



耿鑫智,赵媛媛,包岩峰,萨仁高娃. 农牧交错带典型沙区人地系统可持续性综合评价[J]. 中国农业大学学报,2025,30(02):203-215.

GENG Xinzhi, ZHAO Yuanyuan, BAO Yanfeng, Sarengaowa. A comprehensive evaluation of human-earth system sustainability in the typical sandy areas of agro-pastoral transitional zone[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(02):203-215.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.02.18

农牧交错带典型沙区人地系统可持续性综合评价

耿鑫智¹ 赵媛媛^{1*} 包岩峰² 萨仁高娃¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院/水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083;

2. 自然资源部 国土整治中心, 北京 100035)

摘 要 为评价农牧交错带典型沙区人地系统可持续性,选择内蒙古乌审旗(毛乌素沙地)、正蓝旗(浑善达克沙地)和奈曼旗(科尔沁沙地)为研究区,构建包括经济发展、社会进步和生态环境3个方面22个具体指标的评价指标体系,并采用全排列多边形综合图示法进行评价。结果表明:1)毛乌素沙地乌审旗人地系统综合可持续性水平最高。2021年乌审旗综合可持续性为Ⅱ级良好水平(0.58),奈曼旗和正蓝旗均为Ⅲ级一般水平(分别为0.31和0.30);2)2015—2021年区域可持续性均表现出增强趋势,乌审旗和正蓝旗提升速度更快。乌审旗同期综合可持续性由Ⅲ级一般水平提升到Ⅱ级良好水平,正蓝旗由Ⅳ级较差水平提升到Ⅲ级一般水平,奈曼旗稳定在Ⅲ级一般水平,综合可持续性指数分别提升了48.72%、47.62%和20%。3)三地区人地系统可持续性改善均是生态环境维度贡献最大。乌审旗、正蓝旗和奈曼旗生态环境指数分别提高58.3%、78.3%和32.4%;社会进步指数提高比例为14.3%~23.1%;经济发展指数仅乌审旗有所提高。综上,沙区人地系统可持续性提升与区域对生态环境保护与治理密切相关,但除乌审旗2018—2021年综合可持续性处于Ⅱ级良好水平外,奈曼旗与正蓝旗2015—2021年、乌审旗2015—2017年综合可持续性都处于Ⅲ级一般水平,农牧交错带沙区可持续发展面临挑战,应针对不同沙区发展特征,有侧重地开展调整与治理。

关键词 土地沙化;可持续性;全排列多边形综合图示法;农牧交错带;人地系统

中图分类号 X171.1

文章编号 1007-4333(2025)02-0203-13

文献标志码 A

A comprehensive evaluation of human-earth system sustainability in the typical sandy areas of agro-pastoral transitional zone

GENG Xinzhi¹, ZHAO Yuanyuan^{1*}, BAO Yanfeng², Sarengaowa¹

(1. College of Soil and Water Conservation/Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract The purpose of this study is to evaluate the sustainability of human-earth system in the typical sandy areas of agro-pastoral transitional zone, and provide scientific basis for sustainable management of sandy areas. Wushen Banner in the Mu Us Sandy Land, Zhenglan Banner in the Otindag Sandy Land, and the Naiman Banner in the Horqin Sandy Land in the Inner Mongolia are selected as the study areas. An evaluation index system including 23 specific indicators in three aspects of economic development, social

收稿日期: 2024-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23A2014, M2242005);中央高校基本科研业务费专项资金(PYX202324, PTYX202325)

第一作者: 耿鑫智(ORCID:0009-0003-0234-3314),硕士研究生, E-mail: gengxinzhi0716@163.com

通讯作者: 赵媛媛(ORCID:0000-0002-2986-2769),教授,主要从事荒漠化防治研究, E-mail: yuanyuan0402@bjfu.edu.cn

progress and ecological environment are constructed. The results indicated that: 1) The comprehensive sustainability level of human-earth system in Wushen Banner was the highest. In 2021, the comprehensive sustainability of Wushen Banner was grade II good level (0.58), while both Naiman Banner and Zhenglan Banner were grade III general level (0.31, 0.30). 2) From 2015 to 2021. The regional sustainability exhibited an increasing trend, and the sustainability of both Wushen Banner and Zhenglan Banner increased faster. The comprehensive sustainability in Wushen Banner in the same period increased from grade III general level to grade II good level, and it was increased from grade IV poor level to grade III general level in Zhenglan Banner and was stable at the grade III general level in Naiman Banner. The comprehensive sustainability index in the three areas increased by 48.72%, 47.62% and 20%, respectively. 3) In the three regions, the ecological environment dimension contributes the most to the sustainability improvement of the human-earth system. The ecological environment indexes of Wushen Banner, Zhenglan Banner and Naiman Banner increased by 58.3%, 78.3% and 32.4%, respectively. The social progress index increased by 14.3% to 23.1%. Only the economic development index of Wushen Banner increased. In conclusion, the sustainability improvement of human-earth system in sandy areas is closely related to the ecological environment protection and management of the ecological environment in the region. However, only the comprehensive sustainability of Wushen Banner from 2018 to 2021 is at a good level of level II, the comprehensive sustainability of Naiman Banner and Zhenglan Banner from 2015 to 2021 and Wushen Banner from 2015 to 2017 are at a general level of level III. The sustainable development of the sandy areas in the agro-pasture ecotone is facing challenges. It is suggested the adjustment and management should be carried out according to the development characteristics of the sandy areas.

Keywords land desertification; sustainability assessment; entire-array-polygon indicator method; agro-pastoral transitional zone; human-earth system

北方农牧交错带作为我国东部农业区与西部牧业区之间的过渡地带,是我国重要的生态屏障。该地区自然条件资源的多样性、脆弱性以及农业与牧业共存的特点,使其对全球气候波动和不合理的人类活动反应非常敏感,是我国荒漠化扩展最快、危害最严重的地区之一^[1]。毛乌素沙地、浑善达克沙地和科尔沁沙地均位于农牧交错带,是我国土地沙化发展的典型地区和防沙治沙的前沿阵地,打好科尔沁、浑善达克两大沙地“歼灭战”也是“三北”工程的核心任务^[2-3]。随着生态建设力度的加大,2000年以来区域沙化趋势有所逆转,但由于社会经济发展压力不断增加,区域发展的可持续性仍面临严峻挑战^[4]。开展农牧交错带典型沙区人地系统可持续性评价对于实现沙区可持续健康发展具有重要意义。

人地系统研究自然环境与人为因素的相互作用,是现代地理学研究的重要内容之一^[5]。人地系统可持续性评价理论基础为可持续性科学,其强调社会进步、经济发展和生态环境美好的全面可持续性。联合国可持续发展峰会于2015年提出的人类未来发展17项可持续发展目标(Sustainable Development Goals),也充分体现了这3个方面可持续发展的重要性^[6]。人地系统可持续评价的关键在于科学构建指

标框架和选择评价方法。人地系统可持续评价指标框架主要包括压力—响应模式^[7]、基于经济的投入—产出模式^[8]、人类—生态系统福利模式^[9]、社会—经济—环境三分量模式^[10]等。人地系统可持续评价的评价方法包括层次分析法^[11]、主成分分析法^[12]、生态足迹法^[8]、全排列多边形综合图示法^[13-14]等。其中,全排列多边形综合图示法将传统的加权法改为多维乘法,不需要确定指标权重,体现了系统整合原理。该方法既能表征单一指标,又能体现综合指数,还能将评价结果动态显示,广泛应用于生态城市、资源区等区域可持续性的综合评价。

我国农牧交错带地区人地系统可持续性发展已经引起广泛关注。刘孟竹等^[15]研究表明中国北方农牧交错带2000—2018年土地利用变化程度较为剧烈,其中林地、建设用地显著扩张;草地与耕地明显减少,且两者之间流转面积最多。邱嘉琦等^[16]量化了以北方农牧交错带的核心区域——内蒙古中西部地区2000—2018年关键生态系统服务,研究表明净初级生产力、土壤水蚀控制服务、产水量及三层土壤含水量在东部较高,防风固沙服务在南部和西部较高。王鑫等^[17]运用能值方法分析农牧交错带内乌兰察布市生态经济系统可持续发展状况,结果表明:2011—

2016年乌兰察布市能值可持续发展指标 >1 ,生态经济系统发展是可持续的;2017—2020年则 <1 ,为不可持续状态。崔潇等^[4]研究表明2000—2020年,北方农牧交错带人地系统发展水平呈现上升性和空间非均衡性,人地系统耦合度基本处于高水平耦合阶段,阻碍人地系统协调水平提升的主要因素为乡村人均草地面积、人均GDP和乡村人均肉产量。由此可见,对于农牧交错带土地利用/覆盖变化、生态系统服务、人地系统协调等已有了较深入的研究,然而,针对典型脆弱区——沙区人地系统可持续性的研究还鲜见报道。同时,由于农牧交错带是贯穿我国东北和西南部的一条狭长地带,面积广阔,东中西部自然环境复杂,社会经济发展差异大,明晰人地系统可持续性区

域差异,对于农牧交错带可持续管理十分重要。

因此,本研究拟以北方农牧交错带典型沙区为研究区域,根据其土地沙化及其对可持续性影响的特征,从经济发展、社会进步和生态环境3个方面建立人地系统可持续性评价指标体系,并采用全排列多边形综合图示法对研究区2015—2021年人地系统可持续性进行综合评估和对比分析,以期对沙区可持续性管理提供科学依据。

1 研究区概况

选择位于农牧交错带西部、中部和东部的乌审旗、正蓝旗和奈曼旗为研究区,研究区区位详见图1,研究区沙地类型分布详见图2。

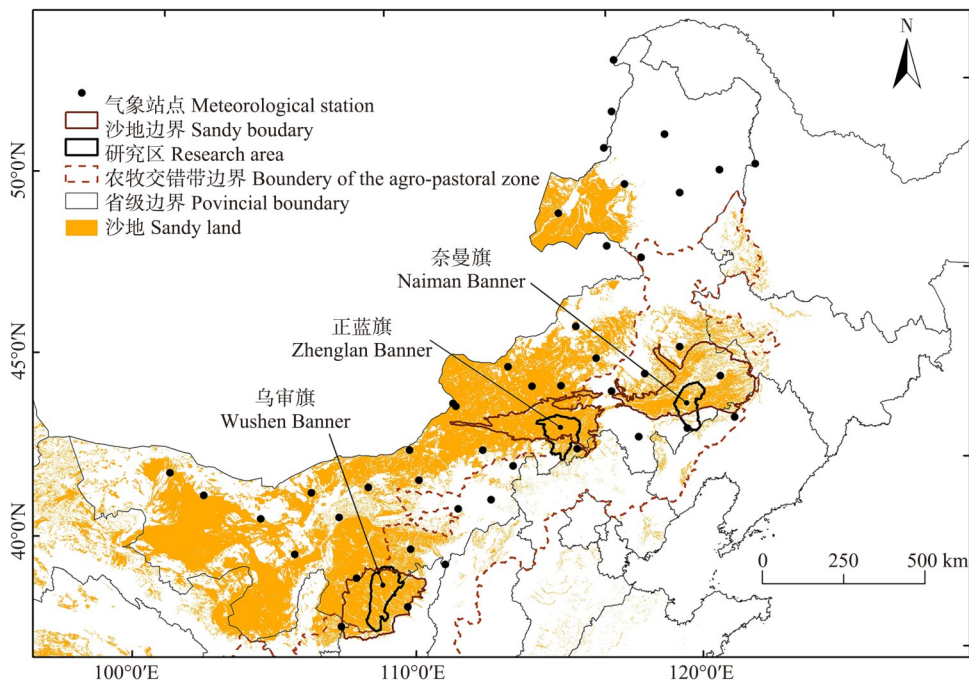


图1 乌审旗、正蓝旗、奈曼旗研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area in Wushen, Zhenglan and Naiman

乌审旗($108^{\circ}17' \sim 109^{\circ}40' E$, $37^{\circ}38' \sim 39^{\circ}23' N$)位于毛乌素沙地腹地(图2(a)),鄂尔多斯市西南部,地势由西北向东南倾斜,平均海拔1300 m左右,该区域是我国比较典型的中温带半干旱区大陆性季风气候,年降水量约300 mm,年均温度在 $8^{\circ}C$ 左右,植被类型主要为沙生植被,此外还有草甸植被、沼泽植被、隐域性植被等^[18]。统计公报显示,2023年全旗完成地区生产总值501.49亿元,3次产业增加值比例为5.1:75.7:19.2,年末全旗户籍人

口为118172人。其地区生产总值在内蒙古排名第6,户籍人口数排名第59。

正蓝旗($114^{\circ}55' \sim 116^{\circ}38' E$, $41^{\circ}46' \sim 43^{\circ}7' N$)位于浑善达克沙地腹地(图2(b)),锡林郭勒盟东南边缘,地势东高西低,海拔1200~1600 m,属于旱半干旱中温带大陆性季风气候,年降雨量360 mm,年均温 $2.8^{\circ}C$ 。典型地带性土壤主要是栗钙土,非地带性土壤主要是风沙土以及草甸土和沼泽土等,植被组成上具有沙地草原的典型特征^[19]。统计公

报显示,2023年全旗完成地区生产总值73.8亿元,3次产业增加值比例为15.7:52.7:31.6,年末全旗户籍人口为83 508人。其地区生产总值在内蒙古排名第63,户籍人口数排名第70。

奈曼旗($120^{\circ}19' \sim 121^{\circ}35' \text{E}$, $42^{\circ}14' \sim 43^{\circ}32' \text{N}$)位于科尔沁沙地腹地(图2(c)),通辽市西南部,地势西高东低、南北隆起,海拔200~270 m,气候属于北温带大陆性季风干旱气候。年平均降水量354.3

mm,年平均气温 7.0°C ,土壤类型为地带性的栗钙土和非地带性的风沙土,但由于沙漠化的影响,非地带性风沙土分布面积最大。自然植被类型以灌木、半灌木和疏林为主^[20]。统计公报显示,2023年全旗完成地区生产总值146.01亿元,3次产业增加值比例为33.6:19.7:46.7,年末全旗户籍人口为443 375人。其地区生产总值在内蒙古排名第32,户籍人口数排名第7。

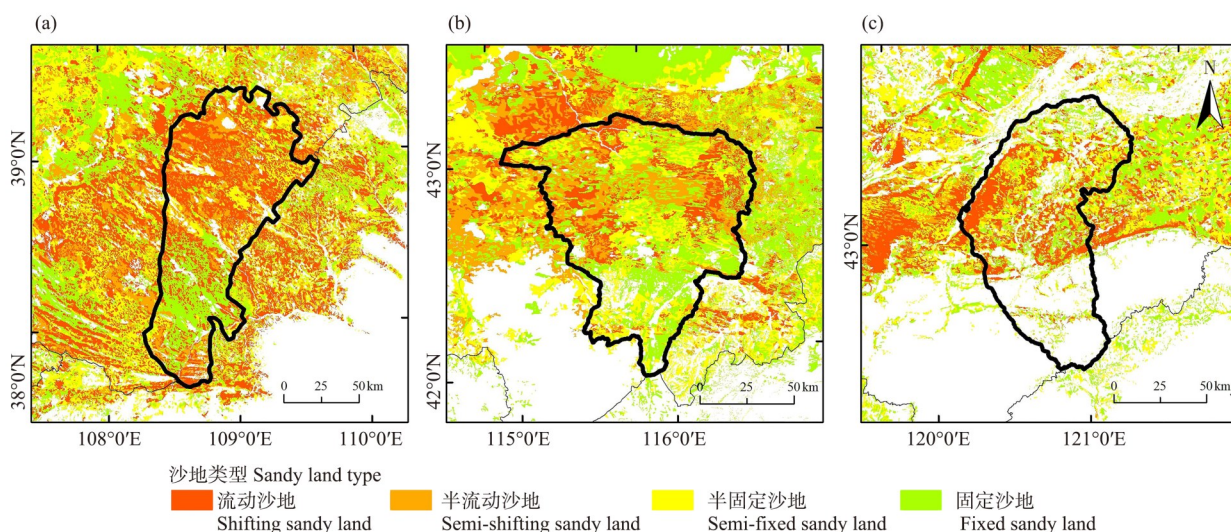


图2 乌审旗(a)、正蓝旗(b)、奈曼旗(c)研究区沙地类型分布

Fig. 2 Distribution of sand land types in Wushen (a), Zhenglan (b) and Naiman (c)

2 研究方法

2.1 指标体系及数据来源

沙区可持续发展的主要内容是减轻沙化程度,在现有条件下引导人类活动发生改变或适应脆弱的自然条件,达到发展经济、促进社会进步的目的^[21]。该研究区位于沙地腹地,且为行政区县,具有双重属性,参考已有研究的城乡可持续评价体系^[22-24],结合沙区特征,依据科学性、独立性、客观性和数据易获得性等原则,从经济发展、社会进步和生态环境3方面选取22项指标。

经济发展指标包括:人均生产总值、人均地方财政收入、人均固定资产投资、第二产业比重、第三产业比重、人均工业产值、人均社会消费品零售总额、全体居民人均可支配收入8个指标,数据来源于《2015—2021年内蒙古统计年鉴》^[25]《2015—2021年中国县域统计年鉴(县市卷)》^[26]和各旗县国民经济和社会发展统计公报。

社会进步指标包括:总人口、人口密度、每万人拥有普通中学学校数、每万人拥有卫生技术人员数、人均公路里程、人均道路面积6个指标,数据来源于2015—2021年《内蒙古统计年鉴》^[25]2015—2021年《中国县城建设统计年鉴》^[27]和各旗县国民经济和社会发展统计公报。

生态环境指标包括:污水处理率、人均公园绿地面积、绿地率、人均日生活用水量、生活垃圾无害化处理率、沙尘天气日数、沙化土地比例、人工造林面积8个指标。其中,污水处理率、人均公园绿地面积、人均日生活用水量、生活垃圾无害化处理率指标数据来源于2015—2021年《中国县城建设统计年鉴》^[27];绿地率与人工造林面积指标数据来源于2015—2021年《中国林业和草原统计年鉴》^[28]。沙尘天气日数指标数据来源于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)下设的国家环境信息中心(National Centers for Environmental Information,

NCEI)中气象观测站点(图1)的逐日平均能见度数据,统计了内蒙古各气象站点能见度<10 km的日数作为沙尘天气日数,采用克里金法进行空间插值,空间分辨率为1 km;利用分区统计工具计算各旗县区域内均值作为研究区沙尘天气日数。沙化土地比例指标数据来源于MOD13A3数据集逐月归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)栅格数据,空间分辨率为1 km,利用最大合成法得到逐年的NDVI,并反演获取植被盖度,将植被盖度>70%定义为非沙化土地,<70%为沙化土地,统计获取研究区沙化土地比例^[29]。

2.2 人地系统可持续性评估方法

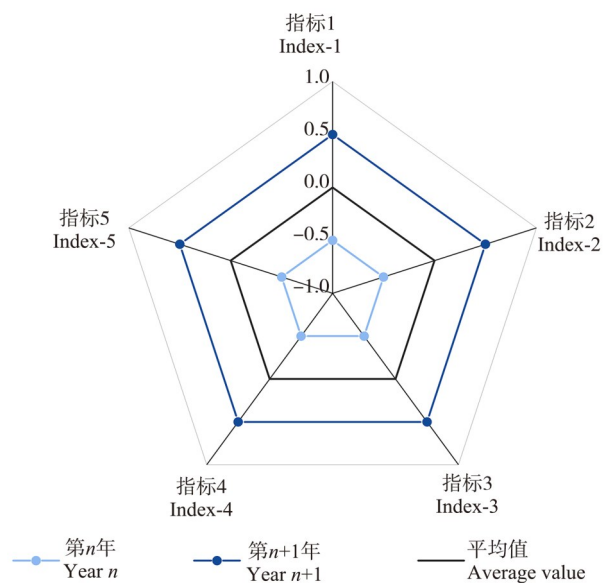
采用全排列多边形综合图示法来评价区域的可持续性。全排列多边形综合图示法是一种简单、直观、有效的评价方法,能够避免其他方法确定权重时的主观性,且引入几何图形面积和形状指数公式,能够实现沙区可持续性评价可视化表达的集成。全排列多边形图示指标法依据合理性等原则选取多个评价指标,对选取的多个指标进行双曲线标准化,标准化值参与全排列多边形综合指数测算,综合指数越大,评价结果越优。目前在可持续发展评价、生态和环境评价等领域,全排列多边形综合图示法被广泛应用^[30]。

该方法是以 n 个评价指标标准化值的上限值1为半径构成一个中心 n 边形,各指标值连线组成不规则 n 边形,综合指数定义为不规则 n 边形与中心 n 边形面积的比值。首先采用双曲线标准化函数对指标进行处理,标准化公式如下:

$$Q_i = \frac{(U_i - L_i)(X_i - T_i)}{(U_i + L_i - 2T_i)X_i + U_iT_i + L_iT_i - 2 \cdot U_iL_i} \quad (1)$$

式中: Q_i 为第 i 个三级指标的标准化值; X 为各个三级指标原始值; U 、 L 和 T 分别为指标 X 的上限、下限和临界值。其中, n 个指标可以作出 n 个顶点为 $Q_i=1$,中心点为 $Q_i=-1$ 的中心正 n 边形,中心点到顶点的距离为各指标标准化值所在区间,而 $Q_i=0$ ($X_i=T$)时构成的多边形为指标的临界区,指标标准化值小于临界区为负,大于为正,全排列多边形综合图示法示意图如图3所示。

由于内蒙古各旗县经济发展、生态建设水平不同,为获得更大的数据样本量,本研究将2015—



图中理想最大值标准化后为1,理想最小值标准化后为-1,临界值标准化后为0。

The graph is normalized to 1 for the ideal maximum value, to -1 for the ideal minimum value, and to 0 for the critical value.

图3 全排列多边形综合图示法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of entire-array-polygon indicator method

2021年内蒙古所有旗县的各个单项指标值从小到大进行排列,依次选取最小值、均值、最大值作为相应指标的下限值、临界阈值和上限值,选取均值作为临界阈值,可以保证阈值两侧数据分布的均衡性。指标体系中,人均日生活用水量、沙尘天气日数、沙化土地比例为负影响指标,需将其正向化,即将最小值作为对应指标的上限值,最大值作为下限值。本研究指标体系如表1所示。

该方法图中既可以展示各单项指标的大小及其最大、最小和临界值的差距和随时间的变化动态,又可以从各指标两两组成的 $(n-1)/2$ 个三角形计算其综合指标值(图2)。全排列多边形综合指数计算公式如下:

$$Q = \frac{\sum_{i \neq j}^{ij} (Q_i + 1)(Q_j + 1)}{2n(n-1)} \quad (2)$$

式中: Q_i 和 Q_j 为同一个二级指标目录下第 i 个和第 j 个三级指标的标准化值; Q 为二级综合指标值,即经济发展、社会进步、生态环境指数值。可持续性综合指数值则以二级综合指数值作为次级指标计算。参考李锋等^[31]研究,基于综合指数将可持续发展能力划分为4个等级,详见表2。

表1 人地系统可持续性评价指标体系

Table 1 Sustainability evaluation index system of human-earth system

一级指标 1 st level indicator	二级指标 2 nd level indicator	三级指标 3 rd level indicator	数据来源 Data source	下限值 <i>L</i> Lower limit	临界阈值 <i>T</i> Critical threshold	上限值 <i>U</i> Upper limit
可持续发展综合能力 Comprehensive ability of urban sustainable development	经济发展	1 人均生产总值/万元		1.43	8.71	54.47
		2 人均地方财政收入/万元		0.04	0.63	4.55
		3 人均固定资产投资/元	2015—2021年《内蒙古	0.44	1 308.77	62 023.37
		4 第二产业比重/%	统计年鉴》、2015—	4.84	40.72	84.12
		5 第三产业比重/%	2021年《中国县域统计	0.78	41.42	91.02
		6 人均工业产值/万元	年鉴(县市卷)》、各旗	0.03	9.10	160.84
		7 人均社会消费品零售总额/万元	县国民经济和社会发 展统计公报	0.34	2.76	21.60
		8 全体居民人均可支配收入/元		10 400.00	27 560.10	63 667.00
	社会 进步	9 总人口/人		14 645.00	23 7420.64	925 100.00
		10 人口密度/(人/km ²)	2015—2021年《内蒙古	116.00	1 969.20	7 042.00
		11 每万人拥有普通中学学 校数/所	统计年鉴》、2015—	0.09	0.46	1.97
		12 每万人拥有卫生技术人 员数/人	2021年《中国县域统计 年鉴(县市卷)》、各旗 县国民经济和社会发 展统计公报	2.88	79.45	584.16
		13 人均公路里程/m		0.1	14.17	157.79
		14 人均道路面积/m ²		5.66	31.10	168.42
	生态 环境	15 污水处理率/%	2015—2021年《中国县	31.82	94.45	100.00
		16 人均公园绿地面积/m ²	城建设统计年鉴》	1.8	22.36	112.06
		17 绿地率/%	2015—2021年《中国林 业和草原统计年鉴》	5.41	31.51	48.16
		18 人均日生活用水量/L		257.34	93.16	29.05
		19 生活垃圾无害化处理 率/%	2015—2021年《中国县 城建设统计年鉴》	20.6	97.57	100.00
		20 沙尘天气日数/d	NOAA-NCEI 气象站逐 日平均能见度数据	80.00	18.57	1.00
		21 沙化土地比例/%	MOD13A3 数据集 NDVI 栅格数据	1.00	0.76	0.00
		22 人工造林面积/m ²	2015—2021年《中国林 业和草原统计年鉴》	3.00	3 158.14	33 334.00

表2 人地系统可持续发展能力分级标准

Table 2 Classification standard of sustainable development ability of human-earth system

等级 Grade	指数值 Value	可持续发展能力 Sustainable development ability
I	[0.75, +∞)	优秀
II	[0.5, 0.75)	良好
III	[0.25, 0.5)	一般
IV	(-∞, 0.25)	较差

3 结果与分析

3.1 乌审旗人地系统可持续性特征

乌审旗2015年、2018年和2021年经济发展、社会进步和生态环境指标变化见图4。可见,2015—2021年,毛乌素沙地乌审旗人地系统可持续发展综合能力总体呈现显著增加趋势,综合可持续性由Ⅲ级一般水平(0.39)提升到Ⅱ级良好水平(0.58)。其中,经济发展、社会进步、生态环境三项综合指数均有所提高。

经济发展指标变化由图4(a)可见:区域产业结构有所调整,经济发展水平稳步提升,经济发展指数由Ⅲ级一般水平(0.48)提升到Ⅱ级良好水平(0.5),指数增长率为4.17%。经济发展指数增长主要受人均GDP、人均固定资产投资和人均可支配收入指标值增加的影响,同期增长率分别为11.93%、100.75%和54.58%。其余指标各年增长率波动在±10%以内,其中,第二产业比重和人均工业产值逐年降低。

社会进步指标变化由图4(b)可见:区域社会福利水平得到提高,社会进步指数由Ⅳ级较差水平(0.23)提升到Ⅲ级一般水平(0.28),指数增长率为21.74%。除人口密度指标值小幅度下降外,其余指标均有增加,每万人拥有普通中学学校数、每万人拥有卫生技术人员数和人均公路里程指标值增长幅度相对较大,同期增长率分别为10.11%、17.35%和16.72%,总人口、人均道路面积指标值增长率在5%左右。

生态环境指标变化由图4(c)可见:区域沙化土地面积减少,生态环境建设持续推进,生态环境指数由Ⅳ级较差水平(0.24)提升到Ⅲ级一般水平(0.38),指数增长率为58.33%。生态环境指数增长主要受人均日生活用水量、生活垃圾无害化处理率、沙尘天气日数和沙化土地比例指标值增加影响,同期增长率分别为75.98%、114.08%、79.24%和194.05%。污水处理率和人工造林面积指标值同期增长36.38%和13.68%,人均公园绿地面积指标值增长率波动在±10%以内。

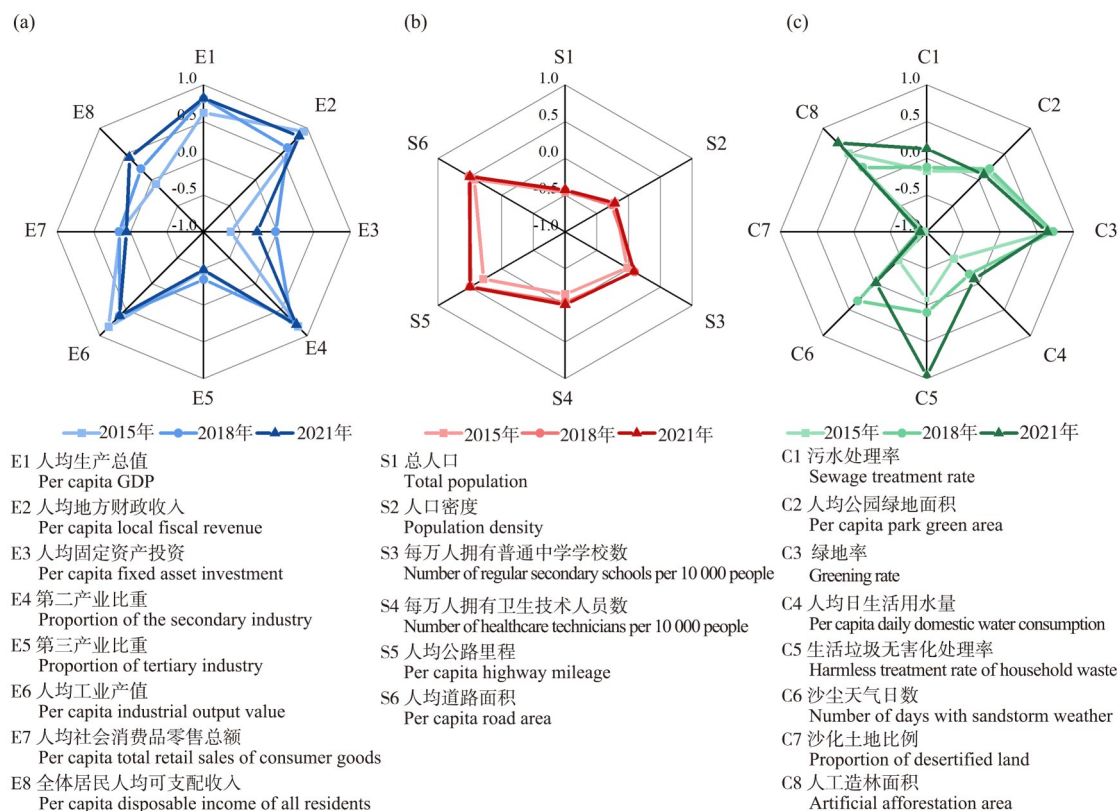


图4 乌审旗2015年、2018年和2021年经济发展(a)、社会进步(b)和生态环境(c)指标变化

Fig. 4 Changes of economic development (a), social progress (b), and ecological environment (c) indicators in Wushen on 2015, 2018 and 2021

3.2 正蓝旗人地系统可持续性特征

正蓝旗2015年、2018年和2021年经济发展、社会进步和生态环境指标变化见图5。可见,2015—2021年,浑善达克沙地正蓝旗人地系统可持续发展综合能力总体呈现增加趋势,综合可持续性由IV级较差水平(0.21)提升到III级一般水平(0.31)。生态环境综合指数显著提高,社会进步综合指数小幅提高,经济发展综合指数趋于稳定。

经济发展指标变化由图5(a)可见:区域产业结构调整,经济发展水平稳步提升。经济发展指数稳定在IV级较差水平(0.2)。经济发展指数的变化主要受地方财政收入和固定资产投资指标值的小幅减少,第三产业比重和人均可支配收入指标值的增加影响,同期变化分别为-40.38%、-38.09%、50.21%和81.44%,其余指标如第二产业比重和人均工业产值指标值分别下降-24.25%和-24.90%。人均生产总值指标值受GDP核算方式的影响同期有小幅波动^[32],对指标值有一定影响。

社会进步指标变化由图5(b)可见:区域社会福利水平提高,社会进步指数稳定在IV级较差水平(0.14提升到0.16),指数增长率为14.29%。社会进步指数的增加主要受每万人拥有卫生技术人员数、人均公路里程和人均道路面积指标值增加影响,同期增长率分别为8.10%、24.60%和12.11%。总人口指标值增长率为1.12%,同期基本持平。人口密度和每万人拥有普通中学学校数指标变化率为-8.59%和-1.36%。

生态环境指标变化由图5(c)可见:区域沙化土地面积减少,生态环境建设持续推进,生态环境指数由IV级较差水平(0.23)提升至III级一般水平(0.41),指数增长率为78.26%。生态环境指数下属三级指标值均有增加,主要受污水处理率、人均日生活用水量、沙尘天气日数、沙化土地比例和人工造林面积指标值增加影响,同期增长率分别为120.07%、115.53%、108.44%、122.24%和33.14%。其余各项指标增长率在10%左右。

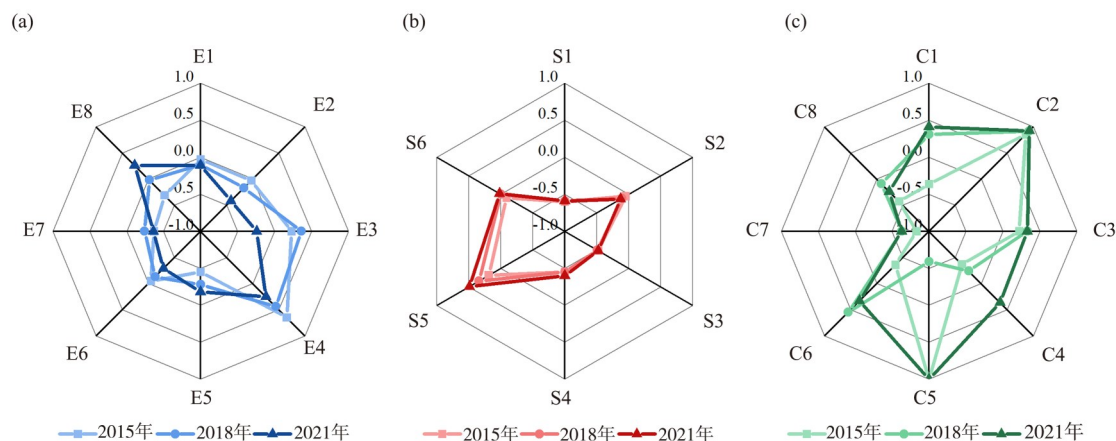


图5 正蓝旗2015年、2018年和2021年经济发展(a)、社会进步(b)和生态环境(c)指标变化

Fig. 5 Changes of economic development (a), social progress (b), and ecological environment (c) indicators in Zhenglan on 2015, 2018 and 2021

3.3 奈曼旗人地系统可持续性特征

奈曼旗2015年、2018年和2021年经济发展、社会进步和生态环境指标变化见图6。可见,2015—2021年,科尔沁沙地奈曼旗人地系统可持续发展综合能力总体呈现增加趋势,综合可持续性稳定在III级一般水平(0.25提升到0.30)。社会进步、生态环境综合指数有所提高,经济发展综合指数趋于稳定。

经济发展指标变化由图6(a)可见:区域产业结构调整,经济发展水平稳步提升,经济发展指数稳定

在IV级较差水平(0.04)。经济发展指数的变化主要受第三产业比重和人均可支配收入指标值增加,人均固定资产投资、第二产业比重、人均工业产值和人均社会消费品零售总额指标值减少影响,同期变化率分别为30.56%、287.94%、-32.88%、-54.96%、-70.23%和-43.65%。其余指标变化率在±10%左右。

社会进步指标变化由图6(b)可见:区域社会福利水平提高,社会进步指数稳定在III级一般水

平(0.26 提升到 0.32), 指数增长率为 23.08%。社会进步指数的增加主要受每万人拥有卫生技术人员数、人均公路里程和人均道路面积指标值增加影响, 同期增长率为 53.76%、25.75% 和 17.03%。

生态环境指标变化由图 6(c)可见: 区域沙化

土地面积减少, 生态环境指数稳定在Ⅲ级一般水平(0.34 提升到 0.45), 指数增长率为 32.35%。生态环境指数的增加主要受沙尘天气日数和沙化土地比例指标值增加影响, 同期增长率为 110.61% 和 90.36%。其余指标值增长率分别在 $\pm 10\%$ 左右。

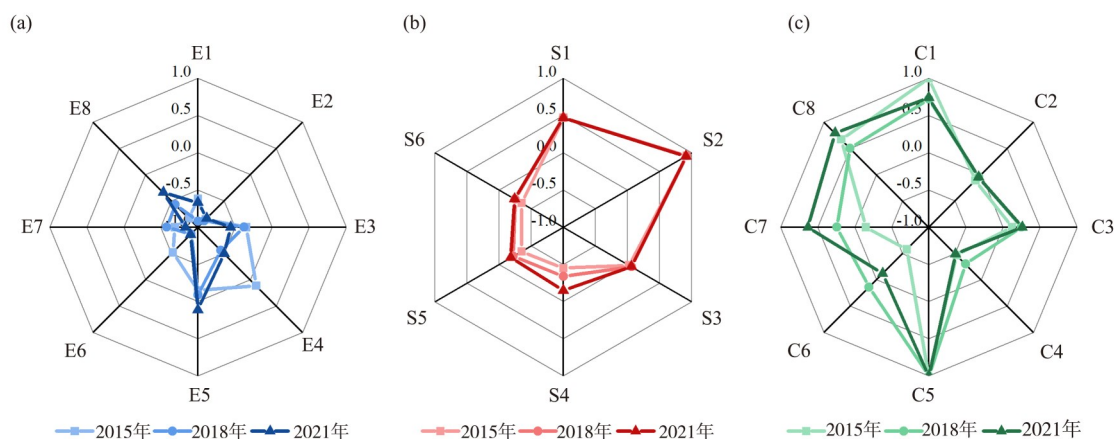


图6 奈曼旗2015年、2018年和2021年经济发展(a)、社会进步(b)和生态环境(c)指标变化

Fig. 6 Changes of economic development (a), social progress (b), and ecological environment (c) indicators in Naiman on 2015, 2018 and 2021

4 结论与建议

本研究采用全排列多边形综合图示法对2015—2021年北方农牧交错带地区的毛乌素沙地乌审旗、浑善达克沙地正蓝旗和科尔沁沙地奈曼旗人地系统的可持续性进行了综合评价。本研究发现, 三地区可持续性综合指数均呈现增长趋势, 乌审旗经济发展指数提高较为显著, 正蓝旗和奈曼旗无显著变化; 社会进步、生态环境指数均有显著提高。从经济发展、社会进步、生态环境三方面来看, 均是生态环境指数提高幅度最大。生态环境指数的增加主要是由于沙尘天气日数指标值和沙化土地比例指标值的显著提高。相关指标值的增加与已有研究^[34-38]和沙地现状一致: 近年来毛乌素、浑善达克、科尔沁三大沙地植被状态得到了显著改善, 土壤风蚀强度显著降低, 沙化扩张比例逐渐减少, 沙化改善程度显著增加; 也凸显了我国实施的“三北”防护林工程、京津风沙源治理工程、山水林田湖草沙一体化保护和修复工程等生态工程政策的成果^[33]。三地区同期经济发展与社会进步指数的增加也表明在沙区严格保护和治理的基础上, 地方也积极推

动沙区社会经济发展^[33,39]。尽管研究区土地沙化得到有效防治, 综合可持续性有所上升, 但三地区综合可持续性均未达到优秀水平, 人地系统可持续性仍然面临挑战。各级指标反映出三地区存在可持续性共性问题。三地区经济发展指数多边形较为紧凑, 除乌审旗有所增长外, 正蓝旗与奈曼旗趋于稳定, 经济发展增速较慢; 社会进步指数中教育与医疗指标均处于中等或中等以下水平; 生态环境指数中人均日生活用水量年平均指标值均处于中等偏下水平; 沙化土地比例年平均指标值处于较低水平。

由此可以看出, 随着国家在区域可持续发展方面投入的不断再增加, 以乌审旗、正蓝旗、奈曼旗为代表的农牧交错带典型沙区的人地系统可持续性综合指数均有所增长, 沙地的有效治理更是提升了生态可持续性。但截至2021年, 三地区综合可持续性仍未达到Ⅰ级优秀水平, 人地系统可持续发展仍然面临挑战。

基于此本研究提出如下4点建议:

1) 持续推进产业结构优化。乌审旗产业主要以工业主导, 农牧业并行。近年来乌审旗工业经济

持续增强,在发展过程中也应持续贯彻绿色发展理念,依托煤炭、天然气等资源优势,打造煤炭精细化工基地和清洁能源生产输出基地;优化传统能源产业结构,推动布局新能源产业发展。正蓝旗是以草地畜牧业为主的典型牧业旗,目前正蓝旗传统畜牧业正处于从高速发展向高质量发展转变的关键期,应当围绕肉牛、奶牛、察哈尔羊三大支柱产业,优化牲畜品种,加快调整畜牧业布局与结构;坚持天然草原草畜平衡,减羊增牛,少养精养,在保护草原生态的同时,提升养殖业效益^[40]。奈曼旗产业主要以农牧业为支撑。近年来奈曼旗一二三产业与乡村振兴融合呈现良好发展的态势,接下来应当持续优化能源供给结构,推进增量配电改革试点项目等新能源项目建设;加快推动如黄牛改良、浅埋滴灌水肥一体化技术、玉米密植高产种植模式等农牧业发展举措;发展如中草药、甘薯、中蒙医药等农村特色产业,稳步推进乡村振兴战略^[41]。

2)加强社会保障与文化素质建设。三地区每万人拥有普通中学学校数与每万人拥有卫生技术人员数年平均指标值为均处于中等及中等偏下水平,其中乌审旗为0.03与-0.12,与其经济发展水平不符,正蓝旗为-0.48与-0.42,处于较低水平。社会保障与文化素质关乎农牧民生计。首先,要提高农牧民文化水平和劳动技能,鼓励农牧民积极参加职业培训,增强其就业能力。其次,要持续扩大就业供给,加强政策扶持牵引,在林业重点项目和特色产业优势驱动下,不仅可以有力地促进生态环境建设,还能够以此为依托,延伸出更多的社会就业岗位,扩大社会就业范围。最后,完善医疗、养老和社会保险制度,提高保险补贴标准,以此促进社会和谐发展^[42]。

3)提高水资源利用效率。三地区人均日生活用水量平均指标值分别为-0.22、-0.07、-0.36,均处于中等偏下水平。水资源是限制干旱半干旱地区生态保护和高质量发展的重要因素。首先应当加大工业污染治理力度、加大城镇生活污水治理和控制力度、规范入河排污,提高污水处理效率。其次应当推广浅埋滴灌、膜下滴灌等节水技术进行耕地灌溉,开展复合型经营模式,提高水资源利用效率^[43-44]。

4)持续落实防沙治沙相关政策,增加沙化治理投入。三地区沙化土地比例年平均指标值为

-0.93、-0.75与0.25,但指标增长率均在100%左右,表明近年来沙地治理卓有成效。乌审旗毛乌素沙地近几十年来治理方案由以林业生态工程建设为主逐步过渡至植树造林和沙产业发展兼顾,其治理成效显著,因此抚育更新已有防护林、丰富防护林树种多样性,着力推进沙产业发展依旧是其生态文明建设工作中的重点^[45]。正蓝旗浑善达克沙地具有脆弱性和可逆性的特点,在治理时应加大力度,因地制宜,例如在牧区制定合理的放牧方式、采取不同的禁牧措施、过牧性草场采取不同封闭政策等^[46]。奈曼旗科尔沁沙地土地利用类型以草地和裸地为主,从土地利用的合理区划出发,针对草地为主区域采取人工造林种草等措施,耕地为主区域采取优化种植结构、改进耕作方式等措施^[47]。

参考文献 References

- [1] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 周瑞莲. 北方农牧交错带的地理界定及其生态问题[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 739-747
Zhao H L, Zhao X Y, Zhang T H, Zhou R L. Boundary line on agro-pasture zigzag zone in North China and its problems on eco-environment [J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(5): 739-747 (in Chinese)
- [2] Guo B, Zang W Q, Han B M, Yang F, Luo W, He T L, Fan Y W, Yang X, Chen S T. Dynamic monitoring of desertification in Naiman Banner based on feature space models with typical surface parameters derived from LANDSAT images[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(12): 1573-1592
- [3] 卢琦, 肖春蕾, 包英爽, 崔梦淳, 曹晓明, 却晓娥, 杨柳, 崔桂鹏. 打赢“三北”攻坚战, 再造一个“新三北”: 实现路径与战略规划[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(7): 956-965
Lu Q, Xiao C L, Bao Y S, Cui M C, Cao X M, Que X E, Yang L, Cui G P. Implementation path and strategic planning of winning the battle of “Three-North” and reconstructing “New Three-North” [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(7): 956-965 (in Chinese)
- [4] 崔潇, 王永生, 施琳娜. 北方农牧交错带人地系统耦合协调的时空特征及障碍因子[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 206-217
Cui X, Wang Y S, Shi L N. Spatio-temporal characteristics and obstacle factors of human-land system coupling coordination in farming-pastoral ecotone of Northern China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1): 206-217 (in Chinese)
- [5] 刘彦随. 现代人类关系与人地系统科学[J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1221-1234
Liu Y S. Modern human-earth relationship and human-earth system science [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(8): 1221-1234 (in Chinese)
- [6] 郭建国, 郭晓川, 杨劼, 钱贵霞, 牛建明, 梁存柱, 张庆, 李昂. 什么是可持续性科学?[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 1-11
Wu J G, Guo X C, Yang J, Qian G X, Niu J M, Liang C Z, Zhang Q, Li A. What is sustainability science? [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 1-11 (in Chinese)

- [7] 解雪峰, 吴涛, 肖翠, 蒋国俊, 边华菁, 马勇, 陈建华. 基于PSR模型的东阳江流域生态安全评价[J]. 资源科学, 2014, 36(8): 1702-1711
Xie X F, Wu T, Xiao C, Jiang G J, Bian H J, Ma Y, Chen J H. Ecological security assessment of the Dongyang River watershed using PSR modeling [J]. *Resources Science*, 2014, 36 (8): 1702-1711 (in Chinese)
- [8] 于娜, 赵媛媛, 丁国栋, 崔晓, 彭功. 基于生态足迹的中国四大沙地地区可持续评价[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1310-1320
Yu N, Zhao Y Y, Ding G D, Cui X, Peng L. Sustainability assessment in four sandy lands of China based on the ecological footprint model [J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(6): 1310-1320 (in Chinese)
- [9] 王伟伟, 周立华, 陈勇, 孙燕, 侯彩霞. 基于可持续性晴雨表的北方农牧交错区可持续发展评价: 以盐池县为例[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 27-34
Wang W W, Zhou L H, Chen Y, Sun Y, Hou C X. Sustainable development assessment of agro-pastoral transitional zone in North China based on barometer of sustainability: A case study in Yanchi, Ningxia [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(2): 27-34 (in Chinese)
- [10] 丁文广, 刘兴德, 耿怡颖, 陈豪, 何莉. 甘肃省农业可持续发展评价及耦合协调性分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(3): 61-69, 129
Ding W G, Liu X D, Geng Y Y, Chen H, He L. Evaluation of agricultural sustainable development and analysis of coupling coordination in Gansu Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(3): 61-69, 129 (in Chinese)
- [11] Zheng Q, Lyu H M, Zhou A N, Shen S L. Risk assessment of geohazards along Cheng-Kun railway using fuzzy AHP incorporated into GIS[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2021, 12(1): 1508-1531
- [12] Malah A, Bahi H. Integrated multivariate data analysis for Urban Sustainability Assessment, a case study of Casablanca city [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 86: 104100
- [13] Sun X, Liu X S, Li F, Tao Y, Song Y S. Comprehensive evaluation of different scale cities' sustainable development for economy, society, and ecological infrastructure in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: S329-S337
- [14] 郭淑芬, 马宇红. 资源型区域可持续发展能力测度研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(7): 72-79
Guo S F, Ma Y H. Comprehensive evaluation for sustainable development capacity of resource-based region [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(7): 72-79 (in Chinese)
- [15] 刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟. 退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 174-182
Liu M Z, Wang Y F, Pei H W. The changes of land use and carbon storage in the northern farming-pastoral ecotone under the background of returning farmland to forest (grass) [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(1): 174-182 (in Chinese)
- [16] 邱嘉琦, 于德永. 中国北方农牧交错带生态系统服务空间格局及影响因素: 以内蒙古中西部地区为例[J]. 生态学报, 2023, 43(18): 7598-7609
Qiu J Q, Yu D Y. Spatial patterns and influence factors of ecosystem services in the agro-pastoral ecotone of northern China: Taking the central and western regions of the Inner Mongolia as an example [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(18): 7598-7609 (in Chinese)
- [17] 王鑫, 海山. 基于能值分析的典型农牧交错带可持续发展规模研究: 以内蒙古乌兰察布市为例[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 706-715
Wang X, Hai S. Sustainable development scale of a typical agro-pastoral ecotone based on emergy analysis: A case study of Ulanqab City, Inner Mongolia [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(4): 706-715 (in Chinese)
- [18] 张靖, 牛建明, 同丽嘎, 张雪峰. 多水平/尺度的驱动力变化与沙漠化之间的关系: 以内蒙古乌审旗为例[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1643-1653
Zhang J, Niu J M, Tong L G, Zhang X F. A multilevel/multiscale analysis of the impact of land use drivers on desertification: A case study of Uxin Banner, Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(6): 1643-1653 (in Chinese)
- [19] 薛颀, 史明昌, 丁国栋, 高广磊, 安全喜. 浑善达克沙地植物适宜性研究: 以内蒙古自治区正蓝旗沙地区为例[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(8): 84-99
Xue D, Shi M C, Ding G D, Gao G L, An Q X. Suitability of plants in Hunshandake sandy land: Taking Zhenglanqi sandy land in Inner Mongolia Autonomous Region as an example [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(8): 84-99. (in Chinese)
- [20] 张宁, 常学礼, 孙小艳, 韩艳. 基于沙漠化程度和NDVI指数的奈曼旗生态安全评价[J]. 生态学报, 2010, 29(6): 1250-1256
Zhang N, Chang X L, Sun X Y, Han Y. Ecological security assessment of Naiman county based on desertification degree and NDVI index [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(6): 1250-1256 (in Chinese)
- [21] 李振山, 包慧娟, 王涛. 沙漠化地区可持续发展评价: I. 指标体系[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 432-439
Li Z S, Bao H J, Wang T. Assessment of sustainable development in desertified area: I. Indicators [J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(3): 432-439 (in Chinese)
- [22] 孙晓, 刘旭升, 李锋, 陶宇. 中国不同规模城市可持续发展综合评价[J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5590-5600
Sun X, Liu X S, Li F, Tao Y. Comprehensive evaluation of sustainable development for different scale cities in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(17): 5590-5600 (in Chinese)
- [23] 张平, 林昕, 张永翔, 孙强强, 孙亚楠, 孙丹峰. 我国城市多尺度社会-生态系统可持续管理框架研究[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(7): 199-209
Zhang P, Lin X, Zhang Y X, Sun Q Q, Sun Y N, Sun D F. Research on sustainable management framework of urban multi-scale social-ecological system in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(7): 199-209 (in Chinese)
- [24] 邵超峰, 战雪松, 陈思含. 基于SDGs的乡村可持续发展评价指标体系[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(12): 21-31
Shao C F, Zhan X S, Chen S H. Evaluation index system of rural sustainable development based on SDGs [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33(12): 21-31 (in Chinese)
- [25] 内蒙古自治区统计局. 内蒙古统计年鉴(2015—2021)[M]. 中国统计出版社, 2015—2021
Inner Mongolia Autonomous Region Statistics Bureau. *Inner Mongolia Statistical Yearbook*, 2015-2021 [M]. China Statistics Press, 2015-2021
- [26] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国县域统计年鉴(2015—2021)[M]. 中国统计出版社, 2015—2021
Rural Social and Economic Survey Department of the National Bureau of Statistics. *China County Statistical Yearbook*, 2015-2021 [M]. China Statistics Press, 2015-2021
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国县城建设统计年鉴(2015—2021)[M]. 中国统计出版社, 2015—2021
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. *Statistical Yearbook of County Town Construction in China*, 2015-2021 [M]. China Statistics Press, 2015-2021

- [28] 国家林业和草原局. 中国林业和草原统计年鉴(2015—2021)[M]. 中国林业出版社, 2015—2021
- National Forestry and Grassland Administration. *China Forestry and Grassland Statistical Yearbook*, 2015-2021 [M]. China Forestry Publishing House, 2015-2021
- [29] 闫峰, 丛日春. 中国沙地分类进展及编目体系[J]. 地理研究, 2015, 34(3): 455-465
- Yan F, Cong R C. Study on classification progress and cataloging system of sandy land in China[J]. *Geographical Research*, 2015, 34(3): 455-465 (in Chinese)
- [30] 张路路, 郑新奇, 原智远, 崔海宁. 基于全排列多边形综合图示法的唐山市土地利用多功能性评价[J]. 中国土地科学, 2016, 30(6): 23-32
- Zhang L L, Zheng X Q, Yuan Z Y, Cui H N. Assessment on multifunctionality of land use based on the entire-array-polygon indicator method in Tangshan[J]. *China Land Science*, 2016, 30(6): 23-32 (in Chinese)
- [31] 李锋, 刘旭升, 胡鹏, 王如松. 城市可持续发展评价方法及其应用[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4793-4802
- Li F, Liu X S, Hu D, Wang R S. Evaluation method and its application for urban sustainable development[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4793-4802 (in Chinese)
- [32] 尹向飞. 新框架核算下中国省级绿色GDP增长时空演变及驱动[J]. 经济地理, 2021, 41(1): 49-57, 180
- Yin X F. The spatio-temporal evolution and driving factors of the provincial green GDP growth in China based on a new research framework [J]. *Economic Geography*, 2021, 41(1): 49-57, 180 (in Chinese)
- [33] 钱贵霞, 王晓欣, 李武, 张倩霓. 中国从防沙治沙到管沙用沙的演变过程与实现路径[J]. 应用生态学报, 2024, 35(1): 8-16
- Qian G X, Wang X X, Li W, Zhang Q N. Evolution and implementation pathways from desertification prevention and control to sandy land management and use in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(1): 8-16 (in Chinese)
- [34] Chi W F, Zhao Y Y, Kuang W H, He H L. Impacts of anthropogenic land use/cover changes on soil wind erosion in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 668: 204-215
- [35] 王姣月, 秦树高, 张宇清. 毛乌素沙地植被水分利用效率的时空格局[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 120-129
- Wang J Y, Qin S G, Zhang Y Q. Spatial-temporal patterns of vegetation water use efficiency in the Mu Us Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(5): 120-129 (in Chinese)
- [36] 刘俊壕, 周海盛, 郭群. 中国北方干旱半干旱区沙漠化治理对植被格局的影响[J]. 中国沙漠, 2023, 43(5): 204-213
- Liu J H, Zhou H S, Guo Q. The effects of desertification control on the patterns of vegetation in arid and semi-arid regions of Northern China [J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(5): 204-213 (in Chinese)
- [37] 常茜, 鹿化煜, 吕娜, 崔梦淳, 李海宇. 1992—2015年中国沙漠面积变化的遥感监测与气候影响分析[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 57-63
- Chang X, Lu H Y, Lü N N, Cui M C, Li H Y. Variation of desert and sandy field in China on the basis of remote sensing analysis and the relationship with climate change during 1992-2015[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(1): 57-63 (in Chinese)
- [38] 同丽嘎, 宁小莉, 张靖, 张雪峰. 近30 a浑善达克沙地沙漠化时空演变特征及驱动机制研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 992-1002
- Tong L G, Ning X L, Zhang J, Zhang X F. Spatial-temporal variation and driving mechanism of desertification in Hunshandake (Otindag) Sandy Land in recent 30 years[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(4): 992-1002 (in Chinese)
- [39] 潘昌祥, 欧阳茜如, 廖梦榆, 范裕, 郭群, 张志山, 吴戈男, 赵洋, 刘立超, 潘颜霞, 李新荣, 屈建军, 穆松林, 李胜利. 西北干旱区沙漠化土地生态修复技术及沙产业的适用范围[J]. 中国沙漠, 2023, 43(5): 155-165
- Pan C X, Ouyang Q R, Liao M Y, Fan Y, Guo Q, Zhang Z S, Wu G N, Zhao Y, Liu L C, Pan Y X, Li X R, Qu J J, Mu S L, Li S G. The applicability of ecological restoration technologies and sand industries to the deserted land in northwest arid region of China[J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(5): 155-165 (in Chinese)
- [40] 蒋高明, 吴光磊, 程达, 郑延海, 刘美珍, 李彩虹. 生态草业特色产业体系与设计: 以正蓝旗为例[J]. 科学通报, 2016, 61(2): 224-230
- Jiang G M, Wu G L, Cheng D, Zheng Y H, Liu M Z, Li C H. Characteristics and designing of eco-husbandry system: A case study in Zhenglan Banner, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(2): 224-230 (in Chinese)
- [41] 苗静, 盖志毅. 基于SSM的内蒙古牧区产业结构演进特征分析[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(6): 219-228
- Miao J, Gai Z Y. Analysis on the evolution characteristics of the industrial structure in Inner Mongolia pastoral area based on SSM [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(6): 219-228 (in Chinese)
- [42] 周升强, 赵凯. 北方农牧交错区农牧民生计资本与生计稳定性的耦合协调分析: 以宁夏盐池县与内蒙古鄂托克旗为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(2): 9-15
- Zhou S Q, Zhao K. Coupling coordination of capital and livelihood stability of farmers and herdsmen in the agro-pastoral ecotone in Northern China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(2): 9-15 (in Chinese)
- [43] 侯林秀, 温璐, 张雪峰, 王立新, 赵吉, 杜凤莲. 内蒙古地区水足迹量化及水资源评价分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(8): 182-195
- Hou L X, Wen L, Zhang X F, Wang L X, Zhao J, Du F L. Quantification of water footprint and analysis of water resources evaluation in Inner Mongolia [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(8): 182-195 (in Chinese)
- [44] 张宇冕, 夏唯一, 骆玉川, 陆梦娜, 黄霖沛. 基于系统动力学模型的内蒙古水资源承载力及其影响因素[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(4): 274-287
- Zhang Y M, Xia W Y, Luo Y C, Lu M N, Huang L P. Water resources carrying capacity of Inner Mongolia under different scenarios and its influential factors based on a system dynamics model [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(4): 274-287 (in Chinese)
- [45] 王岳, 刘学敏, 哈斯额尔敦. 荒漠化治理“经济-生态-社会”效益耦合协调度时空分异及其驱动因素: 以毛乌素沙地为例[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1224-1237
- Wang Y, Liu X M, Hasi E E D. Spatiotemporal differentiation and driving factors of coupling coordination degree of economic-ecological-social benefits from desertification control in the Mu Us Sandy Land[J]. *Resources Science*, 2022, 44(6): 1224-1237 (in Chinese)
- [46] 刘二燕, 赵媛媛, 周蝶, 武海岩, 高广磊, 丁国栋. 科尔沁-浑善达克沙地2000—2020年土地沙化时空变化格局[J/OL]. 中国沙漠, 2024(4): 1-11 [2024-07-28]
- Liu E Y, Zhao Y Y, Zhou D, Wu H Y, Gao G L, Ding G D. Spatiotemporal variation patterns of land desertification from 2000 to 2020 in the Horqin-Otindag Sandy Land [J/OL]. *Journal of Desert*

Research, 2024(4): 1-11[2024-07-28] (in Chinese)

[47] 刘志民, 余海滨. “山水林田湖草沙生命共同体”理念下的科尔沁沙地生态治理[J]. 中国沙漠, 2022, 42(1): 34-40

Liu Z M, Yu H B. Discussion on ecological management of Horqin Sandy

Land under the concept of “a living community of mountains, waters, forests, farmlands, lakes, grasslands and sandy lands” [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(1): 34-40 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 耿鑫智, 硕士研究生, 北京林业大学水土保持学院林业专业。本科毕业于北京林业大学。2023年获得北京林业大学硕士学业二等奖学金。



通讯作者简介: 赵媛媛, 博士, 北京林业大学水土保持学院教授。主要从事土地利用/覆盖变化监测与模拟、草地生态系统服务评估、荒漠化监测与防治等方向的科研教学工作。以第一/责任作者在国内外学术期刊发表研究论文40余篇, 其中SCI收录20篇, 出版专著2部, 登记软件著作权3件。先后获国土资源科学技术奖二等奖、第八届现代生态学讲座暨第六届国际青年生态学者论坛优秀论文奖、全国林业硕士专业学位研究生优秀教学案例奖等科研和教学奖励。