

引用格式: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.] DOI: 10.18402/resci.2022.06.10

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

王岳^{1,2},刘学敏³,哈斯额尔敦³

(1. 南京信息工程大学商学院,南京210044;2. 南京信息工程大学江北新区发展研究院,
南京210044;3. 北京师范大学地理科学学部,北京100875)

摘要:在荒漠化治理成效评估中纳入对经济和社会改善度的考量,是准确评估荒漠生态系统修复水平、防范二次荒漠化出现的重要基础。本文评估了毛乌素沙地2004—2019年荒漠化治理“经济-生态-社会”效益耦合协调度,讨论其时间演化特征和空间分布特征,并采用面板数据多元回归模型分析了影响荒漠化治理效益的驱动因素。研究发现:①毛乌素沙地荒漠化治理综合效益耦合协调度在研究期内由轻度失调提高至初步协调。②荒漠化治理综合效益耦合协调度的变化可分为3个阶段:在起步期(2004—2007年)内轻度失调但波动上升;在发展期(2008—2015年)升至初步协调,且南北两侧县级行政单元的综合效益耦合协调度提升速度更快;在调整期(2016—2019年)持续波动上升,并呈东高西低的空间分布特征。③人工造林面积、农机总动力、在业沙产业企业数和城镇化率对毛乌素沙地荒漠化治理综合效益耦合协调度有显著的正向影响,其中,人工造林和城镇化是驱动荒漠化治理综合效益耦合协调度提升的主导因素。本文为全面、准确评价荒漠化治理成效提供了新思路,同时也能够为荒漠区协调人地关系、实现可持续发展提供科学支撑。

关键词:荒漠化治理;沙产业;卫星账户法;耦合协调度;面板数据;毛乌素沙地

DOI: 10.18402/resci.2022.06.10

1 引言

中国是世界上荒漠面积最大、荒漠化速度最快的国家之一^[1],土地退化造成了巨大的经济损失,沙尘天气严重危害居民健康^[2]。为应对荒漠化造成的环境安全问题,中国自20世纪80年代初即开始研究干旱区土地退化的成因并构建治理体系,持续开展了一系列在国内乃至世界上都产生了重要影响的生态环境建设工程,包括“三北”防护林体系建设

工程、天然林保护工程、退耕还林还草工程、京津风沙源治理工程、知识密集型“沙产业”等^[3,4]。经过近40年的努力,在有利气候变化的共同作用下,中国的荒漠化和沙化土地面积实现了多年连续双减少。根据第五次全国荒漠化和沙化监测^①结果,荒漠化和沙化程度已由极重度转为轻度,2014年全国荒漠化土地面积缩减至 $2.61 \times 10^8 \text{ hm}^2$;北方地区的沙尘暴出现频率也有了明显的下降趋势;中国取得

收稿日期:2021-12-27;修订日期:2022-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41671002);青海省重点研发与转化计划项目(2019-HZ-814-1);南京信息工程大学科研启动经费项目(2020r101)。

作者简介:王岳,女,甘肃兰州人,讲师,研究方向为生态经济学与产业化治沙。E-mail: 003260@nuist.edu.cn

通讯作者:刘学敏,男,山西襄汾人,教授,研究方向为自然资源与环境经济学、区域经济学。E-mail: liuxuemin@bnu.edu.cn

① 因第六次全国荒漠化和沙化监测结果尚未公布,此处引用2014年的第五次全国荒漠化和沙化监测数据。

2022年6月

了举世瞩目的生态治理成就^[4,5]。然而,不可否认的是,干旱、半干旱地区的生态治理形势依然严峻,生态防护林的保存率和防风功能都远低于预期,区域水资源消耗量不降反增,再度沙化现象反复出现,治理成果难以稳定,干旱区生态困境没有实现根本性逆转^[6,7]。

目前学界已形成共识,干燥少雨的气候环境是荒漠地貌形成的重要基础,但人类不合理生产、生活行为给土地造成的过度压力才是荒漠面积不断扩张的主要因素^[8]。中国荒漠分布区普遍经济发展水平较低,生产模式较为落后,大工业和小农业并存,生态建设和经济发展的矛盾突出,由人为因素造成的土地退化问题十分严重^[1]。然而,已有荒漠化治理成效评估往往只关注植被面积或荒漠面积的变化,而忽视不合理的生产、生活模式是否得到改善,其评估结果可能会过于乐观,对出现二次退化的潜在风险考虑不充分^[9]。因此,在荒漠化治理成效评估研究中,亟需增加对经济系统和社会系统的考察,并且要充分考虑到经济、生态、社会等系统间是否形成了紧密联系、相互促进的关系。由此,才能找准治理过程中存在的问题,制定合理的改进措施,实现“生态建设产业化,产业发展生态化”,达到“治沙”和“治穷”的长期统一^[10,11]。

位于鄂尔多斯高原南部和黄土高原北部农牧交错带上的毛乌素沙地是中国四大沙地之一,是典型的由自然环境变化和人类生存活动共同作用形成的荒漠,其沙化过程能够在一定程度上代表干旱、半干旱区土地退化的特征^[12]。相对于中国其他沙漠、沙地而言,毛乌素沙地具有沙化程度较轻、水热配合较好、植被种类多样、矿产资源和人文历史资源丰富等优势^[13],因而较早地开始了荒漠化治理工作,现已建立了乔-灌-草结合的防护体系,有效减少了风沙危害,基本解决了重度荒漠化问题,中轻度退化面积也大幅缩减,成为了全国乃至全球荒漠化治理的典范^[14]。但同时,毛乌素沙地生态环境脆弱敏感、农牧业发展强度高、采矿业对环境破坏严重等问题仍没有得到根本改善,人地矛盾依然尖锐,而现有的治沙措施对水资源的依赖度较高。纵观其生态环境变化的历史,“水草丰茂”的景象曾多

次出现,但“黄沙漫天”的恶果也数度再现^[15],并不能因一时的植被增加而遽下治理成功的结论,必须全面评估人类社会与生态环境间的协同关系是否切实得到了改善^[12]。

当前中国荒漠化治理工作已进入新的阶段,不论是从根本上缓解荒漠化问题,还是响应生态文明建设的需求,都应在生态治理成效评估中充分考虑经济和社会系统的改进程度。据此,本文以毛乌素沙地为研究区,采用区域可持续发展评估中广泛应用的耦合协调度评价^[16,17],将荒漠化治理效益分为经济效益、生态效益、社会效益共3个子系统,建立涵盖三者的综合评价指标体系,分析子系统间耦合协调度的时间演化特征和空间分布特征;在此基础上,拟合荒漠化治理综合效益面板数据多元回归模型,对影响荒漠化治理成效的内在驱动因素进行分析。本文可为准确评价荒漠化治理成效提供新的思路,也为更广泛的生态脆弱区实现人地和谐与区域可持续发展提供科学支撑。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究区概况

毛乌素沙地位于鄂尔多斯高原南部和黄土高原北部交界区,地理坐标为106°58'E—110°35'E、37°28'N—39°48'N,海拔950~2600 m,自第四纪早更新世后期逐渐演化形成。该地区属于温带极端大陆性半干旱气候,年平均温度6.0~8.5℃,多年平均降水量250~440 mm,年平均蒸发量1770~2500 mm,年平均风速2.1~3.3 m/s,是华北地区沙尘天气的主要沙源区之一。土壤类型包括地带性的栗钙土和非地带性的风沙土,植被由东部的草甸草原和灌木逐渐向西部的荒漠草原过渡,主要的土地覆被类型为草地和未利用地。从行政区划上看,毛乌素沙地腹地为鄂尔多斯市乌审旗和榆林市榆阳区,北部为鄂尔多斯市伊金霍洛旗和榆林市神木市,东南部为榆林市横山区、靖边县、定边县和吴忠市盐池县,西部为鄂尔多斯市鄂托克旗和鄂托克前旗,沙地总面积约48288 km²(图1)。

2.2 数据来源

为兼顾结果的时效性和完整性,结合《中华人民共和国防沙治沙法》2002年起实施的背景,将



图1 研究区位置示意图

Figure 1 Location of the study area

2003年定为基期,研究期为2004—2019年。研究团队先后于2017年8月和2018年8月两次前往毛乌素沙地及周边进行实地考察,收集得到各县级行政单元的材用、果用及饲用灌木种植面积及平茬量,中药材种植面积及产量,螺旋藻养殖面积及产量等数据,并以各县级行政单元的统计年鉴和政府报告进行校正;同时,在“全国企业信用信息公示系统(www.gsxt.gov.cn)”中统计得到沙产业生产机构单位的经营信息,据此计算沙产业生产总值,以及确定在业沙产业企业数量。地区生产总值、人工造林面积、常住人口数、乡村人口数、劳动力人数、居民可支配收入、农机总动力、城镇化率等数据来源为吴忠市、榆林市、鄂尔多斯市统计年鉴。荒漠化土地面积数据来源为全国荒漠化和沙化监测结果及毛乌素沙地土地覆被变化研究^[1];沙尘天气过程发生日数来源为《沙尘天气年鉴》;农业灌溉和林牧渔业用水量来源于宁夏回族自治区、陕西省、内蒙古自治区的水资源公报。归一化植被指数NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)来源为中国科学院资源环境科学数据中心资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>)的中国年度植被指数空间分布数据集(DOI: 10.12078/2018060601)。以上数据缺失值由邻近同类均值补齐。

2.3 耦合协调度评价方法

2.3.1 耦合协调度评价指标体系建立

荒漠化治理的根本措施是形成合理的生产方式,直接效果是生态环境的改善,而最终目标是实现经济社会可持续发展。因此,对荒漠化治理成效的评估必须全面考虑经济、生态、社会等子系统的变化情况以及它们之间耦合协调关系的演进方向。据此,参考“三生空间”耦合协调度和荒漠化治理成效的相关研究,以完备性、科学性、数据可获得性为原则,建立了荒漠化治理“经济-生态-社会”综合效益评价指标体系(表1)。

指标体系的目标层为荒漠化治理综合效益耦合协调度,下设经济效益、生态效益、社会效益等3个准则层,共包括12个指标层。需要注意的是,为避免量纲、数量级和属性等差异对结果造成影响,效益评价研究中常对原始数据进行标准化处理,再计算耦合协调度。但常用标准化处理的结果都是相对值,由此得到的耦合协调度在同一年内的地区之间可比,但在年际之间是无法比较的,因而不适用于本文。据此,为同时保证耦合协调度评价结果在空间截面和时间序列上都可比,并弱化数据间量纲、数量级和属性的差异,本文选取的指标均为比率指标,逆向指标在计算时取倒数。具体如下:

表1 荒漠化治理效益耦合协调度评价指标体系

Table 1 Indicator system for the coupling coordination degree of desertification control benefits

目标层	准则层	指标层	类型	权重
荒漠化治理效益 耦合协调度	经济效益	地区生产总值增长率	正向	0.03
		农林沙产业产值增长率	正向	0.12
		制造业沙产业产值增长率	正向	0.39
		服务业沙产业产值增长率	正向	0.09
	生态效益	归一化植被指数NDVI	正向	0.02
		荒漠化治理面积增长率	正向	0.08
		沙尘天气过程发生频率	逆向	0.05
		农业用水量增速	逆向	0.05
		常住人口增长率	正向	0.04
	社会效益	乡村人口增长率	正向	0.03
		乡村劳动力占比	正向	0.06
		城乡人均可支配收入比	逆向	0.04

(1)经济效益。荒漠化治理对区域经济发展的直接和间接促进作用,主要体现为地区生产总值和各类沙产业产值,共有4个指标。其中,地区生产总值增长率是正向指标,以2003年为基期,考察逐年可比价生产总值的增长率,能够反映区域整体经济发展水平的变化;农林沙产业产值增长率、制造业沙产业产值增长率、服务业沙产业产值增长率均为正向指标,以2003年为基期,考察逐年可比价产值的增长率,能够直接反映产业化治沙取得的货币收益,具体计算方法见下一节的公式(3)–(8)。

(2)生态效益。主要包括植被恢复、防风固沙的成果,也要体现治沙措施对资源的消耗,共有4个指标。其中,归一化植被指数(NDVI)反映植被覆盖的空间分布特征,是正向指标;荒漠化治理面积增长率是已完成荒漠化治理的土地面积的增长率,是正向指标;沙尘天气过程发生频率是逆向指标,反映年际沙尘天气过程的出现频率;农业用水量也为逆向指标,以2003年为基期,考察包括生态林种植和沙产业发展在内的农、林、牧、渔业水资源消耗量的变化。

(3)社会效益。集中体现了荒漠化治理对社会稳定尤其是乡村振兴的影响,包括4个指标。其中,常住人口增长率以2003年为基期,考察县域范围内人口的增长情况,间接反映生态环境和产业模式改善对城乡整体居民居住稳定性的影响,是正向指标;乡村人口增长率反映了乡村人口的流动方向和

规模,同样以2003年为基期,是正向指标;乡村劳动力占比为乡村人口中从业人员占总人数的比例,反映了农村就业的稳定性和人口结构,是正向指标;城乡人均可支配收入比为逆向指标,表征区域的贫富差距情况。

此外,采用熵权法确定指标权重(表1),即通过数据本身的信息量大小体现其重要性。在 n 个县级行政单元、 m 个评价指标中,第 j 个指标对应的熵值 E_j 为:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n (p_{ij} \cdot \ln p_{ij}) \quad (1)$$

式中:样本量系数 $k=1/\ln n$; p_{ij} 为信息量期望值,设 Y_{ij} 为第 i 个县级行政单元第 j 个指标的值,则

$p_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^n Y_{ij}$;第 j 个指标的权重 w_j 计算公式为:

$$w_j = (1 - E_j) / \left(m - \sum_{j=1}^m E_j \right) \quad (2)$$

2.3.2 基于卫星账户原理的沙产业产值核算

在上述耦合协调度评价指标体系中,沙产业产值增长率是经济效益的重要组成部分。沙产业是20世纪80年代提出的产业化治沙措施,指在荒漠区通过高新科学技术充分发挥光热条件优势、克服水资源匮乏劣势、对原生物种改良升级的现代化产业,既能直接增加植被覆盖度,又能替代破坏性的传统生产方式,在生产过程中实现生态治理^[3]。目

前沙产业已成为中国荒漠化治理体系中的重要组成部分,在全国荒漠区广为开展,但仍缺乏专门的生产总值核算方法和连续的统计记录。为此,本文采用卫星账户(Satellite Accounts)原理^[18]建立了沙产业产值核算方法,即围绕现行国民经济核算体系的中心框架建立沙产业附属核算体系,将分散在国民经济各产业内的沙产业活动剥离出来,进行独立统一核算。

需特别注意的是,根据钱学森^[19]提出的“沙产业”概念,以及刘恕^[20]、樊胜岳等^[21]学者以及沙草产业协会制定的产业判定标准,只有达到“高科技、低消耗、高效率、生态友好”的生产活动才能划入沙产业核算范围,要避免将高耗水农牧业、矿产采掘加工业等生态效益较低的产业也纳入统计^[22]。具体地,本文分设农林沙产业、制造业沙产业和服务业沙产业3类,遵循国民生产总值核算的权责发生制原则和市场估价原则^[23],分别核算其产值。具体方法如下:

(1) 农林沙产业产值核算

农林沙产业主要为耐旱作物的种植、平茬、抚育等活动,也包括螺旋藻养殖和捕集;此外,研究区尚未形成符合标准的牧业沙产业,因而暂无相关产值核算。农林沙产业涉及行业与第一产业重合度较高,因而参考其产值核算方法,采用生产法分别计算总产出和中间投入,两者的差值即为产值。总产出由“产成品”和“在产品(例如多年生灌木的抚育价值)”两大部分构成,中间投入指生产过程中消耗的一次性货物和服务的价值。

农林沙产业产值计算公式如下:

$$S' = \sum_{a=1}^b pr_a q_a \quad (3)$$

$$S'' = YA \cdot YC + FA \cdot FC \quad (4)$$

$$S = S' + S'' \quad (5)$$

$$V_1 = S - MID \quad (6)$$

式中: S' 为产成品总产出; pr_a 为第 a 种产成品的现行价格, $a=1, 2, \dots, b$; q_a 为第 a 种产成品的本期产量; S'' 为在产品总产出; YA 为育苗面积; YC 为单位面积育苗成本; FA 为抚育面积; FC 为单位面积抚育成本; S 为农林沙产业总产出; 农林沙产业产

值 V_1 为总产出 S 和中间投入 MID 的差值。

(2) 制造业沙产业产值核算

制造业沙产业的生产活动主要围绕农林沙产业产品的加工展开,例如沙棘食品制造、螺旋藻保健品制造、沙柳刨花板制造等,同时也包括沙柳枝条生物能发电。制造业沙产业涉及行业与第二产业重合度较高,且具有机构单位规模较小、统计数据不充足、产品质量等级差异大、生产周期参差不齐等特征,因而适宜采用收入法计算其增加值。计算公式如下:

$$V_2 = \sum_{c=1}^d v_{2c} \quad (7)$$

式中: V_2 为制造业沙产业产值; v_{2c} 为第 c 个制造业沙产业机构单位的增加值, $c=1, 2, \dots, d$ 。

(3) 服务业沙产业产值核算

服务业沙产业主要为沙产业产品的销售、沙漠旅游及农林沙产业辅助性活动,总体为前两类沙产业的下游延伸环节,与第三产业重合度较高,并且具有机构单位规模较小、统计资料不足、劳动者报酬和营业盈余边界模糊、固定资产占比较低、总体数量较少等特征,因而其产值核算也宜采用收入法。计算公式如下:

$$V_3 = \sum_{e=1}^f v_{3e} \quad (8)$$

式中: V_3 为服务业沙产业产值; v_{3e} 为第 e 个服务业沙产业机构单位的增加值, $e=1, 2, \dots, f$ 。

2.3.3 耦合协调度评价方法

耦合度是衍生自物理学的概念,表示两个或两个以上的要素间通过相互作用和彼此影响达到协同的现象;但同时,耦合度高并不代表整体系统效益高,还应考虑要素间耦合关系发展的水平高低,即是否实现了协调。本文参考物理学模型^[16,17,24],构建荒漠化治理综合效益耦合度模型如下:

$$C = \sqrt[3]{(U_1 \cdot U_2 \cdot U_3) / \left(\frac{U_1 + U_2 + U_3}{3} \right)^3} \quad (9)$$

$$U_z = \sum_{j=1}^m w_j Y_{ij} \quad (10)$$

式中: C 为耦合度($0 \leq C \leq 1$), C 越大,要素之间越趋近良性共振耦合,系统整体性越强, C 达到1时系

2022年6月

统耦合状态达到最优; C 越小, 则要素之间越趋近无关状态, 系统整体性越弱, C 趋向于0时系统呈混乱状态。 U_z 为经济、生态和社会3个子系统各自的效益, $z=1, 2, 3$ 分别表示经济子系统、生态子系统和社会子系统, U_z 为第 i 个县级行政单元第 j 个指标值 Y_{ij} 和权重 w_j 的乘积之和。由此, 构建沙产业耦合协调度 D 的计算公式为:

$$B = \lambda U_1 + \mu U_2 + \gamma U_3 \quad (11)$$

$$D = \sqrt{CB} \quad (12)$$

式中: 发展效益指数 B 反映各系统整体正向发展的程度; λ 、 μ 、 γ 分别为经济、生态、社会3个子系统的权重, 本文认为三者同样重要因而均为 $1/3$; 耦合协调度 D 由耦合度和发展效益指数的乘积开方求得。同时, 参考相关研究^[25,26], 将耦合协调度划为4个等级: $0 \leq D < 0.2$ 为严重失调, $0.2 \leq D < 0.5$ 为轻度失调, $0.5 \leq D < 0.7$ 为初步协调, $0.7 \leq D < 1.0$ 为优质协调。

2.4 面板数据多元线性回归模型

面板数据既有横截面的维度(n 个横截面体), 又有时间维度(T 个时期), 能够缓解遗漏变量偏差并提供多个体动态行为信息, 因而采用面板数据进行多元回归分析能够在一定程度上消除不可观测、不随时间变化的异质性, 得到回归系数的一致估计。面板数据多元线性回归模型的形式为:

$$y_{it} = \alpha_i + \beta x_{it} + \varepsilon_{it} \quad (13)$$

式中: i 表示截面数量, 即县级行政单元, $i=1, 2, \dots, n$; t 为时间标示, $t=1, 2, \dots, T$; x_{it} 为解释变量; β 为 $n \times 1$ 系数向量; α_i 为个体 i 不随时间改变的影响因素; ε_{it} 为随截面和时间变化的不可观测影响因素, 即随机误差项。

根据《全国防沙治沙规划》《全国防沙治沙综合示范区规划》《关于加快发展沙产业的若干意见》以及相关研究^[13,27,28], 人工造林种草、转变农牧业生产经营方式、建设沙产业示范区、推进防沙治沙与开发建设同步等措施是毛乌素沙地及周边地区主要的荒漠化治理措施。据此, 本文以荒漠化治理效益耦合协调度 D 为被解释变量, 选择人工造林面积 X_1 、农机总动力 X_2 、在业沙产业企业数 X_3 、以及城镇化率 X_4 等指标为解释变量, 分别表征生态修复

工程实施进度、农牧业生产技术和生产效率变化、沙产业发展水平和城乡二元结构调整, 通过多元线性回归分析, 明确经济、生态、社会多方驱动力对毛乌素沙地治理成效的影响。

3 结果与分析

3.1 时间序列变化分析

毛乌素沙地荒漠化治理效益耦合协调度在研究期内波动上升, 最低值0.29出现在2004年, 最高值0.68出现在2017年, 整体由轻度失调过渡至初步协调; 耦合度由0.80上升至0.94后波动下降, 最低值为2019年的0.55; 协调度最小值为2004年的0.11, 随后波动上升, 最高值0.72出现在2017年(图2)。在经济效益、生态效益、社会效益3个子系统中, 经济效益呈显著的上升趋势, 从2004年的0.04上升至2019年的1.64; 生态效益波动上升, 最低值为2004年的0.17, 最高值为2017年的0.69; 社会效益普遍较低且稳定, 在0.12~0.14之间波动(图3)。综合来看, 可以划分出3个阶段:

起步期(2004—2007年): 荒漠化治理综合效益耦合协调度波动上升但处于轻度失调状态, 最高值为2007年的0.41; 耦合度在2006年达到了研究期内的最高值0.94, 协调度从0.11缓慢提升至0.19。经济、生态、社会3个子系统的效益在这一时期均较低, 经济效益从0.04提升至0.26, 生态效益在0.17~0.22间波动, 社会效益稳定在0.13左右。由此可以看出, 毛乌素沙地荒漠化治理在这一时期初见成

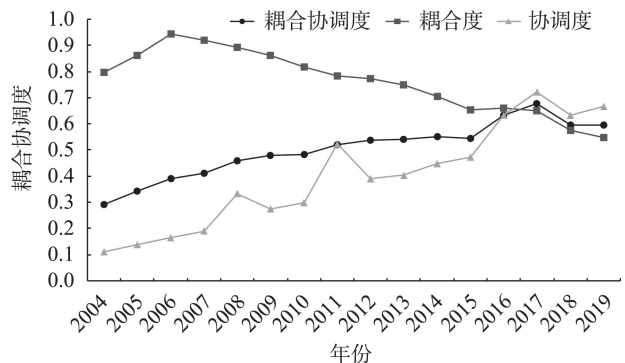


图2 2004—2019年毛乌素沙地逐年荒漠化治理综合效益耦合协调度

Figure 2 Annual coupling coordination degrees of desertification control benefits in the Mu Us Sandy Land, 2004-2019

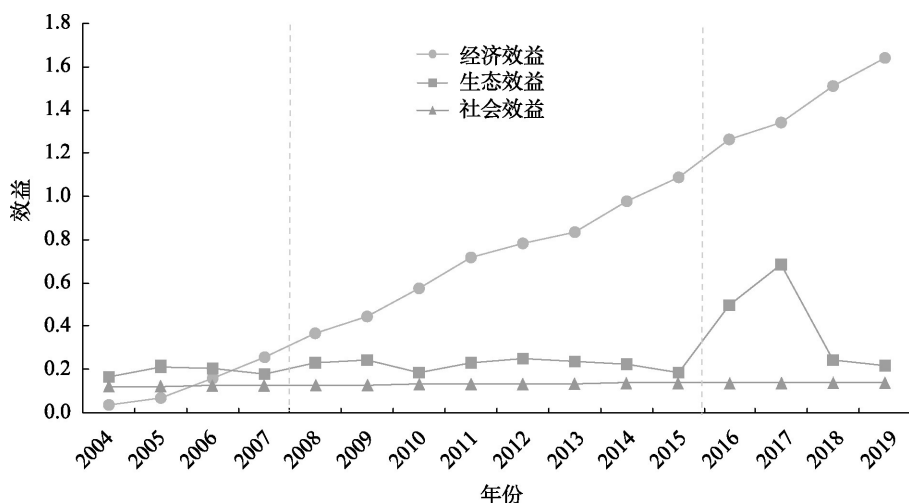


图3 2004—2019年毛乌素沙地逐年荒漠化治理经济、生态、社会效益

Figure 3 Annual economic, ecological, and social benefits of desertification control in the Mu Us Sandy Land, 2004-2019

效,但生态效益和社会效益不显著,经济效益是提升耦合协调度的主要因素;子系统间变动趋势的一致性使这一时期的耦合度较高,但效益产出较低,协调度也因此较低。

发展期(2008—2015年):荒漠化治理综合效益耦合协调度波动上升,由轻度失调转变为初步协调,最低值为2008年的0.46,最高值为2014年的0.55;耦合度持续下降,由0.89降至0.65;协调度有较大的波动,整体呈上升趋势。经济效益在这一时期仍然持续提升,从0.37提高至1.09;生态效益出现了波动但仍然较为稳定,最高值为0.25,最低值为0.19;社会效益略有提升但仍然稳定在低值。据此,毛乌素沙地荒漠化治理在这一时期有显著成效,尤其是经济子系统的快速发展带动了耦合协调度的提升,但生态效益和社会效益的变化不显著,也造成了耦合度持续降低,即子系统间变动趋势的一致性逐渐降低。

调整期(2016—2019年):荒漠化治理综合效益耦合协调度波动上升,在2016年和2017年接近优质协调,随后下降至0.60;耦合度仍然持续下降,降至研究期内最低值0.55;协调度波动上升,在2017年达到研究期内最高值0.72。经济效益在这一时期仍然持续升高,达到研究期内最高值1.64;生态效益在2017年达到最高值0.69,随后波动下降,但相比前两期仍略有提高;社会效益仍然稳定在0.14左右

没有太大变化。由此可以看出,毛乌素沙地荒漠化治理在这一时期有比较显著的综合效益产出,尤其是经济效益较为突出,但受到生态效益和社会效益没有显著提升的影响,耦合度持续下降,耦合协调度整体还是处于初步协调状态。

毛乌素沙地是全国最早开始荒漠化治理的区域之一,至20世纪80年代荒漠化趋势已出现逆转,但人类过度开发造成的耕地、草场退化现象仍然非常严重,不合理的生产活动仍然主导着土地退化过程^[29];随着“三北”防护林工程、天然林保护工程、退耕还林还草工程、全面治理荒沙行动等生态修复工程相继在毛乌素沙地实施建设,进入21世纪后该地区流沙基本得到固定,新增造林速度放缓,荒漠化治理的重点任务逐渐由恢复林草植被调整为发展沙产业,以可持续的生产方式降低对生态系统的压力,兼顾经济效益和社会效益。

上述时间节点与本文所得荒漠化治理综合效益耦合协调度时间序列变化特征有较高的一致性:在起步期(2004—2007年),毛乌素沙地荒漠化治理仍以林业工程建设为主,经济、生态、社会三方面的效益在低位耦合,生态效益相对而言较为突出;至发展期(2008—2015年),在区域整体经济基本面提升和沙产业发展的推动下,经济子系统的效益提升速度较快,而生态治理趋于稳定没有较大增速,社会效益没有显著改善,荒漠化治理效益耦合协调度

2022年6月

在经济效益的带动下波动上升,但3个子系统间的耦合度反而有所下降;至调整期(2016—2019年),毛乌素沙地荒漠化治理的生态任务基本完成,发展沙产业成为重点工作,经济效益持续提升,但对解决就业问题、调整人口结构、缩小贫富差距等社会效益的带动作用仍然不足,因而荒漠化治理效益耦合协调度有所提高,但子系统间的耦合度持续下降;此外,2016年和2017年榆林市及鄂尔多斯市几乎未发生沙尘天气,使当年生态效益显著高于平均水平,虽具有一定的偶然性,但结合研究期内沙尘天气过程发生频率的总体趋势可以看出,随着植被覆盖度的提高,毛乌素沙地及周边地区受风沙灾害的威胁确实在显著降低。

3.2 空间分布特征分析

根据各县级行政单元逐年耦合协调度(图4)可知:所有县级行政单元的荒漠化治理综合效益耦合协调度都在研究期内逐步升高,从轻度失调过渡至初步协调,部分区域达到了优质协调。从空间上看,毛乌素沙地荒漠化治理耦合协调度具有东高西低的特征,东部神木市和东北部伊金霍洛旗的耦合协调度提升速度最快。在起步期(2004—2007年),所有县级行政单元的荒漠化治理综合效益都处于轻度失调状态;在发展期(2008—2015年),毛乌素沙地绝大部分县级行政单元的荒漠化治理综合效益都由轻度失调过渡至初步协调,从空间上看南北两侧的县级行政单元耦合协调度提升速度较快,而榆阳区、乌审旗、鄂托克前旗的耦合协调度改善速度相对较慢;在调整期(2016—2019年),毛乌素沙地所有县级行政单元都实现了初步协调,且具有耦合协调度东高西低的特征,其中榆阳区、神木市、横山区、伊金霍洛旗、乌审旗的荒漠化治理综合效益达到了优质协调。

毛乌素沙地东部是黄土高原与鄂尔多斯高原过渡区^[30,31],人口密度大、人类活动强度高,但沙化程度也相对较浅,荒漠化治理的重点是改善生产方式以缓和人地矛盾。因此,2008年后随着沙产业的推广,该区域的荒漠化治理综合效益有了显著提升,但水资源消耗问题也日益加重,生态效益仍不稳定;东北部伊金霍洛旗和神木市荒漠化治理效益耦合协调度改善较显著,主要得益于这一地区沙化

土地面积较小、旱地灌木资源丰富、人口数量较少,因而通过林业生态工程和沙产业的推动,生态效益和经济效益能够以较快的速度提升,但社会效益改善不显著;中部乌审旗是毛乌素沙地内荒漠化问题最严重的区域,通过林业生态工程建设已基本控制了重度土地退化趋势,流沙面积显著减少,沙产业也有了较好的发展,在2017年实现了优质协调,但该区域荒漠化治理对社会效益的带动仍然不足;西部的鄂托克旗、鄂托克前旗和盐池县属于西鄂尔多斯荒漠草原区,虽然沙化面积较小、人口密度不高,但沙化程度深,产业活动模式也比较落后,农牧业开发对土地造成了很大压力,荒漠化治理综合效益耦合协调度在研究期内有所提升,但总体速度较慢,始终未达到优质协调。

3.3 驱动因素分析

3.3.1 面板数据的平稳性检验

本文选取的研究期跨度较大,因而在回归分析前首先需要进行平稳性检验。具体地,采用相同单位根过程下的LLC(Levin-Lin-Chu)检验,以及不同单位根过程下的IPS(Im-Pesaran-Shin)检验、Fisher-ADF检验和Fisher-PP检验等4种方法,通过Stata 15软件分别对毛乌素沙地荒漠化治理综合效益耦合协调度及其驱动因素的数据进行了平稳性检验。结果显示(表2),所有指标的4种单位根检验 P 值均小于5%,即全部通过了4种单位根检验,由此可以认为所有变量对应的水平方程均为零阶单整平稳序列 $I(0)$,不存在“伪回归”现象。

3.3.2 面板数据模型估计

面板数据线性回归模型包括个体固定效应模型和个体随机效应模型,本文对数据进行了豪斯曼(Hausman)检验,得到 $P=0.00<0.01$,故采用固定效应模型。由此,根据公式(13)对毛乌素沙地荒漠化治理综合效益耦合协调度 D 与人工造林面积 X_1 、农机总动力 X_2 、在业沙产业企业数 X_3 、城镇化率 X_4 等4个解释变量进行回归分析,得到结果如表3所示。据此可以建立毛乌素沙地荒漠化治理综合效益回归模型:

$$D=0.274X_1+0.099X_2+0.057X_3+0.232X_4-5.229 \quad (14)$$

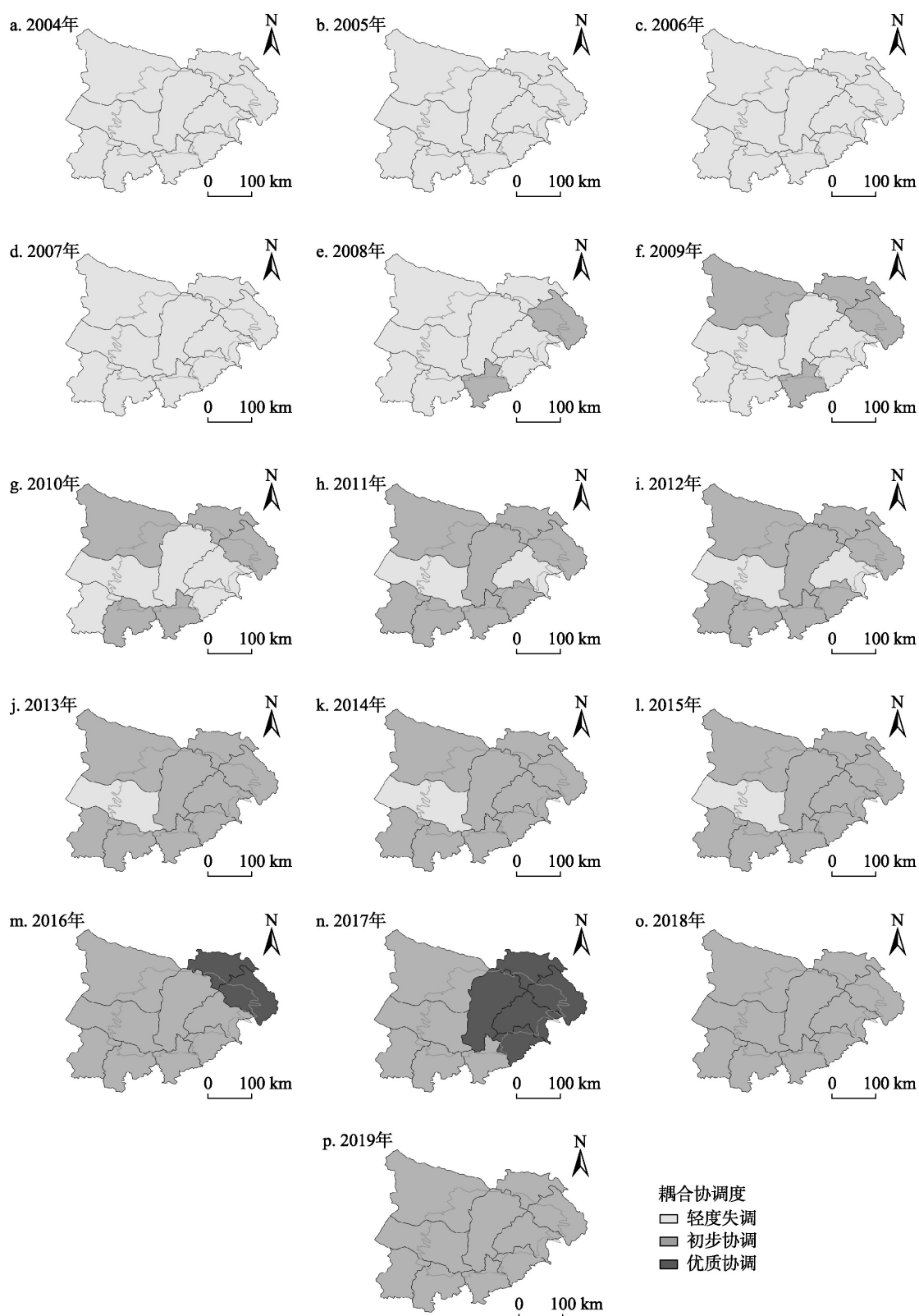


图4 2004—2019年毛乌素沙地荒漠化治理综合效益耦合协调度空间分布

Figure 4 Spatial distribution of annual coupling coordination degrees of desertification control benefits in the Mu Us Sandy Land, 2004-2019

表2 平稳性检验结果

Table 2 Results of stationarity test				
变量	LLC 检验 P 值	IPS 检验 P 值	Fisher-ADF 检验 P 值	Fisher-PP 检验 P 值
D	0.000	0.021	0.000	0.001
X_1	0.000	0.005	0.000	0.000
X_2	0.000	0.025	0.017	0.041
X_3	0.000	0.011	0.000	0.001
X_4	0.000	0.006	0.000	0.002

表3 面板数据多元线性回归结果

Table 3 Results of panel data regression				
变量	回归系数	回归系数标准误差	t	$P> t $
X_1	0.274	0.049	5.620	0.000
X_2	0.099	0.049	2.030	0.045
X_3	0.057	0.018	3.200	0.002
X_4	0.232	0.109	2.120	0.036
常数项	-5.229	0.344	-15.210	0.000

该回归模型的 $P=0.0000<0.0001$,置信度达99.99%以上;组间判定系数(R^2 within)达到了0.8240,拟合效果较好。毛乌素沙地人工造林面积 X_1 、农机总动力 X_2 、在业沙产业企业数 X_3 、城镇化率 X_4 均与荒漠化治理效益耦合协调度 D 有显著的正相关性, P 值均小于5%。其中,人工造林面积和城镇化率对耦合协调度影响较高,分别为0.274和0.232;农机总动力和在业沙产业企业数也显著影响了荒漠化治理成效的提升,但贡献度相对较小,系数分别为0.099和0.057。由此可知,首先,植树造林可直接实现防风固沙,在较短时期内改善生态系统;同时,在毛乌素沙地植被覆盖度已达到干旱区较高水平,鲜有大面积新增造林后,防护林仍能够通过提高土地净初级生产力、增强生态系统韧性、减少风沙灾害、改善人居环境等路径,间接支持经济和社会效益持续提升,因此,人工造林是驱动毛乌素沙地荒漠化治理综合效益耦合协调度改善的主导因素。其次,毛乌素沙地具有悠久的农牧业发展历史,但过度开垦放牧也是造成沙化的重要原因,随着区域产业结构的调整和城镇化的推进,部分从事传统农牧业的居民逐渐转向工业或服务业,逐步减轻了对土地开发的强度,因而城镇化率和荒漠化治理综合效益耦合协调度也具有显著的高相

关性。此外,充分运用高新技术提高农牧业的资源利用效率,降低对生态系统的压力,是平衡自然供给和人类需求的关键途径,以农机总动力表征的农业机械化水平在研究期内持续增长,对毛乌素沙地荒漠化治理综合效益耦合协调度产生了影响,但其程度仍十分有限。同时,沙产业发展是毛乌素沙地实现可持续生态治理和区域发展的重要措施,将在业沙产业企业数量作为沙产业发展水平的表征,可知沙产业发展显著推动了毛乌素沙地荒漠化治理综合效益耦合协调度的改善,但由于沙产业发展处于初期阶段,沙产业企业数量较少,对荒漠化治理的贡献度仍然有待进一步提高。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文选取毛乌素沙地作为研究区,对2004—2019年间荒漠化治理“经济-生态-社会”综合效益耦合协调度进行评估,阐明其在时间尺度上的演化特征和在空间尺度上的分布特征;在此基础上,采用面板数据回归模型分析了影响荒漠化治理综合效益耦合协调度变化的驱动因素。得出如下结论:

(1)毛乌素沙地荒漠化治理综合效益耦合协调度在研究期内波动上升,最低值0.29出现在2004年,最高值0.68出现在2017年,整体由轻度失调过渡至初步协调;耦合度由0.80上升至0.94后持续下降,协调度由2004年的0.11波动上升;在3个子系统中,经济效益持续提高,生态效益逐年增长但趋势平缓,社会效益稳定在低位。

(2)毛乌素沙地荒漠化治理综合效益耦合协调度可分为3个阶段:起步期(2004—2007年)所有县级行政单元均处于轻度失调状态,经济、生态、社会3个子系统在低位耦合,荒漠化治理取得了一定的

成效但不显著;发展期(2008—2015年)经济子系统有较快增长,绝大部分县级行政单元由轻度失调过渡至初步协调,且南北两侧地区的提升速率更高;调整期(2016—2019年)各县级行政单元荒漠化治理综合效益耦合协调度持续提高并实现了初步协调,东侧地区达到了优质协调,但受制于生态效益和社会效益的增速远低于经济效益,耦合度持续下降。

(3)人工造林面积、农机总动力、在业沙产业企业数和城镇化率是驱动毛乌素沙地荒漠化治理综合效益耦合协调度提升的因素。其中,人工造林面积和城镇化率对耦合协调度影响较高,系数分别为0.274和0.232;农机总动力和在业沙产业企业数也显著影响了荒漠化治理成效的提升,但贡献度相对较小,系数分别为0.099和0.057。

4.2 讨论

毛乌素沙地荒漠化治理工作开展较早,近20年来治理方案已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,力图从根本上减轻过度开发对土地造成的压力。通过本文分析,结合荒漠化和沙化土地面积的变动可以发现,毛乌素沙地的荒漠化治理成效突出,生态治理目标基本实现,经济效益快速升高,社会效益也有一定改善^[12]。但同时,鄂托克前旗和乌审旗等深度沙化区仍未完成治理,水资源消耗量不降反增,沙产业推广速度低于预期,劳动力匮乏和贫富差距等问题仍然突出^[5,32],经济、生态、社会3个子系统间仍未形成良好的耦合关系,尤其是生态治理和经济发展的成果未能有效传导至社会系统,治理成果仍不稳定,人地系统的内在掣肘问题有待进一步解决。

通过荒漠化治理综合效益耦合协调度驱动因素分析可知,植树造林的治理成效最为显著,因而抚育更新已有防护林、丰富防护林树种多样性、提高水资源使用效率,依然是荒漠化治理的重要任务^[9]。过度开垦和放牧是毛乌素沙地在历史时期反复出现沙化的主要原因^[33],随着地区产业结构的转型,农牧业生产的范围和强度都有所下降,因而城镇化成为助推荒漠化治理的主要驱动力之一;同时也需注意到,城镇空间将人类生存需求高度集中,在榆林

市和鄂尔多斯市矿产采掘业极为发达的背景下,未来可能会对毛乌素沙地生态系统形成新的威胁^[34]。此外,充分运用高新技术降低传统农牧业对资源的消耗,发展灌木种植、螺旋藻养殖、板材加工、沙漠旅游等沙产业,是补充林业生态工程,协助居民生计转型,实现可持续生态治理和经济社会发展的重要途径^[35,36];毛乌素沙地沙产业发展起步较早,但受制于生产技术研发的速度,对荒漠化治理的贡献度仍然低于预期,应在之后的生态文明建设中着力推进^[3,28]。与此同时,气候变暖导致西北地区在年代际尺度上升温迅速,冰川消融量和径流量连续多年增加,降水量显著上升^[37],这一变化虽有利于植被生长,但也干扰了对荒漠化治理措施的准确评估^[38],因此,未来将进一步探索荒漠生态系统对气候变化因子和人类活动因子的响应,明确毛乌素沙地荒漠化逆转的成因机制,为在全球变化背景下实现稳定生态治理和区域可持续发展提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 甄霖, 胡云锋, 魏云洁, 等. 典型脆弱生态区生态退化趋势与治理技术需求分析[J]. 资源科学, 2019, 41(1): 63–74. [Zhen L, Hu Y F, Wei Y J, et al. Trend of ecological degradation and restoration technology requirement in typical ecological vulnerable regions[J]. Resources Science, 2019, 41(1): 63–74.]
- [2] Cheng L L, Lu Q, Wu B, et al. Estimation of the costs of desertification in China: A critical review[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(4): 975–983.
- [3] 王岳, 刘学敏, 哈斯额尔敦. 毛乌素沙地“沙产业”发展水平评价[J]. 中国软科学, 2019, (6): 22–34. [Wang Y, Liu X M, Hasi E E D. Research on the evaluation of deserticulture development in the Mu Us Desert[J]. China Soft Science, 2019, (6): 22–34.]
- [4] 卢琦, 雷加强, 李晓松, 等. 大国治沙: 中国方案与全球范式[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(6): 656–664. [Lu Q, Lei J Q, Li X S, et al. China's combating desertification: National solutions and global paradigm[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(6): 656–664.]
- [5] Bryan B A, Gao L, Ye Y, et al. China's response to a national land– system sustainability emergency[J]. Nature, 2018, 559 (7713): 193–204.
- [6] Lu C X, Zhao T Y, Shi X L, et al. Ecological restoration by afforestation may increase groundwater depth and create potentially large ecological and water opportunity costs in arid and semiarid China

2022年6月

- [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 176: 1213–1222.
- [7] Cao S X. Impact of China's large-scale ecological restoration program on the environment and society in arid and semiarid areas of China: Achievements, problems, synthesis, and applications[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(4): 317–335.
- [8] Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2016, DOI: 10.1038/nclimate2837.
- [9] 朱教君, 郑晓. 关于三北防护林体系建设的思考与展望: 基于40年建设综合评估结果[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(5): 1600–1610. [Zhu J J, Zheng X. The prospects of development of the Three-North Afforestation Program (TNAP): On the basis of the results of the 40-year construction general assessment of the TNAP [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(5): 1600–1610.]
- [10] 程磊磊, 却晓娥, 杨柳, 等. 中国荒漠生态系统: 功能提升、服务增效[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(6): 690–698. [Cheng L L, Que X E, Yang L, et al. China's desert ecosystem: Functions rising and services enhancing[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(6): 690–698.]
- [11] 王敏晰, 马宇, 刘威, 等. 生态文明建设与资源循环利用耦合关系[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 577–587. [Wang M X, Ma Y, Liu W, et al. Coupling and coordination relationship between resource recycling and ecological civilization construction[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 577–587.]
- [12] 徐志伟, 鹿化煜. 毛乌素沙地风沙环境变化研究的理论和新认识[J]. *地理学报*, 2021, 76(9): 2203–2223. [Xu Z W, Lu H Y. Aeolian environmental change studies in the Mu Us Sandy Land, north-central China: Theory and recent progress[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(9): 2203–2223.]
- [13] 刘铮瑶, 董治宝, 刘永林, 等. 毛乌素沙地沙产业发展条件[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(4): 881–888. [Liu Z Y, Dong Z B, Liu Y L, et al. Conditions for the development of deserticulture in the Mu Us Sandy Land[J]. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(4): 881–888.]
- [14] 赵晓彬, 曹双成, 高静, 等. 毛乌素沙地植物多样性保护防沙治沙示范[J]. *中国野生植物资源*, 2021, 40(6): 64–72. [Zhao X B, Cao S C, Gao J, et al. Demonstration of sand control by plant diversity protection in Mu Us Sandy Land[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2021, 40(6): 64–72.]
- [15] Zhang D, Deng H. Historical human activities accelerated climate-driven desertification in China's Mu Us Desert[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134771.
- [16] 刘洁, 姜丰, 栗志慧. 京津冀城市群产业-人口-空间耦合协调发展研究[J]. *中国软科学*, 2021, (S1): 171–178. [Liu J, Jiang F, Li Z H. Study on the coordinated development of industry-population-space coupling in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. *China Soft Science*, 2021, (S1): 171–178.]
- [17] 赵宏波, 魏甲晨, 孙东琪, 等. 大城市内部“生产-生活-生态空间”多尺度耦合协调度: 以郑州市为例[J]. *资源科学*, 2021, 43(5): 944–953. [Zhao H B, Wei J C, Sun D Q, et al. Multi-scale analysis on the coupling coordination degree of production-living-ecological spaces in cities: A case study of Zhengzhou City[J]. *Resources Science*, 2021, 43(5): 944–953.]
- [18] 蒋萍, 蒋再平. 卫星账户研究视角与体系结构[J]. *统计研究*, 2020, 37(9): 3–10. [Jiang P, Jiang Z P. The research perspective and systematic structure of satellite accounts[J]. *Statistical Research*, 2020, 37(9): 3–10.]
- [19] 钱学森. 创建农业型知识密集产业: 农业、林业、草业、海业和沙业[J]. *农业现代化研究*, 1984, (5): 1–6. [Qian X S. The destruction of knowledge-intensive agriculture: Agriculture, forestry, grass industry, mariculture, and deserticulture[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 1984, (5): 1–6.]
- [20] 刘恕. 跨世纪的沙漠利用战略构想[J]. *中国软科学*, 1995, (5): 33–36. [Liu S. The epoch-making strategy of desert utilization[J]. *China Soft Science*, 1995, (5): 33–36.]
- [21] 樊胜岳, 高新才. 中国荒漠化治理的模式与制度创新[J]. *中国社会科学*, 2000, (6): 37–44. [Fan S Y, Gao X C. Innovations in the model for bringing desertification under control in China and institutional creation[J]. *Social Sciences in China*, 2000, (6): 37–44.]
- [22] 王岳, 刘学敏, 哈斯额尔敦, 等. 中国沙产业研究评述[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(4): 27–34. [Wang Y, Liu X M, Hasi E E D, et al. Review on deserticulture research in China[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(4): 27–34.]
- [23] 许宪春. 中国国民经济核算核心指标的变迁: 从MPS的国民收入向SNA的国内生产总值的转变[J]. *中国社会科学*, 2020, (10): 48–70. [Xu X C. Changes in the core indicators of China's national economic accounting: From MPS national income to SNA Gross Domestic Product[J]. *Social Sciences in China*, 2020, (10): 48–70.]
- [24] 李治兵, 沈涛, 肖怡然, 等. 西北地区农业生态和经济系统协调发展研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(12): 237–244. [Li Z B, Shen T, Xiao Y R, et al. Study on the coordinated development of agricultural ecology and economic in northwest China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(12): 237–244.]
- [25] 任保平, 杜宇翔. 黄河流域经济增长-产业发展-生态环境的耦合协同关系[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(2): 119–129. [Ren B P, Du Y X. Coupling coordination of economic growth, industrial development and ecology in the Yellow River Basin[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(2): 119–129.]
- [26] 张学渊, 魏伟, 颜斌斌, 等. 西北干旱区生态承载力监测及安全

- 格局构建[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2389–2402. [Zhang X Y, Wei W, Xie B B. Ecological carrying capacity monitoring and security pattern construction in arid areas of Northwest China [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11): 2389–2402.]
- [27] 韩雪莹, 杨光, 秦富仓. 毛乌素沙地近30年沙漠化土地时空动态演变格局[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 144–150. [Han X Y, Yang G, Qin F C. Spatial and temporal dynamic patterns of sandy land in Mu Us in the last 30 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 144–150.]
- [28] 范敬龙, 李丙文, 徐新文, 等. 基于植物防沙工程的沙产业技术进展: 以肉苁蓉种植产业为例[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(6): 717–723. [Fan J L, Li B W, Xu X W, et al. Technology progress of sand industry based on desertification control engineering by revegetation: Case study on *Cistanche* plantation[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(6): 717–723.]
- [29] 白壮壮, 崔建新. 近2000 a毛乌素沙地沙漠化及成因[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 177–185. [Bai Z Z, Cui J X. Desertification and its causes in Mu Us Desert in recent 2000 years[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(2): 177–185.]
- [30] 李森, 王涛, 颜长珍. 1965–2015年毛乌素沙地人类活动强度时空变化研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(3): 330–337. [Li S, Wang T, Yan C Z. Spatial-temporal evolution of human activity intensity in the Mu Us Sandy Land from 1965 to 2015 [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2021, 57(3): 330–337.]
- [31] 赵媛媛, 丁国栋, 高广磊, 等. 毛乌素沙区沙漠化土地防治区划[J]. 中国沙漠, 2017, 37(4): 635–643. [Zhao Y Y, Ding G D, Gao G L, et al. Regionalization for aeolian desertification control in the Mu Us Sandy Land region, China[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(4): 635–643.]
- [32] Cao S X, Chen L, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: Lessons in ecological restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2011, 104(4): 240–245.
- [33] 马晓慧, 庞奖励, 刘小楝, 等. 瓦窑沟剖面记录的早中全新世毛乌素沙地东南缘气候变化[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 71–80. [Ma X H, Pang J L, Liu X K, et al. Early and Middle Holocene climate change inferred by Wayaogou Section in the South-eastern Mu Us Desert[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(5): 71–80.]
- [34] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [35] 李茜, 胡昊, 李名升, 等. 中国生态文明综合评价及环境、经济与社会协调发展研究[J]. 资源科学, 2015, 37(7): 1444–1454. [Li Q, Hu H, Li M S, et al. Ecological civilization evaluation and coordinated development between environment, economy and society [J]. Resources Science, 2015, 37(7): 1444–1454.]
- [36] 王涛. 荒漠化治理中生态系统、社会经济系统协调发展问题探析: 以中国北方半干旱荒漠区沙漠化防治为例[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7045–7048. [Wang T. Study on the coordinated development of ecosystem and socio-economic system in desertification control: A case study of desertification control in semiarid area in North China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7045–7048.]
- [37] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, (2): 152–164. [Shi Y F, Shen Y P, Li D L, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, (2): 152–164.]
- [38] 李晓菲, 徐长春, 李路, 等. CMIP5模式对西北干旱区典型流域气温模拟能力评估: 以开都-孔雀河为例[J]. 资源科学, 2019, 41(6): 1141–1153. [Li X F, Xu C C, Li L, et al. Evaluation of air temperature of the typical river basin in desert area of Northwest China by the CMIP5 models: A case of the Kaidu-Kongqi River Basin[J]. Resources Science, 2019, 41(6): 1141–1153.]

Spatiotemporal differentiation and driving factors of coupling coordination degree of economic–ecological–social benefits from desertification control in the Mu Us Sandy Land

WANG Yue^{1,2}, LIU Xuemin³, HASI Eerdun³

(1. Business School, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Development Institute of Jiangbei New Area, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The coupling coordination degree of economic- ecological- social benefits is a vital indicator for measuring the achievements of desertification control, and measuring the integrated benefits is a solid basis of sustainable desertification control. In this study, we evaluated the desertification control benefits of the economic-ecological-social system of the Mu Us Sandy Land in 2004-2019. We discussed the temporal characteristics of desertification control benefits coupling coordination degree as well as its spatial distribution, and analyzed the driving factors. The results show that the coupling coordination degree changed from mild imbalance to preliminary balance. During the initial period (2004- 2007), the coupling coordination degree was imbalanced but improving. During the developing period (2008-2015), the coupling coordination degree increased with volatility, showing the characteristics of high in the north and the south. During the stabilizing period (2016-2019), the coupling coordination degree was preliminary balanced with higher values in the east. Afforestation area, agricultural machinery power, the number of deserticulture companies, and urbanization rate have a consistent long-term positive impact on the coupling coordination degree; afforestation and urbanization are the main driving factors. This study provides a new approach for accurately evaluating the effectiveness of desertification control in the Mu Us Sandy Land, and gives scientific support for the ecological civilization construction and regional sustainable development in a wider range of desert areas.

Key words: desertification control; deserticulture; satellite accounts; coupling coordination degree; panel data; Mu Us Sandy Land