

河北师范大学

硕士学位论文

河北坝上草地土壤风蚀特征研究--以康保县为例

姓名：要洁

申请学位级别：硕士

专业：自然地理学

指导教师：常春平

20120522

摘 要

土壤风蚀所引起的土地退化、土地沙化以及因此所造成的沙尘暴灾害是近年来北方农牧交错带最严重的环境问题,甚至已成为中国北方地区重大的生态环境和社会经济问题之一。河北省 90%以上的草地均出现了不同程度的退化,这不仅制约了草地畜牧业的发展,而且由于草地防风效应的减退,对河北省及京津地区的生态环境安全构成了一定威胁。自 2000 年以来坝上地区开始实施退耕还林还草工程,虽然在局部进行治理并且已经有所好转,但治理的速度还远远赶不上破坏的速度,因此这一地区的荒漠化情况还是很令人担忧的。

本文选择河北坝上地区康保县这一典型农牧交错区,采用野外观测和风洞模拟相结合的方法,通过对不同类型草地类型的土壤有机质含量、地表粗糙度、土壤风蚀量情况的分析并与农田进行比较,研究草地的抗风蚀能力,揭示不同草地类型的防风蚀效果,从而得出草地今后的发展趋势。同时为康保县做好防治土壤风蚀提供了理论依据。

研究表明:

(1) 土壤有机质的高低与草地类型,土层的深度有关系。草地覆盖度越高,风蚀作用越小,土壤有机质含量越高;表层土壤极易被风蚀,土壤退化速度快,而深层土壤退化较为缓慢,退化速度要低于表面退化速度;地下部分植物根群密布,能够固着土壤、改善结构、固定养分、提高有机质含量;不同草地类型放牧强度不同,不仅影响地上部分,而且影响地下部分,进而影响到土壤有机质含量。

(2) 土壤有机质含量与地表状况有明显的关系,地表植被覆盖度高的土壤有机质明显高于地表裸露的土壤的有机质含量。

(3) 土壤的风蚀与地表粗糙度有密切关系。草地地表粗糙度的变化情况为围封草地>人工草地>天然草地,当地表覆盖度在 70%以上地表粗糙度较大,此时就能起到明显的防止水土流失的作用;

(4) 通过与农田实验结果对比,在人工草地的种植中,随植被高度的增加,土壤侵蚀模数有呈指数形式下降的趋势;风向与种植物的茎向夹角越大,土壤受

到的风蚀强度越小。由此可见在退耕还草过程中人工植被建设应采取种植植株相对高的草种，并且人工草地垄向应与风向垂直来减小风蚀强度。

(5) 通过风洞试验得出：草地的风蚀强度 (Q_t) 与地表粗糙度呈负相关，与风速呈正相关。建立了风速 (V) 与风蚀强度的关系模型 $Q_t = k \cdot \exp(b \cdot V)$ (k 、 b 为常数)。

关键字：河北坝上 草地 有机质 土壤风蚀

Abstract

Soil wind erosion can cause land degradation, land desertification and sandstorms which are the most serious environmental problems in recent years in the northern farming-pastoral areas of and even become a major ecological environment problem and one of the socio-economic problems in north of China. More than 90% of the grasses in Hebei Province have been more or less degraded. This phenomenon not only constrains the development of livestock, but also created a threat of ecological security in Hebei Province and Beijing-Tianjin region due to the decline of effect of grassland preventing the wind invasion. Since the year 2000, Bashang area implemented the project of reducing cultivated land for green grass. Some place has been improved, but the speed of governance cannot keep up the speed of destruction. Desertification in this region is still worrying.

This article chooses KangBao county of Hebei Bashang area as a typical farming-pastoral area. I adopt the methods of observation of field and the combination of wind tunnel simulation. Through the analysis of the organic matter of soil, the roughness of the earth's surface and the amount of wind erosion of the different types of grass and the comparison of farmland, this article researches the wind resistance of grass, reveals the effect of wind erosion prevention, and concludes that the trend of development of the grass. At the same this article time provide the theory basis for KangBao country to the prevention of soil erosion.

The results show that:

(1) There are relationships among the soil organic matter, the type of grass and the depth of the soil. The higher of the grass coverage is, the smaller of the wind erosion modulus is and the higher of the soil organic matter is; Surface soil was easily erosion by wind, the speed of soil degradation is fast and the speed of depth soil degradation is relatively slow; Plant roots group of underground which can fix the soil, improve the structure of soil, fix the nutrient and improve the content of the organic matter is densely; Different grass types have different grazing intensity, which not

only has the influence of the ground part, but also had the influence of underground and the content of soil organic matter. (2) There are obvious relationships between the content of soil organic matter and conditions of the earth surface. The content of surface soil organic matter is higher than the surface of the bare soil organic matter.

(3) There are close relationships between the soil erosion and roughness of the earth surface. The changes of the surface roughness is to seal the grass > artificial grass surrounded > natural grassland, when the coverage in 70% or even higher, the grass can prevent soil erosion.

(4) The height of crop plants is different, the angle of the wind and planting is different, and wind erosion strength is different. The height of crop plants increased, the soil erosion modulus show descended trend. The bigger of the angle of the wind and planting is, the smaller of the soil erosion is. Therefore, in the process of forest and grassland construction should take artificial vegetation planting plant relatively high grass seed, and plants should be and the wind to planting vertical to reduce wind erosion intensity.

(5) Wind tunnel test concludes: There are negative correlation between the intensity of grass wind erosion (Q_t) and the roughness of the earth surface. And there are positive correlation between the intensity of grass wind erosion (Q_t) and the wind speed. Establish the relationship model of the wind speed and the strength of wind erosion: $Q_t = k \cdot \exp(b \cdot V)$

.Key word: HebeiBashang; Grassland ;Organic matter ;Wind erosion

1 绪论

1.1 选题背景

草地是一种重要的自然资源,其特征是具有一定的数量、质量,在空间结构上有一定的分布面积,有特定的生产能力,是畜牧业的主要生产资料^[1]。草地是一种可再生资源,对于社会经济的可持续发展来说起着非常重要的作用^[1, 2]。草地是畜牧业发展的重要物质基础,与此同时还有防风固沙、保持水土、涵养水源、保护生物多样性等生态功能^[3, 4, 5, 6]。然而由于各种不合理的利用方式,致使我国天然草地面积不断减少、质量也持续下降、载畜力逐年降低,加之超载过牧现象普遍存在,这些都造成了草地退化、沙化、盐渍化的不断扩张,对我国的生态安全构成了重大威胁。许多研究结果表明,放牧是影响草地植被变化的重要因素,适当的组织放牧和实施科学的放牧技术及牧场管理,可以使家畜获得充分的牧草,不仅不会对草地造成损害,还能改良草地质量,促进牧草再生,同时还能促进生草土块的形成和土壤有机质的分解。我国草地退化十分严重,退化面积以每年 $200 \times 10^4 \text{hm}^2$ 左右的速度不断增加,现已成为世界陆地生态系统中草地退化最严重的地区之一^[7]。

风蚀是造成土地荒漠化的重要原因之一,而在农牧交错带年降水变率大,地表物质较松散,在风力作用下易被吹蚀、搬运和沉降、堆积。土壤风蚀现已逐渐成为全球性的环境问题,多发生于干旱半干旱地区,全球范围内的土壤风蚀主要发生在北非、中亚、南亚和东亚的部分地区,另外在西伯利亚平原、澳大利亚、南美洲南部和北美洲的内陆,都伴有土壤风蚀的发生,风蚀沙化面积多达 3600 多万平方千米,占到陆地总面积的 1/4 左右,与此同时风蚀沙化面积也在不断扩大,每年约有 5-7 万平方公里的肥沃土地被沦为沙漠^[8, 9]。

土壤风蚀及土地沙化也给我国生态环境带来了巨大影响,土地沙化面积占全国总面积的 1/2 以上,且多分布于北方干旱半干旱地区^[10]。我国农牧交错带多位于干旱半干旱地区,因此这一地区的环境问题一直是被关注的焦点。坝上农牧交错带是长期人类活动所形成的传统农业与传统牧业镶嵌结合的区域,该区域气候特征为春季降雨少多风沙,加之人口数量不断增加,加剧了对这一地区草地土壤

的开发,草地被开垦为农田后,特别是秋季翻耕后的农田在初春由于土壤表面缺少覆盖极易发生风蚀,这一现象造成了生态环境的破坏,土壤质地的改变,土壤的物理、化学性质发生变化,生物质量不断下降,养分逐渐减少,土壤肥力随之下降。

鉴于风蚀对土壤和生态环境的破坏 2000 年以来,“一退双还”(退耕还林还草)在这一地区实施,减少了土壤的风蚀,增强了草地土壤的肥力。逐步恢复草地生态系统。目前虽然在局部进行治疗并且已经有所好转,但治理的速度还远远赶不上破坏的速度,因此这一地区的荒漠化情况还是很令人担忧的。

草地生态系统在全球碳循环中的作用重大,主要是改变了土壤有机碳输入及土壤结构和环境条件等^[11]。该系统与森林等其它类型陆地生态系统相比有明显的特点,即土壤中集中了绝大部分的碳素储量^[12],从诸多对草地土壤有机碳的研究中得出,土壤中植物残体量和土壤微生物作用下分解损失量的平衡状况是决定土壤有机碳含量的主要因素。土壤有机质是植物所需营养元素(如 N、P)的重要来源,体现土壤肥力的重要标志,有机质的存在可以使土壤保持良好的渗透性、通气性、缓冲性,重要的是土壤有机质中含有疏水基、亲水基和游离基等多种官能团,在对污染物的吸附-脱附过程中起非常重要的作用^[13、14]。由此可见草地对土壤的保护作用和对风蚀的能力不容忽视。近些年来在康保地区农田周围种植牧草,或将天然草场进行围封,不断扩大草地面积,根据该地区的风向特征集中分布在西部地带;东部草地面积也明显增加,呈现出面积大、分布广、成片集中的特点,农田面积则缩小至低缓丘陵区;在南部波状高原草地面积增加,利用草地特有的防风效应保护农田不被风蚀。

本文通过对康保县的草地土壤有机质、地表粗糙度、土壤风蚀量的变化特征的调查与分析,从其对土壤风蚀的影响方面进行阐述,并与农田进行对比,揭示不同类型的草地对风蚀的防护效果,进一步证明土壤有机质的重要性,同时也为防治风蚀减少土壤沙化危害提供理论依据。

1.2 研究综述

1.2.1 土壤风蚀研究进展

土壤风蚀现象自古以来就被人类所认识,早在古希腊时代国外就有相关叙述,19 世纪末西方科学界认识到,风沙活动是地球表面主要营力之一^[15、16],这

时的风蚀现象主要局限于地质学领域,认为该过程仅仅是一种地质过程,而风蚀也只是一种微弱的地质营力,该阶段主要以考察、描述为主。20 世纪 30 到 50 年代风蚀研究从感性发展到理性,从定性描述飞跃到定量研究。到 60、70 年代土壤风蚀从理论研究向应用研究转变;80 年代以来风蚀研究在深度和广度上进一步得到完善。该时期由于数学分析法、计算机处理技术被广泛应用于土壤风蚀研究中,许多中外学者通过研究建立了各种土壤风蚀预报模型。近些年来由于全球环境、气候的变化导致风蚀强度发生了时空变化,沙漠化、沙尘暴等环境问题日益突出,研究集中在环境变化与土壤风蚀之间的相互关系,对风蚀模型进行检验与完善,以及新技术的推广和应用上,使得区域性风蚀研究逐渐向国际化迈进,国际性的联合学术研究应运而生。

我国早在公元前 1150 年,也有诸如“雨黄土”、“雨砂”、“土霾”等降尘现象的记载^[17]。但我国在土壤风蚀研究中与国外发展相比一直处于薄弱环节,没有形成系统的研究。直到 20 世纪 50~60 年代中国在土壤风蚀研究方面开始建立实验站,研究如何防治农田、交通线风蚀沙害。经过调查分析,针对防治农田的风蚀提出了一些办法,并提出“沙漠化”的概念。这一时期的主要研究以定性分析和描述为主,并提出了防治建议,如营造防护林带、种草以及作物轮作。60 年代后期,航片分析、定位观测、风洞试验等研究手段的引入,获得了大量的科学资料,较细致的进行了风蚀分类,分析出风蚀机制与风的吹蚀、土壤水分蒸发、干裂等理化过程有重要关系^[18]。70 年代以来,全球环境退化、土地沙漠化等一系列环境问题日益突出,我国在对土壤风蚀研究方面实行宏观与微观研究相结合,从定性描述逐步向定量分析过度。主要应用遥感等现代技术手段进行实地调查、定位观测,并结合风洞实验模拟土壤风蚀的影响因子,研究风蚀过程的作用机理。开始涉及土壤风蚀的动态变化,风蚀对水库、河流、泥沙的影响,与局地小气候,大气尘降、输送的关系等的研究。90 年代以来,我国对土壤风蚀过程的模拟采用动态仿真模型与多元统计数学模型。但由于缺乏长期系统的研究,缺少野外试验基地,缺乏先进的仪器,缺少长期的观测资料等,我国的研究进展仍然与国际水平有很大差距。近年来,我国在荒漠化治理方面取得了令人瞩目的成绩,但问题依然很严重,与社会经济、农牧业的发展之间的矛盾仍然十分严峻,使得我国必须在防治土壤风蚀问题上加大研究力度,提出实际可行的研究措施。

1.2.2 土地利用方式与土壤风蚀的关系研究进展

土壤侵蚀是由于土地覆盖发生变化而引起自然环境的改变,是自然和人为双重因素共同作用的结果。不合理的土地利用方式和地表植被覆盖的大量减少对土壤侵蚀现象有放大效应^[19]。出于对土壤风蚀的治理,土地利用与土壤风蚀关系的研究已逐步被列为土壤侵蚀研究新课题。目前,国内外诸多学者对此的研究较局限,从研究方法上一般是基于 GIS 和 RS,另外还包括在模型基础上的定量研究^[20]。

多年来,国内外学者经过研究,构建了大量关于土壤侵蚀的半定量、定量模型,这些模型的共同点是土地利用的不同方式作为土壤侵蚀的一个影响因子,计算在不同的土地利用方式下土壤受到侵蚀总量,依据土壤流失的允许值来选择最佳的土地利用方式。草地作为一种土地利用方式,可以影响土壤的理化性质,改变土壤的环境条件,起到保持水土,防风固沙的作用。所以,近年来我国在一些干旱半干旱地区、农牧交错带地区,在农田的上风向种植草地,以保护农田土壤不被风蚀。

1.2.3 草地土壤风蚀研究进展

19 世纪 40 年代我国针对国外学者对草原的调查,开始了对草原风蚀的研究,直到 50 年代叶培忠和王栋教授开始对草地的利用和改良进行研究,得出我国草地的不良现状主要是由于人为原因所致,如管理粗放^[21]。近些年来,草原退化日益严重,众多的国内外学者分别从植物学、生态学、土壤物理性质和水分状况的角度,研究了放牧率对高山草地的影响以及放牧对草原生态系统影响,但缺乏对草原风蚀的定量研究。近几年,风蚀风洞研究不断推广,建立了许多数学函数关系模型,其中有屈建军(2004)、荣姣凤(2004)等的风蚀量与风速的函数关系模型^[22、23];董治宝(1996)、胡孟春(1991)等的风蚀率与土壤含水率的关系模型^[24、25];董治宝(1996)、陈智(2005)等的净风和挟沙风与土壤风蚀的关系模型^[24、25、26],另外一些学者还研究了风蚀量与风蚀影响因子之间的经验关系。2005 年许中旗等人利用风洞在锡林郭勒草原对不同的放牧条件下的土壤进行了实验研究^[27]。

土壤有机质作为土壤肥力的一项重要指标,对草地土壤有较大影响。草地的风蚀情况也可以从草地土壤有机质的含量高低中表现出来。Kononova 和

E.V.Turin 认为影响土壤有机质转化的因素有气候、植被、地形、成土母质和人为活动^[28]。

气候是土壤有机质的主要外在影响因素之一,温度的变化是影响其组成的外部条件^[29]。Jenkinson 经研究,得出年平均气温每下降 1℃,土壤有机质会随之增加 2~3 倍^[30];我国学者王长庭等研究得出:适宜的温度土为土壤有机质的积累提供良好的外部条件,过高或过低的气温均有负效应^[31]。另外土壤水分也是影响土壤有机质一个重要因素,但没有温度的影响明显。

20 世纪 20 年代,科学家们注意到土壤质地对土壤有机质也有一定的影响。粘重土壤有利于有机质的积累,土壤有机质与粘粒组合形成不易分解的物质:有机——无机复合体^[32]。

人类的放牧、对草地的开垦、管理、利用以及道路建设等活动对土壤有机质含量的影响大大超过自然因素的影响。草地开垦为农田释放出大量土壤有机碳,据估计,每开垦的深度增加 1m,土层内的土壤有机碳将损失 20%~30%^[33]。开垦可以促进土壤呼吸,加速有机质的分解。据研究,不同的土地利用方式对土壤有机质的含量也有所影响,旱地变林地,土壤有机质提高 21%;旱地变草地,土壤有机质提高 38%;因此退耕还林还草改变土壤覆盖度,增强防风蚀能力,提高土壤养分^[34]。

草地生态系统在陆地生态系统中处于重要地位,分布面积达到 $24 \times 10^8 \sim 53 \times 10^8 \text{hm}^2$,占陆地的 24%左右,生物量占全球生物量的 36%左右^[35、36]。草地中土壤有机碳的存储量约占草地总有机碳量的 89.4%^[37]。草地生态系统中的植物凋落物和根系构成了土壤有机质的主要来源,其中地下根系较地上部分更加重要,干旱半干旱地区的草原上,地下生物量往往达到地上生物量的 3~4 倍。放牧活动是影响草地有机质含量的重要因素,有机质含量降低,养分随之减少,土壤结构及其性能变差,草地不断退化,相应的减少了归还到土壤里的有机质。过度放牧一方面由于牲畜不断采食植物,减少了向土壤的碳归还量,另外牲畜不断啃食植物根系,使地下生物量减少进而减少了土壤有机质的大部分来源。另一方面,加速了土壤呼吸作用,损失土壤有机碳^[38]。裴海昆通过对青藏高原草甸土壤有机质的研究得出,各组分有机质的变化受放牧强度影响很大,过度放牧的影响结果尤为明显,导致土壤复合体各组中有机质大幅度下降,促使土壤肥力明显降低^[39]。

盛学斌指出, 超载放牧将促使草地发生一系列的退化变化, 草地生物量的减少, 导致土壤肥力降低, 土壤结构遭破坏, 草地不断退化甚至发展成土壤沙化^[40]。

1.2.4 草地生态系统恢复研究进展

草地属三大生物系统之一, 草地的健康发展可以保持环境的稳定, 维持陆地生态功能的安全。

就草地生态系统恢复的研究, 国外约开始于 20 世纪 30 年代。1935 年美国 Leopold 教授带领他的学生们就开始了最早的草地生态系统恢复试验, 他们创造的理论和方法至今仍有指导作用。美国于 20 世纪 40 年代初开始了对垦荒后受损的草地实施恢复的研究^[41、42]。与此同期前苏联也研究如何改良草地^[43、44、45、46、47]。20 世纪 50、60 年代, 欧美国家环境问题日益突出, 也开始寻求对环境进行恢复和治理的对策方法。近些年来, 环境问题、生态问题日益突出, 区域性甚至全球性开始实行联合方式针对退化的草地生态系统进行恢复和重建。

20 世纪 50 年代, 诸多生态学者对我国西部地区进行数次考察, 都曾强烈表示应对这一生态脆弱区进行草地生态系统恢复, 必须改变在陡坡地带开垦农田实行耕种的现状, 使草原植被得到恢复^[48]。从此我国开始从政策上实行对草地生态系统的恢复和管理。2003 我国正是开始实施“退耕还草”工程, 采取围封草场, 禁牧、休牧、农牧轮作、建设人工草地等方式, 大力增加草地面积^[49、50]。以保护农田不受风沙侵蚀。

1.3 研究目标、内容与创新点

1.3.1 研究目标

通过不同类型草地类型的土壤有机质含量、地表粗糙度、土壤风蚀量情况并与农田进行比较, 揭示草地土壤的风蚀特征以及抗风蚀能力, 从而得出草地今后的发展趋势。

1.3.2 研究内容

(1) 本文通过 1988 年、2000 年、2004 年 2009 年四个时段 TM 影像, 在 ArcviewGIS 技术平台上分析康保县土地利用情况的变化, 得出各个时期草地的时空变化情况及其特点。

(2) 采集野外各类草地土样, 进行土壤有机质测定, 进行有机质含量对比, 从草地有机质含量上揭示不同草地类型抗风蚀能力。

(3) 通过与农田地表粗糙度的对比确定各类草地的防风蚀能力。

(4) 风洞模拟得出不同草地风蚀强度，研究风蚀强度与风速的关系模型。

1.3.3 创新点

通过野外观测和室内风洞模拟相结合的方法，在河北坝上农牧交错带进行草地空间结构土壤风蚀特征研究，并初步确定不同草地类型土壤有机质变化与抗土壤风蚀的能力的关系。

1.4 技术路线

通过收集资料阅读文献确定研究方向，并在河北张家口康保县进行野外调查，确定试验样地。2011 年 4~5 月通过野外观测，获得不同草地类型的实验数据，经过之后的处理分析得出结论。具体技术路线见图 1.1。

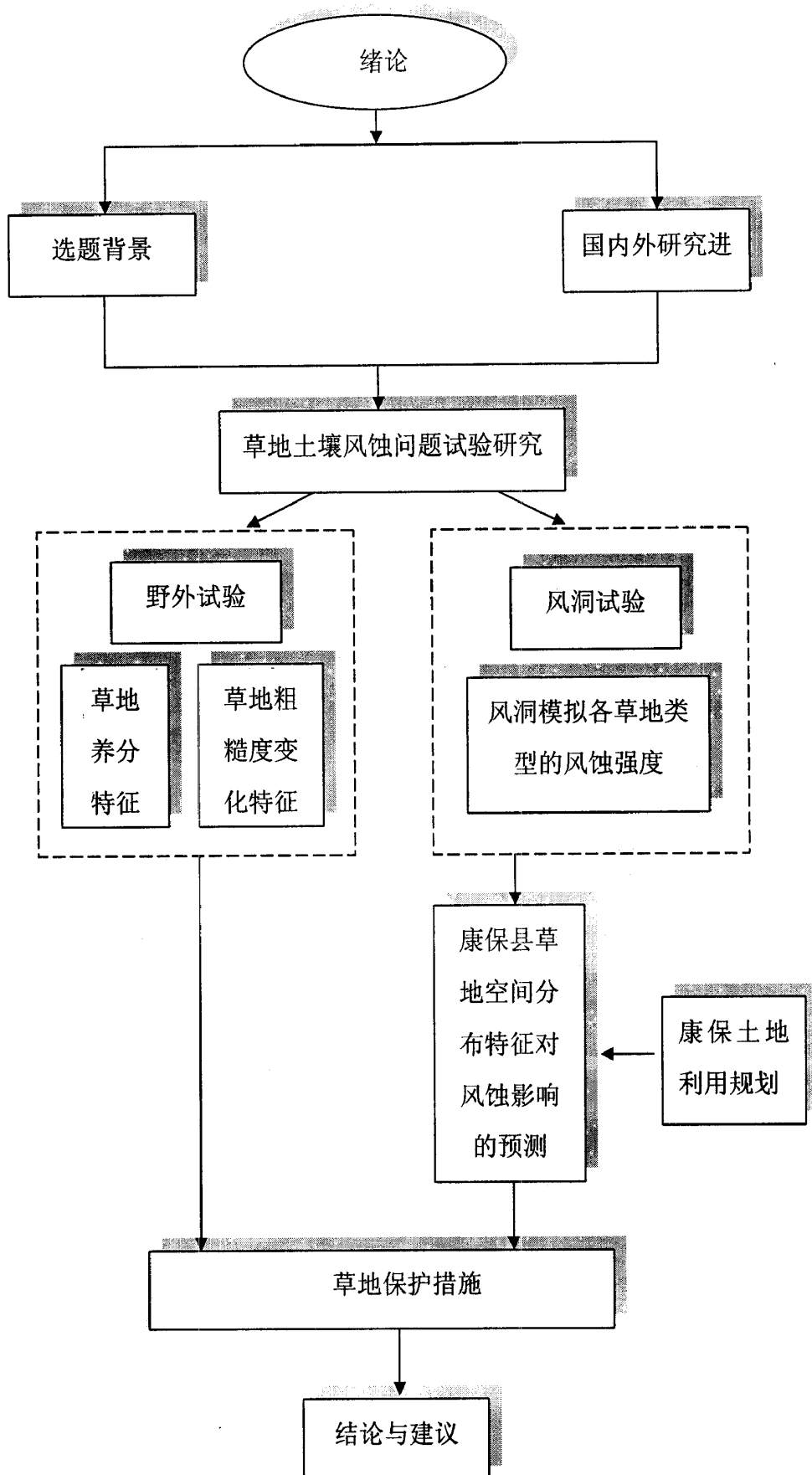


图 1.1 技术路线图

2 研究区概况

2.1 研究区自然

2.1.1 地理位置

康保县位于张家口市北部，内蒙古高原的东南边缘，其三面均与内蒙古自治区接壤，东与太仆寺旗相连，西北与化德毗邻，背靠锡林浩特大草原，南面是经济发达的京津张地区。其地理坐标为北纬 $41^{\circ}25'$ - $42^{\circ}08'$ ，东经 $114^{\circ}11'$ - $114^{\circ}56'$ ，总面积 3365.67 平方公里。

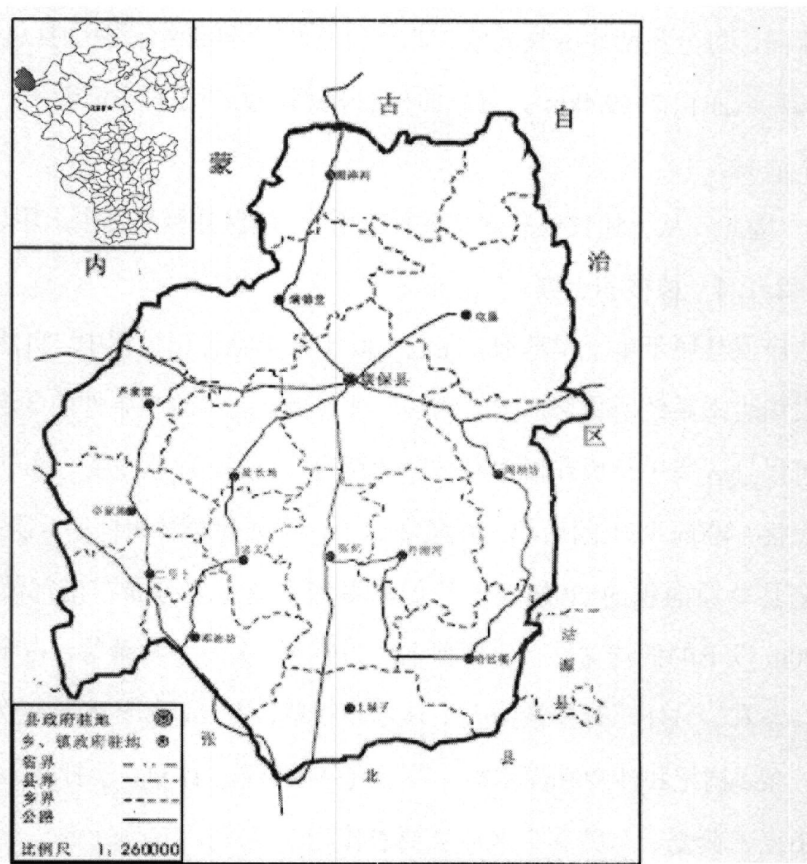


图 2.1 康保县地理位置图

2.1.2 地形地貌

康保大地构造纵跨两个单元，南部是“内蒙台背斜”，北部边缘地区属“内蒙古褶皱带”，由东北向西南依次形成了北部低山丘陵区、东部缓坡丘陵区 and 南部波状高原，全县平均海拔 1450m。

2.1.3 气候及水文条件

· 该县属东亚大陆性季风气候区中的温带亚干旱区，大陆性气候特征明显。全年多受蒙古高压控制，气候条件比较恶劣：（1）热量不足，年均温 1.2℃左右。夏季凉爽短促，年极端最高气温 33.6℃。冬季严寒漫长，年极端最低气温-36.4℃。无霜期 92 天左右，较低的气温不利于农作物生长。（2）大风较多。每年 6 级以上平均 60 天左右，冬春季常有“雪暴”、“沙尘暴”天气出现，每年沙尘暴天气平均 14 天左右，年平均风速约 2.99m/s，严重影响农业生产。（3）干旱少雨。年平均降水量在 306.3-409.6mm 左右，是河北省降水量最少的县域之一。

无常年性河流，是河北省唯一的无河县。仅有几条季节性河流，按照地表水的流向，可分为南北两大流域。北部流域面积 446km²，占全县总面积的 14%；南部流域面积 2949.4km²，占总面积的 86%，另外还有水淖若干，深度不大，不利于灌溉。

因此，从上述气候和水文条件来看，康保县极易发生土壤风蚀、沙漠化。

2.1.4 植被和土壤

康保县属于半干旱草原，在近 100 年来垦荒种田过程中，自然植被逐步被脆弱农田生态系统所代替。按照地形、降水和温度等自然条件的区域差异，全县草原可以划分为干草原和低湿草甸草原两个类型。干草原主要分布在北部低山丘陵区海拔 1400m 以上的山坡、丘陵和山中，主要建群种为针茅、隐子草、冰草等，占全县草原面积的 70%左右；低湿草甸草原主要分布在南部波状高原区海拔 1400m 以下的低洼盆地，建群种主要为碱茅、碱蓬、马薹等，占全县草原面积的 30%左右。另外还有少量的人工林木和牧草，主要以杨树和榆树为主，兼有少部分柠条、枸杞和沙棘等灌木林；人工牧草以苜蓿、冰草、沙打旺、木樨草等为主。春小麦、莜麦、马铃薯为区域主要农作物。

研究区内的地带性土壤为栗钙土，占全县土壤总面积的 99.3%。受地形影响从山地到洼地，依次分布有栗钙土、草甸土和盐土，后二者面积相当。全县土壤耕作层平均在 30cm 左右，有机质含量较低，平均为 1.6%，氮磷含量极低，并随地形呈现规律性变化，在低山丘陵和缓坡丘陵区，土壤养分从山顶到山脚呈递增趋势；在波状平原区，养分由岗梁、旱滩、二阴滩到下湿滩逐渐增加。

2.2 社会经济概况

康保县辖 17 个乡镇级行政单元，共计 28 万人口。自 1990 年以来人口不断增长，由 1990 年的约 27.6 万人增长到现在的 28 万人（图 2.2）。随着人口的增长，人们对经济发展的要求不断增加，促使康保县开始重视经济发展。然而该县经济发展一直处于全省、全市落后水平，2009 年张家口全市域城镇居民人均可支配收入为 12054 元，全市农民人均纯收入 3286 元，而康保县在这两项收入中只有 9290 元和 2420 元。所以，康保县的快速发展与否直接关系到张家口市能否实现全面小康社会的建设。康保县在经济发展方面属后发地区，最近两年开始起步，根据经济统计数据预计未来十年将处于快速发展阶段。

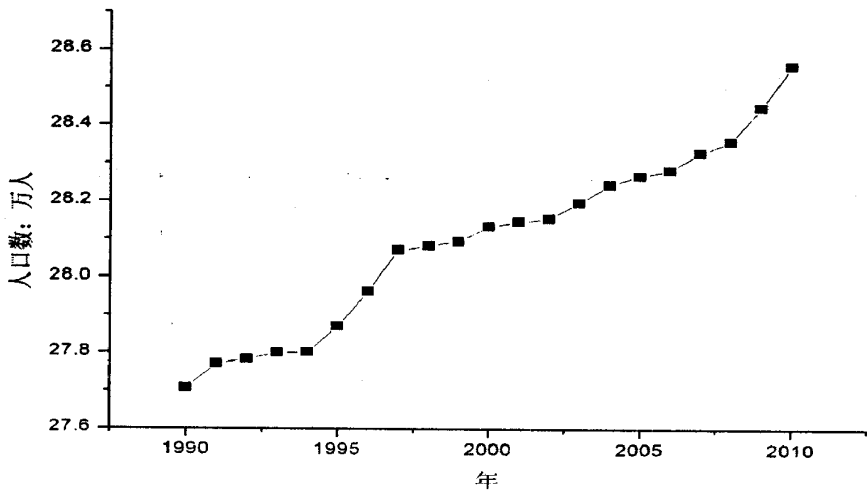


图 2.2 康保县 1990-2010 年人口变化情况

尽管农业生产自然条件较恶劣，但农业一直是该县的支柱产业，有“中国口蘑之乡”、“蔬菜之乡”的称号。近年来，又继续加快农业结构调整的步伐，围绕着壮大畜牧、蔬菜、食用菌等龙头经济，加大科技投入，并向设施农业、绿色农业、特色农业方向不断迈进，实现了农业产业化经营。第二产业发展缓慢是制约经济发展的主要原因，据统计 2009 年一、二、三产业结构比为 42.8:23.3:33.9。因此发展第二产业、改变产业结构成为经济发展的当务之急。近几年，借助当地风力优势开始起步发展风电产业，与此同时光电产业进入了酝酿规划阶段，由此看来康保县产业结构有望改变。

3 康保县草地时空分布特征

本章中康保县不同时期草地分布图的数据源采用的是 1988、2000 和 2004 年三期 Landsat TM 影像，其波段为 4、3、2 (RGB)，地面分辨率分别为 1988、2000 年 30m，2004 年 25m，时相为 9~10 月份。为了与之相作对比，本文又根据全国第二次土地调查所得数据，用 ArcGIS 做出相应的土地利用现状和土地利用规划图。

3.1 康保县草地空间分布变化

图 3.1 是康保县 1988 年各种用地的空间分布状况。从该图可以看出土地利用主要以农田为主，其次为草地、林地。草地主要分布在北部低山丘陵区，特别是在该县东北部，草地大面积的连片分布；在东部缓坡丘陵地区也有小片草地分布，但其主要是农田占主要面积；在南部波状地带草地以小面积分散布局为主，并伴有少部分水域，多为低洼处的水淖。

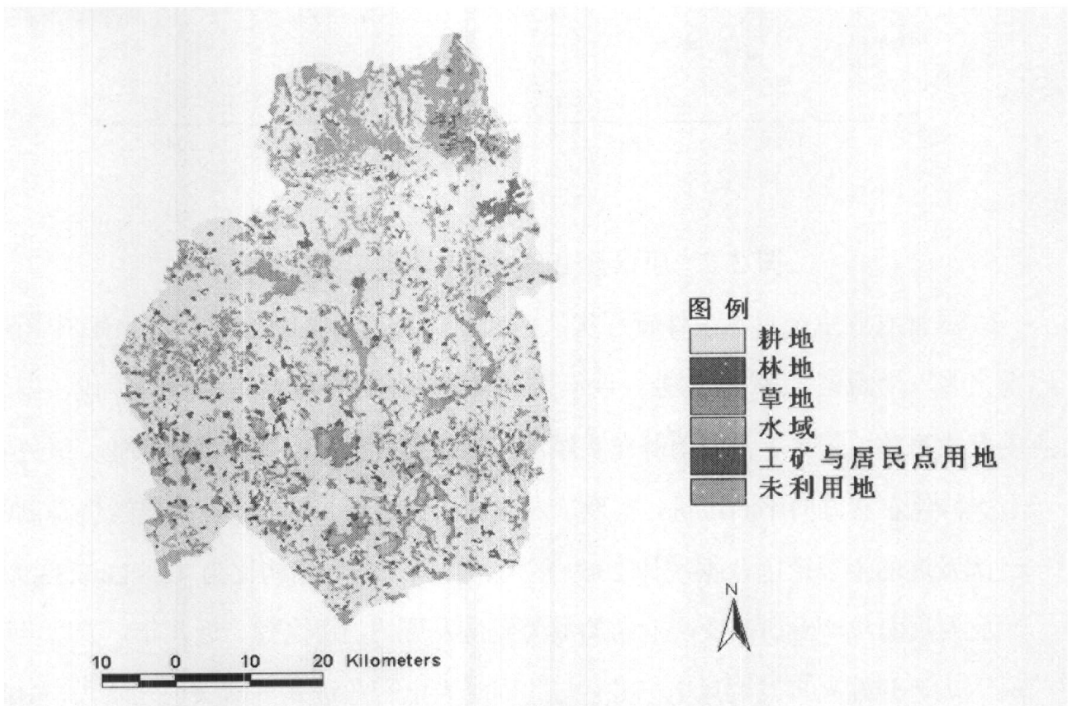


图 3.1 1988 年康保县草地空间分布

图 3.2 为康保县 2000 年各种用地的空间分布状况。由此看来 2000 年草地分布状况相对 1988 年基本变化不大，北部低山丘陵区依然是草地的主要分布区，

农田、林地次之，但明显看出农田面积在部分地区有所增加，草地相对缩减；东部缓坡丘陵草地仍然小面积分散分布；南部波状高原有小面积草地和水域。

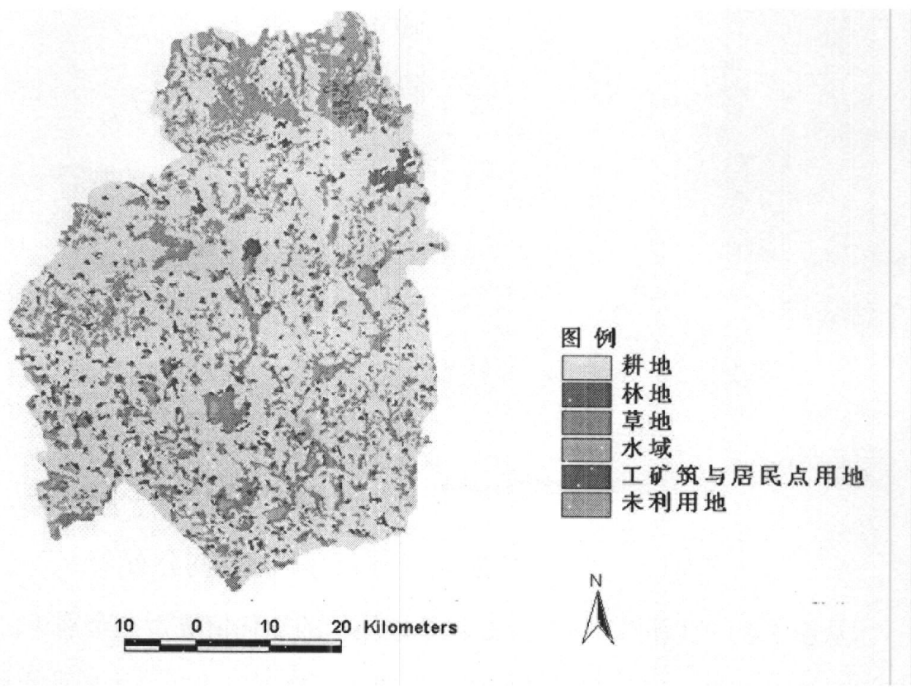


图 3.2 2000 年康保县草地空间分布

图 3.3 为康保县 2004 年各种用地的空间分布状况。2004 年与 1988 年和 2000 年相比，各用地面积发生了明显的变化，主要表现为林、草地面积扩大，农田大面积缩减，但从图中仍然可看出农田依然是主要用地类型，其次是草地、林地。北部低山丘陵仍以草地为主，且林地面积明显增加，农田只分布在地势较为低缓的山间盆地；草地面积扩大，集中分布在西部地带；东部低缓丘陵虽仍以农田为主，但草地面积明显增加，呈现出面积大、分布广、成片集中的特点。南部波状高原区水域面积缩小，草地面积增加。

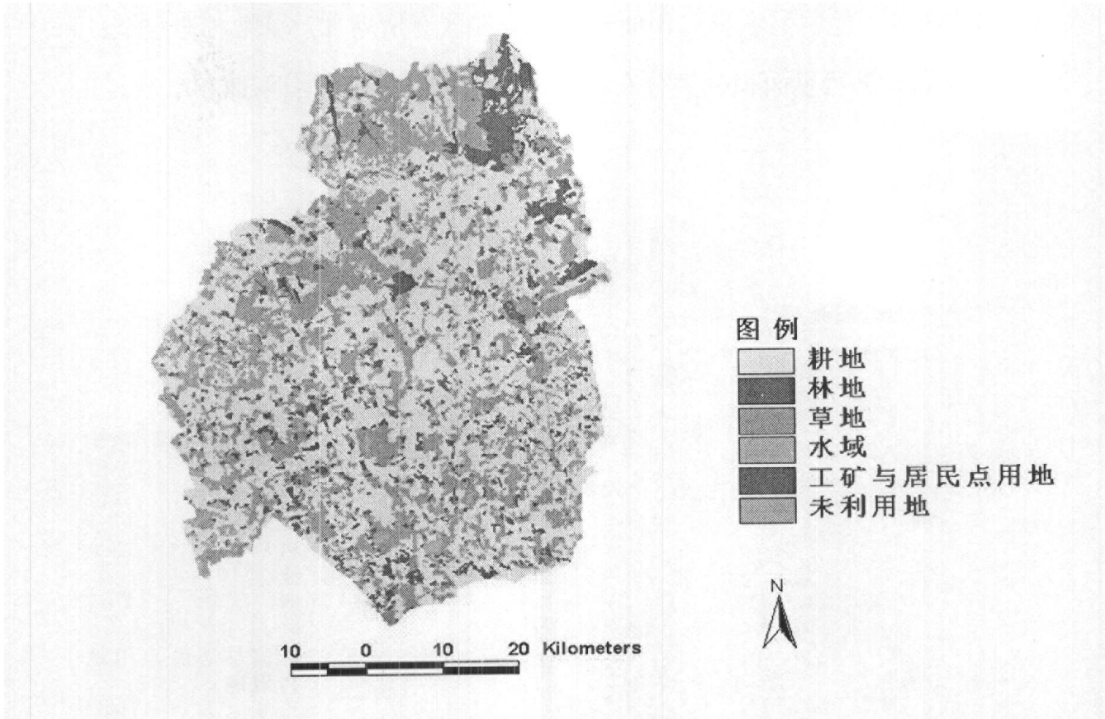


图 3.3 2004 年康保县草地空间分布

从图 3.4 可以看出 1990-2010 年草地面积的变化情况，在个别年份草地面积减少，但总体趋势还是有所增加的。据调查，建国以来随着农田的大面积开垦，高覆盖度的草地面积下降，低覆盖度草地面积不断增加，造成草地的严重退化。由于该县特殊的气候条件造成土壤风蚀严重，因此 1992-2000 年实施了天然草场的保护工程，围封天然草地 0.67 万 hm^2 ，改良天然草场 0.17 万 hm^2 ，退耕种草共计 2 万 hm^2 。中高度覆盖草地恢复迅速，草地面积显著扩大，到 2009 年共有草地面积 104391.91 hm^2 ，占全县土地总面积的 31.02%。

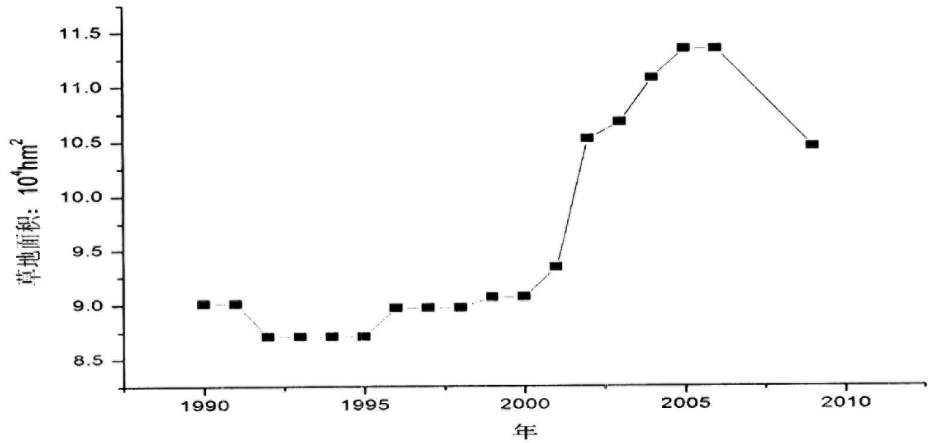


图 3.4 康保县 1990-2010 年草地面积变化

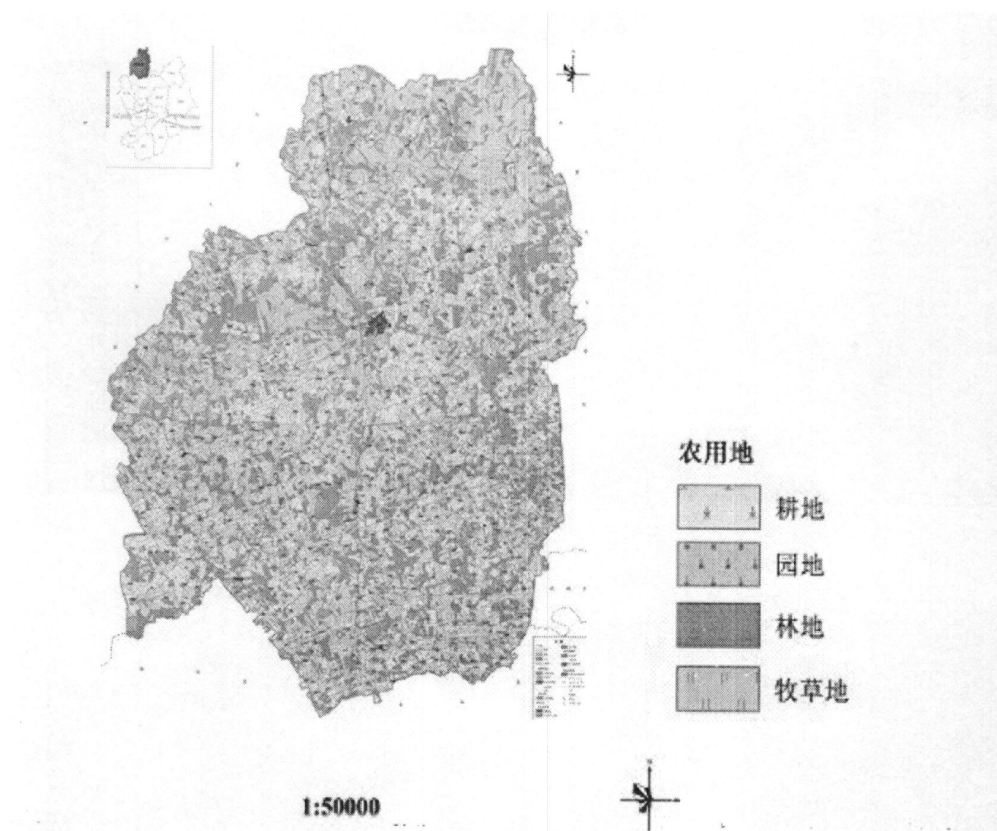
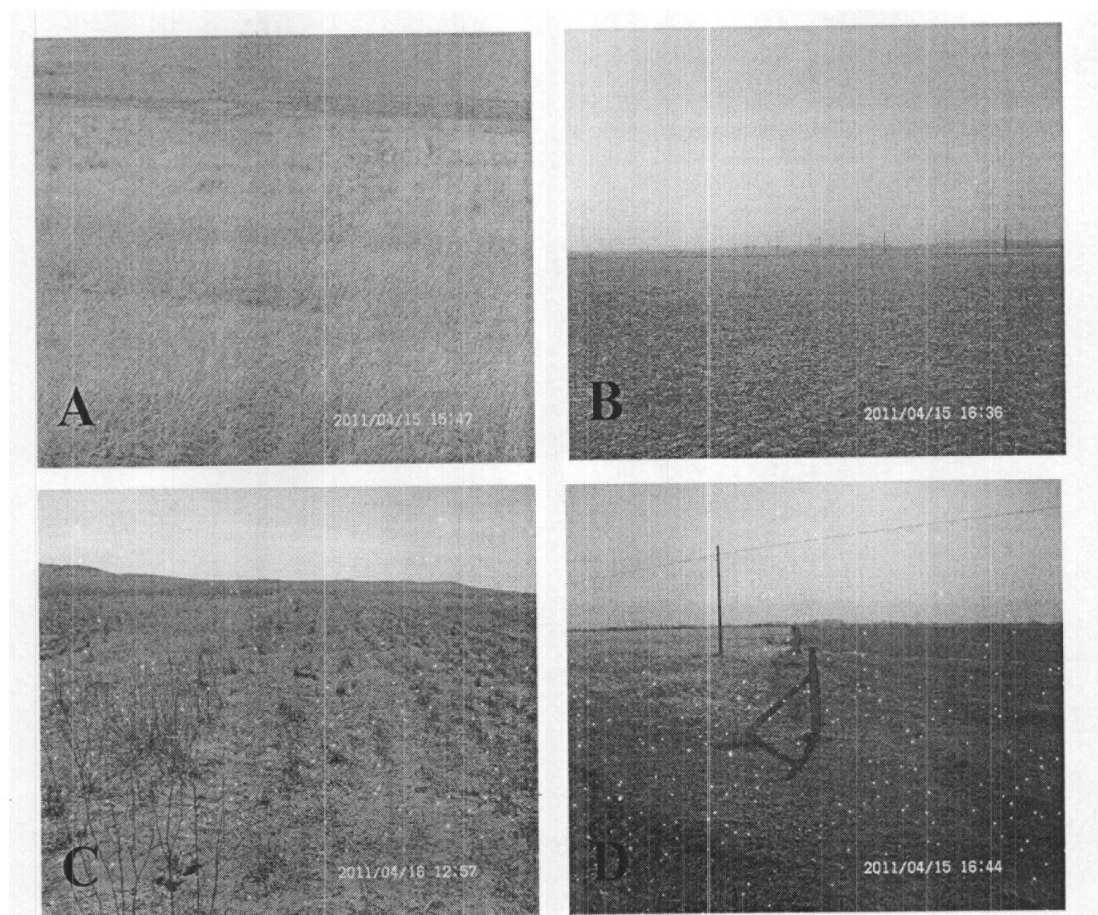


图 3.5 2009 年康保县草地空间分布

图 3.5 为康保县 2009 年各种用地空间分布状况。从图中可以看出康保县草地分布较广，面积大小不等的牧场草场若干，成片且面积较广的草地主要在北部的低山丘陵区 and 西北地区。北部有较大的康保牧场，面积 1.167 万 hm^2 ，该牧场于 2003 年起实施退耕还林草，经过几年的努力，草地土壤土质恢复较好。有人工草地，主要以种植紫花苜蓿为主，其次为柠条，另外还有些低矮的灌木丛，植被生长十分良好，放牧极少，植被盖度达到 60%-80%。

经调查康保地区天然草地和围封草地占草地类型的主要部分，县域西部的三面井牧场主要是大面积的围封草地，约有 7-8 年的围封期，虽有放牧，但由于围封期较长，制度较好，围封效果显著，植被种类有猪毛菜，蒿子，针毛，狗尾草，冰草等，植被盖度达到 50% 以上。



照片 3.1 康保县草地类型(A 围封草地 B 天然草地 C 人工草地 D 围封与天然草地对比)

康保县草地空间特征分析结果表明：康保的草地变化情况可分为三个阶段，第一阶段：1988 年-2000 年草地分布主要集中在康保县的北部低山丘陵区，主要有康保牧场；2000 年在南部波状高原区有零星的草地出现。第二阶段：2000 -2004 年，由于开始实施退耕还草工程，草地面积明显增加，主要向西部地区发展。这一阶段北部低山丘陵区的草地面积增大，很多小的牧场连成片，多分布于农田四周，起到保护农田不被风蚀的作用；西部地区草场面积加大，较大的牧场主要有三面井牧场、青龙村牧场。第三阶段：2004 年至今，草地面积有所缩减，由于过度放牧，使草地退化，为风蚀提供了条件，因此一些天然草地面积锐减。

3.2 康保县草地随时间的变化特征

表 3.1 康保县 1988~2009 年主要用地变化情况

类型	面积 (km ²)				占总面积的比率 (%)			
	1988	2000	2004	2009	1988	2000	2004	2009
农田	2348.7	2332.11	1837.42	1264.19	69.69	69.19	54.52	37.56
林地	98.22	103.95	275.54	759.45	2.91	3.09	8.17	22.56
草地	756.62	767.68	1083.33	1043.92	22.45	22.78	32.15	31.02
水域	46.19	37.08	36.62	27.2	1.37	1.1	1.09	0.81

从图 3.1~3.3 和表 3.1 可以看出康保县主要用地面积变化以 2000 年为标志划分成两个阶段，第一阶段：农田面积减小，林草地面积增加，但变化幅度相对平缓。农田由 1988 年占总面积的 69.69% 下降到 2000 年的 69.19%，林地由 1988 年的 2.91% 上升为 2000 年的 3.09%，草地则由 1988 年的 22.45% 上升为 2000 年的和 22.78%；第二阶段：2000~2004 年这一阶段中，农田与林草面积均出现了较大幅度的变化，农田面积急剧下降，占总面积的比率同 1988 年相比下降了 15.17%，下降幅度是第一阶段的 30 倍；与此相比林草地面积增幅较大，分别上升为占总面积的 8.17%、32.15%，与 1988 年相比分别上升了 5.08%、9.37%，是 1988~2000 年间增长幅度的 22.8 倍和 28.4 倍。

2009 年的土地利用状况又有所变化，农用地面积依然保持下降的趋势，由 2004 年得 54.52% 下降到 37.56%；草地面积也有所下降，由 2004 年的 32.15% 下降到 31.02%，下降幅度较小；而同一时期林地大面积增加，占总面积的比率同 2004 年相比上升了 14.39%。

综上所述，康保县在 2000 年前土地沙漠化较严重，处于扩张状态，而 2000 年后区域生态环境逐步由恶性发展向良性转变的趋势，表明自 2000 年在该地区针对区域生态环境的脆弱现状实施的防风固沙、退耕还林还草等措施，对生态环境的重建有明显的积极影响，可以看出草地和林地建设是防风固沙、防治土壤风蚀的一项行之有效的措施。

3.3 康保县草地现状存在的问题

由于康保县特殊的地理位置、地形、地势以及气候和土壤等因素，致使该县草地资源逐年退化，为草地土壤的风蚀提供了物质基础和动力条件。主要存在的问题：

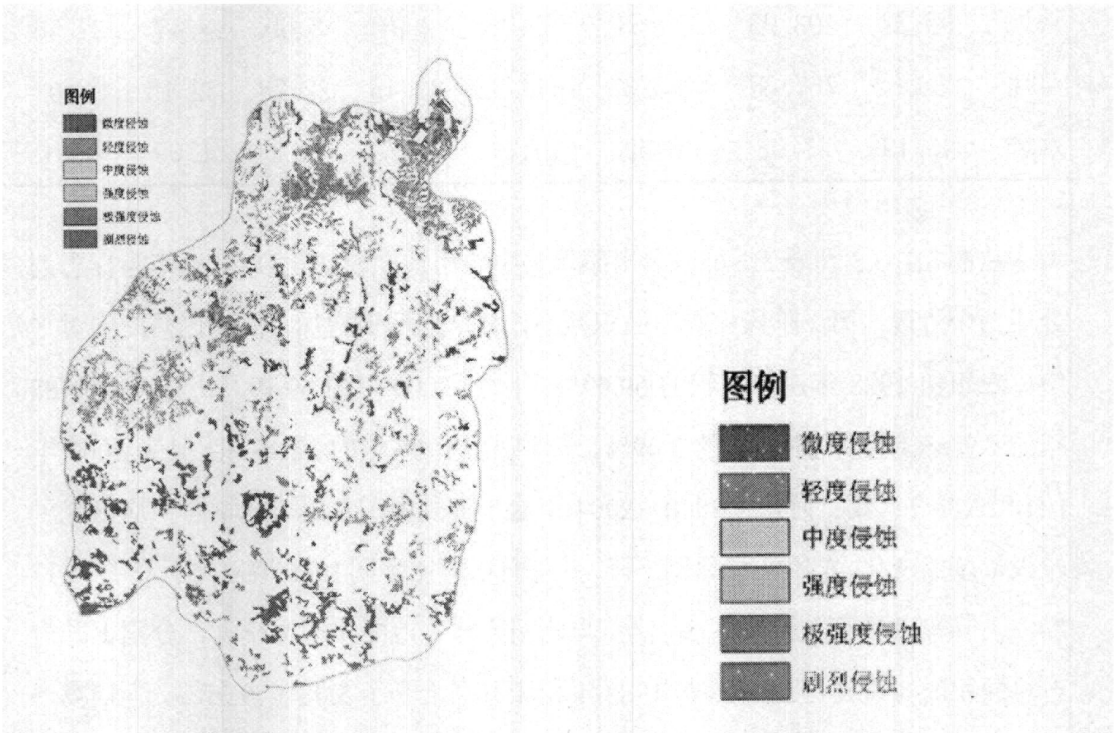


图 3.6 康保县草地风蚀强度图^[51]

表 3.2 不同地形区草地受风蚀的强度 单位%

风蚀强度	北部低山丘陵区	东部低缓丘陵区	南部波状平原区	总面积
微度	24.88	10.89	20.65	26.22
轻度	55.69	15.24	15.56	34.69
中度	26.32	43.21	45.09	29.56
强度	1.33	3.33	7.88	3.92
极强度	2.30	1.06	1.54	1.33
剧烈	1.65	1.21	0.97	1.13

(1) 研究区高覆盖草地面积下降，低覆盖草地增加，且草地布局分散，连片的大型牧场较少，不能起到防风蚀的规模效应。据研究调查，康保县不同地形分布的草地都受到不同程度的风蚀，如图 3.6 分为微度、轻度、中度、强度、极强度、剧烈风蚀。从表 3.2 看出研究区受到中度以上侵蚀的草地占草地总面积的 35.94%。北部低山丘陵区轻、中度风蚀面积较大，轻度以上风蚀比例占草地总面积的 87.29%，东部缓坡丘陵区受中度以上风蚀严重，占草地面积的 48.81%；在

南部波状平原区，草地的风蚀主要以中度为主，占草地总面积的 45.09%。从图 3.6 不难看出，北部低山丘陵区受到剧烈侵蚀的草地分布比例最高，这一地区是该县主导风向的上风向，主要受风蚀作用影响；位居第二的是东部缓坡丘陵区，由于坡度的原因，在坡度较大的地形区，草地的植被覆盖度较小，不足 45%，在迎风坡受到风力的侵蚀作用明显；中南部波状平原区受到风蚀的主要原因是土壤质地多为沙质土壤，易受风蚀。

(2) 由全县草本植被的现状可以看出，由于立地条件的不断恶化，致使大面积植被组成和群落结构简单化，植被稀疏，植株低矮，有毒有害草增多，最终导致草地退化严重。

(3) 缺乏林木防风，草地风蚀严重。该地区草原上几乎没有天然林，加上多年乱砍乱伐，森林的覆盖率以降低到不足 1%。

(4) 水资源不足，草场缺乏有效灌溉。康保县干旱少雨，潮湿系数仅为 0.2，地下水埋深浅，储水条件差，水量贫乏，且地表水贫瘠。

(5) 过度放牧。一直以来，由于过度放牧，优良的自然草场退化为荒山、荒地、荒滩，荒山植被稀疏，植株低矮，生物产量低、质量次，退化严重。因风蚀、沙化而荒芜弃耕的坡梁草地或自然植坡，植被稀疏，优良牧草群落不多，只生长价值极低的劣质杂草。因盐碱地不能农耕而形成的荒滩，植被以天然耐盐碱的植物为主，牲畜不喜食用。草场退化，使畜牧业发展面临很大威胁。2000 年以来，实施退耕还林还草，使草地面积迅速增加，开始发展畜牧业，牛羊啃食草地严重。

(6) 土壤养分不足，质地贫瘠。建国以来，由于康保县人口迅速增加，农垦持续发展，耕地面积不断扩大，草地面积逐步缩小，草场变为耕地后，并未实施合理的耕作制度，部分农田几年后撂荒，未变更的草地，也因为不合理的牧放造成了原生植被退化严重。冬春季节风沙大，吹蚀翻耕耙平的农田，致使地表养分不断减少，土地贫瘠。

3.4 康保县草地空间变化趋势预测

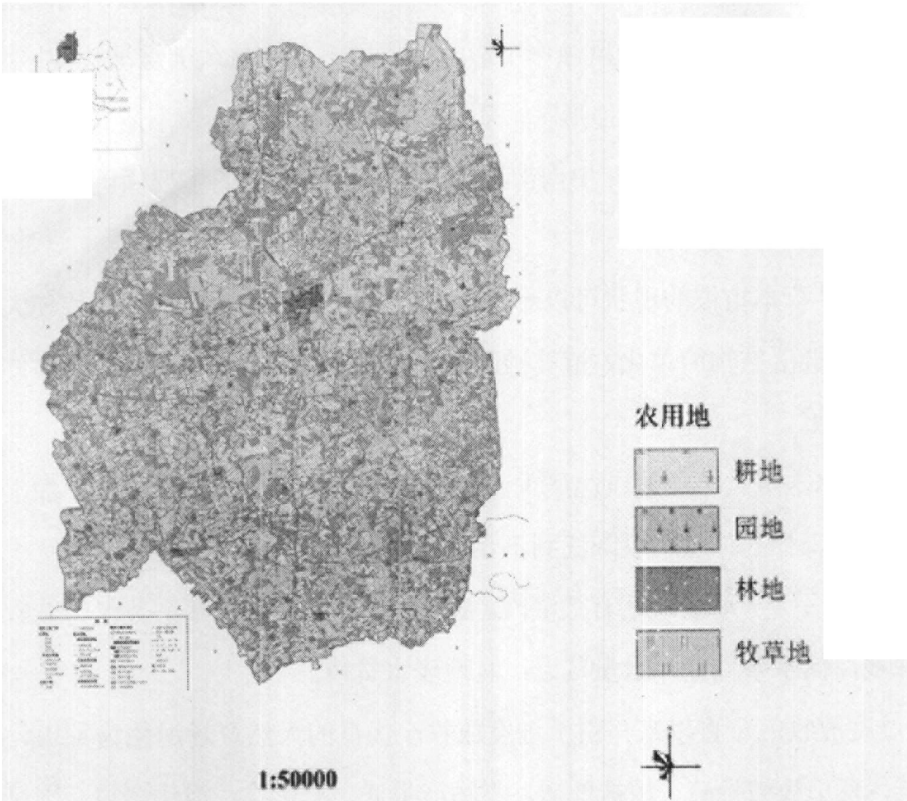


图 3.7 2010-2020 年康保县草地空间分布规划图

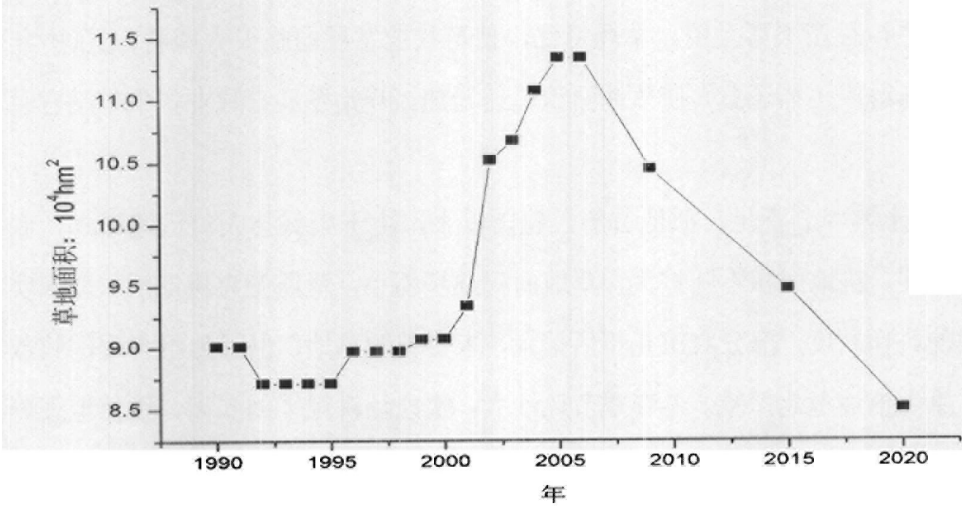


图 3.8 康保县 1990-2020 年草地面积变化情况

为了节约、集约利用土地，康保县根据土地利用现状和经济发展目标对各类用地进行统筹规划，目前已对各土地类型的利用规划至 2020 年，对全县的土地因地制宜，实施宏观调控，农用地结构做了调整。图 3.7 为康保县 2010-2020 年

土地利用规划图，从该图可以看出康保县未来 10 年的草地分布规划。规划将按照严格保护耕地，增加林地面积，减少牧草地面积，增加其他农用地面积的政策执行。从图 3.8 看出规划期内草地面积将有所减少，2009 年草地面积为 104391.91 hm^2 ，占全县土地总面积的 31.02%。规划至 2015 和 2020 年，草地面积分别为 94695.97 hm^2 和 85000.00 hm^2 。2009 年至 2020 年牧草地面积减少 19391.91 hm^2 。规划期间，将加强天然草原的保护和改良，提高草地生产力。加强退化草场治理、退牧还草、草地生态系统恢复重建等工程的实施。在牧区建设高产人工草地和饲草饲料地，逐步改变对天然草原放牧的依赖，在半农半牧区发展人工种草，实行草田轮作。减少的牧草地面积大部分被用于农业结构调整，小部分被建设占用。

4 草地土壤风蚀问题试验研究

草地的土壤风蚀特征是本文研究的核心，本文以康保县为实验区，在风沙最大、风蚀最严重的春季对该县天然、人工、围封草地进行野外观测试验，观测不同草地类型在不同风速下的起沙情况，地表覆盖度与风蚀的关系，并通过野外采集的土样分析土壤有机质的变化情况；另外利用风洞模拟不同草地类型的风速与风蚀强度的关系，为提高土壤肥力、恢复草地生态系统、防治土壤风蚀提供重要的理论依据。

4.1 草地有机质与风蚀关系研究

4.1.1 样点选取

根据实验的研究目的与设计方案，在对康保县各草地类型进行了调查分析后，重点对姚家滩和西伙房的三种草地进行样品采集和各项目的分析研究。试验地具体情况见表 4.1 和照片 4.1

表 4.1 试验地点地类概况

试验日期	试验地点	试验地类	试验地情况
2011 年 5 月 4 日	姚家滩	天然草地	41° 43.916' N, 114° 18.582' E, 海拔 1478m, 植被类型有针毛、紫鸢, 高度 2-3cm 左右, 放牧严重, 植被盖度 5%-10%
2011 年 5 月 4 日	姚家滩	围封草地	41° 43.762' N, 114° 18.568' E, 海拔 1478m, 植被类型有针毛、猪毛菜、紫鸢、冷蒿, 高度 25-50cm 左右, 无放牧, 植被盖度 80%以上
2011 年 5 月 4 日	西伙房南	人工草地	41° 49.940' N, 114° 42.762' E, 海拔 1440m, 植被类型有紫花苜蓿、柠条, 苜蓿间距 30cm 左右, 柠条间距 60cm 左右, 高度 20cm 左右, 植被盖度 50%以上



照片 4.1 试验地地类 (A 天然草地 B 围封草地 C 人工草地)

在以上三个实验地点,随机取土壤表面以下约 15 cm 土样,每个样地每次取土 4 个,其中 2 个土样是地表以下 15cm 处土样,另外 2 个土样分层取土,分别是 5cm、10cm、15cm 处,留作土壤有机质的分析。

4.1.2 有机质测定

1、试验方法

土壤有机质是指存在于土壤中的所有含碳的有机物质,包括各种动、植物残体,微生物及其分解和合成的各种有机物质(生命体和非生命体)。有机质是土壤的重要组成部分,是衡量土壤肥力高低的重要指标之一,它能促使土壤形成结构,改善土壤物理、化学及生物学过程的条件,提高土壤的吸收性能和缓冲性能,同时又可以为植物提供所需的养分。不同土壤中有机质含量差异很大,低的不足 0.5%,高的可达 20%-30%。一般说来大于 20%的是有机质土壤,小于 20%的则是矿质土壤,而耕作土壤有机质含量一般小于 5%。

目前土壤有机质的测定方法很多,从原理上主要分为 2 种,即化学氧化法和灼烧法。许多实验室常用 TOC 分析仪法、550℃烧失量法、950℃烧失量法、水合热重铬酸钾氧化比色法等^[52]测得土壤有机质。国家标准的土壤有机质测定方法

为高温外热氧化亚铁滴定法^[53]，属化学氧化法。本文使用的即是该方法，其原理为：在加热条件下，用一定量的重铬酸钾-硫酸溶液氧化土壤中的有机质，剩余的氧化剂用还原剂硫酸亚铁铵或硫酸亚铁滴定，这样，可从所消耗的氧化剂数量中计算出有机碳的含量。

2、实验步骤

称取通过 0.25mm 筛孔的土样 0.3g 左右（记录土样量），放入干燥硬质试管中，准确加入 0.4mol/L 重铬酸钾-硫酸溶液 10mL 摇匀。将盛有试样的试管移置到已预热热到 200~230℃的电砂浴上消煮 5±0.5min，然后将试管取出冷却片刻，用水冲洗冷凝管内壁及其低端外避，将液体完全移入干净的三角瓶中 60~70mL，加滴 2 滴邻菲啉指示剂，最后用硫酸亚铁铵标准溶液滴定剩余的重铬酸钾，直至溶液变为砖红色。

3、计算结果

$$\text{土壤有机碳}\% = \frac{C (V_0 - V) \times 0.003 \times 1.1}{\text{烘干土样重}} \times 100 \quad (\text{公式 4.1})$$

$$\text{土壤有机质}\% = \text{土壤有机碳}\% \times 1.724$$

式中：C——硫酸亚铁铵标准溶液的浓度，mol/L

V_0 ——空白样品所消耗硫酸亚铁铵标准溶液的体积，mL

V——待测样品消耗硫酸亚铁铵标准溶液的体积，mL

0.003 ——一个毫克当量碳的克数；

1.1 ——氧化校正系数。

1.724——由有机碳换算为有机质的系数

4.1.3 不同草地类型土壤有机质动态变化

土壤质量与其持续能力是通过土壤有机质的变化表现出来的^[54]。土壤有机质在影响植物生长发育的同时，也影响其他营养元素，从而影响地上植物生物量。由于生物量的不同是土地生产能力的直接反映，因此土壤有机质含量的动态变化是土壤质量好坏与草地健康程度的反映指标，影响到草地的生产力^[55、56、57、58]。

根据公式 4.1 将采取的土样做了测定，数据见表 4.2。

表 4.2 不同草地类型各土层间土壤有机质含量变化 (%)

	土层	天然草地	围封草地	人工草地
2004 年	0~5cm	2.1348	3.2324	3.1587
	5~10cm	2.3076	4.1092	3.3269
	10~15cm	2.2308	3.4543	3.3204
2011 年	0~5cm	2.3321	4.1551	3.7868
	5~10cm	2.4269	5.7097	4.0312
	10~15cm	2.4207	5.0809	3.9088

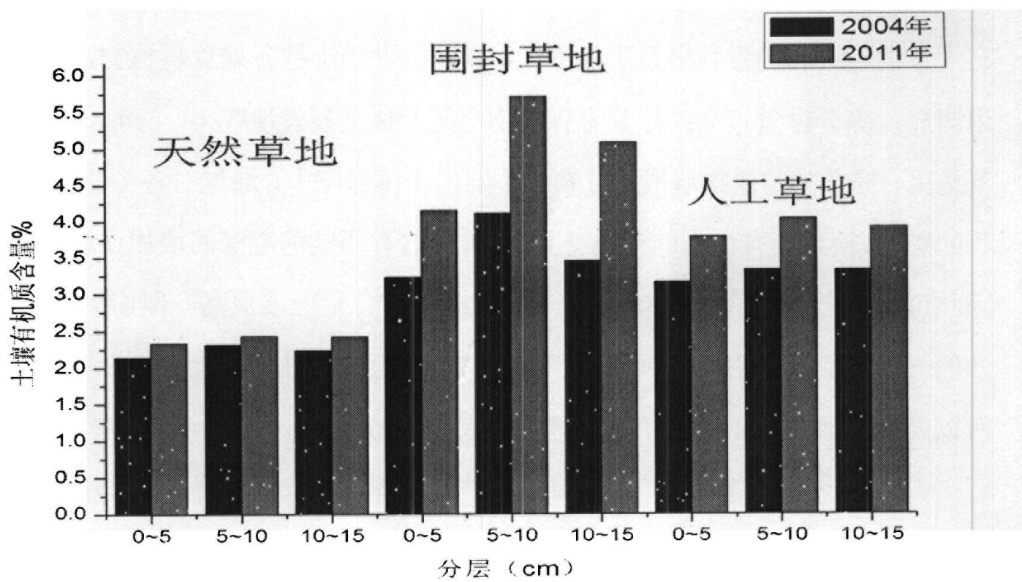


图 4.1 不同土层土壤有机质含量的比较

1、不同草地类型土壤有机质含量的变化

图 4.1 反映出不同草地类型中土壤有机质含量呈现显著差异，不论是 2004 年还是 2011 年，围封草地的土壤有机质含量均是三类草地中最高，2011 年三个土壤分层中有机质含量分别为 0~5cm 中含 4.2%，5~10cm 中含 5.7%，10~15cm 中含 5.1%，均比 2004 年高 1% 以上；其次是人工草地，每层土壤中有机质含量均在 3.7% 以上，均比 2004 年高 0.6% 左右；天然草的土壤有机质含量最低，每层土壤中有机质含量仅在 2.3% 左右，仅比 2004 年高出 0.1% 左右。由此看出天然草地土壤有机质含量低，且增长速度慢。从 0~5cm、5~10cm、10~15cm 三个土层对三种不同草地类型的土壤有机质含量进行了对比，结果可以看出在不同年

份、不同草地类型中的共同特点是 5~10cm 土层中土壤有机质含量均高于其他两个土层。从表中可以看出各草地类型中在 0~5 cm 到 5~10cm 土层间有机质含量变化的差异很大,而 5~10cm 到 10~15cm 土层间差异较小,这说明表层土壤极易被风蚀,土壤退化速度快,而深层土壤退化较为缓慢,且退化速度要低于表面退化速度,而中层土壤可能植物根系分布较多,植物残体被分解、合成各种有机质。

围封草地放牧较少,甚至有些围封草地严禁放牧,因此许多植物生长周期完整,生物量丰富,枯枝落叶及根系量也随之增加,土壤中的有机质含量也不断上升,对地表下 15cm 的土样测定有机质含量为 4.22%,高于天然草地和人工草地。

康保县在实行退耕还林还草后大面积种植紫花苜蓿、柠条。柠条根系分布广,有大量的毛根和侧根且根系生物量大,在植物种类上柠条属豆科植物,固 N 作用明显,养分含量较高;柠条对有机物空间变化主要表现在 0~5cm,在平缓的草地上,柠条与其他牧草根系分布在不同的土壤深度中,通过对各类牧草根系生长的影响,使土壤有机物的分布受到影响,但这种影响随着深的增加逐渐变小^[59],因此可以得出人工草地在 0~5cm 土层中有机质含量应该最高。但由于康保多风沙的气候特征,在初春土壤风蚀严重,将表层土壤吹蚀并带走大量土壤有机质,所以人工草地 0~5cm 层中有机质含量依然低于 5~10cm 和 10~15cm 层。

天然草场由于对放牧活动没有进行严格管理,对草地上的植被破坏严重,相对人工、围封草地来说成为最先受到风蚀退化的草地,有机质含量各层均不超过 2.5%,不足围封草地各层有机质含量的 1/2,仅是人工草地有机质含量的 2/3,有机质含量低。

综上所述,得出植被对其下土壤的影响很大:(1)地上部分植被覆盖度越高,风沙对土壤的风蚀作用就越小,越能保持土壤肥力,使土壤有机质不易被风沙带走;(2)地下部分植物根群大量分布,能够固着土壤、改善结构、固定养分、提高有机质含量。(3)放牧强度的大小直接影响到地上植被的生长状况,不仅影响地上部分,而且影响地下部分,进而影响到土壤有机质含量。

2、与农田的对比

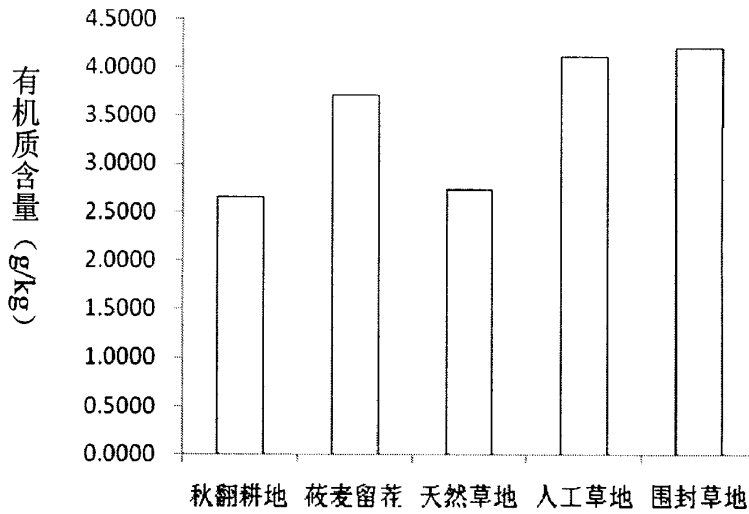


图 4.2 不同地表状况土壤有机质含量

实验得出秋翻耕地、莜麦留茬地、天然草地、人工草地、围封草地的土壤有机质含量分别为 2.65g/kg、3.71g/kg、2.73g/kg、4.15g/kg、4.22g/kg。图 4.2 表现出草地有机质含量明显大于农田,其含量大小依次为围封草地>人工草地>留茬地>天然草地>秋翻耕地。

由此表明土壤有机质含量与地表状况有明显的关系,有作物留茬,有植物覆盖的地表比裸露的地表土壤有机质含量明显高。天然草地比秋翻耕地的有机质略高,因为天然草地虽遭破坏,但是仍有少部分草本植物覆盖,地下根系可以固着土壤,固定养分,起到防风固沙的作用;而秋翻耕地不仅没有植被覆盖地表,而且在秋季进行翻耕,将地表以下的土壤翻至地表形成松散表面,经风力吹蚀带走土壤养分,由此可以看出草本植物有很强的防风固沙、改善土壤结构、固着土壤、防止风蚀的作用。

4.2 草地地表粗糙度变化特征研究

4.2.1 野外气象状况

表 4.3 试验期风向频率表 (单位: %)

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
5月3日	0	0	0	0	0	0	0	0
5月4日	0	0	0	0	0	0	0	0
5月5日	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.3 试验期风向频率续表 (单位: %)

	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
5月3日	0	0	9.1	19.3	29.1	35.2	43.2	0
5月4日	0	0	8.5	20.4	13.4	65.5	75.3	0
5月5日	0	0	7.5	18.2	15.3	34.5	65.8	0

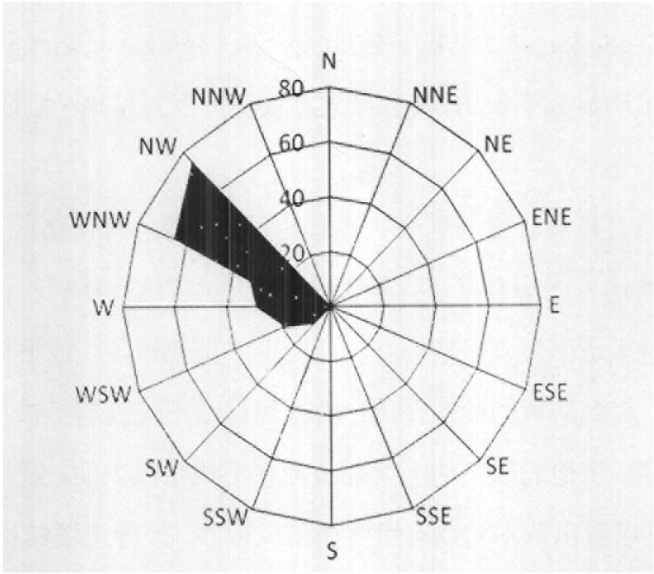


图 4.3 试验期风向玫瑰图

图 4.3 是根据表 4.3 得出的风向玫瑰图, 从图中可以看出该地主导风向为 NW、WNW。

4.2.2 地表粗糙度计算方法

粗糙度指平均风速减小到零的某一几何高度, 是下垫面特征的一个重要参数, 一个衡量防沙治沙效益的重要指标, 反映了不同下垫面所特有的性质。通常同一地表的粗糙度是一个定值, 但实际测定中, 存在多种影响因素, 即使测定相同地点, 多次测定的结果也会有差距, 有时甚至会差出 3-4 个数量级。草地地表

粗糙度与植被高度、种类、土壤颗粒大小等相关，在近地面大气流受地面阻力随高度增加而减小，风速随高度上升而增加，所以粗糙度越大，越能减弱地表风速 [60]。

地表粗糙度有多种计算方法，本文采用以下公式对地表粗糙度进行计算：

$$\lg K = (\lg Z_2 - A \lg Z_1) / (1 - A) \quad (\text{公式 4.2})$$

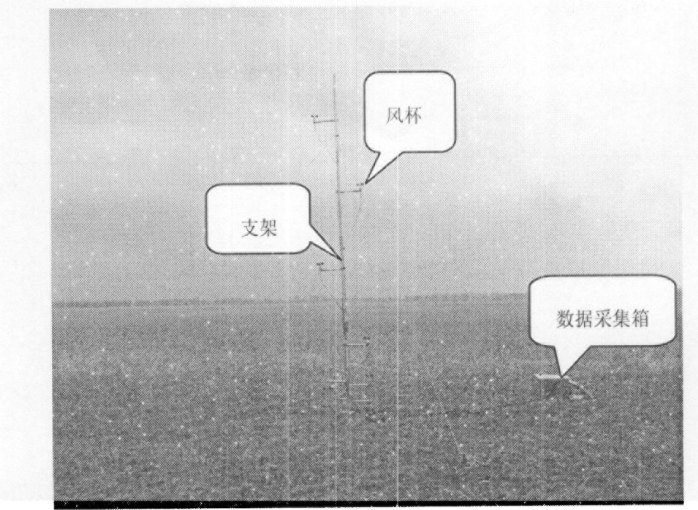
式中： $A = V_2 / V_1$

V_2 和 V_1 分别表示高度为 Z_2 和 Z_1 处的风速

然后求出 K 值即为地表粗糙度。

4.2.3 草地地表粗糙度观测

本实验采用便携式近地层风速廓线仪对近地面风速进行观测，该仪器主要由数据采集箱（记录个时间段的数据值）、风杯（通过风吹时的转数传递风速）、支架构成。由上述公式（公式 4.2）可以看出，地表粗糙度的计算中不同高处风速很重要，在观测中，风杯的高度分别为 5cm、10cm、30cm、50cm、100cm、200cm、300cm、400cm，实验重点记录了 50cm、200cm 在 30min 内的平均风速，计算地表粗糙度（见表 4.4）。



照片 4.2 便携式近地层风速廓线仪

在野外利用风速廓线仪记录的结果通过拟合公式计算风速廓线：

$$V = b + k \ln H \quad (\text{公式 4.3})$$

式中： V ——高度为 H (cm) 处的风速 (m/s)

b, k ——回归系数

表 4.4 各实验草地类型地表粗糙度

草地类型	观测时长	50cm 处平均风速	2m 处平均风速	地表粗糙度 (K)
天然草地	30min	5.18 (m/s)	6.46 (m/s)	0.20 (cm)
围封草地	30min	3.53 (m/s)	4.92 (m/s)	2.80 (cm)
人工草地	30min	4.97 (m/s)	6.58 (m/s)	0.72 (cm)

表 4.5 草地地表风速廓线拟合方程

草地类型	风速廓线	风速与高度相关系数
天然草地	$V=0.997\text{Ln}H+0.568$	$R^2=0.989$
围封草地	$V=1.235\text{Ln}H-1.555$	$R^2=0.987$
人工草地	$V=1.1614\text{Ln}H+0.4266$	$R^2=0.973$

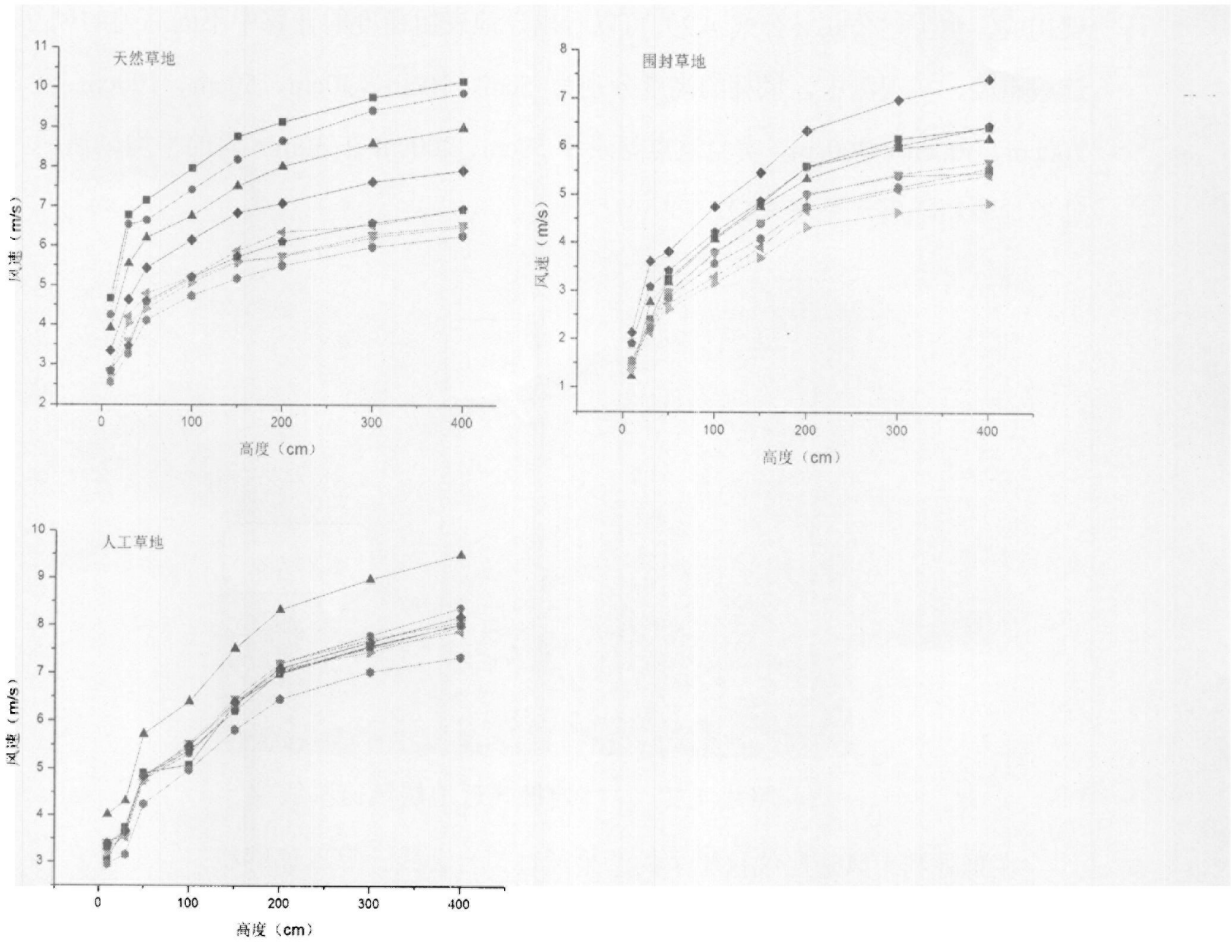


图 4.4 各类草地地表风速廓线

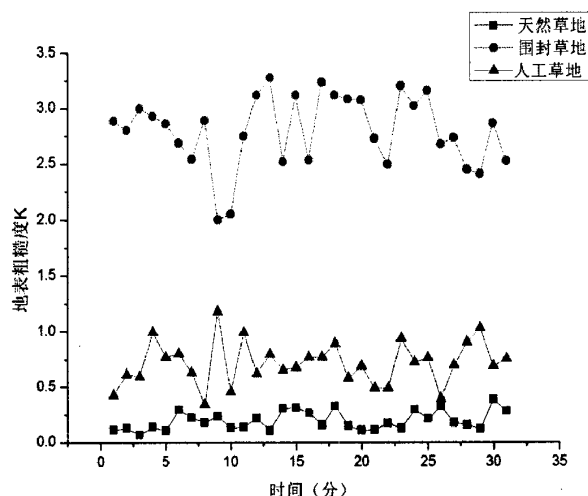


图 4.5 草地地表粗糙度

图 4.4 是三类草地地表风速廓线的变化情况，随着高度的上升风速也随之增大。表 4.5 是依据公式 4.3 计算出的各草地类型风速廓线，从表中可以看出，天然草地、围封草地、人工草地的风速与其高度的相关系数均在 0.97 以上，风速随着高度的上升以对数形式递增。根据公式 4.2 计算出各类草地在 30 分钟内每分钟的地表粗糙度，绘制图 4.5，从图中可以明显的看出围封草地的 K 值最高，三类草地的地表粗糙度变化情况为围封草地>人工草地>天然草地，围封草地和人工草地的地表粗糙度分别是天然草地的 14.34 倍、3.67 倍，围封草地的粗糙度又是人工草地的 3.92 倍。

地表粗糙度的大小与地表植被覆盖度，植物高度，人工草地植物种植的垄向关系密切，围封草地保护措施良好，植被盖度在 80%左右，植物高度 25~50cm，可以有效降低地面风速，减小风沙的侵蚀；天然草地的植被盖度仅有 5%~10%，植物高度仅有 2~3cm，对减小风速几乎没有作用，因此受到风蚀严重，土壤退化速度快，有机质含量减少快，土壤肥力降低。在人工草地上加大播种面积，种植植株较高的草种，且植物垄向应尽量与主风向垂直，研究表明垄向与主风向的夹角增大，地表粗糙度增大。康保地区冬春季盛行西北风，而风蚀严重的季节在冬春季，人工草地垄向最好的分布方向是东北-西南走向。

4.2.4 与农田地表粗糙度的对比

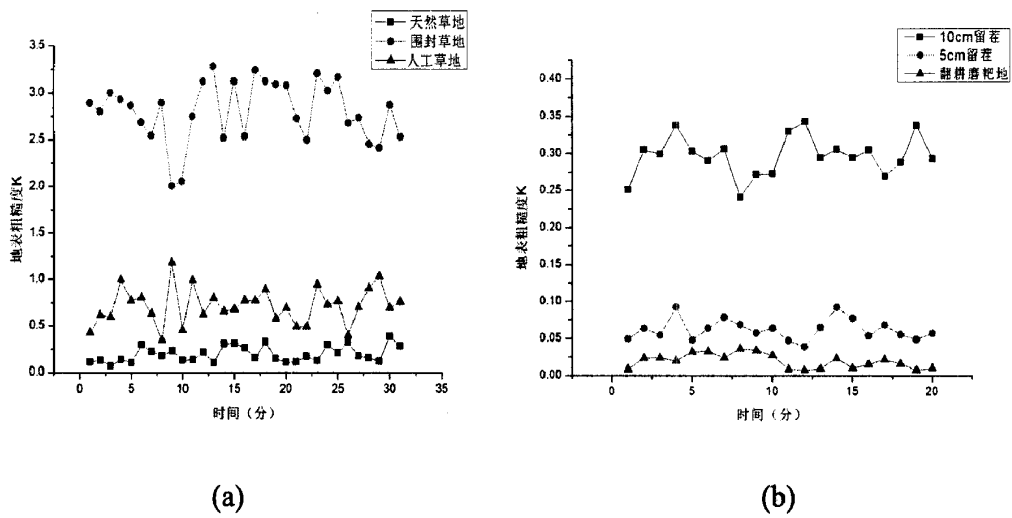


图 4.6 地表粗糙度对比 (a. 草地、b. 农田)

风沙物理学中，沙粒的临界起动风速即为起沙风速。起沙风速的增大，减小风沙对地表土壤的危害。风对地表土壤颗粒的抬升能力用摩擦速度表示，当这一速度超过某个临界值时颗粒物随风开始起动，这个临界值被称作临界摩擦速度。据研究地上植物的分布削减了风对地面的作用，抬高了风速廓线，增加了地表粗糙度，加大了临界摩擦速度，提高了起沙风速。从图 4.6 中可以看出草地的地表粗糙度明显高于农田地表粗糙度，几乎是农田的 10 倍。所以得出草地的起沙风速大于农田的起沙风速，若同等风速，可起沙性从大到小为翻耕磨耙地、5cm 留茬地、10cm 留茬地、天然草地、人工草地、围封草地。因此又可以证明草地有防风固沙、防止风蚀的作用。

4.3 风洞模拟各类草地风蚀强度

4.3.1 风洞试验设备与方案

1、实验设备

(1) 风洞环境介绍

此次风洞模拟试验是在北京师范大学房山实验基地的实验室中实施的，该实验室具备目前国内最大开口直流吹气式风洞（图 4.7）。

该风洞总长 71.1m：包括 66.6m 长的洞体、4.5m 的传动轴和电机。从图中看出从左到右依次为进气段、过渡段、阻尼器、第一扩散段和稳定段、收缩段、速

度车、试验段、第二扩散段。

进气段由 400KW 直流电机提供动力，由玻璃钢材料制成风扇的关键部件；试验段长 24m、宽 2m、高 3m，另外顶板还有 $\pm 0.2\text{m}$ 的自动升降空间，轴心可控风速从 2m/s 可达 45m/s，风速脉动 $>1\%$ ，湍流度 $>0.8\%$ ；在实验过程中风洞气流从第二扩散段排出。

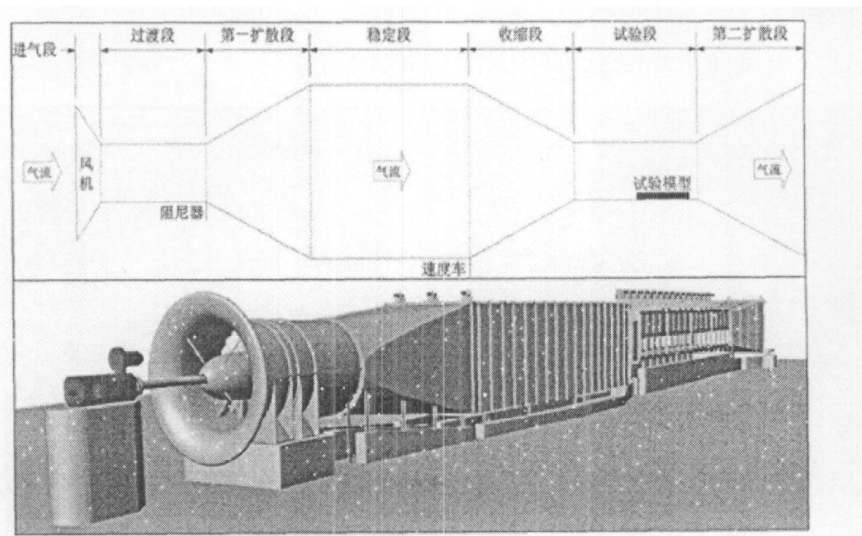


图 4.7 风洞结构图（引自参考文献^[61]）

(2) 实验数据获取

风洞数据采集器：该系统包括风速电测感应器（可测得 15 个高度的风速）和风速电测分析系统（可全天候监测并采集数据）。15 个风速通道的观测高度为：0.5cm、1cm、3cm、5cm、7cm、10cm、15cm、20cm、25cm、30cm、40cm、50cm、60cm、80cm、100cm，风速范围 2-45m/s，分辨率 0.01m/s。另外该系统还设温、湿、压 3 个传感通道，共计 2 套设备，可随时观测风速即时值，并自动记录 1 秒的数据。

电子秤：德国 METTLER TOLEDO 公司生产，包括 KCC150 高精度天平，可精确到 0.001kg。用该高精度电子秤称重实验前后的原状土箱，计算总风蚀量。

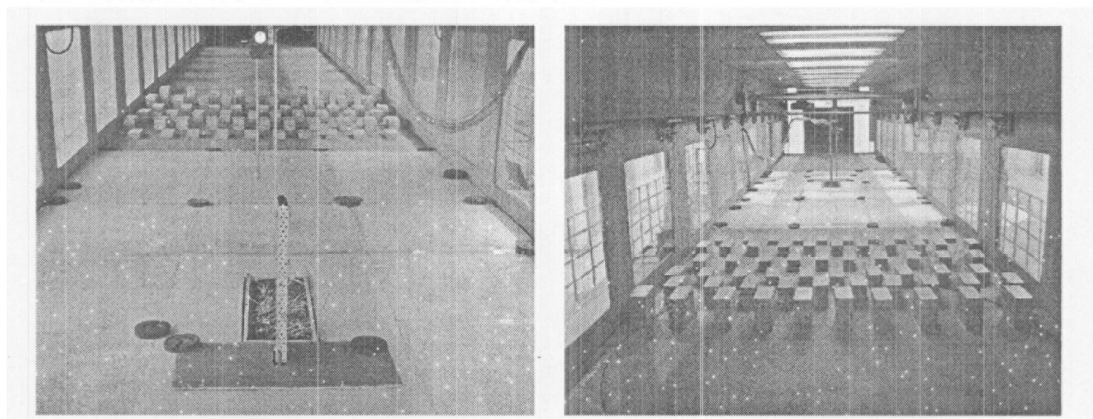
2、实验方案

(1) 样品采集

从康保县采集 5cm 留茬地 2 箱、10cm 留茬地 2 箱（垄向与风向垂直、平行各 1 箱），翻耕磨耙地 1 箱，天然草地、围封草地、人工草地各 1 箱土壤风蚀原状土。样品长 80cm、宽 30cm、厚 20cm，重量约 70kg。

(2) 试验平台搭建

实验地点主要是在风洞洞体中，土壤样品放置于风蚀槽中，该风蚀槽构造为下部中空，长、宽分别为 1.5m 、0.45m。先将采集回来的风蚀原状土样放进风蚀槽中，保证原始地表向上（切记样品长边与风洞轴向呈平行状态），样品表面与风洞底板齐平，风蚀箱上风向一侧与槽边沿紧靠，下风向中间的位置安放积沙仪，保证与风蚀土样箱靠紧，下部与土样齐平，集沙口正冲上风向；风速廓线仪在风蚀箱上风向 1.5m 处垂直安放（照片 4.2）。



照片 4.3 试验平台

(3) 确定风速

每个土样进行一到两组平行试验，第二组主要是针对第一组实验中不理想的试验结果进行补充试验。风洞轴心风速采用 60cm 高度处风速，分别用 6m/s、8m/s、10m/s、12m/s、15m/s、18m/s 这六个风速做模拟试验，试验时间依据风速的不同逐渐减少，分别是 6m/s、8m/s 15 分钟，10m/s 、12m/s 10 分钟，15m/s、18m/s 5 分钟。

(4) 模拟野外试验

为了与野外试验特征相似，在风洞中凭借野外试验得到的各草地类型风速廓线，设置粗糙元以起到调节气流的作用，使风洞的风速廓线尽量与野外相近。

(5) 计算

记录每组试验前后风蚀箱内土样的质量，求得质量差，代入以下公式计算出各类草地在不同风速下的风蚀强度。

$$Q_t = \frac{M}{S \times T} \quad \text{公式 (4.4)}$$

式中： Q_t ——风蚀强度 ($\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$)；

M——风蚀量 (g);

S——试验样品表面积 (m^2);

T——风蚀持续时间 (h)。

4.3.2 风蚀强度与风速的关系

诸多科学家经过多年研究,形成了用定量函数表示土壤风蚀过程中各种影响因素的作用及他们之间的定量关系,并在此基础上提出多种形式的土壤风蚀方程,应用到了风蚀量的估算、各种防风蚀措施的评价。从现有的研究结果看来,经验方程完全是在室内模拟实验的建立基础起来的,并运用数理统计的方法加以归纳,最终用数学方程式表达出风蚀强度与某些风蚀影响因子之间的相互对应关系,得出了风蚀方程。

风蚀强度模型: $Q_t = k \cdot \exp(b \cdot V)$ (公式 4.5)

式中: Q_t ——风蚀强度 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

V ——起沙风速 (m/s)

k 、 b ——常数系数, k 值用来体现各地类地表起沙的初始特征,与起沙风速成负相关,随着 k 值的增大,起沙风速减小,地表起沙越容易; b 值用来体现各地类地表起沙的过程特征, b 值越大,表明地表的风蚀强度随风速上升而增加的幅度越大。

4.3.3 各草地类型风蚀强度的及其与农田的对比

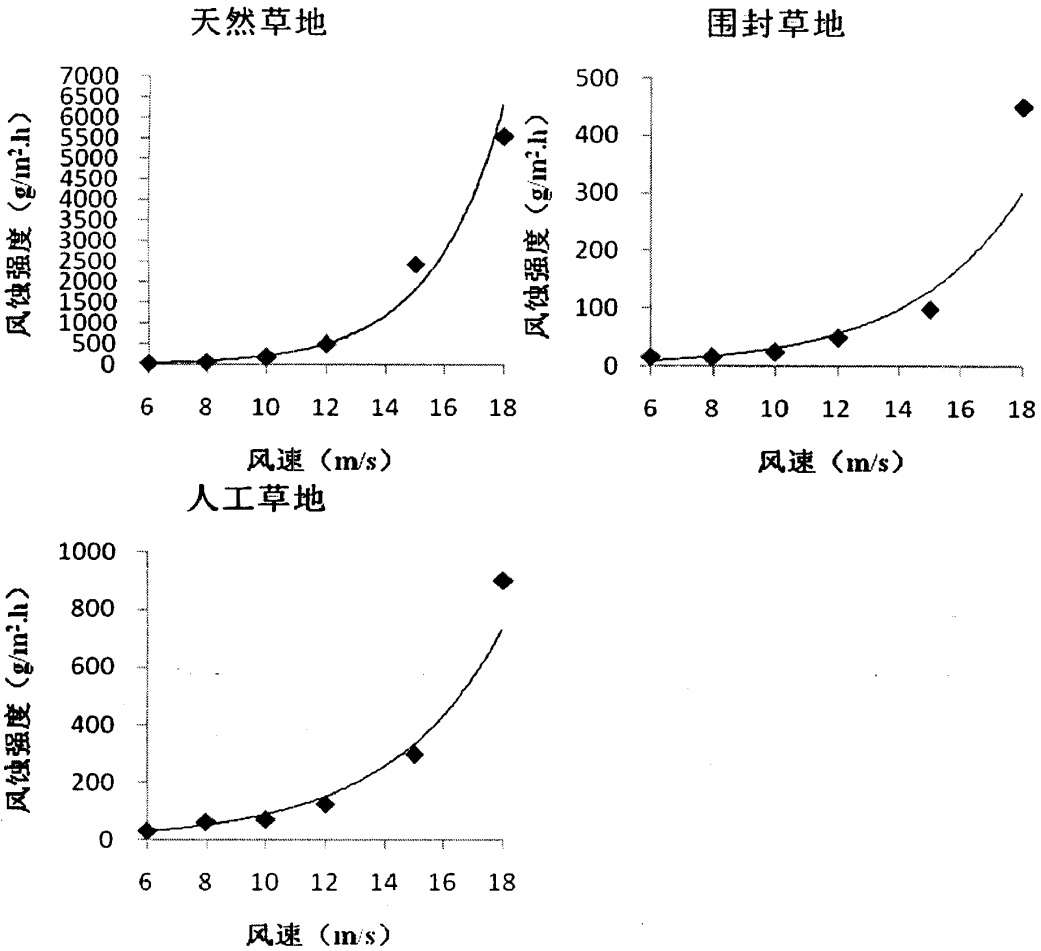


图 4.8 各类草地风蚀强度

图 4.8 中各草地类型的土壤风蚀强度均随风速的加大而增加，并呈现出良好的规律性，拟合结果见表 4.6，相关系数均在 0.95 以上，说明拟合程度较好，反映出土壤风蚀强度与风速之间存在的关系，从图中可以看出各草地类型的风蚀强度随着风速的加大呈指数规律递增。在 6m/s、8m/s、10m/s、12m/s、15m/s、18m/s 六个风速吹蚀下，三种草地类型中很明显的可以看出围封草地的风蚀强度远远小于其他两种，风沙对围封草地的破坏作用较小，而天然草地的风蚀强度颇高，因此风沙对该草地类型的破坏作用非常明显，土壤退化的速度很快。因此围封草地是对土壤防风蚀的最佳保护形式，可以有效的对抗风沙的侵蚀作用，大大减小了草地的退化和土壤的沙漠化。

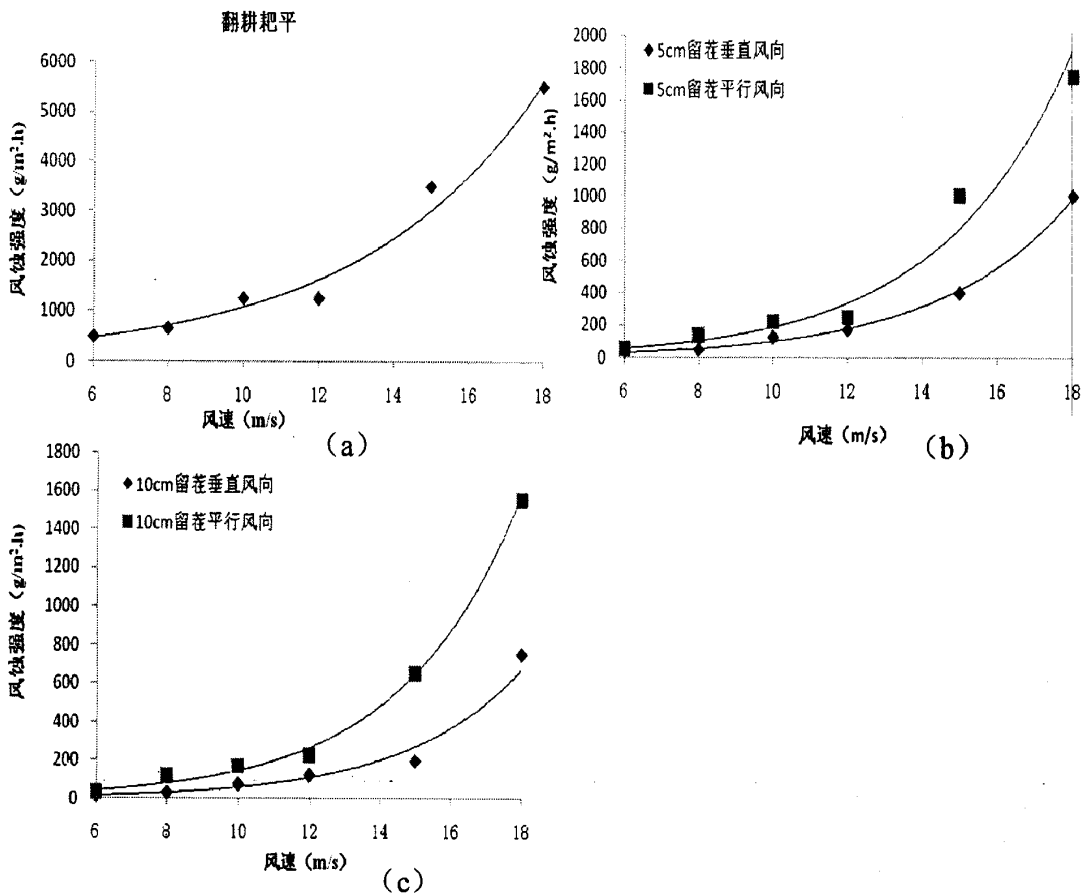


图 4.9 各农田地类风蚀强度

表 4.6 各地类风蚀强度公式风洞模拟结果

地类	经验公式	相关系数 (R^2)
天然草地	$Q_t = 3.480e^{0.417V}$	$R^2 = 0.989$
围封草地	$Q_t = 2.050e^{0.277V}$	$R^2 = 0.955$
人工草地	$Q_t = 6.506e^{0.262V}$	$R^2 = 0.974$
5cm 留茬平行风向	$Q_t = 10.67e^{0.288V}$	$R^2 = 0.969$
5cm 留茬垂直风向	$Q_t = 5.982e^{0.283V}$	$R^2 = 0.991$
10cm 留茬平行风向	$Q_t = 7.712e^{0.295V}$	$R^2 = 0.969$
10cm 留茬垂直风向	$Q_t = 3.076e^{0.299V}$	$R^2 = 0.980$
翻耕磨耙地	$Q_t = 21.588e^{0.308V}$	$R^2 = 0.994$

5 种不同地类的农田观测结果如图 4.9, 从图中可以明显看出随着风速的增加, 各类农田的土壤风蚀强度有随之呈指数递增的趋势, 翻耕耙平地的风蚀强度最大, 高于任何留茬地。

留茬高度不同, 风蚀强度不同。在 6m/s、8m/s、10m/s、12m/s、15m/s、18m/s

六个不同风速的吹蚀下，垄向平行主风向的 10cm 留茬地的风蚀强度小于 5cm 留茬地，垄向垂直主风向的 10cm 留茬地的风蚀强度也小于 5cm 留茬地。由此可以看出垄向相同时，留茬越高，农田所受风蚀强度越小。

地垄方向不同，风蚀强度不同。由图 4.9 中的 (b)、(c) 可以看出，无论风速高低，垄向平行主风向的农田地块风蚀强度大于垄向垂直主风向的农田地块。说明风向与农田垄方向夹角越大，农田受到的风蚀强度越小。

综上所述，相对于翻耕耙平地，农田地表在收割后留有一定高度的作物茬能起到防治农田风蚀的作用。留茬越高、风向与垄向的夹角越大，随之加大了农田的地表粗糙度最终达到了增强农田的抗风蚀能力。

4.3.4 小结

通过以上各类草地的风蚀强度和各类农田的风蚀强度的分析，结果表明：

1、土壤风蚀强度的大小是翻耕地>天然草地>5cm 留茬平行风向>10cm 留茬平行风向>5cm 留茬垂直风向>10cm 留茬垂直风向>人工草地>围封草地。

2、翻耕地的土壤风蚀强度要远远大于留茬地，作物留茬大大减小了土壤风蚀。因此，农田应采取保护性耕作方式，推广高留茬，降低土壤风蚀强度。在人工草地的种植方面，应种植植株相对高的草种。

3、人工植被建设也应仿照农田种植，人工草地的种植应垄向也与风向垂直来减小风蚀强度。

4、对于天然草地以自然恢复为主，根据草地的不同退化程度，因地制宜实行休牧、禁牧、轮封轮牧、围封等措施，使草地退化速度降低，保护好草地土壤。

4.4 草地土壤风蚀量的测算

本文的实验时间选择在初春季节，该季节常有“沙尘暴”出现，是一年中风沙较大，气候较干燥的季节，通过对 1990~2003 年每年 4 月份的实时风速记录得出在这一个月內，不同草地的土壤风蚀量。

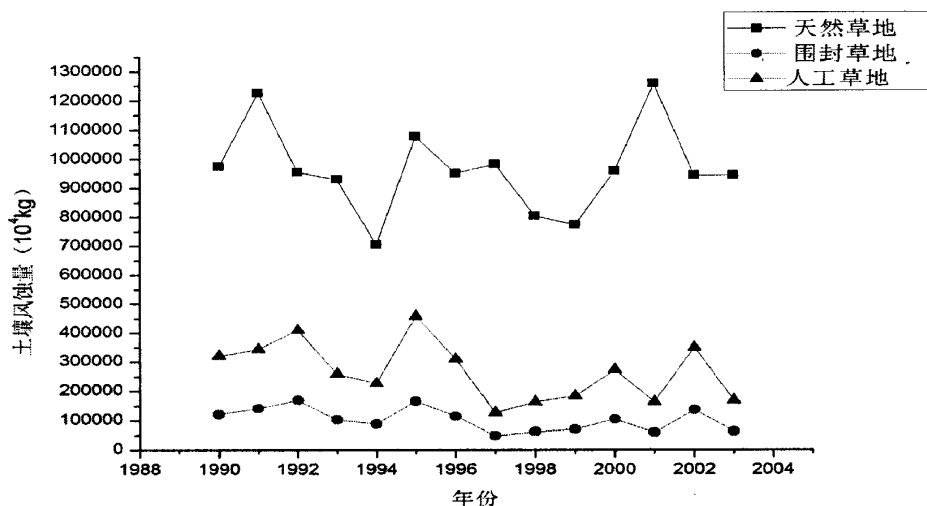


图 4.10 不同草地类型土壤风蚀量变化情况

从图 4.10 中我们可以看出仅仅一个月的时间里天然草地的土壤风蚀量约是人工草地的 3 倍以上，是围封草地的 10 倍以上。天然草地属于重度风蚀，需要进行治理；人工草地属中度风蚀，可对草场进行补种，以增加地表覆盖度，提高地表粗糙度来增强抗风蚀能力；围封草地属轻度风蚀，应对这类草场实施保护措施，减小风蚀量。

通过以上十年的对比，本文将各风速在 4 月份一个月中出现的小时数做了平均，并按三种草地类型各占草地总面积的 1/3，预测出 2015 年和 2020 年天然草地、人工草地、围封草地三种草地类型在这一个月内的风蚀量（见表 4.7）。

表 4.7 2015、2020 年各类草地风蚀量预测

	2015 年	2020 年
	风蚀量 (10 ⁴ kg)	风蚀量 (10 ⁴ kg)
天然草地	360397.08	323495.83
人工草地	98580.08	88486.42
围封草地	38735.16	34769.05

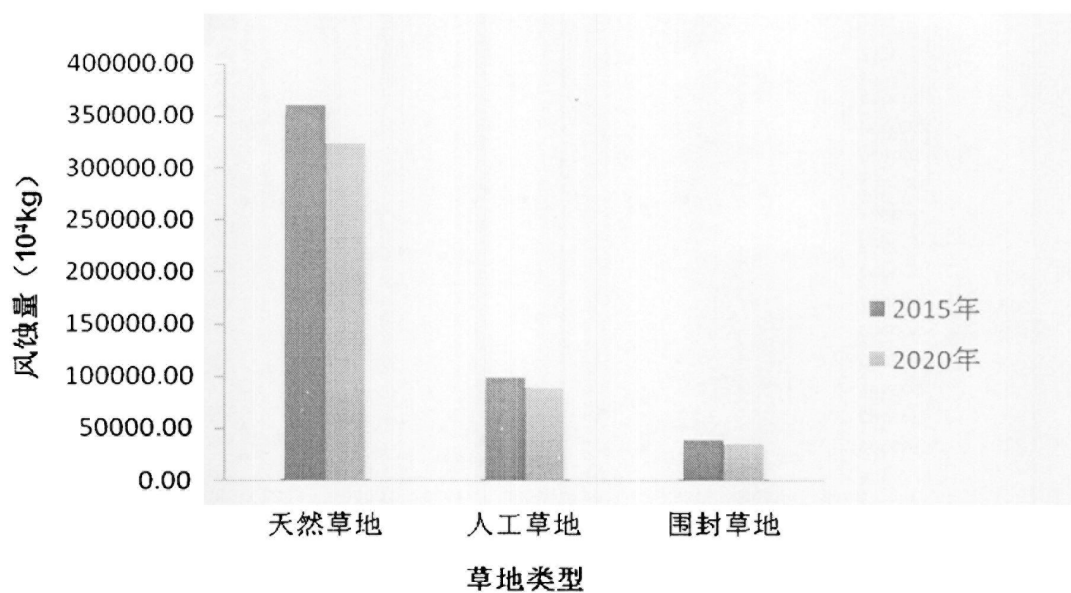


图 4.11 2015、2020 年各类草地风蚀量对比

从图 4.11 看出 2020 年比 2015 年的土壤风蚀量有所减少，虽然草地面积也有所减少可能会使风蚀量降低，但是近些年来对草地的治理和保护也使得草地的抗风蚀能力有了明显提高。

5 草地保护措施

5.1 因地制宜进行草场改良、建立围封草地和人工草地。

康保县由于常年干旱少雨，多风沙，地表土壤干旱松散，土地风蚀沙化现象严重。在该县低山丘陵区，对退化较轻的草地实行围封，对退化严重的进行人工播撒草种，草种选择当地建群植被如针茅、隐子草等为主。东部低缓丘陵区较其它地区降雨略多，土地上层较厚，主要以侵蚀荒山坡度较大的坡耕地和低山丘陵地为主^[62]。对于这一侵蚀特点可在坡耕地周围种草植树，保持水土。以种植牧草饲料为主，在对已有的林、草地进行保护的同时，实行封禁荒山荒坡制度，将人为原因对坡耕地的破坏降低到最小限度。在南部的波状平原区水资源条件较好，地势起伏不大，对植被盖度好的草场以封育保护为主，在条件较好的退耕地进行人工草地种植，草种选择冰草、苜蓿草等高产草类。

5.2 加快草地种植及保护技术更新，提高草地的产草量

加快对草地种植的技术改造，依靠科技提高单位面积上的产草量，技术改造的方向主要包括：①水资源是限制草地生长的因素之一，近年来，康保县在地下水资源比较丰富的地带，合理开发利用地下水资源，提高灌溉技术，还通过建设雨水收集系统，如启动小水库建设、鱼鳞坑兴建等多种方式蓄水。同时，应尽快引进现代节水技术，对人工草地进行科学灌溉。②实施草地保护性是缓减土壤风蚀沙化的重要途径。通过近对草场的围封实践证明，以保护带建设，对天然草地实施围栏封育是一项恢复草地生态系统行之有效的措施。在围封期间禁止放牧，使天然植被利用自身修复能力进行自然恢复，经过 3~5 年的围封，主要建群植物有所改变，植物种类增多，植物量增大，可以有效地遏制草场退化。

5.3 开展草地承载力研究，合理调整载畜量。

根据区域承载力理论，科学计算本区域草地承载力基础，对草场实行分区轮牧。根据家畜的特点、草场的类型、牧草的再生速度实行轮牧，由于牲畜对饲草的喜好不同，使不同的草种生长期交错，不仅可以避免自由放牧时牲畜随意破坏草地的缺点，其最大的优点是给牧草提供再生的时间，起到改善植被生长状况，增加载畜量的作用。对受到风蚀较轻的草地实行生态修复，较严重的实行人工种

草起到防风和扩大饲草来源双重作用；调整土地利用结构，在自然条件较优越的地形区实行退耕还草，提高草地面积。

5.4 调整产业结构，提高产业结构层次。

产业结构应结合当地区域功能定位，转变农牧业生产方式，不断调整、升级，促进经济发展。康保县一直以来以农业为支柱产业，其畜牧业有很大的发展空间，在产业结构调整中，应加大畜牧业的发展力度。实行科学种草，牧草引种，在加大牧草种植量的同时，提升牧草的产量和营养价值。发展畜牧业应改变传统的增加牲畜养殖的方式，在饲草配料，疾病防疫加大力度并延长产业链，向绿色食品生产的方向发展，如提供天然奶源、绿色牛羊肉产品等。还可以利用康保持有的草原风光发展草原旅游业，吸引游客来此避暑、度假，并将当地特产、农副产品加工成礼品以提高其附加值。发展粮食、经济作物、牧草相结合的种植方式，农业生产和防治土壤风蚀并重。

5.5 加强草地建设投入，宣传草地保护法律法规。

对草场实施良好的保护必须有相应的法律法规加以约束，并通过宣传引导，提高牧民保护草地和重建草地的意识，自觉地遵守草地管理政策。大力宣传草原保护观念。充分利用各种媒体大力宣传生态环境保护的法律法规，提高全社会生态保护的意识，在人们心中树立起对草原的认识，正确利用草地，减少人为活动引起的草地土壤风蚀问题。加强草原法律法规的制定，加强草原保护执法、监督力度。对滥垦、滥采、过牧等违背可持续利用发展的各种利用方式进行依法惩治。

6 结论与建议

6.1 结论

本研究区——康保县属于典型的农牧交错带，主要以草原生态系统为主体。由于人口的增长，农田面积增加，草地被开垦成农田，生态环境遭到破坏，土壤风蚀、土壤沙化成为该地区面临的较为严峻且迫切需要解决的主要生态环境问题。2000 年来开始实施退耕还林还草政策，区域生态环境也相应的得到了改善，草地与农田相比土壤风蚀较小，但土壤风蚀问题依然存在。本文以康保县为例，对不同草地类型进行了采样分析，从土壤有机质、地表粗糙度、风蚀强度三个方面对不同地类的防风蚀能力进行了研究，初步结论如下：

(1) 土壤有机质与土壤风蚀的关系

围封草地的土壤有机质含量最高，其次是人工草地，天然草的土壤有机质含量最低。不同年份，不同草地类型中的共同特点是 5~10cm 土层中土壤有机质含量均高于 0~5cm 和 10~15cm 两个土层。经本文实验说明表层土壤极易被风蚀，土壤退化速度快，而深层土壤退化较为缓慢，且退化速度要低于表面退化速度。

(2) 地表植被覆盖度与土壤风蚀的关系

植被盖度作为影响土壤风蚀一个自然因素其敏感度很高。植被对其下的土壤有一定的保护作用，由于有植被覆盖裸露的地表，使被覆盖的地表不会受到风力的作用，大量的植被覆盖不仅降低了风速，保持了地表的水分不流失，增加了地表的粗糙度，而且其庞大的地下根系群可以固着土壤，起到改善土壤结构的作用，从而达到防治或减轻风蚀的目的。据研究，当地表覆盖度在 70% 以上就能起到明显的防止水土流失的作用。

(3) 地表粗糙度与土壤风蚀的关系

本文研究得出表粗糙度的变化情况为围封草地>人工草地>天然草地。由于坝上地区属农牧交错带，地表覆盖度季节变化差异明显。作物一般在 6 月-10 月中旬覆盖地表，而牧草几乎可以全年覆盖地表的，因此牧草防治风蚀的作用比作物要强。为了保护好坝上农牧交错带的土壤肥力和增强土壤的抗风蚀能力，本文建议对草地进行管理，对天然草地进行围封，降低牲畜对牧草的破坏程度；也可进行人工种植，增加牧草种类，增大地表粗糙度。

(4) 植被高度与土壤风蚀的关系

农作物留茬在农田防治风沙侵蚀中效果明显,通过本文的实验研究证明土壤风蚀强度的大小是翻耕地>天然草地>5cm 留茬平行风向> 10cm 留茬平行风向>5cm 留茬垂直风向>10cm 留茬垂直风向>人工草地>围封草地。留茬的影响作用主要表现在:直立和平铺于地表的作物残茬可以令风速断面由地表向上移动、消耗风力动能,迫使搬运土壤颗粒物的能力下降;另一方面植物留茬还可以保护易受侵蚀的土壤颗粒、减少土壤蒸发,防止土壤水分流失,从而起到减弱土壤风蚀的作用。研究表明,留茬高度的增高,土壤侵蚀模数有呈指数形式下降的趋势。由此推广到草地,植被高度的增高防风蚀效应也随即提升。

土壤有机质含量与地表状况有明显的关系,地表有植物覆盖比地表裸露的土壤有机质含量明显高。草地有机质含量明显大于农田,围封草地>人工草地>留茬地>天然草地>秋翻耕地。通过该比较也可以看出植被高度与土壤风蚀强度成负相关。

6.2 建议

本文主要研究探讨了土壤风蚀的概念和理论,针对康保县特有的地理环境特征,通过对各类草地抗风蚀能力的研究,提出如下建议:

(1) 草种选择:草种应选择适宜在坝上地区生长,耐旱、耐寒性强,成活期短,生长年限长,利于防沙的草类,例如披肩草、草木樨、沙打旺等草种,条带状播种,垄向最好与主风向 WNW、NW 垂直,带宽约 5~10m 之间。牧草收割后,应在地表保留一部分留茬,有利于保护留茬底下的地表土壤免受风蚀;另外,还可以选种一年生草种,并实行与耕地轮作,起到提高土壤肥力和增加饲草产量的作用,同时也可保护农田起到防治风蚀的效果。

(2) 加强草地建设,进行草地改良

了解了草地抗风蚀的作用后,应对草地进行合理的改良和利用,充分发挥草地的优势,保护土壤,防治风蚀。实施人工种草和对草地进行改良要结合康保县的自然环境特征,因地制宜。对于退化较轻的草地及时围封,对围封草地进行放牧的科学管理;对已经显现退化迹象的草场根据草种类型的不同进行补播,尽可能的恢复草地生产力。

参考文献

- [1]廖国藩,贾幼陵.中国草地资源[M].北京:中国科学技术出版社,1996.1-14.
- [2]刘起.草地与国民经济的持续发展[J].四川草原,1998(3):1-4.
- [3]李博,杨持.草地生物多样性保护研究[M].呼和浩特:内蒙古大学出版社,1995.126-128.
- [4]杨亚娟,景国臣.论草地植被与土地荒漠化[J].水土保持科技情报,2003(1):44-45.
- [5]韩永伟,韩建国,张蕴薇,等.农牧交错带草地植被的水土保持作用研究[J].水土保持学报,2004(4):24-28.
- [6]许志信,李永强.草地退化对水土流失的影响[J].干旱区资源与环境,2003,17(1):65-68.
- [7]杨汝荣.我国西部草地退化原因及可持续发展分析[J].草业科学,2002,19(1):23-27.
- [8]朱俊凤,朱震达.中国沙漠化防治[M].北京:中国林业出版社,1999.
- [9]王涛.走向世界的中国沙漠化防治的研究与实践[J].中国沙漠,2001,21(1):1-3.
- [10]董治宝,董光荣,陈广庭.以北方旱作农田为重点开展我国的土壤风蚀研究[J].干旱区资源与环境,1996(2):31-37.
- [11]Trumbmore S E, Davidson E A. 1995. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 9: 515~528
- [12]樊江文,钟华平,梁飏等.草地生态系统有机质含量及其影响因素[J].中国草地,2003,25(6):51~58.
- [13]刘维屏,季瑾.农药在土壤-水环境中归宿的主要支配因素——吸附和脱附.中国环境科学,1996,16(1):25~30.
- [14]党志,黄伟林,肖保华.环境有机地球化学:有机污染物-土壤/沉积物吸附作用研究的回顾.岩石矿物地球化学通报,1999,18(3):194~200.
- [15]张洪江.土壤侵蚀原理 D1.中国林业出版社,2003,1.

- [16]董治宝,李振山,严平.国外土壤风蚀的研究历史与特点[J].中国沙漠,1995,15(:)100~104.
- [17]张德二.历史时期“雨土”现象剖析.科学通报,1984.27:294-297.
- [18]Dregne H E. Soil and water conservation: A global perspective [J]. INTERCINE CIA., 1986, 11(4):166~172.
- [19]邹亚荣,张增祥,周全斌等.基于GIS的土壤侵蚀与土地利用关系分析[j].水土保持研究.2002.9(1).
- [20]吴秀芹,蔡运龙.土地利用/土地覆被变化与土壤侵蚀关系研究进展[j].地理科学进展.2003,22(6).
- [21]徐旺生.近代中国牧草的调查、引进及栽培试验综述[J].中国农史,1998,17(2):79-85.
- [22]屈建军,王涛等.沙尘暴风洞模拟实验的综述[J].干旱区资源与环境,2004,(S1):109-115 增刊
- [23]荣皎凤,张海涛等.土壤风蚀量随风速的变化规律研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(2):149-153
- [24]董治宝,陈渭南,李振山,杨佐涛.风沙土水份抗风蚀性研究.水土保持通报,1996,
- [25]胡孟春,刘玉璋,乌兰等.科尔沁沙地土壤风蚀的风洞实验研究.中国沙漠,1991,11
- [26]阴山北麓农牧交错区典型地表土壤抗风蚀能力研究.陈智[D].博士学位论文,呼和浩特
- [27]许中旗,李文华等.典型草原抗风蚀能力的实验研究[J].环境科学,2005,26(5)
- [28]杨瑞吉,杨祁峰等.表征土壤肥力主要指标的研究进展[J].甘肃农业大学学报,2004,39(1):86~91. (1):22-29 内蒙古农业大学,2005
- [29]徐跃,姚天全.气候因素对土壤有机质组成和性质的影响[J].山地研究,1994,12(3):163~168.
- [30]Jenkinson D S and Rayner J H. The turnover of soil organic matter in soil of the Rothamsted classical experiment. Soil Sci. 1977 (123): 298~

- [31]王长庭,龙瑞军,王启基等.高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系[J].草业学报,2005,8:15~20.
- [32]嘎玛旦巴.西藏山南地区农地土壤有机质现状及变化规律[J].土壤肥料,1992,2:8~12.
- [33]方精云,刘国华,徐嵩龄.中国陆地生态系统的碳库[A].王庚辰,温玉璞.温室气体浓度和排放监测及相关过程[C].北京:中国环境科学出版社,1996.109~128.
- [34]傅伯杰,郭旭东,陈利顶,马克明,李俊然.土地利用变化与土壤养分的变化—以河北省遵化县为例[J].生态学报,2001,21(6):926~931
- [35]陶波,葛全胜,李克让等.陆地生态系统碳循环研究进展[J].地理研究,2001,20(5):564~574
- [36]中华人民共和国农业部畜牧兽医司,全国畜牧兽医总站主编.中国草地资源[M].北京:中国科学技术出版社,1996,5.
- [37]李凌浩,陈佐忠.草地生态系统碳循环及其对全球变化的响应,Ⅰ 碳循环的分室模型、碳输入与贮存.植物学通报,1998,15(2):14~22.16(2):17-23
- [38]李永宏.放牧空间梯度上和恢复演替时间梯度上羊草草原的群落特征.内蒙古草原生态系统定位站.草原生态系统研究第4集.北京:科学出版,1992.1~8.
- [39]裴海昆.不同放牧强度下土壤有机质特性变化的研究[J].青海畜牧兽医杂志.2004,34(4):1~2.
- [40]盛学斌,赵玉萍.土壤腐殖质在草地退化中的变化特征[J].环境科学学报,1997,17(4):456~457.
- [41]BradshawAD.The reeonstruction of eeosystems.Washingt onDC:NataeadPress.1992.1—52.
- [42]HarperJl.PoPulationbiology.NewYork:AademiePress.1977.22
- [43]祝庭成.草地生态学研究.长春:东北师范大学出版社,1977
- [44]祝庭成.草地退化与草地生态工程建设.中国草地科学与草业发展.北京:科学出版社,1989

- [45] 祝庭成, 李建成, 钟章成. 植被生态学. 北京: 高等教育出版社. 1988
- [46] 祝庭成等. 论草原退化与兴办草业. 农业现代化研究, 1987, (1): 6-9
- [47] [苏] 格拉西莫夫 LP. 主编; 王广颖, 潘科炎译. 干旱土地开发及抗荒漠化的途径. 北京: 中国环境出版社, 1991
- [48] 刘峥. 西部草地资源保护与可持续利用的激励政策研究[学位论文]. 北京师范大学. 2004
- [49] 林富德. 走向二十一世纪的中国人口、环境与发展. 高等教育出版社. 19%
- [50] 刘克. 中国“退牧还草”工程全面启动 5 年退 10 亿亩. 中国新闻网. 2003, 4, 13
- [51] 代士良. 康保县土地利用与土壤侵蚀关系研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2008
- [52] 钱宝, 刘凌, 肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析[A]. 河海大学学报. 2011, 39(1): 34~38.
- [53] GB9834—88 土壤有机质测定法[S].
- [54] 李忠佩, 李忠佩, 王效举. 红壤丘陵区土地利用方式变更后土壤有机碳动态变化的模拟[J]. 应用生态学报, 1998, 9(4): 365~370.
- [55] 傅 华, 陈亚明, 王彦荣, 万长贵等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2004, Vo24(3): 469~476.
- [56] Steoheb H, Roxburgh, Stability and coexistence in a lawn community: experim ental assessment of the stability of the actual community[J]. Oikos, 2000, 88: 409.
- [57] David A, Wardle. Stability of ecosystem properties in rensponse to abobe-ground functional group richness and composition[J]. Oikes, 2000, 89: 409.
- [58] Mcgrady-Steed J H L . Biodiversity , density compensation , and the dynamics of populations and functional groups[J]. Ecology, 2000, 81(2): 361.
- [59] 曹成有, 蒋德明, 阿拉木萨, 骆永明, 寇振武. 小叶锦鸡儿人工固沙区植被恢复生态过程的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 349~354.

- [60]姚文艺. 风力侵蚀及其预报方法[J]. 中国水土保持, 1994, 3: 16-19.
- [61]高函. 低覆盖度带状人工柠条林防风阻沙效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2010.
- [62]陈烟煤. 冀西北山间盆地地典型区域水土流失成因及防治对策探讨[J]. 水土保持研究, 2003(12).

致 谢

时光飞逝，转眼间三年已如烟花般华丽绽放过，回首这三年的研究、学习历程，让我开阔了视野、丰富了阅历，更成熟了许多。一直以来我都感到非常幸运，遇到了许多良师益友，是他们给予了我很多的鼓励和帮助。

首先要感谢我的导师常春平副教授。在论文的整个撰写过程中，恩师悉心指导，从选题、野外试验、室内试验到论文框架构建、研究思路、研究方法和理论，以及最后的修改措辞，导师都给我认真指点，提出大量指导性的宝贵意见。在求学期间，恩师严谨的治学态度、热情的工作精神、平易近人的待人风范使我终生受益，指引着我以后的人生道路。值此论文完稿之际，我在这里向我的导师表示衷心的感谢和深深的敬意！

其次我要感谢我的父母和家人，他们是最坚强的后盾，是内心最宁静、最踏实的依靠。在我的多年求学道路上给予了无私的奉献、支持和鼓励，是他们的关爱和照顾让我坚持走下来并在以后的工作中继续努力前进。

再次感谢我的师姐、同学、师弟师妹们，谢谢他们对我论文的各种支持和帮助。

最后要感谢我的室友们，是你们在我最艰难的时刻依然在我身边，给我带来无数的欢乐，让我无论是在学习还是在生活中都能坚强微笑地面对困难。

感谢在百忙之中抽出时间来审阅本论文的专家教授，感谢答辩委员会各位教授莅临指导。

攻读学位期间取得的科研成果清单

文章名称	发表刊物（出版社）	刊发时间	刊物级别	署名次序
《农田风沙流结构中 风蚀物粒度特征变化》	《安徽农业科学》	2012 年 7 月	核心期刊	1