

毛乌素沙地农业生态系统优化模式研究

胡兵辉¹, 袁 泉¹, 海江波², 廖允成^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 在分析毛乌素沙地环境背景与系统结构缺陷和功能缺陷的基础上, 按照沙地农业生态系统模式优化必须从产业结构调整出发进行系统功能整合的思路, 以沙地生态恢复、生态工程、资源高效利用及农业产业互补理论为指导, 提出毛乌素沙地农业生态系统功能的有效化, 必须协调处理好系统内的农业与畜牧业、农业与林业、农业与能源开发工业等的关系, 构建防护型生态结构、节水型种植结构、稳定型畜牧结构和效益型农业产业结构为中心内容的沙地脆弱性农业生态系统优化模式体系。并指出注重系统模式之间互补、协调与整合尤为重要。

关键词: 毛乌素沙地; 系统缺陷; 产业优化模式; 农业生态系统

中图分类号: Q181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)01-0212-07

位于我国北方农牧交错带的毛乌素沙地, 是我国重要的生态屏障区, 生态环境脆弱^[1~3]。由于处在森林—草原—荒漠的“生态应力带”上^[4], 加上植被覆盖度低、土壤组成物质疏松以及易受人为干扰等因素影响, 使得毛乌素沙地具有典型的生态脆弱性, 系统的敏感性高、稳定性差。人类不合理的生产经营活动极易造成该区生态环境的迅速恶化^[5,6], 毛乌素沙地农业生态系统因此成为学术界讨论和研究的热点区域。同时, 沙地系统稳定机理复杂、人工调控难度大也成为毛乌素沙地农业生态系统学术研究和生产实践中的基本共识。

1 毛乌素沙地环境背景

毛乌素沙地(图 1)地处鄂尔多斯高原东南部和陕北黄土高原以北的乌审洼地^[1,7~9], 在北纬 37°30′~39°20′、东经 107°20′~111°30′之间, 海拔 1 000~1 600 m, 整个沙地涉及内蒙古鄂尔多斯市的伊金霍洛、乌审、鄂托克、杭锦、特拉特、鄂托克前旗等 6 旗, 陕西榆林市北部的神木、府谷、榆林、横山、靖边、定边 6 县和佳县西北以及宁夏回族自治区的盐池、灵武、陶乐, 共计 16 个县(旗)的 151 个乡镇, 土地总面积约 4 万 km², 是我国 4 大沙地之一。由于地处中纬度干旱半干旱过渡气候区, 具有强烈的内陆性气候特征^[6,7,9], 年均温度 6.0~8.5℃, 年降水量在东南部可达 220~440 mm, 湿润指数 0.12~0.23, 地表水和地下水较为丰富, 正常条件下, 沙

地植物(作物)生长良好, 沙地的中、东南部有不少湖盆滩地和河谷阶地, 是沙地重要的农牧业基地。该区农业水资源虽较相邻的库布齐、腾格尔沙漠为好, 却不及浑善达克和科尔沁沙地, 但因沙地纬度偏南, 热量条件却明显优于上述地区, 气温日较差和年较差均较大, 年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 2 900 ~ 3 300℃^[2,6,10], 且水热资源匹配较好, 具有一定的农牧业发展条件。

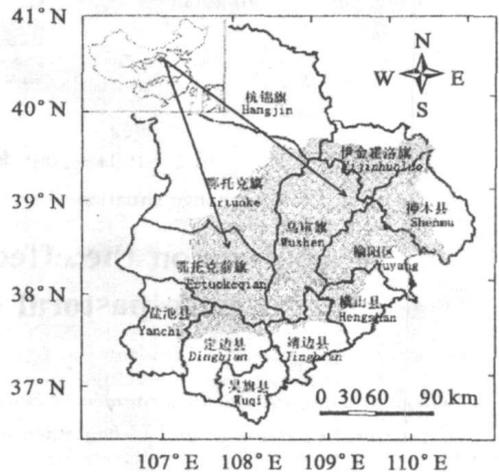


图 1 毛乌素沙地地理位置

Fig. 1 The geographical location of Mu Us sandland

然而, 由于沙地和周边环境的逐年恶化, 使毛乌素沙地与库布齐、腾格尔沙漠连为一体, 并成为我国北方农牧交错带生态十分脆弱区和我国华北地区重

收稿日期: 2008-03-12

基金项目: 高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(706054); 陕西省自然科学基金项目(2007C1, 18)

作者简介: 胡兵辉(1979—), 男, 陕西乾县人, 在读博士, 主要从事沙地资源与环境生态方面的研究工作。E-mail: hubinghui1980@126.com。

通讯作者: 廖允成(1969—), 男, 安徽六安人, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区农作制度和生态学方面的教学与研究工作。E-mail: yunchengliao@163.com。

要沙尘发源地,直接威胁着陕、蒙、宁毗连的能源化工基地的发展和沙地周边地区农牧业的持续生产。

2 毛乌素沙地农业生态系统缺陷

2.1 系统缺陷的内部特征

毛乌素沙地农业生态系统是由农地、草地、林地组成的复合型生态经济系统^[6],长期以来,由于受人口增长与不合理的生产经营活动的影响,农林牧

结构不合理现象普遍,使原来农林牧之间的资源互补优势潜力不仅未能发挥出应有的效应,而且系统缺陷明显(表 1)。系统的内部结构缺陷决定了系统的功能缺陷,从而给系统的稳健发展造成障碍。毛乌素沙地农业生态系统缺陷的内部特征也是系统外部特征的内部化,同时也是系统外部特征的内在表现。这直接造成该沙地农业生态系统的生态经济效应弱化,生态、经济与社会效益低下。

表 1 毛乌素沙地农业生态系统缺陷

Table 1 The analysis of disfigurements of agricultural ecosystem in Mu Us sandland

项目 Items	农地生态系统 Farmland ecosystem	草地生态系统 Grassland ecosystem	林地生态系统 Woodland system
结构缺陷 Disfigurement of structure	a) 种植业比例过大,人均耕地多,水浇地少,旱耕地多,土壤肥力低下。 A disproportionately large farming, much arable land per capita, less irrigated land than rain-fed land, low soil fertility.	a) 草地覆盖度低,甚至地表裸露,草地退化沙化,土地肥力低。 Low grass coverage, even bare land, grassland deterioration and desertification, low soil fertility.	a) 森林资源少,质量低。 Little forest resources with low quality.
	b) 广种薄收,盲目开垦,土地沙化,缺乏水利设施。 Large farming area with low yield, over reclamation, desertification, deficient irrigation facilities.	b) 过度放牧,优良牧草种类少,甚至消失。 Overgrazing, too few varieties of high quality grass.	b) 技术落后,盲目造林,树木适应性差,小老树多,林地植被结构单一。 Backward technology resulting in irrational afforestation, poor adaptability of trees, a single structure of the forest vegetation.
	c) 品种单调,技术落后。 Monotonous varieties, backward technology.	c) 畜种品种退化,疫病多。 Degradation of animal breeds, many diseases.	c) 林灌草缺乏结合,经济林和农田防护林少。 Poor combination of forest, bush and grassland, little cash forest and farmland protecting forest.
功能缺陷 Disfigurement of function	农地质量恶化,单产低,水资源浪费严重,农业比较效益低下,人口压力加大。 Deteriorated farmland with low yield, serious waste of water resources, low efficiency of agriculture, increasing population pressure.	草地质量恶化,生产力和承载力降低,退化沙化面积扩大,生态功能退化。 Deteriorated grassland with low productivity and capacity, increasing area of desertification, degradation of the ecological functions	林地水源涵养、防风固沙、防蚀减沙、水土保持等生态功能降低,社会效益和经济效益低。 Lowered biological function in forest water source catchments, wind prevention and sand fixing, erosion reducing and soil and water conservation, low social and economic benefits.

2.2 系统缺陷的外部特征

环境因子中的水分因子是直接关系毛乌素沙地脆弱性农业生态系统稳定的中心因子,降水稀少及季节分配与植物生长发育阶段需水吻合程度差,再加上经常化的低温特征与沙尘等强烈风蚀气候,很容易使系统全年较长时间处于逆境环境中,最终导致系统结构稳定性差,系统功能弱化,生产力低下,持续发展难度大^[5,6]。图 2 是毛乌素沙地近 40 a 的年平均降水量和年平均气温的距平百分率变化趋势线,可以明显看出气温逐渐走高,而降水量逐渐走低,气候干暖化趋势逐渐显现,这给沙漠化发生与发

展奠定了可靠的气候学基础。气候变化将使旱灾和暴雨等极端恶劣天气发生的次数进一步增加,对土壤地力很低的毛乌素沙地产生更大的影响,该区沙漠化也会进一步加剧,贫困和被迫迁徙现象也会增加,形成严重的恶性循环。从而导致毛乌素沙地农业生态系统内部缺陷的进一步加剧。

从系统内部看,土壤干燥贫瘠、地表组成物质疏松、生物组成简单,体现了毛乌素沙地农业生态系统自身结构的不稳定性;降水少、变率大,且风多风大,是系统缺陷的潜在外部环境;人类不合理的生产经营活动所带来的干扰是诱发和扩大系统缺陷的另一

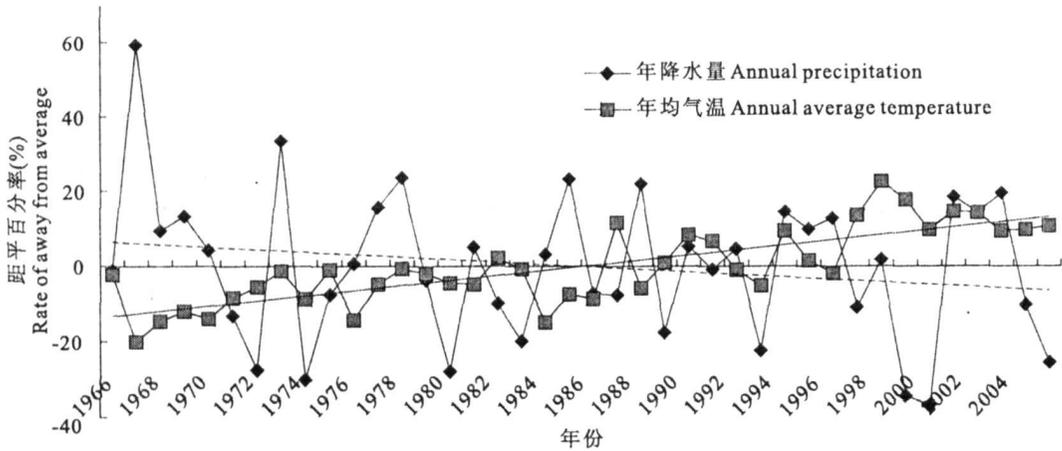


图 2 毛乌素沙地近 40 年平均降水量及气温的距平百分率变化趋势

Fig. 2 Variation trend of anomaly rate from average annual precipitation and temperature in Mu Us sandland during 1966~2005

主要原因。可以说,毛乌素沙地农业生态系统缺陷的主要表现形式是脆弱的生态系统在气候干旱和人类不合理的生产经营活动的胁迫下,导致了沙漠化的发生与发展。

3 毛乌素沙地农业生态系统优化模式体系构建

系统科学思想的一条基本原则就是结构决定功能,优化结构可以提高系统总体功能。从毛乌素沙地农业生态系统的结构缺陷入手,积极搭建以“生态保护与恢复模式、节水种植结构模式、节粮畜牧结构模式、产业耦合互补模式”为中心内容的脆弱性农业生态系统优化模式体系,保证系统功能放大和运行效率提高。

3.1 防护型生态结构

配置合理、结构完善的防护型生态结构体系是毛乌素沙地农业生态系统的重要组成部分,也是人工生态绿洲的基本特色之所在。众多学者做了大量研究,孔德珍认为^[11]毛乌素沙地在选择树种、草种、作物、果树、蔬菜品种和畜种时,必须遵守生物适应性原则;格日勒研究认为^[12]毛乌素沙地东北缘沙丘适合营造樟子松纯林或与油松混交的防护林体系;牛兰兰等研究表明^[8]毛乌素沙地乡土植物沙柳、沙蒿、杨柴、酸刺以及相邻地带引进的花棒等生活习性及生态效益良好,樟子松、油蒿亦有很大潜力挖掘;吴海东认为^[13]如果毛乌素沙地天然柳湾林面积能恢复到解放初的 66.67 万 hm^2 ,沙区治理至少就完成了 40%;封斌认为^[14]榆林风沙区农田防护林体系降低风速和调节农田小气候的作用显著,能有效促进农业高产稳产,并提出该区不同地类农田防护

林体系建设的 10 种最佳结构配置模式;张广才等^[15]在毛乌素沙地西南缘赵家塘研究表明林草复合措施对天然植被恢复的效果明显(表 2)。可见,防护型生态结构具体要以沙地适生林草为主体,实施防风固沙、水土保持、农田林网、草牧场防护、村镇绿化、护岸林等工程。同时,区别不同类型及立地条件选择树种,注重“片、带、网”结合与“乔、灌、草”结合。

毛乌素沙地典型区域的防护型生态结构构建的总体思路应是:(1)丘间营造片林与沙丘表面设置植物沙障及障内栽植固沙植物相结合固定流沙。同时,加强对固定、半固定沙丘的封育,使以流动沙丘为主的严重沙漠化土地处于各种绿色屏障的分割包围之中。(2)河谷、滩地草场、农田应营造杨树为主的带状防护林网,并与边缘固定、半固定沙丘封育及草灌结合固定流沙等措施共同组成农田生态防护体系。(3)在沙漠化较为严重的地段应以灌草固沙为主,适当引种樟子松,在沙质耕地及未受风蚀的农田应营造杨树与沙柳结合的生态防护林体系。在毛乌素沙地自然条件下选择乔灌木及牧草品种时,可采用小叶杨、合作杨、旱柳、沙棘、锦鸡儿、拧条、紫穗槐、花棒、沙打旺、草木樨、苜蓿等^[16]。仅 1999 年底,榆林地区在陕蒙边境、长城沿线、灵榆公路、环山林带 4 条绿色的大型防风固沙林带和沙漠腹地营造的成片林、林带、林网,使整个沙区变成带、片、网相结合的生态防护林体系,有效地遏制了流沙南移^[12]。不难看出,通过恢复和构建天然沙漠植被、人工防风固沙林、农田防护林、生态农业、绿色通道、盐渍化生物防护系统等,可形成一个良好的生态防护屏障,确保毛乌素沙地农业生态系统安全。

表2 毛乌素沙地西南缘林草复合措施对天然植被的恢复效果
Table 2 The renewing effect on natural vegetation under the measure of forest and grass compound in southwest of Mu Us sandland

群落类型 Types of community	物种丰度(种/m ²) Abundance of species	草群高度(cm) Height of community	植被盖度(%) Coverage of vegetation	干物质产量(g/m ²) Yield of dry matter
赖草+苦豆子群落 <i>Elymus racemosus</i> Lam. and <i>Sophora alopecuroides</i> L. community	7~12	30~55	30~50	241.7
白草+蒙山莴苣群落 <i>Pennisetum flaccidum</i> Griseb. and <i>Lactuca tatarica</i> community	13~19	20~35	30~65	313.2
牛枝子+小画眉草群落 <i>Lespedeza davurica</i> Schindl. and <i>Er-agrostis poaeoides</i> community	5~10	10~27	15~30	167.5
蒿类+杂类草群落 <i>Artemisia ordosica</i> Krasch. and weed community	7~15	40~128	20~45	217.3
自然群落 Comparison	3~6	4~22.6	15~20	107.3

3.2 节水型种植结构

以粮食安全为核心,以作物需水量为基础,充分利用现代节水农业技术,构建毛乌素沙地节水型种植结构体系,并依据社会、经济需要科学布局,最大限度地提高沙地作物水分供需的时空协调度,实现沙地农田水分生产效率最大化。

沙地节水型种植结构的技术内容包括:(1)耗水量低的农作物种类及品种的筛选。根据当地的降水分布、干旱发生规律和作物水分特性,因地制宜压缩需水量大、易旱的作物,扩大雨热同步的秋熟作物,选择耗水少且水分利用效率高的作物。通过优化种植制度,调整作物布局,选用抗旱、节水、高产品种一般可较原主栽品种增产15%~30%,水分利用效率提高1.5~2.55 kg/(mm·hm²)。②沙地保护性耕作技术的推广与应用。保护性耕作技术是对农田实行免耕、少耕,尽可能减少土壤耕作,并用作物秸秆、残茬覆盖地表,减少土壤风蚀、水蚀,提高土壤肥力和抗旱能力的技术体系^[17]。在潜在沙漠化地区的农耕地实施高留茬少耕、免耕,或增加种植冬季形成覆盖的越冬性作物或牧草,能显著降低冬季土壤风蚀沙化。目前,陕北长城沿线毛乌素风沙区已经形成了一年一熟冬小麦保护性耕作技术模式和一年一熟春玉米(玉米、葵花轮作)保护性耕作技术模式^[18]。2004年,刘建忠等^[19]在毛乌素沙区短期研究表明,免耕种植虽减产1.66%,但土壤抗风蚀能力加强,节本增收效益明显。2002年以来,榆林定边、神木、榆阳、横山、靖边、绥德等六县区先后列入农业部保护性耕作项目区,累计发展保护性耕作机械5000余台,实施面积3万多hm²,取得了明显的成效^[20]。实践表明,保护性耕作具有较明显的生

态、社会和经济效益,能够减少扬尘,保护环境;减少侵蚀,保护耕地;蓄水保墒,培肥地力;节本增效,增加农民收入,应进一步加大保护性耕作的推广力度。(3)沙地节水种植技术的集成与应用。沙地节水关键技术有沙地输水配水技术、灌溉节水技术、管理节水技术、集雨补灌等高新技术。具体可因地制宜,进行组装配套,形成区域适应性沙地节水种植技术体系。

在毛乌素沙地结合工程技术、农艺技术和管理工作,因地制宜进行有机组合,形成沙地高效农业节水综合技术体系及节水型种植模式,是干旱风沙区节水农业今后发展的方向。值得一提的是,通过实施科学合理的沙地节水型种植结构技术,2007年榆林市靖边县黄家峁村地膜玉米示范田均产达到18514.3 kg/hm²、东胜村均产17976 kg/hm²,榆阳区海流滩村均产17031 kg/hm²,实现了百亩以上集中连片种植亩产突破吨粮的全国最高记录;靖边县专用马铃薯布尔班克均产达到71527.5 kg/hm²,不仅创该品种全国最高单产记录,还超过世界马铃薯生产先进国家平均单产水平^[20]。

3.3 稳定型畜牧结构

毛乌素沙地稳定型畜牧生产结构,要以节粮型畜牧结构为中心,以提高沙地农业生态系统次级生产力水平为目标,依据畜牧业布局特征,(1)在以牧为主的沙地中、北部典型区域,构建以草业、奶业为主体的草种畜种配套、高效种养畜牧结构。严格保护基本草地,不得擅自征收、征用、占用或改变其用途,适当发展牧草产业化开发。实行以草定畜、草畜平衡制度,严格控制载畜量,鼓励牧民改良牲畜品种。根据退耕还林(草)方针,推行草原划区轮牧、

季节性休牧和围封禁牧制度,或推广围栏放牧,实行科学舍饲或半舍饲养殖。对放牧快出栏的羊只提前 1~2 月进行舍饲养殖,这种养殖方式出栏的胴体羊,饲养周期短,饲料消耗少,商品率高,品质好,市场竞争力强。形成以舍饲、半舍饲养殖为主体产业,农业为辅助产业的种养结合的产业体系。这已成为毛乌素沙地中、北部区域推行禁牧舍饲、调整沙区产业结构、退耕还林还草的重要技术保障,取得了显著效果。(2) 在以农为主的南部典型区域,构建以饲料粮、肉类生产为主体的节粮型畜牧结构。要继续深入实施“封沙禁牧、扩大种草、秸秆利用、舍饲育肥”和“建设一小块、保护一大片”的配套方针,大力推广秸秆青贮、氨化、碱化等技术,进行饲草料加工,同时结合农副产品加工后的剩余物配制混合饲料或颗粒饲料,可使饲草有效利用率提高 60%~80%。实行“为牧而种”的反弹琵琶式种植业结构调整思路,抓住退耕还林还草大好时机,大力发展饲草料作物,发展草库伦,建设高产优质的饲草料基地。2004 年毛乌素沙地东南缘的榆阳区畜牧业产值达 2.61 亿元,占农业总产值的 55%,农民人均纯收入 2 088 元,其中 40% 来自畜牧业收入,农民脱贫致富步伐明显加快,畜牧业经济发展势头强劲^[2]。发展舍饲畜牧业的同时,做好有机肥归田,可形成良性循环、健康发展的沙地生态循环农业模式。

毛乌素沙地是种植业和畜牧业结合交叉发展的区域,农牧结合是本地区发展畜牧业的优势。稳定型生态畜牧结构的发展应将草食牧业与农副牧业相结合,使放牧与舍饲相结合,不但可以解决该区的草地退化、沙化问题,且可以自身为纽带通过系统间、区域间的优势互补、有机耦合,把农林牧各系统高效连接起来,提高区域资源的综合利用效率和经济效益。

3.4 效益型农业产业结构

沙地效益型农业产业结构构建应以土地的高效开发利用为前提,以资源保护与合理开发为原则,突出资源特色 and 市场需求,以经济高效和生态安全为目标,把种植业、畜牧业、食品加工业及能矿业结合起来,推动农业产业结构调整 and 产业链建设;应侧重培育特色经济增长点,开辟增加农民收入的新途径;应充分利用沙区的有利条件,通过实施包括生态草业、生态药业、生态特色林果业、生态旅游业为主要内容的生态产业,实现农业生态系统稳定 and 经济高效,建立起适合毛乌素沙地生态经济特征的农业产业结构体系。

毛乌素沙地效益型农业产业结构构建内容:(1)

畜牧、养殖与肉食品加工。毛乌素沙地独特的气候特征,尤其适宜养殖业的发展。在榆阳区温棚养猪、设施养羊等已成规模,并成为农民增收的支柱产业。同时在牧区发展设施、半设施畜牧业,如实行圈养羊,可使羊平均胴体重达 23 kg/只,有的高达 40 kg/只,高于自然放养 8~10 kg/只,每只羊可增收 120~150 元^[21];大力兴办肉制品和奶制品加工业,延伸产业链条,增加农产品附加值。(2) 杂交玉米制种业。榆林是陕西省重要的杂交玉米制种基地,制种隔离、排灌条件、产量及种子质量等方面具有得天独厚的优势,国家于 2002 年 12 月把榆林列入国家级玉米制种基地。仅 2002 年榆林市杂交玉米种子生产面积达到 8 000 hm²,年产良种 4 万多吨,占陕西省的 80% 以上,远销全国 20 多个省(区),效益可观,应加大发展杂交玉米制种,增加农民收入。(3) 绿色蔬菜、瓜果生产。毛乌素沙地是绿色、无公害食品生产的洁净地域,在工矿及城镇附近地区,建立绿色植被保护下的沙区地膜瓜果、大棚蔬菜等绿色产业生产基地,经济、生态效益突出。(4) 小杂粮及马铃薯产业。杂粮、杂豆、马铃薯等均属我国传统的保健品原料作物,随着人民生活水平的提高和膳食结构的改善,市场对小杂粮需求增加,价格看好。毛乌素沙地东南缘是小杂粮的优生区,应抓住机遇,增加杂粮、杂豆、薯类作物面积,改良品种,改进栽培技术,提高品质,形成适度规模的名、优、特小杂粮及马铃薯产业^[22]。(5) 特色动植物资源开发及加工。毛乌素沙区动植物资源较为丰富,不仅有特色的粮食、油料作物及品质优良的各种家畜家禽,还有不少珍贵的药用植物如甘草、麻黄、黄芪、当归等,更有如沙棘、肉苁蓉等野生植物资源有待开发。如内蒙古鄂尔多斯近年涌现出一批以沙柳为原料的绿色纸品加工企业,经不断发展壮大,已经成为当地闻名的利税大户。(6) 沙区生态旅游业,主要产品以民族风情、沙漠生态和草原风光为主。鄂尔多斯地区作为元朝的皇室封地,使鄂尔多斯的歌舞文化、服饰文化、饮食文化具有天朝宫廷文化的独特色彩。同时,可开发“田园体验劳作”、“农舍体验民俗”等游客喜闻乐见的项 目^[23]。(7) 中药材繁殖与栽培。根据中药材市场前景和广大农牧民的愿望,引进并掌握麻黄、黄芪繁殖育苗及栽培技术,推动人工栽培,过去乌审旗的图克就有引种黄芪的成功经验^[24]。目前,鄂尔多斯毛乌素沙地已建成部分人造板厂、麻黄素厂等企业,年产值达 3.5 亿元,实现年创利润 3 000 万元,农牧民人均增收 350 元^[25]。

值得强调的是,农业生态系统是一个“生态一

济-社会”复合生态系统^[26]。单一系统模式固然重要,但模式之间的互补、协调、整合会使系统结构优化、功能更加突出(图 3)。如在毛乌素沙地,目前已

经形成了“草业冠、等高田、树封沟”、“作物突破、草畜跟进”、“小生物圈”、“多元系统”、“生态网”、“三圈”等复合型生态经济治理模式。

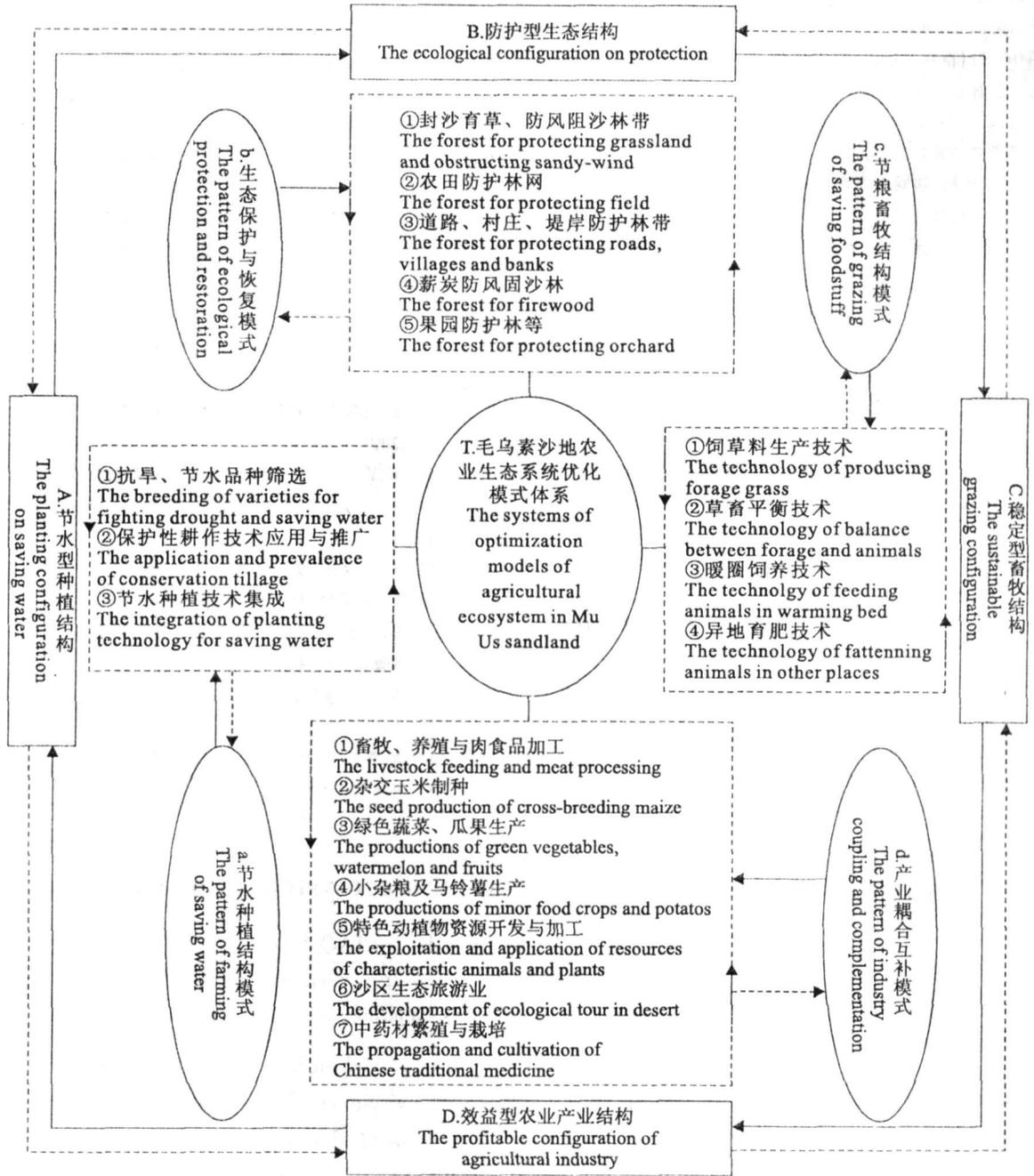


图 3 毛乌素沙地农业生态系统优化模式体系

Fig. 3 The model system of optimization of agricultural ecosystem in Mu Us sandland

4 讨论

毛乌素沙地农业生态系统具有明显的生态过渡性,农牧业生产又具有显著的农牧交错地带性,故系统模式的改良优化必须着眼农业生态系统功能的有效化,协调处理好沙地农业生态系统内的农业与畜牧业、农业与林业、农业与能源开发工业的关系,积

极搭建以防护型生态结构、节水型种植结构、稳定型畜牧结构和效益型农业产业结构为中心内容的脆弱性农业生态系统优化模式体系,具体应用要注重产业模式之间的互补、协调与整合。同时,农牧结合是毛乌素沙地农业生态系统的结构特征,农牧矛盾高度紧张是毛乌素沙地农业生态系统的功能特征,构建稳定、安全的农牧系统耦合结构是实现毛乌素沙

地脆弱性农业生态系统稳健发展的核心问题。

参考文献:

- [1] 朱震达, 刘 恕, 吴 正, 等. 中国沙漠概论[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 63—66.
- [2] 高明华. 突出畜牧业地位, 推进产业化开发—陕西省榆林市榆阳区开创畜牧业崭新局面[J]. 新西部, 2005, 9: 18—19.
- [3] 徐小玲, 延军平. 毛乌素沙地的脆弱性与可持续发展研究[J]. 干旱区研究, 2004, 21(3): 286—289.
- [4] 刘燕华, 李秀彬. 脆弱生态环境与可持续发展[M]. 北京: 商务印书馆, 2001: 21—31.
- [5] 廖允成, 付增光, 贾志宽. 中国北方农牧交错带土地沙漠化成因与防治技术[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 95—98.
- [6] 亢福仁, 王鹏科, 王立祥. 毛乌素沙地农业生态系统分析及评价[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(4): 160—163.
- [7] 北京大学地理系. 毛乌素沙区自然条件及其改良利用[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 1—5.
- [8] 牛兰兰, 张天勇, 丁国栋. 毛乌素沙地生态修复现状问题与对策[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 239—243.
- [9] 姜琦刚, 高会军, 霍晓斌, 等. 中国北方沙漠荒漠化遥感调查与研究[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 57—61.
- [10] 亢福仁. 毛乌素沙区自然资源优势及开发利用途径[J]. 榆林学院学报, 2006, 16(2): 27—30.
- [11] 孔德珍, 王庆锁, 阿拉腾宝. 毛乌素沙地示范区的草地建设[J]. 中国草地, 1996, (4): 8—11.
- [12] 格日勒, 斯琴毕力格, 金荣. 毛乌素沙地防护林结构的研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 44—46.
- [13] 吴海东. 建立毛乌素沙区天然柳湾林自然保护区[J]. 内蒙古林业科技, 2004, 2: 42—44.
- [14] 封 斌, 高保山, 麻保林, 等. 陕北榆林风沙区农田防护林结构配置与效益研究[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(1): 118—124.
- [15] 张广才, 于卫平, 刘伟泽, 等. 毛乌素沙地不同治理措施植被恢复效果分析[J]. 林业科学研究, 2004, 17(增刊): 53—57.
- [16] 韩恩贤. 毛乌素沙地治理规划设计方法与注意问题[J]. 陕西林业科技, 2003, 3: 35—37.
- [17] 高焕文. 保护性耕作技术与机具[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 2—10.
- [18] 农业部保护性耕作研究中心. 陕西省保护性耕作技术模式[EB/OL]. (2006—5—15)[2008—3—6]http://www.cn-cet.net/tgshownews.asp?id=109.
- [19] 刘建忠, 师江澜, 雷金银, 等. 毛乌素沙地南缘不同免耕农田土壤理化性质及玉米产量差异分析[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 29—34.
- [20] 榆林市农业局. 榆林市玉米马铃薯单产创纪录[EB/OL]. [2008—03—06]http://www.ylny.gov.cn/.
- [21] 高国雄. 毛乌素榆林沙区沙产业发展战略研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 143—145.
- [22] 尚爱军, 白小燕, 孙兆敏, 等. 陕北荒漠化地区农业资源优势与特色产业建设[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 138—141.
- [23] 赵晓磊, 马 礼. 农牧交错带农业产业结构的灰色关联度分析[J]. 农业系统科学与综合研究, 2006, 22(4): 252—255.
- [24] 王生杰, 周子涛, 云林强. 发展沙产业治理毛乌素[J]. 内蒙古林业调查设计, 2007, 30(2): 32—34.
- [25] 文 伟. 毛乌素沙地三分之一面积的到治理[J]. 草业学报, 2004, 7(21): 74.
- [26] 杨世琦, 高旺盛. 农业生态系统协调度测度理论与实证研究[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(2): 7—12.

Research on optimization models of agricultural ecosystem in Mu Us sandland

HU Bing-hui¹, YUAN Quan¹, HAI Jiang-bo², LIAO Yun-cheng^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaaxi 712100, China;

2. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaaxi 712100, China)

Abstract: Optimization models of agricultural ecosystem have played an important role in the smooth running of fragile agricultural ecosystem. Based on an analysis of the environmental background and systematic limitation of Mu Us sandland in the northern part of China, a new point of view was proposed for the model optimization of agricultural ecosystem on sandland. Namely, the industrial structure has to be modified so as to make a functional integration of different parts of the whole system. According to the theories of ecological recovery, ecological engineering, the high efficient utilization of resources and complementary industry, and to design the ecology structure of defense, the planting structure of saving water, the pasturage structure of stabilization and industrial structure of benefit when to pay attention to functional availability of agricultural ecosystem, which is feasible on condition that reasonably dealing with the relationships of agriculture and stockbreeding, forestry, energy-industry, and so on. It is important that ecosystem models can be harmonized, integrated and coupled efficiently. We are looking forward to giving academic gist and technical support at model optimization for similar agricultural ecosystem in the adversity.

Key words: Mu Us sandland; systematic limitation; optimization model; agricultural ecosystem