

基于 GIS 和 USLE 模型对滇池宝象河流域土壤侵蚀量的研究

赵磊¹, 袁国林¹, 张琰², 贺彬¹, 刘忠翰¹, 王志芸¹, 李靖³

(1. 云南省环境科学研究院, 云南 昆明 650034; 2. 云南师范大学,
云南 昆明 650092; 3. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 滇池已被列入国家“三河三湖”治理的重点,也是云南省 9 大高原湖泊治理的重中之重。非点源污染是滇池污染的主要原因,而水土流失则是非点源污染的主要来源,占非点源污染总量的 80%。运用 GIS 栅格模块的空间分析功能,根据 USLE 模型的各个因子进行图形运算,估算了小流域土壤侵蚀量。结果表明,流域的年均土壤侵蚀模数为 983.51 t/km²,侵蚀强度为轻度,占流域面积 91.53% 的区域土壤侵蚀强度在轻度以下,对流域土壤侵蚀量的贡献率为 52.80%;而流域 47.2% 的土壤侵蚀来自于占流域面积 8.5% 的中度以上侵蚀区域。

关键词: 土壤侵蚀; GIS; USLE; 滇池

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)03-0042-05

中图分类号: S157.1

The Amount of Soil Erosion in Baoxiang Watershed of Dianchi Lake Based on GIS and USLE

ZHAO Lei¹, YUAN Guolin¹, ZHANG Yan², HE Bin¹, LIU Zhonghan¹, WANG Zhiyun¹, LI Jing³

(1. Yun'nan Academy of Environment Science, Kunming, Yun'nan 650034, China; 2. Yun'nan Normal University, Kunming, Yun'nan 650092, China; 3. Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Dianchi Lake has been listed as the focus of national river bodies harnessing, which attracts special attention in the conservation of the nine major plateau lakes in Yun'nan Province. Non-point source pollution is regarded as the primary cause of pollution of Dianchi Lake, whereas soil erosion, which accounts to 80% of the pollution amount, is the source of non-point source pollution. This paper introduced the integration of GIS with USLE, and usage of the spatial analysis of GIS and the algorithm of each factor of USLE to estimate the amount of soil erosion in the Baoxiang watershed. Results showed the annually averaged amount of soil erosion was 983.51 t/km², which was in the category of low-grade erosion. The none or slightly eroded area occupied 91.5% of the watershed area, and contributed 52.80% sediment in watershed. The middle and the upwards eroded area only occupied 8.5% of the watershed area, but contributed 47.2% sediment.

Keywords: soil erosion; GIS; USLE; Dianchi watershed

流域是由分水线包围的区域^[1],具有相似的水文特性,同时由于自然和人为过程使得各种地理要素存在复杂的空间分布,将它作为一个区域单位,进行自然地理因素与过程相互作用的定量化研究是很有意义且易于着手的^[2]。土壤侵蚀是流域非点源污染的重要组成部分,估算流域土壤侵蚀量是流域非点源污染模拟的基础工作之一^[3]。

20 世纪 60 年代, Wischmeier 提出的通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation)是目前土壤侵

蚀量估算中较为广泛应用的方法^[4]。20 世纪 90 年代中期至今, GIS 与 USLE 集成被广泛地应用于流域管理规划、土壤侵蚀的风险评价、标识关键源区以及模拟评价不同水土保持方案等^[5-7]。相对于传统的集总式方法进行土壤侵蚀量估算,这种分布式方法由于运用 GIS 的栅格数据分析功能,可估算出每个栅格的土壤侵蚀量,有效地提高了土壤侵蚀的预测效率和结果的显示度^[8]。基于此,本研究选择了云南省滇池宝象河流域为研究区,运用 GIS 栅格模块的空

间分析功能,选择合适的因子算法,建立环境要素数据库,估算流域土壤侵蚀量,为建立流域非点源污染模型提供基础数据,探讨建立流域非点源污染模型的方法和思路。

1 研究区概况和 GIS 运行平台

1.1 宝象河流域基本概况

宝象河流域位于滇池的东北部,地理坐标为东经 $102^{\circ}41' - 102^{\circ}56'$,北纬 $24^{\circ}58' - 25^{\circ}03'$;流域面积 302 km^2 ,南北跨度近 30 km ,约占整个滇池流域的 10.3% 。流域属典型的北亚热带湿润季风气候,在低纬度、高海拔地理条件综合影响下,受季风气候制约,形成了流域内四季温差小、干湿季分明、垂直变异显著的低纬山原季风气候。年内降雨分布极不均匀, 80% 以上降雨集中在雨季 5—10 月。多年平均气温 14.7°C ,年均降雨量 953 mm ,土壤主要为红壤、黄棕壤等地带性土壤和水稻土等人为土,其中主要是红壤,约占全流域的 71.7% ,水稻土次之,约占 24.9% ,黄棕壤约占 3.4% 。

1.2 GIS 软件平台

采用美国 ESRI 的地理信息产品 ARC/INFO8.2 工作站及桌面地理信息系统软件 ArcView 3.2 为工作平台,ENVI4.1 遥感图像处理系统。软件功能包括矢量数据转换,遥感数据的图像分析,数据库管理查询,空间数据分析等。

2 宝象河流域地理数据库

图形数据库包括:土壤类型图、土地利用现状图、数字高程图、遥感图像、植被覆盖度图等。属性数据库主要包括:土壤属性、土地利用属性等。

3 流域土壤侵蚀量估算

3.1 USLE 方程及运算流程

通用土壤流失方程(USLE)形式为:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

式中: A —— 年土壤侵蚀量; R —— 降雨侵蚀力因子; K —— 土壤可蚀性因子; L —— 坡长因子; S —— 坡度因子; C —— 耕作管理植被覆盖因子; P —— 侵蚀控制措施因子。

该模型结构中的降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、地形因子、植被措施因子等,基本上包容了土壤侵蚀力与抗蚀力这一矛盾统一体的宏观轮廓,为土壤侵蚀量估算的因子选择提供了成熟的基本骨架^[9]。方程中各因子值的确定均要求对监测区的相关地理要素进行详尽的分析,所以应用 USLE 的关键在于对

各相关因子进行科学的确定,应用 GIS 和 USLE 模型估算土壤侵蚀量的关键也是各因子图的生成。

栅格数据是表征空间地理数据的基本形式之一,其像素数据体现了地表上相应区域的实际地理特征,其数据结构相当于将地表微分成一个个的地理小区,具有一定的地理位置对应关系,这就使应用 GIS 技术通过计算机估算土壤侵蚀量具有了可能性。运用 ARC/INFO 的空间数据管理和分析功能,建立流域的数字高程模型、土地利用现状图、土壤类型图、植被覆盖度图等矢量图,对其属性数据进行相应的数据编码操作,并将其栅格化(Grid 格式),求得各因子值。再根据 USLE 的形式,将各因子值相乘,获得宝象河流域土壤侵蚀量和土壤侵蚀等级图。

3.2 USLE 方程各因子值的确定

3.2.1 降雨侵蚀力因子 降雨侵蚀力是降雨引起侵蚀的潜在动能,它是土壤流失方程中首要的基础因子。因子与降雨量、降雨历时、降雨动能等有关,反映了降雨特性对土壤侵蚀的影响。降雨侵蚀力难于直接测定,大多采用降雨参数,如雨强、雨量等来估算降雨侵蚀力。本研究采用 Wischmeier 经典法,即:

$$R = \sum EI_{30}$$

式中: E —— 降雨动能(MJ/hm^2); I_{30} —— 30 min 最大雨强(mm/h)。

由于流域面积较小,本研究利用研究区域 2003 年和 2004 年上下游 2 个雨量站实测降雨过程资料估算降雨侵蚀力因子。2003 年降雨侵蚀力平均值为 $1585.0 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,2004 年降雨侵蚀力平均值为 $1961.1 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。

3.2.2 土壤可蚀性因子 土壤可蚀性是指土壤是否易受侵蚀破坏的性能,也就是土壤对侵蚀介质剥蚀和搬运的敏感性。由于土壤可蚀性并不是一个物理的或化学的定量可测定指标,而是一个综合因子。因此,只能在一定的控制条件下通过测定土壤流失量或土壤性质的某些参数作为可蚀性指标,从而评价土壤可蚀性。USLE 方程中的因子是 Wischmeier 和 Smith 在 1965 年提出的,是指标准小区(长度 22.1 m ,坡度 9% 的裸露休闲小区)在单位降雨侵蚀指标下的土壤侵蚀量,并建立了土壤可蚀性诺模图^[10]。但诺模图法由于参数众多而难以实现。柯比克查表法给出了大部分质地土壤的 K 值^[11],杨树华的研究给出了滇池流域大部分土壤的 K 值^[12]。因此,我们利用云南省第二次土壤普查资料,收集研究区各种土壤类型的机械组成、粒级含量、有机质含量等数据,确定了研究区土壤的值。并以土壤类型为成图单元,生成因子栅格图,从而得到 K 值空间分布图(表 1)。

3.2.3 坡度坡长因子(LS) 基于 GIS 的空间分析模块,以 DEM 为基础利用栅格像元的坡长算法计算

$$L_{ij} = \left[\left(\sum_1^i D_{i,j} / \cos \theta_{i,j} \right)^{1+m_{i,j}} - \left(\sum_1^{i-1} D_{i,j} / \cos \theta_{i,j} \right)^{1+m_{i,j}} \right] \cos \theta_{i,j} / (22.13^{m_{i,j}} * D_{i,j}) \quad (1)$$

式中: $L_{i,j}$ —— 第(i,j) 像元的坡长因子; $D_{i,j}$ —— 沿径流方向第(i,j) 像元坡长的水平投影距(m),即两相邻像元中心距; $\theta_{i,j}$ —— 第(i,j) 像元的坡度($^\circ$); $m_{i,j}$ —— 第(i,j) 像元的坡长指数。每个像元有 8 个相邻像元,分别对应 8 个方向(东、南、西、北和东北、西北、西南、东南方向)。当像元方向为东、南、西、北时, $D_i = d$ (像元边长值); 当像元方向为东北、西北、西南、东南时, $D_i = \sqrt{2}d$ 。本次研究所用的 DEM 图象像元边长为 25 m。提取像元坡向、坡度,得到每个像元的方向和坡度,从而计算 $D_{i,j}$ 。坡长指数 $m_{i,j}$ 的取值与坡度有关,其范围如下:当坡度 $\geq 5\%$ 时, $m_{i,j} = 0.5$; 当 $3\% \leq$ 坡度 $< 5\%$ 时, $m_{i,j} = 0.4$; 当 $1\% \leq$ 坡度 $< 3\%$ 时, $m_{i,j} = 0.3$; 当坡度 $\leq 1\%$ 时, $m_{i,j} = 0.2$ 。

由于通用土壤流失方程诞生地的美国耕地坡度大都小于 20% (即 11.3°), 坡度计算主要适用于坡度小于 20% 的耕地, 而宝象河流域坡度 $\geq 20\%$ 的占 36.2%, 因此借鉴刘宝元对坡度在 9% ~ 55% 的陡坡土壤侵蚀的研究^[13-14]。

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (2)$$

表 1 流域土壤可蚀性因子值估算

土壤类型	厚层暗黄棕壤	冲、湖、洪积母质水稻土	红壤性母质水稻土	灰岩山地红壤	紫山地红壤	泥质山地红壤	暗山地红壤
K	0.29	0.25	0.29	0.19	0.20	0.34	0.12

表 2 流域耕作管理植被覆盖因子值估算

土地利用类型	耕地	园地	草地	灌林地	林地	农村居民地	荒地	城市用地	水体
C	0.100	0.090	0.042	0.070	0.040	0.020	0.170	0	0

3.2.5 侵蚀控制措施因子 P 该因子考虑一些土地处理措施,如平整、压实、控制性结构物对于控制侵蚀的效果。其值规定为:在农耕地上采用水土保持措施与未经任何保护措施的地块上的水土流失量的比值。流域内的水土保持措施主要有等高带状耕作、等高沟垄耕作和修筑梯田(表 3)。

宝象河流域耕地大多分布在河谷、沟谷地带,田埂是普遍采用的蓄水、保水农业技术措施。据杨子生在滇东北山区的研究^[15],田埂水土保持效果较好, P

坡长。如果将 DEM 的每一个栅格定义为坡面的一个坡段,则每一坡段的因子算法可写为:

式中: S —— 坡度因子; θ —— 坡度($^\circ$)。根据以上算法得到每个像元的地形因子值。

3.2.4 耕作管理植被覆盖因子 C 因子值要受到诸如植被、作物轮作顺序、生产力水平、生长季长短、栽培措施、作物残余物管理等众多因素的控制,这就使得对 C 因子值的直接计算往往难于进行。大量的研究表明,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。通常的做法是对特定覆盖类型进行估计。也就是说, C 因子值主要与植被覆盖和土地利用类型有关。

本研究利用归一化植被指数(NDVI)法,采用 1999 年 9 月的 TM 遥感影像计算了植被覆盖率,并根据实地调查对植被覆盖进行校正,得到流域的植被覆盖图。

分析宝象河流域气候特点、种植特点、农事活动、植被情况,发现流域内复种指数很高,耕地基本没有休耕期,林地在冬季覆盖率仍然很高。因此利用单时相遥感数据获得的地表覆盖率可代表年平均地表覆盖率。借助植被覆盖度图和土地利用类型图,以及前人的研究成果^[12],确定了流域的 C 因子值(表 2)。将 P 值赋给相应的土地利用类型,生成栅格图象,从而得到 C 值的栅格空间分布图。

值为 0.18。在印度尼西亚(CSAR, 1995)的研究表明^[16],梯田及田埂的修建质量对 P 值有直接的影响,并根据梯田及田埂的修建质量,分别给 P 赋值:0.04(好),0.15(一般),0.35(差)。据此,当耕地坡度小于 1° 时, P 值取 0.15; 其余坡度时按等高耕作取值。统计出不同坡度下的耕地面积,利用面积加权平均求出耕地的 P 值。将 P 值赋给相应的土地利用类型,生成栅格图象,从而得到 P 值的栅格空间分布图。表 4 为流域不同土地利用类型值。

表3 不同耕作措施 P 值

耕作措施	坡度/(°)				
	1.1~ 2.0	2.0~ 7.0	7.0~ 12.0	12.0~ 18.0	18.0~ 24.0
等高耕作	0.60	0.50	0.60	0.80	0.90
带状耕作	0.30	0.30	0.30	0.40	0.45
隔坡梯田	0.45	0.40	0.46	0.60	0.70

表4 流域不同土地利用类型值

土地利用类型	耕地	园地	草地	灌林地	林地	农村居民地	荒地	城市用地	水体
P	0.59	0.58	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0	0

4 结论

对像元土壤侵蚀量图和侵蚀等级图的统计结果表明, 宝象河流域 2003 年土壤侵蚀模数为 879.20 t/km², 土壤侵蚀量为 265 930 t; 2004 年土壤侵蚀模数为 1 087.82 t/km², 土壤侵蚀量为 329 032 t; 两年平均侵蚀模数为 983.51 t/km², 平均土壤侵蚀量为 297 481 t。2003 年是枯水年(降雨量 863.0 mm), 2004 年是平水年(993.9 mm), 所以 2003 年土壤侵蚀量小于

表5 流域土壤侵蚀等级面积统计值

侵蚀级别	侵蚀面积/km ²	面积百分比/%	侵蚀总量/10 ⁴ t	侵蚀量百分比/%
微度侵蚀	173.34	57.31	1.91	6.52
轻度侵蚀	103.50	34.22	13.59	46.15
中度侵蚀	21.37	7.06	7.03	23.30
强度侵蚀	2.24	0.74	1.32	4.27
极强烈侵蚀	0.29	0.10	0.29	0.96
剧烈侵蚀	1.73	0.57	5.60	18.80

土壤侵蚀破坏基本农田设施, 降低土地生产力, 物理性淤积水库、渠道, 抬高河床的同时, 还伴随着土壤养分的流失, 是流域非点源污染的主要形式。因此, 在得到流域土壤侵蚀空间分布的基础上, 分析其特点, 分别出于不同的目的采取不同防治措施。流域绝大部分区域属于微度或轻度侵蚀, 该区域大多位于流域湖滨区、台地区, 以及上游河谷带, 这部分土壤侵蚀易于随径流进入河道从而进入滇池, 是流域非点源污染最主要的来源。但该区域又是流域内主要的农业区, 不大可能通过退耕还林降低土壤侵蚀量。该区域可利用地埂种植技术、生物篱技术、混农林技术等生物措施以及径流控制净化等工程措施控制土壤侵蚀。中度侵蚀以上区域虽然面积较小, 但却贡献了 47.2% 的侵蚀量。该区域主要位于流域上游和边界山地, 土壤侵蚀的危害主要表现为降低土地生产力, 淤积水库, 而不是滇池非点源污染源区。宝象水库

3.3 流域土壤侵蚀量计算

USLE 方程实际上就是将所有因子相乘从而获得土壤侵蚀量。利用 GIS 强大的空间运算功能, 将各因子值图进行连乘, 得到像元土壤侵蚀量图。根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—96) 确定土壤侵蚀分级指标, 进行再分类, 得到流域的土壤侵蚀强度图。

2004 年。据云南省水土保持监测总站年土壤侵蚀调查成果^[17], 流域平均土壤侵蚀模数为 1 098.93 t/km², 与本研究结果仅偏差 10.5%, 研究用两年的降雨量均较小, 也导致所得到的侵蚀模数较小, 说明本研究因子选择较合理, 计算结果较为可信。表 5 表明, 占流域面积 91.53% 的区域属于微弱或轻度侵蚀, 这一区域对流域土壤侵蚀量的贡献率为 52.67%, 而流域 47.33% 的土壤侵蚀量来自仅占流域面积 8.47% 的中度侵蚀以上区域(表 5)。

是昆明市主要的水源地之一, 由土壤侵蚀引起的水库淤积、水质下降是水源地保护必须考虑的问题。该区域可通过退耕还林、坡改梯田以及设置前置库等措施控制土壤侵蚀。

[参 考 文 献]

- [1] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. 18—40.
- [2] 曾志远, 潘贤章. 利用遥感和地理信息系统进行流域环境模拟探讨[A]. 见: 遥感新发展与发展战略[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996. 200—204.
- [3] 张建云. 非点源污染模型研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 547—551.
- [4] 张洪江. 土壤侵蚀原理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000. 192—219.
- [5] Christophor Cox, Chandra M. Application of geographic information system in watershed management planning is

- St[J]. *Lucia Computers and Electronic in Agriculture*, 1998, 20: 229—250.
- [6] Renschler C S, Mannaerts C, Diekkruger B. Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk-rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain[J]. *Catena*, 1999, 34: 209—225.
- [7] Sivertun A, Prange L. Non point source critical area analysis in Gisselo Watershed using GIS[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2003, 18: 887—898.
- [8] Lufafa A, Tenywa M M, Isabirye M, et al. Prediction of soil erosion in lake victoria basin catchment using a GIS-based universal soil loss model[J]. *Agricultural Systems*, 2003, 76: 883—894.
- [9] 陈晓燕. GIS 技术在通用土壤流失方程中的应用研究[J]. *中国水土保持*, 2005(5) : 38—39.
- [10] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites[J]. *J Soil and Water Conserv*, 1971, 26: 189—193.
- [11] 柯比克·M J, 摩根·R P C 著, 王礼先, 吴斌, 洪惜英, 等译. 土壤侵蚀[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [12] 杨树华, 贺彬. 滇池流域的景观格局与面源污染控制[M]. 云南: 云南科技出版社, 1998.
- [13] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. *Transactions of the ASAE*, 1994. 105, 107.
- [14] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. *Soil Society of American Journal*, 2000, 64: 1759—1763.
- [15] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤侵蚀的水土保持措施因子[J]. *山地学报*, 1999, 17(A05) : 22—24.
- [16] CSAR. Erosion hazard assessment[A]. in: *Second Land Resource Evaluation and Planning Project (LREP- II) Part C. Technical Report No. 16, Version 1. 0, Bogor, Indonesia*. 1995. 7—12.
- [17] 李建国, 刀红英, 张亮, 等. 滇池流域水土流失监测[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(2) : 75—77.

(上接第 12 页)

- [14] Cajo J F, Braak T. The analysis of vegetation- environment relationships by canonical correspondence analysis[J]. *Vegetatio*, 1987, 69: 69—77.
- [15] 王庆成, 程云环. 土壤养分空间异质性与植物根系的觅食反应[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(6) : 1063—1068.
- [16] 白永飞, 许志信, 李德新. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性[J]. *生态学报*, 2002, 22(8) : 1215—1223.
- [17] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土高原土壤水分空间异质性及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(5) : 715—720.
- [18] 赵文智. 科尔沁沙地人工植被对土壤水分异质性的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1) : 113—119.
- [19] 钱亦兵, 蒋进, 吴兆宁. 艾比湖地区土壤异质性及其对植物群落生态分布的影响[J]. *干旱区地理*, 2003, 26(3) : 217—222.
- [20] 程晓莉, 安树青, 李远, 等. 鄂尔多斯草地退化过程中个体分布格局与土壤元素异质性[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(4) : 503—509.
- [21] 张全发, 闫耀川, 金义兴. 植物群落与异质性[J]. *武汉植物学研究*, 1995, 13(4) : 329—336.
- [22] 李哈尔滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. *应用生态学报*, 1998, 9(6) : 651—657.
- [23] 张金屯. 数量生态学[M]. 科学技术出版社, 2004.
- [24] 唐启义, 冯明光. 数理统计及 DPS 数据处理系统[M]. 中国农业出版社, 1997.
- [25] Raynal D J, Bazzaz F A. Interference of winter annuals with *Ambrosia artemisiifolia* in early successional fields[J]. *Ecology*, 1975, 56: 35—49.
- [26] 张宏, 史培军, 郑秋红. 半干旱地区天然草地灌丛化与土壤异质性关系研究进展[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(3) : 366—370.