

DOI: 10.12357/cjea.20230622

徐文婷, 谢宗强, 葛结林, 徐凯, 熊高明, 毛江涛. 基于 DPSIR 模型的乡村生态景观生物多样性预警[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(12): 1943-1952

XU W T, XIE Z Q, GE J L, XU K, XIONG G M, MAO J T. Biodiversity early warning of rural ecological landscape based on DPSIR model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(12): 1943-1952

## 基于 DPSIR 模型的乡村生态景观生物多样性预警\*

徐文婷<sup>1</sup>, 谢宗强<sup>1,2\*\*</sup>, 葛结林<sup>1</sup>, 徐凯<sup>1</sup>, 熊高明<sup>1</sup>, 毛江涛<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室 北京 100093; 2. 中国科学院大学 北京 101408)

**摘要:** 针对乡村振兴中生物多样性面临的潜在威胁和保护管理需求, 本研究将生物多样性的理论、方法与社会、经济、人口等有机结合, 基于 DPSIR (驱动力-压力-状态-影响-响应) 模型构建了乡村生态景观生物多样性预警指标体系。依据科学性、相关性、实用性和可比性等原则, 该指标体系针对影响生物多样性的驱动力、压力、状态、影响和响应 5 个方面的 12 个因素 25 个指标, 反映人类干扰以及全球变化、重大灾害等多种因素对乡村生物多样性产生的影响, 以及人类为维护乡村生态景观生物多样性而采取的措施和投入。采用均方差方法确定各指标的权重值, 划定评价等级, 运用综合指数法对乡村生态景观的生物多样性进行预警。该研究为绿色宜居乡村振兴及规划建设中的生物多样性保护和评价提供了新的思路和方法, 对构建绿色和谐的美丽乡村具有重要意义。

**关键词:** 乡村景观; 生物多样性预警; DPSIR 模型; 指标体系

**中图分类号:** Q948

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Biodiversity early warning of rural ecological landscape based on DPSIR model\*

XU Wenting<sup>1</sup>, XIE Zongqiang<sup>1,2\*\*</sup>, GE Jielin<sup>1</sup>, XU Kai<sup>1</sup>, XIONG Gaoming<sup>1</sup>, MAO Jiangtao<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

**Abstract:** In view of the potential threats to biodiversity in the process of rural revitalization and the needs of conservation and management, this study organically combined the theories and methods of biodiversity with society, economy, population, etc., and built the early warning index system of biodiversity in rural ecological landscape based on the DPSIR (Driving Force-Pressure-State-Impact-Response) model. Based on the principles of scientificity, relevance, practicality and comparability, the index system reflects the impact of human interference, global change, major disasters, measures and inputs taken by human to maintain the biodiversity of rural ecological landscape, and other factors on rural biodiversity, including 12 factors and 25 indicators of the driving force, pressure, state, impact and response of biodiversity. The mean square deviation method was used to determine the weight value of each index, divide the evaluation level. And the comprehensive index method was used to warn the biodiversity of the rural ecological landscape. The rural biodiversity in this study comprehensively considered the "Ecology, Production, Living" functions of the countryside. Therefore, the species of wild animals and plants, crop species, and rural green plants were all included in the calculation of the biodiversity index. This research method has been applied in the Paifang Community of Nanjing to give early warning to the high risk area. This study provides a new idea and method for biodiversity protection and evaluation in the revitalization and planning of green livable countryside, and it is of great significance to build a beautiful countryside with green harmony.

\* 国家重点研发计划项目(2019YFD1100403)资助

\*\* 通信作者: 谢宗强, 主要研究方向为保护与恢复生态学。E-mail: xie@ibcas.ac.cn

徐文婷, 主要研究方向为生态遥感。E-mail: xuwt@ibcas.ac.cn

收稿日期: 2023-10-26 接受日期: 2023-12-04

\* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2019YFD1100403).

\*\* Corresponding author, E-mail: xie@ibcas.ac.cn

Received Oct. 26, 2023; accepted Dec. 4, 2023

<http://www.ecoagri.ac.cn>

**Keywords:** Rural landscape; Early warning of biodiversity; DPSIR model; Indicator system

乡村是负载人类文明起源、自然资源禀赋以及“地缘-血缘”关系的乡土社会地域综合体。乡村生态景观是以区域自然景观和土地利用格局为背景,以乡村聚落景观为核心,包含自然景观、生产景观和聚落景观<sup>[1]</sup>。乡村生物多样性作为乡村生态景观的关键组成要素,发挥着产品供给、环境调节、文化教育等重要生态服务功能<sup>[2]</sup>,强调人类与土地相互作用下的生物-景观-文化的聚合,与人类生产、生活和生态功能息息相关<sup>[3]</sup>。

生物多样性直接关系到生态及社会系统的稳定和可持续<sup>[4]</sup>,其保护和研究重点多集中在自然区域,忽视了乡村生物多样性的重要性<sup>[5]</sup>。农业土地利用强度是导致栖息地损失和生物多样性降低的主要原因<sup>[6-7]</sup>,农药、化肥的使用导致了野生植物、瓢虫和鸟类物种多样性衰退<sup>[8-9]</sup>,乡村景观建设导致栖息地丧失,进而引发生物多样性下降<sup>[10-11]</sup>。2022年联合国《生物多样性公约》第15次缔约方大会(COP15)通过的《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》强调了乡村生物多样性在提供生态系统服务方面的重要作用,明确了乡村生物多样性保护的重要意义和实施目标<sup>[12]</sup>。随着我国乡村振兴规划建设的推进,乡村的生产技术不断提高、基础设施日益完善、空间环境格局不断变化,对乡村生物多样性产生重要影响<sup>[13]</sup>。中国传统乡村地区生物多样性正面临着农业集约化、人工林树种单一化、非农业用地急剧扩张及生态传承机制解体等多种威胁,这也进一步导致乡村的生态空间受到了生产空间和生活空间的严重挤压和蚕食。目前,虽然许多研究表明了土地利用和景观建设会降低乡村的生物多样性,但维持乡村生物多样性安全的界限尚不清楚<sup>[14]</sup>。

生物多样性预警是对生物多样性安全的提前预判和险情预报,对区域内经济、社会、生态环境协调发展的研究具有重要意义<sup>[14]</sup>。Reyers等<sup>[15]</sup>提出了国家生物多样性风险评估(NABRAI)模型并对62个国家的生物多样性风险进行了评估;Tevie等<sup>[16]</sup>建立了适用于洲际水平的生物多样性评价指标;于谨凯等<sup>[17]</sup>基于DPSIR(驱动力-压力-状态-影响-响应)模型对黄海近海海域生物多样性预警研究;丁晖等<sup>[18]</sup>基于PSR(压力-状态-响应)模型建立了生物多样性风险指标体系和方法,并对全国县域的生物多样性风险进行了评估;刘欢<sup>[19]</sup>综合压力-状态-响应模型和

资源-环境-社会-经济模型,使用人工神经网络的时间序列预测方法,对辽河水生生物多样性进行了预警研究;周晨<sup>[20]</sup>通过建立水质指标与生物多样性之间的关系,依据生态系统风险综合指数方法,对贵州喀斯特高原湿地草海湖泊生物多样性风险状态进行了预警。总体而言,目前对生物多样性预警的研究尚未深入,尤其是对生物多样性的预警方法、界线及模型的研究及对乡村生物多样性预警的研究更为缺乏,故在我国的《中国生物多样性保护战略与行动计划》(2011—2030年)中明确了要建立中国生物多样性监测和预警体系<sup>[14]</sup>。

为了有效维护和管理乡村生物多样性,本研究围绕乡村生物多样性的现状、驱动和影响等因素,构建乡村生物多样性预警指标体系,划定预警等级,并在江苏省南京市牌坊社区进行了应用,以期探讨乡村生物多样性预警的边界和方法,为乡村生物多样性安全管理提供新的方法思路。

## 1 乡村生态景观生物多样性预警评价指标体系构建

### 1.1 DPSIR 模型框架

DPSIR模型是欧洲环境署在综合PSR和DSR(驱动力-状态-响应)模型优点的基础上发展起来的在环境领域中广泛使用的概念模型,它强调人类经济活动、政策、管理及其对生物多样性的影响等各要素之间的联系,具有综合性、系统性、整体性、灵活性等特点<sup>[17]</sup>。

乡村生态景观生物多样性内涵广泛,涉及自然、社会、人口、经济等多个方面。以DPSIR(驱动力-压力-状态-影响-响应)模型将人类活动和生物多样性变化有机地结合起来,可以为生物多样性保护管理和政策制定提供决策信息<sup>[21]</sup>;它从驱动力(D)、压力(P)、状态(S)、影响(I)和响应(R)5个层面,每个层面又包含多个因素和指标,构建表征乡村生态景观生物多样性的综合评价指标体系<sup>[22]</sup>。

根据该框架,人口增长和社会经济是间接驱动力,会引起全球或区域环境变化(例如土地利用变化、气候变化、环境污染等),直接对生物多样性造成压力或威胁,引起生物多样性丧失和生态系统服务功能降低,并影响人类福祉和应对环境变化能力的改变,人类社会则会采用政策或措施减缓生物多样性丧失及其对人类福祉的影响<sup>[21]</sup>(图1)。

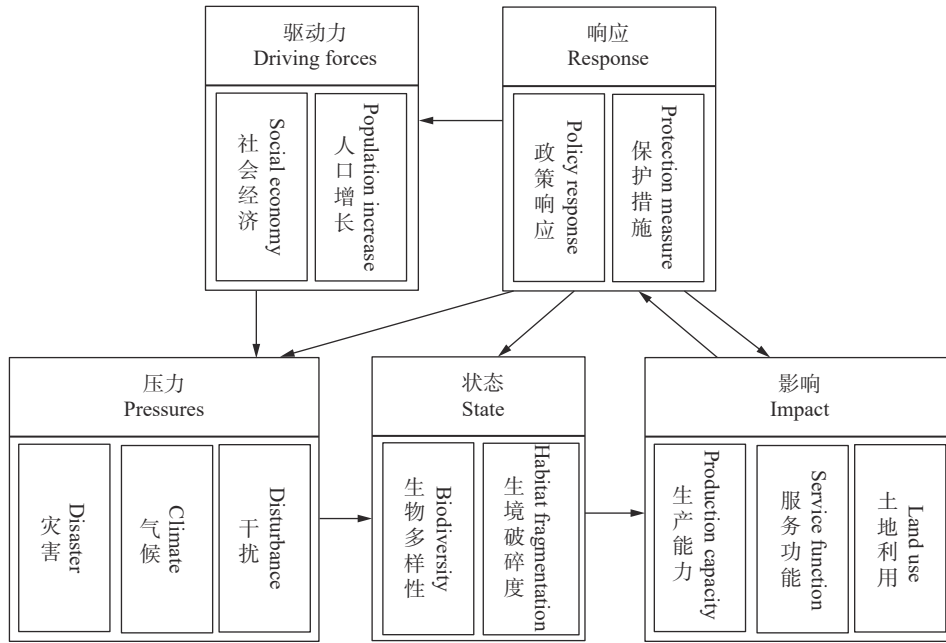


图 1 乡村生态景观生物多样性预警 DPSIR(驱动力-压力-状态-影响-响应) 模型

Fig. 1 DPSIR (Driving Force-Pressure-State-Impact-Response) model for early warning of biodiversity in rural ecological landscape

### 1.2 乡村生态景观生物多样性预警指标体系构建原则

乡村生态景观生物多样性预警指标体系构建需遵循科学性、相关性、实用性、可比性原则。科学性指应坚持严谨、科学、合理的科学态度,采用科学的技术方法,突出不同乡村景观的共性及其特性,针对生物多样性安全主要问题开展评估及预警,指导实践。相关性指预警指标应能够明确表明乡村生态景观的生物多样性状况,在难以选定表明状况指标的情况下,可以选取与之具有相关性的驱动力/压力和响应指标<sup>[23]</sup>。实用性指预警指标选取应具有广泛的认可程度,或政策决策部门广泛使用的指标,且应综合考虑指标获取的难易程度。可比性指预警指标选用应尽可能明确时间、度量单位和空间范围,以便于长时间序列和不同空间区域的比较分析。

### 1.3 指标体系

乡村生态景观生物多样性预警指标体系分为 4 个层次。第 1 层为目标层,即乡村生态景观生物多样性预警指标体系。

第 2 层是项目层,包括驱动力、压力、状态、影响和响应 5 个方面<sup>[17]</sup>。驱动力是指造成乡村生态景观生物多样性变化的潜在原因,是推动乡村生态景观生物多样性压力增加或减少的社会经济、社会活动或社会文化因素,是影响乡村生态景观生物多样性状态的源动力。压力是指人类及经济活动对生物多样性带来的影响,是乡村生态景观生物多样性的

直接作用因子<sup>[22]</sup>。状态是指乡村生态景观生物多样性在前述的驱动力和压力的作用下所产生的结果。状态指标包括区域生物多样性指数和生境破碎化指数。影响是指乡村生态景观生物多样性所处的状态对人类健康和社会经济结构所能产生的后果,反映状态变化的最终结果,其与状态的区别在于状态更体现静态的水平,而影响则更多体现一种动态的变化,具有正负面之分<sup>[24]</sup>。响应是指人类在保护乡村生态景观生物多样性可持续发展进程中所采取的对策和制定的积极政策。

第 3 层是因素层,将驱动力、压力、状态、影响和响应进一步细分为 12 个因素,分别是社会经济、人口增长、灾害、气候、干扰、生物多样性、生境破碎度、生产能力、服务功能、土地利用、政策响应和保护措施等。

第 4 层是指标层,由 25 个可直接度量的指标构成。生物多样性的主要影响因素是人类活动、气候变化、城市化、土地利用改变、资源利用、污染和外来生物入侵等<sup>[25-26]</sup>,综合乡村以人居聚落和人与环境、土地长期相互作用的综合体的特点,本研究驱动力指标包括人均 GDP、恩格尔系数、人口密度、人口增长率和人均耕地面积;压力指标包括病虫害发生率、自然灾害发生率、干燥度、极端天气发生率、放养强度、外来入侵物种种数、外来物种入侵强度、公路密度、农药施用强度;状态指标包括区域生物多样性指数和生境破碎化指数;影响指标包

括森林蓄积量、农作物产量、水源涵养量、植被覆盖度和高干扰土地覆盖率;响应指标由生物多样性保护规划与实施力度、生物多样性保护资金投入、自然保护地覆盖率、公益林覆盖率 4 个指标构成。

指标根据其对乡村生态景观生物多样性的影响

情况可分为正向指标和逆向指标;正向指标是指数值越大对乡村生态景观生物多样性越有利的指标,逆向指标是指数值越大对乡村生态景观生物多样性越不利的指标。乡村生态景观生物多样性预警评价体系中,每个指标的含义、计算及数据来源如表 1 所示。

表 1 乡村生态景观生物多样性预警指标及含义  
Table 1 Early-warning indexes and meanings of biodiversity in rural ecological landscape

目标层 Target layer	项目层 Project layer	因素层 Factor layer	指标层 Index layer	含义 Meaning	性质 Property
乡村生态景观生物多样性预警 Rural ecological landscape biodiversity early warning	驱动力 Driving forces	社会经济 Social economy	人均GDP Per capita GDP (¥·cap. <sup>-1</sup> )	一定时期内GDP总量/总人口,表征经济发展情况的驱动 Total GDP/total population, representing the driver of economic development	正 Positive
			恩格尔系数 Engel coefficient (%)	居民家庭食品消费支出/生活消费支出,表征经济富裕程度的驱动 Household food consumption expenditure/living consumption expenditure, representing the driver of economic affluence	正 Positive
		人口增长 Population increase	人口密度 Population density (persons·hm <sup>-2</sup> )	单位面积居住的人口数,表征人口疏密程度的驱动 Number of people living per unit area, representing the driver of population density	负 Negative
			人口增长率 Population growth rate (%)	出生率减死亡率,表征人口自然增长程度的驱动 Difference between birth rate and death rate, representing the driver of natural population growth degree	负 Negative
	压力 Pressures	灾害 Disaster	人均耕地面积 Per capita cultivated area (hm <sup>2</sup> cap. <sup>-1</sup> )	耕地面积/总人口,表征社会活动的驱动 Cultivated land area/total population, representing the driver of social activity	负 Negative
			病虫害发生率 Pest and disease rate (%)	发生病虫害的面积/总面积,表征病虫害对生物多样性安全的压力 Areas of pests and diseases/total area, representing the pressure of pests and diseases on the security of biodiversity	负 Negative
			自然灾害发生率 Incidence of natural disaster	一定时期内水文、地质、气候等发生灾害的次数,表征自然灾害对生物多样性安全的压力 Number of hydrological, geological and climatic disasters occurring in a certain period, representing the pressure of natural disasters on the security of biodiversity	负 Negative
			气候 Climate	干燥度 Aridity (%)	蒸发量/降水量,表征水资源短缺对生物多样性安全的压力 Evaporation/precipitation, representing the pressure of water scarcity on the security of biodiversity
		干扰 Disturbance	极端天气发生率 Extreme weather phenomenon (%)	极端高温、暴雨、沙尘暴、灾害性台风发生的天数占全年天数的比例,表征极端天气现象对生物多样性安全的压力 Proportion of days of extreme high temperature, heavy rain, sandstorm and disastrous typhoon in the whole year, representing the pressure of extreme weather events on the security of biodiversity	负 Negative
			放养强度 Grazing degree (heads·m <sup>-2</sup> )	放养家畜头数/区域总面积,表征人类活动对生物多样性安全的压力 Number of livestock kept/total area, representing the pressure of human activities on the security of biodiversity	负 Negative
			外来入侵物种种数 Number of invasive alien species	外来入侵物种的种数,表征影响生物多样性的生物因素 Number of invasive alien species, representing the biological factors affecting biodiversity	负 Negative
			外来物种入侵强度 Invasion intensity of alien species (%)	外来入侵物种入侵面积/区域总面积,表征影响生物多样性的生物因素 Total invasion area of alien species/total area, representing the biological factors affecting biodiversity	负 Negative
			道路密度 Highway density (km·km <sup>-2</sup> )	单位面积公路长度,表征人类活动对生物多样性安全的压力 Highway length per unit area, representing the pressure of human activities on the security of biodiversity	负 Negative
			农药施用强度 Pesticide application intensity (kg·hm <sup>-2</sup> )	一定时期内单位面积农药施用量,表征农业生产对生物多样性安全的干扰强度 Pesticide application amount per unit area in a certain period, representing the interference intensity of agricultural production to biodiversity security	负 Negative

续表 1

目标层 Target layer	项目层 Project layer	因素层 Factor layer	指标层 Index layer	含义 Meaning	性质 Property
乡村生态景观生物多样性预警 Rural ecological landscape biodiversity early warning	状态 State	生物多样性 Biodiversity	区域生物多样性指数 Regional biodiversity index	表征基因、物种和生态系统多样性的状态的综合指数, 公式(1) A composite index of the state of genetic, species and ecosystem diversity, formula (1)	正 Positive
			生境破碎度 Habitat fragmentation	生境破碎化指数 Habitat fragmentation index	表征生境的连续性, 破碎化指数 = $\frac{\sum_{i=1}^n \text{景观}i\text{的斑块数}}{n}$ Representing habitat continuity Habitat fragmentation index = $\frac{\sum_{i=1}^n \text{number of patches of landscape } i}{\text{total area of landscape } i}$
	影响 Impact	生产能力 Production capacity	森林蓄积量 Forest stock (m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	表征森林生态系统的生产能力, 活立木的材积总量/森林面积, 一般由林业调查数据得到 Total volume of living trees/forest area, representing the productive capacity of the forest ecosystem, generally obtained from forest data	正 Positive
			农作物产量 Crop yield (kg·hm <sup>-2</sup> )	一定时期(通常是一年)内收获农产品总量/农作物播种面积, 表征农田生态系统的生产能力, 由农业统计数据或调查得到 Total amount of agricultural produce harvested/planted area in a given period (usually one year), a measure of the productive capacity of the farmland ecosystem, obtained from agricultural statistics or surveys	正 Positive
			水源涵养量 Water conservation capacity	表征生态系统的服务能力, 采用环境保护部2017年发布的《生态保护红线划定指南》计算 <sup>[27]</sup> Representing the service capability of ecosystem, and calculated by using the method of <i>Guideline for Delineating Ecological Protection Red Lines</i> issued by the Ministry of Environmental Protection in 2017 <sup>[27]</sup>	正 Positive
		服务功能 Service function	植被覆盖度 Vegetation coverage (%)	表征生态系统功能的服务能力 Representing the service capacity of ecosystem	正 Positive
			土地利用 Land utilization	高干扰土地覆盖率 Coverage of highly-disturbed land (%) 耕地、退化草地、人工林、工矿用地、居民地等面积所占的比例 Proportion of cultivated land, degraded grassland, plantation forest, industrial and mining land, residential land, etc	负 Negative
			政策响应 Policy response	生物多样性保护规划与实施力度 Biodiversity conservation planning and implementation (%)	接受政策法规人数/总人数, 表征生物多样性保护政策的有效性 Number of people accepting policies and regulations/total number of people, representing the effectiveness of biodiversity conservation policies
	响应 Responses	生物多样性保护资金投入 Funding for biodiversity conservation (%)	生物多样性保护投资/GDP, 表征生物多样性保护投入资金的充足性 Investment in biodiversity conservation/GDP, representing the adequacy of investment in biodiversity conservation	正 Positive	
			保护措施 Protection measure	自然保护地覆盖率 Coverage rate of protected natural areas (%)	自然保护地面积/研究区域面积, 表征保护强度对生物多样性的响应 Area of nature reserve/total area, representing the response of conservation intensity to biodiversity
			公益林覆盖率 Coverage rate of non-commercial forest (%)	公益林面积/研究区域面积, 表征保护有效性对生物多样性的响应 Public welfare forest area/total area, representing the response of conservation effectiveness to biodiversity	正 Positive

1.4 区域生物多样性指数 (RBI)

区域生物多样性指数为表征基因、物种和生态系统多样性状态的综合指数, 无量纲, 在区域生物多样性

性评价标准<sup>[28]</sup>的基础上, 充分考虑了作为乡村生物多样性主体的农业和绿化物种多样性, 因此将农作物、乡村绿化树种的丰富度纳入计算公式, 计算方法如下:

$$RBI = 0.2 \times \frac{\text{野生动物丰富度} \times 100}{635} + 0.2 \times \frac{\text{野生维管束植物丰富度} \times 100}{3662} + 0.2 \times \frac{\text{生态系统类型多样性} \times 100}{124} + 0.2 \times \frac{\text{农作物物种丰富度} \times 100}{38} + 0.2 \times \frac{\text{绿化物种丰富度} \times 100}{112} + 0.1 \times 100 \times \left( 1 - \frac{\text{外来物种入侵度}}{0.1441} \right) \quad (1)$$

$$\text{外来物种入侵度} = \frac{\text{乡村内外外来入侵物种数}}{\text{乡村内野生动物种数} + \text{乡村内野生维管束植物种数}} \quad (2)$$

## 2 乡村生态景观生物多样性预警评价方法

### 2.1 数据标准化处理

采用极差法对各指标作无量纲化处理,对乡村生态景观生物多样性起正向作用的指标,如森林蓄积量、人均 GDP 等,用公式 (3) 进行归一化处理;对乡村生态景观起负向作用的指标,如人口增长率、病虫害发生率等,用公式 (4) 进行归一化处理。

$$X_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

$$X_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

式中:  $x_{\max}$  为第  $i$  个指标中的最大值,  $x_{\min}$  为第  $i$  个指标中的最小值。

### 2.2 指标权重确定

均方差是反映随机变量离散程度的最重要和最常用的指标,采用均方差权重法对各评价指标赋权重 ( $w_i$ )。计算步骤及公式如下:

$$\text{求各指标的均值: } \bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{i,j} \quad (5)$$

$$\text{求各指标的均方差: } \sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X_{i,j} - \bar{X}_i)^2} \quad (6)$$

$$\text{求各指标的权重系数: } w_i = \frac{\sigma_i}{\sum_{i=1}^m \sigma_i} \quad (7)$$

### 2.3 综合预警指数

采用综合指数法对乡村生态景观生物多样性进行预警,乡村生态景观生物多样性综合预警指数 (BWI) 是各个评价指标的加权求和。

$$BWI = \sum_{i=1}^m (w_i \times X_i) \quad (8)$$

### 2.4 预警分级

警度区间的确定是乡村生态景观生物多样性预警的重要环节和难点,由于生物多样性预警的研究相对较少,本文参考和借鉴国内外生态安全预警领域研究的方法。目前在资源、生态领域的预警级别划分有历史数据法、德尔菲法、文献参考法、标杆基准法、自然断点法、层次分析法、突变论方法和功效系数法等<sup>[29]</sup>。乡村由于其类型和所处地域环境、聚居人口生活习惯等各不相同,具有复杂性,预警级别的划分很难给出绝对具体的数值区间,因此,本文采用自然分断法确定阈值和警度区间,具体划分阈值及安全状态见表 2。相应部门可根据预警等级建立分层决策机制,分别从居民、社区、村、乡镇、行业部门 5 个层次,对乡村生态系统变化、物种灭绝风险、人类干扰等重大信息,开展生物多样性维护示范与应对措施。

表 2 乡村生态景观生物多样性预警分级及其表征

Table 2 Classification and characterization of early-warning for biodiversity in rural ecological landscape

序号 Order	综合预警指数 Comprehensive warning index	预警等级 Early-warning lever	等级含义 Early-warning description	指示灯 Lamp
I	0~0.2	重度 Severe	物种匮乏,生态系统类型单一、脆弱,生境受到严重干扰,生物多样性受到严重威胁 Species is scarce, ecosystem types are single and fragile, habitat is seriously disturbed, and biodiversity is seriously threatened	红色 Red
II	0.2~0.4	中度 Moderate	物种较少,生态系统类型稳定性低,生境受到干扰,生物多样性受到较重威胁 Species is fewer, ecosystem types are with low stability, habitat is low disturbed, and biodiversity is threatened	橙色 Orange
III	0.4~0.6	轻度 Slight	物种较丰富,生态系统类型相对稳定,生境受到一定干扰,生物多样性受威胁较小 Species is abundant, ecosystem types is relatively stable, habitat is disturbed to some extent, and biodiversity is less threatened	黄色 Yellow
IV	0.6~1.0	无 No	物种丰富,生态系统类型稳定,生境未受到或较少受到干扰或破坏,生物多样性未受到威胁 Species is abundant, ecosystem types are stable, habitats are not or less disturbed or damaged, and biodiversity is not threatened	绿色 Green

## 3 应用案例

### 3.1 研究区概况

牌坊社区位于江苏省南京市江宁区江宁街道东

南部,占地面积 8.2 km<sup>2</sup>,总人口 2154 人<sup>[30]</sup>,研究区土地利用类型见图 2。域内为典型的丘陵山区,多年年平均气温 16.66 °C,年平均降水量 1030 mm,平均风

速  $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 属典型的北亚热带季风湿润气候<sup>[31]</sup>。牌坊社区为典型的丘陵山区, 山水资源丰富, 形成“山—水—茶—林—村”村落格局。乡村景观资源类型多样, 生物多样性丰富, 拥有维管植物 397 种, 其中野生植物 250 种, 农业栽培植物 65 种, 构成了 63 个

自然植被群系、58 个农业植被组合和 64 个绿地植被配置。环境优美, 人文景观与自然景观融合度较高, 获得“中国最美休闲乡村”“中国乡村旅游模范村”称号, 具有较高的乡村生物多样性研究的价值与借鉴意义。

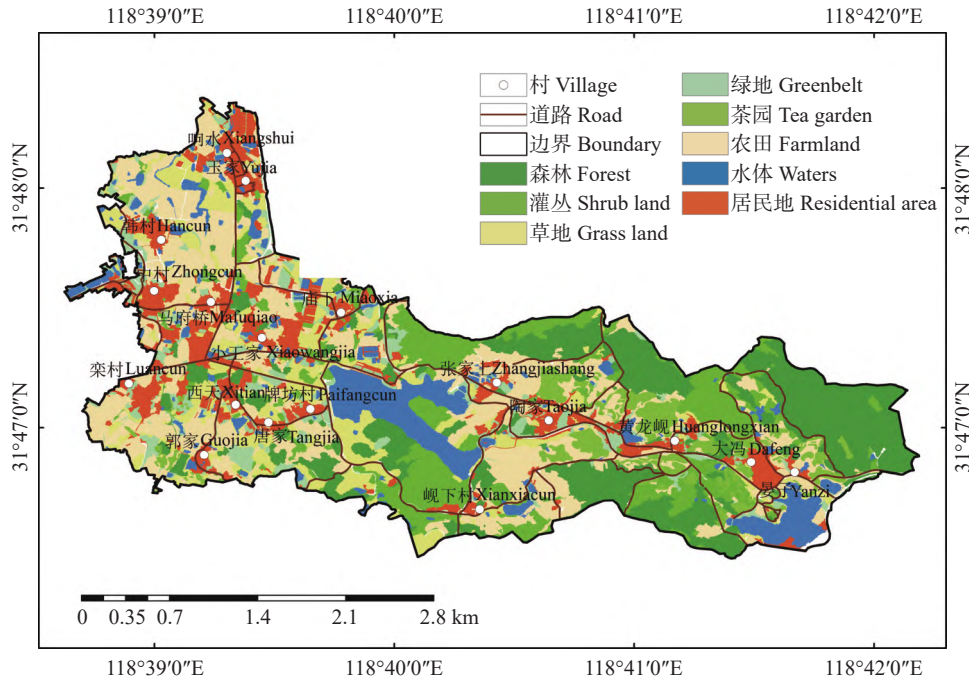


图 2 研究区土地利用类型  
Fig. 2 Land use types of the study area

3.2 数据来源

以牌坊社区为研究区域, 以  $1 \text{ km}\times 1 \text{ km}$  网格为评价单元, 数据主要来源于野外调查、遥感图像解译和统计年鉴。

经过分析数据, 对牌坊社区生物多样性预警起作用的指标为人口密度、外来入侵物种种数、外来物种入侵强度、道路密度、区域生物多样性指数、生境破碎化指数、森林蓄积量、水源涵养量和植被覆盖度, 各指标权重见表 3。

3.3 生物多样性预警格局及分析

牌坊社区乡村生态景观生物多样性安全状态较为严峻 (图 3), 总体趋势表现为西部为中度预警, 中

部为轻度预警, 东部生物多样性状况较好, 为无预警。西部中度预警区域主要为生产空间和生活空间, 建筑用地、农业用地和绿地面积占 56% 以上; 中部和东部的生产空间和生活空间面积比分别为 36% 和 41% (图 4a, 4b)。牌坊社区生物多样性的主要威胁因素来自于外来植物入侵 (图 4c), 共调查到外来入侵植物 21 种, 其中国家环境保护部公布的恶性入侵种有 7 种, 其中小蓬草 (*Conyza canadensis*)、一年蓬 (*Erigeron annuus*)、鬼针草 (*Bidens pilosa*)、加拿大一枝黄花 (*Solidago canadensis*) 等恶性入侵植物已在牌坊社区广泛分布, 对牌坊社区生物多样性产生严重威胁<sup>[32]</sup>。

表 3 研究区生物多样性预警指标权重  
Table 3 Weights of early warning index of biodiversity in Paifang Community

指标 Index	权重 Weight	指标 Index	权重 Weight
人口密度 Population density	0.09	生境破碎化指数 Habitat fragmentation index	0.04
外来入侵物种种数 Number of invasive alien species	0.16	森林蓄积量 Forest stock	0.16
外来物种入侵强度 Invasion intensity of alien species	0.11	水源涵养量 Water conservation capacity	0.10
道路密度 Highway density	0.16	植被覆盖度 Vegetation coverage	0.06
区域生物多样性指数 Regional biodiversity index	0.12		

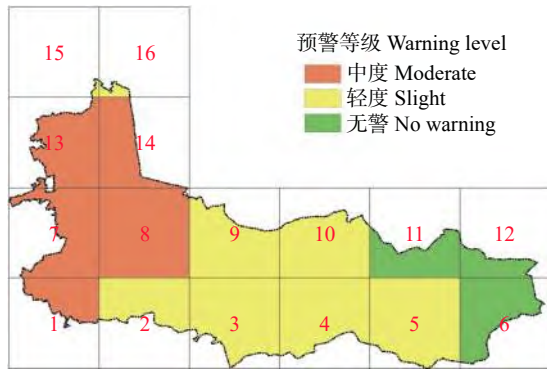


图 3 研究区生物多样性预警格局

Fig. 3 Early-warning pattern of biodiversity in the study area

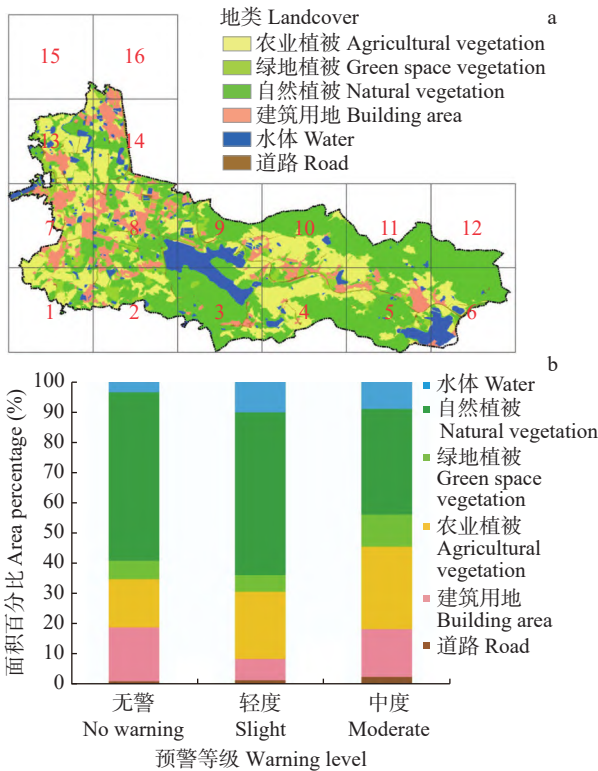


图 4 研究区土地利用/覆盖特征 (a, b) 和外来物种入侵强度 (c)

Fig. 4 Land use/cover types and proportions (a) and invasion intensity of alien species in the study area

### 4 结论

本研究将生物多样性的理论与方法与社会、经

济、人口等进行了有机结合,确立了以 DPSIR 框架模型为基础的乡村生态景观生物多样性预警指标体系,该体系从 5 大类条件出发,包含 12 个一级指标和 25 个二级指标,兼顾科学性、完整性、灵活性和易应用性等特点,可用于指示人类活动、社会经济发展以及全球变化、重大灾害等各因素对乡村生物多样性产生的影响,以及人类为适应或减缓这一影响而采取的一系列积极措施。采用均方差方法确定各指标权重值,划定评价等级,运用综合指数法对乡村生态景观的生物多样性进行预警,该研究结果为乡村振兴中乡村生物多样性保护和乡村规划建设提供了新的方法和思路,具有潜在的实用价值。

目前针对乡村生态景观生物多样性预警的研究尚处于探索和试验阶段,未广泛开展。本文基于乡村作为一种自然-经济-社会文化复合系统的角度,定义了乡村生态景观生物多样性预警的内涵和指标体系,为乡村生态景观生物多样性预警研究提供了一种思路。但指标的合理性和可应用性还需进一步广泛研究和论证,如土地政策变化等定性化指标如何定量,地下生物多样性因受数据获取难度的影响而未被考虑等。评价生物多样性风险高低时,难以采用绝对标准衡量,推荐使用相对标准划分风险<sup>[18]</sup>。

### 参考文献 References

[1] 宇振荣, 郑渝, 张晓彤. 乡村生态景观建设理论和方法 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2011: 150-151  
YU Z R, ZHENG Y, ZHANG X T. The Ecological Restoration and Landscaping of Rural Area Theories and Methods[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011: 150-151

[2] 向羚丰, 袁嘉, 李祖慧, 等. 乡村生物多样性——变化、维持机制及保护策略 [J]. 风景园林, 2023, 30(4): 10-17  
XIANG L F, YUAN J, LI Z H, et al. Rural biodiversity: change, maintenance mechanism and conservation strategy[J]. Landscape Architecture, 2023, 30(4): 10-17

[3] 毛江涛, 徐文婷, 葛结林, 等. 乡村生态景观生物多样性研究热点和趋势——基于文献计量研究 [J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3869-3877  
MAO J T, XU W T, GE J L, et al. Research hotspots and trends of rural ecological landscape biodiversity—based on bibliometric research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3869-3877

[4] BLICHARSKA M, SMITHERS R J, MIKUSIŃSKI G, et al. Biodiversity's contributions to sustainable development[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(12): 1083-1093

[5] ESTRADA-CARMONA N, SÁNCHEZ A C, REMANS R, et al. Complex agricultural landscapes host more biodiversity than simple ones: a global meta-analysis[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2022, 119(38): e2203385119

[6] TILMAN D, FARGIONE J, WOLFF B, et al. Forecasting



- agriculturally driven global environmental change[J]. *Science*, 2001, 292(5515): 281–284
- [7] 丰思捷, 陈宝雄, 刘云慧. 农区土地利用强度变化对生物多样性的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(10): 1271–1280  
FENG S J, CHEN B X, LIU Y H. Effects of land use intensity change on biodiversity in agricultural areas[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(10): 1271–1280
- [8] GEIGER F, BENGTSSON J, BERENDSE F, et al. Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2010, 11(2): 97–105
- [9] GONTHIER D J, ENNIS K K, FARINAS S, et al. Biodiversity conservation in agriculture requires a multi-scale approach[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2014, 281(1791): 20141358
- [10] TYNDALL J, COLLETTI J. Mitigating swine odor with strategically designed shelterbelt systems: a review[J]. *Agroforestry Systems*, 2007, 69(1): 45–65
- [11] 吴灏, 张建锋, 陈光才, 等. 乡村景观建设过程中的生物多样性保护策略 [J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(8): 345–348  
WU H, ZHANG J F, CHEN G C, et al. Strategies for biodiversity protection in rural landscape construction[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42(8): 345–348
- [12] 郑曦. 乡村生物多样性 [J]. *风景园林*, 2023, 30(4): 6–7  
ZHENG X. Rural biodiversity[J]. *Landscape Architecture*, 2023, 30(4): 6–7
- [13] LI X A. Study on protection ways of biodiversity in rural environment construction[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 252: 042020
- [14] 王舒鸿, 邢璐, 陈穗穗. 高水平开放背景下的生物多样性安全: 现状、问题及展望 [J]. *北方论丛*, 2023(1): 88–108  
WANG S H, XING L, CHEN S S. Biodiversity security under high-level opening: status, problems and prospects[J]. *The Northern Literary Studies*, 2023(1): 88–108
- [15] REYERS B, VAN JAARSVELD A S, MCGEOCH M A, et al. National biodiversity risk assessment: a composite multivariate and index approach[J]. *Biodiversity and Conservation*, 1998, 7(7): 945–965
- [16] TEVIE J, GRIMSRUD K M, BERRENS R P. Testing the environmental Kuznets curve hypothesis for biodiversity risk in the US: a spatial econometric approach[J]. *Sustainability*, 2011, 3(11): 2182–2199
- [17] 于谨凯, 刘世青. 基于综合多样性指数的生物多样性安全评估及预警机制分析——以黄海近海海域为例 [J]. *中国渔业经济*, 2013, 31(4): 153–160  
YU J K, LIU S Q. The safety assessment and early warning mechanism of biological diversity based on synthesis diversity index: taking offshore area of the Yellow Sea as an example[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2013, 31(4): 153–160
- [18] 丁晖, 徐海根, 吴翼, 等. 生物多样性风险评估方法和案例研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(1): 90–95  
DING H, XU H G, WU Y, et al. Biodiversity risk assessment: methods and case study[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(1): 90–95
- [19] 刘欢. 辽河铁岭段水生生物多样性可持续性预警研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015
- LIU H. Early warning of aquatic biodiversity sustainability in Tieling section of Liaohe River basin[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015
- [20] 周晨. 草海湿地水质富营养化与生物多样性风险预警研究——以浮游植物和底栖动物为例 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2016  
ZHOU C. Study on the early-warning of water eutrophication and biodiversity risk in Caohai Wetland[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016
- [21] 曹铭昌, 乐志芳, 雷军成, 等. 全球生物多样性评估方法及研究进展 [J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(1): 8–16  
CAO M C, LE Z F, LEI J C, et al. Approaches to assessment of global biodiversity and advancements in their researches[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(1): 8–16
- [22] 田泽, 陈柯婧, 潘晶晶, 等. 基于突变理论方法的我国黄河流域土地生态安全评价 [J]. *水利经济*, 2021, 39(5): 13–19, 37, 79  
TIAN Z, CHEN K J, PAN J J, et al. Evaluation of ecological security of land in the Yellow River Basin based on catastrophe theory[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2021, 39(5): 13–19, 37, 79
- [23] 陈平, 田竹君, 李墨, 等. 日本国家尺度生物多样性综合评价概况及启示 [J]. *地理科学*, 2015, 35(9): 1130–1139  
CHEN P, TIAN Z J, LI Z, et al. An overview on comprehensive biodiversity assessment in Japan and its enlightenment[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(9): 1130–1139
- [24] 李玉照, 刘永, 颜小品. 基于 DPSIR 模型的流域生态安全评价指标体系研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(6): 971–981  
LI Y Z, LIU Y, YAN X P. A DPSIR-based indicator system for ecological security assessment at the basin scale[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(6): 971–981
- [25] LU Y L, BULLOCK J M. Biodiversity conservation in a changing environment beyond 2020[J]. *Science Advances*, 2021, 7(35): eabl8162
- [26] JAUREGUIBERRY P, TITEUX N, WIEMERS M, et al. The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss[J]. *Science Advances*, 2022, 8(45): eabm9982
- [27] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于印发《生态保护红线划定指南》的通知: 环办生态〔2017〕48号 [EB/OL]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2017(2017-07-20). [https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728\\_418679.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm)  
Ministry of Environmental Protection, People's Republic of China; National Development and Reform Commission. Notice on issuing the *Guidelines for Delineating Ecological Protection Red Lines*: Environmental Affairs Office Ecology [2017] No. 48 [EB/OL]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, People's Republic of China, 2017(2017-07-20). [https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728\\_418679.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm)
- [28] 中华人民共和国环境保护部. 区域生物多样性评价标准: HJ 623—2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012  
Ministry of Environmental Protection, People's Republic of China. Evaluation Criteria for Regional Biodiversity: HJ 623—

- 2011[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012
- [29] 陈秋华, 修新田. 森林旅游景区环境承载力预警机制研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2019
- CHEN Q H, XIU X T. Research on the Construction of Early-Warning Mechanism of Environmental Carrying Capacity of Forest Tourism Scenic Spots[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019
- [30] 陈照方, 王云才. 乡村景观单元识别与认知的空间生态智慧——以南京市牌坊社区为例 [J]. 风景园林, 2022, 29(7): 30–36
- CHEN Z F, WANG Y C. Spatial ecological wisdom for identification and cognition of rural landscape units: a case study of Nanjing Paifang Rural Community[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(7): 30–36
- [31] 熊瑶, 何银惠, 杨云峰. 气候适应性视角下传统村落空间格局分析——以南京市江宁区黄龙岷村为例 [J]. 西北林学院学报, 2023, 38(3): 217–227
- XIONG Y, HE Y H, YANG Y F. Spatial pattern of traditional villages from the perspective of climate adaptability: A case study of Huanglongxian Village, Jiangning District, Nanjing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(3): 217–227
- [32] 葛结林, 熊高明, 毛江涛, 等. 加拿大一枝黄花在江南休闲旅游乡村的入侵特征及其影响因素 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(12): 1932–1942
- GE J L, XIONG G M, MAO J T, et al. Invasion characteristics and influencing factors of *Solidago canadensis* in leisure-tourism villages in the south of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(12): 1932–1942