中国生态农业学报 2018 年 10 月 第 26 卷 第 10 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2018, 26(10): 1537−1545

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180615

胡春胜, 陈素英, 董文旭. 华北平原缺水区保护性耕作技术[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1537−1545
HU C S, CHEN S Y, DONG W X. Conservation tillage technology for water-deficit areas in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1537−1545

华北平原缺水区保护性耕作技术*

胡春胜, 陈素英, 董文旭

(中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022)

摘 要: 针对华北平原缺水地区农田生产效益偏低和地下水严重超采导致的生态环境问题, 以建立节水、高产、固碳的华北平原缺水区保护性耕作集成技术为目标, 在国家科技支撑计划长期支持下, 建立了华北平原历时最长的保护性耕作长期定位试验平台(2001 年一), 开展了小麦/玉米两熟制保护性耕作理论和关键技术研究, 集成了农机农艺结合的高产节水型保护性耕作技术体系, 并在河北省进行广泛示范推广。主要结果: 1)华北平原冬小麦/夏玉米一年两熟区保护性耕作具有固碳、减排、节水、提高土壤质量等生态效应。长期保护性耕作具有土壤养分分层表聚现象: 0~5 cm 土层的土壤 C、N、P、K、有机质含量高于 5~10 cm 土层, 旋耕(RT)和免耕(NT1: 秸秆直立免耕; NT2: 秸秆粉碎免耕; NT3: 整秸秆覆盖免耕)处理土壤有机碳(SOC)的层化比率为 1.74~2.04, 显著高于翻耕处理(CK 和 CT)的 1.37~1.45。保护性耕作的固碳效应与机制: 保护性耕作实施 9 年后不同耕作方式年固碳量(0~30 cm)NT2 处理为 840 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、RT 处理为 780 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、CT 处理为 600 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, 14 年后土壤有机碳(0~30 cm)发生了变化, NT2 处理为 540 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、RT 处理为 720 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、CT 处理为 710 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$; 长期免耕减少了土壤的扰动而降低了土壤碳的矿化率, 土壤碳的累积主要固定在土壤大团聚体的颗粒有机碳中, 固定态碳首先进入活性易分解有机碳库, 然后缓慢转入稳定碳库。保护性耕作的减排效应: 不同耕作系统全球增温潜力的计算结果表明, 免耕是大气增温的碳汇, 而其他耕作系统为碳源。NT 处理每年农田生态系统净截留碳 947~1 070 $kg(C)\cdot hm^{-2}$; CK、CT 和 RT 每年向大气分别排放等当量碳 3 364 $kg(C)\cdot hm^{-2}$、989 $kg(C)\cdot hm^{-2}$ 和 343 $kg(C)\cdot hm^{-2}$。保护性耕作的土壤微生物多样性机制: 保护性耕作显著提高了土壤中真菌、细菌、氨氧化古菌和亚硝酸还原酶(*nirK*)基因的反硝化微生物的多样性, 但对氨氧化细菌与含 *nirS* 基因的反硝化微生物的多样性影响不大。保护性耕作节水保墒的土壤结构与水力学机制: 常规耕作对土壤有压实的作用, 而保护性耕作改善了土壤结构, 有效提高了储水孔隙、导水率、田间持水量和有效水含量, 秸秆覆盖又能有效减少土壤蒸发, 具有开源与节流双重节水机制。2)建立了趋零蒸发的麦田玉米整秸覆盖全免耕种植模式。在小麦/玉米一年两熟种植区, 首次提出了玉米整秸秆覆盖小麦全免耕播种的种植模式, 实现了小麦玉米全程全量秸秆机械化覆盖, 形成土壤无效蒸发趋于零的保护性耕作体系与方法; 研制了实现趋零蒸发的 4JS-2 型梳压机和 2BMF-6 型小麦全免耕播种机组, 比目前推广的 2BMFS-6/12 小麦免耕播种机减少作业动力 45.2%, 降低作业费用 33.3%。3)建立了 3 年一深松(翻)的少免耕-深松轮耕模式, 集成了节水高产保护性耕作技术体系。制定了华北平原冬小麦/夏玉米一年两熟区保护性耕作技术体系等河北省地方标准, 与农业、农机部门联合示范, 推动了河北省保护性耕作技术的推广和应用。成果在河北平原冬小麦/夏玉米一年两熟区进行了示范推广, 社会效益和生态效益显著, 2013 年获河北省科技进步一等奖。

关键词: 华北平原; 水资源短缺; 冬小麦/夏玉米一年两作; 保护性耕作; 秸秆覆盖; 免耕

中图分类号: S341 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)10-1537-09

* 国家重点研发计划专项(2016YFD0300808)、国家公益性行业(农业)科研专项(201503117)和国家自然科学基金项目(31371578)资助
胡春胜, 主要从事农田生态系统碳、氮、水循环及土壤生态过程研究。E-mail: cshu@sjziam.ac.cn
收稿日期: 2018-06-25 接受日期: 2018-07-04

* The study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0300808), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503117) and the National Natural Science Foundation of China (31371578).
Corresponding author, HU Chunsheng, E-mail: cshu@sjziam.ac.cn
Received Jun. 25, 2018; accepted Jul. 4, 2018

Conservation tillage technology for water-deficit areas in the North China Plain*

HU Chunsheng, CHEN Suying, DONG Wenxu

(Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-Saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract: The intensive exploitation of groundwater for farmland irrigation has led to the decline of groundwater level and the development of eco-environmental problems in the North China Plain (NCP). In order to establish water saving, high yield, carbon sequestration and conservation tillage integration technology system in NCP, a long-term conservation tillage experimental platform was established from Oct. 2001 in the Luancheng Agro-Ecosystem Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, which included six treatments, CK (deep plowing and wheat row seeding without maize straw return), CT (deep plowing and wheat row seeding with smashed maize straw incorporation), TR (rotary tillage and wheat row seeding with smashed maize straw incorporation), NT1 (non-tillage and wheat furrow seeding with maize straw incorporation), NT2 (non-tillage and wheat furrow seeding with smashed maize straw incorporation) and NT3 (non-tillage and wheat row seeding with maize straw mulching). Studies on conservation tillage theory and key technologies of winter wheat-summer maize double cropping system integrated with agricultural machinery were conducted at the platform. The agronomic water-saving conservation tillage techniques of high yield systems were widely demonstrated in NCP. The results showed that 1) conservation tillage had obvious effects on carbon sequestration, emission reduction, water saving and soil quality improvement. Long-term conservation tillage induced soil nutrient accumulation at the soil surface. Also C, N, P, K and organic matter contents were higher in the 0–5 cm soil layer than in the 5–10 cm soil layer. Soil organic carbon (SOC) stratification ratio under RT and NT1, NT2 and NT3 treatments was in the range of 1.74–2.04, which was significantly higher than that of CK and CT (1.37–1.45). After 9 years of conservation tillage, soil carbon sequestrations (0–30 cm) were 840 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, 780 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ and 600 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ under NT2, RT and CT treatments, respectively. Then after 14 years of conservation tillage, soil carbon sequestrations were respectively 540 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, 720 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ and 710 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$. Long-term non-tillage reduced soil disturbance and consequently decreased the mineralization rate of soil carbon. Soil carbon was mainly fixed in organic carbon particles of soil aggregates. The fixed carbon first changed into readily decomposable organic carbon and then slowly turned into stable carbon. Calculations of global warming potential under different tillage systems showed that farmland ecosystems under non-tillage with straw return served as carbon sink, with annual carbon retention of 947–1 070 $kg(C)\cdot hm^{-2}$ after subtracting directly or indirectly carbon emitted equivalent. Other treatments were carbon resource, with CK, CT and RT treatments annually discharging equivalent carbon of 3 364 $kg(C)\cdot hm^{-2}$, 989 $kg(C)\cdot hm^{-2}$ and 343 $kg(C)\cdot hm^{-2}$ respectively into the atmosphere. The mechanism of soil microbial diversity under conservation tillage was as follows: conservation tillage significantly improved the diversity indexes of soil fungi communities, bacteria communities, ammonia-oxidizing bacteria communities and denitrifying micro-organism communities with *nirK* gene. However, it had little effect on the diversity index of ammonia-oxidized bacteria communities and denitrifying micro-organisms communities with *nirS* gene. Conservation tillage showed significant water-saving effect, which resulted from improvements in soil structure, water-reservoir porosity and saturated hydraulic conductivity. Straw mulching also effectively reduced soil evaporation. 2) Non-tillage plus straw mulching with minimum soil evaporation model was established in winter-wheat/summer-maize double cropping system area. The unit of 4JS-2 straw combing press machine and 2BMF-6 non-tillage sowing machine with zero evaporation were developed, which reduced the operating rate by 45.2% and operation cost by 33.3%, compared with 2BMF-6/12 non-tillage sowing machine currently promoted. 3) A new soil rotation tillage model of deep plowing and deep sub-soiling every 3 years in non-tillage soil was established and integrated with water-saving, high-yielding and protective tillage technology system. A series of technical regulations of Hebei local standards in terms of conservation tillage of winter wheat/summer maize double cropping system were suggested. Cooperated with the Agricultural Bureau and Agricultural Machinery Bureau of Hebei Province, we demonstrated and promoted conservation tillage technologies in Hebei Province with remarkable social and ecological benefits. The main results won the first prize of Hebei Science and Technology Progress Award in 2013.

Keywords: North China Plain; Water resources shortage; Winter wheat/summer maize double cropping; Conservation tillage; Straw mulching; Non-tillage

保护性耕作技术是相对于传统耕作的一种创新耕作技术, 其核心技术是秸秆覆盖和土壤少免耕[1], 具有节水保墒、培肥地力与固碳减排等功能和保水、保肥和环境友好等生态作用[2], 符合我国刚性资源约束与脆弱水土资源保护的国情。特别是华北平原地下水严重超采、秸秆焚烧、雾霾、碳氮温室气体排放[3], 推行保护性耕作技术可以充分挖掘“节水”、“固碳”、“沃土”和“保环境”等潜力, 促进区域农业的持续发展。

20 世纪 80 年代开始中国科学院石家庄农业现代化研究所(现中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 以下简称“农业资源研究中心”)在该区进行了小麦秸秆覆盖、玉米免耕技术体系研究与示范。20 世纪 90 年代开始研发玉米秸秆粉碎机, 推行玉米秸秆粉碎与旋耕技术, 之后开展少耕、免耕、深松等一系列保护性技术示范, 其技术模式在国内一直起着引领作用。但也面临着不断发展的农业生产过程中出现新的技术问题: 1)华北平原冬小麦和夏玉米产量高, 地表秸秆残茬多、作业堵塞严重、播种质量差、播种行宽、群体较小, 产量不稳。机具的性能、可靠性、作业效率、作业质量急待改进, 特别是缺乏与我国小规模生产相适应的小动力作业机械。2)适合新型的保护性耕作的技术规范还没有建立, 如小麦免耕沟播种植方式下的高效灌溉问题、秸秆的快速腐解问题等, 急需制定适合区域的地方技术标准与技术模式。3)长期保护性耕作下出现土壤耕层变浅、容重增加, 根系下扎困难、供肥能力下降等问题。因此如何发挥保护性耕作优势、避免其技术不足, 急待开展合理的轮耕技术配置, 提出适合区域特点的土壤轮耕模式。

农业资源研究中心 2004 年以来一直承担国家科技计划, “河北省保护性耕作技术集成与示范(2004BA520A14)”、“华北平原缺水区保护性耕作技术集成研究与示范(2006BAD15B07)”和“华北山前平原区农田秸秆机械化还田技术集成研究与示范(2007BAD89B08)”等课题。早于 2001 年就开始在河北省栾城县中国科学院栾城农业生态系统试验站建立了华北平原最长的保护性耕作长期定位试验, 开展了冬小麦/夏玉米两熟制保护性耕作的理论创新研究, 创立了趋零蒸发的麦田玉米整秸覆盖全免耕种植模式, 研制了免耕机、秸秆梳压机、土壤深松等少免耕机具和秸秆快速腐解剂, 集成了农机农艺结合的高产节水型保护性耕作技术体系, 建立了 3 年一深松(翻)的少免耕-深松轮耕模式, 制定颁布了保护性耕作、土壤深松、秸秆还田等地方技术标准, 形成了与农业、农机部门联合研发、示范的创新推广机制, 通过政府推动、科技指导与农民参与, 开展大规模的区域示范。

1　研究思路与研究内容

保护性耕作技术因其独特的生态保护作用, 在欧美国家广泛应用, 被视为重要的可持续农业技术[4]。从20世纪80年代至今, 已在全球70多个国家推广应用, 应用总面积约占世界总耕地面积的12%。其中: 美国、加拿大、澳大利亚、巴西、阿根廷等农业大国应用面积均已超过70%, 法国、墨西哥等应用面积超过50%, 特别是近几年在全球正迅速推广应用。

国外的保护性技术主要应用于一年 1 熟区, 作业机具大多技术先进、自动化程度高, 配套拖拉机的功率大, 机型庞大、造价昂贵, 作业规模适应于大型农场, 以环境保护和生态修复为重要内容, 不需要过多考虑单产和经济效益等因素。而我国面临巨大的人口、资源压力, 我国的保护性耕作一般需要考虑产量效应和经济效益。华北平原冬小麦-夏玉米一年两熟制, 并且一家一户小面积种植, 国外的保护性耕作机具不适合我国农业生产需要, 适合我国国情的保护性耕作机具和技术体系仍然比较缺乏。

华北平原缺水区保护性耕作技术研究, 以华北平原最具代表性的小麦-玉米一年两熟农田为研究对象, 以冬小麦-夏玉米两作一体化秸秆还田和全程少免耕机械化生产为技术主体, 开展了保护性耕作条件下的土壤水力学特征和覆盖节水机制、秸秆还田对土壤碳氮微生物过程、土壤温室气体排放和固碳机制等理论研究, 通过保护性耕作条件下减量施肥技术、秸秆快速腐熟技术、调亏灌溉节水技术和作物周年均衡增产技术, 明确保护性耕作条件下的增效机制, 为区域保护性耕作技术体系的形成和推广提供了理论依据。

针对冬小麦-夏玉米一年两熟制中秸秆量大, 影响农机作业和下茬作物出苗等问题, 进行玉米秸秆梳压装置和新型小麦防堵免耕旋耕播种机具研发, 针对出现的土壤亚表层容重增加, 土壤盐分表聚, 影响作物根系对水分和养分的吸收, 造成产量不稳定, 进行了振动式深松机的研发, 同时配套秸秆快速腐解技术、秸秆全程管理等关键, 建立综合保护性耕作丰产技术体系与土壤轮耕技术体系, 研发相应的农机具, 制定保护性模式的相应地方标准, 通

过政府推动、科技指导与农民参与，实现土壤保护性耕作技术体系的大面积示范推广。

2 研究结果

2.1 华北平原历时最长的保护性耕作定位试验平台

2001 年 10 月在国家生态网络台站——河北栾城农田生态系统国家野外科学观测研究站(中国科学院栾城农业生态系统试验站)建立了代表华北平原生产类型的保护性耕作长期定位试验，试验占地 1.33 hm^2，设置 6 个处理：深耕秸秆不还田[CK，玉米秸秆不还田+土壤翻耕(深度为 20 cm)，小麦常规播种(2BX-12 型播种机)]、深耕秸秆还田[CT，玉米秸秆粉碎还田+土壤翻耕(深度为 20 cm)，小麦常规播种]、旋耕秸秆还田[RT，玉米秸秆粉碎还田+土壤旋耕(深度为 10 cm)，小麦常规播种]、秸秆直立免耕[NT1，玉米收获后秸秆直立，利用 2BMF 小麦施肥免耕播种机播种(沟播)]、秸秆粉碎免耕(NT2，玉米秸秆粉碎后用 2BMFS 小麦覆盖免耕播种机播种)、整秸秆覆盖免耕(NT3，玉米秸秆整秸覆盖于小麦行间，小麦免耕播种)。6 个处理中 CK、CT 代表传统的土壤耕作模式，RT 代表生产上大面积应用的土壤少耕模式，NT1、NT2、NT3 代表处于小面积试验示范的免耕方式。RT 和 NT1、NT2、NT3 处理均为保护性耕作模式，小麦苗期田间生长状况见图 1。

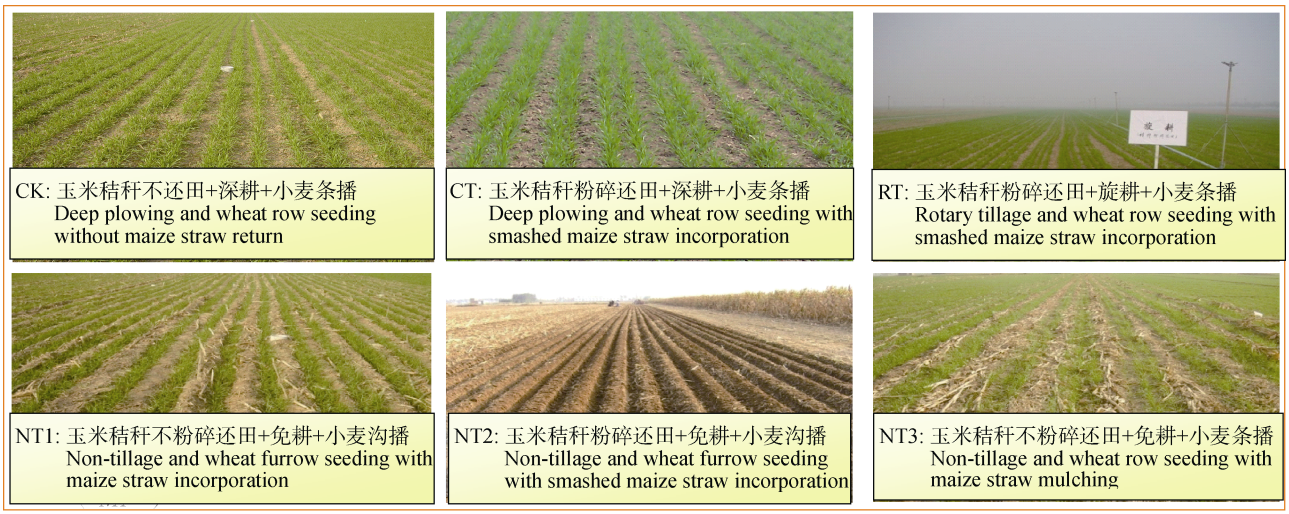

图 1 中国科学院栾城农业生态系统试验站保护性耕作定位试验处理(2001 年起)

Fig. 1 Treatments of the long-term located tillage experiment (from 2001) of the Platform of Located Experiment of Conservation Tillage in Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station, Chinese Academy of Sciences

该试验是华北平原冬小麦/夏玉米一年两熟区历时最长的保护性耕作试验长期定位研究，也是国内外有影响的保护性耕作联合研究平台。利用该平台，农业资源研究中心先后与中国农业大学、河北农业大学、河北农林科学院、德国波茨坦大学、德国莱布尼茨农业景观中心、美国农业部、丹麦阿胡斯大学等国内外教学研究机构的教授和博士生开展了保护性耕作的固碳、培肥、节水机理的联合研究，丰富和完善了保护性耕作理论体系。

2.2 保护性耕作的土壤固碳、培肥、节水效应机制

2.2.1 保护性耕作节水保墒效应

保护性耕作抑制了土壤无效蒸发，具有节水保墒作用。2004—2005 年的研究结果表明，CT 处理在冬小麦各时期的土壤蒸发量均最大，NT2 最小，在冬小麦生长初期处理间相差较大，随着时间推移处理间差异减小，冬小麦返青到成熟期，CT、RT、NT1 和 NT2 处理的平均日蒸发分别为 0.90 $mm\cdot d^{-1}$、0.64 $mm\cdot d^{-1}$、0.45 $mm\cdot d^{-1}$ 和 0.52 $mm\cdot d^{-1}$。与 CT 处理相比，RT、NT1 和 NT2 土壤蒸发分别降低 48.9%、50.0%和 42.2%，保护性耕作措施显著降低了冬小麦田的土壤无效蒸发，避免了土壤水分的损失。对冬小麦生育期不同深度土层蓄水量变化的调查结果显示，与 CT 处理相比，NT2、NT1 和 RT 处理抽穗期前 50 cm 土层蓄水量相对变化增加值分别是 71.3%、56.7%和 35.7%；110 cm 和 170 cm 土层蓄水量变化规律性不明显。生长后期耕作措施对土壤蓄水量的影响减小。因此，不同耕作方式对土壤蓄水量影响的差异主要在作物生育前期，且主要影响 0~50 cm 土层深度[5]。

2.2.2 保护性耕作对土壤水利学参数与土壤质量的影响

至 2007 年，经过 6 年保护性耕作后，土壤物理性状发生了显著变化，与 CK 相比，NT1 处理 0~5 cm、5~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤容重分别提高 7.0%、8.0%和 11.0%，但反映各层土壤团聚体稳定性的平

均当量直径(MWD)也相应提高，土壤团聚体稳定性增加，且 RT 处理的增幅低于 NT1 处理。土壤孔隙分布反映了土壤导水和储水能力，CK 和 CT 处理显著增加了 0~5 cm 土层裂隙(>500 μm)和传输孔隙(500~50 μm)的比例，而 NT 处理则增加储水孔隙(50~0.5 μm)的含量。另外，保护性耕作提高了土壤的饱和导水率、田间持水量和有效水含量。土壤中蚯蚓数量 RT 和 NT1 显著增加。因此，土壤物理质量指标的分析表明，传统耕翻转变为保护性耕作 6 年后，土壤质量总体上得到改善[6-8]。

2.2.3　保护性耕作对土壤养分的影响

至 2007—2008 年，经过 6~7 年的保护性耕作后，不同耕作措施下土壤 0~30 cm 有机质和全氮含量分布状况发生了显著变化。RT、NT2 和 NT1 处理土壤有机质含量随土壤深度的增加呈降低趋势，即表层(0~5 cm)最高，20~30 cm 土层含量最小；RT、NT2 和 NT1 处理可明显提高 0~5 cm 土层有机质含量，其中 RT 处理为 22.3 $g\cdot kg^{-1}$ 最高，显著高于 NT1 和 NT2 处理，CT 处理 0~5 cm 土层有机质含量为 16.2 $g\cdot kg^{-1}$，显著低于 RT、NT1 和 NT2 处理。5~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层各处理之间有机质含量没有显著差异。土壤全氮含量以及剖面分布与有机质变化基本一致，统计表明两者具有极显著相关关系(P<0.01)。RT、NT2 和 NT1 处理 0~5 cm 土壤碱解氮含量高于 CT 处理，在 5~10 cm 土层则与之相反，10~30 cm 各处理结果相接近。0~5 cm 土层 RT 处理速效磷含量最大，顺序依次为 RT>NT2>NT1>CT 处理，RT 处理显著高于 CT 处理，其他处理间差异不显著。RT 处理 5~30 cm 土层随深度增加速效磷含量明显下降，而 CT 处理略有上升，10~20 cm 土层 CT 处理显著高于 RT 处理，5~10 cm 和 20~30 cm 土层各处理差异不显著。除表层积累大量速效钾外，速效钾在土层中分布比较均匀。0~5 cm 和 5~10 cm 土层 RT 处理速效钾含量最大，显著高于 CT、NT1 和 NT2 处理。10 cm 以下土层各处理速效钾含量基本相同，只是 CT 处理略高于 NT1 和 NT2 处理，但未达到显著水平。可以看出，经过 6 年保护性耕作后，保护性耕作处理的土壤养分均聚集在 0~5 cm 土层，出现了明显的养分表聚现象[9]。

2.2.4　保护性耕作对土壤固碳与氮转化机制的影响

至 2007—2008 年，经过 6~7 年保护性耕作后，土壤剖面的有机碳(SOC)储量在 CT、RT 和 NT2 处理之间没有显著差异，但均显著高于 CK 处理，表明秸秆还田是决定 SOC 储量的关键因子。RT 和 NT2 处理对土壤微生量碳和微生物量氮有显著的提高效应，与 CT 相比，0~5 cm 土层 NT 和 RT 处理的土壤微生物量碳含量分别增加 44%和 31%，两处理间无显著差异。5~10 cm 土层，各处理间土壤微生物量碳含量的差异性与 0~5 cm 土层趋势一致。0~5 cm 土层的土壤微生物碳含量高于 5~10 cm 土层，保护性耕作促进了土壤碳氮养分的分层表聚，RT 和 NT 处理土壤 SOC 的层化比率(1.74~2.04)显著高于翻耕处理(CK 和 CT 的 1.37~1.45)，保护性耕作处理的土壤 SOC 层化率显著高于传统耕作，进一步揭示了长期实施保护性耕作，土壤养分有表聚现象[7]。

长期保护性耕作加快土壤固碳速率。由于不同耕作措施下30 cm以下土层SOC含量没有显著差异，只针对0~30 cm土层的土壤碳储量变化进行了研究。结果显示(表1)，经过5年的不同耕作措施后，0~30 cm土层(考虑到容重变化，所有处理以每公顷4 865 t干土计)的碳储量具有显著的变化。其中，NT3处理碳储量最小(36.1 $Mg\cdot hm^{-2}$)，而NT2处理最大(41.8 $Mg\cdot hm^{-2}$)。所有处理碳储量变化顺序为NT2>RT>CT>CK>NT3。与试验开始第1年(2001年)相比，NT2处理的碳储量增加最多，5年增加4.9 $Mg\cdot hm^{-2}$，其次为RT和CT处理，分别增加4.7 $Mg\cdot hm^{-2}$和2.8 $Mg\cdot hm^{-2}$。而CK和NT3处理，则在5年之内没有显著变化。

经过8年不同耕作管理之后，耕层SOC储量变化与5年变化基本一致。其中NT2处理碳储量依然最大(43.6 $Mg\cdot hm^{-2}$)，不同耕作措施的顺序为NT2>RT>NT3>CT>CK。表明华北平原缺水区冬小麦-夏玉米一年两熟制实施翻耕和玉米秸秆不还田，秸秆碳归还量较少，土壤有机碳增量缓慢。如果采取保护性耕作措施，则有可能减缓有机碳的分解速率，碳输入量大于输出量，从而增加土壤有机碳的储量，但是随着年份的增加，保护性耕作碳增加速率逐渐减小，最终与传统翻耕速率没有差异。至2009年，保护性耕作实施9年后0~30 cm土层，NT2处理固碳量840 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、RT处理为780 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、CT处理为600 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$，表明保护性耕作处理具有较强的固碳潜力[10-11]。

经过14年不同耕作管理之后，耕层SOC储量发生了变化，与5年和8年的变化趋势不相同。CT处理碳储量最大(47.1 $Mg\cdot hm^{-2}$)，不同耕作措施的顺序为CT>RT>NT2>NT3>CK。与保护性耕作相比，长期传统翻耕和秸秆还田条件(CT)下，土壤碳储量最高，与旋耕秸秆还田(RT)处理间不显著，但与免耕(NT1、NT2、NT3)和CK处理间达到了显著差异。至2015年，保护性耕作实施14年后0~30 cm土层，NT2处理固碳量540 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、RT处理为720 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、CT处理为

710 kg·hm^{-2}·a^{-1}。与国外保护性耕作长期定位试验结论一致，主要原因是免耕由于减少了对土壤的扰动而降低了土壤有机碳的矿化率[11-12]，而CT处理增强了土壤有机碳的矿化率。

进一步研究发现，土壤碳主要是被固定在土壤大团聚体的颗粒有机碳中，土壤酶活性也在大直径颗粒土壤中表现较大活性，表明保护性耕作的固碳首先增加了活性易分解有机碳库，然后需要缓慢时间转化为稳定碳库[12]。应用^{15}N库稀释法测定了土壤总矿化速率、总硝化速率，发现整秸覆盖免耕处理(NT3)显著低于其他处理。而在CT、RT和NT2处理之间总矿化速率差异不显著，但传统翻耕秸秆还田处理(CT)净矿化速率明显高于其他处理。总硝化速率则不受耕作措施的影响[13-14]。

表 1 长期不同耕作措施对 0~30 cm 土层土壤碳储量的影响

Table 1 Effects of long-term different tillage practices on carbon storage of 0–30 cm soil layer

		CK	CT	RT	NT2	NT3
不同年份碳储量 Carbon storage in different years (Mg·hm^{-2})	2001	38.1a	37.1a	36.4a	36.9a	35.3a
	2006	38.0bc	39.9abc	41.1ab	41.8a	36.1c
	2009	38.1b	41.9ab	42.7ab	43.6a	42.1ab
	2015	43.4b	47.1a	46.5ab	44.5b	43.8b
碳储量变化量 Change in carbon storage	2001—2006 年增加量 Change from 2001 to 2006 (Mg·hm^{-2})	–0.1	2.8**	4.7**	4.9***	0.8
	2001—2006 年平均年截留量 Average annual change from 2001 to 2006 (Mg·hm^{-2}·a^{-1})	–0.01	0.56	0.94	0.99	0.28
	2001—2009 年增加量 Change from 2001 to 2009 (Mg·hm^{-2})	0.05	4.8*	6.3**	6.7**	5.3*
	2001—2009 年平均年截留量 Average annual change from 2001 to 2009 (Mg·hm^{-2}·a^{-1})	0.01	0.60	0.78	0.84	0.66
	2001—2015 年增加量 Change from 2001 to 2015 (Mg·hm^{-2})	5.3	10.0**	10.1**	7.6*	8.5*
	2001—2015 年平均年截留量 Average annual change from 2001 to 2015 (Mg·hm^{-2}·a^{-1})	0.38	0.71	0.72	0.54	0.61

不同小写字母表示不同耕作处理间差异显著(P<0.05); *、**和***分别表示变化在 P<0.05、P<0.01 和 P<0.005 水平显著。Different lowercase letters mean significant differences among tillage treatments at P < 0.05 level. *, ** and *** mean significant changes at P < 0.05, P < 0.01 and P < 0.005 levels, respectively.

2.2.5 保护性耕作对土壤微生物多样性的影响

基于分子生物学方法，包括聚合酶链式反应(PCR)和 DNA 指纹技术(变性梯度凝胶电泳 DGGE)，对不同耕作措施下土壤微生物多样性的研究结果表明，保护性耕作提高了土壤中细菌和真菌的多样性。其多样性主要受 SOC 含量、土壤微生物生物量碳及土壤速效磷含量的影响；耕作引起的土壤扰动会破坏土壤中真菌的菌丝结构，引起土壤真菌种群结构发生变化。保护性耕作显著提高了土壤中氨氧化古菌的多样性，但对氨氧化细菌影响不大。保护性耕作措施显著提高了含有亚硝酸还原酶基因(*nirK*)的反硝化微生物多样性，但对含 *nirS* 基因的反硝化微生物的多样性影响不大。保护性耕作对土壤微生物多样性及其功能基因的作用机制决定着土壤中的关键生态过程[15]。

2.2.6 保护性耕作系统的全球增温潜势

基于长期定位试验，对不同耕作措施下的 CO_2、N_2O 与 CH_4 排放通量进行了测定，并估算了排放总量和综合增温潜势。结果表明，华北小麦-玉米轮作农田土壤是 N_2O 和 CO_2 的排放源，是 CH_4 的吸收汇，每年 NT1、NT2、RT、CT 和 CK 农田土壤 N_2O 排放总量依次为 2.06 kg(N_2O-N)·hm^{-2}、2.28 kg(N_2O-N)·hm^{-2}、2.54 kg(N_2O-N)·hm^{-2}、3.87 kg(N_2O-N)·hm^{-2} 和 2.29 kg(N_2O-N)·hm^{-2}，CO_2 排放总量依次为 6 904 kg(CO_2-C)·hm^{-2}、7 351 kg(CO_2-C)·hm^{-2}、8 873 kg(CO_2-C)·hm^{-2}、9 065 kg(CO_2-C)·hm^{-2} 和 7 425 kg(CO_2-C)·hm^{-2}，CH_4 吸收量依次为 2.50 kg(CH_4-C)·hm^{-2}、1.77 kg(CH_4-C)·hm^{-2}、1.33 kg (CH_4-C)·hm^{-2}、1.38 kg(CH_4-C)·hm^{-2} 和 1.57 kg(CH_4-C)·hm^{-2}。NT1 和 NT2 处理农田生态系统综合增温潜势(GWP)均为负值，表明免耕情况下农田生态系统为大气的碳汇，去除农事活动引起的直接或间接排放的等当量碳，每年农田生态系统净截留碳 947~1 070 kg(C)·hm^{-2}；其他处理农田生态系统的 GWP 值均为正值，表明温室气体是由系统向大气排放，CK、CT 和 RT 每年向大气分别排放等当量碳 3 364 kg(C)·hm^{-2}、989 kg(C)·hm^{-2} 和 343 kg(C)·hm^{-2}[16-17]。

2.3 保护性耕作机具的研发

2.3.1 系列小麦免耕旋播机的研发

2001 年进行保护性耕作试验初期，使用的 2BMFS-5/10 小麦免耕施肥播种机，虽然可以实现秸秆还田和免耕播种，但尚存在以下问题：一是动力消耗和作业费用高，作业堵塞严重，播种质量差，

播种行距大, 小麦出苗率低、群体小、产量低; 二是因免耕为起垄播种, 垄背是被细土覆盖的粉碎秸秆, 宽度占播幅的 72.2%, 加之小麦播在垄沟内, 播种深度距垄背高度约 15 cm, 这一覆盖播种方式, 使小麦从播种至越冬, 返青至起身 2 个阶段产生明显的降温效应, 故免耕地温偏低, 影响了小麦根系发育, 导致小麦晚出苗、晚分蘖、分蘖少和产量降低。针对这些问题进行了新型 2BMF 系列小麦(玉米)免耕播种系列机具研发, 研制出了与各种动力拖拉机配套的免耕播种机, 播种行距由 180 mm 缩小为 150 mm, 增加了播种行的旋耕, 降低了沟播深度, 改善了种床质量, 增大了小麦群体, 保证了保护性耕作下小麦产量稳定。

研制的 4JS-2 型梳压机和 2BMF-6 型小麦全免耕播种机组, 实现了玉米整秸秆机械化覆盖冬小麦田和冬小麦全免耕播种作业, 作业配套动力为目前农村保有率较高的 13~15 kW 小拖拉机, 比目前推广的 2BMFS-5/10 小麦免耕播种减少作业动力 45.2%, 降低作业费用 33.3%; 小型拖拉机作业 2 次即可完成秸秆覆盖还田和小麦播种施肥作业; 实现了小麦平播播种, 克服了垄作小麦带来的灌溉和施肥的不便; 由于玉米秸秆覆盖在小麦行间的地表, 既减弱了土壤无效蒸发又缓解了地温降低; 小麦追肥可以直接追在小麦播种带, 提高了小麦的肥料利用效率。小麦全免耕播种机及播种方法获得发明专利一项(ZL200310109679.X)[18-19]。

2.3.2　深松整地联合作业机的研发

针对实施保护性耕作后华北农田土壤耕层容重增加等问题, 研制了 2BSF-4 玉米深松精量播种机, 该机集深松、玉米精量免耕播种、化肥深施等功能, 采用振动深松结构及新型勺式精量排种机构组合, 并采用四连杆仿型, 一次作业完成深松、种床秸秆清理、开沟、深施肥、播种、覆土、镇压等多道工序, 解决了玉米免耕播种和深松单独作业带来的作业次数多、功率消耗大和土壤重复被压实的问题。获得 3 项国家授权专利: 一种玉米精量免耕播种深松复式作业机具(ZL 2009 2 0103916.4)、一种可调式深松施肥一体机(ZL 2010 2 0116506.6)、一种可调式深松施肥播种一体机(ZL 2010 2 0139976.4)。

2.3.3　穗茎兼收玉米联合收获机的研发

针对冬小麦-夏玉米一年两熟区秸秆还田量大影响小麦出苗, 现行的玉米联合收割机必须对行收获等问题, 研制了 4YQ-2000 型穗茎兼收玉米联合收获机。采用往复式割刀先切割茎秆, 通过横向和纵向两次并行后摘穗, 提高了行距的适应性, 实现了各种行距玉米的不对行收获技术, 机具一次完成玉米果穗摘收、秸秆切碎收集或还田, 解决了制约我国多年玉米机械收获推广的难题, 获发明专利 1 项: 适用于各种行距的玉米收获机(ZL2007100661659.8)。

2.4　高产节水型保护性耕作关键技术及体系集成

2.4.1　夏玉米秸秆快速腐熟技术

为了解决玉米秸秆快速腐熟问题, 研发了一种玉米秸秆快速腐熟方法, 玉米秸秆粉碎还田后立即将腐熟剂、助剂等物料, 撒施于玉米秸秆上, 用量为腐熟剂 30~37.5 $kg\cdot hm^{-2}$、助剂 45~75 $kg\cdot hm^{-2}$、保水剂 7.5~15 $kg\cdot hm^{-2}$、尿素 90~120 $kg\cdot hm^{-2}$; 然后及时进行翻耕或旋耕, 1 周后播种冬小麦。主要优点: 1)夏玉米秸秆就地机械粉碎后全量直接还田利用, 解决了玉米秸秆收集、运输和存放困难; 2)玉米秸秆快速腐熟, 提高了秸秆腐熟率, 在归还土壤养分、改良土壤的同时使下茬冬小麦出苗整齐, 出苗率大幅度地提升; 3)田间操作简单。获得发明专利 1 项: 一种还田夏玉米秸秆快速腐熟方法(ZL201010539332.9)[20]。

2.4.2　提出了氮素减量 30%的平衡施肥技术

根据 10 多年测定, 华北平原小麦-玉米一年两熟区土壤氨挥发 60 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、硝态氮淋失 65 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, 占施氮量的 30%以上[21]。据此, 通过筛选施用缓控肥减少氨挥发损失、减量施用氮肥与减少灌溉量降低硝态氮淋失损失, 建立了基于作物生育阶段土壤-作物系统养分平衡(土壤有效养分+肥料养分)和作物需肥特性相结合的平衡施肥制度, 可达到氮肥减量 30%的目标。

2.4.3　集成节水 100 mm 的调亏灌溉技术

通过秸秆还田和深松等措施结合, 建立了保护性耕作及轮耕条件下, 小麦季灌溉 2~3 次, 玉米季一般年份不灌溉的小麦-玉米一年两作节水高产方案, 实现了地力的提升和肥水的高效利用。集成的小麦玉米周年丰产保护性耕作技术体系可节省灌溉水 1 水, 减少作业环节 2~3 次, 降低作业成本 10%左右。

2.4.4　建立了可持续的土壤轮耕模式

华北平原小麦-玉米两熟区, 自20世纪90年代以来长期进行秸秆全量还田和土壤少免耕耕作, 长期沿用同一耕作措施已暴露出不少新问题, 如犁底层变浅, 亚表层土壤容重增加、下耕层养分贫化, 影响土壤养分供应、作物根系生长, 阻碍了产量的持续增产。长期秸秆还田, 表层土壤的秸秆覆盖层越来越厚, 虽然起到了保护土壤和保墒效应, 但阻碍了

化肥向根系层的下渗，秸秆的表聚减弱了灌溉水的流动速度，增大了灌溉量。如何克服长期保护性耕作中存在的不足，有必要探索建立可持续的土壤轮耕模式的可行性。为此，我们研究了不同耕作方式配合及不同间隔年限的土壤轮耕模式及其效果。

研究发现：多年旋耕土壤进行深松，当年可增产 22%，第 2 年可增产 8%，第 3 年增产 4%，第 4 年基本没有增产效果。因此，我们提出了 3 年一深松(翻)的少免耕-深松轮耕模式。

2.5 推广应用情况、取得的经济效益和社会效益

农业资源研究中心在长期保护性耕作研究中，先后制定了机械化秸秆粉碎还田技术规程(DB13/T 1045—2009)、小麦玉米一年两熟保护性耕作技术规范(DB13/T 1299—2010)、土壤深松机械作业技术规范(DB13/T1478—2011)等河北省地方标准，推动了保护性耕作技术的发展。2010—2012 年在河北省小麦玉米两熟区进行示范推广，土壤深松示范推广 75 万 hm^2，保护性耕作技术推广 122.7 万 hm^2，并辐射山东省和河南省，获经济效益 24.28 亿元。河北省农业厅和财政厅联合出台文件(冀农计发【2013】62)，要求至“十二五”末对全省 240 万 hm^2 麦田深松耕 1 遍。2013 年河北省财政专项补贴 2.5 亿元，支持 100 个县(市、区)安排 66.7 万 hm^2 粮田开展农机深松作业。通过实施保护性耕作，固碳减排 7.3 亿 t、节水 11 亿 m^3。

3 展望

保护性耕作具有节水、培肥、固碳、节能、减排、增效和持续发展等优势，近年来，我国的保护性耕作技术和研究得到了长足的发展。但是面临不断发展的农业生产过程中出现新的技术问题，针对目前我国保护性耕作发展的状况，未来我国保护性耕作研究应从以下几个方面开展：

保护性耕作下理想耕层结构及构建技术研究。针对长期单一少免耕条件下土壤结构变差、产量不稳等生产矛盾及结构-产量内在机制不清问题，基于保护性耕作长期试验与模拟试验，研究不同耕法下的土壤结构特征、不同土壤结构的效应、不同少免耕作及轮耕模式下的耕层结构-土壤结构-养分供应-产量效应的协同作用机制，提出适合华北平原的松紧相间、虚实并存的理想耕层结构和轮耕模式，建立测土耕作的土壤物理指标体系及构建技术。

利用先进手段进行保护性耕作土壤过程和物质循环研究。针对长期实施保护性耕作出现的病虫害增加等问题，利用分子手段研究不同耕作处理土壤微生物、酶、病虫害发生规律。利用标记元素进行保护性耕作土壤 C、N、P、K 等物质转化和循环研究，揭示病虫害发生机制和物质循环机制。

低耗简便型保护性耕作机具研制与产业化示范。针对小麦-玉米两熟制高量秸秆条件下机具通过性困难与播种质量差等问题，以低能耗、简便高效为目标，围绕少免轮耕关键作业环节，重点研制新型小麦免耕平播播种机、玉米定量精准免施肥播种机、新型变速深松旋耕组合作业机、多功能玉米联合收获机组，建立高效的现代保护性耕作机具支撑体系。

参考文献 References

[1] 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 W S. Development trends and basic principles of conservation tillage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(12): 2702–2708

[2] 张海林，高旺盛，陈阜，等. 保护性耕作研究现状、发展趋势及对策[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(1): 16–20
ZHANG H L, GAO W S, CHEN F, et al. Prospects and present situation of conservation tillage[J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(1): 16–20

[3] 逯非，王效科，韩冰，等. 农田土壤固碳措施的温室气体泄漏和净减排潜力[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4993–5003
LU F, WANG X K, HAN B, et al. Researches on the greenhouse gas leakage and net mitigation potentials of soil carbon sequestration measures in croplands[J]. Actae Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4993–5003

[4] 谢瑞芝，李少昆，李小君，等. 中国保护性耕作研究分析——保护性耕作与作物生产[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1914–1924
XIE R Z, LI S K, LI X J, et al., The analysis of conservation tillage in China — Conservation tillage and crop production: reviewing the evidence[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(9): 1914–1924

[5] 陈四龙，陈素英，孙宏勇，等. 耕作方式对冬小麦棵间蒸发及水分利用效率的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 817–821
CHEN S L, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Effect of different tillages on soil evaporation and water use efficiency of winter wheat in the field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(4): 817–821

[6] 杜章留，高伟达，陈素英，等. 保护性耕作对太行山前平原土壤质量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1134–1142
DU Z L, GAO W D, CHEN S Y, et al. Effect of conservation tillage on soil quality in the piedmont plain of Mount Taihang[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1134–1142

[7] DU Z L, REN T S, HU C S. Tillage and residue removal effects on soil carbon and nitrogen storage in the North China Plain[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(1): 196–202

[8] MUELLER L, SHEPHERD G, SCHINDLER U, et al. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality

rating[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 127(1): 74–84

[9] 杨培培, 杨明欣, 董文旭, 等. 保护性耕作对土壤养分分布及冬小麦吸收与分配的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 755–759
YANG P P, YANG M X, DONG W X, et al. Effect of conservation tillage on wheat and soil nutrient distribution and absorption[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 755–759

[10] DONG W X, HU C S, CHEN S Y, et al. Tillage and residue management effects on soil carbon and CO_2 emission in a wheat-corn double-cropping system[J]. Nutrients Cycling in Agroecosystems, 2009, 83: 27–37

[11] Ussiri D A N, Lal R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio[J]. Soil and Tillage research, 2009, 104(1): 39–47

[12] Blanco-Canqui H, Lal R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: an on-farm assessment[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(3): 693–701

[13] QIN S P, HU C S, HE X H, et al. Soil organic carbon, nutrients and relevant enzyme activities in particle-size fractions under conservational versus traditional agricultural management[J]. Applied Soil Ecology, 2010, 45: 152–159

[14] DONG W X, HU C S, ZHANG Y M, et al. Gross mineralization, nitrification and N_2O emission under different tillage in the North China Plain[J]. Nutrients Cycling in Agroecosystems, 2012, 94: 237–247

[15] WANG Y Y, HU C S, DONG W X. Relationship between soil nutrients and soil microbial biomass, structure and diversity under different tillage[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2011, 20(7): 1711–1718

[16] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO_2、CH_4、N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966–975
ZHANG Y M, HU C S, ZHANG J B, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2, CH_4 and N_2O in agricultural soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 966–975

[17] 闫翠萍, 张玉铭, 胡春胜, 等. 不同耕作措施下小麦-玉米轮作农田温室气体交换及其综合增温潜势[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 704–715
YAN C P, ZHANG Y M, HU C S, et al. Greenhouse gas exchange and comprehensive global warming potential under different wheat-maize rotation patterns[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 704–715

[18] 胡春胜, 陈素英, 张西群, 等. 玉米整秸覆盖小麦全免耕播种方法与设备: 中国 ZL200310109679.X[P]. 2014-11-14
HU C S, CHEN S Y, ZHANG X Q, et al. Sowing methods and equipment for wheat no-tillage with maize straw mulching: China ZL200310109679.X[P]. 2014-11-14

[19] 张西群, 陈素英, 胡春胜, 等. 玉米整秸覆盖下小麦免耕播种技术研究与试验[J]. 农机化研究, 2008, (12): 100–103
ZHANG X Q, CHEN S Y, HU C S, et al. Studies on the machinery and techniques of zero-tillage seeding under the whole maize straw mulch to winter wheat fields[J]. Agricultural Mechanization Research, 2008, (12): 100–103

[20] 杨莉琳, 刘小京, 毛任钊, 等. 一种还田夏玉米秸秆快速腐熟方法: 中国 ZL201010539332.9[P]. 2011-01-20
YANG L L, LIU X J, MAO R Z, et al. A method of quickly thorough decomposition of summer maize straw: China ZL201010539332.9[P]. 2011-04-20

[21] 王文岩, 董文旭, 陈素英, 等. 连续施用控释肥对小麦/玉米农田氮素平衡与利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 2): 135–141
WANG W Y, DONG W X, CHEN S Y, et al. Effect of continuously applying controlled-release fertilizers on nitrogen balance and utilization in winter wheat-summer maize cropping system[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp. 2): 135–141