

深松 35 cm 可改善潮棕壤理化性质并提高小麦和玉米产量

梁海, 陈宝成*, 韩惠芳, 王少博, 王桂伟

(养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室/山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

摘要: 【目的】我国传统耕作深度一般为 20 cm, 长期不变的翻耕深度降低耕层厚度, 增加了犁底层厚度, 影响作物的生长。研究小麦—玉米一年两季的种植模式下深松耕作的效果, 为大田耕作管理提供技术支持。

【方法】田间试验在山东烟台潮棕壤上进行。设计 4 个耕作处理, 分别为常规翻耕 20 cm (CK)、深松 30 cm、深松 35 cm、深松 40 cm。小麦播种前进行耕作处理, 所有处理均结合耕作一次性施腐殖酸复合肥 ($N-P_2O_5-K_2O=18-10-12$) 1125 kg/hm²。玉米免耕, 在拔节期追施一次化肥。于小麦、玉米收获期取 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 及 30—40 cm 土层土壤样品, 测定土壤速效养分含量与土壤容重, 计算三相比, 并调查小麦、玉米产量。【结果】与 CK 相比, 深松 30 cm、35 cm、40 cm 小麦季分别增产 10.9%、15.3% 和 15.5%, 玉米季分别增产 12.0%、14.9% 和 9.4% ($P < 0.05$); 10—40 cm 土层土壤容重降低了 0.03~0.18 g/cm³。其中, 小麦季 0—10 cm 土层中 CK 处理土壤容重显著低于各深松处理, 深松 35 cm 处理 0—10 cm 与 10—20 cm 土层土壤容重显著高于其他各处理; 玉米季 0—10 cm 与 10—20 cm 土层土壤容重最低的处理为深松 35 cm, 且显著低于其他处理。小麦季深松 30 cm 处理各土层土壤三相比 (R 值) 在 13.2~15.9 之间, 总体最小, 玉米季则以深松 40 cm 三相比值总体最小, 在 6.03~8.81 之间。深松处理增加了 20—40 cm 土层有效养分含量, 其中深松 35 cm 处理的 20—40 cm 土层有效磷和速效氮含量增加最为明显, 分别为 0.56~37.4 mg/kg 与 31.9~77.8 mg/kg; 速效钾各土层的增加则以深松 30 cm 最为显著, 为 24.3~100 mg/kg; 有机质含量以深松 40 cm 增加量最大, 为 0.95~0.69 g/kg。【结论】深松耕作可显著降低当季土壤容重, 增加当季与下一季作物产量, 提高土壤耕层以下 20—40 cm 土层的养分有效性, 综合各机械能耗与耕作效果, 以深松 35 cm 最佳。

关键词: 深松; 容重; 土壤三相比; 土壤有效养分

Subsoiling 35 cm in depth improve soil physicochemical properties and increase grain yields of wheat and maize in aquic brown soil

LIANG Hai, CHEN Bao-cheng*, HAN Hui-fang, WANG Shao-bo, WANG Gui-wei

(State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization/College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: 【Objectives】Current tillage is 20 cm depth, this long-term practice has reduced the thickness of the plough layer, increased the thickness of the plough pan, and affected the growth of crops. Subsoiling in different depths was attempted in this study to provide technical support for field farming management.

【Methods】A field experiment was conducted in aquic brown soil, Yantai, Shandong Province. Taking conventional tillage 20 cm as control (CK), subsoiling of 30 cm, 35 cm and 40 cm in depth were designed in the experiment. The tillage was conducted before sowing of winter wheat, and all treatments were once applied 1125 kg/hm² of humic acid compound fertilizer ($N-P_2O_5-K_2O=18-10-12$) with the tillage practice. No tillage was conducted for maize, and chemical fertilizer was top dressed at the jointing stage of maize. At wheat and corn harvest period, soil samples of 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm and 30—40 cm in depth were taken to determine the soil organic matter and available N, P and K contents and the soil bulk densities. 【Results】Compared with

收稿日期: 2018-11-16 接受日期: 2019-04-12

基金项目: 农业部公益性行业 (农业) 科研专项 (201503117); 国家“十三五”重点研发计划项目 (2017YFD0200705)。

联系方式: 梁海 E-mail: 516634429@qq.com; * 通信作者 陈宝成 E-mail: bcch108205@163.com

CK, the subsoiling treatments of 30 cm, 35 cm and 40 cm increased yields of crops, for wheat the increments were 10.9%, 15.3% and 15.5%, respectively, and for maize they were 12.0%, 14.9% and 9.4%, respectively. The subsoiling treatments effectively reduced the soil bulk density by 0.03–0.18 g/cm³ in the 10–40 cm soil layer, improved the ratio of three phases and the available nutrient contents in the 20–40 cm soil layer ($P < 0.05$). The soil bulk density in the 0–10 cm soil layer of CK was significantly lower than those of the subsoiling treatments, and those in the 0–10 cm and 10–20 cm soil layers of subsoiling 35 cm treatment was significantly higher than in the others. The lowest soil bulk density in the 0–10 cm and 10–20 cm soil layers of the maize season were all in subsoiling 35 cm treatment, which was significantly lower than in other treatments. After wheat harvest, the minimum R value was between 13.2 and 15.9, and after maize harvest was between 6.03 and 8.81. Subsoiling treatments increased the available P and N contents in 20–40 cm soil layer, with increment of 0.56–37.4 mg/kg for P and 31.9–77.8 mg/kg for N in the 35 cm subsoiling treatment. The available K was increased most significantly by 24.3–100.3 mg/kg in treatment of subsoiling 30 cm. The most significant increase of organic matter content was in subsoiling of 40 cm, with increase of 0.95–0.69 g/kg. 【 **Conclusions** 】 Deep subsoiling is effective in reducing soil bulk density, increasing the crop yield of the current and the following season, improving the available nutrient contents of the 20–40 cm soil layer. Comprehensively considering the mechanical consumption and the tillage effect, the 35 cm depth of tillage is recommended for the tested area.

Key words: subsoiling; soil three-phase ratio; soil bulk density; soil available nutrients

华北平原大部分地区长期采用冬小麦–夏玉米一年两季的种植模式, 小麦季多采用翻耕作业, 玉米季通常为直播, 在这种耕作制度下普遍存在农田耕层变浅、土壤大孔隙减少、容重变大、犁底层加厚的问題, 不利于作物生长, 造成产量下降^[1]。在常年机械压实的耕地实施深松耕作可打破犁底层、增加土壤水气通透性, 改善土壤结构状态, 促进根系向下部土层发展, 耕作深度的不同也导致各土层的物理性状发生改变 (如导水率、透气性、团粒结构等), 土壤有效养分变化亦受到其影响。随着农业机械化普及, 每年的耕作、播种与收获均使用大型农机, 其造成的机械压实效果对耕层土壤的结构造成不可忽视的影响, 如今土壤压实已成为制约玉米、小麦生产的一个重要因素^[2], 深松耕作是一项保护性耕作措施, 可以打破犁底层, 改善土壤理化性状, 有效地降低土壤容重、增加大孔隙体积^[3], 同时因深松耕作带来的土壤结构疏松, 使得降雨和灌溉水入渗的深度和速率增加, 增加心土层土壤的含水量^[4]。在华北平原夏季多雨季节能有效防止渍涝, 而由于心土层土壤含水量的增加, 在干旱季节到来时, 作物的水分需求也能得到一定的满足, 增加其抗旱能力。与传统的旋耕相比, 深松对耕层土壤结构的影响会使土壤养分的迁移状况随之发生变化, 有研究表明土壤结构与土壤孔隙的分布对土壤的供肥与保肥能力有着重要的影响^[5], 在同样的施肥与灌溉条件下, 不同深度土层的养分含量会因土壤的物理性质

而有所不同。此外, 耕地中的底土层 (20–40 cm) 总氮含量约占 50%, 总磷含量约占 25%~70%^[6-7], 但由于机械压实及不合理的耕作制度导致土壤的紧实度加大, 作物根系下扎困难, 处于底土层中的养分难以供作物吸收利用, 有研究表明深松对作物根系生长有着良好的影响, 从而促进根系对土壤水分与养分的吸收^[8]。另一项研究显示, 深松处理影响了根系的空间分布, 使根系吸收水肥能力增强, 从而减少氮肥的损失^[9], 此外, 深松也可以使土壤养分的有效性提高。郭家萌等^[10]发现深松处理增加了 0–15 cm 与 15–25 cm 土层的有效磷含量。而蔡丽君等^[11]研究认为深松有利于 20–40 cm 的土壤速效钾含量的提高。近年来, 国内对深松研究已开展了许多的工作, 但其研究重点主要集中在土壤物理性状, 而对由于不同深度的松耕带来的土壤养分迁移变化情况关注较少。本试验结合深松对土壤物理性状及土壤有效养分的影响, 重点研究不同的深度松耕与常规旋耕处理对土壤物理性状、土壤养分有效化及轮作小麦、玉米生长的影响, 为评价不同深度松耕对土壤理化性质与作物生长影响提供一定的参考, 也为田间选用合适的耕作深度提供帮助。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验为田间试验, 每个小区为 120 m²(长 15 m、

宽 8 m), 地点设在在山东省烟台市朱家埠村, 该区域常年种植方式为冬小麦—夏玉米一年两季, 冬小麦耕作方式为翻耕 20 cm, 夏玉米耕作方式为免耕制。试验区年平均气温 11℃, 无霜期约 200 天, 年平均降雨量 600 mm。

供试土壤: 潮棕壤(筒育湿润淋溶土), 质地为粘壤土, pH 为 6.79, 0—20 cm 土壤有机质含量为 13.0 g/kg、全氮含量为 0.69 g/kg、有效磷为 35.5 mg/kg、速效钾含量为 124 mg/kg。

供试作物: 冬小麦品种为烟农 24; 夏玉米品种为伟科 702。

供试肥料: 玉米季基肥为山东农大肥业科技有限公司生产腐殖酸复合肥 (N-P₂O₅-K₂O=15-15-15), 施肥量为 375 kg/hm², 追肥为山东农大肥业科技有限公司生产的脲铵氮肥 (N 28%), 于玉米拔节期进行追肥, 追施量为 600 kg/hm²。小麦季基肥为山东农大肥业科技有限公司生产的腐殖酸复合肥 (N-P₂O₅-K₂O=18-10-12), 施肥量为 1125 kg/hm², 不再进行追肥。

供试农机: 深松机械为中国农业大学和河南豪丰农业装备有限公司联合研发的 1SF-200 型深松施肥机, 尺寸为 1520 mm × 2216 mm × 1394 mm, 配套动力 73.5~88.2 kW; 翻耕机械为雷沃 M1104-D 轮式拖拉机, 配套动力为 81 kW。

1.2 试验设计

试验设 4 个处理, 分别为常规翻耕 20 cm (CK)、深松 30 cm、深松 35 cm、深松 40 cm, 重复三次, 所有处理采用完全随机区组设计。

小麦季: 2016 年 10 月 18 日耕作后, 进行播种, 播种量为 120 kg/hm², 2017 年 6 月 18 日收获; 小麦收获后, 于 2017 年 6 月 26 日玉米进行播种, 株距 20 cm, 行距 60 cm, 于 2017 年 10 月 10 日收获。玉米季: 播种时不进行耕作, 留茬点播玉米, 所有处理土壤不受机械耕作扰动。

1.3 样品采集与测定

冬小麦每小区选取 1 米双行, 3 次重复进行收获测产, 测定穗粒数, 小麦植株于烘箱 105℃ 杀青后, 与籽粒一同于 75℃ 干燥至恒重, 测定千粒重及干物质积累量。

夏玉米每小区选取 5 米双行, 3 次重复进行收获测产, 测定穗粒数, 玉米植株在烘箱 105℃ 杀青后, 与籽粒一同于 75℃ 干燥至恒重, 测定百粒重及干物质积累量。

土壤样品的测定: 土壤速效氮测定采用风干土样, 以 0.01 mol/L 的 CaCl₂ 溶液浸提 (水土比 1:10), NO₃⁻-N 与 NH₄⁺-N 采用流动注射分析仪 (SEAL, AA3, 德国) 测定, 两者之和为土壤速效氮含量; 土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼蓝比色法测定; 土壤速效钾采用 pH 7.0 醋酸铵浸提—火焰光度计法测定; 土壤有机质用硫酸—重铬酸钾氧化法测定。

在每个地块挖出 50 cm 深度的剖面, 依次以环刀采集 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 及 30—40 cm 未受扰动的土壤样品, 测定土壤容重, 计算土壤三相比。土壤三相比数据转换为 R 值:

$$R = \sqrt{(X - 50)^2 + (Y - 25)^2 + (Z - 25)^2}$$

式中: R 为所测定土壤样品三相比与土壤理想状态下三相比的偏离值; X 为所测定土壤样品固相的数值; 50 为土壤理想状态下固相的数值; Y 为所测定土壤样品液相的数值; 25 为土壤理想状态下液相的数值; Z 为所测定土壤样品气相的数值; 25 为土壤理想状态下气相的数值。

1.4 数据分析

试验数据采用 SAS 8.0、Excel 2017 软件进行处理、统计分析及作图。

2 结果与分析

2.1 深松对土壤容重的影响

当土壤容重在 1~1.5 g/cm³ 范围内, 容重越低越有利于作物的生长。对照处理 (CK) 小麦季在 0—10 cm 土层中土壤容重显著低于各深松处理, 非常适宜小麦的生长, 而在 20—40 cm 的两个土层, 其土壤容重则分别达到了 1.9 与 1.8 g/cm³, 显著高于各深松处理, 且超过了作物生长适宜的容重范围的上限 (图 1)。深松 35 cm 处理 0—10 cm 与 10—20 cm 土层土壤容重显著高于其他各处理, 且达到甚至超过适宜土壤容重的上限, 但在 20—30 cm 土层与其他两个深松处理差异不显著。与 CK 相比, 三个深松处理均显著降低了 20—30 cm 与 30—40 cm 土层的土壤容重。在玉米季, 土壤容重总体高于小麦季, 并且 CK 处理在 0—10 cm、10—20 cm 及 20—30 cm 土层的土壤容重均显著高于各深松处理。深松 35 cm 处理在 0—10 cm 与 10—20 cm 土层土壤容重最低, 且显著低于其他两个处理, 其他两个深松处理在各层次的容重差异不显著。综合两季作物来看, 各深松处

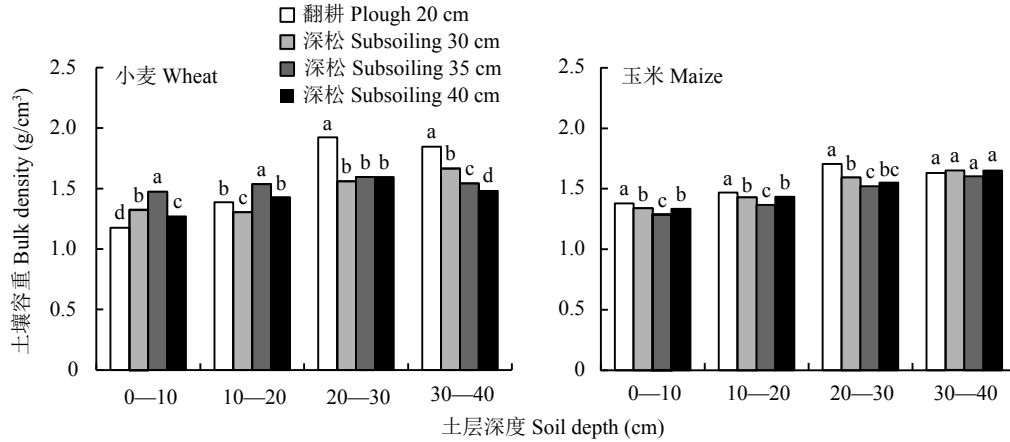


图 1 小麦玉米收获期耕翻和深松处理的土壤容重

Fig. 1 Soil bulk density at harvesting stage of wheat and maize under plough and subsoiling treatments

[注 (Note)]: 柱上不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different small letters above the bars mean significant difference among the treatments at the same soil layer ($P < 0.05$.)

理相较于 CK 处理的土壤容重更适于作物的生产, 特别是在 20—40 cm 土层。

对比相同处理容重在小麦季以后玉米季的变化 (图 2), 发现深松 35 cm 土壤容重在 0—30 cm 土层均有显著下降, 而 CK 则在 20—40 cm 土层出现了显著的下降, 综合观察发现玉米季土壤容重除深松 35 cm 处理外, 其它两个深松处理土壤容重对比小麦季出现了显著的上升。

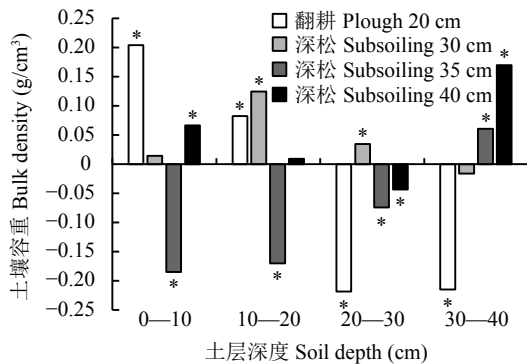


图 2 玉米季对比小麦季不同土层土壤容重变化

Fig. 2 Soil bulk density variation in maize season relative to that in wheat in the same plot at different soil depths

[注 (Note)]: 变化值为同一小区同一层土壤小麦季容重减去玉米季容重 Variation = Density in wheat - Density in maize; *— $P < 0.05$.]

2.2 深松对剖面土壤养分含量的影响

小麦收获期各土层土壤养分含量受耕作措施的影响十分显著 (图 3)。四个土层土壤速效氮含量深松处理均显著高于 CK。三个深松处理间也差异显著, 各层有效氮含量均以深松 35 cm 处理最高, 其次是深松 30 cm。

土壤速效钾含量除 10—20 cm 土层外, 深松处理也均显著高于 CK。深松 30 cm 处理土壤速效钾含量在 0—10 cm 与 20—30 cm 土层中显著高于其他两个深松处理, 在 30—40 cm 土层三个深松处理差异不显著。

各土层土壤有效磷含量深松处理均显著高于 CK。深松 35 cm 各层的有效磷含量又显著高于其他两个处理。综合来看, 深松可以显著增加土壤耕层和亚耕层速效氮磷钾养分的含量, 为下一茬玉米生长提供良好的养分储备, 效果最好的处理为深松 35 cm。

玉米季收获期土壤养分含量结果显示 (图 4), 深松 30 cm 处理 0—10 cm 土层中土壤速效氮含量显著高于其他各处理, 次之为深松 35 cm 处理, 而在 10—20 cm 与 20—30 cm 土层中深松 35 cm 处理显著高于其他各处理, 30—40 cm 土层中各处理间存在差异显著, 其中 CK 显著高于三个深松处理。

土壤速效钾含量在 0—10 cm 与 10—20 cm 土层中深松 30 cm 与深松 40 cm 处理均显著高于 CK 与深松 35 cm 处理, 且在 0—10 cm 土层中深松 30 cm 处理显著高于深松 40 cm 处理, 在 10—20 cm 土层则相反。CK 处理 20—30 cm 土层速效钾含量与三个深松处理差异不显著, 30—40 cm 土层中深松 30 cm 处理土壤速效钾含量显著低于其他各处理。

三个深松处理 10—30 cm 土层有效磷含量均显著高于 CK 处理, 深松 30 cm 处理土壤有效磷含量在 0—10 cm 与 20—30 cm 土层均显著高于其他各处理。上季深松速效氮磷钾养分增加效果延续至玉米季, 而对土壤有效磷含量的影响较上季呈现更显著的效果。

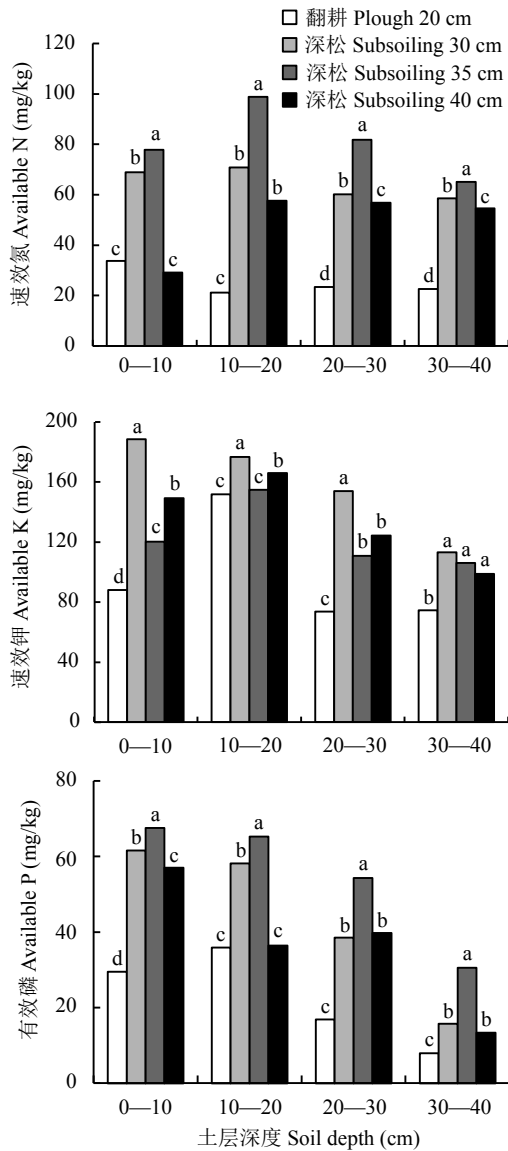


图 3 不同耕作深度小麦季收获期土壤养分含量

Fig. 3 Available nutrient contents in different soil depths under different tillage at wheat harvest

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars mean significant difference among the treatments at the same soil layer ($P < 0.05$).]

2.3 深松对土壤三相比的影响

土壤固相、液相、气相间的容积百分比, 即三相比, 是评价土壤水肥气热相互关系的重要参数。一般土壤固相率在 50% 左右、容积含水量 25%~30%、气相率 15%~25% 时最适宜作物的生长, 即 R 值近似于 0。小麦、玉米收获期不同处理 R 值见表 1。翻耕 20 cm 处理在 0—10 cm 与 10—20 cm 土层的固相率相对较低, 而 20—30 cm 与 30—40 cm 土层则较高, 表明翻耕 20 cm 处理仅增加了 0—20 cm 土层的孔隙度, 各土层比较时发现 20—30

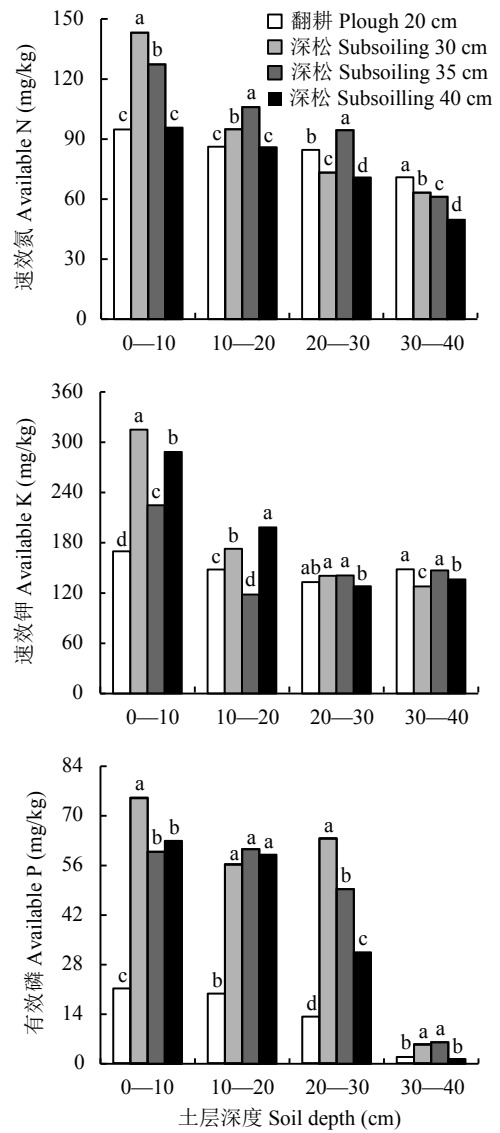


图 4 不同耕作深度玉米季收获期土壤养分含量

Fig. 4 Available nutrient contents in different soil depths under different tillage at maize harvest

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars mean significant difference among the treatments at the same soil layer ($P < 0.05$).]

cm 土层 R 值更为接近最适植物生长的值, 而深松处理可改善 20—40 cm 土层的三相比, 其中以深松 35 cm 处理各层次三项比最优。在玉米季各深松处理在不同土层的固相率均低于翻耕 20 cm 处理, 且比较发现深松 30 cm 与深松 40 cm 处理 R 值均维持在较为适宜的水平, 整体处于 9.60~5.23 之间, 表明深松处理不仅可以减少耕作后由于自然沉降等因素造成的土壤复压实的问题, 也造就了更为适宜作物生长的土壤结构。综合比较各处理发现小麦季深松 30 cm 各土层 R 值在 13.20~15.92 之间, 总体最小, 玉

表 1 不同深松深度土壤固态、液态和气态三相所占百分比 (%) 及其比值 (R)
Table 1 Percentages of solid, liquid and gas phases and their ratios (R) affected by tillage treatments in wheat and maize season

处理 Treatment	土层深度 Soil depth (cm)	小麦季 Wheat season				玉米季 Maize season			
		固相率 Solid	液相率 Liquid	气相率 Gas	R	固相率 Solid	液相率 Liquid	气相率 Gas	R
CK	0—10	50.49	13.19	36.32	16.37	46.72	29.48	23.80	5.68
	10—20	43.40	13.08	43.52	22.99	43.47	36.96	19.57	14.67
	20—30	46.79	16.14	37.07	15.31	35.77	30.89	33.34	17.51
	30—40	43.92	15.16	40.92	19.68	41.51	27.82	30.67	10.59
深松 30 cm Subsoiling 30 cm	0—10	54.00	12.29	33.71	15.92	50.49	30.84	18.67	8.63
	10—20	49.06	16.17	34.77	13.20	43.40	26.37	30.23	8.53
	20—30	49.06	15.20	35.74	14.57	46.79	32.80	20.41	9.60
	30—40	46.23	17.00	36.77	14.72	43.92	27.78	28.30	7.46
深松 35 cm Subsoiling 35 cm	0—10	46.72	17.30	35.98	13.81	49.74	28.82	21.44	5.23
	10—20	43.47	14.32	42.21	21.28	48.30	29.83	21.87	6.00
	20—30	35.77	16.37	47.86	28.28	46.75	36.23	17.02	14.15
	30—40	41.51	17.74	40.75	19.31	43.02	35.22	21.76	12.79
深松 40 cm Subsoiling 40 cm	0—10	49.74	12.78	37.48	17.47	54.00	27.23	18.77	7.73
	10—20	48.30	18.16	33.54	11.07	49.05	29.82	21.13	6.25
	20—30	46.75	14.62	38.63	17.44	49.05	29.66	21.29	6.03
	30—40	43.02	16.32	40.66	19.22	46.20	32.19	21.61	8.81

米季则以深松 40 cm 的 R 值总体最小, 在 6.03~8.81 之间。

2.4 深松对小麦、玉米产量及其构成的影响

不同深度松耕处理冬小麦、夏玉米产量及产量构成因素见表 2。与 CK 相比, 各深松处理小麦籽粒产量均显著提高, 深松 30 cm、深松 35 cm 与深松 40 cm 处理冬小麦籽粒产量分别增加了 10.9%, 15.3% 和 15.5%; 深松 30 cm 与 35 cm 处理的夏玉米产量亦显著高于 CK, 分别增加了 12.0% 和 14.9%, 深松 40 cm 比翻耕 20 cm 玉米产量增加了 9.4%。小麦季各深松处理间有效穗数差异不显著, 但均显著高于翻耕 20 cm 处理, 而玉米季各处理间有效穗数则不存在显著差异; 小麦季各处理穗粒数以深松 30 cm 最高, 而玉米季则以深松 35 cm 最高; 小麦季与玉米季千粒重均以深松 35 cm 处理最高, 且显著高于其它处理。计算小麦、玉米周年产量增产效果, 深松 30 cm、35 cm、40 cm 处理分别比对照增产 11.6%、15.1%、11.8%, 均达显著差异水平。综上所述, 深松可以有效地增加小麦、玉米的穗粒数和千粒重, 是促进产

量提高的主要原因。

3 讨论

本试验采用大田试验, 设置不同深松处理对照传统翻耕, 研究了对小麦玉米产量及土壤理化性状的影响。相对于传统翻耕, 不同的深松处理小麦玉米产量均有增加, 增产率平均约为 13% 左右, 与前人在华北地区大田试验的增幅相近^[12-13], 深松在东北、西北和华北地区均能提高小麦玉米的产量, 在年均降雨量 ≥ 600 mm 和年均气温 $> 12^{\circ}\text{C}$ 时效果更显著^[14], 本试验区气候与该气候条件相近, 因而深松效果较为显著。

土壤容重与质地、压实状况、颗粒密度、有机质及各种管理措施有关, 直接影响土壤通气、透水性能, 也影响土壤温度状况。适宜的土壤容重对保水至关重要, 在一定范围内, 容重小的土壤, 上层土壤的水分容易蒸发, 下层土壤水分容易渗漏, 而容重过大的土壤则不利于水分入渗, 易造成径流损失。本试验结果出现了各处理玉米季的土壤容重整

表 2 不同深松深度处理冬小麦、玉米产量及产量构成

Table 2 Yield and yield components of winter wheat and summer maize under different depths of subsoiling

作物 Crop	处理 Treatment	有效穗数 Spike number ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	穗粒数 Seeds per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	百粒重 100-grain weight (g)	籽粒产量 Grain yield (t/hm ²)	增产 Yield increase (%)
小麦 Wheat	CK	413 b	33.25 b	34.25 b		6.32 c	
	深松 Subsoiling 30 cm	526 a	34.15 a	35.17 b		7.01 b	10.9
	深松 Subsoiling 35 cm	524 a	33.51 b	41.69 a		7.29 a	15.3
	深松 Subsoiling 40 cm	531 a	32.24 b	39.56 a		7.30 a	15.5
玉米 Maize	CK	7.17 b	564.2 b		30.25 b	10.02 b	
	深松 Subsoiling 30 cm	7.23 b	615.4 a		30.56 b	11.23 a	12.0
	深松 Subsoiling 35 cm	7.32 b	624.1 a		31.21 a	11.52 a	14.9
	深松 Subsoiling 40 cm	7.31 b	608.0 b		30.42 b	10.96 b	9.4

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column mean significantly different among treatments ($P < 0.05$).

体大于小麦季的现象, 原因为降雨灌溉使得土壤的自然沉降程度加大, 另外玉米季采用了免耕直播的方法, 沉降的效果结合机器播种压实导致了玉米季容重整体出现增大现象, 而试验中深松 35 cm 整体容重则出现了下降的现象, 应为小麦季深松 35 cm 处理土壤构造处于较为适宜玉米根系生长的状态, 其根系整体下扎深度加深, 从而降低了相应土层容重。深松除影响了土壤结构, 本试验中, 深松 40 cm 处理相对其他处理更好的改善了各土层土壤固液气三相的比例, R 值在一定程度上能反映各土层结构的合理性, 其中玉米季与小麦季各深松处理以深松 40 cm 总体 R 值最小, 即土壤结构更合理。在耕地采用深松耕作能增加耕层的土壤大孔隙, 在华北平原区域, 种肥同播机械已经逐渐得到普及, 在播种时肥料同时施入土壤中, 在土壤孔隙度适宜的条件下, 降雨和灌溉水能有效地被吸持在耕层中, 减少径流损失, 若土壤容重较大, 水分难以下渗, 肥料在水中释放后便极可能随着径流而损失, 也因不能进入较深的土层而造成氮肥的挥发损失和污染环境。深松耕作可使深层紧实的土壤结构向适宜作物生长的疏松程度变化, 且不会对耕层土壤造成过大的扰动而破坏土壤团聚体, 有利于水分下渗维持土壤墒情, 对土壤团聚体破坏较少, 有利于提高养分的有效性。深松耕作促进土壤结构改善和作物根系的生长, 减少根系下扎的机械阻力^[15-17], 深松深度在 30 cm 时玉米根系的单株生长明显得到了改善^[18], 作物的根系生长得以促进从而加强了其水肥吸收能力, 最终可提高作物的产量。

在不同耕作方式的影响下, 土壤的有效养分亦会受到较大的影响^[19], 本试验研究结果表明, 相较于传统的翻耕 20 cm 处理, 深松耕作能够促使较深土层 (10—40 cm) 的养分向有效态转化。本试验中出现小麦季 0—10 cm 翻耕 20 cm 处理低于深松处理而玉米季却相反的现象, 原因可能是在玉米季高温多雨, 翻耕 20 cm 处理 0—10 cm 土层结构相较其他处理更为疏松, 有利于通气透水, 微生物活跃, 小麦季残茬经微生物作用向有机质转化较多。其中深松 35 cm 处理速效氮在各土层的含量变化相较其他处理平缓, 且含量保持在相对较高水平, 表明深松 35 cm 对土壤速效氮具有最良好的影响。有试验表明在黑龙江地区机械耕作可以显著增加土壤有效磷和速效钾的含量^[20], 并且不同耕作方式对土壤有效磷的影响也不尽相同, 其中以深松耕作对 0—30 cm 土层有效磷增加影响最大^[21], 本试验中翻耕 20 cm 处理在小麦季 20—30 与 30—40 cm 土层均显著低于各处理, 在玉米季土壤容重增大, 翻耕 20 cm 处理在各土层中的有效磷含量均低于其他各深松处理, 而深松 35 cm 与深松 30 cm 处理有效磷含量无论在小麦季或是玉米季均较高, 这可能是在小麦玉米轮作体系中作物的需磷特性、土壤温度与土壤的湿度条件共同对土壤磷及肥料中的磷素有效性起作用, 但由于磷施入土层中后容易被土壤固定, 造成其在土壤中的扩散系数小, 移动缓慢, 进而降低其有效性, 而深松耕作改善了土壤物理结构与湿度条件, 为磷的迁移提供了较良好的条件, 因此使得磷素能迁移到较深的土层, 提高其有效性。

4 结论

相较于传统翻耕, 在小麦播种进行前深松能够有效降低 0—40 cm 各土层的土壤容重, 改善其三相相比, 使得其 R 值更小即更趋近适于作物生长的三相比值。与深松 30、40 cm 相比, 深松 35 cm 可以更显著地增加 0—40 cm 土层有效氮磷钾含量, 显著增加小麦、玉米产量。综合考虑土壤培肥效果和成本, 建议在实际生产中推广深松 35 cm。

参考文献:

- [1] 崔景明. 华北南部两熟区不同种植模式下自然资源的利用与评价[D]. 新乡: 河南师范大学硕士学位论文, 2018.
Cui J M. Utilization and evaluation of natural resources in different planting patterns in double planting areas in the southern part of the North China plain[D]. Xinxiang: MS Thesis of Henan Normal University, 2018.
- [2] Liu X B, Zhang X Y, Wang Y X, *et al.* Soil degradation: a problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China[J]. *Plant Soil & Environment*, 2010, 56(2): 87–97.
- [3] Lynch J P, Wojciechowski T. Opportunities and challenges in the subsoil: pathways to deeper rooted crops[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(8): 2199–2210.
- [4] 何润兵, 李传友, 王明武. 深松对土壤理化性质和冬小麦生长特性的影响[J]. *中国农机化学报*, 2014, 35(2): 119–122.
He R B, Li C Y, Wang M W. Effects of subsoiling on soil physical and chemical properties and growth characteristics of winter wheat[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(2): 119–122.
- [5] Lipiec J, Pniewski W S J. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients[J]. *Soil and Tillage Research*, 1995, 35(1): 37–52.
- [6] Wiesmeier M, Hübner R, Barthold F, *et al.* Amount, distribution and driving factors of soil organic carbon and nitrogen in cropland and grassland soils of Southeast Germany (Bavaria)[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 176: 39–52.
- [7] Kautz T, Amelung W, Ewert F, *et al.* Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: a review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 57(3): 1003–1022.
- [8] 晋鹏宇, 任伟, 陶洪斌, 等. 深松对夏玉米物质生产、光合性能及根系生长的影响[J]. *玉米科学*, 2014, 22(1): 114–120.
Jin P Y, Ren W, Tao H B, *et al.* Effects of subsoiling on dry matter production, photosynthetic performance and root development of summer maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(1): 114–120.
- [9] Wang X, Zhou B, Sun X, *et al.* Soil tillage management affects maize grain yield by regulating spatial distribution coordination of roots, soil moisture and nitrogen status[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(6): 10–14.
- [10] 郭家萌, 刘振朝, 高强, 等. 深松对玉米产量和养分吸收的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 249–254.
Guo J M, Liu Z C, Gao Q, *et al.* Effects of subsoiling on yield and nutrient uptake of maize[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2016, 30(2): 249–254.
- [11] 蔡丽君, 边大红, 田晓东, 等. 耕作方式对土壤理化性状及夏玉米生长发育和产量的影响[J]. *华北农学报*, 2014, 29(5): 232–238.
Cai L J, Bian D H, Tian X D, *et al.* Effect of tillage methods on soil physical and chemical properties, growth and grain yield of summer maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(5): 232–238.
- [12] 张总正, 秦淑俊, 李娜, 等. 深松和施氮对夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 790–798.
Zhang Z Z, Qin S J, Li N, *et al.* Effects of subsoiling and N fertilizer application on dry matter accumulation, nitrogen use efficiency and yield of summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(4): 790–798.
- [13] 侯海鹏, 丁在松, 马玮, 等. 高产夏玉米产量性能特征及密度深松调控效应[J]. *作物学报*, 2013, 39(6): 1069–1077.
Hou H P, Ding Z S, Ma W, *et al.* Yield performance characteristics and regulation effects of plant density and sub-soiling tillage system for high yield population of summer maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(6): 1069–1077.
- [14] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(22): 7–15.
Zheng K, He J, Li H W, *et al.* Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in Northern China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(22): 7–15.
- [15] Hu H, Ning T, Li Z, *et al.* Coupling effects of urea types and subsoiling on nitrogen-water use and yield of different varieties of maize in northern China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 142(1): 85–94.
- [16] 齐华, 刘明, 张卫建, 等. 深松方式对土壤物理性状及玉米根系分布的影响[J]. *华北农学报*, 2012, 27(4): 191–196.
Qi H, Liu M, Zhang W J, *et al.* Effect of deep loosening mode on soil physical characteristics and maize root distribution[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, 27(4): 191–196.
- [17] 张瑞富, 杨恒山, 高聚林, 等. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 78–84.
Zhang R F, Yang H S, Gao J L, *et al.* Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 78–84.
- [18] 于晓芳, 高聚林, 尹斌, 等. 春季深松对内蒙古西部农田土壤结构及玉米产量的影响[J]. *北方农业学报*, 2012, (3): 21–23.
Yu X F, Gao J L, Yin B, *et al.* Effect of subsoiling in spring on farmland soil structure and maize yield in western Inner Mongolia[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2012, (3): 21–23.
- [19] Wang Q, Lu C, Li H, *et al.* The effects of no-tillage with subsoiling on soil properties and maize yield: 12-year experiment on alkaline soils of northeast China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 137(3): 43–49.
- [20] 王恩姮, 陈祥伟. 大机械作业对黑土区耕地土壤三相相比与速效养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 98–102.
Wang E H, Chen X W. Effect of heavy machinery operation on soil three phases and available nutrient in phaeozem region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 98–102.
- [21] 李永平, 王孟本, 史向远, 等. 不同耕作方式对土壤理化性状及玉米产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2012, 40(7): 723–727.
Li Y P, Wang M B, Shi X Y, *et al.* Influence of different tillage methods on soil physical and chemical properties and maize yield[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2012, 40(7): 723–727.