

彭保发, 郑俞, 刘宇. 耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架 [J]. 地理科学, 2018, 38(3): 361-367. [Peng Baofa, Zheng Yu, Liu Yu. Coupling Ecosystem Services and Regional Ecological Security Pattern. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(3): 361-367.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.03.005

耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架

彭保发¹, 郑俞¹, 刘宇^{1,2}

(1. 湖南文理学院洞庭湖生态经济区建设与发展湖南省协同创新中心, 湖南 常德 415000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所/中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 在深入阐明生态系统服务与区域生态安全格局之间内在联系的基础上, 根据人类社会与生态系统之间以生态服务流为纽带形成的反馈机制, 提出基于驱动(Driver)-压力(Pressure)-状态(State)-影响(Impact)-响应(Response)区域生态安全格局研究框架。该框架有助于深入理解区域生态安全维持和区域生态安全问题形成的机制, 拓展区域生态安全评估、生态安全格局维持和提升的视野。当前, 耦合生态服务的区域生态安全格局研究有3个关键的前沿议题: ① 生态服务需求和生态服务供给的空间耦合及其对人类活动的响应; ② 维持生态系统服务流网络结构完整性和稳定性的人类活动阈值; ③ 耦合人类生态服务供给和需求的区域生态安全评估模型。

关键词: 生态系统服务; 生态系统服务流; 区域生态安全格局; DPSIR 框架

中图分类号: X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2018)03-0361-07

生态安全是可持续发展的基本保障。日益增强和空间上不断扩大的人类活动剧烈改变着生态系统结构和功能, 削弱生态安全得以维持和提升的物理环境基础。生态安全的维持和提升实质上是在正确对待和协调人与环境之间的关系, 其前提是明晰人类活动与生态安全之间相互作用机制。传统的生态安全的涵义较为广泛, 包括环境资源安全、生物与生态系统安全和自然与社会生态安全^[1]。当前的生态安全研究主要从生态环境物理属性受损、胁迫的角度出发, 以负向指标(如污染负荷、物种丧失等)为主^[1,2]。近年来, 耦合生态系统服务与生态安全逐渐成为区域生态安全研究的重要议题^[3-5]。生态系统服务是人类从生态系统功能中直接或间接获得的益处^[6,7], 是人类最基本的福祉, 与生态安全紧密联系^[3]。过去几十年来, 在生态系统服务内涵、生态服务形成和维持的生态过程机理^[3,8]、生态服务评估方法^[9,10]等领域的研究有了长足发展。生态系统服务已成为耦合人文影响与生态系统结构和功能的纽带^[11], 生态系统服

务的变化也是人类感知生态安全状态最直接的途径。基于生态系统服务的概念和方法框架已成为将人类活动对自然生态系统的影响融入到制定社会可接受且有效的环境政策中工具^[12-14]。生态服务概念的融入, 为生态安全研究提供了一个正向的工具^[5, 15]。

区域生态安全格局是保障区域生态安全和人类福祉的关键环节^[16]。构建区域生态安全格局的目的是通过生态过程的有效调控来充分发挥生态系统功能及服务^[16]。长期以来, 生物多样性保护、生态系统结构和过程的完整性维持是区域生态安全格局构建的基本内容^[17], 人类的生态服务获取被视为一种干扰或区域生态安全格局的外部因素。安全状态的生态系统其结构、功能和过程应处在良好的生存和发展状态, 并能支撑社会经济的持续发展, 因而生态安全是对包括人在内的生物与环境关系稳定程度和生态系统可持续支撑能力的测度^[15]。因此, 区域生态安全格局应体现出人与环境的关系, 而生态服务流是最好的纽带。尽管生

收稿日期: 2017-04-09; **修订日期:** 2017-10-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(414711114)、洞庭湖生态经济区建设与发展湖南省协同创新中心项目资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (414711114); Fund of Hunan Province Cooperative Innovation Center for the Construction & Development of Dongting Lake Ecological Economic Zone.]

作者简介: 彭保发(1962-), 男, 湖南桃源人, 教授, 主要从事区域土地承载力、生态服务与生态安全研究。E-mail: pengbaofa@163.com

通讯作者: 刘宇。E-mail: liuyu@igsrr.ac.cn

态服务和生态安全的研究众多,大多以生态服务物理量或价值量作为综合性指标来指示生态安全状况^[4, 18],但将生态服务融合于生态安全格局的研究鲜见,对融合的方法途径缺乏系统梳理。本文在阐明生态系统服务与生态安全格局之间的内在联系的基础上,提出耦合生态系统服务与区域生态安全格局的研究框架。

1 生态服务和生态安全的内在联系

生态安全狭义上指自然和半自然生态系统的安全,是生态系统完整性和健康水平的整体反映;广义上则包括自然生态安全、经济生态安全和社会生态安全^[17],本质上以人类社会的可持续发展为目的^[2],设定了人类开发自然资源的规模和阈限^[17],涵盖生态系统、人类社会和环境资源等方面的安全^[1, 2]。生态安全不只是生存的稳定性和环境结构的安全,还有发展的支撑能力和生态关系的健全^[15]。目前,从生态系统面临的风险和生态系统健康两个方面建立指标体系^[1, 2]、基于压力-状态-响应(PSR)框架模型^[19]评价是区域生态安全评价的常用的方法。尽管对生态安全及其评价研究众多,生态安全的定义仍未有共识^[1, 2, 5],尚未形成成熟的理论和技术方法体系,概念性、探索性的定性分析多于定量研究^[20]。当前的生态安全评价大多是基于生态风险、生态脆弱性、贫穷、生态问题等方面的指标,但这些评价指标多是负向指标^[5]。

人类社会的发展需要从生态系统获取各类直接的物质产品,需要生态系统提供维持生存所需的环境条件等非物质性的支持服务。生态服务综合反映了生态系统提供人类福祉的水平。生态系统提供生态服务的能力划定了生态服务消费的上限。人类对生态服务的获取直接或间接地影响生态系统的结构和生态过程,进而改变生态服务供给能力,形成生态服务供给与消费之间的复杂反馈关系。自然或人文因素直接或间接地影响生态服务的供给能力和生态服务向人类社会的传输^[21]。由此,生态服务不仅是生态系统物理属性意义上的生态安全表征,还隐含着人与自然之间的反馈,由此,生态服务供给及其传输的变化还是人类社会感知生态安全状态的重要途径^[22]。区域生态安全格局维持和构建的目标是保障区域生态系统服务的可持续供给,提升区域的人类福祉^[16]。健康的生态系统可持续地提供众多的生态系统服务。人类不合理

或过度获取这些服务的活动可导致生态系统结构和功能的退化,削弱生态系统服务供给能力,减少生态服务向人类社会的输送,引起生态安全问题。因此,耦合生态系统服务供给与人类生态服务需求、获取和消费,是区域生态安全研究的新视角。在生态系统服务概念框架下,生态安全可定义为生态系统服务能力与人类社会经济发展对生态系统服务需求相适应的状态。在此状态下,生态系统提供生态服务的能力不因人类的生态服务消费而降低,人类获取生态服务的网络结构完整、功能正常。

2 生态服务概念下的区域生态安全格局

生态服务供给与需求的空间失耦制约着人类对生态系统服务的获取,引发局部地区对某些生态系统服务的过度消费,区域生态系统服务消费超过供给能力,进而引起生态系统服务功能的退化,降低区域生态系统服务能力,甚至进入恶性循环,威胁区域生态安全。景观功能的地域分异决定了生态系统服务供给与需求在空间上的不匹配^[23],生态系统服务供给与需求在空间上的这种关系大致包括4种类型(图1):(a)完全重叠,如土壤形成、噪声削减等;(b)生态服务由形成区向周围的受益区各向同性流动,如固碳、氧气释放等;(c)形成区与受益区在空间上完全分离,按特定的方向流动,如水源涵养、休闲、景观美学功能;(d)相邻且生态服务沿特定方向输送,如风蚀削减、风暴潮灾害防御等服务^[24]。

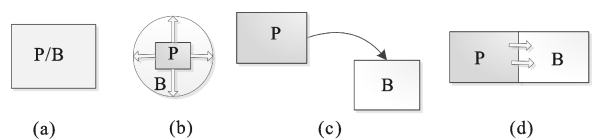


图1 生态系统服务供给区(P)和受益区(B)的空间耦合形式

Fig. 1 Possible spatial relationships between service production areas (P) and service benefit areas (B)

由于生态系统服务供给与消费的空间失耦,生态系统服务从异地自然(通过自然生态过程,如空气调节、水文调节、土壤保持)和人为地输入(休闲娱乐、食物供给等)是满足生态服务需求的主要方式,建立起生态系统服务供给与需求的空间耦

合关系,形成生态系统服务传输的自然路径网络和社会-经济活动网络^[23],即生态系统服务流网络(图2)。传统的区域生态安全格局研究将人作为一个外部因素^[17],专注于从生物多样性保护、自然生态系统结构和功能的恢复出发去构建。区域生态安全格局构建被视为对已存在的或者潜在的对于维护、控制特定地段某种生态过程有着重要意义的关键生态要素的空间识别、恢复或重建,以达到对特定生态过程的有效调控,保障生态系统功能的发挥及服务的供给^[16]。而在现实的区域生态安全格局中,人已成为举足轻重的部分,甚至关键组分。区域生态安全是人类生态安全^[15]。在这种情形下,生态服务流网络成了耦合人与生物和非生物环境的纽带。生态服务供给与需求空间耦合形式的多样性对应多种多样的生态服务传输方式,形成复杂的生态系统服务流网络结构。在区域社会经济功能高度分异的现代社会,维持健康生态服务流网络结构非常重要,是维持和提升区域生态安全的重要方面。因此,从生态系统服务的视角,区域生态安全格局包含生态系统服务供给能力空间格局、生态系统服务消费格局和生态系统服务流网络格局3个方面。辨识生态服务的供给区和需求热点及联系它们的生态服务传输网络,有助于识别区域生态安全关键区位。而评估生态服务传输网络的稳定性和可持续性、监测网络中的生态系统服务流量和评估它们的状况,可作为综合评价区域生态安全格局的基本途径。

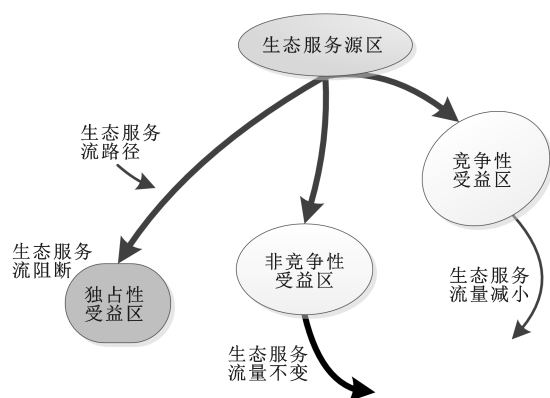


图2 生态系统服务流网络结构

Fig. 2 Diagram of the structure of ecosystem services flow network

由于提供生态服务的区域往往与生态服务受益区在空间上失耦,受益者往往无法直接感知生

态系统功能和结构的状态。而通过生态系统服务流的变化,消费者可感知到生态系统服务供给能力的变化^[22]。对生态系统属性(如土地覆被类型、质量)的改变是人类活动改变生态系统服务的主要方式^[25-27],直接或间接地改变生态系统服务供给能力^[28]、生态系统服务流和生态服务流网络结构,导致可消费的生态系统服务流的增加或减少。这种机制能帮助受益者更好地接受生态系统的反馈。因此,区域生态安全格局可通过生态系统服务供给能力、生态系统服务消费和生态系统服务流网络3个方面的时空动态来评价。对生态系统服务供给能力、消费者分布制图,结合生态系统服务流网络识别和生态服务流的量化,建立识别区域生态安全的关键区位的方法,是在区域尺度分析人类社会经济活动与生态安全的相互作用和开展生态安全格局综合评价和调控的基础。

3 区域生态安全研究的DPSIR框架

由于生态安全与生态服务的内在联系,区域生态安全格局存在以生态服务流量为信息传递媒介的自我维持机制,本质上是生态系统与人类活动之间以生态系统服务流为纽带的反馈机制。在这个机制中,人类围绕生态系统活动的目的是从中获取各种益处,包括产品供给、美学感受以及安全庇护等物质或非物质形态的益处。这些活动通过对生态系统组成、物质循环等有意或无意地施加负面影响,导致生态系统的结构和功能的退化,降低生态服务供给能力,损害生态系统服务流网络结构的完整性和稳定性,进而引起生态系统服务流量的变化。通过生态系统服务流及其变化所传递的信息,人类社会可感知到生态系统结构和功能的变化,进而调整对生态服务的获取方式、类型和数量,促进生态系统的恢复和功能提升,形成耦合人与环境的驱动(Driver)-压力(Pressure)-状态(State)-影响(Impact)-响应(Response)反馈机制(图3),即耦合生态服务的区域DPSIR机制。

在区域生态安全格局维持的DPSIR机制中,人类活动是驱动,生态服务获取是对生态系统的压力,生态系统结构和功能、生态服务流网络结构完整性和稳定性是状态变量,生态服务的供给能力和生态服务传输能力反映出区域生态安全格局受到的影响,响应则以生态服务流量表现出来(表1)。这种反馈机制实质上是人类与区域生态安全之间

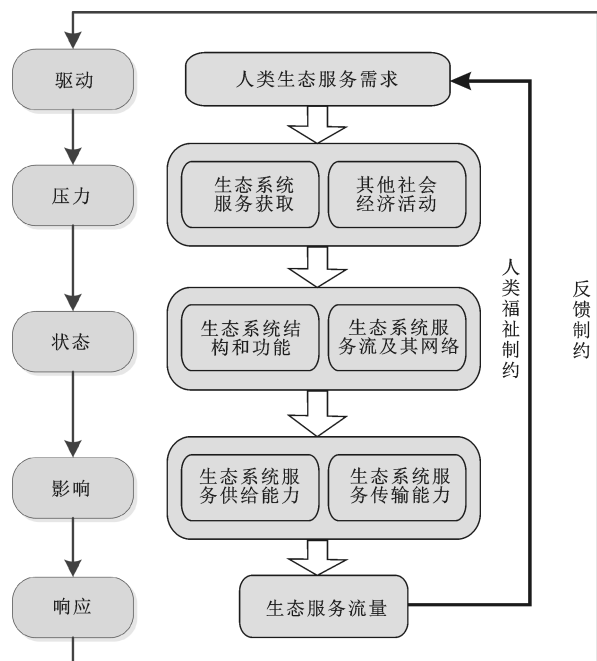


图3 耦合生态系统服务概念的生态安全格局DPSIR机制

Fig. 3 The DPSIR framework on ecological security pattern coupling ecosystem services concept

表1 DPSIR框架下区域生态安全指标

Table 1 Indicators for regional ecological security pattern assessment under DPSIR framework

指标类别	指标
驱动	生态服务需求强度生态服务需求与供给的空间耦合关系
压力	生态服务获取强度
状态	区域生态系统服务功能区域生态服务流网络结构完整性和稳定性
影响	生态服务供给能力生态服务传输能力
响应	生态服务流量

关系的体现,因而可作为区域生态安全格局研究的基本方法框架。它融合了生态服务概念,包含对区域生态系统自然和人文过程的综合,是在综合的思想下开展区域生态安全格局的综合研究的方法框架,有助于更好地揭示区域人类活动与生态安全的相互作用,也为区域生态安全的综合评价提供了有效途径。

在该框架下,良好的区域生态安全格局表现出一个正反馈,在满足人类生态服务需求的同时,生态系统服务供给能力和生态服务流量得到增强或维持;退化的区域生态安全格局则表现为一个

负反馈,过度的人类生态服务需求导致高强度的生态服务获取,导致了生态系统服务供给能力降低,生态服务流网络结构完整性和功能稳定性受损,生态服务流量持续萎缩,最终导致人类的生态服务需求得不到满足。因此,区域生态安全格局的重建或恢复,是将一个负反馈状态的区域生态安全格局推回到正反馈的状态。因此,区域生态安全格局的构建将不仅仅是物理性的区域生态系统结构和功能单元的保护、修复和重建,还包括通过社会经济手段、行政和法律手段对人类生态服务需求、获取方式、强度及其时空格局进行的调整。

4 DPSIR 框架下的区域生态安全关键议题

DPSIR 框架涉及到许多当前尚未破解的理论、方法和技术问题。该框架包括下列关键前沿议题:

1) 生态服务需求和生态服务供给能力的空间耦合及其对人类活动的响应。区域生态服务供给与需求相适应是区域生态安全得以保证的基石。受地理环境地域分异的控制,生态服务供给具有特定的空间分布和时间动态。研究人类的生态服务需求和生态服务供给能力的空间耦合关系、辨识生态系统服务流网络是整个研究框架的第一步,而揭示生态服务需求的类型、数量及其时空动态和评估生态系统服务供给能力及其空间分异是基础。目前,对生态服务供给的时空分布的理解和表达从全球尺度到局地尺度有了很深入的认识^[29,30],提出了大量生态服务供给制图工具^[9,31],但在数量的估算上仍然存在很大的不确定性^[32,33]。此外,生态服务供给对驱动力变化的响应虽有一定认识,但在响应的驱动力阈值等方面尚未有充分的认知和量化。其原因既有对生态服务供给机制的认识欠缺,也有方法探索不深入的原因^[34]。对生态服务需求的研究是区域生态安全格局研究的薄弱点之一。生态服务需求随人类社会的发展而不断演变。大多数基本的生态服务需求有明确的空间位置,也有相当多的生态服务需求是高度动态和空间位置不确定的,但在区域尺度上它们的演变是可以刻画的。

2) 维持生态系统服务流网络结构完整性和稳定性的人类活动阈值。生态服务流网络由生态服务供给和需求的空间耦合关系确定,大致包括

有形的空间网络和无形的社会经济活动网络,随时间和地域而表现出高度动态的特点。生态服务流网络结构是实施区域生态安全格局构建的重要内容,其结构完整性和功能的稳定性是基本原则。人类通过生态系统服务获取和其它社会经济活动对生态系统结构和功能、生态系统服务流网络形成压力,使它们处在一个新的状态。维持区域生态安全格局需要使生态服务需求与生态服务供给在时间、数量上相适应,并维持一个完整和稳定的生态系统服务流网络。人类获取生态服务的活动可改变生态系统结构和生态系统过程,可降低或提升的生态系统服务供给能力^[9],生态系统服务流网络也可能因此而加强或受损,引起生态服务流量的变化^[31]。要维持和提升区域生态安全格局,需要深刻理解生态系统服务供给能力对人类生态服务获取的敏感性和承受阈值,以及维持生态系统服务流网络结构的完整性和稳定性的人类扰动临界。当前,生态服务供给能力对景观破碎化的响应研究已得到关注^[35],但生态系统服务流网络结构特征及其稳定性和完整性的研究匮乏。在区域尺度上,通过地表过程传输的生态服务,其网络结构容易辨识,已发展了一些方法及工具^[36,37],而通过社会经济活动网络形成的生态服务流网络的研究是难点。

3) 耦合人类生态服务需求的区域生态安全评估模型。区域生态安全格局的构建需要具有坚实科学基础的评估工具来甄选不同的方案。已有的区域生态安全评估更多地是从生态系统或景观系统本身的结构和功能恢复或重建的角度去实现^[38,39],而将人类对生态服务的需求、生态服务获取方式和强度等人文因素忽略或作为外部因素,更缺乏对生态服务空间流动的表达。而区域生态安全格局的构建、维持和提升都是人与自然复合的系统工程。这导致设计的区域生态安全格局往往难以实现,或不能很好地服务和引导人类需求。发展以生态服务供需关系为基础、以生态服务流为纽带的区域生态安全评估模型是更好的途径。

5 结语

生态系统服务是区域生态安全的综合体现,是人类从自身福祉的角度感知生态系统结构和功能变化的途径。生态服务与生态安全的关系正得到越来越多的关注,二者的融合成为区域生态安

全研究的重要方向。但融合生态服务于生态安全的研究在理论探索 and 实践中仍然不够深入,对融合的方法途径缺乏系统梳理。在阐明生态系统服务与区域生态安全之间的内在联系的基础上,根据人类与生态系统之间以生态服务流为纽带形成的驱动(Driver)-压力(Pressure)-状态(State)-影响(Impact)-响应(Response)框架(DPSIR)的反馈机制,提出耦合生态系统服务概念的区域生态安全格局的研究框架。该框架耦合了人类活动与生态安全,系统地开展区域生态安全格局研究。在科学理论上可深入揭示区域生态安全维持和区域生态安全问题形成的机制,在方法上可为区域生态安全格局评价提供综合、正向的量化指标,拓展区域生态安全评估、生态安全格局调控的视野。

参考文献(References):

- [1] 彭少麟,郝艳茹,陆宏芳,等.生态安全的涵义与尺度[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(6): 27-31. [Peng Shaolin, Hao Yanru, Lu Hongfang et al. The meaning and scales of ecological security. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2004, 43(6): 27-31.]
- [2] 王根绪,程国栋,钱鞠.生态安全评价研究中的若干问题[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1551-1556. [Wang Genxu, Cheng Guodong, Qian Ju. Several problems in ecological security assessment research. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1551-1556.]
- [3] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J]. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576. [Fu Bojie, Zhou Guoyi, Bai Yongfei et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China. Advances in Earth Science, 24(6): 571-576.]
- [4] 傅伯杰,吕一河,高光耀.中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展[J]. 自然杂志, 2012, 34(5): 261-272. [Fu Bojie, Lyu Yihe, Gao Guangyao. Major research progresses on the ecosystem service and ecological safety of main terrestrial ecosystems in China. Chinese Journal of Nature, 2012, 34(5): 261-272.]
- [5] 王晓峰,吕一河,傅伯杰.生态系统服务与生态安全[J]. 自然杂志, 2012, 34(5): 273-298. [Wang Xiaofeng, Lyu Yihe, Fu Bojie. Ecosystem services and ecological security. Chinese Journal of Nature, 34(5): 273-298.]
- [6] Costanza R, D'Arge R, Groot Rd et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387: 253-260.
- [7] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: Synthesis report [M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [8] 欧阳志云,郑华.生态系统服务的生态学机制研究进展[J]. 生

- 态学报, 2009, 29(11): 6183-6188. [Ouyang Zhiyun, Zheng Hua. Ecological mechanisms of ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11):6183-6188.]
- [9] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B et al. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services [J]. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117-125.
- [10] Kareiva P, Tallis H, Ricketts T H et al. Natural capital: Theory and practice of mapping ecosystem services [M]. Oxford: Oxford University Press, 2011.
- [11] Kandziora M, Benjamin Burkhard, Felix Müller. Mapping provisioning ecosystem services at the local scale using data of varying spatial and temporal resolution [J]. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 47-59.
- [12] Daily G C, Polasky S, Goldstein J et al. Ecosystem services in decision making: Time to deliver[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7: 21-28.
- [13] Farley J, Costanza R. Payments for ecosystem services: From local to global[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69: 2060-2068.
- [14] Bateman I J, Harwood A R, Mace G M et al. Bringing ecosystem services into economic decision-making: Land use in the United Kingdom [J]. *Science*, 2013, 341: 45-50.
- [15] 王如松, 欧阳志云. 对我国生态安全的若干科学思考[J]. *科技与社会*, 2007, 22(3): 223-229. [Wang Rusong, Ouyang Zhiyun. Some considerations with scientific views on ecological security in China *S&T and Society*, 22(3):223-229.]
- [16] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419. [Peng Jian, Zhao Huijuan, Li Yanxu et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419.]
- [17] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. *生态学报*[J], 2004, 24(4): 761-768. [Ma Keming, Fu Bojie, Li Xiaoya et al. The regional pattern for ecological security (RPES): The concept and theoretical basis. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 761-768.]
- [18] 吴健生, 岳新欣, 秦维. 基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 429-440. [Wu Jiansheng, Yue Xinxin, Qin Wei. The establishment of ecological security patterns based on the redistribution of ecosystem service value: A case study in the Liangjiang New Area. *Chongqing Geographical Research*, 2017, 36(3): 429-440.]
- [19] 左伟, 王桥, 王文杰, 等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. *地理学与国土研究*, 2002, 18(1): 67-71. [Zuo Wei, Wang Qiao, Wang Wenjie et al. Study on regional ecological security assessment index and standard. *Geography and Territorial Research*, 2002, 18(1): 67-71.]
- [20] 张百平, 姚永慧, 朱运海, 等. 区域生态安全研究的科学基础与初步框架[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(6): 1-7. [Zhang Baiping, Yao Yonghui, Zhu Yunhai et al. Scientific basis and working frame for regional ecological security research. *Progress in Geography*, 2005, 24(6): 1-7.]
- [21] Willemen L, Drakou E G, Dunbar M B et al. Safeguarding ecosystem services and livelihoods: Understanding the impact of conservation strategies on benefit flows to society [J]. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 95-103.
- [22] Aretano R, Petrosillo I, Zaccarelli N et al. People perception of landscape change effects on ecosystem services in small mediterranean islands: A combination of subjective and objective assessments [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 112: 63-73.
- [23] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B et al. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services [J]. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117-125.
- [24] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making [J]. *Ecological Economics*, 2009, 68: 643-653.
- [25] Metzger M J, Rounsevell M D A, Acosta-Michlik L et al. The vulnerability of ecosystem services to land use change [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114: 69-85.
- [26] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 等. 1990~2000年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化[J]. *地理学报*, 2004, 59(4): 483-496. [Liu Jiyuan, Wang Shaoqiang, Chen Jingming et al. Storages of soil organic carbon and nitrogen and land use changes in China: 1990-2000. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 483-496.]
- [27] Polasky S, Nelson E, Pennington D et al. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: A case study in the state of Minnesota [J]. *Environ Resource Econ*, 2011, 48: 219-242.
- [28] Zheng H, Robinson B E, Liang Y C et al. Benefits, costs, and livelihood implications of a regional payment for ecosystem service program [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110: 1-6.
- [29] Crossman N D, Burkhard B, Nedkov S et al. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services [J]. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 4-14.
- [30] Naidoo R, Balmford A, Costanza R et al. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105: 9495-9500.
- [31] Goldenberg R, Kalantari Z, Cvetkovic V et al. Distinction, quantification and mapping of potential and realized supply-demand of flow-dependent ecosystem services[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 593-594: 599-609.
- [32] de Groot R S, Alkemade R, Braat L et al. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making [J]. *Ecological Complexity*, 2010, 7: 260-272.
- [33] Galler C, Albert C, von Haaren C. From regional environmental planning to implementation: Paths and challenges of integrating ecosystem services [J]. *Ecosystem Services*, 2016, 18: 118-129.
- [34] 谢高地, 鲁春霞, 肖玉, 等. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估[J]. *山地学报*, 2003, 21(1): 50-55. [Xie Gaodi, Lu Chunxia, Xiao Yu et al. The economic evaluation of grassland ecosystem services in Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Mountain*

- tain Science, 2003, 21(1):50-55.]
- [35] Mitchell M G E, Suarez-Castro A F, Martinez-Harms M et al. Reframing landscape fragmentation's effects on ecosystem services [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2015, 30: 190-198.
- [36] Johnson G W, Bagstad K J, Snapp R R et al. Service path attribution networks (spans): A network flow approach to ecosystem service assessment [J]. International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems, 2012, 3: 54-71.
- [37] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: A conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery [J]. Ecological Complexity, 2013, 15: 114-121.
- [38] 陈星. 区域生态安全空间格局评价模型的研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30: 21-28. [Chen Xin. Spatial pattern modeling of ecological security assessment in a region. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30: 21-28.]
- [39] 关文彬, 谢春华, 马克明, 等. 景观生态恢复与重建是区域生态安全格局构建的关键途径[J]. 生态学报, 2003, 23: 64-73. [Guan Wenbin, Xie Chunhua, Ma Keming. A vital method for constructing regional ecological security pattern: landscape ecological restoration and rehabilitation. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(1): 64-73.]

Coupling Ecosystem Services and Regional Ecological Security Pattern

Peng Baofa¹, Zheng Yu¹, Liu Yu^{1,2}

(1. Hunan Province Cooperative Innovation Center for The Construction & Development of Dongting Lake Ecological Economic Zone, Hunan University of Art and Sciences, Changde 415000, Hunan, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 100101 Beijing, China)

Abstract: Ecosystem services (ESs) are material and spiritual benefits obtained from the composition and functions, and processes occurred in ecosystems. They are fundamental and critical for survival and development of human society. They not only reflect the status of ecological security comprehensively from the aspect of ecosystem by ecosystem services supply, but also provide an avenue for human society to perceive the changes of ecosystem composition and function through changes in ecosystem flows. ES is inherently coupling with regional ecological security. A sustainable supply and delivery of ESs indicates a well regional ecological security. Therefore, ES concept and ES evaluation are essential in assessing regional ecological security status. However, theories and methodology related to integrating ES approach into ecological security assessment are insufficient. It is necessary to give a systematic exploring of methodology for combining ES with regional ecological security pattern. In this study, the inherent connection between ES and regional ecological security pattern is revealed. According to the feedback mechanism between the ecosystem capacity on ecosystem services provision and human societies through ES flow, a Driver-Pressure-State-Impact-Response framework (DPSIR) is outlined. In this framework, ES demand of human society is the driven force; Intensity of ES extraction indicates the pressures; Ecosystem composition and function, and integrality and stability of ES delivery network are defined as state variables; ES supply capacity and capacity to deliver ES to human society are indicators for impact. ES flow is considered as a media to feedback information on ecosystem to human society. This framework is provide a map to study regional ecological security pattern, and may broaden the view of regional ecological security assessment and the regulation of ecosystem pattern for ecological security maintenance and improvement. In the end, some critical research issues that are relevant to the DPSIR framework are given. At present, 3 key issues need to be untangled for the DPSIR framework provided here: 1) response of the spatial coupling between ES demands and ES supply capacity; 2) threshold of human activity intensity for maintaining the integrity and stability of ES flow network; 3) models for regional ecological security pattern assessment and coupling ES demands and ES supply.

Key words: ecosystem services; ecosystem service flow; regional ecological security pattern; DPSIR framework