

海南省松涛水库流域土壤侵蚀及控制方案

曾红娟¹, 杨胜天^{1*}, 王 凌², 郑东海¹,
张翠萍², 王雪蕾¹, 高云飞¹

(1 遥感与地理信息系统研究中心, 环境遥感与数字城市北京市重点实验室,
北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2 海南岛环境科学研究院, 海口 100053)

摘要: 采用 RS 和 GIS 技术, 基于 USLE 方程实现了热带地区海南岛松涛水库流域 2003~2005 年平均土壤侵蚀的定量模拟, 通过情景分析研究了流域土壤侵蚀控制方案。结果表明: 流域内潜在土壤侵蚀量约为 4261 万 t/a, 超过容许土壤流失量的 60 倍; 在植被的保护下, 现有年均土壤侵蚀量约为 51.46 万 t/a, 主要集中在退化的林地、浆纸林和橡胶林; 流域平均土壤侵蚀模数略低于容许土壤流失量, 但空间分布不均, 部分区域侵蚀发育强烈; 如对经济林、园地和耕地采取水土保持措施或恢复林草植被, 能有效控制流域内土壤侵蚀, 分别减少侵蚀量 22.46 万 t 和 14.15 万 t, 减少侵蚀面积 98.48 km² 和 65.90 km²。

关键词: 土壤侵蚀; USLE; 控制方案; 热带; 松涛水库流域

文章编号: 1000-0585(2009)05-1197-11

人类社会的出现引起了土壤侵蚀加速, 其速率远远超过自然侵蚀, 直接导致土地资源退化乃至彻底破坏, 据联合国环境署 (UNEP) 和粮农组织 (FAO) 调查^[1], 全世界因土壤侵蚀每年从耕地流失的土壤约 250 亿 t; 另一方面, 大多数径流的发生伴随着泥沙对化学物质的迁移^[2], 表现为吸附态非点源污染。海南岛地处热带北缘, 发育并保存了我国面积最大的热带雨林, 雨量大、集中、强度大的降雨特征是该区土壤侵蚀的气候成因, 但由于有良好的植被覆盖, 全岛土壤侵蚀轻微, 生态环境质量全国最优。上世纪 80 年代以来, 随着海南投资和开发浪潮的兴起, 以及当地落后的生产方式, 如刀耕火种农业的继续, 海南岛原有的生态环境正在发生变化, 热带雨林遭到破坏, 毁林种胶面积扩大, 天然林面积变化明显^[3], 加上经济基础薄弱, 保护措施力度不够, 引起土壤侵蚀加剧。赵玉国等^[4,5]、余炜敏等^[6]、肖寒等^[7]先后在海南岛采用美国通用土壤流失方程 (USLE), 基于 1:25 万 SOTER 数据库或相应精度数据分别开展了土壤侵蚀研究, 结果表明, 岛内潜在土壤侵蚀量巨大, 其空间分布与中间高、四周低的地形构造一致, 主要发生在陡坡地丘陵。松涛水库是海南岛最主要的水源地之一, 担负着海口、澄迈等西北 5 市 (县) 8.53 万 hm² 农田的灌溉任务, 并为海口、那大、洋浦、老城开发区提供生活饮用水和工业用水。目前松涛水库周围地区已成为海南岛侵蚀比较严重和集中的地区^[4], 面临水源污染、生态环境破坏等一系列问题, 亟需开展生态清洁流域建设^[8]。因此, 研究海南岛水源区松

收稿日期: 2009-02-18; 修订日期: 2009-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40671123)

作者简介: 曾红娟 (1982-), 女, 贵州德江人, 博士研究生。主要研究方向为生态水文遥感。

E-mail: zhj_eve@126.com

* 通讯作者: 杨胜天 (1965-), 男, 贵州贵阳人, 教授, 博士生导师。主要从事遥感和 GIS 应用研究。

E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn

涛水库流域的土壤侵蚀对海南岛经济发展、饮用水安全及生态环境建设具有重要意义。本研究采用 RS 和 GIS 技术，基于 USLE 开展了松涛水库流域的土壤侵蚀的定量模拟和分析，通过情景分析提出流域土壤侵蚀控制方案，为合理利用和管理土地资源、保护松涛水库水环境提供科学依据。

1 研究区概况

松涛水库属于典型的热带水库，位于海南岛最大的河流南渡江上游（图 1），流域总面积 1496km²，位于 109°10′ ~ 109°45′ E，18°56′ ~ 19°30′ N，跨儋州市和白沙县，在白沙县境内面积占流域总流域面积的 73.5%。流域位于黎母岭西北，属于低山丘陵地形，由于构造断裂及褶皱作用，山地高耸而陡峻，沟谷众多而深切，较为破碎，切割程度较周边其他地区高，水文网十分发育。平均年降雨量为 1896.1mm，其中 5~10 月份降雨量占全年 80% 以上，干、湿季节明显；土壤类型主要有砖红壤、赤红壤和黄壤，沿河各地带为冲积沙壤土，土地肥沃。流域内农垦经济比较发达，人为活动加剧，沿河地带多被开发为耕地，种植水稻、甘蔗等农作物；热带雨林生长繁茂，植被覆盖很好，但是天然林盗伐、毁林开荒的现象比较严重，植被受到严重破坏，且一般未采取防护措施。在强暴雨的作用下，土壤侵蚀加剧，土壤中 N、P 等营养物质随径流和泥沙迁移至水体，直接导致水体非点源污染加剧，威胁流域及下游人们的饮水安全。

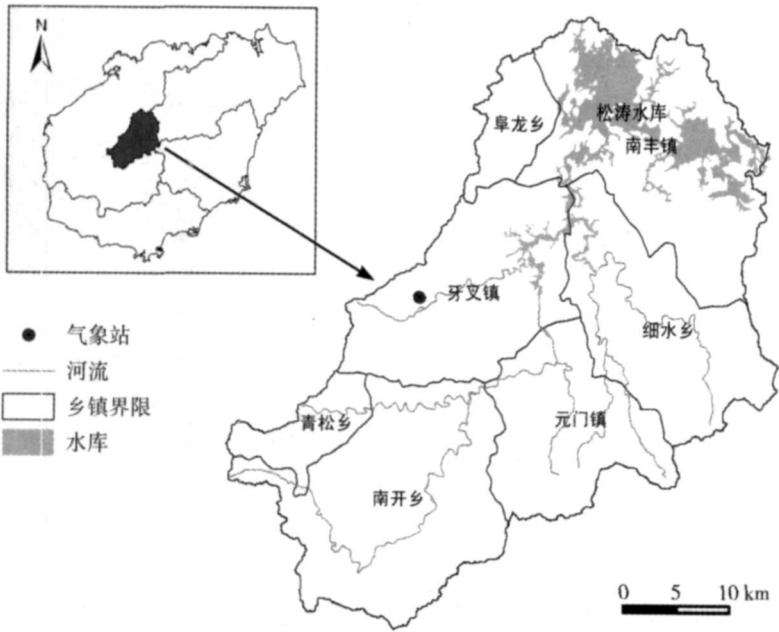


图 1 海南省松涛水库地理位置及流域概况图

Fig 1 Location and basic condition of Songtao Reservoir Basin, Hainan

松涛水库流域是海南岛最重要的水源区，近年来由于开发利用土壤侵蚀有加强的趋势，河流中泥沙含量显著提高，而水质监测数据显示，近年来松涛水库的水质也有下降的趋势。因此，研究流域土壤侵蚀及其控制方案对于保障海南岛水环境安全具有重要意义。

2 材料与方法

2.1 基础数据

基础数据包括松涛水库流域 1: 5 万数字地形数据集, 包括等高线、河道和点高程数据; 2004 年 12 月 TM 多光谱影像, 2005 年 12 月 SPOT-5 全色波段影像, 1: 50 万土壤类型图; 2003~ 2007 年白沙、儋州、琼中的日降雨量数据, 以及实地调查采集的土壤样品等。

2.2 研究技术路线

研究主要包括基础数据预处理、模型开发与土壤侵蚀量估算、土壤侵蚀控制方案研究等几项内容。基础数据预处理包括土地利用、植被盖度、地面坡度与坡长、土壤性质等土壤侵蚀影响因子的提取, 采用遥感影像和 DEM 为基础数据源, 结合野外调查和分析实验, 构建模型计算的空间数据库; 模型开发在 IDL 编程环境下完成, 实现空间数据和模型的对接, 并耦合到生态水文评价系统 (Ecohydrological Assessment Tools, EcoHAT), 基于系统模拟计算流域内土壤侵蚀量; 土壤侵蚀控制方案研究采用情景分析的方法, 根据流域实际情况及相关政策设定不同的情景, 研究不同情景条件下流域土壤侵蚀的控制效果, 提出最佳控制方案。研究技术路线如图 2 所示。

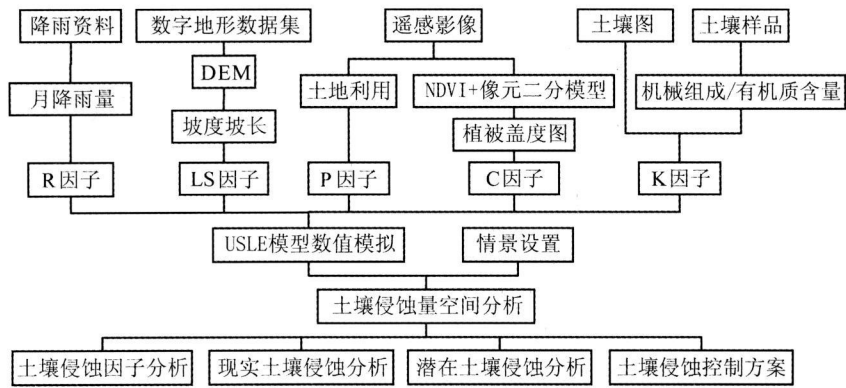


图 2 松涛水库流域土壤侵蚀分析及控制方案研究技术路线图

Fig 2 Sketch map of soil erosion analysis and control scheme research in Songtao Reservoir Basin

2.3 基础数据预处理

(1) 土地利用图: 由于松涛水库流域内地块较为破碎, 需采用较高分辨率的遥感影像, 因此在经过几何校正、大气纠正等影像预处理之后, 采用 HIS 变换法将 TM 多光谱影像和 SPOT 全色波段影像进行融合, 获得遥感数据的光谱特征和高分辨率, 提高信息提取的准确性。结合实地调查建立融合影像的土地利用遥感解译标志, 利用 ArcGIS 软件, 采用人机交互式目视判读的方式, 提取 2005 年松涛水库流域的土地利用图 (图 3-a), 土地利用类型分为林地、草地、耕地、园地、水域、居民点、未利用地七类, 其中耕地分为旱地和水田, 园地分为浆纸林、橡胶林和其他园地。影像分类结果验证结合实地调查获取的 306 个采样点数据进行 (表 1)。遥感影像分类精度采用 Kappa 系数进行评价: 结果表明: 本研究中土地利用遥感解译的总分类精度为 81.70%, Kappa 系数为 0.78, 分类效果较好, 能满足本研究需要。统计得, 松涛水库流域以林地、浆纸林、橡胶林为主, 分别占流域总面积的 40.00%, 18.54% 和 19.30%, 水田占 7.29%, 水域占 7.21%。

表 1 土地利用遥感解译结果与实地类型对比表

Tab 1 Comparison land-use types of remote sensing interpreting results and field survey

| 实地类型 解译类型 | 林地 | 草地 | 浆纸林 | 园地 | 橡胶林 | 旱地 | 水田 | 水域 | 居民点 | 未利用地 | 小计 |
|--------------|----|----|-----|----|-----|----|----|----|-----|------|-----|
| 林地 | 37 | 1 | | 5 | 4 | | | | | | 47 |
| 草地 | | 9 | | 1 | | | | | | 1 | 11 |
| 浆纸林 | 1 | | 13 | 2 | 1 | | | | | | 17 |
| 园地 | | | | 29 | | | 1 | | | | 30 |
| 橡胶林 | 3 | | | 3 | 73 | 2 | | | 1 | | 82 |
| 旱地 | | 1 | 4 | | 4 | 13 | 5 | | | | 27 |
| 水田 | | | | 4 | | 6 | 55 | 2 | 3 | | 70 |
| 水域 | | | | | | | | 8 | | | 8 |
| 居民点 | | | | 1 | | | | | 12 | | 13 |
| 未利用地 | | | | | | | | | | 1 | 1 |
| 小计 | 41 | 11 | 17 | 45 | 82 | 21 | 61 | 10 | 16 | 2 | 306 |

(2) 植被盖度图: 基于 TM 影像的红波段和近红外波段提取归一化植被指数 $NDVI$, 采用像元二分模型 $f = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s}$, 提取流域植被盖度图, 式中, $NDVI_v$ 和 $NDVI_s$ 分别为纯植被和纯裸土的 $NDVI$ 值, 结合土地利用图和土壤类型图确定。分别选取各种土地利用类型 99.5% 的置信区间作为该类型的 $NDVI_v$, 选取各种土壤类型 0.05% 的置信区间作为 $NDVI_s$, 获取流域 $NDVI_v$ 、 $NDVI_s$ 分布图, 计算流域植被覆盖度图 (图 3b)。由图可以看出, 流域内植被总体生长情况较好, 对比图 3-a 可知, 植被覆盖度较低的地区主要是水域、居民点, 水田、部分区域的林地植被盖度也较小。统计得, 流域植被盖度大于 75% 的占流域总面积的 62.53%, 低于 30% 的仅 8.32%。

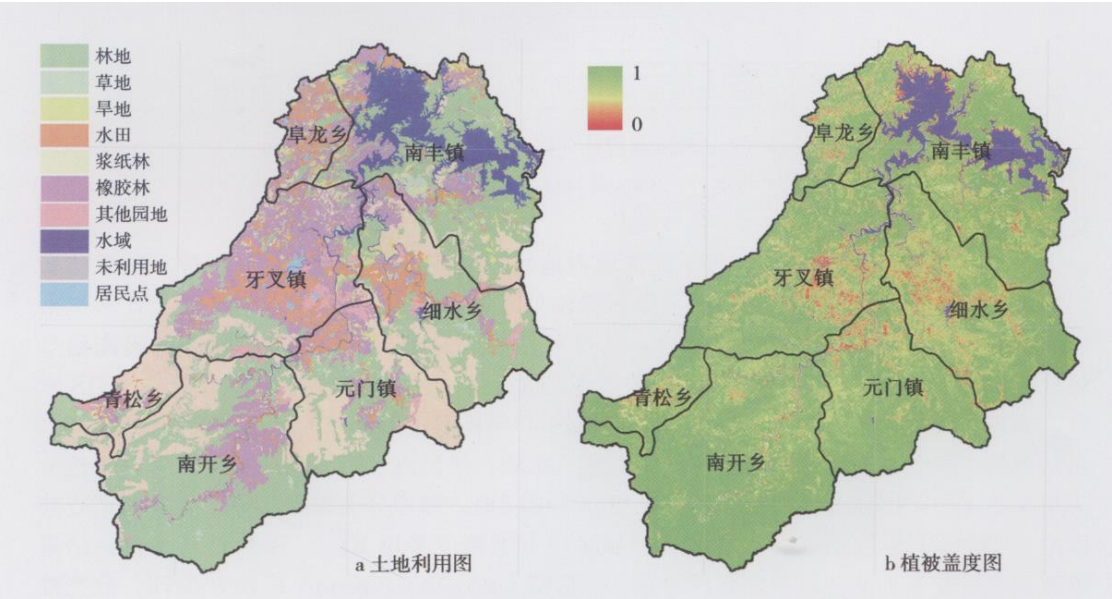


图 3 松涛水库流域土地利用和植被覆盖度图

Fig 3 Map of land use and vegetation cover in the Songtao Reservoir Basin

(3) 坡度坡长图：采用松涛水库流域的等高线、河道和点高程的数字地形数据集，在 ArcInfo 环境的支持下，采用 ANUDEM 算法提取数字高程模型 (DEM)，并提取坡长图和坡度图。统计得，流域内地面坡度范围为 0~ 83.73°，其中，坡度小于 3°的占总面积的 11.52%，3°~ 25°的占 59.80%，大于 25°的占 28.67%，仅 0.05% 的大于 60°；坡长范围为 0~ 2168m，其中，坡长小于 100m 的占流域总面积的 80.67%，100~ 300m 的占 16.94%，大于 300m 的仅占 2.43%，仅 0.05% 的大于 935m。

(4) 土壤样品分析：砖红壤占流域总面积的 53.84%，山地赤红壤占 26.61%，山地黄壤占 13.89%，水域占 5.65%。土壤样品的机械组成测定采用甲种比重计法，有机质含量测定采用重铬酸钾容量法。

2.4 土壤侵蚀模型

国内外对于土壤水蚀预报模型已有相当的研究^[9,10]，本文采用美国通用土壤流失方程 USLE^[11] 进行松涛水库流域土壤侵蚀空间分布的数值模拟，它是目前最普遍的土壤侵蚀模数估算式：

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \tag{1}$$

式中，A 为单位面积上时间和空间平均的土壤流失量，t/ha·a；R 为降雨-径流侵蚀力因子，MJ·mm/(ha·h·a)；K 为土壤可蚀性因子，t·ha·h/(ha·MJ·mm)；LS 为地形因子；C 为覆盖-管理因子；P 为水土保持措施因子。

(1) 降雨侵蚀力因子

降雨侵蚀力因子是评价降雨引起土壤侵蚀潜在能力的一个动力指标，是定量预报土壤流失的重要因子^[12]。本文采用周伏建等^[13]提出的福建省降雨侵蚀力因子的简便算法，其比较适合南方热带亚热带气候区，考虑了月降雨量：

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-2.6398 + 0.3046P_i) \tag{2}$$

式中，R 为年降雨侵蚀力指标 (J·cm/(m²·a))；P_i 为月降雨量 (mm)。

(2) 土壤可蚀性因子

土壤可蚀性因子是土壤潜在侵蚀性的量度，是反映土壤容易遭受侵蚀程度的一个参数，受土壤物理性质的影响。采用 1995 年 Williams 等^[14]在 EPIC 模型中发展的 K 因子的估算方法，其考虑了土壤的机械组成和土壤有机质含量：

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 S_d \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \left[\frac{S_i}{C_i + S_i} \right]^{0.3} \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \left[1 - \frac{0.7(1 - S_d/100)}{(1 - S_d/100) + \exp(-5.51 + 22.9(1 - S_d/100))} \right] \tag{3}$$

式中，K 为土壤可蚀性因子 (100F·T·in/(acre·h))；S_d 为砂粒含量 (%)；S_i 为粉粒含量 (%)；C_i 为粘粒含量 (%)；C 为有机碳含量 (%)。

(3) 地形因子

地形因子反映了地形地貌特征对土壤侵蚀的影响，包括坡度和坡长的影响。采用黄炎和等^[15]在东南地区建立的地形因子计算公式：

$$LS = 0.08 \lambda^{0.35} \alpha^{0.66} \tag{4}$$

式中，λ 为坡长 (m)；α 为坡度 (°)。

(4) 覆盖-管理因子

覆盖-管理因子反映的是有关覆盖和管理变量对土壤侵蚀的综合作用。大量的研究证明,在所有的土壤侵蚀因子中,地表覆盖状况对侵蚀量的影响最大。采用蔡崇法等^[16]建立的 C 因子计算公式:

$$C = \begin{cases} 1 & C = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg c & 0 < c \leq 78.3\% \\ 0 & c > 78.3\% \end{cases} \quad (5)$$

式中, C 为覆盖-管理因子, c 为植物覆盖度 (%)。

(5) 水土保持措施因子

水土保持措施因子是采用措施后的土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值,通常的土壤侵蚀控制措施包括等高耕作、梯田等。参照美国农业部手册 703 号^[17]和土地利用图,结合实地调查数据率定 P 值。

3 计算结果与分析

3.1 土壤侵蚀因子分析

(1) R 因子: 2003~2007 年白沙、儋州、琼中的平均年降雨量分别为 1755mm、1516mm、1977mm,降雨集中、多暴雨是流域内降水的显著特征。经计算,2003~2007 年白沙、儋州、琼中站的年均降雨侵蚀力分别为 $506.34 \text{ J} \cdot \text{cm}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 、 $433.12 \text{ J} \cdot \text{cm}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和 $610.53 \text{ J} \cdot \text{cm}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,采用 Kriging 空间插值得到了松涛水库流域年均降雨侵蚀力分布图。

(2) K 因子: 流域内砖红壤、山地赤红壤和山地黄壤的土壤可蚀性因子分别为 0.228、0.214、0.191。

(3) LS 因子: 流域内 LS 因子取值在 0~1620 之间,其中 LS 因子小于 1 的占流域总面积的 30.33%,1~5 的占 66.93%,大于 5 的占 2.74%,总体而言,松涛水库流域属于低山丘陵区,地形起伏,沟壑发育, LS 因子在海南岛属于较大的区域。

(4) C 因子: 覆盖-管理因子大于 0.01 的占流域面积的 32.35%,大于 0.1 的仅占流域面积的 20.2%。可见,流域内植被状况较好,对土壤侵蚀能起到很好的防护作用,但是也存在部分植被保护不够的区域。

(5) P 因子: 根据土地利用图,确定 P 因子。林地、草地等自然植被 P 值取 1; 橡胶林、浆纸林、果园和其他园地等经济作物多采用顺坡种植方式, P 值取 1; 水田 P 值取 0.15; 耕地 P 因子取值 0.5; 居民区及交通用地 P 值取 1,水域 P 值取 0。总体而言,流域内较少采取水土保持措施,经济作物大多是顺坡种植,易引发土壤侵蚀。

3.2 土壤侵蚀分析

基于 EcoHAT 系统,实现了松涛水库流域年均土壤侵蚀的定量模拟,并按照《土壤侵蚀分类分级标准 (SL190-2007)》进行土壤侵蚀强度划分,得到土壤侵蚀强度分布图(图 4)。

(1) 土壤侵蚀量与土壤侵蚀面积

统计得,流域内土壤侵蚀总量为 51.46 万 t/a,流域内(除水域)平均土壤侵蚀模数约为 $370 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,略低于东南红壤区的容许土壤流失量。流域内土壤侵蚀面积约为 233.24 km^2 ,占流域总面积的 14.70%,轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀分别占土壤侵蚀面积的 79.64%、15.22%、3.40%、1.04%和 0.70%,可见,松涛水库流域土壤

侵蚀面积以轻度、中度为主，极强烈和剧烈侵蚀面积较小。从图 4 可以看出，流域内土壤侵蚀空间分布不均，大部分区域侵蚀比较轻微，无土壤侵蚀现象，但是局部地区土壤侵蚀发育比较强烈，主要分布在松涛水库流域上游的细水乡，以及南开乡和元门镇的部分地区，达到了极强烈侵蚀的程度，部分地区甚至达到剧烈侵蚀的程度。

(2) 不同土地利用类型的土壤侵蚀量与土壤侵蚀面积

对各种土地利用类型的土壤侵蚀量和土壤侵蚀面积分别进行统计，得表 2 和表 3。由表 2 可以看出，松涛水库流域的土壤侵蚀量主要发生在土地面积较大的林地、浆纸林和橡胶林，三者土壤侵蚀量为 44 95 万 t/a，占流域土壤侵蚀总量的 87.35%，平均土壤侵蚀模数以浆纸林最高，约为 550 t/(km²·a)，超过了容许土壤流失量，橡胶林约为 450t/(km²·a)，而林地平均土壤侵蚀模数约为 280 t/(km²·a)。另外，未利用地、荒草地、园地平均土壤侵蚀模数也超过了容许土壤流失量，但由于面积小，土壤流失量并不大。

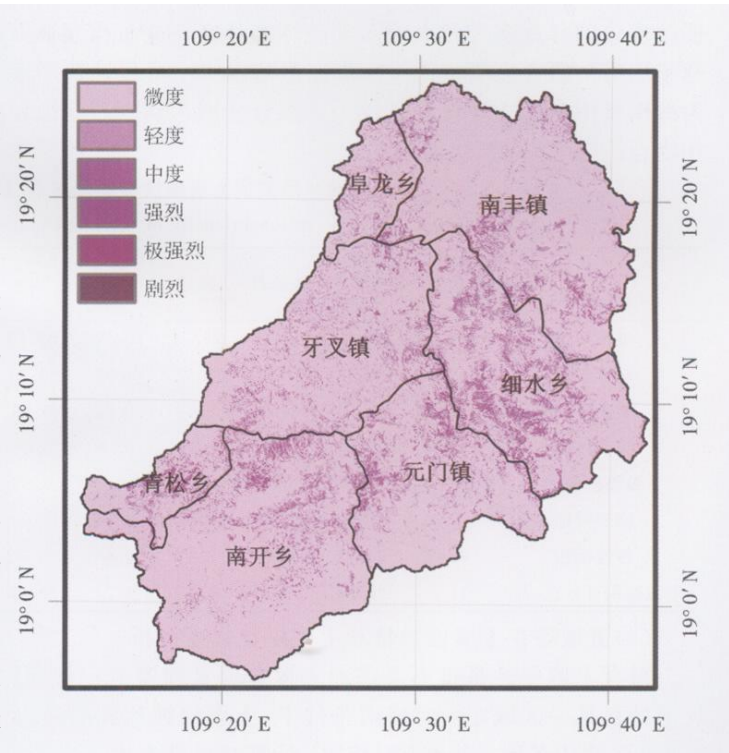


图 4 松涛水库流域土壤侵蚀强度分布图
Fig. 4 Soil erosion intensity in the Songtao Reservoir Basin

表 2 不同土地利用类型土壤侵蚀量及平均土壤侵蚀模数表

| 土地利用 | | 项目 | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|------|------|
| | | 林地 | 浆纸林 | 橡胶林 | 园地 | 水田 | 旱地 | 荒草地 | 居民点 | 未利用地 |
| 面积(km ²) | | 598.34 | 277.41 | 288.70 | 34.33 | 109.10 | 50.54 | 19.83 | 9.78 | 1.12 |
| 侵蚀量(万 t/a) | | 16.62 | 15.33 | 13.00 | 1.76 | 1.31 | 1.85 | 1.40 | 0.08 | 0.11 |
| 占总量百分比(%) | | 32.30 | 29.79 | 25.26 | 3.42 | 2.54 | 3.60 | 2.72 | 0.15 | 0.21 |
| 平均侵蚀模数(t/(km ² ·a)) | | 280 | 550 | 450 | 510 | 120 | 370 | 710 | 80 | 980 |

由表 3 可以看出，流域内林地、浆纸林、橡胶林土壤侵蚀面积相当，分别为 68.86 km²，74.14 km²，58.77 km²，三者土壤侵蚀面积之和占土壤侵蚀总面积的 86.50%，但是土壤侵蚀面积占该土地利用类型总面积百分比的顺序为：浆纸林> 橡胶林> 林地。统计各种土地利用类型的土壤侵蚀面积可以看出，除水田以外，人为开垦土地的土壤侵蚀面积占该类土地利用总面积的百分比均大于 20%，而天然林地侵蚀面积百分比为 11.53%，有

侵蚀现象的林地多为经人为活动破坏的林区，这直接反映了人为扰动对土壤侵蚀的影响。赵王国等^[4]研究表明松涛水库周围是海南省土壤侵蚀最严重和集中的地区，余炜敏等^[6]认为海南省山区的土壤侵蚀量较大，部分区域达到剧烈侵蚀程度，这些与本研究的结论基本相吻合。

表 3 不同土地利用类型土壤侵蚀强度分布表 (单位: km²)

| Tab 3 Soil erosion intensity of different land-use types | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|------|-------|---------|
| 土地利用 项目 | 林地 | 浆纸林 | 橡胶林 | 园地 | 水田 | 旱地 | 荒草地 | 居民点 | 未利用地 | 合计 |
| 微度侵蚀 | 528.27 | 203.09 | 229.29 | 25.41 | 104.29 | 38.29 | 14.15 | 9.68 | 0.78 | 1244.66 |
| 轻度侵蚀 | 53.62 | 57.46 | 47.04 | 7.32 | 4.32 | 11.11 | 4.55 | 0.09 | 0.25 | 185.77 |
| 中度侵蚀 | 11.05 | 12.96 | 8.57 | 1.07 | 0.21 | 0.69 | 0.88 | 0.00 | 0.05 | 35.48 |
| 强烈侵蚀 | 2.58 | 2.82 | 1.99 | 0.26 | 0.08 | 0.06 | 0.13 | 0.00 | 0.02 | 7.93 |
| 极强烈侵蚀 | 0.81 | 0.74 | 0.67 | 0.10 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 2.44 |
| 剧烈侵蚀 | 0.80 | 0.16 | 0.49 | 0.05 | 0.01 | 0.03 | 0.08 | 0.00 | 0.01 | 1.62 |
| 侵蚀面积 | 68.86 | 74.14 | 58.77 | 8.80 | 4.65 | 11.92 | 5.67 | 0.09 | 0.34 | 233.24 |
| 侵蚀面积百分比(%) | 11.53 | 26.74 | 20.40 | 25.73 | 4.27 | 23.74 | 28.62 | 0.96 | 30.40 | 15.78 |

(3) 流域潜在土壤侵蚀量和土壤侵蚀强度分析

潜在土壤侵蚀是指不考虑地表覆盖因素和覆盖-管理因素,即 C、P 因子均取值 1,它反映的是某一区域在一定降雨条件下,土壤侵蚀达到的最大值。其计算公式为: $A = R \cdot K \cdot L \cdot S$, 式中各因子算法同 USLE, 计算结果见表 4。

表 4 不同土地利用类型潜在土壤侵蚀统计表

| Tab 4 Potential soil erosion of different land-use types | | | | | | | | | | |
|--|---------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|---------|
| 土地利用 项目 | 林地 | 浆纸林 | 橡胶林 | 园地 | 水田 | 旱地 | 荒草地 | 居民点 | 未利用地 | 合计 |
| 侵蚀量(万 t) | 2108.00 | 964.11 | 750.53 | 83.75 | 152.73 | 126.58 | 65.28 | 9.07 | 1.85 | 4261.90 |
| 平均侵蚀模数(万 t/km ² ·a) | 3.52 | 3.48 | 2.60 | 2.44 | 1.40 | 2.50 | 3.29 | 0.93 | 1.85 | 3.07 |
| 土壤侵蚀面积 | 578.78 | 274.60 | 268.33 | 31.71 | 95.08 | 47.64 | 18.50 | 8.02 | 0.93 | 1323.61 |
| 侵蚀面积百分比(%) | 96.93 | 99.05 | 93.15 | 92.17 | 87.28 | 94.88 | 93.32 | 82.01 | 83.24 | 95.28 |

由表 4 可以看出,松涛水库流域内潜在土壤侵蚀总量为 4261. 90 万 t/a, 平均土壤侵蚀模数约为 3 07 万 t/(a·km²), 约为现实土壤侵蚀量和平均土壤侵蚀模数的 100 倍,高出容许土壤流失量近 60 倍;潜在土壤侵蚀面积为 1323 61km², 占水域以外的流域总面积的 95 28%, 且剧烈侵蚀面积占土壤侵蚀总面积的 76 73%。由此可见,松涛水库流域潜在土壤侵蚀非常大,主要原因有两方面:一是流域内降雨集中,多暴雨,降雨侵蚀力较大;二是流域属于丘陵区,地形起伏,沟壑发育,气候和地形的综合作用致使土壤侵蚀的高潜在性。对比土壤侵蚀现状可知,植被是松涛水库流域最重要的生态屏障,是土壤侵蚀的主要防护因子,能有效防止土壤侵蚀的发生发展,保土效益显著。因此,流域内植被,特别是天然林地的保护意义重大,地方在加强区域社会经济发展的同时,应充分考虑其所带来的生态环境影响。

3 3 土壤侵蚀控制方案研究

由分析可知,松涛水库流域土壤侵蚀的来源主要有:一是顺坡种植在较陡的坡面上的浆

纸林、橡胶林等人为开垦的经济林；二是人为破坏的天然林地、植被生长较差的荒草地和未利用地。

针对土壤侵蚀的现状提出三种土壤侵蚀控制方案：方案 1：在不改变土地利用的情况下，改变浆纸林、橡胶林的顺坡耕种方式，采用水平阶或者鱼鳞坑等水土保持种植方式，其 P 取值为 0.3，耕地、其他园地等均采用梯田种植， P 取值为 0.1；方案 2：恢复破坏的天然林草植被，提高植被覆盖度，按照林地覆盖度 75%，草地覆盖度 60% 的标准进行植被恢复；方案 3：25° 以上的耕地及人工林实行退耕还林，按照覆盖度 75% 的标准进行植被恢复。分别计算三种方案下流域内土壤侵蚀量及土壤侵蚀面积（表 5）。

表 5 不同土壤侵蚀控制方案的效果

Tab 5 Effect of soil erosion control under different schemes

| 项目 方案 | 土壤侵蚀量 (万 t/a) | 减少土壤 侵蚀量(t/a) | 土壤侵蚀面积 (km ²) | 减少土壤 侵蚀面积(km ²) |
|----------|------------------|------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 现状 | 51.46 | — | 233.24 | — |
| 方案1 | 29.00 | 22.46 | 134.77 | 98.47 |
| 方案2 | 37.31 | 14.15 | 167.34 | 65.9 |
| 方案3 | 43.02 | 84.44 | 192.07 | 41.17 |

由表 5 可以看出，方案 1 效果最好，其次为方案 2，如果两种方案同时采取，土壤侵蚀量将由 51.46t/a 降低至 14.84 万 t/a，减少 71.16%；土壤侵蚀面积将由 233.32km² 减少至 68.87km²，减少 70.48%，其中轻度侵蚀面积减少 65.20km²，中度以上侵蚀面积由 47.47km² 减少至 3.67km²；流域平均土壤侵蚀模数将降低至 150t/(km²·a)。另外，方案 3 每年减少土壤侵蚀量 8.44 万 t，土壤侵蚀面积将减少 41.17km²，其土壤侵蚀效果较前两者稍差。综上，流域在加强当地经济发展的同时，如充分考虑开发利用的方式及注重对天然植被的保护，能较好地控制土壤侵蚀。针对目前的实际情况，较好的土壤侵蚀控制方案是对经济林和耕地采取水土保持措施，对破坏的林草植被实施生态修复工程。

4 结论与建议

采用 GIS 和 RS 技术，基于 USLE 模型实现了海南岛松涛水库流域的土壤侵蚀空间分布的数值模拟，分析了流域内土壤侵蚀主要来源及原因，通过情景分析研究了流域土壤侵蚀控制方案，结果表明：

- (1) 松涛水库流域土壤侵蚀较轻，平均土壤侵蚀模数略低于南方红壤区的容许土壤侵蚀量，但土壤侵蚀空间分布不均，绝大部分区域无侵蚀现象，部分区域土壤侵蚀比较严重，达到了极强烈甚至剧烈侵蚀的程度；浆纸林平均土壤侵蚀模数为流域内土壤侵蚀最严重的土地利用类型。
- (2) 松涛水库流域潜在土壤侵蚀量大，为容许土壤流失量近 60 倍，土壤侵蚀问题应引起充分重视；植被是松涛水库流域最重要的生态屏障，是土壤侵蚀的主要防护因子，能有效防止土壤侵蚀的发生发展，加强流域内植被保护，特别是天然林地保护的意义重大。
- (3) 本文研究结果较肖寒等^[7]研究结果大，分析有以下几个原因：一是肖寒等研究的是整个海南省的土壤侵蚀，本文以海南省中部低山丘陵区为研究区域，该区域属于海南省土壤侵蚀最为严重的区域之一；二是肖寒等使用的是 1:20 万的基础数据，提取的坡度较缓，坡度

因子较小;而本文采用 1:5 万地形数据,提取的坡度较陡,但更能反映实际地形情况,坡度对土壤侵蚀的影响较为显著,因此本文计算的坡度因子较大,土壤侵蚀量相应增大;三是近些年来,流域内人类活动增强,开发力度加大,植被遭受到破坏,直接导致土壤侵蚀加剧。

(4) 采取水土保持措施和林草修复的土壤侵蚀控制效果均比较好,能减少土壤侵蚀量 36.62 万 t/a,减少土壤侵蚀面积 164.37 km²,其中,中度以上侵蚀面积减少 43.80 km²,效果较为显著。

(5) 热带雨林地区植被覆盖较好,土壤侵蚀普遍轻微,但是由于降雨量大且集中,在坡陡的地方潜在土壤侵蚀量非常大,因此,各地应充分考虑经济开发所带来的生态环境影响,一方面注重开发利用方式,另一方面要加大自然保护的力度,特别是天然林地的保护。

参考文献:

- [1] Valentin C B, Favis-Mortlock J, Ingram D, *et al.* The GCTE Soil Erosion Network Proceedings of the ISCO meeting, in 12th International Soil Conservation Organization Conference. Beijing: Tsinghua University Press, 2002 299 ~ 30
- [2] Novotny V, Olem H. Water Quality: Prevention, Identification and Management of Diffuse Pollution. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1993.
- [3] 林媚珍, 张锬铨. 海南岛热带天然林动态变化. 地理研究, 2001, 20(6): 703~ 712
- [4] 赵玉国, 张甘霖, 龚子同. SOTER 支持下海南岛土壤侵蚀模拟与影响因子分析. 土壤通报, 2003, 34(3): 219 ~ 224
- [5] Zhao Yuguo, Zhang Ganlin, Gong Zitong. SOTER-based soil water erosion simulation in Hainan Island. Pedosphere, 2003, 13(2): 139~ 146
- [6] 余炜敏, 漆智国. SOTER 支持下海南土壤侵蚀量估算. 水土保持学报, 2003, 17(6): 51~ 54
- [7] 肖寒, 欧阳志云, 王效科, 等. GIS 支持下的海南岛土壤侵蚀空间分布特征. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 75~ 80
- [8] 岳建华, 张廷龙, 周海燕, 等. 松涛水库生态清洁流域的建设构想. 中国人口·资源与环境, 2005, 15(6): 90~ 94
- [9] 张光辉. 土壤水蚀预报模型研究进展. 地理研究, 2001, 20(3): 274~ 281
- [10] Van Remortel R D, Hamilton M E, Hickey R J. Computing the LS factor for the revised universal soil loss equation through array-based slope processing of digital elevation data using C++ executable. Computers & Sciences, 2004, 30: 1043~ 1053
- [11] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. USDA Agricultural Handbook, No. 282, 1965
- [12] 章文波, 谢云, 刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力. 地理研究, 2002, 21(3): 384~ 390
- [13] 周伏建, 黄炎和, 等. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值. 水土保持学报, 1995, 9(1): 13~ 18
- [14] Williams J R, Renard E P. A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38(1): 381~ 383
- [15] 黄炎和, 卢程隆, 付勤, 等. 闽东南土壤流失预报研究. 水土保持学报, 1993, (4): 13~ 18
- [16] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 和地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19~ 24
- [17] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, *et al.* Prediction soil erosion by water: A guide to conservation planning with revised universal soil loss equation. USDA Agricultural Handbook, No. 703, 1997

The situation and control scheme of soil erosion in Songtao Reservoir Basin of Hainan Island

ZENG Hong-juan¹, YANG Sheng-tian¹, WANG Ling², ZHENG Dong-hai¹,
ZHANG Cu-ping², WANG Xue-lei¹, GAO Yun-fei¹

(1 Research Center for Remote Sensing and GIS, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2 Environmental Sciences Academy of Hainan Province, Haikou 570206, China)

Abstract: As the most important water source region in Hainan Island, the Songtao Reservoir Basin has witnessed significant increases in both soil erosion and sediment in local rivers due to the exploration and utilization in recent years, so it is very important to study the situation and the control scheme of soil erosion in the basin for the protection of water environment. Taking Remote Sensed Imagery and Digital Elevation Model as basic data resource, we accomplished the quantitative simulation and analysis on the soil erosion in the Songtao Reservoir Basin based on Universal Soil Erosion Equation using Remote Sensing and Geographic Information System techniques through the wide investigation and experiments. Then we put forward a scheme for soil erosion control. The results showed that: (1) Potential soil erosion in the Songtao Reservoir Basin was about 42.6 million tons per year which was about more than 60 times of soil loss tolerance. Under the protection of vegetation, the soil erosion was about 514.6 thousand tons per year and mainly occurred to the degraded forestry, Eucalyptus forest and rubber plantation. The soil erosion in Eucalyptus forest plantation was the most severe. (2) The average soil erosion modulus in the basin was a little smaller than soil loss tolerance, but distributed unevenly. Some areas located in Xishui village were strongly eroded and reached acuity degree. (3) Vegetation was a main factor that controls soil erosion, therefore it is very essential to strengthen the protection of vegetation, especially those natural forests. According to the scene analysis, the establishment of relevant soil and water conservation facilities in plantation could help decrease soil erosion and loss coverage by 224.6 thousand tons per year and 98.48 km² respectively, while the rehabilitation of the destroyed forests and bare land could contribute to a reduction of soil losses by 65.9 km² and about 141.5 thousand tons per year. Both methods could control the soil erosion and non-point pollution effectively. From what is said above, we can draw a conclusion that the Songtao Reservoir Basin is facing serious potential soil erosion and more attention should be paid to taking specific measures to control soil erosion when this area is exploited.

Key words: soil erosion; USLE; control scheme; tropic; the Songtao Reservoir Basin