

DOI: 10.5846/stxb201408011540

侯贤清, 李荣, 贾志宽, 韩清芳. 不同农作区土壤轮耕模式与生态效应研究进展. 生态学报, 2016, 36(5): - .

Hou X Q, Li R, Jia Z K, Han Q F. Research progress on ecological effects under the rotational tillage patterns in agricultural regions of China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): - .

不同农作区土壤轮耕模式与生态效应研究进展

侯贤清¹, 李 荣^{1,*}, 贾志宽², 韩清芳²

¹ 宁夏大学农学院, 银川 750021

² 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院/农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 杨凌 712100

摘要: 适时进行不同土壤耕作措施的合理组配, 形成与种植制度相适应的旱作土壤轮耕技术体系, 以解决长期单一耕作措施所带来的诸多问题, 在国内外已备受广泛关注。为深刻理解中国农作区土壤轮耕模式及其生态效应研究进展, 本文就土壤轮耕的概念、轮耕模式及其土壤与作物生态效应进行了详细的阐述; 在总结现有研究的基础上, 归纳总结了不同农作区土壤轮耕模式的类型、作业效果及其机械选择; 科学评价不同轮耕模式下土壤与作物的生态效应; 指出了目前土壤轮耕技术研究中所存在的问题, 并提出相应的建议。针对我国区域农作制的合理轮耕周期研究比较困难, 综合国内外土壤轮耕的研究进展, 提出土壤轮耕模式及技术体系今后的重点研究方向: (1) 结合各区域主流种植模式, 研究轮耕与轮作相结合的轮耕模式; (2) 不同区域轮耕周期的确定与完善; (3) 从技术上解决轮耕导致的土壤质量下降和作物减产的问题; (4) 轮耕对土壤供肥与作物吸肥的影响; (5) 加强轮耕模式及体系的技术评价、技术推广与配套技术的研究。

关键词: 农作区; 轮耕模式; 生态效应; 研究进展

Research progress on ecological effects under the rotational tillage patterns in agricultural regions of China

HOU Xianqing¹, LI Rong^{1,*}, JIA Zhikuan², HAN Qingfang²

¹ School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

² Chinese Institute of Water-saving Agriculture/Key Laboratory of Crop Physi-Ecology and Tillage Science in Northwestern Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: The soil rotational tillage system with the proper match of different tillage practices could solve all the long-term and continuous single-tillage problems in agricultural regions. This method has attracted attention both at home and abroad. In order to understand the research progress on ecological effects under the rotational tillage patterns in different agricultural regions of China, in this paper, we review in detail the concept, patterns of rotational tillage, and the ecological effects of this system. According to existing data, we summarize the soil rotational tillage pattern types, operation effects, and mechanical choice in different agricultural regions. There is a need for scientific evaluation of the ecological effects on soils and crops under rotational tillage, and there are still a number of unsolved problems in the research on current soil rotational tillage technology; accordingly, we provided some suggestions. It is difficult to study the realistic cycle of rotational tillage; analysis of the research progress on the rotational tillage at home and abroad showed that the readily researchable areas and priorities in this field in China are the following: (1) in combination with mainstream cropping patterns for each agricultural region, the rotational tillage patterns that combine rotational tillage with crop rotation need to be studied; (2) the cycle of rotational tillage in different agricultural regions needs to be ascertained and perfected; (3) the problem of soil degradation

基金项目: 宁夏大学引进人才科研启动经费(BQD2012007); 国家青年科学基金项目(31301280)

收稿日期: 2014-08-11; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lirong_mail@126.com

and crop failures caused by the rotational tillage practice and technology has to be solved; (4) the effects of rotational tillage practice on soil fertility maintenance and absorption of fertilizer by crops need further research; (5) the research into the rotational tillage systems with respect to technology evaluation, technical popularization, and matching technologies needs more attention and funding.

Key Words: agricultural regions; rotational tillage pattern; ecological effect; research progress

土壤耕作直接作用于土壤,改变土壤结构,为作物创造良好的耕层构造,以满足作物生长发育对水、肥、气、热的需要。它是农业生产活动的一项主要内容,也是农作物增产的一项基本措施,在现代农业可持续发展中具有举足轻重的作用^[1]。长期以来,旱作农业土壤耕作技术力求纳秋水、抗春旱,但长期单一的耕作方式使土壤耕层变浅、土壤容重变大、土壤有机质在表层富集和病虫害的发生严重等,给作物的生长发育产生严重的威胁,造成作物减产^[2-3]。以减少土壤扰动和增加秸秆覆盖为主要特点的保护性耕作,具有保土、增肥、节水、增产和增效的作用^[4],已在生产上大面积应用。从传统耕作向少免耕技术的转变,是土壤耕作技术的一场革命。近年来,盲目引进美国的保护性耕作措施,推广休耕少耕免耕,致使防治水土流失、加强生态建设的任务越来越重^[5]。多年保护性耕作后出现的问题是土壤变硬,容重增大,影响作物根系发育及对水分和养分的吸收,产量出现下降的趋势^[6]。保护性耕作技术的研究已不再是仅关注土壤耕作技术本身及对当季作物生长的影响,更注重耕作制度的周期、作物轮作、土壤轮耕等综合技术配置及其效应^[7]。王振忠等^[8]在1995年提出了轮耕的概念及在麦稻复种连作条件下轮耕的措施,并确立了“久浅需深、久免需耕”的思想。刘世平等^[9]也提出以增产、节本、高效和可行为原则,将轮作、耕作和培肥相结合,逐步形成轮作、轮培和轮耕的“三轮”技术体系。2005年在全国保护性耕作研讨会上高旺盛指出,建立土壤轮耕技术体系是中国保护性耕作制的关键技术之一^[7]。土壤轮耕发扬和继承了不同耕作方法的优点,为秸秆还田和有机培肥创造良好的土壤条件,更好地解决“用地养地”、“复种农时”和“高产高效”三者之间的关系^[10]。因此,适时进行土壤轮耕对维持农田土壤质量健康具有重要作用。

1 土壤轮耕的概念

针对长期的单一耕作措施和多年保护性耕作技术给作物生长及土壤生态环境带来诸多不利影响,通过保留传统耕作中的有益部分,适墒进行土壤轮耕恢复地力,来提高供肥能力^[8]。关于轮耕,国内外并没有统一的概念。在国内,有研究人员^[9-10]认为,土壤轮耕是通过翻耕、深松和免耕等耕作措施的科学组配,形成与种植制度相适应的土壤耕作技术体系。在国外,轮耕的提法不尽相同,存在着区域性的差异^[11-13]。在澳大利亚,轮耕是采用改变年际间不同耕作深度、实现降低土壤紧实度、避免相同耕作深度的耕作方式;而在美国,轮耕是指与作物轮作相适应的耕作措施交替进行的耕作技术体系。我们认为,土壤轮耕是通过合理配置土壤耕作技术(翻耕、旋耕、深松和免耕等),与种植制度形成相适应的土壤耕作技术体系;同时形成以少耕为主体,少、免耕交替,定期耕翻的轮耕模式,来解决长期少免耕而产生的负面效应。这既考虑到节本增效问题,又综合考虑到农田土壤质量的改善、土地生产力的提高,对于减少长期单一耕作的弊端而具有重要作用,是未来我国农业可持续发展的重要支撑技术,也是我国区域土壤耕作制改革的发展方向。

2 不同农作区土壤轮耕模式

根据我国南北地理气候来看,免耕成为主流耕作方式,辅以少耕和翻耕,是今后我国农作区耕作方式的发展趋势,是持续和效益农业的最佳选择。在不同类型区土壤上采用少免耕模式进行生产,土壤肥力和作物产量都有衰减期,必须实行不同的土壤轮耕模式才能保持和提高土壤肥力,确保持续高产。在具体实施时,轮耕必须与作物轮作结合,从种植制度综合优化要求出发,根据所具备的条件和作物要求,灵活运用与轮作相适应

的轮耕模式,使轮耕效益得到充分发挥^[8]。笔者根据我国不同农作区地域特点及所存在的问题,现将不同农作区土壤轮耕模式的类型、作业效果及机械选择进行对比,归纳如下:

2.1 农牧交错带

近几年来,农牧交错带土壤侵蚀和荒漠化比较严重,留茬免耕技术是北方农牧交错带防止农田土壤风蚀的主导保护性耕作技术^[14]。(1)轮耕模式主要有:a.免耕/免耕/免耕/免耕,结合作物轮作苜蓿/油菜/剑舍豌豆/苜蓿;b.翻耕/翻耕/翻耕/翻耕,结合作物轮作苜蓿/油菜/剑舍豌豆/苜蓿;c.免耕/免耕/深松/深松,并结合作物轮作苜蓿/油菜/剑舍豌豆/苜蓿。即在连续免耕2年后的基础上进行不同耕作处理,农田未进行覆盖,作物收获后留茬20 cm,终年无灌溉。(2)作业效果:多年免耕后土壤容重增大,连年翻耕严重破坏了土壤结构,影响作物根系的生长发育及产量,在免耕的基础上深松,保障了作物产量的需求,同时也提高了土壤抗风蚀能力^[15]。(3)机械选择:免耕采用内蒙古农业大学机械厂生产的2BM-9型免耕播种机;深松采用天津市蓟县农业机械厂生产的ISQ-204型深松机。

2.2 东北旱作区

东北旱作农业区传统耕作法多次作业,压实土壤,破坏土壤结构,土壤失墒严重。为提高耕地蓄水保墒能力,东北旱作区相继创立新的耕法。新耕法主要有:平播后起垄和秋季灭茬起垄。新的耕法坚持了垄作传统,使传统耕法较顺利地过渡到蓄水保墒耕作法,但仍存在一些问题:耕作次数多,土壤压实严重,作业成本高,地表长期裸露休闲,土壤失墒严重,风蚀加剧。针对以上严重现象,对节水抗旱的新耕法进行了探索与总结,研究出适合东北旱作区蓄水保墒耕作技术体系“三年轮耕法”^[16]。(1)三年轮耕法:即第1年秸秆粉碎覆盖还田,第3年留茬越冬,各年中均采用伏雨前深松,播种时采用免耕播种。新耕法集成了秸秆根茬还田、带状少耕、深松、免耕播种、分层深施化肥、窄开沟重镇压、植保等农艺技术,通过不同的联合少耕机具进行优化组合作业。(2)作业效果:新耕法休闲期地表覆盖,消除了裸露休闲,减少动土量,保水、保墒、保土。秸秆根茬还田,使土壤有机质增加,培肥地力;采用联合作业机具,减少机具作业次数及机械压实,降低作业成本,达到联合少耕的效果。(3)机械选择:其配套机具包括耕整、耕播两大类联合作业机具^[17]。耕整联合作业机具包含IDGZL-140(2)、IDGZL-240(4)多功能耕整联合作业机,IDGZL-240(4)J加强型多功能耕整联合作业机,IJGHL-140(2)秸秆-根茬粉碎还田联合作业机和IFS-260(4)仿生减阻深松机。耕播联合作业机具包括IGBL-140(2)、IGBL-240(4)耕播联合作业机,IGBL-240(4)J加强型耕播联合作业机、ZB-Y2硬茬播种机和ZBM-4免耕精播机。

2.3 西北黄土高原区

西北黄土高原旱作区,干旱少雨,春旱、冬春连旱严重,粮食产量低而不稳。作物收获后,充分利用雨季休闲期降水是提高该区降水利用率的关键。(1)土壤轮耕技术主要包括夏闲期轮耕^[18]和冬闲期轮耕^[19]。a.夏闲期轮耕模式主要有:深松/免耕/深松/免耕/深松/免耕、翻耕/翻耕/翻耕。即在前茬冬小麦收获后留高茬将秸秆出地进行耕作处理,经过夏季休闲,9月下旬播种冬小麦,次年6月下旬冬小麦后收获留高茬将秸秆出地进行耕作处理,再进行夏季休闲,9月下旬播种冬小麦,第三年6月下旬冬小麦收获,进行秸秆出地进行耕作处理。b.冬闲期轮耕模式主要有:深松/免耕/免耕/免耕/深松/深松、免耕/免耕/免耕、深松/深松/深松、翻耕/翻耕/翻耕。即在前茬春玉米收获后将秸秆出地进行耕作处理,经过冬季休闲,次年4月中旬播种糜子,9月下旬糜子收获留高茬将秸秆出地进行耕作处理,经过冬季休闲,第三年4月中旬播种谷子,9月下旬谷子收获留高茬将秸秆出地进行耕作处理,经过冬季休闲,第四年4月中旬播种糜子,9月下旬糜子收获留高茬将秸秆出地进行耕作处理。(2)作业效果:与传统耕作相比,休闲期轮耕能有效改善土壤结构,最大限度地接纳夏秋降雨,做到春墒秋保、秋雨春用,显著提高了自然降水利用效率和作物产量。(3)机械选择:免耕、深松和翻耕处理配套机具分别为意大利生产的Amazone NT 250型免耕播种机、中国农业大学研制的1SY-120型带翼铲深松机和山东德州生产的专用铧式犁拖拉机。

2.4 华北平原麦—玉米两熟区

华北平原属典型的小麦—玉米两熟区,随着保护性耕作技术在华北平原的应用,多年少免耕后出现土壤

容重增大、孔隙变小等土壤质量下降问题。因此,探索适宜的轮耕模式来改善土壤质量尤为重要。(1)土壤轮耕技术主要有:a.年内轮耕模式^[20]。即小麦季免耕玉米季免耕,小麦季免耕玉米季深松,小麦季深松玉米季免耕,小麦季深松玉米季深松,小麦季翻耕玉米季免耕,小麦季翻耕玉米季深松。作业效果:小麦季深松玉米季深松能提高土壤理化性状,改善地上部植株性状,增加作物产量和品质,提升经济效益,在该地区进行小麦-玉米年内轮耕时作为首选,其次是小麦季深松玉米季免耕,不建议采用小麦季免耕玉米季免耕的年内轮耕模式。b.多年免耕后轮耕^[21]。在小麦—玉米连续5年进行周年免耕、翻耕和旋耕试验,轮耕模式主要有免耕-免耕、免耕-翻耕和免耕-旋耕。作业效果:轮耕能够提高长期免耕土壤有机碳、活性碳和碳库管理指数,对提高长期免耕土壤质量有重要作用。c.秸秆覆盖下轮耕^[22]。即3年深松+1年免耕、4年深松、3年免耕+1年深松、4年免耕、秸秆覆盖结合3年深松+1年免耕、秸秆覆盖结合4年深松、秸秆覆盖结合3年免耕+1年深松、秸秆覆盖结合4年免耕。作业效果:深松与免耕相结合的土壤轮耕制度是进一步提高该地区玉米增产的有效措施,适宜的土壤轮耕与秸秆覆盖还田可更好发挥两者的增产效果。(2)机械选择:免耕处理选用2BMF-7/14型多功能免耕播种机一次性完成旋耕、施基肥、播种作业,深松处理选用180型震动深松机进行深松;翻耕采用东方红904拖拉机带三铧犁进行翻耕,旋耕使用东方红904拖拉机带旋耕机进行旋耕。

2.5 渭北旱塬区

渭北旱塬区长期采用“多次翻耕一耙耱”土壤耕作法土壤墒情和风蚀严重。针对这一问题,李军在渭北旱塬区进行长期定位试验,研究了不同施肥水平结合不同耕作措施组成的轮耕模式^[23-24]。(1)轮耕模式主要有:免耕/深松轮耕、深松/翻耕轮耕、翻耕/免耕轮耕、5年连续免耕、5年连续深松和5年连续翻耕;施肥水平包括:常规施肥(高氮高磷)、平衡施肥(氮磷钾平衡)和不施肥或低肥(低氮低磷)。即在前茬作物收获后将秸秆粉碎覆盖地表进行耕作处理,经过休闲(夏或冬季),当年9月或次年4月中旬播种冬小麦或春玉米,6月或9月下旬冬小麦或春玉米收获,然后秸秆粉碎覆盖地表进行耕作处理,经过休闲(夏或冬季),第二年9月或第三年4月中旬播种冬小麦或春玉米,6月或9月下旬冬小麦或春玉米收获,进行秸秆粉碎覆盖地表进行耕作处理。(2)作业效果:平衡施肥结合免耕/深松轮耕模式,相比连年翻耕,能够增加休闲期土壤蓄水量,改善生育期土壤墒情,提高表层土壤肥力,有利于旱作农田作物的增产稳产,同时提高了生产收益。(3)配套机具:中国农业大学研制的2BMQF-4C型玉米免耕播种机、1SY-120型带翼铲深松机和专用铧犁翻耕机。

2.6 长江流域

2.6.1 麦稻两熟区

稻麦两熟地区随着少免耕应用年限的延长,也暴露出问题,如土壤养分表层富集,导致土壤供肥能力差,草害严重,作物出现早衰倒伏等现象。许多研究学者提出以少耕为主体,少免交替,定期耕翻的深、浅、免有机结合的轮耕制。即根据苏北地区农业生产特点,本着增产、高效、节本、可行的原则,将轮作、耕作、培肥有机结合,形成轮作、轮耕、轮培的“三轮”技术体系^[9]。(1)轮耕模式主要有:连耕(常耕/水稻—常耕/小麦—常耕/水稻—常耕/小麦)、连少(少耕/水稻—少耕/小麦—少耕/水稻—少耕/小麦)、轮耕(常耕/水稻—少耕/小麦—少耕/水稻—少耕/小麦)。(2)作业效果:轮耕后耕层土壤容重居于连少(连续少耕)和连耕(连续常耕)之间,保持在小麦生长的适宜范围内;轮耕(常耕/少耕)有较高的氮肥利用效率,可适当减少氮肥施用量。小麦产量以轮耕为最高,在土壤肥力水平较低情况下更应避免长期连续少耕^[25]。(2)机械选择:少耕选用1GF-170型反转灭茬旋耕机,常耕选用1LYTA-622水田犁。

2.6.2 双季稻区

在我国南方稻田,连续免耕若干年后如何通过合理的措施进一步改善和提高土壤质量,是目前人们比较关注的问题。土壤轮耕结合秸秆还田措施对于减少长期免耕缺点具有重要作用。中国农业大学的陈卓教授在连续免耕7年的稻田分别进行免耕、旋耕和翻耕3种耕作措施^[26-27]。(1)土壤轮耕模式主要有:免耕—免耕、免耕—翻耕、免耕—旋耕。(2)作业效果:长期免耕后,翻耕、旋耕措施通过改变耕层土壤结构,进而提高稻田土壤水贮量;同时长期免耕后,免耕秸秆还田会增加表层土壤有机碳储量;而翻耕、旋耕秸秆还田会提高

下层土壤有机碳储量。(3)机械选择:免耕采用 2BG-6A 免耕条播机播种,播后立即铺盖秸秆,旋耕选用 1GF-170 型反转灭茬旋耕机,翻耕采用 1ZS-20 型水田耕整机。

3 轮耕的土壤生态效应

3.1 对土壤物理性状的影响

在多年免耕的基础上进行土壤耕作,能有效降低作物生育前期耕层的土壤容重。旋耕 2 年后深耕比连续 3 年旋耕降低 15—20 cm 土层土壤容重,但对表层土壤容重影响相对较小^[28]。长期免耕后翻耕、旋耕,比长期免耕有效改善 0—10 cm 土壤总孔隙,提高 5—10 cm 毛管孔隙^[22];连续耙耕 3—4 年使 15—20 cm 土层土壤形成较紧实的耙底层,但耕翻 1 年后耙耕 2 年周期轮换模式能改善土壤透气性^[29]。耕作方式通过影响微团聚体与大团聚体之间的转化及再分布,进而影响土壤结构的稳定性及抗侵蚀能力。深松 1 年后均能使 >0.25 mm 土壤水稳性团聚体增加^[30]。免耕与深松隔年轮耕比传统耕作显著增加 0—20 cm 土层 0.25—2 mm 团聚体数量,极显著增加 20—40 cm 土层 >5 mm 团聚体含量^[31]。微团聚体与大颗粒团聚体相比,稳定性较强,不易受外界因素的影响,轮耕处理比传统耕作能增加 2—0.25 mm 的团聚体的比例,而微团聚体 (< 0.25 mm) 的比例相应减少^[31]。

相关研究表明,在旱作区进行土壤轮耕可减少土壤扰动,降低土壤容重,增加降水入渗,增强土壤蓄水能力。长期免耕后,翻耕、旋耕能够有效提高耕层土壤蓄水量,特别是在土壤含水率偏低时尤为显著^[26]。夏季农田休闲,特别是在干旱年份,免耕后深松可充分利用夏季降水,将其蓄存于深层土壤,供夏秋作物生长需要^[15]。同时,免耕与深松轮耕还可显著提高了休闲期降雨蓄水效率和小麦整个生育期降水利用效率,改善土壤蓄水保墒效果和作物的水分利用能力^[18]。

3.2 对土壤化学性状的影响

少耕有利于土壤有机质和全氮在上层的富集和积累,促进有机碳氮库的形成,然而,长期少免耕会引起表层土壤紧实,有机质含量减少,表层有机碳富集和氮素流失等严重问题^[32]。轮耕措施能够增加耕层土壤有机碳含量,促进耕层土壤有机碳氮的均匀分布。有研究表明,免耕 1 年后进行翻耕增加耕层土壤全氮含量效果明显^[33],2 年深松 1 年免耕模式能有效增加耕层土壤有机质含量^[34]。可见,轮耕对提高土壤肥力有着重要的作用。

长期连续免耕有利于提高表层(0—5 cm)土壤有效磷的含量,而长期免耕后翻耕、旋耕提高下层(5—20 cm)土壤有效磷的含量,长期免耕后翻耕有利于提高下层土壤速效钾的含量^[27]。而轮耕有利于均衡耕层土壤养分,有效抑制长期免耕带来的养分表层富集现象,同时有利于释放矿化养分,提高土壤肥力,降低农田肥料使用量。免耕与深松隔年轮耕可显著增加耕层土壤有效氮、有效磷含量和速效钾含量,改善了土壤的养分状况^[34]。李娟等^[35]也得出相似的研究结果:免耕后深松对 0—20 cm 土层土壤有效氮含量影响较大,对 20—40 cm 土层土壤有效磷和速效钾含量影响较大。

3.3 对土壤生物性状的影响

免耕可使土壤酶活性增加,对于表层土壤效果更为明显。分析其原因有两个方面:一方面免耕使土壤免受耕作扰动,同时连续免耕使土壤耕层变浅植物根系多分布在表层有关;另一方面免耕增加土壤微生物数量,形成不同时期的微生物区系,进而改变土壤生物特性^[20,36]。肖嫩群等^[37]研究发现,晚稻分蘖盛期的土壤微生物活度表现为少耕 > 翻耕 > 免耕,这与微生物数量变换规律基本一致。作物轮作也可影响土壤生物性状^[38],除了作物轮作外,还可以改变耕作方式。熊鸿焰等^[39]的研究发现,水旱轮作后免耕 0—20 cm 耕层土壤微生物数量、生物量磷和生物多样性显著低于常规耕作,而微生物生物量碳和氮显著高于常规耕作。秸秆还田结合轮耕措施能显著提高 0—40 cm 土层土壤酶活性,也有利于酶在土壤中均匀分布,这对土壤肥力的改善和作物产量的增加将会起到有利的作用^[40]。这主要由于长期免耕处理秸秆覆盖在表层,且养分在表层富集,经过翻耕、旋耕处理后表层秸秆和养分被均匀地分布于耕层,有利于深层土壤微生物的活动^[41]。

4 轮耕的作物生态效应

4.1 作物生理生态效应

作物对土壤氮素的吸收,不仅取决于氮素的化学形态,而且还与其移动性及作物根系在土壤中的分布状况等有密切关系。刘世平等^[25]研究表明,肥料和耕作方式对作物含氮率和累积吸氮量均有较大影响:不同耕法中,无论是施肥区还是不施肥区,各生育期多以轮耕为最高;在不施氮肥的情况下,轮耕与少免耕处理,与长期免耕处理相比,利于氮素的矿化和水稻对氮素的吸收。作物根系的数量、活性以及分布状况,直接影响植株地上部生长发育和产量的形成。轮耕能促进小麦根系下扎,增加下层根的比例^[42]。韩宾等^[29]研究认为,连续耙耕 3—4 年使 15—20 cm 土层形成紧实度较大的耙底层,导致土壤透气性和蓄水保墒能力降低,严重阻碍了根系正常下扎,而耕翻 1 年、耙 2 年的周期轮换模式,能促进根系下扎,进而提高作物的产量。适当深松或改连耕为免耕也可达到同样的效果^[43]。

不同耕作措施通过调节土壤环境,进而影响作物光合特性。侯贤清等^[44]通过 3 年的轮耕试验研究结果证明,不同轮耕模式能显著提高小麦旗叶叶绿素相对含量,使小麦花后旗叶保持较高的光合能力。适宜的耕作措施可以改变土壤的理化性状,而土壤性状的改变又直接影响作物的生长发育,延缓植物衰老,提高作物产量。顾顺芳等^[22]研究结果表明,连续 3 年深松基础上免耕、连续 3 年免耕基础上深松,可以提高玉米穗位叶叶绿素含量,延缓衰老进程,提高花后玉米干物质质量、经济系数和籽粒产量。

4.2 对作物产量与经济效益的影响

轮耕可通过改善土壤的孔隙状况,降低土壤容重和紧实度,从而形成作物适宜的种床,促进籽粒的萌发和生长发育,最终提高作物的产量性状^[35]。侯贤清等^[44]、孔凡磊等^[45]和孙国峰等^[46]研究表明,不同轮耕措施增加了冬小麦的有效穗数,有利于形成高产的小麦群体结构,建立了小麦高产的群体结构和个体基础,从而提高籽粒产量。如表 1 为不同农作区域轮耕模式下作物产量及经济效益对比。通过对比分析发现,结合各区域主流种植模式,采用不同耕作方式与作物轮作相结合的轮耕模式可明显提高作物的产量、水分利用效率和经济效益。

5 存在问题、建议及展望

5.1 存在问题及建议

作物轮作、土壤耕作与培肥,是土壤管理技术的主要方面。如何根据农业生产特点,本着增产、高效、节本、可行的原则,将轮作、耕作、培肥有机地结合起来,形成一个完善的综合技术体系,建立持续农业的土壤耕作技术是当前土壤耕作研究的热点^[9]。然而,传统的频繁翻耕,增加了土壤容重,减少土壤团聚体含量,加速土壤侵蚀,导致严重的水土流失和养分流失,造成作物产量低而不稳^[48-50]。深松和秸秆覆盖虽能解决由于连续免耕覆盖作业出现的土壤问题,但每年的深松作业增加机械作业成本,对提高作物产量效果并不明显^[51]。

国内北方的深松少耕、耙茬少耕、覆盖免耕,南方的自然免耕、稻板麦、轮耕等耕作技术在农业生产中都发挥了很大作用。针对土壤耕作所存在的问题,笔者认为:首先,强调“久免需耕”,并非恢复过去的耕作方式,而是要达到免耕与耕翻之间的辩证统一。在作业上摒弃过去传统耕作中的不合理部分,诸如烂耕、水旋,以及多耕多耙等费工低效的程序。保留传统耕作中的有益部分,如通过适墒耕翻进行上下土层交换,松动耕层以提高供肥能力等。适墒耕翻与少免耕组合,可以起到互补促进作用。这种组合并非传统耕作季季都耕,从数十年为系统来看,总体上以少免耕为主,耕翻为次的少耕制;从年际间来看,耕与免、深与浅、翻与旋等组合轮替。

其次,少耕制或轮耕制可解决提高肥力,灭虫、除草等方面的问题。但鉴于不同农作区种植方式、作业条件等不同,“轮耕制”应遵循以下两个原则:(1)轮耕要着眼于土壤结构的保护与发展,按轮耕方案,进行夏耕晒垡,秋耕冻垡。具体操作要因地制宜,防止对土壤结构的破坏,切忌烂耕烂旋。(2)轮作与轮耕相结合。轮作使土壤生境多变,免耕与耕翻、浅层耕作与深层耕作、夏耕与秋耕科学轮换,生态防除害虫、杂草。

表 1 中国不同农作区轮耕模式下作物产量及经济效益对比

Table 1 Comparison of crop yield and economic benefit in different agricultural areas of China

区域 Areas	主要耕作模式 Main tillage patterns	产量、水分利用效率及经济效益 Yield, water use efficiency and economic benefit
农牧交错带 Ecotone between farming and animal husbandry	留茬免耕/深松轮耕 T1:免耕/免耕/免耕/免耕 T2:翻耕/翻耕/翻耕/翻耕 T3:免耕/免耕/深松/深松	2年免耕后深松比连续免耕作物产量增产 18.29%,水分利用效率增加 9.68% ^[15] 。
东北旱作区 Dryfarming of northeast	三年轮耕法	玉米第 3 年产量比传统耕作法增加 3%—8%,降低作业成本 200—600 元/hm ² ^[16] 。
西北黄土高原区 Loess Plateau area of northern	夏闲期轮耕 T1:深松/免耕/深松 T2:免耕/深松/免耕 T3:翻耕/翻耕/翻耕	免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松比连年翻耕小麦产量分别提高 9.6% 和 10.7%,水分利用效率分别提高 7.2% 和 7.7% ^[18] 。
	冬闲期轮耕 T1:深松/免耕/免耕 T2:免耕/深松/深松 T3:免耕/免耕/免耕 T4:深松/深松/深松 T5:翻耕/翻耕/翻耕	连年免耕、深松/免耕/免耕、免耕/深松/深松和连年深松处理糜子产量比连年翻耕分别增加 29.4%、25.9%、23.9%、20.3% 和 3.54%,水分利用效率增幅在 14.3%—44.3% ^[19] 。
华北平原 麦—玉两熟区 Wheat/corn double cropping area in the north China plain	年内轮耕 T1:麦季免耕玉米季免耕 T2:麦季免耕玉米季深松 T3:麦季深松玉米季免耕 T4:麦季深松玉米季深松 T5:麦季翻耕玉米季免耕 T6:麦季翻耕玉米季深松	小麦、玉米周年产量表现为麦季深松玉米季深松最高,分别比其他轮耕模式提高 11.40%—42.23%。6 种轮耕模式麦季深松玉米季深松的周年利润最高,分别比其他轮耕模式提高 12.23%—54.20% ^[20] 。
	多年免耕后轮耕 T1:免耕—免耕 T2:免耕—翻耕 T3:免耕—旋耕	冬小麦的实际产量表现为:免耕—旋耕>免耕—翻耕>免耕—免耕,免耕—翻耕、免耕—旋耕分别比免耕—免耕增产 11.8% 和 16.9% ^[45] 。
	秸秆覆盖下轮耕 T1:3 年深松+1 年免耕 T2:4 年深松 T3:3 年免耕+1 年深松 T4:4 年免耕	秸秆覆盖还田比不盖还田产量平均提高 10.68%;3 年深松后 1 年免耕比 4 年深松平均增产 2.60%;3 年免耕后 1 年深松比 4 年免耕增产 4.21%;秸秆覆盖还田结合 3 年深松后 1 年免耕比 4 年免耕秸秆不还田增产 23.32% ^[22] 。
渭北旱源区 Weibei Highland area	施肥水平下轮耕 T1:免耕/深松轮耕 T2:深松/翻耕轮耕 T3:翻耕/免耕轮耕 T4:5 年连续免耕 T5:5 年连续深松 T6:5 年连续翻耕	免耕/深松和深松/翻耕轮耕处理小麦产量最高,比连续翻耕产量增加 3.8%;连续免耕和翻耕/免耕轮耕处理产量比连续翻耕产量分别减少 4.1% 和 4.8%。免耕/深松和深松/翻耕轮耕处理的水分利用效率与连续翻耕接近,翻耕/免耕轮耕处理水分生产效率低于连续翻耕。翻耕/免耕和深松/翻耕轮耕处理纯收益较高,相比连续翻耕分别增加 665 和 600 元/hm ² ;纯收益翻耕/免耕>免耕/深松>深松/翻耕 ^[23] 。
长江流域 Yangtze River basin	麦稻两熟区 T1:连耕(连续常耕) T2:连少(连续少耕) T3:轮耕(常耕/少耕)	小麦产量以轮耕为最高,比连耕、连少增产 2.7%—34.2%;不同耕法不施肥区产量占施肥区产量比例不同,连少、连耕、轮耕分别为 40%、45% 和 50% ^[47] 。
	双季稻区 T1:免耕—免耕 T2:免耕—旋耕 T3:免耕—翻耕	早晚稻产量表现为:免耕—旋耕>免耕—翻耕>免耕—免耕与免耕—免耕的实际产量相比,早稻免耕—翻耕和免耕—旋耕分别高出 4.08%、5.72%;晚稻免耕—翻耕和免耕—旋耕分别高出 3.04%、11.79% ^[46] 。

第三,不同农作区轮耕模式的选择及应用。(1)轮耕周期与宜耕时机:轮耕周期的确定涉及影响因子较多,但最重要因素是土壤肥力下降而引起减产的临界年,前人^[52]研究结果表明,少免耕必须结合增施肥料,才能稳产增产。耕作时宜以能充分发挥机具效益、改良土壤和获得作物高产为原则,从宜耕、利土、抢时、省工等综合效果出发,以夏耕为主,争取秋耕为宜耕时机。(2)轮耕模式与应用:根据不同农作区土壤类型,采用少免耕结合轮耕保持和发展土壤肥力,确保持续高产。轮耕制应以少耕为主体,少免耕交替,定期耕翻的深、

浅、免有机结合的体系。在具体实施时,应从不同区域种植制度出发,结合作物要求,建立与轮作相适应的轮耕模式,使轮耕效益得到充分发挥。

5.2 展望

由于不同农作区的气候及土壤环境条件存在明细差异,这就要求不同区域依据自身条件发展适宜的轮耕模式。针对区域农作制的合理轮耕周期研究困难,综合国内外研究进展,我国不同区域土壤轮耕模式及技术体系今后的研究工作中还需对以下方面进行深入探究:

(1)结合各区域主流种植模式,采用轮耕与轮作有机结合的周年轮耕模式。重点研究不同区域、不同耕作模式下的土壤耕层功能调节关键技术,完善不同区域轮耕组合模式。

(2)不同区域轮耕周期的确定与完善。对一个具体地区和土类来说,多长时间才是最经济有效,还有待于各地在实践中继续探索。

(3)要从技术上解决轮耕可能导致的土壤质量下降和作物减产的问题。研究在干旱缺水条件下不同轮耕模式通过与其它覆盖及施肥补灌措施结合,充分利用夏季降雨,达到改善土壤质量和作物增产的目的。

(4)关于轮耕对土壤供肥与作物吸肥影响。轮耕对土壤肥力、土壤微生物环境的影响及作物根系吸肥和病虫草种群发生规律等方面仍需进一步的研究。

(5)加强轮耕模式及体系的技术评价、技术推广与配套技术研究。重点解决我国不同农作区域轮耕技术标准不一、技术集成不够等问题。

参考文献 (References):

- [1] 刘世平, 陆建飞, 庄恒扬, 沈新平. 土壤轮耕: 江苏农业可持续发展的重要技术措施. 土壤, 1998, 30(1): 43-46.
- [2] Fabrizio K P, García F O, Costa J L, Picone L I. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. Soil and Tillage Research, 2005, 81(1): 57-69.
- [3] Chan K Y, Heenan D P. The effects of stubble burning and tillage on soil carbon sequestration and crop productivity in southeastern Australia. Soil Use and Management, 2005, 21(4): 427-431.
- [4] 冯聚凯, 崔彦宏, 甄瑞, 李少昆. 华北平原一年两熟区保护性耕作技术研究进展. 中国农学通报, 2006, 22(6): 177-181.
- [5] 侯贤清, 李荣, 韩清芳, 贾志宽, 王维, 杨宝平, 王俊鹏, 聂俊峰, 李永平. 轮耕对宁南旱区土壤理化性状和旱地小麦产量的影响. 土壤学报, 2012, 49(3): 592-600.
- [6] 何进, 李洪文, 高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究. 农业工程学报, 2006, 22(10): 62-67.
- [7] 高旺盛. 论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势. 中国农业科学, 2007, 40(12): 2702-2708.
- [8] 王振忠, 董百舒, 许学前. “久免需耕”——再谈轮耕的意义. 江苏农业科学, 1995, (5): 43-45.
- [9] 刘世平, 庄恒扬, 沈新平, 陈后庆, 宋家祥, 陆建飞, 黄丽芬. 苏北轮作轮耕轮培优化模式研究. 江苏农学院学报, 1996, 17(4): 31-37.
- [10] 黄细喜, 刘世平, 陈后庆, 邵达三. 江苏省稻麦复种合理轮耕制的研究. 土壤学报, 1993, 30(1): 9-18.
- [11] Carter M R, Sanderson J B, Ivany J A, White R P. Influence of rotation and tillage on forage maize productivity, weed species, and soil quality of a fine sandy loam in the cool-humid climate of Atlantic Canada. Soil and Tillage Research, 2002, 67(1): 85-98.
- [12] López-Fando C, Dorado J, Pardo M T. Effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil properties and crop yields in a semi-arid soil from central Spain. Soil and Tillage Research, 2007, 95(1/2): 266-276.
- [13] López-Fando C, Pardo M T. Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment. Soil and Tillage Research, 2009, 104(2): 278-284.
- [14] 秦红灵. 北方农牧交错带保护性耕作对农田土壤风蚀影响效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- [15] 秦红灵, 高旺盛, 马月存, 马丽, 尹春梅. 两年免耕后深松对土壤水分的影响. 中国农业科学, 2008, 41(1): 78-85.
- [16] 贾洪雷, 陈忠亮, 马成林, 刘昭辰, 杨青, 李广宇. 北方旱作农业区耕作体系关键技术. 农业机械学报, 2008, 39(11): 59-63.
- [17] 贾洪雷, 陈忠亮, 马成林, 刘昭辰, 杨青, 李广宇. 北方旱作区蓄水保墒耕作模式配套装备应用分析. 农业机械学报, 2008, 39(5): 197-200.
- [18] 侯贤清, 李荣, 韩清芳, 王维, 贾志宽. 夏闲期不同耕作模式对土壤蓄水保墒效果及作物水分利用效率的影响. 农业工程学报, 2012, 28(3): 94-100.
- [19] 王维. 宁南旱区休闲期不同轮耕模式的农田生态效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.

- [20] 聂良鹏. 小麦-玉米一年两熟农田高产高效轮耕模式研究[D]. 青岛: 山东农业大学, 2014.
- [21] 孔凡磊, 张海林, 孙国峰, 黄光辉, 陈阜. 轮耕措施对小麦玉米两熟制农田土壤碳库特性的影响. 水土保持学报, 2010, 24(2): 150-154, 183-183.
- [22] 顾顺芳, 王振华, 张新, 张前进, 郭书亚, 张权, 焦念元, 尹飞, 付国占. 轮耕对豫南雨养区夏玉米叶片衰老代谢及产量的影响. 中国农学通报, 2013, 29(6): 154-159.
- [23] 程科. 保护性轮耕对渭北旱作麦田土壤理化性状与作物生产的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [24] 王丽, 李军, 李娟, 柏炜霞. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响. 应用生态学报, 2014, 25(3): 759-768.
- [25] 刘世平, 陆建飞, 单玉华, 黄丽芬, 庄恒扬. 稻田轮耕土壤氮素矿化及土壤供氮量的研究. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2003, 24(2): 36-39.
- [26] 孙国峰, 张海林, 徐尚起, 崔思远, 汤文光, 陈阜. 轮耕对双季稻田土壤结构及水贮量的影响. 农业工程学报, 2010, 26(9): 66-71.
- [27] 唐海明, 孙国峰, 肖小平, 汤文光, 陈阜, 张海林, 杨光立. 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. 生态环境学报, 2011, 20(3): 420-424.
- [28] 蒋向, 贺德先, 任洪志, 刘清瑞, 胡敏. 轮耕对麦田土壤容重和小麦根系发育的影响. 麦类作物学报, 2012, 32(4): 711-715.
- [29] 韩宾, 李增嘉, 王芸, 宁堂原, 郑延海, 史忠强. 土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响. 农业工程学报, 2007, 23(2): 48-53.
- [30] 严波, 贾志宽, 韩清芳, 杨宝平, 聂俊峰. 不同耕作方式对宁夏旱地土壤团聚体的影响. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 58-63.
- [31] 侯贤清, 贾志宽, 韩清芳, 孙红霞, 王维, 聂俊峰, 杨宝平. 不同轮耕模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响. 农业工程学报, 2012, 28(5): 85-94.
- [32] Humberto Blanco-Canqui, Lal R. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till. Soil and Tillage Research, 2007, 95(1/2): 240-254.
- [33] 朱利群, 张大伟, 卞新民. 连续秸秆还田与耕作方式轮换对稻麦轮作田土壤理化性状变化及水稻产量构成的影响. 土壤通报, 2011, 42(1): 81-85.
- [34] Hou X Q, Li R, Jia Z K, Han Q F, Wang W, Yang B P. Effects of rotational tillage practices on soil properties, winter wheat yields and water-use efficiency in semi-arid areas of north-west China. Field Crops Research, 2012, 129: 7-13.
- [35] 李娟, 李军, 尚金霞, 贾志宽. 轮耕对渭北旱塬春玉米田土壤理化性状和产量的影响. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 867-873.
- [36] 陈蓓, 张仁陟. 免耕与覆盖对土壤微生物数量及组成的影响. 甘肃农业大学学报, 2004, 39(6): 634-638.
- [37] 肖嫩群, 陈冬林, 谭周进, 张杨珠, 李建国, 屠乃美. 少免耕对晚稻土生物活性影响的研究. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 598-601.
- [38] 杨祥田, 周翠, 李建辉, 李伟龙, 林俊. 不同轮作方式下大棚草莓产量及土壤生物学特性. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 312-315.
- [39] 熊鸿焰, 李廷轩, 余海英, 张锡洲. 水旱轮作条件下免耕土壤微生物特性研究. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 145-150.
- [40] 张莉, 李友军, 付国占, 焦念元, 张洋洋. 轮耕对冬小麦田土壤酶活性时空变化的影响. 麦类作物学报, 2014, 34(8): 1104-1110.
- [41] 孔凡磊, 张明园, 范士超, 张海林, 陈阜. 耕作方式对长期免耕农田土壤微生物生物量碳的影响. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 240-245.
- [42] 王同朝, 卫丽, 吴克宁, 席章营, 王晨阳. 小麦根系对水分亏缺的生物学响应. 河南农业大学学报, 2000, 34(1): 17-21.
- [43] Pidgeon J D, Soane B D. Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley mono-culture system. The Journal of Agricultural Science, 1977, 88(2): 431-442.
- [44] Hou X Q, Li R, Jia Z K, Han Q F. Effects of rotational tillage practices on soil water status and photosynthetic characteristics at late growth stage of winter wheat in semi-arid areas of northwest China. Agronomy Journal, 2012, 105(1): 215-221.
- [45] 孔凡磊, 陈阜, 张海林, 黄光辉. 轮耕对土壤物理性状和冬小麦产量的影响. 农业工程学报, 2010, 26(8): 150-155.
- [46] 孙国峰, 陈阜, 肖小平, 伍芬琳, 张海林. 轮耕对土壤物理性状及水稻产量影响的初步研究. 农业工程学报, 2007, 23(12): 109-113.
- [47] 刘世平, 庄恒扬, 单玉华, 陈后庆, 陆建飞. 轮耕对土壤供氮和小麦吸氮状况的影响. 江苏农学院学报, 1998, 19(2): 49-52.
- [48] Chen H Q, Norbert Billen, Karl Stahr, Yakov Kuzyakov. Effects of nitrogen and intensive mixing on decomposition of ¹⁴C-labelled maize (*Zea mays* L.) residue in soils of different land use types. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1/2): 114-123.
- [49] Chen H Q, Hou R X, Gong Y S, Li H W, Fan M S, Yakov Kuzyakov. Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat monoculture in Loess Plateau of China. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 85-94.
- [50] He J, Kuhn N J, Zhang X M, Zhang X R, Li H W. Effects of 10 years of conservation tillage on soil properties and productivity in the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia, China. Soil Use and Management, 2009, 25(2): 201-209.
- [51] He J, Li H W, Wang X Y, McHugh A D, Li W Y, Gao H W, Kuhn N J. The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China. Soil and Tillage Research, 2007, 94(2): 493-502.
- [52] Pidgeon J D. A comparison of the suitability of two soils for direct drilling of spring barley. Journal of Soil Science, 1980, 31(3): 581-594.