

文章编号: 1004-7999(2021)01-0073-11

DOI: 10.13478/j.cnki.jasyu.2021.01.011

辽河流域生态系统服务权衡与协同研究

张世栋¹, 李明玉^{1*}, 相恒星², 王宗明², 于媛¹

(1. 延边大学地理与海洋科学学院, 吉林 延吉 133002;

2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 吉林 长春 130102)

摘要: 辽河流域是我国7大流域之一, 是重要的防风固沙和生态屏障区, 明晰流域生态系统服务变化及其权衡与协同关系对实现区域可持续发展具有重要意义。该文在评估辽河流域2000—2015年土壤保持服务、防风固沙服务和生境质量的基础上, 利用相关性分析和均方根偏差对生态系统服务权衡与协同关系进行研究。结果表明: 1) 土壤保持服务由2000年 5.5×10^8 t增至2015年的 6.0×10^8 t, 防风固沙服务由2000年 1.29×10^8 t增长至2015年 1.35×10^8 t, 土壤保持服务、防风固沙服务和生境质量均呈现整体增加、局部减少的趋势, 生态系统服务空间异质性较大; 2) 土壤保持服务与防风固沙服务、防风固沙服务与生境质量为权衡关系, 土壤保持服务和生境质量表现为协同关系; 3) 2000—2015年辽河流域生态系统服务整体表现为权衡程度减弱的趋势, 对比不同土地覆被类型权衡与协同的关系, 发现林地权衡程度较低, 而人工表面权衡程度较高; 通辽市和赤峰市东北部权衡程度较高, 流域东部生态系统服务权衡程度较低。定量评估辽河流域生态系统服务权衡与协同关系可以为该区域环境治理和区域可持续发展提供参考。

关键词: 生态系统服务; 权衡; 协同; 辽河流域

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

Trade-offs and synergies of ecosystem services in the Liaohe River Basin

ZHANG Shidong¹, LI Mingyu^{1*}, XIANG Hengxing², WANG Zongming², YU Yuan¹

(1. Geography and Ocean Sciences College of Yanbian University, Yanji Jilin 133300, China;

2. Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130102 China)

Abstract: The Liaohe River Basin, one of the seven major river basins in China, is an important wind-proof and sand-fixing (WPSF) and ecological barrier area. Clarifying the changes and tradeoffs/synergies of ecosystem services is significant for achieving sustainable development goals. Based on the evaluation of soil conservation service, wind-proof and sand-fixing services and habitat quality in the Liaohe River Basin from 2000 to 2015, correlation analysis and root-mean-square deviation method were used to study the tradeoff and synergy relationship of ecosystem services. The results showed that: 1) The amount of soil conservation increased from 5.5×10^8 t in 2000 to 6.0×10^8 t in 2015, and the wind-proof and sand-fixing amount increased from 1.29×10^8 t in 2000 to 1.35×10^8 t in 2015. The soil conservation service, wind-

收稿日期: 2021-01-19 基金项目: 国家自然科学基金项目(41461036); 吉林省“十三五”科学技术项目(JJKH20191124KJ); 吉林省科技发展计划项目资助(20200301014RQ)

作者简介: 张世栋(1994—), 男, 河北邢台人, 在读硕士, 研究方向为土地覆被变化与生态评价。李明玉为通信作者, E-mail: leemy@ybu.edu.cn

proof and sand-fixing and habitat quality showed a trend of “overall increased and local decreased”, and the spatial heterogeneity of ecosystem services was great. 2) Soil conservation service and wind-proof and sand-fixing service, wind-proof and sand-fixing service and habitat quality were trade-offs. However, soil conservation service and habitat quality were in a synergistic relationship. 3) The overall ecosystem services showed a trend of weakening of trade-offs in the past 15 years for the Liaohe River Basin. Comparing the trade-offs and synergies of different land cover types, it was found that the trade-offs of woodland were lower, while the trade-offs of artificial surface were higher. The overall ecosystem services of the Liaohe River Basin showed a trend of weakening of trade-offs in the past 15 years. Comparing the trade-offs and synergy of different land cover types, it was found that the trade-offs of woodland were lower, while the trade-offs of artificial surface were higher. Quantitatively assessing ecosystem service trade-offs and synergies of the Liaohe River Basin could provide a reference for regional environmental governance and regional sustainable development.

Key words: ecosystem services; trade-offs; synergies; the Liaohe River Basin

生态环境是人类可持续发展的基础,生态文明是指人与自然和谐相处的模式。党的十八大以来,国家把生态文明建设放在突出位置,公布了生态文明先行示范区建设名单,强调区域内的可持续发展^[1]。2015年9月,在联合国成立70周年之际,各国通过了《2030年可持续发展议程》,该议程的核心内容是实现全球可持续发展目标(Sustainable Development Goals,SDGs)。生态系统服务作为人与生态系统联系最为密切的指标,如何有效度量和监测生态系统服务是促进人与自然和谐相处、实现生态文明建设的一个重要环节。围绕陆地生态系统多个服务设计保护措施时,多种生态系统服务之间的权衡与协同关系发挥重要指示作用,将有助于实现区域生态文明可持续发展。

生态系统服务是指人类通过生态系统的功能直接或间接得到的产品和服务的收益^[2-3]。生态系统服务权衡是指某种生态系统服务供给能力的提高导致其他生态系统服务供给能力的降低;协同指的是某种生态系统服务供给能力的提高导致其他生态系统服务供给能力的共同增加^[4]。生态系统服务类型的多样性,空间的异质性以及人类利用方式的不同,导致生态系统服务之间形成较为复杂的权衡与协同关系^[5]。全球可持续发展目标强调区域发展一致性,强调资源薄弱区域重点提高使用效率^[1],因此需要确定生态系统服务的空间分配。另一方面,面对不同生态系统服务之间相互冲突时,需要决策者确定优先目标,解决关键权衡问题,加强跨部门的互动,为可持续发展目标的整合提供支持。因此,如何高效的评估可持续发展下的生态系统服务变化,正确认知生态系统服务之间的权衡与协同关系,实现

区域生态—社会良性发展迫在眉睫。

国内外学者对于生态系统服务权衡与协同关系进行了大量有益的探索,其中,Richard等^[6]运用帕累托边界进行权衡分析,研究了热带沿海地区生态系统服务之间的权衡与协同关系。Howe等^[7]运用系统制图方法对2000—2013年生态系统服务相关研究进行梳理,发现生态系统服务之间的权衡关系高于协同关系。Zhong等^[8]以福建省为研究区域,采用均方根偏差探究农业土地整理前后生态系统服务权衡与协同关系的变化。祝萍等^[9]和余玉洋等^[10]利用相关分析法研究了北方重点功能区和秦巴山区生态系统服务之间的关系,发现了相同生态系统服务在不同尺度下权衡与协同关系不同。还有学者对关中—天水经济区^[11]、石羊河流域^[12]、三江源地区^[13]采用贝叶斯网络、双变量空间自相关分析对生态系统服务关系进行研究。综上所述,相关性分析、生态系统服务协同权衡度模型(Ecosystem Services Trade-off Degree,ESTD)、玫瑰图和可能性边界图是较为常用的方法,其中,相关性分析和均方根偏差最能同时定性和定量地刻画生态系统服务权衡与协同关系的变化^[14]。

辽河流域地处蒙古高原与华北平原的生态过渡地带,流域内部生态系统类型多样,被列为国家生态文明先行示范区之一。辽河流域西部分布着浑善达克沙漠化防治生态功能区、科尔沁草原生态功能区和农牧交错带,防风固沙具有着重要的意义;且东北地区黑土地退化严重,区域内耕地面积较多,土壤保持服务与之密切相关。此外,该区生态系统类型多样,受人为活动干扰破坏明显,生境质量发生显著变化^[15]。因此,在可持续发展目标报告主旨下,首先

基于多源遥感数据量化 2000—2015 年 3 种生态系统服务(土壤保持、防风固沙、生境质量),分析辽河流域生态系统服务的时空格局特征;其次,基于相关性分析和均方根偏差方法探讨生态系统服务权衡/协同关系,揭示权衡/协同关系在空间上的异质性,为辽河流域生态文明建设提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

辽河流域位于中国东北地区西南部(40°31'N~45°17'N,116°54' E~125° 32' E)(图 1),属于北温

带大陆性季风气候,年均气温 4~9℃,年降水量 500~650 mm,主要植被为暖温带落叶阔叶林和温带性灌丛,四季分明,冬季漫长。流域全长 1 345 km,总面积约 21.9×10⁴ km²,包括 4 个子流域:西辽河流域、东辽河流域、浑太河流域和辽河干流流域。山地分布在流域东西两侧,中部为辽河冲积平原,地势整体呈西高东低趋势,包括辽宁省铁岭市、抚顺市、沈阳市、阜新市、锦州市、鞍山市、辽阳市、盘锦市、丹东市、本溪市、朝阳市和营口市,内蒙古自治区赤峰市、通辽市、兴安盟部分地区以及吉林省松原市、辽源市、四平市和白城市等 19 个地级市。

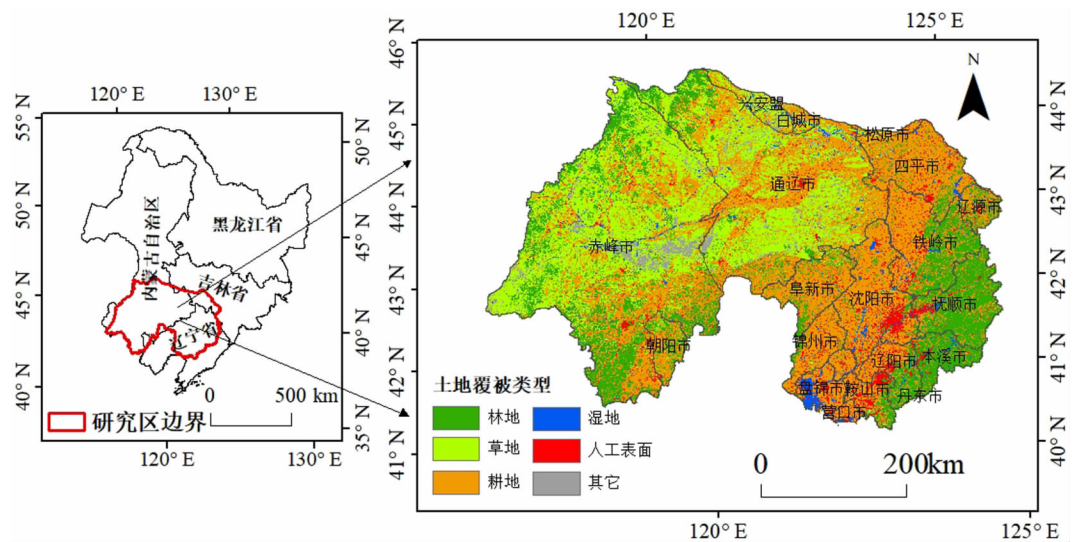


图 1 研究区概况
Fig.1 Study area

1.2 数据来源

该研究采用多源数据集进行生态系统服务评

估。关于数据类型、分辨率和数据源的描述见表 1。

表 1 数据来源
Table 1 The data sources

数据	类型	分辨率/m	数据源	介绍
土地覆被数据	栅格	30	国家地球系统科学数据中心东北分中心	用于生态系统服务计算。
MODIS NDVI	栅格	250	MOD13A 的植被指数数据 (https://lp-daac.usgs.gov)	用于植被覆盖度因子计算。
数字高程模型(DEM)	栅格	30	国际科学数据服务平台 (https://earthexplorer.usgs.gov)	用于计算坡度、坡向和高程等因子。
降水量数据	栅格	1 000	中国气象科学数据共享服务网 (http://data.cma.cn)	用普通克里金法对气象监测站的气象数据进行插值得到。
土壤质地	栅格	1 000	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)	包括砂土、粉土和黏土含量,用来计算土壤保持服务。

由表 1 可知,土地覆被数据以 Landsat Thematic Mapper(ETM+)、Landsat Operational Land Imager(OLI)为数据源,利用 eCognition8.64 采用面向对象分割方法得到,其 2000 和 2015 年的分类精度分别为 92% 和 94%^[16]。所有数据重采样为 1 km。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤保持服务

土壤保持和沉积是生态系统服务能力的重要方面,土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, USLE)模型将土壤侵蚀减少与持留之和视为土壤保持。将土壤质地、土地覆被类型、数字高程等数据,以栅格为单位计算土壤保持量,具体计算公式如下^[17]。

$$SEDRET_i = RKLS_i - USLE_i, \quad (1)$$

$$RKLS_i = R_i \times K_i \times LS_i, \quad (2)$$

$$USLE_i = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i. \quad (3)$$

式中, $SEDRET_i$ 表示栅格 i 的土壤保持量/t; $RKLS_i$ 表示栅格 i 的潜在土壤侵蚀量 t; $USLE_i$ 表示栅格 i 的实际土壤侵蚀量/t; R_i 表示栅格 i 的降雨侵蚀力/ $[MJ \cdot mm/(km^2 \cdot h \cdot a)]$ ^[18]; K_i 表示栅格 i 的土壤可蚀性/ $[t \cdot km^2 \cdot h/(km^2 \cdot MJ \cdot mm)]$ ^[19]; C_i 表示栅格 i 的植被覆盖因子^[20], R 、 K 和 C 因子计算过程由表 2 可知; LS_i 表示栅格 i 的坡度坡长因子,基于数字高程模型利用 ArcGIS 提取、计算得到^[21]; P_i 表示栅格 i 的土壤保持措施因子,根据各子流域的研究成果调整使用^[22]。

表 2 土壤保持服务各因子计算公式

Table 2 The equation of factors of soil conservation service

因子	计算公式	介绍
降水侵蚀力 因子(R)	$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{-1.5 \times \lg \langle P_i^2 / P \rangle - 0.8088}$	P_i 为第 i 个月降水量均值(mm), P 为年降雨量均值(mm)
土壤可蚀性 因子(K)	$K = 0.2 + 0.3 \times \exp \left[-0.0256 S_a \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \left\{ \left[\frac{S_i}{C_i + S_i} \right]^{0.3} \times \left\{ 1 - \frac{0.025Y}{Y + \exp(3.72 - 2.95Y)} \right\} \left\{ 1 - \frac{0.7 S_n}{S_n + \exp(22.9 S_n - 5.51)} \right\} \times 0.1317 \right\}$ $S_n = 1 - \frac{S_a}{100}$	S_a 、 S_i 、 C_i 、 Y 分别为土壤砂粒、粉砂、粘粒、土壤有机碳含量
植被覆盖度 因子(C)	$C = \begin{cases} 0.6508 - 0.343 \frac{1}{6} \lg f & \begin{cases} f = 0 \\ 0 < f \leq 78.3\% \\ f > 78.3\% \end{cases} \end{cases}$	f 为植被覆盖度数据,由 MODIS 数据计算 NDVI 得到。

1.3.2 防风固沙服务

防风固沙服务是指生态系统通过其结构和过程,使风力减弱,风蚀量降低。防风固沙服务通过风速、土壤、植被覆盖等因素估算潜在和实际风蚀量,以两者差值作为生态系统固沙量来评价生态系统防风固沙服务的强弱^[23]。具体计算公式为:

$$SR = SL_r - SL, \quad (4)$$

式中, SR 表示防风固沙量/ $kg \cdot m^{-2}$; SL_r 表示潜在土壤风蚀量/ $kg \cdot m^{-2}$; SL 表示实际土壤风蚀量/ $kg \cdot m^{-2}$ 。土壤风蚀量采用修正风蚀方程(Revised Wind Equation, RWEQ)计算,具体公式如下:

$$SL_r = \frac{2z}{S_r^2} Q_{MAX_r} \times e^{-\left(\frac{z}{S_r}\right)^2} \quad (5)$$

$$Q_{MAX_r} = 109.8 \cdot (WF \times EF \times SCF \times K') \quad (6)$$

$$S_r = 150.71 \times [WF \times EF \times SCF \times K' \times COG]^{-0.3711} \quad (7)$$

$$SL = \frac{2z}{S_r^2} Q_{MAX} \times e^{-\left(\frac{z}{S_r}\right)^2} \quad (8)$$

$$Q_{MAX} = 109.8 \cdot (WF \times EF \times SCF \times K' \times COG) \quad (9)$$

$$S=150.71 \times [WF \times EF \times SCF \times K' \times COG]^{-0.3711}$$

(10)

式中, SL_r 表示潜在风蚀量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; Q_{MAX_r} 表示潜在风力的最大输沙能力/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$; S_r 表示潜在关键地块长度/ m ; SL 表示实际风蚀量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; Q_{MAX} 为风力的最大输沙能力/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$; S 为关键地块长度/ m ; z 表示下风向距

离/ m ,取 $50 \text{ m}^{[24]}$; WF 为气象因子/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$; EF 为土壤可蚀性因子; SCF 为土壤结皮因子; K' 为土壤粗糙度因子; COG 为植被因子,各因子计算公式见表 3^[23-26]。

表 3 防风固沙服务各因子计算公式

Table 3 The equation of factors of sand storm prevention

因子	计算公式	介绍
气象因子(WF)	$WF = Wf \times \frac{\rho}{g} \times SW \times SD$ $Wf = \frac{\sum_{i=1}^N u_2 (u_2 - u_1)^2}{500} \times N_d$ $SW = \frac{ET_p - (R + I) (R_d / N_d)}{ET_p}$ $ET_p = 0.0162 \cdot \frac{SP}{58.5} (DT + 17.8)$	Wf 为风场强度因子, ρ 为空气密度, g 为重力加速度, SW 为土壤湿度因子, SD 为雪盖因子, u_2 为监测风速, u_1 为起沙风速(取 5 m/s), N_d 为计算周期的天数, R_d 为月平均降水日数 SP 为太阳辐射, DT 为平均温度, ET_p 为潜在蒸发量, I 为灌溉量。
土壤可蚀性因子(EF)	$EF = \frac{29.09 + 0.31Sa + 0.17Si + 0.33(Sa/Cl) - 2.59OM - 0.95CaCO_3}{100}$	Sa 为土壤粗砂含量, Si 为土壤粉砂含量, Cl 为土壤粘粒含量, OM 为有机质含量, $CaCO_3$ 为土壤中碳酸的含量。
土壤结皮因子(SCF)	$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066(Cl)^2 + 0.021(OM)^2}$	Cl 为土壤粘粒含量, OM 为有机质含量。
地表粗糙因子(K')	$K' = \cos\alpha$	α 为地形坡,在 ArcGIS 软件中的 Slope 工具实现。
植被因子(COG)	$COG = e^{-0.0438(SC)}$ $SC = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})$	SC 为植被覆盖度(%), $NDVI$ 、 $NDVI_{max}$ 、 $NDVI_{min}$ 分别代表 $NDVI$ 实际值、最大值及最小值。

1.3.3 生境质量

生境质量指生态系统能够提供物种生存、繁殖条件的能力。该文基于生境适宜性模型(habitat suitability index model, HSI),选取对生境质量具有直接影响的生存环境影响因子^[27-28](表 4),具体计算公式如下:

$$HSI = \sum_{i=1}^n w_i f_i$$

(11)

式中, HSI 为生境质量; n 为指标因子个数; w_i 为权重; f_i 为指标因子计算值。

不同环境影响因子对生境质量影响程度不同,为避免人为主观因子的影响,运用熵值法和层次分析法确定因子权重(表 4)。

表 4 生境质量各因子权重

Table 4 Ecological environment quality evaluation factor weight

目标层	准则层		决策层	
	影响因子	权重	影响因子	权重
生境质量	水源状况	0.3	河流密度	0.35
			湖泊密度	0.65
			道路密度	0.45
	干扰因子	0.2	居民地密度	0.55
			生态系统类型	0.75
	遮蔽物	0.2	坡度	0.25
			NDVI	1.00
	食物丰富度	0.3		

为便于对辽河流域生境质量进行比较,按照适宜性得分对流域生境质量做标准化处理,分为质量优秀(65~100)、质量良好(50~65)、质量一般(40~

50)、质量差(0~40)等 4 个等级^[27]。

1.3.4 相关分析

该文以辽河流域 3 种生态系统服务栅格数据为基础,在流域尺度上,基于像元测算生态系统服务间的相关关系。利用 ArcGIS10.4 建立渔网采样,设置采样点距离为 1 km,将各生态系统服务值赋予采样点上,再将采样点导入 SPSS 软件采用 Pearson 相关性系数法^[12]计算。若相关性系数在 1% 的显著水平上为正值^[29],则表明 2 种生态系统服务之间具有协同关系,一种生态系统服务的增加会促进另一种生态系统服务的增加。若相关性系数在 1% 的显著水平上为负值时,则表明 2 种服务具有权衡关系,一种服务的增加会引起另一种生态系统服务的减少。

1.3.5 均方根偏差

均方根偏差(Root Mean standard Deviation, RMSD)用于量化两种生态系统服务之间的权衡关系,并量化这 2 种生态系统服务偏向其中一种服务^[8]。这个方法使用点到直线的距离来表达两种生态系统服务之间的关系。距离越大,2 种生态系统服务之间的权衡关系越强烈。因为不同的生态系统服务的单位不同,生态系统服务数据必须标准化,以便生态系统服务在等式中介于 0 和 1 之间。具体公式为:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (ES_i - \overline{ES})^2} \quad (12)$$

式中, $RMSD$ 是均方根偏差; ES_i 是生态系统相对效益值; \overline{ES} 是 n 种生态系统服务的数学期望值。 $RMSD$ 物理意义代表一对生态系统服务距离 1:1 线的长度。坐标点的相对位置代表某种生态系统服务相对收益(图 2)。

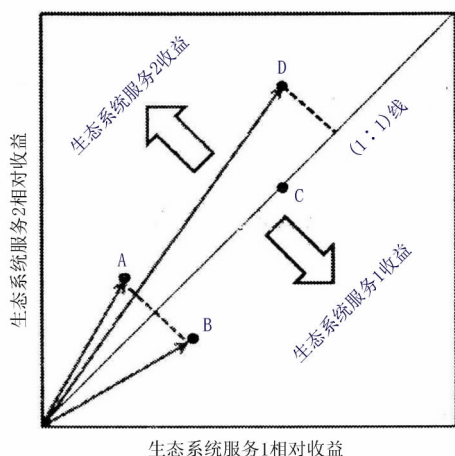


图 2 生态系统服务间权衡

Fig. 2 Trade-offs between ecosystem services

原点到坐标点与 1:1 线夹角越大时,两种生态系统服务权衡越大。图中权衡程度: $A=B>D$, C 点的权衡程度为 0; A、D 点为生态系统服务 2 收益, B 点为生态系统服务 1 收益。

2 结果与分析

2.1 辽河流域生态系统服务时空变化

2000—2015 年,土壤保持服务高值区位于流域两侧,包含铁岭市、丹东市、抚顺市、本溪市和赤峰市西部,该区域大部分地区被原始森林覆盖,森林生态系统提供较高土壤保持服务。低值区域主要分布在辽河流域中部(图 3)。2000 年、2015 年土壤保持服务空间格局基本稳定,大致呈现出中部低,东部和西部高的分布。2000—2015 年,土壤保持增长趋势,由 2000 年的 5.5×10^8 t 增至 2015 年的 6.0×10^8 t,增长率为 8.4%。2015 年土壤保持服务相比于 2000 年,高值区域面积稍有增长,主要分布在流域东北部,增值区域分布在耕地转化为林地的区域。

辽河流域的科尔沁草原生态功能区构成辽河流域防风固沙服务的高值区,防风固沙服务与潜在风力侵蚀量和实际侵蚀量有关,牧草可以固定地表的地表土壤,减少区域的实际侵蚀量,又因该区域的潜在风力侵蚀量大,提高了该区域的防风固沙能力。防风固沙能力低值区出现在辽宁省东部,包括抚顺市和本溪市等地,土地覆被类型为林地,相比于土壤保持服务,林地提供最小的防风固沙服务。2000—2015 年,呈现微弱增长趋势,由 2000 年 1.29×10^8 t 增长至 2015 年 1.35×10^8 t,增长率为 4.7%。防风固沙服务在赤峰市东部变化比较剧烈,高增强区和高衰减区均位于此区域。土地覆被类型上看,增强区主要分布在草地和农田区;防风固沙能力衰减区主要分布在盐碱裸地及农牧交错区。

辽河流域生境质量最好的区域与林地空间分布较为一致,主要分布于流域东部的大片林区,这些地区水源与食物相对充足,比较适合各生物的栖息和生存。生境质量良好区域广泛分布于东部区域内,涵盖东部区域以及吉林省和辽宁省的部分地区。生境质量一般区域主要分布四平市、通辽市、赤峰市以及辽宁省的北部地区,这些地区大量分布着中产田区,其遮蔽条件和 NDVI 值都较低,其生境质量评价因子与生境质量分布一致。生境质量差的区域集中分布于赤峰市、通辽市等交通比较发达,居民地较密集的区域以及道路和居民地集中分布的缓冲地

带,这些地区往往是受人类活动干扰比较强的区域,几乎完全不适合生物的生存。2000—2015 年,生境

质量增强区域较为分散,生境质量衰减区域在沈阳市分布较为集中。

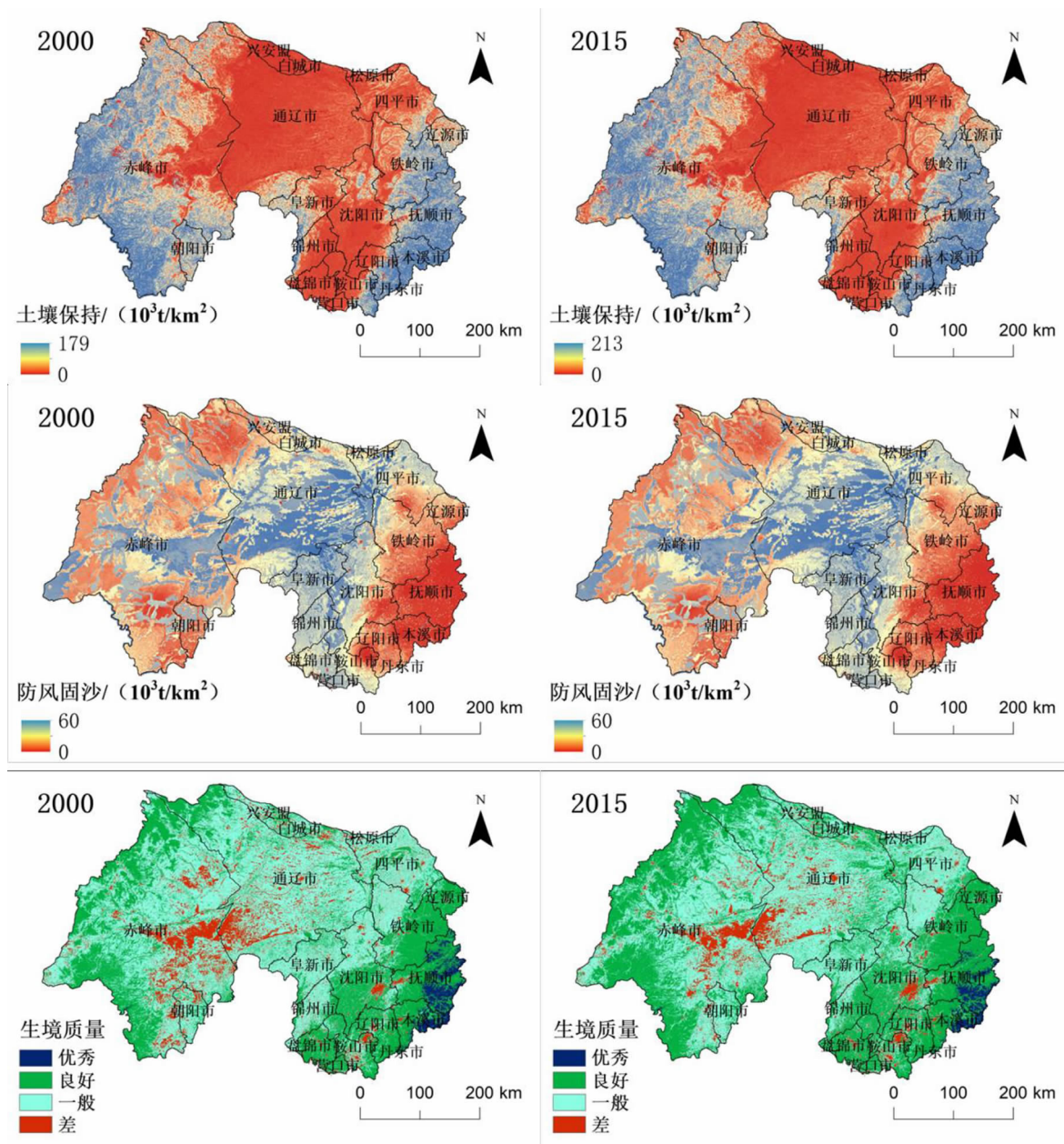


图 3 2000—2015 辽河流域生态系统服务空间格局

Fig. 3 Spatial patterns of the three ecosystem services in the Liaohe River Basin from 2000 to 2015

2.2 生态系统服务权衡与协同关系

2.2.1 生态系统服务间相关性分析

该研究对 2000、2015 年辽河流域的 3 种生态系统服务进行相关性计算,并对计算结果进行 t 检验。相关性结果为正值表明 2 种生态系统服务之间具有协同关系;结果为负值表明 2 种服务具有权衡关系。该研究发现生境质量与土壤保持服务表现为协同关

系,防风固沙服务与土壤保持服务、生境质量表现为权衡关系。2000—2015 年,土壤保持服务和生境质量高值区域土地覆被类型多为林地,林地面积增加,土壤保持服务与生境质量同时提高,生境质量与土壤保持服务的协同系数呈现增加趋势;防风固沙服务与土壤保持服务权衡系数呈减少趋势,流域内草地面积增加,耕地面积和裸地面积减少,而草地生态

系统提供土壤保持服务和防风固沙服务高于耕地生态系统^[17], 权衡系数减少; 防风固沙服务与生境质量权衡系数呈增加趋势, 流域内森林生态系统生境质量变优, 森林生态系统具有庞大的根系系统和茂

密的地上部分, 致使区域内潜在风蚀量和实际风蚀强度均较小, 防风固沙服务较弱, 权衡系数增加(表 5)。

表 5 不同生态系统服务间的相关性关系
Table 5 Pearson correlations between pairs of ecosystem services

	土壤保持		防风固沙		生境质量	
	2000	2015	2000	2015	2000	2015
土壤保持	1	1	-0.153**	-0.147**	0.325**	0.335**
防风固沙			1	1	-0.201**	-0.237**

注: ** 表示两种生态系统服务的相关性通过了 1% 显著性检验。

2.2.2 生态系统服务间权衡强度分析

相关系数的正负和大小只能定性的表征生态系统服务作用关系的方向和强弱, 需进一步对服务间的权衡进行定量分析(表 6)。2000—2015 年, 辽河流域 3 对生态系统服务间的权衡/协同程度呈现较大的差异, RMSD 值域变化不大; 土壤保持服务与防风固沙服务、土壤保持服务与生境质量、防风固沙服务和生境质量 RMSD 均值呈下降趋势, 说明在流域尺度上, 3 种生态系统服务对权衡程度下降(图 4)。由相关性分析已知, 辽河流域土壤保持服务与防风固沙服务为权衡关系, 2000 年 RMSD 高值区域出现在通辽市、四平市分布着农牧交错带, 土地覆被类型主要为草地, 2000、2015 年 RMSD 分别为 0.163 和 0.155, 高于流域均值。草地提供较高的防风固沙服务, 但由于自然环境、气候、土壤制约, 土壤保持服务与防风固沙服务之间表现出显著的权衡关系。RMSD 低值区域位于辽河流域东部, 表现为土壤保持服务相对收益, 土地覆被类型主要为林地, 2000、2015 年 RMSD 为 0.068、0.062, 低于流域均值, 土壤保持服务较高, 防风固沙服务较低, 研究区主要表现为土壤保持服务相对收益, 防风固沙服务的空间异质性较大。

土壤保持服务与生境质量为协同关系, RMSD 高

值区分布沈阳市、赤峰市东部, 赤峰市东部分布着裸地和盐碱地, 土壤保持服务和生境质量极差, 2 种生态系统服务表现强烈的权衡; 沈阳市和辽阳市伴随着城市扩张, 人类干扰强烈、农业活动频繁, 土壤保持服务和生境质量相对较弱。RMSD 低值区分布于流域东部, 生境质量相对收益, 植被覆盖度高, 拥有良好的土壤保持服务, 同时生境质量优秀, 具有良好的协同作用, 此消彼长的权衡关系较弱。

防风固沙服务和生境质量 RMSD 高值区域出现在辽河流域西部, 包括通辽市和赤峰市东部, 草地和其他用地为主要土地覆被类型, 生境质量受遮蔽条件、水源状况、NDVI 等生境因子的制约, 生境质量较差, 防风固沙服务相对受益; RMSD 低值区域分布在辽河流域东部, 为生境质量高值区, 该区域植被覆盖度高, 防风固沙服务、生境质量、土壤保持服务平衡, 属于生态盈余区, 生境质量相对受益。2000—2015 年, 防风固沙服务与生境质量 RMSD 高值区面积缩减, 自 2000 年退耕还林/还草政策实施以来, 生境状况、植被覆盖度、生物丰度提高, 生态系统服务间权衡程度降低; 沈阳市 RMSD 由低值区变为中值区, 该区域防风固沙服务与生境质量权衡程度增强。

表 6 不同生态系统服务间的权衡强度
Table 6 Trade-offs between ecosystem services from 2000 to 2015

年份	项目	土壤保持—防风固沙	土壤保持—生境质量	防风固沙—生境质量
2000	值域	[0, 0.706]	[0, 0.691]	[0, 0.701]
	均值	0.072	0.418	0.390
2015	值域	[0, 0.706]	[0, 0.688]	[0, 0.700]
	均值	0.070	0.409	0.380

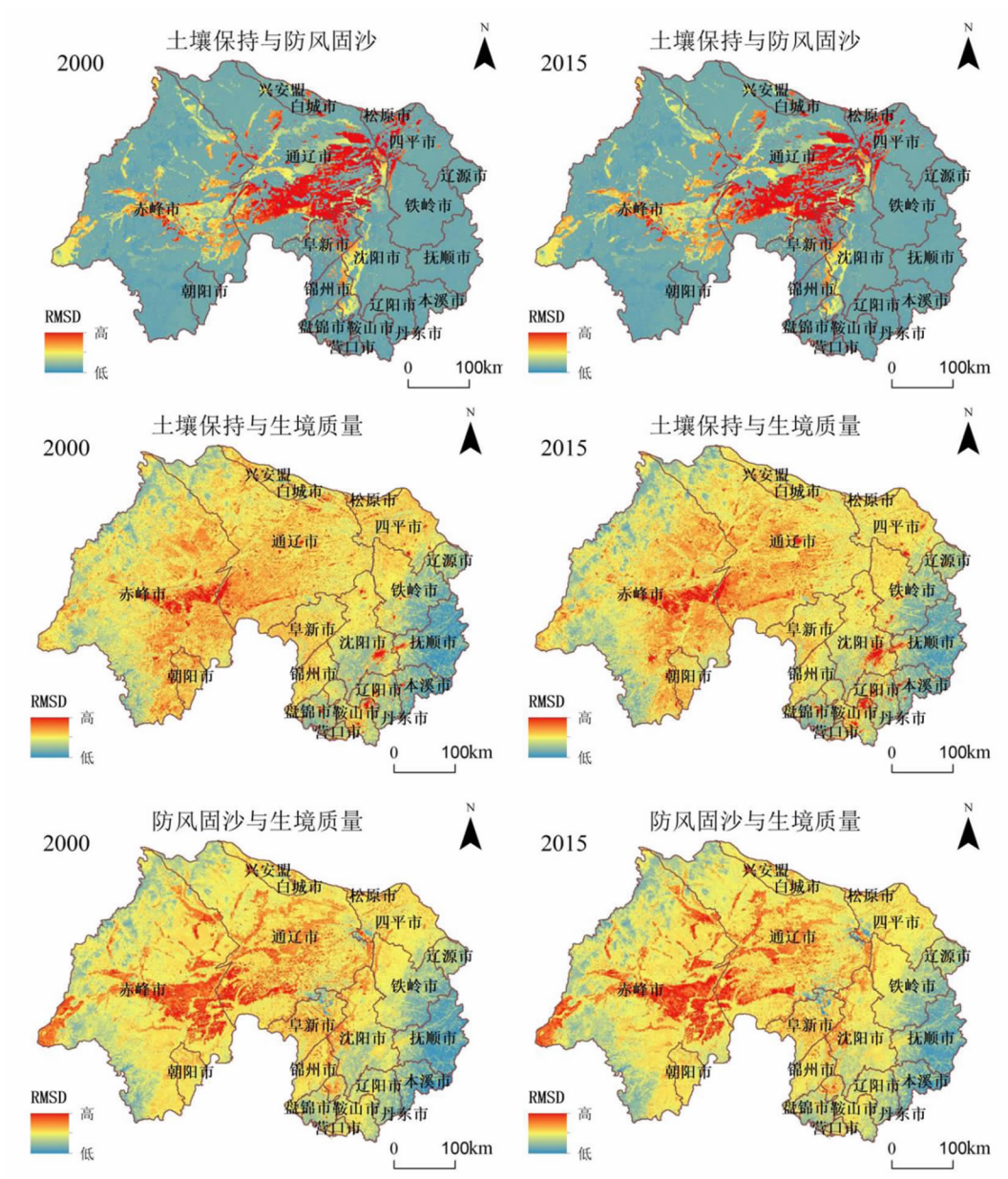


图 4 辽河流域生态系统服务对权衡空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of ecosystem services trade-offs of the Liaohe River Basin

3 讨论

辽河流域内浑善达克和科尔沁地区地处北方农牧交错带,土地覆被类型主要为耕地和草地,防风固沙量与徐杰等^[22]对科尔沁沙地防风固沙量计算结果 $12\,510\text{ t/km}^2$ 相比偏小,相对误差为 22%,这可能与不同土壤类型起沙风速设置有关。该区域防风固沙服务与生境质量、土壤保持服务主要变现为权衡关系,2000—2015 年,生态系统服务关系表现为权衡程度的降低,这与祝萍^[9]的研究结果一致。此外,研究发现农牧交错带防风固沙服务与生境质量

权衡度高于防风固沙服务与土壤保持服务的权衡程度,这可能是由于该区域植被类型单一、水源状况差,生物多样性严重受限而导致。

以耕地为主的中部区域,土壤保持量为 764.5 t/km^2 ,与祁宁等^[30]计算的土壤保持量 $662.36 \pm 1\ 688.23 \text{ t/km}^2$ 相比,相对误差为 13.4% 。分析其原因,虽然估算模型相同,但空间分析和地理边界不同,祁宁等基于生态系统服务簇进行计算,而该研究依据土地覆被类型进行统计。防风固沙服务与生境质量、土壤保持服务与防风固沙服务之间存在权衡关系,这与祁宁等^[30]和 Pan 等^[31]的研究结果一

致。虽然自 2000 以来,在退耕还林/还草政策支持下,生态系统逐步正向演替,但受城市化和人为活动的长期干扰,致使该区域生态系统服务间仍表现为强烈的权衡,并在沈阳、鞍山等城市表现更为明显。

流域东部以落叶栎林为主,土壤保持量与祁宁等^[30]计算结果 $8\,339.99 \pm 9\,320.99 \text{ t/km}^2$ 相比,相对误差为 8.7%。相比于建设用地和耕地,森林具有较高的土壤保持、维持生物多样性的能力。森林生态系统服务间的权衡程度较低,这与孙艺杰等^[32]的研究结果相同。但与流域西部森林生态系统相比,权衡程度较低,探究其原因,一方面流域西部以疏林草原为主,生态系统组分差异较大,另一方面流域东部受到林业政策影响广泛,因此,流域东部生态系统服务间的权衡程度最低。以上均表明该研究采用相关性分析和均方根偏差很好的刻画了生态系统服务权衡与协同的关系。

此外,由于多源遥感数据的空间分辨率不同,该研究将数据重采样为 1 km 空间分辨率,导致量化生态系统服务量较为粗糙,而研究结果案例支持意义表现为:1) 流域尺度上权衡/协同关系空间差异;2) 不同土地覆被类型权衡/协同关系,不能代表更小尺度存在相同关系,需要进一步提高数据源的精度,并结合生态系统服务的尺度效应对生态系统服务权衡/协同关系进行进一步评估。

辽河流域生态系统服务变化趋势总体向好,但目前仍然存在防风固沙服务与土壤保持服务、生境质量权衡严重等问题。该研究提出以下建议:1) 通辽市、赤峰市东部防风固沙服务优秀,但土壤保持服务、生境质量较差,区域生态系统整体效益还比较低,土壤保持服务和生境质量是生态治理的重点;2) 生境质量最差区,划定生态红线,建立物种重点保护区,遏制生物多样性的丧失;3) 退耕还林在辽河流域东部效果显著,森林生态系统得到较好管理,权衡程度降低,需要总结案例经验,以便保持可持续发展。

4 结论

该研究利用 2000 年、2015 年多源数据,基于 USLE 模型、HSI 模型分析辽河流域 2000—2015 年 3 种生态系统服务(土壤保持、防风固沙、生境质量),并基于相关性分析和均方根偏差探究了辽河流域生态系统服务对的权衡与协同关系。结论如下:

1) 辽河流域 3 种生态系统服务空间分布不均,

防风固沙服务高值区分布流域西部,土壤保持、生境质量高值区分布在流域东部。2000—2015 年,3 种生态系统服务呈微弱增强趋势。

2) 通过对生态系统服务相关性计算表明,土壤保持服务与生境质量表现为协同关系;防风固沙服务与生境质量、土壤保持服务与防风固沙服务为权衡关系。

3) 通过 RMSD 定量流域的权衡程度,2000—2015 年,辽河流域 3 种生态系统服务间 RMSD 呈下降趋势,权衡程度降低;权衡强度高值区域分布在赤峰市东部,权衡强度低值区分布在流域东部。

参考文献:

- [1] UN G A. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Report No. A/RES/70/1 [C]. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2015.
- [2] 金晖,姚美岑,李明玉,等. 熵视角下的延边城市生态系统可持续发展能力分析[J]. 延边大学农学学报, 2018, 40(01): 32-40.
- [3] 林昕瑶. 基于因子分析法对新型城镇土地综合利用效益的研究——以福建省为例[J]. 长春大学学报, 2019, 29(03): 6-10.
- [4] Baral H, Keenan R J, Sharma S K, et al. Economic evaluation of ecosystem goods and services under different landscape management scenarios [J]. Land Use Policy, 2014, 39: 54-64.
- [5] 张恒,宫雪,李明玉,等. 延吉市土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响[J]. 延边大学农学学报, 2016, 38(03): 199-203.
- [6] Richard D R, Friess D A. Characterizing Coastal Ecosystem Service Trade-offs with Future Urban Development in a Tropical City [J]. Environmental Management, 2017, 60: 961-973.
- [7] 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 [J]. Global Environmental Change, 2014, 28(1): 263-275.
- [8] Zhong L N, Wang J, Zhang X, et al. Effects of agricultural land consolidation on ecosystem services: Trade-offs and synergies [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121412.
- [9] 祝萍,刘鑫,郑瑜晗,等. 北方重点生态功能区生态系统服务权衡与协同[J]. 生态学报, 2020(23): 1-13.
- [10] 余玉洋,李晶,周自翔,等. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达[J]. 生态学报, 2020,

- 40(16):5465-5477.
- [11] 曾莉. 关中—天水经济区生态系统服务权衡协同关系及空间格局优化研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2019.
- [12] 柳冬青. 流域生态系统服务时空权衡与协同关系研究[D]. 兰州:兰州大学, 2019.
- [13] 吴柏秋. 三江源地区草地载畜功能与水土保持功能权衡与协同关系研究[D]. 南昌:江西师范大学, 2019.
- [14] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 等. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系——以甘肃白龙江流域为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(04):1278-1288.
- [15] 李明月, 钱锋, 李丹, 等. 辽河保护区水质时空分布特征及其影响因素[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(06):1043-1049.
- [16] Mao D H, He X G, Wang Z M, et al. Diverse policies leading to contrasting impacts on land cover and ecosystem services in Northeast China[J]. Journal of Clean Production, 2019, 240:117961.
- [17] 李慧颖. 基于遥感和 InVEST 模型的辽宁省退耕还林工程生态效应评估[D]. 长春:吉林大学, 2019.
- [18] 张超, 吴爽, 荣燕妮. 大沽河流域北部山区土壤侵蚀状况研究[J]. 长春大学学报, 2019, 29(02):28-31.
- [19] 胡先培, 曾成, 钱庆欢, 等. 基于 RUSLE 模型的铜仁地区 1987—2015 年土壤侵蚀时空特征[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(02):158-166.
- [20] 郭达, 宋小宁, 董震, 等. 基于 RUSLE 与 GIS 的黄土高原水土流失评价研究——以宁夏中卫地区为例[J]. 泥沙研究, 2020, 45(05):55-60.
- [21] 林杰, 董波, 潘颖, 等. 南京市植被覆盖管理措施因子的时空格局动态变化[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(05):617-626.
- [22] 刘骞, 谢修鸿. 生物炭对土壤生态系统影响的研究进展[J]. 长春大学学报, 2016, 26(10):49-52.
- [23] 徐洁, 肖玉, 谢高地, 等. 防风固沙型重点生态功能区防风固沙服务的评估与受益区识别[J]. 生态学报, 2019, 39(16):5857-5873.
- [24] 李显玉, 赵鸥, 段磊, 等. 赤峰市防沙治沙典型模式研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2020, 36(01):66-69.
- [25] 王昕, 金额尔德木吐, 郭恩亮. 鄂尔多斯市城镇化与生态环境耦合关系研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2019, 35(11):38-43.
- [26] 彭婉月, 王兆云, 李海东, 等. 黑河中下游防风固沙功能时空变化及影响因子分析[J]. 环境科学研究, 2020, 33(12):2734-2744.
- [27] 孟庆林, 李明玉, 任春颖, 等. 基于 HSI 模型的吉林省东部地区生境质量动态评价[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(03):140-147.
- [28] 王茜晨, 郭恩亮, 布仁. 基于土地利用变化的鄂尔多斯高原东部生态风险评价——以准格尔旗为例[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2020, 36(04):26-30.
- [29] 陈心盟, 王晓峰, 冯晓明, 等. 青藏高原生态系统服务权衡与协同关系[J]. 地理研究, 2021, 40(01):18-34.
- [30] 祁宁, 赵君, 杨延征, 等. 基于服务簇的东北地区生态系统服务权衡与协同[J]. 生态学报, 2020, 40(09):2827-2837.
- [31] Pan Y, Wu J X, Xu Z R. Analysis of the tradeoffs between provisioning and regulating services from the perspective of varied share of net primary production in an alpine grassland ecosystem[J]. Ecological Complexity, 2014, 17:79-86.
- [32] 孙艺杰, 任志远, 赵胜男, 等. 陕西河谷盆地生态系统服务协同与权衡时空差异分析[J]. 地理学报, 2017, 72(03):521-532.