

DOI: 10.5846/stxb202005211296

姚焱中, 李诗婷, 苏美蓉, 廖乐乐, 徐超, 岳文淙. 区县生态系统健康评价方法——以东莞市各镇区为例. 生态学报, 2021, 41(15): 5998-6011.

Yao Y Z, Li S T, Su M R, Liao L L, Xu C, Yue W C. County ecosystem health assessment: a case study of 32 counties in Dongguan City, China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 5998-6011.

区县生态系统健康评价方法 ——以东莞市各镇区为例

姚焱中¹, 李诗婷², 苏美蓉^{2,*}, 廖乐乐², 徐超², 岳文淙²

¹ 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036

² 东莞理工学院生态环境工程技术研发中心, 东莞 523808

摘要: 现有城市生态系统健康研究多集中在城市及城市群层面, 未能深入探究城市内部特征。鉴于此, 聚焦区县生态系统健康状况, 进一步探究城市内部的健康分布特征; 提出了“发展水平-服务功能-抵御干扰-自我维系”四维区县生态系统健康评价框架, 并建立了相应的多层次指标体系, 构建了区县生态系统健康评价模型; 在分析区县生态系统健康变化过程及空间分异特征的基础上, 识别区县生态系统健康的主要贡献因子。针对东莞各镇区的研究结果表明: 1995—2015 年间, 各镇区生态系统健康状态总体趋于恶化, 其中西南地区生态系统的退化比东南地区更为明显。自我维系对各镇区生态系统健康变化具有重要影响, 主要瓶颈在于快速发展过程中土地资源的稀缺及较低的利用效率。对区县生态系统健康的研究可以帮助决策者了解城市生态系统复杂的内部特征, 在此基础上更好地平衡区域发展、维护城市生态系统健康。

关键词: 生态系统健康; 四维评价框架; 贡献因子; 区县尺度; 东莞

County ecosystem health assessment: a case study of 32 counties in Dongguan City, China

YAO Yanzhong¹, LI Shiting², SU Meirong^{2,*}, LIAO Lele², XU Chao², YUE Wencong²

¹ College of Environment, Liaoning University, Shenyang 110036, China

² Research Center for Eco-Environmental Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China

Abstract: With the rapid urbanization, the urban population continues to increase, and the land use changes increasingly, which may induce the deterioration of ecosystems and cause threat to urban sustainable development. As an effective tool of systematic analysis, the concept of urban ecosystem health can be introduced to comprehensively evaluate the development status of cities and provide a systematic diagnosis for urban ecosystems. It is found that existing health studies on urban ecosystems mostly focus on the scale of cities and urban agglomerations, but few studies have concretely analyzed differences within cities, which is right important for urban ecological management. In order to further explore the characteristics of health distribution within cities, we paid attention to the ecosystem health at county scale in this paper. After analyzing the key characteristics of ecosystem health, we first proposed a new four-dimensional evaluation framework of county ecosystem health including “development level-service function-resistance of disturbance-maintenance”. And then we established a multi-layer evaluation index system of county ecosystem health composed of 20 indicators. The evaluation model of weighted sum was also constructed. In addition, the key contribution factors of county ecosystem health were identified based on the analysis of change of county ecosystem health and spatial differentiation features. It is indicated that the state of ecosystem

基金项目: 国家重点研发计划资助(2016YFC0502800); 国家自然科学基金(71673027); 广东省自然科学基金杰出青年基金项目(2017A030306032); 广东省高等学校珠江学者岗位计划资助项目(2017)

收稿日期: 2020-05-21; 网络出版日期: 2021-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sumr@dgut.edu.cn

health showed a common tendency of deterioration for the 32 counties of Dongguan from 1995 to 2015, while the degradation of the southwest region (e.g., Houjie and Shatian) was more serious than those of the southeast region (e.g., Huangjiang and Qingxi). Among the four dimensions of “development level-service function-resistance of disturbance-maintenance”, we found that maintenance has been exerting a great impact on the county ecosystem health, leading to changes of ecosystem health. It is further found that there were two main limiting factors of county ecosystem health, i.e., the scarcity of land and its low usage efficiency. To improve the urban ecosystem health level of Dongguan, it is suggested to improve the usage efficiency of land and other resources, and further adjust the development model and industrial structure. For example, we can release the land stock market by three-old transformation; promote ecological protection and especially ensure the health of water, soil and forest; make use of the location advantages of Dongguan to optimize the industrial structure of various counties. It is concluded that the study on county ecosystem health can help decision-makers better understand the complicated internal characteristics in urban ecosystems, which is useful for balancing regional development and maintaining the health of urban ecosystem.

Key Words: ecosystem health; four-dimensional evaluation framework; contribution factors; county scale; Dongguan

随着城市水平快速发展,城市人口不断增加,土地利用急剧变化^[1-3],可能造成生态系统恶化,对可持续发展造成严重威胁^[2,4-6]。作为对城市进行全面评估的工具,城市生态系统健康受到了广泛关注。研究城市生态系统健康状况,有利于综合把握城市发展现状,为城市生态系统提供一个系统的诊断。

城市生态系统健康指城市系统保持完整和活力,以继续向人类提供生态服务^[2,7-10]。一个健康的城市生态系统不仅能保持合理的生态结构和功能,还应具有为城市居民生产生活提供服务的能力^[11-13]。学者们建立了诸多框架,利用各种模型进行生态系统的健康评估^[2,14-15]。现有城市生态系统健康评价框架从系统特征、人类自身或人与自然共同作用出发,建立评价框架^[16-18],包括自然-经济-社会(NES)模型^[19-20]、活力-组织结构-恢复力(VOR)模型^[2,17,21-22]、活力-结构-恢复力-环境服务-生态系统功能(VORSF)模型^[23-24]、压力-状态-响应(PSR)模型^[25-29]、驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)模型^[25,30-31]及结构-功能-过程-发展(SFPD)模型^[15]等。这些框架很少考虑尺度效应的影响,无法准确识别城市生态系统内部特征。实际上,生态系统在低级尺度往往具有明显的分异性^[2,29]。区县作为城市常见的下级行政或空间单元,能够较充分地反映城市内部特征。同时,区县发展程度不一致可能导致不同区县人与自然相互作用程度的不同^[3,6,22,24,29],使得现有城市生态系统评价框架难以直接应用于区县尺度。目前为数不多的区县健康评价多采用“PSR”模型^[29]、“VOR”及其衍生模型^[22,24]等传统框架,难以反映人与自然的作用过程。

目前城市生态系统健康研究多集中在城市及城市群层面,未能充分探究城市内部特征。因此,进一步从区县生态系统健康层面探究城市内部特征,实现生态系统的精细诊断和治理极为重要。本研究聚焦区县,提出一种新的“发展水平-服务功能-抵御干扰-自我维系”(Development level-Service function-Resistance of disturbance-Maintenance, DSRM)四维区县生态系统健康评价框架,在系统分析区县系统健康变化过程及空间分异特征的基础上,识别区县系统健康的主要因子,为管理者制定政策提供理论依据。

1 方法

1.1 区县生态系统健康评价框架

现有研究通常将城市系统分为自然、社会与经济三个子系统,认为它们相互影响,共同决定系统健康^[20]。鉴于人类主导的社会经济系统与自然系统早已密不可分^[6,28],自然环境已被人类活动深度干扰和渗透,我们将城市系统划分为人工与非人工子系统,主要区别在于人与自然的相互作用过程中的主导作用不同。在非人工子系统中,人与自然的相互作用以自然为主,但不排除人为作用。在这种划分模式下,人工与非人工子系统能够充分反映城市系统中人与自然的相互作用,人工与非人工子系统的相互作用可以通过图1中的四个要素来

表现。

城市演化常遵循这样一条路径:在非人工子系统支撑下,城市发展水平不断提高,系统为人类提供服务的能力也不断增强。人工子系统不断壮大对非人工子系统造成干扰。非人工子系统受到干扰后,能够通过自我调节来抵御干扰,保证城市生态系统稳定。值得指出的是,人工子系统发展到一定程度,也会维护并改善非人工子系统。演化过程中,如果非人工子系统的受干扰程度大于其抵御干扰及更新维育能力,就将导致城市系统恶化甚至崩溃^[12]。

土地作为减少城市脆弱性的重要资源,是城市发展的自然基础,对生态系统具有重要支撑作用^[32-33],土地交易与占用,会促使土地类型和利用方式快速变化^[32,34],对城市生态系统服务及健康产生深远影响^[24,28-29,34]。而区县是土地利用规划管理的最佳尺度^[24,29],区县系统健康研究应重点关注土地利用变化及其引起的系列反应。为全面评价区县生态系统健康状态,我们以土地利用信息为重心,建立了一个更适宜于区县系统的四维健康评价框架,以更好理解区县特点,全面反映区县生态系统健康状态。

1.2 区县生态系统健康评价指标体系

目前区县生态系统健康评价多依赖土地利用变化,很少涉及经济、人口及城市功能^[2,29],在评估健康状况方面缺乏系统理解。针对这一问题,我们基于 DSRM 框架,建立了多层级区县生态系统健康评价体系(表 1)。这套指标体系考虑了基本原则(如科学性、全面性、动态性、数据可得性等),包括目标层(健康综合指数)、要素层(发展水平、服务功能、抵御干扰及自我维育)及指标层(涉及城市发展、系统服务与土地利用)。

1.3 生态系统健康评价模型

1.3.1 熵权法

各指标包含信息量不同,对评价对象的分辨作用有所不同,应具有不同权重^[36]。熵权法基于信息熵对指标进行赋权,能够较客观地反映指标重要性;但其计算略为复杂,且信息熵计算原理决定了其不适用于评价对象较少情形。通常,指标信息熵越大,权重也越大^[37]。在计算前,采用极差法消除不同量纲影响。利用熵权法确定权重的具体步骤如下:

(1) 指标同度化并计算信息熵 e_j

$$p_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum_{i=1}^n q_{ij}} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m) \tag{1}$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \tag{2}$$

式中, q_{ij} 是第 i 个镇区第 j 项指标标准化值, n 是东莞市镇区数量, m 是评价指标数量, p_{ij} 是第 i 个镇区第 j 项指标所占比重。

(2) 计算第 j 项指标差异系数 g_j 及权重 w_j

$$g_j = 1 - e_j \tag{3}$$

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, m) \tag{4}$$

通过比较各指标权重大小,可以确定其贡献度,找出影响区县生态系统健康的主要因素。

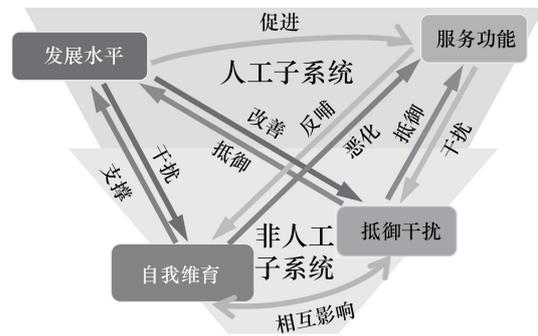


图 1 区县生态系统健康评价框架

Fig.1 The framework of county ecosystem health assessment

表 1 区县生态系统健康评价指标

Table 1 County ecosystem health evaluation indicators

目标层 Object layer	要素层 Factor layer	指标层 Index layer	指标意义 Meaning	方向 Direction
健康综合指数 Ecosystem health index	发展水平 主要从经济水平及结构、人口规模及增长角度衡量城市发展水平	GDP/万元	表征区县经济水平	正向
		第一产业占比/%	表征区县经济结构	正向
		第二产业占比/%		负向
	服务功能 包括人类服务需求、城市基础服务能力与整体服务水平	人口自然增长率/%	表征区县人口规模及增长水平	正向
		总人口数/人		正向
		服务网点数/个	表示区县基础服务能力	正向
	抵御干扰 包括人类对生态系统的干扰及系统自身状态	每千人病床数/张	表示人们对系统服务的需求	正向
		人口密度/(人/km ²)		负向
		GDP 耗电量/(kWh/万元)	负向	
	自我维系 包括城市生态系统结构及自我调节能力	第三产业占比/%	反映区县整体服务水平	正向
		农药施用量/t	衡量人类对生态系统的干扰,间接反映系统可用环境容量	负向
		化肥施用量/t		负向
		人口干扰度 ¹ /%	负向	
		土地垦殖率 ² /%	衡量土地利用情况及生态现状,侧面反映系统环境容量	负向
		均匀度指数 ³		正向
碳密度 ⁴ /(kg/km ²)	表征系统自我调节与恢复能力	正向		
生态弹性度 ⁵	森林覆盖率/%	表征城市生态系统结构	正向	
	水域覆盖率/%		正向	
	多样化指数 ⁶	正向		

¹人口干扰度是建设用地与土地总面积的比值;²土地垦殖率为耕地与土地总面积的比值;³均匀度指数是多样性指数与其最大值的比值;⁴碳密度为各类型土地所占比例与碳密度乘积的总和,各类型土地碳密度见表 2;⁵生态弹性度为各类型土地所占比例与弹性度分值乘积的总和,各类型土地弹性度分值见表 2;⁶多样化指数是各类型土地所占比例与其自然对数乘积总和的负数

表 2 不同类型土地的碳密度及弹性度分值^[35]

Table 2 Carbon density and Elasticity scores of different types of land

土地类型 Land type	碳密度 Carbon density/ (kg/km ²)	弹性度分值 Elasticity scores	土地类型 Land type	碳密度 Carbon density/ (kg/km ²)	弹性度分值 Elasticity scores
耕地 Farm land	11.35	3.55	水域 Water area	12.23	0.65
林地 Forest land	15.58	0.90	建设用地 Construction land	1.20	0.33
绿地 Grass land	8.88	0.70	未利用地 Unutilized land	15.44	0.20

1.3.2 线性加权评价

许多数学模型在生态系统健康评价中被使用,包括模糊可拓物元评价^[15]、集对分析^[23]及物质流评价^[38]等。相较其它数学模型,线性加权法操作简明、含义明确,可求得各个要素指数和系统指数,结果客观合理,满足时空可比性^[39]。评价模型如公式 5:

$$EHI = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_j q_{ij} \quad (5)$$

式中,EHI 为生态系统健康指数,代表生态系统健康水平; w_j 是第 j 项指标权重; q_{ij} 是第 i 个镇区第 j 项指标标准化值。

城市生态系统并不存在固定的健康标准,学者们多将城市生态系统健康标准看作是从系统本身及人类需求出发的一种期望^[12]。因此,我们采用相对评价方法,在有关研究^[2, 29, 40]基础上,根据生态系统可拓性和研究区域状况,将生态系统健康等级分为 5 个等级(表 3)。

表 3 区县生态系统健康状态分级

健康状态 Health state	生态系统特征 Ecosystem characteristics	得分范围 Score class
病态 Sick	系统结构极不合理,人工系统对非人工系统干扰严重,系统抵御及 维育能力极差,发展不可持续,多出现在系统演化中期	0.00—0.15
不健康 Unhealthy	系统结构存在缺陷,人工系统对非人工系统干扰较强,抵御及维育 能力较差,发展可持续性较差,多出现于演化前中期	0.15—0.30
一般 Ordinary	系统结构比较合理,整体稳定,健康状态接近阈值,易恶化,发展可 持续性不强,多出现于演化前期及中后期	0.30—0.50
健康 Healthy	系统结构比较合理,人工系统对非人工子系统干扰整体可控,抵御 能力较强,发展可持续性良好,多出现在演化前期及中后期	0.50—0.75
很健康 Very healthy	系统结构十分合理,人工系统对非人工子系统干扰完全可控,系统 抵御及维育能力较强,发展可持续,多出现于演化后期	0.75—1.00

1.4 研究区域

东莞(113°31'—114°15'E, 22°39'—23°09'N)包含 32 个镇区(图 2),国土面积 2465 km²,到 2019 年,常住人口 846.5 万人,生产总值 9482.5 亿元,三大产业比例 0.3:56.5:43.2。近年来,东莞接受港澳台经济辐射,大规模承接国际产业转移,创造了“东莞奇迹”。

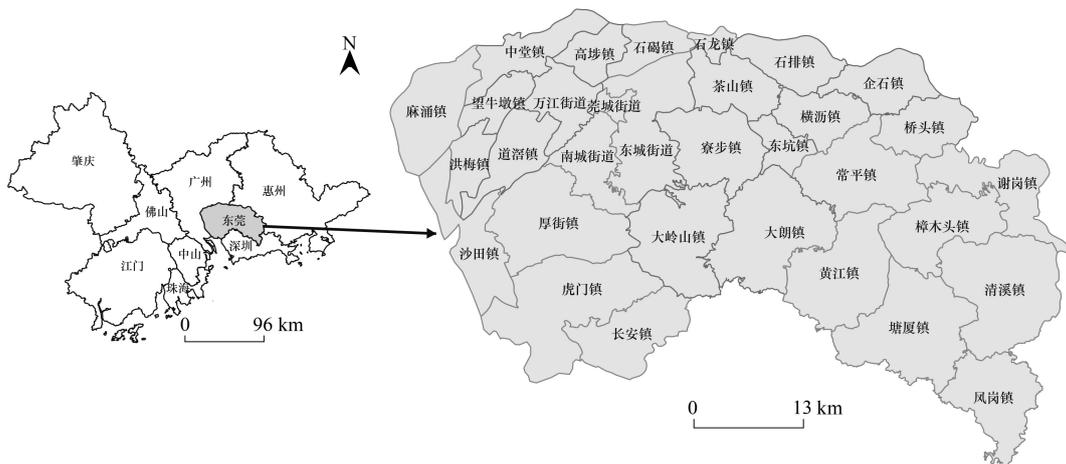


图 2 东莞市地理位置

Fig.2 The study area of Dongguan

东莞各镇区的快速发展会影响城市健康,改变城市系统内部特征。鉴于生态恶化对可持续发展构成的可能威胁^[4],有必要对东莞各镇区进行系统评估。东莞土地利用数据源自中国科学院资源环境科学数据中心,空间分辨率为 30 m(图 3),其余数据来源于 1996 年、2001 年、2006 年、2011 年及 2016 年《东莞市统计年鉴》。

2 结果与讨论

2.1 区县生态系统健康动态变化特征

2.1.1 基于目标层的区县生态系统健康动态变化

如图 4 所示,在 1995—2015 年间,东莞各镇区生态

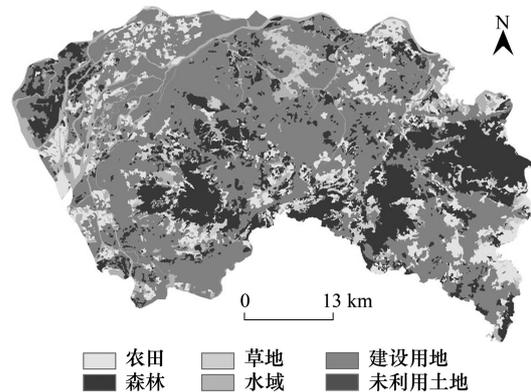


图 3 东莞 2015 年土地利用信息

Fig.3 Landuse patterns in Dongguan 2015

系统健康指数整体呈下降趋势,且趋势逐渐减缓,从 0.50—0.75(1995 年)降至 0.25—0.50(2015 年),状态从 1995 年健康降到 2015 年一般。

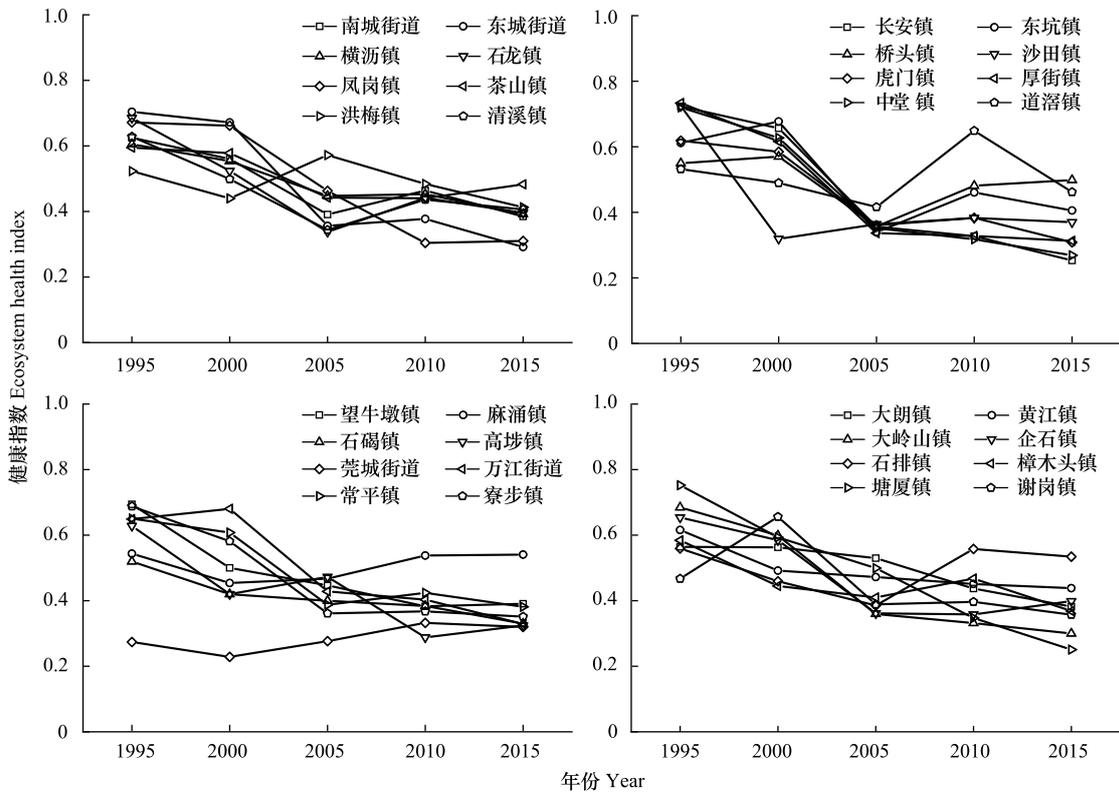


图 4 区县生态系统健康指数的变化

Fig.4 Changes in county ecosystem health index

各镇区生态系统健康变化总体可分为两个阶段:第一阶段为 1995—2005 年,各镇区经济及人口基数较低,系统能满足人们的大部分需求,为人类提供服务的能力较强,产业结构不够合理,经济快速发展导致生态系统的恶化;第二阶段为 2005—2015 年,基础设施建设逐渐完善,区县系统服务能力增强,产业转型及环保意识觉醒,降低了人类活动对生态系统的干扰,系统耐受能力增强,减缓了系统的恶化。但生态恶化未得到根本扭转,区县系统健康仍需持续关注。

区县发展程度不一致直接导致区县生态系统健康变化趋势及程度不同。具体而言,各镇区健康变化表现出四种趋势:上升(如莞城,从不健康到一般);下降(如高埗,从健康到一般);先降后升(如石排,从健康到一般到健康)及先升后降(如谢岗,从一般到健康到一般)。

2.1.2 基于要素层的区县生态系统健康动态变化

如图 5 所示,各镇区生态系统健康各要素变化可分为两个阶段:第一阶段是 1995—2005 年,该阶段维育要素较好,服务要素次之,发展及抵御要素较差;第二阶段是 2005—2015 年,各要素从好到坏分别是抵御要素、服务要素、发展要素和维育要素。

服务要素先降低后升高,主要范围在 0.30—0.70 之间,受益于基础设施建设逐渐完善;发展要素逐渐升高,主要范围在 0.30—0.80 之间,主要依赖于产业结构调整与区县发展;抵御要素较为稳定,略有上升,主要范围在 0.30—0.70 之间,随着农业在产业结构中占比下降,农药及化肥使用量逐渐减少,通过产业转型,人类活动对生态系统的干扰逐渐减弱,系统耐受能力增强;维育要素先快速下降,后较为稳定,主要范围从 0.65—0.95 (1995 年)降低至 0.05—0.25(2015 年),主要在于前期在城市化过程中,森林、水域等土地面积快速缩减,区县维育能力不断削弱;后来随着环保意识觉醒,人们开始关注生态系统保护,森林、水域等土地保持稳定,系统

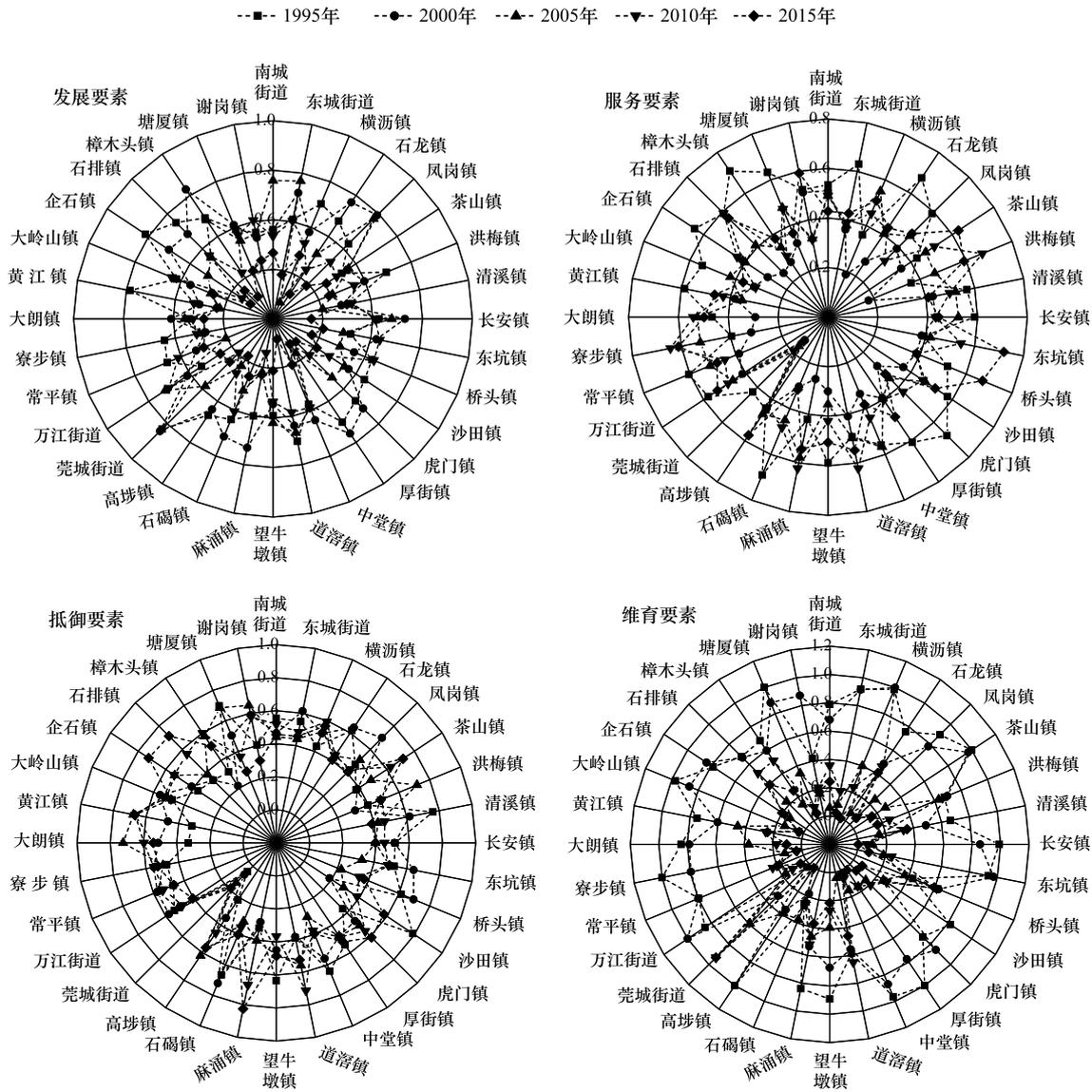


图 5 区县生态系统要素健康指数的变化

Fig.5 Changes in county ecosystem health for different factors

维育能力基本稳定或略有好转。与发展、服务及抵御要素相比,各镇区维育要素变化最为明显,是导致生态系统健康变化的主要因素。

2.2 区县生态系统健康空间分布特征

2.2.1 基于目标层的区县生态系统健康空间分布

如图 6 所示,1995—2015 年间,各镇区生态系统的总体状态逐渐恶化,其中西南地区生态系统退化比东南更明显,主要由于各镇区自然资源禀赋及社会经济发展不一致,使区县系统健康变化趋势与程度也不同。

中部及西北处于系统演化中期,健康水平不佳,尚未好转;东南及西南经济欠发达,以一、二产业为主,系统处于演化前期,生态健康状况逐渐恶化;系统较为健康的南城、东城及虎门等地,处于演化后期,生态系统未出现恶化。

2.2.2 基于要素层的区县生态系统健康空间分布

图 7 反映不同年份生态系统各要素健康分布状况。可以看出,维育要素变化最为明显,其余要素变化较为稳定。西部维育要素恶化更为严重,也说明维育要素对各镇区生态系统健康影响较大。

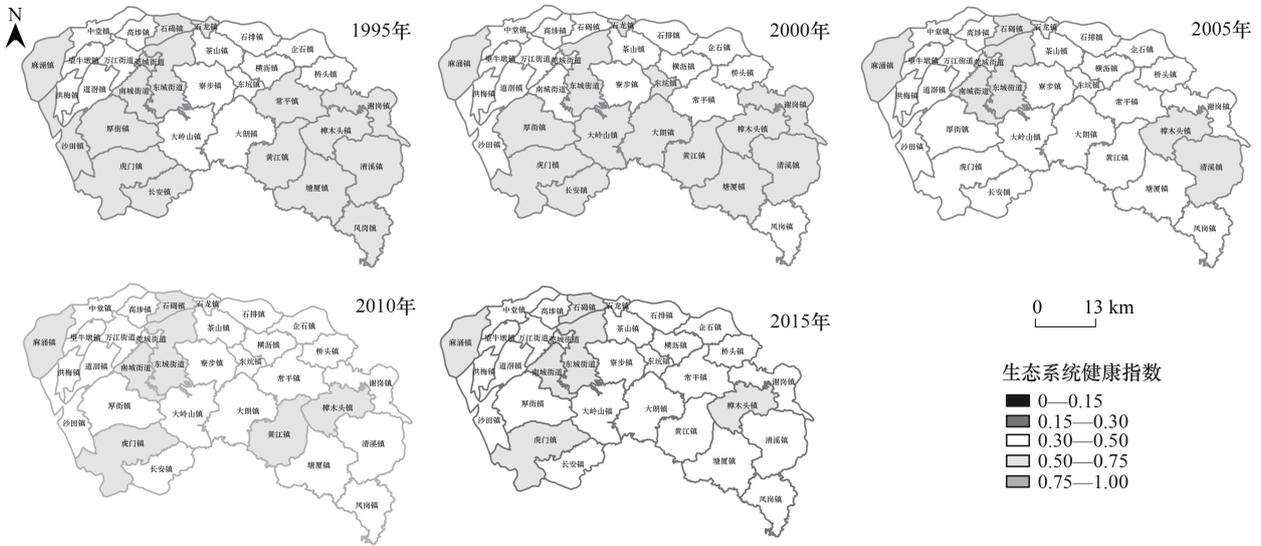


图 6 区县生态系统健康的空间分布
 Fig.6 Spatial distribution of county ecosystem health

对发展要素而言,各镇区状态早期整体一般,呈现出块状分布,不健康及一般镇区主要集中在西北及东北(图 7),缘于北方经济落后南方,人口增长也略低于南方;随后要素水平为一的地区逐渐向南扩散,分布情况趋于破碎,主要在于随着经济总量增加,南方地区增长逐步放缓,如虎门、长安、凤岗、清溪及塘厦等镇区 GDP 前十年增长约 10 倍,后十年仅增长 3 倍。

就服务要素而言,各镇区整体健康,分布较为集中。但在少数年份,健康状态一般且破碎度较高。要素一般或不健康的镇区多分布在西南及东南,缘于这些镇区经济总量较大,第三产业占比较低,系统服务能力较差;其余地区要素状态在良好以上(图 7),得益于镇区丰富的自然资源或合理的产业结构。

各镇区抵御要素基本在健康与很健康之间,少数地区抵御要素水平一般(图 7)。1995 年及 2015 年,抵御要素空间分布较为破碎,1995 年整体小于 2015 年。较差的镇区主要分布在西部,状态的好转或恶化依赖于土地垦殖及化肥施用变化。如高埗土地垦殖率从前十年 0.50 降至后十年 0.30,化肥施用下降 75%,抵御要素从 0.30 升至 0.80。

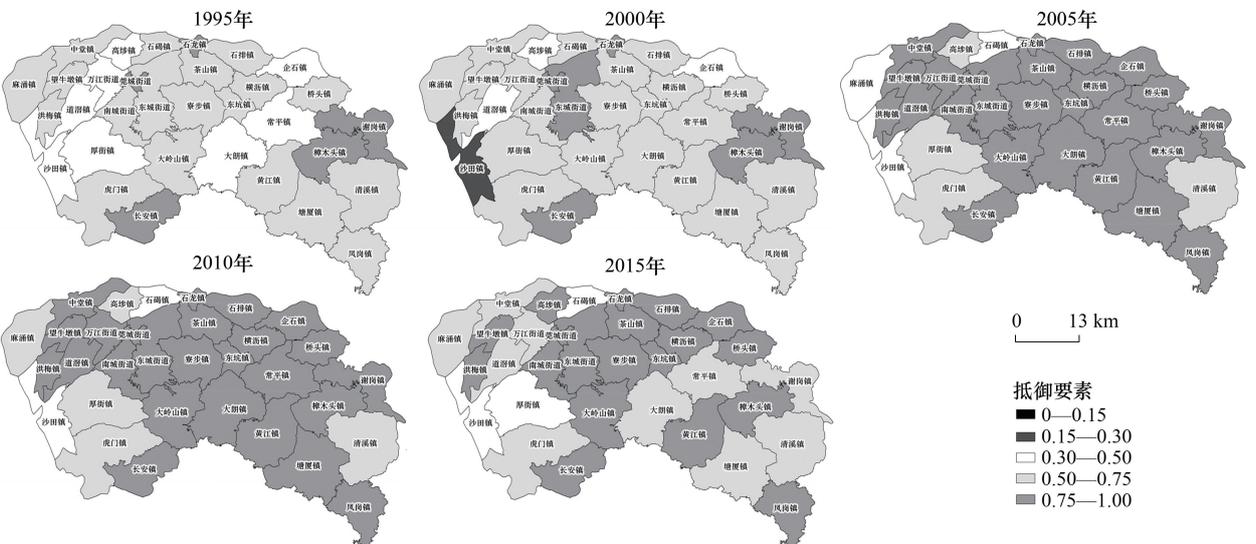
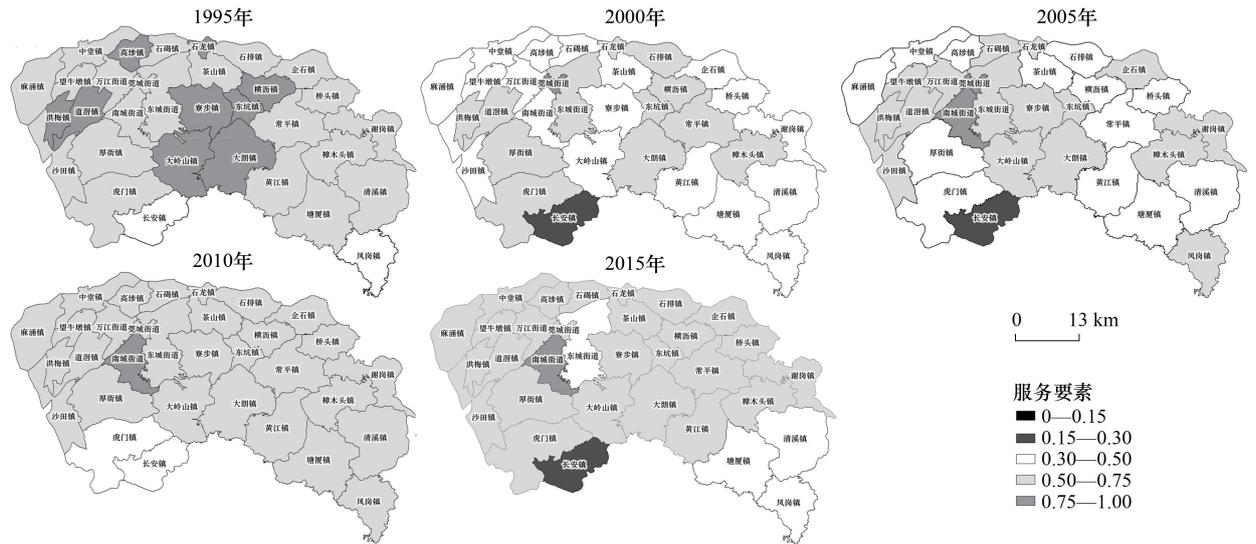
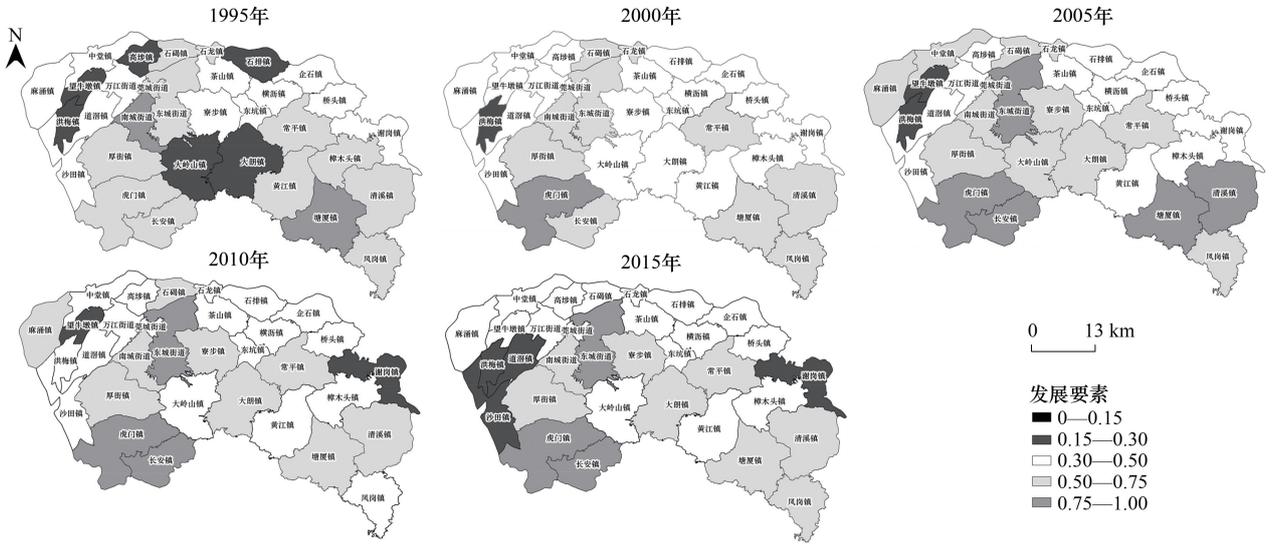
1995—2000 年各镇区维育要素状态一般,主要呈块状分布,破碎度不高。2005—2015 年,各镇区维育要素整体不健康,少数镇区甚至到了病态水平,块状分布逐渐趋于破碎。维育要素不健康的镇区分布在中西部(高埗、莞城),而东部(黄江、樟木头、谢岗)及西部少数镇区(道滘、洪梅)多为一般(图 7)。中西部地区土地资源稀缺,如高埗、莞城森林覆盖率均值分别为 0.00 与 0.01,水域覆盖率为 0.09 和 0.03,生态弹性度偏低。东部及西部少数镇区森林覆盖率相对较高,麻涌、黄江及樟木头分别为 0.58、0.65 及 0.53。

2.3 区县生态系统健康因子特征

2.3.1 区县生态系统健康的因子贡献度分析

对各镇区生态系统健康评价指标进行贡献度分析,找出对区县系统健康起重要作用的贡献因子。从图 8 可知,影响各镇区生态系统健康的重要因子主要是发展要素的 GDP、人口增长率;服务要素的第三产业占比;抵御要素的土地垦殖率、化肥施用量;维育要素的森林覆盖率、水域覆盖率、生态弹性度。

不同年份,各因子贡献大小并不一致。GDP 及生态弹性度的贡献度逐年增加;人口增长率、第三产业占比及土地垦殖率的贡献度先增加后减小;水域覆盖率及森林覆盖率的贡献度基本稳定。综合而言,对区县系统影响最大的因子是 GDP、生态弹性度、水域覆盖率及森林覆盖率;维育要素对东莞各镇区生态系统健康具有较大影响。



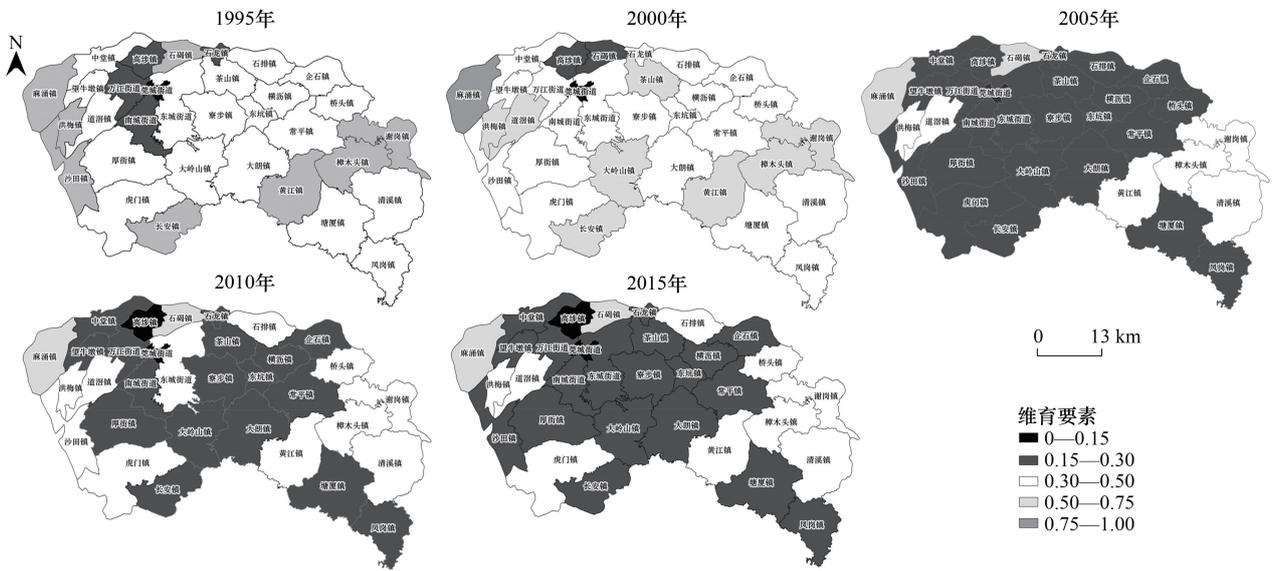


图 7 区县生态系统要素健康的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of county ecosystem health for different factors

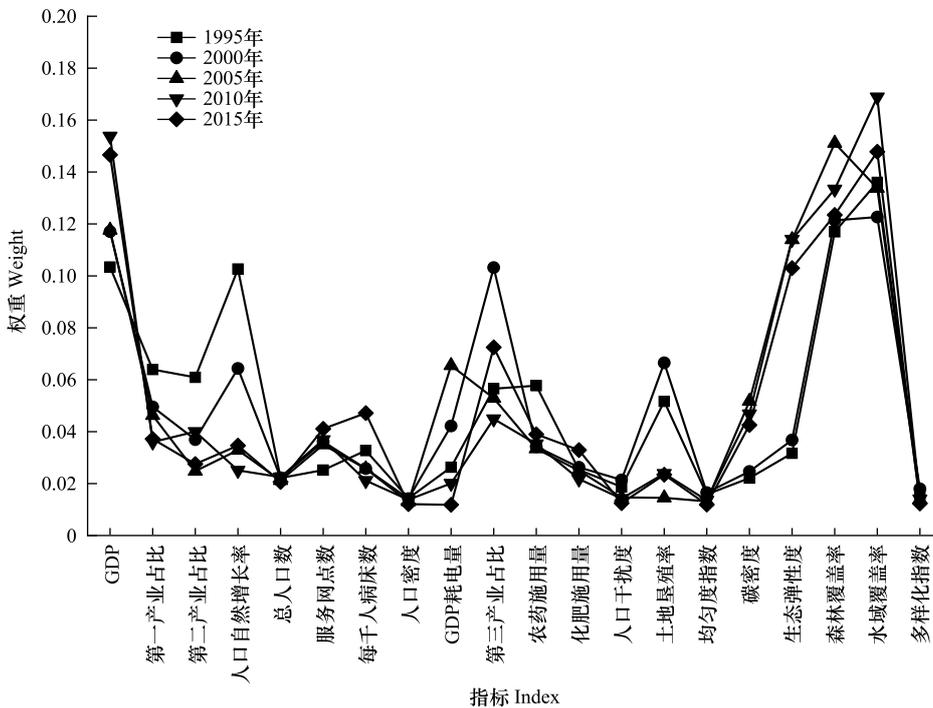


图 8 区县生态系统健康的因子贡献度

Fig.8 Contribution of the evaluation indicators of county ecosystems health

2.3.2 区县生态系统健康重要因子变化

选择 GDP、生态弹性度、水域覆盖率及森林覆盖率为重要因子进行分析。总体来看,各镇区 GDP 不断增加;水域覆盖率、森林覆盖率及生态弹性度较低且略有下降(图 9)。

维育要素重要因子变化可以分成两个阶段,第一阶段是 1995—2005 年,各镇区水域覆盖率、森林覆盖率及生态弹性度快速下降;2005—2015 年,各镇区重要因子基本稳定。这与在城市化发展不同阶段森林、水域

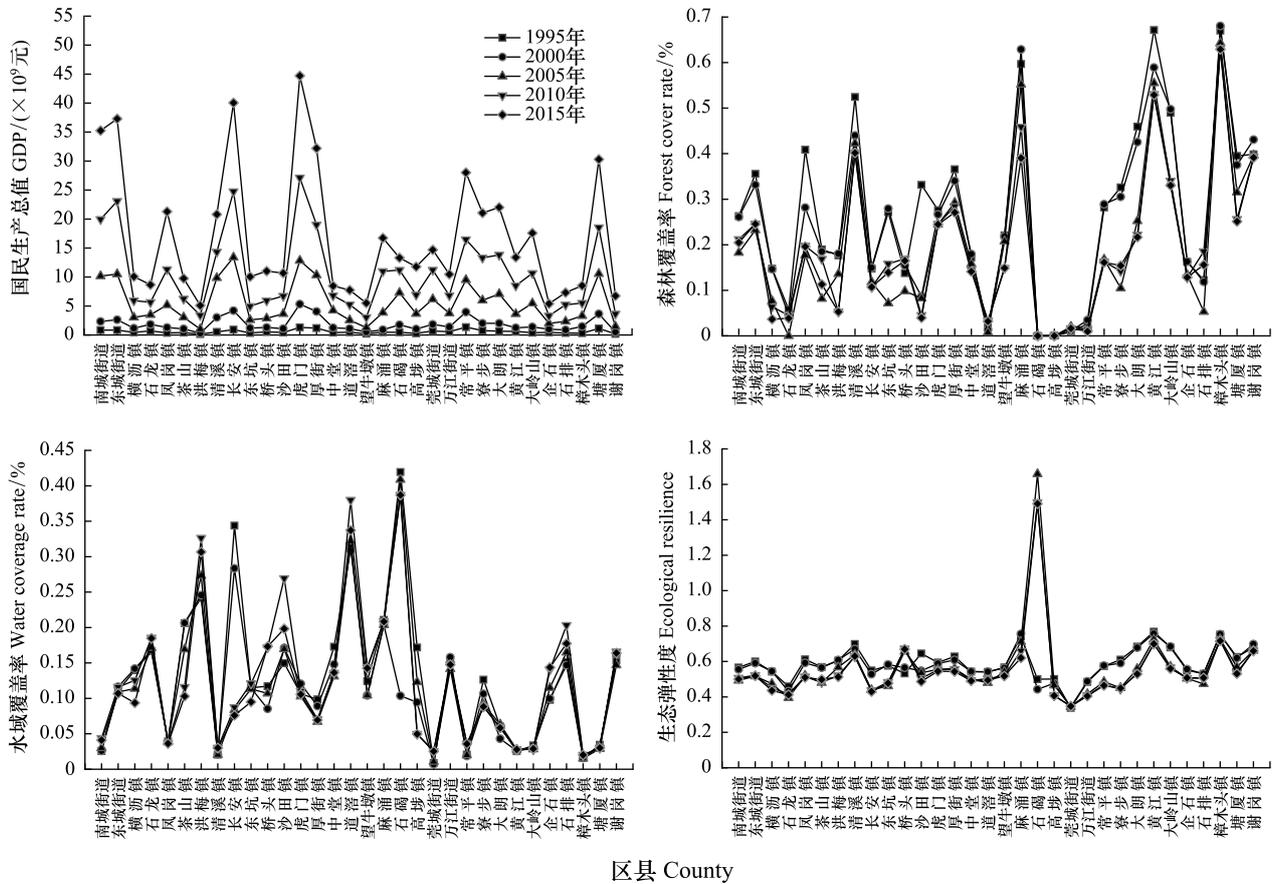


图9 区县生态系统贡献因子的变化情况

Fig.9 Changes in the contribution indicators of county ecosystems

等土地面积变化和人们环保意识增强密切相关。

2.4 典型区县系统健康分析

2.4.1 典型区县系统健康及要素变化

根据东莞市各镇区生态系统健康变化的四种趋势,选取莞城、高埗、石排及谢岗作为典型镇区进行分析。在1995—2015年间,莞城生态系统状态逐渐好转,从不健康到一般;高埗健康指数逐渐下降,从0.63变为0.32;石排与谢岗的健康指数分别表现为先降后升与先升后降(图10)。

从图4和图11可以看出,典型镇区发展、服务及抵御要素的变化与东莞各镇区相应要素整体趋势吻合性较高;而典型镇区维育要素变化与维育要素整体趋势并不一致,与典型镇区健康变化具有较好一致性(图9)。进一步说明,维育要素是影响东莞各镇区生态系统健康变化的重要要素,维育要素变化直接导致区县健康状态改变。

尽管生态系统健康变化主要受维育要素影响,但其他要素也对系统健康发挥作用(图10及图11)。以莞城为例,2015年维育要素是0.93,综合指数为0.32,发展、服务及抵御要素则在0.10—0.40之间,说明莞城生

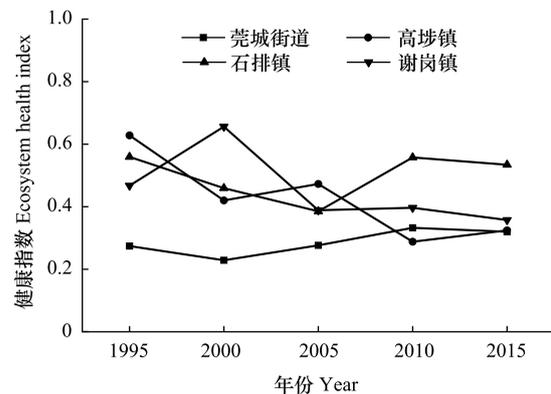


图10 典型区县生态系统健康的变化

Fig.10 Changes of ecosystem health for typical counties

态系统健康后期主要取决于发展、服务及抵御要素。

2.4.2 典型区县系统重要因子变化

典型镇区 GDP 均呈上升趋势,说明其不是导致健康变化的重要因子(图 12)。莞城维育要素上升主要依赖水域覆盖率上升;高埗维育要素下降缘于水域覆盖率和生态弹性度下降;石排及谢岗维育要素变化由森林覆盖率和生态弹性度决定(图 11 及图 12)。表明对不同镇区而言,影响其状态的重要因子有所差异,但离不开土地利用,系统健康的主要瓶颈是发展过程中土地资源的稀缺及利用的低效。

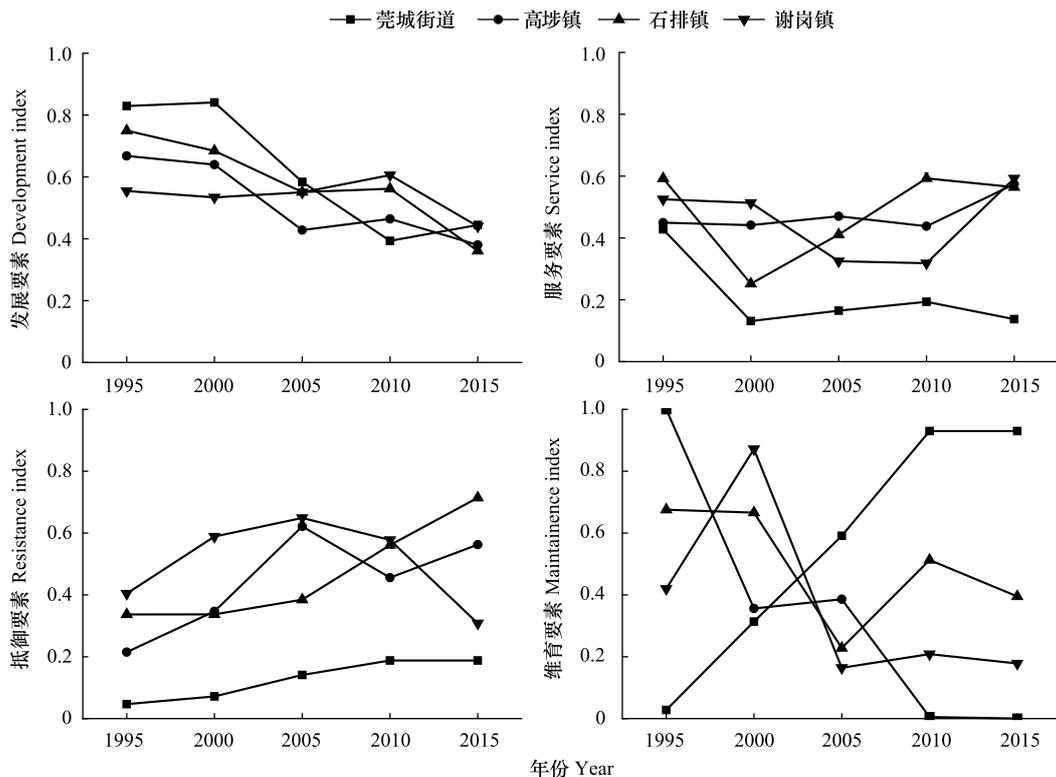


图 11 典型区县生态系统要素健康的变化

Fig.11 Changes of different factors of ecosystem health for typical counties

3 结论

区县生态系统是一个复杂的综合体,其健康离不开人与自然的相互作用,社会、经济和自然的综合影响,及时间与空间的共同效应。想要对区县系统进行全面研究,需要尽可能考虑系统中潜在影响因素,基于人与自然的相互作用,将社会、经济及自然因素全面结合,从时空等多个角度表征系统状态。

本文聚焦区县系统健康,提出一种新的“发展水平-服务功能-抵御干扰-自我维育”四维生态系统评价框架,建立了相应多层次指标体系,构建了区县系统健康评价模型,以东莞各镇区为例,分析了 20 年的时空生态系统健康变化及重要因子。结果表明:

(1) 东莞各镇区 1995—2015 年间生态系统总体健康逐渐恶化,西南地区退化更为明显。中部及西北部镇区系统水平不佳;东南及西南镇区系统逐渐恶化,表现为区域分布;个别镇区系统基本平稳,状态良好,未出现恶化趋势。

(2) 各镇区生态系统要素变化分为两个阶段:1995—2005 年,维育要素状况较好,抵御要素较差;2005—2015 年,抵御要素状况较好,维育要素较差。各镇区维育要素变化最为明显,是导致系统健康变化的主要因素。

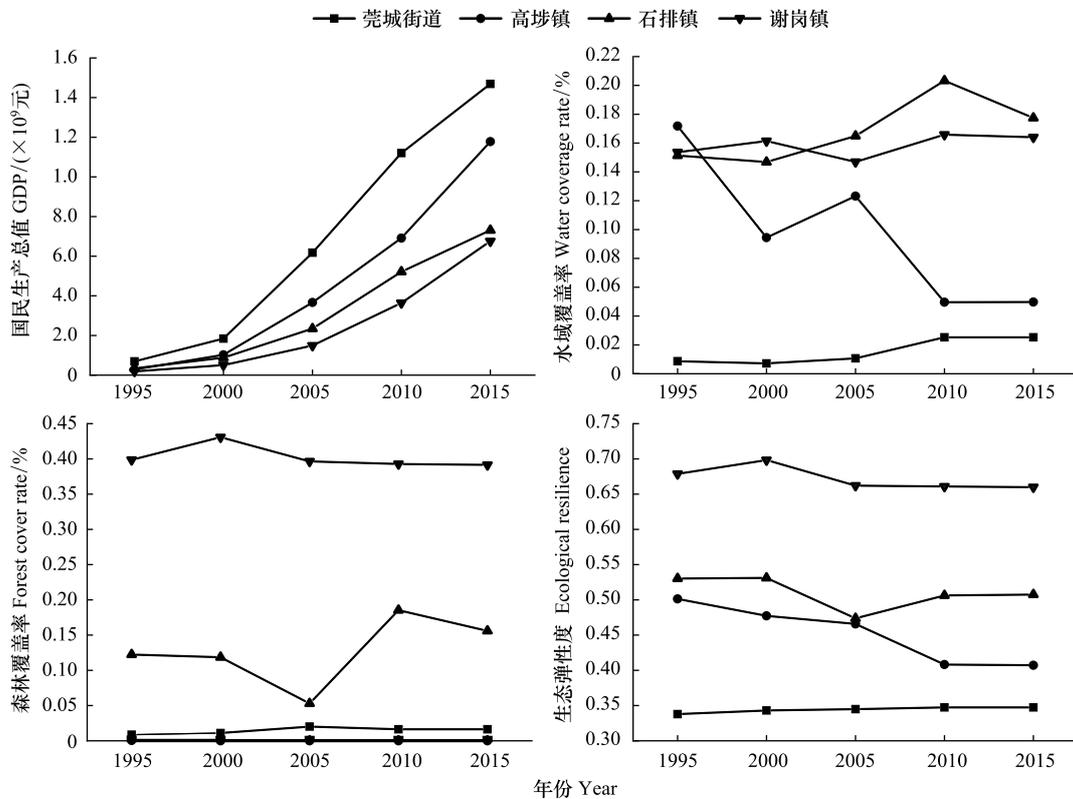


图 12 典型区县主要贡献因子的变化

Fig.12 Changes in the contribution indicators of typical counties

(3) GDP、水域覆盖率、森林覆盖率及生态弹性度是生态系统健康的重要因子。早期东莞发展占用大量森林及水域,系统生态弹性度逐渐削弱;发展到一定阶段,土地的稀缺及生态恶化使人们开始关注生态保护,缓解了系统的恶化,但整体状态依旧严峻。

(4)想从根本上解决东莞市区县生态系统的问题,需要牢固树立生态健康理念,提高土地等资源的利用效率,调整发展模式及产业结构。通过“三旧”改造工作,释放土地存量市场;开展退耕还林,扩大森林覆盖率;推进生态保护工作,注重保障水土健康;发挥东莞三区叠加优势,融入粤港澳大湾区,利用城市群产业分工机遇,承接深圳产业转移,优化各区县产业结构,提升城市竞争力。

(5)尽管本文建立了一个新的生态系统评价框架,对东莞各镇区进行了初步研究,但未来仍需开展大量工作。例如,更加全面地将土地利用同社会经济因素相结合,表征系统健康状态;随着城市生态系统的发展,进一步考虑更多潜在因素改善评价框架。

参考文献 (References):

- [1] Wang J, Lin Y F, Zhai T L, He T, Qi Y, Jin Z F, Cai Y M. The role of human activity in decreasing ecologically sound land use in China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(3): 446-460.
- [2] Xiao R, Liu Y, Fei X F, Yu W X, Zhang Z H, Meng Q X. Ecosystem health assessment: a comprehensive and detailed analysis of the case study in coastal metropolitan region, eastern China. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 363-376.
- [3] 王成,魏朝富,高明,罗光莲,蒋伟. 土地利用结构变化对区域生态健康的影响-以重庆市沙坪坝区为例. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2296-2300.
- [4] Manuel-Navarrete D, Gómez J J, Gallopín G. Syndromes of sustainability of development for assessing the vulnerability of coupled human-environmental systems. The case of hydrometeorological disasters in Central America and the Caribbean. *Global Environmental Change*, 2007, 17(2): 207-217.
- [5] Peng J, Liu Y X, Li T Y, Wu J S. Regional ecosystem health response to rural land use change: A case study in Lijiang City, China. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 399-410.

- [6] Cui N, Feng C C, Han R, Guo L. Impact of urbanization on ecosystem health: a case study in Zhuhai, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(23): 4717.
- [7] Santos J E, Nogueira F, Pires J S, Obara A T, Pires A M. The value of the Ecological Station of Jataí's ecosystem services and natural capital. *Brazilian Journal of Biology*, 2001, 61(2): 171-190.
- [8] Rapport D J, Maffi L. Eco-cultural health, global health, and sustainability. *Ecological Research*, 2011, 26(6): 1039-1049.
- [9] Peng J, Liu Y X, Wu J S, Lv H L, Hu X X. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen City, China. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 143: 56-68.
- [10] Xie X F, Pu L J. Assessment of urban ecosystem health based on matter element analysis: a case study of 13 cities in Jiangsu Province, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(8): 940.
- [11] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态系统健康评价初探. *中国环境科学*, 2002, 22(6): 525-529.
- [12] Su M R, Zhang Y, Liu G Y, Xu L Y, Zhang L X, Yang Z F. Urban ecosystem health assessment: perspectives and Chinese practice. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, 10(11): 5874-5885.
- [13] Lander T A, Monro A. Conservation of *Brosimum alicastrum*, an underutilized crop and keystone forest tree species; a potential win-win for conservation and development in Latin America. *Biodiversity and Conservation*, 2015, 24(8): 1917-1930.
- [14] 潘影, 徐增让, 余成群, 土艳丽, 李艳, 武俊喜. 西藏草地多项供给及调节服务相互作用的时空演变规律. *生态学报*, 2013, 33(18): 5794-5801.
- [15] Su M R, Xie H, Yue W C, Zhang L X, Yang Z F, Chen S H. Urban ecosystem health evaluation for typical Chinese cities along the Belt and Road. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 572-582.
- [16] Schaeffer D J, Herricks E E, Kerster H W. Ecosystem health: I. Measuring ecosystem health. *Environmental Management*, 1988, 12(4): 445-455.
- [17] Costanza R. Toward an operational definition of ecosystem health. In: *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*, Costanza R, Norton B G, Haskell B D (editors), Washington, DC: Island Press, 1992: 239-256.
- [18] Su M R, Fath B D, Yang Z F. Urban ecosystem health assessment: A review. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(12): 2425-2434.
- [19] Wang R S, Li F, Hu D, Li B L. Understanding eco-complexity: social-economic-natural complex ecosystem approach. *Ecological Complexity*, 2011, 8(1): 15-29.
- [20] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [21] Kang P, Chen W P, Hou Y, Li Y Z. Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 1442-1454.
- [22] Ekumah B, Armah F A, Afrifa E K A, Aheto D W, Odoi J O, Afitori A R. Geospatial assessment of ecosystem health of coastal urban wetlands in Ghana. *Ocean & Coastal Management*, 2020, 193: 105226.
- [23] Su M R, Yang Z F, Liu G Y, Chen B. Ecosystem health assessment and regulation for urban ecosystems: a case study of the Yangtze River Delta Urban Cluster, China. *Journal of Environmental Informatics*, 2011, 18(2): 65-74.
- [24] Liu P D, Rong L L, Teng F. The evaluation of ecosystem health based on hybrid TODIM method for Chinese case. *Technological and Economic Development of Economy*, 2019, 25(3): 542-570.
- [25] Spiegel J M, Bonet M, Yassi A, Molina E, Concepcion M, Mast P. Developing ecosystem health indicators in centro Habana: a community-based approach. *Ecosystem Health*, 2001, 7(1): 15-26.
- [26] Feng Y J, Yang Q Q, Tong X H, Chen L J. Evaluating land ecological security and examining its relationships with driving factors using GIS and generalized additive model. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 1469-1479.
- [27] Sun J, Li Y P, Gao P P, Xia B C. A Mamdani fuzzy inference approach for assessing ecological security in the Pearl River Delta urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 386-396.
- [28] Hu X S, Xu H Q. A new remote sensing index based on the pressure-state-response framework to assess regional ecological change. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(6): 5381-5393.
- [29] Liu D L, Hao S L. Ecosystem health assessment at county-scale using the pressure-state-response framework on the Loess Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(1): 2.
- [30] 曾勇, 沈根祥, 黄沈发, 王敏. 上海城市生态系统健康评价. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(2): 208-212.
- [31] 邹君, 吴顺山. 基于 DPSIR 模型的城市生态系统健康评价——以衡阳市为例. *衡阳师范学院学报*, 2011, 32(6): 113-117.
- [32] Morosini R, Zucaro F. Land use and urban sustainability assessment: a 3D-GIS application to a case study in Gozo. *City, Territory and Architecture*, 2019, 6(1): 7.
- [33] Dallimer M, Davies Z G, Diaz-Porras D F, Irvine K N, Maltby L, Warren P H, Armsworth P R, Gaston K J. Historical influences on the current provision of multiple ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2015, 31: 307-317.
- [34] 中航, 秦奋, 朱筠, 张传才. 土地利用及景观格局演变对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2017, 37(4): 1286-1296.
- [35] 徐明德, 李静, 彭静, 钮键, 曹露. 基于 RS 和 GIS 的生态系统健康评价. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1809-1814.
- [36] Renyi, A. On Measures of Entropy and Information. *Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1961: 547-561.
- [37] Zhao S, Chai L H. A new assessment approach for urban ecosystem health basing on maximum information entropy method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(6): 1601-1613.
- [38] Shi X Q, Yang J X. A material flow-based approach for diagnosing urban ecosystem health. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 64: 437-446.
- [39] Zou Z H, Yun Y, Sun J N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5): 1020-1023.
- [40] 周满迷. 东莞市生态环境状况遥感评价研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.