

# 基于土地利用变化的县域水土流失消长评价方法探讨

赵辉<sup>3</sup>, 符素华<sup>1,2,4</sup>, 章文波<sup>2</sup>, 王志强<sup>2</sup>, 丁琳<sup>2</sup>, 于现举<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 3. 水利部水土保持监测中心, 北京 100053;

4. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 以人类活动扰动比较大的内蒙古自治区达拉特旗和人类活动扰动比较小的青海省称多县为例, 收集了 2014—2015 年和 2017 年土地利用、遥感影像等资料, 采用中国土壤流失方程计算了水力侵蚀模数。在此基础上, 分析了 2017 年与 2014—2015 年土地利用和水土流失面积的差异, 对比了基于两期土地利用图和基于遥感影像变化得到的水土流失消长变化之间的差异。结果表明: 基于两期土地利用图得到水土流失面积变化大, 基于遥感影像变化得到的水土流失面积变化小, 前者水土流失面积变化量是后者的 64 倍(称多县)和 94 倍(达拉特旗)。基于遥感影像变化得到的水土流失面积消长结果更符合实际情况。水土流失面积消长量远小于土地利用面积变化量。本结果可为即将开展的全国水土流失消长评价工作提供技术参考。

**关键词:** 土壤侵蚀; 水土流失消长; 土地利用变化; 县域尺度

中图分类号: K903

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0067-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.011

## Evaluation Method of Variation of Soil Loss for a County Scale Based on the Land Use Change

ZHAO Hui<sup>3</sup>, FU Suhua<sup>1,2,4</sup>, ZHANG Wenbo<sup>2</sup>, WANG Zhiqiang<sup>2</sup>, DING Lin<sup>2</sup>, YU Xianju<sup>2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Environmental Remote Sensing and Digital City, Beijing Normal University, Beijing 100875;

2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875; 3. Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 100053; 4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** In this study, Dalateqi County in Inner Magnolia which stands for highly intensity human activity and Chengduo County in Qinghai Province which is for low intensity human activity were selected as study areas. The data on land use and remote image in 2014—2015 and 2017 were collected. The soil loss was calculated using Chinese soil loss equation. The variation of land use and soil loss was analyzed. The differences in soil loss and land use were compared based on the two period land use results (LUR) and on the two period remote image variation results (IVR). The results showed that variation of soil loss based on the LUR was more obvious than that on the IVR. The area variation of soil loss based on the LUR was 64 times (Chengduo) and 94 times (Dalateqi) of that on the IVR. The area variation of soil loss based on the IVR was more reasonable, which reflected the true variation. The area variation of soil loss was far smaller than that of land use. The results will provide the technique support for the evaluation method on the incoming annual variation of soil loss according to the “soil loss inventory plan in China (2018—2022)”.

**Keywords:** soil erosion; variation of soil loss; variation of land use; county scale

自 20 世纪 80 年代以来, 中国先后开展了 4 次土壤侵蚀或水土保持普查以及不同空间尺度的水土流

失动态监测工作, 目的是调查水土流失状况及其动态变化情况<sup>[1]</sup>。一些学者采用遥感监测方法<sup>[2-3]</sup>, 或遥

收稿日期: 2018-02-04

资助项目: 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目; 水利部财政预算项目“全国水土流失动态监测”(126216229000150001); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT\_15R06)

第一作者: 赵辉(1971—), 男, 工学博士, 博士后, 教授级高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持监测技术研究。E-mail: 7166zhaohui@163.com

通信作者: 符素华(1973—), 女, 四川岳池人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: suhua@bnu.edu.cn

感监测与土壤侵蚀模型 (USLE、RUSLE 或 CSLE)<sup>[4-6]</sup> 定量评价相结合的方法,分析县域、区域或流域的水土流失或土壤侵蚀的时空动态变化情况。水土流失时空动态变化主要由于人类活动造成的土地下垫面变化或气候变化而引起的<sup>[7-9]</sup>。因此土地利用变化对土壤侵蚀的影响一直是国内外学者研究的热点<sup>[10-13]</sup>。Zare 等<sup>[14]</sup>利用 RUSLE 研究了伊朗北部地区不同土地利用变化情况对土壤侵蚀的影响;刘世梁等<sup>[15]</sup>基于 SWAT 模型研究澜沧江中游小流域水土流失与 NDVI 的时空动态相关性;姚华荣等<sup>[16]</sup>采用 GIS 空间分析与传统统计分析相结合的方法,研究澜沧江流域云南段土地利用及其变化对土壤侵蚀的影响;倪晋仁等<sup>[17]</sup>基于土地利用结构动态变化,研究不同土地利用类型在影响水土流失方面的权重,通过参照点选择、参照组构建与匹配、观测一期望比值计算等,动态评估区域水土流失。这些研究成果,不仅掌握了水土流失动态变化情况,而且分析了变化规律及其原因,为区域或国家生态环境建设提供了大量基础信息和决策依据。

当前,中国已进入全面建成小康社会决胜阶段,准确掌握年度水土流失消长情况,是水土保持目标责任考核、水土保持生态安全红线预警和生态文明评价考核的基础支撑<sup>[18]</sup>,是建设美丽中国的重要保证。水利部将全国水土流失消长情况分析评价列为全国水土流失动态监测的重点工作,明确要求自 2018 年起持续开展。因此,水土流失消长评价方法研究具有十分重要的实践指导意义。

根据《全国水土流失动态监测规划(2018—2022 年)》,水利部负责全国和国家级重点防治区年度水土流失消长情况分析评价,各省(自治区、直辖市)负责省辖区和省级重点防治区水土流失消长情况分析评价,要求以县级行政区为单元,采用遥感影像解译与专题信息提取、水土流失影响因子赋值、土壤侵蚀模型计算等方法,评价土壤侵蚀强度,分析水土流失的消长情况,最终形成省级和全国水土流失消长情况成果。水土流失消长评价可能有两种方法:(1)基于两期遥感影像判定土地利用和水土保持措施变化的图斑,对变化图斑进行水土保持措施因子赋值,然后进行土壤侵蚀模数的计算和侵蚀强度的判定,得到两年变化图斑的土壤侵蚀模数和土壤侵蚀强度空间分布,以此分析水土流失消长情况;(2)直接利用县域两期遥感影像解译的土地利用和水土保持措施结果,进行水土保持措施因子赋值,然后进行土壤侵蚀模数的计算和侵蚀强度的判定,得到两年县域土壤侵蚀模数和

侵蚀强度空间分布,以此分析水土流失消长情况。通常第一种方法能更真实地反映水土流失动态变化以及年度水土流失的消长情况,第二种方法可能出现误差,如土地利用解译过程中的误差可能被包含在水土流失消长评价结果中。这种误差有多大?是否会评价结果产生根本性影响?这些问题尚需深入探讨。本文分别选择人类活动影响相对较大的内蒙古自治区达拉特旗和人类活动影响相对较小的青海省称多县,分析两种方法水土流失消长评价结果的差异,期为县域水土流失消长评价方法提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 资料获取

以内蒙古自治区达拉特旗和青海省称多县为研究区域,县域面积分别为 8 301.62, 14 668.11 km<sup>2</sup>。在达拉特旗,选用 2015 年和 2017 年两期遥感影像作为遥感解译的数据源,其中 2015 年影像主要为资源 3 号融合后 2 m 空间分辨率的多光谱影像,时相为 6—10 月,2017 年影像主要为高分一号融合后 2 m 空间分辨率的多光谱影像,时相为 6—9 月。在称多县,选用 2014 年和 2017 年遥感影像作为遥感解译的数据源,均以高分一号多光谱影像为主,空间分辨率为 16 m,时相为 6—9 月。土地利用情况均通过遥感数据源解译获取,降雨侵蚀力、土壤可蚀性数据均来自于第一次水利普查结果,地形数据采用 1:50 000 地形图 25 m 分辨率 DEM。

### 1.2 研究方法

(1)基于土地利用解译成果的水土流失消长评价方法。分别利用两期土地利用和水土保持措施解译矢量成果图,在 Arcmap 软件中进行水土保持措施因子赋值。采用中国土壤流失方程 CSLE<sup>[19-20]</sup> 公式(1),进行土壤侵蚀模数的计算。

$$A = R \times K \times LS \times B \times E \times T \quad (1)$$

式中:A 为土壤侵蚀模数(t/(hm<sup>2</sup>·a));R 为降雨侵蚀力因子((MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·a·h));K 为土壤可蚀性因子((t·hm<sup>2</sup>·h)/(hm<sup>2</sup>·MJ·mm));L 和 S 分别为坡长和坡度因子,无量纲;B 为生物措施因子,无量纲;E 为工程措施因子,无量纲;T 为耕作措施因子,无量纲。

地形因子值采用北京师范大学开发的地形因子计算工具<sup>[21]</sup>进行计算,生物措施、工程措施以及耕作措施因子,根据遥感解译结果进行赋值。最后,根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)<sup>[22]</sup>评价土壤侵蚀强度,分析水土流失面积和各土壤侵蚀强度的面积变化情况。

(2)基于影像变化预判的水土流失消长评价方法。以前期遥感影像为基础,通过后期影像的叠加分析,对比相同区域遥感影像的颜色、纹理等特征差异,判断下垫面特征变化情况,据此预判土地利用和水土保持措施是否变化。然后,对预判的变化区域进行边界勾绘,分别填写两个年度的土地利用和水土保持措施属性,生成土地利用和水土保持措施的变化图斑矢量图层。最后,基于土地利用和水土保持措施的变化图斑矢量图层,进行两个年度的水土保持措施因子赋值(其他影响因子赋值和模型计算方法同上)。据此,分

析水土流失面积和各土壤侵蚀强度的面积变化情况。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用变化

2.1.1 基于遥感影像解译成果的土地利用变化 与2015年相比,2017年达拉特旗土地利用变化主要特征为草地面积减少了1 717.17 km<sup>2</sup>,林地增加了1 120.80 km<sup>2</sup>(表1)。其他土地利用(如耕地、居民点及工矿交通用地、水域及水利设施等)面积也不同程度地增加。

表1 2015—2017年达拉特旗土地利用变化情况

单位:km<sup>2</sup>

土地利用类型	2017年							2015年合计
	耕地	园地	林地	草地	居民点及工矿交通用地	水域及水利设施	其他土地	
耕地	1192.91	0.39	56.60	150.30	80.00	34.22	3.79	1518.21
园地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
林地	15.75	0.00	290.63	75.44	4.83	2.98	8.32	397.96
草地	471.72	0.08	1127.88	3040.96	172.29	187.02	111.85	5111.79
居民点及工矿交通用地	57.86	0.01	13.24	36.60	153.09	3.11	0.75	264.66
水域及水利设施	26.73	0.02	10.52	37.84	9.89	144.86	3.47	233.34
其他土地	11.96	0.00	19.89	53.48	11.78	10.94	667.62	775.67
2017年合计	1776.93	0.50	1518.75	3394.61	431.89	383.13	795.81	8301.62
变化情况(2017—2015年)	258.72	0.50	1120.80	-1717.17	167.23	149.79	20.13	

与2014年相比,2017年称多县的草地面积减少了474.08 km<sup>2</sup>,其他土地利用面积均不同程度地增加,其中,林地和其他土地面积增加较多,分别增加了170.36

km<sup>2</sup>和244.52 km<sup>2</sup>(表2)。但据野外调查与复核,称多县林地与草地间的土地利用转移,除少量实际发生外,大部分可能与两次土地利用的遥感解译误差有关。

表2 2014—2017年称多县土地利用变化情况

单位:km<sup>2</sup>

土地利用类型	2017年						2014年合计
	耕地	林地	草地	居民点及工矿交通用地	水域及水利设施	其他土地	
耕地	0.05	0.16	23.53	1.83	0.55	0.06	26.17
林地	0.00	39.99	204.26	0.75	1.44	2.97	249.41
草地	33.84	378.91	12140.32	43.65	78.87	738.76	13414.34
居民点及工矿交通用地	0.16	0.04	14.83	7.66	0.15	0.01	22.85
水域及水利设施	0.08	0.37	58.89	1.91	39.75	4.98	105.97
其他土地	0.27	0.30	498.44	1.09	2.15	347.12	849.37
2017年合计	34.40	419.76	12940.26	56.88	122.91	1093.89	14668.11
变化情况(2017—2014年)	8.23	170.36	-474.08	34.03	16.95	244.52	

2.1.2 基于影像变化预判的土地利用变化 通过影像变化区域的土地利用遥感解译,2015—2017年间达拉特旗共有140.36 km<sup>2</sup>土地的土地利用类型发生了变化(表3)。与2015年相比,2017年达拉特旗耕地、居民点和交通用地面积分别增加了81.11,12.98,4.57 km<sup>2</sup>,草地、其他土地和水域及水利设施面积分别减少了82.66,14.36,4.04 km<sup>2</sup>。增加的耕地面积主要由草地和林地转移而来,分别为71.42,8.25 km<sup>2</sup>,减少的草地面积主要转变成了耕地和林地,分别转移了71.42,11.15 km<sup>2</sup>。在空间上除南方丘陵区 and 中西部沙漠区域外的其他地方,都有较明显的土地利用或水土保持措施变化(图1)。

称多县2014—2017年的土地利用变化较小,仅11个图斑共计0.54 km<sup>2</sup>的土地利用类型发生了变化,由草

地分别转变成居民点和裸地,面积分别为0.46,0.09 km<sup>2</sup>。主要发生在城镇周边以及公路两侧。

### 2.2 水土流失面积消长情况

2.2.1 基于土地利用解译成果的水土流失面积消长情况 与2015年相比,2017年达拉特旗水土流失面积增加了46.03 km<sup>2</sup>。按土壤侵蚀强度分,轻度侵蚀面积增加了1 041.20 km<sup>2</sup>,中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀面积分别减少了270.99,414.04,239.18,70.96 km<sup>2</sup>。2017年新增的轻度侵蚀面积主要来源于2015年属于微度侵蚀的区域;而中度和强烈侵蚀面积减少的区域,主要来源于2015年属于微度和轻度侵蚀的区域;极强烈侵蚀面积减少的区域主要来源于2015年属于轻度侵蚀的区域(表4)。

表 3 基于影像变化预判的达拉特旗土地利用转移矩阵

单位: km<sup>2</sup>

土地利用类型	2017 年							2015 年合计
	耕地	林地	草地	居民点	交通用地	水域及水利设施	其他土地	
耕地	—	0.02	0.45	0.77	0.10	2.44	0.01	3.80
林地	8.25	—	1.26	0.36	0.93	0.07	0.08	10.95
草地	71.42	11.15	—	9.75	3.17	2.67	1.24	99.40
居民点	0.19	0.01	0.60	—	0.01	0.00	0.02	0.82
交通用地	0.00	0.00	0.00	0.00	—	0.00	0.00	0.00
水域及水利设施	2.78	0.00	6.68	0.02	0.01	—	0.10	9.58
其他土地	2.28	2.18	7.75	2.90	0.36	0.36	—	15.81
2017 年合计	84.91	13.36	16.74	13.80	4.57	5.54	1.45	140.36
变化情况(2017—2015 年)	81.11	2.40	-82.66	12.98	4.57	-4.04	-14.36	—

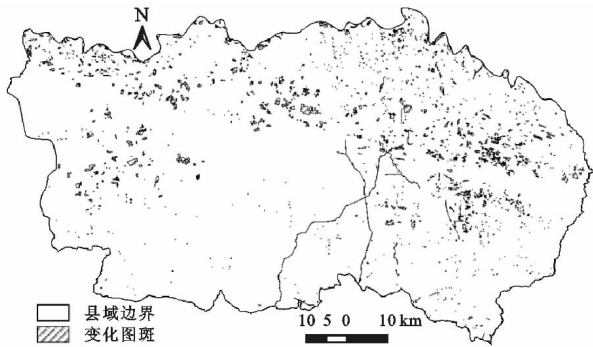


图 1 达拉特旗 2015—2017 年土地利用或水土保持措施变化图斑

与 2014 年相比, 2017 年称多县水土流失面积增

加了 34.71 km<sup>2</sup>。按土壤侵蚀强度分, 轻度侵蚀面积增加了 162.00 km<sup>2</sup>, 中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀面积分别减少了 66.90, 26.60, 28.00, 5.80 km<sup>2</sup>。各土壤侵蚀强度之间的变化主要是微度侵蚀与其他各侵蚀强度之间的转移(表 5)。

#### 2.2.2 基于影像变化预判的水土流失面积消长情况

2015—2017 年间, 达拉特旗发生土地利用变化的 140.36 km<sup>2</sup> 地块中, 2017 年水土流失面积仅增加了 0.49 km<sup>2</sup>(表 6, 图 2), 其中中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀面积分别增加了 0.13, 0.23, 0.22, 0.01 km<sup>2</sup>, 轻度侵蚀面积减少了 0.10 km<sup>2</sup>。极强烈和强烈侵蚀面积主要由 2015 年中度侵蚀面积转移而来。

表 4 达拉特旗基于土地利用解译成果的水土流失面积转移矩阵

单位: km<sup>2</sup>

土壤侵蚀强度	2017 年						2015 年合计
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	
微度	5635.28	657.13	64.51	7.59	2.15	1.37	6368.03
轻度	312.00	251.17	30.67	2.55	0.88	0.31	597.58
中度	194.10	298.80	50.65	4.84	1.30	0.56	550.25
强烈	115.73	262.13	64.79	7.78	2.27	1.16	453.86
极强烈	51.18	137.98	50.86	8.68	3.45	1.28	253.41
剧烈	13.72	31.58	17.76	8.38	4.18	2.86	78.49
2017 年合计	6322.01	1638.78	279.25	39.82	14.23	7.53	8301.62
水土流失面积消长(2017—2015 年)	-46.03	1041.20	-270.99	-414.04	-239.18	-70.96	—

表 5 称多县基于土地利用解译成果的水土流失面积转移矩阵

单位: km<sup>2</sup>

土壤侵蚀强度	2017 年						2014 年合计
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	
微度	13050.36	522.75	129.29	41.84	1.26	0.00	13745.51
轻度	478.62	88.63	9.37	1.14	0.04	0.00	577.80
中度	137.05	87.15	12.47	0.90	0.03	0.00	237.60
强烈	26.44	33.84	11.10	0.60	0.01	0.00	72.00
极强烈	14.01	6.93	7.71	0.72	0.03	0.00	29.40
剧烈	4.32	0.49	0.76	0.21	0.02	0.00	5.80
2017 年合计	13710.80	739.80	170.70	45.40	1.40	0.00	14668.11
水土流失面积消长(2017—2014 年)	-34.71	162.00	-66.90	-26.60	-28.00	-5.80	—

表6 达拉特旗基于影像变化预判的水土流失面积转移矩阵

单位:km<sup>2</sup>

土壤 侵蚀强度	2017年						2015年 合计	
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈		
2015年	微度	134.21	1.94	0.26	0.05	0.04	0.00	136.50
	轻度	1.40	0.72	0.59	0.11	0.03	0.00	2.85
	中度	0.34	0.07	0.13	0.19	0.13	0.00	0.86
	强烈	0.05	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.13
	极强烈	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
	2017合计	136.01	2.75	0.99	0.36	0.23	0.01	140.36
	水土流失面积消长(2017—2015年)	-0.49	-0.10	0.13	0.23	0.22	0.01	

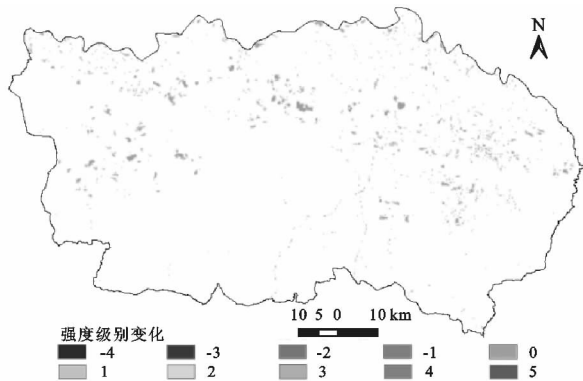


图2 达拉特旗2015—2017年土壤侵蚀强度级别变化

与2014年相比,2017年称多县发生土地利用变化的0.54 km<sup>2</sup>地块中,2017年水土流失面积仅增加了0.03 km<sup>2</sup>。主要是中度和强烈侵蚀面积分别增加了0.02, 0.01 km<sup>2</sup>,均由2014年的微度侵蚀转变而来。

### 3 讨论

#### 3.1 土地利用解译误差对水土流失消长分析评价的影响

基于土地利用解译成果和基于影像变化预判的县域水土流失消长分析评价结果存在较大的差异,前者得到的水土流失面积变化大,后者变化小,分别相差94倍(达拉特旗)和64倍(称多县)。可能的原因是:(1)不同期遥感影像预处理产生的位移偏差,可能引起土地利用解译结果出现偏差(图3),由此导致土壤侵蚀在空间分布上产生位移。(2)土地利用解译本身产生的误差。基于纠错和变化图斑对比分析的解译方法,会导致土地利用面积和空间分布的误差,相应的结果将不可避免地被带入基于土地利用变化的水土流失消长分析中去,有时甚至比真实的消长面积更大。如与2015年相比,2017年达拉特旗土地利用变化主要表现为草地减少了1717.17 km<sup>2</sup>,林地增加了1120.80 km<sup>2</sup>。变化的大部分面积是对前期解译成果的纠错。而根据对影像变化图斑的检查结果,2017年该旗的草地面积较2015年仅减少82.66 km<sup>2</sup>,主要由草地变成耕地。分析可知,基于两期土地利用结果生成的转移矩阵会导致错误的认识。因此如何提高解译精度,减少系统或随机误差,是确保

后期水土流失消长分析评价成果可靠性的重要保证。

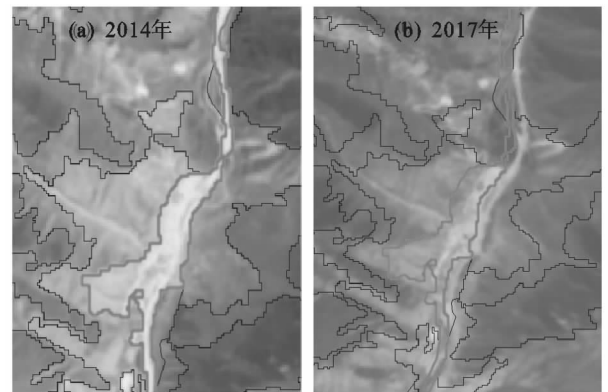


图3 称多县2014年与2017年影像位移

#### 3.2 影像分辨率对水土流失消长分析评价结果的影响

影像分辨率高低直接影响县域水土流失消长分析评价结果精度。如称多县两个年度的影像分辨率均为16 m,难以准确确定土地利用边界。从图4可以看出,称多县土地利用变化相对集中的城镇周边的影像颜色、纹理等与裸地的很接近,难以区分,这直接导致了土地利用和水土流失消长分析评价误差。而达拉特旗采用2 m分辨率的影像,可相对准确地确定土地利用边界,但对水土保持工程措施解译而言,仍需更高分辨率的影像支持。因此,应从技术和经济的综合角度,选择相对较高的影像分辨率,解译或提取相关信息,提高县域水土流失消长评价结果精度。

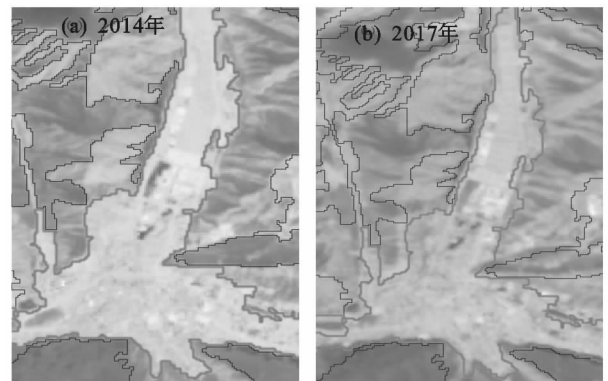


图4 称多县2014年与2017年16 m影像分辨率

#### 3.3 土地利用变化对县域水土流失消长分析评价的影响

土壤侵蚀是自然条件和人类活动多因素综合影

响的结果。土地利用变化不一定会引起水土流失变化。由前述可知,两县的水土流失消长面积均小于土地利用变化面积。这主要是因为土壤侵蚀还受坡度和降雨侵蚀力等因素的影响。如达拉特旗草地变成耕地后,仅有小部分变化面积有水土流失,这是因为大部分转移成耕地的土地坡度都小于 $5^\circ$ ,同时该区域降雨侵蚀力又较小( $690\sim 950(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{a}\cdot\text{h})$ )。因此,即使是转移成人类干扰强烈的耕地,水土流失面积仍然较小。

## 4 结论

本文选择人类活动影响相对较大的内蒙古自治区达拉特旗和人类活动影响相对较小的青海省称多县作为研究区域,采用基于土地利用解译成果和基于影像变化预判的两种水土流失消长评价方法,分析了县域尺度水土流失消长情况。结果表明,基于土地利用解译成果得到的水土流失面积消长变化大,而基于影像变化预判得到的消长变化小,两者相差几十倍,且人类活动影响较大的区域差距更大。基于遥感影像变化预判的水土流失消长评价方法提供了相对准确的评价结果。而基于两期土地利用解译成果得到的水土流失消长变化由于解译误差所引起的差距更大。影像分辨率和土地利用解译误差直接影响水土流失消长分析的精度。根据水土流失影响因子提取的技术要求,选择相对较高的影像分辨率,提高解译精度,减少系统或随机误差,是确保后期水土流失消长分析评价成果可靠性的重要保证。

### 参考文献:

- [1] 赵辉,黎家作,李晶晶. 中国水土流失动态监测与评价的现状与对策[J]. 水土保持通报,2016,36(1):115-119.
- [2] 王庚,查轩,黄少燕,等. 福建省永定县的水土流失动态变化[J]. 水土保持通报,2016,36(6):272-277.
- [3] 高健翎,殷宝库,张建国,等. 黄河中游多沙粗沙区水土流失动态变化分析[J]. 人民黄河,2016,38(10):111-114.
- [4] 陆建忠,陈晓玲,李辉,等. 基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J]. 农业工程学报,2011,27(2):337-344.
- [5] 杨波,王全九,郝姗姗. 佳芦河流域 1988—2013 年土壤侵蚀时空变化特征[J]. 水土保持学报,2017,31(5):87-92.
- [6] 许尔琪,张红旗,董光龙. 伊犁河谷土壤水力侵蚀的时空变化研究[J]. 资源科学,2016,38(7):1203-1211.
- [7] Litschert S E, Theobald D M, Brown T C. Effects of climate change and wildfire on soil loss in the Southern Rockies Ecoregion[J]. Catena,2014,118:206-219.
- [8] Simonneaux V, Cheggour A, Deschamps C, et al. Land use and climate change effects on soil erosion in a semi-arid mountainous watershed (High Atlas, Morocco) [J]. Journal of Arid Environments,2015,122:64-75.
- [9] Zare M, Mohammady M, Pradhan B. Modeling the effect of land use and climate change scenarios on future soil loss rate in Kasilian watershed of northern Iran[J]. Environmental Earth Sciences,2017,76(8):305.
- [10] Moges D M, Bhat H G. Integration of geospatial technologies with RUSLE for analysis of land use/cover change impact on soil erosion: Case study in Rib watershed, north-western highland Ethiopia[J]. Environmental Earth Sciences,2017,76(22):765.
- [11] Modeste M, Abdellatif K, Nadia M, et al. Effects of land use and cover type on the risks of runoff and water erosion: Infiltration tests in the Ourika watershed (High Atlas, Morocco)[J]. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration,2018,3(1):8.
- [12] Meshesha T W, Tripathi S K, Khare D. Analyses of land use and land cover change dynamics using GIS and remote sensing during 1984 and 2015 in the Beressa Watershed Northern Central Highland of Ethiopia[J]. Modeling Earth Systems and Environment,2016,2(4):168.
- [13] Li L, Wang Y, Liu C. Effects of land use changes on soil erosion in a fast developing area[J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2014,11(6):1549-1562.
- [14] Zare M, Samani A A N, Mohammady M, et al. Investigating effects of land use change scenarios on soil erosion using CLUE-s and RUSLE models[J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2017,14(9):1905-1918.
- [15] 刘世梁,安南南,尹艺洁,等. 基于 SWAT 模型的澜沧江中游小流域水土流失与 NDVI 时空动态相关性[J]. 水土保持学报,2016,30(1):62-67.
- [16] 姚华荣,崔保山. 澜沧江流域云南段土地利用及其变化对土壤侵蚀的影响[J]. 环境科学学报,2006,26(8):1362-1371.
- [17] 倪晋仁,李英奎. 基于土地利用结构变化的水土流失动态评估[J]. 地理学报,2001,56(5):611-621.
- [18] 蒲朝勇. 贯彻落实十九大精神做好新时代水土保持工作[J]. 中国水土保持,2017(12):1-6.
- [19] 刘宝元,郭索彦,李智广,等. 中国水力侵蚀抽样调查[J]. 中国水土保持,2013(10):26-34.
- [20] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation[M]. Beijing: Tsinghua Press,2002:143-149.
- [21] 符素华,刘宝元,周贵云,等. 坡长坡度因子计算工具[J]. 中国水土保持科学,2015,13(5):105-110.
- [22] 中华人民共和国水利部水土保持司. 土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)[S]. 北京:中国水利水电出版社,2008.