DOI: 10.5846/stxb202011112915

杨渺, 肖燚, 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.

Yang M, Xiao Y, Ouyang Z Y, Jiang L H, Hou P. Relation of biodiversity and ecosystem multifunctionality in Sichuan Province. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9738-9748.

四川省生物多样性与生态系统多功能性分析

杨 渺^{1,2,*}, 肖 燚², 欧阳志云², 江腊海¹, 侯 鹏³

1 四川省生态环境科学研究院, 成都 610041

2 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

3 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100090

摘要: 生态系统服务与人类福祉和可持续发展息息相关, 近年来生物多样性丧失极大影响了生态系统服务。探究生物多样性与生态系统服务之间的关系成为当前生态学领域内的一个重大科学问题。以四川省各乡镇为单元, 计算了景观尺度上的多样性指数, 评估了四川省水土保持功能、水源涵养功能、固碳功能, 并研究了两者之间关系。结果表明: 在景观尺度上, Shannon's 多样性指数、修正 Simpson's 多样性指数、景观丰度三种多样性指数可以较好表征四川省生物多样性空间分布格局。由景观丰度、欧式最近邻距离的标准差、景观丰度密度构成解释变量矩阵, RDA 模型矫正解释率 42.25% ($P < 0.001$), 可更好解释由水土保持功能、水源涵养功能、固碳功能构成的响应变量矩阵。四川省生物多样性及生态系统服务关系的模式有以下几种: (1) 成都平原区区县空间距离较近, 在生态系统服务和生物多样性梯度均差异较小; (2) 盆周山地区、盆地丘陵区各区县在水土保持功能梯度上差异较大, 与多样性关系较弱; (3) 川西高原区区县在固碳、水源涵养梯度上差异较大, 并有协同关系, 多样性梯度差异较大; (4) 川西高山峡谷区、西南山地区区县之间生态系统服务和多样性差异较大, 生态系统服务可能存在强烈权衡关系, 需进一步引入解释因子。

关键词: 生物多样性; 生态系统服务; 生态系统多功能性; RDA

Relation of biodiversity and ecosystem multifunctionality in Sichuan Province

YANG Miao^{1,2,*}, XIAO Yi², OUYANG Zhiyun², JIANG Lahai¹, HOU Peng³

1 Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610041, China

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Satellite Environment Center of the Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100090, China

Abstract: Ecosystem services are closely linked with human well-being and global sustainable development. Biodiversity loss greatly influence ecosystem services in recent years. Exploring the relationships between biodiversity and ecosystem services has been a major problem in the field of ecology. In this study, we calculated biodiversity indices at the landscape scale for villages and towns in Sichuan Province, evaluated the ecosystem functions of water and soil conservation, water conservation, carbon sequestration, and simultaneously studied their interaction. The results revealed that Shannon's Diversity Index (SHDI), Modified Simpson's Diversity Index (MSIDI) and Patch Richness (PR) indices could well characterize spatial pattern of biodiversity at the landscape scale. The PR, Standard Deviation of Euclidean Nearest Neighbor Distance (ENN_SD) and Patch Richness Density (PRD) indices constituted the explanatory variable matrix of Redundancy Analysis (RDA) model, interpretation rate of which was 42.25% ($P < 0.001$), can better explain the response variable matrix consisting of the three above-mentioned ecosystem functions. Relational schema of biodiversity and ecosystem

基金项目: 四川省重点研发项目 (2017SZ0081, 2017SZYZF0007)

收稿日期: 2020-11-11; 网络出版日期: 2021-08-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: miaoy02@163.com

services in Sichuan Province included: 1) gradient difference of ecosystem services and biodiversity was small due to counties of Chengdu Plain close in space; 2) gradient difference of water and soil conservation function was large in the mountain and hilly areas around the Sichuan Basin, also suggested a weak relationship with biodiversity; 3) gradient difference of carbon sequestration and water conservation was large in western Sichuan Plateau, which existed a collaborative relationship, and gradient difference of biodiversity was also large; and 4) ecosystem services and biodiversity difference was large in alpine canyon areas in the west and mountain areas in the southwest. It is essential to further draw into explanatory factor for strong tradeoff relationship of ecosystem services.

Key Words: biodiversity; ecosystem servers; Ecosystem Multifunctionality; RDA

生态系统最为重要的价值是同时提供多种功能和服务的能力,但这种价值受到生物多样性变化的影响^[1-2]。近年来,受气候变化和人类活动的影响,生物多样性空前丧失,已经极大影响到生态系统功能与服务。生态系统服务与人类福祉和可持续发展息息相关,是连接自然过程与社会过程的桥梁与纽带^[3]。因而,探究生物多样性与生态系统功能之间的关系成为当前生态学领域内的一个重大科学问题^[1, 4-8]。

生物多样性包含遗传多样性、物种多样性、生态系统多样性三个层次(也有学者提出了生物多样性的第四个层次,景观多样性^[9])。目前已有大量研究^[1],从物种层面探讨了生物多样性与生态系统功能之间的关系。这些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功能关系的影响^[5]。与小尺度研究相比,在景观尺度上开展生物多样性评价和生态系统功能评价及二者相互关系研究,不仅考虑了尺度及景观异质性的影响,丰富生物多样性与生态系统功能研究内容,也可促进生物多样性保护格局的合理规划和实施生物多样性有效管理,最大程度上保护生态系统功能。

景观尺度上开展生物多样性评价可分为两种方式:以物种为中心评价和以生态系统为中心评价^[10]。前者需选准保护对象,并对其习性、行为模式有充分的了解。然后,整合多个物种保护对象的多样性评价结果,获得区域整体生物多样性分布格局^[10]。尽管生物多样性监测网络建设的快速发展,为生物多样性保护与评估提供了翔实可靠的数据^[11-13],但普遍来说,基于物种的生物多样性评价仍缺乏足够的资料支撑。景观异质性有利于物种的生存和连续^[10],研究发现景观丰度与物种丰度之间存在很好的正相关,这为生态系统层次上通过景观的多样性评价来实现生物多样性的评价提供了可能性^[10]。遥感能够提供大范围、全覆盖的生物多样性信息,是景观多样性评价的有力工具,当前已成为区域或全球生物多样性研究与评价的重要方法,而且也是未来大尺度生物多样性监测的重要手段之一^[11, 14-15]。获得了遥感这一有力工具,景观尺度的生物多样性评价有极大发展空间和潜力。Fragstats 软件可方便地从斑块、类、景观尺度上计算多种景观指数。

生态系统具有同时维持多种生态系统功能和服务的能力,即生态系统多功能性^[16]。但目前生物多样性与生态系统功能关系的研究主要集中于和单一生态系统功能关系的研究,生物多样性和多功能性关系的研究较少^[2, 17],目前也未有公认的多功能性测度标准^[2],有研究选取木本植物生物量,以及土壤养分作为生态系统功能变量^[14]。经过多年研究,生态系统服务评价理论框架已初步建立^[18-19],水源涵养、水土保持、固碳释氧是其中重要的生态系统服务,作者前期工作^[20],为宏观尺度上探讨生物多样性和生态系统多功能性关系奠定了基础。

跨景观管理多个生态系统服务是生态系统管理的重要环节。跨景观管理多个生态系统服务是生态系统管理的重要环节。面对生物多样性监测数据不足,小尺度不系统的研究难以支撑宏观层面生物多样性保护格局合理规划的局面,以及生物多样性和多功能性关系的研究较少,多功能性测度标准选取混乱这一现状,本研究尝试利用遥感源数据,从景观尺度进行生物多样性评价。依循生态系统服务评价理论框架选取重要生态系统服务指标,从宏观尺度上探讨生物多样性和生态系统多功能性关系。

景观层面上分析生物多样性与生态系统多功能性关系,有利于促进景观格局的空间优化配置和保证景观生态的完整性^[21-22]。四川是全球生物多样性保护热点地区之一,是我国重要的物种基因库,特有、孑遗物种

丰富^[20]。独特的地形、地貌、气候、水文和土壤,孕育了丰富的生态系统多样性,四川有除海洋、沙漠生态系统外的森林、草地、湿地等多种自然生态系统。据统计,2015 年常绿针叶林占国土面积比例最大,为 23.4%、落叶阔叶灌丛为 12.3%、高寒草原为 11.9%、高寒草甸为 8.5%。通过对四川省生态系统层次多样性空间特征的评价,及生物多样性与生态系统多功能性关系的探索,有助于定量预测人类活动造成的土地利用变化对生物多样性的影响,及生物多样性丧失造成的生态系统多功能性变化。可为生物多样性保护规划、构建生物廊道提供支撑,有利于生物多样性有效管理。同样有利于减少生态系统干扰,以获得持续性生态系统产品和服务。

1 数据来源和分析方法

1.1 生物多样性评价

生态系统类型数据采用“全国生态状况调查评估”工作中由环保部卫星中心下发的 2015 年植被类型数据。该数据 I 级类 6 类,II 级类 40 类。根据 II 代码转为分辨率 30 m 的栅格数据,进行生物多样性分析(景观层次)。乡镇行政边界矢量数据(2018 年)来自四川省测绘地理信息局,四川省乡镇 4598 个。软件 Fragstats v4.2.1 在景观级别上可计算形状指标、聚散性指标、多样性指标等,分别对各个乡镇在生态系统尺度计算常用的多样性指标景观丰度(PR)、景观丰度密度(PRD)、Simpson's 多样性指数(SIDI)、Simpson's 均匀度指数(SIEI)、修正 Simpson's 多样性指数(MSIDI)、修正 Simpson's 均匀度指数(MSIEI)、Shannon's 多样性指数(SHDI)、Shannon's 均匀度指数(SHEI)。计算公式,及指标生态学意义见 Fragstats v4.2.1 帮助文档。计算结果在 ArcGIS 中利用自然断点法分为 4 级(低、一般、较高、高),并利用 Optimized Outlier Analysis 工具进行聚类分布制图。根据需要以市州或县为单位进行均值统计,并分别比较 PR、MSIDI、SHDI 各级别在 21 个市州层面所占的比例。

1.2 生态服务功能评估

本研究评估的生态系统服务功能包括四川省水土保持功能、水源涵养功能、固碳功能。评估数据来源,评估方法见作者已发表成果^[20]。分别统计各乡镇水土保持功能、水源涵养功能、固碳功能均值,并进行 Optimized Hot Spot Analysis 分析。

1.3 生物多样性与生态服务功能 RDA 分析

利用开源统计软件 R 4.0.2 的 vegan 包进行服务功能因子分析及排序分析。生态系统景观指数为解释变量,生态系统服务数据为自变量。因 vegan 包主要用于物种环境因子分析,为方便理解,本研究中,权且把生态服务功能数据称为物种数据,景观指数数据称为环境数据。对物种数据、环境数据分别执行极值变换,数据归一化到 $[0,1]$,先进行 DCA 分析,根据第一轴长度确定是执行 CCA 分析或者 RDA 分析。

2 结果与分析

2.1 景观多样性指数

评价结果在 ArcGIS 中利用自然断点法分四级显示(分别代表生物多样性低、一般、高、较高),PR、MSIDI、SHDI 等三景观指数显示的生态系统层次的多样性分布格局与专家经验基本一致。

2.1.1 Shannon's 多样性指数(SHDI)

SHDI 能反映景观异质性,特别对景观中各拼块类型非均衡分布状况较为敏感,即强调稀有拼块类型对信息的贡献,该指标在生态学中应用很广泛。在比较和分析不同景观或同一景观不同时期的多样性与异质性变化时,SHDI 也是一个敏感指标。

根据 SHDI 指数分级结果,四川省生物多样性低、一般、较高和高的四种类型面积占比分别为 1.58%、16.68%、39.76%、41.99%。根据 SHDI 的 Optimized Outlier Analysis 分析结果,成都平原区内岛链状分布着生物多样性高的区域,对于生物多样性保护具有特殊意义(图 1)。

SHDI 高值区主要集中于盆周山地和川西北高原、攀西,以及川东北。SHDI 生物多样性指数低值区主要

图1 Shannon's 多样性指数空间格局

Fig.1 Spatial pattern of Shannon's diversity index (SHDI)

位于成都平原(图1)。阿坝州、甘孜州、凉山州、攀枝花市、雅安市、以及达州市、广安市生物多样性等级为高的面积占比较大,各市州 SHDI 生物多样性丰富性等级占比情况见图2。

2.1.2 修正 Simpson's 多样性指数(MSIDI)

根据 MSIDI 指数分级结果,四川省生物多样性低、一般、较高和高的四种类型面积占比分别为 2.11%、17.28%、40.83%、39.78%。根据 MSIDI 的 Optimized Outlier Analysis 分析结果,成都平原区内岛链状分布着生物多样性高的区域,图3。

MSIDI 高值区主要集中于盆周山地和川西北高原、攀西,以及川东北。MSIDI 生物多样性指数低值区主要位于成都平原,图3。阿坝州、甘孜州、凉山州、攀枝花市、雅安市、以及达州市、广安市生物多样性等级为高的面积占比较大,各市州 MSIDI 生物多样性丰富性等级占比情况见图4。

图2 各市州 SHDI 生物多样性丰富等级比例

Fig.2 Biodiversity Level by SHDI of Each Prefecture

图3 修正 Simpson's 多样性指数空间格局

Fig.3 Spatial pattern of modified Simpson's Diversity Index (MSIDI)

2.1.3 景观丰度(PR)

PR 等于景观中所有斑块类型的总数。PR 是反应景观组分以及空间异质性的关键指标之一,并对许多生态过程产生影响。研究发现景观丰度与物种丰度之间存在很好的正相关,特别是对于那些生存需要多种生境调节的生物来说 PR 就显得尤为重要。

根据 PR 指数分级结果,四川省生物多样性低、一般、较高和高的四种类型面积占比分别为 2.65%、14.11%、30.68%、52.55%。根据 PR 的 Optimized Outlier Analysis 分析结果,成都平原区内岛链状分布着生物多样性高的区域(图 5)。

PR 高值区主要集中于盆周山地和川西北高原、攀西,以及川东北。PR 生物多样性指数低值区主要位于成都平原(图 5)。阿坝州、甘孜州、凉山州、攀枝花市,雅安市、以及达州市、广安市生物多样性等级为高的面积占比较大,各市州 PR 生物多样性丰富性等级占比情况(图 6)。

2.2 生态系统服务功能

2.2.1 生态系统服务冷热点分析

四川省土壤保持价值中,减少泥沙淤积的功能量为 33.4 亿吨,减少面源污染的功能量为 0.55 亿吨。水源涵养功能量为 1214.92 亿立方米;固定二氧化碳 13.98 亿吨。四川省水土保持功能热点区主要分布在岷山、邛崃山区及横断山南段区,以及秦巴山区。固碳功能热点区域主要位于川西北高原阿坝州、甘孜州、凉山州,及秦巴山区,成都平原是冷点区域。水源涵养功能热点区域主要位于岷江流域、沱江流域、渠江流域,以及凉山州境内的雅砻江、大渡河流域、金沙江流域和安宁河流域,而涪江、嘉陵江流域、雅砻江上游区域则为冷点区域(图 7)。

图 4 各市州 MSIDI 生物多样性丰富等级比例
Fig.4 Biodiversity Level by MSIDI of Each Prefecture

图 5 景观丰度空间格局
Fig.5 Spatial pattern of patch Richness (PR)

2.2.2 服务功能影响因子分析

PA1(因子 1)、PA2(因子 2)轴方差解释率分别是 52%和 48%,固碳功能对 PA1 轴贡献较大,水土保持对

PA2 轴贡献较大。水源涵养在 PA1 和 PA2 轴的贡献大致相等。固碳能力强弱与植被生长及呼吸作用强弱直接相关,因此与气温关系紧密;而水土保持能力强弱受降水及地形地貌影响较大,在海陆位置及气候分区基本一致的情况下,地形是影响降水的主要因素。水源涵养能力与植被状况和降水均有直接关系,因此与气候因素和地形因素均联系紧密(图 8)。

根据 183 个县 PA1 与 PA2 因子得分作图。根据 PA1 轴空间图,可见固碳功能高的区域主要位于阿坝州、甘孜州、凉山州高海拔区县。这些区县海拔较高,年均温度较低,植物和土壤呼吸作用较弱,有利于碳汇集。在攀西、川南地区,以及成都平原,年均温度较高,降水量也较大,植物生长旺盛,固碳功能也较强。根据高低值聚类分析,固碳功能高值聚集区主要是位于川西北地区,而低值聚集区主要位于成都平原及川东北区域(图 9)。

根据 PA2 轴空间图,可知土壤保持功能高的区域主要位于四川盆地的盆周山地岷山、邛崃山区,及大小凉山以及秦巴山区。这些区域地形起伏较大,是滑坡、泥石流的活跃区域^[23]。根据高低值聚类分析,土壤保

图 6 各市州 PR 生物多样性丰富等级比例

Fig.6 Biodiversity Level by PR of Each Prefecture

图 7 生态系统服务冷热点分析

Fig.7 Optimized Hot Spot Analysis of Ecological Service

持功能高值聚集区主要是位于甘孜州东部、雅安西部、以及凉山州安宁河谷区域,另外秦巴山区水土保持功能也较高(图 10)。

空间分布上,水土保持功能与固碳功能高的区域几乎互不重叠。水土保持功能低值聚集区主要位于成都平原涪江、沱江、岷江下游区域县市,与固碳功能空间重叠也较少。影响服务功能的主要是气候与地形因子的空间分布格局,在总体分布格局限制下,人类通过自身活动对微气候和微地形的改造,也必将深刻影响着服务功能空间分布为格局。如成德绵城市群极大改变了建设区域的服务功能。本文固碳功能及水土保持功能是以县为单位进行分析,根据已有研究结果,如以栅格为单位进行分析,功能空间分布特征又有所不同^[20]。

2.3 生物多样性与生态系统服务相关性分析

进行 DCA 去趋势分析,结果显示第一轴长度 1.48,小于 3.0,因此进行 RDA 的结果会更合理。对因变量矩阵与所有环境变量进行 RDA 分析。执行 ordiR2step 向前选择,模型选择了包括 PR、ENN_SD、PRD 3 个指标的解釋变量矩阵。模型总体显著($P < 0.001$),矫正解释率 42.25%,3 个解釋变量差异显著($P < 0.05$)。其中 RD1 的对因变量矩阵贡献率 40.95% ($P < 0.001$),RDA2 对因变量贡献率仅为 1.28% ($P = 0.01$)。

图 8 生态服务因子分析

Fig.8 Factor Analysis of Ecological Service

图 9 PA1 空间格局

Fig.9 Spatial pattern of PA1

根据《四川省林业发展“十三五”规划》,四川共分为川西高原区、川西南山地区、川西高山峡谷区、成都平原区、盆周山地区、盆地丘陵区六大区域。在 RDA(I 型)图上,离散点代表了各区县在约束轴的排序,空间分布越近,则表示越相似。根据 I 型标尺 RDA 图可知,成都平原区各区县空间距离较为接近,根据点在各轴上投影,显示了生态服务较弱、景观破碎性较强的特点;盆地丘陵与盆周山地各区县具有在水土保持功能梯度上变化较大,景观丰度变化较大的特点。川西高原各区县具有在固碳服务梯度上变化较大,景观丰度变化较大的特点;西南山地区、川西高山峡谷区具有生态系统服务较强、区县差别大,景观丰度较高的特点。根据 II 型标尺 RDA 图可知,固碳功能、水土保持功能、水源涵养功能与 PR 及 ENN_SD 呈极强正相关,而与 PRD 则呈

极强负相关关系,图 11。

图 10 PA2 空间格局
Fig.10 Spatial pattern of PA2

图 11 RDA 三序图
Fig.11 RDA analysis

3 讨论与结论

3.1 生物多样性格局评价的可信性

以乡镇为评价单元,在景观尺度上,三种多样性指数 SHDI、MSIDI、PR 评价的结果呈现出较为一致的空间格局。结果与基于《中国植物志》数据所得物种丰富度空间分布格局较为一致^[24]。四川生物多样性丰富度聚集区分布于秦巴山、岷山、邛崃山、龙门山、大小凉山、大雪山、沙鲁里山。横断山脉是一个显著的丰富度高峰区,其次为龙门山区^[24]。环境保护部 2015 年核定颁布的生物多样性优先区,基本涵盖了四川境内 5 个生

生物多样性最为丰富的区域,评价结果也与其相符。

ArcGIS 热点分析结果显示,四川省景观多样性指数高值集中区域主要集中于盆周山地和川西北高原,以及川东北、攀西、川南,另外川东北米苍山、华蓥山。川南部分区域生物多样性也较丰富。以雪宝顶-四姑娘山-贡嘎山-大风(贡嘎山-亚丁)螺髻山为节点,构成四川生物多样性丰富区域骨架。生物多样性指数低值区主要位于成都平原。在生物多样性高值和低值集中区,分别点状散布着一些生物多样性低值和高值区。

评价结果有助于不断完善现有自然保护网络,加强生物多样性保护。在生物多样性热点区域,弥补自然保护地空缺、联通保护廊道;在冷点区域充分利用现有碎片化生物多样性相对富集区,构建生物多样性保护岛屿。如成都平原区可通过建立一系列生物多样性保护“踏石”,构建生物多样性保护和迁移网络。

3.2 提高生物多样性评价精度的几种途径

景观尺度上,异质性格局是由群落的多样性决定的^[25],不同的群落具有不同的物种组成,高的群落多样性,一定程度上可以反映高的物种多样性。可以从几个方面来提高评价的精度:首先,一个景观区域内,评价精度与可遥感识别的群落类型数有关,可提高解译数据分类精细程度提高评价精度。一般认为,川西若尔盖湿地是生物多样性丰富区域。根据所采用数据的分类体系,被解译为大面积连续的草本湿地和高寒草甸斑块,景观构成极为单一,故生物多样性评价价值较低;其次,既然不同的群落具有不同的物种组成,那么可根据先验知识,分别对不同类型群落给予差别化权重,从而提高评价精度;再次,群落多样性与群落自身健康状况有关,高寒草甸不同沙化阶段的多样性水平不同^[26]。最后,群落结构受环境因子梯度变化影响较大^[26-28],对于同一群落类型,也可以根据群落结构与环境因子的关系,来修正群落的多样性权重,提高评价精度。北京东灵山地区植物群落多样性的研究结果表明,物种丰富度和物种多样性指数随海拔升高而下降^[25]。

影响群落多样性的因素较多,且受尺度影响,影响机制并非全为线性关系。四川省全省种子植物物种多样性,呈现由盆地到盆周山区逐渐升高,再到高原(川西高原和攀西高原)又逐渐降低的趋势^[24]。玛曲高寒草甸物种丰富度、多样性指数与均匀度指数,均表现为潜在至轻度沙化阶段升高,之后不断下降的动态规律^[26]。因此,基于景观多样性的评价应树立尺度观念,不能一味追求精确性,而应根据实际工作需要,和数据及研究基础,选择合适的尺度。

海拔是群落多样性有重要影响的环境因子^[24-25],且易于获得。大量的研究表明,哺乳动物、鸟类、昆虫等大型生物类群和树木一样也通常随海拔变化呈现单调递减或驼峰状的多样性分布格局,真菌也呈同样分布格局,或无海拔分布格局^[29]。海拔对小型兽类物种组成的垂直分布和对植被垂直分布的影响类似^[30],哺乳动物、鸟类、昆虫等大型生物类群及真菌极有可能与小型兽类一样,随海拔垂直分布格局与植被类似。用海拔做为环境因子,对植物群落进行权重矫正,即便在考虑到小型兽类的时候,可能也不会引起评价结果原则上的偏差,对其它哺乳动物、鸟类、昆虫等大型生物类型及真菌可能同样如此。

不同于海拔等环境因子,放牧^[31]、火烧、沙化等具有不确定性的影响因子,可统称为干扰因子,同样可影响群落生物多样性^[32]。干扰对植物群落多样性的影响模式一般符合“中度干扰假说”。但对于更高精度的评价来说,群落多样性对干扰的相应模式较为复杂,不同的多样性指标,不同的时空尺度,对干扰的相应不同^[26],需要具体分析。

3.3 生物多样性与生态系统服务关系

3.3.1 生物多样性对生态系统服务的解释力

生物多样性是生态系统功能的主要驱动力已得到广泛认可^[33]。本研究通过 RDA 分析研究了生物多样性和生态系统服务的相关性。结果表明,包含 PR、ENN_SD、PRD 3 个指标的解释变量矩阵可解释 42.25% 的生态系统服务变化,模型总体显著($P < 0.01$)。具有不同功能作用的不同物种及其个体相对多度的差异是形成不同群落的基础。受制于组成种的生态生物学特性不同,不同的植物群落在结构和功能上都存在很大的差异^[25]。这是从景观尺度上进行生物多样性评价的基础,也是宏观研究生物多样性与生态系统服务关系的基础。

在解释变量的选择上,由于共线性等原因,由不同类型数据构成解释变量矩阵可提高解释率。研究表明 PR、SHDI、MSIDI 均能较好表征四川省生物多样性格局,但此 3 个变量构成解释变量矩阵的模型解释率要低于 PR、ENN_SD、PRD 3 个变量统一解释矩阵。根据 RDA 三序图(II 型标尺)可知,作为生物多样性的表征因子,ENN_SD 与 PR 正相关,而与 PRD 则呈负相关关系。作为生物多样性的表征因子,ENN_SD、PR 与固碳、水源涵养、水土保持生态系统服务具有正相关关系,而 PRD 则与几个生态系统服务呈负相关关系。综上,可说 RDA 分析显示了高的生物多样性,伴随着高的生态系统服务。

3.3.2 四川生物多样性与生态系统服务关系区域依赖性

根据 I 型标尺 RDA 图可知,四川省不同的地貌单元对生物多样性及生态系统服务功能^[7]都有着重要影响。成都平原区区县空间距离较近,在生态系统服务和多样性梯度上均差异较小。除成都平原区外,其余 5 个区域区县关系模式各有特点。盆周山地区、盆地丘陵区各区县在水土保持功能梯度上差异较大,多样性梯度差异较小。川西高原区区县在固碳、水源涵养梯度上差异较大,并有协同关系,多样性梯度差异较大。川西高山峡谷区、西南山地区可能受山体切割隔离影响,区县之间生态系统服务和多样性差异较大,生态系统服务可能存在强烈权衡关系,需进一步引入解释因子。

3.3.3 生物多样性与生态系统多功能性关系不确定性

每种生态系统服务可能都由一系列功能性状共同影响^[2]。物种多样性与功能多样性关系较为复杂,存在正相关、负相关、S 型曲线及不相关 4 种关系^[2]。对于功能多样性与生态系统服务的关系,目前也缺乏一致认识,可能存在选择效应和互补效应两种主要维持机制。而生物多样性与生态系统多功能性的关系更为复杂^[7, 16],研究仍显不足^[5]。

首先,景观尺度上物种多样性数据获取困难,而且所选生物多样性的量化指标可能与生物多样性真实状况存在不确定性关系^[34]。本研究中,PR、SHDI、MSIDI、ENN_SD 正向指示了生物多样性丰富性,而 PRD 指标则代表了相反趋势。指标选取的不同,生物多样性与生态系统功能关系可能有截然不同结论^[1, 7, 17, 33-34]。环境因子如气温、降水、植被变化常被视为生物多样性改变的经验性表征。生态恢复工程一般来说与生态系统服务呈正相关关系^[21, 35],但在降水量有限地区,种植过多的树木可能会减少产水和土壤保持等服务^[21]。植被覆盖变化与土壤碳库之间的关系,也同样具有复杂性^[36]。其次,生态系统服务间的关系在区域之间和区域内部均可能存在显著差异^[21],表现为协同关系或权衡关系。关中-天水经济区 64 个县研究表明,除 NPP 与保水服务呈现协同关系,大部分县域的固碳释氧、水文调节、水土保持与粮食生产之间表现为权衡关系^[37]。利用生态系统多功能性这一综合性概念,从生态系统多样性层面进行生物多样性与生态系统多功能性关系的研究,可克服物种数据的获取困难,以及不同生态系统功能之间复杂的权衡与协同关系,有助于从整体上理解和认识生物多样性与生态系统功能间的关系格局。

参考文献 (References):

- [1] 蔡艳, 吕光辉, 何学敏, 蒋腊梅, 王恒方, 滕德雄. 不同利用方式下草地生态系统的多功能性与物种多样性. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 200-210.
- [2] 徐炜, 马志远, 井新, 贺金生. 生物多样性与生态系统多功能性: 进展与展望. 生物多样性, 2016, 24(1): 55-71.
- [3] 张宇硕, 吴殿廷, 吕晓. 土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响: 空间尺度视角的研究综述. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1172-1189.
- [4] 张全国, 张大勇. 生物多样性与生态系统功能: 进展与争论. 生物多样性, 2002, 10(1): 49-60.
- [5] 李瑞新, 丁勇, 马文静, 牛建明, 张庆. 植物功能多样性及其与生态系统功能关系研究进展. 生态环境学报, 2016, 25(6): 1069-1075.
- [6] 文志, 郑华, 欧阳志云. 生物多样性与生态系统服务关系研究进展. 应用生态学报, 2020, 31(1): 340-348.
- [7] 邓楚雄, 刘俊宇, 李忠武, 肖海兵, 聂小东, 张宇婷, 周咪. 近 20 年国内外生态系统服务研究回顾与解析. 生态环境学报, 2019, 28(10): 2119-2128.
- [8] 巩杰, 徐彩仙, 燕玲玲, 郭青海. 1997—2018 年生态系统服务研究热点变化与动向. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3265-3276.
- [9] 傅伯杰, 陈利顶. 景观多样性的类型及其生态意义. 地理学报, 1996, 51(5): 454-462.

- [10] 俞孔坚, 李迪华, 段铁武. 生物多样性保护的景观规划途径. 生物多样性, 1998, 6(3): 205-212.
- [11] 胡天宇, 王宁宁, 赵晓倩, 米湘成, 郭庆华, 马克平. 生物多样性监测网络建设进展. 遥感学报, 2018, 22(4): 709-712.
- [12] 徐海根, 崔鹏, 朱筱佳, 雍凡, 伊剑锋, 张文文, 李佳琦, 童文君, 江波, 蔡蕾. 全国鸟类多样性观测网络(China BON-Birds)建设进展. 生态与农村环境学报, 2018, 34(1): 1-11.
- [13] 徐海根, 吴军, 吴延庆, 郭伟波, 何玉晓, 李佳琦, 李建南, 陈萌萌, 蔡蕾. 全国两栖动物多样性观测网络(China BON-Amphibians)建设进展. 生态与农村环境学报, 2018, 34(1): 20-26.
- [14] 魏彦昌, 吴炳方, 张喜旺, 杜鑫. 生物多样性遥感研究进展. 地球科学进展, 2008, 23(9): 924-931.
- [15] 马克平. 生物多样性科学的热点问题. 生物多样性, 2016, 24(1): 1-2.
- [16] 黄小波, 李帅峰, 苏建荣, 刘万德, 郎学东. 云南松天然次生林物种丰富度与生态系统多功能性的关系. 生物多样性, 2017, 25(11): 1182-1191.
- [17] 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.
- [18] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 徐卫华, 郑华, 张琰, 肖焱. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究. 生态学报, 2013, 33(21): 6747-6761.
- [19] 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.
- [20] 杨渺, 肖焱, 欧阳志云, 叶宏, 邓懋涛, 艾蕾. 四川省生态系统生产总值(GEP)的调节服务价值核算. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2019, 45(3): 221-232.
- [21] 邓楚雄, 朱大美, 聂小东, 刘唱唱, 李忠武, 刘俊宇, 张光叶, 肖林辉, 张宇婷. 生态系统服务权衡最新研究进展. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1509-1522.
- [22] 房志, 徐卫华, 张晶晶, 肖焱, 张路. 基于生物多样性与生态系统服务功能的秦岭山系自然保护体系规划. 生态学报, 2017, 37(16): 5334-5341.
- [23] 杨渺, 谢强, 方自力, 刘孝富, 廖蔚宇, 王萍. “5·12”汶川地震极重灾区生态服务功能恢复总体评估. 长江流域资源与环境, 2016, 25(4): 685-694.
- [24] 管磊, 王华军, 王玉宽, 彭培好. 基于 GIS 的四川植物物种丰富度与地形关系分析. 人民长江, 2016, 47(18): 11-17.
- [25] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数. 生态学报, 1995, 15(3): 268-277.
- [26] 王新源, 马仲武, 王小军, 陈萍, 唐霞, 连杰, 张琴, 程小云, 刘健, 曲浩. 不同沙化阶段高寒草甸植物群落与表土环境因子的关系. 生态学报, 2020, 40(19): 6850-6862.
- [27] 杨东, 黎明, 程玉, 温华军, 李鹏飞, 徐飞, 李伟. 长江故道湿地植被的数量分类与排序. 植物科学学报, 2011, 29(4): 467-473.
- [28] 江洪, 黄建辉, 陈灵芝, 杨朝阳, 杨小秋. 东灵山植物群落的排序、数量分类与环境解释. 植物学报, 1994, 36(7): 539-551.
- [29] 罗正明, 刘晋仙, 暴家兵, 王雪, 吴强, 柴宝峰. 五台山亚高山土壤真菌海拔分布格局与构建机制. 生态学报, 2020, 40(19): 7009-7017.
- [30] 岳先涛, 张塔星, 窦亮, 刘洁, 冉江洪, 毛夜明, 马晓龙, 张尧. 四川黑竹沟地区非飞行小型兽类物种多样性与群落组成. 生物多样性, 2020, 28(6): 678-687.
- [31] 牛钰杰, 杨思维, 王贵珍, 刘丽, 花立民. 放牧干扰下高寒草甸物种多样性指数评价与选择. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1824-1832.
- [32] 郝建锋, 李艳, 齐锦秋, 裴曾莉, 黄雨佳, 蒋倩, 陈亚. 人为干扰对碧峰峡栲树次生林群落物种多样性及其优势种群生态位的影响. 生态学报, 2016, 36(23): 7678-7688.
- [33] 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): 2655-2666.
- [34] 林世滔, 谢弟炳, 刘郁林, 陈文波. 景观格局特征与区域生物多样性的关系研究. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1681-1688.
- [35] 王晓峰, 马雪, 冯晓明, 周潮伟, 傅伯杰. 重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征. 生态学报, 2019, 39(20): 7344-7355.
- [36] 杨渺, 李贤伟, 张健, 薛波. 植被覆盖变化过程中土壤有机碳库动态及其影响因素研究进展. 草业学报, 2007, 16(4): 126-138.
- [37] 李晶, 李红艳, 张良. 关中-天水经济区生态系统服务权衡与协同关系. 生态学报, 2016, 36(10): 3053-3062.