

# 区域生态承载力预警评估方法及案例研究

徐卫华<sup>1</sup>, 杨琰瑛<sup>1,2</sup>, 张路<sup>1</sup>, 肖燚<sup>1</sup>, 王效科<sup>1</sup>, 欧阳志云<sup>1</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**本文针对国家资源环境承载能力监测预警评估中生态承载力评估的需求,探讨了生态承载力及预警的定义与内涵,从预警角度提出区域生态承载力评价的内容与方法,并以京津冀地区为例开展了案例研究。主要结论为:生态承载力是指生态系统提供服务功能、预防生态问题、保障区域生态安全的能力。生态承载力预警评估的实质是评估人类活动是否及在多大程度上影响生态系统在水源涵养、水土保持、防风固沙等主要服务功能的提供,是否产生了生态环境问题,是否影响到区域的生态安全。其评价流程主要包括:区域生态承载力评价指标选取及评价方法和阈值的确定、生态承载力预警状况及变化趋势分析、成因解析等内容。本文提出的生态承载力预警评价的方法及案例,可为全国及区域生态承载力的评估提供基础。

**关键词:**生态承载力;预警;生态系统服务;生态安全;京津冀地区

## 1 引言

生态系统所提供的资源、环境条件和服务是人类生存和社会经济发展的基础。近年来随着中国人口的迅猛增长、社会经济的快速发展,土地、矿产、水资源等自然资源的快速消耗,产生了一系列的生态环境问题,威胁到国家与区域的生态安全及人类社会的可持续发展。为了保持社会经济的可持续发展,关键之一就是要了解区域人类活动的强度是否超过了生态系统的承受与调节能力,进而采取有针对性的对策与措施。因此,有关承载力的理论与方法受到国内外的关注(Cohen, 1995; 余卫东等, 2003; 齐亚彬, 2005; 王俭等, 2005; 高鹭等, 2007; 向芸芸等, 2012),特别是近年来,有关承载力的研究受到国家层面的关注,并提出要建立资源环境承载力监测预警机制,区域资源环境承载力状况已成为国家社会经济发展规划的重要决策依据之一(樊杰等, 2015; 封志明等, 2016)。

承载力是生态学中的一个基本概念,最初应用于野生动物种群数量的评估,是指一定地区在不损

害未来物种支持能力的情况下该物种的最大数量(Odum, 1971; Daily et al, 1996)。后来,承载力的概念逐步应用到社会、经济、环境等领域,以土地生产潜力、人口承载能力、资源环境承载能力等为主要指标(齐亚彬, 2005; 高鹭等, 2007; 向芸芸等, 2012),评估一定区域对人口与经济规模支撑能力,以及对污染物的容纳能力。传统承载力的评估有其前提条件,即要在相对封闭的系统或者研究区域内开展。但随着资源配置的全球化,人类需求的多样化和层次化,传统意义上的承载力评估往往难以实现。尽管国内外开展了大量的研究,但目前对于承载力仍然缺乏统一的定义(向芸芸等, 2012),如何定量的评估承载力、如何确定承载力的阈值仍然是研究的难点(向芸芸等, 2012)。本文针对国家资源环境承载能力监测预警评估中生态承载力评估的要求,探讨生态承载力及预警的内涵;并从承载力的本体出发,从预警的角度提出区域生态承载力评价的内容、方法,探讨可能存在的不足,以期为全国及区域生态承载力的评估提供基础。

收稿日期:2017-01;修订日期:2017-03。

基金项目:中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STIS-ZDTP-022)[Foundation: Science and Technology Service Network Initiative of the Chinese Academy of Sciences, No.KFJ-STIS-ZDTP-022]。

作者简介:徐卫华(1977-),男,湖南益阳人,副研究员,主要从事生态评价、生物多样性保护研究,E-mail: xuweihua@rcees.ac.cn。

引用格式:徐卫华, 杨琰瑛, 张路, 等. 2017. 区域生态承载力预警评估方法及案例研究[J]. 地理科学进展, 36(3): 306-312. [Xu W H, Yang Y Y, Zhang L, et al. 2017. Evaluation methods and case study of regional ecological carrying capacity for early-warning[J]. Progress in Geography, 36(3): 306-312.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.03.005

## 2 生态承载力及预警的含义

本文中的生态承载力是指生态系统提供服务功能、预防生态问题、保障区域生态安全的能力。生态承载力主要包括2个方面,一是提供服务的能力,例如水源涵养、水土保持、固碳、气候调节等方面,这些生态系统服务是经济社会发展的基础(欧阳志云等, 2015)。二是预防生态问题的能力,例如预防土地沙化、水土流失和石漠化等生态问题,防止生物多样性丧失,调蓄洪水等。生态系统通过提供生态环境条件与生态系统服务功能,来满足人类长期生存发展的需要,支撑经济发展和社会安定,保障人民生活和健康不受环境污染与生态破坏损害,从而实现区域生态安全。

广义上的生态承载力包括生态系统提供的所有产品与服务的能力,也就是涵盖了自然资源与产品的提供能力,以及空气与水质等环境污染物的净化能力等。狭义的生态承载力仅包括部分关键生态系统调节功能,例如水源涵养、水土保持功能等,而将资源提供相关的功能(如水资源提供等)归为资源承载力,污染物净化功能(如空气质量调节与水质净化等)归到环境承载力。生态承载力与资源承载力、及环境承载力共同构成资源环境承载能力的3个主要方面(樊杰等, 2015),本文重点探讨狭义生态承载力的评价方法。

生态承载力预警是生态承载力评估的重要内容,从供给与消费的角度来看(高鹭等, 2007),其实质是人类对自然资源开发、对于产品与服务的消费是否超过生态系统可持续的供给能力,人类活动是否及在多大程度上影响到生态系统在水源涵养、水土保持、防风固沙等主要服务功能的提供,是否产生了生态环境问题,是否影响到区域的生态安全。如果人类的开发活动超过了生态系统的承受能力,导致生态系统的破坏与生态功能的退化,致使新的生态问题产生或原有生态问题的加剧,威胁区域的生态安全,就需要进行预警。

## 3 生态承载力预警评价流程

生态承载力预警评价流程主要包括指标选取、评价方法及阈值的确定、生态承载力预警状况及变化趋势分析、成因解析等内容。

### 3.1 评价指标选取

生态承载力的预警评价指标选取应该遵循如下原则:①能反映区域生态系统特征。选取关键生

态功能和生态问题相关的评价指标。全国或区域性的生态功能包括水源涵养、水土保持、防风固沙、洪水调蓄、生物多样性保护等,生态问题包括土壤沙化、水土流失、石漠化与盐渍化等。②可测度与评价。选取的指标须在现有的研究基础和条件上可以开展评价,能方便获得评价所需的数据。③具有政策导向性。通过生态保护与生态恢复政策的实施与调整能实现生态承载力的提升。

### 3.2 评价方法选取与阈值确定

评价方法的选取重点考虑科学性和可操作性,推荐采用公认的研究方法(见下文)。阈值是判断生态承载力是否需要预警的关键因素。阈值的确定一般参考内外相关领域已经广泛应用的研究成果,特别是国家与行业已经发布的标准。生态承载力的阈值具有空间与时间异质性。中国国土幅员辽阔,自然环境条件空间差异较大,不同区域阈值存在差异。同时,随着生态系统、承载对象和技术水平的变化,生态承载力的阈值也应该发生变化。

### 3.3 预警状况及变化趋势分析

根据生态系统承载力状况与阈值的关系,将生态系统预警状况分为预警、临界预警和不预警3个等级,明确不同预警等级区域的空间分布。另外,也可通过分析不同年份生态承载力的变化趋势来进行预警,将变好和稳定列为不预警,轻度变差为临界预警,显著变差列为预警。

### 3.4 成因解析与对策建议

从自然、社会、经济等方面分析生态承载力预警等级及变化的影响因素,明确生态保护与恢复政策实施对生态承载力的效果,识别导致生态承载力超载的关键因子,提出生态保护恢复对策与建议。

## 4 生态承载力预警评价方法

本文采用生态系统健康度作为预警指标进行评估,生态系统健康度可用生态系统服务功能或者生态退化来进行衡量。

### 4.1 基于生态系统服务功能的预警

不同的区域主导生态功能存在差异,识别评估区域关键生态系统服务功能,明确生态系统对于关键功能的提供状况,并进行预警。这种方法适用于重点或者重要生态功能区等具有明确主导服务功能的区域。在水源涵养、水土保持、防风固沙和生物多样性维护等不同类型的重点生态功能区(国家发展和改革委员会, 2015),可分别采用水土流失指数、土地沙化指数、水源涵养功能指数、自然栖息地

质量指数为特征指标,评价生态系统健康等级。

#### 4.1.1 水土流失指数

针对水土保持生态功能区,可采用水土流失指数进行评价。首先计算单位面积土壤侵蚀量,然后与该区域的容许土壤流失量相比较,根据值的大小进行分级,进而确定生态系统健康等级。

##### (1) 单位面积土壤侵蚀量

以水文监测站点有关泥沙含量的监测数据为基础,采用通用水土流失方程估算土壤侵蚀模数(Rao et al, 2014; Ouyang et al, 2016)。

$$A = R \times K \times LS \times C \quad (1)$$

式中: $A$ 为土壤侵蚀量; $R$ 为降雨侵蚀力因子,是指降雨引发土壤侵蚀的潜在能力,通过多年平均年降雨侵蚀力来反映; $K$ 为土壤可蚀性因子,是指土壤颗粒被水力分离和搬运的难易程度,主要与土壤质地、有机质含量、土体结构、渗透性等土壤理化性质有关; $LS$ 为地形因子,反映了坡长、坡度等对土壤侵蚀的影响; $C$ 为植被覆盖因子,反映了生态系统对土壤侵蚀的影响,是控制土壤侵蚀的积极因素。

##### (2) 水土流失指数

$$S_i = A/A_r \quad (2)$$

式中: $S_i$ 为水土流失指数; $A$ 、 $A_r$ 分别为土壤侵蚀量、容许土壤流失量,单位均为 $t/(km^2 \cdot a)$ 。根据中华人民共和国水利行业标准《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190-2007)》(中华人民共和国水利部, 2008),不同侵蚀类型区容许土壤流失量如表1所示。

水土流失指数值越低,表示水土流失强度越低,土壤保持功能越强,生态系统健康度越高。根据水土流失指数的高低,参考《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190-2007)》中有关水蚀等级的规定来确定阈值,将健康度划分为高、中和低3个等级(表2)。

#### 4.1.2 土地沙化指数

针对防风固沙生态功能区,采用土地沙化指数进行评价。计算单位面积风蚀量,与该区域的容许土壤流失量相比较,根据值的大小进行分级,进而确定生态系统健康度。

##### (1) 单位面积风蚀量

采用修正风蚀方程估算防风固沙生态功能区的土壤侵蚀模数(Fryrcar et al, 2001; Jiang et al,

2016),计算公式如下:

$$S_L = \frac{2 \times z}{S^2} Q_{\max} \times e^{-(z/s)^2}$$

$$S = 150.71 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711} \quad (3)$$

$$Q_{\max} = 109.8 \times [WF \times EF \times SCF \times K' \times C]$$

式中: $S_L$ 为实际土壤侵蚀量( $t/(km^2 \cdot a)$ ); $Q_{\max}$ 为最大转移量( $kg/m$ ); $z$ 为最大风蚀出现距离( $m$ ); $S$ 为地块长度; $WF$ 为气候侵蚀因子( $kg/m$ ),反映风力等风蚀的影响; $EF$ 为土壤侵蚀因子,主要受粗砂含量、粉砂含量、粘粒含量、有机质含量和碳酸钙含量的影响; $SCF$ 为土壤结皮因子,受土壤粘粒含量和有机质含量的影响; $K'$ 为地表糙度因子,主要受地势起伏等的影响; $C$ 为植被覆盖因子,反映不同植被类型与覆盖度的影响。

##### (2) 土地沙化指数

$$T_i = S_L/A_r \quad (4)$$

式中: $T_i$ 为土地沙化指数; $S_L$ 、 $A_r$ 分别为土壤侵蚀量、容许土壤流失量,单位均为 $t/(km^2 \cdot a)$ 。根据《中华人民共和国水利行业标准(SL190-2007)》(中华人民共和国水利部, 2008),确定风力侵蚀区容许土壤流失量为 $200 t/(km^2 \cdot a)$ 。

土地沙化指数值越低,表示风蚀强度越低,生态系统防风固沙功能越强,健康度越高。根据土地沙化指数值的大小,参考标准中有关风蚀等级的规定来确定阈值,将防风固沙功能评价结果划分为高( $S_i \leq 1$ )、中( $1 < S_i \leq 2$ )和低( $S_i > 2$ )等3个等级。

#### 4.1.3 水源涵养功能指数

针对水源涵养生态功能区,采用水源涵养功能指数进行评价。计算生态系统单位面积的水源涵养量,与单位面积降雨量进行比较,根据值的大小进行分级,进而明确生态系统健康度等级。

##### (1) 水源涵养量

采用水量平衡方程来计算水源涵养量,主要与降水量、蒸散发、地表径流量和植被覆盖类型等因素密切相关(Ouyang et al, 2016)。

$$TQ = \sum_{i=1}^j (P_i - R_i - ET_i \cdot A_i) \quad (5)$$

表2 各侵蚀类型区预警等级阈值

Tab.2 Early-warning threshold values in different soil erosion zones

表1 各侵蚀类型区容许土壤流失量

Tab.1 Soil loss tolerance in different soil erosion zones

类型区	容许土壤流失量/ $t/(km^2 \cdot a)$
西北黄土高原区	1000
南方红壤丘陵区,西南土石山区	500
东北黑土区,北方土石山区	200

类型区	高	中	低
西北黄土高原区	$\leq 1.0$	1~5.0	$> 5.0$
南方红壤丘陵区,西南土石山区	$\leq 1.0$	1~10.0	$> 10.0$
东北黑土区,北方土石山区	$\leq 1.0$	1~12.5	$> 12.5$



式中:  $TQ$  为总水源涵养量( $m^3$ );  $P_i$  为降雨量( $mm$ );  $R_i$  为第  $i$  类生态系统地表径流量( $mm$ );  $ET_i$  为蒸散发( $mm$ );  $A_i$  为第  $i$  类生态系统的面积;  $j$  为研究区生态系统类型数。

其中, 地表径流量( $R_i$ )由降雨量乘以地表径流系数获得, 计算公式如下:

$$R = P \times a \quad (6)$$

式中:  $R$  为地表径流量( $mm$ );  $P$  为年降雨量( $mm$ );  $a$  为平均地表径流系数, 不同生态系统类型地表径流系数均值参见 Ouyang 等(2016)。

## (2) 水源涵养功能指数分级

水源涵养功能指数为单位面积水源涵养量与同一生物地理区域内未退化生态系统单位面积水源涵养量的比值, 根据比值的大小将健康度分为高( $\geq 0.75$ ), 中( $0.50 \sim 0.75$ )和低( $< 0.50$ )等3个等级。

### 4.1.4 自然栖息地质量指数

针对生物多样性维护生态功能区, 采用自然栖息地质量指数进行评价。计算自然栖息地的质量状况, 根据值的大小进行分级, 进而评估生态系统健康度等级。

#### (1) 自然栖息地质量状况

由于珍稀濒危物种空间分布的数据可获得性差, 因此重点评估森林、灌丛、草地和湿地等自然栖息地的整体质量状况, 可以参考 InVEST 模型中栖息地质量等级的计算方法(Sharp et al, 2016), 该方法主要考虑自然栖息地的面积、分布与胁迫状况等因素, 具体评价方法如下。

$$Q_{xj} = H_j \left( 1 - \left( D_{xj}^z / D_{xj}^c + k^z \right) \right) \quad (7)$$

式中:  $Q_{xj}$  是土地利用与土地覆盖类型  $j$  中栅格  $x$  的生境质量;  $D_{xj}$  是土地利用与土地覆盖或生境类型  $j$  栅格  $x$  的生境胁迫水平, 具体参数参见 InVEST 模型。

如果生物多样性维护生态功能区中有明确的保护对象, 也可以通过评估主要保护对象的栖息地质量来反映区域的自然栖息地质量状况。

#### (2) 自然栖息地质量状况分级

在评估的基础上, 统计评价区域内自然栖息地平均质量状况, 结果为  $0 \sim 1$ 。根据比值的大小可以将健康度分为高( $\geq 0.75$ ), 中( $0.50 \sim 0.75$ )和低( $< 0.50$ )等3个等级, 也可以根据评价区域具体保护对象的特征确定相应的等级阈值。

### 4.2 基于生态退化的预警

在评估实践中, 由于许多生态系统服务的物质质量难以量化, 数据的可获得性较差, 因此可采取已经超过阈值, 产生生态环境损害的土地面积比例作

为通用的预警指标表征生态系统健康度。根据已经发生生态退化的土地面积比例及程度, 来进行预警评价, 计算公式如下。

$$H = A_d / A_l \quad (8)$$

式中:  $H$  为生态系统健康度;  $A_d$  为中度及以上退化土地面积, 包括中度及以上的水土流失、土地沙化和土地石漠化面积;  $A_l$  为评价区土地面积。水土流失、土地沙化和土地石漠化面积及等级可参考水利部、国家林业局的调查结果, 也可根据相关的标准进行计算。另外, 生态退化评价指标选取可根据评价区域的特征和面临的生态环境问题进行相应的调整, 可以增加森林、草地、湿地等生态系统退化的指标。

根据中度及以上生态退化土地面积比例来确定评价区域的健康度状况, 分为高、中和低3个等级, 具体的分级阈值可根据区域生态特征和面临的问题进行确定。其中, 健康度高的区域, 退化土地面积比例低, 无需预警; 健康度中等的区域, 退化土地面积比例中等, 为临界预警; 健康度低的区域, 退化土地面积比例大, 需要预警。

## 5 生态承载力预警案例研究

本文选取京津冀地区开展案例研究, 评估重点生态功能区的生态承载力。

### 5.1 案例区及研究方法简介

根据全国及北京、天津和河北的主体功能区规划(国家发展和改革委员会, 2015), 国家与省级重点生态功能区主要为防风固沙和水源涵养2种类型, 共涉及49个区县, 面积  $11.3$  万  $km^2$ , 占京津冀总面积的  $52.4\%$ 。其中, 防风固沙重点生态功能区主要分布在坝上高原, 涉及6个区县, 占京津冀总面积的  $14.7\%$ ; 水源涵养功能区分布于北部燕山山脉地区和西部太行山区, 涉及43个区县, 占京津冀总面积的  $37.7\%$ 。

根据4.1小节的评价方法, 评估京津冀重点生态功能区有关防风固沙和水源涵养功能的生态承载力。评价数据主要包括用于防风固沙、水源涵养评估的生态系统类型、植被覆盖度、地表糙度、风速、降水量、生态系统径流系数等气象与生态系统数据。其中生态系统类型和植被覆盖度数据来自中国科学院遥感所; 气象数据来自国家气象局京津冀地区监测台站, 并通过插值获得; 生态系统径流系数来自全国已经发布的径流监测试验, 并经过多次专家研讨会最终确定。

## 5.2 主要研究结果

### (1) 防风固沙功能区生态功能

根据土地沙化指标的评估结果,生态系统防风固沙功能高、生态系统健康度高的区域包括丰宁和围场2个县,总面积17769 km<sup>2</sup>,占防风固沙生态功能区县域总面积的56%,无需预警。防风固沙功能中等区域包括尚义和沽源2个县,总面积6206 km<sup>2</sup>,占防风固沙生态功能区县域总面积的20%,处于临界预警。防风固沙功能低的区域集中分布于西北邻近内蒙古高原的干旱半干旱区域,包括康保、张北2个区县,总面积7550 km<sup>2</sup>,占防风固沙生态功能区总面积的24%,应该预警(图1a)。

### (2) 水源涵养功能区生态功能

根据水源涵养功能的评估结果,水源涵养功能较高、生态系统健康度高的区域主要包括阜平、灵寿、平山等19个区县,总面积35808 km<sup>2</sup>,占生态功能区县域总面积的44%,无需预警。水源涵养功能中等区域包括沙河、门头沟、曲阳等16个区县,总面积28404 km<sup>2</sup>,占生态功能区县域总面积的35%,处于临界预警。水源涵养功能低的区域集中分布于燕山山脉、内蒙古高原、太行山脉的交界地区,包括万全、崇礼、赤城等8个区县,总面积17546 km<sup>2</sup>,占生态功能区县域总面积的21%,应该预警(图1b)。

### (3) 重点功能区生态功能综合评估

综合土地沙化和水源涵养的评估结果,京津冀重点生态功能区功能较高的区域主要包括燕山山脉东部地区和西部太行山地,涉及阜平、灵寿、平山等21个区县,占生态功能区总面积的47%。功能中

等的区域包括顺平、门头沟、曲阳等18个区县,占生态功能区总面积的31%。功能较低的区县集中分为燕山山脉、内蒙古高原、太行山脉的交界地区,包括万全、崇礼、阳原等10个区县,占生态功能区总面积的22%(图1c)。

## 5.3 政策建议

根据评价结果,京津冀地区重点生态功能区生态系统功能总体中等,43%的区县功能较高,但仍有57%的区县为处于中、低水平,其中有10个区县防风固沙和水源涵养功能较低,需要预警并高度重视,预防生态问题扩大。为此,应根据生态问题的空间分布和强度,开展具有针对性的生态保护工作,划定生态保护红线,并配套有效的管理措施,同时在这些区域建立长效监测和考核机制,确保区域生态安全。

(1) 划定以生态系统服务功能导向的生态保护红线。生态保护红线是保障区域生态安全所需要的基准生态空间,生态红线区能够提供必要的生态系统服务,支撑当地社会经济发展。京津冀地区是中国重要的经济区,开发强度大,人口数量和经济体量巨大。同时,京津冀地区内的大部分区域地处于干旱—湿润气候区过渡带,生态系统脆弱。因此,应以本次评估结果为基础,选择生态服务功能供给的关键区域,划定生态保护红线,并严格禁止大规模开发行为。

(2) 在重点功能区实施生态恢复工程。对于风蚀量较大的康保、尚义、沽源、张北4市县,以自然生态恢复为主,应在“宜乔则乔、宜灌则灌、宜草则草”

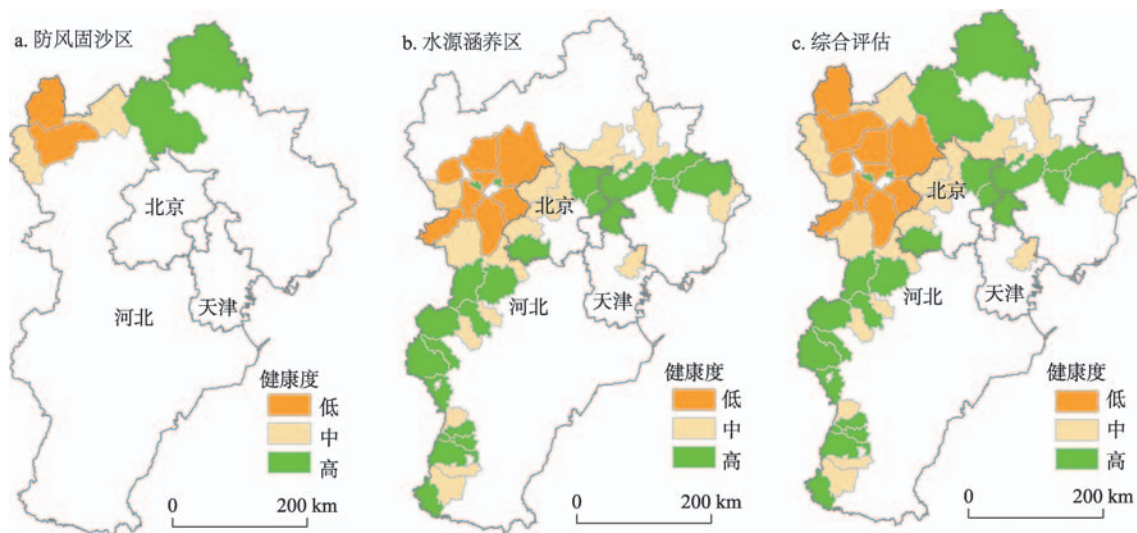


图1 京津冀地区重点生态功能区生态承载力预警评估结果

Fig.1 Evaluation of ecological carrying capacity for early-warning in key ecological function zones of the Beijing-Tianjin-Hebei region



的指导原则下辅以人工恢复工程,固定沙地,防止沙化区扩大。对于西北部近内蒙古高原万全、崇礼、赤城等8个山地区县,恢复与重建水源涵养区森林、灌丛、草原、湿地等自然生态系统,提高生态系统的水源涵养功能。

(3) 建立长效监测、考核和生态补偿机制。在防风固沙和水源涵养核心区域建立监测站,并结合遥感技术,开展“天地一体化”的实时监测,以及时评估土地沙化和水源涵养功能的变化。建立针对防风固沙和水源涵养功能区的自然资源核算和评估体系,并纳入当地政府绩效考核体系,以提高当地政府对生态问题的重视、促进当地生态问题的解决。建立重点生态功能区的生态补偿机制,由国家及有关省市统筹补偿资金,明确具体的补偿对象,以减轻当地居民对自然资源的依赖,促进自然生态系统及生态功能的恢复。

## 6 结论与讨论

目前对于生态承载力缺乏统一的定义,如何定量的评估生态承载力、如何确定承载力的阈值是研究的难点。本文从生态系统服务的角度定义了生态承载力,认为生态承载力是生态系统提供服务功能、预防生态问题、保障区域生态安全的能力。本文认为,生态承载力预警评估的实质是评估人类活动是否及在多大程度上影响生态系统在水源涵养、水土保持、防风固沙等主要生态服务功能的提供能力,是否产生了生态环境问题,是否影响到区域的生态安全。在此定义和内涵理解的基础上提出了生态承载力预警评估的内容、流程与方法,可以为区域生态承载力的评估提供基础。

根据本文提出的评估方法,以京津冀地区的49个重点生态功能区县为对象开展案例研究,发现21个区县生态系统健康度较高,无需预警;18个区县健康度中等,为临界预警;10个区县健康度低,需要预警。根据生态承载力预警状况,建议划定以生态系统服务功能导向的生态保护红线,在重点功能区实施生态恢复工程,建立长效监测、考核和生态补偿机制等。

由于生态系统的复杂性、承载对象的差异性,生态系统承载力预警评估尚有以下一些问题值得进一步思考。

(1) 有关评价内容与指标。生态系统服务一般包括产品提供服务、调节服务、文化服务和支持服务等4个方面,本文主要关注调节服务,而调节服务

又包括水源涵养、水土保持、防风固沙、气候调节、洪水调蓄、海岸防护等多个方面的内容。从生态退化来说,包括森林、草地、湿地等自然生态系统的退化,以及由此造成的生态问题,比如土壤侵蚀、土地沙化、石漠化、盐渍化等。因此,在实际的评估中,不可能对所有的内容都进行评价,要根据评价区域的生态特征以及面临的主要生态环境问题,选择关键的需求进行预警的指标进行评估。

(2) 有关评价方法。评估方法的选择要兼顾科学性、研究基础和数据的可获得性,除此以外,还要将现状与历史变化趋势综合起来进行分析。对于难以确定阈值和是否超载的指标,可通过时间序列数据的分析而确定。对于容易确定阈值的指标,通过历史变化趋势分析,能进一步明确已经超载,并且超载程度加剧的区域,重点对这些区域进行预警,并采取有针对性的对策与措施。

(3) 有关评估单元与尺度。本文提出的研究方法基本上是以网格为基本单元进行计算的,为了与其他资源承及环境承载力等评价指标保持一致,需要以县域等行政单元为基础进行重新统计,由于统计单元面积的变大可能导致评价结果更加均值化而影响评价结果。因此,在评价中要注意评价尺度和评价单元对结果的影响,如果评价区域面积较小,可细化到乡镇或者更小的行政单元,以便保留更多的评估细节。

## 参考文献(References)

- 樊杰,王亚飞,汤青,等. 2015. 全国资源环境承载能力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程[J]. 地理科学, 35(1): 1-10. [Fan J, Wang Y F, Tang Q, et al. 2015. Academic thought and technical progress of monitoring and early-warning of the national resources and environment carrying capacity (V 2014)[J]. Scientia Geographica Sinica, 35(1): 1-10.]
- 封志明,杨艳昭,江东,等. 2016. 自然资源资产负债表编制与资源环境承载力评价[J]. 生态学报, 36(22): 7140-7145. [Feng Z M, Yang Y Z, Jiang D, et al. 2016. The compilation of natural resources balance sheets (NRBS) and the evaluation of resources and environment carrying capacity (RECC)[J]. Acta Ecologica Sinica, 36(22): 7140-7145.]
- 高鹭,张宏业. 2007. 生态承载力的国内外研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 17(2): 19-26. [Gao L, Zhang H Y. 2007. Progress in research of ecological carrying capacity[J]. China Population, Resources and Environment, 17(2): 19-26.]
- 国家发展和改革委员会. 2015. 全国及各地区主体功能区规划[M]. 北京: 人民出版社. [National Development and Reform Commission. 2015. Quanguo ji gediqu zhuti gongnen-

- gqu guihua[M]. Beijing, China: People's Publishing House.]
- 欧阳志云, 李小马, 徐卫华, 等. 2015. 北京市生态用地规划与管理对策[J]. 生态学报, 35(11): 3778-3787. [Ouyang Z Y, Li X M, Xu W H, et al. 2015. Ecological land use planning and management in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(11): 3778-3787.]
- 齐亚彬. 2005. 资源环境承载力研究进展及其主要问题剖析[J]. 中国国土资源经济, 18(5): 7-11. [Qi Y B. 2005. The present situation of resource environmental bearing-capacity research and analysis of its main problems[J]. *Natural Resource Economics of China*, 18(5): 7-11.]
- 王俭, 孙铁珩, 李培军, 等. 2005. 环境承载力研究进展[J]. 应用生态学报, 16(4): 768-772. [Wang J, Sun T H, Li P J, et al. 2005. Research progress on environmental carrying capacity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16(4): 768-772.]
- 向芸芸, 蒙古军. 2012. 生态承载力研究和应用进展[J]. 生态学杂志, 31(11): 2958-2965. [Xiang Y Y, Meng J J. 2012. Research and application advances in ecological carrying capacity[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 31(11): 2958-2965.]
- 余卫东, 闵庆文, 李湘阁. 2003. 水资源承载力研究的进展与展望[J]. 干旱区研究, 20(1): 60-66. [Yu W D, Min Q W, Li X G. 2003. Some progresses and perspectives in study on the carrying capability of water resources[J]. *Arid Zone Research*, 20(1): 60-66.]
- 中华人民共和国水利部. 2008. SL 190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社. [Ministry of Water Resource of China. 2008. SL 190-2007 Standards for classification and gradation of soil erosion[S]. Beijing, China: China Water and Power Press.]
- Cohen J E. 1995. Population growth and earth's human carrying capacity[J]. *Science*, 269: 341-346.
- Daily G C, Ehrlich P R. 1996. Population, sustainability, and earth's carrying capacity[M]//Samson F B, Knopf F L. *Ecosystem management*. New York: Springer: 435-450.
- Fryrear D W, Chen W N, Lester C. 2001. Revised wind erosion equation[J]. *Annals of Arid Zone*, 40(3): 265-279.
- Jiang L, Xiao Y, Zheng H, et al. 2016. Spatio-temporal variation of wind erosion in Inner Mongolia of China between 2001 and 2010[J]. *Chinese Geographical Science*, 26(2): 155-164.
- Odum E P. 1971. *Fundamentals of ecology*[M]. 3rd ed. Philadelphia, PA: Saunders.
- Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, et al. 2016. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital[J]. *Science*, 352: 1455-1459.
- Rao E M, Ouyang Z Y, Yu X X, et al. 2014. Spatial patterns and impacts of soil conservation service in China[J]. *Geomorphology*, 207: 64-70.
- Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, et al. 2016. InVEST + VER-SION+ user's guide[DB/OL]. 2016-12[2017-02-28] <http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html/>.

## Evaluation methods and case study of regional ecological carrying capacity for early-warning

XU Weihua<sup>1</sup>, YANG Yanying<sup>1,2</sup>, ZHANG Lu<sup>1</sup>, XIAO Yi<sup>1</sup>, WANG Xiaoke<sup>1</sup>, OUYANG Zhiyun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the national needs for resources and environment carrying capacity monitoring and early-warning, this article addresses the definition of ecological carrying capacity and its evaluation method for early-warning. A case study was carried out for the Beijing-Tianjin-Hebei region. The article concludes that ecological carrying capacity refers to the ability of ecosystems in providing ecosystem services, preventing ecological problems, and ensuring ecological security. Ecological carrying capacity evaluation for early-warning is to examine the extent of human disturbances that affect ecosystem services supply with regard to water retention, soil retention, sandstorm prevention; produce ecological problems; and affect regional and national ecological security. The main procedures involve indicator and evaluation method selection, threshold identification, status and trend analysis of ecological carrying capacity with reference to early-warning threshold, and cause analysis. The method and case study of ecological carrying capacity evaluation for early-warning proposed in this study can serve as a basis for regional and national assessment.

**Key words:** ecological carrying capacity; early-warning; ecosystem services; ecological security; Beijing-Tianjin-Hebei region