

DOI: 10.20103/j.stxb.202211303459

殷悦, 周侃, 湛东升, 陈妤凡. 基于自然与人文耦合视域的高寒生态功能区宜居性评价及阻滞因子诊断——以青海省为例. 生态学报, 2024, 44(3): 992-1008.

Yin Y, Zhou K, Zhan D S, Chen Y F. Evaluation of livability in alpine ecological function zone and diagnosis of hindering factors from coupled natural and human perspectives: A case of Qinghai Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 992-1008.

基于自然与人文耦合视域的高寒生态功能区宜居性评价及阻滞因子诊断 ——以青海省为例

殷悦^{1,2}, 周侃^{1,2,*}, 湛东升³, 陈妤凡⁴

1 中国科学院地理科学与资源研究所区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 浙江工业大学管理学院, 杭州 310023

4 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211

摘要: 宜居性是自然生态环境和人文社会环境的有机统一体, 厘清高寒生态功能区宜居性及其阻滞因子, 是精准提升生态安全屏障内宜居水平并促进其人与自然和谐共生的重要前提。基于城乡宜居性评价基本范式、顾及高寒生态功能区人居系统的独特性, 从自然与人文耦合视域构建由自然环境、居住环境、设施环境、社会环境 4 个维度、8 个一级指标及 24 个二级指标组成的高寒生态功能区宜居性指标体系, 以青海省 45 个县域单元为例定量评价其宜居性及阻滞因子, 并探讨宜居性与生态重要性、社会经济发展状态的交互关系。结果显示: (1) 青海省总体宜居水平偏低, 并呈现由河湟谷地生态区、柴达木盆地生态区、环青海湖生态区、三江源生态区依次递减的地域分异; (2) 宜居水平和生态重要性的空间耦合不协调, 三江源生态区等生态重要区的宜居水平低, 宜居水平与人口规模、经济发展均成正比; (3) 青海省宜居性主要受到居住环境和社会环境的阻滞, 生态地理分区层面, 在自然因子的主要制约下, 三江源生态区、环青海湖生态区、柴达木盆地生态区分别受设施、居住、社会环境的强约束; (4) 针对不同生态地理分区宜居性特征提出未来人口引导及宜居性优化模式, 即按宜居性及社会经济生态引力明确人口集聚型、疏散型和稳定型 3 种空间集疏类型, 通过人口城镇化、就业移民、教育移民等跨区域移民及就近生态移民增强宜居性与人口分布的空间适配性, 以三江源生态区等弱势区域以及饮水设施、道路设施、物流配送、网络通讯等基础设施阻滞因子为重点, 提升高寒生态功能区人居系统的设施配置与供给能力。

关键词: 宜居性; 阻滞因子; 自然与人文耦合; 生态地理分区; 高寒生态功能区

Evaluation of livability in alpine ecological function zone and diagnosis of hindering factors from coupled natural and human perspectives: A case of Qinghai Province

YIN Yue^{1,2}, ZHOU Kan^{1,2,*}, ZHAN Dongsheng³, CHEN Yufan⁴

1 Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 School of Management, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

4 Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: Livability is the organic unity of the natural eco-environment and human environment. Clarifying the livability

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42230510); 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0406); 国家自然科学基金项目 (42001120)

收稿日期: 2022-11-30; **网络出版日期:** 2023-11-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhoukan@igsrr.ac.cn

and the hindering factors of the alpine ecological function zone on the Qinghai-Tibet Plateau is an important prerequisite for precisely improving the habitat quality and promoting the harmonious coexistence of human and nature within the ecological security barrier area. This paper is based on the fundamental paradigm of urban and rural livability evaluation, taking the uniqueness of habitat systems in alpine ecological function zone into account. From the perspective of coupling nature and humanities, a system of livability indicators for alpine ecological function areas is constructed, which consists of 4 dimensions (natural environment, living environment, facility environment, and social environment), with 8 primary indicators and 24 secondary indicators. Taking 45 counties in Qinghai Province as examples, we evaluate the livability and hindering factors quantitatively, and explore the interaction between livability and ecological importance, as well as socio-economic development status. The results show that: (1) The overall livability in Qinghai Province is low and demonstrates a decreasing geographical differentiation among Huanghe-huangshui valley ecological zone, Qaidam basin ecological zone, Qinghai lake rim ecological zone, and Three-river sources ecological zone. (2) The spatial coupling of livability and ecological importance is not coordinated, and the livability of the most important ecological zones is low. Livability is also proportional to both population size and economic development. (3) The livability of Qinghai Province is mainly hindered by the living environment and the social environment. At the eco-geographic zone layer, under the main constraints of natural factors, the Three-river sources ecological zone, the Qinghai lake rim ecological zone, and the Qaidam basin ecological zone are strongly constrained by the facilities, living, and social environment, respectively. (4) The future population guidance and habitat optimization model is proposed for the livability characteristics of different eco-geographic zones, that is, three types of spatial concentration and evacuation are defined according to livability and socio-economic-ecological gravity: population clustering type, evacuation type, and stable type. Enhance livability and spatial adaptability of population distribution through spontaneous cross-regional migration such as population urbanization, employment migration and education migration, as well as nearby ecological migration, focusing on disadvantaged areas such as the Three-river sources ecological zone and infrastructure hindering factors such as drinking water facilities, road facilities, logistics and distribution, and network communication. Thus, it will finally improve the facility configuration and supply capacity of the alpine ecological function zone habitat system.

Key Words: livability; hindering factors; coupled natural and human; eco-geographical zone; alpine ecological function zone

生态功能区是具有水源涵养、生物多样性维护、水土保持、防风固沙等重要生态功能^[1],关系区域乃至国家生态安全的地域空间单元^[2]。生态功能区在保持并提高生态产品供给能力核心目标下的居民福祉,以及生态系统保护修复对人类福祉的潜在社会挑战^[3],是当前基于自然的解决方案(Nature-based Solution, NbS)、社会—生态系统框架(Social-ecological Systems, SESs)等生态学前沿研究的新兴领域与交叉方向^[4-8]。尤其是在青藏高原等高寒生态功能区^[9],其生态系统稳定性偏低,易受自然与人为扰动影响而产生生态退化,加之居民聚落呈现低人口密度和零散式分布格局^[10],研究高寒生态功能区的宜居水平及空间模式具有重要科学价值^[11]。同时,客观揭示自然与人文因素双重作用下高寒生态功能区宜居性提升的关键阻滞因子,能够为生态功能区内人居环境综合整治政策制定、面向居民福祉的生态保护修复路径设计提供政策依据^[12]。

宜居性是居民居住与生活环境的适宜程度,常用于判断人类在居住地的生活质量^[13-14]。长期以来^[15-16],生态功能区内的宜居性研究通常是在城乡宜居性评价时,嵌入城镇和乡村功能区展开并列研究^[17-24],而针对生态功能区的宜居性研究被忽视。目前,对于生态功能区宜居性的研究主要聚焦以下两方面:一是生态功能区的宜居性评价理论体系^[25-26],研究指标体系大多延续了农村宜居性评价指标体系,主要考虑居住质量、社会环境、基础设施等方面^[27-28]。针对生态功能区内居民生计活动、生产居住的特殊性,在宜居性研究中进一步补充了交通、景观风貌、文化习俗等指标^[29-30],并将政府管理、当地居民主体参与、惠民补

贴等政策管理的影响纳入理论体系之中^[31-32]。同时,针对高寒生态功能区生态系统的脆弱性和重要性,研究也开始考虑水质、空气质量、农药使用等污染要素^[25-26]和生活垃圾、污水处理,卫生厕所配置等环境基础设施对宜居性的积极作用^[33-34]。二是从以自然环境要素为主研究自然适宜性^[35-37],通过地形、水、植被、气候等指标^[38-39]刻画了高寒生态功能区自然环境对人类生存适宜性的约束作用^[40-42],研究揭示了生态功能区的生活环境以不适宜和临界适宜为主,且居民点分布与自然环境适宜性一致^[43-44]。此外,针对高寒生态系统下过度利用产生的生态问题,不少研究表明水土保持能力、植被覆盖率等环境质量恶化影响了宜居性的客观水平或使居民满意度感知受损^[39,45-46],以此揭示自然环境变化过程对宜居性的约束与阻滞效应。

不难看出,当前高寒生态功能区的宜居性研究具有薄弱性。一是尚未形成明确的、系统性的评价指标体系,常延用一般农村宜居性指标体系,但由于指标针对性、适用性和理论分析在案例区的不足,其高寒生态功能区可能失效。二是高寒生态系统的自然约束性强,宜居性受自然和人文的共同作用,现有生存适宜性研究以自然因素视角居多,自然与人文因素的综合研究偏少。亟需基于城乡宜居性评价基本范式、顾及高寒生态功能区人居系统的独特性,从自然与人文耦合视域构建适用于高寒生态功能区的宜居性指标体系,丰富宜居性理论在高寒生态功能区的实证研究。此外,基于生态重要性程度,亟待厘清宜居水平的阻滞因子及其与社会经济发展状态的匹配关系,为高寒生态功能区人口空间引导及宜居性优化模式的精准调控提供研究基础。因此,本文以青海省为例,针对高寒生态功能区构建自然与人文耦合的宜居性指标体系,定量评价青海省各县域宜居水平及阻滞因子,分析其宜居性特征及地域分异,探讨其与生态重要性、社会经济发展状态的交互关系,进一步探索高寒生态功能区的空间优化模式,以期综合改善青藏高原高寒生态功能区宜居水平提供科学参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 评价指标体系构建

宜居性是自然生态环境和人文社会环境的有机统一体^[47],不仅反映人与环境相互作用过程中能够为人类提供的自然本底与生态基础,也映射居住环境、设施环境、社会环境等人类生产生活所需诸领域的保障与供给水平,故从自然与人文视域进行宜居性评价是当前城乡宜居性评价及其指标体系构建的基本范式与要求^[13,48]。高寒生态功能区因其气候高寒性、生态重要性、生态敏感性等自然属性、以及聚落零散性、生计多样性、群体复杂性等人文属性特征,从自然与人文视域构建宜居性评价体系时,除了遵循科学性、典型性、可比性等原则并兼顾数据可获得性,还应兼顾其人居系统及构成要素的独特性,揭示高寒生态功能区人居建设过程中隐含的经济效应、社会效应和生态效应,以期基于自然的人居环境综合整治和面向居民福祉的生态保护修复模式提供依据(图1)。

如表1所示,基于自然与人文耦合、兼顾经济-社会-生态效应的高寒生态功能区宜居性评价指标体系包括自然环境、居住环境、设施环境、社会环境4维度及8个一级指标、24个二级指标。指标构成及涵义如下:①自然环境维度,地形坡度、供氧条件和区位偏远度反映地形与区位条件,高海拔、高坡度差与偏远居住地易对居民生活舒适性和出行便利性产生负向影响^[36];温湿舒适性、绿化舒适性和水资源丰度反映气候与生态环境,适宜的温度湿度、丰富的水资源有利于提升植被覆盖率,满足牧民生计和生态保护需求,提高宜居水平^[35,49]。②居住环境维度,住房宽敞度、住房安全性和屋内卫生设施反映内部房屋居住条件,较高的住房质量通常对宜居性呈正向作用^[50];垃圾处置设施、污水处置设施和清洁能源配置反映外部的社区环境条件,生活环境的洁净度能显著提升居住地的宜居性,清洁能源的使用可促进高寒生态功能区的人居系统可持续性^[33]。③设施环境维度,电力设施、饮水设施、道路设施为一般基础设施,基础设施配置率的提升通常对宜居性呈正向作用^[49];物流配送、网络通讯和出行设施为现代基础设施,现代基础设施的普及将显著提高物资与信息获取、对外沟通交流的效率,对宜居水平为正向作用^[27]。④社会环境维度,文化娱乐服务、基础教育服务、基础医疗服务反映公共服务,拥有优质服务与配置水平的区域通常宜居水平较高^[51];社会福利、养老保

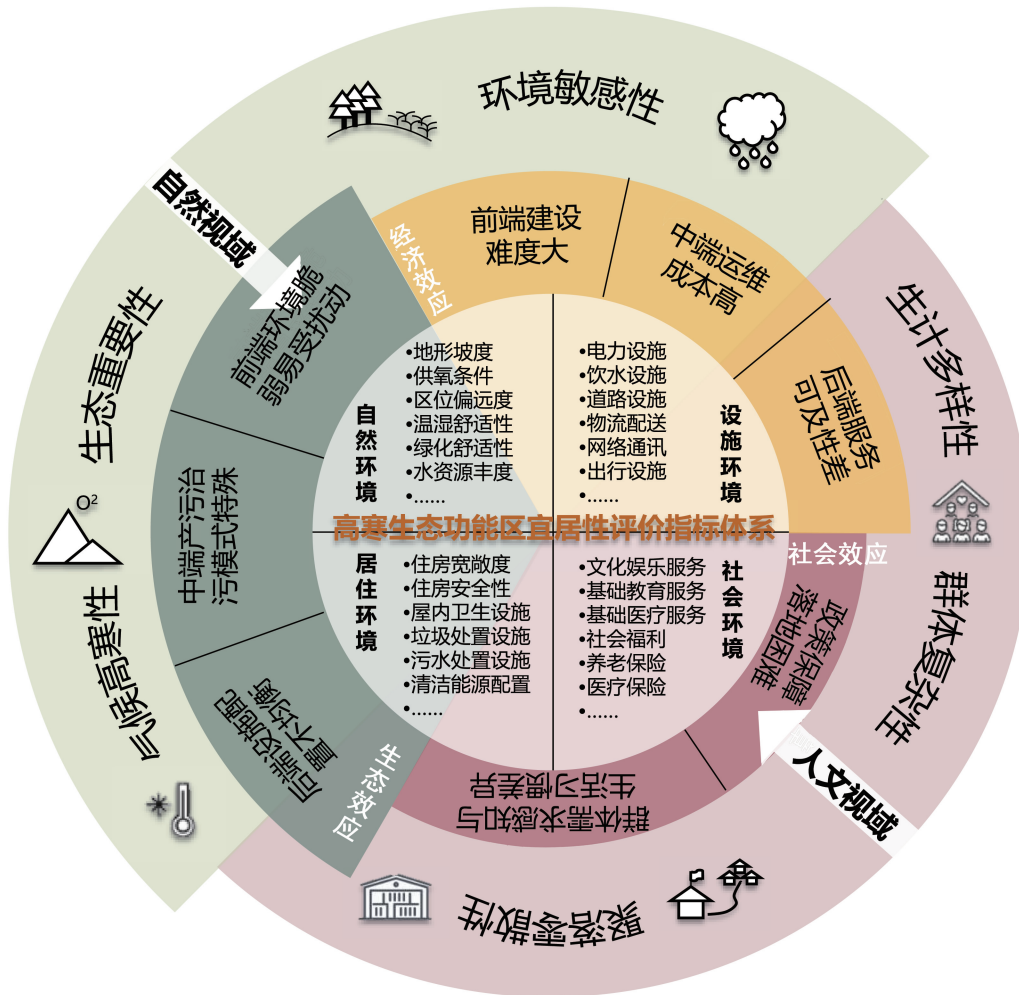


图1 高寒生态功能区人居系统独特性及宜居性指标体系

Fig.1 The uniqueness of habitat system and livability index system of alpine ecological function zone

险、医疗保险反映政策保障,保险和福利政策的广覆盖显著提高宜居水平^[31]。其中,按高寒生态功能区人居系统的独特性分为通适指标与特殊指标两类,预期影响效应如表1所示。

1.2 案例区与数据来源

案例区青海省位于东经 89°25′—103°04′、北纬 31°39′—39°11′,地处中国西北内陆、青藏高原东北部。全省地势呈西高东低,阿尔金山、祁连山、巴颜喀拉山脉纵横,平均海拔高于 3000m(图2),地区高寒缺氧低压,面临草场退化、冻土萎缩、气候暖湿化等自然条件变化,青海省作为青藏高原生态安全屏障区的重要组成部分,是具有突出生态价值、生态责任和生态潜力的高寒生态功能区。此外,2021年,该区域土地总面积 72.23×10⁴km²,农牧民人口密度达到 7.14 人/km²(2021年),低于 8.22 人/km²的青海省城镇人口密度,当地居民生计以农牧业为主,居住与活动的分散性强;受高寒生态环境影响,居民聚居点存在住房条件差、基础设施配置不完备、公共服务配套不均衡等问题。以青海省为例分析青藏高原高寒生态功能区的宜居性现状与区域差异,探索自然与人文双重制约下的宜居性阻滞因素,有利于提升高寒生态功能区的居民生活水平、为寻求高寒生态功能区及自然保护地中生态保护与宜居性改善的平衡点提供理论依据。

以青海省 45 个县域(县级市、行政委员会)为研究单元,根据区域生态安全格局与自然环境地域分异规律,将青海省分为河湟谷地生态区、环青海湖生态区、柴达木盆地生态区 and 三江源生态区四个生态地理分区^[54—55]。建立宜居性指标的自然人文属性数据库,主要数据及来源如下:各级行政区划、水域数据,从国家基

础地理信息系统网站获取。县域农村人文属性数据,从青海省第三次全国农业普查(2016年)数据中获取,对社会经济数据不完整或缺失的数据,进一步获取所在市统计年鉴和县域统计公报补齐。县域自然属性数据,如海拔、坡度等,主要从中国科学院资源环境科学数据中心数字高程模型获取 DEM 数据,并通过 Arcgis 处理以县域为统计单元得到县域平均海拔和平均坡度等,温度、湿度、植被覆盖指数、降水量各值由资源环境科学与数据中心的多年数据平均求得以反映自然环境常年平均约束状态。生态保护重要性数据是基于青藏高原二次科考的青藏高原生态保护重要性综合评价与生态功能区划定。

表 1 高寒生态功能区宜居性评价指标体系及算法

Table 1 The evaluation index system and algorithm of livability in alpine ecological function zone

指标维度 Indicator dimensions	一级指标 Primary indicators	二级指标 Secondary indicators	指标定义与算法 Definition of indicators and algorithms	指标类型 Indicator type	影响效应 Effect
自然环境 Natural environment	地形与区位条件	地形坡度	平均坡度/(°)	通适指标	-
		供氧条件	平均海拔/m	特征指标	-
		区位偏远度	村委会到最远自然村距离在 5km 以内的村比重/%	特征指标	+
	气候与生态环境	温湿舒适性	温湿指数	通适指标	+
		绿化舒适性	植被覆盖指数	通适指标	+
		水资源丰度	水文指数	特征指标	+
居住环境 Living environment	房屋居住条件	住房宽敞度	人均住房面积/m ²	通适指标	+
		住房安全性	房屋构成砖混及钢筋混凝土的住房比重/%	特征指标	+
		屋内卫生设施	卫生厕所户数比重/%	特征指标	+
	社区环境条件	垃圾处置设施	生活垃圾集中处理率/%	通适指标	+
		污水处置设施	生活污水集中处理率/%	通适指标	+
		清洁能源配置	生活能源使用太阳能、电、沼气的家庭比重/%	通适指标	+
设施环境 Facility environment	一般基础设施	电力设施	通电的村比重/%	通适指标	+
		饮水设施	使用经过净化处理的自来水的农户比重/%	特征指标	+
		道路设施	硬化道路的村比重/%	特征指标	+
	现代基础设施	物流配送	有电子商务配送站点的村比重/%	特征指标	+
		网络通讯	通宽带互联网的村比重/%	特征指标	+
		出行设施	每百户小汽车拥有量/(辆/百户)	特征指标	+
社会环境 Social environment	公共服务	文化娱乐服务	每千人拥有公园、图书馆、文化站个数/(个/千人)	通适指标	+
		基础教育服务	每千人拥有小学专任教师数/(人/千人)	通适指标	+
		基础医疗服务	每千人拥有医疗卫生机构床位数/(张/千人)	通适指标	+
	政策保障	社会福利	每千人社会福利收养性单位床位数/(张/千人)	通适指标	+
		养老保险	城乡养老保险参保人数比重/%	通适指标	+
		医疗保险	城乡医疗保险参保人数比重/%	通适指标	+

水文指数是通过降水量(给水能力)和水域面积(集水和汇水能力)的比重反映水资源丰度^[22,52], $WR1 = \alpha P + \beta W_a$, P 为归一化的降水量, W_a 为归一化的水域面积, α 和 β 是权重,分别取值 0.8 和 0.2。温湿指数是通过温度和湿度来反映气候适宜性^[53], $THI = T - 0.55(1-f)(T-58)$; $T = 1.8t + 32$; THI 为温湿指数, t 为月平均气温(°C), T 是月平均华氏温度(°F), f 是月平均空气相对湿度(%)

1.3 研究方法

(1) 宜居性评价及权重确定方法

以平原及山地丘陵城乡人居系统为基准形成的宜居性评价标准及量化方法,评价高寒生态功能区的宜居性易使分值集中在低位区,区分度不显,为使各指标具有可比性,本研究中数据的无量纲化处理采用 Z-score 标准化法^[56-57],使得均值为 0,标准差为 1,将不同量级的数据统一化为同一量级,公式如下:

$$x'_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \tag{1}$$

式中, x'_i 为标准化值, x_i 为原始值, μ 为平均值, σ 为标准差。

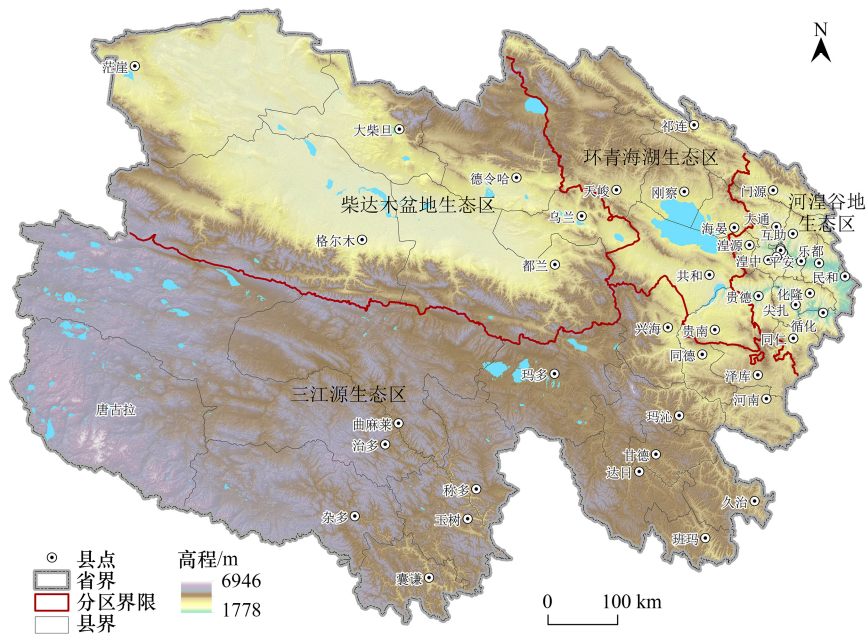


图 2 研究区范围与高程分布

Fig.2 Scope of the study area and elevation distribution

为突出各指标在整体评价中的不同重要程度,需要通过指标权重科学反映研究区各指标作用的差异性,故采用主观赋权法(AHP)和客观赋权法(CRITIC)结合的集成赋权法。AHP 层次分析法是对定性决策问题的定量化分析。专家逐一判断自然、居住、设施、社会环境及二级指标的相对重要性,运用标度系统将定性判断量化,构造判断矩阵最终得到各元素权重,并通过一致性检验判断权重逻辑的合理性,公式如下:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{[AW]_i}{n \omega_i} \quad (2)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$CR = CI/RI \quad (4)$$

式中, $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根, CI 为偏离一致性, RI 是判断矩阵的平均随机一致性指标, CI 和 RI 的比值 CR 用来校验专家打分的思维一致性。

CRITIC 是基于评价指标的对比强度和指标之间的冲突性来综合衡量指标的客观权重,考虑指标波动情况的同时兼顾指标间的相关性,在对宜居性二级指标数据正向化、归一化处理后,通过指标变异性和冲突性来计算客观权重,公式如下:

$$R_j = \sum_{i=1}^p (1 - r_{ij}) \quad (5)$$

$$C_j = S_j \times R_j \quad (6)$$

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^p C_j} \quad (7)$$

式中, r_{ij} 表示宜居性评价指标 i 和 j 之间的相关系数,指标冲突性用 R_j 表现,指标变异性用标准差表现, S_j 表示第 j 个指标的标准差, C_j 为信息量,反映 j 指标在整个评价指标体系中的作用大小, W_j 为客观赋权值。

主客观集成赋权是为了使综合权重 W_i 尽可能地接近 W_i^o 和 W_i^s ,而不偏重任意一项,本文采用最小相对信

息熵原理求取综合权重,有学者已在生态安全评价、基础设施规划、宜居性评价等领域^[58-60]使用该权重确定方法:

$$W_i = \frac{\sqrt{W_i^o W_i^s}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{W_i^o W_i^s}} \tag{8}$$

式中, W_i^o 是客观赋权法权重, W_i^s 是主观赋权法权重, W_i 是综合赋权值。集成权重如表 2 所示。该权重既考虑指标数据间统计规律,同时纳入专家对高寒生态功能区宜居性的专业知识与经验,实现了主客观赋权中正与内在统一。

宜居水平通过指标数据加权求和后的宜居指数(Livability Index, LI)体现,公式如下:

$$LI_i = \sum_i W_i \times M_i \tag{9}$$

$$M_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \tag{10}$$

式中, x_i 为 i 县域的正向化变量值, μ 为平均值, σ 为方差, M_i 为 Z-score 标准化后的变量值,与各变量对应集成权重相乘并相加后得到 LI_i 。

表 2 宜居性评价指标的主客观集成权重
Table 2 Subjective and objective integration weights of each evaluation index

指标维度 Indicator dimensions	一级指标 Primary indicators	二级指标 Secondary indicators	主观权重 Subjective weights	客观权重 Objective weights	主客观集成权重 Subjective and objective integration weights
自然环境 Natural environment(0.238)	地形与区位条件(0.097)	地形坡度	0.008	0.054	0.024
		供氧条件	0.036	0.036	0.043
		区位偏远度	0.014	0.046	0.030
	气候与生态环境(0.141)	温湿舒适性	0.022	0.038	0.035
		绿化舒适性	0.010	0.058	0.028
		水资源丰度	0.083	0.052	0.078
居住环境 Living environment(0.264)	房屋居住条件(0.185)	住房宽敞度	0.150	0.040	0.093
		住房安全性	0.025	0.041	0.038
		屋内卫生设施	0.062	0.033	0.054
	社区环境条件(0.079)	垃圾处置设施	0.034	0.039	0.044
		污水处置设施	0.009	0.032	0.020
		清洁能源配置	0.004	0.036	0.014
设施环境 Facility environment(0.369)	一般基础设施(0.251)	电力设施	0.095	0.038	0.071
		饮水设施	0.060	0.038	0.057
		道路设施	0.222	0.047	0.123
	现代基础设施(0.118)	物流配送	0.015	0.036	0.028
		网络通讯	0.024	0.050	0.041
		出行设施	0.056	0.030	0.049
社会环境 Social environment(0.129)	公共服务(0.074)	文化娱乐服务	0.005	0.025	0.013
		基础教育服务	0.017	0.025	0.025
		基础医疗服务	0.040	0.024	0.037
	政策保障(0.054)	社会福利	0.001	0.033	0.007
		养老保险	0.002	0.070	0.016
		医疗保险	0.009	0.080	0.032

(2) 基于引力模型的空间优化方法

为优化宜居性滞后县域人口发展方向,通过引力模型结合人口、经济、生态重要性和宜居水平测算县域之间的吸引力强度,采用引力模型测算县域之间的吸引力大小,公式如下:

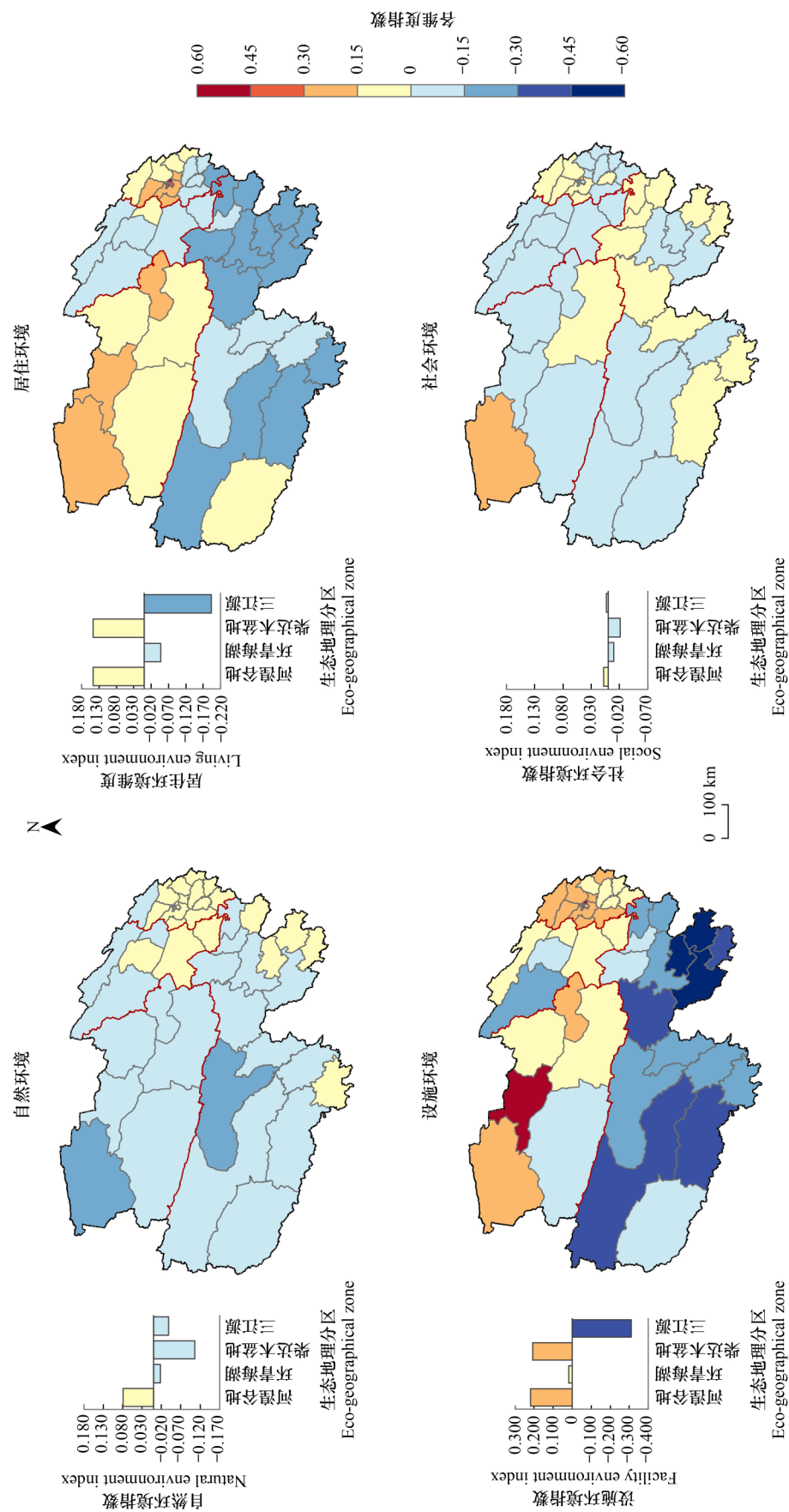


图4 青海省宜居性各维度指数
Fig. 4 Livability index by dimension in Qinghai province

2.1.2 生态地理分区特征

在生态地理分区层面,宜居水平呈河湟谷地生态区、柴达木盆地生态区、环青海湖生态区、三江源生态区依次递减,宜居指数均值依次为 0.452、0.227、-0.057 和-0.539(表 3)。

表 3 各生态地理区宜居水平及县域比重

Table 3 Livability level by region and county share of each eco-geographical zone

地区 Region	宜居水平高 High livability		宜居水平较高 Relatively high livability		宜居水平较低 Relatively low livability		宜居水平低 Low livability		宜居指数 Livability index	居民 比重/% Proportion of residents
	数量/个 Number	比重/% Proportion	数量/个 Number	比重/% Proportion	数量/个 Number	比重/% Proportion	数量/个 Number	比重/% Proportion		
河湟谷地生态区 Huanghe-huangshui valley ecological zone	9	81.82	7	58.33	1	9.09	0	0.00	0.452	69.90
环青海湖生态区 Qinghai lake rim ecological zone	0	0.00	3	25.00	2	18.18	1	9.09	-0.057	6.81
柴达木盆地生态区 Qaidam basin ecological zone	2	18.18	2	16.67	2	18.18	0	0.00	0.227	4.12
三江源生态区 Three-river sources ecological zone	0	0.00	0	0.00	6	54.55	10	90.91	-0.539	19.18

①河湟谷地生态区的整体宜居水平高,在空间上以西宁为中心呈圈层式递减。该区域主要包含西宁市、海东市县域,除同仁县外其他县域均高于全省宜居指数平均值,该区域集中了 81.82%的高宜居水平县域和 58.33%的较高宜居水平县域。河湟谷地生态区服务全省 69.90%的居民,庞大的人口规模对经济活动、基础设施建设产生规模效应,区域实现电力设施全覆盖、95.64%的道路设施配置,每千人拥有 126.39 张医疗机构的床位数等,基础设施和公共服务设施的配置率均在全省中位居前列,各生产生活环节的水平提升共同促进了河湟谷地生态区的宜居水平。

②环青海湖生态区宜居水平较低,近河湟谷地生态区的县域显著优于其他县域。该区域仅有毗邻河湟谷地的海晏、贵南、共和县宜居水平较高,宜居指数分别为 0.214、0.070 和 0.001,受到西宁-海东都市圈高宜居水平的辐射作用,环境基础设施普及率较高,海晏、贵南县的生活垃圾集中处理率均高于 75%,饮水设施和道路设施配置率均高于环湖区其他县域配置率。而祁连县、刚察县和天峻县的宜居指数分别为-0.070、-0.124、-0.431,宜居水平较低,其一般基础设施和环境基础设施相对薄弱,卫生厕所配置率、污水集中处置率仅占 8.27%、9.77%,饮水设施配置率不足五分之一,硬化道路配置率不到二分之一,反映环青海湖生态区的宜居性在全省处于中等偏下且内部县域存在显著差异。

③柴达木盆地生态区宜居水平较高,但内部差异显著。大柴旦行政委员会(0.691)与茫崖市(0.554)的宜居指数最高,乌兰县(0.197)和德令哈市(0.048)次之,都兰县和格尔木市指数较低,分别为-0.037 和-0.089。大柴旦和茫崖等资源富集型县域,其道路、出行、物流等设施配置相对完善,由于仅服务全省 0.03%的居民,人均共享公共服务设施的条件更好,宜居水平高。而在格尔木、都兰等县域,生活污水集中处理率仅为 17.55%,基础设施和公共服务无法满足当地居民对质量和数量的需求,宜居水平较低。

④三江源生态区宜居水平低,黄河源园区宜居指数最低。该区域县域宜居指数均低于平均值,其中久治县、达日县、甘德县的指数仅为-0.764、-0.791、-0.871。根据图 3 不难看出,宜居性低值区主要分布在三江源的三个园区,其中,长江源园区(-0.590)宜居水平略高于澜沧江园区(-0.647)和黄河源园区(-0.665)。由于 4000m 以上高海拔和寒冷干燥的恶劣环境,居民点分散,与村委会距离超过 20m 的定居点占比 39.29%,三江源生态区宜居水平低。此外,自然保护地管理体制束缚较多,保护与开发的矛盾在该区域宜居水平中得以

突显。

2.2 高寒生态功能区宜居性与生态重要性的空间耦合性分析

如图 5 所示,青海省生态重要性呈现南高北低的态势,一般重要区以西宁市、海西州县域为主;生态重要区主要分布在环青海湖生态区和曲麻莱、治多等县域;生态重要区县域位于果洛州和玉树、囊谦、杂多县。河湟谷地生态区生态重要性低值分布在西宁和海东市城区,而大通县为极重要区;环青海湖生态区均为生态重要区;柴达木盆地生态区除德令哈市外均为生态一般重要区;三江源生态区因其涵养水源的重要功能,75%的县域为极重要区。

进一步将宜居性与生态重要性进行空间耦合,一方面,西宁、海东城区与大柴旦行委、茫崖市等生态一般重要区的宜居水平高,该类县域达成社会-生态系统的相对协调;另一方面,三江源生态区等生态极重要区的宜居水平普遍偏低,反映出该区域社会-生态系统协调性较差,当地居民不仅无法享受舒适的生活环境,同时,在生产生活过程中可能破坏生态环境。因此,提升青海省宜居性应立足生态重要性本底特征引导生态移民,适度将宜居水平较低区域的居民向宜居水平高、较高和生态重要性程度更低的临近区域转移,切实降低原居住地人为扰动及生态环境风险。

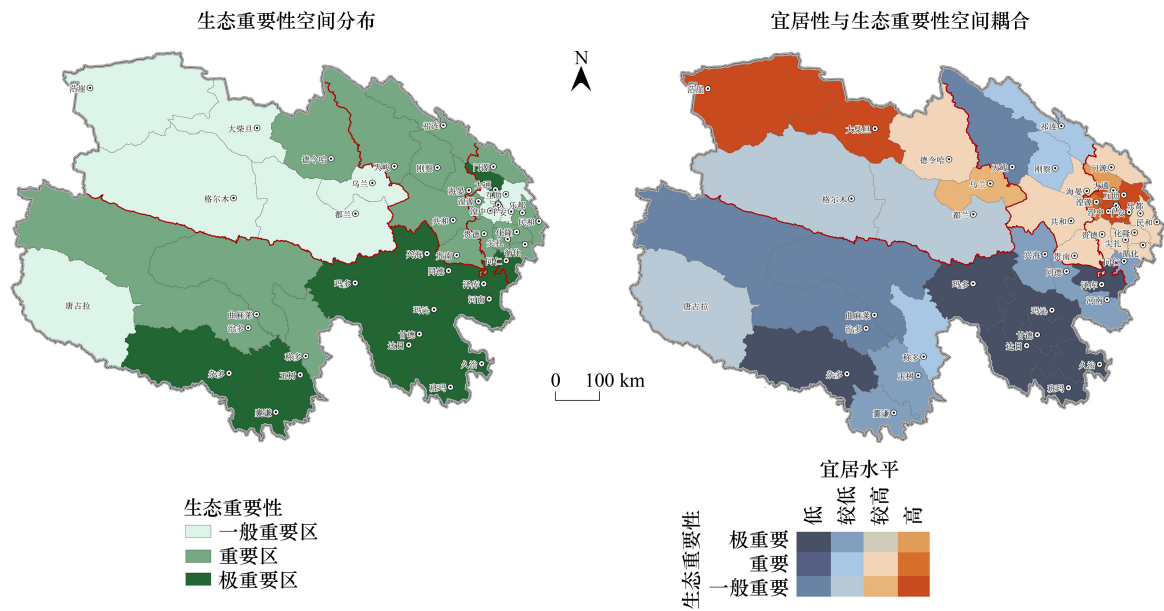


图 5 生态重要性及其与宜居性的空间耦合关系

Fig.5 Ecological importance and its spatial coupling relationship to livability

2.3 高寒生态功能区宜居水平与社会经济发展状态的匹配关系分析

基于高寒生态功能区宜居性评价发现,设施配置高水平县域通常在居民集聚、经济水平较高的河湟谷地生态区,公共服务中人均享有的教育、医疗服务设施也与人口数量息息相关,故将人口规模和人均可支配收入与宜居水平的拟合关系可视化,如图 6 所示。

对于当地居民人口规模而言,71.11%的青海省县域人口数量低于 10 万人,居民人口规模对宜居水平的影响较小,分布波动较大;而当居民超过 10 万人,宜居水平与人口规模呈正比,随着居民人口规模的大幅提升,大量居民的定居促使住房和相关生活设施配置的规模式增长,解决基本居住、水电基础设施问题后,居民对于生活质量的需求也随之提升,追求高质量的教育服务、医疗服务,崇尚更高效的社会管理等等。此外,在人口聚集的县域,设施服务配置相对完善,在不额外增加建设成本的基础上,其生存空间和人居系统具有服务更多居民的潜力,提供更高的宜居水平,呈现边际效应的递增。

经济收入水平与宜居水平呈显著正向相关性,随着当地居民人均可支配收入增加,县域宜居水平显著提高。一方面,人均可支配收入越高,家庭的消费能力提升,对生活水平、高质量的教育医疗服务提出需求;另一方面,收入代表着区域发展水平,需求刺激下吸引大量投资,促使相关基础设施和公共服务的配套完善,宜居水平得以提升。因此,在高寒生态功能区更应注重生态保护的價值化,生态投入有利于提升宜居品质,通过生态补偿带来生计的改善,对于人居品质的提升是正向反馈过程。

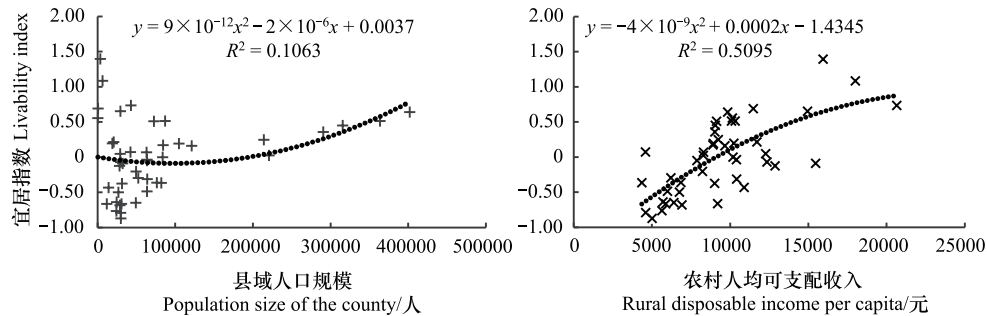


图6 宜居性与居民人口规模和收入水平的拟合关系

Fig.6 Relationship between livability level and population size and income

2.4 高寒生态功能区宜居性的阻滞因子解析

宜居性阻滞因子是对照居民基本生存与发展需求,对其具有强烈约束的自然和人文维度各类指标。青海省高寒生态功能区居住环境和社会环境是主要的阻滞因子,其中教育、医疗、文化娱乐设施是最薄弱的环节,且环境基础设施和清洁能源配置次之。对比宜居水平高、较高、较低、低4个等级不难发现(图7),高宜居水平区域各维度指数均较高;较高宜居水平区域中社会环境(-0.019)是主要的阻滞因子;较低宜居水平区域居住环境(-0.096)和设施环境(-0.077)是显著的制约性指标。低宜居水平区域设施环境(-0.381)和居住环境

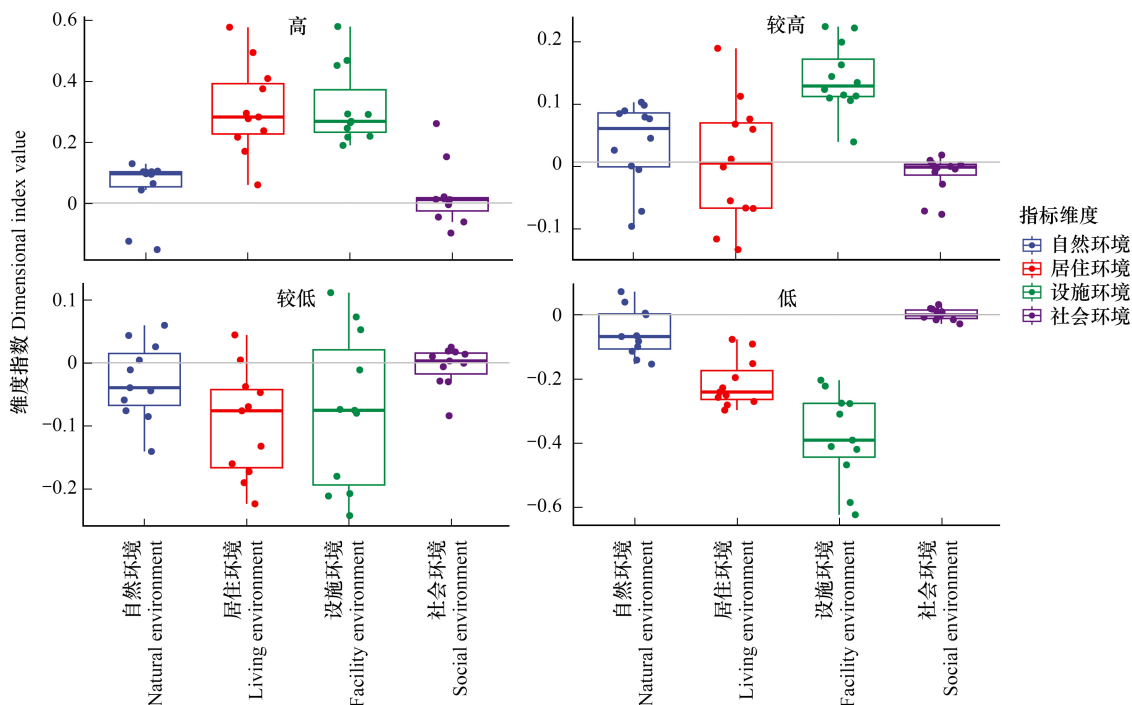


图7 各级宜居水平的分维度数值高低图

Fig.7 Each dimensional values of livability levels by grading

(-0.213)的制约程度最大。综上,在自然因素主控下,较高宜居水平区域中社会环境存在一定制约,较低、低宜居水平区域主要受居住环境和设施环境维度的约束,反映出宜居水平的阻滞因子存在层级差异,满足住房安全及舒适性、社区环境、水电路设施等基础性生活需求配置是提升宜居性的基础,在满足基础设施与住房条件的较高宜居水平区域,社会环境的制约作用突出。

生态地理分区层面(图8),①河湟谷地生态区各维度指数由设施环境(0.218)、居住环境(0.146)、自然环境(0.079)、社会环境(0.008)依次递减,现有一般基础设施和房屋居住条件均已达到较高水平,物质生活需求得到基本满足,但仍受到政策保障、公共服务、气候与生态环境、社区环境条件等因素的制约,反映出河湟谷地生态区硬件设施建设完备,但政策保障的广覆盖和精神文化需求的满足为薄弱环节。②环青海湖生态区各维度指数由高到低分别为设施环境(0.019)、社会环境(-0.010)、自然环境(-0.017)和居住环境(-0.048),受到房屋居住条件、气候与生态环境、社区环境条件和公共服务等指标的显著制约,反映出环青海湖生态区由于生态环境保护和旅游产业发展受到生态制约和居住条件制约显著,公共服务受到高宜居水平河湟谷地的虹吸效应。③柴达木盆地生态区受自然环境(-0.106)与社会环境(-0.021)的约束显著,宜居水平偏低,以水资源丰度、绿化舒适性、医疗保险、养老保险、社会福利的强约束为主。干旱的气候,草场荒漠化直接影响当地居民的生计活动,故自然环境的刚性约束强烈。④三江源生态区受自然环境、居住环境、设施环境各维度的强烈约束,宜居水平最低,各维度指数由社会环境(0.003)、自然环境(-0.038)、居住环境(-0.193)、设施环境(-0.311)依次降低,其中,一般基础设施和房屋居住条件、地形与区位条件的指数较低。该生态区环境恶劣,

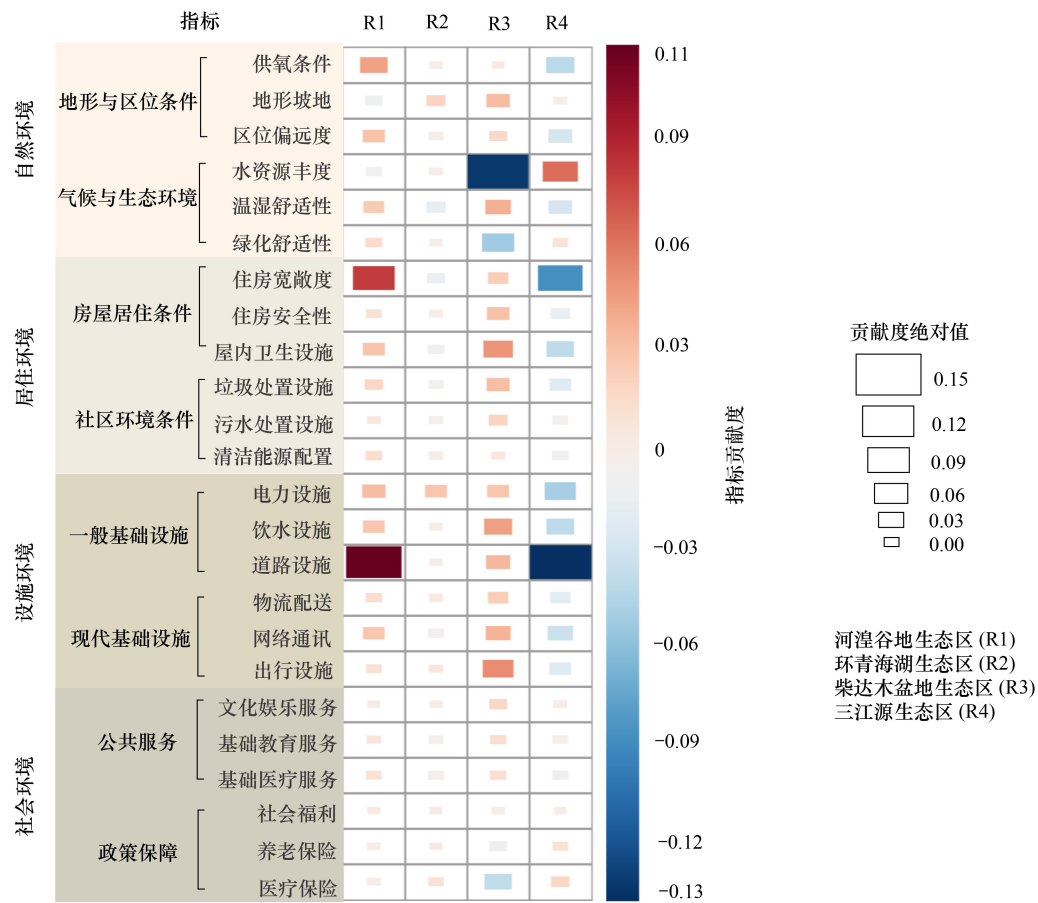


图8 各生态地理分区的二级指标数值热图

Fig.8 Values of secondary indicators for each ecogeographic zone

R1:河湟谷地生态区 Huanghe-huangshui valley ecological zone;R2:环青海湖生态区 Qinghai lake rim ecological zone;R3:柴达木盆地生态区 Qaidam basin ecological zone;R4:三江源生态区 Three-river sources ecological zone

设施建设难度大、成本高、生态风险大;同时区域以生态保护功能为主,自然约束下居住、设施的开发建设限制性较强,高度制约了三江源生态区的宜居水平。

3 讨论

如图 9 所示,高寒生态功能区宜居性呈以下四种空间分布模式:一是以城镇化为主导的核心边缘模式,高人口密度和高宜居水平的县域集聚在有限的地理空间,并辐射周边县域,以城镇发展和农业为区域发展重点;二是高宜居水平县域带动低宜居水平县域模式,环青海湖生态区宜居水平滞后,人口规模较小,受到河湟谷地生态区的高宜居水平辐射;三是高、较高、较低宜居水平并存模式的柴达木盆地生态区,以能矿产业为主导,高宜居水平县域因其居民人口较少,享受人居资源不受限;四是生态约束下的低宜居水平模式,三江源生态区以生态保护为主导功能,地理空间广、人口均匀分布,但宜居水平滞后。农村人居环境整治五年行动方案明确提出^[62],应针对偏远乡村地区应突出乡土特色和地域特点,对于高寒生态功能区而言,同样需要按照各类空间分布模式精准实施宜居性优化提升策略。

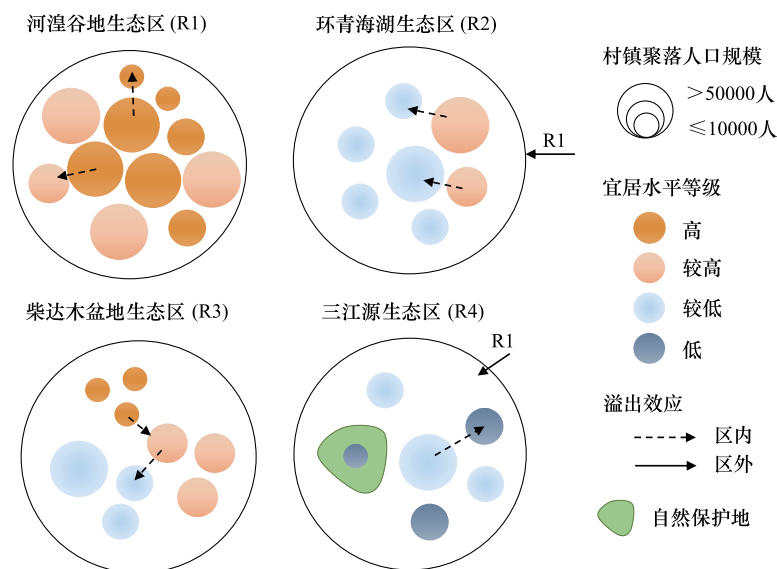


图 9 各生态地理分区宜居性空间分布模式

Fig.9 Spatial distribution pattern of livability in each eco-geographical zone

基于县域单元统筹的宜居性特征,本研究结合社会经济生态引力明确居民集聚型、疏散型和稳定型 3 种空间集疏类型以提升宜居性与人口分布的空间适配性,如图 10 所示。①集聚型:分布在城中、大通、湟中、乐都、贵南、都兰、乌兰等县,该区域生态重要性低,宜居水平高,社会经济集聚能力较强,是低宜居水平县域居民移民的优质选择。该区应持续提升高品质宜居水平的供给能力,增强城镇对于低宜居水平县域人口迁入后的承载能力,尤其是在公共服务和政策保障等方面,持续推动惠民利民政策的落实,并增设服务于高原游牧家庭的补给机构等等,全面促进宜居性的提升和居民福祉的实现。②稳定型:分布在青海省泽库、河南、久治、班玛等县域,该区域应聚焦自身的阻滞因子,以县城和重点镇为核心,公共服务、基础设施配置需从经济、社会、生态效益精准定制分配模式,以饮水设施、道路设施、物流配送、网络通讯等基础设施阻滞因子为提升重点,增强区域设施配置水平。③疏散型:以海北、海南、果洛州为主,该区域生态重要性强、宜居水平偏低,应以人口城镇化、就业移民、教育移民等内生驱动下的自发式跨区域移民为主要方式,辅以政策推动下的就近生态移民,使居民向宜居水平较高的集聚型县域流动,以此实现降低高寒生态功能区人为扰动与改善居民生活质量的双重目标。

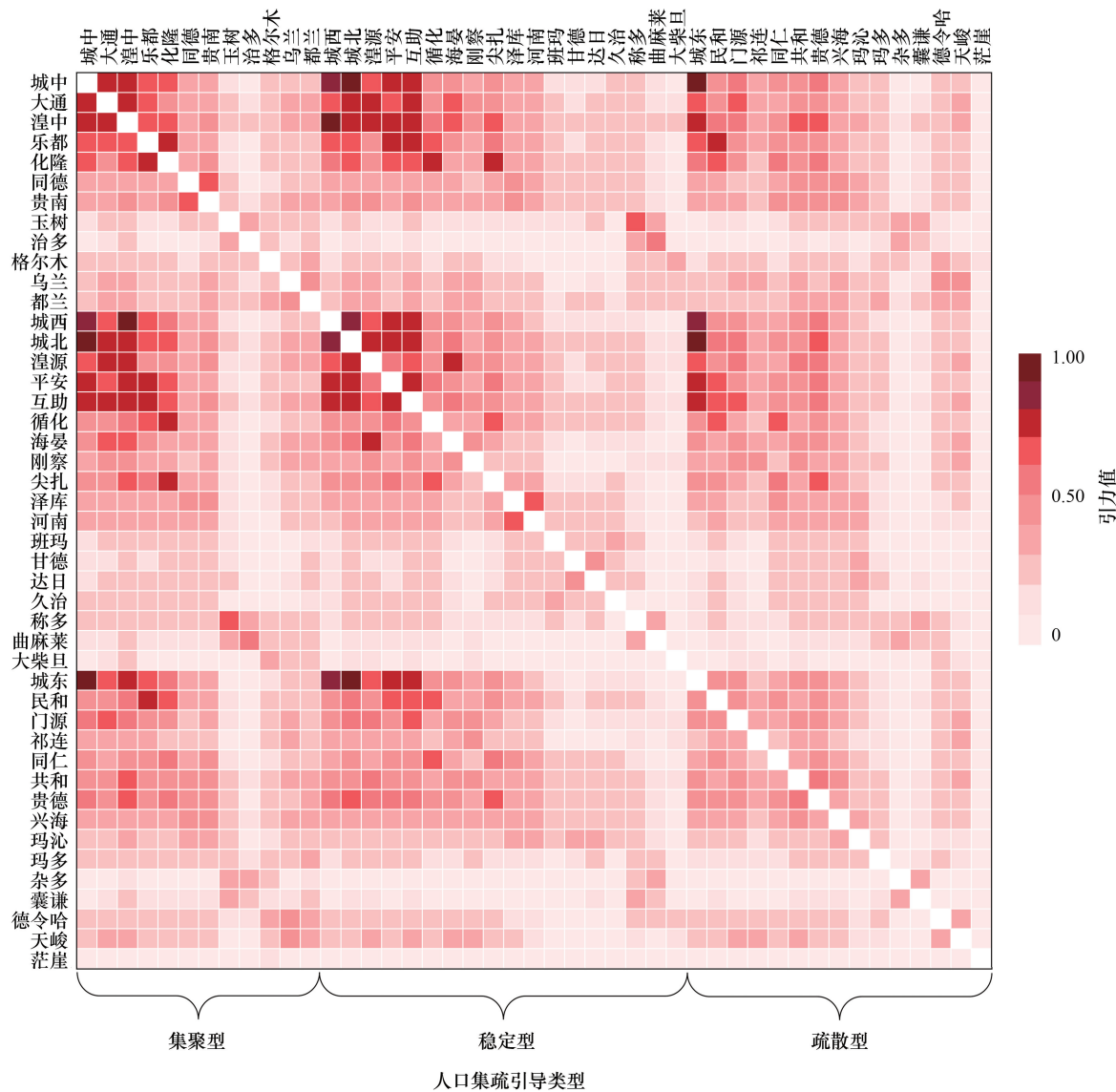


图 10 宜居性指向下的人口集疏引导类型
Fig.10 Types of population spatial guidance under the orientation of livability

4 结论

本文构建包含自然、居住、设施和社会四个维度的高寒生态功能区宜居性指标体系,刻画青海省 45 个县域的宜居性特征及阻滞因素,为提升高寒生态功能区宜居水平、完善设施配置和精准优化模式提供科学依据。主要研究结论如下:

- (1) 青海省宜居水平总体偏低且存在显著空间差异,宜居性由青海省东部河湟谷地向中部及西南片腹地县域递减。生态地理分区层面,宜居性由河湟谷地生态区、柴达木盆地生态区、环青海湖生态区、三江源生态区依次递减。河湟谷地生态区以西宁为中心呈圈层式递减;柴达木盆地生态区内部差异显著,大柴旦与茫崖宜居性显著高于其他县域;环青海湖生态区中邻近西宁-海东都市圈的县域宜居水平较高;三江源生态区中长江源园区、澜沧江园区、黄河源园区的宜居性依次递减。
- (2) 青海省宜居水平和生态重要性的空间耦合存在地域分异,西宁、海东城区与大柴旦、茫崖的社会-生态系统协调性较好,三江源生态区等生态极重要区的宜居水平低,社会-生态系统协调性差。此外,宜居水平与

社会经济发展状态成正比。随着人口规模的扩大和可支配收入的提升,宜居性与人口规模、经济水平均呈正比增长,并体现边际效应的递增。

(3)居住环境、社会环境对青海省宜居水平的约束作用最强,低宜居水平区域以居住和设施环境的制约为主。不同生态地理分区宜居性的阻滞因子存在差异,河湟谷地生态区受自然和社会环境的双重制约;环青海湖生态区中居住和自然环境为主要限制性因素;柴达木盆地生态区宜居水平受自然与社会环境的约束显著;三江源生态区受到由社会、自然、居住、设施环境依次减弱的综合制约。在自然因子主控下,设施、居住环境是最薄弱的环节,而在满足基础设施与住房条件的基础上,社会环境维度的制约显著。

值得深化研究的方向:一是未来可在微观尺度解构影响程度的基础上,纳入水资源、气候条件等自然因素和民族文化、宗教场所等人文因素,增强评价体系在高寒生态功能区的适用性;二是通过多期田野调查和入户问卷,掌握居住、设施等人文因素的发展过程,跟踪研究宜居性在人文维度下的动态变化;三是基于高寒生态功能区的独特性,可根据现有宜居建设标准及行业规范等,探讨适应高寒生态功能区的宜居标准;四是可结合居民满意度,解析高寒生态功能区客观供给与主观感知的匹配模式;五是未来可深入探索环卫设施、公共服务设施等要素对宜居性的影响机制,紧扣高寒生态功能区的差异性与公平性。

参考文献(References):

- [1] 傅伯杰. 地理学:从知识、科学到决策. 地理学报, 2017, 72(11): 1923-1932.
- [2] Xu K P, Wang J N, Wang J J, Wang X H, Chi Y Y, Zhang X. Environmental function zoning for spatially differentiated environmental policies in China. *Journal of Environmental Management*, 2020, 255: 109485.
- [3] 刘慧明, 高吉喜, 刘晓, 张海燕, 徐新良. 国家重点生态功能区 2010—2015 年生态系统服务价值变化评估. *生态学报*, 2020, 40(6): 1865-1876.
- [4] 赵士洞, 张永民. 生态系统与人类福祉——千年生态系统评估的成就、贡献和展望. *地球科学进展*, 2006, 21(9): 895-902.
- [5] Small N, Munday M, Durance I. The challenge of valuing ecosystem services that have no material benefits. *Global Environmental Change*, 2017, 44: 57-67.
- [6] Frantzeskaki N. Seven lessons for planning nature-based solutions in cities. *Environmental Science & Policy*, 2019, 93: 101-111.
- [7] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局:概念与理论基础. *生态学报*, 2004, 24(4): 761-768.
- [8] 王子侨. 恢复力视角下的黄土高原典型乡村社会-生态系统研究——以陕西省长武县为例[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [9] 尹云鹤, 吴绍洪, 李华友, 赵东升, 杨小明, 周景博. SRES 情景下青藏高原生态功能保护区水源涵养功能的变化研究. *资源科学*, 2013, 35(10): 2003-2010.
- [10] 廖顺宝, 孙九林. 基于 GIS 的青藏高原人口统计数据空间化. *地理学报*, 2003, 58(1): 25-33.
- [11] 张海朋, 樊杰, 何仁伟, 刘汉初. 青藏高原高寒牧区聚落时空演化及驱动机制——以藏北那曲县为例. *地理科学*, 2019, 39(10): 1642-1653.
- [12] 曾菊新, 杨晴青, 刘亚晶, 赵纯凤, 李伯华. 国家重点生态功能区乡村人居环境演变及影响机制——以湖北省利川市为例. *人文地理*, 2016, 31(1): 81-88.
- [13] 张文忠. 宜居城市建设的核心框架. *地理研究*, 2016, 35(2): 205-213.
- [14] 湛丽, 张文忠, 李业锦. 大连居民的城市宜居性评价. *地理学报*, 2008, 63(10): 1022-1032.
- [15] Wolfe R I, Doxiadis C A. Ekistics: an introduction to the science of human settlements. *Geographical Review*, 1970, 60(1): 147.
- [16] 吴良镛. 关于人居环境科学. *城市发展研究*, 1996, 3(1): 1-5, 62.
- [17] 王小鹏, 何启明. 甘肃省乡村人居环境质量测度与关键驱动因子分析. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(8): 1030-1040.
- [18] 陈浮. 城市人居环境与满意度评价研究. *城市规划*, 2000, 24(7): 25-27, 53.
- [19] Sompolska-Rzechula A. Diversification of rural areas in Poland in terms of level of living. *Rural Development and Entrepreneurship Bioeconomy Production and Co-operation in Agriculture*, 2017, 44, 182-189.
- [20] 李雪铭, 晋培育. 中国城市人居环境质量特征与时空差异分析. *地理科学*, 2012, 32(5): 521-529.
- [21] Ma L B, Liu S C, Fang F, Che X L, Chen M M. Evaluation of urban-rural difference and integration based on quality of life. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 54(25): 101877.
- [22] 封志明, 唐焰, 杨艳昭, 张丹. 基于 GIS 的中国人人居环境指数模型的建立与应用. *地理学报*, 2008, 63(12): 1327-1336.
- [23] 杨雪, 张文忠. 基于栅格的区域人居环境自然和人文环境质量综合评价——以京津冀地区为例. *地理学报*, 2016, 71(12): 2141-2154.
- [24] Mischenko IV. Theoretical issues of sustainable rural settlements development formation. *Tomsk State University Journal*, 2011, 346: 123.
- [25] 张慧慧, 贾海发, 李成英, 刘成奎. 青海省东部地区乡村人居环境质量测度及空间差异. *江苏农业科学*, 2021, 49(5): 6-12.
- [26] 李萍. 海东市农村人居环境现状评价与改善对策研究[D]. 西宁: 青海大学, 2021.

- [27] 常虎, 王森. 黄土高原村域农村人居环境质量评价研究——以子洲县西北部为例. 农村经济与科技, 2019, 30(9): 27-30.
- [28] 安玉源. 传统聚落的演变·聚落传统的传承——甘南藏族聚落研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [29] 杨萌. 陕北黄土高原沟壑区小流域人居环境空间演化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [30] 王昆. 陇东黄土高原丘陵沟壑区农村人居环境品质提升思考——以甘肃省庆阳市环县为例. 农村经济与科技, 2020, 31(17): 276-277.
- [31] 杨晴青, 杨新军, 高岩辉. 1980 年以来黄土高原半干旱区乡村人居环境系统脆弱性时序演变——以陕西省佳县为例. 地理科学进展, 2019, 38(5): 756-771.
- [32] 吴春宝. 乡村振兴背景下青海农牧区人居环境整治: 成效、挑战及其对策——基于微观调查数据的实证分析. 青海社会科学, 2021(4): 77-85.
- [33] 周侃, 张健, 樊杰, 徐勇. 青藏高原农牧区生活垃圾治理水平的地域分异与影响因素研究——以青海省 4315 个行政村为例. 环境科学学报, 2022, 42(11): 482-492.
- [34] 萨其日娜, 席锦柱. 牧区生活垃圾治理问题及对策研究——以 A 镇为例. 乡村科技, 2021, 12(33): 108-110.
- [35] 白文娟, 白文蓉, 陈晶, 文霞, 祁慧. 西宁市人居环境气候舒适度评价. 青海环境, 2020, 30(1): 34-39.
- [36] 李文君, 李鹏, 封志明, 游珍, 肖池伟. 基于人居环境特征的青藏高原“无人区”空间界定. 地理学报, 2021, 76(9): 2118-2129.
- [37] 金孙梅, 侯光良, 许长军, 文德卓玛, 高靖易. 青藏高原人类活动的极端环境风险评价. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 2048-2059.
- [38] Yang C, Liu H Z, Li Q Q, Wang X Q, Ma W, Liu C L, Fang X, Tang Y Z, Shi T Z, Wang Q B, Xu Y, Zhang J, Li X C, Xu G, Chen J Y, Su M, Wang S Y, Wu J J, Huang L P, Li X, Wu G F. Human expansion into Asian Highlands in the 21st Century and its effects. Nature Communications, 2022, 13: 4955.
- [39] 许长军, 金孙梅, 王英. 基于 GIS 的青藏高原人居环境自然适宜性评价. 生态科学, 2020, 39(6): 93-103.
- [40] 于汉学, 周若祁, 刘临安. 黄土高原沟壑区小流域人居环境规划的生态学途径——以陕北枣子沟小流域为例. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2005, 37(2): 189-193, 209.
- [41] 张东海, 任志远, 刘焱序, 冯雪铭, 刘宪锋. 基于人居自然适宜性的黄土高原地区人口空间分布格局分析. 经济地理, 2012, 32(11): 13-19.
- [42] O'Hara S L, Metcalfe S E, Street-Perrott F A. On the arid margin: the relationship between climate, humans and the environment. A review of evidence from the Highlands of central Mexico. Chemosphere, 1994, 29(5): 965-981.
- [43] 封志明, 游珍, 杨艳昭, 施慧. 基于三维四面体模型的西藏资源环境承载力综合评价. 地理学报, 2021, 76(3): 645-662.
- [44] 游珍, 封志明, 杨艳昭, 施慧, 李鹏. 栅格尺度的西藏自治区人居环境自然适宜性综合评价. 资源科学, 2020, 42(2): 394-406.
- [45] 孙维营, 关莹, 史学建, 张攀, 王玲玲. 生态文明建设背景下青海省水土保持重要性分析. 中国水土保持, 2017(12): 17-20.
- [46] 虞春隆, 党纤纤. 基于流域的黄土高原城镇体系空间结构特征及协调发展策略——以泾河流域为例. 小城镇建设, 2018(2): 66-70, 79.
- [47] 庞瑞秋, 胡宁, 魏冶. 基于多源数据的新疆人居环境质量评价. 地理科学, 2021, 41(12): 2127-2137.
- [48] 张文忠. 中国城市体检评估的理论基础和方法. 地理科学, 2021, 41(10): 1687-1696.
- [49] 张钦, 赵雪雁, 王亚茹, 雒丽, 薛冰. 高寒生态脆弱区农户对气候变化的适应需求——以甘南高原为例. 生态学报, 2017, 37(5): 1688-1698.
- [50] 邓真, 何一民. 论高原环境、民族特性及宗教信仰对西藏城市建筑的影响. 四川大学学报: 哲学社会科学版, 2014(3): 37-44.
- [51] 杨晴青, 高岩辉, 杨新军, 吴孔森. 黄土高原半干旱区微尺度乡村人居环境系统脆弱性测度及时空分异——以陕西省佳县为例. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1371-1381.
- [52] 郝慧梅, 任志远. 基于栅格数据的陕西省人居环境自然适宜性测评. 地理学报, 2009, 64(4): 498-506.
- [53] Thom E C. The discomfort index. Weatherwise, 1959, 12(2): 57-61.
- [54] 周秉荣, 胡爱军, 陈国茜, 张海静, 何永清, 张成祥. 青海省农牧业气候资源综合区划及评价. 资源科学, 2013, 35(1): 191-198.
- [55] 张忠孝, 李生梅. 青海省气候区划探讨. 青海师范大学学报: 自然科学版, 2006, 22(3): 94-97.
- [56] 董锁成, 张佩佩, 李飞, 李富佳, 陈诚, 马蓓蓓. 山东半岛城市群人居环境质量综合评价. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(3): 155-162.
- [57] Wang Q, Zhou K. A framework for evaluating global national energy security. Applied Energy, 2017, 188: 19-31.
- [58] 李帅, 魏虹, 倪细炉, 顾艳文, 李昌晓. 基于层次分析法和熵权法的宁夏城市人居环境质量评价. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2700-2708.
- [59] 赵书强, 汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC 法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 143-148, 162.
- [60] 吴开亚, 金菊良. 区域生态安全评价的熵组合权重属性识别模型. 地理科学, 2008, 28(6): 754-758.
- [61] 朱彬, 张小林, 尹旭. 江苏省乡村人居环境质量评价及空间格局分析. 经济地理, 2015, 35(3): 138-144.
- [62] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 农村人居环境整治提升五年行动方案(2021-2025 年). (2021-12-05) [2022-11-16]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-12/05/content_5655984.htm.