

DOI: 10.20103/j.stxb.202211253410

范玉龙, 胡楠, 丁圣彦. 基于植物功能群的生态系统服务形成与维持机制研究. 生态学报, 2024, 44(1): 60-66.

Fan Y L, Hu N, Ding S Y. Formation and maintenance mechanism of ecosystem services based on plant functional groups. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 60-66.

基于植物功能群的生态系统服务形成与维持机制研究

范玉龙^{1,*}, 胡楠¹, 丁圣彦²

1 南阳理工学院, 南阳 473004

2 河南大学地理与环境学院, 开封 475004

摘要: 生态系统可以从“结构-功能-服务”3个层次来理解, 其中服务是人类的主观感受或效用。维持高质量的生态系统服务还需从生态系统的自然属性入手。结构和功能是生态系统服务形成和维持的内在机制, 而植物是生态系统结构和功能的核心驱动力。植物功能群具有特定功能的植物组合, 其中优势植物功能群控制着生态系统的结构和功能。生态系统服务的概念、分类与植物功能群密切相关, 植物功能群是生态系统与生态系统服务间更直接的桥梁。建立生态系统服务与植物功能群间的联系, 使相关研究有更明确的指向, 在深化理论研究的同时使研究成果更容易落地。生态系统服务的形成、维持机制与植物功能群的内在联系主要体现在4个主要方面: (1) 植物功能群的内在适应性特征和外在效应是生态系统服务形成的基础; (2) 植物功能群的多功能特性为生态系统服务协同提供了可能; (3) 植物功能群间替代和互补效应可以提升生态系统服务质量和稳定性; (4) 植物功能群能够提供基于自然的生态系统服务修复问题解决方案。

关键词: 生态系统服务; 植物功能群; 形成与维持机制; 生态修复

Formation and maintenance mechanism of ecosystem services based on plant functional groups

FAN Yulong^{1,*}, HU Nan¹, DING Shengyan²

1 Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China

2 The College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: Ecosystem can be understood from three levels of “structure-function-service”, in which service is the subjective feeling or utility of human beings. To maintain high-quality ecosystem service, it is necessary to start from the natural attributes of ecosystem. Structure and function are the internal mechanisms for the formation and maintenance of ecosystem services, and plants are the core drivers of ecosystem structure and function. Plant functional groups are specific plant combinations and the dominant plant functional groups control the structural functions of ecosystems. The concept and classification of ecosystem services are closely related to plant functional groups. Plant functional groups are more direct bridges between ecosystem and ecosystem services. Establishing a connection between ecosystem services and plant functional groups provides a clearer direction for relevant research, and facilitates the application of research findings while deepening theoretical research. The internal relationship between the formation and maintenance mechanism of ecosystem services and plant functional groups is mainly reflected in four aspects: (1) the internal adaptability and external effects of plant functional groups are basis for the formation of ecosystem services; (2) The multifunctional characteristics of plant functional groups provide the possibility for ecosystem service collaboration; (3) Substitution and complementary effects between plant functional groups can enhance the quality and stability of ecosystem services; (4) Plant functional groups can

基金项目: 河南省科技攻关项目(212102310225); 国家社会科学基金项目(20BGL192); 南阳理工学院交叉科学研究项目资助

收稿日期: 2022-11-25; **网络出版日期:** 2023-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: elonv@aliyun.com

provide nature-based solutions to ecosystem service restoration problems.

Key Words: ecosystem services; plant functional groups; formation and maintenance mechanism; ecological restoration

1 生态系统服务与植物功能群的概念及联系

1.1 两者间的概念及研究意义

生态系统服务(Ecosystem Services, ES)是指人类在生存和发展过程中直接或间接从生态系统中得到的产品和服务^[1]。生态系统服务将人类福祉与环境紧密地联系在一起,是生态学、地理学 and 经济学等学科的前沿和热点^[2-3]。联合国千年生态系统评估项目(MA)研究了生态系统服务与人类福利间的关系、驱动因子、评价尺度、评价技术与方法等主要内容,把生态系统服务分为供给、调节、文化和支持服务4大类型^[4]。功能群是具有相似结构或功能的物种集合,简化了复杂生态系统研究,为生物多样性、生态系统结构、功能与服务等相关研究提供了思路和切入点。根据功能的不同,生物在生态系统中可以划分为三大类群:生产者、消费者和分解者,其中植物功能群是主要的生产者。植物功能群(Plant Functional Groups)^[5]是基于IGBP的核心计划GCTE(Global Change and Terrestrial Ecosystem)提出来的,是具有确定的植物功能特征的一系列植物的组合,是研究植被随环境动态变化的基本单元,植物功能群可以看作是对环境有相似响应或对主要生态系统过程有相似作用的组合。

生态系统服务以人类需求的视角来评价生态系统服务的整体状况,它将生态系统的生态学特征与人类需求偏好联系在一起,而植物功能群则偏重于生态系统的自然属性,它将生态系统的组成与功能性状联系在一起。生态系统服务主要形成于物质和能量循环过程,植物光合作用是其动力来源。植物功能群是特定植物的组合,能适应区域自然条件,充分利用非生物资源,共同利用自身特性来完成能量的吸收、转换,并能保持系统的弹性和稳定性。植物功能群是生态系统服务形成的初始单元或基本单元。相对于生物多样性或生物多样性对生态系统服务的影响,植物功能群更能控制和定义整个生态系统的结构、功能和演替特征^[6-7],也能更直观地理解生态系统中功能与服务间的关系。关于生态系统服务的研究集中于分类、价值评估、协同与权衡等问题^[8-9],关于植物功能群研究多集中于分类和生理特性等方面^[10],将植物功能群与生态系统服务联系的研究较少。分析植物功能群与生态系统服务形成、维持间的关系,并将其应用到生态修复与生态系统服务管理中,深化生态系统和人类之间的联系,促进人与自然和谐共生。

1.2 两者在功能与认知上的联系

生态系统服务和植物功能群从客观逻辑到主观逻辑在“功能”上产生交集。生态系统服务是人类从生态系统中获得的所有产品和服务,植物功能群是具有相似结构或功能的植物物种集合。前者是人类对生态系统整体理解和感受到的效用^[11],是以人的视角和指标体系去评价生态系统功能,受多数人的主观心理和欲望影响;后者是重点关注生态系统内部的组成结构,以及这些组成的基本功能性状,主要受植物生物学特性影响。

无论是生态系统服务还是植物功能群,都包含了人的主观认知和需求,以人类的直接或间接标准来衡量生态系统。生态系统服务与植物功能群都能使复杂的系统降维,让人们更直观、更容易理解生态系统的功能与服务,并在生态系统具有某种功能和效用上达成共识,这些认知深化了人们对生态系统的理解。生态系统服务是生态系统功能的深化,建立了人类需求与生态系统过程间的联系,这种联系使人们在关注自身的同时不得不关注生态环境,促使人类的行为从经济理性走向生态理性,从人类中心主义向生态中心主义过渡^[12]。植物功能群是对生物多样性的深化,诠释了生物多样性的生态功能属性,以一些关键指标来表征某一类群植物的共同属性^[13],因为某些物种对生态系统功能非常必要^[14],功能多样性比物种多样性对生态系统的影响更为直接和显著。面向人类需求的生态系统服务和面向生态系统结构的植物功能群在“功能”上的交集将外在表象和内在特征更紧密地联系在一起^[15-16],延伸了人类对生态系统认识的知识结构。

2 生态系统服务与植物功能群的内涵与分类

2.1 生态系统服务的内涵及植物功能群的作用

生态系统服务自从被人类认知后,其内涵就不断地深化。从认识到生态系统是一个整体到生态系统服务分类,再到生态价值评估、生态修复和生态文明建设,生态系统服务成为联系人与自然间的桥梁,而其中植物功能群是生态系统服务内涵的核心(表1)。植物功能群的最重要特征是以组团形式高效、稳定地利用自然资源,也是生态系统服务能产生负熵的重要基础。

表1 生态系统服务内涵及植物功能群的作用

Table 1 The connotation of ecosystem services and the role of plant functional groups

时间 Time	代表人物 Author	名词 Terminology	内涵 connotation	植物功能群的主要作用 Main role of PFGs	参考文献 Reference
1935	Tansley	生态系统	相互作用与联系的整体	核心和基础	[17]
1966	King	野生资源	野生资源	利用非生物资源能力	[18]
1971	ODUM	生态系统功能	生态系统的物质、能量和信息传递	物质环境的动力来源和物质基础	[19]
1977	Westman	自然服务	生态系统收益的社会价值	植物的价值	[20]
2005	MA	生态系统服务	从自然系统获得的4类收益	直接作用和间接作用	[4]
2008	Constanza	生态系统服务	从生态系统功能中获得的17种收益	直接作用和间接作用	[1]
2022	傅伯杰	生态系统服务	全球变化、生物多样性、价值评估	生态恢复与可持续发展	[21]

2.2 生态系统服务与植物功能群的分类

生态系统服务是生态系统功能中被感知的部分,其提供的服务渗透到人类生存和发展的各个领域,基于需求、价值和人类福祉的分类方案试图说明生态资源对人类可持续发展的重要性^[22],为生态保护提供了最直接的动力。人们根据需求的强烈程度和国土空间的实际情况,将一些地理空间进行功能分区,并制定相关的措施进行特殊保护。但生态系统服务一般将生态系统看成一个整体,较少关注其内部的组成及功能特征。植物功能群分类能明确的反映出植物的生存策略及植物间的相互关系,是各类生态系统服务的内在动力。植物功能性状与生态系统服务是一对多或多对一的关系^[23],生态系统服务分类需要植物功能群的支撑,两者间形成表里关系(表2),深化人们对生态系统本质和对人类惠益的理解。

表2 主要生态系统服务类型与植物功能群的关系

Table 2 The relationship between main ecosystem service type and plant functional groups

序号 No.	生态系统服务类型 Type of ecosystem service	植物功能群的作用 Role of PFGs	功能特性 Functional characteristics
1	大气调节	光合作用和呼吸作用	C3、C4 和 CAM
2	气候调节	吸收与反射阳光、蒸腾作用	叶片与根系
3	干扰调节	增强稳定性	抗逆性
4	水调节	水分循环和贮存	水分吸附
5	侵蚀控制	土壤保持	根系拦截
6	土壤形成	促进土壤形成	改造土壤
7	养分循环	物质流动	吸收、积累
8	环境净化	光合作用和吸附	叶片特征
9	生物控制	食物链	依存关系
10	栖息地	屏障作用	外貌结构
11	产品供给	生产力	固碳能力
12	基因资源	基因多样性	功能多样性
13	文化	生物美学	生长习性

C3:碳三植物;C4:碳四植物;CAM:景天酸代谢植物 Crassulacean acid metabolism

3 生态系统服务形成与植物功能群的关系

3.1 植物功能性状与人类福祉间的关系

生态系统服务是生态系统结构-过程-功能的外在体现,非生物环境与生物间相互作用的生态过程是生态系统服务形成的内在机制^[24]。认识生态系统服务的形成机制是生态保护的前提。植物是生态系统结构和功能的核心,其功能性状反映了植物的内在适应性特征和外在效应,直接或间接参与整个生态过程^[25],影响整个生态系统的属性和功能,进而影响各类生态系统服务的水平和质量。可以说,植物功能性状是人类各项福祉的来源,是推动社会发展的最初动力来源,同时植物功能性状也会响应社会发展带来的变化(图 1)。植物功能性状-生态系统功能-生态系统服务的研究框架为生态系统服务形成机制提供了重要思路^[26-27]。

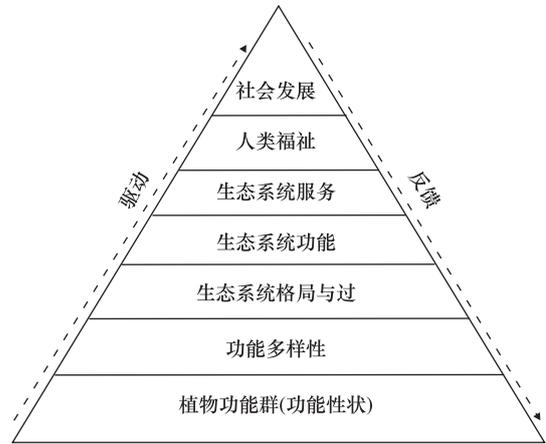


图 1 植物功能性状与人类福祉间的关系

Fig.1 Relationship between plant functional traits and human well-being

3.2 植物功能群与生态系统服务的形成

植物功能群是基于植物功能特性来划分的功能群体,其共有的重要功能特性对某一生态过程具有决定性作用。特别是优势植物功能群往往控制着生态系统的结构和特征,对生态系统的功能起决定作用^[28](图 2)。不同植物功能群功能性状的差异或互补可以减少生态位重叠,通过不同的生存策略组合提高资源利用效率^[29]。外界自然条件如水分、养分、气候等因子可以改变植物功能群的组成、物候特征、生态位分化、叶片特性、根系特性等功能性状^[30],进而影响生态系统的地上净初级生产力、地下生物量、土壤呼吸等生态系统属性和过程^[31],最终影响各类生态系统服务的形成和质量。植物功能群的互补作用也增加了群落的稳定性,为生态系统服务的维持奠定基础。

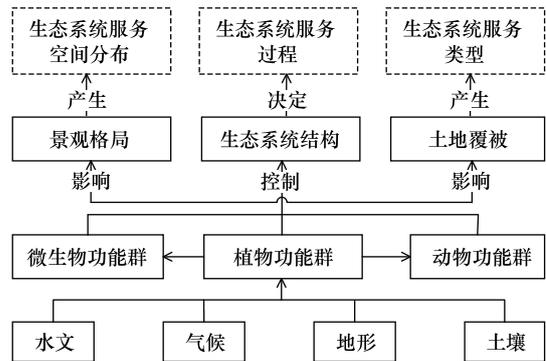


图 2 植物功能群与生态系统形成

Fig.2 Plant functional groups and ecosystem formation

3.3 植物功能群与生态系统服务的尺度特征

植物的生长及其与环境间的生态过程都在一定的时空尺度上发生,生态系统服务具有明显的时空尺度依赖特征^[32-33]。植物功能群的相关性状会随时间发生变化,同一植物功能群在不同的地理环境下会有不同的外在表现。从生态系统尺度到景观尺度是生态系统服务研究的重点^[34],但如何将生态系统尺度下的植物功能群推绎到景观尺度还存在一定的难度。可以将植物功能群的野外调查数据与遥感数据结合,相互验证并建立相应的尺度推绎生态模型,也可以结合我国多点生态观测平台,建立植物功能群空间网络数据库,并与生态系统服务重要功能区进行相叠加分析,从而揭示植物功能群与生态系统服务在更大尺度上的联系。

4 生态系统服务维持机制与植物功能群

4.1 植物功能群与生态多功能性

深入挖掘并提高国土资源的生态多功能性是生态系统服务维持的重要举措^[35]。生态系统本身同时具有多种功能,可以提供多种生态系统服务^[36]。在保证主要生态系统服务的同时,精准刻画区域生态格局,优化

土地资源内部空间,提升其他生态系统服务的水平和质量,发挥我国国土资源的最大价值,成为目前研究的重点^[37-38]。如农田生态系统除提供粮食生产外,其在气候调节、生物多样性保护等方面的生态价值不容忽视。在农业生产区,自然生境缺失、生物多样性减少,农业生产区功能单一、生态脆弱。在难以大幅度增加生态用地的制约下,充分利用非农植物功能群的多功能特性,强化田间地头、沟渠等零散用地的生态网络建设,使农田生态系统同时提供生物多样性、田园风光、文化传承等多种非经济功能和服务,从而促进农业生产区的可持续发展。

4.2 植物功能群与生态系统服务质量和稳定性

生态系统服务质量是生态系统对人类需求的适用性和效用程度,稳定性是其具有的适应性、抵抗力和恢复力,及其在干扰下保持原有状态的能力。生态系统服务的质量和稳定性都受系统的组分、结构和生态过程的影响^[39-40],两者相互支撑、互为基础^[41]。生态系统服务取决于各功能单元的组合秩序,而植物功能群以一系列功能相似或互补的组合出现,功能群内与功能外的补偿生长维持了生态系统的生产力稳定性^[42],这种互惠互利关系是最基本的生态系统形成的“耦合力”。植物功能群的“整体涌现性”^[43]是实现系统整体功能最优的基础,进而能形成了各类物质和能量的循环网络。只有从维持和优化植物功能群的“耦合力”开始,构建微观和宏观的生态关系网络,才能维持生态系统服务质量和稳定性^[44]。

4.3 全球变化对生态系统服务和植物功能群的影响

联合国《2022年可持续发展目标报告》显示,包括气候变化在内的连锁反应和相互关联的危机正将人类自身置于严重危险之中。全球变化主要集中在土地利用、土地覆被、气温和降水等方面。全球变化改变了生态系统的结构和过程,从而影响生态系统的功能和服务^[21]。植被生长是生态系统发挥功能的基础。在气候变暖背景下,植被生长增速变缓、土壤 pH 值更接近中性、叶片光合作用先升后降等现象是植物功能群响应的结果。如气温和降水直接影响植被的叶面积指数(LAI)等植物功能性状^[45]。植被 LAI 的增加改善了生态系统的水源涵养服务^[46];植物的水力性状对植被在极端干旱条件下的抵抗力和恢复力有显著影响,随着干旱胁迫的加剧,植被会改变应对策略^[47]。植物功能群内和功能群间的互补作用会弥补单一植物适应非生物环境的缺陷,使生态系统具有韧性,在全球变化背景下能在有限幅度内维持生态系统服务的稳定性,并能提供基于自然的全球变化问题解决方案^[48]。

4.4 植物功能群与生态修复

人类是生态系统服务的受益者和管理者,建立人与自然间的和谐关系要从 3 个层面出发:一是提高社会对生态系统服务的认识,增加人们对非经济性生态系统服务的价值评估,促进产业绿色发展;二是在宏观国土空间上的优化与管控;三是在生态系统层面提升生态系统的质量。当前我国生态文明建设进入落实与发展期,正在形成绿色发展的理念,以国家公园为代表的生态网络体系正在完善。但在最基本生态系统层面的生态修复还很薄弱,各类生态修复工程由于受经济、技术等因素的影响,未充分重视生态系统功能形成的基础,植被结构单一^[49]、植物配置不合理,造成生态系统无法正常演替,生态系统质量和稳定性较差^[50],甚至出现“绿色荒漠”等现象。

生态修复需要在解构生态系统功能,寻求基于植物本身的功能性状的解决方案。植物功能群是自然生态系统的基本功能单位,控制着生态系统结构、过程与功能,是关键生态系统服务的提供者。植物功能群能立足自然资源禀赋,紧扣区域植被的功能特性,具有较好的区域适应性^[51]、补偿性特征,有自我维持与修复机制,合理的植物功能群配置是基于自然的生态系统修复问题解决方案(图 3)。针对特定的自然地理条件和生态现状,以具有相应适应性功能特征^[52]的植物功能群为主体,进行生态修复和重建,可以更有效地实现生态系统服务修复目标^[53]。在生态系统服务修复过程中存在权衡时,应该优先考虑影响该生态系统服务的主要植物功能性状,如在水循环相关服务中,应优先考虑叶片面积和冠层尺寸。

5 今后研究的重点或方向

植物功能群对生态系统服务的形成为维持起到关键作用,具体表现在以下几个方面:(1)植物功能群的

内在适应性特征和外在效应与生态系统服务形成有一对多或多对一的关系;(2)通过植物功能群空间网络可以探索生态系统服务尺度推绎路径;(3)植物功能群的多功能性为多生态系统服务协同提供了渠道;(4)植物功能群间替代和互补效应可提升生态系统服务质量和稳定性,为全球变化背景下生态系统服务的维持奠定基础;(5)植物功能群是自然生态系统的基本功能单位,能够提供良好的基于自然的生态系统服务修复问题解决方案。

生态系统服务的形成和维持从本质上与社会经济发展无关,但人的主观效用会影响生态系统服务价值的评估^[54],社会经济发展也会破坏生态系统的结构和功能,从而影响生态系统服务的质量和稳定性。生态系统服务本质上是自然生产过程,要提高生态系统服务的质量和稳定性,只有通过扩大生态系统规模和提高生态系统功能两种方式^[55]。在国土空间日益紧张的局面下,大规模增加生态用地的空间较小^[56],不同区域生态系统服务的质量和布局也不同,但无论什么情况,都离不开生态系统的功能属性这一核心内容,将植物功能群整合到生态系统-结构-功能-服务的研究框架中已经成为当前面临的主要挑战和任务。

植物功能群直接推动了生态系统服务的形成和维持,在理论和实践上存在的问题值得下一步深入研究:(1)植物功能群分类标准与生态系统服务分类标准的衔接;(2)不同尺度下区域植物功能群网络构建,将植物功能群向景观尺度推绎;(3)针对不同的国土空间条件,推出适宜性的植物功能群生态修复方案;(4)生态系统服务价值的主观效用对植物功能群分类的影响;(5)植物多样性与功能多样性的区别与联系;(6)建立基于植物功能性状的生态系统服务价值评估体系。

参考文献 (References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] 韩磊, 杨梅丽, 刘钊, 赵永华, 赵子林, 张永锋. 黄土高原典型退耕区生态系统服务权衡与协同关系研究——以延安市为例. *生态学报*, 2022, 42(20): 8115-8125.
- [3] 左丽媛, 姜远, 高江波, 杜馥君, 张怡博. 生态保护红线区生态系统服务多维驱动力的定量分离. *地理学报*, 2022, 77(9): 2174-2188.
- [4] Alcamo J, Bennett E M. *Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*. Washington, DC: Island Press, 2003.
- [5] Smith TM, Woodward FI, Shugart HH. *Plant Function Types*. Cambridge, Cambridge University Press, 1996.
- [6] 姜林, 胡骥, 杨振安, 詹伟, 赵川, 朱单, 何奕析, 陈槐, 彭长辉. 植物功能群去除对高寒草甸群落结构、多样性及生产力的影响. *生态学报*, 2021, 41(4): 1402-1411.
- [7] 金超, 吴初平, 丁易, 袁位高, 朱锦茹, 黄玉洁, 焦洁洁, 臧润国, 江波. 午潮山常绿次生阔叶林主要木本植物功能群及其演替特征. *生态学报*, 2021, 41(8): 3053-3066.
- [8] 牛丽楠, 邵全琴, 宁佳, 黄海波. 西部地区生态状况变化及生态系统服务权衡与协同. *地理学报*, 2022, 77(1): 182-195.
- [9] 倪维秋, 张学鹏, 杨澜, 何莹宣, 陈伟. 基于土地利用的生态系统服务价值估算尺度效应研究. *生态经济*, 2022, 38(9): 170-178.
- [10] 杨德春, 胡雷, 宋小艳, 王长庭. 降雨变化对高寒草甸不同植物功能群凋落物质量及其分解的影响. *植物生态学报*, 2021, 45(12): 1314-1328.
- [11] 范玉龙, 赵天英, 丁圣彦. 基于“生态系统服务网”理论的国土空间规划研究. *生态学报*, 2023, 43(12). DOI: 10.5846/stxb202205081271.
- [12] 汤明洁. 从权力技术反思动物伦理困境——从人类中心主义到生态中心主义. *浙江学刊*, 2021(6): 130-140.
- [13] Hidalgo-Triana N, Latorre A V P, Thorne J H. Plant functional traits and groups in a Californian serpentine chaparral. *Ecological Research*, 2018, 33(3): 525-535.
- [14] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime J P, Hector A, Hooper D U, Huston M A, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle D A. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 2001, 294(5543): 804-808.
- [15] 杨渺, 肖焱, 欧阳志云, 江腊海, 侯鹏. 四川省生物多样性与生态系统多功能性分析. *生态学报*, 2021, 41(24): 9738-9748.
- [16] 郑华, 潘权, 文志, 杨延征. 植物功能性状与森林生态系统服务的关系研究综述. *生态学报*, 2021, 41(20): 7901-7912.
- [17] Tansley A G. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 1935, 16(3): 284-307.
- [18] King RT. *Wildlife and Man*. NY Conservationist, 1966, 20, 8-11.

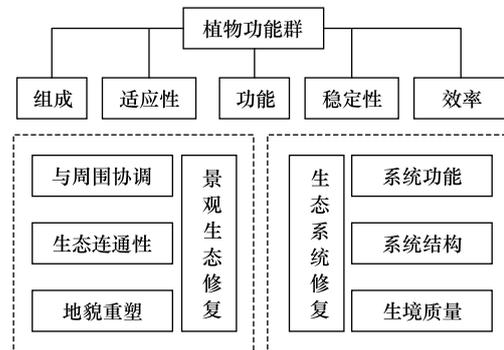


图3 植物功能群与生态修复

Fig.3 Plant functional groups and ecological restoration

- [19] Odum E P. *Fundamentals of ecology*. 3d ed. Philadelphia: Saunders, 1971
- [20] Westman W E. How much are nature's services worth? *Science*, 1977, 197(4307): 960-964.
- [21] 傅伯杰, 田汉勤, 陶福祿, 赵文武, 王帅. 全球变化对生态系统服务的影响研究进展. *中国基础科学*, 2020, 22(3): 25-30.
- [22] 郑德凤, 王燕燕, 曹永强, 王燕慧, 郝帅, 吕乐婷. 基于生态系统服务的生态福祉分类与时空格局——以中国地级及以上城市为例. *资源科学*, 2020, 42(6): 1110-1122.
- [23] 潘权, 郑华, 王志恒, 文志, 杨延征. 植物功能性状对生态系统服务影响研究进展. *植物生态学报*, 2021, 45(10): 1140-1153.
- [24] 尹飞, 毛任钊, 傅伯杰, 刘国华. 农田生态系统服务功能及其形成机制. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 929-934.
- [25] 范玉龙, 刘慧敏, 胡楠, 丁圣彦. 伏牛山自然保护区森林生态系统植物功能群光合特性. *生态学报*, 2016, 36(15): 4609-4616.
- [26] Balvanera P, Pfisterer A B, Buchmann N, He J S, Nakashizuka T, Raffaelli D, Schmid B. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 2006, 9(10): 1146-1156.
- [27] Lamarque P, Lavorel S, Mouchet M, Quétiér F. Plant trait-based models identify direct and indirect effects of climate change on bundles of grassland ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(38): 13751-13756.
- [28] 范玉龙, 胡楠, 丁圣彦, 翟元杰, 柳静, 廖秉华, 卢训令. 伏牛山自然保护区森林生态系统草本植物功能群的分类. *生态学报*, 2008, 28(7): 3092-3101.
- [29] 潘影, 余成群, 土艳丽, 孙维, 罗黎鸣, 苗彦军, 武俊喜. 西藏草地植物功能性状与多项生态系统服务关系. *生态学报*, 2015, 35(20): 6821-6828.
- [30] 朱弘, 杨乐, 李东宾, 何立平, 岳春雷, 李贺鹏. 浙江四明山 12 种沼泽湿地植物功能性状研究. *生态学报*, 2023, 43(7): 2881-2890.
- [31] 白永飞, 黄建辉, 郑淑霞, 潘庆民, 张丽霞, 周华坤, 徐海量, 李玉霖, 马健. 草地和荒漠生态系统服务功能的形成与调控机制. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 93-102.
- [32] 荣月静, 严岩, 赵春黎, 朱婕缘, 郑天晨, 王辰星, 卢慧婷, 章文. 基于生态系统服务供需的景观尺度特征分析和应用. *生态学报*, 2020, 40(22): 8034-8043.
- [33] 陈俊辰, 贺淑钰, 薛晶, 张环宇, 李兆华, 王玲, 李昆. 多尺度生态系统服务的权衡关系及对景观配置响应研究——以湖北省为例. *生态学报*, 2023, 43(12): 4835-4846.
- [34] 夏楚瑜, 国焜, 赵晶, 薛飞, 王楚玥, 周珺, 孙彤, 李淞, 张念慈. 京津冀地区生态系统服务对城镇化的多空间尺度动态响应. *生态学报*, 2023, 43(7): 2756-2769.
- [35] 王凯, 王聪, 冯晓明, 伍星, 傅伯杰. 生物多样性与生态系统多功能性的关系研究进展. *生态学报*, 2022, 42(1): 11-23.
- [36] 熊定鹏, 赵广帅, 武建双, 石培礼, 张宪洲. 羌塘高寒草地物种多样性与生态系统多功能关系格局. *生态学报*, 2016, 36(11): 3362-3371.
- [37] 李善家, 王子濠, 苏培玺, 王辉, 王福祥, 崔莉娟. 荒漠植物性状权衡策略及功能多样性研究进展. *生态学报*, 2022, 42(18): 7308-7320.
- [38] 刘焱序, 傅伯杰. 景观多功能性: 概念辨析、近今进展与前沿议题. *生态学报*, 2019, 39(8): 2645-2654.
- [39] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营. *生态学报*, 2018, 38(1): 1-10.
- [40] Thomaz S M. Ecosystem services provided by freshwater macrophytes. *Hydrobiologia*, 2021: 1-21.
- [41] 于贵瑞, 王永生, 杨萌. 提升生态系统质量和稳定性的生态学原理及技术途径之探讨. *应用生态学报*, 2023, 34(1): 1-10.
- [42] 马晓东. 种间及功能群间的补偿生长响应与群落时间稳定性的关系[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.
- [43] 苗东升. 系统科学大学讲稿. 北京: 中国人民大学出版社, 2007.
- [44] 张琳, 陆兆华, 唐思易, 张萌, 张润廷, 黄玉凯, 尚志. 露天煤矿排土场边坡植被组成特征及其群落稳定性评价. *生态学报*, 2021, 41(14): 5764-5774.
- [45] 何雅琴, 史晓洁, 陈国杰, 赖敏英, 曾纪毅, 魏凯, 邓传远. 滨铃叶功能性状对环境因子的响应. *生态学报*, 2022, 42(6): 2418-2429.
- [46] Zhai R, Tao F L. Contributions of climate change and human activities to runoff change in seven typical catchments across China. *The Science of the Total Environment*, 2017, 605/606: 219-229.
- [47] Li X Y, Piao S L, Wang K, Wang X H, Wang T, Giais P, Chen A P, Lian X, Peng S S, Peñuelas J. Temporal trade-off between gymnosperm resistance and resilience increases forest sensitivity to extreme drought. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(8): 1075-1083.
- [48] Andrés P, Doblas-Miranda E, Mattana S, Molowny-Horas R, Vayreda J, Guardiola M, Pino J, Gordillo J. A battery of soil and plant indicators of NBS environmental performance in the context of global change. *Sustainability*, 2021, 13(4): 1913.
- [49] 胡文浩, 张晓婧, 陈雅杰, 宇振荣, 段美春. 坝上地区不同年代退耕还林生境的草本层植物多样性及影响因素. *生态学报*, 2021, 41(3): 1116-1126.
- [50] 周晓果. 林下植物功能群丧失对桉树人工林土壤生态系统多功能性的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [51] 霍佳璇, 任梁, 潘莹萍, 赵瑾, 向响, 余程, 孟德惠, 王源源, 鲁瑞洁, 黄永梅. 柴达木盆地荒漠植物功能性状及其对环境因子的响应. *生态学报*, 2022, 42(11): 4494-4503.
- [52] 江浩, 黄钰辉, 周国逸, 胡晓颖, 刘世忠, 唐旭利. 亚热带常绿阔叶林冠层附生植物叶片形态结构及生理功能特征的适应性研究. *植物科学学报*, 2012, 30(3): 250-260.
- [53] Pywell R F, Meek W R, Loxton R G, Nowakowski M, Carvell C, Woodcock B A. Ecological restoration on farmland can drive beneficial functional responses in plant and invertebrate communities. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1/2): 62-67.
- [54] 李豫. 大喀纳斯旅游区社会经济发展与其生态系统服务价值的关系研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017.
- [55] 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.
- [56] 林树高, 陆汝成, 叶宗达, 刘少坤, 包博建, 邓诗语. 广西国土空间格局演变特征与形成机理. *地理科学*, 2022, 42(11): 1963-1974.