

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

张恩伟^{1,2}, 彭双云^{1,2}, 冯华梅³

(1.云南师范大学旅游与地理科学学院,昆明 650500;2.云南省地理空间信息技术工程技术研究中心,
昆明 650500;3.西南大学地理科学学院,重庆 400715)

摘要: 土壤侵蚀是滇池流域重要的生态问题之一,掌握滇池流域土壤侵蚀敏感性的时空变化特征有助于水土保持工作的实施和改进。以降雨量、DEM、土壤类型和 Landsat 影像为数据源,选择降雨、土壤、坡度坡长、植被覆盖 4 个因子建立土壤侵蚀敏感性评价体系,对滇池流域进行土壤侵蚀敏感性评价。结果表明:滇池流域土壤侵蚀敏感性以轻度敏感和中度敏感为主。空间分布上,轻度敏感区主要分布在滇池周边。中度敏感区主要分布在滇池流域山地区域,地形陡峭。时间变化上,1999—2014 年滇池流域土壤侵蚀敏感程度呈下降趋势。轻度敏感区域面积增加 20.18%,中度敏感区域面积减少 20.31%,轻度敏感区的增加来源于中度敏感区的转变,转变区域分布于滇池流域西北部 and 东南部。在土壤侵蚀敏感性影响因子中,降雨是影响滇池流域土壤侵蚀敏感性的关键因子。研究滇池流域土壤敏感性时空变化,识别滇池流域易发生土壤侵蚀的区域,有助于该区域水土保持措施实施、生态治理和土地利用优化。

关键词: 土壤侵蚀敏感性; GIS; RUSLE; 时空变化; 滇池流域

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)02-0115-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.017

Sensitivity Assessment of Soil Erosion and Its Spatial Pattern Evolution in Dianchi Lake Basin Based on GIS and RUSLE

ZHANG Enwei^{1,2}, PENG Shuangyun^{1,2}, FENG Huamei³

(1.School of Tourism and Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500;

2.Center for Geospatial Information Engineering and Technology of Yunnan Province,

Kunming 650500; 3. School of Geography Science, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: Soil erosion is one of the important environmental problems in the Dianchi Lake Basin. It is helpful for the implementation and improvement of water and soil conservation to grasp the temporal and spatial characteristics of soil erosion sensitivity in Dianchi basin. Taking rainfall, DEM, soil type and Landsat Image as data sources, four factors including rainfall, soil, slope length and steepness, and vegetation coverage were selected to establish a soil erosion sensitivity evaluation system which apply to basin, such as Dianchi Lake Basin. The results showed that the sensitivity of soil erosion in Dianchi Lake Basin was mainly mildly and moderately sensitive. In the spatial distribution, the mildly sensitive areas were mainly distributed around Dianchi Lake. The moderately sensitive areas were mainly distributed in the mountainous areas with steep terrain. In terms of the temporal change, the sensitivity of soil erosion in the Dianchi Lake Basin declined during 1999—2014. The area of mildly sensitive areas increased by 20.18%, the area of moderately sensitive areas decreased by 20.31%, and the increase of mildly sensitive areas originated from the transformation of moderately sensitive areas, which were distributed in the northwest and southeast of Dianchi Lake Basin. Among the soil erosion sensitivity impact factors, rainfall was a key factor affecting soil erosion sensitivity in Dianchi Lake Basin. The spatial-temporal changes of soil sensitivity in the Dianchi Lake Basin were studied, and the areas prone to soil erosion in the Dianchi Lake Basin were identified, which contributed to the implementation of soil and water conservation measures, ecological management and land use optimization in this area.

收稿日期:2019-08-14

资助项目:国家自然科学基金项目(41971369,41561086,41661082,41461038)

第一作者:张恩伟(1994—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:lamadog@126.com

通信作者:彭双云(1978—),男,博士,副教授,主要从事地理信息系统、流域环境模拟研究。E-mail:frankmei@126.com

Keywords: soil erosion sensitivity; GIS; RUSLE; spatial-temporal change; Dianchi Basin

土壤侵蚀是当今人类面临的一种最普遍、持续性最强的地质灾害,土壤侵蚀不仅破坏土地资源,导致土地退化,而且还会造成河道淤积,洪涝干旱加剧,对农业生产、水质和环境产生巨大威胁^[1-2]。2013 年全国土壤侵蚀普查结果显示,土壤侵蚀面积 $294.91 \times 10^4 \text{ km}^2$,占普查面积的 31.12%^[3]。土壤侵蚀在我国分布范围广泛且危害严重,而且在我国具有多重脆弱性的西南喀斯特山区土壤侵蚀问题也更加突出。进行土壤侵蚀的预测和防治,对于生态问题的治理具有重要意义。

土壤侵蚀敏感性评价是以土壤侵蚀方程为基础,选取评价指标进行敏感性分级,最后采用加权叠加或非加权叠加模型综合评价区域土壤侵蚀敏感性空间分布^[4]。在现有的土壤侵蚀模型中,理论上物理模型的计算结果精度远高于经验模型,但在一些地区,物理模型复杂的参数难以精确获取以达到预期的结果,因此经验模型被广泛用于流域或区域尺度的土壤侵蚀评估^[5]。在所有的经验模型中,通用水土流失方程(USLE)和修正的通用水土流失方程(RUSLE)是全球使用最为广泛的土壤侵蚀模型,并在很多国家得到了应用。近年来,随着 3S 技术的发展,结合遥感影像资源、地理信息系统和土壤侵蚀模型,使得大尺度和定量化评价土壤侵蚀敏感性成为可能,也为土壤侵蚀敏感性的时空变化、趋势分析提供了技术支持。随着研究的不断深入以及理论模型的发展,土壤侵蚀敏感性研究逐渐从定性评价走向定量分析。研究主要集中在关键因子的识别^[6-7]、评价体系的构建^[8-9]和影响因素的权重确定^[10-11]等方面。关键因子的识别通常采用主成分分析方法(SPCA)和叠加排序法。土壤侵蚀敏感性评价体系通常选取与土壤侵蚀密切相关的自然因子进行构建。影响因素的权重确定通常采用层次分析法(AHP)、专家打分法、层次分析法和专家打分法相结合的方法。本文以滇池流域作为研究区,分析土壤侵蚀敏感性的时空变化,探究其在地理空间上的变化趋势。

滇池流域是云南省人类活动最为强烈的地区,城市的快速发展导致滇池流域水土流失严重。同时由于滇池流域地形起伏大,使得土壤易受水力冲刷,加剧了滇池流域水土流失的程度。根据已有研究^[12]结果显示,2010 年滇池流域土壤侵蚀总量为 $2.34 \times 10^6 \text{ t}$,土壤侵蚀已成为滇池流域突出的生态问题。研究滇池流域土壤侵蚀敏感性的变化规律,可为滇池流域的水土保持、生态环境恢复、城市可持续发展提供决

策支持。本文结合遥感影像、地理信息系统和土壤侵蚀模型,根据滇池流域的自然环境特征,选择降雨、土壤、地形和植被覆盖等因子对滇池流域进行土壤侵蚀敏感性评价,分析滇池流域 1999 年、2008 年、2014 年土壤侵蚀敏感性的时空变化趋势,为滇池流域的生态环境恢复、水土保持与监测提供参考。

1 研究区概况

滇池流域位于云南中部($24^{\circ}29' - 25^{\circ}28' \text{ N}$, $102^{\circ}29' - 103^{\circ}01' \text{ E}$),流域面积 $2\,920 \text{ km}^2$ (图 1)。区域气候属于亚热带高原季风气候,年平均气温 $12 \sim 26 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量超过 $1\,030 \text{ mm}$,5—10 月为湿季,11 月到翌年 4 月为干季,降水集中且多暴雨,干湿季分明。依据中国土壤分类系统,土壤类型主要为水稻土和红壤。由于研究区气候冬暖夏凉,干湿季分明,因而红壤土壤母质风化程度较轻,土层较薄,有发育不充分的山地土壤特点^[13]。滇池流域为南北狭长的盆地,以滇池为中心,呈现环状阶梯式,部分山地坡度大,土层薄。滇池周边的平地长期接受来源于上游的侵蚀物质,土层较厚。

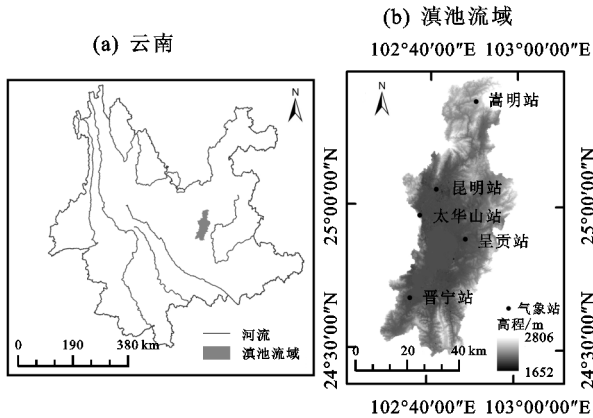


图 1 研究区地理位置

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文数据包括降雨数据、土壤类型数据、高程数据和遥感数据。降雨数据为研究区 1999 年、2008 年、2014 年 5 个气象站点的日降雨数据,嵩明站位于滇池流域北部,昆明站和太华山站位于滇池流域西部,呈贡站位于滇池流域东部,晋宁站位于滇池流域南部。土壤类型数据为研究区 1:75 万土壤分布数据。高程数据为 AS-TER GDEM V2 全球数字高程数据。遥感数据为研究区 1999 年 3 月 1 日、2008 年 4 月 6 日、2014 年 4 月 23 日 3 个年份的 Landsat 影像,高程数据和遥感影像均下载自 USGS(美国地质调查局)。

2.2 研究方法

2.2.1 土壤侵蚀敏感性评价方法 USLE 模型是基于美国落基山脉以东的平原地区的实测数据进行开发而来,并不能适用于一些地形复杂的地区,因此 USLE 模型存在一定的局限性。美国农业部在 USLE 模型的基础上,进行修改和完善,提出了 RUSLE 模型。RUSLE 模型和 USLE 模型相比较,RUSLE 模型与 USLE 模型结构一样,但各因子的含义和算法有了修改,而且研究区应用范围也更加广泛^[14]。本文采用 RUSLE 模型,其表达式为:

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \tag{1}$$

表 1 土壤侵蚀敏感性评价体系

分级	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
降雨侵蚀力因子	<1600	1600~1700	1700~1800	1800~2000	>2000
土壤质地因子	0~0.03	0.03~0.05	0.05~0.07	0.07~0.08	>0.08
坡长坡度因子	0~20	20~50	51~100	101~300	>300
植被覆盖因子	<0.01	0.01~0.09	0.09~0.20	0.20~0.45	>0.45
分级赋值	1	3	5	7	9
分级标准	1.0~2.0	2.1~4.0	4.1~6.0	6.1~8.0	>8

2.2.2 降雨侵蚀力因子 R 降雨侵蚀力可以反映降雨对土壤侵蚀的影响程度,其与降雨的强度、类型、雨量、时间等因素有关^[18]。国内外对降雨侵蚀力的计算进行了大量研究,章文波等^[19]从日降雨量、月降雨量以及年降雨量估算降雨侵蚀力,发现以日降水量的计算结果精度最高。其模型算法为:

$$R_j=\alpha \sum_{i=1}^n(D_i)^\beta \tag{2}$$

式中: R_j 为某个半月的降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); n 为某个半月内的天数; D_i 为某个半月内某一天的日降雨量(mm),其中 $D_i \geq 12 \text{ mm}$,否则以 0 计算; α 、 β 为参数。

$$\alpha=21.586\beta^{-7.1891} \tag{3}$$

$$\beta=0.8363+\frac{18.144}{P_{(\text{day})}}+\frac{24.455}{P_{(\text{year})}} \tag{4}$$

式中: $P_{(\text{day})}$ 为日降雨量 $> 12 \text{ mm}$ 的日均降雨量; $P_{(\text{year})}$ 为日降雨量 $> 12 \text{ mm}$ 的年均降雨量。基于公式(2)计算降雨侵蚀力,并重采样为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的栅格数据,根据表 1 的分级标准生成降雨侵蚀力敏感性等级分布图。

2.2.3 土壤可蚀性因子 K 土壤可蚀性因子反映土壤性质与土壤侵蚀的关系。 K 值越大,土壤越不容易发生土壤侵蚀,反之土壤越容易发生土壤侵蚀。 K 值的大小与土壤类型、土壤质地、土壤有机质含量等有关。但有的土壤性质参数难于获取,因此选择侵蚀—生产力影响模型中的 EPIC^[20] 计算 K 值,该计算方法只需要土壤的砂粒、粉粒、黏粒以及有机质含量等参数。

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($(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$); LS 为坡长坡度因子; C 为植被覆盖和管理因子; P 为水土保持措施因子。

以 RUSLE 模型为基础,结合研究区的环境特征,选取降雨、土壤、坡度坡长、植被覆盖因子作为评价指标。参考《生态功能区划暂行规程》^[15] 和相关研究成果^[16-17],构建研究区的土壤侵蚀敏感性评价体系(表 1),借助 ArcGIS 软件研究土壤侵蚀的单因子敏感性和多因子敏感性。

$$K_{\text{EPIC}}=0.1317\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256\text{SAD}\left(1-\frac{\text{SIL}}{100}\right)\right]\right\} \times \left[\frac{\text{SIL}}{\text{CLA}+\text{SIL}}\right]^{0.3}\left\{1.0-\frac{0.25\text{C}}{\text{C}+\exp(3.72-2.95\text{C})}\right\} \times \left\{1.0-\frac{0.7(1-\text{SAD}/100)}{(1-\text{SAD}/100)+\exp(-5.51+22.9(1-\text{SAD}/100))}\right\} \tag{5}$$

式中: SAD 、 SIL 、 CLA 和 C 为沙粒、粉粒、黏粒和有机碳含量(%)。为了使 EPIC 中的 K 值更符合我国的土壤特征,采用张科利等^[21]提出的方法对结果进行修订,见公式(6)。根据表 1 中的分级标准生成土壤可蚀性敏感性等级分布图。

$$K=-0.01383+0.51575K_{\text{EPIC}} \tag{6}$$

2.2.4 坡长和坡度因子 LS 坡长坡度因子是表征地形对土壤侵蚀影响的重要指标。坡长和坡度能够影响水流的挟沙能力,从而影响土壤侵蚀^[22]。坡长坡度因子的计算采用 Liu 等^[23]提出的计算公式(公式 7、公式 8、公式 9)。

$$L=\left(\frac{l}{22.1}\right)^m \tag{7}$$

$$m=\begin{cases} 0.5 & \theta>5^\circ \\ 0.4 & 3^\circ<\theta\leq 5^\circ \\ 0.3 & 1^\circ<\theta\leq 3^\circ \\ 0.2 & \theta\leq 1^\circ \end{cases} \tag{8}$$

$$S=\begin{cases} 10.8\sin \theta+0.03 & \theta<5^\circ \\ 16.8\sin \theta-0.50 & 5^\circ\leq \theta<10^\circ \\ 21.9\sin \theta-0.96 & \theta\geq 10^\circ \end{cases} \tag{9}$$

式中: L 、 S 分别表示坡长因子和坡度因子; l 为坡长值; m 为坡长指数; θ 为坡度值。基于 ArcGIS 软件计算坡长坡度因子,根据表 1 的分级标准进行重分类生成地形因子敏感性等级分布图。

2.2.5 植被覆盖因子 C C 为土壤侵蚀的抑制因子,具有水土保持作用,其值范围为 $0\sim1$ ^[24]。 C 值越大,表明土壤侵蚀量越大。本文利用 Landsat 影像计算植被覆盖度,然后采用蔡崇法等^[25]提出的方法计算 C 值,该方法通过计算植被盖度建立线性回归方程得到(公式(10))。 c 为植被覆盖度,当植被盖度 $>78.3\%$ 时,地表侵蚀量极其微弱, C 值记为 0;当植被盖度等于 0 时, C 值为 1。根据表 1 的分级标准,利用 ArcGIS 软件进行重分类生成植被覆盖因子敏感性等级分布图。

$$\begin{cases} C=1 & c=0 \\ C=0.6508-0.3436\lg c & 0<c<78.3\% \\ C=0 & c>78.3\% \end{cases} \quad (10)$$

2.2.6 土壤侵蚀敏感性综合评价 单因子的土壤侵蚀敏感性评价只能反映出单个因素对土壤侵蚀的影响。而土壤侵蚀是受降雨、土壤、植被覆盖、地形等多个因子的综合影响,因此采用土壤侵蚀敏感性指数(公式(11))对滇池流域整体的土壤侵蚀敏感性进行评价。基于 ArcGIS 根据表 1 中的分级标准生成土壤侵蚀敏感性等级分布图。

$$S_j=\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 C_i} \quad (11)$$

式中: S_j 为土壤侵蚀敏感性指数; C_i 为第 i 个影响因子。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀敏感性单因子评价

3.1.1 降雨侵蚀力敏感性评价 降雨是土壤发生侵蚀的主要动力,对降雨侵蚀力进行敏感性评价可反映降雨对土壤侵蚀的影响状况^[26]。对滇池流域 1999 年、2008 年、2014 年 3 个年份的降雨侵蚀力进行评价。结果表明,1999 年滇池流域的降雨侵蚀力敏感性主要为轻度、中度和高度敏感,所占比例分别为 24.59%,21.39%,37.80%,以高度敏感所占面积最大。2008 年滇池流域的降雨侵蚀力敏感性主要为轻度和中度敏感,二者比例分别为 40.33%,26.49%,不敏感、高度敏感和极敏感所占面积基本相等(图 2)。2014 年滇池流域降雨侵蚀力敏感性主要为轻度和中度敏感,二者分别占 35.91%,39.86%,其次是不敏感区域占 19.53%。从空间分布上看,滇池流域北部的降雨侵蚀力大于滇池流域南部的降雨侵蚀力,空间差异显著。降雨侵蚀力为中度、高度和极度敏感的区域主要分布在滇池流域的北部,不敏感和轻度敏感主要分布在滇池流域的南部。

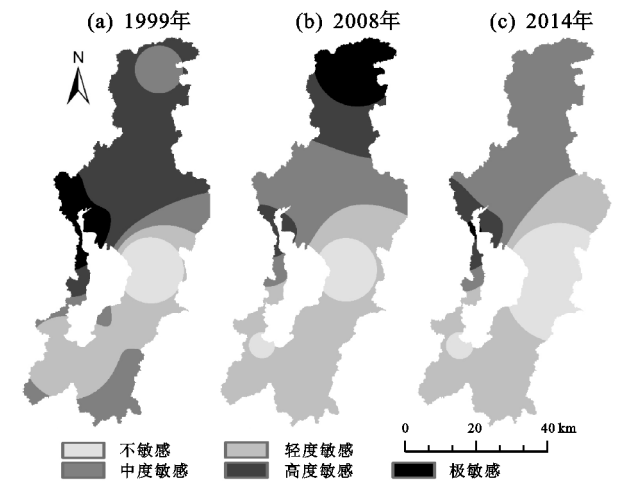


图 2 降雨侵蚀力敏感性空间分布

3.1.2 土壤可蚀性敏感性评价 滇池流域的土壤主要为水稻土和红壤,其他土壤类型所占比例较小。红壤包括棕红土、大红土、酸白泥土和红泥土,水稻土包括暗胶泥田和暗沙泥田。滇池流域土壤可蚀性敏感性主要为中度和高度敏感,中度敏感占 44.87%,面积为 1 175.96 km²,高度敏感占 38.47%,面积为 1 008.07 km²(图 3a)。中度敏感区域主要分布在滇池流域的东北部和东南部,土壤类型为棕红土、红泥土、酸白泥土和红紫泥。高度敏感区域主要分布在滇池周边,土壤类型为暗胶泥田和大红土。极敏感区域占 10.57%,面积为 276.89 km²,零散分布于流域分水岭区域,土壤类型为厚棕红土、棕灰汤土、暗黄棕壤、灰泡泥和暗棕红土。轻度敏感区域占 5.58%,面积为 146.26 km²,土壤类型主要为暗沙泥田和沙红泥土,分布于流域的西南部。从滇池流域土壤的机械组成看,极度敏感区域的土壤黏粒含量低,沙粒、粉粒含量高。随着土壤黏粒含量逐渐增加,沙粒、粉粒含量逐渐降低,滇池流域土壤可蚀性敏感程度由高到低变化,发现滇池流域易发生土壤侵蚀区域的土壤质地疏松,含沙量高。

3.1.3 地形因子敏感性评价 坡度坡长是评价土壤侵蚀敏感性的重要指标之一,是土壤发生侵蚀的重要自然因素^[27]。滇池流域地形起伏大,以滇池为中心呈环状阶梯分布。滇池流域地形因子敏感性较大,高度敏感区域占 45.57%,面积为 1 163.55 km²,分布在流域的山地区域,地形起伏大。不敏感区域占 16.47%,面积为 420.57 km²,分布在滇池周边,地形起伏小。中度敏感区域占 28.21%,面积为 720.40 km²,轻度敏感区域占 9.74%,面积为 248.80 km²。轻度敏感和高度敏感区域是不敏感和高度敏感区域之间的过渡地带(图 3b)。整体上,滇池流域地形因子敏感性主要为中度和高度敏感。从不敏感区、轻度敏感区、中度敏感区到高度敏感区的分布规律与滇池流域地形环状阶梯的分布规律保持一致。

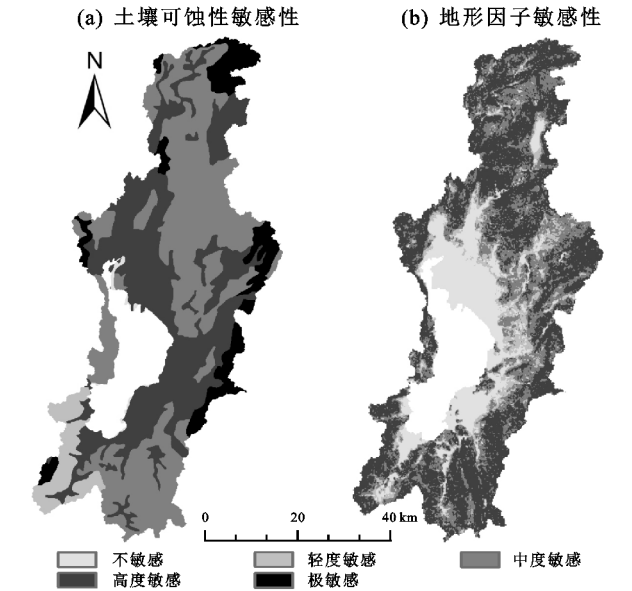


图 3 土壤可蚀性敏感性和地形因子敏感性空间分布

3.1.4 植被覆盖敏感性评价 滇池流域的植被分布受地形和人为活动影响,地形平坦区域多为耕地,山地区域多为林地。1999 年轻度敏感及以下面积为 1 758.15 km²,占流域面积的 67.10%。2008 年轻度敏感及以下面积为 1 840.11 km²,占流域面积的 70.82%。2014 年轻度敏感及以下面积为 1 774.36 km²,占流域面积的 68.30%。1999—2014 年间滇池流域轻度敏感区域面积减少 11.66%,不敏感区域面积增加 12.86%。不敏感区域增加的面积来源于轻度敏感区域减少的面积,变化区域分布在滇池周边,土地利用类型为耕地。在此期间,高度敏感区面积基本保持不变(图 4)。

从空间分布上看,不敏感区域分布在滇池的北部,土地利用类型为建设用地(图 4)。轻度敏感区域分布在流域的山地区域,植被覆盖度高。高度敏感区域分布在滇池周边,植被较少,土地利用类型为耕地,人类活动强烈。整体上看,1999—2014 年间滇池流域高度敏感区域面积基本不变,但植被覆盖因子敏感性呈下降趋势,不敏感区域面积增加(图 4)。这与滇池流域开展的生态工程有关,如滇池面山绿化项目(2003 年)、松华坝水源保护区规划(2006 年)、滇池“四退三还一护”生态建设工程(2009 年)等^[12]。

3.2 土壤侵蚀敏感性多因子评价

土壤侵蚀敏感性评价的结果(表 2)表明,在 1999—2014 年期间滇池流域不敏感区域和高度敏感区域变化较小,其他敏感级变化较大。轻度敏感区域面积由 1999 年的 28.41%增加到 2014 年的 43.96%,增加 389.82 km²;中度敏感区域面积由 1999 年的 62.12%下降到 2014 年的 49.98%,减少 313.64 km²;高度敏感区域面积由 1999 年的 8.89%下降到 2014 年的 3.40%,减少 139.55 km²。

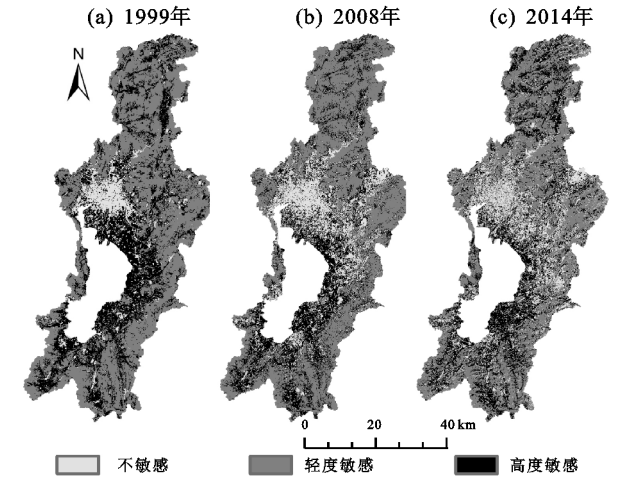


图 4 植被覆盖因子敏感性空间分布

表 2 土壤侵蚀敏感性面积及占比

敏感性等级	1999 年		2008 年		2014 年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
不敏感	14.77	0.58	42.70	1.68	67.03	2.66
轻度敏感	721.01	28.41	929.31	36.65	1110.83	43.96
中度敏感	1576.63	62.12	1358.37	53.58	1262.99	49.98
高度敏感	225.54	8.89	205.14	8.09	85.99	3.40

3.3 土壤侵蚀敏感性时空演变分析

3.3.1 空间分布特征 1999—2014 年期间滇池流域土壤侵蚀敏感性以轻度敏感和中度敏感为主(图 5)。轻度敏感区域降雨量少,地势平坦,主要分布在滇池流域的西北部、东部和东南部,少量分布于滇池流域西南部;中度敏感区域地形起伏大,降雨量大,主要分布于滇池流域的山地区域;不敏感区域面积较小,分布在于滇池流域的东部;而高度敏感区域在 1999 年主要分布在滇池流域的西部和北部,2008 年主要分布在滇池流域的北部,2014 年高度敏感区域面积减小,零散分布在滇池流域的西部和北部。

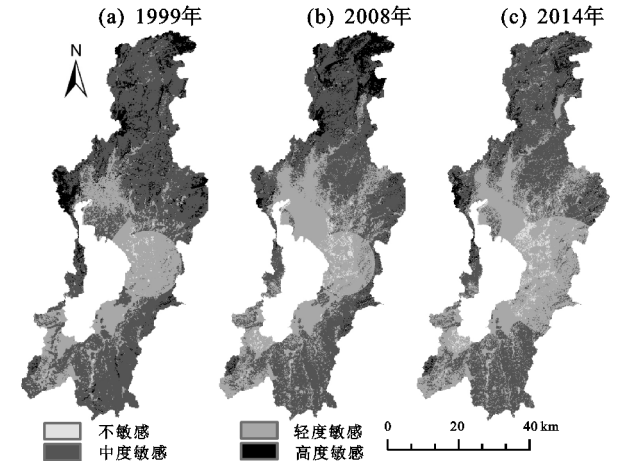


图 5 土壤侵蚀敏感程度空间分布

3.3.2 空间变化特征 为了探究滇池流域土壤侵蚀敏感性各强度类型之间的转变关系,利用 ArcGIS 软件生成滇池流域土壤侵蚀敏感度变化区域分布图(图 6)。图例中第 1 个数字表示变化之前的敏感性等级,第 2 个数

字表示变化之后的敏感性等级。图例中数字 1,3,5,7,9 分别代表不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感、极敏感,与土壤侵蚀敏感性评价体系表相对应(表 1)。从图 6 可以看出,滇池流域土壤侵蚀敏感程度呈下降趋势,不敏感区域增加的面积主要来源于轻度敏感区的减少,轻度敏感区域增加的面积主要来源于中度敏感区的减少,变化区域主要分布于滇池流域西北部 and 东南部。该研究结果与 2015 年云南省水土流失调查公告结果相一致。

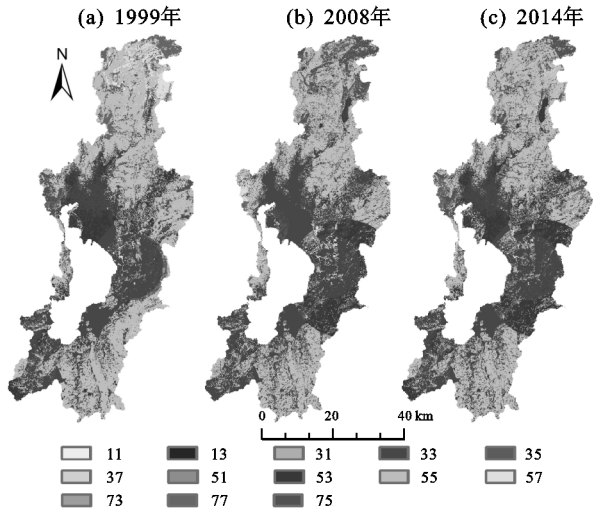


图 6 1999—2014 年滇池流域土壤侵蚀敏感性空间变化

以研究区 1999 年、2008 年、2014 年土壤侵蚀敏感性评价结果为基础,建立土壤侵蚀敏感性转移矩阵(表 3、表 4、表 5)。结果表明,1999—2008 年轻度敏感区面积增加 12.9%,其中有 12.05%由中度敏感区转变而来,增加区域土壤类型主要为暗胶泥田,地形平坦,降雨量少,土壤侵蚀敏感程度低;中度敏感区域面积增加 7.75%,其中 4.42%来源于高度敏感,3.33%来源于轻度敏感,增加区域土壤类型主要为暗棕红土和厚棕红土,地形陡峭,降雨量大,植被覆盖度高。2008—2014 年间,轻度敏感区域面积增加 13.67%,12.32%由中度敏感转变而来,增加区域土壤类型主要为大红土和厚棕红土,地形起伏大,该区域地表植被覆盖度高,降雨量少,土壤侵蚀敏感性较低。

从整个研究期的变化看,轻度敏感区面积增加 20.18%,中度敏感区面积减少 20.31%,中度敏感区转变为轻度敏感区,转变区域分布在滇池沿岸的北部和东部,土壤类型为大红土、厚棕红土、酸白泥土和暗沙泥田,降雨少,地形平坦。整体上,土壤侵蚀敏感程度保持不变区域面积占 68.08%,有 27.89%的区域土壤侵蚀敏感性降低,4.03%的区域侵蚀敏感性升高,土壤侵蚀敏感性降级的面积大于敏感性升级的面积,滇池流域土壤侵蚀敏感性呈下降趋势。

4 讨论

4.1 土壤侵蚀敏感性评价

土壤侵蚀敏感性综合评价采用几何平均数模型,

而未采用加权叠加模型,主要是因为各因子的权重难以客观精确确定。几何平均数模型又称为非叠加模型,通过对各个因子的乘积进行开根,对数据进行压缩和聚类,消除人为主观性^[4]。加权模型考虑了各个因子的影响程度大小,但是权重的确定存在一定主观性,难于确定一个客观权重。土壤侵蚀敏感性权重的确定通常有专家打分法、层次分析法(AHP)、专家打分法和层次分析法(AHP)相结合的方法等。专家打分法是由相关学者根据研究区的情况进行权重的赋值,该方法主观性较强,权重的准确性受人为因素影响较大。与专家打分法相比,层次分析法(AHP)在一定程度上减弱了人为主观性,提高了影响因子权重的客观性。但在构造判断矩阵时会受人为因素影响^[28],最终得到的权重并不是完全客观的。专家打分法和层次分析法相结合通常是该研究领域学者来构造判断矩阵,以减小误差,进一步提高权重确定的精度,但仍具有人为主观性。因此,客观权重的确定可以进一步提高土壤侵蚀敏感性评价的精度。

表 3 滇池流域 1999—2008 年土壤侵蚀敏感性变化转移矩阵

单位: %						
1999 年	2008 年				总计	减少
	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感		
不敏感	0.37	0.19	0	0	0.56	0.19
轻度敏感	1.24	23.70	3.33	0.08	28.35	4.65
中度敏感	0.03	12.05	46.11	4.08	62.27	16.16
高度敏感	0	0.66	4.42	3.74	8.82	5.08
总计	1.64	36.60	53.86	7.90	100.00	
新增	1.27	12.90	7.75	4.16		

表 4 滇池流域 2008—2014 年土壤侵蚀敏感性变化转移矩阵

单位: %						
2008 年	2014 年				总计	减少
	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感		
不敏感	0.94	0.70	0	0	1.64	0.70
轻度敏感	1.62	30.11	4.73	0.14	36.60	6.49
中度敏感	0.05	12.32	40.22	1.30	53.89	13.67
高度敏感	0	0.65	5.28	1.94	7.87	5.93
总计	2.61	43.78	50.23	3.38	100.00	
新增	1.67	13.67	10.01	1.44		

表 5 滇池流域 1999—2014 年土壤侵蚀敏感性变化转移矩阵

单位：％						
1999 年	2014 年				总计	减少
	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感		
不敏感	0.37	0.19	0	0	0.56	0.19
轻度敏感	2.15	23.61	2.58	0.01	28.35	4.74
中度敏感	0.09	18.97	41.99	1.25	62.30	20.31
高度敏感	0	1.02	5.66	2.11	8.79	6.68
总计	2.61	43.79	50.23	3.37	100.00	
新增	2.24	20.18	8.24	1.26		

降雨作为土壤侵蚀的主要动力,随时间变化明

显,研究降雨因子与土壤侵蚀敏感性之间的关系,对于水土保持措施的实施具有重要参考作用。对滇池流域进行降雨侵蚀力敏感性评价的结果显示,滇池流域高度敏感区域面积从1999年的37.8%下降到2014年4.43%,不敏感、轻度敏感、中度敏感区域面积比例呈增加趋势。降雨侵蚀力是通过降雨量进行计算,而在1999—2014年间滇池流域降雨量呈减少趋势^[29],随着滇池流域降雨量的减少,滇池流域降雨侵蚀力敏感性呈下降趋势。将降雨侵蚀力敏感性分布图与土壤侵蚀敏感性分布图进行空间叠加分析,发现1999年、2008年、2014年3年的降雨侵蚀力敏感性的空间分布与土壤侵蚀敏感性的空间分布高度吻合。而土壤可蚀性敏感性分布图、地形因子敏感性分布图、植被覆盖因子敏感性分布图分别与土壤侵蚀敏感性分布图进行空间叠加分析结果显示,土壤可蚀性敏感性、地形因子敏感性、植被覆盖因子敏感性的空间分布与土壤侵蚀敏感性的空间分布吻合度差。降雨侵蚀力敏感性的空间分布和土壤侵蚀力敏感性的空间分布吻合度远大于其他3个因子,说明降雨是影响滇池流域土壤侵蚀敏感性的关键因子。

地形因子是影响土壤侵蚀敏感性的重要因素。将地形因子与土壤侵蚀敏感性进行叠加,发现不敏感和轻度敏感主要分布于流域内坡度 $<5^{\circ}$ 的区域,中度敏感和高度敏感主要分布于流域内坡度 $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的区域。高度敏感整体上并没有分布在坡度 $>25^{\circ}$ 的区域,土壤侵蚀敏感性由低到高的空间分布与坡度由小到大的空间分布并不完全一致。董磊等^[12]在研究滇池流域时发现,滇池流域的土壤侵蚀量随着坡度的增加而增加,当坡度超过 25° 后,土壤侵蚀模数随坡度的增加而减小。滇池流域在土壤侵蚀过程中存在坡度临界值,超过该坡度范围,土壤侵蚀强度减弱。丁剑宏等^[30]研究也发现,滇池流域土壤侵蚀为微度侵蚀的地区多分布于流域内坡度 $<5^{\circ}$ 的区域,轻度侵蚀和中度侵蚀多分布于流域内坡度在 $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的区域。滇池流域内坡度在 25° 以上的区域多为林地,耕地面积少。因此, 25° 是滇池流域土壤敏感性和土壤侵蚀模数的临界点,地形是影响滇池流域土壤侵蚀敏感性的重要因子,但不是关键因子。

土壤的抗侵蚀能力与土壤类型、土壤机械组成和土壤有质含量密切相关。滇池流域土壤抗侵蚀能力较弱,土壤可蚀性敏感性主要为中度和高度敏感,二者占83.34%。中度敏感性区域的土壤类型以棕红土和酸白泥土为主,土壤多为黏土,易结块。高度敏感性区域土壤类型以暗胶泥田和大红土为主。暗胶泥田属水稻土土类,水稻土是改造自然土壤而形成的特殊土壤,该土壤耕作层以下会形成黏重的底土层。大红土与之具有相同现象,由上往下质地更为黏重。

植被对土壤保持具有重要作用,是土壤侵蚀的抑

制因子,不同的植被类型对水土保持的效果也不相同。滇池流域植被覆盖敏感性轻度及以上区域占77.27%,不敏感区域主要为城市建设用地,中度敏感区主要为林地,高度敏感区主要为耕地。植被覆盖因子敏感性与土壤侵蚀敏感性的空间分布不吻合,从植被类型看,滇池流域林地类型与其他流域具有差异,该流域内林地以针叶林为主,其林冠层对降雨截留的作用较弱^[12];另一方面,土壤侵蚀是多个因子共同作用的结果,且不同地区的主导影响因子具有差异性。

4.2 土壤侵蚀敏感性时空特征

在研究期内,滇池流域土壤侵蚀敏感性变化较小,土壤侵蚀敏感度未发生改变的区域占68.08%。整体上,土壤侵蚀敏感性呈现下降趋势,轻度敏感区增加20.18%,中度敏感区减少20.31%。中度敏感区转变为轻度敏感区,转变区域主要分布在滇池沿岸的北部和东部。彭双云等^[31]研究发现,1999—2014年滇池流域土壤侵蚀强度呈下降趋势,土壤侵蚀强度下降区域主要分布在盘龙江下游、宝象河流域以及捞鱼河流域。土壤侵蚀强度减弱区与本文中土壤侵蚀敏感性下降区域的空间分布高度吻合。刘会玉等^[32]研究也发现,1992年、2000年、2006年滇池流域微度土壤侵蚀主要分布于滇池沿岸区域,轻度、中度和强度土壤侵蚀主要分布于滇池沿岸外围向山区过渡的低山丘陵和山地区域,与本文的研究结果一致。本文土壤侵蚀敏感性的空间分布与滇池流域相关土壤侵蚀结果的空间分布一致,说明土壤侵蚀敏感性可以揭示土壤侵蚀的发生、发展和变化。滇池流域土壤侵蚀敏感性为高度敏感性的区域并没有发生严重土壤侵蚀,是因为土壤侵蚀性敏感性反映的是土壤发生侵蚀的可能性,而土壤侵蚀在很大程度上受人为因素影响较大。在防止水土流失的过程中,土壤侵蚀敏感性较高的区域应予以重视,防止土壤侵蚀程度加剧。

5 结论

(1)通过单因子敏感性评价和土壤侵蚀敏感性评价,发现降雨是影响滇池流域土壤侵蚀敏感性的关键因子。

(2)在降雨、坡度坡长、土壤、地表植被覆盖因子综合作用下,滇池流域土壤侵蚀敏感性主要为轻度敏感和中度敏感,二者所占比例超过90%,土壤侵蚀敏感性高。

(3)1999—2014年期间的土壤侵蚀敏感性转移矩阵显示,滇池流域不敏感和高度敏感区域的面积变化小,轻度敏感和中度敏感区域面积变化大。轻度敏感区域面积增加20.18%,中度敏感区域面积减少20.31%,轻度敏感区的增加来源于中度敏感区的转变,分布于滇池沿岸的北部和东部。1999—2014年滇池流域土壤侵蚀敏感性呈下降趋势。

结合地理信息系统、遥感和土壤侵蚀模型,分析滇池流域土壤敏感性的空间分布和时空变化,有助于识别土壤侵蚀敏感区,可以为滇池流域的水土保持措施和生态治理提供参考。

参考文献:

- [1] Park S, Oh C, Jeon S, et al. Soil erosion risk in Korean watersheds, assessed using the revised universal soil loss equation[J]. *Journal of hydrology*, 2011, 399(3/4): 263-273.
- [2] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. *Science*, 2015, 348(6235): 1261071.
- [3] 刘震.我国水土保持情况普查及成果运用[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(2): 1-5.
- [4] 李益敏,朱军.基于 GIS 的区域土壤侵蚀敏感性评价:以怒江州为例[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(1): 98-106.
- [5] Qin W, Guo Q K, Cao W H, et al. 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.
- [6] 乔治,徐新良.东北林草交错区土壤侵蚀敏感性评价及关键因子识别[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1349-1361.
- [7] 朱惇,李璐,韩小波.基于空间主成分分析的湖北省土壤侵蚀敏感性评价[J]. *中国水土保持*, 2013(4): 40-43, 69.
- [8] Conoscenti C, Agnesi V, Angileri S, et al. A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: A test in Sicily, Italy[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(3): 1179-1195.
- [9] Zhang R H, Liu X, Heathman G C, et al. Assessment of soil erosion sensitivity and analysis of sensitivity factors in the Tongbai-Dabie mountainous area of China[J]. *Catena*, 2013, 101: 92-98.
- [10] Kachouri S, Achour H, Abida H, et al. Soil erosion hazard mapping using Analytic Hierarchy Process and logistic regression: A case study of Haffouz watershed, central Tunisia[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(6): 4257-4268.
- [11] Saini S S, Jangra R, Kaushik S. Vulnerability assessment of soil erosion using geospatial techniques-A pilot study of upper catchment of Markanda river[J]. *International Journal of Advancement in Remote Sensing, GIS and Geography*, 2015, 2(1): 9-21.
- [12] 董磊,彭明春,王崇云,等.基于 USLE 和 GIS/RS 的滇池流域土壤侵蚀研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(2): 11-14, 18.
- [13] 杨一光.云南省综合自然区划[M].北京:高等教育出版社,1991.
- [14] 曾凌云.基于 RUSLE 模型的喀斯特地区土壤侵蚀研究[D].北京:北京大学,2008.
- [15] 国务院西部地区开发领导小组办公室,国家环境保护总局.生态功能区划暂行规程[S].2002, http://www.mee.gov.cn/stbh/stgnbh/201605/t20160522_342387.shtml.
- [16] 刘军会,高吉喜,马苏,等.中国生态环境敏感区评价[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(10): 1607-1616.
- [17] 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.
- [18] Efthimiou N. Evaluating the performance of different empirical rainfall erosivity (R) factor formulas using sediment yield measurements[J]. *Catena*, 2018, 169: 195-208.
- [19] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. *资源科学*, 2003, 25(1): 35-41.
- [20] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]. Hyattsville, Maryland: USDA, Science and Education Administration, 1978.
- [21] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 7-13.
- [22] 吴思颖,汪小钦,曾舒娇,等.基于 CSLE 的安溪县土壤侵蚀估算与分析[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(4): 112-121.
- [23] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [24] 胡先培,曾成,钱庆欢,等.基于 RUSLE 模型的铜仁地区 1987—2015 年土壤侵蚀时空特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(2): 158-166.
- [25] 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.
- [26] 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, 35(4): 942-951.
- [27] 舒天竹,王晓红.基于 3S 技术的地形起伏度与区域土壤侵蚀的相关性研究[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 127-132.
- [28] Chen S F, Zha X. Evaluation of soil erosion vulnerability in the Zhuxi watershed, Fujian Province, China[J]. *Natural Hazards*, 2016, 82(3): 1589-1607.
- [29] 芦佳玉,延军平,李英杰.基于 SPEI 及游程理论的云贵地区 1960—2014 年干旱时空变化特征[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2018, 45(3): 363-372.
- [30] 丁剑宏,谢飞帆,陈丽.滇池流域土壤侵蚀空间结构的分形特征分析[J]. *中国水土保持*, 2011(1): 43-45, 67.
- [31] 彭双云,杨昆,洪亮,等.基于 USLE 模型的滇池流域土壤侵蚀时空演变分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 138-146, 305.
- [32] 刘会玉,王充,林振山,等.基于 RS 和 GIS 的滇池流域水土流失动态监测[J]. *南京师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(2): 120-124.