用效率和产量的影响。[结果]深松与施氮量300 kg/hm$^2$处理可显著提高玉米地0~40 cm土层土壤全氮和碱解氮含量。与对照相比,种植第1年和第2年分别显著提高84.89%、89.43%和37.66%、42.88%。深松与施氮量200 kg/hm$^2$处理显著提高了玉米不同生育期NR、GS活性、根长、根系活力及最终的产量。与对照相比,种植第1年和第2年生育期(拔节期、吐丝期、灌浆期)平均NR、GS活性分别显著提高50.92%和40.38%,生育期(拔节期、吐丝期、成熟期)平均根长、根系活力分别显著提高40.21%和38.76%,产量分别显著提高31.95%和30.10%。进一步拟合耕作方式、施氮量与产量的关系发现,产量与施氮量之间呈现二次函数关系,以深松模式下施氮量167.33 kg/hm$^2$时,理论产量最高,为16 027.63 kg/hm$^2$。深松与施氮量200 kg/hm$^2$对氮肥利用率和氮肥农学利用率促进效果最为突出,深松与施氮量100 kg/hm$^2$对氮肥偏生产力促进效果最为突出。相关性分析和主成分分析表明,土壤全氮含量、碱解氮含量、NRA、GSA、根长、根系活力对玉米产量均有较大的正向促进作用,是玉米增产的关键因子,且深松与施氮量200 kg/hm$^2$处理综合得分最高。[结论]不同耕作方式与施氮量可有效提高土壤氮素含量,提升氮代谢关键酶活性,促进玉米根系伸长、增强根系活力,改善根系形态构建和吸收功能,提高氮素利用效率,最终实现玉米产量提升。从氮素利用效率、产量及拟合结果综合考虑,深松为最佳耕作方式,施氮量167~200 kg/hm$^2$为宜,可在东北玉米生产中进一步推广应用。

**关键词**:耕作方式; 施氮量; 氮代谢关键酶; 根系生长; 产量
**中图分类号**:S316　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)05-0027-14

## Effects of tillage and nitrogen application on key enzymes of nitrogen and growth in maize

Gao Li[1], Wang Shu[2*], Ji Qiang[3], Bai Xiangli[1], Tian Hui[1]

(*1.Department of Seed Science and Engineering, Liaodong University, Dandong 118003, China; 2.College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 3.Liaoning Hongshuo Seed Industry Technology Co., Ltd, Dandong 118007, China*)

**Abstract**:[Objective]The research focused on exploring the effects of different tillage methods and nitrogen application rates on key nitrogen metabolism enzyme activities, root growth, nitrogen use efficiency, and yield in maize, to provide a scientific basis for high-efficiency maize cultivation.[Methods]A fixed-site field experiment was carried out over two consecutive years (2023-2024). Three tillage methods, namely ploughing, no-tillage, and deep loosening, and four nitrogen application rates

**收稿日期**:2025-03-03　　**修回日期**:2025-05-30
**基金项目**:辽宁省科技计划联合计划项目(2024-MSLH-178);辽东学院博士科研启动资金项目(2022BS008);辽东学院技术开发(委托)项目(202521060500109)
**作者简介**:高利(ORCID:0009-0009-6532-8342),副教授,研究方向:作物栽培,E-mail:G18359201475@163.com
*通信作者:王术(ORCID:0009-0009-5580-9361),教授,博士,E-mail:wangshu196810@163.com

(0, 100, 200, and 300 kg/hm$^2$) were established to study their effects on soil total nitrogen, alkali-hydrolyzed nitrogen, nitrate reductase activity (NRA), glutamine synthase activity(GSA), root length, root activity, nitrogen use efficiency, and yield. [Results]The combination of subsoiling with a nitrogen application rate of 300 kg/hm$^2$ significantly increased soil total nitrogen and alkali-hydrolysable nitrogen content in the 0~40 cm soil layer. Compared with the control group, these values were significantly increased by 84.89%, 89.43% and 37.66%, 42.88% in the first and second years, respectively. The treatment of subsoiling with 200 kg/hm$^2$ nitrogen significantly enhanced NR and GS activities, root length, root viability, and final yield across different growth stages. Compared to the control group, the average NR and GS activities during the growth periods (jointing, silking, and grain filling stage) increased significantly by 50.92% and 40.38%, respectively. The average root length and root activity during the growth periods (jointing, silking, and maturity stage) increased significantly by 40.21% and 38.76%, respectively, and the yield increased significantly by 31.95% and 30.10%, respectively. Further analysis of the relationship between tillage, nitrogen rate, and yield revealed a quadratic relationship between yield and nitrogen application rate. Under subsoiling, the theoretical maximum yield was 16,027.63 kg/hm$^2$ at a nitrogen rate of 167.33 kg/hm$^2$. Subsoiling combined with 200 kg/hm$^2$ nitrogen had the most pronounced effect on nitrogen fertilizer utilization rate and agronomic nitrogen use efficiency, while subsoiling with 100 kg/hm$^2$ nitrogen most effectively promoted the partial factor productivity of nitrogen. Correlation and principal component analysis indicated that soil total nitrogen, alkali-hydrolysable nitrogen, NRA, GSA, root length, and root activity all had significant positive effects on corn yield and were key factors for yield increase. The treatment combining subsoiling with 200 kg/hm$^2$ nitrogen received the highest comprehensive score. [Conclusion]Adopting different tillage methods and nitrogen application rates can effectively increase soil nitrogen content, key nitrogen metabolism activities, root elongation and vitality, root architecture and uptake function, and nitrogen use efficiency, ultimately increasing maize yield. Considering nitrogen use efficiency, yield, and model fitting results, subsoiling is the recommended tillage method with an optimal nitrogen application rate of 167~200 kg/hm$^2$, which can be further promoted in corn production in Northeast China.

**Keywords**: Farming methods, Nitrogen application rate, Key enzymes of nitrogen metabolism, Root growth, Output

东北地区是我国最大的商品粮生产基地,实际生产过程中,大多数农民一直采用传统耕作方式,使得土壤有效耕层变浅,进而导致土壤结构恶化,严重影响作物根系的生长和对养分的吸收,限制了该区粮食的生产[1-2]。农民还常常过量施用氮肥以期获得作物高产,然而过量和不合理施肥会显著降低肥料利用率,导致养分损失,作物减产,还造成环境污染等一系列问题[3-4]。玉米(*Zea mays* L.)作为我国种植面积最广泛的农作物之一,其高产稳产对于保障我国粮食安全具有重要作用[5]。然而东北春玉米生产中普遍存在长期不合理耕作、氮肥施用过多、耕层质量差等问题,导致只有约10%的氮素被有效利用,使玉米生育中后期出现脱氮现象,严重制约了玉米生长发育及养分效率的提升,同时给环境带来风险[6]。因此,亟需改进当前玉米耕作方式和氮肥施用量,以应对东北地区玉米产量提升所面临的挑战。

耕作方式和氮肥作为影响作物生长与产量的核心因素,二者的耦合效应备受学界关注。已有研究证实,相较于单一因素作用,二者的交互作用能更高效地改善土壤养分环境、调节作物根系生长,从而显著提升作物生产力[7-10]。有研究发现,深松与适量施氮的协同作用能够有效改善土壤氮素供应能力,与翻耕不施氮处理相比,深松结合180 kg/hm$^2$施氮量可显著提高0~20 cm土层的氮素有效性,在该土层深度下,土壤硝态氮和铵态氮含量有显著提高,而单一深松或氮处理难以实现同等效果[7]。在不同施氮水平下,深松施氮二者交互作用对酶活性的调控效应更为显著。施氮量为0 kg/hm$^2$和120 kg/hm$^2$时,深松结合低氮可使氮代谢关键酶活性峰值提前至开花期,且峰值活性较单一深松处理有显著提高[8]。深松结合60 kg/hm$^2$施氮量可显著提升团棵期至成熟期作物的根系活力和根长,较单一深松处理根系活力提高16%,较单一施氮处理根长增加23%[9]。还有研究发现,深松与施氮量240 kg/hm$^2$能显著提高玉米的氮素利用效率和干物质累积量,进而提高产量,较单一耕作施氮处理提升显著,其中施氮处理的影响优于耕作处理[10]。

然而,现有研究仍存在较大局限性,尽管已知耕作方式和氮肥对作物生长有影响,但它们如何协同调控玉米氮代谢关键酶活性,以及这种调控如何进一步影响根系的形态建成、生理功能和对氮素的吸收利用尚不清楚。此外,东北地区因其

特殊的黑土资源、冷凉气候和独特的种植习惯,在耕作方式与氮肥耦合综合影响方面,与其它地区的研究结果可能存在差异,有待进一步深入探究。因此,本研究设计不同耕作方式与施氮量的大田定位试验,通过测定土壤氮素和玉米氮代谢关键酶、根系生长等方面的指标,研究耕作方式与施氮量对玉米土壤养分状况、植株氮素代谢能力、根系发育特征和产量的影响,探寻最佳耕作施氮模式,阐明二者耦合下玉米增产机理,旨在为东北地区粮食增产提供理论依据和技术支撑。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验区概况

本试验于2023-2024年在辽宁省丹东市辽东学院作物育种试验基地(40°09′ N,124°26′ E)进行。种植第1年降水量551.2 mm,年均气温10.83 ℃;种植第2年降水量425.6 mm,年均气温11.33 ℃;每月降水量、气温见图1。进行试验前0～40 cm土层有机质含量14.83 g/kg、全氮含量0.65 g/kg、全磷含量0.43 g/kg、有效磷含量53.74 mg/kg、速效钾含量162.88 mg/kg。

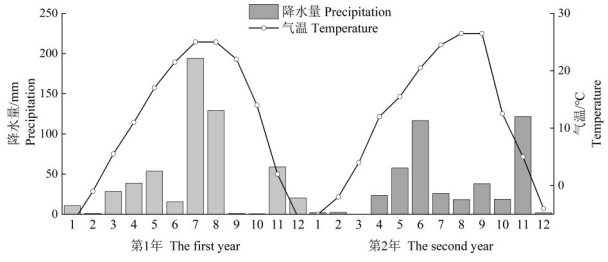



**图1　试验期间月降水气温示意图**

**Fig.1**　Schematic diagram of monthly precipitation and temperature during the experiment

### 1.2　试验设计

玉米品种选用'宏硕738'。供试肥料为尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 18%,$P_2O_5$ 46%)、硫酸钾($K_2O$ 50%),有机肥为鸡粪堆肥(有机质36.12%,N 1.31%,$P_2O_5$ 1.05%,$K_2O$ 0.75%)。

本试验采取双因素裂区试验设计,主因素为耕作方式:翻耕(FG)、免耕(MG)、深松(SG),次因素为施氮量:0 kg/hm²(N0)、100 kg/hm²(N1)、200 kg/hm²(N2)、300 kg/hm²(N3),共12个处理组合,采用随机区组设计,3次重复,每小区面积为150 m²(15 m×10 m)。宽窄行种植,宽行70 cm,窄行30 cm,株距24 cm,播种密度83 333株/hm²。翻耕指前茬作物收获后用铧式犁翻耕15～20 cm,免耕指前茬作物收获后不进行任何土壤耕作措施,深松指前茬作物收获后用深松机深松15～20 cm。磷肥80 kg/hm²、钾肥80 kg/hm²和有机肥9000 kg/hm²全部基施;氮肥基施60%,拔节期追施40%。

### 1.3　试验方法

#### 1.3.1　土壤氮素

在玉米收获期用5点取样法采集0～20、20～40 cm土层土壤,风干后分别过0.15和2 mm筛用于土壤全氮和碱解氮含量测定,其中土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定,碱解氮含量采用碱解扩散法测定[11]。

#### 1.3.2　玉米氮代谢关键酶

分别于玉米拔节期、吐丝期和灌浆期(氮代谢明显时期),每个小区选取5株长势均匀的植株采集功能叶(吐丝前取顶部第一片全展开叶,吐丝及其以后取穗位叶),剪切叶片中部去叶脉部分用液氮速冻后带回实验室,置于-80℃超低温冰箱中保存待测酶活性,硝酸还原酶活性(NRA)、谷氨酰胺合成酶活性(GSA)均使用南京建成生物工程研究所提供的试剂盒进行测定。

#### 1.3.3　玉米根系生长

在玉米的拔节期、吐丝期、成熟期,每个小区内挑选3株长势均匀的玉米植株,以植株为中心,挖掘长30 cm、宽12 cm、高60 cm的土体[12],将挖掘出的土体装入孔径0.425 mm的网袋中进行低水压冲洗。根系样本经冲洗后,使用扫描仪(Epson Perfection V700 photo, Seiko Epson Crop, 日本)在500万像素下扫描获得根系图像,用WinRHIZO(Regent Instrument Inc.,加拿大)进行分析获得根长,再用2,3,5-氯化三苯基四氮唑(TTC)染色法测定根系活力[13]。

#### 1.3.4　玉米产量

玉米成熟后按小区收获,风干后脱粒测产(单位:kg/hm²),测产区域面积为5 m²(5 m×1 m),风干后脱粒按14%含水量折合计算,取平均值作为单位面积籽粒产量。

#### 1.3.5　玉米氮素利用率

氮肥偏生产力(PFP,kg/kg)=施氮区产量/施氮量。

氮肥农学利用率(AE,kg/kg)=(施氮区产量-不施氮区产量)/施氮量。

氮素利用率(NUE,%)=(施氮区-不施氮区)地上部总吸氮量/施氮量×100%。

### 1.4 数据分析与作图

用Excel 2021进行数据整理;用SPSS 27进行方差分析(LSD);用Origin 2024进行相关性分析和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕作方式与施氮量对土壤氮素含量的影响

#### 2.1.1 土壤全氮含量

由表1可见,耕作方式与施氮量可显著影响土壤全氮含量,其中,免耕、深松效果优于翻耕,且施氮量越高,全氮含量越高。相同耕作方式下,施氮处理的0~20 cm土层全氮含量较未施氮提高24.05%~51.85%,20~40 cm土层提高17.39%~47.83%,且施氮300 kg/hm²时含量最高;相同施氮量下,免耕、深松的0~20 cm土层含量较翻耕提高24.42%~36.05%,20~40 cm土层高18.92%~34.29%。深松与施氮量300 kg/hm²效果最优,与翻耕不施氮相比,种植第1年0~20 cm、20~40 cm土层含量分别提高93.24%、75.38%,第2年分别提高86.97%、92.59%。连续种植2年的结果基本一致,即深松与施氮量300 kg/hm²提升效果最优,表明增施氮肥可有效提高土壤全氮含量,同时深松可有效降低全氮流失,其中施氮量处理影响明显大于耕作方式处理。

#### 2.1.2 土壤碱解氮含量

由表2可见,耕作方式与施氮量可显著影响土壤碱解氮含量,其中,免耕、深松效果优于翻耕,且施氮量越高,碱解氮含量越高。相同耕作方式下,施氮处理的0~20 cm土层碱解氮含量较未施氮提高14.21%~24.90%,20~40 cm土层提高16.23%~31.40%,且施氮300 kg/hm²时含量最高;相同施氮量下,免耕、深松的0~20 cm土层含量较翻耕提高4.37%~14.53%,20~40 cm土层高5.50%~11.79%。深松与施氮量300 kg/hm²效果最优,与翻耕不施氮相比,种植第1年0~20、20~40 cm土层含量分别提高33.93%、42.28%,第2年分别提高43.26%、42.46%。连续种植2年结果基本一致,深松与施氮量300 kg/hm²提升效果最优,说明增施氮肥可有效提高土壤碱解氮含量,同时深松因其特性有效降低碱解氮流失,其中

表1 耕作方式与施氮量对土壤全氮含量的影响

**Table 1** Effects of tillage combined with different Nitrogen rates on soil total nitrogen content **g/kg**

| 耕作处理 Tillage treatments | 施氮处理 Nitrogen treatment | 种植第1年 The first year | | 种植第2年 The second year | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 0~20 cm | 20~40 cm | 0~20 cm | 20~40 cm |
| FG Ploughing | N0:0 kg/hm² | 0.74±0.11Cb | 0.65±0.06Bb | 0.69±0.04Bb | 0.54±0.11Bb |
| | N1:100 kg/hm² | 0.85±0.14Cab | 0.72±0.14Cab | 0.78±0.11Bab | 0.67±0.10Bab |
| | N2:200 kg/hm² | 0.89±0.06Cab | 0.75±0.10Bab | 0.92±0.03Bab | 0.75±0.11Bab |
| | N3:300 kg/hm² | 0.95±0.10Ca | 0.84±0.16Ca | 1.05±0.33Ca | 0.84±0.16ABa |
| MG No-till | N0:0 kg/hm² | 0.82±0.06Bc | 0.69±0.37ABb | 0.85±0.13Ab | 0.73±0.01Ab |
| | N1:100 kg/hm² | 1.05±0.06Bbc | 0.83±0.28Bb | 1.07±0.06Aab | 0.95±0.04Aab |
| | N2:200 kg/hm² | 1.18±0.16Bab | 0.92±0.10ABab | 1.16±0.07Aa | 0.98±0.13ABa |
| | N3:300 kg/hm² | 1.32±0.06Ba | 1.08±0.06Ba | 1.21±0.10Ba | 1.02±0.10Aa |
| SG Deep pine | N0:0 kg/hm² | 0.88±0.14Ab | 0.74±0.03Ab | 0.83±0.13Ab | 0.75±0.06Ab |
| | N1:100 kg/hm² | 1.12±0.11Aab | 0.89±0.08Ab | 1.09±0.21Aab | 0.94±0.07Aa |
| | N2:200 kg/hm² | 1.26±0.16Aa | 0.95±0.11Aab | 1.18±0.10Aab | 1.02±0.04Aa |
| | N3:300 kg/hm² | 1.43±0.07Aa | 1.14±0.10Aa | 1.29±0.08Aa | 1.04±0.08Aa |

注:不同大写字母表示同一施氮量下不同耕作方式处理间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一耕作方式下不同施氮处理间差异显著($P<0.05$),表2~表5与此同。

Note: Different uppercase indicate significant differences among different tillage treatments under the same nitrogen application rate ($P<0.05$), and different lowercase indicate significant differences among different nitrogen application treatments under the same tillage method ($P<0.05$). Tables 2 to 5 are the same.

表2　耕作方式与施氮量对土壤碱解氮含量的影响

**Table 2**　Effects of tillage combined with different nitrogen rates on soil alkali—hydrolyzed nitrogen content　**mg/kg**

| 耕作处理 Tillage treatments | 施氮处理 Nitrogen treatment | 种植第1年 The first year | | 种植第2年 The second year | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 0～20 cm | 20～40 cm | 0～20 cm | 20～40 cm |
| FG Ploughing | N0:0 kg/hm² | 63.28±5.85Cb | 61.03±2.90Cb | 61.03±2.90Cb | 52.36±5.76bC |
| | N1:100 kg/hm² | 72.35±1.74Ca | 69.71±3.82Cab | 69.71±3.82Cab | 61.55±3.31Ca |
| | N2:200 kg/hm² | 74.68±3.07Ca | 73.27±4.27Ca | 73.27±4.27Ca | 63.57±3.73Ca |
| | N3:300 kg/hm² | 78.57±12.61Ca | 76.85±1.65Ca | 76.85±1.65Ca | 68.42±1.26Ba |
| MG No-till | N0:0 kg/hm² | 65.49±8.00Bb | 63.18±1.43Bb | 63.18±1.43Bb | 54.13±0.38bB |
| | N1:100 kg/hm² | 76.58±1.47Bab | 73.81±3.93Ba | 73.81±3.93Ba | 66.09±3.07Ba |
| | N2:200 kg/hm² | 78.49±3.92Ba | 76.52±2.60Ba | 76.52±2.60Ba | 69.84±3.05Ba |
| | N3:300 kg/hm² | 81.04±1.40Ba | 79.66±4.14Ba | 79.66±4.14Ba | 73.04±3.31Aa |
| SG Deep pine | N0:0 kg/hm² | 68.45±1.58Ab | 71.08±2.81Ac | 71.08±2.81Ac | 57.93±0.79cA |
| | N1:100 kg/hm² | 79.55±5.76Aa | 79.54±2.72Ab | 79.54±2.72Ab | 68.75±0.85bA |
| | N2:200 kg/hm² | 82.16±4.71Aa | 83.62±2.93Aab | 83.62±2.93Aab | 72.03±3.14Aab |
| | N3:300 kg/hm² | 84.75±2.35Aa | 87.43±1.68Aa | 87.43±1.68Aa | 74.59±1.09Aa |

施氮量处理影响明显大于耕作方式处理。

### 2.2　耕作方式与施氮量对玉米氮代谢关键酶活性的影响

#### 2.2.1　玉米硝酸还原酶活性

由图2可见,随着生育期的推进,玉米NRA呈先升高后降低趋势。相较于翻耕,免耕和深松可显著提高NRA,随着施氮量增加,NRA呈先升高后降低趋势。氮量相同时,免耕、深松处理较翻耕提高7.46%～21.55%,深松与施氮量200 kg/hm²效果最为突出,与翻耕不施氮相比,种植第1年显著提高相同耕作方式下,拔节期施氮处理NRA较未施氮提高16.13%～29.17%,吐丝期提高15.61%～34.36%,灌浆期提高19.10%～34.41%,均以施氮200 kg/hm²最高;相同施氮量下,拔节期免耕、深松NRA较翻耕提高7.46%～21.55%,吐丝期提高7.73%～24.23%,灌浆期提高6.84%～16.73%。深松与施氮量200 kg/hm²效果最优,与翻耕不施氮相比,种植第1年拔节期、吐丝期、灌浆期NRA分别提高49.69%、57.55%、50.00%,第2年分别提高55.52%、41.84%、52.13%。2年结果基本一致,随着玉米生育期的推进以及不同耕作方式、施氮量的改变,NRA呈现规律性变化。在拔节期、吐丝期和灌浆期均以深松与施氮量200 kg/hm²处理的提升效果最为突出。这表明深松改善了土壤环境,搭配适宜的施氮量,能有效提高NRA,增强玉米对氮素的转化利用能力,其中施氮量处理影响明显大于耕作方式处理。

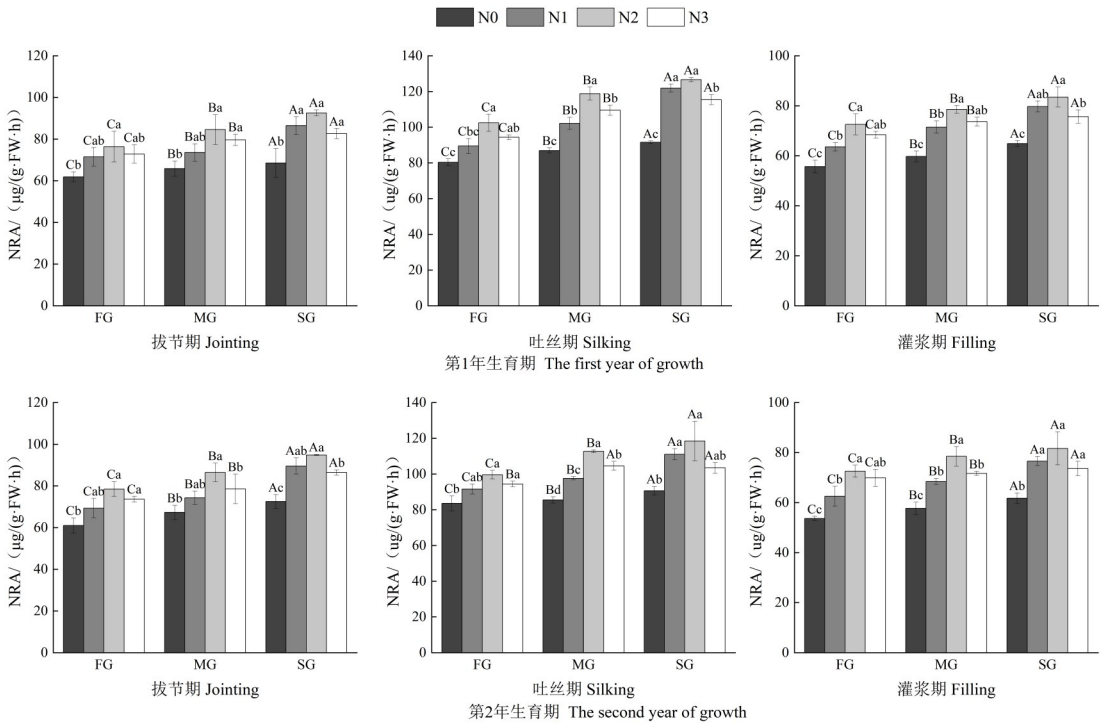
#### 2.2.2　玉米谷氨酰胺合成酶活性

由图3可见,随着生育期推进,玉米GSA呈先快速升高后缓慢降低趋势。相较于翻耕,免耕和深松可显著提高GSA,随施氮量增加,GSA呈先升高后降低趋势。相同耕作方式下,拔节期各施氮处理GSA较未施氮提高15.15%～33.33%,吐丝期提高9.72%～20.00%,灌浆期提高9.52%～23.81%,均以施氮200 kg/hm²最高;相同施氮量下,拔节期免耕、深松GSA较翻耕提高2.78%～19.44%,吐丝期提高6.67%～13.70%,灌浆期提高4.48%～15.87%。深松与施氮量200 kg/hm²效果最优,与翻耕不施氮相比,种植第1年拔节期、吐丝期、灌浆期GSA分别提高53.33%、35.29%、40.68%,第2年分别提高50.00%、36.92%、40.35%。2年结果基本一致,随着玉米生育期从拔节期推进至灌浆期,耕作方式、施氮量的差异使GSA出现了显著变化。在各生育时期,深松与施氮量200 kg/hm²处理对提升GSA效果最佳,即深松优化了土壤环境,搭配适量氮肥供应,有效激发了GSA,增强玉米的氮代谢能力,其中施氮量处理影响明显大于耕作方式处理。

### 2.3　耕作方式与施氮量对玉米根系生长的影响

#### 2.3.1　玉米根长

由表3可见,随着生育期的推进,玉米根长呈先快速升高后缓慢降低的趋势。相较于翻耕,免耕和深松可显著提高根长,随着施氮量增加,根长




FG：翻耕；MG：免耕；SG：深松；N0：0 kg/hm²；N1：100 kg/hm²；N2：200 kg/hm²；N3：300 kg/hm²，不同大写字母表示同一施氮量下不同耕作方式处理间差异显著（$P<0.05$），不同小写字母表示同一耕作方式下不同施氮处理间差异显著（$P<0.05$），图3～图4同

FG: Ploughing; MG: No-till; SG: Deep pine; N0: 0 kg/hm²; N1: 100 kg/hm²; N2: 200 kg/hm²; N3: 300 kg/hm². Different uppercase indicates significant differences among different tillage treatments under the same nitrogen application rate ($P<0.05$), and different lowercase indicate significant differences among different nitrogen application treatments under the same tillage method ($P<0.05$). The same as Fig. 3 and Fig. 4

**图2 耕作方式与施氮量对NRA的影响**

**Fig.2** Effects of tillage combined with different nitrogen rates on NRA

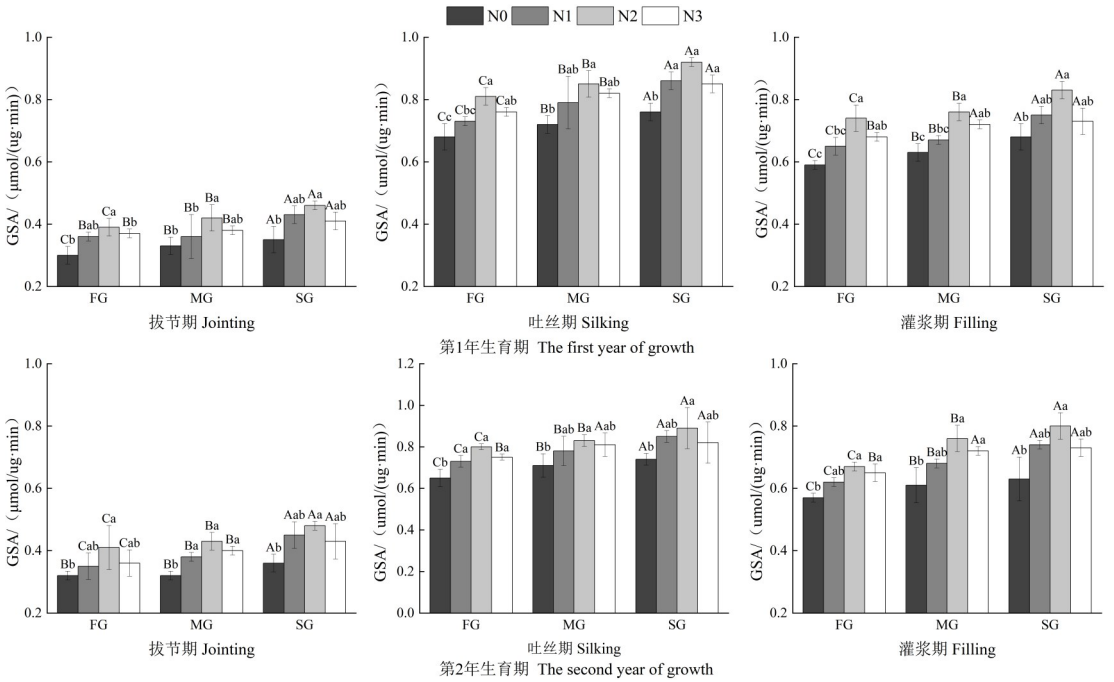



**图3 耕作方式与施氮量对GSA的影响**

**Fig.3** Effect of tillage combined with different nitrogen rates on GSA

呈先升高后降低趋势。相同耕作方式下,拔节期各施氮处理根长较未施氮提高12.50%～20.21%,吐丝期提高12.36%～24.87%,成熟期提高16.36%～35.17%,均以施氮200 kg/hm²最长;相同施氮量下,拔节期免耕、深松根长较翻耕提高2.88%～7.77%,吐丝期提高5.15%～11.55%,成熟期提高9.90%～20.96%。深松与施氮量200 kg/hm²效果最优,与翻耕不施氮相比,种植第1年拔节期、吐丝期、成熟期根长分别提高27.11%、33.74%、59.02%,第2年分别提高27.68%、38.50%、51.65%。种植2年结果基本一致,均以深松与施氮量200 kg/hm²处理对玉米根长提升效果最佳,说明深松为根系延伸创造了适宜环境,搭配适量氮肥供应,使得玉米根系更为发达,施氮量处理影响明显大于耕作方式处理。

**表3　耕作方式与施氮量对玉米根长的影响**

**Table 3**　Effects of tillage methods combined with different nitrogen rates on corn root length　　**cm**

| 年份 Year | 耕作处理 Tillage treatment | 施氮处理 Nitrogen treatment | 拔节期 Jointing | 吐丝期 Silking | 成熟期 Maturity |
|---|---|---|---|---|---|
| 种植第1年 The first year | FG Ploughing | N0:0 kg/hm² | 515.18±30.63Cb | 1 035.93±18.98Cc | 706.55±13.12Cd |
| | | N1:100 kg/hm² | 561.42±16.74Cab | 1 123.67±17.81Cb | 783.49±16.49Cc |
| | | N2:200 kg/hm² | 609.75±8.12Ca | 1 259.49±5.70Ca | 938.47±20.90Ca |
| | | N3:300 kg/hm² | 589.42±22.43Bab | 1 183.47±42.27Cb | 856.36±9.76Bb |
| | MG No-till | N0:0 kg/hm² | 525.68±29.23Bb | 1 083.48±36.59Bc | 754.35±16.28Bd |
| | | N1:100 kg/hm² | 591.42±15.68Ba | 1 208.71±48.89Bb | 875.31±11.71Bc |
| | | N2:200 kg/hm² | 636.59±9.43Ba | 1 347.59±12.42Ba | 1 036.57±9.96Ba |
| | | N3:300 kg/hm² | 615.47±15.43Aa | 1 273.68±15.41Bab | 943.68±41.69Ab |
| | SG Deep pine | N0:0 kg/hm² | 542.75±5.85Ab | 1 136.85±40.18Ac | 831.49±33.18Ac |
| | | N1:100 kg/hm² | 638.41±27.55Aa | 1 326.33±4.27Aab | 1 075.63±11.72Aa |
| | | N2:200 kg/hm² | 654.82±40.22Aa | 1 385.42±15.64Aa | 1 123.58±2.50Aa |
| | | N3:300 kg/hm² | 616.59±12.16Aa | 1 285.74±3.46Ab | 942.59±57.98Ab |
| 种植第2年 The second year | FG Ploughing | N0:0 kg/hm² | 503.28±19.83Cb | 1 026.38±17.03Cc | 721.06±21.92Cc |
| | | N1:100 kg/hm² | 561.84±2.01Ca | 1 195.47±4.55Cb | 798.52±32.75Cb |
| | | N2:200 kg/hm² | 613.55±35.27Ca | 1 315.36±1.58Ca | 936.48±12.54Ca |
| | | N3:300 kg/hm² | 583.92±11.65Ba | 1 254.87±44.52Cab | 845.09±26.16Cb |
| | MG No-till | N0:0 kg/hm² | 521.75±18.82Bc | 1 108.91±119.27Bb | 785.34±16.24Bc |
| | | N1:100 kg/hm² | 575.81±5.40Bb | 1 251.43±30.59Bab | 895.73±11.16Bb |
| | | N2:200 kg/hm² | 621.83±20.53Ba | 1 369.88±7.00Ba | 1 021.56±20.90Ba |
| | | N3:300 kg/hm² | 608.46±9.94Aab | 1 308.49±24.66Ba | 973.84±21.79Aa |
| | SG Deep Pine | N0:0 kg/hm² | 537.15±16.98Ab | 1 153.68±43.25Ac | 836.22±30.08Ac |
| | | N1:100 kg/hm² | 619.88±9.48Aa | 1 376.35±13.15Aab | 1 031.54±73.37Aab |
| | | N2:200 kg/hm² | 642.59±5.80Aa | 1 421.56±24.31Aa | 1 093.47±18.50Aa |
| | | N3:300 kg/hm² | 604.57±27.75Aa | 1 318.49±11.96Ab | 948.75±7.20Bbc |

2.3.2　玉米根系活力

由表4可见,随着生育期推进,玉米根系活力呈先升高后降低的趋势。相较于翻耕,免耕和深松可显著提高根系活力,随施氮量增加,根系活力呈先升高后降低趋势。相同耕作方式下,拔节期各施氮处理根系活力较未施氮提高17.89%～32.45%,吐丝期提高8.94%～19.78%,成熟期提高18.53%～46.58%,均以施氮200 kg/hm²最高;相同施氮量下,拔节期免耕、深松根系活力较翻耕提高9.78%～13.95%,吐丝期提高3.4%～7.24%,成熟期提高14.00%～24.71%。深松与施氮量200 kg/hm²效果最优,与翻耕不施氮相比,种植第1年拔节期、吐丝期、成熟期根系活力分别提高23.35%、23.35%、76.29%,第2年分别提高41.51%、28.05%、72.70%。2年结果基本一致,均以深松与施氮量200 kg/hm²处理对玉米根系活

力提升效果最佳,说明深松为根系呼吸与生长营造良好的土壤环境,搭配适量的氮肥供应为根系生理活动提供充足养分,维持根系细胞的活性,其中施氮量处理影响明显大于耕作方式处理。

**表4 耕作方式与施氮量对玉米根系活力的影响**

**Table 4** Effects of tillage methods combined with different nitrogen rates on maize root vitality **μg/g/h**

| 年份 Year | 耕作处理 Tillage treatments | 施氮处理 Nitrogen treatment | 拔节期 Jointing | 吐丝期 Silking | 成熟期 Maturity |
|---|---|---|---|---|---|
| 种植第1年 The first year | FG Ploughing | N0:0 kg/hm² | 403.85±24.34Cc | 653.83±7.51c | 152.32±19.66b |
| | | N1:100 kg/hm² | 462.57±17.95Cb | 695.42±11.92b | 162.37±7.51b |
| | | N2:200 kg/hm² | 513.49±5.66Ca | 736.85±7.92a | 208.19±11.40a |
| | | N3:300 kg/hm² | 483.74±14.79Cab | 713.48±11.60ab | 185.45±5.77ab |
| | MG No-till | N0:0 kg/hm² | 435.48±14.76Bc | 664.21±25.51c | 165.74±9.35c |
| | | N1:100 kg/hm² | 506.35±10.22Bb | 708.34±7.41bc | 183.22±17.03bc |
| | | N2:200 kg/hm² | 575.62±13.96Ba | 782.92±15.09a | 243.08±6.83a |
| | | N3:300 kg/hm² | 528.47±11.03Ab | 743.06±9.39ab | 215.47±10.86ab |
| | SG Deep Pine | N0:0 kg/hm² | 445.85±10.76Ac | 673.05±17.38c | 173.82±3.44d |
| | | N1:100 kg/hm² | 546.17±10.06Ab | 765.42±25.70ab | 237.46±11.17b |
| | | N2:200 kg/hm² | 613.05±9.15Aa | 806.51±9.25a | 268.53±8.03a |
| | | N3:300 kg/hm² | 518.49±19.71Bb | 726.88±10.24b | 203.49±8.29c |
| 种植第2年 The second year | FG Ploughing | N0:0 kg/hm² | 419.38±10.20Cc | 642.78±8.75Cc | 142.36±10.59Cb |
| | | N1:100 kg/hm² | 465.03±12.09Cbc | 694.18±14.26Cab | 161.85±17.41Cab |
| | | N2:200 kg/hm² | 535.49±15.13Ca | 752.08±16.83Ca | 192.54±9.32Ca |
| | | N3:300 kg/hm² | 498.37±31.64Bab | 721.46±34.46Cbc | 183.57±14.82Ba |
| | MG No-till | N0:0 kg/hm² | 421.68±19.11Bb | 657.35±36.50Bb | 153.21±13.17Bc |
| | | N1:100 kg/hm² | 487.55±58.87Bab | 718.42±9.27Bab | 197.48±8.58Bb |
| | | N2:200 kg/hm² | 563.85±11.79Ba | 789.36±8.50Ba | 232.42±13.48Ba |
| | | N3:300 kg/hm² | 523.06±21.76Aa | 742.05±58.28Aab | 216.74±10.20Aab |
| | SG Deep pine | N0:0 kg/hm² | 476.35±9.81Ab | 673.84±40.33Ac | 162.05±4.80Ac |
| | | N1:100 kg/hm² | 572.85±7.47Aa | 784.59±19.33Aab | 226.48±12.26Aab |
| | | N2:200 kg/hm² | 593.47±11.00Aa | 823.06±31.25Aa | 245.85±7.38Aa |
| | | N3:300 kg/hm² | 519.58±33.52Ab | 732.43±22.90Bbc | 204.32±17.48ABb |

### 2.4 耕作方式与施氮量对玉米产量的影响

由图4可见,相同耕作方式时,各处理施氮后产量均高于未施氮处理,增加8.02%~20.43%,其中施氮量200 kg/hm²时产量最高;施氮量相同时,免耕、深松处理较翻耕提高5.87%~11.93%,其中,深松与施氮量200 kg/hm²效果最为突出,免耕与施氮量200 kg/hm²次之,与翻耕不施氮相比,种植第1年显著提高31.95%、27.68%,第2年显著提高30.10%、25.37%。2年产量趋势基本一致,均以深松与施氮量200 kg/hm²效果最佳,即深松与适宜施氮量可显著提高玉米产量,进而降低传统耕作和不合理施氮对玉米产量的不利影响,其中施氮量处理影响明显大于耕作方式处理。

进一步探寻玉米产量和施氮量之间的相互关系,发现产量与施氮量之间呈现二次函数关系(图5)。

$y_{翻耕}=-0.030x^2+14.833x+12\ 131.828$,当施氮量为247.22 kg/hm²,翻耕玉米可获得理论最高产量13 964.76 kg/hm²;

$y_{免耕}=-0.043x^2+19.516x+12\ 827.845$,施氮量226.93 kg/hm²时,免耕玉米可获得理论最高产量15 042.24 kg/hm²;

$y_{深松}=-0.089x^2+29.784x+13\ 535.807$,施氮量167.33 kg/hm²时,深松玉米可获得理论最高产量16 027.63 kg/hm²。

可见,3种耕作方式下,理论最高产量和最佳施氮量均有较大差别,其中免耕、深松处理最佳施氮量显著低于翻耕处理最佳施氮量。由此说明,为实现产量最大化,应以深松为最佳耕作方式,施

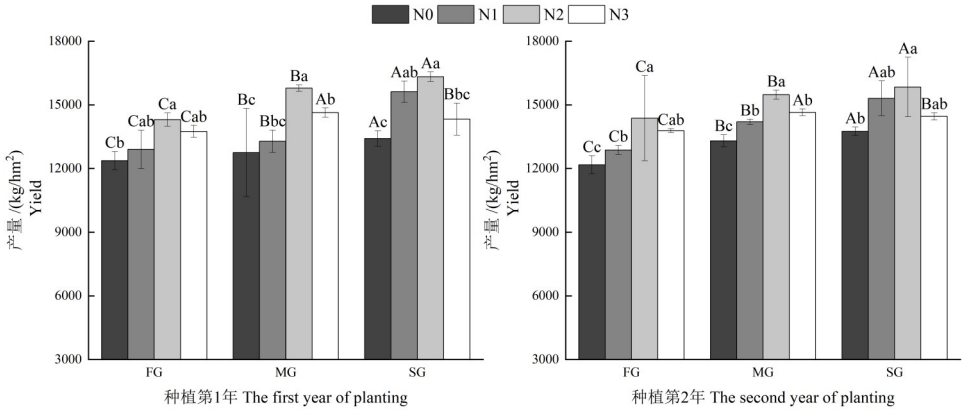



**图4　耕作方式与施氮量对玉米产量的影响**

**Fig.4**　Effects of tillage methods combined with different nitrogen rates on maize yield

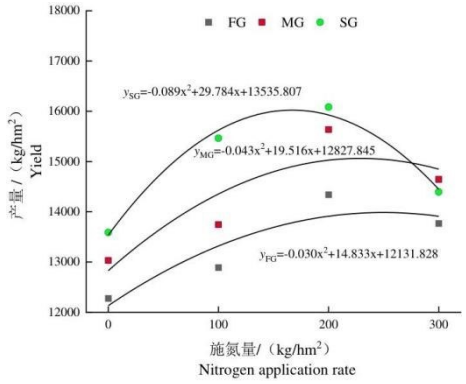



**图5　施氮量与产量拟合图**

**Fig.5**　Fitting diagram of nitrogen rates and yield

氮量在167～200 kg/hm²为宜。

### 2.5　耕作方式与施氮量对氮素利用效率的影响

从表5可见,试验期间,耕作方式与施氮量对氮素利用效率影响显著。相较于翻耕,免耕和深松可显著提高氮素利用效率。随施氮量增加,氮肥利用率和农学利用率先升后降,意味着过量施氮会破坏植株养分平衡,降低氮素利用效率;而氮肥偏生产力则随施氮量增加逐渐减小。相同耕作方式下,200 kg/hm²施氮量对氮肥利用率和农学利用率提升最佳,100 kg/hm²对氮肥偏生产力提升最佳;施氮量相同时,深松因改善土壤环境,使各项氮素利用指标最高,其中深松与200 kg/hm²施氮量对氮肥利用率和农学利用率提升效果最突出,深松与100 kg/hm²施氮量对氮肥偏生产力提升最明显,所以玉米种植应重视耕作与施肥二者协同,借助深松并精准施氮,实现氮素高效利用,从而促进增产。

### 2.6　各指标与产量相关性分析

将玉米产量与土壤氮素含量、氮代谢关键酶活性及根系进行相关性分析,结果如表6所示。土壤全氮含量、碱解氮含量、NRA、GSA、根长、根系活力与玉米产量之间均有极显著正相关关系。这表明在玉米种植中,土壤氮素含量、氮代谢关键酶活性及根系生长对产量有重要的正向作用。

### 2.7　耕作方式与施氮量下各指标综合评价分析

对不同耕作方式与施氮量下各指标进行主成分分析,以此来探讨各指标之间的关联程度及对产量的影响,最后通过综合得分筛选出适宜当地玉米生产的最佳耕作与施氮措施。

对各指标进行主成分分析,结果如图6所示,发现在PC1上,土壤全氮含量、碱解氮含量、NRA、GSA、根长和根系活力均有较高的正载荷,在PC2上,土壤全氮含量和碱解氮含量有较高的正载荷,且第一主成分(PC1)的方差贡献率为91.7%,第二主成分(PC2)的方差贡献率为6.9%,二者合计贡献率为98.6%,可见各指标对玉米产量有显著的正向促进作用。通过主成分分析计算不同处理综合得分并进行排序,如表7所示,SGN2排名最高,MGN2其次。综上所述,深松与施氮量200 kg/hm²可有效提高土壤氮素含量,进而使玉米氮代谢关键酶活性升高,促进玉米根系伸长、增强根系活力,改善根系形态构建和吸收功能,从而提高产量。

## 3　讨论

### 3.1　耕作方式与施氮量对土壤氮素含量的影响

氮是作物生长发育中的必需元素,其含量高

表5 耕作方式与施氮量对玉米氮素利用效率的影响

**Table 5** Effects of tillage methods combined with different nitrogen rates on nitrogen use efficiency of maize %

| 耕作处理 Tillage treatments | 施氮处理 Nitrogen treatments | 种植第1年 The first year | | | 种植第2年 The second year | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 氮肥利用率 NUE | 氮肥农学利用率 AE | 氮肥偏生产力 PEP | 氮肥利用率 NUE | 氮肥农学利用率 AE | 氮肥偏生产力 PEP |
| FG | N0 | | | | | | |
| | N1 | 28.34±1.36Cb | 4.31±0.28Cb | 50.83±4.52Ca | 30.38±2.05Cb | 4.85±0.63Cb | 53.74±3.24Ca |
| | N2 | 32.04±0.52Ca | 5.85±0.34Ca | 28.73±2.25Cb | 34.53±1.33Ca | 6.27±1.45Ca | 31.58±2.87Cb |
| | N3 | 26.88±0.83Cc | 4.63±0.45Cb | 21.59±1.84Cc | 28.49±1.42Cc | 4.93±0.58Cb | 23.65±3.67Cc |
| MG | N0 | | | | | | |
| | N1 | 33.67±1.34Bab | 6.52±0.59Bb | 67.59±6.53Ba | 35.57±1.84Bb | 7.28±0.65Bb | 68.73±4.55Ba |
| | N2 | 35.83±0.63Ba | 7.33±0.63Ba | 35.27±2.85Bb | 37.96±0.52Ba | 8.56±0.74Ba | 37.65±3.91Bb |
| | N3 | 32.19±1.45Bb | 6.28±0.28Bb | 28.53±2.14Bc | 34.28±0.63Bb | 6.12±0.21Bc | 25.47±4.62Bc |
| SG | N0 | | | | | | |
| | N1 | 37.68±1.46Aa | 7.62±0.41Ab | 72.35±5.84Aa | 38.65±1.35Ab | 7.89±0.42Aab | 74.88±2.86Aa |
| | N2 | 38.45±0.58Aa | 8.35±0.15Aa | 43.57±3.42Ab | 41.23±2.66Aa | 8.73±0.79Aa | 46.85±3.94Ab |
| | N3 | 35.73±0.17Ab | 6.59±0.75Ac | 33.69±2.45Ac | 37.84±1.05Ab | 7.45±0.34Ab | 34.27±2.07Ac |

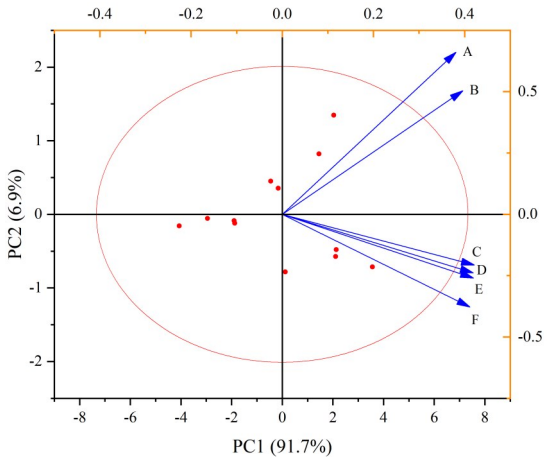
表6 耕作方式与施氮量下各指标与产量相关性分析

**Table 6** Correlation analysis of each index and yield under tillage methods combined with different nitrogen rates

| 指标 Indices | A | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| B | 0.763c | | | | | |
| C | 0.783c | 0.942b | | | | |
| D | 0.976b | 0.830c | 0.871b | | | |
| E | 0.978b | 0.805cd | 0.855bc | 0.993b | | |
| F | 0.978b | 0.806cd | 0.862b | 0.992b | 0.990b | |
| G | 0.980b | 0.761d | 0.819c | 0.983b | 0.981b | 0.991b |

注:A:试验期间平均产量;B:0~40 cm土层土壤全氮含量;C:0~40 cm层土壤碱解氮含量;D:玉米生育期NRA;E:玉米生育期GSA;F:玉米生育期根长;G:玉米生育期根系活力。不同小写字母表示各指标间差异显著。

Note:A: average yield during the test; B: soil total nitrogen in 0~40 cm layer; C: soil alkali-hydrolyzed nitrogen in 0~40 cm layer; D: nitrate reductase activity during growth period; E: glutamine synthetase activity during growth period; F: growth period root length; G: Root activity during growth period. Different lowercase letters indicate significant differences among various indicators.




A:0~40 cm层土壤全氮;B:0~40 cm层土壤碱解氮;C:生育期NRA;D:生育期GSA;E:生育期根长;F:生育期根系活力。

A: 0~40 cm soil total nitrogen; B: soil alkai-hydrolyzed nitrogen in 0~40 cm layer; C: nitrate reductase activity during growth period; D: glutamine synthetase activity during growth period; E: growth period root length; F: Root activity during growth period.

图6 主成分分析图

**Fig.6** Diagram of principal component analysis

低直接影响作物产量的形成[14]。施氮不足时,土壤肥力会逐渐衰退,无法为作物生长提供充足的氮素养分;而当高量施氮时,不同土层的全氮、碱解氮含量则会明显增加[15]。这说明施氮量精准调控对于维持土壤氮素平衡具有极其重要的作用。本研究发现,施氮量相同的条件下,免耕和深松相较于翻耕,可显著提高土壤全氮、碱解氮含量,其中深松效果最佳;耕作方式相同的条件下,随着施氮量的增加,土壤全氮、碱解氮含量逐渐增加,整体以深松与施氮量300 kg/hm$^2$效果最优。这是因为:(1)与翻耕相比,深松可以打破犁底层,提高土壤孔隙度,为土壤微生物提供更为充足的生存空间和氧气供应,促进土壤中含氮有机物的矿化作用,增加氮素矿化量;此外,深松改善后的土壤结构使得雨水能够更快速地渗入土壤深层,减少了

表7　综合得分表

**Table 7**　Comprehensive score table

| 处理 Treatments | FG N0 | FG N1 | FG N2 | FG N3 | MG N0 | MG N1 | MG N2 | MG N3 | SG N0 | SG N1 | SG N2 | SG N3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 综合得分 Comprehensive score | −4.01 | −1.99 | 0.16 | −0.51 | −2.84 | −0.26 | 2.26 | 1.37 | −1.76 | 2.18 | 3.61 | 1.78 |
| 排序 Sort | 12 | 10 | 6 | 8 | 11 | 7 | 2 | 5 | 9 | 3 | 1 | 4 |

氮素随地表径流流失的可能性[16-17]。(2)增施氮肥是直接补充土壤氮源的有效手段,向土壤中添加氮肥,可以迅速提升土壤中的氮含量,满足作物生长对氮素的需求[18];此外,适量施氮还能够对土壤中不同形态氮的比例进行优化和平衡,使得土壤中各种形态的氮素都能维持在一个适宜的水平,从而增强土壤持续稳定供应氮素的能力,为作物整个生育期提供稳定且充足的氮素养分供应[19]。

### 3.2　耕作方式与施氮量对玉米氮代谢关键酶活性的影响

氮代谢是作物植株的基础代谢过程,也是生长发育过程中源库关系形成的基础,对作物产量具有重要意义[20]。硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶是氮代谢过程中的关键酶,在植物调节和氮同化中发挥着重要作用。有研究发现,免耕处理能够显著提高作物在关键生育期的NRA、GSA,并且在整个生育期内使NRA、GSA维持在较高水平,与传统耕作方式相比,分别提升了8.36%和10.42%,这主要归因于免耕减少了对土壤结构的破坏,保持了土壤微生物群落的稳定性和多样性[21]。其它耕作方式也可促进作物氮代谢,深松处理对开花后小麦旗叶的NRA、GSA具有显著的促进作用,可见其对小麦籽粒的灌浆和产量形成有显著作用[22]。对烤烟的研究表明,随着施氮量的逐步提高,NRA、GSA均呈逐渐增加的趋势,这直观地反映出氮素作为酶催化反应的底物,其供应水平对酶活性有着直接的影响[23]。有研究表明,增施氮肥可显著提高NRA、GSA,增强夏玉米氮代谢能力,但过量施氮,则会降低NRA、GSA,影响夏玉米氮代谢能力[24]。本研究发现,随着施氮量的增加,玉米NRA、GSA呈先升高后降低的动态变化趋势,并且在施氮量为200 kg/hm$^2$时达到峰值,同时深松处理下酶活性亦达到最高水平。这是因为:一方面,深松显著提升了土壤的通气性与透水性,增强根系的呼吸能力,为酶的合成和活性维持提供更多的能量[24];另一方面,当施氮量处于适宜范围时,能够为氮代谢过程提供充足的催化底物氮素,使硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶能够充分发挥其催化功能,将土壤中的无机氮高效地转化为有机氮,从而提高酶活性,促进作物的生长和发育[25-26]。

### 3.3　耕作方式与施氮量对玉米根系生长和氮素利用率的影响

良好的根系发育是作物高效吸收土壤养分、提高产量的关键[27]。有研究发现,深松可改良土壤结构,促进根系伸展并提高活力,为玉米生长提供有力支持[28]。冬小麦的根长和根系活力会随着施氮量的变化呈先升高后降低的趋势,且在施氮量为240 kg/hm$^2$时达到最大值[29],这与本研究结果相似,即施氮量过高或过低,都会对玉米根系生长产生负面影响。当深松与施氮量200 kg/hm$^2$时,玉米根长、根系活力达到最大,这说明该模式可促进玉米根系伸长、增强根系活力,改善根系形态构建和吸收功能,最适宜根系生长发育。可能的原因为:一方面,深松打破犁底层后,土壤通透性显著改善,根系下扎获取更丰富的养分和水分资源,还促进根系细胞的分裂和伸长,显著提高根长和根系活力[30-31]。另一方面,适宜的施氮量可以为根系提供充足的氮素养分,供根系生长发育,但当施氮量过高时,会使氮代谢过强,消耗过多的能量,导致根系能量供应不足,从而影响根系的生长和生理功能[4]。在氮素利用效率方面,本研究还发现,随着施氮量的增加,玉米的氮肥利用率和氮肥农学利用率呈先增加后降低的趋势,而氮肥偏生产力则呈逐渐减小的趋势,整体以施氮量在100~200 kg/hm$^2$时效果最佳。这是因为作物对氮素的吸收和利用存在一定的阈值范围,在适宜的施氮量范围内,随着施氮量的增加,作物能够获得更多的氮素养分,从而促进生长和发育,提高产量,使得氮肥利用率和氮肥农学利用率相应增加。然而,当施氮量超过作物的需求阈值时,过多的氮素无法被作物有效吸收利用,会在土壤中积累,造成

氮素过剩[32]。这不仅会导致氮肥的浪费,增加生产成本,还可能引发环境污染等问题。

### 3.4 耕作方式与施氮量下各指标与玉米产量的综合效应分析

在玉米种植研究领域,耕作方式与施氮量对玉米产量的影响至关重要。已有研究表明,二者对玉米产量有着极显著的作用,随施氮量的增加产量呈先升后降趋势,180 kg/hm²时达最大值,深松处理产量比传统耕作高4.48%[33]。本研究相关性分析结果显示,土壤全氮含量、碱解氮含量、NRA、GSA、根长、根系活力与玉米产量间存在极显著正相关关系,这表明在玉米种植中,土壤氮素含量、氮代谢关键酶活性及根系生长对产量有着重要的正向作用。主成分分析发现,X1、X2这2个主成分累积贡献率为98.6%。在PC1上,土壤全氮含量、碱解氮含量、NRA、GSA、根长和根系活力均有较高正载荷;在PC2上,土壤全氮和碱解氮含量有较高正载荷,进一步佐证了各项指标对玉米产量的正向促进作用。本研究结果表明,深松与施氮量200 kg/hm²提升产量效果最佳,这与综合得分结果一致。综合分析认为这是因为深松与适宜的施氮量可有效提高土壤氮素含量,进而使氮代谢关键酶活性升高,促进玉米根系伸长、增强根系活力,改善根系形态构建和吸收功能,提高氮素利用效率,促进产量提高[34]。本研究结果表明深松与施氮量200 kg/hm²可以显著提高玉米产量,避免氮素浪费造成环境污染。后续将从土壤水分动态、微生物群落结构等入手,进一步探究不同耕作方式与施氮量下玉米增产的机制。

## 4 结论

研究通过连续2年的大田试验研究后发现,深松与适宜施氮量可显著提高0~40 cm土壤全氮和碱解氮含量,增强硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性,改善根长、根系活力,提高氮素利用效率,进而使产量提高。相关性分析和主成分分析结果发现,各指标对玉米产量提高有正向作用,且以深松与施氮量200 kg/hm²得分最高。可见,深松与适宜施氮量可有效提高土壤氮素含量,进而使氮代谢关键酶活性升高,促进作物根系形态和生理生长发育,提高氮素利用效率,使产量提高。从氮素利用效率、产量及拟合结果综合考虑,深松为最佳耕作方式,施氮量167~200 kg/hm²为宜,可在东北玉米生产中进一步推广应用。

## 参考文献

[1]张文龙,邵金华,黄凯,等.不同耕作方式对广西旱坡地土壤粒径分布特征的影响[J].江西农业大学学报,2024,46(6):1668-1679.
Zhang W L, Shao J H, Huang K, et al. Effect of different tillage methods on soil particle size distribution characteristics in dry sloping fields of Guangxi[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(6): 1668-1679.

[2]杨冰,孟祥海,王佰成,等.不同耕作及秸秆还田方式对土壤养分及微生物生物量碳氮的影响[J].黑龙江农业科学,2024(7):24-29.
Yang B, Meng X H, Wang B C, et al. Effects of different tillage and straw returning methods on soil nutrients and microbial biomass carbon and nitrogen [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2024(7): 24-29.

[3]王成,马杨明,王春雨,等.种植方式与施氮量对杂交籼稻养分吸收特性及根系活力的影响[J].作物学报,2024,50(12):3069-3082.
Wang C, Ma Y M, Wang C Y, et al. Effects of cropping practices and nitrogen application on nutrient uptake characteristics and root vigor of hybrid indica rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(12): 3069-3082.

[4]郭九信,孔亚丽,谢凯柳,等.养分管理对直播稻产量和氮肥利用率的影响[J].作物学报,2016,42(7):1016-1025.
Guo J X, Kong Y L, Xie K L, et al. Effects of nutrient management on yield and nitrogen use efficiency of direct seeding rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(7): 1016-1025.

[5]宋利,刘广周,张华,等.密植滴灌水肥一体化对西南夏玉米产量及土壤细菌群落的影响[J].作物学报,2025,51(4):992-1004.
Song L, Liu G Z, Zhang H, et al. Effects of drip fertigation with dense planting on yield and soil bacterial community of summer maize in Southwest China [J]. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(4): 992-1004.

[6]曹玉军,姚凡云,吕艳杰,等.综合农艺措施实现东北玉米生产和环境效益及土壤肥力的同步提升[J].植物营养与肥料学报,2023,29(1):18-30.
Cao Y J, Yao F Y, Lü Y J, et al. Integrated agronomic measures increase maize production, environmental efficiency, and soil fertility in Northeast China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(1): 18-30.

[7]吴姗薇,吴金芝,赵凯男,等.灌溉、耕作和施氮对旱地农田土壤生态化学计量特征的影响[J].生态学报,2024,44(22):10377-10390.
Wu S W, Wu J Z, Zhao K N, et al. Effects of irrigation, tillage, and nitrogen application on soil ecological stoichiometry characteristics in dryland farmland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10377-10390.

[8]熊淑萍，王静，王小纯，等.耕作方式及施氮量对砂姜黑土区小麦氮代谢及籽粒产量和蛋白质含量的影响[J].植物生态学报，2014，38(7)：767-775.
Xiong S P，Wang J，Wang X C，et al. Effects of tillage and nitrogen addition rate on nitrogen metabolism，grain yield and protein content in wheat in lime concretion black soil region[J]. Chinese Journal of Plant Ecology，2014，38(7)：767-775.

[9]王慧芳，张希，杨照，等.耕作模式与施氮量对烤烟根系发育、叶片衰老特性和产量的影响[J].江西农业学报，2022，34(9)：85-91.
Wang H F，Zhang X，Yang Z，et al. Effects of tillage mode and nitrogen application rate on root development，leaf senescence characteristics and yield of flue-cured tobacco [J]. Acta Agriculturae Jiangxi，2022，34(9)：85-91.

[10]公臣，王世伟，冯尚宗，等.不同耕作施肥模式对夏玉米干物质积累、产量和氮肥利用率的影响[J].山东农业科学，2024，56(8)：96-102.
Gong C，Wang S W，Feng S Z，et al. Effects of cultivation and fertilization modes on dry matter accumulation，yield and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. Shandong Agricultural Sciences，2024，56(8)：96-102.

[11]Yuan S，Li R N，Zhang Y J，et al. Effects of long-term partial substitution of inorganic fertilizer with pig manure and/or straw on nitrogen fractions and microbiological properties in greenhouse vegetable soils [J]. Journal of Integrative Agriculture，2024，23(6)：2083-2098.

[12]郝淼艺.不同施氮量与密度对玉米根系特性和产量的影响[D].杨凌：西北农林科技大学，2023.
Hao M Y. Effects of different nitrogen application rates and densities on maize root characteristics and yield[D]. Yangling：Northwest A&F University，2023.

[13]王慧云，王珍，冉彦立，等.磷肥类型和滴灌带埋深对滴灌氮磷分布及玉米产量的影响[J].灌溉排水学报，2024，43(10)：67-75.
Wang H Y，Wang Z，Ran Y L，et al. Combined effect of phosphate fertilizer types and dripline depth on distribution of nitrogen and phosphorus in soil and maize yield[J]. Journal of Irrigation and Drainage，2024，43(10)：67-75.

[14]Zhang M，Yao Y L，Tian Y H，et al. Increasing yield and N use efficiency with organic fertilizer in Chinese intensive rice cropping systems [J]. Field Crops Research，2018，227：102-109.

[15]李春梅，马云珍，徐文修，等.不同施氮量对棉花产量和棉田土壤养分的影响[J].核农学报，2022，36(7)：1446-1455.
Li C M，Ma Y Z，Xu W X，et al. Effects of different nitrogen application rates on cotton yield and soil nutrients in cotton fields[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2022，36(7)：1446-1455.

[16]温美娟，杨思存，王成宝，等.不同耕作和秸秆还田方式对灰钙土土壤理化性状、酶活性及玉米产量的影响[J].生态学杂志，2025，44(3)：903-911.
Wen M J，Yang S C，Wang C B，et al. Effects of different tillage and straw returning on soil physicochemical properties，enzyme activities in sierozem，and maize yield [J]. Chinese Journal of Ecology，2025，44(3)：903-911.

[17]黄明，彭彦珉，赵雯馨，等.夏闲季不同耕作措施对旱地麦田土壤养分含量和酶活性的影响[J].中国土壤与肥料，2024(8)：30-42.
Huang M，Peng Y M，Zhao W X，et al. Effects of different tillage measures during summer fallow season on soil nutrient contents and enzyme activities in dryland wheat field[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2024(8)：30-42.

[18]张美微，刘京宝，乔江方，等.施氮量对不同种植密度夏玉米产量和氮素吸收利用的影响[J].河南农业科学，2020，49(5)：55-62.
Zhang M W，Liu J B，Qiao J F，et al. Effects of nitrogen fertilizer application on yield and nitrogen uptake and utilization of summer maize with different planting densities[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences，2020，49(5)：55-62.

[19]兰慧青，孟天天，张向前，等.施氮水平对土壤有机氮组分及氮素利用效率的影响[J].华北农学报，2025，40(1)：166-176.
Lan H Q，Meng T T，Zhang X Q，et al. Effects of nitrogen application levels on soil organic nitrogen components and nitrogen use efficiency[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica，2025，40(1)：166-176.

[20]付帅，刘晓明，马阳，等.氮素形态对强筋和中筋小麦产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报，2022，28(1)：83-93.
Fu S，Liu X M，Ma Y，et al. Effects of nitrogen forms on yield and quality of strong gluten and medium gluten wheat[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2022，28(1)：83-93.

[21]杨迪迪，徐东忆，陈立，等.耕播方式与减氮对扬辐麦13氮素吸收利用的影响[J].麦类作物学报，2022，42(12)：1509-1517.
Yang D D，Xu D Y，Chen L，et al. Effect of reduced nitrogen application on nitrogen uptake and utilization of yangfumai 13 under different tillage and sowing methods [J]. Journal of Triticeae Crops，2022，42(12)：1509-1517.

[22]王庆源，于振文，石玉，等.隔两年深松配合条旋耕显著提升冬小麦的氮素吸收利用效率和产量[J].植物营养与肥料学报，2024，30(5)：863-872.
Wang Q Y，Yu Z W，Shi Y，et al. Strip rotary tillage combining with every two-year subsoiling increases the nitrogen use efficiency and yield of winter wheat[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2024，30(5)：863-872.

[23]王瑞，李向岭，郭栋，等.增施氮肥对夏玉米花后高温胁迫下籽粒碳氮代谢的影响[J].作物学报，2023，49(12)：3342-3351.
Wang R，Li X L，Guo D，et al. Effects of application nitrogen on carbon and nitrogen metabolism of summer maize grain under post-silking heat stress [J]. Acta Agronomica Sinica，2023，49(12)：3342-3351.

[24]王静，王小纯，熊淑萍，等.耕作方式对砂姜黑土小麦氮代谢及氮素利用效率的影响[J].麦类作物学报，2014，34(8)：1111-1117.
Wang J，Wang X C，Xiong S P，et al. Effects of different

tillage methods on nitrogen metabolism and nitrogen utilization efficiency of wheat grown in lime concretion black soil region [J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(8): 1111-1117.

[25]林美霞, 苏建霖, 朱芃铠, 等. 不同施氮量对麻竹光合特性和氮代谢关键酶活性的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(4): 87-91.
Lin M X, Su J L, Zhu P K, et al. Effects of different nitrogen application levels on photosynthetic characteristics and key enzymes activities in nitrogen metabolism of *Dendrocalamus latiflorus*[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(4): 87-91.

[26]马昕, 蔡丰乐, 穆心愿, 等. 施氮量对穗期高温胁迫下玉米叶片光合生理及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(10): 1852-1866.
Ma X, Cai F L, Mu X Y, et al. Effects of nitrogen application rate on photosynthetic physiology of maize leaves and yield under high temperature stress at ear stage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(10): 1852-1866.

[27]张玉芹, 杨恒山, 张瑞富, 等. 浅埋滴灌下水氮运筹对春玉米根系衰减特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(11): 3074-3089.
Zhang Y Q, Yang H S, Zhang R F, et al. Effects of water and nitrogen application on root attenuation characteristics and yield of spring maize under shallow buried drip irrigation[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(11): 3074-3089.

[28]张凤杰, 孙继颖, 高聚林, 等. 春玉米根系形态及土壤理化性质对深松深度的响应研究[J]. 玉米科学, 2016, 24(6): 88-96.
Zhang F J, Sun J Y, Gao J L, et al. Response of spring maize root morphological characteristics and soil physicochemical properties to chiseling depth[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(6): 88-96.

[29]姜丽娜, 朱娅林, 张雅雯, 等. 滴灌条件下施氮量对冬小麦根系生长及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(6): 14-19,45.
Jiang L N, Zhu Y L, Zhang Y W, et al. Effects of nitrogen application rate on root growth and yield of winter wheat under drip irrigation[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(6): 14-19, 45.

[30]郭案铭, 吴昆仑, 姚晓华, 等. 施氮水平对青稞氮素吸收利用率、根系形态和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(6): 787-794.
Guo A M, Wu K L, Yao X H, et al. Effects of different nitrogen application levels on nitrogen uptake efficiency, root morphology, and yield of hulless barley[J]. Journal of Triticeae Crops, 2024, 44(6): 787-794.

[31]郭海斌, 张军刚, 王文文, 等. 夏玉米光合特性、根系生长和产量对砂姜黑土深松增密的响应[J]. 作物杂志, 2024(3): 109-118.
Guo H B, Zhang J G, Wang W W, et al. Response of photosynthetic characteristics, root growth and yield of summer maize to subsoiling and increasing density in lime concretion black soil[J]. Crops, 2024(3): 109-118.

[32]Sanchez I I, Fultz L M, Lofton J, et al. Soil biological response to integration of cover crops and nitrogen rates in a conservation tillage corn production system[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019, 83(5): 1356-1367.

[33]常青, 周生, 吴中凯. 深松配施氮肥对土壤微生物含量及玉米产量和氮素利用效率的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(10): 83-90.
Chang Q, Zhou S, Wu Z K. Effects of subsoiling combined with nitrogen fertilizer on soil microbial content, maize yield and nitrogen use efficiency[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(10): 83-90.

[34]Singh K, Mishra S K, Singh H P, et al. Improved soil physical properties and cotton root parameters under sub-soiling enhance yield of Cotton-Wheat cropping system[J]. Data in Brief, 2019, 24: 103888.

(编辑:郭玥微)