

# 南汀河流域土壤侵蚀的时空分异

顾治家<sup>1</sup>, 白致威<sup>3</sup>, 段兴武<sup>1,2</sup>, 丁剑宏<sup>3</sup>, 冯德泰<sup>1</sup>, 师小宁<sup>1</sup>, 韩 黎<sup>1</sup>

(1. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650091;

2. 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 云南 昆明 650091; 3. 云南省水利水电科学研究院, 云南 昆明 650228)

**摘 要:** [目的] 分析南汀河流域坡面土壤侵蚀的时空分异特征, 为流域水土保持和边疆生态环境建设提供科学参考。[方法] 基于通用土壤流失方程(USLE), 运用 RS 和 GIS 技术计算南汀河流域 1990、2000 及 2010 年 3 个时段的土壤侵蚀模数。[结果] 3 个时段内研究区侵蚀模数呈现先升后降的趋势, 年均侵蚀模数从 24.75 t/(hm<sup>2</sup>·a) 升到 30.05 t/(hm<sup>2</sup>·a), 然后降为 25.87 t/(hm<sup>2</sup>·a)。3 个时段内, 流域内强烈侵蚀及其以上的侵蚀面积仅占总侵蚀面积的 19.94%, 但对流域总侵蚀量的贡献高达 73.56%。1990—2000 年, 强烈及强烈以下侵蚀面积减少了 1 059.85 km<sup>2</sup>, 强烈侵蚀以上的侵蚀面积则增加了 112.29 km<sup>2</sup>; 2000—2010 年, 轻度侵蚀面积有小幅增加, 其余侵蚀等级的侵蚀面积都有所下降。当坡度小于 20° 时, 侵蚀模数随着坡度的增加而增加, 坡度超过 20° 后, 侵蚀模数有降低的趋势; 从海拔上看, 高侵蚀模数区域主要位于海拔 500~2 000 m 范围。[结论] 流域内的土壤侵蚀治理已初见成效, 但在局部地区, 土壤侵蚀仍有加剧现象。

**关键词:** 土壤侵蚀; 时空分异; USLE; 国际河流; 跨境影响

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0334-06

中图分类号: S157

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.062

## Spatial and Temporal Variations of Soil Erosion in Nanting River Basin

GU Zhijia<sup>1</sup>, BAI Zhiwei<sup>3</sup>, DUAN Xingwu<sup>1,2</sup>, DING Jianhong<sup>3</sup>, FENG Detai<sup>1</sup>, SHI Xiaoning<sup>1</sup>, HAN Xu<sup>1</sup>

(1. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091,

China; 2. Yunnan Key Lab of International Rivers and Transboundary Eco-security, Kunming, Yunnan

650091, China; 3. Yunnan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Kunming, Yunnan 650228, China)

**Abstract:** [Objective] We aimed to analyze the spatial and temporal variations of soil erosion in Nanting river basin in order to provide the scientific basis for soil and water conservation and frontier ecological environment construction. [Methods] Based on the universal soil loss equation(USLE), RS and GIS technologies were applied to estimate the soil erosion modulus in Nanting river basin in 1990, 2000 and 2010. [Results] Erosion modulus showed an initial increasing trend and followed by a decreasing trend during the study period. The average annual erosion modulus increased from 24.75 t/(hm<sup>2</sup>·a) in 1990 to 30.05 t/(hm<sup>2</sup>·a) in 2000, and then decreased to 25.87 t/(hm<sup>2</sup>·a) in 2010. Although the intensive and extreme intensive erosions only accounted for 19.94% of the total erosion area, they contributed as much as 73.56% of the total amount of erosion in the study area. From 1990 to 2000, the moderate and light erosion areas were reduced by 1 059.85 km<sup>2</sup>, while the extreme intensive erosion areas were increased by 112.29 km<sup>2</sup>. From 2000 to 2010, the erosion areas for all erosion intensities were decreased, except for the light erosion. The erosion modulus increased with the increase of slope when the slope was less than 20°, while it decreased with the increase of slope when the slope was more than 20°. High erosion modulus was mainly distributed in 500~2 000 m. [Conclusion] Soil erosion control has achieved initial success in Nanting river basin, although intensified soil erosion still occurs in local areas.

**Keywords:** soil erosion; spatial and temporal variation; USLE; international rivers; transboundary effects

收稿日期: 2015-02-21

修回日期: 2015-04-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“元江干热河谷区侵蚀对土壤生产力影响的定量研究”(41101267); 国家科技支撑计划课题(2013BAB06B03); 云南省水利厅水利科技计划项目“高原红壤坡耕地容许土壤流失量计算方法的构建及应用”; 喜马拉雅地区气候变化适应性研究计划(HICAP)

第一作者: 顾治家(1987—), 男(汉族), 河南省洛阳市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: guzhijia2008@163.com。

通信作者: 段兴武(1981—), 男(汉族), 云南省玉溪市人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与土地退化研究。E-mail: xwduan@ynu.edu.cn。

土壤侵蚀是指地球表面的土壤及其母质在水力、风力、冻融、重力等外力作用及人为影响下发生的各种破坏、分离、搬运和沉积的现象<sup>[1]</sup>。然而人类在开发利用土壤资源过程中存在许多诸如砍伐森林和过度放牧等不合理行为,导致加速土壤侵蚀的发生<sup>[2]</sup>。土壤侵蚀可导致土壤贫瘠、土地生产力下降,同时,随水土流失进入水体的化学污染物可危害水体环境,乃至食品安全。土壤侵蚀是限制当今人类生存与发展的全球性环境灾害之一,严重制约着全球社会经济持续发展,是当今全球变化研究的重要组成部分<sup>[3]</sup>。中国是世界上水土流失最为严重的国家之一<sup>[4]</sup>,全国第 4 次土壤侵蚀普查(第一次全国水利普查)资料显示,中国土壤侵蚀总面积为  $2.93 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,占普查范围总面积的 31.12%,其中水力侵蚀面积为  $1.29 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。

无论是土壤侵蚀防治还是河流泥沙管理,都需要一个能预测和评价土壤侵蚀量的工具,来预防和避免土地退化及河流污染等一系列不良影响的发生,这个工具就是土壤侵蚀模型<sup>[1]</sup>。19 世纪初以来,世界各国集中大量人力和物力进行坡面侵蚀模拟的相关研究,先后开发了 USLE, RUSLE, WEPP, LISEM 以及 SWAT 等侵蚀模型<sup>[4-5]</sup>。其中 USLE 模型最具代表性,该模型包括了影响土壤侵蚀的主要因素、模型形式统一、构建模型的基础数据丰富、可信度高,因此在世界范围得到了广泛地应用<sup>[2]</sup>。国内学者对 USLE 在中国的应用也开展了广泛的研究和验证,尤其是在降水较为丰富、水蚀较为严重的南方地区得到推广,USLE 被用于福建省、广东省、海南省的土壤流失预报,九龙江流域、东江流域、鄱阳湖流域的土壤侵蚀量的估算,以及中国西南的滇东北地区、洱海流域、滇池流域和澜沧江流域的土壤侵蚀研究<sup>[6-9]</sup>。这些研究成果不仅为区域水土流失的防治,流域生态环境保护以及水土资源的合理开发与保护提供了重要的参考和科学依据,而且也证明了 USLE 模型在南方地区的适用性。

西南地区地形条件复杂,气候类型多样,是中国水土流失最严重的区域之一,水土流失面积达  $4.72 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,水土流失率高达 41.94%<sup>[10]</sup>。西南地区发育着中国多条重要的国际河流,这些河流的泥沙含量变化会对下游国家河流生态乃至洪泛平原农业发展等带来一系列的影响,受到国际社会的广泛关注。南汀河是中国西南地区一条重要的国际河流,由于南汀河流域耕地坡度大、降水量丰富且相对集中,加之缺乏相应的保护性耕作措施,水土流失严重。剧烈的土壤侵蚀导致流域内可耕地资源减少、土壤肥力降低、河流环境恶化,严重影响着区域粮食生产安全和社会经济的可持续发展。此外,水土流失引起的泥

沙淤积,河床抬高等环境问题,给下游缅甸国带来了诸多不利影响。但由于地理位置偏远、通行困难、社会经济严重滞后以及基础资料数据缺乏,南汀河流域的坡面侵蚀特征及时空分异方面等问题尚不清楚。

本文基于 USLE 模型估算南汀河流域 1990、2000 以及 2010 年 3 个时段的土壤侵蚀量,分析该区域土壤侵蚀变化特征,以期为区域水土保持和边疆生态环境建设提供科学参考。

## 1 研究区概况

南汀河位于中国西南横断山区,发源于云南省临沧市临翔区博尚镇,于耿马县清水河出境,汇入缅甸的萨尔温江,流域面积  $9.17 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。该河为横断山脉中断怒江水系左岸的一级支流,国内部分河道长约 264.2 km,总落差 2 100 m,平均比降为 3.8%,其干流河谷区的地理位置为  $98^\circ 41' - 100^\circ 14' \text{ E}$ ,  $23^\circ 18' - 24^\circ 20' \text{ N}$ ,流经临沧、云县、永德、镇康、耿马、沧源这 6 个县。该流域属亚热带低纬山地季风气候,立体气候显著,年均温  $18.2^\circ \text{C}$ ,降水量变化在 920~1 420 mm。土壤类型以赤红壤和红壤为主,质地主要为壤土,表层土松软,地质构造破碎,抗侵蚀能力差。南汀河上游植被稀少且破坏严重,部分村社有林地占有率不到 5%,下游森林覆盖率达 46.7%,植被保护相对完好。该流域可耕地少,后备资源匮乏,陡坡种植和毁林开荒现象较为突出<sup>[11]</sup>。

## 2 USLE 模型及各因子值的计算

### 2.1 土壤侵蚀模型及其数据来源

本研究所采用的土壤侵蚀模型是通用土壤流失方程 USLE:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

式中: $A$ ——单位面积上时间和空间平均的土壤流失量 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ;  $R$ ——降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ;  $K$ ——土壤可蚀性因子 $[(\text{t} \cdot \text{hm} \cdot \text{h})/(\text{hm} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$ ;  $LS$ ——坡度坡长因子;  $C$ ——作物覆盖与管理因子;  $P$ ——土壤保持措施因子。

本研究所使用的数据包括:南汀河流域及其周边各气象站点(共 16 个)1960—2010 年的降雨资料来源于云南省各县气象局的逐日降水数据;基于项目组在第 2 次土壤普查成果基础上构建的云南省 1:100 万土壤数据库<sup>[12]</sup>,结合南汀河流域野外实地调查并采集典型土壤样本,进行室内测定土壤机械组成和有机质含量;根据 1:5 万地形图获得南汀河流域 30 m 分辨率的数字高程图(DEM),数据来源于国际科学数据共享平台 <http://srtm.datamirror.csdb.cn/>;选用

1990,2000 和 2010 年 3—4 月过境的 LandsatTM/ETM+遥感影像(无云),空间分辨率为 30 m×30 m。

在 ArcGIS 中将各因子图层统一转换为 30 m×30 m 的栅格数据,运用栅格计算器对各因子图层进行连乘,得到研究区土壤侵蚀强度分布图。

## 2.2 USLE 各因子的确定

### 2.2.1 土壤可蚀性因子(K)

土壤可蚀性反映土壤承受侵蚀动力剥蚀和搬运的敏感性,属于土壤侵蚀过程中土体抵抗力。影响土壤可蚀性因子大小的因素有:土壤质地、土壤结构、紧实度、土壤渗透率和含水率及黏土矿物性质等<sup>[1]</sup>。本研究收集研究区第 2 次土壤普查典型剖面 40 个,对其中位置描述准确,代表性突出的 33 个典型剖面进行了野外调查和土壤样本采集,测定机械组成和有机质含量等土壤理化指标 15 项,共获取土壤参数 2 000 余个。结合全国 1:100 万土壤图,构建了研究区土壤数据库。利用 Wischmeier 等<sup>[13]</sup>建立的土壤可蚀性  $K$  值的计算公式计算了流域内 12 个土壤类型的可蚀性  $K$  值。研究区内赤红壤、红壤和棕壤居多,抗侵蚀能力差,整个流域平均土壤可蚀性  $K$  值为  $0.03(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ 。

公式如下:

$$K = [2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - \text{OM}) + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)] / 100 \quad (2)$$

式中: $M = N_1(100 - N_2)$  或者  $M = N_1(N_3 + N_4)$ ;  $N_1$ ——粒径在 0.002~0.1 mm 之间的土壤颗粒含量百分比;  $N_2$ ——粒径 <0.002 mm 的土壤黏粒含量百分比;  $N_3$ ——粒径 0.002~0.05 mm 的土壤粉砂含量百分比;  $N_4$ ——粒径 0.05~2 mm 的土壤颗粒含量百分比;  $\text{OM}$ ——土壤有机质含量(%);  $S$ ——土壤结构系数。

### 2.2.2 降雨侵蚀力因子(R)

降雨侵蚀力是降水及其产生的径流所具有的引起土壤侵蚀的潜在能力,该指标与雨量、雨强有关。由于降雨过程资料难以获得,国内外学者提出了各种基于日、月以及年的降雨量  $R$  的简易算式<sup>[14-15]</sup>。研究表明由于年、月降雨资料相对粗略, $R$  值估算精度不高,相比之下,日雨量能够提供更为丰富的降雨特征信息,降雨侵蚀力估算精度可靠,因而得到广泛的应用<sup>[16]</sup>。本文利用章文波等基于日降雨数据的简易算式来估算南汀河流域的降雨侵蚀力,公式如下:

$$M = \alpha \sum_{j=1}^k (P_j)^\beta \quad (3)$$

式中: $M$ ——某半月时段的降雨侵蚀力 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ;  $P_j$ ——半月时段内第  $j$  日侵蚀性降雨(侵蚀性降雨标准  $\geq 12 \text{ mm}$ );  $k$ ——半月时段内的

天数( $d$ );  $\alpha, \beta$ ——简易模型参数。

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (4)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (5)$$

式中: $P_{d12}$ ——日雨量  $\geq 12 \text{ mm}$  的日均雨量( $\text{mm}$ );  $P_{y12}$ ——日雨量  $\geq 12 \text{ mm}$  的全年平均雨量( $\text{mm}$ )。

依据南汀河流域及其周边地区 16 个气象站点 1960—2010 年的日降雨资料,用算式(3)—(5)计算 1990,2000 以及 2010 年的降雨侵蚀力,在 ArcGIS 中插值生成南汀河流域降雨侵蚀力空间分布图。1990 年降雨侵蚀力变化于 4 009.08~5 868.43 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ,均值为 4 729.89 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ;2000 年降雨侵蚀力变化于 4 137.44~5 844.48 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ,均值为 4 773.34 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ;2010 年降雨侵蚀力变化于 4 153.07~5 898.51 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ,均值为 4 784.41 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。由此可见,研究时段内降雨侵蚀力未发生显著变化。

### 2.2.3 坡度因子和坡长度因子(S, L)

坡度因子  $S$  和坡长因子  $L$  通常为侵蚀动力的加速因子,是度量地形对土壤侵蚀影响的指标。在 USLE 中,地形因子  $LS$  是在相同条件下,单位面积坡面侵蚀量与标准小区侵蚀量比值。中国研究者对该因子进行了广泛的研究,根据各地的地形地貌特征,提出了不同的算式。本文依据南汀河流域的地形地貌,采用刘宝元等<sup>[1]</sup>的研究结果进行计算:

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (6)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & (\theta \leq 1^\circ) \\ 0.3 & (1^\circ < \theta \leq 3^\circ) \\ 0.4 & (3^\circ < \theta \leq 5^\circ) \\ 0.5 & (\theta > 5^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $L$ ——坡长因子;  $\lambda$ ——像元坡长( $\text{m}$ );  $m$ ——坡长指数。

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8\sin\theta - 0.5 & (5^\circ \leq \theta < 10^\circ) \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $S$ ——坡度因子;  $\theta$ ——坡度( $^\circ$ )。

在 ArcGIS 支持下基于研究区域的 DEM 提取坡长  $\lambda$ ,采用以上式子得到地形因子分布图。

### 2.2.4 植被覆盖与管理因子(C)

$C$  因子是指一定条件下有植被覆盖或实施田间管理的土地土壤流失总量与同等条件下实施清耕的连续休闲地土壤流失总量的比值,为无量纲数,介于 0~1。 $C$  因子和植被覆盖度密切相关,利用研究区域所对应年份的 LandsatTM/ETM+遥感影像,在 ENVI 支持下计算生成 NDVI 分布图。基于像元二分模型计算植被覆盖度,

结合土地利用类型,根据蔡崇法等<sup>[17]</sup>提出的公式来算 C 值,在 ArcGIS 支持下生成南汀河流域 C 值时空分布图。研究时段内 C 值由 1990 年的 0.07 降为 2000 年的 0.06 再降为 2010 年的 0.04,呈下降的趋势。C 值计算公式如下:

$$C = \begin{cases} 1 & (c=0) \\ 0.6508 - 0.3436 \lg c & (0 < c \leq 78.3\%) \\ 0 & (c > 78.3\%) \end{cases} \quad (9)$$

式中:C——植被覆盖与管理因子;c——植被覆盖度(%)。

2.2.5 水土保持措施因子 水土保持措施因子 P 是指特定水土保持措施下的土壤流失量与相应未实施该措施的顺坡种植时的土壤流失量之比,反映植被的管理措施差异引起的土壤流失量差别,其范围在 0~1。通过对研究区不同时段遥感影像的土地利用解译,得到流域各时段的土地利用图。由于客观条件的限制,研究区没有设置试验小区,p 值的确定借鉴已有研究成果及相近区域的研究<sup>[18-19]</sup>(表 1)。研究时段内 p 值由 1990 年的 0.75 升为 2000 年的 0.76 再升为 2010 年的 0.83,呈上升的趋势。

表 1 南汀河流域土地利用及管理因子 p 值

| 土地利用类型 | 水田  | 水域 | 耕地  | 灌木  | 林地 | 草地 | 居民与建设用地 | 其他 |
|--------|-----|----|-----|-----|----|----|---------|----|
| p 值    | 0.1 | 0  | 0.4 | 0.6 | 1  | 1  | 1       | 1  |

### 3 结果与分析

本研究通过对比不同时段内土壤侵蚀各因子的变化,发现在研究时段内降雨侵蚀力未发生明显变化;植被覆盖度呈上升趋势,这有利于抑制流域内的土壤侵蚀。草地面积未发生明显的变化;有林地从 1990 年的 1 872.66 km<sup>2</sup> 降为 2010 年的 1 680.94 km<sup>2</sup>;灌木林地由 925.14 km<sup>2</sup> 增为 1 138.28 km<sup>2</sup>;坡耕地持续增加,由 1990 年的 1 121.64 km<sup>2</sup> 增为 2010 年的 1 443.22 km<sup>2</sup>;人造地表则由 13.79 km<sup>2</sup> 增加到 39.11 km<sup>2</sup>。在时间尺度上,研究区土壤侵蚀主要受地表植被覆盖以及人类对土地资源开发利用方式的影响;在空间尺度上,由各因子复杂的空间分异决定了土壤侵蚀空间分布的复杂性。

#### 3.1 土壤侵蚀量的时空分异

基于 USLE 各模型参数的提取,计算了南汀河流

域各时段土壤侵蚀模数及其侵蚀量,根据水利部颁布的侵蚀强度标准确定土壤侵蚀分级指标<sup>[20]</sup>,将南汀河流域土壤侵蚀强度划分为 6 个等级,得到南汀河流域土壤侵蚀强度分级图(附图 5)。

结果表明,在 1990—2010 年的 21 a 间,年均侵蚀模数从 1990 年的 24.75 t/(hm<sup>2</sup>·a) 升为 2000 年的 30.05 t/(hm<sup>2</sup>·a),然后降为 2010 年的 25.87 t/(hm<sup>2</sup>·a)(表 2)。相应的年侵蚀量从 1.52×10<sup>7</sup> t 升为 1.85×10<sup>7</sup> t,再降为 1.59×10<sup>7</sup> t。这说明 90 年代至今南汀河流域的侵蚀状况呈现加剧到好转的变化趋势,尤其是从 2000 年以来流域的侵蚀状况明显好转,这得益于 1994 年开始的南汀河流域大规模治理,以及在南汀河干流河谷区水土保持规划的推动下,2006—2009 年用了 4 a 的时间通过坡改梯、营造水土保持林、保土耕作以及自然修复等措施治理水土流失面积 734.37 km<sup>2</sup>。

表 2 南汀河流域各年份的侵蚀强度等级及其面积

| 侵蚀等级 | 平均侵蚀模数/<br>(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) | 1990               |       | 2000               |       | 2010               |       |
|------|---|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
|      |   | 面积/km <sup>2</sup> | 比例/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 比例/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 比例/%  |
| 微度   | <5  | 2 484.38           | 43.41 | 2 102.05           | 41.26 | 2 121.07           | 44.42 |
| 轻度   | 5~25  | 1 470.31           | 25.69 | 1 247.57           | 24.49 | 1 110.84           | 23.26 |
| 中度   | 25~50   | 811.10             | 14.17 | 605.49             | 11.88 | 561.01             | 11.75 |
| 强烈   | 50~80   | 463.18             | 8.09  | 405.54             | 7.96  | 376.20             | 7.88  |
| 极强烈  | 80~150  | 351.02             | 6.13  | 440.31             | 8.64  | 379.33             | 7.94  |
| 剧烈   | >150  | 142.70             | 2.49  | 294.13             | 5.77  | 226.69             | 4.75  |

从本研究结果看,这些水土保持措施在 5~10 a 后取得了显著的水保效应。1987 和 1999 年的云南省 2 次土壤侵蚀遥感调查显示,怒江流域的年平均侵蚀模数分别为 12.63,12.90 t/(hm<sup>2</sup>·a),南汀河流域作为怒江流域的一个子流域要明显高于其平均水平,

可见南汀河流域是怒江流域潜在的泥沙贡献源区。从不同侵蚀等级的变化来看(表 2),研究区的平均侵蚀强度属于中度,中度及其以下侵蚀面积占总侵蚀面积的 80.06%。自 1990—2010 年,强烈及其以下侵蚀面积减少 1 059.85 km<sup>2</sup>,极强烈和剧烈的侵蚀面积增

加达112.29 km<sup>2</sup>;自2000—2010年,微度侵蚀面积有小幅增加,其余侵蚀等级的侵蚀面积都有所下降。说明该地区的大规模治理已初见成效,但存在着非强烈侵蚀向强烈侵蚀的转换,土壤侵蚀有“局部加剧”的现象。经统计,流域内强烈侵蚀及其以上的侵蚀面积仅占总侵蚀面积的19.94%,但对流域总侵蚀量的贡献高达73.56%,因此该区的治理工作仍处于关键性阶段。

### 3.2 地形坡度及海拔对土壤侵蚀的影响

地形起伏是影响土壤侵蚀的重要环境因子,流域内海拔和坡度变化明显,地形因子对土壤侵蚀的影响至关重要。分析流域内不同坡度下的土壤侵蚀模数发现,随着坡度的增大,年均侵蚀模数先增大后减小(表3)。自1990—2010年,坡度在20°以下的土壤侵蚀模数有所增大,20°以上的土壤侵蚀模数有所减少。这一方面是因为研究区坡度大的地方多分布林地,另

一方面是因为南汀河流域从20世纪90年代中后期开始的退耕还林及封山育林治理的成效。侵蚀面积和侵蚀量随着坡度的增大而增大,从1990—2010年坡度为5°以上的侵蚀面积有所减少,但各个坡度等级的侵蚀面积比例无明显变化。坡度小于10°的区域占流域总侵蚀面积的8.16%~10.89%,对侵蚀量的贡献率为10.16%~10.99%。坡度在10°~25°的区域占总侵蚀面积的47.52%~48.19%,对侵蚀量的贡献率为49.09%~53.68%。坡度大于25°的区域占总侵蚀面积的40.92%~44.32%,对侵蚀量的贡献率为35.62%~39.91%。此外,研究区10°~25°的区域约占流域面积的47%,受人类活动影响较大的坡耕地分布面积比例约为51%(表4),可见,对研究区侵蚀量和侵蚀面积贡献最大的是坡度在10°~25°的区域。

表3 南汀河流域不同坡度的侵蚀统计

| 坡度/(°) | 侵蚀模数/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) |       |       | 侵蚀面积/km <sup>2</sup> |          |          | 侵蚀量/t     |           |           | 土地面积比例/% |       |       |
|--------|---|-------|-------|----------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-------|-------|
|        | 1990年                                       | 2000年 | 2010年 | 1990年                | 2000年    | 2010年    | 1990年     | 2000年     | 2010年     | 1990年    | 2000年 | 2010年 |
| <5     | 20.80                                       | 27.73 | 43.46 | 168.68               | 149.06   | 237.27   | 555 260   | 294 140   | 274 773   | 4.35     | 4.35  | 4.35  |
| 5~10   | 34.06                                       | 44.59 | 42.71 | 298.45               | 267.13   | 282.81   | 1 117 229 | 1 582 174 | 1 424 750 | 5.34     | 5.33  | 5.34  |
| 10~15  | 30.46                                       | 40.26 | 34.05 | 605.19               | 548.22   | 534.63   | 1 944 090 | 2 188 525 | 2 031 753 | 10.39    | 10.39 | 10.39 |
| 15~20  | 26.34                                       | 34.17 | 27.70 | 979.62               | 888.35   | 832.66   | 2 695 961 | 2 580 681 | 2 392 122 | 16.65    | 16.66 | 16.66 |
| 20~25  | 23.76                                       | 29.68 | 23.71 | 1 134.71             | 1 020.90 | 933.67   | 2 824 080 | 4 804 964 | 4 105 915 | 19.35    | 19.35 | 19.35 |
| >25    | 22.49                                       | 24.69 | 20.39 | 2 536.05             | 2 221.44 | 1 954.09 | 6 068 230 | 7 001 851 | 5 660 229 | 43.92    | 43.92 | 43.91 |

表4 南汀河流域坡耕地的分布面积比例

| 坡度/(°) | 比例/%  |       |       | 海拔/m        | 比例/%  |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|
|        | 1990年 | 2000年 | 2010年 |             | 1990年 | 2000年 | 2010年 |
| <5     | 7.54  | 6.66  | 7.76  | <500        | 0.20  | 0.21  | 0.40  |
| 5~10   | 6.52  | 6.18  | 6.91  | 500~1 000   | 18.16 | 18.91 | 18.71 |
| 10~15  | 12.52 | 12.54 | 12.20 | 1 000~1 500 | 36.14 | 35.37 | 34.98 |
| 15~20  | 18.69 | 18.92 | 18.05 | 1 500~2 000 | 38.58 | 38.28 | 35.86 |
| 20~25  | 19.58 | 19.92 | 19.47 | 2 000~2 500 | 6.86  | 7.16  | 9.83  |
| >25    | 35.15 | 35.78 | 35.61 | >2 500      | 0.06  | 0.07  | 0.22  |

南汀河流域最高海拔为3 503 m,最低则为450 m,平均海拔为1 528 m。不同海拔的土壤侵蚀模数及其侵蚀面积如表5所示。除2010年外,其余年份在海拔低于500 m的地区侵蚀模数都低于其他海拔区域,这是因为研究区低海拔地区多为河流阶地或河漫滩,地势低平,侵蚀量较低,2010年前后南汀河下游低海拔山地多被开垦种植橡胶林,导致了这一时段侵蚀模数的增加。在海拔大于500 m的区域,除1990年时段在大于2 500 m海拔地区外,侵蚀模数都有随着海拔的增加而降低的趋势。年均侵蚀模数在海拔为500~2 000 m之间为最大,在该海拔范围土地面积占78.52%,占总侵蚀面积的79%~81.41%,对流域总侵蚀量的贡献高达79.91%~89.62%,这

是因为研究区坡耕地多分布在500~2 000 m的中低海拔地区(表4),随着海拔的增加,坡度加大,种植难度加大,同时政策禁止开垦,从而降低了侵蚀模数。

侵蚀面积随海拔的变化趋势总体与侵蚀模数相似,区别仅在3个时段的侵蚀面积多集中在1 000~2 000 m海拔间的区域,除受土地利用随海拔的分布影响外,这主要与研究区不同海拔的分布面积有关系,研究区60%面积的土地都分布在1 000~2 000 m(表5),本底值高,从而影响了侵蚀面积的总体分布规律。

可见,研究区500~2 000 m间的中低海拔地区,坡耕地分布广,侵蚀模数和侵蚀面积较大,是控制流域水土流失应重点关注的区域。

表 5 南汀河流域不同海拔区域的侵蚀量统计

| 海拔/m        | 侵蚀模数/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) |       |       | 侵蚀面积/km <sup>2</sup> |          |          | 侵蚀量/t     |           |           | 土地面积比例/% |       |       |
|-------------|---|-------|-------|----------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-------|-------|
|             | 1990年                                       | 2000年 | 2010年 | 1990年                | 2000年    | 2010年    | 1990年     | 2000年     | 2010年     | 1990年    | 2000年 | 2010年 |
| <500        | 13.59                                       | 10.32 | 30.61 | 18.42                | 18.37    | 71.76    | 132 104   | 96 629    | 266 186   | 1.38     | 1.35  | 1.36  |
| 500~1000    | 31.72                                       | 39.14 | 37.55 | 959.24               | 877.88   | 911.99   | 3 383 478 | 4 209 736 | 3 998 303 | 17.09    | 17.12 | 17.11 |
| 1 000~1 500 | 23.28                                       | 34.81 | 29.19 | 1 708.84             | 1 585.99 | 1 457.92 | 4 269 786 | 6 371 159 | 5 328 357 | 29.48    | 29.45 | 29.46 |
| 1 500~2 000 | 22.86                                       | 30.31 | 23.73 | 1 852.93             | 1 681.14 | 1 517.53 | 4 497 142 | 5 956 615 | 4 677 601 | 31.95    | 31.98 | 31.97 |
| 2 000~2 500 | 22.99                                       | 15.70 | 13.06 | 1 004.38             | 816.36   | 710.36   | 2 389 673 | 1 632 271 | 1 376 419 | 16.97    | 17.00 | 16.95 |
| >2 500      | 29.05                                       | 10.19 | 13.12 | 178.65               | 115.16   | 105.54   | 532 306   | 185 712   | 242 632   | 3.13     | 3.10  | 3.15  |

## 4 结论

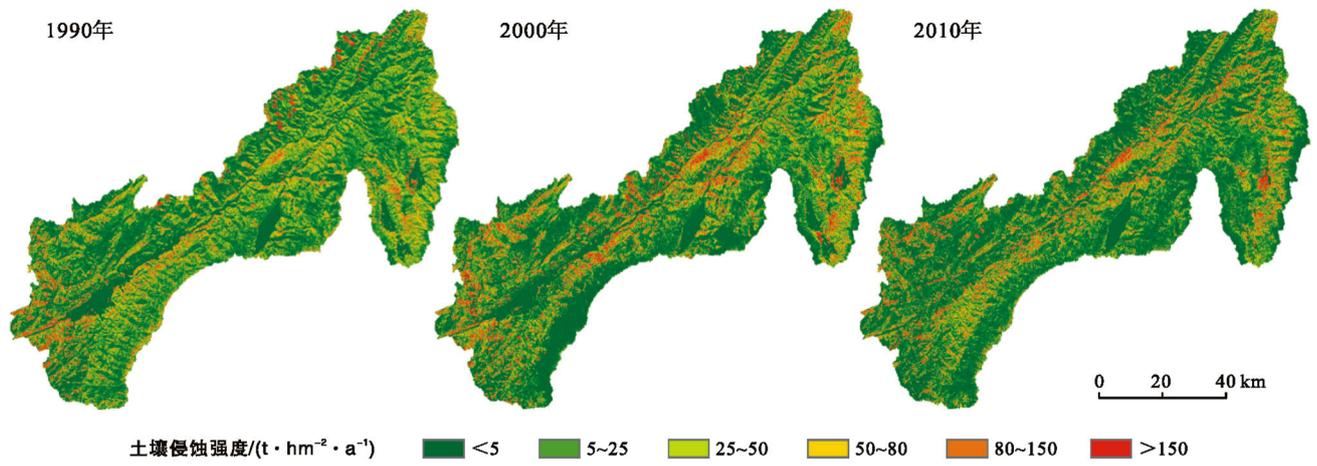
(1) 在 1990—2010 年的 21 a 间,南汀河流域年均侵蚀模数从 24.75 t/(hm<sup>2</sup>·a) 升为 30.05 t/(hm<sup>2</sup>·a),然后降为 25.87 t/(hm<sup>2</sup>·a)。相应的年侵蚀量从 1.52×10<sup>7</sup> t 升为 1.85×10<sup>7</sup> t,再降为 1.59×10<sup>7</sup> t。流域平均侵蚀强度属于中度,从 2000—2010 年,轻度侵蚀面积有小幅增加,其余侵蚀等级的侵蚀面积都有所下降。说明该地区的大规模治理已初见成效,但存在着非强烈侵蚀向强烈侵蚀的转换,土壤侵蚀有“局部加剧”的现象,该区的治理工作仍处于关键性阶段。

(2) 自 1990—2010 年,南汀河流域土壤侵蚀模数随着坡度的递增呈现先增加后减小的趋势,坡度在 20°以下的土壤侵蚀模数随坡度增加而增加,20°以上的土壤侵蚀模数有降低的趋势,结合不同坡度面积分布比例结果,10°~25°的坡度范围是研究区重点水土保持区域。

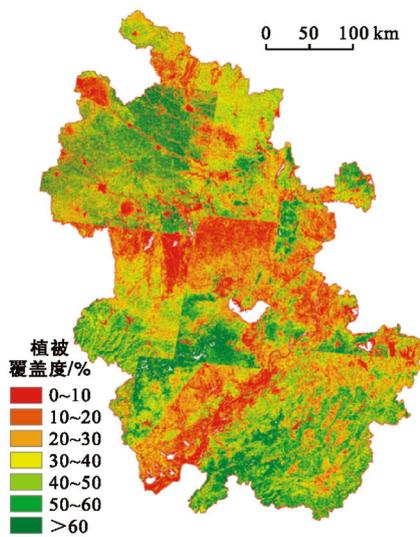
(3) 南汀河流域年均侵蚀模数和侵蚀面积都有随海拔的升高先增大后减小的趋势。研究区 500~2 000 m 间的中低海拔地区,坡耕地分布广,侵蚀模数和侵蚀面积较大,是控制流域水土流失应重点关注的区域。

### [ 参 考 文 献 ]

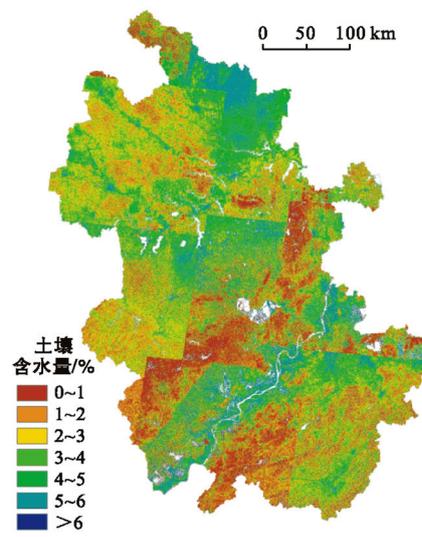
- [1] 刘宝元,谢云,张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京:中国科学技术出版社,2001.
- [2] Hudson N. Soil Conservation[M]. State of Iowa, USA: Iowa State University Press, 1995:2-42.
- [3] 郑粉莉,张勋昌,王建勋,等. WEPP 模型及其在黄土高原的应用评价[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [4] 郑粉莉,王占礼,杨勤科. 土壤侵蚀学科发展战略[J]. 水土保持研究,2004,11(4):1-10.
- [5] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation [M]. Agriculture Handbook No. 703. Washington D C: USDA, 1997.
- [6] 周伏建,陈明华,林福兴,等. 福建省土壤流失预报研究[J]. 水土保持学报,1995,9(1):25-30.
- [7] 黄金良,洪华生,张珞平,等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报,2004,18(5):75-79.
- [8] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤流失方程研究[J]. 水土保持通报,1999,19(1):1-9.
- [9] Zhou Qiwen, Yang Shengtian, Zhao Changsen, et al. A soil erosion assessment of the upper Mekong River in Yunnan Province, China[J]. Mountain Research and Development,2014,34(1):36-47.
- [10] 柴宗新. 西南地区水土流失区划[J]. 山地研究,1995,13(2):121-127.
- [11] 杨丽娟. 南汀河流域生态环境特点及其保护[J]. 云南环境科学. 2000,19(3):44-46.
- [12] DuanXingwu, Rong Li, Hu Jinming, et al. Soil organic carbon stocks in the Yunnan Plateau, Southwest China: Spatial variations and environmental controls[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014,14(10):1643-1658.
- [13] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide To Conservation Planning[M]. Agriculture Handbook No. 537. Washington D C: USDA, 1978.
- [14] 刘宝元,毕小刚,符素华,等. 北京土壤流失方程[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [15] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE[J]. Journal of Hydrology, 1994,157(1/2/3/4):287-306.
- [16] 章文波,谢云,刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学,2002,22(6):705-711.
- [17] 蔡崇法,丁树文,史志华,等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报,2000,14(2):19-24.
- [18] 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):61-68.
- [19] 王万忠,焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报,1996,16(5):1-20.
- [20] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京:水利水电出版社,2008.



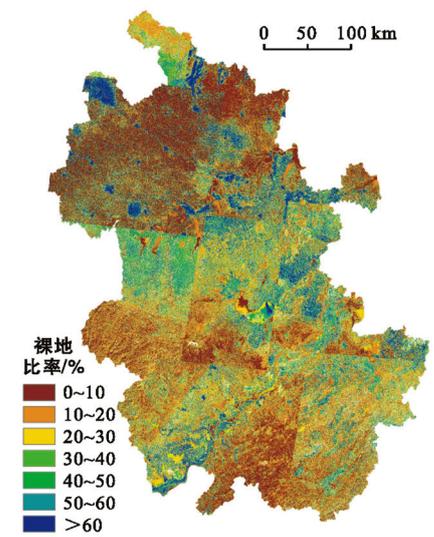
附图5 南汀河流域土壤侵蚀强度(337页)



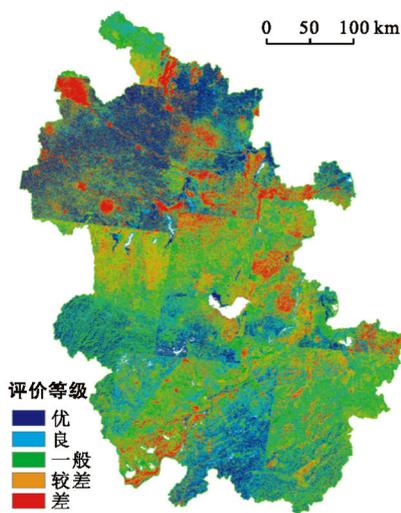
附图6 利用NDVI和像元二分模型提取的安徽省植被覆盖度(343页)



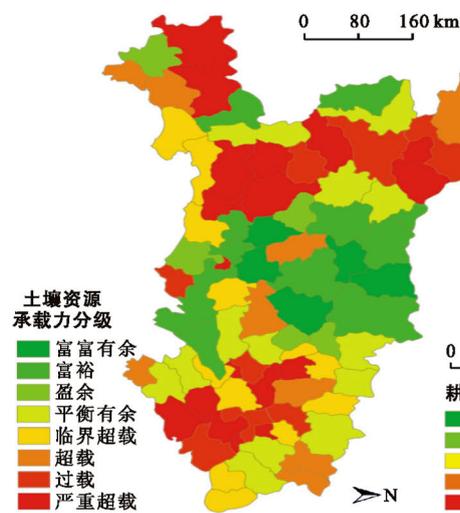
附图7 用热惯量法反演的安徽省土壤含水量(343页)



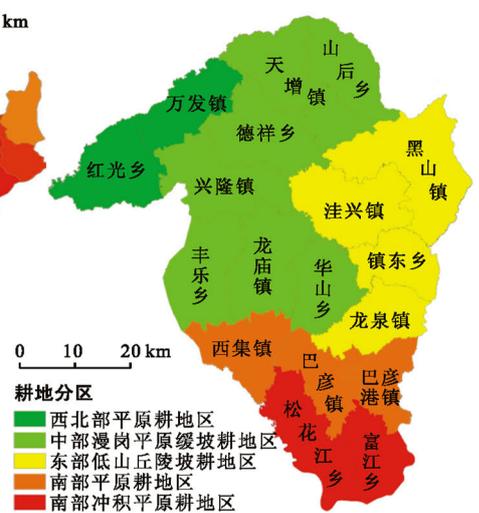
附图8 利用线性光谱混合像元分解提取的安徽省裸地比率(344页)



附图9 安徽省生态质量评价结果(344页)



附图10 2012年湖北省分县土地资源承载力空间格局(348页)



附图11 黑龙江省巴彦县耕地利用分区(353页)