

# 不同耕作模式对小麦—玉米轮作下潮土养分和作物产量的影响

龙潜, 董士刚, 朱长伟, 刘芳, 姜桂英, 申凤敏, 刘世亮

(河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

**摘要:** 通过分析裂区设计下的6个处理, 即小麦季深耕和旋耕2个主处理 $\times$ 玉米季免耕播种、行间深松和行内深松3个副处理: (1) 旋耕+免耕播种(RT-NT); (2) 旋耕+行间深松(RT-SBR); (3) 旋耕+行内深松(RT-SIR); (4) 深耕+免耕播种(DT-NT); (5) 深耕+行间深松(DT-SBR); (6) 深耕+行内深松(DT-SIR), 对土壤养分含量和作物产量影响, 筛选适宜于小麦—玉米轮作体系的耕作模式。结果表明, 各处理土壤养分含量在小麦、玉米两季中均随土层深度增加而降低。小麦季, 旋耕处理0—10 cm 土层土壤全氮、碱解氮、有效磷含量、硝态氮含量显著高于深耕处理; 但深耕增加当季30—40 cm 土层土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、硝态氮、铵态氮含量。玉米季, DT-NT处理0—30 cm 土层有机质含量较RT-NT处理增加40.1%~64.3%。RT-SBR、RT-SIR处理显著提升土壤0—30 cm 全氮含量, 其中RT-SBR处理0—10 cm 土层全氮含量最高, 为1.4 g/kg。RT-SIR处理显著增加0—20 cm 土壤碱解氮含量, 较RT-NT显著增加15.0%~25.3%。在0—40 cm 土层, DT-SBR处理的有效磷含量最高, 而RT-SBR处理的速效钾含量最高。DT-SIR处理显著提升20—50 cm 土层硝态氮和铵态氮含量, 其中硝态氮含量为8.5~30.4 mg/kg, 铵态氮含量为2.6~8.9 mg/kg。与小麦季相比, 玉米季提升10—20 cm 土层有机质含量、0—50 cm 土层的碱解氮、有效磷、速效钾含量以及40—50 cm 土层的硝态氮、铵态氮含量。DT-SBR和DT-SIR处理穗长、百粒重、收获指数和产量显著高于其他处理, 且二者产量较RT-NT处理显著增加6.4%~10.8%。玉米季DT-SIR处理的肥料偏利用率和经济效益最高。综上所述, 深耕+行内深松处理有利于增加土壤养分含量, 且增产效果较好, 在本研究中最优。

**关键词:** 潮土; 深松; 轮耕; 土壤养分; 产量

中图分类号: S158.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0167-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.04.024

## Effects of Different Tillage Modes on Soil Nutrient and Crop Yield Under Wheat-Maize Rotation System in the Fluvo-aquic Soil

LONG Qian, DONG Shigang, ZHU Changwei, LIU Fang,

JIANG Guiying, SHEN Fengmin, LIU Shiliang

(College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002)

**Abstract:** The objective of this study was to select the optimum tillage pattern through studying the effect of the different tillage patterns on the soil nutrient and crop yield. The field experiment was conducted with split plot design with six treatments: two main treatments with rotary tillage and deep tillage in wheat season, combined with three subsidiary treatments with no-tillage sowing, subsoiling between the row and subsoiling in the row in maize season, including (1) rotary tillage + no-tillage sowing (RT-NT); (2) rotary tillage + subsoiling between the row (RT-SBR); (3) rotary tillage + subsoiling in the row (RT-SIR); (4) deep tillage + no-tillage sowing (DT-NT); (5) deep tillage + subsoiling between the row (DT-SBR); (6) deep tillage + subsoiling in the row (DT-SIR). The results showed that, all the soil nutrient contents decreased with soil depths in both wheat and maize seasons. In wheat season, the total nitrogen (TN), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ) contents under rotary tillage treatments were significantly higher than those under deep tillage treatments; while, the soil organic matter (SOM), TN, AN, AP,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , and ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ) contents in

收稿日期: 2019-02-16

资助项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFD0300803); 国家自然科学基金项目(41401327); 中国农业科学院开放基金项目(2015)

第一作者: 龙潜(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤耕作及养分调控研究。E-mail: 415153121@qq.com

通信作者: 姜桂英(1983—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土壤肥力演变及土壤培肥研究。E-mail: jgy9090@126.com

刘世亮(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事作物栽培及生理调控研究。E-mail: shlliu70@163.com

30—40 cm was increased under deep tillage treatments. In maize season, the SOM content in 0—30 cm under DT—NT treatment was increased by 40.1%~64.3% compared with RT—NT treatment. The TN content in 0—30 cm was increased under RT—SBR and RT—SIR treatment, with the highest value of 1.4 g/kg in 0—10 cm under RT—SBR treatment. The AN content was increased by 15.0%~25.3% in 0—20 cm under RT—SIR treatment compared with RT—NT treatment. In 0—40 cm, the highest AP content was observed under DT—SBR treatment, and the highest available potassium (AK) content was under RT—SBR treatment. The  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  (8.5~30.4 mg/kg) and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  (2.6~8.9 mg/kg) contents in 20—50 cm under DT—SIR treatment were significantly higher than the others. Compared with the wheat season, the SOM in 10—20 cm, AN, AP and AK in 0—50 cm,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in 40—50 cm were increased in maize season. In maize season, the ear length, 100-grain weight, harvest index and yield under DT—SBR and DT—SIR were significantly higher than the others, and the yield was increased by 6.4%~10.8% under DT—SBR and DT—SIR compared with RT—NT treatment. The fertilizer partial productivity and economic benefit was highest under DT—SIR treatment in maize season. In sum, the soil nutrient contents and crop yield were improved under the DT—SIR treatment, which was suggested as the optimum practice in this study.

**Keywords:** fluvo-aquic soil; deep tillage; rotational tillage; soil nutrients; yield

优良的土壤结构是实现作物高产稳产的基础<sup>[1]</sup>, 土壤耕作能够直接作用于土壤, 通过改变土壤结构, 为作物创造良好的耕层环境, 从而促进养分转化和植株生长<sup>[2]</sup>。作为我国粮食主产区, 小麦—玉米轮作是黄淮海平原主要的种植制度, 目前普遍采用小麦季播种前旋耕或少耕整地, 玉米季免耕播种的栽培措施。这种长期旋耕、少耕的耕作模式, 造成该地区耕层变浅, 犁底层上升, 结构性变差, 进而导致作物产量降低<sup>[3-6]</sup>。而长期深耕会导致机械压实严重, 成本投入加大等问题, 不利于作物持续生产<sup>[1]</sup>。针对连续单一耕作模式存在的问题, 国内研究人员<sup>[7-8]</sup>提出轮耕概念并建立了适用于不同区域的土壤轮耕技术体系。有研究<sup>[9]</sup>推荐在黄淮海平原小麦—玉米轮作区进行小麦季和玉米季均深松的年内轮耕模式。但玉米季深松方式目前使用较少; 另一方面, 玉米季深松后, 玉米的播种方式也会在一定程度上影响土样养分周转和作物生长。因此研究不同轮耕模式及玉米播种方式, 对土壤养分和作物产量影响及筛选适宜的耕种栽培模式具有重要意义。

针对长期单一耕作模式带来的不利影响, 轮耕作为重要的解决方法, 在不同土壤类型中已有大量研究。包括不同轮耕模式对土壤养分和产量的影响, 但得出的结论不尽相同。张洋等<sup>[10]</sup>研究认为, 在东北黑土区免耕加深松的轮耕模式能够有效增加犁底层以下的土壤氮磷钾和有机质含量; 王平等<sup>[11]</sup>在半干旱黄土丘陵区的研究认为, 深松、免耕及深松轮耕的轮耕模式有利于改善耕层结构和提高土壤养分, 增产增效显著; 而 López-Fand 等<sup>[12]</sup>17 年定位试验结果表明, 免耕增加 0—30 cm 土层有机碳积累, 其中对 0—5 cm 土层影响明显, 较少耕和翻耕分别增加 5.8, 7.6 mg/hm<sup>2</sup>; 侯贤清等<sup>[13]</sup>指出, 3 年轮耕处理较传统耕

作增加土壤有机质和全氮含量, 且对表层影响较大, 同时具有增产效应; 聂良鹏等<sup>[14]</sup>研究表明, 在小麦—玉米两熟农田中, 小麦季和玉米季分别深松, 小麦和玉米周年产量显著升高。目前的研究大多集中在玉米免耕条件下进行的小麦不同耕作方式比较, 缺乏玉米季不同耕作方式的轮耕模式比较, 不能确定小麦—玉米种植制度下最优的轮耕组合。因此, 研究不同轮耕模式对土壤养分含量及作物产量的影响, 探求改善耕层构造, 提高作物产量的适宜轮耕模式, 以期为该地区建立改善农田耕层构造和提高作物产量的轮耕模式提供理论依据及技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2016—2017 年在河南省原阳县河南农业大学科教园区进行。试验区属暖温带大陆性季风气候, 年均气温为 14.5 °C, 年降水量 615 mm, 年日照时间 2 324 h。当地轮作模式为典型的小麦—玉米轮作, 供试土壤为砂质潮土。试验前 0—20 cm 土层基础理化性质为: 有机质含量 17.3 g/kg, 全氮含量 1.25 g/kg, 碱解氮含量 50.2 mg/kg, 有效磷含量 21.6 mg/kg, 速效钾含量 108.0 mg/kg, pH 7.2。

### 1.2 试验设计

试验采用大田小区试验, 裂区设计, 小麦季设旋耕和深耕 2 个主处理, 玉米季设免耕播种、深松后行内播种和深松后行间播种 3 个副处理, 共 6 个处理, 每个处理 3 个重复, 小区面积为 203.5 m<sup>2</sup> (5.5 m × 37 m)。具体处理编号见表 1。

机械作业过程为: (1) 旋耕, 玉米收获后, 秸秆灭茬粉碎 1~2 遍, 旋耕机整地 2 遍, 深度 13~15 cm, 常规播种小麦; (2) 深耕, 玉米收获后, 秸秆灭茬粉碎

1~2 遍,铧式犁耕翻 1 遍,深度 28~30 cm,旋耕机整地 2 遍,深度 15~18 cm,常规播种小麦。

表 1 各处理编号		
处理	小麦季耕作	玉米季耕作
RT-NT	旋耕	免耕
RT-SBR	旋耕	行间深松
RT-SIR	旋耕	行内深松
DT-NT	深耕	免耕
DT-SBR	深耕	行间深松
DT-SIR	深耕	行内深松

表 2 小麦和玉米播种量与施肥情况

作物	品种	氮 N/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	磷 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / (kg·hm <sup>-2</sup> )	钾 K <sub>2</sub> O/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	播种量/ (株·hm <sup>-2</sup> )
小麦	“郑麦 369”	219	120	120	232.5
玉米	“浚单 29”	210	75	90	67500

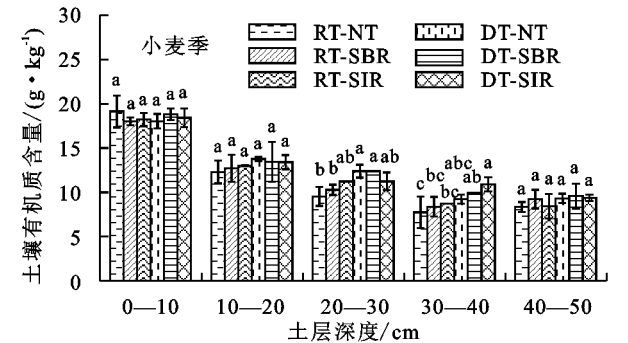
注:小麦播种量为 232.5 kg/hm<sup>2</sup>;玉米播种量为 67 500 株/hm<sup>2</sup>。

1.3 取样与测定方法

于 2017 年 6 月小麦成熟期和 2017 年 10 月玉米成熟期按照“五点”取样法取 0—10,10—20,20—30,30—40,40—50 cm 5 个层次的土壤。鲜土样除去肉眼可见植物残体和石块,置于冰箱中保存用于测定硝态氮和铵态氮含量。土样风干过 10 目和 60 目筛进行速效养分指标和全氮、有机质含量的测定。常规化学指标测定参考鲍士旦的《土壤农化分析》<sup>[15]</sup>:土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;硝态氮和铵态氮含量采用连续流动分析仪法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷含量采用钒钼蓝比色法测定;速效钾含量采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提火焰光度计法测定。

调查小麦和玉米不同处理下产量和产量主要构成因素及经济指数。

肥料偏生产力( $PE, \text{kg/kg}$ ) = 施(氮/磷/钾)区产量/施(氮/磷/钾)量



玉米季机械操作过程为:(1)玉米免耕播种,小麦机械收获后小麦秸秆全量还田,使用玉米免耕播种机进行种肥同播直接贴茬播种玉米;(2)行间深松,小麦机械收获后小麦秸秆全量还田,使用深松机进行田间深松作业,然后玉米播种机进行种肥同播在深松沟间播种玉米;(3)行内深松,小麦机械收获后小麦秸秆全量还田,使用深松机进行田间深松作业,然后玉米播种机进行种肥同播在深松沟中间播种玉米。深松深度为 35 cm 左右,深松行距为 61.33 cm,玉米株距为 21.91 cm。小麦和玉米播种量与施肥情况见表 2。

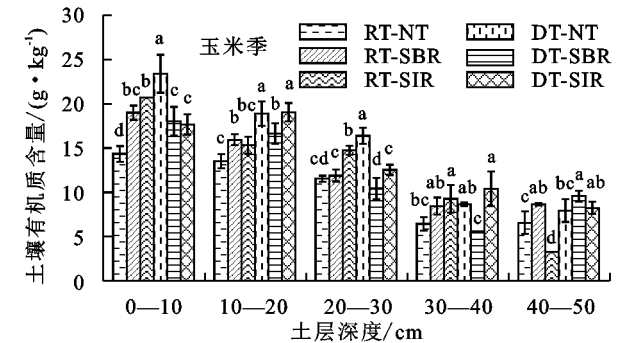
1.4 数据统计

采用 Microsoft Excel 2007 软件录入与整理数据,使用软件 SPSS 20 软件的最小显著极差法(LSD)进行多重比较,采用 Origin Pro 8.5 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理不同土层土壤有机质含量

整体来看,各处理土壤有机质含量在两季中均随土层深度的增加而降低(图 1);与小麦季相比,玉米季 10—20 cm 土层土壤有机质含量呈上升趋势,其余土层不同处理呈现不同趋势。在小麦季,各处理土壤有机质含量在 0—20,40—50 cm 土层均差异不显著。而在 20—40 cm 土层,DT-NT 和 DT-SBR 处理土壤有机质含量显著高于 RT-NT 和 RT-SBR 处理。在玉米季 0—30 cm 土层,DT-NT 处理均较 RT-NT 显著增加土壤有机质含量,为 16.4~23.4 g/kg。30—50 cm 土层各处理呈现不同差异,无明显规律。总体而言,DT-NT 处理有利于提升表层土壤有机质含量。



注:图中不同小写字母表示同一层次不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

图 1 不同处理不同土层土壤有机质含量

2.2 不同处理不同土层土壤全氮含量

整体来看,各处理土壤全氮含量在两季中均随土层深度的增加而降低(图 2)。玉米季 20—50 cm 土

层土壤全氮含量较小麦季有所增加。在小麦季,0—10 cm 土层旋耕处理(RT-NT、RT-SBR 和 RT-SIR)全氮含量显著高于深耕处理(DT-NT、DT-



SBR 和 DT-SIR), 30—40 cm 土层呈现相反趋势。在玉米季, 0—10, 10—20 cm 土层, RT-SBR 处理全氮含量最高, 为 1.1~1.4 g/kg, 较 RT-NT 显著增加 8.5%, 20.1%。20—40 cm 土层 RT-SIR 处理土

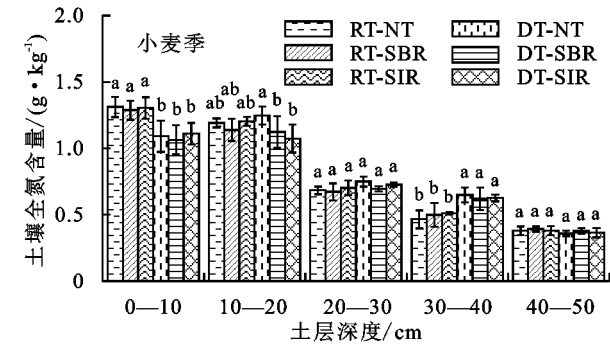


图 2 不同处理不同土层土壤全氮含量

2.3 不同处理不同层次土壤速效养分含量

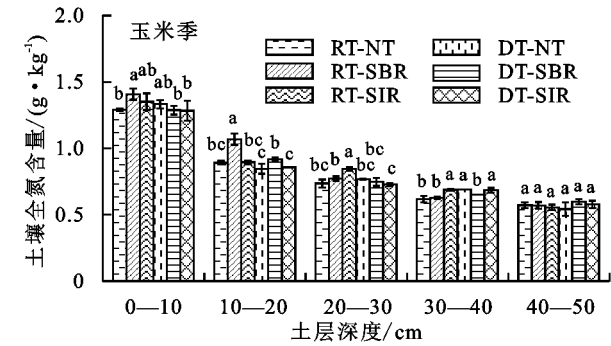
各处理土壤碱解氮含量在两季中均随土层深度增加而降低(图 3a); 与小麦季相比, 玉米季碱解氮含量各土层均呈上升趋势。在小麦季, 0—10 cm 土层 RT-SBR 和 RT-SIR 处理土壤碱解氮含量高于 DT-NT、DT-SBR 和 DT-SIR 处理; 而在 20—40 cm 土层 DT-SBR 和 DT-SIR 处理土壤碱解氮含量高于 RT-NT 和 RT-SBR 处理。在玉米季, 0—20 cm 土层, 其他处理土壤碱解氮含量均显著高于 RT-NT, 其中 RT-SIR 处理含量最高, 为 92.4~119.1 mg/kg, 较 RT-NT 增加 15.0%~25.3%。20—40 cm 土层 DT-SIR 处理土壤碱解氮含量显著高于其他处理, 为 55.5~73.6 mg/kg, 较 RT-NT 显著增加 29.8%。总体来看, RT-SIR 处理和 DT-SIR 处理有利于增加土壤碱解氮含量。

各处理土壤有效磷含量在两季中均随土层深度增加而降低(图 3b); 与小麦季相比, 玉米季各土层土壤有效磷含量均呈上升趋势。在小麦季, 10—20 cm 土层 RT-NT 和 RT-SBR 处理土壤有效磷含量显著高于 DT-NT 和 DT-SBR 处理, 30—50 cm 土层深耕处理(DT-NT、DT-SBR 和 DT-SIR)土壤有效磷含量显著高于旋耕处理(RT-NT、RT-SBR 和 RT-SIR)。在玉米季, 0—50 cm 土层, DT-SBR 处理土壤有效磷含量均表现较高, 其中在 0—10 cm 含量最高, 为 42.9 mg/kg。可见, DT-SBR 处理有利于增加土壤速效磷含量。

与小麦季相比, 各处理土壤速效钾含量在玉米季均呈上升趋势(图 3c)。在小麦季, 0—10 cm 土层 RT-SBR 处理土壤速效钾含量显著高于深耕处理(DT-NT、DT-SBR 和 DT-SIR)处理, 为 128.9 mg/kg; 10—30 cm 土层, DT-NT、DT-SIR 处理土壤速效钾含量显著高于 RT-SIR 处理。在玉米季, 0—10 cm 土层小麦季旋耕(RT-NT、RT-SBR 和 RT-SIR)处理速效钾含量显著高于深耕(DT-NT、DT-SBR 和 DT-SIR)处理, 达到 132.3~139.5

壤全氮含量达到 0.69~0.85 g/kg, 较 RT-NT 显著增加 11.3%~14.8%。

整体而言, RT-SBR 处理和 RT-SIR 处理有利于提高土壤全氮含量。



mg/kg; 在 10—40 cm 土层 RT-SBR 处理含量最高, 速效钾含量范围为 76.7~103.4 mg/kg, 较 RT-NT 显著增加 24%~43.4%。总体而言, RT-SBR 处理有利于提升土壤速效钾含量。

2.4 不同处理不同层次土壤硝态氮、铵态氮含量

各处理土壤硝态氮含量在两季均呈现随土层深度增加而下降的趋势(图 4a)。玉米季深层(30—50 cm)硝态氮含量大于小麦季。在小麦季, 0—20 cm 土层土壤硝态氮含量旋耕处理(RT-NT、RT-SBR 和 RT-SIR)显著高于深耕处理(DT-NT、DT-SBR 和 DT-SIR); 20—40 cm 土层则相反。在玉米季, 0—10 cm 土层 DT-NT 处理硝态氮含量最高, 达到 41.0 mg/kg。10—50 cm 土层 DT-SIR 处理土壤硝态氮含量最高, 达到 8.5~30.4 mg/kg, 显著高于 RT-NT。总体而言, DT-SIR 处理有利于增加土壤硝态氮含量。

各处理土壤铵态氮含量在两季均随土层深度增加下降(图 4b)。小麦季 0—20 cm 土层土壤铵态氮含量高于玉米季, 但是玉米季 40—50 cm 土层土壤铵态氮含量高于小麦季。在小麦季, 0—10 cm 土层旋耕处理(RT-NT、RT-SBR 和 RT-SIR)铵态氮含量显著高于深耕处理(DT-NT、DT-SBR 和 DT-SIR), 10—40 cm 土层深耕处理铵态氮含量显著高于旋耕处理。在玉米季, 0—10 cm 土层 RT-NT 处理铵态氮含量显著高于其他处理, 为 20.2 mg/kg。10—20 cm 土层 DT-NT 处理土壤铵态氮含量最高, 达到了 11.7 mg/kg。玉米季 20—50 cm 土层 DT-SIR 处理铵态氮含量达到 2.6~8.9 mg/kg, 较 RT-NT 显著增加 5%~25%。整体而言, DT-SIR 处理有利于增加土壤铵态氮含量。

2.5 不同处理作物产量

旋耕处理小麦产量整体高于深耕处理小麦产量(表 3), 其中 RT-NT 处理的产量显著高于其他处理, 达 7 384 kg/hm<sup>2</sup>。旋耕处理亩穗数和穗粒数整

体高于深耕处理,小穗数、收获指数呈现不同差异,无

显著性规律,各处理千粒重差异不显著。

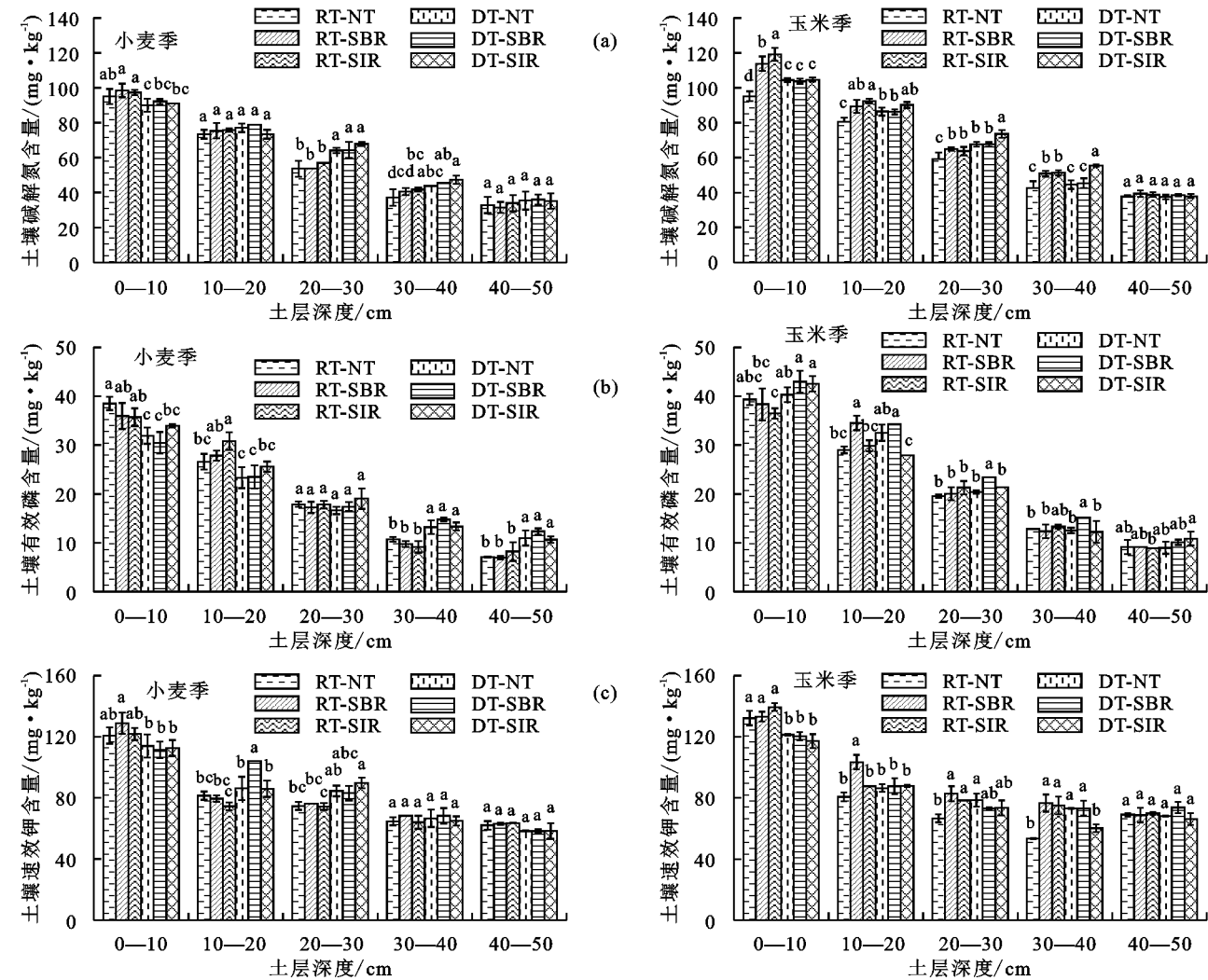


图3 不同处理不同土层土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量

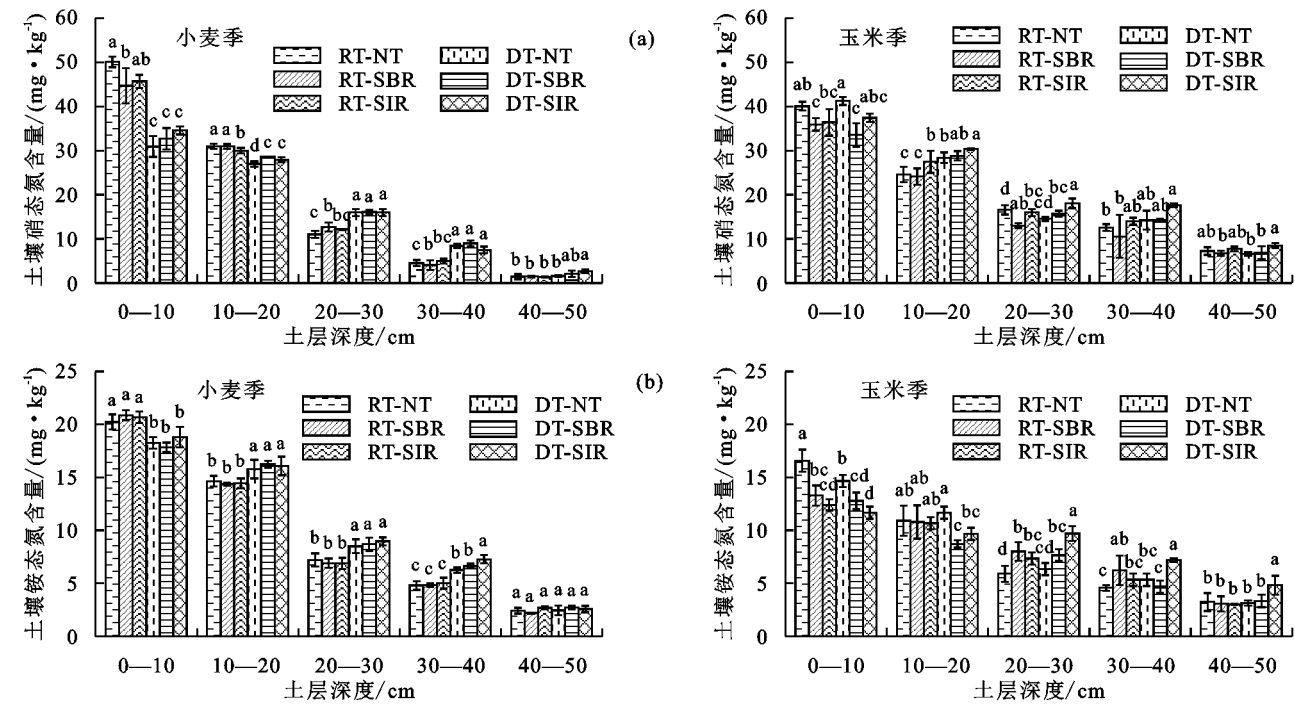


图4 不同处理不同土层土壤硝态氮和铵态氮含量

DT-SBR、DT-SIR 处理产量最高(表4),达到 12 098~12 595 kg/hm<sup>2</sup>,显著高于 RT-NT、RT-SIR、

DT—NT 处理,较 RT—NT 处理显著提高 6.4%~10.8%。DT—SIR 处理穗长、百粒重、收获指数较 RT—NT 分别显著增加 6.59%,3.52%,17.95%。行数和穗粗各处理间差异不显著。整体而言,DT—SBR 和 DT—SIR 处理对玉米产量提升最为明显。

表 3 小麦产量及产量构成因素

处理	亩穗数/10 <sup>4</sup> 穗	小穗数/穗	穗粒数/穗	千粒重/g	收获指数	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
RT—NT	49.59±1.98a	15±1ab	31±3a	50.53±2.41a	0.36±0.02a	7384±677a
RT—SBR	38.21±1.34c	16±1ab	30±3ab	49.96±2.84a	0.32±0.01ab	6512±52b
RT—SIR	38.68±1.61c	14±1bc	28±2ab	51.44±3.02a	0.36±0.01a	6321±280b
DT—NT	37.97±0.87c	13±1c	26±3ab	49.36±2.75a	0.36±0.04a	5175±291c
DT—SBR	49.07±2.10a	15±1ab	25±2b	50.72±2.40a	0.35±0.01a	5468±703c
DT—SIR	43.29±2.25b	16±1a	29±3ab	49.49±2.20a	0.31±0.01b	6266±254b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示各处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

表 4 玉米产量及产量构成因素

处理	行数/行	穗粗/cm	穗长/cm	百粒重/g	收获指数	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
RT—NT	14.33±1.55a	15.57±0.70ab	15.93±0.75b	34.39±0.69bc	0.39±0.02b	11371±268bc
RT—SBR	14.80±1.05a	14.88±0.30b	15.91±0.89b	33.09±0.43d	0.40±0.04b	11531±895bc
RT—SIR	14.00±0.35a	14.81±0.61b	15.64±0.43b	33.31±0.95cd	0.40±0.01b	10766±485c
DT—NT	15.27±0.90a	15.54±0.07ab	15.88±0.69b	32.29±0.12d	0.42±0.01ab	10925±538c
DT—SBR	14.13±0.61a	15.84±0.75ab	16.17±0.44ab	35.29±0.36ab	0.42±0.01ab	12098±490ab
DT—SIR	14.93±0.83a	17.68±2.98a	16.98±0.50a	35.60±0.50a	0.46±0.01a	12596±314a

2.6 不同处理肥料偏生产力

总体来看,小麦季和玉米季磷钾肥偏生产力高于氮肥(图 5)。在小麦季,旋耕处理的肥料偏生产力高于 DT—NT、DT—SBR 处理,但在玉米季,DT—SIR 处理肥料偏生产力显著高于 RT—NT、RT—SBR、RT—SIR、DT—NT 处理。总体来说,DT—SIR 处理能明显提高肥料偏生产力。

2.7 不同处理经济效益

在小麦季,旋耕(RT—NT、RT—SBR、RT—SIR)处理收益高于深耕(DT—NT、DT—SBR 和 DT—SIR)处理,但是玉米季收益 DT—SIR 处理高于其他处理(表 5)。整体来看,RT—NT、DT—SIR 处理在 1 个轮作周期内收益最高。

3 讨论

3.1 不同轮耕模式对土壤养分的影响

土壤有机质是土壤肥力的重要指标,有机质含量增加可增强土壤保肥、供肥能力,提高养分有效性<sup>[16-17]</sup>。全氮含量是土壤各形态氮素含量之和,一定程度上可表达土壤的供氮水平。有研究<sup>[18]</sup>表明,耕作方式直接通过改变土壤结构影响土壤养分转化,进而影响土壤肥力变化。连续免耕促使有机质在土壤表层积累,而下层养分减少,轮耕则有利于均衡养分在土层间的分布,避免养分富集现象<sup>[19]</sup>。王靖等<sup>[16]</sup>研究表明,免耕条件下土壤养分积累主要体现在土壤表层,耕层积累较少,而深松处理不仅能提高表层土壤养分含量,还能打破犁底层,降低土壤容重,增加土壤通透性,有利于养分向耕层以下分布,提高

耕层以下养分含量。

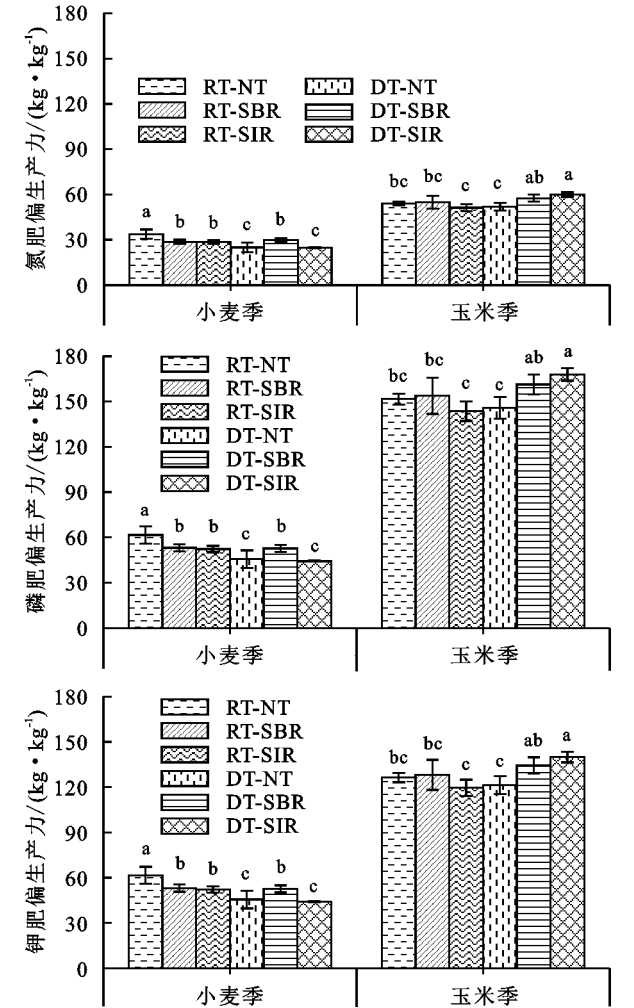


图 5 不同处理氮、磷、钾肥料偏生产力



本研究发现,深耕—免耕和深耕—行内深松相对常规的旋耕—免耕能够有效增加 0—50 cm 土层土壤有机质含量,其中以深耕—免耕处理效果最优,这与侯贤清等<sup>[13]</sup>的研究结果基本一致。许多研究<sup>[20-23]</sup>表明,在秸秆还田下的条件下进行深松可有效增加土壤有机质含量。本研究得出,在小麦季旋耕条件下,玉米季进行深松显著增加 0—40 cm 土层有机质含量,其中行内深松效果最为显著。但是在小麦季深耕条件下,玉米季免耕 0—30 cm 土层有机质含量高于深松处理,30—50 cm 土层深松处理有机质含量高于免

耕。可能原因是玉米季免耕施肥导致大量养分聚集于表层的影响。

本研究中,旋耕—深松处理相比于旋耕—免耕处理显著增加了土壤 0—40 cm 土层土壤全氮含量,且在 0—30 cm 土层显著高于深耕处理。其中行内深松和行间深松分别在 0—20,20—40 cm 表现显著。与侯贤清等<sup>[13]</sup>和王玉玲等<sup>[24]</sup>的研究结果类似。究其原因可能是深耕扰动大,加速土壤氮的矿化损失;而旋耕、深松在改善土壤环境的同时,对土壤扰动较小,减少碳、氮的损失,有利于土壤氮固存<sup>[25-26]</sup>。

表 5 不同处理小麦季和玉米季经济收益

作物季节	处理	投入(元·hm <sup>-2</sup> )						产出(元·hm <sup>-2</sup> )			收益/ (元·hm <sup>-2</sup> )	整体收益/ (元·hm <sup>-2</sup> )
		种子	农药	化肥	燃油	人工	合计	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	单价/ (元·kg <sup>-1</sup> )	合计		
小麦季	RT-NT	1125	675	2040	525	900	5265	7388.75	2.3	16994.18	11726.16	
	RT-SBR	1125	675	2040	525	900	5265	6511.95	2.3	14975.78	9710.78	
	RT-SIR	1125	675	2040	525	900	5265	6321.40	2.3	14538.59	9273.59	
	DT-NT	1125	675	2040	600	975	5415	5171.79	2.3	11893.02	6478.02	
	DT-SBR	1125	675	2040	600	975	5415	5460.53	2.3	12558.22	7143.22	
	DT-SIR	1125	675	2040	600	975	5415	6255.72	2.3	14386.49	8971.49	
玉米季	RT-NT	450	600	1500	450	600	3600	11370.07	1.2	13644.09	10044.09	21770.25
	RT-SBR	450	600	1500	675	675	3900	11520.73	1.2	13824.88	9924.88	19635.66
	RT-SIR	450	600	1500	675	675	3900	10755.73	1.2	12906.88	9006.88	18280.47
	DT-NT	450	600	1500	450	600	3600	10920.33	1.2	13104.76	9604.76	16082.78
	DT-SBR	450	600	1500	675	675	3900	12090.63	1.2	14508.76	10608.76	17751.22
	DT-SIR	450	600	1500	675	675	3900	12585.73	1.2	15102.88	11202.88	20174.37

土壤速效养分含量是衡量土壤肥沃程度的重要指标,也是影响植物生长发育的关键因子。大量研究<sup>[24-26]</sup>表明,土壤耕作措施能够改变土壤的速效养分含量。贾凤梅等<sup>[9]</sup>在不同耕作条件下研究发现,深耕处理土壤有效磷、硝态氮、铵态氮含量均高于旋耕和免耕处理;王玉玲等<sup>[24]</sup>发现,“深松—翻耕”、“翻耕—翻耕—深松”和“免耕—翻耕—深松”轮耕模式均在增加土壤速效养分方面表现突出,尤其是“深松—翻耕”轮耕体系。本研究表明,玉米季深松能够显著增加土壤速效养分含量。行内深松有效增加 0—30 cm 土层土壤碱解氮含量,其中深耕—行内深松效果最为显著。行间深松有效提升土壤有效磷和速效钾含量,其中深耕—行间深松处理有效增加 20—40 cm 土层土壤有效磷含量,旋耕—行间深松显著提高 10—40 cm 土层土壤速效钾含量,与王玉玲等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。可能原因是,土壤在深松扰动下,提高土壤透气性,促进有机质分解,增加土壤中有效养分的含量<sup>[27]</sup>。与旋耕—免耕相比,小麦季深耕有效增加深层土的土壤硝态氮、铵态氮含量,其中深耕—行内深松播种明显提升 30—50 cm 土层的硝态氮、铵态氮含量,与前人<sup>[28]</sup>研究结果一致,深耕将肥料和秸秆混入土壤深处,增加深层土壤的硝态氮、铵态氮来源<sup>[26]</sup>。

国外较多开展少免耕耕作模式对土壤养分的影响研究<sup>[28-29]</sup>。而我国华北平原长期单一旋耕造成犁底层上移,耕层变浅,进而影响耕层结构和作物生长。为打破长期少免耕出现的犁底层,国内较多开展少免耕与深松、深耕组合的轮耕模式研究<sup>[30-31]</sup>。有研究<sup>[32]</sup>表明,深松能够打破犁底层,同时由于不翻动土壤,不会引起土壤养分的大量流失,覆盖分解秸秆,能够有效增加土壤养分。而 Pierce 等<sup>[33]</sup>研究认为,免耕与深松配合的轮耕模式,不利于改善下层土壤结构,土壤环境也受到影响。本研究中,深耕配合深松的轮耕模式有效增加下层土的土壤养分。但是深耕对土壤扰动较大,加速表层土壤有机物质的矿化,不利于上层土壤养分的积累<sup>[34-35]</sup>;同时深耕—行内深松操作较复杂,不易大面积推广。

3.2 不同轮耕模式对作物产量的影响

聂良鹏等<sup>[14]</sup>研究表明,小麦—玉米轮作下深耕比免耕处理能提高玉米季产量的增加;高飞等<sup>[36]</sup>在黏壤土质地上研究发现,小麦季深耕夏玉米免耕则比对照小麦旋耕玉米免耕产量增加显著。本研究表明,小麦季旋耕处理产量显著高于深耕处理,研究结果间的不一致性应该与试验区域土壤质地特性及耕作方式持续年限不同有关。深耕—深松轮耕模式较小麦季旋耕处理产量均

显著增加,深耕—深松轮耕处理深层土土壤养分含量较高,促进作物的根部发育及养分吸收,使玉米穗粗、百粒重显著增加,这正是深耕深松轮耕处理增产的原因所在<sup>[37]</sup>。本研究结果表明,小麦季旋耕处理肥料偏利用率和经济效益均高于深耕处理,玉米季深耕—行内深松肥料偏利用率和经济效益最高。

## 4 结论

经过 1 个轮耕周期,本研究发现,轮耕措施能够增加 0—40 cm 土层土壤有机质和全氮含量,其中深耕—免耕模式明显提高土壤有机质含量,而旋耕—行间深松有利于增加土壤全氮含量。玉米季深松提高深层土壤速效养分含量,其中深耕—行内深松模式显著提高 10—40 cm 土层碱解氮、硝态氮和铵态氮含量;深耕—行内深松有利于提高 20—40 cm 土层有效磷含量,旋耕—行间深松模式有利于提升 10—40 cm 土壤速效钾含量。小麦季旋耕处理小麦的亩穗数、穗粒数及产量显著高于深耕处理,深耕—行内深松和深耕—行间深松处理提高玉米的穗粗、百粒重、收获指数及玉米产量。小麦季旋耕处理肥料偏利用率和经济效益均高于深耕处理,玉米季深耕—行内深松肥料偏利用率和经济效益最高。

综上所述,深耕—行内深松有效提升深层土土壤有机质、全氮含量,以及不同形态氮素含量,且增产增效效果好,经济效益高,推荐在黄淮海平原潮土区推广应用。

### 参考文献:

- [1] 李晓林.黄淮海平原耕地质量现状、问题及解决对策[C].中国土壤学会.中国土壤学会第十一届全国会员代表大会暨第七届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集(中).北京:中国土壤学会,2008:373-379.
- [2] 刘世平,陆建飞,庄恒扬,等.土壤轮耕:江苏农业可持续发展的重要技术措施[J].土壤,1998,30(1):43-46.
- [3] 贾延明,尚长青,张振国.保护性耕作适应性试验及关键技术研究[J].农业工程学报,2002,18(1):78-81.
- [4] 张海林,陈阜,秦耀东,等.覆盖免耕夏玉米耗水特性的研究[J].农业工程学报,2002,18(2):36-40.
- [5] 陈军胜.华北平原免耕冬小麦田土壤水热特征及其对冬小麦生长发育影响研究[D].北京:中国农业大学,2005.
- [6] 李素娟,陈继康,陈阜,等.华北平原免耕冬小麦生长发育特征研究[J].作物学报,2008,34(2):290-296.
- [7] 侯贤清,李荣,贾志宽,等.不同农作区土壤轮耕模式与生态效应研究进展[J].生态学报,2016,36(5):1215-1223.
- [8] 王振忠,许学前.“久免需耕”:再谈轮耕的意义[J].江苏农业科学,1995(5):43-45.
- [9] 贾凤梅,张淑花,魏雅冬.不同耕作方式下玉米农田土壤养分及土壤微生物活性变化[J].水土保持研究,2018,25(5):112-117.
- [10] 张洋,王鸿斌.不同耕作模式对黑土区土壤理化性质及

玉米生长发育的影响[J].江苏农业科学,2018,46(18):58-64.

- [11] 王平,陈娟,谢成俊,等.轮耕条件下土壤改良及春玉米增产增收效果研究[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):59-67.
- [12] López-Fando C, Pardo M T. Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region[J].Soil and Tillage Research,2011,111:224-230.
- [13] 侯贤清,李荣,韩清芳,等.轮耕对宁南旱区土壤理化性状和旱地小麦产量的影响[J].土壤学报,2012,49(3):592-600.
- [14] 聂良鹏,郭利伟,牛海燕,等.轮耕对小麦—玉米两熟农田耕层构造及作物产量与品质的影响[J].作物学报,2015,41(3):468-478.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2008.
- [16] 王靖,林琪,倪永君,等.不同保护性耕作模式对冬小麦产量及土壤理化性状的影响[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2009,26(4):276-281.
- [17] 田慎重,李增嘉,宁堂原,等.保护性耕作对农田土壤不同养分形态的影响[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2008,25(3):171-176.
- [18] 唐海明,孙国峰,肖小平,等.轮耕对双季稻田土壤全氮、有效磷、速效钾质量分数及水稻产量的影响[J].生态环境学报,2011,20(3):420-424.
- [19] 李娟,李军,尚金霞,等.轮耕对渭北旱塬春玉米田土壤理化性状和产量的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(7):867-873.
- [20] 黄明,李友军,吴金芝,等.深松覆盖对土壤性状及冬小麦产量的影响[J].河南科技大学学报(自然科学版),2006,27(2):74-77.
- [21] 赵全仁,陈秉焱,毕江涛,等.旱地春小麦不同覆盖栽培水肥效应研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(1):76-80.
- [22] 张亚丽,张兴昌,邵明安,等.秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J].水土保持学报,2004,18(1):85-88.
- [23] 闫洪奎,王欣然.长期定位试验下秸秆还田配套深松对土壤性状及玉米产量的影响[J].华北农学报,2017,32(增刊1):250-255.
- [24] 王玉玲,李军,柏炜霞.轮耕体系对黄土台塬麦玉轮作土壤生产性能的影响[J].农业工程学报,2015,31(1):107-116.
- [25] Schneider F, Don A, Hennings I, et al. The effect of deep tillage on crop yield: What do we really know? [J]. Soil and Tillage Research,2017,174:193-204.
- [26] 谢迎新,靳海洋,孟庆阳,等.深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J].农业工程学报,2015,31(10):167-173.
- [27] 唐先亮,魏甲彬,周玲红,等.耕作方式对稻田土壤微生物量碳氮的动态影响[J].作物研究,2016,30(3):282-287.



- 差异[D].北京:中国林业科学研究院,2017.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [20] 张晗,欧阳真程,赵小敏,等.江西省油菜土壤碳氮磷生态化学计量学空间变异性及影响因素[J].水土保持学报,2018,32(6):269-277.
- [21] 李明军,喻理飞,杜明凤,等.不同林龄杉木人工林植物—凋落叶—土壤 C、N、P 化学计量特征及互作关系[J].生态学报,2018,38(21):7772-7781.
- [22] 黄丽,范兴科.磷肥和钾肥不同配施方式对其养分在土壤中迁移的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):184-190.
- [23] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.
- [24] 胡耀升,么旭阳,刘艳红.长白山森林不同演替阶段植物与土壤氮磷的化学计量特征[J].应用生态学报,2014,25(3):632-638.
- [25] 张倩,韩贵琳,柳满,等.贵州普定喀斯特关键带土壤磷分布特征及其控制因素[J].生态学杂志,2019,38(2):321-328.
- [26] 张蕾蕾,钟全林,程栋梁,等.刨花楠叶片碳氮磷化学计量比与个体大小的关系[J].应用生态学报,2015,26(7):1928-1934.
- [27] 崔宁洁,刘小兵,张丹桔,等.不同林龄马尾松人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征[J].生态环境学报,2014,23(2):188-195.
- [28] 吴明,邵学新,周纯亮,等.中亚热带典型人工林土壤质量演变及其环境意义[J].生态学杂志,2009,28(9):1813-1817.
- [29] 杨会侠,汪思龙,范冰,等.马尾松人工林发育过程中的养分动态[J].应用生态学报,2010,21(8):1907-1914.
- [30] 项文化,田大伦.不同年龄阶段马尾松人工林养分循环的研究[J].植物生态学报,2002,26(1):89-95.
- [31] Hobbie S E. Plant species effects on nutrient cycling: Revisiting litter feedbacks[J]. Trends in Ecology and Evolution,2015,30(6):357-363.
- [32] Bengtsson G, Bengtson P, Månsson K F. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry,2003,35(1):143-154.
- [33] 雷丽群,卢立华,农友,等.不同林龄马尾松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].林业科学研究,2017,30(6):954-960.
- [34] Krzic M, Newman R, Broersma K. Plant species diversity and soil quality in harvested and grazed boreal aspen stands of northeastern British Columbia[J]. Forest Ecology and Management,2003,182(1/3):315-325.
- [35] 王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J].生态学报,2008,28(8):3937-3947.
- [36] Taylor P G, Townsend A R. Stoichiometric control of organic carbon-nitrate relationships from soils to the sea[J]. Nature,2012,464(7292):1178.
- (上接第 174 页)
- [28] Vogeler I, Rogasik J, Funder U, et al. Effect of tillage systems and P-fertilization on soil physical and chemical properties, crop yield and nutrient uptake[J]. Soil and Tillage Research,2009,103(1):137-143.
- [29] Martin-Rueda I, Muñoz-Guerra L M, Yunta F, et al. Tillage and crop rotation effects on barley yield and soil nutrients on a Calciortidic Haploxeralf[J]. Soil and Tillage Research,2007,92(1/2):1-9.
- [30] Guan D H, Mahdi M, Al-Kaisi, et al. Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize[J]. Field Crops Research,2014,157:89-97.
- [31] Chu P F, Zhang Y L, Yu Z W, et al. Winter wheat grain yield, water use, biomass accumulation and remobilisation under tillage in the North China Plain[J]. Field Crops Research,2016,193:43-53.
- [32] Shao Y H, Xie Y X, Wang C Y, et al. Effects of different soil conservation tillage approaches on soil nutrients, water use and wheat-maize yield in rainfed dryland regions of North China[J]. European Journal of Agronomy,2016,81:37-45.
- [33] Pierce F J, Fortin M C, Staton M J. Immediate and residual effects of zone-tillage on soil physical properties and corn performance[J]. Soil and Tillage Research,1992,24:149-165.
- [34] 吕军杰,姚宇卿,王育红,等.不同耕作方式对坡耕地土壤水分及水分生产效率的影响[J].土壤通报,2003,34(1):74-76.
- [35] 顾秋蓓,杨琼,余涛,等.耕作措施对土壤有机碳稳定性的影响:以黑龙江省与吉林省典型地区为例[J].现代地质,2016,30(2):463-469.
- [36] 高飞,李霞,任佰朝,等.小麦玉米周年生产中耕作方式对夏玉米根系特性和产量的影响[J].中国农业科学,2017,50(11):2141-2149.
- [37] Li H W, Gao H W, Wu H D, et al. Effects of 15 years of conservation tillage on soil structure and productivity of wheat cultivation in northern China[J]. Australian Journal,2007,45(5):344-350.