高明该,张鹏飞,解文艳,等.不同覆盖方式对旱作玉米氮素利用以及土壤硝态氮分布、累积的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(3):100-110.
Gao M G, Zhang P F, Xie W Y, et al.Effects of different mulching practices on nitrogen utilization and distribution and accumulation of soil nitrate nitrogen in dryland maize[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(3):100-110.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202412006

不同覆盖方式对旱作玉米氮素利用以及土壤硝态氮分布、累积的影响

高明该[1,2],张鹏飞[2],解文艳[2],杨振兴[2],刘志平[2],贺丽燕[2],周怀平[2*]

(1.山西农业大学 资源环境学院,山西 晋中 030801;2.山西农业大学 资源环境学院,山西 太原 030031)

摘　要:[目的]高强度化肥投入导致的氮素失衡是影响农田土壤环境的重要因素,覆盖可抑制氮素淋失、提高作物氮素利用效率,但关于长期覆盖的影响还鲜见报道。本研究旨在探究能够合理提高氮素利用率、减少氮在土壤中的淋失的长期覆盖耕作措施。[方法]本研究基于山西省寿阳县宗艾村北坪旱塬地的15年长期定位试验,以明确无覆盖(CK)、秸秆覆盖(J)、普通地膜覆盖(P)、宽幅地膜覆盖(S)、宽幅地膜与行间秸秆覆盖(SJ)和普通地膜与行间秸秆覆盖(PJ)6个处理在种植第15年(2023年)对旱地春玉米产量、氮素利用率和土壤硝态氮剖面分布及累积的影响,以及种植第0、7、10、15年时不同覆盖方式下各处理硝态氮在土壤剖面中的年际变化。[结果]种植春玉米第15年,6个处理玉米产量从高到低为SJ>S>P>PJ>J>CK,氮素回收利用率为SJ>S>PJ>P>J>CK,氮肥贡献率为SJ>S>PJ>P>J>CK,土壤氮素依存率为CK>J>P>PJ>SJ>S,氮肥偏生产力为SJ>S>PJ>P>J>CK,表明SJ处理产量最高且能够有效提高作物对氮素的吸收效率。6个处理下硝态氮总累积量的77%~93%在200 cm以下的土层累积,可视为氮素的淋失,而SJ在200 cm以下土层的累积量占比小于其它覆盖措施,总量小于CK。在年际变化方面,6个处理土壤剖面硝态氮峰值明显下移,种植第15年与第7年相比,8年间土壤硝态氮峰值下移范围为80~180 cm,各处理均呈现出向500 cm土层以下淋洗的趋势;同时,SJ处理总迁移量显著小于CK以及其它覆盖处理。此外,土壤剖面硝态氮的阶段性迁移变化(年际变化)结合降水年型分析,发现经过多个丰水年份的硝态氮累积变化,与种植第7年和种植第10年的硝态氮峰值所在土层深度相比,种植第15年6个处理硝态氮峰值所在土层深度的下降幅度较大。[结论]施用化肥用量一致的条件下,长期覆盖处理在减少硝态氮淋失和提高氮素利用效率方面表现出明显优势,其中宽幅地膜与行间秸秆覆盖相结合的覆盖方式相比其它覆盖方式效果更好,可显著提高氮素回收利用效率和氮肥贡献率,同时有效减少土壤氮素依存率、抑制土壤硝态氮的淋失,从而促进玉米产量的提升,具有优化作物生产、保护环境和促进土壤可持续发展的效益。

关键词:覆盖方式; 氮素利用; 土壤硝态氮; 旱地春玉米; 长期定位试验
中图分类号:S513;S158.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)03-0100-11

Effects of different mulching practices on nitrogen utilization in dryland maize and the distribution and accumulation of soil nitrate nitrogen

Gao Minggai[12], Zhang Pengfei[2], Xie Wenyan[2], Yang Zhenxing[2], Liu Zhiping[2], He Liyan[2], Zhou Huaiping[2*]

(*1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030031, China; 2.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030801, China*)

Abstract:[Objective]Nitrogen imbalance caused by high-intensity fertilizer application is a major factor affecting the farmland soil environment. Mulching can inhibit nitrogen leaching and improve crop nitrogen use efficiency (NUE), but the long-term ef-

收稿日期:2024-12-05　　**修回日期**:2025-03-20
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1900503-02);科技基础资源调查专项(2021FY100501)
作者简介:高明该(ORCID:0009-0003-8286-2674),硕士,研究方向:旱地作物-土壤互作与调控,E-mail:17337078230@163.com
*通信作者:周怀平,研究员,E-mail:huaipingzhou@126.com

fects of mulching remain understudied. This study aimed to explore long-term mulching and tillage practices that can reasonably enhance NUE and reduce nitrogen leaching in soil. [Methods]Based on a 15-year long-term field experiment in Beiping dryland of Zong'ai Village, Shouyang County, Shanxi Province, this study evaluated six treatments,no mulch (CK), straw mulch between rows (J), conventional plastic film mulch (P), water-permeability plastic film mulch (S), water-permeability plastic film mulch + straw mulch between rows (SJ), and common plastic film mulch + straw mulch between rows (PJ), during the 15th year (2023) of cultivation. The study assessed their effects on spring maize yield, NUE, and the distribution and accumulation of soil nitrate nitrogen (NO_3^--N). Additionally, interannual changes in NO_3^--N distribution under different mulching practices were analyzed at years 0, 7, 10, and 15 of cultivation. [Results]In the 15th year of spring maize cultivation (2023), maize yield under the six treatments ranked as follows: SJ>S>P>PJ>J>CK. Nitrogen recovery efficiency followed the order SJ>S>PJ>P>J>CK, while fertilizer nitrogen contribution rate showed SJ>S>PJ>P>J>CK. Soil nitrogen dependence was highest in CK>J>P>PJ>SJ>S, and partial factor productivity of nitrogen fertilizer ranked SJ>S>PJ>P>J>CK, indicating that the SJ treatments achieved the highest yield while effectively improving nitrogen absorption efficiency. Among the six treatments, 77%~93% of the total accumulated NO_3^--N was found below 200 cm, indicating significant nitrogen leaching. However, the SJ treatment had a lower proportion of NO_3^--N accumulation below 200 cm and a smaller total amount than CK. Regarding interannual variations, the peak NO_3^--N concentration in the soil profile shifted downward significantly. Over eight years (from the 7th to the 15th year), the peak NO_3^--N depth moved 80~180 cm deeper, with all treatments showing a tendency for NO_3^--N to leach below 500 cm. At the same time, the SJ treatment exhibited significantly less total NO_3^--N migration compared to CK and other mulching treatments. Furthermore, combining NO_3^--N migration patterns with precipitation trends revealed that after multiple wet years, the depth of NO_3^--N concentrations in the 15th year was substantially deeper than in the 7th and 10th years. [Conclusion]Under consistent fertilizer application rates, long-term mulching practices showed clear advantages in reducing nitrate nitrogen leaching and improving nitrogen use efficiency. Among the mulching methods, wide water-permeability plastic film mulching + straw mulching between rows treatment outperformed others, significantly improved nitrogen recovery efficiency and nitrogen contribution rate , while reducing soil nitrogen dependency and inhibiting nitrate nitrogen leaching. This approach effectively increase maize yield,offering benefits for optimizing crop production, environmental protection, and sustainable soil management.

Keywords: Mulching practices, Nitrogen utilization, Soil nitrate nitrogen, Dryland spring maize, Long-term located experiments

玉米是我国产量最高的粮食作物,其种植面积不断扩大[1]。目前,随着农业经济的发展,各种类型化肥的投入对农作物产量有着一定的促进作用,但与此同时,高强度的化肥投入也给农田土壤和环境带来一系列变化,其中氮素平衡问题尤为突出。氮素平衡在玉米生产中起着至关重要的作用,因此,研究如何有效调控玉米地的氮素平衡对玉米可持续生产尤为关键[2]。大量研究已表明,土壤氮素以硝态氮为主要形式发生淋溶和累积[3-4]。硝态氮淋失导致的氮素失衡与土壤水分、作物产量密切相关,这些因素的相互作用最终会显著影响农业生产。

在农业生产中,氮素失衡是影响作物生长和土壤环境的一个关键问题。地表覆盖技术作为一种有效的调控手段,能够在一定程度上缓解这一问题。例如,秸秆覆盖可增加土壤氮的固定,减少氮素淋溶,提高氮肥利用率[5]。地膜覆盖可显著降低氮肥向深层土壤的淋溶、减少氨挥发等气态损失,延长氮肥在土壤中的有效性,从而提高氮肥利用率[6]。目前,地膜覆盖与秸秆覆盖是干旱与半干旱地区农业生产中2个主要的地表覆盖技术,二者在玉米生育期均具有良好的蓄水保墒作用,还能在不同程度上提高玉米产量,如,与无覆盖相比,地膜覆盖和秸秆覆盖2年后春玉米的产量分别增加了24.9%和11.8%[1,7]。覆膜在旱地农业中能够明显促进作物生长,提高氮素吸收利用效率,并对土壤中硝态氮的分布和累积产生影响[8-9]。有学者认为,覆膜条件下,高温高湿环境会加速土壤有机氮的矿化速率,并在旱地条件下导致以硝态氮(NO_3^--N)为主的矿质氮累积增加[10-12]。根据张悦等[13]的研究,采用全膜双垄沟栽培模式显著提升了春玉米产量和春玉米植株吸氮量及氮素回收利用率,同时也有效减少土壤剖面硝态氮的累积和淋洗。秸秆覆盖除能有效抑制土壤水分蒸发并调

节地温外,还可腐解并为土壤提供额外的养分来源,增强土壤肥力,促进地上部氮素吸收以及作物产量形成[14]。但是,在生产实践中,地膜和秸秆覆盖分别存在地力下降和苗期地温较低的不利现象[15-17]。因此,尽管这2种技术各自具有明显优点,它们在长期应用中的综合效益仍需深入研究。

地膜和秸秆覆盖技术各有优缺点,在不同试验周期中展现出不同的效果。例如,1年的短期试验表明,将秸秆覆盖时间推迟到作物三叶期时,土壤中氮素含量显著增加,除40~60 cm土层外,其它土层的土壤硝态氮含量均随着秸秆覆盖量的增加而上升[18]。3年的中期试验表明,在不同种植方式下,覆膜种植相比裸地平作更能有效减少施肥导致的硝态氮残留,尤其是在高肥处理下,全膜双垄沟播表现出显著的优势[19]。若能继续延长试验周期,有助于揭示不同措施的累积效应,从而为农业生产的可持续性提供更加科学的指导,例如,通过对氮素动态和土壤健康的长期持续观察,更加准确地评估覆膜与秸秆覆盖的长期效益,以实现作物可持续生产。Wang等[20]统计2000-2022年的不同生态区域的无土覆盖、地膜覆盖和秸秆覆盖处理的田间试验报道后,发现地膜覆盖在单作玉米系统中产量增幅更高,为30.3%;秸秆覆盖则在双作种植系统中表现较好,使得双作玉米的产量增加了21.7%;该研究认为地膜覆盖和秸秆覆盖处理联合施用对作物可持续生产具有潜在的促进作用。根据陈桂平等[21]的研究,发现秸秆地膜二元覆盖对于促进玉米生长发育而稳产高产具有明显的增效作用,但试验周期较短,还不清楚2种覆盖方式相结合的长期影响。因此,本研究综合了秸秆覆盖在增加有机物料输入方面的优势,以及地膜覆盖在蓄水保墒方面的优势,深入探讨这2种覆盖方式及其结合应用的效果。通过在山西省旱塬地上种植春玉米并长期进行不同覆盖方式影响的定点观测,研究种植第15年不同覆盖方式对玉米籽粒产量、氮肥利用效率的影响,解析不同覆盖方式下土壤硝态氮的分布和累积特征;以及分析种植第0、7、10、15年时不同覆盖方式下各处理硝态氮在土壤剖面中的年际移动变化,旨在探寻适宜当地玉米生产和生态环境的覆盖类型,进而为该区玉米生产中提高氮肥利用效率、有效降低硝态氮在土壤中的淋失提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

长期定位试验于2008-2023年在山西省寿阳县宗艾村北坪旱塬区(37°45′21″N,113°54′2″E)进行,海拔为1130 m,年均气温7.4 ℃,年均降水量501.1 mm,70%左右的降水集中在6-9月,属暖温带半湿润偏旱区。试验地表面平坦,供试土壤为褐土性土,表层土壤的理化性质见表1[22-23],土层深厚,作物为春玉米,种植制度为一年一季。

表1 长期定位试验播前0~20 cm土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties in 0~20 cm soil layer of pre-sowing soil in the field experiment

指标 Indices	数值 Values
pH	8.3
有机质含量/(g/kg) Organic matter content	16.7
全氮含量/(g/kg) Total N content	1.0
全磷含量/(g/kg) Total P content	0.9
全钾含量/(g/kg) Total K content	18.0
碱解氮含量/(mg/kg) Alkali-hydrolyzed N content	63.8
有效磷含量/(mg/kg) Available P content	7.8
速效钾含量/(mg/kg) Available K content	95.0
容重/(g/cm^3) Unit weight	1.4

1.2 试验设计

长期定位试验设无覆盖(CK)、秸秆覆盖(J)、普通地膜覆盖(P)、宽幅地膜覆盖(S)、宽幅地膜与行间秸秆覆盖(SJ)和普通地膜与行间秸秆覆盖(PJ)6个处理(表2)[24],2008-2023年种植春玉米,每年种植并收获1次,每个处理设3次重复,随机区组排列,小区面积为6 m×8 m,以不施肥为空白。地膜覆盖时间为春玉米全生育期(4-9月),每年覆盖1次。所有处理均施用晨雨调控肥(N:P_2O_5:K_2O=19:11:10)作基肥,施用量为900 kg/hm^2。全生育期不进行灌溉,以自然降水为水分来源。

1.3 样品采集与指标测定

1.3.1 植物与土壤样品采集

于种植第15年,即2023年10月,在每个小区内选取10株生长高度相对一致、籽粒成熟度相似、未发生明显病虫害的玉米植株,收集植株地上部分;收获玉米后用五点采样法采集土壤样品,采样深度为0~500 cm,每20 cm为1层,每小区收集1个土样,重复3次。

表2　旱作玉米不同覆盖方式

Table 2　Different mulching methods for dryland maize

处理 Treatments	处理方法 Methods of treatments
CK	无覆盖
J	秸秆覆盖(出苗后,行间覆盖玉米秸秆);秸秆覆盖用量为7500 kg/hm^2
P	普通地膜覆盖(宽80 cm,覆盖2行玉米)
PJ	普通地膜与行间秸秆覆盖(出苗后,作物行间裸地覆盖玉米秸秆);秸秆覆盖用量为3000 kg/hm^2
S	宽幅地膜覆盖(宽140 cm,覆盖3行玉米)
SJ	宽幅地膜与行间秸秆覆盖(出苗后,作物行间裸地覆盖玉米秸秆);秸秆覆盖用量为3000 kg/hm^2

1.3.2 玉米产量与全氮含量测定

于种植第15年,即2023年10月,将植株地上部分划分为茎、叶、穗轴和籽粒,经过65 ℃、24 h干燥后进行称重,最后计算其生物产量。粉碎植株样品后,采用H_2SO_4-H_2O_2法进行消煮处理,并通过凯氏定氮仪测定植株全氮含量[24]。各指标重复3次。产量公式如下:

玉米产量(kg/hm^2)=处理小区成穗数(穗/48 m^2)×平均单穗风干籽粒重(kg/穗)×10000 m^2/hm^2

1.3.3 土壤硝态氮含量的测定

于种植第0、7、10、15年收集土壤样品,样品风干后使用1 mol/L的KCl溶液,以水土比10∶1对土壤样品进行浸提,恒温震荡1小时后进行过滤,通过流动分析仪测定滤液中的硝态氮浓度,以计算种植第0、7、10、15年的土壤硝态氮含量及种植第15年的氮素利用相关指标[5,10],各指标重复3次。常见的氮素利用相关指标参照解文艳[24]和张秀芝等[25]的方法进行计算,公式如下:

植株吸氮量=植株干重×植株全氮含量

氮素回收利用率=(施氮肥处理地上部吸氮量−不施氮肥处理地上部吸氮量)/氮投入量×100%

土壤硝态氮累积量(kg/hm^2)=土层厚度×土壤容重×土壤硝态氮浓度/10

氮肥贡献率=(施氮肥处理籽粒产量−不施氮肥处理籽粒产量)/施氮肥处理籽粒产量×100%

土壤氮素依存率=不施氮肥处理作物吸氮量/施氮肥处理作物吸氮量×100%

氮肥偏生产力=施氮肥处理籽粒产量/施氮量

1.4　数据处理

采用Excel 2019软件计算数据的平均值和标准差;采用SPSS 2019软件进行差异显著性分析,使用单因素方差分析(ANOVA)中的最小显著性差异(Duncan)法;采用Origin 2019软件进行作图。

2　结果与分析

2.1　不同覆盖方式对玉米产量及氮素吸收利用的影响

由表3可见,与无覆盖(CK)处理相比,不同覆盖方式均能提高玉米产量,但不同覆盖方式下玉米产量存在明显差异,排序为SJ>S>P>PJ>J>CK。与CK处理相比,5种覆盖方式的产量增加了5.98%~19.86%,SJ处理增幅最大,显著高于CK处理。不同覆盖方式处理显著提高了玉米地上部的总吸氮量,各处理的总吸氮量从大到小的排序与玉米产量一致;与CK处理相比,5种覆盖方式的吸氮量增加了5.53%~31.17%,SJ处理增幅最大,显著高于CK处理。在同等施氮量的条件下,氮素盈亏量排序为CK>J>P>PJ>S>SJ。与CK处理相比,5种覆盖方式的氮素盈亏量减少了12.37%~69.80%,SJ处理减幅最大,显著低于CK处理。各处理氮素回收利用率从大到小的排序与产量和吸氮量一致,SJ处理的氮素回收利用率显著高于其它处理。氮素盈亏的变化趋势与氮素回收利用率相反,相较于CK处理,5种覆盖方式的氮素回收利用率提高了3.82%~21.55%,SJ处理增幅最大,显著高于CK。

2.2　不同覆盖方式对氮肥贡献率、土壤氮素依存率和氮肥偏生产力的影响

氮肥贡献率可反映当年氮素吸收利用对植株干重影响的贡献程度。从表4中可见,SJ处理氮肥贡献率最高,达到51.96%,显著高于其它覆盖处理以及CK;CK氮肥贡献率最低,为42.42%,与CK相比,5种覆盖方式的氮肥贡献率提高了3.25%~9.54%,各处理氮肥贡献率的顺序为SJ>

表3 种植第15年不同覆盖处理对土壤氮素利用的影响

Table 3 Effects of mulching treatments on soil nitrogen utilization in the 15th year of cultivation

处理 Treatments	玉米产量/(kg/hm²) Maize yield	施氮量/(kg/hm²) N rate	吸氮量/(kg/hm²) N uptake	氮素盈亏量/(kg/hm²) N balance	氮素回收利用率/% Apparent recovery
CK	7 605.84e	228	157.61c	70.39a	48.67c
J	8 060.62d		166.32bc	61.68ab	52.49bc
P	8 634.55c		180.66b	47.34b	58.78b
PJ	8 869.35ab		182.79b	45.21b	59.72b
S	9 080.52ab		204.84a	23.16c	69.38a
SJ	9 116.38a		206.74a	21.26c	70.22a

注:不施肥处理产量为4 379.63 kg/hm²,吸氮量为46.64 kg/hm²。同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The yield of no fertilization treatment was 4 379.63 kg/hm², The nitrogen uptake was 46.64 kg/hm². Different letters indicated significant differences between treatments ($P<0.05$).

S>PJ>P>J>CK。土壤氮素依存率可反映春玉米对土壤中氮素资源的依赖程度,体现土壤供氮的能力。CK处理的土壤氮素依存率达到了29.59%,显著高于其它覆盖处理;与CK相比,5种覆盖方式的土壤氮素依存率降低了1.55%~7.03%,排序为CK>J>P>PJ>SJ>S。从氮肥偏生产力来看,SJ处理最高,达到39.98%,显著高于其它覆盖处理以及CK;CK处理氮肥偏生产力最低,仅为33.36%,与CK相比,5种覆盖方式的氮肥偏生产力增加了5.98%~19.86%,排序为SJ>S>PJ>P>J>CK。通过氮肥贡献率、土壤氮素依存率和氮肥偏生产力的分析结果,发现SJ处理效果最好,能增强肥效,提高氮素的利用率与生产力。

2.3 不同覆盖方式下土壤剖面硝态氮分布特征

长期定位试验条件下,土壤硝态氮在土体中向下迁移(图1),且在不同覆盖方式下,0~500 cm土层中硝态氮的分布存在显著差异($P<0.05$),各处理硝态氮含量呈先下降后上升再下降的变化趋势。各处理在0~100 cm土层的变化趋势是先上升后下降,在100~300 cm和300~500 cm土层的变化趋势均是先上升后下降。各处理在200 cm以下土层含水量总体维持在较高水平,且不同覆盖处理的含水量显著高于CK。不同覆盖方式下硝态氮在0~100 cm土层变化趋势相似,均先下降后上升;但在100~500 cm土层,各处理硝态氮含量分布的变化幅度较大,处理间差异显著($P<0.05$)。在长期定位试验中,各处理土壤中硝态氮出现了明显的积累现象。CK处理的硝态氮含量出现2个峰值,分别在100~120 cm和220~240 cm土层。相比之下,不同覆盖方式处理的硝态氮峰值较CK处理有所降低,且,向250~400 cm土层迁移。P、S、SJ和PJ处理在100~500 cm土层的硝态氮含量分布出现多个峰值,在300~340 cm土层硝态氮含量最高。除CK处理外,各处理0~200 cm土层的硝态氮含量分布依次为SJ>S>PJ>J>P,而在200 cm以下土层,硝态氮含量分布依次为J>S>P>SJ>PJ。

表4 种植第15年不同覆盖方式处理土壤氮素利用的影响

Table 4 Effects of different mulching treatments on soil nitrogen utilization in the 15th year of cultivation

处理 Treatments	氮肥贡献率/% Nitrogen contribution rate	土壤氮素依存率/% Nitrogen dependent rate	氮肥偏生产力/(kg/kg) Partial factor productivity
CK	42.42d	29.59a	33.36e
J	45.67c	28.04ab	35.35d
P	49.28b	25.82b	37.87c
PJ	50.62ab	25.52b	38.90b
S	51.77a	22.77c	39.83ab
SJ	51.96a	22.56c	39.98a

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters indicated significant differences between treatments($P<0.05$).

2.4 不同覆盖方式对土壤硝态氮累积量的影响

经过长期施肥后,不同覆盖方式处理的土壤硝态氮累积量如表5所示,CK处理0~500 cm土层硝态氮累积最多,高达2 955.28 kg/hm²,表现出较高的淋溶风险。各覆盖处理硝态氮积累主要出现在200~500 cm土层,其次为80~200 cm土层,在0~80 cm土层各处理硝态氮的累积量均极低。CK、P、S、SJ和PJ处理0~200 cm土层硝态氮累积

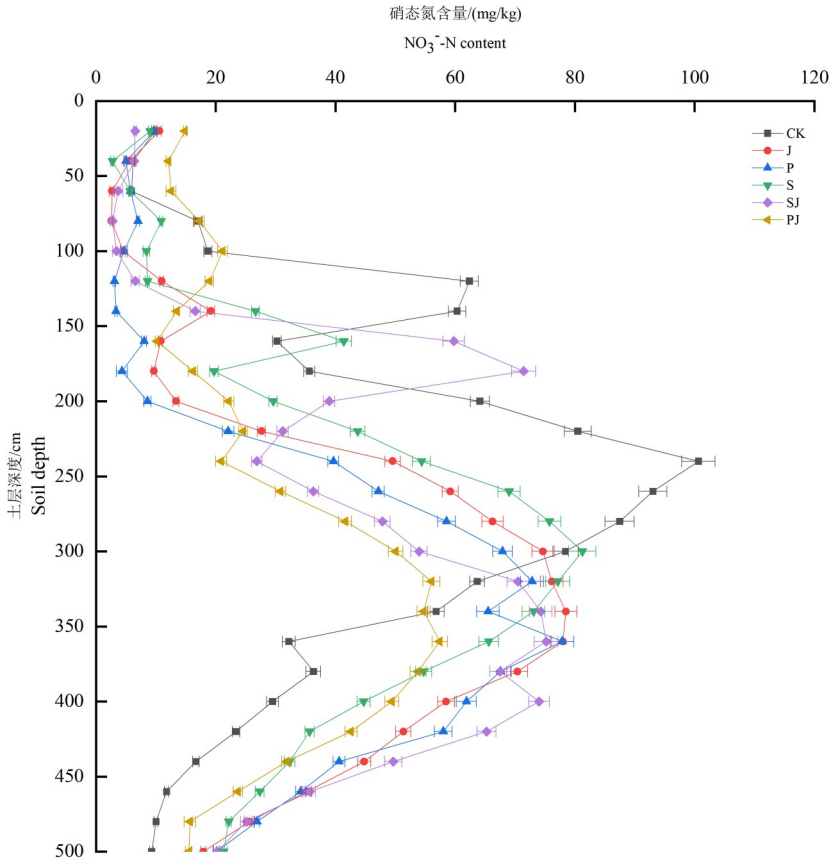


图1　种植第15年不同覆盖方式对土壤剖面硝态氮分布的影响

Fig.1　Effects of different mulching treatments on nitrate nitrogen distribution in soil profile in the 15th year of cultivation

量在0～500 cm土层中占比不超过30%;CK、J、P、PJ、S、SJ处理200～500 cm土层硝态氮累积量分别占0～500 cm土层总累积量的70%、90%、93%、78%、82%、77%。长期的定位试验结果表明,6个处理的硝态氮累积量呈现明显增加趋势,种植15年后各处理总累积量有77%～93%集中在200 cm以下的土层,各处理在200 cm以下的比例大都超过70%,可视为氮素的淋失。SJ在200 cm下的累积量占比小于其它覆盖处理,且总量小于无覆盖处理。因此,SJ处理能够减少深层土壤中硝态氮的积累,从而降低硝态氮的淋失风险。

2.5　不同覆盖方式下土壤剖面硝态氮的阶段性迁移

图2以种植第0、7、10、15年500 cm土层中的硝态氮含量变化为例,展示了6个处理下土壤中硝态氮含量的年际变化,可用于分析土壤硝态氮的阶段性迁移。CK的硝态氮含量在种植第7年,峰值出现在40～60 cm和120～140 cm土层;种植第10年,峰值出现在120～140 cm土层;种植第15年,峰值出现在100～120 cm和220～240 cm土层,即种植第7年硝态氮淋洗到140 cm以下的土层,至种植第15年时已淋洗到240 cm以下的土层。与CK相似,5个覆盖方式下硝态氮含量在种植第7年的峰值为40～180 cm土层,但在种植第15年时已下移至120～360 cm土层。种植第15年与第7年相比,各处理的硝态氮峰值均明显下移,8年间下移范围为80～180 cm,且呈现向500 cm土层以下淋洗的趋势。水分是硝态氮迁移的主要载体,硝态氮会随水分在土壤中迁移,尤其是在降雨或灌溉后,硝态氮可能被淋溶到深层土壤中。可见,与CK相比,SJ处理氮素盈余量减幅最大,显著低于CK处理;在年际变化中,该处理总迁移量显著小于CK以及其它覆盖处理($P<0.05$)。

此外,不同覆盖方式下土壤剖面硝态氮的阶段性迁移和降雨量密切相关。例如,沈新磊等[26]研究表明,试验区降水少时,硝态氮主要分布在0～80 cm土层,降水多时,硝态氮进入下层土壤比例增加,这与本研究结果相似。在15年的试验期

表5 种植第15年不同覆盖方式下硝态氮在土壤剖面中的累积量和占比

Table 5 Accumulation and proportion of nitrate nitrogen in soil profile under different mulching treatments in the 15th year of cultivation kg/hm²

处理 Treatments	0～500 cm土层累积量/(kg/hm²) Accumulation in 0～500 cm soil depth	0～80 cm土层累积量/(kg/hm²) Accumulation in 0～80 cm soil depth	比例/% Percentage	80～200 cm土层累积量/(kg/hm²) Accumulation in 80～200 cm soil depth	比例/% Percentage	200～500 cm土层累积量/(kg/hm²) Accumulation in 200～500 cm soil depth	比例/% Percentage
CK	2 955.28a	98.92a	3	779.92a	27	2 076.44a	70
J	2 487.57ab	54.03b	2	197.15b	8	2 236.39a	90
P	2 248.17ab	69.34b	3	91.22b	4	2 087.61a	93
PJ	1 990.16b	142.86a	7	287.98b	15	1 559.32a	78
S	2 602.02ab	71.47b	3	386.52b	15	2 144.03a	82
SJ	2 680.28ab	48.90b	2	569.16b	21	2 062.22a	77

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

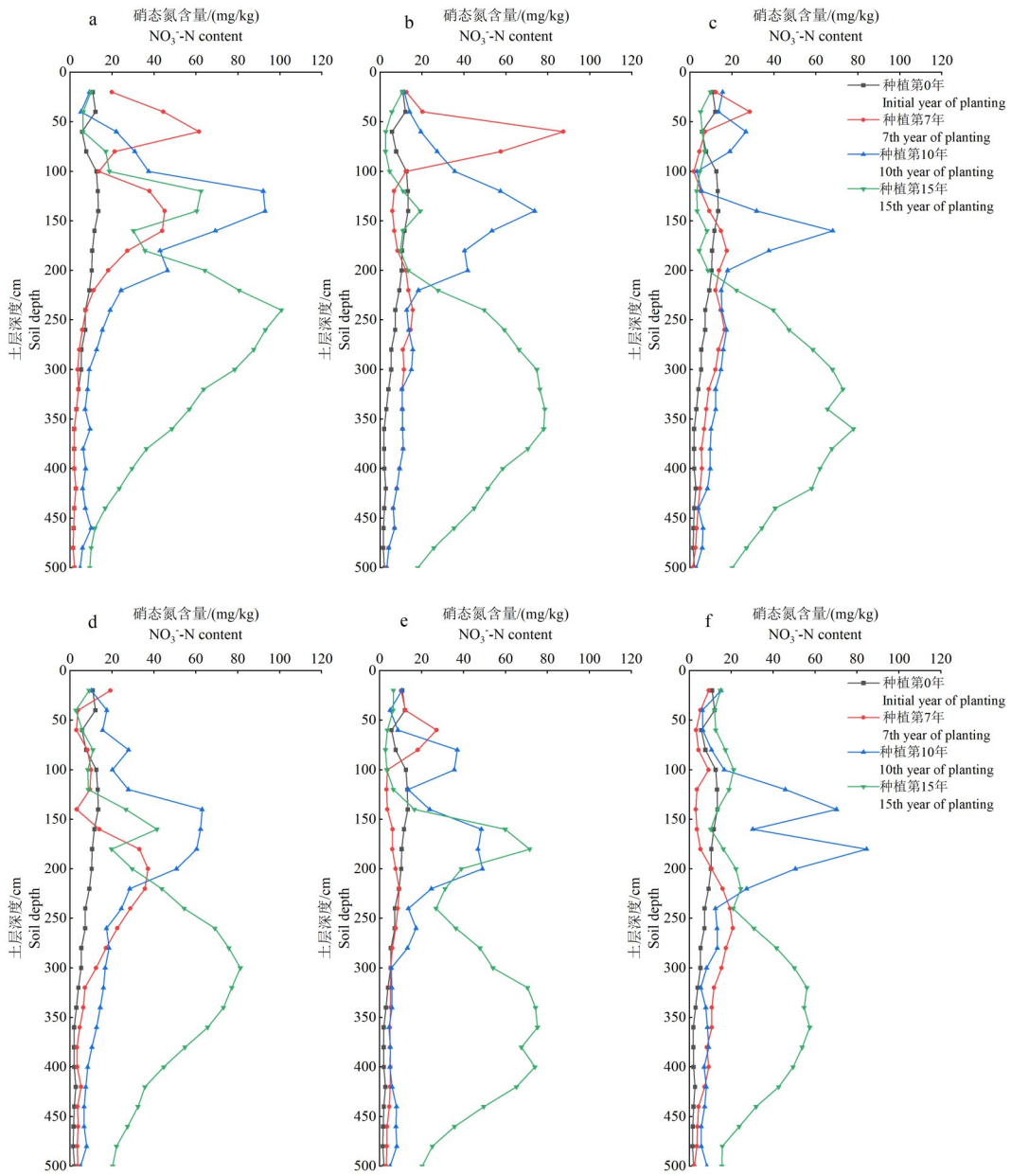
Note: Different letters indicated significant differences between treatments($P<0.05$).

间,通过计算降雨量得出,正常年有9年(2008、2009、2010、2011、2012、2015、2017、2021、2023年),偏旱年有2年(2014、2016年),大旱年有1年(2019年);丰水年有4年(2013、2018、2020、2022年)。不同覆盖方式处理土壤剖面硝态氮峰值随种植时间延长明显下移,且均呈现向500 cm土层以下淋洗的趋势,可能也与种植期间正常与丰水年份较多有关。与CK相比,SJ处理氮素盈余量降幅最大,显著低于CK处理;在年际变化中,其总迁移量显著小于无覆盖处理以及其它覆盖处理($P<0.05$),氮素迁移量小有利于春玉米产量增加。

3 讨论

在干旱半干旱地区,覆膜和施肥处理可明显提高玉米产量,还能提高氮肥利用率和作物对土壤氮素的吸收量[27],本研究表明宽幅地膜与秸秆覆盖处理和无覆盖处理以及其它覆盖处理相比,玉米产量增加了35.86～1 055.76 kg/hm²;玉米植株吸氮量增加了1.90～40.42 kg/hm²;氮素回收利用率提高了0.84%～17.73%。这可能是由于宽幅地膜相比普通尺寸地膜具有更好的蓄水保墒作用,同时秸秆覆盖增加了有机物料的输入,改善了土壤肥力。但经过长期的耕作生产,我国北方干旱和半干旱地区的土壤中有大量的硝态氮累积,这种累积不仅会影响农业生产的可持续性,还导致潜在的环境风险增高。氮素平衡作为一个重要指标,不仅关系到农业生产发展的可持续性,还直接影响到环境效益[28]。长期试验可通过揭示不同覆盖方式的累积效应及其对氮素动态和土壤健康的长期影响,为评估农业管理措施的可持续效益提供科学依据,从而实现作物可持续生产。本研究结果表明,种植第15年6个处理的春玉米产量和氮素回收利用率的排序相同,氮素盈亏量和硝态氮含量分布、累积量的排序相反,这也与多项研究结果相似[29-31],即硝态氮的分布和累积与春玉米产量和氮素盈亏量大小密切相关。

不同深度土层硝态氮的含量反映了硝态氮在土体中的积累与迁移趋势,可用于评价土壤硝态氮的淋失风险[25]。郭星宇等[32]研究发现随着年份的增加,土壤硝态氮的累积量逐年增加且向更深的土层迁移,并在土层加深的过程中呈现下降趋势,这与本试验结果相似,各处理硝态氮含量在种植第7年的峰值为40～180 cm土层,但在种植第15年时已下移至120～360 cm土层。种植第15年与第7年相比,各处理的硝态氮峰值均明显下移,8年间下移范围为80～180 cm,且呈现向500 cm土层以下淋洗的趋势。这种变化可能导致土壤氮素失衡,进而影响作物对其它养分的吸收,最终对作物产量产生负面影响。覆盖可抑制氮淋失,但不同覆盖方式对氮素淋失的长期影响尚少有报道。本研究表明,施用化肥用量一致的条件下,种植第15年不同覆盖方式处理0～500 cm土体土壤硝态氮累积量低于CK处理,各处理的总累积量有77%～93%集中在200～500 cm土层,且各处理在200 cm以下的累积量占比大都超过70%,可视为氮素的淋失。而SJ处理在200～500 cm的累积量



a:无覆盖(CK);b:秸秆覆盖(J);c:普通地膜覆盖(P);d:宽幅地膜覆盖(S);e:宽幅地膜与行间秸秆覆盖(SJ);f:普通地膜与行间秸秆覆盖(PJ)

a:0—mulching(CK);b:Straw mulching between rows(J);c:Common plastic film mulching(P);d:Water—permeability plastic film mulching(S);e:Water—permeability plastic film mulching + straw mulching between rows(SJ);f:Common plastic film mulching + straw mulching between rows(PJ)

图2　不同覆盖方式土壤硝态氮含量的年际变化

Fig.2　Interannual variations in soil NO_3^--N concentrations under different mulching practices

占比小于其它覆盖处理,且总量小于无覆盖处理,意味着SJ处理能够减少深层土壤中硝态氮的积累,从而降低硝态氮的淋失风险。根据胡锦昇等[33]研究,发现在旱塬区采用免耕基础上的秸秆结合地膜覆盖能有效地调节土壤的水分运动,可以减少硝态氮的淋溶累积,从而改善农田的水肥状况,进而增加作物产量。本研究将秸秆与地膜覆盖后秸秆结合地膜覆盖能够有效提高土壤保水保肥能力,减少和氮素流失,同时改善土壤结构,促进作物生长和增产,也与此结论相似。

不仅是长期施氮可导致硝态氮向下层土壤迁移,水分变化也对土壤氮素的移动和分布有着明显影响。土壤中的硝态氮分布特征的年际变化与水分变化密切相关,降雨会增加土壤水分,而土壤

水分越多,硝态氮淋失越多[25,34]。不同覆盖处理的0~100 cm土层土壤含水量比CK处理的含水量高,即相同降雨量条件下,CK处理的土壤水分下渗量大于不同覆盖方式处理。但不同覆盖方式处理下,种植第15年与第10年相比,硝态氮峰值向下移动的幅度较大,这可能与种植期间的降水情况有关。在旱作农业区,降雨对氮素淋溶起着决定性的作用,而且降雨年际间的变化会造成土壤中硝态氮淋失的变化[35]。在降雨量或者灌溉量较高时,土壤中的硝态氮易于向下淋洗;而在干旱条件下,由于深层土壤水分向上移动,较深土层中的硝态氮也随之上移[36]。本研究中,与种植第7年、第10年的峰值位置相比,种植第15年不同覆盖方式处理硝态氮峰值向下移动的幅度较大。这可能是由于种植第10年至种植第15年间有多个丰水年,造成土壤水分的增加,从而导致硝态氮的淋失增加,向下层土壤迁移。同时,由于地表覆盖具有很好的保水效果,可以改善深层土壤水分状况,减少不同土层水分变化,使得土壤水分含量较高且相对稳定,未被利用的氮素以硝态氮的形式随水分下渗淋移到土壤深层并累积[37]。此外,地下水位下降或区域性缺水也会导致土壤的保水能力下降,进而导致硝态氮不断向下淋溶[33]。未来可继续深入研究长期覆盖对氮素淋失的影响机理,为可持续农业发展提供科学支持。

4 结论

本研究依托长期定位试验,于种植第15年对无覆盖(CK)、秸秆覆盖(J)、普通地膜覆盖(P)、宽幅地膜覆盖(S)、宽幅地膜与行间秸秆覆盖(SJ)和普通地膜与行间秸秆覆盖(PJ)6个处理下的氮素回收利用率、氮肥贡献率和土壤氮素依存率及氮肥偏生产力这4个指标进行综合分析,发现与CK相比,不同覆盖方式处理均显著提高了玉米产量和氮素吸收效率,SJ处理在玉米产量、氮素回收利用率、氮肥贡献率和土壤氮素依存率以及氮肥偏生产力方面均表现最佳。6个处理下有77%~93%的硝态氮在200~500 cm土层累积,SJ处理在200 cm以下土层的硝态氮累积量占比低于其它覆盖处理,且总量低于CK。在年际变化方面,不同覆盖方式处理土壤剖面硝态氮峰值随种植时间延长明显下移,且均呈现向500 cm土层以下淋洗的趋势。此外,土壤剖面硝态氮的阶段性迁移变化(年际变化)结合降水年型分析可发现,经过多个丰水年份的累积,与种植第7年、第10年的硝态氮峰值位置相比,种植第15年不同覆盖方式处理硝态氮峰值向下移动的幅度较大。综合分析得出,施用化肥用量一致的条件下,与其它处理相比,宽幅地膜与行间秸秆覆盖相结合,显著提高了氮素回收利用效率和氮肥贡献率,同时有效减少了土壤氮素依存率,并降低了土壤硝态氮的淋失风险,从而促进了玉米产量的提升。

参 考 文 献

[1]同斯捷.覆盖对旱地春玉米水氮利用效率及土壤生物性状的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2022.
Tong S J. Effects of mulching on water and nitrogen use efficiency and soil biological properties of spring maize in dryland [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.

[2]吕慎强.覆盖、垄作及氮肥对黄土区春玉米可持续生产的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2023.
Lü S Q. Effects of mulching, ridge tillage practices and nitrogen on the sustainability of spring maize on the loess tableland [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.

[3]汪涛,朱波,况福虹,等.有机-无机肥配施对紫色土坡耕地氮素淋失的影响[J].环境科学学报,2010,30(4):781-788.
Wang T, Zhu B, Kuang F H, et al. Effects of a combination of organic and inorganic fertilization on nitrogen leaching from purple soil with sloping cropland [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(4):781-788.

[4]牛新胜,张翀,巨晓棠.华北潮土冬小麦-夏玉米轮作包气带氮素淋溶机制[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(1):53-65.
Niu X S, Zhang C, Ju X T. Mechanism of nitrogen leaching in fluvo-aquic soil and deep vadose zone in the North China Plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(1):53-65.

[5]高晓梅,刘晓辉,于淼,等.秸秆还田量对半干旱褐土区氮素淋溶及春玉米产量的影响[J].山东农业科学,2021,53(10):64-71.
Gao X M, Liu X H, Yu M, et al. Effects of straw returning amount on nitrogen leaching and yield of spring maize in cinnamon soil of semi-arid region [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021,53(10):64-71.

[6]蒋洪丽,雷琪,张彪,等.覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响[J].环境科学,2023,44(6):3426-3438.
Jiang H L, Lei Q, Zhang B, et al. Effects of mulching and application of organic and chemical fertilizer on greenhouse gas emission and water and nitrogen use in summer maize farmland [J]. Environmental Science, 2023, 44(6):3426-3438.

[7]胥子航,王睿,刘育旺,等.地膜和秸秆覆盖提高春玉米产量与氮肥利用效率[J].植物营养与肥料学报,2023,29(11):1991-

2003.
Xu Z H, Wang R, Liu Y W, et al. Plastic film and straw mulching improve yield and nitrogen use efficiency of spring maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(11):1991-2003.

[8]关维刚,周建斌,董放,等.旱地不同栽培模式下土壤水分和矿质氮含量的时空变化[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):51-57.
Guan W G, Zhou J B, Dong F, et al. Effects of different cultivation patterns of the dryland farming on the spatial-temporal variations of soil moisture and mineral nitrogen in soils [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(3):51-57.

[9]樊军,郝明德.旱地农田土壤剖面硝态氮累积的原因初探[J].农业环境科学学报,2003,22(3):263-266.
Fan J, Hao M D. Nitrate accumulation in soil profile of dryland farmland[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2003, 22(3):263-266.

[10]高亚军,李云,李生秀,等.旱地小麦不同栽培条件对土壤硝态氮残留的影响[J].生态学报,2005,25(11):2901-2910.
Gao Y J, Li Y, Li S X, et al. Effects of different wheat cultivation methods on residual nitrate nitrogen in soil in dryland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11):2901-2910.

[11]汪景宽,张继宏,须湘成,等.长期地膜覆盖对土壤氮素状况的影响[J].植物营养与肥料学报,1996, 2(2):125-130.
Wang J K, Zhang J H, Xu X C, et al. Effect of long-term covering with plastic film on characteristics of nitrogen in soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 1996, 2(2):125-130.

[12]党廷辉,郝明德,郭胜利,等.黄土高原南部春玉米地膜栽培的水肥效应与氮肥去向[J].应用生态学报,2003,14(11):1901-1905.
Dang T H, Hao M D, Guo S L, et al. Effect of plastic-film mulch on water and nitrogen use by spring maize and on fate of applied nitrogen in the southern Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11):1901-1905.

[13]张悦,岳善超,李婷,等.栽培模式、施氮量对旱作春玉米农田矿质氮和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):99-107.
Zhang Y, Yue S C, Li T, et al. Effects of cultivation patterns and nitrogen fertilization on mineral nitrogen and yield of dryland spring maize [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1):99-107.

[14]王永亮,胥子航,李申,等.秸秆还田与花后灌溉提高春玉米产量及水氮利用效率[J].中国农业科学,2023,56(18):3599-3614.
Wang Y L, Xu Z H, Li S, et al. Straw returning and post-silking irrigating improve the grain yield and utilization of water and nitrogen of spring maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(18):3599-3614.

[15]戴皖宁,王丽学,KhanIsmail,等.秸秆覆盖和生物炭对玉米田间地温和产量的影响[J].生态学杂志,2019,38(3):719-725.
Dai W N, Wang L X, KhanIsmail, et al. Effects of straw mulching and biochar addition on soil temperature and maize yield[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3):719-725.

[16]杨志超,李援农,谷晓博,等.垄沟覆盖种植对晚播夏玉米生长和产量的补偿效应[J].干旱地区农业研究,2022,40(4):60-68.
Yang Z C, Li Y N, Gu X B, et al. Compensation effects of ridge and furrow mulching on growth and yield of late-sown summer maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(4):60-68.

[17]李盼,樊志龙,胡发龙,等.西北灌区秸秆地膜带状覆盖对玉米产量性能的影响[J].玉米科学,2024,32(1):119-129.
Li P, Fan Z L, Hu F L, et al. Effect of strip mulching with straw and plastic film on yield capability for maize in northwest irrigation areas[J]. Journal of Maize Sciences, 2024, 32(1):119-129.

[18]徐清.秸秆覆盖还田对黑土区农田土壤氮磷时空分布特征的影响研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.
Xu Q. Effects of straw mulching on temporal and spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in farmland soil in black soil Area [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.

[19]谢永春,郭天文,刘国一.不同种植方式和施肥对旱地春玉米土壤硝态氮残留的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):110-115.
Xie Y C, Guo T W, Liu G Y. Effects of different patterns of planting and fertilization on the residual of spring maize soil nitrate nitrogen in dry-land [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(5):110-115.

[20]Wang M D, Liu Z J, Zhai B N, et al. Long-term straw mulch underpins crop yield and improves soil quality more efficiently than plastic mulch in different maize and wheat systems [J]. Field Crops Research, 2023, 300: 109003.

[21]陈桂平,郑德阳,郭瑶,等.绿洲灌区地膜秸秆交替覆盖玉米农田土壤水分利用特征[J].干旱地区农业研究,2021,39(4):54-63.
Chen G P, Zheng D Y, Guo Y, et al. Soil water use characteristics of maize field alternatively mulched with straw and plastic film in oasis irrigation area [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4):54-63.

[22]史康婕,周怀平,杨振兴,等.长期施肥下褐土易氧化有机碳及有机碳库的变化特征[J].中国生态农业学报,2017,25(4):542-552.
Shi K J, Zhou H P, Yang Z X, et al. Characteristics of readily oxidizable organic carbon and soil organic carbon pool under long-term fertilization in cinnamon soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4):542-552.

[23]胡雪纯,解文艳,马晓楠,等.长期秸秆还田对旱地玉米土壤有机碳及碳库管理指数的影响[J].中国农学通报,2022,38(34):8-13.
Hu X C, Xie W Y, Ma X N, et al. Effects of long-term straw returning on organic carbon and carbon pool management index in dryland maize soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(34):8-13.

[24]解文艳.旱作褐土覆盖耕作措施对土壤环境的影响及玉米生长的响应[D].太原:太原理工大学,2015.
Xie W Y. Effect of different mulching methods on soil environment of rainfed cinnamon soil and related maize responses[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.

[25]张秀芝,李强,高洪军,等.长期施肥对氮素利用以及土壤剖面氮素分布、积累的影响[J].玉米科学,2023,31(5):128-135.
Zhang X Z, Li Q, Gao H J, et al. Effects of long-term fertilizer on N use efficiency and distribution accumulation of NO_3^--N in soil profile [J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31 (5): 128-135.

[26]沈新磊,黄思光,王俊,等.半干旱农田生态系统地膜覆盖模式和施氮对小麦产量和氮效率的效应[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,(1):1-14.
Shen X L, Huang S G, Wang J, et al. Effects of plastic film mulching models and nitrogen fertilizer on wheat yield and nitrogen efficiency [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry,2003,31(1):1-14.

[27]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.

[28]Fan X W, Worrall F, Baldini L M, et al. A spatial total nitrogen budget for Great Britain [J]. Science of the Total Environment, 2020, 728:138864.

[29]杨忠浩.黄土旱塬不同施氮模式下春玉米产量-土壤水分-硝态氮关系研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
Yang Z H. Research on the relationship among yield, soil moisture and nitrate nitrogen of spring maize under different nitrogen application patterns in Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.

[30]张仙梅,黄高宝,李玲玲,等.覆膜方式对旱作玉米硝态氮时空动态及氮素利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(5):26-32.
Zhang X M, Huang G B, Li L L, et al. Effects of mulching patterns on spatio-temporal variation of soil nitrate and nitrogen utilization efficiency of maize on dry land [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(5):26-32.

[31]Hou P, Gao Q, Xie R Z, et al. Grain yields in relation to N requirement: optimizing nitrogen management for spring maize grown in China[J]. Field Crops Research, 2012, 129:1-6.

[32]郭星宇,刘朋召,王瑞,等.旱地冬小麦产量、氮肥利用率及土壤氮素平衡对降水年型与施氮量的响应[J].作物学报,2022,48(5):1262-1272.
Guo X Y, Liu P Z, Wang R, et al. Response of winter wheat yield, nitrogen use efficiency and soil nitrogen balance to rainfall types and nitrogen application rate in dryland[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(5):1262-1272.

[33]胡锦昇,樊军,付威,等.保护性耕作措施对旱地春玉米土壤水分和硝态氮淋溶累积的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1188-1198.
Hu J S, Fan J, Fu W, et al. Effects of conservation tillage measures on soil water and NO_3^--N leaching in dryland maize cropland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4):1188-1198.

[34]郑文波,王仕琴,刘丙霞,等.基于RZWQM模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律[J].环境科学,2019,40(4):1770-1778.
Zheng W B, Wang S Q, Liu B X, et al. Simulation of the migration and leaching of nitrate nitrogen in the farmland soil profile in a hilly area of Taihang Mountain with the RZWQM model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 40(4):1770-1778.

[35]汪景宽,刘顺国,李双异.长期地膜覆盖及不同施肥处理对棕壤无机氮和氮素矿化率的影响[J].水土保持学报,2006,20(6):107-110.
Wang J K, Liu S G, Li S Y. Effect of long-term plastic film mulching and fertilization on inorganic N distribution and organic N mineralization in brown earth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6):107-110.

[36]周顺利,张福锁,王兴仁.土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏Ⅱ.夏玉米[J].生态学报,2002,22(1):48-53.
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. The spatio-temporal variations of soil NO_3^--N and apparent budget of soil nitrogen Ⅱ. summer maize[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(1): 48-53.

[37]解文艳,周怀平,杨振兴,等.旱地春玉米地表覆盖对土壤硝态氮残留的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):158-164.
Xie W Y, Zhou H P, Yang Z X, et al. Effect of soil surface mulching on residual nitrate nitrogen in soil of spring maize field in dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4):158-164.

(编辑:郭玥微)