



秸秆还田后效对玉米氮肥利用率的影响

邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 陈旭, 郝翔翔, 严君

(中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081)

摘要:【目的】玉米秸秆还田已经成为培肥土壤的重要农艺措施之一, 研究玉米秸秆还田后效对氮肥利用率的影响, 旨在为提出提高氮肥利用率的秸秆还田方式提供理论依据。【方法】以中国科学院海伦农业生态实验站为研究平台, 以质地黏重的黑土为研究对象, 运用 ^{15}N 同位素示踪技术, 以2011年进行秸秆还田的田间试验为基础, 于2016年开展不同秸秆还田方式后效对化肥氮利用率影响的研究。以未进行秸秆还田的处理为对照(CK), 在同等秸秆还田量下($10\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)设置免耕秸秆覆盖(D_0), 粉碎后的秸秆均匀混于0—20 cm土层(D_{0-20})、0—35 cm土层(D_{0-35})和20—35 cm土层(D_{20-35}), 秸秆平铺于35 cm深度(D_{35})和50 cm深度(D_{50})7个处理。【结果】不同秸秆还田方式后效通过促进玉米干物质积累, 提高玉米对氮素的吸收, 增加玉米的氮素积累进而提高氮素利用率。不同处理对玉米各器官干物质积累的影响表现为 $D_{0-35} > D_{20-35} > D_{0-20} > \text{CK} \geq D_0 > D_{35} > D_{50}$, 其中 D_{0-35} 和 D_{20-35} (秸秆深混还田后效)处理比其他处理分别显著提高了7.1%—47.7%和2.0%—39.1% ($P < 0.05$) (叶子除外)。不同秸秆还田方式后效对玉米各器官氮含量没有显著影响 ($P > 0.05$), 但是 D_{0-35} 、 D_{20-35} 和 D_{0-20} 处理显著增加了玉米各器官氮素积累量 ($P < 0.05$), 与CK、 D_0 、 D_{35} 、 D_{50} 处理相比分别提高了15.8%—20.2%、8.5%—18.2%和27.9%—39.5% ($P < 0.05$)。与其他处理相比, D_{0-35} 和 D_{20-35} 处理玉米各器官 ^{15}N 累积量分别显著提高了5.1%—38.4%和9.3%—31.8%。74.1%以上的 ^{15}N 累积在玉米的籽粒中, 不同秸秆还田方式后效没有显著影响 ^{15}N 在玉米各器官的分配比例, 说明玉米秸秆还田后效通过促进玉米植株整体对肥料氮的吸收来提高氮肥的利用率。 D_{0-35} 处理氮肥利用率和 ^{15}N 肥料氮的残留率与其他处理相比分别提高了1.9—12.7个百分点和6.9—21.2个百分点, 而氮肥损失率则降低了8.8—31.3个百分点; 但是与CK处理相比, D_0 、 D_{35} 和 D_{50} (秸秆层铺后效)处理没有显著增加氮肥利用率, 同时 D_0 和 D_{50} 处理氮素损失率提高了3.6和4.4个百分点; 说明秸秆层铺后效有增加氮素损失的风险, 而通过秸秆深混还田后效构建肥沃耕层是一种提高氮肥利用率的有效途径。与CK处理相比, D_{20-35} 、 D_{35} 和 D_{50} 处理的氮肥贡献率分别显著提高了3.74、4.26、3.79和4.51个百分点 ($P < 0.05$), 但是不同秸秆还田方式后效之间没有显著差异 ($P > 0.05$)。Pearson相关分析结果表明秸秆还田后效通过促进玉米根系生长、增加土壤中轻组有机碳含量及改善土壤物理性质来提高氮肥利用率。【结论】对于质地黏重的黑土, 可以通过增加秸秆还田混合深度, 构建肥沃耕层提升土壤肥力和改善土壤结构, 能够有效提高氮肥的利用率。

关键词: 玉米; 秸秆还田后效; 氮肥利用率; 干物质积累; 氮素积累

Effect of Maize Straw Return Aftereffect on Nitrogen Use Efficiency of Maize

ZOU WenXiu, HAN XiaoZeng, LU XinChun, CHEN Xu, HAO XiangXiang, YAN Jun

(Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081)

收稿日期: 2020-02-10; 接受日期: 2020-03-12

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0200309-6、2017YFD0300605)、国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS04)、国家自然科学基金(41771327、41807085、41671299)、黑龙江省应用技术与开发计划(GY2017ZB006、GA19B10)、中国科学院野外台站联盟项目(KFJ-SW-YW035-4)

联系方式: 邹文秀, E-mail: zouwenxiu@iga.ac.cn. 通信作者严君, Tel: 0451-87061443; E-mail: yanjun@ia.ac.cn

Abstract: 【Objective】 Maize straw return has been one of agronomic practices for improving soil fertility. The effect of straw return aftereffect on Nitrogen use efficiency (NUE) was considered, with the objective of suppling the theoretical guidance for proposing the straw return patterns being favorable to enhance the NUE. 【Method】 Based on the black soil with heavy clay content in the Hailun agro-ecosystem experimental station of Chinese Academy of Sciences, the micro-plot experiment was carried out using ^{15}N isotope techniques in 2016 under the treatment of the straw return ($10\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) only once established in 2011. Seven treatments were set up, including control without maize straw return (CK), maize straw cover (D_0), maize straw incorporated within 0-20 cm soil depth (D_{0-20}), 0-35 cm soil depth (D_{0-35}), 20-35 cm soil depth (D_{20-35}), respectively, as well as maize straw placed on the 35 cm depth (D_{35}) and 50 cm depth (D_{50}). 【Result】 The aftereffect of maize straw return increased NUE by enhancing the cumulation of dry biomass and nitrogen in maize organs. The maize dry biomass shown in the decreasing trend of $D_{0-35} > D_{20-35} > D_{0-20} > \text{CK} \geq D_0 > D_{35} > D_{50}$. D_{0-35} and D_{20-35} treatments (Maize straw incorporated within deep soil) significantly increased by 7.1%-47.7% and 2.0%-39.1% (with exception of leaf), respectively ($P < 0.05$), compared with other treatments. The different treatments didn't impact the nitrogen (N) contents of maize organs, but D_{0-35} , D_{20-35} and D_{0-20} treatments significantly increased the N cumulation in maize organs ($P < 0.05$) with the increase of 15.8%-20.2%, 8.5%-18.2% and 27.9%-39.5%, respectively ($P < 0.05$), compared with CK, D_0 , D_{35} , and D_{50} . The cumulation of ^{15}N under D_{0-35} and D_{20-35} treatments significantly increased by 5.1%-38.4% and 9.3%-31.8%, respectively, compared with other treatments. ^{15}N of more than 74.1% were accumulated in the grain, different treatments didn't impact the ^{15}N distribution in maize organs, indicating that NUE was increased by improving the N uptake of whole maize. The NUE and N retention rate reached the largest value under D_{0-35} with the increase of 1.9-12.7 percentage and 6.9-21.2 percentage, respectively. However, the N loss under D_{0-35} reached the lowest value with the decrease of 8.8-31.3 percentage. D_0 , D_{35} and D_{50} treatments (straw return in some soil layer) didn't significantly increased the NUE compared with CK treatment, meanwhile the N loss was higher 3.6 and 4.4 percentages than that in CK treatment. The result indicated that straw return in some soil layer had potential risk in the increase of N loss, constructing fertile cultivated soil layer by straw incorporation within deep soil depth was effective agronomic practice with high NUE. The correlation analysis demonstrated that root biomass, light fraction organic carbon and soil physical properties contributed the increase of NUE in study site. N contribution rate was significantly higher 3.74, 4.26, 3.79 and 4.51 percentages in D_{20-35} , D_{35} and D_{50} treatments than that in CK treatment, no significantly difference was observed among treatments with straw return. 【Conclusion】 NUE could be increased by enhancing soil fertility and improving soil structure under maize straw incorporated within deep soil, and constructing fertile soil layer in black soil with heavy clay content.

Key words: maize; maize straw return aftereffect; nitrogen use efficiency; dry biomass cumulation; maize straw incorporated within deep soil; nitrogen accumulation

0 引言

【研究意义】氮素是玉米生长发育必需的大量营养元素,土壤能够供给玉米生长的氮素非常有限^[1],通过施肥的方式补充土壤氮素是实现玉米高产的有效措施,但是随着氮肥施用量的不断增加,导致氮肥利用率下降^[2];未被利用的氮通过淋溶、氨挥发、硝化反硝化和径流等途径^[3]进入环境,导致环境污染;仅有少部分能够残留在土壤中供给下一季作物吸收利用^[4-5]。世界范围内玉米的氮肥利用率是 25%—50%^[6],平均值为 33%,然而中国玉米氮肥利用率 < 25%,低于发达国家^[7]。所以长期以来,如何提高氮肥利用率,一直是科学家们关注的热点问题。前人已经从施肥、耕作和土壤肥力等方面,持续解析了农艺措施与氮肥利用率之间的内在关系,获得了一系列的研究结果^[8-9],然而目前我国农业生产方式发生了改

变,玉米秸秆还田作为重要培肥方式,已经成为主要的农艺措施。据统计我国秸秆还田的面积已经达到了 0.51 亿 hm^2 ^[9],因此研究玉米秸秆还田与氮肥利用率之间关系是非常必要的。田间试验研究结果表明秸秆还田能够改善土壤物理性质和提高土壤肥力,并且具有一定的时间效应^[10],进而影响氮肥利用率。因此,探明秸秆还田后效对氮肥利用率的影响对秸秆还田方式的优化具有重大的理论意义和重要的应用价值。【前人研究进展】玉米秸秆还田方式包括直接还田和间接还田,其中直接还田有表面覆盖、与土壤混合(混合还田)和以秸秆层的形式填埋入土壤某一深度(层埋还田)^[10]。秸秆覆盖包括表覆盖免耕和覆盖条耕^[11-12],秸秆与土壤混合主要包括浅层混合(深度为 0—15 cm)、深层混合(深度为 0—35 cm)、亚耕层混合(20—35 cm)^[13-15]和翻埋还田(秸秆还到某一土层以下)^[16]。长期定位试验研究发现,秸秆还田能够增加

土壤有机质含量^[17], 提高水稳性大团聚体含量及土壤结构的稳定性^[18-19], 改善了土壤物理性质, 提高了玉米的产量^[13,20]。秸秆还田后土壤中的总氨基糖增加了 4.4%—8.4%^[21], 过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶活性显著增加^[22]。辽宁省西部棕壤区秸秆翻埋还田研究结果表明试验 2 年后玉米产量增加了 1.1%—11.6%, 氮肥的农学利用率提高了 40.9%^[23]。在半湿润易旱区免耕覆盖通过调节土壤水热变化, 提高氮肥的利用率^[24]。在东北黑土区的研究发现秸秆覆盖免耕后玉米的氮肥利用率降低了 16%—27%, 其原因主要是秸秆覆盖降低了作物生长早期的地温和土壤中氮的有效性^[25]; 但是秸秆深埋还田后氮肥利用率提高了 13.3%^[26]。利用 ¹⁵N 标记示踪技术研究发现玉米秸秆还田后能够增加秸秆和根系吸收的氮素中来自于 ¹⁵N 标记秸秆氮的比例, 提高氮肥的利用率^[27]。【本研究切入点】目前关于秸秆还田对玉米氮肥利用率影响的大部分研究关注了当季秸秆还田的影响, 但是对秸秆还田后效对玉米氮肥利用率影响的研究较少; 同时对不同秸秆还田方式, 即秸秆覆盖还田、混合还田和层埋还田对玉米氮肥利用率的影响缺乏对比研究。【拟解决的关键问题】本文采用田间定位试验, 利用 ¹⁵N 同位素示踪技术研究秸秆覆盖、混合和层埋等还田方式对 ¹⁵N 标记氮肥利用率的影响, 明确不同秸秆还田方式后效对氮肥利用率的影响及其机制, 为优化秸秆还田方式和提高氮肥利用率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在中国科学院海伦农业生态实验站内, 该站位于我国典型黑土区的中部, 地势平坦, 属于温带大陆性季风气候区, 全年平均气温 1.5℃, 夏季极端最高温度为 37℃, 冬季极端最低温度为 -39.5℃; 近 50 年平均降水量为 550 mm, 主要集中在 7—9 月份; 年均 >10℃有效积温 2 450℃, 年均日照时数约为 2 700 h, 无霜期为 125 d。土壤按发生分类属于中厚层黑土类型, 质地为黏壤土, 是在第四纪黄土状母质上发育起来的地带性土壤, 土壤物理性黏粒含量 >40%, 黑土层 (A) 较厚, 在 50 cm 以上, 过渡层 (AB) >60 cm, 无碳酸盐反应, 地下水埋深在 20—30 m。

1.2 试验设计

本试验设置于 2011 年 5 月, 共包括 7 个处理。(1) 对照, 农民常规耕作 (CK); (2) 免耕秸秆均匀覆

盖 (D₀); (3) 粉碎后的秸秆均匀混于 0—20 cm 土层 (D₀₋₂₀); (4) 粉碎后的秸秆均匀深混于 0—35 cm 土层 (D₀₋₃₅); (5) 将 0—20 cm 土层剥开, 秸秆均匀混于 20—35 cm 土层, 然后将 0—20 cm 土层回填 (D₂₀₋₃₅); (6) 将 0—20 cm 和 20—35 cm 土层分层剥开, 在 35 cm 深处集中深埋, 形成秸秆层, 然后分层回填 (D₃₅); (7) 将 0—20 cm、20—35 cm 和 35—50 cm 土层分层剥开, 在 50 cm 处集中深埋, 形成秸秆层, 然后分层回填 (D₅₀), 所有秸秆还田小区仅在 2011 年进行了一次秸秆还田操作, 秸秆还田量为 10 000 kg·hm⁻²。小区面积 1.4 m² (长 1.0 m, 宽 1.4 m), 4 次重复, 随机区组排列。2016 年在秸秆短期还田后效的试验小区内进行 ¹⁵N 标记同位素示踪研究。2011 年试验开始前土壤基本化学性质为有机质含量 45.4 g·kg⁻¹, 全氮 2.1 g·kg⁻¹, 全磷 0.8 g·kg⁻¹, 全钾 24.5 g·kg⁻¹, 速效氮 236.0 mg·kg⁻¹, 速效磷 18.2 mg·kg⁻¹, 速效钾 219.0 mg·kg⁻¹, pH 6.3。玉米品种为德美亚 3 号, 氮肥 ¹⁵N 标记尿素含 N 46%, 丰度为 10.17% (上海化工研究院), 磷肥为磷酸二氢钾 (KH₂PO₄), 含磷 23.3%, 含钾 28.6%。

1.3 试验方法

2016 年春季播种前在试验小区中间的垄上插入一个高 50 cm、半径 20 cm PVC 桶, PVC 桶露出地面 5 cm, 插入地下 45 cm。5 月 2 日在每个桶内播种 3 株玉米, 出苗后留 1 株壮苗。每桶施用氮肥 1.88 g (¹⁵N 标记的尿素), 磷酸二氢钾 (化学试剂纯级别) 1.60 g, 30% 的氮肥与全部磷酸二氢钾在播种时作为基肥施用, 剩下 70% 的氮肥在玉米 9 叶期作为追肥施用。9 月 29 日收获时, 按照根、茎 (包括雄穗)、叶 (包括包皮)、轴和籽粒分开, 然后在鼓风烘箱内 105℃ 下杀青 30 min, 80℃ 烘干至恒重, 冷却至室温后分别测定各部位干物质重量, 然后用样品粉碎机磨碎后过 0.5 mm 筛, 备用。

1.4 样品分析

植株各器官全氮含量采用开氏定氮仪测定 (FOSS Kjeltac 8400)。¹⁵N 丰度采用 FLASHEA-DELTA V 联用仪/Flash-2000 Delta V ADVADTAGE/S-090433 型同位素质谱仪检测。土壤轻组有机碳、容重、田间持水量和饱和持水量的分析方法见参考文献[28-29]。

1.5 计算方法

植株吸收肥料氮量占植株总氮量百分率 $N_{dff} = \frac{\text{植株样品中 } ^{15}\text{N 原子百分超/标记肥料中 } ^{15}\text{N 原子百分超}}{\times 100\%}$;

植株氮素来自 ^{15}N 肥料氮的量=玉米植株吸氮量 $\times\text{Ndff}$;

^{15}N 标记肥料氮的利用率(%)=植株氮素来自 ^{15}N 肥料氮的量/ ^{15}N 肥料氮施用总量 $\times 100$;

土壤 Ndff =土壤样品中 ^{15}N 原子百分超/肥料中 ^{15}N 原子百分超 $\times 100$;

^{15}N 肥料氮的土壤残留量=土壤干重 \times 土壤全 $\text{N}\%$ \times 土壤 Ndff ;

0—35 cm 土层 ^{15}N 肥料氮的残留率(%)= ^{15}N 肥料氮的土壤残留量/ ^{15}N 肥料氮施用总量 $\times 100$;

^{15}N 肥料氮的贡献率(%)=植株吸收 ^{15}N 肥料氮的量/玉米植株吸氮总量 $\times 100$;

^{15}N 肥料氮的损失率(%)= $100-^{15}\text{N}$ 标记肥料氮的利用率(%) - 土壤中 ^{15}N 标记肥料氮残留率(%) (0—35 cm 土层)。

1.6 数据处理与分析

所有数据采用 SPSS17.0 进行单因素方差分析 (one-way ANOVA)，分析秸秆还田后效对玉米干物质积累、氮素积累和氮肥利用率等的影响，多重比较采用 Duncan 法 ($P=0.05$)，平均值在 $P<0.05$ 水平下的任何差异具有统计学意义。采用 SPSS17.0 进行玉米氮肥利用率与土壤理化性质的 Pearson 相关性分析。

2 结果

2.1 秸秆还田后效对玉米干物质积累的影响

秸秆还田后效显著影响了成熟期玉米植株各器官干物质积累 (表 1) ($P<0.05$)。除了叶以外， D_{0-35} 和 D_{20-35} 处理玉米各器官干物质质量显著高于其他处理 ($P<0.05$)； D_{50} 处理各器官干物质积累量最小，与秸秆混合施用处理 (D_{0-20} 、 D_{0-35} 和 D_{20-35}) 和 CK 对照

各器官干物质积累量差异达到了显著水平 ($P<0.05$)；不同处理干物质总量表现为 $\text{D}_{0-35}>\text{D}_{20-35}>\text{D}_{0-20}>\text{CK}\geq\text{D}_0>\text{D}_{35}>\text{D}_{50}$ ，整体上表现为秸秆混合还田后效促进了玉米的干物质积累。各处理籽粒占总干物质积累量的 40.5%—41.8%，是积累量最大的器官；其次是叶和茎，其占总干物质积累量的比例分别为 17.3%—18.8%和 16.9%—18.8%，玉米轴所占比例最小为 9.9%—10.4%；根系占干物质总量的比例相对较小。秸秆还田后效显著影响了根系的干物质积累 ($P<0.05$)，秸秆深混处理 (D_{0-35} 和 D_{20-35}) 促进了玉米根系的发育，同时玉米植株的地上部生物量和籽粒也相对较高，说明秸秆混合还田能够协同促进玉米植株营养生长和生殖生长，达到高效的“库”“源”转换。

2.2 秸秆还田后效对玉米植株各器官吸收 ^{15}N 化肥的影响

虽然秸秆还田后效显著影响了玉米各器官的干物质积累 (表 1)，但是对玉米各器官氮含量没有显著的影响 ($P>0.05$) (表 2)，说明了在氮肥施用量和施用方式相同的情况下，不同秸秆还田方式后效并不能改变氮在玉米各器官中的含量。秸秆还田后效对玉米各器官氮素积累总量表现为 $\text{D}_{0-35}\geq\text{D}_{20-35}\geq\text{D}_{0-20}>\text{D}_0\geq\text{CK}\geq\text{D}_{35}>\text{D}_{50}$ (表 3)，其中秸秆混合还田处理 (D_{0-35} 、 D_{20-35} 和 D_{0-20}) 与 CK、覆盖还田 (D_0) 和层铺还田 (D_{35} 和 D_{50}) 的差异达到了显著水平 ($P<0.05$)。与其他处理相比， D_{0-35} 提高了成熟期各器官氮素积累量 (除了根以外)，其中籽粒、茎和轴氮素积累量差异达到了显著水平 ($P<0.05$)，说明秸秆深混还田能够通过促进植株的生长，进而增加氮素积累量。

表 1 秸秆还田后效对玉米各器官干物质积累量的影响

Table 1 Dry biomass accumulation of maize under straw return aftereffect (g/plant)

处理 Treatment	籽粒 Grain	根 Root	茎 Steam	叶 Leaf	轴 Cob	总量 Total biomass
CK	129.6±3.5 d	39.1±2.7 d	55.7±1.8 c	54.5±2.9 d	31.1±1.3 d	310.0±4.9 d
D_0	127.7±5.7 d	31.8±2.9 e	57.7±0.7 c	57.6±1.9 c	31.8±0.9 d	306.6±8.2 d
D_{0-20}	139.1±2.2 c	41.6±1.9 c	62.1±0.6 b	63.8±0.9 b	34.0±0.4 c	340.5±4.0 c
D_{0-35}	156.9±3.7 a	46.2±2.9 ab	66.5±2.2 a	66.9±1.9 a	37.7±0.6 a	374.1±4.3 a
D_{20-35}	147.8±1.8 b	50.9±4.3 a	63.4±3.7 b	62.4±2.9 b	35.7±0.8 b	360.1±5.4 b
D_{35}	114.2±1.8 e	42.7±5.4 c	47.9±1.6 d	48.9±1.9 e	28.5±1.2 e	282.3±5.5 e
D_{50}	106.2±1.7 f	32.5±1.7 de	45.5±0.9 d	45.1±1.1 f	26.1±1.3 f	255.3±2.2 f

同一列数据后的不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant difference for the results in the same column ($P<0.05$). The same as below

表 2 秸秆还田后效对玉米各器官全氮含量的影响

Table 2 Nitrogen contents in different organs of maize under different straw return aftereffect

处理 Treatment	全氮含量 The contents of total nitrogen (g·kg ⁻¹)				
	籽粒 Grain	根 Root	茎 Steam	叶 Leaf	轴 Cob
CK	12.1±0.78 a	3.2±0.25 a	1.7±0.04 a	3.5±0.06 a	3.4±0.07 a
D ₀	12.2±1.12 a	3.5±0.46 a	1.8±0.05 a	3.5±0.05 a	3.6±0.26 a
D ₀₋₂₀	12.4±0.28 a	3.3±0.35 a	1.8±0.03 a	3.6±0.03 a	3.6±0.02 a
D ₀₋₃₅	12.6±0.97 a	3.3±0.11 a	1.8±0.05 a	3.5±0.09 a	3.5±0.04 a
D ₂₀₋₃₅	12.4±1.33 a	3.2±0.36 a	1.8±0.06 a	3.5±0.03 a	3.5±0.06 a
D ₃₅	13.0±1.93 a	3.1±0.31 a	1.8±0.03 a	3.5±0.04 a	3.5±0.06 a
D ₅₀	12.6±0.23 a	3.1±0.16 a	1.8±0.06 a	3.5±0.03 a	3.5±0.01 a

表 3 秸秆还田后效对玉米各器官氮素累积量的影响

Table 3 Nitrogen accumulation in different organs of maize under different straw return aftereffect

处理 Treatment	氮素累积量 Nitrogen accumulation (mg/plant)					
	籽粒 Grain	根 Root	茎 Steam	叶 Leaf	轴 Cob	总量 Total
CK	1568.2±139.0 cd	125.7±17.4 bc	96.0±4.4 b	189.0±9.7 b	106. 9±3.0 d	2085.7±135.1 c
D ₀	1558.4 ±179.1 cd	135.1±16.2 ab	101.0±3.3 b	199.3±8.0 b	114.1±9.3 cd	2107.9 ±166.1 c
D ₀₋₂₀	1722.2±64.7 bc	137.0±10.9 ab	108.8±1.5 a	228.7 ±17.4 a	117.8±1.5 bc	2314.5±39.8 b
D ₀₋₃₅	1975.8±136.1 a	150.1±12.9 ab	116.0±5.2 a	234.4±12.6 a	129.8±3.1 a	2606.1±135.7 a
D ₂₀₋₃₅	1828.0±180.4 ab	162.1±29.2 a	111.6±9.6 a	218.2±11.6 a	123. 7±3.5 ab	2443.5±171.5 ab
D ₃₅	1487.9±209.5 d	134.3±20.9 ab	84.3±4.0 c	169.5±5.2 c	98.4±5.6 e	1974.3±199.0 c
D ₅₀	1335.8±29.2 d	99.8±6.3 c	80.1±2.7 c	156.1±4.3 c	89.9±4.7 f	1761.6±25.6 d

2.3 秸秆还田后效对玉米各器官 ¹⁵N 积累量及分配率的影响

D₀₋₃₅ 和 D₂₀₋₃₅ 处理下玉米各器官 ¹⁵N 积累量显著高于其他处理（根除外）（*P*<0.05），与其他处理相比，分别提高 5.1%—38.4%和 9.3%—31.8%（表 4）。从玉米各器官 ¹⁵N 积累量占植株 ¹⁵N 积累总量

的比例可以得出，74.1%以上的 ¹⁵N 累积在籽粒中，8.1%—9.3%的 ¹⁵N 累积在叶中，剩余的 5.9%—7.8%、2.5%—3.8%和 3.8%—6.5%分别分配在轴、茎和根，不同处理间没有显著性差异，说明玉米秸秆还田对氮肥利用的影响是促进了玉米植株整体对肥料氮的吸收。

表 4 秸秆还田后效对玉米各器官 ¹⁵N 积累量及分配率的影响

Table 4 ¹⁵N accumulation and distribution in different organs of maize under straw return aftereffect

处理 Treatment	累积量 Accumulation (mg/plant)					比例 Proportion (%)				
	籽粒	根	茎	叶	轴	籽粒	根	茎	叶	轴
	Grain	Root	Steam	Leaf	Cob	Grain	Root	Steam	Leaf	Cob
CK	408.8±29.4 d	20.6±0.9 b	18.8±0.9 b	45.2±1.6 d	37.7±1.2 cd	77.0	3.8	3.6	8.5	7.1
D ₀	438.8±34.1 cd	37.3±9.9 a	14.8±1.6 c	47.0±1.5 cd	39.8±3.3 c	76.0	6.5	2.5	8.1	6.9
D ₀₋₂₀	491.3±22.4 bc	33.0±2.9 a	16.8±1.3 bc	57.7±4.8 bc	45.8±1.2 b	76.2	5.1	2.6	9.0	7.1
D ₀₋₃₅	564.0±14.9 a	38.1±0.9 a	28.2±1.7 a	70.8±7.2 a	59.3±2.2 a	74.2	5.0	3.7	9.3	7.8
D ₂₀₋₃₅	537.1±18.8 ab	36.4±2.5 a	27.4±2.4 a	68.1±9.5 ab	56.4±1.2 a	74.1	5.0	3.8	9.3	7.8
D ₃₅	451.7±16.1 cd	21.7±0.8 b	19.5±0.8 b	47.5±1.3 cd	33.9±0.8 de	78.7	3.8	3.4	8.1	5.9
D ₅₀	407.5±19.6 d	20.4±0.9 b	18.0±0.9 bc	44.3±0.7 d	318.0±0.4 e	78.1	3.9	3.5	8.4	6.1

2.4 秸秆还田后效对肥料氮利用率、贡献率、残留率和损失率的影响

不同秸秆还田方式后效均提高了玉米的氮肥利用率(表5),CK与D₀₋₂₀、D₀₋₃₅和D₂₀₋₃₅的差异达到了显著水平($P<0.05$);CK、D₀、D₃₅和D₅₀处理间没有显著性差异($P>0.05$)。D₀₋₃₅和D₂₀₋₃₅处理的玉米氮肥利用率显著高于D₀₋₂₀处理($P<0.05$),分别提高了6.2和4.3个百分点,说明秸秆深混和亚耕层混合施用是一种有效提高氮肥利用率的途径。土壤残留的化肥氮能够为下一季作物生长提供氮源,D₀₋₃₅和D₂₀₋₃₅处理显著提高了¹⁵N肥料氮的残留率,与其他处理相比分别提高了14.7—21.2个百分点和8.0—14.3个百分点。¹⁵N肥料氮损失率最高的处理是D₀和D₅₀处理,显著高于秸秆混合还田的3个处理($P<0.05$);D₀₋₂₀、D₀₋₃₅和D₂₀₋₃₅之间差异显著($P<0.05$),其中D₀₋₃₅

的¹⁵N肥料氮损失率最低为10.6%;D₀、D₃₅和D₅₀与CK之间没有显著差异($P>0.05$)。与CK相比,D₀₋₃₅、D₂₀₋₃₅、D₃₅和D₅₀处理¹⁵N肥料氮贡献率分别显著提高了3.7、4.3、3.8和4.5个百分点($P<0.05$);不同处理之间没有显著查差异($P>0.05$)。

2.5 氮肥利用率与土壤理化性质之间的关系

大量的研究已经证明秸秆还田能够影响土壤理化指标^[28-29]。本研究中对测定了不同处理土壤轻组有机碳、>0.25 mm团聚体、容重、持水量后,分析了氮肥利用率与氮肥贡献率和土壤上述指标之间的相关性(表6)。氮肥利用率和氮肥贡献率与土壤轻组有机碳、>0.25 mm团聚体含量、饱和含水量和田间持水量呈极显著正相关关系($P<0.01$),与土壤容重呈极显著负相关关系($P<0.01$);同时根重也是影响氮肥利用率和氮肥贡献率的重要因素。

表5 秸秆还田后效对玉米植株¹⁵N利用率的影响

Table 5 Nitrogen use efficiency of maize under different straw return aftereffect (%)

处理 Treatment	氮肥利用率 N use efficiency	氮素残留率 N retention rate	氮素损失率 N loss	氮肥贡献率 N contribution rate
CK	28.3±1.7 c	34.2±4.5 bc	37.5±5.4 ab	25.5±1.2 b
D ₀	30.3±2.3 c	27.8±3.6 c	41.9±3.9 a	27.0±1.4 ab
D ₀₋₂₀	34.3±1.0 b	33.6±3.6 bc	32.1±3.3 b	27.8±0.6 ab
D ₀₋₃₅	40.5±1.2 a	48.9±2.1 a	10.6±1.1 d	29.2±1.7 a
D ₂₀₋₃₅	38.6±1.8 a	42.0±4.1 a	19.4±2.1 c	29.8±1.6 a
D ₃₅	30.5±1.0 c	34.0±8.5 bc	35.4±4.3 ab	29.8±2.7 a
D ₅₀	27.8±1.0 c	31.1±5.2 c	41.2±5.9 a	29.6±1.0 a

表6 玉米氮肥利用率与土壤理化性质的相关性分析

Table 6 The relationship between N use efficiency and selected soil properties

项目 Items	根重 Root biomass	轻组有机碳 Light fraction organic carbon	>0.25 mm 团聚体 >0.25 mm aggregate	容重 Bulk density	饱和含水量 Saturated water capacity	田间持水量 Field water capacity
氮肥利用率 N use efficiency	0.72**	0.98**	0.99**	-0.85**	0.96**	0.97**
氮肥贡献率 N contribution rate	0.41*	0.75*	0.77**	-0.70**	0.74**	0.76**

*和**分别表示在0.05和0.01水平上显著相关 * and** represent significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively

3 讨论

秸秆还田通过影响土壤肥力进而调控作物的生长^[13,20]。定位试验研究表明秸秆深混还田对0—35 cm土层的土壤容重、轻组有机碳和氮、磷、钾含量的影响可以延续到6年^[30],证明秸秆还田对土壤的物理化学性质具有明显的后效。但是不同秸秆还田方式后效对土壤性质的影响存在一定的差异^[20,31]。对于黏粒含

量较高的土壤,秸秆深混还田后在微生物的分解过程中显著改善了深层土体的肥力属性^[29],其产生的后效能够促进作物前期生长发育,提高作物对氮肥的利用率。秸秆深混混合能够使秸秆尽可能均匀地分布在土壤中,从而增加土壤微生物与秸秆的接触面积,进而促进秸秆分解释放养分进入土壤供给作物吸收利用^[29],同时秸秆还田还能刺激微生物分泌参与土壤碳、氮、磷循环相关的水解酶,随着秸秆腐解,提高

了土壤中养分含量, 进而促进作物的生长^[31]。郑金玉等研究表明秸秆深混还田能够增加玉米单株叶面积, 提高干物质积累^[32], 免耕显著减低了成熟期玉米地上部的干物质量^[33]。本研究中与农民常规耕作方式相比, 秸秆混合还田后效增加了玉米的干物质积累 (表 1), 其中秸秆深混还田和亚耕层混还田后效效果最佳, 而秸秆覆盖和层施的后效则限制了玉米干物质的积累。秸秆混合还田和 35 cm 土层平铺秸秆处理的根系生物量显著高于其他处理 (表 1), 其原因在于秸秆还田后在微生物的作用下能够向土壤中释放速效养分供作物根系吸收利用, 进而影响作物根系的生长^[34]。同时说明当秸秆还田深度 ≤ 35 cm 时能够影响玉米根系的生长 (无论平铺和还是深混), 但是当秸秆深铺在土层 50 cm 处时则对玉米根系的生长没有促进作用。 D_{0-35} 和 D_{20-35} 的根系生物量比 D_{20} 处理分别增加了 11.0% 和 22.3%, 主要是由于在秸秆深混和亚耕层混施过程中能够通过打破犁底层, 减小耕作层的贯穿阻力, 增加深层土壤孔隙度, 促进作物根系垂直下扎生长^[35-36]。隋鹏祥等研究表明与旋耕相比, 翻耕能够增加土壤中的根长密度、根表面积和根干重密度, 秸秆还田的根干重密度增加了 20.6%^[14]。免耕秸秆覆盖由于土壤自然沉降和农机具压实双重作用导致土壤压实, 增加了土壤容重和紧实度, 减小了土壤孔隙, 从而增加了土壤机械组力, 限制根系生长^[37-39]。

在相同氮肥施用量的情况下, 不同秸秆还田方式的后效没有显著影响玉米各器官的全氮含量 (表 2), 但是通过影响干物质积累进而影响了氮素积累量 (表 3)。DUAN 等统计分析了来自于北京昌平、湖南祁阳、河南郑州和陕西杨凌 4 个试验点的相同氮肥施用情况下不同有机肥处理对玉米全氮含量的影响, 结果表明有机肥的施用没有显著影响玉米的全氮含量, 而氮素的累积量主要受干物质积累量影响^[33]。秸秆施用后通过在作物生长季养分缓慢释放和供给产生后效, 增加作物对氮肥的吸收, 提高玉米产量和土壤肥力^[40]。GENG 等研究表明秸秆还田显著增加了玉米不同生育时期的物质积累, 相应的增加了玉米植株中的氮的累积^[41]。有机物料的投入通过改善土壤结构来影响作物根系的生长和分布^[42], 进而影响作物对氮肥的吸收, 单施化肥玉米的氮肥吸收量是 1.3 g/株, 而化肥有机肥配施处理玉米的氮肥吸收量是 2.4 g/株^[43]。本研究得到了相似的结果, 秸秆混合还田 (D_{0-35} 和 D_{20-35}) 后效增加了根系的生物量, 促进了根系对土壤中氮的吸收, 进而植株氮累积量显著高于其他处理。

而免耕处理由于限制了作物根系的生长, 进而限制了对氮素的吸收^[38], 导致对氮的累积与对照之间没有显著差异。秸秆在 35 cm 土层处层施, 与农民常规相比显著增加了根系的生物量, 但是并没有增加干物质积累, 导致氮的累积量偏低; 秸秆在 50 cm 土层处层施处理氮的累积量最小, 主要是由于玉米生长前期根系主要分布在 0—35 cm 土层, 秸秆层铺在 50 cm 对作物前期生长没有起到直接的调控作用, 在作物生长后期还增加了氮素淋溶的风险, 降低了植物对氮素的累积量^[44]。前人研究已经表明有机物料的施用能够增加土壤中粘粒和团聚体含量, 进而增加土壤中的阳离子交换量和 NO_3^- -N 的固定, 减少了 NO_3^- -N 淋溶的风险, 同时有机物料的施用通过促进根系的生长进而增加了根系对 NO_3^- -N 的吸收^[44-45]。

化肥施用以后在土壤中进行转化、迁移并被作物吸收利用, 土壤肥力和障碍因子通过影响土壤蓄纳和稳定养分的能力, 微生物活性和根系生长, 进而影响土壤-植物系统中的化肥的高效循环利用^[46]。长期的不合理耕作和大量化肥投入导致黑土土壤结构破坏、耕作层变薄^[47], 降低了土壤的养分库容, 抑制作物根系对养分的吸收利用, 降低化肥的利用率。本研究利用 ^{15}N 同位示踪技术研究发现常规耕作方式氮肥利用率显著低于秸秆混合还田产生后效的处理 (D_{0-20} 、 D_{0-35} 和 D_{20-35})。表 6 显示氮肥的利用率与土壤中轻组有机碳、 >0.25 mm 团聚体、持水量呈显著正相关关系, 与容重呈负相关关系, 说明秸秆还田后通过改善土壤理化性质, 维持和提高土壤的肥力^[48], 向作物供给更多的养分^[44], 同时减少氮的损失^[45]来提高氮肥利用率。王振华等研究表明, 秸秆还田后玉米氮肥表现利用率比单施化肥提高 4.3%^[49]。秸秆深混入 0—35 cm 和混入亚耕层 20—35 cm 比秸秆浅混入 0—20 cm 氮肥利用率显著提高了 6.2 和 4.3 个百分点, 说明增加培肥的土层深度能够进一步提高氮肥利用率, 证明在土壤培肥过程中构建肥沃耕层的重要性。通过构建肥沃耕层能够增加深层土壤的速效养分含量, 促进养分在深层土壤的积累^[29], 更重要的是肥沃耕层构后能够显著改善土壤的结构, 特别是增加亚耕层中土壤孔隙度和水稳性团聚体等含量, 有利于根系下扎^[13], 使玉米后期生长能够保持较高的根系活力, 从而维持较高的氮素吸收能力。本研究表明秸秆深混还田后效构建的肥沃耕层可以促进玉米对土壤中氮素的吸收利用 (表 2 和 3), 进而提高氮肥利用率。值得注意的是, 本研究证明了秸秆还田 6 年的后效对氮肥利用率具有明显

的促进作用而秸秆层铺于土层 35 和 50 cm 与农民常规相比没有显著的差异, 主要是因为层铺秸秆即没有增加耕作层深度, 也没有改善耕作层的土壤结构, 对玉米根系生长没有显著的促进作用。在东北黑土区免耕秸秆覆盖由于降低春季的土壤温度, 导致玉米生育期迟缓, 籽粒灌浆受到影响, 进而降低产量^[25]; 同时由于免耕秸秆覆盖增加了土壤容重, 增加了土壤紧实度^[37], 限制了玉米根系的生长^[50], 而影响对土壤中氮素的吸收^[51], 导致氮肥利用率较低。因此, 通过秸秆深混还田构建肥沃耕层的方法培育和提升耕地地力有望成为长期稳定提高化肥利用率、实现藏肥于土与耕地大面积均衡减肥的根本途径。

4 结论

秸秆还田后效能够影响玉米生长及对化肥氮的吸收与利用。不同秸秆还田方式后效对玉米生物量和各器官氮素积累总量表现为秸秆混合还田>秸秆表层覆盖>秸秆层铺, 其中秸秆深混还田效果最佳。 D_{0-35} 和 D_{20-35} 处理促进了玉米各器官 ^{15}N 的积累, 但是不同处理对 ^{15}N 在玉米各器官的分配没有影响。与常规耕作相比, 秸秆深层和亚耕层混合的后效显著提高了玉米的氮素利用率和 ^{15}N 肥料氮的残留率, 而降低了 ^{15}N 肥料氮的损失率。相关性分析表明秸秆还田后效通过促进作物根系生长、增加土壤的轻组有机碳和改善物理性质进而提高氮肥利用率。因此, 对于质地黏重的黑土, 通过增加秸秆还田混合深度, 构建肥沃耕层培育和提升耕地地力, 能够有效提高氮肥的利用率。

References

- [1] 朱兆良. 土壤氮素. 土壤, 1982, 14(3): 116-119.
ZHU Z L. Nitrogen in soil. *Soils*, 14(3):1982, 116-119. (in Chinese)
- [2] GOTOSA J, KODZWA J, NYAMANGARA J, GWENZI W. Effect of nitrogen fertiliser application on maize yield across agro-ecological regions and soil types in Zimbabwe: a meta-analysis approach. *International Journal of Plant Production*, 2019, 13: 251-266.
- [3] 朱兆良. 中国土壤氮素研究. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
ZHU Z L. Research on soil nitrogen in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778-783. (in Chinese)
- [4] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 黄土高原旱地冬小麦/夏玉米轮作体系土壤的氮素平衡. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 759-764.
WANG X N, WANG Z H, LI S X. Soil nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system on dryland of Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 759-764. (in Chinese)
- [5] 王建国, 韩晓增, 刘鸿翔. 黑土农田化肥氮素去向的研究. 生态学杂志, 1997, 16(5): 61-63.
WANG J G, HAN X Z, LIU H X. Study on the fate of nitrogen fertilizer in black soil. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16(5): 61-63. (in Chinese)
- [6] RAUN W R, JOHNSON G V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal*, 1999, 91:357-363.
- [7] MENG Q F, YUE S C, HOU P, CUI Z L, CHEN X P. Improving yield and nitrogen use efficiency simultaneously for maize and wheat in China: a review. *Pedosphere*, 2016, 26(2): 137-147.
- [8] 周宝元, 王新兵, 王志敏, 马玮, 赵明. 不同耕作方式下缓释肥对夏玉米产量及氮素利用效率的影响. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 821-829.
ZHOU B Y, WANG X B, WANG Z M, MA W, ZHAO M. Effect of slow-release fertilizer and tillage practice on grain yield and nitrogen efficiency of summer maize (*Z. mays* L.). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22(3): 821-829. (in Chinese)
- [9] 国家统计局. 2018 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2018.
National Bureau of Statistics. *2018 China Statistical Yearbook*. Beijing: Chinese Statistics Press, 2018. (in Chinese)
- [10] 韩晓增, 邹文秀. 我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 206-212.
HAN X Z, ZOU W X. Effects and suggestions of black soil protection and soil fertility increase in Northeast China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 206-212. (in Chinese)
- [11] 焦晓光, 王晓军, 徐欣, 周珂, 谢洪宝. 秸秆覆盖条件下不同施氮水平对春玉米产量及氮肥利用效率的影响. 土壤与作物, 2018, 7(2): 242-247.
JIAO X G, WANG X J, XU X, ZHOU K, XIE H B. Effects of different nitrogen application rates on spring maize yield and nitrogen fertilizer utilization efficiency under straw cover. *Soils and Crops*, 2018, 7(2): 242-247. (in Chinese)
- [12] MATIN M A, DESBIOLLES J M A, FIELKE J M. Strip-tillage using rotating straight blades: Effect of cutting edge geometry on furrow parameters. *Soil & Tillage Research*, 2016, 155: 271-279.
- [13] 韩晓增, 邹文秀, 王凤仙, 王凤菊. 黑土肥沃耕层构建效应. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2996-3002.
Han X Z, ZOU W X, WANG F X, WANG F J. Constructing effect of fertile cultivated layer in black soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12): 2996-3002. (in Chinese)
- [14] 隋鹏祥, 有德宝, 安俊朋, 张文可, 田平, 梅楠, 王美佳, 王沅, 苏

- 思慧, 齐华. 秸秆还田方式与施氮量对春玉米产量及干物质和氮素积累、转运的影响. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 316-324.
- SUI X P, YOU D B, AN J P, ZHANG W K, TIAN P, MEI N, WANG M J, WANG F, SU S H, QI H. Effects of straw management and nitrogen application on spring maize yield, dry matter and nitrogen accumulation and transfer. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 316-324. (in Chinese)
- [15] 韩晓增, 邹文秀, 严君, 李娜, 王献国, 李禄军. 农业生态学和长期试验示范引领黑土地保护和农业可持续发展. *中国科学院院刊*, 2019, 34(3): 362-370.
- HAN X Z, ZOU W X, YAN J, LI N, WANG X G, LI L J. Ecology in agriculture and long-term research guide protection of black soil and agricultural sustainable development in Northeast China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(3): 362-370. (in Chinese)
- [16] 蔡鸿光, 梁尧, 闫孝贡, 刘剑钊, 袁静超, 张洪喜, 任军, 王立春. 东北黑土区秸秆不同还田方式下玉米产量及养分积累特征. *玉米科学*, 2016, 24(5): 68-74.
- CAI H G, LIANG Y, YAN X G, LIU J Z, YUAN J C, ZHANG H X, REN J, WANG L C. Grain yield and characteristic of nutrient accumulation for maize under different straw return modes in black soil region of northeast. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(5): 68-74. (in Chinese)
- [17] DING X L, YUAN Y R, LIANG Y, LI L J L, HAN X Z. Impact of long-term application of manure, crop residue, and mineral fertilizer on organic carbon pools and crop yields in a Mollisol. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14: 854-859.
- [18] DING X L, LIANG C, ZHANG B, YUAN Y R, HAN X Z. Higher rates of manure application lead to greater accumulation of both fungal and bacterial residues in macroaggregates of a clay soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 84: 137-146.
- [19] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 李海波. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响. *中国农业科学*, 2011, 44(17): 3536-3574.
- LIANG Y, HAN X Z, SONG C, LI H B. Impacts of returning organic materials on soil labile organic carbon fractions redistribution of mollisol in northeast china. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(17): 3536-3574. (in Chinese)
- [20] JIANG H, HAN X Z, ZOU W X, HAO X X, ZHANG B. Seasonal and long-term changes in soil physical properties and organic carbon fractions as affected by manure application rates in the Mollisol region of Northeast China. *Agricultural, Ecosystems and Environment*, 2018, 268: 133-143.
- [21] DING X L, HAN X Z, ZHANG X D. Long-term impacts of manure, straw, and fertilizer on amino sugars in a silty clay loam soil under temperate conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49: 949-954.
- [22] 矫丽娜, 李志洪, 殷程程, 王晓飞, 辛士颖, 于磊. 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响. *土壤学报*, 2015, 52(3): 665-673.
- JIAO L N, LI Z H, YIN C C, WANG X F, XIN S Y, YU L. Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 665-673. (in Chinese)
- [23] 白伟, 张立祯, 逢焕成, 牛世伟, 蔡倩, 孙占祥, 安景文. 秸秆还田配施氮肥对春玉米水氮利用效率的影响. *华北农学报*, 2018, 33(2): 224-231.
- BAI W, ZHANG L Z, PANG H C, NIU S W, CAI Q, SUN Z X, AN J W. Effects of straw returning plus nitrogen fertilizer on water use efficiency and nitrogen use efficiency of spring maize in Northeast China. *Acta Agricultural Boreal-Sinica*, 2018, 33(2): 224-231. (in Chinese)
- [24] 田肖肖, 吕慎强, 张亮, 李娜, 孙晓, 景建元, 王林权, 李厚华. 免耕覆盖有效提高夏玉米产量及水氮利用效率. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 606-614.
- TIAN X X, LÜ S Q, ZHANG L, LI N, SUN X, JING J Y, WANG L Q, LI H H. No-tillage with straw mulching could increase grain yield, water and nitrogen use efficiencies of summer maize. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(3): 606-614. (in Chinese)
- [25] LU X J, LI Z Z, SUN Z H, B Q G. Straw mulching reduces maize yield, water, and nitrogen use in Northeast China. *Agronomy Journal*, 2015, 107(1): 406-414.
- [26] 周珂, 王晓军, 李华芝, 徐欣, 高洪生, 焦晓光. 秸秆深埋条件下不同施氮水平对玉米产量和氮吸收利用的影响. *中国农学通报*, 2019, 35(33): 6-11.
- ZHOU K, WANG X J, LI H Z, XU X, GAO H S, JIAO X G. The effects of different nitrogen application levels on maize yield and the absorption and utilization of nitrogen under straw deep burial. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(33): 6-11. (in Chinese)
- [27] 丁文成, 李书田, 黄绍敏. 氮肥管理和秸秆腐熟剂对 ^{15}N 标记玉米秸秆氮有效性去向的影响. *中国农业科学*, 2016, 49(14): 2725-2736.
- DING W C, LI S T, HUANG S M. Bioavailability and fate of nitrogen from ^{15}N -labeled corn straw as affected by nitrogen management and straw microbial inoculants. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(14): 2725-2736. (in Chinese)
- [28] 韩晓增, 邹文秀, 陆欣春, 丁素荣, 尤孟阳, 严君, 陈旭, 周学超.

- 利用牛粪和黑土构建肥沃耕层对沙性土壤有机质及养分含量的短期影响. 2018, 7(4): 456-464.
- HAN X Z, ZOU W X, LU X C, DING S R, YOU M Y, YAN J, CHEN X, ZHOU X C. The contents of soil organic matter and nutrients as impacted by constructing fertile cultivated layers of sandy soil using cow dung and black soil in a short term experiment. *Soils and Crops*, 2018, 7(4): 456-464. (in Chinese)
- [29] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 陈旭, 郝翔翔. 玉米秸秆混合还田深度对土壤有机质及养分含量的影响. 土壤与作物, 2018, 7(2): 139-147.
- ZOU W X, HAN X Z, LU X C, CHEN X, HAO X X. Responses of soil organic matter and nutrients contents to corn stalk incorporated into different soil depths. *Soil and Crops*, 2018, 7(2): 139-147. (in Chinese)
- [30] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 郝翔翔, 尤孟阳, 张一鹤. 施入不同土层的秸秆腐殖化特征及对玉米产量的影响. 应用生态学报, 2017, 28(2): 563-570.
- ZOU W X, HAN X Z, LU X C, HAO X X, YOU M Y, ZHANG Y H. Effects of straw incorporated to different locations in soil profile on straw humification coefficient and maize yield. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 563-570. (in Chinese)
- [31] 许国伟, 李帅, 赵永芳, 陈明灿, 李友军. 秸秆还田与施氮对水稻根系分泌物及氮素利用的影响研究. 草业学报, 2014, 23(2): 140-160.
- XU G W, LI S, ZHAO Y F, CHEN M C, LI Y J. Effect of straw returning and nitrogen fertilizer application root secretion and nitrogen utilization of rice. *Acta prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 140-160. (in Chinese)
- [32] 郑金玉, 刘武仁, 罗洋, 郑洪兵, 李瑞平. 秸秆还田对玉米生长发育及产量的影响. 吉林农业科学, 2014, 39(2): 42-46.
- ZHENG J Y, LIU W R, LUO Y, ZHENG H B, LI R P. Effects of straws returned into field on growth and development and yield of maize. *Journal of Jinlin Agricultural Sciences*, 2014, 39(2): 42-46. (in Chinese)
- [33] DUAN Y H, XU M G, WANG B R, YANG X M, HUANG S M, GAO S D. Long-term evaluation of manure application on maize yield and nitrogen use efficiency in China. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75: 1562-1573.
- [34] SALEQUE M A, ABEDIN M J, BHUIYAN N I, ZAMAN G M, PANSULLAH G M, PANAULLAH G M. Long-term effects of inorganic and organic fertilizer sources on yield and nutrient accumulation of lowland rice. *Field Crop Research*, 2004, 86: 53-65.
- [35] 于晓芳, 高聚林, 张峰, 胡树平, 孙继颖, 王志刚, 谢岷. 深翻对耕层土壤物理特性及超高产春玉米根系垂直分布的影响. 内蒙古农业科技, 2015(2): 19-21.
- YU X F, GAO J L, ZHAGN F, HU S P, SUN J Y, WANG Z G, XIE M. The effect of moldboard plow on soil physical properties and the root vertical distribution of super-high yield maize. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2015(2): 19-21. (in Chinese)
- [36] 齐华, 刘明, 张卫健, 张振平, 李雪霏, 宋振伟, 丁吉琳, 吴亚男. 深松方式对土壤物理性状及玉米根系分布的影响. 华北农学报, 2012, 27(4): 191-196.
- QI H, LIU M, ZHANG W J, ZHANG Z P, LI X J, SONG Z W, DING J L, WU Y N. Effect of deep loosening mode on soil physical characteristics and maize root distribution. *Acta Agricultural Boreal-Sinica*, 2012, 27(4): 191-196. (in Chinese)
- [37] 陈强, Yuriy S Kravchenko, 陈渊, 李续峰, 李浩, 宋春雨, 张兴义. 少免耕土壤结构与导水能力的季节变化及其保水效果. 土壤学报, 2014, 51(1): 11-21.
- CHEN Q, YURIY S K, CHEN Y, LI X F, LI H, SONG C Y, ZHANG X Y. Seasonal variations of soil structures and hydraulic conductivities and their effects on soil and water conservation under no-tillage and reduced tillage. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 11-21. (in Chinese)
- [38] 雷金银, 吴发启, 王健, 郭建华. 保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响. 农业工程学报, 2008, 24(10): 40-45.
- LEI J Y, WU F Q, WANG J, GUO J H. Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(10): 40-45. (in Chinese)
- [39] MÁRCIORN R N, JOSÉ E D, ELOY A P, FAGANELLO A, PINTO L F S. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no tillage. *Geoderma*, 2015, 259/260: 149-155.
- [40] ZHANG Y L, LI C H, WANG Y W, HU Y M, CHRISTIE P, ZHANG J L. Maize yield and soil fertility with combined use of compost and inorganic fertilizers on a calcareous soil on the North China Plain. *Soil & Tillage Research*, 2016, 155: 85-94.
- [41] GENG Y H, CAO G J, WANG L C, WANG S H. Effects of equal chemical fertilizer substitutions with organic manure on yield, dry matter, and nitrogen uptake of spring maize and soil nitrogen distribution. *PloS One*, e0219512.
- [42] ALLETTO L, POT V, GIULIANO S, COSTES M, PERDRIEUX F, JUSTES E. Temporal variation in soil physical properties improves the water dynamics modeling in a conventional-tilled soil. *Geoderma*, 2015, 243: 18-28.
- [43] WEN Z H, SHEN J B, MARTIN B, LI H G, ZHAO B Q, YUAN H M. Combined applications of nitrogen and phosphorus fertilizers with

- manure increase maize yield and nutrient uptake via stimulating root growth in a long-term experiment. *Pedosphere*, 2016, 26(1): 62-73.
- [44] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 杨波, 任天志, 王洪媛, 武淑霞, 雷秋良. 长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响. *中国农业科学*, 2018, 51(12): 2336-2347.
- GAI X P, LIU H B, ZHAI L M, YANG B, REN T Z, WANG H Y, WU S X, LEI Q L. Effects of long-term additional application of organic manure or straw incorporation on soil nitrogen leaching risk. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(12): 2336-2347. (in Chinese)
- [45] BHOGAL A, YOUNG S D, SYLVESTER-BRADLEY R. Straw incorporation and immobilization of spring-applied nitrogen. *Soil Use and Management*, 1997, 13: 111-116.
- [46] 孙波, 陆雅海, 张旭东, 卢升高, 韦革宏, 杨劲松, 朱安宁, 刘满强, 段英华. 耕地地力对化肥养分利用的影响机制及其调控研究进展. *土壤*, 2017, 49(2): 209-216.
- SUN B, LU Y H, ZHANG X D, LU S G, WEI G H, YANG J S, ZHU A N, LIU M Q, DUAN Y H. Research progress on impact mechanisms of cultivated land fertility on nutrient use of chemical fertilizers and their regulation. *Soils*, 2017, 49(2): 209-216. (in Chinese)
- [47] 韩晓增, 邹文秀. 我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 206-212.
- HAN X Z, ZOU W X. Effects and suggestions of black soil protection and soil fertility increase in Northeast China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 206-212. (in Chinese)
- [48] DONG J, HENGSDIJK H, TING-BO D, BOER W, QI J, CAO W X. Long-term effects of manure and inorganic fertilizers on yield and soil fertility for a winter wheat-maize system in Jiangsu, China. *Pedosphere*, 2006, 16: 25-32.
- [49] 王振华, 曹国军, 耿玉辉, 李佳, 张萌. 不同农业废弃物还田对玉米氮素利用及氮平衡的影响. *中国农学通报*, 2015, 31(23): 127-133.
- WANG Z H, CAO G J, GENG Y H, LI J, ZHANG M. Effect of different agricultural wastes returning to field on the absorption and utilization of nitrogen and nitrogen balance of maize. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(23): 127-133. (in Chinese)
- [50] 刘红亮, 李凤海, 步蕴法, 刘国玲, 曹殿云. 不同耕作方式对土壤物理性状及玉米生长发育的影响. *江苏农业科学*, 2017, 45(8): 52-54.
- LIU H L, LI F H, BU Y F, LIU G L, CAO D Y. The effect of tillage practices on soil physical properties and maize yield. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(8): 52-54. (in Chinese)
- [51] AHMAD N, HASSAN F U, BELFORD R K. Effect of soil compaction in the sub-humid cropping environment in Pakistan on uptake of NPK and grain yield in wheat (*Triticum aestivum*): I. Compaction. *Field Crops Research*, 2009, 110(1): 54-60.
- (责任编辑 李云霞)