

中国自然资源生态服务重要性评价与空间格局分析

吴英迪, 蒙吉军

(北京大学城市与环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 自然资源是保障经济社会发展的重要物质基础, 同时又发挥了重要的生态服务功能。选取水源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性维护和产品提供五类生态服务, 采用NPP定量指标法识别中国自然资源生态服务的重要区域, 并进一步分析空间格局特征。结果表明: 中国自然资源生态服务极重要和高度重要区约占总面积的1/4, 以东北山地、江南地区、西南地区和青藏高原东部等水源涵养能力强、水土保持较好、防风固沙水平高、生物多样性较丰富的地区为主; 不同类型自然资源的生态服务重要性差异显著, 耕地资源的产品提供服务重要性显著, 林地和草地资源的水源涵养、水土保持、防风固沙及生物多样性维护服务重要性均较显著, 水域主要提供水源涵养服务; 各生态服务重要性在空间上均显著集聚, 自然资源综合生态服务的热点区主要分布在大兴安岭、长白山、浙闽山地、武夷山、南岭山地、秦岭山地、滇西南地区 and 藏东南山地等; 自然资源综合生态服务重要性的空间分布与农业自然带/亚带呈现较高的一致性, 热带和温带地区的重要性级别较高。研究结果可为区域自然资源管理及生态保护修复提供决策依据。

关键词: 自然资源; 生态服务重要性; NPP; 空间格局; 中国

自然资源是保障经济社会发展、提高人类当前和未来福祉的重要物质基础和能量来源, 是综合国力的重要构成部分^[1]。同时, 赋存于不同类型生态系统中的自然资源, 又具有强大的提供产品、涵养水源、保持水土、防风固沙、维护生物多样性等服务功能^[2]。随着我国社会经济的飞速发展和城镇化的快速推进, 自然资源不合理利用引发的生态环境问题(如水土流失、沙漠化肆虐、水体污染、生物多样性锐减等)日益严峻^[3]。近年来, 随着人们对生态安全的高度重视, 自然资源的生态服务重要性也引起了世界性的关注。

结合学者从不同角度对自然资源生态重要性的认识^[4,5], 本文定义自然资源的生态服务重要性是指自然资源对于保障区域生态安全、防止生态恶化或退化的重要程度。近年来, 诸多学者也对自然资源的生态服务重要性评价展开了研究: 如对农田^[6,7]、森林^[8,9]、草地^[10,11]等单一自然资源提供的各类服务进行评价; 对特定区域复合生态系统的单一生态服务进行重要性评价^[12,13]; 土地资源利用对生态系统服务的时空影响^[14,15]; 中小尺度区域^[16,17]和典型流域^[18,19]等生态脆弱区的生态服务重要性综合评价。

我国高度重视自然资源生态服务重要性的评价工作, 在《全国主体功能区规划》(2010)、《全国功能分区技术规范》(2014)、《全国生态功能区划》(2015)、《生态保护红线划定指南》(2017)、《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南》(试

收稿日期: 2021-01-11; 修订日期: 2021-08-16

基金项目: 教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(19JZD023); 国家社会科学基金重大项目(20ZDA085)

作者简介: 吴英迪(1998-), 女, 河北沧州人, 硕士, 研究方向为土地生态。E-mail: ydwy@stu.pku.edu.cn

通讯作者: 蒙吉军(1971-), 男, 甘肃张掖人, 博士, 副教授, 研究方向为生态系统管理与土地变化。

E-mail: jijunm@pku.edu.cn

行)》(2020)中,对识别生态服务重要区域的方法及其在相关资源环境领域工作中的意义进行了明确。目前,生态服务重要性评价方法主要有参数法、因子叠加法、模型法和定量指标法^[20]。(1)参数法又称参数借用法,是目前应用最多的方法,根据土地类型单位面积生态系统服务的物质量或价值量为参数来计算生态系统服务价值^[21],但参数法忽略了土地类型在生态系统服务提供的空间差异性^[20]及对社会经济环境的依赖性^[20]。(2)因子叠加法选择影响各生态服务功能的重要因子(如地貌、气候、植被等)通过叠加分析来识别生态服务重要性^[22]。如尤南山等^[18]将河流、湖泊及其缓冲区与水源涵养林叠加划分黑河中游水源涵养重要性。因子叠加法基本属于定性分析,缺乏内在机制的揭示和评价的客观性。(3)模型法主要基于生态系统服务产生机理来估算生态系统物质量,如InVEST、ARIES等模型,进而评价生态服务重要性。如Kusi等^[19]利用InVEST模型中的碳储量、产水量等模块量化评估了Ourika流域的碳固存、水源涵养等服务。由于模型运转需要众多参数,获取难度大,评估中的不确定性和误差也在所难免。(4)定量指标法的出现受模型法的局限和挑战,基于生态模型反演生态系统中间物质,如植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)、归一化差分植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)等,通过明确中间物质与最终服务价值的关系来评价生态服务重要性。该方法参数较少、操作便捷,不以精准模拟生态过程和估算生态系统服务为目的,通过简要算法兼顾了评估生态系统服务能力的科学性和实用性。由于生态系统的生产力是其功能的最显著外在表征,从评价方法的科学性、数据可获取性和方法适用性出发,NPP定量指标法是目前最适用于大空间尺度评估的方法^[20,23,24]。在全国尺度生态服务重要性的研究中,张路等^[25]根据通用土壤流失方程、水量平衡方程等生态过程模拟方法分析了2010年中国生态系统提供土壤保持、水源涵养等六种服务的空间分布;徐新良^[26]参考谢高地等^[27]生态服务价值当量因子法进行修正,计算了2015年中国食物生产、水文调节、生物多样性和美学景观等11种生态服务价值;黄敏等^[28]基于Costanza等^[21]和谢高地等^[27]研究得到的价值系数进行修正,综合分析了1990—2015年中国土地生态系统总生态服务价值的空间演化。总结已有研究,发现多关注单一资源类型,且多以生态系统作为研究对象,多聚焦在生态系统服务的价值评估上;研究以中小尺度区域和典型流域居多,缺乏对全国尺度自然资源生态服务重要性空间格局的揭示。

故此,本文基于NPP定量指标法构建适用于全国尺度的自然资源生态服务重要性评价模型,识别中国自然资源生态服务的重要区域,诊断自然资源利用面临的生态环境问题,为自然资源可持续利用和国土空间规划提供理论与数据支持。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

我国位于亚欧大陆东部,太平洋西岸,3°51′~53°33′N、73°33′~135°5′E。我国地域辽阔,陆地总面积约960万km²。地势总体西高东低,依海拔差异呈现显著的三大阶梯,地貌类型多样,山地、高原、盆地、丘陵和平原均有分布。景观类型丰富,森林、灌丛、草原、草甸、沼泽和荒漠均有分布。我国自然资源丰富多样,但人均拥有量不足、空间分布不均衡。土地资源总量多,但人均占有量少,耕地、林地占比较低,可利用土地面积较少。土地资源空间分布很不均衡,耕地资源主要分布在东部季风区的平原和盆地,

林地资源多分布在东北、西南地区的山地，草地资源则多分布在400 mm等降水量线以西以北的高原和山区。我国水资源总量居世界第四位，用水需求持续增长，水资源供需矛盾十分突出^[29]。水土资源时空分布很不均衡，淮河流域及其以北地区，集中了全国62%的耕地，但水资源只占全国的20%；长江流域及其以南地区集中了全国80%以上的水资源，但耕地只占全国的30%。

1.2 数据来源与处理

NPP数据来自美国蒙大拿大学数字地球动态模拟项目组 (<http://www.ntsug.umt.edu/>) 的2000—2015年MOD17A3数据集，该数据产品是NASA MOD17数据集的升级版。目前已开放共享的NPP数据主要有中国科学院资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>) 的2000—2010年NPP数据集、地理国情监测云平台 (<http://www.dsac.cn/>) 的2000—2016年NPP数据集、全球变化科学研究出版系统 (<http://www.geodoi.ac.cn/>) 的1985—2015年逐月NPP数据集以及NASA/USGS (<https://lpdaac.usgs.gov/>) 的MOD17A3HGF数据集等。相比其他数据集，因该数据集能同时满足数据时效性、精度及质量可靠性的要求，数据产品成熟度较高，并改进了MODIS LAI-FPAR受云层和气溶胶的影响^[30]，可满足本文基于多年平均NPP数据反演自然资源生态服务、揭示中国自然资源生态服务重要性空间格局的要求。此外，气象数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 的中国地面气候资料年值及月值数据集；DEM数据来自中国科学院地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>)；土壤数据来自国家青藏高原科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn/>) 的中国土壤数据集 (v1.1)；土地利用数据、NDVI数据、植被类型空间分布数据、河流水系数据、自然保护区数据及农业自然区划数据均来自中国科学院资源环境数据云平台；重要饮用水水源地数据来自北京大学城市与环境学院地理数据平台 (<http://geodata.pku.edu.cn/>)。

数据处理：对NPP数据进行提取、栅格计算等处理，得到多年平均净初级生产力 NPP_{mean} ；对我国2421个气象站点多年平均气温和平均降水量数据进行整理、样条函数插值并归一化得到多年平均气温因子 F_{tem} 和多年平均降水量因子 F_{pre} ；利用FAO改进的风蚀气候侵蚀模型公式^[31]计算，对结果采用克里格插值再归一化，得到多年平均气候侵蚀力因子 F_q ；基于王万忠等^[32]计算的我国主要气象站点的降雨侵蚀力值，采用空间插值再归一化得到降雨侵蚀力因子 R ；通过对DEM数据进行海拔运算、坡度分析和地表粗糙度计算并归一化，分别得到海拔因子 F_{alt} 、坡度因子 F_{slo} 和地表粗糙度因子 D ；对土壤质地数据进行分类、赋值并归一化，得到土壤渗流因子 F_{sic} ；利用Williams^[33]创建的EPIC模型公式计算再将结果归一化，得到土壤可蚀性因子 K ；对土壤数据库提取、整理并归一化，得到土壤有机质含量因子 F_{oc} ；在谢高地等^[27]制定的生物多样性服务当量的基础上，利用NDVI数据修正^[34]得到生境重要性指数 S_H ，在食物生产和原料生产服务当量的基础上，利用农林牧渔产值数据修正得到供给重要性指数 F_{sup} 。

数据处理工具主要为ArcGIS 10.5。空间数据均统一到相同的坐标系和投影系统 (WGS_1984_Lambert_Conformal_Conic)，栅格数据统一重采样到1 km×1 km的分辨率。

1.3 研究方法

1.3.1 自然资源生态服务重要性评价

本文选取水源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性维护和产品提供五类生态服务进行重要性评价。NPP定量指标法以NPP数据为基础，参数较少且较易获取，结果客

观准确^[17], 因此本文选用NPP定量指标法。各类生态服务重要性评价模型及补充分级标准依据《生态保护红线划定指南》(2017)^[35]、《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(试行)》(2020)^[36]以及相关研究^[18,22,34,37,38]。

(1) 水源涵养

水源涵养重要性以水源涵养服务能力指数 WR 进行评价^[35], 公式如下:

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

式中: NPP_{mean} 为多年植被平均净初级生产力 ($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); F_{sic} 为土壤渗流能力因子; F_{pre} 为多年平均降水量因子; F_{slo} 为坡度因子。

通过 ArcGIS 空间分析工具对水源涵养服务能力指数进行重分类, 利用自然断点法与经验知识相结合, 将其分为极重要、高度重要、中等重要、一般重要和不重要五个级别。后几种服务重要性级别划分方法相同, 不再重复。由于此方法未考虑河流、湖泊、水库、重要饮用水水源地等, 通过识别上述水源保障区 (表1)^[18,36]完善重分类结果。

(2) 水土保持

水土保持重要性以水土保持服务能力指数 S_{pro} 进行评价^[35,37], 公式如下:

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

式中: K 为土壤可蚀性因子; R 为降雨侵蚀力因子。

(3) 防风固沙

防风固沙重要性以防风固沙服务能力指数 S_{ws} 进行评价^[35], 公式如下:

$$S_{ws} = NPP_{mean} \times K \times F_q \times D \quad (3)$$

$$F_q = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} u^3 \left\{ \frac{ETP_i - P_i}{ETP_i} \right\} \times d \quad (4)$$

$$ETP_i = 0.19(20 + T_i)^2 \times (1 - r_i) \quad (5)$$

$$D = 1 / \cos(\theta) \quad (6)$$

式中: F_q 为多年平均气候侵蚀力因子; D 为地表粗糙度因子; u 为 2 m 高处的月平均风速 (m/s); ETP_i 为月潜在蒸发量 (mm); P_i 为月降水量 (mm); d 为当月天数 (天); T_i 为月平均气温 ($^{\circ}\text{C}$); r_i 为月平均相对湿度 (%); θ 为坡度 ($^{\circ}$)。

(4) 生物多样性维护

生物多样性维护重要性以生物多样性维护服务能力指数 S_{bio} 进行评价^[34,35], 公式如下:

$$S_{bio} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt}) \times S_H \quad (7)$$

式中: F_{tem} 为多年平均气温因子; F_{alt} 为海拔因子; S_H 为生境重要性指数。

在重分类基础上, 将 477 个国家级自然保护区补充划入生物多样性维护极重要区^[36], 其中含有核心区、缓冲区、实验区的 167 个国家级自然保护区除核心区划入极重要区域

表1 水源保障区水源涵养重要性分级

Table 1 The classification of the importance of water conservation in water guarantee areas

类型	范围	分级
主干河流	河流两侧 1 km	极重要
	河流两侧 2 km	高度重要
	河流两侧 3 km	中等重要
二级河流	河流两侧 200 m	极重要
	河流两侧 400 m	高度重要
	河流两侧 600 m	中等重要
湖泊、水库	—	极重要
重要饮用水水源地	—	极重要

外，缓冲区和实验区划入高度重要区域。

(5) 产品提供

产品提供重要性以产品提供服务能力指数 S_{ps} 进行评价^[22,38]，公式如下：

$$S_{ps} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{oc} \times (1 - F_{slo}) \times F_{sup} \quad (8)$$

式中： F_{oc} 为土壤有机质含量因子； F_{sup} 为供给重要性指数。

(6) 综合生态服务重要性

借鉴《生态保护红线划定指南》及相关研究^[16,18,39,40]，对五类生态服务重要性评价结果进行级别赋值：极重要为9、高度重要为7、中等重要为5、一般重要为3、不重要为1。然后利用下式综合评价自然资源生态服务重要性：

$$ESI_j = \sqrt{\prod_{i=1}^5 ESI_i} \quad (9)$$

式中： ESI_j 代表 j 空间综合生态服务重要性评价指数； ESI_i 为 i 项生态服务重要性等级值。

最后利用 ArcGIS 重分类功能基于自然断点法将 ESI 分为极重要、高度重要、中等重要、一般重要和不重要五级。

1.3.2 自然资源生态服务重要性空间格局分析

(1) 全局空间自相关分析

为了探究自然资源生态服务重要性在空间上的相关和差异程度，利用 ArcGIS 空间自相关工具计算 Moran's I 指数。在给定显著性水平时，若 Moran's I 显著为正，表明生态服务重要性较高（或较低）的区域在空间上显著集聚，值越趋近于1，总体空间差异越小；反之亦然。若各生态服务重要性在全局上显著集聚，则继续探究局部集聚情况，即是否存在热点集中区。

(2) 中心位置及热点分析

中位数中心是受异常值影响较小的一种中心趋势度量^[41]。通过 ArcGIS 中位数中心计算工具，探究各生态服务重要性区域在研究区分布的地理中心位置，从而得到从不重要到极重要区域地理中心的移动趋势；利用 ArcGIS 热点分析工具对自然资源生态服务极重要和高度重要区进行热点集中区的识别分析，为政府管理部门开展重点保护提供依据。

(3) 基于农业自然区划的空间分析

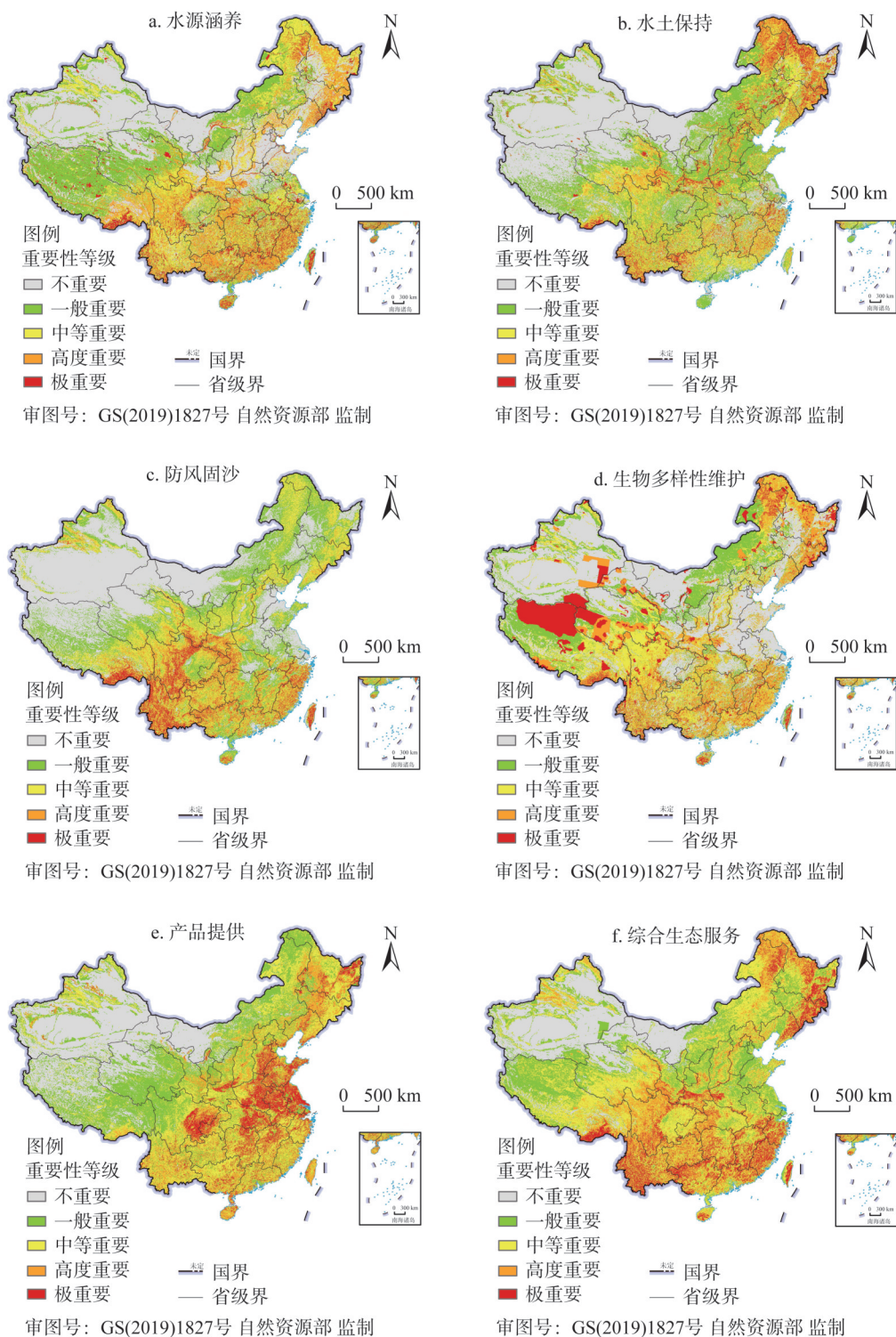
本文根据丘宝剑^[42]对中国农业自然区划结果，揭示不同自然带/亚带自然资源生态服务重要性的空间特征。首先，在13个自然带/亚带各生成1000个随机点，将自然资源综合生态服务重要性值提取到随机点上；然后，将13000组随机点数据进行K-W检验（Kruskal-Wallis test），从而探究多个独立样本之间的差异性。若 $p < 0.05$ ，说明两个区域之间自然资源综合生态服务重要性具有明显的地域性分异；若 $p > 0.05$ ，说明两个区域之间无显著性差异。

2 结果分析

2.1 自然资源生态服务重要性评价结果

2.1.1 水源涵养重要性

我国自然资源水源涵养重要性基本呈东北东南高、西北低的空间分布特征（图1a），面积从不重要到极重要呈逐级递减（表2）。其中，极重要和高度重要区面积分别占总面积



注: 本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作, 底图无修改, 下同。

图1 中国自然资源生态服务重要性分级

Fig. 1 The classification of the importance of natural resource ecosystem services in China

表 2 中国自然资源生态服务重要性级别面积比例

Table 2 The proportion of each important area of natural resource ecosystem services in China (%)

重要性级别	面积比例					
	水源涵养	水土保持	防风固沙	生物多样性维护	产品提供	综合生态
极重要	6.08	4.90	4.61	9.51	7.25	8.37
高度重要	14.38	11.34	10.88	15.58	13.98	17.81
中等重要	20.56	19.95	21.29	17.93	21.26	32.24
一般重要	24.63	27.16	23.94	20.32	25.75	22.50
不重要	34.35	36.65	39.28	36.65	31.75	19.09

积的 6.08%和 14.38%，涵盖了我国主要河流与湖泊的主要水源补给区和发源地，空间上主要分布在小兴安岭、长白山、武陵山区、浙闽丘陵、南岭山地、台湾中东部山区、秦岭山地、海南中部山区、滇西南地区、藏东南山地和横断山区等；这些地区多为森林或草地覆盖，土质疏松，渗流能力较强，水热均衡条件较好，对于截留降水、增强土壤下渗、减缓地表径流等有重要作用，是涵养水源的主要区域。中等重要区面积占总面积的 20.56%，主要分布在大兴安岭、长江中下游平原、川西北高原区、三峡库区、四川盆地、阿尔泰山地和三江源地区等。其余为水源涵养一般重要或不重要地区。

2.1.2 水土保持重要性

我国自然资源水土保持重要性基本呈东北东南高、西北低的空间分布特征（图 1b），面积从不重要到极重要呈逐级递减（表 2）。极重要和高度重要区面积分别占总面积的 4.90%和 11.34%，空间上主要分布在大小兴安岭、三江平原、长白山、南岭山地、秦岭山地、川西北高原、三江源地区和藏东南山地等；这些地区植被覆盖度较高，土壤可蚀性较弱，能够起到拦截降雨、减缓地表径流动能等作用，进而固定土壤，减少地表土壤随降水流失。中等重要区面积占总面积的 19.95%，主要分布在天山山地、塔里木河流域、河西走廊内陆河流域中下游地区、滇西北地区、环四川盆地丘陵区、西南喀斯特地区等。一般重要和不重要区面积分别占总面积的 27.16%和 36.65%，主要分布在西北干旱区、青藏高原区、内蒙古高原、华北平原、黄土高原、南方红壤丘陵区、四川盆地、三峡库区和川滇干热河谷等地区。

2.1.3 防风固沙重要性

我国自然资源防风固沙重要性基本呈南高北低的空间分布特征（图 1c），面积从不重要到极重要呈逐级递减（表 2）。极重要和高度重要区面积分别占总面积的 4.61%和 10.88%，空间上主要分布在大别山区、武夷山区、南岭山地、秦岭山地、川西北高原区、滇西南地区、藏东南山地和横断山区等；这些地区水热条件较好，植被生长茂盛，地表粗糙度较高，对削弱大风携带沙子的能力、减小风速起到阻滞作用。中等重要区面积占总面积的 21.29%，主要分布在大小兴安岭、长白山、燕山—太行山区、黄土高原、天山和阿尔泰山等地区。一般重要和不重要区面积分别占总面积的 23.94 和 39.28%，主要分布在西北内陆干旱区、青藏高原中西部、内蒙古高原、呼伦贝尔草原、科尔沁沙地、三江平原、黄淮海平原、阴山北部和四川盆地等。

2.1.4 生物多样性维护重要性

我国自然资源生物多样性维护重要性基本呈东北西南高、西北低的空间分布特征（图 1d），面积从不重要到极重要呈逐级递减（表 2）。极重要和高度重要区面积分别占总

面积的9.51%和15.58%，涵盖了我国重点保护物种分布区和自然保护区，空间上主要分布在大小兴安岭、长白山、天目山、大别山、浙闽山地、南岭山地、秦岭山地、滇西南地区、羌塘高原、三江源地区和藏东南山地等；这些地区生境质量较好，植被类型多样，动物物种丰富，对于调节气候、扩散种子与花粉、净化土壤环境、减轻洪涝与干旱灾害均有重要作用。中等重要区面积占总面积的17.93%，主要分布在青藏高原东部、天山山地、阿尔泰山、塔里木河流域、祁连山地、燕山—太行山区和西南喀斯特地区等。其余为生物多样性维护一般重要或不重要地区。

2.1.5 产品提供重要性

我国自然资源产品提供服务重要性基本呈东南高、西北低的空间分布格局（图1e），面积从不重要到极重要呈逐级递减（表2）。极重要和高度重要区面积分别占总面积的7.25%和13.98%，涵盖了我国重要的粮食生产基地以及主要畜产品、水产品生产的区域，空间上主要分布在黄淮海平原、长江中下游平原、四川盆地、东北平原、内蒙古东部草甸草原、河套灌区、汾渭平原、云南中部丘陵、天山北部草原等地区；这些地区地势平坦，土壤肥沃，降水量较为充沛，光热条件较好，是我国从事农业生产的传统地区。中等重要区面积占总面积的21.26%，主要分布在小兴安岭、长白山、武夷山区、四川东部丘陵、黔东南丘陵、藏东南山地和伊犁盆地等地区，这些地区是我国提供林产品的主要林区。其余为产品提供一般重要或不重要地区。

2.1.6 综合生态服务重要性

我国自然资源综合生态服务重要性基本呈现东南高、西北低的空间分布特征（图1f），面积从不重要到极重要呈先增后减分布（表2）。极重要和高度重要区面积分别占总面积的8.37%和17.81%，以我国东北山地、江南地区、西南地区 and 青藏高原东部等水源涵养能力强、水土保持较好、防风固沙水平高、生物多样性较丰富的地区为主；这些地区受人为干扰较少，植被覆盖度较高，为维持中国自然资源生态系统的稳定及其服务功能发挥着重要作用。中等重要区面积占总面积的32.24%，以内蒙古东部、新疆西北部、四川盆地和青藏高原中南部等草原草甸覆盖度高的地区为主；这些地区虽动植物物种较为丰富，但水土保持和防风固沙能力较低，部分草地有退化沙化趋势。一般重要区面积占总面积的22.50%，以东北平原、华北平原、长江中下游平原等集中农业耕种地区为主；这些区域地形平坦、土壤肥沃，产品提供服务能力极强，但土壤抗侵蚀性较差，其他生态服务重要性相对较低。不重要区面积占总面积的19.09%，以西北荒漠戈壁地区为主，干旱少雨，生境条件相对恶劣，生态系统结构单一。

2.2 重要自然资源生态服务重要性结构

基于我国土地资源空间分布数据（2018年），提取耕地、林地、草地和水域四种重要自然资源，进而与各生态服务重要性评价结果进行叠置，得到四种自然资源生态服务重要性的结构特征和空间分布（图2、图3）。

从图2看出，耕地的产品提供服务重要性非常显著，体现了耕地作为重要的自然资源所提供的功能，此外耕地在水源涵养和水土保持方面也发挥了重要作用；林地和草地资源除提供林、畜产品之外，在水源涵养、水土保持、防风固沙及生物多样性维护服务重要性上均较显著；水域则主要提供水源涵养服务，此外对于水产品提供、生物多样性维持、调节径流、水土保持等方面也发挥了重要作用。

a. 耕地资源						b. 林地资源					
	不重要	一般重要	中等重要	高度重要	极重要		不重要	一般重要	中等重要	高度重要	极重要
水源涵养	38.49	18.65	22.58	13.88	6.40	水源涵养	8.59	10.07	32.37	34.01	14.96
水土保持	23.29	39.34	21.74	11.40	4.23	水土保持	6.24	14.75	27.44	35.56	16.02
防风固沙	34.67	36.50	20.04	6.63	2.16	防风固沙	3.92	12.60	33.57	35.31	14.60
生物多样性维护	61.36	15.31	11.83	9.27	2.22	生物多样性维护	4.27	9.68	25.28	44.12	16.65
产品提供	2.28	8.80	20.56	32.32	36.04	产品提供	6.72	21.74	32.77	25.88	12.89
综合生态服务	5.04	39.78	36.85	12.99	5.34	综合生态服务	0.49	2.76	23.97	47.01	25.78

c. 草地资源						d. 水域资源					
	不重要	一般重要	中等重要	高度重要	极重要		不重要	一般重要	中等重要	高度重要	极重要
水源涵养	14.09	30.34	26.78	18.13	10.67	水源涵养	6.66	8.01	17.98	26.90	40.45
水土保持	20.78	30.85	22.69	14.24	11.43	水土保持	7.92	10.74	43.28	27.60	10.48
防风固沙	24.11	25.26	27.43	13.38	9.81	防风固沙	58.75	24.46	9.95	4.02	2.81
生物多样性维护	13.87	24.72	32.10	16.60	12.71	生物多样性维护	8.11	12.16	34.27	23.38	22.08
产品提供	15.65	35.27	28.73	13.80	6.55	产品提供	8.95	24.15	32.63	20.62	13.64
综合生态服务	7.92	24.63	36.91	19.67	10.86	综合生态服务	7.58	16.99	45.16	19.50	10.77

单位: %

图2 中国重要自然资源生态服务重要性结构组成

Fig. 2 The important structure of the ecosystem services of major natural resources in China

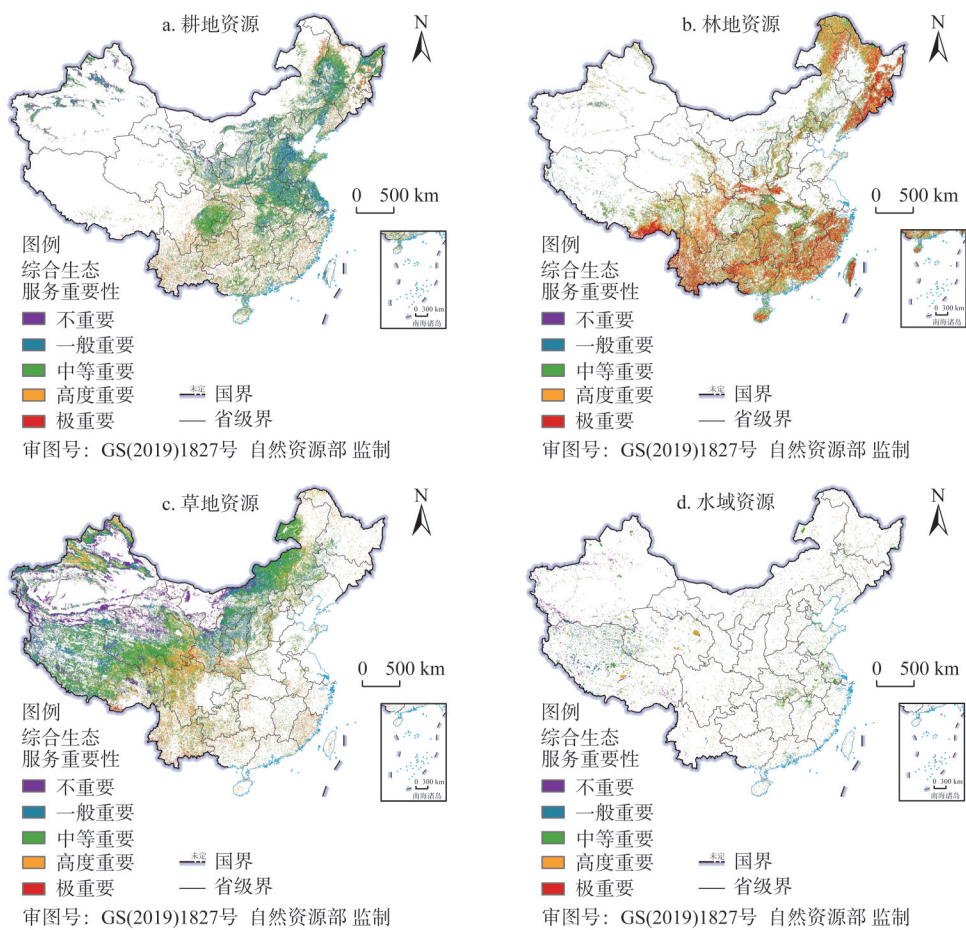


图3 中国重要自然资源的综合生态服务重要性分级

Fig. 3 The classification of the integrated ecological service importance of major natural resources in China

从空间分布来看,耕地资源的生态服务重要性以一般重要为主,其中水田的重要性等级较高,主要分布在秦—淮线以南、降水量丰沛的中国南方地区,东北平原也有零星分布(图3a);林地资源的生态服务重要性以高度重要为主,通过与中国植被类型空间分布数据进行叠置,发现重要性等级高的尤其以阔叶林、针阔混交林类型为主,空间上集中分布在东北林区、西南林区和南方林区(图3b);草地资源的生态服务重要性以中等重要为主,其中高、中覆盖度草地的重要性等级较高,空间上主要分布在内蒙古牧区、青海牧区、西藏牧区和新疆牧区,重要性大致呈从东南向西北递减(图3c);水域资源的生态服务以中等重要为主,其中河流、湖泊等水体的重要性等级较高,空间分布不均,南多北少,长江流域及其以南地区水资源占全国总量的80%,黄河、淮河和海河地区不到全国的6%,西北区水资源量仅占全国4.6%(图3d)。

2.3 自然资源生态服务重要性空间格局

2.3.1 全局空间自相关分析

全局空间自相关结果显示(表3),生态服务重要性的Moran's *I*值均为正、且均在0.50以上,*z*得分均大于2.58、且*p*值均小于0.01,表明中国各生态服务重要性在空间上均呈现显著的正相关关系。自然资源综合生态服务重要性的空间集聚程度最高,其次为产品提供服务,水源涵养服务的空间集聚程度则相对较低。

2.3.2 中心位置及热点分布

从图4可以看出,随着区域重要性级别的升高,我国自然资源的水源涵养、产品提供及综合生态服务的地理中心均近似由西北逐渐向东南方向移动,水土保持服务地理中心由西北向东南、再向东北方向移动,防风固沙服务地理中心由西北向东南、再向西南方向移动,而生物多样性维护服务地理中心则由西北向东南、再向西北方向移动。

我国自然资源的水源涵养、水土保持和生物多样性维护服务热点区均包含大小兴安岭、长白山、秦岭山地及藏东南山地等阔叶林分布较广的地区,此外水源涵养服务热点区还包括湖泊水库等重要水源地,生物多样性维护服务热点区还包括自然保护区等物种保护关键区;防风固沙服务热点区主要分布在横断山区、滇西南地区、藏东南山地等西南地表粗糙度较高的山地;产品提供服务热点区主要分布在长江中下游平原、四川盆地及三江平原等水田分布为主的地区。此外,自然资源综合生态服务的热点区主要分布在大兴安岭中部、三江平原西部、长白山、浙闽山地丘陵区、天目山区、武夷山区、南岭山地、秦岭山地、大娄山区、黔东南地区、桂西南地区、滇西南地区、藏东南山地等。在生态环境和自然资源管理中,政府管理部门应对自然资源生态服务热点区进行重点保护,限制大规模的开发建设活动。

2.3.3 基于农业自然区划的空间分异

选取我国农业自然区划的13个自然带/亚带,揭示不同自然带/亚带自然资源生态服

表3 自然资源各生态服务重要性全局空间自相关分析结果

Table 3 The results of global spatial autocorrelation analysis on the importance of natural resource ecosystem services

生态服务	Moran's <i>I</i> 指数	<i>z</i> 得分	<i>p</i> 值
水源涵养	0.5319	1302.03	0.00
水土保持	0.5847	526.87	0.00
防风固沙	0.6984	1160.46	0.00
生物多样性维护	0.6370	572.87	0.00
产品提供	0.7052	825.37	0.00
综合生态服务	0.7190	1293.23	0.00

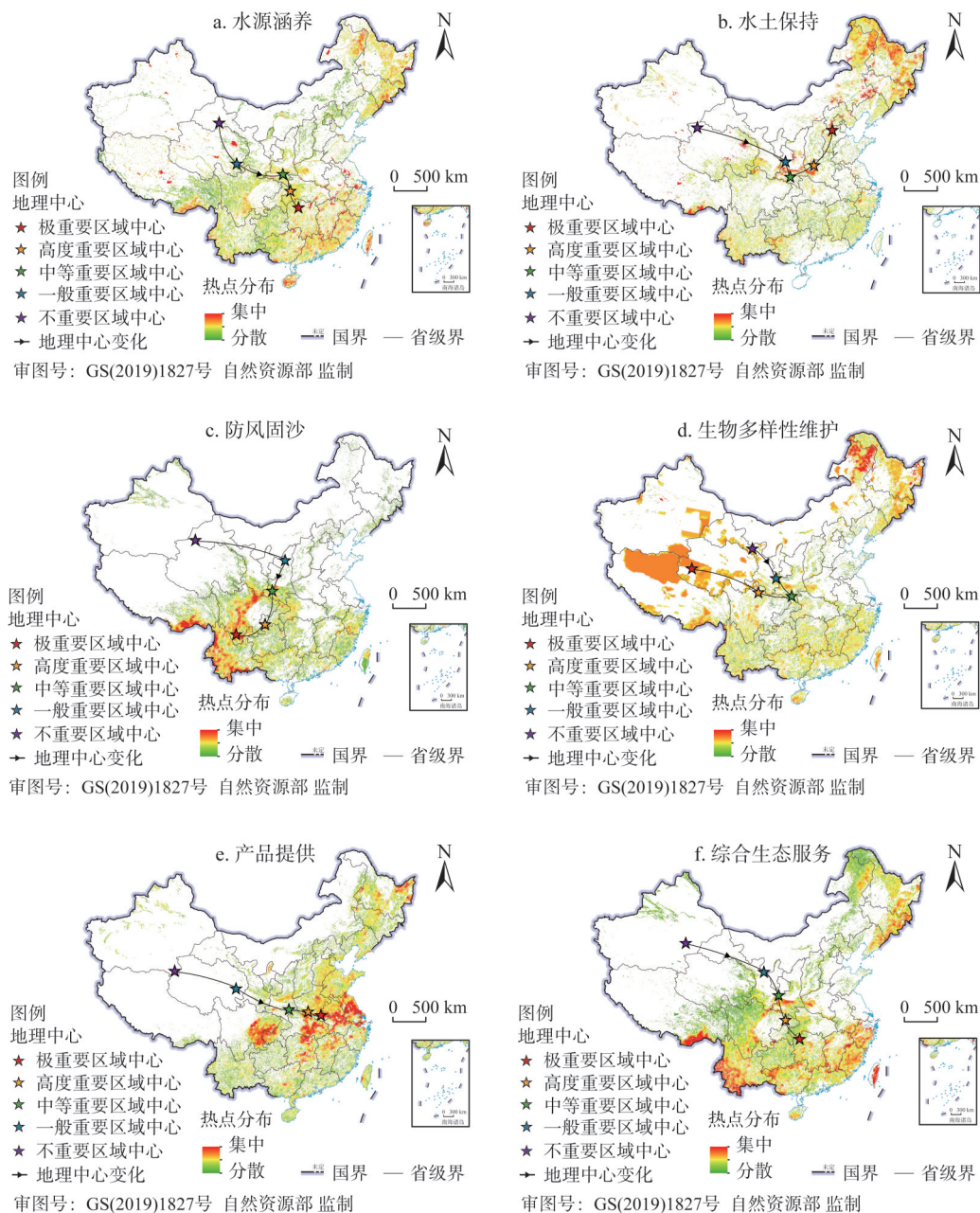


图4 中国自然资源生态服务重要性区域中心位置及热点区分布

Fig. 4 The central location and hot spots distribution of the important regions of natural resource ecosystem services in China

务重要性的空间特征 (图 5a)。由 K-W 检验结果显示, 在 95% 的置信区间下 13 个自然带/亚带的自然资源综合生态服务重要性具有显著差异 ($p < 0.01$)。根据 SPSS 软件得到的箱型图 (图 5b), 13 个自然带/亚带的自然资源综合生态服务重要性从高到低排序为: 中亚热带 > 边缘热带 > 南亚热带 > 寒温带 > 中热带 > 北亚热带 > 中温带 > 暖温带 > 高原温带 > 高原亚寒带 > 干旱中温带 > 高原寒带 > 干旱暖温带。

根据显著性检验结果 (图 5c), 中亚热带、边缘热带和南亚热带三者两两之间均无显

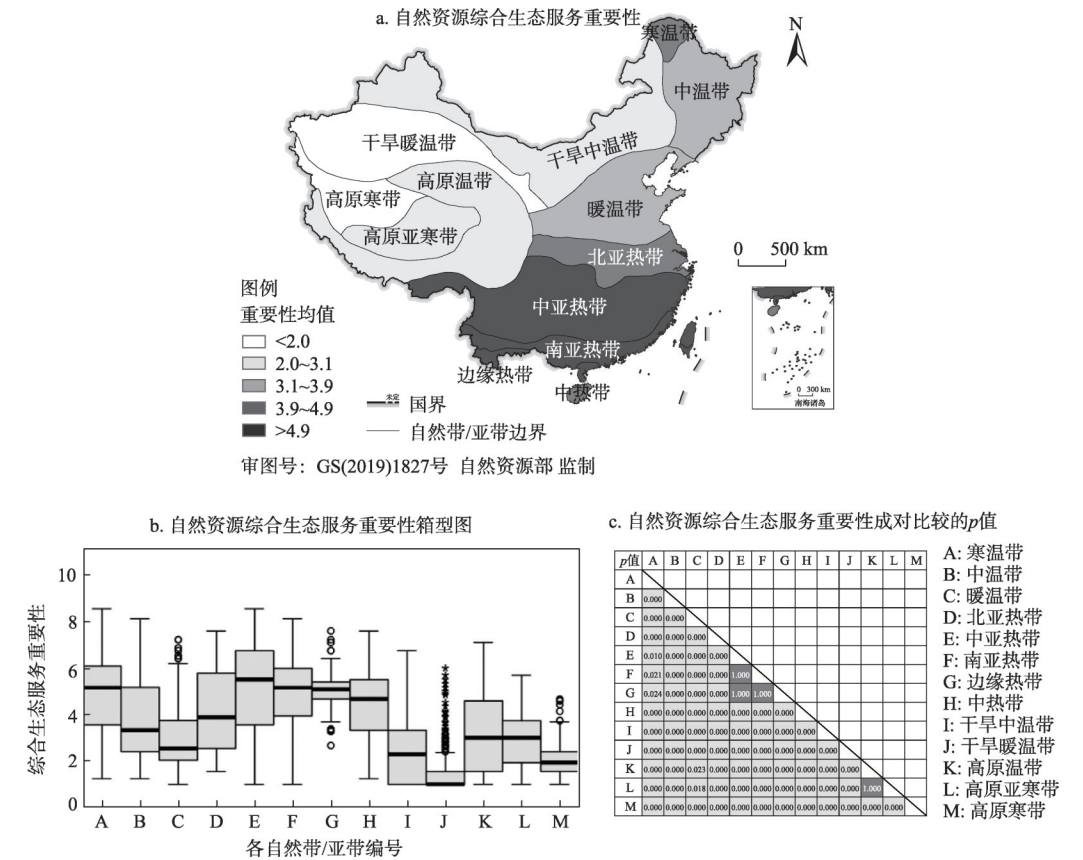


图5 中国农业自然区划的自然带/亚带K-W检验结果

Fig. 5 The Kruskal-Wallis test results of natural zones or subzones in China's agricultural natural divisions

著差异，且三个区域综合生态服务重要性均较高，是自然资源提供生态服务的主要自然带；高原温带与高原亚寒带之间无显著差异，综合生态服务重要性均较低；其他自然带两两之间 p 值 <0.05 ，且重要性级别较高的自然带主要在热带和温带地区，重要性级别较低的主要分布在高寒和干旱地区，说明我国自然资源综合生态服务重要性的空间分布与农业自然区划的自然带/亚带呈现较高的一致性，而且具有明显的地域性分异特征。在自然资源管理中，应针对各区域不同的生态服务重要性特征分区实施分级管理，实现自然资源的质量提升和永续利用。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于NPP定量指标法识别我国自然资源生态服务的重要区域，进而分析自然资源生态服务重要性的空间格局特征和地域差异。主要结论如下：

(1) 我国自然资源综合生态服务极重要和高度重要区约占总面积的1/4，以我国东北山地、江南地区、西南地区 and 青藏高原东部等水源涵养能力强、水土保持较好、防风固沙水平高、生物多样性较丰富的地区为主。

(2) 不同类型自然资源的生态服务重要性差异显著，耕地资源的产品提供服务重要

性非常显著,林地和草地资源除提供林、畜产品之外,水源涵养、水土保持、防风固沙及生物多样性维护服务重要性均较显著,水域主要提供水源涵养服务,对水产品提供、生物多样性维持、调节径流等方面也发挥了重要作用。

(3) 各生态服务重要性在空间上均显著集聚;随着区域重要性级别的升高,综合生态服务的地理中心由西北逐渐向东南方向移动,热点区则主要分布在大兴安岭、长白山、浙闽山地、武夷山、南岭山地、秦岭山地、滇西南地区 and 藏东南山地等。

(4) 我国自然资源综合生态服务重要性的空间分布与农业自然带/亚带呈现较高的一致性,并具有明显的地域分异特点,重要性级别较高的自然带主要在热带和温带地区,重要性级别较低的自然带则主要分布在高寒和干旱地区。

3.2 讨论

已有关于大中尺度生态服务重要性评价的研究中^[25-28],多以生态系统作为研究对象,且大多聚焦在生态系统服务的价值评估上,本文构建了一套全国尺度的自然资源生态服务重要性评价模型,其中水源涵养、生物多样性维护和产品提供重要性的空间分布与张路等^[25]通过 InVEST 模型评估法得到的结果基本一致,一定程度上印证了 NPP 定量指标法在大中尺度区域的适用性。但水土保持和防风固沙重要性的空间分布与上述研究结果在特定地区存在差异,这可能是因为两个评价模型建立的出发点不同。以水土保持服务为例,模型评估法是通过计算潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值得到土壤保持量,考虑了虽然实际土壤侵蚀量较大但仍远小于潜在土壤侵蚀量的地区,诸如黄土高原、三峡库区等,而 NPP 定量指标法是从正向评价自然资源提供水土保持服务能力的相对高低。另外,目前一些省市县基于“双评价”指南也已经开展了相关工作,对比长沙市^[43]、青岛市^[44]生态保护重要性的评估结果,其空间分布与本文结果较为一致,进一步印证了研究结果的可靠性。

本文在评价水源涵养和生物多样性维护重要性时综合运用了 NPP 定量指标法与因子叠加法,即在利用 NPP 定量指标法得到分级结果后,利用因子叠加法补充了水源保障区和物种保护关键区,使评价结果更加科学客观。已有同类型研究对评价结果多为主观上的空间分布识别^[16,18,19],缺乏科学客观的空间格局分析方法,本研究通过全局空间自相关分析、中心位置及热点分析,结合农业自然区划进行了自然资源生态服务重要性空间格局的综合分析。

本文揭示了自然资源的五个生态服务的重要区域,在国土空间规划和自然资源管理中,应基于自然资源生态重要性的空间特征,诊断自然资源利用面临的生态环境问题,调整优化自然资源管理策略:(1) 强化水源涵养功能。对长白山、浙闽丘陵等水源涵养极重要和高度重要区域建立生态功能保护区,实施生态保护补偿机制,限制或禁止影响水源涵养服务的各类开发活动;大力开展森林资源质量的精准提升,进一步加强河湖湿地修复;推进土壤和地下水污染协同防治,发展生态产业及生态清洁小流域的建设。(2) 增强水土保持能力。对大小兴安岭、秦岭山地等水土保持极重要和高度重要区域加强水土流失预防措施,严格自然资源开发项目的生态监管,实施天然林保护工程,控制人为水土流失;对黄土高原、南方红壤丘陵区等水土流失严重的地区实施水土保持工程,科学开展天然林草保护和恢复、退化土地治理等措施,严禁陡坡垦殖和过度放牧。(3) 提高防风固沙水平。对滇西南地区、横断山区等防风固沙极重要和高度重要区域加

强土地的沙化预防,实施更严苛的区域产业环境准入标准,持续推进生态防护林体系建设;对呼伦贝尔草原、科尔沁沙地等抗风蚀性差的地区实施以构建完整防护体系为重点的防风固沙综合整治工程,加大沙化土地封禁保护力度,稳步推进退耕退牧还林还草。(4)构建生物多样性保护网络。对羌塘高原、藏东南山地等生物多样性维护极重要和高度重要区域完善自然保护区体系建设,保护生态系统完整性,限制或禁止破坏重要物种栖息地的各类开发活动;构建区域生态网络,连通生态廊道;开展生物多样性资源调查与监测,开展有害生物防治。(5)保障产品供给能力。对长江中下游平原、天山北部草原等保障农林牧渔产品供给安全的重要区域,保护和改善农田生态系统,发展节水和循环农业,确保耕地资源能够永续利用;推进养殖业规模化标准化发展,保障畜产品和水产品的稳定增产;加强林区建设管理,协调采育平衡,对木材进行深加工以提升附加值。

本文基础数据处理时利用ArcGIS软件空间插值,数据处理的误差会影响研究结果精度,但研究结果仍能充分反映我国自然资源生态服务重要性的空间特征。产品提供服务重要性评价因子的选取也存在一定主观性,随着数据来源的丰富和评估模型的改进,可以更加客观深入地研究。同时,由于数据所限,仅对多年平均状况进行研究,下一步可利用影响因子的时间序列数据进一步揭示我国自然资源生态服务重要性的时空演变特征。

参考文献(References):

- [1] 沈镭,张红丽,钟帅,等. 新时代下中国自然资源安全的战略思考. 自然资源学报, 2018, 33(5): 721-734. [SHEN L, ZHANG H L, ZHONG S, et al. Strategic thinking on the security of natural resources of China in the New Era. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 721-734.]
- [2] 沈镭,钟帅,胡纾寒. 新时代中国自然资源研究的机遇与挑战. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1773-1788. [SHEN L, ZHONG S, HU S H. Opportunities and challenges of natural resources research of China in the New Era. Journal of Natural Resources, 2020, 35(8): 1773-1788.]
- [3] WEI F, ZHAN X. Delineating urban growth boundaries with ecosystem service evaluation. Sustainability, 2019, 11(19): 1-18.
- [4] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等. 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. [FU B J, ZHOU G Y, BAI Y F, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China. Advances in Earth Science, 2009, 24(6): 571-576.]
- [5] 谢花林,李秀彬. 基于GIS的农村住区生态重要性空间评价及其分区管制:以兴国县长冈乡为例. 生态学报, 2011, 31(1): 230-238. [XIE H L, LI X B. Spatial assessment and zoning regulations of ecological importance based on GIS for rural habitation in Changgang town, Xingguo county. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(1): 230-238.]
- [6] XIAO Y, AN K, XIE G D, et al. Evaluation of ecosystem services provided by 10 typical rice paddies in China. Journal of Resources and Ecology, 2011, 2(4): 328-337.
- [7] 谢志坚,贺亚琴,徐昌旭. 紫云英—早稻—晚稻农田系统的生态功能服务价值评价. 自然资源学报, 2018, 33(5): 735-746. [XIE Z J, HE Y Q, XU C X. Appraisal on ecological services from Chinese milk vetch-early rice-late rice cropping ecosystem. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 735-746.]
- [8] 肖强,肖洋,欧阳志云,等. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2014, 34(1): 216-223. [XIAO Q, XIAO Y, OUYANG Z Y, et al. Value assessment of the function of the forest ecosystem services in Chongqing. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(1): 216-223.]
- [9] GETZNER M, ISLAM M S. Ecosystem services of mangrove forests: Results of a meta-analysis of economic values. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(16): 1-13.
- [10] 赵苗苗,赵海凤,李仁强,等. 青海省1998—2012年草地生态系统服务功能价值评估. 自然资源学报, 2017, 32(3): 418-433. [ZHAO M M, ZHAO H F, LI R Q, et al. Assessment on grassland ecosystem services in Qinghai province during 1998-2012. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 418-433.]
- [11] YANG Q, LIU G, GIANNETTI B F, et al. Emergy-based ecosystem services valuation and classification management

- applied to China's grasslands. *Ecosystem Services*, 2020, 42: 101073, Doi: 10.1016/j.ecoser.2020.101073.
- [12] 李该霞, 宋蒙亚, 谢丽芳, 等. 江苏省水土保持功能的重要性评价. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 236-241. [LI G X, SONG M Y, XIE L F, et al. Importance evaluation of soil and water conservation function in Jiangsu province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(1): 236-241.]
- [13] LI P, OMANI N, CHAUBEY I, et al. Evaluation of drought implications on ecosystem services: Freshwater provisioning and food provisioning in the Upper Mississippi River Basin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(5): 1-23.
- [14] 王雅, 蒙古军. 黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响. *干旱区研究*, 2017, 34(1): 200-207. [WANG Y, MENG J J. Effects of land use change on ecosystem services in the middle reaches of the Heihe River Basin. *Arid Zone Research*, 2017, 34(1): 200-207.]
- [15] HUANG A, XU Y, SUN P, et al. Land use/land cover changes and its impact on ecosystem services in ecologically fragile zone: A case study of Zhangjiakou city, Hebei province, China. *Ecological Indicators*, 2019, 104(9): 604-614.
- [16] 陈涛, 叶有华, 孙芳芳, 等. 基于 SPOT 数据的深圳市生态系统服务功能重要性评价. *生态经济*, 2018, 34(2): 151-157. [CHEN T, YE Y H, SUN F F, et al. Assessment on the importance of ecosystem service function in Shenzhen city based on SPOT data. *Ecological Economy*, 2018, 34(2): 151-157.]
- [17] 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): 7254-7268. [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): 7254-7268.]
- [18] 尤南山, 蒙古军. 基于生态敏感性和生态系统服务的黑河中游生态功能区划与生态系统管理. *中国沙漠*, 2017, 37(1): 186-197. [YOU N S, MENG J J. Ecological functions regionalization and ecosystem management based on the ecological sensitivity and ecosystem service in the Middle Reaches of the Heihe River. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(1): 186-197.]
- [19] KUSI K K, KHATTABI A, MHAMMDI N, et al. Prospective evaluation of the impact of land use change on ecosystem services in the Ourika watershed, Morocco. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104796, Doi: 10.1016/j.landusepol.2020.104796.
- [20] 吕一河, 张立伟, 王江磊. 生态系统及其服务保护评估: 指标与方法. *应用生态学报*, 2013, 5(5): 1237-1243. [LYU Y H, ZHANG L W, WANG J L. Assessment of ecosystem and its services conservation: Indicators and methods. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 5(5): 1237-1243.]
- [21] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [22] 凡非得, 罗俊, 王克林, 等. 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. [FAN F D, LUO J, WANG K L, et al. Assessment and spatial analysis of ecosystem service importance in karst area of Northwest Guangxi. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(4): 804-809.]
- [23] EIGENBROD F, ARMSWORTH P R, ANDERSON B J, et al. Error propagation associated with benefits transfer-based mapping of ecosystem services. *Biological Conservation*, 2010, 143(11): 2487-2493.
- [24] JOHNSON K A, POLASKY S, NELSON E, et al. Uncertainty in ecosystem services valuation and implications for assessing land use tradeoffs: An agricultural case study in the Minnesota River Basin. *Ecological Economics*, 2012, 79: 71-79.
- [25] 张路, 肖赓, 郑华, 等. 2010 年中国生态系统服务空间数据集. *中国科学数据*, 2018, 3(4): 11-23. [ZHANG L, XIAO Y, ZHENG H, et al. A spatial dataset of ecosystem services in China (2010). *China Scientific Data*, 2018, 3(4): 11-23.]
- [26] 徐新良. 中国陆地生态系统服务价值空间分布数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统, <http://www.resdc.cn/DOI,2018>, Doi: 10.12078/2018060503. [XU X L. Spatial distribution data set of terrestrial ecosystem service value in China. Data Registration and Publishing System of the Resource and Environmental Science Data Center of the Chinese Academy of Sciences, <http://www.resdc.cn/DOI,2018>, Doi: 10.12078/2018060503.]
- [27] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254.]

- [28] 黄敏, 杨飞, 郑士伟. 中国城镇化进程对生态系统服务价值的影响. 水土保持研究, 2019, 26(1): 352-359. [HUANG M, YANG F, ZHENG S W. Impact of urbanization process on ecosystem service value in China. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 352-359.]
- [29] 贺玉晓, 苏小婉, 任玉芬, 等. 中国生态地理区城市水资源利用效率时空分异特征研究. 生态学报, 2020, 40(20): 7464-7478. [HE Y X, SU X W, REN Y F, et al. Spatiotemporal differentiation of urban water resource utilization efficiency of eco-geographic regions in China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7464-7478.]
- [30] ZHAO M S, HEINSCH F A, NEMANI R R, et al. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2): 164-176.
- [31] 董玉祥, 康国定. 中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析. 水土保持学报, 1994, 8(3): 1-7. [DONG Y X, KANG G D. Study on the wind erosion climatic erosivity in arid and semi-arid areas in China. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(3): 1-7.]
- [32] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-20. [WANG W Z, JIAO J Y. Quantitative evaluation on factors influencing soil erosion in China. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996, 16(5): 1-20.]
- [33] WILLIAMS J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 1990, 329(1255): 421-428.
- [34] 黄心怡, 赵小敏, 郭熙, 等. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的自然生态空间管制分区研究. 生态学报, 2020, 40(3): 1-12. [HUANG X Y, ZHAO X M, GUO X, et al. The natural ecological spatial management zoning based on ecosystem service function and ecological sensitivity. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3): 1-12.]
- [35] 环境保护部, 国家发展改革委. 生态保护红线划定指南, http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm, 2017-07-20. [Ministry of Environmental Protection, National Development and Reform Commission. Guidelines for the delineation of ecological protection red lines, http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm, 2017-07-20.]
- [36] 自然资源部. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(试行), http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200121_2498502.html, 2020-01-19. [Ministry of Natural Resources. Technical guidelines for evaluation of resources and environment carrying capacity and suitability of land and space development (Trial), http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200121_2498502.html, 2020-01-19.]
- [37] 董蕊, 任小丽, 盖艾鸿, 等. 基于中国生态系统研究网络的典型森林生态系统土壤保持功能分析. 生态学报, 2020, 40(7): 2310-2320. [DONG R, REN X L, GAI A H, et al. Use of CERN for estimating the soil conservation capability of typical forest ecosystems in China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2310-2320.]
- [38] 马良, 朱再春, 曾辉. NPP评估过程模型应用研究进展. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1250-1260. [MA L, ZHU Z C, ZENG H. Research advance about application of NPP process models in NPP evaluation. Journal of Desert Research, 2017, 37(6): 1250-1260.]
- [39] ZHANG L Q, PENG J, LIU Y X, et al. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei Region, China. Urban Ecosystems, 2017, 20(3): 701-714.
- [40] 刘军会, 马苏, 高吉喜, 等. 区域尺度生态保护红线划定: 以京津冀地区为例. 中国环境科学, 2018, 38(7): 2652-2657. [LIU J H, MA S, GAO J X, et al. Delimiting the ecological conservation redline at regional scale: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei Region. China Environmental Science, 2018, 38(7): 2652-2657.]
- [41] 曹慧明, 董仁才, 邓红兵, 等. 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. [CAO H M, DONG R C, DENG H B, et al. The concept and application of centroids in the spatial analysis of regional ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): 3639-3645.]
- [42] 丘宝剑. 全国农业综合自然区划的一个方案. 河南大学学报: 自然科学版, 1986, 53(1): 21-28. [QIU B J. A scheme for agricultural comprehensive natural division in China. Journal of Henan University: Natural Science, 1986, 53(1): 21-28.]
- [43] 李彦波, 邓芳荣, 罗道. “双评价”结果在长沙市国土空间规划中的应用探索. 规划师, 2020, 36(7): 33-39. [LI Y B, DENG F R, LUO X. The application of "Double Evaluations" in Changsha national land use and space plan. Planners,

2020, 36(7): 33-39.]

- [44] 于连莉, 郭晓林, 宋军. 青岛市国土空间“双评价”的实践与思考. 规划师, 2020, 36(6): 5-12. [YU L L, GUO X L, SONG J. Practice and reflection of "Dual Evaluations" of national land, Qingdao. Planners, 2020, 36(6): 5-12.]

Quantifying the spatial pattern for the importance of natural resource ecosystem services in China

WU Ying-di, MENG Ji-jun

(Key Laboratory of Earth Surface Processes of Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Natural resources are essential for ensuring economic and social development, and also provide important ecosystem services. This study selected five types of ecosystem services, including water conservation, soil erosion prevention, windbreak and sand fixation, biodiversity maintenance and product provision, and used NPP-associated index to determine the importance of natural resource ecosystem services in China. The spatial pattern of the importance of ecosystem services were then analyzed using spatial statistics methods. The results showed that the areas with extreme and high importance of natural resource ecosystem services are mainly distributed in the mountainous areas of Northeast China, the Southern and Southwestern parts of China, and the Eastern Qinghai-Tibet Plateau, accounting for about 25% of the country's total area. These areas were often characterized by high water conservation capacity, strong capability for soil erosion prevention, windbreak and sand fixation, and rich biodiversity. There were significant differences in the importance of ecosystem services among different natural resource types. Cultivated land resources played an important role in providing products; forest and grassland resources dominated the ecosystem services of water conservation, soil erosion prevention, windbreak and sand fixation, and biodiversity maintenance; water areas mainly provided the service of water conservation. The importance of ecosystem services showed a significantly clustered pattern. The hot spots of natural resource integrated ecosystem service are mainly distributed in the Da Hinggan Mountains, Changbai Mountains, Zhejiang-Fujian Mountains, Wuyi Mountains, Nanling Mountains, Qinling Mountains, Southwestern Yunnan, and Southeastern Tibet. The spatial distribution of the importance of integrated ecosystem service in China is highly consistent with the natural zones and subzones of agriculture, with higher level of importance in tropical and temperate regions. Our research provides sound decision-making support for the exploitation and management of natural resources, and is also useful for ecological protection and restoration.

Keywords: natural resource; importance of ecosystem services; NPP; spatial pattern; China