

东北森林屏障带生态系统服务权衡与协同关系

齐麟^{1,2} 张月^{2,3} 许东⁴ 朱琪^{2,3} 周旺明² 周莉² 王庆伟² 于大炮^{2*}

(¹沈阳大学生物入侵研究中心, 沈阳 110044; ²中国科学院沈阳应用生态研究所, 中国科学院森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016; ³中国科学院大学, 北京 100049; ⁴沈阳师范大学旅游管理学院, 沈阳 110034)

摘要 东北森林带是我国重要的生态屏障, 生态系统服务权衡研究对协调该区生态环境保护和社会经济发展至关重要。本研究利用全局空间自相关分析、双变量空间相关分析、空间聚类分析等方法, 探明了东北森林带水源涵养等 6 种生态系统服务的空间格局以及它们之间权衡、协同关系的作用机制和空间分异。结果表明: 研究所选取的 6 种生态系统服务均呈现出显著的聚集性分布; 整体看来, 水源涵养、生物多样性维持、土壤保持和固碳释氧 4 项生态服务呈现出协同关系, 防风固沙、粮食供给与其他服务呈现出权衡关系。由于生态系统可以提供多种生态系统服务, 且不同生态系统所提供的生态系统服务类型和数量具有明显差异, 不同生态系统服务之间权衡/协同关系因此而存在明显的空间分异。本研究通过生态系统服务簇将研究区划分为生态系统服务平衡区、生态系统服务协调区、防风固沙区和粮食供给区 4 个区域, 以期为研究区生态系统服务管理提供科学依据, 促进资源与生态环境的全面协调和可持续发展。

关键词 生态系统服务; 权衡与协同; 生态系统服务簇; 东北森林带

Trade-offs and synergies of ecosystem services in forest barrier belt of Northeast China. QI Lin^{1,2}, ZHANG Yue^{2,3}, XU Dong⁴, ZHU Qi^{2,3}, ZHOU Wang-ming², ZHOU Li², WANG Qing-wei², YU Da-pao^{2*} (¹Biological Invasion Research Center, Shenyang University, Shenyang 110044, China; ²Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴School of Tourism and Hospitality Management, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China).

Abstract: Northeast forest belt is an important ecological barrier in China. Understanding the trade-offs of ecosystem services is important to coordinate ecological environment protection and social development in this region. In this study, we used spatial autocorrelation analysis, bivariate spatial correlation analysis, and spatial clustering analysis methods to quantify the spatial patterns of six selected ecosystem services, and reveal underlying mechanisms of trade-offs and synergies and spatial variation. The results showed that the six selected ecosystem services showed a significant aggregation distribution. At regional scale, the services of water conservation, biodiversity maintenance, soil conservation and carbon sequestration showed a systematic relationship, while the services of sand fixation and food supply showed a trade-off relationship with other ecosystem services. Ecosystems provide a variety of services, and the types and quantities of ecosystem services provided by different ecosystems were significantly different. Therefore, the trade-off/synergy relationship among different ecosystem services also showed significant spatial variation. The study area was divided into ecosystem service balance zone, ecosystem service coordination zone, sand fixation zone, and food supply zone through ecosystem service clusters, in order to provide a scientific basis for the management of ecosystem services and promote the comprehensive, coordinated, and sustainable development of resources and ecological environ-

国家重点研发项目课题(2018YFC0507305)资助。

收稿日期: 2021-04-30 接受日期: 2021-08-20

* 通讯作者 E-mail: yudp2003@iae.ac.cn

ment.

Key words: ecosystem services; trade-offs and synergy; ecosystem services cluster; Northeast China forest belt.

生态系统服务是人类直接或间接从生态系统中获得的产品或服务,是维持人类生存发展的环境和资源基础(欧阳志云等,1999;张志强等,2001)。生态系统服务的形成受到多种因素的调控,且不同服务的调控因子既有区别又有重叠,导致了不同生态系统服务之间存在着复杂的相互关系,表现为相互增益的协同关系和此消彼长的权衡关系(Kremen *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2021)。全球变化背景下,生态系统服务发生了明显变化(Schroter *et al.*, 2005; Laforteza *et al.*, 2016)。因此,明确不同生态系统服务间权衡协同关系的演变规律、影响因素及驱动机制,寻求区域生态环境和社会经济协同发展的最优模式,对区域甚至全球可持续发展具有重要意义(阎水玉等,2002;戴尔阜等,2015)。

近年来,生态系统服务权衡研究受到国内外学者的广泛关注,取得了大量研究成果(李晶等,2016; Gong *et al.*, 2019; Qiao *et al.*, 2019)。王晓峰等(2019)利用相关系数法并结合植物分布场数据对我国重点脆弱生态区1990—2015年土壤保持、植被净生产力和水源供给等生态系统服务的权衡与协同关系的时空动态进行了研究,发现上述生态系统服务之间整体上协同,局部权衡的关系。因不同类型生态系统服务之间存在紧密的相互关联而非独立发展,在一定的空间范围内上形成了系统的组合,即生态系统服务簇。在同一生态系统服务簇内,各生态系统服务之间的关系相对一致,因此,基于生态系统服务簇的生态区划不仅能够最大限度地涵盖生态系统的功能属性,还能够在空间上量化不同生态系统服务的相对比例及权衡协同关系(李慧蕾等,2017; 祁宁等,2020),为精准化生态系统管理提供科学依据。

东北森林带是我国重点国有林区和北方重要原始林区的主要分布地,该区域生态系统服务类型多样,是我国东北重要的生态屏障(欧阳志云,2008)。目前对该区域生态系统服务已经开展了大量研究,但多集中于对不同类型生态系统服务的估算,且多数以研究森林生态系统为主(马泉来等,2016; 肖骁等,2017)。对该区域生态系统服务协同权衡关系以及生态系统服务簇的相关研究并不多见。本研究

通过多变量空间相关分析,探讨该区域不同生态系统服务之间权衡协同关系的空间分异特征,利用聚类分析方法识别东北森林带生态服务簇并进行生态系统服务区划,探究不同生态系统服务权衡协同关系的形成机制,以期为该地区生态功能提升寻求最优解,为区域可持续发展提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区域为东北森林带,其范围是根据东北地区具有高生态价值森林分布区,以县级行政边界划定的,位于118.80°E—134.37°E、40.87°N—53.56°N(图1),总面积约为60万km²。研究区温带季风气候显著,自南向北地跨中温带和寒温带,四季分明,夏季温热多雨、冬季寒冷干燥,降水量400~1000 mm,土壤分布有暗棕壤、白浆土和黑土。根据研究区内地理特征可分为3个区域,包括:大兴安岭地区、小兴安岭地区和长白山地区。大兴安岭位于黑龙江省西北部和内蒙古东北部,北接黑龙江,西接呼伦贝尔草原,东邻小兴安岭,南依松嫩平原。植被特征为中部、北部以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为主,南部与内蒙古相邻的区域以草原为主。小兴安岭地区位于黑龙江北部,西北接大兴安岭,东南隔松花江谷地与三江平原相衔接,东北部与俄罗斯接壤,主要植物为红松(*Pinus koraiensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、椴树(*Tilia tuan*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、柞树(*Quercus mongolica*)等。长白山地区位于吉林省东部,主要植被类型为温带针阔叶混交林,地带性树种有红松、长白落叶松(*Larix olgensis*)、云杉(*Picea asperata*)、冷杉(*Abies fabri*)、赤松(*Pinus densiflora*)等。

1.2 数据来源

研究区乡镇行政边界数据来源于资源环境科学与数据中心“中国行政乡镇边界数据集”(http://resdc.cn/data.aspx?DATAID=203),数据格式为矢量数据。土地利用数据来源于中国科学院遥感与数字地球研究所的土地利用数据。该数据一级土地利用类型分为林地、草地、耕地、水体、人工表面和其他6类,二级包含38个子类型,本研究根据研究区现

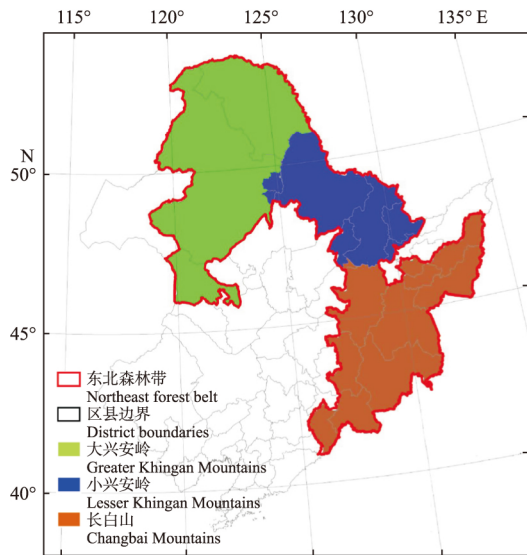


图1 研究区位置示意图
Fig.1 Study area

状及研究需求,将子类型重新分为15类。

研究区6种生态系统服务空间格局,包括水源涵养、生物多样性维持、土壤保持、固碳释氧、防风固沙和粮食供给,从中国生态系统服务空间数据集(<http://www.sciencedb.cn/dataSet/handle/458>)提取(张路等 2018)。该数据集以遥感地物分类数据为基础。叠加检验结果表明该数据生态系统分类数据级类总精度为95%,二级类总精度为90%。各生态系统服务的评价方式和计算方法如下:

(1) 水源涵养

本研究采用水量平衡方程来计算水源涵养量,计算公式为(张路等 2018):

$$TQ = \sum_{i=1}^j (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^3$$

式中: TQ 为总水源涵养量(m^3), P_i 为降雨量(mm), R_i 为地表径流量(mm), ET_i 为蒸散发(mm), A_i 为 i 类生态系统面积(km^2), j 为研究区第 i 类生态系统类型, j 为研究区生态系统类型数。

地表径流因子计算公式如下:

$$R = P \times \alpha$$

式中: R 为地表径流量(mm), P 为多年平均降雨量(mm), α 为平均地表径流系数。

(2) 生物多样性维持

生物多样性维持服务为指示物种在县域单元上分布的数量。其计算公式为(张路等 2018):

$$E_a = \sum_{i=1}^n E_i$$

式中: E_a 为指示种总数量(个); E_i 为物种个数(个)。

(3) 土壤保持

采用水土流失方程(RUSLE)的土壤保持服务模式开展评价,公式如下(张路等 2018):

$$A_c = A_p - A_R = R \times K \times L \times S \times (1 - C)$$

式中: A_c 为水土保持量; A_p 为潜在土壤侵蚀量; A_R 为实际土壤侵蚀量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L, S 为地形因子, L 表示坡长因子, S 表示坡度因子; C 为植被覆盖因子。

(4) 固碳释氧(张路等 2018)

本研究基于净初级生产力(NPP)估算固定碳的重量,计算公式为:

$$NPP = APAR(x, t) \times E(x, t)$$

式中: $APAR$ 表示吸收的光合有效辐射($MJ \cdot m^{-2} \cdot 10 d^{-1}$); E 表示像元实际光能利用率($g C \cdot MJ^{-1}$)。

(5) 防风固沙

通过潜在和实际风蚀强度之差估算固定沙粒的重量。其计算公式为(张路等 2018):

$$SR = S_{L潜} - S_L$$

式中: SR 为固沙量($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$); $S_{L潜}$ 为潜在风力侵蚀量($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$); S_L 为实际风力侵蚀量($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)。

(6) 粮食供给

计算粮食、水产品、肉类、林果产品等食物的产量,统一转换为能量,计算公式为(张路等 2018):

$$E_b = \sum_{i=1}^n E_i$$

式中: E_b 为食物总供给热量($\times 4.187 kJ$); E_i 为第 i 种食物所提供的热量($\times 4.187 kJ$)。

提取后的各项生态系统服务通过 ArcGIS 进行归一化以表征其重要性空间格局。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务空间格局 本研究以乡镇为基本单元提取了研究区6项生态系统服务单位面积平均值,分别制作了各生态系统服务的空间分布图。利用全局 Moran I 空间自相关指数计算了各生态系统服务自身的空间聚集和离散程度。利用双变量 Moran I 指数研究了不同生态系统服务权衡与协同关系及其空间分异。Moran I 空间自相关指数是一种多方向、多维度的自相关方法,计算公式为:

$$I = \frac{N}{\sum_{ij} w_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_i (x_i - \bar{x})^2)}$$

式中: i, j 为多边形编号 w_{ij} 为 i, j 之间的空间连接矩阵 x 为研究区域内的属性均值。其中, Moran I 指数的取值范围为 $[-1, 1]$, 当 Moran I 指数大于 0 时, 表示该区域呈现正相关关系, 当 Moran I 指数小于 0 时, 表示该区域呈现空间负相关关系。当 Moran $I = 0$ 时, 表明分布是完全随机的。

1.3.2 不同土地利用类型生态系统服务供给能力

首先将研究区土地利用类型栅格数据矢量化。之后将从中国生态系统服务空间数据集所选取的 6 种生态系统服务栅格数据(空间分辨率为 250 m)进行归一化。最后按照土地利用类型对所选生态系统服务逐一计算平均值及标准差, 以不同地类的生态系统服务均值表征该地类的生态系统服务供给能力。

1.3.3 生态服务簇

本研究利用聚类分析衡量不同生态系统服务之间的相似性, 并根据相似性原则辅以几何质心加权(权重为 0.2), 把具有较高相似度的县域单元划分至同一生态系统服务簇。为了得到较为稳定的聚类结果, 本文采用 K -means 聚类分析方法, 设置的最佳聚类数目为 4 类, 初始化运行次数 150 次, 最大迭代次数为 1000 次。

本研究中, 全局 Moran I 空间自相关指数、双变量 Moran I 、空间主成分分析以及空间聚类分析的计算以及结果可视化均由软件 GeoDa 完成。

2 结果与分析

2.1 土地利用现状

东北森林带土地利用类型以森林为主, 占总面

积的 65.0%, 其中阔叶林的比例最高, 占森林总面积 65.1%。阔叶林在长白山、小兴安岭和大兴安岭的比例分别为 79.8%、67.2% 和 53.6%; 耕地面积仅次于森林, 占东北森林带总面积的 20.3%, 其中 50.8% 的耕地分布在长白山地区, 30.2% 分布在小兴安岭地区, 长白山地区水田面积占耕地面积比例最大, 为 35.1%; 湿地面积占总面积的 8.0%, 主要分布在大、小兴安岭地区; 草地的面积占总面积的 4.4%, 主要分布在大兴安岭南部和内蒙古交界处(表 1, 图 2)。

2.2 生态系统服务空间格局

从图 3 可以看出, 研究区水源涵养量最高的地区为长白山南部及西部、小兴安岭中东部、以及大兴安岭中部和北部次之, 长白山北部、大小兴安岭交界处、大兴安岭与中部平原交界处水源涵养量相对较低; 研究区生物多样性维持功能最高的地区为长白山自然保护区及周边地区、小兴安岭中部。大兴安岭地区生物多样性维持功能整体较高, 且分布较为均匀。固碳释氧功能空间格局与水源涵养功能分布格局较为相似, 但分布相对均匀, 最高的区域为长白山中南部、小兴安岭大部分区域以及大兴安岭北部; 由于地形原因, 研究区土壤保持服务较高的区域为长白山中南部、大兴安岭中麓和小兴安岭东部区域。这些地区地势起伏较大, 潜在土壤流失量较高, 但植被覆盖优良, 实际土壤流失量很少, 因此, 土壤保持量较高; 研究区西南部地区与内蒙古接壤, 存在一定数量的沙化草地, 因此, 该区的防风固沙量较高, 可以看出该区的植被对防止西部沙地东移具

表 1 东北森林带各区域土地利用类型面积

Table 1 Area of land use types in Northeast China forest belt

土地利用类型 Land use types	大兴安岭 Greater Khingan Mountains (km ²)	小兴安岭 Lesser Khingan Mountains (km ²)	长白山 Changbai Mountains (km ²)	合计 Total (km ²)
阔叶林 Broadleaved deciduous forest	97594.40	49931.00	106803.00	254328.40
针叶林 Coniferous forest	79627.10	14174.70	9922.14	103723.94
针阔混交林 Mixed broadleaf-conifer forest	3716.51	9969.66	16341.80	30027.97
灌丛 Shrub	1173.12	197.49	819.12	2189.73
其他林地 Other forest land	1.82	3.00	15.11	19.94
草原 Grassland	23261.00	136.07	227.14	23624.21
草甸 Grassy marshland	2436.77	230.46	114.20	2781.43
水田 Paddy field	183.96	4206.65	16050.50	20441.11
旱地 Dry farmland	22928.20	32573.70	45754.20	101256.10
湿地 Wetland	33505.80	10735.20	3719.22	47960.22
水体 Water	1031.00	865.07	3313.13	5209.20
建设用地 Construction land	2350.41	1810.38	3812.87	7973.66
苔原 Tundra	0.00	0.00	54.04	54.04
沙漠 Desert	120.40	29.81	199.32	349.52
裸土 Bare soil	79.42	4.01	11.99	95.42
合计 Total	268009.90	124867.20	207157.78	600034.88

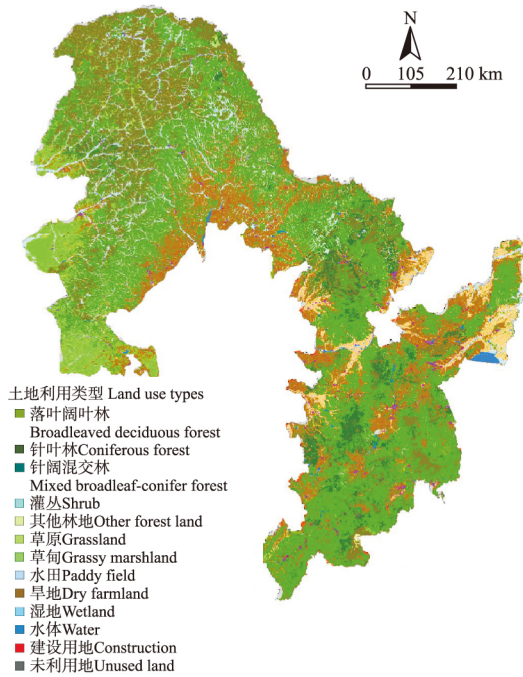


图2 东北森林带土地利用格局
Fig.2 Land use pattern of Northeast China forest belt

有重要作用。研究区南缘和东北缘与东北平原、三江平原两个重要的粮食产区相邻,其粮食供给服务

较高,这一方面是由于该区地势相对平坦且土壤肥沃,另一方面也得益于东北森林带内水系发达、水量充足。

研究区内不同土地利用类型提供的生态系统服务类型和数量均存在明显差异。总体来说,森林、草地、湿地、水体等自然生态系统提供的生态服务种类较多、数量较大,而人工生态系统诸如耕地、建设用地提供的生态系统服务的种类较为单一,数量也相对较少(图4)。从综合生态系统服务角度看,针阔混交林的重要性最高,水体次之,草甸位居第三。从单项生态服务看,针阔混交林对水源涵养、生物多样性维持以及固碳释氧3项生态系统服务重要性均较高(水源涵养: 0.27 ± 0.16 ,生物多样性维持: 0.31 ± 0.21 ;固碳释氧: 0.38)。水体对水源涵养服务的重要性略高于针阔混交林(0.29 ± 0.22),对生物多样性维持的重要性与针阔混交林持平(0.31)。草原对防风固沙重要性最高。人工生态系统中,耕地对生物多样性维持、土壤保持以及固碳释氧等生态系统服务的重要性相对较低。水田对粮食供给服务重要性高于旱地(图4)。

研究区生态系统服务空间自相关分析结果显

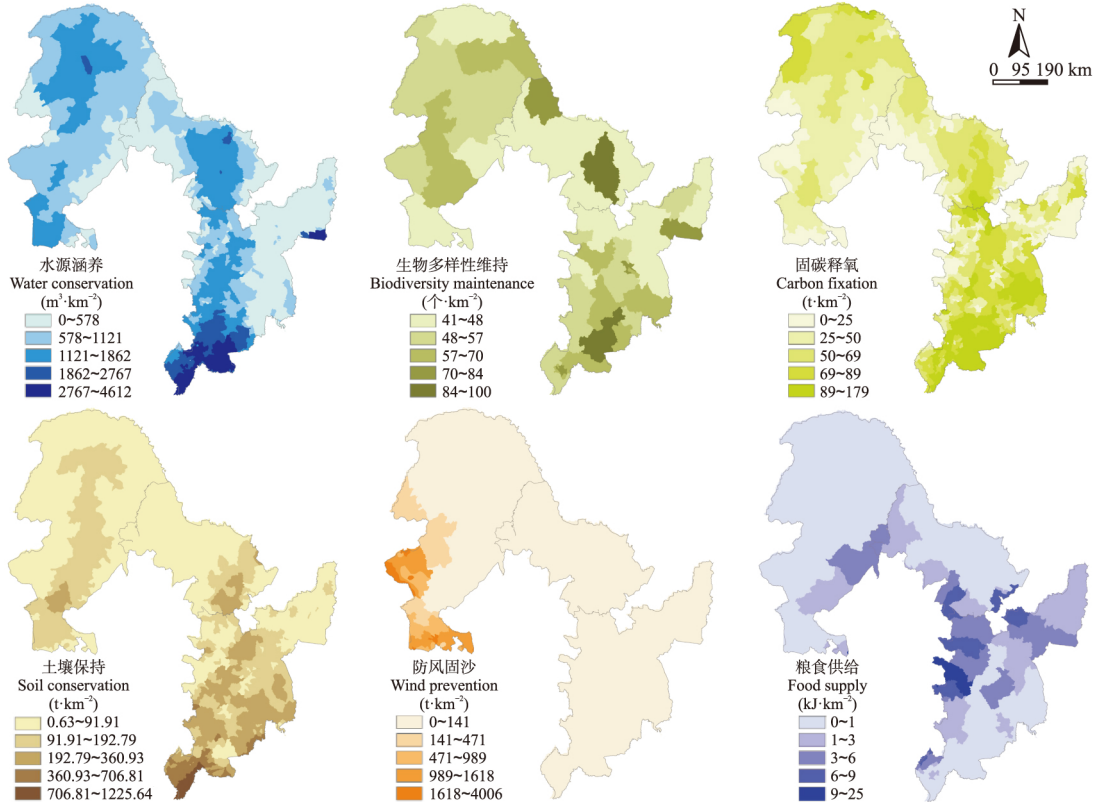


图3 东北森林带生态服务空间分布
Fig.3 Distribution of ecosystem services in Northeast China forest belt

表 2 各生态系统服务全局空间自相关性
Table 2 Spatial autocorrelation of each ecosystem service

	水源涵养 Water conservation	生物多样性维持 Biodiversity maintenance	土壤保持 Soil conservation	固碳释氧 Carbon fixation	防风固沙 Sand storm prevention	粮食供给 Food supply
Moran I	0.859	0.707	0.837	0.673	0.713	0.756
Z Score	33.085	27.78	33.785	25.527	28.45	29.985
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

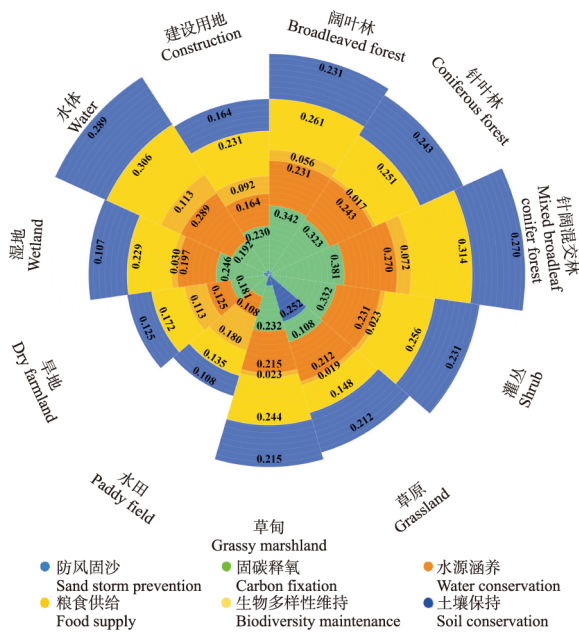


图 4 不同土地利用类型对生态系统服务的重要性
Fig.4 Importance of different land use types to ecosystem services

示,区内 6 种生态系统服务的全局 Moran I 指数均大于 0 ($P < 0.01$),表明这 6 种生态系统服务在研究区内都存在显著的空间聚集(正空间自相关)。其中,土壤保持的聚集程度最高(33.785),水源涵养次之(33.085),粮食供给位居第三(29.985),固碳释氧最低(25.527,表 2)。

2.3 生态系统协同与权衡关系及其空间格局

双变量 Moran I 空间相关性分析结果显示,东北森林带内 6 项生态系统服务中,水源涵养与生物多样性(0.329)、土壤保持(0.698)、固碳释氧(0.508),生物多样性维持与土壤保持(0.218)、固碳释氧(0.328),土壤保持与固碳释氧(0.52)呈现显著的协同关系。防风固沙与固碳释氧(-0.163),粮食供给与防风固沙(-0.116)、固碳释氧(-0.311)、土壤保持(-0.257)、生物多样性维持(0.30)以及水源涵养(-0.237)呈现显著负相关关系(图 5)。

双变量局部 Moran I 空间相关性分析结果显

示,东北森林带内 6 项生态系统服务之间权衡与协同关系存在高度的空间分异。水源涵养与生物多样性维持 2 项生态系统服务存在显著相关性的区域主要分布在小兴安岭和长白山地区,面积占研究区面积的 12.1%,存在显著权衡关系的区域占 5.3%,其余区域两者之间的关系不显著。水源涵养与土壤保持存在显著协同关系的区域占研究区面积的 6.6%,存在显著权衡关系的区域占 1.4%,其余区域两者之间的关系不显著。水源涵养与防风固沙存在显著协同关系的区域占研究区面积的 5.9%,主要分布在大兴安岭南端,存在显著权衡关系的区域占 23.7%,主要分布在长白山西北部和小兴安岭东部。水源涵养与粮食供给存在显著协同关系的区域占研究区面积的 21.6%,主要分布在大兴安岭东北部、小兴安岭西北部 and 长白山东部,存在显著权衡关系的区域占 32.1%,主要分布在大兴安岭西麓、小兴安岭东北部和长白山西南端。生物多样性维持功能与土壤保持、固碳释氧、防风固沙以及粮食供给存在显著空间相关关系的区域主要分布在小兴安岭和长白山地区。粮食供给与土壤保持存在显著协同关系的区域主要分布在大兴安岭,存在显著权衡关系的区域主要分布在长白山地区(图 5)。

2.4 生态系统服务簇

K-mean 聚类分析结果显示,在本研究 1028 个乡镇的 6 种生态系统服务可以聚集成 4 类生态系统服务簇(图 6)。同一生态系统服务簇在地理上有明显的聚集,各服务簇之间呈现出显著的空间差异性。4 类生态系统服务簇分别为:以针阔混交林比例较高的林地为主体的生态系统服务簇 1(生态系统服务平衡/协调区);以阔叶林和针叶林为主体的生态系统服务簇 2(生态系统服务协调区);以农田为主体的生态系统服务簇 3(粮食供给区)和以草地为主体的生态系统服务簇 4(防风固沙区)。

生态系统服务平衡/协调区面积为 $6.57 \times 10^4 \text{ km}^2$,占东北森林带总面积的 11.0%。该区主要分布在小兴安岭和长白山地区,面积分别为 1.82×10^4 和

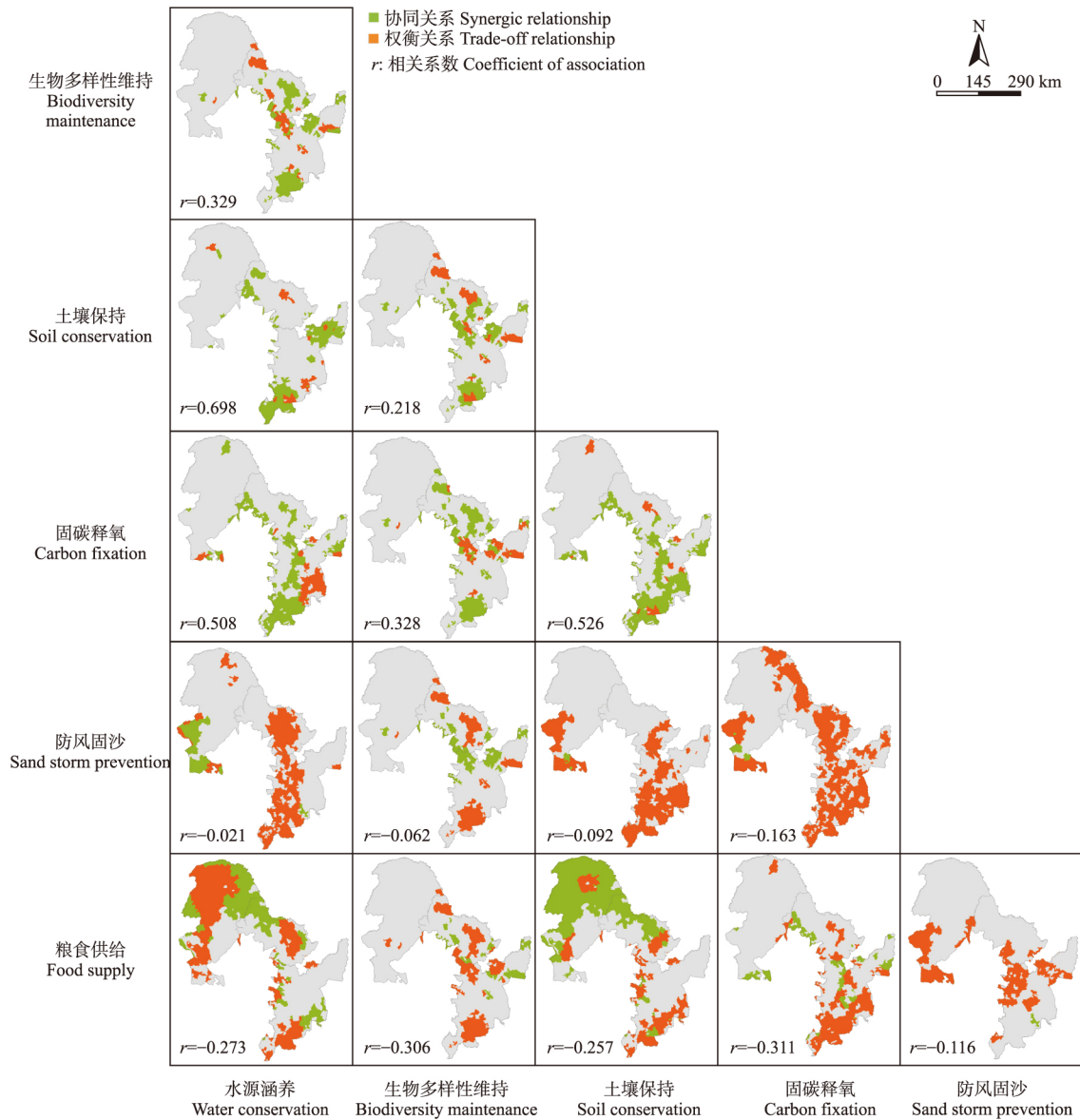


图5 东北森林带生态服务权衡与协同关系空间分异
Fig.5 Spatial variation in ecosystem services trade-offs and synergies in Northeast China forest belt

4.70×10⁴ km²。该区的水源涵养、生物多样性维持、土壤保持以及固碳释氧 4 项生态系统服务均高于其他 3 类生态功能区。在该区内,这 4 项生态系统服务更多的呈现出协同关系,此消彼长的权衡关系较弱。生态系统服务协调区面积为 37.97×10⁴ km²,占东北森林带总面积的 63.3%。该区仅有固碳释氧一项生态服务显著高于其他服务,且存在权衡关系的生态系统服务面积比例偏高。防风固沙区面积为 3.37×10⁴ km²,占东北森林带总面积的 5.6%,该区仅分布在大兴安岭西南部和南缘,且防风固沙服务显著高于其他 3 类生态功能区。该区内防风固沙服务与水源涵养呈现出较为明显的协同作用,而与土

壤保持和固碳释氧 2 项生态系统服务呈现出明显的权衡作用。粮食供给区面积为 12.06×10⁴ km²,占东北森林带总面积的 20.1%,主要分布在大兴安岭东北森林带与三江平原、中部平原的交汇处,其中分布在大兴安岭的面积为 2.47×10⁴ km²,分布在小兴安岭的面积为 4.37×10⁴ km²,分布在长白山地区的面积为 5.40×10⁴ km²,该区粮食供给服务显著高于其他 3 类生态功能区,在该区内,粮食供给服务与防风固沙服务呈现较为明显的权衡关系(图 6)。

3 讨论

3.1 生态系统服务的影响因子

诸多研究表明,尽管生态系统服务的形成与演

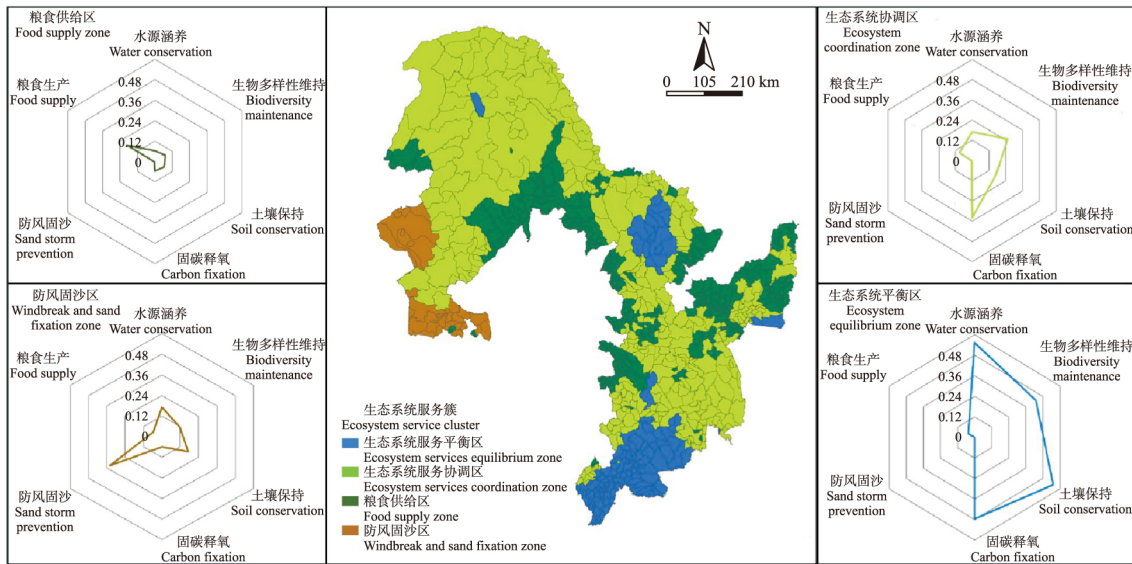


图 6 东北森林带生态服务簇空间格局
 Fig.6 Spatial pattern of ecological service clusters in the Northeast China forest belt

变受到诸如温度、降水以及地形等多种因素的共同影响(耿甜伟等,2020;王秀明等,2020),但在相对较小的尺度内,土地利用方式对生态系统服务影响更为显著(刘华妍等,2021;张元等,2021)。马慧强等(2021)对太原市生态系统服务时空格局及驱动机制进行了研究,认为土地利用变化是生态系统调节服务演化的直接原因。冯源等(2021)则发现,耕地、林地转化为建设用地是导致巴南区生态系统服务价值损失的主要途径,而耕地转化为林地则促进生态系统服务价值增益。与上述研究结果相似,本研究发现林地具有更高的水源涵养、生物多样性维持、土壤保持和碳固存能力。而草地则对防风固沙服务最为重要。此外,本研究将土地利用一级分类进行了进一步的细化,区分了相同用地中不同的生态系统类型,发现针阔混交林的综合生态效益最高。草地的防风固沙服务远高于草甸。耕地中,水田对粮食供给的重要性高于旱地。其原因在于,土地利用二级分类可以更为准确的反映土地的生态属性,如:针阔混交林森林结构更为复杂,层次多、根系更深、郁闭度和生物量更高,因此通常具有更多的生态位,维持更高的生物多样性,具有更高的水分截留和固碳能力。在研究区内,草原主要分布在大兴安岭西南缘相对干燥的地区,该区的特征是降水相对较少,蒸散发较强,具有较高的潜在风沙产量,草原的存在会大大降低实际风沙量,而草甸主要分布在研究区东北部雨量丰沛,蒸散发较弱的地区,这些地区

的潜在风沙产量本身就很低,因此,草原的防风固沙服务要远高于草甸。与之相似,研究区内水田分布在地势相对平坦、土壤有机质含量高、降水丰沛的三江平原区域,而旱地则分布在降水相对较小、地形起伏程度更高的区域,因此,水田对粮食供给的重要性较旱地更高。由此可见,土地利用结构优化在区域生态功能提升中具有重要意义,特别是在以提高区域生态系统服务为目的的土地利用结构优化过程中,以生态系统(土地利用二级分类)为基本调整单元具有更高的准确性和科学性。然而,本研究也发现生态系统服务具有尺度效应,在不同山系间变异较大,而区县尺度变异较小。这说明在较大空间尺度内,生态系统服务受到地理特征、气候条件以及生态系统属性的共同调控,而较小的尺度内则主要受到土地利用的影响。

3.2 生态系统服务权衡协同关系的空间分异

景观基底以及用途存在较高的异质性,使得生态系统服务也具有较高多样性和空间分异(王蓓等,2019;余玉洋等,2020)。例如,土壤保持与水源供给 2 项生态系统服务,在鄱阳湖和青藏高原等寒旱区域主要表现为协同关系,而在汉江上游则呈现出显著的权衡关系(王鹏涛等,2017;陈心盟等,2021),而食物供给与土壤保持在鄱阳湖丘陵地区表现为协同关系,在鄱阳湖平原地区却为权衡关系。本研究与上述结果基本一致,表现为所选取的 6 种生态系统服务的协同与权衡关系在大兴安岭、小兴

安岭以及长白山地区存在明显差异,而在这3个区域内部也存在显著的空间分异。水源涵养、生物多样性维持、土壤保持以及固碳释氧4项生态服务在大兴安岭地区更多的表现为无相关关系,水源涵养与防风固沙服务在大兴安岭西南缘表现为协同关系,而在长白山和小兴安岭则表现为权衡关系。研究区内山系纵横,水系错综,造成了区内地形、地貌、局部气候等多方面的差异,加之区域内部也存在山体效应等非地带性作用(张朔等,2013),进一步增加了环境的复杂性和异质性,促使形成了与之相适应的自然生态系统格局和差异化的生态系统过程,导致生态系统服务权衡与协同作用存在明显的空间分异。因此,生态系统服务优化管理需要处理好整体和局部的关系,宏观把握的同时结合局部特征分区制定生态保护、功能提升政策。

3.3 研究区生态系统服务区域划分与优化

本研究利用空间聚类将研究区划分为4类生态系统服务簇,与《全国生态功能区划》(欧阳志云,2008)中东北地区的生态功能定位基本一致,但因研究尺度更小而更为细致。生态系统平衡区主要以林地为主,其中综合生态系统重要性较高的针阔混交林的比例较高,加之气候条件良好,因而该区域水源涵养、生物多样性维持、土壤保持与固碳释氧4项生态系统调节服务均高于其他区域。该区域作为东北森林带内部生态系统服务的极重要区和核心区,应加以大力的保护;生态系统服务协调区占据了研究区大部分面积,在该区域内水源涵养、生物多样性维持、土壤保持与固碳释氧等4项生态服务的关系呈现出协同与权衡并存的格局。《全国生态功能区划》中指出该区域的主导生态功能为水源涵养和生物多样性保护,因此,该区域应通过实施生态系统保护和恢复的相关措施,提升主导生态系统服务。在主导生态系统服务功能与其他生态系统服务功能存在协同或无显著相关性的区域,应注重生态系统多功能提升。在主导生态功能和其他生态服务功能存在权衡关系的区域,应优先发展主导生态服务功能。在两项主导生态功能存在权衡的区域,应通过生态系统结构调整等手段,降低两者之间的矛盾冲突;位于研究区西南缘的防风固沙区起到了阻止、减缓西部沙地向东移动的屏障作用,意义重大。尽管全局Moran I空间相关性分析显示防风固沙与其他5项生态系统服务均呈现出权衡关系,局部Moran I空间相关性分析却显示,在防风固沙区内,防风固沙与

水源涵养为协同关系,与生物多样性维持无显著空间相关关系。该区内防风固沙与土壤保持的权衡关系是由于该区的土壤侵蚀风险相对较低,潜在土壤侵蚀量很小。该区内不适宜生物量较高的林木生长而适宜生物量较小的草地是造成区内防风固沙功能与固碳释氧呈现负相关关系的主要原因。该区内,防风固沙功能与粮食供给呈现显著权衡关系。尽管作物与草地具有相似的生理特征,但灌溉作物会消耗更多的水资源,使区内水资源短缺的情况进一步恶化。因此,防风固沙区内应适当实施退耕还草,以提升其防风固沙和水源涵养功能,增强其生态屏障作用。粮食供给区分布在东北森林带与东北平原、三江平原的交汇处。该区内粮食生产与其他5种生态系统服务呈现显著权衡关系区域的面积比例较小。在该区域内,一方面应该注重耕地质量提升,在适宜区(长白山北部及小兴安岭东部)应发展对粮食供给服务贡献更高的水田。在不减少耕地面积的同时提升耕地质量,将质量较低的耕地(坡耕地等)向耕地质量更高的区域迁移。另一方面,该区还应积极加强生态建设,提升土壤保持、生物多样性维持等生态系统调节服务。

由于数据和篇幅的限制,本研究没有对生态系统服务权衡/协同关系的时间动态加以分析,对其气候响应也考虑较少。在下一步工作中,应着重分析生态系统服务权衡/协同关系的演变规律以及生态系统服务间的供需流动关系,为准确预测未来气候条件下生态系统服务动态奠定基础。

4 结论

本研究利用空间自相关分析的方法研究了东北森林带水源涵养、生物多样性维持等6种生态系统服务空间格局及其协同/权衡关系的空间分异特征。得出主要结论如下:

(1) 研究所选取的6种生态系统服务均呈现出显著的聚集性分布。水源涵养、生物多样性维持、土壤保持和固碳释氧4项生态服务呈现出协同关系,防风固沙、粮食供给与其他服务呈现出权衡关系。

(2) 由于内部结构(植被组成)不同,研究区各生态系统所提供的生态系统服务类型和数量以及生态系统服务权衡/协同关系都存在明显的空间分异。

(3) 基于生态系统服务簇,研究区应划分生态系统服务平衡区、生态系统服务协调区、防风固沙区和粮食供给区4个区域。针对不同区域,应根据区

内生态系统服务关系特征进行协调,使区域生态功能得以提升。

参考文献

- 陈心盟,王晓峰,冯晓明,等. 2021. 青藏高原生态系统服务权衡与协同关系. 地理研究, **40**(1): 18-34. [Chen XM, Wang XF, Feng XM, et al. 2021. Ecosystem service trade-off and synergy on Qinghai-Tibet Plateau. *Geographical Research*, **40**(1): 18-34.]
- 戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等. 2015. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望. 地球科学进展, **30**(11): 1250-1259. [Dai EF, Wang XL, Zhu JJ, et al. 2015. Progress and perspective on ecosystem services trade-offs. *Advances in Earth Science*, **30**(11): 1250-1259.]
- 冯源,朱建华,曾立雄,等. 2021. 县域土地利用变化下生态系统服务价值损益预测——以重庆市巴南区为例. 生态学报, **41**(9): 1-13. [Feng Y, Zhu JH, Zeng LX, et al. 2021. Prediction of profit and loss of county scale ecosystem service values under landuse change: A case study of Banan District, Chongqing. *Acta Ecologica Sinica*, **41**(9): 1-13.]
- 耿甜伟,陈海,张行,等. 2020. 基于GWR的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析. 自然资源学报, **35**(7): 1714-1727. [Geng TW, Chen H, Zhang H, et al. 2020. Spatiotemporal evolution of land ecosystem service value and its influencing factors in Shaanxi province based on GWR. *Journal of Natural Resources*, **35**(7): 1714-1727.]
- 李慧蕾,彭建,胡熠娜,等. 2017. 基于生态系统服务簇的内蒙自治区生态功能分区. 应用生态学报, **28**(8): 2657-2666. [Li HL, Peng J, Hu YN, et al. 2017. Ecological function zoning in Inner Mongolia Autonomous Region based on ecosystem service bundles. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **28**(8): 2657-2666.]
- 李晶,李红艳,张良. 2016. 关中-天水经济区生态系统服务权衡与协同关系. 生态学报, **36**(10): 3053-3062. [Li J, Li HY, Zhang L. 2016. Ecosystem service trade-offs in the Guanzhong-Tianshui economic region of China. *Acta Ecologica Sinica*, **36**(10): 3053-3062.]
- 刘华妍,肖文发,李奇,等. 2021. 北京市生态系统服务时空变化与权衡分析. 生态学杂志, **40**(1): 209-219. [Liu HY, Xiao WQ, Li Q, et al. 2021. Spatiotemporal variations and trade-offs of ecosystem services in Beijing. *Chinese Journal of Ecology*, **40**(1): 209-219.]
- 马慧强,杨俊,李哲. 2021. 太原市城市复合生态系统调节服务时空格局演化及驱动机制研究. 地理科学, **41**(3): 463-472. [Ma HQ, Yang J, Li Z. 2021. Research on the evolution and driving mechanism of temporal and spatial patterns of regulation service of urban complex ecosystem in Taiyuan City. *Geographic Science*, **41**(3): 463-472.]
- 马泉来,高凤杰,张志民,等. 2016. 东北农林交错区土地利用景观及生态服务价值变化. 水土保持通报, **36**(1): 265-271+345. [Ma QL, Gao FJ, Zhang ZM, et al. 2016. Landscape and ecosystem service values of land-use in forest-agriculture region of Northeast China. *Soil and Water Conservation Bulletin*, **36**(1): 265-271+345.]
- 欧阳志云,王效科,苗鸿. 1999. 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, **19**(5): 19-25. [Ouyang ZY, Wang XK, Miao H. 1999. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica*, **19**(5): 19-25.]
- 欧阳志云. 2008. 全国生态功能区划. 中国科技教育, (5): 21-22. [Ouyang ZY. 2008. National ecological function zoning. *China Science and Technology Education*, (5): 21-22.]
- 祁宁,赵君,杨延征,等. 2020. 基于服务簇的东北地区生态系统服务权衡与协同. 生态学报, **40**(9): 2827-2837. [Qi N, Zhao J, Yang YZ, et al. 2020. Quantifying ecosystem service trade-offs and synergies in Northeast China based on ecosystem service bundles. *Acta Ecologica Sinica*, **40**(9): 2827-2837.]
- 王蓓,赵军,仲俊涛. 2019. 2005—2015年石羊河流域生态系统服务时空分异. 干旱区研究, **36**(2): 474-485. [Wang B, Zhao J, Zhong JT. 2019. Spatiotemporal differentiation of ecosystem services in the Shiyang River Basin from 2005 to 2015. *Arid Zone Research*, **36**(2): 474-485.]
- 王鹏涛,张立伟,李英杰,等. 2017. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. 地理学报, **72**(11): 2064-2078. [Wang PT, Zhang LW, Li YJ, et al. 2017. Spatiotemporal characteristics of the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in the Upper Reaches of Hanjiang River Basin. *Acta Geographica*, **72**(11): 2064-2078.]
- 王晓峰,马雪,冯晓明,等. 2019. 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, **39**(20): 7344-7355. [Wang XF, Ma X, Feng XM, et al. 2019. Spatial-temporal characteristics of trade-off and synergy of ecosystem services in key vulnerable ecological areas in China. *Acta Ecologica Sinica*, **39**(20): 7344-7355.]
- 王秀明,刘谓承,龙颖贤,等. 2020. 基于改进的InVEST模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素. 水土保持研究, **27**(5): 381-388. [Wang XM, Liu XC, Long YX, et al. 2020. Spatial-temporal changes and influencing factors of ecosystem services in Shaoguan City based on improved InVEST. *Research of Soil and Water Conservation*, **27**(5): 381-388.]
- 肖骁,穆治霖,赵雪雁,等. 2017. 基于RS/GIS的东北地区森林生态系统服务功能价值评估. 生态学杂志, **36**(11): 3298-3304. [Xiao X, Mu ZL, Zhao XY, et al. 2017. RS/GIS-based evaluation of forest ecosystem service value in Northeast China. *Chinese Journal of Ecology*, **36**(11): 3298-3304.]
- 阎水玉,王祥荣. 2002. 生态系统服务研究进展. 生态学杂志, **21**(5): 61-68. [Yan SY, Wang XR. 2002. Advances

- of research on ecosystem service. *Chinese Journal of Ecology*, **21**(5): 61–68.]
- 余玉洋, 李晶, 周自翔, 等. 2020. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达. *生态学报*, **40**(16): 5465–5477. [Yu YY, Li Jing, Zhou ZX, et al. 2020. Multi-scale representation of trade-offs and synergistic relationship among ecosystem services in Qinling-Daba Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, **40**(16): 5465–5477.]
- 张路, 肖焱, 郑华, 等. 2018. 2010年中国生态系统服务空间数据集. *中国科学数据*, **3**(4): 11–23. [Zhang L, Xiao Y, Zheng H, et al. 2010. A spatial dataset of ecosystem services in China. *China Scientific Data*, **3**(4): 11–23.]
- 张朔, 张百平, 姚永慧, 等. 2013. 山体效应对台湾常绿阔叶林分布上限的影响. *山地学报*, **31**(5): 534–541. [Zhang S, Zhang BP, Yao HY, et al. 2013. The effects of mass elevation effect on the distribution of evergreen broad-leaved forests of Taiwan. *Journal of Mountain Science*, **31**(5): 534–541.]
- 张元, 张福平, 丁家宝, 等. 2021. 降水和土地利用对黑河上游生态系统服务权衡、协同关系的影响. *山东农业科学*, **53**(6): 69–76. [Zhang Y, Zhang FP, Ding JB, et al. 2021. Effects of precipitation and land use on synergy and trade-off of ecosystem services of upper reaches of Heihe River. *Shandong Agricultural Sciences*, **53**(6): 69–76.]
- 张志强, 徐中民, 程国栋. 2001. 生态系统服务与自然资本价值评估. *生态学报*, **21**(11): 1918–1926. [Zhang ZQ, Xu ZM, Cheng GD. 2001. Valuation of ecosystem services and natural capital. *Acta Ecologica Sinica*, **21**(11): 1918–1926.]
- Gong J, Liu DQ, Zhang JX, et al. 2019. Tradeoffs/synergies of multiple ecosystem services based on land use simulation in a mountain-basin area, western China. *Ecological Indicators*, **99**: 283–293.
- Kremen C. 2005. Managing ecosystem services: What do we need to know about their ecology? *Ecology Letters*, **8**: 468–479.
- Lafortezza R, Chen J. 2016. The provision of ecosystem services in response to global change: Evidences and applications. *Environmental Research*, **147**: 576–579.
- Qiao X, Gu Y, Zou C, et al. 2019. Temporal variation and spatial scale dependency of the trade-offs and synergies among multiple ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China. *Science of the Total Environment*, **651**: 218–229.
- Schroter D, Cramer W, Leemans R, et al. 2005. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, **310**: 1333–1337.
- Shen J, Li S, Liang Z, et al. 2020. Exploring the heterogeneity and nonlinearity of trade-offs and synergies among ecosystem services bundles in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Ecosystem Services*, **43**: 101103.
- Wu YF, Zhang X, Li C, et al. 2021. Ecosystem service trade-offs and synergies under influence of climate and land cover change in an afforested semiarid basin, China. *Ecological Engineering*, **159**: 106083.

作者简介 齐麟,男,1982年生,博士,副教授,研究方向为森林群落、景观恢复理论与技术。E-mail: qilin@iae.ac.cn
责任编辑 张敏

齐麟,张月,许东,朱琪,周旺明,周莉,王庆伟,于大炮. 2021. 东北森林屏障带生态系统服务权衡与协同关系. *生态学杂志*, **40**(11): 3401–3411.

Qi L, Zhang Y, Xu D, Zhu Q, Zhou WM, Zhou L, Wang QW, Yu DP. 2021. Trade-offs and synergies of ecosystem services in forest barrier belt of Northeast China. *Chinese Journal of Ecology*, **40**(11): 3401–3411.