

基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法

杜腾飞, 齐伟, 朱西存, 王鑫, 张瑜, 张蕾

(山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018)

摘要: 自然资源空间管制是平衡生态保护和经济发展关系的基本工具, 严守生态安全格局的底线思维对于重建系统完备、生态盈余的自然资源空间管制新格局具有重要指导意义。以胶东半岛典型山地丘陵区——栖霞市为例, 应用数据密集型知识挖掘, 集成地理信息方法与模型, 基于栅格从生态服务功能重要性和生态环境敏感性两方面精准识别生态源地, 利用地形位指数修正基本阻力面, 并运用最小累积阻力模型提取生态廊道, 从而构建生态安全格局, 实现自然资源分区管制。结果表明: 栖霞市生态源地面积为 627.80 km², 占全市总面积的 31.14%, 集中分布在中东、中南和西北部, 且超过一半源地为林地; 关键、优化生态廊道各 237.19 km、83.90 km, 大多由林地组成, 主要分布在中东、西北和西南部, 形成完整的生态网络; 划定禁止建设区、限制建设区、条件建设区和优先建设区, 为自然资源空间精准管制提供方法保障。

关键词: 生态安全格局; 自然资源空间精准管制; 最小累积阻力模型; 地形位指数; 生态源地; 生态廊道

生态文明建设“必须树立和践行绿水青山就是金山银山的理念”, 自然资源空间管制^[1]对生态保护和经济发展的互促共进具有重要作用^[2]。山地丘陵区生态与生产用地冲突明显, 忽视了生态系统服务的基本供给, 因此自然资源空间管制必须严守生态安全格局的底线思维^[3,4], 既要严格保护生态服务多功能, 又要禁止破坏生态脆弱区, 还要解决生态红线的破碎化、插花化问题, 以实现自然生态空间功能与边界的“双完整”^[5]。进一步扩大生态空间范围, 分级管控生态空间, 重建系统完备、生态盈余的自然资源空间管制新格局^[6], 其基础就是厘清生产、生态、生活空间关系, 构建生态安全格局并划定各级保护区边界^[6]。生态安全格局是由景观中关键性局部、位置和空间联系构成的一种潜在空间格局, 对控制或维护生态过程具有重要作用^[7,8]。景观格局影响生态过程, 生态过程做出反馈又塑造景观格局, 产生土地系统中的多种时空效应, 并共同影响生态服务的供给^[9]。基于景观生态学中的“斑块—基质—廊道”模式, “源地识别—阻力面构建—廊道提取”作为生态安全格局构建的主流范式^[10,11]可为自然资源空间管制布局提供借鉴。源地对保障区域生态安全具有决定意义^[12-14], 耦合格局与过程是研究源地精准识别的基础。生态廊道是区域内能量和物质流动的载体, 多利用较好模拟格局与过程相互关系的最小累积阻力模型提取^[15-17], 其关键在于阻力面的设定, 常根据土地利用类型直接赋值^[18], 但这样掩盖

收稿日期: 2019-03-22; 修订日期: 2019-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271369)

作者简介: 杜腾飞 (1993-), 女, 山东临沂人, 硕士, 主要从事土地规划与利用研究。Email: Du_tf93@163.com

通讯作者: 齐伟 (1970-), 男, 山东泰安人, 博士, 教授, 主要从事土地利用与信息技术研究。

Email: qiwei@sdau.edu.cn

了同一地类的内部差异,需有更加精准的廊道识别方法。当前,地球科学研究已进入模拟型的第三范式和数据密集型的第四范式共同推进阶段,亟需加强力量,为自然资源综合管理提供全面的数据服务与技术支持^[19]。

山地丘陵区地形复杂,影响物质与能量的传递,构成独特生态环境,具有重要的生态安全维护功能但生态基底较脆弱,是空间管制研究颇具代表性的区域,自然资源空间管制对山区三生空间的优化布局与合理利用具有现实意义。当前针对山区的空间管制研究还不够充分^[20,21],但国内外学者已对山区的生态安全、生态系统服务、生态适宜性等开展了大量研究^[22,23],为其自然资源空间管制提供了参考。本文以胶东半岛典型山地丘陵区栖霞市为研究区,应用数据密集型知识挖掘^[24],利用地学大数据,耦合格局与过程,在厘清三生空间中生产、生活、生态空间各自规模、格局、质量特征及三大空间相互作用关系的基础上,集成地理信息方法与模型,利用30 m×30 m栅格数据开展精细化评价,构建生态安全格局,实现自然资源空间精准识别与管制。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

栖霞市地处胶东半岛中部,位于120°33′~121°15′E、37°05′~37°32′N之间,总面积2016 km²。属暖温带季风型半湿润气候,年均降水量743.14 mm,年均气温11.3℃,年日照总时数2690小时,无霜期207天。境内丘陵连绵,群山起伏,海拔30~815 m,以西北的艾山和东南的牙山两大山系构成东南西北走向的地形屋脊,两侧余脉大多为南北走向,形成低山丘陵与少量河谷冲积平原,构成深壑峡谷的地貌特征,素有“六山一水三分田”之说和“胶东屋脊”之称(图1a)。土壤母质主要为洪积物、冲积物、残积物和酸性岩,土壤类型主要为棕壤、潮土和褐土。不仅适合玉米、小麦等农作物生长,而且是各种果树尤其是苹果栽培的适宜区。农地利用表现出典型的集约化特点,人为投入较大,加之城镇开发建设导致生态空间不断减少,使栖霞市面临生态保护的巨大压力(图1b)。

1.2 数据来源与预处理

利用栅格数据对各项资源条件进行空间化,对离散数据应用插值方法实现由点到面的转换。其中土地利用由2015年Landsat 8 OLI影像解译获取;GDEM数字高程源自地理空间数据云;NPP(净初级生产力)采用美国地质调查局提供的2015年MODIS卫星

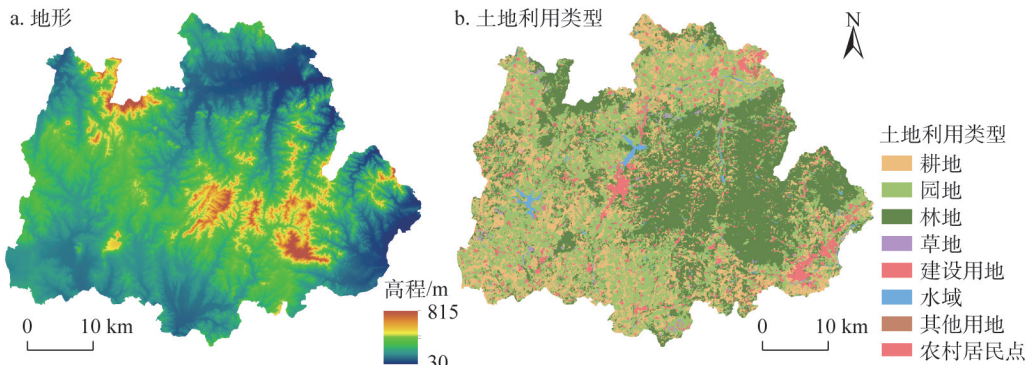


图1 栖霞市地形图与2015年土地利用类型

Fig. 1 Topography map and land use pattern map in 2015 of Qixia city

MOD17A3H数据; 蒸散发使用国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统提供的多年平均蒸散量; 降水来自研究区19个气象观测站多年观测数据和气象局统计数据, 年平均降水量运用多元回归和空间插值方法模拟; 土层厚度和土壤质地根据研究区1:10万土壤图及土壤志提取; 土壤重金属和有机质利用全市均匀布设的499个样点实测数据插值获得, 其中重金属包括As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn八种元素。以30 m×30 m分辨率栅格作为评价单元, 全市划分为1711行、2115列, 共2225105个栅格, 保证数据的连续性与精准性。

1.3 研究方法

结合栖霞市地域特征, 应用ArcGIS平台, 在对基础资源数据精细空间化的基础上, 基于生态服务功能重要性和生态环境敏感性精准识别生态源地, 利用地形位指数修正基于土地利用类型和人为干扰程度赋值的基本阻力面, 并通过最小累积阻力模型精准提取生态廊道, 从而构建栖霞市生态安全格局, 进行自然资源空间精准管制(图2)。

1.3.1 生态服务功能重要性评价方法

针对区域典型生态系统服务, 进行国土空间多功能评价, 以精准识别具有生态价值的核心优势区。基于栖霞市自然本底特征, 从生产、水源涵养、气候调节、生境维持四个方面评价生态服务功能重要性。

生产功能是生态系统最基本的功能, 土壤有机质影响土壤肥力和土壤质量, 土壤质地关系土壤物理性质和保水保肥能力, 土层厚度直接影响作物根系分布的空间范围和作物对养分、水分的利用率与贮量, 故从土壤理化性质的综合效应出发, 利用土壤有机质含量、土壤质地赋值和土层厚度三者极差标准化后的乘积来表征生产功能; 高植被覆盖率和作为水系发源地的优势使水源涵养成为重要的生态系统服务, 计算中采用水量平衡法, 根据多年平均降水量和蒸散量的差值模拟; 气候调节可改善区域生态环境, 提升居民生活品质, 绿色植物通过光合作用释放氧气, 产生NPP, 对局部小气候起重要调节作用, 因此选用NPP表征气候调节功能; 栖霞市生物种类丰富, 生物多样性保护需基于良好的生境, 因此生境维持也是一项重要的生态服务功能, 通过InVEST(生态系统服务与权衡综合评价)模型的生境质量模块测算, 以生境质量表征维持生物多样性的能力。利用自然断点法将各项功能评价结果划分为五个等级(图3a~图3d), 并按功能值从高到低分别赋值5、4、3、2、1, 然后等权叠加获得生态服务功能重要性图层。

1.3.2 生态环境敏感性评价方法

通过生态环境敏感性评估筛选出受到干扰后易产生生态环境问题且难以恢复的高敏感性区域。栖霞市存在一定程度的人

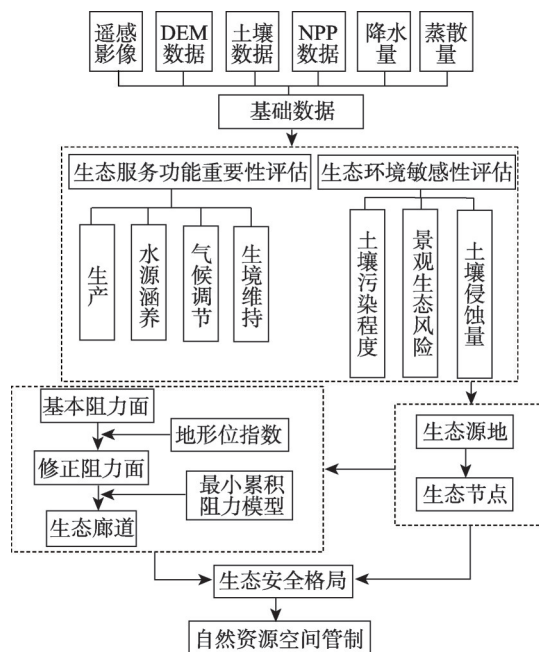


图2 自然资源空间精准识别与管制技术框架
Fig. 2 Framework for precise identification and control of natural resources space

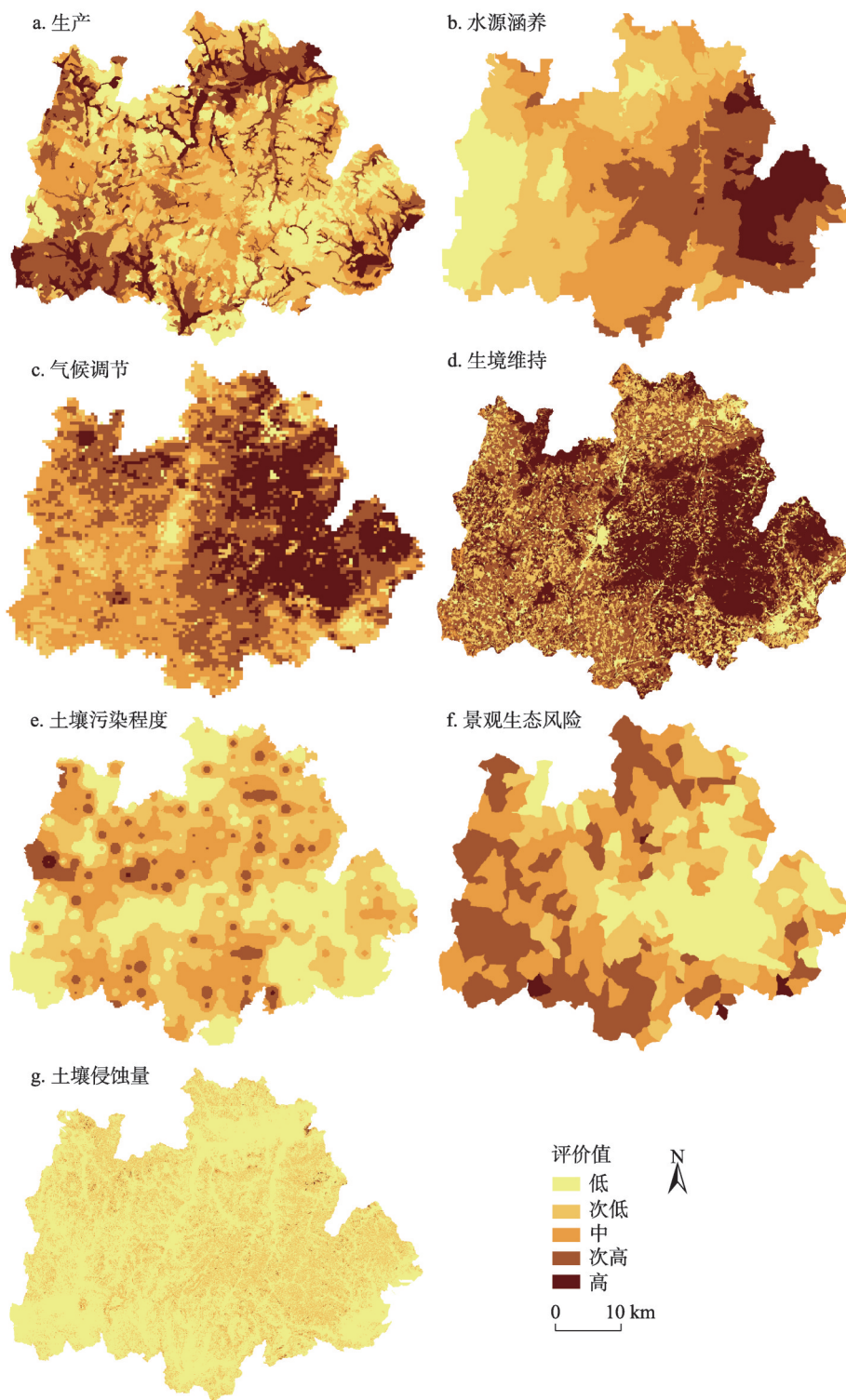


图3 栖霞市生态要素空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of ecological elements in Qixia city

类活动干扰和水土流失,故从土壤污染程度、景观生态风险和土壤侵蚀量三个方面评估其生态环境敏感性。

土壤环境直接影响着农产品的质量安全,栖霞市作为优质苹果主产区,土壤污染必将导致农业损失。土壤重金属含量是土壤环境质量的重要指标,故通过内梅罗综合污染指数^[25]表征土壤污染程度,公式如下:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

$$P_{\text{综}} = \sqrt{(\bar{P}_i^2 + P_{i\text{max}}^2) / 2} \quad (2)$$

式中: P_i 为单因子污染指数; C_i 为第 i 种重金属实测值; S_i 为第 i 种重金属评价标准; $P_{\text{综}}$ 为内梅罗综合污染指数; \bar{P}_i 为污染指数平均值; $P_{i\text{max}}$ 为污染指数最大值。

景观生态风险表现为景观受外界干扰时的敏感程度。随着人类活动愈发频繁,栖霞市景观格局有所改变,面临着生态系统失衡的威胁,而生态过程在流域内相对独立,因此利用景观干扰度指数与脆弱度指数分小流域综合评价景观生态风险。其中景观干扰度指数表征景观代表的生态系统所受干扰的程度,通过景观优势度、分离度和破碎度指数叠加获得;景观脆弱度指数反映生态系统的易损性,依据不同景观类型的抗蚀性表征。基于高程数据通过GIS水文分析模块将研究区划分为300个小流域。

栖霞市降水季节分布不均,境内沟壑纵横,需重点关注土壤侵蚀易发区域。对土壤侵蚀量采用修正的通用土壤侵蚀方程评估,其中,降水侵蚀力因子通过降雨量计算^[26],地形因子通过排水区和坡度推算^[27],土壤抗蚀力因子通过土壤质地计算^[28],土地覆盖因子和水土保持因子根据土地利用类型与坡度赋值^[29]。

上述评价结果均通过自然断点法划分为五个等级(图3e~图3g),并按敏感性从高到低分别赋值5、4、3、2、1,然后等权叠加评价生态环境敏感性。

1.3.3 阻力面构建方法

生物物种运动和生态功能传递的受阻程度主要由土地覆被状态和人类干扰程度决定。参考相关研究^[17,30,31],将栖霞市不同土地利用类型的生态阻力系数设在1~500之间,距离城镇建设用地、村庄用地和道路越近,人为干扰越强,生态阻力越大,通过对其缓冲区赋值表示人类活动影响,构建基本阻力面(表1)。

栖霞市复杂的地形条件引起生态因子的复杂组合并对水土流失等过程产生重要影响,可能破坏原有的生态源地和廊道,形成生境隔离,因此有必要基于地形条件对栖霞市基本阻力面进行修正。山地丘陵区高程和坡度

表1 栖霞市基本生态阻力系数

Table 1 Basic ecological resistance coefficients in Qixia city

阻力因子	阻力因子分类	阻力系数
土地利用类型	林地	1
	草地	10
	园地	50
	水域	50
	耕地	100
	村庄用地	400
	其他用地	450
	交通用地	450
	城镇建设用地	500
村庄用地缓冲区/m	100	250
	200	100
交通用地缓冲区/m	100	300
	300	150
城镇建设用地缓冲区/m	200	300
	500	100

的组合情况较多, 仅用高程或坡度都无法较好地表征地形的空间分布特征, 而地形位指数通过对坡度与高程的综合, 可充分反映区域地形复杂状况^[32], 故采用地形位指数修正阻力面, 公式为:

$$T_i = \ln \left[\left(\frac{E_i}{\bar{E}} + 1 \right) \times \left(\frac{S_i}{\bar{S}} + 1 \right) \right] \quad (3)$$

$$R_i = \frac{T_i}{T_a} \times R \quad (4)$$

式中: T_i 为栅格 i 的地形位指数; E_i 、 S_i 分别为栅格 i 的高程、坡度; \bar{E} 、 \bar{S} 分别为栖霞市平均高程、坡度; R_i 为基于地形位指数修正的栅格 i 的生态阻力系数; T_a 为栅格 i 对应的土地利用类型 a 的平均地形位指数; R 为栅格 i 的基本阻力系数。

1.3.4 生态廊道提取方法

采用广泛应用的最小累积阻力模型定量识别生态廊道, 综合考虑距离、源地和景观介面, 计算物种从源运动到目的斑块所受阻力, 并选取阻力最低的通道作为生态廊道^[33], 公式如下:

$$MCR = f \min \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (5)$$

式中: f 是最小累积阻力同生态过程的正相关关系; MCR 是最小累积阻力值; D_{ij} 是从源 j 到景观单元 i 的距离; R_i 是景观单元 i 的阻力系数。

2 结果分析

2.1 生态保护重要性评价与生态阻力面修正

利用自然断点法将生态服务功能重要性和生态环境敏感性各划分为五个等级。生态服务功能重要性自东向西递减, 中东部山区生态服务供给能力较强, 北部、南部和中部小部分区域因生产能力较强, 也成为功能重要性高值区 (图 4a)。研究区主要为面源污染, 土壤侵蚀强烈区分布于坡度大、植被覆盖度低、土壤保水性差的区域, 生态环境敏感

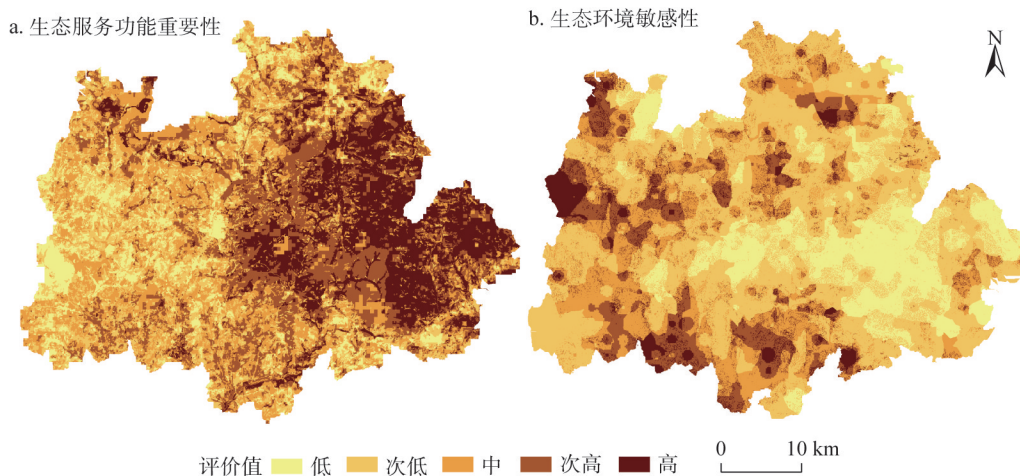


图 4 栖霞市生态服务功能重要性和生态环境敏感性空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of ecosystem service function importance and ecological environment sensitivity in Qixia city

性高值区零星分布,其中西北部和中南部分布较集中,主要因为此处人类活动较强,景观生态风险和土壤污染程度均高于其他区域(图4b)。将生态服务功能重要性和生态环境敏感性图层等权叠加得到生态保护重要性图层,其高值和次高值区分散分布于东部、中南部和西北部(图5)。

地形位指数高值区集中在中东部和西北部山地区,以牙山、艾山处地形最复杂,自两大山系向四周地形位指数逐渐降低,东北部和西南部地势平缓(图6a)。基于地形位指数修正的阻力面能够细致表征同一地类的内部变化(图6b)。

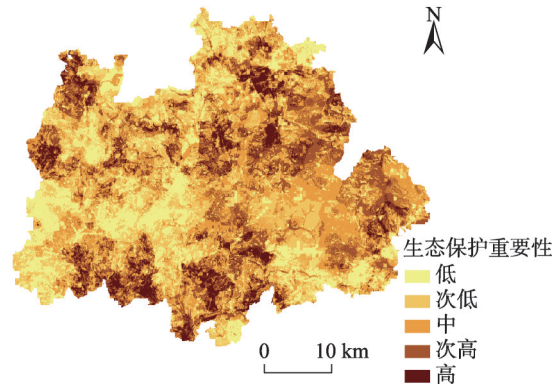


图5 栖霞市生态保护重要性空间格局

Fig. 5 Spatial pattern of ecological conservation importance in Qixia city

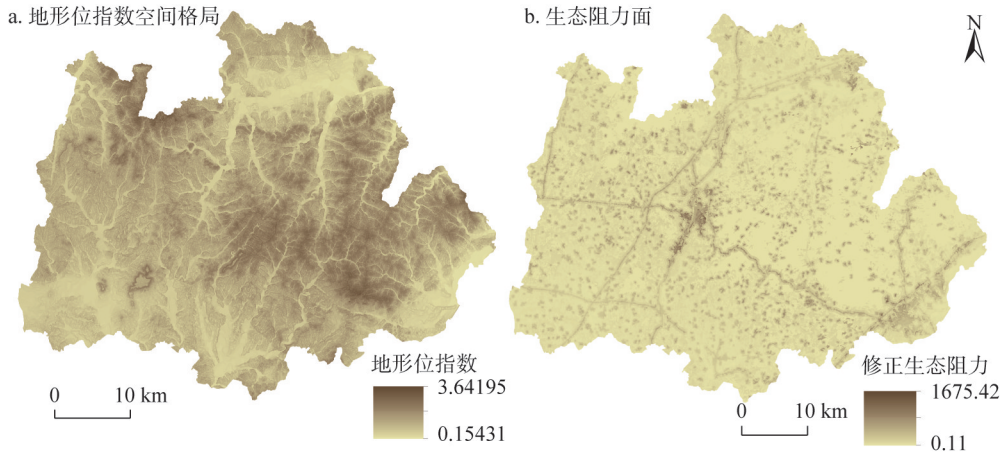


图6 栖霞市地形位指数空间格局和生态阻力面

Fig. 6 Spatial pattern of terrain niche index and ecological resistance surface in Qixia city

2.2 生态源地识别与生态廊道提取

提取生态服务功能重要性、生态环境敏感性的高值区和生态保护重要性的高值、次高值区,并去除面积小于 1 km^2 的细碎斑块,识别生态源地(图7)。栖霞市生态源地面积为 627.80 km^2 ,占全市总面积的31.14%,集中于中东部、中南部和西北部,东北部、东南部和中部部分区域因土地质量优良也成为生态源地。

提取各个源地的几何中心点作为生态节点(共38个),分别以每个节点为源,以剩余37个节点为目标,依据最小累积阻力模型,获得基于图层的最小耗费路径作为关键生态廊道。关键生态廊道没有实现全区域的整体连接,使物种迁移难度加大,有必要构建完整的生态网络。故以现有廊道为基础,以断开连接的生态节点为源点,提取其最小耗费路径,得到6条优化生态廊道。栖霞市的关键、优化生态廊道各 237.19 km 、 83.90 km ,主要分布在中东部、西北部和西南部(图7)。

2.3 自然资源空间精准管制

以林地、园地和耕地为主的生态源地,通过大多由林地组成的廊道相连接,构成了

栖霞市生态安全格局。从土地利用现状来看(表2),生态源地和廊道分布于生态环境良好的地区,生态廊道近80%由林地组成;过半数的源地为林地,其次是园地和耕地,三者占比达96.53%,但仍有少数源地为建设用地,面临着较大的生态阻力,应逐步“退建还生”。

自然资源空间管制要基于生态安全底线,扩大生态空间范围,同时保障建设发展需要,以化解三生空间冲突。生态服务功能越强、生态环境越敏感的区域,越应限制人类干扰。故仍以栅格为单元,主要依据生态保护重要性高低,将生态源地与关键生态廊道、中等生态保护重要性区域与优化生态廊道、其他生态用地、非生态用地分别划定为禁止建设区、限制建设区、条件建设区与优先建设区,并去除面积小于1 km²的细碎斑块,分级管理自然资源空间,精准界定空间管制边界(图8)。

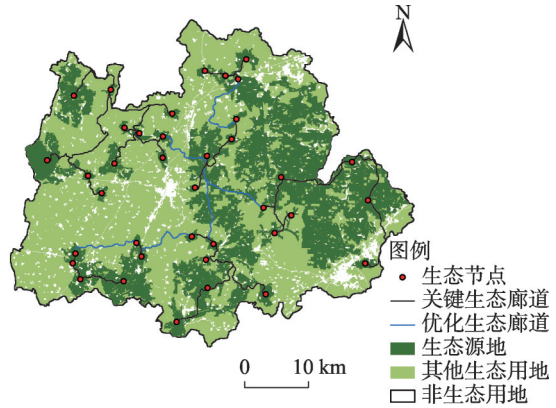


图7 栖霞市生态安全格局

Fig. 7 Ecological security pattern in Qixia city

表2 生态源地面积、生态廊道长度分地类统计表

Table 2 Statistical table of ecological source area and corridor length according to land use type

	林地	园地	耕地	草地	水域	建设用地	总计
生态源地面积/km ²	351.15	194.37	60.52	3.09	8.19	9.60	627.80
关键生态廊道长度/km	184.27	40.28	8.74	2.56	0.93	0.24	237.19
优化生态廊道长度/km	69.68	9.86	2.54	0.32	1.46	0.03	83.90

禁止建设区分布范围较广且相对集中,总面积为786.69 km²,应以原有自然资源保护为主,禁止各类开发建设活动。中东部山区应采取封山育林、退耕还林、退建还生等措施,保护生态环境;北部和西南部土质优良、土壤生产力较高的区域大多为果园,铜基波尔多液、磷肥和地膜的使用使土壤重金属含量增加,应控制化肥农药的使用和废水废弃物的排放,保障土壤生态安全;加大生态廊道沿线环境建设,注重绿色基础设施建设,增加廊道宽度,提升网络连通性。限制建设区329.44 km²,大多紧邻禁止建设区,环境较好,应以生态保护优先,注重生态修复,严格控制开发强度及建设性质。条件建设区面积最大,为836.50 km²,占全市总面积的41.49%,主要分布于中西部地区,应坚持利用性保护,兼顾生态保护与开发建设,可发展生态旅游、观光农业、科研教育等绿色产业。优先建设区主要为建设用地,面积最小,仅为63.36 km²,开发建设活动优先在

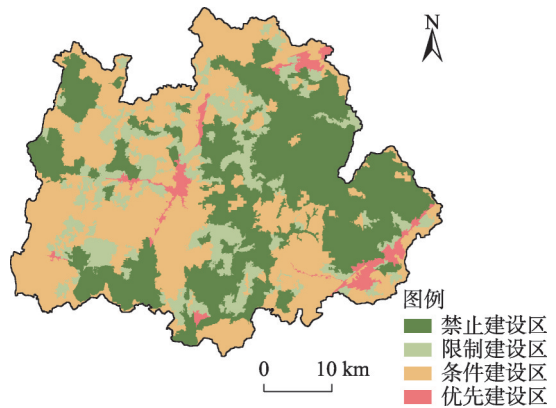


图8 栖霞市自然资源空间管制分区

Fig. 8 Regionalization of natural resources space control in Qixia city

本区域内进行,同时注重节约集约、内涵挖潜与功能优化。

3 结论与讨论

应用数据密集型科学,利用地学大数据,集成地理信息方法与模型,耦合格局与过程,基于生态安全格局底线,优化自然资源空间精准识别与管制方法。本文将所有生态服务功能较强和生态环境较敏感的国土空间均纳入管制范畴,改变了过去山、水、林、田、湖各类自然资源由不同部门分割管理的思路,实现了生态系统全要素保护。物质、能量的流动关系着生态系统服务的实现,通过构建生态廊道保证生态空间的连通性,使空间管制的范畴从零散地块^[3]扩展到整体网络。依据生态保护的重要程度对应不同管制分区并制定差异化管制规则,实现自然资源空间分级管制。

当前空间管制从宽泛逐步向精准转变。本文利用30 m×30 m栅格数据,对各项资源条件空间化,保证数据的连续性与精准性;对于地形复杂的山地丘陵区,仅利用地类赋值难以估量地形等因素对生物空间运动的影响,因此对城镇建设用地、村庄用地和交通用地做不同范围的缓冲区构建基本阻力面以反映人为干扰对生态过程的影响。利用地形位指数修正基本阻力面则充分考虑了栖霞市地形特征,相较于直接利用地类赋值的阻力面^[18],可细致描述物种迁移阻力的空间分异特征,保证廊道识别的精准性。

通过构建生态安全格局用以指导自然资源空间管制,对于创新空间管制分区方法、实现自然资源精准管制、促进部门数据互联共享具有重要意义。本文仅对自然资源空间管制方法进行了初步探讨,评价指标阈值的设定、空间管制分区与生态安全格局的对应关系、管制分区后的弹性调节、开发利用监管等问题还有待进一步探讨。

参考文献(References):

- [1] 余亮亮,蔡银莺.国土空间规划管制与区域经济协调发展研究:一个分析框架.自然资源学报,2017,32(8):1445-1456. [YU L L, CAI Y Y. Research on spatial regulation of land use planning and coordinated development of regional economy: An analytical framework. Journal of Natural Resources, 2017, 32(8): 1445-1456.]
- [2] 沈悦,刘天科,周璞.自然生态空间用途管制理论分析及管制策略研究.中国土地科学,2017,31(12):17-24. [SHEN Y, LIU T K, ZHOU P. Theoretical analysis and strategies of natural ecological space use control. China Land Science, 2017, 31(12): 17-24.]
- [3] 储金龙,王佩,顾康康,等.基于生态安全格局的安庆市规划区空间管制分区研究.安徽建筑大学学报,2016,24(3):100-107. [CHU J L, WANG P, GU K K, et al. Study on spatial regulation zoning of Anqing city planning from the perspective of ecological security. Journal of Anhui Jianzhu University, 2016, 24(3): 100-107.]
- [4] 赵毓芳,祁帆,邓红蒂.生态空间用途管制的八大特征变化.中国土地,2019,(5):12-15. [ZHAO Y F, QI F, DENG H D. Eight characteristics changes in the control of ecological space use. China Land, 2019, (5): 12-15.]
- [5] 强真.新时期国土空间规划的职能构架与路径设计.中国土地,2019,(2):22-25. [QIANG Z. The functional framework and path design of national land space planning in the new period. China Land, 2019, (2): 22-25.]
- [6] 邹晓云,邓红蒂,宋子秋.自然生态空间的边界划定方法.中国土地,2018,(4):9-11. [ZOU X Y, DENG H D, SONG Z Q. Method for demarcating the boundary of natural ecological space. China Land, 2018, (4): 9-11.]
- [7] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局.生态学报,1999,19(1):8-15. [YU K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 8-15.]
- [8] HOU P, YANG M, ZHAI J, et al. Discussion about natural reserve and construction of national ecological security pattern. Geographical Research, 2017, 36(3): 420-428.
- [9] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,等.区域生态安全格局:概念与理论基础.生态学报,2004,24(4):761-768. [MA K M, FU B J, LI X Y, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): The concept and theoretical basis. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 761-768.]
- [10] 彭建,赵会娟,刘焱序,等.区域生态安全格局构建研究进展与展望.地理研究,2017,36(3):407-419. [PENG J,

- ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419.]
- [11] ZHANG L Q, PENG J, LIU Y X, et al. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(3): 701-714.
- [12] 丛佃敏, 赵书河, 于涛, 等. 综合生态安全格局构建与城市扩张模拟的城市增长边界划定: 以天水市规划区为例(2015—2030年). *自然资源学报*, 2018, 33(1): 14-26. [CONG D M, ZHAO S H, YU T, et al. Urban growth boundary delimitation method integrating comprehensive ecological security pattern and urban expansion simulation: A case study of planning areas in Tianshui city (2015-2030). *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(1): 14-26.]
- [13] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 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. *地理研究*, 2017, 36(3): 471-484. [CHEN X, PENG J, LIU Y X, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu city based on the framework of importance-sensitivity-connectivity. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 471-484.]
- [14] 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. *自然资源学报*, 2007, 22(1): 106-113. [LI Z Y, YANG G S, DONG Y W. Establishing the ecological security pattern in rapidly developing regions: A case in the AYRAP. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1): 106-113.]
- [15] HUCK M, JEDRZEJEWSKI W, BOROWIK T, et al. Analyses of least cost paths for determining effects of habitat types on landscape permeability: Wolves in Poland. *Acta Theriologica*, 2011, 56(1): 91-101.
- [16] WANG Y H, YANG K C, BRIDGMAN C L, et al. Habitat suitability modelling to correlate gene flow with landscape connectivity. *Landscape Ecology*, 2008, 23(8): 989-1000.
- [17] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. *地理学报*, 2018, 73(4): 701-710. [PENG J, LI H L, LIU Y X, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 701-710.]
- [18] 朱敏, 谢跟踪, 邱彭华. 海口市生态用地变化与安全格局构建. *生态学报*, 2018, 38(9): 3281-3290. [ZHU M, XIE G Z, QIU P H. Ecological land use change and construction of ecological land security pattern in Haikou city. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3281-3290.]
- [19] 侯增谦. 立足地球系统科学, 支撑自然资源统一管理和系统修复. *中国自然资源报*, 2018-06-12(5). http://gtszb.zrzyb.net/html/2018-06/12/content_5_1.htm. [HOU Z Q. Based on the science of the earth system, supporting the unified management and system repair of natural resources. *China Natural Resources News*, 2018-06-12(5). http://gtszb.zrzyb.net/html/2018-06/12/content_5_1.htm.]
- [20] ZWIENER V P, PADIAL A A, MARQUES M C M, et al. Planning for conservation and restoration under climate and land use change in the Brazilian Atlantic forest. *Diversity and Distributions*, 2017, 23(8): 955-966.
- [21] 张栩晨, 黄鑫. 生态安全导向的西南山地城镇空间管制区划研究: 以重庆涪陵区为例. *建筑与文化*, 2019, 178(1): 152-153. [ZHANG X C, HUANG X. Research on spatial control planning of mountainous towns in Southwest China based on ecological security: A case study of Fuling district in Chongqing. *Architecture & Culture*, 2019, 178(1): 152-153.]
- [22] PENG J, MA J, DU Y Y, et al. Ecological suitability evaluation for mountainous area development based on conceptual model of landscape structure, function, and dynamics. *Ecological Indicators*, 2016, 61(2): 500-511.
- [23] 虞虎, 钟林生, 曾瑜哲. 中国国家公园建设潜在区域识别研究. *自然资源学报*, 2018, 33(10): 1766-1780. [YU H, ZHONG L S, ZENG Y X. Research on identification of potential regions of national parks in China. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(10): 1766-1780.]
- [24] 程昌秀, 史培军, 宋长青, 等. 地理大数据为地理复杂性研究提供新机遇. *地理学报*, 2018, 73(8): 1397-1406. [CHENG C X, SHI P J, SONG C Q, et al. Geographic big-data: A new opportunity for geography complexity study. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(8): 1397-1406.]
- [25] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展. *中国农学通报*, 2010, 26(17): 310-315. [FAN S X, GAN Z T, LI M J, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17): 310-315.]
- [26] ARNOLDUS H M J, BOODT M D, GABRIELS D. An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. *Assessment of Erosion*, 1980, 21(6): 614-628.
- [27] MOORE I D, BURCH G J. Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(5): 1294-1298.
- [28] BERG V D M. A computer program for water erosion assessment applied to SOTER. *International Society of Soil Science*, 1992, 51(8): 1018-1037.

- [29] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. US Department of Agriculture, 1978, 5(12): 1617-1725.
- [30] 张继平, 乔青, 刘春兰, 等. 基于最小累积阻力模型的北京市生态用地规划研究. 生态学报, 2017, 37(19): 6313-6321. [ZHANG J P, QIAO Q, LIU C L, et al. Ecological land use planning for Beijing city based on the minimum cumulative resistance model. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6313-6321.]
- [31] 陈小平, 陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1611-1618. [CHEN X P, CHEN W B. Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake Eco-economic Zone, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1611-1618.]
- [32] 陈影, 哈凯, 贺文龙, 等. 冀西北间山盆地地区景观格局变化及优化研究: 以河北省怀来县为例. 自然资源学报, 2016, 31(4): 556-569. [CHEN Y, HA K, HE W L, et al. Study on the change and optimization of landscape pattern in the basin of Northwest Hebei Mountains: A case study of Huailai county, Hebei province. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(4): 556-569.]
- [33] 蒙古军, 王雅, 王晓东, 等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1052-1061. [MENG J J, WANG Y, WANG X D, et al. Construction of landscape ecological security pattern in Guiyang based on MCR model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(7): 1052-1061.]

Precise identification and control method of natural resources space based on ecological security pattern in mountainous hilly area

DU Teng-fei, QI Wei, ZHU Xi-cun, WANG Xin, ZHANG Yu, ZHANG Lei

(College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China)

Abstract: Space control of natural resources is the basic tool for balancing the relationship between ecological protection and economic development. Observing the bottom line of ecological security pattern strictly is of great guiding significance to reconstruct the new pattern of natural resources spatial control with complete system and ecological surplus. Taking Qixia city, an mountainous intensive agricultural area in Jiaodong Peninsula, as a case study area, coupling pattern and process, integrating geographic information method and model, this paper identified the ecological sources from the aspects of ecosystem service function importance and ecological environment sensitivity. Then the basic ecological resistance surface based on land cover and anthropogenic disturbance was revised by the terrain niche index, and the ecological corridors were identified using the minimum cumulative resistance model, so as to construct the ecological security pattern and achieve natural resources zoning control for Qixia city. The results showed that the ecological sources of Qixia city were 627.80 km², accounting for 31.14% of the total area, mainly distributed in the central eastern, the central southern and the northwestern regions. More than half of the ecological sources were forest land. The key and optimized ecological corridors were 237.19 km and 83.90 km, mostly composed of forest land, mainly distributed in the central eastern, the northwest and the southwest, forming a complete ecological network. Finally, prohibited, restricted, conditional and prioritized construction areas were delineated. This provided method guarantee for precise control of natural resources space.

Keywords: ecological security pattern; precise control of natural resources space; minimum cumulative resistance model; terrain niche index; ecological source; ecological corridor