

# 三峡库区土壤侵蚀和植被覆盖变化分析\*

杨凯祥 刘 强<sup>†</sup> 李秀红 陆彦蓉 刘 璐 宋振威

(北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 全球变化与地球系统科学研究院, 100875, 北京)

**摘要** 基于 Google Earth Engine 平台, 利用 1987—2019 年 Landsat 数据, 合成 30 m 分辨率的三峡库区年度最大 NDVI 图像, 通过像元二分法计算三峡库区年度最大植被覆盖度, 分析植被覆盖度的时空动态; 同时, 利用修正通用土壤流失方程(RUSLE), 估算三峡库区 2000 和 2010 年的土壤侵蚀量( $T$ )。研究表明: 1) 三峡库区 1987—2019 年植被覆盖度持续改善, 植被覆盖度增加区域面积占三峡库区面积的 75.35%, 其中显著增加区域为 39.26%。2) 三峡库区土壤侵蚀模数( $A$ ) 2010 年为  $25.51 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 比 2000 年减少 28.22%, 水土流失强度明显下降; 2010 年的水土流失面积为  $1.91 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 比 2000 年减少 27.38%; 坡度  $>15^\circ$  区域的  $T$  超过整个区域  $T$  的 86%, 坡度  $>25^\circ$  的区域  $T$  超过整个区域  $T$  的 60%, 海拔为 0—500 m 的区域  $T$  超过整个区域  $T$  的 48%, 海拔  $<1500 \text{ m}$  的区域  $T$  接近整个区域  $T$  的 70%, 这些区域均是三峡库区水土流失的重点治理区域。3) 1987—2015 年, 降雨略微减少, 气温有所升高, 尤其是在人类植树造林等活动共同作用下, 三峡库区植被覆盖度增加, 土壤侵蚀减少。

**关键词** Google Earth Engine; Landsat; 土壤侵蚀; RUSLE; 植被覆盖度

**中图分类号** TP79

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2021049

三峡工程是举世瞩目的大型水利工程, 同时也是一项生态环境工程, 它具有防洪、发电、航运等综合功能, 对区域社会经济发展有深远的影响<sup>[1]</sup>。三峡工程移民自 1993 年大规模搬迁以来, 到 2009 年年底, 成功将 100 多万人重新安置到其他地区, 对生态环境的影响是前所未有的。土壤侵蚀是威胁人类生存与发展的重要环境问题之一, 它可以使土层变薄、肥力降低, 造成土地沙石化, 使之永远失去农业价值<sup>[2]</sup>。同时, 土壤侵蚀使大量泥沙进入河道, 造成河床淤积, 加剧洪涝灾害的发生, 直接影响三峡水库的安全以及功能的发挥, 对生态环境产生重大的影响<sup>[1, 3]</sup>。因此, 定量监测和分析三峡库区的土壤侵蚀的动态变化十分必要, 可以为三峡库区土壤侵蚀的防治提供依据。

在土壤侵蚀研究中, 植被覆盖变化被公认为全球和区域环境变化的重要指标之一。量化植被覆盖变化对于评估环境保护政策的效果至关重要<sup>[4]</sup>, 一般需要通过遥感数据获得; 但是遥感数据受传感器以及天气的局限, 要获得完整的植被数据往往需要处理大量的数据, 因此土壤侵蚀研究一般使用低分辨率的 AVHRR、MODIS 植被数据, 但在复杂地形区域分辨率不足, 精度受到局限。

Google Earth Engine(GEE)又称谷歌地球引擎, 是一个大数据和云计算平台, 为大范围遥感技术应用提供了平台。近年来, 由于 GEE 平台的先进性, 已被用于植被覆盖研究。如裴杰等<sup>[5]</sup>基于 GEE 平台进行高分辨率的植被覆盖度时间序列的提取研究。在过去的研究中, 使用分辨率为 30 m 的 Landsat 数据集, 受到大气和云影响以及数据存储的限制, 一般在一年中挑选质量较好的几景影像, 需要下载后再进行运算; 应用 GEE 平台, 无需下载, 可在线调用数据库中所有 Landsat 影像, 能更精确反映植被覆盖的时空动态信息, 使计算的土壤侵蚀结果更精准。

到目前为止, 土壤侵蚀的研究很少结合 GEE 平台进行。本文突破传统方法, 以 GEE 平台提供的长时间序列 30 m 分辨率的 Landsat 数据集为基础, 弥补过去大范围土壤侵蚀研究中植被覆盖度分辨率低的不足, 快速计算出 1987—2019 年三峡库区植被覆盖度变化和 2000、2010 年土壤侵蚀量。为计算土壤侵蚀研究提供新的思路, 主要结论可服务于三峡库区水土流失治理。

## 1 研究区和数据介绍

三峡库区地处长江中上游, 位于  $106^\circ 16' \sim 111^\circ 28' \text{E}$ 、

\* 国家重点研发计划资助项目(2020YFA0608703); 国家自然科学基金资助项目(20180913)

<sup>†</sup> 通信作者: 刘 强(1974—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 多角度遥感、二向反射、反照率和热红外辐射等。E-mail: toliuqiang@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-03-10

29°16′~31°44′N, 地处四川盆地与长江中下游平原的结合部, 跨越渝、鄂中山区峡谷及川东岭谷地带, 北屏大巴山、南依川鄂高原, 属高输沙区域, 是全国水土保持重点防治区。三峡库区范围涉及 21 个县市区, 土地面积约 58 000 km<sup>2</sup>, 地形以山地为主, 约占总面积的 74%, 丘陵约占 21.7%。区内属典型的亚热带湿润季风气候, 年均气温为 17~19 ℃, 年均降水量为 1 000~1 200 mm<sup>[6]</sup>。

本研究用到土壤、植被、地形、气候等多种地理

要素, 数据来源见表 1。使用的土地利用数据是 2000、2010 年的全球 30 m 地表覆盖数据产品 GlobeLand30, 研究表明该套数据产品分类精度达到 80% 以上<sup>[7]</sup>。通过在 GEE 上进行 2000、2010 年随机点选点比较分析, 已证实 GlobeLand30 能够较好地反映三峡库区土地利用情况, 所以选用 GlobeLand30 作为三峡库区土地利用数据进行土壤侵蚀计算。除了 GEE 平台提供数字高程模型 (DEM) 和 Landsat 影像以外, 其他参数均采用国内权威机构发布的数据集。

表 1 各类数据来源

地理要素	数据描述	分辨率/m	数据来源
土壤	基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)(2009)	1 000	国家青藏高原科学数据中心( <a href="http://data.tpdac.ac.cn">http://data.tpdac.ac.cn</a> )
DEM	SRTM (the shuttle radar topography mission)	30	GEE平台( <a href="https://earthengine.google.com">https://earthengine.google.com</a> )
遥感影像	Landsat5、Landsat7、Landsat8影像 (landsat surface reflectance tier 1)	30	GEE平台( <a href="https://earthengine.google.com">https://earthengine.google.com</a> )
气象站点	年基准地面气象观测站及自动站观测的 逐月降水资料	—	中国气象数据网( <a href="http://data.cma.cn">data.cma.cn</a> )
土地覆盖	2000、2010年GlobeLand30	30	国家基础地理信息中心( <a href="http://www.ngcc.cn">www.ngcc.cn</a> )
气象数据	1987—2015年中国逐年年降水量、温度空间插值数据集	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )

## 2 土壤侵蚀、植被覆盖度计算与分析方法

**2.1 修正的通用土壤流失方程** 土壤侵蚀模型是估算土壤侵蚀量的重要手段, 本文使用修正通用土壤流失方程 RUSLE<sup>[8]</sup> 计算平均土壤侵蚀模数 ( $A$ ), 像元总面积与  $A$  的平均值相乘得到土壤侵蚀量 ( $T$ , 单位: t), 计算式为

$$A = R \cdot K \cdot L_s \cdot C \cdot P, \quad (1)$$

式中:  $A$  为平均土壤侵蚀模数 ( $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $R$  为降雨侵蚀力因子 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $K$  为土壤可蚀性因子 ( $t \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ );  $L_s$  为坡长坡度因子, 单位为 1;  $C$  为植被覆盖与管理因子, 单位为 1;  $P$  为水土保持措施因子, 单位为 1。

土壤侵蚀方程的分量及其数据来源如图 1 所示。

**2.2 NDVI 及植被覆盖度计算** 植被覆盖度 (fractional vegetation cover, FVC) 与归一化植被指数 (NDVI) 之间存在极显著的线性相关性, 通常通过建立二者的转换关系, 直接提取植被覆盖度<sup>[9]</sup>。三峡库区是多云多雨地区, 这势必会对遥感影像的观测造成很大的影响。Holben<sup>[10]</sup> 在 1986 年提出最大值合成法 (MVC), MVC 选择合成周期内最大植被指数作为合成值, 能够移除大部分残云和大气影响, 得到反映生长期植被状态的高质量地表数据<sup>[11]</sup>。

在 GEE 上调用 1987—2019 年三峡库区 30 m 分辨率 Landsat 影像共 4 251 景, 批量去云并计算 NDVI, 采用 MVC 合成得到 1987—2019 年每年最大 NDVI 影像, 并用相邻年份最大 NDVI 数据填补去云后的缺失数据。利用 GEE 平台很快完成, 减少了工作量。

用像元二分模型计算最大植被覆盖度, 并参照李苗苗等<sup>[12]</sup> 提出的方法, 取年度最大 NDVI 累计频率 5%, 95% 的 NDVI 分别为当年  $\text{NDVI}_{\text{soil}}$  (纯裸土或无植被覆盖区域的 NDVI)、 $\text{NDVI}_{\text{veg}}$  (纯植被像元的 NDVI), 得到 1987—2019 年每年最大植被覆盖度影像。

### 2.3 RUSLE 模型各因子值的确定

1) 降雨侵蚀力因子 ( $R$ ): 基于三峡库区及其周边 213 个气象站点数据, 用 Kriging 内插法得到 1995—2014 年月降雨量空间分布, 利用 Wischmeier 等<sup>[13]</sup> 提出的式 (2) 计算 2000 和 2010 年的  $R$ 。

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{\left( \frac{1.5 \lg(P_i)}{P} - 0.08188 \right)}, \quad (2)$$

式中:  $R$  为降雨侵蚀力因子,  $P_i$  为月降雨量 (mm),  $P$  为年降雨量 (mm)。

2) 土壤可蚀性因子 ( $K$ ): 本文基于世界土壤数据库的中国土壤数据集 (v1.1) (2009)<sup>[14]</sup>, 用 EPIC 模型<sup>[15]</sup> 计算得到  $K$  值, 并运用张科利等<sup>[16]</sup> 提出的修订式对结果进行修正。

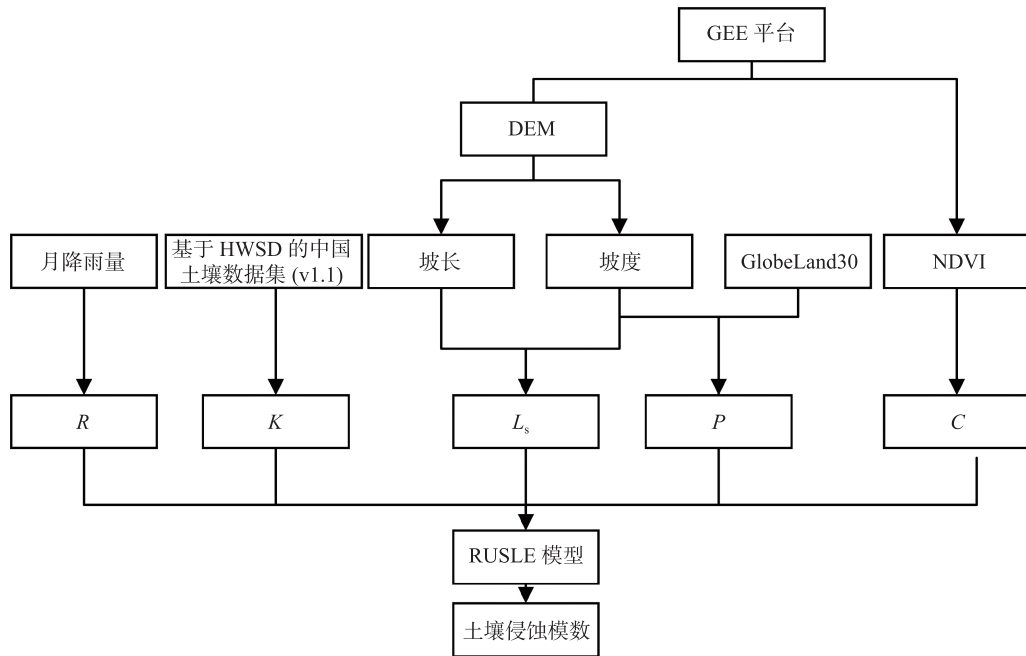


图 1 土壤侵蚀方程的分量及其数据来源

$$K = -0.01383 + 0.51575K_{epic}, \quad (3)$$

式中:  $K$  采用美制单位时为  $t \cdot \text{acre} \cdot \text{h} \cdot 100\text{acre}^{-1} \cdot \text{ft}^{-1} \cdot \text{tonf}^{-1} \cdot \text{in}^{-1}$ , 国际上常用公制单位  $t \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ . 二者的换算关系: 美制单位  $\times 0.1317 =$  公制单位.

3) 坡度坡长因子 ( $L_s$ ):  $L_s$ <sup>[8, 13]</sup> 计算式为

$$L_s = \frac{\lambda^m}{22.1} \times (65.41 \times \sin^2 \theta + 4.56 \times \sin \theta + 0.065), \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  是坡长 (m),  $\theta$  是坡度 ( $^\circ$ );  $m$  取值为: 当  $a > 5\%$  时,  $m = 0.5$ ; 当  $3\% \leq a < 5\%$  时,  $m = 0.4$ ; 当  $1\% \leq a < 3\%$  时,  $m = 0.3$ ; 当  $a < 1\%$  时,  $m = 0.2$ , 其中  $a$  是坡度百分比 (%).

坡长的计算利用汤国安等<sup>[17]</sup>提出的一种快速近似计算方法, 该算法假定坡面水流方向与山脊线垂直, 计算每个点沿垂直方向到山脊线的水平距离作为该点坡长的近似值.

4) 植被覆盖与管理因子 ( $C$ ): 研究表明在大尺度区域利用 NDVI 计算  $C$  值是最有效、实用的方法. 基于 2000、2010 年最大 NDVI 影像,  $C$  因子计算式为

$$C = \exp \left[ -\alpha \times \frac{I_{NDV}}{\beta - I_{NDV}} \right], \quad (5)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$  是定义 NDVI- $C$  曲线形状的参数, 根据经验,  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 1$ ;  $I_{NDV}$  为归一化植被指数.

5) 水土保持措施因子 ( $P$ ): 参考 Wischmeier 等<sup>[13]</sup> 的确定  $P$  值的方法表, 根据《土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007》<sup>[19]</sup> 中的坡度分级标准, 按表 2 对三峡库区不同地区的  $P$  因子赋值.

表 2 不同地区土地利用类型和坡度  $P$  因子值

土地利用类型	坡度/ $^\circ$	$P$ 因子
耕地	0~5	0.1
	>5~8	0.2
	>8~15	0.4
	>15~25	0.6
	>25~35	0.8
	>35	1.0
森林、草地、灌木林、湿地	All	1.0
水体、人造地表	All	0

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤侵蚀情况分析

3.1.1 土壤侵蚀各因子 ( $R$ ) 图 2-a、b 显示了 2000、2010 年的  $R$  高值集中在三峡库区的中部, 说明三峡库区中部的侵蚀力较高, 重庆市西部和湖北地区的三峡库区侵蚀力相对较低;  $K$  (图 2-c) 在  $0.0228 \sim 0.0784 t \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$  之间;  $L_s$  (图 2-d) 为  $0 \sim 683.55$ , 其中高值占比较多, 说明三峡库区地形地貌复杂, 大量的陡坡长坡加剧了土壤侵蚀程度; 2000 和 2010 年  $C$  分别为  $0 \sim 2.72$  (图 2-e) 和  $0 \sim 1.71$  (图 2-f).

3.1.2 土壤侵蚀强度 ( $A$ ) 和土壤侵蚀量 ( $T$ ) 分析 用 RUSLE 模型计算得到 2000、2010 年的  $A$  (图 3-a、b) 分别为  $35.54$ 、 $25.51 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 2000、2010 年三峡库区的  $T$  分别为  $2.056 \times 10^8$ 、 $1.478 \times 10^8 t$ , 与吴昌广等<sup>[18]</sup> 得到的三峡库区 2007 年  $T$  约 1.8 亿  $t$  相符合. 三峡库区

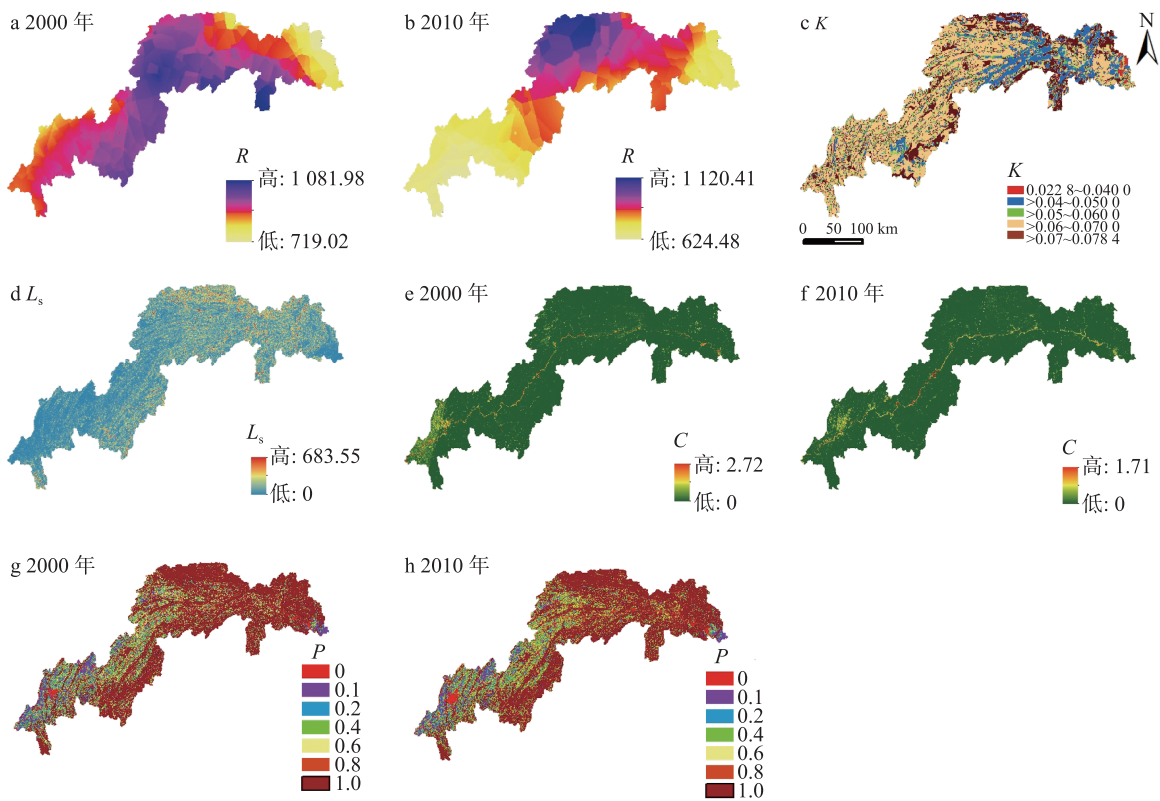


图 2 三峡库区土壤侵蚀因子

2010 与 2000 年相比,  $T$  减少了  $0.578 \times 10^8 \text{ t}$ ,  $A$  减少  $10.13 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。根据中华人民共和国水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[19]</sup> 将土壤侵蚀强度  $A$  划分为微度 ( $0 < A \leq 5$ )、轻度 ( $5 < A \leq 25$ )、中度 ( $25 < A \leq 50$ )、强度 ( $50 < A \leq 80$ )、极强烈 ( $80 < A \leq 150$ ) 和剧烈 ( $A > 150$ ) 6 个等级, 单位为  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。2000、2010 年土壤侵蚀强度面积占比如图 3-c 所示。三峡库区水土流失面积从 2000 年的  $2.63 \times 10^4 \text{ km}^2$  减少到 2010 年的

$1.91 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 而中华人民共和国水利部颁布的中国水土保持公报中的数据, 2000、2011 年三峡库区水土流失面积分别为  $2.96 \times 10^4$ 、 $2.36 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 面积之差约为  $0.40 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 这表明了本文方法计算三峡库区土壤侵蚀的合理性。分析发现 2000 年土壤侵蚀较严重区域主要分布在三峡库区西部、中部; 而 2010 年三峡库区土壤侵蚀较严重区域主要只分布在库区中部, 土壤侵蚀大部分区域改善。

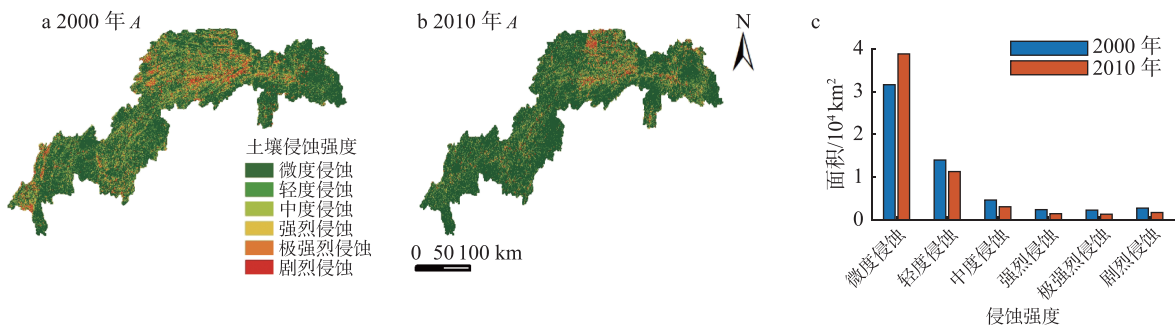


图 3 三峡库区 2000、2010 年  $A$  (a、b) 及不同土壤侵蚀强度等级的像元面积 (c)

**3.1.3 不同坡度上的 2010 年三峡库区土壤侵蚀情况**  
将三峡库区地形坡度分为 6 类 (表 3)。三峡库区以山地为主, 坡度  $>15^\circ$  的土地占总面积的 62.13%。可以看出, 三峡库区  $A$  与坡度存在显著的正相关性, 随着

坡度的增长而明显增长。在坡度  $25 \sim 35^\circ$ 、 $>35 \sim 45^\circ$  和  $>45^\circ$  的地带上,  $T$  比例明显大于其所占面积比例, 是土壤侵蚀相对严重的区域; 而  $>15^\circ$  区域,  $T$  比例达到 86.18%。因此加强坡度  $>15^\circ$  的地带, 尤其是坡度  $>25^\circ$

的地带的水土流失治理非常重要。

表 3 不同坡度的土壤侵蚀情况表

坡度/(°)	面积占比/%	$A/(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	$T$ 占比/%
0~8	16.27	5.79	3.69
>8~15	21.42	12.06	10.13
>15~25	30.07	22.20	26.16
>25~35	20.03	38.35	30.10
>35~45	8.86	56.45	19.60
>45	3.36	78.49	10.33

3.1.4 不同高程上的 2010 年三峡库区土壤侵蚀情况

由表 4 可见, 三峡库区海拔主要集中在 0~1 500 m, 占总面积的 91.69%。三峡库区土壤侵蚀模数与海拔并无直接的线性关系, 而是呈现“高一低一高”的特点。海拔 ≤500 m 及 >1 500 m 的区域土壤侵蚀相对严重,  $T$  比例均大于面积比例, 原因可能是与三峡库区自然格局及人为活动相关。海拔 ≤500 m 区域, 虽然光热资源十分丰富, 但坡耕地被集中开发, 土地利用在 GlobeLand30 上显示以耕地、草地、人造地面为主, 植被覆盖度低、结构单一, 且人口分布密集, 自然植被及生态环境不可避免地会遭到不同程度的破坏, 土壤侵蚀模数达到  $34.73 t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ,  $T$  比例最高, 达到 48.10%。

表 4 不同高程的土壤侵蚀情况表

高程/m	面积比例/%	$A/(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	$T$ 比例/%
≤500	35.34	34.73	48.10
>500~1 000	35.23	15.69	21.66
>1 000~1 500	21.11	19.89	16.46
>1 500	8.31	42.30	13.78

在 >1 500 m 区域, 土壤侵蚀模数较大, 分析得出以下原因: 1) 虽然土地利用以森林为主, 达到 89.58%, 但是温度偏低, 植被较为稀疏。2) 在森林覆盖方面, 根据王鹏程等<sup>[20]</sup>的研究, 三峡库区海拔 400~1 200 m 区域, 马尾松面积最大, 其次为灌木林, 而在海拔 1 200~1 600 m 区域, 以灌木林为主。灌木林水土保持性不如马尾松林, 导致三峡库区高海拔区域平均水土保持模数较低, 而且高海拔区域降雨量比较丰富, 降雨侵蚀力因子最大, 同时坡度也较大(大部分区域坡度 >25°), 因此水土保持较弱。所以应对三峡库区 0~500 和 >1 500 m 区域加强水土流失治理。

3.2 三峡库区植被覆盖变化分析

1) 2000、2010 年的三峡库区植被覆盖度。根据《土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[19]</sup> 中的植被覆盖度分类标

准, 2000 年三峡库区由低到高覆盖度像元面积比例分别为 9%、13%、15%、23%、40%; 而 2010 年面积比例分别为 6%、10%、12%、22%、52%。植被覆盖增长明显。

2) 三峡库区平均植被覆盖度变化。统计 1987—2019 年三峡库区的最大植被覆盖度的平均值, 如图 4 所示, 从 1987 年的 58.94% 增长到 2019 年的 74.37%, 斜率为 0.039 ( $P < 0.05$ ), 呈显著增加趋势。三峡大坝修建与移民安置于 1992 年开始, 至 2009 年年底, 大坝竣工, 分成 1987—1991、1992—2009、2010—2019 年 3 个时间段, 分别对其平均植被覆盖度进行回归拟合(图 4)。拟合直线斜率呈递增趋势, 三峡库区植被覆盖度逐年增多, 且增速加快。

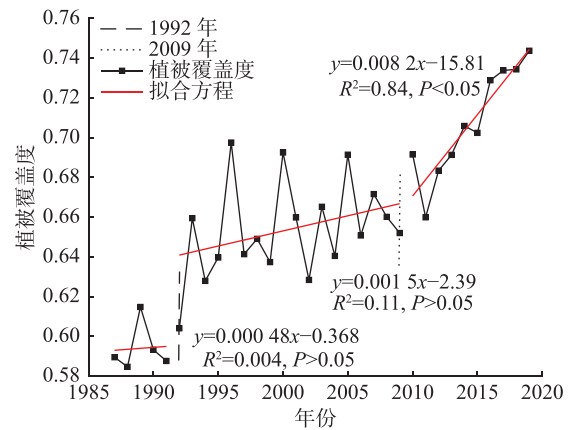


图 4 三峡库区 1987—2019 年平均最大植被覆盖度年际变化

3) 三峡库区植被覆盖度空间上变化趋势。用逐像元一元线性回归方法用来对 1987—2019 年三峡库区每个像元的植被覆盖度进行趋势分析, 得到的每个像元的植被覆盖度变化斜率  $k$  (图 5-a), 表示每个像元的年际变化趋势, 并使用  $F$  检验进行显著性检验。将研究区分为 5 类: 显著降低 ( $k < 0, P \leq 0.05$ )、非显著降低 ( $k < 0, P > 0.05$ )、无变化 ( $k = 0$ )、非显著增加 ( $k > 0, P > 0.05$ )、显著增加 ( $k > 0, P \leq 0.05$ ) (图 5-b)。显著降低区域的面积只占 7.51%, 主要分布在人造地面地区; 而有 39.26% 的区域呈现显著增加的趋势, 主要分布在耕地和森林区域; 无变化的区域主要分布在水体区域; 非显著降低区域和非显著增加区域面积分别占 16.14%、36.06%。若不考虑显著性检验, 三峡库区增加区域面积占 75.35%。

综上, 三峡库区植被覆盖度呈较好的增加趋势。

3.3 三峡库区植被覆盖增加和土壤侵蚀改善的原因分析

1) 植被覆盖度与气候因子的偏相关分析。将三峡库区 1987—2015 年植被覆盖度与中国逐年年降水

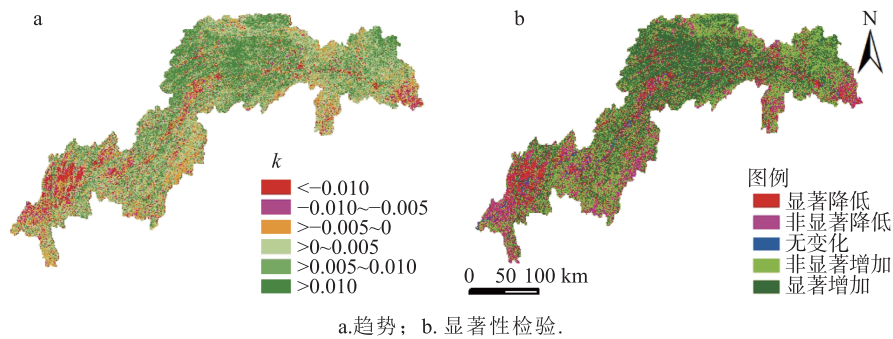


图 5 三峡库区最大植被覆盖度年际变化

量、平均温度空间插值数据集进行偏相关分析(图 6-a、b),根据显著性检验  $P$  值分为显著( $P \leq 0.05$ )、非显著( $P > 0.05$ )。图 6-a 表示植被覆盖度和降水的显著正相关性达到 5.53%,若不考虑显著性的影响,正相关区域面积占 69.71%,覆盖区域面积大于负相关区域面

积。植被覆盖度和温度的偏相关性如图 6-b 所示,植被覆盖度和温度的显著性正相关区域达到 7.92%,若不考虑显著性的影响,1987—2015 年三峡库区正相关区域达到 63.33%。可以看出,三峡库区降水和温度都对植被起着促进作用。

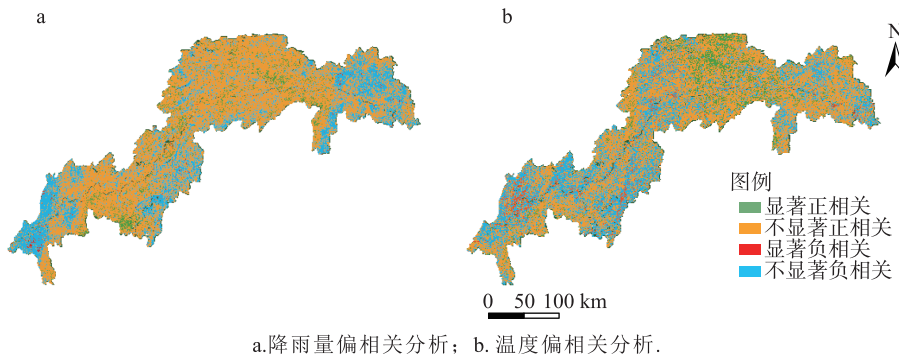


图 6 三峡库区 1987—2015 年 FVC 与降雨量、温度偏相关分析

2) 1987—2015 年三峡库区降水、温度变化。三峡库区 1987—2015 年年平均降水量略微减少,但是在 1250 mm 左右上下波动,总体趋势相对平稳;而年平均气温则为不断上升趋势。在同样雨量条件下,气温(热量)增加,延长了植被生育期,利于植被生长<sup>[21]</sup>。

3) 人类活动对三峡库区的影响。温度及降雨趋势比较平稳,但 1992—2009 年、2010—2019 年植被覆盖度增长斜率分别是 1987—1991 年斜率的 3 倍、16 倍之多(图 4),呈大幅递增趋势。因此,除了气象因素外还必须考虑人类活动的影响,例如 1989 年三峡库区即被国家列入长江上游水土流失重点防治工程,三峡库区移民使居民减少,此外还实施绿化工程、退耕还林等诸多措施。根据对 2000、2010 年 GlobeLand30 数据统计得到的土地利用转移矩阵,三峡库区从 2000—2010 年,虽然人造地面面积增加,灌丛、湿地面积基本不变,耕地面积略微减少,但是草地大幅减少转换为森林,致使森林面积大幅增加,是造成三峡库区植被覆盖度增加、 $T$  减少的主要原因。这也验证了国家政策推动下的植树造林、退耕还林等措施对

三峡库区植被覆盖度增加起了很大的作用。

综上,降雨和植被是影响土壤动态侵蚀变化的两大主要因素<sup>[22]</sup>。植被覆盖度增加,而三峡库区降雨略微减少,人类植树造林等活动,共同使三峡库区土壤侵蚀得到显著改善。

## 4 结语

本文基于 Google Earth Engine 平台,完成 30 m 分辨率的三峡库区 1987—2019 年植被覆盖度长时间序列分析,完成 30 m 土壤侵蚀模数动态变化的研究。如果以传统方法开展 1987—2019 年 30 m 分辨率的三峡库区土壤侵蚀和植被覆盖变化分析将会涉及庞大的工作量,但是结合 GEE 平台则可以快速实现时间和空间上的大尺度的地球科学与环境科学的分析,突破了本地硬件和存储能力的限制,为研究人员提供了方便。主要结论如下:

1) 2000、2010 年三峡库区土壤侵蚀模数  $A$  分别为 35.54、25.51  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,土壤侵蚀量  $T$  分别为  $2.056 \times 10^8$ 、 $1.478 \times 10^8$  t,水土流失显著减少;并且水土流失

面积从2000年的 $2.63 \times 10^4 \text{ km}^2$ 减少到2010年的 $1.91 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。为了减少水土流失,在坡度方面,需要加强对 $>15^\circ$ 尤其是 $>25^\circ$ 坡度带的治理;在高程方面,应对三峡库区0~500 m和 $>1500 \text{ m}$ 区域加强治理。

2) 1987—2019年三峡库区植被覆盖度持续改善,呈现增速加速趋势,植被覆盖增加区域面积占三峡库区面积的75.35%,其中显著增加区域为39.26%。

3) 1987年以来,降雨略微减少,但是在气温升高以及人类植树造林等活动共同作用下,三峡库区植被覆盖度增加,土壤侵蚀减少。

本文重点在数据的获取和分析,没有对土壤侵蚀模型及其在三峡库区的适用性进行分析和验证,研究结论是假设模型准确的前提下得出的,将在后续工作中对三峡库区土壤侵蚀的实际情况和适用模型开展更为细致的研究。

**致谢:** 基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)(2009)数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(http://data.tpdc.ac.cn),特此感谢!

## 5 参考文献

- [1] 刘爱霞,王静,刘正军. 三峡库区土壤侵蚀遥感定量监测: 基于GIS和修正通用土壤流失方程的研究[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 25
- [2] 凌子燕,刘锐. 基于GIS的黄土高原水蚀区土壤侵蚀分析: 以窟野河流域为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 409
- [3] 许小华,雷声,张秀平. 三峡库区土壤侵蚀定量遥感监测[J]. 江西水利科技, 2009, 35(4): 253
- [4] LINDQUIST E J, HANSEN M C, ROY D P, et al. The suitability of decadal image data sets for mapping tropical forest cover change in the Democratic Republic of Congo: implications for the global land survey[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(24): 7269
- [5] 裴杰,牛铮,王力,等. 基于google earth engine云平台的植被覆盖度变化长时间序列遥感监测[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4): 608
- [6] 张煜星,严恩萍,夏朝宗,等. 基于多期遥感的三峡库区森林景观破碎化演变研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(7): 1
- [7] 陈军,陈晋,廖安平,等. 全球30 m地表覆盖遥感制图的身体技术[J]. 测绘学报, 2014, 43(6): 551
- [8] 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)[M]. Washington D C: US Department of Agriculture, 1997
- [9] GUTMAN G, IGNATOV A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533
- [10] HOLBEN B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417
- [11] 龙鑫,李静,柳钦火. 植被指数合成算法综述[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(6): 969
- [12] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, 26(4): 153
- [13] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning[M]. Washington, D. C.: Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978
- [14] FISCHER G, NACHTERGAELE F, PRIELER S, et al. Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008) [Z]. IIASA, Laxenburg, Austria and FAO. Rome, Italy: 2008
- [15] WILLIAMS J R, RENARD K G, DYKE P T. EPIC: a new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1983, 38(5): 381
- [16] 张科利,彭文英,杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7
- [17] 汤国安,陈正江,赵牡丹,等. ArcView地理信息系统空间分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [18] 吴昌广,吕华丽,周志翔,等. 三峡库区土壤侵蚀空间分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(3): 15
- [19] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007
- [20] 王鹏程,姚婧,肖文发,等. 三峡库区森林植被分布的地形分异特征[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(6): 528
- [21] 甘春英,王兮之,李保生,等. 连江流域近18年来植被覆盖度变化分析[J]. 地理科学, 2011, 31(08): 1019
- [22] 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

## Analysis of soil erosion and fractional vegetation cover change in the Three Gorges Reservoir Area

YANG Kaixiang LIU Qiang<sup>†</sup> LI Xiuhong LU Yanrong LIU Lu SONG Zhenwei

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, College of Global Change and Earth System Science,  
Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

**Abstract** Based on the Google Earth Engine (GEE) platform, the annual maximum NDVI images of the Three Gorges Reservoir Area were synthesized at 30 m resolution using Landsat data from 1987 to 2019, and the annual maximum fractional vegetation cover (FVC) of the Three Gorges Reservoir Area was calculated based on the image dichotomy method to analyze the spatial and temporal dynamics of FVC. Based on the GEE platform, the revised universal soil loss equation (RUSLE) was used to estimate the soil erosion ( $T$ ) in the Three Gorges Reservoir Area in 2000 and 2010. The results showed that (1) the FVC in the Three Gorges Reservoir Area continued to improve from 1987 to 2019, and the area of the FVC increase area accounted for 75.35%, including a significantly increased area of 39.26%. (2) The soil erosion modulus ( $A$ ) in the Three Gorges Reservoir Area was  $25.51 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  in 2010, a decrease of 28.22% compared with 2000, and the intensity of soil erosion decreased significantly; the erosion area was  $1.91 \times 10^4 \text{ km}^2$  in 2010, a decrease of 27.38% compared with 2000. Soil erosion in the area with slope  $>15^\circ$  exceeds 86% of the soil erosion in the whole area, soil erosion in the area with slope  $>25^\circ$  exceeds 60% of the soil erosion in the whole area, soil erosion in the area with elevation 0-500 m exceeds 48% of the soil erosion in the whole area, and soil erosion in the area  $<1500 \text{ m}$  is close to 70% of the soil erosion in the whole area, which is the key area for erosion control in the Three Gorges Reservoir Area. It is the key management area of soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area. (3) From 1987 to 2015, rainfall slightly decreased and temperature increased, especially with the combined effect of human activities such as afforestation, which increased FVC and reduced soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area.

**Keywords** Google Earth Engine; Landsat; soil erosion; RUSLE; fractional vegetation cover

【责任编辑: 刘先勤】