

中国农业大学

硕士学位论文

冷凉风沙地区机械化保护性耕作体系试验研究

姓名：李昱

申请学位级别：硕士

专业：农业机械化工程

指导教师：李问盈

20040301

摘 要

冷凉风沙地区寒冷、干旱、风大，农业生产方式落后，作物产量低，农民生活困难；春季干旱和大风天气的同时出现，使得该地区成为春季沙尘暴的主要沙源区。

根据冷凉风沙区农业生产的特点和推广应用机械化保护性耕作技术需要解决的关键问题，在具有典型冷凉风沙区气候特点的丰宁坝上地区进行了生产性对比试验，考察不同机械化保护性耕作体系的实施效果。

试验表明：免耕低茬覆盖体系（喷1次或喷2次除草剂）、免耕高茬覆盖体系（喷1次或喷2次除草剂）和深松耙地覆盖五种保护性耕作体系在影响作物产量的主要因素如土壤含水量、穗粒数、千粒重、作物长势、水分利用效率及土壤肥力等方面均优于传统耕作，虽然在播种质量、出苗率、公顷穗数和土壤容重等指标上差于传统耕作处理，但最终反映出的产量水平高于传统处理 2.96%~11.24%；投入减少 4.56%~13.67%。经济效益提高 20.33%~36.59%。

机械化保护性耕作技术生态效益显著，土壤风蚀比传统耕作减少 33.1%~48.3%。

初步试验结果表明，以“前茬收获后留高茬(20~25cm)→免耕休闲→翌年春季播种前喷除草剂→免耕播种→收获”这样的免耕高茬体系(喷一次除草剂)综合效益最佳，可以作为北方冷凉风沙地区推广机械化保护性耕作技术的推荐体系。

关键词：机械化保护性耕作，技术体系，冷凉风沙区

Abstract

Low temperature, limited rainfall and heavy wind are the most important characteristics of climate in cold, windy and sandy areas. Especially in early spring, this area becomes a main source of dust storm due to the extreme drought accompanied by heavy wind. The traditional agricultural production system is another reason for low yield and poor life of the local farmers. Conservation tillage has received great attentions to solve the problems.

This paper firstly discussed the characteristics of agricultural production in cold, windy and sandy areas and the key problems that must be solved so as to extend mechanized conservation tillage in this area. To identify the effects of different mechanized conservation tillage system in this area, an experimental study was conducted in Fengning County, which has typical characteristics of cold, windy and sandy areas.

The result of experiment indicated that five conservation tillage systems, such as No-Till with Low Standing stubble (spray herbicide once or twice a year), No-Till with High Standing stubble (spray herbicide once or twice a year) and Subsoiling & Harrow with residue Cover, are better than the traditional tillage system in terms of soil moisture content, grains per ear, weight per thousand grains, crop growth, water use efficiency and soil fertility which are the main factors influencing yield. Although conservation tillage system also has some limitations or questions in terms of sowing quality, emergence rate, total ears per hectare, soil bulk density and so on, it can increase yield by 2.96%~11.24%, reduce cost by 4.56%~13.67% thus improve the overall profit by 20.33%~36.5% compared with traditional tillage.

More importantly the ecological benefit of mechanized conservation tillage system is so obvious that it can reduce wind erosion by 33.1%~48.3% compared with traditional tillage system.

Initial experiment and practical experiences proved that "leaving high standing stubble (20~25cm) after harvesting—fallow—spraying herbicide before seeding in spring—no-till planting—harvesting" could be the best mechanized conservation tillage system recommended for the cold, windy and sandy areas.

Keyword: mechanized conservation tillage, technology system, cold, windy and sandy areas

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国农业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：

时间： 2004年3月22日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国农业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国农业大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名：

时间： 2004年3月22日

导师签名：

时间： 2004年3月23日

第一章 绪 论

1.1 基本概念

1.1.1 旱地农业

在英美百科全书中,对“旱农”的定义如下:“旱农是指在有限的降水量、典型的是少于500mm年降水量的地区,不采用灌溉而种植作物的农业”或“旱农是指在有限降水的半干旱气候或地区从事无灌溉的作物生长”。

1.1.2 保护性耕作

国外对保护性耕作的定义是:“保护性耕作是指不引起土壤全面翻转的耕作方法,它与传统的耕作方法不同,要求大量的作物残茬留在地表,将耕作减少到能保证种子发芽即可,它需要使用农药来控制杂草和病虫害。”

我国学者在多年的科学研究基础上,把保护性耕作定义为“以水土保持为中心,保持适量的地表覆盖物,尽量减少翻动土层,而又能保证作物正常生长的耕作方法”。保护性耕作的主要内容包括:①在地表覆盖作物残茬;②在尽量不翻转土壤的前提下,进行免耕播种和施肥;③必要时进行深松或表土耕作来改善土壤结构;④主要利用化学药剂进行除草和防治病虫害^{[1][2][3]}。

经过国内外数十年的试验和实践,证明保护性耕作具有①减少地表径流,减轻土壤风蚀水蚀,改善环境,增加水分入渗^{[4][5]};②增加土壤有机质的含量,改善土壤结构^[6];③提高水、土、光等资源的利用率^[7];④作物根系发达,干物质增多,提高产量^[8];⑤生产成本下降,收入增加,提高经济效益^[9]等优点。

1.1.3 冷凉风沙地区

我国的冷凉风沙地区主要包括河北北部、山西北部、内蒙古、甘肃、宁夏回族自治区、青海等部分地区。该类地区气候条件恶劣。寒冷,年均气温2℃,最低气温达零下36℃;干旱,年均降水量250~400mm左右;风大,年均风速8m/s,最大风速达22m/s,年均5~8级大风达40多天;农田土壤贫瘠。该类地区种植的作物主要有春小麦、莜麦、胡麻、谷子、糜子、豆子、玉米、青贮玉米、马铃薯等作物,属于一年一熟杂粮区。传统的耕作方式和特点是:秋季收获后翻地晒垡,裸露休闲越冬,春季干旱常使农民不能按时播种,导致农作物产量低而不稳,小麦和莜麦产量只有0.7~1.5t/hm²。特别是春季干旱和大风天气同时出现,土壤火碱严重,强劲的大风卷起农田干旱疏松的尘土升上天空,是春季沙尘暴的主要沙源区。

1.2 国内外保护性耕作研究概况

1.2.1 保护性耕作的起源—治理沙尘暴

20 世纪初,随着加利福尼亚发现黄金,美国拉开了西部大开发的序幕。机械化翻耕土地,加快了土地的开发,在随后的几十年获得了不错的收成。然而,随着植被大规模的破坏,导致了震惊世界的灾难。从 1931 年起,持续的干旱、疏松的地表在狂风的袭击下,大量的地表土壤被吹蚀。特别是 1935 年 5 月的“黑风暴”,持续时间达 3d 之久,横扫美国 2/3 国土,将 3 亿吨土壤卷进了大西洋。仅这一年美国就毁掉了 300 万公顷的耕地,冬小麦减产 510 万吨,16 万农民倾家荡产,逃离了美国西部,留下的人们生活极其困难。经过多年自然的洗礼,美国人认识到是错误的耕作方法招来的严重后果。于是,土壤学家、农学家、农机专家共同努力对保水、保土的耕作方法进行了深入的研究,探索出了一套行之有效的保护性耕作措施。经过数十年的长期努力,保护性耕作和植树、种草措施一起,有效地抑制了沙尘暴的再度猖獗。

1.2.2 国外保护性耕作研究概况

目前,世界上已经有 40 多个国家和地区建立了 300 多个旱农科研机构,其分布为:亚洲 69 个,大洋洲 45 个,非洲 43 个,北美洲 73 个,南美洲 23 个。叙利亚、印度、尼日利亚、埃及、美国等国家分别有旱农研究中心^[10]。

最早开始保护性耕作研究的是美国,为了治理“黑风暴”,1942 年美国成立了土壤保护局,对各种保水、保土的耕作方法进行了大量的研究。1977 年,以耕为中心的免耕法获得美国政府一等奖,正式确立了保护性耕作的地位。内不拉斯加试验表明,传统耕作方法土壤水分蒸发占降水量的 80%,而免耕仅为 57%,加上减少径流,土壤贮水量达 139mm,而翻松、深松、开水平沟分别只贮水 29、54、34mm。德克萨斯州五年的连续试验测得,免耕法贮水 141mm,产量 3.34t/hm²,而翻耕、旋耕、深松只有 89、85、114mm,产量分别为 2.56、2.19、2.77 t/hm²,免耕产量提高 21~52%。美国的试验研究证明,保护性耕作不仅能有效地遏制沙尘暴,而且具有减少地表径流、减少蒸发、增加土壤贮水量、提高作物产量、增加土壤有机质、降低作业成本等作用,是很好的旱地耕作技术。1995 年美国保护性耕作中心(CTIC)对约 11300 万公顷粮棉面积三类耕作(传统耕作、少耕、保护性耕作)进行统计,传统耕作 4450 万公顷,占 39.4%;保护性耕作 3990 万公顷,占 35.3%;少耕 2840 万公顷,占 25.1%。保护性耕作与少耕之和大于 60%,95%以上的耕地取消了铧式犁翻耕。经过几十年的努力,保护性耕作与植树、种草综合运用,有效地遏制了沙尘暴。

澳大利亚地处南半球,干旱面积约 625 万平方公里,占澳洲大陆的 81%左右,是典型的旱农国家。它的不少地方上层厚度仅 100cm 左右。经过 20 世纪初几十年的翻耕作业,水土流失严重、土层变浅,对澳大利亚农业的可持续发展构成严重威胁。科学家预测,如果不采取措施,100 年以后全澳洲耕地面积将减少 50%。70 年代初,澳大利亚政府在全国各地建立了大批保护性耕作实验站,吸收农学、水土、农机专家参与实验研究工作。大量的试验

表明：地表覆盖是一项有效的保水、保土措施。有残茬覆盖的农田增产 10%以上，径流量减少到 40%左右，最大排水速度降低 70~80%，土壤受冲刷程度降至裸露农田的 1/10，大大减轻了土层变薄的威胁。截至到 2000 年，澳大利亚免耕播种面积占耕地面积的 36%，少耕面积占 35%，传统耕作面积降低到 29%，而少免耕种植作物面积占耕地总面积的 70%以上。

加拿大地处北美洲的北部，气候寒冷。20 世纪 60 年代以前，加拿大普遍采用铧式犁翻耕，土壤过度耕作，地表无秸秆残茬覆盖，不能有效抵抗风蚀和水蚀，导致严重的土壤侵蚀。加拿大保护性耕作前期研究，主要集中在除草剂和免耕播种机方面。1985~1995 年，实验研究获得成功，除草剂价格下降，效率提高，更多保护性耕作机具可供选用，保护性耕作得到大面积的推广应用。1995 年以后，集中在降低生产成本的研究。随着技术与机具的改进，采用保护性耕作方式的农民收益逐步增加。加拿大还将保护性耕作与土壤保持及气候变化等更广泛的问题联系在一起进行研究，研究结果表明，保护性耕作减少了土壤中二氧化碳等温室气体释放，有利于控制“温室效应”，有利于农业、资源、环境的协调发展。

除上述国家以外，在保护性耕作方面成就突出的国家还有法国、墨西哥、以色列、印度、埃及、巴基斯坦、巴西等国家。

图 1 所示为截止 2001 年 1 月主要旱农国家实施保护性耕作的面积情况。

国外几十年的实践证明，保护性耕作具有防治沙尘暴和促进农业生产发展的双重效果，是当今世界上应用最广、效益最好的一项旱地农业耕作技术，是人类与自然协调发展的产物。

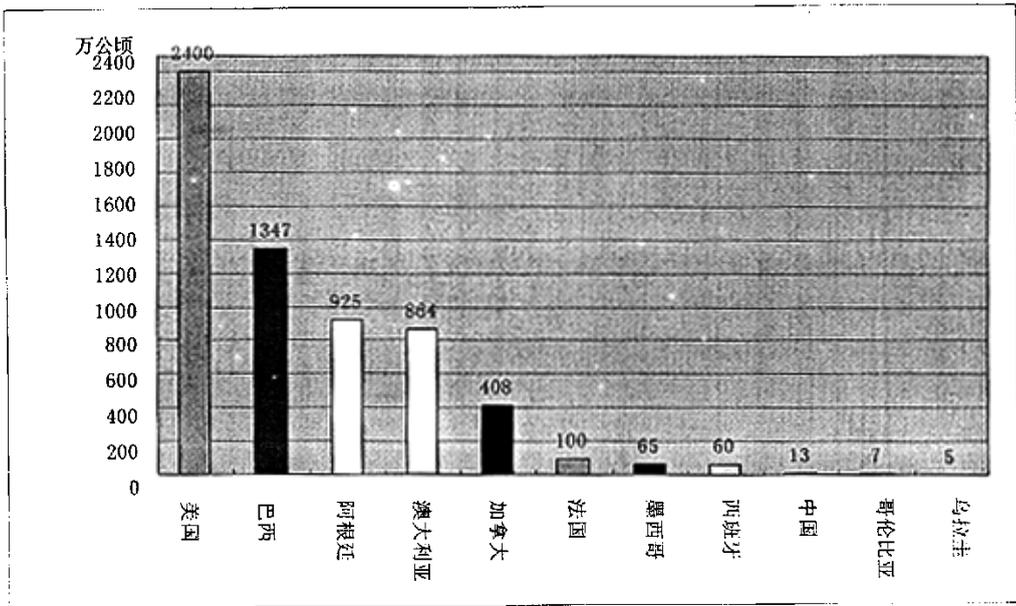


图 1 世界保护性耕作推广情况（截至 2001 年 1 月）

1.2.3 我国的保护性耕作研究

我国是世界上主要的干旱国家之一。干旱、半干旱及半湿润偏旱地区的面积占国土面积的 52.5%，遍及昆仑山、秦岭、淮河以北的 16 个省、市、自治区，雨养农业面积达 3300 万

公顷。旱区农业持续发展的主要问题，一是降雨少、土壤贫瘠、自然条件恶劣、产量低而不稳，农民生活贫困；二是水土流失和风蚀沙化严重。水土流失不仅导致土壤肥力下降，而且蚕食可利用土地。风蚀沙化则是我国北方旱区近年来更为突出的问题，沙尘暴发生的频率越来越高，据统计，我国发生沙尘暴次数逐年上升，50年代5次，60年代8次，70年代13次，80年代14次，90年代23次。全国已有675万公顷耕地、235万公顷草地和639万公顷林地和灌草地沙化，而且荒漠化推进的速度也从70年代以前的每年 1565km^2 增至目前的每年 2460km^2 。我国每年因土地沙化造成的损失达540亿元，占全球荒漠化损失的16%^[1]。为了抗旱增产、节本增效、保护生态环境、实现旱区可持续发展，20世纪50年代起，我国就已经开展了相应的试验研究。50年代，黑龙江国营农场开展了免耕种植小麦的试验研究；60年代江苏开展稻茬地免耕播种小麦的研究；70年代末，西南农业学院研究水稻自然免耕法，由于各种因素影响，这些试验都没有推广应用；80年代以后，北方很多科研机构都进行了免耕、少耕、覆盖、深松等试验研究工作，取得了一定的成果。特别是进入90年代后，由中国农业大学承担的“8.5”攻关课题“北方旱地主要类型区保护性耕作体系及配套机具研究”，“9.5”攻关课题“旱地可持续生产体系及关键机具研究”，由中国农业大学、山西省农机局与澳大利亚昆士兰大学共同主持的“保护性与带状耕作”，“旱地谷物可持续机械化生产体系的研究”等项目，在典型的旱农地区山西临汾、寿阳分别建立了冬小麦和春玉米一年一熟制保护性耕作试验区，开始了我国首次农机农艺相结合的保护性耕作系统试验研究。经过10余年持续的研究，完成了保护性耕作在我国的适应性评价，开发了适合我国一年一熟地区使用和适应我国小地块、小动力特点的机械化保护性耕作机具，形成了有中国特色的机械化保护性耕作体系。连续10年的系统试验结果表明，机械化保护性耕作与传统耕作相比有三方面的效益：

(1) 社会效益

减少径流（水分流失）60%、水蚀（土壤流失）80%左右；

减少风蚀（农田扬沙），抑制沙尘暴；

不烧秸秆，减少大气污染。

(2) 生态效益

增加休闲期土壤贮水量14~15%、提高水分利用效率15~17%、节约水资源；

增加土壤肥力，土壤有机质提高0.03%、速效氮提高16.4%、速效钾提高10.17%；

(3) 经济效益

提高小麦、玉米产量15%~17%；

减少作业工序，降低作业成本10%~15%；

增加农民收入20%~30%。

我国学者将我国北方适宜推广保护性耕作的旱作区分为四种类型：黄土高原一年一熟区、西北冷凉风沙区、东北高寒旱区、华北一年两熟区。目前，机械化保护性耕作的研究和推广已经扩大到华北一年两熟区和西北冷凉风沙地区。由于不同区域有不同的生产特点、技术难点，因此，黄土高原一年一熟地区成功推广的保护性耕作体系不能完全照搬到其他区域使用，必须根据各区域乃至各地的生产特点，研究更适合的机械化保护性耕作配套技术，只有这样，机械化保护性耕作才能取得预期的效果。

冷凉风沙区在冬春季节,农田无植被覆盖,地表裸露,土壤干燥,加上传统翻耕使得土质疏松,在大风的作用下,风蚀严重,使土壤沙化、贫瘠、耕层变浅,土地生产力下降。而以取消铧式犁翻耕、利用作物秸秆、残茬覆盖和少免耕播种为主要手段的保护性耕作技术正是解决这些问题的措施之一,针对冷凉风沙区的生产特点和存在问题,研究适合的机械化保护性耕作技术体系。是改善冷凉风沙区农业生产环境、提高效益的重要课题。

1.3 研究内容

1.3.1 试验区的选取

建立冷凉风沙地区保护性耕作试验研究基地,区域选择必需满足:(1)具有典型的冷凉风沙地区特征,(2)具有经济建设及社会发展方面的显著意义。

试验区选定在河北省北部丰宁县坝上,地跨内蒙古高原和冀北山区两大地貌单元。北与内蒙古自治区正蓝旗和多伦县接壤,南邻北京怀柔县,西与张家口市沽源、赤城县相连。全县总面积 8756km²,总人口 37.4 万,其中农业人口 33.4 万,农民人均纯收入 1338 元,有 9.1 万贫困人口,是国家级贫困县(2001 年数据)。

丰宁属于山坝地区,平均海拔 330~1400m,无霜期 90~150d,年平均气温 1.0~7.9℃,≥10℃积温 1700~3300℃,年降水量 430.7~560mm,70%分布于 6~8 月份,雨热同季,年日照时数 2828h,属于中温带大陆性季风性半干旱半湿润高原山地气候。按气候类型丰宁分为坝上、接坝和坝下三个气候类型区,坝上是内蒙古高原南缘,面积 2031 km²。接坝地区是内蒙古高原向冀北山地丘陵过渡地带,面积 2359 km²。坝下地区为冀北山地丘陵区,面积 4375 km²。现有耕地面积 9.16 万公顷,占 10.5%,林地面积 33.2 万公顷,占 37.9%,草场面积 327 万公顷,占 37.3%,其他占地 12.5 万公顷,4.3%。农作物播种面积 7.2 万公顷,种植作物主要有玉米、春小麦、莜麦、水稻、谷子、马铃薯、蔬菜、胡麻、油菜及杂粮杂豆等,是一年一熟杂粮区,常年粮食产量 1.5 亿千克,油料 400 万千克。土壤类型主要有褐土、栗钙土、棕壤等,土壤质地多为中壤—沙壤,全县耕地养分状况是缺磷少氮富钾。有机质含量 2.14%,速效氮 78.8ppm,速效磷 6.8ppm,速效钾 176.3ppm。

丰宁土地沙化严重,并呈蔓延扩大趋势。全县水土流失面积 4959 km²,占国土面积的 56.5%,其中:草地退化面积 1571 km²,土地重度沙化面积 1129 km²,已形成 4 片通体沙化区。成为全国沙滩、戈壁、沙漠 13 大片之一,而且有不断扩大的趋势。受干旱影响,当地作物产量低,正常年景春小麦只有 1.5~2 t/hm²,平均 3 年就有一年绝收。2000 年北方大旱,丰宁鱼儿山镇大部分土地颗粒无收,1999 年脱贫的农民又返回贫困。当地迫切需要一种既能防止风沙,又能增加产量的耕作技术。

1.3.2 研究内容

以华北坝上这一典型的冷凉风沙区为基点,针对实施机械化保护性耕作所面临的关键性问题进行系统的研究。建立并不断完善适合该地区的农机、农艺结合的保护性耕作体系。在

现有的机械化保护性耕作体系的基础上,进行以机具的改进、杂草防治和土壤耕作等主要技术的组装配套,并对配套技术的防风固沙和作物生产效果进行实地观察,形成相对完善的保护性耕作的机械工艺和农田操作体系。

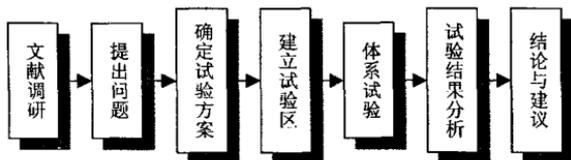
1.3.3 技术关键

1. 针对冷凉风沙区特殊的自然和生产条件,通过系统的、定点定位的农机与农艺的研究,建立具有冷凉风沙区特色的机械化保护性耕作技术体系。
2. 机械化保护性耕作在冷凉风沙地区的防风固沙效果测定。
3. 针对冷凉风沙区特殊的自然和生产条件,确定实施保护性耕作的关键作业技术。

1.3.4 研究意义

冷凉风沙地区在我国的生态建设和农业生产中占有重要的位置。研究表明,冷凉风沙地区的不合理耕作制度导致的生态环境破坏与近年来我国沙尘暴频繁发生、强度和破坏性不断增加的现实有着直接的关系。此外,也严重地影响着当地农民增收问题的解决,制约着该地区的经济发展。大量的实践证明机械化保护性耕作具有防治农田风蚀和水土流失,提高资源效率、简化栽培、降低成本等多种效益。因此,针对冷凉风沙地区作物的生长特点,通过机械化保护性耕作的系统试验,建立并不断完善该地区的农机、农艺结合的保护性耕作体系,为保护性耕作在该地区的大面积推广提供理论与技术指导,对解决我国沙尘暴危害,提高冷凉风沙区的农民收入和生活水平、促进农村、农业持续发展等均有着重大的理论和实践意义。

1.3.5 技术路线



第二章 试验区设计

2.1 试验区自然状况

丰宁坝上位于河北坝上中部的南端,地处北纬 $41^{\circ} \sim 42^{\circ} 20'$,东经 $114^{\circ} \sim 118^{\circ} 15'$ 。试验区选定在坝上的鱼儿山镇,该处的地貌类型主要由舒缓丘陵和丘间滩地以及缓起固定、半固定沙地组成,地势开阔平坦。海拔 $1400 \sim 1700\text{m}$ 。该地区属于中温带大陆性季风性半干旱半湿润高原山地气候,光照充足,冷热剧变,干冷多风,无霜期短。据位于丰宁坝上的鱼儿山镇气象站观测资料(表 2-1)表明,多年平均气温为 1°C ,最冷月平均气温为 -18.3°C ,最热月平均气温 16.9°C 。 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温为 1513.1°C 。全年无霜期为 85d 。降水的年际变化和季节性变化大,年平均降水量为 410.7mm ,年平均降水量差距最大可达 113mm 。年内季节性分配悬殊,冬春季节连续干旱,11月到翌年4月降水很少,仅为 36.8mm ,降水主要集中在夏秋季,占年降水量的 80% 左右,其中7~8月份占 50.7% ,冬春季降水量稀少,占年降水量不足 20% 。年平均蒸发量大,达 1764.3mm ,为降水量的4倍多。当地严重缺水,无灌溉条件,充分利用有限的天然降水是当地农业生产的关键。而且当地风大、沙多,全年盛行西风-西北风,年平均风速为 4.446m/s ,最大瞬时风速为 34m/s ,春季(3~5月)平均风速在 5m/s 以上,年平均超过8级以上($\geq 17.2\text{m/s}$)的大风天数在 $60 \sim 90\text{d}$ 之间。多年平均日照时数为 2930.9h ,日照率为 60% ^[12]。

表 2-1 鱼儿山气象站主要气象要素月季变化(1989—2001)^[1]

	月份												总计或 平均
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
气温/ $^{\circ}\text{C}$	-18.3	-15.2	-6.5	3.6	11.0	15.1	16.9	15.9	9.9	2.6	-7.4	-15.8	0.983
降水/ mm	2.5	3.5	6.8	16.0	31.9	68.5	121.6	96.9	33.3	21.9	5.9	1.9	410.7
蒸发/ mm	19.8	43.6	91.8	244.6	345.4	254.8	241.2	178.9	169.7	103.0	50.6	20.9	1764.3
风速/ m/s	4.9	4.7	4.8	5.3	5.6	3.8	3.2	2.8	3.4	4.2	5.7	5.1	4.46

2.2 试验设计与布置

2.2.1 试验处理设计

丰宁坝上为农牧交错带,农牧结合,农作物秸秆多用于畜牧饲养,不可能全部还田作为覆盖物,因此,试验设计主要考虑农作物留茬高度,结合播种前除草、收获后除草、耕作处理4个因素,每个因素3种水平。

- a、留茬高度: $20 \sim 25\text{cm}$ (A), $10 \sim 15\text{cm}$ (B), 0cm (C);
- b、播种前除草: 喷除草剂(A), 机械深松(B), 不除草(C);
- c、收获后除草: 喷除草剂(A), 机械深松(B), 不除草(C);

d、耕作处理：免耕(A)，深松(B)，翻耕(C)。

借鉴黄土高原一年一熟区的成功经验，考虑是否能在作物生长季节内按时完成全部试验数据测试，综合考虑各因素与水平的影响等因素。只选择其中最典型的六种处理：

- 体系 1：免耕高茬（喷一次除草剂）：高留茬，喷 1 次除草剂（播种前）；
 - 体系 2：免耕低茬（喷一次除草剂）：低留茬，喷 1 次除草剂（播种前）；
 - 体系 3：免耕高茬（喷两次除草剂）：高留茬，喷 2 次除草剂（播种前和前茬收获后）；
 - 体系 4：免耕低茬（喷两次除草剂）：低留茬，喷 2 次除草剂（播种前和前茬收获后）；
 - 体系 5：深松耙地：高留茬，前茬收获后深松，播种前耙地，不喷除草剂；
 - 体系 6：传统对照：不留茬，前茬收获后翻耕，播种前耙地，不喷除草剂。
- 试验设计的工艺体系对照见表 2-2。

表 2-2 机械化工艺体系对照表

处理	体系 1	体系 2	体系 3	体系 4	体系 5	体系 6
	免耕高茬 喷一次	免耕低茬 喷一次	免耕高茬 喷两次	免耕低茬 喷两次	深松耙地	传统对照
留茬高度	A	B	A	B	A	C
播前除草	A	A	A	A	B	C
收后除草	C	C	A	A	C	C
耕作处理	A	A	A	A	B	C

试验地总面积为 11hm²，其中，免耕高茬、免耕低茬和深松耙地为机械化保护性耕作处理，各设 3 次重复，传统对照不设重复，共 10 个试验小区。其中 1 组保护性耕作和传统对照共 4 个小区兼做农田风蚀测试区。兼作农田风蚀测试的试验小区面积为 2.2hm²(180m×120m)，四周隔离带 5m，小区间隔带 2m。一般体系试验小区面积 0.4 hm²(180m×20m)，四周隔离带宽 5m，小区间隔带 2m。试验区布置见图 2-1，不同处理的地表情况见图 2-2。

2.2.2 试验使用的机具

- 拖拉机：泰山 13.24 kW 小四轮拖拉机
- 铧式犁：FH-30 铧式犁
- 深松机：华勤 LS2-160 振动深松机
- 播种机：农哈哈 2BMF-6C-2 小麦免耕施肥播种机
- 圆盘耙：BQG-11A 圆盘耙
- 联合收割机：东风牌联合收割机

2.2.3 农田风蚀测试区的设计

- 1) 目的：测试农田风蚀量和农田土壤损失量。
- 2) 试验小区设计：风沙测试设在 1 组保护性耕作工艺体系及传统对照体系上，共设 4 个小区。

3) 试验小区面积及布置: 对当地气象站提供的气象数据分析知, 所选试验区在春季的主风向以西北风为主, 故在每一处理试验区的西北角选定一个观测点, 在试验区的中部沿西北方向选定垂直主风向、距第一个观测点 150~200m 处设两个观测点, 而且使各个采样器在采沙过程中互不干扰, 布置如图 2-3。每一个观察点上, 均在入风口距地表 0.10、0.25、0.60、1.00、1.50m 五个不同的高度安装采沙器, 通过尾翼的作用使得采沙器入风口时时正对风向^{[13][19]}。

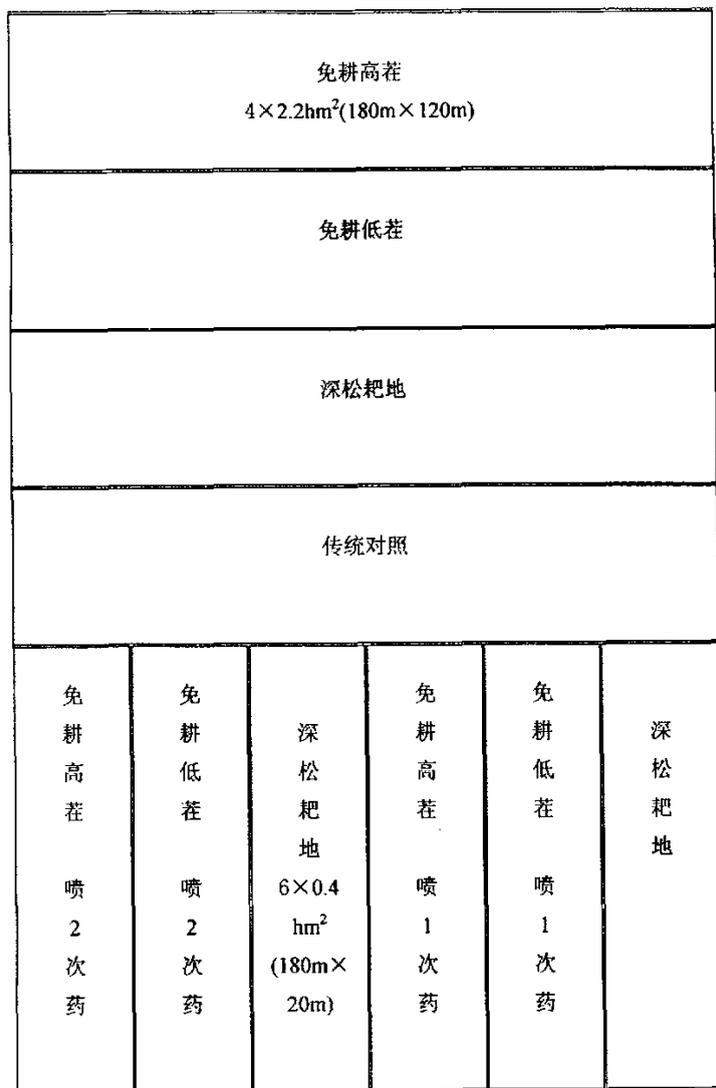
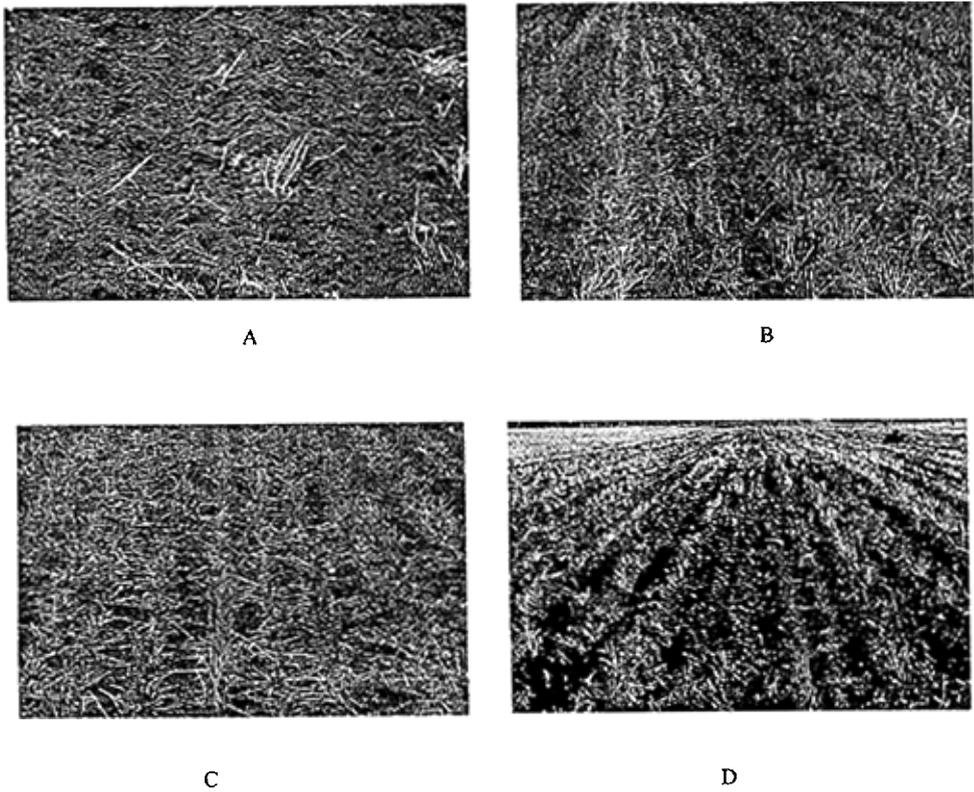


图 2-1 试验区布置图



A.传统处理 B.免耕高茬 C.免耕低茬 D.深松耙地
图 2-2 不同处理地表情况

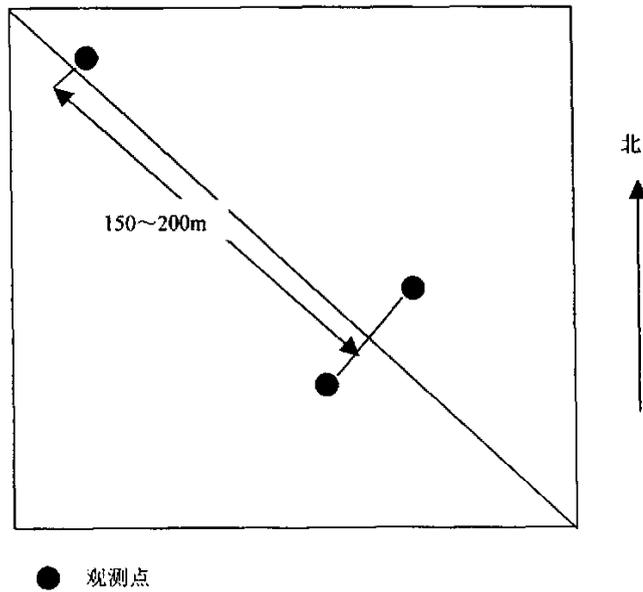


图 2-3 农田风蚀测试小区布置图

往年试验区春季干旱少雨，特别是在大风季节的3、4月份降水量少，常常出现大风扬沙天气，但在试验进行的2003年3/4月份降水多（表2-3），平均5~7天就有一次降水，从而有效的抑制了农田风蚀，没有出现往年的风沙天气，所以农田风蚀试验没有达到预期的效果。为了弥补由于自然条件限制未能完成的农田风蚀试验，秋季收获后，采用移动式野外风洞重新进行了各种处理的风蚀试验。

表 2-3 2000/2003 年 1~4 月份降水量 (mm)

年份 \ 月份	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年
1 月	4.8	2	0.3	1
2 月	0	0.8	0	0
3 月	2.2	0	3.1	20.5
4 月	17.3	7.1	5.6	25.4

2.3 移动式野外风洞风蚀试验的布置

2.3.1 移动式野外风洞简介

自然状态下，土壤的风蚀试验受自然条件的极端暂时性和空间可变性的影响，使得针对不同农田条件和土壤类型的风蚀反应的敏感性难以在短时期内做出评价。为了解决这一问题，在土壤风蚀试验中引入了室内风洞试验，室内风洞试验的优点在于试验条件的可控性，易获得一定控制范围内的独立的自然风，测量方法相对简单。在实验室内测定仅需几个月的时间便可以获得相当于农田试验多年的数据。存在缺点是模拟农田地表条件较困难，难以精确地确定农田地表条件对风蚀的影响。移动式野外风洞可以很好地弥补室内风洞试验的不足之处。美国在风蚀研究中最先使用移动式野外风洞，其时间可以追溯到20世纪30年代，50年代美国的 Zingg 和 Chepil (1950)、Zingg (1951a, b)、Zingg 和 Woodruff (1951)、Mazurak et al. (1953) 和 Chepil et al. (1955) 利用风洞研究结果对风蚀方程进行了扩展。1967年，Armbrust 和 Box 设计并应用一种移动式风洞进行了作物对土壤颗粒剥蚀阻力的研究 (Armbrust 1968)。1978年 Gillette 制作了一座小型的移动式风洞用于确定沙漠土的临界摩擦风速 (Gillette et al. 1980, 1982)。移动式风洞也可用于评估地垄、泥块和地表覆盖对土壤损失减少的研究 (Fryrear, 1984, 1985)。在前苏联，应用移动式风洞展示土壤转移量随风速增加而增加的现象，其中风速是地表条件的函数 (Bocharov, 1984)。这是使用类似跃移的采样器来收集土壤风蚀量的最早尝试之一。在澳大利亚，车载移动式风洞已经被广泛用来研究空旷农田条件下的临界摩擦风速和风蚀土壤的转移率 (Raupach 和 Leys, 1990; Leys 和 Raupach, 1991; Leys, 1991)。此外，1994年 Nickling (per. Comm., 1994) 建造了一座移动式风洞应用于北美洲 (Nickling 和 Gillette, 1989) 和非洲的土壤侵蚀研究^{[15][16]}。近年来，我国也开始采用移动式野外风洞进行农田风蚀试验。中国农业大学保护性耕作研究中心设计、制造了中国第一台移动式野外风洞 (图 2-5)，并于 2003 年在河北丰

宁、内蒙古正蓝旗等地进行了农田风蚀试验。

2.3.2 移动式野外风洞的结构

移动式野外风洞主要由变速箱、风扇、过渡区、工作区几个部分组成（图 2-4）。变速箱通过传动轴与拖拉机的动力输出轴相连，共有 3 个档位，可以调节 5~30m/s 之间的不同风速；风扇提供试验所需的风力；过渡区的两端安装有蜂窝状的金属筛，将风扇吹出的风均匀分配在风洞内，金属网中间安装厚度为 10cm 左右的整流网，主要起稳定气流的作用，这样工作区就可以获得恒定、平稳的气流；工作区的顶部和两侧由金属板包围，底部是农田地表。在工作区的尾部距出口 30cm 左右，安装狭缝采样器。狭缝采样器前窄后宽（图 2-6），高约 60cm，狭缝开口 5mm，顶部是一根排气管，吹入狭缝采样器的气流通过排气管流出狭缝采样器，排气管的底部安装一层金属筛，防止吹入狭缝采样器的土壤颗粒从排气管中吹出，采样器的底部是收沙盒，吹入的土壤颗粒将沉积到收沙盒内。根据试验所需的风速，调节变速箱的转速，在不同风速的恒定风力下，对试验地表吹拂 10min 后，收集狭缝采样器收沙盒中的土样，并进行分析。

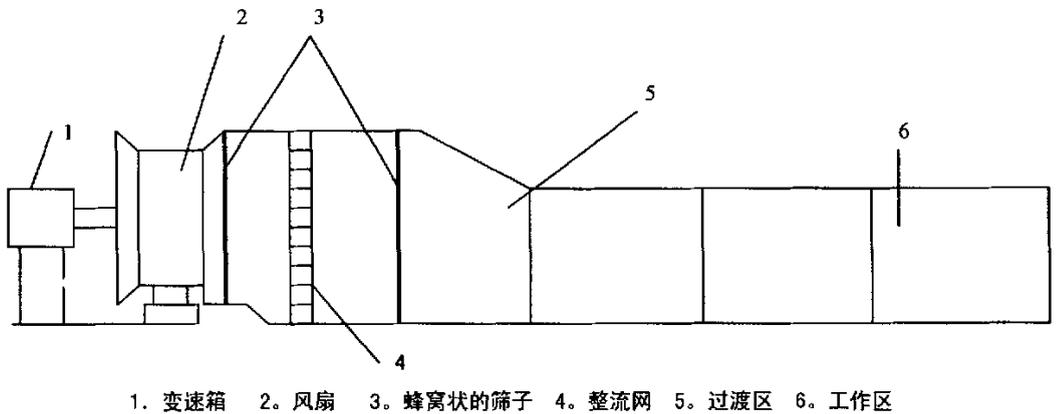


图 2-4 移动式野外风洞结构示意图

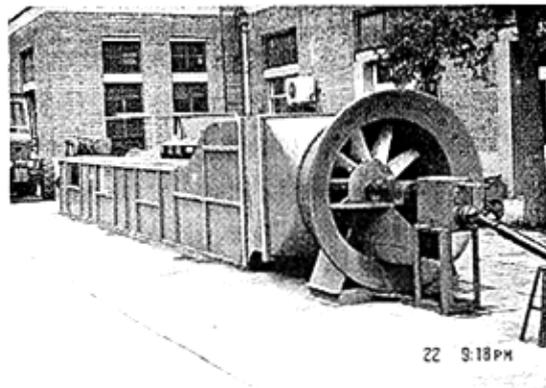
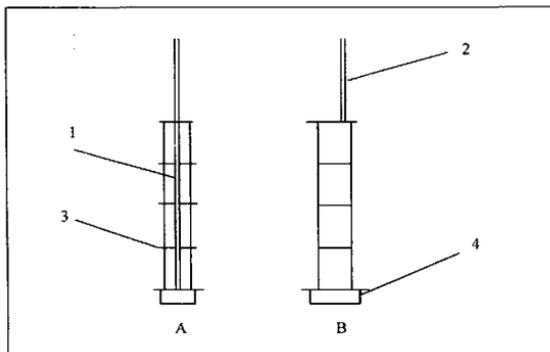


图 2-5 移动式野外风洞



A. 正视图 B. 侧视图

1. 狭缝 2. 排气管 3. 固定片 4. 收沙盒

图 2-6 狭缝采样器示意图

2.3.3 移动式野外风洞试验布置

秋季收获后，在原试验地上，分别按照免耕高茬、免耕低茬、深松耙地、传统耕作四种处理方式对留茬、地表处理。将移动式野外风洞分别布置在四种不同的处理上，在每种地表上做一组试验，每组试验分别采用 5、8、10、14、18、20m/s 六种不同的风速，每种风速吹拂地表的时间为 10min。

2.4 试验作物的选定

凉爽风沙地区气候恶劣寒冷，属于一年一熟杂粮区，该类地区种植的作物主要有春小麦、莜麦、胡麻、谷子、糜子、豆子、玉米、青贮玉米、马铃薯等作物，其中粮食作物主要是春小麦和莜麦。试验作物选用春小麦，原因如下：

1. 小麦是世界上分布最广泛的重要的粮食作物，主要分布在北纬 36°~60°，南纬 24°~40° 的半干旱半湿润偏旱地区，我国旱农区正是小麦的主要产区，其中纬度及海拔较高的地区以种植春小麦为主，偏南及水热条件较好的地区则以种植冬小麦为主。冬小麦和春小麦的分界线基本上与半干旱半湿润地区的分界线一致。试验地所处的地理位置 41°~42° 20'，而且海拔 1400~1700m 左右，地势较高，正好适合春小麦的生长，而且春小麦也是该地区的主要种植作物。

2. 春小麦与冬小麦相比，有其自身的生长特点，主要表现为生育期短，分蘖少且分蘖成穗率低；幼穗分化早且进程快，使得小穗和小花的数量较少，因此，春小麦对于整地条件、播种质量以及前期的管理等要求更为严格。另外，春季北方气候容易干旱，对春小麦根系的生长发育极为不利，特别是次生根生长不发达，吸收机能差，小麦的蒸腾系数达到 400~

500^[1]，比玉米、高粱、谷子的蒸腾系数都高的多。而试验区的春季降水少，容易干旱，对春小麦的前期生长影响很大，如何解决这一问题，探索出一条保水保墒的好办法，成为试验的一个重点。

3. 由于气候条件恶劣，特别是春季干旱少雨，经常使农民不能按时播种，导致农作物产量低而不稳，春小麦和莜麦产量只有 $0.7\sim 1.5\text{t}/\text{hm}^2$ ，农民收入低，生活贫困。如果在该地区试验，并探索出一套稳产、高产的机械化保护性耕作方案，无疑对该地区农民脱贫致富有着极大的推动作用。

综合以上所述，决定采用春小麦为试验作物，小麦的品种选用蒙麦，其优点是抗旱、抗病、穗大粒多、分蘖性强，丰产性能好。该品种适合坝上地区的气候，是坝上春小麦的主要品种。

第三章 机械化保护性耕作体系对春小麦生育环境的影响

3.1 概述

土壤是作物生长的最根本要素之一。作物生长的优劣,在很大程度上由土壤的结构来决定。土壤提供了作物在生长发育时所需要的水、肥、气、热等肥力要素。土壤的特性与气候变化有关。也随着其组成物质、植被、地形以及小气候条件的变化而变化。对田间作业来说,土壤的湿度特性是非常重要的。在气候相似地区,土壤特性是确定采用何种措施才能使作物获得高产的重要依据^[17]。

对于冷凉风沙地区来说,水资源不足,且季节分配不均足限制该地区农业生产的主要因素。随着社会经济的高速发展,用水量日益增多,其中农业用水占总用水的 80%左右,因此,研究农业生产中蓄水保墒、提高水的利用率的有效措施具有十分重要的意义。

同时,土壤的结构和肥力也是决定作物生长的重要因素,冷凉风沙地区的农业生产由于受到自然条件的限制,相对其他地区比较落后,由于春季干旱,并且经常出现大风天气,农田风蚀严重,大量的地表土被风吹走,致使土壤的有机质含量低,土壤肥力差,进而影响农作物的产量。解决这一问题的根本出路,不仅要“从水”字入手,而且要从“土”字入手,加速培肥土壤,提高土壤肥力^[18]。为了实行有科学依据的、可靠的土壤管理措施,避免盲目的耕作,对于影响土壤特性的各种因素,如土壤水分、养分含量、土壤质地等方面,在农业生产中都要认真加以研究。

土壤由于自然因素和人为因素的影响通常会变得紧实。人为因素所产生的压实,其中的一个因素是牲畜的践踏^[19]。据 Tanner 和 Mamril 报导^[20],牲畜能使表层土壤容重从 1.22g/cm^3 增加到 1.43g/cm^3 ,而孔隙度相应的从 17.3%减少到 7.2%,穿透阻力从 3.2ba 增加到 19.5ba。在现代化农业中,运行于土壤上的车轮、履带以及农机具的作用是导致土壤压实的主要原因。Soane^[21]指出,在谷类密植作物各耕期间,土壤表层近 90%可能被拖拉机轮子碾压;随后在用联合收割机收获期间,至少 25%土壤被进一步压实;将秸秆打捆和运出,也会使 30cm 深的土壤表面容重增加,而且在作物整个生育期间仍可维持这种压实状况。粘性土壤处在湿润状态时强度很低,用大型机具耕作,常造成土壤的严重破坏。在耕层下方,由于犁铧的挤压,产生了犁底层。车轮的搅动作用,包括车轮的打滑,对土壤结构的破坏和随后的压实比本身重量的挤压作用要大^[22]。

随着科技进步和人们认识的深入,人们已经认识到,某些传统的耕作方法是多余的,同时日益重视过度耕作的危害性,倾向于减少耕作次数和强度。1962 年,劳森提出了苗床分区的概念,这种概念已经被随后发展成各种耕作制度,如免耕法、少耕法、保护性耕作^{[23][24][25]}。这些耕作体系减少了作业次数,避免了不必要的土壤表层翻动,一般都保留作物残茬作为地表的保护覆盖层。

原苏联土壤学家和耕作学的创始人威廉斯有句名言:“没有不良的土壤,只有不良的耕种方法”。实践证明,土壤耕作可能使土壤环境变好,也可能使土壤环境变坏。因此,如何使机械化土壤耕作创造持续的、适合作物生长的土壤环境,并且降低能源消耗和作业成本,

减少有害气体的排放，就成了各种土壤耕作类型和土壤耕作制度的评价标准^[26]。

国内外的试验研究表明，保护性耕作有利于土壤有机质和水土保持能力的提高，能够改善土壤的物理结构，提高土壤的肥力。然而保护性耕作是否是适合冷凉风沙地区的种植体系，尚未见到系统的报道。

3.2 机械化保护性耕作体系对土壤容重的影响

3.2.1 机械化保护性耕作体系播种前土壤容重状况

土壤容重是评价土壤松紧程度的指标，将不同耕作体系的土壤容重进行方差分析，可以比较不同耕作体系对土壤松紧程度影响的差异。

表 3-1 和表 3-4 分别为播种前试验设计的不同机械化保护性耕作体系与传统耕作体系 0~10cm 和 10~30cm 土壤容重测定结果，表 3-1、表 3-3 和表 3-5、表 3-6 分别为相应的方差分析和相对显著性检验。

表 3-1 不同耕作体系春小麦播种前 0~10cm 土壤容重(g/cm³)

试验点	机械化保护性耕作体系				传统耕作	
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)	深松耙地	
1	1.39	1.50	1.50	1.43	1.34	1.10
2	1.30	1.35	1.39	1.46	1.27	0.97
3	1.44	1.46	1.32	1.36	1.35	0.99
4	1.59	1.48	1.41	1.29	1.40	0.89
5	1.54	1.31	1.43	1.46	1.24	1.00
Σ	7.25	7.1	7.05	7	6.6	4.95
均值	1.45	1.42	1.41	1.4	1.32	0.99
与传统耕作对比±%	46.46	43.43	42.42	41.41	33.33	-

表 3-2 不同耕作体系春小麦播种前 0~10cm 土壤容重方差分析

变差来源	平方和	自由度	方差	方差比
各组处理之间	0.747	5	0.149	22.738
组内	0.158	24	0.00658	
总和	0.905	29		

$F(5, 24) = 22.738 > F_{\alpha}(5, 24) = 3.90$ ，即在 0~10cm 土层内，不同耕作体系的土壤平均容重存在显著差异，由表 3-1 可知，免耕高茬（喷一次）、免耕低茬（喷一次）、免耕高茬（喷两次）、免耕低茬（喷两次）这四种机械化保护性耕作处理的 0~10cm 的土壤容重之间无显著性差异，为了检验各种处理下土壤平均容重的相对显著性差异，还需要进一步作多重比较。现用 t-法进行检验分析。

表 3-3 不同耕作体系播种前 0-10cm 土壤平均容重的相对显著性检验 ($\alpha=0.05$)

t-检验: 成对双样本均值分析								
	免耕高茬 (喷一次)	传统耕 作		免耕低茬 (喷一次)	传统耕 作		免耕高茬 (喷两次)	传统耕 作
平均	1.45	0.99	平均	1.42	0.99	平均	1.41	0.99
方差	0.0128	0.00565	方差	0.00715	0.00565	方差	0.00425	0.00565
观测值	5	5	观测值	5	5	观测值	5	5
泊松相 关系数	-0.46154		泊松相 关系数	0.121934		泊松相 关系数	0.535686	
假设平 均差	0		假设平 均差	0		假设平 均差	0	
df	4		Df	4		df	4	
t Stat	6.342565		t Stat	9.065196		t Stat	13.77234	
P(T<=t)			P(T<=t)			P(T<=t)		
单尾	0.001582		单尾	0.00041		单尾	8.05E-05	
t 单尾			t 单尾			t 单尾		
临界	2.131846		临界	2.131846		临界	2.131846	
P(T<=t)			P(T<=t)			P(T<=t)		
双尾	0.003165		双尾	0.000821		双尾	0.000161	
t 双尾			t 双尾			t 双尾		
临界	2.776451		临界	2.776451		临界	2.776451	
t-检验: 成对双样本均值分析								
	免耕低茬 (喷两次)	传统耕 作		深松耙地 作	传统耕 作		免耕高茬 (喷一次)	深松耙 地
平均	1.4	0.99	平均	1.32	0.99	平均	1.45	1.32
方差	0.00545	0.00565	方差	0.00415	0.00565	方差	0.0128	0.00415
观测值	5	5	观测值	5	5	观测值	5	5
泊松相 关系数	0.617217		泊松相 关系数	-0.28912		泊松相 关系数	0.315572	
假设平 均差	0		均差	0		均差	0	
df	4		Df	4		df	4	
t Stat	14.06288		t Stat	6.573757		t Stat	2.615742	
P(T<=t)			P(T<=t)			P(T<=t)		
单尾	7.42E-05		单尾	0.001386		单尾	0.029531	
t 单尾			t 单尾			t 单尾		
临界	2.131846		临界	2.131846		临界	2.131846	
P(T<=t)			P(T<=t)			P(T<=t)		
双尾	0.000148		双尾	0.002771		双尾	0.059063	
t 双尾			t 双尾			t 双尾		
临界	2.776451		临界	2.776451		临界	2.776451	
t-检验: 成对双样本均值分析								
	免耕低茬 (喷一次)	深松耙 地		免耕高茬 (喷两次)	深松耙 地		免耕低茬 (喷两次)	深松耙 地

平均	1.42	1.32	平均	1.41	1.32	平均	1.4	1.32
方差	0.00715	0.00415	方差	0.00425	0.00415	方差	0.00545	0.00415
观测值	5	5	观测值	5	5	观测值	5	5
泊松相 关系数	0.913305		泊松相 关系数	-0.08929		泊松相 关系数	-0.90416	
假设平 均差	0		假设平 均差	0		假设平 均差	0	
df	4		Df	4		df	4	
t Stat	6.085806		t Stat	2.103861		t Stat	1.325987	
P(T<=t)			P(T<=t)			P(T<=t)		
单尾	0.001843		单尾	0.051601		单尾	0.127747	
t 单尾			t 单尾			t 单尾		
临界	2.131846		临界	2.131846		临界	2.131846	
P(T<=t)			P(T<=t)			P(T<=t)		
双尾	0.003685		双尾	0.103203		双尾	0.255495	
t 双尾			t 双尾			t 双尾		
临界	2.776451		临界	2.776451		临界	2.776451	

从表 3-3 的分析结果来看,免耕高茬(喷一次)、免耕低茬(喷一次)、免耕高茬(喷两次)、免耕低茬(喷两次)、深松耙地这 5 种机械化保护性耕作体系与传统耕作 0~10cm 的土壤容重有显著性差异,而免耕高茬(喷一次)、免耕低茬(喷一次)、免耕高茬(喷两次)、免耕低茬(喷两次)与深松耙地之间的差异性不明显。

通常 0~30cm 深度的土壤状况,对作物的生长和发育关系密切,而且 10~30cm 之间的土壤最具有保水的作用,所以应进一步对 10~30cm 深度的土层作方差分析和多重比较。

从表 3-4 和表 3-5 的测试分析结果来看, $F(5, 24) = 26.36 > F_{\alpha=0.01}(5, 24) = 3.90$, 不同耕作体系在 10~30cm 的土壤容重具有显著性差异。

表 3-4 不同耕作体系春小麦播种前 10~30cm 土壤容重(g/cm³)

试验点	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
1	1.44	1.60	1.58	1.51	1.44	1.21
2	1.42	1.50	1.46	1.50	1.42	1.04
3	1.53	1.50	1.37	1.47	1.50	1.08
4	1.62	1.49	1.50	1.40	1.44	0.99
5	1.59	1.41	1.54	1.57	1.35	1.08
Σ	7.6	7.5	7.45	7.45	7.15	5.4
均值	1.52	1.5	1.49	1.49	1.43	1.08
¹ 与 传统耕作对比%	40.74	38.89	37.96	37.96	32.41	-

表 3-5 不同耕作体系春小麦播种前 10-30cm 土壤容重方差分析

变差来源	平方和	自由度	方差	方差比
各组处理之间	0.709	5	0.142	26.36
组内	0.129	24	0.00538	
总和	0.837	29		

表 3-6 不同耕作体系播种前 10-30cm 土壤平均容重的相对显著性检验 ($\alpha=0.05$)

t-检验: 成对双样本均值分析								
	免耕高茬 (喷一次)	传统耕 作		免耕低茬 (喷一次)	传统耕 作		免耕高茬 (喷两次)	传统耕 作
平均	1.52	1.08	平均	1.5	1.08	平均	1.49	1.08
方差	0.00785	0.00665	方差	0.00455	0.00665	方差	0.0065	0.00665
观测值	5	5	观测值	5	5	观测值	5	5
泊松相			泊松相			泊松相		
关系数	-0.53286		关系数	0.63174		关系数	0.456303	
假设平			假设平			假设平		
均差	0		均差	0		均差	0	
Df	4		Df	4		df	4	
t Stat	6.603302		t Stat	14.40588		t Stat	10.84216	
P(T<=t)			P(T<=t)			P(T<=t)		
单尾	0.001363		单尾	6.75E-05		单尾	0.000205	
t 单尾			t 单尾			t 单尾		
临界	2.131846		临界	2.131846		临界	2.131846	
P(T<=t)			P(T<=t)			P(T<=t)		
双尾	0.002726		双尾	0.000135		双尾	0.000411	
t 双尾			t 双尾			t 双尾		
临界	2.776451		临界	2.776451		临界	2.776451	

t-检验: 成对双样本均值分析								
	免耕低茬 (喷两次)	传统耕 作		深松耙地 传统耕 作		免耕高茬 (喷一次)	深松耙 地	
平均	1.49	1.08	平均	1.43	1.08	平均	1.52	1.43
方差	0.00385	0.00665	方差	0.0029	0.00665	方差	0.00785	0.0029
观测值	5	5	观测值	5	5	观测值	5	5
泊松相			泊松相			泊松相		
关系数	0.508904		关系数	0.045543		关系数	-0.19387	
假设平			假设平			假设平		
均差	0		均差	0		均差	0	
Df	4		Df	4		df	4	
t Stat	12.53407		t Stat	8.18168		t Stat	1.792843	
P(T<=t)			P(T<=t)			P(T<=t)		
单尾	0.000117		单尾	0.000608		单尾	0.073731	
t 单尾			t 单尾			t 单尾		
临界	2.131846		临界	2.131846		临界	2.131846	

P(T<=t)			P(T<=t)			P(T<=t)		
双尾	0.000233		双尾	0.001215		双尾	0.147462	
t 双尾			t 双尾			t 双尾		
临界	2.776451		临界	2.776451		临界	2.776451	
t-检验: 成对双样本均值分析								
免耕低茬 (喷一次)		深松耙 地	免耕高茬 (喷两次)		深松耙 地	免耕低茬 (喷两次)		深松耙 地
平均	1.5	1.43	平均	1.49	1.43	平均	1.49	1.43
方差	0.00455	0.0029	方差	0.0065	0.0029	方差	0.00385	0.0029
观测值	5	5	观测值	5	5	观测值	5	5
泊松相 关系数	0.557468		泊松相 关系数	-0.63916		泊松相 关系数	-0.64344	
假设平 均差	0		假设平 均差	0		假设平 均差	0	
Df	4		Df	4		df	4	
t Stat	2.684377		t Stat	1.097275		t Stat	1.276307	
P(T<=t)			P(T<=t)			P(T<=t)		
单尾	0.027489		单尾	0.16707		单尾	0.135457	
t 单尾			t 单尾			t 单尾		
临界	2.131846		临界	2.131846		临界	2.131846	
P(T<=t)			P(T<=t)			P(T<=t)		
双尾	0.054978		双尾	0.334141		双尾	0.270915	
t 双尾			t 双尾			t 双尾		
临界	2.776451		临界	2.776451		临界	2.776451	

从表 3-6 的分析结果来看, 免耕高茬(喷一次)、免耕低茬(喷一次)、免耕高茬(喷两次)、免耕低茬(喷两次)、深松耙地这 5 种机械化保护性耕作体系与传统耕作体系 10~30cm 的土壤容重有显著性差异, 而免耕高茬(喷一次)、免耕低茬(喷一次)、免耕高茬(喷两次)、免耕低茬(喷两次)与深松耙地之间的差异性不明显。

3.2.2 机械化保护性耕作体系收获后土壤容重状况

春小麦收获后, 对不同处理的土壤容重进行测定、分析, 可以了解作物生育期土壤容重、孔隙度等的变化及其不同处理之间的差异。

表 3-7 和表 3-9 分别为收获后试验设计的不同机械化保护性耕作体系和传统耕作体系 0~10cm 和 10~30cm 土壤容重, 表 3-8 和表 3-10 分别为相应的方差分析。

由表 3-7 和表 3-8 的结果分析, $F(5, 24) = 2.4685 < F_{\alpha} = 0.01(5, 24) = 3.90$, 不同耕作体系在 0~10cm 的土壤容重不具有显著性差异。

表 3-7 不同耕作体系春小麦收获后 0~10cm 土壤容重 (g/cm^3)

试验点	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
1	1.37	1.41	1.39	1.46	1.34	1.30
2	1.46	1.47	1.37	1.45	1.42	1.33
3	1.59	1.34	1.46	1.47	1.47	1.42
4	1.51	1.56	1.51	1.35	1.38	1.29
5	1.42	1.47	1.45	1.42	1.24	1.31
Σ	7.35	7.25	7.18	7.15	6.85	6.71
均值	1.47	1.45	1.44	1.43	1.37	1.342
与传统耕作对比±%	9.53	8.04	7.46	6.56	2.09	-

表 3-8 不同耕作体系春小麦收获后 0~10cm 土壤容重方差分析

变差来源	平方和	自由度	方差	方差比
各组处理之间	0.061	5	0.0123	2.4685
组内	0.119	24	0.0050	
总和	0.180	29		

由表 3-9 和表 3-10 的结果分析, $F(5, 24) = 3.423 < F_{\alpha=0.01}(5, 24) = 3.90$, 不同耕作体系在 10~30cm 的土壤容重不具有显著性差异。

表 3-9 不同耕作体系春小麦收获后 10~30cm 土壤容重 (g/cm^3)

试验点	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
1	1.43	1.54	1.48	1.53	1.41	1.30
2	1.58	1.54	1.45	1.49	1.49	1.38
3	1.62	1.38	1.53	1.55	1.52	1.40
4	1.55	1.60	1.60	1.42	1.45	1.39
5	1.47	1.49	1.46	1.51	1.28	1.42
Σ	7.65	7.55	7.52	7.5	7.15	6.89
均值	1.53	1.51	1.504	1.5	1.43	1.38
与传统耕作对比±%	10.87	9.42	8.98	8.69	3.62	-

表 3-10 不同耕作体系春小麦收获后 10~30cm 土壤容重方差分析

变差来源	平方和	自由度	方差	方差比
各组处理之间	0.086	5	0.017	3.423
组内	0.121	24	0.00502	
总和	0.207	29		

从以上的分析看出, 播种前, 由于传统耕作经过翻地、耙地作业, 与机械化保护性耕作

的五种体系相比,土壤容重有显著性差异,而机械化保护性耕作种的深松耙地虽然经过耙地作业,但是其土壤容重与其他四种机械化保护性耕作体系无显著性差异。经过一茬作物的耕种后,各种不同的耕作体系间的土壤容重已经没有了显著性差异。从一年的试验来看,尽管五种机械化保护性耕作体系的土壤容重从总体上要大于传统耕作体系,但是,由于作物根系及土壤冻融作用,其容重范围仍然在作物的适宜生长范围之内,从一定程度上解除了人们对机械化保护性耕作对土壤紧实度加重的担忧。

3.3 机械化保护性耕作体系对土壤水分状况的影响

3.3.1 机械化保护性耕作体系播种前土壤水分状况

试验区所在的地区,春季少雨干旱,不利于作物发芽生长,特别是2000年北方大旱,丰宁鱼儿山镇大部分土地颗粒无收,1999年脱贫的农民又返回贫困。如何充分利用天然降水,提高土壤保持水分的能力,已经成为提高该地区农业生产水平、增加产量、改善农民生活水平急需解决的一个问题。机械化保护性耕作的少免耕和残茬覆盖有利于减少降雨径流和土壤水分蒸发,因此,有很强的保水能力。

表3-11、表3-13分别为机械化保护性耕作体系与传统耕作体系在0~10cm和10~30cm的土壤含水量,表3-12和表3-14分别为相应的方差分析结果。

从表3-11和表3-12来看,不同耕作体系的土壤含水量是不同的。机械化保护性耕作的五种体系0~10cm的土壤含水量分别比传统耕作体系的高10.72%、13.45%、12.09%、10.73%、7.33%, $F(4, 20) = 0.061 < F_{\alpha} = 0.01(4, 20) = 4.43$ 保护性耕作五种体系相互之间没有显著性差异。

表 3-11 不同耕作体系播种前 0—10cm 土壤含水量(%)

试验点	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
1	15.7	19.2	16.9	16.8	13.9	15.3
2	26.8	17.9	16.2	17.4	16.1	14.2
3	13.3	13.0	15.1	15.3	15.5	15.7
4	12.4	16.1	17.3	16.4	18.3	16.0
5	13.3	17.3	17.0	15.6	15.2	12.4
均值	16.3	16.7	16.5	16.3	15.8	14.72
与传统耕作对比±%	10.73	13.45	12.09	10.73	7.33	-

表 3-12 五种机械化保护性耕作播种前 0~10cm 土壤含水量方差分析

变差来源	平方和	自由度	方差	方差比
各组处理之间	2.240	4	0.560	0.061
组内	182.38	20	9.12	
总和	184.62	24		

从表 3-13 和表 3-14 的结果分析, 机械化保护性耕作的五种体系 10~30cm 的土壤含水量分别比传统耕作体系的高 18.95%、21.57%、16.99%、17.65%、16.99%, $F(4, 20) = 0.0461 < F_{\alpha=0.01}(4, 20) = 4.43$, 机械化保护性耕作五种体系相互之间没有显著性差异。

表 3-13 不同耕作体系播种前 10~30cm 土壤含水量 (%)

试验点	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
1	17.4	21.2	19.0	18.6	16.0	15.9
2	27.8	18.0	18.1	19.4	18.9	15.4
3	14.5	13.9	17.4	16.2	16.6	16.0
4	13.0	21.0	17.6	17.2	20.2	16.2
5	18.3	18.9	17.4	18.6	17.8	13.0
均值	18.2	18.6	17.9	18	17.9	15.3
与传统耕作对比±%	18.95	21.57	16.99	17.64	16.99	-

表 3-14 五种机械化保护性耕作播种前 10~30cm 土壤含水量方差分析

变差来源	平方和	自由度	方差	方差比
各组处理之间	1.740	4	0.435	0.0461
组内	188.6	20	9.430	
总和	190.34	24		

从以上的分析可知, 机械化保护性耕作体系的保水效果优于传统耕作体系, 机械化保护性耕作体系之间的保水效果没有显著性差异。由于保水效果好, 有利于春小麦的出苗和生长发育, 所以机械化保护性耕作体系的出苗率高于传统耕作, 小麦长势也好于传统耕作。

3.3.2 机械化保护性耕作体系收获后土壤水分状况

在春小麦收获后的第二天, 对不同耕作体系进行土壤含水量的测定, 从表 3-15 和 3-16 来看, 保护性耕作体系的五种处理的 0~10cm 的土壤含水量分别比传统耕作高 9.85%、6.82%、5.30%、14.4%、14.4%、 $F(4, 20) = 0.9396 < F_{\alpha=0.01}(4, 20) = 4.43$ 。保护性耕作五种体系相互之间没有显著性差异。

表 3-15 不同耕作体系收获后 0-10cm 土壤含水量 (%)

试验点	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
1	16.3	14.9	14.2	15.1	13.9	14.4
2	11.3	12.6	12.6	14.6	14.7	12.5
3	14.3	14.0	13.1	17.5	15.5	8.5
4	15.1	14.6	14.9	13.9	16.0	17.4
5	15.5	14.4	14.7	14.4	15.4	13.2
均值	14.5	14.1	13.9	15.1	15.1	13.2
与传统耕作对比±%	9.84	6.81	5.30	14.39	14.39	-

表 3-16 五种机械化保护性耕作收获后 0-10cm 土壤含水量方差分析

变差来源	平方和	自由度	方差	方差比
各组处理之间	6.16	4	1.540	0.9396
组内	32.78	20	1.639	
总和	38.94	24		

表 3-17 不同耕作体系收获后 10-30cm 土壤含水量 (%)

试验点	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
1	16.4	15.4	14.3	16.0	15.4	14.8
2	14.1	13.4	14.7	14.6	15.1	13.4
3	13.7	15.4	13.9	19.0	16.0	9.6
4	15.3	15.1	14.6	14.4	16.2	17.4
5	16.5	15.2	15.0	15.0	15.8	12.8
均值	15.2	14.9	14.5	15.8	15.7	13.6
与传统耕作对比±%	11.76	9.55	6.61	16.17	15.44	-

表 3-18 五种机械化保护性耕作收获后 10-30cm 土壤含水量方差分析

变差来源	平方和	自由度	方差	方差比
各组处理之间	5.94	4	1.485	1.174
组内	25.30	20	1.265	
总和	31.24	24		

从表 3-17 和表 3-18 的结果分析, 机械化保护性耕作的五种体系 10-30cm 的土壤含水量分别比传统耕作体系的高 11.76%、9.56%、6.61%、16.18%、15.44%, $F(4, 20) = 1.174 < F_{\alpha=0.01}(4, 20) = 4.43$ 。机械化保护性耕作五种体系相互之间没有显著性差异。

从以上的数据分析, 机械化保护性耕作体系的保水效果好于传统耕作体系, 使得春小麦得出苗时间早, 小麦生长发育好, 产量也有较大的提高, 这对于水资源日趋紧张的干旱半干

旱地区来说,无疑具有重要的经济和生态意义。

3.3.3 机械化保护性耕作体系下小麦的水分利用效率 (WUE)

表 3-19 机械化保护性耕作体系下小麦的水分利用率

处理	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
产量 (kg/hm ²)	2364.9	2389.35	2422.91	2399.17	2086.70	2026.65
耗水量 (mm)	262.08	262.71	261.95	260.18	260.78	263.41
WUE (kg/(hm ² ·mm))	9.02	9.09	9.25	9.22	8.00	7.69
与传统对比±%	17.30	18.20	20.29	19.89	4.03	

注:从播种到收获后的降水量约为 244mm

从表 3-19 来看,五种机械化保护性耕作体系的水分利用率都比传统耕作的要高,依次比传统耕作高 17.3%、18.20%、20.29%、19.89%、4.03%,除了深松耙地提高的较少以外,其他四种比传统耕作的提高程度都比较大。由此可见,机械化保护性耕作体系对缓解冷凉风沙地区水资源紧张局势和促进该地区农业的可持续发展具有广阔的应用前景。

3.4 机械化保护性耕作体系的土壤肥力状况

3.4.1 引言

土壤肥力具有供给农作物生长发育所需要的水分、养分、空气和热量的能力。土壤肥力包括自然肥力和人工肥力,是由土质、气候、生物、地形和时间等自然因素在土壤形成工程中综合影响的结果。人工肥力是通过人的生产活动给它的,它是人类对土地进行耕作、施肥和改良等农业技术措施所创造的^[27]。

保护性耕作已经有 70 多年的历史,最初的目的是通过土壤表面的残茬防止土壤侵蚀。近 20 多年来,一些发达国家对保护性耕作进行了大量研究,发现除了防止土壤侵蚀外,还可以增加土壤的水分,提高土壤肥力,增加产量。

试验区所在的冷凉风沙地区,由于土壤风蚀严重,大量的地表土壤被风吹走,土壤有机质损失严重,造成土壤贫瘠,作物产量低。另外,由于该地区有机肥料投入少,土壤板结,不利于保水保肥,也影响了化肥的产量效益。土壤退化严重制约着当地的农业生产,在总结国内外经验的基础上,根据小麦根系的形态和生长发育规律,探索出一套有利于提高冷凉风沙地区土壤肥力的办法,也是本次试验的一个要点。

3.4.2 机械化保护性耕作体系的土壤养分含量状况

试验所在的地块从 2000~2002 年连续三年,农户均采用当地传统的种植方式播种了春小麦。在播种前对不同耕作体系处理的土壤养分测定,结果如表 3-20 和 3-21

表 3-20 不同耕作体系播种前 0-10cm 土壤养分含量 测试: 丰宁县农业局

处理方式	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
有机质%	1.19	1.20	1.20	1.20	1.19	1.18
与传统对比%	0.85	1.69	1.69	1.69	0.85	-
全氮%	0.095	0.094	0.095	0.095	0.094	0.093
与传统对比%	2.15	1.08	2.15	2.15	1.08	-
全磷%	0.0138	0.0139	0.0137	0.0138	0.0138	0.0137
与传统对比%	0.73	1.46	0	0.73	0.73	-
全钾%	1.81	1.81	1.80	1.81	1.80	1.79
与传统对比%	1.12	1.12	0.56	1.12	0.56	-

对表 3-20 分析可得:在播种前,机械化保护性耕作的五种体系 0-10cm 的土壤养分含量稍微高于传统耕作,这主要是由于传统耕作在秋天翻地后,地表裸露,无残茬覆盖,地表土壤颗粒容易被大风吹走,从而带走一部分养分。

表 3-21 不同耕作体系播种前 10-30cm 土壤养分含量 测试: 丰宁县农业局

处理方式	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
有机质%	1.02	1.03	1.01	1.03	1.02	1.02
与传统对比%	0	0.98	-0.98	0.98	0	-
全氮%	0.069	0.068	0.070	0.069	0.068	0.069
与传统对比%	0	-1.44	1.44	0	-1.44	-
全磷%	0.0099	0.0096	0.0098	0.0097	0.0099	0.0098
与传统对比%	1.02	-2.04	0	-1.02	1.02	-
全钾%	1.47	1.46	1.47	1.45	1.46	1.46
与传统对比%	0.68	0	0.68	-0.68	0	-

对表 3-21 分析可得:播种前,在 10-30cm 的土层中,不同耕作体系之间土壤养分含量可以无显著性差异,可以近似认为土壤养分含量相等。

综合表 3-21 和 3-22 的分析,我们可以认为在播种前,各种耕作体系之间的土壤养分含量是相等的。

经过一年的耕种,秋天收获后马上对不同的耕作体系取样,测定其土壤养分的含量,分析结果见表 3-22 和表 3-23。

表 3-22 不同耕作体系收获后 0~10cm 土壤养分的含量 测试: 丰宁县农业局

处理方式	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
有机质%	1.24	1.25	1.25	1.28	1.23	1.20
与传统对比%	3.33	4.17	4.17	6.67	2.50	-
全氮%	0.104	0.105	0.104	0.104	0.103	0.096
与传统对比%	8.33	9.38	8.33	8.33	7.29	-
全磷%	0.0146	0.0144	0.0147	0.0144	0.0142	0.0140
与传统对比%	4.28	2.85	5.00	2.85	1.43	-
全钾%	1.93	1.94	1.88	1.91	1.87	1.83
与传统对比%	5.46	6.01	2.73	4.37	2.19	-

由表 3-22 可知, 在 0~10cm 的土层中, 机械化保护性耕作五种处理的土壤养分含量均高于传统耕作, 与传统耕作相比, 有机质高 2.50%~6.67%, 全氮高 7.29%~9.38%, 全磷高 1.43%~5.00%, 全钾高 2.19%~6.01%。

表 3-23 不同耕作体系收获后 10~30cm 土壤养分的含量 测试: 丰宁县农业局

处理方式	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
有机质%	1.11	1.06	1.09	1.11	1.06	1.02
与传统对比%	8.82	3.92	6.86	8.82	3.92	-
全氮%	0.075	0.073	0.074	0.075	0.074	0.069
与传统对比%	8.69	5.70	7.25	8.69	7.25	-
全磷%	0.0105	0.0106	0.0107	0.0106	0.0104	0.0098
与传统对比%	7.14	8.16	9.18	8.16	6.12	-
全钾%	1.52	1.53	1.54	1.52	1.53	1.46
与传统对比%	4.11	4.79	5.48	4.11	4.79	-

由表 3-23 的结果可知, 在 10~30cm 的土层中, 机械化保护性耕作五种处理的土壤养分含量均高于传统耕作的, 与传统耕作相比, 有机质高 3.92%~8.82%, 全氮高 5.70%~8.69%, 全磷高 7.14%~9.18%, 全钾高 4.11%~5.48%。

由以上的数据分析得出, 机械化保护性耕作体系的土壤有机质、全氮、全钾、全磷的含量显著高于传统耕作, 在提高土壤肥力方面也明显优于传统耕作。土壤肥力高是小麦高产的重要因素之一, 从春小麦的考种情况来看, 穗粒数和千粒重明显高于传统耕作, 保护性耕作体系的产量也高于传统耕作。

3.5 机械化保护性耕作体系的土壤风蚀状况

试验区所在的坝上地区, 春季干旱, 经常出现大风天气, 而且农田由于传统的翻耕作业,

地表裸露, 容易造成土壤风蚀。土壤风蚀导致土地沙化, 一方面影响农业生产, 另一方面影响生态环境, 研究表明, 河北省西北部是北京市沙尘暴的主要沙尘源之一^[28]。

在小麦收获后 15d, 按照试验设计中的布置, 将便携式野外风洞布置在经过六种不同耕作体系处理的地表上, 每一种处理采用 5~20m/s 的六种风速吹拂地表, 对狭缝采样器收集到的土壤进行分析, 并以传统耕作作为标准, 将五种保护性耕作体系的土壤风蚀量与其对比。试验时地表情况见表 3-24。

从表 3-25 的试验结果可以看出, 机械化保护性耕作五种体系中, 免耕高茬(喷一次)和免耕高茬(喷两次)的抑制风蚀的效果最好, 分别比传统耕作体系减少风蚀 48.3%和 48.2%; 免耕低茬(喷一次)和免耕低茬(喷两次)的效果次之, 分别减少了 43.4%和 43.5%; 深松耙地的效果最差, 但是也比传统耕作减少了 33.1%。说明保留残茬有良好的抑制扬沙作用。

无论风速如何变化, 免耕高茬抑制扬沙的效果最好, 这是因为沙尘主要在离地 0~20cm 高度随风运动, 而免耕高茬留茬高度在 20~25cm, 故可以有效地阻止风沙运动, 比留茬高度为 10~15cm 的免耕低茬处理的风蚀量小; 深松耙地处理虽然留茬较高, 但是由于其经过深松、耙地作业后, 表层存在疏松土壤, 导致扬沙较多, 所以比免耕低茬处理扬沙大。

表 3-24 地表情况

处理方式	机械化保护性耕作体系					传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)	深松耙地	
覆盖量 kg/hm ²	1657.51	1429.36	1664.29	1417.85	1629.74	0
覆盖率%	58.1	57.6	57.8	57.9	57.9	0
0~10cm 含水率%	5.88	5.79	5.81	5.82	5.69	5.24

表 3-25 五种保护性耕作处理在不同风速下的风蚀量减少率

风速 (m/s)	风蚀量比传统处理减少(%) (传统处理的风蚀率为 1)				
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)	深松耙地
	5	41.3	33.3	41.7	34.1
8	48.6	42.1	47.9	41.9	31.9
10	49.8	44.2	49.1	44.3	35.8
14	48.4	46.3	49.1	46.3	31.1
18	49.2	46.4	49.3	46.5	33.2
20	52.3	48.1	51.8	47.9	35.8
平均	48.3	43.4	48.2	43.5	33.1

3.6 杂草的防治

3.6.1 概述

农田杂草是指那些生长在农田,分布广、危害农作物、非人工有意栽培的草本植物。它是长期适应当地作物、耕作、气候、土壤等生态条件和其他社会因素而生存下来的,是农业生态系统中的一个重要组成部分,是自然环境种适应性最强、最繁茂的植物。联合国粮农组织报道,全世界杂草总数约5万种,其中8000种为农田杂草,而危害主要粮食作物的约有250种,危害最严重的杂草有76种,其中18种尤其严重,如香附子、狗牙根、牛筋草、白茅等。

杂草生长于农田,影响农作物的生长发育,降低农作物产量,使产品质量变差,增加生产成本,给农业生产带来了很大损失。农田杂草的危害主要有①与农作物争夺水分、养分、光照和空间;②传播病虫害;③降低作物产量和质量;④增加管理用工和生产成本^[29]。

在农业生产中有很多防治杂草的办法,麦茬搅耧深松,使杂草种子停留于表土层,使其萌发整齐一致,便于采取防治措施。深耕可使多年生杂草如苜蓿菜、刺儿菜、打碗花和问荆等地下根茎切断,翻露于土表,经日晒和霜冻,杀死部分营养繁殖器官。翻入深层土中的根茎,降低了拱土能力,延缓出土或减弱了生长势。我国北方有通过春小麦的早播和密植,促其早发封垄和郁蔽,能有效抑制晚春的稗、马唐和鸭跖草的萌发、出苗及生长发育;通过作物的轮作,亦能达到控制麦田杂草的目的。保护性耕作技术由于不翻地,杂草的地下根茎难以有效的切除,一般采用喷施除草剂和表土作业等方法控制杂草^{[30][31][32]}。

受试验条件与时间的限制,本试验只进行了喷施除草剂防治杂草的试验研究。

3.6.2 试验结果及分析

麦田杂草发生种类多,由于各地区、各地块间杂草种类不尽相同,除草剂对不同杂草敏感度也不同。因此,喷施除草剂之前查清本地区本地块主要杂草发生情况,选择适宜的除草剂,方可达到理想的除草效果。本次试验地麦田以麦蒿、荠菜、婆婆蒿、繁缕、刺菜、田旋花等阔叶杂草为主。按照试验布置,在前茬作物秋天收获后15d左右,对一组免耕高茬和免耕低茬处理喷施除草剂,所用除草剂为草甘膦,用量为1500g/hm²,兑水750kg全面喷施。在次年播种前10d左右,再对这一组处理喷施除草剂,同时对另一组免耕高茬和免耕低茬处理喷施除草剂,用量也为1500g/hm²,兑水750kg全面喷施。

由表3-26的结果可知,播种前,传统耕作处理杂草株数和质量最小,自上而下,保护性耕作体系的五种处理的杂草株数分别比传统耕作处理高125.00%、120.00%、40.0%、45.00%、135.00%,杂草质量分别比传统耕作高119.75%、117.28%、40.74%、34.57%、139.51%。由以上数据可知,传统耕作的翻埋除草效果最好,深松耙地只通过播种前耙地的除草办法最差,免耕高茬(喷一次)和免耕低茬(喷一次)分别比免耕高茬(喷两次)和免耕低茬(喷两次)的杂草株数高60.71%和51.72%,杂草质量分别高56.14%和61.46%。这是因为前茬收获后杂草较多,喷施除草剂后,除去了大部分杂草,由于冬天寒冷,杂草再生速度慢,在

播种前再次喷施除草剂,可以收到更好的效果,而只在播种前喷一次除草剂的处理因为除草剂类型和用量的因素,没有达到预期的效果。在今后进一步的试验中,要重点考虑除草剂的类型与用量问题。

表 3-26 不同耕作体系播种前的杂草状况

处理方式	杂草量	试验点					平均	与传统对比±%
		1	2	3	4	5		
机械化保护性耕作	免耕高茬 杂草株数(株/m ²)	5	10	8	11	11	9	125.00
	(喷一次) 杂草质量(g/m ²)	10.1	22.4	14.2	21.6	20.9	17.8	119.75
	免耕低茬 杂草株数(株/m ²)	6	8	10	14	6	8.8	120.00
	(喷一次) 杂草质量(g/m ²)	11.4	15.7	22.1	27.7	11.0	17.6	117.28
	免耕高茬 杂草株数(株/m ²)	6	7	4	5	6	5.6	40.00
	(喷两次) 杂草质量(g/m ²)	11.7	13.4	8.6	10.8	12.4	11.4	40.74
	免耕低茬 杂草株数(株/m ²)	10	8	2	4	5	5.8	45.00
	(喷两次) 杂草质量(g/m ²)	15.9	15.1	3.8	9.3	10.6	10.9	24.57
	深松耙地 杂草株数(株/m ²)	11	9	10	6	11	9.4	135.00
	杂草质量(g/m ²)	22.8	17.1	21.5	12.6	23.1	19.4	139.51
传统耕作	杂草株数(株/m ²)	5	2	4	3	6	4	-
	杂草质量(g/m ²)	9.5	3.1	8.0	6.1	13.5	8.1	-

在作物收获后,对不同耕作体系的杂草株数和质量进行测定的结果见表 3-27,由表可知,保护性耕作的五种体系杂草的株数分别比传统耕作体系高 25.24%、30.42%、2.91%、5.51%、74.76%,杂草质量分别比传统耕作体系高 24.96%、30.23%、4.92%、5.80%、74.51%。试验田所在地区作物生长期一般不进行除草作业,收获后田间杂草较多。实验结果表明:喷施除草剂比不喷施除草剂的深松耙地处理田间杂草有所减少,喷施一次和喷施两次除草剂效果差异显著,以喷两次除草剂的效果最好。与传统翻耕处理相比,田间杂草量仍然较多,有待于进一步试验不同除草剂(包括除草剂类型与用量等)、不同喷施时间的除草效果或考虑机械除草措施,以减少杂草危害,进一步提高作物产量。

表 3-27 收获后机械化保护性耕作体系的杂草状况

处理方式	杂草量	试验点					平均	与传统对比±%
		1	2	3	4	5		
保护性耕作体系	免耕高茬 杂草株数(株/m ²)	31	44	29	33	57	38.7	25.24
	(喷一次) 杂草质量(g/m ²)	54.7	81.2	41.5	58.9	119.2	71.1	24.96
	免耕低茬 杂草株数(株/m ²)	45	51	36	36	34	40.3	30.42
	(喷一次) 杂草质量(g/m ²)	95.6	101.9	64.4	65.7	42.9	74.1	30.23
	免耕高茬 杂草株数(株/m ²)	35	28	41	32	23	31.8	2.91
	(喷两次) 杂草质量(g/m ²)	62.1	55.3	79.9	59.6	41.8	59.7	4.92
	免耕低茬 杂草株数(株/m ²)	19	36	33	27	48	32.6	5.51
	(喷两次) 杂草质量(g/m ²)	42.8	75.6	61.7	39.1	81.8	60.2	5.80
	深松耙地 杂草株数(株/m ²)	49	51	66	45	59	54.0	74.76
	杂草质量(g/m ²)	88.5	64.8	131.8	87.2	124.2	99.3	74.51
传统耕作	杂草株数(株/m ²)	42	37	14	26	36	30.9	-
	杂草质量(g/m ²)	84.9	68.7	20.1	55.1	55.7	56.9	-

3.7 小结

1. 播种前, 机械化保护性耕作体系的土壤容重大于传统耕作体系的土壤容重, 存在显著性差异, 经过一茬作物的耕作之后, 这种显著性差异消失。虽然播种时, 机械化保护性耕作的土壤容重较大, 但其容重范围仍然在作物的适宜生长范围之内。

2. 机械化保护性耕作体系播种前的含水量比传统耕作的高 7.33%~13.45%, 机械化保护性耕作体系之间的含水量无显著性差异, 对于春季少雨的冷凉风沙区来说, 有利于作物的出苗和生长, 而且机械化保护性耕作体系的水分利用率也高于传统耕作, 这对于提高作物产量有着重要的意义。作物收获后, 机械化保护性耕作体系的含水量也比传统耕作的高 6.61%~16.18%, 可以得知, 机械化保护性耕作的保水效果好于传统耕作的保水效果。

3. 机械化保护性耕作体系的土壤肥力在有机质、全磷、全氮和全钾方面都高于传统耕作, 与传统耕作相比, 在 0-10cm 的土层中, 有机质高 3.33%~9.17%, 全氮高 7.29%~10.42%, 全钾高 0%~14.29%, 全磷高 2.19%~6.01%; 在 10-30cm 的土层中, 有机质高 5.88%~9.80%, 全氮高 7.25%~13.04%, 全钾高 11.11%~22.22%, 全磷高 4.11%~5.48%。而保护性耕作的五种体系相互之间无显著性差异。可见采用机械化保护性耕作方式对于改善冷凉风沙地区土壤贫瘠的状况有着积极的作用。

4. 机械化保护性耕作五种体系都能有效的抑制土壤风蚀, 相对于传统耕作体系, 能减少 33.1%~48.3% 的土壤风蚀, 从抑制风蚀的效果来看, 从高到低依次排列为: 免耕高茬 > 免耕低茬 > 深松耙地 > 传统耕作。这能够有效的改善农田土壤养分流失, 抑制沙尘暴, 净化空气质量, 在改善环境质量上有着很好的生态意义。

5. 从不同耕作体系对农田杂草的控制情况来看, 播种前传统耕作体系的效果最好, 深松耙地的效果最差, 喷两次除草剂的效果好于喷一次除草剂的效果, 从抑制杂草生长的效果来看, 从高到低依次排列为: 传统耕作 > 喷两次除草剂 > 喷一次除草剂 > 深松耙地。由于没有中期的田间管理, 经过一茬作物的耕种之后, 各种处理体系的杂草都比较多。

第四章 机械化保护性耕作体系对春小麦生长发育的影响

4.1 引言

小麦是世界上分布最广的重要粮食作物，也是冷凉风沙地区主要的粮食作物之一。

田间的土壤、植物和大气是一个综合的动态系统，J.R. Philip(1996)将这一系统称之为“土壤—植物—大气连续体系”(Soil—Plant—Atmosphere Continuum, SPAC)^[33]。在这个体系中存在着各种相互依赖的循环过程，其中起主导作用并且人们研究最多的就是水分运移过程。作物根系不断地从土壤中吸收水分，以保持应有的含水量；同时，其地上部分，尤其是叶子又必须向外散失水分（蒸腾作用），使作物体内的水分总量处于动态的平衡状态。作物的正常生理活动（代谢、同化作用）就是在不断被吸收、传导、利用与散失中进行的。也就是说，在土壤、作物和大气任一环节上出现有碍于水分循环的问题，都会给作物的生长发育带来不利的影响。

在通气良好的土壤中，根系吸水的能力较强，因为根系生长和水分吸收，都必须在根系代谢活动正常进行的条件下才有可能。在土壤通气较好时，它可提供根系生理活动所需的物质和能量，根系呼吸较强，有利于根系生长和主动吸水。

作物的蒸腾作用主要通过叶子进行，文献^[34]指出，叶片上气孔蒸腾散失的水量可达到总量的80%~90%。尽管蒸腾不是主要的生理功能，也不是作物生长过程的直接结果^{[35][36]}，但是在高温干燥的气候条件下，作物打开气孔调节体温。否则经常关闭气孔限制蒸腾，会使作物生长受到影响，因为叶子的气孔能够吸收进行光合作用所需要的二氧化碳，而且，降低蒸腾容易导致作物的温度升高，呼吸增强，于是会进一步降低其净同化作用。然而，当蒸腾量超过水分吸收量时，会导致作物体内水分数量减少、细胞紧张度降低、细胞内水热负值变大，达到一定程度会阻碍细胞的分裂和生长，同样影响作物生长。由此可见，土壤在“土壤—植物—大气连续体系”中发挥着基础的重要作用。

Heath 和 Gregory (1938)、Waston (1947) 等认为，叶片生长时决定干物质生产力差异的重要因素。提高作物生产力的主要途径之一，就是增加叶片面积。Waston (1947) 首先提出了叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 的概念，Monsi 和 Saeki (1953) 从理论上以及 Waston (1956) 等从试验中都证明了作物群体应保持“最适叶面指数”。国内学者的大量研究也同样证明，叶面积在作物生产中的重要作用是不可忽视的，并且对不同作物的叶面积发展动态和叶面积指数与产量的关系进行了定性和定量的描述，这对于指导作物生产有极为重要的意义。

本试验的目的在于通过对不同耕作体系的比较，反映不同耕作体系对作物播种质量、出苗、长势以及产量的影响，以期表明其在生长发育上的差异，为选择适合的机械化保护性耕作体系提供依据。

4.2 机械化保护性耕作体系对小麦播种深度及出苗的影响

试验用的春小麦品种为“蒙麦 34 号”，其优点是抗旱、抗病、穗大粒多、分蘖性强，丰产性能好。该品种适合坝上地区的气候，是坝上春小麦的主要品种。

表 4-1 春小麦苗期出苗数(株/m²)

处理方式	时间	测 点					平均	与传统耕作比较 ±%	
		1	2	3	4	5			
机 械 化 保 护 性 耕 作	免耕高茬 (喷一次)	5.28	315	396	340	388	391	366	95.72
		6.8	409	395	447	411	403	413	1.98
		6.18	486	452	439	516	492	477	-11.17
	免耕低茬 (喷一次)	5.28	356	404	375	398	422	391	109.09
		6.8	460	444	418	473	485	456	12.60
		6.18	503	498	463	490	451	481	-10.42
	免耕高茬 (喷两次)	5.28	342	385	355	374	379	367	96.26
		6.8	441	435	419	396	409	420	3.70
		6.18	429	518	501	457	475	476	-11.36
	免耕低茬 (喷两次)	5.28	386	345	359	368	397	371	98.39
		6.8	440	481	452	436	436	449	10.86
		6.18	488	476	501	493	457	483	-10.05
	深松肥地	5.28	378	381	337	395	329	364	94.65
		6.8	394	426	411	437	367	407	0.05
		6.18	547	487	495	481	495	501	-6.70
	传统耕作	5.28	206	167	189	176	197	187	-
		6.8	391	433	387	412	402	405	-
		6.18	567	529	521	539	529	537	-

坝上地区春小麦的播种期为 4 月 20 日~5 月 10 日，试验区播种时间为 5 月 8-9 日。播种采用 13.24 kW 小四轮拖拉机悬挂 2BMF-6C-2 小麦免耕播种机，一次完成开沟、施肥、分层播种、覆土镇压等农艺环节。为了保证播种质量，根据当地种植习惯、气候条件、地表状况、土质和土壤墒情等多方面因素，并参考以前试验结果，选择播种农艺规程：播种量 225kg/hm²；施肥量 150 kg/hm²（磷酸二氢铵）；行距 20 cm；施肥深度 7~8cm；播种深度 5~6cm；种子覆土厚度约 3cm。种子的千粒重 38g。由表 4-1 的出苗数可以得出表 4-2 的春小麦出苗率。

表 4-2 春小麦出苗率(%)

测定 时间	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)	深松肥地	传统耕作
5.28	61.9	66.1	62.9	62.8	61.9	31.6
6.8	69.9	77.1	71.1	75.9	69.0	68.5
6.18	80.7	81.4	80.5	81.7	84.7	90.8

由表 4-2 可知，在播种后 20d 左右（5 月 28 日）保护性耕作几种处理的出苗率都达到

了 61.9~66.1%，而传统耕作的出苗率只有 31.6%。相对于传统耕作，保护性耕作播种的出苗时间早，且出苗率比传统耕作的出苗率高出 30~34.5 个百分点。随着时间的推移，保护性耕作和传统耕作的出苗率都有所增加，传统耕作的增加速度比保护性耕作的增加速度要快，最后测定的出苗率显示传统耕作的出苗率比保护性耕作的出苗率高出 6.1~10.3 个百分点。产生这一结果的原因，是由于播种时机械化保护性耕作处理的土壤含水量较高（表 3-11），且地温高于传统耕作（具体数据见土壤分析章节），有利于春小麦的出苗，所以保护性耕作的出苗时间早，相应的传统耕作出苗时间较晚；但是由于保护性耕作处理的地表不平整，且覆盖有残茬，容易导致播种管的堵塞，造成漏播，播种质量差于传统耕作处理，所以最终的出苗率比传统耕作的要低。

表 4-3 机械化保护性耕作体系的播深情况 (cm)

测点	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)	深松耙地	传统耕作
1	5.6	5.1	6	4.8	5.6	5.7
2	4.9	5.6	5.8	6	5.4	5.4
3	5.1	6.1	5.6	5.8	5.9	5.6
4	5.8	5.7	5.7	5.7	6.1	5.3
5	6.0	5.3	5.1	5.4	5.1	5.5
平均	5.48	5.56	5.64	5.54	5.62	5.50
方差	0.174	0.118	0.0904	0.174	0.126	0.020

从表 4-3 的播种深度来看，传统耕作处理的平均播深为 5.5cm，其他 5 种机械化保护性耕作处理的平均播深值与之相比无明显差异。但是从方差来看，传统耕作的播深方差仅为 0.02，而保护性耕作处理的播深方差为 0.09~0.174，传统耕作处理的播深方差仅为保护性耕作处理播深方差的 11.5%~22%，表明传统耕作播种深度均匀性好，这是由于传统耕作的经过翻地、耙地平整之后，地表比较平坦，而保护性耕作的地表覆盖有残茬，播种机在播种时，不容易控制播种深度，所以，从播种深度来看，传统耕作的播种效果好于保护性耕作的播种效果。

4.3 春小麦苗期的生长状况

在春小麦播种后 30d，进行了小麦苗期的植株调查，每种耕作选择三个点，每个测点随机提出 10 株小麦，对每一株生长情况进行了考核，数据处理结果见表 4-4。

从表 4-4 中的数值可以看出，机械化保护性耕作的五种处理的植株高度为 26.75~27.66cm，相互之间无明显差异，传统耕作处理的植株高度为 22.97cm，机械化保护性耕作的植株高度比传统耕作的植株高度高 16.5~20.4%。机械化保护性耕作五种处理的根密集区长度比传统的根密集区长度长 0.34~0.99cm，高出约 5.78~16.8%；同时五种保护性耕作体系的春小麦总根长比传统耕作的总根长高出 12.60%~19.72%，这使得春小麦能够从更深的土层中汲取水分和养分，从而使麦苗长得更加高大、粗壮。从麦苗的生物量来看，机械化保护性耕作体系的鲜重分别比传统耕作体系的高出 20.19%~30.13%，干重分别比传统耕作体

系的高出 21.78%~33.6%。从麦苗的直径来看,机械化保护性耕作的麦苗直径为 0.25~0.28cm,五种机械化保护性耕作体系处理相互之间无明显差异,而传统耕作的麦苗直径为 0.22cm,机械化保护性耕作的麦苗直径比传统耕作的麦苗直径粗 13.6~31.8%。

表 4-4 机械化保护性耕作春小麦苗期生物量测定

处理方式	测点	株高 (cm)	根长(cm)			生物量(g)			根茎(cm)	
			根长	密集 区长	总鲜 重	地上 鲜重	地下 鲜重	总干 重	根茎 长	直径
免耕高茬 (喷一次)	1	26.65	12.41	6.14	4.26	3.97	0.32	1.39	1.52	0.28
	2	28.11	12.75	5.85	3.78	3.25	0.53	1.21	1.49	0.22
	3	27.69	13.11	6.66	3.44	2.98	0.46	1.09	1.24	0.24
	平均	27.48	12.76	6.22	3.83	3.40	0.44	1.23	1.42	0.25
	比传统±%	19.63	16.53	5.79	22.75	24.09	15.79	21.78	84.41	13.63
免耕低茬 (喷一次)	1	28.01	13.24	7.45	3.56	3.14	0.42	1.21	1.65	0.23
	2	27.40	12.92	6.25	3.47	3.09	0.38	1.20	1.14	0.26
	3	27.13	12.18	5.99	4.03	3.55	0.48	1.32	1.38	0.27
	平均	27.51	12.78	6.56	3.69	3.26	0.43	1.24	1.39	0.25
	比传统±%	19.76	16.71	11.56	18.26	18.98	13.16	22.77	80.52	13.63
机械化 保护性 耕作	1	27.58	13.34	6.47	4.12	3.80	0.32	1.39	1.17	0.29
	2	26.92	12.70	6.85	4.06	3.68	0.38	1.37	1.69	0.24
	3	28.20	13.29	7.28	3.99	3.45	0.54	1.30	1.26	0.31
	平均	27.66	13.11	6.87	4.06	3.64	0.41	1.35	1.37	0.28
	比传统±%	20.42	19.72	16.84	30.13	32.84	7.89	33.66	77.92	27.35
深松耙地	1	27.85	12.74	5.78	3.69	3.24	0.45	1.26	1.38	0.25
	2	27.61	12.82	7.52	3.97	3.53	0.44	1.31	1.37	0.27
	3	26.94	12.14	6.87	3.51	3.15	0.36	1.20	1.31	0.29
	平均	27.47	12.57	6.72	3.72	3.31	0.42	1.26	1.35	0.27
	比传统±%	19.59	14.79	14.62	20.19	20.80	10.52	24.75	75.32	27.27
传统耕作	1	25.78	11.56	6.03	3.24	2.75	0.49	1.23	1.19	0.19
	2	26.84	12.66	7.12	4.24	3.84	0.40	1.42	1.26	0.31
	3	27.64	12.78	7.28	3.78	3.26	0.52	1.26	1.37	0.25
	平均	26.75	12.33	6.81	3.75	3.28	0.47	1.30	1.27	0.25
	比传统±%	16.45	12.60	15.81	20.19	19.70	23.68	28.71	64.94	13.63
传统耕作	1	23.41	10.94	5.74	3.12	2.69	0.43	1.13	0.97	0.23
	2	22.98	10.88	5.69	2.98	2.63	0.35	0.88	0.63	0.21
	3	22.53	11.03	6.21	3.27	2.91	0.36	1.02	0.72	0.21
	平均	22.97	10.95	5.88	3.12	2.74	0.38	1.01	0.77	0.22

4.4 春小麦的生长分析

自 Mason 和 Maskeu 提出作物生产的“库”“源”理论以来,国内外学者对库源理论关系做了大量的研究,但对提高作物产量的限制因子是源还是库,目前还没有一致的观点^[37]。如英国和北欧的学者依据产量和开花后叶面积的关系,而遮光或剪叶则产量普遍降低的实验结果,认为源是产量的限制因素,主张扩源,通过提高光合物总量而提高产量。澳大利亚学者(Evans 等, 1975)则依据“在强光下,光合能力不限制籽粒产量,光合作用能够满足甚至超过籽粒发育的最大需求”的试验结果,认为“库”是限制产量的主要原因,因此主张扩库,通过增加结实粒数来提高产量。我国学者经过广泛的研究认为:源和库的关系是复杂的,要获得高产,既要扩库,又要增源。大多数学者认为,源和库是相互依赖又相互制约的矛盾统一体。在不同的条件下,矛盾的主要方面不同^{[38][39][40][41]}。深入了解两者之间的关系及其动态变化,有助于在作物生长过程中采取相应的管理措施,以获得尽可能高的产量。

“源”,指的是生产光合产物的器官,它包括绿色的叶片、叶鞘、茎秆、颖壳和芒等。对不同的耕作体系的小麦群体,源的发展速度各不相同,主要表现在生育期的叶面积、干物质积累量存在明显差异。为了研究问题方便,本研究仅以叶面积的大小、持续时间的长短和光合能力的强弱来分析不同处理的春小麦源的形成与发展动态。

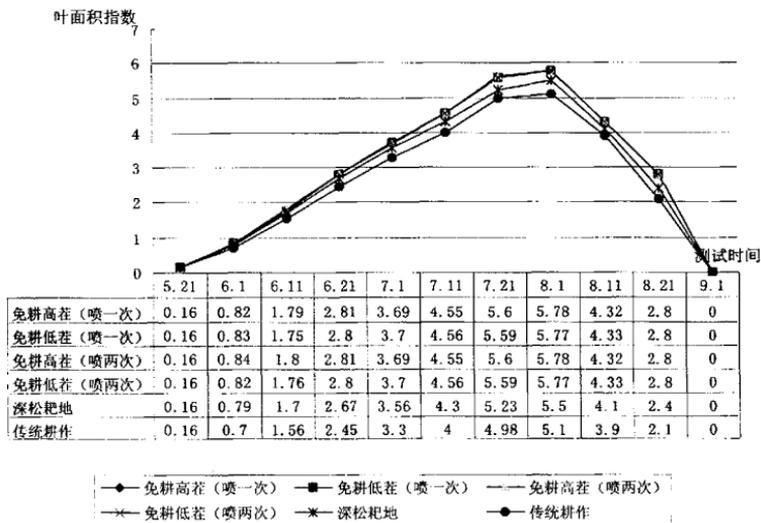


图 4-1 机械化保护性耕作体系小麦叶面积的变化图

试验区春小麦叶面积指数 LAI 的消长趋势经历两个阶段(图 4-1);

第一个阶段(5.21~8.1),由拔节到挑旗。此时由于气候原因,小麦加速生长,小麦挑旗时,叶片全部抽出, LAI 达到峰值,此间属于快速增长期;

第二阶段,由挑旗到成熟(8.1~9.1)。小麦挑旗后,叶面积不再增加,并且逐渐衰退。

下部叶枯黄死亡，此间属于衰退期。

机械化保护性耕作的五种体系中，不同体系的春小麦叶面积指数 LAI 的变化结果是：免耕高茬（喷一次）、免耕低茬（喷一次）、免耕高茬（喷两次）、免耕低茬（喷两次）、深松耙地分别比传统耕作的叶面积指数峰值高 10.3%、10.4%、10.6%、10.4%和 8.5%。就其单株叶面积来看，保护性耕作体系的小麦整个生育期均高于传统耕作，而且生育期的总天数比传统耕作体系的要多，大致上多 2~3d。

4.5 春小麦库的形成与充实

库(Sink)是指贮存（消耗）光合产物的器官，小麦分蘖期的分蘖节、拔节后的茎秆、抽穗后的籽粒都属于库的范畴。这里以单位面积上具有经济价值的籽粒的数量和质量来分析小麦库的形成与发展动态。

一般认为，基本苗是决定单位面积库容量的先决条件，小麦抽穗开花以后，从籽粒形成期开始，具有经济价值的库即开始充实。单位面积上的籽粒数与籽粒重之积构成了经济产量，通常称为单位面积的总库容。而单位面积上籽粒数是由单位面积上的穗数和每穗的实粒数决定的，籽粒重则是由开花前后干物质的生产与积累量决定的^{[42][43][44]}。由于不同的处理对播种质量产生了影响，导致小麦的出苗出现差异，必然会影响单位面积上穗数的多少。因此，不同处理对单位面积库容量的首要因子——基本苗的影响、发展动态、以及基本苗的变化与单位面积上穗数、穗粒数的关系决定着小麦产量的高低。

表 4-5 机械化保护性耕作体系对春小麦群体动态的影响

体系	出苗	拔节	挑旗	抽穗	成熟
	万株/公顷	万株/公顷	万株/公顷	万株/公顷	万株/公顷
免耕高茬（喷一次）	477.23	486.25	336.67	260.14	260.13
免耕低茬（喷一次）	481.24	487.98	348.54	251.13	251.11
免耕高茬（喷两次）	476.24	491.62	351.24	258.94	258.93
免耕低茬（喷两次）	483.24	495.36	357.99	261.93	261.93
深松耙地	501.25	514.14	367.23	336.18	336.17
传统耕作	537.27	551.21	412.66	394.20	394.20

表 4-5 和表 4-6 分别列出了不同体系的春小麦群体动态和考种结果，由两表可以看出（下文中机械化保护性耕作五种体系依次顺序为免耕高茬（喷一次）、免耕低茬（喷一次）、免耕高茬（喷两次）、免耕低茬（喷两次）、深松耙地）：

1. 以实播面积对比，机械化保护性耕作五种处理的春小麦群体动态小于传统耕作处理，在机械化保护性耕作五种处理中，最高的为深松耙地。之所以出现这样的结果，是由于机械化保护性耕作的地表处理不平整，造成播种机堵塞，使春小麦出苗率要低于传统耕作的出苗率。拔节期保护性耕作的五种处理每公顷茎数分别比传统耕作体系低 11.78%、11.47%、10.81%、10.13%、6.7%，在挑旗期，分别比传统耕作的低 18.41%、15.54%、14.88%、13.25%、11.01%。一般小麦群体具有自身调节功能，苗期群体存在的差距在后期得到一定的变化。

2. 以实播面积计算，机械化保护性耕作的五种体系的公顷穗数分别比传统耕作体系的低

34.01%、36.29%、34.31%、33.55%、14.72%。机械化保护性耕作五种体系的公顷穗数也有显著性差异。其中深松耙地体系明显高出其他四种，而其他四种之间差异不大。

3. 不同处理小麦的穗粒数相比较，机械化保护性耕作体系的五种处理中，除了深松耙地外，其余四种没有明显的差异，均明显高于传统耕作。五种机械化保护性耕作体系的穗粒数分别比传统耕作高 65.4%、60.57%、64.76%、63.27%、24.74%，很显然穗粒数是造成增产的一个主要因素。不少研究指出，在正常情况下，每公顷穗数与每穗粒数和千粒重呈负相关。虽然保护性耕作体系因为播种质量问题而导致每公顷穗数减少，但是由于保护性耕作体系良好的水、肥、土壤条件使得其与传统耕作体系相比穗粒数有明显的增加，从而达到增产的效果，做到“减穗不减产”。

4. 从不同体系的春小麦千粒重来看，机械化保护性耕作体系的五种处理除了深松耙地外，均比传统耕作的高，并且相互之间无明显差异。而深松耙地的千粒重比传统耕作低，免耕高茬（喷一次）、免耕低茬（喷一次）、免耕高茬（喷两次）、免耕低茬（喷两次）分别比传统耕作的高 10.7%、11.24%、9.20%、10.38%，再一次证明了“减穗不减产”的结果。虽然深松耙地的千粒重比传统耕作的低了 3.21%，但是由于其穗粒数高于传统耕作处理，所以最终产量比传统耕作的要高。

在小麦穗数和穗粒数确定以后，籽粒灌浆过程即可理解为库的充实过程，库的充实程度影响最后的千粒重。有关小麦的灌浆过程已有许多报道，不同的品种、不同的栽培管理措施，其籽粒增重的模式、灌浆的持续时间、灌浆强度、最大粒重均有较大的差异，其中小麦群状况和生长环境对灌浆的影响较大。田间调查发现，传统耕作体系和机械化保护性耕作体系相比，小麦后期叶子干枯加剧，机械化保护性耕作体系的小麦比传统耕作体系晚熟 2~3 天，尤其是旗叶、倒二叶抗衰老能力强，这对于提高籽粒重量很有好处。

5. 机械化保护性耕作的五种体系的产量都比传统耕作的高，除了深松耙地增产比较少以外，其他四种保护性耕作处理增产效果比较明显，五种机械化保护性耕作体系处理分别比传统耕作增产 16.70%、17.90%、19.55%、18.38%、2.97%。从最终的结果来看，机械化保护性耕作体系达到了增产效果，这也是考察保护性耕作体系的一个重要指标。

以上分析说明，不同耕作体系对春小麦的生长和发育的影响是不同的，机械化保护性耕作体系改善了小麦个体和群体的生长发育，不仅促进了“源”的发展，而且也促进了“库”的积累，从而使产量增加，在冷凉风沙地区实行机械化保护性耕作体系，能够保持春小麦的生长过程中获得源和库较好的协调和小麦高产。

表 4-6 机械化保护性耕作体系的春小麦产量

试验处理	测点	穗/m ²	有效穗数 (万/hm ²)	株高 (cm)	穗粒数 (粒)	千粒重 (g)	理论产量 (kg/hm ²)	实收产量 (kg/hm ²)
免耕高茬 (喷一次)	1	300	300.15	60.19	26.88	31.13	2511.58	2386.00
	2	236	236.12	63.17	24.52	39.92	2311.23	2195.67
	3	233	233.12	79.54	27.22	45.63	2895.46	2750.69
	4	279	279.14	61.23	24.53	38.11	2609.51	2479.03
	5	207	207.10	57.27	25.20	38.31	1999.37	1899.40
	方差	1134	1135.2	61.85	1.34	21.46	89760.9	81009.6
	平均	251	251.11	64.28	25.67	38.62	2489.4	2364.9

	比传统±%	-36.29	-36.29	10.39	65.40	10.75	16.69	16.69
	1	275	275.14	64.70	23.92	34.79	2289.65	2175.17
	2	230	230.12	81.68	27.88	45.20	2899.91	2754.92
	3	288	288.14	75.63	26.53	35.10	2683.17	2549.01
免耕低茬 (喷一次)	4	243	243.12	60.36	24.86	34.89	2108.74	2003.30
	5	264	264.13	63.63	21.41	43.97	2486.51	2362.18
	方差	442.8	433.16	65.30	4.93	22.55	78157.5	70538.2
	平均	260	260.13	69.20	24.92	38.79	2514.6	2389.35
	比传统±%	-34.01	-34.01	18.84	60.57	11.24	17.87	17.87
	1	298	298.15	65.38	27.47	32.64	2673.27	2539.61
	2	252	252.13	58.92	23.49	41.02	2429.42	2307.95
	3	281	281.14	77.65	21.33	37.83	2268.56	2155.13
免耕高茬 (喷两次)	4	238	238.12	69.76	26.82	33.22	2121.55	2015.48
	5	240	240.12	61.28	28.76	45.69	3155.28	2997.52
	方差	563.36	563.91	44.17	7.53	23.97	131359.85	118552.4
	平均	262	261.93	66.60	25.57	38.08	2550.43	2422.91
	比传统±%	-33.50	-33.50	14.37	64.76	9.21	19.55	19.55
	1	284	284.14	85.34	24.04	35.75	2441.98	2319.89
	2	247	247.12	67.66	27.38	34.62	2129.49	2023.02
	3	258	258.13	77.45	23.05	43.89	2611.41	2480.84
免耕低茬 (喷两次)	4	229	229.11	59.16	25.71	39.54	2329.07	2212.62
	5	276	276.14	76.20	26.56	38.67	2836.17	2694.36
	方差	391.76	392.21	80.45	2.54	10.56	58133.99	52464.89
	平均	259	258.93	73.16	25.34	38.49	2525.44	2399.17
	比传统±%	-34.26	-34.26	25.64	63.27	10.38	18.38	18.38
	1	279	279.14	66.76	15.32	33.86	1447.99	1375.60
	2	388	388.19	62.32	16.48	32.33	2068.27	1964.86
	3	321	321.16	53.67	21.36	29.75	2040.84	1938.80
深松耙地	4	340	340.17	58.21	23.58	35.12	2817.05	2676.19
	5	352	352.18	55.19	20.06	37.69	2662.69	2529.56
	方差	1290	1291.2	22.90	9.38	7.09	240553.0	217095.1
	平均	336	336.17	59.23	19.36	33.75	2196.53	2086.70
	比传统±%	-14.72	-14.72	1.71	24.74	-3.21	2.96	2.96
	1	352	358.18	64.52	17.04	35.78	2183.79	2074.60
	2	364	364.17	60.24	15.94	36.13	2097.29	1992.42
	3	416	416.20	57.97	12.82	35.11	1873.36	1779.69
传统耕作	4	377	377.18	54.71	15.68	33.54	1983.61	1884.44
	5	461	461.23	53.71	16.12	33.79	2512.29	2386.69
	方差	1585	1491.7	15.30	2.03	1.08	47480.6	42853.0
	平均	394	394.20	58.23	15.52	34.87	2133.34	2026.65

4.6 小结

1. 从播种质量来看, 机械化保护性耕作没有经过翻地、耙地作业, 地表处理不平整, 播种深度不均匀, 播种深度的稳定性差于传统耕作。从作物出苗情况来看, 由于土壤含水量较高, 保护性耕作体系比传统耕作体系的出苗时间早; 但是因为地表处理不平整, 播种质量差, 保护性耕作体系比传统耕作体系的出苗率低 7.1 到 10.6 个百分点。

2. 对机械化保护性耕作体系春小麦苗期的测定结果表明: 保护性耕作体系的春小麦根密集区和总根长非别比传统耕作体系的高出 5.78~16.8%和 12.60%~19.72%, 使得麦苗能够从更深的土层吸收水分和养分, 同时机械化保护性耕作体系麦苗直径比传统耕作的麦苗直径粗 13.6~31.8%, 有利于水分和养分的输送, 从而使麦苗更加健壮。对麦苗的生物量的测定证实了这一点, 机械化保护性耕作体系的鲜重分别比传统耕作体系的高出 20.19%~30.13%, 干重分别比传统耕作体系的高出 21.78%~33.6%。

3. 对机械化保护性耕作体系春小麦叶面积指数测定的结果表明: 机械化保护性耕作的 5 种体系的 LAI 的峰值分别比传统耕作体系的高 10.3%、10.4%、10.6%、10.4%和 8.5%, 由于叶面积大, 光合作用的能力比传统耕作强。就单株小麦叶面积来看, 机械化保护性耕作体系的小麦整个生育期均高于传统耕作, 而且生育期的总天数比传统耕作体系的要多, 大致上多 2~3d。

4. 由于出苗率低于传统耕作, 保护性耕作的五种体系的公顷穗数分别比传统耕作体系低 34.01%、36.29%、34.31%、33.55%、14.72%, 但是由于机械化保护性耕作植株高大、根系长而且根密集区长、叶面积指数大、生育天数多等原因, 穗粒数分别比传统耕作高 65.4%、60.57%、64.76%、63.27%、24.74%; 从小麦的千粒重情况来看, 免耕高茬(喷一次)、免耕低茬(喷一次)、免耕高茬(喷两次)、免耕低茬(喷两次)分别比传统耕作的高 10.7%、11.24%、9.20%、10.38%。由于穗粒数多、千粒重大, 因此机械化保护性耕作处理的春小麦产量分别比传统耕作提高了 16.70%、17.90%、19.55%、18.38%、2.97%。其中深松耙地的千粒重比传统耕作处理低 3.21%, 但是由于其穗粒数高于传统耕作, 所以最终产量比传统耕作的要高。

第五章 机械化保护性耕作体系的效益分析

5.1 引言

耕地是土地资源最重要的组成部分之一，是粮食和多种经济作物生产的物质基础。特别是对于我们这样一个只占世界 7% 的耕地，却拥有世界 22% 以上人口的国家来说，保护有限的耕地资源尤为重要^[49]。然而，近几十年来，由于受诸多自然和人为因素的影响，我国的耕地资源在利用的过程中出现了许多令人担忧的问题，最突出的表现为耕地的严重流失、人均耕地面积的不断减少、耕地退化现象严重等，这些都对我国农业可持续发展构成严重的威胁。

我国耕地面临的突出问题有：①耕地严重流失，人均耕地面积不断减少。我国耕地面积只占我国土地总面积的 10% 左右，大大低于世界许多国家耕地在土地总面积中的比例。从 1952 年至 1992 年我国共失去耕地 0.69 亿公顷，如果减去同期新开垦的耕地 0.54 亿公顷，40 年间我国净减少耕地 0.15 亿公顷，相当于一个山东省的面积。照此计算，到 21 世纪初，我国人均耕地将下降到 0.07 公顷^{[46][47][48]}。②耕地退化严重。我国耕地退化的表现之一是水土流失造成耕地土壤被侵蚀，耕地质地变差，肥力下降。目前，我国 4200 万公顷的耕地出现不同程度的水土流失，占我国耕地总面积的 43% 左右，每年地表土壤流失量超过 50 亿吨，其中 62% 左右来自耕地表层，耕地有机质含量平均为 1.5%，明显低于欧美等地一些国家 2.5%~4% 的水平。表现之二是耕地荒漠化现象严重^[49]。目前，我国荒漠化耕地面积累计达 1000 万公顷，约占我国耕地面积的 10% 以上，其中，沙化面积为 260 万公顷，主要分布在东北平原西部、华北平原北部、黄土高原及西北地区等直接或间接受风沙危害的地区，且每年以 10 万公顷的速度增加。表现之三是土壤结构变差。在我国传统的耕作方式中，多用农作物的秸秆作为肥料定期补充到耕地土壤中，这对及时弥补土壤中的有机质和各种养份、改良土壤结构是十分有益的。近年来，我国农村化肥的使用量大大增加，这无疑对提高粮食产量起了重要作用，但却忽视了传统农业产业中“秸秆还田”这一有益的作法，大量农作物秸秆抛弃在田边、荒野或放火焚烧，使耕地的有机质含量越来越少，土壤板结，结构变差^{[50][51][52][53]}。以上存在的这些问题严重地影响着我国农业生产的可持续发展。

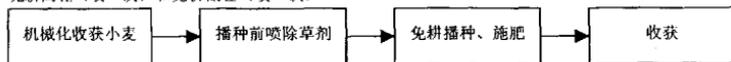
由于耕地不断减少、退化，制约粮食生产的发展；随着人口的不断增加，粮食问题已成为人们日益关注的一个问题。我国是一个人口大国，粮食生产资源极其稀缺。中国粮食白皮书确定的实现国家粮食安全的基本方针是：立足基本自给，并适度依靠国际市场。而粮食自给的基础是耕地资源的数量与质量必须有保证，因此，加强耕地资源的保护、管理和有效利用，维护我们的生命线，已成为中国 21 世纪实现国家粮食安全的必然选择。要解决此问题，大力提高耕地质量才是出路^[54]。

前面几章介绍了冷凉风沙地区保护性耕作体系对作物生长、土壤物理性能等方面的产生的影响，本章结合前面的内容，重点对保护性耕作体系的经济效益、社会效益和生态效益进行分析，并且就其在我国冷凉风沙地区推广的可能性进行探讨。

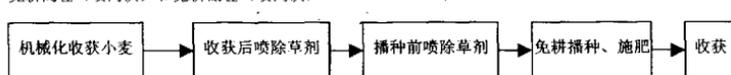
5.2 机械化保护性耕作体系经济效益分析

不同耕作体系的作业工序的次数和顺序是不同的，具体如下：

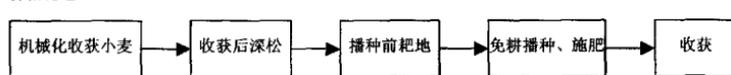
免耕高茬（喷一次）和免耕低茬（喷一次）



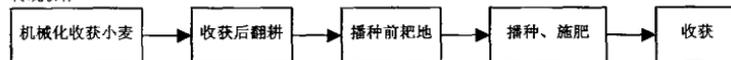
免耕高茬（喷两次）和免耕低茬（喷两次）



深松耙地



传统耕作



生产成本包括机械作业成本和非机械作业成本。非机械作业成本包括人、畜力、种子、化肥、除草剂和税收，其中人畜力费用按当地价格计算。不同耕作体系的春小麦投入、产出、产出投入比情况见表 5-1，表 5-2，表 5-3。

表 5-1 机械化保护性耕作体系小麦生产投入（元/hm²）

作业名称	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
深松					300	
翻地						225
耙地					150	150
播种	150	150	150	150	150	150
收获	100	100	100	100	100	100
喷除草剂	30	30	60	60		
种子	357	357	357	357	357	357
化肥	304.5	304.5	304.5	304.5	304.5	304.5
除草剂	120	120	240	240		
农业税	360	360	360	360	360	360
合计	1421.5	1421.5	1571.5	1571.5	1421.5	1646.5
比传统±%	-13.67	-13.67	-4.56	-4.56	-13.67	-

表 5-2 机械化保护性耕作体系小麦产量 (千克/ hm^2) 及产值 (元/ hm^2)

处理	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
产量	2364.9	2389.35	2422.91	2399.17	2086.70	2026.65
产值	2364.9	2389.35	2422.91	2399.17	2086.70	2026.65
与传统对比%	16.69	17.89	19.55	18.38	2.96	-

表 5-3 机械化保护性耕作体系的产出投入比

处理	机械化保护性耕作体系				深松耙地	传统耕作
	免耕高茬 (喷一次)	免耕低茬 (喷一次)	免耕高茬 (喷两次)	免耕低茬 (喷两次)		
产出投入比	1.66	1.68	1.54	1.53	1.48	1.23
与传统对比%	34.96	36.59	25.20	24.39	20.33	-

从表 5-1、5-2、5-3 可知, 机械化保护性耕作体系的作业成本比传统耕作的作业成本降低了 4.56%~13.67%, 而产量却比传统耕作的高出 2.96%~19.55%, 按每千克小麦一元的价格计算, 相应的产值也高出了 2.96%~19.55%, 最终机械化保护性耕作获得了较好的产出投入比, 产出投入比比传统耕作的要高 20.33%~36.59%。经济效益从高到低依次是免耕低茬(喷一次)、免耕高茬(喷一次)、免耕高茬(喷两次)、免耕低茬(喷两次)、深松耙地、传统耕作。

5.3 机械化保护性耕作体系生态效益分析

5.3.1 减少风蚀

研究证明, 当地表 30cm 高度的风速达到 5.8m/s 时, 风可以将土粒带走。直径小于 0.1mm 的土粒常以悬浮状被带走, 直径 0.1~0.5mm 的土粒呈“跳跃”状态移动, 直径 1mm 以上的颗粒则在地面上呈蠕动状态慢慢的变动位置。产生风蚀的条件包括: 干燥细松的土壤; 植被覆盖少或者光滑的地表; 较大的地块; 足以吹动土粒的强风。

我国冷凉风沙区面积辽阔, 严重的风蚀可能会导致数次毁苗重播仍然得不到全苗。干燥的风会降低作物对降雨的有效利用, 使蒸发加大, 同时又增加了作物叶面的蒸腾作用, 使缺水的威胁增加。由于漏水漏肥, 土壤的养分含量低, 腐殖质积累少, 肥力低下, 作物产量低而不稳。

相对于传统耕作, 机械化保护性耕作能够有效的抑制农田风蚀, 本论文第三章的测试结果已对此进行了验证。进一步分析保护性耕作抑制农田风蚀的效果, 可以证明:

1. 残茬固土和降低近地表风速是抑制农田风蚀的主要因素。机械化保护性耕作地表留有残茬, 残茬的根部能够紧固周围的土壤, 同时可以有效降低地表风速, 阻挡地表土壤颗粒的移动。从抑制农田风蚀的效果来看, 留高茬优于留低茬。

2. 机械化保护性耕作能够有效的保持土壤中的水分, 土壤湿润, 团聚性好, 不容易形成干松细碎的表土。

3. 机械化保护性耕作不进行翻耕和平整地表的作业, 不会大规模的破坏土壤结构, 具有较高的地表粗糙度, 能够降低地表风速。

试验的结果证明: 机械化保护性耕作的风蚀率只有传统耕作的 51.7%~66.9%。在抑制风蚀方面效果从高到低依次排列为: 免耕高茬 > 免耕低茬 > 深松耙地 > 传统耕作。这是因为沙尘主要在离地 0~20cm 高度随风运动, 而免耕高茬留茬高度在 20~25cm, 故可以有效地阻止风沙运动, 比留茬高度为 10~15cm 的免耕低茬处理的风蚀量少; 深松耙地处理虽然留茬较高, 但是由于其经过深松、耙地作业后, 表层存在疏松土壤, 导致扬沙较多, 所以比免耕低茬处理扬沙多。

5.3.2 改善土壤结构

培肥土壤的主要目的在于给土体创造一个有利于保水、保肥、通气的土壤结构。土壤结构的好坏, 对土壤肥力因素的调节、微生物的活动、耕作的难易都有很大关系。在土层中, 拥有更多的水稳性团粒结构, 能够协调土壤内部水分与空气比例, 形成固、液、气三相平衡的良好结构以满足作物生长的需要。因此, 团粒结构是土壤肥力的重要指标之一, 实践证明, 土壤的水稳性团粒结构与土壤的有机质含量密切相关, 依靠施用有机肥, 使土壤中积累大量的腐殖质, 能够改善土壤结构状况, 发展团粒结构。试验的结果表明, 在 0~10cm 的土层中, 机械化保护性耕作五种处理的土壤养分含量均高于传统耕作, 与传统耕作相比, 有机质高 2.50%~6.67%, 全氮高 7.29%~9.38%, 全磷高 1.43%~5.00%, 全钾高 2.19%~6.01%。在 10~30cm 的土层中, 机械化保护性耕作五种处理的土壤养分含量均高于传统耕作的, 与传统耕作相比, 有机质高 3.92%~8.82%, 全氮高 5.70%~8.69%, 全磷高 7.14%~9.18%, 全钾高 4.11%~5.48%。因此, 机械化保护性耕作在改善土壤结构方面优于传统耕作。

第六章 结论与建议

6.1 主要结论

1. 一年的试验结果表明,在冷凉风沙区实施春小麦机械化保护性耕作种植取得了初步成功。五种保护性耕作技术体系均达到了增产增收,且均具有良好的生态和社会效益。比较而言,以“前茬收获后留高茬(20~25cm)→免耕休闲→翌年春季播种前喷除草剂→免耕播种→收获”这样的免耕高茬体系(喷一次除草剂)综合效益最好。

2. 机械化保护性耕作处理可保蓄更多的土壤水分。比传统耕作处理多蓄水 7.33%~13.45%,也有利于土壤肥力提高,对培育春小麦壮苗、穗粒数、千粒重等奠定了基础,有利于增产,除深松耙地产量增加幅度较小(2.97%)外,其余四种处理春小麦产量比传统耕作提高 16.70%~19.55%。

3. 采用免(少)耕留茬覆盖的机械化保护性耕作体系,可有效地减少土壤风蚀,环境效益显著。比传统耕作减少 33.1%~48.3%的土壤风蚀,其中以免耕留高茬体系抑制风蚀的效果最好。

4. 机械化保护性耕作体系比传统耕作体系生产成本降低,产投比提高 20.33%~36.59%。有利于提高冷凉风沙区务农农民的收入。

6.2 建议

1. 由于试验年比较特殊,降水量高于往年的平均降水量,特别是春季的降水量多于往年同期的平均降水量,所以保护性耕作体系和传统耕作体系的产量都高于往年,获得了不错的收成。同时,由于春季降水多,有效的抑制了农田风蚀和沙尘暴,建议在该试验点进行连续多年的试验,进一步检验试验结果。

2. 五种保护性耕作体系中,深松耙地体系效果最不显著。增加了作业次数和作业成本,产量增加有限,产出投入比较低,抑制扬沙的作用也低于其他几种保护性耕作处理,应进行深松持续效应和深松间隔年限的试验研究。

3. 对机械化保护性耕作地块喷施除草剂以控制杂草的生长,虽然取得一定的效果,但是对喷施的时间、用量、次数还有待进一步试验,以达到降低生产成本、减少杂草危害的效果。作物没有田间管理这项作业,各种处理在一茬作物后,田间杂草都比较多,在今后进一步的试验中,建议加入田间管理这一作业项目进行考查。

4. 机械化保护性耕作体系的播种质量、出苗率、公顷穗数等差于传统耕作处理,主要原因是地表处理与免耕施肥播种机的性能所致,在进一步的试验研究中可考虑增加播前地表处理作业,提高免耕施肥播种机性能,以充分发挥保护性耕作的效益。

参考文献

- [1] 西北农业大学, 旱农学, 北京: 农业出版社, 1991
- [2] Muhter H.A , An economic comparison of conventional and conservation tillage systems:[A ph.D Dissertation], Michigan State University, 1982. 14-16
- [3] Shapoor Powshan, Alternative tillage systems for corn production in Micigan,[A ph.D Dissertation], Michigan State University ,1986 , 1-2
- [4] Mosunto „Conservation tillage seminar, November 1981
- [5] E.B Robert, 余汉章译, 玉米地传统耕作和保护性耕地多年平均流失量, 中国水土保持, 1985 (7): 55-61
- [6] M.J Kirkby&R.P.C.Morgan, Soil ersion, John wiley&Sons Ltd, 1981
- [7] 高克昌, 旱地玉米(高粱)整秸秆覆盖免耕试验, 山西农业科学, 1992 (12): 4-6
- [8] 山西农业科学院旱作农业耕作栽培体系及增产机理课题组, 旱地玉米(高粱)少免耕整秸秆覆盖节水增产技术, 山西农业科学, 1991 (4): 1-4
- [9] D.N.Sharma&M.L.Jain, Evaluation of no-tillage and conventional tillage systems , AMA, 1984(3): 65-70
- [10] 罗守番等, 免耕秸秆覆盖对玉米根系的影响。山西农业科学, 1993, (1) 99.1-7
- [11]高焕文.机械化保护性耕作研究, 山西农业科学, 1996 (7): 11-14
- [12]丰宁县气象局.丰宁县气象资料
- [13]戚英.保护性耕作防治土壤风蚀的试验研究[学位论文], 中国农业大学, 2002, 6
- [14]戚英, 高焕文, 周建忠. 保护性耕作防治土壤风蚀的试验研究. 农业工程学报 2003, 19 (2): 56-60
- [15]John Leys &David Heinjus. Simulated Wind Erosion In The South Australian Murray Mallee. National soil conservation, 1991
- [16]Keith E.Saxton. Wind Erosion Air Quality Project. USDA, Agriculture Research Service Pullman, WA 99164-6120. 1995,2
- [17]D. W. Suen, 郭风山等译, 土壤、水与农作物产量关系, 河北人民出版社, 1984. 6, 22-31
- [18]高惠民主编, 农业土壤管理, 北京, 中国农业科技出版社, 1988, 12: 172
- [19]D. 希勒尔著, 尉庆丰, 荆家海等译, 土壤物理学概论, 西安, 陕西人民教育出版社, 1988. 2: 124~126
- [20]Tanner. CB and Mamaril. CP, Pastrue soil compaction by animal traffic. Agron. J, 1959(51):329~331
- [21]Soane. B. D, Studies on some soil physical properties in relation to cultivation and traffic in soil physical conditions and crop production, 1975:249~260
- [22]Davies, D. B ,Relative effects of tractor weight and wheel slip in causing soil compaction , J. Soil Sci, 1973(24):399~408
- [23]Wittmus, H. Olson, Energy requirements for conventional versus minimum tilliage, J. Soil Water Conserv, 1975(30):72~75

- [24] Lewis, W.M, No-tillage system in conservation tillage, 1973:182~187
- [25] Mcgregor, K.C and G.E.Gurley, Erosion control with no-tillage cropping practices. Trans of ASAE, 1975 (18):918~920
- [26] 王孟. 王坚, 土壤物理学, 北京农业大学出版社, 1993. 10, 第一版: 198~204
- [27] 张怀福, 保持土壤肥力和清洁是农业可持续发展的必然选择, 兰州科技情报 2001(6):41-42
- [28] 山仑, 郭礼昆, 逆境成苗生态生理研究(1)春播谷类作物成苗期间的抗旱性及其需水条件, 作物学报, 1984(4): 258-263
- [29] 苏少泉, 杂草防治的发展趋向, 世界农业, 1996(7):35-36
- [30] 代可方, 王金容, 稻田杂草的防治探讨, 植物医生 1996(2):12-14
- [31] 牛巧鱼, 保护性耕作制中对杂草的防治, 中国棉花, 2001(3):22-25
- [32] 洪素娣. 张国华. 陈秀兰. 马利民, 农田杂草防治途径及方法, 江苏农机与农艺, 1999(6): 29-31
- [33]. 西北农业大学, 早农学, 北京. 农业出版社, 1991: 213
- [34]. 江苏农学院主编, 《植物生理学》, 北京, 农业出版社, 1986. 5, 98-100
- [35]. Philip, J.R. Plant, Water relation in some physics aspects. Ann. Rev. Plant physiol, 1996(17):245-268D. 希勒二著, 尉庆丰, 荆家海等译, 《土壤物理学概论》, 西安, 陕西人民教育出版社
- [36] 李增佳, 小麦/玉米间套作高产复合群体结构特征与功能研究, 博士论文, 中国农业大学, 1996
- [37] 刘敏浩主编, 《耕作学》, 北京, 中国农业大学出版社, 1996. 11
- [38] 梁欣荣, 沈能展, 作物的光合潜力估算, 东北农学院学报, 1980. (2)
- [39] 牛大元, 作物最大生产力, 自然资源, 1980(3)
- [40] 王宏广, 中国农业问题、潜力、道路、效益, 农业出版社, 1993
- [41] 小麦灌浆期生理特性和土壤水分条件对灌浆影响的研究, 植物生理学通讯 1980(3): 41-46
- [42] 刘文兆等, 作物产量与好水量关系的田间研究, 西南农业大学学报, 1989(增刊)
- [43] 梁淑文等, 抽穗后土壤供水条件对小麦感物质积累和运输的影响, 植物生理学报, 1964
- [44] 刘京会, 高新法, 孟立君. 河北坝上地区土地荒漠化现状及生物对策研究[J]. 河北师范大学学报, 2001, 25(3): 407-412.
- [45] 蔡运龙. 我国经济快速发展中的耕地问题[A]. 国家土地管理局科技宣教司等. 土地用途管制与耕地保护[C]. 北京:北京大学出版社, 1997. 1~12.
- [46] 中国 21 世纪议程:中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1994. 120.
- [47] Brown L.R. Who Will Feed China ?Wake - Up Call for Small Planet [M]. The World Watch Institute. New York :W W Norton and Company ,1995.

- [48] 胡红帆. 联合国粮农组织粮食安全特殊计划[J]. 世界农业, 2000, (2): 3~5.
- [49] 中国土地资源生产能力及人口承载量研究课题组. 中国土地资源生产能力及人口承载量研究(概要) [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1992. 15, 20.
- [50] 杜受祜, 等. 中国粮食问题: 现实分析与评价[J]. 中国农村观察, 1996, (1): 22~26.
- [51] 陈百明, 陈安宁. 中国农业资源现状与近期潜力评估[J]. 资源科学, 2000, 22(2): 1~7.
- [52] 封志明. 耕地与粮食安全战略: 藏粮于土, 提高中国土地资源的综合生产能力[J]. 地理学与国土研究, 2000, 16(3): 1~5.
- [53] 张凤荣, 等. 中国耕地资源数量与质量变化分析[J]. 资源科学, 1998, 20(5): 32~39.
- [54] 黄不凡. 中国农业发展强盛趋势与评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 53~55.

致 谢

衷心感谢导师李问盈教授！课题的选题和研究工作的每一步进展都包含着李老师的大量心血。在课题研究和论文撰写的过程中，李老师提出了大量的无微不至的、宝贵的建设性意见。李老师敏锐的洞察力、科学的研究方法和丰富的经验使我受益匪浅；在学术上对我严格要求，悉心指导，使我的学业得以完成；在学风上严谨求实的态度，脚踏实地的工作作风，让我受益终身；对我无私的关怀，不诤的教导让我深深感动；我的每一点进步都包含着李老师的心血，师恩如海，终身不忘！

衷心感谢毛宁老师，在课题的研究过程始终都给予我慷慨无私的帮助。他不顾试验区恶劣的自然和气候条件，在田间试验的第一线给我悉心的指导和帮助，在外出差期间，给我生活无微不至的关怀，使我能顺利的完成课题。

在此还要感谢高焕文教授、李洪文教授、王世学副教授、王晓燕副教授以及王树东等各位老师，在课题的选题和实施过程中给予的指导、大力支持和帮助；感谢臧英博士、周建忠博士、荣娇凤博士、刘立晶博士在试验过程中给予的无私帮助；感谢丰宁县农业局对本论文的野外工作提供的许多便利。

本研究参阅大量的文献资料，在此感谢文献资料的作者。参考文献目录中难免有遗漏和笔误，欢迎指正。

作者简介

作者：李昱

性别：男

出生日期：77.5

籍贯：湖南郴州

学历：硕士

毕业院校：中国农业大学

在读期间的论文：

李昱, 李问盈. 冷凉风沙地区机械化保护性耕作体系试验研究 中国农业大学学报 已收录