

DOI: 10.5846/stxb201905221052

李理, 赵芳, 朱连奇, 何莎莎, 叶露培. 淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测. 生态学报, 2021, 41(19): 7568-7578.

Li L, Zhao F, Zhu L Q, He S S, Ye L P. Geographical detection of ecosystem services trade-offs and their spatial variation mechanism in Qihe River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7568-7578.

淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测

李 理^{1,2}, 赵 芳¹, 朱连奇^{1,*}, 何莎莎³, 叶露培¹

1 河南大学环境与规划学院, 开封 475004

2 北京师范大学政府管理学院, 北京 100875

3 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

摘要:复杂的地形地貌使小流域具有生产、水源供给和调节等多种生态系统服务功能和显著的区域差异性,然而对小流域生态系统服务权衡关系及外部驱动机制集成测度一直是地理学、生态学和经济学研究的难题。以太行山南段淇河流域为研究对象,利用气象数据、土地利用/覆被数据、植被 NDVI 等多源数据,使用 CASA 模型和 InVEST 模型分别估算固碳、土壤保持及水源供给服务,运用空间叠置法和相关性分析测度生态系统服务权衡关系,进一步利用地理探测器中因子探测和交互探测分析自然环境和人类活动影响对生态系统服务权衡关系的空间影响。结果表明:①2000—2015 年,淇河流域多年平均固碳量为 $375.55 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,且多年递减速率为 $18.20 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;多年平均土壤保持量为 $396.72 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,多年递减速率为 $1.2 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$;多年平均水源供给量为 67.26 mm/a ,以 0.16 mm/a 的速率递减。②研究时段内,生态系统服务关系以强权衡和低协同为主导,且存在显著的空间分异特征,低协同分布区域减幅为 16.21%,强权衡增幅最多(11.85%),表明流域生态系统服务能力呈升高趋势;生态系统服务两两关系中固碳与水源供给、水源供给与土壤保持表现为权衡关系,固碳与土壤保持呈协同态势。③地理探测器结果表明:固碳与土壤保持方面,植被 NDVI(0.306)>气温(0.241)>土地利用程度(0.002);固碳与水源供给方面,植被 NDVI 因子解释力最强(0.381);水源供给与土壤保持方面,降水、气温和高程因子解释力均高于 0.5;交互探测后各影响因子解释能力显著增强。

关键词:CASA;InVEST;生态系统服务;地理探测器;淇河流域

Geographical detection of ecosystem services trade-offs and their spatial variation mechanism in Qihe River Basin

LI Li^{1,2}, ZHAO Fang¹, ZHU Lianqi^{1,*}, HE Shasha³, YE Lupei¹

1 College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China

2 School of Government, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: The complex topography makes the small watershed have many ecosystem services, such as production, water supply and regulation, and significantly regional differences. However, the balance of ecosystem service and the integration measurement of external driving mechanism in the small watershed, which have always been a difficult problem in the research of geography, ecology and economics. This paper takes Qihe River Basin in the south of Taihang Mountain as the research object, using CASA and InVEST models estimate carbon sequestration, soil conservation and water resources

基金项目:国家重点研发计划(2015CB52702);国家自然科学基金项目(41671090);科技基础资源调查专项(2017FY100902)

收稿日期:2019-05-22; **网络出版日期:**2021-07-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lqzhu@henu.edu.cn

supply services respectively, based on the multi-source data such as meteorological data, land use/cover data, Normalized Difference Vegetative Index (NDVI). The spatial overlay analysis method and correlation analysis are used to measure the ecosystem services trade-off relationship, and the spatial impacts of natural environment and human activities on the ecosystem service trade-off relationship are further analyzed by factor detection and interaction detection in the geographical detector. The results indicate that ① from 2000 to 2015, the average annual carbon sequestration is $375.55 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, and the annual deceleration rate is $18.20 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ in the Qi River Basin; the annual average soil conservation is $396.72 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, and the annual decline rate is $1.2 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; the average annual water resources supply is 67.26 mm/a with decreasing rate of 0.16 mm/a . ② The ecosystem service relationship is dominated by strong balance and low coordination. There are significant spatial differentiation characteristics during the research period, low coordination distribution area reduced 16.21% and strong balance increased 11.85%, indicating the ecosystem service capacity of the river basin is increasing; In the pairwise relationship of ecosystem services, carbon sequestration and water resources supply, water resources supply and soil conservation show a trade-off relationship, while carbon sequestration and soil conservation show a synergistic trend. ③ Geodetector result show that NDVI (0.306) > temperature (0.241) > land use degree (0.002) in terms of the carbon sequestration and soil conservation; for carbon sequestration and water supply, vegetation NDVI has the strongest explanatory power (0.381); for water resources supply and soil conservation, the explanatory power of precipitation, temperature and elevation factors are higher than 0.5; the explanatory power of each influencing factor is obviously enhanced after interactive detection.

Key Words: CASA model; InVEST model; ecosystem service; Geodetector model; Qihe River Basin

生态系统服务 (Ecosystem Services, ES) 是指人类为满足自身需求从生态系统中所获取的直接或间接收益^[1-2], 主要包含供给服务、调节服务、支持服务和文化服务等 4 种服务类型^[3]。自 1997 年 Constanza 等率先估算全球尺度生态系统服务以来, 国内外学者陆续对全球^[4]、国家^[5]、区域^[6]、省市^[7]、山区^[8]、流域^[9]等不同空间尺度生态系统服务进行评估, 并测度冰川^[10]、森林^[11]、草地^[12]和湿地^[13]等类型生态系统服务。不同生态系统服务受到自然环境和人为干扰的综合影响呈现此消彼长的权衡关系和互相增益的协同关系^[14-16], 正确认知生态系统服务相互关系是制定多种生态系统服务可持续管理决策的前提, 有助于区域生态系统服务效益最优化, 从而实现经济发展与生态环境保护双赢^[17]。权衡全球或区域尺度上生态系统服务相互关系成为学界研究的热点^[18], 统计描述法、空间统计制图法、情景分析法和模型模拟法是权衡与协同常用分析方法^[19-20], 如王鹏涛运用二阶偏相关分析逐像元计算土壤保持、NPP 和产水的相关系数, 研究表明 3 种服务皆以权衡关系为主导^[21]; 钱彩云利用双变量空间自相关测度白龙江流域产水量、土壤保持、碳储量和粮食生产权衡程度, 高高集聚和低低集聚为协同关系、高低集聚和低高集聚为权衡关系, 识别空间尺度上生态系统服务关联特征^[22]。以往研究多集中于测度时间尺度上生态系统服务两两之间权衡关系并进行空间可视化, 生态系统服务整体间权衡程度研究相对薄弱^[23-24]。在此情形下, 亟需评估区域层面上生态系统整体权衡关系及空间特征, 对生态系统服务两两之间非线性权衡关系研究进行补充, 揭示生态系统服务权衡程度及空间差异, 为制定流域生态环境保护政策提供科学依据。因此, 本文以淇河流域为对象研究生态系统服务权衡及空间分异机制, 探讨小流域生态系统服务类型之间的权衡与协同规律。

自然和人文因素综合影响生态系统服务的形成及其权衡关系, 探究生态系统服务关系的外部驱动机制受到学界的广泛关注^[25], 如张宇硕通过层次分析法构建结构方程模型分析京津冀湿地生态系统服务的影响因素, 结果得出气候、土壤等内部驱动力对生态系统服务起促进作用, 外部驱动力抑制生态系统服务提升^[26]; 郭慧基于生态系统服务价值的均衡因子和产量因子测度方法, 评估了 1990—2015 年北京市门头沟区生态承载力, 发现均衡因子和产量因子较通用因子更好体现区域生态承载力^[27]。上述研究大多通过分析外部驱动因素对各项生态系统服务的影响程度, 但对于生态系统服务关系对环境变量的响应机制亟需厘清^[28], 已有研究

表明植被覆盖度^[29]、土地利用类型^[30]、地形^[31]、人类活动影响^[32]对生态系统服务之间相互关系的作用方向及影响程度存在差别,研究手段多为统计学方法,对外部驱动因素在空间尺度上影响生态系统服务动态权衡关系解释程度不够^[33]。地理探测器是一种新型的空间统计方法,能有效识别同一地域单元上相邻要素之间空间关联程度^[34-35],主要用于测度驱动因子影响程度及其交互作用,已广泛应用于城市建设用地驱动^[36]、生态系统服务价值空间分异^[37]、粮食安全^[38]、疾病监测^[39]、贫困化差异机制^[40]等方面。流域是具有明显物理边界且综合性极强的地理单元,运用地理探测器分析流域尺度生态系统服务权衡关系的外部驱动因素,有助于识别生态系统服务权衡关系影响因素的地理影响及交互作用,能够为流域的生态环境规划及决策提供科学依据和实证分析。

淇河流域位于中国第二级阶梯向第三级阶梯过渡区域,地处太行山与华北平原的地理过渡地带,具备丰富的水源涵养功能及供给服务能力^[41]。本文以淇河流域为研究对象,利用 CASA 模型、InVEST 模型测度 2000—2015 年流域内固碳、土壤保持、水源供给等生态系统服务,刻画流域尺度生态系统服务时空变化特征,运用空间叠置法度量不同时段生态系统服务空间权衡程度,进一步利用相关性分析精准分析生态系统服务两两之间权衡关系,结合地理探测器中因子探测和交互探测模块分析生态系统服务权衡关系外部驱动机制,从而量化自然环境和人为扰动对生态系统服务权衡的影响程度,为改善区域生态环境质量及提升人类福祉提供理论依据和实证分析。

1 研究区概况

淇河流域(35°32′—36°15′N, 113°15′—114°23′E)地处华北平原西南部和太行山南段之间,源于山西省陵川县方脑岭,经河南省汇入海河支流卫河,流域面积 2227 km²,呈现西高东低分布态势(图 1)。研究区主要气候类型为暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水量 574 mm,年均气温 11.9℃,夏季降水集中;复杂的地形使淇河流域生态环境脆弱,多样的地貌类型使流域生态系统服务呈现复杂的变化。

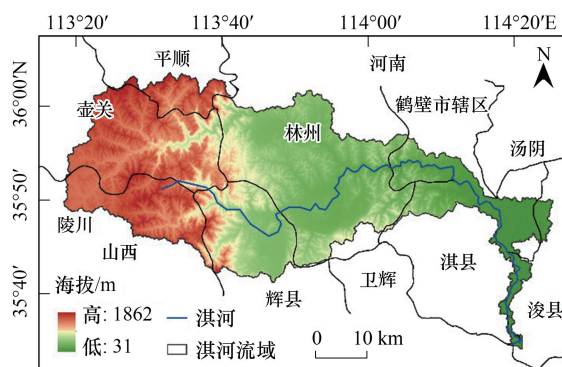


图 1 研究区位置及高程示意图

Fig.1 Location and elevation of the study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

2000、2005 和 2010 年淇河流域土地覆被/利用数据均来自中国地球系统数据共享平台-黄河中下游科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>), 2015 年土地利用数据在参考研究区历年土地利用类型图的基础上对 LANDSAT5 多波段遥感影像(来源于地理空间数据云,<http://www.gscloud.cn/>)进行人机交互目视解译并进行实地勘察,其 Kappa 系数为 86%;研究区内 9 个气象站点的气温和降水数据来源于河南省气象局及中国气象科学数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn/>);土壤数据来源于国家地球系统数据共享平台-黄河下游科学数据中心(<http://henu.geodata.cn/>);植被 NDVI 数据来源于美国国家航空航天局(NASA) 16 d 合成的空间分辨率为 250 m MOD13Q1 产品,利用最大合成法提取每年 7 月中 NDVI 的最大值,从而合成逐年 NDVI 数据;DEM 数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),分辨率为 30m;土地利用强度和人类活动影响通过文献计算得到^[42-43]。

2.2 生态系统服务评估方法

本文利用 CASA 模型和 InVEST 模型等生态系统服务评估模型,定量估算淇河流域固碳、土壤保持与水源供给服务时空变化特征。固碳利用 CASA(Carnegie Ames-Stanford Approach)生态系统碳循环过程模型估算生态系统净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP),参数确定及模型计算方法,具体见参考文献^[44];土壤

保持服务利用 InVEST 模型中 SDR (Sediment Delivery Ratio Model) 模块进行计算,结合土地利用/覆被数据、DEM、土壤数据和降水等多种数据对土壤流失方程进行修正,模型中所需的降雨侵蚀力因子 (R) 是利用 Kriging 插值得到并运用 Wischmeier 的月尺度经验模型进行计算得到^[45],土壤可蚀性因子 (K) 是通过 Williams 等提出的 EPIC 模型对流域内 1:100 万土壤数据集进行计算,植被覆盖因子 (C) 参考蔡崇法的计算方法得到^[46],水土保持措施因子 (P) 参考以往的研究并结合研究区土地利用情形及农业生产活动确定^[47-48];水源供给服务根据 InVEST 模型中产水量模块计算得到,该模块是根据水量平衡原理并通过 Budyko 曲线^[49]和年降雨量计算得到,相关参数通过文献^[50-51]进行修正。

2.3 生态系统服务权衡与协同量化方法

基于 Matlab 平台对固碳、土壤保持和水源供给服务逐像元进行相关性分析,量化固碳与土壤保持、固碳与水源供给及土壤保持和水源供给服务间的权衡协同程度并进行可视化表达。进一步利用 t 检验法对生态系统服务权衡强度进行显著性分析,若 $P < 0.01$,则权衡/协同度通过了极显著性检验,若 $0.01 < P < 0.05$,表明通过了显著性检验^[52]。为探究研究时段内不同时期生态系统服务权衡协同程度,利用 ArcGIS 10.3 软件中的地图代数工具,将生态系统服务标准化处理后并运用自然断裂点法进行分级,按照低、中、高三类并进行重分类,依次对应 1、2、3,参考叠置规则对标准化的各项生态系统服务值进行叠置^[53],计算公式如下:

$$ES_{std} = \frac{ES_{pixel} - ES_{min}}{ES_{max} - ES_{min}} \quad (1)$$

式中: ES_{std} 为生态系统服务标准化的值(介于 0—1), ES_{pixel} 、 ES_{max} 、 ES_{min} 分别为某类型生态系统服务任意栅格值、最大值和最小值,按照自然断裂点法将服务标准化的值分类为高、中、低;CODE 为三位数叠置代码,碳为固碳、水为水源供给、土为土壤保持,代码序列依次为固碳、水源供给和土壤保持,值介于 111 和 333 之间,分别对应服务类型的供给能力,即低、中、高。参考张静静等^[14]研究将一种生态系统服务能力高而其它生态系统服务能力较低视为强权衡,两种生态系统服务供给能力高而另一种生态系统服务能力低定义为弱权衡;高协同表现为各项生态系统服务都处于较高水平、如供给能力组合中 333、332 等,低协同是各项生态系统服务都处于较低水平,如 111、221 等,具体分级标准见表 1:

表 1 生态系统服务权衡/协同划分标准

Table 1 Ecosystem service trade-off/synergism criteria

服务关系 Service relationships	亚类 Subclass	供给能力组合 Supply capacity mix	样例 Examples
权衡 Trade-off	强权衡	1 高 2 低、1 高 1 中 1 低	311、131、113、321、123
	弱权衡	2 高 1 低	331、313、133
协同 Synergism	高协同	3 高、2 高 1 中、3 中、1 高 2 中	333、332、222、322、232
	低协同	3 低、2 中 1 低、1 中 2 低	111、221、212、121、112

2.4 地理探测器

地理探测器能有效分析同一地域单元上两个要素之间的地理关联性以及不同区域变量的差异性,可以揭示区域尺度上要素之间的因果性^[54-55]。本文利用地理探测器中因子探测和交互探测两个模块,其中环境变量通过自然断裂点法进行分类,以此探测各影响因素对生态系统服务权衡关系的影响及交互作用影响程度,公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (3)$$

式中: q 为探测因子 A 的探测力值, $q \in [0, 1]$, q 值越大,表明因素 A 对于研究区生态系统服务权衡/协同影响程度越高; N 和 N_h 分别为研究区样本数; σ_h^2 为因素 A 在样本 h 内的离散方差; L 为研究区各因素的类型。交互探测类型可以划分为双因素增强、非线性减弱、非线性增强、独立和单因子非线性减弱等五类,识别自然环境

和人为扰动交互作用后对生态系统服务关系综合影响程度^[55]。

3 结果分析

3.1 淇河流域生态系统服务时空变化特征

淇河流域固碳、土壤保持与水源供给空间分布及变化趋势(图2)。近15年来研究区平均固碳、土壤保持及水源供给量分别为 $375.55 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $396.72 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 67.26 mm/a , 且各项生态系统服务空间分布上存在差别: 固碳含量表现为西北高、东南低, 高值区集中分布淇河上游地区, 低值区分布于下游区域; 土壤保持量高值区集聚态势不显著, 流域中上游、中下游分布较广; 水源供给量高值区主要分布于流域四至及中下游区域, 低值区分布范围较广。2000—2015年间固碳含量以 $18.20 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的速率递减, 超过90%的区域呈减少态势, 淇河上游及下游地区减幅最大; 土壤保持量递减速率为 $1.2 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 减少幅度主要集中于 $[-8, -0]$, 流域内土壤保持含量均以一定速率递减; 水源供给服务递减率为 0.16 mm/a , 95%的区域产水量减少, 流域中下游区域产水量增加较为明显。

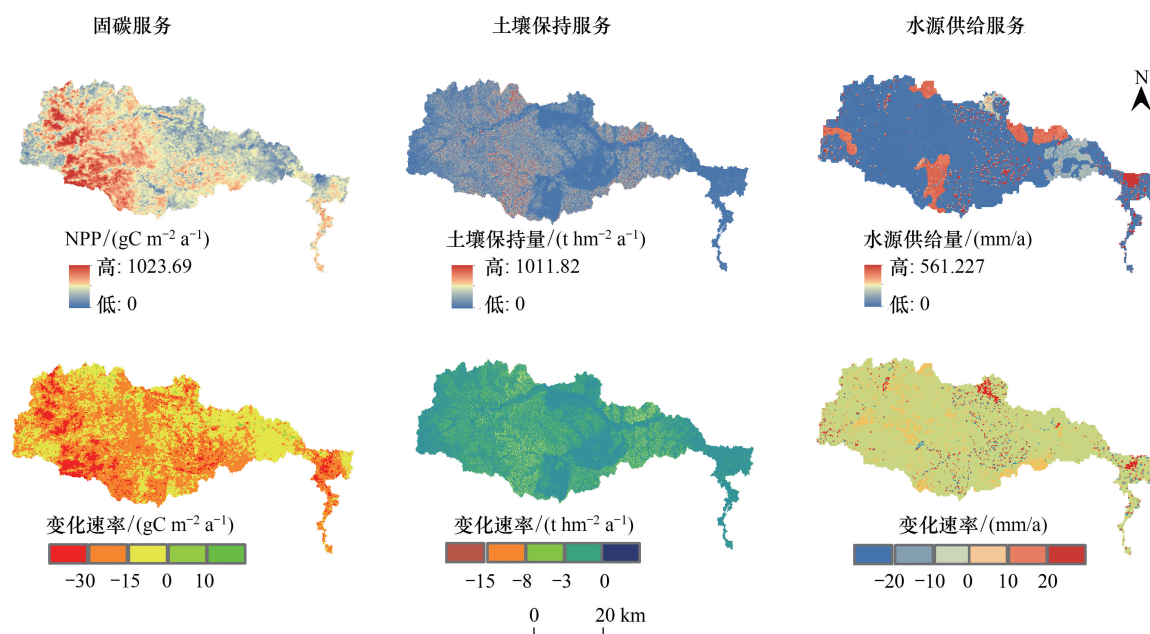


图2 生态系统服务空间分布及变化速率

Fig.2 Spatial distribution and change rate of ecosystem services

3.2 生态系统服务权衡与协同关系定量分析

3.2.1 生态系统服务权衡分析

由图3和表3可知,2000—2015年淇河流域生态系统服务关系以低协同和强权衡关系为主,其中低协同主要分布于流域上游和下游,固碳、土壤保持和水源供给等生态系统服务整体较低;研究区中下游生态系统服务关系以强权衡为主导,表示一类生态系统服务供给能力较高而其它类型较低;从各时期生态系统服务权衡与协同关系像元个数及所占比例来看,强权衡仅在2000年像元个数占比低于50%,其它时期均高于50%,表明淇河流域生态系统服务以强权衡为主导;在弱权衡方面,2005年像元数量最多(1519个)、2015年次之(813个)、2000年最少(451个);高协同是生态系统服务都处于较高水平,生态系统服务关系达到最理想的状态,2015年占比最多(10.74%)、2005年次之(10.63%)、2000年最少(7.43%);低协同在2000年所占比例最高(50.64%)、2010年次之(37.20%)、2005年最低(31.69%),反映固碳、土壤保持和水源供给服务都处于较低水平,也是生态系统服务关系中最不理想的状态。研究时段内,低协同分布的面积减少了16.21%,强权衡、高协

同和弱权衡分别增加了 11.85%、3.31% 和 1.05%,表明流域内生态系统服务协同程度加强,生态环境呈好转趋势。

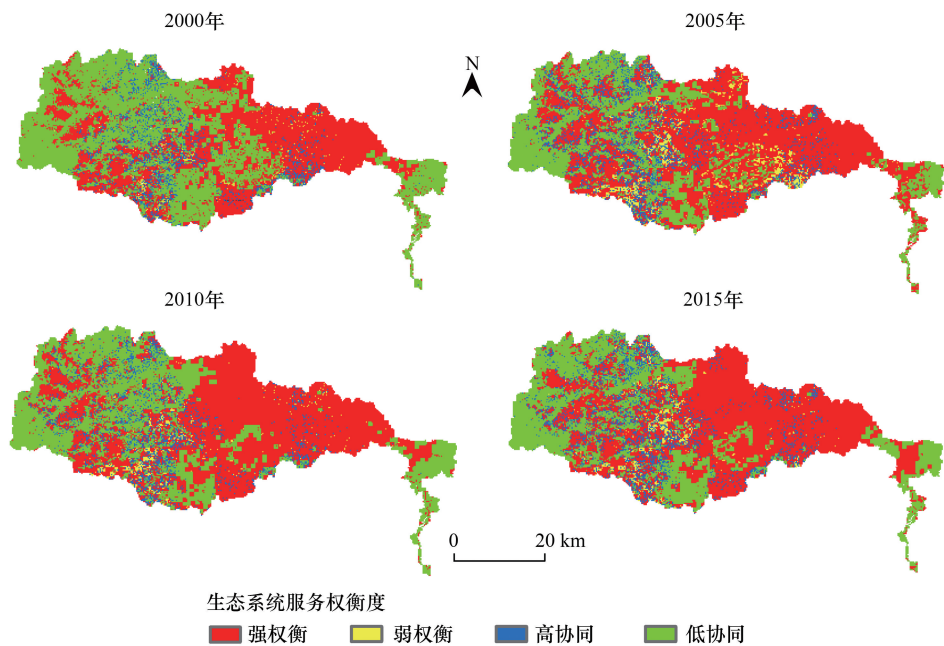


图 3 2000—2015 年淇河流域生态系统服务权衡/协同关系
Fig.3 Ecosystem services trade-offs/synergies from 2000 to 2015 in the Qi River Basin

表 3 淇河流域生态系统服务权衡关系像元数量及比例/%

Table 3 The number and proportion of pixels (%) in ecosystem services trade-off relationship of Qihe River Basin								
年份 Years	强权衡		弱权衡		高协同		低协同	
	Strong trade-off		Weak trade-off		High synergies		Low synergies	
	像元数量	比例/%	像元数量	比例/%	像元数量	比例/%	像元数量	比例/%
2000	14070	40.63	451	1.30	2573	7.43	17537	50.64
2005	18464	53.29	1519	4.38	3682	10.63	10980	31.69
2010	18322	52.88	592	1.71	2844	8.21	12887	37.20
2015	18181	52.48	813	2.35	3720	10.74	11929	34.43

3.2.2 生态系统服务两两权衡分析

基于像元尺度计算 2000—2015 年固碳、土壤保持和水源供给相关性并进行空间制图,图 4 表示固碳与水源供给、固碳与土壤保持及水源供给和土壤保持服务之间的权衡协同程度及显著性检验分析。固碳与水源供给服务关系以权衡为主导,比重为 65.2%,且通过显著性水平检验仅占 3.04%,表明两者生态系统服务权衡程度处于较低状态、显著性水平不高,时间尺度上固碳服务的增加/减少对水源供给服务的减弱/增强的影响较为平缓,协同关系比重为 34.8%,且通过显著性检验为 2.63%;固碳与土壤保持权衡、协同占比分别为 2.63%、97.37%,主导服务类型为协同关系,其中协同度大于 0.8 的像元占比 8.08%、0.5—0.8 占比 64.76%,即研究时段内固碳与土壤保持服务变化方向一致、协同程度高,通过显著性水平的像元比重为 10.56%,其中约有 8.54% 像元表现极显著相关、1.68% 像元为显著相关;水源供给和土壤保持服务关系表明,权衡关系比重为 90.06%,通过显著性检验的像元数为 5969,占比 18.41%,反映淇河流域水源供给服务和土壤保持服务空间尺度上表现为此消彼长的权衡关系,即像元尺度上水源供给服务能力的增加会减损土壤保持服务供给量。

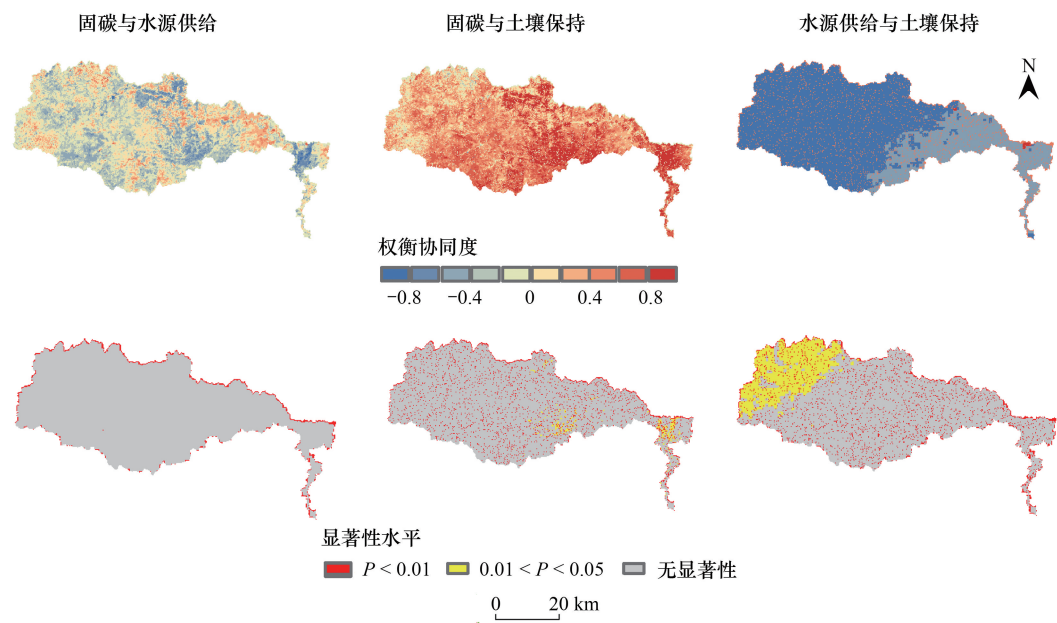


图 4 生态系统服务两两权衡关系及显著性分析

Fig.4 Trade-off relationship and significance analysis of ecosystem services

3.3 淇河流域生态系统服务权衡驱动力探测

3.3.1 因子探测

运用地理探测器中因子探测模块对生态系统服务权衡关系外部驱动因子进行分析,揭示自然环境因子和人类活动影响空间尺度上对权衡关系的影响机制(表 4),发现生态系统服务两两权衡关系对不同环境变量响应程度存在差别:在固碳与土壤保持权衡方面,植被 NDVI 影响最强(0.306)、气温次之(0.247)、土地利用强度最弱(0.002);固碳与水源供给方面,植被 NDVI 影响强度远大于其它环境变量,证明固碳与水源供给权衡关系主控因子为植被 NDVI;水源供给与土壤保持服务外部驱动机制表明,降水量因子解释力最强、为 0.594,气温次之(0.574),土地利用程度影响能力最弱(0.004),发现两类生态系统服务关系受自然环境因子影响显著高于人类活动及植被 NDVI,主要因为地形及气候条件决定了水源供给及土壤保持服务供给强度,显著影响生态系统服务相互关系。

表 4 淇河流域生态系统服务权衡因子探测结果

Table 4 Detection results of ecosystem service trade-off factors in Qi River Basin

服务关系 Service relationship	气温 Temperature	降水量 Precipitation	高程 Elevation	坡度 Slope	土地利用程度 Degree of land use	人类活动影响 Influences of Human Activities	植被 NDVI
固碳 VS. 土壤保持 C VS. S	0.247	0.214	0.235	0.084	0.002	0.018	0.306
固碳 VS. 水源供给 C VS. W	0.007	0.030	0.023	0.042	0.004	0.011	0.381
水源供给 VS. 土壤保持 W VS. S	0.574	0.594	0.561	0.075	0.004	0.032	0.031

C: Carbon sequestration; W: Water resources supply; S: Soil conservation

3.3.2 交互探测结果分析

生态系统服务权衡的影响过程受到外部因素多重影响,各影响因素彼此存在交互关系。由交互探测结果(表 5)可以看出,两两因素交互探测后对各生态系统服务权衡关系因子解释力显著增大,从不同交互类型来

看,主要表现为双因子增强和非线性增强两种类型:在固碳与土壤保持服务中,植被 NDVI 与气温、降水和高程交互后因子解释力分别达到 0.4 以上,植被 NDVI、气温、降水和高程相互作用后对生态系统服务关系解释程度增强,表明生态系统服务关系受到多种因素共同作用,而非单一因子起决定性作用;在水源供给与土壤保持服务中,气温、降水和高程与其它环境因素交互后解释力明显增强,反映气温、降水和高程在水源供给服务与土壤保持服务关系中处于核心位置,解释程度远高于其它环境变量。

表 5 淇河流域生态系统服务权衡各影响因素交互探测

Table 5 Interaction detection of various influencing factors of ecosystem service trade-off in Qihe River Basin							
交互类型 Interaction types	固 VS. 土 C VS. S	固 VS. 水 C VS. W	水 VS. 土 W VS. S	交互类型 Interaction types	固 VS. 土 C VS. S	固 VS. 水 C VS. S	水 VS. 土 W VS. S
$X_1 \cap X_2$	0.271 *	0.051 **	0.645 *	$X_3 \cap X_4$	0.292 *	0.109 *	0.568 *
$X_1 \cap X_3$	0.282 *	0.054 **	0.633 *	$X_3 \cap X_5$	0.240 **	0.03 **	0.565
$X_1 \cap X_4$	0.305 *	0.077 **	0.584 *	$X_3 \cap X_6$	0.251 *	0.046 *	0.580 *
$X_1 \cap X_5$	0.255 **	0.019 **	0.579 *	$X_3 \cap X_7$	0.489 *	0.424 **	0.569 *
$X_1 \cap X_6$	0.264 *	0.026 **	0.590 *	$X_4 \cap X_5$	0.087 **	0.049 **	0.084 **
$X_1 \cap X_7$	0.505 *	0.410 *	0.596 *	$X_4 \cap X_6$	0.097 *	0.052 *	0.103 *
$X_2 \cap X_3$	0.256 *	0.054 *	0.635 *	$X_4 \cap X_7$	0.359 *	0.398 *	0.114 **
$X_2 \cap X_4$	0.278 **	0.109 *	0.608 *	$X_5 \cap X_6$	0.027 **	0.024 **	0.048 **
$X_2 \cap X_5$	0.222	0.040 **	0.601 **	$X_5 \cap X_7$	0.315 **	0.390 **	0.052 **
$X_2 \cap X_6$	0.237 **	0.052 **	0.619 **	$X_6 \cap X_7$	0.323 *	0.389 *	0.091 **
$X_2 \cap X_7$	0.493 *	0.426	0.606 **				

X1 气温 Temperature; X2 降水 Precipitation; X3 高程 Elevation; X4 坡度 Gradient; X5 土地利用程度 Degree of land use; X6 人类活动影响 Impact of human activities; X7 植被 NDVI Vegetation Normalized Difference Vegetation Index; * 代表双因子增强, ** 表示非线性增强

4 结论与讨论

4.1 讨论

4.1.1 生态系统服务权衡与协同

目前,生态系统服务权衡研究多集中于生态系统服务两两之间相互关系的时空权衡分析及空间表达上,缺乏对生态系统服务整体权衡机制的深入剖析。本文定量评估了淇河流域固碳、土壤保持和水源供给服务,生态系统服务整体关系以强权衡和低协同为主导,其中低协同是生态系统服务关系都处于较低水平,也是生态系统服务最不理想的状态,迫切需要政府部门制定有关政策进行调控,促使低协同区域逐渐过渡至高协同。运用空间叠置法对于研究区域尺度上生态系统服务整体权衡关系有积极意义,但仍需进一步研究生态系统服务关系演变趋势及局部特征。相关性结果表明,固碳与水源供给、水源供给与土壤保持以权衡为主导,固碳与土壤保持以协同关系为主,且空间格局上存在差异,其原因为约束阈值对生态系统服务关系产生一定的影响^[56],如固碳较高的区域植被覆盖水平较高,抑制了土壤侵蚀作用,这时固碳与土壤保持服务呈协同关系,而植被覆盖度较高的区域降水量较为充沛,土壤侵蚀程度加剧,固碳与土壤保持服务表现为权衡关系^[21]。另外,生态系统服务权衡关系存在尺度特征,潘竞虎发现县域尺度上各项生态系统服务表现协同关系,而区域尺度上土壤保持与水源供给、粮食生产为权衡关系^[57],未来应加强流域生态系统服务权衡关系尺度特征与区域差异的研究,构建栅格-乡镇-县域-流域多级评价单元,明晰各尺度上生态系统服务能力及权衡关系。本研究集中评估固碳、土壤保持和水源供给等调节服务权衡与协同关系,后期应开展其它类型生态系统服务的估测并权衡其相互关系,从而建立流域生态系统服务簇并刻画各项服务权衡关系,为流域国土空间规划及优化提供参考。

4.1.2 生态系统服务权衡驱动机制探讨

本文运用遥感、GIS 和地理探测器技术,系统分析了淇河流域生态系统服务权衡关系及其空间分异的驱

动机制,地理探测器有助于揭示淇河流域生态系统服务权衡程度空间分异的主要外部驱动因子及其交互作用,较以往的统计学方法,优势在于能够定量描述各环境变量对生态系统服务权衡关系的空间影响,对于研究生态系统服务关系的驱动机制是一种有益的尝试,为流域生态系统服务管制及生态安全格局的建立提供依据。综合来看,自然环境因素对生态系统服务关系影响强度显著高于人类活动影响,植被 NDVI、气温、降水和高程是影响淇河流域生态系统服务权衡关系的主导因子,且交互作用后因子解释力明显增大,表明流域内生态系统服务关系受到多种因素共同影响,而非单一因素起决定性作用。在 CASA 和 InVEST 模型参数输入过程中需要输入诸如植被 NDVI、地形等要素,一定程度上增加了自然要素的影响程度,此外,自然环境决定生态系统服务供给强度并形成生态系统服务权衡与协同关系,这也可能对研究结果产生一定的影响。有研究表明,土地利用/覆被变化是影响生态系统服务权衡与协同关系的主导因子^[58-59],本文通过计算土地利用强度和人类活动影响表征人为扰动程度,结果显示两者对生态系统服务关系影响程度较低,主要是生态用地提供生态系统服务,但土地利用强度及人为影响较弱,其次,数据分辨率较低也可能是影响地理探测结果的因素之一。因此,今后研究的重点应包含:(1)提高土地利用/覆被及 DEM 数据的分辨率,准确评估流域尺度生态系统服务能力;(2)选取自然环境-社会经济-人类活动等多种影响因素,探究其对生态系统服务关系的影响机理;(3)基于土地利用/覆被变化,进一步测度生态系统服务权衡与协同关系的变化机制;(4)关注极端气候变化对生态系统服务及其权衡关系的影响,建立极端气候与生态系统服务时空匹配关系,揭示全球变化背景下生态系统服务关系变化情形,为区域生态环境建设、构建和谐的人地关系提供理论依据。

4.2 结论

(1)2000—2015 年,淇河流域多年平均固碳量为 $375.55 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,呈西北高、东南低分布趋势,多年递减速率为 $18.20 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;多年平均土壤保持量为 $396.72 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,多年递减速率为 $1.2 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,空间差异不显著;多年平均水源供给量为 67.26 mm/a ,高值区主要分布于流域四至及中下游区域,低值区分布广泛,以 0.16 mm/a 的速率递减。

(2)在生态系统服务权衡与协同关系中,以强权衡和低协同关系为主,其中强权衡主要分布于流域中下游、低协同主要分布于研究区下游及中上游;研究时段内低协同分布的面积减少了 16.21%,强权衡、高协同和弱权衡分别增加了 11.85%、3.31%和 1.05%。生态系统服务两两之间关系表明,固碳与水源供给、水源供给与土壤保持服务以权衡关系为主,水源供给与土壤保持服务以协同关系为主,空间特征及显著性水平表现为异质性。

(3)地理探测器结果表明:固碳与土壤保持方面,植被 NDVI 影响最强(0.306)、气温次之(0.241)、土地利用程度最弱(0.002);固碳与水源供给方面,植被 NDVI 因子解释力显著高于其它因素,为 0.381;水源供给与土壤保持方面,降水、气温和高程因子解释力均高于 0.5;交互探测后各影响因子解释能力显著增强,主要为双因子增强和非线性增强两种类型。

参考文献 (References):

- [1] Study of Critical Environmental Problems (SCEP). Man's Impact on the Global Environment: Assessment and Recommendations for Action. Cambridge: MIT Press, 1970: 22-23.
- [2] Daily G C. Introduction: what are ecosystem services? //Daily G C, ed. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [3] 余玉洋,李晶,周自翔,马新萍,张城.基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达.生态学报,2020,40(16):5465-5477.
- [4] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Ecological Economics, 1997, 387(6630): 253-260.
- [5] 石垚,王如松,黄锦楼,阳文锐.中国陆地生态系统服务功能的时空变化分析.科学通报,2012,57(9):720-731.
- [6] 刘慧明,高吉喜,刘晓,张海燕,徐新良.国家重点生态功能区 2010-2015 年生态系统服务价值变化评估.生态学报,2020,40(6):1865-1876.
- [7] 刘永强,廖柳文,龙花楼,秦建新.土地利用转型的生态系统服务价值效应分析—以湖南省为例.地理研究,2015,34(4):691-700.

- [8] 徐媛银, 郭烁, 薛达元, 孙思琦. 赣南地区土地利用格局及生态系统服务价值的时空演变. 生态学报, 2019, 39(6): 1969-1978.
- [9] 李云生, 周广金, 梁涛, 吴连喜, 刘伟江. 巢湖流域的土地利用变化及其生态系统功能损益. 地理研究, 2009, 28(6): 1656-1664.
- [10] 张正勇, 何新林, 刘琳, 李忠勤, 王璞玉. 中国天山冰川生态服务功能及价值评估. 地理学报, 2018, 73(5): 856-867.
- [11] 刘胜涛, 高鹏, 刘潘伟, 牛香, 王兵. 泰山森林生态系统服务功能及其价值评估. 生态学报, 2017, 37(10): 3302-3310.
- [12] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 郑度, 成升魁. 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.
- [13] 陈翠, 刘贤安, 闫丽丽, 王娟, 彭培好. 四川南河国家湿地公园生态系统服务价值评估. 湿地科学, 2018, 16(2): 238-244.
- [14] 张静静, 朱文博, 朱连奇, 李艳红. 伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析[J]. 地理学报, 2020, 75(05): 975-988.
- [15] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 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.
- [16] Rodríguez J P, Beard T D, Bennett E M, Cumming G S, Cork S J, Agard J, Dobson A P, Peterson G D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28.
- [17] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 肖飞艳, 程昌武, 张欣蓉. 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.
- [18] 王晓峰, 程昌武, 尹礼唱, 冯晓明, 卫新东. 新疆生态系统服务时空变化及权衡协同关系. 生态学报, 2020, 39(3): 990-1000.
- [19] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 赵东升. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. 地理研究, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [20] 杨晓楠, 李晶, 秦克玉, 李婷, 刘婧雅. 关中—天水经济区生态系统服务的权衡关系. 地理学报, 2015, 70(11): 1762-1773.
- [21] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 焦磊, 王浩, 延军平, 吕一河, 傅伯杰. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. 地理学报, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [22] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 柳冬青, 马学成. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系. 地理学报, 2018, 73(5): 868-879.
- [23] 巩杰, 徐彩仙, 燕玲玲, 郭青海. 1997-2018 年生态系统服务研究热点变化与动向. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3265-3276.
- [24] 税伟, 付银, 林咏园, 杨海峰, 杜勇. 基于生态系统服务的城市生态安全评估、制图与模拟. 福州大学学报: 自然科学版, 2019, 47(2): 143-152.
- [25] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 城市化与生态系统服务的空间交互关系研究——以长株潭城市群为例. 生态学报, 2019, 39(20): 7502-7513.
- [26] 张宇硕, 吴殿廷. 京津冀地区生态系统服务权衡的多尺度特征与影响因素解析. 地域研究与开发, 2019, 38(3): 141-147.
- [27] 郭慧, 董士伟, 吴迪, 裴顺祥, 辛学兵. 基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算. 生态学报, 2020, 40(4): 1405-1412.
- [28] 敦越, 杨春明, 袁旭, 杨燕平, 肖复晋, 梁斯琦, 陆颖. 流域生态系统服务研究进展. 生态经济, 2019, 35(7): 179-183.
- [29] 刘洋, 毕军, 吕建树. 生态系统服务权衡与协同关系及驱动力——以江苏省太湖流域为例. 生态学报, 2019, 39(19): 7067-7078.
- [30] 王保盛, 陈华香, 董政, 祝薇, 邱全毅, 唐立娜. 2030 年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响. 生态学报, 2020, 40(2): 484-498.
- [31] 孙艺杰, 任志远, 郝梦雅, 段艺芳. 黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素——以延安市为例. 生态学报, 2019, 39(10): 3443-3454.
- [32] 刘世梁, 芦萌, 武雪, 侯笑云, 赵爽, 刘国华. 区域生态效应研究中人类活动强度量化评价. 生态学报, 2018, 38(19): 6797-6809.
- [33] 李婧昕, 许尔琪, 张红旗. 关键驱动力作用下的新疆生态系统服务时空格局分析. 中国农业资源与区划, 2019, 40(5): 9-20.
- [34] 纪晓萌, 秦伟山, 李世泰, 刘肖梅, 王秋贤. 中国地级单元旅游业发展效率格局及影响因素. 资源科学, 2021, 43(01): 185-196.
- [35] 葛咏, 刘梦晓, 胡珊, 任周鹏. 时空统计学在贫困研究中的应用及展望. 地球信息科学学报, 2021, 23(01): 58-74.
- [36] 李进涛, 刘彦随, 杨园园, 刘继来. 1985-2015 年京津冀地区城市建设用地时空演变特征及驱动因素研究. 地理研究, 2018, 37(1): 37-52.
- [37] 黄木易, 方斌, 岳文泽, 冯少茹. 近 20a 来巢湖流域生态服务价值空间分异机制的地理探测. 地理研究, 2019, 38(11): 2790-2803.
- [38] 叶妍君, 齐清文, 姜莉莉, 张岸. 基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产量影响因素分析. 地理研究, 2018, 37(1): 171-182.
- [39] 李浩, 张明鑫, 汪冉. 区域地理环境因素对宁夏泾源县儿童呼吸系统疾病的影响. 地理研究, 2019, 38(12): 2889-2898.
- [40] 武鹏, 李同昇, 李卫民. 县域农村贫困化空间分异及其影响因素——以陕西山阳县为例. 地理研究, 2018, 37(3): 593-606.
- [41] 张静静, 朱文博, 赵芳, 朱连奇, 李茂娟, 朱明, 张晓东. 山地平原过渡带地形起伏特征及其对景观格局的影响——以太行山淇河流域为例. 中国科学: 地球科学, 2018, 61(4): 450-461.
- [42] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究. 自然资源学报, 1997, 12(2): 105-111.
- [43] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 夏朝宗. 1990-2011 年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力. 生态学报, 2014, 34(20): 5962-5973.
- [44] Peng J, Shen H, Wu W H, Liu Y X, Wang Y L. Net primary productivity (NPP) dynamics and associated urbanization driving forces in metropolitan areas: a case study in Beijing City, China. *Landscape Ecology*, 2016, 31(5): 1077-1092.
- [45] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. Washington, DC: US Department of Agriculture, 1965.

- [46] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion-sediment yield models. *Soil Technology*, 1997, 11(1): 43-55.
- [47] 潘美慧, 伍永秋, 任斐鹏, 董一帆, 江源. 基于 USLE 的东江流域土壤侵蚀量估算. *自然资源学报*, 2010, 25(12): 2154-2164.
- [48] 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.
- [49] Budyko M I. *Climate and Life*[M]. New York: Academic Press, 1974.
- [50] 周文佐. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
- [51] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998.
- [52] Cleophas T J, Zwinderman A H. Partial correlations//Cleophas T J, Zwinderman A H, eds. *Regression Analysis in Medical Research: for Starters and 2nd Levelers*. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [53] 朱雪虹, 张书亮, 张伟佩. 基于格网聚类与空间叠置的矢量空间数据变化检测方法研究—以地理国情监测应用为例. *南京师大学报: 自然科学版*, 2019, 42(2): 136-144.
- [54] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors - based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [55] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33: 114-115.
- [56] Hao R F, Yu D Y, Wu J G. Relationship between paired ecosystem services in the grassland and agro-pastoral transitional zone of China using the constraint line method. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 240: 171-181.
- [57] 潘竞虎, 李真. 干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 280-289.
- [58] Elmhagen B, Eriksson O, Lindborg R. Implications of climate and land-use change for landscape processes, biodiversity, ecosystem services, and governance. *AMBIO*, 2015, 44(S1): 1-5.
- [59] Pan Y, Xu Z R, Wu J X. Spatial differences of the supply of multiple ecosystem services and the environmental and land use factors affecting them. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 4-10.