

采用最大溯源径流路径法估算 RUSLE 模型中地形因子探讨^{*}

罗 红^{1,2} 马友鑫^{1**} 刘文俊¹ 李红梅¹

(¹中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; ²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要 采用基于 AML 的提取坡长值的新方法——最大溯源径流路径法,对贵州省毕节地区 5 个不同范围区域的 DEM 数据进行坡长值、地形因子的提取,并与基于 AML 的迭代累计坡长法和基于 C⁺⁺ 的迭代累计坡长法对提取坡长值的时间消耗、地形因子值进行了比较。结果表明:基于 AML 的最大溯源径流路径法能够实现修正的通用土壤流失模型(RUSLE)中坡长值、地形因子的提取,可达到与迭代累计坡长法相同的效果;与基于 AML 的迭代累计坡长法相比,该方法计算效率较高,大大减少了提取坡长值的时间消耗,可实现基于 AML 的坡长值、地形因子提取在大范围区域上的扩展;与基于 C⁺⁺ 的迭代累计坡长法相比,该方法计算时效和结果相当,程序编写简单,容易修改和调试,能更普遍应用于 GIS 用户。

关键词 坡长值 迭代累计坡长 最大溯源径流路径 地形因子 修正的通用土壤流失模型

文章编号 1001 - 9332(2010)05 - 1185 - 05 **中图分类号** S157; TP306.2 **文献标识码** A

Estimation of topographical factors in revised universal soil loss model based on maximum upstream flow path LUO Hong^{1,2}, MA You-xin¹, LIU Wen-jun¹, LI Hong-mei¹ (¹Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2010, 21(5): 1185 - 1189.

Abstract: By using maximum upstream flow path, a self-developed new method for calculating slope length value based on Arc Macro Language (AML), five groups of DEM data for different regions in Bijie Prefecture of Guizhou Province were extracted to compute the slope length and topographical factors in the Prefecture. The time cost for calculating the slope length and the values of the topographical factors were analyzed, and compared with those by iterative slope length method based on AML (ISLA) and on C⁺⁺ (ISLC). The results showed that the new method was feasible to calculate the slope length and topographical factors in revised universal soil loss model, and had the same effect as iterative slope length method. Comparing with ISLA, the new method had a high computing efficiency and greatly decreased the time consumption, and could be applied to a large area to estimate the slope length and topographical factors based on AML. Comparing with ISLC, the new method had the similar computing efficiency, but its coding was easily to be written, modified, and debugged by using AML. Therefore, the new method could be more broadly used by GIS users.

Key words: slope length value; iterative slope length; maximum upstream flow path; topographical factor; revised universal soil loss model

作为全球几大环境问题之一,土壤侵蚀严重地威胁着人类的生存与发展,已受到世界各国的普遍关注。针对土壤侵蚀的定量研究,目前主要围绕土壤

侵蚀模型的应用而展开^[1-4],在这些物理过程模型和经验统计模型中,地形因子中坡长值的提取方法显得尤为重要^[5-9]。坡长的野外实测适合小尺度地区,而对于流域和区域尺度应通过数字高程模型(digital elevation model, DEM)来提取,其主要计算方法是基于 Arc Info AML 的迭代累计坡长法^[10-13]

* 国家科技支撑计划项目(2007BAD53B01)资助。

** 通讯作者。E-mail: may@xtbg.ac.cn

2009-11-18收稿,2010-03-04接受。

或基于 C^{++} 的迭代累计坡长法^[14]提取 DEM 上每个栅格单元的地形因子. 由于 AML 宏语言简单易懂, 容易被 ArcGIS 用户接受, 因此, 采用基于 AML 的迭代累计坡长法提取坡长值进而提取土壤侵蚀模型中地形因子的应用较多^[15-18], 但该方法对于大范围地形因子的提取却存在用时较长的问题^[14], 甚至无法完成计算. 基于 C^{++} 的迭代累计坡长法与基于 AML 的迭代累计坡长法的原理相同, 应用 C^{++} 编写程序可提高计算速度, 但无法避免循环迭代的过程, 且程序编写复杂、调试难度较大, 应用者必须熟练掌握 C 语言且具备较强的程序编写能力, 应用范围受到局限. 本文基于修正的通用土壤流失模型 (revised universal soil loss equation, RUSLE)^[19]和 ArcGIS 用户所熟悉的 AML 宏语言编程, 提取了土壤侵蚀模型中的坡长值, 以期通过 AML 编程实现基于 DEM 的大区域范围地形因子提取.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区为位于贵州省西北部的毕节地区 (26° 21'—27° 46' N, 105° 36'—106° 43' E). 该区土地总面积 26853 km², 海拔 457~2900.6 m, 河谷深切, 山高坡陡, 地形复杂, 是典型的喀斯特山区. 土壤类型以黄壤和黄棕壤为主, 大部分地区属亚热带温暖湿润季风气候, 年均气温 13.2 °C, 水热资源适中, 年均降水量 848.6~1394.4 mm, 降水主要集中在 5—9 月. 试验数据源于贵州省测绘资料档案馆的毕节地区 DEM 数据, 分辨率 25 m × 25 m, 文件大小达 339 Mb. 同时, 在毕节地区内另设计 4 组不同范围区域 (表 1) 于 2009 年 7 月进行坡长值、地形因子的提取试验, DEM 文件大小 3.7~85 Mb, 分辨率同前.

1.2 最大溯源径流路径法的算法原理

最大溯源径流路径法原理为: 每个栅格单元根据流向向上游追索流入该单元的最大径流路径, 当遇到截止坡度单元时, 最大径流路径从截止坡度单元的上一流入单元断开, 从截止坡度单元的上一流入单元开始重新向上游追索最大径流路径. 该原理与迭代累计坡长法原理的主要区别在于: 1) 最大溯源径流路径法是按径流路径从下游向上游追索, 而迭代累计坡长法是按径流路径从上游向下游追索; 2) 迭代累计坡长法按径流路径循环迭代, 每迭代 1 次, 完成新的栅格单元坡长值的求算, 而最大溯源径流路径法一次性完成所有栅格单元的坡长求算. 由于最大溯源径流路径法不存在循环迭代的过程, 所

以在相同的开发工具下应具备更高的计算时效. 对于区域尺度上地形因子的提取, 应用 GIS 下的 AML 比应用 C^{++} 具有更强的普适性, GIS 下的 AML 更容易实现算法的编写和运行.

1.3 RUSLE 中地形因子的生成

RUSLE 模型结构如下,

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

式中: A 为年均土壤侵蚀量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子. 参照 McCool 等^[20]和 Liu 等^[21]的计算公式求算 S :

$$\begin{cases} S = 10.8 \times \sin\theta + 0.03 & \theta < 9^\circ \\ S = 16.8 \times \sin\theta + 0.50 & \theta \geq 9^\circ \\ S = 21.91 \times \sin\theta + 0.96 & \theta \geq 14^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ 为各栅格单元的坡度.

参照 Wischmeier 等^[22]提出的程序, 应用改进的坡长因子公式计算 L ^[23-24]:

$$L = (\lambda / 22.13)^m \quad (3)$$

$$m = \beta / (1 + \beta) \quad (4)$$

$$\beta = (\sin\theta / 0.0896) / [3.0 \times (\sin\theta)^{0.8} + 0.56] \quad (5)$$

式中: λ 为水平坡长 (m); m 为坡长指数. 坡长因子与坡度因子相乘得到地形因子 (无量纲).

1.4 算法的实现及流程

在 ArcGIS 环境下, 主要计算步骤如下: 1) 对 DEM 填洼; 2) 针对填洼后 DEM, 采用 Flowdirection 函数提取栅格流向图层, 进而提取高点单元和单元坡长值; 3) 针对填洼后 DEM, 采用最大坡降坡度法^[24], 提取栅格坡度 (θ) 图层; 4) 根据流向图层和坡度图层, 提取截止坡度单元的上游单元 (即坡度降低造成沉积出现的上一流入单元), 进而将截止坡度单元上一流入单元的流向修改为 0, 得到修改的流向图层; 5) 根据步骤 2 的流向图层划分出流向为正四方向和斜四方向的两类高点的流经区域 A_1 和 B_1 ; 6) 在两类高点流经区域内分别划分出截止坡度单元上游单元的流经区域 A_2 和 B_2 ; 7) 利用 Flowlength 函数结合步骤 2 的单元坡长值图层和步骤 4 修改的流向图层, 分别提取出 A_1 、 A_2 和 B_1 、 B_2 内各单元的最大溯源路径, 分别合并 A_1 、 A_2 和 B_1 、 B_2 内各单元的最大溯源路径, 对重叠区域取较大者, 得到两类高点流经区域内各单元的最大溯源径流路径 A_3 和 B_3 ; 8) 合并 A_3 和 B_3 , 对二者重叠区域取较大者, 进而得到整个研究区域内各栅格单元的最大溯源径流路径, 即地形因子的重要参数——各栅格单

元的坡长值 (水平坡长); 9)将坡长因子和坡度因子相乘得到地形因子。

2 结果与分析

2.1 提取坡长值的时间消耗

由表 1可以看出,随着试验区域范围的扩大,提取坡长值的耗时越来越长,且方法 1 (本研究所用方法)和方法 3在不同范围区域的时间消耗均明显短于方法 2(基于 AML 的迭代累计坡长法),方法 1和方法 3(基于 C⁺ 的迭代累计坡长法)提取坡度值所消耗时间的差距不大。对于整个毕节地区而言,方法 2 因耗时太长,无法完成坡长值的提取,而方法 1和方法 3都能在 2 h内完成如此大区域范围的坡长值提取,虽然方法 1用时较方法 3稍长,但该方法实现了基于 AML 的坡长值提取在大区域空间上的扩展。

2.2 不同方法下坡长值的比较

大部分野外实际测量的坡长值 (水平坡长) 小于 120 m,且该值通常不会超过 300 m^[1]。为此,本文针对研究区不同范围区域的 DEM,求算每个单元 (最小划分单位:栅格) 的坡长值,并计算其坡长值小于

120 m 和不超过 300 m 的单元所占百分比 (表 2)。

由表 2可以看出,不同范围的试验区域中,坡长值不超过 120 m 的单元所占百分比均达到 70%以上,说明不同范围的实验区域中均有 70%以上单元坡长值的提取达到了野外测量水平,且随着试验区域的扩大,该百分比不断升高;而坡长值不超过 300 m 的单元所占百分比均达到 90%以上,即 90%以上栅格单元的坡长值可以应用,且随着实验区域的扩大,该百分比也不断升高。坡长值小于 120 m 和不超过 300 m 的单元所占百分比均随着区域扩大而不断升高,一定程度上说明这 3种方法在区域扩展上的有效性,而方法 2针对整个毕节地区的 DEM 因耗时太长而无法提取坡长值,表明该方法在区域范围达到一定程度后将无法扩展,而方法 1和方法 3在大区域范围仍能扩展。方法 1提取的两项坡长值指标扩展到 B 组试验后均高于其他两种方法,且 3种方法所得结果的总体差距不大,表明基于 AML 的最大溯源径流路径法与迭代累计坡长法的计算结果相当,其计算精度在一定程度上可超过基于 C⁺ 的迭代累计坡长法。

表 1 基于不同方法的不同区域坡长值的时间消耗
Tab 1 Time cost to extract the slope length of different regions under different methods

试验区域 Experimental region	地理范围 Geographic range	DEM 属性大小 Property size of DEM (Mb)	区域面积 * Area (km ²)	耗时 Time cost (min)		
				方法 1 Method 1	方法 2 Method 2	方法 3 Method 3
A	27°20′—27°30′N, 104°30′—104°45′E	2.9	463	<1	21	<1
B	27°10′—27°30′N, 104°30′—105°00′E	11.3	1839	4	48	3
C	27°00′—27°30′N, 104°15′—105°00′E	25.4	4134	7	92	5
D	26°40′—27°30′N, 103°45′—105°15′E	85.0	13785	25	518	18
毕节地区 Bijie prefecture	26°20′—27°50′N, 103°30′—106°30′E	339.0	39020	76	-	51

方法 1: 基于 AML 的最大溯源径流路径法 Method 1 was the maximum upstream flow path based on the AML; 方法 2: 基于 AML 的迭代累计坡长法 Method 2 was the iterative slope length based on the AML; 方法 3: 基于 C⁺ 的迭代累计坡长法 Method 3 was the iterative slope length based on the C⁺. 下同 The same below. * 区域面积为 DEM 的图幅面积,非行政区划面积 “Area” was the area of DEM’s mapsheet, was not the area of administrative divisions

表 2 基于不同方法的不同区域坡长值有效指标
Tab 2 Valid indicator of slope length of different regions under different methods (%)

试验区域 Experimental region	坡长值有效指标 Valid indicators of slope length	方法 1 Method 1	方法 2 Method 2	方法 3 Method 3
A	<120 m 单元所占百分比 CPSL <120 m	73.59	72.67	73.60
	≤300 m 单元所占百分比 CPSL ≤300 m	94.07	94.00	94.20
B	<120 m 单元所占百分比 CPSL <120 m	75.64	74.75	75.62
	≤300 m 单元所占百分比 CPSL ≤300 m	94.95	94.86	94.34
C	<120 m 单元所占百分比 CPSL <120 m	77.30	76.44	77.28
	≤300 m 单元所占百分比 CPSL ≤300 m	95.50	95.42	95.48
D	<120 m 单元所占百分比 CPSL <120 m	77.32	76.49	77.27
	≤300 m 单元所占百分比 CPSL ≤300 m	95.23	95.15	95.21
毕节地区 Bijie prefecture	<120 m 单元所占百分比 CPSL <120 m	78.59	-	78.54
	≤300 m 单元所占百分比 CPSL ≤300 m	95.72	-	95.70

CPSL: Cell percentage with slope length

2.3 不同方法下地形因子的比较

RUSLE模型中规定:地形因子值不超过 72 从表 3可以看出,不同范围的试验区域中,地形因子值不超过 72的单元所占比例均达 95%以上,且随着研究区域的扩大,该项指标不断升高,其中方法 1 的升幅最高,说明这 3种方法不仅表现出有效的区域

表 3 基于不同方法的不同区域地形因子
Tab 3 LS factor of different regions under different methods

试验区域 Experimental region	地形因子各项指标 Indicators of LS factor	方法 1 Method 1	方法 2 Method 2	方法 3 Method 3
A	最小值 Minimum	0	0.05	0
	最大值 Maximum	486.37	488.05	486.23
	平均值 Average	24.70	24.93	24.61
	标准方差 Standard deviation	22.36	22.48	22.36
	≤72的单元百分比 Cell percentage with LS ≤72 (%)	95.99	95.91	96.01
B	最小值 Minimum	0	0.05	0
	最大值 Maximum	486.37	488.05	486.37
	平均值 Average	22.13	22.32	22.14
	标准方差 Standard deviation	20.83	20.97	20.83
	≤72的单元百分比 Cell percentage with LS ≤72 (%)	96.93	96.86	96.93
C	最小值 Minimum	0	0.04	0
	最大值 Maximum	486.37	488.05	486.37
	平均值 Average	20.92	21.10	20.93
	标准方差 Standard deviation	19.85	19.99	19.85
	≤72的单元百分比 Cell percentage with LS ≤72 (%)	97.41	97.35	97.41
D	最小值 Minimum	0	0.03	0
	最大值 Maximum	770.63	772.97	770.63
	平均值 Average	18.91	19.06	18.91
	标准方差 Standard deviation	19.59	19.72	19.59
	≤72的单元百分比 Cell percentage with LS ≤72 (%)	97.69	97.65	97.69
毕节地区	最小值 Minimum	0	-	0
	最大值 Maximum	770.63	-	770.63
Bijie prefecture	平均值 Average	18.28	-	18.28
	标准方差 Standard deviation	19.34	-	19.34
	≤72的单元百分比 Cell percentage with LS ≤72 (%)	97.82	-	97.82

扩展性,且方法 1随区域的扩展性较其他两种方法更有效.不同方法所得地形因子的最小值、最大值、平均值、标准方差的差距不大,且随着试验区域的扩大,其平均值、标准方差逐渐变小,表明随区域范围的扩大,3种方法的精度均有所提高.随着研究区域的扩展,方法 1和方法 3所得地形因子的各项值达到了完全相等的程度(D 试验区 and 毕节地区),进一步表明基于 AML 的最大溯源径流路径法提取坡长值是可行的,其精度比基于 AML 的迭代累计坡长法更高.

3 讨 论

Van Remortel等^[14]采用基于 AML 和 C⁺⁺的迭代累计坡长法提取了美国 Rincon和 Yakima流域的坡长和坡度因子值,结果表明,随着研究区域的扩展,基于 AML 的迭代累计坡长法的时间消耗显著增加,任何情况下基于 C⁺⁺的迭代累计坡长法的耗时均短于基于 AML 的迭代累计坡长法,当 Yakima 流域的 DEM 文件大小为 37 Mb (分辨率 10 m ×10 m) 时,基于 AML 的迭代累计坡长法耗时达 5760 min,而基于 C⁺⁺的迭代累计坡长法耗时仅 18 min 充分暴露了基于 AML 的迭代累计坡长法提取大范围区域地形因子耗时过长的缺陷,同时也体现了基于 C⁺⁺的迭代累计坡长法在耗时上的优势.本研究结果再次证实了基于 AML 的迭代累计坡长法在耗时上的缺陷,同时也证明了基于 AML 的最大溯源径流路径法和基于 C⁺⁺的迭代累计坡长法不仅计算效率高,而且能够解决大范围区域地形因子提取困难或无法实现的问题.

基于 C⁺⁺的迭代累计坡长法在提取地形因子耗时方面具有显著优势^[14].本文中基于 AML 的最大溯源径流路径法虽然计算效率不能赶超该方法,但由于 AML 相比 C⁺⁺具有简单易懂、容易编程等优势,使基于 AML 的最大溯源径流路径法能更多地被广大 ArcGIS 用户利用.迭代累计坡长法最早采用 AML 编程实现^[10],为克服耗时和区域限制,后来采用 C⁺⁺编程得以实现^[14].本文已经证实了采用 AML 对最大溯源径流路径法编程的可行性,同时也证明了基于 AML 的最大溯源径流路径法较迭代累计坡长法具有绝对优势.采用 C⁺⁺编程,能否实现最大溯源径流路径法下坡长值的提取还有待进一步探讨,如果能够实现,基于 C⁺⁺的最大溯源径流路径法在坡长值的提取结果和时间消耗上能否赶超基于 C⁺⁺的迭代累计坡长法,更待深入研究.

致谢 感谢 Van Remortel RD 提供的 lsfac_c.exe 程序,感谢 Van Remortel RD 和 Hickey R 对本研究的支持和帮助。

参考文献

- [1] Renard KG, Foster GR, Weesies GA, *et al* Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) // United States Department of Agriculture, ed Agriculture Handbook No. 703. Washington DC, USA: United States Department of Agriculture, 1997: 101 - 141
- [2] Flanagan DC, Laflen JM. The USDA Water Erosion Prediction Project (WEPP). *Eurasian Soil Science*, 1997, **30**: 524 - 530
- [3] Young RA, Onstad CA, Bosch DD, *et al* AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, **44**: 168 - 173
- [4] Cooper AB, Smith CM, Bottcher AB. Predicting runoff of water, sediment, and nutrients from a New Zealand grazed pasture using CREAMS *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1992, **35**: 104 - 112
- [5] Moore D, Burch GJ. Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation *Soil Science Society of America Journal*, 1986, **50**: 1294 - 1298
- [6] Moore D, Wilson JP. Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: Simplified method of estimation *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, **47**: 423 - 428
- [7] Desmet P, Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, **51**: 427 - 433
- [8] Cowen J. A proposed method for calculating the LS factor for use with the USLE in a grid-based environment *Proceedings of the Thirteenth Annual ESRI User Conference* Palm Springs, California, 1993: 65 - 74
- [9] Van Remortel RD, Hamilton M, Hickey R. Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data within Arc Info Grid *Cartography*, 2001, **30**: 27 - 35
- [10] Hickey R, Smith A, Jankowski P. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1994, **18**: 365 - 380
- [11] Hickey R. Slope angle and slope length solutions for GIS *Cartography*, 2000, **29**: 1 - 8
- [12] Wang B-W (汪邦稳), Yang Q-K (杨勤科), Liu Z-H (刘志红), *et al* Extraction of RUSLE-LS factors using DEM data and GIS techniques *Science of Soil and Water Conservation (中国水土保持科学)*, 2007, **5** (4): 18 - 23 (in Chinese)
- [13] Zhang Z-L (张照录), Cui J-H (崔继红). Algorithm of topographic factors for soil erosion based on grid GIS *Computer Engineering (计算机工程)*, 2006, **32** (5): 226 - 228 (in Chinese)
- [14] Van Remortel RD, Maichle RW, Hickey RJ. Computing the LS factor for the revised universal soil loss equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable *Computers and Geosciences*, 2004, **30**: 1043 - 1053
- [15] Zhang Z-L (张照录). The algorithm design and optimization for topographic factors of universal soil loss equation based on DEM. *Research of Soil and Water Conservation (水土保持研究)*, 2007, **14** (3): 203 - 205 (in Chinese)
- [16] Xu XQ, Shao XM, Kong XB, *et al* Adapting the RUSLE and GIS to model soil erosion risk in a mountains karst watershed, Guizhou Province, China *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **141**: 275 - 286
- [17] Xu XQ, Pen J, Shao XM. Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS: A case study of the Maotiao River watershed, Guizhou Province, China *Environmental Geology*, 2009, **56**: 1643 - 1652
- [18] Xu XL, Liu W, Kong YP, *et al* Runoff and water erosion on road side-slopes: Effects of rainfall characteristics and slope length *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009, **14**: 497 - 501
- [19] Renard KG, Foster GR, Yoder DC, *et al* RUSLE revisited: Status, questions, answers, and the future *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, **49**: 213 - 220
- [20] McCool DK, Foster GR, Mutchler CK, *et al* Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1987, **30**: 1387 - 1396
- [21] Liu BY, Nearing MA, Risse LM. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1994, **37**: 1835 - 1840
- [22] Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall-erosion losses: A guide to conservation planning // United States Department of Agriculture, ed Agriculture Handbook No. 537. Washington DC, USA: United States Department of Agriculture, 1978: 285 - 296
- [23] McCool DK, Foster GR, Mutchler CK, *et al* Revised slope length factor for the universal soil loss equation *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1989, **32**: 1571 - 1576
- [24] Dunn M, Hickey R. The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS *Cartography*, 1998, **27**: 9 - 15

作者简介 罗 红,女,1984年生,硕士研究生.主要从事景观生态学研究. E-mail: luohong841014@sina.com

责任编辑 杨 弘