

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.03.009

引用格式:何清,魏路,肖永红.基于多源数据的土壤侵蚀时空变化分析——以安徽省宿松县为例[J].华东地质,2023,44(3):333-344.(HE Q, WEI L, XIAO Y H. Spatial-temporal variation analysis of soil erosion based on multi-source data—A case study of Susong County, Anhui Province[J]. East China Geology, 2023, 44(3):333-344.)

基于多源数据的土壤侵蚀时空变化分析 ——以安徽省宿松县为例

何清,魏路,肖永红

(安徽省地质环境监测总站,安徽 合肥 230001)

摘要: 基于地理信息系统(GIS)技术和土壤流失方程(RUSLE)模型,文章分析宿松县 2015—2019 年土壤侵蚀时空变化特征,探讨土壤侵蚀影响因子。结果表明:①研究区 2015 年土壤侵蚀强度为 $612.53 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,土壤侵蚀总量为 $1\,339\,078.87 \text{ t/a}$,土壤侵蚀整体呈现出西北强、中部及南部弱的空间分布格局;②土壤侵蚀随坡度变化并不明显,大多集中在 $0\sim 15^\circ$ 坡度带,以微度、轻度和中度为主,东坡侵蚀面积最大,其次为西坡;③在不同土壤类型中,侵蚀面积最大的为棕红壤,其次为灰潮土;在不同土地利用类型中,土壤侵蚀面积最大的为耕地,其次为水域,再次为林地;④2015—2016 年,侵蚀总量增加,土壤侵蚀强度不断提高,中度以上侵蚀占比较大,2017 年之后,土壤侵蚀总量逐年减少,剧烈侵蚀和极强度侵蚀区域逐渐向中度侵蚀和轻度侵蚀转变。研究表明,降水、植被覆盖、地形和人类活动的干扰均对土壤侵蚀变化造成影响。

关键词: GIS;RUSLE 模型;土壤侵蚀;安徽省宿松县

中图分类号: P66; X833

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2023)03-333-12

土地资源是人类赖以生存发展的基石,近年来随着社会的飞速发展,各种环境问题逐渐暴露出来,其中土壤侵蚀是直接威胁人类未来可持续发展的恶性因子之一^[1]。土壤侵蚀不仅会导致土壤结构受损、农作物减产、滑坡泥石流等自然灾害的发生,同时直接制约区域经济发展^[2]。因此,深入开展土壤侵蚀的时空定量分析研究,有利于决策部门科学制定区域水土保护措施,减缓土壤侵蚀给生态环境带来的威胁。

目前,野外调研、物理过程模型及经验统计模型等是研究土壤侵蚀时空特征的主要方法。一方面,结合遥感数据、调研及地形数据,根据土壤侵蚀类型与强度的先验规则,可获取土壤侵蚀的时空特征^[3-5]。例如,陈少辉^[6]基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据和 TM 影像,提出土壤侵蚀强度快速测算法,使用

多分辨率图像融合技术生成土壤侵蚀融合图。但此类方法受限于研究人员的先验知识和经验,物理模型需要更多参数调整,难以实现广泛应用。另一方面,通用土壤流失方程(USLE)模型与修正通用土壤流失方程(RUSLE)模型应用于土壤侵蚀的研究较多^[7-11],参数简单易获取,能够更好地结合地理信息系统和遥感探究土壤侵蚀时空分布特征。例如,陈红等^[12]基于 RUSLE 模型对安徽省淮河流域土壤侵蚀及其养分流失空间分布的研究,分析了土壤侵蚀强度与坡度、海拔等地形因子的关系;刘天可等^[13]以河南省黄河流域作为研究区域,利用 RUSLE 模型进行了土壤侵蚀空间特征研究。对区域土壤侵蚀和水土流失的定量研究,大多基于 RUSLE 作为土壤侵蚀研究模型,在一定条件下计算出单位时间面积上的水土流失量,是区域土壤侵蚀风险检测和评估的有效手

* 收稿日期:2023-03-14 修订日期:2023-05-19 责任编辑:叶海敏

基金项目: 中国地质调查局“全国地质资源环境承载力评价与监测预警(编号:WT2018175B)”项目资助。

第一作者简介: 何清,1967 年生,男,高级工程师,本科,主要从事地质环境监测、地质测绘等技术工作。Email: heq@mail.ahdkj.gov.cn。

通信作者简介: 魏路,1983 年生,男,高级工程师,博士,主要从事水文地质、工程地质及环境地质调查与研究工作。Email: weilu101@126.com。

段^[14-15]。此外,土壤侵蚀随着时间在不断变化,但目前对于土壤侵蚀的研究主要集中在单一年份或长间隔年份的时序上,关于连续时间序列的土壤侵蚀及相关影响因素的研究则关注较少,因此,研究土壤侵蚀及相关影响因素,有助于进一步认识自然因素与人类活动的作用下的土壤侵蚀定量归因,为空间规划和生态修复提供参考。

安徽省宿松县地处大别山南麓,属于亚热带湿润季风气候典型山区,地理位置特殊,生态环境敏感脆弱。该地区城镇化以及交通建设发展迅速,局部地区采用不合理的生产方式不可避免地破坏地表植被,加之气候变化和人类活动的干扰,生态系统的基本结构和功能遭到破坏,导致水土流失加剧。为此,本文基于 RUSLE 模型,运用 GIS 分析技术,对宿松县进行土壤侵蚀时空分析,旨在探讨各因子土壤侵蚀空间分布规律及土壤侵蚀作用机理,为今后宿松县土壤侵蚀检测、治理、预测和水土保持方案制定等提供科学依据。

1 研究区概况

宿松县位于安徽省西南边陲,皖、鄂、赣三省的交界处、长江下游之北岸(115°52′~116°34′40″E、29°47′20″~30°25′30″N,图1)。东与望江县湖面毗连,南滨长江与江西省彭泽县隔江相望,西和湖北省黄梅县接壤,北连太湖县,县域面积 2 393.53 km²。区内地貌主要受地质构造影响,形成了由西北向东南地形逐渐减缓,山地、丘陵、平原依次排列的基本格局。西北部为山区,海拔 800 m 以上的山峰有 8 座,最高峰罗汉尖海拔 1 015.5 m;中部为丘陵区,面积为 854 km²。研究区属长江流域水系,总体特征为西北部河流多而长,东南部河流少而短。研究区位于北亚热带湿润气候区,四季分明,日照充足,热量充沛,雨量充沛,无霜期长,年平均气温 16.6℃,年平均降水量 1 307.2 mm,山区降水量大于丘陵平原。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本次研究使用数据包括:①宿松县 DEM 数据,类型为 ASTGTM30m,来源于地理空间数据云官方网站;②宿松县土壤图,来源于世界土壤数据库^[16],空间分辨率是 1 km,其中包含了土壤深度、有

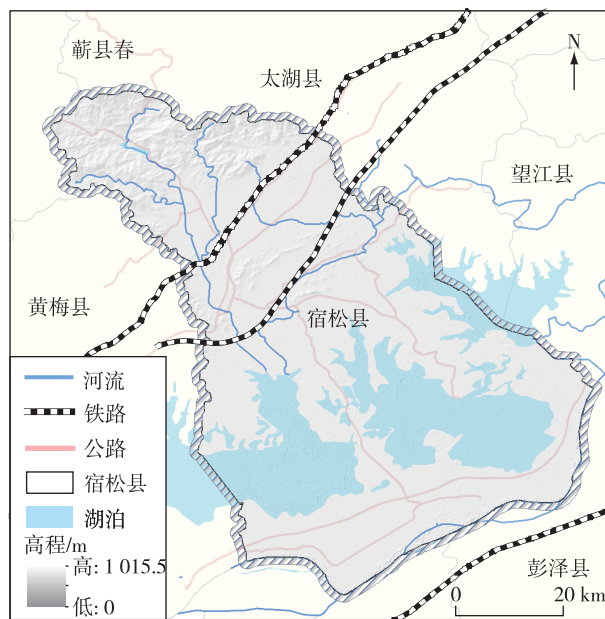


图1 宿松县交通位置图

Fig. 1 Traffic location of Susong County

机质以及各种土壤微粒含量数据;③中国气象局安徽省气象观测点月降水量数据,时间尺度为 2015—2019 年,该数据来自中国气象局;④ Landsat 8 数据,来源于 USGS;⑤宿松县土地利用现状图,来源于清华大学数据网^[17]。

2.2 土壤侵蚀模型

采用 RUSLE 模型和 GIS 技术进行宿松县土壤侵蚀空间分布计算^[18-20],公式为

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

式中: A 为土壤侵蚀量, $t/(hm^2 \cdot a)$; R 为降雨侵蚀因子, $(MJ \cdot MM)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子, $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(MJ \cdot hm^2 \cdot m)$; LS 为坡长坡度因子,无量纲; C 因子为植被覆盖与管理因子,无量纲; P 因子为水土保持措施因子,无量纲。

2.3 RUSLE 模型因子计算

2.3.1 降雨侵蚀力因子(R)

降雨侵蚀力因子是导致土壤侵蚀的主要因素,本文采用的是吴素业^[21]在大别山地区研究中所提出的算法。基于安徽省大别山区降水量,通过 MATLAB 进行回归分析计算,建立 R 值简便算法为

$$R = \sum_{i=1}^{12} 0.0179 \times P_i^{1.592}, \quad (2)$$

式中: P_i 为某月降水总量, mm。

通过公式(2)利用 Python 进行编程,得到安徽省各个市县的 R 值结果,裁剪处理获得宿松县的降雨侵蚀力数据。 R 值的空间分布如图 2(a)所示,宏观上研究区 R 值呈现东南高、西北低。

2.3.2 土壤可蚀性因子(K)

土壤可蚀性因子是刻画土壤侵蚀敏感度的指

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[0.0256 \text{SAN} \left(1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \times \left(1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95)} \right) \left(1.0 - \frac{0.7\text{SN}}{\text{SN} + \exp(22.9\text{SN} - 5.51)} \right), \quad (3)$$

式中:SAN 是砂粒含量; C 是有机质含量;CLA 是黏粒含量;SIL 是粉粒含量; $\text{SN} = 1 - \text{SAN}/100$ 。

土壤可蚀性因子空间分布情况如图 2(b)所示。

2.3.3 坡度因子(S)和坡长因子(L)

影响土壤侵蚀的基本地理要素就是地形^[12],由于缺乏实测值,本文提取了安徽省大范围 DEM 数据进行坡长因子(S)和坡度因子(L)的估计和测算。对于 S 因子,依据参考文献^[19,21]中霍山、岳西、歙县、广德 4 个水土保持试验站实测资料,根据 MC-COOL D K 等^[24]的研究公式计算缓坡($<14^\circ$)区域的 S 因子,根据 LIU B Y 等^[25]的研究公式计算陡坡($\geq 14^\circ$)区域的 S 因子,分析得到分段坡度对土壤侵蚀的影响,公式为

$$\begin{cases} S = 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ S = 16.8 \sin \theta - 0.05 & 5^\circ \leq \theta < 14^\circ \\ S = 21.93 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 14^\circ \end{cases}, \quad (4)$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度。

对于 L 因子,根据 WISCHMEIER W H 等^[26]的研究公式计算,在其他条件相同的情况下,计算特定坡长的土壤侵蚀与 22.1 m 坡长的土壤侵蚀之比,在陡坡上采用 RUSLE 中的坡长指数 m 取 0.3,本模型中的坡长计算公式为

$$L = (Y/22.1)^{0.3}, \quad (5)$$

式中: L 为坡长因子; Y 为坡长, m。研究区的 L 值、 S 值空间分布如图 2(c)所示,高值区基本分布在宿松县西北山区。

2.3.4 植被覆盖与管理因子(C)

根据修正后的 RUSLE 方程, C 表示在同等条件下植被覆盖或田间管理下的土壤流失量与净耕地下土壤流失量之比,取值为 0~1,比值越小表示植被对土壤侵蚀的抑制作用越大。本文利用 ENVI 对 Landsat8 OLI 数据进行预处理^[27],将预处理后

标,不同土壤类型有不同的 K 值。 K 值的估计方法因地区差异而各不相同^[22]。本文采用较为常用的一种方法进行估算,即 WILLIAMS J R^[23] 在 EPIC 模型中使用的方法。

利用最新土壤调查数据、第二次土壤普查中有有机质和颗粒数据进行 K 值估算,公式为

的 Band5 和 Band4 地表反射率数据分别输出为 TIFF 格式,导入 ArcGIS 10.2 中,使用掩膜提取工具将宿松县域提取出来;在栅格计算器中,输入公式计算出 NDVI,并用像元二分模型估算植被覆盖度^[25],从 NDVI 频率累积表中分别得到频率为 2.5%、97.5% 的 NDVI 值,分别作为 $\text{NDVI}_{\min}$ 、 $\text{NDVI}_{\max}$ 值。去除异常值后,确定 0.052 706 为裸地 NDVI 值,0.891 294 为全植被覆盖 NDVI 值。在 ArcGIS 中计算植被覆盖度,在栅格计算器中输入的植被覆盖度计算公式为

$$f = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}). \quad (6)$$

由于 C 值和植被覆盖度之间有较强的相关性,本文采用徐勤学等^[28]方法计算 C 值,公式为

$$C = \begin{cases} 1 & f = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f & 0 < f \leq 78.3\% \\ 0 & f > 78.3\% \end{cases}, \quad (7)$$

式中: f 为植被覆盖度。

C 值的空间分布如图 2(d)所示。

2.3.5 水土保持措施因子(P)

参考相关水土保持措施因子研究^[12],通过土地利用类型确定 P 值,其取值为 0~1, P 值越小,表明水土保持力越强。宿松县 P 值数据见表 1, P 值的空间分布见图 2(e)。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀特征分析

基于(1)~(7)公式进行计算,得到 RUSLE 模型的各个因子及土壤侵蚀强度图(图 2(f))。侵蚀强度分级是根据《SL190—2007 土壤侵蚀分类分级标准》^[29](表 2),将宿松县 2015—2019 年的土壤侵蚀量划分为 6 个侵蚀等级。

表 1 土地利用类型 *P* 值参考表^[12]
Table 1 *P* value reference of land use types^[12]

	有林地	灌木林	疏林地	其他林地	草地	水田	旱地	水域	建设用地	未利用地
<i>P</i>	1.00	1.00	1.00	0.70	1.00	0.15	0.40	0	0	1.00

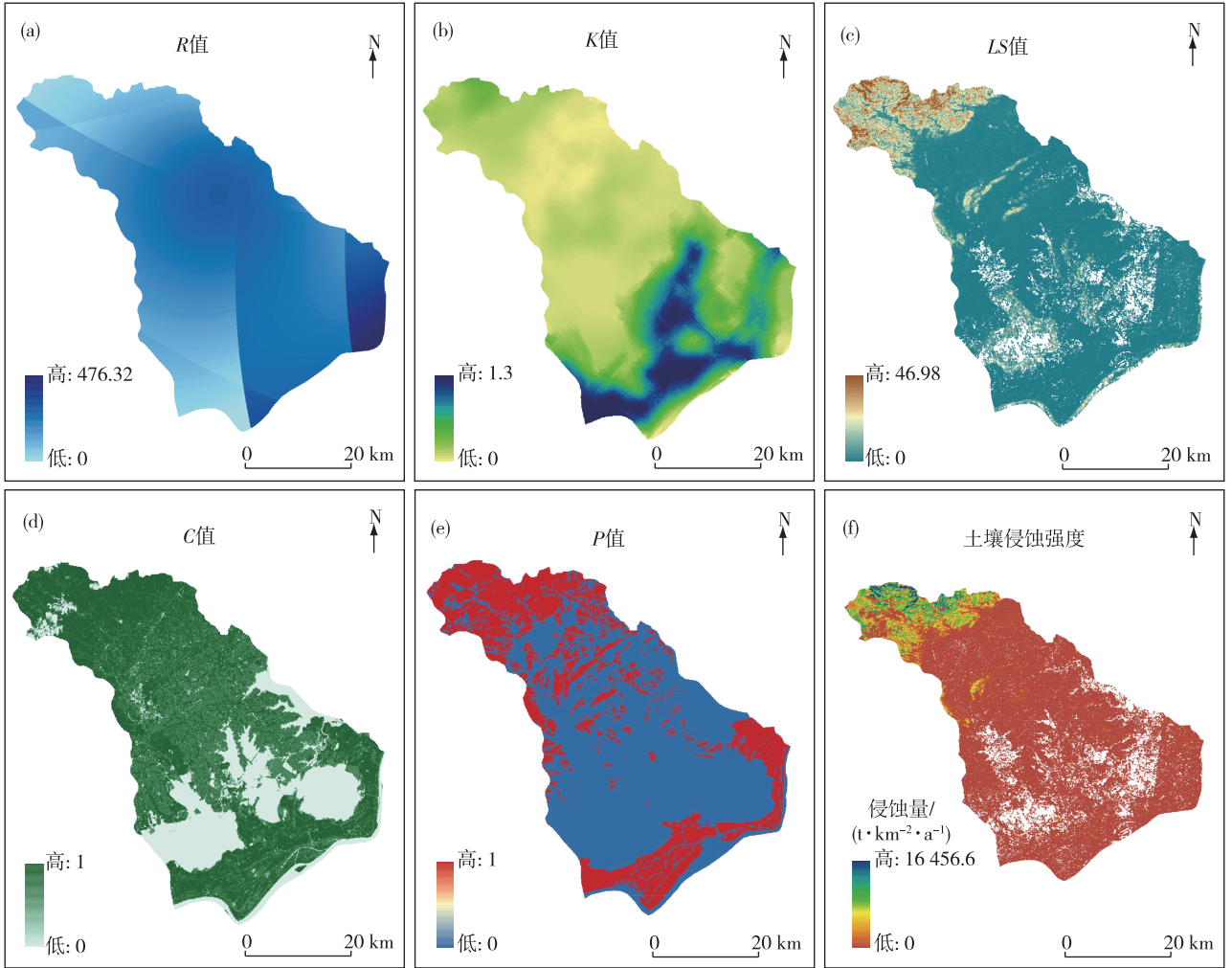


图 2 宿松县土壤侵蚀因子分布及土壤侵蚀强度图
Fig. 2 Distribution of RUSLE factors and soil erosion intensity in Susong County

表 2 土壤侵蚀强度分级^[29]
Table 2 Soil erosion intensity levels^[29]

级别	平均侵蚀量/($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)
微度侵蚀	<500
轻度侵蚀	500~2 500
中度侵蚀	2 500~5 000
强度侵蚀	5 000~8 000
极强度侵蚀	8 000~15 000
剧烈侵蚀	$>15\ 000$

根据土壤侵蚀模型进行计算,得到研究区 2015 年土壤侵蚀量 *A*。由表 3 可知,宿松县平均土壤侵蚀强度为 $612.53\ t/(km^2 \cdot a)$,土壤侵蚀总量为 $1\ 339\ 078.87\ t/a$,土壤侵蚀面积为 $1\ 964.17\ km^2$ 。其中,微度侵蚀面积有 $1\ 685.84\ km^2$,面积占比最大,占宿松县土壤侵蚀面积 85.83% ;侵蚀面积次之的是轻度侵蚀,面积是 $112.69\ km^2$,占比为 5.74% ,总计微度和轻度侵蚀面积占比为 91.57% ;极强度侵蚀面积仅占比 1.45% 。从侵蚀量来看,宿松县主

要侵蚀形式为中度侵蚀、强度侵蚀和极强度侵蚀,其中强度侵蚀面积最大,侵蚀量为 401 402.94 t/a,占宿松县总侵蚀量的 29.98%;其次为极强度侵蚀,侵蚀量为 274 208.04 t/a,占比为 20.48%;中度侵蚀仅次于极强度,侵蚀量为 271 511.63 t/a,占比为 20.28%。从空间分布来看,西北部山区的土壤侵蚀较为严重,微度侵蚀和轻度侵蚀分布在中部和南部的丘陵和平原区,未侵蚀区域呈现块状和点状分布在南部和东南部地区(图 3)。鉴于宿松县地貌主

要受地质构造的控制而形成地势由西北向东南逐渐降低,土壤侵蚀程度也呈由西北部向东南部逐渐降低的趋势。西北部分地区植被覆盖率较低,地表裸露面积占比较大,在雨季极易发生大面积土壤侵蚀;中部及东南部植被覆盖率较高,对降水具有较强的截留作用,能够有效地减少土壤侵蚀,因而以微度和轻度侵蚀为主。因此,受地形地貌、植被覆盖、降水以及人类活动的影响,全区土壤侵蚀分布的空间异质性较高。

表 3 2015 年宿松县侵蚀等级统计表

Table 3 Statistics of soil erosion levels in Susong County in 2015

侵蚀等级与指标	面积/km ²	面积比/%	侵蚀量/(t·a ⁻¹)	平均侵蚀量/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀量比例/%
微度: <500 t/(km ² ·a)	1 685.84	85.83	255 168.74	151.36	19.06
轻度: 500~2 500 t/(km ² ·a)	112.69	5.74	135 070.23	1 198.60	10.09
中度: 2 500~5 000 t/(km ² ·a)	73.35	3.73	271 511.63	3 701.59	20.28
强度: 5 000~8 000 t/(km ² ·a)	63.64	3.24	401 402.94	6 307.40	29.98
极强度: 8 000~15 000 t/(km ² ·a)	28.54	1.45	274 208.04	9 607.85	20.48
剧烈: >15 000 t/(km ² ·a)	0.11	0.01	1 717.30	15 611.78	0.13
合计	1 964.17	100	1 339 078.87	612.53	100

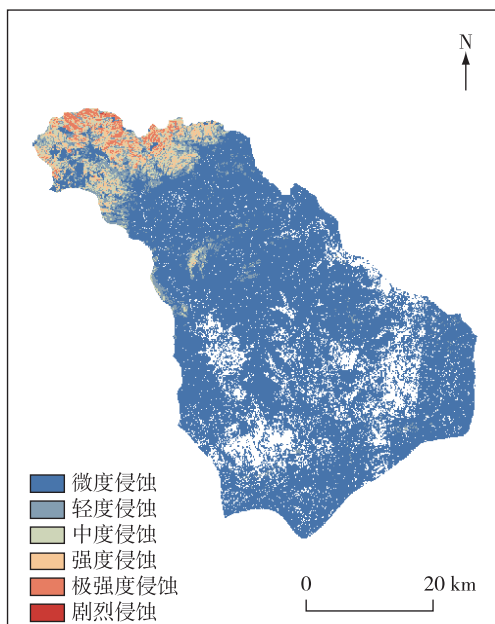


图 3 宿松县土壤侵蚀重分类强度图

Fig. 3 Reclassification of soil erosion intensity in Susong County

3.2 不同海拔土壤侵蚀特征分析

利用 DEM 数据将宿松县划分为 6 个海拔高程

带,结合分类后的 2015—2019 年土壤侵蚀量 A 进行面积制表,得到不同海拔地区土壤侵蚀的分布(表 4)。其中,海拔 0~100 m 地区的土壤侵蚀面积最大,占土壤侵蚀总面积的 81.03%,超过其他海拔地区的总量;其次是海拔 200~500 m 区域,面积占比为 6.95%;再其次为 -200~0 m 洼地区域,面积占比为 6.33%;海拔 800~1 000 m 的地区是侵蚀最微弱的地区,面积占比仅 0.20%。中度和强度土壤侵蚀主要发生在海拔 200~500 m 的区域,极强度土壤侵蚀主要发生在 500~800 m 的区域,其侵蚀带均由该区域向两侧逐渐减小。可以看出,随着海拔的不断升高,侵蚀面积在减小,但侵蚀程度在增强。鉴于海拔 100~800 m 是人口集中居住地,加上大量开垦使得耕地、林地减少,导致土壤侵蚀恶化,今后应针对此范围加强水土保持措施。

3.3 不同坡度土壤侵蚀特征分析

利用 DEM 数据生成宿松县坡面图,并结合土壤侵蚀情况进行重新分类和制表,得到了不同坡度带土壤侵蚀的分布情况(表 5)。其中,0~5°坡度带的土壤侵蚀面积最大,占总侵蚀面积的 72.60%;其次是 5°~15°坡度带,占比为 16.92%。0~15°坡度带面积共占

比 89.52%。据表 5 可知,宿松县绝大多数侵蚀为微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀,三者共占比共计 98.13%。其中,微度侵蚀占比为 88.34%,远远高于其他侵蚀等级侵蚀面积的总和;强度侵蚀占比为

1.74%,主要集中在 15°~35°坡度带;极强度侵蚀占比 0.12%,集中在 25°~45°坡度带。因此,宿松县土壤侵蚀随着坡度的变化并不明显,大多数集中在 0~15°坡度带,以微度、轻度和中度为主。

表 4 宿松县不同海拔地区土壤侵蚀面积占比统计表

Table 4 The proportion statistics of the soil-eroded area at different elevations in Susong County

高程/m	—200~0	0~100	100~200	200~500	500~800	800~1 000	合计
微度/%	6.30	79.29	1.20	1.31	0.27	0.03	88.40
轻度/%	0.03	1.66	1.46	2.03	0.31	0.04	5.52
中度/%	0	0.08	0.88	2.71	0.50	0.05	4.22
强度/%	0	0	0.04	0.89	0.74	0.06	1.73
极强度/%	0	0	0	0.01	0.10	0.01	0.12
合计/%	6.33	81.03	3.58	6.95	1.92	0.20	100

表 5 不同坡度带土壤侵蚀面积占比统计表

Table 5 The proportion statistics of soil-eroded area at different slopes

坡度/°	0~5	5~15	15~25	25~35	35~45	45~90	合计
微度/%	72.10	12.29	2.94	0.71	0.24	0.06	88.34
轻度/%	0.49	3.71	1.11	0.19	0.05	0.01	5.55
中度/%	0.01	0.88	2.89	0.43	0.03	0	4.24
强度/%	0	0.04	0.82	0.75	0.13	0	1.74
极强度/%	0	0	0.01	0.06	0.05	0	0.12
合计/%	72.60	16.92	7.77	2.14	0.49	0.07	100

3.4 不同坡向土壤侵蚀特征分析

利用 DEM 数据生成坡向图,结合计算的 2015—2019 年土壤侵蚀量进行面积制表,得到不同坡向的土壤侵蚀分布情况(表 6)。从侵蚀面积占比可以看出,侵蚀面积最大的为东坡,占比为 13.14%;其次为西坡,占比为 12.98%。其中,水平方向的侵蚀面积最

小,占比为 0.21%。坡向影响着土壤的水、热分配,从而影响植被长势^[30-32],进而导致不同坡向土壤侵蚀强度、侵蚀方式和数量存在差异。南坡方向为阳坡,土壤水分含量大,植被生长迅速,地表的植被覆盖度较高,相对于北坡的侵蚀程度低,因此坡向也是影响土壤侵蚀变化的因素之一。

表 6 不同坡向土壤侵蚀面积占比统计表

Table 6 The proportion statistics of soil-eroded area in different slope orientations

坡向	水平	北	东北	东	东南	南	西南	西	西北	合计
微度/%	0.21	10.67	10.79	11.86	11.13	10.63	10.52	11.63	10.96	88.40
轻度/%	0	0.65	0.60	0.71	0.84	0.87	0.62	0.59	0.64	5.52
中度/%	0	0.69	0.55	0.43	0.47	0.46	0.43	0.54	0.66	4.22
强度/%	0	0.36	0.23	0.14	0.14	0.15	0.14	0.21	0.34	1.73
极强度/%	0	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.12
合计/%	0.21	12.41	12.19	13.14	12.59	12.13	11.72	12.98	12.63	100

3.5 不同土壤类型土壤侵蚀特征分析

将土壤类型数据与宿松县的 2015—2019 年土壤侵蚀数据进行叠加,得到不同土壤类型的土壤侵蚀分布情况(表 7)。在所有土壤类型中,土壤侵蚀面积由大到小的依次为:棕红壤>灰潮土>水稻土>黄棕壤>红壤>黄红壤>石灰(岩)土>山原红壤>暗黄棕壤>黄褐土>暗棕壤性>潮土>河沙土,其大小与土壤内在性质、植被覆盖及坡度相关^[33]。宿松县的

土壤类型较多,棕红壤侵蚀面积最大,占总侵蚀面积的 20.52%;其次为灰潮土,占比为 18.58%,两者均分布在县域中部和东南部地区,且主要发生微度侵蚀;水稻土分布在中部地势平缓地区,其可蚀性较弱,使得土壤流失速率降低,基本上为微度侵蚀;黄棕壤的土质较为疏松,主要分布坡度较大、植被覆盖率低的西北部山区,使得西北部的土壤侵蚀程度较高,因此,西北部是宿松县重点关注的区域。

表 7 宿松县不同土壤类型的土壤侵蚀面积占比统计表

Table 7 The proportion statistics of soil-eroded area in different soil types in Susong County

土壤类型	暗黄棕壤	潮土	水稻土	石灰(岩)土	黄褐土	黄红壤	黄棕壤
微度/%	0.34	0.12	13.90	1.52	0.92	1.69	1.58
轻度/%	0.40	0	0.19	0.09	0	0.16	2.57
中度/%	0.44	0	0.04	0.02	0	0.04	2.84
强度/%	0.23	0	0	0	0	0	1.47
极强度/%	0.02	0	0	0	0	0	0.10
合计/%	1.43	0.12	14.13	1.63	0.92	1.89	8.56

土壤类型	山原红壤	河沙土	红壤	灰潮土	棕红壤	暗棕壤性	其他	合计
微度/%	1.46	0.04	5.71	18.45	18.25	0.57	23.77	88.32
轻度/%	0.12	0	0.34	0.13	1.52	0	0.05	5.58
中度/%	0	0	0.13	0	0.72	0	0.01	4.24
强度/%	0	0	0	0	0.04	0	0	1.74
极强度/%	0	0	0	0	0	0	0	0.12
合计/%	1.58	0.04	6.19	18.58	20.52	0.57	23.83	100

3.6 不同土地利用类型土壤侵蚀特征分析

将宿松县土地利用数据和土壤侵蚀重分类图相叠加,得到了不同土地利用类型的土壤侵蚀分布情况(表 8)。在各类土地利用类型中,耕地的土壤侵蚀面积最大,占总侵蚀面积的 54.29%;其次是水域,占比 24.99%;第三是林地,占比 17.31%,三者共计占比 96.6%。草地和城镇用地面积占比仅 3.41%。这说明不同类型土壤侵蚀面积的大小顺序与其陆地面积占比基本一致。

3.7 不同年份土壤侵蚀变化分析

因缺少其他因子的不同年份数据,且已知降雨侵蚀力是影响土壤侵蚀的主导因素^[34-35],因此,本文利用 2015—2019 年降水量数据,结合其他因子数据研究不同年份的土壤侵蚀变化情况。首先加载 2015—2019 年数据进行数据投影定义,选择亚洲北

表 8 宿松县不同土地利用的土壤侵蚀面积占比统计表

Table 8 The proportion statistics of soil-eroded area of different land uses in Susong County

土地利用类型	耕地	林地	城镇用地	水域	草地
微度/%	53.41	6.59	0.61	24.99	2.80
轻度/%	0.86	4.64	0	0.08	0
中度/%	0.02	4.22	0	0	0
强度/%	0	1.74	0	0	0
极强度/%	0	0.12	0	0	0
合计/%	54.29	17.31	0.61	24.99	2.80

部阿尔伯斯等积圆锥投影(Asia_North_Albers_Equal_Area_Conic)自定义第一标准纬线为 25°、第二标准纬线为 47°的宿松县 Albers 投影,与 Excel 表关联得到求取后的 R 值,然后经 IDW 插值和裁剪等操作,得到不同年份的宿松县降水量数据。选取 K 、 LS 、 P 、 C 因

子数据与 2015—2019 年的 R 数据进行计算,得到

2015—2019 年的土壤侵蚀量数据(图 4)。

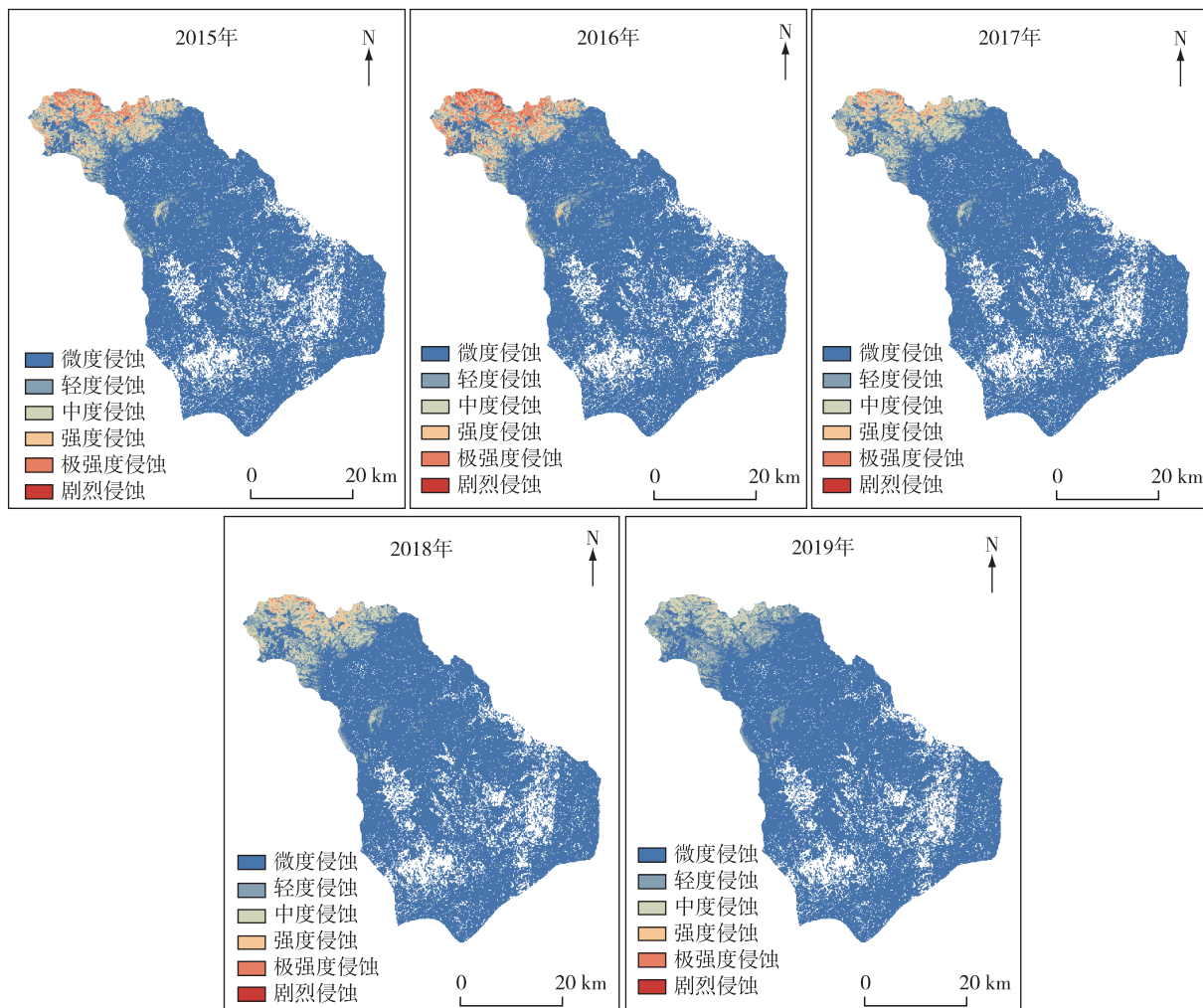


图 4 宿松县 2015—2019 年土壤侵蚀强度等级

Fig. 4 Soil erosion levels in Susong County from 2015 to 2019

将不同年份土壤侵蚀量数据进行区域统计,得到侵蚀等级面积和侵蚀量占比(表 9,图 4)。2015—2019 年宿松县土壤侵蚀强度空间分布格局均以微度侵蚀为主,侵蚀强度由南至北逐渐加剧。中度及强度侵蚀主要分布在西北部的山区,微度侵蚀主要分布在中部及南部的平原。因此,宿松县的土壤侵蚀空间格局主要受地形因素控制。此外,宿松县降水量北少南多的空间格局,一定程度上也影响了土壤侵蚀的空间分布格局。

2015—2019 年宿松县土壤侵蚀总量呈现先增加后减少的趋势,其中微度、轻度和中度侵蚀量先减少后增加,强度、极强度和剧烈侵蚀量持续减少。2015 年宿松县土壤以强度、极强度和中度侵蚀为

主,其侵蚀量分别占 29.98%、20.48%和 20.28%。2016 年转为以极强度和强度侵蚀为主。2019 年转为以中度和微度侵蚀为主,二者之和占比 $>70\%$ 。结合已有研究^[36-37],表明降水、植被覆盖、地形和人类活动的干扰均对土壤侵蚀变化造成影响。其中,人类活动引起的水土资源的不合理开发利用会加剧土壤侵蚀,但是近年来在生态文明政策的支持下,人类的水土保持意识不断加强,遏制了水土流失和生态恶化的趋势,特别是退耕还湖、退耕还林政策以及农业结构调整等都为土壤侵蚀的减缓做出了贡献。2015 年国务院批复的《全国水土保持规划(2015—2030 年)》和 2018 年《全国坡耕地水土流失综合治理“十三五”专项建设方案》将宿松县纳入

了治理范围,这些政策都为该县土壤侵蚀减缓提供了保障。

表 9 2015—2019 年宿松县土壤侵蚀量变化及比例

Table 9 Quantitative change and proportion of soil erosion in Susong County from 2015 to 2019

年份	侵蚀等级	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀	总计
2015 年	侵蚀量/(t·a ⁻¹)	255 168.74	135 070.23	271 511.63	401 402.94	274 208.04	1717.30	1 339 078.87
	侵蚀量比例/%	19.06	10.09	20.28	29.98	20.48	0.13	
2016 年	侵蚀量/(t·a ⁻¹)	250 909.47	148 830.16	227 758.83	400 393.75	527 759.20	36 843.80	1 592 495.22
	侵蚀量比例/%	15.76	9.35	14.30	25.14	33.14	2.31	
2017 年	侵蚀量/(t·a ⁻¹)	258 916.42	135 597.62	326 406.21	291 086.51	58 703.96	—	1 070 710.71
	侵蚀量比例/%	24.18	12.66	30.49	27.19	5.48	—	
2018 年	侵蚀量/(t·a ⁻¹)	260 301.36	137 779.07	338 473.39	223 534.26	24 884.33	—	984 972.41
	侵蚀量比例/%	26.43	13.99	34.36	22.69	2.53	—	
2019 年	侵蚀量/(t·a ⁻¹)	264 158.01	172 490.53	267 069.72	18 165.31	—	—	721 883.57
	侵蚀量比例/%	36.59	23.89	37.00	2.52	—	—	

4 结论

本文基于 GIS 技术和 RUSLE 模型,结合遥感影像及相关因子数据,通过空间分析和数理统计等方法,获取宿松县的土壤侵蚀强度时空分布及影响因素,得到如下结论:

(1)宿松县土壤侵蚀强度以微度和中度侵蚀为主,强度由南向北逐渐加剧。西北山区的土壤侵蚀变化较大,中部和南部平原地区的土壤侵蚀变化较小。西北山区坡度较大,植被覆盖率低,土壤土质疏松;中部和南部地势平缓,土壤可蚀性较弱,土壤流失速率较低,使得宿松县的土壤侵蚀强度形成西北强、中部及南部弱的空间分布格局。

(2)宿松县属于南方红壤丘陵区,岩石解体,碎裂和砂化速度快,地表依附能力低,易被冲刷。在土壤类型上,棕红壤的侵蚀面积最大,其次为灰潮土,两者均分布在宿松中部和东南部地区,主要发生微度侵蚀。在土地利用类型上,耕地的土壤侵蚀面积最大,草地和城镇用地占比最小。植被覆盖会减缓水土流失,城镇地面硬化,不易被侵蚀。

(3)2015—2019 年宿松县土壤侵蚀强度呈现先增加后减少的趋势,其中 2015—2016 年土壤侵蚀总量升高,2017 年后整体侵蚀程度逐渐降低,极强度和强度侵蚀逐渐转向中度和微度侵蚀。近年来在生态文明政策的支持下,人们的水土保持意识不断加强,土壤侵蚀状况得到改善。

参考文献

- [1] 罗娅,杨胜天,刘晓燕,等. 黄河河口镇—潼关区间 1998—2010 年土地利用变化特征[J]. 地理学报, 2014,69(1):42-53.
LUO Y, YANG S T, LIU X Y, et al. Land use change in the reach from Hekouzhen to Tongguan of the Yellow River during 1998—2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(1):42-53.
- [2] 张芷温. 基于 CSLE 模型的沂蒙山区土壤保持量与功能动态研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
ZHANG Z W. Dynamic study of soil conservation quantity and function based on CSLE model in Yimeng Mountain area [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020.
- [3] 南秋菊,华珞. 国内外土壤侵蚀研究进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2003,24(2):86-95.
NAN Q J, HUA L. Recent progress of the soil erosion in the world [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2003,24(2): 86-95.
- [4] 杨勤科,李锐,曹明明. 区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J]. 地球科学进展, 2006,21(8):849-856.
YANG Q K, LI R, CAO M M. Advances of quantitative assessment on regional soil erosion[J]. Advances in Earth Science, 2006,21(8): 849-856.
- [5] 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):28-38.
ZHAO M S, LI D C, ZHANG G X, et al. Evaluation

- of soil erosion and soil nutrient loss in Anhui province based on RUSLE model[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (1): 28-38.
- [6] 陈少辉. 遥感影像融合在土壤侵蚀分析中的模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- CHEN S H. Model study of remote sensing image fusion in soil erosion analysis[D]. Wuhan: University of Science and Technology, 2007.
- [7] 蒋志坚. 长江流域(安徽段)土壤侵蚀特征分析[J]. *安徽地质*, 2015, 25(3): 231-233.
- JIANG Z J. Characteristics of soil erosion in the Yangtze River basin(Anhui section) [J]. *Geology of Anhui*, 2015, 25 (3): 231-233.
- [8] 司家济. 基于 ArcGIS 和 USLE 模型的颍河流域土壤侵蚀研究[J]. *人民珠江*, 2020, 41(6): 93-98.
- SI J J. Study on soil erosion in the Yinghe River Basin based on ArcGIS and USLE model[J]. *Pearl River*, 2020, 41 (6): 93-98.
- [9] 张雁, 唐丽霞, 谭伟. 基于 GIS 的喀斯特地区土壤侵蚀度分析——以贵阳市花溪水库流域花溪区范围为例[J]. *山地农业生物学报*, 2013, 32(6): 522-527.
- ZHANG Y, TANG L X, TAN W. Estimation of soil erosion in karst region area based on GIS—A case study of Huaxi reservoir watershed in Huaxi borough, Guiyang City[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2013, 32 (6): 522-527.
- [10] 陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J]. *资源科学*, 2014, 36(6): 1288-1297.
- CHEN S X, YANG X H, XIAO L L, et al. Study on soil erosion in the Southern hillside area of China based on RUSLE model[J]. *Resource Science*, 2014, 36 (6): 1288-1297.
- [11] 钱庆欢, 白晓永, 周德全, 等. 基于 RUSLE 模型的北盘江流域土壤侵蚀研究[J]. *人民珠江*, 2018, 39(2): 19-25.
- QIAN Q H, BAI X Y, ZHOU D Q, et al. Study on soil erosion in Beipanjiang River basin based on the RUSLE model[J]. *Pearl River*, 2018, 39 (2): 19-25.
- [12] 陈红, 江旭聪, 任磊, 等. 基于 RUSLE 模型的淮河流域土壤侵蚀定量评价[J]. *土壤通报*, 2021, 52(1): 165-176.
- CHEN H, JIANG X C, REN L, et al. Quantitative evaluation of soil erosion in the Huaihe River basin based on RUSLE model[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52 (1): 165-176.
- [13] 刘天可, 袁彩凤. 基于 RUSLE 模型的河南省黄河流域土壤侵蚀研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(3): 7-13.
- LIU T K, YUAN C F. Study on soil erosion in the Yellow River Basin of Henan Province based on RUSLE model[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2020, 41 (3): 7-13.
- [14] 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 S, LI D C, ZHANG G L. Dynamic evolution and prediction of soil erosion in Anhui Province from 1980 to 2010 [J]. *Soil*, 2016, 48 (3): 588-596.
- [15] 赵明松, 李德成, 程先富, 等. 皖西大别山区土壤侵蚀空间分布特征及与地形的关系[J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(3): 265-270.
- ZHAO M S, LI D C, CHENG X F, et al. Spatial characteristics soil erosion and its relationship to topography in Dabie Mountains of west province [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 40 (3): 265-270.
- [16] 孟现勇, 王浩. 基于世界土壤数据库(HWSD)土壤数据集(v1.2) [M]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2018.
- MENG X Y, WANG H. Soil map based Harmonized World Soil Database (v1.2) [M]. Beijing: National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2018.
- [17] GONG P, LIU H, ZHANG M, et al. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(6): 370-373.
- [18] 怡凯, 王诗阳, 王雪, 等. 基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀时空分异特征分析——以辽宁省朝阳市为例[J]. *地理科学*, 2015, 35(3): 365-372.
- YI K, WANG S Y, WANG X, et al. The characteristics of spatial-temporal differentiation of soil erosion based on RUSLE model: A case study of Chaoyang City, Liaoning Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35 (3): 365-372.
- [19] 彭建, 李丹丹, 张玉清. 基于 GIS 和 RUSLE 的滇西北山区土壤侵蚀空间特征分析——以云南省丽江市为例[J]. *山地学报*, 2007, 25(5): 548-556.
- PENG J, LI D D, ZHANG Y Q. Analysis of spatial characteristics of soil erosion in mountain areas of

- northwestern Yunnan based on GIS and RUSLE[J]. Mountain Research, 2007, 25(5): 548-556.
- [20] 武翼飞,陈国光.基于 InVEST 模型的矿区土壤保持功能评估——以银顶格矿区为例[J]. 华东地质, 2022, 43(2):184-195.
- WU Y F, CHEN G G. Assessment on soil conservation service based on InVEST model—A case study of Yindingge mining area [J]. East China Geology, 2022, 43(2):184-195.
- [21] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力简化算法与时空分布规律[J]. 中国水土保持, 1994(4):12-13.
- WU S Y. The simplification algorithm and the law of space-time distribution of rainfall erosion in the Dabie Mountain area of Anhui Province[J]. Soil and Water Conservation in China, 1994 (4): 12-13.
- [22] 夏岑岭. 皖南地区降雨侵蚀力研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1998(6):40-43.
- XIA C L. Study on rainfall erosion in Wannan region [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 1998 (6): 40-43.
- [23] WILLIAMS J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation [J]. Technical Bulletin United States Department of Agriculture, 1990, 4(4):206-207.
- [24] MCCOOL D K, BROWNE L C, FOSTER G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5):1387-1396.
- [25] 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.
- [26] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses—A guide to conservation planning [J]. United States Department of Agriculture, Agriculture handbook (USA), 1978.
- [27] 陈丽萍. 基于 Landsat 数据的森林碳储量与土壤侵蚀功能研究[D]. 北京:北京林业大学, 2019.
- CHEN L P. Study on forest carbon storage and soil erosion function based on Landsat data [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [28] 徐勤学,李春茂,李朝霞,等.三峡库区紫色土坡地作物覆盖与管理因子 C 值估算[J].水土保持研究, 2019, 26(2):175-179.
- XU Q X, LI C M, LI C X, et al. Calculation and analysis of C-value of crop cover and management factor in purple soil of sloping land in three gorges reservoir area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26 (2): 175-179.
- [29] 中华人民共和国水利部. SL190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL190—2007 Classification and classification of soil erosion [S].2008.
- [30] 郝李霞,程先富,张广胜.安徽省岳西县土壤侵蚀时空演变特征及趋势预[J].水土保持研究, 2011, 18(1): 31-36.
- HAO L X, CHENG X F, ZHANG G S. Study on spatial and temporal changes of soil erosion in Yuexi County, Anhui province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18 (1): 31-36.
- [31] 李传武.皖西大别山区水土流失机理分析及治理[J].皖西学院学报, 2003(2):70-74.
- LI C W. Mechanism and countermeasure of soil erosion mechanism in Dabie Mountains in the west of Anhui Province[J]. Journal of West Anhui University, 2003 (2): 70-74.
- [32] 程先富,余芬. 安徽省土壤侵蚀空间分布及其与环境因子的关系[J]. 地理研究, 2010, 29(8):1461-1470.
- CHENG X F, YU F. Spatial distribution of soil erosion and its relationship to environmental factors in Anhui Province [J]. Geography Research, 2010, 29 (8): 1461-1470.
- [33] 李秀霞,倪晋仁. 土壤侵蚀及其影响因素空间相关性分析[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2):161-166.
- LI X X, NI J R. Spatial similarity between soil erosion and its influencing factors based on information entropy theory[J]. Progress in Geography, 2009, 28 (2): 161-166.
- [34] 余芬. 石台县土壤侵蚀空间分布格局及其与环境因子的关系研究[D]. 芜湖:安徽师范大学, 2010.
- YU F. Study on the spatial distribution pattern of soil erosion and its relationship with environmental factors in Shitai County [D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2010.
- [35] 何金龙,黄英,樊宇航. 土壤侵蚀影响因素及研究方法分析[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(1):130-134.
- HE J L, HUANG Y, FAN Y H. Analysis of soil erosion influence factors and research methods [J]. Sichuan Building Science, 2015, 41 (1): 130-134.
- [36] 徐劲林,查轩. 土壤侵蚀危险度的计算与影响因子分析——以福建安溪红壤水土流失区为例[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(5):5577-5584.
- XU J L, ZHA X. Soil erosion risk assessment based on the research of impact factors: Taking Anxi County as

- an example[J]. Journal of Geo-information Science, 2009, 11 (5): 5577-5584.
- [37] 唐志敏, 白晓, 湛龙, 等. 福建省长汀县重点水土流失区土壤元素地球化学特征及其指示意义[J]. 华东地质, 2022, 43(3): 324-335.

TANG Z M, BAI X, ZHAN L, et al. Geochemical characteristics and its indicative significance of soil elements in sky soil erosive areas of Changting County, Fujian Province[J]. East China Geology, 2022, 43(3): 324-335.

Spatial-temporal variation analysis of soil erosion based on multi-source data—A case study of Susong County, Anhui Province

HE Qing, WEI Lu, XIAO Yonghong

(Anhui Institute of Geological Environment Monitoring, Hefei 230001, Anhui, China)

Abstract: This paper analyzed spatial-temporal variation of soil erosion in Susong County from 2015 to 2019 and discussed the influencing factors of soil erosion based on geographic information system (GIS) and soil loss equation (RUSLE) model. The results showed that: ① The soil erosion modulus of the study area in 2015 was $612.53 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, and the total eroded area covers $1\,339\,078.87 \text{ t/a}$, which is distributed in the pattern of strong eroded northwest and weakly eroded middle and south. ② Soil erosion did not change significantly with slope, mostly concentrated in the $0 \sim 15^\circ$ slope zone and dominated by slight, light and moderate erosion, with the largest eroded area in the eastern slope, followed by the western slope. ③ Among the different soil types, the largest eroded area is brown-red soil, followed by gray fluvo-aquic soil, in terms of land use types, the largest soil-eroded area was in cultivated land, followed by water area and forest land. ④ From 2015 to 2016, the total amount of erosion increased and the intensity of soil erosion kept improving with the moderate and above erosion accounting for a large proportion. After 2017, the total amount of soil erosion decreased and the areas of intense and extreme erosion gradually changed into those of moderate and light erosion. This study shows that precipitation, vegetation cover, topography and human activity disturbance together affect the soil erosion variation.

Key words: GIS; RUSLE model; soil erosion; Susong County, Anhui Province