

退耕还林工程建设对吴起县土地利用/ 覆被变化及其土壤侵蚀的影响

郭建英¹, 李锦荣¹, 刘铁军¹, 孙保平², 梁占岐¹, 赵 岩²

(1. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100038)

摘 要:为研究退耕还林工程建设对吴起县土地利用/覆被变化及其土壤侵蚀的影响,基于 3S 技术与 RUSLE 土壤侵蚀模型,分析评价了该县退耕还林前后土地利用/覆被、土壤侵蚀的时空变化。结果表明:吴起县实施退耕还林后 10 a 来,各种土地利用类型之间发生了较为复杂的转化,耕地面积比退耕前减少 66.51%,林地面积比退耕前增加了 212.61%;水土流失控制效果明显,全县平均土壤侵蚀模数由退耕还林前的 9 779 t/(km²·a)减少为退耕还林后的 5 285 t/(km²·a),减少了 45.96%,退耕还林后全县每年可减少土壤侵蚀量约 1 704 万 t;土壤侵蚀与土地利用类型关系密切,未利用地的侵蚀最严重,其平均土壤侵蚀模数为 19 513 t/(km²·a),为林地土壤侵蚀模数平均值 856 t/(km²·a)的 22.79 倍;研究结果将对该区域水土流失控制及其土地资源的合理利用提供参考依据。

关键词:退耕还林; 土壤侵蚀; 土地利用/覆被变化

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)05-0001-06

Effect of Conversion of Cropland to Forestland on Soil Water Erosion and Land Use/Cover in Wuqi County

GUO Jian-ying¹, LI Jin-rong¹, LIU Tie-jun¹, SUN Bao-ping², LIANG Zhan-qi¹, ZHAO Yan²

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot

010010, China; 2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:To study the impact of conversion of cropland to forestland project on land use change/cover and soil erosion in Wuqi County in this paper, based on 3S technology and RUSLE soil erosion model, the analysis and evaluation of the county, returning farmland to forest and land use/cover, the temporal and spatial changes of soil erosion were carried out. The results showed that the implementation of returning farmland to forestland in Wuqi County after 10 years, various types of land use complex changes happened between cultivated land area, 66.51% less than before returning cultivated land, forest area increased by 212.61% than before project, soil erosion was obvious controlled effect, the average soil erosion modulus was 9 779 t/(km²·a) before the project, and it was 5 285 t/(km²·a) after the conversion of cropland to forestland, the reduction percentage was 45.96%, after conversion of cropland to forestland in the county to the annual reduction amount of soil erosion was about 1.704×10^7 t. Soil erosion and land use types were closely related, the most serious erosion occurred on unused land, the average soil erosion modulus was 19 513 t/(km²·a), which is 22.79 times of average modulus with 856 t/(km²·a) in forestland; the study results will provide reference to soil erosion control and rational use of land resources in this region.

Key words:conversion of cropland to forestland; soil erosion; land use/land cover change

土壤侵蚀的发生发展特性与地表植被、土地利用方式息息相关,土地利用方式的改变可以引起一系列生态过程的变化,进而影响到土壤侵蚀的发生过

程^[1-2]。黄土丘陵区土壤侵蚀是目前世界瞩目的环境问题,严重的水土流失使土地资源遭到破坏、土壤肥力和质量下降,泥沙淤积河道引发洪水灾害,破坏地

表植被,恶化生态环境,加剧土地和小气候的干旱程度以及其他自然灾害的发生^[3-4]。因此有效地控制水土流失,恢复和保护环境是社会经济发展的需要,为此国家为改变黄土高原地区不合理的土地利用方式,实施了大规模的退耕还林还草工程,对于治理水土流失取得了显著的成效^[5]。然而,黄土高原区土地利用发生变化后,有关黄土丘陵区的研究主要是针对退耕还林工程建设的植被恢复、土壤改良、生态效益评价及水土流失控制机理等方面的研究^[7-14],而关于土地利用变化对县域土壤侵蚀影响程度,在该地区尚缺乏定量分析和研究。定量评价区域土地利用结构变化后土壤侵蚀量、土壤侵蚀强度及其空间分布特征,对于采取相应措施减少水土流失、保护和合理利用土地资源具有重要的意义^[15-17]。随着科学技术的不断发展以及数据源的多样化和完整化,RS 和 GIS 技术在宏观把握土地利用/覆被变化、土壤侵蚀现状和预测其发展趋势方面得到了广泛应用^[18]。本文基于遥感和 GIS 技术,应用修改后的通用土壤流失模型(RUSLE)对吴起县退耕还林工程建设前后的土地利用/覆被变化、土壤侵蚀状况进行定量分析,旨在对该区域退耕还林、还草等土地利用政策实施后的生态环境进行评价,为黄土丘陵区土地资源的可持续发展及其制定合理的土地利用政策提供参考依据。

1 实验材料与方法

1.1 研究区概况

吴起县位于延安市西北部,东经 $107^{\circ}38'37''$ — $108^{\circ}32'49''$,北纬 $36^{\circ}33'33''$ — $37^{\circ}24'27''$,地处毛乌素沙地南缘农牧过渡地带,属黄土高原梁峁沟壑区,县境内有无定河、北洛河两大流域,白于山、子午岭两大山系。全县面积 $3\,791.5\text{ km}^2$,海拔高度 $1\,233\sim 1\,809\text{ m}$ 。年平均气温 7.8°C ,无霜期 $96\sim 146\text{ d}$,年平均降雨量 478.3 mm ,且 64% 以上集中在 7—9 月份,其它季节多为无效降雨,旱灾、雹灾、冻灾、风灾等自然灾害频繁,多年平均陆面蒸发量为 $400\sim 450\text{ mm}$,属典型的干旱半干旱地区^[19]。吴起县近 10 a 来土地利用变化较大,于 1998 年在全县实行封山禁牧,于 1999 年实行一次性退耕还林还草,2000 年被列为国家退耕还林还草科技示范点,截至 2010 年,吴起县经国家确认退耕还林面积 $116\,846.66\text{ hm}^2$,占吴起县总面积的 30.82% ,1999 年一次性的退耕还林面积占总退耕还林面积的 80.24% ;退耕还林模式主要有沙棘×山杏混交林、刺槐×沙棘混交林、山杏、沙棘、油松纯林,其中沙棘纯林面积最大,生长较好,种

植面积占吴起县退耕还林总面积的 80.29% ^[20]。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源与处理 本研究的基础数据包括:遥感影像包括多波段的 Landsat 5 TM(pl28r34),成像时间为 1998 年 7 月 30 日和 2010 年 8 月 3 日(空间分辨率为 30 m);吴起县行政边界,依据国家基础地理信息系统网站提供 $1:400$ 万的全国县界电子图进行确定;DEM 数据及由其产生的坡度、坡长等数据采用国家测绘局提供的 $1:5$ 万电子数字化图生成;土壤数据来自陕西省第二次土壤普查数据^[21],并依据当地的土壤分布图($1:50$ 万)和土地利用方式对各种土壤类型于 2009 年 7 月进行实地取样,野外采样时取 $0\sim 20\text{ cm}$ 的表层土壤,每一采样点周围取 3 个点,混合土样,四分法取样,采样的同时,利用 GPS 获取土壤采样点的地理坐标,共采集土样 165 个,带回实验室测定土壤有机质含量(重铬酸钾法)及土壤机械组成(吸管法)。

利用 ArcGIS 10.0 以及 Erdas 9.1 等地理信息系统软件,对遥感数据进行影像校正、影像镶嵌、影像裁剪、影像增强和融合等预处理,将预处理之后的遥感影像,用于解译土地利用/覆盖信息;在获得植被、地形、土地利用等基础数据后,建立包括矢量和栅格两种形式的地理信息数据库,对其属性数据进行相应的数据编码,再借助 ArcGIS 10.0 将上述各类型图层栅格化(Grid 格式),考虑到县域尺度和计算精度,栅格大小为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$,获得通用土壤流失方程(USLE)的因子图层,再通过 ArcGIS 10.0 将各因子图连乘,获得研究区不同时期的土壤侵蚀强度等级及其分布图;根据水利部颁发的土壤侵蚀强度分级标准(SL190-2007)确定土壤侵蚀强度,将本研究区内土壤侵蚀分为微度、轻度、中度、强烈和极强烈侵蚀 5 种强度级别^[22-23];依据中国生态环境数据库土地利用类型解译标准^[2],将土地利用类型划分为 6 个类别,即农业用地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地。按照遥感影像判读精度,对照影像预判结果,选择具有代表性的点和区域,结合土壤、地质、气候和实地 GPS 定位调查结果等因子对解译结果进行综合分析及纠正^[24]。

1.2.2 土壤侵蚀模型选择 目前用来评估土壤侵蚀量的模型有很多,其中最早建立且较为成熟的侵蚀预报模型是 Wischmeier 等人 1965 年基于大量小区观测资料和人工模拟降雨试验资料建立的通用土壤流失方程 USLE(Universal Soil Loss Equation)^[25],我国自 20 世纪 80 年代以来,开始引进通用土壤流失方

程,根据实地观测参数,对通用土壤流失方程进行修订,该模型在我国得到了广泛的应用^[16-18,26-29]。其方程表达式如下:

$$A=RKLS\textit{SCP} \tag{1}$$

式中: A ——侵蚀模数 $[(\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a}))]$; R ——降雨侵蚀力因子 $[(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{km}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})]$; K ——土壤可蚀性因子 $[(\text{t}\cdot\text{h})/(\text{MJ}\cdot\text{mm})]$; LS ——坡长坡度因子,无量纲; C ——植被与经营管理因子,无量纲; P ——水土保持因子,无量纲。

1.2.3 土壤侵蚀因子计算

(1) 降雨侵蚀力因子 R 。根据研究区气象局降雨资料的分析,该地区水土流失季节为 5—10 月份,当降雨量 $\geq 10\text{ mm}$,最大 30 min 雨强 $\geq 4\text{ mm}$ 时将会引起土壤流失。侵蚀降雨多集中在 7—9 月 3 个月,占 5—10 月降雨量的 63.5%~94.6%,占年降水总量的 51.1%~80.3%,与孙保平、孙立达等^[30-31]研究降雨侵蚀力的区域基本相似,因此采用其建立的 5—10 月份降雨量(h)与年侵蚀力回归方程: $R=1.77h-133.03$ (相关系数 $r=0.85$)。按以上公式计算,吴旗县 1999 年 $R=537.5\text{ (MJ}\cdot\text{mm})/(\text{km}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,2007 年 $R=570.2\text{ (MJ}\cdot\text{mm})/(\text{km}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。

(2) 土壤可蚀性因子 K 。依据 Ei-Swaify 等的研究, K 值的大小与土壤质地有较高的相关性。本文采用 Williams 等人在 EPIC 模型中土壤可蚀性因子 K 的计算公式^[32]。

$$K=(0.2+0.3\exp[-0.0256S_a(1-S_i/100)])\times(\frac{S_i}{C_l+S_i})^{0.3}\times(1.0-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)})\times(1.0-\frac{0.7S_n}{S_n+\exp(-5.51+22.9S_n)}) \tag{2}$$

式中: S_a ——砂粒(0.1~2 mm)含量(%); S_i ——粉粒(0.002~0.1 mm)含量(%); C_l ——黏粒($<0.002\text{ mm}$)含量(%); C ——有机碳含量(%); $S_n=1-S_a/100$ 。将野外采样点所得的土壤粒径组成和有机质含量数据输入上式计算各采样点的 K 值,采用克里格插值

法得到吴起县土壤可蚀性 K 值分布图。

(3) 坡度坡长因子的计算。① 坡长因子 L 的计算。采用 DEM 栅格数据,利用 ArcGIS 提取坡长 λ 。利用 L 和坡长的关系求取坡长因子。

$$L=(\frac{\lambda}{22.1})^m \tag{3}$$

式中: λ ——坡长(m); m ——坡长效应指数,当坡度 $\theta<0.57^\circ$ 时, $m=0.2$; 坡度 $0.57^\circ\leq\theta<1.72^\circ$, $m=0.3$; 坡度 $1.72^\circ\leq\theta<5.14^\circ$, $m=0.4$; 坡度 $\geq 5.14^\circ$, $m=0.5$ ^[17]。

② 坡度因子 S 的计算。缓坡上选用 McCool 等研究的坡度公式^[33],见式(4)和式(5);在陡坡上采用刘宝元在黄土高原建立的陡坡因子计算公式^[34],见式(5—6)。

$$S=10.8\sin\theta+0.03 \quad \theta<5^\circ \tag{4}$$

$$S=16.8\sin\theta-0.50 \quad 5^\circ\leq\theta<10^\circ \tag{5}$$

$$S=21.91\sin\theta-0.96 \quad \theta\geq 10^\circ \tag{6}$$

式中: S ——坡度因子; θ ——坡度。按照上述方法和计算公式,计算得到吴起县坡长坡度因子 LS 图。

(4) 植被与经营管理 C 因子的计算。 C 值主要受植被覆盖度和土地利用现状的制约,本次研究将参考国内外的研究成果^[35-37],结合吴起县的实际情况利用式(7)计算得出各地类年均 C 因子。利用 ArcGIS 中的 raster calculator,计算得到研究区退耕还林前后 C 因子。

$$c=\frac{\text{NDVI}-\text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max}-\text{NDVI}_{\min}} \tag{7}$$

$C=1,$ $c=0;$
 $C=0.6508-0.3436\lg c,$ $0<c<78.3\%$
 $C=0,$ $c\geq 78.3\%$

式中:NDVI——所求像元的归一化植被指数; NDVI_{\min} , NDVI_{\max} ——研究区 NDVI 的最小值和最大值。

(5) 保护措施因子 P 的确定。参照已有的研究成果^[17,38-39],结合遥感解译分类得到的土地利用现状图进行 P 因子赋值,见表 1。

表 1 吴起县退耕还林前后 P 值变化

土地利用	有林地	灌木林地	耕地	高盖度	中盖度	未利用	水域	城乡居民工矿建设用地
退耕前 P 因子值	1	1	0.3	1	1	1	0	0
退耕后 P 因子值	1/0.8	1/0.8	0.35	1	1	1	0	0

注:退耕的有林地、灌木林地 $P=0.8$,退耕还林后剩余的地势较为平坦的耕地和梯田 $P=0.35$ 。

2 结果与分析

2.1 退耕还林前后土地利用变化分析

对 1998 年和 2010 年的遥感影像进行监督分类

和分类后处理,得到了 1998 年和 2010 年的土地利用/覆被分类图(附图 1)。

对 1998 年和 2010 年的 TM 遥感影像的分类结果进行统计,得到了吴起县土地利用/覆被的统计数

据(表 2)。由表 2 可以看出,1998 年吴起县的耕地面积为 74 618. 60 hm², 占全县总土地面积的 19. 68%, 主要分布于梁卯的缓坡地和水平梯田; 林地面积 47 403. 22 hm², 仅占总土地面积的 12. 29%, 主要分布在较为平缓的背阴沟坡, 而且主要是灌木林地; 草地面积 168 607. 01 hm², 占研究区总面积的 44. 47%, 其中中覆盖度草地为 113 874. 15 hm², 占总面积的 30. 03%, 是吴起县占地面积最大的土地利用类型, 主要分布在沟坡和梁卯陡坡, 占草地面积的 75%, 构成草地的主体, 在全县境内分布较均匀; 荒草地的分布面积也比较大, 为 77 009. 78 hm², 占总土地利用的 20. 31%, 主要分布在陡峭的沟坡。2010 年耕地面积

25 737. 84 hm², 占 6. 79%, 比例有大幅度的减少, 主要由于该地实施了退耕还林工程, 大部分坡耕地都退成林地, 这时吴起县的主要土地利用类型为林地和草地, 分别占研究区土地总面积的 38. 42% 和 40. 69%, 草地主要分布在沟坡和梁卯顶部, 其中高覆盖度草地主要分布在梁卯的阴坡, 而阳坡则由灌木林地和低覆盖度草地代替了原先广泛分布的旱地, 荒草地的一部分转化为中盖度草地, 水域的面积有所减少, 其中主要为河流面积的减少, 而湖泊、水库面积略有所增加。由此可以看出实施退耕还林还草以及封育措施, 有效地提高了吴起县的植被覆盖率, 生态环境得到了明显的改善。

表 2 吴起县土地利用/覆被分类面积统计

年份	项目	耕地	林地	草地	水域	居民建设用地	荒草地	合计
1998	面积/hm ²	74618. 60	47403. 22	168607. 01	4870. 96	6635. 29	77009. 78	379159. 56
	面积百分比/%	19. 68	12. 29	44. 47	1. 29	1. 75	20. 31	100. 00
2010	面积/hm ²	25737. 84	145699. 77	154295. 74	3600. 66	13743. 85	36077. 97	379155. 81
	面积百分比/%	6. 79	38. 42	40. 69	0. 95	3. 62	9. 52	100. 00

2.2 退耕还林前后土壤侵蚀变化分析

利用 ArcGIS 10. 0 的空间分析模块, 执行图形叠加运算功能, 生成土壤侵蚀量图层, 在栅格土壤流失量图的基础上, 根据水利部颁发的土壤侵蚀强度等级划分标准, 对栅格土壤流失量进行分类, 将侵蚀量在同一侵蚀等级的栅格进行合并, 得到吴起县退耕还林工程建设前后的土壤侵蚀强度分布图(附图 2—3), 由于其单位为英制, 需要进行单位转换, 乘以系数 224. 2, 即可转换为 t/(km² · a) 的公制单位, 得到各像元的年土壤流失量。

从附图 2—3 及表 3 可以明显看出, 与退耕前的 1998 年相比, 土壤侵蚀强度总体上降低, 较高强度土壤侵蚀的土地面积在大幅度减少。极强度、剧烈的高等级土壤侵蚀面积 2010 年比 1998 年分别减少了

74. 58% 和 78. 93%, 使得极强度、剧烈的高等级土壤侵蚀面积由 1998 年占国土总面积的 56. 67% 下降到 2010 年的 13. 38%; 依据表 3 的统计结果可知: 吴起县 2010 年的全县平均土壤侵蚀为 5 285 t/(km² · a), 属于强度侵蚀, 其研究结果与张岩等^[40] 利用中国土壤侵蚀模型(CSLE)对吴起县 2009 年县域平均土壤侵蚀强度 5 504 t/(km² · a) 的研究结果基本相似。总体来看, 吴起县退耕还林前以极强度侵蚀为主, 占吴起县土地总面积的 42. 76%, 退耕还林后的 2010 年以中度侵蚀为主, 占吴起县土地总面的 43. 62%。由此可见, 吴起县退耕还林后水土流失得到了有效遏制, 生态建设成果突出, 但土壤侵蚀状况仍然较为严重, 需要继续加强巩固退耕还林工程建设成果, 充分发挥退耕还林工程建设的水土保育效应。

表 3 吴起县退耕还林前后土壤侵蚀强度面积百分比级

项目	面积百分比/%						平均侵蚀强度/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)
	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈	
2010 年	2. 27	13. 38	43. 62	27. 35	10. 87	2. 51	5285
1998 年	0. 97	2. 85	10. 03	31. 48	42. 76	11. 91	9779
1998—2010 年变化	1. 30	10. 53	33. 59	—4. 13	—31. 89	—9. 40	—4494
变化百分比	134. 02	369. 47	334. 90	—13. 12	—74. 58	—78. 93	

2.3 土壤侵蚀量与土地利用类型的关系

利用已有土地利用/覆被、土壤侵蚀数据库分析土地利用类型对土壤侵蚀的影响。计算出不同土地利用类型的平均土壤侵蚀模数。从图 1 的统计结果表明, 不同土地利用类型间, 土壤侵蚀模数差异显著, 侵蚀最严重的未利用地平均土壤侵蚀模数为 19 513

t/(km² · a), 其侵蚀模数相当于林地土壤侵蚀模数平均值 856 t/(km² · a) 的 22. 79 倍, 其研究结果与淮宗安等人对黄土高原区的生物措施治理水土流失效益进行观测研究的结果基本相似, 其通过径流小区观测研究结果表明农田的平均土壤侵蚀量 9 600 t/(km² · a), 林地的土壤侵蚀量为 847 t/(km² · a)^[41]; 陡坡旱地,

土壤侵蚀模数最大,平均值 $12\,449\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,这部分地区地势高、坡度大且坡长,自然条件恶劣,生态环境脆弱,加之坡耕地耕作粗放,缺少水土保持措施,尤其是坡度在 20° 以上的地区,土壤侵蚀非常严重并很难恢复。土壤侵蚀模数仅次于陡坡旱地的是缓坡农田,这些地区由于自然条件较好,易于开发,频繁的人类活动对土壤的抗蚀能力造成了严重的破坏,因此抵御侵蚀的能力较弱,易发生水土流失。

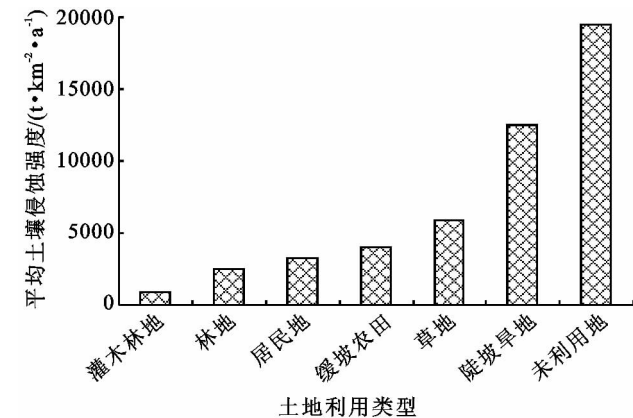


图1 不同土地利用类型下的平均土壤侵蚀模数

3 结论

本文基于 3S 技术,利用修改后的通用土壤流失模型(RUSLE),结合野外实地调查结果,客观地反映出吴起县退耕还林工程建设前后土地利用/覆被、土壤侵蚀的变化过程,结果表明:吴起县退耕还林 10 a 来,植被恢复明显,水土流失得到了有效遏制,工程建设成果突出。

(1) 吴起县退耕还林前 1998 年的耕地面积为 $74\,618.60\text{ hm}^2$, 占全县总土地面积的 19.68%,林地面积 $47\,403.22\text{ hm}^2$, 仅占总土地面积的 12.29%,草地面积 $168\,607.01\text{ hm}^2$, 占研究区总面积的 44.47%,是吴起县占地面积最大的土地利用类型;退耕还林后,吴起县的主要土地利用类型转变为林地和草地,分别占研究区土地总面积的 38.42% 和 40.69%,耕地面积 $25\,737.84\text{ hm}^2$, 占 6.79%,比例大幅度地锐减;耕地面积比退耕前减少 66.51%,林地面积比退耕前增加了 212.61%,可见吴起县退耕还林前后的土地利用变化极为显著。

(2) 吴起县实施退耕还林后 10 a 来,水土流失控制效果明显,较高强度土壤侵蚀的土地面积在大幅度减少。研究区退耕还林 10 a 后土壤侵蚀分布以中度侵蚀最多,其面积占吴起县国土总面积的 43.62%,而退耕还林前吴起县土壤侵蚀以极强度侵蚀为主,占吴起县国土总面积的 42.76%;吴起县退耕还林 10 a 后的全县平均土壤侵蚀为 $5\,285\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,属于强度

侵蚀,其退耕还林前 1998 年的平均土壤侵蚀为 $9\,779\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,为退耕还林后的 1.85 倍,每年约减少土壤侵蚀量 1 704 万 t。由此可见,退耕还林工程建设对于吴起县控制水土流失和改善生态环境有着重要作用。

(3) 不同土地利用方式下,土壤侵蚀强度由大到小依次为未利用地>陡坡旱地>缓坡农田>草地>居民地>灌木林地>林地。未利用地平均土壤侵蚀模数为 $19\,513\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、陡坡旱地土壤侵蚀模数为 $12\,449\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,其侵蚀模数分别相当于灌木林地(吴起县主要退耕还林地)平均土壤侵蚀模数 $2\,458\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的 7.94 倍和 5.06 倍,由此可见退耕还林工程建设对于控制区域土壤侵蚀的效果极为明显,应积极巩固退耕还林工程建设的成果,加强退耕还林地的管理,使其长效发挥其生态功能。同时应积极将陡坡旱地(分布较少)进行退耕还林或采取“坡改梯”的措施,着重对现有水土流失特别严重,坡度 $>30^\circ$ 的未利用土地进行综合治理,提高植被覆盖率,尽可能减少其土壤侵蚀。

参考文献:

- [1] 张鲁,周跃,张丽彤. 国内外土地利用与土壤侵蚀关系的研究现状与展望[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 43-48.
- [2] 郭碧云,王光谦,张正峰. 内蒙古农牧交错区土地利用/覆被变化及土壤侵蚀:以太仆寺旗为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(5): 9-16.
- [3] 于国强,李占斌,裴亮. 不同植被类型下坡面径流侵蚀产沙差异性[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 1-6.
- [4] 王晓慧,陈永富,陈尔学. 基于遥感和 GIS 的黄土高原中阳县土壤侵蚀评价[J]. 山地学报, 2011, 29(4): 442-448.
- [5] 许智超,张岩,刘宪春,等. 半干旱黄土区退耕还林十年植被恢复变化分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 91-96.
- [6] 罗国占,赵廷宁,王贤,等. 吴旗县覆沙黄土区退耕还林结合封禁的植被恢复效果研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 80-82.
- [7] 杨光,孙保平,赵廷宁,等. 黄土丘陵沟壑区退耕还林工程植被恢复效益初步研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 165-170.
- [8] 王丹丹,吴普特,赵西宁. 黄土高原退耕还林(草)效益评价研究进展[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(3): 223-228.
- [9] 秦伟,朱清科,赖亚飞. 退耕还林工程生态价值评估与补偿:以陕西省吴起县为例[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(5): 159-164.
- [10] 贾晓娟,常庆瑞,薛阿亮,等. 黄土高原丘陵沟壑区退耕还林生态效应评价[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 182-185.

- [11] 李登科. 陕北吴起县退耕还林(草)成效的遥感监测分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 125-130.
- [12] 李登科, 卓静, 孙智辉. 基于 RS 和 GIS 的退耕还林生态建设工程成效监测[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 120-126.
- [13] 张翼. 黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀研究[J]. 水土保持研究, 2000, 7(2): 39-47.
- [14] 穆兴民, 徐学选, 王文龙. 黄土高原沟壑区小流域水土流失治理对径流的效应[J]. 干旱区资源与环境, 1998, 12(4): 119-126.
- [15] 周湘山, 孙保平, 李锦荣, 等. 基于 GIS 和 USLE 的土壤侵蚀定量分析研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 5-9.
- [16] 李忠锋, 王一谋, 冯毓荪, 等. 遥感与 GIS 在准格尔旗土壤侵蚀监测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(6): 322-326.
- [17] 王晓慧, 陈永富, 陈尔学. 基于遥感和 GIS 的黄土高原中阳县土壤侵蚀评价[J]. 山地学报, 2011, 29(4): 442-448.
- [18] 宫奎方, 范建容, 张定容, 等. RS 和 GIS 技术支持下的昌都县土壤侵蚀评估[J]. 中国水土保持, 2011(5): 51-53.
- [19] 李萍, 朱清科, 王露露, 等. 吴起县耕地面积变化对其产业结构影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 250-255.
- [20] 郭建英. 吴起县退耕还林工程效益的监测与评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [21] 郭兆元, 黄自立, 冯立孝. 山西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [22] 吴亚宁, 张虎林, 杨丽萍. 黄河流域甘肃片土壤侵蚀遥感普查的初步分析[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(6): 398-401.
- [23] 何兴元, 胡志斌, 李月辉, 等. GIS 支持下岷江上游土壤侵蚀动态研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2271-2278.
- [24] 李扬, 刘霞, 姚孝友, 等. 沂蒙山区典型小流域土壤侵蚀与环境影响因子耦合关系[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 66-70.
- [25] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: A guide for selection of practices for soil and water conservation[J]. Department of Agriculture, 1965, 21(3): 280-282.
- [26] 李婷, 张世熔, 廖明辉. 基于 3S 和 USLE 的沱江流域中游土壤侵蚀定量评价[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 24-27.
- [27] 吕明权, 王继军, 江青龙, 等. 基于 LUCC 的冀北土石山区东北沟流域土壤侵蚀时空变化分析[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 18-25.
- [28] 齐述华, 蒋梅鑫, 于秀波. 基于遥感和 ULSE 模型评价 1995—2005 年江西土壤侵蚀[J]. 中国环境科学, 2011, 31(7): 1197-1203.
- [29] 周为峰, 吴炳方. 基于遥感和 GIS 的密云水库上游土壤侵蚀定量估算[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 46-50.
- [30] 孙立达, 孙保平. 西吉县黄土丘陵沟壑区小流域土壤流失量预报方程[J]. 自然资源学报, 1988, 3(2): 141-153.
- [31] 孙保平, 赵廷宁, 齐实. 在西吉县黄土丘陵沟壑区的应用[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1990, 12: 50-58.
- [32] 周湘山, 孙保平, 李锦荣, 等. 基于 GIS 和 USLE 的土壤侵蚀定量分析研究: 以四川省洪雅县为例[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 5-10.
- [33] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science of America Journal, 2000, 64(2): 1759-1763.
- [34] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning, U. S. [J]. Department of Agriculture, 1987, 20(6): 537.
- [35] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 10(2): 1-9.
- [36] 安培浚, 刘树林, 领耀文, 等. 植被指数遥感定量研究: 以民勤绿洲为例[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(6): 576-581.
- [37] 刘得俊, 李润杰, 王文卿, 等. 基于地理信息系统的西宁市土壤侵蚀监测的实现[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 111-113.
- [38] 潘竞虎, 董晓峰. 基于遥感和 GIS 的黄土丘陵区土壤侵蚀变化监测分析[J]. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2006, 42(2): 85-89.
- [39] 邱一丹, 李锦荣, 孙保平, 等. 退耕还林和降雨对中阳县土壤侵蚀的影响[J]. 湖南农业科学, 2011(13): 66-69.
- [40] 张岩, 刘宪春, 李智广, 等. 利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 165-171.
- [41] 淮宗安, 李惠萍, 张晓梅. 黄土高原生物措施治理水土流失效益分析[C]. 第十届中国科协年会论文集, 北京: 蓝天出版社, 2008.