

DOI: 10.20103/j.stxb.202409052132

宫炳含, 吕楠, 武旭同, 余慧倩. 面向可持续发展目标的中国旱地社会-生态系统分类研究. 生态学报, 2025, 45(10): 4743-4757.

Gong B H, Lü N, Wu X T, Yu H Q. Mapping the social-ecological system in China's drylands towards sustainable development goals. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 4743-4757.

# 面向可持续发展目标的中国旱地社会-生态系统分类研究

宫炳含<sup>1,2</sup>, 吕楠<sup>1,2,\*</sup>, 武旭同<sup>3</sup>, 余慧倩<sup>1,2</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态安全全国重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

**摘要:**旱地(干旱指数小于 0.65 的区域)是人地关系最复杂、人地矛盾最突出的地区之一,是研究可持续发展的关键区域。中国旱地范围广阔,人-地相互作用特征明显且具有较大的区域差异。开展中国旱地“社会-生态系统”(Social-ecological System, SES)分类研究,有助于识别旱地 SES 的基本特征,提出与关键挑战和可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)相符的发展路径。基于 SES 理论和 SDGs 框架,构建了中国旱地 SES 分类框架,运用自组织映射网络的聚类方法进行 SES 分类,并分析各类型 SES 的特征、SDGs 实现状态及其时空变异,研究时间为 2000, 2010 和 2020 年。结果表明:(1)中国旱地 SESs 可划分为五个类型区:农业与城市化区(A)、农林牧交错带发展区(B)、草原工业化区(C)、绿洲待发展区(D)和高寒草地脆弱区(E)。(2)社会经济子系统的三个组分,包括经济发展水平、政策稳定性和人口特征,以及社会-生态相互作用子系统中人对自然的干预组分在 5 个 SES 类型区都呈现向好发展趋势,土地资源特征和生态系统服务在各类型之间差异较大,时间趋势差别较小。(3)整个旱地的 SDGs 存在显著组间差异,农业与城市化区的 SDGs 整体表现最好;绿洲待发展区的整体表现最差。各类型 SES 面临的关键挑战分别是:类型 A,提升城市绿色空间并减少不平等;类型 B,调节农牧结构失衡、水资源过度以及利用技术创新和转型。类型 C、D 和 E,都面临提升经济发展的挑战,此外,类型 C 要兼顾减排;类型 D 兼顾生态系统服务和提高人民生活质量;类型 E 兼顾生态系统服务维持和满足当地居民的生存、生活需求。研究建议要面向不同 SES 类型区的关键挑战,制定因地、因时制宜的可持续发展策略,优先提升人民基本需求,攻克 SDGs 短板,逐步实现可持续发展。

**关键词:**旱地;社会-生态系统;可持续发展目标;聚类分析

## Mapping the social-ecological system in China's drylands towards sustainable development goals

GONG Bingham<sup>1,2</sup>, LÜ Nan<sup>1,2,\*</sup>, WU Xutong<sup>3</sup>, YU Huiqian<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory for Ecological Security of Regions and Cities, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** Drylands (areas with an aridity index less than 0.65) are regions characterized by complex human-environment interactions and significant human-land conflicts, making them key areas for studying sustainable development. Mapping the Social-Ecological System (SES) in China's drylands can help identify the basic characteristics of SESs in drylands and

**基金项目:**国家自然科学基金重点基金项目(42430505)

**收稿日期:**2024-09-05; **网络出版日期:**2025-03-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nanlv@rcees.ac.cn

限于数据的可获取性,本研究尚未含中国港澳台和新疆建设兵团统计数据。

propose development paths consistent with key challenges and the Sustainable Development Goals (SDGs). Based on the SES theory and the SDGs framework, this paper constructed a classification framework for SES in China's drylands and applied the Self-Organizing Map clustering method for SES archetype mapping. The temporal dynamics and spatial variations of SES characteristics and SDGs were also analyzed for the years 2000, 2010, and 2020. The results showed that: (1) China's drylands are divided into five SES archetypes: Agricultural and Urbanization Systems (A); Agricultural, Forestry, and Pastoral Zones to Be Developed Systems (B); Grassland Industrialization Systems (C); Oases to Be Developed Systems (D); and Alpine Grassland Fragile Systems (E). (2) In the social-economic subsystem, the three components of economic development level, policy stability, and demographic characteristics, as well as human intervention in the social-ecological interaction subsystem, showed a positive trend across the five SES archetypes. Land resource characteristics and nature's contribution to humans varied considerably across archetypes, with smaller differences in temporal trends. (3) Significant intergroup differences in SDGs were found, with the Agricultural and urbanization systems performing the best; and the Oases-to-be developed systems the worst. The key challenges for each SES archetypes are: A enhancing urban green space and reducing inequality; B addressing imbalances in agro-pastoral structures, excess water use, and technological innovations and transformations. In addition, C, D, and E faced the challenge of upgrading economic development. C integrating emission reductions; D improving ecosystem services and quality of life; and E balancing ecosystem services preservation with fulfilling local survival and livelihood needs. The findings of this study contributed to the formulation of locally adapted sustainable development strategies, suggesting that priority should be given to upgrading the basic needs of the people and overcoming the shortcomings of the SDGs to progressively achieve sustainable development by targeting the key challenges of different SES archetypes.

**Key Words:** drylands; social-ecological system; sustainable development goals; archetype analysis

人类活动对自然环境产生的影响日益加剧且呈全球化趋势,地球进入“人类世”阶段<sup>[1]</sup>。人类生存与发展与地球系统过程的诸多方面相互影响,社会系统与生态系统相互作用的复杂系统研究范式逐步出现,成为可持续发展科学的研究焦点<sup>[2-3]</sup>。为适应全球环境变化,实现人类长期稳定发展,联合国制定了可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)。SDGs的实现不仅依赖于社会经济系统的过程与功能、生态系统的过程与功能,更依赖于二者之间的正向相互作用<sup>[4-5]</sup>。因此,SDG框架将人和自然视为一个整体,旨在通过区域和全球生态、社会、经济、文化全领域合作,协调人类发展与生态环境保护。

社会-生态系统(Social-ecological System, SES)理论是可持续科学研究的重要理论和前沿。社会-生态系统指的是社会系统与生态系统两者关联而成的耦合系统,其中“社会”指代人类社会及其活动的本体,“生态”指代自然生态系统本体,SES是包含生态系统要素组成、社会经济系统要素组成、生态与社会经济过程及其相互作用的综合性表述<sup>[3,6]</sup>。马世骏先生早在1984年就提出了“社会-经济-自然复合生态系统”理论,开拓了人与环境系统之间复杂相互作用研究的先河<sup>[7]</sup>。近年来,社会-生态系统理论不断发展,代表性的研究范式包括可持续性分析通用框架,即社会-生态系统框架<sup>[8-9]</sup>(Social-ecological systems framework, SESF),人地耦合框架<sup>[10]</sup>(系统内、近程、远程耦合)(Coupled human and natural systems, CHANS),格局-过程-服务-可持续性框架<sup>[11]</sup>(Pattern-process-service-sustainability)等。这些框架分别以研究人类与环境系统之间的反馈关系、系统内和系统间动态耦合与全程耦合相互作用,以及级联相关与驱动机制为研究重点,解析人地动态作用关系。

SES分类研究介于案例研究的特殊性与理论研究的抽象性之间,是认识区域环境和社会经济差异的有效方法<sup>[12]</sup>,可为可持续发展的分类型治理奠定基础。先前关于SES分类研究大多集中于脆弱性和恢复力或韧性等概念<sup>[13-15]</sup>,例如,全球脆弱性分类<sup>[16]</sup>、气候变化适应性分类<sup>[17]</sup>、沿海城市群生态韧性分类<sup>[18]</sup>等研究。近年来也有一些基于SES的分类研究主题拓宽了依靠识别人类聚落<sup>[19]</sup>、土地利用强度<sup>[20]</sup>、生态区位或生态系统服务簇<sup>[21-23]</sup>等单一系统要素的方式,将分类拓展为粮食安全与减贫<sup>[24]</sup>、野生动物保护<sup>[25]</sup>、以及整体阐述人与环境的相互作用等<sup>[26-28]</sup>。整体上,这些研究通常缺少人-地交互作用方面的指标,对应的SDGs较为单一。同时,如何筛选和完善适宜不同区域特征的指标体系也依然存在挑战<sup>[27-29]</sup>。尤为重要的是,这些SES分类研究与SDGs之间没有建立整体联系,SDGs发展状态究竟受到SES哪些关键组分制约仍不明晰,从而难

以制订面向关键挑战的资源管理和区域生态环境治理策略。

旱地(UNEP 定义为干旱指数 aridity index ( $AI$ ) 小于 0.65 的区域,包括极端干旱区( $AI < 0.05$ ),干旱区( $0.05 \leq AI < 0.2$ ),半干旱区( $0.2 \leq AI < 0.5$ ),半干旱易湿润区( $0.5 \leq AI < 0.65$ ), $AI = \text{年降雨量} / \text{年潜在蒸散量}$ )是典型的资源限制性系统。由于水资源限制,区域植被盖度小,生产力低,土地退化风险高,农业和工业发展规模受限,在气候变化条件下可持续发展面临重大挑战。旱地涵盖了地球上最为脆弱的一些 SES 类型,例如农牧交错带、草地和绿洲等,生态承载力低,人地相互作用复杂而强烈。目前,仍缺少基于综合量化指标的旱地 SES 分类研究以及空间明晰的 SES 分类制图,阻碍了面向不同挑战的区域可持续治理进程。本文以中国北方旱区为研究对象,SES 理论为基础,结合 SDGs 框架,旨在建立面向 SDGs 的旱地 SES 分类框架,构建适合于旱地的 SESs 分类多元指标体系,并对不同分类的 SDGs 表现开展动态评估。SES 与 SDGs 包含很多共同的代理指标,建立这些指标之间的对应关系,可以有效地联接 SES 与 SDGs 的特征和动态<sup>[4]</sup>。本文的具体研究目标是:1)面向 SDGs,构建旱地 SES 的分类框架和指标体系,2)对旱地进行 SES 分类并进行空间制图与分析,3)探究 2000、2010 和 2020 年不同时段旱地不同类型 SESs 可持续发展目标状态的变化特征,提出面临的可持续发展问题及其可持续管理对策。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 中国旱地概况

中国是拥有旱地面积最大的国家之一,旱地占国土面积一半以上,主要分布于北方地区<sup>[30]</sup>。大致位于大兴安岭以东,昆仑山脉—柴达木盆地—黄土高原以北的西北地区,介于  $73.5^{\circ}\text{E}$ — $126.7^{\circ}\text{E}$ ,  $29.7^{\circ}\text{N}$ — $53.3^{\circ}\text{N}$ ,面积约 538.7 万  $\text{km}^2$ ,覆盖 109 个地级市、直辖市以及自治州,主要包括新疆、青海、宁夏、山西、河北、北京、天津,甘肃和内蒙古大部分地区,以及西藏、陕西、河南、山东、辽宁、吉林、黑龙江部分地区。中国旱地范围广阔,提供多种重要的生态系统服务,涵盖全国 40% 的耕地面积<sup>[31,32]</sup>,是国家粮食安全的重要保障,影响大约 5.8 亿人的生计<sup>[30]</sup>。

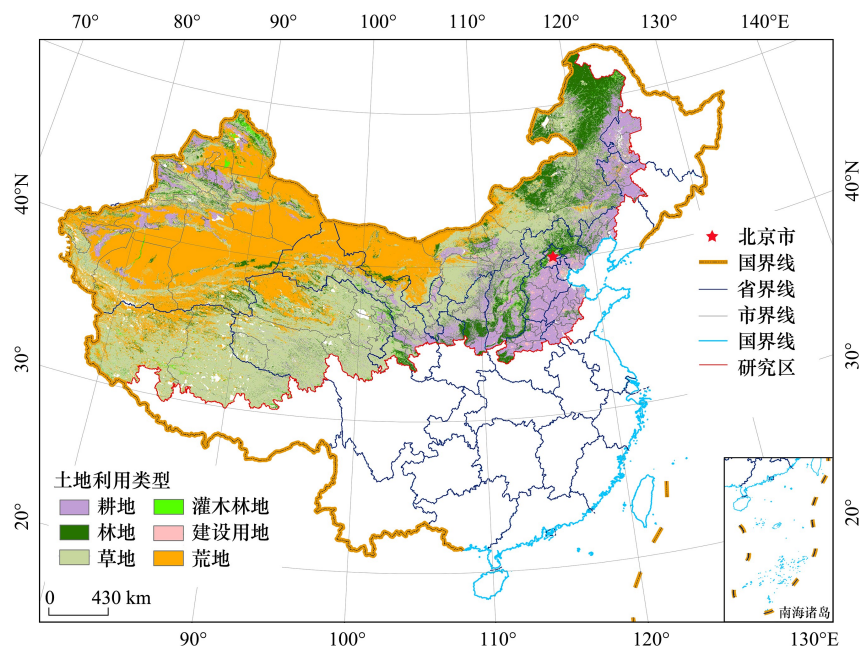


图1 中国旱地分布范围及其土地利用情况(土地利用数据来源于 2020 年欧空局土地利用数据)

Fig.1 The distribution and land use of drylands in China (land use data from ESA 2020)

根据 IUCN 的旱地定义确定中国旱地的范围( $AI$  数据为 2000—2020 多年均值);无值区域代表  $AI$  大于 0.65 的非旱地

旱地降水量低并且年际和年内变化大,极端天气易频发<sup>[33]</sup>,水资源是影响生态系统过程的主要因素<sup>[34]</sup>。植被相对单一,群落组成和结构动态受到气候、土壤和植物之间交互影响<sup>[35]</sup>,土壤肥力较低,植被以相对矮小

的灌木和草本为主。

经济发展受到当地有限的水资源以及脆弱的生态环境的限制,以生态效率较低的粗放式经济发展形式为主。人为因素是短时间内土地利用类型改变的直接驱动力,是旱地生态环境问题的主导因素<sup>[36]</sup>。随着气候变化和人口不断增长,生态环境与社会经济发展之间的矛盾进一步加剧<sup>[37]</sup>。

为了保护生态系统的稳定性和生物多样性,保障居民的生态福祉,中国旱地实施了一系列的生态建设工程,包括天然林保护工程、退耕还林工程、三北防护林保护工程、退牧还草工程、京津风沙源综合治理工程以及三江源生态保护和建设工程等<sup>[38,39]</sup>,对区域生态环境的改善发挥了重要作用。

1.2 研究方法

本研究结合 SES 理论和“基本需求、目标和治理”的 SDGs 分类框架,依据中国旱地的自然生态条件和社会经济发展状况,构建面向 SDGs 的 SES 分类框架及指标体系。采用自组织映射网络(SOM)的聚类方法,将进行标准化和去除共线性后的数据结果进行聚类分析,进而得到 SES 分类结果。利用非参数检验的方法,比较不同类型不同时间段的 SES 的特征差异和 SDGs 的表现情况。

1.2.1 中国旱地 SES 分类框架与指标体系

构建旱地 SES 理论框架,包括社会经济子系统、生态环境子系统和社会-生态相互作用子系统三大子系统(图 1)。其中,社会经济子系统包括经济发展水平、政策稳定性和人口特征三个方面,生态环境子系统包括土地资源和气候特征,社会-生态相互作用子系统是 SES 框架关注的重点,包括人类对自然的干预和自然提供给人类的惠益(Nature’s contribution to people, NCP,即生态系统服务)<sup>[28]</sup>两个方面。

考虑于中国旱地的独特的区位条件、自然因素、生态系统服务和经济社会发展情况,参考中国本土化可持续发展目标的评估指标<sup>[24,40–41]</sup>,以及变量数据的可获取性,研究选取了表征中国旱地 SES 特征的 34 个关键指标(表 1)。

表 1 SES 分类指标体系  
Table 1 Indicator system for SES classification

| 指标类型                                 |        | 具体指标            | 单位                 | 缩写名称                   | 对应的                | 数据来源                                                                              |
|--------------------------------------|--------|-----------------|--------------------|------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Indicator type                       |        | Indicators      | Unit               | Indicator abbreviation | Corresponding SDGs | Data sources                                                                      |
| 社会经济子系统<br>Socio-economic subsystems | 经济发展水平 | 人均 GDP          | 万元                 | GDP                    | SDG8               | 各省、市统计年鉴                                                                          |
|                                      |        | 第二产业总产值占 GDP 比重 | %                  | SIP                    | SDG9               | 各省、市统计年鉴                                                                          |
|                                      |        | 第三产业总产值占 GDP 比重 | %                  | TIP                    | SDG12              | 各省、市统计年鉴                                                                          |
|                                      |        | 夜间灯光指数          | —                  | NLD                    | SDG9               | 国家青藏高原科学数据中心<br>( <a href="https://data.tpdc.ac.cn">https://data.tpdc.ac.cn</a> ) |
|                                      | 政策稳定性  | 固定资产投资          | 亿元                 | FAI                    | SDG9               | 各省、市统计年鉴和各市政府网站的国民经济和社会发展统计公报                                                     |
|                                      |        | 每万人拥有的卫生技术人员数   | 人/万人               | HTP                    | SDG3               | 各省、市统计年鉴和各市政府网站的国民经济和社会发展统计公报                                                     |
|                                      |        | 保险密度            | 元/人                | INS                    | SDG3               | 各省、市保险统计年鉴和各市政府网站的国民经济和社会发展统计公报                                                   |
|                                      |        | 财政支出            | 万元                 | FNC                    | SDG16              | 各省、市统计年鉴和各市政府网站的国民经济和社会发展统计公报                                                     |
|                                      | 人口特征   | 城镇居民人均可支配收入     | 元                  | INC                    | SDG1               | 各省、市统计年鉴和各市政府网站的国民经济和社会发展统计公报                                                     |
|                                      |        | 平均受教育年限         | a                  | EDU                    | SDG4               | 中国人口普查数据库                                                                         |
|                                      |        | 性别比             | %                  | SEX                    | SDG5               | 中国人口普查数据                                                                          |
|                                      |        | 城乡可支配收入差距       | 元                  | ING                    | SDG10              | 各省、市统计年鉴和各市政府网站的国民经济和社会发展统计公报                                                     |
|                                      |        | 人口密度            | 万人/km <sup>2</sup> | PPD                    | —                  | 中国人口普查数据                                                                          |
|                                      |        | 人口总抚养比          | %                  | DEP                    | —                  | 中国人口普查数据库                                                                         |

续表

| 指标类型<br>Indicator type                                         | 具体指标<br>Indicators    | 单位<br>Unit              | 缩写名称<br>Indicator abbreviation | 对应的<br>SDGs<br>Corresponding<br>SDGs | 数据来源<br>Data sources      |                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 生态环境子系统<br>Ecological subsystems                               | 土地资源特征                | 林地占比                    | %                              | WDL                                  | SDG15                     | 欧空局土地利用数据<br>( <a href="https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover">https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover</a> )                   |
|                                                                |                       | 灌木林地占比                  | %                              | SHR                                  | SDG15                     | 欧空局土地利用数据<br>( <a href="https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover">https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover</a> )                   |
|                                                                |                       | 草地占比                    | %                              | GRA                                  | SDG15                     | 欧空局土地利用数据<br>( <a href="https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover">https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover</a> )                   |
|                                                                |                       | 荒地占比                    | %                              | DES                                  | SDG15                     | 欧空局土地利用数据<br>( <a href="https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover">https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover</a> )                   |
|                                                                |                       | 绿洲面积                    | km <sup>2</sup>                | OSA                                  | —                         | 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 ( <a href="http://www.ncdc.ac.cn">http://www.ncdc.ac.cn</a> )                                                               |
|                                                                | 气候特征                  | 干旱指数 <sup>[42—45]</sup> | %                              | AI                                   | —                         | 国家青藏高原科学数据中心<br>( <a href="https://data.tpdc.ac.cn">https://data.tpdc.ac.cn</a> )                                                          |
|                                                                |                       | 积温                      | ℃                              | ACT                                  | —                         | 中国地面气候资料日值数据集 V3.0<br>( <a href="https://data.cma.cn/">https://data.cma.cn/</a> )                                                          |
| 社会-生态相互作用子人类对自然的系统<br>Socio-ecological interactions subsystems | 干预                    | 土壤水含量 <sup>[46]</sup>   | 体积分数                           | SWC                                  | —                         | 国家青藏高原科学数据中心<br>( <a href="https://data.tpdc.ac.cn">https://data.tpdc.ac.cn</a> )                                                          |
|                                                                |                       | 单位 GDP 用水量              | m <sup>3</sup> /万元             | WTC                                  | SDG6                      | 水资源公报、各市统计年鉴和各市政府网站的国民经济和社会发展统计公报                                                                                                          |
|                                                                | 自然对人类的惠益<br>(即生态系统服务) | 单位 GDP 二氧化碳排放           | t/万元                           | CDE                                  | SDG7、<br>SDG9、<br>SDG13   | 中国城市二氧化碳排放数据集                                                                                                                              |
|                                                                |                       | 公路路网密度                  | km/km <sup>2</sup>             | RDD                                  | SDG11                     | Openstreetmap 数据网站<br>( <a href="http://www.openstreetmap.org">www.openstreetmap.org</a> )                                                 |
|                                                                |                       | 放牧强度                    | —                              | GRAZ                                 | SDG15                     | 国家综合地球观测数据共享平台<br>( <a href="https://www.chinageoss.cn">https://www.chinageoss.cn</a> )                                                    |
|                                                                |                       | 耕地占比                    | %                              | CRP                                  | —                         | 欧空局土地利用数据<br>( <a href="https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover">https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover</a> )                   |
|                                                                |                       | 环境污染治理投资占 GDP 比重        | %                              | ECI                                  | SDG12                     | 各省、市统计年鉴和各市政府网站的国民经济和社会发展统计公报                                                                                                              |
|                                                                |                       | 生态工程数量                  | 个                              | EEG                                  | SDG13、<br>SDG15、<br>SDG16 | 包括三北防护林体系建设工程、退耕还林工程、天然林资源保护工程、京津风沙源综合治理工程、退牧还草工程以及三江源生态保护和建设。国家生态科学数据中心 ( <a href="http://www.nesdc.org.cn">http://www.nesdc.org.cn</a> ) |
|                                                                |                       | 粮食产量                    | 万 t                            | GRP                                  | SDG2                      | 各省、市农业统计年鉴和各市政府网站的国民经济和社会发展统计公报                                                                                                            |
|                                                                |                       | 肉类产量                    | t                              | MTP                                  | SDG2                      | 各省、市农业统计年鉴和各市政府网站的国民经济和社会发展统计公报                                                                                                            |
|                                                                |                       | 碳固存                     | t                              | CAR                                  | SDG13、<br>SDG15           | InVEST 模型计算地上、地下根系、土壤和死亡有机质的总碳储量                                                                                                           |
|                                                                |                       | 产水量                     | mm                             | WAT                                  | SDG6、<br>SDG15            | InVEST 模型计算年产水量                                                                                                                            |
|                                                                |                       | 生境质量                    | %                              | HAB                                  | SDG15                     | InVEST 模型计算生境质量指数                                                                                                                          |

其中 SDG14(海洋水下生物),和 SDG17(促进目标实现的伙伴关系)在本研究中未作考虑;GDP:人均 GDP GDP per capita;SIP:第二产业总产值占比 GDP Secondary industry proportion;TIP:第三产业总产值占比 GDP Tertiary industry proportion;NLD:夜间灯光指数 Nighttime Lighting Index;FAI:固定资产投资 Fixed-asset investments;HTP:每万人拥有的卫生技术人员数 Health technicians per 10,000 people;INS:保险密度 Insurance density;FNC:财政支出 Financial Expenditure;INC:城镇居民人均可支配收入 Per capita disposable income of urban residents;EDU:平均受教育年限 Average Years of Education;SEX:性别比 Gender Ratio;ING:城乡可支配收入差距 Disposable Income Gap between Urban and Rural Areas;PPD:人口密度 Population density;DEP:人口总抚养比 Total population dependency ratio;WDL:林地占比 Percentage of forested land;SHR:灌木林地占比 Percentage of shrubland;GRA:草地占比 Percentage of grassland;DES:荒地占比 Percentage of barren land;OSA:绿洲面积 Oasis area;AI:干旱指数 Aridity index;ACT:积温 Accumulated temperature;SWC:土壤含水量 Soil water content;WTC:单位 GDP 用水量 Water consumption per unit of GDP;CDE:单位 GDP 二氧化碳排放 Carbon dioxide emission per unit of GDP;RDD:公路路网密度 Density of Highway Network;GRAZ:放牧强度 Grazing intensity;CRP:耕地占比 Percentage of cultivated land;ECI:环境污染治理投资占 GDP 比重 Investment in Environmental Pollution Control as % of GDP;EEG:生态工程数量 Number of ecological projects;GRP:粮食产量 Grain production;MTP:肉类产量 Meat production;CAR:碳固存 Carbon Sequestration;WAT:产水量 Water production;HAB:生境质量 Habitat quality;SDGs:可持续发展目标 Sustainable development goals;SES:社会-生态系统 Social-ecological system

具体而言,社会经济子系统中,采用 GDP、产业发展和固定资产投资等表征区域的宏观经济发展状态;医疗、保险和财政支出从保障方面表征政策稳定性;收入、教育、性别、收入差距、人口密度和劳动力占比从微观居民个体角度表征区域的人口特征。生态环境子系统中,采用土地利用、气候和土壤状态等指标表征区域的生态系统和自然环境特征。社会-生态相互作用子系统中,人类对自然的干预主要包括资源消耗或对环境的影响以及生态保护和恢复两个方面,采用耕地占比、放牧强度、单位 GDP 用水量、单位 GDP 二氧化碳排放量和路网密度表征人类通过农业、工业和建设改造自然景观以及可能造成直接或潜在环境影响;环境污染治理投资占 GDP 比重和生态工程数量表征人类对生态系统进行保护与恢复的程度。自然提供给人类的惠益即生态系统服务主要包括粮食和肉类产量、碳储存、产水量和生境质量等旱地生态系统服务关键指标。

接下来,根据具体指标的含义,结合 SDGs 目标及其小目标和指标含义,以具体指标为联接,将 SDGs 与 SES 各组分对应起来(表 1),SDGs 的“基本需求、高层次理想(objective)和治理”分类框架<sup>[4,5]</sup>与 SES 框架相呼应(表 1,图 1)。其中,土地资源特征和生态系统服务相关的 SDGs 是“基本需求”,属于人类生存的基本保障,与气候、土地利用和生态系统服务相关,通常通过提高资源利用效率来实现,例如,SDG2(零饥饿)、SDG15(陆地生物)等,它们关注在有限的自然资源中,保障人类基本需求的满足。社会经济子系统相关的 SDGs 大多关注人类生活质量,属于“高层次理想”,是可持续发展的最终目标或期望成果,其实现更依赖于制度改革,因此与经济发展、政策稳定以及人口特征等指标有密切联系,例如,SDG1(消除贫困)、SDG3(良好健康与福祉)、SDG8(体面工作和经济增长)等,强调提升社会经济发展,增进民生福祉。与人类对自然的干预相关的 SDGs 相对复杂,是“治理”层面目标,更多是涉及有效管理人地交互关系和建立公平的规则制度等方面,能够与人类对自然的改造以及治理、恢复和保护呼应,不仅包括提升人类社会经济发展的基本需求保障,如 SDG9(产业、创新和基础设施)和 SDG11(可持续城市和社区)等,还包括提升自然资源的利用效率和保护,如 SDG12(负责任的消费和生产)和 SDG13(气候变化)等与碳排放相关的目标。

### 1.2.2 中国旱地 SES 分类方法

收集整理 2000、2010 和 2020 年三个年份的相关数据,将栅格数据或矢量数据通过 ArcGIS 工具的区域分析功能,赋值至各市/直辖市/自治州(本研究的基本单元),与社会经济的表格数据对应。将人均 GDP、财政支出、固定资产投资、城镇居民收入和城乡居民收入差距利用每个省份的 GDP 指数进行平减,并统一平减至 2020 年,消除物价变动的影响,使不同年份的数据可以进行比较。然后进行归一化至 0—1 之间,使不同类别、不同时间的数据具有统一性和可比性。为了降低指标之间的共线性使聚类结果更加准确,计算各指标两两之间的相关性,去除相关性大于 0.85 的指标对中的一个指标(生境质量、干旱指数、人口密度、人均 GDP 和固定资产投资五个指标由于与碳储量、产水量、公路路网密度、夜间灯光指数和财政支出的相关性超过 0.85,未进入聚类分析)。自组织映射网络(Self-organizing map, SOM)的聚类方法是通过无监督学习的神经网络方法,能够避免初始输入数据的影响,被广泛运用于识别 SES 内部特征的分析<sup>[22,24]</sup>。本研究运用 SOM 统一对中国旱地所在的 109 个地级市、直辖市以及自治州 2000、2010 和 2020 年三个时期的各个指标均值做聚类分析。其中聚类的类别数依据簇内平均差别较小、簇间差别较大的原则,参考 k-means、层次聚类、模糊聚类等聚类方法的最佳聚类数量,最终确定聚类个数为 5 类。将唐古拉山镇(格尔木市的飞地)调整为与周边一致的类型。聚类分析运用软件 R 4.3.1 的“kohonen”包执行。

### 1.2.3 SDGs 和 SES 复合指标值计算方法

SDGs 与 SES 评估中,34 个变量分别归类到 15 个 SDGs 和 SES 6 个关键结构组分,进行复合指标计算(每个 SDG 或每个结构组分)。生态环境子系统的气候特征参量不纳入 SES 指标状态计算。具体处理方式:将林地、灌木、草地和荒地占比处理为荒地、林地、灌木和草地面积的比值;将生态工程数量处理为效率,即生态工程数量与生境质量的比值。然后,将负向指标进行负向归一化计算;由于性别比的最优值是 1,属于中间型指标,因此进行中间型标准化;其他正向指标进行正向归一化计算。最后,将包含多个指标取均值,得到复合指标值,即 15 个 SDGs 数值与 SES 7 个结构组分数值。生态环境子系统的土地资源特征是通过除荒地占比

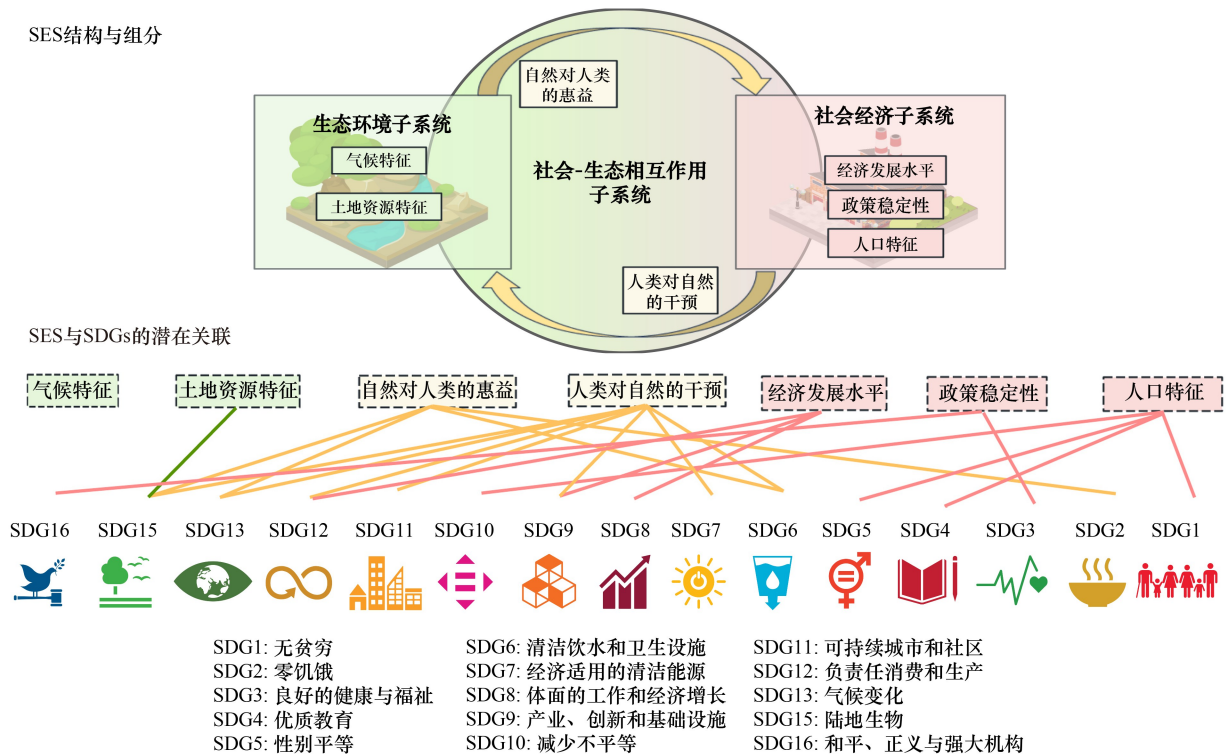


图 2 SES-SDGs 关联框架图

Fig.2 SES-SDGs linkage framework

SDGs: 可持续发展目标 Sustainable development goals; SES: 社会-生态系统 Social-ecological system; SES 结构与组分. SES 包括社会经济子系统(经济发展水平、政策稳定性和人口特征)、生态环境子系统(气候特征、土地资源特征)和社会-生态相互作用子系统(生态系统服务和人类对自然的干预)三大部分七个关键组分. SES 与 SDGs 的潜在关联. SDG8、SDG9 和 SDG12 与经济发展水平相关, SDG3 和 SDG16 与政策稳定性相关, SDG1、SDG4、SDG5 和 SDG10 与人口特征相关, SDG15 与土地资源特征相关, SDG2、SDG6、SDG12 和 SDG15 与生态系统服务相关, SDG6、SDG7、SDG9、SDG11、SDG12、SDG13 和 SDG15 与人类对自然的干预相关. 气候特征没有相关的 SDGs

外,其他自然用地占比相加得到。

#### 1.2.4 非参数检验统计方法

在对研究区的 109 个地级市、直辖市或自治州进行聚类后,使用 Kruskal-Wallis 检验验证各个 SDGs 在不同类型 SES 之间差异的显著性。Kruskal-Wallis 检验是一种广泛使用的非参数分组检验的方法,用于检验自变量组在不同组之间是否存在统计学上的显著差异<sup>[47]</sup>。参数分组检验运用软件 R 的“rstatix”包进行多组间的 Kruskal-Wallis 非参数检验,“viridis”包进行画图。

## 2 研究结果

### 2.1 中国旱地 SESs 类型及其空间分布

聚类分析结果表明,中国旱地可划分为 5 种 SES 类型区,具有明显的空间聚集特征,且从东到西呈现明显的地域性分布规律。5 个 SES 类型区分别为:A,农业与城市化区;B,农林牧交错带发展区;C,草原工业化区;D,绿洲待发展区;E,高寒草地脆弱区(图 3)。区域土地利用呈现耕地占比由东至西逐渐减少的趋势,城市用地占比在农业与城市化区最高,草地占比高寒草地脆弱区最高,其次是草原工业化区,荒地占比在绿洲待发展区最高。5 类 SESs 的地理区位、环境特性、土地利用特征、社会经济特征和人口统计学特征概括如下:

类型 A:农业与城市化区。包括的地级市及直辖区的数量有 29 个,主要分布在中国东部旱地。该类型区水热条件好,其耕地最多、粮食产量最大。林地、草地占比较小,生态系统碳储量和生境质量较低。社会经济

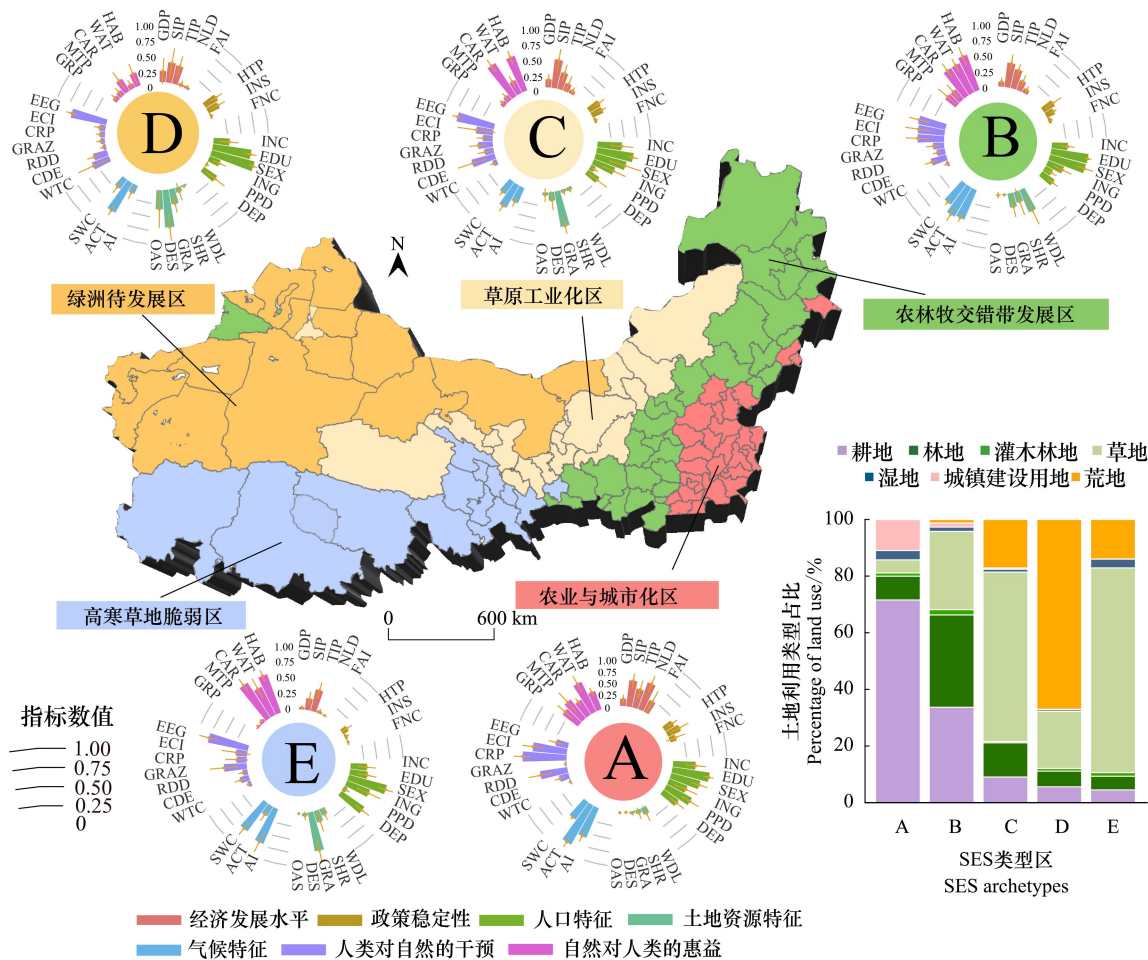


图3 中国旱地 SES 类型区分布图及其特征指标的差异

Fig.3 Mapping of SES archetype of China's drylands and differences in their characteristic indicators

误差线为各指标的标准差;土地利用类型占比的总和为该类型区的总面积;GDP:人均 GDP GDP per capita;SIP:第二产业总产值占比 GDP Secondary industry proportion;TIP:第三产业总产值占比 GDP Tertiary industry proportion ;NLD:夜间灯光指数 Nighttime Lighting Index;FAI:固定资产投资 Fixed-asset investments;HTP:每万人拥有的卫生技术人员数 Health technicians per 10,000 people;INS:保险密度 Insurance density;FNC:财政支出 Financial Expenditure;INC:城镇居民人均可支配收入 Per capita disposable income of urban residents;EDU:平均受教育年限 Average Years of Education;SEX:性别比 Gender Ratio;ING:城乡可支配收入差距 Disposable Income Gap between Urban and Rural Areas;PPD:人口密度 Population density;DEP:人口总抚养比 Total population dependency ratio;WDL:林地占比 Percentage of forested land;SHR:灌木林地占比 Percentage of shrubland;GRA:草地占比 Percentage of grassland;DES:荒地占比 Percentage of barren land;OSA:绿洲面积 Oasis area;AI:干旱指数 Aridity index;ACT:积温 Accumulated temperature;SWC:土壤含水量 Soil water content;WTC:单位 GDP 用水量 Water consumption per unit of GDP;CDE:单位 GDP 二氧化碳排放 Carbon dioxide emission per unit of GDP;RDD:公路路网密度 Density of Highway Network;GRAZ:放牧强度 Grazing intensity;CRP:耕地占比 Percentage of cultivated land;ECI:环境污染治理投资占 GDP 比重 Investment in Environmental Pollution Control as % of GDP;EEG:生态工程数量 Number of ecological projects;GRP:粮食产量 Grain production;MTP:肉类产量 Meat production;CAR:碳固存 Carbon Sequestration;WAT:产水量 Water production;HAB:生境质量 Habitat quality。

系统的整体情况较好,单位 GDP 二氧化碳排放量和单位 GDP 耗水少,环境污染治理投资占 GDP 比重高。城市化水平高,城镇居民可支配收入高,但是城乡居民收入差距大。人口抚养比较高,存在人口老龄化趋势。保险意识强,卫生技术人员数量多,平均受教育年限高,社会整体保障水平高。

类型 B:农林牧交错带发展区。包括的地级市和自治州的数量有 33 个,主要分布在中国旱地的中东部地区,以及新疆伊犁哈萨克自治州。该类型区的显著特征是林地和灌木林地占比较高,社会整体发展发展较好。干旱程度较低,水资源相对充裕,能够提供较高生态系统服务。城市化水平处于中间阶段,人口抚养比较低,

劳动力较为充裕,有较大的发展潜力,城镇居民可支配收入较低,但城乡差距较小。该类型区单位 GDP 耗水小,有一定的单位 GDP 二氧化碳排放量,环境污染治理投资占 GDP 比重高,粮食产量较高,放牧强度大,肉类产量高。

类型 C:草原工业化区。包括地级市和自治州的数量有 18 个,主要分布在中国旱地的中部地区。该类型区的显著特征是草原占比高,第二产业占比较高。该类型区作物产量较低,荒地较少,实施了较多的生态工程,碳储量和生境质量较高。工业化程度较高,城镇居民收入高,但城乡收入差距大,各市之间社会整体发展情况差异大,人口抚养比较低,劳动力较为充裕。该类型区单位 GDP 二氧化碳排放量高,单位 GDP 耗水高。

类型 D:绿洲待发展区。包括地级市和自治州的数量有 16 个,主要分布在中国旱地的西北部地区,干旱程度最高,水资源缺乏,荒地占比很高,几乎没有林地分布。绿洲分布广泛,整体生态系统服务的功能低。整体社会发展水平低,该类型区内部社会保障情况差异较大,城市化水平低,社会整体保障水平较低。城镇居民收入和城乡收入差距低,单位 GDP 二氧化碳排放量较高,单位 GDP 耗水高,环境污染治理投资少,但是生态工程实施数量多。

类型 E:高寒草地脆弱区。包括地级市和自治州的数量有 13 个,主要分布在中国旱地的青藏地区。该类型区的显著特征是年积温低,作物产量低,草地为主导土地覆被类型,生态保护工程实施数量多,生态系统服务高。第二产业和第三产业占比都低,城市化水平低,城镇居民可支配收入较高,但是城乡居民收入差距也较大。财政支出少,保险密度较低,卫生技术人员数量少,平均受教育年限低,社会整体保障水平不高。

## 2.2 不同类型 SES 子系统特征与动态变化

中国旱地 SESs 可持续发展面临的关键问题是在水资源受限的条件下,如何平衡好社会经济发展与生态环境亟待保护之间的矛盾。A 类的自然环境条件最好,社会经济子系统状况最好;B 类林地资源丰富,生态环境子系统状况最好;C 和 D 类的水资源压力最大,尤其是 D 类的各个子系统的状况在 5 类 SESs 中都相对较差,其生态环境子系统的指标值最低;E 类由于特殊位置和保护措施决定其自然资源开发利用程度弱,自然对人类的惠益子系统的状态最好。

各类型区的大部分 SES 的子系统随时间推移逐渐变好(图 4 和图 6)。各类型区呈现总体向好趋势,社会经济子系统(经济发展水平、政策稳定性、人口特征)和人类对自然的干预四个方面逐渐向好发展。类型 A 的社会经济发展处于最高水平且不断向好发展,但是自然用地占比相对较少;类型 B 自然对人类的惠益最高且不断提升;类型 C 对土地资源利用强度逐渐提升,经济发展速度较快;类型 D 的自然对人类的惠益表现相对

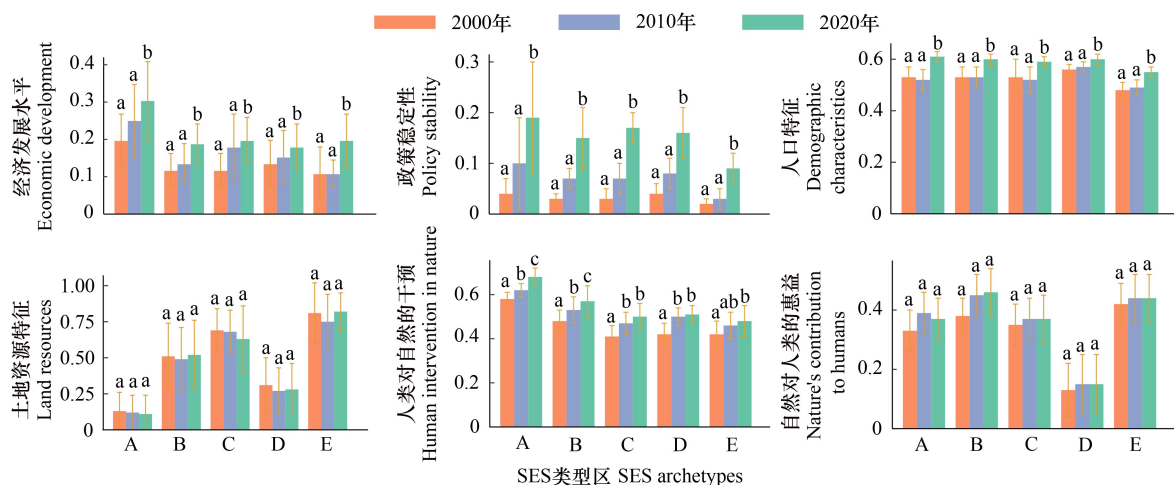


图 4 不同类型的 SES 子系统组分的时间变化

Fig.4 Temporal variation of subsystem components in different archetype SES

误差线为各指标组内标准差,顶端不同小写字母在各组内有显著差异

最差,有向好趋势;类型 E 社会经济发展水平低,但是有明显上升趋势。

### 2.3 不同类型 SES 的可持续发展目标状态及动态变化

综合 15 个 SDGs, 类型 A 的 SDGs 表现最好; 类型 D 的 SDGs 最差, 且与 A、B、D 和 E 四个类型区有显著组间差异(图 5)。SDGs 的表现从东到西呈现越来越低趋势, 主要体现在 A、B、C 和 D 类型区存在明显的差异, 且类型 D 综合 SDGs 表现显著最低, 这与在 SES 各个子系统的状况都最差相对应。在 SDG2(无饥饿)、SDG13(气候行动)、SDG15(陆地生物)和 SDG16(和平、正义与强大机构)这四类目标的表现情况上, 各 SES 类型之间差异明显, 存在显著的组间差异, 其他 12 个目标的 SESs 类型间差异较小。对比 A 和 B 区这两类在 SES 的子系统的发展状态中表现出趋同性, 即状态相对一致且差别较小, 尤其是在社会经济子系统方面尤为相近, 这与 A 和 B 两个类型区在 SDG3(良好健康与福祉)、SDG4(优质教育)、SDG6(清洁饮水和卫生设施)、SDG10(减少不平等)和 SDG12(负责任消费和生产)方面表现一致能够对应, 说明 B 类在上述四个目标的表现与 A 相差不大, 可持续发展目标表现较差于 A 不是由于这四个方面导致。同时, C 和 D 类型区在 SDG3、SDG4、SDG8(体面工作和经济增长)、SDG9(产业、创新和基础设施)、SDG11(可持续城市和社区)和 SDG12 方面也呈现一定趋同性, 说明二者在社会经济子系统的表现相对一致。

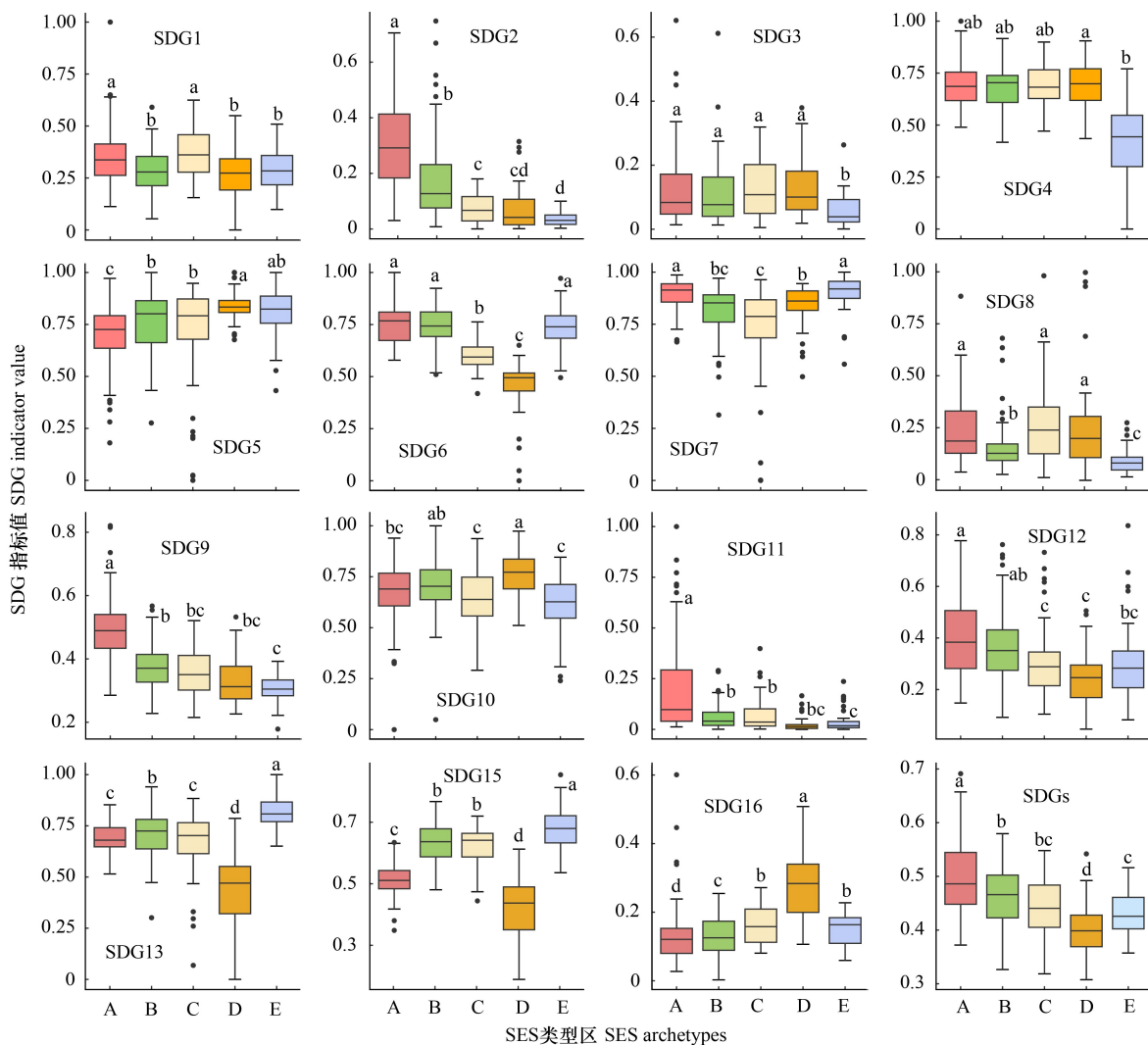


图 5 不同类型 SES 的 SDGs 状态对比

Fig.5 Group chart of the status of the SDGs in different archetype SES

误差线是各指标组内的标准差, 顶端不同小写字母的箱线图在各组间有显著差异

各类型区 SES 的 SDG1(无贫穷)、SDG3、SDG4、SDG6、SDG11 和 SDG12 逐渐提高(图 6),这与社会经济子系统的状态逐年提高相互对应(图 4)。说明目前中国旱地逐渐解决贫困问题,实施了一系列的有利于民生的政策和改革,使人民生活质量提升。生态系统服务反应了人类生存的基础,各类型区基本都有提升,且除类型 D 外各类型区的人类生存状态较好,这与国家实施生态工程有较大关系。人口特征的变化较小,整体相对稳定。土地资源特征的主要评估对象是自然土地利用变化,在这 20 年间,林地、灌木林地、草地或者湿地等自然用地的占比各类型区都呈现下降趋势,其中下降最为明显的是类型 C,基于土地利用数据可以看出,由于该类型区城镇扩张过程和土地退化,导致草地、林地和灌木林地面积下降;此外, B 和 E 呈现明显的先下降后上升趋势,说明自然用地占比增加。

值得注意的是,各类型区之间的 SDG13 和 SDG15 差异较大,并且很大程度与土地利用情况有较为直接关系。虽然 SDG15 与土地资源特征有较强关联,但是土地资源特征的变化较小,说明土地利用情况不仅直接导致各类型区差异,还可能通过影响生态系统服务等方式间接影响了可持续发展状态。此外,在人类对自然的干预方面虽然都在向好发展,但是类型 B、C、D 和 E 与 A 表现依然存在差距。类型 D 的生态系统服务相对其他类型区较差,与此对应的 SDG13 和 SDG15 的表现也最差。虽然类型 D 在 SDG13 方面呈逐年下降,但是 SDG12 方面的表现呈变好趋势。说明在类型 D 生态脆弱性较高的情况下,牺牲了一部分生态环境质量来完成发展,虽然没有实现社会经济发展与生态环境退化脱钩,但是在通过减排等可持续生产的方式寻求解决方案。

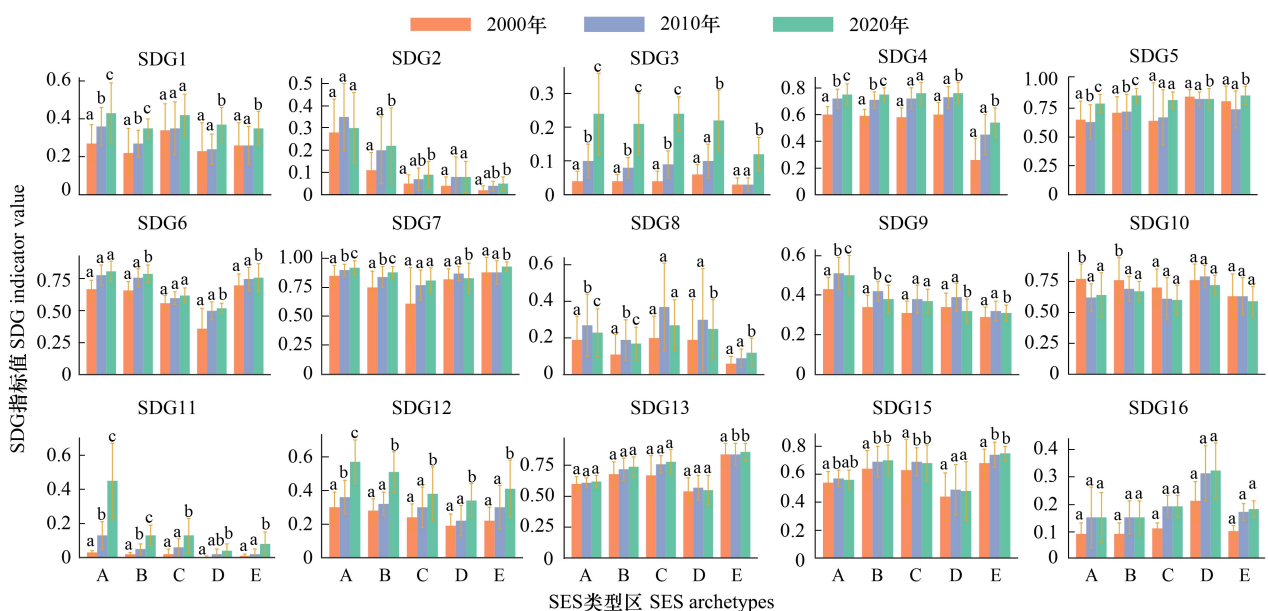


图 6 不同类型的 SES 的 SDG 表现状态的时间变化

Fig.6 Temporal variation of SDG states in different archetype SES

误差线为各指标组内标准差

### 3 讨论

#### 3.1 面向 SDG 构建 SES 分类指标体系的优势

可持续发展目标的评估框架是目标导向型框架,没有兼顾环境本底值,环境因子在 SDGs 的评估框架中没有直接体现<sup>[5,41,48]</sup>,因此评估 SDGs 时很容易忽略评估对象本身的自然条件对实现可持续发展的限制。构建面向 SDGs 的 SES 分类框架有助于将 SES 中的不同子系统进行量化分析,并探究实现可持续发展过程中面临的主要问题。不同类型 SES 的生态环境、社会经济及其相互作用都具有鲜明的特征和不同的可持续发展

挑战。只有对区域的 SES 进行分类,才能实施分类型治理,制定出适合于区域特征的可持续发展策略。

以往 SES 分类研究,指标体系一般基于社会经济发展以及个体角度会纳入生产总值、收入、劳动力等指标<sup>[20,26]</sup>,基于生态环境角度纳入土壤水含量、土地利用类型等指标<sup>[26]</sup>,以及生态系统服务指标<sup>[28]</sup>。这些指标能够揭示不同类型的社会经济发展、资源环境特征或者生态系统服务,但是未完整揭示人与资源环境之间的相互作用。本研究的指标体系除了考虑人均 GDP、居民收入、收入差距、受教育水平和人口抚养比等社会经济指标,土壤水、干旱指数、积温等环境因子指标,还增加了人与环境相互作用关系指标,包括单位 GDP 二氧化碳排放、单位 GDP 用水量、放牧强度、生态工程数量 and 环境污染治理投资占 GDP 比重等,这些指标不仅能反映旱地的人类对自然干预的具体特征,而且可以反映社会经济发展、生态系统的多样性和稳定性。本研究指标体系的优势是能够相对全面评估生态系统与社会系统的相互作用,即人类活动对生态环境的影响以及生态系统服务反馈<sup>[49]</sup>。

### 3.2 中国旱地不同类型 SES 面临的主要问题及挑战

中国旱地分布广泛,不同类型的 SES 在可持续发展进程中受到不同 SES 关键组分制约,面临不同的挑战,因此只有厘清各类型 SES 的可持续发展面临的主要问题,才能为后续制定发展策略奠定基础。

类型 A 社会经济发展状态较好,但是土地资源更多被用于建设或者农田,自然类型的土地资源相对较少,导致生态系统服务不高。此外,类型 A 社会经济的快速发展,也带来了内部的不平等现象的出现,SDG5 (性别平等)和 SDG10 相对较低,且内部差异大。因此类型 A 如何在城市化快速进程中提升城市绿色空间,并减少不平等,是实现可持续发展的关键方式。类型 B 经济发展水平不高,人类对自然的干预表现较差,主要体现在放牧强度和耕地占比较大。碳排放较高,导致 SDG7 (经济适用的清洁能源)相对较低。生态系统服务高,但是如何保护现有高生态系统服务,成为其面临的问题。B 类型区 SES 面临的具体问题是耕地占比高且放牧强度大,农牧结构失衡、水资源过度开发,以及如何利用技术创新和转型,实现经济绿色高质量发展。类型 C SES 人类对自然的干预表现也较差,存在土地退化问题,但是与 B 不同的是,类型 C 主要体现在单位 GDP 二氧化碳排放量高,环境污染治理投资占比 GDP 比重低。这导致虽然类型 C 的 SDG8 相对最高,但是 SDG12 相对最低,说明 C 类 SES 为了发展经济,承担了一些高污染高能耗产业。因此 C 类型区面临的问题是如何在保证经济发展水平持续增长的情况下做到减排和土地退化零增长,促进经济高质量发展。类型 D 的生态系统服务相对最低,土地资源特征以荒漠为主,干旱程度最高,生态脆弱性强,虽然近几年实施了一系列减排、增绿的治理措施,但是整体 SDGs 的表现最差,尤其体现在 SDG1、SDG6、SDG12、SDG13、SDG15 和 SDG16,说明 D 类型区面临的可持续发展问题较多,需要优化人类对自然的干预方面,推动经济高质量发展,提升生态系统服务。此外,类型 C、D 的 SDG8 标准差较大,说明区域内部的经济差异较大。E 类的经济发展水平、政策稳定性和人口特征相对低,但是发挥重要的生态系统服务功能。整体 SDGs 的表现情况相对较差,居民生计、教育、医疗保障等多维度发展存在问题。因此,E 类型区的可持续发展问题是如何兼顾维持生态系统服务和满足当地居民的生存、生活需求,并且提高经济发展水平。整体来看,中国旱地的可持续发展是相对不均衡的,可以被显著分为四个组阶段,类型 A 自身综合可持续发展水平相对最高,类型 D 相对最低。因此 A 类型区如何能够辐射带动旱地其他类型发展,也是实现可持续发展的重要方式。

### 3.3 中国旱地不同类型 SES 的可持续发展策略

类型 A 的 SES 社会发展水平较高,自身可持续发展面临问题相对较少,可以针对不平等现象以及 2020 年相对下降的生态系统服务采取行动,例如提升低收入人群的保障措施和转移支付,缩小城乡可支配收入差距;保护现有自然植被,恢复退化植被和栖息地,提高碳储量和生境质量。同时,该类型区的 SDG9 表现好,说明先进人才、技术水平和资金力量相对强劲,可以发挥资源的高效利用的技术优势,大力推动低碳技术和绿色产业创新,并对其他类型进行输出,充分发挥溢出效应。类型 B 需要科学合理利用自然资源,提升环境治理能力和以创新减排节水等技术引领产业模式调整,提升经济发展水平。首先降低放牧强度,借助退牧还草工程的政策优势,实施种养结合,确保草地能够在合理范围内得到恢复和利用,实现草畜平衡。优化高耗水农作物

种植面积,推广耐旱农林产业,提高生产力和水资源利用效率。此外,类型 B 经济发展还需要平衡生态环境和社会发展之间关系,目前整体生态系统服务整体较高,更应该增强对林地和草地保护力度,坚持生态优先,依据水资源承载力,重点支持节水、节能、低碳的绿色技术研发推广。

类型 C、D 和 E 生态环境较为脆弱,在发展初期将面临更为严峻的可持续发展挑战,需要保障生态系统服务功能,通过有序的生态修复和资源管理措施,恢复被破坏或退化的草地和林地,增强产水量和碳固存的功能。类型 C、D 是转型的需求更为迫切的类型,C 和 D 可以优先遏制高耗能、高排放、高水消耗项目盲目发展,提升资源利用效率,减低内部经济发展差异。类型 C 的工业化程度更高,因此 C 需要保持经济发展水平,扩大固定资产投资规模,以市场化手段激励减排、节水和治污等绿色技术升级,严格降低单位 GDP 用水量和二氧化碳排放;D 需要以政策和财政支持引领产业转型,带动经济发展。此外,类型 C 需要利用退耕还林工程和三北防护林工程等生态工程,实施较大规模的植被恢复措施,恢复乡土植被,修复退化土地,通过人工种植耐旱的草种,增加草地的碳固存和水土保持能力,提高生态系统质量和服务。类型 D 需要在生态修复工程中避免水资源过度利用,保护绿洲地区的水源稳定性,在绿洲沙漠过渡地区积极采取防风固沙措施,种植防风固沙的耐旱植物,重视绿洲地区水源保护和栖息地保护,建立生态补偿机制,提升人民生活质量。类型 E 的工业化程度较低,其排放量不高,更需要发展绿色高新产业以维持较低的排放量,发挥自身生态价值,例如海南州借助自身光照充足的优势发展光伏产业,提升生境质量。同时,绿洲和高寒特点造就了 D、E 类型区的独特风光和民俗文化,尤其类型 E 的生态系统服务较高,通过增加生态工程以及设置国家公园自然保护区的政策,能够一定程度弥补为了保护环境而减缓经济发展的情况,并且能够鼓励当地居民积极参与生态保护和恢复,丰富收入来源,提高收入,进而提升居民参与感和绿色发展意识。此外,类型 E 还需要提升政策稳定性和人口特征子系统方面的状态,加强财政资金投入,保障人民生活。

在有限的资源和精力的条件下,旱地各 SESs 通过优先发展满足人民基本需求的 SDGs,并且辅助提升具有较大短板和具有影响潜力的 SDGs,以显著提升其完成程度<sup>[48]</sup>。同类型区的发展水平和环境资源条件相对一致,因此建立示范城市能够总结可复制经验,帮助同类城市解决相似问题。促进类型间合作学习和产业转型升级,完善生态补偿机制,提升生态系统服务功能,树立典型创新示范区,探索总结能复制的可持续发展模式。类型 A 目前可持续发展相对最好,其他类型区可以借鉴其发展经验,学习其先进技术和创新模式,总结适合自身类型的发展模式。

#### 4 结论

本文基于 SES 框架理论,开展分类研究,分析中国旱地的社会经济、生态环境及其相互作用特征和可持续发展目标表现状态。通过构建面向 SDGs 的 SES 指标体系,将 109 个地级市、直辖市和自治州分为农业与城市化区、农林牧交错带发展区、草原工业化区、绿洲待发展区和高寒草地脆弱区 5 种 SESs。各类型 SES 面临的主要问题及挑战分别为:类型 A,在城市化快速进程中如何维持经济发展水平,提升人口特征,恢复生态系统服务;类型 B,如何提升经济发展水平,调节农牧结构失衡,保护与恢复生态系统;类型 C,如何在保证经济发展水平持续增长的情况下,优化人类对自然的干预,维持生态系统服务提升;类型 D,如何保障生态系统服务,推动经济发展;类型 E,如何维持生态系统服务和提高政策稳定性,满足当地居民的生存、生活需求,提高经济发展水平。

基于 SES 分类分析中国旱地可持续发展问题,能够以保障生态功能和改善环境质量为目标,实施分类型差异化精准管控,因地制宜满足我国“生态优先、绿色发展”的要求,推动经济社会高质量发展。本研究为各类型区提出可持续发展建议为:类型 A,提升低收入人群的保障措施,减少不平等,增进居民福祉,发挥资源高效利用优势;类型 B,降低放牧强度,推广节水型农业和工业;类型 C,提升资源利用效率,修复退化土地,实施乡土植被恢复,增强碳固存和产水能力;类型 D,发挥财政支持和生态工程引领效果,重视绿洲地区水源保护和栖息地保护,关注绿洲沙漠过渡地区的荒漠化防治;类型 E,发挥自身生态价值,提升居民收入和保障。总

结建议为以下三点:1)因地制宜为区域可持续发展制定更有针对性的目标和衡量标准,提升生态系统服务功能。2)设立目标完成的优先级,优先发展满足人民基本需求的可持续发展目标,逐步提升表现较差,具有影响潜力的短板目标。3)在同类型内部树立可持续发展典型示范区,创新引领技术发展,不同类型之间设立援助和帮扶机制,形成以点带面的规模效益,促进生态产品价值实现。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, Melillo J M. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277(5325): 494-499.
- [ 2 ] Folke C, Polasky S, Rockström J, Galaz V, Westley F, Lamont M, Scheffer M, Österblom H, Carpenter S R, Stuart Chapin F 3rd, Seto K C, Weber E U, Crona B I, Daily G C, Dasgupta P, Gaffney O, Gordon L J, Hoff H, Levin S A, Lubchenco J, Steffen W, Walker B H. Our future in the anthropocene biosphere. *Ambio*, 2021, 50(4): 834-869.
- [ 3 ] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, Alberti M, Folke C, Moran E, Pell A N, Deadman P, Kratz T, Lubchenco J, Ostrom E, Ouyang Z Y, Provencher W, Redman C L, Schneider S H, Taylor W W. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317(5844): 1513-1516.
- [ 4 ] Fu B J, Wang S, Zhang J Z, Hou Z Q, Li J H. Unravelling the complexity in achieving the 17 sustainable-development goals. *National Science Review*, 2019, 6(3): 386-388.
- [ 5 ] Zhang J Z, Wang S, Pradhan P, Zhao W W, Fu B J. Untangling the interactions among the sustainable development goals in China. *Science Bulletin*, 2022, 67(9): 977-984.
- [ 6 ] Liu J G. Integration across a metacoupled world. *Ecology and Society*, 2017, 22(4): art29.
- [ 7 ] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [ 8 ] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [ 9 ] McGinnis M D, Ostrom E. Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges. *Ecology and Society*, 2014, 19(2): art30.
- [ 10 ] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, Folke C, Alberti M, Redman C L, Schneider S H, Ostrom E, Pell A N, Lubchenco J, Taylor W W, Ouyang Z Y, Deadman P, Kratz T, Provencher W. Coupled human and natural systems. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2007, 36(8): 639-649.
- [ 11 ] Fu B J, Wei Y P. Editorial overview: Keeping fit in the dynamics of coupled natural and human systems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: A1-A4.
- [ 12 ] Liu Y X, Fu B J, Wang S, Zhao W W. Global ecological regionalization: from biogeography to ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 1-8.
- [ 13 ] 王帅, 傅伯杰, 武旭同, 王亚萍. 黄土高原社会-生态系统变化及其可持续性. *资源科学*, 2020, 42(1): 96-103.
- [ 14 ] 张萌萌, 王帅, 傅伯杰, 刘焱序, 武旭同. 社会-生态网络方法研究进展. *生态学报*, 2021, 41(21): 8309-8319.
- [ 15 ] 王晗, 张丹妮, 华廷, 赵宇豪, 王振宇, 吴健生. 社会-生态系统: 研究态势、主题演进与地域实践. *生态学报*, 2023, 43(15): 6499-6513.
- [ 16 ] Reimann L, Koks E, de Moel H, Ton M J, Aerts J C J H. An empirical social vulnerability map for flood risk assessment at global scale ("Globe-SoVI"). *Earth's Future*, 2024, 12(3): e2023EF003895.
- [ 17 ] Riach N, Glaser R, Fila D, Lorenz S, Fünfgeld H. Climate risk archetypes. Identifying similarities and differences of municipal risks for the adaptation process based on municipalities in Baden-Wuerttemberg, Germany. *Climate Risk Management*, 2023, 41: 100526.
- [ 18 ] Xu C Y, Li B W, Kong F B, He T. Spatial-temporal variation, driving mechanism and management zoning of ecological resilience based on RSEI in a coastal metropolitan area. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111447.
- [ 19 ] Ellis E C, Ramankutty N. Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, 6(8): 439-447.
- [ 20 ] Václavík T, Lautenbach S, Kuemmerle T, Seppelt R. Mapping global land system archetypes. *Global Environmental Change*, 2013, 23(6): 1637-1647.
- [ 21 ] Hamann M, Biggs R, Reyers B. Mapping social-ecological systems: identifying 'green-loop' and 'red-loop' dynamics based on characteristic bundles of ecosystem service use. *Global Environmental Change*, 2015, 34: 218-226.
- [ 22 ] Xia H, Yuan S F, Prishchepov A V. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their social-ecological drivers: Implications for spatial planning and management. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 189: 106767.
- [ 23 ] Queiroz C, Meacham M, Richter K, Norström A V, Andersson E, Norberg J, Peterson G. Mapping bundles of ecosystem services reveals distinct types of multifunctionality within a Swedish landscape. *Ambio*, 2015, 44(Suppl 1): S89-101.

- [24] Rocha J, Malmberg K, Gordon L, Brauman K, DeClerck F. Mapping social-ecological systems archetypes. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(3): 034017.
- [25] Dressel S, Ericsson G, Sandström C. Mapping social-ecological systems to understand the challenges underlying wildlife management. *Environmental Science & Policy*, 2018, 84: 105-112.
- [26] Aho K, Parsons S, Castro A J, Lohse K A. Mapping socio-ecological systems in Idaho: spatial patterns and analytical considerations. *Ecosphere*, 2022, 13(10): e4242.
- [27] Pacheco-Romero M, Cabello J. A data-driven methodological routine to identify key indicators for social-ecological system archetype mapping. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(4): 045019.
- [28] Yang Y Y, Bao W K, de Sherbinin A. Mapping fine-resolution nested social-ecological system archetypes to reveal archetypal human-environmental interactions. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 239: 104863.
- [29] Eisenack K, Villamayor-Tomas S, Epstein G, Kimmich C, Magliocca N, Manuel-Navarrete D, Oberlack C, Roggero M, Sietz D. Design and quality criteria for archetype analysis. *Ecology and Society*, 2019, 24(3): art6.
- [30] Li C J, Fu B J, Wang S, Stringer L C, Wang Y P, Li Z D, Liu Y X, Zhou W X. Drivers and impacts of changes in China's drylands. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(12): 858-873.
- [31] Rosa L, Chiarelli D D, Rulli M C, Dell'Angelo J, D'Odorico P. Global agricultural economic water scarcity. *Science Advances*, 2020, 6(18): eaaz6031.
- [32] Sardo M, Epifani I, D'Odorico P, Galli N, Rulli M C. Exploring the water-food nexus reveals the interlinkages with urban human conflicts in Central America. *Nature Water*, 2023, 1: 348-358.
- [33] Wu B F, Zeng H W, Nan L, Wang Y F, Fu B J, Xu Z H. Essential dryland ecosystem variables. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, 48: 68-76.
- [34] Stringer L C, Mirzabaev A, Benjaminsen T A, Harris R M B, Jafari M, Lissner T K, Stevens N, Tirado-von der Pahlen C. Climate change impacts on water security in global drylands. *One Earth*, 2021, 4(6): 851-864.
- [35] Puigdefabregas J, Sole A, Gutierrez L, del Barrio G, Boer M. Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in Southeast Spain. *Earth-Science Reviews*, 1999, 48(1/2): 39-70.
- [36] 高宇婷;于洋;孙凌霄;于瑞德. 塔里木盆地南缘绿洲土地覆盖变化及驱动力. *干旱区研究*, 2021, 38(4): 1172-1183.
- [37] Lü Y H, Da L, Feng X M, Fu B J. Multi-scale analyses on the ecosystem services in the Chinese Loess Plateau and implications for dryland sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, 48: 1-9.
- [38] 邵全琴, 刘树超, 宁佳, 刘国波, 杨帆, 张雄一, 牛丽楠, 黄海波, 樊江文, 刘纪远. 2000—2019 年中国重大生态工程生态效益遥感评估. *地理学报*, 2022, 77(9): 2133-2153.
- [39] Shao Q Q, Liu S C, Ning J, Liu G B, Yang F, Zhang X Y, Niu L N, Huang H B, Fan J W, Liu J Y. Remote sensing assessment of the ecological benefits provided by national key ecological projects in China during 2000—2019. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, 33(8): 1587-1613.
- [40] Pacheco-Romero M, Alcaraz-Segura D, Vallejos M, Cabello J. An expert-based reference list of variables for characterizing and monitoring social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2020, 25(3): art1.
- [41] 邵超峰, 陈思含, 高俊丽, 贺瑜, 周海林. 基于 SDGs 的中国可持续发展评价指标体系设计. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(4): 1-12.
- [42] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901—2100. *Sustainability*, 2020, 12(2): 477.
- [43] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal change and attribution of potential evapotranspiration over China from 1901 to 2100. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 145(1): 79-94.
- [44] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, Li Z. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [45] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z M, Chen Y M, Cao Y, Ren J Y. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233: 183-194.
- [46] Meng X J, Mao K B, Meng F, Shi J C, Zeng J Y, Shen X Y, Cui Y K, Jiang L M, Guo Z H. A fine-resolution soil moisture dataset for China in 2002—2018. *Earth System Science Data*, 2021, 13(7): 3239-3261.
- [47] Kruskal W H, Wallis W A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 1952, 47(260): 583-621.
- [48] Wu X T, Fu B J, Wang S, Song S, Lusseau D, Liu Y X, Xu Z C, Liu J G. Bleak prospects and targeted actions for achieving the Sustainable Development Goals. *Science Bulletin*, 2023, 68(22): 2838-2848.
- [49] 刘畅, 渠鸿娇, 郭砾. 山水林田湖草沙生命共同体理念下社会-生态系统时空耦合及模拟预测. *生态学报*, 2024, 44(7): 1-16.