

基于 GIS 和 USLE 的龙墩水库小流域土壤侵蚀评估研究^①

陈玉东, 陈梅, 孙旭, 刘臣炜, 张龙江, 苏良湖*

(环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要:本研究以南京市高淳区龙墩水库流域为研究对象,利用通用土壤流失方程(USLE)模型与地理信息系统(GIS)技术结合的方法对流域土壤侵蚀进行模拟预测。结果表明:整个流域年均土壤侵蚀模数为 4 343.46 t/km²,属中度侵蚀。整个流域微度和轻度侵蚀所占面积比例相对较大,两者所占面积比例之和超过了 63%,极强度和剧烈侵蚀虽然所占面积较小,但却产生了超过了 70% 的侵蚀量。不同土地利用类型中土壤侵蚀强度差异较大,年均侵蚀模数旱田>草地>水田>林地,侵蚀量旱田>水田>草地>林地。通过 GIS 将整个流域划分为 13 个子流域,子流域 4、5、10 由于区域内大部分是旱田,土壤侵蚀模数较大,为流域内土壤侵蚀的关键源区,子流域 10 侵蚀模数和侵蚀量都比较大,应该重点关注;而子流域 1、9 和 12 由于侵蚀总量较大,也应该保持一定的关注。所有子流域土壤侵蚀量都主要来自高强度侵蚀等级,其中以剧烈侵蚀为主。因此,控制土壤侵蚀应该优先考虑高强度侵蚀等级区域。

关键词: GIS; USLE; 土壤侵蚀; 小流域

中图分类号: S157.1

随着点源污染逐步得到控制,非点源污染已经成为我国水质污染控制的重点。在农业非点源污染中,土壤侵蚀是主要的发生形式。大面积的土壤侵蚀造成土壤肥力下降、营养物质随泥沙进入水体,导致水体水质恶化,严重影响了水体正常功能和周边的生态环境。因此,评估流域土壤侵蚀是流域非点源污染模拟的基础工作之一,也是非点源污染控制中的关键因素^[1]。模型是土壤侵蚀预测与评价中的重要方法,研究人员模拟各种不同形式的侵蚀过程和预报土壤侵蚀在时空上的变化,建立了诸多适用于不同条件下的经验模型或者物理模型,如 USLE^[2],RUSLE^[3],WEPP^[4]等。近几年,随着 GIS 技术的快速发展,借助 GIS 在数据管理、空间分析的强大功能,模型在土壤侵蚀与非点源污染定量化研究领域得到了广泛应用,为流域水土流失及非点源污染控制提供了很好的工具。

通用土壤流失方程(USLE)是最为广泛应用的经验模型,该模型是美国 Wischmeier 和 Smith^[2]对美国东部地区 30 个州 10 000 多个径流小区近 30 年的观测资料进行系统分析建立的经验公式,是最早将坡

度、坡长、气候因子、植被因子、土壤可蚀性等引入土壤侵蚀预报的一个简洁模型。相对于传统的集中式方法进行土壤侵蚀量预测,GIS 与 USLE 相结合的分布式方法由于运用 GIS 的栅格数据分析功能,可预测出每个栅格的土壤侵蚀量,有效地提高了土壤侵蚀量的预测效率和结果的显示度,便于管理者找出较为严重的土壤侵蚀区,从而针对性地提出最佳管理措施,因此 USLE 与 GIS 相结合被国内外学者广泛应用于具有空间特征的土壤侵蚀研究^[5-10]及养分流失评估^[11-12]。龙墩水库是高淳县唯一一座中型水库,作为高淳县的第二水源地,承担着防洪、供水、灌溉等重要功能,其水质的好坏直接影响着人们的生产生活。流域内没有工业企业,农业非点源污染成为影响该流域水体水质的关键因素,因此本研究以龙墩水库流域为研究对象,通过 USLE 模型结合 GIS 对流域的土壤侵蚀量进行预测,完成对龙墩水库小流域土壤侵蚀强度的分等定级,并通过子流域的方式进行分区讨论,对小流域的非点源污染控制和水土资源管理,具有一定的现实意义。丘陵为世界五大陆地基本地形之一,在我国东部浙江、江苏、安徽、湖北、湖南等

基金项目:环保公益性行业科研专项(201309035)、中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2016)、国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07101-012)资助。

* 通讯作者(sulianghu@nies.org)

作者简介:陈玉东(1984—),男,江苏响水人,博士,助理研究员,主要从事农田磷素循环及农村面源污染控制研究。E-mail: dongzi1225@sina.com

地区都有较广分布。本研究所在区域为典型的低山丘陵区,研究结果也可为我国东部丘陵区其他小流域的水土资源管理提供参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

龙墩水库流域位于南京市高淳县东北部低山丘陵区(119°1'~119°4' E, 31°22'~31°26' N),距高淳县城淳溪镇 17 km,距漆桥镇镇区约 3 km。流域地形大致呈长方形,南北向最长约 7.0 km,东西向最宽约 5.0 km,汇流面积中大部分属高淳县,只有北部一小部分属溧水县。流域中的龙墩河水库位于南京市高淳县东北部的漆桥河上游,是高淳县境内最大的水库,库容 1 183 万 m³,水库集水面积 26.50 km²,上游河道干流长 4.01 km,地势东高西低,最高处为位于流域东部的大山,最低处为库区拦河坝所处的河谷位置。水库下游河道依次汇入漆桥河、固城湖、长江。龙墩水库流域位于北亚热带和中亚热带过渡地区,受季风环流影响,区域性气候明显,常年四季分明,平均气温 16℃,最高气温 39.8℃,最低气温 -14.0℃。多年平均降水量 1 190.8 mm,降水量年内分配不均,年际变化较大,最大年降水量 1 878.6 mm(1991年),最小年降水量 569.5 mm(1978年)。土壤以水稻土类为主,其次是黄棕壤土类。主要农作物种有水稻、小麦、油菜等。

1.2 小流域资源数据库的建立及子流域划分

图形数据库:包括流域数字高程模型(DEM)图、土壤类型图、土地利用现状图等。通过购买的 DEM 图(江苏省测绘地理信息局,2009年6月航摄,2010年调绘,分辨率为 5 m),提取研究区的等高线图、坡度坡向图和流域边界以及水系图。土壤类型图以土种或变种作为成图单元(高淳县土壤肥料站 2010 年制),土地利用图根据遥感影像图(Landsat TM,分辨率为 30 m)通过遥感分类提取与人工解译相结合获得。属性数据库:主要包括龙墩水库地区 2010—2013 年各月降雨量等气象数据(高淳县 2010—2013 统计年鉴)、土地利用属性、土壤机械组成、有机质含量等。各种图形数据通过数字化仪输入计算机,经编辑后成为数字化图,与属性数据库链接,可以实现空间分析功能,进行可视化及编辑运算。

子流域划分:在 ArcGIS 中利用水文分析模块进行流域的划分。将汇流累积栅格数据作为基础,对其进行阈值的设定,阈值的设定是通过不断的实验加上现有地形数据综合分析获得,本研究中最终设定阈

值为 0.8 km²。计算出所有大于设定阈值的栅格,再将栅格河网转成矢量的河网数据,便于后面河网分级获得等级节点。随后分别输入水流方向数据和出水口河网节点数据,便得到各个流域范围。根据流域实际情况及监管需求,对自动生成的子流域进行合并,一般子流域保持在 10 个左右,这样既不会因为子流域过多而不方便监管,也不会因为子流域过少而显得结果过于粗糙,最终完成流域的分区。本研究结合流域的实际情况,将整个小流域划分为 13 个子流域(图 1)。

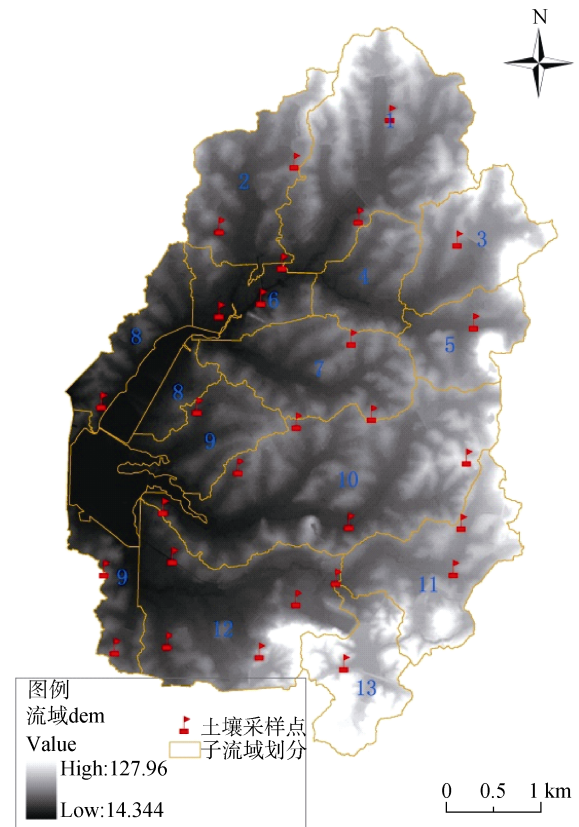


图 1 龙墩水库子流域区划图

Fig. 1 Zoning map of the Longdun Reservoir sub-watersheds

1.3 评估模型

本研究采用 Wischmeier 提出的通用土壤流失方程(USLE)评估流域的土壤侵蚀风险。由于其因子的解释具有物理意义,仍是目前预测土壤侵蚀最为广泛使用的方法^[13]。该方程是将影响水土流失的 6 个因子用连乘的形式组成,侵蚀模数(单位面积年均土壤侵蚀量)计算式为:

$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

式中: A 为土壤年侵蚀量(t/(hm²·a)); R 为降雨侵蚀力因子(MJ·mm/(hm²·h)); K 为土壤可蚀因子(t·hm²·h/(MJ·mm·hm²)); LS 为坡长坡度因子,无量纲; C 为植被覆盖与管理因子,无量纲; P 为水土保持措施因

子，无量纲。

1.3.1 降雨侵蚀力因子 R 值的计算以 Wischmeier^[14]经典法最具代表性，即根据一次降雨总动能 E 和最大 30 min 降雨强度 I_{30} 的乘积表示 R 值，但 I_{30} 需要详细的降雨过程资料难以获得。本研究采用 Wischmeier 等^[13]提出的直接利用多年各月平均降雨量和多年平均降雨量推求 R 值的经验公式：

$$R = \sum_{i=1}^{12} \left\{ 1.735 \times 10^{\left(1.5 \times \lg \frac{P_i^2}{P} - 0.8188 \right)} \right\} \quad (2)$$

式中： R 为降雨侵蚀力因子(MJ·mm/(hm²·h))； P_i 为各月平均降雨量(mm)； P 为年平均降雨量(mm)。根据 2011—2013 年《高淳统计年鉴》的 3 年降雨数据，根据上面提出的计算公式推求小流域年降雨侵蚀力。由于研究地区面积小，约 26.34 km²，可认定降水的分布是均一的，因此整个研究地区的 R 值等于 195.71 MJ·mm/(hm²·h)。

1.3.2 土壤可侵蚀因子 土壤可侵蚀因子 K 是土壤潜在侵蚀性的量度，指单位降雨侵蚀力在标准小区上所造成的土壤流失量^[15]，国内外学者在 K 值计算方面开展了大量的研究^[16-19]。Williams 等^[20]在 EPIC 模型中，发展了土壤可蚀性因子 K 的估算方法，其值的大小与土壤质地、土壤有机碳含量有关，使其使用更简便。结合 GIS 通过插值的方法获得 K 值的空间分布在我国运用较为普遍^[21-23]。因此本研究采用 Williams 等^[20]中提出的改进后的土壤可侵蚀因子 K 的估算方法：

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 SAN (1 - SIL / 100) \right] \right\} \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \left(1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95c)} \right) \left(1 - \frac{0.75SNI}{SNI + \exp(-5.51 + 22.9SNI)} \right) \quad (3)$$

式中： SAN 为土壤中砂粒含量(%)； SIL 为土壤中粉粒含量(%)； CLA 为土壤中黏粒含量(%)； C 为土壤中有机碳含量(%)； $SNI = (1 - SAN) / 100$ 。

本研究中所用到的土壤的质地组成以及土壤有机碳的含量，通过实地采集研究区域的土壤进行分析得到。土样采集通过网格法布置网格大小为 1 km × 1 km 的采样点，充分考虑土地利用方式和土壤类型，样点覆盖整个流域，共采集耕层(0~20 cm)土壤样品 28 个(图 1)，质地及有机碳的含量分析参考《土壤农业化学分析方法》^[24]。按照公式(3)获得采样点的 K 值， K 值范围为 0.256 ~ 0.454 t·hm²·h/(MJ·mm·hm²)。由于本研究所在流域相对较小，土壤类型相对比较单

一旦斑块结构并不复杂，如果直接采用土壤类型进行赋值，可能难以体现空间变化的特征，而通过插值的方式可以从一定程度上体现出 K 值空间的差异性，因此本研究通过 ArcGIS 软件在流域内进行 Kriging 插值处理，从而得到流域的 K 值分布。

1.3.3 坡长坡度因子 在土壤通用流失方程中，坡长和坡度因子分别用 L 和 S 表示，坡长因子 L 是指在其他条件相同的情况下，任意坡长的单位面积土壤流失量与标准坡长单位面积土壤流失量之比；坡度因子 S 是指在其他条件相同的情况下，任意坡度下的单位面积土壤流失量与标准小区坡度下单位面积土壤流失量之比^[25]。在实际应用中常把它们作为一个独立的地形因子 LS 来计算，本文中 L 因子采用的是坡面尺度的坡长因子计算公式， LS 计算公式如下：

$$LS = S \times \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m \quad (4)$$

式中： λ 为坡长， m 为坡长指数， S 为坡度。

指数 m 的推荐值如下：

$$m = \begin{cases} 0.5 & S \geq 5\% \\ 0.4 & 3\% \leq S < 5\% \\ 0.3 & 1\% \leq S < 3\% \\ 0.2 & S < 1\% \end{cases} \quad (5)$$

根据由 McCool 等^[26]的研究表示，通用土壤流失方程允许计算的最大坡度为 18%(10°)。而 Liu 等^[27]对坡度在 9% ~ 55% 的陡坡土壤侵蚀的做了进一步研究。本研究借鉴洪华生等^[28]的方法，将坡度因子 S 的计算通过分段考虑，即缓坡采用 McCool 等^[26]坡度公式，陡坡采用 Liu 等^[27]坡度公式，并将公式合并表示如下：

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (6)$$

式中： θ 为坡度。根据以上算法得到每个像元的地形因子值。

1.3.4 植被覆盖与管理因子和水土保持因子 植被覆盖与管理因子 C 值是指在在相同的地表条件和降雨条件下，指定作物或植被情况下的土地与连续休闲土地的土壤流失量之比，主要和土地利用类型有关。当地面完全裸露时，其 C 值规定为 1；当地面得到良好保护时 C 值为 0.001，其他情况取 0 ~ 1 之间的数值^[29]。因此根据研究区域土地利用类型，并结合美国农业部农业研究所提供的标准表及蔡崇法等^[30-31]的计算方法来确定 C 值(表 1)。

水土保持因子 P 是指某一特定的保持措施下与相应未经实施保持措施的顺坡耕作的地块的土壤

流失量之比,反映了水保持措施对土壤侵蚀量的影响。 P 值范围在 $0 \sim 1$ 之间, 0 值代表根本不发生侵蚀的地区,而 1 值代表了未采取任何控制措施的地区。本研究由于没有设小区试验,主要参照美国农

业部手册 703号及刘宝元^[32]《中国土壤侵蚀模型》的 P 值选取方法对流域内各土地利用类型进行赋值,生成栅格图像,从而得到 P 值图层,不同土地利用类型取值见表 1。

表 1 不同土地利用类型的植被覆盖与管理因子 C 值及水土保持因子 P 值
Table 1 The value of C -factor and P -factor under different land-use types

土地利用类型	水田	旱地	林地	草地	建设用地	水体
C 值	0.18	0.31	0.006	0.15	0	0
P 值	0.3	0.7	1	0.6	1	0

1.3.5 侵蚀模数计算 将以上获得的各个土壤侵蚀因子的图层进行处理,使得所有图层都具有相同的坐标和投影体系,具有相同的网格大小($5\text{ m} \times 5\text{ m}$)。经过处理后,在 ArcGIS 进行 3D 空间分析,将各因子层按照 $A=R \times K \times L \times S \times C \times P$ 进行复合运算,得到生成网格土壤流失量图,最后对网格土壤侵蚀量进行统计计算。土壤侵蚀强度分级结合研究区位置,采用《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)^[33]中制定的标准进行划分,得到流域不同的土壤侵蚀强度比例及分布。

2 结果与分析

2.1 全流域土壤侵蚀状况及分析

土壤侵蚀破坏基本农田设施,降低土地生产力,还伴随着土壤养分的流失,是流域非点源污染的主要形式。因此,在得到流域土壤侵蚀空间分布的基础上,分析其特点以便采取不同防治措施。根据收集的数据应用 ArcGIS 软件对 USLE 模型中的各个评价因子(R 值、 K 值、 LS 值、 C 值和 P 值)以图层的形式输出,应用软件中的栅格计算器来读取各评价因子栅格图中的数据,将各因子连乘得到研究区土壤像元侵蚀量的计算结果。从图 2 中可以看出,在水库的北部及东部 K 值较大,而 K 值较小的区域主要分布在流域东部边界区域。 LS 的高值点,基本上都分布在流域的东部及南部地区,因为该区域主要是山地,地势相对比较陡峭。 C 值与土地利用方式有关,较高值点主要分布在水库周边,此片区域地势相对较为平坦,适合作物耕作,大部分水田与旱田都分布在此。根据土壤侵蚀分类分级标准,流域超过一半的区域属于微度或轻度侵蚀,土壤侵蚀度比较强的区域主要分布在水库东部的一些农田,侵蚀度较小的主要是流域北部以及南部的林地。

对像元土壤侵蚀图的统计结果(表 2)表明,龙墩水库流域年均土壤侵蚀模数为 $4\ 343.46\ \text{t}/\text{km}^2$,侵蚀强度总体属中度侵蚀。有研究表明苔溪流域的侵蚀模

数为 $2\ 347\ \text{t}/\text{km}^2$ ^[7],下庄小流域的平均土壤侵蚀模数为 $2\ 541.66\ \text{t}/\text{km}^2$ ^[28],东江湖流域的年均土壤侵蚀模数为 $3\ 425.57\ \text{t}/\text{km}^2$ ^[34],这些结果比本研究略小,也有研究表明安徽省 2002 年平均土壤侵蚀模数只有 $249.5\ \text{t}/\text{km}^2$,但土壤侵蚀严重地区的皖南丘陵山区和皖西大别山区,局部地区平均侵蚀模数达 $16\ 460\ \text{t}/\text{km}^2$ 以上^[35],江苏吴县市典型小流域旱田土壤(菜地)的土壤侵蚀模数高达 $5\ 185.68\ \text{t}/\text{km}^2$,远高于非耕作土壤,人为因素是影响该流域土壤侵蚀的主要因素^[36],土壤侵蚀模数变化范围较大。土壤侵蚀系统分布格局的不同以及相同土地利用单元上土壤侵蚀强度的差异可能是造成不同流域侵蚀模数结果差异较大的重要原因。本研究结果介于这些研究结果之间,并且龙墩水库小流域属于丘陵区,面积相对较小且大部分区域是农田,受人为因素影响较大,因此土壤侵蚀结果相对较大也是情理之中,结果有一定的可信度。

流域内微度侵蚀的面积为 $7.64\ \text{km}^2$,占整个流域的 32.89% ;轻度侵蚀的面积为 $7.13\ \text{km}^2$,占整个流域的 30.69% ;两者所占比例之和超过了 63% ,但这两个等级对流域土壤侵蚀量的贡献率仅为 8.8% ,为 $8\ 940\ \text{t}$ 。极强度侵蚀和剧烈侵蚀面积分别占总面积的 8.39% 和 7.92% ,两者占的总比例为 16.31% ;但是两者的侵蚀总量分别占总侵蚀量的 21.18% 和 49.01% ,两者所占的比例之和超过了 70% ,为 $70\ 794\ \text{t}$,是微度侵蚀和轻度侵蚀的侵蚀量的 7.9 倍。总体而言,流域内以微度和轻度侵蚀面积较大,但是产生的侵蚀量较小;而极强度和剧烈侵蚀虽然所占面积较小,但却产生了大部分的侵蚀量。

2.2 不同土地利用方式的土壤侵蚀状况及分析

土壤侵蚀强度与土地利用类型具有一定相关性,龙墩水库流域各土地利用类型的土壤侵蚀量见表 3。流域内以旱田、林地、水田为主,占到了整个流域面积的 78.7% ,其中旱田面积最大,为 $8.87\ \text{km}^2$,占到了整个流域面积的 33.6% 。旱田和水田交错分布在水库东部大部分区域,林地主要分布在南、北两

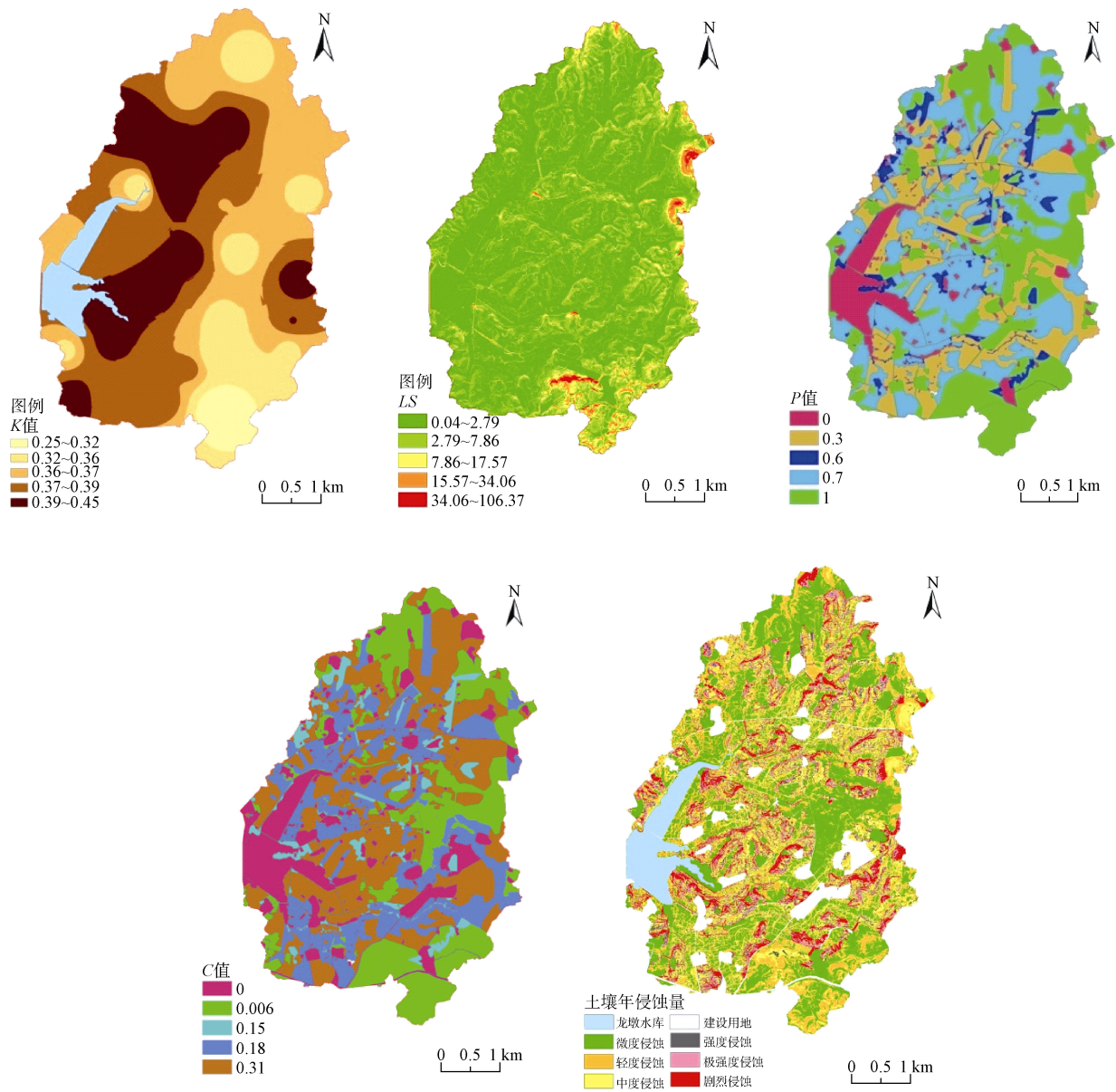


图 2 研究区域土壤侵蚀因子空间分布及侵蚀分级图
Fig. 2 Spatial distribution of soil erosion factors and classification in the study area

表 2 小流域土壤侵蚀强度等级表
Table 2 Grades of soil erosion intensity in the watershed

侵蚀级别	侵蚀面积 (km ²)	侵蚀面积百分比 (%)	平均侵蚀模数 (t/km ²)	侵蚀总量 (t)	侵蚀量百分比 (%)
微度	7.64	32.89	115.69	883.87	0.88
轻度	7.13	30.69	1 129.93	8 056.40	7.99
中度	2.85	12.27	3 499.67	9 974.06	9.89
强度	1.82	7.83	6 125.8	11 148.96	11.05
极强度	1.95	8.39	10 954.82	21 361.90	21.18
剧烈	1.84	7.92	26 865.66	49 432.82	49.01

端及东部边界区域。不同土地利用类型土壤侵蚀模数及侵蚀量的差异较大。除了建设用地及水体的侵蚀模数及侵蚀量为 0 外，林地的侵蚀模数相对较小，为

680.37 t/km²，旱田的侵蚀模数最大，为 9 138.31 t/km²，为林地的 13 倍，已经达到了极强烈侵蚀级别。侵蚀模数从大到小的顺序依次为旱田>草地>水田>林地。

表 3 不同土地利用类型土壤侵蚀统计

Table 3 Summary data for soil erosion of different land use types

土地利用类型	面积(km ²)	侵蚀模数(t/km ²)	侵蚀量(t)
水田	5.88	1 556.47	9 152.04
林地	6.03	680.37	4 102.63
旱地	8.87	9 138.31	81 056.81
草地	1.32	4 897.36	6 464.52
建设用地	1.92	0	0
水体	2.38	0	0

侵蚀量最大的土地利用类型为旱田，年侵蚀量为 81 056.81 t，其次水田和草地，分别为 9 152.04 t 和 6 464.52 t，林地的土壤侵蚀量较小，为 4 102.63 t，仅为旱田的 5%。不管是土壤侵蚀模数还是侵蚀量，旱田都是最大，是该流域土壤侵蚀的主要来源。

在各种土地利用类型中，不同侵蚀等级侵蚀量所占的比例也不尽相同，草地以剧烈侵蚀、极强度侵蚀和强度侵蚀为主，三者占了草地总侵蚀量的 73%；水田以微度和轻度侵蚀为主，占到了水田总侵蚀量的 61%；林地侵蚀量以轻度侵蚀为主，占到了总侵蚀的 54%，微度侵蚀和中度侵蚀都占了约 20%；而旱田侵蚀量以剧烈侵蚀为主，其次为及强度侵蚀，分别占到了旱田侵蚀总量的 55% 和 23%。总体来讲，草地和旱地的高强度侵蚀等级产生了较多的侵蚀量，而水田和林地的侵蚀量还主要来自较低侵蚀等级。

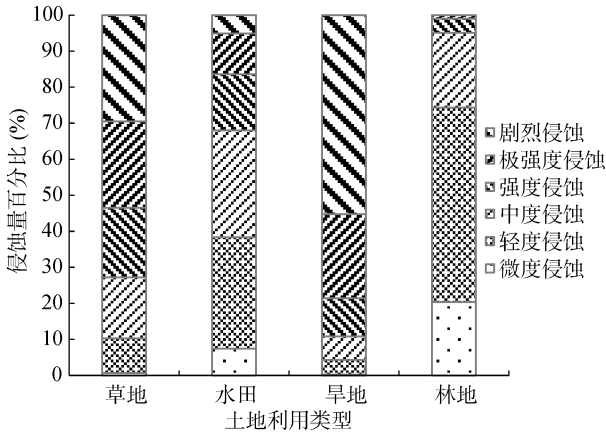


图 3 不同土地利用类型的土壤侵蚀强度

Fig. 3 Grades of soil erosion intensity of different land use types

2.3 不同子流域的土壤侵蚀状况及分析

为了便于后期监管，将整个流域划分为 13 个子流域。由表 4 可知，所有子流域中，子流域 4 的土壤侵蚀模数最大，为 5 201.79 t/km²，其次为子流域 5，侵蚀模数为 5 120.15 t/km²，两者都属强烈侵蚀区域。子流域 13 的土壤侵蚀模数最小，为 2 244.88 t/km²，属轻度侵蚀区域。除子流域 4、5 和子流域 13 外，

表 4 不同子流域的土壤侵蚀统计

Table 4 Summary data for soil erosion in different sub-watersheds

子流域序号	年侵蚀模数 (t/km ²)	子流域面积 (km ²)	年侵蚀总量 (t)	侵蚀等级
1	4 157.59	3.34	13 886.35	中度侵蚀
2	3 026.07	1.78	5 386.40	中度侵蚀
3	3 507.11	1.46	5 120.38	中度侵蚀
4	5 201.79	1	5 201.79	强烈侵蚀
5	5 120.15	1.08	5 529.76	强烈侵蚀
6	3 936.87	0.94	3 700.66	中度侵蚀
7	3 874.84	1.82	7 052.21	中度侵蚀
8	4 461.13	1.75	7 806.98	中度侵蚀
9	4 511.99	2.68	12 092.13	中度侵蚀
10	4 989.4	4.24	21 155.06	中度侵蚀
11	3 994.93	1.92	7 670.27	中度侵蚀
12	3 774.65	3.01	11 361.70	中度侵蚀
13	2 244.88	1.31	2 940.79	轻度侵蚀

其他子流域都属于中度侵蚀等级，侵蚀模数的范围在 3 026.07~4 989.4 t/km²，其中子流域 10 侵蚀模数相对较大一些，超过了 4 500 t/km²。13 个子流域中，年侵蚀总量最大的为子流域 10，其次为子流域 1、9 和 12，这 4 个子流域虽然侵蚀模数属于中等侵蚀等级，但是面积比其他子流域大得多，所以侵蚀总量也相对较大一些。子流域 13 大部分区域是林地，除了 *LS* 值较大外，*K* 值、*C* 值以及 *P* 值都相对较小，面积也相对较小，因此土壤侵蚀模数和侵蚀量都是最低的。子流域 4、5、10 土壤侵蚀模数值最高，主要是因为该子流域内大部分是旱田，*C* 值与 *P* 值都比较高。综合侵蚀模数与侵蚀量结果，子流域 4、5、10 为流域内土壤侵蚀的关键源区，应适当调整种植方式，退耕还林或者利用地埂种植技术、生物篱技术、混农林技术等生物措施以及径流控制净化等工程措施控制土壤侵蚀，加强这些子流域的植被保护工作并提高水土保持措施，以降低土壤侵蚀模数。子流域 10 侵蚀模数和侵蚀量都比较大，应该重点关注，而子流域 1 和 12 由于侵蚀总量较大，也应该保持一定的关注。

在不同子流域中，不同侵蚀等级侵蚀量所占的比例相差较大，主要以剧烈侵蚀为主，占到了各自子流域的 35%~54%，其中子流域 10 最高，子流域 2 最低；而微度侵蚀所占的比例非常得低，最大不超过 7%，其他侵蚀等级分别占了各自子流域的 3%~20%。总体来讲，所有子流域土壤侵蚀量主要来自高强度侵蚀等级，其中以剧烈侵蚀为主。因此对土壤侵蚀控制的重心应该是在高强度侵蚀等级，通过恢复植被、调节坡面径流等措施，降低土壤侵蚀等级，从而进一步达到减少土壤侵蚀。

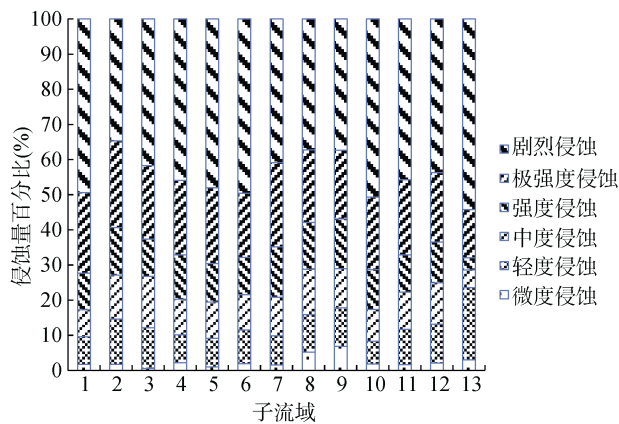


图 4 不同子流域的土壤侵蚀强度

Fig. 4 Grades of soil erosion intensity in different sub-watersheds

3 结论

本研究利用 GIS 强大的空间数据管理能力,通过 USLE 模型实现了龙墩水库小流域土壤侵蚀量的预测并进行了空间分析及统计,结果表明:龙墩水库流域年均土壤侵蚀模数为 $4\ 343.46\ t/km^2$,侵蚀强度总体属中度侵蚀。整个流域微度和轻度侵蚀所占面积比例相对较大,但产生的侵蚀量较小;极强度和剧烈侵蚀虽然所占面积较小,但却产生了大部分的侵蚀量,两者所占侵蚀量比例之和超过了 68%,因此对土壤侵蚀控制的重心应该是在高强度侵蚀等级。

从土地利用方式来看,不管是土壤侵蚀模数还是侵蚀量,旱田都是最大,是该流域土壤侵蚀的主要来源,而林地的侵蚀量相对较小,仅为旱田的 5%。草地和旱地的高强度侵蚀等级产生了较多的侵蚀量,而水田和林地的侵蚀量还主要来自较低侵蚀等级。旱田由于耕作强度较大,植被覆盖率低等原因,更容易产生侵蚀,应该重点关注。

从子流域来看,13 个子流域中,子流域 4、5、10 土壤侵蚀模数较大,为流域内土壤侵蚀的关键源区,子流域 10 侵蚀模数和侵蚀量都比较大,应该重点关注,主要是因为这些子流域内大部分是旱田;而子流域 1、9 和 12 由于侵蚀总量较大,也应该保持一定的关注。所有子流域土壤侵蚀量都主要来自高强度侵蚀等级,其中以剧烈侵蚀为主。通过分区可以更加明确地了解区域侵蚀状况,便于后期的监管和防治。

参考文献:

[1] Wang X, Hao F H, Cheng H G, et al. Estimating non-point source pollutant loads for the large-scale basin of the Yangtze River in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 63(5): 1 079-1 092

[2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses : A guide to conservation planning[M]. Department of Agriculture, Agricultural Handbook, No.537 Science and Education Administration, United States Department of Agriculture. 1978

[3] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation(RUSLE) [M]. USDA Agricultural Handbook, NO. 703.Agricultural Research Service. United States Department of Agriculture, 1996

[4] Nearing M, Foster G, Lane L, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5): 1 587-1 593

[5] Warwade P, Hardaha M K, Kumar D, et al. Estimation of soil erosion and crop suitability for a watershed through remote sensing and GIS Approach[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2014, 84(1): 18-23

[6] Pacheco F a L, Varandas S G P, Fernandes L F S, et al. Soil losses in rural watersheds with environmental land use conflicts[J]. Science of the Total Environment, 2014, 485: 110-120

[7] 戴露莹, 王飞儿, 俞洁. 基于 GIS 的东苕溪典型小流域土壤侵蚀风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9): 1 777-1 784

[8] 齐述华, 蒋梅鑫, 于秀波. 基于遥感和 USLE 模型评价 1995—2005 年江西土壤侵蚀[J]. 中国环境科学, 2011, 31(7): 1 197-1 203

[9] 徐天蜀, 彭世揆, 岳彩荣. 基于 GIS 的小流域土壤侵蚀评价研究 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2002, 26(4): 43-46

[10] 黄金良, 洪华生, 张珞平, 等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 75-79

[11] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 24-34

[12] 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 基于 GIS 的小流域养分流失预测[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 837-844

[13] Wischmeier W, Johnson C, Cross B. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26(5): 189-193

[14] Wischmeier W H. Use and misuse of universal soil loss equation[J]. Journal of Soil and Conservation, 1976, 31(1): 5-9

[15] 黄河水利委员会宣传出版中心译拉尔(Lal.R) 主编. 土壤侵蚀研究方法[M]. 北京: 科学出版社. 1991: 96-100

[16] 姜小三潘, 杨林章, 卜兆宏. 土壤可蚀性 K 值的计算和 K 值图的制作方法研究[J]. 土壤, 2004, 36(2): 177-180

[17] Shi Z H, Cai C F, Ding S W, et al. Soil conservation planning at the small watershed level using rusle with GIS: A case study in the Three Gorge area of China [J]. Catena, 2004, 55(1): 33-48

[18] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26(5): 189-193

- [19] 梁音, 史学正. 长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性 K 值研究[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 47-52
- [20] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. Transactions of the Asae, 1984, 27(1): 129-144
- [21] 张金池, 李海东, 林杰, 等. 基于小流域尺度的土壤可蚀性 K 值空间变异[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2 199-2 206
- [22] 曹祥会, 龙怀玉, 雷秋良, 等. 河北省表层土壤可侵蚀性 K 值评估与分析[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1 192-1 198
- [23] 杨萍, 胡续礼, 姜小三, 等. 小流域尺度土壤可蚀性(K 值)的变异及不同采样密度对其估值精度的影响[J]. 水土保持通报, 2006, 26(6): 35-39
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[J]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [25] 傅世锋, 查轩. 基于 GIS 和 USLE 的东圳库区土壤侵蚀量预测研究[J]. 地球信息科学, 2008(3): 390-395
- [26] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1989, 32(1): 1 571-1 576
- [27] 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): 1 835-1 840
- [28] 洪华生, 杨远, 黄金良. 基于 GIS 和 USLE 的下庄小流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2005, 44(05): 675-679
- [29] 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
- [30] 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
- [31] 倪九派, 袁道先, 谢德体, 等. 基于 GIS 的岩溶槽谷区小流域土壤侵蚀量估算[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2): 217-225
- [32] 刘宝元. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001
- [33] S1190-2007, 土壤侵蚀分类分级标准(S)
- [34] 郭翔, 杜蕴慧, 刘孝富, 等. 东江湖流域农业面源污染负荷研究[J]. 环境工程技术学报, 2013, 3(4): 350-358
- [35] 张淑花, 周利军, 张雪萍. 基于 RUSLE 和 GIS 的绥化市土壤侵蚀评估[J]. 土壤通报, 2011(6): 1 472-1 475
- [36] 刘晓南, 吴志峰, 程炯, 等. 珠江三角洲典型流域颗粒态氮磷负荷估算研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1 432-1 436

Evaluation of Soil Erosion in Longdun Reservoir Watershed Based on GIS and USLE Model

CHEN Yudong, CHEN Mei, SUN Xu, LIU Chenwei, ZHANG Longjiang, SU Lianghu*

(Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: Universal Soil Loss Equation (USLE) model and GIS were used to evaluate soil erosion in Longdun Reservoir watershed of Nanjing. The results showed that Longdun Reservoir watershed was moderately eroded, and the average soil erosion modulus was $4\ 343.46\ t/km^2$. More than 63% of the watershed area was at the level of micro or slight erosion. The watershed area with severe erosion was very small, but it contributed to more than 70% of soil erosion amount. Soil erosion in this watershed varied with land use types, and the annual average soil erosion modulus followed the order: upland field > grass > paddy field > forest land, and the soil erosion amount followed the order: upland field > paddy field > grass > forest land. The watershed was divided into 13 sub-watersheds by GIS. The sub-watersheds 4, 5 and 10 were the areas with large soil erosion modulus, and the more attentions need to be paid to the sub-watershed 10 because of its large soil erosion modulus and soil erosion amount. The sub-watersheds 1, 9 and 12 should also be taken care of due to their large soil erosion amounts. Soil erosion amount in all sub-watersheds mainly came from the areas with high erosion grades and severe erosion. Therefore, the more attentions should be paid to the areas with high erosion potentials when the control measures are taken to inhibit soil erosion in future.

Key words: Geographic Information System(GIS); Universal Soil Loss Equation (USLE); Soil erosion; Small watershed