

三峡库区腹地土壤侵蚀动态演变研究^{*1}

文雯 李阳兵^{*} 李睿康 周亚琳

(重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331)

【摘要】:以三峡库区腹地5个区县为研究区,以1988、2000、2010和2015年4期遥感数据为数据源,借助RS和GIS技术,得到研究区土壤侵蚀数据,采用土壤侵蚀综合指数,从区域尺度、乡镇尺度分析三峡库区腹地土壤侵蚀时空演变规律及其差异性。结果表明:(1)在27a间,区域尺度的土壤侵蚀状况呈现波动性演变,2000年以前研究区土壤侵蚀状况在恶化,而2000年以后侵蚀状况逐渐好转并趋于稳定;(2)在乡镇尺度上,进一步分异,出现4种演变类型:持续性变好、持续性变差、波动性变好、波动性变差;主体演变类型与整体大体一致,但在云阳县和长江沿岸存在与整体相反的演变类型;(3)侵蚀状况始终严重或持续性变差的12个乡镇为治理重点区域,而波动性变差的24个乡镇为治理的次重点区域。研究结果有助于该区域水土流失的精准治理。

【关键词】:土壤侵蚀演变;土壤侵蚀综合指数;多尺度研究;三峡库区腹地

【中图分类号】:S159; S157 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2018)03-0544-12

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201803010

基于尺度原理,通过时间和空间两方面分析探究同一地区不同时间、同一时间不同地区的土壤侵蚀空间变化特征是国内外众多学者研究的出发点和着眼点^[1~3]。在国家尺度,McHugh^[4]发现放牧是英国高地土壤侵蚀增加的最常见因素, Park认为在韩国土壤侵蚀高风险区,必须进行周期性的监测^[5], Alkharabsheh^[6]发现土壤侵蚀变化的主要原因是旱地的撂荒;在省市县级尺度上,赵明松、杨新华、仲晓雷、林晨、李大龙等^[1, 7~10]通过土壤流失通用方程或数理统计方法研究江西、浙江慈溪、辽宁省、福建长汀县和新疆伊犁等地区的土壤侵蚀敏感性、时空演变和空间尺度效应;在流域尺度上,Prasuhn^[11]认为长期的土壤侵蚀野外评价有助于了解耕地侵蚀时空变化、侵蚀严重程度、侵蚀源和侵蚀发生原因等, Meshesha^[12]根据侵蚀严重性、地形和土地利用来识别侵蚀热点区,查良松等^[13]、姜琳等^[14]在RS技术上借助RUSLE模型计算巢湖流域和岷江上游地区的土壤侵蚀演变状况;杨琴^[15]发现地形因子对纸坊沟流域土壤侵蚀评估的影响最明显。三峡库区作为国家水土流失最严重的地区之一,其土壤侵蚀及其治理研究越来越受到学者的关注,涉及整个三峡库区的土壤侵蚀空间格局变化^[16]、三峡库区(重庆段)土壤侵蚀时空分异规律^[17]、土壤侵蚀及其景观破碎化情况^[18]和流域土壤侵蚀强度动态监测等。

综上所述,目前有关土壤侵蚀的成果多在国家、地区和流域等单一尺度展开;关于三峡库区的土壤侵蚀研究也主要从整个库区、小流域、行政单元等着手,并未从多尺度角度探析土壤侵蚀的空间演变状况及其侵蚀规律的差异性。但空间尺度不同,景观格局、生态环境效应等也大不相同^[19],因此进一步应从多尺度综合评价土壤侵蚀演变规律。三峡库区自然环境和社会经济条件空间差异大,因此,当前的研究并未能在不同空间尺度揭示该区域土壤侵蚀演变的空间动态差异。考虑当前库区自然社会

¹ 收稿日期:2017-07-12; 修回日期:2017-10-11

基金项目:重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjBX0128);重庆市研究生科研创新项目(CYS17177);重庆师范大学研究生科研创新项目(YKC16007)

作者简介:文雯(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为水土保持与荒漠化治理。E-mail:674096908@qq.com

***通讯作者** E-mail:yapin@sohu.com

经济等多重复杂背景,本文借助遥感解译,获取研究区土壤侵蚀强度和空间格局等图谱,并通过土壤侵蚀强度指数,从研究区区域、乡镇两种尺度分析土壤侵蚀时空变化存在何种差异,以探究三峡库区多尺度土壤侵蚀时空演变规律及其差异性,以反映该区域人—环境关系的演变,并探究其差异性存在的自然和社会因素耦合作用原因,最终为该区域水土流失治理提供更精准的参考。

1 研究区概况

三峡库区是指受长江三峡工程淹没并有移民任务所涉及区域,包含湖北省和重庆市 20 个县(区)市。依据《三峡库区近、中期农业和农村经济发展总体规划(1995~2010 年)》对三峡库区划分标准,将三峡库区划分为库首区、库腹地区、库尾区三大区域,库区腹地包括重庆市万州区、忠县、开州区、奉节县、巫溪县、巫山县、云阳县、武隆县,石柱县、丰都县、涪陵区 11 个区县。在现有三峡库区土壤侵蚀研究中都指出库区腹地中开州区到巫山段是库区水土流失最为严重的地区^[20, 21],且属于重庆市五大功能区建设中的渝东北生态涵养发展区。因此,综合考虑自然和社会经济因素后,论文选取库区腹地中的开州区、云阳县、奉节县、巫溪县、巫山县五区县作为研究区域,总面积约为 18683km²(图 1),所辖乡镇 165 个,截止 2015 年底,常住人口为 367.45 万人^[22]。研究区域地势东北高西南低,重庆市海拔最高点和最低点都位于该区内;地形地貌复杂,起表伏度大,生态环境先天性脆弱,坡耕地开垦严重,人地矛盾突出。各县具体情况如表 1。

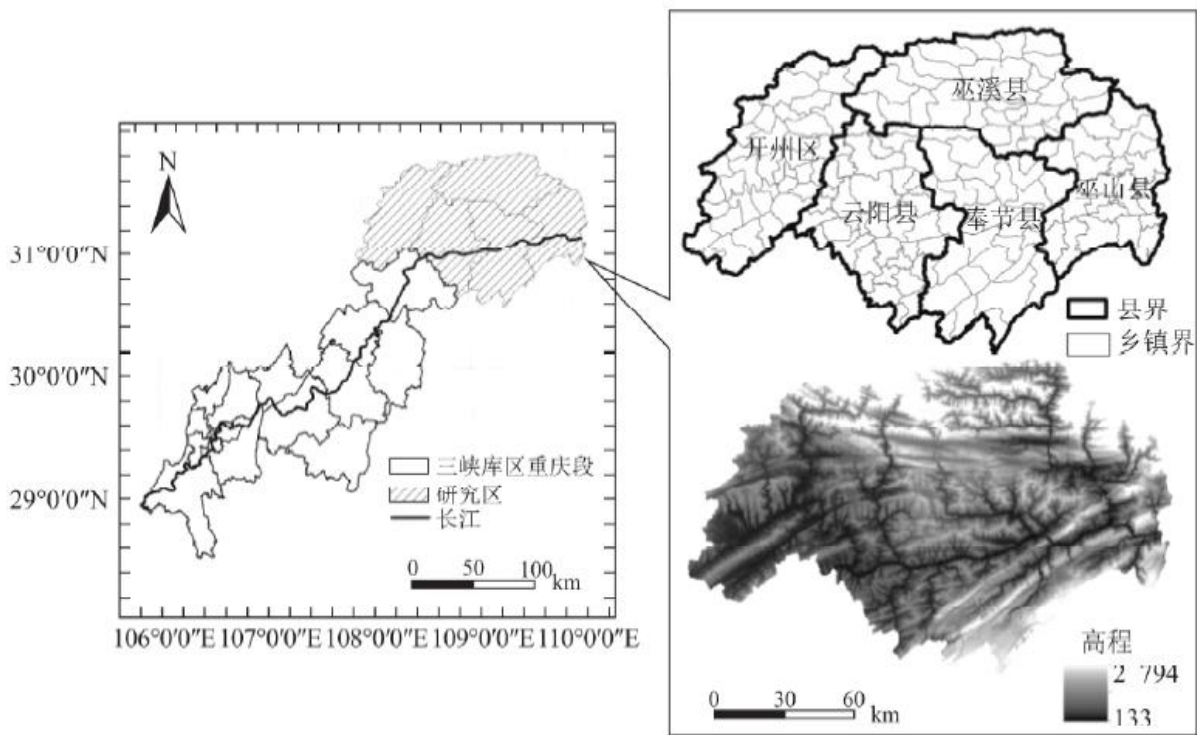


图 1 研究区位置
Fig. 1 Location of study area

表 1 研究区五区县统计表(截止 2015 年)

区县名称	行政区面积 (km ²)	乡镇个数 (个)	耕地面积 (km ²)	常住人口 (万人)	地形地貌
开州区	3 959	38	999. 72	117. 07	“六山三丘一分坝”，东北高西南低
云阳县	3 649	41	655. 58	89. 66	属喀斯特地貌，岭谷地貌明显
奉节县	4 087	30	512. 62	75. 33	以山地为主，总体为东南、东北高而中部偏西稍平缓，南 北约为对称分布
巫山县	2 958	25	479. 58	46. 29	地貌上呈深谷和中低山相间形态，形成典型的喀斯特地貌
巫溪县	4 030	31	526. 84	39. 10	以山地为主，属于典型的中深切割中山地形

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源及处理

以遥感数据为主要信息源，其中 1988 年为 Landsat TM 影像，2000 年、2010 年为 Landsat ETM+ 影像，2015 年为 Landsat8OLI/TIRS 影像，精度都为 30m。借助 ENVI5.0 和 ArcGIS10.2 对遥感影像进行波段融合、几何校正、拼接等预处理，1988 年、2000 年、2010 遥感影像年通过 4、3、2 波段组合假彩色合成影像，2015 年则为 5、4、3 波段组合假彩色合成影像。库区腹心地带的土壤侵蚀类型多样，侵蚀过程复杂，主要为水力侵蚀，参照水利部颁发的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)^[23] 和何丙辉、WangX、武国盛^[24~26] 等学者对水利侵蚀的分级判定，从土地利用、植被覆盖度、坡度 3 个方面综合分析，采用人机交互解译，将研究区土壤侵蚀强度划分为 6 级：微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈(表 2)。根据野外调研建立的解译标志，在 2011 年 2 月和 5 月、2016 年 6 月在野外对土壤侵蚀和土地利用解译结果进行验证，结合重庆市水利局发布的 2005 年、2012 年《重庆市水土保持公报》及重庆市 1999 年水土流失遥感资料与研究区土壤侵蚀的统计进行大致对比(表 3)，结果表明，本研究在侵蚀面积上基本吻合，解译精度达到 85%左右。文中社会经济数据主要来源于相关统计年鉴和统计公报。

表 2 研究区土壤侵蚀分级判读标准

侵蚀类型	判读标准	影像截图
11 微度侵蚀	坡度 $\leq 5^{\circ}$ 平地；植被覆盖度 $\geq 75\%$ 的林、灌、草地；水田、建设用地、水域等	
12 轻度侵蚀	植被覆盖度介于 60%~75%且坡度介于 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的坡地；植被覆盖度介于 45%~60%且坡度介于 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 的坡地；植被覆盖度介于 30%~45%且坡度介于 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 的坡地；坡度介于 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 的耕地	

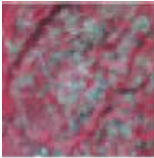
13 中度侵蚀	植被覆盖度介于 60%~75%且坡度大于 25° 的坡地；植被覆盖度介于 45%~60%且坡度介于 15° ~35° 的坡地；植被覆盖度介于 30%~45%且坡度介于 8° ~15° 的坡地；植被覆盖度低于 30%且坡度低于 15° 的坡地；坡度介于 8° ~15° 的坡耕地	
14 强烈侵蚀	植被覆盖度介于 45%~60%且坡度大于 35° 的坡地；植被覆盖度介于 30%~45%且坡度介于 25° ~35° 的坡地；植被覆盖度低于 30%且坡度介于 15° ~25° 坡地；坡度介于 15° ~25° 的坡耕地	
15 极强烈侵蚀	植被覆盖度介于 30%~45%且坡度大于 35° 的坡地；植被覆盖度低于 30%且坡度介于 25° ~35° 之间的坡地；坡度介于 25° ~35° 的坡耕地	
16 剧烈侵蚀	植被覆盖度低于 30%且坡度大于 35° 的坡地；坡度大于 35° 的坡耕地	

表 3 土壤侵蚀数据结果对比

来源	年份	微度侵蚀 (无明显水土流失)		各级土壤侵蚀面积 (km ²)					土壤侵 蚀综合 指数
		(km ²)	(%)	轻度	中度	强度	极强度	剧烈	
中国科学院地理科 学与资源研究所	1999	6 179.57	32.99	2 695.33	5 47.12	3 026.81	1 031.96	69.92	2.94
本研究	2000	6 478.75	34.59	4 627.22	4 240.93	2 035.30	938.69	400.42	2.67
重庆水利局	2005	8 124.07	43.52	1 781.38	4 269.35	3 720.49	652.54	120.17	2.64
本研究	2010	8 177.20	43.66	4 599.16	3 557.61	1 665.29	469.23	259.43	2.12
重庆水利局	2012	9 011.84	48.23	3 479.85	3 264.77	1 211.46	924.26	597.11	2.17
本研究	2015	9 048.81	48.31	4 773.35	3 102.13	1 302.97	315.36	182.78	1.82

2.2 空间评价尺度选择

一般而言,流域作为研究对象探究土壤侵蚀演变及其差异性受到多数学者的青睐,而在省市、区县等行政区划尺度[28~30]研究的基础上,以乡镇等次一级尺度作为评价单元的研究不常见。考虑到目前不同地区水土流失治理以流域尺度为主,但对乡镇等较小行政单位的研究较少。本研究针对不同空间尺度的分析,并结合区域实际情况,选取三峡库区水土流失最为严重地区作为研究区,区域中低山地地形和岩溶地貌面积广泛,同时作为中国14个连片贫困区之一,是精准扶贫政策实施区域,即研究区的整体及分级水平上均具有相似性。因此本文将从区域、乡镇两方面分析土壤侵蚀的动态变化,探析两尺度下土壤侵蚀演变的异同性,并在乡镇小尺度单元上为库区水土流失的治理提供方向。

2.3 土壤侵蚀综合指数及其演变类型判断

引用土壤侵蚀综合指数的概念评价某个单元内土壤侵蚀严重程度和时空变化,或是比较不同单元侵蚀状况^[27]。该指标的大小反映土壤受侵蚀的严重程度,用土壤侵蚀的综合指数(INDEX)^[30]来表示,其计算公式如下:

$$INDEX = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} A_{ij} \quad (1)$$

式中: W_{ij} 为第*i*类第*j*级土壤侵蚀强度的分级值; A_{ij} 为第*i*类第*j*级土壤侵蚀强度面积的比重。将水力侵蚀中的微度到剧烈的分级值划分为0, 2, 4, 6, 8, 10。INDEX值越大代表土壤侵蚀强度越剧烈。

计算出1988年、2000年、2010年、2015年4期土壤侵蚀综合指数,比较1988~2000年、2000~2010年、2010~2015年、1988~2015年4个阶段初期和末期土壤侵蚀综合指数的大小,土壤综合指数变大则表示研究区土壤侵蚀状况变差,土壤侵蚀综合指数变小则表示土壤侵蚀状况变好。通过判断各空间尺度4个阶段土壤侵蚀的恶化与好转情况,总结出土壤侵蚀4种演变类型,具体判定依据:

(1)单向变化:若1988~2000年、2000~2010年、2010~2015年侵蚀状况一直为变好则为“持续性变好类型”,若一直变差则为“持续性变差类型”;

(2)波动变化:若1988~2000年、2000~2010年、2010~2015年的3个阶段侵蚀状况呈现波动变化,则需要对1988~2015侵蚀状况进行比较,若2015年指数小于1988年,表示27a间研究区呈变好趋势,则为“波动性变好类型”,反之为“波动性变差类型”。

3 结果分析

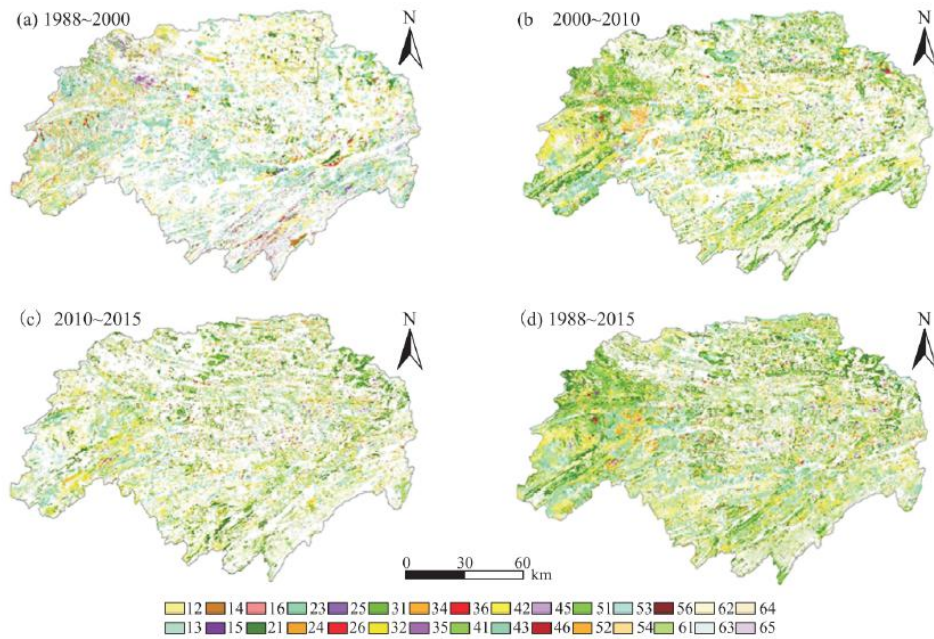
3.1 研究区土壤侵蚀强度时空演变

1988~2015年研究区土壤侵蚀强度的面积随着强度的增大而减小,即面积最大的侵蚀类型对应微度侵蚀,面积最小则为剧烈侵蚀(表4)。研究区轻度侵蚀及以上侵蚀面积在2000年达到最大,为12242.56km²,约占总面积的65.3%,而2015年此面积比降到52%;尽管强烈及以上侵蚀程度所占比例较低,但从库区腹地的土壤侵蚀面积来看,侵蚀程度较为严重。研究区土壤侵蚀强度按面积变化可归为两类:(1)先减后增型,包括微度侵蚀和轻度侵蚀;(2)先增后减型,包括中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀。

表 4 研究区 1988~2015 4 期土壤侵蚀强度

侵蚀类型	1988 年		2000 年		2010 年		2015 年	
	面积 (km ²)	百分比 (%)	面积 (km ²)	百分比 (%)	面积 (km ²)	百分比 (%)	面积 (km ²)	百分比 (%)
微度侵蚀(无明显水土流失)	7 492.84	40.00	6 478.75	34.59	8 177.20	43.66	9 048.81	48.31
轻度侵蚀	4 883.14	26.07	4 627.22	24.70	4 599.16	24.56	4 773.35	25.49
中度侵蚀	3 234.70	17.27	4 240.93	22.64	3 557.61	18.99	3 102.13	16.56
强烈侵蚀	1 939.17	10.35	2 035.30	10.87	1 665.29	8.89	1 302.97	6.96
极强烈侵蚀	921.86	4.92	938.69	5.01	469.23	2.51	315.36	1.68
剧烈侵蚀	249.62	1.33	400.42	2.14	259.43	1.39	182.78	0.98

图 2 和图 3 反映不同土壤侵蚀强度之间的动态转换关系，具体分析如下：



注：12 微度转轻度；13 微度转中度；14 微度转强烈；15 微度转极强烈；16 微度转剧烈；21 轻度转微度；23 轻度转中度；24 轻度转强烈；25 轻度转极强烈；26 轻度转剧烈；31 中度转微度；32 中度转轻度；34 中度转强烈；35 中度转极强烈；36 中度转剧烈；41 强烈转微度；42 强烈转轻度；43 强烈转中度；45 强烈转极强烈；66 强烈转剧烈；51 极强烈转微度；52 极强烈转轻度；53 极强烈转中度；54 极强烈转强烈；56 极强烈转剧烈；61 剧烈转微度；62 剧烈转轻度；63 剧烈转中度；64 剧烈转强烈；65 剧烈转极强烈

图 2 土壤侵蚀强度空间变化

Fig. 2 Spatial variation of soil erosion intensity

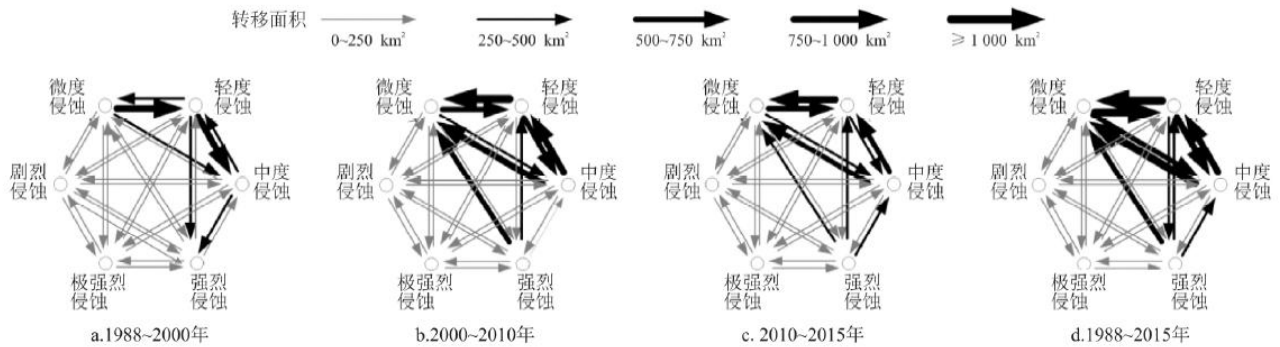


图 3 土壤侵蚀强度转移图谱

Fig. 3 Transfer map of soil erosion intensity

1988~2000 年，总转移量为 5374.11km²，主要发生在微度、轻度侵蚀向其他侵蚀强度的转移。其中，微度侵蚀主要转移方向为轻度侵蚀，基本分布在研究区西北、西南和南部；轻度侵蚀转向中度侵蚀的面积最大，多分布于研究区的西南及西北部。大体上，转移量是从低强度向高强度转移，反映了该阶段研究区的土壤侵蚀以西南和西北地区为侵蚀转移中心呈现恶化的趋势。

2000~2010 年，总转移量为 7277.10km²，主要转移量发生在轻度、中度侵蚀向其他侵蚀强度的转移。其中轻度向微度侵蚀转移的面积最大，主要分布在研究区西部及东部地区；中度主要向微度和轻度侵蚀转移，且分布范围较广，以研究区西部及长

江沿岸地区为主。转移强度上表现为高强度向低强度转移，反映该阶段的土壤侵蚀在整个研究区内呈现好转趋势。

2010~2015 年，与上一时期的转移趋势类似，研究区轻度、中度侵蚀向其他侵蚀强度的转移，尤其向微度侵蚀增加。总体转移方向同样是从高强度向低强度转移，说明在该时期研究区土壤侵蚀状况进一步好转。

总体而言，整个研究时段内，微度、轻度和中度侵蚀相互之间的变化幅度最大，转移量大于 2000km²，转移多发生在研究区西部、南部及东北部地区。土壤侵蚀多向轻、微度侵蚀转移，土壤侵蚀发生好转。从整体转移量得出:2000 年以前研究区土壤侵蚀状况在恶化，而 2000 年以后，侵蚀状况逐渐好转并趋于稳定。

3.2 乡镇尺度土壤侵蚀演变

3.2.1 土壤侵蚀综合分布特征

从表 5 中得出:土壤侵蚀综合指数介于 1.25~3.75 之间的乡镇数量最多，这与研究区整体的土壤侵蚀综合指数区间大体一致，在此区间侵蚀面积的贡献率最大，具体表现为 1.25~2.50 区间除 2000 年侵蚀面积贡献率最大，而 2000 年则为 2.5~3.75 区间乡镇贡献率最大。随时间推移，2000 年相较 1988 年侵蚀面积所占比例趋向于土壤侵蚀综合指数更高区间，而在此后表现为乡镇个数和侵蚀面积占比逐渐向指数较低区间转移，这侧面体现 2000 年的土壤侵蚀程度加重，而之后 15a，土壤侵蚀程度在逐步缓解。

表 5 研究区乡镇尺度土壤侵蚀综合指数统计表

指数区间	1988 年		2000 年		2010 年		2015 年	
	乡镇个数	侵蚀面积所占比例 (%)	乡镇个数	侵蚀面积所占比例 (%)	乡镇个数	侵蚀面积所占比例 (%)	乡镇个数	侵蚀面积所占比例 (%)
0.00-1.25	15	4.22	1	0.34	15	5.31	33	11.94
1.25-2.50	78	44.19	68	35.52	97	58.83	92	59.65
2.50-3.75	58	40.70	81	54.36	49	33.61	38	27.23
>3.75	14	10.89	15	9.78	4	2.25	2	1.18

土壤侵蚀综合指数在>2.5 的侵蚀较为严重的乡镇主要分布(图 4)在研究区西部、中东部的巫山、巫溪和奉节三县交界处及长江沿岸地区。随时间推移，>2.5 的乡镇在这些地区呈现向四周扩展后快速收缩的演变态势，但仍为侵蚀程度相对严重的地区，这与其人类活动剧烈以及岩溶地貌生态脆弱地区有关。而该指数<1.25 的侵蚀程度较轻地区，随时间推移在研究区西北部开州区和巫溪县交界处逐渐扩大。

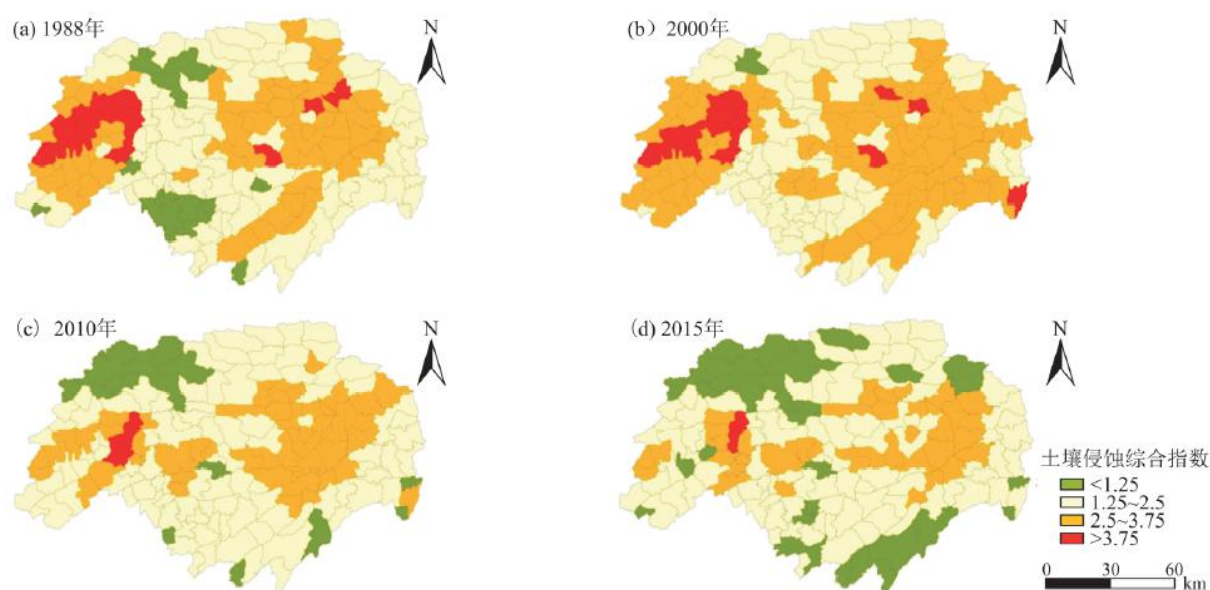


图 4 研究区乡镇尺度四期土壤侵蚀综合指数分布图

Fig. 4 Distribution map of the integrated index of soil erosion in the four stage in the township scale

由图 5 发现，在 1988 和 2000 年侵蚀最严重的 10 个乡镇全部位于研究区西部开州区的乡镇，这与开州区人口最多，移民人口比重大而导致的人类活动剧烈有关。在 2010 年和 2015 年侵蚀最严重的 10 个乡镇开始向东边转移，但 2010 年排名前四及 2015 年排名前三的乡镇仍然属于开州区，乡镇个数占比近 1/2，说明开州区在乡镇土壤侵蚀治理有一定效果但仍需要关注。综合分析 1988~2015 年侵蚀严重的 10 个乡镇，发现如温泉镇、郭家镇、九龙山镇、大德镇、敦好镇等镇排除前十乡镇之外侵蚀状况明显好转，而白桥镇、金峰镇、厚坝镇、渠口镇在四期中一直存在，这 4 个镇应属于侵蚀治理的重点区域。

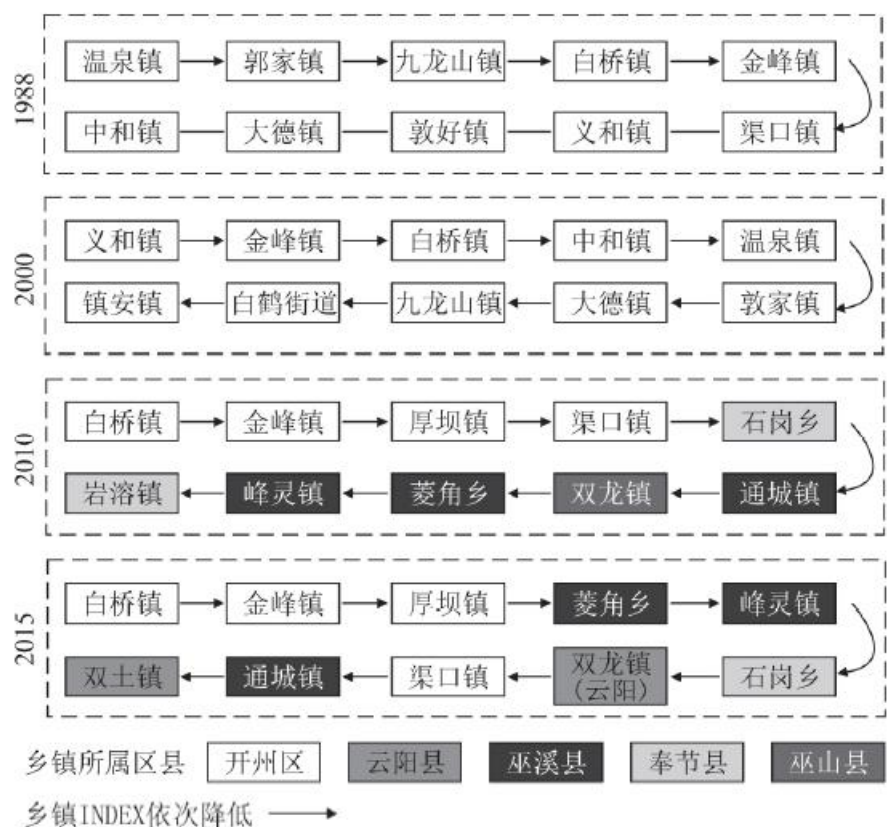


图5 土壤侵蚀综合指数前十乡镇

Fig. 5 Top ten towns of integrated index of soil erosion

3.2.2 乡镇尺度土壤侵蚀动态变化

统计研究区 165 个乡镇土壤侵蚀好转或恶化状况(图 6)。

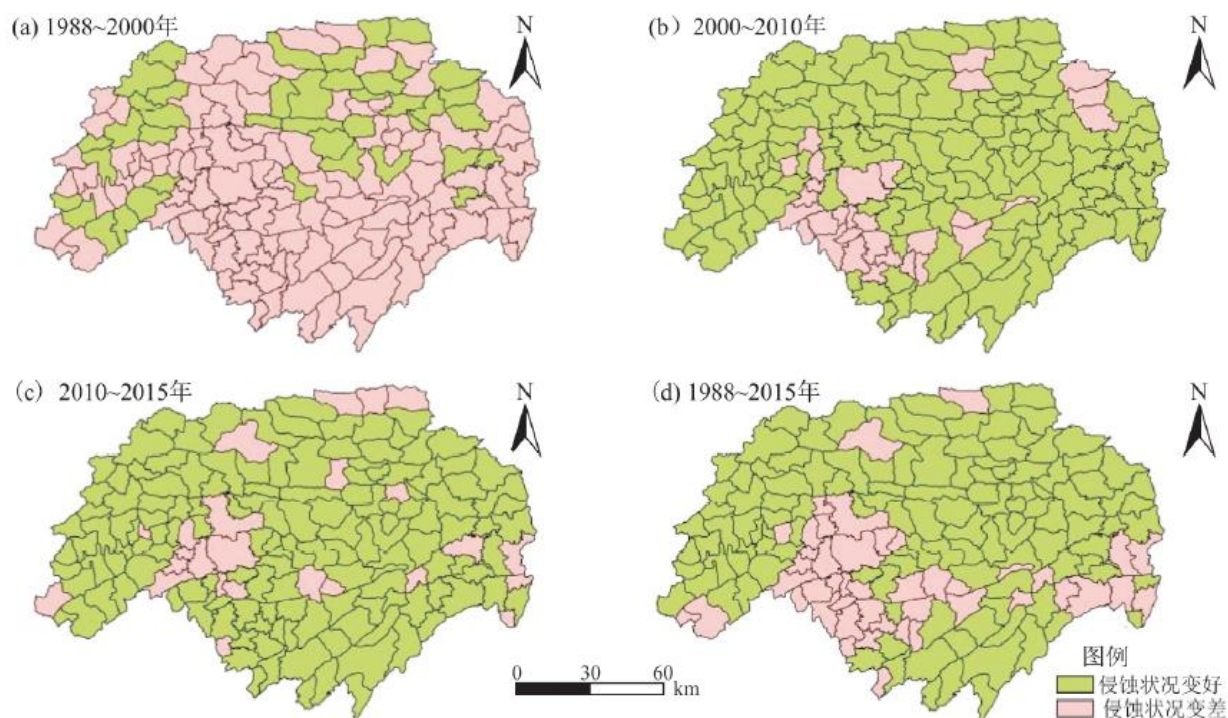


图6 研究区乡镇尺度土壤侵蚀演变分布图

Fig. 6 Distribution map of soil erosion in the township scale

1988~2000年,侵蚀状况变好的乡镇仅占24.85%,主要分布于开州区与巫溪县,分别占据开州区与巫溪县乡镇总数的39.47%和51.61%,说明在2000年整体侵蚀状况变差的情况下,仍然有开州区和巫溪县的部分乡镇在向好的情况下转变。

2000~2010年,乡镇侵蚀状况变化以变好的情况为主,81.82%的乡镇在该阶段侵蚀状况变好。侵蚀状况变差的乡镇只有30个,基本分布在研究区西南部的云阳县。云阳县在该阶段下,侵蚀状况变差的乡镇个数达到50%左右,说明云阳县在2000~2010年的变好幅度小于其他4个区县。

2010~2015年,土壤侵蚀状况进一步好转,土壤侵蚀状况变好的乡镇个数占比扩大到84.85%;状况变差的乡镇仍主要分布在云阳县,但明显数量减小,侵蚀状况变差乡镇向巫溪县北部及长江沿岸地区的转移。

总体而言。整个研究时段内研究区侵蚀状况大幅度好转,仅1/4乡镇处于侵蚀状况变差状态。侵蚀变差的乡镇也多分布在研究区的云阳县和长江沿岸地区,尤其是云阳县,侵蚀状况变差的乡镇多达28个,而状况变好的仅有13个。因而,作为三峡库区第一移民大县,云阳县27a间的侵蚀状况在恶化,虽然在2000~2015年时段在好转,但仍需加强土壤侵蚀的治理力度。

3.3 土壤侵蚀演变类型特征研究

3.3.1 区域尺度

计算1988年、2000年、2010年、2015年土壤侵蚀综合指数(表6),发现最高值为2000年的2.66。1988~2015年间土壤侵蚀指数呈现先增大后减小的趋势,1988~2000年间指数值明显增加,表明在此期间研究区区域整体土壤侵蚀状况恶化。2000~2010年和2010~2015年间指数值急剧减小,差值分别为0.54和0.3,2015年指数值降至1.82,从土壤侵蚀综合指数来看,库

区腹地侵蚀程度呈现整体转好的趋势。根据土壤侵蚀演变类型分析出区域尺度上研究区土壤侵蚀演变为波动性变好类型。

表 6 研究区 1988 ～ 2015 年 4 期土壤侵蚀综合指数

年份	1988 年	2000 年	2010 年	2015 年
土壤侵蚀综合指数	2.36	2.66	2.12	1.82

3.3.2 乡镇尺度

从图 7 得出，乡镇尺度上存在 4 种土壤侵蚀演变类型:持续性变好、持续性变差、波动性变好、波动性变差。土壤侵蚀状况中波动性变好的乡镇占大部分，占比为 60%，这与研究区区域尺度土壤侵蚀的变化方向具有一致性。其他 3 种演变类型也占据有 40%，其中乡镇个数较多的为持续性变好的演变类型，主要分布在长江沿岸以北地区，这与该地区山高坡陡的自然条件密不可分，加之重庆市建设渝东北生态涵养区的政策影响。而与整体变化方向相反的持续性变差模式共有 8 个乡镇，分别是:康坪乡、双龙镇、渠马镇、养鹿镇、平安镇、南溪镇、水口镇、栖霞镇。除康坪乡属于奉节县，其余 7 个镇都分布在云阳县长江以北地区，大多属于库区移民的重点乡镇，这 8 个乡镇依据演变类型虽然其侵蚀状况未属于侵蚀最差区域，但侵蚀状况一直变差，也应属于治理的重点区域，而波段性变差类型的 24 个乡镇整体上也属于侵蚀恶化区域，将作为治理的次重点地区。

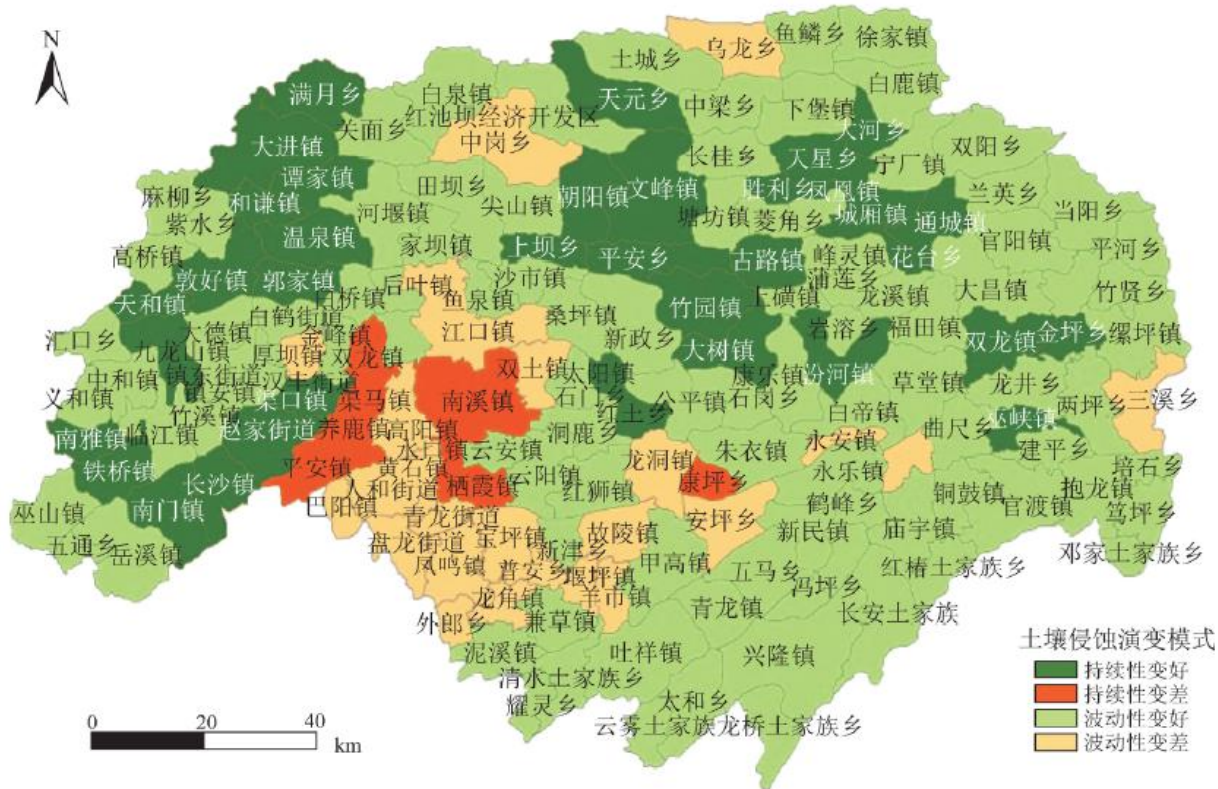


图 7 研究区乡镇尺度土壤侵蚀演变类型分布图

Fig. 7 Distribution pattern of soil erosion evolution in Township scale

4 讨论

4.1 不同尺度土壤侵蚀演变的差异性

研究表明,随着研究范围的面积变化,土壤侵蚀的整体特征会出现差异^[30],并且小尺度上斑块格局重新组合为较大尺度的空间格局过程中,通常将会由不规则趋向规则,空间类型减少^[31]。在本研究中选取研究区区域尺度、乡镇尺度对库区腹地土壤侵蚀的动态变化进行详细分析,得出不同尺度上演变特征及其差异性,表现出随尺度逐渐减小,土壤侵蚀演变空间分异逐步加大。研究区区域尺度上,土壤侵蚀综合指数可反映库区腹地 27a 间整体侵蚀状况呈现先变差后变好的变化趋势,且以 2000 年左右为变化点,至 2010 年已大幅度降低,且侵蚀状况好于 1988 年,与已有研究一致^[2, 18, 32~34]。而土壤侵蚀强度面积变化表现为:较低侵蚀强度(微度侵蚀和轻度侵蚀)随时间变化先减后增,较高侵蚀强度(中度侵蚀及以上)面积随时间变化先增后减的变化趋势。

在乡镇尺度,以土壤侵蚀综合指数来描述研究区乡镇土壤侵蚀状况的动态演变。侵蚀指数位于 1.25~3.75 之间的乡镇数量最多,与整体的土壤侵蚀综合区间相符合。同时,指数<1.25 的乡镇数量在 27a 间先减后增,且对应的侵蚀面积与其变化一致,而>3.75 较高侵蚀程度的乡镇数量和对应的侵蚀面积与指数<1.25 的变化趋势相反,这与整体土壤侵蚀强度面积变化趋势相近。同时乡镇尺度土壤侵蚀状况的四种变化模式中,主要演变类型仍为波动性变好类型,但转折点已经不完全位于 2000 年左右,且出现了波动性变差及持续变差与研究区整体变化方向相反的情况。

研究区区域尺度从宏观上反映出库区腹地的演变方向:在 2000 年左右侵蚀状况恶化后,随即呈现大幅变好的趋势。乡镇尺度土壤侵蚀的演变趋势及分布与整体区域的变化大体上趋于一致,但乡镇作为次一级尺度较整体来说具有其不规则性,特别是在演变趋势中与整体演变相反的侵蚀状况恶化部分,但乡镇的主要演变类型依然反映了区域的演变趋势,且随着尺度的扩大,区域整体的演变趋势主导着乡镇演变类型的发生方向。

4.2 土壤侵蚀格局演变驱动因素分析

从自然条件来看,研究区本身自然条件复杂,以山地为主,且喀斯特地貌广泛分布, $>15^{\circ}$ 坡度带的面积占到总面积的 82.38%,坡耕地开垦严重,一遇暴雨极易发生土壤侵蚀 [35]。以上自然条件决定了库区腹地土壤易发生侵蚀,人类活动在此基础上进一步影响了研究区的土壤侵蚀演变(图 8)。1993 年三峡工程开始施工和移民,1997 年重庆升为中国第 4 个直辖市,研究区内大量进行工程建设、快速推进城镇化等,加剧了库区腹地的土壤侵蚀;加之该阶段库区移民导致坡耕地的开垦,进一步加深了土壤侵蚀,因而 1988~2000 年研究区土壤侵蚀强度明显增强。2000~2010 年期间,三峡工程在 2003 年和 2006 年实现了 135m 和 156m 蓄水,在 2002 年全面开展退耕还林(草)工程,与此同时天然林保护工程、长江景观防护林工程、低效林改造工程、高山生态扶贫搬迁工程等建设,大量坡耕地转换为水域和林草地,且农业人口大量进城务工等原因导致了研究区人口急剧减少,使耕作优势较少的坡耕地被撂荒,种种因素致使侵蚀大幅度减少。2010 年以年,三峡库区进入后三峡时期,随着三峡工程建成,主要任务变为对消落区生态环境的保护、土地生态功能的建设等降低人类活动对生态环境的压力,同时在 2013 年 9 月,重庆将研究区划为生态涵养发展区,作为长江流域重要生态屏障,“十二五”期间,重庆深入实施“绿化长江,重庆行动”等政策,研究区的土壤侵蚀状况在此阶段进一步好转。

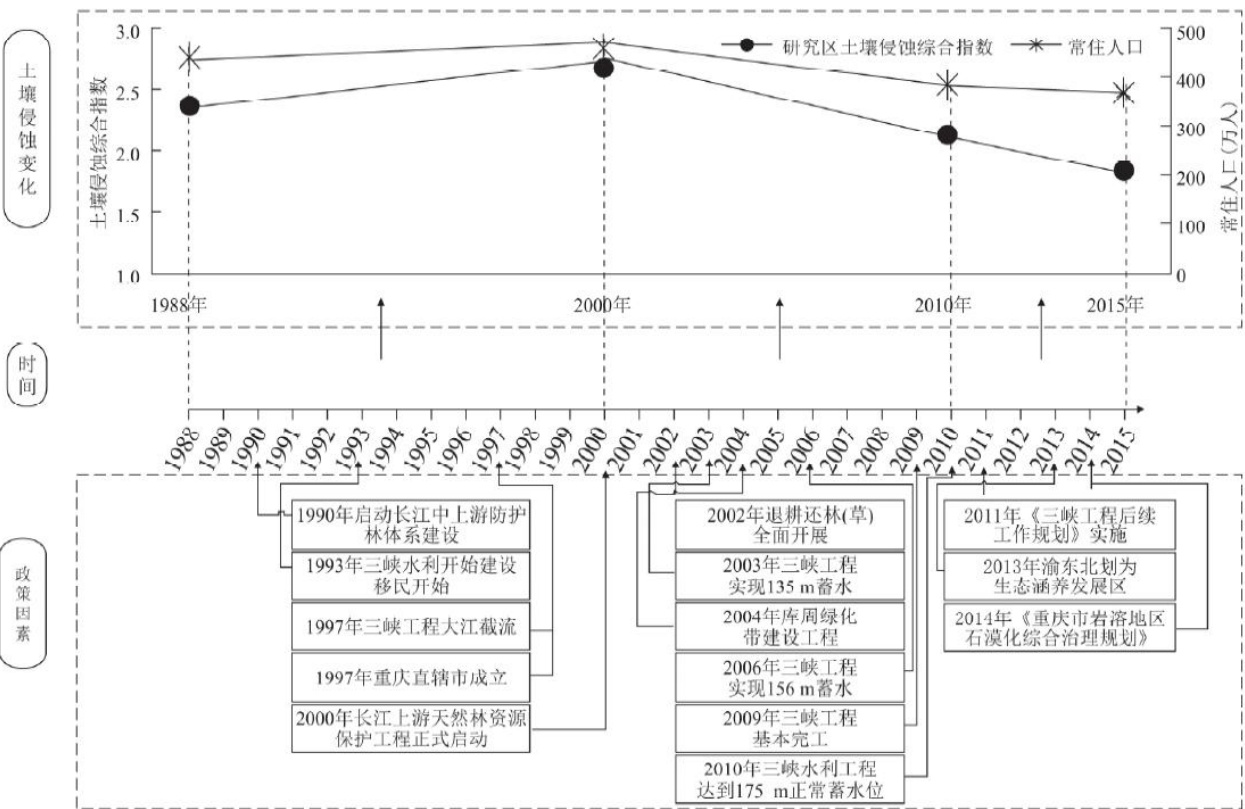


图 8 研究时段内库区政策变化情况

Fig. 8 Policy changes of the reservoir area during the study period

4.3 研究不足

本研究的不足在于仅对不同空间尺度对土壤侵蚀状况进行评价和对区域土壤侵蚀的演变因素进行简略描述,但对不同尺度之间差异形成的内部因素没有进行具体分析,在之后的研究中将进一步探究差异形成的具体原因。

5 结论

通过研究 1988~2015 年三峡库区腹地 5 个区县 165 个乡镇土壤侵蚀时空演变及其在空间评价尺度上的差异性,得到如下认识:

(1)在 27a 间,研究区土壤侵蚀面积整体上先增后减,2000 年左右出现变化的转折。2000 年前土壤侵蚀强度类型由较低强度向较高强度类型转移,土壤侵蚀状况在恶化;而之后转移方向相反,由较高强度向较低强度类型转移,侵蚀状况逐渐好转。

(2)随着评价空间尺度的变小,侵蚀面积、侵蚀强度变化发生分异,部分地区出现侵蚀状况变差,与主体发展方向相反的趋势。

(3)区域尺度上,位于西、西南部区域的开州区和云阳县应加强土壤侵蚀治理;乡镇尺度上,四个侵蚀程度始终严重的乡镇及持续性变差的八个乡镇作为治理的重点区域,而属波动性变差的 24 个乡镇应作为治理的次重点区域。

(4)本文从不同空间评价尺度探讨研究区土壤侵蚀动态演变差异性,既把握了研究区土壤侵蚀演变的总体趋势,揭示了三峡库区土壤侵蚀演变转型的特点;又在小尺度上剖析了土壤侵蚀演变空间分异,为该区域水土流失精准治理提供了依据。

参考文献:

[1] 赵明松,李德成,张甘霖. 1980 ~ 2010 年间安徽省土壤侵蚀动态演变及预测 [J]. 土壤,2016,48(3):588—596.

ZHAO M, LI D C, ZHANG G L. Dynamic evolution and prediction of soil erosion in Anhui Province from 1980 to 2010. Soils, 2016, 48(3):588—596.

[2] 赵岩洁,李阳兵,冯永丽. 三峡库区紫色岩小流域土壤侵蚀强度动态监测 [J]. 资源科学,2012,34(6):1125—1133.

ZHAO Y J, LI Y B, FENG Y L. Dynamic monitoring of soil erosion intensity in purple rock small watershed of three gorges reservoir area [J]. Resources Science, 2012, 34(6):1125—1133.

[3] 陈晓燕,何丙辉,陈道平. 重庆合川区土壤侵蚀时空变化研究 [J]. 西南农业大学学报,2003,25(5):463—466.

CHEN X Y, HE B H, CHEN D P. Study on spatial and temporal changes in soil erosion in Hechuan city of Chongqing [J]. Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science), 2003, 25(5):463—466.

[4] MCHUGH M. Short-term changes in upland soil erosion in England and Wales: 1999 to 2002 [J]. Geomorphology,

2007, 86(1) : 204—213.

[5] PARK S, OH C, JEON S, et al. Soil erosion in Korean watersheds, assessed using the revised universal soil loss equation [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 399(3) : 263—273.

[6] ALKHARABSHEH M M, ALEXANDRIDIS TK, BILAS G, et al. Impact of land cover change on soil erosion hazard in northern Jordan using remote sensing and GIS [J]. *Procedia Environmental Science*, 2013, 19(12) : 912—921.

[7] 杨新华, 王侃, 李加林, 等. 基于 GIS 的慈溪市土壤侵蚀敏感性评价 [J]. *水土保持通报*, 2016, 36(4) : 210—215.

YANG X H, WANG K, LI J L, et al. A GIS-based assessment on soil erosion sensitivity in Cixi City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(4) : 210—215.

[8] 仲晓雷, 郭成久, 范昊明, 等. 辽宁省土壤侵蚀空间尺度效应初探 [J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(3) : 33—37.

ZHONG X L, GUO C J, FAN H M, et al. Preliminary study of spatial scale effects of soil erosion in Liaoning province [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(3) : 33—37.

[9] 林晨, 周生路, 吴少华. 30 年来东南红壤丘陵区土壤侵蚀时空演变研究——以长汀县为例 [J]. *地理科学*, 2011, 31(10) : 1235—1241.

LI C, ZHOU S L, WU S H. Evolution of soil erosion degree in 30 years in granite hills, Southeastern of China—a case study of Changting County, Fujian [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(10) : 1235—1241.

[10] 李大龙, 杨井, 李卫红, 等. 基于 GIS 和 USLE 的伊犁河谷土壤侵蚀敏感性评价 [J]. *生态学杂志*, 2016(4) : 942—951.

LI D L, YANG J, LI W H, et al. Evaluating the sensitivity of soil erosion in the Yili River valley based on GIS and USLE [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016(4) : 942—951.

[11] PRASUHN V. Soil erosion in the Swiss midlands: Results of a 10-year field survey [J]. *Geomorphology*, 2011, 126(1—2) : 32—41.

[12] MESHESHA D T, TSUNEKAWA A, TSUBOM, et al. Dynamics and hotspots of soil erosion and management scenarios of the Central Rift Valley of Ethiopia [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2012, 27(1) : 84—99.

[13] 查良松, 邓国徽, 谷家川. 1992 ~ 2013 年巢湖流域土壤侵蚀动态变化 [J]. *地理学报*, 2015, 70(11) : 1708—1719.

ZHA LI S, DENG G H, GU J H. Dynamic changes of soil erosion in the Chaohu Watershed from 1992 to 2013 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11) : 1708—1719.

[14] 姜琳, 边金虎, 李爱农, 等. 岷江上游 2000 ~ 2010 年土壤侵蚀时空格局动态变化 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(1) : 18—25, 35.

JIANG L , BIAN J H, LI A N, et al. Spatial-temporal changes of soil erosion in the upper Reaches of minjiang river from 2000 to 2010 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1) : 18—25, 35.

[15] 杨琴, 孙金水, 李天广. 不同比例尺流域土壤侵蚀评估及其尺度效应研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(增刊) : 201—209.

YANG J , SUN J S, LIT G. Soil erosion assessment undervarions scales and scale effects [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(Suppl.) : 201—209.

[16] 汪涛, 黄子杰, 吴昌广, 等. 基于分形理论的三峡库区土壤侵蚀空间格局变化 [J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(2) : 47—51.

WANG T, HUANG Z J, WU C G, et al. Spatial Pattern variation of soil erosion in Three Gorges Reservoir Area based on fractal theory [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(2) : 47—51.

[17] 李月臣, 刘春霞, 赵纯勇, 等. 三峡库区重庆段水土流失的时空格局特征 [J]. 地理学报, 2008, 63 (5) : 502—513.

LI Y C, LIU C X, ZHAO C Y, et al. Spatiotemporal features of soil and water loss in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing [J]. Acta Geographica Sinica, , 2008, 63 (5) :502—513.

[18] 李阳兵, 邵景安, 杨华, 等. 重庆市土壤侵蚀空间格局研究 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2007, 24(4) : 12—15.

LI Y B, SHAO J A, YANG H, et al. Spatial patterns of soil erosion in Chongqing Area [J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science Edition) , 2007, 24(4) : 12—15.

[19] 傅伯杰, 赵文武, 陈利顶, 等. 多尺度土壤侵蚀评价指数 [J]. 科学通报, 2006, 51(16) : 1935—1943.

FU B J, ZHAO W W, CHENG L X, et al. Multi-scale soil erosion evaluation index [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(16) : 1935—1943.

[20] 李月臣, 刘春霞, 赵纯勇, 等. 重庆市三峡库区水土流失特征及类型区划分 [J]. 水土保持研究, 2009, 16 (1) :13—17.

LI Y C, LIU C X, ZHAO C Y, et al. Study on the soil and water loss characteristics and regionalization of Three Gorges Reservoir Area in Chongqing [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(1) : 13—17.

[21] 罗翀, 周志翔, 王鹏程, 等. 三峡库区生态功能区划研究 [J]. 人民长江, 2010, 41(7) : 27—67.

LUO C, ZHOU Z X, WANG P C, et al. Study on ecological function regionalization of Three Gorges Reservoir Area [J]. Yangtze River, 2010, 41(7) : 27—67.

[22] 重庆市统计局. 重庆市统计年鉴 2016 年 [D]. 北京: 中国统计出版社, 2016.

[23] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分级分类标准 SL190-2007 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008, 8—9.

[24] 何炳辉. 重庆市三峡库区土壤侵蚀分级分类标准的探讨 [J]. 水土保持研究. 2003. 10(4) : 63—65.

HE B H. Discussion on criterion of classification of soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003. 10(4) : 63—65.

[25] WANG X, ZHAO X, ZHANG Z, et al. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use /cover change in China from the end of the 1980s to 2010 [J]. Catena, 2016, 137: 256—268.

[26] 武国盛, 林惠花, 朱建鹤, 等. 典型红壤侵蚀景观的时空变化——以福建长汀为例 [J]. 应用生态学报. 2011. 22(7) : 1825—1832.

WU G S, LIN H H, Zhu Hejian, et al. Spatiotemporal variation of typical red soil eroded landscape pattern: a case study in Changting County of Fujian Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011. 22(7) : 1825—1832.

[27] 梁音, 杨轩, 苏春丽, 等. 基于 EI 的南方红壤区土壤侵蚀县域差异与趋势分析 [J]. 土壤学报, 2009, 49(1) : 24—29.

LIANG Y, YANG X, SU C L, et al. EI-Based analysis of variation and trends of soil erosion of red soil region on a county scale [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 49(1) : 24—29.

[28] 杨存建, 刘纪远, 张增祥. 重庆市土壤侵蚀与其背景的空间分析 [J]. 水土保持学报, 2000, 14(3) : 84—87.

YANG C J, LIU J Y, ZHANG Z X. Spatial analysis of soil erosion and its background in Chongqing City [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(3) : 84—87.

[29] 史明德, 史学正, 梁音, 等. 我国不同空间尺度土壤侵蚀的动态变化 [J]. 水土保持通报, 2005, 25(5) : 85—89.

SHI M D, SHI X Z, LIANG Y, et al. Dynamic change of soil erosion in different spatial scale of China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(5) : 85—89.

[30] 倪九派, 魏朝富, 谢德林. 土壤侵蚀定量评价的空间尺度效应 [J]. 生态学报, 2005, 25(8) : 2061—2067.

NI J P, WEI C F, XIE D L. Effects of spatial scale on the quantitative estimation of soil erosion [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8) : 2061—2067.

[31] 李霖, 吴帆. 空间数据多尺度表达模型及其可视化 [D]. 北京: 科学出版社, 2005.

LI L, WU FAN. Multi-scale representation model of spatial data and its visualization [J]. Beijing: Science press, 2005.

[32] NIE YONG, FAN JIANRONG, YANG A' QIANG. Temporal and spatial conversion analysis of soil erosion in the Three Gorges Region Based on RS and GIS Technique—A Case Study in Kaixian County [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2008, 13(3) : 369—376.

[33] 徐昔保, 杨桂山, 李恒鹏, 等. 三峡库区蓄水运行前后水土流失时空变化模拟及分析 [J]. 湖泊科学, 2011, 23(3) : 429—434.

XU X B, YANG G S, LI H P, et al. Simulation on the spatial-temporal changes of soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area between the pre-and post-storage periods [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(3) : 429—434.

[34] 莫斌, 朱波, 王玉宽, 等. 重庆市土壤侵蚀敏感性评价 [J]. 水土保持通报, 2004, 24(5) : 45—49, 59.

MO B, ZHU B, WANG Y K, et al. Sensitivity evaluation for soil erosion in Chongqing City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004, 24(5) : 45—49, 59.

[35] 冯永丽, 李阳兵, 程晓丽, 等. 重庆市主城区不同地质条件下土壤侵蚀时空分异特征 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(5) : 30—34.

FENG Y L, LI Y B, CHENG X L, et al. The spatial-temporal variation characteristics of the different geological conditions of soil erosion in the downtown area of Chongqing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5) : 30—34.