

## 黄河中游不同流域尺度土壤侵蚀评价

王晓峰<sup>1,2,3</sup>, 肖飞艳<sup>1</sup>, 尹礼唱<sup>1</sup>, 檀畅<sup>4</sup>

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710064; 2. 长安大学土地工程学院, 西安 710064;

3. 国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 西安 710075;

4. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094)

**摘要:** 黄河中游是黄河流域土壤侵蚀最严重的区段, 基于 GIS 和 RS 技术, 利用 2000—2010 年黄河中游土地覆被数据、气象数据和地形数据等, 提取了该区 2000—2010 年植被覆盖度, 应用修正的通用土壤流失方程 (RUSLE) 计算了逐年土壤侵蚀模数, 探讨了土壤侵蚀与植被覆盖度间的相关关系, 并分析了不同生态系统、不同流域尺度土壤侵蚀时空变化特征。结果表明: (1) 黄河中游植被覆盖度在空间上呈西北低东南高的分布特征, 在时间上呈波动上升趋势, 且植被覆盖度与土壤侵蚀模数之间存在负相关关系; (2) 研究区 2000—2010 年各生态系统的土壤侵蚀强度在减弱, 侵蚀状况明显好转; (3) 黄河中游二级流域的土壤侵蚀量在 2000—2010 年间均有不同程度的减少; (4) 在整个研究时段内, 三级流域中的泔河、伊河及黑河流域的土壤侵蚀量在增加, 其他流域的土壤侵蚀在减少。研究结果对黄河中游地区的水土保持措施具有一定的指导意义, 同时, 多尺度土壤侵蚀评价方法及通过剔除降雨因素实现以植被为主导因子的土壤侵蚀评价方法也可为其他地区的土壤侵蚀评价提供借鉴。

**关键词:** 黄河中游; 土壤侵蚀; RUSLE; 多尺度土壤侵蚀评价

中图分类号: S154.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)06-1070-08

## Evaluation of soil erosion at different watershed scales in the middle reaches of the Yellow River

WANG Xiaofeng<sup>1,2,3</sup>, XIAO Feiyan<sup>1</sup>, YIN Lichang<sup>1</sup>, TAN Change<sup>4</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710064;

2. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064;

3. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation, the Ministry of Land and Resources of China (Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Co. Ltd), Xi'an 710075;

4. Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094)

**Abstract:** The area of the middle reaches is the most serious soil erosion area in the Yellow River basin. Using the data of land cover, meteorological records and terrain from 2000 to 2010, we extracted the vegetation coverage based on GIS and RS, and calculated soil erosion modulus using revised universal soil loss equation (RUSLE), and then explored the correlation between soil erosion and vegetation coverage and the temporal and spatial variation characteristics of soil erosion in different ecosystems and basin scales. Results showed that: (1) in the middle reaches of the Yellow River, the vegetation coverage was low in northwest and high in southeast and with a fluctuating upward trend over time. There was a negative correlation between the soil erosion modulus and vegetation coverage; (2) the intensity of soil erosion in different ecosystems of the study area decreased during 2000-2010 and the erosion was significantly weakening; (3) the amount of soil erosion in the Yellow River's secondary basin reduced to certain degrees during 2000-2010; (4) throughout the study period, the amount of soil erosion was increased in Yi River, Fenghe and Heihe watershed, and reduced in other tertiary basins. The results

收稿日期: 2017-03-27

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划 (STS 计划), 重点脆弱生态区生态恢复技术集成与应用 (KFJ-STZ-ZDTP-036), 国家重点研发项目 (2016YFC0501603), 中央高校基本科研业务费高新研究项目 (自然科学类) “基于植被群落结构的流域土壤侵蚀遥感评价研究” (310827162026) 和陕西省重点科技创新团队计划项目 (2016KCT-23) 共同资助。

作者简介: 王晓峰, 博士, 副教授。E-mail: wangxf@chd.edu.cn

of this study provide some guiding significance for the soil and water conservation measures in the middle reaches of the Yellow River. The multi-scale soil erosion assessment method and the soil erosion assessment through the elimination of rain factors and recognition of the vegetation as a dominant factor of soil erosion would be a reference for soil erosion assessment in other areas.

**Key words:** the middle reaches of the Yellow River; soil erosion; RUSLE; the multi-scale soil erosion assessment method

土壤侵蚀作为全球最严重的生态问题之一<sup>[1]</sup>, 制约着全球社会经济健康的有序发展<sup>[2]</sup>。中国是全世界土壤侵蚀最严重的国家之一<sup>[3-4]</sup>, 由于特殊的地理位置和历史遗留问题, 我国黄河流域的土壤侵蚀问题尤为严重。“中国水土流失与生态安全综合科学考察”结果显示, 中国严重水土流失县有 646 个, 其中黄河流域就有 225 个<sup>[5]</sup>。2000 年前后, 中国西部地区大力开展退耕还林还草等植被恢复工程, 植被覆盖度逐渐增加, 土壤侵蚀得到显著遏制。在此背景下, 合理采用评价模型, 精确评估植被覆盖对土壤侵蚀动态变化的影响, 有利于区域水土保持措施优化配置以及经济持续、稳定和平衡发展<sup>[3]</sup>。

土壤侵蚀研究一直以来广受国内外学者的关注<sup>[6-10]</sup>, 应用预测模型的方法开展定量测度是土壤侵蚀研究的常用手段<sup>[11]</sup>。近 30 年来, 各国学者根据各自的区域特征提出了许多土壤侵蚀预报模型, 其中, 美国农业部研发的通用土壤流失方程(USLE)及修正的通用土壤流失方程(RUSLE)应用最为广泛<sup>[12-13]</sup>, 在中国许多地区也得到了广泛应用<sup>[14-17]</sup>。流域属于一种典型的自然区域, 是一条河流(或水系)的集水区域<sup>[18]</sup>, 在水文分析中经常基于其进行分析。现阶段, 中国的土壤侵蚀研究多集中在单一尺度尤其是小流域尺度的研究, 多尺度和大尺度土壤侵蚀研究略显匮乏, 且土壤侵蚀具有复杂性, 是气候、植被和人类活动等多重影响的结果, 现有研究中, 剥离气候因素以植被变化为主导因子的土壤侵蚀定量评价鲜有报道。

黄河中游地形破碎、土质疏松、植被稀少且抗水蚀性能差, 生态系统脆弱, 极易产生水土流失, 是黄河流域土壤侵蚀最严重的区段, 也是全国水土保持重点区域<sup>[19-21]</sup>。本研究以黄河中游为研究对象, 运用趋势分析法分析 2000—2010 年研究区的植被覆盖度动态变化特征, 借助修正的通用土壤流失方程(RUSLE), 采用多年平均降雨侵蚀因子, 剔除气候要素中的降雨变化的影响, 进而定量评估 2000 年以来以植被变化为主导因子的黄河中游地区不同生态系统、不同流域尺度土壤侵蚀状况, 旨在为黄河中游地区的水土保持措施的优化配置提供决策依据。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区概况

黄河中游位于 33°24'N~40°30'N, 104°12'E~113°24'E (见图 1), 北至内蒙古托克托县的河口镇, 南至河南郑州的桃花峪, 干流长约 1 206 km, 区域总面积约 34.4 万 km<sup>2</sup>, 平均海拔 1 000~1 500 m。该区属于温带大陆性季风气候, 多年平均气温 4.3~14.3 °C, 多年平均降水 150~750 mm, 6—9 月高温多暴雨。黄河中游大量支流流经植被稀疏、土质疏松, 地表破碎的黄土丘陵沟壑区, 且黄河中游不同生态系统类型分配不合理, 农地多, 林草地和城市绿地少, 地带性植被类型为森林草原带, 生态环境脆弱, 水土流失严重。此外, 该地区矿产资源丰富, 早期研究区内的滥采资源使得该地区的水土流失更为严重, 是黄河洪水泥沙的主要来源。

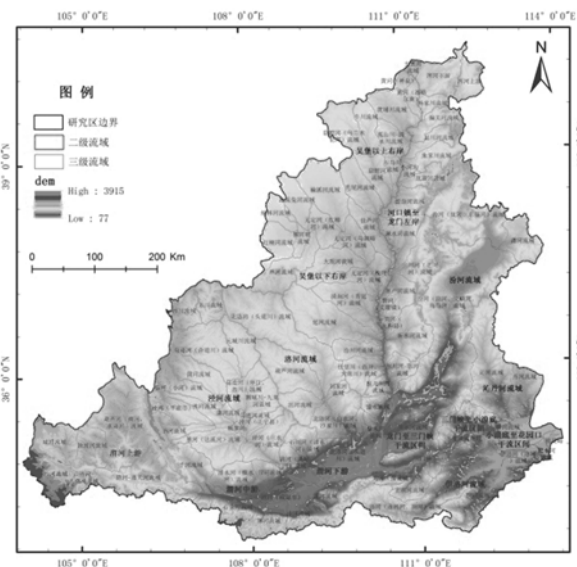


图 1 研究区范围和高程

Figure 1 The range and elevation of the study area

### 1.2 数据来源及处理

本研究采用的气象数据为 2000—2010 年黄河中游及周边地区共 70 个气象站点的年、月平均降水量, 来自中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>); 土壤类型数据为中国 1:100 万土壤数据集, 来自中国科学院南京土壤研究所土

壤分中心中国土壤数据 (<http://www.soil.csdb.cn>), 该数据集用于计算土壤可蚀性因子 ( $K$ ); 地形数据是中国 30 m 分辨率数字高程数据产品 (SRTM-DEM 数据产品), 来自中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台 (<http://landsat.datamirror.csdb.cn>), 该数据用于提取坡长 ( $L$ ) 和坡度 ( $S$ ) 因子及流域边界; 由于在大、中尺度下, MODIS 影像的应用广泛<sup>[22]</sup>, 且 MODIS 数据易于获取, 故采用的遥感数据为 2000—2010 年的 MODIS 月最大合成 NDVI 产品, 空间分辨率为 250 m (来自 <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>), 对该数据进行年最大合成, 消除季节的差异, 该数据主要用于提取植被覆盖因子  $C$ 。数据投影采用 Albers 投影, 地球椭球体采用 Krasovsky1940 模型。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 植被覆盖度变化分析方法** slope 趋势分析可以模拟逐个栅格单元的变化趋势<sup>[23-25]</sup>。本研究采用此方法模拟了 2000—2010 年年均植被覆盖度的变化趋势, 计算公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n iV_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n V_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式 (1) 中,  $\text{slope}$  为植被覆盖度在 2000—2010 年的变化速率, 即斜率; 变量  $i$  表示年序号,  $V_i$  表示第  $i$  年的植被覆盖度,  $n$  为研究序列的长度。若  $\text{slope} < 0$ , 说明植被覆盖度在  $n$  年间的变化趋势是减少的,  $\text{slope} > 0$  则是说明植被覆盖变化趋势是增加的, 且  $\text{slope}$  的绝对值越大, 说明变化趋势越明显<sup>[17]</sup>。根据  $\text{slope}$  值变化范围, 并参考已有研究<sup>[26]</sup> 定义明显退化、中度退化、微度退化、基本不变、微度改善、中度改善和明显改善 7 个变化区间。

**1.3.2 土壤侵蚀评价模型** 土壤侵蚀量的计算采用修正通用土壤侵蚀方程 (RUSLE), 见式 (2):

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (2)$$

式中,  $A$  为土壤侵蚀量 ( $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ );  $R$  为降雨侵蚀力因子 ( $MJ \cdot mm \cdot (km^2 \cdot h \cdot a)^{-1}$ ), 采用 Wischmeier 和 Smith<sup>[27]</sup> 提出的基于月降水量经验公式计算  $R$  因子, 克里金插值法常被用来对降水数据进行插值<sup>[28]</sup>, 故采用该法对  $R$  因子进行空间化。此外, 由于土壤侵蚀主要驱动因素是降雨侵蚀力和植被覆盖因子<sup>[29]</sup>, 因此, 本研究求取了多年平均降雨侵蚀力, 从而剥离气候要素中降雨动态变化对土壤侵蚀的影响;  $K$  为土壤可蚀性因子 ( $t \cdot km^2 \cdot h \cdot (km^2 \cdot MJ \cdot mm)^{-1}$ ), 采用 Williams 等在 EPIC 模型中  $K$  值计算方法计算<sup>[30]</sup>;

$LS$  为地形因子 (坡长、坡度), 采用 Van Remortel 开发的用以计算坡长的 RUSLE\_PC.AML 模型提取坡长因子, 由于黄河中游地区的地形特殊, 不宜直接采用美国的坡度算法, 因此, 采用分段算法, 缓坡采用 McCool 等<sup>[31]</sup> 坡度公式, 陡坡采用刘宝元等<sup>[32]</sup> 提出的坡度公式;  $C$  为植被覆盖与管理因子, 采用 Cai 等<sup>[33]</sup> 的  $C$  值计算公式;  $P$  为水土保持措施因子, 采用 Wener 的经验公式<sup>[34]</sup> 来计算黄河中游地区的水土保持措施因子, 其计算公式为  $P = 0.2 + 0.03 \times S$  (其中  $S$  为坡度)。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被覆盖度变化趋势分析

2000—2010 年间, 在退耕还林还草等措施的实施下, 黄河中游的植被覆盖度明显增加 (见图 2), 整体上呈上升趋势, 但受气候等影响, 年际间有所波动。2000 年的植被覆盖度平均值最低, 为 54.10%, 2010 年最高, 为 64.81%, 与 2000 年相比, 增高了 19.8%, 平均涨幅为 1.98%。

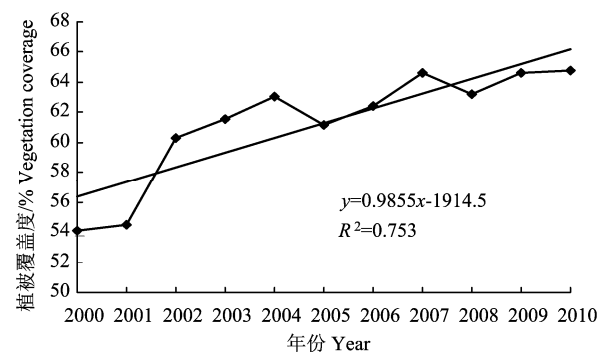


图 2 2000—2010 年黄河中游植被覆盖度年际变化  
Figure 2 Interannual variation of vegetation coverage in the middle reaches of the Yellow River during 2000-2010

图 3 为研究区 2000—2010 年的植被覆盖度变化趋势图, 结合表 1 可知, 2000—2010 年研究区 46.48% 的区域植被覆盖度在改善, 41.65% 的区域植被覆盖度基本不变, 11.87% 的区域植被覆盖度在退化, 其中微度退化占到了退化面积的 95.87%。

利用研究区 DEM 并参考河流分布图, 借助 ArcGIS 中的水文分析模块逐级提取黄河中游二级、三级流域边界并分析不同流域植被覆盖特征。就二级流域而言, 吴堡以上右岸、吴堡以下右岸、河口镇至龙门左岸、龙门至三峡干流区间以及洛河流域植被覆盖度改善的面积比重高达 50% 以上, 小浪底至花园口干流区间、渭河宝鸡峡至咸阳以及沁丹河流域的植被覆盖度退化比重较大, 均达到了 25% 以

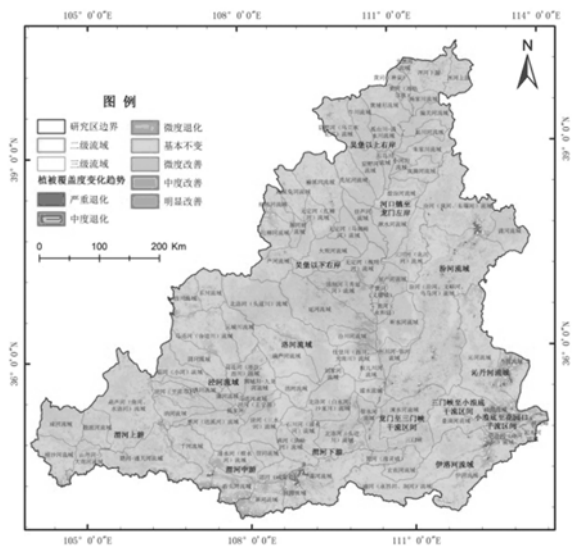


图 3 研究区不同流域植被覆盖度变化趋势

Figure 3 The variation trend of vegetation coverage in different watersheds of the study area

上。三级流域中,清涧河(秀水河)、黄河(义牒镇)、无定河(槐理河)流域的植被覆盖度改善比重超过了 95%,黄河(永和县)、石马川流域等 7 个流域

的植被覆盖度改善比重介于 90%~95%之间,石头河流域的植被覆盖度退化比重较大,超过了 50%,其次,黑河流域、桃花峪、丹河以及泮河流域的植被覆盖度退化比重介于 40%~50%。

2.2 黄河中游土壤侵蚀分析

2.2.1 土壤侵蚀与植被覆盖度间的相关关系 植被覆盖度是影响土壤侵蚀的重要因素,探究植被覆盖度与土壤侵蚀间的关系对于土壤侵蚀的治理有重大意义。对比分析了 2000—2010 年研究区的年均植被覆盖度与年均土壤侵蚀量结果(图 4)显示。2001 年研究区平均土壤侵蚀量达到最大值 3 303.37 t·(km<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>,而同年的平均植被覆盖度仅为 54.45%;2010 年该区平均土壤侵蚀量为研究时段内最低值 1 689.96 t·(km<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>,而同年的平均植被覆盖度达到了最大值 64.81%。在整个研究时段内,平均土壤侵蚀量总体上呈直线下降趋势,平均植被覆盖度在 2005 年和 2008 年虽略有下降,但总体趋于直线上升。可见,对于黄河中游地区,在多年平均降雨量基本保持不变的情况下,土壤侵蚀量与植被覆盖度存在明显的负相关关系。

表 1 2000—2010 年植被覆盖度变化

Table 1 The variation of vegetation coverage in 2000-2010

变化趋势 Variation tendency	变化程度 Change degree	变化面积/km <sup>2</sup> Change area	变化比率/% Change ratio
$slope > 5.05$	明显改善 Significantly improved	29.38	0.01
$2.01 < slope \leq 5.05$	中度改善 Moderately improved	7 990.81	2.32
$0.53 < slope \leq 2.01$	微度改善 Micro improved	151 758.50	44.15
$-0.53 < slope \leq 0.53$	基本不变 Steady	143 163.75	41.65
$-2.01 < slope \leq -0.53$	微度退化 Micro decreased	39 100.06	11.38
$-5.05 < slope \leq -2.01$	中度退化 Moderately decreased	1 568.50	0.46
$slope \leq -5.05$	严重退化 Significantly decreased	116.69	0.03

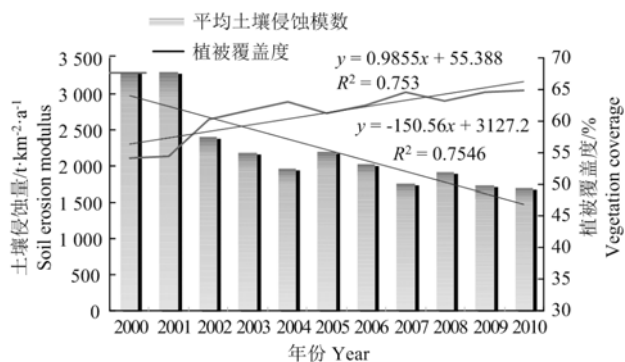


图 4 2000-2010 年黄河中游土壤侵蚀模数与植被覆盖度对比  
Figure 4 Comparison of soil erosion modulus and vegetation coverage in the middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2010

2.2.2 不同生态系统土壤侵蚀评价 在退耕还林还草工程的实施下,黄河中游大量退耕坡耕地转为草

地、林地和灌丛。其中,草地主要分布在研究区西北部,森林主要分布在南部、东南部等山区,耕地主要分布在渭河上游、关中平原及汾河盆地等(见图 5)。图 6 为 2010 年研究区土壤侵蚀强度空间分布图(土壤侵蚀强度根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007)》<sup>[35]</sup>划分),由该图可知研究区强烈以上土壤侵蚀主要分布于渭河上游,泾河流域中上游以及黄河、汾河沿岸等地区。

统计分析了 2000 年、2005 年和 2010 年研究区不同生态系统类型的土壤侵蚀强度分布状况。结果表明,研究区的土壤侵蚀以微度、轻度和中度侵蚀为主,且 2000—2010 年间,强烈侵蚀以上(包括强烈侵蚀)的面积减少了 38 777.88 km<sup>2</sup>,可见黄河中游的土壤侵蚀状况整体明显好转。

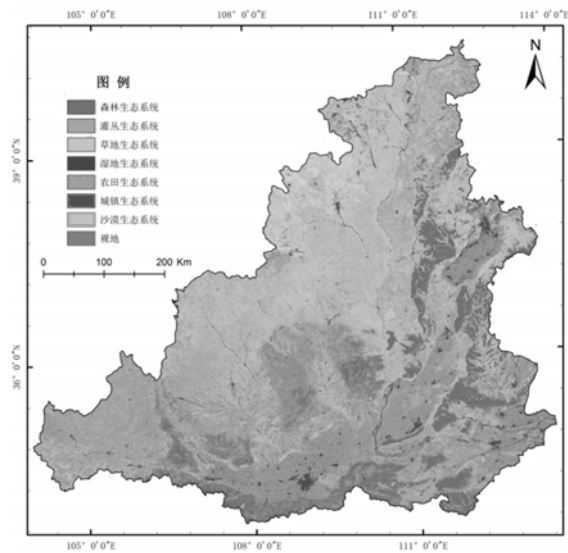


图 5 2010 年研究区生态系统空间分布

Figure 5 Ecosystem distribution of the study area in 2010

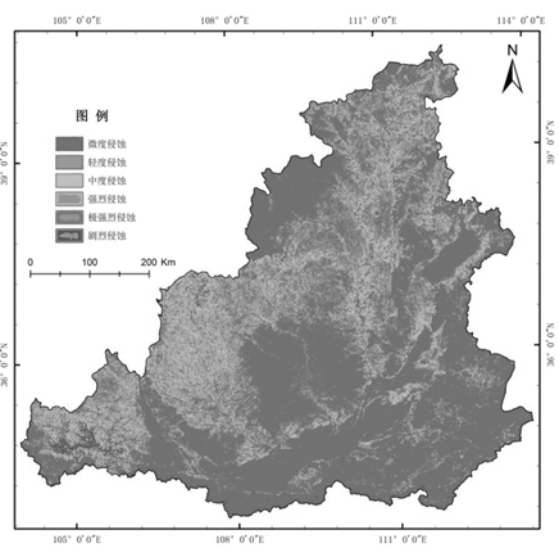


图 6 2010 年研究区土壤侵蚀强度空间分布

Figure 6 The spatial distribution of soil erosion intensity of the study area in 2010

表 2 不同生态系统不同土壤侵蚀强度比重

Table 2 The proportion of different soil erosion intensities in different ecosystems

%

年份	生态系统	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀	剧烈侵蚀
Year	Ecosystems	Micro erosion	Mild erosion	Moderate erosion	Intense erosion	Extreme intense erosion	Severe erosion
2000	森林 Forest	87.88	5.03	3.26	1.61	1.35	0.88
	灌丛 Bush	61.77	14.28	11.10	5.77	4.65	2.43
	草地 Grassland	29.93	23.17	21.17	11.50	9.38	4.85
	湿地 Wetland	62.65	12.40	8.58	4.92	5.06	6.39
	农田 Farmland	43.50	17.82	16.05	9.38	8.24	5.02
	城镇 Town	69.79	12.95	8.03	3.75	3.27	2.22
	沙地 Sand	86.98	9.25	2.90	0.63	0.20	0.04
	裸地 Bare land	44.15	17.71	13.76	7.84	8.11	8.43
	总计 Total	48.42	17.20	15.02	8.33	7.04	4.00
2005	森林 Forest	95.15	4.36	0.37	0.09	0.02	0.01
	灌丛 Bush	80.25	18.12	1.41	0.19	0.03	0.00
	草地 Grassland	56.41	40.28	3.00	0.27	0.03	0.01
	湿地 Wetland	75.11	18.44	4.25	1.51	0.57	0.12
	农田 Farmland	64.43	32.25	2.98	0.31	0.03	0.00
	城镇 Town	81.68	16.26	1.67	0.32	0.06	0.01
	沙地 Sand	95.93	4.06	0.01	0.00	0.00	0.00
	裸地 Bare land	63.27	29.07	5.55	1.43	0.43	0.25
	总计 Total	68.94	28.40	2.37	0.26	0.03	0.00
2010	森林 Forest	95.46	2.42	1.13	0.45	0.30	0.23
	灌丛 Bush	77.68	11.72	6.27	2.38	1.34	0.62
	草地 Grassland	49.58	25.85	14.38	5.56	3.33	1.30
	湿地 Wetland	67.58	11.61	7.60	4.17	4.04	5.00
	农田 Farmland	58.93	18.66	11.89	5.11	3.55	1.86
	城镇 Town	73.04	12.99	6.90	3.17	2.21	1.69
	沙地 Sand	91.91	6.50	1.30	0.25	0.05	0.00
	裸地 Bare land	50.98	19.07	11.49	6.22	5.30	6.95
	总计 Total	64.48	17.36	10.11	4.11	2.65	1.29

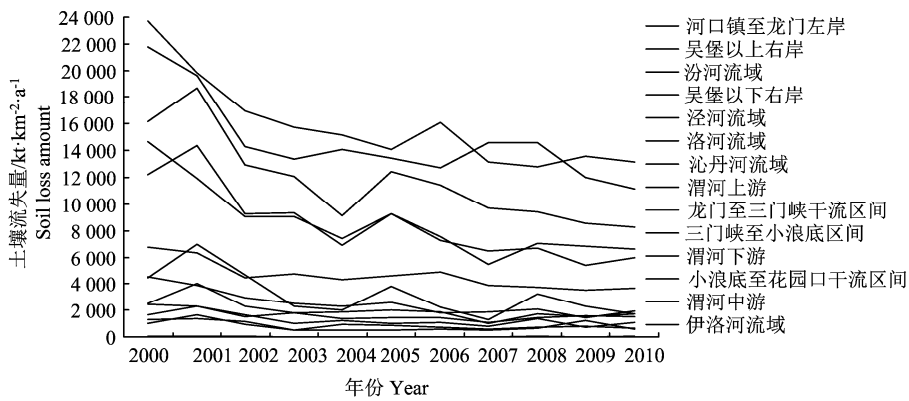


图 7 2000—2010 年研究区不同二级流域土壤侵蚀总量对比

Figure 7 Comparison of total soil erosion among sub-basins of the study area from 2000 to 2010

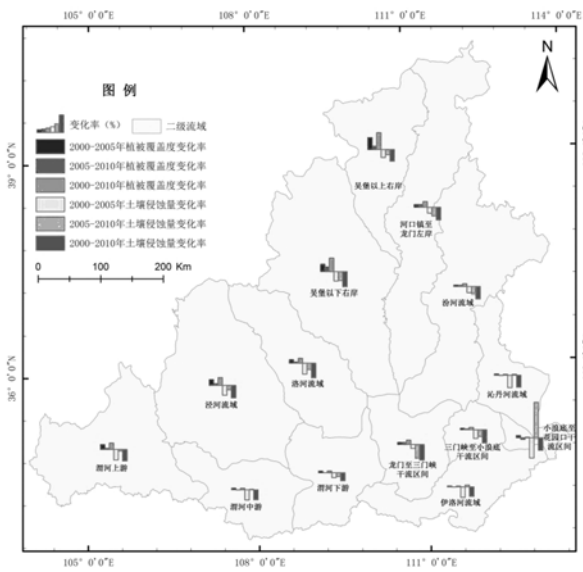


图 8 研究区二级流域土壤侵蚀及植被覆盖度变化率对比  
Figure 8 Comparison of soil erosion and vegetation coverage in sub-basins of the study area

就不同生态系统而言, 农田生态系统的土壤侵蚀面积最大, 其次是草地, 且 2000—2010 年, 各生态系统中度以下土壤侵蚀的比重均呈先增加后减少整体增加的趋势, 强烈以上侵蚀的比重均呈先减少后增加整体减少的趋势, 各生态系统的土壤侵蚀强度明显在减弱。此外, 裸地和农田强烈侵蚀以上级别的侵蚀比重在 2000、2005 以及 2010 年均较大, 而森林和灌丛强烈侵蚀以上级别的侵蚀比重较小。可见, 黄河中游地区的森林、灌丛等生态系统的水土保持效益较好, 裸地和农田的土壤由于该地区地形破碎且降水多集中在夏季汛期而易受水蚀影响。

**2.2.3 以二级流域为单元的土壤侵蚀变化分析**  
2000—2010 年, 随着退耕还林(草)工程的实施, 黄河中游地区的植被覆盖度明显增加, 同时, 各流域的土壤侵蚀量也整体降低(见图 7), 其中, 土壤

侵蚀量减少比重最大的是龙门至三峡干流区间, 为 60.72%, 其次是吴堡以下右岸、洛河流域及三门峡至小浪底区间, 减少比重均超过了 50%; 而减少速率最大的是泾河流域, 其次是渭河上游, 其减少速率均超过了  $1\ 000\ t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ 。

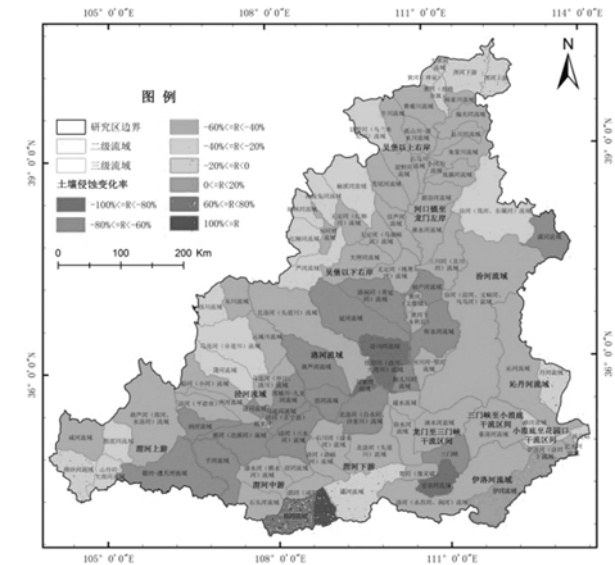


图 9 2000-2010 年研究区三级流域土壤侵蚀变化率分布  
Figure 9 Distribution of soil erosion change rate during 2000-2010 in three-order basins of the study area

就不同时段而言, 土壤侵蚀的变化趋势均与植被覆盖度的变化趋势相反, 但由于地形、土质及生态类型的差异, 不同流域植被覆盖度变化的幅度和土壤侵蚀的变化幅度不完全一致(见图 8)。2000—2005 年黄河中游各二级流域的土壤侵蚀量均在减少, 其中, 小浪底至花园口干流区间的减少比重最大, 为 78.49%, 其植被覆盖度虽在增加, 但增加幅度不及土壤侵蚀减少幅度, 其余二级流域的减少比重不足 50%; 2005—2010 年期间除小浪底至花园口干流区间、伊洛河流域、沁丹河流域和渭河

中游外,其余流域的土壤侵蚀均在减少,其中,减少比率最大的是龙门至三峡干流区间,其减少比率超过了50%,增加的流域中,小浪底至花园口干流区间的土壤侵蚀增加比率最大,近140%,其他流域增加比率均不足20%。这可能是由于降水、地形、土壤类型和生态类型的空间差异以及植被的时空变化造成的。可见,在未来的水土保持工程中,应当更加重视小浪底至花园口干流区间的土壤侵蚀,优化小浪底至花园口干流区间及伊洛河流域、沁丹河流域、渭河中游的水保措施,以改善这些流域的土壤侵蚀状况。

**2.2.4 以三级流域为单元的土壤侵蚀变化分析** 2000—2010年,研究区三级流域中除沔河、伊河及黑河流域的土壤侵蚀量在增加外,其余小流域的土壤侵蚀量均有不同程度的减少(见图9)。其中,增加比率最大的是沔河流域,其次是黑河和伊河流域,其增加比率分别为131.52%、63.54%和11.23%;减少比率最大的是仕望川流域、宏农河流域、北洛河(刘家河)流域以及汾川河流域,其减少比率均超过了80%。

### 3 讨论

黄河中游地区以土壤水力侵蚀为主,因此本研究主要考虑水力侵蚀。研究表明,近年来,沔河、伊河及黑河等流域的土壤侵蚀改善状况不容乐观,那么,导致这些流域土壤侵蚀仍旧严重的原因是什么,目前的治理措施有何优点和不足,如何采取更有效的防治措施改善这些地区的土壤侵蚀状况等问题在未来的研究中有待深入剖析;C因子是RUSLE模型中最重要的影响因子,降雨是水土流失的主要外营力,控制降雨因素分析以植被为主导因子的土壤侵蚀可间接的体现退耕还林还草工程的水土保持效益,通过对R因子进行多年平均处理简单剔除了气候要素中的降水变化对土壤侵蚀的影响,如何采用更为有效的方法剥离气候因素并准确评估人类活动对土壤侵蚀的影响还有待研究;采用修正的通用土壤侵蚀模型估算了黄河中游的土壤侵蚀量,其中的C因子是通过植被覆盖度计算得到的,它无法表征植被的垂直结构以及落叶对水土的保持作用,因此,在未来的研究中应当考虑植被垂直结构以及落叶的水土保持作用;詹蕾<sup>[36]</sup>以陕西省为例对SRTM-DEM的精度进行评价,结果表明陕西省的SRTM-DEM数据存在不同程度的误差,所采用的DEM为SRTM-DEM数据产品,在未来的研究中可考虑用InSAR技术获取地面数字高程模型

(DEM)替代SRTM-DEM。

### 4 结论

运用GIS和RS技术,基于修正的通用土壤流失方程计算了黄河中游地区在多年平均降雨量基本保持不变情况下的平均土壤侵蚀模数,分析了土壤侵蚀与植被覆盖度间的关系,探讨了不同生态系统土壤侵蚀强度的分布以及不同二级、三级流域的土壤侵蚀动态特征,结果如下。

(1)黄河中游的土壤侵蚀和植被覆盖度之间存在着明显的负相关关系。黄河中游地区的植被覆盖度在2000年前后实施退耕还林还草工程以来逐渐增加,整个黄河中游的平均侵蚀模数由 $3\ 300.97\ t\cdot(km^2\cdot a)^{-1}$ 下降到了 $1\ 689.96\ t\cdot(km^2\cdot a)^{-1}$ ,土壤侵蚀状况整体明显好转,这与傅伯杰<sup>[26]</sup>的研究结果基本一致。

(2)黄土高原地区开展了大规模的退耕还林还草工程,大量退耕坡耕地转为草地、林地和灌丛。2000—2010年期间,研究区各生态系统的土壤侵蚀强度明显减弱,土壤侵蚀逐渐得到遏制。

(3)由于降水、土壤属性和地形等的空间差异以及植被覆盖度的时空变化,不同流域的土壤侵蚀差异明显。以二级流域为单元的土壤侵蚀评价结果表明,黄河中游地区二级流域的土壤侵蚀在研究时段内整体均呈下降趋势,但在2005—2010年间,小浪底至花园口干流区间、伊洛河流域、沁丹河流域以及渭河中游的土壤侵蚀状况有所逆转,在未来的发展中要采取措施继续加强伊洛河、沁丹河流域和渭河中游地区土壤侵蚀的治理,调整小浪底至花园口干流区间的土壤侵蚀治理方案,减少该地区的土壤侵蚀量。

(4)以三级流域为单元的土壤侵蚀评价结果表明,除沔河、伊河及黑河流域的土壤侵蚀量在增加外,其余小流域的土壤侵蚀量在研究时段内均有不同程度的减少,因此,沔河、伊河及黑河流域的土壤侵蚀在未来的防治中需重点关注。

### 参考文献:

- [1] 冷疏影,冯仁国,李锐,等. 土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 1-26.
- [2] 郑粉莉,王占礼,杨勤科. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J]. 自然杂志, 2008, 30(1): 12-16.
- [3] 倪九派,谢春燕,魏朝富,等. 土壤侵蚀预测建模研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(1): 66-71.
- [4] 高光耀,傅伯杰,吕一河,等. 干旱半干旱区坡面覆被

- 格局的水土流失效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 12-22.
- [5] 李锐, 上官周平, 刘宝元, 等. 近 60 年我国土壤侵蚀科学研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 1-6.
- [6] BRUBAKER S C, JONES A J, LEWIS D T, et al. Soil properties associated with landscape position [J]. Soil Sci Soc Am J, 1993, 57(1): 235-239.
- [7] RENARD K G, FOSTER G R, WEESIES G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[R]. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Agriculture Handbook Number 703, 1997.
- [8] CERDÀ A, KEESSTRA S, JORDAN A, et al. Soil erosion measurements by means of experimental plots to determine best land management strategies in vineyards and olive orchards[C]// EGU General Assembly. EGU General Assembly Conference Geophysical Research Abstracts. Vienna: 2016, 18: 17892.
- [9] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪乡为例[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62-68.
- [10] 任坤, 梅琨, 朱慧敏, 等. 基于 RUSLE 模型的珊溪水库流域土壤侵蚀定量估算[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1950-1958.
- [11] 查良松, 邓国徽, 谷家川. 1992—2013 年巢湖流域土壤侵蚀动态变化[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1708-1719.
- [12] 冯强, 赵文武. USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4461-4472.
- [13] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 28-38.
- [14] 蔡强国, 刘纪根. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2003, 22(3): 142-150.
- [15] 李建牢, 刘世德. 罗玉沟流域坡面土壤侵蚀量的测算[J]. 中国水土保持, 1989(3): 36-39.
- [16] 刘淼, 胡远满, 徐崇刚. 基于 GIS、RS 和 RUSLE 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.
- [17] 李天宏, 郑丽娜. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1164-1175.
- [18] 王灵恩, 何露, 成升魁, 等. 澜沧江流域旅游资源空间分异与发展模式探讨[J]. 资源科学, 2012, 34(7): 1266-1276.
- [19] FU B J, HU C X, CHEN L D, et al. Evaluating change in agricultural landscape pattern between 1980 and 2000 in the Loess hilly region of Ansai County, China[J]. Agr Ecosyst Environ, 2006, 114(2): 387-396.
- [20] MU X, ZHANG L, MCVICAR T R, et al. Analysis of the impact of conservation measures on stream flow regime in catchments of the Loess Plateau, China[J]. Hydrol Process, 2007, 21(16): 2124-2134.
- [21] 孟庆香, 刘国彬, 杨勤科. 黄土高原土壤侵蚀时空动态分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 20-22.
- [22] 张婧, 刘咏梅, 徐健, 等. 影像分辨率对植被覆盖度提取的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 120-124.
- [23] 宋怡, 马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 89-93.
- [24] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3960-3968.
- [25] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [26] 傅伯杰. 黄土高原景观格局变化与土壤侵蚀[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [27] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains- Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation [R]. Washington, D.C.: Agricultural Research Service, Agriculture Handbook, No. 282, 1965.
- [28] 刘玲. 区域土壤侵蚀影响因子的尺度效应研究[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [29] 赵志平, 王军邦, 吴晓蕾, 等. 1990—2005 年内蒙古兴安盟地区土壤水力侵蚀变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(6): 124-129.
- [30] WILLIAMS J R, RENARD K G, DYKE P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. J Soil Water Conserv, 1983, 38(5): 381-383.
- [31] MCCOOL D K, BROWN L C, FOSTER G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. T ASABE, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [32] 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.
- [33] CAI C F, DING S W, SHI Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. J Soil Water Conserv, 2000, 14(2): 19-24.
- [34] WENER C G. Soil conservation in Kenya, Nairobi[M]. 3rd ed. Nairobi: Printfast Kenya Limited, 1980.
- [35] 中华人民共和国水利部. 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.
- [36] 詹蕾. SRTM DEM 的精度评价及其适用性研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.