

生态系统服务的生态学机制研究进展

欧阳志云, 郑 华

(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)

摘要: 全面认识和理解生态系统服务的生态学机制是加强生态系统服务功能管理的前提, 但目前从生态系统服务的生态学机制研究中提供给管理者的信息还非常有限。针对生态系统服务功能的物质基础(生境、生态系统结构和生态系统过程), 目前生态系统服务的生态学机制研究主要集中在 3 个方面: 生物多样性与生态系统服务功能关系; 生态系统服务功能的时空尺度特征; 气候和土地利用变化对生态系统服务功能的影响机制。在综述上述 3 方面进展的基础上, 提出了今后的研究方向。

关键词: 生态系统服务功能; 生物多样性; 时空尺度; 土地利用变化

文章编号: 1000-0933(2009)11-6183-06 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Ecological mechanisms of ecosystem services

OUYANG Zhi-Yun, ZHENG Hua

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6183 ~ 6188.

Abstract: To understand the ecological mechanisms of ecological services will provide basis for ecosystem service management. However, there exists little information from the ecological mechanism research of ecosystem services. According to the basis of ecosystem services (habitat, ecosystem structure and ecosystem process), the following three works were conducted: the relationships between biodiversity and ecosystem services, the tempo-spatial scale attributes of ecosystem services and the effects of climate changes and land-use changes on ecosystem services. The above progresses on ecological mechanisms of ecosystem service were summarized and the problems that need to be studied further in the future were also put forward.

Key Words: ecosystem services; biodiversity; tempo-spatial scale; land-use change

生态系统为人类提供产品和生存环境两个方面的多种服务功能, 生态系统服务功能是人类社会赖以生存和发展的基础。近年来国内外学者围绕生态系统服务功能内涵、生态系统服务功能类型划分、生态系统服务功能经济价值评价方法与经济价值评价、生态系统服务功能供给与需求区划、人类活动对生态系统服务功能的胁迫五个方面开展了大量研究, 国内学者也曾对此展开述评^[1-4]。与此同时, 人们也深刻意识到: 人类活动在不断改变生态系统组成、结构和功能过程中^[5], 也严重削弱了生态系统服务功能^[6-8]。但是, 由于对生态系统的大部分服务功能缺乏深入的生态学理解, 致使能够为决策提供依据的生态学信息非常少(例如: 管理生态系统哪些关键组分、管理的边界和范围如何确定、采用哪种管理方式合适等等), 直接影响生态系统服务功能的保育和管理^[7, 9-13]。因此, 探讨生态系统服务的生态学机制成为当前生态系统服务功能研究的热点和难点。本文综述了这方面的研究进展, 以期对生态系统服务功能的保护和管理提供参考。

1 生态系统服务功能的物质基础与研究热点

生态系统服务功能是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50639070); 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2009CB421105; 2006CB403402)

收稿日期: 2008-04-19; 修订日期: 2009-08-24

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

用^[1,2]。生态系统服务功能的维持与提供离不开三大要素:生态系统结构、生态系统过程和生境(图1)。生态系统结构完整性是生态系统服务功能得以维持的基础,某一组分的缺损或变化将直接影响生态系统服务功能,如植被受损导致生态系统产品提供、水土保持和气候调节等功能受损;草原上狐狸种群数量的减少,造成啮齿类老鼠种群的增长,使草原退化,服务功能受损。生态系统过程运行中产生了多种支持功能,如初级生产、固碳释氧、生物地化循环、水循环等等;生境提供不仅直接为人类服务,还为提供服务的动植物提供生存条件。

日益加剧的人类活动导致生态系统组成、结构和功能发生了显著变化^[5],致使生态系统服务功能受到损害和削弱^[1,7]。人类活动正是通过上述3条途径影响生态系统服务功能(图1):(1)生态系统一级结构缺损或二级结构发生变化(如:土地开垦、森林采伐、放牧、外来物种引入与扩散、捕鱼、狩猎);(2)改变生态系统物质循环的量或速率(如:水资源开发利用、土地开垦、农业、林业、化石能源消耗、工业化);(3)改变生境或使生境破碎化;污染物降低生境质量(如:土地开垦、农业开发、放牧、城市化、工业化)^[8]。

随着人类活动对生态系统服务功能影响的加剧,人们逐步认识到:深刻认识生态系统服务的生态学机制是调控人类活动、实施生态系统服务功能管理的前提。Kremen^[14]认为,管理生态系统服务功能,应该重点从以下四个方面了解其生态学机制:描述生态系统服务功能的提供者以及他们之间的功能关系;将生物多样性与生态系统功能关系拓展到生态系统服务功能提供的范畴;影响生态系统服务在时间和空间上提供的关键因素;生态系统服务功能的时空尺度特征。2006年英国组织28个与政策制订相关的组织和10个学术团体的科学家,在咨询654位政策制订者的基础上提出了1003个与政策制订相关的生态学问题,在此基础上又进一步凝练出100个问题分成14个主题,其中第一个主题就是生态系统服务功能(ecosystem services),共包括6个问题:(1)与未保护的相比,保护土地在水资源提供、碳固定、其他产品和服务方面所带来的好处是什么?(2)生物多样性在维持生态系统功能(如生物地球化学循环)中的角色?(3)土壤生物多样性(尤其是未知的螨类和线虫类等)在生态系统功能、修复与恢复中的角色?(4)土壤生物多样性如何影响和响应地表生物多样性?(5)海洋生物与河流底栖生物在海洋-大气碳循环与初级生产中的角色?(6)如何测度自然资本(可更新的与不可更新的),并将其纳入国内生产总值(GDP)?^[15]。可见,生态系统服务功能管理迫切需要生态系统服务的生态学机制研究提供科学支撑。

针对生态系统服务功能维持与提供的物质基础(生态系统结构、生态系统过程与生境),结合人类活动对生态系统服务功能的影响途径,当前生态系统服务生态学机制研究热点主要从以下3个方面展开:生物多样性与生态系统服务功能关系;生态系统服务功能的时空尺度特征;气候和土地利用变化对生态系统服务功能的影响机制(图1)。

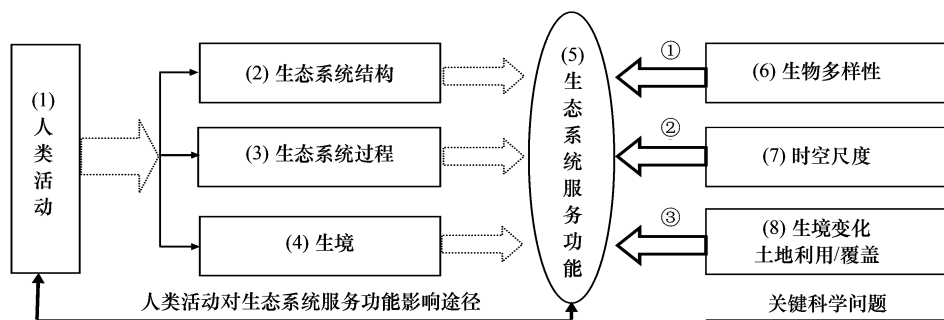


图1 生态系统服务功能管理的生态学基础

Fig. 1 Ecological foundation for ecosystem services management

(1) Human activities; (2) Ecosystem structure; (3) Ecological process; (4) Habitat; (5) Ecosystem services; (6) Biodiversity; (7) Spatial-tempo scale; (8) Habitat change/Land use/cover change

2 生态系统服务功能的表征与及其影响机制

2.1 生物多样性与生态系统服务功能

生物多样性与生态系统服务功能的关系,目前有两种看法:(1)生物多样性对生态系统服务功能有积极影响。Balvanera 等^[16]分析了 2004 年 6 月以前近 50 年的研究工作(共 446 个案例)来寻找生态多样性影响生态系统功能和服务的定量证据,并认为:生物多样性总体上对生态系统服务功能有积极影响。Worm 等^[17]研究生物多样性丧失如何影响海洋生态系统服务功能过程中也发现:随着生物多样性丧失,资源不断匮乏,恢复潜力、稳定性和水质呈指数降低;而恢复生物多样性能平均提高 4 倍生产力、降低 21% 的变异性;海洋生物多样性的丧失极大削弱了海洋提供食物、净化水质和抗干扰的能力。种群多样性在种群大小、数量、分布和遗传组成的变化影响生态系统服务功能的机理可能是:生物多样性的降低意味着具体提供服务功能的物种可能丧失,生物多样性丰富使生态系统能有更强的能力抵抗环境条件的变化以及人为与非人为的压力^[11]。(2)生物多样性影响生态系统服务功能尚缺乏有力证据,尤其是在热带环境条件下,通过生物多样性管理来调控生态系统服务功能尚需谨慎^[16, 18]。主要原因在于:目前并没有界定生物多样性在提供生态系统服务功能中的潜在角色^[14]。Díaz 等人^[19]也认为:功能植物多样性在生态系统服务功能供给中就具有重要位置,生态系统服务功能评估中应当整合植物功能多样性。并且以往的生物多样性与生态系统功能关系研究中,常常研究一些群落,而这些群落的结构与直接提供服务群落的结构显著不同^[20~22],这些研究也仅仅局限于少数生态系统过程^[23]。有必要在生物多样性与生态系统功能、生物多样性与生态系统服务功能两方面的研究中构建一座联系的桥梁,这将有助于加强对生态系统服务生态学机制的理解,以便为自然资源的保护和可持续利用提供管理和决策支持^[14]。

加强生物多样性与生态系统服务功能的长期研究与观测是阐明生物多样性与生态系统服务功能的关系的必然途径^[18]。其研究重点是:明确生态系统服务功能的提供者以及他们之间的功能关系^[14]。Kremen^[14]认为可通过以下途径描述生态系统服务:构建一个“功能清单”,以明确生态系统服务提供者、测度和估计生态系统服务每一提供者对群体功能贡献的重要性。不过,功能重要性既依赖于它提供服务的效率,也依赖于它的丰富度^[24]。效率和丰富度会对资源、捕食者、竞争者、依生生物以及物理或生物物理参数产生响应。明确所有这些因子的相互关系一般是不可能的,实际上,效率能够作为服务提供者特征用平均数和变异来测定^[22]。服务提供者的贡献常常以这种方式对不同的过程测定或估算,包括授粉、水流调节、固碳、叶片分解和疾病控制^[14]。同时,明确生态系统服务功能提供者及其提供方式(通过丰富度或效率)^[24]。

2.2 生态系统服务功能的时空尺度特征

生态系统的服务功能依赖在不同空间和时间尺度上的生态与地理系统过程,包括在生境水平上的个体植物的竞争,到中间尺度上的过程如火、病虫害爆发,以及在更大的空间和时间尺度上的气候和地貌过程^[14]。生态系统服务功能可以在所有的生态尺度上产生^[14]。例如,鱼可以通过小池塘供应,也可以在太平洋里捕获。生物氮的固定对植物土壤肥力的提高体现在个体尺度上,而碳固定对气候的影响则体现在全球尺度上。总的来说,大尺度的、长期的现象约束着小尺度、短时间的现象^[25]。然而,大尺度的过程可能由小尺度的联合作用驱动^[26]。例如,微生物在微米和分钟尺度上运动,而它们的累积行为决定了更大尺度的过程,例如,通过有机物质分解和氮固定实现营养循环。要确定自然生态系统是怎样提供生态服务的,必须有一明确测度方法并了解相应尺度生态系统服务功能的动力学机制^[7]。

近年来,对生态系统服务功能尺度效应的探讨也引起越来越多人的关注^[26~28],成为生态系统服务功能研究的一个热点问题,其研究主要集中在 3 个方面:

(1) 生态系统服务表达的时空尺度

生态系统过程和服务功能只有在特定的时空尺度上才能充分表达其主导作用和效果,而且最容易观测。也就是说,生态系统过程和服务功能常常具有一个特征尺度,即典型的范围范围和持续时段^[29]。明确生态系统服务的空间尺度对于景观层次的保护和土地管理规划具有重要意义。例如:流域内多大的面积留作森林才

能保证流域为下游人们提供洁净的水资源? 自然生境的斑块如何分布在农业景观中, 才能充分发挥生态系统作为作物授粉和控制害虫的服务功能? 或者说, 土地开发利用与森林保持多远的距离, 才能不影响森林和土壤生态系统净化水质的功能^[30]。为了保护和管理生态系统服务功能, 必须明确保护地如何分布、土地如何利用才能回答这些问题。Kremen 等人^[31]也认为: 生态系统服务功能管理对于人类生存至关重要, 然而对于在多大的自然范围内才能支持生态系统服务, 却了解很少, 目前的许多研究就围绕这一方面展开。当然, 除了考虑某一特定服务功能表达的时空尺度特征以外, 强调某种服务功能与兼顾利用其他服务功能之间的矛盾也需要加以考虑。

(2) 不同尺度生态系统服务功能的转换与关联

同一生态系统服务的不同提供者能够在一系列时空尺度范围内提供服务, 并且不同尺度上的同一生态系统服务相互关联。Peterson 等人^[32]提出执行同一功能但在不同时空尺度起作用的物种均为生态系统服务功能的恢复提供帮助。Le Maitre 等^[6]研究了生物结皮(m^2)-山坡-河流(km^2)等不同尺度养分滞留和转移方式, 发现: 小尺度水分、养分的转移促使河流养分输移的提高, 这些流失强度超出了生态系统补充的能力, 导致山坡上上述资源的净流失, 从而导致生态系统的不断退化^[6]。

另外, 在不同的尺度, 生态系统体现出来的服务功能有所侧重。在局部尺度上, 森林生态系统服务功能主要体现在木材生产方面; 在区域尺度上, 森林生态系统的服务功能则体现在涵养水源、调节气候、防洪减灾等功能。人们对某一尺度生态系统服务功能的过度强调, 可能会导致其他尺度功能的丧失或退化, 如对我国西部草原提供食物的功能过度重视, 导致草原沙化, 则会使草原固沙功能退化, 甚至丧失, 加剧我国华北地区的沙尘暴。在一个流域内, 流域上游是水源涵养区与水源形成区, 大多山高坡陡, 不利于工农业活动的展开, 人民生活水平较中下游低。地理环境的限制使上游的经济发展速度低于中下游, 但是上游却为流域提供了重要的生态系统服务功能, 为中下游的社会发展和经济发展提供了生态保障。但是目前生态系统服务功能还未能进入到生产成本当中, 人类享受到的生态系统服务功能未能得到正确的评估。这直接导致了经济发展的倒挂现象, 上游地区为全流域的发展提供了重要的生态系统服务保障, 然而该地区的人民的生活水平却较低; 下游地区由于上游地区的水源涵养功能、径流形成功能以及防洪功能, 而获得了经济发展需要的水资源, 并免于洪水灾害的威胁。

因此, 为了揭示不同尺度生态系统服务功能复杂关系, 一方面, 需要通过尺度转换, 全面认识生态系统服务功能在不同尺度间的关联关系; 另一方面, 需要通过尺度关联与区域平衡, 在考虑主导服务功能的基础上, 协调不同尺度上生态系统服务功能的保育, 满足区域不同群体对不同生态系统服务功能需求。

(3) 同一尺度内部生态系统的相互作用

生态系统过程和服务功能常常具有一个特征尺度, 但是在同一尺度内部各生态系统的功能是不一致的, 正如生态系统内部多样化生物物种中各物种的功能不一致一样, 各生态系统对表达某一服务功能的贡献如何? 各生态系统之间的相互作用关系又怎样? 各生态系统组成的不同格局所产生的生态学效应或服务功能怎样? 这些问题也是当前景观生态研究的热点。例如: Fu 等人^[33]比较黄土高原坡面尺度上不同土地利用格局后发现: 与林地-坡耕地-草地、草地-林地-坡耕地相比, 林地-草地-坡耕地具有较好的土壤水分和养分保持能力。在关注生态系统内部生态系统服务功能的提供者及相互功能关系的同时; 探讨景观或区域尺度各生态系统的功能特征及相互作用关系也是揭示生态系统服务机制的一个重要方面。

2.3 气候和土地利用变化对生态系统服务功能的影响机制

气候和土地利用变化将极大改变生态系统服务的供给。Schröter 等^[34]采用一系列生态系统模型和关于气候与土地利用变化的情景预测了欧洲 21 世纪生态系统服务的供给, 发现: 典型的气候和土地利用变化导致生态系统服务供给的变化。这些变化的趋势可能是积极的(如: 森林面积和生产力的提高), 或不确定的(如: 剩余土地用于农业扩张和生物质能源生产)。不过, 许多变化削弱了生态系统服务的供给(如: 土壤肥力降低、可获得的水资源减少、森林火灾的风险提高), 尤其是在地中海地区和山区。

土地利用变化对生态系统服务功能的影响主要通过三条途径:改变生物多样性、改变生态系统过程、改变生境,其中研究最多的案例是农业开发。(1)土地利用变化直接改变生物生境和资源的时空分布,进而改变生态系统服务孕育、传递和表达的时空格局,Kremen 等人^[35]在此基础上则提出了一个考虑土地利用变化影响生态系统服务功能的概念框架,用于评价土地利用变化对授粉等服务功能的影响。Tscharntke 等^[36]也认为应该从景观角度阐明农业土地利用对生物多样性保护的正负效应及其与生态系统服务功能(授粉、生物控制)的关系。(2)土地利用变化还通过改变植物特征(如功能多样性)影响生态系统服务功能^[37],Díaz 等^[19]分析了土地利用变化如何通过改变植物功能多样性改变生态系统特征,在此基础上提出了一个在生态系统服务功能评估中整合植物功能多样性的框架。(3)土地利用变化也通过改变生态系统过程影响生态系统服务功能。非洲南部的干旱草原,过渡放牧、农作物栽培和灌溉等农业开发导致景观连接性被破坏,如水文过程、有机质与营养物质的再循环等,生态过程的破坏或中断影响了生态系统水分和养分的保持能力,从而导致生态系统的不断退化^[6],这是土地利用变化改变生态系统过程、削弱生态系统服务功能的一个典型案例。

3 结语

生态系统服务功能是人类赖以生存和发展的基础,加强生态系统服务功能的管理、保育和恢复是保障区域可持续发展的重要内容,而全面认识和理解生态系统服务的生态学机制又是生态系统服务功能管理的前提。尽管围绕生态系统服务的生态学机制开展了许多研究,但尚不系统,提供给管理者的信息极其有限,今后有必要围绕下述方面开展重点研究:

(1)以管理需求为目标,针对重要生态系统服务功能,深入揭示生态系统服务的生态学机制,提出影响生态系统服务供给的关键指标;

(2)深入解析和认识生态系统服务功能的时空尺度特征,为保障生态系统服务孕育、传递和表达的完整性提供科学依据;

(3)构建基于生态系统服务机制的模拟模型,预测气候和土地利用变化情境下生态系统服务功能变化的方向和程度,为管理决策提供决策依据;

(4)研究区域尺度内不同群体对生态系统服务功能需求的差异,在明确生态系统服务机制的基础上探讨保育区域内多种生态系统服务功能的方法,协调区域内各利益相关者的关系,促进区域协调发展。

References:

- [1] Daily G C ed. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Washington D C; Island Press, 1997.
- [2] Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607—613.
- [3] Xie G D, Xiao Y, Lu C X. Study on ecosystem services: process, limitation and basic paradigm. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(2): 191—199.
- [4] Guo Z W, Gan Y L. Some scientific questions for ecosystem services. *Biodiversity Science*, 2003, 11(1): 63—69.
- [5] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, Melillo J M. Human domination of Earth's ecosystem. *Science*, 1997, 277: 494—499.
- [6] Le Maitre D C, Milton S J, Jarman C, Colvin C A, Saayman I, Vlok J H J. Linking ecosystem services and water resources: landscape-scale hydrology of the Little Karoo. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(5): 261—270.
- [7] Palmer M A, Morse J, Bernhardt E, *et al.* Ecology for a crowded planet. *Science*, 2004, 304: 1251—1252.
- [8] Zheng H, Ouyang Z Y, Zhao T Q, Li Z X, Xu W H. The impact of human activities on ecosystem services. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(1): 118—126.
- [9] National Research Council. *Watershed Management for Potable Water Supply: Assessing the New York City Strategy*. A Report. National Academy Press, Washington, DC. 2000.
- [10] Balmford A, Green R E, Jenkins M. Measuring the changing state of nature. *Trends in Ecology and Environment*, 2003, 18: 326—330.
- [11] Luck G W, Daily G C, Ehrlich P R. Population diversity and ecosystem service. *Trends in Ecology & Evolution*, 2003, 18: 331—336.
- [12] Robertson G P, Swinton S M. Reconciling agricultural productivity and environmental integrity: a grand challenge for agriculture. *Frontier in Ecology and Environment*, 2005, 3: 38—46.
- [13] Armsworth P R, Chan K M A, Daily G C, Ehrlich P R, Kremen C, Richkettts T H, Sanjayan M A. Ecosystem-Service Science and the Way Forward for Conservation. *Conservation Biology*, 2007, 21(6): 1383—1384.

- [14] Kremen C. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecology Letters*, 2005, 8: 468—479.
- [15] Sutherland W J, Armstrong-Brown S, Armsworth P R, *et al.* The identification of 100 ecological questions of high policy relevance in the UK. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43: 617—627.
- [16] Balvanera P, Pfisterer A B, Buchmann N *et al.* Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 2006, 9: 1146—1156.
- [17] Worm B, Barbier E B, Beaumont N, *et al.* Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services. *Science*, 2006, 314(787): 787—790.
- [18] Mertz O, Ravnborg H M, Lövei G L, Nielsen I, Konijnendijk C C. Ecosystem services and biodiversity in developing countries. *Biodiversity Conservation*, 2007, 16: 2729—2737.
- [19] Diaz S, Lavorel S, de Bello F, Qu tier F, Grigulis K, Robson T M. Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessment. *Proceedings of the Natural Academy of Sciences*, 2007, 104(52): 20684—20689.
- [20] Diaz S, Symstad A J, Chapin F S, Wardle D A, Huenneke L F. Functional diversity revealed by removal experiments. *Trends in Ecology & Evolution*, 2003, 18: 140—146.
- [21] Symstad A J, Chapin F S, Wall D H, Gross K L, Huenneke L F, Mittelbach G G, *et al.* Long-term and large-scale perspective on the relationship between biodiversity and ecosystem functioning. *Bioscience*, 2003, 53: 89—98.
- [22] Larsen T H, Kremen C, Williams N. Extinction order and altered community structure rapidly disrupt ecosystem functioning. *Ecology Letters*, 2005, 8(8): 857—874.
- [23] Schwartz M W, Brigham C A, Hoeksema J D, Lyons K G, Mills M H, van Mantgem P J. Linking biodiversity to ecosystem function: implications for conservation ecology. *Oecologia*, 2000, 122: 297—305.
- [24] Balvanera P, Kremen C, Martinez M. Applying community structure analysis to ecosystem function: examples from pollination and carbon storage. *Ecological Application*, 2005, 15: 360—375.
- [25] Limburg K E, O'Neill R V, Costanza R, Farber S. Complex systems and valuation. *Ecological Economics*, 2002, 41: 409—420.
- [26] Holmes T P, Bergstrom J C, Huszar E, *et al.* Contingent valuation, net marginal benefits, and the scale of riparian ecosystem restoration. *Ecological Economics*, 2004, 49: 19—30.
- [26] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 1992, 73: 1943—1967.
- [27] Swift M J, Izac A M N, Noordwijk M van. Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes—are we asking the right questions? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104: 113—134.
- [28] Yue T X, Liu J Y, Li Z Q, *et al.* Considerable effects of diversity indices and spatial scales on conclusions relating to ecological diversity. *Ecological Modelling*, 2005, 188: 418—431.
- [29] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington D C: Island Press, 2005. 1—102.
- [30] Houlihan J E, Findlay C S. Estimating the critical distance at which adjacent land-use degrades wetland water and sediment quality. *Landscape Ecology*, 2004, 19: 677—690.
- [31] Kremen C, Williams N M, Bugg R L, Fay J P, Thorp R W. The area requirements of an ecosystem service: crop pollination by native bee communities in California. *Ecology Letters*, 2004, 7: 1109—1119.
- [32] Peterson D L, Parker V T. *Ecological Scale: Theory and Applications*. New York: Columbia University Press, 1998. 5—16.
- [33] Fu B J, Chen L D, Ma K M, *et al.* The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in northern Shanxi, China. *Catena*, 2000, 39(1): 69—78.
- [34] Schr ter D, Cramer W, Leemans R, *et al.* Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, 2005, 310(25): 1333—1337.
- [35] Kremen C, Williams N M, Aizen M A, *et al.* Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change. *Ecology Letters*, 2007, 10: 299—314.
- [36] Tschamtk T, Klein A M, Kruess A, Steffan-Dewenter I, Thies C. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity-ecosystem service management. *Ecology Letters*, 2005, 8: 857—874.
- [37] Qu tier F, Lavorel S, Thuiller W, Davies I. Plant-trait-based modeling assessment of ecosystem-service sensitivity to land-use change. *Ecological Applications*, 2007, 17(8): 2377—2386.

参考文献:

- [2] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 607—613.
- [3] 谢高地, 肖玉, 鲁春霞. 生态系统服务研究: 进展、局限和基本范式. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 191—199.
- [4] 郭中伟, 甘雅玲. 关于生态系统服务功能的几个科学问题. *生物多样性*, 2003, 11(1): 63—69.
- [8] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 李振新, 徐卫华. 人类活动对生态系统服务功能的影响. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 118—126.