贵州省乌江流域土壤侵蚀与地貌特征的关联分析

王 尧[1,3], 蔡运龙[2], 潘 懋[1]

(1. 北京大学 地球与空间科学学院 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;
2. 北京大学 城市与环境学院, 北京 100871; 3. 国土资源部 资源环境承载力评价重点实验室, 北京 101149)

摘 要: 结合乌江流域 2000 年土壤侵蚀分布图和研究区 30 m 分辨率的 ASTER GDEM 数据,对乌江流域土壤侵蚀在海拔高度、坡度、地表起伏度和粗糙度方面的空间分布特征进行研究。结果表明,贵州省乌江流域土壤侵蚀主要为水力侵蚀,包括微度、轻度、中度、强度和极强度侵蚀 5 种类型,以微度和轻度侵蚀为主。乌江流域微度和轻度土壤侵蚀空间分布的高程特征呈现单峰现象,中度以上侵蚀的高程特征呈双峰现象。流域中度及中度以下土壤侵蚀空间分布的坡度特征为单调下降趋势,强度和极强度土壤侵蚀的面积比例随着坡度的增加呈现先增大后减小的趋势,15°左右存在一个侵蚀临界坡度。乌江流域的土壤侵蚀随地形起伏度的增加表现为先增加后减小的趋势,存在 7～16 m 临界起伏度;各类型土壤侵蚀随地表粗糙度的增加均呈减小趋势。喀斯特地区流域尺度侵蚀强度的变化受高程和坡度的影响较大,对地形起伏度和地表粗糙度的变化不敏感。

关键词: 土壤侵蚀; 地貌特征; 乌江流域; 喀斯特

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2013)03-0007-06 **中图分类号**: S157

Relationship Between Soil Erosion and Topographic Characters in Wujiang River Basin of Guizhou Province

WANG Yao[1,3], CAI Yun-long[2], PAN Mao[1]

(1. *Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution of the Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing*, 100871, *China*; 2. *College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing* 100871, *China*; 3. *Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, Ministry of Land & Resources, Beijing* 101149, *China*)

Abstract: The spatial correlation between soil erosion and the elevation, slope, amplitude and surface roughness is analyzed based on overlay analysis of soil erosion in 2000 and DEM with a resolution of 30 meters. Results show that the main type of erosion in Wujiang River basin is water erosion. According to the strength, the erosion can be divided into five levels which are minor, slight, moderate, high and extremely-high. The minor and slight levels of erosion are the dominated erosion. The minor and slight levels of erosion appear a single peak with the increasing elevation, while the moderate and the other beyond the moderate show obvious double peaks. The distribution of the moderate and other levels of erosion below it decreases with increasing slope. The ratio of high erosion area to extremely-high increases with the surface rolling at first, and then decreases, with 15° as a threshold. The erosion increases with the amplitude at first and decreases later, with a threshold of 7～16 meters. The surface roughness is negatively correlated to soil erosion. The rougher the land surfaces, the lighter the soil erosion. Soil erosion in the karst area is not sensitive to amplitude and surface roughness, while it is largely affected by elevation and slope.

Keywords: soil erosion; topographic character; Wujiang River basin; karst

土壤侵蚀作为土地利用/覆被变化引起的主要环境效应之一,是自然因素和人为因素叠加的结果,是全世界瞩目的环境问题。由于海拔高度、坡度、地形起伏度等因素能间接或直接反映人为活动的频率,

收稿日期:2012-09-14 修回日期:2012-12-17
资助项目:国家科技支撑计划项目子课题"西南生态安全屏障决策支撑技术体系"(2011BAC09B08-04);国土资源大调查项目"资源环境承载力综合评价技术与方法研究"(1212011220090)
作者简介:王尧(1979—),女(汉族),山东省威海市人,博士,助理研究员,主要从事土地科学研究。E-mail:wangyaopku@pku.edu.cn。
通信作者:蔡运龙(1948—),男(汉族),贵州省贵阳市人,教授,主要从事自然地理学、土地变化、地理学理论与方法等方面的研究。E-mail:caiyl@urban.pku.edu.cn。

光、温、降雨等自然资源空间差异和水土流失等级等，加强土壤侵蚀空间分布的地貌特征研究，对于流域水土流失治理与区域评价无疑具有十分重要的意义[1-13]。中国西南喀斯特地区生态环境脆弱，以土壤侵蚀为特征的土地退化问题严峻，直接危害到长江和珠江流域的生态安全和经济安全[14]。喀斯特地区大部分土壤侵蚀研究集中于分析人类活动造成的土地利用结构的变化对土壤侵蚀的影响[15-18]，而以中尺度流域为研究对象分析自然因素对土壤侵蚀的影响研究几乎没有。

为了深入分析流域土壤侵蚀发生、发展的驱动力，本文以乌江流域为研究对象，采用 3S 技术手段，通过定量方法对乌江流域土壤侵蚀强度变化随海拔高度、坡度、地形起伏度等自然因素的变化规律进行了探讨，旨在为乌江流域以及其他喀斯特地区流域的合理开发和水土保持规划提出科学依据。研究乌江流域土壤侵蚀空间分布的地貌特征，具有重要的科学意义和实践价值。

1 研究区概况

研究区域贯穿贵州省中部的乌江流域。乌江属长江水系，发源于贵州西部乌蒙山东麓威宁县境的香炉山，干流在贵州省境内流经威宁、水城、纳雍等 23 个县市，在东北部出境进入四川，主要支流有六冲河、三岔河、猫跳河、鸭池河、湘江、偏岩河、清水江、石阡河和余庆河等。乌江流域在贵州省境内面积 51 817 km^2，其地势西高东低，流域内 75.6%的地区为碳酸质岩发育的喀斯特地貌。上游威宁、赫章一带溯源侵蚀尚未波及，高原地面保存较好；中下游地区大多河谷深切，山高谷深，地表起伏度最高达 300 m。

2 研究数据与研究方法

2.1 数据来源

乌江流域 2000 年土壤侵蚀强度等级分布图来自贵州省水利厅组织开展的贵州省第 2 次水土流失遥感调查成果。长江上游 1∶25 万水系分布数据来自地球系统科学数据共享平台。高程数据采用日本地球遥感数据分析中心于 2011 年公布的 30 m 精度的 ASTER GDEM（advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer global digital elevation model）第 2 版数据。

2.2 研究方法

在 ArcGIS 下采用 30 m 分辨率的 ASTER GDEM 数据和 1∶25 万长江上游水系分布图，基于 Arc Hydro Tools 扩展模块提取流域特征，包括 5 个流程：DEM 的预处理、水流流向的确定、汇流栅格图的生成、自动生成河网和子流域边界的划分。在使用 Arc Hydro Tools 处理 DEM 数据过程中，自 1∶25 万长江上游水系提取的乌江流域水系，用 AGREE 方法来融合主干河网至 DEM 中，设定 3 个参数缓冲区大小（栅格数）、平滑距离、陡降距离分别为 10，50，500。最终设定的集水区栅格数阈值为 5 000 000，得到乌江流域的边界。用流域边界提取 DEM 数据生成 4 个表征流域复杂地貌形态特征的宏观因子专题图层：高程、坡度、地表粗糙度和地形起伏度专题图。将乌江流域 2000 年土壤侵蚀空间分布图和 4 个宏观因子专题图层进行叠加和统计分析，得到贵州省乌江流域土壤侵蚀空间分布的地貌特征。

3 结果与分析

3.1 乌江流域土壤侵蚀空间分布基本特征

由于地处高温多雨的高原亚热带湿润气候区，贵州省的土壤侵蚀基本属于水蚀类型。由附图 2 分析可知，乌江流域土壤侵蚀包括微度、轻度、中度、强度和极强度侵蚀 5 种类型，其面积分别占流域面积的 55.0%，26.19%，13.21%，4.82%和 0.78%。水土流失强度高、分布面积广的区域在乌江流域上游的赫章、镇雄、纳雍和下游的思南、德江、印江土家族苗族自治县和沿河土家族自治县等地，这些地区的共同特点是地形切割强烈、平均坡度大，侵蚀强度等级高的类型多发生在土质山地的坡耕地和植被稀疏区上。流域内碳酸盐岩分布广泛，这些岩层大多具有石质坚硬、成土过程缓慢、土层浅薄的特点，在现代加速侵蚀条件下，很多山丘土壤侵蚀殆尽，岩石裸露，成为广大无土可流区域，水土资源不断流失后呈现的“石漠化”现象严重。

乌江流域的思南、德江、沿河等县裸岩石山到处可见，约有 20%面积石化。在中度和强度石漠化地区，土壤的存在与否及土层厚度是决定土壤侵蚀发生及强弱的关键，土壤侵蚀表现为侵蚀总量小，但局部地段侵蚀大，土壤侵蚀强度小但有植被覆盖区侵蚀强度大的特点。因此，虽然流域土壤侵蚀以微度和轻度侵蚀为主，但从控制水土流失的角度来讲，轻度和中度土壤侵蚀地区也是重点治理地区。

3.2 土壤侵蚀空间分布的高程特征

按照 200 m 高程间距，将乌江流域 DEM 划分成 10 个高程等级。将高程等级专题图（附图 3）与土壤侵蚀空间分布图进行叠加计算与统计分析，得到乌江流域土壤侵蚀空间分布的垂直带谱图（图 1），对其垂直分异性进行分析。

从图 1 和表 1 可以看出,该流域土壤侵蚀空间分布的高程特征呈现峰值现象。其中微度侵蚀和轻度侵蚀呈现明显的单峰现象,主要集中在 1 100～1 300 m 的黔中石质丘陵盆地区,微度侵蚀面积比重为 4%,轻度侵蚀面积比为 21%。中度以上侵蚀的高程特征呈现明显的双峰现象,其中中度水力侵蚀有18.9%发生在 700～900 m,有 18%分布在 1 300～1 500 m;强度侵蚀主要分布在 700～900 m(16.3%)和 1 500～1 700 m(18.2%);极强度土壤侵蚀集中在 500～700 m(11.9%)和 1 500～1 700 m(23.6%)。轻度以上水力侵蚀主要集中在 700～900 m 和 1 300～1 700 m这 2 个海拔高度范围,说明现阶段该流域高强度水土流失主要集中在 700～900 m 和 1 300～1 700 m,这 2 个范围是人类活动干扰的强烈区与水土流失发生的集中区,高程高于 1 900 m 和低于 500 m的地区水土流失强度逐渐减弱。由高程分布图(附图 3)可知,1 300～1 700 m 区域主要集中分布在乌江流域上游高原山地区,区内地貌类型复杂,大部分地区山高坡陡,山原山地貌显著,不仅有石灰岩峰丛山地、丘陵洼地和砂页岩侵蚀山地,而且有岩溶台地、锥状山地和断裂谷地,土壤以黄棕壤、红壤、黄红壤为主。该地区大部分属于毕节地区,20 世纪 70—80 年代,人口增长过快,为了解决吃饭的问题,毕节大多数地方采取扩大面积增加总收入的办法,靠毁林毁草开荒来增加粮食,结果导致生态环境恶化,水土流失严重。极强度侵蚀区除了有 46%的面积集中分布在高程 1 500～1 900 m 的地带,还有 11.92%的面积分布在海拔高度 500～700 m 的黔东北山地区。黔东北山区河流多,比降大,坡陡谷深,白云质灰岩广泛分布,土壤类型主要为黄红壤、黄壤、山地黄棕壤,并且是少数民族聚集区,人类活动频繁,因此土壤侵蚀强度大。

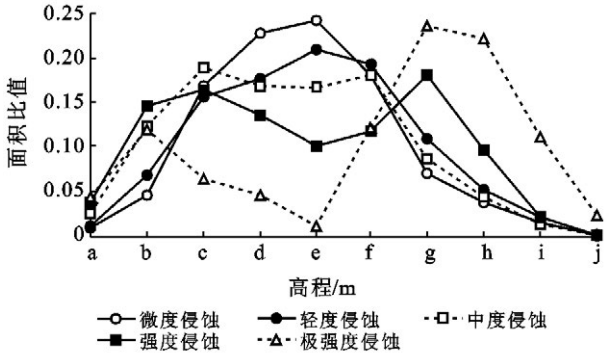


图 1　土壤侵蚀空间分布的垂直带谱

注:a,b,c,d,e,f,g,h,i,j 分别代表 270～500,500～700,700～900,900～1 100,1 100～1 300,1 300～1 500,1 500～1 700,1 700～1 900,1 900～2 100,2 100～2 463 的高程带。

表 1　研究区各侵蚀类型不同高程等级所占面积比例

高 程/m	微度侵蚀		轻度侵蚀		中度侵蚀		强度侵蚀		极强度侵蚀	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
270～500	253	0.94	152	1.17	166	2.52	89	3.75	17	4.41
500～700	1 260	4.68	891	6.85	803	12.20	347	14.55	45	11.92
700～900	4 542	16.88	2 009	15.46	1248	18.97	388	16.26	24	6.36
900～1 100	6 138	22.81	2 303	17.71	1119	17.01	323	13.54	18	4.69
1 100～1 300	6 481	24.09	2 734	21.03	1093	16.61	239	10.01	5	1.29
1 300～1 500	4 850	18.03	2 517	19.36	1189	18.07	279	11.67	45	12.11
1 500～1 700	1 871	6.95	1 417	10.90	573	8.71	435	18.21	88	23.6
1 700～1 900	253	3.87	676	5.20	294	4.46	230	9.64	83	22.08
1 900～2 100	1 260	1.51	278	2.14	87	1.33	53	2.22	42	11.16
2 100～2 463	4 542	0.24	23	0.18	7	0.11	3	0.14	9	2.39
合 计	26 907	100.00	13 001	100.00	6 580	100.00	2 386	100.00	375	100.00

3.3　土壤侵蚀空间分布的坡度特征

利用 ArcGIS 的空间分析功能,对乌江流域坡度专题图进行重新分类,每 5°为 1 级,40°以上为第 9 级。将坡度等级专题图与土壤侵蚀空间分布图进行叠加计算与统计分析(表 2),得到乌江流域各种强度土壤侵蚀的地面坡谱图(图 2)。对乌江流域土壤侵蚀空间分布的坡度特征分析可知,轻度和微度侵蚀面积比例随坡度增加而减小。中度侵蚀的面积比例由 0°～5°所占的 21.98%先减小至 5°～10°所占的 20.32%,后增大到 10°～15°所占的 20.82%,随后又随坡度增加减小。极强度侵蚀和强度侵蚀的面积比例随着坡度的增加呈先增大后减小的趋势,峰值主要集中在 10°～15°。说明 10°～15°的缓坡区水土流失严重。坡度对水力侵蚀作用的影响不是单一的正比关系,而是有一个侵蚀临界坡度存在,超过这一临界坡度,侵蚀反而减少。

3.4　土壤侵蚀空间分布的起伏度特征

地表起伏度是指在一个特定的区域内,最高点海

拔高度与最低点海拔高度的差值。它是描述一个区域地形特征的一个宏观性指标，最早源于前苏联科学院地理所提出的地形切割深度，现已成为划分地貌类型的一个重要指标。它能在一定程度上反映地貌的发育阶段，年轻的多有较大的起伏度，而年老的受夷平作用地形起伏度较小。在 ArcGIS 的 Spatial Analyst Tool 下，采用 Focal 函数分别计算 DEM 的最大高程值和最小高程值，再将最大高程值和最小高程值进行差值运算，即得流域起伏度分布图。

按一定规则将乌江流域地表起伏度划分成 10 个等级。将起伏度等级专题图与土壤侵蚀空间分布图进行叠加分析，得到乌江河流域土壤侵蚀空间分布的起伏度特征图(图 3)。

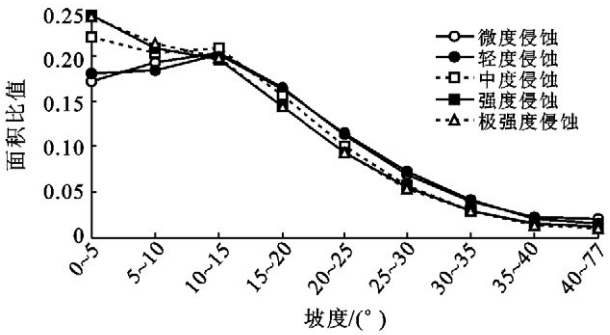


图 2 土壤侵蚀空间分布的地面坡谱

表 2 研究区各侵蚀类型不同坡度等级所占面积比例

坡度/(°)	微度侵蚀		轻度侵蚀		中度侵蚀		强度侵蚀		极强度侵蚀	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
0～5	6 529	24.26	3 186	24.50	1 447	21.98	432	18.12	65	17.29
5～10	5 744	21.35	2 715	20.88	1337	20.32	441	18.48	73	19.36
10～15	5 334	19.82	2 547	19.59	1370	20.82	482	20.20	77	20.42
15～20	3 899	14.49	1 883	14.48	1030	15.65	392	16.44	62	16.50
20～25	2 497	9.28	1 215	9.35	658	10	277	11.61	42	11.32
25～30	1 446	5.38	711	5.47	373	5.66	173	7.25	26	6.91
30～35	779	2.89	390	3	196	2.98	100	4.17	15	3.99
35～40	387	1.44	198	1.52	95	1.45	50	2.10	8	2.21
40～77	292	1.09	157	1.21	74	1.12	39	1.63	8	2
合 计	26 907	100	13 001	100	6 580	100	2 386	100	375	100

由图 3 和表 3 可知，各种强度水力侵蚀的起伏度分布较为相似，即随着起伏度等级的增大面积比例都呈现先增大后减少的趋势，7～16 m 等级是土壤侵蚀分布的高峰值。可见乌江流域水土流失存在 7～16 m 的临界起伏度，大于 16 m 和小于 7 m 的起伏度范围水土流失逐渐减弱。进一步分析可知，各种强度土壤侵蚀的起伏度分布都很相似，说明侵蚀强度变化对起伏度的变化不敏感，造成这种现象的主要原因是各种强度的水力侵蚀相互交错分布，侵蚀强度的变化主要受高程、坡度等地貌因子的影响较大，受起伏度的影响相对较弱。

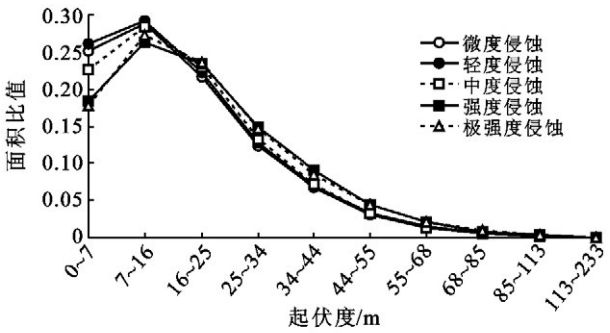


图 3 土壤侵蚀空间分布的起伏度特征

表 3 研究区各侵蚀类型不同起伏度等级所占面积比例

起伏度/m	微度侵蚀		轻度侵蚀		中度侵蚀		强度侵蚀		极强度侵蚀	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
0～7	6 759	25.12	3 399	26.15	1 497	22.76	441	18.46	67	17.94
7～16	7 736	28.75	3 804	29.26	1867	28.38	630	26.41	102	27.29
16～25	5 830	21.67	2 900	22.3	1524	23.16	560	23.46	88	23.57
25～34	3 300	12.27	1 660	12.77	872	13.25	358	14.99	56	14.82
34～44	1 786	6.64	908	6.98	463	7.04	214	8.95	32	8.42
44～55	842	3.13	437	3.36	213	3.23	107	4.49	16	4.36
55～66	373	1.39	198	1.52	91	1.39	49	2.05	8	2.18
66～85	147	0.55	83	0.63	37	0.57	20	0.84	4	1.02
85～113	51	0.19	29	0.22	13	0.20	7	0.29	1	0.35
113～293	10	0.04	6	0.04	2	0.04	1	0.05	0	0.05
合 计	26 907	100	13 001	100	6 580	100	2 386	100	375	100

3.5　土壤侵蚀空间分布的粗糙度特征

地表粗糙度反映地表微地貌形态,即微地形起伏或结构。对此不同学科有不同的含义。从水蚀角度讲,吴发启等[19]将地表糙度定义为:地表在比降梯度最大方向上凸凹不平的形态或起伏状况。在地理信息系统方面,地表粗糙度一般定义为地表单元的曲面面积与其在水平面上的投影面积之比[20-21],反映地面凹凸不平的程度,也称地表微地形。在区域土壤侵蚀研究中,地表粗糙度是衡量地表侵蚀程度的重要量化指标,在研究流域水土流失规律时研究地表粗糙度有很重要的意义。地表粗糙度的影响因子包括耕作方式、土壤性质和降雨等,对其进行准确的定量化描述显得非常必要。在 ArcGIS 下,可以近似地认为其等于 $1/\cos\theta$[22],θ 表示地表面与水平面的坡度。以 0.04 为间距,将乌江流域地表粗糙度划分成 9 个等级。将粗糙度等级专题图与土壤侵蚀空间分布图进行叠加分析,经统计得到乌江流域各侵蚀类型不同粗糙度等级所占面积比例(表 4)。

从表 4 可知,各种强度侵蚀面积分布的高峰值都集中在 1.0～1.04 等级范围内,随着粗糙度的增加,面积比例都降低,并且变化趋势很相似,侵蚀强度变化对粗糙度的变化不敏感。

表 4　研究区各侵蚀类型不同粗糙度等级所占面积比例

粗糙度	微度侵蚀		轻度侵蚀		中度侵蚀		强度侵蚀		极强度侵蚀	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
1.00～1.04	18 481	68.69	8 869	68.22	4 385	66.64	1440	60.36	227	60.63
1.04～1.08	4 280	15.91	2 071	15.93	1 131	17.19	443	18.57	70	18.60
1.08～1.12	1 856	6.90	908	6.99	486	7.39	213	8.94	32	8.55
1.12～1.16	929	3.45	457	3.51	238	3.61	113	4.74	17	4.53
1.16～1.20	511	1.90	255	1.96	128	1.95	65	2.73	10	2.59
1.20～1.24	296	1.10	151	1.16	74	1.12	38	1.61	6	1.57
1.24～1.28	182	0.68	93	0.72	45	0.68	24	0.99	4	1.05
1.28～1.32	115	0.43	59	0.45	28	0.43	15	0.62	3	0.71
1.32～4.33	256	0.95	138	1.06	65	0.98	34	1.42	7	1.77
合 计	26 907	100	13 001	100	6 580	100	2 386	100	375	100

4　结 论

(1) 乌江流域微度和轻度土壤侵蚀空间分布的高程特征呈现单峰现象,中度以上侵蚀的高程特征呈双峰现象。轻度土壤侵蚀集中发生在 1 100～1 300 m的黔中石质丘陵盆地区。中度及强度侵蚀集中分布在 500～900 m 和 1 300～1 700 m 地区。极强度侵蚀集中发生在乌江上游高原山地区和下游黔东北山地区。

(2) 中度及中度以下土壤侵蚀空间分布的坡度特征为单调下降趋势,强度和极强度土壤侵蚀的面积比例随着坡度的增加呈现先增大后减小的趋势,15°左右存在一个侵蚀临界坡度。

(3) 乌江流域的土壤侵蚀随地形起伏度的增加表现为先增加后减小的趋势,存在 7～16 m 的临界起伏度;随地表粗糙度的增加土壤侵蚀均呈减小趋势。土壤侵蚀强度的变化对地形起伏度和地表粗糙度的变化均不敏感。

(4) 流域尺度各种强度的土壤侵蚀相互交错分布,侵蚀强度的变化主要受高程、坡度等地貌因子的影响较大,受起伏度和粗糙度的影响相对较弱。此结论为进一步研究流域水土流失动态模拟提供了新思路和新角度。

尽管本研究获得了研究区土壤侵蚀在高程、坡度、地表起伏度和粗糙度方面的空间分布特征,可为当地水土流失治理提供依据,然而研究中仍然存在一些问题。首先,研究中使用的 ASTER GDEM 第 2 版数据相比 2009 年公布的第 1 版数据,虽然数据质量改善很大,精度达到 30 m,但仍存在数据空洞和异常问题,为提高分析结果的准确性,下一步需对空洞及异常区域的高程进行模拟修复。其次,由于地表糙度的复杂性,地表粗糙度的算法需要进一步改进,从理论上建立适于水土保持学科的侵蚀地表糙度计算模型,并通过模拟试验和野外校核,确定糙度参数,对其进行准确的描述。

[参 考 文 献]

[1] Zhang Xiwang, Wu Bingfang, Li Xiaosong, et al. Soil erosion risk and its spatial pattern in upstream area of Guanting reservoir[J]. Environmental Earth Sciences, 2012,65:221-229.

[2] Ma Qian, Yu Xingxiu, Lu Guoan, et al. The changing relationship between spatial pattern of soil erosion risk and its influencing factors in Yimeng mountainous area, China 1986—2005[J]. Environmental Earth Sciences, 2012,66:1535-1546.

[3] Liu Baoyuan, Nearing M A, Shi Pejun, et al. Slope length effects on soilloss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1759-1763.

[4] Wang Ku, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, et al. Environmental factors affecting temporal and spatial dynamics of soil erosion in Xingguo County, South China[J]. Pedosphere, 2005,15(5):620-627.

[5] 孙希华,姚孝友,周虹,等. 基于 DEM 的山东沂沭泗河流域地貌演化与水土流失研究[J]. 水土保持通报,2005,25(4):24-28.

[6] 马乃喜. 黄土地貌演化与土壤侵蚀关系的分析[J]. 水土保持通报,1996,16(2):6-10.

[7] 陈晓安,蔡强国,张利超,等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J]. 山地学报,2010,28(4):415-420.

[8] 许月卿,蔡运龙. 贵州省猫跳河流域土壤侵蚀量计算及其背景空间分析[J]. 农业工程学报,2006,22(5):50-53.

[9] 程先富,余芬. 安徽省土壤侵蚀空间分布及其与环境因子的关系[J]. 地理研究,2010,29(8):461-469.

[10] 陈龙,谢高地,张昌顺,等. 澜沧江流域土壤侵蚀的空间分布特征[J]. 资源科学,2012,34(7):1240-1247.

[11] 黄 麟,邵全琴,刘纪远. 近 30 年来青海省三江源区草地的土壤侵蚀时空分析[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(1):12-20.

[12] 欧阳晓. 区域土壤侵蚀地形指标研究[D]. 西安:西北大学,2011.

[13] 刘飞,范建容. 地貌特征与土壤侵蚀空间分布直方图相似度研究[J]. 水土保持研究,2011,18(6):18-21.

[14] 蔡运龙. 贵州喀斯特高原土地系统变化空间尺度综合的一个研究方案[J]. 地球科学进展,2009,24(12):301-306.

[15] 樊哲文,黄灵光,钱海燕,等. 鄱阳湖流域土地利用变化的土壤侵蚀效应[J]. 资源科学,2009,31(10):1787-1792.

[16] 胡文帙,王世杰,罗维均,等. 喀斯特峰丛洼地土地利用演变及其土壤侵蚀效应[J]. 生态学杂志,2012,31(4):975-980.

[17] Xu Yueqing, Luo Ding, Peng Jian. Land use change and soil erosion in the Maotiao River watershed of Guizhou Province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2011,21(6):1138-1152.

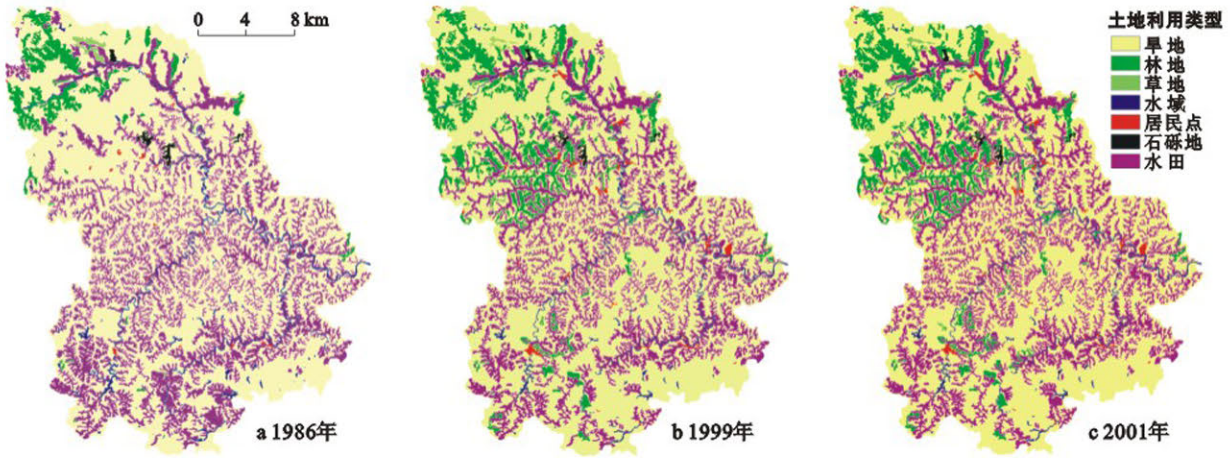
[18] Quan Bin, Römkens M J M, Li Rui, et al. Effect of land use and land cover change on soil erosion and the spatio-temporal variation in Liupan mountain Region, Southern Ningxia, China[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2011,5(4):564-572.

[19] 吴发启,赵晓光,刘秉正,等. 地表糙度的量测方法及对地面径流和侵蚀的影响[J]. 西北林学院学报,1998,13(2):15-19.

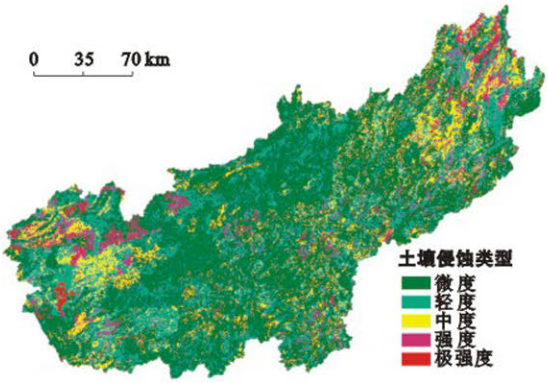
[20] 刘新华. 区域水土流失地形因子分析与提取研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2001:29-30.

[21] 崔晨. 基于 DEM 的土壤侵蚀模型中地形因子的研究:以陕北黄土高原为例[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2010:39-40.

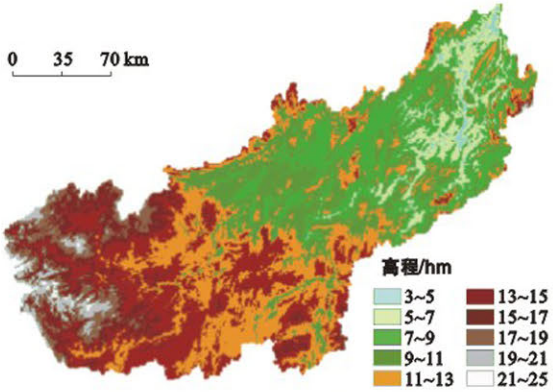
[22] 黄杏元,马劲松. 地理信息系统概论[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2008:145-147.



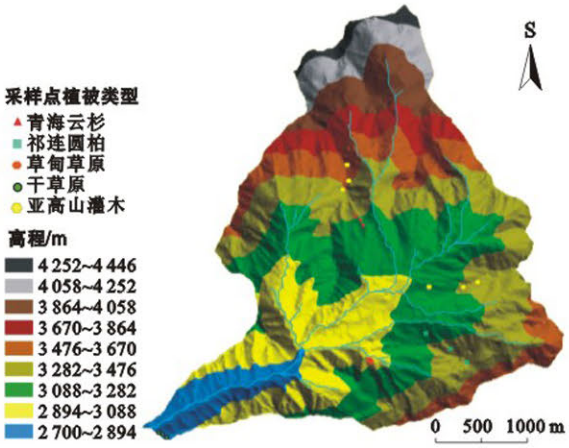
附图1 四川省紫色丘陵区不同时期土地利用类型



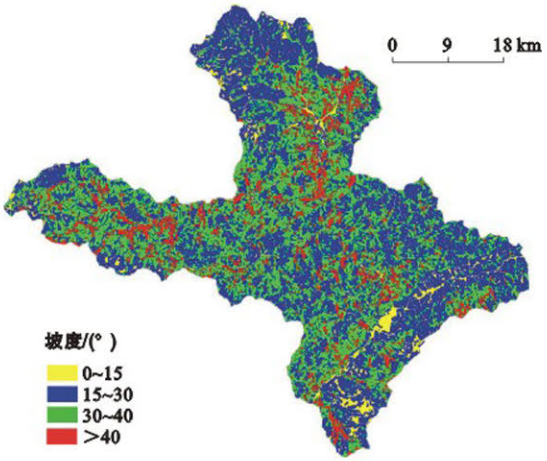
附图2 2000年乌江流域土壤侵蚀类型



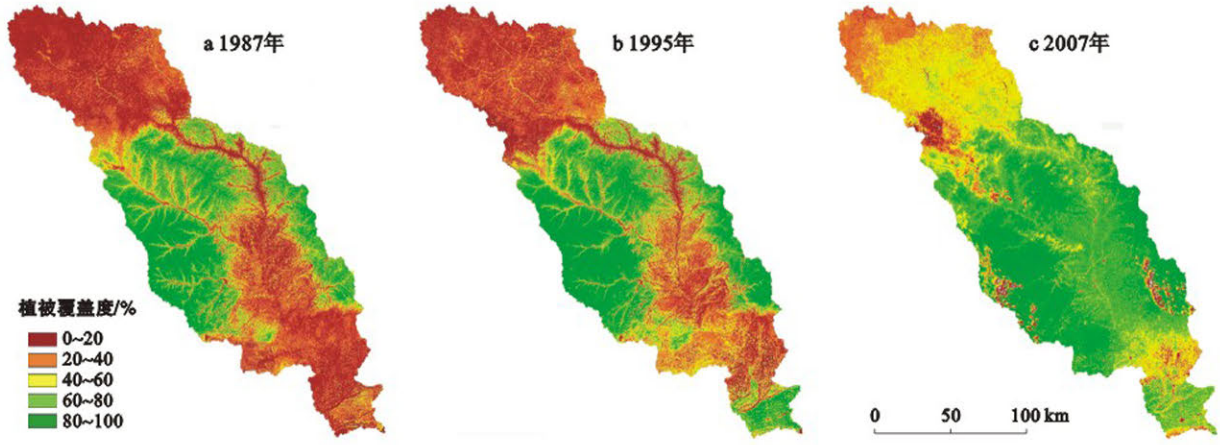
附图3 乌江流域高程等级分布



附图4 采样点在黑河上游的天老池流域中的分布



附图5 四川省茂县坡度分布



附图6 北洛河流域1987,1995和2007年植被覆盖度对比