西藏自治区生态安全评价与预测

张承成

（西藏大学 中华民族共同体研究院，西藏 拉萨 850000）

摘　要：［目的］分析西藏自治区综合生态环境状态及未来生态安全状况，为该区创建生态文明高地，筑牢国家生态安全屏障和推进生态文明建设提供决策参考。［方法］基于PSR概念框架，构建西藏生态安全综合评价指标体系；利用2012—2022年社会经济发展和环境保护数据，对该区生态安全状况进行评价；采用单因素分析法，分析影响生态安全变化的主要因素，并基于灰色系统预测方法对该区未来生态安全状况进行预测。［结果］①从准则层指标权重值看，研究区生态安全压力指标权重为0.395 7，生态安全状态指标权重为0.245 2，生态安全响应指标权重为0.359 1，表明生态压力和生态响应对西藏生态安全的综合评价最重要。②2012—2022年西藏生态安全综合指数整体呈现上升趋势，11 a间生态安全综合指数从0.154 2上升至0.221 7，生态安全等级由Ⅰ级转化为Ⅱ级。③未来西藏生态安全综合指数将持续上升。2023—2032年生态安全综合指数预测值从0.216上升到0.261，生态安全指数值呈现逐年增长趋势，生态安全等级始终保持Ⅱ级，生态安全状况目前处于并将在较长时期处于低水平稳定发展阶段。［结论］西藏生态安全等级长期处于较低水平，生态系统结构处于低水平的稳定状态，生态安全压力较大；西藏生态安全状态动态变化与全区第二产业占比、年末总人口、造林总面积、水资源总量和城镇化率密切相关。

关键词：生态安全屏障；PSR模型；灰色预测系统；生态环境；西藏自治区

文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X（2026）04-0433-15　　**中图分类号：**X826，F062.2

文献参数：张承成.西藏自治区生态安全评价与预测[J].水土保持通报，2026，46（4）：433-447. Zhang Chengcheng. Ecological security evaluation and prediction in Xizang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46（4）：433-447.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.011　　**CSTR：32312.14.stbctb.2026.04.011**

Ecological security evaluation and prediction in Xizang Autonomous Region

Zhang Chengcheng

（*Institute of Community for the Chinese Nation*，*Xizang University*，*Lhasa*，*Xizang* 850000，*China*）

Abstract：［Objective］The comprehensive ecological environment state of Xizang Autonomous Region was analyzed，and its future ecological security situation was predicted，in order to provide decision-making references for Xizang to develop a highland of ecological civilization，build a national ecological security barrier，and promote ecological civilization construction.［Methods］A comprehensive evaluation index system for ecological security of Xizang Autonomous Region was established based on the pressure-state-response（PSR）conceptual framework. The data on socioeconomic development and environmental protection from 2012 to 2022 were used to evaluate its ecological security state. The single factor analysis method was adopted to analyze the main factors affecting the changes in ecological security，and the grey prediction system was applied to predict the future ecological security situation.［Results］① From the perspective of the weight values of criterion layer indicators，the weight of ecological security pressure indicators in the study area was 0.395 7，the weight of ecological security state indicators was 0.245 2，and the weight of ecological security response indicators was 0.359 1，indicating that ecological pressure and ecological response played the most important roles in the comprehensive evaluation of the ecological security. ② Overall，the comprehensive ecological security index of Xizang Autonomous Region

收稿日期：2025-11-28　　**修回日期：**2026-01-19　　**采用日期：**2026-01-21

资助项目：2024年度国家社科基金专项项目“中华民族共同体视野下的西藏生态文明建设与文化保护传承协同发展研究”（24VMZ008）；2024年西藏自治区西藏大学中国少数民族经济发展协同创新中心青年项目（0808006）；2025年度西藏自治区西藏大学研究生高水平人才培养项目（2025-GSP-B042）；2026年度西藏自治区社会科学院重点项目（26BXSNY01）

第一作者：张承成（1992—），男（白族），云南省大理市人，博士研究生，主要研究方向为边疆治理与边疆安全。Email：844894866@qq.com。

showed an upward trend from 2012 to 2022, increasing from 0.154 2 to 0.221 7, and the ecological security level improved from level Ⅰ to level Ⅱ. ③ In the future, the comprehensive ecological security index of Xizang will continue to rise. The predicted value of the index from 2023 to 2032 would increase from 0.216 to 0.261, showing a year-on-year increasing trend. The ecological security level would remain at level Ⅱ, and the ecological security situation will remain in a state of low-level stable development for a relatively long period. [Conclusion] The ecological security level of Xizang has remained at a relatively low level over the long term, and the ecosystem structure is in a low-level stable state, with ecological security still facing significant pressure and threats. The dynamic changes of the ecological security state are closely related to the share of the secondary industry in GDP, total population at the end of the year, total afforestation area, total water resources, and urbanization rate of the region.

Keywords: ecological security barrier; PSR model; grey prediction system; ecological environment; Xizang Autonomous Region

生态安全是一种实现生态环境与经济社会可持续发展的良好状态,维护生态安全是推动生态文明建设的应有之义[1]。通过构建现代化环境治理体系,减少生态系统面临的破坏和威胁,实现生态环境良性循环及其与经济社会的协调可持续发展是生态安全的主要内容[2]。

全球环境问题已经威胁到人类的生存与发展,维护生态安全已成为全世界关注的热点。目前,国外学者围绕构建生态安全格局与生态系统风险管理[3]、生态系统服务供给与社会可持续发展[4]、生态安全维护与生物多样性保护[5]等生态安全核心议题展开探究,重点聚焦土壤生态系统服务功能现状评估[6]、自然与人为因素对农业生态系统结构的影响机制[7-8]、预测模拟土地生态系统变化的驱动因素[9]等具有社会现实意义的研究,其核心内容是将生态安全与环境保护、经济发展的协同逻辑纳入现代化发展框架,形成了以机制分析和效应量化为特点的研究范式。国内学者对生态安全的研究已广泛覆盖土地[10]、森林[11]、绿洲[12]等典型生态系统,围绕生态安全评价[13]、生态安全屏障构建[14]、生态安全格局划分[15]等内容进行了深入研究,从战略性地位看,生态安全关系着国家安全和国民经济发展。在生态安全评价研究中,压力-状态-响应(PSR)概念框架及其衍生分析框架[16]因其系统性特点被普遍用于构建生态安全评价指标体系[17-18],借助评价模型的预测、解释、推断等功能,采用数学模型法[19]、生态模型法[20]、景观生态模型法[21]等生态安全评价模型方法进行研究;研究尺度多集中于市域[22]、县域[23]等小范围区域,重点探究生态安全的区域差异性[24]、驱动因素、发展趋势、模拟预警等内容[16,25]。然而,现有研究仍存在薄弱环节与亟待解决的问题。①研究尺度失衡。多数研究侧重探究小范围区域的生态安全异质性,而针对省域等较大尺度,能够完整反映生态系统整体性与稳定性的研究相对匮乏,难以满足区域生态安全屏障建设的实践需求;②指标体系构建缺乏区域适配性。现有研究多采用通用性、常规化指标,未能充分结合研究区的典型特征与客观实际选取针对性指标,导致对特殊区域生态安全的评价精准度不足;③针对高寒脆弱生态系统的生态安全评价与预测研究存在短板,尤其是西藏高寒缺氧、生态系统脆弱、自我恢复能力差的独特性未给予充分关注,缺乏适配其区域特征的评价框架与预测模型,难以有效支撑该区域生态文明高地建设的政策制定需求。

西藏作为中国西南生态安全屏障的核心区域,其生态战略地位对国家生态安全全局具有重大影响[26]。基于生态系统的核心表征判断,从生态环境的静态评估结果来看,西藏当前生态环境质量状况总体保持稳定,仍然是世界上生态环境质量最好的地区之一[27]。该区拥有中国面积最大的天然草地、原始森林及众多高原湖泊,生物多样性丰富,大气、水体等环境要素污染程度极低,水源涵养、碳汇、水土保持等核心生态服务功能处于较高水平,体现出西藏生态环境“当前状态的优越性”。西藏独特且珍贵的生态本底是中国生态系统的重要组成部分,也是维系生态平衡、保障生态安全的战略基石,守护这一核心生态资源已成为关乎国家长远发展的重要命题。西藏生态系统的显著特征体现在“独特性”与“脆弱性”的高度交织,形成了“优质但高危”的特殊生态格局。独特性源于世界海拔最高的极端自然地理条件。西藏高寒缺氧,气候干燥,土壤发育缓慢的环境特征,决定了生态系统的抗干扰阈值极低,孕育了区别于其他区域的独特生态系统结构,构建了完整且独特的生态体系,支撑着丰富的特有物种与特殊生态服务功能。然而,这种独特性也直接导致了

生态系统的高脆弱性。脆弱性作为生态系统内在的动态属性,核心反映其对外界干扰的“稳定性与韧性”。西藏高寒生态系统因具有脆弱性特征,自然环境的自我维持和恢复能力极差。这种“高现状质量与低系统韧性”的矛盾,使得西藏生态保护既具备良好基础,又面临严峻挑战。西藏生态系统兼具多重核心生态功能,这些功能的协同耦合关系直接决定了区域乃至全国生态安全的整体水平。从现实需求来看,在省级尺度下开展整合全域生态安全状况的系统性分析,全面把握生态功能的整体格局,可为国家层面制定西藏生态屏障整体性保护战略提供理论支撑。

本研究以西藏自治区为研究对象,围绕“实现较大范围内生态系统的完整与稳定”目标,选取2012—2022年西藏社会经济发展和环境保护相关数据,基于压力-状态-响应(PSR)概念框架,构建适配西藏高寒特征的生态安全综合评价指标体系,系统开展西藏生态安全评价;采用单因素分析法分析影响西藏生态安全变化的主要因素,并运用灰色系统预测方法建立西藏生态安全预警模型以探明西藏未来生态安全发展态势,为西藏创建生态文明高地,筑牢国家生态安全屏障和推进生态文明建设的相关政策制定提供参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

西藏自治区地处中国西南边疆(26°50′—36°53′N,78°25′—99°06′E),下辖6个市(拉萨、日喀则、山南、林芝、昌都、那曲)、1个地区(阿里),地理幅员总面积1.20×10^6 km^2,约占全国总面积的1/8。西藏自治区地处青藏高原西南部,是青藏高原的主体部分,平均海拔4 000 m以上,有“世界屋脊”之称。西藏90%以上土地处于高寒环境,其中冻融区面积占总面积的75.8%,生态环境敏感脆弱。西藏自治区是全球海拔最高、生态系统最独特的区域之一,其生态环境状况不仅关乎区域自身可持续发展,也对全国乃至全球生态安全具有不可替代的战略意义。在气候方面,西藏属典型的高原温带半干旱至寒带干旱气候,受地形与大气环流共同影响,呈现出高寒干旱,昼夜温差大,太阳辐射强烈,降水时空分布不均的特征,年平均气温−2.8～11.9 ℃,年降水量60～1 000 mm,且主要集中于6—9月,干旱半干旱区域占比达80%以上,极端气候事件频发;在植被与土壤方面,区域内植被类型以高寒草地、高山灌丛、亚高山针叶林为主,其中高寒草地面积占比超60%,是中国重要的草原生态系统分布区,植被覆盖度呈现由东南向西北逐渐降低的空间分异特征。2022年森林覆盖率12.31%,草原综合植被覆盖率47.14%;土壤发育受高寒环境制约,土层浅薄,肥力较低,以高山草甸土、高山草原土、寒漠土为主,且冻土广布,冻融作用强烈,显著影响生态系统的稳定性。在生态系统与生物多样性方面,西藏涵盖草地、森林、湿地、湖泊、荒漠等多元生态系统类型,拥有众多高原湖泊,雅鲁藏布江、金沙江等重要江河源头,以及三江源、羌塘、珠穆朗玛峰等多个国家级自然保护区,孕育了藏羚羊、藏野驴、雪豹等大量高原特有珍稀物种,是中国生物多样性保护的核心区域之一。西藏作为中国西南生态安全屏障的核心组成部分,承担着水源涵养、水土保持、防风固沙、碳汇储能等关键生态服务功能,其中长江、黄河、澜沧江等江河源头区的水源涵养量占全国重要江河源头涵养总量的40%以上;然而,受高海拔、低温、缺氧等自然条件限制,区域生态系统结构简单,抗干扰能力弱,自我恢复能力极差,加之全球气候变化引发的冰川消融、冻土退化、极端干旱等问题,以及局部区域人类活动(如放牧、基础设施建设)的影响,生态系统脆弱性特征显著,生态安全保障面临严峻挑战。该区发育了除海洋生态系统外的几乎所有的陆地生态系统类型,构成对周边地区和国家具有重大影响的生态安全屏障。2022年西藏自治区生产总值2.13×10^{11}元,同比增长1.1%;年末常住人口总数为3.64×10^6人,藏族人口占90%左右,汉族占8%左右,其他少数民族占2%左右,城镇人口占总人口的37.4%。

1.2　数据来源

选取2012—2022年西藏相关社会经济发展、环境保护的时间序列数据作为研究样本。研究数据主要来源于相应年份的《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《西藏统计年鉴》、国家统计局国家数据库和西藏自治区国民经济和社会发展统计公报、西藏自治区生态环境状况公报。多数指标数据可直接从统计年鉴中有效获取,其余则根据已有数据计算得出。沙化土地面积和城市生活垃圾无害化处理率等指标个别年份存在数据缺失,为保证数据准确性与完整性,采用前后2 a的平均值进行填补。

1.3　研究方法

1.3.1　评价指标体系构建

“压力-状态-响应(PSR)”概念框架构建指标体系评价生态安全的方法因强调人类活动的后果与人类过度的活动对生态环境的影响之间的因果关

系而在国内外被广泛使用,其逻辑架构是人类过度的行为活动对生态环境产生干扰(带来压力),生态环境因此出现问题(改变状态),人类为了应对生态环境问题而采取一系列生态环境治理措施(产生响应),以达到恢复生态结构功能或防止生态环境恶化的目的,形成闭合的因果循环(图1)。其中,“压力”指标是指人类过度的行为活动对生态环境造成的压力;“状态”指标是指生态环境因压力导致的状态变化;“响应”指标是指为了应对或缓解人类活动导致的生态环境变化所采取的环保治理措施。

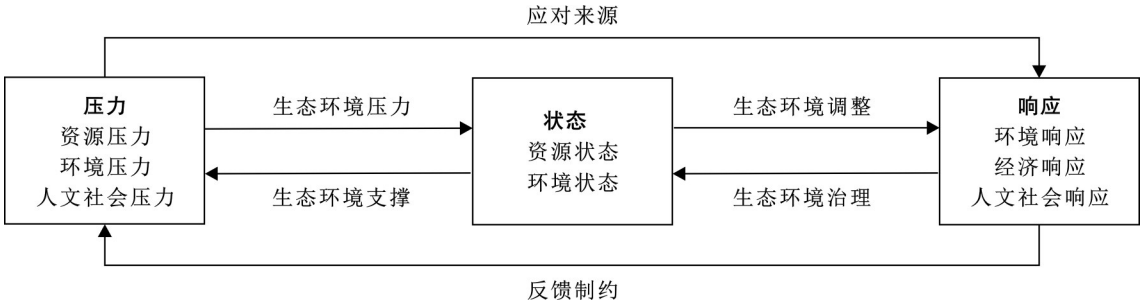


图1 压力-状态-响应(PSR)概念框架逻辑架构

Fig.1 Logical structure of pressure-state-response (PSR) conceptual framework

基于压力-状态-响应(PSR)模型,在参考相关已有研究基础上[16],参照区域生态安全评价的一般性指标体系,遵循科学性、典型性、可获得性、可操作性等原则,充分考虑西藏生态环境敏感性、脆弱性、适应性等因素,并结合西藏生态建设和环境保护实际情况,通过专家咨询法和指标多重共线性诊断分析,选取表征社会、经济、民生、生态环境因素的25项指标,构建西藏生态安全综合评价指标体系(表1)。该指标体系特别设置了如下指标。①年末牲畜存栏总数:表征西藏畜牧业对生态系统的压力;②沙化土地面积:表征西藏土壤沙化的严重性和生态治理成效;③农牧业经济比重:表征西藏特有高原产业对生态安全的压力;④人均旅游收入:表征近年来西藏突破性发展的特色旅游业对生态系统的影响;⑤草地面积:表征西藏牧区草场草原建设情况等。这些都是体现西藏生态环境脆弱性、敏感性、风险性的代表性指标。

1.3.2 评价指标权重确定

熵值法是一种应用于多元指标体系的客观综合评价方法,其基本原理是依据指标在评价体系中的变差系数大小或评价指标所蕴含信息的多少程度来赋予指标权重。单一指标权重值越高,说明该指标在综合评价过程中对最终评价结果的影响程度越大。本研究采用熵值法对指标体系进行赋权,具体计算步骤如下。

(1)数据标准化处理。为消除各单一指标量纲和取值范围差异的影响。使各单一指标之间具备可比性,采取极差变换法对原始指标数据进行标准化处理,方法如下:

正向(+)指标:

$$Y'_{ij}=0.9Y_{ij}+0.1=0.9\frac{X_{ij}-\min X_j}{\max X_j-\min X_j}+0.1 \quad (1)$$

负向(-)指标:

$$Y'_{ij}=0.9Y_{ij}+0.1=0.9\frac{\max X_j-X_{ij}}{\max X_j-\min X_j}+0.1 \quad (2)$$

式中:X_{ij}为第$i(i=1,2,3\cdots m)$个年份处在第$j(j=1,2,3\cdots n)$项评价指标中的数据;$\min X_j$和$\max X_j$分别表示在第j项评价指标下全部指标数据中的最小值和最大值。由于标准化处理原始数据后会出现零的现象,为了使后续的数据运算有意义,需对原数据Y_{ij}进行转换处理,考虑统计数据标准化处理的科学性,依据$Y'_{ij}=0.9Y_{ij}+0.1$进行转换处理,即对整体原数据扩大0.9倍,并平移0.1的量,最终得到标准化值Y'_{ij}。

(2)计算指标特征比值。第j项评价指标在第i年的标准化值Y'_{ij}占该评价指标所有研究年份标准化值总和的比重V_{ij},计算方法如下:

$$V_{ij}=\frac{Y'_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}Y'_{ij}} \quad (i=1,2,3\cdots m;\ j=1,2,3\cdots n) \quad (3)$$

(3)计算指标熵值。第j项评价指标的熵值R_j,计算方法如下:

$$R_j=CT=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}V_{ij}\ln V_{ij} \quad (i=1,2,3\cdots m;\ j=1,2,3\cdots n) \quad (4)$$

式中:$T=-\sum_{i=1}^{m}V_{ij}\ln V_{ij}$,表示评价指标蕴含总信息量;$R_j$表示单一指标蕴含信息量,即熵值;$C=\frac{1}{\ln m}=\frac{1}{\ln 11}$。

表 1　西藏生态安全综合评价指标体系

Table 1　Comprehensive evaluation indicator system of ecological security of Xizang

目标层	准则层		指标层	指标意义和作用方向	衡量方式	指标权重
西藏生态安全	压力(0.395 7)	资源压力(P_1)	P_{11}人均耕地面积/(hm^2/人)④	农业对生态安全的压力(—)	年末实有耕地面积/年末总人口	0.038 3
			P_{12}工业增加值/亿元②	工业生产对生态安全的压力(—)		0.028 5
		环境压力(P_2)	P_{21}年末牲畜存栏总数/(万头、万只、万匹)①	畜牧业发展对生态安全的压力(—)		0.022 9
			P_{22}沙化土地面积/(10^4 hm^2)①	植被退化对生态安全的压力(—)		0.036 2
			P_{23}化肥施用强度/kg①	农业发展对生态安全的压力(—)		0.049 9
		经济压力(P_3)	P_{31}经济密度/(万元/km^2)④	社会经济发展对生态安全的压力(—)	当年地区生产总值/区域地理面积	0.039 9
			P_{32}农牧业经济比重/%③	农牧业发展对生态安全的压力(—)	当年农牧业地区生产总值/本年地区生产总值	0.027 1
		人文社会压力(P_4)	P_{41}人口密度/(人/km^2)④	人口承载对生态安全的压力(—)	年末总人口/区域地理面积	0.061 3
			P_{42}城区面积/$km^2$②	城市化扩张对生态安全的压力(—)		0.091 5
	状态(0.245 2)	资源状态(S_1)	S_{11}人均粮食产量/kg①	土地资源质量健康状态(+)	本年粮食总产量/年末总人口	0.026 0
			S_{12}人均旅游收入/(元/人)④	生态环境质量健康状态(+)	本年旅游总收入/年末总人口	0.032 3
			S_{13}第三产业GDP占比/%①	产业结构健康状态(+)		0.020 1
			S_{14}农林牧渔业产值/万元①	基础产业发展健康状态(+)		0.044 6
		环境状态(S_2)	S_{21}草地面积/$km^2$①	草地资源状态(+)		0.042 4
			S_{22}森林覆盖率/%①	森林资源状态(+)		0.079 9
	响应(0.359 1)	环境响应(R_1)	R_{11}城市生活垃圾无害化处理率/%①	对人居环境的响应(+)		0.041 1
			R_{12}农业有效灌溉面积/(10^3 hm^2)①	对生态环境需求的响应(+)		0.047 8
			R_{13}当年人工造林面积/(10^3 hm^2)①	对森林资源保护的响应(+)		0.022 3
		经济响应(R_2)	R_{21}农业机械总动力/(10^4 kW)①	对农业现代化程度的响应(+)		0.024 4
			R_{22}研究与试验发展(R&D)经费投入强度/%③	对生态安全维护科技水平的响应(+)		0.029 4
			R_{23}财政用于节能环保支出增长率/%④	对节能环保投入强度的响应(+)		0.044 2
			R_{24}固定资产投资/亿元①	对基础设施建设投入的影响(+)		0.032 8
			R_{25}人均GDP/(元/人)①	对社会经济发展的响应(+)		0.040 0
		人文社会响应(R_3)	R_{31}农村居民可支配收入/元③	对生态安全维护的经济发展水平的响应(+)		0.044 5
			R_{32}每万人高等学校平均在校生数/人①	对生态安全维护的教育水平的响应(+)		0.032 6

注:指标层各单一指标右上角指数为数据来源。①为统计年鉴,②为国家统计局国家数据库,③为统计公报,④为核算数据。下同。

(4)计算指标变差系数。第j项评价指标的变差系数(u_j)越大,说明指标越重要,计算方法如下:

$$u_j = 1 - R_j \quad (j = 1, 2, 3\cdots n) \tag{5}$$

(5)计算指标权重。计算第j项评价指标的权重S_j,计算方法如下:

$$S_j = \frac{u_j}{\sum_{j=1}^{n} u_j} \quad (j = 1, 2, 3\cdots n) \tag{6}$$

1.3.3　计算生态安全指数

采用综合指数法计算生态安全指数,并以此评价西藏生态安全状况,计算方法如下:

(1)子系统生态安全指数。

$$Z_f = \sum_{j=1}^{n} Y'_{ij} S_j \tag{7}$$

($f = 1, 2, 3$; $i = 1, 2, 3\cdots m$; $j = 1, 2, 3\cdots n$)

式中:Z_f为压力、状态、响应3个子系统的生态安全指数。

(2)生态安全综合指数。

$$Z = \sum_{f=1}^{3} Z_f S_f \quad (f = 1, 2, 3) \tag{8}$$

式中:Z为生态安全综合指数,取值为$[0, 1]$;S_f为第f个子系统的权重,$S_f = \sum_{f=1}^{n} S_j$,$f = 1, 2, 3$,$j = 1, 2, 3\cdots n$。

考虑到各子系统生态安全指数是由各指标生态安全指数加权求和得到的,在计算生态安全综合指数时,为使生态安全的综合指数结果和分级评价结果都位于$[0, 1]$,对其乘以相应的子系统权重并加权求和,即可得到生态安全的综合指数值Z($Z \in [0, 1]$)。

在省域生态安全评价中,依据生态安全指数可以反映研究区生态安全状况数值大小,但是无法直接反映生态安全程度。为了直观地描述生态安全状况,需

进一步将生态安全指数转换为生态安全等级值。目前国内外尚未达成统一完备的生态安全等级划分标准[28],本研究基于生态安全指数结果,并结合西藏生态安全特征,参考相关研究[29],采用等分法建立省域生态安全等级评价标准,将评价标准划分为5个等级,生态安全综合指数越高,生态环境就越趋安全,生态安全等级也就越高,相反地,生态安全综合指数越低,生态安全就越趋不安全,生态安全等级也就越低(表2)。

表2 西藏生态安全等级评价标准

Table 2 Evaluation standards for ecological security levels of Xizang

生态安全综合指数	生态安全评价	生态安全等级	生态安全特征
[0,0.2]	不安全	Ⅰ	生态环境恶劣,生态系统崩溃,生态功能严重退化,抵抗外界干扰能力极差,草地退化、土地沙化等生态压力严重超过生态承载能力,发生生态灾害风险的可能性极高,生态文明建设面临严重挑战
(0.2,0.4]	较不安全	Ⅱ	生态环境遭受明显破坏,生态系统不稳定,生态系统结构自我维持和恢复能力差,生态功能面临潜在威胁,抵抗外界干扰能力较差,生态敏感脆弱,生态修复和恢复具有较大困难,生态压力明显,草地退化、土地沙化等初现端倪,人与自然可持续发展关系失衡,明显影响区域经济、社会、人口、资源、环境的协调发展,生态文明建设面临诸多挑战
(0.4,0.6]	临界安全	Ⅲ	生态环境遭受不同程度破坏,生态系统状态逐渐不稳定,生态服务功能逐渐退化,能够抵抗少量外界干扰,生态修复和恢复具有困难,生态压力初现,生态灾害现象时有发生,生态文明建设面临挑战
(0.6,0.8]	较安全	Ⅳ	生态环境较好,生态系统较稳定,生态系统结构自我维持和恢复能力较好,生态功能服务能力较强,抵抗外界干扰能力较强,生态压力不明显,发生生态灾害风险的可能性不高,生态文明建设压力不大
(0.8,1]	安 全	Ⅴ	生态环境优美,生态系统稳定,生态结构完整,生态系统结构自我维持和恢复能力强劲,生态功能完善,能够抵抗外界干扰,生态问题不明显,生态文明建设实现可持续发展

1.3.4 影响因素选取

①特定区域内的地形、气候、水文、土壤等自然地理要素长期耦合作用而形成的自然生态系统会与该特定区域保持相适应的生态结构和相对一致的稳定与安全。西藏大部分地处高寒地区,生态系统脆弱敏感,稳定性与安全性极低,表现出对人类活动和全球气候变化快速响应的特点。故而选取年均气温、年降水量、水资源总量、天然草地面积、森林面积5个自然因素,分析自然地理要素对西藏生态安全的影响。②异化的人与自然关系本质上是“此消彼长”的相互掠夺和制约,人类社会的发展必然会出现人口增加,城市扩张等影响生态系统结构稳定的现象。选取年末总人口、城镇化率、城区面积、道路面积等4个社会因素分析人类活动对生态承载力的影响。③区域经济发展观念的转变和经济发展方式的转型会推动生态文明建设进程,生态文明建设必然会夯实生态系统可持续发展的基础,进而完善生态系统服务功能,巩固生态安全。从经济发展和产业结构调整角度分别选取地区生产总值、全体居民人均可支配收入和三大产业占比等5个因素,分析西藏经济发展和产业结构变化对生态安全的影响。④政策因素在生态安全中起着引导和保障作用。分别选取草原防治面积、种草改良面积、造林总面积、大中小工业企业数量4个因素,分析林草环保政策的制定和执行情况对生态安全的影响以及国土空间规划政策对生态安全资源与环境压力的影响(表6)。

灰色关联度分析是依据时间序列数据曲线几何形状的相似程度来判断因素之间的关联程度。在系统发展过程中,若两个因素同步变化程度较高,则两者关联程度较高。西藏生态系统环境条件差异大,受自然、社会、经济、政策等不确定因素的影响,生态系统变得脆弱、敏感、易变。因此,采用灰色关联度模型计算分析各影响因素的关联系数,用以评价研究区生态安全与各影响因素之间联系的紧密程度。计算步骤如下:

(1) 选择序列。母序列(参考序列):

$$Z_{0i}=\{Z_{0i}\,|\,i=1,2,3\cdots11\} \tag{9}$$

式中:Z_{0i}为生态安全综合指数时间序列数据。

子序列(比较序列):

$$H_{ig}=\{H_{ig}\,|\quad i=1,2,3\cdots11;\ g=1,2,3\cdots18\} \tag{10}$$

式中:H_{ig}为第$i(i=1,2,3\cdots11)$个年份处在第$g(g=1,2,3\cdots18)$项影响因素指标中的数据。

(2) 数据无量纲化处理。运用初值法对数据进行无量纲化处理,即每个数据序列的每个数据均分别除以该数据序列的第一个数据,计算方法如下:

母序列(参考序列)无量纲化处理:

$$Z'_{0i}=\frac{Z_{0i}}{Z_{01}}\qquad(i=1,2,3\cdots11) \tag{11}$$

子序列(比较序列)无量纲化处理:

$$H'_{ig}=\frac{H_{ig}}{H_{1g}}\quad(i=1,2,3\cdots11;g=1,2,3\cdots18)\tag{12}$$

(3)计算差序列。子序列(比较序列)的无量纲化数据分别依次减去母序列(参考序列)的无量纲化数据,并对该差值取绝对值,计算方法如下:

$$\Delta'_{ig}(p)=\{\Delta_{ig}(p)\,|\,\Delta_{ig}(p)=|H'_{ig}(p)-Z'_{0i}(p)|\}\quad(g=1,2,3\cdots18;\ i=p=1,2,3\cdots11)\tag{13}$$

(4)计算极最大差和极最小差。对每个子序列(比较序列)的差序列数据分别求解最大值和最小值,得到最大值数据序列和最小值数据序列,并进一步求解该最大值序列的最大值和该最小值序列的最小值,即可分别得到极最大差和极最小差,计算方法如下:

极最大差:

$$D=\max_g\max_p\Delta'_{ig}(p)\quad(g=1,2,3\cdots18;\ i=p=1,2,3\cdots11)\tag{14}$$

极最小差:

$$d=\min_g\min_p\Delta'_{ig}(p)\quad(g=1,2,3\cdots18;\ i=p=1,2,3\cdots11)\tag{15}$$

(5)计算关联系数。方法如下:

$$\gamma\left[Z'_{0i}(p),H'_{ig}(p)\right]=\frac{d+\beta D}{\Delta'_{ig}(p)+\beta D}\tag{16}$$

($\beta\in[0,1]$;$g=1,2,3\cdots18$;$i=p=1,2,3\cdots11$)

式中:β为分辨系数,常取$\beta=0.5$。

(6)计算关联度。方法如下:

$$\gamma\left(Z'_{0i},H'_{g}\right)=\frac{1}{m}\sum_{p=1}^{m}\gamma\left[Z'_{0i}(p),H'_{pg}(p)\right]\quad(g=1,2,3\cdots18;\ i=p=1,2,3\cdots11)\tag{17}$$

式中:m为年份期数,$m=1,2,3\cdots11$。对关联度结果进行排序,若$\gamma(Z'_{0i},H'_1)>\gamma(Z'_{0i},H'_2)>\gamma(Z'_{0i},H'_3)>\cdots>\gamma(Z'_{0i},H'_g)$,则表示$H'_1$优于$H'_2$,$H'_2$优于$H'_3$,其余类推,并记作$H'_1>H'_2>H'_3>\cdots>H'_g$。其中,$H'_1>H'_2$表示影响因素指标$H'_1$对母序列(参考序列)$Z'_{0i}$的灰色关联度大于$H'_2$对$Z'_{0i}$的灰色关联度,其余类推。关联度越大,说明指标$H'_g$与母序列(参考序列)$Z'_{0i}$联系的紧密程度越强。

1.3.5　生态安全预测

生态安全是一个跨尺度的动态过程,针对生态安全系统结构的静态评价和内部子系统关系的分析具有模糊片面性,因而采用灰色系统预测方法GM(1,1)模型,基于生态安全综合指数对西藏2023—2032年的生态安全状况进行预测。

运用最小二乘法拟合建立一阶微分方程,用以描述该新数据序列的变化趋势,最终推导得到预测模型函数式,并进一步采用后验差检验方法对预测模型进行预测精度检验,通过检验后即可认为预测模型符合预测精度标准,可以运用预测模型进行数据预测分析。计算方法如下:

(1)建立GM(1,1)微分方程并求解,得到预测模型函数式:

$$Z^{(1)}(k+1)=\left(Z^{(0)}(1)-\frac{b}{a}\right)e^{-ak}+\frac{b}{a}\quad(k=1,2,3\cdots q-1)\tag{18}$$

式中:$Z^{(1)}(k+1)$为预测的生态安全综合指数累加值;$Z^{(0)}(1)$为原始离散的数据序列的第一个数据;a为发展系数,b为灰色作用量,a和b通过最小二乘法拟合得到;e为无理常数;k为时间序列的项数。

(2)计算预测值。$Z^{(1)}(k+1)$是由预测得到的累加值,把预测的累加值还原即可得到实际预测值$Z^{(0)}(k+1)$,计算方法如下:

$$Z^{(0)}(k+1)=Z^{(1)}(k+1)-Z^{(1)}(k)\quad(k=1,2,3\cdots q-1)\tag{19}$$

式中:$Z^{(0)}(k+1)$为预测的生态安全指数;k为时间序列的项数。

(3)后验差检验。计算步骤如下:

$$A_1=\sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{q}\left(Z^{(0)}(k)-\overline{Z^{(0)}}\right)^2}{q}}\tag{20}$$

$$A_2=\sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{q}\left(\Delta^{(0)}(k)-\overline{\Delta^{(0)}}\right)^2}{q}}\tag{21}$$

$$L=\frac{A_2}{A_1}\tag{22}$$

$$P=\left\{|\Delta^{(0)}(k)-\overline{\Delta^{(0)}}|<0.674\,5A_1\right\}\quad(k=1,2,3\cdots q)\tag{23}$$

式中:A_1为原始离散数据序列$Z^{(0)}$的标准差;A_2为残差序列$\Delta^{(0)}$的标准差;L为方差比,L值越小,精度越高,若$L\leqslant0.35$,则表明预测模型精度等级为优;P为小误差概率,P值越大,误差越小,若$P>0.95$,则表明预测模型精度等级为优。具体精度等级划分标准如表3所示。q为数据预测个数(期数)。

表 3　灰色预测模型预测精度等级划分标准

Table 3　Classification criteria for prediction accuracy levels of grey prediction model

方差比值L	小误差概率P	预测精度等级
[0,0.35)	(0.95,1.00]	优
[0.35,0.50)	(0.80,0.95]	合格
[0.50,0.65)	(0.70,0.80]	勉强合格
[0.65,1.00]	[0,0.70]	不合格

2 结果与分析

2.1 权重分析

确定指标权重时，指标权重值越大，说明该指标在生态安全综合评价体系中的作用就越大。由表1可知，生态安全压力指标权重为0.395 7，生态安全状态指标权重为0.245 2，生态安全响应指标权重为0.359 1。这表明生态压力和生态响应对西藏生态安全的综合评价最为重要。同时，位居前5位的指标分别是城区面积、森林覆盖率、人口密度、化肥施用强度、农业有效灌溉面积。这表明这些指标对生态安全的影响作用较大。近年来，为推动社会长治久安和经济高质量发展，西藏不断提升城镇化水平。2014—2017年西藏5个地区（日喀则、昌都、林芝、山南、那曲）实现“撤地设市”，2012—2022年城镇化率增速达63.49%，城区面积增长了87.83%，城市化扩张是影响生态安全评价最重要的因素，因而城区面积的权重值最大；植被覆盖率显著影响西藏自然生态系统的稳定性与脆弱性，因此森林覆盖率权重值较高；随着西藏城市化进程的加快，人口规模增加和城市人口聚集，西藏自治区年末总人口数从2012年的3.15×10^6增长到2022年的3.64×10^6，城镇人口比重从2012年的22.75%增长到2022年的37.36%，人口规模的增大和人口密度的增加对区域生态环境造成了较大压力，故而成为影响生态安全状况的重要因素。化肥施用强度表征人类活动对生态环境施加的外力作用。西藏大多数地区处于高寒环境，自然生态系统表现出抵御外力作用能力极弱的特征，化肥施用强度的权重值较大，体现了人类活动对生态安全造成的压力；西藏太阳辐射强烈，地表水分蒸发对农业生态系统造成较大威胁，因而农业有效灌溉面积的权重值较大。

2.2 生态安全指数变化特征

2.2.1 生态安全状况

研究结果显示，西藏生态安全综合指数由2012年的0.154 2提升至2022年的0.221 7（表4），增幅达43.7%以上，生态安全整体呈现波动上升态势（图2），安全等级由Ⅰ级改善为Ⅱ级。其中，2012—2015年西藏生态安全综合指数上升幅度较大，区域生态环境改善效果明显，增幅达27.05%。受2016年生态安全状态指数与响应指数大幅下降的影响，当年综合指数出现小幅回落。2016—2022年综合指数呈现稳步提升态势。从2016年的0.175 9升至2022年的0.221 7，年均增幅为3.97%。研究结果表明，西藏生态安全状况虽保持稳定且渐趋向好，生态环境得到显著改善，但生态安全等级提升相对缓慢，生态文明建设仍面临诸多挑战。

2.2.2 生态安全压力指数变化趋势

2012—2022年西藏生态安全压力指数处于[0.190 2, 0.259 5]区间，数值相对较高。这表明生态环境压力在西藏生态安全综合评价中占据重要地位。11 a间，该指数整体呈下降趋势（图2），降幅达25.57%，表明人类活动及外界干扰对西藏生态安全的胁迫作用逐渐减弱。这主要得益于资源利用效率提升，经济发展模式优化等多重因素的综合作用。

在生态安全压力指数下降的驱动机制方面，西藏自治区工业增加值从2012年的5.74×10^9元增加至2022年的2.15×10^{10}元（增幅高达274.39%，年均增长24.94%）、农牧业经济比重从2012年的15.83%降至2022年的12.29%（降幅为22.33%）。工业增加值增长依托技术进步和产业升级，单位产值的能耗、排污强度显著下降，生态负荷增速低于经济增速，对生态压力产生削弱效应。同时工业增加值提升带来的经济收益，可投入到污染治理、生态修复、环保设施建设中，增强区域生态安全保障能力。然而，一个相对更高比重的农牧业经济，则意味着人类生产活动在区域经济结构中占据更主导地位，其资源消耗和排放的绝对量或强度更可能接近甚至突破脆弱生态系统的承载阈值，进而构成显著且持续的生态压力风险。

表4 2012—2022年西藏生态安全子系统指数及综合指数
Table 4 Ecological security subsystem index and comprehensive index of Xizang (2012—2022)

年份	压力指数	状态指数	响应指数	生态安全综合指数	生态安全等级
2012	0.259 5	0.065 1	0.098 9	0.154 2	Ⅰ
2013	0.254 4	0.064 4	0.093 7	0.150 1	Ⅰ
2014	0.250 2	0.142 9	0.156 5	0.190 2	Ⅰ
2015	0.229 0	0.130 9	0.203 8	0.195 9	Ⅰ
2016	0.219 3	0.113 8	0.170 5	0.175 9	Ⅰ
2017	0.197 2	0.119 6	0.203 7	0.180 5	Ⅰ
2018	0.190 2	0.126 1	0.209 5	0.181 4	Ⅰ
2019	0.196 4	0.131 7	0.229 3	0.192 3	Ⅰ
2020	0.201 8	0.105 8	0.260 2	0.199 2	Ⅰ
2021	0.191 8	0.141 7	0.254 8	0.202 1	Ⅱ
2022	0.193 1	0.148 3	0.303 2	0.221 7	Ⅱ

2.2.3 生态安全状态指数变化趋势

2012—2022年西藏生态安全状态指数在各子系统中最低，处于[0.064 4, 0.148 3]区间。这一特征表

明,尽管当前生态安全压力已逐步减小,但西藏生态环境应对外部胁迫的能力仍相对较弱,自然生态系统的敏感脆弱性特征显著,整体生态环境状况有待进一步提升。从变化趋势来看,该指数整体呈明显上升态势(图 2),11 a间增幅达 127.62%,说明在生态压力持续缓解的背景下,西藏生态环境状况得到有效改善,生态安全系统的抗压能力逐步增强。这主要与区域自然资源高效利用,人居环境质量提升,产业结构优化调整等因素密切相关。

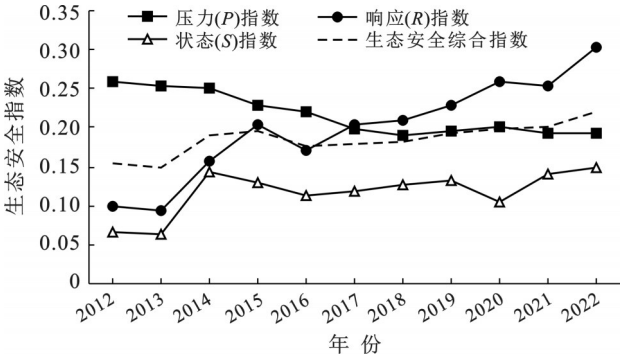


图 2　2012—2022 年西藏生态安全子系统指数及综合指数年度变化趋势

Fig.2　Annual variation trends of ecological security subsystem index and comprehensive index of Xizang (2012—2022)

2012—2022 年西藏自治区草地面积从 8.70×10^5 km^{2}增加至 8.85×10^5 km^2,净增 1.5×10^4 km^2;森林覆盖率从 11.89% 提高至 12.31%,净增 0.42 个百分点;人均旅游收入从 4 020.94 元/人提高至 1.10×10^4元/人。草地面积扩大和森林覆盖率提高,通过优化生态系统结构与强化生态功能,发挥对高寒生态系统状态的协同驱动作用,森林和草地的植被根系能固定土壤,降低地表径流速度,减少水土流失与土地沙化风险;植被冠层可阻挡风沙侵袭,减轻沙尘暴等灾害对区域的威胁,筑牢生态安全的物理屏障。同时,扩大的植被面积会形成更丰富的生境,为动植物提供更多生存空间与食物资源,促进物种多样性提升。物种多样性的增加又能增强生态系统的自我调节、自我修复能力,降低病虫害暴发的风险,因而生态安全状态指数上升。此外,在科学规划和有效管理的前提下,旅游业发展与生态保护可以形成良性互动,一方面,优良的生态环境是生态旅游、自然观光等核心吸引力的基础;另一方面,旅游带来的经济收益也可反哺于环境保护投资与可持续发展。

2.2.4　生态安全响应指数变化趋势

2012—2022 年西藏生态安全响应指数整体呈显著上升趋势(图 2),增幅高达 206.52%。这一结果表明,西藏在缓解人类活动及外界干扰对生态安全的压力方面采取了积极有效的应对措施,生态环境治理成效显著,对改善生态安全状况起到了重要推动作用。该指数的提升主要受环境治理力度加大,生态保护经济投入增加,公众环保教育水平提升等多重因素的综合影响。

在生态安全响应指数大幅增长的驱动机制方面,政策投入与基础设施完善对生态治理成效具有直接驱动作用。社会参与与制度保障则对响应能力提升提供辅助作用。2012—2022 年,西藏自治区的城市生活垃圾无害化处理率从 85.84% 增至 99.80%,财政用于节能环保支出从 2.37×10^9元增至 3.92×10^9元,环保治理项目开工数从年均 128 个增至 315 个;同时,公众环保参与率从 23.5% 提升至 67.8%,多元主体协同参与的生态保护格局逐步形成,进一步强化了生态安全响应能力。

总体而言,西藏生态安全综合指数整体呈上升趋势,生态安全状况持续向好,生态环境不断改善,但综合指数始终处于[0.154 2, 0.221 7]区间,11 a间年均增幅仅为 4.07%,改善速度相对缓慢;生态安全等级从“不安全(Ⅰ级)”提升至“较不安全(Ⅱ级)”,整体仍处于稳定的低水平安全状态,生态安全形势依然严峻,生态安全状况亟待进一步改善。

从生态安全各子系统看,2012—2022 年西藏生态安全各子系统的生态安全变化特征具有显著差异。生态安全压力指数变化幅度最小,11 a间年均降幅为 2.82%,说明尽管人类活动与外界干扰对西藏生态安全的压力逐步减小,但减幅有限,且整体压力指数值仍处于较高水平,生态环境仍面临较强的人为干扰胁迫,依然处于高压状态,未来需持续重点关注生态安全压力对西藏生态安全的影响。由于生态安全压力与农牧业发展方式、工业主导型社会经济发展、人口增长及城市化进程等因素密切相关,西藏自治区需加快推进高原生态农牧业、绿色加工业、文化旅游业等生态产业发展,充分发挥高原清洁能源资源优势,在推动高原经济高质量发展的同时进一步减轻生态环境压力;严守生态保护红线,统筹国土空间规划,科学合理布局城市空间,充分盘活城区土地资源“存量”,依法管控城区土地资源“增量”,探索推动城市向“纵深”方向发展,有效缓解城市化进程带来的生态环境压力。同时,11 a间生态安全的状态指数与响应指数的年均增幅相近,分别为 13.31% 和 13.78%,且变化幅度均较大,表明西藏生态环境抵抗人类活动及外界干扰的能力已明显提升。在减轻生

态安全压力，改善生态环境方面，西藏采取了积极有效的环保治理措施，为持续改善区域生态安全状况提供了有力支撑。

2.3 生态安全影响因素分析

为识别各单指标对生态安全综合指数的影响强度与关键作用路径，采用单因素分析法分析2012—2022年西藏生态安全评价指标体系的单一指标对生态安全综合评价指数的显著影响程度。研究结果（表5）显示，城区面积、人口密度、化肥施用强度、经济密度、城市生活垃圾无害化处理率等指标对西藏生态安全等级提升的贡献率较大，表明西藏在推进生态文明建设进程中，应重点聚焦城市化建设的科学布局，人口增长的合理分布，农牧业生产方式的绿色转型，社会经济的高质量发展以及环境基础设施的持续完善，通过靶向发力核心影响领域，进一步巩固生态安全改善成效，为筑牢国家生态安全屏障提供有力支撑。城区面积、人口密度、化肥施用强度、经济密度、城市生活垃圾无害化处理率等指标与生态安全综合指数均呈显著相关，且累计贡献率达28.5%，是驱动西藏生态安全等级提升的核心指标。从指标所属准则层的结构性特征来看，压力准则层中的城区面积（贡献率8.54%）、人口密度（贡献率6.01%）、化肥施用强度（贡献率4.85%）与经济密度（贡献率4.57%）通过影响区域资源消耗强度和生态胁迫压力，形成对综合指数的间接驱动作用。其中城区面积扩张与人口密度增加的贡献源于城镇化进程中优化空间布局对生态压力的缓解；化肥施用强度的贡献则与农牧业生产方式转型带来的污染减排相关；经济密度通过产业结构升级与资源利用效率提升直接改善生态系统支撑能力。响应准则层中的城市生活垃圾无害化处理率（贡献度4.53%）作为生态治理核心指标，通过提升环境基础设施运行效能直接作用于综合指数，其贡献度在该准则层指标中最高，凸显了生态响应措施的关键作用。

自然、社会、经济、政策等不确定因素的灰色关联度分析结果（表6）表明，影响因素指标的“高关联性”具有明显边界。为避免将关联度较低、对生态安全影响较弱的因素纳入分析范围，选取关联度排名前5的影响因素进行分析，以保证“主要因素”的代表性。与西藏生态安全状况关联度较高的前5位影响因素分别是第二产业占比、年末总人口、造林总面积、水资源总量、城镇化率，其关联度分别为0.972 2，0.969 8，0.961 1，0.958 0，0.953 6。在自然因素中，水资源总量是主要因素，水分直接影响局部区域小气候的特征，进而影响区域气温和降水量，而气温和降水量又是影响植物生长和下垫面性质的重要因素，且影响自然生态系统结构稳定性和功能完整性，因此，生态安全与水资源总量密切相关。在社会影响因素中，西藏自治区年末总人口数从2012年的3.15×10^6增长到2022年的3.64×10^6，人口增长导致频繁的人类活动和经济活动，为区域自然生态环境带来压力。2012—2022年西藏城市化进程加快，城市化率由2012年的22.87%提高到2022年的37.39%，增幅达63.49%，城市扩张对生态安全造成较大压力。因此，年末总人口和城镇化率是社会因素中与生态安全关联度较高的影响因素。西藏作为面向南亚开放的重要通道，当前社会经济正处于迈向高质量发展的战略机遇期，在产业结构转型升级过程中，工业发展基础不断夯实。2012—2022年西藏工业增加值年均增长率（14.41%）远大于同期农林牧渔业增加值的年均增长率（9.35%），在城市化进程加快和社会经济快速发展的同时，生态环境也面临较大压力，土地沙化、草场破坏、城市生活垃圾和工业垃圾增加等生态问题显现，引起生态灾害风险的可能性增加，生态安全状况不容忽视。从政策影响因素看，实施生态环保督察、绿化造林、草原修复治理等生态政策，对于改善西藏生态安全状况具有重要作用。

在经济因素中，产业结构转型升级与改善西藏生态安全状况呈正相关。淘汰高污染、高耗能、高风险的“夕阳产业”，加快生态产品价值转换，建立清洁化、高效化、安全化、科技化的产业有助于改善生态环境，推动生态安全水平提升；在社会因素中，人口规模和城市扩张等人类活动显著影响西藏生态安全，与改善生态安全状况呈负相关，即城镇化率越高，城市扩张带来人口聚集，对土地资源侵占程度就越高，土地生态负荷不断增大，就会越挤压生态环境空间，生态安全等级越低。在政策因素中，植被覆盖率和规模与改善西藏生态安全状况呈正相关关系，主动采取植树造林、草原建设等环保治理措施能够有效遏制生态环境恶化，提高生态安全等级。在自然因素中，水资源总量与改善西藏生态安全状况呈正相关关系，水资源总量较多的区域，生态安全状况较好。

2.4 预测模型结果与分析

基于2012—2022年西藏生态安全综合指数，依据灰色预测模型方法构建GM（1，1）预测模型，同时对预测模型进行必要的残差修正，最终得到预测模型函数式：

$$Z^{(1)}(k+1)=\left(Z^{(0)}(1)-\frac{b}{a}\right)\mathrm{e}^{-ak}+\frac{b}{a}=\left(Z^{(0)}(1)+290\right)\mathrm{e}^{0.004k}-290 \quad (24)$$

式中:$a=-0.004$,$b=1.16$;e为无理常数;k为时间序列的项数,$k=1,2,3\cdots q-1$。根据灰色系统理论,当发展系数$a\geqslant-0.3$时,GM(1,1)预测模型可用于中长期预测。

表5　西藏生态安全综合指数指标贡献率

Table 5　Contribution rates of comprehensive ecological security index of Xizang

项 目	指 标	生态安全贡献率/%
压力(41.82%)	人均耕地面积	4.26
	工业增加值	3.74
	年末牲畜存栏总数	2.89
	沙化土地面积	3.59
	化肥施用强度	4.85
	经济密度	4.57
	农牧业经济比重	3.37
	人口密度	6.01
	城区面积	8.54
状态(21.74%)	人均粮食产量	3.33
	人均旅游收入	3.24
	第三产业GDP占比	2.83
	农林牧渔业产值	3.85
	草地面积	4.40
	森林覆盖率	4.09
响应(36.44%)	城市生活垃圾无害化处理率	4.53
	农业有效灌溉面积	3.96
	当年人工造林面积	3.14
	农业机械总动力	2.84
	研究与试验发展经费投入强度	2.93
	财政用于节能环保支出增长率	4.14
	固定资产投资	3.79
	人均GDP	3.87
	农村居民可支配收入	3.86
	每万人口高等学校平均在校生数	3.38

经后验差检验,该预测模型方差比值$L=0.302$,小误差概率$P=0.952\,4$,模型预测精度等级为优,表明该模型预测准确度符合标准,可以运用该预测模型预测分析西藏2023—2032年的生态安全综合指数。预测结果显示(表7),2023—2032年西藏生态安全综合指数呈现上升趋势(图3),未来10 a内生态安全等级依旧处于较不安全(Ⅱ)等级,但是同期内的生态安全指数值呈现逐年增长趋势,预测值由0.216增长到0.261,生态安全状态不断趋好。

表6　西藏生态安全综合指数影响因素关联度结果

Table 6　Results of correlation degree of influencing factors of comprehensive ecological security index of Xizang

类型	指 标	关联度	排序
自然	年均气温①	0.948 4	9
	年降水量①	0.924 6	11
	水资源总量①	0.958 0	4
	天然草地面积③	0.951 1	6
	森林面积②	0.949 8	8
社会	年末总人口①	0.969 8	2
	城镇化率④	0.953 6	5
	城区面积②	0.915 7	12
	道路面积①	0.849 1	15
经济	地区生产总值②	0.842 0	16
	全体居民人均可支配收入②	0.853 4	14
	第一产业占比②	0.911 8	13
	第二产业占比②	0.972 2	1
	第三产业占比②	0.939 8	10
政策	草原防治面积④	0.708 8	17
	种草改良面积①	0.695 9	18
	造林总面积②	0.961 1	3
	大中型工业企业数量②	0.950 5	7

注:各指标右上角指数为数据来源,①为统计年鉴;②为国家统计局国家数据库;③为统计公报;④为核算数据。

3　讨 论

根据2012—2022年西藏生态安全综合评价结果,研究期内西藏生态安全综合指数呈上升趋势,生态环境治理成效显著,这与西藏近年来持续推进生态保护修复,落实生态安全屏障建设等举措直接相关。但需重点关注的是,西藏生态安全等级长期处于Ⅱ级(较不安全)状态,生态系统结构维持低水平稳定,区域生态文明建设仍面临严峻挑战。

从生态安全系统分维度指数变化来看,11 a间压力指数持续下降,状态指数和响应指数均呈上升趋势,这一特征揭示了西藏生态安全演化的核心逻辑,一方面,西藏通过实施一系列生态保护政策,开展生态治理工程,有效减轻了人类活动对生态环境的干扰,缓解了生态环境压力,同时推动生态系统状态逐步改善;另一方面,受限于环保治理手段单一,生态保护投入与技术支撑不足等,响应措施的综合效能尚未充分释放,难以彻底扭转生态系统的脆弱特征,

导致生态安全长期处于较低等级，生态安全压力仍是制约区域生态安全提升的核心因素。

表7 基于GM(1,1)预测模型的西藏生态安全指数动态预测结果

Table 7 Dynamic prediction results of ecological security index of Xizang based on GM (1,1) prediction model

年份	观测值	预测值	残差	相对误差/%	生态安全等级
2012	0.154	0.154	0	0	Ⅰ
2013	0.150	0.167	−0.017	11.495	Ⅰ
2014	0.190	0.172	0.018	9.521	Ⅰ
2015	0.196	0.177	0.019	9.711	Ⅰ
2016	0.176	0.182	−0.006	3.262	Ⅰ
2017	0.181	0.186	−0.006	3.297	Ⅰ
2018	0.181	0.191	−0.010	5.432	Ⅰ
2019	0.192	0.196	−0.004	1.963	Ⅰ
2020	0.199	0.201	−0.002	0.873	Ⅱ
2021	0.202	0.206	−0.004	1.847	Ⅱ
2022	0.222	0.211	0.011	4.931	Ⅱ
2023		0.216			Ⅱ
2024		0.221			Ⅱ
2025		0.226			Ⅱ
2026		0.231			Ⅱ
2027		0.236			Ⅱ
2028		0.241			Ⅱ
2029		0.246			Ⅱ
2030		0.251			Ⅱ
2031		0.256			Ⅱ
2032		0.261			Ⅱ

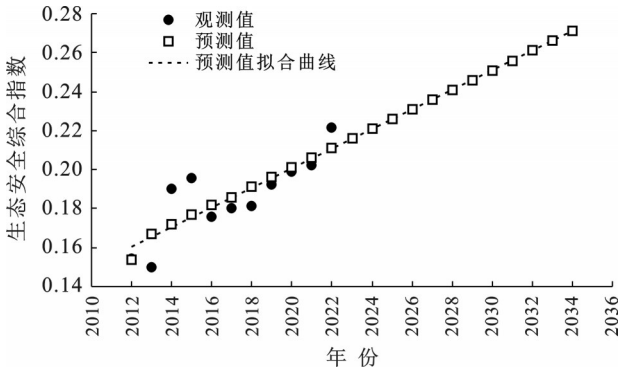


图3 西藏生态安全综合指数预测发展趋势

Fig.3 Predicted development trend of comprehensive ecological security index of Xizang

西藏生态安全的动态变化是自然、社会、经济、政策多因素协同作用的结果，其中，城区面积、人口密度、化肥施用强度、经济密度、城市生活垃圾无害化处理率等指标的变化对西藏生态安全等级判定有较大影响；自然因素、社会因素、经济因素、政策因素对西藏生态安全的影响具有一致性，第二产业占比、年末总人口、造林总面积、水资源总量、城镇化率与西藏生态安全联系紧密。综合研究发现，在压力维度，工业增加值增长带来的“三废”污染、经济密度提升导致的资源环境负荷增加、人口增长与城镇化推进引发的城区面积扩张，是生态安全压力的主要来源；第二产业占比、年末总人口、经济密度、城区面积等因素变化直接加剧了生态系统的承载压力，这与近年来西藏推行“壮大二产”的经济发展导向存在一定的阶段性矛盾。如何协同工业发展与生态保护成为关键命题。在状态维度，土地资源质量不稳定，人均粮食产量下降，反映出生态系统服务功能有所减弱；而在产业结构调整中第三产业占比减少，第一产业与第二产业占比上升，进一步放大了生态环境压力，导致环境状态趋恶。这一现象表明，产业结构的合理性直接影响生态系统的稳定状态。传统产业模式对生态安全的制约作用仍需重视。在响应维度，当年人工造林面积大幅减少，环保治理措施单一导致响应指数虽有上升但年均增幅有限，难以有效对冲压力维度的负面影响；城市生活垃圾无害化处理率、造林总面积等指标与生态安全紧密关联，印证了生态保护修复措施对提升生态安全的关键作用，也凸显了当前响应措施的不足。此外，水资源总量等自然因素作为生态安全的本底支撑，其稳定性直接影响生态系统的抗干扰能力；而政策因素通过引导产业发展、规范人类活动、推动生态治理，在协调各驱动因素关系中发挥着核心调控作用，是实现生态安全提升的重要保障。

对2023—2032年生态安全的预测结果表明，综合指数将持续上升，但生态安全状况仍将长期处于低水平稳定阶段。这一预测结果既印证了当前生态保护政策的有效性，也表明现有治理模式下西藏生态安全等级仍存在较大提升空间。其根本原因在于生态系统的高脆弱性具有不可逆性，短期内难以通过人为干预实现根本性改变；同时，经济发展与生态保护无法完全实现平衡，工业增长、人口聚集与城镇化进程带来的生态压力仍将长期存在，若不优化治理策略，协调统筹发展，生态安全等级将难以实现质的突破。

本研究采用灰色系统预测方法构建生态安全预测模型，契合西藏生态系统数据可得性有限，生态过程复杂且存在不确定性的特征。该方法无需大量样本数据，能够有效处理非线性、模糊性的生态安全演化过程，预测结果客观反映了西藏生态安全的长期发展态势，为政策制定提供了科学依据。同时，本研究以省域尺度为研究范围，聚焦生态系统的整体性与稳定性，弥补了现有研究“小尺度聚焦有余，大尺

度整合不足”的短板,能够更全面地支撑西藏生态安全屏障建设的实践需求。但是,生态安全具有区域差异性,且研究范围存在明显的尺度效应,研究范围越大,区域生态安全状况整体越稳定,差异越小。本研究以西藏生态安全为研究对象,在考虑生态安全的完整性上,选取了在较大尺度范围内分析生态安全,而未能充分揭示市域、县域等小范围区域的生态安全异质性,难以精准识别区域内部的差异化问题与治理重点,这也是未来研究需进一步深化的方向。

4　结 论

(1) 2012—2022年西藏生态安全综合指数呈现整体上升趋势,生态安全状况不断改善,生态环境治理成效显著,但生态安全等级长期处于较低水平,生态系统结构处于低水平的稳定状态。

(2) 西藏生态安全的压力指数持续下降,状态指数和响应指数均呈上升趋势。西藏生态环境状况明显改善,人类活动对生态环境的干扰有所减轻,进而减缓了由此产生的生态环境压力。然而,受限于单一的环保治理措施,生态安全长期处于较低等级,生态系统结构维持低水平稳定,生态安全仍然面临较大的压力威胁,这也是导致生态安全等级较低的主要原因。

(3) 西藏生态安全动态变化与全区第二产业占比、年末总人口、造林总面积、水资源总量和城镇化率有紧密联系。

(4) 2023—2032年西藏生态安全综合指数将持续上升,但生态安全状况仍将在较长时期内处于低水平稳定发展阶段。

5　建 议

为进一步改善西藏生态安全状况,建设生态文明高地,筑牢国家生态安全屏障,推动西藏生态文明建设,提出以下建议。

(1) 优化产业结构,减轻生态压力。①积极推动“工业生态化”转型,发展绿色低碳工业,借助科技手段提高产业附加值,主动引导工业产业向“高端化、生态化、低碳化、可持续化”迈进,降低工业“三废”排放;激活第三产业内生动力,发展生态旅游、文化创意、数字经济等低耗能、高附加值产业,提高第三产业GDP占比,形成“生态优先,绿色发展”的产业格局。②在着力创建高原经济高质量发展先行区的同时,高度重视西藏生态文明建设,培育生态富民产业,将生态保护与农牧民增收相结合,实现经济发展与生态安全的协同推进。③转变经济发展方式,降低经济产值能耗,提高资源利用效率,减轻经济密度提升对生态环境的压力。

(2) 强化生态保护和修复,改善生态状况。①持续开展大规模国土绿化和城市庭院绿化活动,继续实施山体绿化,江河周边及城区段综合治理,水土流失与荒漠化治理等生态工程,提高植被覆盖率;②深入推进“蓝天碧水净土工程”,增施有机肥提升土壤肥力,推广农牧业生物技术防治鼠害和病虫害,稳定土地资源质量与粮食生产能力;③加大重要江河流域生态环境保护与修复力度,严格落实林草生态保护制度,筑牢生态环境本底。

(3) 科学管控国土与人口,降低生态负荷。统筹国土空间体系规划,合理划定“生态、生活、生产”的区域边界,严守生态保护红线,分类实施保护与开发对策,科学规划城市发展用地,避免无序扩张。优化人口布局,引导人口向城镇适度集聚的同时,严控生态敏感区的人口规模,降低生态脆弱区域的人类活动强度。

(4) 健全治理体系,提升响应效能。①建立健全生态建设与保护的法律法规,严格落实国家生态综合补偿、生态环保督察制度,加强政策执行力度;②扩充环保治理手段,加大环保科技投入,提升工业污染治理、城市生活垃圾无害化处理等技术水平,构建精准化、精细化、科学化、多元化的环境治理模式;③加大生态补偿奖补力度,激励地方政府、企业与公众参与生态保护,形成“政府主导,企业主体,社会参与”的环境治理格局。

(5) 提升公众参与,凝聚环保共识。①通过多种渠道普及生态安全知识,提升公众对西藏生态系统独特性与脆弱性的认知水平,增强环保责任意识;②引导公众践行绿色生产生活方式,减少人为活动对生态环境的干扰;③建立公众参与生态保护的监督机制与激励机制,鼓励公众参与生态环保决策、监督生态保护措施落实,形成全社会共同守护生态安全的良好氛围。

参考文献(References)

[1] 习近平.全面推进美丽中国建设加快推进人与自然和谐共生的现代化[N].人民日报,2023-07-19(1).
Xi Jinping. Comprehensively promote the construction of beautiful China and accelerate the modernization of harmonious coexistence between man and nature. [N]. People's Daily, 2023-07-19(1).

[2] 庄贵阳,陈寅岚.“双碳”视域下的生态安全与风险防范[J].贵州社会科学,2024(5):112-118.
Zhuang Guiyang, Chen Yinlan. Ecological safety and risk prevention from the perspective of carbon peak and

carbon neutrality [J]. Guizhou Social Sciences, 2024(5): 112-118.

[3] Pancorbo-Olivera M, Parra-Rondinel F, Torres-Guevara J, et al. Gathering, agriculture, and exchange: An ethnoecological approach to the study of food patterns and feedstuff sources in communities of the central Andes, Peru [J]. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 2024, 20(1):69.

[4] Das B, Bhardwaj P K, Chaudhary S K, et al. Bioeconomy and ethnopharmacology: Translational perspective and sustainability of the bioresources of northeast region of India [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024,330:118203.

[5] Mohammadpour N, Jahanishakib F, Asadolahi Z. Systematic design of habitat services network (HSsN) for updating conservation areas in Iran's arid and semi-arid ecosystems [J]. Ecological Indicators, 2024, 161: 111961.

[6] Entezami E, Mosaddeghi M R, Shirvani M, et al. Interactive effects of Ag nanoparticles/nitrate and plant root systems on quality indicators and aggregate stability of two texturally-different soils [J]. Soil and Tillage Research, 2024,244:106257.

[7] Belarmino E, Cabral H, Garcia A M. Long-term trends in the functional structure of estuarine fish assemblages in a subtropical estuary and its relationships with local environmental variability, man-made changes, and climatic drivers [J]. Marine Environmental Research, 2024,201: 106698.

[8] Velamazán M, Gómez-Martín A, Maestre T, et al. Transhumance in Sierra de Segura (Spain): A resilient traditional grazing system [J]. Small Ruminant Research, 2024,239:107343.

[9] Adarkwah F, Awuni S, Hajek M, et al. Modelling the drivers of land use and land cover change of the great Amanzule wetland ecosystem to inform the development policy of the southwestern oil-rich region of Ghana [J]. Heliyon, 2024,10(17):e36635.

[10] 陕永杰,魏绍康,苗圆,等.基于PSR-TOPSIS模型的"晋陕豫黄河金三角"地区土地生态安全评价[J].生态经济,2022,38(7):205-211.
Shan Yongjie, Wei Shaokang, Miao Yuan, et al. Evaluation of land ecological security in the Yellow River golden triangle of Shanxi, Shaanxi and Henan based on PSR-TOPSIS model [J]. Ecological Economy, 2022, 38(7):205-211.

[11] 王怡然,王雅晖,杨金霖,等.黄河流域森林生态安全等级评价与时空演变分析[J].生态学报,2022,42(6):2112-2121.
Wang Yiran, Wang Yahui, Yang Jinlin, et al. Forest ecological security rating and its spatio-temporal evolution analysis in the Yellow River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(6):2112-2121.

[12] 刘志有,曲秀武,魏冉,等.生态文明视角下的伊犁河谷绿洲土地生态安全评价及障碍因子诊断[J].水土保持通报,2022,42(1):137-143.
Liu Zhiyou, Qu Xiuwu, Wei Ran, et al. Evaluation of land ecological security and diagnosis of obstacle factors for oasis land in Yili River valley from perspective of ecological civilization [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(1):137-143.

[13] 应凌霄,孔令桥,肖燚,等.生态安全及其评价方法研究进展[J].生态学报,2022,42(5):1679-1692.
Ying Lingxiao, Kong Lingqiao, Xiao Yi, et al. The research progress and prospect of ecological security and its assessing approaches [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(5):1679-1692.

[14] 王毅,巫金洪,储诚进,等.中国生态安全屏障体系建设现状、主要问题及对策建议[J].生态学报,2023,43(1):166-175.
Wang Yi, Wu Jinhong, Chu Chengjin, et al. Building an ecological security barrier system in China: Current state, issues and proposed solutions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(1):166-175.

[15] 陈群,刘平辉,朱传民.基于MCR模型的江西省抚州市生态安全格局构建[J].水土保持通报,2022,42(2): 210-218.
Chen Qun, Liu Pinghui, Zhu Chuanmin. Construction of an ecological security structure in Fuzhou City of Jiangxi Provicne based on an MCR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(2):210-218.

[16] 卢国志,庞鑫燕,侯景伟,等.基于PSR模型的石嘴山市生态安全评价与预测[J].安全与环境学报,2023,23(10):3784-3792.
Lu Guozhi, Pang Xinyan, Hou Jingwei, et al. Evaluation and prediction of ecological security in Shizuishan City based on PSR model [J]. Journal of Safety and Environment, 2023,23(10):3784-3792.

[17] 高玉琴,郑航,王子睿,等.基于DSR模型的秦淮河流域防洪能力变化及成因分析[J].水利水电科技进展,2023,43(3):1-8.
Gao Yuqin, Zheng Hang, Wang Zirui, et al. Analysis of flood control capacity changes and causes of Qinhuai River basin based on DSR model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023,43(3): 1-8.

[18] 邵月花,杨调调,谈存峰.基于DPSIR模型的渭河干流甘肃段生态安全评价[J].水土保持通报,2022,42(3): 166-170.
Shao Yuehua, Yang Diaodiao, Tan Cunfeng. Ecological security evaluation of Gansu section of Weihe River

based on DPSIR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(3):166-170.

[19] 王毅勇,周超凡,黄榕,等.基于DPSIR-熵权的陕西省水生态安全评价及障碍诊断分析[J].环境科学,2025,46(7):4335-4348.
Wang Yiyong, Zhou Chaofan, Huang Rong, et al. Evaluation of water ecological security and analysis of barriers in the Shaanxi Province based on DPSIR-entropy weight [J]. Environmental Science, 2025, 46(7):4335-4348.

[20] 李中锋,高婕,钟毅.西藏草地生态安全评价研究:基于生态系统服务价值改进的生态足迹模型[J].干旱区资源与环境,2023,37(4):9-19.
Li Zhongfeng, Gao Jie, Zhong Yi. Assessment on grassland ecological security in Tibet based on ecological footprint model improved by ecosystem services value [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(4):9-19.

[21] 王雪然,万荣荣,潘佩佩.太湖流域生态安全格局构建与调控:基于空间形态学-最小累积阻力模型[J].生态学报,2022,42(5):1968-1980.
Wang Xueran, Wan Rongrong, Pan Peipei. Construction and adjustment of ecological security pattern based on MSPA-MCR model in Taihu Lake basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(5):1968-1980.

[22] 刘少坤,黄荣华,张利国,等.2000—2020年广西边境地区土地生态安全与兴边富民进程的耦合协调关系[J].水土保持通报,2023,43(3):176-184.
Liu Shaokun, Huang Ronghua, Zhang Liguo, et al. Coupling coordination relationship of land ecological security and prosperity process at border areas in Guangxi Zhuang Autonomous Region from 2000 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(3):176-184.

[23] 朱陇强,郭泽呈,肖敏,等.半干旱区县域生态安全格局构建:以临洮县为例[J].生态学报,2022,42(14):5799-5811.
Zhu Longqiang, Guo Zecheng, Xiao Min, et al. Construction of county ecological security pattern in semi-arid area: A case study of Lintao County [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(14):5799-5811.

[24] 吕添贵,邱蓉,赵巧,等.基于DPSIRM模型的长江中游城市群生态安全时空特征及障碍因素[J].水土保持研究,2024,31(2):379-388.
Lü Tiangui, Qiu Rong, Zhao Qiao, et al. Temporal-spatial evaluation of regional ecological security and obstacle diagnosis of the urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River based on DPSIRM model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2):379-388.

[25] 穆学青,郭向阳,明庆忠,等.黄河流域旅游生态安全的动态演变特征及驱动因素[J].地理学报,2022,77(3):714-735.
Mu Xueqing, Guo Xiangyang, Ming Qingzhong, et al. Dynamic evolution characteristics and driving factors of tourism ecological security in the Yellow River basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(3):714-735.

[26] 丹曲,王旭萍.西藏生态文明走在全国前列的成就及建设路径[J].西藏民族大学学报(哲学社会科学版),2023,44(5):93-99.
Dan Qu, Wang Xuping. The glorious achievements and best path to Xizang's ecological civilization construction in the forefront of the nation [J]. Journal of Xizang Minzu University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2023,44(5):93-99.

[27] 2022年西藏自治区生态环境状况公报[N].西藏日报(汉),2023-06-05(2).
Bulletin of ecological environment in Xizang Autonomous Region in 2022 [N]. Tibet Daily (Chinese version),2023-06-05(2).

[28] 张成,黄芳芳,尚国琲.土地生态安全预警系统设计与实现[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(6):931-944.
Zhang Cheng, Huang Fangfang, Shang Guobei. Design and implementation of the land ecological security warning system [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020,28(6):931-944.

[29] 张楠楠,石水莲,李博,等.基于"压力-状态-响应"模型的土地生态安全评价及预测:以沈阳市为例[J].土壤通报,2022,53(1):28-35.
Zhang Nannan, Shi Shuilian, Li Bo, et al. Evaluation and prediction of land ecological security based on PSR model: Take Shenyang as an example [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022,53(1):28-35.