

DOI: 10.5846/stxb202209282758

张锦琳, 游巍斌, 蔡新瑜, 何东进. 武夷山小流域生态系统服务(簇)权衡/协同及对地形起伏度的响应. 生态学报, 2023, 43(12): 4892-4903.

Zhang J L, You W B, Cai X Y, He D J. Trade-offs and synergies among ecosystem service Bundles in response to relief degree of land surface in a small watershed of Mount Wuyi. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 4892-4903.

武夷山小流域生态系统服务(簇)权衡/协同及对地形起伏度的响应

张锦琳^{1,2}, 游巍斌^{1,2,*}, 蔡新瑜^{1,2}, 何东进^{1,2,3}

1 福建农林大学林学院, 福州 350002

2 福建省南方森林资源与环境工程技术研究中心, 福州 350002

3 福建农业职业技术学院, 福州 350119

摘要:地形起伏度(RDLS)通过影响生态系统的格局、过程和功能而作用于生态系统服务,揭示二者间的作用关系对提升生态系统服务认知具有重要意义。综合运用地形起伏度模型、InVEST模型、K-mean聚类分析、生态系统服务变化指数(ESCI)及权衡协同度指数(ESTD)等方法,探究2009—2016年武夷山国家公园武夷山九曲溪流域主要生态系统服务、生态系统服务簇及其权衡/协同关系对地形起伏度的响应规律。结果表明:①2009—2016年生物多样性维持、固碳、水源涵养和水质净化服务及其增益面积均随着RDLS等级的升高而增加。②生态脆弱型服务簇聚集在RDLS较低地方,生态调节型服务簇则聚集在RDLS较高区域,而生态保育型服务簇无明显分布规律。2009—2016年,RDLS较低和较高区域分别有19%、18%的生态保育型服务簇转变为生态脆弱型服务簇和生态调节型服务簇。③生态系统服务权衡/协同关系对RDLS的响应模式有两种模式,即以二级或四级RDLS为峰值的倒U型曲线(固碳与生物多样性维持的权衡关系,固碳与水源涵养的协同关系)和以二级、四级RDLS为拐点的N型曲线(水质净化与固碳、水源涵养的协同关系,水质净化与生物多样性维持的权衡关系)。

关键词:生态系统服务簇;生态系统服务变化指数;InVEST模型;权衡与协同;九曲溪流域

Trade-offs and synergies among ecosystem service Bundles in response to relief degree of land surface in a small watershed of Mount Wuyi

ZHANG Jinlin^{1,2}, YOU Weibin^{1,2,*}, CAI Xinyu^{1,2}, HE Dongjin^{1,2,3}

1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Fujian Southern Forest Resources and Environmental Engineering Technology Center, Fuzhou 350002, China

3 Fujian Vocational College of Agriculture, Fuzhou 350119, China

Abstract: The Relief Degree of Land Surface (RDLS) represents the undulation of a region's terrain and is determined by the elevation change relative to the flat land. RDLS is a macroscopic indicator of topographic features that are closely linked to local climate, vegetation, biodiversity, land use/cover, and human activities. These factors significantly influence ecosystem patterns, processes, and functions, which are fundamental to the provision of ecosystem services. Therefore, revealing RDLS's effects has great implications for improving ecosystem services. Previous studies have examined the distribution pattern, value, and temporal and spatial evolution of ecosystem services based on regional topographic gradients. However, the response process of ecosystem services and their trade-off/synergistic relationship with RDLS in the watershed remains unclear. To address this gap, we conducted a study focused on the Jiuquxi watershed, which is the core watershed in Wuyishan National Park. And we explored the response of key ecosystem services, ecosystem service bundles

基金项目: 福建农林大学林学学科创新团队项目经费(72202200205)

收稿日期: 2022-09-28; 采用日期: 2023-02-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wbyou@fafu.edu.cn

and their trade-off/synergistic relationships to the RDLS in Jiuquxi watershed from 2009 to 2016, using relief degree of land surface model, InVEST model, K-mean clustering analysis, ecological services change index (ESCI), and ecosystem services trade-off degree (ESTD). The results showed that (1) the ecosystem services including biodiversity, carbon sequestration, water yield and water purification increased with the increase of RDLS during 2009—2016, as did their gain area. (2) In the Jiuquxi watershed, ecosystem services can be categorized into three types of bundles: eco-fragile bundles, where all four services are low; eco-regulating bundles, where all four services are high with carbon sequestration being dominant; and eco-conservation bundles, where all four services are high with biodiversity being dominant. The eco-fragile bundles clustered in the regions with low RDLS value and eco-regulating bundles in the area with high RDLS value. While the eco-conservation bundles had no typically spatial pattern for ESCI. From 2009 to 2016, 19% of the areas in eco-conservation bundles in low RDLS region were transformed into eco-fragile bundles and eco-conservation bundles, and 18% in high RDLS region. (3) The pattern of ecosystem service trade-offs/synergies in response to RDLS was identified: an inverted U-shape curve with secondary or quaternary RDLS at its peak (e.g., the trade-off between carbon sequestration and biodiversity, and the synergistic between carbon sequestration and water yield) and the N-type curve with secondary and quaternary RDLS as the inflection point (e.g., synergistic between water purification, carbon sequestration and water yield, and the trade-off between water purification and biodiversity).

Key Words: ecosystem service bundles; ecological services change index; InVEST model; trade-offs and synergies; Jiuquxi watershed

生态系统服务是人类从生态系统中获得的效益^[1],生态系统服务的定量评估不仅促进了解生态系统现状及其发展变化,还有利于生态环境资源的合理优化和配置,对区域可持续发展有重要意义^[2-3]。生态系统服务簇(ecosystem service bundles)是指一系列在空间和时间上重复出现的生态系统服务^[4]。目前识别生态系统服务簇的常用方法包括主成分分析^[5]、自组织特征映射网络(SOFM)^[6]和 K-means 聚类分析法^[7]等方法。生态系统服务簇的定量分析可以对区域内多重生态系统服务的组合规律进行研究,明确生态系统服务在空间上的集聚特征^[8],识别出区域内的主导生态系统服务^[9]。通过生态系统服务及其簇的动态变化研究能够反映出生态系统服务变化的潜在驱动因素^[10],可以作为生态系统结构和功能关键转变的早期预警^[11]。当多重生态系统服务对同一种驱动因素作出反应,或者一种服务的变化影响到另一种服务时,生态系统服务之间就会产生此消彼长的权衡关系和同增减的协同关系^[12]。正确认识生态系统服务之间的权衡与协同关系,可以使生态系统提供的整体服务最优化,实现区域经济发展与生态环境保护的双赢^[13]。

地形是流域中最基本的自然地理要素,制约着地表物质与能量的再分配^[14]。地形起伏度(Relief Degree of Land Surface, RDLS)是指一定区域内海拔变化与平地比例表征的地形起伏度情况^[15-16],是确定地形地貌条件的重要因子^[17]。关于 RDLS 的影响研究目前已被应用在一些自然灾害发生评估和社会经济发展要素评价等领域。例如,伍剑波分析了滑坡灾害与 RDLS 之间的相关性,认为 RDLS 低值区更利于滑坡灾害发育^[18];田湘云分析了 RDLS 对石漠化地区的水土流失分布规律的影响,认为 RDLS 是石漠化地区水土流失的主导因素之一^[19]。张静静基于栅格单元对 RDLS、人口和经济密度空间分布规律进行分析,表明人口分布和经济发展多集聚在 RDLS 低值区^[20];Yang 对中国不同城市的街道网络复杂性度量信息进行统计分析发现 RDLS 越高城市街道的网络路线就越曲折^[21]。

小流域是自然界中一个具有明显物理边界且综合性强的独特地理单元^[22],流域生态过程和格局变化受地形影响。地形制约下的自然和人文过程形成的不同地形特征区域下的土地利用/覆被类型格局差异对流域生态系统服务供给同样产生影响^[23],已有研究表明土地利用/覆被的变化会对水循环、能量交换、土壤侵蚀或生物地球化学循环等产生改变,从而造成生态系统服务的变化^[24]。已有部分学者开始从区域的地形梯度角度探究生态系统服务的价值、分布格局和时空演变^[25-27]。然而,流域内生态系统服务及其权衡/协同关系对 RDLS 的响应过程尚不清楚。

因此,本文选择武夷山国家公园中的核心流域——九曲溪流域为研究对象,探讨如下科学问题:不同类型生态系统服务及服务簇时空格局对 RDLS 的响应有何规律?生态系统服务权衡/协调关系随着 RDLS 如何变化?通过选取研究区内的 4 种关键生态系统服务并识别其主要的 3 类生态系统服务簇,分析不同时期生态系统服务和服务簇的时空演变以及各生态系统服务之间的权衡/协同关系对 RDLS 的响应,以期为地形特征与生态系统服务关系研究提供新的视角,亦为研究区流域生态系统服务维持和生态系统管理提供参考。

1 研究区概况

武夷山市位于福建省西北部地区,1999 年 12 月被联合国教科文组织批准列入《世界遗产名录》,是全球 13 处、全国 4 处世界文化与自然“双遗产”地之一,这里也是我国首批国家公园、世界生物多样性重要保护区之一的武夷山国家公园的所在地。武夷山九曲溪流域(117°47' E, 27°41' N)位于武夷山市西南部,总面积约为 526 km²,属于典型的丹霞地貌,是武夷山国家公园的核心流域,是武夷山水的精华,被誉为“武夷山之魂”(图 1)。九曲溪流域内地势西北高东南低,地处中亚热带季风湿润气候区,水资源丰富,水质全优,主要土地利用/覆被类型为林地、茶园和耕地(图 1);流域内森林资源丰富,主要的森林类型包括马尾松林、阔叶林、杉木林和毛竹林等,具有良好的生态环境和生态资源。因而固碳、水源涵养、水质净化等调节服务与生物多样性维持是九曲溪流域的重要生态系统服务之一。

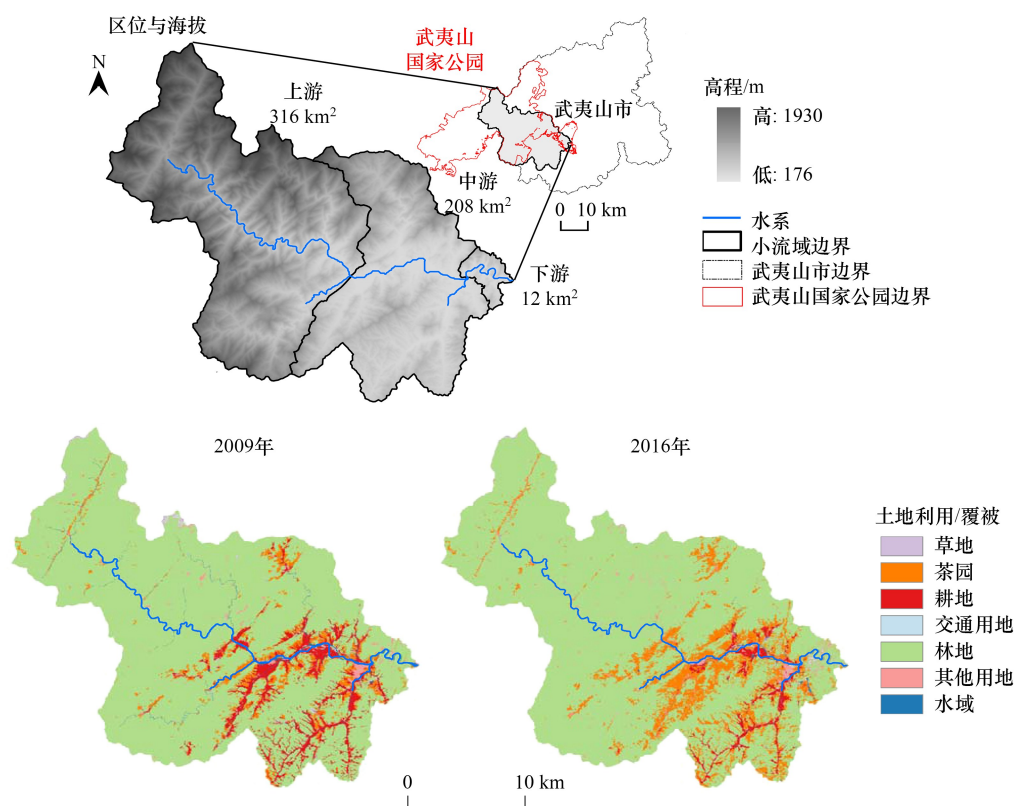


图 1 2009—2016 年九曲溪流域区位、海拔与土地利用/覆被情况

Fig.1 The location, DEM and land use/cover of Jiuxuqi watershed from 2009 to 2016

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究的数据主要包括:(1)采用空间分辨率为 25 m 的武夷山市数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),数据来源于福建省武夷山景区管委会,利用 ArcGIS 的裁剪工具得到九曲溪流域范围的 DEM。(2)九

曲溪流域 2009 年与 2016 年的土地利用/覆被(Land Use and Land Cover, LULC)数据来自于福建省地质遥感与地理信息中心,结合实地情况将其分为草地、林地、耕地、茶园、水域、交通过用地和其他用地。空间分辨率为 25 m,投影坐标系为 UTMWGS 1985。(3)水质检测数据来自于武夷山世界遗产检测中心水质数据。(4)气象数据下载于中国气象网(<http://data.cma.cn/>)。(5)土壤数据来自中国 1:100 万土壤数据库。(6)净初级生产力(Net Primary Production, NPP)数据集来源于全国生态状况遥感调查和评估成果,利用 ArcGIS 的裁剪工具与栅格计算器工具得到九曲溪流域 NPP 多年平均值图层。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据来源于地理空间数据云的 TM 影像(分辨率为 30 m×30 m),经过大气、几何校正和辐射校正处理。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务评估

使用 InVEST 模型定量评估固碳、水源涵养、水质净化和生物多样性维持服务^[28]。利用自然断点法分别将 2009 年、2016 年九曲溪流域各类生态系统服务从低到高分 5 级。本研究中的所有计算均采用 25 m×25 m 正方形网格单元。

①借助 InVEST 模型中的固碳模型进行固碳服务评估。模型中所需的地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度和死有机物碳密度数据主要通过查询文献得来^[29-31],并在计算林地的碳密度时将林分类型与林龄构成考虑在内。

②利用 InVEST 模型中的产水量模块对水源涵养服务进行评估。具体算法如下:

$$Y_{xj} = \left[1 - \frac{AET_{xj}}{P_x} \right] \times P_x \quad (1)$$

式中, Y_{xj} 为栅格单元 x 中用地类型 j 的年产水量(mm), AET_{xj} 为栅格单元 x 中用地类型 j 的实际蒸散量(mm), P_x 为栅格单元的降雨量(mm)。

③利用 InVEST 模型中的水质净化模块得到水质净化服务,此模块是通过产水量模块生成子流域等级的总径流量及平均径流量,利用水体中的总氮或总磷的含量来表征水质状况,在本研究中视氮、磷污染物输出各占总污染负荷值的 50%。计算公式如下:

$$\begin{cases} WP_x = 1/ALV_x \\ ALV_x = HSS_x \times pol_x \end{cases} \quad (2)$$

式中, WP_x 代表栅格 x 的水质净化能力, ALV_x 代表栅格 x 的调节负荷值, HSS_x 代表栅格 x 的水文敏感度, pol_x 代表栅格 x 的输出系数。

④借助 InVEST 模型中的生境质量模块对生物多样性维持服务进行评估^[32-33],模型中胁迫因子的影响距离、权重和敏感度等参数根据九曲溪流域环境特征以及参考相关文献^[34-36]所设置。计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right) \quad (3)$$

式中, Q_{xj} 为生境类型 j 中栅格 x 的生境质量,数值范围 0—1,越接近 1 生物多样性维持越高; H_j 为生境类型 j 的生境适宜度; D_{xj} 为生境类型 j 中栅格 x 的生境退化度; k 为半饱和常数,本文取 0.45; z 为模型默认参数的归一化常量。

2.2.2 流域地形与起伏度划分

(1) 九曲溪小流域的划分

运用 ArcGIS 中的水文分析模块对九曲溪流域边界进行提取,并结合九曲溪流域的 DEM 提取地表水径流模型的水流方向、计算汇流量积累量、生产河流网络,将研究区划分为上游(316 km²)、中游(208 km²)和下游(12 km²)3 个子流域(图 1)。

(2) 地形起伏度的划分

借助封志明等^[37]提出的 RDLS 计算方法,利用 ArcGIS 和 Python 软件开展九曲河流域 RDLS 评价分析,并采用 ArcGIS 软件中的自然断点法将其从低到高分为一至五级(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ分别代表一、二、三、四、五级 RDLS)。RDLS 是根据平均海拔、特定窗口大小内的相对高差及平地面积的占比来进行计算,其计算公式为:

$$RDLS = ALT/1000 + \{ [\text{Max}(H) - \text{Min}(H)] \times [1 - P(A)/A] \} / 500 \quad (4)$$

式中,RDLS 为地形起伏度;ALT 为以某一栅格单元为中心一定区域内的平均海拔(m);Max(*H*)和 Min(*H*)分别为该区域内最高海拔和最低海拔(m);*P*(*A*)为该区域内平地面积(m²),即为最佳窗口下相对高差<30 m 的区域面积;*A* 为区域总面积(km²)。

RDLS 的高低受分析窗口的影响,分析窗口增大能够包含更为完整的山体,RDLS 也随之增大,但在增大的同时会使小范围内的起伏特征变得不易识别^[37]。均值变点法是目前最常用于计算 RDLS 最佳统计单元的方法,对恰有一个变点的检验最有效^[38],本文运用均值变点法,经过多次计算比较最终将最佳窗口大小确定为 350 m×350 m(即为栅格分辨率的 14 倍)。

2.2.3 生态系统服务变化指数

运用生态系统服务变化指数(Ecological Services Change Index,ESCI)来刻画各类生态系统服务的时空变化^[39]。ESCI 能够表征各项生态系统服务的变化方向。当 ESCI<0 时表明生态服务有所减损,当 ESCI>0 时表明生态系统服务有所增益,当 ESCI=0 时则表明生态系统服务没有变化。其计算公式为:

$$ESCI_x = \frac{ES_{CUR_x} - ES_{HIS_x}}{ES_{HIS_x}} \quad (5)$$

式中,ESCI_{*x*}代表单项生态系统服务变化指数;*ES*_{*CUR_x*}代表最后状态下的生态系统服务;*ES*_{*HIS_x*}代表初始状态下的生态系统服务;ESCI_{*x*}的绝对值表示单项生态系统服务变化的强度。在本研究中,将 2009 年定为初始状态,2016 年为最终状态。

2.2.4 生态系统服务簇的识别

聚类分析能够衡量不同生态系统服务之间的相似性来进行生态系统服务簇的划分^[40]。K-means 算法是一种非监督的聚类方法,具有聚类结构明确和聚类过程简单等优点^[41]。在前文 4 类生态系统服务评估结果的基础上,采用 R 4.1.1 对研究区生态系统服务进行 K-means 聚类,并由手肘法确定最优聚类数为 3 类^[42]。在生态系统服务簇识别的基础上,运用 Fragstats 4.2 软件,分析各生态系统服务簇的空间格局变化。

2.2.5 生态系统服务权衡与协同分析

采用 Spearman 相关分析评价研究区 4 种生态系统服务之间的相关关系。当相关系数 *r*<0 时,生态系统服务之间的关系为权衡,*r* 的绝对值越大,权衡关系越强;反之则为协同关系^[43]。

在不同空间尺度下生态系统服务的权衡与协同关系有所不同^[44],为了进一步探究九曲河流域不同空间尺度下各类生态系统服务间的相互关系,进一步采用了生态系统服务权衡与协同度(Ecosystem Services Trade-off Degree,ESTD)^[45],分别对 5 级 RDLS 进行权衡与协同分析。具体计算公式如下:

$$ESTD_{ij} = \frac{ESC_{i2} - ESC_{i1}}{ESC_{j2} - ESC_{j1}} \quad (6)$$

式中,ESTD_{*ij*}表示第 *i* 种与 *j* 种生态系统服务间权衡与协同度;ESC_{*i1*}为 *t*₁时刻第 *i* 种生态系统服务值;ESC_{*i2*}为 *t*₂时刻第 *i* 种生态系统服务值;ESC_{*j1*}、ESC_{*j2*}分别为 *t*₁、*t*₂时刻第 *j* 种生态系统服务值;ESTD_{*ij*}为负值时,表示第 *i* 与 *j* 种生态系统服务为权衡关系;反之则为协同关系;ESTD_{*ij*}的绝对值表示相较于第 *j* 种生态系统服务的变化,第 *i* 种生态系统服务变化的程度。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务演变及其对 RDLS 的响应

3.1.1 生态系统服务的时空演变

2009 年和 2016 年武夷山九曲河流域 4 类生态系统服务的评估结果如图 2 所示。2009—2016 年,生物多

样性维持服务整体均较高,低值区主要分布在流域中下游。固碳服务的高值区主要分布在流域上游,低值区分布在流域中下游。水源涵养服务变化明显,表现为由南向北递增的趋势;2009 年高值区主要分布在上游流域南部地区,低值区分布在流域下游;2016 年水源涵养高值区向北部扩张。2009 年水质净化服务呈现四周高、中部低的特征;2016 年流域上游低值区范围减少,有由上游向中游转移的趋势,高值区基本保持不变。

从 2009—2016 年的损益变化(ESCI)来看(图 2),生物多样性维持减损集中于流域中游,上游和下游呈增益状态;固碳整体呈增益状态,流域中游没有发生明显变化(ESCI 接近于 0);水源涵养由西北向东南方向从增益状态逐渐过渡为减损;水质净化增益集中于流域上游,中游东南部地区和下游减损明显。

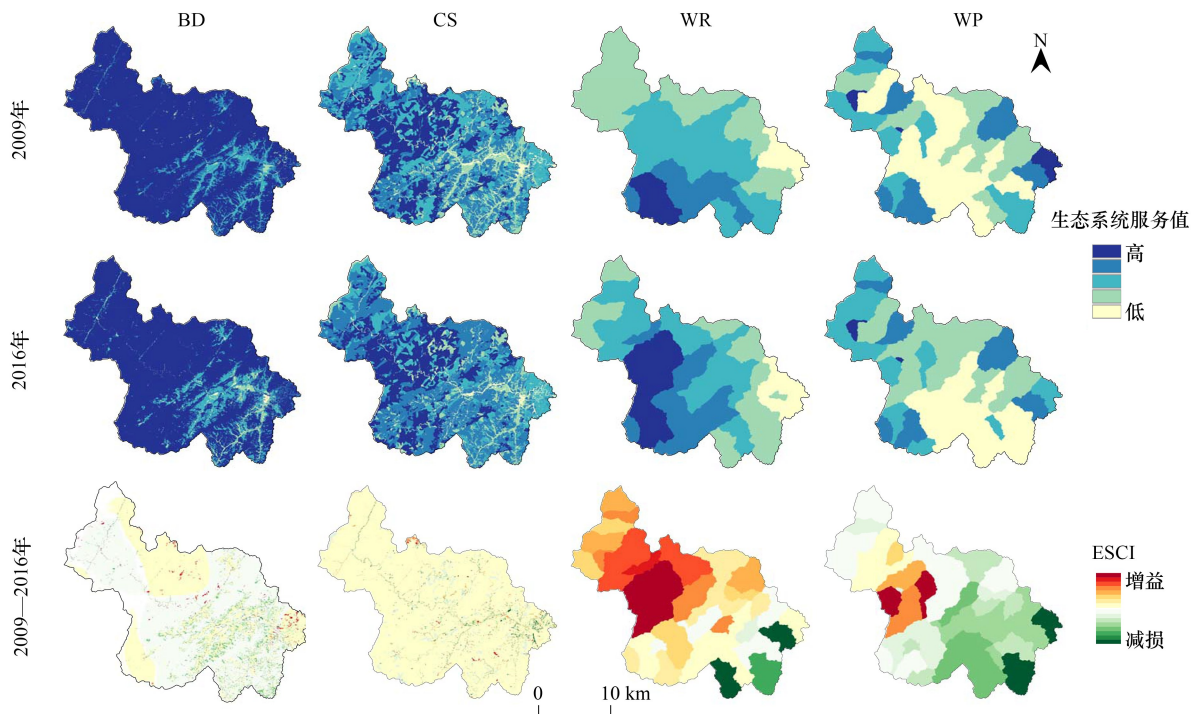


图 2 2009—2016 年九曲溪流域生态系统服务及 ESCI 空间格局

Fig.2 Spatial pattern of ecosystem services and ESCI in Jiuquxi watershed from 2009 to 2016

BD:生物多样性维持;CS:固碳;WR:水源涵养;WP:水质净化

3.1.2 生态系统服务对 RDLS 的响应

2009—2016 年各级 RDLS 下各个服务的增益与减损面积占比见图 3。总体而言,4 种生态服务的增益面积占比随着 RDLS 的增加而上升。生物多样性维持在一级至三级 RDLS 上的减损面积(70%—83%)大于增益面积(15%—35%),在四级和五级 RDLS 区域分别有 16%、30%的面积无增损变化;固碳在各级 RDLS 上增益面积(77%—96%)远大于减损面积(3%—10%);水源涵养在一级至五级 RDLS 区域增益面积大幅增加(由 46%增加至 98%),减损面积急剧缩小(由 54%减少至 0%);水质净化服务在一级起伏度区域以减损为主导(99%),二级至四级起伏度区域减损面积占比逐步减小(由 95%减少至 52%),增益面积占比逐步增加(由 5%增加至 47%),但在五级 RDLS 区域减损面积扩大(65%),增益面积缩小(32%)。

3.2 生态系统服务簇及其对 RDLS 的响应

3.2.1 生态系统服务簇的识别与时空变化

2009 年和 2016 年武夷山九曲溪流域生态系统服务簇空间分布特征见图 4,研究区生态系统服务簇可分为 3 大类型:簇内 4 种服务均低的生态脆弱型(ESB1);簇内 4 种服务均高且固碳占优势地位的生态调节型(ESB2);簇内 4 种服务均高且生物多样性维持占主导地位的生态保育型(ESB3)(图 4)。2009—2016 年,ESB1 的空间分布格局由中部水系向两侧蔓延,面积占比由 9%扩张为 14%;ESB2 集中分布在研究区西部和

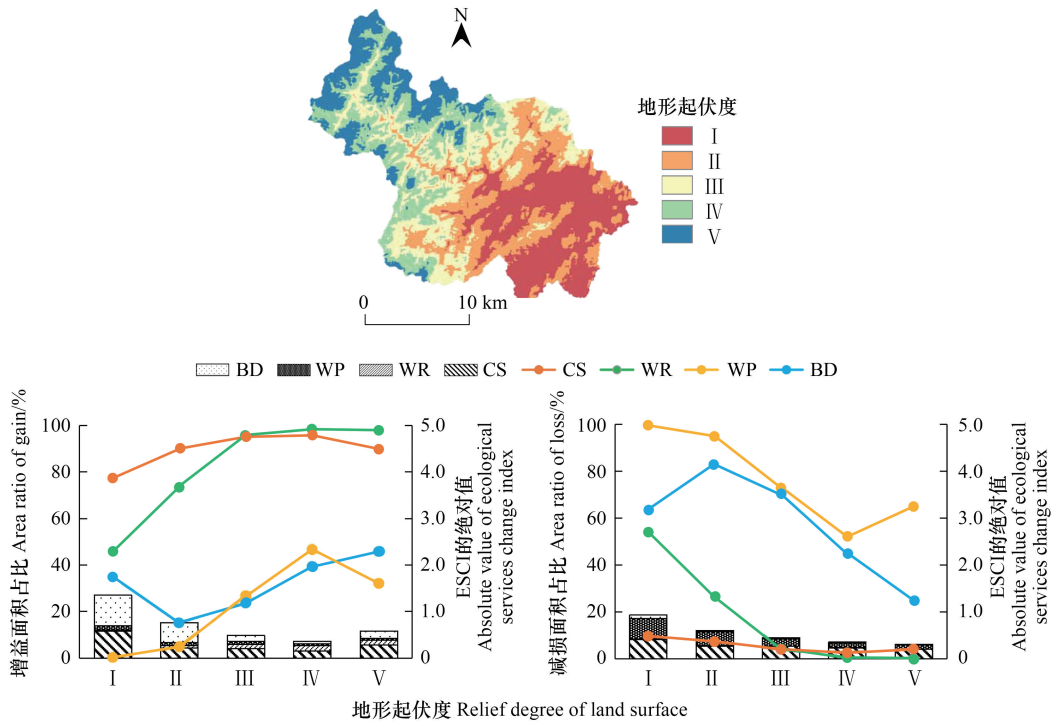


图3 九曲流域地形起伏度和各等级上 ESCI 面积占比统计

Fig.3 Topographical level (RDLS) of Jiuquxi watershed and ESCI percentage of area in each level

I : 一级; II : 二级; III : 三级; IV : 四级; V : 五级; 折线图代表各级地形起伏度等级上增益或减损的面积占比, 柱状图代表 ESCI 的绝对值

南部地区, 相比于 2009 年其面积占比由 37% 增加至 45%; ESB3 主要分布在东部和西北部, 2009—2016 年, ESB3 面积占比由 54% 缩小至 42%, 其斑块数量由 1471 个增加至 2012 个, 斑块密度由 2.77 (个/100 hm^2) 上升至 3.78 (个/100 hm^2)。

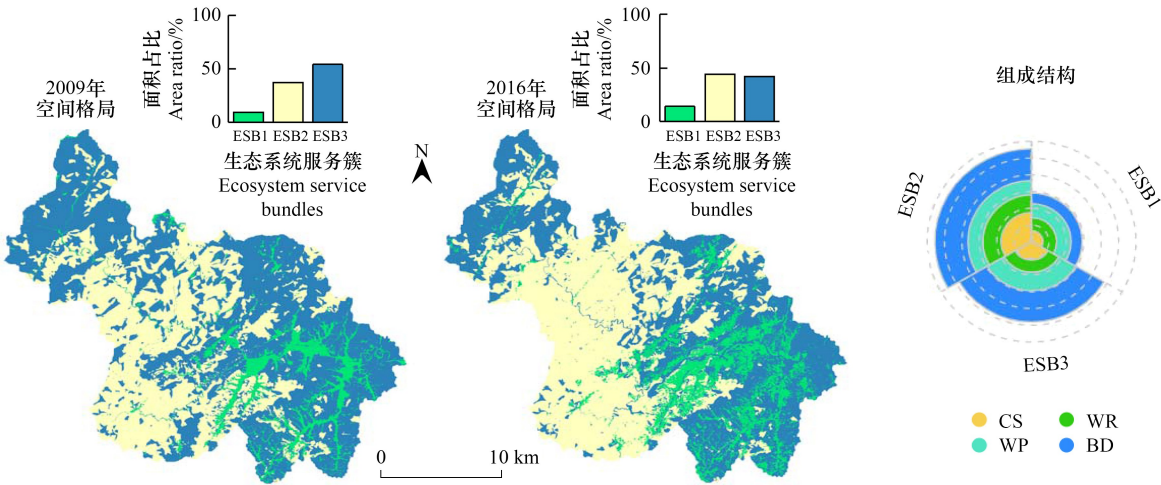


图4 2009—2016 年九曲流域生态系统服务簇

Fig.4 Ecosystem service bundles in Jiuquxi watershed from 2009 to 2016

ESB1: 生态脆弱型服务簇; ESB2: 生态调节型服务簇; ESB3: 生态保育型服务簇; 由于水质净化服务的比值很小, 为提高显示效果, 对其进行放大十倍处理

3.2.2 生态系统服务簇对 RDLS 的响应

2009 年和 2016 年各级 RDLS 下各个服务簇的面积占比及变化见图 5。2009 年,在一级、二级和五级 RDLS 区域,生态保育型服务簇的面积占比最大(59%、58%、68%);在三级和四级 RDLS 区域,生态调节型服务的面积占比最大(56%、54%)。2016 年,在一级、二级 RDLS 区域,生态脆弱型服务簇面积占比分别由 30%、4%增长为 43%、11%,但还是以生态保育型面积占比最大(52%);三级至五级 RDLS 区域,最大面积占比的服务簇类型不变。从两期的整体面积变化来看,RDLS 较低区域的生态保育型服务簇转变为生态脆弱型(19%),较高区域的转变为生态调节型(18%)。

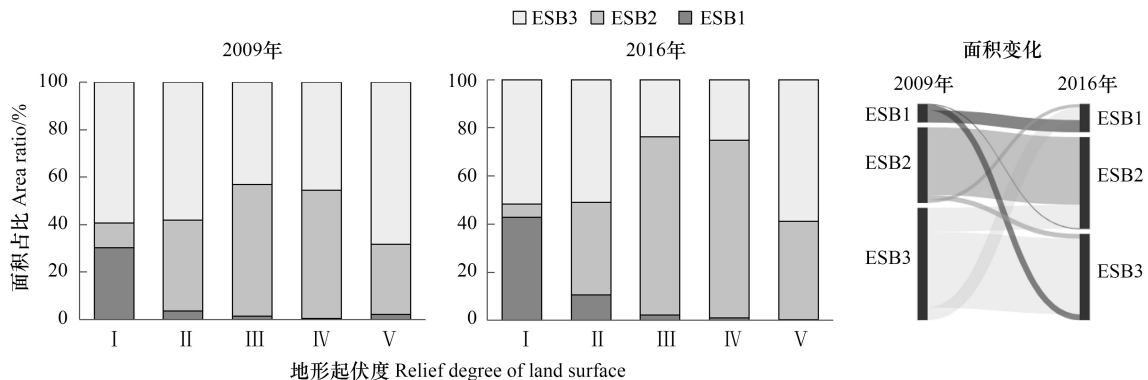


图 5 2009—2016 年九曲溪流域生态系统服务簇面积占比及其变化

Fig.5 Ecosystem service bundles area and its changes in the Jiuqixi watershed from 2009 to 2016

图中不同颜色的线条代表 2009—2016 年间某一类型生态系统服务簇转为其他类型的变化轨迹,线条的宽度与遵循这一变化轨迹的生态系统服务簇面积占比成正比

3.3 生态系统服务权衡/协同关系与 RDLS 的响应

从全域尺度来看,不同生态系统服务之间的相关系数均不大于 0.6。2009 年水质净化与固碳、水源涵养呈权衡关系,其他服务之间均为协同关系(图 6)。2016 年所有服务之间均呈协同关系,并且协同关系进一步增强。

基于 ESTD 计算所得出的不同等级 RDLS 下生态系统服务权衡与协同关系的面积占比见图 7。在一级 RDLS 区域,固碳与水质净化的权衡面积占比远大于协同(89%),其余生态系统服务之间的权衡与协同关系面积占比差距不大(权衡面积占比集中在 36%—53%之间)。随着 RDLS 的升高,生物多样性维持与水源涵养、固碳的权衡面积占比呈先增长再下降趋势,固碳与水源涵养、水质净化则相反;生物多样性维持与水质净化的权衡面积占比呈先下降后上升再下降趋势,水源涵养与水质净化则相反。

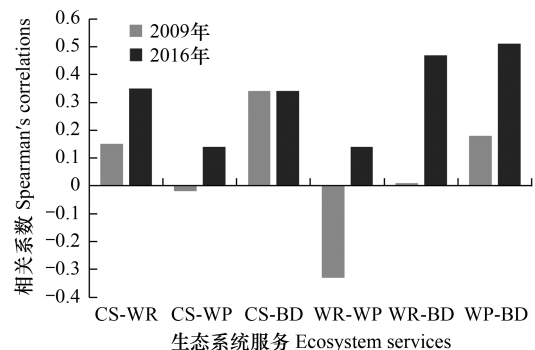


图 6 2009—2016 年九曲溪流域生态系统服务 Spearman 相关系数

Fig.6 Spearman correlation coefficient of ecosystems services in the Jiuqixi watershed from 2009 to 2016

4 讨论

4.1 生态系统服务与土地利用/覆被变化

2009—2016 年武夷山九曲溪流域中下游地区的茶园面积迅速扩张(图 8),大面积的耕地与林地转变为茶园,造成植被覆盖度下降和人为干扰增强,从而导致了生物多样性维持和固碳服务呈减损状态,促使该区域

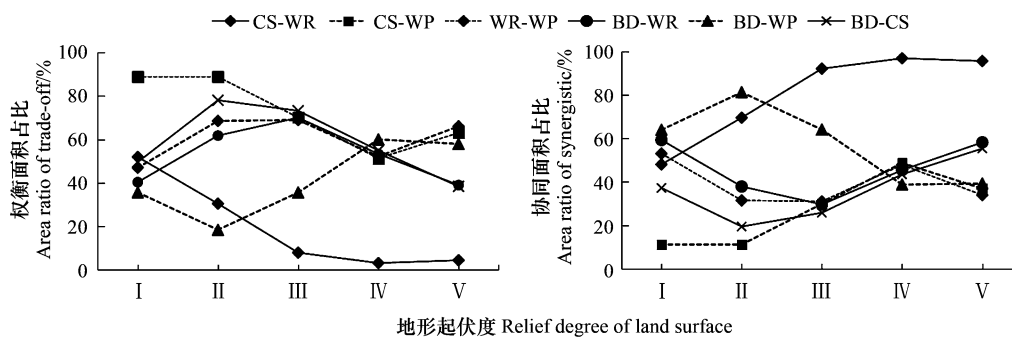


图7 各地形起伏度等级下生态系统服务权衡和协同关系面积占比

Fig.7 The percentage of trade-off and synergistic relationship area under each level of topographic

大面积的生态保育型和生态调节型服务簇转变为生态脆弱型服务簇;这与曾志伟等^[46]、武燕等^[47]的研究结果一致。对此区域建议限制茶园的扩张,在不危害生态本底的基础上适度开发,减少对优质林草地的占用,必要时需要对周围被侵占的自然用地采取退耕还林措施,以降低生态权衡风险。流域上游主要的土地利用/覆被类型为林地(图8),在研究期间未发生明显的面积变化;森林良好的固碳、水源涵养与水质净化功能随着林龄的增长不断加强^[48],特别是大面积的竹林因竹子生长速率快而具有较高的固碳速率^[49—51];因而该区域的3种调节服务都为增益状态,从而促使大面积的生态保育型服务簇转变为生态调节型服务簇(图8);张琨等^[52]、Gao等^[53]的研究也同样证实了植被覆盖度的增加能够促进碳固定服务。基于此区域较好的生境质量特征,建议实施生态刚性保护,注重已有的森林资源,严格限制不合理的开发与建设活动,减少人类活动的干扰。

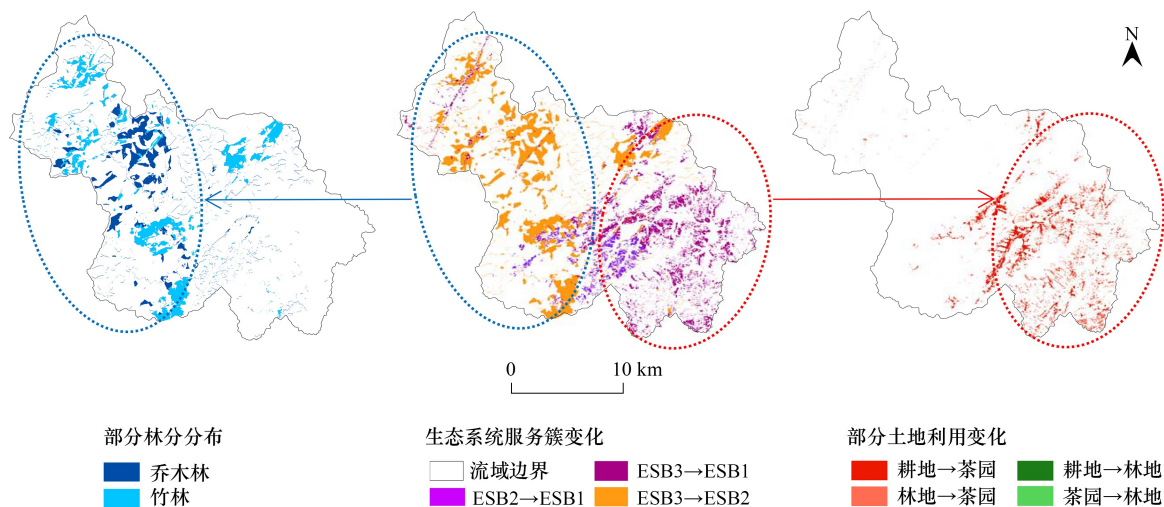


图8 2009—2016年九曲溪流域生态系统服务簇变化

Fig.8 Ecosystem service bundles change in Jiuquxi watershed from 2009 to 2016

4.2 生态系统服务对 RDLS 的响应模式

本研究发现研究区生态系统服务对 RDLS 有两种响应模式,即倒 U 型和 N 型曲线变化。从 4 种生态系统服务的 ESCI 来看,随着 RDLS 的增加,生物多样性维持的减损面积和固碳、水源涵养、水质净化的增益面积占比分别以二级、四级 RDLS 为峰值的倒 U 型变化曲线。从生态系统服务的权衡/协同关系来看,随着 RDLS 的增加,固碳与生物多样性维持的权衡面积占比、与水源涵养的协同面积占比分别呈以二级、四级 RDLS 为峰值的倒 U 型变化曲线;水质净化与固碳、水源涵养的协同面积占比、与生物多样性维持的权衡面积占比呈以二

级、四级 RDLS 为拐点的 N 型变化曲线。综合来看,四级 RDLS 是影响生态系统服务响应的关键,一至四级 RDLS 的土地类型由耕地或茶园等受人类干扰较强的土地利用/覆被类型逐渐过渡为林地,到五级 RDLS 又有少量茶园分布,这意味着四级 RDLS 是受人类活动干扰最小、生态环境最好的区域。四级 RDLS 区域有着较差的农耕适宜性和可达性,但其适中的地形位更有利于自然植被的生长和发育^[54],高度的森林植被覆盖率使其具有良好的生态调节能力。

生态系统服务对 RDLS 的响应模式是自然(如地形、气候、土壤和植被等)、社会经济(如土地利用结构、城市建设和人类活动等)和生态政策等多种因素综合影响的结果^[27],而 RDLS 作为区域地形特征的宏观指标,又对流域区域局部气候、植被类型与分布、生物多样性、土地利用/覆被以及人类活动存在潜在的影响。特别是 RDLS 是制约土地利用/覆被分布格局的因素之一^[55],而气候变化对生态系统服务的影响从某种程度来说是基于土地利用类型的。更有研究表明地形或气候条件通常比土壤理化因子更主导森林植被特征的变化^[56-57],也就是说在林地这一土地利用类型上生态系统服务会因 RDLS 的差异而不同。为进一步探究 RDLS 与土地利用变化对研究区生态系统服务演变的影响,采用 R 语言 rdacca.hp 包对其进行评估^[58](图 9)。RDLS 和土地利用变化共同解释了生态系统服务演变的 36.9%(校正 $R^2 = 36.9$),二者的共同效应为 7.43%,表明二者均是影响生态系统服务演变的重要因素并且二者之间存在一定的共线性;RDLS 的单独效应(31.83%)远远高于土地利用变化(5.11%),表明在本研究区地形起伏度对生态系统服务演变的影响大于土地利用变化。

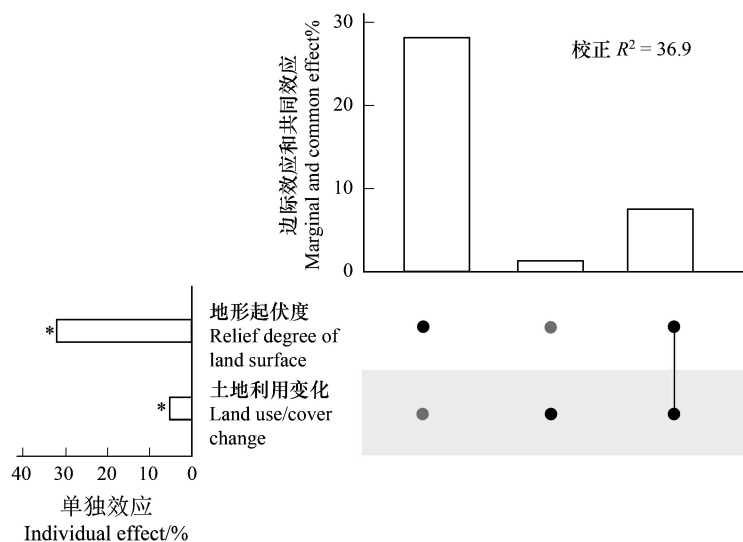


图 9 地形起伏度与土地利用变化对生态系统服务演变的相对重要

Fig.9 The relative importance of relief degree of land surface and land use change on the evolution of ecosystem services

右侧点阵图中孤立黑点表示地形起伏度和土地利用变化的边际效应,两点间连线表示二者的共同效应;左侧柱形图为地形起伏度和土地利用变化的单独效应;*, $P < 0.001$

未来可尝试通过定量刻画 RDLS 与生态系统服务之间的权衡/协同之间的关系,进而拓展 RDLS 指标的跨学科应用领域。值得注意的是,目前对于生态系统服务关系分析,多采用定量指标法或模型法来定量评估生态系统服务,并以此为基础探究权衡/协同关系^[59]。然而,无论采用哪种定量分析方法都需要大量自然与人文方面数据的支撑,由于大尺度空间范围的生态系统服务研究往往又受相应方法所需数据的可获取性的限制,未来通过 RDLS 与生态系统服务作用关系的深入揭示,探究 RDLS 作为生态系统服务评估中的参数或变量的替代因子的可行性,进而较大程度上减少数据获取成本和难度,希望对生态系统服务深入研究提供新视角。

5 结论

本研究借助 InVEST 模型量化了武夷山国家公园九曲溪流域 4 种重要生态系统服务,运用地形起伏度模型、生态系统服务变化指数、生态系统服务权衡协同度等方法来揭示生态系统服务及其权衡/协同关系与地形起伏度的响应机制。随着 RDLS 等级的增加,4 种服务的优势逐渐扩大,生态系统服务簇类型也由生态脆弱型过渡为生态保育型和生态调节型;生态系统服务的权衡/协同关系对 RDLS 的响应模式有两种,即以二级或四级 RDLS 为峰值的倒 U 型曲线和以二、四级为拐点的倒 N 型曲线。基于本文研究,为未来更好地提升和维持生态系统服务,建议限制茶园扩张和加强原有森林保护。

参考文献(References):

- [1] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [2] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352 (6292): 1455-1459.
- [3] 蒋明卓,李殿生,苏欢.快速城市化地区生态系统服务价值演化及空间自相关特征分析——以河南省洛阳市为例. *林业经济*, 2020, 42 (7): 51-61.
- [4] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [5] Karimi J D, Corstanje R, Harris J A. Understanding the importance of landscape configuration on ecosystem service bundles at a high resolution in urban landscapes in the UK. *Landscape Ecology*, 2021, 36(7): 2007-2024.
- [6] 宋家鹏,陈松林.基于生态系统服务簇的福州市生态系统服务格局. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 1045-1053.
- [7] Gan S, Xiao Y, Qin K Y, Liu J Y, Xu J, Wang Y Y, Niu Y N, Huang M D, Xie G D. Analyzing the interrelationships among various ecosystem services from the perspective of ecosystem service bundles in Shenyang, China. *Land*, 2022, 11(4): 515.
- [8] 李慧蕾,彭建,胡熠娜,武文欢.基于生态系统服务簇的内蒙古自治区生态功能分区. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2657-2666.
- [9] 吴健生,钟晓红,彭建,秦维.基于生态系统服务簇的小尺度区域生态用地功能分类——以重庆两江新区为例. *生态学报*, 2015, 35 (11): 3808-3816.
- [10] Hong Y Y, Ding Q, Zhou T, Kong L Q, Wang M Y, Zhang J Y, Yang W. Ecosystem service bundle index construction, spatiotemporal dynamic display, and driving force analysis. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2020, 6(1): 1843972.
- [11] Bi J, Hao R F, Li J, Qiao J M. Identifying ecosystem states with patterns of ecosystem service bundles. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108195.
- [12] Cord A F, Bartkowski B, Beckmann M, Dittrich A, Hermans-Neumann K, Kaim A, Lienhoop N, Locher-Krause K, Priess J, Schröter-Schlaack C, Schwarz N, Seppelt R, Strauch M, Václavík T, Volk M. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: main concepts, methods and the road ahead. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 264-272.
- [13] Shen J S, Li S C, Liang Z, Liu L B, Li D L, Wu S Y. Exploring the heterogeneity and nonlinearity of trade-offs and synergies among ecosystem services bundles in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Ecosystem Services*, 2020, 43: 101103.
- [14] 斯皮里顿诺夫(А.И.Спиридонов).地貌制图学.北京:地质出版社,1956: 81-84.
- [15] Feng Z M, Yang Y Z, Zhang D, Tang Y. Natural environment suitability for human settlements in China based on GIS. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(4): 437-446.
- [16] 李钜章.中国地貌基本形态划分的探讨. *地理研究*, 1987, 6(2): 32-39.
- [17] Yin J H, Chen J, Xu X W, Wang X L, Zheng Y G. The characteristics of the landslides triggered by the Wenchuan M_s 8.0 earthquake from Anxian to Beichuan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(5/6): 452-459.
- [18] 伍剑波,孙强,张泰丽,朱延辉,韩帅,赵阳.地形起伏度与滑坡发育的相关性——以丽水市滑坡为例. *华东地质*, 2022, 43(2): 235-244.
- [19] 田湘云,张超,陈棋,史小蓉,王妍.滇东南石漠化地区地形起伏度对水土流失的影响. *西北林学院学报*, 2022, 37(3): 162-170.
- [20] 张静静,朱文博,朱连奇,崔耀平,何莎莎,任涵.基于栅格的豫西山区地形起伏特征及其对人口和经济的影响. *地理学报*, 2018, 73 (6): 1093-1106.
- [21] Yang N, Jiang L, Chao Y, Li Y, Liu P. Influence of relief degree of land surface on street network complexity in China. *ISPRS Int J Geo Inf*, 2021, 10: 705.
- [22] 钱彩云,巩杰,张金茜,柳冬青,马学成.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系. *地理学报*, 2018, 73(5): 868-879.
- [23] Jin G, Deng X Z, Chu X, Li Z H, Wang Y. Optimization of land-use management for ecosystem service improvement: a review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2017, 101: 70-77.
- [24] Hasan S S, Zhen L, Miah M G, Ahamed T, Samie A. Impact of land use change on ecosystem services: a review. *Environmental Development*,

- 2020, 34: 100527.
- [25] 陈小波, 林孝松, 牟凤云, 王莹, 程植, 贾腊春. 渝东北生态系统服务价值时空演变及地形梯度效应. 河南理工大学学报(自然科学版). doi:10.16186/j.cnki.1673-9787.2021110087.
- [26] 张学斌, 罗君, 石培基, 周亮. 格网尺度下张掖生态系统服务价值时空演变及地形梯度分异特征. 应用生态学报, 2020, 31(2): 543-553.
- [27] 杨锁华, 胡守庚, 瞿诗进. 长江中游地区生态系统服务价值的地形梯度效应. 应用生态学报, 2018, 29(3): 976-986.
- [28] 王雅, 蒙古军, 齐杨, 彭福利. 基于 InVEST 模型的生态系统管理综述. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3526-3532.
- [29] 魏文俊, 王兵, 郭浩. 基于森林资源清查的江西省森林贮碳功能研究. 气象与减灾研究, 2008, 31(4): 18-23.
- [30] 张治, 钟全林, 程栋梁, 徐朝斌, 胡波, 常云妮. 闽西北地区不同龄组常绿阔叶混交林生态系统碳储量结构特征. 生态环境学报, 2014, 23(2): 203-210.
- [31] 郭丽玲, 潘萍, 欧阳勋志, 宁金魁, 臧颢, 刘苑秋, 杨阳, 桂亚可. 赣南马尾松天然林不同生长阶段碳密度分布特征. 北京林业大学学报, 2018, 40(1): 37-45.
- [32] 张文静, 孙小银, 周俊. 南四湖流域关键生态系统服务的时空权衡关系. 生态学报, 2021, 41(20): 8003-8015.
- [33] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生态系统服务权衡协同关系时空异质性. 中国沙漠, 2021, 41(6): 78-87.
- [34] 巩杰, 马学成, 张玲玲, 柳冬青, 张金茜. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生境质量时空分异. 水土保持研究, 2018, 25(3): 191-196.
- [35] 王军, 严有龙, 王金满, 应凌霄, 唐倩. 闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究. 生态学报, 2021, 41(14): 5837-5848.
- [36] 洪宇, 刘金福, 涂伟豪, 林志玮, 谭芳林. 基于生境质量构建森林生物多样性保育价值模型. 北京林业大学学报, 2020, 42(1): 1-9.
- [37] 封志明, 李文君, 李鹏, 肖池伟. 青藏高原地形起伏度及其地理意义. 地理学报, 2020, 75(7): 1359-1372.
- [38] 陈学兄, 常庆瑞, 毕如田, 刘正春, 张小军. 地形起伏度最佳统计单元算法的比较研究. 水土保持研究, 2018, 25(1): 52-56.
- [39] 雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 李苑菱, 吴庭天. 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化. 生态学报, 2020, 40(14): 4760-4773.
- [40] Saidi N D, Spray C. Ecosystem services bundles: challenges and opportunities for implementation and further research. Environmental Research Letters, 2018, 13(11): 113001.
- [41] 冯兆, 彭建, 吴健生. 基于生态系统服务簇的深圳市生态系统服务时空演变轨迹研究. 生态学报, 2020, 40(8): 2545-2554.
- [42] 王建仁, 马鑫, 段刚龙. 改进的 K-means 聚类 k 值选择算法. 计算机工程与应用, 2019, 55(8): 27-33.
- [43] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 赵东升. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. 地理研究, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [44] Qiao X N, Gu Y Y, Zou C X, Xu D L, Wang L, Ye X, Yang Y, Huang X F. 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, 2019, 651: 218-229.
- [45] 刘华超, 任春颖, 王宗明, 张柏. 大兴安岭生态功能区生态系统服务功能动态及权衡协同关系研究. 生态与农村环境学报, 2022, 38(5): 587-598.
- [46] 曾志伟, 杨华, 宁启蒙, 汤慧. 洞庭湖区土地利用强度演变及其对生态系统服务的影响. 经济地理, 2022, 42(9): 176-185.
- [47] 武燕, 吴映梅, 高彬媛, 李琛, 郑可君, 李婵. 成渝城市群生态系统服务价值与人类活动强度空间关系. 水土保持研究, 2023, 30(1): 173-182.
- [48] Qiu Z X, Feng Z K, Song Y N, Li M L, Zhang P P. Carbon sequestration potential of forest vegetation in China from 2003 to 2050: predicting forest vegetation growth based on climate and the environment. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119715.
- [49] Kaushal R, Subbulakshmi V, Tomar J M S, Alam N M, Jayaparkash J, Mehta H, Chaturvedi O P. Predictive models for biomass and carbon stock estimation in male bamboo (*Dendrocalamus strictus* L.) in Doon valley, India. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): 469-476.
- [50] Yen T M, Lee J S. Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model. Forest Ecology and Management, 2011, 261(6): 995-1002.
- [51] Li C, Shi Y J, Zhou G M, Zhou Y F, Xu L, Tong L, Liu X. Effects of different management approaches on soil carbon dynamics in Moso bamboo forest ecosystems. CATENA, 2018, 169: 59-68.
- [52] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. 地理学报, 2020, 75(5): 949-960.
- [53] Gao J B, Zuo L Y, Liu W L. Environmental determinants impacting the spatial heterogeneity of Karst ecosystem services in Southwest China. Land Degradation & Development, 2021, 32(4): 1718-1731.
- [54] 向珈瑶, 彭文甫, 陶帅. 2000—2020 年岷江上游植被 NDVI 时空变化及其地形响应. 长江流域资源与环境, 2022, 31(7): 1534-1547.
- [55] 李佩君, 左德鹏, 徐宗学, 高晓曦. 基于地形梯度的雅鲁藏布江流域土地利用及景观格局分析. 山地学报, 2022, 40(1): 136-150.
- [56] Liu Y Z, Shen H H, Ge G, Xing A J, Tang Z Y, Fang J Y. Classification and distribution of evergreen broad-leaved forests in Jiangxi, East China. Journal of Plant Ecology, 2022: rtac059.
- [57] Zhao Y F, Wang X, Jiang S L, Xiao J J, Li J, Zhou X H, Liu H Y, Hao Z G, Wang K C. Soil development mediates precipitation control on plant productivity and diversity in alpine grasslands. Geoderma, 2022, 412: 115721.
- [58] Lai J S, Zou Y, Zhang J L, Peres-Neto P R. Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the rdacca.hp R package. Methods in Ecology and Evolution, 2022, 13: 782-788.
- [59] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. 地理学报, 2017, 72(6): 960-973.