DOI：10.11766/trxb201503240666

基于RUSLE模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估*

赵明松[1, 2] 李德成[2] 张甘霖[2†] 程先富[3, 4]

（1 安徽理工大学测绘学院，安徽淮南 232001）

（2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室（中国科学院南京土壤研究所），南京 210008）

（3 安徽师范大学国土资源与旅游学院，安徽芜湖 241003）

（4 安徽省自然灾害过程与防控研究省级实验室，安徽芜湖 241003）

摘 要 基于修正的通用土壤流失方程（RUSLE）和GIS空间分析技术，定量分析了安徽省土壤侵蚀及其养分流失的空间分布特征，探讨了土壤侵蚀强度与海拔、坡度等地形因子的关系。结果表明：2010年安徽省土壤侵蚀总量为3 454×10^4 t a^{-1}，土壤侵蚀模数平均值为256.9 t km^{-2} a^{-1}。全省以微度土壤侵蚀为主，侵蚀强度由北向南逐渐加剧。淮北与沿淮平原、江淮丘陵岗地以微度土壤侵蚀为主，皖南丘陵山区和皖西大别山区以强度侵蚀为主。海拔200～500 m和坡度15～25° 的区域土壤侵蚀量最大。不同土壤侵蚀强度在各高程、坡度带的面积分布比例规律相似，随着海拔和坡度的增加，土壤侵蚀强度逐渐加剧。微度侵蚀的面积比例逐渐减小，其他侵蚀强度的面积比例逐渐增加。全省因土壤侵蚀引起的土壤有机碳（SOC）、全氮（TN）、全磷（TP）和全钾（TK）等养分流失总量为 106.6×10^4 t a^{-1}，其中SOC、TN、TP和TK的平均流失量分别为3.57、0.37、0.10和3.90 t km^{-2} a^{-1}。土壤养分流失量总体上由北向南逐渐增多，淮北与沿淮平原四种养分平均流失量和流失总量最小，皖南丘陵山区平均流失量和流失总量最大。

关键词 RUSLE；土壤侵蚀；土壤养分流失；安徽省

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

土壤侵蚀是土壤及其母质在水力、风力、冻融、重力等外力作用下被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程，是当今人类面临的一种最普遍、持续性最强的地质灾害[1]。它不仅破坏土地资源，造成河床淤积，加剧旱涝等灾害，污染水体；同时造成土壤中氮、磷、钾和有机质等养分的流失，导致土壤肥力降低、农作物减产，制约了区域的社会、经济发展和生态环境保护。我国是土壤侵蚀严重的国家，根据第二次全国土壤侵蚀遥感调查，全国水土流失面积占总面积的37.42%；土壤流失量为49.8×10^8 t[2]。2000年全国因水土流失损失的有机质高达1.63×10^8 t，损失的氮、磷、钾共计1.18×10^8 t[2]。

定量评估区域土壤侵蚀、分析土壤侵蚀空间分布特征是防治区域水土流失的基础[3]。近30年来，各国学者根据各自的区域特征研发了较多的土壤侵蚀预报模型，其中美国农业部研发的通用土壤流失方程（USLE）及修正的通用土壤流失方程（RUSLE）应用最为广泛。20世纪90年代以来，在GIS和RS技术的支持下，RUSLE模型在我国广泛用于区域土壤侵蚀研究。在国家尺度上，杨胜天等[4]基于第二次土壤普查数据估算了全国土壤侵

* 国家自然科学基金项目（41501226）、土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目（Y412201431）和国家科技基础性工作专项（2008FY110600）资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China（No.41501226），the Foundation of State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture（No.Y412201431），and the National Science and Technology Infrastructure Program（No.2008FY110600）

† 通讯作者Corresponding author，E-mail：glzhang@issas.ac.cn

作者简介：赵明松（1983—），男，安徽淮南人，博士，讲师，主要从事数字土壤制图、土壤侵蚀遥感调查研究。E-mail：zhaomingsonggis@163.com

蚀量，并估算了由此引起的土壤可吸附态氮磷的流失量。在省级或流域尺度上，众多学者根据研究区特征对RUSLE方程中有关因子进行修正，评价了区域土壤侵蚀状况，如安徽省[5]、海南省[6]、南方丘陵区[7]、海河流域[8]、密云水库上游流域[9]等。这些研究主要关注区域的土壤侵蚀面积、侵蚀总量以及空间分布等，但对于土壤侵蚀空间分布与环境因子的关系、土壤侵蚀造成的生态环境损失等关注的较少。

国内对于土壤侵蚀引起的直接经济损失关注较多，主要利用环境经济学理论和方法将土壤侵蚀引起的养分流失、水分流失、泥沙流失和土地废弃损失等折算成相应的货币价值。如行政区尺度上，湖南省[10]、安徽省[11]、武汉市[12]等地的土壤侵蚀直接经济损失估算；流域尺度上，贵州省猫跳河流域[13]、云南省金沙流域[14]、三峡库区[15]等地的土壤侵蚀直接经济损失估算。这些研究直观地将土壤侵蚀所造成的巨大损失公布于众，提高了民众的土壤侵蚀防治意识，为环境管理决策提供了宏观的科学依据。但上述研究中的土壤信息大多来源于20世纪80年代的第二次土壤普查数据或土壤环境背景值，实效性较差，且多采用区域的平均值来计算经济损失，忽略了区域内部存在的差异。

据我国第一、二次水土流失遥感调查，安徽省水土流失面积分别占土地总面积的20.67%和13.45%[16]，主要集中在皖西大别山区和皖南山区，其次是江淮丘陵岗地区。但有关安徽省的土壤侵蚀研究报道很少，李德成等[17]利用遥感技术模拟了安徽省岳西县土壤侵蚀动态演变，吴素业[18]采用Wisehmeier经验公式计算了安徽大别山区降雨侵蚀力指标，张海林[19]运用ULSE估算了安徽中部的杭埠河流域舒城县1949—2000年土壤侵蚀的变化，余芬等[20]根据土壤侵蚀因子评价了安徽省土壤侵蚀敏感性的空间分布规律，估算了由土壤侵蚀造成的经济损失[11]。张乃夫[21]利用“3S”技术研究了安徽省新安江流域的土壤侵蚀敏感性、土壤侵蚀等级、空间分布特征。程先富和余芬[5]利用USLE和GIS空间分析技术分析了2002年安徽省土壤侵蚀空间分布与地形、土壤类型、土地利用的关系，但其利用的土壤数据是来自20世纪80年代第二次土壤普查，土地利用信息来自2002年，也未涉及养分流失。近年来，尤其是随着“中部崛起”战略的实施，安徽省近年来城镇化和交通建设发展迅猛，加之局部地区不合理的生产方式，不可避免地引起或破坏地表植被，引起新的水土流失。为此，本研究利用2010—2011年土壤调查获取的安徽省最新土壤数据和2010年的土地利用等数据，运用RUSLE和GIS空间分析方法，定量揭示安徽省土壤侵蚀及其养分流失的空间分布规律，估算全省土壤侵蚀及其养分流失总量，详细探讨土壤侵蚀空间分布与海拔、坡度等地形因子的关系，旨在进一步了解安徽省土壤侵蚀现状，为水土流失防治工作和生态环境恢复与保护提供及时有效的数据基础。

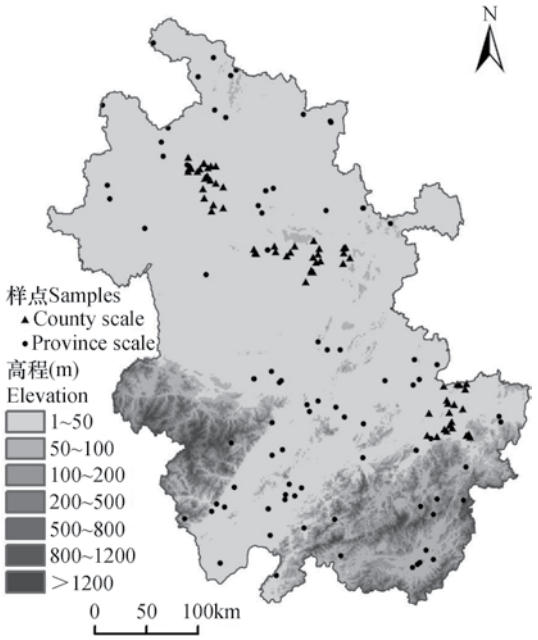
1　材料与方法

1.1　研究区概况

安徽省位于我国华东腹地，跨长江、淮河中下游，介于114° 54′～119° 37′ E，29° 41′～34° 38′ N之间，总面积为1.4×10^5 km^2。全省地处亚热带与暖温带的过渡地区，年均气温14～16° C，年均降水量800～1 800 mm，年均日照1 800～2 500 h。全省地势西南高、东北低，海拔6～1 865 m，地形地貌南北迥异，分为淮北与沿淮平原、江淮丘陵岗地、皖西大别山区、沿江平原区和皖南丘陵山区五个地理区域。省内主要分布着潮土（潮湿雏形土）、水稻土（水耕人为土）、黄棕壤与黄褐土（湿润淋溶土）、粗骨土（正常新成土）、草甸土（正常有机土）等土壤。省内淮河以北以小麦—玉米（大豆）轮作为主，长江、淮河流域以小麦（油菜）—晚稻轮作为主，皖西和皖南山区为林、茶为主。

1.2　数据来源

本研究主要使用以下数据：（1）2010年降雨量，来源于安徽省气象信息中心的全省78个市县级气象站观测数据；（2）安徽省1∶50万土壤图，来源于全国第二次土壤普查；（3）数字高程模型SRTM DEM，90 m空间分辨率（http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp）；（4）安徽省2010年土地利用图，由Landsat TM影像监督分类获得；（5）MODIS 16天合成NDVI，250 m空间分辨率（http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html），共获取全省2010年16天合成NDVI共23期；（6）典型土壤类型理化性质，来源于2010—2011年土壤调查获取的206个典型样点数据集（图1）。



注：“●”为国家科技基础性工作专项（2008FY110600）的典型样点，“▲”中国科学院战略性先导科技专项（XDA05050503）中典型样区蒙城县、定远县、宣州区的样点 Note: “●” stands for typical sampling sites for the National Science and Technology Infrastructure Program (2008FY110600), “▲” stands for sampling sites for the “Strategic Priority Research Program” of the Chinese Academy of Sciences (XDA0505050303)) in Mengcheng County, Dingyuan County and Xuanzhou District

图1 安徽省典型土壤样点空间分布

Fig.1 Spatial distribution of soil sampling sites in Anhui Province

1.3 RUSLE模型及因子确定

本研究采用RUSLE和GIS技术研究安徽省土壤侵蚀空间分布特征：

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

式中，A为土壤侵蚀量（t km^{-2} a^{-1}）。R为降雨侵蚀力因子（MJ mm hm^{-2} h^{-1} a^{-1}），安徽省和福建省同属于亚热带季风湿润区，气候条件较相似，本研究中R因子采用周伏建等[22]提出的公式计算。K为土壤可蚀性因子（t hm^2 h MJ^{-1} hm^{-2} mm^{-1}），采用Williams等[23]在EPIC模型中的估算方法，并根据张科利等[24]的研究进行修订。LS为坡长坡度因子，L因子采用Wischmeier和Smith[25]提出的公式计算；S因子，缓坡（<14°）采用McCool等[26]提出的公式，陡坡（≥14°）采用Liu等[27]提出的公式。C为植被覆盖与管理因子（无量纲），采用蔡崇法等[28]提出的方法利用植被覆盖度估算。P为水土保持措施因子（无量纲），参考前人研究[5, 28]，对2010年安徽省土地利用图赋值，赋值如下：林地、疏林地和草地为1，旱地为0.35，水田为0.15，水域、居民用地和裸岩均为0。

1.4 土壤养分流失估算

本研究将安徽土系典型土壤剖面的表层土壤有机碳（SOC）、全氮（TN）、全磷（TP）和全钾（TK）数据，在ArcGIS 9.3支持下与土壤类型图连接生成养分空间分布图，并转为栅格图。考虑研究区范围、计算量等，栅格图空间分辨率采用100 m。在ArcGIS 9.3中将土壤养分与土壤侵蚀模数两类栅格图层相乘得到土壤养分流失量空间分布图，再乘以栅格面积得土壤养分流失总量。

1.5 数据处理

本研究中计算的土壤侵蚀因子的空间分辨率重采样为100 m，利用RUSLE模型和ArcGIS 9.3空间分析，得到安徽省2010年土壤侵蚀和土壤养分流失空间分布图，统计全省和各地理区域的土壤侵蚀和养分流失总量。结合DEM利用ArcGIS 9.3空间分析功能，详细探讨土壤侵蚀与海拔、坡度的关系。参考水利部《土壤侵蚀分类分级标准》（SL190–2007），对安徽省土壤侵蚀强度分级如下：<500 t km^{-2} a^{-1}，微度侵蚀；500～2 500 t km^{-2} a^{-1}，轻度侵蚀；2 500～5 000 t km^{-2} a^{-1}，中度侵蚀；5 000～8 000 t km^{-2} a^{-1}，强度侵蚀；8 000～15 000 t km^{-2} a^{-1}，极强度侵蚀；>15 000 t km^{-2} a^{-1}，剧烈侵蚀。

2 结 果

2.1 模型精度的验证

利用安徽省水利厅的霍山、岳西、歙县和广德4个水土保持科学试验站的2010年观测数据进行模型结果的比较。2010年霍山、岳西、歙县和广德4站的土壤侵蚀监测值分别为33.04、14.12、176.2和26.27 t km^{-2} a^{-1}；RUSLE模型预测值分别为25.61、10.64、142.3和20.73 t km^{-2} a^{-1}。模型预测结果分别占监测值的77.51%、75.35%、80.75%、78.92%。结果表明RUSLE模型的预测值低于土壤侵蚀监测数据，但总体精度较可靠。

2.2 土壤侵蚀空间分布特征

安徽省2010年土壤侵蚀总量为3 454×10^4 t a^{-1}，平均土壤侵蚀模数为256.9 t km^{-2} a^{-1}，侵蚀模数最大值达44 860 t km^{-2} a^{-1}。图2为安徽省土壤

侵蚀强度等级图，全省以微度侵蚀为主，侵蚀强度由北至南逐渐加剧。全省土壤侵蚀空间分布格局与地形特征相似：微度侵蚀主要分布在低海拔、地形平缓的北部和中部地区；强度侵蚀主要分布在地形起伏较大的皖西和皖南山区，地形主导着全省土壤侵蚀的空间分布。此外，皖西和皖南山区年均降雨量分别在1 200 mm和1 400 mm以上，丰富的降水加剧了该地区的土壤侵蚀。

全省微度侵蚀面积最大，占全省陆地总面积的90.10%，主要分布在淮北与沿淮平原、江淮丘陵和沿江平原。强度以上的侵蚀面积占总面积的1.13%，主要分布于皖南丘陵山区、皖西大别山区，沿江平原的局部地区也有零星分布。从侵蚀量上看，全省土壤侵蚀总量以轻度和微度侵蚀为主，分别占侵蚀总量的29.42%和19.62%（表1）。与程先富等[5]的2002年研究相比，两个时期全省土壤侵蚀空间分布格局基本一致，但2010年全省土壤侵蚀稍有加剧。2002到2010年，全省轻度和中度土壤侵蚀面积减少22.69%和37.63%；微度和强度以上土壤侵蚀面积增加2.33%和148.51%。从土地利用变化上看，2002到2010年全省林地和建设用地面积减少1.35%和增加23.56%，这可能是全省土壤侵蚀加剧的一个主要原因。

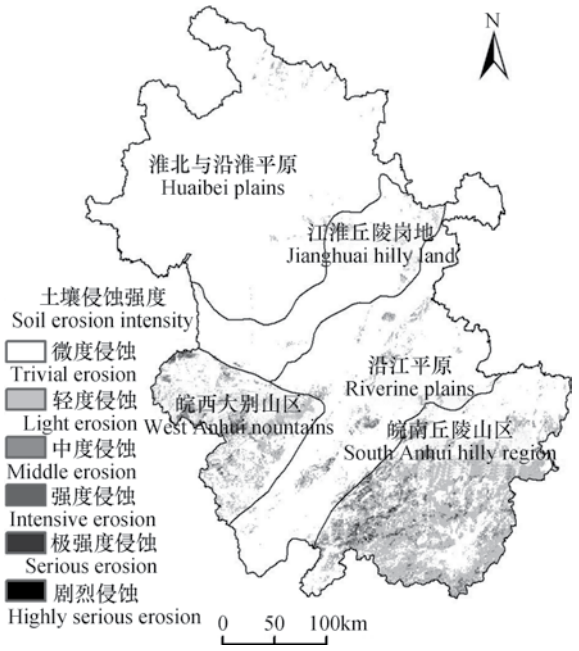


图2　安徽省土壤侵蚀强度等级分布图

Fig.2　Spatial distribution of grades of soil erosion in intensity in Anhui Province

表1　安徽省土壤侵蚀量统计

Table 1　Statistics of soil erosion in Anhui Province

侵蚀分级 Soil erosion grade ($t\ km^{-2}\ a^{-1}$)	面积 Area (km^2)	面积比 Area ratio (%)	平均侵蚀模数 Average erosion modulus ($t\ km^{-2}\ a^{-1}$)	侵蚀量 Erosion amount ($\times 10^4\ t\ a^{-1}$)	侵蚀量比例 Erosion amount ratio (%)
微度 Trivial	121 200	90.10	55.93	678	19.62
轻度 Light	10 460	7.78	971	1 016	29.42
中度 Middle	1 328	0.99	3 604	479	13.85
强度 Intensive	859	0.64	6 323	543	15.72
极强度 Serious	592	0.44	10 360	613	17.76
剧烈 Highly serious	69.87	0.05	17 930	125	3.63
总计 Total	134 500	100	256.9	3 454	100

安徽省土壤侵蚀模数南北差异较大，最高与最低值相差约30倍（表2）。皖南丘陵山区和皖西大别山区平均土壤侵蚀模数为730.3 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$和560.4 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$，侵蚀总量达2 131×104 $t\ a^{-1}$和743.4×104 $t\ a^{-1}$，分别占全省侵蚀总量的60%和20%以上。该区域地形变化剧烈、地表切割破碎、植被覆盖稀疏，局部区域土壤侵蚀模数达20 000 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$以上。此外，皖西大别山区以黄棕壤为主，呈酸性、多砂砾，粘结力差，易流失。淮北与沿淮平原土壤侵蚀模数平均为26.55 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$，侵蚀总量为126.0×104 $t\ a^{-1}$，仅占全省侵蚀总量的3.65%。该区东北部有零星丘陵分布，局部地区土壤侵蚀模数达1 000 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$。

表2 不同地理区域土壤侵蚀量统计

Table 2 Statistics of soil erosion of various geographic areas

地理区域 Geographic area	面积 Area (km^2)	侵蚀模数均值 Average erosion modulus ($t\ km^{-2}\ a^{-1}$)	侵蚀量 Erosion amount ($\times 10^4\ t\ a^{-1}$)	侵蚀量比例 Erosion amount ratio (%)
淮北与沿淮平原 Huaibei plains	47 460	26.55	126.0	3.65
江淮丘陵岗地 Jianghuai hilly land	15 060	63.10	95.01	2.75
沿江平原 Riverine plains	29 500	121.6	358.8	10.39
皖西大别山区 West Anhui mountains	13 270	560.4	743.4	21.52
皖南丘陵山区 South Anhui hilly region	29 180	730.3	2 131	61.69

2.3 土壤侵蚀与地形的关系

表3和表4为不同高程带的土壤侵蚀分布状况，表5和表6为不同坡度带上的土壤侵蚀分布状况。安徽省土壤侵蚀强度随着海拔和坡度的增加而增加（表3、表5）。高程在500 m以上的区域土壤侵蚀较严重，土壤侵蚀模数平均为1 000 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$以上；0～100 m区域的土壤侵蚀较弱，侵蚀模数平均为45.82 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$（表3）。坡度在15° 以上的区域土壤侵蚀较严重，土壤侵蚀模数均在1 100 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$以上；0°～5°坡度带的土壤侵蚀较弱，侵蚀模数平均为31.38 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$（表5）。

不同高程带上的土壤侵蚀量差异较大，200～500 m区域的土壤侵蚀量最大，占侵蚀总量的40.15%，总体上以此为中心向上、向下逐渐减少（表3）。不同土壤侵蚀强度的侵蚀量在各高程带的分布比例存在较大差异：随着高程的增加，同一高程带上各级侵蚀量分布比例的最大值由微度侵蚀向强度侵蚀方向移动。如在0～100 m高程带上，微度土壤侵蚀的侵蚀总量所占比例最大；800 m以上，极强度以上的侵蚀总量所占比例最大。不同侵蚀强度在各高程带的面积分布比例存在较大差异：随着高程的增加，微度侵蚀在各高程带分布的面积比例逐渐减小，其他侵蚀强度的面积比例逐渐增加（表4）。如微度侵蚀在各高程带均有分布，主要分布在0～100 m高程带；剧烈侵蚀只分布在海拔200 m以上的区域。

表3 不同高程带土壤侵蚀量的统计特征

Table 3 Statistics of soil erosion relative to elevation

高程 Elevation (m)	面积 Area (km^2)	侵蚀模数均值 Average erosion modulus ($t\ km^{-2}\ a^{-1}$)	侵蚀量 Erosion amount ($\times 10^4\ t\ a^{-1}$)	侵蚀量比例Erosion amount ratio (%)					
				微度 Trivial	轻度 Light	中度 Middle	强度 Intensive	极强度以上 Serious	总计 Total
1～100	98 560	45.82	451.7	8.86	2.54	0.88	0.5	0.29	13.08
100～200	10 600	461.9	489.6	3.09	4.68	2.66	2.14	1.61	14.18
200～500	16 920	819.5	1 387	5.38	13.7	5.93	6.66	8.48	40.15
500～800	6 095	1 089	663.9	1.74	5.96	2.17	2.97	6.37	19.22
800～1 200	2 006	1 932	387.5	0.49	2.23	1.86	2.73	3.90	11.22
1 200～1 900	279.3	2 669	74.55	0.06	0.31	0.36	0.71	0.72	2.16

不同坡度带上的土壤侵蚀总量差异较大，15°～25° 坡度带土壤侵蚀量最大，占侵蚀总量的38.71%，总体上以此为中心向上、向下逐渐减少（表5）。不同侵蚀强度的土壤侵蚀量在各坡度带的分布比例差异较大：随着坡度的增加，同一坡度带上侵蚀量分布比例的最大值由微度侵蚀向剧烈侵蚀方向移动。如在0°～5° 坡度带上微度土壤侵蚀的侵蚀量所占比例最大；35° 以上区域，极强度以上土壤侵蚀的侵蚀量所占比例最大。不同侵蚀强度在各坡度带的面积分布比例存在较大差异：随着

表4　不同土壤侵蚀强度占各高程带的面积百分比

Table 4　Area percentages of grades of soil erosion relative to elevation (%)

高程（m） Elevation	微度 Trivial	轻度 Light	中度 Middle	强度 Intensive	极强度 Serious	剧烈 Highly serious
1 ~ 100	98.95	0.91	0.10	0.03	0.01	0.00
100 ~ 200	80.84	15.10	2.41	1.14	0.51	0.00
200 ~ 500	63.04	29.89	3.34	2.15	1.43	0.16
500 ~ 800	56.73	34.22	3.31	2.65	2.65	0.44
800 ~ 1 200	42.28	36.24	8.72	7.38	5.37	0.67
1 200 ~ 1 900	33.33	33.33	9.52	14.29	9.52	0.00

表5　不同坡度等级的土壤侵蚀量统计

Table 5　Statistics of soil erosion relative to slope gradient

坡度 Slope (°)	面积 Area (km^2)	侵蚀模数均值 Average erosion modulus ($t\ km^{-2}\ a^{-1}$)	侵蚀量 Erosion amount ($\times 10^4\ t\ a^{-1}$)	侵蚀量比例Erosion amount ratio (%)					
				微度 Trivial	轻度 Light	中度 Middle	强度 Intensive	极强度以上 Serious	总计 Total
0 ~ 5	100 400	31.38	315.0	8.71	0.41	0.00	0.00	0.00	9.12
5 ~ 8	6 052	209.3	126.6	1.83	1.8	0.03	0.00	0.00	3.67
8 ~ 15	11 530	467.4	538.7	4.56	6.96	3.60	0.47	0.06	15.60
15 ~ 25	11 510	1 161	1 337	3.70	11.00	8.15	11.16	4.70	38.71
25 ~ 35	4 261	2 103	895.9	0.76	7.31	1.87	3.67	12.33	25.94
35 ~ 90	731.6	3 289	240.6	0.07	1.94	0.22	0.44	4.30	6.97

坡度的增加，微度侵蚀在各坡度带分布的面积比例逐渐减小，其他侵蚀强度的面积比例逐渐增加（表6）。0° ~ 25° 的四个坡度带以微度侵蚀为主；极强度侵蚀和剧烈侵蚀只分布在15° 以上的区域。中度侵蚀和强度侵蚀主要分布在15° ~ 25° 区域，并以该坡度带为中心向上和向下面积逐渐减小。

表6　不同土壤侵蚀强度占各坡度带的面积百分比

Table 6　Area percentages of grades of soil erosion relative to slope gradient (%)

坡度 Slope (°)	微度 Trivial	轻度 Light	中度 Middle	强度 Intensive	极强度 Serious	剧烈 Highly serious
0 ~ 5	99.79	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00
5 ~ 8	87.78	12.22	0.00	0.00	0.00	0.00
8 ~ 15	79.58	16.92	3.27	0.23	0.00	0.00
15 ~ 25	46.50	40.19	6.54	5.37	1.40	0.00
25 ~ 35	24.92	57.41	4.10	4.42	8.52	0.63
35 ~ 90	14.81	66.67	3.70	3.70	9.26	5.56

2.4 土壤养分流失评估

图3为安徽省2010年土壤侵蚀引起的土壤养分流失量空间分布图。表7为全省不同地理区域的土壤养分流失量统计。安徽省土壤养分流失量与土壤侵蚀强度空间格局相似，呈北低南高、丘陵山区高于平原区的格局。全省SOC单位面积平均流失量为3.57 t km^{-2} a^{-1}，集中分布在0～3 t km^{-2} a^{-1}之间，流失面积占总面积的84.57%，主要分布在淮北与沿淮平原、江淮丘陵岗地、沿江平原。SOC流失量在50 t km^{-2} a^{-1}的区域占总面积的1.31%，主要分布在皖西大别山区和皖南丘陵山区的地形起伏较大的区域。TN和TP的平均流失量为0.37 t km^{-2} a^{-1}和0.10 t km^{-2} a^{-1}，集中分布在0～0.1 t km^{-2} a^{-1}之间，分别占区域总面积的84.36%和85.65%；TK的平均流失量为3.90 t km^{-2} a^{-1}，集中分布在0～3 t km^{-2} a^{-1}之间，占总面积的83.39%，其空间分布格局均与SOC流失量空间格局相似。

不同地理区域土壤养分流失量南北差异较大，其中淮北与沿淮平原四种养分单位面积平均流失量最小，皖南丘陵山区的土壤养分平均流失量最大，二者相差近30倍（表7）。皖南丘陵山区的土壤养分流失总量最大，四种养分的流失总量均占全省养分流失总量的60%以上；淮北平原的养分流失总量均不足养分流失总量的5%。这主要由于土壤侵蚀强度的南北差异所致，皖南丘陵山区的平均土壤侵蚀模数是淮北与沿淮平原的近30倍（表2）；其次是土壤养分的空间差异所致，全省SOC和TN总体上北低南高，TP和TK总体上也呈北低南高分布趋势，但其南北差异相对SOC和TN较小。

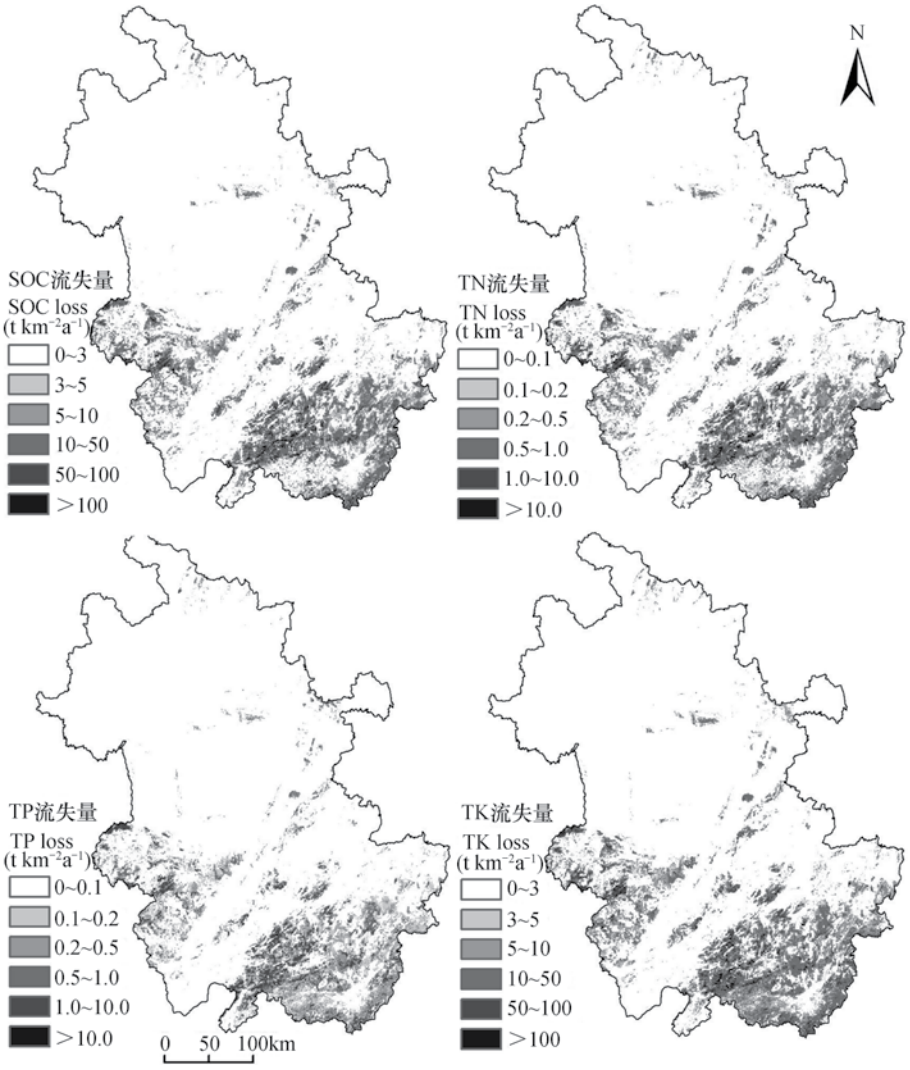


图3 安徽省土壤养分流失空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of soil nutrient loss in Anhui Province

表7　不同地理区域土壤养分流失量统计

Table 7　Statistics of soil nutrient loss in various geographic areas

地理区域 Geographic area	平均流失量 Average nutrient loss（t km^{-2} a^{-1}）				流失总量 Total nutrient loss（× 10^4 t a^{-1}）				
	SOC	TN	TP	TK	SOC	TN	TP	TK	总量Total
淮北与沿淮平原 Huaibei plains	0.30	0.03	0.01	0.39	1.414	0.132	0.063	1.842	3.452
江淮丘陵岗地 Jianghuai hilly land	0.86	0.09	0.03	0.94	1.292	0.132	0.039	1.422	2.884
沿江平原 Riverine plains	1.63	0.17	0.04	1.87	4.823	0.493	0.120	5.517	10.95
皖西大别山区 West Anhui mountains	7.61	0.81	0.21	8.77	10.09	1.072	0.277	11.63	23.07
皖南丘陵山区 South Anhui hilly region	10.39	1.06	0.27	10.99	30.32	3.106	0.796	32.06	66.28
总计 Total	3.57	0.37	0.10	3.90	47.94	4.934	1.295	52.47	106.6

2010年全省因土壤侵蚀导致土壤养分大量流失，SOC流失47.94 × 10^4 t，TN流失4.934 × 10^4 t，TP流失1.295 × 10^4 t，TK流失52.47 × 10^4 t，合计养分流失总量106.6 × 10^4 t。土壤侵蚀导致的土壤养分（N/P_2O_5/K_2O）流失总量占全省2010年施肥总量（农用化肥（N/P_2O_5/K_2O）施用总量为317.8 × 10^4 t，其中氮肥112.2 × 10^4 t、磷肥35.94 × 104 t、钾肥31.83 × 10^4 t）[29]的18.36%。土壤TK流失最严重，相当于全年钾肥施用量的1.6倍。安徽省是农业大省，土壤养分的大量流失必将对农业生产造成较大的经济损失。将N、P、K等分别折算为碳酸氢铵、过磷酸钙和氯化钾等肥料（折算系数分别为5.64，3.37和1.66）。2010年，全省碳酸氢铵、过磷酸钙和氯化钾化肥的平均价格分别为630元 t^{-1}、540元 t^{-1}和2750元 t^{-1}。2010年全省土壤养分流失的经济损失达61.88亿元，相当于全省农业生产总值的4%和全省GDP的0.5%（2010年全省农业生产总值为1 544亿元，GDP为12 360亿元）。

土壤侵蚀和地表径流是引起土壤中N、P流失的主要途径，N、P从土壤侵蚀中流失随地表径流进入河流、湖泊中，加剧水域N、P负荷，从而引起水体污染、富营养化以及一些次生危害等环境问题[30]。2010年全省土壤TP平均流失量为0.10 t km^{-2} a^{-1}，流失总量占施肥总量的3.60%。而一般农田中P素的流失量低于0.1 t km^{-2} a^{-1}，只占施肥量的2%左右[30]，表明安徽省土壤P素流失可能面临更大的水体富营养化等风险。土壤侵蚀以及造成的土壤养分大量流失，不仅对农业生产发展造成较大的经济损失，同时会引起一系列生态环境问题，必须加强土壤侵蚀防治工作。

3　结　论

安徽省2010年平均土壤侵蚀模数为256.9 t km^{-2} a^{-1}，以微度土壤侵蚀为主，土壤侵蚀总量为3 454 × 10^4 t a^{-1}。全省因土壤侵蚀引起的SOC、TN、TP和TK等养分流失总量为106.6 × 10^4 t。土壤侵蚀强度和土壤养分流失量由北向南逐渐加剧，皖南丘陵山区和皖西大别山区最为严重，淮北与沿淮平原土壤侵蚀较弱。

海拔、坡度等地形因子主导着安徽省土壤侵蚀强度的空间分布，随着海拔和坡度的增加，土壤侵蚀不断加剧，微度侵蚀面积比例逐渐减小，其他侵蚀强度面积比例逐渐增加；海拔在200～500 m区域的土壤侵蚀量最大，坡度在15°～25° 区域的侵蚀量最大。

致　谢　感谢中国科学院遥感与数字地球研究所陈良富研究员提供的2010年安徽省土地利用图。

参 考 文 献

[1] 史德明. 如何正确理解有关水土保持术语的讨论. 土壤侵蚀与水土保持学报，1998，4（4）：89—91
Shi D M. Discussion on some terminology of soil and water conservation（In Chinese）. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation，1998，4（4）：89—91

[2] 朱高洪，毛峰. 我国水土流失影响辨识与直接经济损失评估. 中国水土保持，2007（8）：4—8
Zhu G H，Mao F. Recognition of influence of soil and water loss in China and evaluation on direct economic losses（In Chinese）. Soil and Water Conservation in

China，2007（8）：4—8

[3] 李占斌，朱冰冰，李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展. 土壤学报，2008，45（5）：802—809
Li Z B，Zhu B B，Li P. Advancement in study on soil erosion and soil and water conservation（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2008，45（5）：802—809

[4] 杨胜天，程红光，步青松，等. 全国土壤侵蚀量估算及其在吸附态氮磷流失量匡算中的应用. 环境科学学报，2006，26（3）：366—374
Yang S T，Cheng H G，Bu Q S，et al. Estimation of soil erosion and its application in assessment of the absorbed nitrogen and phosphorus load in China（In Chinese）. Acta Scientiae Circumstantiae，2006，26（3）：366—374

[5] 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. 地理研究，2010，29（8）：1461—1470
Cheng X F，Yu F. Spatial distribution of soil erosion and its relationship to environment factors in Anhui Province（In Chinese）. Geographical Research，2010，29（8）：1461—1470

[6] 赵玉国，张甘霖，龚子同. SOTER支持下海南岛土壤侵蚀模拟与影响因子分析. 土壤通报，2003，34（3）：219—224.
Zhao Y G，Zhang G L，Gong Z T. SOTER—based soil water erosion simulation and contribution factor analysis in Hainan Island（In Chinese）. Chinese Journal of Soil Science，2003，34（3）：219—224

[7] 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. 资源科学，2014，36（6）：1288—1297
Chen S X，Yang X H，Xiao L L，et al. Study of soil erosion in the southern hillside area of China based on RUSLE model（In Chinese）. Resources Science，2014，36（6）：1288—1297

[8] 李晓松，吴炳方，王浩，等. 区域尺度海河流域水土流失风险评估. 遥感学报，2011，15（2）：372—387
Li X S，Wu B F，Wang H，et al. Regional soil erosion risk assessment in Hai Basin（In Chinese）. Journal of Remote Sensing，2011，15（2）：372—387

[9] 周为峰，吴炳方. 基于遥感和GIS 的密云水库上游土壤侵蚀定量估算. 农业工程学报，2005，21（10）：46—50
Zhou W F，Wu B F. Soil erosion of the up river areas of Miyun Reservoir located on the Chaobai River using remote sensing and GIS（In Chinese）. Transactions of the CSAE，2005，21（10）：46—50

[10] 田亚平，李虹，邓运员. 湖南省水土流失的经济损失评估. 水土保持学报，2008，22（4）：42—46
Tian Y P，Li H，Deng Y Y. Estimated on economic costs of soil erosion in Hunan Province（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，2008，22（4）：42—46

[11] 余芬，程先富. 安徽省土壤侵蚀的经济损失评估. 水土保持研究，2010，17（2）：15—19
Yu F，Cheng X F. Estimated on economic costs of soil erosion in Anhui Province（In Chinese）. Research of Soil and Water Conservation，2010，17（2）：15—19

[12] 杨青华，张志. 武汉市土壤侵蚀经济损失估算研究. 中国水土保持，2008（2）：20—25
Yang Q H，Zhang Z. Economic loss estimation of soil erosion of Wuhan Municipality（In Chinese）. Soil and Water Conservation in China，2008（2）：20—25

[13] 许月卿，蔡运龙. 土壤侵蚀经济损失分析及价值估算——以贵州省猫跳河流域为例. 长江流域资源与环境，2006，15（4）：470—474
Xu Y Q，Cai Y L. Ecnomic loss analysis on soil erosion and estimation of its values（In Chinese）. Resource and Environment in the Yangtze Basin，2006，15（4）：470—474

[14] 李云辉，贺一梅，杨子生. 云南金沙江流域水土流失直接经济损失测算方法与区域特征分析. 山地学报，2002，20（增刊）：36—42
Li Y H，He Y M，Yang Z S. The calculation methods and analysis on the regional characteristics of direct economic loss of soil erosion in Jinsha River Basin of Yunnan Province（In Chinese）. Journal of Mountain Science，2002，20（Suppl.）：36—42

[15] 吕华丽，吴昌广，周志翔，等. 三峡库区土壤侵蚀经济损失估算. 水土保持通报，2012，32（4）：117—125
Lü H L，Wu C G，Zhou Z X，et al. Estimation on erosion—induced economic loss in Three Gorges Reservoir area（In Chinese）. Bulletin of Soil and Water Conservation，2012，32（4）：117—125

[16] 安徽省水利厅. 安徽省水土保持监测公报. 2005：1—3
Water Resources Department of Anhui Province. Anhui bulletin about soil and water conservation（In Chinese）. 2005：1—3

[17] 李德成，徐彬彬，石晓日. 利用马氏过程模拟和预测土壤侵蚀的动态演变——以安徽省岳西县为例.遥感学报，1995，10（2）：89—96
Li D C，Xu B B，Shi X R. Simulation and forecast of soil erosion development with Markov process：A case study in Yuexi，Anhui Province（In Chinese）.Journal of Remote Sensing，1995，10（2）：89—96

[18] 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研究. 中国水土保持，1994（4）：12—13
Wu S Y. Spatial distribution of the rainfall erosivity and its simplified algorithm in Dabie Moutain of Anhui

Province（In Chinese）. Soil and Water Conservation in China, 1994（4）: 12—13

[19] 张海林. 安徽杭埠河流域土地利用变化及其环境效益研究. 上海：华东师范大学，2005：89—93
Zhang H L. Study on the landuse change and its environmental impact in Hangbu River Basin of Anhui Province（In Chinese）. Shanghai: East China Normal University, 2005: 89—93

[20] 余芬，程先富，赵明松. 安徽土壤侵蚀敏感性评价研究. 人民长江，2009，40（9）：32—34
Yu F, Cheng X F, Zhao M S. Study on evaluation of soil erosion sensitivity in Anhui Province（In Chinese）. Yangtze River, 2009, 40（9）: 32—34

[21] 张乃夫. 安徽新安江流域景观格局特征及土壤侵蚀评价. 泰安：山东农业大学，2014：36—44
Zhang N F. Landscape pattern and soil erosion assement in the Xin'An River Basin of Anhui（In Chinese）. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014: 36—44

[22] 周伏建，陈明华，林福兴，等. 福建省降雨侵蚀力指标R值. 水土保持学报，1995，9（1）：27—33
Zhou F J, Chen M H, Lin F X, et al. The rainfall erosivity index in Fujian Province（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9（1）: 27—33

[23] United Stated Department of Agriculture. EPIC—Erosion/productivity impact calculator 1. Model documentation. Washington D C: Technical Bulletin Number 1768, 1990

[24] 张科利，彭文英，杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算. 土壤学报，2007，44（1）：7—13
Zhang K L, Peng W Y, Yang H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44（1）: 7—13

[25] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses—A guide for conversation planning. USDA: Agriculture Handbook, No.537, 1978

[26] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. Transactions of the ASAE, 1987, 30（5）: 1387—1396

[27] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. Transactions of the ASAE, 1994, 37（6）: 1835—1840

[28] 蔡崇法，丁树文，史志华，等. 应用ULSE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究. 水土保持学报，2000，14（2）：19—24
Cai C F, Ding S W, Shi Z H, et al. Study of applying ULSE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14（2）: 19—24

[29] 安徽省统计局. 安徽统计年鉴——2011年. http://www.ahtjj.gov.cn/tjj/web/tjnj_view.jsp. 2011
Statistical Bureau of Anhui Province. Statistical yearbooks of Anhui Province—2011（In Chinese）.2011. http://www.ahtjj.gov.cn/tjj/web/tjnj_view.jsp

[30] 陈怀满. 环境土壤学. 北京：科学出版社，2005：100—145
Chen H M. Environmental Soil Science（In Chinese）. Beijing: Science Press, 2005: 100—145

Evaluation of Soil Erosion and Soil Nutrient Loss in Anhui Province Based on RUSLE Model

ZHAO Mingsong[1, 2]　LI Decheng[2]　ZHANG Ganlin[2†]　CHENG Xianfu[3, 4]

（1 *School of Surveying and Mapping*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan*, *Anhui* 232001, *China*）

（2 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture*, *Institute of Soil Science*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 210008, *China*）

（3 *College of Territorial Resources and Tourism*, *Anhui Normal University*, *Wuhu*, *Anhui* 241003, *China*）

（4 *Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention*, *Wuhu*, *Anhui* 241003, *China*）

Abstract　Soil erosion is a major ecological and environmental issue concerned globally. It causes soil degradation and some environmental problems as well. Based on Revised Universal Soil Loss Equation（RUSLE）and GIS spatial analysis technique, this research quantitatively analyzed the spatial distribution of soil erosion and soil nutrient loss in Anhui Province, and explored relationships of soil erosion intensity with elevation and slope based on ArcGIS zonal statistics. Results show that in 2010 the total amount of soil erosion

was 3 454 × 10^4 t a^{-1}, and the mean soil erosion modulus was 256.9 t km^{-2} a^{-1}. The soil erosion in the province as a whole was dominantly trivial in degree, with 90.10% or 121 200 km^2 in the grade of trivial erosion, and 1.12% or 1 521 km^2 in the grade of intensive erosion distributed mainly in the hilly region of South Anhui and the Dabieshan mountain region of West Anhui. The grade of light erosion contributed 1 016 × 104 t a^{-1}, 29.42 % to the total amount of soil erosion, the grade of trivial erosion did 677.6 × 10^4 t a^{-1} or 19.62%, and the grade of highly intensive erosion did 125.3 × 10^4 t a^{-1} or 3.63%. Spatially, soil erosion intensified from north to south. Trivial soil erosion, the dominant grade of soil erosion, was distributed mainly in the North Anhui Plain, the riverine plains alongside the Huaihe River and the hilly region between the Yangtze River and the Huaihe River, while intensive soil erosion, in the hilly region of South Anhui and the mountains of West Anhui. Intensity degree of the soil erosion in the study area was closely related to elevation and slope. The soil erosion on slopes, 15° ~ 25° in gradient and 200 ~ 500 m in elevation, was the most severe. Distributions of soil erosions different in intensity in areas different in elevation and slope displayed a similar rule, that is, with rising elevation and slope, the soil erosion gradually increased in intensity, and the area of trivial soil erosion shrank gradually, while the areas of the other grades of soil erosion expanded gradually. The total loss of soil nutrients caused by soil erosion reached 106.6 × 10^4 t a^{-1}, of which soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total potassium (TK), accounted for 47.94 × 10^4, 4.934 × 10^4, 1.295 × 10^4, and 52.47 × 10^4 t a^{-1}, respectively, or 3.57, 0.37, 0.10, and 3.90 t km^{-2} a^{-1}, respectively, on average. The soil nutrient loss showed a spatial variation trend similar to that the soil erosion did, that is, rising from north to south. The North Anhui Plain was the lowest in mean and total loss of the four soil nutrients, and the hilly region of Southern Anhui the highest. As a whole, the findings may help understand how soil erosion and soil nutrient loss is spatially distributed, and then provide certain data basis for soil and water conservation.

Key words RUSLE; Soil erosion; Soil nutrient loss; Anhui Province

(责任编辑：檀满枝)