

麦-玉两熟区组合耕作模式周期生产力综合评价

张银平¹, 迟岩杰¹, 王占滨¹, 李晓冉¹, 李洪文², 刁培松^{1*}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对黄淮海两熟区传统精耕细作存在的土壤结构破坏、动力消耗过大和连续免耕存在耕层土壤紧实度增加、表层杂草养分富集等问题, 该研究设计了4 a的“翻耕-免耕-深松-免耕”的组合耕作模式(Combine Tillage, CT), 通过4 a的周期定位试验, 以连续免耕(Continuous No-tillage, CN)和连续翻耕(Continuous Ploughing, CP)为对照, 运用综合评价法, 对组合耕作模式的周期生产力进行综合评价, 结果表明: 土壤质量方面, CT处理可以提高土壤的结构质量, 减小土壤容重, 有效降低0~30 cm土层土壤容重, 平均容重比连续免耕和连续翻耕分别小0.089和0.125 g/cm³; CT处理提高土壤养分质量, 增加0~30 cm土层全氮、速效磷和速效钾含量, 对碱解氮含量影响不显著, 增加土壤有机碳含量, 平均有机碳含量比CN处理和CP处理分别高0.36和0.61 g/kg, 并且各层之间有机碳含量分布较均匀; CP处理破坏0~20 cm土壤结构, 在20~30 cm土层形成犁底层, 增加土壤容重, 并且只增加10~20 cm土层有机碳含量, 各层养分不均; CN处理虽未对土壤结构造成破坏, 但只增加0~10 cm土层有机碳含量, 使土壤养分在表层积累。投入产出方面, CT处理周期总投入与CN处理差异不显著, 两者均显著低于CP处理, 但CT处理粮食总产量和总产值显著高于CN处理和CP处理, 组合耕作能够提高物质利用率、劳动生产率和产投比, 节本增效显著。CT、CN和CP的周期生产力综合评价得分分别为4.85、3.8和1.7, CT处理得分显著高于CN处理和CP处理, 说明组合耕作具有较高的周期生产力。该研究可为小麦-玉米两熟区耕作模式的优化提供参考, 促进两熟区的生产力提升和节本增效。

关键词: 耕作; 土壤; 团聚体; 周期生产力; 组合耕作模式; 土壤容重; 土壤养分; 产量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.005

中图分类号: S345

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-16-0035-09

张银平, 迟岩杰, 王占滨, 等. 麦-玉两熟区组合耕作模式周期生产力综合评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 35-43. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.005 http://www.tcsae.org

Zhang Yinping, Chi Yanjie, Wang Zhanbin, et al. Comprehensive evaluation of periodic productivity of combined tillage mode in wheat-maize double cropping areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(16): 35-43. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.005 http://www.tcsae.org

0 引言

现有耕作模式主要有精耕细作和保护性耕作, 2种耕作模式对人类社会的发展贡献巨大, 但也存在严重不足。在黄淮海两熟区, 传统精耕细作模式下播前耕作工序多, 过程复杂, 耗时长, 影响下茬作物及时播种, 而且长期机械化翻耕、旋耕等, 导致土壤结构破坏, 养分流失, 肥力减退, 犁底层变浅变厚^[1-3]。保护性耕作虽然在一熟区得到了大面积推广, 但在两熟区应用有一定的局限性, 秸秆大量覆盖影响播种, 长期不进行翻耕, 使养分和杂草种子、虫卵等在地表富集, 病虫草害严重, 农药(包含除草剂)使用量超标, 生态环境污染^[4-6]。本研究集成传统精耕细作和保护性耕作的技术优点,

设计组合耕作模式, 通过定位试验对其周期生产力进行综合评价, 以期对麦玉两熟区土地生产力的提升提供参考。

目前针对保护性耕作模式和效益的研究较多, Olivella等^[7]评价了保护性耕作对土壤理化性质的影响; 徐阳春等^[8-9]分析了保护性耕作在平衡土壤内部生物和微生物以及减少草害、虫害等方面的生态环境效益; 刘振东^[10]研究了保护性耕作在防止风蚀方面的作用。原君静等^[11]选取了5个等级18个指标对保护性耕作的适应性及生态效益进行了评价; 刘月楼等^[12]研究了保护性耕作对农作物年产量的影响, 从产量角度评价了保护性耕作的经济效益; 周景奎等^[13]从投入与产出比角度分析了保护性耕作的经济效益; 杨爱民等^[14]从用工角度分析了保护性耕作的经济效益。高旺盛^[15]提出保护性耕作“三少两高”综合效益评价原则, 陈源泉等^[16-17]在其基础上, 提出了综合保护度综合反映指标, 评价不同模式的优缺点。对生产力评价的研究还较少, 刘世平^[18]评价了稻麦两熟制不同栽培方式对农田生态环境和周年生产力的影响, 但现有研究的评价体系对生产力的评价一般是以单一年份或周年为期限, 不能很好地反应耕作模式的长期效应。本研究建立“翻耕-免耕-深松-免耕”4 a为一个周期

收稿日期: 2020-03-19 修订日期: 2020-07-05

基金项目: 十三五国家重点研发计划“小麦玉米全程机械化技术模式综合效益评价”(2018YFD0300607); 山东省自然科学基金“黄淮海两熟区生态沃土机械耕作模式及作用机理研究”(ZR2018LD002); 山东省现代农业产业体系玉米创新团队机械加工岗位专家项目。

作者简介: 张银平, 博士, 讲师, 研究方向: 旱作农业机械化体系及装备。

Email: zhangyinping929@163.com

*通信作者: 刁培松, 教授, 博士生导师, 主要从事旱作农业机械化体系及装备研究。Email: dps@sdu.edu.cn

的组合耕作模式, 对不同耕作模式的生产力(即周期生产力)进行综合评价, 以更好地反映组合耕作模式的连续效应, 明确不同耕作模式的周期生产力, 为在黄淮海两熟区的推广提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2012 年 9 月开始在山东省淄博市临淄区凤凰镇东申村富群农机专业合作社试验基地进行, 试验基地位于山东省中部的平原地区, 地处北纬 36.88°, 东经 118.23°, 年降水量 650~800 mm, 7、8 月份降水量集中, 年均气温 12.2 °C, 属典型的北温带大陆性气候。土壤为棕褐土, 试验前, 该地长期进行传统翻耕作业, 翻耕深度 15~18 cm, 犁底层较浅、较厚, 秸秆不还田, 0~20 cm 耕层土壤平均有机质含量 1.16%, 平均容重 1.38 g/cm³。常年种植作物为小麦和玉米。

1.2 试验方案

试验设计 3 个处理: 组合耕作(Combine Tillage, CT)、连续免耕(Continuous No-tillage, CN)和连续翻耕(Continuous Ploughing, CP), 每个处理面积 1 500 m², 3 次重复。各处理每季秸秆全量还田, 还田方式为切碎均匀抛撒, 秸秆长度≤100 mm; 翻耕深度为 20 cm, 由于铧式犁翻耕后无法直接进行小麦播种, 在翻耕后进行旋耕整地; 深松深度为 30 cm, 深松铲间距 60 cm。4 a 间各处理作业工序如下:

CT: 翻耕(第 2 年免耕、第 3 年深松、第 4 年免耕)——小麦播种——小麦田间管理——小麦收获与秸秆粉碎还田——玉米贴茬直播——玉米田间管理——玉米收获与秸秆粉碎还田。

CN: 小麦免耕播种——小麦田间管理——小麦收获与秸秆粉碎还田——玉米贴茬直播——玉米田间管理——玉米收获与秸秆粉碎还田。

CP: 翻耕——小麦播种——小麦田间管理——小麦收获与秸秆粉碎还田——玉米贴茬直播——玉米田间管理——玉米收获与秸秆粉碎还田。

1.3 供试品种与种植方式

供试小麦品种为济麦 22, 宽苗带播种, 苗带宽度 12~14 cm, 播量、播种时间及收获时间如表 1 所示。供试玉米品种为登海 605, 行距 60 cm, 播种密度、播种时间及收获时间如表 2 所示。

表 1 小麦播量、播种及收获时间

Table 1 Seeding rate, sowing time and harvesting time of wheat

年份 Year	播种时间 Sowing time	播量 Seeding rate/(kg·hm ⁻²)			收获时间 Harvest time
		CT	CN	CP	
2012—2013	10 月 9 日	120	150	120	6 月 10 日
2013—2014	10 月 10 日	150	150	120	6 月 12 日
2014—2015	10 月 8 日	120	150	120	6 月 10 日
2015—2016	10 月 12 日	150	150	120	6 月 12 日

注: CT 为组合耕作, CN 为连续免耕, CP 为连续翻耕, 下同。

Note: CT is combine tillage, CN is continuous no-tillage, CP is continuous ploughing. The same below.

表 2 玉米播量、播种及收获时间

Table 2 Seeding rate, sowing time and harvesting time of corn

年份 Year	播种时间 Sowing time	播种密度 Seeding rate /10 ⁴ (株·hm ⁻²)	收获时间 Harvest time
2013	6 月 8 日	6.75	10 月 9 日
2014	6 月 12 日	6.75	10 月 8 日
2015	6 月 10 日	6.75	10 月 10 日
2016	6 月 11 日	6.75	10 月 8 日

小麦播种时深施基肥: 纯 N 225 kg/hm², P₂O₅ 180 kg/hm², K₂O 180 kg/hm², 各处理在拔节期统一追施纯 N 100 kg/hm²; 玉米播种时深施基肥: 纯 N 150 kg/hm², P₂O₅ 120 kg/hm², K₂O 100 kg/hm², 大喇叭口期追施纯 N 120 kg/hm²。

采用卷盘式喷灌机进行灌溉。小麦生育期灌溉越冬水 60 mm、拔节水 60 mm、灌浆水 60 mm; 玉米生育期灌溉拔节水 80 mm、灌浆水 80 mm。

翻耕年, 冬小麦喷施 1 次除草剂, 1 次杀虫剂; 免耕和深松年, 喷施 2 次除草剂、2 次杀虫剂。玉米均喷施 2 次除草剂、1 次杀虫剂。

2 评价指标与评价方法

2.1 评价指标选取

评价指标的选取是能否进行综合评价的关键, 对后期评价的科学性至关重要。本研究在遵循科学合理、具有层次性和易于评价等原则的基础上, 结合已有研究, 选出目前运用较多、农民普遍关心或认为比较重要、能够准确获取的评价指标, 土壤综合质量、成本投入与作物产出是生产力的重要表现, 因此本文建立包含这 3 方面的生产力综合评价指标体系。

土壤综合质量指标(Integrated Quality Index, IQI)包括: 土壤结构指标(Structure Index, SI)和土壤养分指标(Nutrient Index, NI)。对于土壤结构指标, 土壤水稳性大团聚体以及土壤团聚体平均质量直径(Mean Weight Diameter, MWD)是体现土壤结构稳定性的重要指标^[19-21], 土壤容重是衡量耕作层土壤耕作质量的重要指标^[22], 因此土壤结构指标选取土壤水稳性大团聚体、大团聚体平均质量直径(MWD)和土壤容重; 对于土壤养分指标, 常用的指标为: 有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量。本研究在 2016 年秋季玉米收获后进行土壤取样测定经过 4 a 耕作后的土壤结构和养分含量, 取样时为避免深松位置及玉米根茬对土壤质量的影响, 取样点位于距离 2014 年深松位置 15 cm 处。

成本投入包括农资投入、机械作业成本投入和人工投入, 通过调研当地农业合作社的农资平均价格、机械作业平均收费及用工平均费用等确定不同耕作模式种子、化肥、农药等物资投入和各环节的机械作业投入、人工费投入。

作物产出包括作物产量和产值, 作物成熟后, 在不同耕作模式的试验田中分别随机选取 20 m×2.4 m 的 3 个样区测产, 并根据当年收购价格计算产值。

2.2 评价指标值的处理

2.2.1 标准化处理

由于土壤的各项理化指标值的量纲不同，对土壤质量影响的贡献率也不相同，在计算土壤综合质量指标时，不能直接将各项指标简单累加，必须对各评价指标进行标准化，以消除各评价指标之间的量纲差异。本文通过建立隶属度函数，计算土壤的各项理化指标的隶属度值，来表示土壤各项理化指标的状态值。根据文献[18]可知，在一定的范围内，耕作对土壤质量的效应曲线均呈 S 型，土壤大团聚体平均质量直径 (WMD) 越大土壤质量越好，土壤养分指标越高土壤越肥沃，所以本文中土壤平均质量直径 (WMD) 和土壤养分指标的隶属度函数也采用 S 型曲线，相应的隶属度函数为

$$f(x) = \begin{cases} 1.0, & x \geq x_2 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1, & x_1 \leq x < x_2 \\ 0.1, & x < x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $f(x)$ 为测定的土壤指标的隶属度值； x 为土壤指标的测定值， x_1 为土壤指标所在的 S 型隶属度函数曲线的第一转折点取值， x_2 为土壤指标所在的 S 型隶属度函数曲线的第二转折点取值。根据测定的土壤各项指标值的范围确定其所在隶属度函数曲线的转折点值，本研究中土壤结构指标 MWD 和土壤养分指标有机碳、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾含量的第一转折点取值分别为 0.3 mm、7 g/kg、0.7 g/kg、60 mg/kg、25 mg/kg、100 mg/kg，第二转折点取值分别为 0.7 mm、10 g/kg、0.9 g/kg、80 mg/kg、35 mg/kg、115 mg/kg。

土壤容重反应的是土壤的紧实度，容重太大或太小的都不利于作物生长，其所在隶属度函数应该有且仅有一个最大值，因此土壤容重的隶属度函数为抛物线型，相应的隶属度函数为

$$f(n) = \begin{cases} 0.9(n-n_3)/(n_4-n_3)+0.1, & n_3 < n \leq n_4 \\ 1.0, & n \geq n_2 \\ 0.9(n-n_1)/(n_2-n_1)+0.1, & n_1 \leq n < n_2 \\ 0.1, & n < n_1 \text{ 或 } n > n_4 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $f(n)$ 为土壤容重的隶属度值， n 为土壤容重的测定值， n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 分别为土壤容重指标所在的抛物线型隶属度函数曲线的转折点取值，根据测定的土壤容重值的大小范围确定其所在隶属度函数曲线的转折点取值为 $n_1=1.25 \text{ g/cm}^3$ ， $n_2=1.30 \text{ g/cm}^3$ ， $n_3=1.35 \text{ g/cm}^3$ ， $n_4=1.40 \text{ g/cm}^3$ 。

各项土壤质量评价指标的隶属度值的范围为 0.1~1.0，指标隶属度值的大小反映指标的隶属程度，根据实际情况，土壤质量值一般不会为 0，因此将最小值定为 0.1，最小值 0.1 表示土壤质量最差状态，最大值 1.0 表示土壤质量最好状态。

2.2.2 单项指标权重确定

土壤的各项指标对土壤综合质量的影响作用是不同的，因此必须给各项指标赋予一定的权重。本文采用相关系数法^[23]计算各项土壤质量评价指标之间的相互关系，建立各项指标之间的相关系数矩阵 G ，然后由相关系数矩阵求出其逆矩阵 G^{-1} ，由所得的逆矩阵中的相关元

素计算偏相关系数，单项土壤质量指标与其他指标偏相关系数的平均值占所有指标偏相关系数平均值之和的百分比即为单项土壤质量指标占土壤综合质量指标的权重。通过计算得到各项指标权重如表 3 所示。

表 3 土壤指标权重计算结果
Table 3 Calculation results of soil index weight

指标 Indexes	权重值 Weight values
容重 Soil bulk density	0.859 6
MWD	0.140 4
有机碳含量 Organic carbon content	0.193 8
全氮含量 Total nitrogen content	0.208 6
碱解氮含量 Alkali hydrolyzed nitrogen content	0.191 3
速效磷含量 Available phosphorus content	0.225 3
速效钾含量 Available potassium content	0.180 9

2.2.3 土壤质量综合评价指标计算

根据加乘原则，把 2 项土壤结构指标和 5 项土壤养分指标进行加法合成，从而求得土壤结构指标 (SI) 和养分指标值 (NI)，再将 SI 和 NI 进行乘法合成，求得土壤质量的综合评价指标 IQI。

$$SI = W(S) \times f(S) \quad (3)$$

$$NI = W(N) \times f(N) \quad (4)$$

$$IQI = NI \times SI \quad (5)$$

式中 $W(S)$ 为土壤结构指标的权重值； $W(N)$ 为土壤养分指标的权重值； $f(S)$ 为土壤结构指标的隶属度值； $f(N)$ 为土壤养分指标的隶属度值。

2.3 周期生产力评价方法

高产、高效、可持续是现代农业发展的目标，本文运用综合评分法对组合耕作模式的周期生产力进行综合评价，选择产量和产值作为高产指标，低成本和高收入作为高效的指标，选用土壤养分指标 NI 和土壤综合质量指标 IQI 作为可持续发展的指标。将各项指标及权重代入公式 (6)。

$$\sum W_i P_i = W_1 P_1 + W_2 P_2 + \dots + W_i P_i \quad (6)$$

式中 $\sum W_i P_i$ 为某一耕作模式的总得分； P_i 为各项指标得分； W_i 为各项指标权重。

根据目前高产、高效和可持续在总指标中的相对重要性，通过查阅相关资料^[17-19]、向两熟区农业合作社发放调查问卷 (22 份)、电话咨询相关专家 (7 人) 的方式确定高产、高效和可持续在总指标中的权重分别为 35%、35% 和 30%。其中高产指标中的周期总产量权重为 20%，周期总产值权重为 15%；高效指标中周期总投入权重 15%，周期纯收入权重 20%，可持续指标中土壤养分指标 NI 权重 10%，土壤综合质量指标 IQI 权重 20%。

3 结果与分析

3.1 周期土壤质量评价

连续 4 a 耕作后不同耕作模式 0~30 cm 土层的 $R_{0.25}$ (粒径大于 0.25 mm 的水稳性大团聚体) 含量、平均质量直径和土壤容重的测量结果如表 4 所示。

3.1.1 耕作模式对土壤大团聚体含量及 MWD 的影响

土壤水稳性大团聚体 (直径大于 0.25 mm 的土壤团

粒)反映了土壤结构的稳定性、持水性和抗侵蚀的能力,比较表4中的水稳性大团聚体含量可知,在0~30 cm土层,土壤水稳性大团聚体含量从高到低均为CT、CN和CP。在0~10 cm土层,CT处理与CN处理差异不显著,两者均显著高于CP处理($P<0.05$),分别高35.54%和32.42%;在>10~20 cm土层各处理之间差异显著($P<0.05$),CT处理比CN处理高8.93%,比CP处理高达22.79%,CN处理比CP处理高12.72%;在>20~30 cm土层CT处理比处理CN和CP分别高16.17%和34.33%。比较0~30 cm土层的水稳性大团聚体平均含量可知,CT处理比CN处理和CP处理分别高8.2%和30.4%。说明秸秆连续还田条件下,与连续翻耕模式和连续免耕模式相比,组合耕作模式显著增加0~30 cm土层土壤水稳性大团聚体含量,连续免耕模式只增加0~10 cm土层土壤水稳性大团聚体含量,连续翻耕模式则显著降低0~30 cm土壤水稳性大团聚体含量,对土壤大团聚体有破坏作用。分析可知,耕作对土壤水稳性大团聚体的形成有影响,连续翻耕模式由于过度耕作对表层土壤水稳性大团聚体结构造成破坏,同时在>20~30 cm土层形成较厚的犁底层,不利于土壤水稳性大团聚体的形成,但在>10~20 cm土层,连续翻耕的土壤水稳性大团聚体含量比0~10 cm土层和>20~30 cm土层高,可能是因为连续翻耕将秸秆翻到>10~20 cm土层,增加了该土层的有机碳含量,有利于土壤水稳性大团聚体的形成;连续免耕模式由于耕作较少对土壤水稳性大团聚体的破坏作用小,其各层土壤的水稳性大团聚体含量均比连续翻耕高,地表秸秆覆盖增加了0~10 cm土层的土壤有机碳的含量,有利于土壤水稳性大团聚体的形成,但随着免耕年限的增加,机械对土壤的压实次数增多,导致土壤表层紧实度增加,透气、透水性变差,不利于>10~20和>20~30 cm土层土壤水稳性大团聚体的形成;组合耕作模式在4 a周期内进行1次翻耕,可将表层积累的有机碳翻到亚表层,增加亚表层土壤有机碳含量,免耕年份的秸秆覆盖在地表,避免雨水对地面的直接冲刷,并在4 a周期内进行1次深松,打破犁底层,增强土壤的透气、透水能力,促进土壤水稳性大团聚体的形成,从而显著增加0~30 cm土壤水稳性大团聚体含量。

土壤团聚体的粒径分布反映土壤质量,土壤大团聚体平均质量直径(MWD)是表示土壤团聚体粒径分布的常用指标,水稳性团聚体MWD越大表示土壤团聚体的平均粒径团结构度越高,稳定性越强。由表4可知,在0~30 cm土层,各处理的MWD从高到低为CT、CN和CP。在0~10 cm土层,CT处理和CN处理之间差异不显著,两者均显著高于CP处理;在>10~20 cm土层CT处理显著高于CN和CP处理,CN和CP处理差异不显著;在>20~30 cm土层,各处理差异显著。分析其原因可知,耕作对土壤水稳性团聚体的稳定性影响显著($P<0.05$),连续翻耕破坏土壤水稳性团聚体的稳定性,不利于形成较大直径的水稳性大团聚体;CN处理的耕作强度比CT处理小,但在>10~20和>20~30 cm土层的土壤水稳性团聚体MWD却显著低于CT处理,可能是由于连续免耕

的秸秆长期覆盖在地表,有机碳在表层积累,>10~20和>20~30 cm土层的有机质含量较少,不利于形成较大直径的水稳性大团聚体。

表4 4 a耕作后不同耕作模式0~30 cm土层的 $R^*0.25$ 含量、平均质量直径和土壤容重

Table 4 $R^*0.25$ content, Mean Weight Diameter(MWD) and soil bulk density of different tillage modes in 0~30 cm soil layers after four years

土层 Soil layers/cm	处理 Treatments	$R^*0.25$ 含 量 $R^*0.25$ content	MWD/mm	土壤容重 Soil bulk density/(g·cm ⁻³)
0~10	CT	39.55a	0.62a	1.332c
	CN	38.64a	0.60a	1.382b
	CP	29.18c	0.48b	1.454a
>10~20	CT	38.41a	0.60a	1.342c
	CN	35.26b	0.53b	1.532a
	CP	31.28c	0.52b	1.415b
>20~30	CT	29.31a	0.54a	1.501c
	CN	25.23b	0.47b	1.543b
	CP	21.82c	0.37c	1.612a

注:同列不同字母表示同一土层深度的不同处理间差异显著($P<0.05$); $R^*0.25$ 表示粒径大于0.25 mm的水稳性大团聚体。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences between different treatments of the same sampling depth ($P<0.05$); $R^*0.25$ means the particle size of water stable macroaggregates is greater than 0.25 mm. The same below.

3.1.2 耕作模式对土壤容重的影响

土壤容重反映土壤的松紧度,适宜的土壤容重有利于植物根系生长对水分养分的吸收,所以能否创造松紧适宜的耕作层是衡量土壤耕作质量的重要指标,一般适宜作物生长的土壤容重在1.3~1.4 g/cm³之间。根据表4,4 a组合耕作后0~10和>20~30 cm土层土壤容重大小顺序从高到低均为CP、CN和CT,>10~20 cm土层土壤容重高到低的顺序为CN、CP和CT。分析原因可能是CP处理连续4 a进行翻耕,使地表裸露,经喷灌水、雨水等的冲刷,表层土壤板结严重,导致0~10 cm土壤容重增加;连续翻耕在>20~30 cm形成犁底层,增加了该土层土壤容重,大于1.5 g/cm³,不利于作物的生长;连续4 a的秸秆还田,翻耕到>10~20 cm土层,使该土层有机质含量高于CN处理,因此该层土壤容重小于CN处理。而CN处理由于4 a未进行耕作,对土壤大团聚体的破坏作用小,同时又有秸秆覆盖在地表,增加了表层土壤有机质含量,0~10 cm土层土壤容重较处理CP小,但连续4 a免耕的土壤遭到碾压后紧实度增加,4 a未翻耕,>10~20 cm土层土壤有机质较少,团聚体含量少,容重有所增加,略大于CP处理,显著大于CT处理;>20~30 cm土层CN处理由于连续4 a未进行翻耕,试验前长期传统耕作形成的犁底层变得不明显,土壤容重显著小于CP处理,但由于未进行深松作业,原有的犁底层并未被打破,因此土壤容重显著大于CT处理。0~20 cm耕层的土壤质量反映土壤维持作物生长的能力,是生产力的重要体现^[24],CT处理在4 a内进行一次翻耕,可显著减小耕层(0~20 cm)土壤容重;第3年进行了深松,打破了原有的犁底层,有效减小了>20~30 cm的土壤容重。比较3种耕作模式下的土壤容重可知,连续4 a组合耕作后,CT

处理 0~20 cm 土层的平均土壤容重比初始容重减小 0.043 g/cm³, 0~30 cm 土层的平均土壤容重比连续免耕和连续翻耕分别小 0.089 和 0.125 g/cm³, 可见组合模式可以有效降低 0~30 cm 土层土壤容重。

3.1.3 耕作模式对土壤养分的影响

秸秆作为植物残体, 腐解后能够提供作物生长所需的大量和微量元素, 秸秆还田可以减少肥料的施用量。表 5 是不同耕作模式的土壤养分含量, 可以看出, 秸秆还田 4 a 后, 全氮、速效磷、速效钾含量都有显著增加, 但碱解氮增加不显著。耕作模式对 0~30 cm 土层的全氮、速效磷、速效钾含量的影响显著 ($P<0.05$), 对>20~30 cm 土层土壤碱解氮的含量影响显著, 但对 0~10 和>10~20 cm 土层碱解氮影响不显著。0~10 cm 土层, CT 处理和 CN 处理的全氮含量、速效磷含量和速效钾含量都显著高于 CP 处理, CT 处理和 CN 处理之间差异不显著; >10~20 cm 土层, CT 处理和 CP 处理的全氮含量、速效磷含量和速效钾含量均显著高于 CN 处理, CT 处理和 CP 处理之间差异不显著; >20~30 cm 土层, CT 处理的全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量均最高, 特别是速效磷含量显著高于 CN 处理和 CP 处理。比较 0~30 cm 土层全氮、速效磷和有效钾的平均含量可知, CT 处理的平均全氮含量分别比 CN 处理和 CCT 处理高 0.05 和 0.09 g/kg, 速效磷平均含量分别高 0.62 和 1.45 mg/kg,

有效钾平均含量分别高 1.46 和 3.02 mg/kg。说明组合耕作模式能够显著增加 0~30 cm 土层的全氮、速效磷、有效钾的含量。

不同耕作模式的有机碳含量方面, 0~10 cm 不同耕作模式的土壤有机碳含量差异达到显著水平 ($P<0.05$), 有机碳含量从高到低的顺序为 CN、CT 和 >CP, CN 处理和 CT 处理差异不显著, 但两者均显著高于 CP 处理; >10~20 cm 土层土壤有机碳含量从高到低的顺序为 CT、CP 和 CN, CT 处理与 CP 处理差异不显著, 但两者均显著高于 CN 处理 ($P<0.05$); >20~30 cm 土层土壤有机碳含量从高到低的顺序为 CT、CN 和 CP, CT 处理有机碳含量显著高于 CN 处理和 CP 处理 ($P<0.05$), CN 处理和 CP 处理差异不显著。说明在秸秆还田条件下, 连续免耕模式只增加 0~10 cm 土层土壤有机碳含量, 使得有机碳在表层积累, 而亚表层出现养分分化现象, 这也是 CN 处理在 10~20 cm 土层土壤大团聚体含量少、土壤容重较大的原因; 连续翻耕模式增加>10~20 cm 土层土壤有机碳含量, 而 0~10 和>20~30 cm 土层有机碳含量显著小于组合耕作模式和连续免耕模式, 有机碳在各层之间的分布也不均匀, 特别是>20~30 cm 土层有机碳含量很低; 而组合耕作模式可显著增加 0~30 cm 土层土壤有机碳含量, 平均有机碳含量比连续免耕和连续翻耕分别高 0.36 和 0.61 g/kg, 并且各层之间有机碳含量分布较均匀。

表 5 4 a 后不同耕作模式的土壤养分含量
Table 5 Soil nutrient content of different tillage modes after four years

土层 Soil layers/cm	处理 Treatments	有机碳 Organic carbon/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali hydrolyzed nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/(mg·kg ⁻¹)
0~10	CT	8.82 a	0.88a	76.27a	32.84a	114.94a
	CN	8.92 a	0.89a	77.39a	33.28a	115.36a
	CP	8.04 b	0.72b	76.74a	30.54b	111.55b
>10~20	CT	8.66a	0.86a	73.21a	31.98a	112.32a
	CN	8.06b	0.76b	72.03a	30.60b	110.56b
	CP	8.32 a	0.82a	72.12a	31.26a	113.47a
>20~30	CT	8.12 a	0.79a	68.02a	31.01a	108.36a
	CN	7.53 b	0.72b	67.56a	29.65b	105.32b
	CP	7.40 b	0.70c	60.12b	29.24b	101.53c

3.1.4 土壤综合质量评价

将各项土壤指标按式 (1) 和式 (2) 标准化, 然后按式 (3) 计算得到土壤结构指标 SI, 按式 (4) 计算得到土壤养分指标 NI, 再按式 (5) 计算得到土壤综合质量指标 IQI, 如表 6 所示。从土壤结构指标看, CT 处理在各土层的土壤结构指标均最高, 说明组合耕作模式可以提高土壤结构质量, 连续免耕只提高>20~30 cm 土层土壤结构质量, 连续翻耕对各层土壤结构均造成破坏; 从土壤养分指标看, CT 处理的各土层土壤养分指标均最高, 说明组合耕作模式提高土壤养分质量, 而连续免耕只提高表层土壤养分质量, 连续翻耕提高>10~20 cm 土层土壤养分质量; 从土壤综合质量指标看, CT 处理的各土层土壤综合质量指标均最高, 说明组合耕作模式能够提高土壤的综合质量, 土壤生产力较高。

表 6 标准化后的土壤质量指标
Table 6 Standardized soil quality indexes

土层 Soil layers/cm	处理 Treatments	SI	NI	IQI
0~10	CT	0.974 7a	0.511 2a	0.498 3a
	CN	0.359 8c	0.573 6a	0.206 4c
	CP	0.712 2b	0.364 6b	0.259 7b
>10~20	CT	1.012 6a	0.449 5a	0.455 2a
	CN	0.507 9b	0.359 3c	0.182 5b
	CP	0.153 7c	0.419 6a	0.064 5c
>20~30	CT	0.156 9a	0.345 4a	0.054 2a
	CN	0.169 5a	0.247 0b	0.041 9b
	CP	0.122 1b	0.186 3c	0.022 7c

注: SI 为土壤结构指标, NI 为土壤养分指标, IQI 为土壤综合质量指标。
Note: SI is Soil Structure Index, NI is Soil Nutrient Index, IQI is Soil Integrated Quality Index.

3.2 周期产量和产值评价

3.2.1 耕作模式对作物产量的影响

2013—2016 年间不同耕作模式作物产量与产值计算结果如表 7 所示。由表 7 可知, 2013 年 CN 处理的小麦产量和玉米产量均显著高于 CT 处理和 CP 处理, 这是因为 CN 处理长期翻耕后进行了免耕, 减少了耕作对土壤团聚体的破坏, 改善了土壤结构, 并且 2014 年 CT 处理进行免耕后小麦产量和玉米产量均显著高于 CP 处理, 说明长期翻耕后免耕可以提高小麦和玉米产量, 小麦增产幅度为 4%~6.5%, 玉米增产幅度为 7.5%~9%; 而 2014 年 CN 处理小麦产量和玉米产量仍显著高于 CP 处理, 小麦产量比 CP 处理高 4.8%, 玉米产量比 CP 处理高 7.7%, 说明 CN 处理连续免耕 2 a 土壤结构仍能保持较好的状态, 能维持增产优势, 但 2015 年 CN 处理小麦产量比 CP 处理仅高 2%, 玉米产量差异不显著, 这是因为连续 3 a 免耕, 随着机器进地次数的增多, 对表层土壤的压实作用导致土壤紧实度增加, 表层土壤容重增大, 土壤结构变差, 使得增产优势有所减弱; 而 2015 年 CT 处理进行深松后的小麦和玉米产量显著高于 CN 处理和 CP 处理, 小麦产量分别高 15.56%和 22.68%, 玉

米产量分别高, 说明免耕 1 a 后深松能够改善土壤结构, 降低土壤容重, 显著提高小麦和玉米产量, 并且 2016 年 CT 处理的小麦产和玉米产量均显著高于 CN 处理和 CP 处理, 其中小麦产量比 CN 处理和 CP 处理分别高 16.22%和 17.52%, 玉米产量比 CN 处理和 CP 处理分别高 3.69%和 7.49%, 增产幅度较大, 说明深松后免耕仍能保持较好的土壤结构, 增产显著, 但 CN 处理的小麦与玉米产量与 CP 处理无显著差异, 可能是因为连续 4 a 未进行翻耕, 养分在土壤表层富集, 亚表层养分分化, 不利于作物根系生长, 导致增产作用减弱, 需要进行必要的耕作。

3.2.2 周期总产量与总产值评价

从表 7 中可以看出, 4 a 周期各处理小麦总产量和总产值以及玉米总产量和总产值从高到低的顺序均为 CT、CN 和 CP。CT 处理小麦总产量显著高于 CN 处理和 CP 处理, 分别高 7.7%和 10.7%, CN 处理与 CP 处理差异不显著; CT 处理的玉米总产量与 CN 处理无显著差异, 两者均显著高于 CP 处理; CT 处理的粮食总产值显著高于 CN 处理和 CP, 处理间差异显著。因此组合耕作模式具有较高的周期生产力。

表 7 2013-2016 年不同耕作模式的作物产量与产值
Table 7 Crop yields and output value of different tillage modes from 2013 to 2016

年份 Years	处理 Treatments	小麦 Wheat			玉米 Corn		
		产量 Yields/(kg·hm ⁻²)	价格 Price/(元·kg ⁻¹)	产值 Output value/(元·hm ⁻²)	产量 Yields/(kg·hm ⁻²)	价格 Price/(元·kg ⁻¹)	产值 Output value/(元·hm ⁻²)
2013	CT	7 027b		15 459.4	7 605b		16 731.0
	CN	7 324a	2.2	16 112.8	8 175a	2.2	17 985.0
	CP	7 088b		15 593.6	7 680b		16 896.0
2014	CT	7 485a		18 712.5	8 206a		18 873.8
	CN	7 369a	2.5	18 422.5	8 103a	2.3	18 636.9
	CP	7 028b		17 570.0	7 524b		17 305.2
2015	CT	9 356a		22 454.4	10 357a		23 303.3
	CN	8 096b	2.4	19 430.4	9 586b	2.25	21 568.5
	CP	7 926c		19 022.4	9 562b		21 514.5
2016	CT	9 081a		19 978.2	10 163a		16 260.8
	CN	7 813b	2.2	17 188.6	9 801b	1.6	15 681.6
	CP	7 727b		16 999.4	9 455b		15 128.0
总计 Total	CT	32 949a		76 604.5a	36 331a		75 168.9a
	CN	30 602b		71 154.3b	35 665a		73 872.0a
	CP	29 769c		69 185.4c	34 221b		70 843.7b

3.3 周期经济效益评价

周期经济效益包括周期投入和周期产出, 其中周期投入包含种子、化肥、农药等农资投入、机械投入和人工投入, 如表 8 所示。在施肥量和灌溉量相同的条件下, 机械作业费用从高到低的顺序为 CP、CT 和 CN, 处理间差异显著, 由于连续免耕减少了耕整地机械作业环节, 因此 CN 处理每公顷的机械作业投入最低, 相应的人工费投入也较低; CP 处理要进行 4 a 的翻耕整地, 翻耕后还要进行旋耕整地, 因此机械作业费投入最高, 相应的人工费投入也最高; 而组合耕作在 4 a 内进行 1 次翻耕和 1 次深松, 机械作业费用投入比连续免耕高, 但显著低于连续翻耕, 相应的人工费投入也显著低于连续翻耕, 与连续免耕无显著差异, 是相对轻简化的耕作模式。各处

理农资投入从高到低的顺序为 CN、CP 和 CT, 在施肥量相同的情况下, CT 处理和 CN 处理比 CP 处理投入更多的种子和农药, 这是由于免耕年份的秸秆覆盖影响小麦出苗, 且不能将杂草和虫卵翻扣在底层, 需要化学控草和杀虫, 但与连续免耕相比, 组合耕作模式在 4 a 周期内进行的一次翻耕能够显著减少农药施用量, 减少农药对生态环境的污染, 是相对生态的耕作模式。从周期总投入看, 各处理从高到低得顺序为 CP、CT 和 CN, CT 处理和 CN 处理差异不显著, 总投入分别比 CP 处理每公顷节约 3 069 和 3 969 元, 可见组合耕作模式和连续免耕具有良好的省工节本效应。

表 9 表示的是为不同耕作模式的周期经济效益, 分析可知, 4 a 周期不同耕作模式的个处理纯收入、物质投入净

产率、劳动投入净产率、产投比的从高到低的顺序均为 CT、CN 和 CP。在一个周期内，CT 处理的每公顷总收入、纯收入和净产值均显著高于 CN 处理和 CP 处理，总收入比 CN 处理和 CP 处理分别高 6 747.1 和 11 744.3 元，纯收入比 CN 和 CP 处理分别增加 5 847.1 和 14 813.3 元，说明组合耕作模式具有良好的经济效益。从物质和劳动力的利用方面看，CT 处理和 CN 处理的物质投入净产率、劳动投入净产率以及产/投比均显著高于 CP 处理，说明组合耕作模式和连续免耕能够提高物质农资的利用率，提高劳动效率。

表 8 2013—2016 年不同耕作模式的总投入
Table 8 Total cost of different tillage modes from 2013 to 2016 (元·hm⁻²)

处理 Treatments	机械作业费用 Mechanical costs						农资投入 Agricultural materials costs			人工费 Labor cost	总投入 Total costs
	耕整地 Cultivation	播种 Seeding	灌溉 Irrigation	植保 Protection	收获 Harvest	秸秆还田 Straw returning	种子 Seed	化肥 Fertilizer	农药 Pesticide		
CT	1 875b	3 738a	255a	990b	7 460a	1 800a	5 112b	14 852a	2 550b	4 800b	43 432b
CN	0c	3 825a	255a	1 080a	7 460a	1 800a	5 280a	14 852a	3 000a	4 980b	42 532b
CP	4 560a	3 650c	255a	900b	7 460a	1 800a	4 944c	14 852a	2 100c	5 980a	46 501a

表 9 不同耕作模式的周期经济效益分析
Table 9 Analysis of periodic economic benefits of different tillage modes

处理 Treatments	总收入 Total income /(元·hm ⁻²)	物资成本 Material costs/(元·hm ⁻²)	劳动成本 Labor costs /(元·hm ⁻²)	总成本 Total cost /(元·hm ⁻²)	净产值 Net output value /(元·hm ⁻²)	纯收入 Net income /(元·hm ⁻²)	物质投入净产率 Net productivity of material input	劳动投入净产率 Net productivity of labor input	产投比 Input-output ratio
CT	151 773.4a	38 632b	4 800b	43 432b	113 141.4a	108 341.4a	2.93a	23.57a	3.49 a
CN	145 026.3b	37 552b	4 980b	42 532b	107 474.3b	102 494.3b	2.86a	21.58 a	3.41 a
CP	140 029.1c	40 521a	5 980a	46 501a	99 508.1c	93 528.1c	2.46b	16.64 b	3.01b

注：总收入和纯收入中未计各项政府补贴，总成本中未计算流转土地租金。物质投入净产率是指净产值与物资成本的比值，劳动投入净产率是指净产值与劳动成本的比值。
Note: Government subsidies are not included in total income and net income, the transfer land rent is not calculated in the total cost. Net productivity of material input refers to the ratio of net output value to material cost, the net productivity of labor input refers to the ratio of net output value to labor cost.

3.4 周期综合生产力评价

评分标准应包含各项指标数据，根据测定及计算的各项指标数据，划分评分段，评分标准及结果如表 10 所示。将各指标得分及权重代入式（6），计算得到不同耕

作模式的得分。CT 处理得分 4.85，CN 处理得分 3.8，CP 处理得分 1.7，CT 处理得分显著高于 CN 处理和 CP 处理，组合耕作模式的周期综合生产力最高，连续免耕次之，连续翻耕最低。

表 10 各项指标评分标准及评分
Table 10 Criteria and points of comprehensive evaluation index

周期总产量 Total yields /(kg·hm ⁻²)	周期总产值 Total value/(元·hm ⁻²)	周期总成本 Total costs/(元·hm ⁻²)	周期纯收入 Total net income/(元·hm ⁻²)	NI	IQI	评分 Scores
>69 000~70 500	>150 000~152 500	42 000~43 000	>106 000~110 000	>0.4~0.5	>0.4~0.5	5
>67 500~69 000	>147 500~150 000	>43 000~44 000	>102 000~106 000	>0.3~0.4	>0.3~0.4	4
>66 000~67 500	>145 000~147 500	>44 000~45 000	>98 000~102 000	>0.2~0.3	>0.2~0.3	3
>64 500~66 000	>142 500~145 000	>45 000~46 000	>94 000~98 000	>0.1~0.2	>0.1~0.2	2
63 000~64 500	140 000~142 500	>46 000~47 000	90 000~94 000	0~0.1	0~0.1	1

4 讨 论

在保证生产力提高的前提下，耕作模式对生态环境的影响也是农业技术必须重点考虑的内容。化肥、农药、机械等现代物资的投入对于提高生产力、促进现代农业发展具有重要的作用，但是这些物质直接或间接的来源与化石能源，不合理使用也容易带来一系列的环境问题，如水体污染、农药残留、温室气体排放等^[25]。本文通过对不同耕作模式对土壤质量的影响以及对投入成本的分析，定性分析了耕作模式对生态环境的影响，组合耕作模式能提高土壤质量，提高土壤生态质量，同时较连续翻耕模式节约机械投入成本，较连续免耕模式节约农药投入，减少了化石能源的投入，对生态环境的污染相对较小。但不同耕作模式对生态环境的具体影响要利用能值分析、生态服务评价等方法进行评价，其结果有待进行长期连续试验研究。

5 结 论

本研究针对两熟区现有耕作模式存在的问题，设计了“翻耕-免耕-深松-免耕”的 4 a 组合耕作模式，通过 4 a 的定位试验，运用综合评价法对两熟区组合耕作模式、连续翻耕和连续免耕模式的周期生产力进行了综合评价，结果表明：

1) 组合耕作模式可以提高土壤的结构质量，有效降低 0~30 cm 土层土壤容重，平均容重比连续免耕和连续翻耕分别小 0.089 和 0.125 g/cm³；组合耕作模式提高土壤养分质量，增加 0~30 cm 土层全氮、速效磷和速效钾含量，对碱解氮含量影响不显著，增加土壤有机碳含量，平均有机碳含量比连续免耕和连续翻耕分别高 0.36 和 0.61 g/kg，并且各层之间有机碳含量分布较均匀；连续翻耕破坏 0~20 cm 土壤结构，在>20~30 cm 土层形成犁底层，增加土壤容重，并且只增加>10~20 cm 土层有机

碳含量, 各层养分分布不均; 连续免耕虽未对土壤结构造成破坏, 但只增加 0~10 cm 土层有机碳含量, 使土壤养分在表层积累。

2) 组合耕作模式的周期总投入显著低于连续翻耕, 比连续翻耕节约成本 3 069 元/hm², 粮食总产量和总产值显著高于连续免耕和连续翻耕, 总收入比连续免耕和连续翻耕分别高 6 747.1 和 11 744.3 元, 节本增效显著。

3) 组合耕作模式、连续免耕和连续翻耕的周期生产力的综合评价得分分别为 4.85、3.8 和 1.7, 组合耕作模式的得分显著高于连续免耕和连续翻耕, 具有较高的周期生产力。

本研究可为小麦-玉米两熟区耕作模式的优化提供参考, 促进两熟区的生产力提升和节本增效。

[参 考 文 献]

- [1] 杨如萍, 郭贤仕, 吕军峰, 等. 不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 252-256.
Yang Ruping, Guo Xianshi, Lü Junfeng, et al. Effects of distribution and dtability on soil aggregate in different patterns of tillage and cropping[J]. Jour nal of Soil and Water Conserv ation, 2010, 24(1): 252-256. (in Chinese with English abstract)
- [2] 田慎重, 王瑜, 李娜, 等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7116-7124.
Tian Shenzhong, Wang Yu, Li Na, et al. Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): 7116-7124. (in Chinese with English abstract)
- [3] Si Pengfei, Liu Enke, Wenqing, et al. Effect of no-tillage with straw mulch and conventional tillage on soil organic carbon pools in Northern China[J]. Journal Archives of Agronomy and Soil Science, 2018, 64(3): 398-408
- [4] 孔凡磊, 陈阜, 张海林, 等. 轮作对土壤物理性状和冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 150-155.
Kong Fanlei, Chen Fu, Zhang Hailin, et al. Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat yield[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transaction of CASE), 2010, 26(8): 150-155. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李传友. 机械深松对土壤理化属性和夏玉米生长特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(6): 746-750.
Li Chuanyou. Effects on mechanical subsoiling on soil physical and chemical properties and growth characteristics of summer corn[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(6): 746-750. (in Chinese with English abstract)
- [6] 秦红灵, 高旺盛, 马月, 等. 两年免耕后深松对土壤水分的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 78-85.
Qin Hongling, Gao Wangsheng, Ma Yue, et al. Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage 2 years later[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 78-85. (in Chinese with English abstract)
- [7] Olivella M A, Fernandez I, Cano, et al. Role of chemical components of cork on sorption of aqueous polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. International Journal of Environmental Research, 2013, 7(1): 225-234.
- [8] 徐阳春, 沈其荣. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 89-95.
Xu Chunyang, Shen Qirong. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(1): 89-95. (in Chinese with English abstract)
- [9] Shao Jingan, Tang Xiaohong, Wei Chaofu, et al. Effects of conservation tillage on soil organic matter in paddy rice cultivation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4434-4442.
- [10] 刘振东. 保护性耕作措施对土壤风蚀的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
Liu Zhendong. The Impact of Protective Cultivation Measures to Soil Wind Erosion[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [11] 原君静, 李洪文. 保护性耕作适应性评价与模式选择方法研究[J]. 农机化研究, 2009, 7(7): 10-13.
Yuan Junjing, Li Hongwen. Study on suitability evaluation hierarchical system and model-selection methods of conservation tillage[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 7(7): 10-13. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘月楼, 种旭东, 刘楨, 等. 保护性耕作在小麦生产上的增产增效试验[J]. 内蒙古农业科技, 2010(3): 46-47.
Liu Yuelou, Zhong Xudong, Liu Zhen, et al. Experiment of conservation tillage on wheat production to increase yield and efficiency[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2010(3): 46-47. (in Chinese with English abstract)
- [13] 周景奎, 隋淑霞, 宇文剑飞. 机械化保护性耕作技术经济效益分析[J]. 农村牧区机械化, 2002(4): 74-77.
Zhou Jingkui, Sui Shuxia, Yuwen Jianfei. Benefit analysis on the technology of mechanized conservation tillage[J]. Mechanization in Rural Pastoral Areas, 2002(4): 74-77. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨爱民, 刘孝盈. 发展保护性耕作技术有效防治耕地土壤侵蚀[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(6): 47-52.
Yang Aimin, Liu Xiaoying. Developing conservation tillage to effectively control soil erosion on farm land[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(6): 47-52. (in Chinese with English abstract)
- [15] 高旺盛. 论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势[J]. 中国农业科学, 2007, 40(12): 2702-2708.
Gao Wangsheng. Development tends and basic principles of conservation tillage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(12): 2702-2708. (in Chinese with English abstract)
- [16] 陈源泉, 高旺盛, 隋鹏. 保护性耕作技术界定指标探讨[A]. 中国农作制度研究进展, 2008.
- [17] 陈源泉, 李媛媛, 隋鹏, 等. 不同保护性耕作模式的技术特征值及其量化分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 161-167.
Chen Yuanquan, Li Yuanquan, Sui Peng, et al. Technological characteristics and quantitative analysis of different conservation tillage patterns[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transaction of CASE), 2010, 26(12): 161-167. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘世平. 稻麦两熟制不同耕作栽培方式对农田生态环境和

- 周年生产力的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2006.
- Liu Shiping. Effects of Tillage and Cultivation on Cropland Eco-environment and Yearly Productivity in a Wheat-rice Double Cropping System[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李洋阳, 刘思宇, 单春艳, 等. 保护性耕作综合效益评价体系构建及实例分析 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 48—54.
- Li Yangyang, Liu Siyu, Shan Chunyan, et al. Framework for comprehensive benefit assessment on conservation tillage and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 48—54. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王海霞, 孙红霞, 韩清芳, 等. 免耕条件下秸秆覆盖对旱地小麦田土壤团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1025-1030.
- Wang Haixia, Sun Hongxia, Han Qingfang, et al. Effects of straw mulching on the soil aggregates in dryland wheat field under no-tillage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(4): 1025-1030. (in Chinese with English abstract)
- [21] Six J, Elliot E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62: 1367-1377.
- [22] 侯贤清, 贾志宽, 韩清芳, 等. 不同轮作模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 85-94.
- Hou Xianqing, Jia Zhikuan, Han Qingfang, et al. Effects of different rotational tillage patterns on soil structure, infiltration and water storage characteristics in dryland[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transaction of CASE), 2012, 28(5): 85-94. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张丽琼. 长期轮耕与施肥对土壤肥力的影响及其综合评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- Zhang Liqiong. Effect of Long-time Rotation and Fertilization to Soil Fertility and its Comprehensive Evaluation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [24] 陈正发, 史东梅, 金慧芳, 等. 基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 256-67.
- Chen Zhengfa, Shi Dongmei, Jin Huifang, et al. Evaluation on cultivated-layer soil quality of sloping farmland in Yunnan based on soil management assessment framework (SMAF)[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transaction of CASE), 2019, 35(3): 256-67. (in Chinese with English abstract)
- [25] 陈源泉, 隋鹏, 高旺盛, 不同方法对保护性耕作的生态评价结果对比[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 80-88.
- Chen Yuanquan, Sui Peng, Gao Wangsheng. Comparison of ecological evaluation results on conservation tillage by different methods[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transaction of CASE), 2014, 30(6): 80-88. (in Chinese with English abstract)

Comprehensive evaluation of periodic productivity of combined tillage mode in wheat-maize double cropping areas

Zhang Yinping¹, Chi Yanjie¹, Wang Zhanbin¹, Li Xiaoran¹, Li Hongwen², Diao Peisong^{1*}

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems of traditional tillage in Huang-Huai-Hai double cropping area, such as soil structure destruction, excessive power consumption, increase of soil compaction and the nutrient enrichment of surface weeds in the surface soil layer resulted by continuous no tillage, the four years combined tillage(CT) from 2013 to 2016 of “ploughing-no tillage-subsoiling-no tillage” was designed in the wheat-corn double cropping area in this study, taking continuous no tillage (CN) and continuous ploughing(CP) as control, the comprehensive evaluation method was used to evaluate the cycle productivity of the combined tillage mode. During the experiment, the soil structure indexes and soil nutrient indexes were measured, and the agricultural materials, machinery, labor cost and crop yields of different tillage modes were statistically analyzed. On this basis, the comprehensive evaluation method was used to evaluate the periodic productivity of different tillage modes. The results showed that, the CT improved the quality of soil structure, reduced the soil bulk density in 0-30 cm soil layer effectively, the average soil bulk density was smaller 0.089 and 0.125 g/cm³ than that of CN and CP. CT increased the content of total nitrogen, rapid available phosphorus and rapid available potassium in 0-30 cm soil layer, but no significant impacts on the available nitrogen content, the organic carbon content was higher 0.36 and 0.61 g/kg respectively than that of CN and CP, the organic carbon concentration distribution was balanced between the soil layers of 0-10, >10-20 and >20-30 cm, but not balanced of CN and CP. CN only increased the soil nutrient in 0-10 cm soil layer, while CT increased the soil nutrient in >10-20 cm soil layer. CT and CN reduced the costs and increased the input, the total investment of CT and CN was not difference significantly, and saved 3 069 and 3 969 yuan/hm² respectively than that of CP. The total crops yields and total output of CT were significantly higher than that of CN and CP, CT improved the material utilization rate, the labor conversion rate and input-output ratio. The comprehensive evaluation scores of CT, CN and CP were 4.85, 3.8 and 1.7, respectively, the score of CT was significantly higher than that of CN and CP, the periodic productivity of CT was the highest. This study can provide a reference for the improvement of tillage modes in wheat-corn double cropping area, and promote productivity improvement and cost saving.

Keywords: tillage; soil; aggregates; periodic productivity; combined tillage mode; soil bulk density; soil nutrient; yield