

GIS 空间分析技术在土壤侵蚀评价中的应用

褚英敏¹, 方海燕², 袁再健^{2,3}

(1. 河北经贸大学旅游学院, 石家庄 050061;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

3. 河北科技大学经济管理学院, 石家庄 050018)

摘要:详细阐述了近年来 GIS 空间分析功能在土壤侵蚀评价中的应用, 主要包括侵蚀因子的提取、专题图的制作、基于空间分析的分布式模型的建立、土壤侵蚀空间分析、模拟及其生态风险评价等, 并针对区域经济、生态和社会可持续发展的需要, 展望了 GIS 空间分析技术在土壤侵蚀和水土保持研究工作中的前景。

关键词: GIS; 空间分析; 土壤侵蚀; 水土保持

中图分类号: S157.1; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)03-0239-04

Use of GIS-based Spatial Analysis in Soil Erosion Assessment

CHU Ying-min¹, FANG Hai-yan², YUAN Zai-jian^{2,3}

(1. College of Tourism, Hebei University of Economics & Business, Shijiazhuang 050061;

2. Key Laboratory of Water Circle and Related Land Surface Processes,

Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. School of Economics & Management, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Spatial analysis is the spirit of geographical information system (GIS), and some applications in recent years of GIS-based spatial-analytical researches on soil and water conservation were discussed detailedly, including the abstraction of erosion factors, the constructions of thematic figures and GIS-based distributed soil erosion models, the spatial analysis and simulation of soil erosion, and the estimation of ecological risk etc. And in terms of requirements of sustainable developments of economy, ecology and society, some deeper applications of GIS-based spatial-analytical researches on soil and water conservation in future were also point out.

Key words: GIS; spatial analysis; soil erosion; soil and water conservation

土壤侵蚀是一个十分复杂的地质问题, 涉及的影响因子众多, 与空间数据的联系十分密切, 尤其是宏观尺度上的区域水土流失研究, 涉及的数据量十分庞大, 按常规的数据采集和处理方法受到很大的局限, 所以必须借助现代先进的地质分析工具。GIS 正是符合这一应用要求的现代技术产品, 它以地理信息空间数据库为基础, 在计算机软硬件的支持下, 对空间相关数据进行采集、管理、操作、分析、模拟和显示, 采用地理模型分析方法, 适时提供多种空间和动态的地理信息, 为地理研究和地理决策服务^[1]。GIS 的优势主要体现在空间分析和图形显示上, 使计算结果图形化, 直观简洁, 配合空间数据的属性信息, 能提供强大、丰富的空间数据查询功能^[2]。GIS 空间分析功能的应用和遥感 (remote sense 简称 RS) 技术的发展, 使大范围水土流失计算和预测成为可能^[3]。另外利用遥感图像的时效性, 还可以实现水土流失的动态监测, 能够直观的以图形的形式展示影响土壤侵蚀的各种因素, 从而能够有的放矢的提出不同时空尺度上水土流失和水土保持动态监测的技术规程与方法, 建立水土流失和水土保持的评价模型和水土保持管理信息系统, 促进水土保持的信息化和现代化, 提高水土保持的经济效益、社会效益和

生态效益。本文旨在阐述目前 GIS 强大的空间分析功能在土壤侵蚀因子的提取、专题图的制作和分布式土壤侵蚀模型建立、生态安全危险性分析和水土保持中的应用情况, 同时提出了 GIS 强大的空间分析功能在水土保持应用中进一步的发展方向。

1 应用现状

1.1 土壤侵蚀因子及其提取

影响区域水土流失的因素通常包括自然和人为两个方面: 自然因素有气候 (如降水)、土壤、植被、地形等因子; 人为影响则主要指土地利用方式及土壤保护措施等^[4]。各影响因子又可由若干个次级因子组成 (图 1)。在土壤侵蚀模型建立过程中, 提取这些影响因子是关键。利用地理信息系统, 能对遥感影像及其它收集来的图件和观测数据进行空间分析和提取, 并能以单项专题图或叠加图的形式输出。

实际应用中, 在 Erdas Image 软件平台上, 对获取的 TM 卫星影像图进行粗纠正, 并利用标准地图进行遥感图像几何精纠正, 产生统一的影像底图; 同时, 融合其他图件和社会信息的属性数据, 开展综合应用分析, 结合有关的统计资料和

* 收稿日期: 2006-04-18

作者简介: 褚英敏 (1977 -), 女, 河北定州人, 河北经贸大学教师, 主要从事旅游管理与 GIS 应用研究。

实地调查,确定解译标志,然后选取训练样区进行人机交互分析解译^[5],得出影响水土流失的各类因子数据,并以图形和空间属性数据库的形式存储,便捷编辑修改、更新、模型运行时的直接调用和空间分析应用。

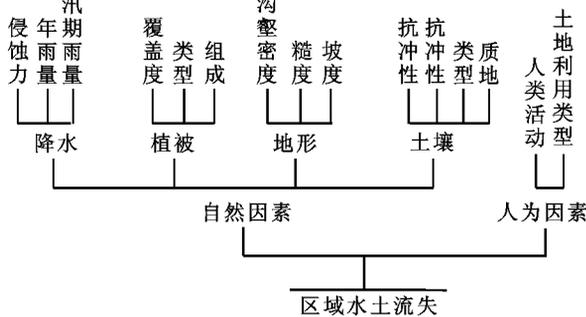


图 1 土壤侵蚀因子分类树

1.1.1.1 地形因子的提取

高分辨率卫星遥感影像的出现使得能够在较小的空间尺度上观察地表的细微变化,在计算机软硬件的支持下,进行大比例尺地形图的制作,并对生成的地形图进行矢量化,在地理信息软件 ARC/INFO 下编辑等高线图并附高程值,又由等高线数据生成 TIN 高程模型,进一步生成栅格 (GRID),完成数字高程模型 (DEM) 的制备,从而可以进一步提取坡向、坡度和沟谷密度图。刘洋等利用已有或生成的等高线图,在 Arc/Info 的 TIN 模块中生成三维模型,并分析生成取值区间为 0~90 的二维坡度图^[6]。韦中亚等提出了一种基于数学形态学的算法,通过对 TM 遥感影像的信息增强,突出沟谷信息,并通过沟谷线的自动识别等方法来提取沟谷密度,为沟谷密度的量测提供了新思路与新方法^[7]。但是,由于遥感影像受光照角度、地面阴影和地面植被盖度等的影响,在不同程度上影响提取的精度,而数字高程模型的出现,为自动进行高精度数字地形分析提供了有效方法。

1.1.1.2 植被覆盖和土地利用信息

植被在自然界中对拦截雨量和控制地表径流起着举足轻重的作用,是制约土壤侵蚀最有效的因子,也是卫星影像中表现敏感的因素。植被种类、生长情况和覆盖度的大小对土壤侵蚀也有很大的影响^[8]。在 TM 上,植被(主要是乔灌木)因为强烈地反射红外光而呈红色,可根据这一颜色特性用主成分变换法将地形和植被分开,提取植被覆盖率,即通过目视判读的方法来提取植被覆盖率。另外,在 TM 影像中,采用标准化植被指数 (NDVI) 的方法计算植被覆盖率,其公式为: $NDVI = (\text{波段}4 - \text{波段}3) / (\text{波段}4 + \text{波段}3) \times 100 + 127$ 。此外土地利用状况也是水土流失因素较为活跃的因素,ERDAS 7/IMAGINE 图像处理软件能方便地对遥感影像进行土地利用方面的分类。因为 SPOT 全色影像的分辨率为 10 m, TM 影像的分辨率为 30 m,但 TM 影像具有多光谱特性,可以将它们进行融合处理,以充分利用它们既具有多光谱,又具有高分辨率的特性,使影像的信息大为丰富,从而有利于分类。土地利用分类做好后,在 ARC/INFO 中进行格式转换并进行专题图的制作。

1.1.1.3 降水信息

降水是土壤侵蚀中的动力因素,降雨量的大小、降雨强度和频率等都会影响到土壤侵蚀。降雨信息的收集和处理为土壤侵蚀模型的建立和土壤侵蚀的模拟提供不可缺少的动力因子。胡良军(2001)利用 surfer 软件对降雨资料进行预处理,将点数据整理为一对地理坐标对应一个专题信息值的形式,并将其转换为空间图形格式 (Surfer 格式),并转换

成 ARC/INFO 格式,经过拓扑重建、空间编辑、属性添加以及投影变换等,最后完成区域雨量分布图,再与评价单元图叠加,即可得到研究区内任一点的雨量^[9]。詹小国等利用 ARC/INFO 软件将长江三峡库区 4~10 月份的降雨量等值线图生成 TIN 图,并将 TIN 数据转换成 LATTICE 格式文件,再由 LATTICE 数据转换成类似于 DEM 的 GRID 数据,从而获得研究区内任一点该时段的降雨量^[10]。

1.1.4 土壤类型信息

土壤侵蚀是土壤抗蚀因子和外界动力因子相互作用的结果。土壤类型不同,会影响到土壤的机械组成有机质含量和矿物胶体的接触关系等,从而会影响到土壤的渗透性和抗蚀抗冲性^[4]。依据 GIS 强大的空间分析功能,可以建立研究区土壤的空间分布情况,为土壤专题图的制作及其与土壤侵蚀的空间关系研究建立基础。曹瑜等从数字黄土高原的角度研究了黄土高原黄土的分布特征和堆积,侵蚀过程,建立了地貌地质、黄土坡面和水文等的空间数据库,研制数字黄土分布图件,展示黄土分布特点,构建黄土分布模型,模拟主要地质时期黄土分布,探讨侵蚀过程和人类活动对侵蚀的影响^[11]。

1.2 土壤侵蚀因子专题图的生成和叠加分析

在 GIS 软件的支持下,将影响水土流失的各因素通过软件的制图功能,制成一系列的专题地图,并将这些专题图分别输入 GIS 并建立起完整的数据库,然后通过 GIS 的叠加分析 (Overlay)、拓扑分析等操作,并配以一些特定的算法程序,可以进行水土流失强度、水土流失危险性分析。傅伯杰(1994)曾以小流域为研究对象,利用 GIS,通过将各影响因子专题图进行叠加,实现了小流域的水土流失危险性评价制图。他以计算机分色显示的方式来表示不同的水土流失危险程度^[12]。

1.3 基于空间分析土壤侵蚀模型的建立

随着现代计算机的高速发展和地理信息系统 (GIS) 的引入,为数据的提取、贮存、处理和计算提供了灵活、方便的手段,使分布式模型 (Distributed Model) 的发展成为可能,并成为当今国际水文科学研究的重点和发展方向,它可以对研究区内的任何一空间地面区域进行较为准确的水土流失计算^[13]。GIS 和 RS 技术的进步使分布式模型得到了长足的发展。许多研究者结合 GIS 和 RS 在采集、存储、管理空间数据上的有效性,研制出能够分析预报各种尺度流域产沙产流过程的模型^[14,15],例如 ANSWERS 模型、AGNPS 模型、TOP-MODEL 模型^[16],LISEM 模型,STREAM 模型^[17],MEFIDIS 模型^[18],KINEROS 模型^[19]均是随着地理信息系统 (GIS) 技术及遥感 (RS) 技术的迅速发展,在空间分析的基础上建立起来的,它们为获取不同时空条件下的相关数据,并进行分析处理,模拟出地表水土流失的情况和进行敏感性分析提供了必要的研究方法和手段。因此,基于 GIS 空间分析的分布式模型建立是土壤侵蚀模型发展的一个新趋势。

1.4 土壤侵蚀空间分析和模拟

在小流域和区域层次上,利用 GIS 技术结合 RS 技术制图,可以进行土壤侵蚀评价和空间分布特征研究。通过土壤侵蚀专题图与土地利用专题的叠加和统计软件如 SPSS 的分析,得出土地利用类型与土壤侵蚀分布的相关关系,从而进行土壤侵蚀与土地利用关系的地域分析^[20]。Renschler (1999)在分别应用 RUSLE 和 AGNPS 模型模拟土壤流失率季节变化和空间变化的基础上,对西班牙安达卢西亚 Malaga 西北地区不同土地利用类型下的土壤侵蚀进行了风险评价模拟,并且验证了模拟结果^[21]。这为从土地利用入手,

合理规划土地利用,防止土壤侵蚀提供了科学依据。土壤侵蚀模拟可以模拟许多地理过程或现象,例如气候变迁、沙漠化过程、土地退化过程以及土壤侵蚀,使得受几个因素共同影响,要经过若干年才能完成的地理过程,采用计算机模型模拟,只需几分钟就能得到类似的结果,为资源开发、国土整治、水土保持等提供依据。

1.5 土壤侵蚀生态风险评价

水土流失生态风险评价对土地合理利用和针对不同的侵蚀危险性,采取不同的对策具有重要的意义。在应用计算机软件和统计软件的基础上,对研究区各个生态环境因子运用主成分分析法,选择影响土壤侵蚀的主要生态因子,并对研究区的生态风险评价进行制图,以直观的空间形式展示研究区环境风险分级。邹亚荣等(2002)在 ARCPINFO 中运用主成分分析方法,对江西省水土流失生态环境风险进行了评价。应用主成分与其权重相乘的方法得到侵蚀风险图,并定出风险等级,从而对江西省的生态环境风险性作出评价^[20]。赵小敏(1999)采用结构化的系统设计方法,以 ARC/INFO 和 Spaceman 为工具软件,应用系统中开发的应用模型,进行了南丰县水土流失的因子分析,得出影响水土流失的因素有地面坡度、地表覆盖率、土壤砂砾含量、土壤抗冲性和土层厚度;然后应用系统中的叠加分类模型、层次分析模型和综合评价模型,进行了南丰县水土流失的综合评价与分区^[22]。倪九派等(2002)在 GIS 软件 ARC/INFO8.0 和统计软件 SPSS10.0 下,运用层次分析法和系统聚类法,对重庆丰都水土保持生态园区土壤危险性作了评价。结果表明,丰都水土保持生态园区,土壤侵蚀危险性主要受坡度、土层厚度和植被覆盖度 3 个因素的影响。在园区内进行退耕还林时,不宜过多的营造经济林,应经济林和生态林并重发展^[23]。

1.6 水土保持规划

水土保持规划是土壤侵蚀治理的有效手段,它常常采用人为改变下垫面环境因子,即通过改变地形坡度和植被覆盖率等措施来减少土壤侵蚀面积和强度^[24]。应用地理信息系统软件 ARC/INFO 等提供的强大空间分析功能,以土地利用类型现状图和土壤侵蚀量分级图进行空间叠合分析,以图形和空间数据库为工具,按照区域发展规划,综合各种自然和人类活动对土壤侵蚀的分析,对已造成和潜在的侵蚀强度大的区域采取相应的植物措施、工程措施和耕作措施。比如坡度大于 25° 的坡耕地退耕还林还草,坡度在 15~25° 的耕地进行坡改梯建设,并根据实际情况配套修建淤地坝、塘堰、滚水坝和排水沟渠等,以更好地保水保土和防止养分流失^[25],从而使得这种基于 GIS 的水土保持规划对采取措施的每一块图斑在专题地图上都能实现空间定位和属性数据查询。规划期内,根据经济、生态综合效益和实施的难易程度,规划建设重点项目示范区。利用空间分析中的叠置(Overlay)、缓冲(Buffer)分析功能,在图上提取应该重点保护的区域,并将图形和空间数据整理入库,作为优先发展的重点项目示范区,同时调整土地的利用方式,降低土壤侵蚀,减少养分损失,改善生态环境,从而提高区域的生态、经济和社会安全。

2 空间分析在防治土壤侵蚀中的应用前景

地理信息系统空间分析功能集空间数据和属性数据于一体化得管理和分析的技术系统。GIS 空间分析功能在水土保持中的应用不仅要求 GIS 空间分析功能能力的增强,还要有配套的属性系统的管理和分析功能。随着经济、生态和社会可持续发展的需要,目前地理信息系统正朝着网络化、分布式、真三维和时空信息系统方向发展;空间数据和属性

数据的一体化管理正逐步实现。目前 GIS 空间分析功能在水土保持工作中的应用趋势主要五个方面:

(1) 建立水土流失评价模型系统。由于水土流失环境的特殊性和复杂性,建立多空间尺度(坡面、小域、区域)、多用途(水土流失评价预报、水土保持效益评价、水土保持规划与设计、灾害性水土流失预警和多形式(物理过程模型、数理统计模型、土壤侵蚀评价与 GIS 形成集成模型)的水土流失评价模型系统,为适时适地的较为准确的预测预报研究区的时空侵蚀状况提供研究手段和方法,是目前水土流失研究中一项十分重要的内容。

(2) 建立区域水土流失敏感性评价指标体系。随着经济的发展,人类活动越来越深刻的影响着土壤侵蚀的面积和强度,为正确判断人类活动对干扰水土流失的干扰方式和强度,辨识出研究区潜在敏感性和现实敏感性不同等级的空间分布特征并进行水土流失敏感性分布制图,目前应在对区域水土流失影响因素分析的基础上,建立区域水土流失敏感性评价指标体系,并采取相应的水保措施使得人类活动导致的土壤侵蚀降低到最低点,为实施生态环境保育、进行水土保持规划和促进区域可持续发展具有十分重要的意义。

(3) 建立土壤侵蚀与水土保持信息系统。为提供系列化、动态化的侵蚀环境数据并做出预测预报,对土地利用规划、水土保持规划、水土保持效益评价等提供动态监测和辅助决策支持的功能,迫切需要建立土壤侵蚀与水土保持信息系统。在该系统的建设过程中,充分采用土地系列制图资料及试验观测资料,借助 GIS 强大的空间分析和处理功能,结合运用 RS 监测与地面监测相结合的手段,取得有关的信息数据并建成空间数据库(DTM、图像、专题图等)、属性数据库、数据管理库和模型库,开发形成一个集数据采集、数据管理、规划设计等功能为一体的多功能复合系统,以提供系列化、动态化的侵蚀环境数据并做出预测预报,从而可以对土地利用规划、生态效益、水土保持规划和效益评价等提供动态监测及辅助决策支持的功能。

(4) 建立 GIS 水土流失动态监测预报系统。近年来,地理信息系统(GIS)在许多领域都得到了广泛应用,但在水土流失监测预报中的应用还很不够,目前我国还没有一整套完善的水土流失监测体系。GIS 具有对空间信息处理和的强大功能,而水土流失主要与地理的空间信息有关,因此 GIS 在水土流失监测中有较广阔的应用空间。同时开展水土保持科学研究及政府部门制定水土保持规划,都必须对不同地区的水土流失情况有较细致的了解,针对不同的水土流失情况,采取相应的水土保持综合防治措施。同时 GIS 水土流失动态监测预报系统的建立可以准确地为社会提供监测区域的水土流失动态信息,它将在生态环境整治及社会经济可持续发展中发挥重要的作用。

(5) 区域水土流失快速调查。为准确的了解水土流失的分布范围和强度,确定的水土流失严重区,从而确定水土保持规划的措施和设计,建立区域水土流失快速调查技术系统,实现水土流失的快速调查是土壤侵蚀和水保研究中的又一发展方向。在区域水土流失快速调查过程中,需以水土流失基本数据库和评价模型系统为基础,以地面监测和 RS 监测的成果为现实资料依据,划分不同尺度的水土流失调查评价基本信息元,采集水土流失评价指标和现有调查数据,建立水土流失快速调查的基本 GIS 数据库、参数库、模型库和知识库,编制各种空间尺度的水土流失专题图,作为区域水土流失评价的基本手段,还需要完成不同尺度下评价参数、模型、比例尺和水土流失图的空间尺度转换,增加大区域水

土流失调查的精度和可信度,为小流域水土保持研究成果和治理经验的推广提供支持。

参考文献:

[1] 黄杏元. 地理信息系统概论[M]. 北京:高等教育出版社,1989. 1 - 56.

[2] 潘建平,龚健雅,李长风. 土壤侵蚀模型研究现状和 GIS、RS 应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(1): 89 - 93.

[3] 刘淼,胡远满,徐崇刚. 基于 GIS、RS 和 RU SLE 的林区土壤侵蚀定量研究 - 以大兴安岭呼中地区为例[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 21 - 24.

[4] 景可,卢金发,梁季阳,等. 黄河中游侵蚀环境特征和变化趋势[M]. 郑州:黄河水利出版社,1997. 65 - 80.

[5] 张艳军,郭跃,赵纯勇. GIS 和 RS 在水土保持规划中的应用[J]. 重庆师范大学学报, 2005, 22(2): 61 - 63.

[6] 刘洋,刘述彬,陆忠军,等. RS、GIS 技术在松嫩平原水土流失调查中的应用[J]. 国土资源遥感, 2003, (2): 27 - 29.

[7] 韦中亚. 石家庄市土壤侵蚀定量评价研究[J]. 水土保持研究, 1999, 6(4): 62 - 68.

[8] Li X Q Zhou J, Dodson J. The vegetation characteristics of the 'Yuan' area at Yaoxian on the Loess Plateau in China over the last 12 000 years[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2003, 124:1 - 7.

[9] 胡良军,李锐,杨勤科. 基于 GIS 的区域水土流失评价研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 167 - 175.

[10] 詹小国,王平. 基于 RS 和 GIS 的三峡库区水土流失动态监测研究[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(2): 41 - 44.

[11] 曹瑜,吴文祥,刘嘉麒,等. 黄土高原的地理信息系统(GIS)试研究[J]. 第四纪研究, 2001, 21(2): 108 - 113.

[12] 傅伯杰,汪西林. DEM 在研究黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀类型和过程中的应用[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 17 - 21.

[13] 卫海燕,张科利,王敬义. 分布式侵蚀预报模型中网格面积的选定 - 以黄土高原丘陵沟壑区为例[J]. 地理研究, 2002, 21(5): 578 - 584.

[14] 李清河,李昌哲,齐实,等. 流域降雨径流路径的数字模拟技术[J]. 地理研究, 2000, 19(2): 209 - 216.

[15] 阎国年,钱亚东,陈钟明. 黄土丘陵沟壑区沟谷网络自动制图技术研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(2): 131 - 137.

[16] 焦凤红,于显威. 分布式土壤侵蚀模型研究概述[J]. 亚热带水土保持, 2005, 17(2): 32 - 33.

[17] Nearing M A, Jetten, V, Baffaut C, et al. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover[J]. Catena, 2005, 61: 131 - 154.

[18] Nunes J P, Seixas J. Impacts of extreme rainfall events on hydrological soil erosion patterns: application to a Mediterranean watershed[J]. World Resource Review 2004, 15(3): 336 - 351.

[19] Smith R E, Goodrich D C, Woolhiser, D A, et al. KINEROS: a kinematic runoff and erosion model[A]. In: Singh, V P (Ed). Computer Models of Watershed Hydrology[M]. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, 1995. 697 - 732.

[20] 邹亚荣. GIS 支持下的江西省水土流失生态风险评价[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 18 - 20.

[21] Renschler C S, Mannaerts C, Diekkruger B. Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk - rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain[J]. Catena, 1999, 34: 209 - 225.

[22] 赵小敏. GIS 支持下的南丰县水土流失评价[J]. 江西农业大学学报, 1999, 21(2): 233 - 236.

[23] 倪九派,傅涛,何丙辉,等. 基于 GIS 的丰都三合水土保持生态园区土壤侵蚀危险性评价[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 62 - 66.

[24] 冉大川,王宏,刘斌,等. 黄河中游地区林草措施减洪减沙作用分析[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 141 - 143.

[25] 陈浩,梁广林,周金星,等. 黄河中游植被恢复对流域侵蚀产沙的影响与治理前景[J]. 中国科学(D), 2005, 35(5): 452 - 463.

(上接第 238 页)

表 6 不同群落植物多样性

群落类型	Shannon - wiener	Simpson	Mackintosh	Pielou
乔木林	0. 949	0. 1597	1. 128	0. 8846
灌木林	0. 909	0. 1594	1. 127	0. 8967
草原	1. 449	0. 2004	1. 129	0. 8115

群落的群落盖度、重要值、生物量、植物多样性进行分析,可以得出以下结论:

(1) 经过多年的退耕还林、禁牧、轮牧等措施,鄂尔多斯市乌审旗植被得到明显恢复,植被群落正趋于稳定,风沙化情况得到一定程度的遏制。

(2) 牧区的植被恢复效果如此明显,同时也说明了由于人为造成的风沙化、荒漠化严重的情况是可以经过合理、严格的管理措施而改善的。

(3) 对于如何保证人工林的稳定性仍需要进一步研究。

4 结论与讨论

通过对乌审旗毛乌素沙地腹地乔木林、灌木林以及草原

参考文献:

[1] 丁国栋. 沙漠学概论[M]. 北京:中国林业出版社,2002.

[2] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京:科学出版社,2004.

[3] 孙保平. 荒漠化防治工程学[M]. 北京:中国林业出版社,2000.

[4] 杨光,丁国栋,等. 黄土丘陵沟壑区退耕还林工程对植被恢复影响的研究 - 以陕西吴旗县为例[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 76 - 78.