

基于EI指数的江苏省土壤侵蚀县域差异 及变化趋势分析

代梦梦¹, 田芷源¹, 梁 音¹, 郭红丽², 张 嫜², 张艺铭³

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008;
2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029; 3. 江苏省水文水资源勘测局泰州分局, 江苏 泰州 225300)

摘要:采用土壤侵蚀综合指数对江苏省县域土壤侵蚀状况空间分布及变化趋势进行了分析, 结果表明: ①96个县(区)平均EI指数逐年降低, 2019—2021年EI指数分别为0.2997、0.2152和0.1997; ②全省土壤侵蚀严重等级空间分布表现为北部和西部丘陵山区的土壤侵蚀严重等级较高, 中西部平原地区的土壤侵蚀严重等级较低; ③全省96个县(区)中有59个EI指数呈现逐年递减的趋势($21 < 20 < 19$), 有19个县(区)的EI指数呈现波动减小的趋势($20 < 21 < 19$ 或 $21 < 19 < 20$), 有18个县(区)的EI指数呈现波动增大的趋势($20 > 21 > 19$ 或 $21 > 19 > 20$)。研究成果可为江苏省水土流失治理及成效评价提供依据。

关键词:土壤侵蚀综合指数; 水土流失; 空间分布; 变化趋势

中图分类号: S157 文献标识码: B 文章编号: 1007-7839(2023)10-0015-0007

Analysis of county level variation and changing trends of soil erosion in Jiangsu Province based on EI index

DAI Mengmeng¹, TIAN Zhiyuan¹, LIANG Yin¹, GUO Hongli²,
ZHANG Qiang², ZHANG Yiming³

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China; 3. Taizhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Taizhou 225300, China)

Abstract: This study used the Soil Erosion Aggregative Index (EI) to analyze the spatial distribution and change trend of soil erosion status at the county level of Jiangsu Province. The results show that: ①The average EI of 96 counties (districts) has been decreasing, reaching 0.2997, 0.2152, and 0.1997 from 2019 year to 2021 year, respectively; ②The spatial distribution of soil erosion severity level in Jiangsu province is characterized by higher

收稿日期: 2023-08-28

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021059、2020051)

作者简介: 代梦梦(1995—), 女, 硕士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: daimengmeng@issas.ac.cn

通信作者: 梁音(1963—), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持生态恢复研究。E-mail: yliang@issas.

ac.cn

soil erosion severity level in the northern and western hilly and mountainous areas, and lower soil erosion severity level in the central and western plain areas; ③ Among the 96 counties (districts) in the province, 59 is decreasing year by year in EI ($21 < 20 < 19$), 19 counties (districts) have a fluctuant decreasing trend in EI ($20 < 21 < 19$ or $21 < 19 < 20$), and 18 counties (districts) have a fluctuant increasing trend in EI ($20 > 21 > 19$ or $21 > 19 > 20$). The research results can provide a basis for soil erosion control and effectiveness evaluation in Jiangsu Province.

Key words: soil erosion aggregative index; water and soil erosion; spatial distribution; change trend

水土流失面积和土壤侵蚀模数是表征区域水土流失严重程度的两项关键指标^[1-2]。以往的研究大多只关注水土流失面积占比(如水土流失率^[3-4]、水土保持率^[5-6]),评价结果不够全面;或使用两个指标共同表征,但评价结果不够简明^[7]。土壤侵蚀综合指数既能表征评价单元土壤侵蚀模数的大小,同时能反映水土流失面积的变化,具有综合性和可比性的特点^[8]。本研究借鉴前人^[7,9]提出的计算方法,进一步明确了不同水土保持区划各侵蚀等级的权重值,分析江苏省在县级尺度上土壤侵蚀综合指数的空间分布和变化趋势,旨在为江苏省科学制定水土流失治理方案提供依据。

1 研究区概况

江苏省位于我国东部沿海地区,介于 $116^{\circ}18' - 121^{\circ}57'E$, $30^{\circ}45' - 35^{\circ}20'N$,全省陆地总面积 10.72 万 km^2 ,共有 13 个设区市,96 个县(市、区)。江苏省地势平坦,平原面积占比高达 68.8%。江苏省属于亚热带向暖温带的过渡区,气候温和,雨量适中,四季分明,全年平均气温在 $13 \sim 16^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量为 $800 \sim 1100 \text{ mm}$,但时空分布不均,降雨多集中在 5—9 月。依据全国水土保持区划^[10],江苏省地跨南方红壤区及北方土石山区 2 个一级区,并进一步被划分为 3 个二级区和 7 个三级区(图 1),水土保持功能主要涉及农田防护、水质维护、人居环境、土壤保持等方面。全省土壤侵蚀以水蚀为主,丰县和沛县存在少量风蚀。

2 研究方法与数据

2.1 土壤侵蚀综合指数 EI 值的概念

土壤侵蚀综合指数(soil erosion aggregative index, EI, 公式中用 I_{EI} 表示)是一项评价研究单元内土壤侵蚀总体状况的综合指标,是根据评价单元内各级土壤侵蚀面积和土地总面积量化分级进行权重变换后形成的一个综合指标数值,其表达式为

$$I_{EI} = \sum_{i=1}^n W_i A_i / S \quad (1)$$

式中: S 为评价单元土地面积; A_i 为第 i 等级土壤侵蚀面积; W_i 为第 i 等级土壤侵蚀等级权重; n 为土壤侵蚀等级数,取值为 1~6。

2.2 EI 指数的侵蚀学意义

由式(1)可知: EI 指数的取值范围理论上是 0~100 之间,代表两个极端值。其侵蚀学意义是:当 EI 指数为 0 时,评价单元上没有任何级别可造成水土流失危害的土壤侵蚀发生,或者说评价单元内全部是微度侵蚀(南方红壤区土壤侵蚀模数 $\leq 500 \text{ t/km}^2$, 北方土石山区土壤侵蚀模数 $\leq 200 \text{ t/km}^2$),这在平原区域是实际存在的,而且比较普遍;当 EI 指数为 100 时说明评价单元上全部是剧烈侵蚀,这种情况在实际当中是不可能存在的,除非评价单元很小(例如一个径流小区)。一般而言评价单元的土壤侵蚀综合指数大小均是介于这两个极值之间, EI 值越高表示着该单元的土壤侵蚀对区域环境的危害越严重,

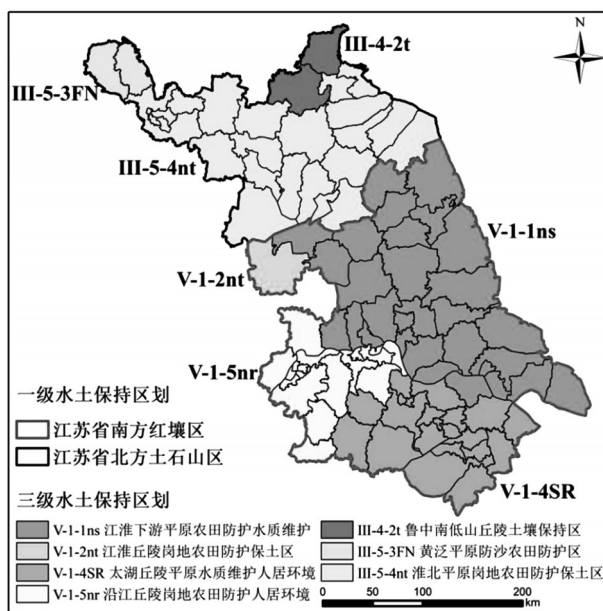


图 1 江苏省水土保持区划分区

相反,EI值越低表示该单元土壤侵蚀对区域环境的危害越轻。此外,当评价单元以县级行政区为单元时,强度、极强度和剧烈侵蚀的面积不可能占很高的比例,所以EI值远小于100。

2.3 权重分值的多项式法推算

依据国家标准^[11],按照土壤侵蚀模数的大小,将土壤侵蚀强度分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈6级,不同等级土壤侵蚀强度对区域生态环境的危害不同。江苏省地跨南方红壤区和北方土石山区两大水土保持区划^[10],二者在土壤侵蚀强度分级标准上略有不同。

针对南方红壤区,本研究引入梁音等^[1]提出的多项式方程模拟法对各级别的土壤侵蚀模数中值进行修正,拟合后得到的多项式方程为

$$Y = 104.17X^3 - 366.07X^2 + 1\,779.8X - 1\,300 \quad (2)$$

式中: Y 为土壤侵蚀模数中值; X 为土壤侵蚀等级级别,取值为1~6,该方程的决定系数 $r^2=0.9991$ 。

将数值6代入式(2),得到南方红壤区剧烈等级的预测中值为 $18\,700\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,将其权重赋值为100,计算各侵蚀强度等级的实际模数中值占18 700的比重,进而确定各等级的权重,如表1所示。由于微度侵蚀不构成水土流失危害,研究将其权重值确

定为0。

针对北方土石山区,研究借鉴梁音等^[1]的方法,对各级别的土壤侵蚀模数中值进行修正,拟合后得到的多项式方程为

$$Y = 91.67X^3 - 264.29X^2 + 1\,594X - 1\,360 \quad (3)$$

式中: Y 为土壤侵蚀模数中值, X 为土壤侵蚀等级级别,取值为1~6,该方程的决定系数 $r^2=0.9987$ 。

将数值6代入式(3),得到北方土石山区剧烈等级的预测中值为 $18\,490\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,将其权重赋值为100,计算各侵蚀强度等级的实际模数中值占18 490的比重,进而确定各等级的权重,如表2所示。

2.4 数据来源及计算

计算土壤侵蚀综合指数EI值所需的土壤侵蚀模数,来源于江苏省2019—2021年水土流失动态监测数据。应用式(1)计算得到江苏省96个县(区)的EI值,进而分析EI值的县域差异及其随时间的变化趋势。研究成果采用ArcGIS10.6制图展示。

3 结果与讨论

3.1 EI计算结果

研究统计了2019—2021年不同县(区)EI的计

表1 江苏省红壤区土壤侵蚀模数修正中值及权重指标

侵蚀强度	级别	水蚀侵蚀模数/ ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	侵蚀模数中值/ ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	预测中值/ ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	权重 W_i
微度	1	≤ 500	250	220	0.00
轻度	2	500~2 500	1 500	1 630	8.02
中期	3	2 500~5 000	3 750	3 560	20.05
强烈	4	5 000~8 000	6 500	6 630	34.76
极强烈	5	8 000~15 000	11 500	11 470	61.49
剧烈	6	$> 15\,000$		18 700	100.00

表2 江苏省土石山区土壤侵蚀模数修正中值及权重指标

侵蚀强度	级别	水蚀侵蚀模数/ ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	侵蚀模数中值/ ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	预测中值/ ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	权重 W_i
微度	1	≤ 500	100	60	0.00
轻度	2	500~2 500	1 350	1 500	7.30
中期	3	2 500~5 000	3 750	3 520	20.28
强烈	4	5 000~8 000	6 500	6 650	35.15
极强烈	5	8 000~15 000	11 500	11 460	62.20
剧烈	6	$> 15\,000$		18 490	100.00

算结果(表3)。由表3可知,全省96个县(区)3年间EI值分别介于0.003~6.1997、0.003~2.7175、0.004~2.4089之间。全省EI均值分别为0.2997、0.2152、0.1997,与张玉刚等^[12]研究得出的2002—2011年江苏省EI值0.31相近。从统计结果来看,96个县(区)EI的极差、均值、变异系数均呈明显的减小趋势,表明经过2年的水土流失治理,江苏省土壤侵蚀的面积和程度减轻,县域之间发生土壤侵蚀状况的差异减小。

根据江苏省96个县(区)EI的分布情况,本研究将其按土壤侵蚀严重程度分为极轻微(EI值<0.01)、轻微($0.1>EI\geq 0.01$)、较严重($1>EI\geq 0.1$)和严重($EI\geq 1$)4个等级。研究统计了不同土壤侵蚀严重等级下的县(区)数量(表4),统计结果表明,江苏省96个县(区)土壤侵蚀严重等级以轻微和较严重为主,这两个等级的县(区)数量历年占比之和均超过70%,极轻微等级的县(区)数量3年间增加了5个,数量占比由2019年的18.75%上升至2021年的23.96%,严重等级的县(区)数量则由5个减少至3个。以上结果表明近年来江苏省水土流失得到有效控制。

3.2 EI指数空间分布

根据EI的计算方法,计算得到2019—2021年每个县(区)的EI值并进行分级统计,江苏全省96个县(区)的空间分布结果如图2所示。由图2可知,江苏省历年各县(区)土壤侵蚀严重等级空间分布特征基本一致,均表现为北部和西部丘陵山区的土壤侵蚀严重等级较高,中西部平原地区的土壤侵蚀严重等级较低。

2019年EI最高值出现在徐州市鼓楼区(6.1997),最低值出现在泰州市的姜堰区(0.0003)和兴化市(0.0003)。全省有5个县(区)的土壤侵蚀严重等级表现为严重($EI\geq 1$),分别是徐州市鼓楼区(6.1997)、常州市溧阳市(2.0171)、镇江市句容市(1.6172)、南京市溧水区(1.2869)、淮安市盱眙县(1.0297)。全省有37个县(区)的土壤侵蚀严重等级表现为较严重($1>EI\geq 0.1$),主要分布在北部沂沭低山丘陵平原区和西南部的宁镇扬及宜溧低山丘陵地区;有36个县(区)的土壤侵蚀严重等级表现为轻微($0.1>EI\geq 0.01$),主要分布在东部里下河平原及苏东滨海平原地区;有18个县(区)的土壤侵蚀严重等级表现为极轻微($EI<0.01$)主要分布在东

表3 EI计算结果统计

年份	最大值	最小值	极差	均值	变异系数
2019	6.1997	0.0003	6.1994	0.2997	2.3778
2020	2.7175	0.0003	2.7172	0.2152	1.8295
2021	2.4089	0.0004	2.4085	0.1997	1.7835

表4 2019—2021年江苏省各土壤侵蚀严重等级县(区)数量

土壤侵蚀 严重等级	EI值	县(区)数量			占全省比重/%		
		2019年	2020年	2021年	2019年	2020年	2021年
极轻微	0~0.01	18	21	23	18.75	21.88	23.96
轻微	0.01~0.1	36	37	37	37.50	38.54	38.54
较严重	0.1~1	37	33	33	38.54	34.38	34.38
严重	≥ 1	5	5	3	5.21	5.21	3.13

南长江三角洲平原区。

2020年EI最高值与2019年一致,出现在徐州市鼓楼区(2.7175),最低值则仅出现在泰州市兴化市(0.0003)。全省有5个县(区)的土壤侵蚀严重等级表现为严重($EI\geq 1$),分别是徐州市鼓楼区(2.7175)、徐州市贾汪区(1.3532)、常州市溧阳市

(1.1606)、南京市溧水区(1.0924),淮安市盱眙县(1.0763)。全省有33个县(区)的土壤侵蚀严重等级表现为较严重($1>EI\geq 0.1$),有37个县(区)的土壤侵蚀严重等级表现为轻微($0.1>EI\geq 0.01$),有21个县(区)的土壤侵蚀严重等级表现为极轻微($EI<0.01$)。这与2019年的空间分布规律极为相似,

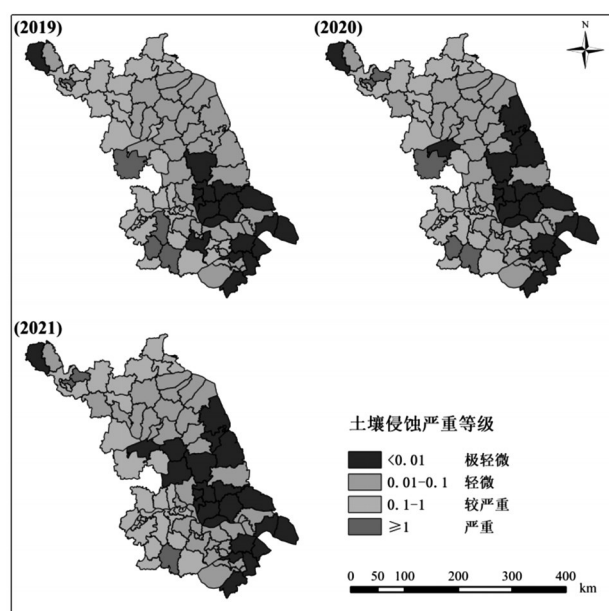


图2 江苏省2019—2021年土壤侵蚀严重等级空间分布

除极轻微等级县(区)向苏东滨海平原地区扩展。

2021年EI的极值分布与2020年一致,最高值出现在徐州市鼓楼区(2.4089),最低值出现在泰州市兴化市(0.0004)。全省减少至3个县(区)的土壤侵蚀严重等级表现为严重($EI \geq 1$),分别是徐州市鼓楼区(2.4089)、徐州市贾汪区(1.2105)、常州市溧阳市(1.1822)。全省有33个县(区)的土壤侵蚀严重等级表现为较严重($1 > EI \geq 0.1$),有37个县(区)的土壤侵蚀严重等级表现为轻微($0.1 > EI \geq 0.01$),有23个县(区)的土壤侵蚀严重等级表现为极轻微($EI < 0.01$)。与2020年相比,极轻微等级县(区)数量进一步增加,严重等级县(区)数量减少。

3.3 EI变化趋势

经过2019—2021年的治理,江苏省水土保持状况总体好转:总体表现为土壤侵蚀等级为严重和较严重的县(区)数量减少,表现为极轻微和轻微县(区)数量增加。其中,较为明显的是西南宁镇山脉一带,该区域范围内土壤侵蚀严重等级为严重的县(区)数量由2019年的3个,减少至2020年的2个和2021年的1个。

从96个县(区)2019—2021年土壤侵蚀综合指数(EI)的变化情况来看(表5,图3),全省有59个县(区)水土保持状况持续向好,出现EI呈现逐年递减的趋势($21 < 20 < 19$),占全省县(区)数量的61.46%。

全省有19个县(区)的EI呈现波动减小的趋势,其中15个县(区)的EI表现为2020年 $<$ 2021年 $<$

表5 江苏省2019—2021年不同EI指数变化县(区)数量统计

EI指数变化趋势		数量/个	数量占比/%
逐年递减	2019>2020>2021	59	61.64
	2019>2021>2020	15	15.63
波动减小	2020>2019>2021	4	4.17
	2020>2021>2019	16	16.67
波动增大	2021>2019>2020	2	2.08
	2021>2020>2019	0	0.00

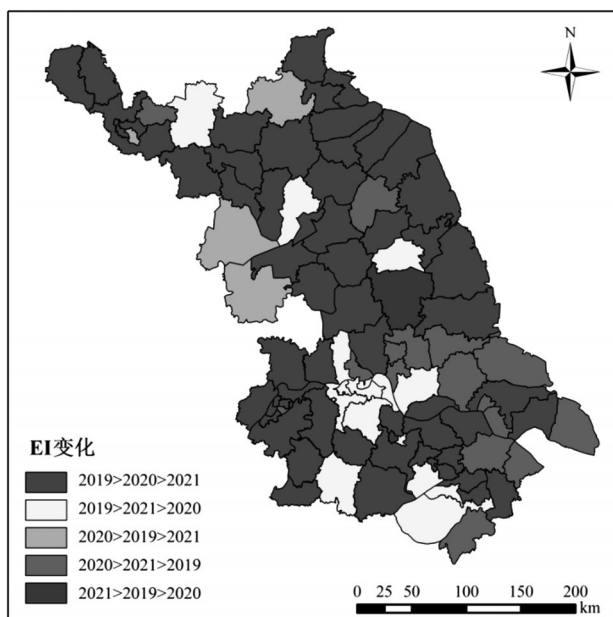


图3 江苏省2019—2021年土壤侵蚀综合指数变化情况

2019年,占全省县(区)数量的15.63%,主要分布在镇江市;另有徐州市云龙区、连云港市东海县、淮安市盱眙县、宿迁市泗洪县4个县(区)的EI表现为2021年 $<$ 2019年 $<$ 2020年,占全省县(区)数量的4.17%,且这4个县(区)水土流失率均较高。

全省有18个县(区)的EI呈现波动增大的趋势,其中16个县(区)的EI表现为2020年 $>$ 2021年 $>$ 2019年,占全省县(区)数量的16.67%,主要分布在苏州市和南通市,另有常州市钟楼区和泰州市兴化市2个县(区)的EI表现为2021年 $>$ 2019年 $>$ 2020年,占全省县(区)数量的2.08%。

3.4 EI变化程度

具体到96个县(区)土壤侵蚀综合指数EI的变化数值来看,各县(区)土壤侵蚀综合指数变化不大,绝大部分县(区)EI的变化集中在 $-0.02 \sim 0.02$ 之间(表6、图4),这主要是因为江苏省水土保持状况较好,EI总体较小。

表6 江苏省2019—2021年不同EI变化范围内县(区)数量

EI变化范围	2019— 2020年	2020— 2021年	2019— 2021年
≤ -0.2	8	2	9
$-0.2 \sim -0.1$	9	2	8
$-0.1 \sim -0.06$	8	3	11
$-0.06 \sim -0.02$	8	9	9
$-0.02 \sim -0.01$	11	2	13
$-0.01 \sim 0$	31	58	28
$0 \sim 0.02$	15	17	15
$0.02 \sim 0.04$	3	3	1
> 0.04	3	0	2

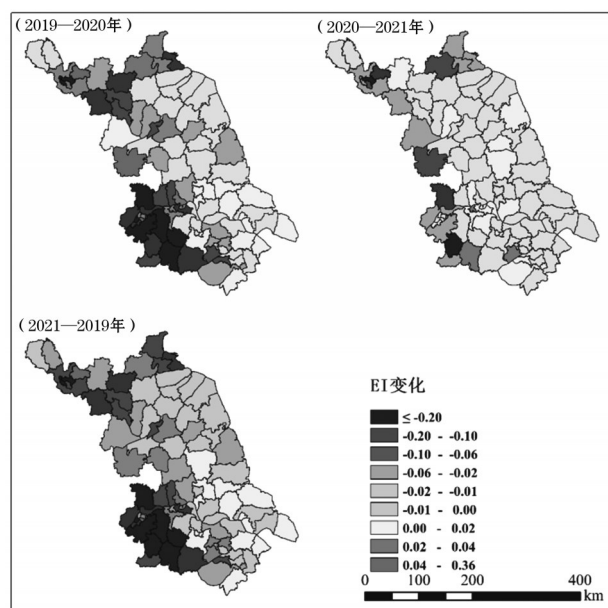


图4 江苏省2019—2021年土壤侵蚀综合指数空间变化

经过2019—2020年的治理,全省有75个县(区)土壤侵蚀综合指数(EI)减小,有21个县(区)土壤侵蚀综合指数(EI)增加(表6),表明绝大部分县(区)水土流失治理工作取得成效,但仍有部分县(区)的土壤侵蚀严重程度有所增强。具体而言,徐州市鼓楼区EI值减小最为明显,从6.1997下降至2.7175,降低了3.4822,此外常州市溧阳市、镇江市句容市、南京市建邺区EI值减小较多,分别降低了0.8565、0.6679和0.4173。EI值增加的县(区)中徐州市贾汪区、南京市秦淮区和淮安市盱眙县EI值增加最多,分别为0.3595、0.3240和0.0466。

经过2020—2021年的治理,全省有72个县

(区)土壤侵蚀综合指数EI减小,有4个县(区)土壤侵蚀综合指数EI保持不变,有20个县(区)土壤侵蚀综合指数EI增加(表6)。除南京市溧水区和徐州市鼓楼区分别减少了0.3737和0.3086,以及镇江市润州区、无锡市滨湖区和常州市溧阳市分别增加了0.0331、0.0248和0.0216外,其余91个县(区)的EI变化值集中在 $-0.2 \sim 0.02$ 之间。

综合2019—2021年治理成果,全省有77个县(区)土壤侵蚀综合指数EI减小,有1个县(区)土壤侵蚀综合指数EI保持不变,有18个县(区)土壤侵蚀综合指数EI增加(表6)。徐州市鼓楼区EI减小最为明显,降低了3.7909,其次是常州市溧阳市、镇江市句容市、南京市溧水区和南京市建邺区,分别降低了0.8350、0.6756、0.5683和0.4200;南京市秦淮区EI值增加最多,其次是徐州市贾汪区和扬州市广陵区,分别增加了0.3224、0.2168和0.0304。

以上数据表明,2019—2021年绝大部分县(区)土壤侵蚀状况得到不同程度的改善,这主要源于近年来开展的小流域治理工程,大幅减少了水土流失面积;少部分县(区)的EI值增加,这主要是因为城市发展需要造成在强烈及以上水土流失面积占比的上升。由此可见,水土流失治理不能仅关注面积的变化,还应当加强对侵蚀强度变化的监管。

4 结 语

通过对江苏省县域EI的计算和分析,得到以下几点主要结论:

(1)江苏省2019—2021年各县(区)土壤侵蚀严重等级空间分布特征基本一致,均表现为北部和西部丘陵山区的土壤侵蚀严重等级较高,中西部平原地区的土壤侵蚀严重等级较低。

(2)2019—2021年EI总体减小的县(区)数量占81.25%,EI总体增大的县(区)数量占18.75%,后续应重点加强这该部分县(区)的水土流失治理。

(3)江苏省水土保持状况较好,各县(区)EI变化较小,主要集中在 $-0.02 \sim 0.02$ 之间。

参考文献:

- [1] 李晶晶,张建国,贾利红,等. 区域水土流失面积与平均土壤侵蚀模数关系探究[J]. 中国水土保持, 2021(5): 36-38, 9.
- [2] 高云飞,张栋,赵帮元,等. 1990—2019年黄河流域水土流失动态变化分析[J]. 中国水土保持, 2020(10): 64-67, 7.
- [3] 陈明,张寿鹏. 云南省水土流失变化趋势分析[J]. 中国

- 水土保持,2000(7):8-9,45.
- [4] 叶永棋,杨轩. 浙江省水土流失时空演变研究[J]. 土壤, 2007(3):400-403.
- [5] 曹文洪,宁堆虎,秦伟. 水土保持率远期目标确定的技术方法[J]. 中国水土保持,2021(4):5-8,21.
- [6] 中华人民共和国水利部. 水土保持率目标确定方法指南[Z]. 北京:中华人民共和国水利部,2021:1-5.
- [7] 梁音,杨轩,苏春丽,等. 基于EI的南方红壤区土壤侵蚀县域差异与趋势分析[J]. 土壤学报,2009,46(1):24-29.
- [8] 李纯乾. 辽宁省土壤侵蚀宏观区域差异与趋势分析[J]. 中国水土保持,2013(4):47-48,49.
- [9] 李智广,罗志东. 县域土壤侵蚀严重性评价方法初探——土壤侵蚀严重指数的定义与应用[J]. 水土保持通报, 2006,26(4):41-43.
- [10] 中华人民共和国水利部. 全国水土保持规划(2015—2030年)[Z]. 北京:中华人民共和国水利部,2015.
- [11] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准:SL 190—2007[S]. 北京:中国水利水电出版社,2008:3-8.
- [12] 张玉刚,卢慧中,曹龙熹,等. 太湖流域片土壤侵蚀现状与变化[J]. 中国水土保持科学,2016,14(3):26-34.

(上接第14页)

- 多水源灌区灌溉用水量模拟分析[J]. 农业工程学报, 2018,34(14):94-100.
- [14] 唐华俊. 农业遥感研究进展与展望[J]. 农学学报,2018, 8(1):167-171.
- [15] 刘逸竹,吴文斌,李召良,等. 基于时间序列 NDVI 的灌溉耕地空间分布提取[J]. 农业工程学报,2017,33(22): 276-284.
- [16] 何娇娇,刘海新,张安兵,等. 温度反演和植被供水指数的农田灌溉面积提取[J]. 测绘科学,2017,42(5):50-55.
- [17] 王啸天. 大型灌区作物种植结构与实际灌溉面积遥感监测研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2016.
- [18] 田鑫,李瑞平,王思楠,等. 基于VSWI和TVDI差异的河套灌区沈乌灌域耕地灌溉面积遥感监测[J]. 灌溉排水学报,2020,39(8):129-135.
- [19] ZHANG J H, GUO W J. Quantitative retrieval of crop water content under different soil moistures levels [J]. Proceedings of SPIE Int Soc Opt Eng,2006.
- [20] TUCKER C J. Remote sensing of leaf water content in the near infrared [J]. Remote Sensing of Environment, 1980 (10):23-32.
- [21] CECCATO P, FLASSE S, TARANTOLA S, et al. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain [J]. Remote Sensing of Environment, 2001 (77):22-33.