

1986—2013 年南京市土地利用变化对土壤侵蚀的影响

郭 庚¹, 丁鸣鸣², 钱 洲³, 林 杰¹, 佟光臣⁴, 崔琳琳¹

(1.南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037;

2.南京市水务局, 南京 210036; 3.南京市水土保持管理中心, 南京 210008; 4.浙江省宁海县水利局, 浙江 宁海 315600)

摘 要:为了了解南京市土地利用变化对土壤侵蚀的响应,基于气象、土壤、地形、遥感等多源数据,运用 GIS 和统计方法分析了南京市 1986—2013 年的土地利用/覆被时空动态变化特征,并运用 RUSLE 模型定量评估了南京市的土壤侵蚀时空变化特征。结果表明:(1)全市土壤侵蚀呈现先增加后减少的趋势:1986—1996 年南京市土壤侵蚀面积增加了 132.95 km²,由 324.11 km²增加到 457.06 km²;1996—2013 年土壤侵蚀面积比从 7.46%减少到 2.45%,由 457.06 km²减少到 150.11 km²。空间分布结果表明南京市土壤侵蚀主要发生在生产建设活动较为频繁的丘陵山区。(2)全市不同等级侵蚀面积与对应的侵蚀量呈明显的倒挂现象,较高等级侵蚀区应当是重点治理区域。(3)土地利用类型是影响南京市土壤侵蚀的因素之一,87%以上的土壤侵蚀量动态变化集中在林地和耕地。值得注意的是,水域、居民点及建设用地和其他用地变化对土壤侵蚀无明显影响,而耕地变化对土壤侵蚀具有明显的负面影响,林地和草地变化对土壤侵蚀既具有负影响也具有正影响,以正面影响为主,主要是因为林地既转变成耕地也转变成居民点及建设用地和水域,不同时期其主要影响也不同。综上,该研究结果可为南京市土地资源配置及水土流失防治提供科学参考和理论依据。

关键词:GIS; RUSLE; 土地利用/覆被变化; 土壤侵蚀

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0108-09

Effect of Land Use Change on Soil Erosion in Nanjing from 1986 to 2013

GUO Geng¹, DING Mingming², QIAN Zhou³, LIN Jie¹, TONG Guangchen⁴, CUI Linlin¹

(1.Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2.Nanjing Water Conservancy Bureau, Nanjing 210036, China; 3.Soil and Water Conservation Management Center of Nanjing, Nanjing 210008, China; 4.Ninghai Water Conservancy Bureau, Ninghai, Zhejiang 315600, China)

Abstract:In order to understand the response of land use change on soil erosion in Nanjing, we analyzed the characteristics of temporal and spatial dynamics of land use/cover in Nanjing from 1986 to 2013 using GIS and statistical methods. The meteorological, soil, topographic, remote sensing and other multi-source data were used to quantitatively assess the spatial and temporal change characteristics of soil erosion in Nanjing using RUSLE model. The results show that: (1) soil erosion showed an initial increasing and then decreasing trend; from 1986 to 1996, the eroded area increased from 324.11 km² to 457.06 km², which increased by 132.95 km²; from 1996 to 2013, the eroded area decreased from 457.06 km² to 150.11 km², with the area ratio reducing from 7.46% to 2.45%; spatial distribution results showed that soil erosion mainly occurred in hilly mountainous areas of Nanjing where production and construction activities were more frequent; (2) the eroded area of different grades and the corresponding erosion amount were obviously inverted, and thus higher-grade erosion areas should be the key treatment regions; (3) land use type was one of the factors affecting soil erosion in Nanjing, and more than 87% of the dynamic changes of soil erosion concentrated in forestland and cultivated land; it is worth noting that changes in water bodies, residential and construction

收稿日期:2021-05-27

修回日期:2021-08-24

资助项目:国家自然科学基金面上项目“基于侵蚀与沉积过程的林下水蚀区碳源汇效益研究”(31870600)

第一作者:郭庚(1997—),男,江西省吉安市人,博士研究生,研究方向为土壤侵蚀与碳循环。E-mail: gengguoacademy@njfu.edu.cn

通信作者:林杰(1976—),女,辽宁省丹东人,博士,教授,主要从事土壤侵蚀与遥感监测方面的研究。E-mail: linjiecn@gmail.com

sites and other land use had no significant effects on soil erosion, while variations in cultivated land had significant negative impact on soil erosion, and the changes in forestland and grassland had both positive and negative impacts on soil erosion, with positive effects predominating; this was mainly due to the conversion of woodland, cultivated land, residential land, construction site and water, with their main effects varying from period to period. Overall, the results of this study can provide scientific reference and theoretical basis for land resource allocation and soil erosion control in Nanjing.

Keywords: GIS; RUSLE; the change of land use/cover; soil erosion

土壤侵蚀是影响最广、危害最严重的世界十大环境问题之一,它不仅导致水土资源流失、土地生产力下降和粮食减产,还会带来崩塌、滑坡、泥石流、洪水和水污染等生态环境问题^[1-4],已经成为影响社会经济持续稳定发展的限定性因素之一。因此,快速、准确地监测和预报土壤侵蚀对于实现资源与环境可持续性发展具有重要的意义。

土地利用/覆被变化(LUCC)长期以来一直是全球环境研究的热点和前沿问题之一,其与土壤侵蚀的关系是国际地圈与生物计划(International Geosphere Biosphere Program, IGBP)与全球环境变化的人文领域计划(International Human Dimensions Programme on Global Environment Change, IHDP)的核心研究计划之一,是全球环境研究的热点和前沿问题^[5]。土地利用覆被格局及其变化的复杂化,对生态系统的结构、功能和演变产生了深刻的影响^[6],产生诸如城市热岛效应^[7-8]、地表径流与土壤侵蚀^[9-10]、土壤性质变异^[11-13]、水资源污染^[14]、生物多样性减少等^[15]问题。LUCC是土壤侵蚀的催化剂,可以改变气候、土壤、植被等局部地区的微环境,进而影响土壤侵蚀。因此,探讨土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响对区域内水土流失防治等工作具有现实意义。

近年来,已有不少学者对 LUCC 与土壤侵蚀的关系进行了研究分析。喻锋等^[16]利用 USLE 模型研究皇甫川流域不同土地利用类型下土壤侵蚀分布规律,结果表明近几十年流域土地利用变化剧烈,且林、灌措施是流域植被恢复和减少土壤侵蚀的首选。李婷等^[17]利用 ArcGIS 10.0 及 InVEST 土壤保持模型,着重探讨了秦岭山地丹江流域土地利用类型方式转变对流域土壤侵蚀的影响,结果表明 2000—2010 年耕地大面积转为灌丛是该流域由土地利用类型变化引起的土壤侵蚀减缓的主要原因。徐晓雅等^[18]运用 USLE 模型,借助 ENVI 和 ArcGIS 软件,综合分析了澜沧县 2000 年、2010 年、2014 年三期土地利用变化和土壤侵蚀的特征,研究结果表明 15 a 间澜沧县土壤侵蚀总面积变化不大,草地和耕地的侵蚀面积减少,土壤侵蚀量下降,但 2014 年由于人类活动、人

口增长和城市化进程的加快等原因,林地和桉树林地的土壤侵蚀加重。谢颖颖等^[19]利用 RS 和 GIS 技术,运用叠置分析和转移矩阵分析的方法,研究分析了喀斯特山区土地利用变化与土壤侵蚀的关系,结果表明两者间具有密切的联系,其中耕地是该地区土壤侵蚀发生的主要土地利用类型,耕地减少和草地增加分别与土壤侵蚀呈正相关和负相关关系,研究结果有利于土地资源的合理配置和喀斯特地区的生态保护。综上所述,土地利用/覆被与土壤侵蚀相互影响,相互制约,土地利用/覆被的变化会影响土壤侵蚀的转变,反之,会影响土地利用/覆被的转变。

作为长江流域四大中心城市和长三角西部枢纽城市,南京市人口、社会经济的快速增长,地形起伏大,长期不合理的开发利用和降雨集中等特点,使得该地区土壤侵蚀环境较为复杂。因此,研究土地利用与土壤侵蚀间的耦合关系对于区域资源与生态环境可持续性发展具有重要理论和实际意义,以期更有效地指导城市土地利用结构调整、优化开发保护布局、设计合理治理措施和规划未来城市的生态布局和重点建设区域,从而在促进城市经济快速发展的同时治理好水土流失。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

南京市位于长江中下游平原,地理坐标为 31°14′—32°36′N,118°32′—119°14′E,共 11 个区,其中调整后的江南六区(鼓楼、玄武、秦淮、建邺、雨花台、栖霞)是中心城区。全市国土总面积约 6 587.02 km²,其中丘陵岗地、平原洼地、江河湖泊等水面的面积比例大约为 63 : 24 : 11,以低山丘陵为主。气候属于北亚热带季风气候区,四季分明,年平均气温 15.4℃,日照时数 1 687 h,雨热同期,降水充足,年平均降雨量 1 106 mm,属于南方红壤水力侵蚀区。植被类型属于常绿落叶阔叶混交林,多为次生植被,以人工林为主。主要分布树种有马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、麻栎(*Quercus acutissima*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、冬青(*Llex chinensis* Sims)等。该地区土壤

主要有地带性土壤(黄棕壤和少部分红壤)和耕作性土壤(水稻土和灰潮土)两种类型。

1.2 数据源及其预处理

1.2.1 数据源 基础数据源包括:南京市 1986 年、1996 年、2002 年三期的土地利用/覆被数据,空间分辨率为 30 m(中国科学院资源环境数据中心提供)、气象数据(来自国家气象数据网 www.cma.gov.cn)、土壤数据(来自 www.geodata.cn)、南京市数字高程模型 DEM(30 m)(来自地理空间数据云 www.gscloud.cn)、南京市的社会经济资料及统计年鉴等。

遥感影像数据源包括:Landsat 8 OLI 及 Landsat 5 Thematic Mapper 数据。由于 1986 年和 1996 年两期的遥感图像受云雾等影响存在质量问题,没有合适的数据库,故选用相邻的 1987 年和 1997 年两期数据进行代替。此外,由于南京市地理范围较大, TM 影像上北部有小部分落在了 120/37 条带上,因此需要两景数据进行拼接,共 7 景影像数据。遥感影像参数见表 1。

表 1 遥感影像数据参数表

传感器	成像时间	条带号	分辨率/m
Landsat TM	1987-09-21	120/38	30
Landsat TM	1990-10-15	120/37	30
Landsat TM	1997-10-18	120/38	30
Landsat TM	2002-07-12	120/37	30
Landsat TM	2002-07-12	120/38	30
Landsat TM	2002-07-12	120/37	30
Landsat OLI	2013-08-11	120/38	30

1.2.2 数据预处理 遥感影像预处理包含辐射校正和几何校正,其中辐射校正是遥感影像获取地面物体真实反射率必不可少的步骤。本文采用 ENVI 软件进行辐射定标和大气校正,同时以校正好的南京市 2007 年的 TM 遥感影像为基准,采用二次多项式拟合法进行几何校正,并将误差控制在 0.5 个像元内。最后,用南京的边界矢量数据进行裁切,得到研究区域 7 景影像数据。

2 研究方法

2.1 土地利用类型划分

根据研究区的景观特点,结合影像分辨率和研究目的,土地利用现状分类解译主要采用 1984 年全国农业区划委员会制定的《土地利用现状调查技术规程》,采用该分类方法的原因是为了与中国科学院资源环境数据中心提供的四期土地利用覆被分类方案一致。为了本研究需要,最终将土地利用重分类为 6 类:耕地、林地、草地、居民点及建设用地、水域和其他用地。

2013 年土地利用覆被数据是以 2013 年 Landsat

8 OLI 数据为基础,参考 GOOGLE EARTH 高分辨率影像和 2002 年土地利用覆被数据以及国家科技基础条件平台——地球系统科学数据共享平台获取的 2013 年土地利用覆被数据,人机交互解译获得,经实地采样验证,解译精度在 88% 以上。

2.2 RUSLE 模型

修正的通用土壤流失方程(RUSLE)表达式为:

$$A_i=f \cdot R \cdot K \cdot L S \cdot C \cdot P \tag{1}$$

式中: A_i 为年土壤流失量[$t/(km^2 \cdot a)$]; R 为降雨和径流因子[$(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; K 为土壤可蚀性因子[$(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$]; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子,其中 L, S, C 与 P 为无量纲单位。 f 为转换系数,土壤流失量的单位为 $t/(hm^2 \cdot a)$,我国习用 $t/(km^2 \cdot a)$,二者转换常数 f 为 100。

2.3 RUSLE 模型中各因子的确定

2.3.1 降雨侵蚀力因子的计算 降雨是引起土壤侵蚀最重要的外部因素之一,也是土壤侵蚀发生最直接的动力之一。本研究以南京市 31 个气象站点的逐日降雨量数据为基础,选择了章文波等^[20]提出的日雨量估算模型计算降雨侵蚀力,公式为:

$$M=\alpha \sum_{j=1}^k(P_j)^{\beta} \tag{2}$$

式中: M 为某一半月时段的降雨侵蚀力值[$(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; k 是指该半月时段内的降雨天数; P_j 表示该半月时段内第 j 天的日雨量,并且要求日雨量不得小于 12 mm,否则记为 0,上述 12 mm 阈值是与中国侵蚀性降雨标准相符合的^[21]。半月时段的分隔日为每月第 15 日,每月前 15 d 作为一个半月时段,该月剩下天数作为另一个半月时段,以此全年共被划分为 24 个时段^[20]。

根据章文波的回归计算,待定参数 α 和 β 的拟合方程为:

$$\beta=0.8363+\frac{18.177}{P_{d12}}+\frac{24.455}{P_{y12}} \tag{3}$$

$$\alpha=21.586\beta^{-7.1891} \tag{4}$$

式中: P_{d12} 为日雨量不小于 12 mm 的日平均雨量(mm); P_{y12} 为日雨量不小于 12 mm 的年平均雨量(mm)。

2.3.2 土壤可蚀性因子的计算 本研究参考前人的研究并结合具体的实际情况,采用 Williams 等^[22-23]于 1990 年提出的 EPIC 模型来计算 K 值,公式为:

$$K=\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256SAN\left(1-\frac{SIL}{100}\right)\right]\right\}\times\left(\frac{SIL}{CLA+SIL}\right)^{0.3}\times\left(1-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)}\right)\times$$

$$\left[1-\frac{0.7SN_1}{SN_1+\exp(-5.51+22.9SN_1)}\right] \quad (5)$$

式中: K 为土壤可蚀性因子,为美国制单位,需要转化为国际制单位 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(MJ \cdot mm \cdot hm^2)]$; 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 为土壤中有有机碳含量(%); $SN_1=1-SAN/100$ 。该公式需要的砂粒、粉粒、黏粒及有机质含量原始数据来源于中国土种志和中国科学院南京土壤研究所土壤数据库。

2.3.3 地形因子的计算 在大尺度上,坡度坡长因子主要靠数字高程模型(DEM)来提取^[24]。本文参考水利部 2012 年颁布的水土保持遥感监测技术规范(SL592—2012)中采用的坡度与坡长因子计算方法,结合南京市丘陵山区陡坡较多的实际情况,对坡度因子中部分参数参考刘宝元^[25]陡坡公式进行了修订。

坡度因子计算公式:

$$S=\begin{cases} 10.8\sin\theta+0.03 & \theta<5^\circ \\ 16.8\sin\theta-0.50 & 5^\circ\leq\theta<14^\circ \\ 21.9\sin\theta-0.96 & \theta\geq14^\circ \end{cases} \quad (6)$$

坡长因子计算公式:

$$L=\left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^M \quad (7)$$
$$M=\begin{cases} 0.5 & \theta>5^\circ \\ 0.4 & 3^\circ<\theta\leq5^\circ \\ 0.3 & 1^\circ<\theta\leq3^\circ \\ 0.2 & \theta\leq1^\circ \end{cases} \quad (8)$$

式中: S 为坡度因子; L 为坡长因子; λ 为水平投影坡长(m); M 为坡长指数。

2.3.4 植被覆盖管理措施因子的计算 林杰等^[26-27]提出以植被结构因子—叶面积指数(LAI)取代长期以来用于水土保持定量评价的植被覆盖度,能有效的提高侵蚀预测精度。本文选择 BP 模型和 LAI,反演研究区的植被方向性覆盖度和植被覆盖管理措施因子 C 。

植被方向性覆盖度与叶面积指数(LAI)间存在一个经典物理意义上的转换公式。Chen 等^[28](1997)和 Kuusk 等(2004)提出^[29]:

$$F_{cover}(\theta)=1-P(\theta)=1-e-G(\theta)LAI/\cos\theta \quad (9)$$

式中: $F_{cover}(\theta)$ 是植被方向性覆盖; $P(\theta)$ 为冠层的孔隙率; $G(\theta)$ 为叶片在太阳入射方向上的投影,表征了叶子截光能力的大小; LAI 是叶面积指数; θ 为太阳入射天顶角;当植被叶片呈球形随机分布时, $G(\theta)=0.5$,公式(9)简化为:

$$F_{cover}(\theta)=1-P(\theta)=1-e-LAI/(2\cos\theta) \quad (10)$$

因此,只要从遥感影像上反演出长时间序列 LAI,即可准确地估算出植被乔、灌和草垂直植被覆

盖度动态变化。

蔡崇法等^[30]通过径流小区的多场人工降雨和天然降雨资料与地表覆盖度之间的相关关系,用回归分析方法建立了 C 因子与植被覆盖度 f_c (以百分数表示)的关系式。林杰等^[26]修订了该模型如下:

$$C=\begin{cases} 1 & f_c\leq0.09 \\ 0.6508-0.3436\lg f_c & 0.09<f_c<78.3\% \\ 0 & f_c\geq78.3\% \end{cases} \quad (11)$$

2.3.5 水土保持措施因子的计算 P 因子是指其他条件相同情况下采用一定水土保持措施后的土壤流失量与无水土保持措施时的土壤流失量之比,一般介于 0 到 1。在对研究区实际考察的基础上,结合前人的研究及经验^[31-32],对不同土地利用类型赋值,林地、草地、居民点及建设用地、水域、其他用地、水田、旱地对应的 P 因子分别为 1.00,1.00,0,0,1,0.01,0.35。

3 结果与分析

3.1 南京市土壤侵蚀时空变化

将计算的 RUSLE 模型中的各因子代入公式(1),得到 1986 年、1996 年、2002 年、2013 年四年的土壤侵蚀模数图,统计分析不同年份土壤侵蚀模数的均值和最值(表 2)。

由表 2 可知,1986—2013 年南京市土壤侵蚀共经历了两个阶段:第一阶段为 1986—1996 年,土壤侵蚀加剧,土壤侵蚀模数从 1986 年的 245.98 t/(km² · a)上升到 636.8 t/(km² · a),土壤侵蚀面积由 324.11 km² 增加到 457.06 km²,增加了 132.95 km²,侵蚀面积比从 5.29%增加到 7.46%,增加了 41.02%。第二阶段为 1996—2013 年,土壤侵蚀得到了有效的治理,侵蚀模数从 1996 的 636.8 t/(km² · a)降到 175.27 t/(km² · a),土壤侵蚀面积由 457.06 km²减少到 150.11 km²,减少了 306.95 km²,侵蚀面积比从 7.46%减少到 2.45%,减少了 67.16%,南京市土壤侵蚀严重的地区主要分布在位于江宁区的宁镇山脉西段和浦口区的老山,2000 年以前这两处采矿较多,采矿区基本为裸露山体,植被覆盖率很低,2000 年以后南京市政府关停了大多数的露天开采的矿山、窑厂,生态条件才逐步改善,土壤侵蚀状况得以遏制。

表 2 南京市不同年份去除水体后土壤侵蚀模数

	t/(km ² · a)			
参数	1986 年	1996 年	2002 年	2013 年
最小值	0	0	0	0
最大值	780794	1993905	1560909	759308
平均值	2458	636	236	175

利用上述计算得到研究区土壤侵蚀分布图,根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)中关于南方红壤丘陵区土壤侵蚀强度分级标准,将研究区侵蚀等级分为 6 个等级 $[t/(km^2 \cdot a)]$:分别为微度(<500)、轻度($500 \sim 2500$)、中度($2500 \sim 5000$)、强烈($5000 \sim 8000$)、极强烈($8000 \sim 15000$)、剧烈(>15000),得到南京市 4 个年份的土壤侵蚀强度分级。微度侵蚀所占比重大,四期分别占总面积的 94.71%, 92.54%, 95.34%和 97.55%,轻度及其以上的土壤侵蚀占比依次为 5.29%, 7.46%, 4.66%和 2.45%,由此可知南京市水土保持的本底较好;其次是轻度侵蚀,四期分别占总面积的 3.41%, 4.44%, 3.23%和 1.53%。微度和轻度侵蚀的面积之和超过总面积的 97%。然而,微度侵蚀的侵蚀量所占比例却最小,四期分别为 6.78%, 3.11%, 6.29%, 4.31%;中度及其以上侵蚀类型所占的面积虽然不超过总面积的 3%,但四期侵蚀量的比例之和却均超过 77%,最高达 88.9%;其中极强烈和剧烈侵蚀的面积比不超过 1.27%,但两者侵蚀量比例之和却超过 53.49%,最高达 76.58%,由此可见,南京市不同等级侵蚀面积与对应的侵蚀量呈明显的倒挂现象,因此较高等级侵蚀区应当是重点治理的区域,不可因为面积较小而轻视。1986—1996 年南京市除了微度侵蚀的面积下降之外,其他等级的侵蚀面积均有较明显的增长,中度及以上侵蚀类型所占的侵蚀量比例之和从 77.1%增加到 88.9%,土壤侵蚀总量从 150.4 万 t 增加到 387.32 万 t,侵蚀总量显著增加。1996—2002 年南京市除了微度侵蚀面积略有增加之外,其他侵蚀面积均有所减小,土壤侵蚀总量从 387.32 万 t 减少到 145.76 万 t,侵蚀总量显著减小。2002—2013 年南京市的微度侵蚀面积继续增大,其他等级的侵蚀面积也都继续减小,土壤侵蚀总量从 145.76 万 t 减少到 107.97 万 t,土壤侵蚀总量持续下降。2013 年南京市的土壤侵蚀总量相比于 1986 年减少了 28.2%,中度及以上侵蚀类型所占面积比下降了 0.96%,由此可知 2013 年南京市土壤侵蚀状况相比于 1986 年有所改善。

从南京市土壤侵蚀强度的空间分布来看,土壤侵蚀主要发生在生产建设活动扰动比较频繁的丘陵山区,主要分布在大、中型采矿挖沙、水泥厂等企业开采而裸露的山体,如宁镇山脉西段江宁区的黄龙山、小茅山等地,这些区域植被覆盖遭到严重破坏,水土流失严重。1986—1996 年侵蚀强度下降明显,主要分布在江宁、溧水、浦口老山和六合东部的一些丘陵山区。

3.2 不同土地利用类型的土壤侵蚀特征

从南京市四期土地利用类型的面积(表 3)可以看出,南京市土地利用类型主要是耕地和居民点及建设用地,其次是林地和水域。从不同土地利用类型对应的土壤侵蚀状况(表 4)可以看出,南京市 87%以上的土壤侵蚀量集中在林地和耕地,主要原因是南京市的林地多分布在丘陵山区,地形坡度较大,一旦植被破坏,植被覆盖率迅速降低,在暴雨冲刷下很容易形成较大的土壤流失量;而对于耕地来说,虽然总体上土壤侵蚀强度较轻,但是由于其本身面积比例大,所以最终累积的结果也比较大。草地和其他用地由于本身的面积就比较小,所以土壤侵蚀量也比较小。因此,南京市的土壤侵蚀治理重点要放在被破坏的山体上,必要时采取工程措施、生物措施与农业措施相结合对破坏山体进行生态修复。

结合表 3 和表 4 可知,1986—1996 年耕地和林地的面积比略有下降,分别由原来的 67.29%和 10.9%下降到 65.28%和 10.83%,但是其对应的侵蚀量分别由 286 340 t 和 1 133 150 t 增加到 687 748 t 和 2 730 124 t;与此相反,草地和其他用地面积比略有上升,分别由 0.26%和 0.07%上升到 0.27%和 0.08%,其对应的侵蚀量分别由 51 716.11 t 和 35 651.12 t 增加到 273 032.9 t 和 182 562 t,由此可知,该时段内土壤侵蚀状况加剧。1996—2013 年耕地面积比由 65.28%降低到 45.58%,对应的土壤侵蚀量也由 687 748.3 t 减少到 167 521 t;相反,林地和居民点及建设用地的面积比由 10.83%和 13.52%增加到 12.6%和 27.27%,其中由林地引起的土壤侵蚀量由 2 730 124 t 减少到 770 902 t,因此该时段内土壤侵蚀状况得到明显改善。

从不同土地利用类型中土壤侵蚀强度等级的面积分布来看(图 1),1986—2013 年的 4 个时段内不同土地利用类型中的侵蚀强度等级构成相一致,同一土地利用类型中构成的侵蚀强度的类型和面积比很接近,且微度和轻度等级的面积在各土地利用类型中均占主体。具体而言,在耕地中,侵蚀等级比重最大的为微度侵蚀,且四期均在 94%以上,其次为轻度侵蚀,四期的面积比介于 1.2%~4.6%;在林地中,侵蚀等级最大的仍为微度侵蚀,面积比介于 70.1%~89.2%,其次为轻度侵蚀,面积比介于 5.8%~15.4%,中度及其以上侵蚀介于 5%~18.8%;在草地中,侵蚀等级排在前两位的是微度侵蚀和轻度侵蚀,各自面积比分别介于 75%~89.2%和 6.4%~16.2%;居民点及建设用地和水域都是微度侵蚀;在其他用地中,侵蚀等级偏重,中度及其以上等级的面积比介于 42.7%~83.8%。

表 3 南京市不同年份不同土地利用类型

土地利用类型	1986 年		1996 年		2002 年		2013 年	
	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%
耕地	442744.20	67.29	429563.20	65.28	395078.50	60.05	319635.10	48.58
林地	71694.50	10.90	71271.37	10.83	74420.59	11.31	82938.79	12.60
草地	1719.44	0.26	1759.68	0.27	146.96	0.02	1678.73	0.26
居民点及建设用地	77956.91	11.85	88968.39	13.52	113595.50	17.26	179442.70	27.27
水域	63391.94	9.63	65902.76	10.02	74622.93	11.34	73927.16	11.24
其他用地	476.66	0.07	518.23	0.08	90.86	0.01	362.33	0.06

表 4 南京市不同年份不同土地利用类型土壤侵蚀量

土地利用类型	1986 年		1996 年		2002 年		2013 年	
	侵蚀量/ (t·a ⁻¹)	占比/%	侵蚀量/ (t·a ⁻¹)	占比/%	侵蚀量/ (t·a ⁻¹)	占比/%	侵蚀量/ (t·a ⁻¹)	占比/%
耕地	286340.70	19.00	687748.30	17.76	460529.50	31.55	167521.20	15.54
林地	1133150.00	75.20	2730124.00	70.48	887740.90	60.81	770902.90	71.50
草地	51716.11	3.43	273032.90	7.05	219.38	0.01	26474.58	2.45
居民点及建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
水域	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
其他用地	35651.10	2.37	182562.00	4.71	111327.10	7.63	113335.70	10.51

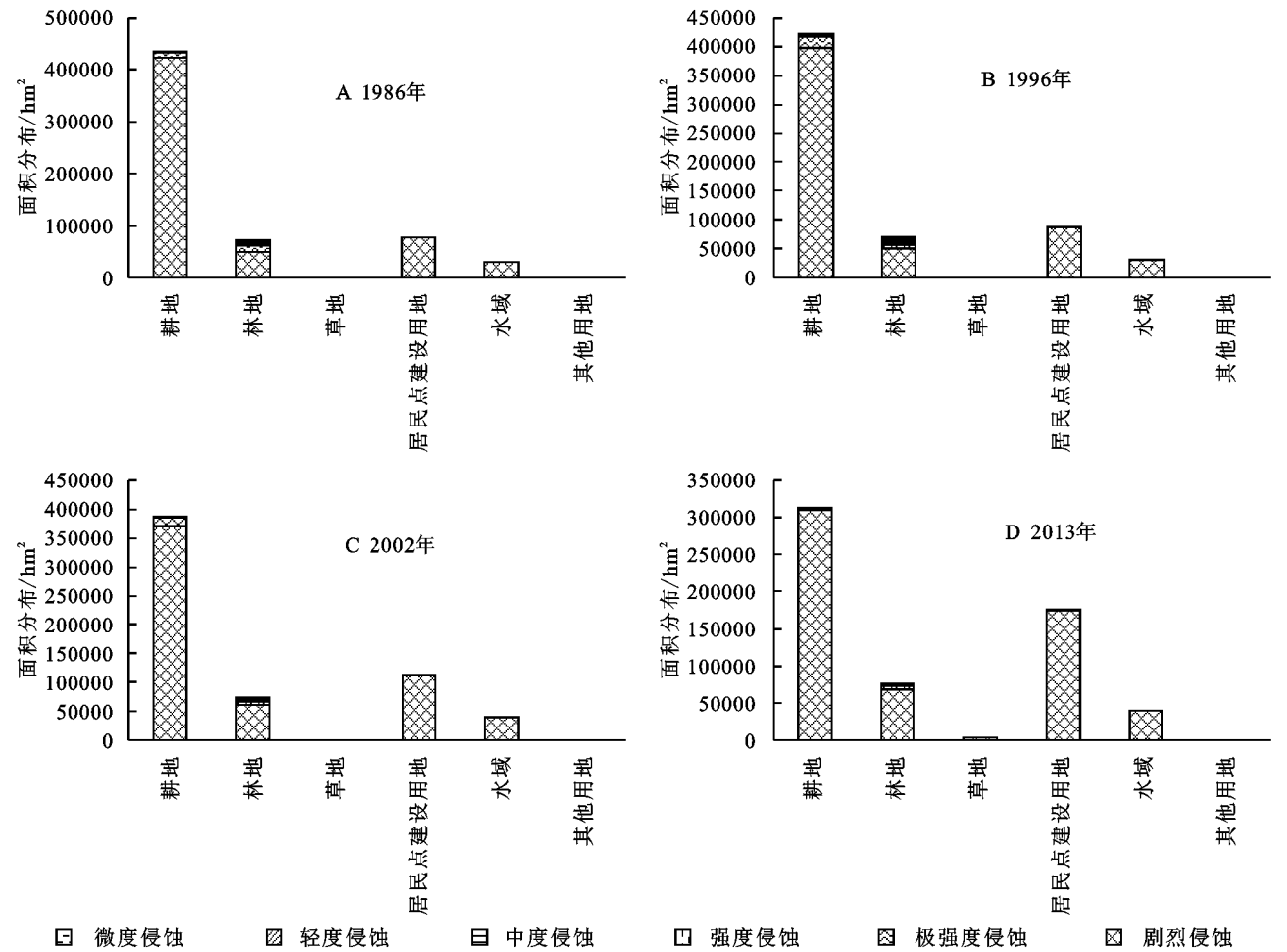


图 1 1986—2013 年不同土地利用类型在不同土壤侵蚀强度中的分布

3.3 土地利用变化与土壤侵蚀关系分析

从不同土地利用类型引起的土壤侵蚀变化速率来看(图 2), 1986—2013 年近 30 a 时间内由居民点及建设用地、水体和其他用地变化引起的土壤侵蚀变

化速率波动较小,侵蚀速率基本在 $500 \text{ hm}^2/\text{a}$ 以下,且 2002 年之前由这 3 种土地利用类型变化引起的土壤侵蚀速率呈增加趋势,而 2002 年之后土壤侵蚀速率呈显著下降趋势;相反地,由耕地、林地和草地变化引起的土壤侵蚀变化速率波动较大,其中由耕地变化引起的侵蚀速率在 $757 \sim 2\,196 \text{ hm}^2/\text{a}$,由林地变化引起的侵蚀速率介于 $1\,096 \sim 2\,711 \text{ hm}^2/\text{a}$,由草地变化引起的侵蚀速率介于 $257 \sim 1\,009 \text{ hm}^2/\text{a}$ 。

从 1986—2013 年的时间变异来看,1996—2002 年除耕地外,其余土地利用类型变化引起的侵蚀变化速率都达到最大值,1986—2002 年除由耕地变化引起的侵蚀变化速率呈下降趋势外,其余均呈上升趋势,其中由林地变化引起的侵蚀变化速率呈急剧上升趋势;1996—2013 年,土壤侵蚀变化速率呈显著下降趋势,在 2002—2013 年除其他用地外,其余土地利用类型变化引起的侵蚀变化速率达到最低值。

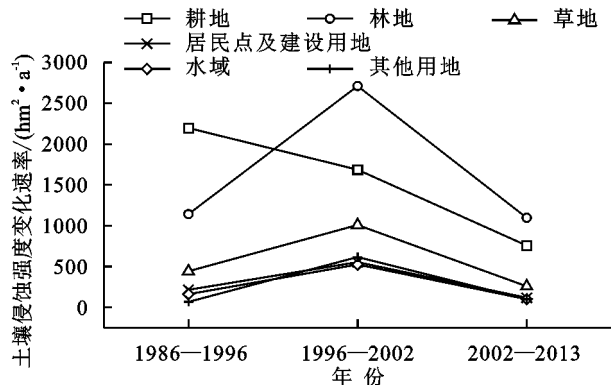


图 2 1986—2013 年不同土地利用变化引起的土壤侵蚀强度变化速率

土地利用/覆被对土壤侵蚀的影响可以归为 3 类:无明显影响、正面影响和负面影响。由于土地利用类型转换的多样性,所以由其变化对侵蚀强度引起的影响也可以同时包含上述 3 个影响。

根据图 3 可以看出,1986—1996 年这一时段内水域、居民点及建设用地和其他用地对土壤侵蚀无明显影响,主要原因是前两者类型转化具有不可逆性或者转化成本巨大,而其他用地由于面积较小,因此变化不显著。耕地变化对土壤侵蚀具有明显的负面影响,主要是因为耕地在快速城市化背景下主要流向居民点及建设用地、水域和林地。其中耕地在流向居民点及建设用地和水域时,由于二者侵蚀等级和大部分耕地均为微度,没有下降的空间,故没有体现出正面影响,但是在侵蚀模数数值上是降低的,地表硬化后土壤不再发生明显侵蚀,但是水土流失及生态环境并没有得到相应的改善;耕地在流向林地时,尤其是流

向经济林地时,主要发生在丘陵山区周围,造成土壤侵蚀状况加剧,在提高一个等级处有明显的波峰,其峰值为 $15\,446.05 \text{ hm}^2$ 。林地和草地尤其是林地对土壤侵蚀既具有正影响也具有负面影响,以正面影响为主,本时段内两者兼有的原因是林地流向居民点及建设用地的同时也流向耕地,在流向居民点及建设用地时主要起正面影响作用,降低了土壤侵蚀强度,而在流向耕地时主要起负面作用,增加了土壤侵蚀强度,尤其是毁林开垦,陡坡开垦,降低了植被盖度,造成了大量的水土流失。林地在降低一个等级处和增加一个等级处各存在一个小的波峰,峰值分别为 $6\,524.19$, $2\,338.92 \text{ hm}^2$;草地在降低两个等级处也有一个小的波峰,峰值为 $1\,743.57 \text{ hm}^2$ 。由于耕地变化引起的侵蚀强度下降一个等级的面积远大于由林地和草地变化分别引起的增加一个等级和两个等级的面积之和,造成研究区土壤侵蚀状况加剧。

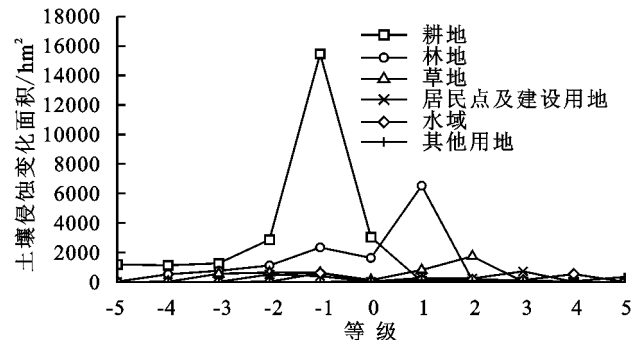


图 3 1986—1996 年土地利用变化引起的土壤侵蚀强度变化

由图 4 可以看出,1996—2002 年这一时段内整体趋势与上一时段相同,但林地和耕地引起的变化幅度出现了互换,其中由林地变化引起的在下降一个等级处有个峰值为 $14\,616.5 \text{ hm}^2$ 。此外,由林地和草地变化分别引起的下降一个等级和两个等级的面积远大于由耕地变化引起的侵蚀强度上升一个等级的面积,所以该时段内土壤侵蚀状况有所缓解。

由图 5 可以看出,2002—2013 年这一时段内整体趋势与 1996—2002 时段相同,只是在引起的变化幅度上较上一时段趋缓,土壤侵蚀得到进一步缓解。

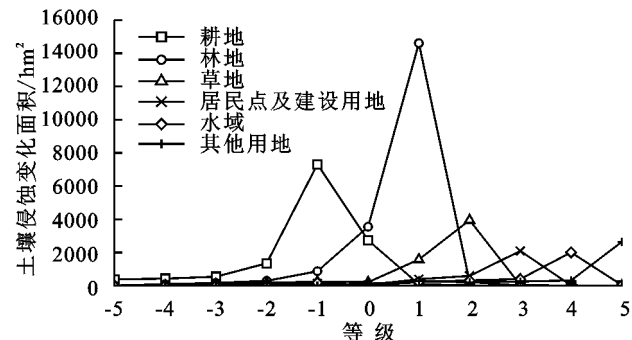


图 4 1996—2002 年土地利用变化引起的土壤侵蚀强度变化

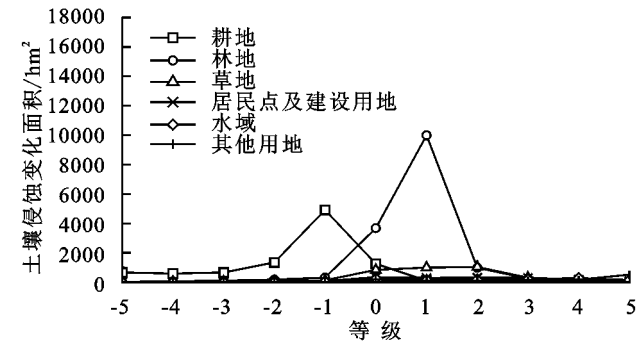


图5 2002—2013年土地利用变化引起的土壤侵蚀强度变化

4 结论

(1) 南京市土壤侵蚀以微度侵蚀为主,其侵蚀面积比不小于92%,而其侵蚀量所占比重最小($<3.11\%$)。极强烈和剧烈侵蚀的面积比不超过1.27%,但两者侵蚀量比例之和超过53.49%,最高达76.58%。由此可见,南京市不同等级侵蚀面积与对应的侵蚀量呈明显倒挂现象,因此极强烈与剧烈侵蚀区是预防和加强整治的重点区域。从南京市土壤侵蚀强度的空间分布来看,土壤侵蚀主要发生在生产建设活动扰动比较频繁的丘陵山区。

(2) 1986—2013年南京市的土壤侵蚀经历了一个先增加后减弱的过程。1986—1996年土壤侵蚀加剧,土壤侵蚀模数从 $245.98 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 增加到 $636.8 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,侵蚀面积比增加了41.02%。1996—2013年土壤侵蚀得到了有效治理,侵蚀模数从 $636.8 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 减少到 $175.27 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,侵蚀面积比减少了67.16%,结果表明南京市近年来土壤侵蚀治理效果显著。

(3) 1986—2013年内由居民点及建设用地、水体和其他用地变化引起的土壤侵蚀变化速率波动较小,相反地,由耕地、林地和草地变化引起的土壤侵蚀变化速率波动较大。从时间变异来看,1996—2002年土壤侵蚀速率变化最大,2002—2013年土壤侵蚀变化速率最为稳定。

从不同土地利用覆被类型对土壤侵蚀强度影响来看,水域、居民点及建设用地和其他用地对土壤侵蚀无明显影响,而耕地对土壤侵蚀具有明显的负面影响,主要是因为耕地在快速城市化背景下主要流向居民点及建设用地、水域和林地,从而降低了土壤侵蚀强度。林地和草地变化对土壤侵蚀既有负面影响也具有正面影响,以正面影响为主,这主要是因为林地既流向耕地也流向居民点及建设用地和水域,不同时期其主要影响不同。

因此,南京市需加大对于开矿、生产开发建设项目等重点区域的治理力度,加大线状、河流、带状等生态廊道的建设,加大绿色景观建设,优化国土利用空间布局。

参考文献:

- [1] Boardman J, Poesen J. Soil erosion in Europe[M]. Hoboken USA: John Wiley & Sons, 2007.
- [2] Zhang X, Walling D E, Quine T A. Use of reservoir deposits and caesium-137 measurement to investigate the erosional response of a small drainage basin in the rolling loess plateau region of China [J]. Land Degradation Development, 1997, 8(1): 1-16.
- [3] 齐晓君,王恩德,贾三石.基于GIS和RS的抚顺市土壤侵蚀动态研究[J].东北大学学报:自然科学版,2008,129(9):1342-1345.
- [4] 王冬梅,张文艳,苏新琴.城市水土流失及其防治对策[J].城市发展研究,2001,8(5):49-53.
- [5] 吴秀芹,蔡运龙.土地利用/土地覆盖变化与土壤侵蚀关系研究进展[J].地理科学进展,2003,22(6):576-584.
- [6] Deng J S, Wang K, Hong Y, et al. Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization[J]. Landscape and Urban Planning, 2009, 92(3/4): 187-198.
- [7] 盛莉.快速城市化背景下城市热岛对土地覆盖及其变化的响应关系研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [8] 彭保发,石忆邵,王贺封,等.城市热岛效应的影响机理及其作用规律:以上海市为例[J].地理学报,2013, 68(11):1461-1471.
- [9] Li Z, Liu W, Zhang X, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1/2): 35-42.
- [10] 李志,刘文兆,张勋昌,等.未来气候变化对黄土高原黑河流域水资源的影响[J].生态学报,2009,29(7):3456-3464.
- [11] 李志,刘文兆,王秋贤.黄土塬区不同地形部位和土地利用方式对土壤物理性质的影响[J].应用生态学报, 2008, 19(6): 1303-1308.
- [12] 吴文斌,杨鹏,唐华俊,等.土地利用对土壤性质影响的区域差异研究[J].中国农业科学,2007,40(8):1697-1702.
- [13] 高中贵,彭补拙,喻建华,等.经济发达区土地利用变化对土壤性质的影响:以江苏省昆山市为例[J].自然资源学报,2005,20(1):44-51.
- [14] 彭澄瑶.城市水资源可持续规划与水生态环境修复[D].北京:北京工业大学,2011.
- [15] Meffert P J, Dziok F. The influence of urbanisation on diversity and trait composition of birds [J]. Landscape

- Ecology, 2013, 28(5):943-957.
- [16] 喻锋, 李晓兵, 陈云浩, 等. 皇甫川流域土地利用变化与土壤侵蚀评价[J]. 生态学报, 2006, 26(6):1947-1956.
- [17] 李婷, 刘康, 马力阳, 等. 秦岭山地丹江流域土地利用变化的土壤侵蚀效应评价[J]. 自然资源学报, 2016, 31(4):583-595.
- [18] 徐晓雅, 高翔宇, 顾泽贤, 等. 澜沧县土地利用变化和土壤侵蚀特征分析[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(3):421-429.
- [19] 谢颖颖, 邵争, 兰小机, 等. 喀斯特山区土地利用变化与土壤侵蚀耦合关系研究: 以毕节试验区为例[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6):1-5.
- [20] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6):705-711.
- [21] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4):6-11.
- [22] 查良松, 邓国徽, 谷家川. 1992—2013 年巢湖流域土壤侵蚀动态变化[J]. 地理学报, 2015, 10(11):1708-1719.
- [23] Vol. N. Using soil erosion models for global change studies [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(5):381-385.
- [24] 张宏鸣, 杨勤科, 刘晴蕊, 等. 基于 GIS 的区域坡度坡长因子提取算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(9):246-248.
- [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] 林杰, 张金池, 顾哲衍, 等. 基于叶面积指数的植被覆盖管理措施因子 C 的遥感定量估算[J]. 林业科学, 2013, 49(2):86-92.
- [27] Lin J, Zhang J, Gu Z, et al. A new approach of assessing soil erosion using the remotely sensed leaf area index and its application in the hilly area[J]. Yegetos-An International Journal of Plant Research, 2014, 27(2):1-12.
- [28] Chen J M, Rich P M, Gower S T, et al. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D24):29429-29443.
- [29] Kuusk A, Lang M, Nilson T. Simulation of the reflectance of ground vegetation in sub-boreal forests [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 126(1/2):33-46.
- [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] 陈思旭, 杨晓唤, 肖林林, 等. 基于 USLE 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.
- [32] 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, 35.

(上接第 107 页)

- [29] 刘斌涛, 陶和平, 史展, 等. 青藏高原土壤可蚀性 K 值的空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4):11-16.
- [30] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(5):105-110.
- [31] Sun I, Cheng G W, Li W P, et al. On the Variation of NDVI with the principal climatic elements in the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing, 2013, 5(4):1894-1911.
- [32] 于涛, 沈浩, 仲嘉亮. 基于 CA-Markov 模型的新疆克州土地利用动态模拟研究[J]. 新疆环境保护, 2008, 30(1):11-14.
- [33] 赵博轩. 基于 RUSLE 和 CA-Markov 的土壤侵蚀变化监测及预测研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [34] Hong Q L, Xu Y, Hai Y D, et al. Analysis of Energy consumption influence factors in Japan based on LMDI model[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71-78:2416-2419.
- [35] 付建新, 曹广超, 郭文炯. 1998—2017 年祁连山南坡不同海拔、坡度和坡向生长季 NDVI 变化及其与气象因子的关系[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4):1203-1212.
- [36] 崔晓临, 自红英, 王涛. 秦岭地区植被 NDVI 海拔梯度差异及其气温响应[J]. 资源科学, 2013, 35(3):618-626.
- [37] 张静静, 郑辉, 朱连奇, 等. 豫西山地区植被 NDVI 及其气候响应的多维变化[J]. 地理研究, 2017, 36(4):765-778.
- [38] 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.
- [39] 陈豪. 基于 USLE 模型的祁连山国家公园土壤水力侵蚀动态分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.