风蚀水蚀交错区
综合治理技术及效益评价研究

胡海华　吉祖稳　陆琴　余弘婧　等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

风蚀水蚀交错区
综合治理技术及效益评价研究

胡海华　吉祖稳　陆琴　余弘婧　等 著

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
·北京·

内 容 提 要

本书基于对风蚀水蚀交错区典型示范区的调查研究，采用理论分析、现场调研、室内试验及资料分析相结合的方法，进行了以下研究：风蚀水蚀交错区风沙起动、扬起和输移规律；风水两相侵蚀的特性；风水两相侵蚀受气候、水文、地质地貌、植被以及人类活动等因素影响的形成机理；植被演化与风沙活动的影响关系以及小流域环境因子对风水两相侵蚀的影响；提出了包括工程措施、生物措施、生态自然修复措施等具体可行的综合防治措施；对典型区域治理工程减少风蚀水蚀的效益进行了评价。

本书为风蚀水蚀交错区综合治理提供了科学依据和技术支撑，具有重要的理论与现实意义。本书适合从事水土保持专业的相关管理、研究、设计人员参考，也适合高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

风蚀水蚀交错区综合治理技术及效益评价研究 / 胡海华等著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2019.11
ISBN 978-7-5170-8209-5

Ⅰ. ①风… Ⅱ. ①胡… Ⅲ. ①风蚀－小流域综合治理－研究②水蚀－小流域综合治理－研究 Ⅳ. ①TV88

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第253967号

书　　名	**风蚀水蚀交错区综合治理技术及效益评价研究** FENGSHI SHUISHI JIAOCUO QU ZONGHE ZHILI JISHU JI XIAOYI PINGJIA YANJIU
作　　者	胡海华　吉祖稳　陆琴　余弘婧　等 著
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路1号D座　100038） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@waterpub.com.cn 电话：（010）68367658（营销中心）
经　　售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排　　版	中国水利水电出版社微机排版中心
印　　刷	天津嘉恒印务有限公司
规　　格	170mm×240mm　16开本　11.5印张　220千字
版　　次	2019年11月第1版　2019年11月第1次印刷
印　　数	0001—1000册
定　　价	**58.00**元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言



中国是世界上受土地荒漠化危害最为严重的国家之一，现有沙化土地168.9万km^2，占国土面积的17.6%，主要分布在西北大部、华北北部、东北西部及西藏北部，形成了一条西起塔里木盆地，东至松嫩平原西部，长约4500km，宽约600km的风沙带。特别是2000年3月以来，我国北方地区连续出现沙尘暴天气，我国华北、西北200多万km^2的土地多次遭受沙尘暴的严重威胁，并直接袭击首都北京，其次数之多、规模之大为历史所罕见。

为了解决首都圈日益突出的生态环境问题，京津风沙源治理工程于2000年启动，是国家六大生态建设工程之一。该项目根据风沙来源对重点风沙源区进行集中治理，工程范围西起内蒙古的达茂旗，东至河北的平泉县，南起山西的代县，北至内蒙古的东乌珠穆沁旗，范围涉及内蒙古、河北、山西及北京和天津的75个县（市、区、旗），区域总面积约为45.8万km^2。在京津周围的广大荒漠化区多是区域经济不发达地区，科学技术发展程度低，为了确保风沙治理项目的顺利实施，科学技术部同时起动了风沙源治理科技支撑项目，以典型小流域为依托，采用加大技术投入和增强监测力度，从而提高项目治理的技术含量，通过以点带面的方式达到最佳治理效果。风蚀水蚀交错区综合治理技术示范与推广及效益监测与评价项目就是在此背景下获得立项支持的。以典型水蚀风蚀交错地区为基础，对水土保持及植被生态修复等方面的先进技术进行应用和实践，保护和恢复侵蚀区的植被，改善当地的生态环境；运用3S技术进行动态监测与有效管理，建成相应的试验示范区。

风蚀水蚀交错区是风蚀、水蚀两相侵蚀方式共同作用的结果，其侵蚀特性和治理措施既不同于水力侵蚀，也不同于风力侵蚀。本书通过结合典型风蚀水蚀交错区自然和社会条件以及当地的治理实践，系

统地调查了区域内的气候条件、植被现状、经济状况和风蚀水蚀情况等综合要素，并通过野外植被踏勘、区域风沙综合监测、实验室风洞模拟试验等多种方法对区域风沙输移规律和综合治理技术及效益监测与评价进行了系统的分析研究。结合土壤侵蚀和泥沙运动理论对气象、风速分布、风沙输移、径流泥沙等监测数据进行系统分析，研究了气象因素对区域风沙活动的影响程度、典型区域风速的变化和垂直分布、风沙输移和垂直分布、典型冲沟的径流泥沙情况等有关典型区域的风沙起动、扬起和输移规律，并对典型区域治理工程减少风蚀水蚀的效益进行了评价。为了进一步深入研究风蚀水蚀交错区风沙活动的形成机理，本书主要采用理论分析、现场调研、室内试验及资料分析相结合的方法，通过研究风蚀水蚀交错区风蚀水蚀两相侵蚀的特性，揭示了风蚀水蚀两相侵蚀受气候、水文、地质地貌、植被以及人类活动等因素影响的形成机理，系统研究了坝上地区植被演化与风沙活动的影响关系以及小流域环境因子对风蚀水蚀两相侵蚀的影响，并根据典型区域实际情况提出了包括工程措施、生物措施、生态自然修复措施等具体可行的综合防治措施，为风蚀水蚀交错区综合治理提供了科学依据和技术支撑，具有重要的理论与现实意义。

本书是在京津风沙源治理工程科技支撑项目“沽源县风蚀水蚀交错区综合治理技术示范与推广及效益监测与评价”、中国水利水电科学研究院重点科研专项“非均匀沙运动理论前沿研究（二）”及水利部技术示范项目“西藏高寒地区水土保持无人机综合监测技术”的部分研究成果基础上，通过系统总结编写而成。全书共分 8 章，主要内容及编写人员如下：第 1 章概述，由胡海华、吉祖稳执笔；第 2 章典型示范区基本情况，由胡海华、吉祖稳、陆琴执笔；第 3 章示范区风沙观测结果与分析，由胡海华、陆琴、余弘婧执笔；第 4 章风沙活动与植被条件耦合关系风洞实验，由胡海华、石雪峰、吉祖稳执笔；第 5 章示范区植被调查及优势物种分析，由陆琴、夏建新、余弘婧执笔；第 6 章风蚀水蚀形成机理及综合治理措施，由胡海华、陆琴、余弘婧执笔；第 7 章小流域地理信息管理及效益评价系统，由胡海华、杜龙江、袁雪梅执笔；第 8 章结语，由胡海华、吉祖稳执笔。全书由胡海华审定统稿。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

特别需要说明的是，本书的研究成果在研究过程中，得到了许多领导、专家的指导和支持以及同事的帮助，主要有曹文洪、吉祖稳、夏建新、邓安军、董占地、陆琴、余弘婧、石雪峰、刘世海、杜龙江、袁雪梅、付玲燕等，在此表示诚挚的感谢！

本书得到了中国水利水电科学研究院重点科研专项“非均匀沙运动理论前沿研究（二）”（SE0145B362016）、中国水利水电科学研究院科技成果转化基金专项“水库泥沙淤积与调控技术成果集成与转化研究”（SE1003A012017）及水利部技术示范项目“西藏高寒地区水土保持无人机综合监测技术”（SF-201902）的资助，特此感谢！

鉴于风蚀水蚀交错区小流域综合治理技术及效益评价的复杂性，加之作者水平有限，书中定有不少欠妥或谬误之处，竭诚欢迎读者批评指正。

胡海华

2019 年 11 月于北京

目录



前言

1 概述…… 1

2 典型示范区基本情况…… 3

2.1 自然条件 …… 3

2.2 社会经济状况 …… 4

2.3 水土流失和治理状况 …… 5

2.4 建设目标、规模与总体布局 …… 7

2.5 建设内容 …… 8

3 示范区风沙观测结果与分析…… 9

3.1 主要观测仪器 …… 9

3.2 主要观测指标 …… 13

3.3 气象资料观测结果与分析 …… 14

3.4 不同下垫面风速分布特点与分析 …… 46

3.5 风速对大气悬浮颗粒物（TSP）的影响实验…… 51

3.6 不同下垫面的风沙结构与变化特征 …… 52

4 风沙活动与植被条件耦合关系风洞实验 …… 56

4.1 研究内容概述 …… 56

4.2 实验系统设计和组成 …… 57

4.3 风洞测试与测量仪器校正 …… 61

4.4 实验方案设计 …… 66

4.5 植被条件的相关影响研究 …… 69

4.6 植被覆盖条件下地表输沙率模型研究 …… 81

4.7 风蚀输沙率的垂直分布特征研究 …… 86

4.8 本章小结 …… 91

5 示范区植被调查及优势物种分析 …… 93
5.1 植物区系划分和植被类型 …… 93
5.2 土壤理化性质分析 …… 97
5.3 退耕还林还草前后经济情况调查分析 …… 103
5.4 植被恢复优势物种的选择 …… 106

6 风蚀水蚀形成机理及综合治理措施 …… 111
6.1 风蚀水蚀特性 …… 111
6.2 风蚀水蚀两相侵蚀形成机理 …… 112
6.3 植被演化与风沙活动的关系 …… 113
6.4 示范区小流域环境因子对风水两相侵蚀的影响 …… 116
6.5 项目区风蚀水蚀综合防治措施 …… 117
6.6 风蚀水蚀综合治理措施的治理效果 …… 118

7 小流域地理信息管理及效益评价系统 …… 120
7.1 地理信息采集 …… 120
7.2 土壤侵蚀遥感调查 …… 122
7.3 综合数据管理信息系统 …… 138
7.4 水土流失治理效益评价系统 …… 141

8 结语 …… 156
8.1 风蚀水蚀交错区风沙形成机理 …… 156
8.2 风蚀水蚀交错区小流域综合治理措施 …… 158
8.3 风沙活动与植被条件的耦合关系 …… 159
8.4 植被特征和土壤理化性质 …… 160
8.5 经济状况变化和优势物种选择 …… 161
8.6 地理信息管理及效益评价系统的应用 …… 161

参考文献 …… 165

附表 …… 166

1 概述



我国是世界上受土地荒漠化危害最为严重的国家之一，现有沙化土地168.9万km^2，占国土面积的17.6%，主要分布在西北大部、华北北部、东北西部及西藏北部，形成了一条西起塔里木盆地，东至松嫩平原西部，长约4500km，宽约600km的风沙带。沙化土地分布涉及全国30个省（自治区、直辖市）的841个县（市、区、旗）。沙化日趋扩展的势头尚未遏制。据观测，20世纪50—70年代全国风蚀沙化土地平均每年扩大1560km^2，80年代平均每年扩大2100km^2，近年来已增加到2460km^2，相当于每年损失掉一个中等县的土地面积。沙尘暴天气发生频繁。据统计，造成重大经济损失的特大沙暴，60年代发生8次，70年代13次，80年代14次，进入90年代已达23次。1993年5月5日发生的大范围强沙尘暴天气，造成西北地区85人死亡，受灾面积37万km^2，直接经济损失5.4亿元。特别是2000年3月以来，我国北方地区连续出现沙尘暴天气，我国华北、西北200多万km^2的土地多次遭受沙尘暴的严重威胁，并直接袭击首都北京，其次数之多、规模之大为历史所罕见。

为了解决首都圈日益突出的生态环境问题，京津风沙源治理工程于2000年启动，是国家六大生态建设工程之一。该项目根据风沙来源对重点风沙源区进

行集中治理，工程范围西起内蒙古的达茂旗，东至河北的平泉县，南起山西的代县，北至内蒙古的东乌珠穆沁旗，范围涉及内蒙古、河北、山西及北京和天津的75个县（区、市、旗）。据初步统计，截至2004年，已累计退耕还林及配套荒山造林2442万亩、营造林2420万亩、草地治理10952万亩、小流域综合治理5223km^2，分别占规划任务的62%、33%、69%和22%。

在京津周围的广大荒漠化区多是区域经济不发达地区，科学技术发展程度低，为了确保风沙治理项目的顺利实施，科学技术部同时起动了风沙源治理科技支撑项目，以典型小流域为依托，采用加大技术投入和增强监测力度，从而提高项目治理的技术含量，通过以点带面的方式达到最佳治理效果。风蚀水蚀交错区综合治理技术示范与推广及效益监测与评价项目就是在此背景下获得立项和资金支持的。该项目紧紧围绕河北坝上地区的京津风沙源治理工程，选择芦草胡同小流域为技术推广与示范区，以相关科研院所的科研成果为技术支撑，结合项目区自然和社会条件和当地的治理实践，在项目区实施人工定向植被恢复和重建技术、坡改梯林草配置技术和水资源合理利用与高效农田建设技术的推广与示范，同时对风沙起动和风力侵蚀进行现场观测，并结合3S技术对治理区的综合治理效益进行监测与评价；此外，发挥专业科研院所的综合技术优势，对当地水保工作者和群众进行技术培训和公众意识教育，以提高当地风沙治理水平和公众的生态环境保护意识。

2 典型示范区基本情况



2.1 自然条件

典型示范区芦草胡同小流域地处河北省沽源县白土窑乡西南约2km处（见图2.1），流域面积14.67km^2，其中水土流失面积13.27km^2（含风蚀面积）；最高高程1590m，最低1418m，相对高差172m。流域年均气温1.6℃，无霜期100天。流域年降水量约为403mm，主要集中在6—9月，降水量为309.5mm，占全年降水量的76.8%。

典型示范区地形南高北低，呈长条形，为典型的坡状高原区。小流域总土地面积1467hm^2。其中：农用耕地596.19hm^2，占总土地面积的40.64%，主要分布于流域中部和东南部；林地95.30hm^2，占总土地面积的6.50%，分布于流域西部；荒山荒坡730.81hm^2，占总土地面积的49.82%。流域土壤主要以沙壤栗钙土为主，多分布在流域的中部、北部及东南部；流域的中南部分布有部分草甸钙土。流域内土地有效土层较薄，土壤结构松散、质地较差、土壤含水量较低，且部分耕地沙化严重，已无法继续耕种，较为适宜采用封禁、退耕还林还草等防沙治沙措施。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

流域内树种主要有杨、榆等耐旱乔木树种类，虽因气温低，无霜期较短，降水量少等自然因素制约，生长缓慢，但对于防沙治沙工程而言，具有十分重要的作用。现有林地呈零星、带状散落在流域内，主要分布在流域的北部较为平缓的区域。流域内灌木只有少量的野生柠条，生长状况较差。流域内没有人工草地，草地均是荒草地，覆盖度很低，生长状况较差。

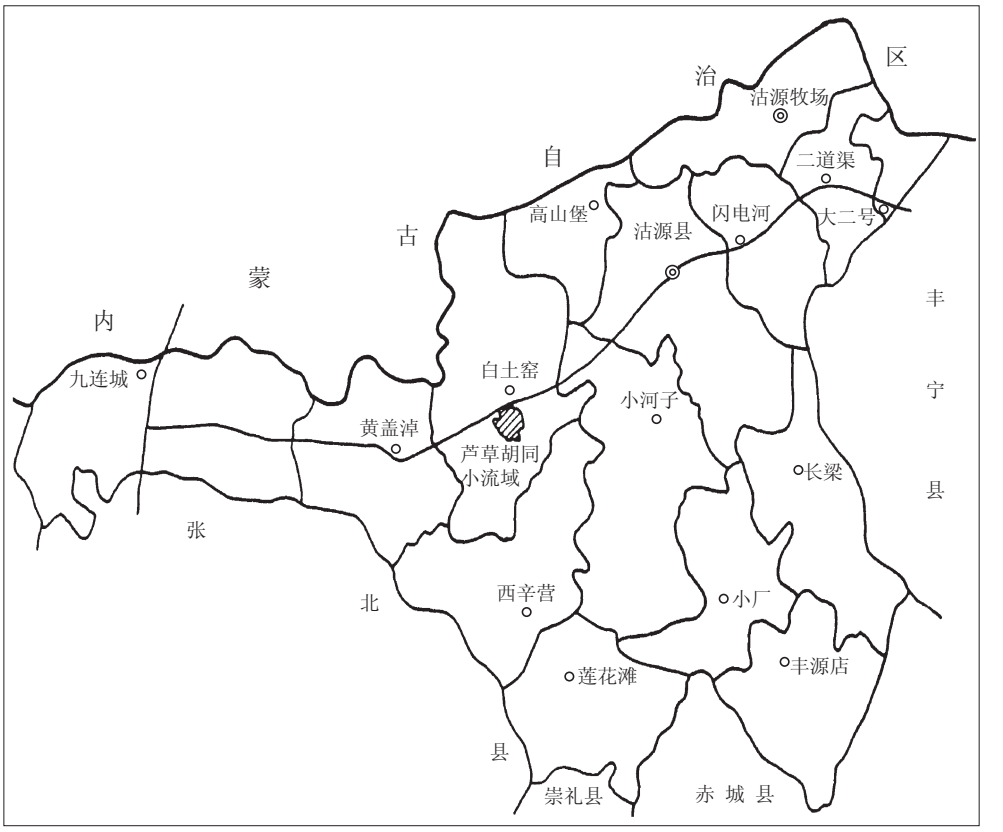


图 2.1　芦草胡同小流域位置示意图

2.2　社会经济状况

典型示范区小流域涉及白土窑乡 1 个行政村，总人口 942 人，人口密度为 64 人/km^2。2007 年底各业总产值 77.62 万元，其中：农业 54.6 万元，占总产值 70.3%；牧业 13.2 万元，占总产值的 17%；其他 9.82 万元，占总产值的 12.7%。农作物以小麦、莜麦为主，人均粮食 560kg，人均收入只有 829 元。有大牲畜 220 头，羊 970 只。

2.3 水土流失和治理状况

2.3.1 水土流失现状

流域位于沽源县西部，属典型的风蚀水蚀交错区。土壤侵蚀形式以面蚀为主，坡耕地和荒山荒坡是水土流失的主要来源。流域的土壤侵蚀强度为中度，平均土壤侵蚀模数为 3500t/km^2 左右。水蚀主要分布在流域的北部和环流域的浅山基部，风蚀主要分布在流域的浅山丘陵区的中上部，环流域的东、西和南部分布。芦草胡同小流域土壤侵蚀类型和水土流失程度分布见图 2.2。形成风蚀水蚀的主要原因有以下几个方面：

（1）春季干旱大风频繁是引起土壤风蚀的巨大动力。由于本流域春季多风少雨，极易形成春旱，土壤含水量小于 10%，干燥的土壤颗粒为风蚀提供了大量的物质，易造成风蚀。

（2）大面积沙质土壤为土地沙化提供了丰富的沙源。流域内耕地和荒山荒

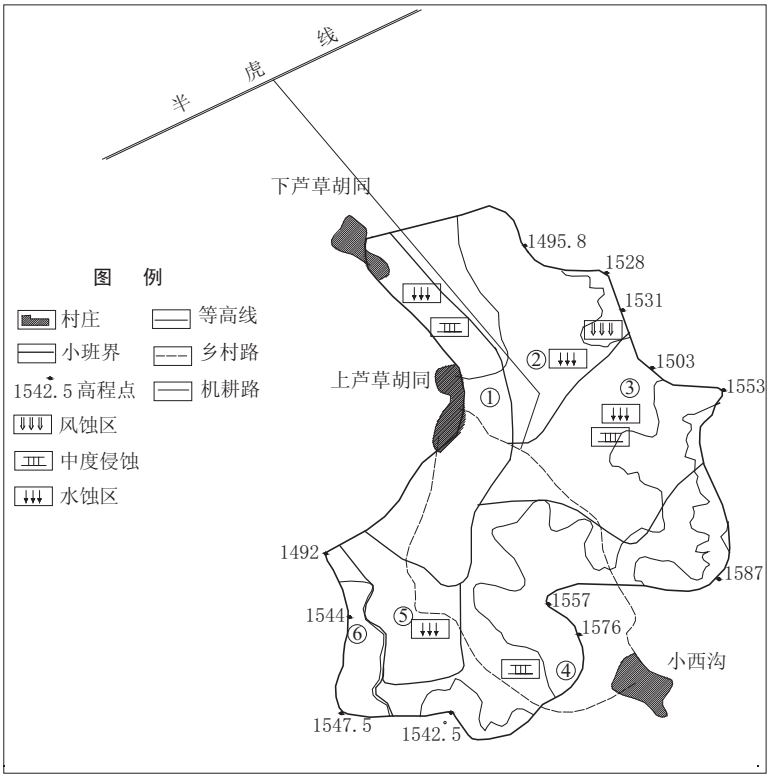


图 2.2 芦草胡同小流域土壤侵蚀类型和水土流失程度分布图

坡占总面积的 90.46%，均系由疏松的沙质沉积物构成，其所需起动风速小，极易形成风蚀。

（3）人为过度经济活动，破坏了干旱和半干旱地区的生态平衡，引起土壤风蚀沙化。长期以来，由于流域内毁林开荒、乱垦滥牧以及耕种形式陈旧，致使脆弱的生态环境进一步恶化，造成流域土壤风蚀沙化进一步加剧。

（4）局部暴雨频繁，地表植被稀少、覆盖率低是小流域水蚀的主要形成原因。项目区小流域的降雨主要集中在 6—9 月，占全年降雨量的 76.8%，易有局部暴雨对地表土壤产生较强的水蚀作用。

2.3.2 治理现状

当地开展了小范围的水土保持治理工作，在治理水土流失方面取得了一定的成绩。但由于科技水平低、措施单一、标准不高、管护力度不够等，治理成果保存率很低，大部分已经不复存在。芦草胡同小流域土地利用和水保措施现状见图 2.3。因此，亟需结合一些先进的科技成果进行综合治理，进一步提高治理效果。

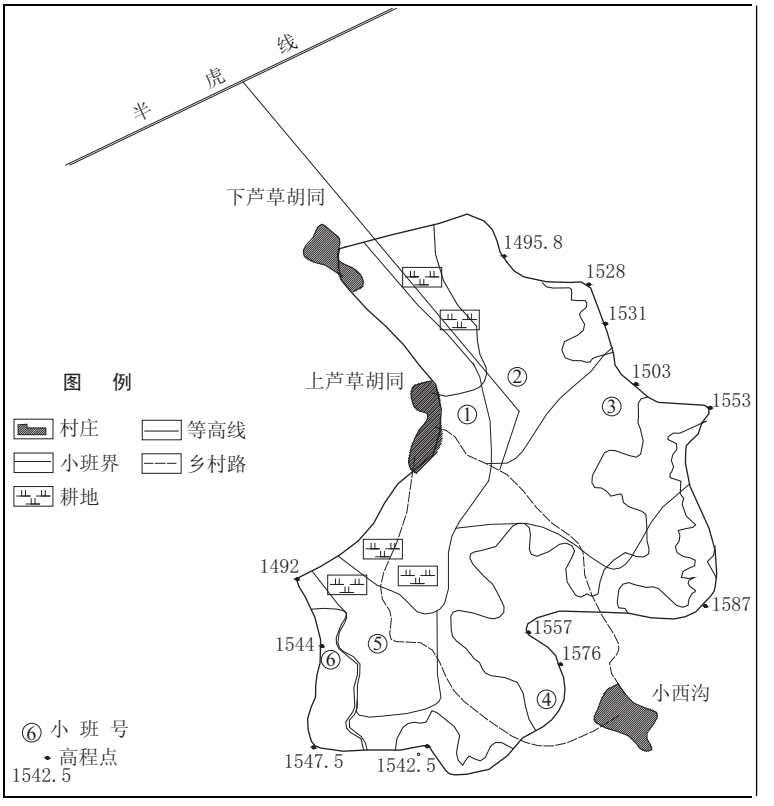


图 2.3 芦草胡同小流域土地利用和水保措施现状图

2.4 建设目标、规模与总体布局

2.4.1 建设目标

典型示范区防治工程的建设目标主要包括以下三方面的内容：

（1）治理水土流失目标。紧密结合在芦草胡同小流域实施的京津风沙源治理工程，建设 7km^2 的示范区，其中：植被定向恢复示范面积 4km^2；高效农田 1km^2；退耕还林还草 2km^2。治理完成后，综合治理度达 90％以上，治理措施保存率达 85％以上。各种水保措施全面发挥作用后，拦沙和保水效率达到 70％以上。

（2）改善生态环境目标。通过在示范区内实施人工定向植被恢复和退耕还林还草，使项目区内 90％以上的宜林宜草面积得到绿化，林草覆盖率达到 70％以上，有效地减少水土流失。

（3）经济增长目标。经过综合治理后，示范区内可新增直接经济效益 103.5 万元，新增人均粮食 206kg，人均收入达到 1513 元，比治理前增加 964 元。

2.4.2 建设规模

根据示范区土地利用现状，结合自然和社会经济条件及治理目标，在优先建好基本农田、解决当地群众温饱问题的前提下，遵循宜农则农，宜林则林，宜牧则牧，适地适树（草）的原则确定治理规模。示范区建设和京津风沙源治理工程相结合，在芦草胡同小流域治理面积 1327hm^2 的基础上，建设 400hm^2 人工植被定向恢复试验示范区，退耕还林还草 200hm^2，高效农田 100hm^2。

2.4.3 总体布局

根据中度侵蚀区的地形地貌特点，以治理风蚀和水蚀为中心，采取工程措施、生物措施相结合的办法，从上到下，设计三道防护体系。

（1）坡面工程防护体系：主要包括坡的上、中、下三部分。

1）坡的上部：以封禁治理结合造林为主，树种为山杏、核桃等耐瘠薄、耐干旱灌木。

2）坡的中部：以截流沟等小型拦蓄水工程为主，层层设防、节节拦蓄、减缓冲刷；同时根据地质条件、土层厚度，因地制宜地栽种灌木。

3）坡的下部：即坡脚，大部分为坡耕地，以修筑坡式梯田为主，梯田地埂栽植灌木形成生物埂；同时根据土壤类型、土层厚度可以布置带式林草带，以

林防风固沙，以草养畜，促进农村各业经济发展。

（2）发展以水浇地为主导的高效农田建设体系：有效利用水源条件，积极发展水浇地，建立防风固沙的农田防护林系；打井灌溉，推广高科技的节水灌溉技术；变广种薄收为少种多收，提高经济效益，增加农民收入。

（3）沟道工程防护体系：以谷坊坝、沟头围埝等小型拦蓄水工程为主；其中筑谷坊坝 40 道，沟头围埝 0.6 万 m。

2.5 建设内容

本着示范区建设和京津风沙源小流域综合治理相结合的原则，在芦草胡同小流域内，建设 4km^2 人工植被定向恢复试验示范区，退耕还林还草 2km^2，高效农田 1km^2，建设不同土地利用类型（农地、灌木林地和草地）侵蚀观测试验区各一个。在整个项目示范区中营造灌木林 200hm^2，其中沙棘 70hm^2、柠条 80hm^2、山杏核种植 50hm^2。人工种草 150hm^2，其中紫花苜蓿 70hm^2、沙打旺 80hm^2。建设浅层地下水灌溉高效农田 100hm^2，截流沟 0.8 万 m，坡式梯田建设 200hm^2，鱼鳞坑整地 30hm^2，小坑整地 170hm^2；封禁治理 400hm^2，科研观测设施建设 5 个小区。

由于没考虑到集中连片，布设的措施较为分散。为了使示范区能够体现集中连片，科研观测集中化，按照大不动小调整的原则，对部分措施面积及投资进行了调整，具体调整后任务包括：在整个项目区中营造灌木林 550hm^2，其中柠条 500hm^2、山杏核 50hm^2。人工种植冰草 220hm^2。坡式梯田建设 50hm^2，高效农田建设 100hm^2，鱼鳞坑整地 160hm^2，截流沟 0.8 万 m，封禁治理 130hm^2。

3 示范区风沙观测结果与分析



为了对典型示范区综合治理效果进行科学评估，分别选择农地、灌木林地和草地三种典型地貌建立风蚀观测试验小区。对试验小区内的气象、风速、地表侵蚀厚度、土壤泥沙颗粒组成和输沙率等进行现场观测，并结合泥沙运动理论分析，研究风沙源区的风沙起动、扬起和输移规律，探讨不同粒径组成的地表物质扬起输移的范围，对示范区内治理工程减少风蚀的效益进行评价。

3.1 主要观测仪器

在监测试验小区内建立了一套全自动气象监测系统，进行全年 365 天实时动态跟踪监测，并配合部分人工现场监测。现场监测仪器主要包括小型自动气象站、手持气象仪、自记式水位计、集沙仪、量水堰和高精度电子天平等，其主要使用情况说明如下。

（1）小型自动气象站。示范区气象观测采用的是美国生产的 TERM8W 型全自动数据采集气象站（见图 3.1），该气象站可以实现气象监测全程自动化，采集人员可以根据需要随时调用采集器存储的数据，也可以使用电脑与采集器

需要全本请访问 www.ertongbook.com