

国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室支持

2011 年度陕西省科学技术研究发展计划“青年科技新星”培育专项资助

砒砂岩与沙复配成土 稳定性及可持续利用研究

PISHAYAN YU SHA FUPEI CHENG TU WENDINGXING
JI KECHIXU LIYONG YANJIU

罗林涛 王欢元 著



黄河水利出版社

国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室支持
2011年度陕西省科学技术研究发展计划“青年科技新星”培育专项资助

砒砂岩与沙复配成土 稳定性及可持续利用研究

罗林涛 王欢元 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书在砒砂岩与沙复配成土技术研究的基础上,针对复配土稳定性和可持续利用开展了系统研究。其主要内容除研究背景和复配土研究进展外,还包括基本理论和方法、试验设计、土壤特性分析、水肥运移、水土资源匹配分析、生态环境修复分析等。通过研究揭示了砒砂岩与沙复配土的稳定性及可持续生产能力,为我国毛乌素沙地治理、开发和利用提供了有力的理论基础及技术支撑。

本书可作为高等院校和科研院所土地整治相关专业以及工程技术人员的参考资料,也可为土地资源利用管理部门提供技术参考和指导。

图书在版编目(CIP)数据

砒砂岩与沙复配成土稳定性及可持续利用研究/罗林涛,王欢元著. —郑州:黄河水利出版社,2015. 7
ISBN 978 - 7 - 5509 - 1040 - 9

I. ①砒… II. ①罗… ②王… III. ①砂岩 - 应用 - 复土造田 - 研究 IV. ①P588. 21②TD88

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 047090 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:12

字数:277 千字

版次:2015 年 7 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2015 年 7 月第 1 次印刷

定价:35.00 元

前言

随着我国人口的增长以及经济高速发展对建设用地需求的不断加大,耕地资源日益退化和减少,耕地保护和经济发展的冲突逐日凸显。根据 2013 年国土资源公报数据显示,2010~2012 年三年内,全国因建设占用、灾毁、生态退耕等原因减少耕地面积 123.78 万 hm^2 ,通过土地整治、农业结构调整等增加耕地面积 101.4 万 hm^2 ,净减少耕地面积达到 22.38 万 hm^2 。因此,在保证经济发展的同时,保障我国 18 亿亩耕地红线不动摇是关乎国家生存发展的重大问题。

毛乌素沙地沙荒地面积巨大,且在北纬 40° 附近,具有丰富的光、热和水资源,适合作物生长,土地生产潜力巨大,是被国家列为重点治理的沙地之一。对毛乌素沙地进行整治利用,提高其耕地质量,实现土地的可持续利用对于解决区域经济发展与粮食生产间的矛盾具有重大意义。

砒砂岩和沙是毛乌素沙地的重要物质成分,前者裸露风化后遇风起尘、遇水流失,后者结构松散、漏水漏肥,二者为具有明显差异性、互补性特征的两类物质。陕西省土地工程建设集团韩霁昌研究员及其团队创新性地总结和提出了砒砂岩与沙复配成土固沙造田技术,研究发现砒砂岩与沙复配成土后具有良好的通透性和保水保肥能力,能满足作物生长发育的需求,并进行了一定规模的工程应用和示范,取得了显著的成效。然而作为一种新的合成“土壤”,其结构能否稳定发育?其后期利用是否具有可持续性?针对以上问题,作者及其团队在陕西省科学技术研究发展计划“青年科技新星”培育专项的资助下,利用国土资源部退化与未利用土地整治工程重点实验室平台,在韩霁昌研究员、解建仓教授指导下,在毛乌素沙地榆林野外观测站进行了连续 3 年多的大田试验和观测,对复配土的稳定性及可持续利用进行了深入系统的研究,调控合成土壤的质量,使其良性发展,促进土壤的可持续利用,为合成土壤的可持续利用奠定了基础。

研究主要取得了以下成果:①经对砒砂岩与沙复配土土壤特性研究,各项指标呈现出良性发展趋势。②经对试验大田区域内水资源的可持续利用性研究,区域水资源可以满足农业生产种植的用水需求,复配土节水效益显著,基于节水措施的区域水资源利用具有可持续性。③通过对大田土壤结皮、冻土层、粗糙度、积雪消融和风洞试验等研究,复配土对区域生态环境修复效应作用显著。通过这些研究揭示了砒砂岩与沙复配土的稳定性及可持续生产能力,为我国毛乌素沙地治理、开发和利用提供了有力的理论基础及技术支撑。

在以上试验研究成果的基础上,借鉴国内外相关理论和实践,编写了这本书。全书共分 9 章。其中,第 1 章、第 2 章主要阐述了砒砂岩的利用及已有研究基础,第 3 章详细介绍了复配土稳定性及可持续利用的基本理论和方法;第 4 章~第 7 章主要阐述了复配土

土壤特性、水肥管理和水资源可持续利用研究;第8章专题对复配土固沙效应开展了试验研究,为复配土在生态环境修复和环境可持续利用性提供了理论依据;第9章简要介绍了研究的工作历程。

在本书撰写过程中,作者吸收和借鉴了前人大量的既有成果,对于引用的资料,本书注明来源出处,但难免有所疏漏,在此谨请各位先学海涵和谅解。在研究期间,韩霁昌研究员,西安理工大学解建仓教授、罗纨教授,中国科学院地理科学与资源研究所刘彦随研究员对本研究在试验设计、技术路线和研究内容方面给予了悉心指导。杜宜春、王曙光、汪妮、范王涛、胡延涛、张扬、张海欧、胡一、赵彤、童伟、马增辉、张卫华、付佩、张瑞庆、张露、雷娜、程科等多位高级工程师、博士及研究人员、工程技术人员在试验研究和书稿整理等方面做了大量工作。同时,本书的研究和出版得到了陕西省科学技术研究发展计划“青年科技新星”培育专项(2011KJXX60)和陕西省土地工程建设集团的资助,在此一并致谢。

本书出版旨在与广大同仁和读者共享作者在该领域的研究成果及相关学术理念,殷切盼望能够集思广益,共同推动该领域的技术发展水平,服务于我国土地整治事业的发展。因此,本书作者的观点和相关成果仅是一家之言,也希望读者能够以包容的胸怀分享作者的研究成果。

由于本书著作时间仓促,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2015 年 1 月

目 录

前 言

第1章 背景	(1)
1.1 毛乌素沙地开发利用的背景与需求	(2)
1.1.1 毛乌素沙地开发利用的背景与优势	(2)
1.1.2 毛乌素沙地整治是土地开发利用的需求	(4)
1.2 毛乌素沙地综合整治现状分析和存在问题	(5)
1.2.1 毛乌素沙地开展土地综合整治的紧迫性与可行性分析	(6)
1.2.2 毛乌素沙地综合整治潜力分析	(6)
1.2.3 砒砂岩与沙复配土壤稳定性研究关键技术问题	(8)
1.3 研究区概况	(9)
1.3.1 区域范围	(9)
1.3.2 自然环境特征	(11)
1.3.3 社会经济特征	(12)
1.4 示范项目区概况	(14)
1.4.1 自然条件	(14)
1.4.2 社会经济条件	(15)
1.4.3 基础设施状况	(16)
1.4.4 土地利用现状	(17)
第2章 研究进展和基础	(18)
2.1 毛乌素沙地资源开发利用情况	(18)
2.2 沙地治理的国内外研究进展	(20)
2.2.1 国外研究进展	(20)
2.2.2 国内研究进展	(22)
2.3 砒砂岩区治理及土地利用	(25)
2.3.1 砒砂岩的治理现状	(25)
2.3.2 砒砂岩区土地利用的背景、现状与趋势	(32)
2.3.3 砒砂岩区土地利用目标定位与生态友好型土地利用战略转型	(35)
2.4 砒砂岩与沙复配成土研究进展	(37)
2.5 研究的主要内容	(39)
2.5.1 复配土土壤特性研究	(39)
2.5.2 复配土水肥耦合研究	(39)

2.5.3 水资源可持续利用研究	(39)
第3章 基本理论和方法	(41)
3.1 土壤成土机理	(41)
3.1.1 成土因素	(41)
3.1.2 成土过程	(44)
3.2 新生土壤培肥理论	(45)
3.2.1 土壤培肥原理	(45)
3.2.2 国内外土壤培肥技术研究进展	(46)
3.3 土壤质量评价理论	(49)
3.3.1 土壤质量的概念和内涵	(49)
3.3.2 土壤质量评价	(50)
3.4 田间水肥管理理论	(54)
3.4.1 水肥耦合效应概述	(54)
3.4.2 水肥耦合效应的理论依据	(55)
3.4.3 水肥耦合效应的研究进展	(55)
3.5 区域水资源管理理论	(57)
3.5.1 水资源可持续利用的理论基础	(57)
3.5.2 水资源优化配置原则	(58)
3.5.3 水资源优化配置方法	(59)
3.6 生态修复基础理论	(61)
3.6.1 生态修复的概念	(61)
3.6.2 生态修复基础理论	(61)
第4章 试验设计	(64)
4.1 研究目的	(64)
4.2 材料与方法	(64)
4.2.1 材料	(64)
4.2.2 技术路线	(69)
4.2.3 田间小区设计	(69)
4.2.4 试验管理	(71)
4.2.5 试验方法与内容	(71)
4.3 复配土水力学性质研究试验设计	(76)
4.4 复配土保水持水性研究试验设计	(76)
4.4.1 不同颗粒级配复配土保水持水性研究	(76)
4.4.2 确定颗粒级配复配土持水、保水性能的研究	(77)
4.5 复配土土壤结构变化研究试验设计	(79)
4.6 复配土水肥耦合研究试验设计	(80)
4.7 复配土固沙效应研究试验设计	(82)

第5章 砒砂岩与沙复配成土后土壤特性分析	(83)
5.1 复配土水力学性质研究	(83)
5.1.1 复配土的水分特征曲线	(83)
5.1.2 土壤传递函数预测复配土水力学性质的适用性研究	(84)
5.1.3 土壤传递函数在预测复配土水力学性质中的应用	(87)
5.2 复配土土壤结构变化研究	(88)
5.2.1 复配土机械组成(质地)的变化研究	(88)
5.2.2 复配土土壤孔隙度的变化研究	(89)
5.2.3 复配土水稳定性团聚体变化研究	(90)
5.3 复配土可持续性研究	(91)
5.3.1 复配土土壤肥力评价	(92)
5.3.2 复配土土壤环境质量评价	(95)
5.3.3 复配土作物种植适宜性研究	(100)
第6章 砒砂岩与沙复配土壤水肥运移	(101)
6.1 复配土储水量研究	(101)
6.2 复配土氮素运移研究	(103)
6.2.1 复配土壤剖面中铵态氮运移特征	(103)
6.2.2 复配土壤剖面中硝态氮运移特征	(103)
6.2.3 复配土壤剖面中无机氮的累积量分析	(105)
6.3 复配土水肥损失模型模拟	(106)
6.3.1 模型参数输入	(106)
6.3.2 模型校验	(107)
6.3.3 水分分析	(114)
6.3.4 氮素平衡分析	(115)
6.3.5 水肥损失分析	(116)
6.3.6 不同气象条件年份下水肥耦合研究	(118)
第7章 区域水资源匹配研究	(122)
7.1 水资源储量分析	(122)
7.1.1 水资源概况	(122)
7.1.2 荒漠化地区水资源状况	(123)
7.2 水资源可持续利用分析	(124)
7.2.1 作物需水量计算	(124)
7.2.2 灌溉模式与制度选择	(127)
7.2.3 水土资源供需平衡分析	(133)
7.3 砒砂岩与沙复配土节水效益分析	(139)
7.3.1 复配土节水及保水特性研究	(139)
7.3.2 试验田复配土节水及保水效果对比分析	(144)
7.4 不同措施灌溉制度水资源平衡分析	(144)

7.4.1	一般节水设备措施下灌溉制度	(144)
7.4.2	复配土措施下灌溉制度	(147)
7.4.3	复配土节水措施下灌溉制度	(148)
7.4.4	不同节水措施下水资源平衡分析对比	(149)
第8章	复配土固沙效应研究	(151)
8.1	毛乌素沙地生态环境问题	(151)
8.1.1	土地沙漠化问题严重	(151)
8.1.2	砒砂岩水土流失严重	(152)
8.2	固沙效应分析研究	(152)
8.2.1	复配土土壤结皮分析	(153)
8.2.2	复配土冻层深度分析	(153)
8.2.3	复配土地表粗糙度分析	(154)
8.2.4	复配土地表积雪消融分析	(155)
8.2.5	复配土风洞试验分析	(157)
8.2.6	复配土植被恢复分析	(159)
8.3	本章小结	(160)
第9章	研究历程	(161)
9.1	砒砂岩与沙复配土理化性质室内研究	(161)
9.2	砒砂岩与沙复配土试验田作物种植研究	(161)
9.2.1	富平基地试验田研究	(161)
9.2.2	榆林野外科学观测站试验田研究	(162)
9.3	大纪汗示范工程项目基本情况	(166)
第10章	结 论	(169)
参考文献		(172)

第1章 背景

我国是一个人多地少的国家,随着城市化进程和基础设施建设的加快,建设用地骤增,耕地数量锐减,人地矛盾日益加剧,坚守18亿亩耕地红线,提高耕地质量,改善土地生态环境,保障粮食安全已成为我们急需解决的重大问题。据国土资源部提供的资料显示:2010~2012年3年内,全国因建设占用、灾毁、生态退耕等原因减少耕地面积123.78万 hm^2 ,通过土地整治、农业结构调整等增加耕地面积101.4万 hm^2 ,净减少耕地面积达到22.38万 hm^2 。人均耕地面积约0.1 hm^2 ,不到世界平均水平的40%。特别是在生态脆弱区,自然灾害面积不断扩大,耕地资源减少更加严重。

同时,沙漠化土地作为我国耕地后备资源的主要来源之一,面积约26.14亿亩,但存在水资源短缺,生态环境脆弱等问题,长期以来无法得到高效利用。此外,分布于沙地中的砒砂岩水土流失严重,治理难度大,分布范围广,遍及陕、晋、蒙、宁、甘、新等多个省份和地区。作为我国四大沙区之一的毛乌素沙地,其本身存在着巨大的挖掘潜力;沙地境内,土地沙漠化和砒砂岩的水土流失,严重制约着该区域的可持续发展。

近几年,随着陕西省的经济持续发展,耕地后备资源严重短缺,关中地区可开发利用资源趋于枯竭,陕南地区地处山区,石多土少,可用资源非常稀缺,陕北地区面积广阔,光热充足,开发潜力大,但基本都地处毛乌素沙漠边缘,土地沙化和砒砂岩流失严重。如何对毛乌素沙地进行整治利用,实现土地资源的再利用和可持续利用已成为亟待解决的关键问题(李文学,2008;刘军方,2008;王仁德和吴晓旭,2009)。陕西省“十二五”规划纲要明确提出,加强土地开发整理,充分挖掘陕北地区粮食潜力,建设陕西第二粮仓。

毛乌素沙地是鄂尔多斯高原东南部和陕北长城沿线沙地的统称(朱俊凤和朱震达,1999),位于北纬 $37^{\circ}30' \sim 39^{\circ}20'$,东经 $107^{\circ}20' \sim 111^{\circ}30'$ 。全国沙漠化普查结果显示,全国沙区总面积184.47万 km^2 ,其中毛乌素沙地占总面积的4.3%,约为7.9万 km^2 ,沙漠、沙漠化土地面积约为6万 km^2 ,占毛乌素沙地面积的77%,居全国第5位。同时,毛乌素沙地是我国太阳能最为丰富的地区之一,光照充足,日照时数达2900~3200h, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温2900~3300 $^{\circ}\text{C}$,有利于瓜果生长。此外,该地区还具有相对丰富的水资源,东部和南部地区年降水量为350~470mm,北部地区为300~400mm,西部地区为277~302mm,明显高于同纬度的西部沙区,而这些有利的自然条件为毛乌素沙地的开发利用提供了一定的可能性。

砒砂岩在毛乌素沙地是分布最为广泛的矿物砂岩,是导致水土流失的主要因子。砒砂岩是砂岩、泥质砂岩及砂页岩组成的岩石互层,属于陆相碎屑岩系(王愿昌等,2007a)。砒砂岩具有无水如石,遇水如泥的特点。由于这种岩层自身物理、化学性质和当地特殊的自然、人文环境,使得该岩层极易发生风化剥蚀。砒砂岩区土壤侵蚀模数高达3~4万 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,是黄土高原侵蚀最剧烈的区域,被称为“世界水土流失之最”和“环境癌症”(李晓丽等,2011;刘艳和牛国权,2012;赵国际,2001;毕慈芬等,2003;金争平,2003)。群

众深受其水土流失危害,视其危害毒如砒霜,故称其为“砒砂岩”。沙和砒砂岩在当地被群众称为“两害”。砒砂岩成岩和结构强度低,比较容易风化,胶结程度低,渗透性差,但同时它的持水性和保水能力好。而风沙土,它的质地比较均一,结构松散、漏水漏肥,水分补给一旦减少,蒸散增加,易发生整体性缺水。因此,利用二者互补的性质,将沙与砒砂岩按一定比例混合复配成土,既可以减少或阻止沙地水分渗漏,又可减弱砒砂岩坚硬板结的现象,从而达到改善土壤理化特性和治理土地沙漠化的双重目的。

从2009年开始,韩霁昌研究员及其团队对沙与砒砂岩复配成土进行了系统研究,研究发现,砒砂岩与沙经复配成土具有良好的通透性和保水保肥能力,能满足作物生长发育的需求,并进行了较大规模的工程示范,取得了较好的成效。研究的初步成果于2011年经陕西省科技厅组织鉴定,认为研究成果丰富,技术先进,具有原创性和重要推广价值,达到同类研究的国际领先水平。砒砂岩与沙复配成土技术已经在毛乌素沙区得到应用并得到土地工程领域专家的肯定,但作为一种新型复配土壤,其结构能否持续稳定发育,区内的水资源能否保证农业的需求,生态环境能否得到恢复,特别是休闲期其固沙性能否持续等问题直接影响了该技术能否在更大范围的推广和应用。所以,研究砒砂岩与沙复配土的稳定性和持续利用对于新增耕地质量和生产管理及实现土地资源可持续利用具有重要意义。

1.1 毛乌素沙地开发利用的背景与需求

1.1.1 毛乌素沙地开发利用的背景与优势

1.1.1.1 毛乌素沙地开发利用的背景

在近20年来的快速工业化、城镇化进程中,建设用地需求不断增加,保增长与保耕地的压力急剧增大。截至2012年底,全国共有建设用地约5.54亿亩,其中城镇村及工矿用地约4.53亿亩,我国城镇化率的增加,占用大量优质耕地,使得人地关系日益紧张。土地资源的利用和管理面临严峻的形势,粮食安全和生态安全问题日益严重,吃饭与建设、土地开发利用与保护两大矛盾将长期存在。我国于20世纪90年代末期提出了耕地占补平衡政策,要求建设占用耕地与开发复垦耕地相平衡。该政策为后备耕地资源的开发整治工作提出了新要求。从近年来的实施情况看,该项政策对于防止耕地快速减少起到了积极作用。2009年国土资源部《关于全面实行耕地先补后占有关问题的通知》(国土资发[2009]31号)和2014年国土资源部《关于强化管控落实最严格耕地保护制度的通知》(国土资发[2014]18号)等文件进一步强化了土地开发整治在保障经济发展与保护耕地红线方面的重要性。

从全国区域分布上,人一地一社会矛盾集中表现在东部沿海地区、东北地区、中部地区、西部地区。在东部沿海地区,改革开放以来的快速工业化、城镇化过程既推动了整个国家的社会经济发展进程,也给该区域带来了系列资源环境问题,集中表现为大量耕地非农占用和环境污染问题凸显,其地地紧张状态较之中西部地区要明显和严峻得多(张雷和刘毅,2004);在东北地区,老工业基地在新时期的振兴难度较大,粮食主产区的后备耕

地资源过度开发及耕地和水资源可持续利用问题日益严峻;在中部地区,城乡二元结构及城市偏向的发展战略背景下,以传统农业为主的农业生产区正面临着农业劳动力大量外出,随之带来农村空心化和内生发展能力的进一步丧失,并由此进一步拉大了城乡差距(刘彦随等,2009);在西部地区,集生态脆弱、资源富集、贫困集中等于一体,农村劳动力大量外出务工,充分发挥资源禀赋优势、切实助推区域城乡一体化、可持续发展仍需在实践中进一步探索。本书重点关注的毛乌素沙地主要涉及陕西、内蒙古和宁夏三省区,随着西部大开发的逐步推进,经济发展步伐明显加快,工业化、城镇化的加速发展对该三省区现已突出的人地矛盾尤其是环境退化产生了进一步的催化作用。

陕西省作为西部发展的桥头堡、丝绸之路的起点,随着社会经济的飞速发展,人地矛盾、占补平衡的压力持续加大。在区位无位移前提下,要实现先补后占、已补定占、占优补优,就只能在耕地质量上下功夫。改革开放以来,随着城市化的加快,陕西关中地区既是重要的商品粮生产基地,同时又是陕西的主要城市带所在地,发展占地和耕地保护矛盾非常严重。陕南地处秦巴山区,地块零散,石多、水多、土少,所以开发具有丰富后备土地资源的陕北地区成为陕西的唯一选项。随着耕地开发复垦的空间重心北移,由此进一步强化了陕北地区在陕西省耕地占补平衡中的突出地位。与此同时,榆林作为我国的重要能源化工基地之一,随着产业园区的建设,城镇化、工业化的快速发展,耕地保护与占补平衡的压力也在不断增大。迫切需要进一步探索和发挥自然资源与空间区位优势,科学挖掘后备资源潜力,切实实现耕地占补平衡的目标要求。因此,毛乌素沙地区域作为重要的耕地后备资源,对其开发利用已成为当前解决人地矛盾的重要举措。

毛乌素沙地地处半干旱与干旱气候区,属于内陆高原,远离太平洋,并有山脉阻挡,太平洋上空的湿润气团难以抵达;西南部印度洋上空湿润空气也被喜马拉雅山隔绝。毛乌素沙地四周和内部无高降水量的山地和森林作为常年补给水源,仅靠 250 ~ 300 mm 降水的直接入渗补给和汇水区梁地入渗水的侧向补给,补给量有限,属典型的温带大陆性气候,年均大风日数 10 ~ 40 d,最长达 95 d。该区大风持续时间为 1 d 的占 60% ~ 70%,持续 2 ~ 3 d 的占 20% ~ 30%,持续 4 ~ 6 d 的约占 5%;年均沙尘暴发生 11 ~ 29 d,属于我国北方的农牧交错生态脆弱带,地质上属于典型的多层次过渡带,是我国北方沙漠化最严重的地区之一,也是我国重要的耕地后备资源。

由于历史上长期战乱破坏,人口大幅度波动,不合理的农垦和过度放牧引起了毛乌素沙地严重的草地退化、土地沙化,土地生产力低下。近年来晋、陕、蒙接壤区能源基地的开发对本区脆弱的生态环境造成了更严重的影响。沙漠化非常严重,风沙灾害频繁发生,不仅使当地生态环境遭到破坏,自然环境趋于恶化,也对该地区经济社会发展和人民的生产、生活造成严重影响。治沙是毛乌素沙地面临的首要任务,经过多年的努力,一些地区的防护林体系已初具规模,受风沙危害的滩、川、塬、涧地区的农田部分实现林网化,但是相对于毛乌素沙地数万平方千米的总面积,治沙任务仍然艰巨。

“十二五”期间,陕西省大力挖掘地处黄土高原和毛乌素沙地边缘的陕北的粮食生产潜力,建立陕西第二粮仓。陕北地区的 800 里沙漠气候恶劣、风沙肆虐,土地贫瘠,制约了农业发展。土地整治工程成为了农业发展的重要基础工作。根据“毛乌素沙地砒砂岩与沙复配成土核心技术研究及工程示范”项目,截至 2014 年底,已经在毛乌素沙地南缘成功

整治了 6.97 万亩沙地。继续深化和加强复配土的土壤特性和可持续研究对新增加的耕地利用和该技术的进一步推广应用尤为重要。

1.1.1.2 农牧交错区的农业地域优势

陕北毛乌素沙地边缘是我国北方半湿润农区与干旱、半干旱牧区接壤的过渡地带,为典型的农牧交错区。该区同干燥度为 1.5 ~ 3.49 的半干旱区基本吻合,也大体处于年降水量 250 ~ 500 mm 的两条等雨线之间,气候干燥,降雨量偏少。由于降雨量少,土壤水分长期处于亏缺状态,只能满足抗旱牧草和抗旱灌木的生长,有时草灌植物的生长需水也得不到完全满足。自然生境脆弱,水土流失严重;土地资源丰富,但质量较差;水资源短缺,农业“靠天吃饭”(刘彦随等,2006)。传统的自给自足的小农经济下,农牧交错区是生态脆弱、产业单一、广种薄收、乡村贫困的特殊问题区域。但是,农牧交错区独特的气候特征、资源禀赋和零污染优势,为发展现代特色优质农业提供了重要条件。

随着社会经济发展水平的提高,社会消费者对农产品的需求逐渐转型,对高品质特色杂粮、果蔬的消费需求明显增多,这为农牧交错区的农业和农村发展带来了新的机遇。农牧交错区若能依据区域地形地貌特点与水土流失规律,重视旱作农业与节水灌溉技术、示范推广造林实用技术、水保型生态农业技术的创新与应用,大力发展防护林产业化、水保型立体农业、生态资源开发增效等典型农村特色生态经济模式(刘彦随等,2006),适当推进种植业与养殖业相互适应与协调的农牧一体化发展,通过标准化生产、产业化运营,注重品牌创建,可带来较好的社会效益、经济效益和生态效益。并且,近年来对促进农牧交错区现代特色农业发展,政府扶持力度逐渐加大。若能结合土地开发整治、特色产业发展的相关政策,可进一步强化该区域的农业生产地域优势。因此,该地区的土地资源开发利用宜以人口调控为突破口,以农业经济发展为重点,通过优化产业结构,发展多种经营,提高产品价值,增加农民收入;以人地关系地域系统的总协调为目标,通过提高植被覆盖率、减少水土流失及其人为负面影响,来改善区域生态环境的状况,促进生态保护体系、人地耦合体系和生产经营体系的和谐统一。

1.1.2 毛乌素沙地整治是土地开发利用的需求

我国现代意义的土地开发整治与利用实践起步较晚,作为土地开发、利用、整治和保护的手段得以实施还是在新中国成立初期,但真正到 20 世纪 70 年代才日益得到重视(韩霁昌,2004)。在倡导“农业学大寨”的背景下,土地开发工作受到重视,平整土地、合并田块、新建新村和完善道路、沟、林为其主要内容;80 年代,随着农村联产承包责任制的推广与发展,土地开发整治工作的重点又转到了土地权属关系的调整上;进入 90 年代,社会经济迅猛发展,导致耕地数量锐减,为切实加强土地管理工作,1998 年成立了国土资源部,修订了《中华人民共和国土地管理法》,明确提出开展土地整治,并开始实施“耕地占补平衡制度”,后备耕地资源开发成为补充被建设占用的耕地的重要途径。到目前为止,由国家投资建设的土地开发整治项目已遍布全国各地,并相继出台了一系列土地开发整治的相关技术标准和法规,这对我国土地开发整治事业的蓬勃发展起到了巨大的推动作用。

过去数十年,我国的土地开发整治在增加耕地面积、促进占补平衡、提高耕地产能等方面起到了重要作用。但是,现阶段的土地开发整治与利用也面临着一系列现实问题:一

是土地开发整治规划体系尚不完善,规划的宏观调控和指导作用尚未得到充分发挥;二是项目和资金管理工作还未完全到位,重项目申报、轻实施管理的现象还比较普遍;三是部门配合需要进一步加强,工作效率有待进一步提高;四是后备资源的数量越来越少,开发难度越来越大;五是“重开发、轻利用、弱保护”的传统的开发模式已经影响到了生态脆弱区的生态环境保护和土地资源可持续利用(张凤荣等,2003),成为需要深入研究并尽快解决的重要课题。

1.1.2.1 后备资源日益减少而成本急剧增加

后备资源潜力大小对土地开发利用具有根本性影响。随着过去多年来的大量开发,宜垦后备资源日益减少,挖掘潜力的难度日益增大,集中表现为经济成本和生态风险增加。2000~2003年,国土资源部实施了新一轮的国土资源大调查工程。此次调查评价结果显示,全国集中连片、能形成国家级土地开发复垦基地的后备耕地资源7.3万 km^2 ,主要分布在北方和西部干旱地区。据陈印军(2011)的测算,其中的66.5%集中于我国西北部的干旱和半干旱地区,另外有5%集中于生态脆弱的西南地区,位于东北、黄淮海、长江中下游、东南和其他地区的后备耕地资源仅占28%。如果以国土资源部1998~2007年平均每年复垦和开发后备耕地资源2267 km^2 计算,到2010年底,全国集中连片、能形成国家级土地开发复垦基地的后备耕地资源仅有5万 km^2 。而且,有学者建议,考虑到干旱区的自然环境条件和生态风险,西北干旱区不宜作为我国后备耕地资源基地(张百平等,2010)。此外,从各地土地开发利用的经济成本来看,近年上涨迅速,如陕西省2015年最新颁布的新增耕地开垦费标准,旱地达到2万元/亩,水浇地2.3万元/亩,水田2.6万元/亩。

1.1.2.2 部分地区的土地开发利用带来新的资源环境问题

在内蒙古及长城沿线区、黄土高原区、云贵高原区、横断山区、东北区、西北区和青藏高原区等生态脆弱地区,对土地的盲目开发并粗放式经营造成的负面影响已经显现:土壤有机质含量下降、水土流失和风蚀沙化等严重土地退化(张迪等,2004),洪涝灾害发生频率和影响程度也有所加剧(Liu et al., 2005)。如果继续对北方天然草地资源进行新一轮的大规模开垦,加之已开垦农田的弃耕、撂荒,将会进一步加剧草地生态系统的退化,从而对生态环境造成恶劣影响(刘玉杰等,2007)。

1.2 毛乌素沙地综合整治现状分析和存在问题

全国沙漠化普查结果表明,毛乌素沙地总面积为7.84万 km^2 ,占全国沙区总面积的4.25%(袁泉,2008)。自然气候条件和人文活动干扰的综合影响使毛乌素沙地的沙漠化态势明显加剧,对我国北方地区的生态安全造成巨大冲击。毛乌素沙地属于生态脆弱区,广泛分布着砒砂岩,近几十年来,砒砂岩区内的许多县区均开展了砒砂岩区域的治理工作。总体来看,通过生物固沙、机械固沙和化学固沙,在一定程度上控制了毛乌素沙地的快速扩张。但是,沙地土壤贫瘠,呈现出“整体遏制,局部好转,局部退化”的局面,未治理的面积仍占较大比例。而且随着工业化、城镇化的快速发展,人类经济活动加剧,特别是能源开采、水资源开发、农业结构战略性调整仍会对区域生态建设、沙漠化防治带来新的

冲击和压力,因此科学协调发展与保护生态环境是生态脆弱地区资源可持续利用和经济社会可持续发展的重要保障。

砒砂岩(被称为“环境癌症”)和风沙土在该地区分布范围广(王愿昌,2007),砒砂岩易风化黏粉粒含量高,保水和持水性好。风沙土结构疏松漏水漏肥。陕西省土地工程建设集团利用二者的性质,将砒砂岩与沙混合,既可以减少或阻止沙地水分渗漏,又可减弱砒砂岩坚硬板结的现象,达到改善土壤物理特性,进而提高土地生产力的目的。

1.2.1 毛乌素沙地开展土地综合整治的紧迫性与可行性分析

随着社会经济的持续快速发展,对土地利用需求量激增。根据现阶段我国的基本国情,既要保障各个重点、大型基础设施建设用地,又要坚守“18 亿亩耕地红线”,保障发展与保护耕地的“双保”压力不断增大,破解土地供需矛盾迫在眉睫。

通过对毛乌素沙地基本概况、前期治理思路以及新时期生态脆弱区土地综合整治战略的系统分析和梳理,认为仍有必要深入开展沙地开发、治理、利用的综合研究,以实现生态脆弱地区的生态环境治理与资源开发利用的协同发展。

砒砂岩和沙是毛乌素沙地的重要物质成分,前者裸露风化后遇风起尘、遇水流失,后者结构松散、漏水漏肥,二者为具有明显差异性、互补性特征的两类物质。项目申报单位开展砒砂岩与沙的配比组合成土相关技术、工程研究,将这两种物质机械合成、物理胶结,构筑沙岩交融体,混合成土,在实现固沙的同时,尝试利用新形成的“土壤”进行规模化的现代农业生产,特别是集成运用现代高效节水技术,基于生态友好型农田生态系统建设的相关理论与技术,率先建设高标准农田,大力发展现代特色高效农业,促进生态脆弱区生态环境治理、资源开发利用和高效产业发展的系统耦合,力争实现从“被动的单一化治理”向“主动的综合化利用”的模式转变与战略转型。而砒砂岩与沙复配成土的稳定良性发展成为促进毛乌素沙地耕地可持续发展的重要前提。

按照学术界用得较多的黄委绥德水土保持科学试验站“晋陕蒙接壤区砒砂岩分布范围及类型区划分”得出的面积数据,王愿昌等(2007a)在以往研究成果基础上进行补充完善,突破了晋陕蒙接壤区这一范围,而是以此为中心,又把内蒙古自治区的杭锦旗、清水河县的部分地区划进去,得到砒砂岩区总面积 1.67 万 km^2 。分布范围为东至黄河,西达杭锦旗境内的毛布拉孔兑,从西北向东南沿毛乌素沙地东北缘分布,南抵陕西省神木县城,北到库布齐沙漠南缘,介于北纬 $38^{\circ}10' \sim 40^{\circ}10'$,东经 $108^{\circ}45' \sim 111^{\circ}31'$,大致分布在由杭锦旗、清水河县、神木县城三点组成的三角形区域内。毛乌素沙地总面积为 7.84 万 km^2 ,广泛分布着砒砂岩,沙地面积也较广泛,将砒砂岩和沙复配成土研究具有广阔的市场应用前景。

1.2.2 毛乌素沙地综合整治潜力分析

毛乌素沙地位于鄂尔多斯高原南部和黄土高原北部区域,它是对当地工、农、牧业生产和经济危害较大,而自然条件又相对较好,被国家列为重点治理的沙地之一。毛乌素沙地也是我国沙尘暴最主要的沙源区。随着毛乌素沙地南部的神府煤田、东部的东胜煤田、东北部的准格尔煤田的大规模开发,以及相应的交通、能源、通信设施的建设和沙地腹部

的查汗淖天然碱的开采与加工,原有的自然生态环境遭受了破坏,毛乌素沙地的治理面临着新的挑战,同时也给毛乌素沙地生产提供更多的畜产品和农副产品提出了新的要求,因此发展沙产业,对毛乌素沙地综合整治具有重要意义。

位于陕、蒙、宁的毛乌素沙地,境内砒砂岩和沙广泛分布,砒砂岩无水坚硬如石、遇水则松软如泥,而沙子结构松散、漏水漏肥,土地沙漠化和砒砂岩的水土流失并称“两害”,严重制约着区域可持续发展。随着陕西耕地“占”、“补”工作的开展,陕西关中地区可开发利用的耕地后备资源日益减少,加之区域分布零散、面积小,实施大规模、集中连片的土地整治项目难度极大;陕南地处山地,受秦岭山系影响,未利用地多分布在无人烟区,整治难度大,即使整治出来也很难耕种,容易使所造耕地撂荒、废弃;在陕北榆林长城沿线以北,广袤的毛乌素沙地属中温带大陆性季风气候,季节变化明显,温差大,光照时间充裕,热量资源丰富,具备农作物高产、丰产的自然条件。但是,由于土地沙化严重,农作物不能种植或产量低下,农民对土地的重视程度普遍不高,因此若能改造沙地土壤质地,改善区域生态环境,满足农作物的生产要求,达到提高土地生产力的目的,调动农民种地的积极性,那么,榆林完全能够建设成为陕西的“第二粮仓”和全国重要的现代特色农业生产基地。

根据2009年第二次土地全面调查数据汇总结果显示,陕西省未利用地总面积为843 900.33 hm^2 ,其中榆林市未利用地面积为384 848.81 hm^2 ,占陕西省未利用地总面积的45.60%;沙荒地面积352 718.34 hm^2 ,占榆林未利用地面积的91.65%。只要方式方法得当,沙荒地整治利用的前景还是极为广阔的。长期以来,人们对整治利用进行了一些探索,如黄土客土法。但在毛乌素沙地周边缺少黄土土源,远距离运输成本又很高,加之沿途污染严重,造成治理时间长、经济效益差,无法大面积推广,致使毛乌素沙地长期以来未作为耕地后备资源进行有效利用。

作为我国四大沙区之一的毛乌素沙地,其本身存在着巨大的挖掘潜力。毛乌素沙地总面积7.84万 km^2 ,其中2/3的面积分布在内蒙古鄂尔多斯市境内。毛乌素沙地深居内陆,为中温带大陆性季风气候,年平均气温6.4 $^{\circ}\text{C}$, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 年平均积温3 320 $^{\circ}\text{C}$,年日照时数2 900 h,年平均降水量为360 mm,降水量的80%集中在6~9月中旬,年蒸发量为2 300 mm,湿润度0.3,年平均风速3.3 m/s,年大风扬沙日数40~50 d,沙暴日数16 d。流动沙丘上植被覆盖率<5%,沙层中含水量一般都保持在3%~4%,固定沙地地表有厚约1.5 cm苔藓生物结皮层,但1.5 m土层通体都较干燥,植被分别由油蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条(*Caragana intermedia*)、臭柏(*Sabina vulgaris*)等建群植物组成,植被覆盖率30%~50%。半固定沙地植被、土壤介于流动和固定沙地之间。丘间滩地面积大小不等,主要土壤有沙质草甸土、沼泽草甸土、碱化沼泽草甸土等。这些土壤的共同特征是土层中小于0.01 mm微粒含量较多(13%~20%),有机质含量较高(0.2%~1.2%),受地下水影响,具潜育层。滩地中常见埋藏泥炭层,植被主要建群植物种分别有假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)、寸草(*Carex stenophylla*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、碱茅(*Puccinellia tenuiflora*)、马蔺(*Iris lacteavar. Chinensis*)等,植被覆盖率40%~80%,由于过度放牧,滩地草场大多处于矮、稀的退化状态。

毛乌素沙地地下水资源比较丰富,分布普遍但不均衡,据水文地质部门勘察测量,仅

浅层地下水储存量就达 1 203 亿 t。地下水主要靠大气补给,补给量多年平均为 14 亿 t/a。地下水水质较好,矿化度 $< 1 \text{ g/kg}$ 。地下水位在多水年份可达滩地地表,低洼处则有季节性积水,干旱年份滩地地下水埋深 0.5 ~ 1.5 m,适于人畜饮用。

毛乌素沙地自然条件比较恶劣,天然降水量少,风多风大,土壤基质为沙子,肥力低、保水性差、易沙化等是其主要特点。然而,毛乌素沙地同时也具有光、热、风、水和泥炭资源丰富,特别是浅层地下水储存量和补给量都较高的优点,是国内陆地沙漠中较易治理和具有开发前景的沙地。

1.2.3 砒砂岩与沙复配土壤稳定性研究关键技术问题

砒砂岩与沙的合成土壤具有良好的理化性质,为作物生长、农业生产创造了良好的基础。田间试验和工程示范结果也已证实,合成“土壤”用于种植作物、农业生产的效果显著。目前,土地作为一种非常珍贵的资源,我们关心的不仅是目前合成“土壤”具有良好的理化性质,可以满足农业生产的基本需求,我们更关心这种合成“土壤”的性质稳定性和是否可持续利用。

本书主要通过研究砒砂岩与沙复配成土的土壤特性变化、水肥耦合和水土匹配等方面的变化机理,从而为新造土壤的稳定性和可持续利用提供技术指导与理论支持。

毛乌素沙地砒砂岩与沙复配土壤稳定性研究关键技术问题如下。

1.2.3.1 揭示复配土壤结构、成分等特性随时间的变化机理

已有研究成果发现,砒砂岩与沙按一定比例复配成土,在农业管理措施(灌溉、耕作等)的影响下,土壤中的粉粒和黏粒有向下运移的趋势,经过长期影响,土壤耕层的粉粒和黏粒含量将如何影响土壤质地?土壤耕层砒砂岩与沙的复配比例在这种情况下如何保证?需要对土壤剖面中的粉粒和黏粒的向下运移对土壤质地的影响进行研究,以指导工程实践中砒砂岩与沙复配成土的混合比例的确定。

土壤团聚体是土壤结构最基本的单元,是土壤肥力的协调中心和土壤性状的敏感性物理指标。单独的砒砂岩与沙的氮、磷、钾和有机质等养分含量都非常低,难以满足作物对土壤肥力的需求。而砒砂岩与沙复配成土后,需要对复合土壤的有机质含量随时间的变化规律进行研究;而土壤团聚体是土壤养分的有效载体,较好的团聚体组成是土壤熟化的指标之一,因此还需要对土壤团粒随时间的变化进行研究,采用水稳性团聚体的研究来评价砒砂岩与沙合成土壤的稳定性。

1.2.3.2 确定不同作物种植的农田管理制度

砒砂岩与沙复配成土后改善了土壤的通透性和保水保肥性,种植作物的产量显著高于沙地产量,对砒砂岩与沙复配成土后不同作物品种水肥耦合利用进行研究,以达到提高水肥资源利用效率、提高作物产量的目的。同时,针对作物的品质进行对比研究,对复合土壤上种植作物的品质与沙地作物品质进行对比研究,以确保复合土壤上的作物安全食用问题。

砒砂岩与沙合成土壤养分匮乏,要满足作物生长养分需求,需增施肥料,尤其要多施有机肥,施入的有机肥形成腐殖质,可以增加土壤中的胶结物,提高沙土的黏结性和团聚性,促进土壤团粒结构的形成(吕贻忠等,2006)。增施有机肥对于合成土壤尤其重要,因