

长三角一体化下城市规模提升的水环境风险 ——以合肥市为例

李 涛, 曹卫东, 王雪妍

(安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241002)

摘要: 在长三角一体化背景下, 中心城市规模能级得到快速提升, 引发资源环境承载压力的升高, 尤其是作为制约城市高质量发展的水环境风险备受关注。通过 PSIR-TOPSIS 模型对合肥水环境综合风险水平进行测度, 结合环境库兹涅茨曲线和脱钩分析对城市规模与水环境风险的动态关系进行分析。结果表明: (1) 2006—2020 年间合肥城市规模水平呈线性增长, 水环境风险指数经历持续上升—波动下降—波动上升三个阶段, 提示合肥当前水环境风险压力加剧。(2) 环境库兹涅茨曲线拟合显示合肥城市规模与水环境风险呈现“N”型曲线关系, 两个拐点分别处于城市规模 0.2 和 0.8 水平处, 对应城市增长起步阶段和高规模阶段。(3) 脱钩分析表明合肥城市规模取得显著增长后, 城水关系的脱钩状态进入不稳定时期, 强脱钩与扩张负脱钩交替出现, 虽然风险水平仍处于上升阶段, 但水环境风险的扩大趋势已被抑制, 表征合肥城市规模与水环境风险将进入新的平衡发展状态。本文为避免传统水环境评价单一性局限, 结合多种理论模型构建城水关系研究框架, 为推动长三角一体化高质量发展提供城市与水环境协调共生的理论支撑与参考。

关键词: 城市规模; 水环境风险; PSIR-TOPSIS 模型; 脱钩分析; 长三角一体化

安徽省早在 20 世纪 90 年代便提出了“开发皖江、呼应浦东”的决策, 合肥作为开发开放的“支点”发挥重要作用; 2005 年开始实施“东向发展”战略, 合肥成为融入长三角的“排头兵”; 2014 年在《关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》中明确指出合肥是长三角城市群副中心城市; 2019 年在《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》中提出加快合肥都市圈建设。在安徽响应和融入长三角区域一体化的过程中, 合肥作为省会中心城市迅速崛起, 成为促进长三角区域协调发展的增长极, 由于各项要素集聚规模显著提升, 对支撑城市发展的资源环境产生了潜在压力。关注区域一体化背景下中心城市快速发展与资源环境承载之间的关系, 有助于推动区域生态文明建设和中心城市可持续发展, 促进长三角一体化高质量发展^[1-4]。

国外针对经济发展与生态环境关系的研究起步较早, 主要形成了压力—状态—响应模型 (PSR 模型)^[5]、环境库兹涅茨曲线假说 (EKC 假说)^[6]、脱钩分析^[7,8]等标志性研究^[9]。国内研究在上述理论成果的基础上开展了大量检验与拓展, 如运用压力—状态—响应模型对资源环境承载能力进行综合评价, 避免单一视角评价引发的局限性, 伴

收稿日期: 2022-07-25; 修订日期: 2022-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41571124, 41901151)

作者简介: 李涛 (1991-), 男, 安徽合肥人, 博士研究生, 研究方向为经济地理与可持续发展。

E-mail: litaoah@126.com

通讯作者: 曹卫东 (1973-), 男, 安徽寿县人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为经济地理与可持续发展。

E-mail: weidongwh@163.com

随耦合协调研究的兴起,二者结合为经济发展与资源环境协调共生提供参考^[10];EKC假说以长时段视角表达经济发展与生态环境关系见长,众多学者通过选取不同污染物与经济增长指标作为变量,检验其曲线类型并对二者发展趋势进行预测与解读^[11];脱钩分析则在表征经济发展与生态环境短期动态关系中具有一定优势,其能够为EKC拐点及发展趋势提供内在层面解释,因此其与EKC模型结合较多^[12]。通过对脱钩弹性指数等指标的分解,能够从社会经济发展不同子系统判断其对生态环境的影响程度,从而提出相关建议^[13]。

虽然以上标志性研究在相关领域内取得了丰富成果,但由于理论构建层面的差异导致其在应用阶段具有一定的局限性。PSR模型对研究对象的承载力测度属于多系统综合性评价^[14],缺少经济发展与生态环境相互影响的关系研究。EKC在选取指标时容易陷入孤立性研究的局限,在当前区域一体化背景下,城市分工协作远超以往,导致环境污染的外部因素和污染物类型愈发复杂,污染转移现象频发,传统的EKC假说对污染物和人均收入的关系研究已不能表达社会经济发展的实际情况。脱钩分析与EKC的研究局限有相似之处,但是其绝对脱钩与相对脱钩的表达仅以指标变化率作为判断,在一定程度上简化了社会经济发展的系统性影响。

综上所述,各标志性研究虽然受到自身研究范式的制约,但是其局限之处可通过其他研究的优势进行补充,然而受制于不同研究间的结构差异,目前将三者结合的研究较为有限。因此,为构建适应长三角区域一体化发展背景下的城市与生态环境关系研究框架,本文尝试将各标志性研究的优势结合,形成具备综合视角和动态机理解读的研究方法。通过压力—状态—影响—响应模型(PSIR模型)描述环境承载风险,利用EKC和脱钩分析对城市发展与环境风险的动态关系进行研究,从而判断城市规模增长对生态环境的影响过程,根据不同阶段特征提出相应对策建议。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况与数据来源

合肥作为安徽省会承担着推动全省经济发展、缩小与长三角发达地区差距的重要作用。自2006年宣布提升经济首位度推动都市圈建设以来,合肥逐渐成为长三角一体化高质量发展的西部核心城市(图1)。

在积极响应和融入长三角一体化过程中,合肥城市各项要素规模显著提升,主要通过人口、经济、产业、空间等子系统指标的变化进行表征^[15-17]。经过近15年发展,2020年合肥常住人口增至937万人、GDP总量为10046亿元,非农产业占比达96.7%,建成区面积为480.5 km²,较

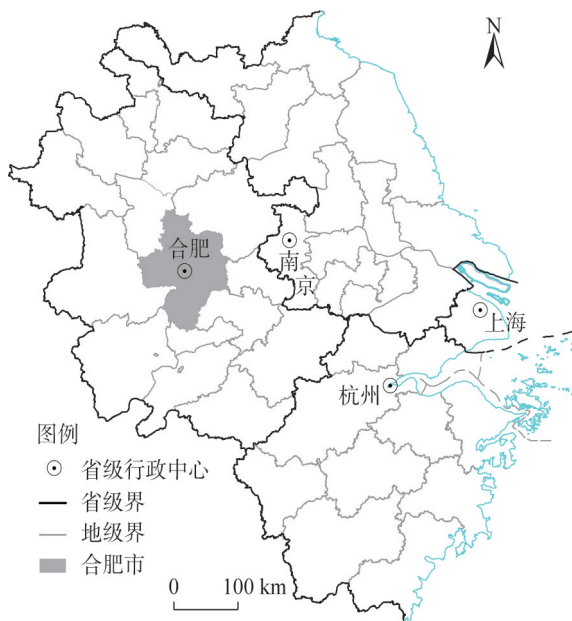


图1 合肥区位图

Fig. 1 Location of Hefei city

2006年各项数据取得显著增长(图2),证实合肥快速崛起形成了人口集聚、经济增长、产业升级、空间外延的规模扩张现象。中心城市是经济发展与生态环境潜在矛盾相对集中的区域,合肥发展历程表明其作为快速崛起的中心城市具有一定的代表性,其环境风险问题值得深入研究。同时在组成生态环境的众多系统中,水环境直接关联城市的生产、生活和生态功能,发挥着要素供应、污染净化、环境提升等作用,是与城市发展互馈最为频繁和直接的环境系统之一。由于合肥的崛起,其“大湖名城,创新高地”的发展定位被广泛关注,合肥以水定城、向湖发展、因湖而兴促使更多研究关注到合肥与其水环境的互馈关系^[18]。因此,本文选取合肥及其水环境为对象,分析城市规模与水环境风险间的变化情况,为区域一体化背景下城水关系研究提供参考。根据合肥响应融入长三角推动都市圈建设的起始时间和已公布的数据情况,将研究期限定为2006—2020年。本文数据主要来源于《中国城市统计年鉴》《合肥市统计年鉴》《安徽统计年鉴》以及《安徽省水资源公报》等。

1.2 模型与方法

1.2.1 PSIR 模型

本文采用PSIR模型对响应融入长三角一体化过程中合肥水环境进行综合性评价,PSIR模型是在OECD提出的PSR模型基础上改进而来,构建了压力—状态—影响—响应四个子系统,将水环境支撑城市发展过程中的因果关系进行辩证统一^[19]。由四个系统的内部联系评价水环境在城市快速扩张阶段的发展水平具有综合性和系统性优势,在测度

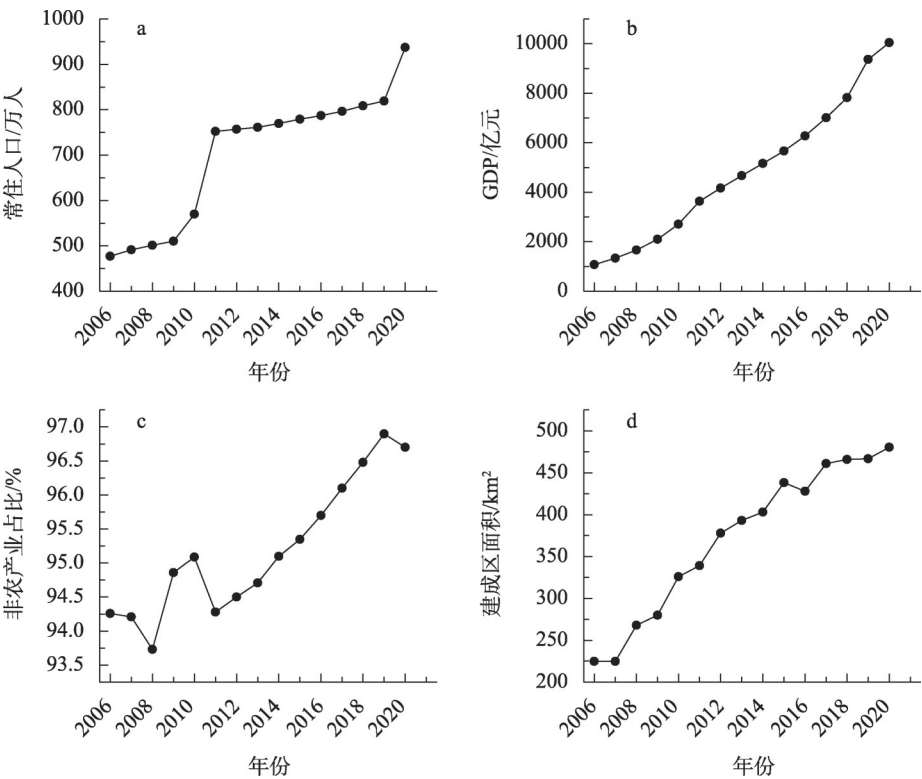


图2 合肥城市规模变化特征
Fig. 2 The variation of city size in Hefei

水环境承载力研究中应用广泛，能够避免研究视角及评价指标的孤立性和单一性局限。

1.2.2 熵权TOPSIS模型

熵权TOPSIS模型通过引入熵权法对不同指标进行加权计算，解决了传统TOPSIS在进行逼近正负理想解过程中对指标的主观判断，使评价结果更具客观性^[20,21]。本文在运用熵权TOPSIS模型时，将通常计算远离最劣解距离的正向排序更改为计算与最优解距离的负向排序，从而将PSIR模型评价的水环境综合水平转化为水环境风险指数。风险指数作为负向指标能够与EKC假说及脱钩分析中的环境恶化指标形成契合。

1.2.3 EKC假说

EKC假说反映了环境污染与经济增长之间的形态关系，多数研究选取不同类型的污染物和人均收入作为指标，通过函数拟合形成了“U”型、倒“U”型、“N”型、倒“N”型等不同的曲线关系^[22,23]。但环境恶化在城市发展过程中受多种因素作用，仅用某种污染物无法表明环境的实际恶化状态，此外受一体化发展影响，某一城市的污染物变化还将受到区域分工的影响，因此针对传统EKC适用性的讨论逐渐增加^[11]。本文以PSIR-TOPSIS模型计算得到水环境风险指数并以此作为环境恶化指标，以城市各项要素增长水平作为城市规模指标，与传统研究相比指标内涵具有综合性和多样性优势，更加适用于当前长三角区域一体化发展背景。

1.2.4 脱钩分析

脱钩分析是对两个或多个事物之间的关联状态发生变化的动态解释，通常可分为速度脱钩分析与数量脱钩分析两种类型，速度脱钩分析包括OECD脱钩指数、Tapio脱钩弹性系数等，当前多数研究采用Tapio弹性系数作为分析方法。针对数量脱钩分析的代表方法，部分学者认为以EKC模型的运用较为普遍^[24]。由于本文计划采用EKC进行分析，因此在脱钩分析阶段采用Tapio脱钩弹性系数进行研究以避免重复。通过对城市规模和水环境风险变化率进行分析，不仅可以判断当前城水关系是否处于可持续发展阶段，还能进一步明确城市规模与水环境风险间的匹配情况，从而提出具有针对性的阶段治理建议。

1.3 指标选取及数据处理

1.3.1 城市规模指标

在当前长三角区域一体化背景下，推动城市快速增长的要素已不再局限于城市周边，借助交通与信息技术的革新，城市因优势职能在更广泛区域内形成要素集聚，从而表达为城市各系统的规模增长。因此，本文从人口、经济、产业、空间四个系统对城市规模进行测度，参考相关文献选取指标^[15-17]。人口系统从人口数量和人口结构两个层面分别选取常住人口和城镇化率两个指标；经济系统从宏观经济和人均经济表达城市综合经济发展水平，选取全市GDP和人均GDP两个指标；产业系统从产业增加值和产业结构变化表达城市产业现代化发展水平，分别选取第二产业增加值、第三产业增加值以及非农产业占比为指标；空间系统以城市建成区面积作为城市空间规模增长指标。具体见表1。

表1 合肥城市规模评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of city size in Hefei

目标层	系统层	指标层	权重	性质
城市规模评价	人口系统	常住人口 X_1 /万人	0.149	正
		城镇化率 X_2 /%	0.142	正
	经济系统	全市GDP X_3 /亿元	0.112	正
		人均GDP X_4 /亿元	0.117	正
	产业系统	第二产业增加值 X_5 /万元	0.139	正
		第三产业增加值 X_6 /万元	0.092	正
	空间系统	非农产业占比 X_7 /%	0.114	正
		建成区面积 X_8 /km ²	0.135	正

1.3.2 水环境风险评价指标

测度水环境风险指数需对水环境质量展开先行评价，根据相关文献构建水环境评价指标体系^[10,21,25]，具体分为压力、状态、影响、响应四个系统，压力系统表达水环境在支撑城市发展时需要应对的城市用水结构压力以及各类城市活动产生的污水排放压力，选取不同经济活动的万元用水量等用水效率指标以及用水总量和排污量指标进行测度；状态系统表征水环境本体具备的自然状态属性，是评价水环境本底条件的主要指标，选取水资源总量、降水量和产水系数进行测度；影响系统对水环境在城市用水功能作用下的综合水平进行测度，选取人均水资源量、用水普及率和供水能力作为指标；响应系统是城市为进一步提升城水关系可持续发展而采取的改善治理与要素投入，借助建成区绿化覆盖率、城市供排水设施建设水平以及污水处理相关指标进行表达。具体指标见表2。

1.3.3 数据处理

数据处理主要包括城市规模评价以及水环境风险指数两个方面，其中城市规模评价运用熵权法确定各指标权重，通过各系统得分求和的方式获得城市规模综合水平。水环境风险指数通过熵权TOPSIS对PSIR模型中的各指标进行测度^[20,21]。首先根据指标数量 m 和研究期限 n 建立决策矩阵，对原始数据进行极差标准化处理获得矩阵 X 。

$$X=\begin{bmatrix}x_{11}&x_{12}&\cdots&x_{1n}\\x_{21}&x_{22}&\cdots&x_{2n}\\\cdots&\cdots&\cdots&\cdots\\x_{m1}&x_{m2}&\cdots&x_{mn}\end{bmatrix}$$

(1)

运用熵权法确定PSIR模型中各指标权重 W_i ，对矩阵中数据进行加权处理，其中 W_i 为

表2 合肥水环境评价指标体系
Table 2 Evaluation index system of water environment in Hefei

目标层	系统层	指标层	权重	性质
水环境评价	压力系统	万元生产总值用水量 P_1/m^3	0.046	负
		万元工业增加值用水量 P_2/m^3	0.024	负
		工业用水量 $P_3/\text{亿 m}^3$	0.064	负
		万元工业增加值废水排放量 P_4/t	0.018	负
		城市人均日生活用水量 $P_5/\text{升}$	0.060	负
		城市污水排放量 $P_6/\text{亿 t}$	0.048	负
		用水总量 $P_7/\text{亿 m}^3$	0.094	负
	状态系统	水资源总量 $S_1/\text{亿 m}^3$	0.100	正
		降水量 $S_2/\text{亿 m}^3$	0.085	正
		产水系数 S_3	0.102	正
	影响系统	人均水资源量 $I_1/(\text{m}^3/\text{人})$	0.061	正
		用水普及率 $I_2/\%$	0.020	正
		供水综合生产能力 $I_3/(\text{万 m}^3/\text{日})$	0.058	正
	响应系统	建成区绿化覆盖率 $R_1/\%$	0.031	正
		城市排水管道长度 R_2/km	0.058	正
		城市供水管道长度 R_3/km	0.059	正
		城市污水处理率 $R_4/\%$	0.015	正
		城市污水处理总量 $R_5/\text{亿 m}^3$	0.056	正

第*i*项指标的权重。*x_{ij}*为第*i*项指标第*j*年标准化处理结果；*z_{ij}*为*x_{ij}*加权后的综合数值。

$$z_{ij}=x_{ij}\times W_i,i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n$$
 (2)

确定各指标最优解*Z⁺*和最劣解*Z⁻*，分别计算各评价对象与最优解的距离*D_j⁺*和最劣解的距离*D_j⁻*。

$$Z^+=\{\max_{1\leq j\leq n}z_{ij}|i=1,2,\cdots,m\}=\{z_1^+,z_2^+,\cdots,z_m^+\}$$
 (3)

$$Z^-=\{\min_{1\leq j\leq n}z_{ij}|i=1,2,\cdots,m\}=\{z_1^-,z_2^-, \cdots,z_m^-\}$$
 (4)

$$D_j^+=\sqrt{\sum_{i=1}^m(z_{ij}-z_i^+)^2} \quad D_j^-=\sqrt{\sum_{i=1}^m(z_{ij}-z_i^-)^2}$$
 (5)

*D_j⁺*值越大表明评价指标与最优解的距离越远，水环境恶化水平越高。因此，将评价对象的水环境风险指数*R_i*定义为指标*D_j⁺*与最优最劣解距离和*D_j⁺+D_j⁻*的比值。

$$R_j=\frac{D_j^+}{D_j^++D_j^-} \quad 0\leq R_j\leq 1$$
 (6)

2 结果分析

2.1 城市规模与水环境风险分析

根据评价模型及方法，计算获得2006—2020年合肥城市规模和水环境风险指数，如图3所示。研究期内合肥城市规模呈线性增长态势，由2006年最低水平0.004增长至2020年的0.992，证实合肥近15年推动城市发展的各类要素规模持续处于高速增长状态。合肥对人口、经济、产业和空间等要素的集聚能力尚未出现衰减，在长三角一体化

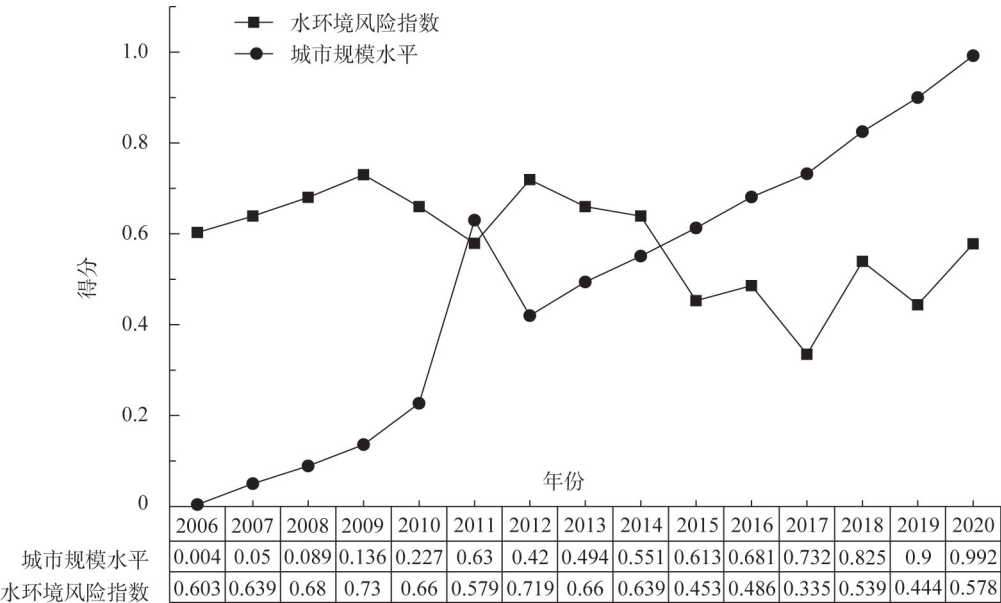


图3 合肥城市规模与水环境风险指数变化特征
Fig. 3 The variation of city size and water environment risk index in Hefei

进程中的副中心城市作用还将进一步扩大。水环境风险指数经历了初期持续上升—中期波动下降—末期波动上升的过程,其中2009年为初期上升阶段达到的最高风险值,风险指数为0.730;波动下降阶段中2012年为研究期内次高风险值,风险指数为0.719;研究期内合肥水环境风险指数最低水平为2017年的0.335,随后水环境风险指数波动上升,2020年达到0.578。结果表明合肥城市增长起步阶段出现了短暂的水环境风险上升,随后城市规模与水环境关系进入良性互馈阶段,城市在各类要素迅速增长的过程中仍能保持水环境风险的持续降低。但当合肥进入城市高规模阶段后,水环境风险由波动下降转为波动上升,且波动频率与幅度均大于波动下降时期,表明合肥规模快速扩张后对水环境的压力愈发显著,城市面临水环境风险失控的可能性逐渐上升。

2.2 城市规模与水环境风险EKC拟合分析

将2006—2020年间合肥城市规模与水环境风险指数作为EKC曲线分析变量,运用Grossman等^[6]对该模型的拓展成果,以三次函数进行拟合,具体公式如下:

$$y = a + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + \varepsilon \quad (7)$$

式中: y 为水环境风险指数; x 为城市规模水平; a 为常数项; b_1 、 b_2 、 b_3 表示 x 变量的一次、二次、三次项系数; ε 为随机误差项, EKC拟合结果如图4所示。

环境库兹涅茨曲线回归拟合方程中 x 变量的系数及误差分别为: $b_1 = 1.36789 \pm 0.57682$, $b_2 = -4.0775 \pm 1.40252$, $b_3 = 2.69582 \pm 0.92394$, R^2 为 0.66194。根据彭水军等^[23]对EKC回归中系数大小与曲线关系的总结,若 $b_1 > 0$, $b_2 < 0$ 且 $b_3 > 0$, 则拟合曲线满足三次曲线形式, 即“N”型曲线关系。因此, 本文运用三次函数对城市规模与水环境风险关系进行拟合具有合理性。

结果表明, 2006—2020年合肥城市规模与水环境风险呈现“N”型曲线关系, 初期城市发展引发人口及经济活动总量增加, 致使用水与排污压力同步增长, 导致水环境风险指数持续上升。当城市规模水平达到0.2时, 水环境风险指数出现拐点, 拐点风险水平在0.7左右。根据合肥发展进程判断, 城市增长起步阶段要素规模效应和城市环境治理投入同步增长, 城市与水环境间的互馈效率提升, 促使水环境风险持续降低。当城市规模水平达到0.8时, 水环境风险指数再次出现拐点, 此后伴随城市规模的提升, 水环境风险指数重新升高。可能由于城市快速扩张进入高规模阶段后, 持续积累的要素规模突破了原本城市环境治理能力的极限, 引发城市规模与环境承载关系进入新的矛盾状态。但此时城市规模处于高水平阶段, 拥有较强的要素调配能力, 所以水环境风险指数在曲线两侧出现反复波动, 体现了城市主动干预水环境风险变化, 构建适应城市新规模下水环境承载系统的尝试。当水环境风险扩大趋势被抑制后, 城市规模与水环境风险将迎来新的拐点, 环境库兹涅茨曲线将呈现倒“W”型, 合肥将进入新的城水关系高质量协调发展阶段。

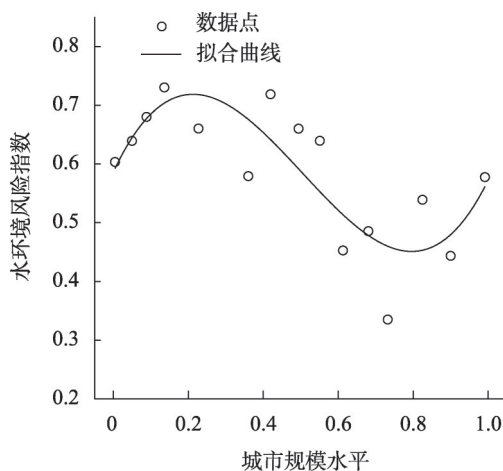


图4 合肥城市规模与水环境风险EKC拟合图

Fig. 4 EKC fitting diagram of city size and water environment risk in Hefei

2.3 城市规模与水环境风险脱钩分析

对城市规模与水环境风险指数进行脱钩分析，脱钩弹性系数 T 为水环境风险指数变化率与城市规模水平变化率的比值，计算公式为：

$$T = \frac{\Delta R/R}{\Delta U/U} \tag{8}$$

通过水环境风险指数与城市规模的变化趋势以及脱钩弹性指数的大小能够将脱钩状态分为六种类型，分别为强脱钩、弱脱钩、衰退脱钩、扩张负脱钩、弱负脱钩、强负脱钩，具体状态可参考图 5，合肥城市规模与水环境风险指数变化情况如表 3 所示。

从脱钩分析可以判断合肥城市规模与水环境风险经历了三种脱钩状态，主要类型为：弱脱钩，表示水环境风险的增长小于城市规模的增长，城市发展对水环境造成的恶性影响较低；强脱钩，表示城市规模扩张中水环境未出现恶化，甚至表现为环境改善，风险水平降低的状态；扩张负脱钩，表示城市规模提升进入消耗水环境质量的发展状态，城市规模增长速度低于水环境恶化速度。

结果显示：2006—2009 年间合肥城市规模与水环境风险呈现弱脱钩状态，城市增长起步阶段水环境恶化程度较低，风险指数增长速度相对于城市规模提升速度而言处于较低水平，对应环境库兹涅兹曲线为初期逐渐放缓的上升曲线。

2009—2015 年间大部分时段二者关系为强脱钩状态，城市规模扩张速度持续增长，水环境风险负向变化，表明水环境恶化受到遏制，对应 EKC 为第一拐点右侧持续下降的曲线阶段。其中 2011—2012 年间出现一次扩张负脱钩，可能与合肥 2011 年行政区划调整相关，原巢湖市拆

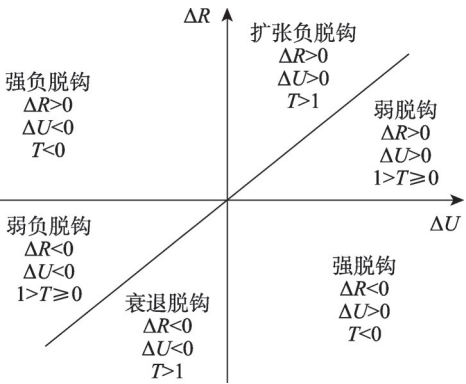


图 5 脱钩状态
Fig. 5 Decoupling state diagram

表 3 2006—2020 年合肥城市规模与水环境风险脱钩指数

Table 3 Decoupling index of city size and water environment risk in Hefei from 2006 to 2020

时间段/年	水环境风险变化率	城市规模变化率	脱钩弹性指数	脱钩类型
2006—2007	0.059	10.238	0.006	弱脱钩
2007—2008	0.064	0.781	0.082	弱脱钩
2008—2009	0.074	0.537	0.138	弱脱钩
2009—2010	-0.096	0.668	-0.143	强脱钩
2010—2011	-0.123	0.585	-0.210	强脱钩
2011—2012	0.241	0.165	1.463	扩张负脱钩
2012—2013	-0.081	0.178	-0.457	强脱钩
2013—2014	-0.031	0.115	-0.273	强脱钩
2014—2015	-0.292	0.111	-2.618	强脱钩
2015—2016	0.073	0.111	0.656	弱脱钩
2016—2017	-0.310	0.076	-4.077	强脱钩
2017—2018	0.609	0.126	4.818	扩张负脱钩
2018—2019	-0.177	0.091	-1.946	强脱钩
2019—2020	0.302	0.102	2.969	扩张负脱钩

分部分地区并入合肥后,对原城市发展进程与水环境保障能力造成了一定冲击,增加了环境压力,导致水环境风险出现小幅上升。但因脱钩弹性指数与其他扩张负脱钩时期的指数相比处于较低水平,因此对于城水良性发展的趋势影响较小。

2015—2020年间二者脱钩状态出现频繁变化,连续年份间未出现相同脱钩状态,弱脱钩、强脱钩、扩张负脱钩交替出现,表明合肥城市规模与水环境风险关系出现不稳定状态,从2015年出现弱脱钩状态代表水环境风险下降趋势放缓,对应EKC为逐渐接近第二拐点,此后水环境风险变化率出现正负交替现象,但风险正向增长数值均大于前一时段负向缓解数值,导致水环境风险指数在波动中重新上升,对应为第二拐点右侧上升曲线。此阶段内城市规模变化速度逐渐稳定在0.1,提示合肥城市规模进入稳定提升阶段,城市扩张带来的环境压力短期内不会出现爆发式增长,水环境风险指数的增加幅度出现降低,证明合肥水环境承载能力正在重新适应城市发展规模,脱钩弹性指数的正向增长趋势下降,印证了合肥城市规模与水环境风险将重新进入平衡状态。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文对合肥在响应融入长三角一体化过程中的城市规模水平及水环境风险特征进行测度,运用EKC假说和脱钩模型分析二者动态关系,具体结论如下:

(1) 2006—2020年间合肥城市规模呈线性增长态势,由2006年的最低值0.004增长至2020年的0.992,证实合肥近15年始终保持高速发展状态,城市各项要素规模持续提升。水环境风险指数经历持续上升—波动下降—波动上升三个阶段,初期上升至2009年,达到最大风险值0.730,随后波动下降,波动期间最大值为2012年0.719,最小值为2017年0.335,2017年后水环境风险指数波动上升,2020年波动上升水平已达到0.578。伴随合肥进入城市高规模阶段,水环境风险压力波动上升。

(2) 将城市规模与水环境风险指数代替传统库兹涅茨曲线以人均GDP和污染物作为变量进行拟合,其线型与传统倒“U”型曲线不同,显示为“N”型曲线关系。两个拐点分别处于城市规模0.2和0.8水平处,对应城市增长起步阶段和城市高规模阶段。表明综合视角下水环境风险指数伴随城市规模初期扩张出现短暂增长,随后受益于城市各项要素规模的外部性和治理能力升级,风险水平持续降低,当城市进入高规模阶段时,原有城水关系承载的平衡状态被突破,水环境风险因城市规模的压力重新出现增长。

(3) 脱钩分析表明合肥城市规模与水环境风险的脱钩状态主要处于弱脱钩、强脱钩中,仅三个时段出现扩张负脱钩,证实合肥城水关系整体协调性较好。此外,当城市规模取得显著增长后,脱钩状态进入不稳定时期,强脱钩与扩张负脱钩交替出现,虽然风险水平仍处于上升阶段,但水环境风险的扩大趋势已被抑制,表征合肥城市规模与水环境风险将进入新的平衡发展状态,水环境风险在合肥治理能力适应当下城市规模后逐渐受到控制。

综上所述,合肥在当前长三角一体化背景下城市规模快速增长,水环境风险在波动变化中呈现整体可控的发展趋势,联系合肥作为安徽加速融入长三角重要增长极的定位,反映了核心城市在快速增长过程中主动干预和治理环境风险的能力较强。长三角其他核心城市因其发展基础和治理体系更为完善,遭遇水环境风险恶化的几率较小,可推断长三角地区核心城市具备良好的城市规模与水环境风险协调发展能力。但仍需关注长

三角其他城市在应对水环境风险变化时的处理能力,长三角整体水环境风险的合理调控是推动一体化高质量发展的基础。

3.2 讨论

通过本文构建的研究框架可以揭示合肥城水关系表象状态与内部机理间的差异情况,有效避免传统水环境评价单一性局限。根据研究结论,可以判断当前合肥城市规模与水环境风险关系隐含多层信息,仅从评价指标数值能够发现合肥在城市规模快速增长下,水环境风险出现增高趋势。但是以环境库兹涅兹曲线和脱钩分析对二者动态关系和发展趋势进行研究,能够得到合肥水环境风险正在逐渐适应城市规模的结论。由于合肥在长三角一体化过程中发挥西部核心城市的重要作用,其城市规模将长期保持稳定增长,需要根据不同规模子系统增长趋势合理规划水环境治理的工作重点。如居民用水基础设施的完善、生产用水效率的提升以及各类净水和引水工程的建设等。将城市规模指标与各项水环境压力指标间的联系作为建立从单一指标到整体关系状态的预警机制,依据城水关系的变化曲线设定风险阈值,促进合肥治理能力适应城市规模增长水平。在响应城市规模加大治理投入的过程中努力提升治理效率,避免因环境规制对城市发展造成制约,推动合肥迈向与环境协调共生的更高质量和可持续的绿色增长路径。

当前,长三角一体化高质量发展正在持续推动中心城市响应和融入区域协调发展的国家战略中,各中心城市快速崛起的过程可能引发类似的城水关系矛盾。合肥城市规模的快速扩张具有代表性,其城水关系能够反映在区域一体化过程中部分城市的发展规律。但是各中心城市的特质存在差异,需要关注其他城市在长三角一体化过程中的城水关系变化。因此,有必要在后续研究中加强对全区域中心城市的城水关系研究,厘清不同类型城市水环境风险的变化特征和规律,以为长三角一体化高质量发展提供理论支撑与参考。

参考文献(References):

- [1] 曹卫东,曾刚,朱晟君,等.长三角区域一体化高质量发展:问题与出路.自然资源学报,2022,37(6):1385-1402. [CAO W D, ZENG G, ZHU S J, et al. High-quality integrated development in the Yangtze River Delta Region: Problems and solutions. Journal of Natural Resources, 2022, 37(6): 1385-1402.]
- [2] 陈晓红,周宏浩.城市化与生态环境关系研究热点与前沿的图谱分析.地理科学进展,2018,37(9):1171-1185. [CHEN X H, ZHOU H H. Research hotspots and prospects of urbanization and ecological environment relationship based on visual knowledge mapping. Progress in Geography, 2018, 37(9): 1171-1185.]
- [3] 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. [GUO S S, CHEN M X, LIU H. Coupling procedure and decoupling analysis of urbanization and resource environment: The study of Beijing. Geographical Research, 2018, 37(8): 1599-1608.]
- [4] 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. [LIANG L W, WANG Z B, FANG C L, 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.]
- [5] OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews. Paris: OECD, 1993.
- [6] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement. CEPR Discussion Papers, 1992, 8(2): 223-250.
- [7] OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). Environmental Indicators Development, Measurement and Use. Paris: OECD, 2003.
- [8] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland be-

- tween 1970 and 2001. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151.
- [9] 马艳. 长江经济带城镇化与生态环境耦合协调效应测度与交互胁迫关系验证. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(2): 275-286. [MA Y. Examining the coupling degree and interactive stress between urbanization and Eco-environment in Yangtze River Economic Belt. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(2): 275-286.]
- [10] 黄晖, 胡求光, 马劲韬. 基于 DPSIR 模型的浙江省海域承载力的评价分析. *经济地理*, 2021, 41(11): 48-55. [HUANG H, HU Q G, MA J T. Evaluation analysis of marine carrying capacity in Zhejiang province based on DPSIR model. *Economic Geography*, 2021, 41(11): 48-55.]
- [11] 彭红松, 郭丽佳, 章锦河, 等. 区域经济增长与资源环境压力的关系研究进展. *资源科学*, 2020, 42(4): 593-606. [PENG H S, GUO L J, ZHANG J H, et al. Research progress and implication of the relationship between regional economic growth and resource environmental pressure. *Resources Science*, 2020, 42(4): 593-606.]
- [12] 夏勇, 钟茂初. 经济发展与环境污染脱钩理论及 EKC 假说的关系: 兼论中国地级城市的脱钩划分. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(10): 8-16. [XIA Y, ZHONG M C. Relationship between EKC hypothesis and the decoupling of environmental pollution from economic development: Based on China prefecture-level cities' decoupling partition. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(10): 8-16.]
- [13] 李健, 王尧, 王颖. 京津冀区域经济发展与资源环境的脱钩状态及驱动因素. *经济地理*, 2019, 39(4): 43-49. [LI J, WANG Y, WANG Y. Decoupling analysis and influence factors between resource environment and economic growth in Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Economic Geography*, 2019, 39(4): 43-49.]
- [14] 赵翔, 贺桂珍. 基于 CiteSpace 的驱动力—压力—状态—影响—响应分析框架研究进展. *生态学报*, 2021, 41(16): 6692-6705. [ZHAO X, HE G Z. Research progress of CiteSpace based driving-pressure-state-impact-response analysis framework. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(16): 6692-6705.]
- [15] 曲衍波, 王霞, 王世磊, 等. 环渤海地区城市规模扩张与质量增长的时空演变及耦合特征. *地理研究*, 2021, 40(3): 762-778. [QU Y B, WANG X, WANG S L, et al. Spatio-temporal evolution and coupling characteristics of urban scale expansion and quality growth in Bohai Rim. *Geographical Research*, 2021, 40(3): 762-778.]
- [16] 岳启蒙, 文倩, 贺奕, 等. 水生态文明城市建设对城市水生态承载力的影响: 以武汉市为例. *生态学报*, 2021, 41(14): 5586-5597. [YUE Q M, WEN Q, HE Y, et al. Influence of water ecological civilization city construction on urban water ecological carrying capacity: A case study of Wuhan city. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5586-5597.]
- [17] 张宇, 曹卫东, 梁双波, 等. 中部地区资源型城市质量与规模时空差异演化研究: 以山西省为例. *自然资源学报*, 2018, 33(2): 233-245. [ZHANG Y, CAO W D, LIANG S B, et al. Research on spatial and temporal evolution of quality and scale of resource based cities in central region of China: A case study of Shanxi province. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(2): 233-245.]
- [18] 曹辉, 张亦弛, 李平星, 等. 高质量发展背景下的城湖共生关系识别与评价: 以长三角合肥—巢湖为例. *自然资源学报*, 2022, 37(6): 1626-1642. [CAO H, ZHANG Y C, LI P X, et al. Recognition and evaluation of city-lake symbiosis under the background of high-quality development: A case study of Hefei and Chaohu Lake in Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(6): 1626-1642.]
- [19] 王嵩, 孙才志, 范斐. 基于共生理论的中国沿海省市海洋经济生态协调模式研究. *地理科学*, 2018, 38(3): 342-350. [WANG S, SUN C Z, FAN F. Marine economic and ecological symbiosis form of coastal provinces and cities in China based on symbiosis theory. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(3): 342-350.]
- [20] 吕添贵, 孔安妮, 汪立. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的区域生态安全时空演化及影响因素研究. *资源与产业*, 2022, 24(2): 30-41. [LYU T G, KONG A N, WANG L. Temporal-spatial evolution and factors of regional ecological security based on DPSIR-TOPSIS model. *Resources & Industries*, 2022, 24(2): 30-41.]
- [21] 石晓昕, 袁重乐, 钱会, 等. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的河北省水资源承载力评价及障碍因素研究. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(5): 92-99. [SHI X X, YUAN Z L, QIAN H, et al. Evaluation and obstacle factors of water resources carrying capacity in Hebei province based on DPSIR-TOPSIS model. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(5): 92-99.]
- [22] 李竞, 侯丽朋, 唐立娜. 基于环境库兹涅茨曲线的我国大气污染防治重点区域环境空气质量与经济增长关系研究. *生态学报*, 2021, 41(22): 8845-8859. [LI J, HOU L P, TANG L N. Relationship between air quality and economic growth in key areas of air pollution control in China based on the Environmental Kuznets Curve. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(22): 8845-8859.]
- [23] 彭水军, 包群. 经济增长与环境污染: 环境库兹涅茨曲线假说的中国检验. *财经问题研究*, 2006, (8): 3-17. [PENG S J, BAO Q. Economic growth and environmental pollution: An empirical test for the Environmental Kuznets Curve hy-

pothesis in China. Research on Financial and Economic Issues, 2006, (8): 3-17.]

- [24] 杨晓华, 胡怡文. 制造业碳排放和经济增长脱钩关系研究: 基于速度和数量双重视角. 生态经济, 2021, 37(4): 13-18. [YANG X H, HU Y W. Research on the decoupling relationship between carbon emissions and economic growth in manufacturing industry: Based on dual perspectives of speed and quantity. Ecological Economy, 2021, 37(4): 13-18.]
- [25] 熊曦. 基于 DPSIR 模型的国家级生态文明先行示范区生态文明建设分析评价: 以湘江源头为例. 生态学报, 2020, 40(14): 5081-5091. [XIONG X. Analysis and evaluation of ecological civilization construction in national ecological civilization pilot demonstration area based on DPSIR model: A case study of the headstream of Xiangjiang River. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 5081-5091.]

Study on water environment risk of city size increase under the integration of Yangtze River Delta: A case study of Hefei city

LI Tao, CAO Wei-dong, WANG Xue-yan

(School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, Anhui, China)

Abstracts: In the context of the integration of the Yangtze River Delta, the size of the central city has been increased rapidly, which leads to the increase of the bearing pressure of resources and environment. Especially the water environment risk which restricts the high-quality development of the city has been deeply concerned. The comprehensive risk level of Hefei water environment was measured by PSIR-TOPSIS model. The dynamic relationship between city size and water environment risk was analyzed by combining environmental Kuznets curve and decoupling analysis. The specific conclusions include: (1) The city size level of Hefei grew linearly between 2006 and 2020, and the water environment risk index went through three stages of continuous increase- fluctuating decrease- fluctuating increase, suggesting that the current water environment risk pressure in the city has increased. (2) The environmental Kuznets curve fitting shows N-shaped curve relationship between city size and water environment risk in Hefei. The two inflection points are at the level of 0.2 and 0.8, respectively, corresponding to the initial stage and large-scale stage of city growth. (3) The analysis shows that the decoupling state of city-water relationship enters an unstable period after the city size of Hefei increases significantly. Strong decoupling alternates with extended negative decoupling. Although the risk level is still in the rising stage, the expanding trend of water environment risk has been restrained. This indicates that Hefei city size and water environment risk will enter a new balanced development state. In this paper, in order to avoid the limitations of traditional water environment evaluation, we combine various theoretical models to build a research framework of city-water relationship. To provide theoretical support and reference for promoting the integrated and high-quality development of the Yangtze River Delta with the harmonious coexistence of city and water environment.

Keywords: city size; water environment risk; PSIR-TOPSIS model; decoupling analysis; integration of Yangtze River Delta