

DOI: 10.5846/stxb202005141228

宋洁, 温璐, 王凤歌, 李宽, 吴程, 张宏伟, 张雪峰. 乌兰布和沙漠生态系统服务价值时空动态. 生态学报, 2021, 41(6): 2201-2211.

Song J, Wen L, Wang F G, Li K, Wu C, Zhang H W, Zhang X F. Spatiotemporal dynamics of ecosystem service value in Ulan Buh Desert. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2201-2211.

乌兰布和沙漠生态系统服务价值时空动态

宋洁¹, 温璐¹, 王凤歌¹, 李宽², 吴程², 张宏伟², 张雪峰^{2,*}

¹ 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021

² 内蒙古科技大学包头师范学院资源与环境学院, 包头 014030

摘要:以乌兰布和沙漠为研究区, 基于 1990—2018 年 4 期土地利用类型数据, 以“当量因子法”为基础, 运用网格分析、热点分析、权衡协同分析等方法, 探究乌兰布和沙漠近 30 年生态系统服务价值的时空动态特征。结果表明: (1) 生态系统服务价值总量以 2000 年为拐点先下降后逐期上升, 由 1990 年 17.03 亿元上升至 2018 年 25.94 亿元, 其中调节服务价值贡献量最大, 4 期平均占 71.34%, 供给服务增幅最大, 近 30 年间增加 85.04%; (2) 生态系统服务价值呈东部和东北部高、中部和西南部低的空间分布特征, 1990—2010 年空间格局基本不变, 但 2018 年高值区有所扩展; (3) 1990—2018 年间生态系统服务冷点区面积占比由 2.85% 增至 4.23%, 热点区面积占比由 0.22% 增至 10.45%, 热点区分布在黄河沿岸及部分生态恢复区, 但东南部冷点区逐渐增大, 生态治理时应着重关注; (4) 1990—2018 年生态系统服务间以协同关系为主, 权衡关系存在于初期供给服务与其他类型服务之间。

关键词:生态系统服务价值; 网格分析; 热点分析; 权衡协同关系; 乌兰布和沙漠

Spatiotemporal dynamics of ecosystem service value in Ulan Buh Desert

SONG Jie¹, WEN Lu¹, WANG Fengge¹, LI Kuan², WU Cheng², ZHANG Hongwei², ZHANG Xuefeng^{2,*}

¹ School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

² College of Resources and Environment, Baotou Normal College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014030, China

Abstract: Desert ecosystem is an important subsystem of the terrestrial ecosystem, but the desert ecosystem is very fragile. Scientific research on the spatio-temporal pattern of ecosystem service value in desert regions is of great significance for the implementation of desert ecological environmental protection policies, ecological security construction and sustainable development of desert regions. This paper selected Ulan Buh Desert as the research area, collected four phases land use data of 1990—2018. Based on the equivalent factor method, the spatio-temporal dynamic characteristics of ecosystem service value in Ulan Buh desert in the past 30 years were explored by using grid analysis, hot spot analysis, trade-offs and synergies analysis, the driving factors for its formation were also discussed. The results showed that: (1) the total value of ecosystem services first decreased and then increased gradually from 17.03 billion yuan in 1990 to 25.94 billion yuan in 2018. The contribution of regulating services value was the largest among all ecosystem services, accounting for 71.34% on average, and the provisioning services increased by 85.04% in the past 30 years, which was the biggest among all ecosystem services. But the ecosystem service value was still dominated by water, desert and cultivated land, and the regional ecological security was unstable to some extent. (2) The spatial distribution of ecosystem service value was characterized by high value in the east and northeast and low value in the southwest and middle part. This was mainly related to the land use

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0506701); 内蒙古自治区科技重大专项(ZDZX2018054, 2019ZD002); 包头师范学院高层次人才科研启动基金项目(BTTCRCQD2018-09)

收稿日期:2020-05-14; **网络出版日期:**2021-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xzfzhang2003@163.com

distribution in this area; to the east is the Yellow River, to the northeast is the Hetao Plain, and in the middle and southwest are deserts and saline-alkali lands. The spatial pattern was basically unchanged from 1990 to 2010, while the high-value area was expanded in 2018. (3) From 1990 to 2018, the proportion of the cold spot area increased from 2.85% to 4.23%, and the proportion of the hot spot area increased from 0.22% to 10.45%. Hot spots were distributed along the Yellow River and part of the ecological recovery areas in the northeast, but the cold spot area near the Jilantai Salt Lake increased gradually, which should be taken seriously in ecological management. (4) From 1990 to 2018, the relationship between ecosystem services was primarily synergies, and the trade-offs existed between provisioning services and other ecosystem services in 1999–2000. From 2000 to 2018, ecosystem services were all in synergies, and the degree of synergy increased with time.

Key Words: ecosystem service value; grid analysis; hot spot analysis; trade-offs and synergies; Ulan Buh Desert

生态系统服务(Ecosystem Services, ES)是指人类从生态系统获得的所有惠益^[1],是生态系统向人类提供的环境和商品服务。2005 年联合国千年生态系统评估表明全球约有 60%的生态系统正在退化或处于不可持续状态^[2],将严重威胁全球的生态安全格局^[3]。生态系统服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)评估是用货币的形式评估生态系统的功能,能直观反映生态系统服务效益的变化^[4-5]。研究区域 ESV 时空动态能定量描述生态系统服务演化特征^[6],对区域生态保护及生态安全稳定具有重要意义。

沙漠生态系统是分布最广泛的荒漠生态系统类型,是陆地生态系统的重要组成部分,具有防风固沙、气候调节、水源涵养、旅游观光以及生物多样性保育等重要生态系统服务^[7-9]。同时沙漠生态系统极为脆弱,水资源贫乏、植被稀疏、生物量和生物多样性相对较低^[10],且社会经济发展缓慢。国内外学者已对城市^[11-12]、森林^[13]、草地^[14-15]、湿地^[16-17]等不同生态系统的 ESV 进行大量深入研究,但针对沙漠 ESV 的研究相对较少,因此近年来相关研究内容逐渐受到关注。现有沙(荒)漠的 ESV 评估以环境经济学方法(直接市场法、间接市场法、模拟市场法)为主,如任鸿昌等评估西部荒漠 3 种生态系统服务的价值为 537.24 亿元/a^[18],美国奇瓦瓦沙漠 ESV 达 16.1 亿美元^[8],2010 年宁夏沙坡头保护区 ESV 为 1.94 亿元^[19],塔里木河干流胡杨林荒漠 ESV 为 402.75 亿元^[20];也有部分研究采用“当量因子法”进行评估,如杨春利等计算了民勤绿洲 1994—2007 年间的 ESV 变化^[21],库布齐沙漠杭锦旗 ESV 为 360.18 亿元^[22];极少数研究采用物质流计算方法^[23]或能量价值法^[24]进行评价。这些研究在一定程度上弥补了沙漠地区 ESV 评估的空白,但现有研究时间尺度较短,缺乏时空分异特征的分析。

本研究基于谢高地等^[25]提出的“当量因子法”,利用网格分析、热点分析及相关分析法客观评价乌兰布和沙漠 ESV 时空动态及生态系统服务间权衡协同关系。研究结果旨在明确该区 ESV 时空演化特征,为科学开展沙漠区域 ESV 时空格局研究提供可借鉴的方法,为该区生态环境保护政策实施和生态安全建设提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

乌兰布和沙漠(39°41′07″—40°31′14″N, 105°59′45″—106°41′53″E)位于内蒙古自治区阿拉善盟和巴彦淖尔市境内,海拔为 1030—1474 m,面积约为 14000 km²(图 1)。该地区属典型中温带大陆性干旱季风气候区^[26],干旱少雨,日照充足,蒸发强烈;年均气温 7.8℃,年日照时间为 3229.9 h,昼夜温差大,年均降雨量 151 mm,年均蒸发量 2372 mm,平均风速约 3.7 m/s,多年平均大风日数 10—32 d,四季均有风沙天气。乌兰布和沙漠地势中间低、边缘高,内部地势平坦;地貌类型主要包括沙漠、山地、戈壁,地貌形态以流动沙丘、半流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘为主。

1.2 数据来源及处理

土地利用数据源于 1990 年、2000 年、2010 年和 2018 年 4 期 Landsat TM 和 OLI 影像,依据 2018 年 8 月上旬野外调查采集的 60 个样点,利用面向对象的分类方法结合目视解译获得,总体分类精度和 Kappa 系数分别为 85.13% 和 0.80^[27],土地利用分为耕地、林地、草地、水体、盐碱地、城乡工矿居民地、流动沙丘、半流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘、戈壁 11 类(图 1)。社会经济统计数据来源于《内蒙古统计年鉴》、“内蒙古自治区国民经济和社会发展统计公报”和《中国粮食年鉴》等。根据研究区范围,参考相关研究^[28-29],利用 ArcGIS 10.4 软件生成 2 km×2 km 网格,基于网格计算乌兰布和沙漠不同时期空间的 ESV。

2 研究方法

2.1 ESV 估算模型

本研究参考谢高地等^[25, 30]提出的“单位面积价值当量因子法”对乌兰布和沙漠 ESV 进行估算。基于内蒙古自治区 1990—2018 年相应统计资料,计算不同时期“1 个标准当量因子的生态系统服务价值量(Ea)”,并对其进行支付意愿系数修正,取 4 期均值作为最终 Ea 值,即 578.12 元/hm²。 Ea 的计算公式如下:

$$Ea = \frac{1}{4} \sum_{t=1990}^{2018} Ea_t \quad (1)$$

$$Ea_t = \frac{1}{7} \times R_t \sum_{i=1}^n \frac{m_{it} q_{it} p_{it}}{M_t} \quad (2)$$

式中, Ea_t 为 t 年 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量; R_t 为 t 年支付意愿系数,计算方法参考林栋等^[31]; i 表示作物种类(内蒙古自治区的主要粮食作物:小麦、玉米、大豆); m 为 t 年该粮食作物的种植面积(hm²), p 为 t 年粮食作物价格(元/kg), q 为 t 年粮食作物单产(kg/hm²), M 为 t 年三种粮食作物总种植面积(hm²); $1/7$ 指没有人力投入的自然生态系统提供的经济价值占现有单位面积耕地提供的食物生产服务经济价值的 $1/7$ 。

以研究区 4 期土地利用数据为基础计算 ESV。考虑研究区土地利用类型,结合谢高地等制定的单位面积生态系统服务价值的基础当量表对生态系统服务价值系数进行修正,其中本文的耕地、林地、草地、盐碱地、水体分别对应二级生态系统分类中的旱地、阔叶林、草甸、裸地、水系,城乡工矿居民地归为裸地^[32],固定沙丘、半固定沙丘、流动沙丘、半流动沙丘、戈壁一并归为荒漠,基于此获得研究区单位面积生态系统服务价值当量表(表 1)。计算研究区 ESV 的公式如下:

$$ESV = \sum_{j=1}^m A_j \sum_{r=1}^n B_{jr} Ea \quad (3)$$

式中, A_j 为第 j 类土地利用类型的面积(hm²); B_{jr} 为第 j 类土地利用类型第 r 种生态系统服务类型单位面积生态系统服务价值当量(表 1)。

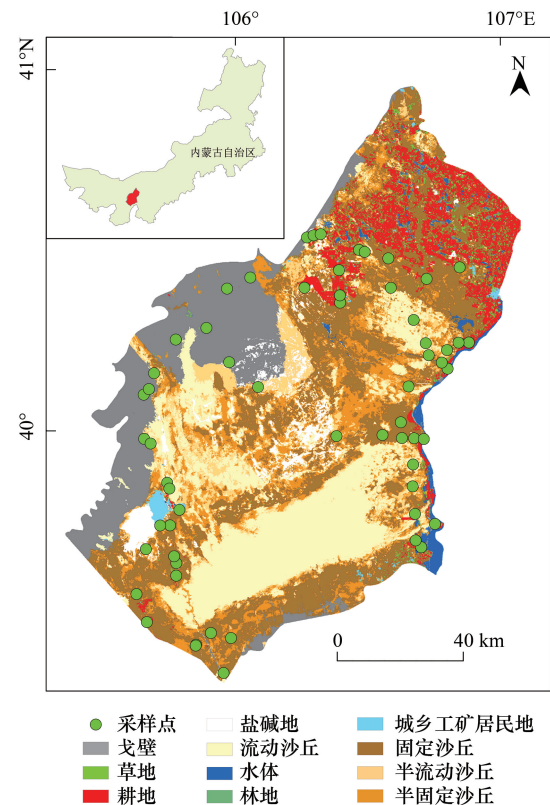


图 1 研究区示意图(土地利用类型为 2018 年数据)

Fig.1 Location of the study area (land use type data is 2018)

表 1 乌兰布和沙漠地区单位面积生态系统服务价值当量

Table 1 Equivalent value of ecosystem services per unit area in Ulan Buh desert

生态系统分类 Classification of ecosystem		供给服务 Provisioning services			调节服务 Regulating services			支持服务 Supporting services			文化服务 Cultural services	
一级分类 First-level class	二级分类 Second-level class	食物生产 Food production	原料生产 Raw material production	水资源供给 Water supply	气体调节 Gas regulation	气候调节 Climate regulation	净化环境 Purification environment	水文调节 Hydrological regulation	土壤保持 Soil conservation	维持养分循环 Nutrient cycling	生物多样性 Biodiversity	美学景观 Aesthetic landscape
农田 Cropland	旱地 Dry land	0.85	0.40	0.02	0.67	0.36	0.10	0.27	1.03	0.12	0.13	0.06
森林 Forest	阔叶林 Broadleaf forest	0.29	0.66	0.34	2.17	6.50	1.93	4.74	2.65	0.20	2.41	1.06
草地 Grassland	草甸 Meadow	0.22	0.33	0.18	1.14	3.02	1.00	2.21	1.39	0.11	1.27	0.56
荒漠 Desert	荒漠 Desert	0.01	0.03	0.02	0.11	0.10	0.31	0.21	0.13	0.01	0.12	0.05
	裸地 Bare land	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.10	0.03	0.02	0.00	0.02	0.01
水域 Water area	水系 River system	0.80	0.23	8.29	0.77	2.29	5.55	102.24	0.93	0.07	2.55	1.89

2.2 热点分析方法

Getis—Ord G_i^* 指数用于识别具有统计显著性的高值(热点)和低值(冷点)的空间聚类,能够识别 ESV 空间变化是否具有高值聚集区(热点区)和低值聚集区(冷点区),以及确定高值区和低值区空间聚集的位置,相关公式参考涂小松等^[28]。

2.3 权衡与协同关系分析方法

采用皮尔逊相关分析法对 1990—2018 年 4 期的 11 种生态系统服务进行时间的权衡与协同关系测度。该方法用相关系数定量描述两变量之间的线性相关程度,相关系数为正值,两变量具有协同(同增或同减)关系;若为负值,则两变量为权衡(此消彼长)关系;其数值大小反映变量之间相关性的强弱。

2.4 ESV 变化指数

为使不同时期 ESV 变化具有可比性,将研究区内 ESV 变化量进行标准化处理,得到 ESV 变化指数:

$$\gamma = \frac{V_{t_2} - V_{t_1}}{V_{t_2}(t_2 - t_1)} \quad (4)$$

式中, γ 为 ESV 变化指数, t_1 、 t_2 分别为不同时期的年份, V_{t_1} 、 V_{t_2} 分别为 t_1 、 t_2 年份的 ESV。

3 结果与分析

3.1 ESV 时空变化

3.1.1 ESV 时间变化

1990—2018 年乌兰布和沙漠 ESV 总量上升 8.91 亿元,增幅 52.32%,其中 1990—2000 年呈下降趋势,2000—2018 年呈上升趋势,2010—2018 年增幅最大。从一级生态系统服务来看,调节服务、支持服务和文化服务的 ESV 随时间变化趋势与总价值一致,增加量依次为 7.25 亿元、0.50 亿元和 0.10 亿元;供给服务呈逐年上升趋势,增幅最大,达 85.04%,增加量为 1.08 亿元。二级生态系统服务中,食物生产、原料生产、气体调节、土壤保持、维持养分循环的 ESV 呈逐期上升趋势,其余生态系统服务与总价值变化趋势一致;水文调节和水源供给 ESV 增量较大分别是 6.72 亿元、1.54 亿元,ESV 增幅最大的 3 类生态系统服务依次为食物生产、水文调节、水源供给,均大于 90.00%(表 2)。

从 1990—2018 年 4 期不同土地利用类型的 ESV 来看:水体和草地先下降后又逐期上升,水体增加 144.50%,草地降低 37.41%;林地、耕地、城乡工矿居民地、固定沙丘、半固定沙丘逐年增加,流动沙丘逐年下降,盐碱地呈波动上升,半流动沙丘呈波动下降,沙漠及戈壁整体变化幅度不大(图 2)。

3.1.2 ESV 空间变化

基于网格单元在空间上统计乌兰布和沙漠 1990—2018 年单位面积的 ESV(图 3),4 期 ESV 空间分布特征较为一致:高值区集中于东部和东北部,低值区集中于中部和西南部。1990—2000 年黄河沿岸 ESV 有所下

降, 吉兰泰镇东北缘低值区范围增大。2000—2010 年沙金套海苏木西南侧低值区范围减小, 乌斯太镇东部出现低值区。2010—2018 年黄河沿岸高值区范围明显增大, 价值增高, 巴彦木仁苏木北部出现一条高值带延伸至敖伦布拉格镇内部; 北部高值区范围扩大; 敖伦布拉格镇北缘由低值区变为高值区; 中部和西南部的低值区范围明显扩大。

表 2 1990—2018 年乌兰布和沙漠地区 ESV/亿元

Table 2 Ecosystem services value of Ulan Buh Desert from 1990 to 2018

年份 Year	供给服务 Provisioning services			小计 Subtotal	调节服务 Regulating services				小计 Subtotal	支持服务 Supporting services			小计 Subtotal	文化服务 Cultural services 美学景观	总计 Total	较上期 变化率 Change rate/%
	食物 生产	原料 生产	水资源 供给		气体 调节	气候 调节	净化 环境	水文 调节		土壤 保持	维持养 分循环	生物 多样性				
1990	0.32	0.38	0.57	1.27	1.21	1.48	2.82	6.77	12.28	1.49	0.12	1.28	2.89	0.58	17.03	—
2000	0.45	0.42	0.41	1.28	1.22	1.25	2.63	4.86	9.95	1.53	0.13	1.15	2.81	0.51	14.55	-14.54
2010	0.52	0.45	0.52	1.49	1.28	1.31	2.68	6.12	11.40	1.62	0.14	1.18	2.95	0.53	16.37	12.51
2018	0.71	0.52	1.11	2.35	1.43	1.58	3.03	13.49	19.53	1.84	0.17	1.38	3.39	0.68	25.94	58.45

3.2 ESV 变化的冷热点分析

为更好地探索乌兰布和沙漠 ESV 变化量在空间上的局部表现, 基于网格单元计算 1990—2000 年、2000—2010 年、2010—2018 年 3 个时期 ESV 变化指数, 利用 ArcGIS 热点分析 (Getis—Ord G_i^*) 工具, 识别 ESV 年际变化的冷、热点区。

1990—2000 年研究区 ESV 变化以冷点区为主, 占总面积的 2.85%, 分布在黄河沿岸和东北部; 热点区占 0.22%。2000—2010 年间冷、热点区面积占比分别为 4.36%、3.88%, 较均匀的分布在东北部和黄河沿岸。2010—2018 年热点区范围明显扩大, 面积占 10.45%, 分布在东部和东北部; 冷点区面积占 4.23%, 主要分布在中部和西南部。3 个时间段的冷热点分析表明, 乌兰布和沙漠 ESV 变化存在空间聚集性, 东北部和东部从以冷点区为主转变为以热点区为主, ESV 空间变化剧烈 (图 4)。

3.3 生态系统服务间的权衡协同关系

1990—2000 年 11 种生态系统服务相关分析显示, 45 组为正相关占 81.82%, 10 组为负相关占 18.18%, 说明此时间段内协同关系是乌兰布和沙漠地区的主导关系。在 45 组协同关系中有 18 组表现为强显著正相关 (相关系数 $R>0.80, P<0.01$); 食物生产与气候调节、净化环境、生物多样性、美学景观呈权衡关系, 原料生产和维持养分循环均与水资源供给、净化环境、水文调节呈权衡关系 ($P<0.01$)。2000—2010 年间不同生态系统服务间均呈协同关系, 在 55 组相关系数中, 有 1 组无显著性, 4 组在 0.05 水平上显著相关, 其余均在 0.01 水平上显著相关, 有 18 组为强协同关系 ($R>0.80$)。2010—2018 年 11 种生态系统服务的 55 组相关系数均在 0.01 水平上呈显著正相关, 有 22 组协同关系较强 ($R>0.80$) (图 5)。

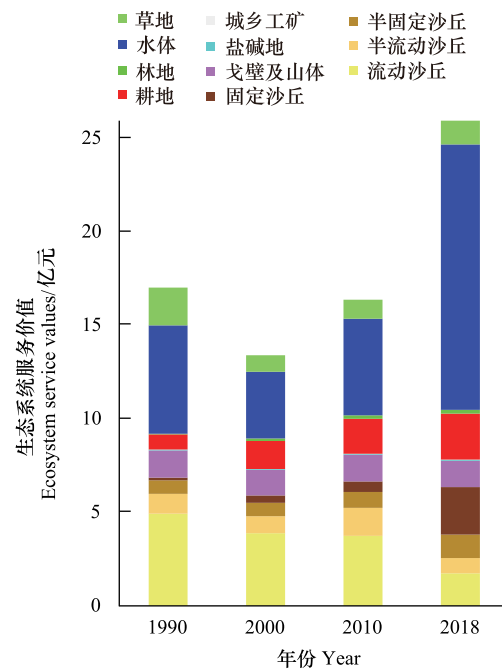


图 2 1990—2018 年不同土地利用类型的生态系统服务价值 (ESV)

Fig.2 Ecosystem service values of different land use types from 1990 to 2018

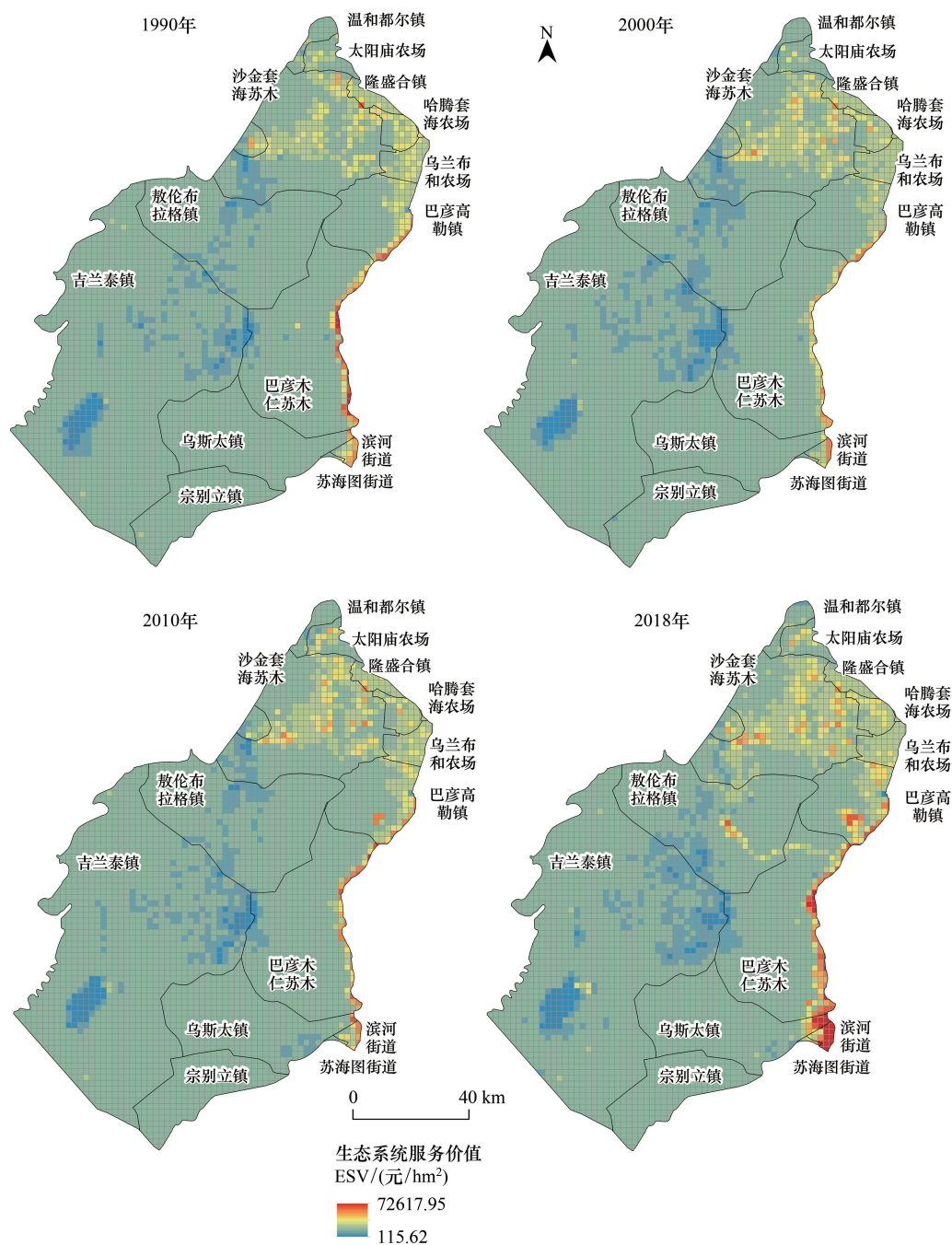


图3 1990—2018年乌兰布和沙漠地区ESV空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem services value in Ulan Buh Desert from 1990 to 2018

4 讨论

4.1 乌兰布和沙漠地区ESV时空变化及其驱动因素

乌兰布和沙漠ESV以调节和支持服务为主,供给服务和文化服务的价值相对较低,与我国干旱区其他研究的ESV组成结构相比较为一致(表3)。但从时间变化来看,1990—2018年研究区ESV总量以2000年为拐点先下降后上升,这与王凤歌^[27]对乌兰布和沙漠生态系统服务物质质量的评估结果相似;在空间上ESV呈东部和东北部高,中部和西南部低的分布特征,且ESV变化具有一定的空间聚集性,这可能与这些地区土地利

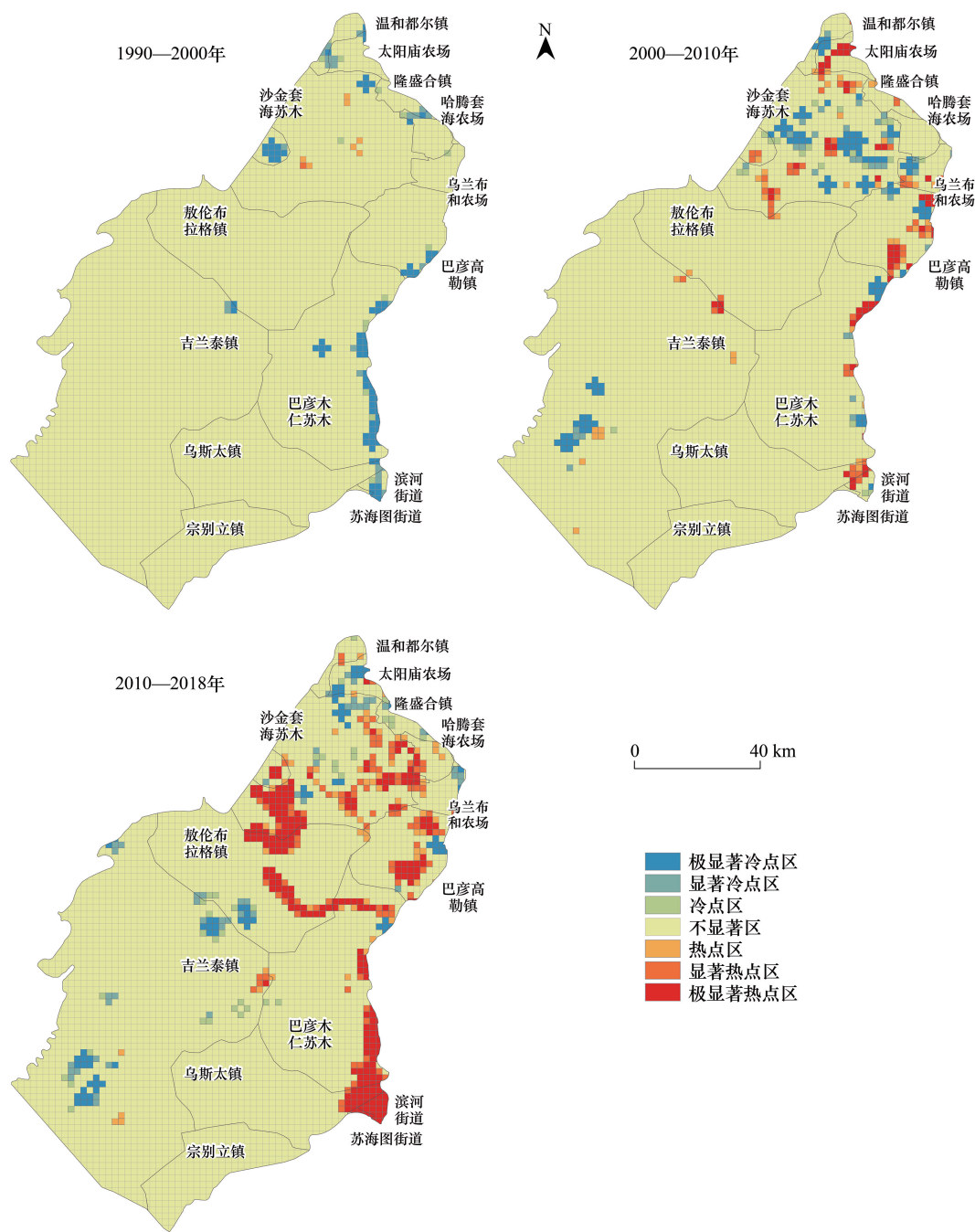


图4 乌兰布和沙漠地区 1990—2018 年 ESV 变化热点空间分布

Fig.4 Spatial distribution of hot spots in changes of ecosystem service value in Ulan Buh Desert from 1990 to 2018

冷(热)点区表示 ESV 减少(增加)且聚集;极显著冷(热)点代表 99% 的置信水平;显著冷(热)点代表 95% 的置信水平;冷(热)点代表 90% 的置信水平

用变化剧烈有关。

土地利用变化是乌兰布和沙漠 ESV 变化的直接原因。其东北部和东部分别与河套平原和黄河相邻,而中部和西南部则主要是沙漠和盐碱地分布区。1990—2000 年间主要是研究区东部水域面积减少和东北部草地转变为耕地导致价值损失;2000—2010 年 ESV 空间分布变化不大,但冷、热点区均有所增加,热点区是由沙漠和盐碱地向耕地、林地、草地及水体等类型转变形成,冷点区主要是由草地和水体向耕地和沙漠转变导致。2010—2018 年东部 ESV 增加主要是沙漠转变为水体导致,其次是因为沙漠中开发大量耕地和草地。中部和

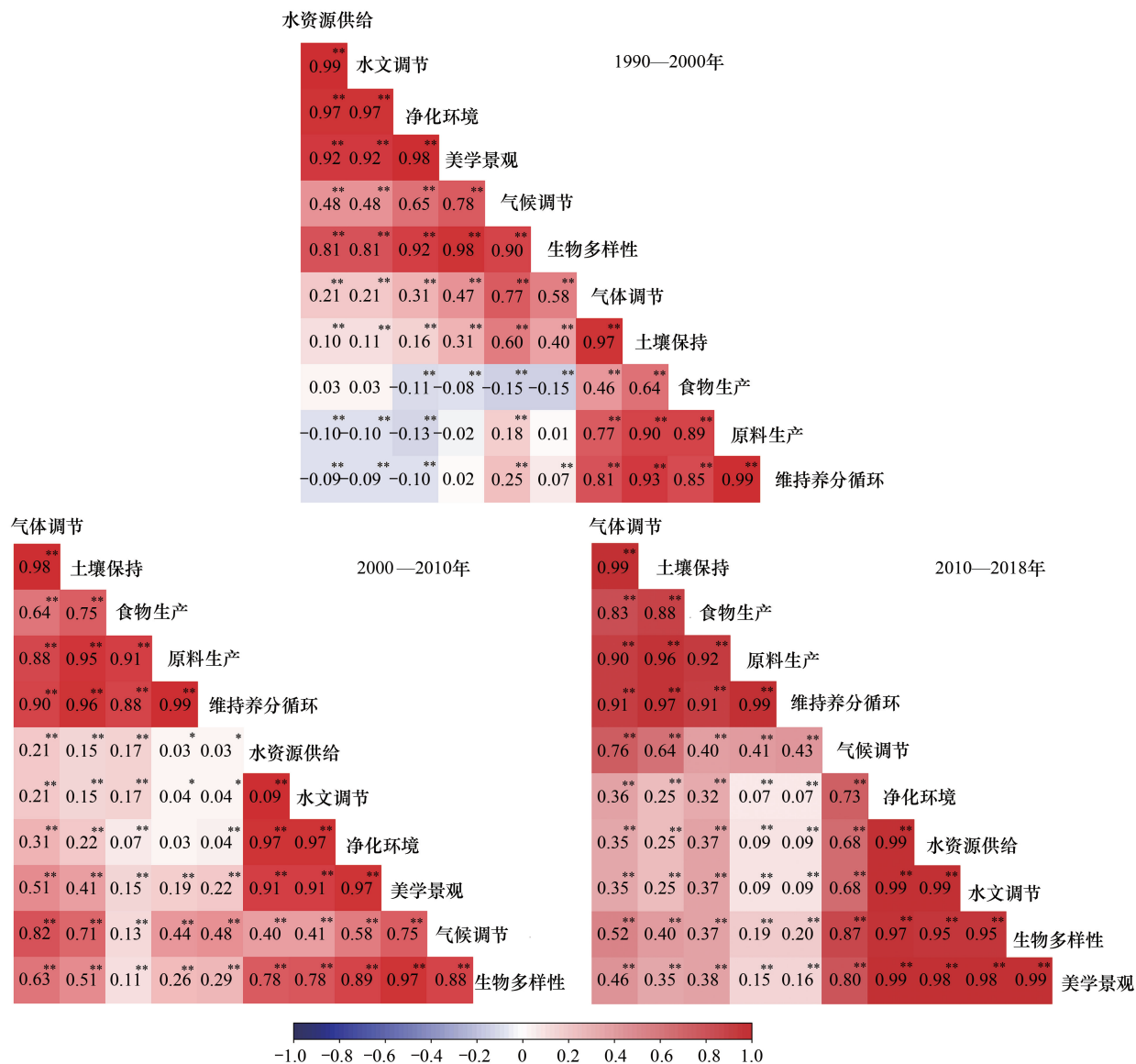


图5 乌兰布和沙漠地区 1990—2018 年生态系统服务间关系

Fig.5 Relationship between ecosystem services in Ulan Buh Desert from 1990 to 2018

** 表示两种生态系统服务在 0.01 水平上显著相关; * 表示两种生态系统服务在 0.05 水平上显著相关

西南部冷点区分别可能是自然盐积过程使盐碱地扩大^[35]和草地及林地等变为盐碱地导致。不同政策实施对当地 ESV 变化有一定影响。1990—2000 年间国家实行农业综合开发政策,农产品价格上升,引起大规模林地和草地开垦^[36]导致 ESV 下降。2000—2018 年研究区 ESV 逐渐增加,与卢周扬帆等^[37]对阿拉善干旱荒漠区的研究一致,这可能是 2000 年以来国家陆续实施天然林保护、“三北”防护林工程、“西部大开发战略”和“退耕还林还草战略”等政策^[22,35]使研究区耕地、林地和水体面积增加,促使其价值上升,如 2012 年乌兰布和生态沙产业示范区^[38]的建设和 2010 年以来实施治理黄河水利工程^[39]中形成的科泊尔滩防凌分洪渠均对区域 ESV 增加有所贡献。同时,分析乌兰布和沙漠近 30 年降水量和气温发现气候变化并不明显(图 6),也间接表明人为因素是驱动 ESV 变化的主要原因。

表 3 干旱区其他区域 ESV 构成/亿元
Table 3 The ecosystem service value composition of other study areas in arid region

地区 Region	面积/km ² Area	供给服务 Provisioning services	调节服务 Regulating services	支持服务 Supporting services	文化服务 Culture services	总价值 Total value
乌兰布和沙漠 Ulan Buh desert	140.00×10 ²	1.59	13.29	3.01	0.57	18.47
沙坡头保护区 Shapotou reserve ^[19]	140.43	0.13	1.65	0.16	—	1.94
库布齐沙漠 Kubuqi desert ^[22]	188.00×10 ²	24.33	215.02	129.11	13.21	381.67
中国荒漠 China's desert ^[33]	577.10×10 ³	851.73	759.67	640.00	32.86	2284.39
内蒙古自治区 Inner Mongolia ^[34]	118.30×10 ⁵	859.59	12213.89	3624.46	896.29	17594.22

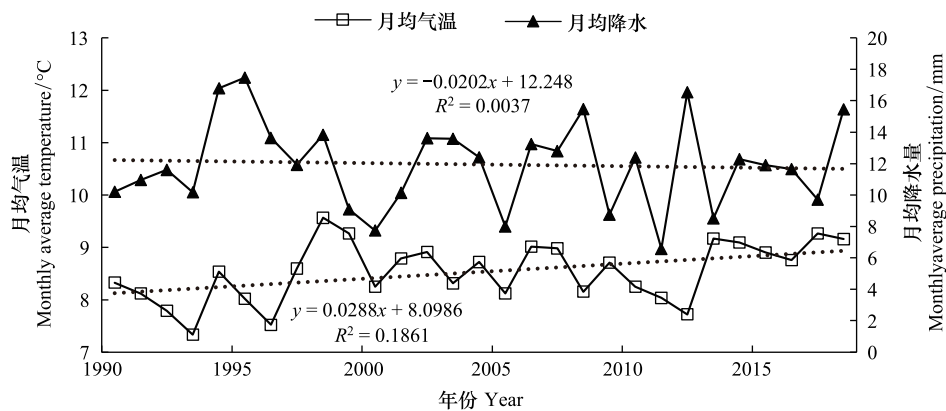


图 6 乌兰布和沙漠地区 1990—2018 年每月气温和降水变化趋势
Fig.6 Trend of monthly average temperature and precipitation in Ulan Buh Desert from 1990 to 2018

4.2 乌兰布和沙漠地区生态系统服务权衡协同关系变化分析

生态系统服务权衡与协同关系对于制定区域经济发展与生态保护“双赢”的政策措施,实现生态系统服务可持续供给具有重要的支撑作用。生态系统服务间的关系可能随时间变化而改变^[40],若仅对某个时间点或时间段静态研究可能会导致误判,因此本文对长时间尺度进行分段研究。较多研究发现供给服务与其他生态系统服务存在权衡关系^[41-43],本文 1990—2000 年期间的结果与之一致,可能是食物及原料生产用地与其他用地(特别是草地、水体)存在一定竞争关系^[43],导致了这种此消彼长的权衡关系。而在 2000—2018 年的 2 个时期中,所有生态系统服务间均演变为协同关系,这与郑德凤等^[44]研究结果相似,且不同类型的生态系统服务间皆存在强协同关系,可能是生态恢复政策起了一定的积极作用^[45],但生态系统服务权衡协同关系的驱动机制复杂多样,不可一概而论。今后应对长时间不同空间尺度的生态系统服务间关系进行深入研究和分析。

5 结论

通过对乌兰布和沙漠地区 1990—2018 年 ESV 时空动态研究主要得出以下结论:

- (1) 1990—2018 年乌兰布和沙漠地区 ESV 先下降后上升,由 17.03 亿元增加至 25.94 亿元;但目前 ESV 仍以水体、沙漠和耕地为主,区域生态安全存在一定的不稳定性。
- (2) 乌兰布和沙漠地区不同时期 ESV 呈东部和东北部高,中部和西南部低的趋势;ESV 热点区分布在东部和东北部的部分生态恢复区,但在吉兰泰盐湖附近存在冷点区扩展现象。
- (3) 乌兰布和沙漠地区生态系统服务间权衡协同关系具有时间动态性,1990—2000 年间协同关系占 81.82%,权衡关系占 18.18%,2000—2018 年生态系统服务间都变为协同关系,且协同度随时间变化有所

增强。

参考文献 (References):

- [1] 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. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [3] 张永民, 赵士洞. 全球荒漠化的现状、未来情景及防治对策. *地球科学进展*, 2008, 23(3): 306-311.
- [4] Xie G D, Zhen L, Lu C X, Xiao Y, Li W H. Applying value transfer method for eco-service valuation in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(1): 51-59.
- [5] 石晓丽, 王卫. 生态系统功能价值综合评估方法与应用——以河北省康保县为例. *生态学报*, 2008, 28(8): 3998-4006.
- [6] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 冯少茹. 1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制. *地理学报*, 2019, 74(9): 1904-1920.
- [7] 丁雪, 雷国平, 许端阳, 李达净, 王子玉. 1981—2010 年内蒙古沙漠化演变对区域生态系统服务价值的影响. *水土保持研究*, 2018, 25(1): 298-303.
- [8] Taylor N T, Davis K M, Abad H, McClung M R, Moran M D. Ecosystem services of the Big Bend region of the Chihuahuan Desert. *Ecosystem Services*, 2017, 27: 48-57.
- [9] 黄湘, 李卫红. 荒漠生态系统服务功能及其价值研究. *环境科学与管理*, 2006, 31(7): 64-70, 73-73.
- [10] 曹燕丽, 崔向慧, 卢琦, 李新荣, 肖洪浪, 王学全. 荒漠生态系统定位观测方法与指标体系探讨. *中国沙漠*, 2006, 26(4): 619-624.
- [11] Chen S R, Feng Y J, Tong X H, Liu S, Xie H, Gao C, Lei Z. Modeling ESV losses caused by urban expansion using cellular automata and geographically weighted regression. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 136509.
- [12] 周渝, 邓伟, 刘婷, 齐静, 艾婕, 李寄聪. 重庆都市区生态系统服务价值时空演变及其驱动力. *水土保持研究*, 2020, 27(1): 249-256.
- [13] Barua S K, Boscolo M, Animon I. Valuing forest-based ecosystem services in Bangladesh: implications for research and policies. *Ecosystem Services*, 2020, 42: 101069.
- [14] Yang Q, Liu G Y, Giannetti B F, Agostinho F, Almeida C M V B, Casazza M. Emergy-based ecosystem services valuation and classification management applied to China's grasslands. *Ecosystem Services*, 2020, 42: 101073.
- [15] 茹克亚·萨吾提, 阿斯娅·曼力克, 李虎, 尼加提·卡斯木, 郑逢令, 李学森, 热娜·阿不都克力木, 亚森·喀哈尔. 乌鲁木齐山地草地生态系统服务价值变化评估——基于遥感与 GIS. *生态学报*, 2020, 40(2): 522-539.
- [16] Zhou L L, Guan D J, Huang X Y, Yuan X Z, Zhang M J. Evaluation of the cultural ecosystem services of wetland park. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106286.
- [17] 荔琢, 蒋卫国, 王文杰, 吕金霞, 邓越. 基于生态系统服务价值的京津冀城市群湿地主导服务功能研究. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1654-1665.
- [18] 任鸿昌, 孙景梅, 祝令辉, 孟庆华. 西部地区荒漠生态系统服务功能价值评估. *林业资源管理*, 2007, (6): 67-69, 95-95.
- [19] 王亚慧, 王文瑞, 王伟伟. 中小尺度荒漠生态系统服务研究及其价值评价——以宁夏沙坡头保护区为例. *宁夏大学学报: 自然科学版*, 2016, 37(1): 106-111.
- [20] 李青, 王娇, 李博, 徐崇志. 荒漠生态系统服务功能货币化评估——以塔里木河干流胡杨林为例. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(7): 47-52.
- [21] 杨春利, 白永平. 干旱地区绿洲生态系统服务价值功能的评估——以石羊河下游民勤绿洲为例. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(5): 230-234.
- [22] 赵敏敏, 周立华, 王思源. 生态政策对库布齐沙漠土地利用格局及生态系统服务价值的影响. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 252-258.
- [23] 肖生春, 肖洪浪, 卢琦, 李双, 魏恒. 中国沙漠(地)生态系统水文调控功能及其服务价值评估. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1568-1576.
- [24] 刘博, 张宇清, 吴斌, 吴秀芹, 秦树高, 张举涛. 我国荒漠生态系统动物物种多样性保护价值估算. *中国水土保持科学*, 2015, 13(2): 92-98.
- [25] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [26] 杨志勇, 陈新闯, 郭建英, 董智, 李锦荣, 温挨树, 田世民. 乌兰布和沙漠不同土地利用类型粒度特征分析. *中国水土保持*, 2015, (7): 50-53.
- [27] 王凤歌. 乌兰布和沙漠生态系统服务时空动态与权衡分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [28] 涂小松, 龙花楼. 2000-2010 年鄱阳湖地区生态系统服务价值空间格局及其动态演化. *资源科学*, 2015, 37(12): 2451-2460.

- [29] 李潇, 吴克宁, 刘亚男, 冯喆, 谢家麟. 基于生态系统服务的山水林田湖草生态保护修复研究——以南太行地区鹤山区为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8806-8816.
- [30] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [31] 林栋, 马晖玲, 任正超, 李元恒. 基于 LUCC 的兰州城市生态系统服务价值动态分析. 生态科学, 2016, 35(2): 134-142.
- [32] 刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系. 生态学报, 2018, 38(13): 4609-4624.
- [33] 崔向慧. 陆地生态系统服务功能及其价值评估——以中国荒漠生态系统为例[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [34] 李佳鸣, 冯长春. 基于土地利用变化的生态系统服务价值及其改善效果研究——以内蒙古自治区为例. 生态学报, 2019, 39(13): 4741-4750.
- [35] 贾宝全, 陈利军, 杨维西, 李梦仙, 屠志方. 乌兰布和沙漠地区土地利用动态变化分析. 干旱区研究, 2007, 24(5): 610-617.
- [36] 郝玉光. 乌兰布和沙漠东北部绿洲化过程生态效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [37] 卢周扬帆, 许端阳, 张绪教, 赵志荣, 张晓宇. 阿拉善干旱荒漠区土地利用变化对生态系统服务的影响. 水土保持研究, 2019, 26(6): 296-302.
- [38] 郭质冰. 乌兰布和沙漠生态沙产业区水资源承载力评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [39] 闫煦, 李赫, 黎小艳. 内蒙古干旱地区生态沙产业园区规划实践研究——以乌兰布和生态沙产业示范区为例//规划 60 年: 成就与挑战——2016 中国城市规划年会论文集. 沈阳: 中国城市规划学会, 沈阳市人民政府, 2016: 184-196.
- [40] 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.
- [41] 李晶, 李红艳, 张良. 关中——天水经济区生态系统服务权衡与协同关系. 生态学报, 2016, 36(10): 3053-3062.
- [42] 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.
- [43] 王川, 刘春芳, 乌亚汗, 刘宥延. 黄土丘陵区生态系统服务空间格局及权衡与协同关系——以榆中县为例. 生态学杂志, 2019, 38(2): 521-531.
- [44] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 徐文瑾, 王燕燕, 王辉. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡——协同关系. 地理研究, 2020, 39(1): 64-78.
- [45] 周志强, 黎明, 侯建国, 李剑凌, 刘彤. 沙漠前沿不同植被恢复模式的生态服务功能差异. 生态学报, 2011, 31(10): 2797-2804.