

基于 GIS 与 Fragstats 的安徽省生态安全格局研究

白星亮, 任冲, 李景宜*, 徐云环, 马晓武, 马力 (宝鸡文理学院 地理与环境学院, 陕西宝鸡 727100)

摘要 从区域生态安全重要性和敏感性角度出发, 结合景观生态指数, 构建安徽省生态安全格局评估指标体系, 绘制安徽省生态安全格局图。结果表明: 安徽省生态安全格局总面积为 41 083.46 km², 占全省面积的 29.53%, 主体部分以大别山生态屏障和黄山生态屏障为支撑, 总面积为 30 883.63 km², 长江干流水生态廊道为屏障链接, 巢湖等其他湖泊湿地为生态格局重要组成成分, 总面积为 1 130.74 km²。

关键词 生态安全格局; 生态重要性; 生态敏感性; 景观生态指数

中图分类号 X 826 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)13-0070-08

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.13.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Ecological Security Pattern of Anhui Province Based on GIS and Fragstats

BAI Xing-liang, REN Chong, LI Jing-yi et al (College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 727100)

Abstract Combined with the landscape ecological index, the assessment index system of ecological security pattern in Anhui Province was constructed from the perspective of ecological safety importance and sensitivity. On the basis of the above research, the ecological security pattern map of Anhui Province was drawn. The results show that the total area of ecological security pattern in Anhui Province is 41 083.46 km², accounting for 29.53% of the province's total area. The main part is supported by the Dabie Mountain Ecological Barrier and the Huangshan Ecological Barrier, with a total area of 30 883.63 km². The barrier link is the Yangtze River mainstream water ecological corridor, and the important components of the ecological pattern are others lakes and wetlands such as Chaohu, with the total area is 1 130.74 km².

Key words Ecological security pattern; Ecological importance; Ecological sensitivity; Landscape ecological index

生态安全是人类赖以生存的环境安全状况。近年来, 人类对自然生态环境施加了前所未有的影响, 环境污染、土地退化、森林减少、生物多样性丧失等一系列严重的生态环境问题严重威胁了国家和区域生态安全。区域生态安全格局研究已成为生态安全领域前沿研究方向之一^[1]。

近年来, 国内外相关研究者在区域生态安全领域开展了大量系统及精细的研究。研究重点主要集中在概念及理论探讨、指标体系设计、综合模型构建、评价方法研究等领域。其中, 我国学者基于生态安全重要性和敏感性理论构建生态安全格局已成为当前研究领域的最重要方法^[2-7]。与此同时, 随着景观生态学的发展, 景观生态与生态保护研究也在逐步展开^[8-9]。有学者发现城市面临的多种问题都与景观的组成分布格局有关^[8]。城市化改变景观格局和生态功能导致生态系统服务(ESS)下降^[9]。移动窗口法等方法用于景观分布格局的研究^[10-12]。景观破碎化程度影响生物多样性程度^[13], 连通性指数对生态系统服务功能的退化程度也有重要影响^[14]。

为构建完整生态预警机制, 保障生态环境可持续发展, 安徽省依据生态环境部颁布的《生态保护红线划定技术指南》发布了全省生态保护红线^[15-16]。然而, 由于安徽地理位置特殊性和经济地位重要性, 生态保护红线的划定与全国其他地区略有差异^[17-18]。若以全国统一标准构建安徽生态红线, 则会出现生态保护与生态安全格局的协调和差异问题^[19-21], 生态保护红线方案的实际效益和补偿价值将有所折

损^[22-24]。另外, 已有研究表明安徽省生态安全现状与格局分布有发生改变的迹象^[2], 具体表现生态系统服务功能重要性和敏感性出现南北分布差异, 生态廊道集中于长江沿岸, 生态源地向皖南地区集中^[25], 以西部大别山和南部黄山生态屏障为重要保障的安徽省生态安全格局逐步显现。

综上, 已有研究内容多数倾向于生态安全重要性与敏感性的单独探讨, 尚未能从景观生态学角度对生态安全进行全面综合的考量, 使得生态安全格局与景观生态分布之间的联系略有不足。该研究将从生态安全重要性、生态安全敏感性角度出发, 依托景观生态指数, 构建安徽省生态安全格局, 进一步丰富省域生态安全评价实证研究和分析, 为区域生态文明建设和政府制定相关政策提供技术支撑和决策依据。

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况 安徽省位于 114°54'~119°37'E, 29°41'~34°38'N, 地处长江下游, 跨长江、淮河和钱塘江三大流域, 面积 1.401×10⁵ km², 约占全国总面积 1.45% (图 1)。秦岭-淮河地理分界线横贯全省, 全省自北向南可分为淮北平原、江淮丘陵、大别山区、沿江平原和皖南山区五大自然区域。气候属亚热带向暖温带过渡型, 年均气温 14~17℃, 平均日照 1 800~2 500 h, 无霜期 200~250 d, 平均降水量 800~1 800 mm。全省森林覆盖率 28.65%。下辖 16 个省辖市, 8 个县级市, 53 个县, 44 个市辖区, 是长三角的重要组成部分, 处于全国经济发展的战略要冲和国内几大经济板块的对接地带。《2016 年生态文明建设年度评价结果公报》显示, 安徽省绿色发展指数不足全国平均水平, 为 79.02, 居于 19 位; 全省人均耕地面积为全国平均水平的 97.1%, 人均湿地面积为全国均值的 43.4%; 全省轻度污染湖泊水库有 29 座, 轻度污染河流有 101 条; 空气优良天数比例为 74.3%。

1.2 数据来源 基础数据主要来源于《安徽统计年鉴

基金项目 陕西省科技厅项目(2017JM4033); 陕西省教育厅项目(14JS009)。

作者简介 白星亮(1995—), 男, 陕西铜川人, 硕士研究生, 研究方向: 资源环境地理信息系统。*通信作者, 教授, 博士, 从事区域环境风险评估与区划研究。

收稿日期 2019-11-21; **修回日期** 2019-12-05

(2010—2016)》,高程数据来源于地理空间数据云网站 GDEM V2 30 m 分辨率数字高程模型,蒸散发数据来源于 NASA 网站 (<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>), NPP 数据来源于全国生态状况遥感调查与评估成果 NPP 数据集,气温和降水资料来源于中国气象科学数据共享服务网,土壤数据来源于全国生态环境调查数据库,土地利用数据来源于清华大学数据网站分辨率为 10 m 土地利用图 (<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>)。

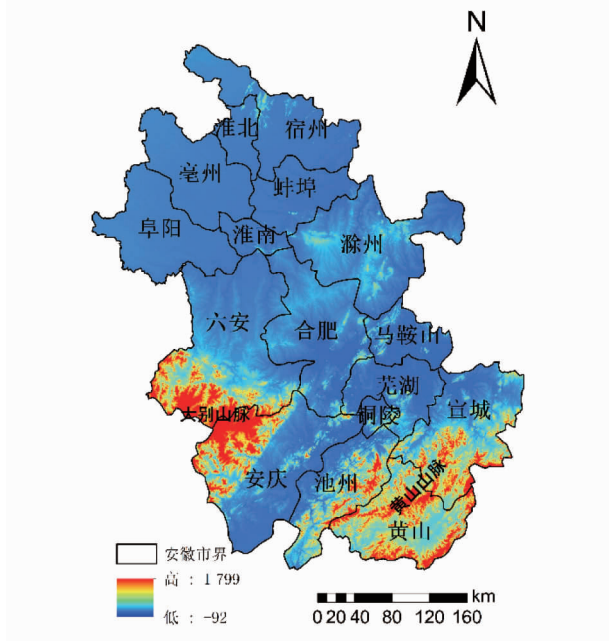


图 1 安徽省行政区划与 DEM 图

Fig. 1 Administrative divisions and DEM map of Anhui Province

1.3 研究方法 以构建安徽省生态安全格局为目标,综合定性判定和定量评估 2 种分析方法,开展生态保护功能评估,以生态系统服务功能重要性、生态环境敏感性为评估指标,结合景观生态指数,合理划定识别生态安全格局重要区域。

1.3.1 区域生态安全重要性。区域生态安全重要性评估使用 NPP 定量指标评估方法^[15],结合安徽省地域气候特征,不考虑防风固沙重要性评估,选择水源涵养、水土保持和生物多样性保护 3 项指标为生态功能重要性评估对象,分别建立评估模型,针对安徽省地域生态现状,选择不同的等级分级标准。各评估对象的模型公式如下。

水源涵养功能重要性模型公式为:

$$WR = NPP_{\text{mean}} \times F_{\text{sic}} \times F_{\text{pre}} \times (1 - F_{\text{slo}}) \quad (1)$$

式(1)中,WR 为区域水源涵养功能重要性指数;NPP_{mean} 为区域植被净初级生产力多年平均值;F_{sic} 为区域土壤渗流因子(将土壤数据集中 HWSO_China_Albers.img 栅格图属性表下的 value 字段与土壤属性表 HWSO.mdb 中的 MU_GLOBAL 字段连接,对 T_USDA_TEX 字段值除以 13,即为土壤渗流因子^[15]);F_{pre} 为区域降水量多年平均值;F_{slo} 为坡度因子,即归一化后的坡度值。

水土保持功能重要性模型公式为:

$$S_{\text{pro}} = NPP_{\text{mean}} \times (1 - K) \times (1 - F_{\text{slo}}) \quad (2)$$

式(2)中,S_{pro} 为区域水土保持功能重要性指数;NPP_{mean} 为区域植被净初级生产力多年平均值;K 为土壤侵蚀因子^[15];F_{slo} 为坡度因子。

生物多样性保护功能重要性模型公式为:

$$S_{\text{bio}} = NPP_{\text{mean}} \times F_{\text{pre}} \times F_{\text{tem}} \times (1 - F_{\text{alt}}) \quad (3)$$

式(3)中,S_{bio} 为区域生物多样性保护功能重要性指数;NPP_{mean} 为区域植被净初级生产力多年平均值;F_{pre} 为区域降水量多年平均值;F_{tem} 为区域气温多年平均值;F_{alt} 为海拔因子(即归一化后海拔数值)。

1.3.2 生态环境敏感性。由于安徽省境内土地沙漠化、石漠化、盐渍化程度较弱,仅选用水土流失敏感性评估指数作为指标。依照通用水土流失方程为基准,选用降水侵蚀力度、土壤侵蚀因子、地形因子、植被覆盖为参数建立评估模型^[26-28]。模型公式为:

$$SS_i = \sqrt[4]{R_i \times K_i \times LS_i \times C_i} \quad (4)$$

式(4)中,SS_i 为水土流失敏感性指数;R_i 为降水侵蚀力度;K_i 为土壤侵蚀因子;LS_i 为地形因子;C_i 为植被覆盖参数^[15]。

1.3.3 景观生态指数。选用景观分裂指数和斑块密度为基准参考指标,分别对应建立景观破碎度和景观完整性评价指标,使用蔓延度指数为景观生态指标。

景观破碎化是由于自然或人为因素影响,生态景观原有的连续性被分割、隔离为多个不连续斑块的现象。基于 Fragstats 景观分裂指数 (DIVISION) 对安徽省景观破碎度进行分析,分裂指数模型公式为^[29-31]:

$$\text{DIVISION} = \left[1 - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2 \right] \quad (5)$$

式(5)中,a_{ij} 为斑块 ij 的面积;A 是总景观面积(m²)。DIVISION 所得是 0~1 的比值,值越小,斑块破碎度越低。

景观完整性以单位面积为单位表示斑块数目,有助于在不同大小的景观类型之间进行比较。基于 Fragstats 中斑块密度 (PD) 计算景观完整性,斑块密度计算公式为^[30-31]:

$$\text{PD} = \frac{N}{A} \times 10^6 \quad (6)$$

式(6)中,PD 是斑块密度;N 是景观中的斑块总数;A 是总景观面积(m²),即为景观中的斑块数除以景观总面积,再乘以 10⁶(即为每平方千米内斑块的个数)。PD 越小,景观完整性越好,景观类型越单一。

蔓延度是指景观中不同斑块类型的团聚程度或延展趋势。使用 Fragstats 中蔓延度指数 (CONTAG) 为指标,公式为^[32]:

$$\text{CONTAG} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left(P_i \cdot \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \cdot \ln \left(P_i \cdot \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right)}{2lnm} \quad (7)$$

式(7)含义为景观中各斑块类型所占景观面积乘以各斑块类型之间相邻的格网单元数目占总相邻的格网单元数目的比例,乘以该值的自然对数之后的各斑块类型之和,除以 2 倍

的斑块类型总数的自然对数,其值加1后再转化为百分比的形式。其中, P_i 为斑块类型占用的景观比例; $i;g_{ik}$ 为基于重复计数方法的斑块类型*i*和*k*的像素之间的邻接或连接数; m 为景观中存在的斑块类型数量。CONTAG值越小,表明景观中存在越多小斑块,越接近100表明景观中有连通度高的优势斑块类型存在。

2 结果与分析

2.1 生态安全重要性 运用 ArcGIS 软件综合计算安徽省水源涵养服务功能、水土保持服务功能和生物多样性服务功能空间分布(图2)。

安徽省水源涵养能力高值出现在六安市南部和安庆市北部的大别山区,池州市东南部和黄山市大部的黄山山脉群,以及中部北部主要江河湖地带,最大值为280 826,低值

出现在北部平原区域,最低值为6 821,极差为274 005。全省平均值为45 136,整体分布态势为南多北少,西多东少,山地水源涵养能力高于平原地区,个别低值区集中出现在长江两岸滩涂地带。

安徽省水土保持能力总体良好,分布状况和水源涵养功能分布类似,高值区出现在西部大别山区和东南部黄山区,主要包括六安市、安庆市、池州市和黄山市,最高值为759,平均值为391。北部平原地带水土保持能力较好,中东部滁州市山区丘陵地带具有较完整的水土保持能力集中区,总体呈南多北少,东南多西北少分布。

安徽省生物多样性分布集中于山区丘陵地带,以南部黄山市黄山区为代表,以及宣城市黄山余脉地带、安庆市中部平原山地交汇地带等,呈现南多北少的分布状况。

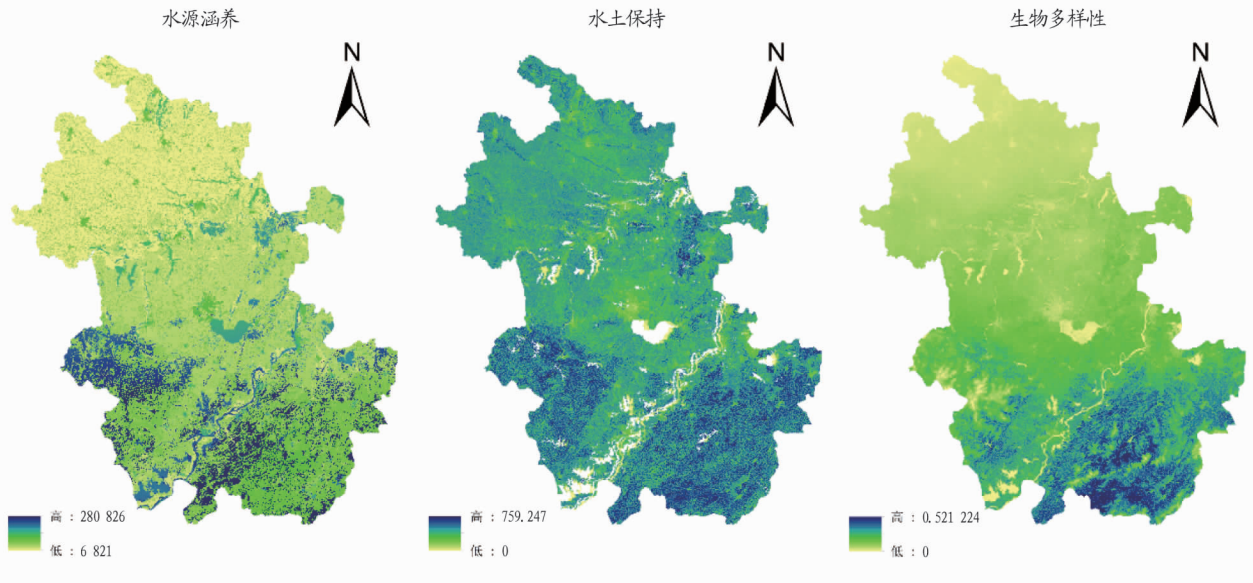


图2 安徽省水源涵养功能、水土保持功能、生物多样性功能分布

Fig.2 The distribution of water conservation function, soil and water conservation function and biodiversity function in Anhui Province

2.1.1 水源涵养功能重要性分析。式(1)计算出水源涵养功能空间分布后,在 ArcGIS 栅格计算器(Spatial Analyst → Raster Calculator)中将安徽省水源涵养功能空间分布栅格图采用最大最小值法将数据归一化到0~1,导出栅格数据属性表,属性表记录了每一个栅格像元的水源涵养服务值,将该组服务值求和,计算累加服务值^[15]。将水源涵养服务值按从高到低的顺序排列,经详细试验后,发现将累加服务值占水源涵养服务值比例的90%与80%所对应的栅格值作为水源涵养服务功能评估分级的分界点,最能体现分级特征。利用 ArcGIS 重分类工具,将水源涵养功能重要性分为三级,即极重要、重要和一般重要^[15]。提取极重要区域并剔除面积不足1 km²区域作为安徽省水源涵养能力生态安全格局分布。

水源涵养极重要区域主要集中在长江沿线、皖西大别山区、皖南黄山区、巢湖以及中北部部分河流湿地,总体呈现南多北少的分布状况(图3)。长江作为水生态安全控制点,是水源涵养极为重要的组成部分;大别山区和黄山区有充足的

林木可以锁住大量水分,是全省水源涵养能力的重点区域;巢湖以及其他河湖湿地对水源涵养有着较为明显的调节作用。

2.1.2 水土保持功能重要性分析。式(2)计算出水土保持功能分布后,数据归一化导出服务值属性表并按从大到小顺序排列,经试验分析确定将总值占水土保持服务总值比例的60%与40%所对应的服务值作为生态系统服务功能评估分级的分界点,并将其重分类为三级重要性。提取极重要区域并剔除面积不足1 km²区域作为安徽省水土保持能力生态安全格局分布。

水土保持极重要区域集中在皖西大别山区、皖东南黄山区和皖东滁州市中部山区(图4),该区域林木较多,尤其适宜乔木灌丛等植被生长,植被对水土的依附性又可以保证水土不被流失。

2.1.3 生物多样性保护重要性分析。计算安徽省生物多样性保护功能服务值,经试验重要性分界点选择80%和95%,重分类后得出生物多样性保护重要性分级。提取极重要区

域并剔除斑块面积不足 1 km² 区域,作为安徽省生物多样性

保护生态安全格局分布。

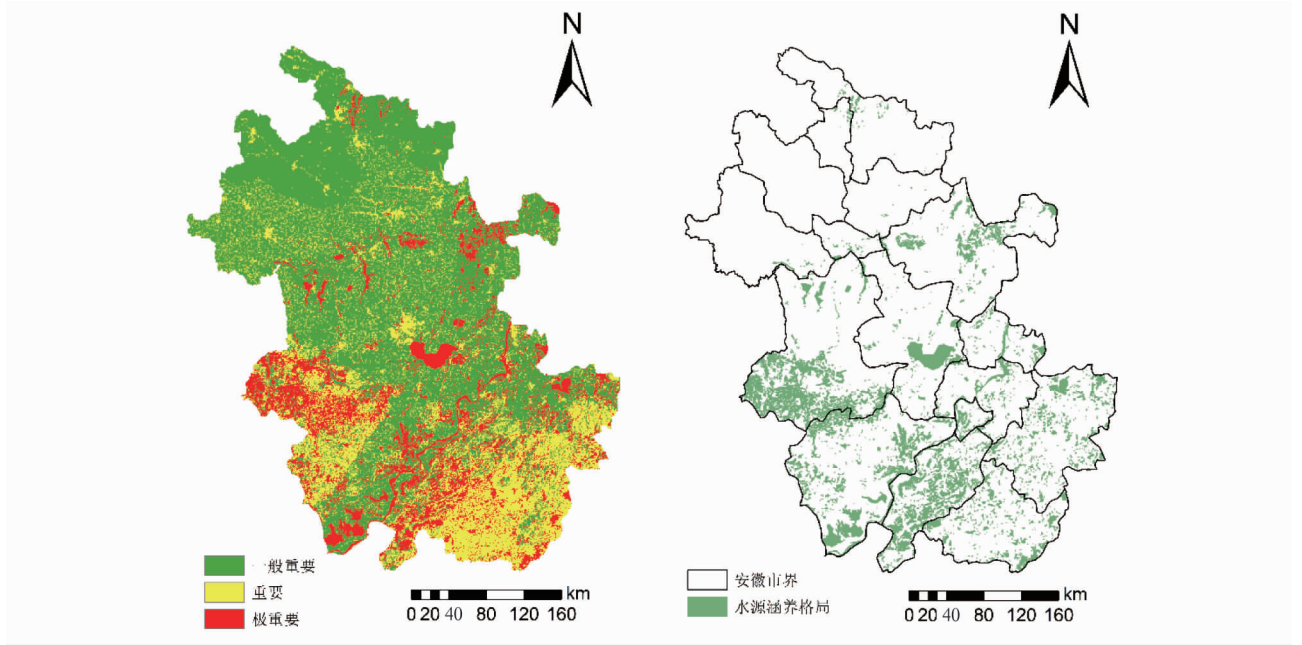


图 3 安徽省水源涵养功能重要性分级与水源涵养生态安全格局

Fig. 3 The importance classification of water conservation function and the ecological security pattern of water conservation in Anhui Province

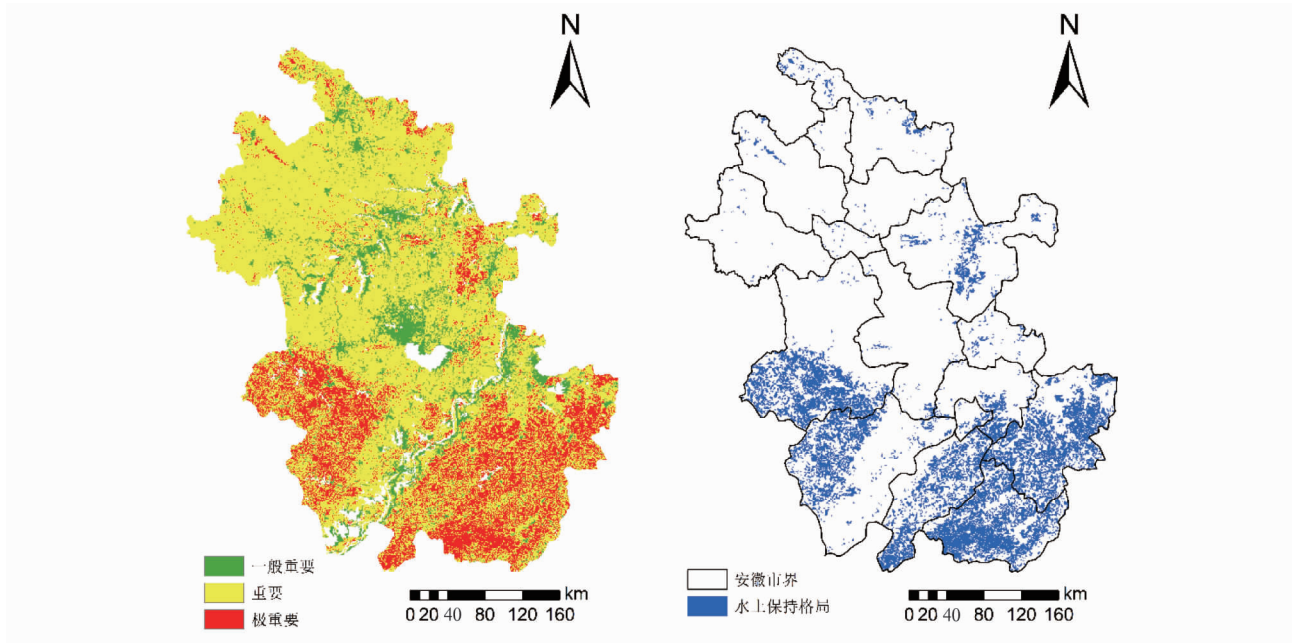


图 4 安徽省水土保持功能重要性分级与水土保持生态安全格局

Fig. 4 The importance classification of soil and water conservation function and the ecological security pattern of soil and water conservation in Anhui Province

生物多样性表现为动植物种类数量和集聚程度,安徽省从北向南依次为平原、丘陵、山地分级,平原地区生物多样性明显弱于南部山地,黄山区为全省生物多样性高值区,总体呈现南多北少分布态势,西部大别山南麓出现斑块状生物多样性高值区(图 5)。山区林木茂盛,自然环境丰富多样,适宜更多生物生长繁殖。

2.2 水土流失敏感性分析 根据通用水土流失方程的基本原理,依据评估模型计算得水土流失敏感性指数,并对其归

一化处理,结合水土流失强度分级标准和专家知识^[33-34],将安徽省水土流失敏感性指数分级为一般敏感、敏感、极敏感,得出安徽省水土流失敏感性分级。提取极敏感区域并剔除斑块面积不足 1 km² 区域作为安徽省生态敏感性格局。

综合全省水土流失敏感性指数来看,极敏感区域主要集中在皖南黄山区,皖西大别山部分区域,以及大别山、黄山余脉延伸区,整体呈现东南多西北少的趋势(图 6)。黄山和大别山作为重要旅游资源地,在旅游开发过程中难免存在生态

与发展间的矛盾,水土流失问题虽不甚于我国西北地区,但从全省来看,两大山区应注重保持水土等相关举措,严防水

土流失敏感性问题扩大化。

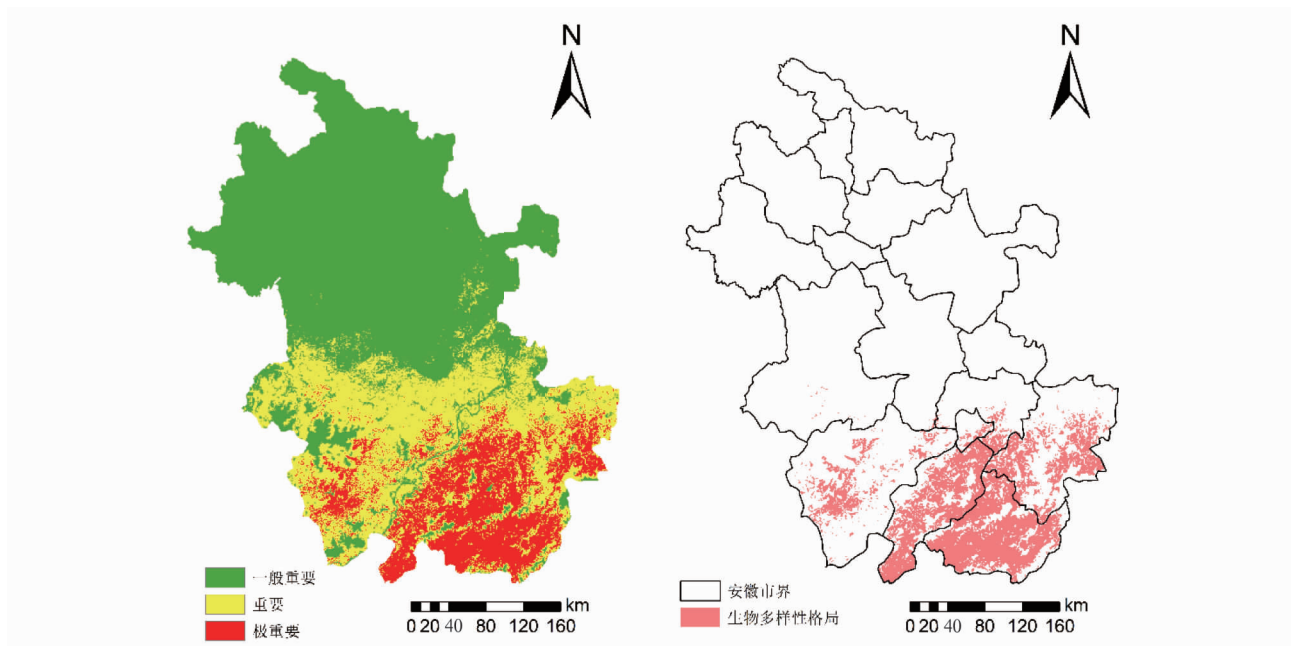


图5 安徽省生物多样性功能重要性分级与生物多样性生态安全格局

Fig. 5 The importance classification of biodiversity function and the ecological security pattern of biodiversity in Anhui Province

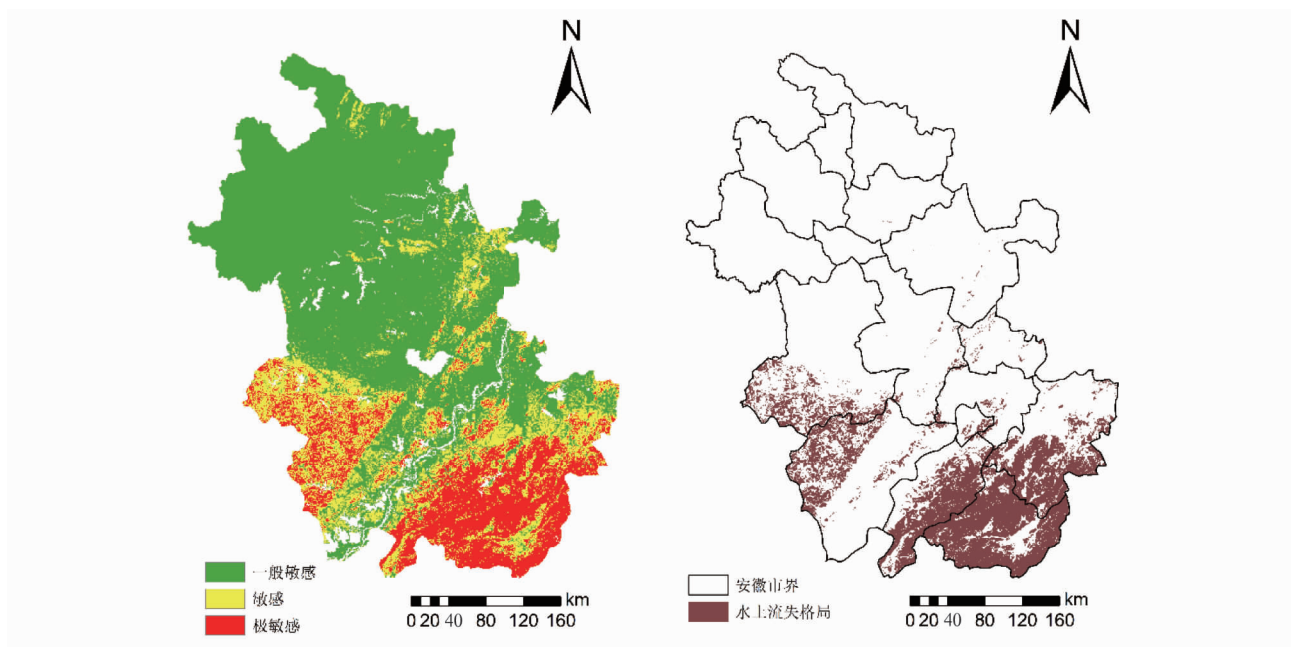


图6 安徽省水土流失敏感性分级与生态敏感性格局

Fig. 6 Sensitivity classification and ecological sensitivity pattern of soil and water loss in Anhui Province

2.3 景观生态指数分析

2.3.1 景观破碎度与景观完整性分析。景观分裂指数(DIVISION)与斑块密度指数(PD)类似,所得均可显示区域内景观种类的复杂程度。通过对 1 km、500 m、250 m 的窗口调试分析,250 m 窗口大小较能反映全省景观的分布情况。在 Fragstats 软件中得出全省 DIVISION 和 PD 的空间分布格局(图 7)。

要集中于淮河支流区域,西部大别山北麓和南麓,长江沿线,以及马鞍山市、芜湖市、宣城市交汇地带(图 7)。对照安徽省土地利用图,发现北部高值区成因在于河流周围均为耕地而凸显;长江沿线和大别山南北麓高值区内土地利用类型复杂多样,河流、农田、城镇以及其他土地利用类型均有分布,三市交汇地区土地利用更为复杂。剔除分布格局中土地利用类型为建设用地和农田的区域,按照从小到大顺序排列其余指数值,计算累加指数值。由于景观分裂指数与斑块密度

全省范围内分裂指数和密度指数分布相似。高值区主

指数表达意义相反:分裂指数越高,区域内景观分布越离散,破碎度越高;密度指数越高,区域内景观种类越多,景观完整性越低。通过对指数值占累加值比例的 40%、60%、80%作为

分级关键点试验分析后,发现 60%~100%区域内指数值最能作为景观破碎度高值区和景观完整性低值区(图 8)。

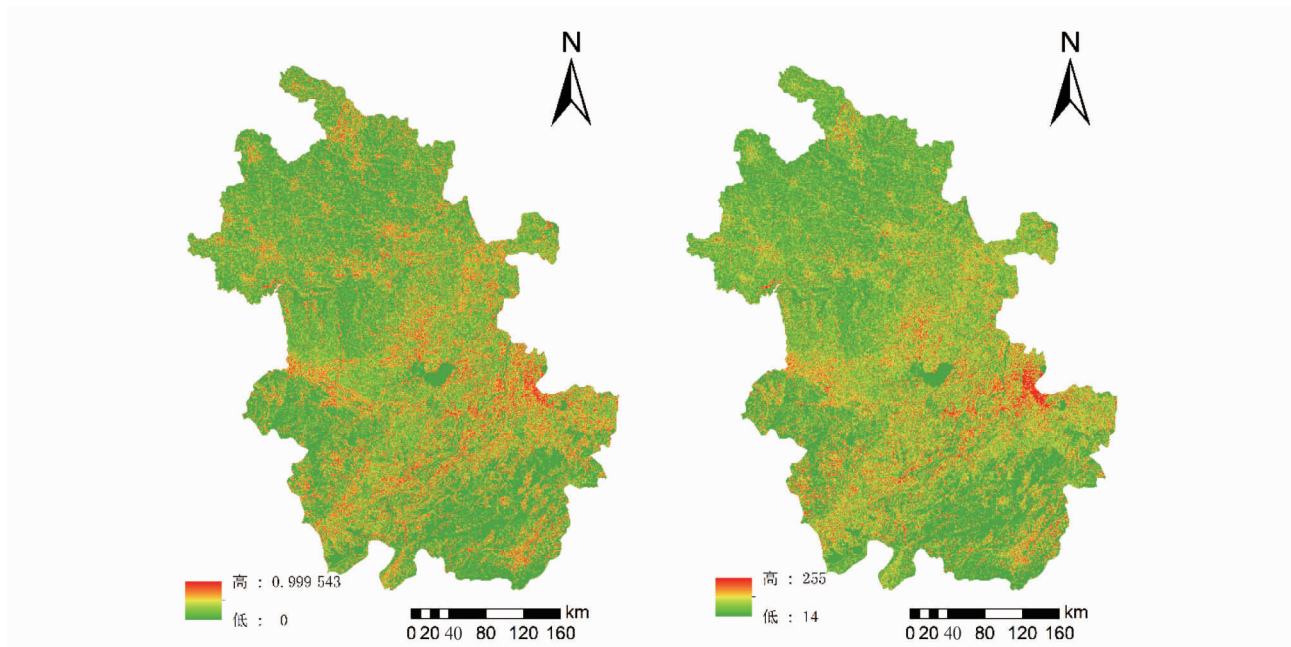


图 7 安徽省景观分裂指数与斑块密度指数空间分布格局

Fig. 7 Spatial distribution pattern of landscape split index and patch density index in Anhui Province

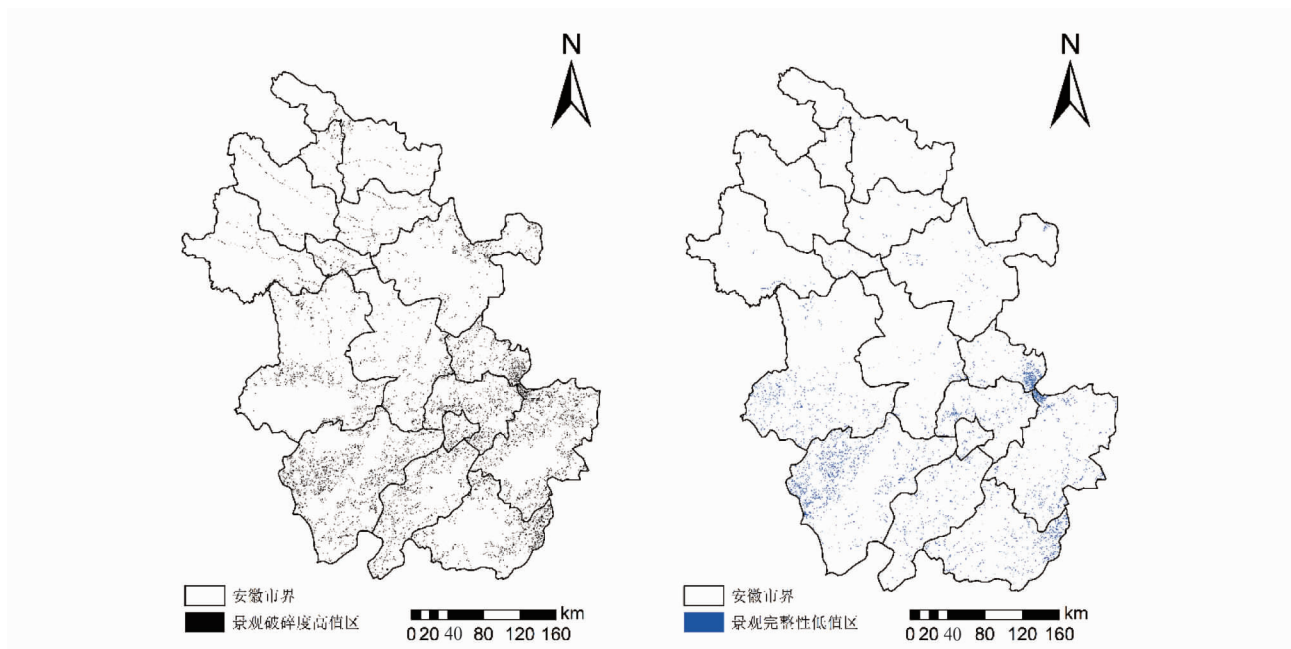


图 8 安徽省景观破碎度高值区与景观完整性低值区

Fig. 8 High value area of landscape fragmentation and low value area of landscape in Anhui Province

剔除农田和建设用地后,景观破碎度高值区和景观完整性低值区出现在大别山南麓,长江沿线,马鞍山、芜湖、宣城三市交汇地带(图 8),表明当前区域内林地河湖等土地利用类型分布较为分散,景观特征表现为区域内同种土地利用类型独立分布,其中长江沿线极值区成因与长江沿线斑块状分布的沿江防护林有关。省内其他地区的极值区与单独出现的河湖湿地有关。

2.3.2 蔓延度分析。使用 Fragstats 计算出安徽省蔓延度,高值说明景观中某种优势斑块类型形成良好的连接性,反之则表明景观是具有多种要素的分布格局。剔除城镇农田所在区域,经试验将蔓延度值低于 60%的区域选为低值区。

相比于 DIVISION 和 PD 指标,蔓延度低值区有更广的分布范围,除大别山和黄山地区外,东部滁州市境内山区也存在低蔓延度地区(图 9),表明该地区景观类型较为丰富,

各斑块间连接性较低。

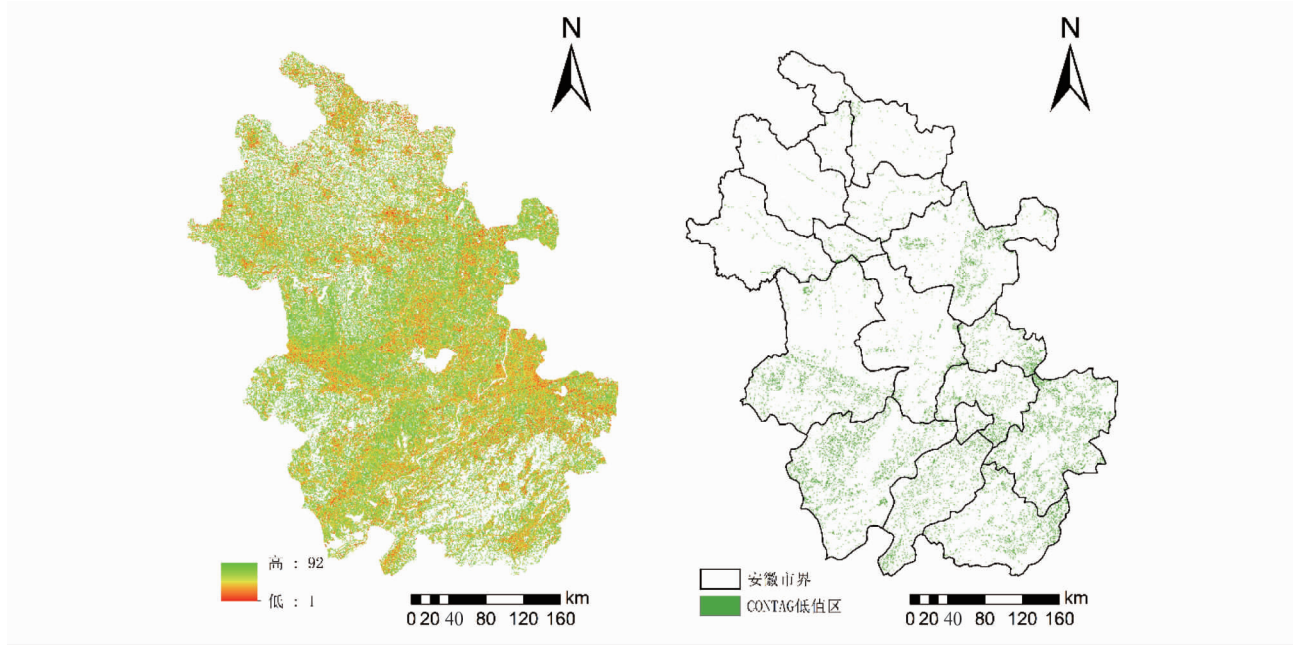


图9 安徽省景观蔓延度与蔓延度低值区

Fig. 9 Landscape spread and spread low value area in Anhui Province

3 安徽省生态安全格局

在 ArcGIS 中,叠加生态安全重要性和生态敏感性 4 幅格局图(水源涵养生态安全格局、水土保持生态安全格局、生物多样性生态安全格局和生态敏感性格局),剔除图中土地利用类型为建设用地和耕地的部分,形成生态安全重要性敏感性格局。叠加景观破碎度高值区、景观完整性低值区和蔓延度低值区 3 幅图,剔除斑块面积不足 1 km² 的区域形成景观生态安全格局。融合生态安全重要性敏感性格局和景观生态安全格局建立安徽省生态安全格局(图 10)。

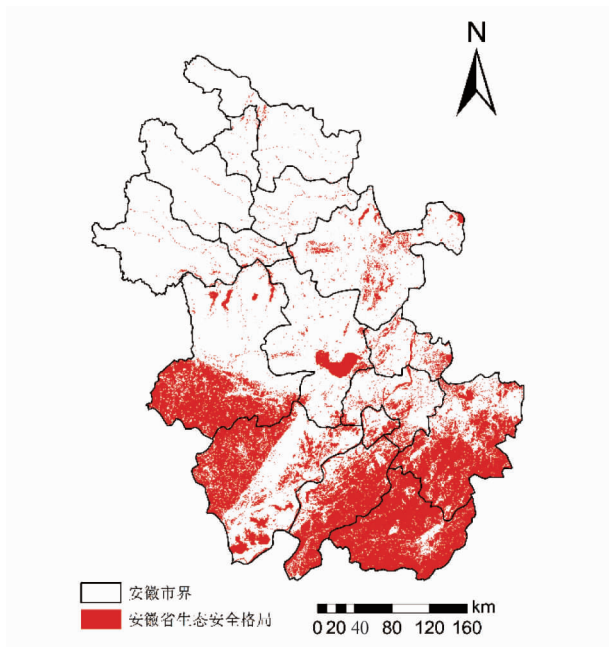


图 10 安徽省生态安全格局

Fig. 10 Ecological security pattern in Anhui Province

安徽省生态安全格局以西部大别山生态屏障和南部黄山生态屏障为框架,以长江干流水生态廊道为连接枢纽,融合以巢湖为首的中北部湖泊为湿地保护屏障,共同表现为“两山一江,山环水绕”生态安全格局。

4 结论与讨论

该研究基于 GIS 和 Fragstats 软件,运用生态安全重要性与敏感性划分生态安全高值区,使用景观生态指数为参考基准划分景观生态极值区,构建了安徽省生态安全格局。研究表明,安徽省生态安全格局总面积 41 083.46 km², 占全省面积的 29.53%,整体主要格局以西部大别山生态屏障和南部黄山生态屏障为支撑,总面积分别为 10 878.66、20 004.97 km²,长江干流水生态廊道为屏障链接,巢湖等湖泊湿地为生态格局重要组成成分,总面积 1 130.74 km²。

该研究通过综合生态安全重要性敏感性指数和景观生态指数,构建了安徽省生态安全格局,改变了以往生态安全格局的单一评估指标情况,为安徽省生态保护提供了新的思路和参考。针对不同地区、不同指标类型使用了不同的等级进行分级处理,突破了以往全国使用统一分级标准造成的地区间生态格局差异性不明显的情况,使生态安全的区域特殊性更加显著。由于研究未统一各个指标的栅格分辨率大小,具体表现为生态安全重要性栅格分辨率低于景观生态指数的分辨率,使得生态安全格局不同指数之间的精准性略有不足。如何更加科学地突出地区间生态安全格局的科学性和系统性,统一不同尺度下生态安全的地区性差异,开展区域生态安全动态评价和高效预警是今后亟待深入研究的部分。可以进一步选择更大尺度和更长时间跨度,从更微观的评价单元角度,加强区域生态安全的时空分析,更好揭示生态安全的变化规律和驱动因子,提出更有针对性的决策建议。

参考文献

- [1] 秦晓楠, 卢小丽, 武春友. 国内生态安全研究知识图谱: 基于 Citespace 的计量分析[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3693-3703.
- [2] 李宗尧, 杨桂山, 董雅文. 经济快速发展地区生态安全格局的构建: 以安徽沿江地区为例[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 106-113.
- [3] 宋伟东. 基于生态功能重要性和敏感性的安徽省生态安全格局构建[J]. 阜阳师范学院学报(自然科学版), 2019, 36(3): 103-109.
- [4] 张豆, 渠丽萍, 张柒滴. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化: 以长三角地区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7526-7537.
- [5] 陈昕, 彭建, 刘焱芬, 等. 基于“重要性-敏感性-连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484.
- [6] 杜悦悦, 胡熠娜, 杨扬, 等. 基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建: 以云南省大理白族自治州为例[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8241-8253.
- [7] 付刚, 白加德, 齐月, 等. 基于 GIS 的北京市生态脆弱性评价[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(9): 830-839.
- [8] 谭云凤. 基于 GIS 和 Fragstats 的团结镇景观格局优化研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [9] ZHOU D Y, TIAN Y Y, JIANG G H. Spatio-temporal investigation of the interactive relationship between urbanization and ecosystem services: Case study of the Jingjinji urban agglomeration, China[J]. Ecological indicators, 2018, 95: 152-164.
- [10] 刘琦, 刘世梁, 赵清贺, 等. 基于移动窗口法的水电开发影响下景观格局梯度分析[J]. 山地学报, 2012, 30(5): 628-635.
- [11] 仇江啸, 王效科, 逮非, 等. 城市景观破碎化格局与城市化及社会发展水平的关系: 以北京城区为例[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2659-2669.
- [12] 张琳琳, 孔繁花, 尹海伟, 等. 基于景观空间指标与移动窗口的济南城市空间格局变化[J]. 生态学杂志, 2010, 29(8): 1591-1598.
- [13] 唐建, 谭飞, 周琳. 景观破碎化对物种多样性的影响探讨[J]. 绿色科技, 2018(24): 158-161.
- [14] LARSEN L G, CHOI J, NUNGESESSER M K, et al. Directional connectivity in hydrology and ecology[J]. Ecological applications, 2012, 22(8): 2204-2220.
- [15] 中华人民共和国生态环境部. 生态保护红线划定指南: 环办生态(2017)48号[A]. 2017.
- [16] 安徽省人民政府. 安徽省人民政府关于发布安徽省生态保护红线的通知: 皖政秘(2018)120号[A]. 2018.
- [17] 卢一梦. 安徽省湿地生态保护红线划分研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2019.
- [18] 白育铭. 安徽省生态红线区管控指标体系构建研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- [19] 王在高, 吴楠. 安徽省重点生态功能区保护红线划定方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(10): 1412-1415.
- [20] 王在高, 吴楠. 基于 GIS 的安徽省生态保护红线划定方法研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2018, 41(3): 287-292.
- [21] 王在高, 吴楠. 安徽省生态环境敏感区保护红线划定方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(8): 1100-1107.
- [22] 宋言奇. 长三角生态安全一体化研究[J]. 南通大学学报(社会科学版), 2005, 21(4): 61-66.
- [23] 宋言奇. “长三角”地区生态安全应走一体化综合治理的道路[J]. 科技导报, 2005, 23(12): 72.
- [24] 李进华, 孙庆业, 周立志, 等. 安徽生态建设与长三角生态安全[C]//中国生态学会、安徽生态省建设领导小组办公室. 循环·整合·和谐——第二届全国复合生态与循环经济学术讨论会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2005: 6.
- [25] 张贝尔, 蒋旭东, 孙京禄, 等. 安徽省区域生态安全动态评价与预警分析[J]. 中国农学通报, 2018, 34(27): 142-151.
- [26] 刘晓哲. 改进的通用土壤侵蚀方程在流域水土流失模拟中的运用[J]. 水利规划与设计, 2016(4): 69-71.
- [27] 刘海涛. 基于改进通用土壤侵蚀方程的水土流失时空模拟: 以淮河流域上游为例[J]. 人民长江, 2016, 47(4): 17-19, 26.
- [28] 陈正发. 基于 RUSLE 模型的重庆市土壤流失方程研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [29] 方行, 方元. 基于 GIS 与 Fragstats 景观水平的空间格局特征分析: 以珠江口两岸为例[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(4): 841-842.
- [30] 冯永玖, 刘艳, 周茜, 等. 景观格局破碎化的粒度特征及其变异的分形定量研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(3): 443-450.
- [31] 洪鸿加, 彭晓春, 陈志良, 等. 长沙市景观破碎化时空分异特征研究[J]. 国土资源遥感, 2011(1): 133-137.
- [32] SONG H H, LIU L X, ZHANG Y T, et al. Research on landscape pattern optimization of Xianglan Town based on GIS and fragstats[C]//Proceedings of the 2017 International Conference on Society Science (ICoSS 2017). Paris, France: Atlantis Press, 2017.
- [33] 连艺昕. 基于遥感及 GIS 技术的水土流失信息提取与分级研究: 以福建省永春县为例[D]. 南昌: 东华理工大学, 2014.
- [34] 连米钧. 水土流失概念及水土流失强度分级标准[J]. 水土保持科技情报, 2001(1): 25-27, 44.
- [24] 覃杰香, 王兆礼. 基于 GIS 和 RUSLE 的从化市土壤侵蚀量预测研究[J]. 人民珠江, 2011, 32(2): 37-41.
- [25] JIANG Z S, ZHENG F L, WU M. China water erosion prediction model [M]. Beijing: Science Press, 2008: 200-202.
- [26] 陈彦光. 地理数学方法: 基础和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 488-516.
- [27] 刘少佳, 任志远, 杨文艳, 等. 基于马尔科夫模型土壤侵蚀动态变化研究: 以西安都市圈为例[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 14-19, 24.
- [28] 江青龙, 谢永生, 张应龙, 等. 京津水源地小流域土壤侵蚀空间模拟[J]. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1703-1711.
- [29] 石香琼, 查轩, 陈世发. 基于马尔科夫模型的红壤退化地水土流失动态变化预测研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 19-23.

(上接第 69 页)