

DOI: 10.20103/j.stxb.202405161118

梁晨, 赵倩一, 王倩雯, 赵孟尧. 生态敏感区乡镇微观发展格局识别与适应性管控——以环白洋淀地区为例. 生态学报, 2025, 45(6): 2918-2931.
Liang C, Zhao Q Y, Wang Q W, Zhao M Y. Micro-development pattern identification and adaptive management of towns in ecologically sensitive areas: a case study of the Baiyangdian region. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2918-2931.

生态敏感区乡镇微观发展格局识别与适应性管控 ——以环白洋淀地区为例

梁 晨¹, 赵倩一¹, 王倩雯^{2,*}, 赵孟尧¹

1 河北工业大学建筑与艺术设计学院, 河北省健康人居环境重点实验室, 天津 300130

2 天津师范大学地理学部, 天津 300387

摘要:生态敏感区乡镇是中国县域发展和乡村振兴的重要战略支点, 同时面临着以“开发-保护”权衡为主的人地系统矛盾。针对既有宏观静态治理范式的局限, 研究构建了生态敏感区乡镇微观发展格局识别框架并提出适应性管控策略, 并以环白洋淀地区开展实证分析。主要结论如下: ①环白洋淀乡镇承载的生态系统服务结构差异显著, 其时空发展动态主要受区域交通因素影响; ②超前建设单元占比最大, 聚集在乡镇周边并向外围腹地蔓延, 而潜在建设单元占比最小, 镶嵌在乡镇及湿地周边; ③雨洪调蓄服务、水源涵养服务和水质净化服务在未来 30 年面临较为严重的胁迫, 其中雄州镇生态风险斑块面积最大, 而三台镇和小里镇生态风险斑块扩张速度最快; ④基于八类微观发展格局单元, 对环白洋淀乡镇提出了适应性分区分管控策略。研究可以为优化生态敏感区乡镇人地系统和相关规划决策提供参照。

关键词:生态敏感区; 乡镇; 发展趋势; 适应性管控; 环白洋淀地区

Micro-development pattern identification and adaptive management of towns in ecologically sensitive areas: a case study of the Baiyangdian region

LIANG Chen¹, ZHAO Qianyi¹, WANG Qianwen^{2,*}, ZHAO Mengyao¹

1 School of Architecture and Art Design, Hebei University of Technology, Key Laboratory of Healthy Human Settlements in Hebei Province, Tianjin 300130, China

2 School of Geography and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract: Towns in ecologically sensitive areas (ESAs) serve as crucial strategic fulcrums for China's county-level development and rural revitalization, yet they also encounter conflicts within the human-environment system, primarily manifested as a trade-off between development and conservation. In the spatial dimension, towns in ESAs present remarkable spatial heterogeneity. The macro-control paradigm has become incompatible with the differentiated trends of the micro-development pattern and the demand for refined governance in towns. In the development dimension, towns demonstrate diverse spatio-temporal evolution trajectories in their sequential progress. Nevertheless, existing studies or practices still adhere to the static control measures. Excessive external constraints have constricted the towns' sustainable development in ESAs. To address the limitations of the current macro-static governance paradigm, this research develops a micro-development pattern recognition framework for towns in ESAs and suggests adaptive management and control strategies. An empirical analysis was conducted in the Baiyangdian region. The main conclusions are as follows: (1) The geographical variations in the ecosystem service structure of towns in the Baiyangdian region are pronounced. Furthermore,

基金项目:国家自然科学基金项目 (52208055); 2023 年度河北省社会科学发展研究课题 (20230303052); 河北省自然科学基金项目 (E2023202187); 天津市哲学社会科学规划项目 (TJGLQN23-011)

收稿日期: 2024-05-16; 采用日期: 2025-01-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qwwang@tjnu.edu.cn

The high-value areas of ecosystem services are basically consistent with the pattern of Baiyangdian Wetland, and extend in a zonal pattern along the river system towards the west; (2) Transportation factors exert a crucial influence on the development dynamics of towns in the Baiyangdian region. This includes the distribution of the construction extent, which shows a decreasing trend from the transportation trunk lines to both sides, and the high-probability areas of construction are in proximity to the transportation trunk lines; (3) The micro-development pattern of towns was identified from the aspects of construction probability and construction degree. The proportion of advanced construction units is the highest, clustering around towns and expanding into the hinterland, while the proportion of potential construction units is the lowest, embedded within towns and wetlands; (4) Rainwater storage and regulation services, water conservation services, and water quality purification services will face relatively severe threats in the next 30 years, with Xiongzhou Town having the largest ecological risk patch area, while Santai Town and Xiaoli Town having the fastest expansion rate of ecological risk patches. Adaptive zoning management and control strategies for towns in the Baiyangdian region are proposed, based on eight types of micro-development pattern units (further divided by the comprehensive ecosystem service level). The study can provide a reference for optimizing the human-land system and related planning decisions in towns in ESAs.

Key Words: ecological sensitive areas; towns; development trend; adaptive management; Baiyangdian region

改革开放 40 年来,我国乡镇发展表现出鲜明的两面性。一方面,全国近 3 万个基层乡镇支撑着 2843 个县级单元的经济的发展并为近 5 亿农村人口提供直接服务^[1],对城乡社会经济系统运行起到基础性作用。另一方面,由于管控薄弱和低效集聚^[2],乡镇的无序开发建设也对资源环境造成巨大风险^[3],面临着不可持续的问题。因此,作为县域发展和乡村振兴的重要战略支点,乡镇的发展引导和管控对我国城乡融合与高质量发展意义重大。

位于生态敏感区的乡镇是开发与保护矛盾最为突出的聚落类型。在空间维度,生态敏感区乡镇往往临近重要生态斑块,并在长期演进中构成复杂的镶嵌关系^[4-5],具有突出的空间异质性^[6]。目前县域尺度的空间格局研究已取得丰富成果^[7-9],其中广泛应用的综合指标评价^[10]、景观格局指数^[11]等方法主要聚焦于景观特征的宏观量化层面。对生态敏感区而言,考虑到生态系统服务的尺度级联性^[12],需要在更小的空间粒度上识别乡镇局部开发建设状态,从而干预空间管控决策并规避局部生态风险的传导和扩散。当前,主流的宏观管控范式已经不能适应乡镇微观发展格局分异趋势。在发展维度,由于人口和空间体量小,资源禀赋差异大^[13],且发展容易受到宏观政策^[14]、交通区位^[15]、产业转型^[16]等因素影响,乡镇在时序演进中有较强不确定性^[17],表现出多样化时空演进轨迹^[18-19]。然而,生态敏感区乡镇的既有研究或实践多从静态视角探究空间约束机制^[20-22],缺乏对其发展路径的探讨。过多的外部限制导致生态敏感区乡镇的发展空间被压缩,内生发展动力缺失,反而激化了人地矛盾。已有研究表明,城镇开发与建设生态保护并不构成绝对矛盾^[23]。因此,针对宏观分区研究范式不适应生态敏感区乡镇的高度异质化格局,以及静态刚性管制模式不适应乡镇聚落演进的不确定性两大核心问题,亟需在生态敏感区乡镇这一典型的复杂人地系统中,构建适应性管控机制,在保证生态底线的同时预留发展空间。

综上所述,本研究从生态功能和城镇演进两方面构建生态敏感区乡镇微观发展格局识别框架,并以环白洋淀 19 个乡镇为实证探索适应性空间管控路径,为优化生态敏感区人地系统和相关规划决策提供参照。

1 研究方法与研究区概况

1.1 研究区概况

研究范围是雄安新区南部环绕白洋淀湿地的 19 个乡镇(图 1),总面积 1118.72 km²,占雄安新区面积的 63.20%。自然条件方面,属暖温带季风性气候,土地利用类型以耕地、水域和湿地为主。其中,白洋淀为华北平原最大的淡水湖泊,是京津冀城市群的重要生态功能区。《河北雄安新区规划纲要》提出白洋淀生态修复

是雄安新区建设的重要支撑工程,而起步区外围组团和特色乡镇将作为承接北京非首都功能疏解与特色产业培育的重要空间载体。因此,如何协调处理保护与发展的关系,因地制宜为环白洋淀乡镇制定差异化管控引导路径具有重要战略意义,也对其他生态敏感区乡镇空间管控研究有典型参考意义。

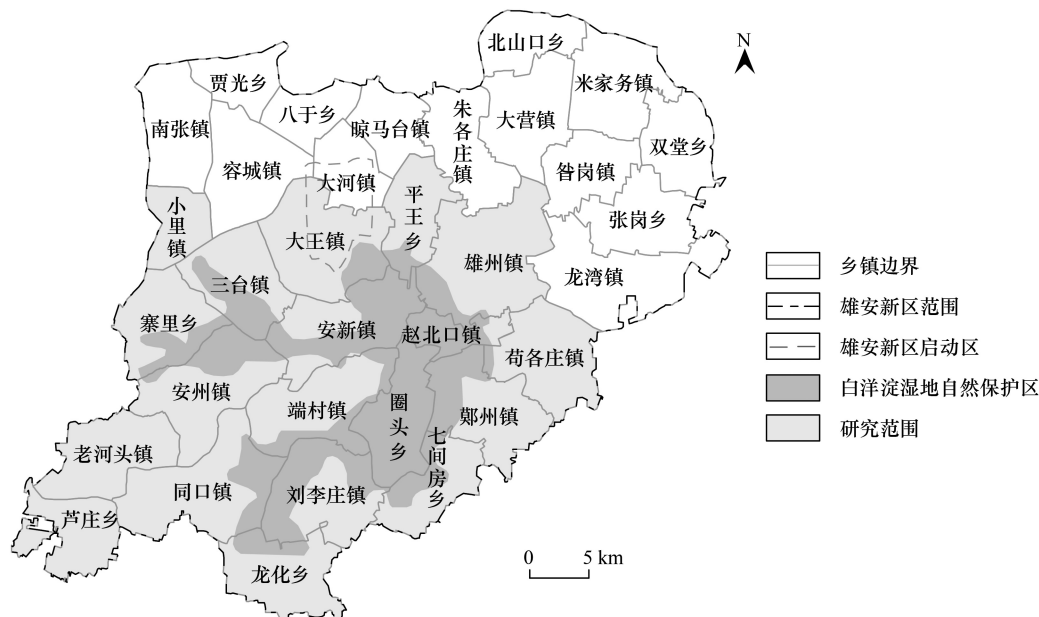


图1 研究区域

Fig.1 Study area

1.2 研究方法

1.2.1 生态系统服务评估

(1) 固碳服务

采用 InVEST 模型的碳存储模块评估固碳服务 (CS), 包括地上生物量、地下生物量、土壤碳库、死亡有机物质四种基本碳库。计算参数参考了前人相关研究^[24]。具体公式如下:

$$C = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{dead}} + C_{\text{soil}}$$

式中, C 为碳储量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); C_{above} 为地上碳储量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); C_{below} 为地下碳储量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); C_{dead} 为死亡有机质碳储量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); C_{soil} 为土壤碳储量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)。

(2) 生境质量服务

采用 InVEST 模型的生境质量模块评估生境质量服务 (HQ)。结合土地覆被和生物多样性威胁因素所生成的评价研究范围能够提供适合生物生存条件的能力^[25]。具体公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^Z}{D_{xj}^Z + K^Z} \right) \right]$$

式中, Q_{xj} 为表示土地利用类型 j 中的栅格 x 的生境质量, 无量纲; H_j 为表示土地利用类型 j 的生境适宜性; D_{xj} 表示土地利用类型中的栅格 x 所受胁迫水平; K 为半饱和系数; Z 为模型默认参数。

(3) 水源涵养服务

采用 InVEST 模型的产水量模块评估水源涵养服务 (WC), 计算参数设置参考了相关研究^[26-27]。具体公式如下:

$$Y(x) = \left[1 - \frac{\text{AET}(x)}{P(x)} \right] \times P(x)$$

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)} \right)^W \right]^{1/W}$$

$$PET(X) \equiv Kc(x) \times ET_o(x)$$

$$W(x) = \frac{AWC(x) \times Z}{P(x)} + 1.25$$

式中, $Y(x)$ 为地类的年均产水量 (mm); $AET(x)$ 为栅格单元的年均实际蒸散量 (mm); $P(x)$ 为栅格单元上的年均降水量 (mm); $PET(x)$ 为栅格单元 x 的潜在蒸散量 (mm); $Kc(x)$ 为作物蒸散发系数; $ET_o(x)$ 为参考 (作物) 蒸散量 (mm); $AWC(x)$ 为植物可利用含水量 (mm); $W(x)$ 为经验参数; Z 为季节参数。

(4) 土壤保持服务

采用修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 评估土壤保持服务 (SC), 参数设置参考了相关研究^[28-29]。具体公式如下:

$$Q = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$$

式中, Q 为土壤保持量 (t/hm^2); R 为降雨侵蚀力因子 ($MJ \text{ mm } h^{-1} h^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子 ($t \text{ km}^2 \text{ h } h^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$); LS 为坡长坡度因子; C 为植被覆盖和管理因子; P 为水土保持措施因子。

(5) 水质净化服务

采用 InVEST 模型的营养物输送模块评估水质净化服务 (WP)。根据白洋淀地区水质特征^[30], 选取氮营养盐的输出量作为评价标准, 输出量越大则水质净化能力越弱^[31]。具体公式如下:

$$x_{\text{exp},i} = \text{load}_{\text{surf},i} \times \text{NDR}_{\text{surf},i} + \text{load}_{\text{sub},i} \times \text{NDR}_{\text{sub},i}$$

式中, $x_{\text{exp},i}$ 为栅格单元 i 的污染物输出量 (kg); $\text{load}_{\text{surf},i}$ 和 $\text{load}_{\text{sub},i}$ 分别表示地表和地下污染物负载 (kg); $\text{NDR}_{\text{surf},i}$ 和 $\text{NDR}_{\text{sub},i}$ 分别表示地表和地下污染物输送率。

(6) 雨洪调蓄服务

采用 SCS-CN 水文模型模拟地表径流调蓄量, 从而评估雨洪调蓄服务 (RM)。其中, 模型关键参数 CN 值利用饱和导水率等数据计算得出^[32]。降水情景则选取年平均降水量计算一般情况下研究范围的地表产流。具体公式如下:

$$V = Q_a - Q_b$$

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}, & (P \geq I_a) \\ Q = 0, & (P < I_a) \end{cases}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

$$I_a = \lambda \times S$$

式中, V 为地表径流调蓄量 (mm); Q_a 为地表全部为不透水面的地表径流 (mm); Q_b 为实际地表径流 (mm); Q 为地表产流量 (mm); P 为降水量 (mm); S 为降水潜在最大滞留率; CN 为表征地表产流能力的参数, 取值范围是 0—100; I_a 是降水的初始下渗量; λ 是土壤的下渗系数, 一般取值为 0.2。

(7) 综合生态系统服务

对上述六类生态系统服务进行极差标准化, 其中对水质净化服务中污染输出量进行反向处理。其后, 采用等权重叠加方式^[33]得到综合生态系统服务指数 (CESI)。

(8) 生态系统服务贡献与结构

通过刻画特定空间单元的单一生态系统服务水平占全局比例表达其贡献率, 进而通过各类生态系统服务贡献率的比值表达该空间单元内生态系统服务结构。具体公式如下:

$$ESC_{ik} = \frac{\sum_{q=1}^m ES_{ikq}}{\sum_{k=1}^n \sum_{q=1}^m ES_{ikq}}$$
$$ESS_{ik} = \frac{ESC_{ik}}{\sum_{i=1}^6 ESC_{ik}}$$

式中, ESC_{ik} 为空间单元 k 中生态系统服务 i 的单一贡献率; ES_{ikq} 为空间单元 k 中第 q 个栅格上生态系统服务 i 的取值, m 和 n 分别表示栅格总数和空间单元总数; ESS_{ik} 为空间单元 k 中六类生态系统服务的结构。

1.2.2 生态风险斑块预测

根据我国城镇化发展阶段和特点^[34-35], 乡镇作为乡村上一级集聚中心仍需要保障土地供给。因此, 生态敏感区乡镇的生态风险主要考虑未来土地增长与生态系统服务簇的冲突矛盾斑块。参考既有研究^[36]与研究区实际情况, 将生态系统服务前 25% 的部分定义为生态系统服务关键空间。基于 FLUS 模型^[37] 模拟预测 2035 年和 2050 年研究区建设用地扩张范围, 同时将雄安新区起步区规划方案与其叠加整合。最后, 将 2020—2035 年、2035—2050 年建设用地扩张范围分别与单一生态系统服务与综合生态系统服务的关键空间进行相交分析, 识别 2035 年和 2050 年新增生态风险斑块。

1.2.3 微观发展格局识别

根据乡镇的发展特征并参考了梁晨等^[38] 提出的时空双维城市化特征识别方法, 从建设概率和建设程度两方面开展乡镇微观发展格局识别。引入网格进行空间特征分析和管控决策。为获得适宜分析粒度, 通过不同尺度的空间网格对研究地区土地景观进行信息提取 (计算 Shannon 多样性指数)。根据前人研究^[39], 选择平均采样信息量最大同时样本差异最大的网格尺寸 1 km 作为后续分析的基本空间单元。栅格数据与矢量网格的转换统一采用 ArcGIS 10.8 的 Zonal Statistics 进行取均值处理。

(1) 建设概率模拟

针对乡镇发展的动态性与复杂性, 非线性方法在对其未来建设动态的模拟中表现出显著优势。引入人工神经网络算法 (Artificial Neural Networks, ANNs), 考虑乡镇发展实际并参考前人研究^[40], 对基期乡镇土地利用数据和 12 类驱动因子进行拟合计算 (表 1)。ANNs 模型由输入层、隐藏层和输出层上的多个神经元构成, 通过每个栅格单元中输入空间要素信息以及输出的土地利用类型。输入层将土地利用类型重分类为建设用地与非建设用地两类, 而输出层每个栅格单元数值代表了未来进行建设开发的概率。具体计算公式如下^[41]:

$$S = \sum w \times V$$
$$\text{Sigmoid}(S) = \frac{1}{1 + e^{-S}}$$

式中, S 表示隐藏层中神经元获取的信号; w 表示输入层与隐藏层的适应性权重; V 表示与输入层神经元相关联的变量。

表 1 乡镇建设驱动因素

Table 1 Driving factors for town construction

类型 Type	驱动因素 Driving factors	计算方法 Calculation method	类型 Type	驱动因素 Driving factors	计算方法 Calculation method
自然因素 Natural factors	高程	DEM 导入	社会因素 Social factors	医院密度	POI 核密度
	坡度	DEM 表面分析		到铁路距离	欧氏距离
社会因素 Social factors	到水系的距离	欧氏距离	交通因素 Traffic factors	到高速距离	欧氏距离
	到乡镇政府距离	欧氏距离		到主干道距离	欧氏距离
	经济活动强度	夜间灯光导入		到高速出入口距离	欧氏距离
	中小学密度	POI 核密度		到铁路站点距离	欧氏距离

(2) 建设程度评估

针对人类对土地资源的开发活动,刘纪远^[42]提出了一种分段量化思路,已经得到广泛应用。借鉴该方法并基于 1 km 网格对研究区乡镇建设程度开展评估。其中建设用地、耕地、林地与水域、未利用地的土地利用程度赋分依次为 4、3、2、1。此外,为避免单纯依赖土地覆被评估建设程度的误差,引入夜间灯光修正因子进一步加强该方法对乡镇异质性发展格局的识别精度。具体公式如下:

$$L_a = \frac{TLI_i}{TLI_n} \times L_{a0}$$
$$L_{a0} = \sum_i^n A_{mi} \times C_i$$

式中, L_a 为修正后的土地利用程度综合指数; TLI_i 是栅格 i 的夜间灯光系数; TLI_n 是土地类型 n 的平均夜间灯光值; L_{a0} 为第 m 个网格的土地利用程度指数; A_{mi} 为第 m 个网格中土地利用类型 i 的面积比重; C_i 为土地利用类型 i 的开发程度分值。

(3) 发展类型判别

以建设概率和建设程度平均值为原点构建二位四象限坐标系^[38]判别乡镇微观发展格局,其中纵轴为建设概率,横轴为建设程度。象限Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ依次代表常规建设单元、潜在建设单元、不宜建设单元、超前建设单元。

1.3 数据来源

研究采用的数据包括土地利用、DEM、土壤质地、夜间灯光、地理要素和兴趣点共六类,数据精度及来源见表 2。

表 2 研究数据来源
Table 2 Data source

数据名称 Data name	格式 Format	精度 Accuracy	数据来源 Data source
土地利用数据 Land use data	栅格	30 m	中国逐年土地覆盖数据集 (CLCD) (https://doi.org/10.5281/zenodo.8176941)
DEM 数据 DEM data	栅格	30 m	地理空间数据云平台 (http://www.gscloud.cn)
土壤质地数据 Soil texture data	栅格	1 km	世界土壤数据库 (HWSD v2.0) (https://www.fao.org/)
夜间灯光数据 Night light data	栅格	130 m	珞珈一号数据平台 (http://59.175.109.173:8888/)
地理要素数据 Geographic element data	矢量	1:100 万	全国地理信息资源目录服务系统 (https://www.webmap.cn/)
兴趣点 (POI) 数据 POI data	矢量	—	高德开放平台 (https://lbs.amap.com)

2 生态系统服务的空间分异

2.1 单一生态系统服务的空间分异

以乡镇行政区划为基本单元,单一生态系统服务的空间分布具有明显差异,并且与白洋淀湿地有一定空间关联(图 2)。总体来看,雨洪调蓄服务、固碳服务和水质净化服务在 19 个乡镇的组间构成相对稳定,占比分别保持在 13.38%—23.35%、10.95%—19.34%和 13.24%—21.40%。六类服务中,生境质量服务在各个乡镇单元内的空间异质性最强,其中圈头乡占比最高达到 38.42%,而老河头镇占比最低仅为 10.57%。土壤保持服务同样显示出较高的分布差异,占比最高值与最低值差距达到 24.24%。通过 Pearson 相关分析发现,白洋淀湿地占比与雨洪调蓄服务 (coef. = 0.822, $P < 0.01$) 和生境质量服务 (coef. = 0.819, $P < 0.01$) 呈正相关,而与土

壤保持服务 (coef. = -0.557, $P < 0.01$) 和水质净化服务 (coef. = -0.415, $P < 0.05$) 呈负相关。由此可见, 白洋淀湿地对区域雨洪调蓄和维护生境质量具有关键作用。然而, 由于湿地生态系统结构的特殊性, 其土壤保持服务和水质净化服务依赖周边生态系统的供给, 例如完全位于白洋淀内部的圈头乡中土壤保持服务占比仅 4.91%, 远远低于其生境质量服务, 表明环白洋淀地区复合生态系统的内在依存性和功能连接性。除此之外, 固碳服务和水质净化服务与白洋淀湿地的空间分布未显示明显空间关联。

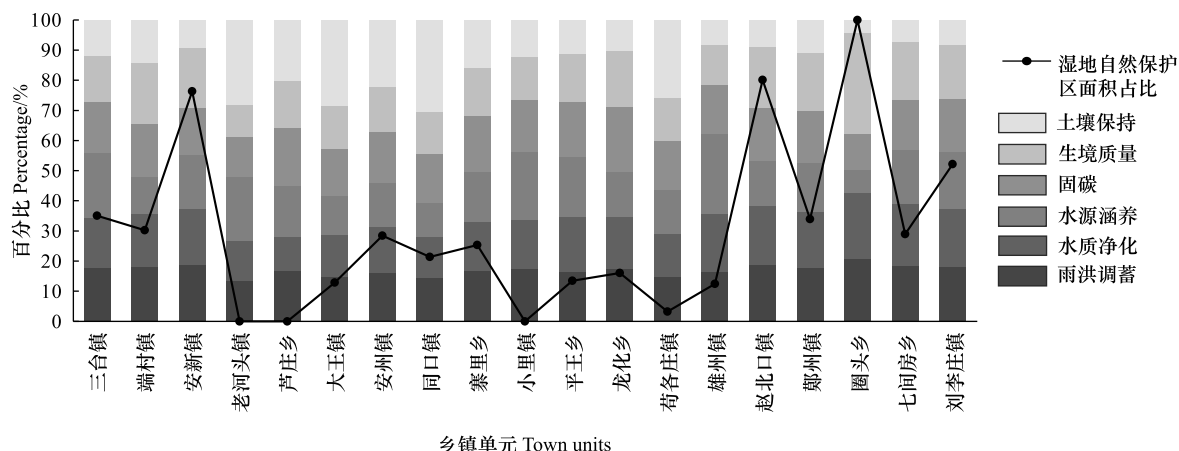


图 2 环白洋淀地区乡镇的生态系统服务结构

Fig.2 The ecosystem service structure of towns in the Baiyangdian region

2.2 综合生态系统服务的空间分异

从综合生态系统服务的空间分布来看, CESI 高值区与白洋淀湿地格局基本一致, 集中于研究区东部, 并且沿河流水系向西部呈带状延伸 (图 3)。值得注意的是, CESI 低值区存在枝状分布格局, 经分析主要是受到水质净化服务的影响。白洋淀处于太行山前的永定河和滹沱河冲积扇交汇处的扇缘洼地, 随着华北地区整体地表水资源萎缩, 大量退化河道被开垦耕种。由于地形凹陷、坡度平缓, 易引起污染物富集, 降低了综合生态系统服务水平。从截面分析来看, 截面 A 东西向穿越了大面积湿地保护区, 其 CESI 整体较高但是存在较大波动。一方面体现了白洋淀湿地保护区内部地表覆被和生态功能的异质性, 另一方面反映了不同乡镇发展模式对生态系统服务带来差异化影响。截面 B 南北向跨越了城镇建设区、乡村、农田以及部分白洋淀湿地。CESI 仅在湿地保护区范围内达到峰值, 而湿地保护区外部的生态系统服务水平相对平稳。总的来看, 位于白洋淀湿地内部聚落 (如圈头乡) 表现出更好的生态适应性, 即在承载社会经济功能的同时, 保持了较高的生态系统服务能力。

3 乡镇微观发展格局识别

3.1 乡镇时空演进特征

环白洋淀乡镇在建设程度和建设概率两方面表现出较大差异 (图 4), 其中建设程度代表了空间维度上乡镇发展的现状态势, 建设概率代表了时间维度上乡镇发展的未来趋势。研究区建设水平整体呈现了北高南低和西高东低的分布格局, 其中雄州镇作为城关镇现状建设程度最高, 并且其西南侧紧邻的数个乡镇构成了开发建设隆起带, 与过境国道津神线走向高度一致。环白洋淀地区的乡镇建设程度以该交通干线为轴向两侧呈递减分布, 而位于湿地保护区内部的乡镇建设程度较低, 其中圈头乡和赵北口镇处在最低建设程度。建设概率在研究区的分布受到交通干线的影响更加明显, 除了沿津神线的建设概率高值区以外, 受津雄高速影响的平王乡和小里镇, 以及受大广高速和津石高速影响的苟各庄镇、郑州镇、七间房乡、刘李庄镇和龙化乡, 均表现出较高的建设概率。由此可见良好的交通区位因素会刺激乡镇扩张, 其中包括位于白洋淀湿地保护区的赵北

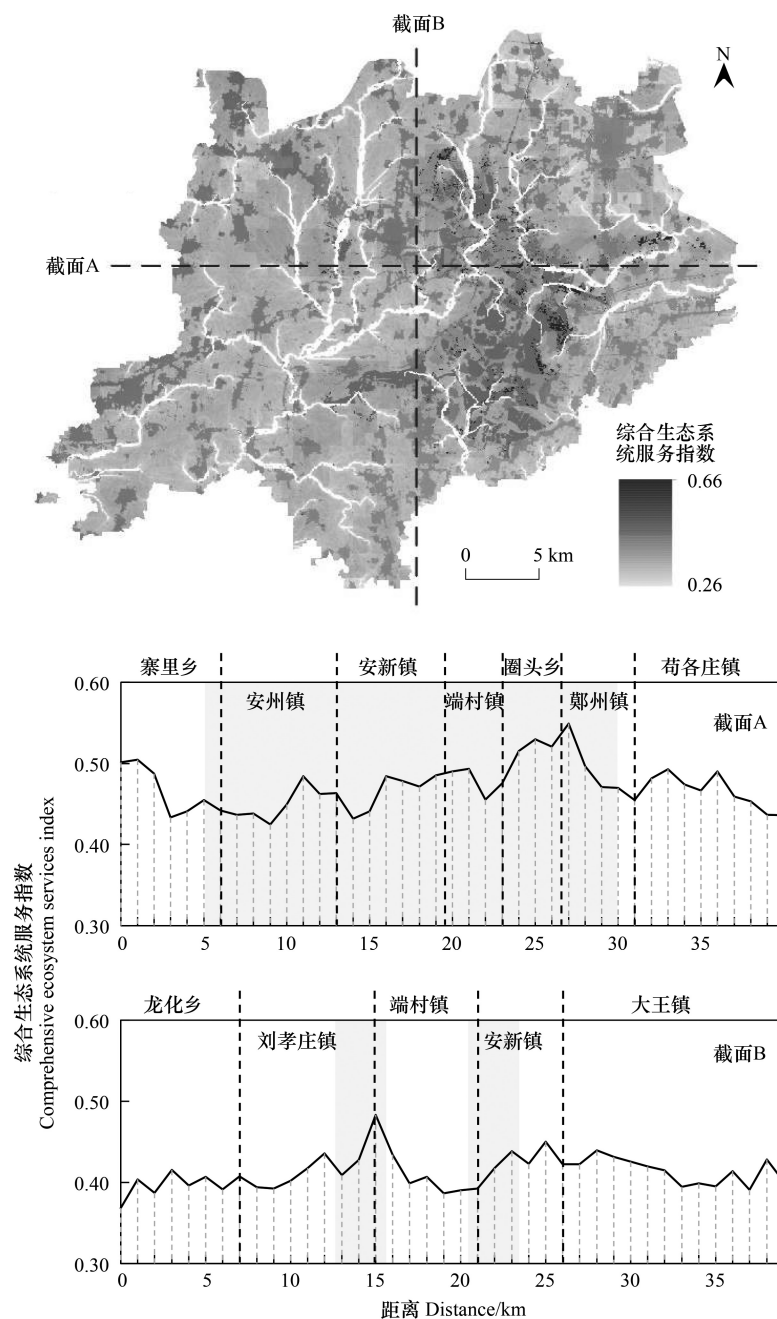


图3 环白洋淀地区的综合生态系统服务空间分布

Fig.3 Spatial distribution of comprehensive ecosystem services in the Baiyangdian region

综合生态系统服务截面中灰色表示白洋淀湿地自然保护区范围

口镇和刘李庄镇。通过比较建设程度和建设概率的分布特征可见,环白洋淀乡镇的实际建设水平总体上超前于算法模拟的理想建设概率,前者的空间异质性不及后者。

3.2 乡镇演进阶段划分

乡镇的微观演进阶段呈现了复杂的镶嵌格局(图5)。常规建设单元(占比26.73%)指已基本完成开发建设的成熟地区,主要分布于雄州镇、安新镇并沿着过境主干公路向外围延伸,呈现了明显的“点-轴”格局。潜在建设单元占比最少(11.61%),指即将进行开发建设的后备空间,主要分散镶嵌在常规建设单元周边,同时也集聚在白洋淀湿地保护区边界处,可见白洋淀优质的生态资源对周边乡镇建设发展产生的明显引力,特别

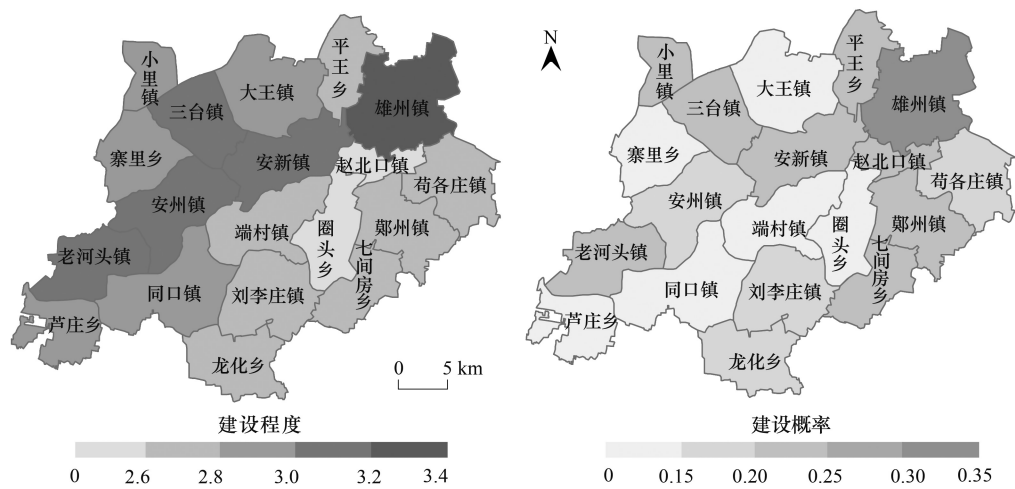


图 4 环白洋淀地区乡镇的建设程度与建设概率

Fig.4 Construction level and construction probability of towns in the Baiyangdian region

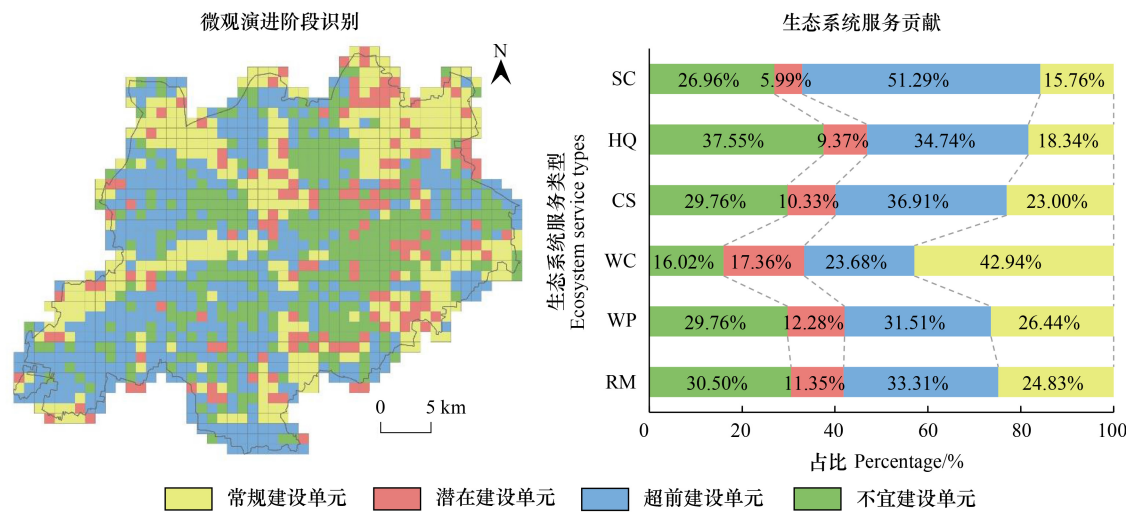


图 5 环白洋淀地区细分空间的演进阶段识别

Fig.5 Identification of evolution stages of sub-units in the Baiyangdian region

SC 为土壤保持服务 Soil conservation; HQ 为生境质量服务 Habitat quality; CS 为固碳服务 Carbon sequestration; WC 为水源涵养服务 water conservation; WP 为水质净化服务 Water purification; RM 为雨洪调蓄服务 Runoff mitigation

是大量淀中村镇聚落也显示出进一步扩张的态势。超前建设单元指土地开发超过了城市扩张客观需求的地区,在四类建设单元中占比最多(34.53%),并且其空间分布除了集聚在常规建设单元周边,已经向乡村地区和生态腹地蔓延。从白洋淀生态保护区的范围来看,已经有 25.81% 的单元处于超前建设状态,并有 12.63% 的单元处于潜在建设状态。此外,不宜建设单元(占比 27.13%)指未进行规模化建设活动的乡村或自然地区,集中于白洋淀湿地保护区内部,主要为林地、水体、湿地等高质量生态空间,但是其边缘已经出现景观碎片化现象,可见既有空间约束机制无法有效遏制地方乡镇超前开发建设的冲动。

从各类生态系统服务的贡献程度来看(图 5),处于不同阶段的空间单元发挥着不同功能。超前建设单元虽然在多数生态系统服务的贡献中占据优势,但是根据其面积规模占比,超前建设单元在生境质量服务、固碳服务和雨洪调蓄服务仅达到平均贡献水平,甚至在水源涵养和水质净化服务中还处于低贡献水平。常规建设

单元除了在水源涵养服务中具有绝对优势外,其他生态系统服务贡献均低于平均水平,特别是在土壤保持和生境质量的功能严重受限,体现了人工开发建设对环境的破坏作用。不宜建设单元除了在水源涵养服务中表现出明显劣势,其他服务贡献均高于或接近平均水平,可见白洋淀地区仍存在缺水风险,依赖外部水源。潜在建设单元在土壤保持服务、生境质量服务和固碳服务的贡献薄弱,与常规建设单元有一定相似性。

3.3 乡镇生态风险解析

叠加环白洋淀乡镇的建设格局预测结果与重要生态系统服务簇的冲突情况,得到生态风险斑块(表3)。2020—2035年和2035—2050年两个时间段内生态风险斑块面积整体呈现增长趋势,分别为7.28%和11.60%。环白洋淀地区位于京津冀城市群重要的津保陆海通廊,随着高铁、高速等区域交通基础设施完善,以及雄安新区规划落地实施的综合影响,区域经济社会发展仍需要大量建设承载空间,由此产生的生态风险斑块将呈现增长趋势。雄州镇生态风险斑块面积最大,在全域生态风险斑块的面积占比从2020年的14.25%扩张到2050年的17.97%。雄州镇作为原雄县城关镇,具有较大的经济、人口和建成区规模,因此在集聚效应的推动下扩张规模较大,也衍生了新的生态风险。从增长幅度来看,三台镇和小里镇在2035—2050年的生态风险斑块新增面积比例分别达到27.99%和71.73%,远高于同期其他乡镇的新增风险规模。然而,三台镇和小里镇在2020—2035年阶段却并未显示出较高的新增风险水平,表明从2035年开始建设规模有了显著扩大。经比较,该两个乡镇临近雄安新区容东片区与起步区,因此在远期发展中受到拉动作用呈现了大规模扩张。此外,圈头乡作为淀中聚落在未来30年的生态风险斑块扩张幅度最小,体现了白洋淀生态保护区的空间约束作用。

表3 环白洋淀地区乡镇生态风险斑块面积变化
Table 3 Changes in the ecological risk patch area of towns in the Baiyangdian region

乡镇单元 Town units	2035 年新增面积/km ² New area added in 2035	新增面积比例/% Proportion of newly added area	2050 年新增面积/km ² New area added in 2050	新增面积比例/% Proportion of newly added area
三台镇	0.97	7.81	3.74	27.99
端村镇	0.59	7.63	0.95	11.35
安新镇	1.11	8.47	1.17	8.23
老河头镇	0.30	1.72	1.26	7.14
芦庄乡	-0.27	-3.57	0.36	4.88
大王镇	1.74	15.43	2.32	17.85
安州镇	0.68	5.98	0.02	0.19
同口镇	0.33	2.91	0.77	6.48
寨里乡	0.24	2.71	0.29	3.26
小里镇	0.86	13.06	5.31	71.73
平王乡	1.53	18.62	1.19	12.27
龙化乡	0.40	5.12	0.34	4.13
苟各庄镇	0.55	4.68	0.79	6.45
雄州镇	3.47	11.77	4.23	12.82
赵北口镇	0.19	5.46	0.23	6.13
郑州镇	0.81	6.76	1.15	9.03
圈头乡	-0.02	-0.70	0.04	1.42
七间房乡	0.41	4.52	0.72	7.55
刘李庄镇	1.23	8.34	0.90	5.65
合计 Total	15.08	7.28	25.76	11.60

从单一生态系统服务的风险斑块来看(图6),雨洪调蓄服务、水源涵养服务和水质净化服务在未来30年面临较为严重的胁迫。环白洋淀地区水系发达,在人类活动和气候变化背景下,河道萎缩、水域面积缩减,建

设用地扩张和农用地开垦侵占了大量生态空间,严重损害了区域内与水相关的生态系统服务功能,从而加剧生态风险。具体来看,小里镇和三台镇的雨洪调蓄服务的冲突斑块分别由 2035 年的 1.13 km² 和 1.86 km² 增长到 2050 年 5.46 km² 和 4.99 km²,表明了雄安新区起步区周边急剧增加的城镇雨涝风险。除了小里镇、平王乡和雄州镇,其他乡镇的水质净化服务冲突面积增长均得到显著控制。并且全域水源涵养服务的风险斑块都出现收缩,从 2035 年的 14.81 km² 降低到 2050 年的 8.73 km²,表明环白洋淀区域整体水体治理的积极影响。此外,固碳服务、生境质量服务和土壤保持服务受到城镇发展的影响较小。整体来看,环白洋淀地区与水文相关的生态系统服务是未来一段时期内需要重点关注的领域。

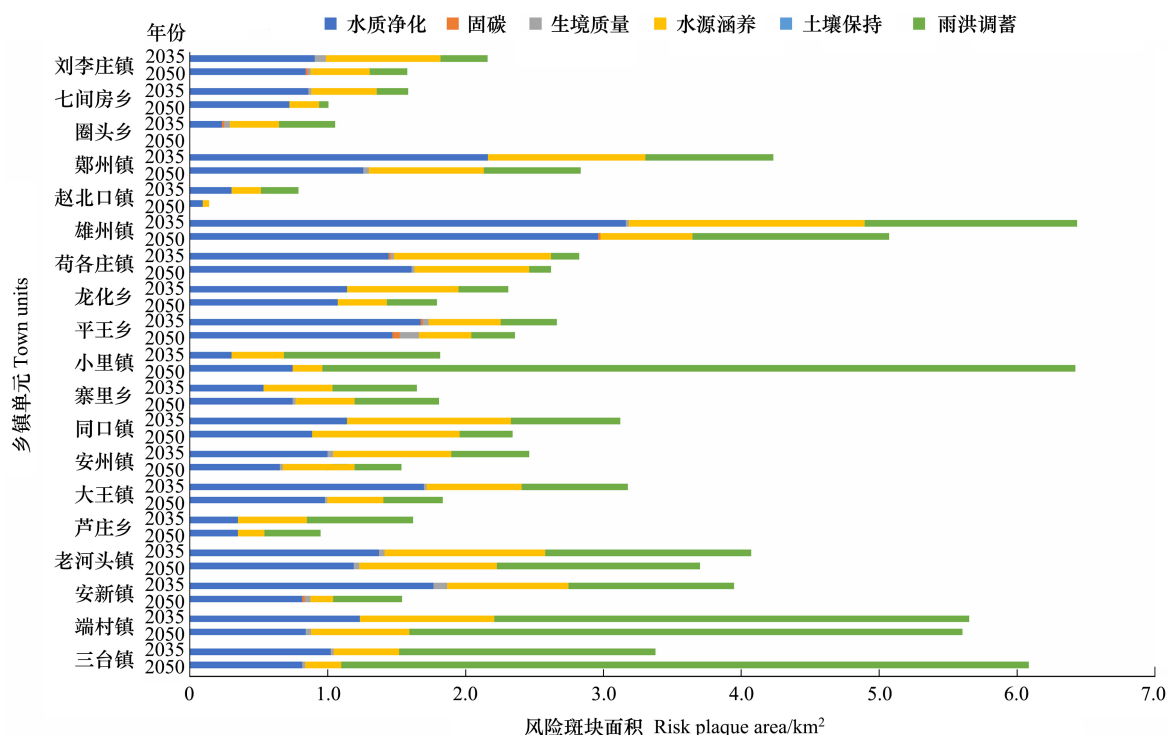


图 6 环白洋淀地区单一生态系统服务的风险斑块面积

Fig.6 The risk patch area of single ecosystem service in the Baiyangdian region

4 乡镇的适应性空间管控

4.1 研究区管控单元分类

在单元发展阶段基础上,根据 CESI 是否高于平均水平对空间单元进行管控分类。从图 7 可见,空间单元三维分布呈现了较强的集聚性,建设程度居中(2.0—3.5)的单元同样处于 CESI 的中位水平,可见环白洋淀地区的乡镇空间普遍处于生态环境与人工环境的均衡状态。另外,具备高建设概率的单元,同时具备高建设程度或高 CESI 的特征,体现了乡镇扩张更偏好紧邻建成区 and 环境良好的优势区位,一方面可以借力于既有城镇的规模效益,另一方面可以借力于自然资源的溢出效益。研究区 CESI 与距水系距离表现为负相关($\text{coef.} = -0.408, P < 0.01$),而建设程度与距水系距离表现为正相关($\text{coef.} = 0.334, P < 0.01$)。这一方面印证了生态系统服务与白洋淀的空间耦合关系,同时说明近水地区的建设控制有一定成效。

环白洋淀地区的 8 类细分单元结构差异较大(图 7)。超前建设单元中有 76.73% 处于低 CESI 水平,远高于 58.23% 的研究区平均值,表明乡镇的蔓延扩张对生态环境带来较大影响,因此需要重点管控。潜在建设单元中有 57.53% 处于高 CESI 水平,因此要注重对未来城镇建设的引导,减少环境影响,避免过度开发。常规建设单元中,高 CESI 空间占比 53.57%,超过研究区平均水平。这对于建成区来说是较为难得的,因此需要进一

步保持其生态服务效能。值得注意的是,不宜建设单元的低 CESI 空间数量达到 181 个(53.08%),不符合该类型空间的定位,亟需通过生态环境涵养和受损空间修复等手段进行治理。

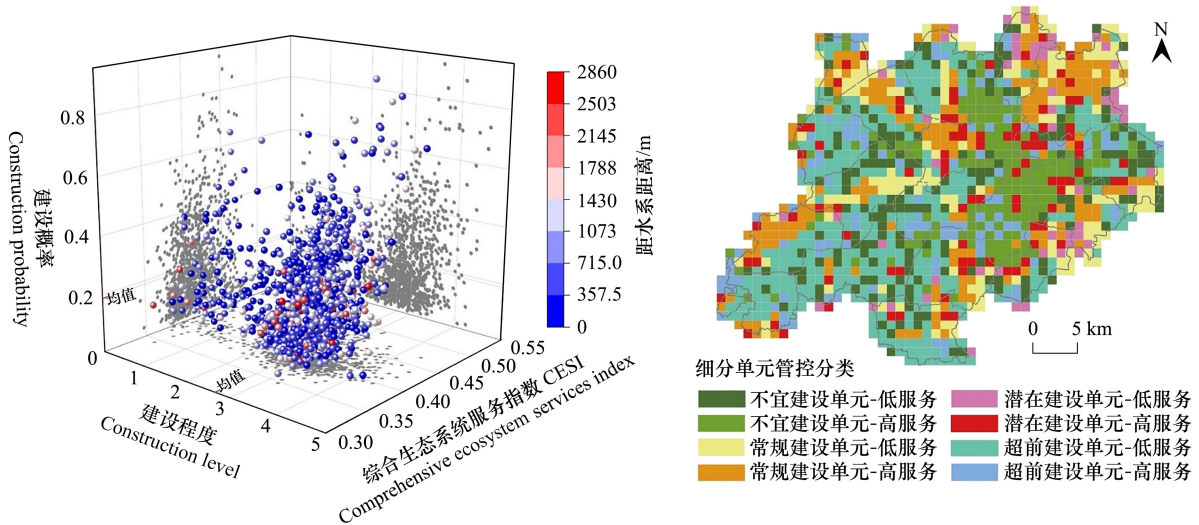


图 7 环白洋淀地区乡镇空间适应性空间管制图

Fig.7 Adaptive management map for the spatial development of towns in the Baiyangdian region

4.2 适应性分区管控策略

从生态约束和发展引导两方面对 8 类空间单元进行差异化管控,以适应乡镇空间演进阶段和生态系统服务特征(图 8)。整体上,常规建设单元与潜在建设单元均属于发展型空间,定位是“精管控,优发展”,而超前建设单元与不宜建设单元均属于保护型空间,定位是“保底线,重修复”。常规建设高 CESI 单元一般是位于乡镇建成区并具有一定规模蓝绿空间覆被的区域,人居环境良好,管控核心是维护;保护重要生态空间并约束建设空间的过度扩张,增强发展韧性。常规建设低 CESI 单元主要是乡镇建成区内的高度硬化空间,管控核心是优化;通过存量挖潜增补绿色基础设施,同时促进产业结构的绿色化转型。潜在建设高 CESI 单元指区位、交通等发展条件良好,并且原址具有良好生态资源的空间,管控核心是协调;尽量规避开发建设衍生风险,控制建设布局和强度,保护未开发生态资源。潜在建设低 CESI 单元通常是发展条件优良同时生态限制较小的空间,同时也是乡镇未来发展的主要战略储备空间,管控核心是引导;一方面需要促进城镇要素有序空间集聚,提高建设用地利用效率,另一方面应把控产业准入门槛,引导产业发展方向。超前建设高 CESI 单元一般

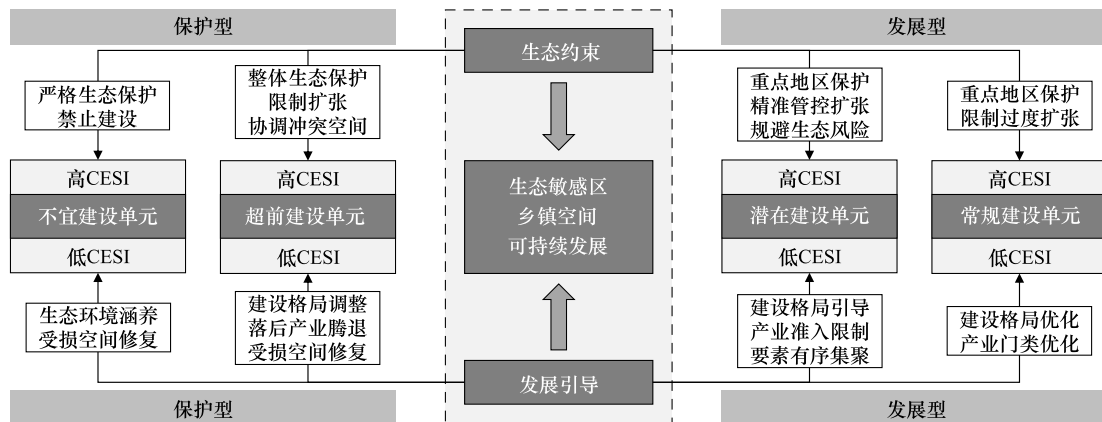


图 8 生态敏感区乡镇适应性空间管控策略

Fig.8 Adaptive spatial management strategies for towns in ecologically sensitive areas

是开发建设超出实际需求并对生态系统服务产生胁迫的空间,管控核心是调控;需要严格落实“三线”要求以限制继续扩张,同时协调建成空间与生态空间的矛盾冲突。超前建设低 CESI 单元由于过度建设已经对生态环境产生较大损害,管控核心是修复;亟需调整建设格局,控制无序扩张,同时腾退高污高耗的低端产业,推动重点地区生态修复。不宜建设高 CESI 单元是生态价值最高的空间,管控核心是保护;严格禁止破坏性开发建设,削减人类活动影响。不宜建设低 CESI 单元指存在生态功能衰退的自然空间,管控核心是涵养;提高生态系统服务能力,全面进行生态修复。

5 结论与展望

5.1 结论

(1) 环白洋淀乡镇承载的生态系统服务结构具有显著差异,其中生境质量服务的空间异质性最强。此外,生态系统服务高值区与白洋淀湿地格局基本一致,并且沿河流水系向西部呈带状延伸;

(2) 交通因素对环白洋淀乡镇的时空发展动态有重要影响,包括建设程度以交通干线为轴向两侧呈递减分布,以及建设概率高值区临近交通干线;

(3) 环白洋淀乡镇的潜在建设单元分散镶嵌在常规开发建设单位周边,同时集聚在白洋淀湿地保护区边界处,而超前建设单元除了集聚在常规建设单位周边,已经向乡村地区和生态腹地蔓延;

(4) 环白洋淀地区承载的雨洪调蓄服务、水源涵养服务和水质净化服务在未来 30 年面临较为严重的胁迫,其中雄州镇生态风险斑块面积最大,而三台镇和小里镇生态风险斑块扩张速度最快。

5.2 展望

生态敏感区乡镇的发展演变是人地关系不断调整适应的过程,也是传统人居文化的集中体现。现阶段,随着外部经济社会条件改变,原有人地系统的平衡被打破,引起了大量的社会、生态和经济问题,严重制约了这些地区的乡村振兴和在地城镇化。例如研究发现区域交通基础设施的规划落位对环白洋淀乡镇发展产生了重要影响,其中过境交通干线通过改变乡镇区位条件,大幅增加了物质、信息要素的外向交换,从而改变其空间发展轨迹。此外,生态敏感区乡镇微观发展格局识别,旨在寻求保护与发展的协调统一,并因地制宜构建适应性管控机制。本研究提出的空间单元细分管控方法,是对传统基于乡镇行政边界的研究与管理范式的补充,而不是替代关系。来自微观视角的信息识别和空间管控,能在一定程度上减少宏观分区范式的盲区,从而为县级、乡镇级国土空间规划决策提供支撑。需要指出,本研究还存在一些局限:一是生态敏感区的生态系统服务评价体系仍有完善空间,例如文化服务也对乡镇发展有一定影响,需要针对不同生态空间类型探讨适宜的计量方式;二是采样网格对乡镇发展格局识别起到关键作用,在不同研究区域使用时应慎重考虑尺度效应的影响。

参考文献 (References):

- [1] 国家统计局. 2023 年中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [2] 郑皓, 秦瑜, 邱德华. 苏南旅游小城镇“三生”空间韧性评价. 现代城市研究, 2023, 38(7): 17-23.
- [3] 姚焱中, 李诗婷, 苏美蓉, 廖乐乐, 徐超, 岳文淙. 区县生态系统健康评价方法——以东莞市各镇区为例. 生态学报, 2021, 41(15): 5998-6011.
- [4] 罗红, 陈磊, 姜运力, 李从瑞, 周凤娇, 吴建普. 自然保护地整合优化的景观格局变化分析——以贵州省思南县为例. 生态学报, 2021, 41(20): 8076-8086.
- [5] 李久林, 胡大卫, 谢敏, 张龔, 滕璐, 储金龙, 尹海伟. 社会-生态视角下乡村聚落系统脆弱性评价——以蒙洼行蓄洪区为例. 生态学报, 2023, 43(22): 9164-9176.
- [6] Bertolo L S, dos Santos R F, de Agar P M, de Pablo C T L. Land-use changes assessed by overlay or mosaic methods: Which method is best for management planning? Ecological Indicators, 2015, 55: 32-43.
- [7] Yao Y, Ma L B, Che X L, Dou H J. Simulation study of urban expansion under ecological constraint—Taking Yuzhong County, China as an example. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 57: 126933.
- [8] Fu F, Deng S M, Wu D, Liu W W, Bai Z H. Research on the spatiotemporal evolution of land use landscape pattern in a county area based on CA-

Markov model. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 80: 103760.

- [9] 焦庚英, 杨效忠, 黄志强, 张潇, 陆林. 县域“三生空间”格局与功能演变特征及可能影响因素分析——以江西婺源县为例. *自然资源学报*, 2021, 36(5): 1252-1267.
- [10] 岳奕帆, 陈国鹏, 王立, 杨钧, 杨克彤. 基于 Google Earth Engine 云平台的甘肃舟曲县生态环境质量动态监测与评价. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1608-1614.
- [11] 冯君明, 冯一凡, 李翅, 吕硕, 马俊杰. 河势特征分界下的黄河滩区周边城镇生境质量与景观格局演变. *生态学报*, 2023, 43(16): 6798-6809.
- [12] 张城, 李晶, 周自翔, 刘宪锋. 生态系统服务级联效应研究进展. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1633-1642.
- [13] 唐永, 李小建, 胡雪瑶, 刘雪怡. 快速城镇化中传统农区小城镇规模演变与影响因素. *经济地理*, 2023, 43(10): 148-159.
- [14] 杨志, 魏姝. 政策爆发: 非渐进政策扩散模式及其生成逻辑——以特色小镇政策的省际扩散为例. *江苏社会科学*, 2018(5): 140-149.
- [15] 朱金, 李强, 王璐妍. 从被动衰退到精明收缩——论特大城市郊区小城镇的“收缩型规划”转型趋势及路径. *城市规划*, 2019, 43(3): 34-40, 49.
- [16] 陈悦, 邵雨, 特里·范戴克. 历史城镇产业与空间形态的互动演变研究——以角直镇为例. *城市发展研究*, 2023, 30(10): 97-103, 140.
- [17] Hou Y, Burkhard B, Müller F. Uncertainties in landscape analysis and ecosystem service assessment. *Journal of Environmental Management*, 2013, 127: S117-S131.
- [18] 唐永, 李小建, 姜帆, 滕琼瑶. 快速城镇化背景下中国小城镇时空演变及影响因素. *经济地理*, 2022, 42(3): 66-75.
- [19] 王雪芹, 戚伟, 刘盛和. 中国小城镇空间分布特征及其相关因素. *地理研究*, 2020, 39(2): 319-336.
- [20] 徐文烨. 基本管理单元在上海郊野单元村庄规划中的应用与探索——以浦东新区川沙新镇为例. *上海城市规划*, 2021, 6(6): 51-55.
- [21] 毛珍婧. 生态保护理念下的工矿型山地小城镇规划策略——以宜昌市黄花镇为例. *规划师*, 2019, 35(S3): 10-13, 22.
- [22] 沈大伟. 基于生态优先的西南民族地区小城镇国土空间规划策略——以广西壮族自治区隆安县国土空间总体规划为例. *西部人居环境学刊*, 2023, 38(1): 23-28.
- [23] 王丽群, 张志强, 李格, 马丰伟, 陈立欣. 北京边缘地区景观格局变化及对生态系统服务的影响评价——以牛栏山-马坡镇为例. *生态学报*, 2018, 38(3): 750-759.
- [24] 林一诚, 郑景明, 周怡宁, 关颖慧, 周金星. 基于 InVEST 模型的围场县小滦河流域碳储量空间分布及热点区域分析. *生态学杂志*, 2023, 42(10): 2536-2544.
- [25] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 黄秀兰, 卢志强. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3457-3466.
- [26] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 中国土壤有效含水量分布. *地理学报(英文版)*, 2005, 15(1): 3-12.
- [27] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, Jones L, Ziv G, Clarke D, Oliver T H, Bullock J M. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 1418-1426.
- [28] 荣月静, 严岩, 王辰星, 章文, 朱婕缘, 卢慧婷, 郑天晨. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态网络构建与优化. *生态学报*, 2020, 40(20): 7197-7206.
- [29] 王晓峰, 马雪, 冯晓明, 周潮伟, 傅伯杰. 重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征. *生态学报*, 2019, 39(20): 7344-7355.
- [30] 阳小兰, 张茹春, 毛欣, 王瑞君, 孟赫男, 刘冬梅, 田学东, 杨永壮. 白洋淀水体氮磷时空分布与富营养化分析. *江苏农业科学*, 2018, 46(24): 370-373.
- [31] 冯琳, 雷国平. 东北地区生态系统服务及权衡/协同关系时空演变特征与功能分区研究. *中国土地科学*, 2023, 37(7): 100-113.
- [32] 冯憬, 卫伟, 冯青郁. 黄土丘陵区 SCS-CN 模型径流曲线数的计算与校正. *生态学报*, 2021, 41(10): 4170-4181.
- [33] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. *地理学报*, 2020, 75(5): 949-960.
- [34] 方创琳. 中国新型城镇化高质量发展的规律性与重点方向. *地理研究*, 2019, 38(1): 13-22.
- [35] 夏柱智, 贺雪峰. 半工半耕与中国渐进城镇化模式. *中国社会科学*, 2017(12): 117-137.
- [36] 王国玉, 白伟岚, 熊筱, 穆晓红, 邱莉淘. 京津冀城市群生态空间受损识别研究. *城市规划*, 2021, 45(8): 9-19, 41.
- [37] 王旭东, 姚尧, 任书良, 史绪国. 耦合 FLUS 和 Markov 的快速发展城市土地利用空间格局模拟方法. *地球信息科学学报*, 2022, 24(1): 100-113.
- [38] 梁晨, 曾坚, 沈中健, 王倩雯. 快速城市化生态系统服务格局分析与空间管控——以厦门市为例. *生态学报*, 2021, 41(11): 4379-4392.
- [39] Liang C, Zhang R C, Zeng J, Shen Z J. A land-use decision approach integrating thermal regulation, stormwater management, and economic benefits based on urbanization stage identification. *Science of the Total Environment*, 2021, 779: 146415.
- [40] 刘晓阳, 曾坚, 贾梦圆, 张森. 闽三角城市群生态安全格局构建及城镇扩展模拟. *生态学报*, 2020, 40(21): 7873-7885.
- [41] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [42] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.