

DOI: 10.20103/j.stxb.202212163612

邹易, 蒙古军, 吴英迪, 魏婵娟, 程浩然, 马宇翔. 基于自组织特征映射模型(SOFM)网络的中国自然资源生态安全区划. 生态学报, 2024, 44(1): 171-182.

Zou Y, Meng J J, Wu Y D, Wei C J, Cheng H R, Ma Y X. Ecological security regionalization of natural resources in China based on Self-Organizing Feature Map neural network. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 171-182.

# 基于自组织特征映射模型(SOFM)网络的中国自然资源生态安全区划

邹 易<sup>1</sup>, 蒙古军<sup>1,\*</sup>, 吴英迪<sup>1</sup>, 魏婵娟<sup>1</sup>, 程浩然<sup>2</sup>, 马宇翔<sup>1</sup>

1 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

2 多伦多大学地理、地理信息与环境系, 加拿大安大略省密西沙加市密西沙加路 3359 号 L5L 1C6

**摘要:** 自然资源生态安全是国家安全的重要组成部分, 自然资源生态安全区划对保障区域可持续发展提供了重要途径。基于自然资源数据、生态环境数据和相关区划资料, 从生态敏感性与生态服务重要性角度构建了自然资源生态安全评价指标体系, 进而揭示了中国自然资源生态安全的空间格局; 通过建立区划的原则和指标, 按照一级区主要反映自然资源空间分布格局, 二级区主要揭示自然资源生态安全水平的差异, 采用 SOFM 网络制订了中国自然资源生态安全区划方案。结果显示: (1) 中国自然资源生态安全水平整体偏低, 以中警与重警状态区域为主, 安全和较安全状态的区域仅占 24.22%, 其中低安全等级区多分布于 400mm 等降水量线以西的干旱、半干旱区, 高安全等级区则集中分布于水热资源与生物资源较为丰富的东南部地区; (2) 中国自然资源生态安全区划方案包括 8 个一级区与 27 个二级区, 总结归纳各大区自然资源的特征和威胁生态安全的问题, 并针对二级区自然资源生态安全状况提出了对策建议。研究结果可为分区、分类推进全国自然资源可持续利用和国土空间优化提供理论支持与决策依据。

**关键词:** 自然资源生态安全; 自组织特征映射模型(SOFM)网络; 区划方案

## Ecological security regionalization of natural resources in China based on Self-Organizing Feature Map neural network

ZOU Yi<sup>1</sup>, MENG Jijun<sup>1,\*</sup>, WU Yingdi<sup>1</sup>, WEI Chanjuan<sup>1</sup>, CHENG Haoran<sup>2</sup>, MA Yuxiang<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Earth Surface Processes of Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2 Department of Geography, Geomatics and Environment, University of Toronto, 3359 Mississauga Road, Mississauga ON L5L 1C6, Canada

**Abstract:** Ecological security of natural resource is an important component of national security, and the regionalization of natural resource ecological security provides an essential approach to ensure regional sustainable development. Based on the natural resource data, ecological environment data, and relevant regionalization materials, this article constructs a natural resource ecological security evaluation index system from the perspectives of ecological sensitivity and ecological service importance, then reveals the spatial pattern of China's natural resource ecological security. By establishing the principles and indicators of regionalization, according to the fact that the first-level area mainly reflects the spatial distribution pattern of natural resources, and the second-level area mainly reveals the difference in natural resource ecological security level, the Self-Organizing Feature Map (SOFM) neural network is used to formulate a regionalization scheme for the natural

**基金项目:** 教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(19JZD023); 国家社会科学基金重大项目(20ZDA085)

**收稿日期:** 2022-12-16; **网络出版日期:** 2023-09-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jijunm@pku.edu.cn,

resource ecological security in China. The results show that: (1) The overall level of ecological security of natural resource in China is relatively low, with most of the areas being classified as having moderate to high levels of warning. Only 24.22% of the regions have a safe or relatively safe state. The areas with low-security levels are primarily located in the arid and semi-arid regions west of the 400mm precipitation line. On the other hand, the areas with high-security levels are concentrated in the southeastern parts of the country, where water, heat, and biological resources are relatively abundant. (2) The natural resource ecological security regionalization scheme for China includes 8 first-level zones and 27 second-level zones. We summarize a comprehensive summary and analysis of the unique features and ecological security threats of natural resources in each major region. Moreover, we present practical recommendations to address the challenges faced by natural resources in the secondary regions to enhance their ecological security status. The research results can provide theoretical support and a decision-making basis for promoting the sustainable utilization of natural resources and the optimization of national land space by regionalization and classification.

**Key Words:** natural resource ecological security; Self-Organizing Feature Map(SOFM) network; regionalization scheme

近年来,随着我国社会经济的飞速发展和城镇化的快速推进,自然资源不合理利用引发了诸多生态环境问题,水土流失、沙漠化肆虐、水体污染、生物多样性锐减等问题日益严峻<sup>[1]</sup>。基于此,党的十八大提出“大力推进生态文明建设”的战略决策,对区域生态安全的重视日益提高。生态安全的含义广泛,包括自然、社会和经济系统的安全<sup>[2]</sup>,且任何一个系统的安全对复杂系统整体的安全都至关重要。自然资源作为人类赖以生存的物质基础,同时也是保障社会经济发展与人类福祉的物质基础与能量来源<sup>[3]</sup>。自然资源生态安全即是指区域内的自然资源生态系统维持整体性、保障经济发展的自然资源供给、满足居民生活等基本权利以及人类适应环境变化的能力等不受威胁的状态<sup>[4]</sup>。自然资源生态安全是经济发展与生态保护之间耦合程度的表征,确保区域自然资源处于安全状态,是国家安全的重要组成部分,也是地区可持续发展的重要前提与保障。

区划是区域的划分,通过对“过程-类型”的综合研究,探讨区域单元的演进过程、地域分异、聚类归并及相互关系<sup>[5]</sup>,对于揭示区域空间发展的规律性与差异性、指导自然资源的合理开发利用具有重要作用。近代自然区划始于欧洲,19—20世纪西方国家开展了大量以生态区划为特色的自然区划研究<sup>[6]</sup>。我国自然区划始于20世纪20—30年代,50年代区划研究进入全面发展时期,尤其为满足农业生产需要,开展了大量综合自然区划<sup>[7-8]</sup>、农业区划<sup>[9-11]</sup>及公路自然区划<sup>[12]</sup>方案的研究。80年代以来,随着市场经济发展与产业转型加速,区域开发与产业经济相关的区划不断涌现,例如经济区划<sup>[13]</sup>、乡村经济区划<sup>[14]</sup>、商业经济区划<sup>[15]</sup>等。2000年以来,随着人们对生态环境问题的关注,生态区划<sup>[16]</sup>和生态地理区划<sup>[5]</sup>成为热点。区划的对象已逐渐由多要素的综合自然区划转向应用性、专业性和部门性区划,例如主体功能区划<sup>[17]</sup>、旅游区划<sup>[18]</sup>、草原区划<sup>[19]</sup>与风能开发的风环境区划<sup>[20]</sup>等。近年来,结合新时期现实需要,又相继开展了现代农业区划<sup>[21]</sup>、环境功能区划<sup>[22]</sup>等研究。系统深入的区划研究,奠定了我国在此领域的国际领先地位<sup>[23]</sup>。

自然资源生态安全区划是根据自然资源生态安全水平及其分异规律进行地理分区。近年来,我国先后发布了《全国主体功能区规划》(2010)、《生态功能分区技术规范》(2014)、《全国生态功能区划》(2015)、《国土空间规划编制技术规范》(2020)、《“三线一单”生态环境分区管控指导意见》(2021),已有研究针对“三区三线”与“三线一单”的制度框架、技术方法与应用路径等方面展开论述<sup>[24]</sup>,作为国土空间规划的重要内容和工具,也是自然资源生态安全的重要保障和支撑,尤其在资源环境领域发挥重要作用<sup>[25]</sup>。以生态安全为导向的自然资源空间分区与管制,已成为实现自然资源与生态环境统筹治理的新举措<sup>[26]</sup>。围绕自然资源生态安全的内涵,诸多学者选择自然资源的生态敏感性与生态服务重要性作为表征区域资源环境状况的重要指标,来刻画自然资源的生态安全状态<sup>[27-28]</sup>。在区划方法和技术方面,计算机技术的快速进步推动数理方法引入区划研究中,如回归分析<sup>[29]</sup>、聚类分析<sup>[30]</sup>、判别分析<sup>[31]</sup>和主成分分析<sup>[32]</sup>等。同时,人工神经网络<sup>[33]</sup>、遗传算法<sup>[34]</sup>和模糊评价理论<sup>[35]</sup>等新兴理论与方法也应用于区划研究。其中,自组织特征映射模型(Self-Organizing

Feature Map, SOFM)作为一种非监督型的人工神经网络,因在分区研究中具有适应性强、空间精度高等优势<sup>[36]</sup>,在地理学和生态学领域,尤其是数据结构复杂、数据量大和非线性特征明显的问题上得到广泛应用<sup>[23]</sup>。

本文着眼于全国自然资源生态安全格局分析,立足于新时期生态文明建设宏观背景,从自然资源生态敏感性与生态服务重要性,探索自然资源生态安全区划研究的技术方法和指标体系,制订全国自然资源生态安全区划方案,识别生态安全的关键区域、监管薄弱区域、发展优势区域,为分区、分类推进全国自然资源可持续利用和优化国土空间布局提供决策依据。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 数据来源

本研究使用的数据及来源如表 1 所示。

表 1 数据来源  
Table 1 Data source

数据类型 Data type	数据产品 Data product	来源 Data source
地形地貌 Topography	分省 DEM 数据(SRTM)	中国科学院资源环境数据云平台/90m
土地利用 Land use	中国土地利用数据(2020)	中国科学院资源环境数据云平台/1km
降水量 Precipitation	中国逐年年降水量空间插值数据集(1980—2015)	中国科学院资源环境数据云平台/500m
气温 Air temperature	中国逐年年平均气温空间插值数据集(1980—2015)	中国科学院资源环境数据云平台/500m
太阳辐射 Sun radiation	中国逐月月平均太阳辐射数据集(1980—2015)	欧洲中尺度天气预报中心
风速 Wind speed	中国逐月月平均地面风速数据集(1980—2015)	欧洲中尺度天气预报中心
降雨侵蚀力 Rain erosion	中国多年平均降雨侵蚀力数据(1986—2015)	国家地球系统科学数据中心/250m
NDVI	MOD13Q1 数据产品(2010—2019)	美国国家航空航天局/250m
NPP	MOD17A3 数据集(2000—2015)	美国蒙大拿大学数字地球动态模拟项目组
土壤质地 Soil texture	基于 HWSO 的中国土壤数据集(2009)	国家冰川冻土沙漠科学数据中心(1:100 万)
植被类型 Vegetation types	植被类型空间分布数据	中国科学院资源环境数据云平台/1km
河流水系 River system	河流水系数据	中国科学院资源环境数据云平台/shp
自然保护区 Nature reserve	自然保护区数据	中国科学院资源环境数据云平台/shp
水源地 Source of water	重要饮用水水源地数据	北京大学城市与环境学院地理数据平台/shp
区划空间参考 Regionalization spatial reference	中国农业自然区划 <sup>[10]</sup>	中国科学院资源环境数据云平台/shp

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; NPP:植被净初级生产力 Net Primary Productivity

### 1.2 自然资源生态安全评价

选取相关研究中常用的生态敏感性与生态服务重要性进行自然资源生态安全评价<sup>[28]</sup>,其中自然资源生态敏感性包括土壤侵蚀敏感性与土地沙化敏感性<sup>[37]</sup>;自然资源生态服务重要性包括产品提供、生物多样性维护与水源涵养重要性<sup>[38]</sup>(表 2)。

在自然资源生态敏感性评价时,首先根据不敏感、轻度敏感、中度敏感和高度敏感 4 个级别,将各指标分别赋值为 1,3,5,7;其次按照下式计算土壤侵蚀敏感性指数与土地沙化敏感性指数<sup>[37]</sup>:

$$A_i = \sqrt[4]{a_{i1} \times a_{i2} \times a_{i3} \times a_{i4}} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

式中,  $A_i$  表示第  $i$  类敏感性指数,  $a_{i1}$ — $a_{i4}$  分别为对应的评价指标。根据敏感性指数计算结果值域范围,将敏感性分为 4 级:[0, 2.0] 为不敏感,(2.0, 4.0] 为轻度敏感,(4.0, 6.0] 为中度敏感,>6.0 为高度敏感。

基于“木桶”原理,综合生态敏感性指标定义为区域内生态敏感性的最低水平<sup>[27,37]</sup>。在自然资源生态服务重要性评价时,首先利用 ArcGIS 重分类功能基于自然断点法与经验知识相结合的方法对三类生态服务重要性进行赋值:高度重要为 7、中等重要为 5、一般重要为 3、不重要为 1。综合生态服务重要性评价利用下式计算<sup>[38]</sup>:

$$ESI_j = \sqrt[3]{\prod_{i=1}^3 ES_i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中,  $ESI_j$  代表  $j$  空间综合生态服务重要性评价指数,  $ES_i$  为  $i$  项生态服务重要性等级值。最后, 通过 ArcGIS 重分类功能基于自然断点分级法将  $ESI_j$  分为高度重要、中等重要、一般重要和不重要。

表 2 自然资源生态安全评价指标

Table 2 Evaluation index of ecological security of natural resources

评价属性 Evaluation attribute	具体指标 Indicators	评价方法 Evaluation method	
自然资源生态敏感性 Ecological sensitivity of natural resources	土壤侵蚀敏感性	降雨侵蚀力  土壤质地*	<1000 不敏感; 1000—4000 轻度敏感; 4000—6500 中度敏感; >6500 高度敏感  I. 石砾、沙: 不敏感; II. 粗砂土、细砂土、粘土: 轻度敏感; III. 面砂土、壤土: 中度敏感; IV. 砂壤土、粉粘土、壤粘土及 V. 砂粉土、粉土: 高度敏感
		地形起伏度/m	<20 不敏感; 20—50 轻度敏感; 50—100 中度敏感; >100 高度敏感
		植被类型**	I. 水体、草本沼泽、稻田: 不敏感; II. 阔叶林、针叶林、草甸、灌丛和生矮林: 轻度敏感; III. 稀疏灌木草原、一年二熟粮作、一年水旱两熟: 中度敏感; IV. 荒漠、一年一熟粮作及 V. 无植被: 高度敏感
	土地沙化敏感性	湿润指数	>40 不敏感; 0—40 轻度敏感; -30—0 中度敏感; <-30 高度敏感
		起沙风天数/d	<3 不敏感; 3—5 轻度敏感; 5—10 中度敏感; >10 高度敏感
		土壤质地*	基岩: 不敏感; 粘质: 轻度敏感; 砾质: 中度敏感; 壤质及沙质: 高度敏感
		冬春季植被覆盖度/%	>70 不敏感; 50—70 轻度敏感; 30—50 中度敏感; <30 高度敏感
自然资源生态服务重要性 The importance of natural resource ecosystem services	产品提供重要性	产品提供服务能力指数 $S_{ps}$	$S_{ps} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{oc} \times (1 - F_{slo}) \times F_{sup}$
	生物多样性维护重要性	生物多样性维护服务能力指数 $S_{bio}$	$S_{bio} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt}) \times S_H$
	水源涵养重要性	水源涵养服务能力指数 $WR$	$WR = NPP_{mean} \times F_{sic} \times F_{pre} \times (1 - F_{slo})$

\* 土壤质地采用基于 HWSD 的中国土壤数据集 (2009) 分类标准; \*\* 植被类型使用《1:100 万中国植被图》分级标准; 计算公式中:  $NPP_{mean}$  为多年植被平均净初级生产力 ( $g C m^{-2} a^{-1}$ );  $F_{pre}$  为多年平均降水量因子;  $F_{oc}$  为土壤有机质含量因子;  $F_{sup}$  为供给重要性指数;  $F_{tem}$  为多年平均气温因子;  $F_{alt}$  为海拔因子;  $S_H$  为生境重要性指数;  $F_{sic}$  为土壤渗流能力因子;  $F_{slo}$  为坡度因子

将综合生态敏感性与综合生态服务重要性按表 3 的矩阵规则叠加<sup>[39]</sup>, 得出自然资源生态安全等级: I 级为重警状态、II 级为中警状态、III 级预警状态、IV 级为较安全状态、V 级为安全状态。

表 3 自然资源生态安全分级规则

Table 3 The rule of natural resources ecological security level

生态安全等级 Ecological safety level		综合生态敏感性 Comprehensive ecological sensitivity			
		不敏感 Not sensitive	轻度敏感 Mildly sensitive	中度敏感 Moderately sensitive	高度敏感 Highly sensitive
		综合生态服务重要性 The importance of comprehensive ecological services	高度重要 高度重要	V	V
	中等重要	V	IV	III	II
	一般重要	IV	III	II	I
	不重要	III	II	I	I

### 1.3 区划原则与指标体系

中国自然资源生态安全区划遵循以下原则:综合性与主导因素相结合,资源特点与产业布局相协调,定量评价与定性分析相结合,空间连续性与区内一致性,行政边界完整性等。

从自然资源生态安全的内涵出发,基于上述原则,结合相关研究<sup>[40]</sup>,建立自然资源生态安全区划指标体系(表4)。其中,一级区划主要反映自然资源空间分布格局,选择 DEM 和坡度表征自然地理特征,土地资源表征耕地、森林和草地资源,年降水量表征水资源状况,年均气温与太阳辐射表征光、热资源状况,风速表征风能资源状况;二级区划主要揭示各一级区中自然资源生态安全水平的差别,采用自然资源生态敏感性与自然资源生态服务重要性表征,各项指标数据均经过极差标准化处理,并统一重采样至 1km×1km 栅格分辨率<sup>[22,38,41]</sup>。

表 4 自然资源生态安全区划指标体系

Table 4 Comprehensive index system of natural resources ecological security regionalization

指标类型 Indicator type	主导指标 Leading indicator	具体指标 Specific indicators
一级区划(自然资源格局) First-level area (natural resource pattern)	地势地貌	海拔 坡度 土地资源 耕地、林地、草地、水域等(2020年) 水资源 年降水量(1980—2015年平均值) 光、热资源 年平均气温(1980—2015年平均值) 月平均太阳辐射(1980—2015年平均值) 风能资源 月平均地面风速(1980—2015年平均值)
二级区划(自然资源生态安全) Second-level area (ecological security of natural resource)	生态敏感性 生态服务重要性	土壤侵蚀敏感性 土地沙化敏感性 产品提供重要性 生物多样性维护重要性 水源涵养重要性
参考指标 Reference indicator	农业自然区划	中国农业自然区划

### 1.4 区划方法

按照定量与定性分析相结合的原则,采用 SOFM 模型进行自然资源生态安全分区。SOFM 模型的学习规则是一种与大脑皮层竞争抑制相似的算法<sup>[42-43]</sup>,根据学习规则对输入的模式自动进行分类,降低了指标权重的主观性,提高了分类的客观性和准确性。SOFM 模型的拓扑结构如图 1 所示,模型由结构输入层和竞争层组成,输入层具有尽可能多的神经元和变量,输入层中的所有神经元都通过连接权重与竞争层中的神经元相连。竞争层引入网络的拓扑结构,可模拟生物学中的侧抑制现象。相邻的竞争层神经元也通过权值相连,竞争层神经元以一维或多维的拓扑结构排列,网络对输入向量进行无监督训练,竞争层神经元根据距离的远近决定抑制关系,不断调整网络结构和连接权重。当输入新的样本时,系统就以拓扑结构的形式输出分类结果<sup>[44]</sup>。经过多次试验,在尽可能保证数据准确科学的前提下,本研究建立 10000 个随机样本点,输入指标分别为自然资源指标、生态敏感性与生态服务重要性指标,神经网络训练次数为 200 次。在 SOFM 分区的基础上,结合农业自然区划结果<sup>[10]</sup>和土地覆

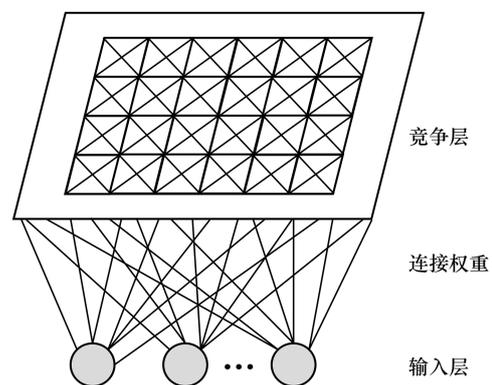


图 1 SOFM 模型网络拓扑结构<sup>[23]</sup>

Fig.1 SOFM model network topology structure<sup>[23]</sup>

SOFM: 自组织特征映射模型 Self-organizing feature map

被空间特征,对分区边界进行适当调整。

### 1.5 区划单位的命名

区划单位的命名与编码,既要反映地理位置,又要反映区域综合特点,还要精练简洁、便于使用<sup>[6]</sup>。借鉴相关研究<sup>[21,45]</sup>,本区划方案既考虑我国自然资源空间分布特点,又兼顾自然资源分区中生态安全水平差异,采用“大区—区”2级区划方案,具体区划命名为:一级区划为大区,命名规则为“地理位置+主导自然资源特点”,编码采用大写罗马数字(I、II、III…);二级区划为区,命名规则为“自然地理位置+地貌形态特征+区域生态安全等级”,编码采用阿拉伯数字(1、2、3…),标注在大区罗马数字之后右下角。

## 2 结果与分析

### 2.1 中国自然资源生态安全空间格局

中国自然资源生态敏感性以轻度敏感为主(图2),土壤侵蚀轻度敏感地区占61.34%,土壤侵蚀中高度敏感区主要分布于东部季风区,与季节性降水存在较强相关性,东北山区、黄土高原区、南方红壤丘陵区 and 西南喀斯特地区是相对集中的侵蚀敏感区。土地沙化轻度敏感区占比43.28%,土地沙化中度和高度敏感区主要分布于我国400mm与200mm等降水量线以西的干旱、半干旱区,高度敏感区集中分布于我国三大强风区——新疆、内蒙古和甘肃交界的戈壁、藏北高原和内蒙古中部沙地,与干旱气候及强风区高度相关。综合生态敏感性以中度敏感地区为主(40.36%),轻度敏感次之(33.30%),不敏感区面积仅占0.12%。高度敏感区集中在北方干旱、半干旱沙漠(地)、黄土高原与南方低山丘陵区,中度敏感区集中分布于北方地区,轻度敏感区多分布于南方地区以及青藏高原东部、新疆西部等地。

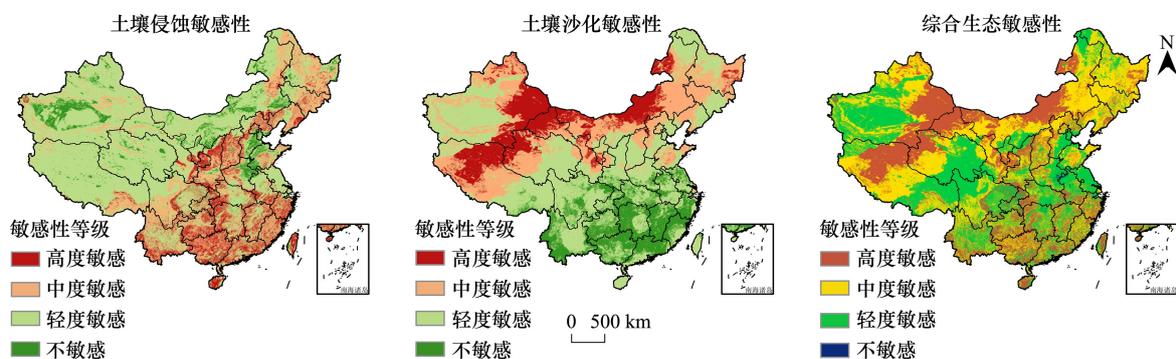


图2 中国自然资源生态敏感性空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecological sensitivity of natural resources in China

中国自然资源生态服务重要性各等级面积较均衡(图3)。其中,产品提供重要性呈东南高、西北低的空间分布格局,高度重要区与光热、降水等自然条件优渥的区域紧密相关,多分布在地势平坦、光热条件好、降水充沛的传统农业区、林区、草原区或水产品主产区;生物多样性维护重要性呈东北西南高、西北低的空间分布格局,高度重要区与生物资源分布高度相关,多位于生境质量较好、动植物资源丰富的地区,如大小兴安岭、长白山、秦岭、羌塘高原、三江源和藏东南山地等;水源涵养重要性则呈现东北东南高、西北低的空间格局,高度重要区多为森林和草地资源,集中分布在大江大河的水源补给区或发源地,涵养水源能力强。自然资源综合生态服务重要性同样呈现东南高、西北低的空间分布特征,其中高度重要区占21.80%,多分布于我国东北山地、江南地区、西南地区等;中等重要与一般重要区分布较零星,面积分别占19.01%与23.07%;不重要区面积占比最大(36.12%),集中分布在西北内陆地区。

中国自然资源生态安全呈现东南高、西北低的空间分布格局(图4)。其中,以400mm等降水量线为界,以东以南安全水平较高,以西以北安全水平较低。V级区面积占比最小(6.56%),多分布于大兴安岭、陇南与

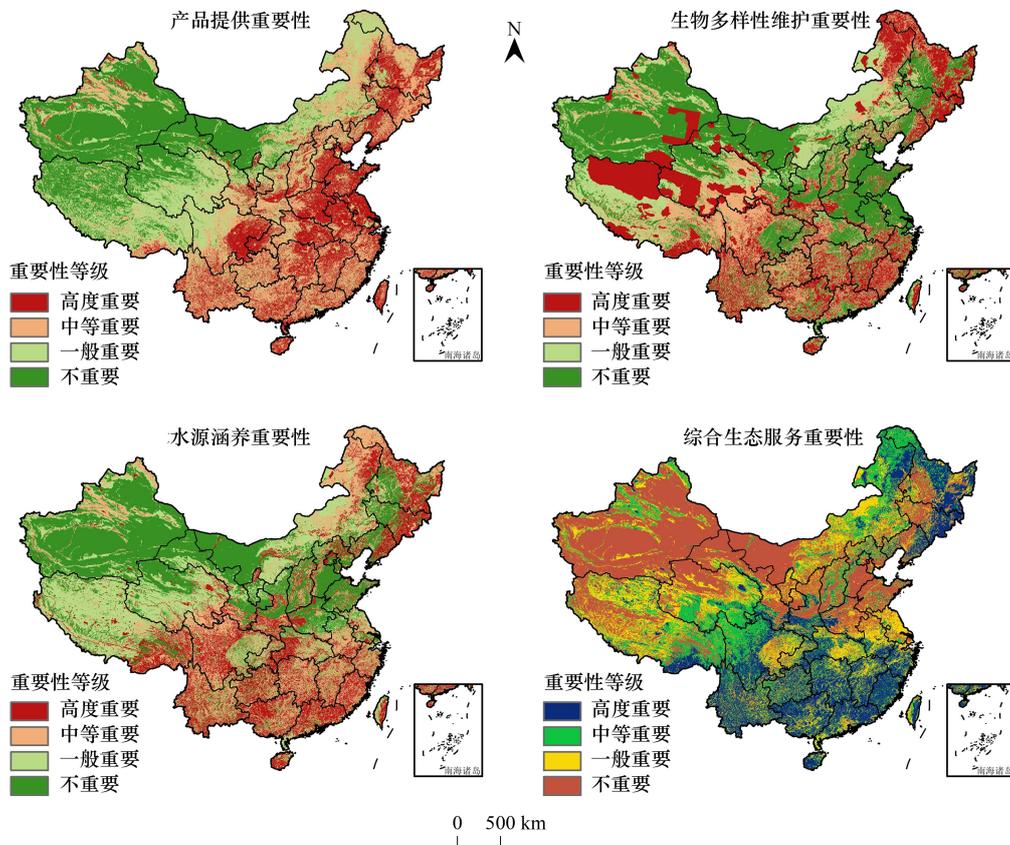


图3 中国自然资源生态服务重要性空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the importance of natural resource ecosystem services in China

藏南地区,零星分布于福建、江西、湖南中南部地区以及云南中部等地;IV级区面积占 17.65%,主要分布于长白山区、横断山区等;III级区面积占 21.21%,分布较分散,主要分布于江苏、安徽与青海东南部地区。I级区和II级区面积占比分别为 31.65%与 22.92%,主要分布于新疆、甘肃与内蒙古,此外西藏西部、青海东北部与陕西北部也有分布。可以看出,自然资源安全与较安全区多位于水热条件好、生物资源丰富的区域,低安全等级区多位于干旱、半干旱区。

### 2.2 中国自然资源生态安全区划方案

根据 SOFM 模型模拟结果,兼顾行政边界完整性和农业自然区划单元<sup>[10]</sup>,中国自然资源生态安全区划方案包括 8 个一级区划与 27 个二级区划(图 5)。其中,一级区划单元综合反映了自然资源(包括耕地资源、森林资源、草地资源、水资源、光热资源与风能资源等)的地域分异特征;二级区划单元则综合体现了自然资源的生态安全水平。

I 东北林农资源大区:包括黑龙江、吉林与内蒙古东北部地区,面积共 106.62 万 km<sup>2</sup>,占总面积 11.22%。土地资源、水资源与森林资源丰富,但热量资源不足。该区是我国重点国有林区、北方重要原始林区的主要分

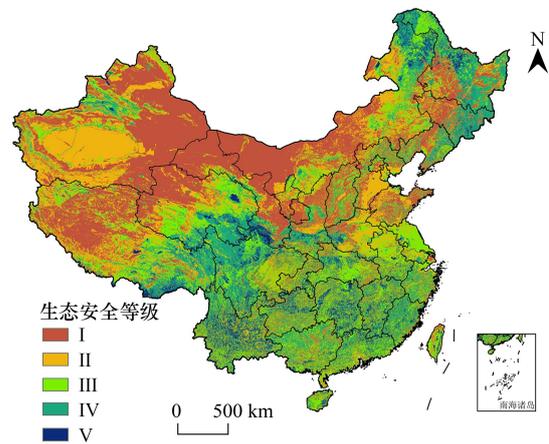


图4 中国自然资源生态安全等级空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecological security level of natural resources in China

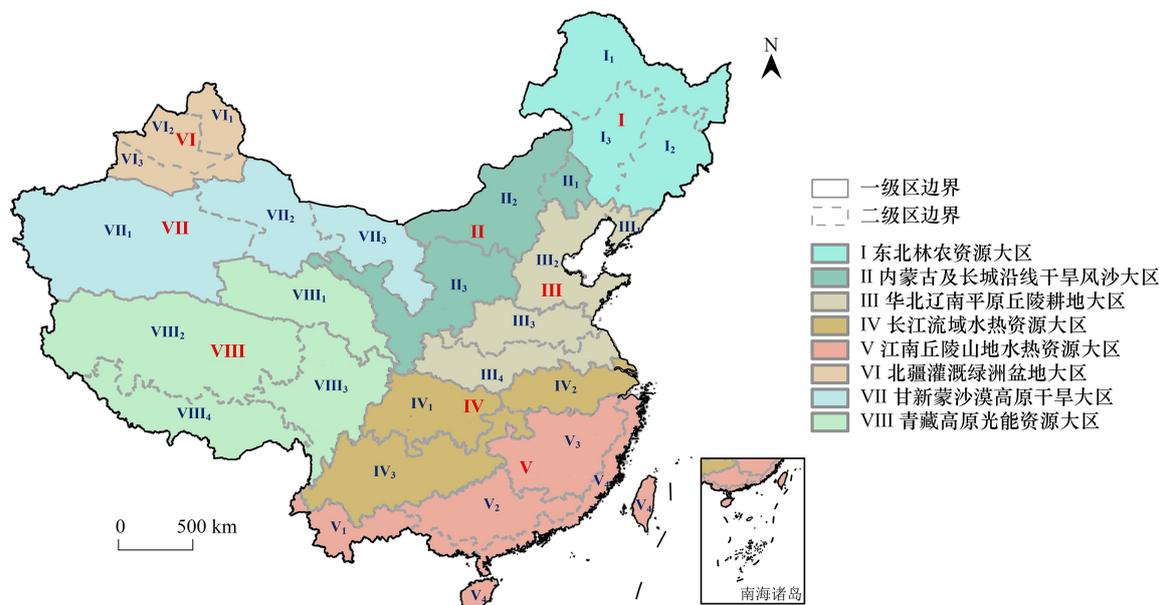


图5 中国自然资源生态安全区划方案

Fig.5 The ecological security regionalization scheme of natural resources in China

布地,世界同纬度地区植物物种最为丰富的区域,同时也是我国最大的商品粮生产基地,粮食产量约占全国总产量的四分之一,平均粮食商品率达70%以上。然而该区生态环境较脆弱,尤其是耕地大规模开垦占用生态空间,是该区生态安全面临的巨大威胁。

II 内蒙古及长城沿线干旱风沙大区:包括内蒙古中部、陕西与山西北部、宁夏南部与河北东北部,面积共99.36万 $\text{km}^2$ ,占总面积的10.46%。区域内自然资源以草原为主,水热条件较差,春旱频发,生态问题严重。受干旱与半干旱环境条件的影响,水土资源的开发潜力受到极大制约。华北辽南平原丘陵耕地大区:包括北京、天津、河北、山东、河南、辽宁南部、陕西南部、山西南部与江苏、安徽北部等地,面积共91.10万 $\text{km}^2$ ,占总面积的9.59%。该区域光热条件好,耕地资源丰富,是我国粮食主产区之一,但人均耕地少,水资源不足,人地矛盾较为突出。水资源短缺与环境污染是制约该区资源开发利用的主要限制因素。

IV 长江流域水热资源大区:包括湖北、重庆、贵州、湖南东南部、云南中部与北部地区、安徽与江苏南部等区域,面积共109.54万 $\text{km}^2$ ,占总面积的11.53%。该区河网密集、径流丰沛,水热资源与水能资源丰富。区域内耕地资源丰富,成都平原、鄱阳湖平原、洞庭湖平原与太湖平原等地都是我国著名的商品粮基地。该区社会经济基础良好,发展潜力巨大,是我国经济发展的重要腹地。

V 江南丘陵山地水热资源大区:包括江西、福建、广西、广东、海南、台湾、湖南南部、云南南部等区域,面积共114.86万 $\text{km}^2$ ,占总面积的12.09%。该区海岸线漫长,光、热、水、水热资源均较丰沛,水热资源居全国之冠,土地生产潜力大。此外,森林资源与水能资源也较为丰富,生物种类多样,是中国重要的水产品养殖和经济作物种植区。该区是中国较早对外开放的重点地区,有着深厚的外向型经济基础,区位条件优越,有利于自然资源的开发。

VI 北疆灌溉绿洲盆地大区:主要为北疆地区,面积共39.06万 $\text{km}^2$ ,占总面积的4.11%。该区光热资源丰富、气温年较差与日较差大,土地资源以草地为主,矿产资源丰富,主要包括石油、天然气、煤等。该区属于典型内陆干旱气候,降水少,蒸发大,生态环境极其脆弱。

VII 甘新蒙沙漠高原干旱大区:包括南疆、甘肃东北部与内蒙古西部地区,面积共168.69万 $\text{km}^2$ ,占总面积的17.76%。该区光能资源丰富,但气候干旱,水资源匮乏,沙漠戈壁广布,地广人稀,自然生态环境极度脆弱,成为资源开发与经济发展的最大限制因素。

Ⅷ 青藏高原光能资源大区:包括西藏、青海与四川西部,面积共 220.64 万 km<sup>2</sup>, 占总面积的 23.23%。高寒是该区突出特点,热量不足,但又是全国太阳辐射最多的地区,光能资源丰富;地处第一级阶梯,水力资源丰富。青藏高原特殊的地理环境造就了丰富独特的动植物资源,但受高海拔和高原气候的影响,区域资源开发阻力较大。

二级区划单位生态安全水平及生态保护对策建议如表 5。

表 5 中国自然资源生态安全二级区划单位主要特征

Table 5 The characteristics of secondary regionalization units for ecological security of natural resources in China

一级区 First-level area	二级区 Second-level area	所在区域 Region	区域自然资源生态安全 状况 Ecological security of natural resource status	对策建议 Suggestions
Ⅰ 东北林农资源大区 Ⅰ Northeast forestry and agricultural resources region	Ⅰ <sub>1</sub> 大小兴安岭森林生态 安全Ⅳ级区	大小兴安岭及呼伦贝尔 北部地区	土壤侵蚀中度敏感,生物 多样性保护重要区。	加大林区保护力度,保护生物多样性,发展 绿色产业,发挥林区碳汇优势,建设造林碳 汇项目。
	Ⅰ <sub>2</sub> 长白山区生态安全Ⅳ 级区	吉林省东南部长白山区	土壤侵蚀中度敏感,各项 生态系统服务中等重 要区。	加强森林资源保护,坚守生态底线,保护区 域野生动植物,加强景区污染监管,发展可 持续农业。
	Ⅰ <sub>3</sub> 松嫩平原生态安全Ⅲ 级区	黑龙江西南部及吉林省 东北部	土地沙化中度敏感,产品 提供高度重要区。	重视耕地保护,治理土地盐碱化与耕地退 化、草场沙化问题,重视湿地保护,建立湿 地长效补水机制,提高区域整体生态质量。
Ⅱ 内蒙古及长城沿线干旱风沙 大区 Ⅱ Arid and sandy areas in Inner Mongolia and along the Great Wall	Ⅱ <sub>1</sub> 科尔沁草原生态安全 Ⅱ级区	科尔沁草原所在县(市)	土地沙化中度敏感,产品 提供一般重要区。	积极开展生态防护林建设,发展高效畜牧 业,减少对草原的破坏,保护湿地。
	Ⅱ <sub>2</sub> 浑善达克沙地生态安 全Ⅰ级区	浑善达克沙漠所在县 (市)	土地沙化高度敏感,生物 多样性维护中等重要区。	加大沙地源头防治,因地制宜实施沙地综 合治理模式,遏制沙漠化发展。
	Ⅱ <sub>3</sub> 黄土高原生态安全Ⅱ 级区	鄂尔多斯、黄土高原及甘 肃河西走廊	土地沙化与土壤侵蚀高 度敏感,产品提供中等重 要区。	推进草畜平衡制度和水土流失地治理,加 快山水林田湖草沙景观格局构建,促进农 林牧业全面发展。
Ⅲ 华北辽南平原丘陵耕地大区 Ⅲ North China Liaonan Plain hilly cultivated land region	Ⅲ <sub>1</sub> 辽中南生态安全Ⅲ 级区	辽宁中部及南部地区	土壤侵蚀与土地沙化中 度敏感,产品提供高度重 要区。	应对区域内矿产资源枯竭、水资源不足问 题,调整产业结构,发展科技,引进人才,治 理环境污染。
	Ⅲ <sub>2</sub> 京津冀鲁平原丘陵生 态安全Ⅱ级区	辽宁西部、北京、天津、河 北及山东北部	土壤侵蚀与土地沙化中 度敏感,产品提供高度重 要区。	构建政府、市场和社会协同发展网络体系, 建立区域污染联防联控机制,共建良好渤 海生态。
	Ⅲ <sub>3</sub> 黄淮海平原生态安全 Ⅲ级区	黄淮海平原地区	土地沙化与土壤侵蚀中 度敏感,产品提供高度重 要区。	实施黄淮海平原旱涝碱综合治理,引水输 沙,治理“地上悬河”,加强风沙地和盐碱地 治理。
	Ⅲ <sub>4</sub> 秦岭淮河生态安全Ⅳ 级区	江苏、安徽北部与河南、 陕西南部	土壤侵蚀轻度敏感,水源 涵养与产品提供高度重 要区。	加强秦岭生态环境保护,协同推进淮河流 域生态环境保护和经济社会高质量发展, 筑牢区域生态安全防线。
Ⅳ 长江流域水热资源大区 Ⅳ Hydrothermal resources region of the Yangtze River Basin	Ⅳ <sub>1</sub> 秦巴山地生态安全Ⅳ 级区	秦巴山区	土壤侵蚀中度敏感,产品 提供高度重要区。	控制人口增长,落实退耕还林政策,推动城 镇化建设,环境保护与区域开发并重。
	Ⅳ <sub>2</sub> 长江中下游生态安全 Ⅲ级区	江苏、安徽南部及湖北 东部	土壤侵蚀轻度敏感,产品 提供高度重要区。	加快生态文明建设,兼顾经济发展与耕地 生态健康,因地制宜探索合理经济运行模 式,实现耕地资源可持续利用。
	Ⅳ <sub>3</sub> 云贵高原生态安全Ⅴ 级区	云南、贵州及四川南部	土壤侵蚀中度敏感,各项 生态系统服务高度重 要区。	严格资源开发监管,推进水土流失小流域 综合治理,加快退化植被的恢复和重建,协 调经济发展与生态保护的关系。

续表

一级区 First-level area	二级区 Second-level area	所在区域 Region	区域自然资源生态安全 状况 Ecological security of natural resource status	对策建议 Suggestions
V 江南丘陵山地地热资源大区 V Jiangnan hilly and mountainous hydrothermal resources region	V <sub>1</sub> 华南热带农业生态安全 全IV级区	云南南部	土壤侵蚀高度敏感,生态 服务中度重要区。	加大自然保护区建设与管理力度,控制水 土流失,积极发展热带经济作物种植,推动 绿色高质量发展,创新体制与机制,提高环 境治理效能。
	V <sub>2</sub> 南岭山地森林生态安 全III级区	粤北、广西中东部	土壤侵蚀中度敏感,水源 涵养高度重要区。	推进封山育林措施,减少人为干扰,保护山 地自然生态环境。
	V <sub>3</sub> 江南丘陵山地生态安 全V级区	江西、福建及湖南东部	土壤侵蚀中度敏感,生态 系统服务高度重要区。	稳定粮食生产,增加林草植被,发展林果经 济,封育山林,加强丘陵山地水土流失 治理。
	V <sub>4</sub> 东南沿海生态安全IV 级区	东南沿海地区、海南、 台湾	土壤侵蚀中度敏感,生态 系统服务高度重要区。	加快小流域生态工程建设,促进水土流失 综合治理,深化沿海防护林体系建设,发展 热带现代高效农业。
VI 北疆灌溉绿洲盆地 大区 VI Northern Xinjiang irrigated oasis basin region	VI <sub>1</sub> 阿尔泰山地生态安全 II级区	新疆阿勒泰地区	土地沙化高度敏感,生物 多样性维护高度重要区。	合理利用土地资源,加快实施退耕还林与 退牧还湿,健全野生动植物保护的法规, 加强宣传教育,推进社会经济与生态环 境可持续发展。
	VI <sub>2</sub> 准噶尔盆地生态安全 I级区	准噶尔盆地所在县(区)	生态敏感性轻度,生态服 务重要性水平低。	合理利用水资源,平衡绿洲水土资源,加快 油气产能建设,实施生态治理与资源开发 并重策略。
	VI <sub>3</sub> 天山北坡生态安全III 级区	天山北部地区	土壤侵蚀轻度敏感,生态 系统服务中等重要区。	依据资源环境承载力优化资源开发利 用,适度发展城镇规模,加强荒漠-绿洲过 渡带的生态修复。
VII 甘蒙沙漠高原干旱大区 VII Gan-Xin-Meng desert plateau arid region	VII <sub>1</sub> 南疆沙漠山地生态安 全II级区	新疆南部	土地沙化轻度敏感,生态 服务重要性低水平区。	以改善区域生态环境质量为核心筑牢生态 安全屏障,发挥绿洲生态优势,开发矿产和 油气资源,加快转型发展。
	VII <sub>2</sub> 祁连山生态安全II 级区	新疆东部、甘肃中西部及 青海东北部边缘	生物多样性保护高度重 要,土地沙化高度敏 感区。	完善祁连山国家公园建设,保护生物多样 性,严格控制草场载畜量,以绿色发展观念 推进区域发展转型。
	VII <sub>3</sub> 内蒙古西部生态安全 I级区	内蒙古阿拉善盟	土地沙化高度敏感,生态 服务重要性低水平区。	完善防沙治沙体系,构建集“山水林田湖草 沙”于一体的全域生态安全格局,建设内蒙 古西部生态安全屏障。
VIII 青藏高原光能资源大区 VIII Qinghai-Tibet Plateau light energy resource region	VIII <sub>1</sub> 柴达木盆地生态安全 III级区	青海东北部地区	土地沙化高度敏感,生态 服务重要性低水平区。	推进生态工程建设,推广节水灌溉措施,合 理开发利用矿产资源,科学适度开发太阳 能资源。
	VIII <sub>2</sub> 藏西北高原生态安全 II级区	西藏北部、青海西南部	土地沙化高度敏感,生物 多样性维护高度重要区。	大力实施生态保护建设工程,保护野生动 植物,促进人与自然和谐共生。
	VIII <sub>3</sub> 横断山区生态安全III 级区	青海东南部、四川中西部 及西藏东南部地区	土壤侵蚀中度敏感,生物 多样性维护高度重要区。	加大西南林区保护,增强生态系统服务能 力,保护重要生物物种资源,适度开发利用 有色金属、水力和中药材资源,提高资源利 用效率。
	VIII <sub>4</sub> 藏南谷地生态安全IV 级区	西藏日喀则、林芝、山南 等县(市)	土地沙化轻度敏感,生物 多样性保护高度重要区。	加强退化生态环境的恢复与重建,发展高 原特色种植业与养殖业,合理开发药材、森 林和水力资源,促进区域经济发展。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 讨论

本研究采用 SOFM 聚类方法进行了中国自然资源生态安全区划,区划方案兼顾中国自然资源格局与生态安全状况,既是对已有区划的传承与改进,又体现自身的特色。区划结果客观揭示出了中国自然资源环境南

北方向的纬度地带性和东南-西北方向的干湿地带性的空间分异规律。其中,一级区自然资源大区划分时考虑了土地资源、风能资源、水资源、光热资源等指标,因此区划结果反映出的自然资源分异特征与《中国综合农业区划》<sup>[11]</sup>和《中国农业自然区划》<sup>[10]</sup>方案较为契合。但也有不一致之处,例如东部区域的划分不单纯以温度和湿度为依据,更能够反映区域的气候类型与生态环境特征,有利于更合理地规划区域产业布局及指导资源开发利用;北疆地区拥有丰富的自然资源,是重要的生态屏障,将其单独划区,加强区域内生态环境建设与保护。二级区自然资源生态安全区则体现了本区划自身的特色,基于GIS平台利用多源数据,将自然资源的生态敏感性与生态服务重要性作为主导标志刻画其生态安全特征,与《中国生态环境胁迫过程区划》方案<sup>[46]</sup>、《中国生态区划》方案<sup>[16]</sup>相比,二级区变化较为显著,例如根据土地沙化敏感程度与生态服务重要性等级的不同将内蒙古高原缺水微胁迫区细分为四个二级区;根据生物多样性保护重要性与土地沙化敏感程度的不同将青藏高原牧业无胁迫区分为四个二级区。相比之下,本研究的生态安全评价结果更注重生态环境的自然属性与自然功能,可更好地识别自然环境的脆弱性及恢复力,为自然资源的系统规划与管理提供依据。研究结果也表明,SOFM聚类可有效识别不同聚类间数据结构的差异<sup>[46]</sup>,在自然资源生态安全区划中具有良好的应用效果。

本区划方案在二级区划分中,根据自然资源生态安全水平分为I—V级,针对不同等级状况可采取不同程度的生态保护措施。例如,Ⅲ级为预警状态,此类区域往往是生态服务功能开始出现退化,但其基本状态尚可维持<sup>[47]</sup>,因此是未来需要重点关注、及时采取措施保护的区域;I级和Ⅱ级为重警和中警状态,此类区域生态恢复较困难,生态系统结构破坏较大,需采取长效措施来缓解生态系统所面临的压力;V级和Ⅳ级为安全与较安全状态,此类区生态环境基本未遭到破坏,有必要采取有效措施预防出现新的生态问题。

本文在土地利用数据选取时使用2020年数据,而气象因子数据采用1980—2015年平均值,考虑到当下气候异常与极端事件频繁发生,生态系统不稳定性增加,这样的数据处理可能会增加研究结果的不确定性。同时,由于自然资源生态安全耦合了人类福祉与生态系统健康,涉及到诸多方面的因素<sup>[48]</sup>,本研究基于生态敏感性与生态服务重要性来揭示自然资源生态安全水平,但目前自然资源生态安全评价指标及方法规则尚未形成统一的标准,还有待继续深入研究。科学有效地刻画自然地理环境与人文经济发展间关联,是实现区域生态环境保护与高质量发展需重点关注的问题,应在后续的研究中围绕社会-生态复合系统展开分析。

### 3.2 结论

本研究立足于新时代生态文明建设的宏观背景,着眼于自然资源的空间属性,构建了全国自然资源生态安全评价指标体系与评价规则,应用SOFM模型,制订了中国自然资源生态安全区划方案。结果显示,我国自然资源生态安全水平整体偏低,以中警与重警状态为主,占全国总面积54.57%,安全和较安全状态的区域仅占24.22%;低安全等级区多分布于400mm等降水量线以西的干旱、半干旱区,高安全等级区则集中分布于水热资源与生物资源较为丰富的东南部地区。制订的中国自然资源生态安全区划方案包括8个一级区和27个生态安全等级二级区,分析了二级区自然资源生态安全状况,从资源利用模式、生态保护措施等方面提出了对策。研究结果对分区、分类推进全国自然资源可持续利用和国土空间优化提供理论支持与决策依据。

### 参考文献(References):

- [1] Wei F, Zhan X W. Delineating urban growth boundaries with ecosystem service evaluation. *Sustainability*, 2019, 11(19): 5390.
- [2] Pan N H, Du Q Q, Guan Q Y, Tan Z, Sun Y F, Wang Q Z. Ecological security assessment and pattern construction in arid and semi-arid areas: a case study of the Hexi Region, NW China. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108797.
- [3] 沈镭,张红丽,钟帅,胡纾寒. 新时代下中国自然资源安全的战略思考. *自然资源学报*, 2018, 33(5): 721-734.
- [4] Cheng H R, Zhu L K, Meng J J. Fuzzy evaluation of the ecological security of land resources in mainland China based on the Pressure-State-Response framework. *Science of the Total Environment*, 2022, 804: 150053.
- [5] 刘焱序,傅伯杰,王帅,赵文武. 从生物地理区划到生态功能区划——全球生态区划研究进展. *生态学报*, 2017, 37(23): 7761-7768.
- [6] 蒙古军. 综合自然地理学. 3版. 北京: 北京大学出版社, 2020.
- [7] 黄秉维. 中国综合自然区划草案. *科学通报*, 1959(18): 594-602.
- [8] 赵松乔. 中国综合自然地理区划的一个新方案. *地理学报*, 1983, 38(1): 1-10.

- [ 9 ] 邓静中. 中国农业区划方法论研究. 北京: 科学出版社, 1960.
- [ 10 ] 邱宝剑, 黄秉维. 中国农业自然区划, 北京: 中国地图出版社, 1988.
- [ 11 ] 周立三. 中国农业区划的理论与实践. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993.
- [ 12 ] 耿大定, 陈传康, 杨吾扬, 江美球. 论中国公路自然区划. 地理学报, 1978, 33(1): 49-61.
- [ 13 ] 杨树珍. 国土整治与经济区划. 地理学报, 1983, 38(2): 105-112.
- [ 14 ] 石忆邵. 浅论中国乡村经济区划. 农业区划, 1991, 12(2): 54-56.
- [ 15 ] 隋锡山, 周鸣, 彭国同. 中国商业经济区划初探. 地理科学, 1991, 11(3): 213-222.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] 樊杰. 我国主体功能区划的科学基础. 地理学报, 2007, 62(4): 339-350.
- [ 18 ] 潘竟虎, 从忆波. 基于景点空间可达性的中国旅游区划. 地理科学, 2014, 34(10): 1161-1168.
- [ 19 ] 董世魁, 唐芳林, 平晓燕, 杨秀春, 杨智, 林长存, 卢欣石, 王铁梅, 纪宝明, 徐斌, 苏德荣. 新时代生态文明背景下中国草原分区与功能辨析. 自然资源学报, 2022, 37(3): 568-581.
- [ 20 ] 朱蓉, 徐红, 龚强, 孙朝阳, 常蕊. 中国风能开发利用的风环境区划. 太阳能学报, 2023, 44(3): 1-14.
- [ 21 ] 刘彦随, 张紫雯, 王介勇. 中国农业地域分异与现代农业区划方案. 地理学报, 2018, 73(2): 203-218.
- [ 22 ] Xu K P, Wang J N, Wang J J, Wang X H, Chi Y Y, Zhang X. Environmental function zoning for spatially differentiated environmental policies in China. *Journal of Environmental Management*, 2020, 255: 109485.
- [ 23 ] 黄皎, 高阳, 赵志强, 李双成. 基于 GIS 与 SOFM 网络的中国综合自然区划. 地理研究, 2011, 30(9): 1648-1659.
- [ 24 ] Wang Z S, Li W F, Li Y S, Qin C B, Lv C Y, Liu Y. The "Three Lines One Permit" policy: an integrated environmental regulation in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 163: 105101.
- [ 25 ] Xu Z H, Peng J, Dong J Q, Liu Y X, Liu Q Y, Lyu D N, Qiao R L, Zhang Z M. Spatial correlation between the changes of ecosystem service supply and demand: an ecological zoning approach. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 217: 104258.
- [ 26 ] 陈新闯, 李小倩, 吕一河, 郭建英, 谷德海, 吴颜岐. 生态空间区划体系的理论内涵及关键技术研究. 生态学报, 2022, 42(3): 843-850.
- [ 27 ] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 乔青, 奚雪松. 国土尺度生态安全格局. 生态学报, 2009, 29(10): 5163-5175.
- [ 28 ] Chen J, Wang S S, Zou Y T. Construction of an ecological security pattern based on ecosystem sensitivity and the importance of ecological services: a case study of the Guanzhong Plain urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108688.
- [ 29 ] Jin C, Xu J, Huang Z F. Spatiotemporal analysis of regional tourism development: a semiparametric Geographically Weighted Regression model approach. *Habitat International*, 2019, 87: 1-10.
- [ 30 ] 尤南山, 蒙古军. 基于生态敏感性和生态系统服务的黑河中游生态功能区划与生态系统管理. 中国沙漠, 2017, 37(1): 186-197.
- [ 31 ] Gao J Z, Liu C J, He G S, Wang T. Study on the management of marine economic zoning: an integrated framework for China. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 149: 165-174.
- [ 32 ] Benevides M N, de Sousa Teixeira D B, Carlo J C. Climatic zoning for energy efficiency applications in buildings based on multivariate statistics: the case of the Brazilian semiarid region. *Frontiers of Architectural Research*, 2022, 11(1): 161-177.
- [ 33 ] 彭建, 胡熠娜, 吕慧玲, 酆天映, 陈昕. 基于要素-结构-功能的生态功能分区——以大理白族自治州为例. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2251-2259.
- [ 34 ] Lin J Y, Li X. Large-scale ecological red line planning in urban agglomerations using a semi-automatic intelligent zoning method. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 46: 101410.
- [ 35 ] 袁红. 基于层次分析和模糊评判的湖北省休闲农业区域发展潜力分析. 中国农业资源与区划, 2018, 39(9): 309-314.
- [ 36 ] 吴佳楠, 储君, 孙裔燾, 晁恒. SOFM 网络下的深圳市城市用地功能识别分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2022, 58(4): 664-672.
- [ 37 ] 魏婵娟, 蒙古军. 中国土地资源生态敏感性评价与空间格局分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2022, 58(1): 157-168.
- [ 38 ] 吴英迪, 蒙古军. 中国自然资源生态服务重要性评价与空间格局分析. 自然资源学报, 2022, 37(1): 17-33.
- [ 39 ] 崔宁, 于恩逸, 李爽, 唐明方, 吴钢. 基于生态系统敏感性与生态功能重要性的高原湖泊分区保护研究——以达里湖流域为例. 生态学报, 2021, 41(3): 949-958.
- [ 40 ] Zhang Y L, Zhao Z Y, Fu B J, Ma R M, Yang Y Y, Lü Y H, Wu X. Identifying ecological security patterns based on the supply, demand and sensitivity of ecosystem service: a case study in the Yellow River Basin, China. *Journal of Environmental Management*, 2022, 315: 115158.
- [ 41 ] 冯喆, 蒋洪强, 卢亚灵. 基于大数据方法和 SOFM 聚类中国经济-环境综合分区研究. 地理科学, 2019, 39(2): 242-251.
- [ 42 ] Wang Z Y, Luo K Y, Zhao Y H, Lechner A M, Wu J S, Zhu Q L, Sha W, Wang Y L. Modelling regional ecological security pattern and restoration priorities after long-term intensive open-pit coal mining. *Science of the Total Environment*, 2022, 835: 155491.
- [ 43 ] Fei D Q, Cheng Q, Mao X F, Liu F G, Zhou Q. Land use zoning using a coupled gridding-self-organizing feature maps method: a case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 1162-1170.
- [ 44 ] Kohonen T. Essentials of the self-organizing map. *Neural Networks*, 2013, 37: 52-65.
- [ 45 ] 杨保清, 晁恒, 李贵才, 何谕. 中国村镇聚落概念、识别与区划研究. 经济地理, 2021, 41(5): 165-175.
- [ 46 ] 苗鸿, 王效科, 欧阳志云. 中国生态环境胁迫过程区划研究. 生态学报, 2001, 21(1): 7-13.
- [ 47 ] 喻锋, 李晓兵, 王宏, 余弘婧. 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价. 地理学报, 2006, 61(6): 645-653.
- [ 48 ] 王梓洋, 石培基, 张学斌, 姚礼堂, 童华丽. 基于栅格尺度的生态安全评价及生态修复——以酒泉市肃州区为例. 自然资源学报, 2022, 37(10): 2736-2749.