

DOI: 10.20103/j.stxb.202303290612

马小宾, 章锦河, 郭丽佳, 杨良健, 王静玮. 生态环境研究中压力-状态-响应模型应用的陷阱与改善. 生态学报, 2024, 44(12): 4923-4932.

Ma X B, Zhang J H, Guo L J, Yang L J, Wang J W. Traps and improvements of PSR model: an eco-environmental perspective. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 4923-4932.

# 生态环境研究中压力-状态-响应模型应用的陷阱与改善

马小宾<sup>1,2</sup>, 章锦河<sup>1,2,3,\*</sup>, 郭丽佳<sup>1,2</sup>, 杨良健<sup>1,2</sup>, 王静玮<sup>1,2</sup>

1 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

2 黄山国家公园生态系统教育部野外科学观测研究站, 黄山 245899

3 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016

**摘要:** 压力-状态-响应 (Pressure-State-Response, PSR) 模型在国内外生态环境研究领域中的应用十分广泛, 但有关该模型指标遴选的适宜性和科学性则较少受到重视, 导致模型在实际应用中存在指标的套用、误用、混用等现象。通过对国内外 100 多篇 PSR 模型应用研究文献的梳理与分析, 认为: (1) PSR 模型的实质是对人地关系的适应、反应与响应的评估, 压力 (Pressure) 更多源于人类活动对自然资源的利用方式与强度, 状态 (State) 是人类活动压力下生态环境自身的质与量的表现, 响应 (Response) 则是对谋求人地关系和谐所做出的制度安排, PSR 模型指标遴选宜与之相契合。(2) 目前国内外 PSR 模型应用主要存在内生性 (Endogeneity)、矢量性 (Vectority)、指示性 (Indexicality)、针对性 (Pertinence) 等四个方面的缺憾。(3) 忽视研究目标的指向性、科学问题的针对性、研究对象的特殊性、人地关系的复杂性以及研究者的主观性等, 是造成 PSR 模型应用陷阱的主要因素。最后, 本文提出 PSR 模型的优化与改善路径, 以为生态环境领域的 PSR 理论实证和实践应用提供参考。

**关键词:** 压力-状态-响应 (PSR) 模型; 陷阱; 生态环境; 人地关系

## Traps and improvements of PSR model: an eco-environmental perspective

MA Xiaobin<sup>1,2</sup>, ZHANG Jinhe<sup>1,2,3,\*</sup>, GUO Lijia<sup>1,2</sup>, YANG Liangjian<sup>1,2</sup>, WANG Jingwei<sup>1,2</sup>

1 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 Huangshan National Park Ecosystem Observation and Research Station, Ministry of Education, Huangshan 245899, China

3 Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810016, China

**Abstract:** The Pressure-State-Response (PSR) model is widely used in the field of ecological and environmental research at home and abroad, but less attention is paid to the appropriateness and scientificity of the selection of the model indicators. This leads to a variety of problems in the practical application of the model, such as the mechanical application and misuses. This study presented a review and analysis of more than 100 domestic and international literature on the application of PSR models. The results show that: (1) The essence of the PSR model is an assessment of adaptation, reaction and response to human-land relations. Pressure is more a result of the way and intensity of human activity on natural resources. State is the change of the ecological environment in a specific period of time, which is the "qualitative" and "quantitative" expression of the ecological environment under the pressure of human activities. Response is an institutional and operational arrangement that seeks to harmonize human-land relations. The PSR indicator selection is appropriate to fit. (2) At present, there are four main deficiencies in the application of PSR models at home and abroad, including Endogeneity, Vectority, Indexicality, and Pertinence. In particular, Endogeneity is reflected in the omission of important

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (42271251)

**收稿日期:** 2023-03-29; **网络出版日期:** 2024-04-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjinhe@nju.edu.cn

variables; associativity bias; and self-selection bias. Vectority is reflected in the researcher's own neglect of the directionality of the indicators; the possible inversion of the positive and negative indicators; and the threshold effect of the indicator itself. Indexicality is reflected in the fact that the "Pressure" variable indicators are not effective in indicating human pressures on ecosystems; the "State" variable indicators are not effective in indicating the timely state of ecosystems; and the "Response" variable indicators are not effective in indicating human society responses. Pertinence is reflected in the relevance of different scientific issues and the specificity of different research subjects. (3) Neglecting the directionality of research objectives, the relevance of scientific questions, the specificity of research objects, the complexity of human-land relations, and the subjectivity of researchers are the main factors causing the traps in the application of PSR models. Finally, this paper mainly focused on the dual aspects of internal control and external reference, combined with comprehensive and systematic thinking about the research topic, discipline integration, indicator innovation and other specific ways, to put forward the optimization and improvement path of the PSR model in order to provide references for the theoretical empirical and practical application of PSR in the field of ecology and environment.

**Key Words:** Pressure-State-Response (PSR) model; traps; ecological environment; human-land relations

生态环境是人类社会赖以生存的物质基础,关系人类福祉,关乎人类未来。近百年来,世界经济高速发展,人类物质财富不断增加,同时由于非理性的人类活动方式和强度所导致生态环境问题却也日益凸显<sup>[1]</sup>,干扰人地关系和谐,制约可持续发展。千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment,简称MA)对全球生态环境的变化以及人类福祉进行了全方位、多尺度、系统化的评估<sup>[2-3]</sup>,证实了在人类活动的强烈影响下,全球自然生态环境资本正在持续被消耗和减少,人类福祉的可持续性受到严重制约。面对人类与生态环境之间关系的异化,加强生态环境的监测与评估,科学调控人类行为的方式与强度,谋求人地关系和谐,成为生态环境研究的核心。

目前,国内外有关生态环境评估的方法多样,大多立足于可持续发展、耦合协调、承载力、韧性等理念视角,主要采用综合指标评估方法,对生态安全、生态健康、生态风险等进行研究。综合指标评估方法成为生态环境研究的一种便捷、适用、易操作的主流范式,其主要原因在于:其一,综合指标评估可满足生态环境不同尺度效应的要求,即无论是国家、区域<sup>[4]</sup>、流域等大尺度,还是城市<sup>[5]</sup>、湖泊<sup>[6]</sup>、县域、乡村等中小尺度,都具有适应性以及能够刻画空间分异特征<sup>[7]</sup>;其二,可满足生态环境不同时间效应的要求,揭示生态环境演变过程及特征,具有时间纵向可比性<sup>[4,7]</sup>;其三,可满足量化要求,视“要素”为数量,通过借助各种变量指标搭建起生态环境的“数字塔”,具有系统性与全面性。各种综合指标评估模型中,PSR(Pressure-State-Response)模型在生态环境领域得到最为广泛的应用,相关研究文献已有千篇以上。该模型应用主要涉及生态安全<sup>[8]</sup>、生态健康<sup>[9-10]</sup>、资源安全<sup>[11]</sup>、土地利用<sup>[12]</sup>等主题,得到地理学、生态学、经济学、环境科学以及资源科学等多学科科学者的广泛参与,表现出较强的交叉融合、高拓展性特点<sup>[4,13]</sup>。然而,PSR模型在应用方面表现出的特点也带来了一些困扰,首先,高拓展性、学科交叉性导致在PSR模型的理论认知上存在内涵模糊性、学科差异性、选择主观性等问题,不同学科背景、不同研究领域、不同实证案例在使用该指标模型中对生态环境与人类活动关系的辨析和区分以及变量指标的选择尚未形成统一的认知,现有研究中,相同的变量指标甚至可以出现在PSR模型的任一维度。其次,生态环境与人类活动的相互异化过程具有非线性、动态化、不确定性以及不连续性等特征。在此背景下,要实现PSR模型的科学使用,需要有效结合实证案例的特殊性、差异性,并辅以严谨逻辑思辨。

目前,PSR模型在生态环境领域中的多数应用研究,仍存在指标的套用、误用、混用等现象,不同学科的不同学者对PSR模型的指标内涵认知、指标遴选逻辑等存在差异,未能有效彰显和科学表征实证主义的研究范式和理论价值。有鉴于此,本文遴选国内外100余篇PSR模型的应用研究文献,采用文献分析法,旨在回答三个问题:(1)PSR模型指标内涵的实质是什么?(2)PSR模型应用研究中存在哪些陷阱?(3)如何优化PSR模型的应用?以期为生态环境领域的PSR理论探讨和实践应用提供参考。

## 1 PSR 模型的缘起和指标内涵

### 1.1 模型的缘起

PSR 模型最早由加拿大统计学家 Rapport 和 Friend 为量化和分析生态环境系统状态而提出<sup>[14]</sup>,其基本内容是人类活动方式和强度导致生态环境的“质”与“量”发生变化,进而人类社会作出改善和阻止生态环境恶化的响应<sup>[15]</sup>,目的是解释与揭示环境压力、环境状况以及社会响应三者之间相互关系的特征与规律,为科学保护生态环境与合理利用自然资源等提供科学决策依据。二十世纪八九十年代,经经济合作与发展组织(OECD)和联合国环境规划署(UNEP)的共同推介,PSR 模型成为生态环境系统评估的研究框架之一。

### 1.2 模型的指标内涵

PSR 模型使用“原因-效应-响应”这一思维逻辑,体现了人类活动与生态环境之间的相互作用关系。生态环境的变迁受到自身演化和人类活动的双重影响。从生态环境自身演化来看,尽管存在突变的情形,但通常其要素、结构与功能变化较为缓慢、循序渐进,演化过程具有长时间尺度效应,例如群落演替;从人类活动角度来看,人类活动的方式和强度是扰动生态环境的核心外因,其对生态环境的影响具有及时性特点,譬如对水、土壤、生物、空气等人类生存环境质量的影响效应更为显著。因此,PSR 模型更多地是从后者视阈,评估人类活动与生态环境之间的适应、反应与响应。

PSR 模型旨在回答“发生了什么、怎么样和如何做”这 3 个问题<sup>[16]</sup>,这些都与人类活动的方式和强度密切相关。人类通过各种活动从生态环境中获取其生存与发展所必需的资源,同时又向生态环境排放废弃物,从而改变了资源储量与环境质量,对生态环境产生干扰,而受干扰的生态环境又反过来影响人类的社会经济活动和福利,因此人类社会需要通过各种制度与行动来响应生态环境的变化,谋求人地关系的和谐。据此,该模型分为 3 类指标,即压力指标(发生了什么)、状态指标(怎么样)和响应指标(怎么做)。

压力指标表征人类各种活动对生态环境造成的压力,如资源的占用与耗费,废弃物的排放等,压力大小更多源于人类活动对自然资源的利用方式与强度。状态指标表征特定时段内生态环境的变化情形,如资源赤字、环境污染、生态破坏等,是人类活动压力下生态环境自身的“质”与“量”的表现。响应指标指社会和个人如何预防、减轻、阻止或恢复人类活动对生态环境造成的负面影响,其本质是谋求人地关系和谐所做出的制度与行动安排。

## 2 PSR 模型应用存在的陷阱

### 2.1 指标的内生性

内生性问题的讨论多出现在经济学、管理学、统计学等研究中,是指模型中解释变量与扰动项之间存在相关性<sup>[17]</sup>。客观世界的复杂性、多变性、动态性,使得模型在简化抽象过程中对指标间的因果关系、相关关系、测量误差等根源性问题难以有效克服,进而产生一系列的指标内生性问题。PSR 模型指标的内生性主要表现在以下 3 个方面。

(1) 遗漏重要变量。遗漏重要变量,对 PSR 内涵的呈现与表征不足,导致 PSR 模型对研究问题的缺失性表达偏差。譬如,压力指标方面,通常遗漏对水、能源、生物、土地等资源的占用与耗费指标;状态指标方面,往往遗漏表达水、土、气、生等自然环境要素的“存量”状态与“质量”状态指标,值得一提的是,“压力”不一定必然导致“状态”不好或恶化,但现有相关研究似乎都有“负面”影响的前提假定的倾向,导致空气质量、土壤质量、水体质量以及水、能源、生物、土地等资源存量指标不足,不能反映“压力”作用下的生态环境自身的真实“状态”,失之偏颇。此外,在生态环境研究中,PSR 模型指标体系的构建时往往存在对相关文献指标的“套用”而非“借鉴”现象,缺失针对不同研究问题特点、不同研究案例特色的有效指标,譬如,湿地、耕地、湖泊等生态环境系统存在显著差异,具有各自独特的物质、理化属性,然而相关研究往往遗漏生态环境重要的物理化学指标,未将此类变量有效融入到区域安全、区域健康的评估中<sup>[8,10,18]</sup>(表 1)。(2) 联立性偏差。生态环境演



化过程复杂,压力、状态、响应的各项指标之间存在因果关系识别的复杂性。PSR 模型在现阶段的实证分析中,普遍存在对模型本身适用性、指标独立性、指标间因果性等问题的科学思考,导致各种变量指标选择归属的随意性与主观性,在生态安全、环境健康、灾害风险的实证中联立性偏差常有发生<sup>[4,9,11]</sup>。譬如,在生态安全研究中,各项指标的边界较为模糊,容易联立,致使发生“因森林覆盖高或水体质量优导致耕地或湿地系统安全,还是因系统整体处于安全状态,导致多项内部组成成分处于优良级别”的混沌现象<sup>[28-29]</sup>。此外,在与人类活动密切关联的指标中,常常会发生“人口指标既是状态指标又是响应指标,城镇化既是压力指标又是状态指标”的互斥现象<sup>[20,30-31]</sup>(表1)。(3)自选择偏差。自选择偏差是指变量指标不是随机的,而是选择的结果,这个选择的过程会产生偏差进而导致模型产生内生性陷阱。在生态环境研究中,PSR 模型的变量指标选择与案例地、研究问题、研究者存在密切联系,如果无法对无关指标进行有效控制,则会造成最终结果无法解释研究问题的矛盾。譬如,人均 GDP 能够对湿地生态健康产生影响<sup>[23]</sup>(表1),但人均 GDP 的差异受到资源禀赋、科学技术等多种因素影响,这些变量会造成模型结果误差,进而产生内生性陷阱。

## 2.2 指标的矢量性

矢量性意指变量指标的方向性,也即表征人类活动对生态环境影响的正负性。矢量性的讨论常见于工程技术科学中,聚焦在速度、渗透率<sup>[32]</sup>、动量守恒等方面。在以 PSR 模型等为代表的综合指标模型中,相关研究对于矢量性问题关注不多,缺乏深究,特别是指标量化过程中,各变量指标的方向性关乎 PSR 模型评估的科学性和结果的准确性。PSR 模型指标的矢量性应注意以下 3 个方面:

(1)研究者本身忽视指标的方向性。生态环境研究领域涉及不同学科背景的学者,学科交叉的特征也带来研究者主观认知的偏差。在 PSR 模型实证分析中,研究者往往忽视指标方向性对评估对象的正负影响。在使用 PSR 模型评估生态安全的过程中,指标的选择和权重的确定受到重视,但对各项指标的正负方向性欠缺考虑<sup>[13,21,33]</sup>(表1),譬如,废水排放量指标要考虑是否达标排放,而不能一概认为是负向指标等。(2)针对不同的研究对象和问题,指标正负可能存在倒置现象。由于 PSR 模型较高的适用性,其在生态环境研究的多个方面均受到关注和大量应用,涉及到的研究对象和问题既有森林、湿地、流域、城市、耕地等,又有生态安全、生态健康、生态风险、灾害管理等。由于相关研究对研究对象和问题的特殊性欠缺考虑,导致各项指标的方向性存在争论。譬如,在使用 PSR 模型评估耕地生态安全的研究中,人口密度、人口自然增长率、城镇化水平等指标的方向性存在互斥<sup>[8,22]</sup>(表1);关于生态脆弱性和生态系统健康的研究中人口密度、人口自然增长率等存在方向倒置现象<sup>[30,34]</sup>等。(3)指标本身的阈值效应,即某些特定的指标在超过一定范围时会发生方向性的逆转。在 PSR 模型使用中,涉及到多种要素,一些自然或者社会类要素会存在临界现象,部分因素在案例地长时间的评估中会发生正负方向逆转。譬如,在湿地生态系统健康研究中,平均气温、土壤 PH 值、旅游强度等在一定范围内可能是正向影响,但是超过该指标阈值范围,则指标的方向性会发生转变<sup>[23]</sup>(表1)。

## 2.3 指标的指示性

现象哲学观认为指示性是符号的第一性<sup>[35]</sup>,同时指示性被视为一种对对象的“锚定”<sup>[36]</sup>。即指示性是符号与对象之间最直接、最实在、质的存在。因此,指标模型的核心是现象和问题之间对对象的“关系诠释”,指示性是指标模型的第一性。在 PSR 模型中,存在压力、状态、响应三大核心方面,每个方面“第一性”的诠释都需要把握指标的指示性,否则,容易造成变量指标能指、所指偏差,阻碍对现象的量化评估。在生态环境研究中,PSR 模型的要义旨在寻找能够代表与生态环境密切相关的指示性“符号”,也就是指示变量指标,但是在实际应用中,PSR 模型的各项变量指标指示性问题时有发生,主要表现在以下几个方面:

(1)压力变量指标未有效指示生态环境系统所受的人类压力。在模型指标内涵的分析中,压力主要来源于人类的经济和社会活动对生态环境的胁迫作用,如各类资源的占用与耗费,各种废弃物的排放等,压力大小更多源于人类活动对自然资源的利用方式与强度。因此压力变量指标应该直接体现人类活动产生的胁迫影响。然而,现有研究中,仍存在压力的变量指标未有效表征人类活动强度和利用方式对自然资源的损耗和消耗的现象,譬如:在对水源区生态安全问题研究中,使用水土流失面积表示压力,该指标虽与水生态安全密切

表 1 PSR 模型四种陷阱的典型案例

| 研究对象 Research objects   | 压力 Pressure  | 状态 State   | 响应 Response   | 陷阱类型 Traps  | 参考文献 References |
|---|--|--|---|-------------|-----------------|
| 福建省耕地生态安全<br>Fammland ecological security in Fujian Province                    | 人口密度、人口自然增长率、人均耕地面积、城镇化水平、单位耕地面积化肥负荷、单位耕地面积农药负荷、单位耕地面积农膜负荷                   | 森林覆盖率、粮食单产、复种指数、耕地垦殖率、第一产业占 GDP 比重   | 污水处理率、有效灌溉面积比重、水土流失治理面积、农村人均可支配收入、人均粮食占有量、环境污染治理投资占 GDP 比重、单位耕地面积农业机械总动力                        | 内生性、矢量性、针对性 | [8]             |
| 凌河口湿地生态系统健康<br>Linghe estuary wetland ecosystem health                          | 人口密度、人类干扰指数  | 景观多样性指数、平均斑块面积、水文调节指数、景观优势度指数、均匀度指数、初级生产力                                      | 湿地退化指数、斑块破碎化指数  | 内生性         | [10]            |
| 汝溪河流域生态系统健康<br>Ecosystem health assessment of Ruxi River basin                  | 人口密度、城镇化率  | 生物第一性潜在生产率、森林覆盖率、水土流失率、地表水综合污染指数   | 工业废水达标处理率、饮用水源水质达标率、人均 GDP、年均降水量、年均气温   | 内生性         | [18]            |
| 西藏耕地生态安全<br>Fammland ecological security in Tibet                               | 耕地粮食生产压力指数、人口密度、人口自然增长率、城镇化率、单位面积耕地农药使用量、单位面积耕地化肥施用量、单位面积耕地农膜使用量、耕地减少面积、沙化面积 | 耕地粮食单产、人均粮食占有量、农田有效灌溉面积、单位面积耕地农业机械总动力、土地垦殖率、生态退耕面积                             | 农民年人均纯收入、生活垃圾无害化处理率、工业废水排放达标率、工业固体废物综合利用、除涝面积、水土流失治理面积、滑坡、泥石流治理面积、植被覆盖指数                        | 内生性、针对性     | [19]            |
| 北京水资源可持续性<br>Water resource sustainability in Beijing                           | 年总用水量、国内生产总值用水量、废水排放量、万元工业增加值用水量、粮食种植面积占作物种植面积的比重、工业用水量、环境用水率、工业废水排放量        | 年水资源总量、人均水资源量、农田灌溉用水有效利用系数、有效灌溉率、人均国内生产总值、人口密度、常住人口增长率、森林覆盖率                   | 总人口、废水处理率、循环水使用、万元 GDP 用水量下降率、水土保持规划总投资、工业节约用水、节约用水、植树造林面积                                      | 内生性         | [20]            |
| 昆明市水源地生态安全<br>Ecological security of drinking water source area in Kunming City | 人口密度、人均纯收入、水土流失面积、人均耕地面积   | 土壤侵蚀模数、森林覆盖率、年化肥使用量、年农药使用量、每天生活污水处理量、林业用地土地面积比例                                | 年能源补给、年污水处理经费、环境保护宣传教育普及率、环保投资占 GDP 比重  | 矢量性、指示性     | [21]            |
| 云南省耕地生态安全<br>Fammland ecological security in Yunnan province                    | 耕地面积、化肥使用量、农用塑料薄膜使用量、农药使用量、粮食产量、有效灌溉面积                                       | 人口密度、第三产业占比、人均 GDP、城乡居民消费总量、人口自然增长率、农业支出占公共支出比重                                | 废水排放量、工业固体废物排放量、城镇化水平、化石能源消费总量、建成区面积、人均公园绿地面积、建成区绿化覆盖率  | 矢量性、指示性     | [22]            |
| 甘南尔海湿地生态系统健康<br>Gahai wetland ecosystem health                                  | 年降水量(+)、年平均气温(-)、人口密度(-)、人均 GDP(+)、旅游强度(-)                                   | 植被覆盖度(+)、植物多样性(+)、植物生物量(+)、土壤 pH(-)、土壤有机碳(+)、土壤总氮(+)、土壤总磷(+)、土壤速效磷(+)、土壤含水量(+) | 人口受教育水平(+)、环保投资指数(+)、政策法规贯彻力度(+)、湿地管理水平(+)  | 矢量性         | [23]            |
| 上海滩涂生态安全<br>Ecological security of tidal flats in Shanghai                      | 国内生产总值、渔业生产、人口、垦区  | 生物条件、环境条件、生态功能条件   | 保护级别、回收输入   | 指示性         | [24]            |
| 甘南地区生态系统健康<br>Ecosystem health of the Gannan region                             | 人口密度、人口自然增长率、城镇化率、牲畜库存、经济密度、人均耕地面积、施肥量、工业增加值                                 | 人均草原面积、人均森林面积、人均国内生产总值、人均城镇居民净收入、农牧民人均净收入                                      | 香农多样性指数、传染指数、节水、植被恢复面积、畜产品率、植被指数增强、净初级生产率、第三产业占国内生产总值的比重  | 指示性         | [25]            |
| 陕西省生态系统健康<br>Ecosystem health assessment in Shaanxi Province                    | 单位耕地化肥负荷、人口自然增长率、城市化水平、人均耕地面积、固定资产投资年增长率、土地垦殖率、耕地粮食单产、灾害指数                   | 农民人均纯收入、有效灌溉面积、工业固体废物综合利用率、工业废水排放达标率   | 单位耕地农业机械  | 针对性         | [26]            |
| 青铜峡市土地生态安全<br>Land ecological security in Qingtongxia city                      | 人口密度、自然人口增长率、恩格尔系数、农药使用量、农用化肥使用量、农用塑料薄膜使用量、废水排放量、万元 GDP 能耗、工业固体废物产生量         | 人均耕地面积、人均 GDP、农村人均纯收入、人均粮食产量、单位耕地粮食产量、农村固定资产投资、农业受灾面积、人均水资源总量、环境空气质量达标率        | 建成区绿化覆盖率、第三产业占的比重、生活垃圾处理率、工业废气治理设施套数、废水治理设施套数、水利、环保设施投资占 GDP 的比重、教育投资占 GDP 的比重、每万人在校学生数、卫生机构床位数 | 针对性         | [27]            |

GDP 国内生产总值 Gross domestic product; pH 酸碱性 Pondus hydrogenii

相关,但却是人类活动的结果或生态系统的状态指标,而非压力指标<sup>[21]</sup>(表1);同样的在滩涂生态敏感性和安全性评价中,使用国内生产总值作为压力指标并不能指代滩涂地区的生态胁迫<sup>[24]</sup>(表1)。(2)状态变量指标未有效指示生态环境系统的及时状态。状态指标是人类活动压力下生态系统自身的“质”与“量”的表现,如资源赤字、环境污染、生态破坏、物种多样性减少、生境质量下降等。譬如:在高寒牧区生态系统健康研究中采用人均收入、人均面积占比等变量指标指征高寒牧区生态系统健康的状态,这类变量指标多用来说明人类社会的状况,并非是对高寒牧区生态系统健康的“质”和“量”准确有效的量化表达,未能指征牧区生态系统的及时现状特征,如是否存在资源枯竭、水土流失、植被破坏、土壤沙化等<sup>[25]</sup>(表1)。(3)响应变量指标未有效指示人类做出的应对措施。响应指标应反映社会和个人如何预防、减轻、阻止或恢复人类活动对环境的负面影响,其实质是谋求人地关系和谐所做出的制度与行动安排,这类变量指标核心目的是强调人类所发挥的主观能动性。目前 PSR 模型在实证分析中对响应变量指标的考虑一般会涉及政策、制度、行为等几个方面,但在具体变量指标选择过程中却存在误用情形。譬如:在高寒牧区生态系统健康研究中,选择香农多样性指数作为生态系统健康的响应措施有失偏颇<sup>[25]</sup>(表1),香农多样性指数在景观生态学中多是反映景观异质性,即生态环境的基本状况,对于人的主观能动性体现不足,并不能有效反映制度与行动安排。

#### 2.4 指标的针对性

针对性主要是指面对特定事物所采取的独特处置方式,简而言之,即因事制宜。目前国内外学者基于 PSR 模型开展的实证分析案例丰富,一方面表明该模型应用的广泛性,认同度高,另一方面却容易产生忽视科学问题的针对性、研究对象的特殊性等,造成 PSR 在应用研究中针对性不强的缺憾,主要表现在以下 2 个方面。

(1)不同科学问题的针对性。基于 PSR 模型的应用研究广泛涉及到生态安全、生态健康、生态风险、可持续性、生态韧性、生态脆弱性、生态敏感性、生态稳定性、环境承载力等科学问题<sup>[37]</sup>,这些科学问题多属于生态、环境、资源等研究领域,存在关联性强、相近度高,概念内涵存在重叠,科学问题边界交叉,对上述不同科学问题的 PSR 应用研究时,指标遴选往往缺乏不同科学问题的针对性。譬如,在土地生态安全和生态健康的研究中,指标的重复率达到 80% 以上<sup>[26-27]</sup>(表1);在可持续性和环境承载力的研究中,上述现象也较为显著<sup>[38-39]</sup>。(2)不同研究对象的特殊性。针对不同研究对象应体现出研究对象的特殊性,包括自然地理条件、社会经济状况等,这要求变量指标必须能表征区域代表性、典型性和差异性,但实际应用研究中常常被忽视。譬如,在福建<sup>[8]</sup>、西藏<sup>[19]</sup>等地区的耕地生态安全评价,压力层中的变量指标人口密度均被使用(表1),然而福建与西藏的自然条件、社会发展存在显著的差异,人口密度指标在西藏耕地生态安全评价中的适用性有待商榷。

### 3 模型应用的完善与优化

#### 3.1 PSR 模型完善的内部控制

PSR 模型存在的四种典型陷阱是模型应用广泛和理论思辨不足的矛盾外显<sup>[40]</sup>。一方面,不能因噎废食,不能因存在内生性、矢量性、指示性和针对性的陷阱,否认 PSR 模型的科学性;另一方面,不能生搬硬套,需要具体问题具体分析,避免坠入为量化而量化的陷阱。从内部控制角度而言,完善 PSR 模型应用研究主要关注两点。(1)明确科学问题,即进行实证研究时,需要仔细梳理科学问题的缘起、过程、已有成果、存在问题,在具体指标遴选时,独立性、科学性、有效性、可操作性等基本要求需要重点考虑。在此基础之上,针对 PSR 模型的内生性、矢量性、指示性和针对性等问题,可以借鉴相关文献的研究思路,但需掌握变量指标之间的逻辑性,避免各个变量选择的随意性和无效性。(2)厘清作用机制,即强化对研究对象生态环境要素、结构与功能的系统性、整体性的相互作用机理的思考。展开实证分析和建立指标体系之前,应厘清研究问题的生态环境理论基础,如环境利益相关者、环境空间正义、生态伦理、自然中心主义、人类中心主义等的不同主张与诉求,明晰每种变量指标在宏观和微观尺度上对研究问题的影响和效应。例如,明确科学问题有助于在应用 PSR



模型中,全面理解生态安全、生态健康、生态风险的深刻内涵和内部差异,缓解由变量缺失、因果不清等导致的内生现象;厘清作用机制能够帮助研究者重视变量指标的方向性问题,重视长时间研究过程的阈值效应。避免矢量性陷阱的发生。

### 3.2 PSR 模型提升的外部借鉴

PSR 模型常常被生态学者、环境学者、地理学者等所采用,面对 PSR 模型存在的内生性、矢量性、指示性以及针对性的四种陷阱,可以借鉴他山之石来提升。在科学技术加持和学科交叉赋能的背景下,可借助其他学科、专业、视阈等外部力量,融合学理性、逻辑性、思辨性,将哲学、经济学、计算科学、心理学、管理学等学科思维纳入到 PSR 模型分析框架之中,借彼之长,弥己之短。(1)科技赋能指标创新。当前大数据、云计算、物联网、人工智能、区块链、无人机遥感等技术不断与生态环境研究交融,对生态环境“质”和“量”的描述、阐释与解析日益深入。相比以往因难以获得数据而放弃遴选的指标,在现在条件下,能够更好地获取和使用,实现连续采集、实时监测,例如物种迁徙、生物多样性监测、污染物扩散追踪、物候变化、环境信息流波动、生态系统的物质循环和能量流动等。丰富的基础资料获取渠道和方式有利于 PSR 指标创新,有利于提升 PSR 模型测度结果的稳定性、有效性和可信度。(2)学科融合拓展视野。依托哲学、心理学、管理学等学科的融合,增强对 PSR 模型的学理思辨,促使采用更加科学、综合、动态的视角处理生态环境问题。PSR 模型的指示性、针对性等问题,多是研究者缺少对人类活动和生态环境要素、结构、功能以及格局、过程、机理等相互作用关系的学理性、哲学性的思考,对案例的特殊性、变量指标的局限性、评估体系的逻辑性无法实现信度和效度的整体统一,这也是实证研究趋于重复,理论贡献囿于一隅的根源。例如针对 PSR 模型的指示性陷阱,科技赋能指标创新有利于从新技术、新方法化解压力变量指标、状态变量指标、响应变量指标的表征误差,同时学科融合也有利于从新视角、新路径正确认识生态环境表征和本质之间的认知错位,提升 PSR 模型建构的科学性和学理性。

综合上述内容,结合 PSR 模型的指标内涵以及当前应用陷阱,本研究构建了 PSR 模型应用中模型内涵、指标认知、陷阱解决、路径转换的优化和提升框架(图 1)。

如图 1 所示,本文提出的 PSR 模型优化和提升框架主要从是什么,为什么,如何做三个角度进行阐述。首先,需要进一步明确 PSR 模型本身的基本内涵,厘清压力、状态、响应各自包含的内容和各项要素之间的流转关系,为 PSR 模型应用陷阱的发现提供理论基础。其次,在深入理解 PSR 模型的基本内涵和总结现有 PSR 模型实证分析的基础上,提出 PSR 模型存在的四种陷阱,以及解析各项陷阱存在的层面,回答 PSR 模型应用陷阱是什么,同时在结合相关典型文献的例证分析,分级分类表明各类应用陷阱出现的原因,回答为什么的问题。最后,针对上述出现的各项应用陷阱,从内外结合视角出发,总结 PSR 模型在应用研究中,如何避免出现四种陷阱,并且从“是什么”,到“为什么”,再到“如何做”的逻辑框架下提炼出 PSR 模型传导逻辑的新认知。总的来看,上图所呈现的四个方面是结合系统论和认识论,从内部和外部、整体和局部、本源和规律等不同方面阐述关于 PSR 模型存在的陷阱和优化方案。

与此同时,结合上述模型优化和提升框架,归纳总结当前 PSR 模型在生态环境领域的研究基础,提出 PSR 模型在应用中指标遴选的参考范式(表 2)。

## 4 结论

### 4.1 PSR 模型应用的新认知

本文全面系统地回顾了生态环境研究中,PSR 模型的内涵、陷阱,并提出优化路径。在生态安全、环境健康、可持续评估、宜居城市建设等方面应用中,不少研究者仍停留在对 PSR 模型的固有认知:产生生态环境压力→评估生态环境状态→政策调整响应的单程线性传导路径,在选择各种对应变量指标中造成指标的多种陷阱出现。本文经过对 PSR 模型存在陷阱的详细探讨,发现在生态环境领域中,PSR 模型各要素之间存在新路径,由单程线性传导转变为双线程传递(图 2)。

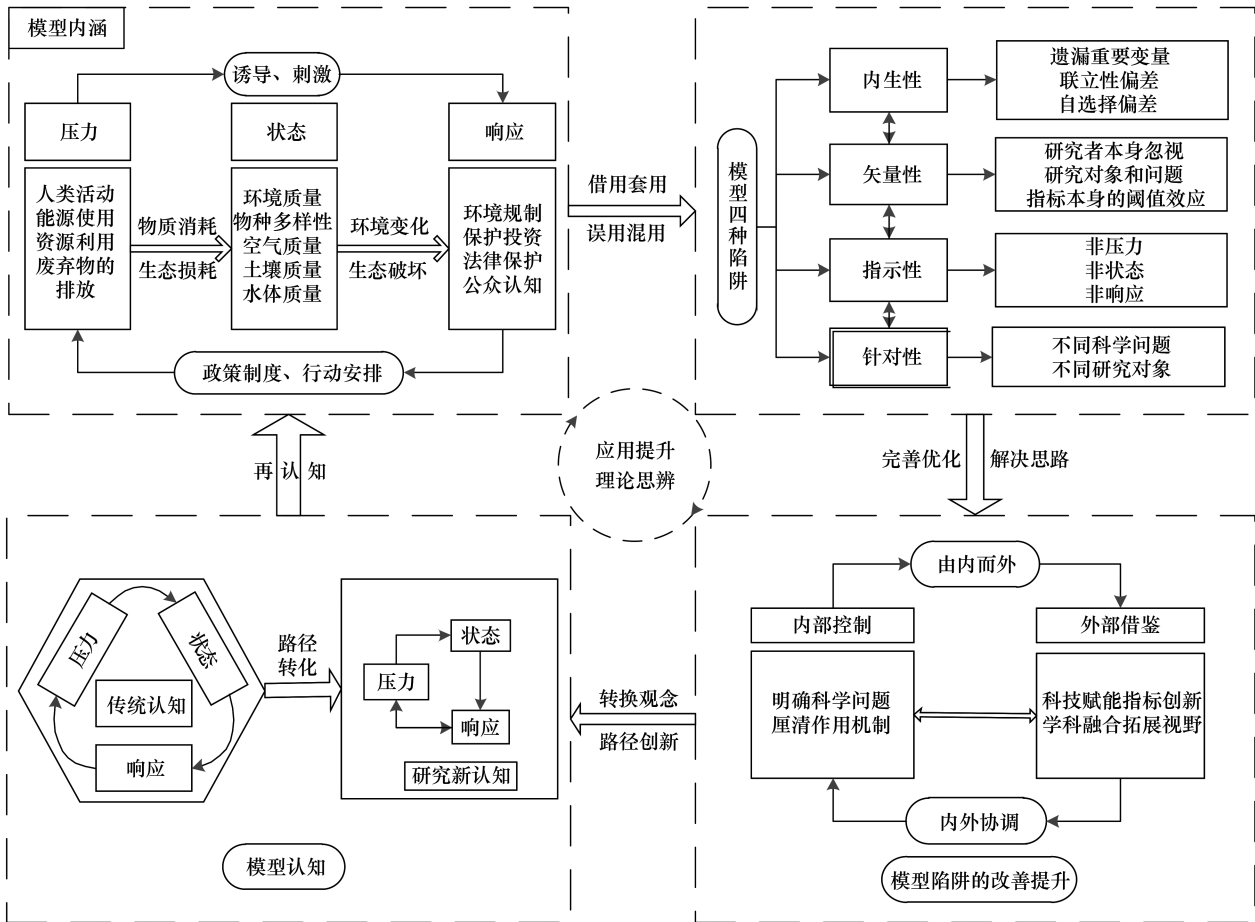


图1 PSR模型优化和提升框架

Fig.1 PSR model improvement framework

表2 PSR模型指标构建参考

Table 2 Construction reference of PSR model

| 要素 Indicators | 指标释义 Indicator interpretation  | 指标参考 Indicator reference                                    |
|---------------|--|---|
| 压力 Pressure   | 表征人类各种活动对生态环境造成的压力,如资源的占用与耗费,废弃物的排放等,压力大小更多源于人类活动对自然资源的利用方式与强度。(人类活动方式和强度) | 工业物质消耗(耗水、耗电、耗木材等)、污染物排放量(固废、废气、废水排放量等)、矿产资源能源消耗(耗煤、耗气、耗油)等 |
| 状态 State      | 表征特定时段内生态环境的变化情形,如资源赤字、环境污染、生态破坏等,是人类活动压力下生态环境自身的“质”与“量”的表现。(生态环境的反应)      | 大气质量、水环境质量、生物多样性、土壤质量等                                      |
| 响应 Response   | 指社会和个人如何预防、减轻、阻止或恢复人类活动对生态环境造成的负面影响,其实是谋求人地关系和谐所做出的制度与行动安排。(人类社会的反应)       | 生态环境保护投资、环保要求政策(污水达标率、废气达标率等)、禁止性规定(禁止永久性建筑建设等)。生态红线等等      |

基于PSR模型的生态环境研究,人类活动方式和强度是生态环境演化的诱因,产生了多种不同方面、不同层次、不同维度、涵盖时空的资源消耗、污染排放等压力,作用于生态环境系统,生态环境承载了各种人类活动的压力进而导致自身“质”和“量”属性发生变化,如物种丰富度下降、土壤沙化、森林面积减少等,生态环境状态发生改变;同时,作为诱因的人类活动压力改变生态环境,刺激人类社会为了维持或保持生态环境“质”和“量”而做出政策调整、环保投入等行为,即做出响应。

此外,PSR模型的实质是对人地关系的适应、反应与响应的评估,针对PSR模型内涵本文给出明确阐释:



压力(Pressure)更多源于人类活动对自然资源的利用方式与强度;状态(State)是特定时段内生态环境的变化情形,是人类活动压力下生态环境自身的“质”与“量”的表现;响应(Response)则是对谋求人地关系和谐所做出的制度与行动安排。

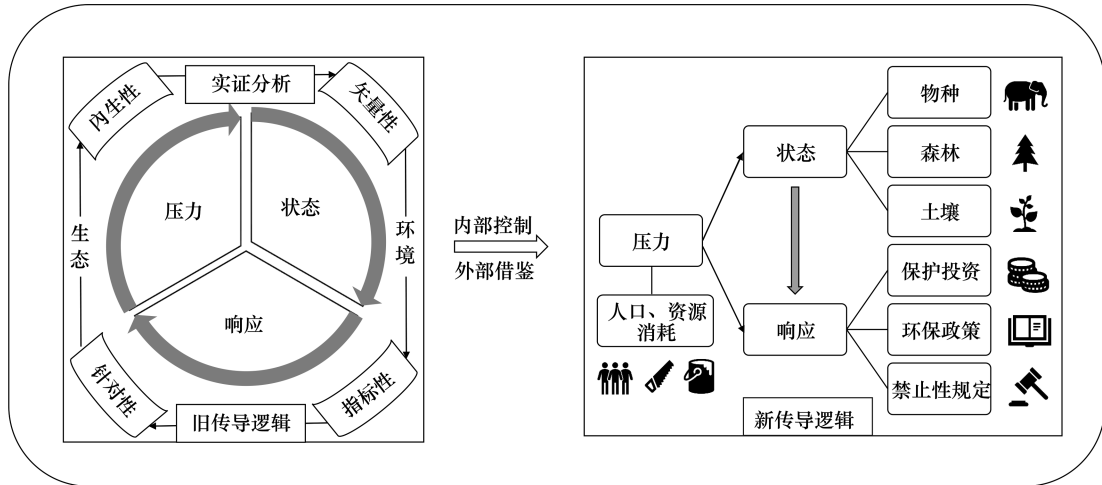


图2 PSR模型的传导逻辑新认知

Fig.2 New understanding of the conduction logic of the PSR model

### 4.2 PSR模型应用存在的四类陷阱

生态环境研究中PSR模型备受关注。一方面,为学术界提供良好的生态环境议题量化范式,促进多个研究议题的广泛发展;另一方面,模型的适用性被证实,也被泛化,导致在生态环境研究中未能进一步实现理论和实践突破,出现研究处于借用、套用、误用、混用的现象。为此,本文对现有研究分类归纳总结,提出PSR模型应用过程中的四种陷阱:内生性(Endogeneity)、矢量性(Vectority)、指示性(Indexicality)、针对性(Pertinence),简称“EVIP”。四种陷阱表现在不同方面,涉及内涵认知、科学问题、科研人员、数据限制、变量差异等多个方面,构成了PSR模型陷阱的多维异构特征。

### 4.3 PSR模型完善的基本框架

针对PSR模型在借用、套用、误用、混用中出现的四种陷阱,文章指出两条解决路径:内部控制和外部借鉴。其中内部控制是在明确科学问题和厘清作用机制基础上,叠加对于研究议题的全链条、全过程分析和生态环境要素结构功能的全认知、全系统的思考,因地制宜,避免坠入为量化而量化的陷阱,减缓内生性、矢量性等的发生;外部借鉴是在他山之石基础上,利用科技赋能指标创新,开展学科融合拓展视野,为变量指标的更新、精准、完善、多样等提供创新视阈,减轻甚至消除指示性、针对性问题的发生。

本文结合现有研究和理论思辨,规整模型指标内涵,提出应用过程中的四种陷阱问题,并且发现造成PSR模型应用陷阱的主要因素表现在忽视研究目标的指向性、科学问题的针对性、研究对象的特殊性、人地关系的复杂性以及研究者的主观性等。因此,从两个方面“内部控制和外部借鉴”搭建PSR模型的完善和提升框架,遵循从内涵认知到应用完善,再到概念再认知的框架,为更好理解全面认知模型的概念内涵、要素关系,以及辩证人类活动和生态环境关系提供理论批判,强化模型的逻辑性和科学性,为PSR模型在生态环境研究的应用中注入新活力。

### 参考文献(References):

[ 1 ] 黄金川,方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. 地理研究, 2003, 22(2): 211-220.

[ 2 ] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, Capistrano D, Defries R S, Díaz S, Dietz T, Duraipapp A K, Oteng-Yeboah A, Pereira H M, Perrings C, Reid W V, Sarukhan J, Scholes R J, Whyte A. Science for managing ecosystem services: beyond the Millennium Ecosystem Assessment.

- Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(5): 1305-1312.
- [ 3 ] Ehrlich P R, Kennedy D. Millennium assessment of human behavior. *Science*, 2005, 309(5734): 562-563.
- [ 4 ] Fan Y P, Fang C L. Evolution process and obstacle factors of ecological security in Western China, a case study of Qinghai Province. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106659.
- [ 5 ] 刘钢, 袁晓梅, 黄晶, 王慧敏. 基于 PSR 框架的城市洪涝弹性评估——以苏锡常地区为例. *资源开发与市场*, 2018, 34(5): 593-598.
- [ 6 ] 林妙丽, 陈诚, 张建华, 李港, 何梦男, 王智源, 何欣霞, 陈天宇, 陈求稳. 基于 PSR 的围圩养殖区湖泊湖荡群水生态系统健康评价. *环境科学学报*, 2021, 41(10): 4315-4324.
- [ 7 ] 张琨, 林乃峰, 徐德琳, 于丹丹, 邹长新. 中国生态安全研究进展: 评估模型与管理措施. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(12): 1057-1063.
- [ 8 ] 范胜龙, 杨玉珍, 陈训争, 张莉, 黄炎和. 基于 PSR 和无偏 GM(1, 1) 模型的福建省耕地生态安全评价与预测. *中国土地科学*, 2016, 30(9): 19-27.
- [ 9 ] Su Y F, Li W M, Liu L, Hu W, Li J J, Sun X Y, Li Y. Health assessment of small-to-medium sized rivers: comparison between comprehensive indicator method and biological monitoring method. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107686.
- [ 10 ] 徐浩田, 周林飞, 成遣. 基于 PSR 模型的凌河口湿地生态系统健康评价与预警研究. *生态学报*, 2017, 37(24): 8264-8274.
- [ 11 ] 王国萍, 闵庆文, 丁陆彬, 何思源, 李禾尧, 焦雯珺. 基于 PSR 模型的国家公园综合灾害风险评估指标体系构建. *生态学报*, 2019, 39(22): 8232-8244.
- [ 12 ] 钟少华, 时鹏, 杨文刚, 李占斌, 李鹏, 杨殊桐. 基于 PSR 模型的土地利用系统健康评价及障碍因子诊断——以延长县为例. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 283-289.
- [ 13 ] 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. *资源科学*, 2014, 36(8): 1702-1711.
- [ 14 ] Rapport D J, Singh A. An EcoHealth-based framework for State of Environment Reporting. *Ecological Indicators*, 2006, 6(2): 409-428.
- [ 15 ] 杨兆青, 陆兆华, 刘丹, 袁明扬, 王菲, 荣正阳, 黄玉凯. 煤炭资源型城市生态安全评价——以锡林浩特市为例. *生态学报*, 2021, 41(1): 280-289.
- [ 16 ] 全川. 环境指标研究进展与分析. *环境科学研究*, 2000, 13(4): 53-55.
- [ 17 ] Roberts M R, Whited T M. Endogeneity in empirical corporate Finance. *Handbook of the Economics of Finance*. Amsterdam: Elsevier, 2013: 493-572.
- [ 18 ] 杨予静, 李昌晓, 丽娜·热玛赞. 基于 PSR 框架模型的三峡库区忠县汝溪河流域生态系统健康评价. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(S1): 66-74.
- [ 19 ] 马年圣, 支晓娟, 宋雨婷. 基于 PSR 和 GM(1, 1) 模型的西藏耕地生态安全评价与预测. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(11): 81-86.
- [ 20 ] Wang Q, Li S Q, Li R R. Evaluating water resource sustainability in Beijing, China: combining PSR model and matter-element extension method. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 206: 171-179.
- [ 21 ] 付伟, 王见, 刘畅, 杨芳. 基于 PSR 模型的昆明市城市饮用水源区生态安全问题研究. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(S1): 83-86.
- [ 22 ] 韩磊, 潘玉君, 高庆彦, 马佳伸. 基于 PSR 和无偏 GM(1, 1) 模型的云南省耕地生态安全评价与预测. *生态经济*, 2019, 35(2): 148-154.
- [ 23 ] 徐国荣, 马维伟, 李广, 张宏奎. 基于 PSR 模型的甘南杂海湿地生态系统健康评价. *水土保持通报*, 2019, 39(6): 275-280.
- [ 24 ] Shi Y S, Li J Q, Xie M Q. Evaluation of the ecological sensitivity and security of tidal flats in Shanghai. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 729-741.
- [ 25 ] Li W L, Liu C L, Su W L, Ma X L, Zhou H K, Wang W Y, Zhu G F. Spatiotemporal evaluation of alpine pastoral ecosystem health by using the Basic-Pressure-State-Response Framework: a case study of the Gannan region, Northwest China. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 108000.
- [ 26 ] 王同达, 曹锦雪, 赵永华, 韩磊, 刘钊. 基于 PSR 模型的陕西省土地生态系统健康评价. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1563-1572.
- [ 27 ] 王鹏, 王亚娟, 刘小鹏, 陈晓, 孔福星. 基于 PSR 模型的青铜峡市土地生态安全评价与预测. *水土保持通报*, 2018, 38(2): 148-153, 159.
- [ 28 ] 陈凤, 苏少川, 陈妍, 李宁, 王韧, 游巍斌, 何东进. 基于 PSR 模型的闽东滨海湿地生态系统健康评价. *湿地科学与管理*, 2020, 16(3): 25-29.
- [ 29 ] 谢余初, 巩杰, 张玲玲. 基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化. *地理科学*, 2015, 35(6): 790-797.
- [ 30 ] 宁立新, 马兰, 周云凯, 白秀玲. 基于 PSR 模型的江苏海岸带生态系统健康时空变化研究. *中国环境科学*, 2016, 36(2): 534-543.
- [ 31 ] 温馨, 朱金勋, 高维新. 异质体制下粤港澳大湾区九市生态安全协同效率实证分析——基于 PSR 和 GIS-DEA 组合模型. *生态经济*, 2020, 36(4): 200-205.
- [ 32 ] 王端平, 周涌沂, 马泮光, 田同辉. 方向性岩石渗透率的矢量特性与计算模型. *岩土力学*, 2005, 26(8): 1294-1297.
- [ 33 ] 李莉鸿, 李中才. 基于 PSR 方法的山东省耕地生态安全评价. *国土与自然资源研究*, 2020(3): 23-24.
- [ 34 ] Hu X J, Ma C M, Huang P, Guo X. Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection: a case of Weifang City, China. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107464.
- [ 35 ] 赵毅衡. 指示性是符号的第一性. *上海大学学报: 社会科学版*, 2017, 34(6): 104-113.
- [ 36 ] Genias S. *The Origins of the Horizon in Husserl's Phenomenology*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012.
- [ 37 ] 蒋依依, 张敏. 基于 PSR 模型旅游地生态持续性空间差异评价——以云南省玉龙纳西族自治县为例. *资源科学*, 2013, 35(2): 332-340.
- [ 38 ] 邓玲, 张文博. 基于 PSR 模型的西部地区可持续发展评价. *宁夏社会科学*, 2012(5): 33-38.
- [ 39 ] 狄乾斌, 韩帅帅. 城市经济承载力的综合评价及其时空差异研究——以我国 15 个副省级城市为例. *经济地理*, 2015, 35(9): 57-64.
- [ 40 ] 彭建, 吴健生, 潘雅婧, 韩忆楠. 基于 PSR 模型的区域生态持续性评价概念框架. *地理科学进展*, 2012, 31(7): 933-940.