

DOI: 10.5846/stxb202010162642

李皓, 翟月鹏, 杨小龙, 董旭彤, 杨佳, 马子川, 刘敬泽. 基于层次分析-有序加权平均多准则评估的雄安新区生态安全格局模拟研究. 生态学报, 2022, 42(1): 150-160.

Li H, Zhai Y P, Yang X L, Dong X T, Yang J, Ma Z C, Liu J Z. Simulating ecological security patterns in the Xiong'an New Area based on the multicriteria evaluation of AHP-OWA. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 150-160.

基于层次分析-有序加权平均多准则评估的雄安新区生态安全格局模拟研究

李 皓^{1,*}, 翟月鹏¹, 杨小龙¹, 董旭彤¹, 杨 佳¹, 马子川², 刘敬泽¹

¹ 河北师范大学生命科学学院, 石家庄 050024

² 河北师范大学化学与材料科学学院, 石家庄 050024

摘要: 稳定、高效的生态安全格局对于“建设雄安新区”国家战略具有重大意义。然而, 目前尚缺乏一套科学、弹性的规划方法, 用于指导新区建设。采用层次分析(AHP)和有序加权平均(OWA)空间多准则评估方法, 结合 Google Earth Engine 遥感云计算技术和 InVEST 模型, 在量化生态系统服务和生态风险的基础上, 模拟新区生态安全格局。首先, 生态安全格局涉及众多专业领域, 内涵较为丰富, 决策过程应采用参与式方法, 建立包含生态环境和社会经济因素在内的综合指标体系, 奠定格局构建的决策基础; 其次, AHP-OWA 方法按不同决策情景(风险), 提供了一整套“完全保护—中立—完全开发”的空间决策集, 定量揭示“保护—开发”权衡关系, 为格局构建提供充足决策支持; 最后, 白洋淀保护地以及启动和起步区建设, 会对生态安全格局产生重要影响, 所以构建工作应在科学规划启动和起步区建设的同时, 围绕白洋淀开展。未来在“绿色生态宜居新城区”目标指引下, 新区建设方案应以“保护优先”为基本原则, 结合重要区域、现有规划和资金预算等要素共同确定, 实现保护与开发的“双赢”。

关键词: 生态安全格局; 生态系统服务; 空间多准则评估; 有序加权平均; 雄安新区

Simulating ecological security patterns in the Xiong'an New Area based on the multicriteria evaluation of AHP-OWA

LI Hao^{1,*}, ZHAI Yuepeng¹, YANG Xiaolong¹, DONG Xutong¹, YANG Jia¹, MA Zichuan², LIU Jingze¹

¹ College of Life Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China

² College of Chemistry and Material Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China

Abstract: Xiong'an New Area, officially described as the millennium plan and one of the key national strategies, is a state-level new area in the Baoding municipality of Hebei province, China and was established in April 2017. It is located about 100 km southwest of Beijing and 50 km east of downtown Baoding. The Xiong'an New Area's main function is to serve as a development hub for the Beijing-Tianjin-Hebei economic triangle. At the same time, the "non-core" functions of the Beijing city are expected to migrate here, including offices of some state-owned enterprises, government agencies, and research and development facilities. Within this context, the Xiong'an New Area raises higher requirements for ecological security. As such, stablely and efficiently ecological security pattern is significant to the national strategy of developing the Xiong'an New Area. However, a set of scientific and flexible planning methods that can be used to guide the development of the Xiong'an New Area is still lacking so far. This study uses the method of spatial multicriteria evaluation, namely, the analytic hierarchy process (AHP) and the ordered weighted averaging (OWA). Based on the quantification of local

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0506901); 国家自然科学基金面上项目(42071257); 河北省自然科学基金面上项目(C2021205022); 河北师范大学博士科研启动基金(L2020B18)

收稿日期: 2020-10-16; 网络出版日期: 2021-08-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lihao@hebtu.edu.cn

ecosystem services and ecological risks, the AHP and OWA are integrated with the cloud computation technology of Google Earth Engine for remote sensing images and the InVEST model to simulate the ecological security pattern in the Xiong'an New Area. First, ecological security pattern is an integrative field covering various disciplines. As a result, the decision-making processes should be participatory to correspondingly establish a comprehensive set of indicator system consisted of biophysics and socioeconomics. Second, according to different decision scenarios or risks, the AHP-OWA method provides a complete set of alternatively spatial decisions, ranging from full conservation and neutral to full development. This decision set can quantitatively reveal the tradeoffs between conservation and development and will strengthen decision-making processes for the construction of ecological security pattern in the Xiong'an New Area. Finally, the Baiyangdian protected area and the construction of the promoter and start-up areas will generate the significant effects on the ecological security patterns. Thus, efforts of pattern construction are suggested to focus on the Baiyangdian protected area while systematically planning the construction of the promoter and start-up areas. In the future, toward the objective of becoming green, ecological, and livable, the Xiong'an New Area development plans should set conservation priority as a basic principle while factoring key areas, ongoing conservation plans, and budgets to achieve a "win-win" outcome balancing conservation and development.

Key Words: ecological security pattern; ecosystem services; spatial multicriteria evaluation; ordered weighted averaging; Xiong'an New Area

生态安全格局是指:为维持城市或区域生态安全,生态系统中各种土地利用类型的形状、比例和空间配置^[1-2]。因此,可通过设计土地利用开发强度或方式,来保障生态安全^[3-4]。总体来看,生态安全格局具有如下特点:(1)综合性。格局受生态系统物质、能量和信息流的综合影响^[5-6];(2)权衡性。生态安全格局体现为:不同生态系统服务间的权衡,以及享用生态系统服务与承担生态风险之间的权衡^[7-8];(3)情景性。应在不同目标情景下,讨论生态安全格局问题^[6];(4)尺度性。不同尺度的生态过程涉及不同生态系统服务,因此应在具体的空间尺度上探讨生态安全格局^[4,9]。近年来,国内外学者采用空间多准则评估、情景模拟和人工智能优化等多种定量方法^[1,6],模拟不同空间尺度的生态安全格局,取得了良好的效果^[10-13],遥感大数据和云计算技术的兴起,更极大地提高了工作效率^[14]。

2017年4月1日,党中央提出“建设雄安新区”国家重大战略,计划将新区建设成为绿色、生态、宜居新城区,对于集中疏解北京非首都功能,具有重要意义^[15]。显然,构建稳定、高效的生态安全格局,已成为雄安新区建设的当务之急。我国学者围绕新区生态安全格局构建技术策略,进行了深入研究。卢慧婷等从新区、大清河流域和京津冀区域三个尺度,提出生态安全格局构建框架^[1];杨萌等则提出“大清河流域—新区一起起步区”的生态基础设施核心区识别技术体系^[16]。然而,随着建设的深入推进,新区将面临不同程度的“保护”与“开发”目标冲突^[17],目前尚缺乏一套能够有效权衡二者矛盾的生态安全格局规划方法。

因此,本研究在量化雄安新区生态系统服务和生态风险的基础上,采用空间多准则评估方法,根据不同“保护—开发”权衡水平,模拟新区生态安全格局,优化生态系统服务供给,为新区建设决策提供充足依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

雄安新区位于华北平原腹地,距离北京 105 km;包括河北省雄县、容城、安新三县,以及周边部分区域,总面积 1770 km²;按照规划要求,新区将首先建设 198 km²的起步区,然后在其内部建设启动区;新区属于海河流域大清河水系,境内有重要的生态水体——白洋淀(图 1)。近年来,由于气候干旱和人类活动干扰,造成新区生态安全格局受损,表现为:空气污染、地下水超采、水质下降等,资源环境形势严峻。

当前,雄安新区人均 GDP 及城镇化率远低于河北省和全国平均水平^[18],发展需求强烈,建设空间充足。

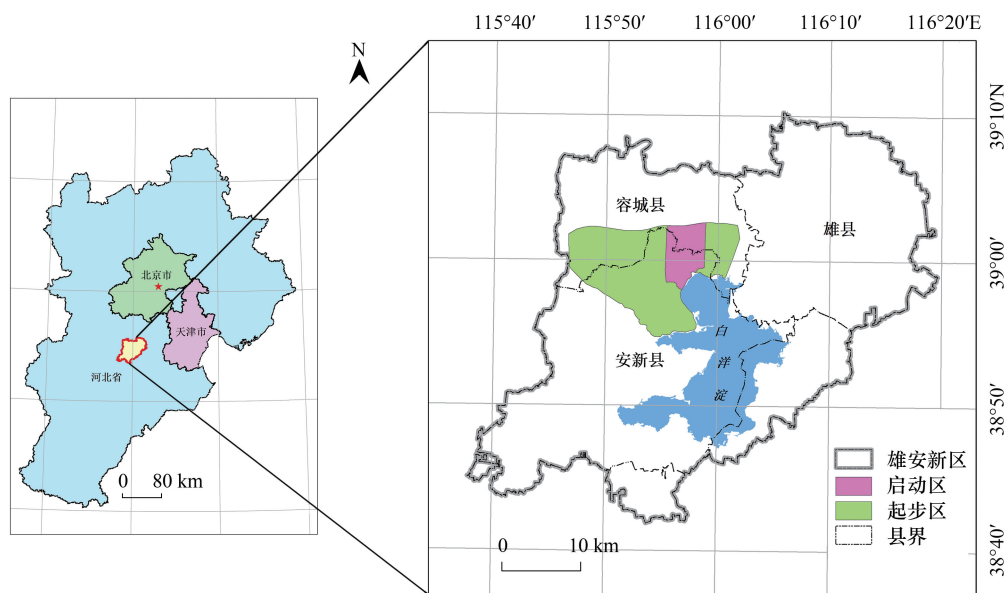


图1 雄安新区位置图

Fig.1 Location of Xiong'an New Area

因此,2018年公布的《河北雄安新区规划纲要》提出:到2035年,基本建成绿色低碳、宜居宜业、人与自然和谐共生的高水平社会主义现代化城市。然而,随着新区建设的深入推进,势必会带来“保护—开发”矛盾,对新区生态安全格局产生不利影响。

1.2 空间数据预处理

本研究基于 Google Earth Engine 云计算平台,以2019年 Sentinel-2 无云影像(空间分辨率 10 m)为数据源,采用随机森林监督分类算法(分类精度 94%),建立雄安新区土地利用空间数据库^[14,19–20]。具体结果如图2所示:

各土地利用类型按面积大小依次为:耕地、未利用地、城镇、水域、林地和草地。其中,耕地(1335 km²)占新区面积的 75.4%,同样反映出该地区以农业为主,城镇化水平较低的发展现状。

1.3 研究方法

空间多准则评估(Multicriteria Evaluation, MCE)指按照一定的决策规则,结合地理信息系统技术,对多个评估准则进行复杂空间运算,以有效权衡不同决策目标,确保最优决策^[13]。本研究的决策规则包括:层次分析(Antalytic Hierarchy Process, AHP)和有序加权平均(Ordered Weighted Averaging, OWA)。其中,AHP 对所有

评估准则进行两两重要性比较,建立比较矩阵,通过矩阵运算求得准则权重,辅助最终决策^[21];OWA 则充分

考虑不同准则间的权衡作用,模拟不同的决策风险或情景,提供一整套连续的决策集^[22],如图3所示:

在此决策空间内, ω 指准则权衡作用, α 代表决策情景。当决策点在 B、C 间移动时,各准则权重的相对重要性会发生变化。其中,B 点代表一种“风险规避”情景,结果必须满足所有准则;而 C 点则恰好相反,表示

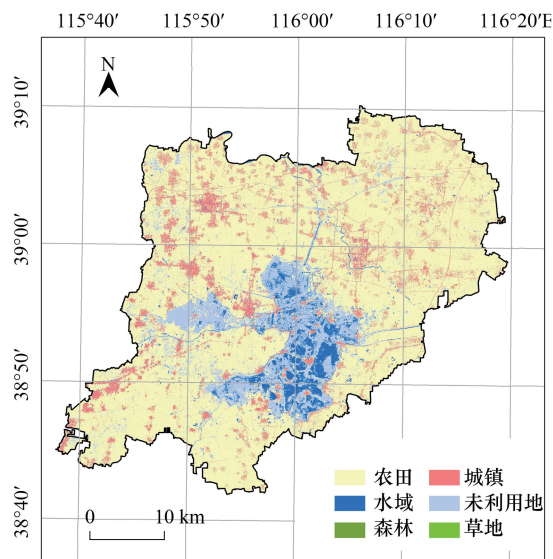


图2 2019年雄安新区土地利用图

Fig.2 Land use map of Xiong'an New Area in 2019

“风险耐受”情景,结果只需满足一条准则;当决策位于 B、C 之间的其它情景时,则反映了不同的“风险规避—风险耐受”权衡关系。特别是当处于 A 点时,各准则保持原有权重,相互不受影响,决策完全中立^[23]。目前, AHP 与 OWA 紧密结合,已广泛应用于土地适宜性评价^[23—24]、风险评估^[25—26]和景观规划^[27—28]等领域。

AHP-OWA 法具体包括以下三步:准则选取、权重计算和准则聚集。

1.3.1 准则选取

在系统、全面的基础上,选取评估准则需要重点考虑其权衡特征。生态安全格局内部的权衡关系,如图 4 所示:

一方面,不同生态系统服务供给可能存在较为复杂的权衡现象;另一方面,增加生态系统服务供给,是以控制人类或自然生态风险为条件换取的。在此基础上,2020 年 8 月,研究人员组织召开小型研讨会,经水利、林业、农业、国土等领域专家共同协商,从“生态系统服务”和“生态风险”两个方面,确定如下 8 条评估准则。

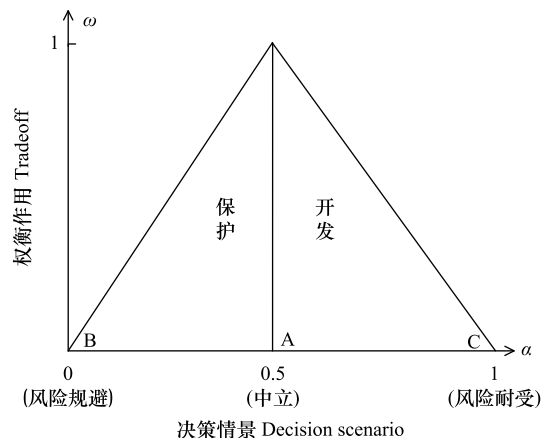


图 3 OWA 决策空间示意图

Fig.3 Decision strategy space in OWA

OWA:有序加权平均,Ordered Weighted Averaging

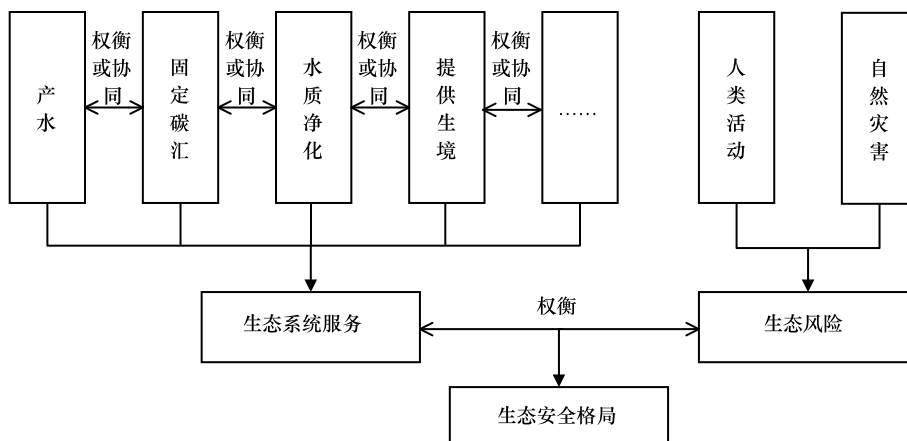


图 4 生态安全格局的权衡关系

Fig.4 Tradeoffs of ecological security pattern

生态系统服务

a. 产水

产水服务对于维持新区生态安全格局具有积极作用。本研究采用水量平衡法^[29],通过计算降雨量与实际蒸散量之差,求得产水量,具体如(1)式所示:

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

式中, Y_x 为 x 像元的年产水量(mm); P_x 为该位置的年降雨量(mm),采用保定市气象站监测数据,通过 ArcGIS 10.2 的克里金插值得到; AET_x 为该位置的年实际蒸散量(mm),根据修正的 Hargreaves 公式^[30],代入年平均气温和 P_x 计算得到。

b. 固定碳汇

新区生态系统碳汇服务越充足,生态安全格局越稳定。本研究采用反映地上生物量的净初级生产力

(NPP)来测量碳汇服务,根据 CASA 模型^[31],NPP 可表示为(2)式:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (2)$$

式中, $NPP(x, t)$ 指 x 像元在 t 月份的净初级生产力(g/hm^2); $APAR(x, t)$ 指在该位置和时间处的吸收有效光合辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{a}^{-1}$),根据光合有效辐射、吸收光合有效辐射比例等参数计算; $\varepsilon(x, t)$ 为光能利用率(%),参考朱文泉提出的中国典型植被类型光能利用率进行赋值^[32]。

c.水质净化

本研究以总氮(TN)和总磷(TP)输出量为依据评估水质净化服务,具体计算如(3)式:

$$ALV_x = HSS_x \times pol_x \quad (3)$$

式中, ALV_x 为 x 像元调整后的 TN、TP 输出量(kg/hm^2); HSS_x 为该位置的水文敏感性评分,由汇流量、坡度、土壤深度等参数确定^[33]; pol_x 为该位置的 TN、TP 输出系数(kg/hm^2)。显然, TN 和 TP 输出量越低,水质净化服务越强,新区生态安全格局越稳定;反之,则不稳定。

d.提供生境

物种越丰富,则生境质量越高,新区生态安全格局越稳定。具体计算如(4)式:

$$Q_{xj} = H_j \times \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \quad (4)$$

式中, Q_{xj} 为 j 地类 x 像元的生境质量, H_j 为 j 地类的生境适应性指数, D_{xj} 为 j 地类 x 像元的受威胁水平, z 为模型定义常数, k 为半饱和常数。

以上除固定碳汇服务采用 ArcGIS 10.4 栅格计算外,其余均在 InVEST 模型相关模块下完成^[34]。

生态风险

e.到启动和起步区的距离

地块到启动和起步区的距离,反映了新区建设带来的生态风险。距离越近,生态风险越高,增加了生态安全格局的不稳定性;反之,则维护了稳定性。

f.到村庄的距离

同上,距离村庄越近,则人为干扰风险越高,新区生态安全格局越不稳定;反之,则越稳定^[27]。以上三类距离均采用 ArcGIS 10.4 中的欧氏距离模块计算。

g.人口密度

人口密度一定程度上反映了人类社会经济系统对资源环境的潜在压力^[27]。人口密度越大,对于维护新区生态安全格局越不利;反之,则越有利。本研究人口密度栅格数据(100m 分辨率)从 Worldpop 数据库中提取^[35]。

最后,需要对上述栅格数据进行归一化处理,以消除不同单位的影响,具体如(5)式所示^[36]:

$$x_i = \frac{(R_i - R_{\min})}{(R_{\max} - R_{\min})} \times NR \quad (5)$$

式中, x_i 是准则的归一化值, R_i 指准则原始值, R_{\max} 和 R_{\min} 分别代表准则最大值和最小值, NR 指归一值的范围 $[0, 1]$ 。

1.3.2 权重计算

AHP-OWA 法同时需要准则和次序权重来完成计算。首先,采用 AHP 法计算准则权重,以衡量不同准则对于决策结果的影响。本研究对以上准则进行两两重要性比较,并按表 1 标准赋予所有准则对重要性分值。

不同分值表示不同准则对的相对重要性变化。例如,1/9 表示准则 1 与准则 2 相比,前者是极端不重要的,以此类推,当分值从左向右变化时,准则 1 相较于准则 2 的重要性逐步增加,直至最右端的极端重要(9)。由此可得到由各准则对比较分值组成的配对比较矩阵,如表 2 所示:

表 1 AHP 配对比较分值标准

Table 1 Scales of AHP pairwise comparison

重要性 Importance 程度 Extent	不重要 Less important				一样	重要 More important			
	极端	非常	很	有些		有些	很	非常	极端
分值 Scale	1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9

AHP: Analytic Hierarchy Process, 层次分析法

表 2 AHP 配对比较矩阵

Table 2 Pairwise comparison matrix of AHP

准则 Criterion	准则 1 Criterion 1	准则 2 Criterion 2	准则 3 Criterion 3
准则 1 Criterion 1	1			
准则 2 Criterion 2	分值 1	1		
准则 3 Criterion 3	分值 2	分值 3	1	
.....	1

由于此矩阵完全对称,因此通常只沿对角线计算一半。通过求解该矩阵最大特征值对应的归一化特征向量,可得到准则权重。在此基础上,为保证打分结果的前后一致,矩阵需满足一致性比率 $CR < 0.1$ 的要求,否则,需要重新打分^[21]。在 2020 年 8 月的小型研讨会上,由所有与会专家共同协商确定各准则对的比较分值,完成构建配对比较矩阵,有效确保了结果准确。

其次,次序权重不仅反映了准则间的相互影响,而且进一步量化了不同情景下决策目标的权衡关系,以控制不同准则聚集,从而获得更为客观、精准的决策结果。需要注意的是,次序权重仅与所在位置或排序有关,而与准则类别和数值无关^[22]。次序权重与 α 、 ω 之间的关系可表示为(6)——(8)式^[25]。

$$\text{MAX}(\omega) = - \sum_{j=1}^n w_j \ln w_j \quad (6)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^n \left(\frac{n-j}{n-1} \right) w_j \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \text{ 和 } 0 \leq w_j \leq 1 \quad (8)$$

式中, w 表示次序权重, n 为准则个数。本研究采用 What's Best 14.0 优化计算软件,编程求解上述非线性联立方程组,可得到不同 α 和 n 条件下的最优次序权重。

1.3.3 准则聚集

本研究采用加权 OWA (Weighted OWA, WOWA) 来聚集准则和次序权重,能够获得不同情景下的空间决策结果^[25],具体如(9)式所示:

$$\text{WOWA} = \sum_{j=1}^n \frac{u_j w_j z_{ij}}{\sum_{j=1}^n u_j w_j} \quad (9)$$

式中, u_j 和 z_{ij} 分别表示经过降序排列的准则权重和原始准则值。以上准则权重和聚集计算均在 IDRISI 18.21 软件下完成。

2 结果

2.1 评估准则归一化

各准则的归一化结果如图 5 所示:

白洋淀保护地具有与周边区域显著不同的产水、水质净化和提供生境服务能力,显示出该地具有较高的生态重要性,特别是白洋淀的提供生境服务明显高于其它地区,这主要是由于这里为各种水生动植物提供栖息地,具有较高生物多样性的缘故。生态风险方面,启动和起步区周边具有明显较高的生态风险,表明新区建

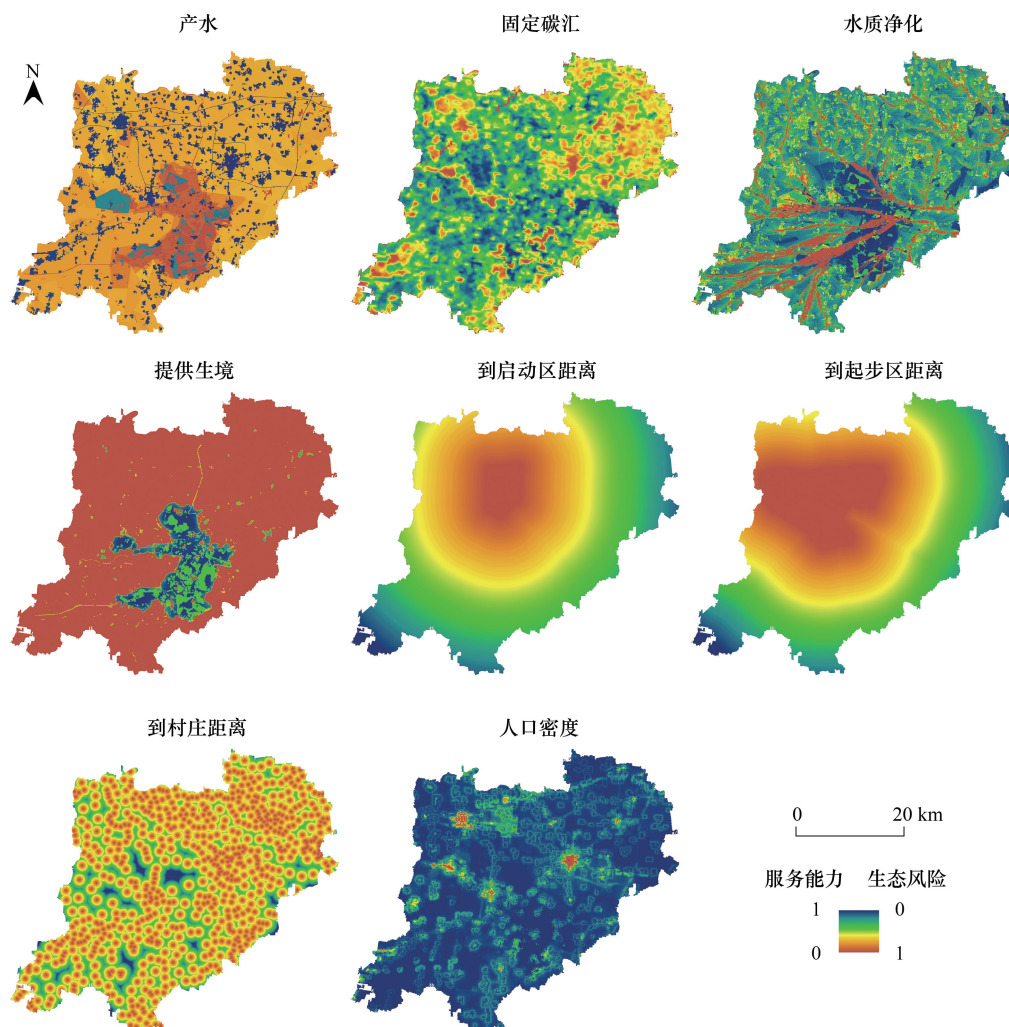


图 5 归一化的评估准则栅格图

Fig.5 Raster maps of normalized criteria

设的影响范围较广;密集的村庄分布,导致人类干扰高风险区覆盖了新区的绝大部分(图 5),将对生态安全格局产生一定影响。

2.2 准则权重

配对比较矩阵和准则权重计算结果,如表 3 所示:

$CR=0.03<0.1$,表明打分结果一致性满足要求。生态系统服务准则方面,水质净化服务权重达 0.3156,表明以白洋淀为重要载体的水质净化服务,对于构建新区生态安全格局极端重要;就生态风险准则来说,到启动和起步区距离分列前两位(0.2745 和 0.1289),显示专家较为关注新区建设对于当地生态安全格局的潜在影响。

2.3 次序权重

不同 α 和 ω 水平下,最优次序权重的计算结果如表 4 所示:

不同 α 水平下, w_j 和 ω 均呈现出明显的非线性变化特征,这实际上反映了“保护”与“开发”两种规划目标的复杂权衡关系,既要建设雄安新区,也要维持当地稳定的生态安全格局。随着 α 从 0 到 1 变化,规划目标从侧重新区保护($\alpha \in [0, 0.5)$),到中立($\alpha=0.5$),再到侧重新区开发($\alpha \in (0.5, 1]$)(图 3),由此相应生成一系列空间决策结果。

表 3 配对比较矩阵和准则权重结果

Table 3 Pairwise comparison matrix and results of criterion weights									
准则 Criterion	产水 Water yield	固定碳汇 Carbon sequestration	水质净化 Water purification	提供生境 Habitat provision	到启动 区距离 Distance from promoter area	到起步 区距离 Distance from start- up area	到村庄距离 Distance from village	人口密度 Population density	准则权重 Criterion weight
产水	1								0.1185
固定碳汇	1/3	1							0.0531
水质净化	5	7	1						0.3156
提供生境	1/5	1/3	1/7	1					0.0265
到启动区距离	3	5	1	7	1				0.2745
到起步区距离	1	3	1/3	5	1/3	1			0.1289
到村庄距离	1/3	1	1/5	3	1/5	1/3	1		0.0606
人口密度	1/5	1/3	1/9	1	1/9	1/7	1/5	1	0.0223
				总计					1.0000

表 4 不同决策情景(α)和权衡水平(ω)下的最优次序权重($n=8$)

Table 4 Optimum order weights in different decision scenarios (α) and at various tradeoff levels (ω)											
$n=8$	α										
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
w_1	0.000	0.001	0.012	0.037	0.074	0.125	0.192	0.279	0.399	0.586	1.000
w_2	0.000	0.003	0.020	0.049	0.085	0.125	0.167	0.209	0.243	0.243	0.000
w_3	0.000	0.007	0.033	0.065	0.097	0.125	0.146	0.156	0.148	0.101	0.000
w_4	0.000	0.017	0.055	0.087	0.111	0.125	0.128	0.117	0.090	0.042	0.000
w_5	0.000	0.042	0.090	0.117	0.128	0.125	0.111	0.087	0.055	0.017	0.000
w_6	0.000	0.101	0.148	0.156	0.146	0.125	0.097	0.065	0.033	0.007	0.000
w_7	0.000	0.243	0.243	0.209	0.167	0.125	0.085	0.049	0.020	0.003	0.000
w_8	1.000	0.586	0.399	0.279	0.192	0.125	0.074	0.037	0.012	0.001	0.000
$\sum w_j$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ω	0.634	0.776	0.835	0.873	0.897	0.906	0.897	0.873	0.835	0.776	0.634

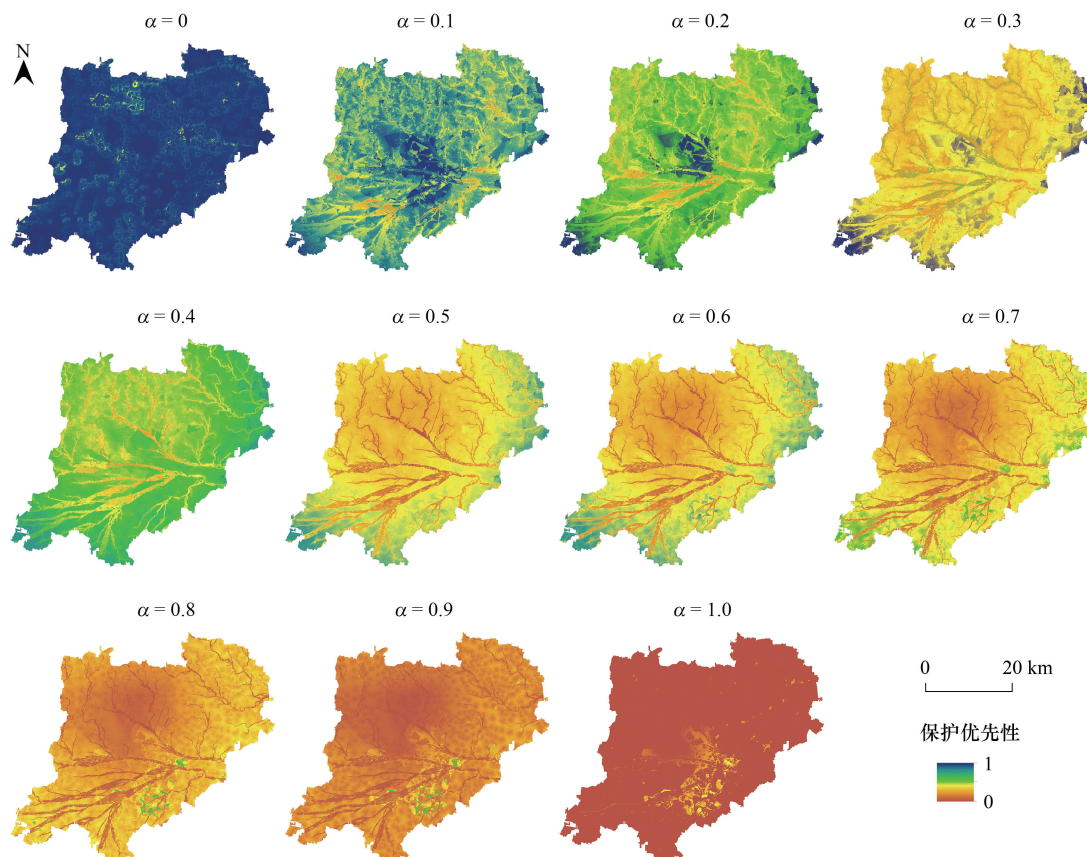
2.4 准则聚集

通过计算 WOWA,评估准则的空间聚集结果如图 6 所示:

WOWA 实际上衡量了雄安新区不同位置(像元)的保护优先性,随着规划目标从“保护”转向“开发”,新区整体保护优先水平呈下降趋势,由此增加了生态安全格局的不稳定性。当 $\alpha=0$ 时,优先水平处于最高(WOWA ≈ 1)(图 6),这实际上反映了一种“完全保护”的极端规划目标,即优先保护绝大多数新区土地,禁止开发行为;当 α 向 0.5 移动时,保护目标开始向中立目标转变,逐步重视新区开发,图像表现为:越来越多像元的优先水平不断下降(图 6),这是由于规划目标或准则间权衡作用(ω)不断增强的结果;当 $\alpha=0.5$ 时,绝大多数像元处于中等优先水平(WOWA ≈ 0.5)(图 6),体现了一种完全中立的规划目标,视新区保护和开发为同等重要,二者可以相同强度推进;与此相反,当 α 从 0.5 增加到 1 时,随着权衡水平不断下降,中立目标逐渐转变为开发目标,新区开发需求开始超过保护需求,更多像元的优先水平下降到 0.5 以下(图 6);直到 $\alpha=1$ 时,所有像元的优先水平降至最低(WOWA ≈ 0)(图 6),此时体现了一种“完全开发”的极端观点——决策者只关注新区开发,而无视新区保护。

3 讨论

本研究由于时间所限,仅邀请部分领域专家进行小范围研讨,确定了包含“生态系统服务”和“生态风险”

图 6 不同 α 水平的准则聚集结果Fig.6 Aggregation results of criteria at different α levels

内容的八条准则。生态安全格局不仅涉及土壤、水、生物、大气等生态环境要素,而且关联人口、收入、城镇化、基础设施等社会经济因素^[7]。因此,决策者今后应采用更为广泛的参与式方法^[37],与企事业单位、科研院所和社区代表等多利益相关方共同协商,在进一步细化生态安全格局内涵的基础上,确定更为详细的评估指标体系,为新区建设和保护提供充足技术支撑。

本研究按不同情景(α),提供了一整套连续的决策集(图 6),能够灵活满足各种条件下的保护和开发需求。显然,“完全开发”决策($\alpha=1$)并不可取,不仅无法构建稳定的生态安全格局,而且资金预算也不允许;同时,“完全保护”决策($\alpha=0$)则难以实现新区建设目标。实际上, α 从 0 到 1 的决策变化,反映出开发优先性的持续上升,是以有关生态系统服务损失和生态风险升高为代价换取的。因此,决策者应根据实际情况,科学平衡保护与开发需求,确定最优建设方案。

水质净化服务,以及到启动和起步区距离的准则权重值较高,占总权重的 71.9%,对生态安全格局具有重要影响。一方面,尽管白洋淀目前面临:水体污染、湿地退化、水资源超载等一系列问题^[1],但它依然承担着产水、水质净化和提供生境等关键生态系统服务供给(图 5);另一方面,新区启动和起步区建设产生的生态风险,其影响远超各自的建设范围(图 5),二者产生的高风险区(>0.5)分别占新区面积的 49.7%和 69.8%,将对本地生态安全产生广泛影响。因此,在新区建设中,要特别注意对白洋淀的保护,并科学规划启动和起步区建设,以构建高效、稳定的生态安全格局。

为了提供更为精准的规划方案,本研究选取 $\alpha=0.3$ 、0.5 和 0.7 时的准则聚集结果,以 $WOWA=0.33$ 和 0.66 为断点值,划分出:优先、适度和限制开发三类区域,如图 7 所示:

无论哪一个情景,启动和起步区均表现为适宜或优先开发,这也从另一个角度说明相关准则对于决策结

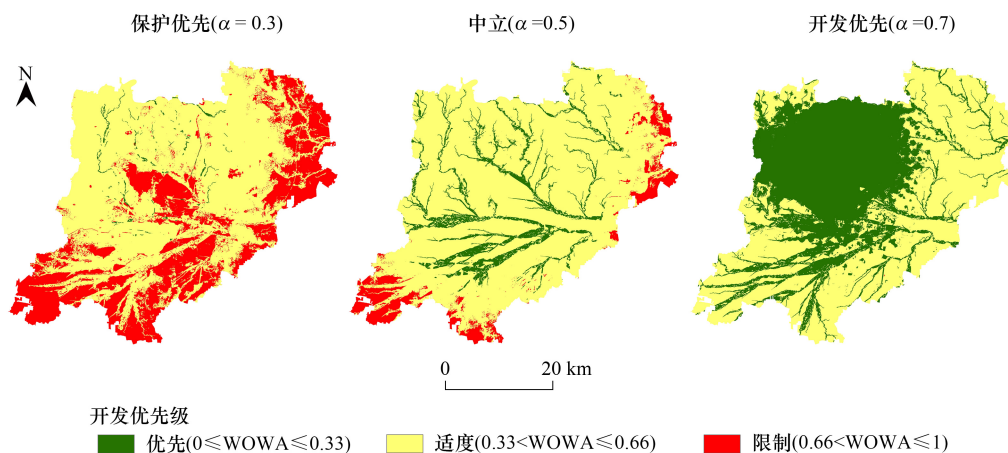


图7 不同情景下的开发优先区空间分布

Fig.7 Spatial distributions of development priority areas in different scenarios

WOA: 加权 Weighted OWA

果具有较大影响。 $\alpha=0.3$ 时,体现了一种“保护优先”的规划思路,限制开发区占新区面积的32.2%,其中白洋淀又占限制开发区的19.9%,这不仅进一步印证了白洋淀的生态重要性,更与国家加强白洋淀治理和保护的精神相吻合。而当位于“中立”($\alpha=0.5$)和“开发优先”情景时($\alpha=0.7$) (图7),限制开发区则大幅下降为7.2%和0.0%。显然,过度开发会对新区生态安全格局产生不利影响。因此,具体的新区开发规划应基于“绿色生态宜居新城区”的建设目标,在“保护优先”区间内($\alpha \in (0, 0.5)$),结合重要保护区域(如:白洋淀)、现有保护规划(如:生态保护红线)和资金预算等共同确定,并审慎实施。

4 结论

本研究在量化生态系统服务和生态风险的基础上,采用层次分析(AHP)和有序加权平均(OWA)相结合的空间多准则评估方法,探讨了雄安新区生态安全格局模拟问题,形成如下结论:(1)由于生态安全格局涉及众多专业领域,因此决策过程应采用参与式方法,在细化格局内涵的基础上,建立包含生态环境和社会经济因素在内的综合指标体系,奠定格局构建的决策基础;(2)OWA沿不同决策风险水平($\alpha \in [0, 1]$),提供了一整套“完全保护—中立—完全开发”的空间决策集,定量揭示“保护—开发”权衡关系,为新区建设提供充足决策支持;(3)白洋淀保护地、启动和起步区建设,会对新区生态安全格局产生重要影响,所以应对白洋淀进行重点保护,并科学规划启动和起步区建设;(4)在“绿色生态宜居新城区”目标指引下,今后新区建设方案应以“保护优先”为基本原则,结合重要区域、现有规划和资金预算等要素共同确定,实现保护与开发的“双赢”。

参考文献(References):

- [1] 卢慧婷, 严岩, 赵春黎, 吴钢. 雄安新区多尺度生态安全格局构建框架. 生态学报, 2020, 40(20): 7105-7112.
- [2] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 林乃峰, 徐梦佳. 生态安全格局研究的主要内容与进展. 生态学报, 2018, 38(10): 3382-3392.
- [3] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 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.
- [4] 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. 生态学报, 1997, 17(5): 453-461.
- [5] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] 欧定华, 夏建国, 张莉, 赵智. 区域生态安全格局规划研究进展及规划技术流程探讨. 生态环境学报, 2015, 24(1): 163-173.
- [7] 王如松, 欧阳志云. 对我国生态安全的若干科学思考. 中国科学院院刊, 2007, 22(3): 223-229.
- [8] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. Ecology Letters, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [9] 施晓清, 欧阳志云. 城市生态安全及其动态评价方法. 生态学报, 2005, 25(12): 3237-3243.

- [10] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: a Framework for Assessment. Washington: Island Press, 2003.
- [11] 徐德琳, 邹长新, 徐梦佳, 游广永, 吴丹. 基于生态保护红线的生态安全格局构建. 生物多样性, 2015, 23(6): 740-746.
- [12] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6.
- [13] Kiker G A, Bridges T S, Varghese A, Seager T P, Linkov I. Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. Integrated Environmental Assessment and Management, 2005, 1(2): 95-108.
- [14] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18-27.
- [15] 百度百科. 雄安新区. (2020-07-01) [2020-09-10]. <https://baike.baidu.com/item/雄安新区/20594936?fr=aladdin>.
- [16] 杨萌, 廖振珍, 石龙宇. 雄安新区多尺度生态基础设施规划. 生态学报, 2020, 40(20): 7123-7131.
- [17] 冯运双, 石龙宇. 雄安新区生态系统服务需求空间分布格局预测. 生态学报, 2020, 40(20): 7187-7196.
- [18] 国家统计局农村社会经济调查司. 2019 中国县域统计年鉴(县市、乡镇卷). 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [19] 国土资源部. GB/T 21010—2017 土地利用现状分类. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [20] Breiman L. Random forests. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [21] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [22] Yager R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1988, 18(1): 183-190.
- [23] Jiang H, Eastman J R. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. International Journal of Geographical Information Science, 2000, 14(2): 173-184.
- [24] 刘焱序, 彭建, 韩忆楠, 魏海, 杜悦悦. 基于 OWA 的低丘缓坡建设开发适宜性评价——以云南大理白族自治州为例. 生态学报, 2014, 34(12): 3188-3197.
- [25] Malczewski J, Chapman T, Flegel C, Walters D, Shrubsole D, Healy M A. GIS-multicriteria evaluation with ordered weighted averaging (OWA): Case study of developing watershed management strategies. Environment and Planning A: Economy and Space, 2003, 35(10): 1769-1784.
- [26] 张正昱, 金贵, 郭柏枢, 董寅, 陈坤. 基于多准则决策的长江经济带国土空间脆弱性与恢复力研究. 自然资源学报, 2020, 35(1): 95-105.
- [27] Li H, Ma Z C, Zhu Y J, Liu Y S, Yang X H. Planning and prioritizing forest landscape restoration within megacities using the ordered weighted averaging operator. Ecological Indicators, 2020, 116: 106499.
- [28] Vettorazzi C A, Valente R A. Priority areas for forest restoration aiming at the conservation of water resources. Ecological Engineering, 2016, 94: 255-267.
- [29] Hoyer R, Chang H. Assessment of freshwater ecosystem services in the Tualatin and Yamhill Basins under climate change and urbanization. Applied Geography, 2014, 53: 402-416.
- [30] Droogers P, Allen R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrigation and Drainage Systems, 2002, 16(1): 33-45.
- [31] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [32] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2005.
- [33] 吴楠, 苏德毕力格, 高吉喜, Ennaanay D, Mendoza G F, 罗遵兰, 李岱青, 田美荣. 生态系统减轻水环境磷素非点源污染服务及价值——以雅砻江二滩水库为例. 生态学报, 2010, 30(7): 1734-1743.
- [34] Kareiva P, Tallis H, Ricketts T H, Daily G C, Polasky S. Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services. New York: Oxford University Press, 2011.
- [35] Bondarenko M, Kerr D, Sorichetta A, Tatem A J. Census/Projection-Disaggregated Gridded Population Datasets for 189 Countries in 2020 Using Built-Settlement Growth Model (BSGM) Outputs. Southampton: WorldPop, University of Southampton, 2020.
- [36] Voogd H. Multi-criteria Evaluation for Urban and Regional Planning. London: Pion, 1983.
- [37] IUCN, WRI. A Guide to the Restoration Opportunities Assessment Methodology (ROAM): Assessing Forest Landscape Restoration Opportunities at the National or Sub-National Level. Gland, Switzerland: IUCN, 2014.