

DOI: 10.5846/stxb201710011772

朱立晨, 王豪伟, 唐立娜. 闽三角区域生态系统服务重要性评价及其空间分布. 生态学报, 2018, 38(20): - .

Zhu L C, Wang H W, Tang L N. Importance evaluation and spatial distribution analysis of ecosystem services in Min triangle area. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

闽三角区域生态系统服务重要性评价及其空间分布

朱立晨^{1,2}, 王豪伟^{1,*}, 唐立娜¹

1 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 3610212

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 本文基于 GIS 及 RS 技术, 选取研究区内最重要的水源涵养服务、水土保持服务、生物多样性保护服务、生态系统综合服务为研究对象, 采用 NPP 定量指标评价方法, 对 4 种生态系统服务的重要性进行评价, 试图揭示闽三角区域各类生态系统服务重要性分级情况及其空间分布规律。同时, 从土地利用以及主控因子识别两方面对形成闽三角区域生态系统服务各重要性级别区域的深层次原因做出科学分析。以最终闽三角生态系统综合服务为例, 研究结果表明: (1) 极为重要和高度重要的区域面积共占研究区总面积的 30.39%, 总体分布在闽三角中部偏西南地区的南靖县、平和县以及长泰县境内, 其在海拔 300—600m 以及坡度 10°—20°的环境中面积占比较高。(2) 一般重要和较为重要区域总体分布在闽三角东北部沿海地区的泉州市及厦门市范围内, 其在海拔 900—1800m 以及坡度 >40°的环境中面积占比较高。(3) 随着重要性级别从一般重要到极为重要的提升, 其相应重要性级别区域的地理中心由南安市境内出发, 逐渐向西方向移动, 后经由华安县境内转向西南方向, 最终落在南靖县境内。(4) 从一般重要区域到极为重要区域, 林地和草地的面积占比显著增加, 而城乡、工矿、居民用地、耕地以及水域的面积占比则出现明显降低。(5) 一般重要区域划分的主要控制因子依次为多年平均净初级生产力、降水因子、土壤渗流能力因子, 极为重要区域划分的主要控制因子依次为多年平均净初级生产力、海拔因子、降水因子。

关键词: 闽三角区域; 生态系统服务重要性; 水源涵养; 水土保持; 生物多样性保护; NPP 定量指标评价法; 空间分布

Importance evaluation and spatial distribution analysis of ecosystem services in Min triangle area

ZHU Lichen^{1,2}, WANG Haowei^{1,*}, TANG Lina¹

1 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Based on GIS and RS technologies, this study selected the most important soil, water, biodiversity, and ecosystem services in the Min delta region as research objects. NPP (Net Primary Productivity) quantitative indicators were used to evaluate the benefits of four ecosystem services to determine the hierarchical importance and spatial distribution of these services. This paper also analyzes the underlying reasons driving the regional importance of ecosystem services. from the two aspects of land use and master factor identification. Taking the final integrated ecosystem services in the Fujian Triangle Region as an example, the results show that: (1) Extremely important and highly important regional areas account for 30.39% of the total study area. These areas are slightly distributed in Nanjing County, Pinghe County, and Changtai County, which occupy a relatively high area of 300—600 m above sea level and a gradient of 10—20°. (2) Slightly important and more important areas are largely distributed in the areas of Quanzhou and Xiamen in the northeastern coastal Fujian Province, with a relatively high area of 900—1800 m above sea level and a gradient of >40°. (3) The area of forest

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0502902); 国家自然科学基金(41571148); 国家重点研发计划课题(2016YFC0501101)

收稿日期: 2017-10-01; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hwwang@iue.ac.cn

land and grassland increased significantly from the slightly important areas to the most important ones, while urban and rural areas, industrial and mining areas, residential land, and cultivated land and water areas decreased. (4) The main controlling factors in the division of regional importance of integrated ecosystem services in the evaluation process are NPP, precipitation, soil seepage, and the integrated ecosystem services. The main control factors of regional division are NPP, elevation, and precipitation.

Key Words: Min Triangle area; importance of ecosystem services; water conservation; soil and water conservation; biodiversity conservation; NPP quantitative index evaluation method; spatial distribution

生态系统服务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用^[1-4]。多年来生态学学科不断发展,生态系统服务的相关研究逐渐成为了新热点。20 世纪 60 年代,日本相关学者使用替代成本法率先在森林公益机能的生态价值评估中对生态系统服务进行了评价^[5-6]。而后,1997 年 Daily 等学者对生态系统服务的概念及其价值评估的理论方法进行了系统的说明^[1,7],Costanza 等学者随之将生态系统服务的主要功能总结为 17 类,并以货币价值的形式对 10 类生物群系进行了估算^[8-11]。20 世纪 80 年代初,中国学者也陆续对不同尺度、不同类型的生态系统服务展开了研究^[3-4,9,12]。目前研究已经由类型识别、经济价值评估更多转向机理分析,同时也十分注重时空尺度特征对生态系统服务的影响^[13]。生态系统服务重要性评价是针对典型区域生态系统,分析生态系统服务的区域分异规律,明确各种生态系统服务的重要区域。评价结果也将为重点生态功能区的确定以及生态保护政策的制定提供直接依据^[5,14]。目前对于陆地生态系统服务重要性的评价主要分为以下四类:(1)对特定区域内生态系统某单一服务进行评价^[15-19]。(2)对某一类型生态系统中的各种服务进行评价^[20-23]。(3)利用土地利用数据对单位面积某种土地类型的生态系统服务价值进行评价,从而表征出生态系统服务的重要性^[24-25]。(4)对于某区域生态系统服务重要性的综合评价^[26-31]。在不同程度上,这些研究提高了人们对于生态系统服务的理解和认知,但仍然存在一些重点和难点问题有待我们进一步的研究和解决。例如:在已有的研究中,对于大中尺度区域生态系统服务重要性综合评价的研究较少。一些研究是基于专家的先验知识对研究区进行定性的、主观的评价分析,结果不能客观的反应研究区生态系统服务的真实情况。而部分量化分级评价方法由于参数设置的过于繁杂,使得数据较难获取。另外,在现有的各类重要性评价研究中,对于评价结果的分析较为单一,也少有文章对评价结果的空间分布以及内在机理进行进一步研究,本文则将针对这些问题展开研究。

近年来,闽三角城市群经济发展迅速,但由于缺乏对重点生态功能区的识别和有效保护,发生了许多因城市扩张占用生态用地的现象,已经对生态系统造成了不同程度上的威胁和破坏。如果不能及时的对重点生态功能区进行科学的识别、划分和加以保护,随着城市的不断发展壮大,未来闽三角区域将会面临更加严峻的生态风险。为了更大程度上降低可能面临的这类生态风险,我们选择以闽三角区域为研究对象,运用 NPP 定量指标评价方法,借助 RS 以及 GIS 相关技术对区内生态系统服务重要性进行综合评价,合理划分出各重要性级别区域,并对评价结果的空间分布进行分析,试图发现生态系统服务重要性从低值地区到高值地区的分布特点以及分布规律。期望通过对土地利用数据以及主控因子的分析能理清影响研究区各生态系统服务重要性区域划分的内在机理^[32]。希望通过此项研究工作的开展,能为闽三角区域生态空间的合理开发、利用以及保护工作提供理论和数据的支持,为区域生态保护红线区的划定以及相关政策的制定提供科学依据。

1 研究区概况

闽三角区域地处福建省南部(25°94′—23°56′N,119°02′—116°89′E),地理位置如图 1 所示,是中国除长三角、珠三角、环渤海之外的第四大沿海区域经济体,素有“闽南金三角”的美誉^[33]。研究区东临台湾海峡和金門諸島,地势西北高、东南低,海拔范围在 0—1828m,平均海拔 900m,由厦门、漳州、泉州三市及其所辖的云霄县、漳浦县、诏安县等县(市、区)组成,年平均气温在 6.1—21.7℃之间,年平均降水量在 1136—1831mm 之

间,属亚热带季风性气候。区域内植被覆盖度总体较高,自然资源丰富,生态环境质量良好。但由于区内山地、丘陵分布广泛,加之土壤质地多以壤土和粉砂壤土为主,地区内水土流失现象较为严重。区域面积约为 25058.89km^2 ,占福建省总面积的 20.7%。2015 年闽三角区域人口约 1700 余万人,GDP 总量约占全省总量的 47.86%,实现外贸进出口总值约占全省总量的 70%^[34]。闽三角区域是中国沿海经济开放区之一,其在加快建设海峡西岸经济区、加强闽台经济合作、推进国家一带一路伟大战略布局中发挥着重要作用。

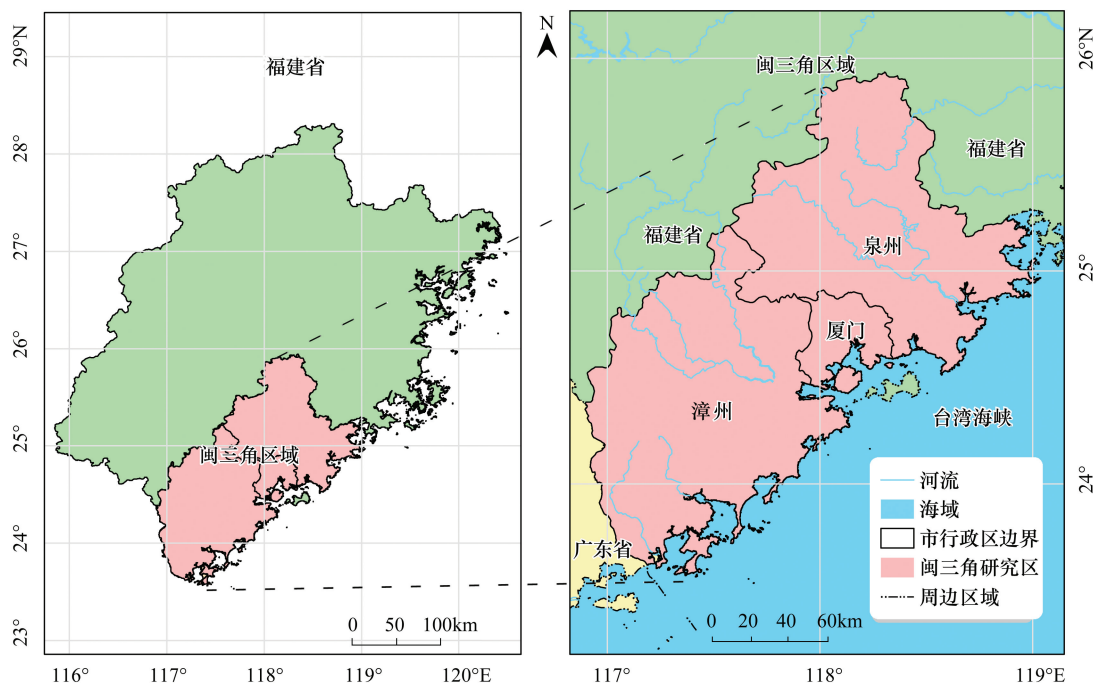


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study area

2 研究方法

2.1 数据来源与数据预处理

2.1.1 数据来源

研究所采用的数据主要由研究区内的 NPP(净初级生产力)、气温及降水、DEM、土壤质地以及土地利用数据 5 种数据组成。其中:(1)NPP 数据来源于 NASA(美国国家航空航天局)MOD17 观测项目,本文提取了 MOD17A3 数据集中自 2000 年至 2015 年的年平均 NPP 数据,空间分辨率为 1km。(2)气温及降水数据来源于中国气象数据网中的中国地面累年值数据集(1981—2010 年)。(3)DEM 数据来源于 ASTER GDEM 先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型数据,空间分辨率为 30m,垂直精度为 20m,水平精度为 30m。(4)土壤质地数据来源于“寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)”。基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集。(5)土地利用数据来源于中科院资源环境科学数据中心的 2015 年闽三角区域土地利用一级分类数据。

2.1.2 数据预处理

通过对原始数据的提取、整理以及空间插值等运算,将原始数据处理为评价中可直接使用的 7 种影响因素,分别是:(1)多年平均净初级生产力 NPP_{mean} (2)土壤渗流能力因子 F_{sic} (3)降水因子 F_{pre} (4)坡度因子 F_{Slo} (5)土壤可蚀性因子 K (6)气温因子 F_{tem} (7)海拔因子 F_{alt} 。具体处理方法如下:(1)将 NPP 元数据通过提取、转换、剔除无用值、统一单位等操作,得到 2000—2015 年近 16 年 NPP_{mean} 值的分布图。(2)通过对中国土壤数

据集的数据进行提取、分类、归一化赋值得到 F_{sic} 值的分布图。(3)通过选取闽三角区域以及周边广东省部分区域内 69 个气象站点近 30 年的年平均降水数据并对其进行空间克里格插值运算,再将结果归一化,得到 F_{pre} 值的分布图。(4)通过 GIS 工具对 DEM 数据进行坡度运算并将结果归一化,得到 F_{slo} 值的分布图。(5)通过对中国土壤数据集的数据进行提取、分类、查表赋值,得到 K 值的分布图^[35]。(6)通过选取闽三角区域以及周边广东省部分区域内 69 个气象站点的近 30 年的年平均气温数据并进行空间插值运算,利用海拔数据对气温插值结果进行进一步校正,将校正后的插值数据归一化,最终得到 F_{tem} 值的分布图。(7)通过对 ASTER GDEM 分块数据进行拼接、提取、归一化的处理,最终得到 F_{alt} 值的分布图。数据预处理的结果如图 2 所示。

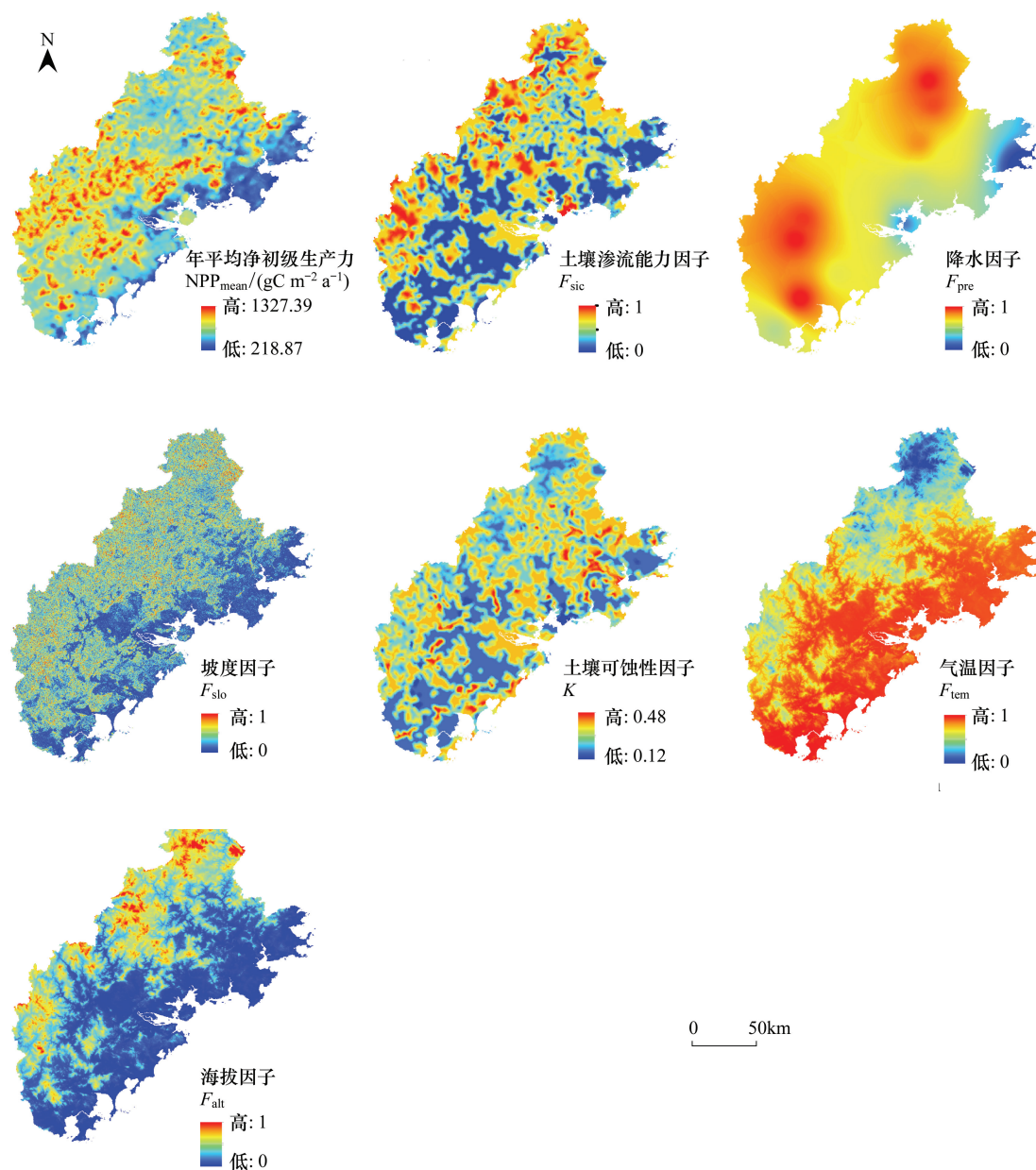


图 2 闽三角区域七种影响因子的空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of seven influencing factors in Min triangle area

2.2 生态系统服务重要性评价方法

目前对于生态系统服务重要性的评价主要采用模型评价法^[36-38]和 NPP 定量指标评价法^[39-40]等。由于模型评价法参数繁多,且需要精准的数据作为支撑,一些模型使用的地域条件也十分苛刻,所以在对大中尺度区

域的重要性评价中较难实现。而 NPP 定量指标评价法是以 NPP 数据为基础,结合了种类较少、获取较易的相关数据进行评价,具有客观准确、操作便捷等特点,结合本研究区的实际情况,此方法较为适用^[40]。NPP 定量指标评价方法分为生态系统服务能力指数的计算和生态系统服务重要性等级的划分两部分,具体方法如下:

2.2.1 生态系统服务能力指数的计算方法

(1) 水源涵养服务能力指数的计算方法

生态系统水源涵养服务主要表现为植被截留降水、增强土壤下渗、抑制蒸发、缓和地表径流和增加降水等功能^[41-43]。通过计算闽三角区域水源涵养服务能力指数 WR 来实现对研究区水源涵养服务重要性的评价。计算中,我们选取了 4 个主要的影响因子,分别为 NPP_{mean} 多年平均净初级生产力、 F_{sic} 土壤渗流能力因子、 F_{pre} 降水因子、 F_{slo} 坡度因子。具体 WR 指数的计算公式如下:

$$WR = NPP_{mean} \times F_{sic} \times F_{pre} \times (1 - F_{slo}) \quad (1)$$

(2) 水土保持服务能力指数的计算方法

生态系统水土保持服务是指生态系统通过其结构与过程减少由于水蚀所导致的土壤侵蚀作用,主要表现为植被根系能够固定土壤,减少地表土壤随降水流失进入沟壑的能力,是生态系统提供的重要调解服务之一^[39]。通过计算闽三角区域水土保持服务能力指数来实现对研究区水土保持服务重要性的评价,计算中,我们选取了 3 个主要的影响因子,分别为 NPP_{mean} 多年平均净初级生产力、 F_{slo} 坡度因子、 K 土壤可蚀性因子。此方法强调了绿色植被、地形和土壤结构在水土保持中的作用,可以定量揭示生态系统水土保持服务能力的基本空间格局,具体 S_{pro} 指数的计算公式如下:

$$S_{pro} = NPP_{mean} \times (1 - K) \times (1 - F_{slo}) \quad (2)$$

(3) 生物多样性保护服务能力指数的计算方法

生态系统生物多样性保护服务主要表现为生态系统对生物多样性的产生与维持、对气候的调节、对洪涝与干旱灾害减轻、对种子与花粉的扩散、对有害生物的控制、对土壤环境的净化等^[39]。通过计算闽三角区域生物多样性保护服务能力指数来实现对研究区生物多样性保护服务的评价。在计算中,我们选取了 4 个主要的影响因子,分别为 NPP_{mean} 多年平均净初级生产力^[44]、 F_{tem} 气温因子、 F_{pre} 降水因子、 F_{alt} 海拔因子,具体 S_{bio} 指数的计算公式如下:

$$S_{bio} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt}) \quad (3)$$

(4) 生态系统综合服务能力指数的计算方法

通过计算闽三角区域生态系统综合服务能力指数来实现对研究区生态系统综合服务的重要性评价,由于我们对于闽三角区域 3 种生态系统服务的研究不涉及具体的权重偏侧,即无法比较哪种服务对总体的贡献最大,为了保持研究的中立性,默认三种能力指数的权重相同,则具体计算公式如下:

$$IESI = WR + S_{pro} + S_{bio} \quad (4)$$

式中: $IESI$ 为生态系统综合服务能力指数, WR 为水源涵养服务能力指数, S_{pro} 为水土保持服务能力指数, S_{bio} 为生物多样性保护服务能力指数。

2.2.2 生态系统服务重要性等级的划分方法

通过 ArcGIS 的栅格计算器工具,将 4 种生态系统服务所涉及影响因子的图层数据按照其公式进行叠加运算,得到闽三角区域 4 种生态系统服务能力指数的空间分布数据^[39]。其中, WR 取值范围在 0—898 之间, S_{pro} 取值范围在 0—994 之间, S_{bio} 取值范围在 0—998 之间, $IESI$ 取值范围在 0—2476 之间,最后采用自然间断点分级法 (Jenks)^[26] 对闽三角区域 4 种生态系统服务重要性进行分级操作,将指数值由低到高依次划分为 5 个重要性级别,具体分级标准如表 1 所示。

表 1 生态系统服务重要性评价分级标准

Table 1 Grading criteria for the evaluation of the importance of ecosystem service function

生态系统服务 Ecosystem services	对应服务能力指数 Service capability index	分级 Classification				
		一般重要 Slightly important	较为重要 More important	中等重要 Moderately important	高度重要 Strongly important	极其重要 Extremely important
水源涵养服务 Water conservation services	水源涵养服务能力指数	0—139	140—229	230—324	325—445	446—898
水土保持服务 Function of soil and water conservation	水土保持服务能力指数	0—321	322—409	410—496	497—602	603—994
生物多样性保护服务 Biodiversity conservation services	生物多样性保护服务能力指数	0—199	200—323	324—445	446—586	587—998
生态系统综合服务 Integrated ecosystem services	生态系统综合服务能力指数	138—725	726—960	961—1178	1179—1434	1435—2476

2.3 对评价结果空间分布规律的分析方法

通过观察分级评价结果图,我们可以大致观察出各个重要性级别区域的空间分布情况,但为了进一步科学的总结和归纳分级评价结果的空间分布规律,我们又对评价结果的空间分布进行了一系列客观、定量的分析,具体方法如下:

2.3.1 生态系统服务重要性空间平面上的分布规律

为了研究了 5 个重要性级别区域在 4 种生态系统服务空间平面中的分布规律。首先,我们对其中心位置及方向分布规律进行分析,通过 arcgis 软件中的中位数中心计算,找出该级别区域在研究区内分布的一个地理中心位置。再使用方向分布(标准差椭圆)算法,创建各个重要性级别区域分布的标准差椭圆用以概括其整体的位置、离散程度和方向趋势的分布特征^[45]。其次,针对各个生态系统服务极为重要区域进行集中区与分散区的分布规律分析,使用 arcgis 聚类分布工具对极为重要区域的分布数据进行热点分析。通过对集中区与分散区分布规律的识别分析,政府部门可以对某生态系统服务极为重要区域的集中区加以重点保护并限制某些建设与开发。

2.3.2 生态系统服务重要性空间立体上的分布规律

通过 arcgis 软件将生态系统服务重要性评价结果按照研究区的海拔及坡度范围平均分为若干个区域,分别计算每个范围区域内 4 种生态系统服务各重要性区域的面积占比,通过统计分析软件制作成随海拔及坡度变化的面积占比趋势图,以定量分析的方法来揭示闽三角生态系统服务各重要性区域在海拔以及坡度上的分布规律。

2.4 对形成现有各重要性区域空间分布规律内在机理的分析方法

首先,对评价结果中各重要性区域的土地利用现状进行分析,使用 arcgis 软件将选取的 2015 年闽三角区域土地利用一级分类数据与各个生态系统服务重要性区域叠加进行分析。通过对分析结果的统计和计算,得到闽三角区域 4 种生态系统服务重要性评价区域内的土地利用现状占比柱状图。其次,对评价结果中各重要性区域内主要控制因子进行识别分析^[15]。通过 arcgis 软件将 4 种生态系统服务重要性区域内每种影响因子的平均值进行提取和统计,计算各个生态系统服务重要性区域内影响因子的相对偏差,找出每种影响因子在各个重要性分区中正向偏离程度较高前几项,计算结果用于识别各个重要性区域内的主要控制因子。具体计算公式如下:

$$d_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\bar{x}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, d_i 为某个影响因子在重要性为 i 级别区域内的相对偏差, x_i 为某个影响因子在重要性为 i 级别区域内的平均值, $\bar{x}$ 为某个影响因子在整个研究区内的平均值^[15]。根据以上公式对统计数据进行计算,得出 4 种生态系统服务重要性区域的主控因子识别图。本文将选取生态系统服务中最具代表性的极为重要区域和一般

重要区域为研究对象,识别出这两个区域内的主控因子,从而能推导得出影响整个研究区内 4 种生态系统服务重要性划分的主要因子。

3 结果分析

通过使用以上分析方法,最终得到了各类生态系统服务重要性评价的结果(图 3)以及其相应的空间分布的规律,结果分析如下:

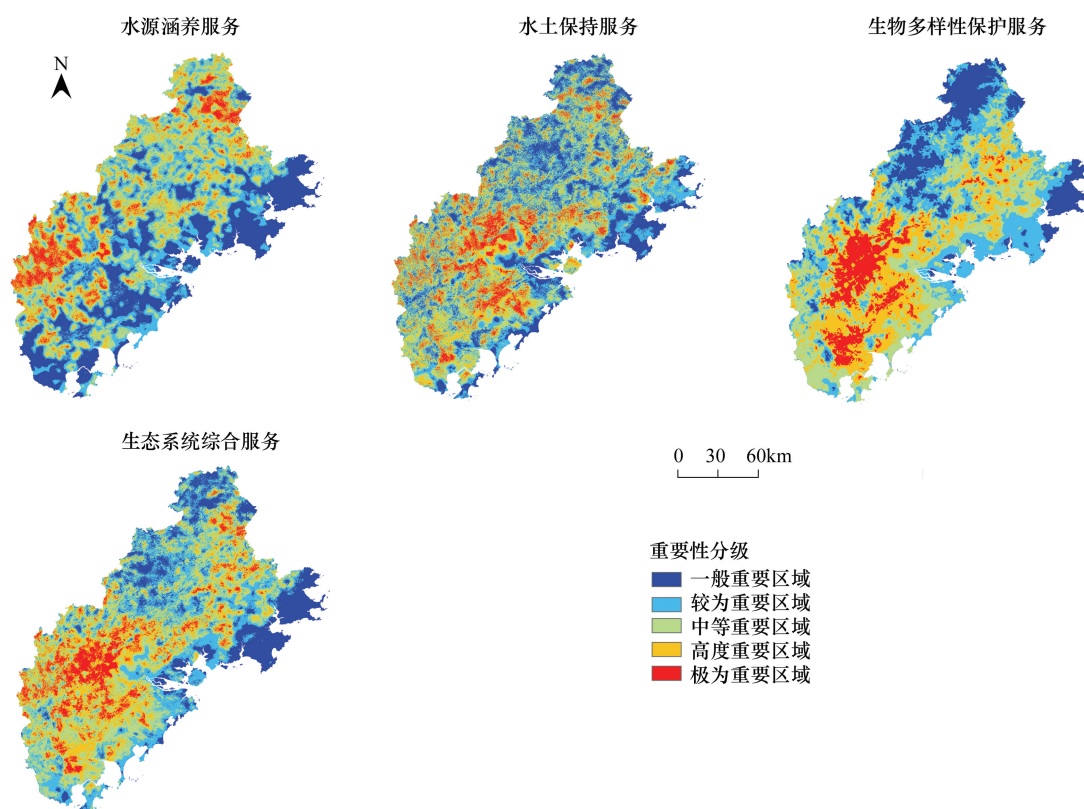


图 3 闽三角区域生态系统服务重要性评价结果分布图

Fig.3 Distribution of Importance Evaluation Results of Ecosystem Services in Min triangle area

3.1 水源涵养服务重要性评价

3.1.1 水源涵养服务各重要性区域的数量特征

从表 2 可以看出,闽三角区域水源涵养服务极为重要和高度重要区域面积分别为 1507.08km^2 和 4131.63km^2 ,占区域总面积的 6.01%和 16.49%,中等重要区域面积 6291.98km^2 ,占区域总面积的 25.11%,较为重要和一般重要区域面积分别为 6959.65km^2 和 6168.56km^2 ,占区域总面积的 27.77%和 24.62%。

3.1.2 水源涵养服务各重要性区域的空间分布特征

从空间平面上看,随着重要性级别的提高,闽三角水源涵养服务各重要性区域的地理中分布,由厦门市集美区境内逐渐向西北方向移动,最终极为重要区域的地理中心落在南靖县境内。各个重要性级别区域分布的方向基本为东北至西南方向,且均较为离散(图 4)。极为重要区域的集中区主要分布在平和县、南靖县以及德化县境内(图 5)。从空间立体上看,闽三角水源涵养服务极为重要和高度重要的区域主要分布在海拔 300—1200m 之间,一般重要和较为重要的区域主要分布在海拔 0—300m 之间和 1200—1800m 之间(图 6)。与此同时,极为重要和高度重要区域主要分布在坡度为 10° — 20° 之间的地表环境中,一般重要和较为重要区域主要分布在坡度为 0° — 10° 以及坡度 $>30^\circ$ 的地表环境中(图 7)。

表 2 生态系统服务各重要性区域面积占比统计表

Table 2 The importance of ecosystem services area accounted for statistics

分级 Classification	水源涵养重要性 Importance of water conservation			水土保持重要性 Importance of soil and water conservation			生物多样性保护重要性 Importance of biodiversity conservation			生态系统综合服务重要性 Importance of ecosystem integrated service function		
	面积 /km ²	比例 /%	累积百分比/%	面积 /km ²	比例 /%	累积百分比/%	面积 /km ²	比例 /%	累积百分比/%	面积 /km ²	比例 /%	累积百分比/%
极为重要 Extremely important	1507.08	6.01	6.01	1862.44	7.43	7.43	2381.67	9.5	9.5	2199.34	8.78	8.78
高度重要 Strongly important	4131.63	16.49	22.5	4804.11	19.17	26.6	5416.92	21.62	31.12	5415.09	21.61	30.39
中等重要 Moderately important	6291.98	25.11	47.61	6790.29	27.1	53.7	7122.71	28.42	59.54	7177.24	28.63	59.03
较为重要 More important	6959.65	27.77	75.38	7223.46	28.83	82.53	6328.14	25.26	84.8	6689.58	26.7	85.73
一般重要 Slightly important	6168.56	24.62	100	4378.59	17.47	100	3809.45	15.2	100	3577.65	14.28	100

3.1.3 形成水源涵养服务各重要性区域空间分布规律的内在机理

在对研究区水源涵养服务各重要性级别区域土地利用情况的研究中,我们发现,随着重要性级别的提高,相应级别区域内林地面积占比的呈现出明显的提升,草地面积占比保持平稳,而耕地、城乡、工矿、居民用地、水域以及未利用地的面积占比均呈现出持续下降的趋势(图 8)。在对水源涵养服务重要性评价结果各重要性区域内主要控制因子的分析中(图 9),我们可以看出一般重要区域的主要控制因子依次为土壤渗流能力因子、多年平均净初级生产力,极为重要区域的主要控制因子依次为土壤渗流能力因子、多年平均净初级生产力(表 3)。

3.2 水土保持服务重要性评价

3.2.1 水土保持服务各重要性区域的数量特征

从表 2 可以看出,闽三角水土保持服务极为重要和高度重要区域面积分别为 1862.44km² 和 4804.11km²,占区域总面积的 7.43%和 19.17%,中等重要区域面积 6790.29km²,占区域总面积的 27.10%,较为重要和一般重要区域面积分别为 7223.46km² 和 4378.59km²,占区域总面积的比例为 28.83%和 17.47%。

3.2.2 水土保持服务各重要性区域的空间分布特征

从空间平面上看,随着重要性级别的提高,闽三角水土保持服务各重要性区域的地理中分布,由安溪县东南部逐渐向西南方向移动,最终极为重要区域分布的地理中心落在漳州市芗城区境内,各个重要性级别区域分布的方向基本为东北至西南方向,且分布均较为离散(图 4)。极为重要区域的集中区主要分布在长泰县、南靖县、平和县、华安县、漳州市芗城区、漳浦县、云霄县以及诏安县境内(图 5)。从空间立体上看,闽三角水土保持服务各重要性级别区域在海拔上的分布较为平稳,总体来说,随着海拔的不断升高,极为重要以及高度重要区域的面积占比略有下降,而一般重要和较为重要区域的面积占比则略有上升趋势(图 6)。与此同时,极为重要和高度重要区域主要分布在坡度为 0°—20°之间的地表环境中,一般重要和较为重要区域主要分布在坡度>20°的地表环境中(图 7)。

3.2.3 形成水土保持服务各重要性区域空间分布规律的内在机理

在对研究区水土保持服务各重要性级别区域土地利用情况的研究中,我们发现,随着重要性级别的提高,相应重要性级别区域内林地面积占比呈现出明显的提升,草地和耕地面积占比呈现出先增大后持续降低的趋势,而城乡、工矿、居民用地、水域以及未利用地的面积占比均呈现出持续下降的趋势(图 8)。在对水土保持服务重要性评价结果中各重要性区域内主要控制因子的分析中(图 9),可以看出一般重要区域的主要控制因子依次为土壤渗流能力因子、多年平均净初级生产力,极为重要区域的主要控制因子依次为土壤

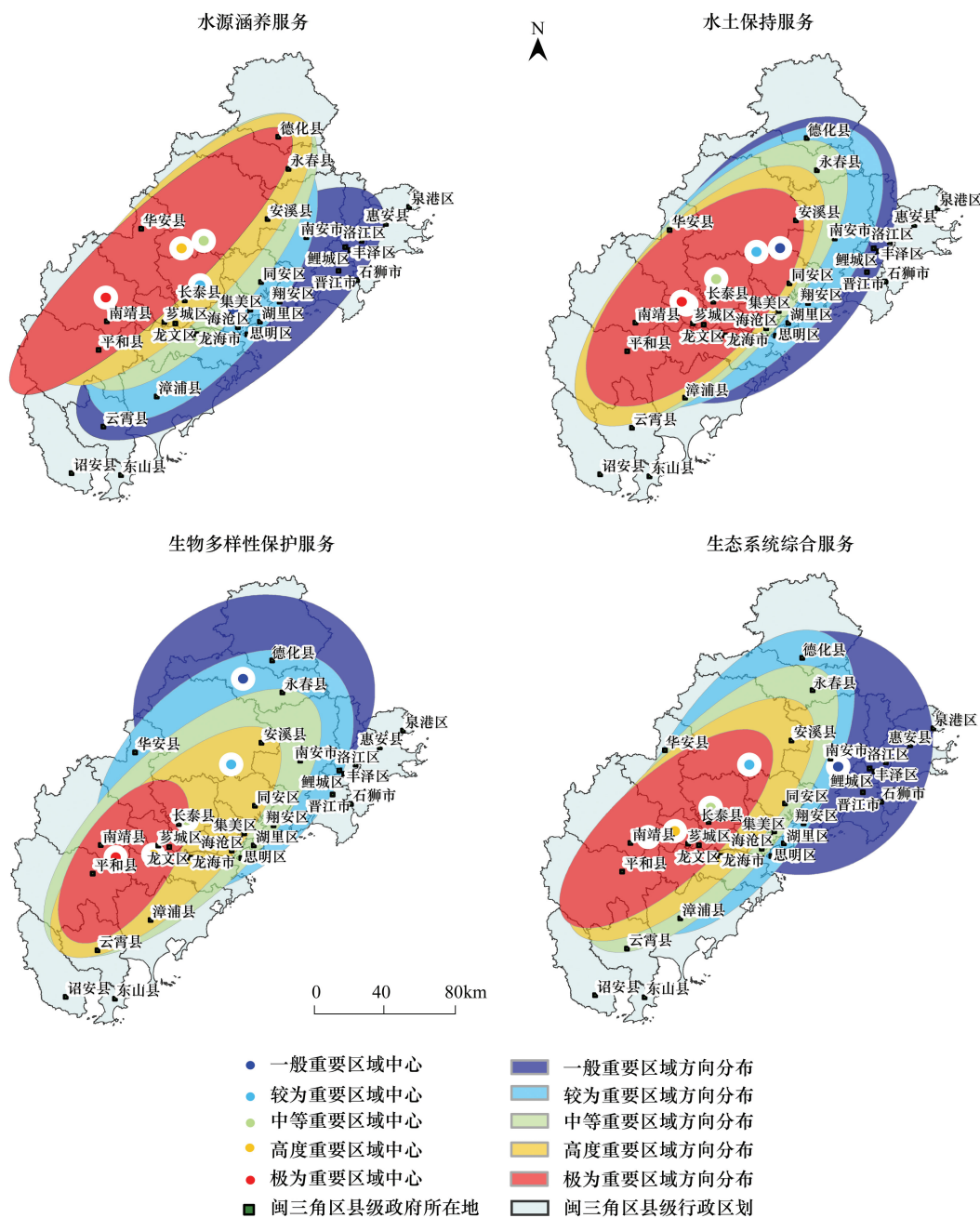


图 4 评价结果中各重要性级别区域的地理中心及方向分布示意图

Fig.4 Sketch map of geographical center and direction of each important grade area in the evaluation result

图中椭圆的长轴方向代表区域分布的方向,长轴越长说明分布越离散,反之越集中

渗流能力因子、多年平均净初级生产力(表3)。

3.3 生物多样性保护服务重要性评价

3.3.1 生物多样性保护服务各重要性区域的数量特征

从表2可以看出,生物多样性保护服务极为重要和高度重要区域面积分别为2381.67km²和5416.92km²,占区域总面积的9.50%和21.62%,中等重要区域面积7122.71km²,占区域总面积的28.42%,较为重要和一般重要区域面积分别为6328.14km²和3809.45km²,占区域总面积的25.25%和15.20%。

3.3.2 生物多样性保护服务各重要性区域的空间分布特征

从空间平面上看,闽三角生物多样性保护服务从一般重要区域到极为重要区域的地理位置中心分布由北

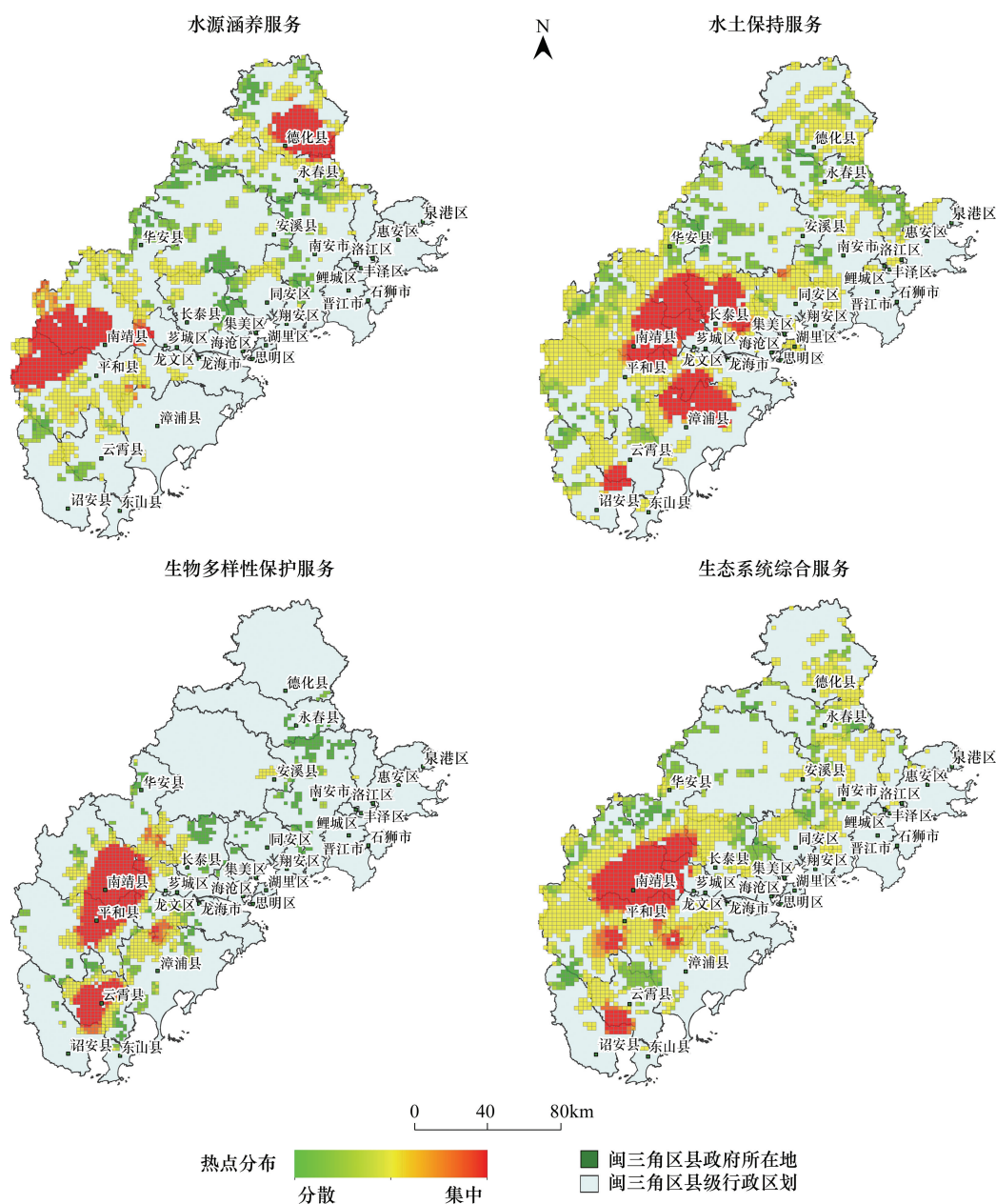


图 5 评价结果中极为重要区域的集中区与分散区分布示意图

Fig.5 Sketch map of geographical center and direction of each important grade area in the evaluation result

图中,红色热点区域为集中区,绿色热点区为分散区,集中与分散程度均随颜色的加深而提高

部永春县境内逐渐向西南方向移动,最终极为重要区域的地理中心落在了平和县境内,各个重要性级别区域除一般重要区域无明显分布方向外,其余分布方向基本为东北至西南方向。此外,除极为重要区域分布相对集中外,其余分布均较为离散(图4)。极为重要区域的集中区主要分布在南靖县、平和县、云霄县以及漳州市龙文区境内(图5)。从空间立体上看,闽三角生物多样性保护服务极为重要以及高度重要的区域主要分布在海拔0—600m之间,一般重要以及较为重要的区域主要分布在海拔600—1800m之间(图6)。与此同时,随着地表坡度的逐渐增加,极为重要以及高度重要区域的面积占比逐渐降低,而一般重要以及较为重要区域的面积占比则呈现出逐渐增加的趋势(图7)。

3.3.3 形成生物多样性保护服务各重要性区域空间分布规律的内在机理

在对研究区生物多样性保护服务各重要性级别区域土地利用情况的研究中,我们发现,随着重要性级别

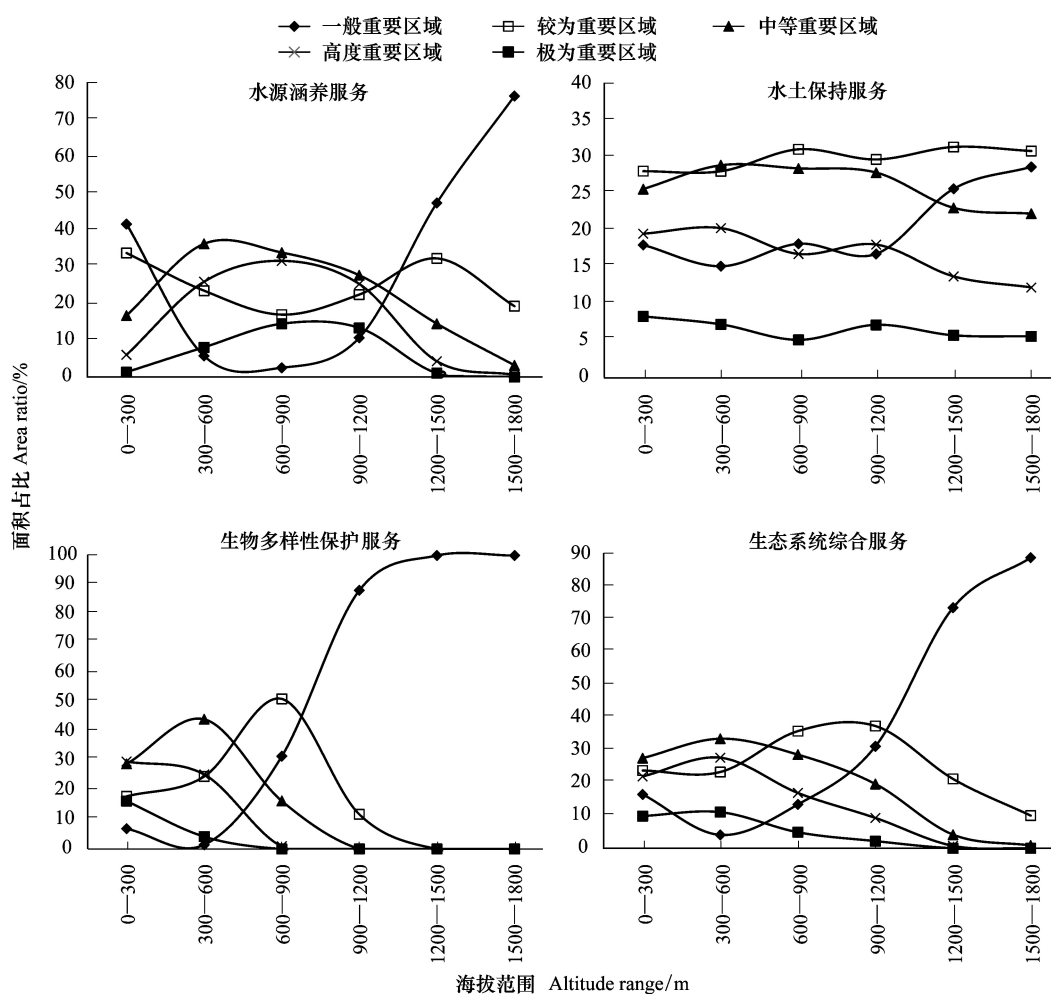


图6 闽三角生态系统服务5种重要性级别区域在不同海拔范围内的面积占比示意图

Fig.6 Variation trends of the area of five important regions of ecosystem services in the Min triangle region with altitude change

图6中横轴0—300的含义为:大于0且小于等于300的范围,以此类推

的提高,相应重要性级别区域内林地和草地面积的占比基本呈现出先减少后增加的趋势,而耕地、城乡、工矿、居民用地、水域以及未利用地的面积占比则均呈现出先增加后减少的趋势(图8)。在对生物多样性保护服务重要性评价结果中各重要性区域内主要控制因子的分析中(图9),我们可以看出一般重要区域的主要控制因子依次为海拔因子、温度因子,极为重要区域的主要控制因子依次为海拔因子、多年平均净初级生产力(表3)。

3.4 生态系统综合服务重要性评价

3.4.1 生态系统综合服务各重要性区域的数量特征

从表2可以看出,生态系统综合服务极为重要和高度重要区域面积分别为2199.34km²和5415.09km²,占区域总面积的8.78%和21.61%,中等重要区域面积7177.24km²,占区域总面积的28.64%,较为重要和一般重要区域面积分别为6689.58km²和3577.65km²,占总面积的26.70%和14.28%。

3.4.2 生态系统综合服务各重要性区域的空间分布特征

从空间平面上看,闽三角生态系统综合服务从一般重要区域到极为重要区域的地理位置中心分布由东北沿海逐渐向西南部方向移动,各个重要性级别区域的分布方向除一般重要区域无明显分布方向外,其余基本为东北至西南方向,分布均较为离散(图4)。极为重要区域的集中区主要分布在华安县、漳州市芗城区、漳州市龙文区、平和县、南靖县、漳浦县、诏安县以及云霄县境内(图5)。从空间立体上看,闽三角水源涵养服务极

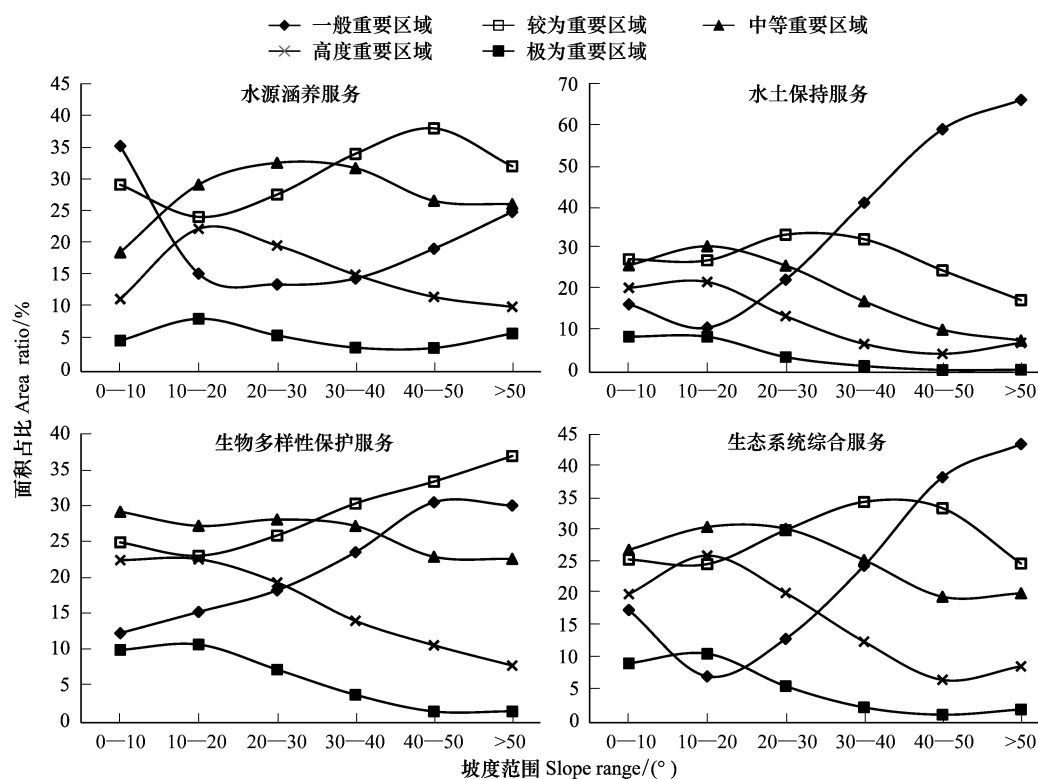


图7 闽三角生态系统服务5种重要性级别区域在不同坡度范围内的面积占比示意图

Fig.7 Variation trends of the area of five important regions of ecosystem services in the Min triangle area with slope change

图7中横轴0—10的含义为:大于0且小于等于10的范围,以此类推

为重要以及高度重要的区域主要分布在海拔0—600m之间,一般重要区域主要分布在海拔900—1800m之间,较为重要区域主要分布在海拔600—1200m之间(图6)。与此同时,随着地表坡度的逐渐增加,极为重要以及高度重要区域的面积占比出现先增加后降低再增加的现象,但总体趋势为下降,而一般重要以及较为重要区域的面积占比则呈现出先降低后增加再降低的现象,但总体趋势为上升(图7)。

表3 主控因子识别结果表

Table 3 The results of the master factor identification

生态系统服务 Ecosystem services	主控因子 Master control factor	
	极为重要区域 Extremely important area	一般重要区域 Slightly important area
水源涵养服务 Water conservation services	土壤渗流能力因子、多年平均净初级生产力	土壤渗流能力因子、多年平均净初级生产力
水土保持服务 Function of soil and water conservation	多年平均净初级生产力、土壤可蚀性因子	多年平均净初级生产力、土壤可蚀性因子
生物多样性保护服务 Biodiversity conservation services	海拔因子、多年平均净初级生产力	海拔因子、温度因子
生态系统综合服务 Integrated ecosystem services	多年平均净初级生产力、海拔因子、降水因子	多年平均净初级生产力、降水因子、土壤渗流能力因子

3.4.3 形成生态系统综合服务各重要性区域空间分布规律的内在机理

在对研究区生态系统综合服务各重要性级别区域土地利用情况的研究中,我们发现,随着重要性级别的提高,相应重要性级别区域内林地面积占比的呈现出明显的提升,而耕地、城乡、工矿、居民用地以及水域的面积占比均呈现出持续下降的趋势,未利用地占比基本呈现出平稳下降的趋势(图8)。在对生态系统综合服务重要性评价结果中各重要性区域内主要控制因子的分析中(图9),我们可以看出一般重要区域的主要控制因

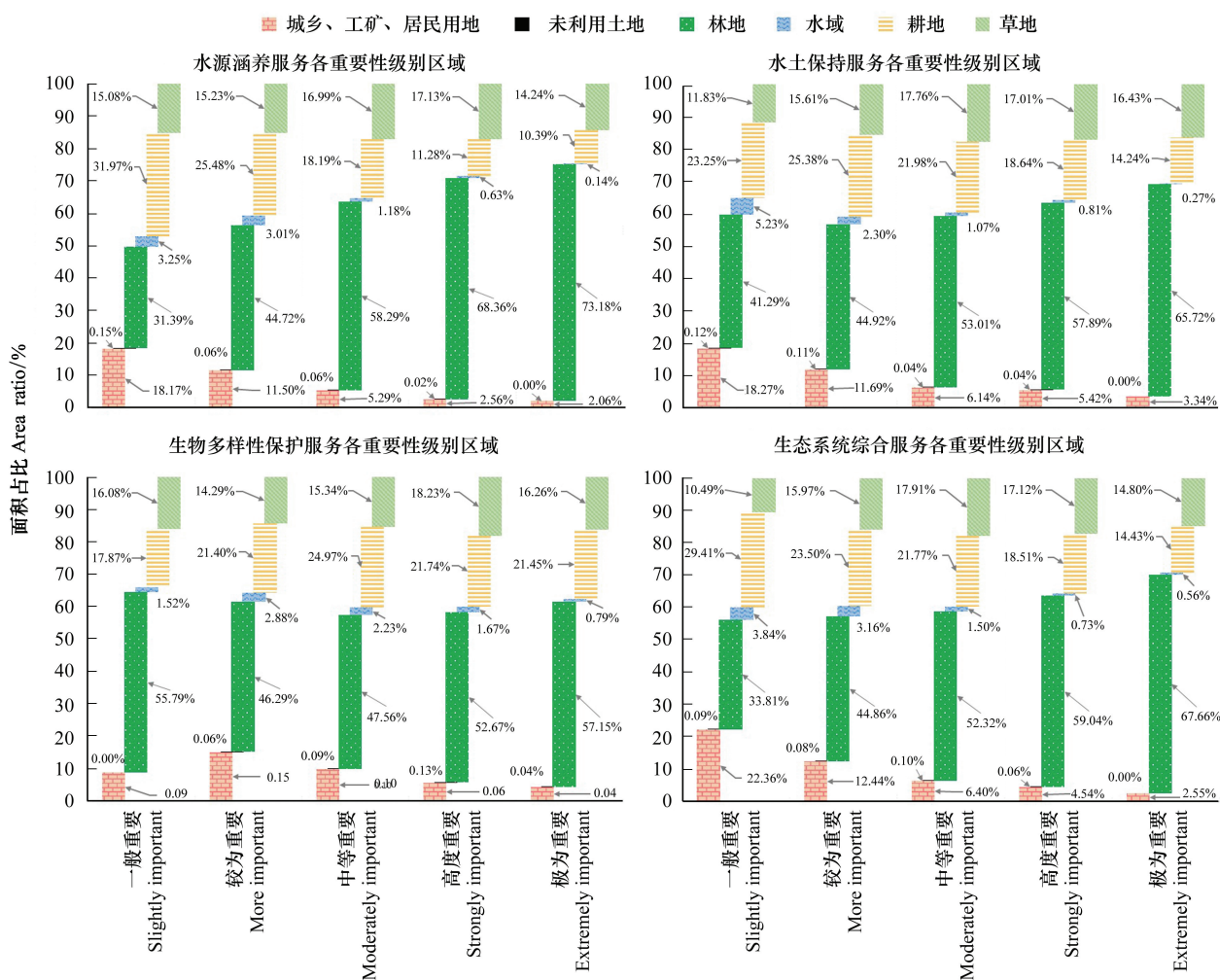


图 8 闽三角生态系统服务各重要性级别区域内的土地利用现状占比图

Fig.8 Land use proportion in 4 kinds of ecosystem service importance assessment area

子依次为多年平均净初级生产力、降水因子、土壤渗流能力因子,极为重要区域的主要控制因子依次为多年平均净初级生产力、海拔因子、降水因子(表3)。

4 讨论与结论

在研究过程中,我们发现 NPP 定量指标评价方法对于这类大中尺度区域生态系统服务的重要性评价研究十分有效。在对重要性区域的等级划分中,我们没有使用已有的分位数法而是选择自然间断点法,是因为我们认为分位数法会将每种重要性级别机械的按照等像元数量分类。这样并不能凸显各能力指数分布的客观规律,也不能体现出极为重要区域的差异性。而自然间断点分级法则基于数据中固有的自然分组对分类间隔加以识别,可对相似值进行最恰当的分组,并使各类之间的差异最大化。

同时,我们发现在现有的同类研究中,对评价结果的空间分布分析存在过多的主观判断,缺少科学定量的分析过程。针对此现象,在研究中我们给出了一套自己的分析方案,也使得我们对评价结果能有一个更加科学直观的统一认识。在使用 NPP 定量指标评价方法对闽三角区域进行了重要性评价之后,我们并没有立刻结束研究,而是产生了两点新的思考。其一,是否能够进一步发现各重要性区域空间分布与土地利用之间存在的潜在关系。其二,既然 NPP 定量指标评价方法能够对区域生态系统服务进行重要性评价,那么到底是哪种或者哪几种影响因子对产生各自生态系统服务重要性的评价结果起到了主导作用。正是这两个问题的产生,让我们带着问题重新回到研究中,对形成现有空间分布规律的内在机理做了进一步探究,研究最终得到富

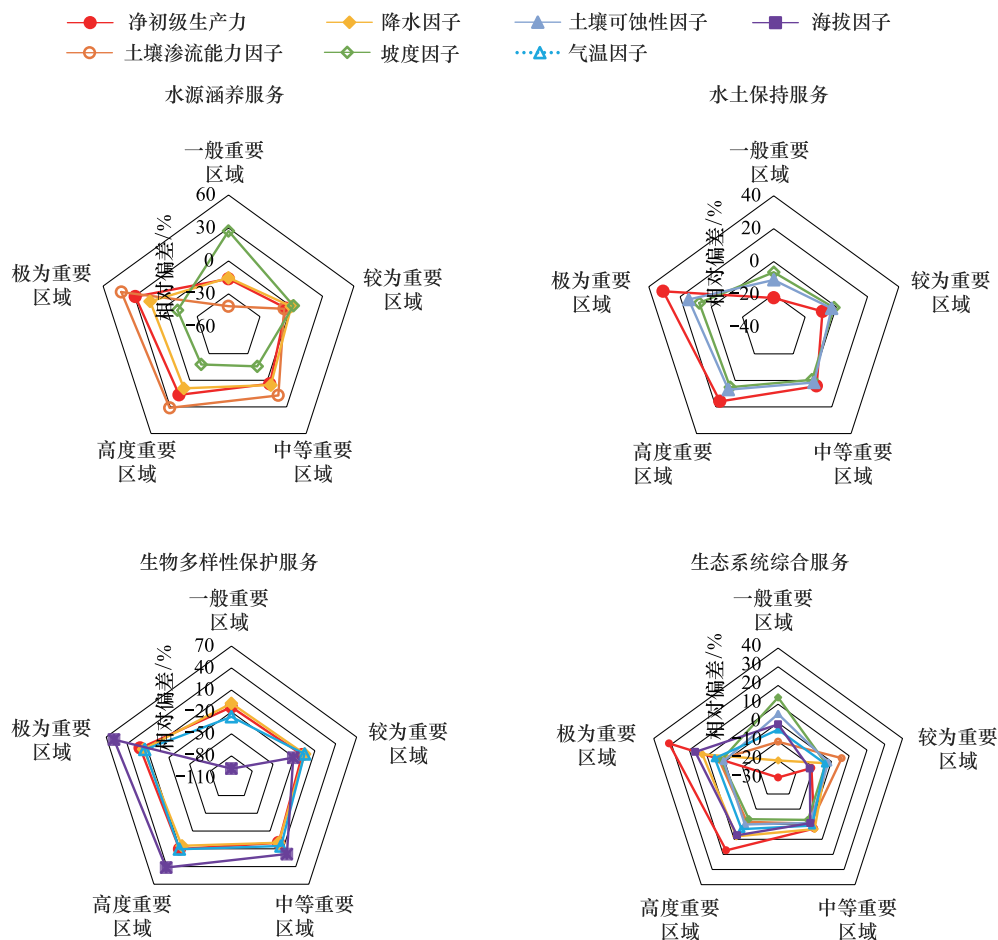


图 9 闽三角区域生态系统服务各重要性区域内主控因子识别图

Fig.9 Identification of main control factors in the importance regions of ecosystem services of Min triangle area

有规律的结果也让我们对其有了更加深入的理解。

由于数据收集的困难性,本文仅对研究区影响因子的多年年平均数据进行了获取,希望得到一个稳定的、普适的生态系统综合服务评价结果。而现在看来,此项研究的进展也十分顺利,研究结果明确划分了闽三角区域水源涵养服务、水土保持服务、生物多样性保护服务以及生态系统综合服务的重要性等级和区域。通过对闽三角区域生态系统服务重要性的评价,我们验证了 NPP 定量指标评价方法在大中尺度区域生态系统服务重要性评价中所具有的科学与可行性。在对生态系统服务重要性评价的结果分析中,我们引入定量分析的方法,从面积、位置、方向、集中分布区、海拔以及坡度这几个维度切入,直观揭示了闽三角区域 4 种生态系统服务各重要性区域的空间分布规律。此外,通过对各重要性级别区域内土地利用占比变化的分析和主要控因子的识别分析,我们尝试着发现了部分影响区域内生态系统服务重要性划分结果的内在机理,结果印证了不同土地利用类型下的生态系统所提供服务的能力是有明显差别的。同时,我们还可以看出在这项研究中 NPP 几乎在每一种生态系统服务重要性的评价中都作为主要控制因子,这也同样可以说明 NPP 值的空间分布对反映生态系统服务能力的空间分布研究具有重要意义。

在接下来的研究中,我们将会对近些年来每年的影响因子数据进行获取,希望能够探究研究区范围内生态系统服务重要性区域多年的、连续的时空演变规律,进而更好地理解研究区生态系统服务的变化情况,并基于此规律对未来生态系统服务的演变给予科学的预测。最后,希望此项研究的成果能为闽三角区域生态系统科学的研究以及重点生态功能区的识别、划分提供科学依据,为区域生态保护红线划定的相关工作提供理论

与技术上的支持,为相关环境规划与管理政策制定者提供客观合理的决策依据。

参考文献(References):

- [1] Daily G C. Nature's Services; Societal Dependence on Natural Ecosystems. Natural Ecosy: Island Press, 1997: 220-221.
- [2] 傅伯杰,周国逸,白永飞,宋长春,刘纪远,张惠远,吕一河,郑华,谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576.
- [3] 欧阳志云,王如松. 生态系统服务功能、生态价值与可持续发展. 世界科技研究与发展, 2000, 22(5): 45-50.
- [4] 欧阳志云,王如松,赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [5] 王治江,李培军,万忠成,王延松,董丽新,陈大光. 辽宁省生态系统服务重要性评价. 生态学杂志, 2007, 26(10): 1606-1610.
- [6] 和爱军. 浅析日本的森林公益机能经济价值评价. 中南林业调查规划, 2002, 21(2): 48-54.
- [7] 李艳春. 区域生态系统服务功能重要性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 李文华,欧阳志云,赵景柱. 生态系统服务功能研究. 北京: 气象出版社, 2002.
- [11] 陈仲新,张新时. 中国生态系统效益的价值. 科学通报, 2000, 45(1): 17-22.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 王治江,李培军,王延松,胡涛,巩宗强,孙铁珩,万忠成,陈大光. 辽宁省生态功能分区研究. 生态学杂志, 2005, 24(11): 1339-1342.
- [15] 刘娅,朱文博,韩雅,李双成. 基于 SOFM 神经网络的京津冀地区水源涵养功能分区. 环境科学研究, 2015, 28(3): 369-376.
- [16] 王春菊,汤小华. 基于 GIS 的水源涵养功能评价研究——以福建省为例. 安徽农业科学, 2007, 35(28): 9090-9091.
- [17] 朱万泽,范建容,王玉宽,申旭红,田兵伟,魏宗华. 长江上游生物多样性保护重要性评价——以县域为评价单元. 生态学报, 2009, 29(5): 2603-2611.
- [18] 倪艳芳,钱锐,潘保原. 黑龙江省生物多样性保护重要性评价. 环境科学与管理, 2007, 32(3): 81-83.
- [19] 陈雅春,程淑芳,潘保原. 黑龙江省土壤保护重要性评价. 环境科学与管理, 2007, 32(11): 53-54, 97-97.
- [20] 吴钢,肖寒,赵景柱,邵国凡,李静. 长白山森林生态系统服务功能. 中国科学(C 辑), 2001, 31(5): 471-480.
- [21] 肖玉,安凯,谢高地,鲁春霞. 中国 10 类典型稻田生态系统服务评价(英文). 资源与生态学报, 2011, 2(4): 328-337.
- [22] 谢高地,张钊铨,鲁春霞,郑度,成升魁. 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.
- [23] 刘晓辉,吕宪国,姜明,商丽娜,王锡刚. 湿地生态系统服务功能的价值评估. 生态学报, 2008, 28(11): 5625-5631.
- [24] 肖玉,谢高地,安凯. 青藏高原生态系统土壤保持功能及其价值. 生态学报, 2003, 23(11): 2367-2378.
- [25] 李屹峰,罗跃初,刘纲,欧阳志云,郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. 生态学报, 2013, 33(3): 726-736.
- [26] 李月臣,刘春霞,闵婕,王才军,张虹,汪洋. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价. 生态学报, 2013, 33(1): 168-178.
- [27] 付奇,李波,杨琳琳,张新时. 西北干旱区生态系统服务重要性评价——以阿勒泰地区为例. 干旱区资源与环境, 2016, 30(10): 70-75.
- [28] 阮俊杰. 基于生态系统服务重要性的城镇优化管理——以福州沿海地区为例. 水土保持研究, 2015, 22(5): 186-190.
- [29] 肖宝,任华丽,马广文,李咏红,袁兴中,谢强,苏德苏日古格. 成渝经济区生态系统服务功能重要性评价. 环境科学研究, 2011, 24(7): 722-730.
- [30] 凡非得,罗俊,王克林,陈洪松,张伟. 桂西北喀斯特地区生态系统服务功能重要性评价与空间分析. 生态学杂志, 2011, 30(4): 804-809.
- [31] 李鲁欣,邓祥征,战金艳,李玉江. 鄱阳湖流域生态系统服务功能重要性评价——基于 AHP 分析方法. 安徽农业科学, 2008, 36(20): 8786-8787.
- [32] 傅伯杰,陈利顶,王军,孟庆华,赵文武. 土地利用结构与生态过程. 第四纪研究, 2003, 23(3): 247-255.
- [33] 刘泉,丁智才,杨雨潇. 闽南金三角会展都市圈构建策略研究——基于厦漳泉一体化背景. 厦门理工学院学报, 2016, 24(4): 34-40.
- [34] 福建省统计局,国家统计局福建调查总队. 2015 福建统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2015: 8-8.
- [35] 卜兆宏,李全英. 土壤可蚀性(K)值图编制方法的初步研究. 农村生态环境(学报), 1995, 11(1): 5-9.
- [36] 刘智方,唐立娜,高莉洁,许通. 生态系统服务模型应用的研究. 环境科学与技术, 2016, 39(S1): 387-392.
- [37] 肖寒,欧阳志云,赵景柱,王效科,韩艺师. 海南岛生态系统土壤保持空间分布特征及生态经济价值评估. 生态学报, 2000, 20(4): 552-558.
- [38] 黄从红,杨军,张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [39] 中国环境保护部. 生态保护红线划定技术指南. [2017-06-25]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201505/t20150518_301834.htm.
- [40] 张立伟,傅伯杰,吕一河,董治宝,李英杰,曾源,吴炳方. 基于综合指标法的中国生态系统服务保护有效性评价研究. 地理学报, 2016, 71(5): 768-780.
- [41] 陈东立,余新晓,廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析. 世界林业研究, 2005, 18(1): 49-54.
- [42] 韦红波,李锐,杨勤科. 我国植被水土保持功能研究进展. 植物生态学报, 2002, 26(4): 489-496.
- [43] 李昌哲,郭卫东. 森林植被的水文效应. 生态学杂志, 1986, 5(5): 17-21.
- [44] Costanza R, Fisher B, Mulder K, Liu S, Christopher T. Biodiversity and ecosystem services: A multi-scale empirical study of the relationship between species richness and net primary production. Ecological Economics, 2007, 61(2/3): 478-491.
- [45] 曹慧明,董仁才,邓红兵,余丽军,刘建军,王豪伟,马赫. 区域生态系统重心指标的概念与应用. 生态学报, 2016, 36(12): 3639-3645.