

DOI: 10.5846/stxb202012253277

陈利顶, 孙然好, 孙涛, 杨磊. 城市群生态安全格局构建: 概念辨析与理论思考. 生态学报, 2021, 41(11): 4251-4258.

Chen L D, Sun R H, Sun T, Yang L. Eco-security pattern building in urban agglomeration: conceptual and theoretical thinking. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4251-4258.

城市群生态安全格局构建: 概念辨析与理论思考

陈利顶^{1,2,*}, 孙然好^{1,2}, 孙涛^{1,2}, 杨磊^{1,2}

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:城市群是城市发展到一定阶段通过城市间物流、人流和能流高度融合而形成的区域性复合生态系统, 如何保障城市群生态安全与健康发展成为当前关注的热点问题。本研究系统分析了生态安全、城市生态安全与城市群生态安全的内涵。认为狭义上城市群生态安全侧重于城市群内部生态空间优化和生态系统服务功能提升, 重点关注城市群地区生态用地空间优化与“三生空间”(生态、生活及生产空间)的合理布局。广义上的城市群生态安全不仅需要考虑城市群内部生态系统结构和功能协调及其生态系统服务的供需平衡, 也需要从区域尺度考虑城市群与其他区域之间的协调关系。城市群生态安全格局构建的目的则是保障城市群内部区域一体化协调发展, 满足人们日常生活的基本需求, 实现城市群与区域之间物流、能流和人流的有序流通。在城市群生态安全格局构建时, 除了遵循生态安全一般性原则外, 还需要遵循以下原则: ① 生态系统服务供需平衡尺度效应; ② 生态安全保障的阈值效应; ③ 生态安全格局的空间联动效应。最后文章提出了城市群生态安全格局构建的基本思路和技术路径。

关键词:城市群; 生态安全; 生态安全格局构建; 生态系统服务供需平衡; 社会调控能力

Eco-security pattern building in urban agglomeration: conceptual and theoretical thinking

CHEN Liding^{1,2,*}, SUN Ranhao^{1,2}, SUN Tao^{1,2}, YANG Lei^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Urban agglomeration is a regional complex ecosystem developed by the integration of substance, energy and labor flow between cities after urban development to a high level. How to ensure the ecological security and sustainable development of urban agglomeration has become a hot topic. Through literature review, this paper analyzes the characteristics of ecological security, urban ecological security and urban agglomeration ecological security. In a broad sense, the ecological security of urban agglomeration needs to consider not only the optimization of ecosystem pattern and function as well as the balance of supply and demand of ecosystem service, but also the tele-coupling relationship between urban agglomeration and the other regions. The goal of building eco-security pattern in urban agglomeration is to ensure the coordinated development of regional integration within the urban agglomeration, to meet the basic needs of human daily life, and to realize the regular circulation of substance flow, energy flow and labor flow between urban agglomeration and the other regions. When an eco-security pattern of urban agglomeration is to be established, the following principles have to be followed: (1) the difference of supply and human demand on ecosystem services in different levels; (2) the threshold effect of eco-security for different cities; (3) the spatial synergistic linkage of eco-security pattern. Finally, the basic idea

基金项目:国家重点研发计划“脆弱生态修复与保护研究”重点专项(2016YFC0503000); 国家自然科学基金项目(41590841)

收稿日期:2020-01-22; **修订日期:**2021-12-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liding@rcees.ac.cn

and technical roadmap to build eco-security pattern in urban agglomeration was proposed.

Key Words: urban agglomeration; ecological security; ecological security pattern building; balance between supply and demand on ecosystem service; social regulation ability

随着人口增长和社会经济快速发展,城市化已经成为人类社会发展的必然趋势。作为人口和产业高度集聚的中心^[1-2],城市也成为维持人们日常生活需求和健康发展的主要空间载体和物质基础^[3];但在快速城市化给人类带来福祉同时,也带来了一系列的生态环境问题,如热岛效应、城市内涝、雾霾、水资源短缺、粮食供给不足、能源短缺、水土环境污染、生物多样性下降等^[4-5]。城市群是人类社会发展到一定阶段城市不断演变与发展的结果,通过与临近城市之间物流、能流、人流和信息流的高度融合与发展而形成的区域型复合生态系统,最终实现产业结构互补、生态功能协调、社会发展高度融合。在自然环境变化、人口集聚和社会经济活动不断增强的多重压力下,如何保障城市群生态安全与健康发展成为目前各界关注的热点问题^[6-7]。

生态安全本质是为了实现人类社会可持续发展^[8]。狭义上,生态安全是指人类生存所依赖的自然生态环境未受到人为破坏或干扰而导致生态系统功能失调的状态,可以为人类社会持续不断提供优质产品和服务,满足人类生存发展对自然生态环境的需求^[9]。广义上,生态安全是指影响人类生存安全的状态,涉及到衣食住行各个方面,反映了人类生存所依赖的环境是否可以满足不断增长的物质需求、精神需求,与此同时人类的身心健康又未受到严重威胁^[10]。狭义上生态安全强调自然生态系统的保护与优化利用,需要考虑人类社会经济发展与生态保护之间的协调关系;而广义的生态安全除了要求保护与人类有关的自然生态系统外,还要从物质需求、精神需求方面满足各种生态安全需求,突出对人类健康的维护。

1 城市生态安全与城市群生态安全

1.1 城市生态安全内涵与特点

城市生态系统是一个人为建造的开放型复合生态系统,与周边地区存在着复杂的物质和能量交换。城市生态安全是把城市生态系统健康与可持续发展作为最终目标,通过生态修复与重建,解决人类社会活动中所面临的各种生态环境问题,维持城市为人类提供福祉的能力^[11]。城市是人类生存的重要栖息场所,因此城市生态安全涉及到与人类有关的各种社会经济活动^[12-13]。城市生态安全的目的性很强,从人类生产与发展角度,探讨如何控制城市生活中所面临的各种生态环境问题,进而通过城市生态系统结构优化来增强城市生态系统的健康、提高城市居民的生活质量和生活水平,满足人们不断增长的物质需求和精神需求^[14-17]。

城市生态安全特点包括三个方面^[11]:(1)主观性。人类在城市发展与演变过程中居于主导地位,而城市生态安全又是以维持人类社会可持续发展作为主要目的,不同城市类型、不同社会群体对城市生态安全的理解不同,所面临的生态安全需求存在差异,因此城市生态安全具有一定的主观性。(2)可塑性。城市生态安全需要根据人类社会水平和生存需求,制定城市生态安全的目标,城市规划中建筑物抗震标准、防洪标准以及城市公共服务标准等,均是根据人类社会可承受的风险而制定。(3)阶段性。城市发展不同阶段人类的追求不同,那么人类谈及城市生态安全时也会因人而异、因城而变;特别是随着经济发展、人口集聚和城市规模的不断扩大,城市的功能随之发生改变,在城市生态安全上也会不断提高标准,提出新的要求。

1.2 城市群生态安全内涵

城市群生态安全不仅需要考虑各城市所面临的生态环境问题,也需要从城市群一体化发展角度,考虑城市复合生态系统的健康运行与可持续发展。城市群生态安全是指在保障城市复合生态系统正常社会经济活动同时,实现城市群地区生态系统结构优化与生态系统服务功能提升。内涵上,城市群生态安全与城市生态安全没有本质区别,但由于二者所关注的空间尺度不同,所面对的问题存在差异。城市群生态安全是从更大空间尺度上,探讨人类社会经济的有序发展,解析资源优化配置与物质、能源、信息的合理高效流动,是对城市

生态安全的补充、完善与提升。许多城市尺度上无法解决的问题,可以通过城市群一体化协同发展来实现或得到缓解。

城市群生态安全同样包括狭义和广义两个层面。狭义上城市群生态安全侧重于城市群内部生态系统空间优化和服务能力提升,重点关注城市群地区生态用地的空间优化以及城市群地区“三生空间”(生态、生活及生产空间)的合理布局,以满足城市群地区人们日常生活中的物质和精神需求作为基本目标,以不破坏城市群地区生态系统可持续性作为基本原则,通过生态恢复和安全格局构建实现生态系统服务功能最大化、提升城市复合生态系统的韧性和可持续发展能力。广义上城市群生态安全需要既考虑城市群内部生态系统结构和功能协调,以及生态系统服务供需平衡,也需要从区域尺度考虑城市群与其他区域之间的协调关系。为此,不仅需要从生态流角度研究城市群近远程耦合关系,探讨支撑城市群发展环境资源的空间尺度效应,也需要考虑城市群内部以及城市内部不同功能空间资源利用关系,连接不同功能区的物质循环和再利用过程^[18]。

1.3 城市群生态安全特点

城市群生态安全具有一般的生态安全属性特征,如综合性、区域性、相对性和动态性特点^[11]。除此以外,城市群生态安全也有其自身特点,需要从两个层面上考虑:一是城市群内部生态安全,需要在物质保障方面实现城市群地区的自给自足,满足生活在城市群地区人们的日常需求,实现区域内基本生态系统服务的供需平衡,如公共基础设施保障能力、休闲服务满足能力、自然灾害防御能力、人居环境健康维持能力等,同时也需要实现城市群内部物质代谢平衡,如废弃物吸纳和消解能力等;二是城市群与其他区域之间的近远程耦合关系,需要综合考虑城市群与其他地区之间发展的协调关系,需要从物质、能源保障方面考虑城市群与其他地区之间的供需平衡关系,但城市群是否可以达到生态安全,关键取决于城市群本身科技发展水平和对外辐射能力,只有通过提升城市群吸引力和竞争力,才能弥补因土地空间有限而在物质资源保障方面的不足。

城市群生态安全还具有以下特点:(1)生态环境要素之间的协调与平衡。无论何种生态安全,均需要从立地尺度上建立不同生态环境要素之间的协调与平衡,从水土资源角度构建适宜的景观生态系统,以及适宜本地生态环境特征的人类活动形式;(2)生态环境要素近远程耦合关系的协调与平衡。对于城市群来说,生态安全的关键在于区域内居民生产生活的需求是否可以达到满足?然而作为以外来物质和能源输入为主的城市群地区,许多生产和生活的基本需求需要从其他地区获取,因此城市群的生态安全严格意义上是一个城市群与其他区域之间在物质、能量、人力和技术方面形成的动态平衡。(3)城市群内部小循环与区域大循环之间的协同联动。城市群生态安全不仅要求位于城市群地区的所有城市之间在功能上协调,实现城市群内部生态系统服务供需的协调以及物质能量的平衡,同时也需要城市群地区与周边更大区域范围内实现生态功能的协调与平衡。

2 生态安全格局构建:从城市到城市群

2.1 城市生态安全格局构建

(1)城市生态安全格局构建目的:以满足人类的生存和发展需求作为主要目的,具有其本身的特殊性^[19-21],主要包括:①控制城市扩张和发展中出现的生态环境问题,实现城市人居环境质量和生态系统服务功能的提升,保障城市居民的生活与生存需求。②维持城市地区正常的物质循环与代谢功能,实现城市与周边地区物质良性循环和代谢功能的正常发挥。③维持城市生态系统健康运行与可持续发展,实现城市生态系统的结构优化和功能提升。④保障城市人居环境健康,减少城市生态系统有害代谢物质的排放与环境暴露和居民的正常生活。⑤满足城市居民可预见时期内生态系统服务需求,特别是一定时期内对生态系统服务的需求。

(2)城市生态安全格局构建基本原则:基于城市生态系统特殊性,城市生态安全格局构建需要遵循以下原则^[11]:①以人为本原则:人类是城市生态系统的干预者,也是城市建设的参与者与受益者,因此也将是城市生态安全格局构建的直接主导者,在生态安全格局构建时,需要全方位考虑人类社会的需求。②区域适应

原则:城市生态安全必须放在流域/区域尺度上考虑,城市生态安全格局构建需要考虑其在流域/区域中的环境背景、空间位置、生态过程与功能。③ 区域协调原则:城市与周边区域之间通过近、远程的物质、能量、信息和人类的耦合作用而形成一个复杂的生态网络,城市发展离不开周边区域的支持,周边区域的发展也需要城市的辐射带动作用。④ 有限目标原则:随着城市发展和人类生活水平提高,城市生态安全的目标会逐渐提高,因此在构建城市生态安全格局时必须根据现阶段所遇到的突出问题和未来一段时期内人类社会发展需求,否则很难将生态安全格局落到实处。

2.2 城市群生态安全格局构建目的

城市群生态安全格局构建的核心是保障城市群地区生态系统健康与安全运行,保障生态系统服务的有效和持续供给,因此,城市群生态安全格局构建的目的包括:

(1)保障城市群内部区域一体化协调发展。城市群的形成起源于产业的区域分工与协同发展,提高了城市之间的竞争活力和资源环境效率。然而随着城市群不断壮大和竞争发展,如何提高城市群的社会调控能力,对于实现区域一体化协同发展至关重要。城市群生态安全格局构建就是探讨城市之间、区域内部交通、产业、物流、能流的合理空间布局和有序发展,寻找适合城市群一体化发展的城市模式、产业模式和物流能流模式,最终做到城市群内部产业分工明确、功能定位准确、责任分配到位、物质流通高效、人口流动顺畅,从而提高城市群对外辐射竞争能力和城市群生态系统的韧性。

(2)保证城市群地区生态系统服务供需平衡。城市群发展不仅将区域产业、交通和物流能力紧密联系在一起,同时也为区域之间生态系统服务和人流提供了便利条件,特别是就业和休闲服务。因此,通过城市群生态安全格局构建,来满足生活在城市群内部人们日常生活基本需求,如就业、职住通勤、休闲服务、环境健康与生存安全等。在城市群尺度,生态安全格局构建需要通过生产、生活和生态用地调整以及生态系统优化,提升生态系统服务功能。

(3)实现城市群与区域之间物流、能流和人流畅通。由于城市群的人为主导和空间资源的有限性,依托城市群本身实现对城市群发展的安全保障与可持续性维持十分困难,必须从更大空间尺度上探讨城市群发展依托的生态腹地。为此,需要通过城市群本身生态系结构优化,提升城市群的辐射竞争能力,与周边区域之间构成一个交错发展、有机融合、结构稳定的生态网络体系,明确城市群与周边地区物流、能流和人流过程与空间特征,探讨城市群发展在物质、能源和人力资源方面对周边区域依赖性,从近远程耦合角度探讨城市群的生态安全保障机制。

城市群生态安全格局的基本框架如图 1 所示:

依据上述原则和目的,需要区分城市群生态安全格局构建与生态安全保障。生态安全格局构建侧重于城市群内部可调控的资源,更多关注人类社会发展的基本需求。城市群生态安全保障需要考虑城市群与周边地区之间的近远程耦合关系,关注城市群尺度物质、能源供需平衡与资源利用效率,以及城市群与外部环境之间的近远程耦合关系。判断城市群是否处于生态安全状态时需要设定一个阈值,而阈值大小则取决于三个方面因素:城市发展水平与城市生态系统韧性、城市群对外部资源的依赖程度、国家/地区政府干预与调控能力。

2.3 城市群生态安全格局构建原则

城市群生态安全与城市生态安全的主要区别在于覆盖的空间范围更大、形成的生态系统更为复杂。但其与城市生态安全具有很多相似之处,均是以人为主导、依赖于外来物质输入的开放型生态系统。因此城市群生态安全格局构建不仅需要满足城市生态安全格局构建的基本原则,还需要基于城市群地理环境背景与资源特征,遵循以下原则:

(1)生态安全供需平衡的尺度效应。对于生态安全格局构建来说,人们可以改造和调控的空间范围局限于城市群地区,因此需要依据城市群发展定位、地理环境、生态背景和资源禀赋,梳理城市群本身可支配的土地资源、环境资源以及存在的突出问题,由此明确生态安全格局构建所依托的资源环境和生态系统服务需求。除了需要保障本地区基本生态系统服务需求外,还需要通过优化城市群生态系统结构、过程和功能,提升城市

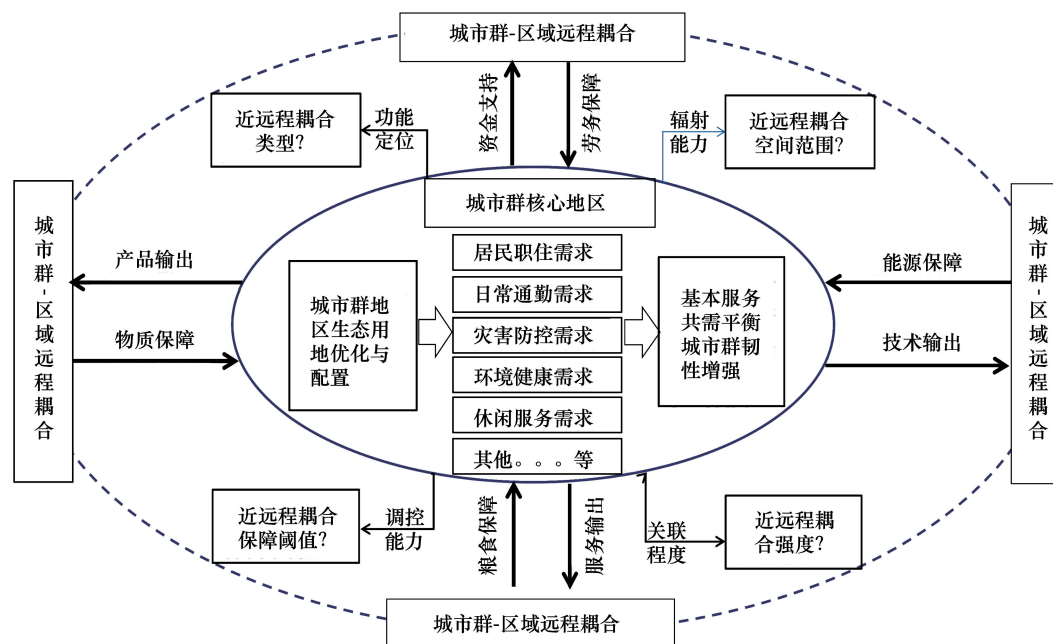


图1 城市群生态安全格局基本框架与空间关系图

Fig.1 Framework of ecological security pattern in urban agglomeration regions

群对外辐射竞争能力,来获取外部地区的物质、能源和人力支持。因此,在生态安全格局构建时,需要从近远程耦合、近远期目标提出城市群生态安全格局构建的目标和需要解决的现实问题。

(2)生态安全保障的阈值效应。城市群生态安全保障的基本需求,需要通过土地利用结构调整、土地利用空间优化配置和生态重建,来实现对城市群发展基本需求的保障,如生产生活空间扩张、粮食和水资源供给、健康环境维持、生态风险防控、休闲娱乐供给。而对于城市群发展的远期(程)目标需求,如物质保障、资源供给、人力资源服务等方面,需要通过与周边区域之间的合作与协调来实现。多大程度上需要本地区的资源环境来保障,则取决于城市群本身的社会调控能力,据此给出生态安全保障阈值。通常,城市群地区社会调控能力越强,其对周边地区的辐射竞争力越强,可以从周边地区获取更多的物质资源和人力来为城市群发展提供服务,因此其本身生态安全保障阈值可以稍低。而对于社会调控能力较弱的城市群,其既难以向周边地区输出产品、技术或服务,也难以从周边地区吸引物质、能源和人口的流入,生态安全保障则需要设定较高的阈值。因此对于不同类型的城市群,面对不同生态安全需求,需要根据城市群的资源禀赋与社会调控能力设定不同的阈值。

(3)生态安全格局的空间联动性。城市群作为一个复杂的生态系统,无论是生态环境要素之间,还是城市与区域之间形成了千丝万缕的关系。在生态安全格局构建时,必须从城市群整体出发,充分考虑要素之间、城市之间的互动关系,探讨满足城市群社会经济可持续发展的途径和方式,构建结构稳定、功能齐全的城市与区域生态网络,保障物质、能源、人口在城市群生态网络的合理运移转化,从而实现城市群地区生态系统服务功能的提升和抵御外来灾害风险的韧性。因此,在生态安全格局构建时,需要首先明确不同城市和功能定位,明确不同城市与地区之间的服务关系,解析不同城市与地区之间的空间联动性,依据城市群地区社会经济发展目标和居民生产生活需求探讨生态安全实现的路径和方式。

2.4 城市群地区生态安全格局构建技术路径

生态安全格局构建的技术路线如图2所示。

2.4.1 生态环境敏感性评价

一个地区的生态环境背景特征决定了其生态安全格局。开展生态敏感性评价就是要准确描述城市群地区的本底环境特征,掌握维持区域生态安全的基础构架。影响一个地区生态环境敏感性的因素包括环境地质

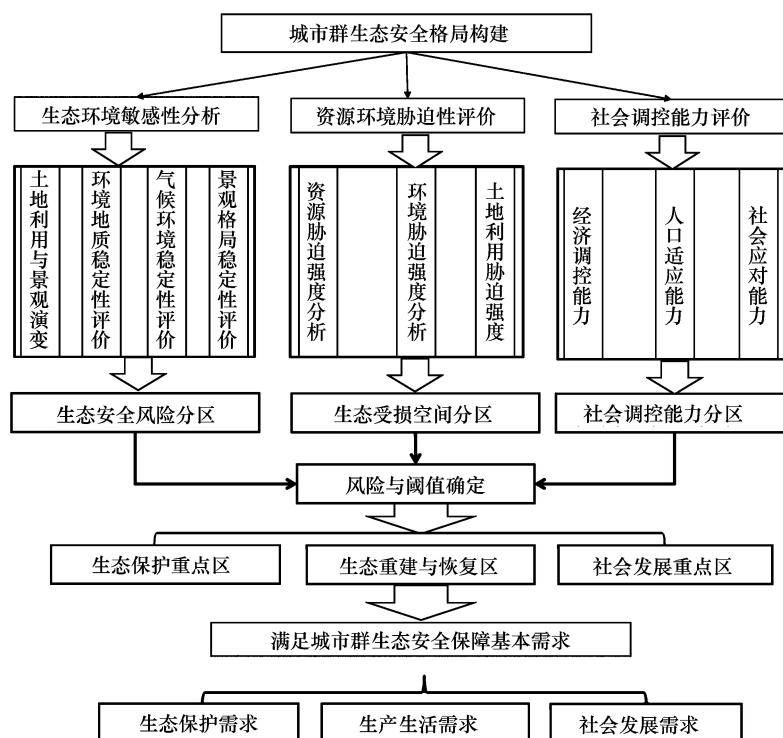


图2 城市群生态安全格局构建技术路径

Fig.2 Roadmap of ecological security pattern building in urban agglomeration

背景^[22-23]、气候环境空间变异特征^[24]、水土资源禀赋和土地利用格局^[25]。为此,生态环境敏感性可以从环境地质稳定性、气候环境稳定性和景观格局演变的稳定性方面评价。

环境地质背景特征与稳定性是生态安全的本底特征,直接决定了一个地区生态安全的水平,也将影响到人类活动的类型和形式。地球表层生物生存均离不开光照、温度和水,而气候的差异性直接导致地表植被和生态环境的空间异质性,也决定了人类可以利用的资源禀赋以及生存环境的本底质量。评价气候环境稳定性的主要目的是分析一个地区维持生态安全气候资源的稳定程度。景观格局稳定性评价需要依据不同景观类型在空间上的邻接关系,以及受到外来人为胁迫的程度,定量分析景观格局的稳定程度。通过分析景观格局与区域生态安全之间的相互关系,开展景观格局稳定性分区评价。

2.4.2 资源环境胁迫性评价

资源环境是维持一个地区生态安全的基本保障,而资源环境受到的胁迫程度直接关系到生态安全的受损状态。因此需要从资源的承载能力、环境受胁迫状态和土地利用对区域生态安全的胁迫程度来评价一个地区生态安全的胁迫程度。资源的承载能力和受胁迫状态直接关系到一个地区生态安全水平,过度的人类活动使得生态环境资源受到高度胁迫,反而无法满足人们生产和生活的需求。资源环境胁迫从资源有效性、人居环境健康和环境容量等方面反映了人类所面临的生态安全威胁。资源环境胁迫强度评价需要从人类活动与资源、环境之间的相互作用关系出发,评价人类生产生活的资源索取、以及向环境中排放的各种废弃物是否会影响生态安全与人居环境健康。因此,在进行资源环境胁迫强度评价时,需要重点考虑与生态安全有关的资源和环境要素受到人类活动影响的程度。土地利用可以直接反映人类社会经济活动的类型和方式,影响到区域生态安全的状态。当一个地区的土地利用强度超出本地区资源环境的承载能力时,土地利用将会产生较大的负面效应,区域生态安全就会受到胁迫。因此,资源环境胁迫强度评价可以结合本地区的资源环境背景和土地利用现状,分析土地利用对区域生态安全的影响程度。

2.4.3 社会调控能力评价

无论城市还是城市群地区,均是一个高度人为干扰的生态系统,仅靠本地区的资源环境无法满足其功能维持,必须依靠外来物质能源的输入和环境支撑才能实现城市或城市群的健康运行。因此,通过城市群产业结构调整 and 布局优化,建立结构稳定的物流、能流和人流网络,提高城市群的韧性、对外竞争能力和社会调控能力,对于保障城市群的生态安全具有重要意义。经济调控能力的增强有助于生态安全保障,可以从外部获取更多的资源来满足城市发展和生态安全保障的需求。人口适应能力主要反映了当地居民对外来干扰的适应状态和抵御外来灾害和风险的能力。而社会应对能力主要反映了一个地区在遇到外来重大事件或灾害时,社会可以调动的资源、应变能力和机制。对于依赖外来物质输入的城市来说,只有增强了经济调控能力,才能从外部获取更多的资源来满足城市发展和生态安全保障需求;而人口适应能力的增强才能应对外界环境变化,维持城市生态系统的正常运转。社会调控能力取决于一个地区的经济实力、政策保障机制和领导的应变处理能力,同时也与一个地区的物资保障体系密切相关,提高一个地区的社会调控能力对于实现区域生态安全具有至关重要的作用。

3 结语

随着人口增长和社会经济发展城市已经成为人类社会发展的必然趋势,作为人类生存的重要栖息场所,如何控制城市发展过程中所出现的各种生态环境问题,保障城市生态系统健康、满足居民日益增长的物质需求和精神需求已经成为社会关注的热点问题。城市群的生态系统健康与生态安全不仅取决于城市群本身特征,更大程度上取决于城市群与周边区域之间的耦合关系。实现城市群生态安全保障,不仅需要考虑城市群内部生态系统的结构优化和功能协调,也需要考虑城市群与周边区域之间的近远程耦合关系;而对于城市群生态安全格局构建来说,则需要重点解决城市群发展过程中面临的实际问题和城市发展基本需求,侧重于城市群内部生态空间优化和服务能力提升,以及城市群内部生态用地空间优化与“三生空间”(生态、生活及生产空间)的合理布局。因此,城市群生态安全格局构建的主要目的就是保障城市群内部区域一体化协调发展,保证人们日常生活的基本需求,实现城市群与区域之间物质、能源和人员的有序流动与畅通。城市群生态安全格局构建除了遵循生态安全格局构建的一般原则外,还需要考虑生态系统服务供需平衡的尺度效应、生态安全保障的阈值效应和生态安全的空间联动效应。需要首先明确不同地区的功能定位,阐述清楚不同地区之间的服务关系,依据城市群地区社会经济发展目标和居民生产生活需求确定生态安全实现的路径和方式。首先,需要从环境地质稳定性、气候环境稳定性和景观格局演变的稳定性等方面,开展城市群地区的生态敏感性评价;其次,需要从城市群本身的资源承载能力、环境受胁迫状态和土地利用对区域生态安全的胁迫三个方面综合分析资源环境的胁迫程度;最后从经济调控能力、人口适应能力和社会应对能力评价城市群地区的社会调控能力。在此基础上,开展城市群生态安全风险分区、生态受损空间分区和社会调控能力分区,进而从生态保护、生产生活和社会需求角度,确定城市群地区生态保护重点区、生态重建与恢复区、社会发展重点利用区。

参考文献(References):

- [1] 方创琳、姚士谋、刘盛和等著,《中国城市群发展报告》,科学出版社,2011年。
- [2] 方创琳,周成虎,顾朝林,陈利顶,李双成. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. 地理学报, 2016, 71(4): 531-550.
- [3] 李广东,方创琳. 城市生态-生产-生活空间功能定量识别与分析. 地理学报, 2016, 71(1): 49-65.
- [4] Lv Yonglong, Song Shuai, Wang Ruoshi, Liu Zhaoyang, Meng Jing, Sweetman Andrew J., Jenkins Alan, Ferrier Robert C., Li Hong, Luo Wei, Wang Tiejun. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. Environment International, 2015, 77: 5-15.
- [5] Liang Wei, Yang Ming. Urbanization, economic growth and environmental pollution: evidence from China. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2019, 21: 1-9.
- [6] 陈利顶,周伟奇,韩立建,孙然好. 京津冀城市群地区生态安全格局构建与保障对策. 生态学报, 2016, 36(22): 7125-7129.

- [7] 杨玉盛. 全球环境变化对典型生态系统的影响研究: 现状、挑战与发展趋势. 生态学报, 2017, 37(1): 1-11.
- [8] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [9] 黎晓亚, 马克明, 傅伯杰, 牛树奎. 区域生态安全格局: 设计原则与方法. 生态学报, 2004, 24(5): 1055-1062.
- [10] 陈利顶, 郭书海, 姜昌亮. 西气东输工程沿线生态系统评价与生态安全. 北京: 科学出版社, 2006.
- [11] 陈利顶, 景永才, 孙然好. 城市生态安全格局构建: 目标、原则和基本框架. 生态学报, 2018, 38(12): 4101-4108.
- [12] Gong J Z, Liu Y S, Xia B C, Zhao G W. Urban ecological security assessment and forecasting, based on a cellular automata model: a case study of Guangzhou, China. *Ecological Modelling*, 2009, 220(24): 3612-3620.
- [13] Han B L, Liu H X, Wang R S. Urban ecological security assessment for cities in the Beijing - Tianjin - Hebei metropolitan region based on fuzzy and entropy methods. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 217-225.
- [14] Su Y X, Chen X Z, Liao J S, Zhang H G, Wang C J, Ye Y Y, Wang Y. Modeling the optimal ecological security pattern for guiding the urban constructed land expansions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 19: 35-46.
- [15] 付士磊, 时泳, 石铁矛. 基于景观异质性的城市生态安全格局构建. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(S2): 130-132.
- [16] 江源通, 田野, 郑拴宁. 海岛型城市生态安全格局研究——以平潭岛为例. 生态学报, 2018, 38(3): 769-777.
- [17] 景永才, 陈利顶, 孙然好. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架. 生态学报, 2018, 38(12): 4121-4131.
- [18] Zhu Yonguan, Reid Brian J, Meharg Andrew A, Banwart Steve A, Fu Bojie. Optimizing Peri-Urban Ecosystems (PURE) to re-couple urban-rural symbiosis. *Science of the Total Environment*, 2018, 586: 1085-1090.
- [19] 任西锋, 任素华. 城市生态安全格局规划的原则与方法. 中国园林, 2009, 25(7): 73-77.
- [20] 张浩, 马蔚纯, Ho H H. 基于 LUCC 的城市生态安全研究进展. 生态学报, 2007, 27(5): 2109-2117.
- [21] 张小飞, 李正国, 王如松, 王仰麟, 李锋, 熊侠仙. 基于功能网络评价的城市生态安全格局研究——以常州市为例. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(4): 728-736.
- [22] Reed, D. J.. Sea-level rise and coastal marsh sustainability: geological and ecological factors in the Mississippi delta plain. *Geomorphology*, 2002, 48(1-3): 233-243.
- [23] Yang Z, Li W, Pei Y, Qiao W, Wu Y. Classification of the type of eco-geological environment of a coal mine district: A case study of an ecologically fragile region in Western China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 1513-1526.
- [24] Seddon, A W R, Macias-Fauria M, Long P R., Benz D & Willis K J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. *Nature*, 2016, 531(7593): 229-232.
- [25] Hong W, Guo Z, Su M, Tang H, Chen L, Hu W. Sensitivity evaluation and land-use control of urban ecological corridors: A case study of Shenzhen, China. *Land Use Policy*, 2017, 62: 316-325.