

1980—2010 年间安徽省土壤侵蚀动态演变及预测^①

赵明松^{1,2}, 李德成², 张甘霖^{2*}

(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)

摘要: 基于修正的通用土壤流失方程(RUSLE)和 GIS 技术, 定量分析了 1980 年、2000 年、2010 年安徽省土壤侵蚀空间分布及动态变化特征, 并利用马尔柯夫模型预测了未来 30 年土壤侵蚀变化趋势。利用 GIS 空间分析方法进一步探讨了土壤侵蚀强度空间变化与高程、坡度等地形因子间的关系。结果表明: 1)1980—2010 年安徽省土壤侵蚀状况明显改善, 平均土壤侵蚀模数由 1980 年的 461.09 t/(km²·a)减少为 2010 年的 245.26 t/(km²·a); 相应的侵蚀总量由 6 199.92 万 t/a 减少为 3 297.84 万 t/a。全省微度侵蚀面积增加了 8 188.65 km²; 强度以上侵蚀面积减少了 1 576.93 km²。2)安徽省 3 个时期的土壤侵蚀强度空间分布规律一致, 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。3)1980—2010 年全省土壤侵蚀等级减弱面积达 11 762.83 km², 侵蚀等级加剧面积仅 811.21 km²。土壤侵蚀空间变化主要分布在 200 ~ 500 m 和 15° ~ 25°区域。土壤侵蚀等级转化逐级进行, 主要以向侵蚀程度较弱等级转化为主, 仅有少量微度侵蚀向侵蚀强度较强等级转化。4)根据马尔柯夫方法预测, 未来 30 年安徽省土壤侵蚀状况逐渐减轻, 微度土壤侵蚀面积逐渐增加, 其他侵蚀等级的面积持续减少。

关键词: RUSLE; 土壤侵蚀; 马尔柯夫模型; 动态演变; 安徽省

中图分类号: S157.1

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, 还污染水体, 导致土壤肥力降低、农作物减产。土壤侵蚀制约了区域的农业发展、社会、经济发展和生态环境保护。定量评估区域土壤侵蚀、揭示其空间动态演变特征是防治区域水土流失的基础。

土壤侵蚀时空变化研究主要有两类常用的方法。一类主要利用 RS 技术、地形数据结合野外调查, 提取不同土壤侵蚀类型及强度与遥感、地形等数据的知识规则, 推测土壤侵蚀强度空间分布, 研究不同侵蚀强度区域的演变规律。McHugh^[2]通过野外调查研究了 1999—2002 年英格兰和威尔士的旱地土壤侵蚀变化概况。Nigel 和 Rughooputh^[3]利用研究区土壤侵蚀

与环境因子间的知识规则, 通过决策树方法评价了毛里求斯岛逐月土壤侵蚀风险和敏感性。Prasuhn^[4]利用 10 年野外实地调查数据分析了瑞士中部地区土壤侵蚀变化。国内研究主要集中在小流域和县级尺度上, 如山西晋西洪水沟小流域^[5]、四川省李子河流域^[6]、三峡库区紫色岩小流域^[7]等地的土壤侵蚀动态变化。县级尺度上, 如安徽省岳西县^[8-9]、江西省兴国县和余江县^[10-11]、西藏中部地区^[12]等地土壤侵蚀动态变化。该类方法中调查者的专业知识、经验和选择的不同时段的遥感影像等都会影响侵蚀强度判别规则的建立以及评价结果, 且该方法只能确定土壤侵蚀强度的面积及变化, 无法研究侵蚀模数和总量的变化。

另一类方法, 主要基于土壤侵蚀预报模型和 GIS、RS 技术, 获取土壤侵蚀各因子, 评价不同时期的土壤侵蚀模数、侵蚀量和侵蚀强度分布, 研究土壤侵蚀模数、侵蚀量和侵蚀强度的空间演变特征。通用

基金项目: 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)、中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA05050503)、国家科技基础性工作专项(2008FY110600)、安徽省高校自然科学基金项目(KJ2015A034)和安徽理工大学人才引进项目(ZY020)资助。

* 通讯作者(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

土壤流失方程(universal soil loss equation, USLE)、修正的通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)等是常用的土壤侵蚀预报模型,在近期的土壤侵蚀时空变化研究中应用较多。Park等^[13]基于RUSLE模型研究了1985—2005年韩国土壤侵蚀危害变化。Meshesha等^[14]基于USLE模型研究了1973—2006年埃塞俄比亚南部的Central Rift Valley地区土壤侵蚀变化。Alkharabsheh等^[15]基于RUSLE模型研究了1992—2009年约旦北部某农业区的土壤侵蚀变化对土地覆盖变化的响应。国内研究主要集中在流域或省域尺度上,如三江平原^[16]、鄱阳湖流域^[17]、延河流域^[18]、岷江上游^[19]、江西省^[20]等地的土壤侵蚀动态演变。该类方法的可靠性主要取决于土壤侵蚀预报模型在研究区域的适用性。

据全国第一、二次水土流失遥感调查,安徽省水土流失面积占总面积的20.67%和13.45%^[21]。有关安徽省土壤侵蚀空间动态变化的研究报道较少。李德成等^[8]利用RS资料研究了安徽省岳西县1958—1992年土壤侵蚀变化。郝李霞等^[9]利用岳西县1958年、1982年、1992年水土流失调查图和2004年遥感影像分析了该区域近50年土壤空间侵蚀变化特征。张乃夫^[22]利用“3S”技术和USLE研究了安徽省新安江流域2000—2010年的土壤侵蚀强度动态变化。随着“中部崛起”战略实施,安徽省近年来城镇化和交通建设发展迅猛,不可避免地引起或破坏地表植被,引起新的水土流失。程先富和余芬^[23]、赵明松等^[24]研究均表明RUSLE模型在安徽省土壤侵蚀研究的预测精度较可靠。因此,本研究利用1980年、2000年、2010年的降雨、土壤、地形、土地利用等数据,借助RUSLE和GIS空间分析方法,定量评价1980年、2000年和2010年安徽省土壤侵蚀的空间分布特征,揭示近30年来土壤侵蚀动态变化特征,预测土壤侵蚀演变趋势,为水土流失防治和生态环境恢复与保护提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

安徽省地跨长江、淮河中下游,介于114°54′~119°37′E, 29°41′~34°38′N,总面积为13.96万km²。全省地处亚热带与暖温带的过渡地区,年均气温14~16℃,年均降水量800~1800mm,总体上由北向南增加。全省地势西南高、东北低,海拔6~1864m,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5

个地理区域。省内主要分布着潮湿锥形土、水耕人为土、湿润淋溶土、正常新成土、正常有机土等。省内淮河以北以小麦—玉米(大豆)为主,淮河、长江流域以小麦(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: 1980年、2000年、2010年安徽省78个市县级气象站降雨量数据,来源于安徽省气象信息中心; 安徽省1:50万土壤图及《安徽土种》,来源于安徽省土壤普查办公室; 数字高程模型SRTM DEM, 90m空间分辨率(<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>); 1980年、2000年、2010年全省土地利用图,由Landsat TM影像监督分类获得; 2010年全省典型土壤类型理化性质,来源于国家科技基础性工作专项“我国土系调查与《中国土系志》编制”中安徽省土系调查的206个典型样点数据集,采样时间为2010—2011年。

1.3 RUSLE模型及因子确定

本研究采用RUSLE模型评价安徽省3个时期土壤侵蚀空间分布特征:

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

式中: A 为土壤侵蚀量,单位 $t/(km^2 \cdot a)$; R 为降雨侵蚀力因子,单位 $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子,单位 $t \cdot hm^2 \cdot h/(MJ \cdot hm^2 \cdot mm)$; 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 R 因子 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,本研究采用周伏建等^[25]提出公式计算 R 值。利用全省气象站点的年降雨量,计算各站点3个时期的 R 值,再用ArcGIS插值生成各时期 R 值的空间分布。1980年、2000年、2010年全省 R 值平均为 445.42 ± 137.68 、 379.61 ± 52.84 、 $362.30 \pm 118.48 MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ 。

1.3.2 K 因子 采用Williams等在EPIC模型中的估算方法,并根据文献[26—27]的研究成果,进行修订。本研究利用《安徽土种》中记录的第二次土壤普查时期典型剖面的属性数据计算1980年的 K 值,利用安徽省土系调查数据计算2010年的 K 值。在ArcGIS中与土壤类型图斑链接生成 K 值空间分布图,并转为栅格形式。在ArcGIS中将1980年和2010年的 K 值分布图取均值代替2000年的 K 值。1980年和2010年全省土壤 K 值平均为 $0.1154 \pm 0.0298 t \cdot hm^2 \cdot h/(MJ \cdot hm^2 \cdot mm)$ 和 $0.0761 \pm 0.0427 t \cdot hm^2 \cdot h/(MJ \cdot hm^2 \cdot mm)$ 。

1.3.3 LS 因子 在流域尺度上, LS 因子可利用 DEM 提取。本研究中 L 因子采用 Wischmeier 和 Smith^[28]提出的公式计算。 S 因子采用分段计算: 缓坡($< 14^\circ$)采用 McCool 等^[29]提出的公式, 陡坡($\geq 14^\circ$)采用 Liu 等^[30]提出的公式。详细公式参见文献[28–30]。

1.3.4 C 因子和 P 因子 区域尺度上常根据对土地利用图进行赋值获取 C 和 P 因子。参考以往研究^[23, 31], 根据安徽省土地利用情况, 确定各土地利用类型平均 C 值: 旱地为 0.31, 居民地为 0.2, 水田为 0.18, 草地为 0.06, 疏林地地为 0.017, 林地地为 0.006, 裸岩为 0。 P 因子赋值如下: 林地、疏林地和草地为 1, 旱地为 0.35, 水田为 0.15, 居民用地和裸岩均为 0。

本研究中土壤侵蚀各因子的空间分辨率统一为 100 m。利用 RUSLE 模型和 ArcGIS 空间分析功能, 生成安徽省 1980 年、2000 年和 2010 年土壤侵蚀空间分布图, 统计全省和各地理区域的土壤侵蚀状况。参考水利部《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)进行重分类, 得到 3 个时期全省土壤侵蚀强度空间分布图, 利用 ArcGIS 空间分析功能研究不同时期土壤侵蚀强度的动态演变特征, 进一步探讨土壤侵蚀空间变化与高程、坡度的关系。本研究中假定 30 年间安徽省水域面积不变, 未纳入研究范围。

1.4 马尔柯夫预测方法

马尔柯夫方预测方法通过对各个时刻事件不同状态的初始概率及状态之间的转移关系, 来研究不同状态的变化趋势^[32]。该方法在土壤侵蚀演变、土地利用变化等领域中应用较多^[8–9]。该方法预测土壤侵蚀演变的关键在于确定各侵蚀等级间的相互转移的概率矩阵 T 。计算转移概率矩阵 T , 就是求出从状态 E_i 转为其他状态 E_j 的转移概率 $T_{ij}(i, j=1, 2, \dots, n)$ 。一般采用频率近似概率的思想求出每个 T_{ij} 。具体计算过程参见文献[32]。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀强度动态变化

2.1.1 全省 安徽省 1980 年土壤侵蚀总量为 6 199.92 万 t/a, 平均土壤侵蚀模数为 461.09 t/(km²·a); 2000 年侵蚀总量为 4 773.54 万 t/a, 平均土壤侵蚀模数为 355.01 t/(km²·a); 2010 年侵蚀总量为 3 297.84 万 t/a, 平均土壤侵蚀模数为 245.26 t/(km²·a)。与 1980 年相比, 2000 年和 2010 年全省平均侵蚀模数和侵蚀总量分别减少了 23.01% 和 46.81%。自 1980 年以来全省土壤侵蚀状况好转, 侵蚀总量和平均侵蚀模数均

呈降低趋势。

图 1 为安徽省 1980 年、2000 年和 2010 年土壤侵蚀强度等级图。3 个时期全省土壤侵蚀强度空间分布格局相似, 以微度侵蚀为主, 侵蚀强度由北至南逐渐加剧。中度及强度侵蚀主要分布在皖南丘陵山区和皖西大别山区, 微度侵蚀主要分布在淮北与沿淮平原、江淮丘陵和沿江平原, 这与程先富和余芬^[23]的研究结果一致。全省土壤侵蚀空间格局主要受地形特征主导, 南部和西部多为山区丘陵, 地形起伏较大; 北部多为平原地势平坦。此外, 全省降雨量南多北少的空间格局, 一定程度上也加剧了土壤侵蚀的空间分布格局。

表 1 为不同时期土壤侵蚀概况统计。从侵蚀面积来看, 1980 年、2000 年和 2010 年全省微度侵蚀面积不断增加, 分别占全省陆地总面积的 84.01%、87.20% 和 90.10%。全省其他侵蚀强度等级的面积逐渐减少, 其中强度及强度侵蚀以上的面积在 3 个时期分别为 3 097.81、2 332.25 km² 和 1 520.88 km², 占总面积的 2.29%、1.73% 和 1.13%。30 年以来全省微度侵蚀面积增加了 8 188.65 km², 增幅达 7.25%; 强度以上侵蚀面积减少了 1 576.93 km², 减幅达 50% 以上。1980—2010 年全省不同侵蚀强度的面积, 总体上由高等级侵蚀向低等级侵蚀转移。

从侵蚀量上看, 自 1980 年以来各侵蚀等级的侵蚀量总体上呈减少趋势, 其中微度和中度侵蚀量先增加后减小。剧烈、极强度和轻度侵蚀量减少较多, 分别为 784.63、755.93 和 677.70 万 t/a, 减幅达 86.77%、56.35% 和 41.13%。强度侵蚀面积虽然较小, 但其侵蚀模数较大, 进而使其对全省侵蚀量的贡献也较大。1980 年全省土壤侵蚀量主要贡献是轻度和极强度侵蚀, 其侵蚀量占全省侵蚀总量的 25.68% 和 21.64%。到 2000 年和 2010 年, 全省土壤侵蚀量的主要贡献转为微度和轻度侵蚀, 二者之和均占侵蚀总量的 40% 以上。剧烈和极强度侵蚀量对全省侵蚀量的贡献逐渐减小, 所占比例由 1980 年的 14.58% 和 21.64% 减少为 3.63% 和 17.76%。上述结果表明, 近 30 年来安徽省土壤侵蚀逐渐减弱, 水土保持成效显著。

2.1.2 各地理区域 表 2 为安徽省 5 大地理区域不同时期的土壤侵蚀量统计。1980—2010 年, 各地理区域土壤侵蚀强度差异较大, 其中皖南丘陵山区和皖西大别山区土壤侵蚀最严重, 3 个时期的平均土壤侵蚀强度均远高于全省平均水平; 淮北与沿淮平原侵蚀最弱, 平均土壤侵蚀强度均远低于全省平均水平, 平均侵蚀模数均不足 100 t/(km²·a)(表 2)。不同地

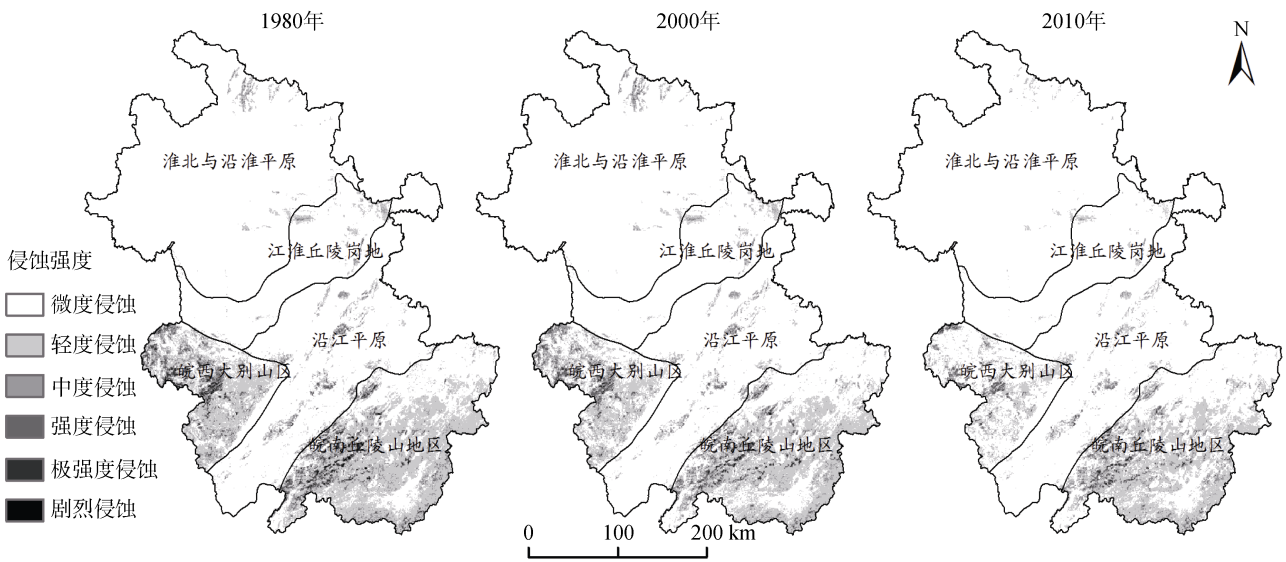


图 1 安徽省土壤侵蚀强度等级空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of soil erosion intensity in Anhui Province

表 1 安徽省土壤侵蚀统计
Table 1 Statistics of soil erosion in Anhui Province

侵蚀分级 (t/(km ² ·a))	侵蚀面 (km ²)			侵蚀量(×10 ⁴ t/a)		
	1980 年	2000 年	2010 年	1980 年	2000 年	2010 年
微度(< 500)	112 963.24	117 251.74	121 151.89	852.04	928.85	647.01
轻度(500 ~ 2 500)	16 487.01	12 893.82	10 461.04	1 647.86	1 202.61	970.16
中度(2 500 ~ 5 000)	1 931.59	1 983.84	1 327.84	653.94	696.65	456.91
强度(5 000 ~ 8 000)	1 313.55	1 318.54	858.87	800.27	803.89	518.53
极强度(8 000 ~ 15 000)	1 305.18	863.65	592.14	1 341.56	868.75	585.63
剧烈(> 15 000)	461.08	150.06	69.87	904.24	272.71	119.61
总计	134 461.65	134 461.65	134 461.65	6 199.92	4 773.54	3 297.84

表 2 1980—2010 年各地理区域土壤侵蚀量统计
Table 2 Statistics of soil erosion in various geographic areas from 1980 to 2010

地理区域	面积 (km ²)	侵蚀模数均值(t/(km ² ·a))			侵蚀量(×10 ⁴ t/a)		
		1980 年	2000 年	2010 年	1980 年	2000 年	2010 年
淮北与沿淮平原	47 460.71	69.20	84.91	25.35	328.42	403.00	120.31
江淮丘陵岗地	15 057.29	188.20	143.65	116.13	555.19	423.77	342.59
沿江平原	29 500.88	125.75	114.47	60.25	189.34	172.36	90.72
皖西大别山区	13 266.64	1 406.16	1 028.24	535.05	1 865.51	1 364.13	709.83
皖南丘陵山区	29 176.13	1 117.85	826.11	697.28	3 261.46	2 410.27	2 034.39

理区域的平均土壤侵蚀模数最大相差约 10 ~ 30 倍。皖南丘陵山区和皖西大别山区的土壤侵蚀总量最大，二者之和占全省侵蚀总量的 70% 以上。

从各地理区域的平均土壤侵蚀模数和侵蚀总量的变化来看，1980 年以来各地理区域的土壤侵蚀强度总体上减弱。各地理区域减小的幅度存在明显差异，其中淮北与沿淮平原的土壤侵蚀先加剧再减弱，其他区域侵蚀强度逐渐减弱。从 1980—2010 年，皖西大别山区和皖南丘陵山区的平均土壤侵蚀模数变

化较大，分别减少 871.11 t/(km²·a)和 420.57 t/(km²·a)，侵蚀量分别减少 1 155.68 万 t 和 1 227.07 万 t。淮北与沿淮平原和沿江平原的平均土壤侵蚀模数分别减少 43.85 t/(km²·a)和 65.50 t/(km²·a)，侵蚀量分别减少 208.11 万 t 和 98.62 万 t。

2.2 土壤侵蚀强度空间演变特征

2.2.1 1980—2000 年土壤侵蚀空间变化特征 图 2 为安徽省土壤侵蚀强度空间变化分布图，表 3 为 1980—2000 年土壤侵蚀面积转移矩阵。1980—2000

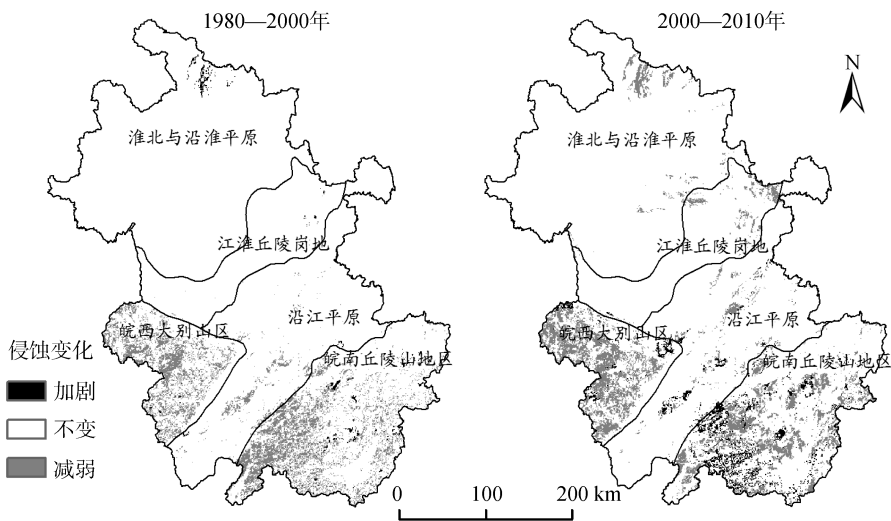


图 2 安徽省土壤侵蚀强度变化空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of changes in soil erosion intensity in Anhui Province

表 3 安徽省 1980—2000 年土壤侵蚀面积转移矩阵(km²)
Table 3 Transition matrixes of various soil erosion grade area from 1980 to 2000 in Anhui Province

1980 年	2000 年					
	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
微度	112 770.30	165.53	26.31	1.06	0.04	0.00
轻度	4 457.02	11 831.10	74.81	60.05	57.25	6.78
中度	12.43	888.07	988.44	33.23	2.02	7.40
强度	5.64	2.44	891.96	401.79	11.32	0.40
极强度	6.35	3.07	2.23	820.96	472.21	0.36
剧烈	0.00	3.61	0.09	1.45	320.81	135.12

年,全省土壤侵蚀状况总体上减轻,土壤侵蚀强度变化区域主要分布在皖西大别山区和皖南丘陵山地区。土壤侵蚀减弱的面积达 7 416.13 km²,其中土壤侵蚀减弱一个等级(如轻度侵蚀转化为微度侵蚀)的面积为 7 378.82 km²,减弱两个及两个等级以上的面积仅为 37.31 km²。土壤侵蚀加剧的面积为 446.56 km²,主要分布在皖南山区的地形起伏较大区域,其中侵蚀强度增加一个等级(如微度侵蚀转化为轻度侵蚀)的面积为 285.25 km²,侵蚀强度增加两个及两个等级以上的面积为 161.31 km²。

从不同土壤侵蚀等级转移方向看,微度土壤侵蚀转移面积较少,不足自身面积的 1%,仅有少量面积向轻度、中度侵蚀转移。轻度侵蚀转移面积占 28.24%,主要向微度侵蚀转移,仅有少量面积转化为侵蚀程度较强的等级。中度及中度侵蚀等级以上的转移面积较大,且向各侵蚀等级均有转移。中度土壤侵蚀转移面积占 48.83%,主要向轻度侵蚀转移,转移面积占 45.98%。强度土壤侵蚀转移面积占 69.41%,主要向中度侵蚀转移;仅有极少量面积转化为极强度侵蚀,不足 12 km²。

极强度土壤侵蚀转移面积占 63.82%,主要向强度侵蚀转移;仅有极少量面积转化为剧烈侵蚀,不足 1 km²。剧烈土壤侵蚀主要向极强度侵蚀转移,面积占 69.58%。

2.2.2 2000—2010 年土壤侵蚀空间变化特征 表 4 为 2000—2010 年的土壤侵蚀面积转移矩阵。与过去 20 年相比,2000—2010 年全省土壤侵蚀状况总体上持续减轻,各侵蚀等级间均有相互转移;土壤侵蚀空间变化格局相似,变化区域主要分布在皖西和皖南山区(图 2 右)。全省土壤侵蚀减弱的面积达 7 564.49 km²,其中侵蚀减弱一个等级的面积为 6 262.07 km²,减弱两个及两个等级以上的面积仅为 1 302.42 km²。土壤侵蚀加剧的面积为 2 512.87 km²,主要分布在皖南山区的地形起伏较大区域,其中侵蚀强度增加一个等级的面积为 2 424.36 km²,侵蚀强度增加两个及两个等级以上的面积仅为 88.51 km²。这一时期全省土壤侵蚀空间变化范围较大,侵蚀减弱和加剧的面积均高于过去 20 年。这与张乃夫^[22]的研究结果相一致,该研究表明 2000 年以后安徽省新安江流域土壤侵蚀状况减轻,无论在面积和分

表 4 安徽省 2000—2010 年土壤侵蚀面积转移矩阵(km²)
Table 4 Transition matrixes of various soil erosion grade area from 2000 to 2010 in Anhui Province

2000 年	2010 年					
	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
微度	115 426.72	1 771.69	32.68	13.69	5.86	1.10
轻度	5 004.00	7 668.98	203.78	9.55	6.48	1.03
中度	529.67	630.24	580.64	227.84	15.40	0.05
强度	162.20	266.73	346.25	353.40	187.29	2.67
极强度	25.78	117.11	135.95	227.76	323.29	33.76
剧烈	3.52	6.29	28.54	26.63	53.82	31.26

布范围上侵蚀变化均较大，其中侵蚀面积总体减少 14.65%，其中轻度、强度和极强度侵蚀面积减少较多分别为 23.48%、81.04% 和 42.44%。

2000—2010 年，全省微度土壤侵蚀转移面积较少，转移面积占 1.56%，主要转化为轻度侵蚀，面积达 1 771.69 km²，仅有少量面积向中度和强度侵蚀转移。轻度侵蚀转移面积占 40.52%，主要向微度土壤侵蚀转移，仅有少量面积转化为侵蚀程度较强的等级。中度侵蚀转移面积占 70.73%，向轻度和微度侵蚀转移的面积分别占 31.77% 和 26.70%。强度侵蚀转移面积占 73.20%，主要向中度侵蚀转移。极强度侵蚀转移面积占 62.57%，主要向强度侵蚀转移。剧烈土壤侵蚀转移面积占 79.17%，主要向极强度侵蚀转移。

综上所述，安徽省近 30 年土壤侵蚀总体上明显改善，侵蚀减弱的总面积达 11 762.83 km²，侵蚀

加剧的面积仅 811.21 km²。土壤侵蚀变化呈现以下特点：微度侵蚀仅有少量面积向侵蚀强度较强等级转化，其他侵蚀等级主要向侵蚀程度较弱等级转化；随着土壤侵蚀强度的增加，侵蚀转移的面积占本侵蚀强度面积的比例逐渐增加；土壤侵蚀强度转移是逐级转化的。

2.3 土壤侵蚀动态演变预测

表 5 为 2000—2010 年全省土壤侵蚀等级转移概率矩阵。表 6 为利用马尔柯夫模型预测的全省未来 30 年各土壤侵蚀等级的面积。结果表明，若按现在的土壤侵蚀状况和水土保持措施发展下去，未来 30 年全省土壤侵蚀状况总体上逐渐减轻：微度土壤侵蚀面积逐渐增加，其他侵蚀等级的面积持续减少，其中轻度以上侵蚀面积变化较明显，说明目前的水土保持措施较得当。

表 5 安徽省 2000—2010 年土壤侵蚀等级转移概率矩阵(%)
Table 5 Transition probability matrixes of various soil erosion grades from 2000 to 2010 in Anhui Province

2000 年	2010 年					
	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
微度	98.44	1.51	0.03	0.01	0.00	0.00
轻度	38.81	59.48	1.58	0.07	0.05	0.01
中度	26.70	31.77	29.27	11.48	0.78	0.00
强度	12.30	20.23	26.26	26.80	14.20	0.20
极强度	2.99	13.56	15.74	26.37	37.43	3.91
剧烈	2.35	4.19	19.02	17.75	35.87	20.83

表 6 安徽省不同土壤侵蚀等级面积的预测(km²)
Table 6 Prediction of soil erosion areas at different levels in Anhui Province

侵蚀等级	实际值		预测值		
	2000 年	2010 年	2020 年	2030 年	2040 年
微度	117 251.74	121 151.89	125 595.79	126 795.05	127 593.71
轻度	12 893.82	10 461.04	7 526.81	6 700.11	6 138.95
中度	1 983.84	1 327.84	661.54	496.19	389.94
强度	1 318.54	858.87	390.47	274.24	200.37
极强度	863.65	592.14	260.11	177.68	125.61
剧烈	150.06	69.87	26.93	18.37	13.06

全省微度土壤侵蚀面积，到 2020 年增加到 125 595.79 km²，占总面积的 93.41%；预计到 2040 年增加到总面积的 94.89%。轻度土壤侵蚀，到 2020 年减少到总面积的 5.60%，比 2010 年减少 2 934.23 km²；预计到 2040 年减少到总面积的 4.57%。轻度以上土壤侵蚀面积总和，到 2020 年减少到总面积的 1% 以下，预计到 2040 年减少到总面积的 0.5% 以下。与 2010 年相比，2020 年轻度以上土壤侵蚀面积减少幅度较大，均减少一半以上。

3 讨论

地形是影响土壤侵蚀的自然要素，它控制着地表物质和能量的再分配，决定着地表径流的运动状态和方向。陈明华等^[33]在 5°~26°坡度范围的人工扰动土和 5°~37°坡度范围的自然原土土的试验表明不同坡

度等级的土壤侵蚀量相差 2~3 倍。表 7、表 8 为近 30 年土壤侵蚀强度变化区域在不同海拔、坡度带的分布面积。1980—2000 年和 2000—2010 年全省土壤侵蚀变化面积在不同海拔带、坡度带存在明显差异。不同高程带上，土壤侵蚀加剧和减弱的面积均在 200~500 m 区域最大，以此为中心向上、向下递减。不同坡度带上，侵蚀加剧和减弱的面积均在 15°~25°区域最大，以此为中心向上、向下递减。该区域是全省土壤侵蚀变化的敏感区域，无论是侵蚀加剧还是减弱都极易发生。坡耕地开垦极易引发水土流失，特别在 15°以上的顺坡开垦方式，25°以上开垦造成水土流失的概率为 100%。因此>25°区域严禁农业开垦，5°~25°为保护性开垦，宜采用横坡耕作或梯田耕作，并辅助等高篱、田埂保护等植物措施。因此全省应在该区域加强水土保持政策的宣传和侵蚀治理工作。

表 7 不同高程带土壤侵蚀变化面积
Table 7 Area changes of soil erosion intensity at different elevation zones

高程 (m)	1980—2000 年(km ²)		2000—2010 年(km ²)	
	加剧	减弱	加剧	减弱
1~100	121.39	684.79	242.70	953.41
100~200	98.10	1 244.90	471.27	1 200.23
200~500	131.86	3 539.85	1 316.11	2 952.16
500~800	51.34	1 307.73	339.82	1 692.07
800~1 200	40.53	543.05	117.75	653.67
1 200~1 900	3.34	95.81	25.22	112.95

表 8 不同坡度带土壤侵蚀变化面积
Table 8 Area changes of soil erosion intensity at different slope levels

坡度 (°)	1980—2000 年(km ²)		2000—2010 年(km ²)	
	加剧	减弱	加剧	减弱
0~5	91.73	363.49	93.70	447.96
5~8	37.35	505.15	154.55	595.50
8~15	117.49	1 355.26	351.02	1502.16
15~25	143.33	4 420.87	1 645.16	3 313.29
25~35	48.54	585.46	218.16	1504.73
35~90	8.12	185.90	50.28	200.85

近 30 年来，安徽省土壤侵蚀状况总体减弱，这主要与当地的水土保持治理工作密不可分。自 1980 年以后，全省水土保持工作逐步恢复并走入正轨，尤其是近年来，在各级党委、政府的正确领导和大力支持下，水土保持工作进入快速发展时期。80 年代以来全省累计治理水土流失面积 112 万 hm²，其中建设水平梯田 8.17 万 hm²，水保林 28 万 hm²，经济林 14.49 万 hm²，种草 0.77 万 hm²，封禁治理 57.03 万 hm²，其他措施 3.57 万 hm²^[21]。

在水土流失严重的皖西和皖南丘陵山区，地形

因素主导着土壤侵蚀特征^[23]。对于地形平缓的地区(如<15°)，可以通过相应的保护性开垦，减少水土流失同时解决山区人民的生活生产需求。如安徽黄山地区、岳西县等地的茶叶梯田，潜山县高标准石埂田。自 1998 年，通过国债项目，全省有 2 个市、3 个县和 23 条小流域被命名为全国水土保持生态环境建设“十百千”示范城市、示范县和示范小流域^[21]，这些地方主要分布在皖西和皖南山区。合理的水土保持措施、政策的大力支持是全省尤其是皖西和皖南山区土壤侵蚀减弱的主要原因。

马尔柯夫模型是利用某一变量的现状和动向预测未来状态的一种分析手段,主要关注变量的前后状态,忽略邻域变量的状态对其转移规律的影响。因此,该方法仅能预测变量的变化结果,无法预测变化结果的空间分布,但其计算结果可作为多种方法的一种对比。元胞自动机和元胞自动机-马尔柯夫模型是目前较流行的土壤侵蚀和土地利用空间变化模拟方法,今后的工作需在该领域继续深入研究。

4 结论

1980—2010年,安徽省土壤侵蚀状况好转,平均侵蚀模数和侵蚀总量均呈逐渐降低趋势。皖西大别山区和皖南丘陵山区的土壤侵蚀模数变化较大,淮北与沿淮平原和沿江平原的土壤侵蚀模数变化较小。30年来全省微度侵蚀面积增加了 $8\,188.65\text{ km}^2$;强度以上侵蚀面积减少了 $1\,576.93\text{ km}^2$ 。

1980年、2000年和2010年,全省以微度侵蚀为主,侵蚀强度空间分布规律一致,侵蚀强度由北向南逐渐加剧。1980—2010年,全省土壤侵蚀状况明显改善,侵蚀强度减弱面积达 $11\,762.83\text{ km}^2$,侵蚀强度加剧面积仅 811.21 km^2 ;变化区域主要分布在皖西大别山区和皖南丘陵山地区。土壤侵蚀空间变化呈现以下特点:微度侵蚀仅有少量面积向侵蚀强度较强等级转化,其他侵蚀等级主要向侵蚀程度较弱等级转化;随着土壤侵蚀强度的增加,土壤侵蚀转移面积占本侵蚀强度面积的比例逐渐增加;侵蚀强度转移是逐级转化的。若按当前的土壤侵蚀状况和水土保持措施发展下去,未来30年全省土壤侵蚀状况总体上逐渐减轻,微度土壤侵蚀面积逐渐增加,其他侵蚀等级的面积持续减少。

致谢:感谢长江三角洲科学数据共享平台(<http://nnu.geodata.cn>)为本研究提供了1980年和2000年安徽省土地利用图,中国科学院遥感与数字地球研究所陈良富研究员提供了2010年安徽省土地利用数据。

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[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(4): 89-91

[2] McHugh M. Short-term changes in upland soil erosion in England and Wales: 1999 to 2002[J]. Geomorphology, 2007, 86: 204-213

[3] Nigel R, Rughooputh SDDV. Soil erosion risk mapping with new datasets: An improved identification and prioritisation of high erosion risk areas[J]. Catena, 2010, 82: 191-205

[4] Prasuhn V. Soil erosion in the Swiss midlands: Results of a 10-year field survey [J]. Geomorphology, 2011, 126: 32-41

[5] 郭学军, 郭立明. 应用不同时期的航片分析土壤侵蚀量的动态变化[J]. 中国水土保持, 1994, (02): 40-42

[6] 范建容, 柴宗新, 刘淑珍, 等. 基于RS和GIS的四川省李子河流域土壤侵蚀动态变化[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 25-28

[7] 赵岩洁, 李阳兵, 冯永丽. 三峡库区紫色岩小流域土壤侵蚀强度动态监测[J]. 资源科学, 2012, 34(6): 1125-1133

[8] 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[J]. 环境遥感, 1995, 10(2): 89-96

[9] 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测[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 31-36

[10] 史德明, 梁音, 吕喜玺, 等. 江西省兴国县土壤侵蚀动态监测研究[J]. 长江流域资源与环境, 1995, 4(3): 257-263

[11] 潘剑君, 赵其国, 张桃林. 江西省兴国县、余江县土壤侵蚀时空变化研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 58-64

[12] 赵晓丽, 张增祥, 王长有, 等. 基于RS和GIS的西藏中部地区土壤侵蚀动态监测[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 44-50

[13] 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: 263-273

[14] Meshesha D T, Tsunekawa A, Tsubo M, et al. Dynamics and hotspots of soil erosion and management scenarios of the Central Rift Valley of Ethiopia[J]. International Journal of Sediment Research, 2012, 27: 84-99

[15] Alkharabsheh M M, Alexandridis T K, Bilas G, et al. Impact of land cover change on soil erosion hazard in northern Jordan using remote sensing and GIS[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 19: 912-921

[16] 张树文, 王文娟, 李颖, 等. 近50年来三江平原土壤侵蚀动态分析[J]. 资源科学, 2008, 30(6): 843-849

[17] 陆建忠, 陈晓玲, 李辉, 等. 基于GIS/RS和USLE鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 337-344

[18] 李天宏, 郑丽娜. 基于RUSLE模型的延河流域2001—2010年土壤侵蚀动态变化[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1164-1175

[19] 姜琳, 边金虎, 李爱农, 等. 岷江上游2000—2010年土壤侵蚀时空格局动态变化[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 18-25

[20] 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): 1197-1203

[21] 安徽省水利厅. 安徽省水土保持监测公报[M]. 合肥, 2005

[22] 张乃夫. 安徽新安江流域景观格局特征及土壤侵蚀评价[D]. 泰安, 山东农业大学, 2014

[23] 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

- [24] 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. 土壤学报, 2016, 53(1): 28–38
- [25] 周伏建, 陈明华, 林福兴. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 27–33
- [26] United States Department of Agriculture. EPIC-Erosion/productivity impact calculator 1. Model documentation[M]. Washington DC: Technical Bulletin Number 1768, 1990
- [27] 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
- [28] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses—a guide for conservation planning[M]. USDA, Agriculture Handbook, No.537, 1978
- [29] McCool D K, Brown 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
- [30] 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
- [31] 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[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19–24
- [32] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002
- [33] 陈明华, 周伏建, 黄炎和, 等. 坡度和坡长对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 31–36

Dynamic Evolution and Prediction of Soil Erosion in Anhui Province from 1980 to 2010

ZHAO Mingsong^{1,2}, LI Decheng², ZHANG Ganlin^{2*}

(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)

Abstract: Based on revised universal soil loss equation (RUSLE) and GIS technique, this research analyzed the spatial distribution of soil erosion in 1980, 2000, and 2010, and its dynamic evolution in Anhui Province, and predicted soil erosion change over the next 30 years based on Markov model. Furthermore, this paper explored relationships of spatial change of soil erosion intensity with elevation and slope based on spatial analysis of GIS. The results showed: 1) soil erosion of Anhui Province obviously improved from 1980 to 2010, and mean soil erosive modulus decreased from $461.09 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ to $245.26 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, the amount of soil erosion decreased from $6\,199.92 \times 10^4 \text{ t/a}$ to $3\,297.84 \times 10^4 \text{ t/a}$. Slight soil erosion areas increased by $8\,188.65 \text{ km}^2$, and intensive soil erosion areas reduced by $1\,576.93 \text{ km}^2$. 2) Spatially, soil erosion strengthened from north to south in three periods. Slight soil erosion mainly distributed in Huaibei Plain and Jianghuai Hilly Region, while intensive soil erosion mainly in hilly mountain of southern and western Anhui. 3) From 1980 to 2010, area of soil erosion grade weakened was $11\,762.83 \text{ km}^2$, area of soil erosion strengthened only was only 811.21 km^2 . Soil erosion change mainly distributed in region of $200 \sim 500 \text{ m}$ and $15^\circ \sim 25^\circ$. Soil erosion grade transformed stepwise. Erosion grade mainly transformed into weaker grade, and only a few of slight erosion transformed into the stronger grade. 4) According to the Markov prediction, soil erosion improved over the next 30 years, area of slight soil erosion gradually increased while areas of other erosion grades declined.

Key words: RUSLE; Soil erosion; Markov model; Spatial dynamic evolution; Anhui Province