

基于 GIS 的慈溪市土壤侵蚀敏感性评价

杨新华^{1,2}, 王侃², 李加林¹, 贾琼琼^{1,2}, 李天昊^{1,2}, 杨雪玲²

(1. 宁波大学 城市科学系, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 生态环境研究所, 浙江 宁波 315211)

摘 要: [目的] 对影响浙江省慈溪市土壤侵蚀敏感性的各因素进行评价, 为该市进行环境功能区划和各项水土保持措施工程的布局调整提供参考。[方法] 借鉴土壤侵蚀流失 USLE 模型, 选取降雨侵蚀力、土壤质地、植被覆盖和地形起伏度 4 因子构建土壤侵蚀敏感性评价体系, 并运用 GIS 进行土壤侵蚀敏感性分析。[结果] 慈溪市土壤侵蚀敏感性在空间格局上呈半圆环状结构分布, 并且轻度敏感区面积为 733.05 km², 占比高达 75.70%, 广泛分布于平原乡镇地区; 不敏感区主要分布于近海滩涂区域, 极敏感、高度敏感及中度敏感区则位于南部的丘陵、山地地区。[结论] 慈溪市土壤侵蚀敏感性评价结果与水土流失现状空间分布走势大致相符, 为此应重视和预防水土保持工作。

关键词: 土壤侵蚀; 敏感性评价; 地理信息系统; 慈溪市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)04-0210-06

中图分类号: S157.1, P951

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.037

A GIS-based Assessment on Soil Erosion Sensitivity in Cixi City

YANG Xinhua^{1,2}, WANG Kan², LI Jialin¹, JIA Qionqiong^{1,2}, LI Tianhao^{1,2}, YANG Xueling²

(1. Urban Science Department, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

2. Institute of Eco-environmental Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: [Objective] Through evaluating the impact factors of soil erosion sensitivity for the Cixi City of Zhejiang City, references for conducting the environmental functional zoning and the layout of water conservation measure were expected to be provided. [Methods] According to the USLE model, rainfall erosion force, soil texture, vegetation cover and terrain fluctuation were selected to construct sensitivity evaluation system of soil erosion. Moreover, GIS was employed to analyze soil erosion sensitivity. [Results] Results showed a semicircle structure in the spatial distribution pattern of soil erosion sensitivity in Cixi City. The area of slight sensitivity was 733.05 km², accounting for a high percentage of 75.7%, which was widely distributed in the villages and towns of plain area. The insensitive part located in the offshore area of tidal flat. The areas of extreme sensitive, high sensitive and moderate sensitive were mainly distributed in the hill and mountain regions of the southern part of Cixi City. [Conclusion] The results of sensitivity evaluation were in accord with the spatial distribution of soil water loss, indicating that more attentions should be paid to the conservation of soil and water.

Keywords: soil erosion; sensitivity evaluation; GIS; Cixi City of Zhejiang City

土壤侵蚀是指表土及其母质在自然与人为外力作用下发生的水土流失, 土层破坏, 有机质含量下降等一系列自然分解和人为破坏的过程^[1]。土壤侵蚀问题作为影响全球生态环境问题的一个重要方面, 关乎全球生态系统的可持续发展, 对于人类社会的生存

与发展也有着至关重要的意义。因此对土壤侵蚀进行预测和防治, 成为人类改善生存环境建设和谐社会刻不容缓的任务。土壤侵蚀敏感性表示在各种自然要素的作用下, 可能会发生土壤侵蚀的机率和程度^[2]。而对敏感性评价则是依据土壤侵蚀的成因, 判

收稿日期: 2016-02-27

修回日期: 2016-04-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“围垦对杭州湾南岸潮滩湿地沉积地貌过程的影响”(40701006), “围垦影响下的象山港潮汐汉道潮盆系统沉积动力学研究”(41171073)

第一作者: 杨新华(1994—), 女(汉族), 河南省周口市人, 硕士研究生, 研究方向为资源环境保护与利用。E-mail: 1131935999@qq.com。

通讯作者: 王侃(1977—), 男(汉族), 浙江省奉化市人, 博士, 副教授, 主要从事环境规划与管理、环境污染模拟与控制方面的研究。E-mail: wangkan@nbu.edu.cn。

断与监测潜在侵蚀类型与程度,反映土壤侵蚀对社会生产和生活进行的各类活动敏感度,可用于预防和治理土壤侵蚀,保证社会生产的自然安全^[3]。目前国外的专家学者对此进行了多方面研究,并取得了一定研究成果,Routschek^[4]选取德国 Saxony 流域为例,利用 ECHAM4-OPYC3, WETTREG 和 EROSION 3D 三个模型量化了气候变化在流域尺度对土壤侵蚀的影响; Ciampalini^[5]基于 STREAM 土壤侵蚀模型建立一个新模型应用于地中海流域的农业景观演变分析;国内学者也从不同角度进行实证,如对省域^[6-7]、特殊流域^[8-9]、热点地区^[10-11]的土壤敏感性进行评价,并在评价的基础上提出合理性建议。慈溪市的大部分土地是由于围海造田以及淤泥质滩涂发育形成,是比较典型的沿海经济相对发达县级市,就 2014 年水土流失现状而言,该市水土流失总面积有所下降,但水土流失强度有所提高,水土流失治理现状不容乐观,对水资源的点源面源污染以及经济发展都存在很大的影响。选取慈溪市为研究区域,利用最新的研究数据,通过土壤侵蚀模型 USLE 和 ArcGIS 软件,对其土壤侵蚀敏感性特征进行探究,并与水土流失现状相比对,以期为该市进行环境功能区划和各项水土保持措施工程的布局调整提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

慈溪市位于浙江省东北部,杭州湾南岸,面积 968.36 km² (不含杭州湾新区),辖 5 个街道和 13 个乡镇。其地理位置位于北纬 30°02′—30°24′,东经 121°02′—121°42′,是长江三角洲南翼工商名城和宁波市北部重要的中心城市,地理区位优势,交通优势明显。慈溪市经济状况良好,2014 年国民生产总值达 1 111.51 亿元,人均 GDP 达 75 093 元,均高于全省平均水平。该区属于亚热带季风型气候,四季分明,夏冬略长,春秋略短,温暖湿润,雨量充沛,光照充足。慈溪市土壤有 5 个土类,11 个亚类,22 个土属,42 个土种。慈溪市地形地貌特征独特,境内包括丘陵、平原和滩涂 3 种地貌类型,地势走向与地貌类型的分布一致,即西南高,东北低。该地区土壤类型多样,近山平原土壤肥力差,易造成水土的流失;而滨海平原区的土壤在七塘以北为新垦耕地,保土保肥的性能差,七塘以南蓄水保肥能力和耕地性能都比较好。慈溪市属于以水力侵蚀为主类型的南方红壤丘陵区,通过进行土壤侵蚀的敏感性评价,明确土壤侵蚀发生的可能性情况,对合理配置水土流失防治措施,制定相关的水土流失对策具有一定的借鉴意义。

1.2 数据来源与预处理

研究资料主要包括 2013 年慈溪市遥感影像、1:1 万的土地利用现状图、公益林分布图、DEM、行政边界线、1:10 万的土壤质地图和 2010—2014 年慈溪市 12 个气象站点的月降雨数据,2014 年慈溪市水土流失现状图,利用 ArcGIS 10.2 对原始的栅格数据和矢量数据进行空间校正和地理配准,并把所有图层投影坐标系统一为宁波独立坐标。

2 土壤侵蚀敏感性评价研究方法

2.1 评价因子的确立和估算

以 1 km 网格为评价单元,结合慈溪市生态环境特征,对区域土壤侵蚀敏感性进行评价。目前学界在进行土壤侵蚀敏感性评价时,常用经验统计模型、物理成因模型、分布式土壤侵蚀模型。受数据源限制本研究选择通用侵蚀方程 USLE。USLE 方程对多方面因素进行了综合考量,确定了土壤流失量的算法为:

$$A=R \cdot LS \cdot K \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中: A ——土壤的流失量[t/(m²·a)]; R ——降水侵蚀力因子[(J·cm)/(m²·h)]; LS ——地形起伏度因子; K ——土壤质地因子; C ——植被覆盖因子; P ——水土保持的措施因子。

由于 P 更多的关注于人类活动,相对不稳定,故对该因子不做考虑。本研究选取降雨侵蚀力、坡度与坡长、土壤质地和植被覆盖 4 个因子作为评价指标进行分析研究。由于研究区域和福建省的自然环境、气候条件相似,所以在对慈溪市进行土壤侵蚀敏感性分级时,主要是参照由国家水利部门公布的分类分级标准^[12]和陈燕红等^[13]对吉溪流域进行评价时所选取的分类分级标准(表 1)。

2.1.1 降水侵蚀力因子 R 降水侵蚀力是加速土壤侵蚀的动力机制,不同区域的降水侵蚀力存在差异,直接影响到土壤侵蚀强度大小。降雨侵蚀力作为土壤水蚀的一个重要因子,对土壤侵蚀流失量进行定量评价、侵蚀风险评价预估以及对各种水利基础设施进行合理的布局都具有重要意义。本研究区域位于杭州湾南岸地区,其地理特征类似于福建省,因此采用我国周伏建等^[14]提出的适合我国南方地区降雨侵蚀力 R 值的简易计算公式。

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-2.6398 + 0.3046P_i) \quad (2)$$

式中: P_i ——月降雨量(mm); R ——年降雨侵蚀力指标 R 值[(J·cm)/(m²·h)]。均匀选取慈溪市代表性的 4 个国家气象站点和另外其他 8 个气象站点 2010—2014 共 5 a 的月降雨数据,把 5 a 的月降雨

数据代入公式(2)进行计算得出 R 值的大小,再应用 ArcGIS 软件对 R 值进行普通克里金插值,依据等级划分标准,生成土壤侵蚀敏感性有关降水的单因子评价分布图。

表 1 土壤侵蚀敏感性的评价标准

分级	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
降水侵蚀力	≤300	300~350	350~400	400~450	>450
土壤质地	≤0.15	0.15~0.20	0.20~0.25	0.25~0.30	>0.30
地形起伏度/m	0~20	20~50	51~100	101~300	>300
植被覆盖	≤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	>8.0

2.1.2 土壤质地因子 K K 因子在 USLE 模型中起到关键性的作用,反映了土壤质地不同会影响土壤的抗侵蚀能力即发生土壤侵蚀的可能性大小。 K 作为一个重要的评价指标,其值越大,土壤越容易遭受侵蚀,

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.025 \, 6 S_{an} \left(1 - \frac{S_{il}}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{S_{il}}{C_{la} + S_{il}} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7SN_1}{SN_1 + \exp(-5.51 + 22.9SN_1)} \right]$$

(3)

式中: K ——土壤质地; S_{an} ——砂粒含量%; S_{il} ——粉砂含量%; C_{la} ——黏粒含量%; C ——有机碳含量%; $SN_1=1-S_{an}/100$ 。在进行计算时所需要的各种有机质含量数值和土壤质地都来自于浙江省土壤信息数据库。把矢量化后的慈溪市土壤地图作为底图,通过公式的计算,依据等级划分标准,利用 GIS 软件生成土壤侵蚀敏感性有关土壤质地的单因子评价分布图。

2.1.3 植被覆盖因子 C 植被覆盖因子 C 是指在相同土壤、地形和降雨条件下,某一特定作物或植被情况下土壤流失量与连续休闲地土壤流失量的比值。裸地 C 值取最大值 1,地面植被覆盖情况良好时 C 值取 0, C 值位于 $[0,1]$ 。植被覆盖因子 C 反映的是所有有关现状地表植被覆盖和其各种变化所能对土壤侵蚀产生的综合影响,在防治水土流失,监督预防土壤侵蚀,保持土壤的肥力方面起到重要的评估作用。对于 C 因子的估算,采取蔡崇发等^[16]的计算公式:

$$C = 0.650 \, 8 - 0.343 \, 6 \lg f \quad (0 < f < 78.3\%)$$

(4)

式中: f ——植被覆盖度(%),当 $f=0$ 和 $f \geq 78.3\%$ 时, C 为 1,0。对于 f 的计算,采取谭炳香等^[17]的计算公式:

$$f = (NDVI - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min})$$

(5)

式中: $NDVI$ ——所求区域的归一化植被指数; $NDVI_{\min}$, $NDVI_{\max}$ ——研究区域归一化植被指数的最小值与最大值。以慈溪市卫星遥感图像解译的土地利用现状图和公益林分布图为基础底图,依据等级划分标准,利用 GIS 软件生成土壤侵蚀敏感性有关

反之 K 值越小,土壤遭受侵蚀的潜在可能性越小。在进行土壤质地因子 K 值的确定时重点考虑有机质含量这个土壤本身带有的性质因素。对于 K 值计算利用 Williams^[15]在 EPIC 模型中的修正公式,即:

植被的单因子评价分布图。

2.1.4 地形起伏度因子 LS 在土壤通用方程^[17] USLE 这一模型中,地形起伏度因子对土壤的侵蚀过程起加速作用。地形起伏度因子作为地形指标,是一个区域地形特征的客观表达,综合反映了地形高低对土壤侵蚀所产生的影响作用^[18]。应用 ArcGIS 软件中空间分析功能的栅格邻域计算工具,首先要进行的步骤是把统计类型设为最大值,邻域类型选择矩形,其具体大小设置为 11×11 ,然后重复操作最小值后,再使用栅格计算器进行差值计算,即得到地形起伏度。依据等级划分标准,利用 GIS 软件生成土壤侵蚀敏感性有关地形因素的单因子评价分布图。

2.2 土壤侵蚀敏感性的综合评价模型

利用 R, K, C, LS 4 个因子分别进行评价,只是反映了单一自然因素所产生的影响,不能从综合的角度去反映研究区发生侵蚀敏感性的空间分异特征和规律。对土壤侵蚀敏感性而言,不同的影响因子会在不同的方面发挥作用,需要把各个因素进行叠加综合才能看到其整体作用。综合评价方法为:将以上 4 个单因子评价图利用 GIS 软件进行叠加,并且对 4 个单因子评价价值进行叠加计算,运算公式为:

$$SS_j = \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 C_i}$$

(6)

式中: SS_j —— j 空间单元土壤侵蚀敏感性指数; C_i —— i 因素敏感性等级值。在单个因素评价结果的基础上,利用 GIS 软件进行各个因素的空间叠加综合分析,按照公式中的计算方法和等级划分的评价标

准,绘制土壤侵蚀敏感性的分级图,通过叠加慈溪市的行政区划图,可以得出不同敏感性级别在乡镇行政区上的分布情况。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀敏感性评价结果

3.1.1 土壤侵蚀敏感性单因子评价结果与分析

(1) 降水侵蚀力敏感性。慈溪市位于杭州湾南岸,常年雨量充足,年平均降水量 1 345 mm,但降水时空分布不均,地表水拦蓄能力弱,其中 6、9 两月为降雨高峰,平均占年降水量 27.8%,多年平均年径流总量 $5.35 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在整个浙江省范围内为降雨侵蚀低值区^[19-20]。降雨侵蚀力 R 值介于 303.84~429.94 之间,其中介于轻度敏感范围区的面积最大(图 1)。



图 1 研究区降水侵蚀力敏感性因子

(2) 土壤可蚀性敏感性。慈溪市的土壤可蚀性是浙江省境内可蚀性因子相对较高的区域,但是慈溪市又是以平原为主的区域,其实际土壤侵蚀状况要比以山地、丘陵为主的区域好很多^[21]。境内的土壤类型大致包括酸性粗骨土、黄红壤、水稻土、潮土以及滨海盐土等。北部侵蚀敏感性等级相对较低主要包括沿海滩涂区域的不敏感区和平原区的轻度敏感区;南部敏感性等级较高,主要是沿山平原的中度敏感区和山区的高度敏感、极敏感区域(图 2)。

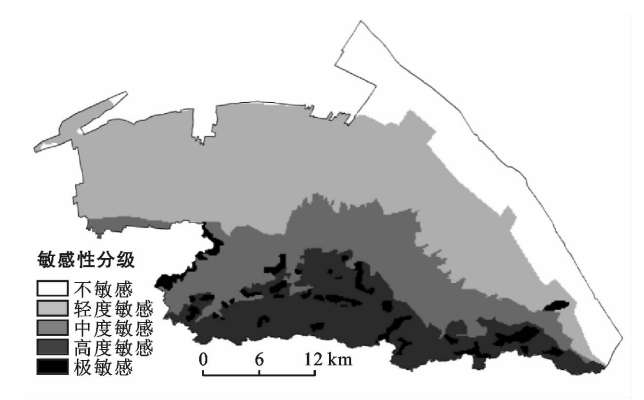


图 2 研究区土壤质地敏感性因子

(3) 植被覆盖敏感性。慈溪市的植被覆盖状况与浙江省内的众多城市相比而言还有待改善,在慈溪市进行生态工程建设时退耕还林政策还要加强。慈溪市的植被覆盖度敏感性以中度敏感和轻度敏感为主,而不敏感区域较少,分布于北部市海涂地的一小部分区域(图 3)。

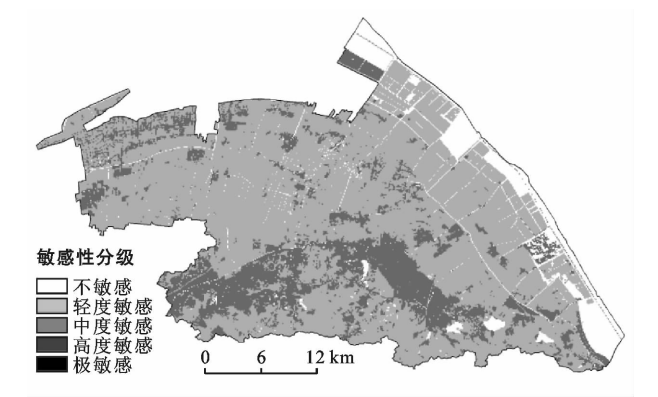


图 3 研究区植被覆盖敏感性因子

(4) 地形起伏度敏感性。慈溪市位于北部沿海地区,相对于西北和西南地区而言,其地形较为平坦,起伏度不大。研究区境内由丘陵、平原和滩涂共同组成,丘陵面积不大,分布于南部,且地形起伏度较大,所以轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极敏感都分布于此;北部的平原和滩涂,地势平坦,面积较大,为不敏感区域(图 4)。

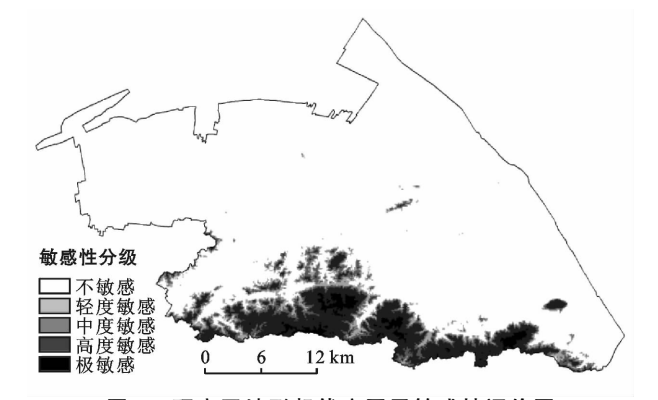


图 4 研究区地形起伏度因子敏感性评价图

3.1.2 土壤侵蚀敏感性综合评价结果与分析 慈溪市在进行土壤侵蚀敏感性评价时,将敏感性的等级划分为 5 级,在全区的综合评价结果分析时,可以看出区域内 5 个敏感性等级的空间分布情况。其中以轻度敏感区域所占总面积的比重最大 75.7%,而极敏感区域所占总面积的比重最小 3.19%(表 2)。慈溪市土壤侵蚀敏感性的空间分布类似于半圆环的结构特征,土壤侵蚀轻度敏感区主要分布在市域内的中部平原区,土壤侵蚀的不敏感区域主要分布在市海涂地的西侧,这些地区地势平坦、降雨量相对较少、土壤多

为灰潮土和滨海盐土,土壤侵蚀敏感性程度相对较低;土壤侵蚀的中度敏感区分布在市域内山区和平原的交界处,土壤侵蚀的高度敏感区分布在横河镇东南部、匡堰镇南部、观海卫镇南部、掌起镇南部、龙山镇南部,土壤侵蚀的极敏感区主要分布在横河镇、匡堰镇、桥头镇、观海卫镇、龙山镇的南部山区水库周边区域,这些南部丘陵山区地形起伏度较大,该地段分布的红壤、黄红壤以及水稻土一般表土疏松,多石砾和黏粒,质地中壤或轻粘,酸性较重,养分相对贫乏,保肥性差,易发生土壤侵蚀(图 5)。土壤侵蚀敏感性评价是从自然角度评价土壤侵蚀的易发区域,从敏感性等级分布图上可以看出高等级的敏感性区域主要是受到地形和土壤质地的影响,而低敏感区域的主导因子则主要是降水和植被。故针对不同的影响因子,应采取不同的治理措施。在土壤侵蚀治理的过程中,要关注土壤侵蚀发生的原因机制、确定主导因子,以便采取合适的治理措施和政策。目前一些主要的生态治理工程都在筹建之中,在慈溪市进行生态文明建设过程中,土壤的治理也是一项不容忽视的重大工程,需要加以重视,并建立水土流失的动态监测预报系统,注重预防。政府在进行各项规划时,对土壤侵蚀敏感度较高的区域加强关注度。慈溪市大概有 17% 的面积处于敏感度较高的状态,对比慈溪市的生态环境功能区划结果发现,该区主要是自然生态红线区,集中分布于南部山区连片区域,会对自然生态环境和人类的生命财产安全产生重大的影响,故政府需要对该区域加强治理研究。

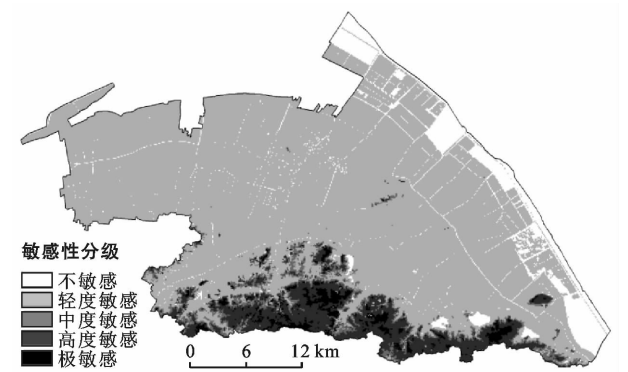


图 5 研究区土壤侵蚀敏感性综合评价图

表 2 慈溪市土壤侵蚀敏感性综合评价统计

敏感性	面积/km ²	占该市总面积比例/%
不敏感	70.28	7.26
轻度敏感	733.05	75.7
中度敏感	42.25	4.36
高度敏感	91.94	9.49
极敏感	30.92	3.19

3.2 水土流失现状与土壤侵蚀敏感性对比分析

2014 年慈溪市水土流失现状调查中水土流失的面积为 37.99 km², 占土地总面积的 3.9% 左右(表 3), 比 20 年代末水土保持工作开始之初的水土流失面积减少了约 12.06 km²。但是这些面积的减少是建立在轻度水土流失面积减少的基础上的, 其余面积都在增加(图 6)。而水土流失新增面积与新增建设项目用地和农村的坡耕地、经济林的不合理耕作以及土地的利用方式转变密切相关。土壤侵蚀属于水土流失的范畴但是不依附水土流失而存在, 水土流失必须在土壤侵蚀的基础之上发生, 土壤侵蚀是水土流失的预备阶段。慈溪市水土流失现状的空间分布与土壤侵蚀敏感性评价结果走向大致相符, 南部山区包括了森林公园、风景名胜区、大型水库集雨区和湖库型饮用水水源保护区等特殊区域, 即是水土流失的高发区, 也是土壤侵蚀敏感性评价的高敏感区域, 是进行水土保持的重点预防区。但是相对于水土流失现状而言, 敏感性的评价结果更加严重, 有些敏感性等级高的区域还处于水土流失的演进过程中。在进行水土保持工程措施布局时要秉承治理和预防并重的理念。在对土壤侵蚀进行监督预测时应充分考虑水土流失的区域现状。在对水土流失进行治理的同时, 对土壤侵蚀敏感性等级高的区域进行重点预防和监控, 以防发生新的水土流失。

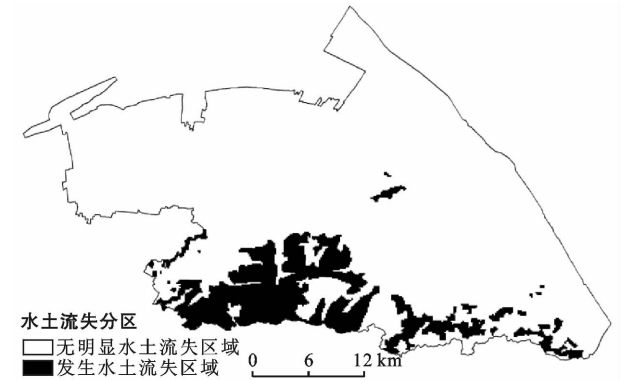


图 6 慈溪市 2014 年水土流失现状图

表 3 慈溪市 2014 水土流失现状统计

流失强度	面积/km ²	占该市总面积比例/%
轻度	5.76	0.59
中度	20.45	2.11
强烈	9.11	0.94
极强烈	2.35	0.24
剧烈	0.32	0.03

4 结论

慈溪市土壤侵蚀评价结果显示, 本研究区的土壤

侵蚀敏感性等级不高,绝大多数地区属于轻度敏感(占 75.7%)地区,除不敏感(占 7.26%)地区分布在市海涂地西侧边缘区外,少数中度敏感(占 4.36%)、高度敏感(占 9.49%)和极敏感(占 3.19%)地区则集中分布在南部丘陵区。慈溪市土地利用现状基本合理,但局部土地利用结构和方式存在土壤侵蚀隐患,土壤侵蚀敏感性轻度敏感虽然强度不高,但现状不容乐观。土壤侵蚀与社会发展和生态系统健康的矛盾依然存在,水土保持监测站网的监督管理能力还有进一步提升的空间。

[参 考 文 献]

- [1] 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,2001:1-5.
- [2] 汤小华,王春菊. 福建省土壤侵蚀敏感性评价[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,2006,22(4):2-4.
- [3] 王效科,欧阳志云,肖寒,等. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究[J]. 生态学报,2001,21(1):14-19.
- [4] Routschek A, Schmidt J, Enke W, et al. Future soil erosion risk: Results of GIS-based model simulations for a catchment in Saxony/Germany[J]. *Geomorphology*, 2014, 206(2):299-306.
- [5] Ciampalini R, Follain S, Bissonnais Y L. LandSoil: A model for analysing the impact of erosion on agricultural landscape evolution [J]. *Geomorphology*, 2012, 175(15):25-37.
- [6] 王小丹,钟祥浩,范建容. 西藏水土流失敏感性评价及其空间分异规律[J]. 地理学报,2004,59(2):183-188.
- [7] 杨广斌,李亦秋,安裕伦. 基于网格数据的贵州土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异[J]. 中国岩溶,2006,3(1):73-78.
- [8] 王娇,程维明,祁生林,等. 基于 USLE 和 GIS 的水土流失敏感性空间分析:以河北太行山区为例[J]. 地理研究,2014,33(4):614-624.
- [9] 李斌,李俊祥,朱飞鸽,等. 基于 RUSLE 的环杭州湾地区土壤侵蚀敏感性评价及关键敏感因子识别[J]. 应用生态学报,2009,20(7):1578-1584.
- [10] 赵明月,赵文武,安艺明,等. 青海湖流域土壤侵蚀敏感性评价[J]. 中国水土保持科学,2012,10(2):15-20.
- [11] 曾旭婧,张毅,黄素萍,等. 定量遥感支持下的岷江上游土壤侵蚀敏感性评价[J]. 土壤通报,2014,45(4):955-959.
- [12] 中华人民共和国水利部. SL90-96 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
- [13] 陈燕红,潘文斌,蔡尧斌. 基于 RS/GIS 和 RUSLE 的流域土壤侵蚀定量研究:以福建省吉溪流域为例[J]. 地质灾害与环境保护,2007,18(3):5-10.
- [14] 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.
- [15] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. The EPIC model documentation[M]. Washington D C: U S Department of Agriculture,1990.
- [16] 蔡崇发,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.
- [17] 谭炳香,李增元,王彦辉,等. 基于遥感数据的流域土壤侵蚀强度快速估测方法[J]. 遥感技术与应用,2005,20(2):215-220.
- [18] 何锡君,吕振平,杨轩,等. 浙江省降雨侵蚀力时空分布规律分析[J]. 水土保持研究,2010,17(6):31-34.
- [19] 沈照伟,田刚,李钢,等. 浙江省降雨侵蚀力变化特征分析[J]. 水土保持通报,2013,33(4):119-124.
- [20] 荆长伟. 浙江省土壤数据库的建立与应用[D]. 浙江 杭州:浙江大学,2013.
- [21] 周俊菊,石培基,师玮,等. 基于 GIS 的陇南市土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异特征[J]. 土壤通报,2011,42(5):1076-1080.

(上接第 209 页)

- [14] 王静,程积民,万惠娥,等. 厚穗宾草地上部生物量与株高的分形关系[J]. 西北植物学报,2005,25(8):1623-1627.
- [15] Wang Zhiqiang, Liu Baoyuan, Zhang Yan. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(6): 707-718.
- [16] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵小流域生态用水试验研究:气候和土地利用变化的影响[J]. 水科学进展,2006,17(1):14-19.
- [17] 张北赢,徐学选,白晓华. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分分析[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(2):96-99.
- [18] 郭忠升,邵明安. 土壤水分植被承载力初步研究[J]. 科技导报,2006,24(2):56-59.
- [19] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J]. 土壤学报,2002,39(3):404-411.
- [20] Critchley C N R, Chambers B J, Fowbert J A, et al. Association between lowland grassland plant communities and soil properties [J]. *Biological Conservation*, 2002,105(2):199-215.