

# 基于 USLE 和 GIS/RS 的滇池流域土壤侵蚀研究

董磊<sup>1</sup>, 彭明春<sup>1</sup>, 王崇云<sup>1</sup>, 杜建海<sup>2</sup>, 陈振亮<sup>1</sup>, 孔维琳<sup>1</sup>

(1. 云南大学 生态学与地植物学研究所, 昆明 650091; 2. 云南秀川环境工程技术有限公司, 昆明 650021)

**摘要:** 人类不合理的土地利用方式是水土流失发生的主要原因之一。研究滇池流域的土壤侵蚀现状, 对于控制流域内生态环境恶化, 建立良好的生态环境具有十分重要的意义。采用 USLE 模型并结合 RS、GIS 技术对滇池流域土壤侵蚀进行估算, 分析不同坡度和不同植被类型对侵蚀的影响, 同时提出了基于植被覆盖度的植被覆盖与作物管理因子计算方法。结果表明: 滇池流域土壤侵蚀量为 233.96 万 t, 土壤侵蚀以中、轻度侵蚀为主, 强烈以上侵蚀较弱。侵蚀主要发生在 8°~35° 的区域, 灌木林地的侵蚀模数最大。在 GIS 支持下, 通过土壤侵蚀模型进行定量评价, 可高效、客观地反映土壤侵蚀情况, 对减少流域内新增土壤侵蚀风险, 控制非点源污染有着重要的参考价值。

**关键词:** 土壤侵蚀; USLE; SPOT5 影像; 滇池流域

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)02-0011-04

## Research on Soil Erosion Based on the USLE Model and RS/GIS in the Dianchi Lake Watershed

DONG Lei<sup>1</sup>, PENG Ming-chun<sup>1</sup>, WANG Chong-yun<sup>1</sup>, DU Jian-hai<sup>2</sup>, CHEN Zhen-liang<sup>1</sup>, KONG Wei-lin<sup>1</sup>

(1. Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Yunnan Xiuchuan Environmental Engineering Technique Co. Ltd., Kunming 650021, China)

**Abstract:** Unreasonable land use pattern is the main cause leading to soil erosion. It is important to evaluate soil erosion in the Dianchi Lake watershed for the purpose of preventing soil and water from loss, controlling environmental deterioration, and establishing good ecological environment. We conducted soil erosion research in the Dianchi Lake watershed by using RS/GIS and USLE model. Impacts of different slope and vegetation types on soil erosion were discussed. And the way to calculate C factor based on vegetation coverage was proposed. The results indicated that the total rate of soil erosion was 2.339 6 million tons. Most of soil erosion occurred at mild and moderate degree. And heavy soil erosion area was few. Soil erosion mainly occurred in the region of the slope from 8° to 35°. Soil erosion modulus was the largest in shrublands. The quantitative assessment by USLE model could indicate the soil erosion efficiently and objectively with the support of GIS. It was an extremely important reference for reducing soil erosion and controlling non-point source pollution.

**Key words:** soil erosion; USLE; SPOT5 image; the Dianchi Lake watershed

土壤侵蚀是地球表面的一种自然现象, 是指地球表面的土壤及其母质在水力、风力、冻融、重力等外力的作用及人为因素影响下发生的各种破坏、分离、搬运和沉积的现象<sup>[1]</sup>。土壤流失与水土保持定量评价在研究尺度上可概括为 3 个层次: 地块—小流域—区域(或国家)<sup>[2]</sup>。土壤侵蚀预报是有效监测水土流失和评价水保措施效益的手段, 侵蚀模型则是进行土壤流失监测和预报的重要工具。常用的土壤侵蚀模型

包括通用土壤流失方程式(USLE)<sup>[3]</sup>、修正通用土壤流失方程式(RUSLE)<sup>[4]</sup>等, 以及刘宝元等人<sup>[5]</sup>在 USLE 和 RUSLE 方程式的基础上, 经过改进提出的中国土壤流失方程式(CSLE)。用常规方法研究水土流失需要大量的野外调查并且周期长、区域小。若在 RS 和 GIS 技术的支持下, 不仅可以节省大量的人力、物力和财力, 而且还能及时掌握水土流失状况, 以进行区域合理规划<sup>[6]</sup>。本文通过 GIS 与 USLE 相结

收稿日期: 2011-09-23

修回日期: 2011-10-22

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项研究课题(2008ZX07102-004)

作者简介: 董磊(1987—), 男, 新疆人, 硕士生, 主要从事植被、景观生态学方面的研究。E-mail: dl-donald@163.com

通信作者: 王崇云(1971—), 男, 云南丽江人, 博士, 副教授, 研究方向植被生态学、生态系统服务功能、生物多样性保护、进化生态学等。  
E-mail: cywang@ynu.edu.cn

合的方法并运用 GIS 的栅格数据分析功能,预测土壤侵蚀量。USLE 中的  $C$  因子为植被覆盖与作物管理因子,国内  $C$  值的研究缺乏可比性,主要原因是方法不统一,另外  $C$  因子值的研究周期长,耗费大量人力、物力<sup>[7-8]</sup>。本文采用 RS 技术,进行基于植被覆盖度的  $C$  值计算,以确定引起水土流失的这一关键因子,将为流域内土壤侵蚀现状提供最新的资料,为土地资源评价和管理利用、面源污染控制、区域发展规划等提供科学依据与决策。

## 1 研究区概况

滇池流域位于云贵高原中部,是昆明市人口最多,社会经济最发达的区域。2010 年末,流域内常住人口达 348.62 万人。生产总值达到 1 632.82 亿元,约占昆明市的 80%。同时,滇池流域也是昆明市工农业和生活用水的主要水源地。流域地理位置处于 24°28′—25°28′N,102°30′—103°00′E,地处长江、珠江和红河三大水系分水岭地带,南北长约 109 km,东西宽约 52 km,面积约 2 900 km<sup>2</sup><sup>[9]</sup>。整个流域处于干湿季分明的亚热带高原季风气候区,年平均气温为 14.5℃,平均降水量为 1 035 mm,地带性植被类型是亚热带半湿润常绿阔叶林,但目前以针叶林、灌丛及稀树灌木草丛为主<sup>[10]</sup>。

USLE 方程广泛应用于较大区域的土壤侵蚀定量评价<sup>[10-11]</sup>。目前,CSLE 模型的应用还不是很成熟,其参数的正确性与模拟精度还需进一步说明<sup>[12]</sup>,且该模型的应用主要集中在北方,尤其是黄土高原地区,该地区植被覆盖度低,风蚀、水蚀严重<sup>[13-14]</sup>。本文选取通用土壤流失方程(USLE),作为预测面蚀和沟蚀引起的年平均土壤流失量的方法,公式如下:

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

式中: $A$ ——年平均土壤流失量 $[(t)/(hm^2 \cdot a)]$ ;

表 1 滇池流域常见土壤类型的可蚀性因子值

土壤 基岩	棕壤			棕红壤			山原红壤			紫色土		水稻土	
	石灰岩	玄武岩	泥质岩	石灰岩	玄武岩	泥质岩	石灰岩	玄武岩	泥质岩	紫色岩	红壤性	紫色土性	冲积土性
K 值	0.12	0.29	0.33	0.12	0.31	0.25	0.19	0.12	0.34	0.21	0.29	0.13	0.25

### 1.4 坡长坡度因子 LS

$L$  因子和  $S$  因子合称为 LS 地形因子,根据刘宝元等<sup>[15-16]</sup>的研究结果进行计算:

$$L = \left( \frac{l}{22.13} \right)^m \quad (3)$$

式中: $L$ ——坡长因子; $l$ ——像元坡长; $m$ ——坡长指数。

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.08 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (4)$$

$R$ ——降雨和径流侵蚀因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$ ; $K$ ——土壤可蚀性因子 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$ ; $LS$ ——地形因子; $C$ ——植被覆盖与作物管理因子; $P$ ——水土保持措施因子,其中  $L, S, C, P$  为无量纲因子。

### 1.1 流域数据库建立

图形数据库包括 1:5 万数字高程模型(DEM)空间分辨率为 25 m,流域土壤图,植被/土地利用现状图。植被/土地利用现状图由 SPOT5 影像(全色波段分辨率 5 m,2009 年 12 月 14 日、2010 年 1 月 30 日和 2010 年 5 月 19 日共三景)解译获得。土壤图以土种类型作为成图单元。图形库数据统一为 1:5 万比例尺,以矢量和栅格图层建库。属性数据库包括土壤属性、土地利用属性、植被类型属性等。

### 1.2 降雨侵蚀因子 $R$

本文采用 Wischmeier 的经典算法来计算  $R$  因子,该公式既考虑年降水总量,又考虑降水的年内分布:

$$R = \sum \{1.735 \exp[1.5 \lg(P_i^2/P) - 0.8188]\} \quad (2)$$

式中: $P_i$ ——月降雨量(mm); $P$ ——年降雨量(mm)。

降雨量数据分别来自呈贡县、晋宁县、太华山和昆明市 4 个气象站点的监测数据,这 4 个站点分别位于滇池流域的东、南、西、北 4 个方向,具有一定代表性。其中,数据又有丰水年(1997 年)、平水年(2002 年)和枯水年(2009 年)之分。对 4 个站点不同年份的  $R$  值求平均,以代表该地区的  $R$  值水平。

### 1.3 土壤可蚀性因子 $K$

土壤可蚀性因子是反映土壤抗侵蚀的能力,与土壤类型有关,指的是在其他条件相同时,由于土壤性质不同所引起的侵蚀量的差异。参照杨树华等<sup>[9]</sup>的研究给出滇池流域土壤  $K$  值(表 1),并以土壤类型为成图单元,生成因子栅格图,从而得到  $K$  值的空间分布。

式中: $S$ ——坡长因子; $\theta$ ——坡度。

### 1.5 植被覆盖与作物管理因子 $C$

植被覆盖与作物管理因子( $C$ )是 USLE 方程中最重要的参数。在一定条件下,决定土壤侵蚀强度的大小,反映出不同植被和管理措施对土壤侵蚀的效果。 $C$  因子值的大小受多种因素影响,同时计算也较为复杂,可通过小区观测和人工模拟降水模拟获取。 $C$  值的大小取决于植被类型、植被长势和植被覆盖度<sup>[17]</sup>。植被归一化指数(NDVI)能综合地反映单位

像元内的植被类型、覆盖形态和生长状况,它与地表植被覆盖度有密切关系<sup>[18]</sup>。采用密度模型<sup>[19]</sup>,利用 SOPT5 遥感影像获取的 NDVI 值计算植被覆盖度,公式如下:

$$F_g = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) \quad (5)$$

C 因子值分布范围为 0(纯植被覆盖)到 1(裸岩、土壤等无植被覆盖),植被覆盖度范围为 0(裸岩、土壤等无植被覆盖)到 1(纯植被覆盖)。C 值的计算参照公式(6),从而得到 C 值的空间分布。

$$C = \exp\left(\frac{-2F_g}{1-F_g}\right) \quad (6)$$

式中: $F_g$ ——植被覆盖度。城镇的下垫面性质已发生改变,因此不考虑城镇用地和水域对侵蚀的影响,其 C 值为 0。

### 1.6 水土保持措施因子 P

水土保持措施因子(P)是采用专门措施后的土壤流失量与顺坡种植时土壤流失量的比值,反映了水土保持措施对于坡地土壤流失量的控制,通常采用的侵蚀控制措施有:等高耕作、条带种植、梯田等。由于

资料缺乏,滇池流域内 P 因子值为 1<sup>[20]</sup>。

### 1.7 土壤侵蚀量估算

各因子计算过程在 ArcMAP 9.2 软件中进行,把滇池流域划分成 25 m×25 m 的单元格进行计算,各因子计算结果生成因子图层,再将各因子图层进行叠加运算,得到土壤侵蚀量图。根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)确定土壤侵蚀分级,进行再分类,得到流域的土壤侵蚀强度图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤侵蚀计算结果

本研究将 USLE 模型和 3S 技术结合对滇池流域 2010 年水土流失进行了估算,结果显示滇池流域平均土壤侵蚀模数为 802.22 t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀总量为 2.34×10<sup>6</sup> t。对不同侵蚀强度等级的侵蚀量和侵蚀面积统计后(表 2)表明,占流域面积 94.56% 的微度及轻度侵蚀区域对流域土壤侵蚀量的贡献率为 73.27%,而流域 26.72% 的土壤侵蚀量来自于仅占流域面积 5.43% 的中度及以上侵蚀区域。土壤侵蚀以中、轻度侵蚀为主,强烈及以上侵蚀较弱。

表 2 滇池流域不同侵蚀强度的侵蚀状况

侵蚀强度分级	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	< 500	500~2500	2500~5000	5000~8000	8000~15000	>15000
侵蚀总量/t	284392.86	1429745.61	545451.33	72387.88	7567.56	9.73
侵蚀量贡献率/%	12.16	61.11	23.31	3.09	0.32	0.00
面积/km <sup>2</sup>	1178.04	801.6	106.15	7.38	0.28	0.00
面积百分比/%	56.27	38.29	5.07	0.35	0.01	0.00

### 2.2 坡度与侵蚀的关系

根据 DEM 数据得到流域内的坡度信息,将坡度栅格图层重分类为 6 个坡度等级,然后统计得到每个等级的侵蚀模数(表 3)。研究发现,滇池流域侵蚀量并不是随着坡度的增加而增加,坡度与侵蚀模数之间

并非线性关系,当坡度到达 35°时,土壤侵蚀模数略有下降的趋势,但总体上侵蚀模数随坡度的增加而增大(35°坡度以下)。坡度分布在 8°~35°的区域,土壤侵蚀量占流域总侵蚀量的 78.2%,侵蚀贡献量最大的为 15°~25°的区域。

表 3 滇池流域不同坡度等级的侵蚀状况

指标	0°~2°	2°~8°	8°~15°	15°~25°	25°~35°	≥35°
侵蚀量/t	74375.98	326075.91	645539.78	788829.79	395098.86	109634.65
贡献量/%	3.18	13.94	27.59	33.72	16.89	4.69
面积/km <sup>2</sup>	915.98	567.19	564.32	577.72	227.65	67.13
侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	81.20	574.89	1143.92	1365.42	1735.54	1633.19

### 2.3 土地利用类型与侵蚀的关系

在滇池流域的土地利用类型中,不同类型侵蚀模数差异较大,侵蚀模数由大到小依次为:灌木林地、坡耕地、有林地、园地和平耕地(表 4)。流域土壤侵蚀最严重的类型是灌木林地,侵蚀模数为 1 575.06 t/(km<sup>2</sup>·a)。流域内灌木林地以暖温性灌丛为主,结构较为简单,且分布坡度范围主要集中在 8°~35°,植被覆盖度较低,植被对降雨的截留效果较差,枯落物较少,地面裸露程度大,同时植被对土壤的改造较弱,

水土流失较为严重。坡耕地和平耕地面积相差不大,但坡耕地侵蚀量却是平耕地的 2 倍。因此,在今后的政府工作中应加强对耕地水土保持措施的推广。有林地的土壤侵蚀量也较大,流域内有林地目前以针叶林为主<sup>[9]</sup>,其林冠层对降雨截留的作用较弱;同时有林地中人工纯林的比例较大,其水土保持功能低下。园地和平耕地侵蚀模数相对较小,土壤侵蚀主要发生在坡度 8°~25°的区域,但其受人为扰动影响较大,属于轻度侵蚀强度。

表 4 不同土地利用类型的侵蚀状况

项目	有林地	灌木林地	园地	平耕地	坡耕地
侵蚀量/t	993353.73	651680.63	31065.81	227139.15	436315.65
占侵蚀总量百分比/%	42.46	27.85	1.33	9.71	18.65
侵蚀面积/km <sup>2</sup>	885.68	413.75	40.63	391.34	368.25
占总面积百分比/%	30.33	14.17	1.39	13.40	12.61
侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	1121.57	1575.06	764.60	580.42	1184.82

### 3 结论与讨论

本文以滇池流域为例,利用 USLE 与 3S 技术相结合的方法研究了其 2010 年土壤侵蚀状况,与国内相关研究有一定差别,如与李建国等人<sup>[21]</sup>根据流域内 6 个径流小区实地观测的 283.1 万 t 水土流失量相比,流域内侵蚀量减少了 17.4%,这主要是在“十一五”期间,政府加强了对流域内生态防护的建设,如滇池面山绿化项目(2003 年)、松华坝水源保护区规划(2006 年)以及 2009 年全面开展滇池湖滨“四退三还一护”生态建设工程等。丁剑宏等人<sup>[22]</sup>以 2009 年 ALOS 卫星数据及流域内 1:1 万 DEM 数据,研究了滇池流域土壤侵蚀的空间结构特征。研究表明,滇池流域轻度及以上土壤侵蚀面积占流域面积的 24.60%,本文则为 43.72%,这可能与影像数据、DEM 数据分辨率和侵蚀计算方法不同有关。

通常 C 值是由小区观测得出的经验方程求得,如杨子生<sup>[8]</sup>连续 3 a 根据 6 个径流小区实验,得到了坡耕地不同作物类型的 C 值。基于植被覆盖度的回归方程法,可对大区域不同土地利用类型的 C 值进行快速估算。

通过模型模拟结果发现,当坡度 < 35° 时,土壤侵蚀模数随着坡度的增加而增加,当坡度 > 35° 时,土壤侵蚀模数略有下降的趋势,说明该区域土壤侵蚀过程中存在临界坡度值。不同土地利用方式的侵蚀模数空间差异性较大,侵蚀模数大小为灌木林地 > 坡耕地 > 有林地 > 园地 > 平耕地。为了减少流域内土壤流失量,可以对灌木林地生态功能进行提升,摒弃以往种植人工纯林的局面,以针阔混交林种植为主;对于有林地而言,对低效林和纯林进行生态疏伐,补植阔叶类林种,促进其向顶极群落演替。对于流域内坡度 > 25° 的区域,应巩固退耕还林政策实施的成果,同时加强对灌木林地的植被优化,以减少流域侵蚀的发生。

随着社会、经济的快速发展以及人口的迅速增加,滇池流域水质污染已成为制约昆明市可持续发展的重要因素。滇池是国家重点治理的“三河三湖”之一,面源污染逐渐成为滇池水污染的主要来源。水土

流失是引起面源污染的重要动力和主要载体之一,土壤侵蚀本身就是一个大范围的面源污染<sup>[22]</sup>。因此,对土壤侵蚀模数的研究,也是面源污染研究的一个重要方面。按照新昆明建设“一湖四片”的规划,滇池流域土地利用将发生很大的改变,如何对其进行科学管理并减少流域内新增土壤侵蚀的风险,并有效控制非点源污染将面临严峻的挑战,加强滇池流域的水土流失监测显得尤为重要。

#### 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] 杨勤科,李锐. 中国水土流失和水土保持定量研究进展[J]. 水土保持通报,1998,18(5):13-18.
- [3] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: A guide for soil and water conservation planning [M]. Washington D C: USDA,1978.
- [4] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Rainfall Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Washington D C: USDA,1997.
- [5] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An Empirical Soil Loss Equation[M]. Beijing: Tsinghua Press,2002:143-149.
- [6] 徐旌,张军,刘燕,等. 基于 RS, GIS 的滇池流域水土流失变化研究[J]. 水土保持学报,2004,18(2):80-83.
- [7] 张岩,袁建平,刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 应用生态学报,2002,13(8):1033-1036.
- [8] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤侵蚀的作物经营因子[J]. 山地学报,1999(S1):19-21.
- [9] 杨树华,贺彬. 滇池流域的景观格局与面源污染控制[M]. 昆明:云南科技出版社,1998.
- [10] 吴全,秦富仓,王桂华,等. 内蒙古锡林郭勒盟太仆寺旗土壤侵蚀初步分析[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(9):78-84.
- [11] 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.
- [12] 江青龙,谢永生,张应龙,等. 京津水源区小流域土壤侵蚀空间模拟[J]. 生态学报,2011,30(8):1703-1711.

(4)不同行政单元界限范围对坡长的影响,主要影响因素是水流方向。若村界位于分水线上且水流方向向外,则提取得到的行政界线范围坡长正确。若村界不在分水线上但水流方向向外,则提取的行政界线范围坡长基本正确。若村界不在分水线上同时水流方向向内,截断坡长的累积,坡长值变小,产生较大的边际效应。因此,坡长的提取应以流域边界或行政单元边界向外缓冲一定宽度为界,避免边际效应的产生。

本研究主要是从各种统计特征值及构造方面对坡长不确定性进行对比分析,因此存在一定局限。下一步工作主要是利用地统计学方法,通过半变异函数的变化特征来说明空间分布与格局特征。此外,数据范围及其缓冲宽度的建议,仅仅针对黄土丘陵区 2.5 m 分辨率,更多水土流失区和较低分辨率 DEM(如 5 m 和 10 m)的情况如何,有待进一步分析。

#### 参考文献:

- [1] 杨勤科,李锐,刘咏梅. 区域土壤侵蚀普查方法的初步讨论[J]. 中国水土保持科学,2008,6(3):1-7.
- [2] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. A empirical soil loss equation[M]. Beijing: Tsinghua press,2002:143-149.
- [3] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: A Guide to conservation planning [M]. Washington D C: USDA Agric. Handb,1978.
- [4] Hickey R, Smith A, Jankowski P. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO grid[J]. Computers, Environment and Urban Systems,1994,18(5):365-380.
- [5] Van Remortel R D, Maichle R W, Hickey R J. Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable[J]. Computers and Geosciences,2004,30(9/10):1043-1053.
- [6] 曹龙熹,符素华. 基于 DEM 的坡长计算方法比较分析[J]. 水土保持通报,2007,27(5):58-62.
- [7] 张宏鸣,杨勤科,郭伟玲,等. 基于 GIS 的区域 LS 因子算法及实现[J]. 计算机工程,2010, 36(9):246-248.
- [8] 杨勤科,郭伟玲,张宏鸣,等. 基于 GIS 和 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法[J]. 水土保持通报,2010,30(2):203-206.
- [9] 李俊. 基于 GIS 的小流域坡度坡长因子计算方法研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [10] 张彩霞,杨勤科,段建军. 高分辨率数字高程模型构建方法[J]. 水利学报,2006,37(8):1009-1014.
- [11] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision Graphics and Image Processing,1984,28:323-344.
- [12] Freeman T G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid [J]. Computers and Geosciences,1991,17(3):413-422.
- [13] 郭伟玲,杨勤科,程琳,等. 区域土壤侵蚀定量评价中的坡长因子尺度变换方法[J]. 中国水土保持科学,2010,8(4):73-78.
- [14] 程琳,杨勤科,谢红霞,等. 基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价研究[J]. 水土保持学报,2009,23(5):61-66.
- [13] 程琳,杨勤科,谢红霞,等. 基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J]. 水土保持学报,2009,23(5):61-66.
- [14] XU Xia, MIAO Chiyuan, LIAO Yunfei. Quantitative Remote Sensing Study on Regional Soil Erosion: Bin County of Heilongjiang as an Example [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences,2008,13(3):377-384.
- [15] 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.
- [16] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of American Society of Agriculture Engineers,1994,37(6):1835-1840.
- [17] Ahmet K. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed[J]. Ozcan Journal of Applied Sciences,2010,3(1):77-85.
- [18] 陈晋,陈云浩,何春阳. 基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用[J]. 遥感学报,2001,5(6):416-422.
- [19] 陈云浩,李晓军,史培军. 北京海淀区植被覆盖的遥感动态研究[J]. 植物生态学报,2001,25(5):588-593.
- [20] Lin Chao-Yuan, Lin Wen-Tzu, Chou Wen-Chieh. Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience[J]. Soil & Tillage Research,2002,68:143-152.
- [21] 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.
- [22] 丁剑宏,谢飞帆,陈丽. 滇池流域土壤侵蚀空间结构的分形特征分析[J]. 中国水土保持,2011(1):43-45.

(上接第 14 页)