三峡库区蓄水运行前后水土流失时空变化模拟及分析*

徐昔保, 杨桂山**, 李恒鹏, 苏伟忠

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 利用三峡库区水土流失预测模型和 250m 的 MODIS-NDVI 数据, 模拟三峡库区蓄水运行前后水土流失时空变化, 结果表明: 三峡库区 2000–2008 年水土流失波动较大, 总体上水土流失面积、总量和强度都呈减弱趋势, 2006–2008 年年均水土流失总量和面积分别比 2000–2002 年减少 4.10×10^6 t 和 1129.6 km²; 强度、极强度和剧烈等级水土流失主要分布在秭归、巫山、巫溪、石柱和武隆等坡度 15° 以上的林地和耕地, 水土流失减弱主要集中分布在奉节、云阳、万州和忠县等坡度 10° 以上的耕地和林地; 库区水土流失时空变化主要受降水强度与分布、移民与蓄水运行和生态工程实施影响。库区水土流失总体虽然呈好转趋势, 但库区水土保持与治理工作还需进一步加强, 尤其是对库首秭归、兴山和巴东及库中武隆等区域, 需严禁坡耕地退耕还林反弹。

关键词: 三峡库区; 蓄水运行; 水土流失; 时空变化; 模拟

Simulation on the spatial-temporal changes of soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area between the pre- and post-storage periods

XU Xibao, YANG Guishan, LI Hengpeng & SU Weizhong

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

Abstract: Spatial and temporal changes of soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area (TGRA) between the pre- and post-storage periods were simulated with the soil erosion model using 250m MODIS-NDVI remote sensing data. The results showed that: Total amount, area and intensity of soil erosion were all generally at the reducing trends during 2000–2008 with great fluctuations. The average annual total amount and area of soil erosion decreased by 4.10×10^6 t and 1129.6 km² from 2000–2002 to 2006–2008, respectively. The high, very-high and severe types of soil erosion mainly centralized at the forest and cropland above 15° in Zigui, Wushan, Wuxi, Shizhu and Wulong, and soil erosion intensity with lower levels from 2000–2002 to 2006–2008 mainly centralized at the cropland and forest above 10° in Fengjie, Yunyang, Wanzhou and Zhongxian. Spatial and temporal changes of soil erosion in the TGRA were mainly influenced by rainfall intensity and distribution, the resettlement and the operation of the Three Gorges Project, and the implementation of a series of ecological projects. Although the soil erosion in the TGRA was reduced, the management of soil and water conservation in the TGRA need to be further strengthened, especially in the area of Zigui, Xingshan, Badong and Wulong.

Keywords: Three Gorges Reservoir Area; storage period; soil erosion; spatial-temporal variation; simulation

三峡工程是举世瞩目的特大型水利工程, 1993 年动工, 2003 年 135m 一期蓄水运行, 2006 年 156m 二期蓄水运行, 2008 年试验性蓄水 172.8m, 2009 年 9 月正式竣工。目前, 三峡工程在发电、航运和防洪方面正发挥着巨大作用, 而三峡库区不可避免面临着一系列生态环境问题, 如耕地淹没、水土流失、水环境恶化及生态退化等。其中水土流失问题是三峡工程生态环境影响备受关注 and 争议的问题之一, 既对三峡工程的长期安全运行和长江中下游的防洪与生态安全具有特殊的战略意义, 也是影响库区生态安全的关键因子和亟待

* 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX1-YW-08-01)、国家自然科学基金项目 (40871238) 和中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-07) 联合资助。2010-07-08 收稿; 2010-08-27 收修改稿。徐昔保, 男, 1978 年生, 博士; E-mail: xbxu@niglas.ac.cn.

** 通讯作者; E-mail: gsyang@niglas.ac.cn.

解决的生态环境问题之一. 截至 2008 年底, 三峡工程四期移民工作基本全部完成, 累计搬迁安置移民 126 万多人, 外迁安置农村移民 20 余万, 淹没耕地约 170 km², 库区 11 个县(区)完成搬迁重建, 导致库区土地利用发生显著变化. 另外, 水库蓄水运行初期诱发库区地质灾害频发, 如 2003 年 135m 一期蓄水运行, 库区共发生 4719 次崩塌与滑坡和 541 次地震, 分别比 2002 年(4299 次和 61 次)增长了 9.7% 和 786.9%. 因此, 三峡工程建设与蓄水运行可能加剧库区水土流失的风险, 研究库区蓄水运行前后水土流失时空变化有助于客观评价三峡工程及其相关生态工程实施的效应.

从 1980s 三峡工程论证前期研究开始, 相关部门和学者对库区水土流失的成因、类型、组成物质、时空分布、产沙规律、移民对其影响及治理措施等进行了系统研究^[1], 《长江三峡水利枢纽环境影响报告书》明确指出库区移民就地后靠安置可能造成一定范围和有限时间内的水土流失^[2-3]. 目前, 针对库区水土流失问题的认识或研究结论仍存在较大分歧: 傅秀堂等^[4]和中国工程院^①认为由于库区尖锐的人地矛盾促使土地利用强度不断加大, 新垦坡耕地持续出现, 25°以上坡耕地退耕还林还草不断反弹, 耕地复种指数不断上升, 将进一步加剧库区水土流失; 黄真理等^[5]通过分析 1992–2002 年库区土地利用/覆被变化认为库区水土流失总体上基本保持不变, 仍保持较高的水土侵蚀作用; 李月臣等^[6]利用 TM 解译的 1999 和 2004 年水土流失数据分析三峡库区重庆段水土流失时空格局特征, 认为重庆库区水土流失等级强度和程度都呈明显下降趋势, 三峡工程蓄水运行后库区水土流失总体呈好转趋势. 上述研究结论差异主要由采用的研究手段或基础数据的差异以及缺乏库区全面有效的监测体系导致.

土壤侵蚀模型是监测水土流失、指导水土保持措施配置、优化水土资源利用的有效工具. 根据建模手段与方法, 一般可分为经验统计模型(如 USLE 方程)和物理过程模型(如 WEPP、EU-ROSEM、LISEM 和 GUESTS). 杨艳生等参考通用土壤流失 USLE 方程形式, 结合在三峡库区开展的大量野外调查和监测, 定制了三峡库区水土流失经验统计模型^[1,7-8]. 该模型具有结构简单、高精度和易操作性等特点, 适用于三峡库区低山中区大中比例尺度区域水土流失预测与评价. 另外, Shen 等^[9]在库区张家冲小流域验证了 SWAT 和 WEPP 模型的适用性及其精度差异, 表明在三峡库区小流域水土流失模拟中 WEPP 比 SWAT 精度更高.

上述大量研究为三峡库区水土流失及治理研究奠定了基础, 但大多以定性或半定量研究和局部试验为主, 缺乏连续长时间序列库区水土流失时空变化监测与定量分析, 缺乏三峡工程蓄水运行对库区水土流失时空变化影响的客观评价, 也是导致针对库区水土流失问题仍存在较大分歧的主要原因之一. 鉴于此, 本研究利用月值 MODIS-NDVI 数据, 适当改进杨艳生等的三峡库区水土流失模型, 在中观尺度上模拟库区蓄水运行前后(2000–2008 年)水土流失的时空变化, 为“后三峡时代”生态环境影响评估提供科学依据.

1 研究方法 with 数据

1.1 三峡库区水土流失模型

杨艳生等参考通用土壤流失 USLE 方程形式, 利用开县小江流域内 13 个大小不等的山塘和水库的淤积监测数据和大量的野外调查, 以开县作为库区水土流失模型导出的基准条件, 建立了三峡库区水土流失经验统计模型^[1,7-8]:

$$A = gh(152.5D - 1016.4)RL_sC^{-2.3} \quad (1)$$

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \times \lg \frac{P_i}{P} - 0.8188)} \quad (2)$$

$$L_s = (3.28\lambda)^{0.5} \times [0.0076 + 0.006S + 0.00076(1.11S)^2] \quad (3)$$

式中: A 为预测的水土流失量(t/(km²·a)), D 为土壤粉砂或极细砂(0.002–0.10mm)含量百分比, R 为魏斯曼经验公式计算的降雨因子, L_s 为地形因子, C 为植被覆盖度; g 和 h 分别为土壤有机质含量和不同坡耕地条件下的校正系数.

1980s 由于缺乏高时空分辨率的遥感数据, 模型中对植被覆盖度通过实地调查和 Landsat MSS 影像计算获取. 因三峡库区降水时空分布极不均匀及地理环境复杂, Landsat 影像不能有效反映不同月份之间的

① 中国工程院. 三峡库区及其上游水污染防治战略咨询研究报告. 2008.

植被覆盖度差异. 因此本研究利用 250m 的 MODIS-NDVI 数据, 引入像元二分模型计算其植被覆盖度^[10-11]. 同时, 本研究引入校正系数 α 以校正模型应用的空间尺度外推, 利用式(1) 模拟 2004 年重庆库区各县水土流失与《2005 年重庆市水土流失公告》^①中对应区县水土流失量(TM 解译) 进行线性拟合获取($\alpha = 3.96, R = 0.85$). 因此通过对三峡库区水土流失模型进行上述适当改进后, 使其成为基于高时空分辨率 MODIS 数据的、可模拟库区连续长时间序列月值水土流失时空动态变化的三峡库区水土流失模型:

$$A = 3.96gh(152.5D - 1016.4)RL_sC^{-2.3} \quad (4)$$

1.2 数据来源与处理

研究数据主要包括 USGS 共享提供的 MODIS-NDVI 数据(2000 - 2008 年), 时间和空间分辨率分别为 16d 和 250m, NDVI 月值数据通过最大值合成法(MVC)获取; 国家气象局共享提供了 2000 - 2008 年三峡库区及邻近区域内 30 个站点的降水月值数据, 中国科学院地球系统科学数据共享网提供了 1:100000TM 影像解译 2000 年土地利用数据和 1:250000 的 2005 年土地利用数据, 中国科学院南京土壤研究所共享提供了 1:250000 土壤数据和 1:250000 库区 DEM 等. 因土地利用变化是个连续的过程, 限于数据获取的局限性, 假设蓄水前(2000 - 2002 年)库区水土流失变化主要基于 2000 年土地利用数据, 蓄水后(2003 - 2008 年)水土流失变化主要基于 2005 年土地利用数据. 月值降水数据采用反距离权重插值法(DW)进行插值获取, 所有数据均统一转换成 250m × 250m 的 Albers 等积投影的二进制格式.

2 结果与分析

2.1 水土流失时空变化

2.1.1 水土流失总量 三峡库区蓄水运行前后水土流失变化存在较大的波动(图 1). 降水强度是影响库区水土流失的重要因素. 降水强度因具有极强的时空分布异质性, 不同年份之间很难进行有效比较, 为了快速有效比较蓄水前后库区水土流失变化, 假设降水量相似的年份具有相似的降水强度, 即选择 2000 与 2008 年、2001 与 2006 年、2002 和 2007 年进行两两比较. 2008 年库区水土流

图 1 三峡库区 2000 - 2008 年水土流失总量和年降水量变化趋势

Fig. 1 Changes of soil erosion and annual precipitation during 2000 - 2008 in Three Gorges Reservoir Area

失总量比 2000 年增长了 15.74×10^6 t, 而 2006 年和 2007 年分别比 2001 年和 2002 年减少了 18.41×10^6 t 和 9.64×10^6 t(图 1). 二期蓄水期间(2006 - 2008 年)年均水土流失总量比蓄水前(2000 - 2002 年)减少 4.10×10^6 t, 约 4.1%. 库区 2003 年水土流失异常偏高, 达 3.67×10^8 t, 为 2002 年水土流失总量的 3.0 倍, 一方面受移民就地安置开发坡耕地影响, 另一方面主要受三峡工程一期 135m 蓄水运行引起的地质灾害影响, 2003 年共发生 4719 次崩塌与滑坡和 541 次地震, 分别比 2002 年增加了 9.7% 和 786.9%, 降低了相应局部区域的植被覆盖度或甚至使其裸露, 进而导致库区水土流失增强异常显著. 库区水土流失极小值出现在 2006 年, 达 0.55×10^8 t, 仅占二期蓄水期间平均值的 58.8%, 主要受异常干旱气候影响, 年降水量(868.8mm) 仅占正常年份均值(1189.2mm) 的 73.1%. 因此, 三峡库区水土流失总量变化总体上呈减少趋势, 一期蓄水运行期间水土流失异常较为显著.

2.1.2 水土流失面积与强度 库区 2008 年和 2006 年水土流失总面积分别比 2000 年和 2001 年减少了 1463.6 km^2 (2.5%) 和 4939.3 km^2 (8.5%). 2007 年水土流失总量虽然比 2002 年降低了 9.64×10^6 t, 但水土流失总面积却比 2002 年增加了 1044.5 km^2 (1.9%), 其中中度、强度和极强度水土流失面积分别增加了 1187.6 、 344.0 、 25.5 km^2 , 而轻度和剧烈水土流失面积分别减少了 356.8 km^2 和 155.8 km^2 . 2003 年水土流失

① 重庆市水土保持生态环境监测总站. 2005 年重庆水土流失公告.

总量尽管比 2002 年增加了 2 倍,但水土流失总面积仅比 2002 年增长 2634.8km² (4.6%),其中中度、强度、极强度和剧烈水土流失面积分别增加了 1684.5、1127.9、951.3、1159.3km² (表 1),其水土流失异常主要受移民就地后靠开发坡耕地和地质灾害影响。

表 1 三峡库区 2000 - 2008 年水土流失面积变化
Tab. 1 Area changes of soil erosion during 2000 - 2008 in Three Gorges Reservoir Area

年份	无明显水土流失		水土流失面积						
	面积 (km ²)	占总面 积比(%)	轻度 (km ²)	中度 (km ²)	强度 (km ²)	极强度 (km ²)	剧烈 (km ²)	水土流失 面积(km ²)	占总面 积比(%)
2000	23954.4	41.4	26661.6	5911.3	1008.4	245.4	53.9	33880.6	58.6
2001	28970.7	50.1	24770.0	3495.4	472.6	100.9	25.4	28864.3	49.9
2002	22953.8	39.7	27525.3	5696.8	1075.3	364.8	219.1	34881.3	60.3
2003	20287.0	35.1	25237.1	7381.3	2203.3	1316.1	1378.3	37516.0	64.9
2004	25507.1	44.1	26881.9	4572.3	641.8	152.3	47.6	32295.9	55.9
2005	24350.3	42.1	25849.4	5272.3	1184.6	577.4	569.2	33452.8	57.9
2006	33877.9	58.6	22281.5	1348.6	153.8	66.9	74.3	23925.1	41.4
2007	21877.3	37.8	27168.5	6884.4	1419.3	390.3	63.3	35925.8	62.2
2008	25386.0	43.9	25719.3	5276.0	1119.7	256.3	45.8	32417.0	56.1

2006 - 2008 年平均水土流失总面积比 2000 - 2002 年减少了 1129.6km²,轻度、中度、强度、极强度和剧烈水土流失面积都呈下降趋势,分别减少了 325.1km²、594.2km²、111.6km²、67.1km² 和 31.7km² (表 1). 水土流失类型变化主要表现为轻度向微度,中度向轻度,强度向中度和轻度,极强度向强度、中度和轻度以及剧烈向中度和轻度转化. 因此库区水土流失面积和强度总体都呈下降趋势,库区水土流失总体呈好转趋势,主要受一系列生态工程实施影响,如“长治”工程、“天保”工程和退耕还林工程等。

2.1.3 水土流失空间分布变化 库区水土流失以轻度和中度为主,强度、极强度和剧烈水土流失主要分布在秭归、巫山、巫溪、石柱和武隆. 二期蓄水期间较蓄水前总体呈减弱趋势,水土流失等级减弱区域主要集中在库中的奉节、云阳、万州和忠县,而库首的秭归、兴山和巴东及库中的石柱、涪陵和武隆的部分区域呈加剧趋势. 一期蓄水期间较蓄水前呈显著增强趋势,其中强度、极强度和剧烈水土流失主要集中在巫山、巫溪、奉节、云阳、开县、石柱和武隆,尤以武隆最为显著. 另外,强度、极强度和剧烈水土流失主要集中在坡度 15°以上区域,累计分别占 95.6%、92.2% 和 76.4%;水土流失等级减弱主要集中在坡度 10°以上区域,累计占 63.0% (图 2). 同时,强度、极强度和剧烈水土流失主要分布于林地,分别占 60.7%、60.0% 和 55.6%,其次为耕地,分别占 23.4%、24.2% 和 22.1%. 水土流失等级减弱主要分布于耕地和林地,分别占 42.2% 和 40.1%;而水土流失等级增强主要分布于林地,占 47.7%,其次为耕地,占 36.9%. 因此,库区水土流失主要集中在秭归、巫山、巫溪、石柱和武隆等坡度 15°以上的林地和耕地,水土流失减弱主要集中在奉节、云阳、万州和忠县等坡度 10°以上的耕地和林地(图 2)。

2.2 水土流失变化成因

2.2.1 降水强度与分布是影响库区水土流失时空变化的重要因素 三峡库区年均降水量为 1189.2mm,但季节分配不均,5 - 9 月降雨量占全年降水量的 60% - 80%,且暴雨集中、历时短、强度大. 李月臣等^[6]研究表明库区水土流失强度与降水侵蚀力具有较好的对应关系. 库区 2001 和 2006 年水土流失明显偏低,主要受这两年降水偏少影响,其年降水量分别为 882.4、868.8mm,分别只占库区正常年份年均降水量的 74.2% 和 73.1%. 因此,降水强度与分布是影响库区水土流失时空变化的重要因素。

2.2.2 三峡移民与蓄水运行是导致库区局部区域水土流失加剧的主要因素 三峡工程建设导致库区约 126 万移民,其中就地后靠安置农村移民 46.85 万,导致库区开发大量坡耕地、土地利用强度和复种指数明显提高,进而加剧相应局部区域的水土流失. 另外,三峡库区环境地质条件较为脆弱,是我国山地灾害的多发区之一,表现为中小地震频发,沿江两岸滑坡、崩塌、泥石流广为分布,活动频繁等^[1,12]. 三峡工程蓄水运行初期,诱发地震、滑坡、泥石流和崩塌等地质灾害加剧频发,库区微震活动频度比蓄水前明显增加,从 2002 年

图2 三峡库区水土流失时空变化
(蓄水前(2000-2002年)水土流失空间分布(a);一期蓄水(2003-2005年)水土流失空间分布(b);
二期蓄水(2006-2008年)水土流失空间分布(c);二期蓄水与蓄水前水土流失等级空间变化(d);
2000年土地利用(e);坡度空间分布(f))

Fig.2 Spatial and temporal changes of soil erosion in Three Gorges Reservoir Area

的61次增长到2008年的2121次,但仍维持低强度、高频次的地震活动特征,没有突破正常态势。同时,高频率的地震活动又极易诱发滑坡、泥石流等次生地质灾害,降低相应局部区域的植被覆盖度或甚至使其裸露,进而导致局部区域水土流失增强异常显著。如2003年三峡工程135m一期蓄水运行,库区共发生4719次崩塌与滑坡和541次地震,分别比2002年增加了9.7%和786.9%,导致库区2003年水土流失总量为2002年的3倍。因此,三峡移民和蓄水运行是导致库区局部区域水土流失加剧的主要因素。

2.2.3 生态工程实施是促进库区水土流失总体呈好转趋势的关键因素 从1988年开始,国务院把三峡库区作为重点治理区域分别启动了长江中上游水土保持重点防治工程、退耕还林工程和天然林资源保护等生态工程。通过近20年的生态工程建设,库区生态环境有了明显改善:(1)重庆库区森林覆盖率从1997年的21.9%上升到2008年的34.5%,提高了12.6%^[13];(2)库区年均NDVI植被指数总体呈增长趋势,从2000年的0.627增长到2008年的0.663;(3)库区2000-2008年退耕还林1019.8km²;(4)库区水土流失总量和面积从1980s到2007年末分别减少了27%和28%。虽然移民就地后靠与三峡工程蓄水运行加剧了局部区域的水土流失,而一系列生态工程的有效实施,不仅有效弥补了移民与蓄水运行对库区水土流失的负面影响,整体上还促使库区水土流失呈好转趋势,对改善库区水土流失起着关键作用。

3 讨论

该模型充分考虑了土壤可蚀性因子、降雨侵蚀因子、坡度、植被覆盖度及坡耕地校正系数,获取每个月的植被覆盖度和降雨可蚀性因子,比基于 Landsat TM 的水土流失遥感调查(仅考虑土地利用类型、坡度和植被覆盖度三个指标)的考虑因子更全面^[14],更适宜于三峡库区降水时空分布极不均匀及复杂的地理环境。但该模型在应用过程中存在几个问题:(1)虽然 MODIS-NDVI 数据具有高时间分辨率,可以较精确的模拟月水土流失的时空变化,但由于 250m 空间分辨率相对较粗,导致模拟的高强度(强度、极强度和剧烈)水土流失的面积明显比 TM 遥感调查结果偏小,模拟结果在一定程度上弱化了库区实际水土流失,但在 250m 空间尺度上,其水土流失时空变化趋势是可以接受的。(2)与基于 Landsat TM 的水土流失遥感调查一样,由于缺乏精细的移民安置后 DEM 数据,坡改梯后旱地的坡度变化在模型中得不到真实的反映,无法真实模拟“长治”工程和移民就地后靠过程中坡改梯工程对减少库区水土流失的积极效应。(3)蓄水前后水土流失变化分析中,假设降水量相似的年份具有相似的降水强度,实际上降水强度时空分布呈现极强的空间分异性,将导致相应分析存在一定的不确定性。(4)本研究模拟仅针对库区渐发性水土流失(包括片蚀和沟蚀),而库区也是突发性侵蚀易发区域(包括崩塌、滑坡和泥石流等),因此库区实际发生的水土流失总量可能远超过模拟值,需引起高度重视。另外,影响库区水土流失变化的因素除了降水、移民与蓄水运行及生态工程外,还有诸如城市化、移民政策及土壤退化等。城市化扩展及道路基础设施修建等将造成局部年份局部区域水土流失;受 1998 年长江流域特大洪水灾害影响,国务院及时调整了三峡水库的移民政策,加强农村移民外地安置,于 2008 年底完成外迁安置约 20 万人,有效地缓解了库区紧张的人地关系,间接地改善了库区水土流失;三峡库区地带性土壤主要有黄壤、黄棕壤和棕壤,植被破坏导致土壤有机质流失导致土壤退化也极易发生水土流失,因本研究时间跨度较短,其影响程度相对有限,但从长期来看也不可忽视。

致谢:感谢中国科学院地球系统科学数据共享网提供 2000 年和 2005 年的土地利用数据;感谢中国科学院南京土壤研究所史学正教授提供库区 1:250000 土壤数据。

4 参考文献

- [1] 杜榕桓,史明德,袁建模等.长江三峡库区水土流失对生态与环境的影响.北京:科学出版社,1994.
- [2] 中国科学院环境评价部和长江水资源保护科学研究所.长江三峡水利枢纽环境影响报告书(简写本).北京:科学出版社,1996.
- [3] 长江水利委员会.三峡工程生态环境影响研究.武汉:湖北科学技术出版社,1997.
- [4] 傅秀堂,尹忠武,李殿球等.水工程移民与环境.人民长江,2005,36(12):7-11.
- [5] 黄真理,吴炳方,敖良桂.三峡工程生态与环境监测系统研究.北京:科学出版社,2006.
- [6] 李月臣,刘春霞,赵纯勇等.三峡库区重庆段水土流失的时空格局特征.地理学报,2008,63(5):502-513.
- [7] 杨艳生.区域性土壤流失预测方程的初步研究.土壤学报,1990,27(1):73-79.
- [8] 杨艳生,史明德.长江三峡土壤侵蚀研究.南京:东南大学出版社,1994.
- [9] Shen ZY, Gong YW, Li YH *et al.* A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Agricultural Water Management*, 2009, 96:1435-1442.
- [10] Leprieux C, Verstraete MM, Pinty B. Evaluation of the performance of various vegetation indices to retrieve vegetation cover from AVHRR data. *Remote Sensing Review*, 1994, 52(10):265-284.
- [11] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8):1533-1543.
- [12] 郭希哲,黄学斌,徐开祥等.三峡工程库区崩滑地质灾害防治.北京:中国水利水电出版社,2007.
- [13] 杨桂山,马超德,常思勇.长江保护与发展报告 2009.武汉:长江出版社,2009.
- [14] 聂勇,范建容,贺秀斌等.水土流失遥感调查中植被信息提取与评价指标讨论.水土保持通报,2007,27(4):10-14.