

地形因子计算方法对土壤侵蚀评价的影响

梁晓珍¹, 符素华^{1,2}, 丁琳¹

(1.北京师范大学地理科学学部, 北京 100875;

2.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 选取嫩江县、怀来县、吴起县、开州区、长汀县 5 个区域 1:1 万地形图, 生成 5 m 分辨率的 DEM 作为数据来源。分别用分段坡长法和汇流面积法计算了坡长坡度因子, 并用中国土壤流失方程(CSLE)计算了土壤侵蚀模数, 评价了土壤侵蚀强度, 对比分析了分段坡长法和汇流面积法对坡长因子及水土流失面积的影响。结果表明: 采用汇流面积法提取的坡长因子值和空间分布差异比分段坡长法更大, 2 种方法的低值区差异较小, 高值区差异较大。2 种方法计算水土流失面积比例差异不大, 而在计算土壤侵蚀强度上显示出明显的差异。研究结果为不同地形区土壤侵蚀的地形因子和土壤侵蚀评价提供了数据支撑和理论基础。

关键词: 分段坡长法; 汇流面积法; 坡长因子; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0021-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.003

The Influence of Terrain Factors' Calculation Methods on Soil Erosion Evaluation

LIANG Xiaozhen¹, FU Suhua^{1,2}, DING Lin¹

(1.Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875;

2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: The universal soil loss equation (USLE) and Chinese soil loss equation (CSLE) are widely used for soil erosion evaluation. Different methods for calculating slope length factor could cause differences in topographic factors and soil erosion. The purpose of this study was to evaluate the effects of different methods for calculating slope length factor (L) on topographic factor and then on the soil erosion. The 1:10 000 topographic maps from five regions of Nenjiang, Wuqi, Kaixian, Huailai and Changting were selected and 5 m $\times$ 5 m DEMs were generated. The segment slope length method (SSLM) and the catchment area method (CAM) were used to calculate the slope length factor. The CSLE was used to calculate soil erosion. The results showed that the average L factor value and spatial variation from the CAM were greater than those from the SSLM. The area with low L factor values had less difference and the area with high L factor value greater difference between the two methods. The proportions of soil erosion area calculated by the two methods in different terrain areas were not obviously different. However, the soil erosion intensities showed significant differences between the two methods. The results could provide data support and theoretical basis for the study of soil erosion topographic factors and soil erosion assessment in different topographic regions.

Keywords: segment slope length method; catchment area method; slope length factor; soil erosion

水土流失是目前最严重的环境问题之一,它不仅破坏土壤结构,使土壤肥力和生产力下降,而且使河湖渠道泥沙淤积,增加洪水旱涝隐患。随径流泥沙运移的污染物质给异地生态、环境、人类生存和社会经济发展带来了严重影响^[1]。作为研究的热点问题之一,定量评价和预报土壤侵蚀显得十分必要而且迫切。因此,国内外学者提出了一系列土壤侵蚀经验模型。其中被广泛运用的土壤侵蚀模型是由美国 Wis-

chmeier 等^[2]建立的通用土壤流失方程 USLE 和 Renard 等^[3]修正通用土壤流失方程 RUSLE。刘宝元等^[4-5]根据中国土壤坡面特点和水土保持特点建立了中国水土流失方程 CSLE。在这 3 种模型中,地形因子是其重要的影响因子之一。地形因子包括坡度因子和坡长因子,其中坡度因子是指降雨、土壤、坡长、地表状况等条件一致时,某坡度下的坡面土壤侵蚀量与坡度为 5.14°时坡面土壤侵蚀量的比值;坡长因子

收稿日期:2019-04-23

资助项目:国家自然科学基金项目(41571259);长江学者和创新团队发展计划项目(IRT_15R06);中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目

第一作者:梁晓珍(1992—),女,福建龙岩人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:201821051008@mail.bnu.edu.cn

通信作者:符素华(1973—),女,四川岳池人,博士,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail:suhua@bnu.edu.cn

指其他条件一致的情况下,某种坡长的坡面土壤侵蚀量与 22.13 m 坡长坡面土壤侵蚀量的比值^[6]。目前,坡度因子计算方法较为成熟,而坡长因子仍然是最具争议的侵蚀影响因子,也是模型应用的主要限制因素。采用 USLE/RUSLE 的坡面模型计算坡长因子,仅适用于均一的直型坡。因此,Foster 等^[7]将坡面划分为若干个特征相近的小坡段,用分段坡长法来计算复杂坡的坡长因子;Moore 等^[8-9]考虑了水流汇集和分散的影响,利用二维汇流面积代替一维空间中的坡长来计算坡长;Desmet 等^[10]在 Foster 和 Wischmeier 分段坡长因子公式的基础上,考虑了汇流对坡长因子的影响^[6];Böhner 等^[11]通过输沙指数(STI)来计算坡长因子,该指数用集水区的加权平均坡度来体现复杂坡上的坡长因子;胡刚等^[12-13]以东北黑土区为研究区域,比较了单位径流能量法、汇水面积法、输沙指数法和网络三角技术 4 种算法对地形因子的影响,之后又比较了基于单位汇水面积和基于径流路径栅格累积计算地形因子的差别。然而到目前为止,关于不同区域不同计算方法对地形因子以及土壤侵蚀影响的研究鲜有报道。本文选取我国 5 个典型地形区域的数据,采用分段坡长法和汇流面积法 2 种典型计算坡长因子的方法,探索不同区域不同计算方法对土壤侵蚀评价的影响,为流域尺度的地形因子计算和土壤侵蚀评价提供重要的研究基础。

1 研究区概况

选取黑龙江省嫩江县、河北省怀来县、陕西省吴起县、重庆直辖市开州区和福建省长汀县 5 个区域 1:1 万的地形图,生成 5 m 分辨率的 DEM 作为数据源。嫩江县(49.0°N,125.3°E)地处东北黑土区漫川漫岗地带,呈长坡缓坡地形特点,海拔较低,多为 360~380 m,适宜耕作;怀来县(40.4°N,115.6°E)地处北方土石山区,海拔约 850 m,最高处高程接近 1 300 m,植被稀疏,地形崎岖;

吴起县(37.0°N,108.0°E)地处西北黄土高原区,地形破碎,沟壑纵横,梯田密布,平均海拔 1 400 m 以上;开州区(31.3°N,108.6°E)地处西南土石山区,地形高低起伏,山地众多,海拔约 650 m,且山地陡峭,植被较茂;长汀县(25.6°N,116.3°E)地处南方红壤丘陵区,海拔 250~600 m,地势起伏较大,多陡崖,有河流流过,修建有一定数量的水利大坝设施。

为定量研究 5 个区域不同计算方法地形因子对土壤侵蚀的影响,采用刘宝元等^[4]提出的 CSLE 模型计算:

$$M=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \tag{1}$$

式中: M 为土壤水蚀模数($t/(hm^2 \cdot a)$); R 为降雨侵蚀力因子($(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$); K 为土壤可蚀性因子($(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$); L 和 S 分别为坡长因子和坡度因子,无量纲; B 为植被覆盖与生物措施因子,无量纲; E 为工程措施因子,无量纲; T 为耕作措施因子,无量纲。

本文收集了第 1 次水利普查中 5 个区域的土壤侵蚀模数部分计算因子数据,即降雨侵蚀力因子(R)、土壤可蚀性因子(K)和耕作措施因子(B)值(表 1)。为了简化参数,将各区域均当作农地处理,所以工程措施因子(E)和生物措施因子(T)值均取值 1;同时将 5 个区域采用 Arcgis 软件分析坡度情况。 R 长汀县和开州区较大,其他区域无较大差异; K 长汀县最小,怀来县最大; B 各个区域的值差距不大。吴起县平均坡度最大,87.2%的坡度 $>15^\circ$,坡度陡;嫩江平均坡度最小,99.8%的坡度 $<5^\circ$,坡度平缓;其他 3 个区域,平均坡度由大到小依次是开州区、怀来县和长汀县,开州区 73.4%坡度 $>15^\circ$,较吴起县平缓,怀来县 25.7%坡度 $<5^\circ$,55.6%坡度 $>15^\circ$;长汀县 64.2%坡度为 $8^\circ \sim 35^\circ$,19.2%坡度 $<5^\circ$;长汀县和怀来县坡度分级差异不大。

表 1 各区域土壤侵蚀模数部分计算因子及坡度

区域	R	K	B	平均坡度/(°)	坡度分级/%					
					0~5°	5°~8°	8°~15°	15°~25°	25°~35°	>35°
嫩江县	1227	0.025	0.331	2.14	99.8	0.2				
吴起县	1020	0.013	0.417	27.06	2.1	2.3	8.4	24.9	40.4	21.9
开州区	5791	0.008	0.403	23.13	9.2	4.9	12.4	25.9	31.2	16.3
怀来县	1021	0.017	0.397	18.52	25.7	7.7	11.0	18.6	24.6	12.4
长汀县	6814	0.003	0.354	18.27	19.2	6.6	17.1	25.6	21.5	10.0

2 研究方法

2.1 计算原理

在 CSLE 模型中地形因子反映土壤侵蚀量与坡长坡度之间的定量关系。由于我国存在大量 $15^\circ \sim 25^\circ$ 的陡坡耕地,坡度因子计算也需考虑到陡坡条件下的情况。因此,选择 Liu 等^[14]适合我国土壤侵蚀特点的坡度因子计算公式:

$$S=10.8\sin \theta+0.03 \quad \theta<5^\circ \tag{2}$$

$$S=16.8\sin \theta-0.5 \quad 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \tag{3}$$

$$S=21.91\sin \theta-0.96 \quad \theta \geq 10^\circ \tag{4}$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度(°)。

坡长因子计算方法有 2 种:第 1 种采用 1974 年 Foster 等^[7]提出的分段坡长公式。

$$Li=\frac{(\lambda_{out})^{m+1}-(\lambda_{in})^{m+1}}{(\lambda_{out}-\lambda_{in}) \cdot (22.13)^m} \tag{5}$$

式中: L_i 为第 i 个栅格的坡长因子; λ_{out} 、 λ_{in} 分别为栅

格出口及入口的坡长(m); m 为坡长指数。此方法简称分段坡长法,坡长指数取值为:

$$m=0.2 \quad \theta<0.5^{\circ} \tag{6}$$

$$m=0.3 \quad 0.5^{\circ}\leq\theta<1.5^{\circ} \tag{7}$$

$$m=0.4 \quad 1.5^{\circ}\leq\theta<3^{\circ} \tag{8}$$

$$m=0.5 \quad 3^{\circ}\leq\theta \tag{9}$$

第 2 种坡长计算方法是采用 1996 年 Desmet 等^[10]考虑了汇流影响的汇流面积法坡长因子公式:

$$L_i=\frac{(A_{out})^{m+1}-(A_{in})^{m+1}}{(\Delta X)^2\cdot NCSL^m\cdot (22.13)^m} \tag{10}$$

式中: L_i 为第 i 个栅格的坡长因子; A_{out} 、 A_{in} 分别为栅格出口及入口的汇流面积(m^2); m 为坡长指数; ΔX 为栅格分辨率(m);NCSL 为与栅格入口、出口水流方向相关的非累计坡长(m)。此方法简称汇流面积法。

2.2 数据处理

利用土壤侵蚀模型地形因子计算工具^[6]分别采用分段坡长法和汇流面积法计算坡长因子及坡度因子,其中输入参数坡长阈值为 100 m,坡度阈值为 30° ,汇流面积阈值为 25 km^2 ,去短枝为 120 m,缓坡中断因子为 0.7,陡坡中断因子为 0.5;然后采用 CSLE 模型计算土壤侵蚀模数。根据水利部土壤侵蚀分类分级标准^[15]将土壤侵蚀强度分为 6 级:微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀。土壤侵蚀强度轻度侵蚀以上的区域确定为水土流失区域,并计算水土流失面积比例。

3 结果与分析

3.1 坡长因子差异

3.1.1 平均坡长因子差异 分段坡长法计算的平均坡长因子最大为吴起县(1.90),最小为长汀县(1.35),其余区域均为 1.78;离差系数由大到小依次为长汀县、开州区、怀来县、吴起县和嫩江县。汇流面积法计算的平均坡长因子最大为怀来县(3.73),最小为长汀县(2.36),其他 3 个区域差距不大,坡长因子值均为 3.2~3.4,离差系数由大到小依次为吴起县、开州区、怀来县、长汀县和嫩江县。5 个区域汇流面积法计算值较分段坡长法计算值大,2 种计算方法的相对差异由大到小其次为怀来县、嫩江县、开州区、长汀县和吴起县,相对差异最大的是怀来县(109.43%),最小的是吴起县(72.63%)(表 2)。

表 2 各区域平均坡长因子统计

区域	分段坡长法		汇流面积法		相对 差异/%
	均值	离差系数	均值	离差系数	
嫩江县	1.78	0.22	3.41	0.71	91.57
怀来县	1.78	0.39	3.73	2.75	109.55
吴起县	1.90	0.38	3.28	2.97	72.63
开州区	1.78	0.43	3.23	2.87	81.46
长汀县	1.35	0.57	2.36	2.53	74.81

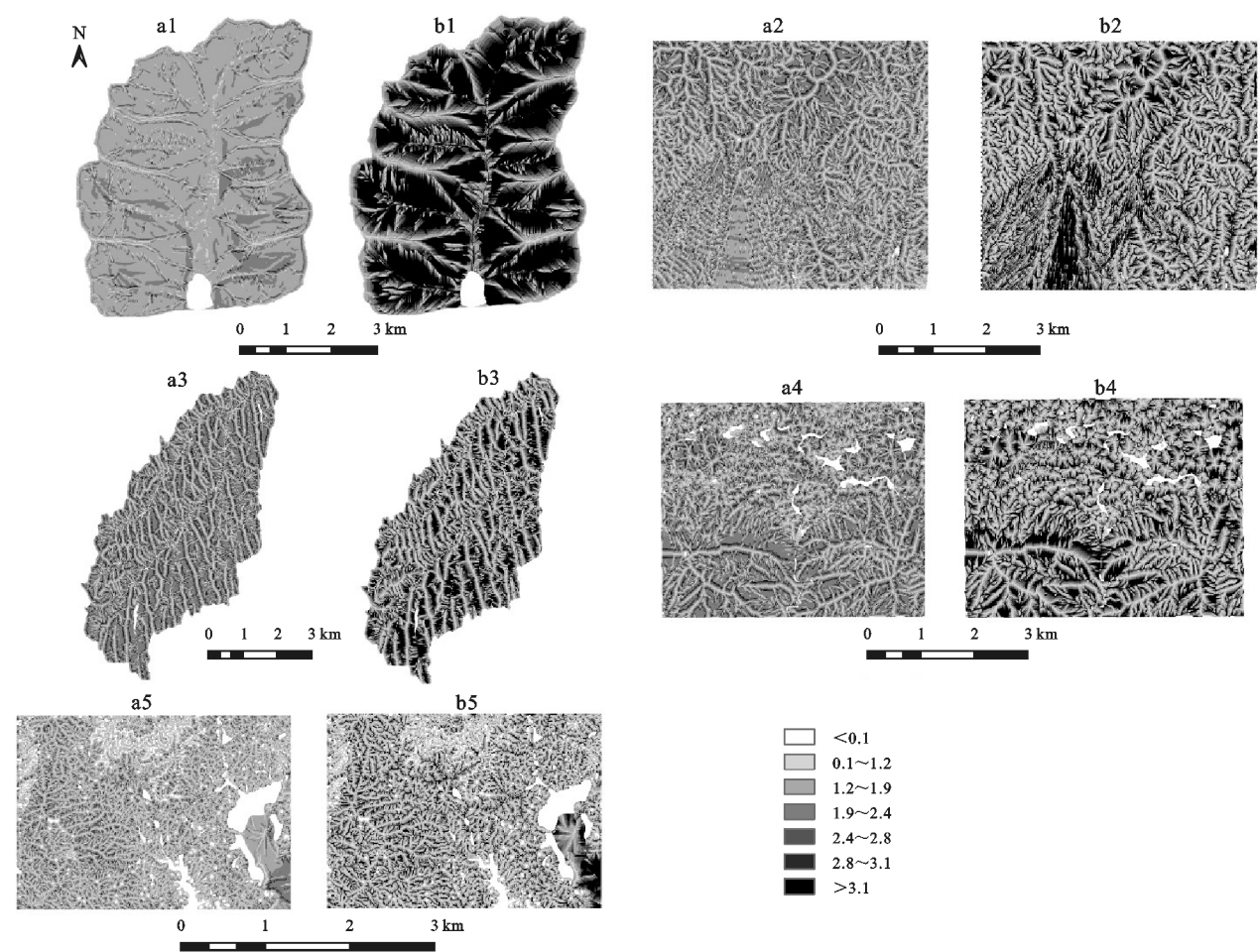
3.1.2 坡长因子分级差异 从总体来看,2 种方法提取的坡长因子空间分布差异较大,低值区差异较小,高值区差异较大。并且汇流面积法计算所得的坡长因子值偏大,嫩江县坡长因子差异最明显(图 1)。

2 种计算方法在同一区域不同分级坡长因子面积比例存在显著差别(表 3)。嫩江县、怀来县、吴起县、开州区和长汀县用分段坡长法计算的坡长因子分级分别集中在 1.2~1.9,1.2~1.9,1.9~2.4,1.9~2.4,1.2~1.9;用汇流面积法计算的坡长因子分级分别集中在 ≥ 3.1 ,1.2~1.9,1.2~1.9,1.9~2.4,0.1~1.2。

2 种计算方法坡长因子面积比例相对差异最小的分级为 <0.1 ,该分级中各个区域的相对差异基本为 0;相对差异最大的坡长因子分级为 ≥ 3.1 ,该分级中相对差异最大的区域为嫩江县(19 628.2%),最小的区域为吴起县(505.6%);在其他的坡长因子分级中,怀来县、吴起县、开州区和长汀县 4 个区域的相对差异较小,嫩江县在坡长因子分级为 2.4~2.8 和 2.8~3.1,相对差异较大。

2 种计算方法差异的主要原因是分段坡长法只考虑最长的流向对土壤侵蚀的影响^[16](如图 2 栅格序号 36 最长坡长为虚线所示),忽略其他流向的影响;而汇流面积法是将所有流入当前栅格的所有流向的汇流面积考虑在内(如栅格序号 36 需要考虑栅格序号 30 和栅格序号 35 流入的总汇流面积)。

2 种算法坡长因子值在空间上的差异可以分为偏大、偏小和相等 3 种情况。汇流面积法比分段坡长法计算值偏大的区域主要分布在不同流向汇集的坡面下端(如栅格序号 29,35 和 36),且入口处累计汇流面积越大,差异也就越大,如栅格序号 36 差异大于栅格序号 35。汇流面积法比分段坡长法计算值偏小的区域主要分布在流向为东北、西北、东南和西南方向,同时该区域内的所有栅格水流流入流出方向一致(如栅格序号 1~3)。汇流面积法和分段坡长法计算值相等的区域主要分布在流向方向为东、西、南和北方向,同时该区域内的所有栅格水流流入流出方向一致(如栅格序号 30~34)。当然,5 个区域坡面特征不同,流向分布规律也不同,加上分级区间的影响,3 种类型的差异会部分抵消,但最终在分级的高值区差异会变大,因为越到坡面下端,汇集效果越大,差异也越大。相比起分段坡长法只考虑一维最长坡长,汇流面积法用二维贡献面积代替一维坡长,这就使坡长增大导致地表径流和土壤侵蚀增加的机理得以体现。因此,汇流面积法对于流域和区域尺度上的土壤侵蚀评价更加合理,尤其是对于像嫩江县那样汇流比较强烈的漫川漫岗地区。



注:a 为分段坡长法;b 为汇流面积法;1 为嫩江县;2 为怀来县;3 为吴起县;4 为开州区;5 为长汀县。下同。

图 1 各区域坡长因子分级

表 3 各区域 2 种算法坡长因子分级面积比例和相对差异

区域	项目	<0.1	0.1~1.2	1.2~1.9	1.9~2.4	2.4~2.8	2.8~3.1	≥3.1
嫩江县	分段坡长法	1.3	6.7	70.2	17.9	3.5	0.3	0.2
	汇流面积法	1.3	7.1	14.8	11.6	10.0	6.6	48.6
	相对差异/%	0	6.5	-79.0	-34.7	186.3	2188.8	19628.2
怀来县	分段坡长法	0.1	18.6	34.5	28.7	11.2	4.3	2.5
	汇流面积法	0.1	24.9	28.6	13.4	7.1	2.9	23.0
	相对差异/%	0	33.5	-16.9	-53.5	-36.8	-33.6	823.6
吴起县	分段坡长法	1.1	13.9	26.1	36.0	12.9	5.9	4.1
	汇流面积法	1.1	20.9	26.4	14.3	8.9	3.8	24.6
	相对差异/%	0	50.7	0.8	-60.2	-30.6	-36.4	505.6
开州区	分段坡长法	2.6	17.4	29.1	31.2	11.5	5.1	3.1
	汇流面积法	2.6	23.0	28.1	13.8	7.7	3.1	21.7
	相对差异/%	0	32.3	-3.4	-55.9	-33.2	-39.0	607.1
长汀县	分段坡长法	8.0	29.2	37.6	15.7	6.1	2.4	0.9
	汇流面积法	8.0	34.7	28.5	10.2	4.4	1.8	12.5
	相对差异/%	0	18.6	-24.3	-35.2	-28.3	-26.1	1254.3

3.2 土壤侵蚀模数和土壤侵蚀强度差异

3.2.1 平均土壤侵蚀模数差异 分段坡长法计算的平均侵蚀模数从大到小依次是开州区、吴起县、怀来县、长汀县和嫩江县。离差系数由大到小依次为长汀县、怀来县、开州区、吴起县和嫩江县。汇流面积法计

算的平均侵蚀模数各个区域的大小关系和分段坡长法的一样。离差系数由大到小依次为长汀县、开州区、怀来县、吴起县和嫩江县。汇流面积法比分段坡长法计算值大,2 种计算方法的相对差异最大的是嫩江县(97.5%),最小的是长汀县(35.3%),其他 3 个区域的相对差异差不多,均为 42%左右,即漫川漫岗

地带差异大,山地丘陵差距较小。

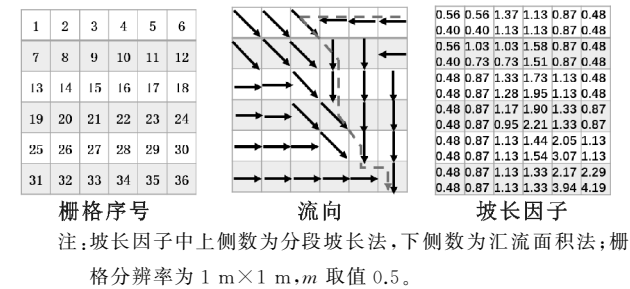


图2 不同算法的坡长因子

土壤侵蚀模数是由各个因子的乘积决定,2种计算方法的土壤侵蚀模数差异取决于LS乘积的差异。

表4 各区域平均侵蚀模数及相对差异统计

区域	分段坡长法				汇流面积法				S	相对差异/%
	M	离差系数	L	S/L	M	离差系数	L	S/L		
嫩江县	836	0.48	1.8	0.2	1651	0.86	3.4	0.1	0.4	97.5
怀来县	6932	0.87	1.8	10.4	9847	1.68	3.7	5.0	18.5	42.0
吴起县	8958	0.51	1.9	4.2	12657	1.52	3.3	2.5	8.1	41.3
开州区	23664	0.65	1.8	3.9	33786	1.71	3.2	2.1	6.9	42.8
长汀县	5695	0.90	1.4	4.0	7707	1.79	2.4	2.3	5.5	35.3

注:M为平均侵蚀模数($t/(km^2 \cdot a)$);L为平均坡长因子;S为平均坡度因子。

3.2.2 土壤侵蚀强度分级及水土流失面积差异 2种方法计算的土壤侵蚀模数除嫩江县外空间分布

嫩江县位于漫川漫岗地带,相比其他区域平均坡度因子值最小,且数值远小于该区的平均坡长因子值。所以LS的乘积大小更多取决于坡长因子的大小,从而使坡长因子的差异对土壤侵蚀模数的差异造成显著影响,这与胡刚等^[13]的研究成果相符。而其他区域,同一区域平均坡度因子的数值比平均坡长因子大,分段坡长法大1倍以上,而汇流面积法大2.9倍以上。所以LS的乘积大小更多取决于坡度因子的大小,由于2种算法的坡度因子计算值差距不大,从而使坡长因子的差异引起土壤侵蚀模数的差异被坡度因子明显地减弱(表4)。

差异不大,嫩江区低值差异不大,中高值差异较大(图3)。

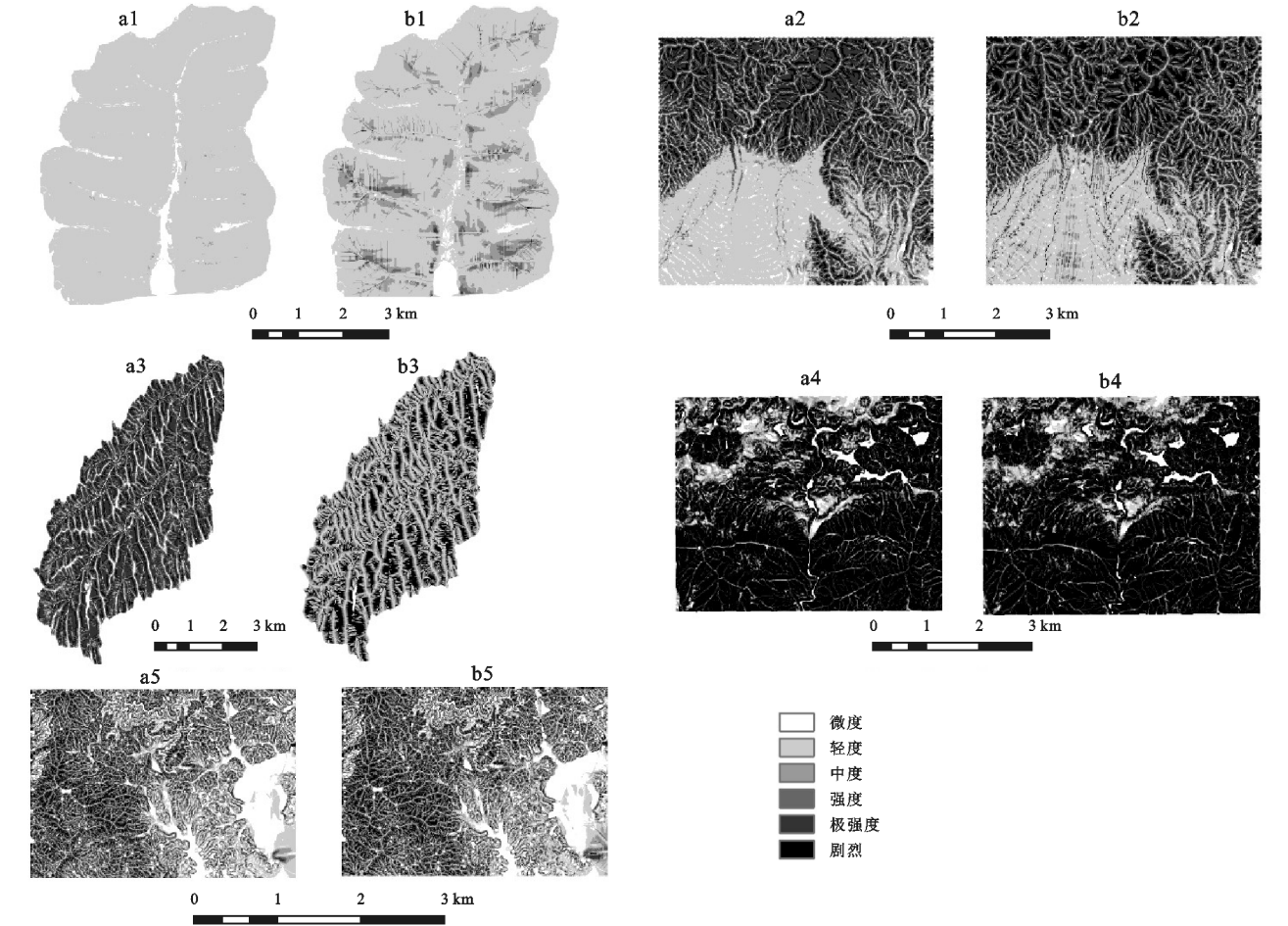


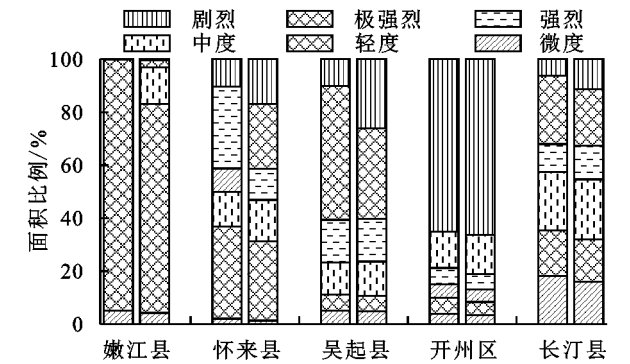
图3 各区域土壤侵蚀模数分级

从图4可以看出,用分段坡长法计算嫩江县的土壤侵蚀强度主要集中在轻度;用汇流面积法计算嫩江

县土壤侵蚀强度主要集中在轻度和中度;用 2 种方法计算吴起县和开州区的土壤侵蚀强度都主要集中在强烈以上;用 2 种方法计算怀来县和长汀县的土壤侵蚀强度都主要集中在轻度到极强烈之间。

除嫩江县和开州区外,汇流面积法比分段坡长法在土壤侵蚀强度为剧烈的差异较大,其他强度的差异较小;嫩江县差异主要集中在侵蚀强度为中度上,开州区所有的侵蚀强度段上差异不明显。

除长汀县外,2 种方法计算的水土流失面积比例基本在 95%以上,2 种算法的差异不到 1%;长汀县 2 种计算的水土流失面积比例均在 81%~84%,差异为 2.63%。总体上说,2 种算法计算的水土流失面积比例差异较小。



注:左柱为分段坡长法,右柱为汇流面积法。
图 4 各区域土壤侵蚀强度分级百分比

4 结论

不同地形区采用汇流面积法提取的坡长因子值和空间分布差异比分段坡长法更大。坡长因子分级在 ≥ 3.1 的高值区相对差异最大,该分级中各区域差异值大小顺序为嫩江县>长汀县>怀来县>开州区>吴起县,坡长因子分级在 < 0.1 的低值区差异不大。产生差异的主要原因是分段坡长法只考虑最长坡长的坡长因子,汇流面积法则考虑了所有流向的汇流面积。

不同地形区采用汇流面积法计算的平均土壤侵蚀模数值比分段坡长法更大,2 种计算方法的差异也较大,其中嫩江县漫川漫岗地带的差异最大,原因是该区的坡长因子差异对土壤侵蚀模数差异的影响最为显著。

2 种方法计算的水土流失面积比例差异不到 1%。在吴起县、长汀县、怀来县土壤侵蚀强度剧烈的差异较大,在嫩江县土壤侵蚀强度中度的差异较大,开州区则所有的侵蚀强度段上差异不明显。

参考文献:

[1] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(9):7-9.
[2] 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]. Agriculture Handbook No 537. Washington D C: USDA, 1978.
[3] 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]. Agriculture Handbook No 730. Washington DC: USDA, 1997.
[4] 刘宝元,郭彦彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].中国水土保持,2013(10):26-34.
[5] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation[C]. ISCO Pot. Beijing: Tsinghua Press, 2002: 143-149.
[6] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].中国水土保持科学,2015,13(5):1-10.
[7] Foster G R, Wischmeier W H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction[J]. Transaction of ASAE, 1974, 17: 305-309.
[8] Moore I D, Wilson J P. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 47(5): 423-428.
[9] Moore I D, Burch G J. Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(5): 1294-1298.
[10] Desmet P J, Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(5): 427-433.
[11] Böhner J, Selige T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation, analysis and modeling applications [M]. Göttingen: Göttinger Geographische Abhandlungen, 2006.
[12] 胡刚,宋慧,刘宝元,等.黑土区基准坡长和 LS 算法对地形因子的影响[J].农业工程学报,2015,31(3):166-173.
[13] 胡刚,宋慧,石星军,等.基于单位汇水面积的地形因子特征评价[J].地理科学,2016,36(4):621-627.
[14] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transaction of American Society of Agriculture Engineers, 1974, 37(6): 1835-1842.
[15] 中华人民共和国水利部水土保持司.土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
[16] Qin W, Guo Q K, Cao W H. A new RUSLE slope length factor and its application to soil erosion assessment in a Loess Plateau watershed[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 182: 10-24.