

氮肥深施对旱作覆膜农田土壤养分含量及春玉米产量的影响

高飞¹,任亮奇^{2,3},崔增团¹,郭世乾¹,
郑杰¹,叶旭^{2,3},王钰皓^{2,3},张鹏^{2,3}

(1. 甘肃省耕地质量建设保护总站,甘肃兰州 730020;2. 西北农林科技大学农学院,陕西杨凌 712100;
3. 农业农村部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要:以春玉米为供试作物,于 2021—2022 年在甘肃省定西市进行不同深度施肥田间试验,以双垄沟覆膜种植为基础,设置 3 个氮肥施用深度:5 cm(D5)、15 cm(D15)和 25 cm(D25),以不施氮(N0)处理为对照,共 4 个处理,分析不同氮肥施用深度对农田土壤养分含量、干物质积累、水分利用及玉米产量的影响,为优化施肥模式和进一步提升其节水增产效能提供理论依据。结果表明,随施肥深度的增加,农田 0~40 cm 土层土壤养分含量逐渐增大,D25 处理较 D15 和 D5 处理的土壤有机碳、全氮、速效磷和速效钾含量分别平均提高 8.67%、2.23%、22.11%和 15.18%;氮肥深施可提高生育后期养分供给能力,玉米干物质积累量显著提高,D25 处理播后 105 d~收获期干物质积累量分别较 D15 和 D5 提高 6.53%和 25.30%;2 个试验年份农田耗水量和水分利用效率均随着施肥深度的增加逐渐增大,D25 处理分别较 D15 和 D5 平均提高 10.09%和 10.08%;D25 处理玉米生物产量和经济产量较 D5 处理分别平均提高 27.20%和 34.93%。在西北旱作区,氮肥 25 cm 深施模式能为玉米提供更好的养分供给,是提高覆膜旱作农田玉米干物质积累量及产量的有效措施。

关键词:玉米;氮肥深施;覆膜;土壤养分;产量

中图分类号:S513;S147.3;S157.4 **文献标志码:**A

Effects of deep application of nitrogen fertilizer on soil nutrient content and spring maize yield in dryland film mulched farmland

GAO Fei¹, REN Liangqi^{2,3}, CUI Zengtuan¹, GUO Shiqian¹,
ZHENG Jie¹, YE Xu^{2,3}, WANG Yuhao^{2,3}, ZHANG Peng^{2,3}

(1. Cultivated Land Quality and Construction Protection Station of Gansu, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Tillage in Northwest Loess Plateau, Minister of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A field experiment with three nitrogen fertilizer application depths (D5: 5 cm, D15: 15 cm, and D25: 25 cm) and no nitrogen (N0) under double ridge and furrow plastic film mulching planting was carried out in Dingxi City, Gansu Province in 2021–2022. The effects of different nitrogen fertilizer application depths on soil nutrient content, dry matter accumulation, water use and maize yield were analyzed in order to provide a theoretical basis for optimizing fertilizer application mode and further improve its water-saving and yield-increasing efficiency. The results showed that with the increase of fertilization depth, the soil nutrient content in 0~40 cm was gradually increased. Compared with D15 and D5, the soil organic carbon, total nitrogen, available phosphorus and available potassium contents under D25 treatment were increased by 8.67%, 2.23%, 22.11% and 15.18%, respectively. The dry matter accumulation of maize was also significantly increased with the increase of fertilization depth, and D25 was 6.53% and 25.30% higher than D15 and D5 from 105 d after sowing to harvest, respectively. Each depth of fertilization treatment increased the water consumption and water use efficiency ($P<0.05$), which both gradually

increased with the increase of fertilization depth. Compared with D5, the biomass and economic yield of maize under D25 were increased by 27.20% and 34.93%, respectively. These results showed that nitrogen fertilizer application at 25 cm depth can effectively improve soil nutrient content and water use efficiency, which is an effective measure to improve the maize yield under film-mulched farmland in northwest of China.

Keywords: maize; deep application of nitrogen fertilizer; film-mulching; soil nutrients; yield

玉米是我国重要的粮食、饲料和工业原料作物,在西北旱作农业地区广泛种植,玉米高产稳产是保障我国粮食安全的重要措施之一^[1]。近年来我国人口快速增长的同时农业耕地面积不断缩减,实现作物单位面积增产已成为农业可持续发展的必然途径^[2-3]。干旱缺水 and 土壤瘠薄是限制西北干旱地区农业发展的重要因素^[4]。地膜覆盖能有效提升土壤蓄水保墒能力,是目前应用最广泛的种植方式,很大程度上缓解了旱区农业缺水问题^[5]。传统肥料投入方式粗放,导致肥料利用效率较低。因此改变现有施肥方式,提高作物养分吸收能力和肥料利用效率,是目前旱作覆膜农田实现化肥减量增效的重要措施。

化肥的推广使用极大地提高了土壤肥力和粮食产量,已成为农业生态系统中不可或缺的物质输入资源^[6]。有研究表明,土壤氮素含量及其分布对作物生长有非常重要的影响,在旱地农业生产中表现更为明显^[7]。施用氮肥是直接提高土壤氮素含量的重要方式,但氮肥施用过浅会造成其在农田耕层分布不均匀,易挥发损失;氮肥施用过深又会导致氮素随降水迁移到更深层土壤中,产生淋溶现象,无法被作物高效吸收利用^[8]。可见,改进施肥技术及调整施肥深度以降低氮肥损失率在提高氮肥的吸收利用效率方面具有很大的潜力^[9]。Wu 等^[7]研究指出,氮肥适当深施能防止其挥发和淋溶,同时可增强土壤对铵态氮和硝态氮的吸附,减少流失,还能降低硝化和反硝化作用造成的损失。此外,氮肥适当深施可以通过改善深层根系生长环境和提高农田养分利用效率,促进玉米深层根系的生长^[10]。在西北旱作地区,播种时一次性浅层(距地表 10~15 cm)基施化肥是玉米种植最常采用的施肥方式^[11]。因此,可通过调整氮肥施用深度调控农田养分的合理分布和玉米对光热、水土资源的高效利用,合理深施有望成为西北旱作地区玉米增产增效的重要技术手段。

目前关于提高农田养分利用效率的研究主要集中在施肥种类、施肥量等方面,且多以研究南方水田为主,针对北方旱作农田的研究则以半湿润易旱区居多^[12-13],关于西北旱区不同施肥深度对作物

水肥利用方面的研究相对较少。因此本研究在甘肃定西开展不同施肥深度定位试验,研究氮肥施用深度对农田养分含量、春玉米水氮利用效率及产量的影响,明确氮肥深施后土壤养分分布及其与玉米生长的耦合特征,为优化该区春玉米施肥方式、提高产量和实现农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021—2022 年在甘肃省定西市安定区旱作节水农业示范园(35°47'N, 104°31'E, 海拔 1 822 m)进行。该地区属于典型的大陆性季风气候,年平均降雨量 370 mm,其中 70%的降雨集中在 6—9 月(图 1);年平均气温为 7.1℃,年平均日照时数 2 500.2 h,年蒸发量 1 478.5 mm,无霜期 140~162 d。试验田为旱平地,土壤质地为黑垆土,中低等肥力水平,前茬作物为玉米,试验地 0~20 cm 土层土壤基础理化性质见表 1。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,在双垄沟覆膜种植方式下设置 3 个氮肥施用深度:带状施于地下 5 (D5)、15 cm (D15) 和 25 cm (D25),以不施氮处理(N0)为对照,共 4 个处理。每个小区面积 120 m²(15 m×8 m),设 3 次重复。供试玉米品种为‘先玉 335’,播种密度为 75 000 株·hm⁻²,各处理行距分别为 70 cm (大行) 和 50 cm (小行),株距均为 23 cm,各年份玉米均于 4 月初播种,9 月底收获。

试验前 5 d 进行整地施肥,用深松机(1S-220,农哈哈,河北,中国)将土壤深松至 40 cm 深度后,用旋耕机将磷肥均匀旋耕混合于土壤 0~30 cm 土层,采用人工分层施肥机将全部氮肥按处理分别条施入不同深度土层,进行机械起垄覆膜。各氮肥施用深度处理氮肥施用量(以纯 N 计)均为 225 kg·hm⁻²,各处理磷肥(P₂O₅)施用量均为 120 kg·hm⁻²,氮肥和磷肥分别为尿素(N≥46.4%,陕西陕化化肥股份有限公司)和过磷酸钙(P₂O₅≥12%,云南云天化股份有限公司),所有肥料均为基施,生育期内不进行追肥和灌溉,其他田间管理与当地农户保持一致。

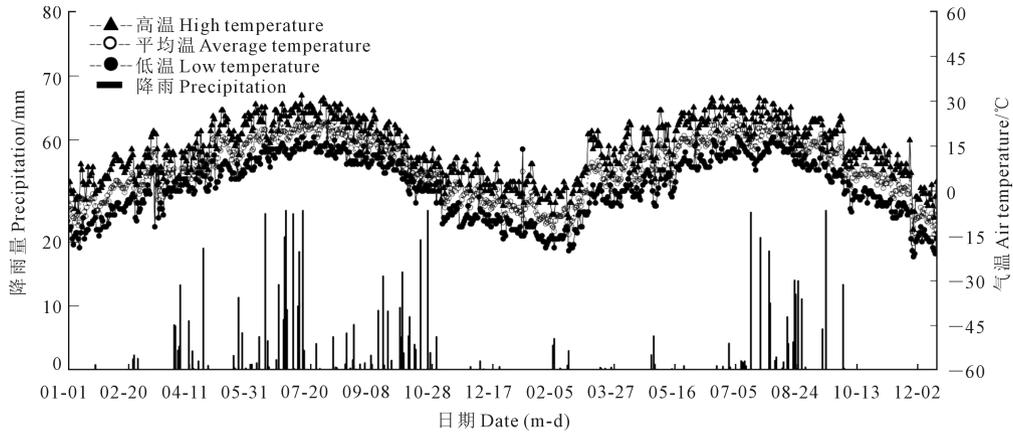


图1 2021年试验期间试验地日降雨量和日均气温

Fig.1 Daily precipitation and mean temperature at experimental station in 2021

表1 试验地播前土壤基础理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil foundation before sowing in the test site

土层 Soil depth /cm	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available nitrogen /(mg·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus /(g·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(mg·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium /(g·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg·kg ⁻¹)	pH
0~20	1.02	11.83	0.98	39.25	0.69	20.47	22.40	109.01	8.3

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤取样 2022年玉米收获后次日,在各小区内用直径为5 cm的土钻按“S”型5点取土法进行取样,取样深度分别为0~10、10~20、20~30、30~40 cm土层,同小区取样点土样同层混合,作为1次重复(约500 g),每个小区重复3次,样品剔除石块及动植物残体等杂质后,放在阴凉通风处自然风干,再粉碎、过筛,备测土壤养分。

1.3.2 土壤养分测算 土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法,全氮(TN)采用凯氏定氮法,碱解氮(AN)采用碱解扩散法,速效磷(AP)采用钼锑抗比色法,速效钾(AK)采用火焰光度法测定;并利用土壤有机碳和全氮的比值计算土壤C/N。

1.3.3 土壤贮水量计算 在玉米播前和收获后每隔20 cm土层取一个土样,采用烘干法测定0~200 cm土层土壤含水量,取样位置为大、小垄间及玉米株间3个位置,取平均值,并用公式(1)进行播前和收获后贮水量(Soil water storage, SWC, mm)的计算:

$$SWC = h \times p \times b \times 10 \quad (1)$$

式中, h 为土层深度(cm), p 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$), b 为土壤水分重量百分数。

1.3.4 农田全生育期耗水量计算 根据作物播前和收获后土壤贮水量计算全生育期耗水量(Evapotranspiration, ET, mm):

$$ET = W_1 - W_2 + P \quad (2)$$

式中, W_1 为播前土壤贮水量(mm), W_2 为收获期土壤贮水量(mm), P 为生育期降水量(mm)。

1.3.5 作物水分利用效率计算 结合农田生育期耗水量、作物经济产量计算作物水分利用效率(Water use efficiency, WUE, $kg \cdot mm^{-1} \cdot hm^{-2}$):

$$WUE = Y_{\text{grain}} / ET \quad (3)$$

式中, Y_{grain} 为作物籽粒产量($kg \cdot hm^{-2}$), ET 为农田耗水量(mm)。

1.3.6 干物质积累量、产量测定 分别于玉米播后30、45、65、85、105、135 d和160 d在各小区随机选取5株玉米进行干物质积累量的测定;收获期,每个小区选取4行有代表性的玉米,每行随机收获10株进行单株生物量的测定。玉米穗自然风干(籽粒含水量 $\leq 14\%$)后进行单株籽粒产量(穗行数、行粒数和百粒重)的测定,将单株籽粒产量和生物量分别折算为公顷经济产量和生物产量。

1.3.7 收获指数计算 根据生物产量和经济产量计算作物收获指数(Harvest index, HI):

$$HI = Y_{\text{grain}} / Y_{\text{biomass}} \quad (4)$$

式中, Y_{grain} 为作物籽粒产量($kg \cdot hm^{-2}$), Y_{biomass} 为作物生物产量($kg \cdot hm^{-2}$)。

1.3.8 氮肥利用效率、氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力计算 根据作物收获后土壤氮肥吸收量计算氮肥利用效率(Nitrogen use efficiency, NUE, $kg \cdot kg^{-1}$):

$$NUE = 100\% \times (N_F - N_0) / F_N \quad (5)$$

式中, N_F 表示施氮处理氮吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), N_0 表示不施氮处理氮吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), F_N 表示施氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

根据作物产量及施氮量计算氮肥农学利用效率 (Nitrogen agronomic efficiency, NAE , $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$):

$$NAE = 100\% \times (GY_{NF} - GY_{N0}) / F_N \quad (6)$$

式中, GY_{NF} 表示施氮处理经济产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), GY_{N0} 表示不施氮处理经济产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), F_N 表示施氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

根据施氮处理作物产量和施氮量计算氮肥偏生产力 (Nitrogen partial productivity, NPP , $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$):

$$NPP = GY_{NF} / F_N \quad (7)$$

式中, GY_{NF} 表示施氮处理经济产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), F_N 表示施氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.4 数据分析

采用 Excel 2020 进行数据处理, Origin 2022 进行绘图, SPSS 23.0 软件进行显著性差异分析、单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和相关性分析等。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤有机碳、全氮及 C/N 的影响

连续 2 年氮肥深施后, 各处理 0~40 cm 土层土壤 SOC 含量随土层深度的增加逐渐减小 (图 2), 各处理大小均表现为 $D25 > D15 > D5 > N0$ 。在不同土层, 各施肥深度处理间差异有所不同, 除 0~10 cm 土层, D25 在其余土层土壤 SOC 含量均显著高于 D5

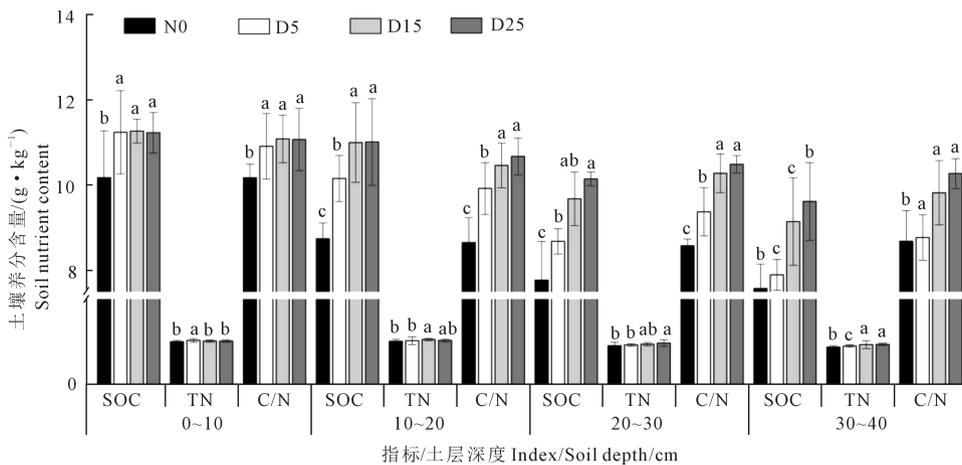
处理, 平均提高 15.12% ($P < 0.05$); D15 处理仅在 10~20 cm 和 30~40 cm 土层分别较 D5 显著 ($P < 0.05$) 提高 8.29% 和 15.82%; D25 在各土层均略高于 D15 处理, 但两者之间差异不显著。

各处理 TN 含量均随着土层的加深逐渐减小。各施肥深度处理间差异随土层加深逐渐增大, 0~10 cm 土层, D5 处理 TN 含量显著 ($P < 0.05$) 高于 D25 和 D15 处理, 分别提高 1.31% 和 1.53%; 10~20 cm 土层, D15 处理最高, 分别较 D25 和 D5 提高 1.88% 和 2.71% ($P < 0.05$); 随着土层加深, 20~30 cm 土层和 30~40 cm 土层, TN 含量均表现为 $D25 > D15 > D5$, D25 较 D5 分别显著提高 4.46% 和 4.02% ($P < 0.05$)。

与 SOC 变化趋势类似, 各施肥深度处理间土壤 C/N 在各土层均表现为 $D25 > D15 > D5$, 除 0~10 cm 土层外, D25 和 D15 处理在其余土层均显著 ($P < 0.05$) 高于 D5 处理, 分别平均提高 11.98% 和 8.87%; D25 处理 30~40 cm 土层土壤 C/N 较 D15 显著提高 4.60% ($P < 0.05$), 其余土层两处理间无显著差异。

2.2 不同处理对土壤速效养分的影响

2022 年玉米收获后, 各施肥处理 0~40 cm 土层土壤碱解氮含量随着土层的加深逐渐降低 (图 3)。施肥深度对土壤碱解氮的影响在不同土层有所不同, 表层 (0~10 cm) 施肥深度处理表现为 $D5 > D15 > D25$, 随着土层加深, 在 20~40 cm 土层则表现为 $D25 > D15 > D5$, 且 D25 处理在 20~30 cm 土层较 D15 和 D5 分别显著提高 5.67% 和 3.21% ($P < 0.05$), 其余土层各处理间均无显著差异。



注: 图中误差棒为标准误差, 柱上不同字母表示相同测定指标处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: The error bar in the figure is the standard error, and different letters on the column indicate significant differences among treatments with the same index ($P < 0.05$). The same as the following figure.

图 2 不同施肥深度处理 0~40 cm 土层土壤有机碳、全氮含量及 C/N (2022 年)

Fig.2 Soil organic carbon, total nitrogen and C/N in 0~40 cm soil depth under different fertilization depth treatments (2022)

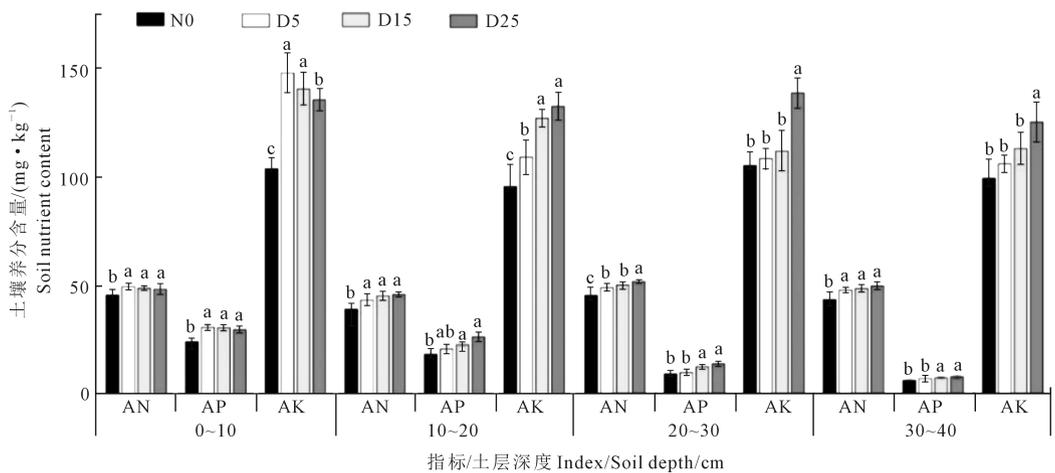
各处理土壤速效磷含量随土层深度增加显著降低,深层(20~40 cm)较表层(0~20 cm)降幅达60.72%~74.90%。各施肥深度对土壤速效磷含量的影响有所不同,随着土层加深,处理间差异逐渐增大,在20~40 cm土层,D25和D15处理均显著($P<0.05$)高于D5,分别平均提高30.49%和19.88%。

玉米收获后各处理速效钾含量基本维持在85.00~148.07 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且随着土层加深逐渐降低(图3)。同碱解氮和速效磷相比,施肥深度对土壤速效钾影响较大,10~40 cm土层均表现为D25>D15>D5,10~40 cm各土层,D25较D15分别提高4.26%、23.88% ($P<0.05$)和10.89% ($P<0.05$),D25较D5分别显著提高21.45%、27.94%和18.29% ($P<0.05$),D15处理仅在10~20 cm土层较D5显著提

高16.48% ($P<0.05$)。

2.3 不同处理对玉米干物质积累量的影响

玉米各处理干物质积累量均随生育进程的推进呈“增大-降低-增大-降低”的双波峰趋势(图4)。在玉米生育前期(0~65 d),各施肥深度处理均表现为D5>D15>D25;随着生育进程的推进,D25处理逐渐增大,播后105 d~收获,D25处理干物质积累量均高于D15和D5处理,且差异逐渐增大。播后105 d,D25较D15和D5分别提高5.20%和22.48% ($P<0.05$),播后135 d分别提高7.07%和25.16% ($P<0.05$),收获期(播后160 d)分别提高7.32%和28.27% ($P<0.05$);D15较D5平均显著提高17.61% ($P<0.05$),说明适当增加施肥深度有利于提高玉米生育期干物质积累量。

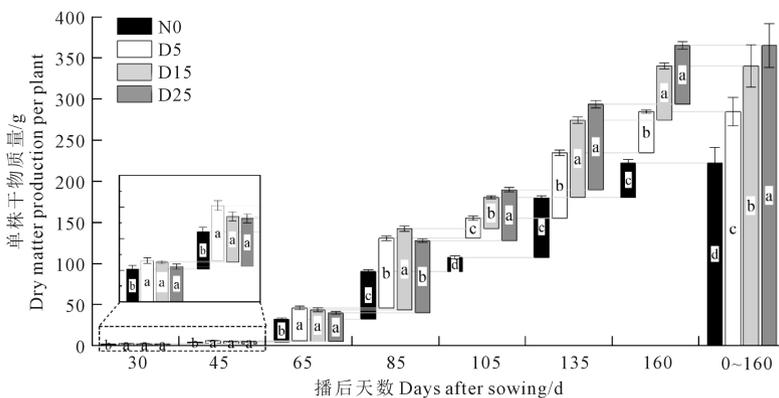


注:AN表示碱解氮,AP表示速效磷,AK表示速效钾。

Note: AN stands for alkali hydrolyzed nitrogen, AP stands for available phosphorus, and AK stands for available potassium.

图3 不同施肥深度处理0~40 cm土层土壤速效养分含量(2022年)

Fig.3 Available nutrient content in 0~40 cm soil depth under different fertilization depth treatments (2022)



注:图中误差棒为标准误差,柱中不同字母表示相同时间处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The error bar in the figure is the standard error, and different letters in the column indicate significant differences among treatments with the same number of days after sowing ($P<0.05$).

图4 不同施肥深度处理玉米干物质积累量动态变化(2022年)

Fig.4 Dynamic changes of dry matter accumulation of maize under different fertilization depth treatments (2022)

2.4 不同处理对玉米生物产量、经济产量及收获指数的影响

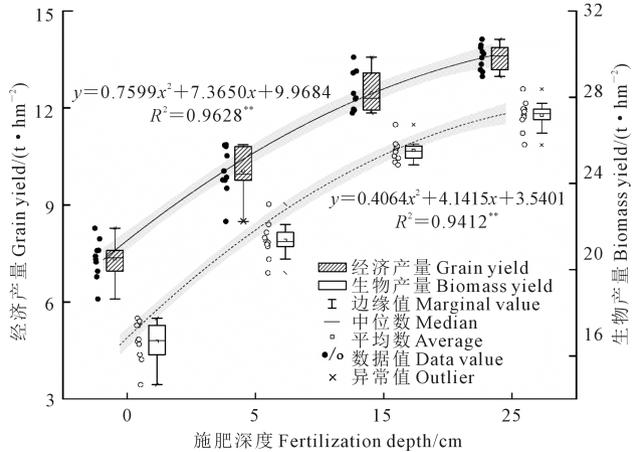
如图 5 所示,施肥深度对 2 个年份春玉米产量均有显著影响,且随着施肥深度的增加各处理生物产量和经济产量逐渐增大,表现为 D25>D15>D5>N0。由表 2 可知,D25 处理较 D15 和 D5 处理生物产量 2021 年分别显著 ($P<0.05$) 提高 6.42% 和 27.20%,2022 年分别显著 ($P<0.05$) 提高 7.21% 和 23.38%;D25 处理 2021 年经济产量较 D15 和 D5 分别显著 ($P<0.05$) 提高 8.92% 和 34.93%,2022 年分别显著 ($P<0.05$) 提高 7.61% 和 29.83%;各年份 D15 处理产量也显著高于 D5,说明肥料适当深施有利于提高春玉米产量。

与产量变化趋势类似,2 个年份各处理收获指数均随施肥深度的增加逐渐增大(表 2),D25 分别较 D15 和 D5 平均提高 1.31% 和 8.02% ($P<0.05$),D25 与 D15 间在各年份均无显著差异。

2.5 不同处理对玉米收获期贮水量、生育期耗水量及水分利用效率的影响

不同施肥深度对玉米收获后农田土壤水分含量均有一定影响,各年份玉米收获期土壤贮水量均随施肥深度的增加逐渐降低(表 3),D25 和 D15 分别较 D5 处理平均显著 ($P<0.05$) 降低 12.34% 和 10.33%,D25 仅较 D15 平均降低 1.82%,两者之间无显著差异。

生育期耗水量与贮水量变化趋势相反(表 3),随着施肥深度的增加,各年份玉米生育期耗水量均逐渐增大(图 6),表现为 D25>D15>D5>N0,其中 D25 和 D15 处理均显著高于 D5 ($P<0.05$),2021 和 2022 年分别平均提高 17.41% 和 14.12%,D25 和 D15 处理间在各年份均无显著差异。



注:图中误差棒为标准误差,箱体中线、上/下限和宽度分别代表中位数、上/下四分位数和数据波动程度,阴影部分代表 95% 置信区间。* * 表示极显著水平 ($P<0.01$),下同。

Note: The error bar in the figure is the standard error ($P<0.05$). The center line, upper and lower limits, and width of the box represent the median, upper and lower quartiles, and the degree of data fluctuation, respectively. The shaded part represents the 95% confidence interval. * * indicates extremely significant level ($P<0.01$). The same below.

图 5 施肥深度与玉米经济产量、生物产量的相关关系

Fig.5 Correlation between fertilization depth and maize grain and biomass yield

表 2 不同施肥深度处理下的玉米产量及收获指数

Table 2 Maize yield and harvest index under different fertilization depth

处理 Treatment	生物产量 Biomass yield/(t·hm ⁻²)		经济产量 Grain yield/(t·hm ⁻²)		收获指数 Harvest index	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022
N0	16.67±0.98d	15.69±0.94d	7.32±0.71d	7.06±0.66c	0.44±0.02c	0.45±0.02c
D5	21.36±1.53c	18.98±1.09c	10.05±0.97c	9.02±0.71b	0.47±0.01b	0.48±0.01b
D15	25.53±1.12b	21.81±1.02b	12.45±0.78b	10.89±0.92a	0.49±0.01a	0.50±0.01a
D25	27.17±1.47a	23.42±1.06a	13.56±1.07a	11.72±1.01a	0.50±0.02a	0.50±0.02a

注:表中数据为平均值±标准差($n=3$),同列不同字母表示处理间差异达显著水平 ($P<0.05$)。下同。

Note: The data in the table is Mean ± standard deviation ($n=3$), different letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

表 3 不同施肥深度处理下的玉米收获期贮水量、生育期耗水量及水分利用效率

Table 3 Water use efficiency, soil water storage after harvested, and soil water consumption during growth period under different fertilization depth

处理 Treatment	收获期贮水量/mm		生育期耗水量/mm		水分利用效率/(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	
	Soil water storage after harvested		Soil water consumption during growth period		Water use efficiency	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022
N0	577.97±15.15a	507.81±14.74a	308.10±18.07c	256.65±16.38c	23.77±2.27c	27.49±2.68c
D5	533.34±23.75a	473.77±21.32b	352.72±20.87b	290.70±20.06b	28.5±3.24b	31.04±3.43b
D15	475.42±19.76b	437.37±17.57c	410.64±15.86a	327.09±17.45a	30.33±1.48b	33.29±2.03ab
D25	468.45±18.01b	428.05±14.22c	417.61±23.64a	336.41±26.90a	32.46±1.03a	34.83±2.07a

2 个试验年份各处理水分利用效率均随施肥深度的增加而逐渐增大(图 6),其中 2021 年 D25 处理均显著高于 D15 和 D5 ($P<0.05$),分别提高 7.02% 和 13.89%,2022 年 D25 处理较 D5 显著 ($P<0.05$) 提高 12.19%,较 D15 提高 4.63%;D15 与 D5 处理间在各年份均无显著差异。

2.6 不同处理对氮肥利用效率、氮肥农学利用效率及氮肥偏生产力的影响

不同施肥深度对玉米的氮肥利用效率影响有所不同,随着施肥深度的增加,各年份氮肥利用效率均逐渐增加(表 4),表现为 $D25>D15>D5$,其中 2021

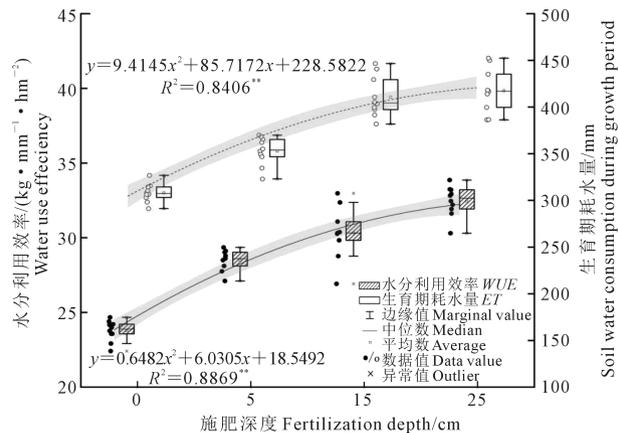


图 6 施肥深度与作物生育期耗水量和水分利用效率的相关关系

Fig.6 Correlation between fertilization depth and water use efficiency and soil water consumption during growth period

年 D25 较 D15 和 D5 分别显著 ($P<0.05$) 提高 25.66% 和 143.25%,2022 年分别显著 ($P<0.05$) 提高 26.37% 和 149.43%。与 D5 相比,D15 两年平均显著提高 95.48% ($P<0.05$)。

与氮肥利用效率变化趋势相似,增加氮肥施用深度可以显著提高氮肥农学利用效率,表现为 $D25>D15>D5$ (表 4),且 2 个试验年份均以 D25 处理最高。D25 处理 2021 年分别较 D15 和 D5 显著 ($P<0.05$) 提高 23.07% 和 111.96%,2022 年分别显著 ($P<0.05$) 提高 24.95% 和 147.65%。

由表 4 可知,各年份氮肥偏生产力均随施肥深度的增加逐渐增大,表现为 $D25>D15>D5$,2 个试验年份 D25 和 D15 分别较 D5 平均显著 ($P<0.05$) 提高 36.74% 和 26.76%,D25 较 D15 处理分别提高 8.89% ($P<0.05$) 和 6.63%。

2.7 各指标相关性

相关性研究结果表明(表 5),所有土壤养分指标均与玉米生物产量和经济产量呈正相关关系,其中 SOC、C/N、速效钾呈显著正相关关系,土壤全氮与玉米产量无显著相关性;各土壤养分对收获指数和 WUE 影响较小,仅土壤 C/N 与 WUE 显著正相关 ($P<0.01$);同时,土壤养分指标中仅 SOC 和 C/N 与氮素利用相关指标 NUE 和 NAE 显著正相关;收获期贮水量与玉米生物产量 ($P<0.01$)、经济产量 ($P<0.01$)、收获指数 ($P<0.05$)、WUE ($P<0.01$)、NUE ($P<$

表 4 不同施肥深度处理下的玉米氮肥利用效率、氮肥农学利用效率及氮肥偏生产力

Table 4 Nitrogen use efficiency, agronomic nitrogen use efficiency and nitrogen partial productivity of maize under different fertilization depth

处理 Treatment	氮肥利用效率/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Nitrogen use efficiency		氮肥农学利用效率/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Nitrogen agronomic efficiency		氮肥偏生产力/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Nitrogen partial productivity	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022
	D5	32.65±1.07c	30.97±1.35c	12.46±0.96c	10.01±1.13c	41.88±1.71c
D15	63.2±1.93b	61.13±2.11b	21.46±0.31b	19.84±0.57b	51.87±2.59b	52.22±2.28a
D25	79.42±2.07a	77.25±2.38a	26.41±1.15a	24.79±1.24a	56.48±1.62a	55.68±1.39a

表 5 不同施肥深度处理下各土壤养分指标与玉米产量指标及水肥利用效率的相关性

Table 5 Correlation of soil nutrient indexes with maize yield indexes, water and fertilizer use efficiency under different fertilization depth

指标 Index	有机碳 SOC	全氮 TN	碳氮比 C/N	速效钾 AK	速效磷 AP	碱解氮 AN	收获贮水量 SWS	耗水量 ET
生物产量 Biomass yield	0.63**	0.33	0.74**	0.55*	0.21	0.54*	-0.99**	0.91**
经济产量 Grain yield	0.54*	0.18	0.69**	0.48*	0.10	0.47	-0.95**	0.90**
收获指数 HI	0.11	-0.27	0.33	0.14	-0.22	0.13	-0.50*	0.57*
水分利用效率 WUE	0.47	0.11	0.65**	0.45	0.04	0.45	-0.90**	0.82**
氮肥利用效率 NUE	0.57**	0.27	0.69**	0.50	0.19	0.45	-0.91**	0.85**
氮肥农学效率 NAE	0.58*	0.29	0.70**	0.51*	0.21	0.46	-0.91**	0.85**
氮肥偏生产力 NPP	0.48	0.19	0.62*	0.38	0.06	0.34	-0.93**	0.84**

注:表中数据表示相关系数,*和**分别表示相关性达到 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平。

Note:The data in the table is correlation coefficient,* and ** indicate the correlation between indexes at $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively.

0.05)、 NAE ($P < 0.05$) 和 NPP ($P < 0.05$) 均具有显著负相关关系,而生育期耗水量则与这些指标均显著正相关。

3 讨论

3.1 氮肥深施对农田土壤养分含量的影响

氮肥是生产上影响作物生长最主要的因子之一,作物产量的提高与氮肥施用息息相关。近年来氮肥施用不当带来的负面影响日趋严重,如何合理施用氮肥以促进农田可持续发展成为热点研究内容,而通过增加氮肥施用深度改善农田土壤养分状况是其中的重要方向。有研究表明,氮肥深施是增加土壤养分含量和减少氮肥损失和的重要技术措施^[14]。适当增加施肥深度比常规覆土施肥处理具有更高的养分利用效率和土壤养分含量^[15]。本研究表明玉米收获后,D25 处理农田土壤碱解氮含量均高于其他施氮深度处理,其较 D15 和 D5 处理分别提高 3.46% 和 1.58% (图 3)。丁相鹏等^[10]也得出类似结果。这可能是因为随着施用深度递增的情况下,氮肥的挥发损失会逐渐变少,同时土壤 $NO_3^- - N$ 的淋溶也会减少^[16]。而 Chen 等^[17]在陕西关中平原进行的夏玉米不同施肥深度试验表明,施氮 15 cm 深度处理农田土壤碱解氮含量均高于其他施氮深度处理。其结果与本研究存在差异,一方面可能是因为不同地区降水、灌溉条件差异影响了土壤氮素的分布土层;另一方面可能是作物播种时间不一致引起土壤微生物活性和根系酶代谢活性不同造成的。尽管不同研究土壤氮素最大值分布土层有所不同,但深施处理氮素含量均较常规浅施处理有所提升,可见适当增加氮肥施用深度有利于根层土壤氮肥的保持和利用。土壤磷、钾参与并影响作物的多种生长和生理进程,而速效磷和速效钾含量被广泛用于评估土壤供磷和供钾能力^[18]。前人研究表明,改变施肥深度显著影响土壤速效磷和速效钾在土壤中的含量和分布情况^[19]。Liu 等^[20]研究发现,施肥深度增至 16 cm 可以有效提高土壤速效磷和速效钾含量,同时提高不同土层根系活力,促进冬小麦生长。本研究中,D15 和 D25 处理显著增加了 0~40 cm 土层土壤速效磷和速效钾含量,并且施氮 25 cm 深度处理高于其他处理。这可能是因为施肥深度增加促进了磷和钾在土壤深层分布,同时降低了土壤中这两种元素的流动和挥发损耗;且氮肥深施提高了土壤微生物活性,促进作物对速效磷和速效钾的吸收,进而形成明显的养分分布层次性^[21]。由此可见,施氮 25 cm 深度处理更有利于改

善速效磷和速效钾在土壤剖面的分布,土壤速效钾含量与玉米产量显著正相关也进一步支撑了此结论(表 5)。

西北旱地土壤养分供应能力差,与实现作物增产目标之间的矛盾日益增加。提高土壤有机碳(SOC)含量是改善该地区土壤理化性状、提高作物产量的重要途径^[22]。前人研究指出,氮肥深施可以显著提高土壤有机碳的含量,同时降低土壤有机碳的降解速率^[23]。本研究表明,随着施肥深度的增加,土壤 0~40 cm 土层土壤有机碳含量逐渐增加,且 25 cm 深施处理高于常规浅施及其他施肥深度处理(图 2),这可能是因为氮肥深施会增加作物的生物量和归还到土壤中的有机物量,进而提升 SOC 的累积^[14]。樊代佳等^[24]在湖北省武穴市的研究表明,与传统表施和深施 20 cm 处理相比,氮肥深施 10 cm 处理土壤有机碳含量最高,提高土壤肥力和作物产量的效果也最佳。其影响有机碳的最佳施肥深度与本研究不同,可能是两地的气候条件和成土过程差异造成的。

3.2 氮肥深施对农田玉米干物质积累量及产量的影响

不少研究表明,氮肥深施能通过改善土壤养分状况和土壤结构促进作物生长,最终实现增产增收^[25-26]。Wang 等^[27]研究发现,深施氮肥能够增加玉米穗数以及穗粒数,从而提高玉米产量及收获指数。本研究也发现,随着施肥深度的增加,玉米生物产量及经济产量均逐渐增加,D25 处理增产效果最佳(图 5,表 2)。这可能是因为氮肥深施后氮素以气态形式的损失量减少,保证了玉米生育中后期氮素供给,促进了植株的生殖生长,同时有利于花后植株氮素向籽粒转移,从而实现增产^[11]。本研究还发现各处理玉米干物质积累量均随施肥深度的增加呈逐渐增大趋势,这与 Qiang 等^[28]的研究结果基本一致,可能是相比于浅施,氮肥深施可提高玉米根层土壤养分含量,促进根系对养分和水分的吸收利用,提高植株光合能力,进而增加地上部干物质积累量^[29]。

3.3 氮肥深施对农田耗水量及水分利用效率的影响

优化施肥深度有利于作物根系生长,进而提高作物吸收和利用水分的能力^[30-32]。前人研究表明,旱作农田土壤贮水量同时受降雨量和作物根系对水分吸收利用情况的影响^[33]。而改变施肥深度能显著影响作物根系吸收利用水分能力进而影响作物耗水量^[34]。本研究发现,随着施肥深度的增加,

玉米生育期耗水量逐渐增加,收获期土壤贮水量逐渐降低,D25和D15处理贮水量均显著低于D5(表3)。这可能是因为氮肥深施可有效提高作物的叶面积指数和蒸腾速率^[18],与5cm施肥深度处理相比,15cm和25cm氮肥深施处理玉米生育中后期的干物质积累量较有所增加(图4),生物产量和经济产量显著提高(表2),而农田耗水量与玉米产量显著正相关(表5),故氮肥深施处理农田耗水量显著增加,同时收获期土壤贮水量降低^[35]。本研究还表明,优化施肥深度可以改善作物水分利用状况,随着施肥深度的增加,春玉米水分利用效率逐渐增大,D25较D15和D5处理2年平均显著提高5.85%和13.06%(图6)。这与Wu等^[26]在半湿润易旱区的研究结果一致,可能是因为深施氮肥可以一定程度上缓解水分的空间错位问题,减少水分的无效蒸发,促进了作物对深层土壤水分的利用^[36-37];此外,地膜覆盖措施也可以有效收集和利用雨水,防止径流和保持土壤湿度,从而提高作物产量及水分利用效率^[38]。本研究还发现春玉米水分利用效率与收获期土壤贮水量极显著负相关,与农田耗水量极显著正相关(表5),进一步印证了此结论。

4 结 论

与常规施氮深度处理(D5和D15)相比,氮肥25cm深施处理(D25)提高了覆膜农田0~40cm土层有机碳(SOC)、全氮(TN)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)和速效钾(AK)等土壤养分含量;可促进玉米吸收利用土壤水分和养分,提高春玉米水分利用效率和整个生育期干物质积累量,显著增加玉米产量并提高氮肥利用效率。因此,氮肥25cm深施模式是优化西北旱作区春玉米施肥方式、提高农田水肥利用率和农业可持续发展的重要措施。

参 考 文 献:

- [1] 杨文钰,杨峰. 发展玉豆带状复合种植,保障国家粮食安全[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3748-3750.
YANG W Y, YANG F. Developing maize-soybean strip intercropping for demand security of national food[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3748-3750.
- [2] 陈晓影,刘鹏,程乙,等. 基于磷肥施用深度的夏玉米根层调控提高土壤氮素吸收利用[J]. 作物学报, 2020, 46(2): 238-248.
CHEN X Y, LIU P, CHENG Y, et al. The root-layer regulation based on the depth of phosphate fertilizer application of summer maize improves soil nitrogen absorption and utilization[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(2): 238-248.
- [3] LYNCH J P. Root phenotypes for improved nutrient capture: an under-exploited opportunity for global agriculture[J]. *New Phytologist*, 2019, 223(2): 548-564.
- [4] 李廷亮,谢英荷,高志强,等. 黄土高原旱地小麦覆膜增产与氮肥增效分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2735-2746.
LI T L, XIE Y H, GAO Z Q, et al. Analysis on yield increasing and nitrogen efficiency enhancing of winter wheat under film mulching cultivation in the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2735-2746.
- [5] 王秀康,邢英英,李占斌. 覆膜和施氮肥对玉米产量和根层土壤硝态氮分布和去向的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3944-3957.
WANG X K, XING Y Y, LI Z B. Effect of mulching and nitrogen fertilizer on maize yield, distribution and fate of nitrogen in root layer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3944-3957.
- [6] WANG W Y, YUAN J C, GAO S M, et al. Conservation tillage enhances crop productivity and decreases soil nitrogen losses in a rainfed-agroecosystem of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274: 122854.
- [7] WU P, LIU F, LI H, et al. Suitable fertilizer application depth can increase nitrogen use efficiency and maize yield by reducing gaseous nitrogen losses[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 781: 146787.
- [8] 左红娟,自由路,卢艳丽,等. 基于高丰度¹⁵N华北平原冬小麦肥料氮的去向研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(15): 3093-3099.
ZUO H J, BAI Y L, LU Y L, et al. Fate of fertilizer nitrogen applied to winter wheat in north China plain based on high abundance of ¹⁵N[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(15): 3093-3099.
- [9] 樊叶,樊琳琳,薛兵东,等. 氮钾肥配施对辽东南地区玉米生长及氮素积累的影响[J]. 河北农业学报, 2019, 42(1): 8-13.
FAN Y, FAN L L, XUE B D, et al. Effects of nitrogen and potassium fertilizer combination on maize growth and nitrogen accumulation in southeast region of Liaoning[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2019, 42(1): 8-13.
- [10] 丁相鹏,李广浩,张吉旺,等. 控释尿素基施深度对夏玉米产量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21): 4342-4354.
DING X P, LI G H, ZHANG J W, et al. Effects of base application depths of controlled release urea on yield and nitrogen utilization of summer maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(21): 4342-4354.
- [11] QIANG S C, ZHANG Y, ZHAO H, et al. Combined effects of urea type and placement depth on grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of rain-fed spring maize in northern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 262: 107442.
- [12] WU J L, QUE R W, QI W L, et al. Varietal variances of grain nitrogen content and its relations to nitrogen accumulation and yield of high-quality rice under different nitrogen rates[J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): 2719.
- [13] CHEN G Z, REN L Q, WANG J Y, et al. Optimizing fertilization depth can promote sustainable development of dryland agriculture in the Loess Plateau region of China by improving crop production and reducing gas emissions [J/OL]. *Plant and soil*. (2022-11-23). <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-022-05795-6>. DOI: 10.1007/s11104-022-05795-6.
- [14] LI L, TIAN H, ZHANG M H, et al. Deep placement of nitrogen fertilizer increases rice yield and nitrogen use efficiency with fewer greenhouse gas emissions in a mechanical direct-seeded cropping system[J]. *The Crop Journal*, 2021, 9(6): 1386-1396.
- [15] 张建军,党翼,赵刚,等. 覆膜时期和施氮量对陇东旱地玉米产量和水氮利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(3): 479-490.
ZHANG J J, DANG Y, ZHAO G, et al. Influences of mulching periods and nitrogen application rates on maize yield as well as water and

- nitrogen use efficiencies in Loess Plateau of eastern Gansu province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(3): 479-490.
- [16] 王书伟,林静慧,吴正贵,等. 氮肥深施对太湖地区稻田氨挥发的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(12): 2002-2012.
WANG S W, LIN J H, WU Z G, et al. The effects of nitrogen fertilizer deep placement on the ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region of China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture (Chinese and English)*, 2021, 29(12): 2002-2012.
- [17] CHEN G Z, CAI T, WANG J Y, et al. Suitable fertilizer application depth enhances the efficient utilization of key resources and improves crop productivity in rainfed farmland on the Loess Plateau, China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 900352.
- [18] WEI W L, ZHANG S R, WU L P, et al. Biochar and phosphorus fertilization improved soil quality and inorganic phosphorus fractions in saline-alkaline soils[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67(9): 1177-1190.
- [19] LU D J, SONG H, JIANG S T, et al. Managing fertiliser placement locations and source types to improve rice yield and the use efficiency of nitrogen and phosphorus[J]. *Field Crops Research*, 2019, 231: 10-17.
- [20] LIU P, YAN H H, XU S N, et al. Moderately deep banding of phosphorus enhanced winter wheat yield by improving phosphorus availability, root spatial distribution, and growth[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 220: 105388.
- [21] DE OLIVEIRA L E Z, DE SOUZA NUNES R, DE FIGUEIREDO C C, et al. Spatial distribution of soil phosphorus fractions in a clayey Oxisol submitted to long-term phosphate fertilization strategies [J]. *Geoderma*, 2022, 418: 115847.
- [22] 王楚涵,刘菲,高健水,等. 减氮覆膜下土壤有机碳组分含量的变化特征[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(19): 3779-3790.
WANG C H, LIU F, GAO J Y, et al. The variation characteristics of soil organic carbon component content under nitrogen reduction and film mulching [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(19): 3779-3790.
- [23] LIU T Q, LI S H, GUO L G, et al. Advantages of nitrogen fertilizer deep placement in greenhouse gas emissions and net ecosystem economic benefits from no-tillage paddy fields [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121322.
- [24] 樊代佳,李成芳,曹湊贵. 氮肥深施对免耕稻田土壤有机质化学特性和胞外酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(3): 621-630.
FAN D J, LI C F, CAO C G. Effects of nitrogen deep placement on chemical properties of soil organic matter and extracellular enzyme activity in no-tillage paddy fields[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2021, 40(3): 621-630.
- [25] CHENG Y, WANG H Q, LIU P, et al. Nitrogen placement at sowing affects root growth, grain yield formation, N use efficiency in maize [J]. *Plant and soil*, 2020, 457(1): 355-373.
- [26] WU P, LIU F, CHEN G Z, et al. Can deep fertilizer application enhance maize productivity by delaying leaf senescence and decreasing nitrate residue levels? [J]. *Field Crops Research*, 2022, 277: 108417.
- [27] WANG C, ZHOU L B, ZHANG G B, et al. Responses of photosynthetic characteristics and dry matter formation in waxy sorghum to row ratio configurations in waxy sorghum-soybean intercropping systems [J]. *Field Crops Research*, 2021, 263: 108077.
- [28] QIANG S C, ZHANG Y, FAN J L, et al. Maize yield, rainwater and nitrogen use efficiency as affected by maize genotypes and nitrogen rates on the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 996-1003.
- [29] 侯慧芝,张绪成,尹嘉德,等. 旱地化肥分层和深施对春小麦水肥利用及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(17): 3289-3302.
HOU H Z, ZHANG X C, YIN J D, et al. Effects of deep and layered application of reduced chemical nitrogen fertilizer on water, nutrient utilization and yield of spring wheat in rain-fed arid area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(17): 3289-3302.
- [30] ZHANG X D, YANG L C, XUE X K, et al. Plastic film mulching stimulates soil wet-dry alternation and stomatal behavior to improve maize yield and resource use efficiency in a semi-arid region [J]. *Field Crops Research*, 2019, 233: 101-113.
- [31] 何华,康绍忠. 灌溉施肥深度对玉米同化物分配和水分利用效率的影响[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(4): 454-458.
HE H, KANG S Z. Effect of fertigation depth on dry matter partition and water use efficiency of corn [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(4): 454-458.
- [32] 王远远,乔露,陈宗奎,等. 土壤深层水和施肥深度对棉花生长发育及水分利用效率的影响[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(6): 812-818.
WANG Y Y, QIAO L, CHEN Z K, et al. Effect of deep layers water and fertilizer application depth on cotton growth and water use efficiency[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2018, 27(6): 812-818.
- [33] XU J, GUO Z Y, LI Z M, et al. Stable oxygen isotope analysis of the water uptake mechanism via the roots in spring maize under the ridge-furrow rainwater harvesting system in a semi-arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 252: 106879.
- [34] GUO L W, NING T Y, NIE L P, et al. Interaction of deep placed controlled-release urea and water retention agent on nitrogen and water use and maize yield[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 75: 118-129.
- [35] ZHONG Y Q W, SHANGGUAN Z P. Water consumption characteristics and water use efficiency of winter wheat under long-term nitrogen fertilization regimes in northwest China [J]. *PLoS One*, 2014, 9(6): e98850.
- [36] 段文学,于振文,石玉,等. 施氮深度对旱地小麦耗水特性和干物质积累与分配的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(4): 657-664.
DUAN W X, YU Z W, SHI Y, et al. Effects of nitrogen application depth on water consumption characteristics and dry matter accumulation and distribution in rainfed wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(4): 657-664.
- [37] 王小彬,代快,赵全胜,等. 农田水氮关系及其协同管理[J]. *生态学报*, 2010, 30(24): 7001-7015.
WANG X B, DAI K, ZHAO Q S, et al. Opinions on water-nitrogen relations and their synergic management [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 7001-7015.
- [38] FANG H, LI Y N, GU X B, et al. Can ridge-furrow with film and straw mulching improve wheat-maize system productivity and maintain soil fertility on the Loess Plateau of China? [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 246: 106686.