

水土保持耕作对黑土玉米氮素利用与温室气体排放影响

齐智娟^{1,2} 李 骛^{1,2} 张忠学^{1,2} 余佩哲^{1,2} 尹致皓^{1,2} 宋 芳^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探明不同水土保持耕作技术对东北黑土坡耕地玉米氮素利用和温室气体排放的影响,以大田试验为基础,设置7个耕作处理:等高耕作 (Transverse slope planting, TP)、垄向区田 (Ridge to the district field, RF)、深松耕 (Subsoiling tillage, SF)、等高耕作 + 深松耕 (Transverse slope planting + subsoiling tillage, TP-S)、垄向区田 + 深松耕 (Ridge to the district field + subsoiling tillage, RF-S)、等高耕作 + 垄向区田 (Transverse slope planting + ridge to the district field, TP-R)、常规耕作 (Down-slope cultivation, CK),探究水土保持耕作技术对东北黑土坡耕地土壤养分状况、温室气体排放、氮素吸收利用和产量的影响。结果表明:在玉米全生育期内,水土保持耕作处理显著提高了玉米产量、器官氮素转运率以及氮肥利用率,部分水土保持耕作措施也可以显著降低 N₂O 与 CO₂ 排放。其中,玉米成熟期时,实施水土保持耕作措施的植株产量较 CK 处理增加 3.39% ~ 26.43%, TP-S 处理提升效果最高。对于氮肥利用率,水土保持耕作技术较 CK 处理提高 25.23% (RF 处理) ~ 76.98% (TP-S 处理),提升效果显著。对于 CO₂ 排放,除 SF 处理外,其余水土保持耕作处理均显著低于 CK 处理。但对于 N₂O 排放,TP 处理、TP-S 处理和 TP-R 处理显著低于 CK,而 SF 处理、RF 处理以及 RF-S 处理较 CK 处理则明显增加。故综合来看,建议当地玉米种植采取等高耕作 + 深松耕的水土保持耕作技术。

关键词: 水土保持耕作; 玉米; 氮素利用率; N₂O; 作物产量

中图分类号: S157.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)09-0365-09

OSID:



Effects of Soil and Water Conservation Tillage on Nitrogen Utilization and Greenhouse Gas Emissions of Maize in Black Soil

QI Zhijuan^{1,2} LI Ao^{1,2} ZHANG Zhongxue^{1,2} YU Peizhe^{1,2} YIN Zhihao^{1,2} SONG Fang^{1,2}

(1. School of Water and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to explore the effects of different soil and water conservation tillage techniques on nitrogen utilization and greenhouse gas emissions in sloping farmland of black soil in Northeast China, a field experiment was conducted. Seven tillage treatments were set up: transverse slope planting (TP), ridge to the district field (RF), subsoiling tillage (SF), transverse slope planting + subsoiling tillage (TP-S), ridge to the district field + subsoiling tillage (RF-S), transverse slope planting + ridge to the district field (TP-R), and down-slope cultivation (CK). Explore the effects of soil and water conservation tillage techniques on soil nutrient status, greenhouse gas emission, nitrogen absorption and utilization, and yield of black soil slope farmland in Northeast China. The results showed that during the whole growth period of maize, soil and water conservation tillage treatment significantly increased maize yield, organ nitrogen transport rate and nitrogen use efficiency, and some soil and water conservation tillage measures could also significantly reduce N₂O and CO₂ emissions. Among them, at the maturity stage of maize, the plant yield of soil and water conservation tillage measures were increased by 3.39% ~ 26.43% compared with that of CK treatment, and TP-S treatment had the highest improvement effect.

收稿日期: 2023-05-12 修回日期: 2023-06-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1500802)和东农学者计划学术骨干项目(21XG18)

作者简介: 齐智娟(1987—),女,副教授,博士生导师,主要从事土壤水热运移和节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhijuan.qi@neau.edu.cn

通信作者: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangzhongxue@163.com

For nitrogen use efficiency, soil and water conservation tillage technology were increased by 25.23% (RF treatment) ~ 76.98% (TP-S treatment) compared with CK treatment, and the improvement effect was significant. For CO₂ emissions, except for SF treatment, the remaining soil and water conservation tillage treatments were significantly lower than that of CK treatment. However, for N₂O emissions, TP treatment, TP-S treatment and TP-R treatment were significantly lower than that of CK, while SF treatment, RF treatment and RF-S treatment were significantly higher than that of CK treatment. Therefore, it was suggested that the local maize planting should adopt the soil and water conservation tillage technology of transverse slope planting + subsoiling tillage.

Key words: soil and water conservation tillage; maize; nitrogen use efficiency; N₂O; crop yield

0 引言

N₂O 是三大温室气体之一,其单位分子增温潜能是 CO₂ 的 300 倍,给全球气候和环境带来严重的威胁^[1-5]。约 75% 的人为 N₂O 排放源于农业土壤,其中旱地土壤是农业源 N₂O 排放的主要来源之一^[6]。当前,人类活动导致的全球 N₂O 排放量的增长速度超过了最高预期排放情景,凸显了减少 N₂O 排放的紧迫性,氮肥高效利用是最有潜力的减排措施^[7]。

东北黑土区是我国最重要的商品粮基地,是中国粮食安全的可靠保证,对保障国家粮食安全和生态安全具有重要意义^[8-9]。近年来,由于长期高强度开发利用、气候变化、耕作方式不合理(搅动土壤、植被破坏、秸秆根茬未还田)以及自然因素(地势波状起伏、水沟侵蚀)等原因,我国黑土地遭受的破坏日益严重,水土流失,地力下降,对粮食产量造成威胁^[10]。因此,水土保持耕作显得尤为重要。与传统耕作方式相比,水土保持耕作处理可以减少土壤扰动,在优化土壤团聚结构、改善土壤蓄水保水能力、促进土壤有机质形成及其稳定化过程等方面具有积极的调控作用^[11-14]。

现有的水土保持耕作技术主要有等高耕作、垄向区田以及深松耕作等。已有研究表明,实施水土保持耕作措施可以更好地调控土壤的养分供应状况,实现土壤氮素供应与作物需氮的时空吻合,有助于实现夏玉米高产高效生态安全生产^[15]。而且不同水土保持措施均可在不同程度上降低坡耕地水土及磷养分的流失^[16]。目前对于水土保持耕作条件下有关作物的研究主要集中在耕作方式对作物产量、生长发育、蓄水肥田以及土壤结构等方面的影响^[17]。对于不同耕作方式对氮素吸收利用以及温室气体排放影响方面的研究并不深入。氮素作为影响作物产量的首要因子,在作物生长过程中起着至关重要的作用,要进一步研究施加同样数量氮肥条件下,可以为作物生长提供较好的生长环境,提高氮肥利用率,稳产或增产,并有效减少温室气体排放的

黑土坡耕地水土保持耕作技术。

本文针对当前东北黑土区玉米田存在的土地退化、氮肥利用率低、温室气体排放增加等问题,以传统耕作方式为对照,研究不同耕作模式对玉米田温室气体排放与氮肥吸收利用的影响,为黑土坡耕地保护、肥料高效利用、农田氧化亚氮气体减排提供应用基础理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

依托中国科学院海伦水土保持监测研究站开展试验,试验站位于黑龙江省松嫩平原北部海伦市西南部的前进乡光荣村(47°37'N,126°84'E)。该试验区位于东北典型黑土区北部,为商品粮核心产区,漫川漫岗水土流失区,平均海拔 210 m,坡度为 0.5°~7°,坡长为 200~1 000 m,土壤侵蚀模数大于 1 000 t/(km²·a),沟壑密度 2.27 km/km²,垦殖率 80%,坡耕地占比 90% 以上,黑土层厚度约为 30 cm。主要作物为大豆和玉米。试验区多年平均气温 -4~5℃,无霜期 135 d,年降水量 400~650 mm,7—9 月降雨量占年降水量的 70%。土壤速效氮(N)质量比 154.4 mg/kg,速效磷(P₂O₅)质量比 40.1 mg/kg,速效钾(K₂O)质量比 376.8 mg/kg,pH 值为 7.27。

1.2 试验设计

在海伦光荣小流域开展小区试验和大田试验,为了解决黑土变薄变瘦的问题,试验基于等高耕作、深松耕、垄向区田以及其组合模式,开展不同水土保持耕作方式下的东北黑土坡耕地玉米农田耕作试验,选择等高耕作(TP)、垄向区田(RF)、深松耕(SF)、等高耕作+深松耕(TP-S)、垄向区田+深松耕(RF-S)和等高耕作+垄向区田(TP-R)6 种模式,常规耕作(CK)为对照。试验处理设计如表 1 所示。

结合当地玉米种植经验,施肥水平、生产管理与当地保持一致,累积施用氮肥 250 kg/hm²,分 2 次施入。采用全面试验设计方法,共计 7 个处理,每个处

表 1 田间小区试验处理设置

Tab.1 Field plot test treatment settings

处理名称	处理方式
常规耕作(CK)	旋耕 + 顺坡起垄。旋耕深度 12 ~ 16 cm
深松耕(SF)	深松 + 旋耕 + 顺坡起垄。深松深度 35 ~ 45 cm, 旋耕深度 12 ~ 16 cm
垄向区田(RF)	旋耕 + 顺坡起垄 + 筑挡。旋耕深度 12 ~ 16 cm, 于 6 月末玉米追肥后进行筑挡, 挡距约 75 cm
垄向区田 + 深松耕(RF-S)	深松 + 旋耕 + 顺坡起垄 + 筑挡。深松深度 35 ~ 45 cm, 旋耕深度 12 ~ 16 cm, 于 6 月末玉米追肥后进行筑挡, 挡距约 75 cm
等高耕作(TP)	旋耕 + 等高线起垄。旋耕深度 12 ~ 16 cm
等高耕作 + 垄向区田(TP-R)	旋耕 + 等高线起垄 + 筑挡。旋耕深度 12 ~ 16 cm, 于 6 月末玉米追肥后进行筑挡, 挡距约 75 cm
等高耕作 + 深松耕(TP-S)	深松 + 旋耕 + 等高线起垄。深松深度 35 ~ 45 cm, 旋耕深度 12 ~ 16 cm

理 3 次重复, 共计 21 个试验小区, 随机排列, 每个小区面积为 100 m² (20 m × 5 m)。供试玉米品种为“迪卡 1563”, 种植密度为 56 700 株/hm², 试验区无灌溉, 玉米生育期内日气温与降雨量变化如图 1 所示。

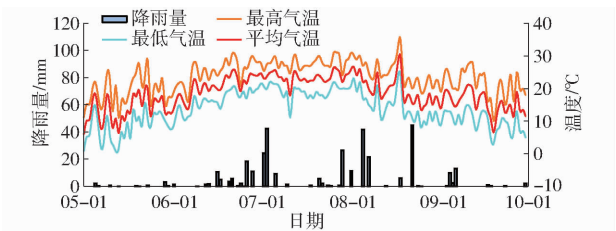


图 1 生育期内试验地日气温和降雨量
Fig.1 Daily temperature and rainfall in growth period of test site

1.3 测定指标与方法

(1) 地上部生物量

将植株沿地上部分取下, 用农用压缩喷雾器将植株冲洗干净, 并将植株按不同器官放入干燥箱中, 105℃杀青 30 min 后, 60℃干燥至干质量恒定。将干燥后的样品放置在干燥箱中冷却, 称量干物质量。

(2) 植株各器官氮素指标测定

将称量后的成熟期样品按不同器官用球磨机磨碎, 过 80 目筛后混匀, 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 取消煮后的清液, 采用德国 SEALAnalytical 公司生产的 AutoAnalyzer-Ⅲ 型流动分析仪, 测定成熟期植株各器官氮质量分数。

(3) 土壤有机质和氮素相关指标

各生育期取 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm 土层样品, 风干后浸提, 使用 AA3 型连续

流动分析仪 (Seal Analytical GmbH, 德国, 灵敏度 0.001 AUFS) 测定土壤全氮含量。在气体采集日采集各处理表层土壤 (0 ~ 10 cm), 鲜土过筛后用 KCl 溶液浸提, 采用 AA3 型连续流动分析仪测定浸提液中 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 质量浓度 (mg/L), 并计算土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量 (质量比, mg/kg)。

(4) 气体排放量

采用静态箱-气相色谱法采集各时期 N₂O 与 CO₂ 气体。箱体由有机玻璃制成, 四周采用透明隔热防晒漆进行隔热处理, 箱内装有 1 个风扇以混匀气体, 侧面中上部设置气密性气体取样孔, 气样抽取后转入采气袋 (50 mL)。气体测定后计算气体排放通量, 计算式为^[18]

$$F = \rho \frac{P}{760} \frac{V}{A} \frac{\Delta C}{\Delta T} \frac{273}{273 + T}$$

式中 F ——N₂O、CO₂ 排放通量, 单位分别为 μg/(m²·h)、mg/(m²·h)
 ρ ——在标准状态条件下气体密度, g/cm³
 P ——气体采集时标准大气压, Pa
 V ——箱体体积, m³
 A ——箱体底面积, m²
 $\Delta C/\Delta T$ ——箱体内气体浓度随时间变化的回归曲线斜率, μL/(m³·h)
 T ——采样时箱体内气体温度, °C

玉米全生育期内土壤 N₂O 与 CO₂ 累积排放量计算公式为

$$M = \sum \frac{24(f_{i+1} + f_i)(t_{i+1} - t_i)}{2 \times 100}$$

式中 M ——土壤 N₂O、CO₂ 排放总量, kg/hm²
 f_i ——第 i 次采样时 N₂O、CO₂ 排放量, mg/(m²·h)
 f_{i+1} ——第 $i+1$ 次采样时 N₂O、CO₂ 排放量, mg/(m²·h)
 t_i ——第 i 次采样时间, d
 t_{i+1} ——第 $i+1$ 次采样时间, d

试验期间使用 3 次气体监测结果的平均值作为期间未采样日的排放通量 (线性内插法), 将每日的排放量累加求得阶段性累积排放量。

(5) 产量及其构成

在收获期取每小区中间 2 行进行测产, 记录穗数, 收获后随机选择 20 个果穗记录每穗的穗行数、穗粒数, 风干玉米穗部至质量恒定, 进行脱粒、称量, 并折算成籽粒含水率为 14% 的玉米籽粒产量。

(6) 相关指标计算公式

植株器官氮素累积量 (Ni) 为植株器官干物质

量与植株含氮量乘积,营养器官氮素转运量 (NTA) 为抽雄期营养器官氮素积累量与成熟期营养器官氮素积累量差值,氮素转运效率 (NTE) 为营养器官氮素转运量占抽雄期营养器官氮素积累量百分比,氮素转运对籽粒贡献率 (NTCP) 为营养器官氮素转运量占成熟期籽粒氮素积累量百分比,氮肥生产效率 (NPE) 为单位面积玉米产量与施氮量比值,氮素吸收效率 (NUE) 为植株氮素积累量与施氮量比值,氮素收获指数 (NHI) 为籽粒氮素积累量与施氮量比值^[19-23]。

1.4 数据分析

试验数据使用 Microsoft Excel(2016) 进行整理,采用 SPSS 22.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, 美国) 进行统计分析,运用最小显著差异法 (LSD) 对各处理数据进行多重比较 ($P < 0.05$)。使用 Microsoft Excel(2016) 和 Origin Pro 9.1 作图。

2 结果与分析

2.1 不同水土保持耕作技术对 N₂O 与 CO₂ 排放的影响

玉米生育期农田 N₂O 排放通量如图 2a 所示,各处理均表现为正值,表明旱地土壤是 N₂O 的排放源。在玉米整个生育期内,N₂O 排放通量在不同处理间的趋势基本一致,呈“山”字型,有明显的季节变化规律。生长初期和末期的排放通量较低,中期排放通量高,且在 6 月出现最高峰,之后逐渐保持平稳。从整个生育期来看,TP 处理的 N₂O 排放通量显著低于其他处理,SF 处理的 N₂O 排放通量最高,CK 处理位于中间值。各处理 N₂O 排放通量由小到大依次为 SF 处理、RF 处理、RF-S 处理、CK 处理、TP-S 处理、TP-R 处理、TP 处理。CO₂ 排放通量如图 2c 所示,从图中可以看出在玉米生育期内土壤 CO₂ 的排放规律与 N₂O 有着明显的不同,CO₂ 的排放峰值有 2 个,分别集中在 7 月初的拔节期与 8 月初的抽雄期,其他时期则较为平缓。从图 2c 可以看出,SF 处理的 CO₂ 排放通量最高,TP 处理的排放通量最低。以最高峰来看,SF 处理比 CK 处理 CO₂ 排放高 36.42%,TP 处理则显著降低,较 CK 处理减少 128.63%。不同水土保持耕作技术下,土壤的 N₂O 与 CO₂ 的累积排放量都在生育期内逐渐增高。苗期各处理土壤 CO₂ 累积排放量增加比较缓慢,拔节期至抽雄期增速加快,抽雄期至灌浆期累积排放量逐渐减缓,灌浆期至成熟期最低。

2.2 不同水土保持耕作技术对土壤中氮的影响

2.2.1 土壤全氮

图 3 为不同水土保持耕作模式下玉米土壤的全

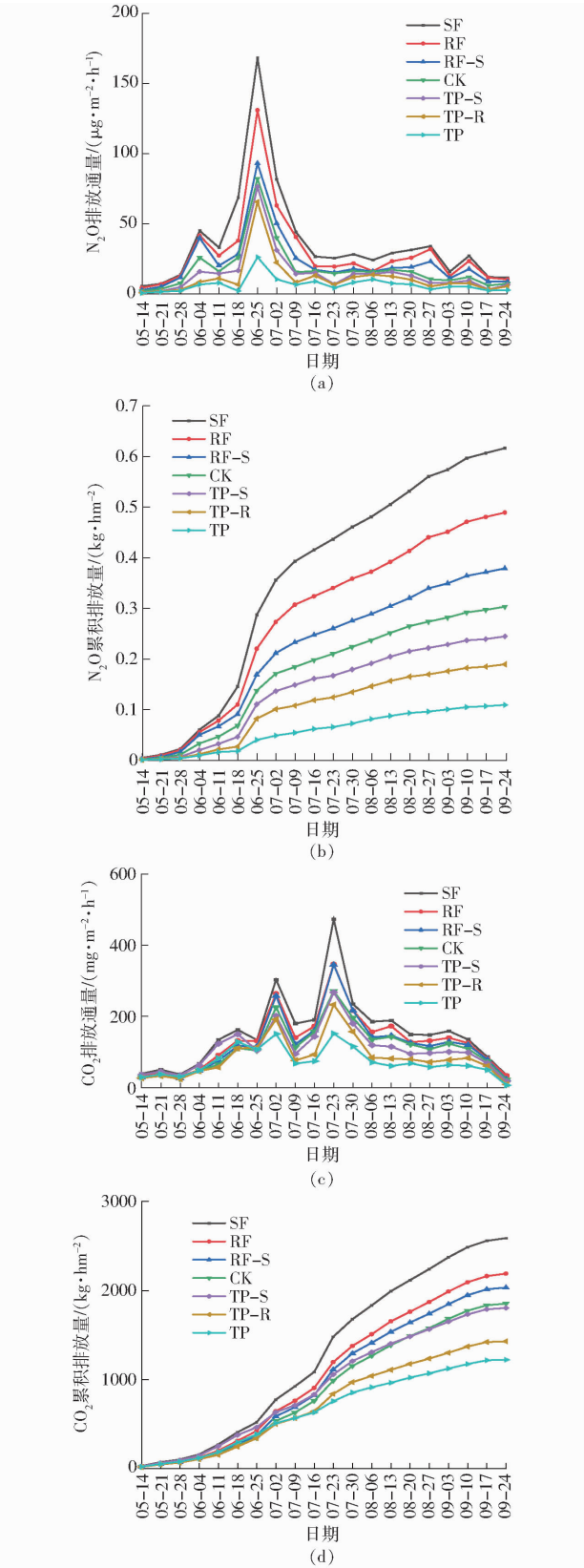


图 2 生育期内不同水土保持耕作技术下的土壤温室气体排放通量与累积排放量
Fig. 2 Soil greenhouse gas emission flux and cumulative emission under different soil and water conservation tillage techniques during growth period

氮 (TN) 含量 (质量比)。在玉米的不同生长阶段,同一生育期内表层土壤的全氮含量在不同处理之间

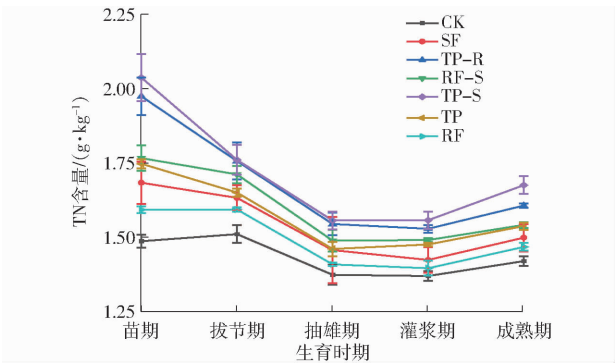


图3 生育期内不同水土保持耕作技术下的土壤全氮含量

Fig.3 Total nitrogen content of soil under different soil and water conservation tillage techniques during growth period

存在差异。从图3中可以看出,苗期的土壤全氮含量较高,在之后的生育过程中,由于玉米植株生长,吸收养分而导致土壤的全氮含量逐渐减少。从整个生育期来看,各处理土壤的全氮含量均比常规耕作高,并且随着玉米的发育生长,土壤的全氮含量均呈下降趋势。在玉米成熟期时,CK处理相比较TP-S、TP-R、TP、RF-S、RF和SF处理土壤全氮含量分别低18.03%、13.17%、8.31%、8.59%、3.38%和5.56%。

2.2.2 土壤硝态氮与铵态氮

从图4a可以看出,土壤硝态氮含量在苗期至拔节期以及抽雄期至灌浆期呈降低趋势,在拔节期至抽雄期以及灌浆期至成熟期有所增加,但变化幅度各不相同。整体来看,实施了水土保持耕作技术的地块,土壤硝态氮含量均比CK处理高。苗期时,水土保持耕作处理较常规处理土壤硝态氮含量高18.48%~52.08%;拔节期高0.12%~26.32%;抽雄期高21.12%~54.29%;灌浆期高40.72%~86.57%;成熟期高37.82%~140.06%。

土壤铵态氮含量的变化趋势与硝态氮含量相似,但同一个处理在相同时期土壤铵态氮含量明显低于硝态氮含量。从图4b可以看出,整个生育期内,实施水土保持耕作处理的土壤铵态氮含量明显高于常规处理。在玉米成熟期时,各水土保持耕作处理较常规耕作处理高47.13%~118.33%。

2.3 不同水土保持耕作技术对植株氮素的影响

2.3.1 植株氮素累积

成熟期单植株氮素累积量如图5(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$))所示,从图中可以看出,各处理植株器官氮素分配由大到小依次为籽粒、叶、茎、苞叶、穗轴,这表明玉米吸收的大部分氮被输送到籽粒中。各水土保持耕作处理的植株总氮累积量均高于常规处理,其中含量最高的为TP-S处理,相比较其他处理高16.24%~77.06%。

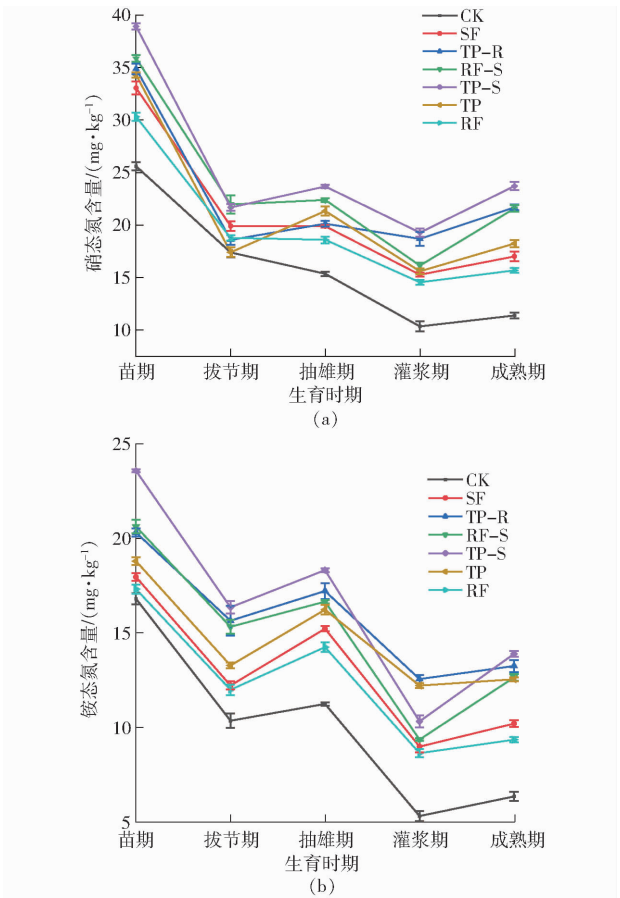


图4 生育期内不同水土保持耕作技术下的土壤硝态氮、铵态氮含量

Fig.4 Nitrate nitrogen content and ammonium nitrogen content of soil under different soil and water conservation tillage techniques during growth period

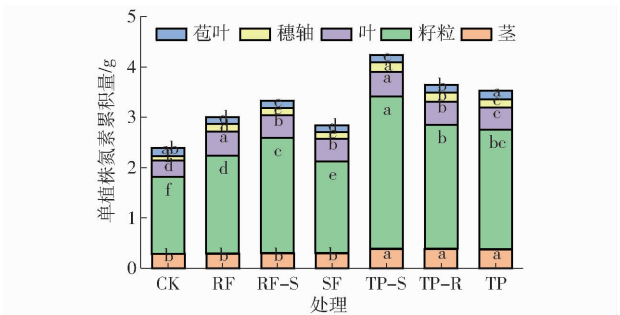


图5 成熟期不同水土保持耕作技术下单植株器官氮素累积量

Fig.5 Nitrogen accumulation in single plant organs under different soil and water conservation tillage techniques at maturity stage

各处理籽粒和穗轴的氮累积量差异显著,最高的处理为TP-S,分别较CK处理显著提高98.75%和120.22%;TP-S处理、TP-R处理和TP处理茎的氮累积量没有显著差异,但相比较其他处理差异显著;叶的氮累积量TP-S处理最高,比TP-R、TP、RF-S、RF、SF、CK处理分别高5.96%、9.84%、5.96%、1.05%、6.43%、46.79%。

2.3.2 植株氮素转运及效率

氮素转运率可以反映植株各营养器官的转运能力,从表2可以看出,耕作方式的不同,对NTE以及NTCP的影响较为显著。其中总的氮素转运效率为30.4%~54.8%,最高处理为TP-S,最低处理为CK;氮素转运对籽粒贡献率为17.6%~38.7%,最高处理为TP-R,最低处理为CK。TP-S、TP-R、TP、RF-S、RF、SF处理的氮素转运对籽粒贡献率分别比CK处理高97.73%、119.89%、64.20%、99.43%、75.00%、97.73%;总的氮素转运效率分别比CK处理高80.26%、50.33%、44.08%、74.67%、50.00%、69.74%。

表2 不同水土保持耕作技术下玉米氮素转运效率及氮素转运对籽粒贡献率

Tab.2 Nitrogen transport efficiency and contribution rate of nitrogen transport to grain of maize under different soil and water conservation tillage techniques				
处理	NTE			NTCP
	茎	叶	总	
CK	35.2 ^e	25.6 ^d	30.4 ^f	17.6 ^c
RF	45.6 ^c	42.6 ^c	45.6 ^c	30.8 ^b
RF-S	53.9 ^a	49.9 ^b	53.1 ^a	35.1 ^{ab}
SF	39.1 ^d	49.2 ^b	51.6 ^d	34.8 ^{ab}
TP-S	54.0 ^a	55.4 ^a	54.8 ^a	34.8 ^{ab}
TP-R	51.9 ^b	54.2 ^a	45.7 ^b	38.7 ^a
TP	40.2 ^d	49.7 ^b	43.8 ^c	28.9 ^b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

2.4 产量及其构成

不同水土保持耕作技术下玉米产量及其构成如表3所示。从表3可以看出,RF处理的穗行数和穗粒数均最小,分别较其他处理降低3.89%~15.00%与3.25%~13.42%。穗粒数由小到大依次为RF处理、TP-R处理、SF处理、TP处理、CK处

表3 不同水土保持耕作技术下玉米产量构成及收获指数

Tab.3 Yield components and harvest index of maize under different soil and water conservation tillage techniques

处理	穗行数	穗粒数	产量/ (kg·hm ⁻²)	干物质量/ (kg·hm ⁻²)	收获 指数
CK	20.0 ^{ab}	889.0 ^{ab}	11 318.5 ^c	24 902.1 ^b	0.455 ^f
SF	18.7 ^{ab}	882.7 ^{ab}	11 702.3 ^c	25 310.3 ^b	0.462 ^e
RF	18.0 ^b	819.4 ^b	12 535.8 ^{bc}	26 512.4 ^{ab}	0.473 ^d
RF-S	20.7 ^a	929.4 ^a	13 190.1 ^{ab}	26 185.8 ^{ab}	0.504 ^b
TP	20.0 ^{ab}	886.7 ^{ab}	13 713.5 ^{ab}	27 733.1 ^a	0.495 ^c
TP-S	19.4 ^{ab}	900.7 ^{ab}	14 309.9 ^a	27 737.6 ^a	0.516 ^a
TP-R	18.0 ^b	846.0 ^{ab}	14 034.9 ^a	27 806.8 ^a	0.505 ^b

理、TP-S处理、RF-S处理。不同处理的玉米产量由小到大依次为CK处理、SF处理、RF处理、RF-S处理、TP处理、TP-R处理、TP-S处理,CK处理较其他水土保持耕作处理产量分别降低3.39%、10.75%、16.54%、21.16%、24%和26.43%。不同处理间收获指数差异显著,其中TP-S处理收获指数最大,较其他处理提高2.18%~13.41%。

2.5 氮素利用效率

氮肥生产效率、氮素吸收效率和氮素收获指数均是反映氮素利用的重要指标,不同的水土保持耕作措施对玉米的氮素利用效率产生了显著的影响,从表4可以看出,TP-S处理氮肥生产效率最高,各水土保持耕作处理较常规处理氮肥生产效率显著提高3%~26%。对于氮素吸收效率,各水土保持耕作处理均优于常规处理,TP-S、TP-R、TP、RF-S、RF、SF处理较CK处理分别提高76.98%、52.30%、47.33%、39.04%、25.23%、28.55%。对于氮素收获指数,从高到低依次为TP-S处理、TP-R处理、TP处理、RF-S处理、RF处理、SF处理、CK处理,TP-S处理分别比其他处理提高22.90%、27.46%、32.37%、55.78%、66.75%、99.13%,提升效果显著。

表4 不同水土保持耕作技术下玉米氮素利用效率

Tab.4 Nitrogen utilization efficiency of maize under different soil and water conservation tillage techniques

处理	NPE	NUE	NHI
CK	45.274 ^d	0.543 ^e	0.345 ^d
RF	50.143 ^{bc}	0.680 ^d	0.441 ^c
RF-S	52.760 ^{ab}	0.755 ^c	0.519 ^b
SF	46.809 ^{cd}	0.698 ^d	0.412 ^c
TP-S	57.240 ^a	0.961 ^a	0.687 ^a
TP-R	56.140 ^a	0.827 ^b	0.559 ^b
TP	54.854 ^a	0.800 ^b	0.539 ^b

3 讨论

在我国,坡耕地是人类从事农业生产的主要场所之一,水土流失严重会导致耕作层土壤养分流失,降低土地生产力和土壤潜在肥力,从而影响作物对于养分的吸收利用,对作物产量以及农业生产和经济发展极为不利^[24]。水土保持耕作技术可以提升土壤抗侵蚀能力,并使土壤保留更多的养分,在对水土侵蚀予以有效控制的同时,使土壤的肥力得到显著增强^[25]。已有研究表明干旱地区耕作方式的转变也会对土壤养分的流失及作物对养分的吸收利用产生较大影响^[26-28]。因此探明水土保持耕作技术

对东北黑土坡耕地氮素利用以及产量的影响显得尤为重要。

本研究中,玉米成熟期时,实施水土保持耕作处理的植株产量较 CK 处理增加 3.39% ~ 26.43%,与 CK 处理相比,TP 处理、TP-R 处理以及 TP-S 处理由于是沿着等高线起垄,能有效拦截雨水,减少地面径流,增加水分的入渗,从而使玉米根系可以吸收更多的水分进而为玉米各器官输送。TP-S 处理在等高耕作的基础上由于加上了深松,进一步打破犁底层,改变了土壤的结构,RF 处理由于筑挡的存在,可以减少土壤的流失,均为作物根系提供了一个良好的生长环境,所以玉米产量明显提高。玉米产量取决于籽粒的干物质量,有研究表明,干物质积累量取决于其积累速率和积累持续期^[29-30]。本试验中,RF 与 SF 处理的玉米产量较其他水土保持耕作处理有所减少,说明其籽粒干物质量相对于其他水土保持耕作处理有所减少,这可能是由于 RF、SF 处理的干物质积累持续期不长的原因。

氮是作物产量形成的重要限制因子,无论是土壤中的氮含量还是植株对氮素的利用情况,均是衡量这个处理优劣的重要因素。在本试验中,各处理所施的肥量保持一致,但土壤的全氮含量有所差别,常规处理较水土保持耕作处理土壤全氮含量明显降低^[31]。其中土壤全氮含量最高的处理为 TP-S,与 CK 处理相比,TP-S 处理由于土壤流失的减少从而减轻了土壤的扰动,导致全氮的矿化量减少,最终使得土壤的全氮含量增加,这也与郭亚飞等^[32]的研究结果类似。国际上农田水平的氮肥利用率(NUE)是指单位施氮量所增加的籽粒产量^[33]。我国氮效率包含两方面含义,一是指植物在同等的供氮水平下吸氮量大,二是指对已吸收的氮素利用效率高^[34]。在本研究中,水土保持耕作处理可以显著提高氮转运效率,其中 RF-S 处理的器官氮素转运效率以及氮素转运对籽粒贡献率都处于较高水平。这可能是由于在抽雄期,RF-S 处理积累了大部分氮素,进而可以在灌浆成熟期时向籽粒输送,从而提高器官氮素转运效率与籽粒贡献率。也有研究表明,根质量、根长、根表面积、根密度是造成产量、氮素营养效率差异的主要原因之一,RF-S 处理由于进行了深松,耕层土壤更为松散,所以根系可以更好地生长,从而提高了氮素转运效率^[35]。对于氮肥利用率,TP-S 处理由于改变了垄向,增加了田埂深度,使根系纵向伸长,从而使总根长、平均根长增加。由于根长

的增加,植株除了可以吸收表层的肥料养分,也可以吸收溶解到深层的肥料养分,所以提高植株对肥料的利用率,这与王艳^[36]的研究结果相似。

翟胜等^[37]研究发现土壤中碳氮基质、温度、湿度、pH 值等因素均影响 N₂O 排放。耕作方式的改变会影响土壤温度、水分等理化性质和微生物的活性,进而影响 N₂O 排放^[38]。耕作措施对 N₂O 排放的影响研究结果之间存在较大差异,尚无统一的结论^[39]。在本试验中,SF 处理下的 N₂O 排放通量最高,TP 处理最低。与常规耕作相比,SF 处理 N₂O 排放高的原因可能是由于其土壤容重增加,使土壤非常容易形成厌氧环境或者是微域厌氧环境,使土壤反硝化作用能力提高,所以产生更多的 N₂O。TP 处理比常规耕作氧化亚氮排放低的原因可能是由于 TP 处理土壤贯穿阻力增强、气体扩散速率降低,进而使得硝化、反硝化过程产生的 N₂O 在扩散逸出土面之前,就被进一步还原为 N₂从而降低了 N₂O 排放,还有可能是因为 TP 处理充气孔隙度与总孔隙度比值较小,致使土壤的通气性差,进而限制土壤 N₂O 向大气排放,所以 TP 处理土壤的 N₂O 排放量较低。

4 结束语

以东北地区黑土坡耕地为研究对象,从降低农业温室气体排放、提高氮素利用效率的角度出发,开展了为期一年的不同水土保持耕作方式下的东北黑土坡耕地玉米农田耕作试验,揭示了不同水土保持耕作方式下土壤温室气体排放通量与变化特征以及对于氮素的利用效率。结果表明,水土保持耕作措施可以显著提高玉米对于氮素的利用效率,提升产量,部分水土保持耕作措施可以明显降低 N₂O 与 CO₂ 的排放通量。在玉米整个生育期内,进行水土保持耕作处理的玉米产量、土壤氮素含量、氮素转运效率以及对氮肥的利用效率均明显优于常规耕作。对于 CO₂ 排放,除 SF 处理外,其余水土保持耕作处理较常规耕作均有降低。对于 N₂O 排放,TP 处理、TP-S 处理和 TP-R 处理较常规耕作减少显著,但 SF 处理、RF-S 处理以及 RF 处理较常规耕作增加明显,对此有待进一步研究。6 种水土保持耕作方式中以等高耕作 + 深松耕的方式在改善玉米关键期土壤氮素含量、促进玉米生殖生长、提高玉米氮素利用效率以及减少温室气体排放方面效果最为显著,本试验可为东北黑土坡耕地玉米种植过程中水土保持耕作方式的选取提供参考。

参 考 文 献

[1] LEHNERT N,MUSSELMAN B W,SEEFELDT L C. Grand challenges in the nitrogen cycle[J]. Chemical Society Reviews, 2021,50(6):3640–3646.

[2] THOMPSON R L, LASSALETTA L, PATRA P K, et al. Acceleration of global N₂O emissions seen from two decades of atmospheric inversion[J]. Nature Climate Change, 2019,9:993–998.

[3] IPCC. Climate change 2014:synthesis report. Contribution of Working Groups I , II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva,Switzerland:IPCC,2014.

[4] RAVISHANKARA A R,DANIEL J S,PORTMANN R W,et al. Nitrous oxide(N₂O):the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. Science,2009,326:123–125.

[5] RODHE H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. Science,1990,248:1217–1219.

[6] 李玥,巨晓棠. 农田氧化亚氮减排的关键是合理施氮[J]. 农业环境科学学报,2020,39(4):842–851.
LI Yue,JU Xiaotang. Rational nitrogen application is the key to mitigate agricultural nitrous oxide emission[J]. Journal of Agro-Environment Science,2020,39(4):842–851. (in Chinese)

[7] TIAN Hanqin,XU Rongting,JOSEP G C,et al. A comprehensive quantification of global nitrous oxide source and sinks[J]. Nature,2020,586:248–256.

[8] 李荣. 黑土地保护与耕地质量提升[J]. 腐植酸,2023(1):13–22.
LI Rong. Black soil conservation and cultivated land quality improvement[J]. Humic Acid,2023(1):13–22. (in Chinese)

[9] 郭孟洁,李建业,李健宇,等. 实施 16 年保护性耕作下黑土土壤结构功能变化特征[J]. 农业工程学报,2021,37(22):108–118.
GUO Mengjie,LI Jianye,LI Jianyu,et al. Changes of soil structure and function after 16-year conservation tillage in black soil[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(22):108–118. (in Chinese)

[10] 徐峰,张树阁. 保护黑土地应从保护性耕作开始[J]. 农机科技推广,2021(9):33–34,37.
XU Feng,ZHANG Shuge. Protecting black soil should start with conservation tillage[J]. Agriculture Machinery Technology Extension,2021(9):33–34,37. (in Chinese)

[11] YANG Y L,XIE H T,MAO Z,et al. Fungi determine increased soil organic carbon more than bacteria through their necromass inputs in conservation tillage croplands[J]. Soil Biology and Biochemistry,2022,167:108587.

[12] DAS A,LAYEK J,IDAPUGANTI R G,et al. Conservation tillage and residue management improves soil properties under a upland rice-rapeseed system in the subtropical eastern Himalayas[J]. Land Degradation and Development,2020,31:1775–1791.

[13] 朱雪峰,张春雨,郝艳杰,等. 玉米秸秆覆盖还田量对免耕土壤有机碳中红外光谱特征的影响[J]. 应用生态学报,2021,32(8):2685–2692.
ZHU Xuefeng,ZHANG Chunyu,HAO Yanjie,et al. Effects of corn stover mulch quantity on mid-infrared spectroscopy of soil organic carbon in a no-tillage agricultural ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(8):2685–2692. (in Chinese)

[14] BLANCO-CANQUI H,RUIS S J. No-tillage and soil physical environment[J]. Geoderma,2018,326:164–200.

[15] 周宝元,孙雪芳,丁在松,等. 土壤耕作和施肥方式对夏玉米干物质积累与产量的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(11):2129–2140.
ZHOU Baoyuan,SUN Xuefang,DING Zaisong,et al. Effect of tillage practice and fertilization on dry matter accumulation and grain yield of summer maize(*Zea Mays* L.)[J]. Scientia Agricultura Sinica,2017,50(11):2129–2140. (in Chinese)

[16] 辛艳,王瑄,邱野,等. 辽宁省不同耕作方式对坡耕地水土及氮磷养分流失的影响效果[J]. 水土保持学报,2013,27(1):27–30.
XIN Yan,WANG Xuan,QU Ye,et al. Effects of different tillage modes on soil, water and N,P nutrient loss on sloping croplands in Liaoning Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2013,27(1):27–30. (in Chinese)

[17] 常旭虹,赵广才,张雯,等. 保护性耕作及氮肥运筹对玉米生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(2):2273–2276.
CHANG Xuhong,ZHAO Guangcai,ZHANG Wen,et al. Effects of conservation tillage and nitrogen application on growth of corn[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2006,12(2):2273–2276. (in Chinese)

[18] 谭月臣,诸葛玉平,刘东雪,等. 华北平原农田管理措施对冬小麦-夏玉米轮作系统 N₂O 和 CH₄ 排放的影响[J]. 环境科学学报,2016,36(7):2638–2649.
TAN Yuechen,ZHUGE Yuping,LIU Dongxue,et al. Effect of farmland management on N₂O and CH₄ emission from winter wheat – summer maize rotation system in North China Plain[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2016,36(7):2638–2649. (in Chinese)

[19] 程乙,王洪章,刘鹏,等. 品种和氮素供应对玉米根系特征及氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(12):2259–2269.
CHENG Yi,WANG Hongzhang,LIU Peng,et al. Effect of different maize varieties and nitrogen supply on root characteristics and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica,2017,50(12):2259–2269. (in Chinese)

[20] 王丽萍,白岚方,王天昊,等. 不同施氮水平对青贮玉米植株氮素积累转运的影响[J/OL]. 作物杂志:1–10 [2023–03–22]. [http://h-s.kns.cnki.net.neau.vpn358.com/kcms/detail/11.1808.S.20220825.1353.002.html](http://h-s.kns.cnki.net/neau.vpn358.com/kcms/detail/11.1808.S.20220825.1353.002.html).
WANG Liping,BAI Lanfang,WANG Tianhao,et al. Effects of different nitrogen levels on nitrogen accumulation and transport in silage maize[J/OL]. Crops:1–10[2023–03–22]. <http://h-s.kns.cnki.net.neau.vpn358.com/kcms/detail/11.1808.S.20220825.1353.002.html>. (in Chinese)

- [21] 曲晓莲,李耕,仲锦维,等. 耕作方式与氮肥类型对夏玉米产量及氮素利用的影响[J]. 农业科技与装备,2022(3):17–20.
QU Xiaolian, LI Geng, ZHONG Jinwei, et al. Effects of tillage method and nitrogen fertilizer types on yield and nitrogen utilization of summer maize[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2022(3):17–20. (in Chinese)
- [22] 吕娇,李淑敏,潘明阳,等. 不同包膜控释氮肥对玉米氮素吸收和产量的影响[J]. 天津农业科学,2012,18(1):46–50.
LÜ Jiao, LI Shumin, PAN Mingyang, et al. Effect of different controlled-release N fertilizers on nitrogen absorption and yield of maize[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2012, 18(1):46–50. (in Chinese)
- [23] 齐智娟,宋芳,张忠学,等. 保护性耕作对寒地黑土土壤水热效应与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报,2022,53(12):380–389.
QI Zhijuan, SONG Fang, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of different conservation tillage methods on soil hydrothermal condition as well as maize yield in cold black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12):380–389. (in Chinese)
- [24] 方乾,赵龙山,吴发启. 降雨强度对农业耕作措施水土保持作用的影响[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(2):215–219,228.
FANG Qian, ZHAO Longshan, WU Faqi, et al. Effect of rainfall intensity on soil and water conservation of tillage practices[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(2):215–219, 228. (in Chinese)
- [25] 刘芬. 水土保持耕作措施及其对土壤影响的探究[J]. 海河水利,2021(2):29–30,33.
LIU Fen. Exploration on the tillage measures of soil and water conservation and relevant Impact on soil[J]. Haihe Water Resources, 2021(2):29–30, 33. (in Chinese)
- [26] 孙哲,毕军,夏光利,等. 2种耕作方式下玉米还田秸秆养分释放特征研究[J]. 中国农学通报,2014,30(9):133–136.
SUN Zhe, BI Jun, XIA Guangli, et al. Study of characteristic of nutrient releasing of maize straw with two tillage methods[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(9):133–136. (in Chinese)
- [27] 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.
- [28] ZHANG Y, XIE D T, NI J P, et al. Conservation tillage practices reduce nitrogen losses in the sloping upland of the Three Gorges Reservoir area; no-till is better than mulch-till[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 300:107003.
- [29] 胡昌浩,董树亭,王空军,等. 我国不同年代玉米品种生育特性演进规律研究Ⅱ物质生产特性的演进[J]. 玉米科学, 1998(3):50–54.
HU Changhao, DONG Shuting, WANG Kongjun, et al. Study on the evolution law of growth characteristics of maize varieties in different ages in China Ⅱ. Evolution of material production characteristics[J]. Journal of Maize Sciences, 1998(3):50–54. (in Chinese)
- [30] ZHOU B Y, YUE Y, SUN X F, et al. Maize grain yield and dry matter production responses to variations in weather conditions [J]. Agronomy Journal, 2016, 108(1):1–9.
- [31] CASSMAN K G. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 1999, 96(11):5952–5959.
- [32] 郭亚飞,翟正丽,张延,等. 长期不同耕作方式对土壤耕层全氮的影响[J]. 土壤与作物, 2018, 7(1):38–46.
GUO Yafei, ZHAI Zhengli, ZHANG Yan, et al. Long-term effects of different tillage practices on total nitrogen in black soils [J]. Soils and Crops, 2018, 7(1):38–46. (in Chinese)
- [33] DOBERMANN A, CASSMAN K G. Cereal area and nitrogen use efficiency are drivers of future nitrogen fertilizer consumption [J]. Science in China, 2005, 48(Supp. 2):745–754.
- [34] 刘宗华. 氮胁迫条件下玉米氮利用效率及相关性状的 QTL 分析[D]. 郑州:河南农业大学, 2007.
LIU Xianhua. QTL analysis of related characters and nitrogen use efficiency under N-stress in maize[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [35] 黄高宝,张恩和,胡恒觉. 不同玉米品种氮素营养效率差异的生态生理机制[J]. 植物营养与肥科学报, 2001, 7(3):293–297.
HUANG Gaobao, ZHANG Enhe, HU Hengjue. Eco-physiological mechanism on nitrogen use efficiency difference of corn varieties[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2001, 7(3):293–297. (in Chinese)
- [36] 王艳. 玉米根系对硝酸盐反应的基因型差异及生理机制[D]. 北京:中国农业大学, 2001.
WANG Yan. Genotypic differences and physiological mechanisms of nitrate response in maize roots[D]. Beijing: China Agricultural University, 2001. (in Chinese)
- [37] 翟胜,高宝玉,王巨媛,等. 农田土壤 N_2O 产生机理及影响因素研究[C]//第三届全国农业环境科学学术研讨会, 2009: 728–732.
- [38] OORTS K, MERCKX R, ERIC G, et al. Determinants of annual fluxes of CO_2 and N_2O in long-term no-tillage and conventional tillage systems in northern France[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 95(1–2):133–148.
- [39] FLECHARD C R, AMBUS P, SKIBA U, et al. Effects of climate and management intensity on nitrous oxide emissions in grassland systems across Europe[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2007, 121(1):135–152.