

# 基于 Lotka-Volterra 共生模型的关中平原城市群生态安全测度研究

吴艳霞, 罗恒, 王彦龙

(西安理工大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** [目的] 对关中平原城市群生态安全的时空演变进行测度和分析, 为该区生态安全保障措施的制定提供科学参考。[方法] 通过构建社会经济—自然生态 Lotka-Volterra 共生模型及生态安全 DPSIR 指标体系, 以 2008—2017 年关中平原城市群生态安全状况进行测度, 并根据测度结果进行指标回溯分析生态安全问题成因。[结果] ①2008—2017 年关中平原城市群整体而言社会经济发展迅猛但生态环境改善状况幅度并不明显; ②2009—2016 年社会经济子系统受力方向为正, 但自然生态子系统受力方向在多个年份表现为负, 表明社会经济高速发展而生态环境受到侵害的偏利发展模式在关中平原城市群长期存在。[结论] 产业结构优化步伐缓慢、工业污染、人口扩张对生态承载力造成的压力、快速城镇化对自然资源的侵占等因素已成为阻碍关中平原城市群生态安全提升的重要原因。

**关键词:** 关中平原城市群; Lotka-Volterra 共生模型; 生态安全; 指标体系

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)06-0230-10

中图分类号: F127, X171.1

**文献参数:** 吴艳霞, 罗恒, 王彦龙. 基于 Lotka-Volterra 共生模型的关中平原城市群生态安全测度研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 230-239. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 06. 034; Wu Yanxia, Luo Heng, Wang Yanlong. Ecological security measurement of urban agglomeration in Guanzhong plain based on Lotka-Volterra symbiosis model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 230-239.

## Ecological Security Measurement of Urban Agglomeration in Guanzhong Plain Based on Lotka-Volterra Symbiosis Model

Wu Yanxia, Luo Heng, Wang Yanlong

(School of Economics and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial and temporal evolution of ecological security in Guanzhong plain urban agglomeration was studied in order to provide scientific reference for the formulation of ecological security measures in this area. [Methods] The social economy-natural ecology lotka-volterra symbiosis model and the DPSIR indicator system of ecological security were constructed to measure the ecological security status of Guanzhong plain urban agglomeration from 2008 to 2017. And the causes of ecological security problems were analyzed based on the measurement results. [Results] ① From 2008 to 2017, the social and economic development of Guanzhong plain was rapid, but the improvement of ecological environment was not obvious. ② From 2009 to 2016, the force direction of social and economic subsystems was positive, while that of the natural ecological subsystem was negative in many years, which indicated that the profit-oriented development model with rapid social and economic development and the damage of ecological environment existed for a long time in Guanzhong plain urban agglomeration. [Conclusion] Factors such as the slow pace of industrial structure optimization, industrial pollution, pressure on ecological carrying capacity caused by population expansion, and the occupation of rapid urbanization on natural resources have become important reasons that hinder the improvement of ecological security in Guanzhong plain urban agglomeration.

**Keywords:** Guanzhong plain urban agglomeration; Lotka-Volterra symbiotic model; ecological security; indicator system

收稿日期: 2019-05-13

修回日期: 2019-05-28

资助项目: 2018 年度陕西省社科院重大理论与现实问题研究项目“陕西秦岭地区生态安全测度及生态保护研究”(2018C010)

第一作者: 吴艳霞(1964—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 教授, 主要从事区域经济, 区域生态方面的研究。E-mail: wyxls521@163.com。

改革开放以来,快速的城镇化与工业化为中国经济的高速发展打下了坚实的基础,但粗放式的城市扩张在一定程度上加剧了城市及周边地区生态环境的恶化并制约了区域发展的潜力<sup>[1-2]</sup>。在此背景下,城市发展过程中的生态安全问题日益成为政府决策部门及相关学者关注和研究的重点。20 世纪 70 年代布朗<sup>[3]</sup>首次将“生态安全”作为一个研究概念进行阐述,随后诸多学者对生态安全进行研究并从不同方面对生态安全的概念和内涵进行了延伸和拓展,目前国际应用系统分析研究所提出的生态安全定义在学界应用最为广泛,生态安全是指作为主体的人与所处环境相互作用而产生的现实或潜在生态安全风险对人的生存状态没有直接或间接威胁的演变趋势<sup>[4]</sup>。近些年来,生态安全领域研究成果颇丰,主要的研究方向包含林业生态安全<sup>[5-6]</sup>、土地生态安全<sup>[7-8]</sup>、流域生态安全<sup>[9-10]</sup>、生态安全屏障<sup>[11-12]</sup>、区域生态承载力等<sup>[13-14]</sup>,主要的研究方法包含生态足迹法<sup>[15-16]</sup>、神经网络模型<sup>[17-18]</sup>、物元模型<sup>[19-20]</sup>、遥感及地理信息系统技术<sup>[21]</sup>、模糊数学模型等<sup>[22]</sup>。就研究对象与研究区域而言,目前的生态安全研究主要集中于自然区域及部分热点城市<sup>[24-25]</sup>,而对于区域城市发展的高级形态——区域城市群的研究尚处于起步阶段。王振波等<sup>[26]</sup>构建了 PSR 城市群生态安全协同会诊指标体系研究京津冀城市群的生态安全现状并提出相关改善措施。胡志仁等<sup>[27]</sup>从经济、人口、资源、环境 4 个层面出发构建生态安全评价指标体系并发现珠三角城市群生态安全呈现逐渐下滑态势且未来 7 a 生态安全状况将愈发严峻。宓泽锋等<sup>[28]</sup>基于生态文明建设潜力模型将长三角城市群与其余城市群作比较,提出长三角城市群应坚持走经济与环境协调发展模式。赵烜等<sup>[29]</sup>评估了闽三角城市群 2004—2015 年生态安全状况,表明闽三角地区生态安全已到预警状态。梳理相关文献不难发现,在当前城市群生态安全研究中,研究区域也多集中于经济发达地区,如京津冀特大城市群、长三角及珠三角城市群等,且对城市群生态安全的定量研究仍较少。2018 年初国务院正式批复《关中平原城市群发展规划》,标志着关中平原城市群被列入国家级城市群并开始踏上发展快车道。作为新兴城市群,关中平原城市群正在成为激活西部地区经济追赶超越潜力的前沿阵地和丝绸之路向西开放的战略支点。但在快速发展的同时,社会经济发展与资源需求及环境污染之间的矛盾更加突出,高污染高耗能产业发展模式仍桎梏着关中平原城市群由高速发展转向高质量发展。因此在日益强调生态文明建设的今天,研究关中平原城市群生态安全发展格

局,对于推进关中平原城市群实现高效、可持续发展至关重要。基于此,本研究基于 Lotka-Volterra 共生模型及 DPSIR 模型构建关中平原城市群生态安全测度指标体系,并利用熵权法进行赋权,最后结合双特征指数对关中平原城市群生态安全的时空演变进行测度和分析,并就研究结论提出有针对性的对策建议,以期能为有关部门制定关中平原城市群生态安全保障措施提供参考和借鉴。

## 1 研究区概况、数据来源及研究方法

### 1.1 研究区概况及数据来源

关中平原城市群以国家级中心城市——西安为核心,涵盖宝鸡、咸阳、渭南、商洛、铜川、平凉、庆阳、临汾、运城等地市,区域横跨陕西、山西、甘肃三省,总人口 3 865 万人辖区总面积为  $1.07 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占全国国土面积的 1.12%。关中平原城市群地处中国内陆中心,南依秦岭,东跨黄河,历史文化底蕴深厚,拥有大量珍贵的文化遗产和丰富的人文自然资源,城市群内各地区合作交流密切,区域认同感强。同时关中平原城市群拥有航空、航天、新能源、IT、物流等完备的现代产业体系,在科教资源、军工科技等方面实力也名列全国前沿,创新实力雄厚。作为亚欧大陆桥的重要支点和西部地区面向东部地区的重要门户,关中平原城市群吸引着大量人员来此学习、生活,城镇化体系日趋完备。但也正因为城镇化的快速发展,关中平原城市群面临着越来越大的生态安全压力,生态环境问题亟待解决。本文研究时间段为 2008—2017 年,研究数据来源于 2009—2018 年各年的陕西、山西、甘肃省统计年鉴、各地市统计年鉴、《中国城市统计年鉴》、各地区国民经济运行及社会发展统计公报、各地区环保部门及水利部门发布公报及信息。对于部分缺失数据,利用插值法及相邻年份的数据补齐。

### 1.2 Lotka-Volterra 共生模型构建

当前对于区域生态安全的测度学者们主要集中于两大类方法<sup>[30]</sup>,其一是特征指数法,其二是指标体系法。特征指数法虽可表征生态意义但无法对指标进行回溯分析,因而难以精准进行原因分析,指标体系法虽可以进行回溯分析,但其最后的综合值并不具备便于理解的生态意义。同时,在使用层次分析法、专家打分法、主成分分析进行指标赋权时,也会出现主观性较大、降维后因子代表性不足等问题,失去了赋权的本意。为了结合特征指数法与指标体系法的优点而避开其缺点,本文将构建特征指数法与指标体系法耦合测度方法——Lotka-Volterra 模型。西方

学者 Lotka 和 Volterra 首次构建微分动态模型(即 Lotka-Volterra 模型)来研究同一空间下两个物种种群间的共生关系<sup>[31]</sup>,该模型认为在同一生态系统中,各种群都有其存在的作用及相对稳定的生存空间,在此基础上各种群面临着对生态系统资源的竞争或共生关系,只有保有现有生态位的物种才能继续存活, Lotka-Volterra 模型的提出促进了后续生态学和生物种群关系研究的发展。Lotka-Volterra 模型如下所示:

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = r_1 N_1(t) = \frac{K_1 - N_1(t) - \alpha N_2(t)}{K_1} \quad (1)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = r_2 N_2(t) = \frac{K_2 - N_2(t) - \beta N_1(t)}{K_2} \quad (2)$$

式中: $N_1(t)$ ——种群  $S_1$  数量; $N_2(t)$ ——种群  $S_2$  数量; $K_1$ ——种群  $S_1$  环境容纳量; $K_2$ ——种群  $S_2$  环境容纳量; $r_1$ ——种群  $S_1$  增长率; $r_2$ ——种群  $S_2$  增长率; $\alpha(\beta)$ —— $S_2$  对  $S_1$  ( $S_1$  对  $S_2$ ) 竞争强度系数; $t$ ——时间。 $\alpha N_2(t)$ ——在  $S_1$  的环境容量  $K_1$  中,一个物种  $S_2$  的存在所占据的环境容量将相当于  $\alpha$  个物种  $S_1$  占据的环境容量; $\alpha$ ——正数则表示物种  $S_2$  的增加将侵占物种  $S_1$  的环境容量, $\alpha$  为负数则表示物种  $S_2$  的增加将扩充物种  $S_1$  的环境容量, $\alpha$  为 0 时表示物种  $S_2$  对  $S_1$  无影响。对  $\beta$  的分析相同。因此  $\alpha, \beta$  表征的是两物种间对环境容量的竞争关系,将其定义为竞争系数。

而在人类的生存空间中,社会经济子系统与自然生态子系统之间的关系恰好类似于两个生物种群之间的共生关系:社会经济系统的构建基础例如能源、矿产等都来源于自然系统,因此自然资源的提供会促进社会经济系统的发展。而社会经济系统的扩张则会侵占自然环境,对生态的发展产生抑制作用。另一方面,社会经济系统的进步可以为自然生态系统提供更好地保护机制,自然生态系统受益于此,然而因社会系统侵占而导致的自然生态系统的不良发展,会产生各种自然灾害,对社会经济系统的生产生活产生不良影响,从而抑制社会经济系统的发展。可见,社会经济子系统与自然生态子系统存在着对自然资源占有的复合共生关系,其整体原理与公式(1)–(2)所示规律相符合。因此可以引入 Lotka-Volterra 模型来研究社会经济子系统与自然生态子系统的共生作用机理,进而来测度人类生存空间的区域生态安全状况。

据此构造出自然生态—社会经济 L-V 共生模型,公式为(子系统 I 为社会经济系统,子系统 II 为自然生态系统):

$$\frac{dF(t)}{dt} = r_F F(t) = \frac{C - F(t) - \alpha E(t)}{C} \quad (3)$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = r_E E(t) = \frac{C - E(t) - \beta F(t)}{C} \quad (4)$$

式中: $F(t)$ ——子系统 I 的发展水平指数; $E(t)$ ——子系统 II 发展水平指数; $C$ ——环境容量指数; $r_F$ ——子系统 I 增长率; $r_E$ ——子系统 II 增长率; $\alpha(\beta)$ ——子系统 I 对子系统 II (子系统 II 对子系统 I) 竞争强度系数,表示自然环境对社会经济(社会经济对自然环境)发展的阻碍或促进作用; $t$ ——时间变量。

当  $\alpha > 0$  时,自然生态子系统的增长会侵占社会经济子系统的环境容量,社会经济子系统会衰减,即自然生态子系统的发展对社会经济子系统的发展起阻碍作用;当  $\alpha < 0$  时,自然生态子系统的增长会增加社会经济子系统的环境容量,表明自然生态子系统对社会经济子系统发展有益;当  $\alpha = 0$  时,表明自然生态子系统对社会经济子系统无影响。同理,当  $\beta > 0$  时,社会经济子系统的增长会侵占自然生态子系统的环境容量,自然资源子系统会衰减,即社会经济子系统的发展对自然生态子系统的发展起阻碍作用;当  $\beta < 0$  时,社会经济子系统的增长会增加自然生态子系统的环境容量,表明社会经济子系统对自然生态子系统发展有益;当  $\beta = 0$  时,表明社会经济子系统对自然生态子系统无影响。

### 1.3 竞争强度系数测算

为对基本系数和竞争强度系数  $\alpha$  与  $\beta$  的值进行测算。本文将公式(3)–(4)进行离散化处理,离散化时间变量取年份  $k$ 。假定第  $k$  年附近,环境容量、竞争强度系数为常数,则公式(1)–(2)可变为:

$$F(k+1) - F(k) = \frac{F(k) - F(k-1)}{F(k-1)} F(k) \quad (5)$$

$$E(k+1) - E(k) = \frac{E(k) - E(k-1)}{E(k-1)} E(k) \quad (6)$$

对上述公式求解可得:

$$\alpha(k) = \frac{[\varphi_F(k)C(k) - F(k)]}{E(k)},$$

$$\beta(k) = \frac{[\varphi_E(k)C(k) - E(k)]}{F(k)}$$

其中:

$$\begin{aligned} \varphi_F(k) &= 1 - \frac{F(k+1) - F(k)}{F(k)} \times \frac{F(k-1)}{F(k) - F(k-1)} \\ &= 1 - \frac{\gamma_F(k+1)}{\gamma_F(k)} \\ \varphi_E(k) &= 1 - \frac{E(k+1) - E(k)}{E(k)} \times \frac{E(k-1)}{E(k) - E(k-1)} \\ &= 1 - \frac{\gamma_E(k+1)}{\gamma_E(k)} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\gamma_F(k+1), \gamma_E(k+1)$ ——第  $k+1$  年社会经济指数和自然生态指数的增长率; $\gamma_F(k), \gamma_E(k)$ ——第  $k$  年社会经济指数和自然生态指数的增长率。

生态安全的核心问题之一在于研究 L-V 模型中自然生态系统与社会经济的相互竞争关系。而由上述公式可得  $F(t), E(t), C$  等指数的测算是研究竞争关系的关键。

### 1.4 生态安全 DPSIR 模型及指标体系构建

为计算  $F(t), E(t), C$  等基本指数,则需构建测度社会经济——自然生态复合系统中社会经济水平、自然生态水平、环境容量的指标体系。在相关学者研究的基础上<sup>[32-35]</sup>,构建 DPSIR 模型(driving force:驱动力; pressure:压力; state:状态; impact:影响; response:响应)来构建生态安全指标体系,从而对相关指数进行科学合理的计算。

社会经济系统中的驱动力( $D$ )将改善资源与环境状态( $S$ ),经济压力( $P$ )则会破坏资源与环境状态

( $S$ ),而资源与环境状态会为社会经济系统输送资源。同时驱动力( $D$ )和经济压力( $P$ )反映了社会经济发展的两方面,因此可以用驱动力( $D$ )和经济压力( $P$ )这两个因素来反映社会经济发展水平测度指标。地区生产总值表明的是地区经济强度,是推动社会经济发展的核心动力。居民人均可支配收入从消费角度解释了地区社会经济的推动因素,而固定资产投资和一般公共预算支出则分别从城市建设和政府投入角度解释了两者的驱动。因而选取上述 4 个指标表示社会经济驱动力(表 1)。

城镇化带来的大量工业设施运行是给环境造成破坏的主要因素之一,工业烟粉尘及废水排放量解释了工业化给自然环境带来的压力,单位 GDP 能耗从能源消耗产出角度解释了社会经济生产所带来的压力,城镇化带来的人口虹吸效应则是社会经济为自然环境带来压力的另一体现,用人口密度和人口自然增长率来表示。

表 1 DPSIR 模型指标构建及指标权重

目标层	准则层	指标层	指标释义	属性	权重
社会经济发展水平指数 $F$	社会经济驱动力 $D$	地区生产总值/亿元	经济强度驱动力	正向	0.129 2
		居民人均可支配收入/元	经济消费驱动力	正向	0.050 4
		年末固定资产投资/亿元	城市建设驱动力	正向	0.120 2
		一般公共预算支出/亿元	社会发展驱动力	正向	0.081 0
	社会经济压力 $P$	工业烟粉尘排放量/t	空气环境压力	逆向	0.015 3
		工业废水排放量/t	工业污染压力	逆向	0.003 9
		单位 GDP 能耗(t 标准煤/万元)	能源消耗压力	逆向	0.028 3
		人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	人口承载压力	逆向	0.026 2
		人口自然增长率/%	人口增长压力	逆向	0.002 7
		环境容量指数 $C$	资源与环境状态 $S$	人均水资源储量(m <sup>3</sup> /人)	水资源状态
人均绿地面积(m <sup>2</sup> /人)	城镇绿化状态			正向	0.043 1
人均道路面积(m <sup>2</sup> /人)	城市建设状态			正向	0.118 7
燃气普及率	居民生活状态			正向	0.010 9
人类响应 $R$	污水处理率/%		水资源响应	正向	0.016 3
	工业固体废物综合利用率/%		工业响应	正向	0.030 5
	当年造林面积/hm <sup>2</sup>		林业响应	正向	0.059 1
自然生态水平指数 $E$	生态影响 $I$	第三产业比重/%	产业结构响应	正向	0.067 5
		森林覆盖率/%	森林资源影响	正向	0.077 5
		城市绿化覆盖率/%	城市环境影响	正向	0.025 5
		空气质量二级以上天数占比/%	大气环境影响	正向	0.046 6
		人均耕地面积/(hm <sup>2</sup> /人)	耕地生态影响	正向	0.042 6

人类响应( $R$ )表示的是人类对生态环境进行的正向积极的保护工作,既可以达到改善生态环境的目的,也可以抑制社会经济系统对环境的破坏作用来间接减轻生态环境压力,可见人类响应( $R$ )对环境容量水平( $C$ )由较大影响,因此可以和资源与环境状况一起共同反映环境容量测度指标( $C$ )。人类响应表现在

三个层面,一是对于工业污染的治理,用污水处理率和工业固废处理率表示,二是对生态的恢复,用当年造林面积来表示,三是从经济结构层面做出的响应,通过改变产业结构比来减轻环境压力,用第三产业占比来表示。而人均水资源量、人均绿地面积、人均道路面积、燃气普及率则分别从资源储量、城镇绿化、城

市建设、居民生活状态 4 个层面表示了地区资源与环境状况。

生态影响(I)则代表资源环境状态与社会经济状态对自然生态系统造成的影响,在一定程度上反映了当下的生态水平状况,因此可以反映生态水平测度指标。森林覆盖率和城镇绿化覆盖率分别表示自然生态和城市环境受到的影响,空气质量二级以上天数占比则可以表示大气环境所受影响,耕地指标表示社会经济发展对土地生态环境所带来的影响。

根据上述分析,基于 DPSIR 模型可以构建关中平原城市群生态安全评价指标体系,结果详见表 1。然后利用熵权法对所选取指标进行赋权,熵权法计算权重结果详见表 1。

1.5 综合特征指数的构造及生态安全判据

参照张智光等<sup>[36]</sup>对共生关系的研究,在竞争系数  $\alpha, \beta$  的基础上可以得到社会经济与自然生态子系

统的受力方向(图 1)并据此构造出共生受力指数  $S_F(k)$  和  $S_E(k)$  :

$$S_F(k) = -\alpha(k) = -\frac{[\varphi_F(k)C(k) - F(k)]}{E(k)} \quad (8)$$

$$S_E(k) = -\beta(k) = -\frac{[\varphi_E(k)C(k) - E(k)]}{F(k)} \quad (9)$$

式中: $S_F(k)$ ——社会经济子系统受到自然生态子系统作用力大小; $S_E(k)$ ——自然生态子系统受到社会经济子系统的作用力大小。

进一步,可以构造出社会经济—自然生态复合系统中涵盖  $S_F(k)$  和  $S_E(k)$  的综合特征指数,即共生度指数  $S(k)$  :

$$S(k) = \frac{S_F(k) + S_E(k)}{\sqrt{S_F^2(k) + S_E^2(k)}} \quad (10)$$

式中:具有明确的生态意义,可以表征社会经济子系统与自然生态子系统共生关系的优劣程度。

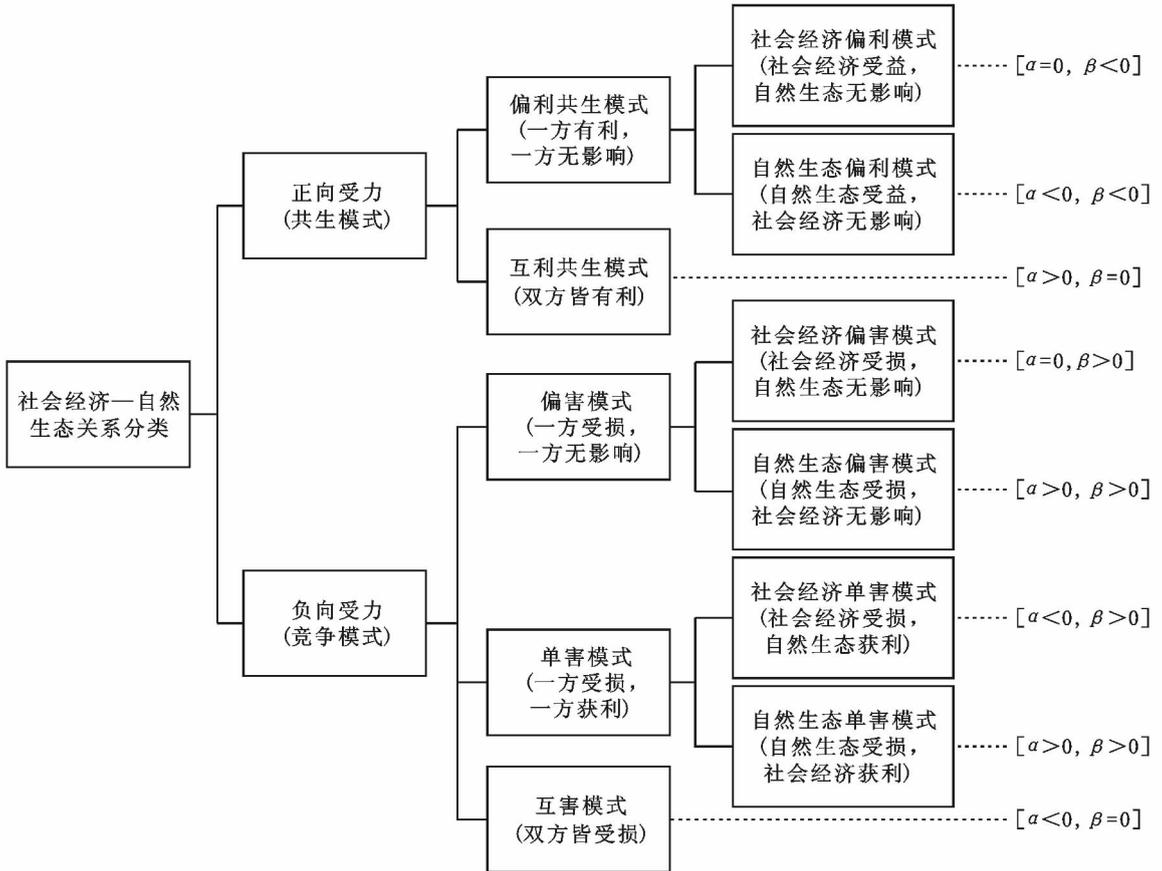


图 1 社会经济—自然生态竞争系数关系分类

由公式(10)可以推出,共生指数  $S(k)$  的取值范围为: $[-\sqrt{2}, \sqrt{2}]$ 。数值越大则两子系统共生关系越好,数值越小则两个子系统共生关系越差。但是共生指数与地区生态安全之间的关系却并不只是如此简单的对应,还需要依据生态受力指数  $S_E(k)$  为共生指数  $S(k)$  双特征指数共同来建立关中平原城市群生态

安全判断依据,以此来综合表征关中平原城市群的生态安全。本文用社会经济—自然生态二维共生模型来表示双特征指数下的生态安全演变情况。在这一模型中,生态安全被分为 6 个区域,这 6 个区域相互递进,符合生态安全在演变过程中存在着渐进性的规律。在安全区,社会经济系统和自然生态系统相互增

益,两者都能得到很好的发展;在亚安全区,自然生态系统虽然仍处于增益状态,但这是以牺牲社会经济发展为前提的生态安全,处于不稳定状态;如果社会经济系统持续受损,那么就会掉入敏感区,此时社会经济系统收到的损害要大于自然生态系统的获利,这一状态若长期存在,将使得社会经济和自然生态处于竞

争状态,两者都受到伤害,即位于危险区;在风险区,社会经济获得弱利而自然经济受损,此时人类若能认识到这一状况并采取措施改善环境,则可能从风险区跨越至康复区,使得生态安全出现好转,并有机会进入安全区域。基于上述分析,本文将生态安全状态划分为 6 类,对应 6 个生态安全预警等级如表 2 所示。

表 2 生态安全状态和预警等级

序号	生态受力指数	共生度指数	两子系统共生关系	安全状态	预警等级
1	$S_E(t) > 0$	$1 < S(t) < \sqrt{2}$	社会经济自然生态互利共生	安全级	绿色安全
2	$S_E(t) > 0$	$0 < S(t) < 1$	社会经济受损自然生态获利	亚安全级	蓝色预警
3	$S_E(t) < 0$	$0 < S(t) < 1$	社会经济获利自然生态受损	康复级	黄色预警
4	$S_E(t) > 0$	$-1 < S(t) < 0$	社会经济受损自然生态获利	敏感级	橙色预警
5	$S_E(t) < 0$	$-1 < S(t) < 0$	社会经济获利自然生态受损	风险级	紫色预警
6	$S_E(t) < 0$	$-\sqrt{2} < S(t) < -1$	社会经济自然生态互相损害	恶化级	红色危险

## 2 结果与分析

### 2.1 关中平原城市群生态安全状态综合评判结果分析

2.1.1 基本指数计算结果 通过对关中平原城市群 2008—2017 年生态安全状况进行实证分析,得到社会经济系统发展水平指数、自然生态系统发展水平指数、环境容量指数等基本指数,如图 2 所示。由图 2 可知,关中平原城市群社会经济子系统发展水平指数一直呈稳定增长状态,由 2008 年的 0.028 4 增长至 2017 年的 0.439 1,分析其增长的原因主要来自于两方面,一方面,随着 2008 年往后中国整体经济形势的高速发展,关中平原城市群社会经济环境得到了较大改善,城市化进程也不断加快,地区国民生产总值、人均可支配收入、固定资产投资、公共预算支出等社会经济发展驱动力增长明显;另一方面社会经济发展压力的减轻也是社会经济子系统发展水平指数呈上升趋势的另一重要原因,产业结构优化和技术进步使得单位 GDP 能耗不断下降,同时虽然关中平原城市群部分城市仍然存在大量工业“三废”排放状况,但就地区总体情况而言,随着环保执法力度的加强和污染物处理装置的普及,这一情况也逐年改善。而人口的不断增长和人口密度的增加为关中平原城市群社会经济发展带来的压力不断增长,虽然其他因素的改善超过了这两者带来的压力,但这一情况仍然值得注意。关中平原城市群环境容量指数从 2008—2017 年总体呈上升状态,但中间波动态势明显,波动态势在 2008—2012 年尤为突出。究其原因,第一是社会经济的发展必然会消耗自然资源,例如关中平原成人群人均水资源量不断呈下降趋势,而人均城市道路面积、人均绿地面积等资源与环境状态却呈现改善状态,这

一点值得肯定;第二是人类响应情况带来的影响,关中平原城市群产业结构升级速度较为缓慢,部分城市第三产业 GDP 占比在甚至一度出现下降趋势,总体而言而言关中平原城市群对于污染的处理率相较前几年而言得到强化,但近几年部分城市却在对污染的处理力度和效率上有所下降,而就植树造林这一指标而言,自 2008 年以来处于上升趋势,对地区环境承载力的扩充做出了一定贡献。因此综合等等原因,共同造成了关中平原城市群环境容量指数在总体上升过程中呈现波动的状态。关中平原城市群自然生态系统发展水平指数呈缓幅上升趋势,通过指标回溯发现,关中平原城市群植树造林面积不断增加,在一定程度上使得关中平原城市群森林生态涵养功能得到改善,固碳放氧能力得到提升,有利的促进了地区生态环境的良性循环,除此以外,城市绿化覆盖率的提高也改善了城市生态水平,但是另一方面,城市化的快速扩充以及工业、汽车污染物的排放对于土地生态、空气质量的影响也较大,间接导致了地区自然生态水平增益速度缓慢,这一点应当警惕。

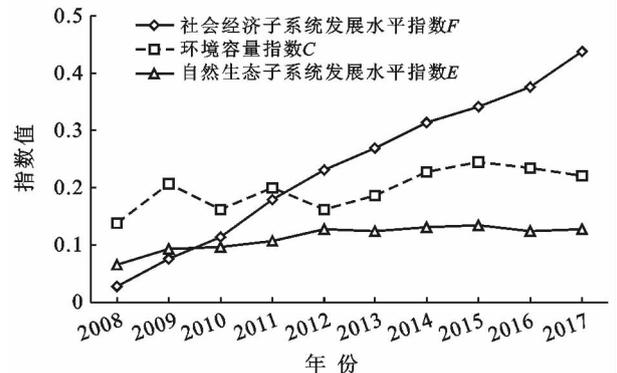


图 2 关中平原城市群生态安全基本指数

2.1.2 综合特征指数计算结果 根据上述对社会经济发展水平指数、环境容量指数、自然生态发展水平指数生态安全基本指数的测度结果,本文对 2009—2016 年关中平原城市群生态安全状态进行综合评判并给出相应的预警等级,如图 3 所示。由图 3 可知,关中平原城市群社会经济受力指数  $S(F)$  一直大于 0,这表明自然生态子系统对社会经济子系统的作用力为正向,对社会经济子系统的发展起到增益作用。关中平原城市群自然生态受力指数  $S(E)$  仅有 3 个年份(2010,2011 和 2014 年)受到正向作用力,同时按照前述生态安全判断依据来看,这 3 个年份共生指数都大于 1,表明此 3 年社会经济子系统与自然生态子系统处于共赢发展的局面,生态状况位于安全区,然而其余年份皆受到负向作用力,表明社会经济子系统对自然生态子系统产生了负向抑制作用,应当特别注意的是,在 2009 与 2013 年两个年份,共生度指数都小于 0,表明地区生态安全已经处于风险区甚至恶化区,生态状况堪忧。可知,生态安全的状态取决于社会经济子系统和自然生态子系统的共生性,为两者相互作用的结果。就 2015 及 2016 年两年而言,关中平原城市群生态安全预警状态一直为黄色预警,即生态安全位于康复区,表明关中平原城市群自然生态子系统处于产业获利而生态受损的偏害模式,可以预见,如果积极改善地区生态环境,缓解社会经济子系统

发展对自然生态带来的压力,那么关中平原城市群将有望步入绿色安全状态,而若生态偏害模式持续下去,关中平原城市群生态状态将突破安全底线,生态环境会受到更大的损害。

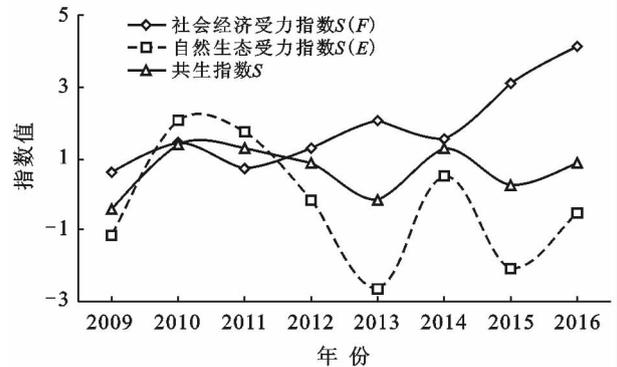


图 3 关中平原城市群生态安全状态及预警评价结果

## 2.2 各城市生态安全状态及预警等级评判结果分析

在上述研究的基础上,本文对 2009—2016 年关中平原城市群下辖城市生态安全受力状况及共生指数进行具体测度,并得到其生态安全状态及预警等级评判结果,如附图 6 及表 3 所示。从附图 6 可以看出,关中平原城市群生态格局整体呈现好转趋势,至 2016 年无生态安全恶化地区,生态安全整体格局由“西南—东北偏低,西北—东南较高”转向“西部偏低,东部较高”。

表 3 各城市 2009—2016 年生态安全预警等级评判结果

城市	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
临汾	紫色预警	绿色安全	绿色安全	紫色预警	黄色预警	绿色安全	黄色预警	绿色安全
运城	黄色预警	紫色预警	黄色预警	紫色预警	黄色预警	黄色预警	黄色预警	紫色预警
庆阳	黄色预警	紫色预警	绿色安全	黄色预警	蓝色预警	黄色预警	紫色预警	黄色预警
平凉	红色危险	紫色预警	紫色预警	绿色安全	绿色安全	绿色安全	黄色预警	黄色预警
西安	紫色预警	黄色预警	绿色安全	黄色预警	绿色安全	黄色预警	红色危险	绿色安全
宝鸡	紫色预警	绿色安全	紫色预警	红色危险	橙色预警	黄色预警	黄色预警	黄色预警
咸阳	黄色预警	黄色预警	黄色预警	黄色预警	绿色安全	黄色预警	黄色预警	黄色预警
铜川	绿色安全	黄色预警	黄色预警	绿色安全	紫色预警	黄色预警	绿色安全	绿色安全
渭南	紫色预警	黄色预警	红色危险	红色危险	绿色安全	黄色预警	黄色预警	黄色预警
商洛	绿色安全	绿色安全	绿色安全	紫色预警	黄色预警	绿色安全	紫色预警	绿色安全

2.2.1 绿色安全区域分析 由表 3 具体分析,在 2016 年生态预警状态为绿色安全 [ $S_E(t) > 0, 1 < S(t) < \sqrt{2}$ ] 的地区为临汾市、西安市、铜川市、商洛市,表明在 2016 年这几个地市社会经济子系统与自然生态子系统尚处于相互增益状态,通过对 2009—2016 年生态安全相关指数变化情况的分析,这些地市生态安全状况演变趋势呈现如下特征:就社会经济子系统受力指数  $S(F)$  而言,临汾市、西安市、铜川市、商洛市社会经济子系统发展水平指数都处于上升趋势,社会经济

系统受到自然生态子系统的正向作用力,西安作为国家中心城市,近年来经济发展势头尤为强劲,对关中平原城市群发展带动作用明显。结合自然生态系统发展水平指数  $S(E)$  与共生度指数  $S$  来看,临汾市 2010—2012 年工业污染排放量呈上涨趋势,并在 2012 年达到顶峰,导致这三年临汾市生态承载力遭受了破坏,土地、空气、水资源生态状况都受到威胁,自然生态系统整体遭受负向作用力,生态状态在 2012 年一度处于风险区,2012 年以后随着工业污染

排放量的下降及自然生态环境才逐步得到好转。西安市生态安全演变呈倒 V 形,在 2009—2013 年间由风险区转为安全区,但 2013 年后生态状况出现下降乃至危险区,由于西安市对于秦岭地区西安段自然资源的保护力度不足,森林生态涵养功能在一定程度上遭到损害,另外不可忽视的是,随着城镇化的快速发展,人口激增为西安市带来的生态压力显著增大,但是此后随着西安市对秦岭整治力度加强以及三产比例的上升(2016 年达 61.29%),生态承载力得以恢复,生态环境状况得到明显提升。同样位于秦岭地区的商洛市森林资源与水资源在关中平原城市群中都位于前列,生态承载力情况较好,且社会经济的发展能与自然生态保护长期处于协调发展状态,但是在 2012 年与 2015 年仍出了位于风险区的情况,通过指标回溯发现,在这两个年份工业污染出现反复情况,对其生态产生了胁迫,另一方面,耕地资源的减少也是其生态安全出现下降的一大原因。铜川市生态容量指数一直呈上升趋势,然而自然生态指数呈 U 形态势,在 2013—2014 年间出现了下降,同时自然生态子系统受力指数为负,表明社会经济的发展对自然生态造成了侵害,虽然社会经济发展获利指数超过生态受损指数,但生态偏害模式仍不可取,需要在未来进一步改善。

**2.2.2 黄色预警区域分析** 在 2016 年生态预警状态为黄色预警 $[S_E(t) < 0, 0 < S(t) < 1]$ 的地区为庆阳市、平凉市、咸阳市、宝鸡市和渭南市。表明在 2016 年这几个地区社会经济获利而自然生态受损,社会经济子系统的发展已经阻碍了自然生态子系统的发展。同时社会经济子系统与自然生态子系统共生指数(S)大于 0,这几个地区生态状况尚未突破安全底线,若社会经济发展对生态水平转向增益状态,地区生态状况有转向安全区的可能。通过对 2009—2016 年生态安全相关指数变化情况的分析,这些地市生态安全状况演变趋势呈现如下特征:在 5 个城市中,庆阳市社会经济子系统发展水平虽然在近年来有所提升,但在关中平原城市群中仍处于较为靠后的水平,而产业结构的不合理使得第三产业占比过低,生态承载力处于低位水平,更为重要的是,相比于秦岭沿线城市,庆阳市自然资源禀赋较弱,多重原因导致庆阳市生态安全状况在多数时期都是处于预警状态,社会经济子系统与自然资源子系统无法协调发展。平凉市与庆阳市类似,社会经济子系统发展水平排名靠后,同时自然生态受力指数在前几年受到负向作用力,在 2009—2011 年生态环境受损严重,处于风险区甚至危险区,意味着该地区不仅无法满足自然生态建设要求,社会

经济发展也受到损害或只能获取弱利,通过指标回溯发现,在前几年平凉市 GDP 增长动力不足,工业“三废”污染较大,环境质量堪忧,形成恶性循环,后期社会经济子系统对自然生态子系统的胁迫有所减轻并转向增益状态,但并未一直持续,仍需长期提升生态环境质量。咸阳市生态状况除 2013 年位于安全区外,其余年份皆处于黄色预警状态,即处于康复区,咸阳市社会经济子系统受力方向全部为正向,但自然资源子系统受力方向除 2013 年为正以外其余全部为负,表明咸阳市社会经济发展一直以损害自然资源子系统发展为前提,处于生态偏害状态,在未来的发展过程中必须重视生态文明建设,减轻社会经济发展为自然生态带来的压力。宝鸡市自 2010 年以后社会经济发展与自然生态发展长期处于不协调状态,在 2012 年甚至处于恶化区,表明此时社会经济子系统与自然生态子系统处于相互损害状态,后期虽有所好转,但仍无法达到社会经济与自然生态的协调发展,作为秦岭沿线城市之一,宝鸡市森林覆盖面积排名靠前,各类自然资源丰富,但作为工业城市,宝鸡二产占比一直高于三产,2016 年第二产业占比 63.5%而第三产业占比却仅有 27.6%,工业污染问题一直是宝鸡面临的重点攻坚问题,例如在 2016 年工业废水排放总量一度达  $3.57 \times 10^7$  t,严重危害生态安全。可以预见,第二产业、第三产业比例悬殊将导致宝鸡市产业结构转型升级缓慢,并成为困扰其生态安全发展的长期问题。渭南市社会经济子系统发展水平指数一直稳步提升,但自然生态子系统发展水平指数却一直呈下滑趋势,自然生态子系统在大部分时间受力方向为负,表明其受到损害,尤其值得注意的是,2010—2011 年渭南市生态安全社会经济子系统与自然资源子系统受力方向皆为负,共生指数 S 都小于 -1,表明渭南市生态状况已经突破安全底线,处于恶化区。后面几年社会经济子系统受力方向转为正向,但自然经济子系统受力指数仍为负向,表明渭南市仍处于牺牲环境发展社会经济的模式,生态建设水平有待提升。

**2.2.3 紫色预警区域分析** 在 2016 年生态预警状态为紫色预警 $[S_E(t) < 0, -1 < S(t) < 0]$ 的地区为运城市,表明运城市自然生态子系统受到负向作用力,且受损值已经超过社会经济子系统的获利值,共生指数小于 0,意味着运城市生态环境已经突破了安全底线,位于风险区。通过对 2009—2016 年运城市生态安全相关指数变化情况的分析,运城市生态安全状况演变趋势呈现如下特征:运城市社会经济子系统发展水平指数呈上升状态,且其受力方向  $S(F)$  为正向,表明自然生态子系统对社会经济子系统的发展有增

益作用,但是自然生态子系统发展水平指数在 2010 及 2012 年都出现了下滑,并且这两年生态受力方向都为负,处于不可持续的偏害状态。运城市生态安全状况在 2013—2015 年有所好转进入生态康复区,但无法转向安全区,更为重要的是,运城市生态容量指数在 2015 年以后出现了下降,表明地区生态承载力出现了危机,这也是其生态安全掉入危险区的重要原因。通过指标回溯发现,运城市在近年来对于工业污染的处理力度出现了滑坡,同时生态造林力度也下降明显,再加上人口密度的持续增加,导致了生态承载力遭到了巨大压力,未来应当更加注重生态承载力的恢复。

### 3 结论与对策建议

#### 3.1 结论

(1) 社会经济—自然生态 Lotka-Volterra 共生模型可以综合指标体系法与特征指数法的优势:①文中的社会经济受力指数  $S(F)$ 、自然生态受力指数  $S(E)$  以及共生度指数  $S$  都具有明确的生态意义,通过生态受力指数  $S_E(k)$ —共生指数  $S(k)$  双特征指数可以准确分析各地区生态安全状况;②通过指标回溯可以得到造成地区生态安全现状的具体原因,便于相关部门有针对性的制定对策。

(2) 从时间演变来看,2008—2017 年关中平原城市群社会经济发展迅猛但生态环境改善状况幅度并不明显,地区生态承载力呈现波动状态但总体呈上升趋势。从生态安全受力方向及共生度指数来看,关中平原城市群自 2009—2016 年社会经济子系统受力方向为正,但自然生态子系统受力方向在多个年份表现为负,表明社会经济高速发展而生态环境受到侵害的偏利发展模式在关中平原城市群长期存在,这一不可持续的发展模式若得不到及时纠偏不仅将继续给地区生态环境造成损害,同时社会经济发展也有可能遭到反噬,生态安全最终掉入恶化区。

从空间格局来看,关中平原城市群下辖各城市生态安全演变格局差异显著,临汾市、西安市、铜川市、商洛市等地区环境改善状况显著,在 2016 年进入安全区,庆阳市、平凉市、咸阳市、宝鸡市、渭南市处于黄色预警状态,社会经济与生态环境仍不能协调发展,运城市生态安全状况出现恶化趋势,社会经济获弱利而自然生态受到强害,值得警惕。

(3) 通过指标回溯发现,工业污染给关中平原城市群生态安全提升带来的桎梏仍有待破解。另一方面,城镇化的快速扩张引起的人口压力对城市生态承载力的压力与日俱增,特别是西安市被确定为国家级

中心城市以来,关中地区对于人口的吸引力不断增加,人口规模不断扩张,同时城镇化也会对土地、森林、水资源等自然资源提出需求,部分城市生态环境受损明显。但值得肯定的是,在处理工业“三废”、扩大生态造林面积上,大部门城市进步明显,在一定程度上缓解了生态安全面临的恶化风险。

#### 3.2 对策建议

(1) 对于生态预警状态为绿色安全的城市而言,西安应当优化人口布局,避免过度的人口聚集给生态承载力造成的破坏。商洛市可以充分利用其森林资源,加强基础设施建设发展生态旅游经济,进行保护型开发,使得社会经济子系统对自然生态子系统增益加强。临汾市和铜川市则要继续保持工业污染排放量不断下降这一良好态势,并提升城镇化的质量。对于生态安全预警状态为黄色预警的城市而言,庆阳市应当加快步伐优化其产业结构,改变三产占比过低的发展局面,平凉市则要稳固经济发展,防止经济滑坡给生态带来更严重的损害,庆阳和平凉市同处自然资源禀赋弱势区,必须抓住关中平原城市群建设机遇,培育地区优势产业。宝鸡、咸阳市作为工业城市,要制定严格的环境保护政策,禁止新增高污染、高能耗的工业项目,同时及时淘汰落后产能并对已经过剩的产能进行裁剪。渭南市生态安全曾处一度于恶化区,应当强化其生态建设水平,注重绿色发展,避免其低质城镇化给自然生态系统的过度负荷。对于处于风险区的运城市而言,当务之急是进行生态修复,做好生态保护红线的严格划定,出台完备的自然资源保护政策,防止生态进一步恶化和生态破坏给社会经济发展造成损害。

(2) 关中平原城市群在 2016 年整体处于康复区,未来有希望转入生态安全区,关键在于减轻自然生态受到的压力。关中平原城市群应当制定联动环境执法机制,统一严格污染排放、生产能耗、质量标准,倒逼相关企业自我改革,促进地区产业分布优化。除了限制落后产能,尽快培育关中平原城市群自身的优势绿色、高新产业也是当前的重中之中,绿色、高新产业的发展对于生态环境也具有增益效用,从而缓解当前关中平原城市群社会经济发展给自然生态造成的压力。同时应当抓住西安被确立为国家中心城市这一契机,强化西安对关中平原城市群的辐射带动范围和力度,强化各城市的基础建设和产业发展氛围,打造“绿色关中平原城市产业链”,更加注重城市群的联动性,提升关中平原城市群整体的经济实力和经济发展质量,缩小地区间的发展差距,进而推动实现社会经济与生态环境协调发展。

(3) 对于关中原城市群中的秦岭沿线城市,必须加深对保护秦岭这一生态战略的认识,要加快构建以国家公园为主体的秦岭自然保护地体系,破解秦岭各自然保护地区域交叉重叠、多头管理的碎片化问题,能更科学的开发秦岭能源资源、旅游资源、林业资源,用同时更严格的立法来明晰秦岭生态保护的界限,加大对秦岭违法商业活动的打击力度。从而在最大程度保护秦岭地区的生态安全,进而提升关中原城市群的整体生态环境。

#### [参 考 文 献]

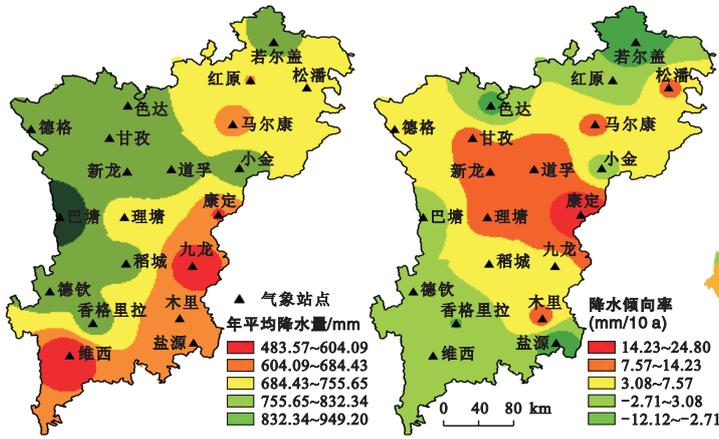
- [1] 任梅,程钰,任建兰. 山东省城市化与生态环境非协调耦合关系判别及空间类型研究[J]. 世界地理研究, 2016, 25(5):58-68.
- [2] Li Yangfan, Sun Xiang, Zhu Xiaodong. An early warning method of landscape ecological security in rapid urbanizing coastal areas and its application in Xiamen, China[J]. Ecological Modelling, 2010,221(19):2251-2260.
- [3] Cui Shenghui, Hong Huasheng, Huang Yunfeng. Progress of the ecological security research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(4):861-868.
- [4] Rapport D J, Hildén, Mikael. An evolving role for ecological indicators; From documenting ecological conditions to monitoring drivers and policy responses [J]. Ecological Indicators, 2013,28(1):10-15.
- [5] 张智光. 林业生态安全的共生耦合测度模型与判据[J]. 中国人口·资源与环境, 2014,24(8):90-99.
- [6] Stone C, Old K, Kile G, et al. Forest health monitoring in Australia: National and regional commitments and operational realities[J]. Ecosystem Health, 2001,7(1):48-57.
- [7] 刘时栋,徐丽萍,张婕. 新疆土地生态安全时空变化[J]. 生态学报, 2019,39(11):3871-3884.
- [8] Xu Xibao, Yang Guishan, Yan Tan, et al. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020 [J]. Science of the Total Environment, 2016,554/555:7-16.
- [9] 王云,潘竟虎. 基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化:以张掖市甘州区为例[J/OL]. 生态学报, 2019,39(10):3455-3467.
- [10] 李虹,王丽娟,刘永. 水库型流域水质安全评估与预警技术框架[J]. 水生态学杂志, 2018,39(6):1-7.
- [11] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,张懿鲤. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报, 2012,67(1):3-12.
- [12] Zhaorong Qu, Qingke Zhu, Yongyu Sun. Regional ecological security and diagnosis of obstacle factors in underdeveloped regions: A case study in Yunnan Province, China[J]. Journal of Mountain Science, 2017,14(5):870-884.
- [13] 荣月静,郭新亚,杜世勋,等. 基于生态系统服务功能及生态敏感性与 PSR 模型的生态承载力空间分析[J]. 水土保持研究, 2019,26(1):323-329.
- [14] 裴鹰,杨俊,李冰心,等. 城市边缘区生态承载力时空分异研究:以甘井子区为例[J]. 生态学报, 2019,39(5):235-244.
- [15] 杨屹,胡蝶. 生态脆弱区榆林三维生态足迹动态变化及其驱动因素[J]. 自然资源学报, 2018,33(7):1204-1217.
- [16] 李姣,周翠烟,张灿明,等. 基于生态足迹的湖南省洞庭湖生态经济区全要素生态效率研究[J]. 经济地理, 2019,39(2):199-206.
- [17] 李杨,李海东,施卫省,等. 基于神经网络的土壤重金属预测及生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2017,26(4):591-597.
- [18] Chen Meiting, Kuang Yaoqiu, Huang Ningsheng, et al. Early-warning of spatiotemporal evolvement of land ecological security in Guangdong Province based on RBF[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(3):217-224.
- [19] 黄和平,杨宗之. 基于 PSR-熵权模糊物元模型的森林生态安全动态评价:以中部 6 省为例[J]. 中国农业资源与区划, 2018,39(11):42-51.
- [20] 常婷婷,姜世中,彭文甫. 基于熵权物元模型的四川省土地生态安全评价[J]. 中国农学通报, 2015,31(26):122-127.
- [21] 李建春,袁文华. 基于 GIS 格网模型的银川市土地生态安全评价研究[J]. 自然资源学报, 2017,32(6):988-1001.
- [22] 刘庆,陈利根,舒帮荣,等. 长株潭城市群土地生态安全动态评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010,19(10):1192-1197.
- [23] 秦晓楠,程钰. 中国旅游城市生态安全系统评估与类型划分研究:基于节点权重约束网络 DEA 模型[J]. 地理科学, 2019,39(1):156-163.
- [24] 牛慧,张云路,李雄. 基于“城乡—自然”共轭关系重建的市域绿地系统规划与管控研究:以北京城市副中心为例[J]. 城市发展研究, 2019,26(3):92-100.
- [25] 魏黎灵,李岚彬,等. 基于生态足迹法的闽三角城市群生态安全评价[J]. 生态学报, 2018,38(12):4317-4326.
- [26] 王振波,梁龙武,方创琳,庄汝龙. 京津冀特大城市群生态安全格局时空演变特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2018,38(12):4132-4144.
- [27] 胡志仁,龚建周,李天翔,等. 珠江三角洲城市群生态安全评价及态势分析[J]. 生态环境学报, 2018,27(2):304-312.
- [28] 宓泽锋,曾刚,周灿,等. 长三角城市群生态文明建设问题及潜力研究:基于 5 大城市群的比较[J]. 长江流域资源与环境, 2018,27(3):463-472.

与土地集约度的相关程度提出建议和意见,鲜见对土地集约利用与土地利用结构进行系统分析的研究。而本文引入耦合协调模型,系统地研究土地利用结构与土地集约利用两个系统间的耦合协调关系,从整体上研究二者关系,是一个新的方向。结合本文与现有研究的思路,后续研究中可以同时与研究区进行两个系统关系研究和各个地类与土地集约利用系统进行研究,整体上掌握二者关系,局部进行土地利用结构的调整和优化,以达到最优的效果。本文不足之处是本研究主要着眼于时间变化分析,缺少在空间尺度的特征分析,未来应结合时间与空间双重尺度对区域土地集约利用和土地利用结构进行研究。

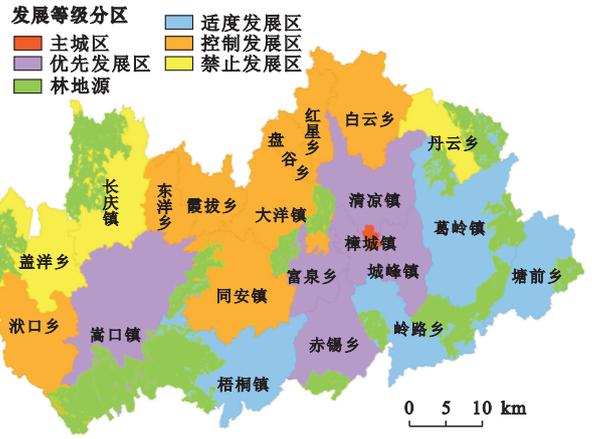
### 【参 考 文 献】

- [1] 王芳萍,师燕,姚步青,等. 西宁市土地利用效益与新型城镇化耦合协调度研究[J]. 水土保持研究,2016,23(6): 253-259.
- [2] 张志,龚健,王利华,等. 城市土地集约利用与社会经济时空耦合协调发展评价:以湖北省12个地级市为例[J]. 水土保持研究,2017,24(4):296-303,310.
- [3] 谭勇,徐文海,韩啸,等. 新时代区域建设用地节约集约利用评价:以长沙梅溪湖国际新城为例[J]. 经济地理,2018,38(9):200-205.
- [4] 范辉,刘卫东,吴泽斌,等. 城市土地集约利用内部协调性的时空演变:以武汉市中心城区为例[J]. 地理科学,2014,34(6):696-704.
- [5] 汪延彬,胡燕凌,米成林,等. 基于GIS和FAHP的高校教育用地集约利用评价[J]. 安徽师范大学学报:自然科学版,2017,40(2):167-173.
- [6] 黄佩. 基于综合评价模型的阿坝州土地可持续利用评价[J]. 当代经济,2018(19):89-91.
- [7] 于永建,刘学录. 基于熵值法的兰州市城市土地集约度与土地利用结构关系的研究[J]. 黑龙江农业科学,2010(4):61-64.
- [8] 张昌善,程文仕,刘学录,等. 基于改进灰色关联模型的兰州市土地集约度与利用结构关系研究[J]. 安徽农业科学,2017,45(13):195-197,200.
- [9] 范建双,虞晓芬. 杭州市土地集约利用与产业结构演进的互动关系[J]. 杭州:浙江工业大学学报:社会科学版,2016,15(3):273-280.
- [10] 周营,张游. 博罗县土地利用结构与产业结构耦合协调关系[J]. 资源与产业,2018,20(2):59-64.
- [11] 关江华,张雪冰. 县域土地利用结构与产业结构调整耦合机制研究:以黄冈市为例[J]. 黄冈师范学院学报,2018,38(4):104-108.
- [12] 严超,张安明,石仁蓉,等. 重庆市土地利用结构与产业结构耦合协调发展评价[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2015,40(7):158-164.
- [13] 杨莹. 广州市花都区土地集约利用评价[J]. 广东土地科学,2016,15(1):16-22.
- [14] 何明花,刘峰贵,唐仲霞,等. 西宁市城市土地集约利用研究[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(3):44-49.
- [15] 宁婉君,赵小汎,徐育红,等. 盘锦市城市土地集约利用评价研究[J]. 国土与自然资源研究,2018(3):38-41.
- [16] 徐婕. 基于熵值法的德阳市城市土地集约利用综合评价[J]. 当代经济,2018(17):62-65.
- [17] 朱永明,李葛,张慧,等. 生态宜居视角下农村居民点用地集约利用评价及障碍因子诊断[J]. 土壤通报,2018,49(3):525-530.
- [18] 樊鹏飞,梁流涛,陈常优,等. 城市土地集约利用评价及障碍因子诊断:基于生态健康与低碳发展视角[J]. 水土保持通报,2016,36(4):273-279.
- [19] 宋德勇,苗澍森,杨睿,等. 土地集约利用指标评价研究:以武汉市为例[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(S1):62-65.
- [29] 赵焯,李岚彬,程煜,等. 闽三角城市群生态安全动态评估[J]. 森林与环境学报,2018,38(4):451-457.
- [30] 张智光. 林业生态安全的共生耦合测度模型与判据[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(8):90-99.
- [31] 廖冰,张智光,刘春香,等. 引入森林资源中介变量的林业产业与生态作用机理研究[J]. 中国人口·资源与环境,2017,27(11):159-168.
- [32] 申世广,刘小钊,范晨璟. 基于生态安全格局的苏锡常都市圈绿化系统空间布局研究[J]. 现代城市研究,2018(11):20-25.
- [33] 谭文兵,李雪梅. 灰色关联投影模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 中国人口·资源与环境,2017,27(S2):111-114.
- [34] 张宏伟,阿如早,孙紫英,等. 基于GIS的阴山北麓地区土地生态安全评价[J]. 安全与环境学报,2017,17(6):2421-2426.
- [35] 王云,潘竟虎. 基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化:以张掖市甘州区为例[J]. 生态学报,2019,39(10):1-12.
- [36] 张智光. 生态文明阈值和绿值二步测度:指标—指数耦合链方法[J]. 中国人口·资源与环境,2017,27(9):212-224.

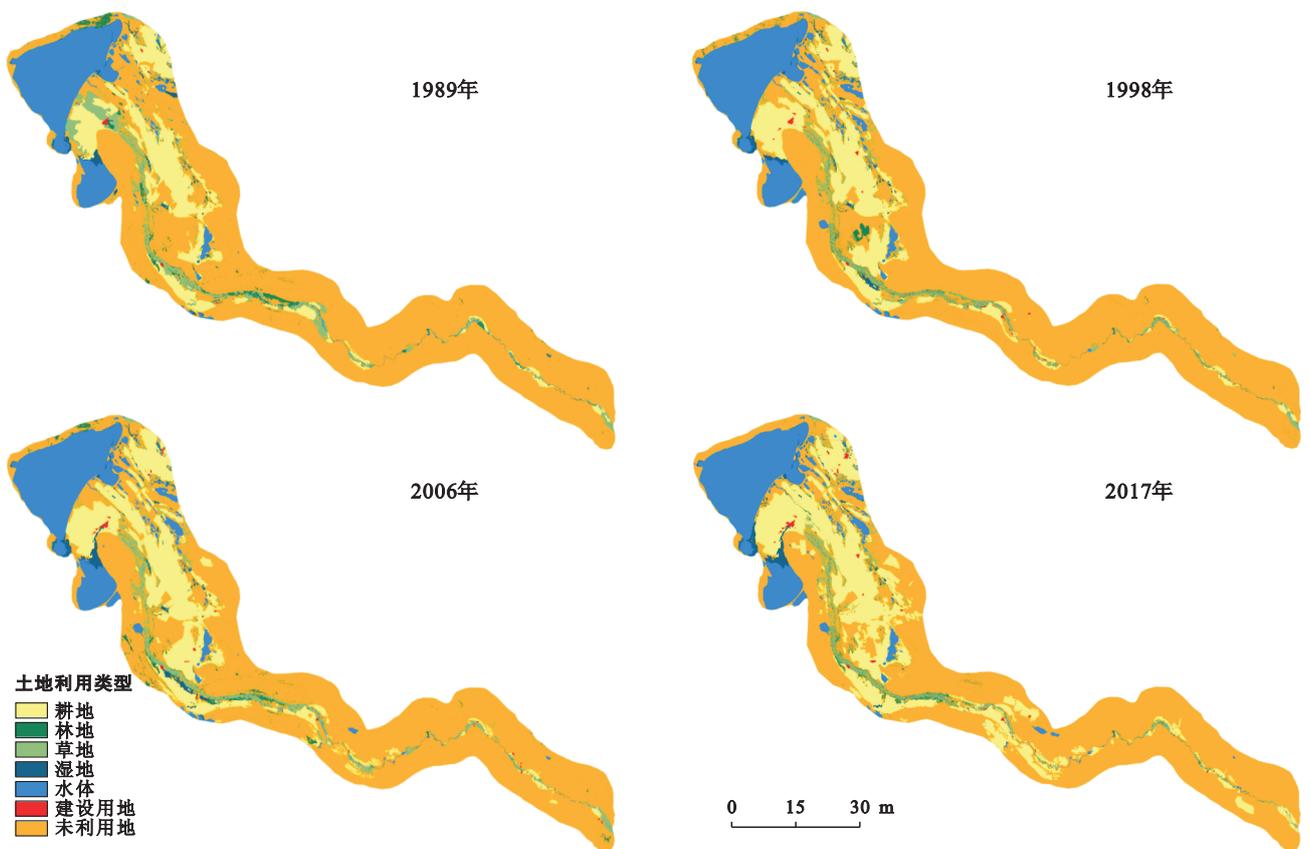
(上接第239页)



附图3 南方农牧交错带年均降水量及变化倾向率空间分布(第186页)



附图4 福建省永泰县综合发展等级分布(第203页)



附图5 乌伦古河流域1989—2017年土地利用类型空间分布(第226页)



附图6 陕西省关中平原城市群生态安全格局(第236页)