

# 2000—2013年北洛河河源区土壤侵蚀 潜在风险时空变化分析

魏鹤举

(青海大学 水利电力学院, 西宁 810016)

**摘要:**以北洛河河源区为研究区,利用2000年、2013年Landsat影像和DEM数据作为数据源,分别对土地利用类型、植被覆盖度和坡度信息进行提取,采用多因素综合分析法对土壤侵蚀风险进行快速评估,并对土壤侵蚀风险变化趋势、植被变化对土壤侵蚀风险的影响、水土保持措施优先等级等进行了分析。结果表明:(1)土壤侵蚀风险无变化区域面积最大,且风险减弱区域面积比(31.97%)大于风险增加区域面积比(16.05%)。其中,中度土壤侵蚀风险区域相对于其他风险等级区域更加稳定;(2)土壤侵蚀风险变化区域内随着变化程度的增大,相应变化区域面积越小;(3)在土壤侵蚀风险减弱区,自然植被覆盖度增加和退耕的影响区域面积比分别为42.8%和57.2%,在土壤侵蚀风险增加区,自然植被覆盖度降低和开垦农田的影响区域面积比分别为93.7%和6.3%,且随着土壤侵蚀风险变化程度的增加,耕地类型转变的影响范围越大,自然植被覆盖度变化的影响范围越小。

**关键词:**土壤侵蚀;多因素综合法;土地利用类型;植被覆盖度;坡度;退耕还林还草工程

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)04-0168-06

## Analysis on Spatiotemporal Change of Potential Risk of Soil Erosion in the Source Region of the Beiluo River from 2000 to 2013

WEI Guanju

(College of Water Resources and Electric Power, Qinghai University, Xining 810016, China)

**Abstract:** The objective of this study is to assess the water erosion risk and dynamic change trend of spatial distribution in erosion status and intensity, analyze the effects of vegetation variation on erosion risk, and obtain the conservation priority map between 2000 and 2013 in the source region of the Beiluo River using a multicriteria evaluation method based on land cover types, fractional vegetation coverage and slope derived from Landsat7 ETM+ image in 2000, Landsat8 OLI image in the 2013 and DEM data. The results show that: (1) the area of region with unchanged erosion risk is the largest, and the area proportion (31.97%) of region with decreasing erosion risk is larger than that (16.05%) of region with increasing erosion risk, the region with moderate risk is more stable than the area with other risk-level; (2) with the degree of variation of erosion risk getting greater, the area of region with corresponding variation degree of erosion risk will become less; (3) the area proportions of regions affected by improving natural vegetation cover and by abandoning farmland in the region with decreasing trend of erosion risk are 42.8% and 57.2%, respectively, and the area proportions of regions affected by improving natural vegetation cover and by farming in the region with increasing trend of erosion risk are 93.7% and 6.3%, respectively. The area affected by land cover change get larger and the area affected by natural vegetation coverage get smaller as the level of erosion risk get higher.

**Keywords:** soil erosion; multicriteria evaluation method; land cover type; fractional vegetation coverage; slope; Grain for Green Project

土壤侵蚀是指土壤及其母质在水力、风力、冻融或重力等外营力作用下,被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程。土壤侵蚀通过减少表土层的有机质和养分含量而降低土地生产力,通过沉积作用淤积江河、湖泊、水库,损害基础设置,威胁人类安全,它是导致人类赖以生存的土地资源退化和损失的主要原因之一,已经成为一个全球性的环境问题<sup>[1]</sup>。我国是世界上水土流失最严重的国家之一,水土流失分布范围广、面积大,水土流失类型复杂多样。据最近公布的全国第二次土壤侵蚀遥感调查结果显示,目前受水蚀影响的面积达165万 km<sup>2</sup>,占国土总面积的17%以上,成为制约我国国民经济和社会可持续发展的重要因素之一<sup>[2]</sup>。

土壤侵蚀的发生受到多种自然要素和人类活动的综合影响。自从研究土壤侵蚀一个多世纪以来,国内外学者提出了多种多样的土壤侵蚀评价方法,包括定性的判断和定量的计算<sup>[3-4]</sup>。其中,区域尺度的土壤侵蚀评价主要的困难在于数据的可获取性。近些年来,遥感技术的快速发展和广泛应用为区域尺度的地表覆盖信息提取提供了可靠的技术途径<sup>[5-10]</sup>。相对于传统的土地调查,由于遥感方法具有耗资少、周期短、覆盖广等特点,利用遥感技术对土壤侵蚀强度进行评估分析已经成为国内外学者的共识,该技术可以对土壤侵蚀类型和强度的时空分布进行快速评估,此评估对各级政府和水土保持主管部门的水土保持规划和决策制定具有非常重要的指导意义。

本文基于遥感数据,利用多因素综合评价方法分别对2000年和2013年黄土高原丘陵沟壑区的北洛河河源区土壤侵蚀风险进行评估,并对2000—2013年土壤侵蚀风险的时空变化进行分析研究,分析近14 a黄土高原实施的大规模退耕还林还草工程对北洛河河源区土壤侵蚀风险的影响程度,并提出水土保持措施优先实施等级。同时,对过去14 a土地利用类型转换和植被覆盖度变化对土壤侵蚀风险变化的影响分别进行分析研究。此研究对北洛河河源区的水土保持措施生态成效评估以及今后水保措施建设规划都具有一定的指导意义。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

北洛河源头区地处黄土高原腹地,属黄土高原丘陵沟壑区第二副区,地形破碎、沟壑纵横,具有半干旱、半湿润向干旱过度的气候特征,以黄绵土为主要土壤类型。地貌、气候和土壤特征使该区成为黄土高原土壤侵蚀最为严重的地区之一,且作为黄河的二级支流,北洛河流域的侵蚀产沙也是黄河泥沙的主要来源区。该地区位于北洛河吴起水文站以上,包括5个

小支流,分别为二道川,头道川,乱石头川,窝窝沟,宁赛川,流域总面积为3 408 km<sup>2</sup>。按县域划分包括两个县,第一个区域属定边县,面积1 024 km<sup>2</sup>,第二个区域属吴起县,面积2 384 km<sup>2</sup>。由于过度农耕和肆意放牧,北洛河源头区的原生植被几乎被毁坏殆尽,形成了以农牧用地占绝对优势的土地利用结构,长期以来一直是典型的水土流失高风险区域。随着全国开始实施退耕还林(草)工程以来,北洛河源头区的吴起县成为“全国退耕还林第一县”,同时,通过配套实施“封山禁牧,舍饲养畜”政策,该区域自然植被得到显著恢复。较短时间内的大规模植被重建使该地区的土地利用在结构、格局上都发生了明显变化。

### 1.2 数据来源

本研究中所采用的数据包括2000年8月15日获取的Landsat7 ETM+影像(30 m分辨率),2013年8月3日获取的Landsat8 OLI影像(30 m分辨率),ASTER DEM第二版数据(30 m分辨率),2000年“中国1:10万土地利用数据”和2010年“河龙区间土地利用数据”。其中,DEM数据用于坡度数据的提取,两景遥感影像用于土地利用类型和植被覆盖度的提取,遥感影像均选取8月份数据,避免了Landsat影像的植被物候差异对土地覆盖分类和植被覆盖度反演的影响。2000年“中国1:10万土地利用数据”是由中国科学院所属19个研究所的遥感科技队伍,基于Landsat遥感数据所构建,该产品是目前我国精度最高的土地利用数据产品,已经在国家土地资源调查、水文、生态研究中发挥着重要作用<sup>[11]</sup>。2010年“河龙区间土地利用数据”是由北京师范大学研究人员通过人机交互式解译方法获取的分类产品,实地调查数据验证精度达到93.8%<sup>[12]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 总体技术路线

本文首先基于两个时相的遥感数据对研究区的土地利用类型、植被覆盖度以及坡度信息进行提取,然后采用第二次全国土壤侵蚀遥感调查多因素综合分析法分别对2000年和2013年北洛河河源区的土壤侵蚀风险进行分级,并利用叠加分析方法获取2000—2013年土壤侵蚀风险时空变化图。最后,根据2013年土壤侵蚀风险图与2000—2013年土壤侵蚀风险变化图,基于决策分类规则生成研究区水土保持措施实施优先等级图,同时,对两个时相的植被覆盖度、土地利用类型图与土壤侵蚀变化图进行叠加分析,分别提取植被覆盖度变化和土地利用类型变化对研究区土壤侵蚀的影响范围与影响程度。总体技术路线见图1。

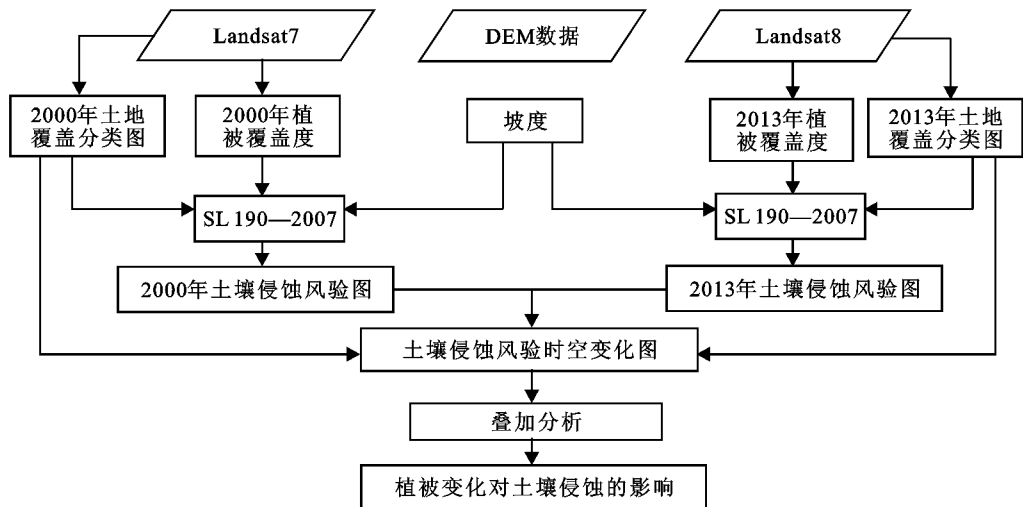


图 1 本研究总体技术路线

## 2.2 多因素综合分析法

土壤侵蚀受到多种因素的影响,如地形、植被覆盖度、降雨强度、径流、土壤可蚀性、土地利用类型。这些因素的不同组合决定着土壤侵蚀的类型、程度、区域分布以及潜在危险的大小等,其中,降雨强度、时长、频率是土壤侵蚀的驱动力因子,植被覆盖度、坡度、土地利用类型等可认为是阻止土壤侵蚀发生的因素。因此,土壤侵蚀风险程度可利用植被覆盖度、坡度、土地利用类型等信息进行评估。本文采

用了第二次全国土壤侵蚀遥感调查中使用多因素综合分析法对土壤侵蚀风险度进行评估,土壤侵蚀分类标准采用 2008 年水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007》<sup>[3]</sup>,土壤侵蚀强度划分为 6 个等级:微度[ $<500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ],轻度[ $500\sim2\,500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ],中度[ $2\,500\sim5\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ],强烈[ $5\,000\sim8\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ],极强烈[ $8\,000\sim15\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ],剧烈[ $>15\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ],具体分类规则见表 1。

表 1 土壤侵蚀分类分级标准

土地覆盖	植被覆盖度	坡度/(°)					
		$<5$	$5\sim8$	$8\sim15$	$15\sim25$	$25\sim35$	$>35$
非耕地 林草覆盖/%	$>75\%$	微度	微度	微度	微度	微度	微度
	$60\%\sim75\%$	微度	轻度	轻度	轻度	中度	中度
	$45\%\sim60\%$	微度	轻度	轻度	中度	中度	强烈
	$30\%\sim45\%$	微度	轻度	中度	中度	强烈	极强烈
坡耕地	$<30\%$	微度	中度	中度	强烈	极强烈	剧烈
		微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈

## 2.3 坡度计算

本文基于 ASTER DEM 第二版数据,利用 ENVI 5.1 软件中的地形参数计算程序模块,对坡度参数进行计算,获取研究区内的坡度图。本文将坡度数据划分为 6 个等级,分别为 $<5^\circ$ , $5^\circ\sim8^\circ$ , $8^\circ\sim15^\circ$ , $15^\circ\sim25^\circ$ , $25^\circ\sim35^\circ$ , $>35^\circ$ ,分别占研究区面积的 4.2%,6.4%,24.1%,39.5%,21.1%,4.8%。图 2 表示了坡度等级空间分布情况,从图中可以看出研究区属于典型的黄土高原丘陵沟壑区。

## 2.4 土地利用类型

已获取的 2000 年和 2010 年土地覆盖数据采用分层土地覆盖分类系统,包括 6 个一级类和 31 个二级类。根据本研究的需要,首先将 2000 年和 2010 年的土地利用类型进行重新编码(包括:农田、林地、草

地、水体、建筑用地、裸地),然后根据 2010 年土地覆盖分类图、2013 年 Landsat8 OLI 数据、Google Earth 高空间分辨率图像,利用人机交互式解译方法,解译 2013 年研究区土地利用类型,从解译结果来看,2013 年土地利用类型图与 2010 年相差不大,这主要是由于该地区退耕还林还草工程实施进度较快,2010 年之后土地利用类型发生变化较少。两个时期研究区内的土地覆盖空间分布情况见图 3。

## 2.5 植被覆盖度

本文首先对两景 Landsat 卫星影像的 DN 值进行辐射定标处理,然后利用 FLAASH 大气校正模型对辐射亮度数据进行绝对大气校正,最终获取两景影像的地表反射率数据。归一化植被指数(NDVI)与植被长势、生物量、盖度和叶面积指数等有较强相关性,

且能部分消除辐照条件变化对反演参数的影响,因此,本文选用 NDVI 构建像元二分模型反演植被覆盖度。像元二分模型反演植被覆盖度公式为:

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (1)$$
$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (2)$$

式中:FVC 为植被覆盖度(%); $NDVI_{soil}$  为裸土或无植被覆盖 NDVI 值,采用 NDVI 直方图 2% 下分位数对应 NDVI 值代表  $NDVI_{soil}$ ;  $NDVI_{veg}$  为完全被植被覆盖 NDVI 值,采用 NDVI 直方图 98% 下分位数对应 NDVI 值代表  $NDVI_{veg}$ ; NIR 为近红外波段反射率;R 为红光波段反射率。本文将植被覆盖度按照 SL190~007 标准进行等级划分,不同等级空间分布见图 4。

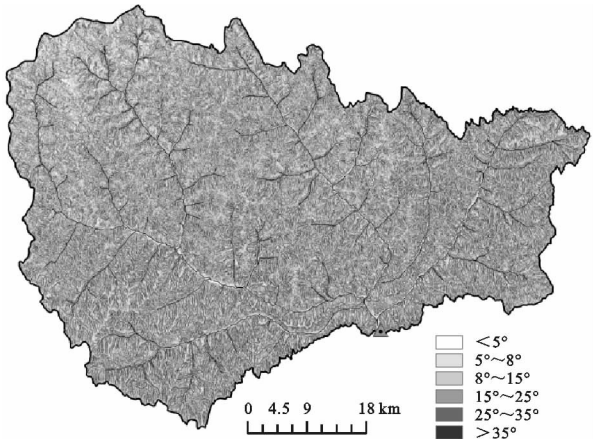


图 2 DEM 数据生成的坡度

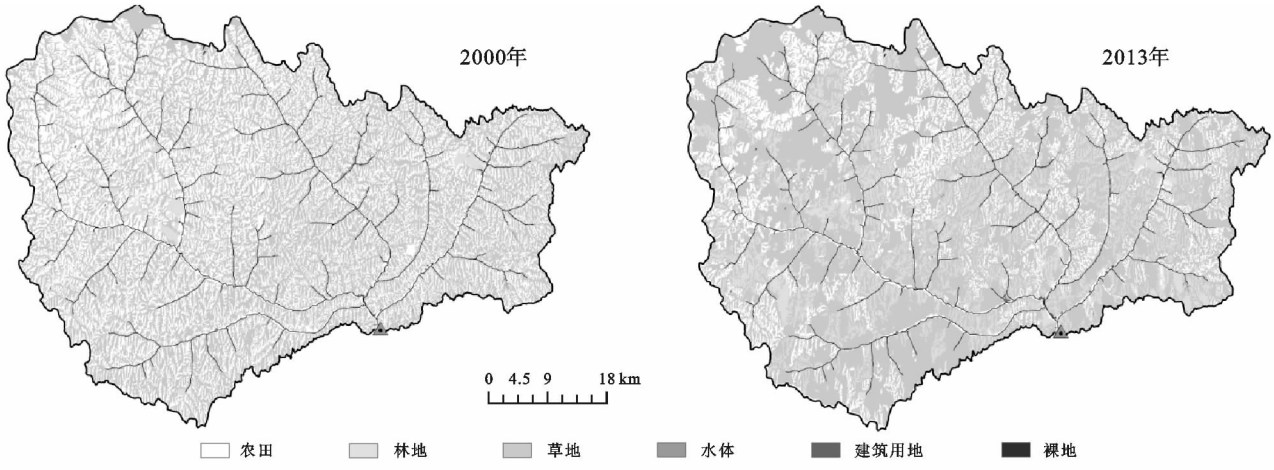


图 3 2000 年和 2013 年土地覆盖分类

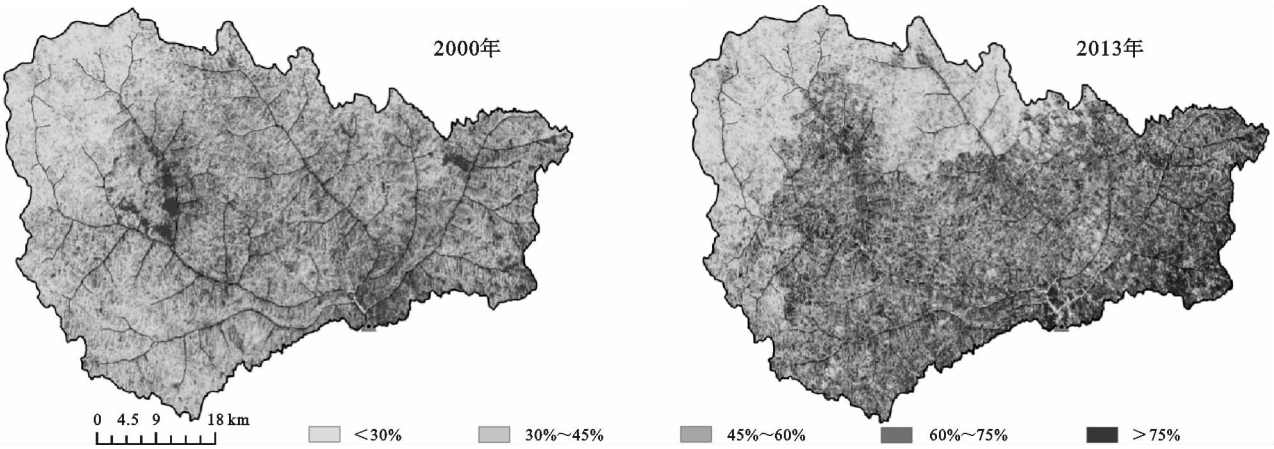


图 4 2000 年和 2013 年植被覆盖度等级

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀风险度评估结果

本文利用多因素综合分析法分别对 2000 年和 2013 年的土壤侵蚀风险度进行评估,结果见图 5。从图中可以明显看出,与 2000 年相比,2013 年研究区内强度以上等级区域显著减少,且减少区域主要分布在吴起县境内。为了进一步在区域尺度上分析 2000—2013 年河源区土壤侵蚀风险,本文对两个时期内的不同侵蚀风险等级区域所占面积以及面积比

例进行统计,其统计结果对比见表 2。

从表 2 中可以看出,北洛河河源区内存在微度以上土壤侵蚀风险的区域从 2 971. 19 km<sup>2</sup> (86. 7%) 减少到 2 853. 42 km<sup>2</sup> (83. 27%),表明土壤侵蚀区域面积并没有发生显著变化。剧烈、极强度、强度土壤侵蚀风险度的区域面积分别从 76. 90 km<sup>2</sup> (2. 24%), 371. 84 km<sup>2</sup> (10. 85%), 828. 97 km<sup>2</sup> (24. 19%) 减少到 37. 16 km<sup>2</sup> (1. 08%), 219. 05 km<sup>2</sup> (6. 39%), 607. 40 km<sup>2</sup> (17. 73%)。轻度和中度土壤侵蚀风险度的区域面积分别从 522. 56 km<sup>2</sup> (15. 25%) 和 455. 07 km<sup>2</sup> (13. 29%) 增加到 653. 07

km<sup>2</sup> (19.06%)和 573.22 km<sup>2</sup> (16.73%)。

表 2 2000 年与 2013 年土壤侵蚀风险等级统计对比结果

土壤侵蚀 风险等级	2000 年		2013 年	
	面积/km <sup>2</sup>	面积比/%	面积/km <sup>2</sup>	面积比/%
微度	455.07	13.29	573.22	16.73
轻度	522.56	15.25	653.07	19.06
中度	1170.9	34.17	1336.75	39.01
强度	828.97	24.19	607.40	17.73
极强度	371.84	10.85	219.05	6.39
剧烈	76.90	2.24	37.16	1.08

通过基于像素尺度的 2000 年和 2013 年土壤侵蚀风险图叠加分析,并对每一个土壤侵蚀风险等级转换成其他风险等级的区域占研究区总面积的百分比进行统计,2000—2013 年土壤侵蚀风险等级转移矩阵见表 3。表 3 中的对角线元素的总和表示的是研究区土壤侵蚀风险没有发生变化区域面积比。对角线右上部分元素总和与左下部分元素总和分别代表

了研究区土壤侵蚀风险增加和减少区域面积比。从表 3 中可以看出,土壤侵蚀风险无变化区域的面积比为 52.07%,面积约为 1 782.23 km<sup>2</sup>,土壤侵蚀风险增加的面积比为 16.05%,面积约为 549.31 km<sup>2</sup>,土壤侵蚀风险减弱的面积比为 31.97%,面积约为1 094.51 km<sup>2</sup>,统计结果表明北洛河河源区土壤侵蚀风险在总体上得到了改善。中度土壤侵蚀风险无变化区域的面积比最大,达到 20.35%,且在 2000 年中度土壤侵蚀风险区域中,风险没有发生变化的区域面积比也最大,达到 59.49%,表明研究区内中度土壤侵蚀风险区域相对稳定。在 2000 年剧烈土壤侵蚀风险区域中,无变化区域面积比最小,表明剧烈土壤侵蚀风险区域变化程度较大。从剧烈等级转换成微度、轻度、中度等级区域面积比分别为 0.17%,0%,0.33%;从微度等级转换成强烈、极强烈、剧烈等级区域面积比分别为 0.61%,0.18%,0.03%。

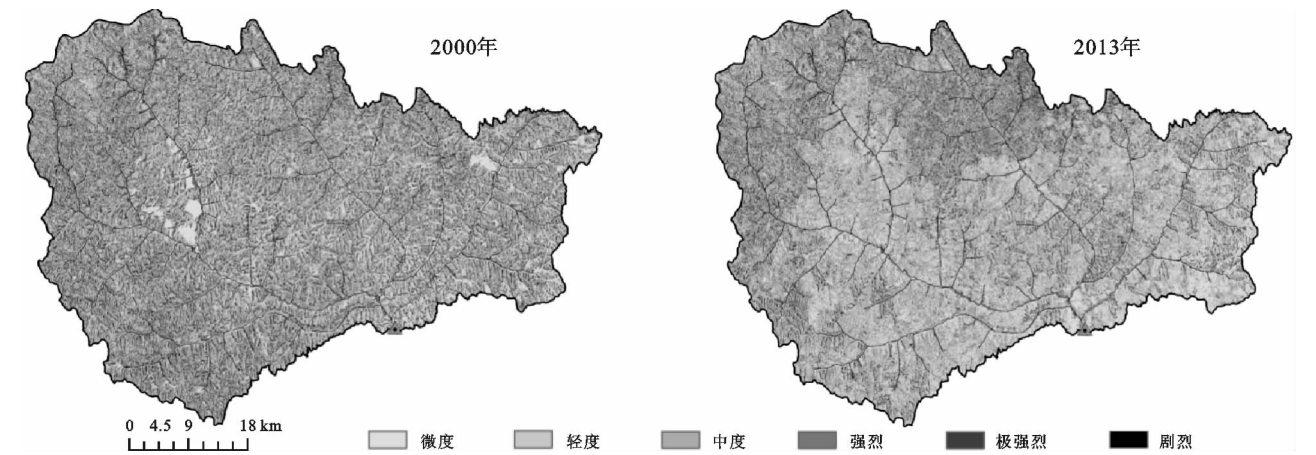


图 5 2000 年和 2013 年土壤侵蚀风险度

表 3 2000—2013 年土壤侵蚀风险等级转移矩阵

不同年份土壤 侵蚀风险等级		2013 年土壤侵蚀风险等级					
		微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
2000 年土壤 侵蚀风险 等级	微度	<u>7.03</u>	2.62	2.83	0.61	0.18	0.03
	轻度	2.07	<u>7.96</u>	4.69	0.55	0	0
	中度	3.98	6.10	<u>20.35</u>	3.08	0.66	0.04
	强烈	2.42	2.41	7.44	<u>11.26</u>	0.62	0.07
	极强烈	1.04	0	3.41	1.72	<u>4.60</u>	0.09
	剧烈	0.17	0	0.33	0.54	0.34	<u>0.87</u>

3.2 土壤侵蚀风险度变化趋势分析

为了分析实施退耕还林草工程后研究区土壤侵蚀风险的变化趋势情况,本文将 2013 年与 2000 年的土壤侵蚀风险图进行叠加分析,如果某个像素在 2000 年为轻度,而在 2013 年转变为中度,则该像素定义为土壤侵蚀风险“增加一级”,反之则定义为“减弱一级”,基于像素尺度的土壤侵蚀风险变化类型分为 11 类,其中 5 类为侵蚀增加,5 类为侵蚀减弱,不同变化等级空间分布图如附图 8 所示,不同变化等级

区域所占总面积比例见表 4 所示。结果表明,土壤侵蚀风险减弱区域面积明显大于土壤侵蚀风险增加区域面积,且主要分布在距离各个支流较近的沟坡地区。土壤侵蚀风险增加区域主要分布在乱石头川上游地区和窝窝沟下游地区。研究区内土壤侵蚀风险变化区域内随着变化程度的增大,相应变化区域面积越小,如:土壤侵蚀风险减弱一级和增加一级的区域分别占到 17.58%和 11.04%,而减弱五级和增加五级的区域分别仅站 0.17%和 0.03%,在总体上来说

研究区土壤侵蚀风险程度处于减弱趋势。

3.3 植被变化对土壤侵蚀风险的影响分析

土地利用类型和植被覆盖度的变化综合导致了土壤侵蚀风险的剧烈变化,本文为了分析土地利用类型转变和植被覆盖度变化对土壤侵蚀风险变化的影响,首先将 2000 年、2013 年的土地覆盖图与土壤侵蚀风险变化图进行叠加分析,提取由于耕地变化而导致的土壤侵蚀风险变化图,如附图 9 所示,然后利用土壤侵蚀风险变化图(附图 8)与耕地变化导致的风险变化图相减,从而得到由于植被覆盖度变化而导致的土壤侵蚀风险变化的空间分布图,如附图 10 所示。

表 4 不同土壤侵蚀风险变化程度区域的面积与面积比

土壤侵蚀风险变化程度	面积/km <sup>2</sup>	面积比/%
减弱五级	5.98	0.17
减弱四级	35.62	1.04
减弱三级	94.34	2.74
减弱二级	353.82	10.29
减弱一级	604.74	17.58
增加一级	379.84	11.04
增加二级	140.45	4.08
增加三级	22.10	0.64
增加四级	6.02	0.17
增加五级	0.90	0.03

研究区的土地利用类型转变主要导致了土壤侵蚀风险的减弱,这主要是因为该区域的大规模退耕还林还草工程使得大量的耕地转变为林地和草地,林草植被与农作物相比具有更好的水土保持效益;研究区土壤侵蚀风险增加主要是由于自然植被覆盖度降低所导致,这主要是因为剧烈的人类生产生活活动对植被造成了一定破坏,从图中也可以看出,植被覆盖度降低区域主要分布在油井建设较多的定边县境内的乱石头川上游以及吴起镇附近山区,说明该地区虽然在退耕还林还草背景下植被总体情况得到显著改善,但由于经济发展、城镇扩张等原因,植被也会不可避免的受到人类的破坏。

通过统计两种因素导致土壤侵蚀风险变化的区域面积可知,在土壤侵蚀风险减弱的 1 094. 51 km<sup>2</sup> 区域内,42. 8%的区域是由于植被覆盖度增加所导致的,57. 2%的区域是由于土地利用类型转变所导致的;在土壤侵蚀风险增加的 549. 31 km<sup>2</sup> 区域内,93. 7%的区域是由于植被覆盖度降低所导致的,6. 3%的区域是由于土地利用类型转变所导致的,因此表明土壤侵蚀风险增加主要是由于植被覆盖度降低所导致,而土壤侵蚀风险减弱是由植被覆盖度增加和退耕还林草共同所导致。从图 6 中可以看出,随着土壤侵蚀风险变化程度的增加,土地利用类型转变的影响范围越大,植被覆盖度变化的影响范围越小。

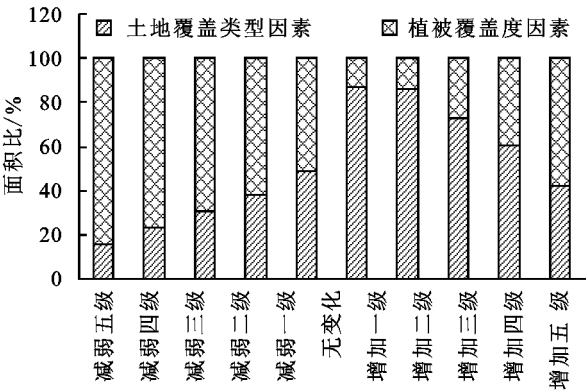


图 6 由土地覆盖变化和植被覆盖度变化引起的各级土壤侵蚀风险变化面积比

4 结论与讨论

(1) 研究区内 2000—2013 年土壤侵蚀风险无变化区域的面积比为 52. 07%, 面积约为 1 782. 23 km<sup>2</sup>, 土壤侵蚀风险增加的面积比为 16. 05%, 面积约为 549. 31 km<sup>2</sup>, 土壤侵蚀风险减弱的面积比为 31. 97%, 面积约为 1 094. 51 km<sup>2</sup>。其中, 中度土壤侵蚀风险区域相对于其他风险等级区域更加稳定。

(2) 土壤侵蚀风险减弱区域主要分布在距离各个支流较近的沟坡地区。土壤侵蚀风险增加区域主要分布在乱石头川上游地区和窝窝沟下游地区。研究区内土壤侵蚀风险变化区域内随着变化程度的增大, 相应变化区域面积越小。在总体上来说, 研究区土壤侵蚀风险程度处于减弱趋势, 生态环境得到极大改善。

(3) 在土壤侵蚀风险减弱区域内, 植被覆盖度增加和土地利用类型转变的影响区域面积比分别为 42. 8% 和 57. 2%; 在土壤侵蚀风险增加区域内, 植被覆盖度增加和土地利用类型转变的影响区域面积比分别为 93. 7% 和 6. 3%。表明土壤侵蚀风险增加主要是由于植被覆盖度降低所导致, 而土壤侵蚀风险减弱是由两种因素共同所导致。且随着土壤侵蚀风险变化程度的增加, 土地利用类型转变的影响范围越大, 植被覆盖度变化的影响范围越小。

本文仅考虑了植被覆盖度、土地利用类型、坡度信息对土壤侵蚀风险程度进行评估, 今后的研究中需要将降雨侵蚀力和径流等因素进行综合考虑。本文仅考虑了耕地和非耕地两种土地利用类型及其对应的植被覆盖度, 今后的研究中可将非耕地分为森林、灌木、草地等, 并结合其各自的植被覆盖度对土壤侵蚀风险程度进行快速评估。今后的研究中将利用更多年份的 Landsat 数据开展时间序列分析, 从而提高土壤侵蚀风险快速评估的准确性与实用性。

- 壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [20] Martinez E, Fuentes J P, Silva P, et al. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 99(2): 232-244.
- [21] 赵如浪, 冯佰利, 蒋树怀, 等. 黄土高原旱地保护性耕作农田土壤团聚体特性变化研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(4): 74-79.
- [22] 侯贤清, 李荣, 韩清芳, 等. 轮耕对宁南旱区土壤理化性状和旱地小麦产量的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 592-600.
- [23] 余海英, 彭文英, 马秀, 等. 免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 99-104.
- [24] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 759-768.
- [25] 李华, 逢焕成, 任天志, 等. 深旋松耕作法对东北棕壤物理性状及春玉米生长的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 647-656.
- [26] 雷金银, 吴发启, 王健, 等. 保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 40-45.
- [27] 侯贤清, 李荣. 免耕覆盖对宁南山区土壤物理性状及马铃薯产量的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 112-119.
- [28] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340-347.
- [29] 张鹏, 贾志宽, 王维, 等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1513-1520.
- [30] Gao M, Luo Y J, Wang Z F, et al. Effect of tillage system on distribution of aggregates and organic carbon in a Hydragric Anthrosol[J]. Pedosphere, 2008, 18(5): 574-581.
- [31] Zhang Xirui, Li Hongwen, He Jin, et al. Influence of conservation tillage practices on soil properties and crop yields for maize and wheat cultivation in Beijing, China[J]. Australian Journal of Soil Research, 2009, 47(4): 362-371.
- [32] Huang Shan, Sun Yanni, Rui Wenyi, et al. Long-Term effect of no-tillage on soil organic carbon fractions in a continuous maize cropping system of north-east China[J]. Pedosphere, 2010, 20(3): 285-292.
- [33] 李涵, 张鹏, 贾志宽, 等. 渭北旱源区秸秆覆盖还田对土壤团聚体特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 27-33.
- [34] 程科, 李军, 毛红玲. 不同轮耕模式对黄土高原旱作麦田土壤物理性状的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(18): 3800-3808.

(上接第 173 页)

#### 参考文献:

- [1] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [2] 王经武, 王娟. 水土保持是生态环境建设的主体[J]. 水土保持研究, 2000, 7(3): 11-12.
- [3] 李智广, 曾大林. 浅谈基于 GIS 的区域土壤侵蚀遥感快速调查技术[J]. 中国水土保持, 1999(10): 38-39.
- [4] 陈万辉, 刘良云, 张超, 等. 基于遥感的土壤侵蚀快速监测方法[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 8-10.
- [5] 谭炳香, 李增元, 王彦辉, 等. 基于遥感数据的流域土壤侵蚀强度快速估测方法[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(2): 215-220.
- [6] 张有全, 官辉力, 赵文吉, 等. 基于遥感与 GIS 的土壤侵蚀强度快速估测方法[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 102-107.
- [7] 徐静, 史明昌, 王晓云, 等. 辽宁省细河流域土壤侵蚀监测方法对比研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 103-107.
- [8] 宋文龙, 张荣华, 高云飞, 等. 基于野外调查、遥感信息和 CSLE 模型的土壤侵蚀强度分级[J]. 南水北调与水利科技, 2014(5): 170-174.
- [9] 周宁. 黑龙江省拉林河流域土壤侵蚀强度评价模型构建[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [10] Wang L, Huang J, Du Y, et al. Dynamic Assessment of Soil Erosion Risk Using Landsat TM and HJ Satellite Data in Danjiangkou Reservoir Area, China[J]. Remote Sensing, 2013, 5(8): 3826-3848.
- [11] Liu J, Liu M, Zhuang D, et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995—2000[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2003, 46(4): 373-384.
- [12] 罗娅, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 黄河河口镇—潼关区间 1998—2010 年土地利用变化特征[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 42-53.