

# 青藏高原城镇化与生态环境交互影响关系分析

冯雨雪<sup>1,2</sup>, 李广东<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院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)

**摘要:** 科学评估青藏高原城镇化与生态环境交互影响的总体状况, 对优化城镇化速度和质量, 修复和提升生态环境状态具有重要意义。在梳理青藏高原城镇化与生态环境交互影响研究进展基础上, 本文尝试构建一套完整的城镇化与生态环境交互影响分析模型体系, 实现从综合评价指数分析、耦合协调度量、耦合类型识别、解耦路径探索到未来趋势预测的全过程解析。以青藏高原及其省域、地级单元多尺度分析对比为手段, 尝试厘清尺度之间的差异性, 识别出问题区域, 并提出针对性的改进措施。研究发现, 青藏高原不同尺度间城镇化综合评价指数呈阶段性上升趋势, 青海的整体城镇化指数高于西藏; 生态环境指数变化趋势不同, 青海呈下降态势, 西藏则趋向平稳, 各地级单元生态环境指数存在分层现象。青藏高原不同尺度城镇化与生态环境耦合协调度总体呈上升趋势, 协调类型由失调衰退类向濒临失调衰退类转变, 最后转为勉强协调发展类, 基本属于城镇化滞后型。城镇化指数与生态环境指数呈现出强脱钩、弱脱钩交互出现的波动态势, 说明不同尺度间存在城镇化与生态环境的负相互作用, 消极城镇化现象突出。通过预测, 青藏高原各地级单元在未来10年内, 系统耦合协调度将稳步上升, 但各地增长速度将存在显著差距。

**关键词:** 城镇化; 生态环境; 耦合协调度; 解耦; 预测; 青藏高原

DOI: 10.11821/dlxb202007005

## 1 引言

生态脆弱地区通常是指在特定空间尺度上生态系统对外部干扰的抵抗力和弹性较弱的地区。其生态脆弱性往往根源于自然本底条件, 如地形、气候和植被结构等, 人类活动的强烈干扰是其生态脆弱性加剧的关键因素。目前国内外学者重点关注: 生态脆弱地区城镇化与生态环境的关系、解耦地区生态脆弱性与贫困发生的关联等热门议题。作为典型高寒脆弱地区, 青藏高原被称为“世界屋脊”“第三极”, 一方面它是“江河源”“生态源”<sup>[1]</sup>, 具有极为特殊的生态环境地位, 据计算, 青藏高原不同生态系统每年生产产品经济价值约为170亿元, 每年水源涵养量达2612亿m<sup>3</sup>, 其经济价值为1744亿元<sup>[2]</sup>; 另一方面, 青藏高原的生态脆弱程度以极重度、中度脆弱为主<sup>[3]</sup>, 其中西藏与青海脆弱度分别为

收稿日期: 2019-05-29; 修订日期: 2020-04-20

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20040400); 国家自然科学基金项目(41971207) [Foundation: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA20040400; National Natural Science Foundation of China, No.41971207]

作者简介: 冯雨雪(1996-), 女, 河南信阳人, 硕士生, 主要从事城镇化与生态环境耦合关系研究。

E-mail: fengyx.18s@igsnr.ac.cn

通讯作者: 李广东(1986-), 男, 山东临沂人, 博士, 副研究员, 主要从事城市地理, 城镇化与生态环境耦合关系研究。

E-mail: ligd@igsnr.ac.cn

0.8329和0.8045,属极强度脆弱区<sup>[4]</sup>。此外,青藏高原环境变化不仅在区域地表过程中具有敏感响应,在长时间尺度和大空间范围上也会影响到整个北半球乃至全球气候环境系统<sup>[5]</sup>。鉴于青藏高原地区的特殊生态地位、生态脆弱性与显著的空间转移效应,加之日益频繁的人类活动,近年来青藏高原人类活动与生态环境的关系得到强烈关注。

国内外学者对此开展了一系列研究,可分为以下3个方面:①关注人类活动(主要是土地利用变化)与全球变暖对青藏高原生态过程的影响。例如,对人类足迹的计算证明,人类足迹逐渐增大,人类活动对青藏高原地区存在严重威胁<sup>[6]</sup>;对青藏高原地区人类活动强度与生态系统服务价值交互关系的研究发现,生态系统服务价值高的地区人类活动强度也更高<sup>[7]</sup>;并在此基础上探寻了人类活动和全球变暖对青藏高原生物化学循环<sup>[8]</sup>、能量循环<sup>[9]</sup>、森林生态系统<sup>[10]</sup>、局部气候<sup>[11]</sup>等的影响。②关注远程人类活动对青藏高原环境变化的影响以及其他地区对青藏高原环境变化的响应。例如,区域大气污染物输入对青藏高原冰川加速消融的影响<sup>[12]</sup>;人类活动引起的青藏高原春季显热通量的减少导致东亚季风减弱<sup>[13]</sup>;青藏高原气候变暖对东亚夏季强降水存在显著影响<sup>[14]</sup>。③对青藏高原环境变化进行人类活动的归因分析,并剖析其影响效应。如不当砍伐使得森林退化,造成严重水土流失,自然灾害频发<sup>[15]</sup>;为追求经济尤其是农业发展,过分追求土地利用经济效益而人为地大面积改变土地覆被类型,影响高原气候变化<sup>[16]</sup>;长期过度放牧导致的草场退化和沙漠化,人类活动密集引起地表温度与降水变化,进而导致高原冻土退化等<sup>[17]</sup>。

目前,青藏高原地区城镇化加速,人口迅速增长,资源的不合理开发利用使高原呈现生态环境退化的趋势<sup>[15]</sup>,加之全球变暖的复合影响,高原气候变化更为不稳定。从维持青藏高原可持续发展的视角,必须实施切实可行的人与自然的协调机制和环境保护政策来缓解严峻的生态退化形势、应对环境威胁<sup>[18]</sup>。其中,在社会经济系统中城镇化这一最不可逆的人类活动对青藏高原生态环境的影响是不可避免的。但对于青藏高原城镇化发展目前仍存在诸多争论,争论的关键点涉及“青藏高原是否需要推进城镇化、根据高原特色选择何种城镇化发展模式、如何协调高原城镇化与生态环境的关系”等科学命题<sup>[19]</sup>。因此,对于该地区城镇化与生态环境耦合状况的研究十分必要。

已有学者针对青藏高原地区城镇化与生态环境耦合协调度在省域层面进行了具体测算。研究表明,1978—2016年青海耦合协调状态呈转好趋势,已逐步向协调状态靠近<sup>[20-22]</sup>,西藏协调度较低,恶化趋势近几年得到遏制<sup>[23-25]</sup>。但是现有研究并未回答清楚青藏高原城镇化与生态环境到底处于何种关系中,城镇化发展对生态环境的影响处于何种阶段、何种程度。在指标选取上,现有研究并未考虑青藏高原生态特殊性,使用的生态环境数据多数来自于统计数据;时间尺度上,只针对历史数据展开研究,没有对未来状况进行预测;研究方法上,仅关注城镇化与生态环境耦合关系,并未对两者解耦关系进行分析。在空间尺度上,没有考虑整体区域尺度与地级行政单元尺度,未关注省级地区间对比。

基于以上分析,本文以青藏高原为研究对象,尝试对青藏高原城镇化与生态环境交互影响进行全面系统的论述,从青藏高原整体、省域和地级行政单元展开多尺度研究,利用距离协调耦合度模型与Tapio解耦模型,从耦合与解耦两个维度研究城镇化与生态环境交互胁迫的复杂关系及其动态演化特征,并利用灰色系统预测方法对青藏高原城镇化与生态环境的未来耦合状况进行预测,以为青藏高原新型城镇化发展以及城镇化与生态环境的均衡协调发展提供参考,也为国内外其他生态脆弱地区城镇化与生态环境关系研究提供思路及方法。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 研究区概况与数据来源

**2.1.1 研究区概况** 青藏高原平均海拔4000 m以上,在全国主体功能区规划中,青藏高原作为生态屏障区划入限制开发区域的重点生态功能区和禁止开发区域。本文研究范围为青藏高原的核心区,包括西藏自治区与青海省,总面积约189.89万km<sup>2</sup>(图1)。

青藏高原城镇化水平处于较低水平,2015年研究区城镇化率为42.0%,低于全国城镇化水平14.10%。区域经济发展水平较低,2015年青海、西藏两省区地区生产总值分别为2417.05亿元和1026.39亿元,在全国GDP总量中所占比重分别为0.33%和0.14%。自20世纪70年代至21世纪初,青藏高原冰川与湿地面积严重缩水,荒漠化土地占其总面积的19.5%,其中最高的重度沙漠化土地增长率达到311.5%,草场退化严重,减少率高达24.3%<sup>[15]</sup>。2011年《青藏高原区域生态建设与环境保护规划(2011—2030)》颁布实施,部分地区生态系统退化趋势得到一定遏制<sup>[26]</sup>。但逐渐好转的生态环境状况并不意味着可以重拾过去城镇化发展的老路子,必须时刻注意高原生态环境状况,制定合理的城镇化策略。

**2.1.2 空间尺度与基础单元** 本文拟从3个空间尺度对青藏高原城镇化与生态环境交互影响关系进行研究,分别为青藏高原整体尺度、省域尺度及地级行政单元尺度。青藏高原层面,研究区域包括青海省与西藏自治区。省域层面包括青海省与西藏自治区两个省级单元。地级行政单元层面,包括青海省与西藏自治区下辖的15个地级行政单元,其中8个地级市、6个自治州以及1个地区。

**2.1.3 数据来源** 本文研究时段为2000—2015年。社会经济数据来自《青海省统计年鉴(2001—2016年)》《西藏统计年鉴(2001—2016年)》《中国统计年鉴(2001—2016年)》。土地覆被数据来自欧洲空间局(ESACCI, <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php>),数据分辨率为300 m×300 m。生态系统服务价值参考谢高地构建的基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值评估方法进行计算<sup>[27]</sup>。植被覆盖度来自美国国家航空航天局(MODIS; <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>)。景观指数根据土地覆被数据,利用Fragstats V4.2计算得到。CO<sub>2</sub>排放量数据参考相关文献进行计算<sup>[28]</sup>。PM<sub>2.5</sub>浓度数据来自达尔豪斯大学大气成分分析组(Atmospheric Composition Analysis Group; [http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page\\_id=140](http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140))。

**2.1.4 研究框架** 本文研究思路如图2所示,本文尝试构建一套完整的城镇化与生态环境交互影响分析模型体系,实现从综合评价指数分析、耦合协调度量、耦合类型识别、解耦路径探索到未来趋势预测的全过程解析,最后根据研究结果,提出政策建议。

### 2.2 城镇化与生态环境综合评价指标体系构建

**2.2.1 城镇化综合评价指标体系** 结合地区实际情况并基于数据可得性,将城镇化分为人口城镇化、经济城镇化、空间城镇化、社会城镇化4个一级指标,采用城镇人口密度、城镇人口占比等10个基础指标构成青藏高原地区城镇化综合评价指标体系。利用熵值法

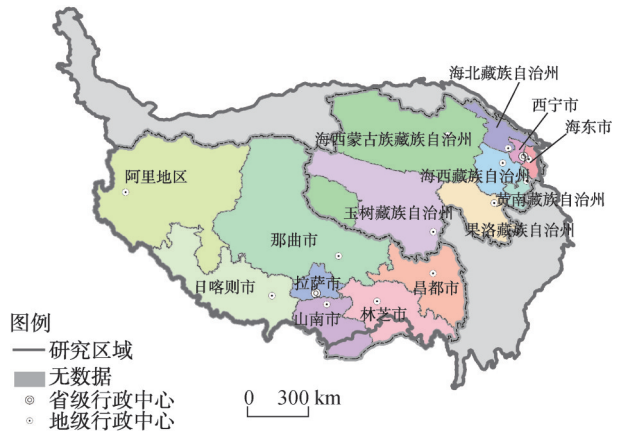


图1 青藏高原研究区范围  
Fig. 1 The study area of Tibetan Plateau

与层次分析法计算各项指标权重，对青藏高原地区城镇化水平进行综合评价（表1）。

**2.2.2 生态环境综合评价指标体系** 青藏高原地区生态环境具有特殊性，在构建评价指标体系衡量其生态环境状况时需考虑高原特殊条件，如冰川、未利用地、草场等特殊类型土地的变化状况。本文将生态环境质量分为生态系统结构、生态环境功能、生态环境压力以及生态环境格局4个一级指标，以及景观破碎度（Patch Density, PD）、景观多样性（Shannon's Diversity Index, SHDI）、景观连通性（Connectance Index, CONNECT）、森林覆盖率等13个基础指标，共同构成青藏高原生态环境综合评价指标体系（表2）。

**2.2.3 指标预处理及权重求解** 为消除各项指标的数量级及量纲差异对计算结果的影响，对指标进行标准化处理，以降低随机因素干扰。其中生态环境不同的指标可分为正效应指标与负效应指标，分别采用不同的标准化处理公式<sup>[29]</sup>：

$$A_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})}, & X_{ij} \text{ 为正效应指标} \\ \frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})}, & X_{ij} \text{ 为负效应指标} \end{cases} \quad (1)$$

式中：*i*为指标序号；*j*为年份；*X<sub>ij</sub>*为实际计算值；max(*X<sub>ij</sub>*)和min(*X<sub>ij</sub>*)分别为第*i*指标的最大值和最小值经过标准化处理后，所有指标值均越大越优。

指标权重反映指标相对重要程度，对评价结果的准确性和可靠性有重要影响，本文将主客观赋权法相结合，主观权重采用层次分析法，邀请专家对综合评价指标体系中各项指标进行打分。客观权重采用熵值法，最后利用最小信息熵原理对主客观权重进行综合，缩小偏差。*w<sub>1i</sub>*、*w<sub>2i</sub>*分别为熵值法与层次分析法计算所的权重。具体计算公式为<sup>[29]</sup>：

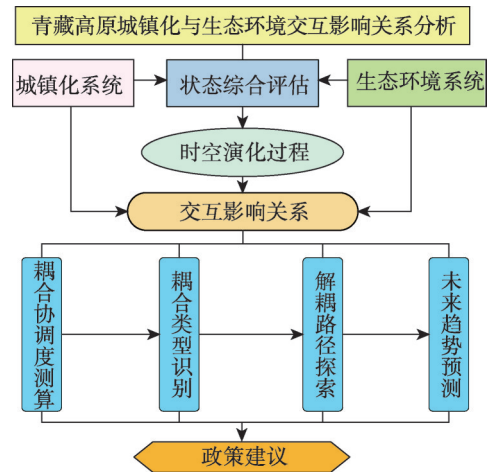


图2 青藏高原城镇化与生态环境交互影响关系分析研究框架

Fig. 2 Framework of research on the interaction between urbanization and eco-environment in the Tibetan Plateau

表1 城镇化综合评价指标及权重

Tab. 1 Comprehensive evaluation indexes of urbanization and index weight

	熵值法	层次分析	综合权重	指标层	熵值法	层次分析	综合权重
	权重	法权重			权重	法权重	
人口城镇化	0.1991	0.1238	0.1582	城镇人口密度(人/km <sup>2</sup> )	0.5461	0.3333	0.4130
				城镇人口占比(%)	0.5518	0.6667	0.5870
经济城镇化	0.4027	0.3875	0.3981	人均地区生产总值(万元)	0.2689	0.4704	0.3558
				第二、三产值占GDP比重(%)	0.2725	0.2797	0.2762
				财政收入占地区生产总值比重(%)	0.2721	0.1142	0.1764
				全社会固定资产投资总额(万元)	0.2699	0.1358	0.1916
空间城镇化	0.1050	0.1011	0.1038	每万人城市建成区面积(km <sup>2</sup> )	1.0000	1.0000	1.0000
社会城镇化	0.2996	0.3875	0.3398	城镇居民人均可支配收入(元)	0.3695	0.5499	0.4369
				每万人拥有卫生机构数量(个)	0.3797	0.2098	0.2735
				社会消费品零售总额(万元)	0.3719	0.2402	0.2896

表2 生态环境综合评价指标及权重

Tab. 2 Comprehensive evaluation indexes of eco-environment and index weight

准则层	熵值法 权重	层次分析 法权重	综合权重	指标层	熵值法 权重	层次分析 法权重	综合权重
生态系统 结构	0.3709	0.3145	0.3464	草地覆盖率(%)(+)	0.2182	0.2234	0.2209
				湿地占比(%)(+)	0.2019	0.1829	0.1923
				森林覆盖率(%)(+)	0.1677	0.1688	0.1684
				冰川占比(%)(+)	0.1968	0.1829	0.1898
				植被覆盖指数(+)	0.2155	0.2420	0.2285
生态环境 功能	0.1480	0.2845	0.2081	生态空间占比(%)(+)	0.5412	0.4013	0.4707
				生态系统服务价值(元)(+)	0.4588	0.5987	0.5293
生态环境 压力	0.2470	0.2005	0.2257	PM <sub>2.5</sub> 平均浓度(μg)(-)	0.3317	0.2702	0.3001
				CO <sub>2</sub> 排放量(万吨)(-)	0.3339	0.3528	0.3440
				生物栖息地侵占量(hm <sup>2</sup> )(-)	0.3345	0.3771	0.3560
生态环境 格局	0.2341	0.2005	0.2197	景观破碎度(-)	0.3446	0.3548	0.3502
				景观连通性(+)	0.3166	0.3548	0.3356
				景观多样性(+)	0.3388	0.2905	0.3142

注：“+”代表正效应指标；“-”表示负效应指标。

$$w_i = \frac{(w_{1i} \times w_{2i})^{\frac{1}{2}}}{\sum_{i=1}^n (w_{1i} \times w_{2i})^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

**2.2.4 城镇化与生态环境系统综合评价求解** 采用系统指数评估模型,运用线性加权方法先计算人口、经济、社会、空间城镇化子系统,生态系统结构、生态环境功能、生态环境压力、生态环境格局子系统评价指数值,进而得出城镇化和生态环境综合评价值,计算公式为<sup>[29]</sup>:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i \times x_i, \quad g(y) = \sum_{j=1}^m w_j \times y_j \quad (3)$$

$$F(x) = \sum_{i=1}^n W_i \times f(x), \quad G(y) = \sum_{j=1}^m W_j \times g(y) \quad (4)$$

式中:  $f(x)$ 、 $g(y)$ 分别表示城镇化与生态环境子系统综合评价值;  $F(x)$ 、 $G(y)$ 分别表示城镇化与生态环境系统的综合评价值;  $x_i$ 、 $y_j$ 分别表示城镇化与生态环境评价指标标准化数值;  $w_i$ 、 $w_j$ 分别表示城镇化与生态环境评价指标综合权重;  $W_i$ 、 $W_j$ 分别表示城镇化与生态环境子系统权重。

### 2.3 城镇化与生态环境耦合协调度测算模型

耦合协调度模型能够定量评价城镇化系统与生态环境系统交互耦合的协调程度,可以更为细致清楚地了解发展过程中的问题。本文运用基于距离协调度的系统协调发展度模型,此模型在协调度计算上“引入欧式距离公式,度量系统实际状态与理想状态的距离,即评价变量的实际值与理想值的偏差<sup>[30]</sup>”,强调理想状态的界定,不采用固定变量以及理想值,减少主观因素干预。

假定城镇化与生态环境系统的理想协调状态为  $A'$ , 当系统处于理想协调时,两系统相互拉动并处于相同发展状态,根据理想协调状态,以两系统发展度为评价变量,则理想值等于另一系统发展度的实际值。以  $x_{1t}$ 、 $x'_{1t}$ 和  $x_{2t}$ 、 $x'_{2t}$ 代表城镇化系统和生态环境系统第  $t$ 年发展度实际值和理想值,则有  $(x'_{1t}, x'_{2t})^T = (x_{2t}, x_{1t})^T$ 。距离协调度计算公式为<sup>[30]</sup>:

$$c_t = \left( \frac{1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^2 (x_{it} - x'_{it})^2}{\sum_{i=1}^2 s_i^2}}}{\sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^2 (x_{it} - x'_{it})^2}{\sum_{i=1}^2 s_i^2}}} \right)^k \quad (5)$$

假定两系统同等重要，取  $s_1 = s_2 = 1$ ， $k$  为调节系数，一般取  $k = 2$ ，则城镇化与生态环境系统距离协调度为<sup>[30]</sup>：

$$c_t = \left( \sqrt{1 - \frac{(x_{1t} - x'_{2t}) - (x_{2t} - x'_{1t})}{2}} \right)^2 = 1 - |(x_{1t} - x_{2t})| \quad (6)$$

式中： $c_t$  表示第  $t$  年的系统协调度， $c_t$  值越大，说明系统实际协调状态与理想协调状态距离更近，城镇化与生态环境系统的协调水平越高。

系统协调发展度反映系统协调发展水平，基于距离协调度的系统协调发展度其计算公式为<sup>[30]</sup>：

$$d_t = D(x_t, c_t) = \sqrt{x_t c_t} \quad (7)$$

式中： $d_t$  表示第  $t$  年的系统协调发展度， $d_t$  值越高，系统协调发展水平越高。

参照已有研究，将城镇化与生态环境系统的协调发展状况分为协调发展类、过渡类及失调类 3 大类（表 3），在过渡类中根据具体数值细化为勉强协调发展类与濒临失调衰退类，共计 4 个亚类，依据城镇化与生态环境发展度水平差异以及研究区域实际情况，进一步划分为 12 种基本类型<sup>[31]</sup>。

表 3 城镇化与生态环境协调发展类型分类标准

Tab. 3 Classification standards of coordinated development in urbanization and eco-environment

大类	协调发展度	亚类	$F(x)$ 与 $G(y)$ 对比关系	基本类型
协调发展类	0.60~1.00	协调发展类 (IV)	$F(x) - G(y) > 0.1$	协调发展类生态环境滞后型(IV-1)
			$ F(x) - G(y)  \leq 0.1$	协调发展类城镇化生态环境同步型(IV-2)
			$G(y) - F(x) > 0.1$	协调发展类城镇化滞后型(IV-3)
过渡类	0.50~0.59	勉强协调发展类(III)	$F(x) - G(y) > 0.1$	勉强协调发展类生态环境滞后型(III-1)
			$ F(x) - G(y)  \leq 0.1$	勉强协调发展类城镇化生态环境同步型(III-2)
	0.40~0.49	濒临失调衰退类(II)	$G(y) - F(x) > 0.1$	勉强协调发展类城镇化滞后型(III-3)
			$F(x) - G(y) > 0.1$	濒临失调衰退类生态环境滞后型(II-1)
失调类	0.00~0.39	失调衰退类 (I)	$ F(x) - G(y)  \leq 0.1$	濒临失调衰退类城镇化生态环境共损型(II-2)
			$G(y) - F(x) > 0.1$	濒临失调衰退类城镇化滞后型(II-3)
			$F(x) - G(y) > 0.1$	失调衰退类生态环境滞后型(I-1)
			$ F(x) - G(y)  \leq 0.1$	失调衰退类城镇化生态环境共损型(I-2)
			$G(y) - F(x) > 0.1$	失调衰退类城镇化滞后型(I-3)

## 2.4 城镇化与生态环境交互影响关系脱钩模型构建

“脱钩”原本为物理学概念，指两个或多个物理量之间最初的相互关系降低或不复存在。经济合作与发展组织（OECD）将脱钩理论概念引入环境经济领域，并广泛运用于刻画经济增长与环境污染之间的关系。城镇化与生态环境交互影响关系与前者类似，目前已有研究采用 Tapio 模型研究城镇化与资源环境两者关系<sup>[32]</sup>。Tapio 脱钩模型聚焦于增长率的相对大小，有利于刻画研究对象相对发展情况，本文采用此方法，与上文提到的基于距离协调度的系统协调发展度评价方法联合，能够更进一步刻画各协调发展阶段内部城镇化与生态环境之间相互影响的复杂关系。脱钩指数（ $DI_t$ ）具体计算公式为：

$$DI_t = \frac{(E_t - E_{t-1})/E_{t-1}}{(U_t - U_{t-1})/U_{t-1}} \quad (8)$$

式中： $E_t$ 、 $E_{t-1}$  分别为第  $t$  年和第  $t-1$  年的生态环境水平指数； $U_t$ 、 $U_{t-1}$  分别为第  $t$  年和第  $t-1$  年的城镇化水平指数。以 0、0.8、1.2 为临界值并参考生态环境指数增长率与城镇化指数

增长率正负情况, Tapio模型将脱钩细分为衰退脱钩、强脱钩、弱脱钩、扩张连接、衰退连接、扩张负脱钩、强负脱钩、弱负脱钩8类<sup>[33]</sup>(表4)。

表4 脱钩状态类型划分标准<sup>[34]</sup>  
Tab. 4 Classification standards of decoupling states

状态		生态环境指数增长率	城镇化指数增长率	脱钩指数 $DI$
脱钩	衰退脱钩	-	-	$DI \geq 1.2$
	强脱钩	-	+	$DI < 0$
	弱脱钩	+	+	$0 \leq DI < 0.8$
连接	扩张连接	+	+	$0.8 \leq DI < 1.2$
	衰退连接	-	-	$0.8 \leq DI < 1.2$
负脱钩	扩张负脱钩	+	+	$DI \geq 1.2$
	强负脱钩	+	-	$DI < 0$
	弱负脱钩	-	-	$0 \leq DI < 0.8$

## 2.5 未来演化趋势灰色预测模型

灰色系统理论以“部分信息已知, 部分信息未知”的“小样本”“贫信息”不确定性系统为研究对象, 通过对部分已知信息的生成、开发, 提取有价值的信息, 实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控。本文采用灰色预测GM(1, 1)模型对耦合协调度随着时间演化的情况做定量预测, 得到该指标的未来数值<sup>[35]</sup>。

首先, 设原始时间序列为:

$$A_0 = [a_0(1) - \delta/\beta]_e^{-\beta k} + \delta/\beta, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

通过对  $A_0$  做累加处理生成序列:

$$A_1 = [a_1(1), a_1(2), \dots, a_1(n)] \quad (10)$$

微分方程计算:

$$\frac{dA_1}{dt} + \beta A_1 = \delta \quad (11)$$

式中:  $\beta$  为发展灰度;  $\delta$  为内生控制灰数。设待估参数向量并利用最小二乘法求解, 最终得到预测模型为:

$$a_1^T \hat{A}_1(k+1) = [a_0(1) - \delta/\beta]_e^{-\beta k} + \delta/\beta, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

最后, 对预测模型进行精度检验, 求解相对精度与后检验误差检验比值, 模型通过检验则可求得合理且有效的预测值。

## 3 结果分析

### 3.1 城镇化与生态环境综合评价指数

#### 3.1.1 城镇化综合评价指数时空演化

(1) 青藏高原及省域尺度。2000—2015年间青藏高原、青海、西藏的城镇化综合指数总体表现为起点低、平稳上升的发展趋势(图3)。其中, 青海城镇化评价指数始终最高, 青藏高原数值介于青海与西藏之间。其主要原因是, 青海近年来抓住西部大开发战略的发展机遇, 开发盐湖和油气等特色资源, 优势产业得到发展, 城镇化建设进入加速阶段。当前青藏高原城镇化水平较高的城市多位于青海, 如西宁市、格尔木市、德令哈市。而西藏起点值低, 生态环境较青海更为脆弱, 对城镇化约束更强, 且交通不便, 对外联系弱, 城镇化建设效率较低, 一直落后于青海。

(2) 地级尺度。各地级单元城镇化评价指数呈明显的上升趋势(图4)。2015年评价指数前3位为海西州、西宁市与拉萨市。其中,海西州与西宁市始终处于领先地位。究其原因可以概括为两方面:① 两者的城镇化发展基础良好。海西州的城镇化发展属于工业带动城镇化类型,以沿湖资源综合利用为核心,构建了完备的工业产业体系;西宁市作为省会城市,拥有区位优势,通过西宁(国家级)经济技术开发区建设,有效带动了自身的城镇化发展。② 两者城镇化率处于60%~70%左右,高于全国平均水平,进入城镇化发展中后期,城镇化发展质量逐步提升。海西州与西宁市人均GDP与全社会固定资产投资以及

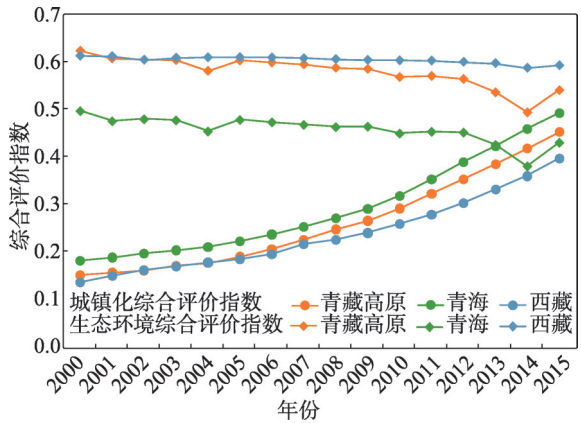


图3 2000—2015年青藏高原、青海省、西藏自治区综合评价指数时间变化

Fig. 3 Temporal evolution of comprehensive evaluation index of the Tibetan Plateau, Qinghai and Tibet from 2000 to 2015

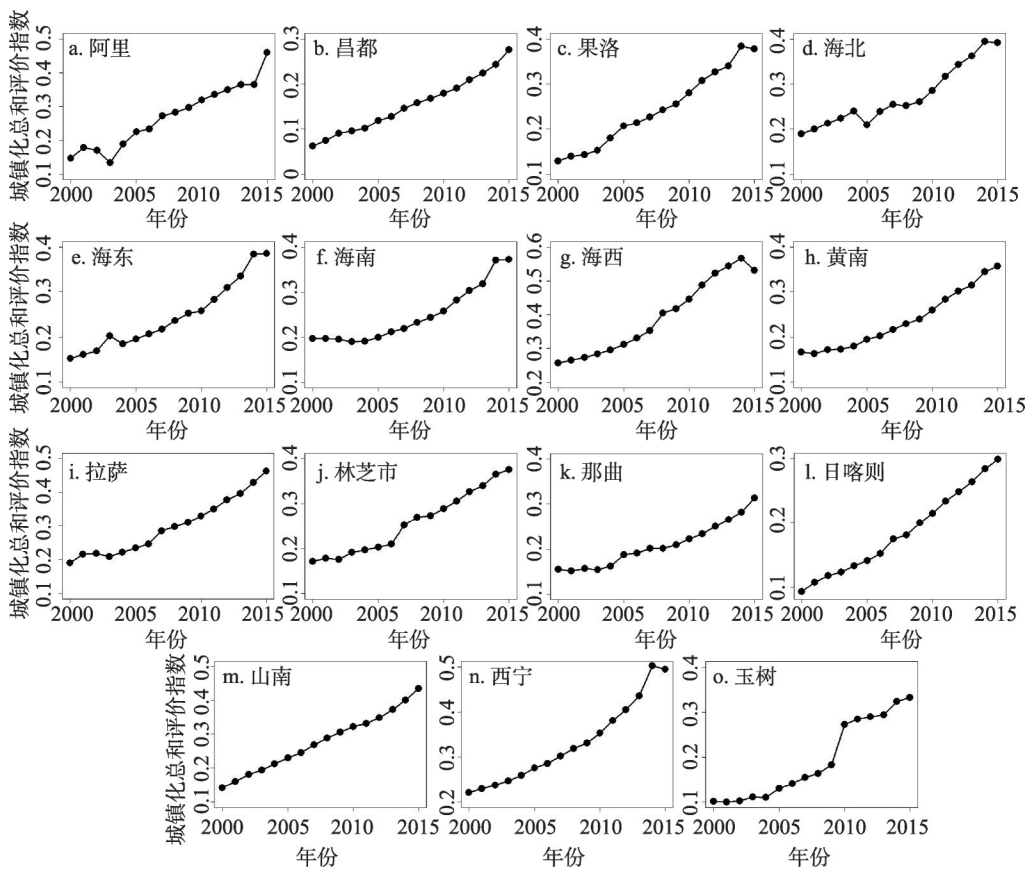


图4 2000—2015年青藏高原各地级市城镇化综合评价指数时间变化

Fig. 4 Temporal evolution of comprehensive evaluation index of urbanization for each prefecture-level city in the Tibetan Plateau from 2000 to 2015



社会城镇化等指标均处于领先地位,表明两者的城市经济发展能力、城市基础设施建设能力和社会公共服务设施建设水平均较高。与之相反,昌都市城镇化水平一直处于较低水平,增幅也较小。究其原因,昌都市经济发展主要依靠国家和自治区投资带动,全市社会消费品零售总额低,消费拉动经济能力有限,产业发展水平低,工业发展处于起步阶段,旅游业虽有所发展,但落后的基础设施建设与服务能力使得旅游业暂时还不能成为城镇化发展的主要支撑。昌都市需要确立未来城镇化建设方向,选择合适的主导产业,规划合理有效的城市发展路径。

选取2000年、2005年、2010年和2015年青藏高原城镇化评价指数进行空间可视化分析,为体现不同时间尺度下城镇化评价指数的标准性和可比性,依据数理倍数关系将当年各地级单元城镇化指数平均值的0.5倍、1.0倍、1.5倍作为划分标准。城镇化类型相应区分为高城镇化区(>1.5倍),偏高城镇化区(1.0~1.5倍)、中城镇化区(0.5~1.0倍)、低城镇化区( $\leq 0.5$ 倍)4种类型。

图5显示青藏高原高城镇化区与中城镇化区空间格局相对稳定,主要沿青藏铁路分布,低城镇化区基本不存在。其中,西宁市、拉萨市2000—2015年均均为偏高城镇化区,海西州2000—2010年为高城镇化区,2015年转变为偏高城镇化区。拉萨市、西宁市和海西州作为青藏高原城镇化水平较高地区,组成青藏高原3个城镇化核心区,带动周边城市发展。这种带动作用体现在海北州与山南市的发展上,两者都受到核心区的辐射而发展为偏高城镇化区。其中,海北州紧邻海西州与西宁市,能够直接与海西州和西宁市开展合作,联系更为紧密,进而加速自身发展。山南市紧邻拉萨市,与拉萨市产业结构互补,借助拉萨带动自身城镇化发展。这也表明拉萨山南一体化发展战略切实可行,未来可以加深两市合作,进一步增大辐射区域范围。此外,阿里地区也属于偏高城镇化区,但阿里地区地广人稀,经济总量不高,仍旧依靠其他地区援助以及中央财政转移支付支

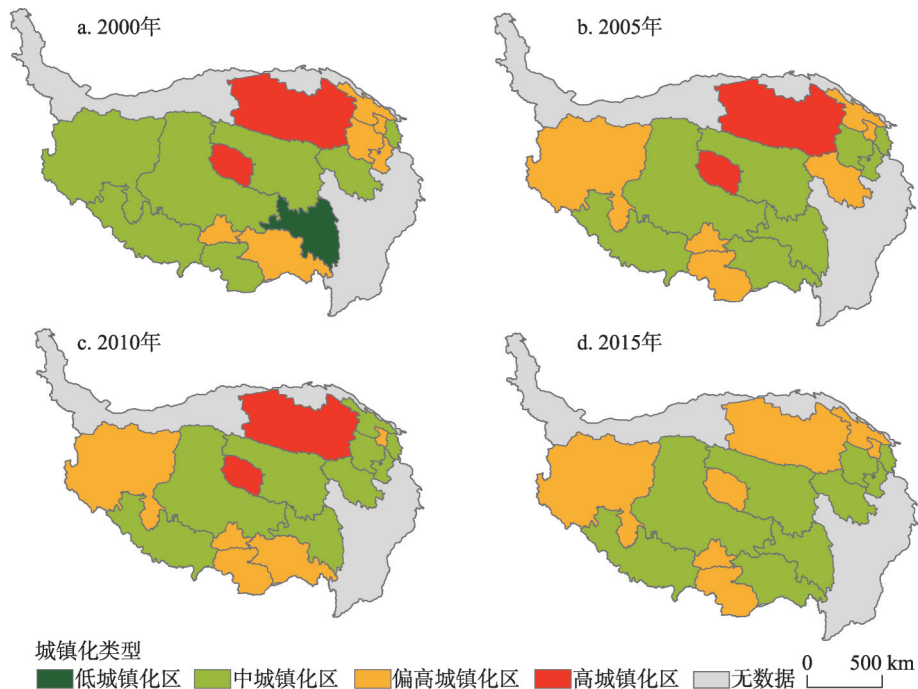


图5 2000—2015年青藏高原各地级市城镇化综合评价指数空间演变

Fig. 5 Spatial evolution of evaluation index of urbanization for each prefecture-level city in the Tibetan Plateau from 2000 to 2015

撑地区发展,在指标体系中的人均指标上占有优势,其实际城镇化水平与同属偏高城镇化区的拉萨市、山南市仍有差距。林芝市在中城镇化区和偏高城镇化区之间变动,究其原因,其城镇化主要依靠生态旅游产业带动,但基础设施建设薄弱、国际旅游市场开拓受限,旅游业发展遭遇瓶颈,城镇化发展动力不足。海南州、黄南州、果洛州3个地级单元由偏高城镇化区下降至中城镇化区,这3个地区都位于农牧区,土地利用类型以草地为主,三者产业结构均以农牧业为主,面临畜牧业生产经济方式粗放,产业链条短,农畜产品附加值低的问题,城镇化发展缺乏有效动力。那曲市、日喀则市、昌都市、玉树州、海东市5个地级单元长期属于中城镇化区,城镇化评价指数与整体平均值相近,未来还需要充分利用本地区资源,合理定位城市功能,寻求更为有效的城镇化发展道路。

### 3.1.2 生态环境综合评价指数时空演化过程

(1) 青藏高原及省域尺度。青藏高原与青海整体生态环境指数下降,2014年为最低点,2015年小幅度回升;西藏基本保持平稳,略有下降(图3)。表明青藏高原生态环境水平波动情况主要受青海影响。青海省2014年PM<sub>2.5</sub>浓度大幅增加,引起生态环境评价指数大幅下降,2015年出现小幅回升。这一变化趋势表明青海已经意识到其粗放型城镇化发展模式对于生态环境的负面影响,开始对高耗能工业企业污染进行治理,生态建设有所进步,但仍旧慢于城镇化发展。

(2) 地级尺度。各地级单元发展趋势表现出明显的阶段性和异质性和(图6),2000—2013年为平稳阶段,2013—2015年出现波动。异质性一方面表现在生态环境综合评价指数数值分层上,林芝市最高,海东市、海西州、西宁市最低。另一方面表现在波动趋势的分化上,海西州、山南市、玉树州、林芝市、拉萨市5个地市(州)呈现下降趋势,而黄南州与西宁市呈上升趋势,其余地市(州)较为平稳。其中,黄南州与西宁市均在生态结构子系统方面增长幅度最高。黄南州得益于景观多样性指数上升,西宁市得益于景观破碎度指数下降,表明两市(州)开始重视土地资源综合利用,提升区域景观多样性,降低破碎斑块数量,既保护生态环境,也能提升城镇化建设效率。

为直观显示青藏高原生态环境水平时空演变格局,对青藏高原生态环境评价指数进行空间可视化分析。依据各地级单元实际生态环境综合评价指数数值,为最大程度凸显其差异,以0.4、0.5、0.6为临界值,将生态环境类型区分为优生态环境区(>0.6),偏优生态环境区(0.5~0.6)、中生态环境区(0.4~0.5)、劣生态环境区(≤0.4)4种类型。

图7显示生态环境综合评价指数空间格局相对稳定。低值区主要分布于青海,高值区主要分布在西藏。2000—2005年生态环境空间格局维持稳定。西藏更为均衡,整体处于偏优水平,林芝市为优生态环境区,阿里地区为中生态环境区。青海的西宁市、海东市、海西州2000年、2005年、2015年均均为劣生态环境区,三者也是城镇化核心区,同时也是青海主要工业城市,与之相邻的非工业地区海南州也长期处于中生态环境区,表明青海依靠工业带动城镇化发展的模式负效应显著,并影响到周边地区。2010年西宁和海西转变为中生态环境区。2015年西藏拉萨市由偏优生态环境区转变为中生态环境区,拉萨作为西藏中心,城镇化工作不断推进,但粗放式的经济增长方式使其资源利用效率低、环境污染严重,生态环境评价指数下降。

## 3.2 不同尺度城镇化与生态环境耦合协调度变化

### 3.2.1 青藏高原及省域尺度

如图8所示,2000—2015年间青藏高原、西藏城镇化与生态环境耦合协调度呈上升趋势,两者数值相近。青海呈现上升—下降—上升的趋势。表明青藏高原整体发展尚处于生态环境承受范围之内,总体上城镇化与生态环境协调发展。但内部城镇化与生态环境协调发展水平不均衡,西藏城镇化水平低,城镇化发展还没有

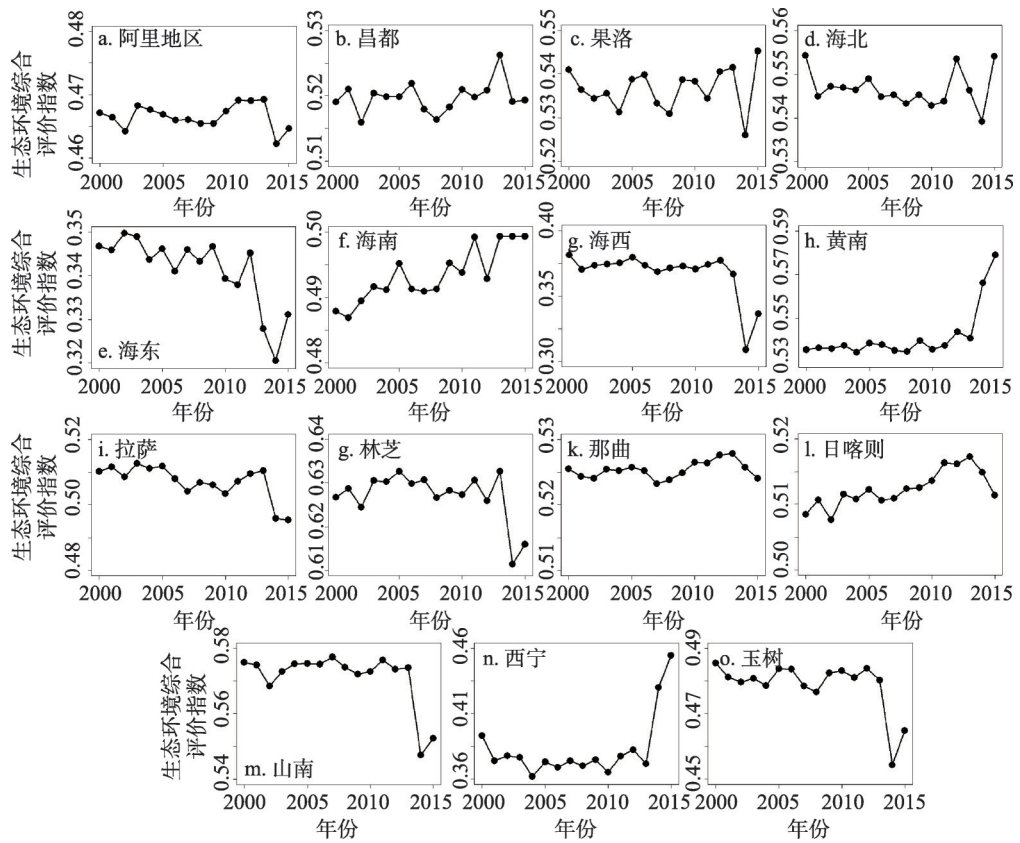
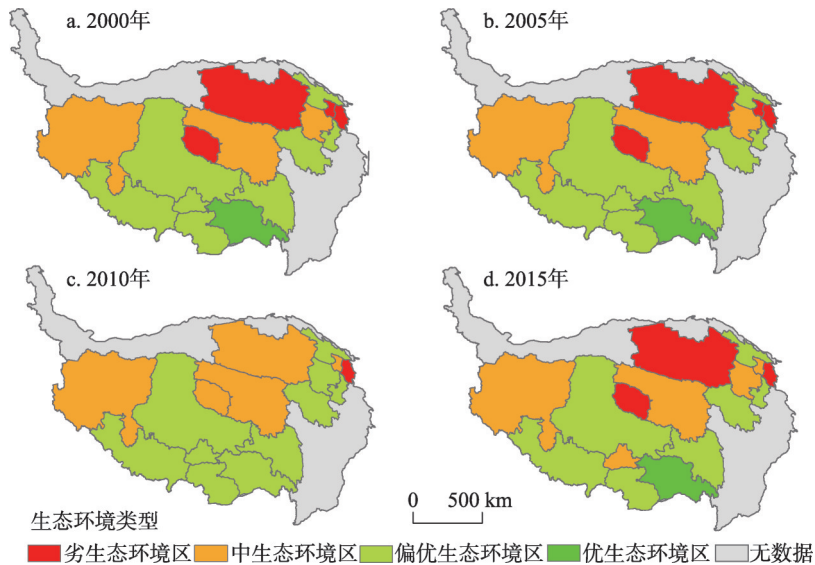


图6 2000—2015年青藏高原各地级市生态环境综合评价指数时间变化

Fig. 6 Temporal evolution of evaluation index of eco-environment for each prefecture-level city in the Tibetan Plateau from 2000 to 2015



生态环境类型  
劣生态环境区 中生态环境区 偏优生态环境区 优生态环境区 无数据

图7 2000—2015年青藏高原各地级市生态环境综合评价指数空间演变

Fig. 7 Spatial evolution of evaluation index of eco-environment for each prefecture-level city in the Tibetan Plateau from 2000 to 2015

达到生态承载力阈值，耦合度较低。青海强调城镇化发展，生态环境发展滞后，耦合协调度先上升后下降，自2011年《青藏高原区域生态建设与环境保护规划（2011—2030）》颁布实施后，青海省开展了一系列生态环境保护工程，耦合协调度又有所回升。

**3.2.2 地级尺度** 如图9所示，青藏高原各地级单元城镇化与生态环境系统协调度异质性明显，多数地市（州）属于稳步上升状态，青海各地市（州）波动更为剧烈。究其原因，青藏高原多数地市（州）生态环境水平起点值高，且多年保持平稳，同时其城镇化水平不断增长，耦合度随之上升。海东市、海西州、拉萨市呈现出较为特殊的上升一下降趋势，说明3市（州）城镇化发展已经濒临生态环境承载力阈值，当前发展模式存在问题。其中，海西州属于工业带动城镇化发展模式，其结构性污染较为突出，工业污染源治理距离全面达标仍有差距，局部地区污染源治理后环境

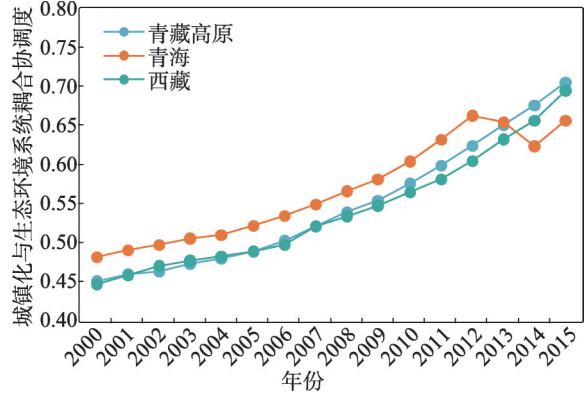


图8 2000—2015年青藏高原、青海省、西藏自治区耦合协调度时间变化

Fig. 8 Temporal evolution of coupling coordination degree in the Tibetan Plateau, Qinghai and Tibet from 2000 to 2015

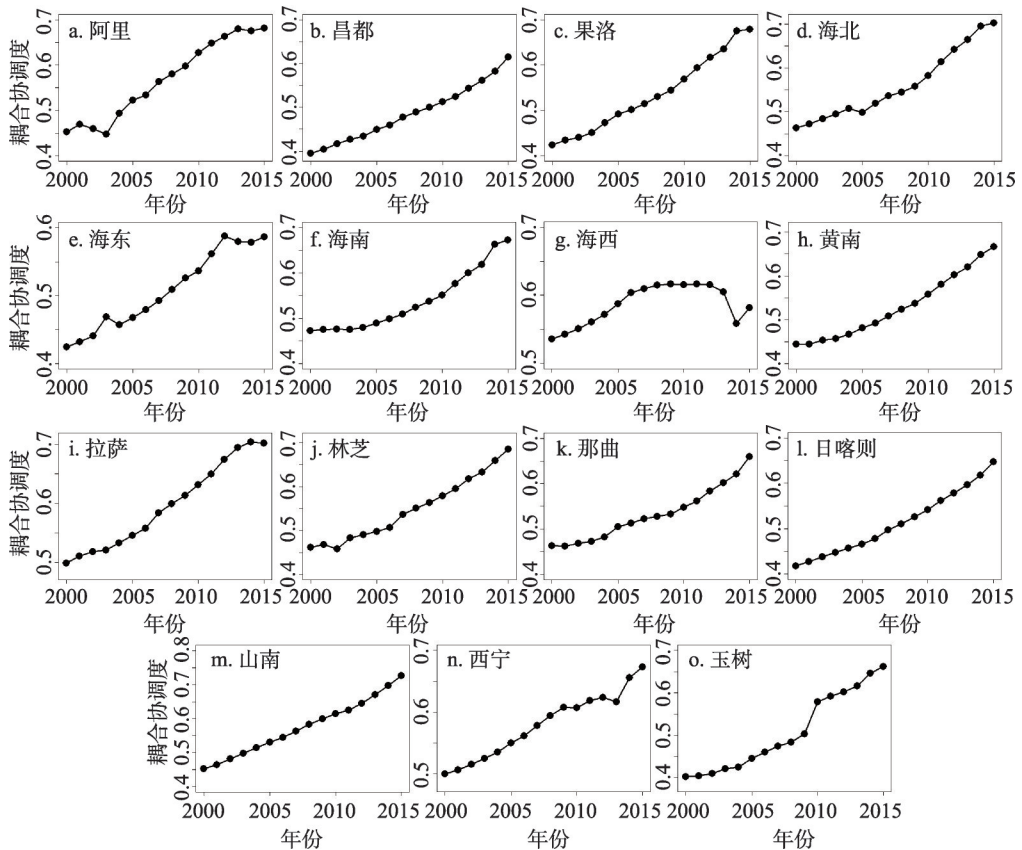


图9 2000—2015年青藏高原各地级市耦合协调度时间变化

Fig. 9 Temporal evolution of coupling coordination degree for each prefecture-level city in the Tibetan Plateau from 2000 to 2015

质量得以改善,但环境污染总体趋势没有得到根本扭转,城镇化与生态环境发展趋势相背离,耦合度下降。海东市生态环境评价指数本身处于较低水平,存在干旱、水土流失、植被稀疏等诸多生态问题,生态环境脆弱性高,承载力弱,城镇化发展受限,必须采取更有针对性的措施,在保护当地生态环境基础上利用资源优势走特色城镇化道路。拉萨市作为西藏省会,城镇化建设起步早,速度快,但主体功能区提出后,西藏自治区内重点生态功能区得到重点有效保护,城镇化建设影响有限,故耦合下降幅度较小。

### 3.3 不同尺度城镇化与生态环境交互影响类型识别

**3.3.1 青藏高原及省域尺度** 青藏高原城镇化与生态环境总体协调程度不断提高,但长期处于城镇化发展滞后阶段,2014年实现突破转变为同步型(表5)。青海与西藏存在较大差异,青海比西藏更早进入协调发展阶段,逐步由城镇化滞后型转变为生态环境滞后型,西藏一直属于城镇化滞后型。可以看出青藏高原城镇化生态环境同步型是青海与西藏平均之后的结果。其中青海生态环境水平不断下降,城镇化指数追赶并逐渐超过生态环境指数,两者由解耦至耦合,未来有可能转向解耦。西藏生态环境水平变化趋势平稳,其城镇化发展尚未达到生态环境承载力阈值,未来耦合协调的关键仍在城镇化上。主要原因是西藏由于交通不便利,对外经济联系弱,城镇化发展缓慢。其大部分属于青藏高原生态屏障区和禁止开发区,生态环境状况受到重点关注,城镇化发展受到一定限制。

表5 青藏高原、青海省、西藏自治区城镇化与生态环境耦合类型结果

Tab. 5 Coupling types of urbanization and eco-environment in the Tibetan Plateau, Qinghai and Tibet

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
青藏高原	II-3	II-3	II-3	II-3	II-3	II-3	III-3	III-3
青海省	II-3	II-3	II-3	III-3	III-3	III-3	III-3	III-3
西藏自治区	II-3	II-3	II-3	II-3	II-3	II-3	II-3	III-3
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
青藏高原	III-3	III-3	III-3	III-3	IV-3	IV-3	IV-2	IV-2
青海省	III-3	III-3	IV-2	IV-2	IV-2	IV-2	IV-1	IV-1
西藏自治区	III-3	III-3	III-3	III-3	IV-3	IV-3	IV-3	IV-3

**3.3.2 地级尺度** 如图10所示,青藏高原15个地级单元城镇化与生态环境耦合协调类型整体趋势良好,多数城市由过渡类转变为协调发展类,但基本类型上有所差异。其中,拉萨市和西宁市属生态滞后型;黄南州、林芝市属城镇化滞后型;其余为城镇化生态同步型。除黄南州与林芝市目前城镇化发展尚有空间外,拉萨市与西宁市生态环境开始滞后,生态环境问题开始显现,其余地市(州)处于同步阶段,城镇化与生态环境发展状态相近,但这种同步状态是否为良性有待进一步研究。此外,2015年仅昌都市、海东市、海西州仍处于勉强协调发展类。其中,昌都市为城镇化滞后型,生态环境良好,但区域城镇化发展水平增长缓慢,以致耦合度较低。海西州与海东市为生态滞后型,海西州2006年就转为协调发展类,后又下降至勉强协调发展类,且从城镇化生态环境同步型转变为生态滞后型,生态环境在其城镇化发展过程中受到较大影响,说明其2006—2015年的发展是不协调的。海东市位于黄土高原向青藏高原过渡的镶嵌地带,水土流失较为严重,其生态环境评价指数一直处于较低水平,直接制约了区域城镇化发展。

### 3.4 不同尺度城镇化与生态环境交互影响关系解耦路径

**3.4.1 青藏高原及省域尺度** 青藏高原2000—2015年城镇化指数与生态环境指数脱钩状态主要呈现出强脱钩、弱脱钩和扩张连接3种状态,强弱脱钩动态变化,2015年为扩张连接(表6)。青藏高原城镇化与生态环境耦合协调度虽保持增长,但其实质是生态环境指数不断下降、城镇化指数不断上升的结果。这一关系在2000—2014年一直不断强化。

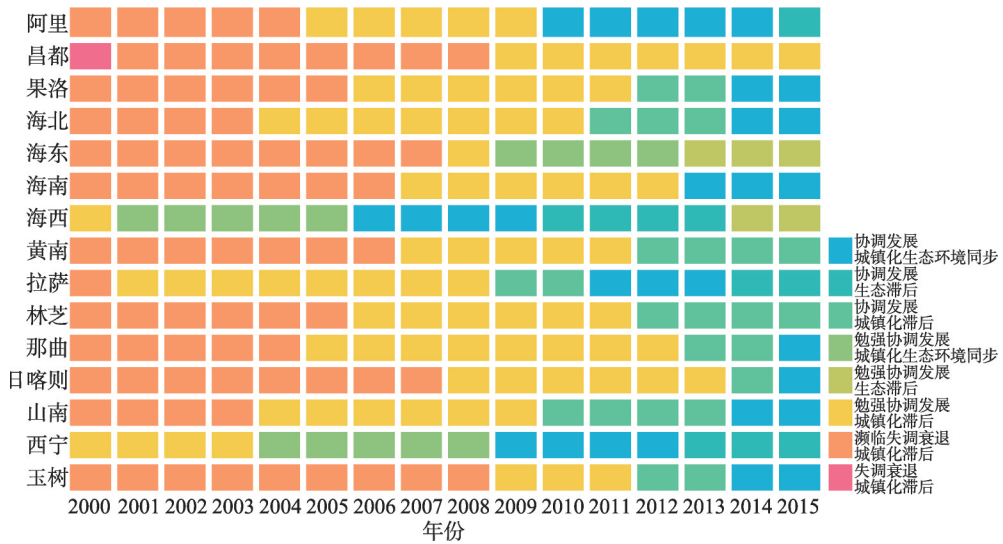


图 10 青藏高原各地级市城镇化与生态环境耦合类型结果

Fig. 10 Coupling types of urbanization and eco-environment for each prefecture-level city in the Tibetan Plateau

这也说明青藏高原城镇化的发展对生态环境产生了影响，虽还未达到生态承载力极限，城镇化尚有上升空间，但城镇化负效应也应引起重视。

2001—2015年青海城镇化指数与生态环境指数脱钩状态呈现出强波动状态（表7），2001—2014年其脱钩状态一直在强脱钩与弱脱钩之间往复变换，且强脱钩指数高，2015年转变为扩张负脱钩状态。青海城镇化负效应较为显著，是一种不可持续的、暂时的协调状态，需要强化对生态环境的保护，不应盲目追求城镇化增速。

西藏与青海类似，但其波动较青海小，2006—2014年维持在强脱钩状态，但脱钩指数小。西藏城镇化与生态环境两系统的发展趋势虽不一致，但目前城镇化进程并未对生态环境造成较大压力，具有一定的城镇化发展潜力，应当进一步推进城镇化进程，但要制定稳妥的城镇化发展政策。

**3.4.2 地级尺度** 青藏高原各地级单元城镇化指数与生态环境指数脱钩状态主要以强脱钩与弱脱钩交替出现为主（图11），即主要以城镇化指数正增长与生态环境指数负增长和城镇化指数增长率高于生态环境指数增长率两种情形为主。这说明青藏高原各地级单元目前所处城镇化进程对本地区生态环境造成压力，两系统耦合度上升，但脱钩指数表明城镇化与生态环境存在相互负向作用，这种负向作用在时间尺度上呈现波动趋势。

参考强脱钩与弱脱钩分别代表的意义，根据各地级单元在2001—2015年间强脱钩次数与弱脱钩次数对比关系，将其分为3组，分类如下：

表 6 青藏高原生态环境指数增长率与城镇化指数增长率及脱钩关系

Tab. 6 The growth rates of eco-environment index and urbanization index and their decoupling relationship in the Tibetan Plateau

年份	$\Delta E$	$\Delta U$	$DI$	脱钩程度
2001	-0.02	0.01	-0.35	强脱钩
2002	0.00	0.01	-0.06	弱脱钩
2003	0.00	0.01	-0.02	弱脱钩
2004	-0.02	0.01	-0.44	强脱钩
2005	0.02	0.01	0.38	弱脱钩
2006	0.00	0.02	-0.06	弱脱钩
2007	0.00	0.02	-0.05	弱脱钩
2008	-0.01	0.02	-0.09	强脱钩
2009	0.00	0.02	-0.04	弱脱钩
2010	-0.02	0.03	-0.23	强脱钩
2011	0.00	0.03	0.03	弱脱钩
2012	-0.01	0.04	-0.08	强脱钩
2013	-0.03	0.04	-0.39	强脱钩
2014	-0.04	0.04	-0.69	强脱钩
2015	0.05	0.04	0.86	扩张连接

参考强脱钩与弱脱钩分别代表的意义，根据各地级单元在2001—2015年间强脱钩次数与弱脱钩次数对比关系，将其分为3组，分类如下：

表7 青海省、西藏自治区生态环境指数增长率与城镇化指数增长率及脱钩关系

Tab. 7 The growth rates of eco-environment index and urbanization index and their decoupling relationship in Qinghai and Tibet

年份	地区	$\Delta E$	$\Delta U$	$DI$	状态	地区	$\Delta E$	$\Delta U$	$DI$	状态
2001	青海	-0.0214	0.0134	-0.5817	强脱钩	西藏	-0.0009	0.0172	-0.0118	强脱钩
2002	青海	0.0041	0.0095	0.1747	弱脱钩	西藏	-0.0073	0.0144	-0.1317	强脱钩
2003	青海	-0.0024	0.0101	-0.0997	强脱钩	西藏	0.0041	0.0100	0.1176	弱脱钩
2004	青海	-0.0234	0.0089	-1.1814	强脱钩	西藏	0.0009	0.0094	0.0275	弱脱钩
2005	青海	0.0243	0.0152	0.7844	弱脱钩	西藏	0.0003	0.0072	0.0142	弱脱钩
2006	青海	-0.0049	0.0178	-0.1381	强脱钩	西藏	-0.0006	0.0129	-0.0159	强脱钩
2007	青海	-0.0054	0.0214	-0.1362	强脱钩	西藏	-0.0016	0.0330	-0.0167	强脱钩
2008	青海	-0.0049	0.0231	-0.1254	强脱钩	西藏	-0.0018	0.0167	-0.0437	强脱钩
2009	青海	0.0013	0.0229	0.0356	弱脱钩	西藏	-0.0017	0.0188	-0.0383	强脱钩
2010	青海	-0.0146	0.0319	-0.3197	强脱钩	西藏	-0.0009	0.0251	-0.0168	强脱钩
2011	青海	0.0034	0.0408	0.0662	弱脱钩	西藏	-0.0004	0.0238	-0.0094	强脱钩
2012	青海	-0.0014	0.0421	-0.0280	强脱钩	西藏	-0.0028	0.0322	-0.0481	强脱钩
2013	青海	-0.0260	0.0400	-0.6294	强脱钩	西藏	-0.0029	0.0374	-0.0463	强脱钩
2014	青海	-0.0454	0.0414	-1.2288	强脱钩	西藏	-0.0096	0.0345	-0.1862	强脱钩
2015	青海	0.0500	0.0404	1.6851	扩张负脱钩	西藏	0.0053	0.0536	0.0730	弱脱钩

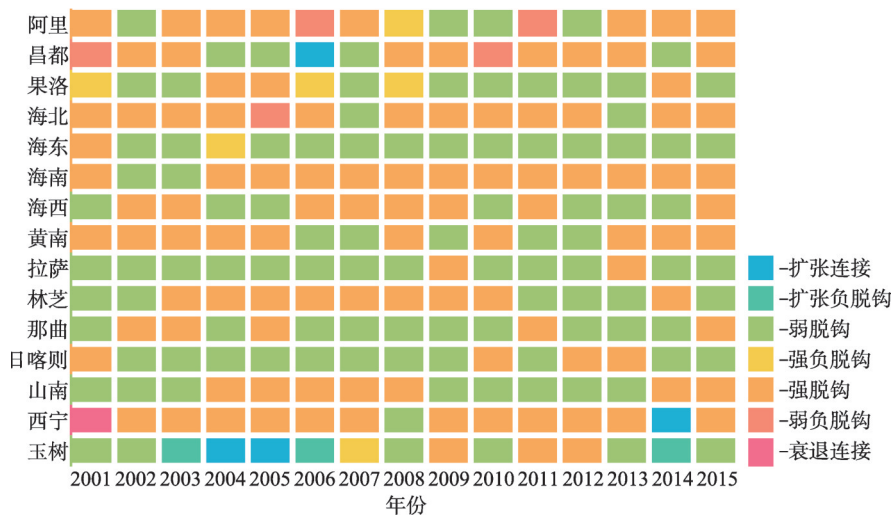


图11 青藏高原各地级市生态环境指数与城镇化指数脱钩关系

Fig. 11 Decoupling relationship between eco-environment index and urbanization index for each prefecture-level city in the Tibetan Plateau

① 积极城镇化：强脱钩次数小于弱脱钩次数，以城镇化指数增长率高于生态环境指数增长率为重，生态环境逐步改善，对应城市为昌都市、海西州、林芝市、日喀则市、山南市。② 中性城镇化：强脱钩次数等于弱脱钩次数，两种情况并重，生态环境同步，对应城市为阿里地区、那曲市。③ 消极城镇化：强脱钩次数大于弱脱钩次数，以城镇化指数正增长与生态环境指数负增长为主，生态环境滞后，对应城市为果洛州、海北州、海东市、海南州、黄南州、拉萨市、西宁市、玉树州。

西藏下辖的地级单元多属于积极城镇化类型，而青海下辖的地级单元则多属于消极城镇化类型，长期呈现强脱钩态势。但本分类结果仅以强弱脱钩次数对比关系进行分

类, 未考虑脱钩强度对比, 分类结果存在特殊情况。海西州虽归属为积极城镇化类型, 但其强脱钩强度远高于弱脱钩强度, 弱脱钩指数绝对值最高仅有0.2, 但强脱钩指数绝对值最高达3, 与其生态环境上升幅度小而下降幅度高的变化趋势相吻合。黄南州被归类至消极城镇化, 但强脱钩强度小, 生态环境负增长率低, 年际下降幅度最高值仅有0.003, 而增长幅度最高值为0.025。同时, 结合耦合与解耦两者变化趋势可知, 果洛州、海北州、海南州、玉树州虽归属于协调发展类城镇化与生态环境同步型, 但在脱钩分类中属于消极城镇化, 说明这4个地市(州)的协调状态是短暂的、不可持续的, 仅仅是城镇化与生态环境评价指数数值上的同步, 但其实际增长趋势相背离。

### 3.5 青藏高原城镇化与生态环境交互影响未来趋势

利用2000—2015年青藏高原各单元城镇化与生态环境耦合协调度数据, 代入至灰色系统GM(1, 1)模型中, 将模拟获得的2000—2015年耦合协调度数值与实际值进行比较, 计算平均相对误差、相对精度和C值, 若C值小于0.35, 相对精度大于95%, 则模型预测等级为优。结果如表8所示, 各预测单元的C值(残差方差)均小于0.35, 所有计算值与实际值平均相对误差处于0.55%~3.41%范围内, 可以进行未来趋势预测分析。预测年份范围为2016—2025年, 预测前提条件是假定未来10年不存在较大波动。

根据GM(1, 1)预测结果来看(表9), 青藏高原各尺度未来耦合协调趋势明朗, 2020年仅昌都市、海东市、海西州低于0.7, 2025年仅海西州低于0.7。随着兰西城市群、西宁都市圈、拉萨都市圈的相继提出, 未来青藏高原各地级单元城镇化水平将会进一步提高, 其生态环境制约也会愈加凸显。从预测结果看, 海西州在城镇化进程中需要更进一步实施促进城镇化水平和质量提升的措施, 提高城镇化发展质量与效率。但这一结果只是预测了耦合协调度的整体变化, 还需要参考城镇化与生态环境指数各自变化趋势, 及时调整发展策略。

表8 青藏高原各单元城镇化与生态环境耦合协调度未来变化预测精度表

Tab. 8 Prediction accuracies of future changes in coupling coordination degree of urbanization and eco-environment in the Tibetan Plateau

预测单元	青藏高原	青海	西藏	阿里	昌都	果洛	海北	海东	海南
平均相对误差(%)	1.76	1.97	1.97	2.57	0.83	0.94	2.32	1.56	2.47
相对精度(%)	98.24	98.02	98.04	97.42	99.16	99.06	97.67	98.44	97.53
C值	0.07	0.17	0.09	0.12	0.06	0.06	0.08	0.13	0.14
预测单元	海西	黄南	拉萨	林芝	那曲	日喀则	山南	西宁	玉树
平均相对误差(%)	3.41	1.22	1.07	1.05	1.42	0.90	0.55	1.02	2.54
相对精度(%)	96.58	98.77	98.93	98.95	98.57	99.10	99.45	98.98	97.47
C值	0.43	0.06	0.07	0.07	0.12	0.05	0.04	0.12	0.10

表9 青藏高原各单元城镇化与生态环境耦合协调度未来变化预测

Tab. 9 Predictions of future changes in coupling coordination degree of urbanization and eco-environment in the Tibetan Plateau

预测单元	青藏高原	青海	西藏	阿里	昌都	果洛	海北	海东	海南
2020年预测值	0.81	0.76	0.78	0.84	0.69	0.81	0.81	0.68	0.75
2025年预测值	0.96	0.85	0.90	0.98	0.80	0.96	0.95	0.76	0.86
预测单元	海西	黄南	拉萨	林芝	那曲	日喀则	山南	西宁	玉树
2020年预测值	0.63	0.88	0.82	0.78	0.72	0.74	0.83	0.73	0.81
2025年预测值	0.64	0.90	0.93	0.90	0.81	0.86	0.97	0.81	0.99



## 4 青藏高原城镇化与生态环境协调发展的对策建议

### 4.1 结论

本文尝试构建一套完整的城镇化与生态环境交互影响分析模型体系,实现从综合评价指数分析、耦合协调度量、耦合类型识别、解耦路径探索到未来趋势预测的全过程解析。以青藏高原及其省域、地级单元多尺度分析对比为手段,尝试厘清尺度之间的差异性,识别出问题区域,并提出针对性的改进措施。主要结论如下:

(1) 青藏高原不同尺度间城镇化综合评价指数呈上升趋势,青海整体城镇化指数高于西藏,增长极为海西州与西宁市,西藏城镇化水平较低,拉萨市为增长重心;生态环境指数变化趋势不同,青海呈下降态势,西藏则趋向平稳,同时各地级单元生态环境指数存在分层现象,最高为林芝市。

(2) 青藏高原不同尺度间城镇化与生态环境耦合协调度总体均呈上升趋势,海西州、海东市和拉萨市出现增长一减小的特殊趋势。在协调类型上,由失调衰退类与濒临失调衰退类转为协调发展类,仅昌都市、海东市、海西州处于勉强协调发展类,提升城镇化发展质量是近期城镇化发展的重点。

(3) 城镇化指数与生态环境指数主要呈现出强脱钩、弱脱钩交互出现的波动态势,说明不同尺度间存在城镇化与生态环境间的负向作用,存在消极城镇化发展问题。积极推进城镇化同时提升其质量,对构建城镇化与生态环境的良性协调关系十分必要和迫切。

(4) 通过预测分析发现青藏高原各单元在未来10年内,系统耦合协调度将稳步上升,表明未来青藏高原的城镇化与生态环境的关系将逐步趋于协调。但各地增长速度将存在差距,其中海西州最为缓慢,需要补齐短板,尽早采取措施促进二者关系协调发展。

### 4.2 政策建议

(1) 提升城镇化质量,走可持续发展之路。研究结果显示青藏高原城镇化与生态环境耦合协调度呈上升趋势,虽存在强脱钩与弱脱钩交互波动,但未来趋势明朗。表明青藏高原地区城镇化之路是可走之路,是青藏高原实现现代化的必由之路,提高城镇化的速度和质量是青藏高原不可避免的必然趋势。但青藏高原的生态环境本底极为脆弱,在充分考虑资源环境承载力、不对生态环境造成破坏的前提下发展城镇化是青藏高原城镇化的基本准则。

(2) 突破薄弱环节,推动城镇化与生态环境的系统协调发展。青藏高原地区各地级单元发展程度不一,城镇化与生态环境水平均有所差异。在制定政策时,要针对青藏高原不同尺度城镇化与生态环境发展水平,两者耦合协调度所处类别,对症下药,更要充分考虑不同地区经济发展基础与生态环境本底差别,推进更有质量、有效率、符合高原特色和特质的新型城镇化发展之路,走出青藏高原城镇化发展的特殊模式。

(3) 重点关注问题地区,解决好瓶颈性问题。例如,通过研究发现,海西州城镇化与生态环境耦合协调发展状况不佳,出现高度强脱钩趋势,工业经济发展对生态环境压力极大,应及时调整产业结构,强化生态环境保护力度。昌都市城镇化进程缓慢,可开展跨区域甚至跨省合作,培育绿色环保产业,推进产业转型升级,紧抓“一带一路”新机遇和脱贫攻坚契机,解决问题区域发展瓶颈,推动区域协调发展。

(4) 生态脆弱地区应重视科学评估,制定符合地方实际的发展战略。青藏高原作为典型高寒脆弱区,城镇化与生态环境协调发展未来趋势明朗,说明生态脆弱地区通过合理的政策引导,能够促进城镇化与生态环境协调发展。只有深入了解地区耦合协调状

态, 才能对症下药, 因此地方政府应重视科学评估, 对本地区城镇化与生态环境发展水平、耦合与解耦关系时空变化动态定期定量评估, 对城镇化与生态环境耦合与解耦类型及阶段进行科学判断, 参考评估结果制定城镇化发展政策。

### 参考文献(References)

- [1] Liu Tongde. Study on sustainable development in Qinghai-Tibet Plateau [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. [刘同德. 青藏高原区域可持续发展研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.]
- [2] Lu Chunxia, Xie Gaodi, Xiao Yu, et al. Ecosystem diversity and economic valuation of Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2749-2755, 3011. [鲁春霞, 谢高地, 肖玉, 等. 青藏高原生态系统服务功能的价值评估. *生态学报*, 2004, 24(12): 2749-2755, 3011.]
- [3] Yuan Fengdi, Zhang Xi, Wei Yongqiang. Study on ecological environment vulnerability assessment in the ecological barrier area of Qinghai-Tibet Plateau. *Geospatial Information*, 2018, 16(4): 67-69, 10. [袁烽迪, 张溪, 魏永强. 青藏高原生态屏障区生态环境脆弱性评价研究. *地理空间信息*, 2018, 16(4): 67-69, 10.]
- [4] Zhao Yuelong, Zhang Lingjuan. A study on index and method of quantitative assessment of fragile environment. *Progress in Geography*, 1998, 17(1): 67-72. [赵跃龙, 张玲娟. 脆弱生态环境定量评价方法的研究. *地理科学进展*, 1998, 17(1): 67-72.]
- [5] Yao Tandong, Zhu Liping. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy. *Advances in Earth Science*, 2006, 25(5): 459-464. [姚檀栋, 朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策. *地球科学进展*, 2006, 25(5): 459-464.]
- [6] Li S C, Wu J S, Gong J, et al. Human footprint in Tibet: Assessing the spatial layout and effectiveness of nature reserves. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 18-29.
- [7] Li S C, Zhang Y L, Wang Z F, et al. Mapping human influence intensity in the Tibetan Plateau for conservation of ecological service functions. *Ecosystem Services*, 2018, 30: 276-286.
- [8] Chen H, Zhu Q A, Peng C H, et al. The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 2940-2955.
- [9] Yang K, Wu H, Qin J, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review. *Global and Planetary Change*, 2014, 112: 79-91.
- [10] Lamsal P, Kumar L, Shabani F, et al. The greening of the Himalayas and Tibetan Plateau under climate change. *Global and Planetary Change*, 2017, 159: 77-92.
- [11] Cui X F, Graf H, Langmann B, et al. Climate impacts of anthropogenic land use changes on the Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 2006, 54(1-2): 33-56.
- [12] Kang S C, Zhang Q G, Qian Y, et al. Linking atmospheric pollution to cryospheric change in the Third Pole region: Current progress and future prospects. *National Science Review*, 2019, 6(4): 796-809.
- [13] Ma Y M, Ma W Q, Zhong L, et al. Monitoring and modeling the Tibetan Plateau's climate system and its impact on East Asia. *Scientific Reports*, 2017, 7: 44574.
- [14] Ge J, You Q L, Zhang Y Q. Effect of Tibetan Plateau heating on summer extreme precipitation in eastern China. *Atmospheric Research*, 2019, 218: 364-371.
- [15] Niu Yafei. The study of environment in the Plateau of Qinghai-Tibet. *Progress in Geography*, 1999, 18(2): 69-77. [牛亚菲. 青藏高原生态环境问题研究. *地理科学进展*, 1999, 18(2): 69-77.]
- [16] Wang X H, Zheng D, Shen Y C. Land use change and its driving forces on the Tibetan Plateau during 1990-2000. *Catena*, 2008, 72(1): 56-66.
- [17] Cui X F, Graf H. Recent land cover changes on the Tibetan Plateau: A review. *Climatic Change*, 2009, 94(1/2): 47-61.
- [18] Liu J, Richard I, Marc W, et al. Protect Third Pole's fragile ecosystem. *Science*, 2018, 362(6421): 1368.
- [19] Fang Chuanglin, Li Guangdong. Particularities, gradual patterns and countermeasures of new-type urbanization in Tibet, China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(3): 294-305. [方创琳, 李广东. 西藏新型城镇化发展的特殊性与渐进模式及对策建议. *中国科学院院刊*, 2015, 30(3): 294-305.]
- [20] Xue Bing, Chen Xingpeng, Wu Junhui, et al. A study on the coupling relation and evolvement of the population-resources-environment in Qinghai Province. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2007(1): 33-36. [薛冰, 陈兴鹏, 伍俊辉, 等. 青海人口—资源—环境关系的耦合演变研究. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2007(1): 33-36.]
- [21] Yang Haoran. Study on the coupling of eco-economic system in Qinghai Province. *Qinghai Social Sciences*, 2013(5):

- 59-63, 68. [杨皓然. 青海省生态经济系统耦合分析. 青海社会科学, 2013(5): 59-63, 68.]
- [22] Zhang Mingxia, Wang Dexiang. Measurement of coupling between urbanization and ecological environment in Qinghai Province. *Qinghai Social Sciences*, 2018(3): 59-65. [张明霞, 王得祥. 青海城市化与生态环境耦合关系测度. 青海社会科学, 2018(3): 59-65.]
- [23] Fan Jie, Xu Yong, Wang Chuansheng, et al. The effects of human activities on the ecological environment of Tibet over the past half century. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(32): 3057-3066. [樊杰, 徐勇, 王传胜, 等. 西藏近半个世纪以来人类活动的生态环境效应. 科学通报, 2015, 60(32): 3057-3066.]
- [24] Cao Shisong, Wang Yanhui, Duan Fuzhou, et al. Coupling between ecological vulnerability and economic poverty in contiguous destitute areas, China: Empirical analysis of 714 poverty-stricken countries. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(8): 2614-2622. [曹诗颂, 王艳慧, 段福洲, 等. 中国贫困地区生态环境脆弱性与经济贫困的耦合关系: 基于连片特困区714个贫困县的实证分析. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2614-2622.]
- [25] Wang Zhonghua. Research on the coupling of ecological construction and economic development in the minority areas of our country [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2005. [汪中华. 我国民族地区生态建设与经济发展的耦合研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.]
- [26] The State Council Information Office of the People's Republic of China. Ecological Progress on the Qinghai-Tibet Plateau. 2018. [中华人民共和国国务院新闻办公室. 青藏高原生态文明建设状况. 2018.]
- [27] Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254. [谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [28] Wang Y, Li G D. Mapping urban CO<sub>2</sub> emissions using DMSP/OLS "city lights" satellite data in China. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2016, 49(2): 248-251.
- [29] Liang Longwu, Wang Zhenbo, Fang Chuanglin, et al. Spatiotemporal differentiation and coordinated development pattern of urbanization and the ecological environment of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(4): 1212-1225. [梁龙武, 王振波, 方创琳, 等. 京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局. 生态学报, 2019, 39(4): 1212-1225.]
- [30] Tang Ling, Li Jianping, Yu Lean, et al. Quantitative evaluation methodology for system coordination development based on distance coordination degree model. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(4): 594-602. [汤铃, 李建平, 余乐安, 等. 基于距离协调度模型的系统协调发展定量评价方法. 系统工程理论与实践, 2010, 30(4): 594-602.]
- [31] Liao Zhongbin. Quantitative judgement and classification system for coordinated development of environment and economy: A case study of the city group in the Pearl River Delta. *Tropical Geography*, 1999, 19(2): 76-82. [廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系: 以珠江三角洲城市群为例. 热带地理, 1999, 19(2): 76-82.]
- [32] Guo Shasha, Chen Mingxing, Liu Hui. Coupling procedure and decoupling analysis of urbanization and resource environment: The study of Beijing. *Geographical Research*, 2018, 37(8): 1599-1608. [郭莎莎, 陈明星, 刘慧. 城镇化与资源环境的耦合过程与解耦分析: 以北京为例. 地理研究, 2018, 37(8): 1599-1608.]
- [33] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151.
- [34] Li Tan, Wang Jing, Zhang Qingguo, et al. Spatiotemporal characteristics of an ecological footprint, decoupling effect tendency, and grey prediction in Hefei city. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5): 1735-1747. [李坦, 王静, 张庆国, 等. 合肥市生态足迹时空特征与脱钩效应变化及灰色预测分析. 生态学报, 2019, 39(5): 1735-1747.]
- [35] Zhou Cheng, Feng Xuegang, Tang Rui. Analysis and forecast of coupling coordination development among the regional economy-ecological environment-tourism industry: A case study of provinces along the Yangtze Economic Zone. *Economic Geography*, 2016, 36(3): 186-193. [周成, 冯学钢, 唐睿. 区域经济—生态环境—旅游产业耦合协调发展分析与预测: 以长江经济带沿线各省市为例. 经济地理, 2016, 36(3): 186-193.]

## Interaction between urbanization and eco-environment in Tibetan Plateau

FENG Yuxue<sup>1,2</sup>, LI Guangdong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Scientifically assessing the interaction between urbanization and eco-environment in the Tibetan Plateau is critical for optimization of urbanization speed and quality, and for the restoration and improvement of the eco-environment. Based on previous studies about the interaction between urbanization and eco-environment in the Tibetan Plateau, we established complete analysis models to examine the overall process, including comprehensive evaluation index analysis, coupling coordination degree measurement, coupling type identification, decoupling path exploration, and future trend prediction. We used a multi-scale comparison analysis method to clarify the differences between scales (across the Tibetan Plateau and its provinces and prefecture-level cities), identify the problem regions, and propose customized improvement measures. Here we show that the comprehensive evaluation index of urbanization has experienced a staged upward trend in different scales, and the overall urbanization index of Qinghai is higher than that of Tibet. However, the changing trends of the eco-environment index are different. The changes in eco-environment index of Qinghai show a decreasing trend, whereas Tibet's changes tend to be stable. The eco-environment index of prefecture-level cities is stratified. We also found that the changing trends of coupling coordination degree of urbanization and eco-environment in different scales were overall rising. The coupling type has changed from imbalanced recession type to nearly imbalanced recession type, and finally to grudgingly coordinated development type. However, most of these types are lagged urbanization types. The alternate change trend between strong decoupling and weak decoupling indicates a negative interaction between urbanization and the eco-environment at different scales. Thus, it can be inferred that the lagged urbanization is a prominent phenomenon. The result of predication shows that in the next 10 years the coupling coordination degree of urbanization and eco-environment will increase steadily in all geographic units, but there will be a gap in the growth rate.

**Keywords:** urbanization; eco- environment; coupling coordinated degree; decoupling; predicting; Tibetan Plateau