

基于 CSLE 的湖北省土壤侵蚀时空变化特征

李嘉麟, 陈家慧, 华 丽, 韩兆君, 蔡崇法

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 以湖北省为研究区, 利用 CSLE 模型计算 1990—2015 年的土壤侵蚀模数, 借助 GIS 空间分析方法揭示多时期土壤侵蚀的时空变化特征。结果表明: (1) 湖北省主要为微度侵蚀, 其次为轻度侵蚀, 中度侵蚀及以上等级侵蚀所占面积较小, 轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀面积 25 年间分别减少 11 267.0, 497.6, 176.9, 307.7, 313.7 km², 减幅分别为 27.39%, 13.85%, 11.79%, 24.88% 和 56.04%。(2) 总侵蚀面积先减再增后持续减少, 其中极剧烈和剧烈侵蚀面积下降明显。侵蚀强度在不同时期的变化呈现空间异质性。1990—1995 年、2000—2005 年和 2010—2015 年土壤侵蚀以好转为主, 土壤侵蚀强度降低区域 1990—1995 年集中在恩施、咸宁, 1995—2000 年集中在恩施、十堰, 2000—2005 年集中在神农架林区、宜昌市和秭归县周边, 2005—2010 年集中在黄冈和黄石市, 2010—2015 年集中在神农架林区和宜昌市; 其中旱地与裸地好转情况最为明显。在 1995—2000 年和 2005—2010 年土壤侵蚀加剧, 土壤侵蚀强度加剧区域 1990—2000 年集中在神农架局部地区, 2000—2005 年集中在十堰市, 2005—2010 年集中在竹溪县; 2010—2015 年集中在恩施市、宣恩县和鹤峰县, 其中林地与旱地表现最为明显。土壤侵蚀主要变化区域表现在 25 年间, 坡度 < 8° 区域轻度以上等级侵蚀面积逐年增加, 这与人类活动对地表负面扰动 (生产建设项目、坡耕地农业生产、其他人类活动导致的土地利用类型转换) 等主要集中在地形较为平缓的区域有很大关系。坡度在 8°~35° 区域轻度以上等级侵蚀面积明显减少, 主要表现在退耕还林和水保工程治理的实施取得成效明显。

关键词: 土壤侵蚀; CLSE 模型; GIS; 时空变化; 湖北省

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)04-0043-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.007

Spatial and Temporal Characteristics of Soil Erosion in Hubei Province Based on CSLE

LI Jialin, CHEN Jiahui, HUA Li, HAN Zhaojun, CAI Chongfa

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

Abstract: Soil erosion is one of the global environmental problems restricting the survival and development of human beings. With the development of economy, human activities induce the aggravation of soil erosion and bring about eco-environmental problems in the short time. Therefore, taking Hubei Province as the research area, the CSLE model is used to calculate the soil erosion modulus from 1990 to 2015, and the GIS spatial analysis method is revealed the spatiotemporal characteristics of soil erosion in multiple periods. The results show that Hubei Province mainly has slight erosion, followed by mild erosion, and other grade erosion such as moderate erosion occupies a small area. The areas of mild erosion, moderate erosion, strong erosion, extremely strong erosion and severe erosion decreased by 11 267.0, 497.6, 176.9, 307.7, 313.7 km² respectively in 25 years, with decreases of 27.39%, 13.85%, 11.79%, 24.88% and 56.04% respectively. The total erosion area first decreased, then increased, and finally continued to decrease. Among them, the area of intense erosion and extremely intense erosion decreased significantly. The changes of erosion intensity in different periods show spatial heterogeneity. Soil erosion was mainly improved in 1990—1995, 2000—2005 and 2010—2015, such as Enshi and Xianning in 1990—1995, Enshi and Shiyan in 1995—2000, Shennongjia forest area,

收稿日期: 2021-11-23

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (41601280)

第一作者: 李嘉麟 (1997—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事水土流失动态监测、树种识别研究。E-mail: 1535420728@qq.com

通信作者: 华丽 (1977—), 女, 宁夏吴忠人, 博士, 副教授, 硕导, 主要从事水土流失动态监测与驱动机制、灾害预警、作物监测研究。E-mail: huali@mail.hzau.edu.cn

Yichang City and the periphery of Zigui County in 2000—2005, Huanggang and Huangshi City in 2005—2010, Shennongjia forest area and Yichang City in 2010—2015; Their soil erosion conditions are gradually improving, and the improvement of dry land and bare land is the most obvious. Soil erosion was intensified in 1995—2000 and 2005—2010, and the intensification of soil erosion was concentrated in Shennongjia area (1990—2000), Shiyan City (2000—2005), Zhuxi County (2005—2010) Enshi City, Xuanen County and Hefeng County (2010—2015), among which forest land and dry land were the most obvious. The main change areas of soil erosion are as follows: in the past 25 years, the area of mild and above grade erosion in the area with slope less than 8° has increased year by year, which is closely related to the fact that the negative surface disturbance caused by human activities (production and construction projects, agricultural production of sloping farmland, land use type conversion caused by other human activities) is mainly concentrated in the region with relatively flat topography. The area with a slope of 8° to 35° with mild or above grade erosion has been significantly reduced, which is mainly manifested in the remarkable results achieved in the implementation of returning farmland to forests and comprehensive control of soil erosion and water loss.

Keywords: soil erosion; CSLE; GIS; spatiotemporal change; Hubei Province

土壤侵蚀(soil erosion)是指在风力、水力和重力等外力作用下,土壤及母质被剥蚀、搬运和沉积的自然现象。人类对自然资源不合理的开发利用导致土壤侵蚀加剧,生态环境问题日益突出,给经济和社会发展带来了极大危害,严重影响我国的可持续发展^[1]。中国是世界上受土壤侵蚀影响最严重的国家之一,目前水土流失问题已成为我国急需解决的环境问题。

土壤侵蚀预报模型是分析土壤侵蚀过程的重要依托工具,更是土壤侵蚀研究的热门领域。目前计算土壤侵蚀模数的主要模型有 USLE 模型^[2]、WEPP 模型^[3]、EUROSEM 模型^[4]、LISEM 模型^[5]、RUSLE 模型^[6]等。我国土壤侵蚀定量观测始于 20 世纪中期,主要工作为在各地建立径流小区从而获取大量观测数据。1980 年以来,随着 USLE 模型的广泛应用,我国学者通过大量系统科学的试验,针对不同侵蚀类型,对 USLE 模型进行修正。江忠善等^[7]修正浅沟侵蚀影响系数,建立计算沟间地次降雨的土壤流失模型;蔡强国等^[8]建立次降雨侵蚀产沙模型,模型综合考虑降雨入渗、径流分散、重力侵蚀及泥沙输移过程,从而对影响侵蚀过程的因子做出定量分析,建立黄土丘陵区侵蚀产沙过程模型;蔡崇法等^[9]建立典型小流域地理数据库,运用 USLE 模型对小流域土壤侵蚀量进行预测;刘宝元等^[10]以 USLE 模型为原型根据国内水土流失情况和水保措施情况提出中国土壤侵蚀模型(Chinese Soil Loss Equation, CSLE),通过分析大量观测小区规格,综合考虑地形、植被、降雨、水土保持措施等因子,提出我国标准小区规格,其中水保措施根据国内具体实施情况进行修改,分为耕作措施因子(T)、工程措施因子(E)和生物措施因子(B)。国内学者经过大量试验验证,对模型或因子进行修

正,能够使其更好地应用于国内各区域。江忠善等^[7]基于黄土高原的研究数据对坡长坡度因子进行修改,并引入浅沟侵蚀因子 G ,建立水蚀坡面土壤侵蚀预报模型;刘宝元等^[11]对地形因子计算进行修改,得出符合我国土壤侵蚀特点的坡长坡度因子计算公式;周伏建等^[12]提出福建省以 EI_{60} 为降雨侵蚀力指标;郭继成等^[13]、范建荣等^[14]分别利用 CSLE 方程对我国西南喀斯特地区和东北地区的 B 因子值进行了研究。同时,随着 GIS 与 RS 的发展,越来越多的学者综合利用 GIS、RS 与土壤侵蚀预报模型理论技术对土壤侵蚀进行定量化分析,史彦林^[15]利用 TM 影像和通用土壤流失方程(USLE)分析了饶河县 1995 年、2005 年土壤侵蚀变化情况;齐晓君等^[16]利用遥感数据和修正的通用土壤侵蚀方程(RUSLE)动态研究了浑河上游抚顺地区的土壤侵蚀;陆建忠等^[17]利用 GIS 与通用土壤流失方程(USLE)相结合对鄱阳湖流域 1990 年、2000 年土壤侵蚀量进行计算。目前大部分研究着眼于特定时期县域、市域、流域等范围的土壤侵蚀空间分布特征分析,已有的不同时期的土壤侵蚀动态变化研究也多集中于市域^[18]、流域^[19]范围,对省域范围长时间序列多期土壤侵蚀时空变化特征的研究较少。

本文以湖北省为研究区,综合地理信息系统和遥感学科理论与技术,通过 CSLE 模型计算全省 6 期(5 年 1 期)土壤侵蚀量,得出湖北省 1990—2015 年土壤侵蚀模数。根据湖北省 25 年间土壤侵蚀的变化,分析其变化特征和各等级侵蚀转移特点,从不同土地利用类型和不同坡度条件下对土壤侵蚀的分布特征和变化规律进行总结。

1 研究区概况

湖北省位于我国中部,东接安徽,西邻重庆,南接江西、湖南,北与河南毗邻,西北与陕西接壤。介于北

纬 29°01′53″—33°6′47″,东经 108°21′42″—116°07′50″。总面积 185 900 km²,占中国总面积的 1.94%。湖北省处于中国地势第二级阶梯至第三级阶梯过渡地带,其北、西、东三面环山,中间低平,拥有多种地貌类型,山地、丘陵和平原兼备。地势高低相差悬殊,呈现由西北向东南倾斜的趋势。湖北省地处亚热带,位于典型的季风区内。全省除高山地区外,大部分为亚热带季风性湿润气候,光能充足,热量丰富,无霜期长,降水充沛,雨热同季。温度空间分布呈现东高西

低的态势,多年降水量自北向南逐渐增加,鄂西南和鄂东地区为降水量高值区,鄂西北为降水量低值区。根据第一次全国水利普查结果,湖北省共有水土流失面积 36 900 km²,占全省总面积的 19.85%,是全国水土流失严重的省份之一。

2 材料与方法

2.1 数据来源与预处理

本文所用数据来源及预处理方法见表 1。

表 1 数据来源与预处理

数据类型	数据来源	预处理
2000—2015 年遥感数据(共 4 期,5 年 1 期):MODIS 8 天合成的地表反射率产品 MOD09Q1	美国地质勘探局(USGS, https://www.usgs.gov/),空间分辨率为 250 m	投影转换和坐标设置、批量拼接、批量裁剪
1990 年与 1995 年遥感数据:GIMMS NDVI3g NDVI 半月合成数据	美国国家航天航空局(NASA, https://ecocast.arc.nasa.gov/data),空间分辨率为 8 km	裁剪与投影转换
地形数据:ASTER GDEM 数据	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn),空间分辨率为 30 m	数据检查、投影转换、拼接裁剪
1990—2015 年土地利用数据(共 6 期,5 年 1 期):Landsat TM 影像(Landsat 5)	美国地质勘探局(USGS, https://www.usgs.gov/)	人机交互目视解译
降雨量数据:中国地面气候资料日值数据集(V3.0)	国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)	普通克里金插值
土壤数据	第二次全国土地调查以及湖北省第二次土壤普查的土种志和土壤类型图资料	扫描和数字化
统计数据	湖北省水土保持公报数据、水土保持调查报告、中国耕作制度 70 年、湖北省统计年鉴等	数据统计

2.2 研究方法

2.2.1 中国土壤侵蚀预报模型(CSLE) 选用的中国土壤侵蚀预报模型(CSLE)是刘宝元等^[10]参考美国通用土壤流失方程(USLE)和修正通用土壤流失方程(RUSLE)进行本土化修改后提出的。该模型在不同地区参数选取不同,其表达式为:

$$A=R\times K\times L\times S\times B\times E\times T \tag{1}$$

式中: A 为土壤侵蚀模数($\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$); R 为降雨侵蚀力因子($(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$); K 为土壤可蚀性因子($(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})$); L 为坡长因子; S 为坡度因子; B 为生物措施因子; E 为工程措施因子; T 为耕作措施因子。

2.2.2 降雨侵蚀力因子(R) 降雨量数据统计自 1951 年以来全国八百多个气象站点日观测数据,搜集湖北省及周边共 41 个站点日降雨量数据,并按月统计汇总。利用地统计插值方法建立降雨量的空间分布推算模型。

本文利用周伏建等^[20]建立的降雨侵蚀力模型,分别利用 1975—1990 年、1980—1995 年、1985—2000 年、1990—2005 年、1995—2010 年和 2000—2015 年的年平均降雨侵蚀力估算 1990—2015 共 6 期的降雨侵蚀力(图 1)。

$$R=\sum_{i=1}^{12}0.179P_i^{1.5527} \tag{2}$$

式中: R 为年降雨侵蚀力($(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$);

P_i 为月降雨量(mm)。

2.2.3 土壤可蚀性因子(K) 土壤可蚀性因子是用来衡量土壤侵蚀本体敏感性的一个重要因子,是基于土壤类型图计算所得。湖北省土壤类型多样,共计 39 种,主要有水稻土、潮土、黄棕壤、黄褐土、石灰土、红壤、黄壤和紫色土等。本文采用 Williams^[21] 的 EPIC 模型中的计算方法,其具体计算公式为:

$$K=\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256S_{AN}\left(1-\frac{S_{IL}}{100}\right)\right]\right\}\times\left\{\frac{S_{IL}}{C_{LA}+S_{IL}}\right\}^{0.3}\times\left\{1-\frac{0.25C}{[C+\exp(3.718-2.947C)]}\right\}\times\left[1-\frac{0.7SN_1}{SN_1+\exp(-5.509+22.899SN_1)}\right] \tag{3}$$

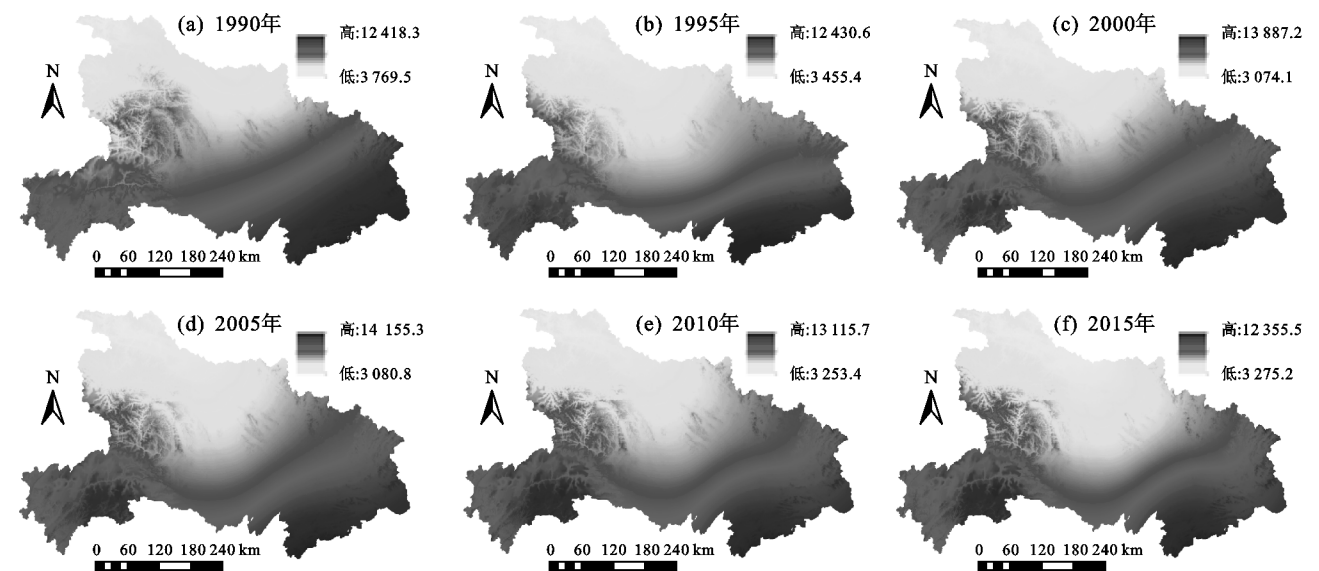
$$SN_1=1-\frac{S_{AN}}{100} \tag{4}$$

式中: S_{AN} 、 S_{IL} 、 C_{LA} 、 C 分别是指砂砾、粉粒、黏粒和有机碳含量(%).运用 EPIC 模型进行计算结果可得到湖北省土壤可蚀性因子(图 2)。

2.2.4 坡度坡长因子(LS) 地形对土壤侵蚀有着重要的影响作用。坡长坡度是根据 DEM 衍生出来的 2 个因子,其中坡度因子采用 Foster 等^[22]的分段坡长因子公式:

$$L_i=\frac{\lambda_{out}^{m+1}-\lambda_{in}^{m+1}}{\lambda_{out}-\lambda_{in}} \tag{5}$$

式中: L_i 为第 i 个栅格坡长因子; λ_{out} 、 λ_{in} 为栅格出口及入口坡长; m 为坡长指数,其中的 m 值根据刘宝元等^[10]的修改取值为 $m=0.2, \theta<0.5^\circ$; $m=0.3, 0.5^\circ\leq\theta<1.5^\circ$; $m=0.4, 1.5^\circ\leq\theta<3^\circ$; $m=0.5, \theta\geq3^\circ$ 。



注:降雨侵蚀力单位为 $(MJ\cdot mm)/(hm^2\cdot h\cdot a)$ 。

图 1 各年份降雨侵蚀力因子值

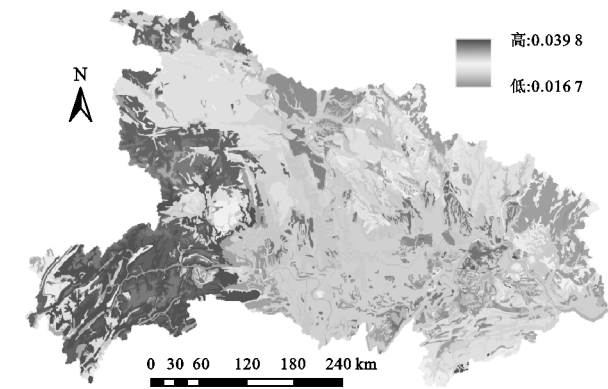


图 2 土壤可蚀性因子值

坡度因子的提取分为 10° 以上和 10° 以下,分别参考 McCool 等^[23] 与 Liu 等^[24] 的公式:

$$\begin{cases} S=10.80\times\sin\theta+0.03 & \theta<5^\circ \\ S=16.80\times\sin\theta-0.50 & 5^\circ\leq\theta<10^\circ \\ S=21.91\times\sin\theta-0.96 & \theta\geq10^\circ \end{cases} \quad (6)$$

式中: S 为坡长因子; θ 为坡度($^\circ$)。

2.2.5 水土保持措施因子(BET) 水土保持因子可以衡量水土保持措施对土壤侵蚀的抑制程度。CSLE 模型将 RUSLE 模型中的水土保持因子分为 3 个因子:植被覆盖与生物措施 B 因子、工程措施 E 因子和耕作措施 T 因子。

土地利用数据来源于美国地质勘探局(USGS) Landsat 5 卫星上 TM 传感器的影像。经过人机交互目视解译获得 1990—2015 年(共 6 期,5 年 1 期)研究 30 m 分辨率土地利用图,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地(含城乡用地及工矿用地)和未利用地(含裸土地和其他未利用地)。

利用 MODIS 影像的 8 天合成的地表反射率

MOD09Q1 产品,选取 1990—2015 年(共 6 期,5 年 1 期)每年 5—9 月的数据计算归一化植被指数(NDVI),其公式为:

$$NDVI=\frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (7)$$

式中: NIR 为近红外波段; R 为红外波段。

取每月 4 期 NDVI 的最大值作为月 NDVI 值,取 5 个月的均值计算年 NDVI 值。采取融合修订的方式,利用年 NDVI 值计算植被覆盖度,计算公式为:

$$FVC=\begin{cases} 1 & NDVI>NDVI_{soil} \\ \frac{(NDVI-NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg}-NDVI_{soil})} & NDVI_{soil}\leq NDVI\leq NDVI_{veg} \\ 0 & NDVI<NDVI_{veg} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $NDVI_{soil}$ 为裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值;而 $NDVI_{veg}$ 则表示完全被植被覆盖区域的 NDVI 值。关于 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 值的选取,根据张亮等^[25] 的选取方法进行调整,统计图像中不同 NDVI 值对应的栅格数,根据 NDVI 的概率分布表,寻找其累计概率在 1% 和 99% 附近的值,即作为 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 的值,以此得到各年份植被覆盖度均值。

结合湖北省土地利用数据,根据 RUSLE 手册和刘宝元等^[11]、王万忠等^[26] 的研究,由表 2 对不同土地利用类型赋值,最终得到 B 因子。

工程措施因子采用水保工程数据结合水保投入数据进行估算。其中水保工程数据以湖北省的水土保持公告数据作为计算基础。其中 1990 年和 1995 年的梯田面积因数据缺失,通过时间序列分析推算,

并结合《水土保持公报》^[27] 中的水保投入数据进行合理地修改外推。根据上述数据,采用加权平均算法,通过公式得出工程因子值:

表 2 B 因子赋值依据

土地利用 类型	植被 覆盖度/%	<i>B</i> 值	土地利用 类型	植被 覆盖度/%	<i>B</i> 值
耕地	旱地	1	林地	0~20	0.100
	水田	0		20~40	0.080
水域	—	0		40~60	0.060
建设用地	城镇建设用地	0.010		60~80	0.020
	农村建设用地	0.025		80~100	0.004
未利用地	采矿用地	1	草地	0~20	0.450
	裸土地	1		20~40	0.240
	其他未利用地	0		40~60	0.150
				60~80	0.090
				80~100	0.043

$$ESL = \frac{[STL \times ETL + (SSL - STL)]}{SSL}$$

(9)

式中:ESL 是指将梯田面积按照权重平均至坡耕地上后坡耕地处的工程措施因子;ETL 为梯田的工程措施因子值,这里的 ETL 采用水土保持工程措施因子赋值表中的石坎水平梯田的工程因子值 0.121;STL 与 SSL 分别为梯田和坡耕地的面积。

根据《区域水土流失动态监测技术规范(试行)》^[28] 中全国轮作区 T 因子赋值表,结合郭乾坤等^[29] 的研究将对应耕作措施因子值赋值到湖北省不同耕作制度区域旱地的栅格上,得到不同年份的湖北省耕作措施因子。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀空间分布

运用 CSLE 模型对 1990—2015 年各个因子进行计算,得到湖北省近 25 年间共 6 期的土壤侵蚀模数(图 3)。其中根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)^[30],将湖北省土壤侵蚀划分为 6 个等级,0~500 t/(km²·a)为微度,500~2 500 t/(km²·a)为轻度,2 500~5 000 t/(km²·a)为中度,5 000~8 000 t/(km²·a)为强烈,8 000~15 000 t/(km²·a)为极强烈,>15 000 t/(km²·a)为剧烈侵蚀。从空间上可知,土壤侵蚀较为严重区域分布在鄂西南、鄂西北、鄂东区域,其中位于鄂西南区域的鄂渝山地侵蚀面积最大,且侵蚀更严重。由图 3 可以看出,1990—1995 年土壤侵蚀等级降低集中在恩施、咸宁,1995—2000 年土壤侵蚀等级降低集中在恩施、十堰,2000—2005 年土壤侵蚀等级降低集中在神农架林区和宜昌市秭归县周边,2005—2010 年土壤侵蚀等级降低集中在黄冈和黄石市,2010—2015 年土壤侵蚀等级降低集

中在神农架林区和宜昌市。

3.2 土壤侵蚀动态变化

3.2.1 土壤侵蚀总体变化分析 微度侵蚀被定义为土壤侵蚀小于土壤容许流失量,在统计土壤总侵蚀面积时应统计轻度及以上侵蚀等级的侵蚀面积。利用 ArcGIS 对湖北省 25 年间各等级土壤侵蚀面积进行汇总。由表 3 可知,总侵蚀面积由 1990 年的 48 023.0 km² 减至 1995 年约 41 977.9 km²,后增至 2000 年 44 398.8 km²,2000 年后持续减少,1995—2000 年总侵蚀面积增加是受“九五”规划影响,湖北省林地被破坏,部分林地植被覆盖度下降,轻度侵蚀面积在林地区域增加 11.13%。25 年侵蚀面积共减少 12 562.9 km²,相对 1990 年侵蚀面积下降 26.16%。而轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀面积 25 年间分别减少 11 267.0,497.6,176.9,307.7,313.7 km²,减幅分别为 27.39%,13.85%,11.79%,24.88%和 56.04%,说明经过多年的水土保持治理,湖北省土壤侵蚀状况得到较好的改善。

轻度侵蚀及以上等级侵蚀需着重关注,由表 3 可知,轻度侵蚀约占总侵蚀面积的 85%,且 25 年间减少 1.67%,中度侵蚀和强烈侵蚀占比分别增加 16.67%和 19.46%,剧烈侵蚀占比变化最为明显,占比减少 40.47%。

中度侵蚀以上侵蚀等级 1990—2015 年变化见图 4。1990—1995 年各侵蚀等级的面积均有下降,1995—2000 年间维持稳定,后至 2015 年持续缓慢减少,其中极剧烈和剧烈侵蚀面积减少相对明显,强烈侵蚀则变化较少,这表明强烈侵蚀区域的治理需得到更多关注。

3.2.2 侵蚀强度变化分析 利用 ArcGIS 的 Tabulate Area 工具对 25 年的土壤侵蚀各强度面积转移矩阵、不同土地利用类型的土壤侵蚀强度、不同坡度等级的土壤侵蚀强度进行统计分析。不同土地利用类型的侵蚀强度面积见表 4。

从图 5 可以看出,1990—2015 年土壤侵蚀强度中微度侵蚀最为稳定,其次为轻度侵蚀;强烈侵蚀和剧烈侵蚀相对而言更易转移为别的侵蚀强度;大部分侵蚀等级主要向更低侵蚀等级转移。流向剧烈侵蚀的主要为轻度侵蚀,其次为微度侵蚀与极强烈侵蚀,1990—2015 年湖北省林地面积减少 628.81 km²,草地面积减少 46.81 km²,这些主要是因基础设施建设、房地产开发、农林生产开发等人为扰动造成的土地利用发生变化,进而导致短期局部区域侵蚀强度发生的变化。从长时间序列来看,湖北省土壤侵蚀总体呈现好转趋势。

从表 4 和图 6 可以看出,在土地利用类型方面,

旱地中微度侵蚀面积由 1990 年 14 255.6 km²下降至 2015 年 14 132.3 km²,主要是旱地转换为其他地类,面积有所减少导致。旱地侵蚀等级分布均匀,面积占

比随侵蚀等级增加而减少,旱地中强烈侵蚀及以上等级的占比由 10.33%逐年减少至 7.22%,剧烈侵蚀面积 25 年间减少 377.4 km²,减少 68.72%。

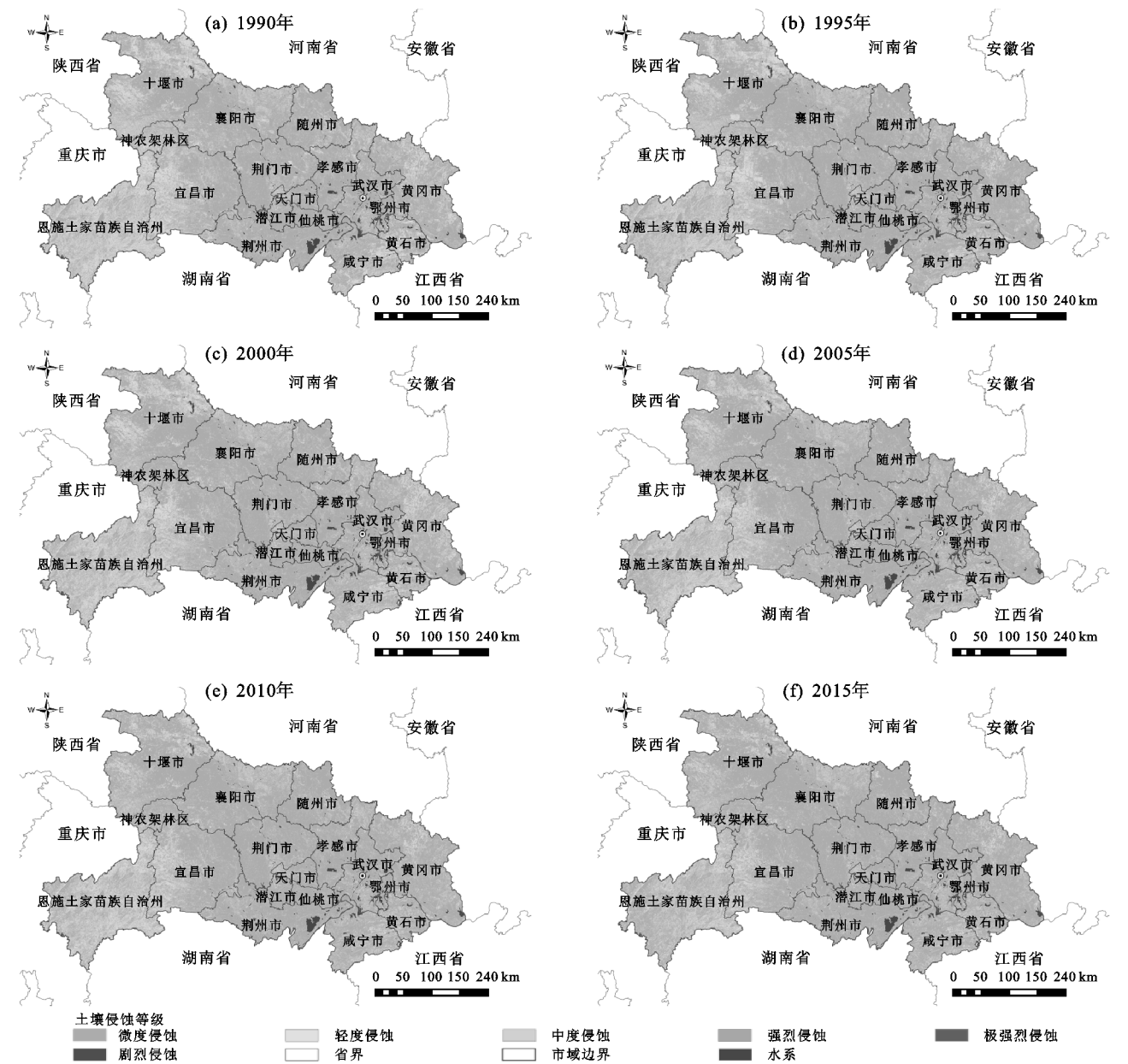


图 3 不同时期土壤侵蚀等级

表 3 湖北省 25 年间土壤侵蚀各等级情况

土壤侵蚀等级	土壤侵蚀面积及变化/km ²							变化率/%
	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	25 年变化	
微度侵蚀	137798	143831	141466	145563	146144	150405	12606	9.1
轻度侵蚀	41134.4	35679.1	38172.1	34357.8	33734.0	29867.4	−11267.0	−27.4
中度侵蚀	3592.34	3340.03	3397.48	3264.64	3296.05	3094.73	−497.62	−13.9
强度侵蚀	1500.11	1386.89	1404.69	1360.07	1373.09	1323.19	−176.92	−11.8
极强度侵蚀	1236.39	1116.05	1048.45	996.13	1001.65	928.74	−307.65	−24.9
剧烈侵蚀	559.74	455.72	376.09	322.85	315.16	246.03	−313.70	−56.0
总面积	48023.0	41977.8	44398.8	40301.4	39720.0	35460.1	−12562.9	−26.2

林地微度侵蚀面积由 1990 年的 66 778.7 km²增至 2015 年的 78 586.2 km²,占比由 1990 年的 71.95%增至

2015 年的 85.21%,林地中轻度侵蚀及以上等级的侵蚀面积占比由 26 035.0 km²减少至 13 637.2 km²,减少

47.62%。林地能使土壤理化性质有所变化,有效减少水土流失并提高植被覆盖度,对土壤侵蚀的控制起到积极作用,所以林地的土壤侵蚀集中在轻度侵蚀,土壤侵蚀强度低。但在 1995—2000 年和 2005—2010 年湖北省林地土壤加剧较为严重,主要与林地植被覆盖度降低有关,1995—2000 年林地植被覆盖度下降区域占林地加剧和明显加剧面积的 78.6%,2005—2010 年林地植被覆盖度下降区域占林地加剧和明显加剧面积的 65.7%。

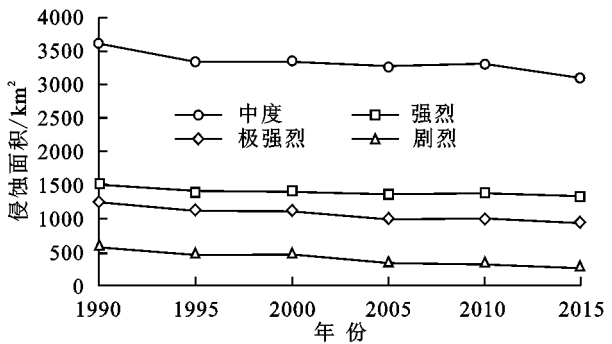


图 4 中度侵蚀以上侵蚀等级面积变化

表 4 湖北省 25 年间不同土地利用土壤侵蚀各等级情况

年份	土地利用 类型	土壤侵蚀面积/km²						总侵蚀 面积/km²
		微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	
1990	旱地	14255.6	10445.8	2750.5	1400.7	1212.6	549.1	16358.6
	林地	66778.7	25982.5	50.2	2.3	0	0	26035.0
	草地	1814.7	4337.7	763.6	81.9	9.1	0.1	5192.4
	居民点用地	4367.4	363.5	24.5	12.8	11.8	7.5	420.2
	裸土地	7.5	4.9	3.6	2.4	2.9	3.1	16.8
1995	旱地	14305.5	10519.5	2664.7	1327.6	1094.1	443.5	16049.2
	林地	72477.2	20321.0	34.6	0.8	0	0	20356.4
	草地	1882.3	4474.3	601.8	37.1	2.1	0	5115.3
	居民点用地	4597.4	359.5	35.7	19.2	17.4	9.9	441.7
	裸土地	7.0	4.8	3.4	2.2	2.4	2.4	15.2
2000	旱地	14333.1	10641.3	2757.8	1335.4	1020.2	360.8	16115.5
	林地	70097.5	22584.5	31.8	1.6	0	0	22618.0
	草地	1875.1	4555.1	561.9	41.6	3.8	0.1	5162.5
	居民点用地	4662.5	386.5	42.7	23.9	21.8	12.8	487.8
	裸土地	6.9	4.7	3.2	2.2	2.5	2.4	15.1
2005	旱地	14202.8	10728.4	2696.7	1289.7	962.2	303.7	15980.7
	林地	73981.4	18627.6	32.8	1.8	0	0	18662.2
	草地	1903.8	4593.4	476.1	35.9	4.6	0.1	5110.2
	居民点用地	4887.9	404.1	55.9	30.5	27.0	16.8	534.3
	裸土地	7.0	4.3	3.1	2.1	2.3	2.3	14.0
2010	旱地	14094.8	10729.0	2669.7	1281.9	954.8	287.0	15922.4
	林地	74542.0	17992.3	50.3	3.4	0.1	0	18046.1
	草地	1899.3	4568.9	490.9	43.0	6.0	0.2	5108.9
	居民点用地	5148.3	439.3	81.9	42.7	38.5	25.8	628.2
	裸土地	7.1	4.5	3.3	2.0	2.3	2.2	14.3
2015	旱地	14132.3	10800.4	2483.9	1165.9	795.7	171.7	15417.7
	林地	78586.2	13615.9	20.5	0.9	0	0	13637.2
	草地	1950.9	4682.3	321.2	12.0	1.2	0.1	5016.8
	居民点用地	5929.6	764.3	265.9	142.4	129.7	72.2	1374.5
	裸土地	7.0	4.5	3.3	2.0	2.1	2.0	13.9

草地土壤侵蚀等级主要为轻度侵蚀,其次为微度侵蚀,轻度侵蚀占比由 1990 年的 61.90% 上升至 2015 年的 67.20%,强烈及以上等级侵蚀面积由 1990 年的 91.1 km² 减少至 2015 年的 13.3 km²,下降 85.38%,说明在草地侵蚀强度高的区域得到有效治理,这与种草及退耕还草等水保措施有着密切关系。

居民点用地土壤侵蚀等级主要为微度侵蚀,其次为轻度侵蚀,轻度及以上等级侵蚀面积由 1990 年的 420.0

km² 增至 2015 年的 1 374.5 km²。居民点用地土壤侵蚀面积逐年增加,在 25 年间增加 2 516.53 km²,这是由于社会经济飞速发展,以及人口增加、迁移和城镇化建设引起的城市扩张所导致的。裸地轻度及以上等级侵蚀面积由 1990 年的 16.8 km² 减少至 2015 年的 13.9 km²,减少 17.10%,强烈及以上侵蚀等级约占 30%,侵蚀强度较高。裸地各侵蚀等级在各年间变化差异不大,25 年间侵蚀变化区域主要以好转为主。

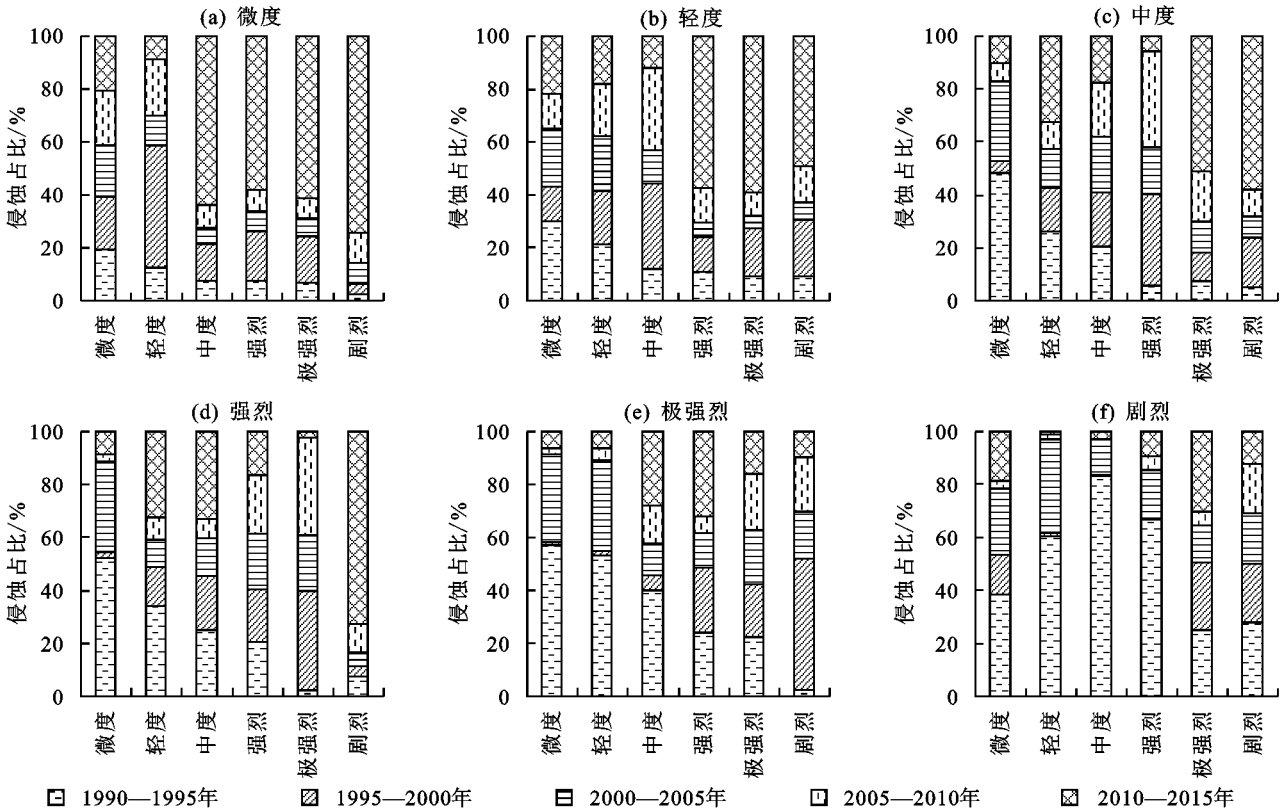


图 5 1990—2015 年湖北省各时期土壤侵蚀强度等级变化转移情况

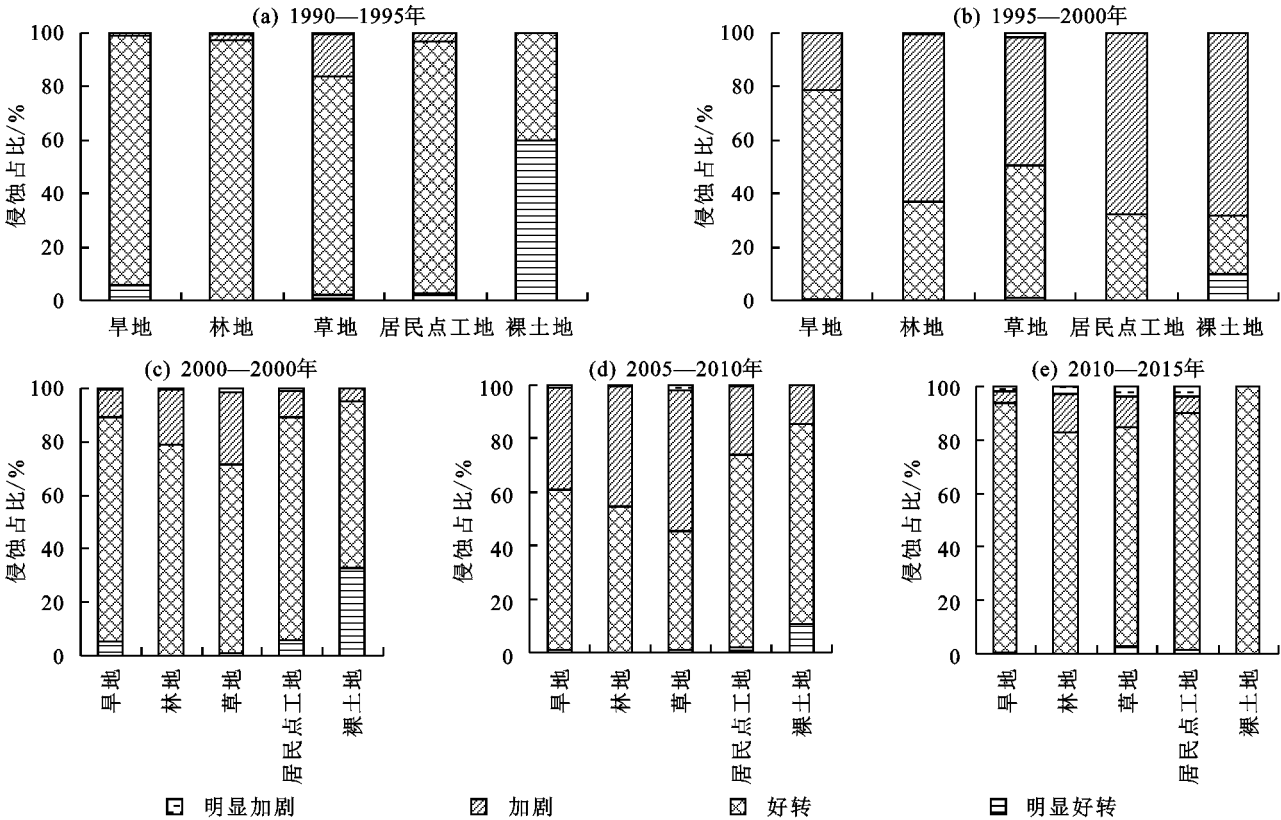


图 6 不同变化等级下土地利用分布情况

由图 7 可知,在不同坡度等级方面,1990—1995 年和 2000—2005 年间,极陡坡侵蚀情况好转与加剧 无太大差距,但在 1995—2000 年和 2005—2015 年间,侵蚀好转面积明显多于加剧面积,可知这些区域

水土流失治理效果明显。斜坡、陡坡和急坡区域中轻度以上等级侵蚀面积 25 年分别减少 2 212.9,4 599.8, 3 298.9 km²,侵蚀占比分别减少 24.8%,38.2%和33.2%, 表明该区域治理效果较为明显。

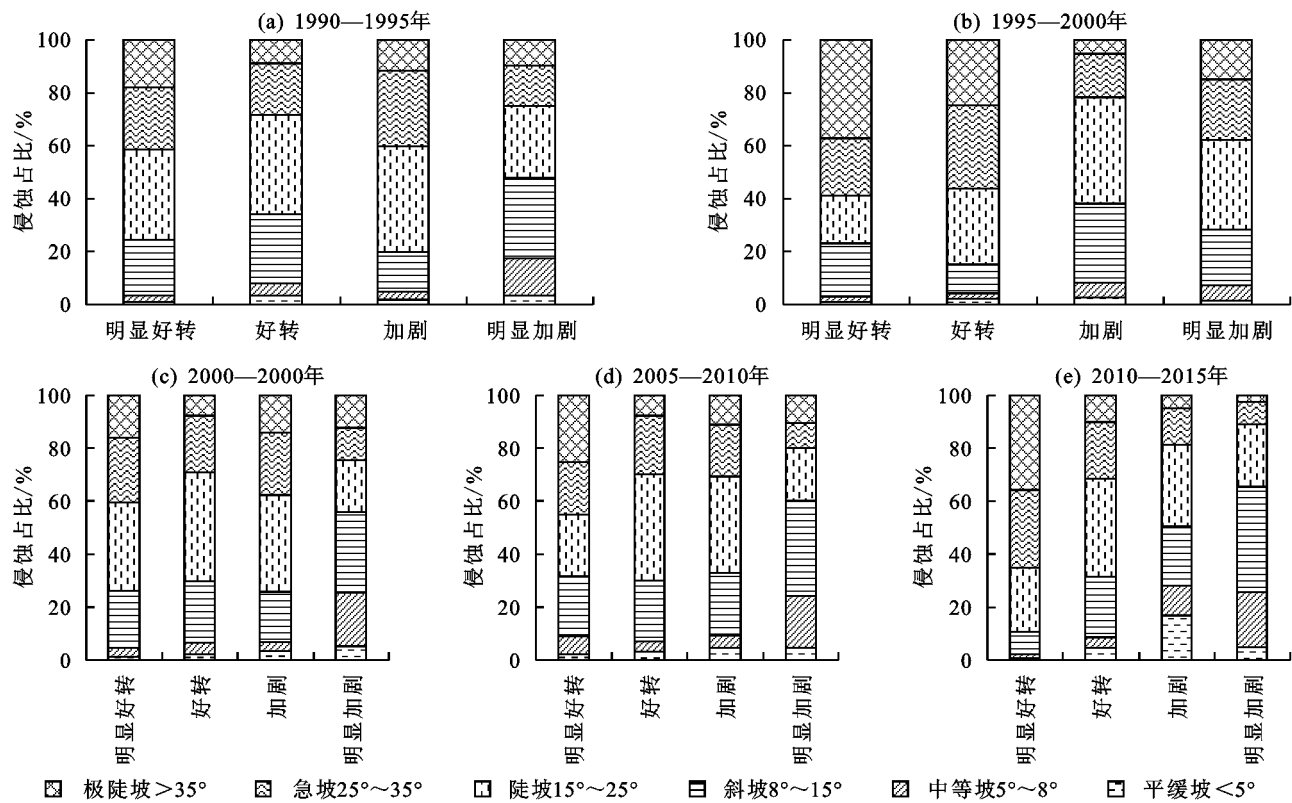


图 7 不同坡度等级下侵蚀面积变化情况

4 讨论

4.1 不同区域土壤侵蚀强度的变化

由 6 期土壤侵蚀模数可知,侵蚀分布及不同侵蚀强度的面积与《湖北省水土保持公报》^[31]数据较为一致。湖北省主要为轻度侵蚀,中度侵蚀及以上等级侵蚀所占面积较小。总侵蚀面积先减再增后持续减少,其中极剧烈和剧烈侵蚀面积下降明显。1990—1995 年土壤侵蚀等级降低集中在恩施、咸宁,咸宁开展农业生产结构优化,结合 1990 年和 1995 年土地利用数据得出,咸宁耕地面积减少 19.8 km²,林地面积增加 10.2 km²,恩施实施长江防护林工程,共 16.6 km²坡耕地、裸地转换成林地,在一定程度上减少土壤侵蚀;但同期神农架地区由于局部地区砍伐严重,林地面积减少 7.9 km²,存在局部水土流失加剧的隐患。1995—2000 年土壤侵蚀等级降低集中在恩施、十堰:根据恩施水土流失公报,恩施在水土流失方面资金投入不断加大,实施坡改梯、经果林、水保林、保土耕作等措施,治理力度不断加强,5 年共完成 68.3 km²的水土保持综合防治;十堰“九五”期间加大土地改良投入,增强土壤蓄水能力,使得土壤侵蚀状况有所缓减;但同期神农架地区仍处于木头经济转为生态经济的阶段,且主要能源为木材,土壤侵蚀加剧。2000—2005 年土壤侵蚀等级降低集中在神农架林区周边:神农架地区加大天然林保护力度,转变能源使用方

式,推动生态保护;但十堰市工业迅速发展,结合 2000 年和 2005 年土地利用数据得出,十堰市建设用地面积 5 年增加 3.8 km²,林地和草地向建设用地转换导致短期土壤侵蚀加剧。2005—2010 年土壤侵蚀等级降低集中在黄冈:“十一五”期间黄冈地区通过退耕还林、退田还湖、荒山造林等措施,给土壤侵蚀治理带来积极影响;但“十一五”期间竹溪县借助退耕还林政策,大面积对耕地、草地进行农业生产改造,在土地改造过程中因挖损、塌陷、压占等造成土地破坏,结合土地利用数据,竹溪县共 2.4 km²的草地和耕地转化成建设用地,加剧了土壤侵蚀。2010—2015 年土壤侵蚀等级降低集中在神农架林区和宜昌市,神农架林区因为多年的林区保护,木材采伐量骤减,生态恢复良好,宜昌市优化种植模式,积极植树造林,林地面积增加 9.4 km²,土壤侵蚀状况持续好转。

4.2 不同土地利用下土壤侵蚀强度的变化

不同土地利用类型植被覆盖、微地貌特征、水土保持效应存在差异性,从而影响地表径流和土壤侵蚀过程^[32]。从本文研究结果来看,湖北省旱地的土壤侵蚀等级在长时间周期内逐年减弱,侵蚀等级改善区域得益于坡改梯、退耕还林等水保工程措施的实施,治理成效显著。但在 1995—2000 年和 2005—2010 年旱地土壤侵蚀加剧较为明显,主要与降雨有关,1995—2000 年降雨侵蚀力增加区域占旱地总面积的 39.55%,2005—2010 年降雨侵蚀力增加区域占旱地

总面积的 49.23%。1990—2015 年林地侵蚀加剧和明显加剧区域共 772.0 km², 其中植被覆盖度下降面积达 638.3 km², 占林地加剧和明显加剧面积的 82.67%; 降雨侵蚀力增加面积达 278.1 km², 占林地加剧和明显加剧面积的 36.02%, 植被覆盖度对林地侵蚀变化产生较大影响。1990—2015 年草地侵蚀加剧和明显加剧区域共 672.9 km², 其中植被覆盖度下降面积达 118.9 km², 占草地加剧和明显加剧面积的 17.76%, 降雨侵蚀力增加面积达 402.3 km², 占草地加剧和明显加剧面积的 59.79%, 降雨对草地侵蚀变化产生较大影响; 草地土壤侵蚀总体情况在 25 年间未有明显改善, 该类型土壤侵蚀治理需得到重视。

4.3 不同坡度下土壤侵蚀强度的变化

1990—2015 年侵蚀加剧和明显加剧区域面积为 1 815.55 km², 平缓坡和中等坡区适合人类生活, 开发利用较多, 其中平缓坡和中等坡 25 年间耕地有 238.89 km² 转成居民点用地, 林地有 72.88 km² 转成居民点用地, 分别占侵蚀加剧和剧烈加剧区域的 13.1% 和 6.6%, 这导致该区域轻度以上等级侵蚀面积在 1990—2015 年间逐年增加。

5 结论

(1) 湖北省 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年侵蚀面积分别为 48 023.0, 41 977.8, 44 98.8, 40 301.4, 39 720.0, 35 460.1 km², 分别占湖北省总面积的 25.8%, 22.6%, 23.9%, 21.7%, 21.4% 和 19.1%。湖北省主要为微度侵蚀, 其次为轻度侵蚀, 中度侵蚀及以上强度的侵蚀所占面积较小。

(2) 从土壤侵蚀等级转移矩阵分析可知, 微度侵蚀最为稳定, 其次为轻度侵蚀, 强烈侵蚀和剧烈侵蚀容易发生转移。大部分变化区域的侵蚀等级降低, 微度侵蚀和轻度侵蚀中极少部分转移为剧烈侵蚀, 湖北省土壤侵蚀总体呈现好转趋势。

(3) 在不同环境背景下对土壤侵蚀变化进行研究, 使用叠置分析功能统计分析土壤侵蚀在不同土地利用类型和不同坡度等级下空间分布特征, 可得 1990—1995 年、2000—2005 年和 2010—2015 年间土壤侵蚀以好转为主, 其中旱地与裸地好转情况最为明显; 在 1995—2000 年和 2005—2010 年土壤侵蚀变化区域中, 侵蚀加剧情况不容小觑, 其中林地与旱地表现最为明显, 林地土壤侵蚀加剧主要和林地植被覆盖度降低有关, 土壤侵蚀变化区域中平缓坡和中等坡区域 25 年间轻度以上等级侵蚀面积逐年增加, 斜坡、陡坡和急坡区域轻度以上等级侵蚀面积明显减少。

本文土壤侵蚀计算时因遥感影像数据源无法统一,

2000 年前计算生物措施使用的 GIMMS NDVI3g 数据受混合像元影响计算出的植被覆盖度精度低, 经过简单校正后仍然存在一定误差, 在以后的植被覆盖度计算中使用更高分辨率影像进行统一计算来提高精度。

参考文献:

- [1] 刘江. 全国生态环境建设规划[J]. 中国水利, 1999, 2: 14-18.
- [2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland East of the Rocky Mountains [R]. USDA Agricultural Handbook, No. 282, 1965.
- [3] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology [J]. Transactions of the ASAS, 1989, 32(5): 1587-1593.
- [4] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6): 527-544.
- [5] De Roo A P J. The LISEM Project: An introduction [J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8): 1021-1025.
- [6] Kenneth G R, George R F, Glenn W, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation [M]. USDA Handbook, 1997.
- [7] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1-9.
- [8] 蔡强国, 陆兆熊, 王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型 [J]. 地理学报, 1996, 63(2): 108-117.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 刘宝元, 毕小刚, 符素华. 北京土壤流失方程 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [12] 周伏建, 陈明华, 林福兴, 等. 福建省降雨侵蚀力指标的初步探讨 [J]. 福建水土保持, 1989(2): 58-60.
- [13] 郭继成, 顾再柯, 苑爽, 等. 西南喀斯特地区水土保持措施因子值计算与评价 [J]. 中国水土保持, 2014(10): 50-53, 71.
- [14] 范建荣, 王念忠, 陈光, 等. 东北地区水土保持措施因子研究 [J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 75-78, 92.
- [15] 史彦林. 基于 GIS 的饶河县土壤侵蚀动态变化研究 [J]. 中国水土保持, 2014, 10: 47-49, 71.
- [16] 齐晓君, 王恩德, 贾三石. 基于 GIS 和 RS 的抚顺市土壤侵蚀动态研究 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2008, 9: 1342-1345.

- 特征研究[D].陕西 杨陵:西北农林科技大学,2013.
- [6] 赵喧,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体下垫面仿真模拟标准化参数[J].水土保持学报,2012,26(5):229-234.
- [7] 杨凯.黄土丘陵区生物结皮对土壤结构体稳定性的影响[D].陕西 杨陵:西北农林科技大学,2013.
- [8] 张桃林,潘剑君,赵其国.土壤质量研究进展与方向[J].土壤,1999(1):2-8.
- [9] 周建明,沈仁芳.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社,2013:15-25.
- [10] 董盛盛,霍连飞,丁启朔,等.机械耕作土壤结构体的数字图像分析[J].土壤通报,2016,47(5):1102-1106.
- [11] 李毅,邵明安.间歇降雨和多场次降雨条件下黄土坡面土壤水分入渗特性[J].应用生态学报,2008,19(7):1511-1516.
- [12] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.多场次降雨对崩岗崩积体细沟侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2014,12(6):1-7.
- [13] 袁和第,信忠保,蒋秋玲,等.连续降雨作用下褐土坡面侵蚀及其水动力学特征[J].水土保持学报,2020,34(4):14-20,30.
- [14] 吕佼容,张文博,胡锦涛,等.连续降雨下不同砾石含量工程堆积体土壤侵蚀[J].水科学进展,2019,30(2):210-219.
- [15] Lv J R, Xie Y S, Luo H. Erosion process and temporal variations in the soil surface roughness of spoil heaps under multi-day rainfall simulation[J]. Remote Sensing,2020,12(14):e2192.
- [16] 郑粉莉,赵军.人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J].水土保持研究,2004,11(4):177-178.
- [17] 戎玉博,王森,白玉洁,等.含砾石锥状工程堆积体侵蚀水动力学特性和细沟形态特征[J].水土保持学报,2018,32(2):134-141.
- [18] 杨帅,高照良,李永红,等.工程堆积体坡面植物篱的控蚀效果及其机制研究[J].农业工程学报,2017,33(15):147-154.
- [19] 方荣杰,朱晓锋,江斌伟,等.模拟降雨条件下岩溶坡耕地产流产沙特征[J].水土保持研究,2018,25(3):11-16.
- [20] 袁建平,蒋定生,甘淑.影响坡地降雨产流历时的因子分析[J].山地学报,1999,17(3):259-264.
- [21] 张文博,吕佼容,谢永生,等.不同形态工程堆积体产流产沙对比研究[J].水土保持学报,2020,34(3):49-54.
- [22] Ban Y Y, Lei T W, Gao Y, et al. Effect of stone content on water flow velocity over Loess slope: Non-frozen soil[J]. Journal of Hydrology,2017,549:525-533.
- [23] 王林华,汪亚峰,王健,等.地表粗糙度对黄土坡面产流机制的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):120-128.
- [24] 陈卓鑫,王文龙,康宏亮,等.砾石对红壤工程堆积体边坡径流产沙的影响[J].生态学报,2019,39(17):6545-6556.
- [25] Peng X D, Shi D M, Jiang D et al. Runoff erosion process on different underlying surfaces from disturbed soils in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Catena,2014,23(123):215-224.
- [26] 王雪松,谢永生.模拟降雨条件下锥状工程堆积体侵蚀水动力特征[J].农业工程学报,2015,31(1):117-124.
- (上接第 52 页)
- [17] 陆建忠,陈晓玲,李辉,等.基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J].农业工程学报,2011,27(2):337-344,397.
- [18] 张思琪,翁应芳.基于 GIS 与 RUSLE 模型的毕节市土壤侵蚀动态变化[J].绿色科技,2018,18:7-10,24.
- [19] 张恩伟,彭双云,冯华梅.基于 GIS 和 RUSLE 的滇池流域土壤侵蚀敏感性评价及其空间格局演变[J].水土保持学报,2020,34(2):115-122.
- [20] 周伏建,陈明华,林福兴,等.福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J].水土保持学报,1995,9(1):13-18.
- [21] Williams J R. EPIC: The erosion-productivity impact calculator[J]. Technical Bulletin United States Department of Agriculture,1990,4:206-207.
- [22] Foster G R, Wischmeier W H. Evaluation irregular slopes for soil loss prediction[J]. Transactions of the ASAE,1974,17(2):305-309.
- [23] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transaction of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers,1987,30(5):13387-13396.
- [24] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal,2000,64(5):1759-1763.
- [25] 张亮,丁明军,张华敏,等.1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J].自然资源学报,2018,33(12):2084-2097.
- [26] 王万忠,焦菊英.中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J].水土保持通报,1996,16(5):1-20.
- [27] 中华人民共和国水利部.2015 年中国水土保持公报[R/OL].(2017-01-30)[2021-12-01]. <http://www.mwr.gov.cn/zzsc/tjgb/zgstbcgb/2015/mobile/index.html#p=1>.
- [28] 水利部水土保持监测中心.区域水土流失动态监测技术规范(试行)[R/OL].(2018-09-06)[2021-11-10]. https://www.sohu.com/a/252397899_651611.
- [29] 郭乾坤,刘宝元,朱少波,等.中国主要水土保持耕作措施因子[J].中国水土保持,2013(10):22-26.
- [30] 中华人民共和国水利部.SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [31] 湖北省水利厅.2020 湖北省水土保持公报[EB/OL].(2021-10-20)[2021-12-01]. <https://slt.hubei.gov.cn/bfw/cxfw/stbcgb/>.
- [32] 陈正发,龚爱民,宁东卫,张刘东,王建雄,相彪.基于 RUSLE 模型的云南省土壤侵蚀和养分流失特征分析[J].水土保持学报,2021,35(6):7-14.