

基于生态功能区的河北省生态系统服务 权衡与协同分析

李倩茹^{1,2}, 贾彦龙³, 王慧军⁴, 王 哲^{1,2}

(1. 河北农业大学经济管理学院, 保定 071000; 2. 河北省城市森林健康技术创新中心, 保定 071000;

3. 河北农业大学林学院, 保定 071000; 4. 河北省农林科学院谷子研究所, 石家庄 050035)

摘要: 生态系统服务权衡与协同分析是当下生态系统服务的研究前沿和热点, 可为生态系统管理提供科学依据。本文基于河北省生态功能区划分, 选取粮食生产、碳储存、土壤保持和水源涵养4种生态系统服务, 利用空间叠置法分析了2017年河北省不同生态功能区生态系统服务的权衡/协同关系, 主要结论为: ① 河北省粮食生产总量为3828万t, 五大生态区的贡献排序为低平原生态修复区(PY)>燕山太行山生态涵养区(YS)>环京津生态过渡带(HJJ)>坝上高原生态防护区(BS)>沿海生态防护区(YH)。② 河北省碳储存、土壤保持、水源涵养服务的总量分别为8567万t碳、470161万t土、656875万t水。3种服务呈现相似分布, 以燕山太行山生态涵养区贡献量最高(均超过75%), 其余各生态功能区贡献量普遍较低。③ 河北省全域不同生态系统服务之间以强权衡和低协同关系为主, 强权衡、低协同、弱权衡、高协同的比例分别为48.15%、45.92%、5.09%、0.83%。④ 河北省强权衡关系生态系统的主导功能与其所处生态区功能定位基本一致, 强权衡关系的生态系统可为生态功能区主导功能的发挥提供保障。本文可为管理者从生态功能区的角度优化生态系统服务权衡/协同关系提供新思路。

关键词: 生态系统服务; 权衡/协同; 生态功能区; 河北省

DOI: 10.11821/dlxb202311012

1 引言

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, 是生态系统为人类提供的各种福祉的统称^[1-3]。不同类别的生态系统服务之间存在复杂的相互关系^[4], 其中, 生态系统服务权衡/协同关系可以为管理者的决策提供有效依据而受到人们的关注^[5-7]。生态系统服务权衡是指一种生态系统服务的增加导致另一种生态系统服务减少的情形, 协同是指两种生态系统服务同时增加或同时减少的情形^[8], 即不同生态系统服务之间此消彼长的关系为权衡, 同增同减的关系为协同。生态系统管理的最终目标也是达到生态系统服务同增协同的“双赢”状态。然而, 生态系统服务的权衡/协同关系存在很强的空间异质性^[8], 不同区域的生态系统处于权衡/协同关系的不同状态。例如, Howe等通过整合分析1324份研究案例发现权衡关系的出现是协同关系的3

收稿日期: 2023-05-17; 修订日期: 2023-10-23

基金项目: 河北农业大学现代农业发展研究中心项目(SK2020015); 河北省教育厅重大课题(ZD202115) [Foundation: Hebei Agricultural University Scientific Research Academy Program, No.SK2020015; Hebei Education Department Key Projects, No.ZD202115]

作者简介: 李倩茹(1985-), 女, 河北宁晋人, 博士后, 主要从事生态系统服务评估相关研究工作。

E-mail: lqr7182005@163.com

通讯作者: 王慧军(1957-), 男, 河北怀来人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业经济管理相关工作。

E-mail: nkywhj@126.com

倍^[9]；Turkelboom等利用利益主体为中心的分析框架对24个研究案例进行分析，发现生态系统服务权衡关系的复杂性远超过文献描述，供给服务和文化服务之间权衡关系更为突出^[7]。因此，识别生态系统权衡/协同关系的空间异质性及其影响因素对于生态系统优化管理至关重要^[10]。

目前，生态系统服务权衡/协同关系的异质性研究主要聚焦在权衡/协同的空间尺度效应^[11-12]、权衡/协同关系空间异质性的影响因素分析^[13-14]、生态功能区优化及生态系统管理的政策制定等方面^[15-17]。研究发现同一类生态系统服务（如固碳、产水、土壤保持）在大尺度研究区域内，以协同关系为主^[18-19]，而在小尺度研究区域内，表现为权衡关系^[20-22]，生态系统服务权衡/协同关系在空间分布上表现出尺度效应。在影响因素研究方面，生态系统服务权衡/协同关系的空间异质性受到生态修复工程实施^[11]、区域城市化发展^[23]、土地利用类型转变^[24]等人类活动的影响和气候、土壤、海拔等自然因素的影响^[13-14]。在生态功能区优化方面，有研究在识别区域生态系统服务权衡/协同关系空间异质性的基础上进行生态功能区的精细划分^[25-26]，并提出各功能区的特色与优化路径。目前国家和省级区域的生态功能区划是综合考虑自然、社会经济条件、生态系统特征的以县为单位的粗线条划分，从生态系统服务权衡/协同的角度其是否能反应生态功能区的主导功能、存在问题及如何调整是优化生态系统分区面临的重要问题。

河北省地形地貌多样、生态系统类型丰富，同时环抱北京、天津，地理区位十分重要。在河北省建设京津冀生态环境支撑区“十四五”规划中，将全省分为环京津生态过渡带、坝上高原生态防护区、燕山太行山生态涵养区、低平原生态修复区、沿海生态防护区5个生态功能区。从生态系统服务权衡/协同的空间异质性特征来判断目前河北省生态功能分区是否合理是亟需解决的问题。因此，本文选择粮食生产、碳储存、水源涵养和土壤保持4种典型生态系统服务，运用空间叠置分析法探索河北省不同生态功能区生态系统服务权衡/协同关系的空间异质性及其原因，并针对性地提出各生态功能区存在的问题及解决建议，以期为区域尺度的生态功能区管理、规划提供理论支撑。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

河北省（36°05'N~42°40'N，113°27'E~119°50'E）总面积约18.88万km²，下辖石家庄、唐山、秦皇岛、邯郸、邢台、保定、张家口、承德、沧州、廊坊、衡水11个地级市。河北省气候属温带大陆性季风气候，一年四季，冷热分明，多年平均降水量484.5 mm，一般集中在7—8月，雨热同期。省内地形地貌复杂多样，整体地势西北高、东南低，形成了以坝上高原、燕山—太行山地、河北平原为主的三大地貌类型。河北省是中国重要的粮食生产大省，2022年粮食总产量为3865.1万t，位居全国第7。河北省生产能力和生产潜力较高^[27]，为保障京津冀都市圈的粮食供应、维持社会经济良性循环发挥了重要作用^[28]。

根据《京津冀协同发展规划纲要》《京津冀协同发展生态环境保护规划》《河北省主体功能区规划》、“三线一单”、国土空间规划等，综合考虑自然和社会经济条件、生态系统特征，建设京津冀生态环境支撑区“十四五”规划以县（市、区）为基本单元，将河北省分为环京津生态过渡带、坝上高原生态防护区、燕山太行山生态涵养区、低平原生态修复区、沿海生态防护区5个区域（图1），面积分别为1.67万km²、1.38万km²、10.35万km²、4.22万km²、1.18万km²，旨在依据不同功能区的生态特征，注重提升特有的生态系统服务，为京津冀做好生态屏障^[29]。

2.2 指标选取及数据来源

陆地生态系统碳储存是通过降低大气CO₂浓度减缓气候变化的重要途径之一^[30]，碳储存服务一直以来都是生态系统服务评价指标体系中调节服务的代表之一^[1-3]，河北省生态系统多样在区域碳平衡中发挥了重要作用。水资源紧缺是河北省面临的严峻资源问题，由于河北省还承担着北京、天津储备水库的功能，水资源短缺已经成为京津冀都市圈经济发展的主要限制因素^[31-32]，选择水源涵养服务评估有助于从生态系统服务权衡/协同角度了解河北省水资源情况。土壤侵蚀是河北省面临的又一个重要环境问题^[33]，土壤保持可以通过调整生态系统结构与过程减少土壤侵蚀造成的危害^[1, 33]，是生态系统重要的调节服务之一，与区域降水量、蒸散发量、土壤质地、地形地貌、植被覆盖等因素密切相关^[34]，体现了区域整体多种自然环境条件的情况。基于此，本文选择了粮食生产、碳储存、水源涵养和土壤保持4种典型生态系统服务作为评估的指标。

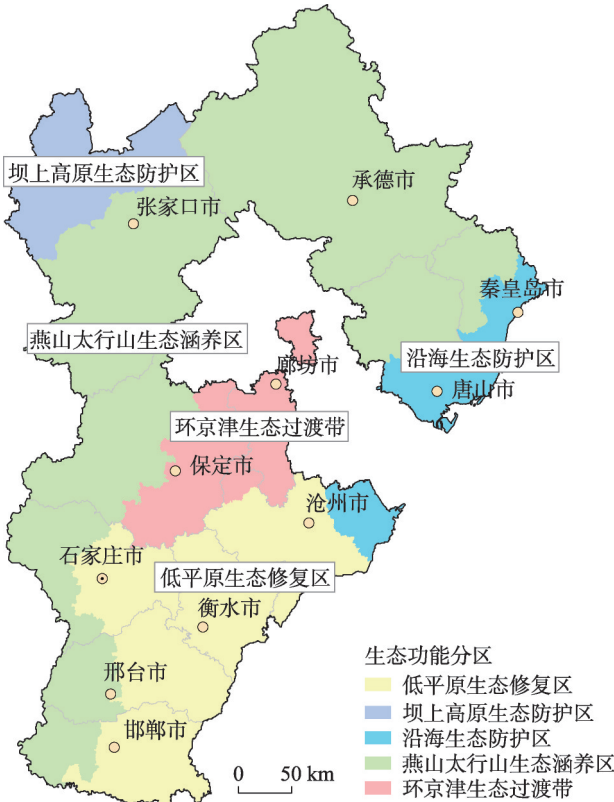


图1 河北省生态功能分区
Fig. 1 Ecological function zones of Hebei province

本文所用到的河北省土地利用类型数据、土壤质地空间分布数据、NDVI数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)；降雨量数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)；实际蒸散发、草地/湿地生物量数据来自于国家生态数据中心资源共享服务平台 (<http://www.nesdc.org.cn/>)；森林地上和地下植被碳储量数据、坡长坡度因子数据、径流系数数据来自于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpcd.ac.cn/home>)，粮食生产数据来自于河北省统计局《2007—2017河北省第三次全国农业普查数据核定和相关历史数据修订汇编》以及国家统计局 (<http://www.stats.gov.cn/>)。所有数据的时间均为2017年，空间分辨率统一至1 km×1 km。

2.3 生态系统服务评估方法

2.3.1 粮食生产服务 本文采用粮食产量来表征生态系统的粮食生产服务。研究结果表明，某一区域的粮食产量与NDVI具有显著的线性关系^[35-36]，据此本文采用河北省统计资料中的粮食产量数据和NDVI数据将粮食生产服务空间化至1 km×1 km栅格。

$$CP_i = \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \times CP_{sum}$$

(1)

式中：CP_i表示栅格*i*的粮食产量；CP_{sum}表示研究区域总的粮食产量；NDVI_i表示栅格*i*的归一化植被指数；NDVI_{sum}表示研究区域总的归一化植被指数。

2.3.2 土壤保持服务 本文采用土壤保持量来表征生态系统的土壤保持服务。土壤保持量采用目前比较成熟且应用广泛的修正通用水土流失方程 (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) 来进行计算^[37], 该方程的原理是认为某一区域在没有植被覆盖的情景下发生的潜在土壤侵蚀量 (即植被覆盖因子 $C = 1$, 水土保持因子 $P = 1$) 与现实土壤侵蚀量之间的差值即可认为是该区域的土壤保持量, 计算公式如下^[38-40]:

$$Q = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (2)$$

式中: Q 为土壤保持量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; LS 为坡长坡度因子, 该因子从《泛第三极重点地区 20 国 LS 数据》数据集中提取获得^[41]; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持因子, 根据不同生态系统类型进行赋值; LS 、 C 、 P 均无量纲。

降雨侵蚀力因子 R 采用 Wischmeier 等^[42]提出的利用各月降雨量推求的经验公式:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \times \lg \frac{p_i^2}{p}) - 0.8188} \quad (3)$$

式中: R 为栅格单元的降雨侵蚀力因子; i 为月份; p_i 为某月降雨量; p 为年降雨量。

土壤可蚀性因子 K 采用 Williams 等在 EPIC 模型中发展的计算公式^[43]:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 Sa \left(1 - \frac{Si}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{Si}{Cl + Si} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25 SOC}{SOC + \exp(3.72 - 2.95 SOC)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7 Sn}{Sn + \exp(-5.51 + 22.9 Sn)} \right] \quad (4)$$

式中: K 为土壤可蚀性因子; $Sn = 1 - Sa/100$; Sa 为土壤砂粒含量; Si 为土壤粉粒含量; Cl 为土壤粘粒含量; SOC 为土壤有机碳含量。

植被覆盖因子 C 采用 NDVI 指数计算的植被覆盖度来得到, 公式如下:

$$C = \begin{cases} 1 & f = 0.1 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f & 0.1 < f \leq 0.783 \\ 0 & f > 0.783 \end{cases} \quad (5)$$

$$f = \frac{NDVI_i - NDVI_{soil}}{NDVI_{max} - NDVI_{soil}} \quad (6)$$

式中: C 为植被覆盖因子, 无量纲, 介于 0~1 之间; f 为植被覆盖度指数; $NDVI_i$ 为栅格 i 的 NDVI 数值; $NDVI_{soil}$ 为裸土象元的 NDVI 数值; $NDVI_{max}$ 为纯植被象元的 NDVI 数值。

2.3.3 水源涵养服务 本文采用水源涵养量来表征生态系统的水源涵养服务。由于生态系统涵养水源的功能主要依赖于地表植被^[44], 因此本文采用有植被覆盖 (森林、草地、湿地) 和无植被覆盖区域 (裸地) 的水源涵养量差值来体现该区域生态系统所发挥的水源涵养功能 (农田因为需要灌溉, 聚落生态系统主要为人工建筑, 所以不考虑在内^[45])。水源涵养量依据水量平衡方程计算, 即生态系统的水源涵养量是降水输入与暴雨径流和生态系统自身蒸散发量之差, 计算公式如下:

$$Q_{wr} = \sum_{i=1}^n A_i \times (P_i - R_i - ET_i) \times 10^{-3} \quad (7)$$

式中: Q_{wr} 为水源涵养量; A_i 为第 i 类生态系统的面积; P_i 为产流降雨量; R_i 为地表径流量; ET_i 为蒸散发量; i 为生态系统类型; n 为生态系统类型总数。

2.3.4 碳储存服务 本文采用植被碳储量来表征生态系统的碳储存或碳汇服务, 包括森林、草地、湿地等自然生态系统。由于受到人为因素的强烈干扰其碳周转快速, 本文不考虑农田生态系统碳储存服务。森林碳储量数据来自于中国科学院生态环境研究中心《中国森林地上和地下植被碳储量数据集 (2002—2021)》, 该数据集的预测精度达到

89%，可准确地反映中国森林植被碳储量的空间格局以及年际变化情况^[46]。本文从该数据集中提取河北省森林地上和地下碳储量，并叠加得到森林总碳储量。草地和湿地碳储量数据的获取分为两步：①从国家生态数据中心资源共享服务平台中提取河北省草地和湿地生物量数据；②结合从文献中提取的河北省草地和湿地植物的平均碳含量系数^[47-48]计算得到二者的碳储量结果。森林、草地、湿地碳储量数据叠加得到河北省生态系统碳储存服务功能量分布。

2.4 生态系统服务权衡与协同分析方法

空间叠置法是一种基于排序分级框架的生态系统服务权衡/协同量化方法，其通过对多种生态系统服务供给能力进行等级划分并在空间上叠加，以生态系统服务量间的高低关系判断生态系统服务间的权衡/协同关系。在该方法中，权衡是指一个空间栅格单元或生态系统中1种或2种服务供给能力强而其他服务能力弱的不均衡状态，协同是指多种服务供给能力均较强或较弱的均衡状态^[49]。虽然这是一种静态的数量方法，但其优点在于可将多种生态系统服务综合考虑来表征其权衡/协同状态，能够直接表征生态系统的主导功能，并将权衡与协同关系的空间异质性在空间上的差异清晰、直观地表达出来。该方法是生态系统权衡/协同关系分析的有效方案，可以用来判断生态系统在某一时间节点上生态系统服务功能是否达到高协同的理想状态。因此该方法在近些年被国内外学者重视起来，在生态系统服务权衡/协同关系的综合量化、空间异质性分析、生态功能区优化等方面发挥了重要作用^[50-53]。

本文使用空间叠置分析法对研究区域内不同生态区、不同类型生态系统服务之间的权衡/协同关系进行分析和展示，该方法可清晰地反映出不同生态系统服务之间权衡/协同关系在空间上的分布特征^[20]。具体操作方法为：首先对不同生态系统服务数据进行标准化处理，即每个栅格单元的生态系统服务值与研究区域内该服务的最大值相比，之后采用自然断点法分为低、中、高3个等级，对应编号1、2、3（表1）；其次，对分级后的生态系统服务栅格数据在ArcGIS10.2软件中进行空间叠置（新代码=粮食生产×1000+碳储存×100+土壤保持×10+水源涵养），得到不同等级组合的生态系统服务空间分布结果；最后，根据权衡/协同的定义^[54]，对空间叠置结果进行分类，将不同生态系统服务之间的关系分为强权衡、弱权衡、高协同、低协同4种（表2）。本文中，强权衡为1种服务供给能力强而其他服务较弱的情形；弱权衡为2种或3种服务供

表1 各生态系统服务能力分级

Tab. 1 Classification of ecosystem services capacity

服务类型	低(1)	中(2)	高(3)
粮食生产	0~0.349	0.349~0.804	0.804~1
碳储存	0~0.118	0.118~0.298	0.298~1
土壤保持	0~0.059	0.059~0.212	0.212~1
水源涵养	0~0.094	0.094~0.271	0.271~1

表2 生态系统服务权衡/协同划分标准及统计

Tab. 2 Classification criteria and statistics of trade-offs/synergies among ecosystem services

服务关系	亚类	供给能力组合	组合个数	组合示例
权衡	强权衡	1高3低	4	3111、1311
		1高1中2低	12	3211、3121
		1高2中1低	12	3221、3122
	弱权衡	2高2低	6	3311、3131
		2高1中1低	12	3321、3312
		3高1低	4	3331、3313
协同	高协同	4高	1	3333
		3高1中	4	3332、3323
		2高2中	6	3322、3232
		1高3中	4	3222、2322
		4中	1	2222
	低协同	3中1低	4	2221、2212
		2中2低	6	2211、2121
		1中3低	4	2111、1211
		4低	1	1111

给能力强而其余服务较弱的情形；强协同为4种服务能力都达到中级及以上的情形；低协同为4种服务能力都为中级及以下的情形。

3 结果分析

3.1 河北省生态系统服务总量及空间格局

2017年河北省粮食生产总量为3828万t，五大生态区的贡献排序为低平原生态修复区（37.85%）>燕山太行山生态涵养区（32.84%）>环京津生态过渡带（13.73%）>坝上高原生态防护区（8.12%）>沿海生态防护区（7.46%）（表3）。单位面积的粮食生产平均能力最高为低平原生态修复区，最低为坝上高原生态防护区。从空间格局来看，粮食生产高值区集中在邯郸、邢台、沧州、石家庄、保定的平原区和唐山、秦皇岛的平原区，位于燕山、太行山山区的张家口、承德及其他市的部分地区粮食生产能力较弱（图2）。

河北省碳储存、土壤保持、水源涵养服务的总量分别为8567万t碳、470161万t土、656875万t水（表3）。3种服务呈现相似的生态区分布，五大生态区的贡献排序整体表现

表3 河北省不同生态区生态系统服务统计
Tab. 3 Ecosystem services of different ecological function zones in Hebei province

服务类型	生态区	单位面积服务能力			区域总量 (万 t)	河北省占比 (%)
		最小值	最大值	平均值		
粮食生产 (kg hm ⁻² a ⁻¹)	低平原生态修复区	333.46	5001.83	4376.38	1449	37.85
	燕山太行山生态涵养区	1333.82	5001.83	4135.64	1257	32.84
	环京津生态过渡带	1244.90	5001.83	4302.87	526	13.73
	坝上高原生态防护区	1333.82	5001.83	3638.83	311	8.12
	沿海生态防护区	111.15	5001.83	4287.50	286	7.46
	河北省				3828	
碳储存 (t C hm ⁻²)	低平原生态修复区	0.00	31.27	1.27	316	3.69
	燕山太行山生态涵养区	0.00	51.62	9.84	7984	93.19
	环京津生态过渡带	0.00	31.93	0.97	123	1.43
	坝上高原生态防护区	0.00	34.74	2.59	35	0.41
	沿海生态防护区	0.00	32.12	1.66	109	1.28
	河北省				8567	
土壤保持 (t hm ⁻² a ⁻¹)	低平原生态修复区	0.00	1238.07	8.72	3682	0.78
	燕山太行山生态涵养区	0.00	6166.20	437.79	453230	96.40
	环京津生态过渡带	0.00	1421.35	8.36	1394	0.30
	坝上高原生态防护区	0.00	530.00	19.96	2748	0.58
	沿海生态防护区	0.00	3115.35	76.94	9108	1.94
	河北省				470161	
水源涵养 (t hm ⁻² a ⁻¹)	低平原生态修复区	0.00	1490.10	70.93	29881	4.55
	燕山太行山生态涵养区	0.00	3665.93	477.36	492731	75.01
	环京津生态过渡带	0.00	2011.85	143.82	23889	3.64
	坝上高原生态防护区	0.00	2791.27	594.58	81439	12.40
	沿海生态防护区	0.00	2120.33	271.94	28934	4.40
	河北省				656875	

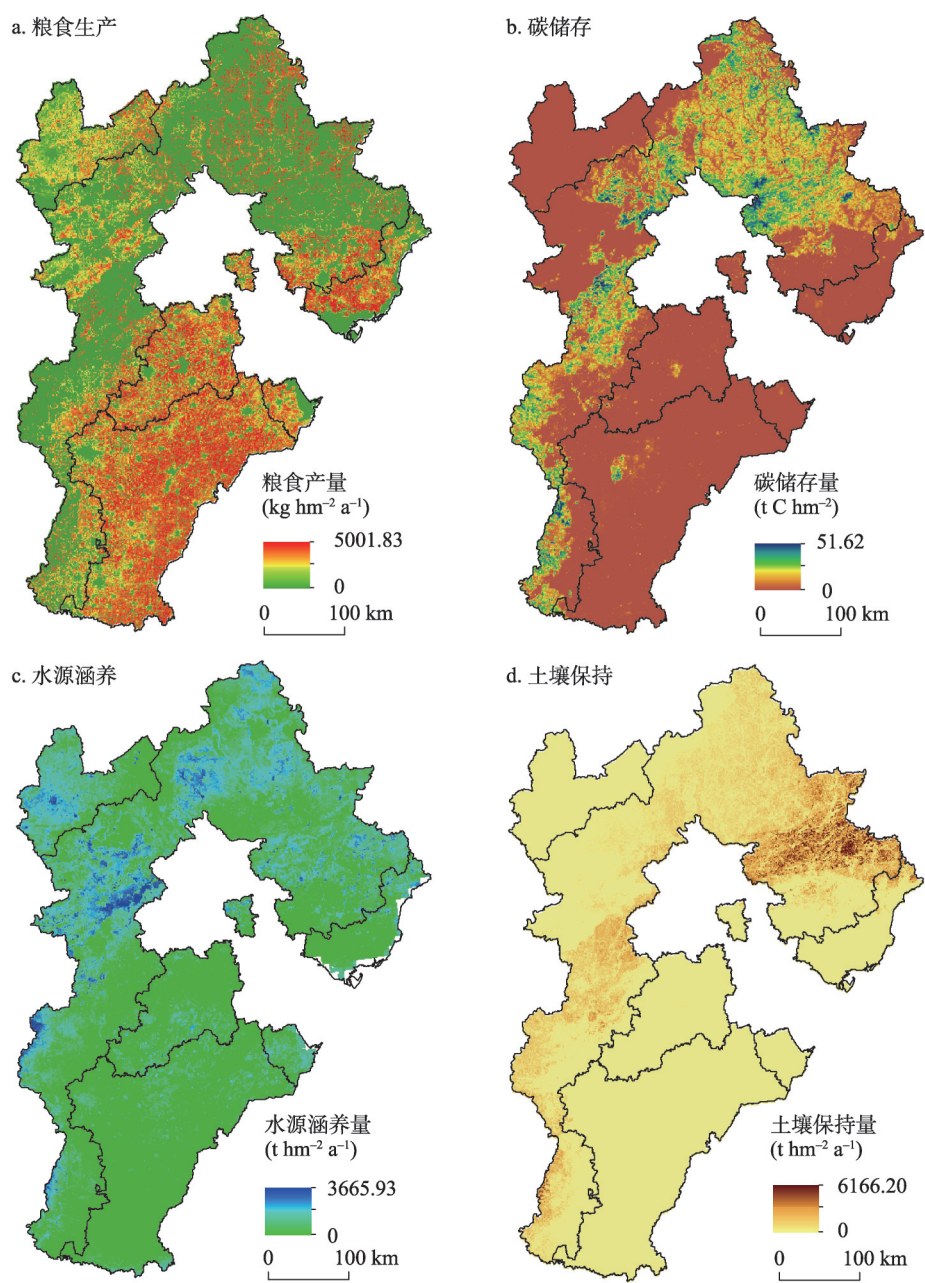


图2 2017年河北省生态系统服务空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ecosystem services in Hebei province in 2017

为，燕山太行山生态涵养区贡献量均最高，占比超过75%，其余各生态功能区贡献量普遍较低（表3）。单位面积的平均服务能力，燕山太行山生态涵养区的碳储存和土壤保持能力最强，坝上高原生态防护区的水源涵养能力最强，环京津生态过渡带的碳储存和土壤保持能力最弱，低平原生态修复区的水源涵养能力最弱。从空间格局来看，3种服务的高值区主要位于燕山太行山山区，平原区、坝上草原区、沿海地区的服务能力逐渐降低（图2）。

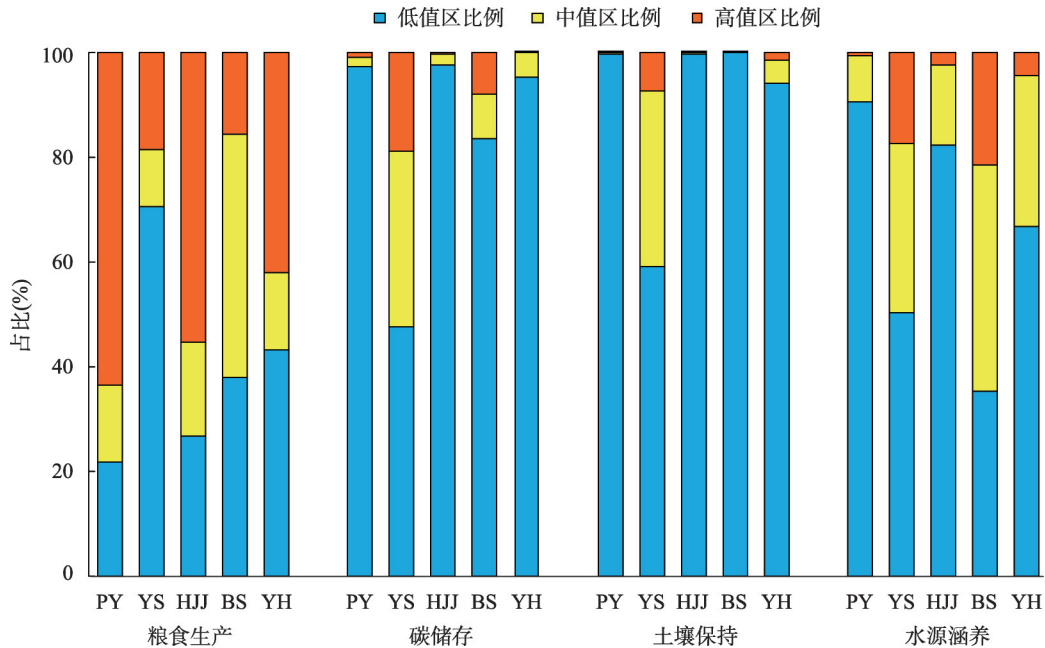
3.2 河北省不同生态区生态系统服务等级差异

从图3可以看到,粮食生产服务高值区在河北省不同生态功能区都有分布,其中高值区占比较高的生态功能区为低平原生态修复区(64%)、环京津生态过渡带(55%)和沿海生态防护区(42%),中值区占比除坝上高原生态防护区达到46%,其余生态功能区该比例均在15%左右,低值区在燕山太行山生态涵养区占比最高(71%)。

碳储存服务中,只有燕山太行山生态涵养区和坝上高原生态防护区有部分高值区分布,占比分别为19%和8%,中、高值区占比总和分别达到52%和16%,其他生态功能区均以低值区为主(占比84%以上)。

土壤保持服务中,仅燕山太行山生态涵养区和沿海生态防护区有少量高值区分布,且占比非常低,分别为7%和1%,中、高值区占比总和分别为41%和6%,其余各生态功能区均为低值区(100%)。

水源涵养服务高值区在各生态功能区均有分布,其中燕山太行山生态涵养区(17%)和坝上高原生态防护区(21%)分布比例较高,与高值区分布相比,中值区在各生态功能区分布比例有所增加,燕山太行山生态涵养区和坝上高原生态防护区中高值区分布比例总和均达到或超过50%;除坝上高原生态防护区外,低值区分布占比在其他各生态功能区均达到了50%以上。



注: 图中PY表示低平原生态修复区,YS表示燕山太行山生态涵养区,HJJ表示环京津生态过渡带,BS表示坝上高原生态防护区,YH表示沿海生态防护区。

图3 不同生态功能区生态系统服务各等级面积占比

Fig. 3 Area proportion of ecosystem services at different levels among different ecological function zones

3.3 河北省生态系统服务权衡/协同关系

河北省不同生态系统服务之间以强权衡和低协同关系为主(图4),强权衡和低协同的比例分别达到48.15%和45.92%,其次为弱权衡5.09%和高协同0.83%(表4)。在各个生态区也是以强权衡和低协同为主,不同的是这两种关系在不同生态区的高低具有差异(表4)。低平原生态修复区和环京津生态过渡带表现为强权衡面积比例高于低协同,燕

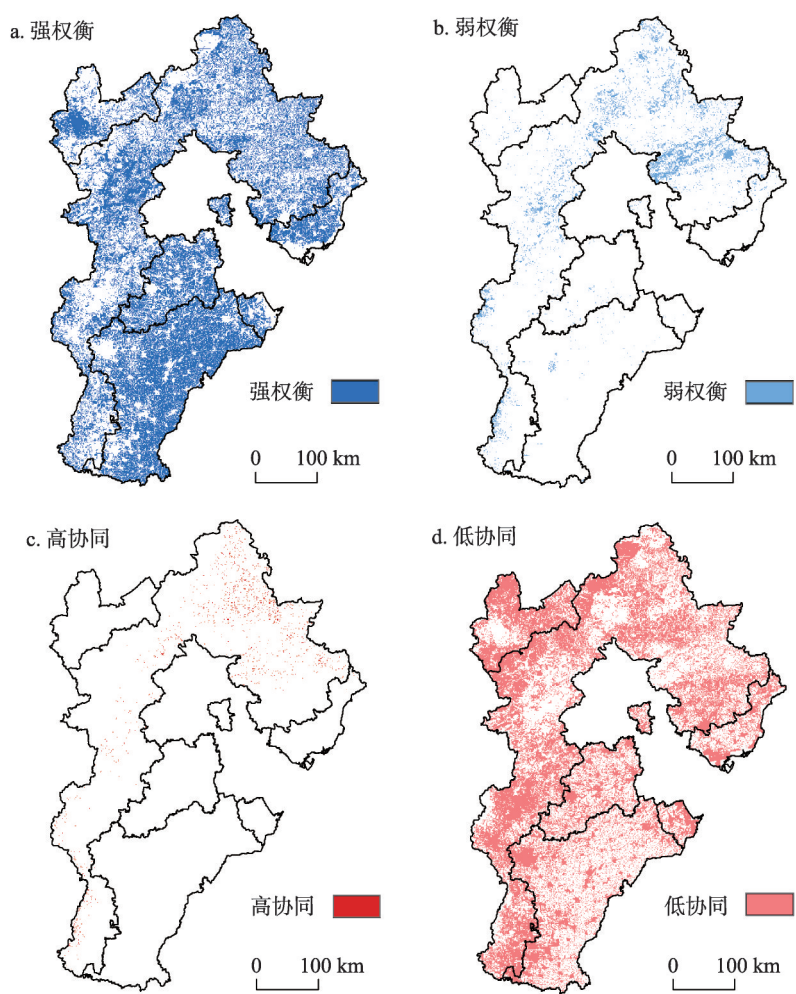


图4 河北省生态系统服务权衡/协同关系

Fig. 4 Ecosystem services trade-off/synergy of Hebei province

山太行山生态涵养区和坝上高原生态防护区表现为低协同面积比例高于强权衡，沿海生态防护区二者基本相当。高协同关系所占面积比例最少，主要出现在燕山太行山生态涵养区和沿海生态防护区（图4），在各自生态区所占比例分别为1.49%和0.08%，其他3个生态区高协同所占比例几乎为零（表4）。

本文将有一种生态系统服务功能占主导功能的权衡关系定义为强权衡。如果强权衡下的主导功能与该生态区的功能定位一致，也是一种比较理想的生态系统状态。本文统计了不同生态区强权衡关系下4种服务作为主导功能的面积占比（表5）。结果表明，低平原生态修复区、环京津生态过渡带

表4 不同生态区权衡/协同面积比例(%)

Tab. 4 Area proportion of ecosystem services trade-off/synergy among ecological function zones

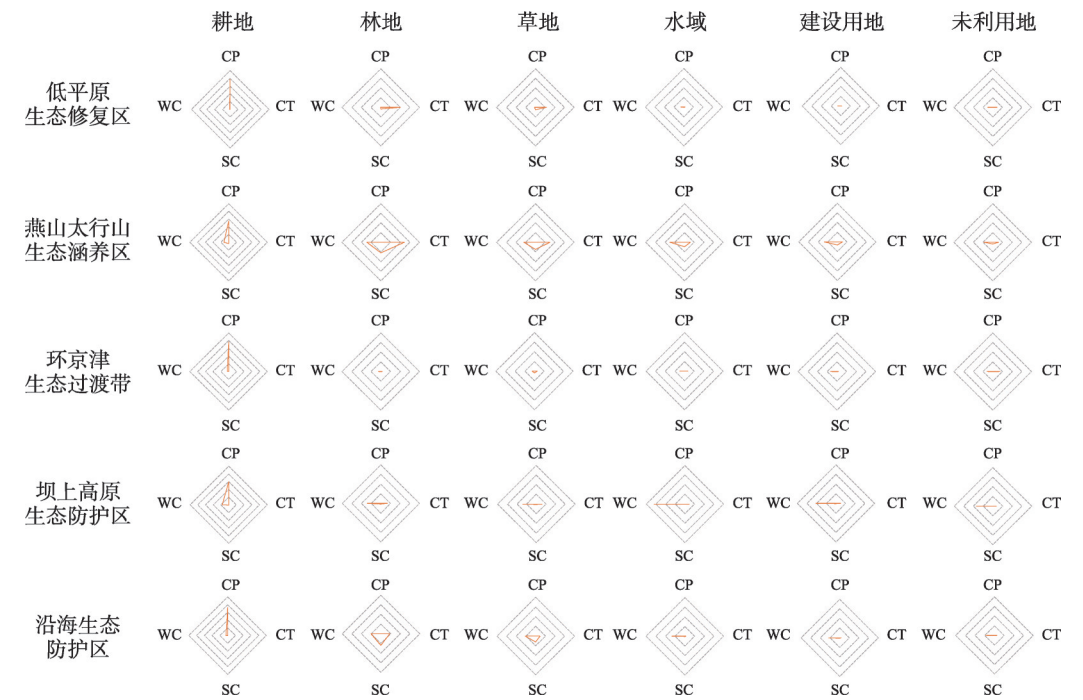
生态区	低协同	高协同	强权衡	弱权衡
低平原生态修复区	35.54	0.00	63.95	0.50
燕山太行山生态涵养区	48.04	1.49	41.77	8.70
环京津生态过渡带	42.57	0.00	56.73	0.69
坝上高原生态防护区	63.45	0.00	35.98	0.57
沿海生态防护区	49.13	0.08	49.83	0.97
河北省	45.92	0.83	48.15	5.09

表 5 不同生态区主导功能面积比例(%)

生态区	粮食生产	碳储存	土壤保持	水源涵养
低平原生态修复区	98.81	0.72	0	0.48
燕山太行山生态涵养区	33.83	29.93	8.58	27.66
环京津生态过渡带	96.56	0.33	0.01	3.10
坝上高原生态防护区	42.05	0.43	0	57.52
沿海生态防护区	89.94	0.06	3.08	6.93

和沿海生态防护区以粮食生产为主导功能的面积占比最高（均为90%左右），说明导致这3个功能区生态系统强权衡的直接原因是粮食生产能力。燕山太行山生态涵养区粮食生产、碳储存、水源涵养作为主导功能的占比三者基本相当（为30%左右），这3种功能在该生态功能区强权衡关系形成中均发挥了重要作用，而且碳储存和水源涵养作为主导功能的面积比例之和达到61%，基本体现了该生态功能区生态涵养的主导功能。坝上高原生态防护区则为水源涵养作为主导功能的占比最高，该功能是该生态功能区强权衡关系形成最重要的原因，水源涵养能力强也说明了该生态区植被保护、植被建设方面具有显著成效，在高原生态防护方面发挥了有益作用。

不同地类由于主导功能的差异其生态系统服务之间的关系可能不同。本文对各生态系统服务数据标准化，消除量纲的影响，并统计各生态区、不同地类4种生态系统服务的标准化数据均值，通过玫瑰图反应各生态区不同地类生态系统服务的关系（图5）。4



注：CP表示粮食生产,CT表示碳储存,WC表示水源涵养,SC表示土壤保持。

图 5 河北省各生态区不同地类生态系统服务玫瑰图

Fig. 5 Ecosystem services for different land-use types in ecological function zones of Hebei province

种生态系统服务在不同地类中的关系主要表现出3种模式。①单一功能主导模式。在耕地中粮食生产占主导功能,在不同生态区的耕地中均如此;坝上高原生态防护区除耕地外的其他地类均表现出水源涵养的主导功能。②两种功能均衡模式。环京津生态过渡带除耕地外的其他地类和低平原生态修复区的水域、建设用地、未利用地均表现出水源涵养和碳储存相对均衡的状态。③3种功能鼎力模式。燕山太行山生态涵养区除耕地外的其他地类和沿海生态防护区的林地、草地均表现出水源涵养、碳储存、土壤保持都较强的状态。总的来说,不同地类的生态系统服务之间的关系有所不同,同一地类在不同生态区其生态系统服务之间的关系也会存在差异。

4 结论与讨论

4.1 讨论

在理想条件下,多数研究认为,同一个生态系统其所有生态系统服务之间呈现“高协同”关系或者“正向协同”是利益最大化的表现,这是生态系统管理的最终目标^[20, 54-55]。但现实状况中往往只有部分甚至少数区域能够达到这种状态,多数表现为一种或两种为主导的“权衡”关系,甚至还有生态系统服务都不太理想的“低协同”状态^[56-57]。在这种情况下,通过人为干预,制定相应管理规定,将“低协同”关系为主的生态系统转换为以一种或两种服务功能为主导的“强权衡”关系,在短期内会是既能发挥生态系统主要功能,又易于实现的可行目标^[49, 56]。根据环保部印发的《全国生态功能区划(修编版)》,其确定生态功能区的第一条原则即为主导功能原则,该原则指出:区域生态功能的确定以生态系统的主导服务功能为主;在具有多种生态系统服务功能的地域,以生态调节功能优先;在具有多种生态调节功能的地域,以主导调节功能优先。因此,从生态系统权衡/协同的角度来看,生态功能区划的主导功能原则即为生态系统服务间的关系表现为强权衡,且强权衡中的主导功能要与生态区的功能定位相吻合。

河北省生态功能区权衡/协同关系中强权衡面积占比达到48.15%,而高协同地区占比仅为0.83%。这说明在河北地区生态系统服务高协同的状态确实很难达到,强权衡关系的地区可以占到河北省国土面积的约一半。在进一步的强权衡关系主导功能分析中发现,燕山太行山生态涵养区以碳储存、水源涵养和土壤保持作为主导功能的区域占到该功能区面积的66%,坝上高原生态防护区以水源涵养作为主导功能的区域占到该功能区面积约57.5%,充分体现了这两个生态区在生态涵养、防护方面的主要作用。低平原生态修复区、环京津生态过渡带、沿海生态防护区强权衡关系的主导功能均为粮食生产,其粮食生产功能作为主导功能的区域均占到其功能区面积的90%以上,这是河北省作为全国粮食大省的重要体现,在国民社会、经济安全中发挥了重要作用,但是在生态修复、防护中的作用还需再加强。总的来说,从生态系统服务权衡/协同关系的角度来看,河北省生态功能区划分体现了国家生态功能区划的主导功能原则,符合河北省不同地形、地貌、地类实际情况,将为河北省国土空间安全、发展提供基础支撑。

另一个主要的问题是,河北省不同生态功能区权衡/协同关系中低协同面积占比达到45.92%,说明河北省有将近一半的国土面积处于生态系统服务最不理想的状态。根据本文生态系统服务权衡/协同分析,强权衡为不同生态系统服务“1高3低”“1高1中2低”“1高2中1低”的状态,低协同为“4低”“1中3低”“2中2低”“3中1低”的状态。可以看出,要实现低协同向强权衡的关系转变并不难,只需将低协同中的“1中”或“1

低”转变为“1高”即可实现,而且在调整的过程中最好是将要提升的生态服务类型与所处生态区定位的主导功能保持一致,这样既实现了生态系统服务关系从低协同到强权衡的转变,又与当地的生态功能区定位吻合,实现另一种意义上的“双赢”。

本文以河北省生态系统服务为案例,分析了河北省五大生态功能区服务功能的权衡/协同关系,提出了“强权衡关系与生态功能区主导功能一致即为生态系统阶段性管理目标实现”的观点,并指出了低协同关系如何向强权衡关系转变的建议。依据本文生态系统服务权衡/协同关系的结果和存在问题,针对不同生态功能区的未来发展提出以下建议:①燕山太行山生态涵养区虽然目前已体现了其碳储存、水源涵养和土壤保持的主导功能,但是燕山地区的森林以人工纯林为主,应逐步向混交林转变,促使其向着更加健康稳定的混交异龄复层林发展,发挥更大的生态涵养功能;②低平原生态修复区目前以粮食生产服务为主导,在未来保障粮食产量的基础上,应更加注重降低农业面源污染,加大精准施肥、精准灌溉力度,提供更多有机、绿色的粮食;③环京津生态过渡带目前也是以粮食生产服务为主导,未来应在雄安新区“千年秀林”、白洋淀生态保护修复工程等工作的基础上,进一步提升该地区森林、水域的生态容量,为京津冀城市发展提供生态空间保障;④坝上高原生态防护区目前以水源涵养能力为主导的地区面积占近60%,未来应继续加强对该地区重要水源涵养区的保护与修复,处理好草地保护与放牧的关系,进一步提升该地区涵养水源和防风固沙的能力;⑤沿海生态防护区目前是以粮食生产服务为主,生态防护能力不足,未来应加强海岸带环境保护与修复,而且要建设海洋牧场、充实“蓝色粮仓”,增强“向海洋要食物”的能力。

本文以河北省2017年数据为例,基于空间叠置分析法进行了生态系统服务权衡/协同关系分析,并针对不同生态功能区的未来发展提出了建议,但也存在以下不足:首先,本文只以一年的数据研究了河北省不同生态功能区生态系统服务权衡/协同关系的现状,未来可应用空间叠置法通过多年连续数据从时间、空间二维角度深入探讨生态系统服务权衡/协同关系的变化。其次,本文选择的生态系统服务项目较少,选择了该地区4种典型生态系统服务,若再增加几项,生态系统服务权衡/协同关系可能会有不同的结果,需要未来更深入的探讨。最后,关于生态系统服务权衡/协同关系空间变异的影响机制分析本文未做探讨,这也是目前该研究方向亟需深入的问题和难点^[20,58]。其成为难点的原因主要是因为生态系统服务权衡/协同指标没有进行很好的数值量化,虽然也有研究通过冗余分析^[59-60]、地理探测器^[61]等方法来分析,同时以相关系数或均方根误差来量化的生态系统服务权衡/协同关系的形成机理,但是生态系统服务权衡/协同关系的方向和强度还受到关系变化的速率、显著性等综合的影响,单独进行相关系数或均方根误差并不能真正揭示生态系统服务权衡/协同关系变化的内在机理。空间叠置法也存在类似的问题,在该方法中生态系统服务权衡/协同的关系是进行的等级划分,权衡和协同并没有统一的量化强度,所以目前也很难进行其空间异质性的机理探讨。因此,目前生态系统服务权衡/协同关系的结果主要用于评价和建议,很难找到普适性的机理解释,未来需要再优化指标和方法来进行生态系统服务权衡/协同关系的机理探索。

4.2 结论

本文以河北省生态系统服务为研究对象,评估了2017年河北省粮食生产、碳储存、土壤保持、水源涵养四大服务功能的总量及空间格局,通过空间叠置法分析了不同生态功能区生态系统服务的权衡/协同关系,主要结论如下:

(1) 河北省不同生态系统服务之间以强权衡和低协同关系为主, 强权衡和低协同的面积占比分别达到48.15%和45.92%, 其次为弱权衡(5.09%)和高协同(0.83%)。

(2) 强权衡关系是一种既能发挥生态系统主要功能, 又易于实现的生态系统服务关系。河北省的强权衡关系生态系统的主导功能与其所处生态区功能定位基本一致, 河北省生态功能区划分体现了国家生态功能区划的主导功能原则。

(3) 低协同区的生态系统服务可通过将其与所处生态区定位的主导功能服务类型由低或中等级提升至高等级, 实现生态系统服务关系从低协同到强权衡的转变, 从而更好地服务于生态功能区的定位。

参考文献(References)

- [1] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington: Island Press, 1997: 412.
- [2] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(15): 253-260.
- [3] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [4] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12: 1394-1404.
- [5] Raudsepp-Hearene 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.
- [6] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [7] Turkelboom F, Leone M, Jacobs S, et al. When we cannot have it all: Ecosystem services trade-offs in the context of spatial planning. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 566-578.
- [8] Rodríguez J P, Beard T D, Bennett E M, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28-41.
- [9] Howe C, Suich H, Vira B, et al. Creating win-wins from trade-offs? Ecosystem services for human well-being: A meta-analysis of ecosystem service trade-offs and synergies in the real world. *Global Environmental Change*, 2014, 28: 263-275.
- [10] Dai Erfu, Wang Xiaoli, Zhu Jianjia, et al. Progress and perspective on ecosystem services trade-offs. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(11): 1250-1259. [戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望. *地球科学进展*, 2015, 30(11): 1250-1259.]
- [11] Hou Y, Lü Y H, Chen W P, et al. Temporal variation and spatial scale dependency of ecosystem service interactions: A case study on the central Loess Plateau of China. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1201-1217.
- [12] Qiao X N, Gu Y Y, Zou C X, 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(1): 218-229.
- [13] Hou Y Z, Zhao W W, Liu Y X, et al. Relationships of multiple landscape services and their influencing factors on the Qinghai-Tibet Plateau. *Landscape Ecology*, 2021, 36(7): 1987-2005.
- [14] Xia H, Yuan S F, Prishchepov A V, et al. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their social-ecological drivers: Implications for spatial planning and management. *Resources, Conservation & Recycling*, 2023, 189: 106767. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106767.
- [15] Li Y J, Zhang L W, Qiu J X, et al. Spatially explicit quantification of the interactions among ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2017, 32: 1181-1199.
- [16] Liu Y X, Li T, Zhao W W, et al. Landscape functional zoning at a county level based on ecosystem services bundle: Methods comparison and management indication. *Journal of Environmental Management*, 2019, 249: 109315. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109315.
- [17] Liu Y C, Jing Y D, Han S M. Ecological function zoning of Nansi Lake Basin in China based on ecosystem service bundles. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30: 77343-77357.

- [18] Yin Lichang, Wang Xiaofeng, Zhang Kun, et al. Trade-offs and synergy between ecosystem services in national barrier zone. *Geographical Research*, 2019, 38(9): 2162-2172. [尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 等. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同. *地理研究*, 2019, 38(9): 2162-2172.]
- [19] Niu Zhong'en, He Honglin, Ren Xiaoli, et al. Spatio-temporal characteristic of terrestrial ecosystem services and their trade-offs and synergies in China from 2000 to 2018 based on a process model. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(2): 496-509. [牛忠恩, 何洪林, 任小丽, 等. 基于过程模型的2000—2018年中国陆地生态系统服务时空动态及其权衡与协同分析. *生态学报*, 2023, 43(2): 496-509.]
- [20] Zhang Jingjing, Zhu Wenbo, Zhu Lianqi, et al. Multi-scale analysis of trade-off/synergy effects of forest ecosystem services in the Funiu Mountain Region. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 975-988. [张静静, 朱文博, 朱连奇, 等. 伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析. *地理学报*, 2020, 75(5): 975-988.]
- [21] Gou Mengmeng, Li Le, Liu Changfu, et al. Gradient effects of ecosystem services trade-off relationships in the Daning River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(18): 7445-7457. [勾蒙蒙, 李乐, 刘常富, 等. 大宁河流域生态系统服务权衡关系梯度效应. *生态学报*, 2022, 42(18): 7445-7457.]
- [22] Wen Yuling, Zhang Xiaolin, Wei Jiahao, et al. Temporal and spatial variation of ecosystem service value and its trade-offs and synergies in the peripheral region of the Poyang Lake. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(7): 1229-1238. [温玉玲, 张小林, 魏佳豪, 等. 鄱阳湖环湖区生态系统服务价值时空变化及权衡协同关系. *地理科学*, 2022, 42(7): 1229-1238.]
- [23] Yang Y, Li M W, Feng X M, et al. Spatiotemporal variation of essential ecosystem services and their trade-off/synergy along with rapid urbanization in the Lower Pearl River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2021, 133: 108439. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108439.
- [24] Li B Y, Chen N C, Wang Y C, et al. Spatio-temporal quantification of the trade-offs and synergies among ecosystem services based on grid-cells: A case study of Guanzhong Basin, NW China. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 246-253.
- [25] Xu Z H, Peng J, Zhang H B, et al. Exploring spatial correlations between ecosystem services and sustainable development goals: A regional-scale study from China. *Landscape Ecology*, 2022, 37: 3201-3221.
- [26] Liu Chao, Xu Yueqing, Lu Xinhai. Spatio-temporal evolution and optimization regionalization of trade-off and synergy of land use functions in ecologically fragile and poverty areas: A case study of Zhangjiakou city. *Economic Geography*. 2021, 41(1): 181-190. [刘超, 许月卿, 卢新海. 生态脆弱贫困区土地利用多功能权衡/协同格局演变与优化分区: 以张家口市为例. *经济地理*, 2021, 41(1): 181-190.]
- [27] Gao Chan, Zhang Bangbang, Zhao Minjuan, et al. Grain productivity potential of cultivated land and yield gap analysis in China. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(1): 10-18. [高婵, 张蚌蚌, 赵敏娟, 等. 中国耕地粮食生产能力及产量差测算. *中国农业大学学报*, 2020, 25(1): 10-18.]
- [28] Wang Qian, Jin Xiaobin, Ayituerxun Shamuxi, et al. Space difference research of the grain production in Hebei province. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(9): 1525-1535. [王千, 金晓斌, 阿依吐尔逊·沙木西, 等. 河北省粮食产量空间格局差异变化研究. *自然资源学报*, 2010, 25(9): 1525-1535.]
- [29] Wen Lanjiao, Zhang Jingjing. Progress and trends of land spatial regulation, unbalanced development and spatial externalities. *China Land Sciences*, 2015, 29(7): 4-12. [文兰娇, 张晶晶. 国土空间管制、土地非均衡发展及外部性研究: 回顾与展望. *中国土地科学*, 2015, 29(7): 4-12.]
- [30] Fang Jingyun, Yu Guirui, Ren Xiaobo, et al. Carbon sequestration in China's terrestrial ecosystems under climate change: Progress on ecosystem carbon sequestration from the CAS Strategic Priority Research Program. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(6): 848-857. [方精云, 于贵瑞, 任小波, 等. 中国陆地生态系统固碳效应: 中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展. *中国科学院院刊*, 2015, 30(6): 848-857.]
- [31] Feng Zhiming, Liu Dengwei. A study on water resources carrying capacity in Jingjinji region. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(5): 689-699. [封志明, 刘登伟. 京津冀地区水资源供需平衡及其水资源承载力. *自然资源学报*, 2006, 21(5): 689-699.]
- [32] Yu Haozhe, Li Lijuan, Li Jiuyi. Evaluation of water resources carrying capacity in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on quantity-quality-water bodies-flow. *Resources Science*, 2020, 42(2): 358-371. [余灏哲, 李丽娟, 李九一. 基于量—质—域—流的京津冀水资源承载力综合评价. *资源科学*, 2020, 42(2): 358-371.]
- [33] Leng Shuying, Feng Renguo, Li Rui, et al. Key research issues of soil erosion and conservation in China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 1-6, 26. [冷疏影, 冯仁国, 李锐, 等. 土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 1-6, 26.]

- [34] Rao Enming, Xiao Yi. Spatial characteristics and effects of soil conservation service in Sichuan province. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(24): 8741-8749. [饶恩明, 肖懿. 四川省生态系统土壤保持功能空间特征及其影响因素. *生态学报*, 2018, 38(24): 8741-8749.]
- [35] Wu Wenhuan, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos city. *Progress in Geography*, 2017, 36(12): 1571-1581. [武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析. *地理科学进展*, 2017, 36(12): 1571-1581.]
- [36] Xie Yuchu, Gong Jie, Qi Shanshan, et al. Assessment of ecosystem food production and its spatiotemporal heterogeneity in the Bailong River Watershed, Gansu. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1719-1728. [谢余初, 巩杰, 齐姗姗, 等. 甘肃白龙江流域生态系统粮食生产服务价值时空分异. *生态学报*, 2017, 37(5): 1719-1728.]
- [37] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *USA Agriculture Handbook*, 1997, 703: 27-28.
- [38] Xiao Han, Ouyang Zhiyun, Zhao Jingzhu, et al. The spatial distribution characteristics and eco-economic value of soil conservation service of ecosystems in Hainan Island by GIS. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 552-558. [肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 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.]
- [39] Kashiwar S R, Kundu M C, Dongarwar R U. Soil erosion estimation of Bhandara region of Maharashtra, India, by integrated use of RUSLE, remote sensing, and GIS. *Natural Hazards*, 2022, 110(2): 937-959.
- [40] Dong Rui, Ren Xiaoli, Ge Aihong, 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. [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.]
- [41] Yang Q K. Slope length and stepness factor dataset of Pan-Third Pole 20 countries (2020, with a resolution of 7.5 arcsecond). Beijing: National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2021. <https://doi.org/10.11888/Soil.tpd.271740>. [杨勤科. 泛第三极(20国)坡度坡长因子数据集(2020年, 7.5弧秒分辨率). 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2021. <https://doi.org/10.11888/Soil.tpd.271740>.]
- [42] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Washington DC: Agricultural Research Service, 1978: 537-539.
- [43] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences*, 1990, 329(1255): 421-428.
- [44] Wu Dan. Research on water conservation services of major terrestrial ecosystems in China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. [吴丹. 中国主要陆地生态系统水源涵养服务研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.]
- [45] Zhao Tongqian, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, et al. Forest ecosystem services and their valuation in China. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(4): 480-491. [赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. *自然资源学报*, 2004, 19(4): 480-491.]
- [46] Chen Y Z, Feng X M, Fu B J, et al. Maps with 1 km resolution reveal increases in above- and belowground forest biomass carbon pools in China over the past 20 years. *Earth System Science Data*, 2023, 15: 897-910.
- [47] Cen Yu, Wang Chengdong, Zhang Zhen, et al. Spatial distributions of biomass and carbon density in natural grasslands of Hebei, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(3): 265-276. [岑宇, 王成栋, 张震, 等. 河北省天然草地生物量和碳密度空间分布格局. *植物生态学报*, 2018, 42(3): 265-276.]
- [48] Tan Haixia, Jin Zhaoguang, Sun Fuqiang, et al. Stoichiometry characteristics of typical halophytes in Luanhe Estuary wetland. *Bulletin of Botanical Research*, 2018, 38(6): 956-960. [谭海霞, 金照光, 孙富强, 等. 滦河口典型盐生植物的生态化学计量特征研究. *植物研究*, 2018, 38(6): 956-960.]
- [49] Cademus R, Escobedo F J, McLaughlin D, et al. Analyzing trade-offs, synergies, and drivers among timber production, carbon sequestration, and water yield in *Pinus elliotii* forests in southeastern USA. *Forests*, 2014, 5(6): 1409-1431.
- [50] Wang J Y, Cao Y, Fang X Q, et al. Identification of the trade-offs/synergies between rural landscape services in a spatially explicit way for sustainable rural development. *Journal of Environmental Management*, 2021, 300: 113706. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113706.
- [51] Mashizi A K, Sharafatmandrad M. Investigating tradeoffs between supply, use and demand of ecosystem services and their effective drivers for sustainable environmental management. *Journal of Environmental Management*, 2021, 289: 112534. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112534.
- [52] Jafarzadeh A A, Mahdavi A, Shamsi S R F, et al. Assessing synergies and trade-offs between ecosystem services in forest landscape management. *Land Use Policy*, 2021, 111: 105741. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105741.

- [53] Wang Y C, Li B Y. Dynamics arising from the impact of large-scale afforestation on ecosystem services. *Land Degradation & Development*, 2022, 33: 3186-3198.
- [54] Li Peng, Jiang Luguang, Feng Zhiming, et al. Research progress on trade-offs and synergies of ecosystem services: An overview. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5219-5229. [李鹏, 姜鲁光, 封志明, 等. 生态系统服务竞争与协同研究进展. *生态学报*, 2012, 32(16): 5219-5229.]
- [55] Peng Jian, Hu Xiaoxu, Zhao Mingyue, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(6): 960-973. [彭建, 胡晓旭, 赵明月, 等. 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.]
- [56] Hao Mengya, Ren Zhiyuan, Sun Yijie, et al. The dynamic analysis of trade-off and synergy of ecosystem services in the Guanzhong Basin. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 592-602. [郝梦雅, 任志远, 孙艺杰, 等. 关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析. *地理研究*, 2017, 36(3): 592-602.]
- [57] Liu S, Crossman N D, Nolan M, et al. Bringing ecosystem services into integrated water resources management. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 92-102.
- [58] Zhu Hanshou, Zhai Jun, Hou Peng, et al. The protection characteristics of key ecological functional zones from the perspective of ecosystem service trade-off and synergy. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(5): 1275-1288. [祝汉收, 翟俊, 侯鹏, 等. 生态系统服务权衡与协同视角下的重点生态功能区保护特征. *地理学报*, 2022, 77(5): 1275-1288.]
- [59] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, et al. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: A case study in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 1250-1263.
- [60] Huang J M, Zheng F Y, Dong X B, et al. Exploring the complex trade-offs and synergies among ecosystem services in the Tibet autonomous region. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 384: 135483. DOI: /10.1016/j.jclepro.2022.135483.
- [61] Liu Y, Wan C Y, Xu G L, et al. Exploring the relationship and influencing factors of cultivated land multifunction in China from the perspective of trade-off synergy. *Ecological Indicators*, 2023, 149: 110171. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110171.

Analysis of trade-off and synergy effects of ecosystem services in Hebei province from the perspective of ecological function area

LI Qianru^{1,2}, JIA Yanlong³, WANG Huijun⁴, WANG Zhe^{1,2}

(1. College of Economic and Management, Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China;

2. Hebei Urban Forest Health Technology Innovation Center, Baoding 071000, Hebei, China;

3. College of Forestry, Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China;

4. Institute of Millet Crops, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050035, China)

Abstract: The trade-off and synergy analysis of ecosystem services is a hot topic in current research on ecosystem services, which can provide scientific basis for ecosystem management. Based on ecological functional areas in Hebei province, this study evaluated the value of four ecosystem services, including food production, carbon storage, soil conservation and water conservation. Then the trade-off and synergy of ecosystem services in different ecological functional areas were analyzed through the spatial overlay method. The results showed that the total grain production in Hebei province was 38.28 million tons in 2017, and the contribution ranking of the five major ecological areas is Low Plain Ecological Restoration Area (PY) > Yanshan and Taihang Mountains Ecological Conservation Area (YS) > Surrounding Beijing and Tianjin Ecological Transition Zone (HJJ) > Bashang Plateau Ecological Protection Zone (BS) > Coastal Ecological Protection Zone (YH). The total amount of carbon storage, soil conservation, and water conservation services in Hebei was 85.7 million tons of carbon, 4701.61 million tons of soil, and 6568.75 million tons of water, respectively. These three services exhibit a similar spatial pattern, with the contribution of Yanshan and Taihang Mountains Ecological Conservation Area was the highest, while the contribution of other ecological functional areas was generally lower. Strong trade-offs and low synergies among different ecosystem services were the main relationship. The area proportions of strong trade-offs, low synergies, weak trade-offs, and high synergies were 48.15%, 45.92%, 5.09%, and 0.83%, respectively. The dominant function of strong trade-offs in ecosystems was basically consistent with the functional positioning of the ecological zone where it is located, which can provide basis for the better play of the dominant function of the ecological functional zone. This study can provide new ideas for managers to optimize the trade-off and synergy effects of ecosystem services from the perspective of ecological functional zones.

Keywords: ecosystem services; trade-off/synergy; ecological functional zone; Hebei province