

雄安新区生态系统服务簇权衡与协同

申嘉澍^{1,2}, 梁 泽^{1,2}, 刘来保^{1,2}, 李德龙^{1,2}, 张亚彤^{1,2}, 李双成^{1,2}

(1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;

2. 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 河北雄安新区建设是千年大计、国家大事。在生态优先、绿色发展理念引领下, 深入理解生态系统服务间关系对于优化国土空间开发保护、实现自然资源可持续管理具有重要意义。本文基于多源数据评估了雄安新区四种生态系统服务, 分析了生态系统服务间关系, 并利用自组织映射特征网络划分了生态系统服务簇, 以为新区统筹权衡规划建设提供科学依据。研究表明: 雄安新区生物多样性维持服务供给总体呈从东北向西南递增; 食物供给服务在安新县与容城县供给较高, 在雄县供给较低; 产水服务供给以西南部地区较高, 东北部地区较低; 娱乐服务供给则以中北部地区较高, 西南部地区较低。不同类型生态系统服务间多为协同关系, 少为权衡关系。识别出四种生态系统服务簇, 不同服务簇的主要土地利用类型及服务供给特点均存在差异, 食物供给簇以旱地为主, 主要提供食物供给服务; 文化娱乐簇也以旱地为主, 主要提供娱乐服务; 生态保育簇以水域、旱地和林地为主, 主要提供生物多样性维持服务; 城镇生活簇则以建设用地为主, 也包括少部分水田, 主要以产水服务较高。根据不同生态系统服务供给间关系特征, 为新区合理确定土地利用变更时序与位置以及促进多重生态系统服务可持续供给提出了建议。

关键词: 雄安新区; 生态系统服务供给簇; 权衡; 协同

DOI: 10.11821/dljy020181000

1 引言

生态系统服务是指人类直接或间接地从生态系统中所获得的各种惠益, 可以分为支持服务、供给服务、调节服务和文化服务四种类型^[1-4]。生态系统服务不仅建立起从自然生态系统到人类福祉的关联, 还架构起从生态系统研究到政策制定辅助的桥梁, 实现了从生态系统服务监测、评估、模拟到土地管理、环境治理、生态补偿和空间规划的应用。

生态系统服务簇、权衡与协同研究是生态系统服务间关系研究中的重要内容, 一系列时空共现的生态系统服务形成生态系统服务簇, 簇中生态系统服务间此消彼长或相互增益的关联关系即为权衡与协同, 主要产生于生态系统服务种类多样性、空间异质性以及人类使用的选择性^[5-7]。目前, 研究者已从国家^[8-10]、区域^[11,12]和地方^[13-15]多尺度下利用相关分析、排序分析、生产可能性边界或袋状图等方法分析了生态系统服务间权衡与协同, 通过不同聚类方法划分了生态系统服务簇, 探讨了不同土地利用类型与生态系统服务簇的关联关系, 并从服务簇的角度提出了增进协同、减少权衡的生态系统管理建议。

收稿日期: 2018-09-14; 修订日期: 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41590843)。

作者简介: 申嘉澍(1994-), 男, 河北保定人, 博士研究生, 研究方向为自然资产核算。

E-mail: Jiashu_Shen@pku.edu.cn

通讯作者: 李双成(1961-), 男, 河北平山人, 教授, 博士生导师, 从事土地利用与覆被变化的生态效应及政策研究。

E-mail: scli@urban.pku.edu.cn

已有生态系统服务簇、权衡与协同研究结果表明,形成生态系统服务簇的一系列生态系统服务在空间上一定范围内通常表现为共现集聚特征^[10],簇内调节服务与文化服务间多为协同关系,供给服务与调节服务间则主要为权衡关系^[16],后者可通过一定政策管理措施来进行缓解与减少^[17],从而促进多重生态系统服务可持续供给,例如Lü等分析了黄土高原地区生态修复工程对该地区生态系统及服务的影响,研究表明该地区大面积耕地转变为林地与草地,不仅提高了土壤保持服务与固碳服务供给,还增加了粮食供给服务产出^[18]。而在类似政策措施制定中,针对多重生态系统服务的政策手段会比关注特定生态系统服务的管理措施更有效率^[19]。Wang等通过分析三江源地区土地利用类型与生态系统服务变化发现,在农业发展政策下该地区大面积天然湿地转变为耕地,尽管提升了粮食供给服务,但却造成了碳贮存服务的降低^[20];而Zhang等利用城市土地利用情景模拟模型比较了不同生态系统服务保护政策情景下京津冀地区生态系统服务总体变化情况,结果发现只有在综合保护多重服务政策情景下大多数生态系统服务才能得到最为有效的保护^[21]。生态系统服务簇由具有相似供给水平、相同权衡与协同关系特征的多重生态系统服务组成,产生于自然因素与社会经济因素综合作用,能够在一定程度上表征出人地耦合复杂系统特征。不同类型生态系统服务簇将不同人地耦合复杂系统区分开来,从而能够有针对性地识别不同簇类型下存在的生态环境问题,提出同时针对多重生态系统服务的有效政策措施建议,有利于提高生态系统服务多重供给,并最大化生态系统服务带来的社会福祉^[22]。

2017年4月1日,中共中央、国务院印发通知,决定设立河北雄安新区。这是以习近平同志为核心的党中央作出的一项重大的历史性战略选择,是千年大计、国家大事。规划建设雄安新区,一方面要牢牢把握北京非首都功能疏解集中承载地的初心,促进新区社会经济高质量发展,另一方面要兼顾新区生态环境本底条件优良、资源环境承载能力较强的实际情况,坚持生态优先、绿色发展的理念,将雄安新区打造成蓝绿交织、清新明亮、水城共融的生态城市。为了协调好新区社会经济发展与生态环境建设间关系,在两者间找到人与自然和谐共处的平衡点,就客观上要求对新区生态系统服务关联关系进行分析,以服务关联关系为抓手,优化新区国土空间开发保护格局。之前已有研究对雄安新区生态系统服务供给进行了评估,匡文慧等对雄安新区三县生态系统服务现状进行了分析^[23],彭建等评估了雄安新区5种生态系统服务,识别了新区生态源地与生态廊道,并探讨了新区生态安全格局的优化方案,但还尚未有研究从生态系统服务簇的视角对雄安新区生态系统服务间的权衡与协同进行分析^[24]。因此,本文分析了雄安新区生态系统服务供给本底特征,识别了生态系统服务间权衡与协同关系,划分了生态系统服务簇,并探讨了每种生态系统服务簇内服务的供给特点,以期对新区土地管理、环境保护和生态建设等提供科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

雄安新区地处京津冀腹地,地跨115°38'8"E~116°19'42"E,38°43'44"N~39°10'14"N,规划范围涉及河北省雄县、容城、安新3县及周边部分区域,规划总面积1770 km²,以耕地、建设用地和水域为主(图1),林地面积较小,建成区不透水面比例超过70%^[25];土地资源丰富,以容城、安新耕地质量好,雄县耕地质量较差;地形以低海拔平原、洼地为主;新区属暖温带半湿润大陆季风气候,年均气温12.0℃,年均降水量550~600

mm, 年际变化较大^[23,26]。有“华北明珠”之称的白洋淀主要分布于安新县和雄县境内, 提供了多种生态系统服务, 对当地生物多样性保护和气候调节具有不可替代的作用^[27-29]。

2.2 数据来源

本研究所用统计数据来自2016年保定经济统计年鉴; 行政边界数据来自地理国情监测云平台 (<http://www.dsac.cn/>); 土地利用/覆盖现状数据来自2015年中国土地利用/覆盖现状数据集 (<http://www.resdc.cn>), 空间分辨率为30 m^[30]; DEM数据来源于来自CIAT-CSI SRTM (<http://srtm.csi.cgiar.org>), 空间分辨率为90 m; 土壤数据来源于FAO基于世界土壤数据库(HWSD)中国土壤数据集, 是由中国科学院南京土壤所提供的中国1:100万土壤图处理得到 (<http://web.archive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>), 空间分辨率为1 km; 日照、气温、相对湿度和风速等气象要素2015年月值数据来自中国气象数据共享网 (<http://data.cma.cn/>); 人口数据来自2015年LandScan高分辨率全球人口数据集 (<http://web.ornl.gov/sci/landscan/>), 空间分辨率为1 km; 2015年兴趣点数据来自百度地图 (<http://lbsyun.baidu.com/>)。

2.3 研究方法

2.3.1 自组织特征映射网络

自组织特征映射网络 (Self-Organizing Feature Map, SOFM) 可用于识别与划分生态系统服务簇, 且其结果能够实现可视化, 有助于从服务簇角度研究生态系统服务权衡与协同^[31]。该神经网络最初由芬兰学者Teuvo Kohonen提出, 属于无监督学习类神经网络, 拓扑结构包括输入层和竞争层, 神经元对输入的响应权值连接起输入层和输出层, 神经元间的连接强度则控制其相互作用大小, 可通过对输入矢量进行竞争学习, 不断修正初始权值, 使网络学习权矢量不断逼近输入矢量, 最终实现分类处理, 用所形成的曲线或二维网格来描述输入样本情况, 具有并行处理、自组织、自学习、鲁棒性和容错性等特点^[32,33]。在利用自组织特征映射网络识别与划分生态系统服务簇时, 首先初始化网络对N个输入层神经元到输出层神经元的连接权值赋予较小随机值 $w_{ij}(t)$, 设置输出神经元 j ($0 \leq j \leq n$) 初始邻域及学习速率 $\eta(t)$, 两者随时间 t 变化逐渐变小, 然后提供新输入样本向量 X , 计算输入样本 X 与输出神经元 j 之间欧氏距离 d_j , 优胜输出单元为具有最小欧式距离的神经元 k 。

$$d_j = \|X - W_j\| = \sqrt{\sum_{i=1}^N [x_i(t) - w_{ij}(t)]^2} \quad (1)$$

式中: W_j 为权值向量; $x_i(t)$ 为时刻 t 第 i 个输入神经元; $w_{ij}(t)$ 为时刻 t 第 i 个输入神经元与第 j 个输出神经元之间的连接权重随机初始值。

定义 t 时刻优胜邻域为 $N_k(t)$, 对优胜神经元 k 及其邻域内的神经元更新权值, 权值改变量 Δw_{ij} 为:

$$\Delta w_{ij} = \eta(t) \cdot [x_i(t) - w_{ij}(t)], \quad j \in N_k(t) \quad (2)$$

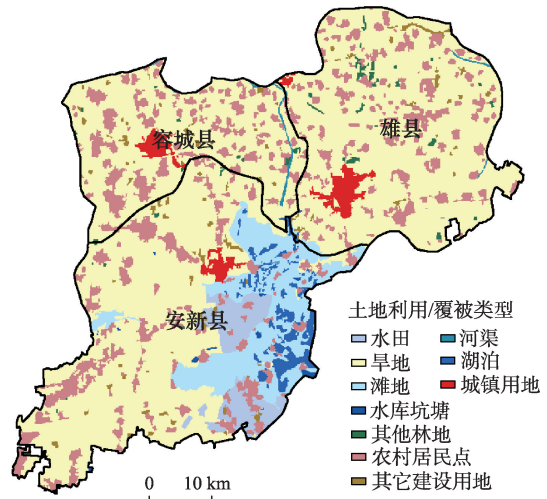


图1 2015年雄安新区地理位置与土地利用/覆盖状况
Fig. 1 Location and land use/cover status of Xiongan New Area in 2015

$t+1$ 时刻连接权重 $w_{ij}(t+1)$ 为:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij} \quad (3)$$

再提供新输入向量 X' 重复上述学习过程直到满足停止条件。

2.3.2 生态系统服务评估

(1) 支持服务。以生境质量为指标, 基于 InVEST 的生境稀缺性模型评估了生物多样性维持服务。该模型主要考虑影响生境质量的三个因素: 威胁的相对影响、生境与威胁的相对距离以及生境类型对威胁的相对敏感性。威胁因素主要包括城镇用地、农村居民点、其他建设用地、铁路、其他道路与高速公路(表1)。不同威胁对生境的最大影响距离以及不同生境类型对不同威胁的相对敏感性如表1所示。威胁对生境类型的相对影响越高, 相对影响得分越高; 生境与威胁的相对距离越近, 威胁的程度越强。

表1 支持服务评估参数

Tab. 1 Parameters for supporting service

		威胁因素				
		生境得分	城镇用地、农村居民点 和其他建设用地	铁路	其他道路	高速公路
威胁因素特点	权重	-	0.60	0.70	0.50	0.50
	对生境影响的 最大距离(km)	-	5.00	7.00	8.00	10.00
每种生境类型对威胁的相对敏感性	水田	0.40	0.35	0.60	0.40	0.30
	旱地	0.40	0.35	0.60	0.40	0.30
	其他林地	1.00	0.80	0.70	0.70	0.60
	河渠	0.70	0.90	0.50	0.50	0.60
	湖泊	0.70	0.90	0.50	0.50	0.60
	水库坑塘	0.70	0.90	0.50	0.50	0.60
	滩地	0.70	0.90	0.50	0.50	0.60
	城镇用地	0	0	0	0	0
	农村居民点	0	0	0	0	0
	其他建设用地	0	0	0	0	0

在模型中可通过线性或指数距离衰减函数来表示威胁的空间衰减如公式所示:

线性衰减:

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{r\max}} \right) \quad (4)$$

指数衰减:

$$i_{rxy} = \exp\left(-\left(\frac{2.99}{d_{r\max}}\right)d_{xy}\right) \quad (5)$$

式中: i_{rxy} 为威胁 r 在栅格 x 的生境对栅格 y 的影响; d_{xy} 是栅格 x 和 y 间距离; $d_{r\max}$ 是威胁 r 的最大影响距离。

不同生境类型对不同威胁的相对敏感性不同, 受威胁生境越敏感, 越易受到威胁影响而退化。生境类型 j 中栅格 x 总威胁水平 D_{sj} 如公式所示:

$$D_{xy} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(W_r / \sum_{r=1}^R W_r \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (6)$$

式中: y 为 r 威胁栅格图中所有栅格; Y_r 是指 r 威胁栅格图上的一组栅格; β_x 表示栅格 x 的邻近性; S_{jr} 为生境 j 对威胁 r 的敏感程度。

生境类型 j 中栅格 x 的生境质量为 Q_{xy} 如公式所示, H_j 为生境类型 j 的生境适宜性。生境质量数值越高生境质量越好。

$$Q_{xy} = H_j \left(1 - \left(\frac{D_{xy}^z}{D_{xy}^z + k^z} \right) \right) \quad (7)$$

模型所用参数表根据 InVEST 模型使用手册及已有文献整理^[34-38]。

(2) 供给服务。食物供给服务是指雄安新区陆地生态系统和水生生态系统产生的物质或产品。本文食物供给服务采用雄安新区安新县、雄县和容城县 2015 年经济作物、粮食作物、渔业生产、水果生产数据, 经济作物包括花生、芝麻、芹菜、油菜、菠菜、大白菜、卷心菜、白萝卜、胡萝卜、黄瓜、豇豆、四季豆、茄子、辣椒、西红柿等; 粮食作物包括稻谷、小麦、玉米、大豆、绿豆、红小豆、马铃薯、甘薯等; 水果包括苹果、梨、桃、葡萄、红枣、草莓、西瓜、杏等; 渔业生产产品包括虾蟹类、贝类和鱼类。为了统一量纲进行核算, 根据中国食物成分表计算每一种食物 (t) 所含的能量 (J)^[39]。基于雄安新区三县的土地利用类型情况, 将经济作物和粮食作物按照水田和旱地面积, 水果按照其它林地面积, 水产品按照河渠、湖泊、水库、坑塘以及滩地面积计算单位面积食物供给量, 单位为 J/km^2 。

$$E_s = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n (100 \times M_i \times EP_i \times A_i) \quad (8)$$

式中: E_s 为雄安新区食物供给总热量 (J); i 为不同产品或物质类别数; E_i 为不同产品或物质类别; M_i 为不同产品或物质类别产量 (t); EP_i 为不同产品或物质可食部 (%); A_i 为产品或物质每 100g 可食部热量 (J)。产品或物质每 100g 可食部热量来自中国食物成分表^[40]。

(3) 调节服务。根据 InVEST 的产水量模型评估了产水服务。该模型基于 Budyko 水热耦合平衡假设^[41]计算产水量, 如公式所示:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right) \times P(x) \quad (9)$$

式中: $Y(x)$ 为栅格 x 产水量 (mm); $AET(x)$ 为栅格 x 年实际蒸散发量 (mm); $P(x)$ 为栅格 x 年降水量 (mm)。

植被蒸散发采用傅抱璞和 Zhang 等提出的 Budyko 水热耦合平衡假设公式计算^[42,43]:

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left(1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)} \right)^\omega \right)^{\frac{1}{\omega}} \quad (10)$$

式中: $PET(x)$ 为年潜在蒸散量 (mm); $\omega(x)$ 为经验参数。

$PET(x)$ 计算公式为:

$$PET(x) = K_c(l_x) ET_0(x) \quad (11)$$

式中: $ET_0(x)$ 为栅格 x 的参考作物蒸散 (mm); $K_c(l_x)$ 表示栅格 x 中特定土地利用/覆盖类型的植被蒸散系数。

$\omega(x)$ 计算公式为:

$$\omega(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (12)$$

式中： $AWC(x)$ 为土壤有效含水量 (mm)； Z 为季节常数，与年降水次数成正比。

模型所用降水数据是基于雄安新区及其周边气象站点 2015 年年降水量数据利用克里金插值方法进行空间插值得到，潜在蒸散发由 FAO 推荐 Penman-Monteith 公式计算^[44]，并利用克里金插值方法进行空间插值，植被根系限制层深度使用土壤数据库中的土壤深度数据，植被可利用水含量结合土壤数据根据公式计算得到^[45]。模型所用参数表根据 INVEST 使用手册参数数据库和已有文献整理^[44-48] (表 2)。

(4) 文化服务。文化服务是指人类直接或间接地从生态系统中所获得的非物质惠益，其中人类从自然或人工生态系统中所获得的休闲娱乐即为娱乐服务^[49]。作为一种“受益者活动相关”服务^[50]，娱乐服务供给不仅与生态系统自然属性有关^[51]，而还受生态系统可达性和受益者位置影响^[52]。Qiu 等认为生态系统面积越大、提供的娱乐机遇越多、距离人口聚集地和道路越近，娱乐服务供给越高，据此利用娱乐得分法评估了美国雅哈拉 (Yahara) 流域娱乐服务，并结合其他服务供给情况分析

表 2 调节服务评估参数

Tab. 2 Parameters for regulating service

土地利用/覆盖类型	K_c	根系深度 (mm)	植被覆盖情况
水田	1.0	200	1
旱地	0.8	2100	1
其他林地	0.7	5000	1
河渠	1.0	500	0
湖泊	1.0	1000	0
水库坑塘	0.7	1000	0
滩地	1.0	1000	0
城镇用地	0.3	500	0
农村居民点	0.3	500	0
其他建设用地	0.1	50	0

其他服务供给情况分析该区域生态系统服务间权衡与协同^[53]。在中国太湖流域，Qiao 等也利用娱乐得分法评估了该流域 1990—2010 年娱乐服务供给变化，并与其他服务一同分析了该流域生态系统服务时空权衡与协同变化，为该区域生态红线划定与退耕还林政策实施提供科学依据^[54]。基于雄安新区自然与社会经济状况，本文利用娱乐得分法评估了雄安新区陆生生态系统与水生生态系统所提供的娱乐服务，从土地利用/覆盖数据中提取了雄安新区旱地、水田、其他林地、河渠、湖泊、水库坑塘和滩地，并分别计算其面积。根据风景名胜、宾馆酒店、餐饮服务和公园广场兴趣点数据计算了陆生生态系统与水生生态系统所提供的娱乐机遇，娱乐机遇越多，相应得分越高；对人口数据以 10 km 为半径进行焦点分析，陆生生态系统与水生生态系统距离人口聚集中心越近，得分越高；基于欧氏距离对高速公路和其他道路分别建立 2 km 和 0.5 km 的缓冲区，距离道路越近，得分越高。根据以下公式对得分进行加和，并将分数重分类为 0~10 分，0 分表示无娱乐服务，10 分表示娱乐服务最高。

$$RS_i = A_i \sum (Oppt_i + Pop_i + Road_i) \quad (13)$$

式中： RS_i 为陆生生态系统或水生生态系统娱乐服务总得分； A_i 为陆生生态系统或水生生态系统面积； $Oppt_i$ 为娱乐机遇得分； Pop_i 为人口聚集邻近度得分； $Road_i$ 为道路邻近度得分。

3 结果分析

3.1 生态系统服务

雄安新区生物多样性维持服务总体呈从东北向西南递增的趋势，以东南部的白洋淀

内滩地供给最高, 生境质量明显高于周边地区, 而在城乡建设用地周边人类活动强度相对较大, 生境质量相对较低, 这与吴平等对雄安新区该种服务供给模拟情况基本相同^[55] (图2a)。新区食物供给服务总量约为6278.8万亿J, 按照提供食物供给服务的土地利用类型计算, 单位面积食物供给服务提供量约为5.0万亿J/km²。新区西南部安新县和容城县耕地质量较好、耕作限制因素较少、复种指数较高^[26,56], 而雄县耕地质量较差、复种指数较低^[26], 造成食物供给服务在空间上总体呈从西南向东北递减趋势(图2b)。根据新区2015年末总人口数, 可得该地区人均食物供给服务量约为1579.5万J/d, 明显高于中国食物与营养发展纲要(2014—2020年)中人均962.7万J/d标准, 表明新区食物供给服务供大于求。

新区产水服务平均值为123.1 mm, 西南部产水服务高于东北部, 其中城镇及其周边地区产水服务较高, 这主要与建设用地不透水面比例高、降水入渗低以及洪峰流量大有关^[25,57]。这与彭建等对该区域产水服务评估结果相似^[24] (图2c)。新区城镇用地与大部分农村居民点分布于中北部, 人口分布相对集中, 且中北部地区交通基础设施较为完善, 可达性更好, 娱乐服务可获得性更高, 使得娱乐服务供给以中北部地区较高, 西南部地区较低(图2d)。

3.2 生态系统服务权衡与协同

3.2.1 生态系统服务权衡与协同关系 对四种生态系统服务进行极差正规化处理后, 利用

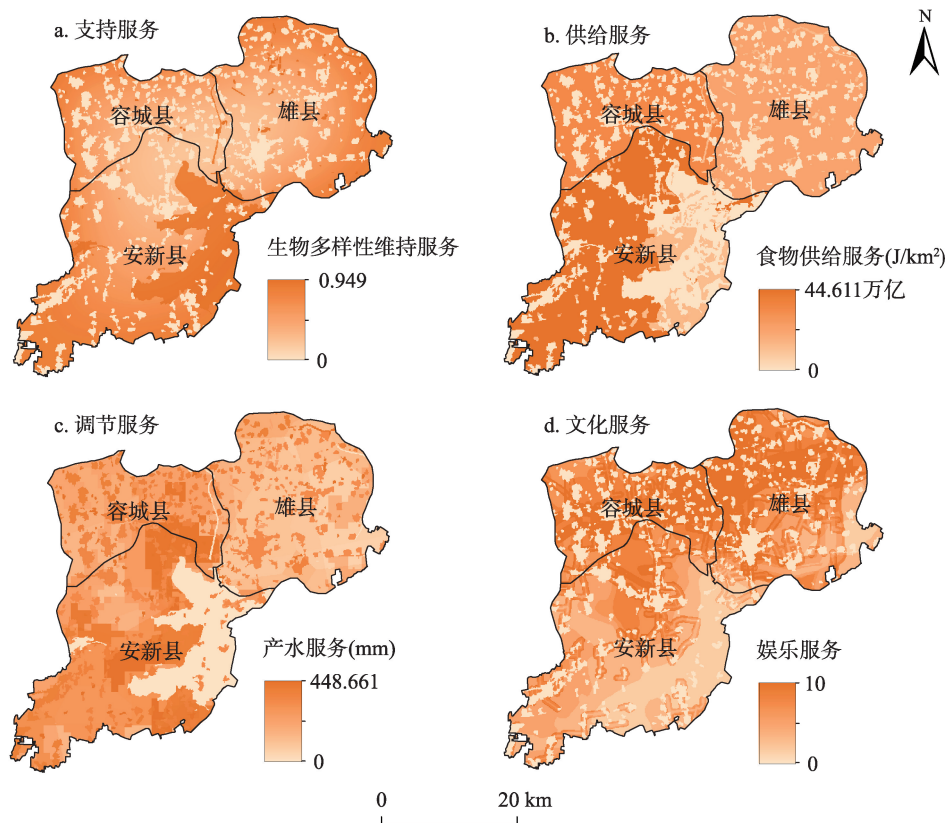


图2 2015年雄安新区生态系统服务空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of ecosystem services in Xiongan New Area in 2015

Spearman秩相关系数来检验生态系统服务间关联关系,在显著性水平0.01下所有生态系统服务都是显著相关的(表3)。不同生态系统服务间正负相关关系反映出其复杂的关联关系,其中食物供给服务与娱乐服务间的协同关系最强,产水服务与生物多样性维持服务的权衡关系最强。

表3 雄安新区生态系统服务相关性

Tab. 3 Correlations among ecosystem services in Xiongan New Area

正相关关系		负相关关系	
食物供给服务与娱乐服务	0.394**	产水服务与生物多样性维持服务	-0.537**
食物供给服务与生物多样性维持服务	0.337**	产水服务与娱乐服务	-0.203**
食物供给服务与产水服务	0.146**		
娱乐服务与生物多样性维持服务	0.055**		

注:**表示在显著性水平0.01下(双尾)相关性显著。

3.2.2 生态系统服务簇分布格局 利用自组织特征映射网络对雄安新区生态系统服务簇进行识别与划分,并根据Davies-Bouldin指数确定最优簇数目,Davies-Bouldin指数越小,表明簇内差异越小簇间差异越大,当生态系统服务簇数目为4时该指数最小,因此划分为4种生态系统服务簇^[58](图3)。

根据各生态系统服务簇的服务供给特点,分别命名为食物供给簇、文化娱乐簇、生态保育簇和城镇生活簇(图4)。土地利用类型影响生态系统服务簇的形成^[59],通过计算不同土地利用类型在每种生态系统服务簇中所占面积比例,识别了不同服务簇的主要土地利用类型(图5)。食物供给簇位于安新境内,主要为旱地(图5),以食物供给服务最高,产水服务、生物多样性服务和娱乐服务供给量相近(图4)。文化娱乐簇位于雄县境内,主要为旱地(图5),以娱乐服务供给最高,其次是生物多样性维持服务和食物供给服务,以产水服务最低(图4)。生态保育簇主要为白洋淀水域、旱地和林地(图5),以生物多样性维持服务最高,其次是娱乐服务和食物供给服务,以产水服务最低(图4)。城镇生活簇主要以建设用地为主(图5),也包括少部分水田,尽管两种土地利用类型相差较大,但两种土地利用类型在不同生态系统服务供给上具有一定相似性,食物供给服务、生物多样性维持服务与娱乐服务均相对较低(图4),建设用地中大面积的不透水地面使得其产水服务相对较高,从而相应该类型服务簇中产水服务平均水平也相对较高(图4)。

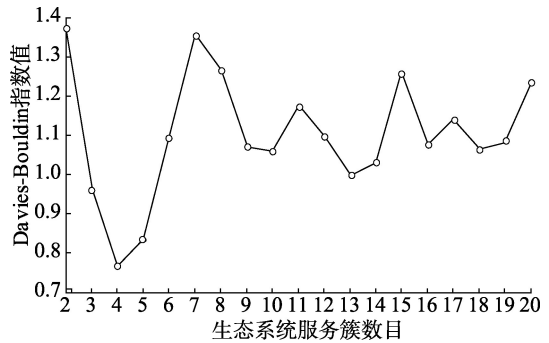


图3 雄安新区生态系统服务簇数目确定

Fig. 3 Determination of cluster number for ecosystem service bundles in Xiongan New Area

4 结论与讨论

不同土地利用类型、强度和格局产生的生态系统服务不同,雄安新区土地开发与建设必然会对新区生态系统服务供给产生一定影响。在生态优先、绿色发展理念指导下,要将新区淀水林田草作为一个生命共同体,统筹兼顾淀、水、林、田、草之间的关联、

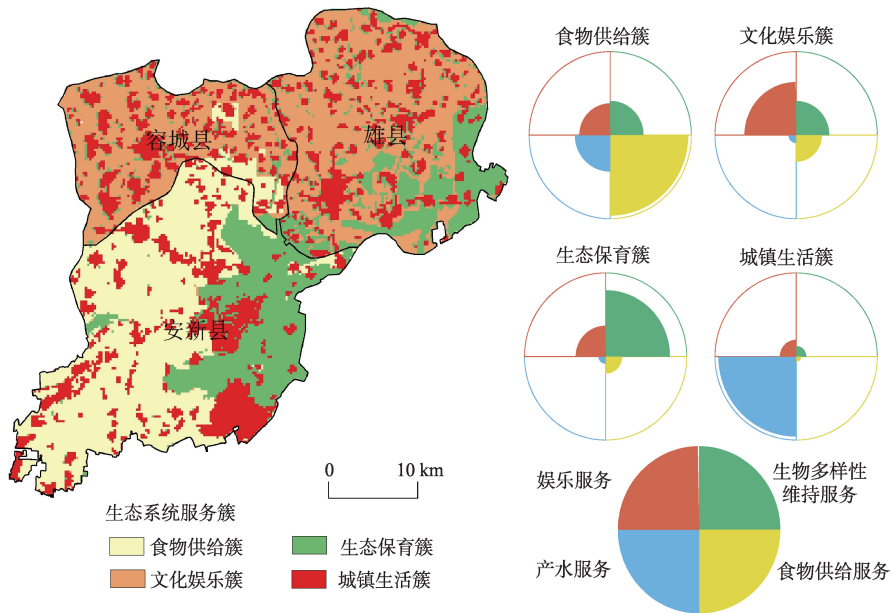


图4 2015年雄安新区生态系统服务簇空间分布及簇模式

Fig. 4 Spatial distribution and patterns of ecosystem services in Xiongan New Area in 2015

转化与权衡关系，确保新区生态系统服务种类不减少、数量不下降、效益不降低。本文首先通过评估新区四种典型生态系统服务供给情况，深入了解了新区生态系统服务本底特征；随后进一步厘清了新区生态系统服务间权衡与协同关系，揭示了新区生态系统服务在现状条件影响下相互反馈情况，能够为生态系统管理政策制定提供科学依据，有利于产生“一举多利”积极作用；最后识别与划分了不同类型生态系统服务簇，对不同服务簇中淀水林田草组成结构、生态系统服务供给水平与生态系统服务间关联关系进行了分析，从空间上充分反映了新区淀水林田草生态系统服务供给差异性，有利于对新区淀水林田草进行空间管控、精准施策，促进新区土地节约集约利用，实现新区生态系统服务可持续供给，不断改善新区人民福祉。

总体来看，雄安新区西南部的多重生态系统服务供给高于东北部；生态系统服务间以协同关系较多，权衡关系较少；与之前生态系统服务簇相关研究结果类似，雄安新区四种生态系统服务在空间上呈现出共现集聚特征，形成四种生态系统服务簇，每种服务簇均有其服务供给特点，并主要受一种或几种土地利用类型的影响。从食物供给簇、文化娱乐簇和生态保育簇中可以看出，雄安新区的耕地、林地和湿地景观均具有一定多功

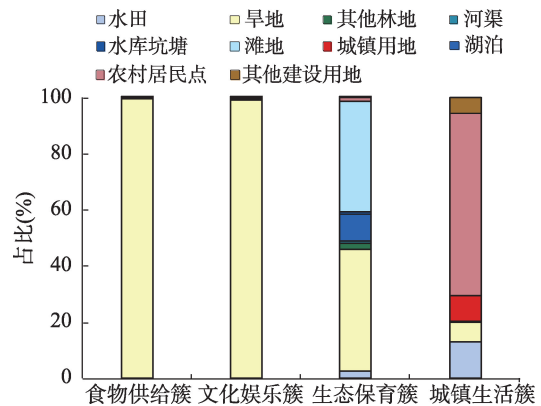


图5 雄安新区生态系统服务簇中主要土地利用类型识别

Fig. 5 Identification of main land use types in ecosystem services bundles in Xiongan New Area

能性,一种用地类型能同时提供多种生态系统服务。

在雄安新区开发建设中,统筹权衡土地利用结构与布局应考虑生态系统服务间的权衡,通过科学合理的生态规划,减少生态系统服务间的权衡,促进生态系统服务间的协同,进而降低土地利用变化成本,提高生态系统服务所带来的惠益。为了促进不同类型生态系统服务总体供给水平,就要求缓解生态系统服务间权衡关系。雄安新区产水服务与其他服务间多为权衡关系,而城镇生活簇又尤以产水服务供给最高,其他服务供给均相对较低,产水服务与其他服务间权衡情况尤为突出,可在控制新区发展中城镇建设用地数量的同时,通过减少不透水地表面积来缓解产水服务与其他服务间权衡关系,使得产水服务在降低到一定水平时,产水服务与其他类型服务间权衡强度能够有所减少,其他类型服务供给水平能够有所改善,生态系统服务供给总体水平能有所提升。生态保育簇和文娱生活簇的产水服务供给较少,其他服务间均为相互增益的协同关系,可以此协同关系为抓手,在这些地区全面推广绿色建筑,大力推进绿色建造,以提高一种或几种生态系统服务量,这些服务又可通过与其他服务间的协同关系,促进其他服务量的提升。

本文基于生态系统服务簇分析了雄安新区生态系统服务权衡与协同情况,并提出了从空间上差异化、精细化管理新区淀水林田草的建议措施,对于雄安新区生态城市建设具有一定参考价值。但是,受数据可得性与模型适用性限制,本文仅对雄安新区4种典型生态系统服务的供给情况进行了评估,而不同生态系统服务类型和数量下所形成的生态系统服务簇有所区别,服务间权衡与协同关系也会有所差异;并且生态系统服务间关联关系具有时空变异性,本文仅对2015年雄安新区生态系统服务间关联关系进行了静态分析,未能反映该地区生态系统服务动态变化特征,有待进一步深入探讨与研究。

参考文献(References)

- [1] Ehrlich P R, Ehrlich A H, Ehrlich P R, et al. The causes of consequences of the disappearance of species. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 1981, (1): 82-83.
- [2] 李双成, 王珏, 朱文博, 等. 基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架. *地理学报*, 2014, 69(11): 1628-1639. [Li Shuangcheng, Wang Jue, Zhu Wenbo, et al. Research framework of ecosystem services geography from spatial and regional perspectives. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(11): 1628-1639.]
- [3] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446. [Fu Bojie, Zhang Liwei. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress. *Progress in Geography*, 2014, 33(4): 441-446.]
- [4] Costanza R, Groot R D, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26(1): 152-158.
- [5] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379-1390. [Li Shuangcheng, Zhang Caiyu, Liu Jinlong, et al. The tradeoffs and synergies of ecosystem services: Research progress, development trend, and themes of geography. *Geographical Research*, 2013, 32(8): 1379-1390.]
- [6] Fu B, Zhang L, Xu Z, et al. Ecosystem services in changing land use. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(4): 833-843.
- [7] Cord A F, Bartkowski B, Beckmann M, et al. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: Main concepts, methods and the road ahead. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 264-272.
- [8] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, et al. Bundling ecosystem services in Denmark: Trade-offs and synergies in a cultural landscape. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 125(10): 89-104.
- [9] Queiroz C, Meacham M, Richter K, et al. Mapping bundles of ecosystem services reveals distinct types of multifunctionality within a Swedish landscape. *Ambio*, 2015, 44(1): 89-101.
- [10] Dittrich A, Seppelt R, Václavík T, et al. Integrating ecosystem service bundles and socio-environmental conditions—A national scale analysis from Germany. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 273-282.
- [11] 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.

- [12] Yang G, Ge Y, Xue H, et al. Using ecosystem service bundles to detect trade-offs and synergies across urban - rural complexes. *Landscape & Urban Planning*, 2015, 136: 110-121.
- [13] Crouzat E, Mouchet M, Turkelboom F, et al. Assessing bundles of ecosystem services from regional to landscape scale: Insights from the French Alps. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(5): 1145-1155.
- [14] Yao J, He X, Chen W, et al. A local-scale spatial analysis of ecosystem services and ecosystem service bundles in the upper Hun River catchment, China. *Ecosystem Services*, 2016, 22: 104-110.
- [15] Wang B, Tang H, Xu Y. Integrating ecosystem services and human well-being into management practices: Insights from a mountain-basin area, China. *Ecosystem Services*, 2017, 27: 58-69.
- [16] Lee H, Lautenbach S. A quantitative review of relationships between ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 340-351.
- [17] Deng X, Li Z, Gibson J. A review on trade-off analysis of ecosystem services for sustainable land-use management. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 953-968.
- [18] Lü Y, Fu B, Feng X, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China. *PLOS ONE*, 2012, 7(2): e31782.
- [19] Crossman N D, Bryan B A. Identifying cost-effective hotspots for restoring natural capital and enhancing landscape multifunctionality. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 654-668.
- [20] Zhang D, Huang Q, He C, et al. Planning urban landscape to maintain key ecosystem services in a rapidly urbanizing area: A scenario analysis in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 2019, 96(1): 559-571.
- [21] Wang Z, Mao D, Li L, et al. Quantifying changes in multiple ecosystem services during 1992-2012 in the Sanjiang Plain of China. *Science of the Total Environment*, 2015, 514: 119-130.
- [22] Costanza R, Groot R D, Braat L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go?. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [23] 徐涵秋, 施婷婷, 王美雅, 等. 雄安新区地表覆盖变化及其新区规划的生态响应预测. *生态学报*, 2017, 37(19): 6289-6301. [Xu Hanqiu, Shi Tingting, Wang Meiya, et al. Land cover changes in the Xiong'an new area and a prediction of ecological response to forthcoming regional planning. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6289-6301.]
- [24] 匡文慧, 杨天荣, 颜凤芹. 河北雄安新区建设的区域地表本底特征与生态管控. *地理学报*, 2017, 72(6): 947-959. [Kuang Wenhui, Yang Tianrong, Yan Fengqin. Regional urban land-cover characteristics and ecological regulation during the construction of Xiong'an new district, Hebei province, China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(6): 947-959.]
- [25] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. *地理学报*, 2018, 73(4): 701-710. [Peng Jian, Li Huilei, Liu Yanxu, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 701-710.]
- [26] 姜鲁光, 吕佩忆, 封志明, 等. 雄安新区土地利用空间特征及起步区方案比选研究. *资源科学*, 2017, 39(6): 991-998. [Jiang Luguang, Lv Peiyi, Feng Zhiming, et al. Land use patterns of the Xiongan New Area and comparison among potential choices of start zone. *Resources Science*, 2017, 39(6): 991-998.]
- [27] 白杨, 郑华, 庄长伟, 等. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控. *生态学报*, 2013, 33(3): 711-717. [Bai Yang, Zheng Hua, Zhuang Changwei, et al. Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian basin: Based on InVEST model. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 711-717.]
- [28] 王瑾, 张玉钧, 石玲. 可持续生计目标下的生态旅游发展模式: 以河北白洋淀湿地自然保护区王家寨社区为例. *生态学报*, 2014, 34(9): 2388-2400. [Wang Jin, Zhang Yujun, Shi Ling. Evaluation index system of sustainable livelihoods ecotourism strategy: A case study of wangjiazhai community in baiyangdian wetland nature reserve, Hebei. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(9): 2388-2400.]
- [29] 江波, 陈媛媛, 肖洋, 等. 白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估. *生态学报*, 2017, 37(8): 2497-2505. [Jiang Bo, Chen Yuanyuan, Xiao Yang, et al. Evaluation of the economic value of final ecosystem services from the Baiyangdian wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(8): 2497-2505.]
- [30] Liu J, Liu M, Tian H, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: An analysis based on Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(4): 442-456.
- [31] Mouchet M A, Lamarque P, Martín-López B, et al. An interdisciplinary methodological guide for quantifying associations between ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 28(1): 298-308.
- [32] Kohonen T. Self organizing maps. *Series in Information Science*, 1995, 30(4): 266 - 270.
- [33] 马程, 李双成, 刘金龙, 等. 基于SOFM网络的京津冀地区生态系统服务分区. *地理科学进展*, 2013, 32(9): 1383-1393. [Ma Cheng, Li Shuangcheng, Liu Jinlong, et al. Regionalization of ecosystem services of Beijing-Tianjin-Hebei

- area based on SOFM neural network. *Progress in Geography*, 2013, 32(9): 1383-1393.]
- [34] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 等. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3457-3466. [Wu Jiansheng, Cao Qiwen, Shi Shuqin, et al. Spatio-temporal variability of habitat quality in Beijing-Tianjin-Hebei area based on land use change. *The Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(11): 3457-3466.]
- [35] Xiao S, Zhongming L, Feng L, et al. Analyzing spatio-temporal changes and trade-offs to support the supply of multiple ecosystem services in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 117-129.
- [36] Xie W, Huang Q, He C, et al. Projecting the impacts of urban expansion on simultaneous losses of ecosystem services: A case study in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2018, 84: 183-193.
- [37] Bhagabati N K, Ricketts T, Sulistyawan T B S, et al. Ecosystem services reinforce Sumatran tiger conservation in land use plans. *Biological Conservation*, 2014, 169(387): 147-156.
- [38] Terrado M, Sabater S, Chaplinkramer B, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of the Total Environment*, 2016, 540(1): 63-70.
- [39] Ouyang Z, Zheng H, Xiao Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [40] 杨月欣, 王光亚, 潘兴昌. 中国食物成分表. 北京: 北京大学医学出版社, 2009. [Yang Yuexin, Wang Guangya, Pan Xingchang. *China Food Composition*. Beijing: Peking Univ. Medical Press, 2009.]
- [41] Xie Z, Gao Y, Li C, et al. Spatial heterogeneity of typical ecosystem services and their relationships in different ecological-functional zones in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Sustainability*, 2017, 10(1): 6.
- [42] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算. *大气科学*, 1981, 5(1): 23-31. [Baw-Puh F. On the calculation of the evaporation from land surface. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1981, 5(1): 23-31.]
- [43] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, 2004, 40(2): W02502.
- [44] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君, 等. 中国土壤有效含水量分布. *地理学报: 英文版*, 2005, 15(1): 3-12. [Zhou Wenzuo, Liu Gaohuan, Pan Jianjun, et al. Distribution of available soil water capacity in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(1): 3-12.]
- [45] Canadell J, Jackson R B, Ehleringer J B, et al. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 1996, 108(4): 583-595.
- [46] 吴迎霞. 海河流域生态服务功能空间格局及其驱动机制. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2013. [Wu Yingxia. *Spatial pattern of ecosystem services and its driving forces in the Haihe River Basin*. Wuhan: Master Dissertation of Wuhan University of Technology, 2013.]
- [47] Allan R G, Pereira L S, Raes D, et al. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No.56. FAO, 1998, 56.
- [48] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. *Science of the Total Environment*, 2016, 569-570(1): 1418-1426.
- [49] Qiu J, Turner M G. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(29): 12149-12154.
- [50] Leemans H B J, Groot R S D. Millennium ecosystem assessment: Ecosystems and human well-being: A framework for assessment. *Physics Teacher*, 2003, 34(9): 534-534.
- [51] Scholte S S K, Daams M, Farjon H, et al. Mapping recreation as an ecosystem service: Considering scale, interregional differences and the influence of physical attributes. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 175: 149-160.
- [52] Costanza R. Ecosystem services: Multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, 2008, 141(2): 350-352.
- [53] Paracchini M L, Zulian G, Kopperoinen L, et al. Mapping cultural ecosystem services: A framework to assess the potential for outdoor recreation across the EU. *Ecological Indicators*, 2014, 45(5): 371-385.
- [54] Qiao X, Gu Y, Zou C, et al. 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.
- [55] 吴平, 林浩曦, 田璐. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态安全格局构建. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(9): 5-11. [Wu Ping, Lin Haoxi, Tian Lu. Construction of ecological security pattern based on: A case study in Xiongan new area, Hebei province, China. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(9): 5-11.]
- [56] 高星, 陈景, 刘蕾, 等. 雄安新区耕地质量空间分布特征与建设占用推荐分区. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 1-7. [Gao Xing, Chen Jing, Liu Lei, et al. Spatial distribution characteristics and construction occupancy zoning of cultivated land quality in Xiongan New Area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(1): 1-7.]

- [57] Li B, Chen D, Wu S, et al. Spatio-temporal assessment of urbanization impacts on ecosystem services: Case study of Nanjing City, China. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 416-427.
- [58] Davies D L, Bouldin D W. A Cluster Separation Measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1979, PAMI-1(2): 224-227.
- [59] Mouchet M A, Paracchini M L, Schulp C J E, et al. Bundles of ecosystem (dis)services and multifunctionality across European landscapes. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 23-28.

Trade-offs and synergies of ecosystem service bundles in Xiong'an New Area

SHEN Jiashu^{1,2}, LIANG Ze^{1,2}, LIU Laibao^{1,2}, LI Delong^{1,2},
ZHANG Yatong^{1,2}, LI Shuangcheng^{1,2}

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The construction of Xiong'an New Area is crucial for generations and a national affair of China. Under the concept of ecological priority and green development, exploring the associations between ecosystem services is of vital significance for optimizing territory development plan and realizing the sustainable management of natural resources. In this study, four ecosystem services were quantified based on multi-sources data. The associations among ecosystem services were analyzed by using correlation analysis and ecosystem service bundles were identified by applying the self-organizing feature map, in the expectation of providing a scientific basis for balancing the planning and construction of Xiong'an New Area. The results showed that the supply of biodiversity protection service presented an increasing trend from the northeast to the southwest; the delivery of food production service was higher in Anxin county and Rongcheng county than that of Xiongxian county; the higher provision of water yield service mainly occurred in the southwest, while the lower provision of water yield service occurred primarily in the northeast; the recreation service supply was higher in the north-central part of Xiong'an New Area and lower in the southeast. Most of the associations among ecosystem services are synergistic and have less trade-offs. Four ecosystem service bundles were mapped with different main land use classes and supplies of ecosystem services. The food production bundle was predominantly covered by the dry lands and had the highest supply of food production service. The cultural entertainment bundle also primarily contained dry lands and dominated in providing recreation service. The ecological conservation bundle mainly consisted of water bodies, dry lands and forests, which had the highest delivery of biodiversity protection service. The urban life bundle was associated with urban areas and some paddy lands and showed a high provision of water yield service. On the basis of the characteristics of different ecosystem services supplies bundles, the suggestions were put forward for rationally determining the timing and location of changing land use types and promoting the sustainable provision of multiple ecosystem services in Xiong'an New Area.

Keywords: Xiong'an New Area; supply bundles of ecosystem services; trade-off; synergy