

DOI: 10.5846/stxb201803160519

李奇, 朱建华, 肖文发. 生物多样性与生态系统服务—关系、权衡与管理. 生态学报, 2019, 39(8): - .

Li Q, Zhu J H, Xiao W F. Relationships and trade-offs between, and management of biodiversity and ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): - .

生物多样性与生态系统服务—关系、权衡与管理

李 奇¹, 朱建华^{1,2}, 肖文发^{1,2,*}

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091

2 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

摘要: 生物多样性和生态系统服务是人类生存和社会经济可持续发展的物质基础, 应对生物多样性丧失和生态系统服务退化问题已经成为继气候变化之后的又一个全球性环境热点问题。生物多样性是生态系统生产力、稳定性、抵抗生物入侵以及养分动态的主要决定因素, 生物多样性越高, 生态系统功能性状的范围越广, 生态系统服务质量就越高越稳定。我们的目的是探讨生物多样性和生态系统服务之间的关系: (1) 明确了生物多样性与生态系统过程、功能、服务之间的关系; (2) 生物多样性在生态系统服务中的角色; 生物多样性在不同的空间尺度通过各种形式的运行机制与生态系统服务产生联系, 生物多样性是生态系统过程的调节者, 是巩固生态系统服务的一个重要因素, 生物多样性也是一种终极的生态系统服务, 并在遗传和物种水平上直接贡献了其利益和价值; (3) 生物多样性与生态系统服务权衡和协同关系的研究可以更好的帮助管理人员做出有利的决策和保护工作, 也是制定规划和适应策略以减少生物多样性危机带来的不利影响的的基础; (4) 生物多样性与生态系统服务的关系在不同的时间和空间尺度上是不恒定的, 有必要共同确定生态系统服务和生物多样性的空间格局, 以有效和可持续的进行生态系统管理; (5) 虽然生物多样性保护和生态系统管理还存在许多不确定性, 但相关理论应该在管理、保护和恢复生态系统中发挥重要作用。最后, 研究提出了进一步研究的领域, 以促进生物多样性保护和生态系统服务提供之间的协同作用。希望对相关领域的研究有所帮助。

关键词: 生物多样性; 生态系统服务; 多重关系; 权衡与协同; 保护与管理

Relationships and trade-offs between, and management of biodiversity and ecosystem services

LI Qi¹, ZHU Jianhua^{1,2}, XIAO Wenfa^{1,2,*}

1 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: Biodiversity and ecosystem services (ES) are the material basis for the sustainable development of human survival and socio-economics, biodiversity loss and ES degradation have become hot global environmental issues following climate change. Biodiversity is a major determining factor for ecosystem productivity, stability, resistance to biological invasions, and nutrient dynamics. ES shows a high-level of quality and stability at high-levels of biodiversity and ecosystem function. We therefore aim to explore the relationships between biodiversity and ES. It is important to clarify the relationships between biodiversity and ecosystem processes, functions, and services. The role that biodiversity plays in ES can be resolved by recognising that different relations exist at the various levels of the ES hierarchy: Biodiversity is the regulator of ecosystem processes and an important factor in consolidating ES, biodiversity is also an ultimate ES and directly contributes to their interests and values at the genetic and species level. Improving the understanding of key relationships

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFD060020602)

收稿日期: 2018-03-16; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaowenf@caf.ac.cn

between biodiversity and ES provisions will help guide effective management and protection strategies. Research on the tradeoffs and synergies of biodiversity and ES can help managers make favorable decisions for protection, and it is also the basis for planning adaptation strategies to reduce adverse effects of a biodiversity crisis. The link between biodiversity and ES is not constant across different temporal and spatial scales, so it is necessary to jointly determine the spatial patterns of ES and biodiversity for an effective and sustainable plan for ecosystem management. Although there are still many uncertainties in biodiversity conservation and ecosystem management, theory should play an important role in managing, conserving, and restoring ecosystems. The issues discussed here should receive further attention in the context of the multiple goals for sustainable management. Lastly, further research was concluded by proposing areas for the fostering of conservation synergies between biodiversity and ES. It is expected to be helpful for future research in related fields.

Key Words: biodiversity; ecosystem services; multiple relationships; trade-offs and synergies; protection and management

生物多样性和生态系统是人类赖以生存和发展的基础,是社会稳定和可持续发展的根本保障^[1-2]。在当今不同时空和生物学尺度生物多样性持续下降的背景下,全球范围内对生物多样性保护的关注和需求日益增加。同时,全球生物多样性丧失削弱生态系统功能和对人类有益的生态系统服务的可持续性已达成共识^[3-5]。

生态系统功能退化、物种灭绝是当今世界面临的重大生态环境危机之一^[6]。最近有关生物多样性和生态系统功能的关系研究,包括净初级生产力、养分循环和分解的研究表明随着生物多样性丧失的加快生态系统属性也加速下降并最终影响生态系统服务的发挥。人类是生物多样性丧失的主要驱动力,生物多样性又通过影响生态系统的过程和功能来影响生态系统服务。加强生态系统服务供给水平的同时加强对生物多样性的保护越来越受到研究人员、土地管理者以及国际社会的关注。2007年发布的生态系统与生物多样性经济学(The Economics of Ecosystems and Biodiversity, TEEB)以及2012年建立的政府间生物多样性与生态系统服务科学政策平台(Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES)都强调了二者之间的重要关系,其主要目的是帮助各级政策制定者认识到生态系统和生物多样性提供的广泛利益从而制定各种保护政策^[7]。联合国生物多样性保护公约(Convention on Biological Diversity, CBD)战略规划愿景是:“到2020年,生物多样性能够得到评估、保护、恢复和合理应用,维护生态系统服务,维持一个健康的地球”,任务是:“采取有效迫切的行动来阻止生物多样性丧失,确保到2020年实现生态系统的可恢复性并继续提供必要的服务,保护地球生命的多样性,促进人类福祉和消除贫困”^[8]。这使得生物多样性保护公约成为国家层面行动的全球框架,不仅仅是保护生物多样性本身,而且对维护和恢复与人类福祉息息相关的生态系统服务至关重要。

一些研究证实,生物多样性丧失危及生态系统供给水平和人类福祉^[9],从生物多样性入手对生态系统服务的形成进行探究最为合适^[10]。同样,生态系统服务的提出,为生物多样性保护提供了全新的视角和依据,人类更加直观地认识到生态系统的作用和面临的困境。通过生物多样性的相关研究,可以揭示生态系统结构、过程和服务之间的耦合机制^[11]。鉴于生物多样性与生态系统服务之间的重要关系。本文主要论述了生物多样性和生态系统服务的关系内涵;生物多样性与生态系统服务的多重关系以及它们之间权衡与协同作用的研究进展;对二者之间不同时空尺度的空间关系进行了讨论;提出生物多样性保护工作要立足于生态系统,通过保护物种的途径保护生态,从多学科、多角度的方向考虑保护。

1 生物多样性与生态系统过程、功能、服务

生态系统是生物和非生物群落相互作用的综合体^[12]。这些相互作用,包括所有生物多样性组成部分,决定了生态系统服务的数量和质量。生态系统过程、生态系统功能与生态系统服务是既相互区别,又相互联系的概念^[13]。在已有的研究中,生态系统功能和生态系统服务的概念常常被混淆。生态系统功能是生态系统

为人类提供生态服务的过程和基础,没有生态系统功能,生态系统就不可能为人类提供各种服务。可以说生态系统服务的每一种形式都必须有生态系统功能作为支撑^[14-15]。理解生物多样性与生态系统服务之间的关系,必须先明确生物多样性与生态系统过程及生态系统功能之间的关系。

生物多样性(Biodiversity)是生物及其与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和,表现在生命系统的各个组织水平上,包括遗传多样性、物种多样性以及生态系统多样性三个层次^[16]。

生态系统过程(Ecosystem process)是生态系统中生物(有机体)和非生物(化学和物理的)通过物质和能量驱动的复杂相互作用的结果,支持信息(例如刺激)、能量(例如阳光)和物质(例如营养物质、气体、水)的流通^[17]。这个概念是“以生物体为中心”的,所涉及的过程可能是生理(例如光合作用、呼吸作用)、生物(例如扩散)或进化的(例如选择或突变)。由于物种之间存在复杂的相互作用,生物多样性的变化和丧失可以通过物种性状改变个体生理生态特性(生物途径)来直接调节生态系统过程,也可以通过改变有限资源的可获得性、微生物小气候及干扰机制等(非生物途径)来调控生态系统功能^[18]。由于生物与非生物的相互作用主要发生在生态系统过程的水平上,而不是在生态系统服务的传递过程中,环境变化对生态系统服务的影响通常是非线性的,难以预测和/或不可逆的^[19]。

生态系统功能(Ecosystem function)的概念是生态系统作为一个开放系统,其内部及其与外部环境之间,所发生的能量流动、物质循环和信息传递的总称^[20]。这个概念是“以生态系统为中心”的,如光合作用、呼吸作用、分解作用、互利共生性、竞争性和捕食性,这些过程通过食物网传递能量和营养物质,是生态系统结构和过程之间的相互作用^[21-22]。生态系统功能是生态系统本身所具备的一种基本属性,独立于人类而存在,它们未必转化为人类的利益,有时被认为是生态系统的“支持服务”^[23]。

生态系统服务(Ecosystem service)被定义为人们从自然所能获得的好处^[24]。这些服务是根据它们对个人或社会的特定利益来定义的,因此,这个概念是“以人为本”的。它们被认为是生态系统服务是因为它们与产生它们的生态系统功能有直接的联系。MA(2005)将这些服务分为四类:供应服务:从生态系统获得的产品,如食物、淡水、纤维、生物和遗传资源等;调节服务:从调节生态系统过程中获得的好处,例如调节洪水、干旱、疾病和水净化等;支持服务:生产其他生态系统服务所必需的服务,如土壤形成、养分循环、初级生产等;文化服务:来自生态系统的非物质贡献,如娱乐、旅游、文化与精神体验等。

生物多样性是生态系统功能的主要驱动力已被得到广泛认可^[25]。一些生态系统服务,如水源涵养、土壤侵蚀控制或授粉,取决于生态系统中的物种控制的生态系统功能。Tscharntke 等(2012)等认为适度的生物多样性在生态系统功能及过程中具有重要作用,适度干扰的生物多样性保护能使生态系统服务达到最大化,也有利于保证某些濒临灭绝物种的可持续性^[26]。在控制植物物种丰富度的实验中,生态系统功能随着生物多样性的减少而减少。然而,当考虑个体功能时,物种丰富度—生态系统功能关系经常在物种丰富度低的水平饱和(即物种对生态系统过程的贡献表现出一定的冗余)^[27-28]。当多个物种执行相似的功能时,如果这些物种对环境扰动也有不同的反应,那么生态系统功能的抵抗力会更高^[29]。因此,在低营养级水平,某些物种的损失对生态系统功能未必是灾难性的。然而,在高营养级水平,捕食者通常是相对稀有的,并且很少或没有冗余^[30]。肉食动物的损失会对生态系统造成严重的后果,例如由于失去对食草动物的调节,许多食草动物会成为森林害虫。

在全球变化的各种驱动力中,生态学家发现生物多样性丧失是对地球生态系统功能和可持续性影响最大的因素之一,并且对任何系统功能的影响都是非线性的饱和形式,意味着初期的生物多样性降低对生态系统功能的影响较小,而当物种数目低于某一阈值后,任何物种的灭绝都会对生态系统功能产生严重的影响,从而影响生态系统服务水平,如果在更大的时空尺度,影响更加明显^[31-33]。任何营养级物种的大量损失,特别是关键种,会造成生态系统状态的变化。在变化的环境中,物种多样性为过程的损失提供了缓冲。这就产生了生物多样性的“保险效应”,这在经验和理论上都得到了很好的支持^[34-35]。

如上所述,生态系统服务与生态系统功能的关键区别在于,功能既有内在价值,也有潜在的人类中心价

值,而服务的定义只取决生态系统对于人们的利益^[36]。生物多样性在各个层次上促进生态系统功能(如初级生产力、分解、养分循环和营养相互作用等)从而支持广泛的生态系统服务(如食品生产、碳固定、水源涵养、气候调节、病虫害防治等)^[11]。

2 生物多样性与生态系统服务的多重关系

生物多样性与大多数生态系统服务之间有着积极的关系。生物多样性是许多重要生态系统服务的基础,具有多重生态系统功能和高水平生态系统服务的群落往往拥有更多的物种,而多样化的生物群落对生态系统稳定性、生产力以及养分供应具有促进作用^[37-38]。生物多样性在生态系统服务中发挥的作用可以通过识别其在生态系统服务不同层次上的功能来解决。在不同的层次上,生物多样性的功能也不相同,如表 1 所示。

2.1 生物多样性是生态系统过程的调节者

生物多样性在调节生态系统服务方面具有重要作用。生物多样性可以缓冲环境变化,在生态系统面对干扰时维持一定的生态系统服务。大多数生态系统服务的产生依赖于生态系统中的动植物,尽管其质量和数量与野生动植物的多样性之间往往没有简单关联。主流观点认为,当生物多样性元素丢失时,生态系统将变得不那么有弹性^[39]。

生物多样性是控制生态系统服务的生态系统过程的一个重要因素。例如,许多土壤养分循环的动态是由土壤中生物群落的组成决定的,在更多样化的生物群落中,生态系统对害虫和环境变化的抵抗力也更强。因此,作为衡量生态系统生物组成的生物多样性在生态系统服务供给中起着关键作用^[40-41];陆地和水中的植物对固碳释氧、空气质量调节和水质净化等调节功能具有重要意义;植物种间一起生长的互相促进作用会导致某些混交林的生长加快,例如在氮限制的地点,固氮树种可以促进混交林分内其他树种的生长^[42-43];拥有更多物种的群落增加了包含一个生长更快的物种的可能性,对一个特定的干扰会有更强的抵抗力或者其他有利的特性,与物种少的群落相比,会具有更强大的生态系统功能或者提供更多的生态系统服务^[44-45]。还有昆虫物种作为传粉者的作用,农田中种类繁多的捕食者可以减少害虫的爆发的作用^[46]。

2.2 生物多样性本身作为最终的生态系统服务

生物多样性是所有农作物和家养牲畜的起源以及它们的品种多样性的基础。基因和物种水平上的生物多样性直接有益于某些商品和它们的价值。例如一些包含高水平遗传多样性的物种用于食品和纤维;野生植物具有的潜在的药用价值;野生作物亲本的遗传多样性对于作物品种改良具有重要意义,对于生物燃料作物和牲畜来说也是如此;传粉动物为农业景观提供了重要的生态服务,维持传粉动物的物种多样性或功能群多样性可以提高作物授粉的成功率,直接关系着作物的产量和经济价值。因此,遗传多样性和野生物种多样性是直接贡献了其商品和价值的最终生态系统服务。

2.3 生物多样性作为商品

生物多样性的许多组成部分具有文化价值,包括野生动植物和风景名胜的观赏价值以及精神、教育、宗教和娱乐价值^[47]。保留大量野生物种是非常重要的,大型脊椎动物的多样性是游客的主要吸引力,鸟类和其它具有观赏价值的动植物如蝴蝶和野花,对休闲观光者和业余鸟类爱好者具有娱乐价值;森林内旗舰树种或伞护种对林内动物栖息地具有保护价值。因此,生物多样性本身就是一个很好的商品,具有独特的价值。此外,生物多样性在一定程度上对文化服务来说是很重要的,例如人们对不同的动植物群的欣赏,但在关注农产品生产时,生物多样性是被高度忽视的^[46]。

生物多样性的一个组成部分可以有助于几种生态系统服务。例如,枯死木中的甲虫幼虫可以为啄木鸟提供食物(最终生态系统服务),也可以促进分解和养分循环(调节生态系统服务)。枯死木在不同的分解阶段是许多生物的栖息地,也有助于碳储存,并将天然森林塑造为有巨大潜力的自然体验场所(文化生态系统服务)。需要说明的是,生物多样性的丧失是否损害生态系统服务,提高生物多样性是否有利于服务的改善,在科学界还没有绝对定论。一些学者认为高度多样化的生态系统具有更高的稳定性,也有学者认为高度多样化

的生态系统似乎更加脆弱。目前在探索生物多样性与生态系统服务之间关系所取得的一些成果并不具备普遍性,且在大尺度范围内,无法确定小范围的生物多样性丧失就一定会对生态系统服务带来负面影响^[48]。

表 1 生物多样性与生态系统服务的多重关系
Table 1 Multiple relationships between biodiversity and ecosystem services

生态系统过程的调节者 Regulator of ecosystem processes	最终生态系统服务 Final ecosystem services	商品 Goods
土壤动物和微生物:有机质分解与土壤养分循环; 初级生产者(陆地和水中的植物):生物量生产和碳储存、空气质量调节、水质净化; 捕食者:种群调节、食物网调节、减少害虫爆发; 传粉动物:非农业生态系统的稳定性。	野生作物和牲畜亲缘植物(动物):确保遗传多样性,提供食品生产系统的弹性以应对未来气候变化/疾病等; 具有次级化合物的生物体:具有商业开发潜力,例如新型药物; 传粉动物:许多粮食作物的安全。	大型脊椎动物,尤其是鸟类、哺乳动物和供人观赏的开花植物:因其魅力和审美情趣而被认可; 旗舰树种或伞护种:为更广阔的群落和动物栖息地提供保护; 系统发育不同的物种:维持进化多样性; 濒危物种:保持分类学多样性

3 生物多样性与生态系统服务权衡与协同

生物多样性与生态系统服务的关系可能由于复杂的生态系统动力学和所涉及的生态系统组成部分之间的多尺度相互作用而难以揭示。但它们之间的权衡与协同关系却可以表现出来,例如生物多样性保护措施减少生态系统服务的供应或者生态系统服务的管理导致了生物多样性的丧失。一个双赢的局面是一个期望的生态系统服务和生物多样性保护成果可以通过相同的措施实现,例如,用混交林代替单作针叶树种可有益于生态系统服务的提供和几种物种的丰富度^[49]。

Maes 等(2012)对整个欧洲生态系统服务供给、生物多样性和生境保护之间的权衡与协同作用进行了分析,他们的研究表明生物多样性指数和生态系统服务供给呈正相关,但这种关系受生态系统服务空间权衡的影响,特别是在作物生产和调节生态系统服务之间。他们的研究还证明处于良好保护状态的生境提供了更多的生物多样性并且具有更高的生态系统服务供给潜力,特别是在调节和文化生态系统服务方面^[50]。Cordingley 等(2015)设置了 3 种不同的管理情景,分析了景观尺度上生物多样性价值和主要生态系统服务价值(碳储存、娱乐、审美和木材价值)之间的权衡关系。他们的研究表明权衡关系可以通过景观尺度的管理方法来解决,根据斑块大小进行不同的干预。具体而言,如果对生物多样性保护管理集中在更大的斑块上,随着木本植物的演替,小斑块上的美学、碳储存和木材价值都将增加,这样无论相对较高的生物多样性价值或者较高的生态系统服务供给都可以得到发挥^[51]。Law 等(2016)等人假设确保热带和温带森林多个生态系统的服务功能和考虑保护生物多样性的前提下,探讨了土地利用与管理方式的选择。根据人类的不同需求,在实际中提供多个而不是单一的生态系统服务是非常重要的。在这种情况下,需要帮助管理层优化多目标需求,包括生物多样性保护和其他相关利益者的需求。在实际的生态系统管理中存在许多权衡和冲突,为了解决这一复杂的现实问题,可以从土地利用、景观配置、相关利益者需求等不同的角度综合考虑,以达到更好的经济利益和生态保护的目的^[52]。生物多样性保护和减缓气候变化之间的潜在冲突需要管理者对土地利用方式做出权衡。Shoyama 等(2014)研究了在(a)现有土地利用现状、(b)生物多样性保护和(c)气候变化减缓 3 种情境下生物多样性保护与各种生态系统服务之间的关系,研究结果指出,在生物多样性保护和气候变化减缓双重目标下生态系统的供给、支持和调节服务之间的权衡关系,可以帮助土地管理者制定和规划更优的土地管理方式^[53]。

这些研究强调了生物多样性与生态系统服务的协同和权衡关系,凸显了在全球范围内重新评估生物多样性以及保护生物多样性的重要性。在空间权衡与协同分析的基础上,通过热点区域识别,进一步了解不同区域服务供给能力的强弱,了解哪些地方存在权衡和协同作用,以及这些权衡和协同如何随环境变化而变化,从而优化土地资源规划和利用。生态学家和管理人员需要共同努力确保多重目标的识别与实现。与此同时,使

用工具和方法来量化生物多样性和生态系统服务之间的权衡与协同将是必不可少的。

4 生物多样性与生态系统服务的尺度效应

时间尺度和空间尺度是生态学研究的重点问题和探索生态学过程的主要方法,同一问题在不同的尺度上对生态要素影响的结果存在差异^[54]。生物多样性与生态系统服务关系的研究对于理解地球上的生物多样性,制定生物多样性保护策略,以及研究生态系统功能、结构、服务和生物多样性之间的关系是非常重要的,尽管控制生物多样性模式和分布的基础机制仍存在许多分歧和不同的理论^[55-56]。

4.1 样地尺度

在小尺度的研究样地(小于 400 m²),大量的实验已经研究了物种多样性(通常是物种的数量)对生态系统功能的影响,逐渐形成普遍共识,诸如随着群落中物种数量的增加,初级生产力和养分吸收等过程随之增加^[57]。这些实验似乎为生物多样性保护提供了强大的动力,因为生态系统功能支撑着对人类有益的许多生态系统服务,如牧草生产和碳汇。这些实验研究通常集中在较小的空间尺度上,不仅是因为实际的原因,而且还因为生物,特别是植物,通常在短距离内相互作用,因此在小尺度上,生物多样性最有可能对生态系统功能和服务产生重要影响^[58]。

栖息地丧失、物种入侵和过度开发等因素加速了全球物种灭绝,人们很容易认为全球生物多样性的下降必然伴随着较小空间尺度的下降^[59-60]。然而,这不是一个逻辑必然性,不同于全球环境变化的其他关键变量,大尺度生物多样性不是小尺度生物多样性的累加函数。例如,如果温度或大气 CO₂ 浓度在全球范围内增加,则在局地尺度内随时间的净变化平均来说肯定也是增加的。然而,由于本地物种损失可能伴随着外来物种的迁徙,生物多样性在全球范围内的减少不一定导致较小尺度上生物多样性的变化^[61]。

4.2 区域及全球尺度

区域及世界范围内生物多样性的尺度空间格局,一直是生态学家感兴趣的研究方向,他们长期致力于探索生物多样性空间模式的理论和实际原因以及后果^[62]。虽然有许多假说来解释生物多样性的全球梯度,但在控制生物多样性模式和分布的机制上还没有完全一致。在全球范围内,生物多样性和生态系统服务热点区域,特别是在热带森林之间呈正的空间关系。热带雨林中存在的多样化的结构和功能生态组成可能是它们具有更高的潜力以提供高潜力多重生态系统服务的原因。在这些地区,保护生态系统服务的投资和策略更有可能同时保护生物多样性^[63]。Alamgir 等(2018)的研究表明,在热带森林景观中,生物多样性和全球气候调节服务等方面存在着空间上的一致性,通过保护未受干扰的热带雨林,有助于减缓全球气候变化。因此,在尽可能的情况下,应该尽量少或不干扰热带雨林。此外,管理干预需要重点增加树木丰富度,无论在无林地或者受干扰的森林,这可能有助于增加高潜力的生态系统供给能力^[64]。

然而,在世界上大多数其它地区(例如干旱、北方、温带和极地地区)生物多样性与生态系统服务热点区域表现出弱的正相关关系^[65-66]。Morelli 等(2017)对法国全国范围内常见鸟类群落生物多样性与生态系统服务之间关系的研究表明,生态系统服务和生物多样性指标没有系统的正相关关系,有时甚至显示出相反的关系;在农业系统中,生态系统服务与任何多样性指标都没有正相关关系^[67]。杨路存等(2018)对青海省高寒灌丛物种多样性与生物量关系研究表明,不同灌丛类型物种丰富度、草本物种丰富度都与总生物量负相关^[68]。而覃光莲等(2002),杜国祯等(2003)对高寒地区植物群落物种多样性与生物量关系的研究却表明二者呈对数线性增加关系^[69-70]。所以,即使在同一研究区域,由于研究时间或者取样地点的不同,研究结果也会呈现相反的情况。

现有关生物多样性、生态系统服务关系的研究,主要集中于小尺度、匀质生境,忽略了尺度及环境异质性对多样性与生态系统服务的影响^[71]。生物多样性丧失减少了生态系统功能在局部尺度上物种间的相互作用,但对生物多样性丧失在更大尺度的空间和时间尺度上如何影响生态系统服务还不清楚。而尺度和环境异质性被广泛认为是导致生态模型差异的一个主要原因。现实世界中,生物多样性与生态系统服务之间的关系极其复杂,植物群落多样性和组成在各个尺度上的变化会导致生态系统服务的退化或提高,仍然因时间和空

间尺度而异,并且迫切需要进一步研究。因此,在多个尺度上及环境梯度下开展多尺度整合研究,对于揭示不同尺度功能多样性与生态系统服务关系及维持机制是非常必要的。

结合遥感数据、样地调查实测数据和地理信息技术评估、绘制生物多样性与生态系统服务空间分布图及时间序列上的动态分布图,可以直观的反应物种多样性及生态系统服务的各项指标,并分析其空间和时间上的相关性;掌握目前用于情景分析和建模的政策支持工具,模拟未来生物多样性和生态系统服务变化趋势,从而制定积极的策略应对未来生物多样性丧失和生态系统服务水平下降带来的负面影响并帮助其恢复,是未来努力的方向^[72-73]。

5 生物多样性保护与生态系统管理

对生态系统进行管理,即满足当前和未来的人类需求而又能不减少对生物多样性保护,对政治家、土地使用规划者和环保主义者来说都是一个挑战。生态系统管理的目的是增强一种或几种生态系统服务。例如,农业或林业系统的管理者通常通过控制样地的植被以促进所需资源的生长,例如某些作物或树木;通过植树造林和森林保护可以增加碳储量;恢复湿地的目的是创造一个自然的水净化系统。然而,为某些生态系统服务而进行的生态系统管理可能会对其他服务造成负面影响。

5.1 生物多样性与生态系统服务的协同保护

生物多样性与生态系统服务在本质上是相互联系的,并且对人类福祉至关重要。生物多样性保护不仅是保护其内在价值,而且在为人类提供必要服务的生态系统功能起着至关重要的作用。应用生态系统服务方法作为国家管理生物多样性的工具需要超越传统的自然保护方法,例如交叉政策和法律方法。可以通过对生态系统的管理和保护实现生物多样性保护,生物保护学家和生态系统管理人员需要共同努力以确保多重目标的识别和实现^[74]。如果生物多样性和生态系统服务各自的优先级区域在空间上是一致的(即生物多样性可以代表生态系统服务的提供),二者的保护行动可以联合进行。越来越多的研究者正在研究生物多样性与生态系统服务之间的一致性和互补性,以在生物多样性保护和生态系统管理中最大限度地发挥二者的协同作用。

生物多样性保护工作要立足于生态系统,通过保护物种的途径保护生态,从多学科、多角度的方向保护。由于全球人口增长而日益增加的人为压力预计将缩小自然生态系统,并因此导致生物多样性和生态系统服务的全球性下降。为了支持生态系统管理和生物多样性保护策略,未来的研究还应考虑社会经济因素和土地利用决策对生物多样性的影响乃至生态系统服务的提供^[75]。将传统的物种和栖息地保护策略纳入更广泛的社会生态系统和生态系统服务供给背景下。

我们对生物多样性与生态系统的关系以及生物多样性丧失对生态系统服务影响的认识不断加深。因此,整合生态系统服务与保护区的管理规划和策略的研究有越来越多的趋势。我国近十多年来实施了一系列有利于保护生物多样性的政策和规划,先后启动了天然林资源保护、退耕还林、退牧还草、“三北”防护林建设、湿地保护与恢复、水土流失综合治理等重点生态工程。这些重点生态工程的实施,促进了退化生态系统和野生生物种生境的恢复,对生物多样性保护和生态系统服务提升有很大的作用。

5.2 生物多样性保护与生态系统服务评估的不确定性

评估预测全球生物多样性和生态系统服务的状态、趋势及其对人类福祉的影响,是当前生物多样性和生态系统服务研究领域的重要任务^[76]。由于在局地、区域和全球尺度上缺乏可靠的测量方法,同时由于对生物多样性、生态系统的复杂结构、功能和过程以及生态过程与社会经济过程之间的复杂关系缺乏充分的讨论和研究。生物多样性保护与生态系统服务评估只能独立进行,导致难以展开生物多样性和生态系统服务评估指标和模型方法的集成研究^[77]。当前,大多数保护区的管理主要是针对生物多样性,而忽视了生态系统服务的维持。生态系统服务价值评估对生物多样性保护是一个有价值的工具,可以更好的促进环境政策决策和土地管理,并可以帮助土地管理者制定干预措施以弥补斑块水平的生物多样性丧失^[78],也可以作为一种政策工具促进生物多样性评估框架更好地发展^[79]。

目前国际上开展了大量生物多样性和生态系统服务价值评估工作,但并没有产生预期的效果,主要是因为评估方法不确定、对生物多样性和生态系统服务价值认识不足以及数据难以获取等,导致评估结果的权威性和可信度不足;其次,没有将利益相关方全部纳入进来,而且很难达到利益平衡,导致评估结果很难被采纳;最后,评估的方法和过程在时间连续性及空间可比性上存在不足,导致科学研究与政策脱节,评估结果难以应用于实际管理^[80]。尽管生物多样性保护和生态系统服务评估之间存在不确定性,二者的保护优先程度也存在权衡,但仍然可以通过系统规划实现二者的协调,同时将生态系统服务纳入保护规划可能是最具成本效益的保护途径。未来的研究也应关注在社会—生态系统中适用于生物多样性保护价值评估的其他重要因素,使得社会和自然能够相互履行自己的角色。

6 研究展望

减缓气候变化已被确认为生物多样性保护的一项重要战略。虽然已有大量的研究探讨了生物多样性、生态系统服务以及气候变化之间的相互关系,但这些研究大多都侧重于气候变化对生命支持系统负面影响的调查和分析,重点关注生物多样性适应和减缓气候变化两个方面。而气候变化对生物多样性的影响以及生物多样性丧失对生态系统服务输送链到底有怎样的影响,生态系统在群落灭绝后的缓慢物种补充动态这一过程很少被评估。在国家战略规划实施中应当充分重视生物多样性,提高决策者的认识,并制定可能的缓解和适应计划,有助于最大限度的减少气候变化的风险从而支持生物多样性乃至整个生态系统服务。

现在越来越多的人认识到生态系统管理和恢复需要以生态学理论为基础。生态恢复被认为是增加生态系统服务供给水平以及逆转生物多样性丧失的一个重要战略^[81]。理论基础的积累和应用研究最终将产生更好的解决方案,以应付管理生物多样性和生态系统服务的困难和不确定性。同时,对生物多样性、生态系统功能和服务的进一步深入研究将在可持续经营管理实践发展中发挥重要作用。实现生物多样性保护与生态系统服务的提升对科研人员和管理人员之间的协作需求也越来越大,以确保科学能充分满足管理者的需要。科学家应该在研究项目的规划阶段与管理人员联系,并开发最终结果(如报告、文章),提供科学的保护方案。最后,实施有效的适应战略,成功地减少生态系统脆弱性,提高其恢复能力,促进生物多样性及相关生态系统服务各方面的优化。

目前,生态系统服务研究正由类型识别、经济价值评估向机理分析转变,无论哪种研究,都离不开生物多样性这个核心内容^[82]。关于生物多样性与生态系统服务功能耦合性如何?它们之间如何相互作用、需要用哪些物种来率先恢复生物多样性?生物多样性保护和生态系统服务间存在着什么样的数量关系?生物多样性又是如何直接为生态系统服务做出贡献以及生物多样性保护在多大程度上满足了生态系统服务功能的支撑和维护?有待以后深入探究。

参考文献(References):

- [1] Tittensor D P, Walpole M, Hill S L L, Boyce D G, Britten G L, Burgess N D, Butchart S H M, Leadley P W, Regan E C, Alkemade R, Baumung R, Bellard C, Bouwman L, Bowles-Newark N J, Chenery A M, Cheung W W L, Christensen V, Cooper H D, Crowther A R, Dixon M J R, Galli A, Gaveau V, Gregory R D, Gutierrez N L, Hirsch T L, Höft R, Januchowski-Hartley S R, Karmann M, Krug C B, Leverington F J, Loh J, Lojenga R K, Malsch K, Marques A, Morgan D H W, Mumby P J, Newbold T, Noonan-Mooney K, Pagad S N, Parks B C, Pereira H M, Robertson T, Rondinini C, Santini L, Scharlemann J P W, Schindler S, Sumaila U R, Teh L S L, van Kolck J, Visconti P, Ye Y M. A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. *Science*, 2014, 346(6206): 241-244.
- [2] 潘玉雪, 田瑜, 徐靖, 张博雅, 李俊生. IPBES 框架下生物多样性和生态系统服务情景和模型方法评估及对我国的影响. *生物多样性*, 2018, 26(1): 89-95.
- [3] Thomsen M S, Garcia C, Bolam S G, Parker R, Godbold J A, Solan M. Consequences of biodiversity loss diverge from expectation due to post-extinction compensatory responses. *Scientific Reports*, 2017, 7: 43695.
- [4] Crist E, Mora C, Engelman R. The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. *Science*, 2017, 356(6335): 260-264.

- [5] Mori A S. Biodiversity and ecosystem services in forests: management and restoration founded on ecological theory. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54(1): 7-11.
- [6] Butchart S H M, Walpole M, Collen B, van Strien A, Scharlemann J P W, Almond R E A, Baillie J E M, Bomhard B, Brown C, Bruno J, Carpenter K E, Carr G M, Chanson J, Chenery A M, Csirke J, Davidson N C, Dentener F, Foster M, Galli A, Galloway J N, Genovesi P, Gregory R D, Hockings M, Kapos V, Lamarque J F, Leverington F, Loh J, McGeoch M A, McRae L, Minasyan A, Hernández Morcillo M, Oldfield T E E, Pauly D, Quader S, Revenga C, Sauer J R, Skolnik B, Spear D, Stanwell-Smith D, Stuart S N, Symes A, Tierney M, Tyrrell T D, Vié J C, Watson R. Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science*, 2010, 328(5982): 1164-1168.
- [7] Silvis H. The Economics of ecosystems and biodiversity in national and international policymaking: Patrick ten Brink (ed.) *The Economics of Ecosystems and Biodiversity in National and International Policymaking* Earthscan, London and Washington, 2011. ISBN: 978-1-84971-250-7, 494 pages, Price: £ 60 (hardback). *European Review of Agricultural Economics*, 2012, 39(1): 186-188.
- [8] Coates D. Strategic plan for biodiversity (2011-2020) and the Aichi biodiversity targets//Finlayson C M, Everard M, Irvine K, McInnes R J, Middleton B A, van Dam A A, Davidson N C, eds. *The Wetland Book*. Dordrecht: Springer, 2016.
- [9] Pastur G M, Peri P L, Herrera A H, Schindler S, Díaz-Delgado R, Lencinas M V, Soler R. Linking potential biodiversity and three ecosystem services in silvopastoral managed forest landscapes of Tierra del Fuego, Argentina. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2017, 13(2): 1-11.
- [10] 刘绿怡, 刘慧敏, 任嘉衍, 卞子开, 丁圣彦. 生态系统服务形成机制研究进展. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2731-2738.
- [11] Cardinale B J, Duffy J E, Gonzalez A, Hooper D U, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace G M, Tilman D, Wardle D A, Kinzig A P, Daily G C, Loreau M, Grace J B, Larigauderie A, Srivastava D S, Naeem S. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 2012, 486(7401): 59-67.
- [12] Currie W S. Units of nature or processes across scales? The ecosystem concept at age 75. *New Phytologist*, 2015, 190(1): 21-34.
- [13] Pettorelli N, Böhne H S T, Tulloch A, Dubois G, Macinnis-Ng C, Queirós A M, Keith D A, Wegmann M, Schrödt F, Stellmes M, Sonnenschein R, Geller G N, Roy S, Somers B, Murray N, Bland L, Geijzenborffer I, Kerr J T, Broszeit S, Leitão P J, Duncan C, El Serafy G, He K S, Blanchard J L, Lucas R, Mairota P, Webb T J, Nicholson E. Satellite remote sensing of ecosystem functions: opportunities, challenges and way forward. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2018, 4(2): 71-93.
- [14] 黄桂林, 赵峰侠, 李仁强, 徐明. 生态系统服务功能评估研究现状挑战和趋势. *林业资源管理*, 2012, (4): 17-23.
- [15] Brockerhoff E G, Barbaro L, Castagneyrol B, Forrester D I, Gardiner B, González-Olabarria J R, Lyver P O B, Meurisse N, Oxbrough A, Taki H, Thompson I D, van der Plas F, Jactel H. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 2017, 26(13): 3005-3035.
- [16] Song G E. What determines species diversity? *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(19): 2033-2041.
- [17] Mace G M, Norris K, Fitter A H. Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship. *Trends in Ecology & Evolution*, 2012, 27(1): 19-26.
- [18] 苏宏新, 马克平. 生物多样性和生态系统功能对全球变化的响应与适应: 协同方法. *自然杂志*, 2010, 32(5): 272-278.
- [19] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, Capistrano D, Defries R S, Díaz S, Dietz T, Duraipappah A K, Oteng-Yeboah A, Pereira H M, Perrings C, Reid W V, Sarukhan J, Scholes R J, Whyte A. Science for managing ecosystem services: beyond the millennium ecosystem assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(5): 1305-1312.
- [20] 李慧蓉. 生物多样性和生态系统功能研究综述. *生态学杂志*, 2004, 23(3): 109-114.
- [21] Ansink E, Hein L, Hasund K P. To value functions or services? An analysis of ecosystem valuation approaches. *Environmental Values*, 2008, 17(4): 489-503.
- [22] Cardinale B J, Matulich K L, Hooper D U, Byrnes J E, Duffy E, Gamfeldt L, Balvanera P, O'Connor M I, Gonzalez A. The functional role of producer diversity in ecosystems. *American Journal of Botany*, 2011, 98(3): 572-592.
- [23] 冯剑丰, 李宇, 朱琳. 生态系统功能与生态系统服务的概念辨析. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1599-1603.
- [24] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. Washington: World Resources Institute, 2005: 77-101.
- [25] Hooper D U, Chapin III F S, Ewel J J, Hector A, Inchausti P, Lavorel S, Lawton J H, Lodge D M, Loreau M, Naeem S, Schmid B, Setälä H, Symstad A J, Vandermeer J, Wardle D A. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 2005, 75(1): 3-35.
- [26] Tschamntke T, Tylianakis J M, Rand T A, Didham R K, Fahrig L, Batúry P, Bengtsson J, Clough Y, Crist T O, Dormann C F, Ewers R M, Fründ J, Holt R D, Holzschuh A, Klein A M, Kleijn D, Kremen C, Landis D A, Laurance W, Lindenmayer D, Scherber C, Sodhi N, Steffan-Dewenter I, Thies C, van der Putten W H, Westphal C. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes - eight hypotheses. *Biological*

- Reviews, 2012, 87(3): 661-685.
- [27] Diaz S, Cabido M. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 2001, 16(11): 646-655.
- [28] Petchey O L, Gaston K J. Extinction and the loss of functional diversity. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2002, 269(1501): 1721-1727.
- [29] Mouillot D, Graham N A J, Villéger S, Mason N W H, Bellwood D R. A functional approach reveals community responses to disturbances. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(3): 167-177.
- [30] Terborgh J, Lopez L, Nuñez P, Rao M, Shahabuddin G, Orihuela G, Riveros M, Ascanio R, Adler G H, Lambert T D, Balbas L. Ecological meltdown in predator-free forest fragments. *Science*, 2001, 294(5548): 1923-1926.
- [31] Isbell F, Calcagno V, Hector A, Connolly J, Harpole W S, Reich P B, Scherer-Lorenzen M, Schmid B, Tilman D, van Ruijven J, Weigelt A, Wilsey B J, Zavaleta E S, Loreau M. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature*, 2011, 477(7363): 199-202.
- [32] Hooper D U, Adair E C, Cardinale B J, Byrnes J E K, Hungate B A, Matulich K L, Gonzalez A, Duffy J E, Gamfeldt L, O'Connor M I. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 2012, 486(7401): 105-108.
- [33] Reich P B, Tilman D, Isbell F, Mueller K, Hobbie S E, Flynn D F B, Eisenhauer N. Impacts of biodiversity loss escalate through time as redundancy fades. *Science*, 2012, 336(6081): 589-592.
- [34] Yachi S, Loreau M. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: the insurance hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(4): 1463-1468.
- [35] Meyer S T, Ptacnik R, Hillebrand H, Bessler H, Buchmann N, Ebeling A, Eisenhauer N, Engels C, Fischer M, Halle S, Klein A M, Oelmann Y, Roscher C, Rottstock T, Scherber C, Scheu S, Schmid B, Schulze E D, Temperton V M, Tschamtk T, Voigt W, Weigelt A, Wilcke W, Weisser W W. Biodiversity-multifunctionality relationships depend on identity and number of measured functions. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(1): 44-49.
- [36] Petter M, Mooney S, Maynard S M, Davidson A, Cox M, Horosak I. A methodology to map ecosystem functions to support ecosystem services assessments. *Ecology and Society*, 2012, 18(1): 31.
- [37] Bullock J M, Aronson J, Newton A C, Pywell R F, Rey-Benayas J M. Restoration of ecosystem services and biodiversity: conflicts and opportunities. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, 26(10): 541-549.
- [38] Tilman D, Isbell F, Cowles J M. Biodiversity and ecosystem functioning. *Annual Review of Ecology Evolution & Systematics*, 2014, 45: 471-493.
- [39] Harrison P A, Berry P M, Simpson G, Haslett J R, Blicharska M, Bucur M, Dunford R, Egoh B, Garcia-Llorente M, Geamăna N, Geertsema W, Lommelen E, Meiresonne L, Turkelboom F. Linkages between biodiversity attributes and ecosystem services: a systematic review. *Ecosystem Services*, 2014, 9: 191-203.
- [40] Bradford M A, Jones T H, Bardgett R D, Black H I J, Boag B, Bonkowski M, Cook R, Eggers T, Gange A C, Grayston S J, Kandeler E, McCaig A E, Newington J E, Prosser J I, Setälä H, Staddon P L, Tordoff G M, Tscherko D, Lawton J H. Impacts of soil faunal community composition on model grassland ecosystems. *Science*, 2002, 298(5593): 615-618.
- [41] Cardinale B J, Harvey C T, Gross K, Ives A R. Biodiversity and biocontrol: emergent impacts of a multi-enemy assemblage on pest suppression and crop yield in an agroecosystem. *Ecology Letters*, 2003, 6(9): 857-865.
- [42] Binkley D. Seven decades of stand development in mixed and pure stands of conifers and nitrogen-fixing red alder. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(11): 2274-2279.
- [43] Thompson I D, Okabe K, Parrotta J A, Brockerhoff E, Jactel H, Forrester D I, Taki H. Biodiversity and ecosystem services: lessons from nature to improve management of planted forests for REDD-plus. *Biodiversity and Conservation*, 2014, 23(10): 2613-2635.
- [44] Wardle D A. Experimental demonstration that plant diversity reduces invasibility-evidence of a biological mechanism or a consequence of sampling effect? *Oikos*, 2001, 95(1): 161-170.
- [45] Lefcheck J S, Byrnes J E K, Isbell F, Gamfeldt L, Griffin J N, Eisenhauer N, Hensel M J S, Hector A, Cardinale B J, Duffy J E. Biodiversity enhances ecosystem multifunctionality across trophic levels and habitats. *Nature Communications*, 2015, 6: 6936.
- [46] Lucas P L, Kok M T J, Nilsson M, Alkemade R. Integrating biodiversity and ecosystem services in the post-2015 development agenda: goal structure, target areas and means of implementation. *Sustainability*, 2014, 6(1): 193-216.
- [47] Blicharska M, Smithers R J, Hedblom M, Hedenas H, Mikusiński G, Pedersen E, Sandström P, Svensson J. Shades of grey challenge practical application of the cultural ecosystem services concept. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 55-70.
- [48] Balvanera P, Siddique I, Dee L, Paquette A, Isbell F, Gonzalez A, Byrnes J, O'Connor M I, Hungate B A, Griffin J N. Linking biodiversity and ecosystem services: current uncertainties and the necessary next steps. *Bioscience*, 2014, 64(1): 49-57.
- [49] Felton A, Nilsson U, Sonesson J, Felton A M, Roberge J M, Ranius T, Ahlström M, Bergh J, Björkman C, Boberg J, Drössler L, Fahlvik N,

- Gong P C, Holmström E, Keskitalo E C H, Klapwijk M J, Laudon H, Lundmark T, Niklasson M, Nordin A, Pettersson M, Stenlid J, Sténs A, Wallertz K. Replacing monocultures with mixed-species stands: ecosystem service implications of two production forest alternatives in Sweden. *Ambio*, 2016, 45(S2): 124-139.
- [50] Maes J, Paracchini M L, Zulian G, Dunbar M B, Alkemade R. Synergies and trade-offs between ecosystem service supply, biodiversity, and habitat conservation status in Europe. *Biological Conservation*, 2012, 155: 1-12.
- [51] Cordingley J E, Newton A C, Rose R J, Clarke R T, Bullock J M. Can landscape-scale approaches to conservation management resolve biodiversity-ecosystem service trade-offs? *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(1): 96-105.
- [52] Law E A, Bryan B A, Meijaard E, Mallawaarachchi T, Struwig M, Wilson K A. Ecosystem services from a degraded peatland of Central Kalimantan: implications for policy, planning, and management. *Ecological Applications*, 2015, 25(1): 70-87.
- [53] Shoyama K, Yamagata Y. Predicting land-use change for biodiversity conservation and climate-change mitigation and its effect on ecosystem services in a watershed in Japan. *Ecosystem Services*, 2014, 8: 25-34.
- [54] 毛齐正, 马克明, 邬建国, 唐荣莉, 张育新, 罗上华, 宝乐, 蔡小虎. 城市生物多样性分布格局研究进展. *生态学报*, 2013, 33(4): 1051-1064.
- [55] He F L, Legendre P. Species diversity patterns derived from species-area models. *Ecology*, 2002, 83(5): 1185-1198.
- [56] Rahbek C. The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns. *Ecology Letters*, 2005, 8(2): 224-239.
- [57] Hector A, Bagchi R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature*, 2007, 448(7150): 188-190.
- [58] Vellend M, Baeten L, Myers-Smith I H, Elmendor S C, Beausejour R, Brown C D, De Frenne P, Verheyen K, Wipf S. Global meta-analysis reveals no net change in local-scale plant biodiversity over time. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(48): 19456-19459.
- [59] Barnosky A D, Matzke N, Tomiya S, Wogan G O U, Swartz B, Quental T B, Marshall C, McGuire J L, Lindsey E L, Maguire K C, Mersey B, Ferrer E A. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 2011, 471(7336): 51-57.
- [60] Pereira H M, Navarro L M, Martins I S. Global biodiversity change: the bad, the good, and the unknown. *Annual Review of Environment and Resources*, 2012, 37: 25-50.
- [61] Sax D F, Gaines S D. Species diversity: from global decreases to local increases. *Trends in Ecology & Evolution*, 2003, 18(11): 561-566.
- [62] Gaston K J. Global patterns in biodiversity. *Nature*, 2000, 405(6783): 220-227.
- [63] Naidoo R, Balmford A, Costanza R, Fisher B, Green R E, Lehner B, Malcolm T R, Ricketts T H. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9495-9500.
- [64] Alamgir M, Turton S M, Campbell M J, Macgregor C J, Pert P L. Spatial congruence and divergence between ecosystem services and biodiversity in a tropical forested landscape. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 173-182.
- [65] Larsen F W, Londoño-Murcia M C, Turner W R. Global priorities for conservation of threatened species, carbon storage, and freshwater services: scope for synergy? *Conservation Letters*, 2011, 4(5): 355-363.
- [66] Strassburg B B N, Kelly A, Balmford A, Davies R G, Gibbs H K, Lovett A, Miles L, Orme C D L, Price J, Turner R K, Rodrigues A S L. Global congruence of carbon storage and biodiversity in terrestrial ecosystems. *Conservation Letters*, 2010, 3(2): 98-105.
- [67] Morelli F, Jiguet F, Sabatier R, Dross C, Princé K, Tryjanowski P, Tichit M. Spatial covariance between ecosystem services and biodiversity pattern at a national scale (France). *Ecological Indicators*, 2017, 82: 574-586.
- [68] 杨路存, 赵玉红, 徐文华, 周国英. 青海省高寒灌丛物种多样性、生物量及其关系. *生态学报*, 2018, 38(1): 309-315.
- [69] 覃光莲, 杜国祯, 李自珍, 杨广运, 马建云, 娘毛加. 高寒草甸植物群落中物种多样性与生产力关系研究. *植物生态学报*, 2002, 26(S1): 57-62.
- [70] 杜国祯, 覃光莲, 李自珍, 刘正恒, 董高生. 高寒草甸植物群落中物种丰富度与生产力的关系研究. *植物生态学报*, 2003, 27(1): 125-132.
- [71] Bartkowski B. Are diverse ecosystems more valuable? Economic value of biodiversity as result of uncertainty and spatial interactions in ecosystem service provision. *Ecosystem Services*, 2017, 24: 50-57.
- [72] Pereira H M, Ferrier S, Walters M, Geller G N, Jongman R H G, Scholes R J, Bruford M W, Brummitt N, Butchart S H M, Cardoso A C, Coops N C, Dulloo E, Faith D P, Freyhof J, Gregory R D, Heip C, Höft R, Hurr G, Jetz W, Karp D S, McGeoch M A, Obura D, Onoda Y, Pettorelli N, Reyers B, Sayre R, Scharlemann J P W, Stuart S N, Turak E, Walpole M, Wegmann M. Essential biodiversity variables. *Science*, 2013, 339(6117): 277-278.
- [73] Vihervaara P, Auvinen A P, Mononen L, Törmä M, Ahlroth P, Anttila S, Böttcher K, Forsius M, Heino J, Heliölä J, Koskelainen M, Kuussaari M, Meissner K, Ojala O, Tuominen S, Viitasalo M, Virkkala R. How Essential Biodiversity Variables and remote sensing can help national biodiversity monitoring. *Global Ecology and Conservation*, 2017, 10: 43-59.

- [74] Callesen I. Biodiversity and ecosystem services in life cycle impact assessment-Inventory objects or impact categories? *Ecosystem Services*, 2016, 22: 94-103.
- [75] Eyvindson K, Repo A, Mönkkönen M. Mitigating forest biodiversity and ecosystem service losses in the era of bio-based economy. *Forest Policy and Economics*, 2018, 92: 119-127.
- [76] 于丹丹, 吕楠, 傅伯杰. 生物多样性与生态系统服务评估指标与方法. *生态学报*, 2017, 37(2): 349-357.
- [77] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. *生态学报*, 2017, 37(2): 341-348.
- [78] Liu Y F, Zhang L, Wei X J, Xie P. Integrating the spatial proximity effect into the assessment of changes in ecosystem services for biodiversity conservation. *Ecological Indicators*, 2016, 70: 382-392.
- [79] Aslaksen I, Nybø S, Framstad E, Garnåsjordet P A, Skarpaas O. Biodiversity and ecosystem services: the nature index for Norway. *Ecosystem Services*, 2015, 12: 108-116.
- [80] 杜乐山, 李俊生, 刘高慧, 张凤春, 徐靖, 胡理乐. 生态系统与生物多样性经济学(TEEB)研究进展. *生物多样性*, 2016, 24(6): 686-693.
- [81] Sasaki T, Furukawa T, Iwasaki Y, Seto M, Mori A S. Perspectives for ecosystem management based on ecosystem resilience and ecological thresholds against multiple and stochastic disturbances. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 395-408.
- [82] 范玉龙, 胡楠, 丁圣彦, 梁国付, 卢训令. 陆地生态系统服务与生物多样性研究进展. *生态学报*, 2016, 36(15): 4583-4593.