

基于胡焕庸线波动的长江经济带 水资源环境承载力动态演变特征

卢亚丽¹, 徐帅帅¹, 沈 镭^{2,3}

(1. 华北水利水电大学管理与经济学院, 郑州 450046; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 自然资源部资源环境承载力评价重点实验室, 北京 100101)

摘要: 基于水资源生态足迹模型, 对长江经济带 2010—2018 年 131 个地区水资源生态足迹与生态承载力进行研究, 并用 GIS 可视化揭示和探讨长江经济带水资源时空特征。研究发现: (1) 胡焕庸线假说在长江经济带区域成立; (2) 长江经济带人均水资源生态盈余状况在胡焕庸线以西区域最好, 胡焕庸线与胡焕庸亚线之间次之, 胡焕庸亚线以东最差; (3) 长江经济带胡焕庸线以西区域人均水资源承载力均值、水资源承载力均值在三个区域中最大; (4) 长江经济带各地区历年万元 GDP 生态足迹呈减小趋势, 水资源利用率逐年提高; (5) 长江经济带历年平均水资源负载指数呈上升趋势, 水资源压力逐年上升。研究结果有助于长江经济带水资源综合管理, 为水资源的调控及使用提供量化依据。

关键词: 长江经济带; 胡焕庸线; 水资源; 生态足迹; 生态承载

1935 年, 地理学家胡焕庸^[1]提出了从黑龙江瑷珲至云南腾冲的中国人口分布及人口密度规律线, 被学者们称为“胡焕庸线”。2013 年 8 月 30 日, 国务院总理李克强就“胡焕庸线”问题, 提出了“该不该破? 能不能破? 如何破?” 三个问题, 被学者们称之为“总理三问”^[2,3]。随之学者们对胡焕庸线展开了讨论。陆大道等^[4]认为胡焕庸线的稳定性将长期存在, 且在世界上具有普遍性, 可能会被打破。郭华东等^[5]在对相关时空数据及空间信息进行综合分析的基础上, 结合西部充足的绿色能源和互联网技术发展等因素认为, 在实施先进的节水措施下胡焕庸线可以突破。尽管部分学者持胡焕庸线短期内不可突破的观点, 但是可以通过优化城市的其他方面来逐渐改善胡焕庸线两侧的空间地理分布。对于胡焕庸线的研究, 多聚焦于中国整体区域的胡焕庸线两侧人口空间分布^[5]、城镇失业率^[6]、生态承载力^[7,8]、资源环境人口承载力^[9]、气候变化^[10]等, 而鲜见胡焕庸线视角下的水资源环境研究和经济带区域上的胡焕庸线存在与否的研究。

水资源是人类社会发展不可或缺的重要资源, 然而, 水资源时空分布不均匀、水资源量与生产活动不匹配等问题导致水资源成为影响区域可持续发展的决定性因素^[11]。因此, 构建“江河连通”是解决我国区域性用水危机的调水新格局^[12]。生态足迹是研究可持续消费的重要指标, 也是基于土地面积进行量化的一种理论模型, 可以有效计算各区域水资源

收稿日期: 2020-05-06; 修订日期: 2020-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71974056); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA19040102); 河南省高校科技创新人才支持计划 (人文社科类) 资助成果 (2021-CX-004); 中国地质调查局项目 (DD20211413)

作者简介: 卢亚丽 (1976-), 女, 河南漯河人, 博士, 教授, 研究方向为管理系统工程。

E-mail: luyali676@163.com

通讯作者: 沈镭 (1964-), 男, 湖北麻城人, 博士, 研究员, 研究方向为资源经济与政策。E-mail: shenl@igsnrr.ac.cn

匹配状况,为“江河连通”提供量化基础。加拿大生态经济学家 William 等^[13]最早在 1992 年提出生态足迹, Wackernagel 等^[14]在 1996 年进一步完善,利用水资源生态足迹与生态承载力的差值,得出区域水资源处于盈余或赤字的状态,进而对地区水资源和经济可持续发展状况进行科学评价,具备易于理解、操作简单、实用性强等优点,得到了全球学者的普遍青睐和广泛应用。Haberl 等^[15]对长时间段生态足迹计算方法进行探讨,计算了奥地利 1926—1995 年的生态足迹。Wackernagel 等^[16]分别采用全球年平均产量和当地实际年平均产量计算了菲律宾、韩国、奥地利三个国家在 1961—1999 年的生态足迹。林永钦等^[17]利用生态足迹模型研究了中国食物的可持续消费模式。靳相木等^[18]对自然资源核算的生态足迹模型演进进行了深入的研究,并指出生态足迹模型可能需要优化的方向。聂莹等^[19]研究了经济全球化对国家生态足迹产生的不同影响。黄林楠等^[20]建立了水资源生态足迹以及水资源生态承载力的计算模型,确定了计算水资源帐户生态足迹所需的三个关键参数。部分学者分别对河南^[21]、内蒙古^[22]、江西^[11]、成都^[23]、延边州^[24]、重庆^[25]等不同区域上的水资源生态足迹进行了计算和分析,说明该模型对水资源评价具有良好的普适性,但鲜见水资源生态足迹在经济带区域上的应用分析。

长江经济带作为国家“新常态”三大战略之一的经济带,其经济总量和人口总量均占全国总量 40% 以上,是我国综合实力最强的巨型经济带。进一步开发我国的黄金水道,推动长江经济带的快速发展,形成我国经济建设、生态文明建设的示范带,是目前长江经济带发展的重要任务。然而,长江经济带存在水资源开发利用不合理、水质型缺水等问题。本文将从胡焕庸线视角出发,运用水资源生态足迹模型,结合 GIS 空间自相关技术,验证长江经济带人均生态足迹存在的胡焕庸线假说,分析长江经济带水资源时空特性,并从胡焕庸线和胡焕庸亚线角度提出对策建议,有利于提高长江经济带水资源利用效率,合理均衡地分配长江经济带水资源,推动长江经济带发展,走出一条生态优先、绿色发展之路。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 数据来源

本文用到长江经济带 131 个地区的面积、人口、GDP、水资源总量、用水量、降水量等基础数据,数据来源于 2010—2018 年长江经济带 11 省(市)水资源公报、统计年鉴及《中国水利年鉴》《中国统计年鉴》等。2010 年是国家十一五规划最后一年,2011—2015 年是国家十二五规划,2016—2018 年是国家十三五规划的前三年。选择 2010—2018 年开展研究,跨度国家三个五年规划阶段,可比较在不同国家战略期间长江经济带的水资源特征变化。长江经济带水资源公报数据更新至 2018 年,2009 年及更早数据缺失严重,最终选择 2010—2018 年数据。长江经济带行政区划如图 1 所示。

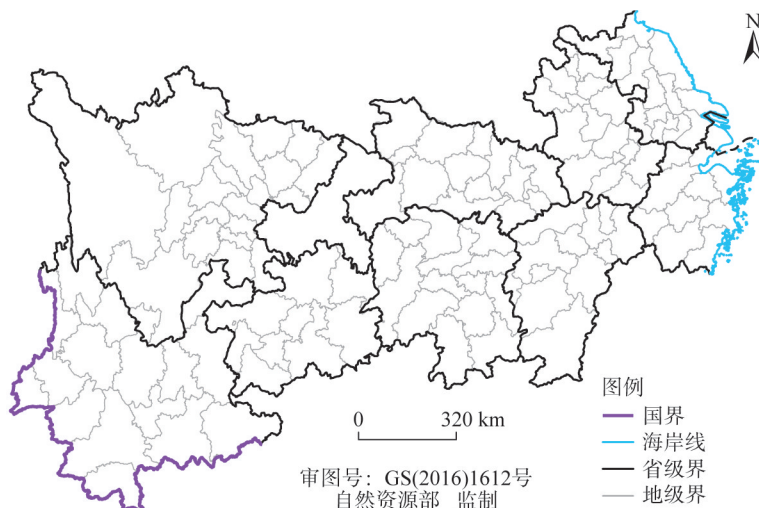
1.2 研究方法

1.2.1 水资源生态足迹模型

基于生态足迹模型建立水资源生态足迹模型,参考用水特征和内涵以及黄林楠等^[20]的研究成果,将水资源生态足迹概括为地区维持其人口生活与生产所消耗的全部水资源量,其中耗损的水资源量包括生活用水、生产用水和生态环境用水,计算模型如下^[23]:

$$EF_w = N \times ef_w = N \times \gamma_w \times (W/P_w) \quad (1)$$

式中: EF_w 为水资源总生态足迹 (hm^2); N 为总人口数 (人); ef_w 为人均水资源生态足



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 长江经济带行政区划

Fig. 1 Administrative divisions of Yangtze River Economic Belt

迹 ($\text{hm}^2/\text{人}$)； γ_w 为水资源的全球均衡因子，本文采用世界自然基金会 (WWF) 基于 2000 年合算的均衡因子计算出的水资源全球均衡因子 5.19^[23]； W 为人均消耗的水资源量 (m^3)； P_w 为水资源全球平均生产能力，取值为 $3140 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ^[20]。

1.2.2 水资源生态承载力模型

水资源承载力决定区域经济的可持续发展，水资源承载力的上限受到人类社会活动的影响，超出水资源承载力上限后，区域水资源环境系统功能和结构将产生质变进而限制人类社会活动。本文利用生态理论的水资源承载法作为研究区域水资源承载力的模型方法，其计算模型为^[20]：

$$EC_w = 0.4 \times \varphi \times \gamma_w \times Q/P_w \quad (2)$$

式中： EC_w 为水资源承载力大小 (hm^2)； φ 为区域水资源的产量因子，其值大小为区域内水资源平均生产能力与全球水资源平均生产能力 P_w 之比，而区域内水资源平均生产能力值大小为区域水资源总量与流域面积之比^[23]； Q 为水资源总量 (m^3)。一个国家和地区的水资源承载力至少有 60% 用于维持生态环境，所以水资源承载力计算中乘以系数 0.4^[11]。

1.2.3 水资源生态盈余/赤字

水资源消耗程度用水资源生态承载力与水资源生态足迹的差值度量，水资源的可持续利用状况以及水资源消耗是否超载皆可用此评价，计算公式如下^[26]：

$$\text{水资源生态盈余/赤字} = EC_w - EF_w \quad (3)$$

式中：若 $EC_w > EF_w$ 时，区域水资源处于盈余状态，可持续利用状况良好； $EC_w = EF_w$ 时，水资源消耗处于平衡状态； $EC_w < EF_w$ 时，区域水资源处于赤字状态，生态和经济发展将受到制约，水资源利用不可持续。

1.2.4 万元 GDP 水资源生态足迹

区域水资源生态足迹与其万元 GDP (G_{GDP}) 的比值称为万元 GDP 水资源生态足迹，其大小可以作为衡量区域内水资源利用率的依据，值越大，区域水资源利用率越低，反

之利用率越高，计算公式如下^[26]：

万元GDP水资源生态足迹 = EF_w/G_{GDP} (4)

1.2.5 水资源负载指数模型

水资源开发前景可用水资源负载指数评估，水资源负载指数 C 可测算区域水资源利用水平和开发难度，其指数划分见表1，计算公式如下^[24]：

$C = K \times \sqrt{NG}/Q$ (5)

式中： G 为GDP产值（亿元）； K 为降水系数，其计算公式如下 [R 为降水量（mm）]：

$$K = \begin{cases} 1.0 & (R \leq 200) \\ 1.0 - 0.1(R - 200)/200 & (200 < R \leq 400) \\ 0.9 - 0.2(R - 200)/400 & (400 < R \leq 800) \\ 0.7 - 0.2(R - 200)/800 & (800 < R \leq 1600) \\ 0.5 & (R > 1600) \end{cases}$$
 (6)

表1 水资源负载指数等级
Table 1 Water resource load index grade

级别	C	水资源利用程度及开发潜力	水资源开发条件评价
I	>10	高，潜力很小	艰巨，需跨区域调水
II	5~10	高，潜力小	困难
III	2~5	中等，潜力较大	中等
IV	1~2	较低，潜力大	较容易
V	<1	低，潜力很大	容易，可兴建中小工程

2 结果分析

2.1 胡焕庸线假说在长江经济带区域成立

利用 ArcGIS 10.2，采用自然断裂法分类功能，根据人均水资源生态足迹大小将其分为五类（图中颜色深浅表示大小），绘制出 2010—2018 年长江经济带各地区人均水资源生态足迹空间演化分布图（图2）。由图2可知，远离胡焕庸线的区域人均生态足迹较大，接近胡焕庸线的区域人均生态足迹较小，由此说明胡焕庸线假说在长江经济带区域成立。考虑到长江经济带胡焕庸线以西的部分区域面积较小，以东的部分区域面积较大，且整个长江经济带区域人均水资源生态足迹差异呈区域化，将胡焕庸线向东平移 700 km 得到胡焕庸亚线，据此将长江经济带人均水资源生态足迹分为胡焕庸线西部、胡焕庸线与胡焕庸亚线之间、胡焕庸亚线以东三个区域。胡焕庸线是中国人口分布的基本分界线，长江经济带在胡焕庸线的波动是长江经济带人口分布特征的反映。长江三角洲是长江经济带上经济水平较高的区域，人口吸纳能力强，要素集聚水平高，人口密度明显高于长江经济带其他区域；人口密度从沿海到内陆的阶梯式分布是胡焕庸线在长江经济带区域波动并形成胡焕庸亚线的主要原因。

总体来看，长江经济带人均生态足迹的阶梯式分布，说明存在着胡焕庸线和胡焕庸亚线。本文依据人均水资源生态足迹确定的胡焕庸亚线与黄贤金等^[9]对长江经济带人口承载格局研究时确定的胡焕庸亚线2基本重合。胡焕庸线和胡焕庸亚线将长江经济带人均水资源生态足迹分为高、中、低三个阶梯式区域。可以说，胡焕庸线、胡焕庸亚线是长江经济带水资源使用程度、经济发展水平、人口密度的分界线，这一局面也解释了我国胡

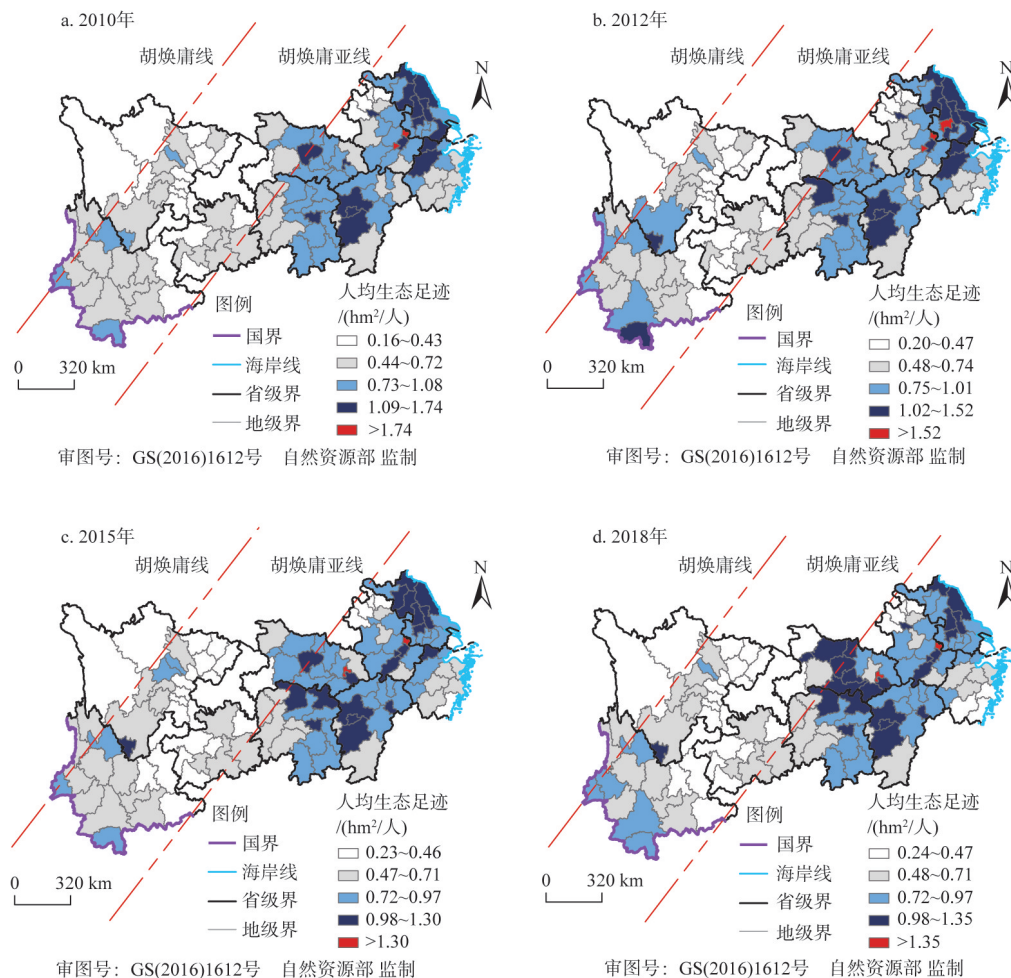


图2 2010—2018年长江经济带人均水资源生态足迹时空演化

Fig. 2 Spatial and temporal evolution of per capita ecological footprint of water resources in the Yangtze River Economic Belt from 2012-2018

焕庸线较难破的原因。长江经济带人均水资源生态足迹分布有如下特征：

(1) 长江经济带人均水资源生态足迹呈现三级阶梯状，胡焕庸线以西区域的人均水资源生态足迹最小，胡焕庸线至胡焕庸亚线之间区域的人均水资源生态足迹次之，胡焕庸亚线以东区域的人均水资源生态足迹最大。

(2) 长江经济带胡焕庸亚线以东区域主要为湖北、安徽、江苏、浙江，人均水资源生态足迹较大，并且江苏、湖北的人均水资源生态足迹整体高于安徽、浙江的人均水资源生态足迹。其中2010—2014年安徽铜陵、2010—2013年及2014—2015年马鞍山、2011—2013年镇江人均水资源生态足迹高于胡焕庸亚线以东其他各地区。

(3) 长江经济带胡焕庸线与胡焕庸亚线之间的区域主要以云南、四川、贵州、重庆为主，其人均水资源生态足迹与胡焕庸亚线以东区域的人均水资源生态足迹相比较小。其中2010—2018年德宏、西双版纳、丽江、2012—2018年云南普洱人均水资源生态足迹较高；2012—2013年和2015—2018年四川攀枝花的人均水资源生态足迹在此区域内最高，与攀枝花是四川唯一的亚热带水果生产基地的实际情况符合。

2.2 长江经济带人均水资源生态足迹时空特征

从长江经济带总区域及各地区的分析来看,人均水资源生态足迹大小均无显著变化。长江经济带人均水资源生态足迹均值在0.74~0.79之间浮动,胡焕庸亚线以东区域人均水资源生态足迹大小在0.83~0.94之间浮动,胡焕庸线与胡焕庸亚线之间区域人均水资源生态足迹均值在0.52~0.57之间变动,胡焕庸线以西区域人均水资源生态足迹均值0.47~0.55之间浮动。2010—2018年长江经济带各地区人均水资源生态足迹均值大小排在前十位的是马鞍山2.87 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、铜陵1.91 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、鄂州1.56 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、镇江1.44 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、扬州1.40 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、芜湖1.31 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、宜春1.27 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、盐城1.23 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、孝感1.22 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、泰州市1.21 $\text{hm}^2/\text{人}$,均处于胡焕庸亚线以东区域。人均水资源生态足迹均值排在后十位的是广安0.31 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、南充0.29 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、邵通0.28 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、亳州0.28 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、阜阳0.28 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、达州0.27 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、苏州0.27 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、毕节0.27 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、舟山0.25 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、恩施0.22 $\text{hm}^2/\text{人}$ 。其中除亳州、阜阳、苏州、舟山位于胡焕庸亚线以东区域外,其他均处于胡焕庸线和胡焕庸亚线之间。以三年为一单位用ArcGIS 10.2绘制出长江经济带2010—2018年水资源生态足迹均值大小时空演化图,如图3所示。

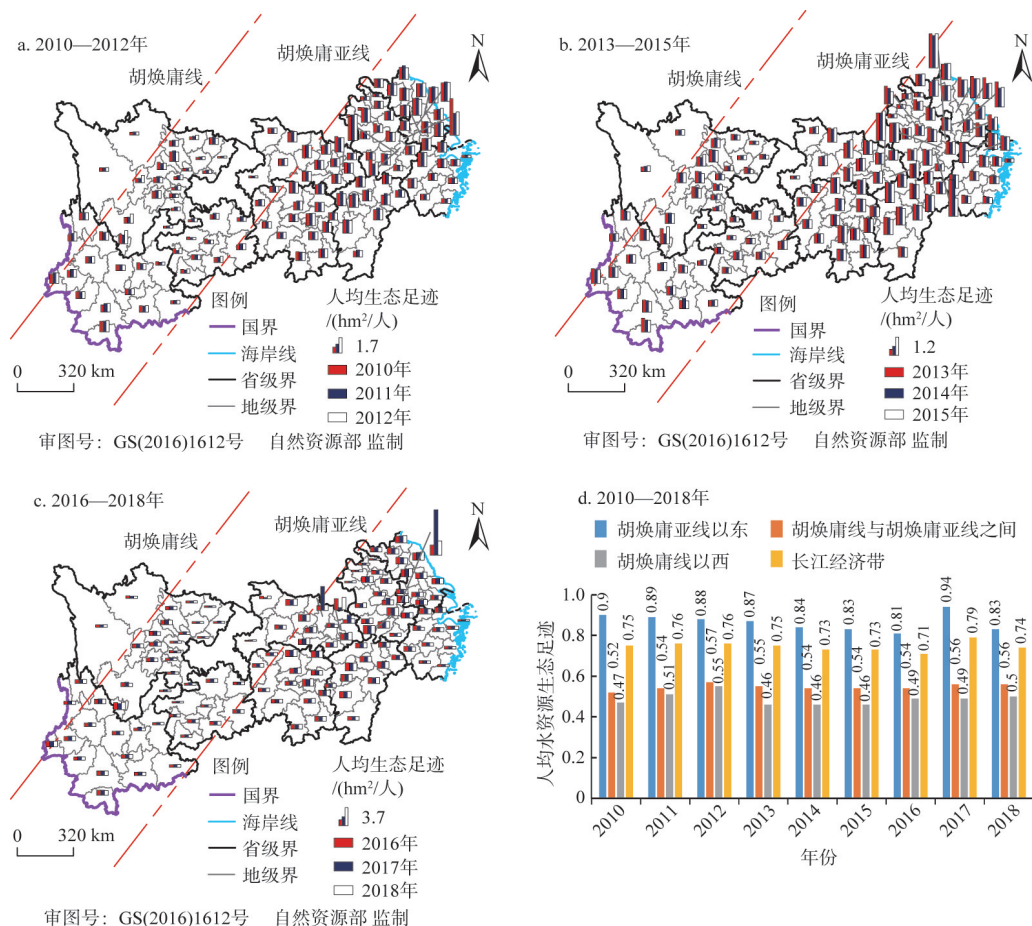


图3 2010—2018年长江经济带人均水资源生态足迹大小变化

Fig. 3 Changes in the ecological footprint of water resources per capita in the Yangtze River Economic Belt from 2010-2018

2.3 长江经济带人均水资源生态盈余/赤字时空特征

长江经济带人均水资源生态盈余/赤字状况的时空演化特征如图4所示。整体来看,胡焕庸线以西区域人均水资源生态盈余相对于胡焕庸线与胡焕庸亚线之间区域、胡焕庸亚线以东区域处于较高水平,水资源可持续利用状况较好;胡焕庸线与胡焕庸亚线之间区域人均水资源生态状况次于胡焕庸线以西区域,但高于胡焕庸亚线以东区域,空间分布呈阶梯状。

胡焕庸线与胡焕庸亚线之间的区域人均水资源基本处于生态盈余状态,但有少数地区处于生态赤字状态。该区域的德阳除2013年外,其余年份都处于人均水资源生态赤字状态;遂宁、内江、自贡在2011年、2015—2018年间处于人均水资源生态赤字状态;昆明、楚雄、大理在2012年、2013年均处于人均水资源生态赤字状态;襄阳在2011年、2012年均处于人均水资源生态赤字状态。其余地区均处于人均水资源生态盈余状态,其中恩施在2011—2018年间处于该区域人均水资源生态盈余最高水平。

胡焕庸亚线以东区域人均水资源生态状况较其他两个区域差。江苏除2015年、2016年部分地级市处于人均水资源生态盈余状态外,其他年份各地区几乎均处于人均水资源生态赤字状态,这与江苏经济发展水平较高直接相关,该省水资源不足以支持社会活动的耗水需求,经济和生态发展可持续性较差。

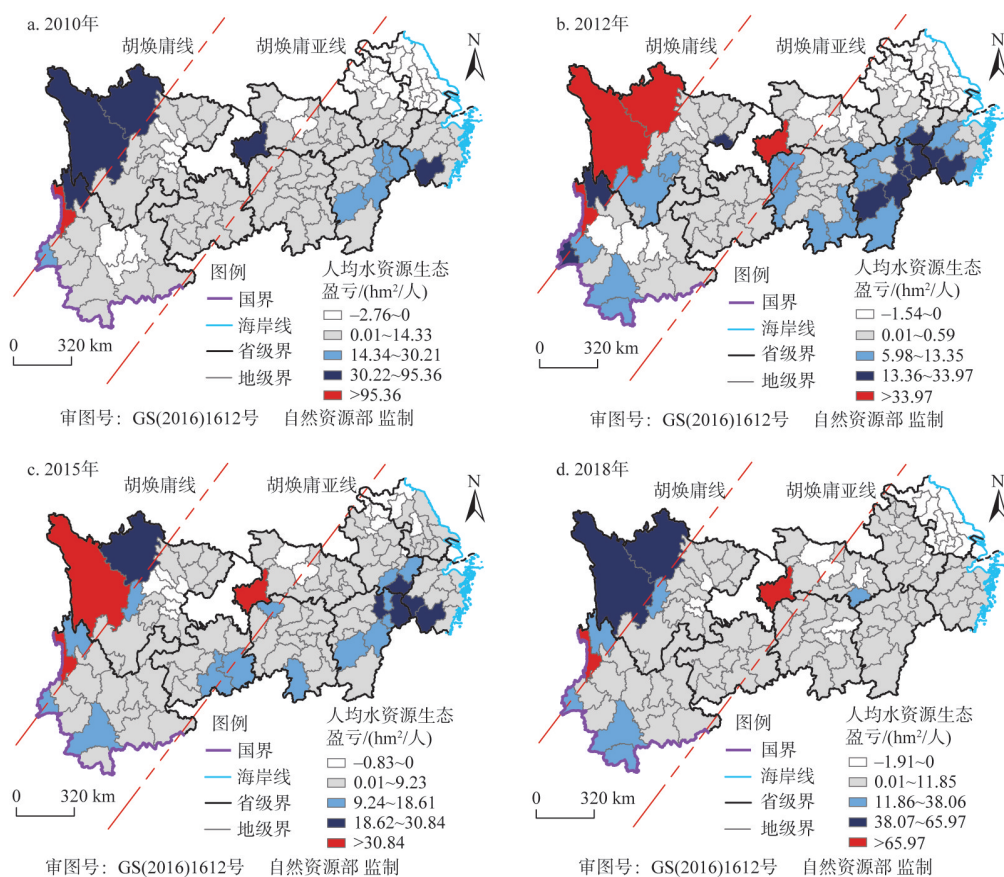


图4 2010—2018年长江经济带人均水资源生态盈余/赤字

Fig. 4 Ecological surplus/deficit of per capita water resources in the Yangtze River Economic Belt from 2010-2018

2010—2018年长江经济带人均水资源生态盈余均值在逐年下降, 2010—2018年间人均水资源生态盈余均值分别为: $7.52 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $3.59 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $6.25 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $3.99 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $5.27 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $5.53 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $8.71 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $6.90 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $5.50 \text{ hm}^2/\text{人}$, 整体呈下降趋势。

长江经济带人均水资源盈余分布如图5所示。长江经济带人均水资源盈余均值排名前十的地区, 地区水资源丰富。例如, 中国西南地区的大河之一怒江流经怒江、德宏; 甘孜境内主要河流为金沙江、雅砻江和大渡河三大河流; 迪庆位于金沙江、澜沧江、怒江三江并流的国家级风景名胜

区腹地, 澜沧江和金沙江自北向南贯穿全境; 岷江干流及最大支流大渡河纵贯阿坝; 长江及新安江流经黄山, 恩施境内有龙潭河、清江河、龙洞河、宣恩贡水河等, 特殊地理位置使得这些地区水资源丰富, 水源生态盈余远远高于其他地区。国家级生态示范区的丽水、国家级自然保护区世界地质公园的神农架林区、首批通过全国水生态文明建设试点城市的咸宁等因其特殊的优越地理位置及自然生态条件, 水资源丰富, 人均生态盈余同样高于大多数地区。排名后十位的主要表现为经济发展特性, 除徐州、宿迁、连云港其他均是长江三角洲中心区城市。在水资源并不是十分充足的情况下受产业结构、人口密度、区域蓄水能力、经济发展等因素影响, 水资源亏欠, 不足以支持耗损需求, 水资源出现生态赤字, 生态和经济发展受到制约, 水资源不可持续。

2.4 长江经济带水资源承载力时空特征

从空间分布特征来看, 2010—2018年胡焕庸线以西区域人均水资源承载力均值、水资源承载力均值在三个区域中最大。在胡焕庸线与亚线之间恩施人均水资源承载力均值最大, 保山、临沧、普洱、西双版纳、张家界等次之。胡焕庸亚线以东区域的江西南部 and 浙江南部如吉安、赣州、抚州、鹰潭、上饶、丽水、温州、杭州等市人均水资源生态承载力及水资源生态承载力均值较大。2010—2018年长江经济带各地区人均水资源承载力均值及水资源承载力均值空间分布情况如图6所示。其中2010—2018年长江经济带各地区人均水资源承载力均值位列前十的是怒江、恩施、甘孜、阿坝、迪庆、丽水、德宏、神农架、黄山、咸宁, 人均水资源承载力大小依次为 $107.59 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $99.19 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $48.96 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $46.27 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $28.19 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $22.93 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $21.30 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $20.64 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $19.61 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $17.28 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。与2010—2018年人均水资源生态盈余均值位列前十的地区及排名相同, 原因不再赘述。

2.5 长江经济带水资源利用效率

在2010—2018年长江经济带131个地区万元GDP水资源生态足迹基础上, 以三年为

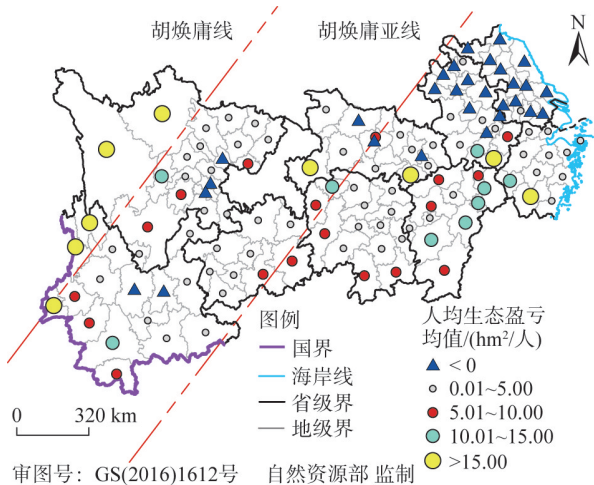


图5 2010—2018长江经济带各地区人均水资源生态盈余/赤字情况

Fig. 5 Ecological surplus/deficit of water resources per capita in the Yangtze River Economic Belt from 2010 to 2018

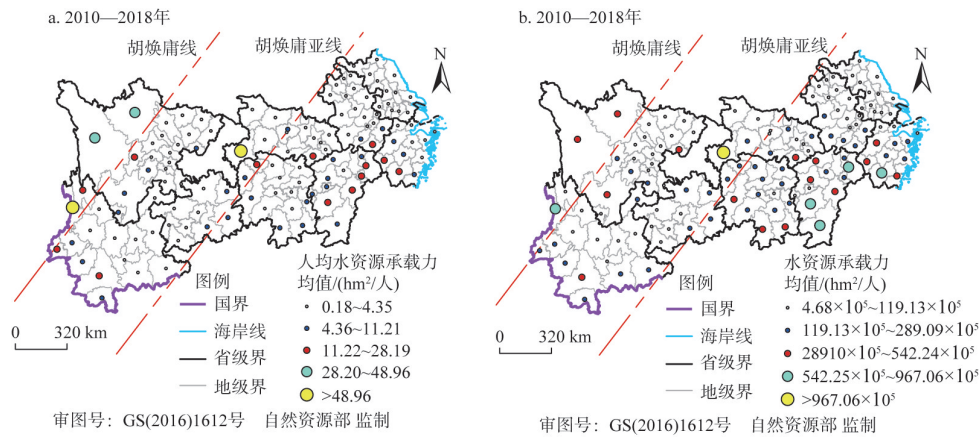


图6 2010—2018年长江经济带水资源承载力

Fig. 6 Water resources carrying capacity of the Yangtze River Economic Belt from 2010-2018

一个单位，将各地区万元GDP水资源生态足迹用ArcGIS 10.2做时空分布柱形图(图7)。2010—2018年间各地区万元GDP生态足迹呈减小趋势，水资源利用率提高，但也存在区域性差异。在胡焕庸线和胡焕庸亚线之间以成都为中心的广元、绵阳、资阳、

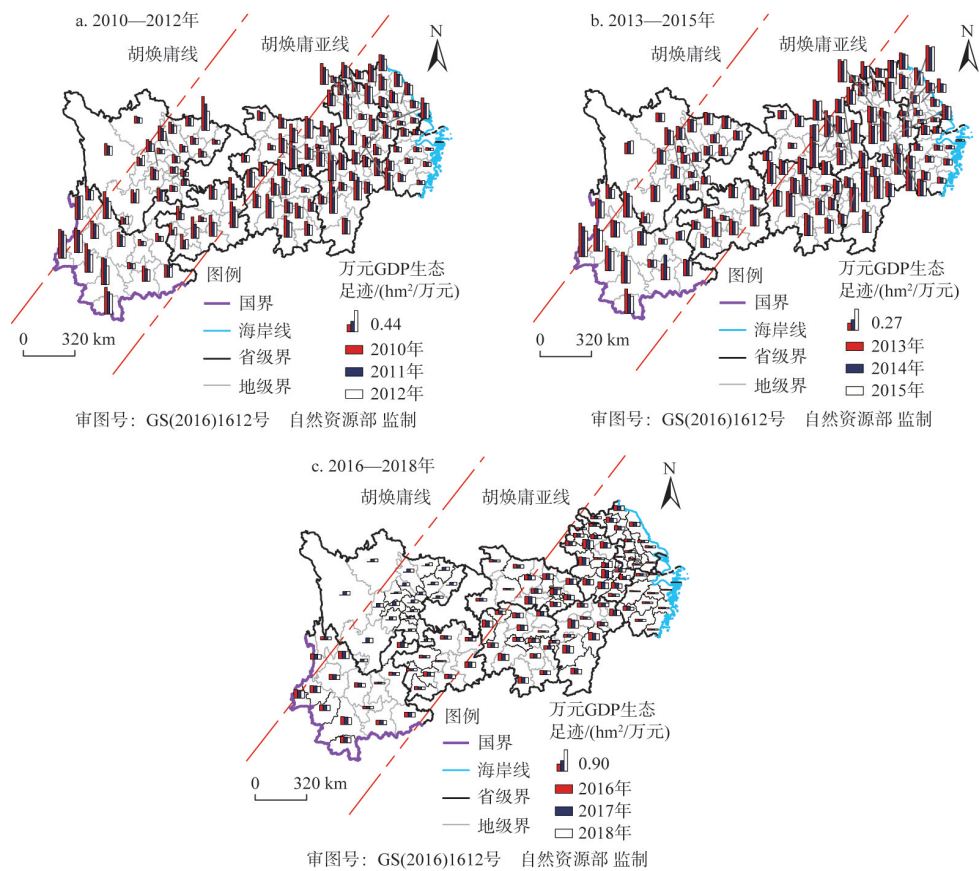


图7 2010—2018年长江经济带万元GDP生态足迹大小

Fig. 7 The ecological footprint of ten thousand yuan GDP of the Yangtze River Economic Belt from 2010-2018

广安、重庆及该区域南部的昆明、玉溪、丽江、六盘水水资源利用率整体上高于胡焕庸线与胡焕庸线之间区域的其他地区。在胡焕庸亚线以东区域，以上海为中心的苏州、无锡、舟山、嘉兴、台州、宁波、金华、杭州、温州等水资源利用率整体高于其他地区，经济发展较好的地区水资源利用率整体较高。

2010—2018年长江经济带历年万元GDP水资源生态足迹大小为0.35 hm²/万元、0.29 hm²/万元、0.25 hm²/万元、0.23 hm²/万元、0.20 hm²/万元、0.19 hm²/万元、0.15 hm²/万元、0.16 hm²/万元、0.15 hm²/万元，整体呈递减趋势，2018年有所上升。2010—2018年长江经济带水资源利用率排在前十位和后十位的地区历年万元GDP水资源生态足迹如表2所示。

表2 2010—2018年长江经济带各市万元GDP水资源生态足迹表
Table 2 Water resource ecological footprint table of ten thousand yuan GDP of each city
in the Yangtze River Economic Belt from 2010-2018

地区	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	均值	排名
舟山	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	1
上海市辖区	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	2
宁波	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05	3
武汉	0.12	0.10	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.07	4
无锡	0.12	0.10	0.09	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	5
温州	0.12	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.08	6
贵阳	0.15	0.12	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.08	7
南京	0.14	0.12	0.10	0.09	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.08	8
绍兴	0.13	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.08	9
苏州	0.15	0.14	0.12	0.08	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.08	10
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
保山	0.64	0.59	0.48	0.41	0.35	0.33	0.29	0.28	0.26	0.40	125
丽江	0.70	0.54	0.45	0.40	0.37	0.33	0.31	0.31	0.29	0.41	126
天门	0.64	0.55	0.49	0.45	0.41	0.34	0.28	0.29	0.26	0.41	127
抚州	0.61	0.59	0.48	0.45	0.38	0.35	0.32	0.28	0.26	0.41	128
荆州	0.71	0.59	0.49	0.47	0.39	0.37	0.33	0.32	0.29	0.44	129
普洱	0.70	0.67	0.49	0.49	0.43	0.36	0.33	0.31	0.29	0.45	130
六安	0.75	0.62	0.56	0.52	0.46	0.44	0.35	0.33	0.30	0.48	131
吉安	0.83	0.69	0.57	0.51	0.45	0.38	0.34	0.32	0.29	0.49	132
宜春	0.73	0.66	0.52	0.54	0.48	0.44	0.40	0.35	0.32	0.49	133
德宏	0.75	0.71	0.60	0.53	0.48	0.40	0.36	0.33	0.31	0.50	134

2.6 长江经济带水资源负载指数

根据式(5)、式(6)计算出2010—2018年长江经济带各地区历年及平均水资源负载指数。2010—2018年间长江经济带历年平均水资源负载指数为8.23、12.78、10.08、12.49、9.71、8.38、15.89、12.08、12.39，总体呈上升趋势，说明长江经济带水资源压力在逐年上升，水资源负载指数均值为11.34，水资源利用程度高，开发潜力小。从2010—2018年各地区水资源负载指数空间分布图(图8)来看，在胡焕庸亚线以东区域水资源负载指数大于10的大部分地区集中在长三角城市群及湖北荆门、孝感、武汉、鄂州、湖南长沙。胡焕庸线与胡焕庸亚线之间水资源负载指数大于10的地区有德阳、成都、资阳、

内江、自贡、南充、达州、广安、襄阳, 这些地区水资源开发利用程度高, 开发潜力小, 水资源开发条件艰苦, 需跨区域调水。胡焕庸线以西的区域水资源负载指数均小于1, 这些地区水资源利用程度低, 开发潜力大, 水资源开发条件容易, 可兴建中小型工程。

3 结论与建议

3.1 结论

本文以长江经济带为研究对象, 深入分析了2010—2018年长江经济带131个地区的水资源状况, 通过建立模型测度水资源生态足迹、水资源生态盈余/赤字、水资源承载力、水资源利用率和水资源负载情况, 并用ArcGIS 10.2分析时空特征, 以期对未来长江经济带水资源的利用与开发提供理论依据。得到的主要研究结论如下:

(1) 揭示了长江经济带人均水资源生态足迹的空间格局特征。① 人均生态足迹存在胡焕庸线, 根据2010—2018年各地区人均生态足迹的时空演化将胡焕庸线沿向东平移700 km得到胡焕庸亚线; ② 长江经济带各地区人均生态足迹分布呈三级阶梯状, 胡焕庸线以西区域人均水资源生态足迹最小, 胡焕庸线与胡焕庸亚线之间的区域人均水资源生态足迹次之, 胡焕庸亚线以东的区域人均水资源生态足迹最大; ③ 2010—2018年长江经济带人均生态足迹均值无显著变化。

(2) 探讨了长江经济带水资源利用状态的时空特征。① 长江经济带人均水资源生态盈余/赤字情况时空演化存在区域性特征, 胡焕庸线以西区域的水资源生态盈余比胡焕庸线与胡焕庸亚线之间区域、胡焕庸亚线以东区域高, 水资源可持续利用状况较好。胡焕庸线与胡焕庸亚线之间的区域人均水资源生态状况次于胡焕庸线以西的区域、但高于胡焕庸亚线以东的区域, 总体分布呈阶梯状。② 胡焕庸线以西区域人均水资源生态承载力及水资源生态承载力均值在三个区域中最大。在胡焕庸线与胡焕庸亚线之间恩施人均水资源承载力均值最大。胡焕庸亚线以东区域的江西南部 and 浙江南部人均水资源生态承载力及水资源生态承载力均值较大。③ 长江经济带131个地区万元GDP水资源生态足迹在2010—2018年间呈减小趋势, 水资源利用率提高。④ 2010—2018年长江经济带各地区平均水资源负载指数总体呈上升趋势, 水资源压力逐年上升。

胡焕庸线假说在长江经济带区域成立, 印证了中国人口密度分布状况, 从侧面反映胡焕庸线短时间内比较难破。长江经济带被胡焕庸线、胡焕庸亚线划分的三个区域的水资源情况存在的时空特征, 是区域间水资源与人口密度、经济发展水平匹配情况的综合反映。

3.2 建议

为契合长江经济带“坚持生态优先、绿色发展, 共抓大保护, 不搞大开发”的发展战略, 立足长江经济带水资源时空特性, 合理使用水资源, 不断完善城市功能, 发展优势产业, 带动地区经济发展, 本文建议从以下方面推进长江经济带水资源的利用与开发:

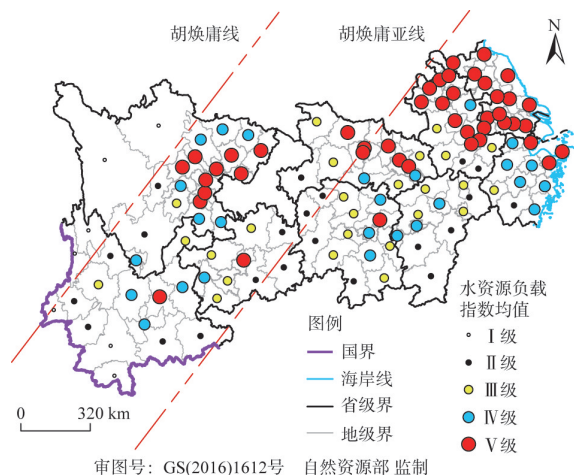


图8 长江经济带水资源负载指数

Fig. 8 Load index of water resources in the Yangtze River Economic Belt

(1) 区域性调整产业结构及污染物排放控制。依据胡焕庸线、胡焕庸亚线划分的三个区域的水资源生态足迹、水资源生态盈余/赤字情况,对相关区域进行产业结构调整。胡焕庸亚线以东地区水资源生态赤字较为严重,建议优化产业结构,减小人均水资源生态足迹,提高水资源承载力,促使水资源向生态盈余方向演进。胡焕庸线以西区域是水资源生态盈余区域,通过调整产业结构,增加生产、生活、农业等用水,提高区域经济总量。在区域性产业调整的同时,考虑污染物的排放,严格把控可能对水资源造成污染的污染物排放,调整甚至关停污染物排放较多的产业,最大程度地保护水资源。

(2) 突出区域性用水特征差异及用水总量宏观控制。依据胡焕庸线、胡焕庸亚线划分的三个区域的水资源状况,结合长江经济带各区域经济水平发展、城市化进程、人口密度、生态环境,对生活用水、生态用水、生产用水进行区域化调整,使水资源分配更加符合区域特征,进而实现水资源与区域性的高度匹配。根据各区域水资源特征确定用水量标准,宏观控制各区域水资源总量,提高水资源利用率,促进区域经济发展。

(3) 分区域建立水资源使用及保护标准体系。根据水资源生态足迹、万元GDP水资源生态足迹、水资源生态盈余/赤字、水资源负载指数,在胡焕庸线以西、胡焕庸线与胡焕庸亚线之间、胡焕庸线以东三个区域,根据水资源使用和水资源保护两个方面建立标准体系,按产业结构制定水资源使用量标准,精细化治理水污染。

(4) 水资源合理开发及调度。根据长江经济带各市水资源负载指数,正确评估水资源利用程度及开发潜力。由于水资源开发的限制条件,可以通过跨区域调水或兴建中小型水利工程,平衡两地水资源,达到协同发展。水资源生态盈余区域要充分利用水资源优势,提高本区域经济水平的同时对水资源生态赤字区域进行跨区域补水。水资源生态赤字地区要致力于提高水资源利用率,在上级政府监督下合理进行生态补偿并实施严格的奖惩措施等。

(5) 构建“江河连通”调水新格局^[12],实现区域水资源一体化。发挥我国调水优势,构建长江经济带纵横交错的水资源调度格局。将流经长江经济带的怒江、澜沧江、金沙江、雅砻江、闽江、大渡河、新安江、长江等河流,以江河连通的方式,对水资源压力较大的地区补水,实现长江经济带水资源一体化。

(6) 以水资源要素为中心编制长江经济带国土空间规划。在编制长江经济带国土空间规划时,着重解决人与水之间的矛盾。以水资源要素为中心考虑长江经济带的资源分配,建立合理的跨界水权交易机制、生态补偿机制、特色产业发展机制,实现长江经济带全区域以水资源要素为中心的自然资源稳定管理模式。

参考文献(References):

- [1] 胡焕庸. 中国人口之分布: 附统计表与密度图. 地理学报, 1935, 2(2): 33-74. [HU H Y. Population distribution in China: Attached statistical tables and density maps. Acta Geographica Sinica, 1935, 2(2): 33-74.]
- [2] 李梅. 李克强之问与胡焕庸线之破. 探索与争鸣, 2016, (1): 36. [LI M. The question of LI Keqiang and the breaking of Hu-Huanyong-Line. Exploration and Free Views, 2016, (1): 36.]
- [3] 郭华东, 王心源, 吴炳方, 等. 基于空间信息认知人口密度分界线: 胡焕庸线. 中国科学院院刊, 2016, 31(12): 1385-1394. [GUO H D, WANG X Y, WU B F, et al. Cognizing population density demarcative line (Hu Huanyong-Line) based on space technology. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(12): 1385-1394.]
- [4] 陆大道, 王铮, 封志明, 等. 关于“胡焕庸线能否突破”的学术争鸣. 地理研究, 2016, 35(5): 805-824. [LU D D, WANG Z, FENG Z M, et al. Academic debates on Hu Huanyong Population Line. Geographical Research, 2016, 35(5): 805-824.]
- [5] 李佳谔, 陆大道, 徐成东, 等. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化. 地理学报, 2017, 72(1): 148-160. [LI J M,

- LU D D, XU C D, et al. Spatial heterogeneity and its changes of population on the two sides of Hu Line. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 148-160.]
- [6] 谢获帆, 谢明. 基于胡焕庸线的中国城镇失业率空间分布研究. *调研世界*, 2018, (1): 52-56. [XIE D F, XIE M. Research on the spatial distribution of urban unemployment rate in China based on Hu Huanyong's line. *The World of Survey and Research*, 2018, (1): 52-56.]
- [7] 钟茂初. 如何表征区域生态承载力与生态环境质量: 兼论以胡焕庸线生态承载力涵义重新划分东中西部. *中国地质大学学报: 社会科学版*, 2016, 16(1): 1-9. [ZHONG M C. How to characterize regional ecological carrying capacity and ecological environment quality? Discuss the meaning of ecological carrying capacity of Hu Huanyong Line to divide the eastern and western regions. *Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition*, 2016, 16(1): 1-9.]
- [8] 钟茂初, 孙坤鑫. 中国城市生态承载力的相对表征: 从胡焕庸线出发. *地域研究与开发*, 2018, 37(5): 152-157. [ZHONG M C, SUN K X. Relative characterization of urban ecological carrying capacity in China: Analysis from the Hu Line. *Areal Research and Development*, 2018, 37(5): 152-157.]
- [9] 黄贤金, 金雨泽, 徐国良, 等. 胡焕庸亚线构想与长江经济带人口承载格局. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(12): 1937-1944. [HUANG X J, JIN Y Z, XU G L, et al. Conception of sub-line of Hu Huangyong Population Line and patterns of future population carrying in the Yangtze River Economic Belt. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(12): 1937-1944.]
- [10] 王铮. 地理本性: 胡焕庸线的突破与打破问题. 探索与争鸣, 2016, (1): 43-47. [WANG Z. Geographical nature: The breakthrough and breaking problem of Hu Huanyong's line. *Exploration and Free Views*, 2016, (1): 43-47.]
- [11] 孟丽红, 叶志平, 袁素芬, 等. 江西省2007—2011年水资源生态足迹和生态承载力动态特征. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 256-261. [MENG L H, YE Z P, YUAN S F, et al. Dynamic characteristics of ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Jiangxi province during 2007-2011. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(1): 256-261.]
- [12] 陈传友, 沈镭, 胡长顺, 等. 我国大西线“江河连通”调水新格局的设想与评析. *水利水电科技进展*, 2019, 39(6): 1-8. [CHEN C Y, SHEN L, HU C S, et al. Analysis of and preliminary comments on new pattern of rivers-connected water transfer along Great Western. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(6): 1-8.]
- [13] WILLIAM E R. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4: 121-130.
- [14] WACKERNAGEL M, WILLIAM E R. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [15] HABERL H, ERB K H, KRAUSMANN F. How to calculate and interpret ecological footprints for long periods of time: The case of Austria 1926-1995. *Ecological Economics*, 2001, 38(1): 25-45.
- [16] WACKERNAGEL M, MONFREDA C, ERB K H, et al. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961-1999: Comparing the conventional approach to an 'actual land area' approach. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 261-269.
- [17] 林永钦, 齐维孩, 祝琴. 基于生态足迹的中国可持续食物消费模式. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 338-347. [LIN Y Q, QI W H, ZHU Q. Chinese sustainable food consumption pattern based on ecological footprint model. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(2): 338-347.]
- [18] 靳相木, 柳乾坤. 自然资源核算的生态足迹模型演进及其评论. *自然资源学报*, 2017, 32(1): 163-176. [JIN X M, LIU Q K. Evolution of ecological footprint models for natural resources accounting. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(1): 163-176.]
- [19] 聂莹, 刘清杰, 孙素芬. 经济全球化能够有效抑制“一带一路”沿线国家的生态足迹吗? 来自动态门槛面板模型的经验证据. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 301-311. [NIE Y, LIU Q J, SUN S F. Does economic globalization effectively inhibit the ecological footprint of countries along "The Belt and Road"? Empirical evidence from the dynamic threshold panel model. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(2): 301-311.]
- [20] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法. *生态学报*, 2008, 28(3): 1279-1286. [HUANG L N, ZHANG W X, JIANG C L, et al. Ecological footprint method in water resources assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1279-1286.]
- [21] 焦士兴, 王安周, 陈林芳, 等. 河南省水生态足迹测度及其驱动效应分析. *水文*, 2020, 40(1): 91-96. [JIAO S X, WANG A Z, CHEN L F, et al. Analysis of water ecological footprint and its driving effects in Henan province. *Journal of China Hydrology*, 2020, 40(1): 91-96.]
- [22] 杨艳昭, 张伟科, 刘登伟. 内蒙古水土资源平衡及其水资源承载能力. *干旱区地理*, 2008, 31(3): 436-441. [YANG Y

- Z, ZHANG W K, LIU D W. Water and land balance and water resources carrying capacity in Inner Mongolia. *Arid Land Geography*, 2008, 31(3): 436-441.]
- [23] 熊娜娜, 谢世友. 成都市水资源生态足迹及承载力时空演变研究. 西南大学学报: 自然科学版, 2018, 40(6): 124-131. [XIONG N N, XIE S Y. A study of the spatio-temporal evolution of ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources of Chengdu. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2018, 40(6): 124-131.]
- [24] 张洺也, 赵春子. 基于生态足迹法的延边州水资源生态环境研究. 东北师大学报: 自然科学版, 2019, 51(3): 135-142. [ZHANG M Y, ZHAO C Z. Research on water resources ecological environment of Yanbian prefecture based on ecological footprint method. *Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition*, 2019, 51(3): 135-142.]
- [25] 胡正李, 葛建平, 韩爱萍. 中国大都市生态足迹的比较研究: 以北京、上海、天津和重庆为例. 现代城市研究, 2017, (2): 84-93. [HU Z L, GE J P, HAN A P. A comparative study of Chinese metropolis ecological footprint: The case of Beijing, Shanghai, Tianjin and Chongqing. *Modern Urban Research*, 2017, (2): 84-93.]
- [26] 王文国, 何明雄, 潘科, 等. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1555-1565. [WANG W G, HE M X, PAN K, et al. Analysis of spatio-temporal characteristics of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Sichuan province. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(9): 1555-1565.]

The dynamic evolution of water resources environmental carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt based on the fluctuation of Hu Line

LU Ya-li¹, XU Shuai-shuai¹, SHEN Lei^{2,3}

(1. School of Management and Economics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, Ministry of Natural Resources, Beijing 100101, China)

Abstract: The water resource ecological footprint model was used to study the water resource ecological footprint and ecological carrying capacity of 131 cities in the Yangtze River Economic Belt from 2010 to 2018. The spatial and temporal characteristics of urban water resources in the study area are revealed and discussed by GIS visualization and spatial autocorrelation. The results show that: (1) The Hu Huanyong Line (also known as Heihe-Tengchong Line, or Hu Line) hypothesis is valid in the Yangtze River Economic Belt. (2) The region west of the Hu Line tends to have higher per capita water resource ecological surplus. Per capita water resource ecological surplus of the region between Hu Line and Hu Sub-line is higher than that of the region west of the line. (3) The per capita water resources carrying capacity and the average water resources carrying capacity of the regions west of Hu Line in the study belt are the largest of the three regions. (4) The ecological footprint of ten thousand yuan GDP of each city is decreasing, which means that the utilization rate of water resources is increasing. (5) The average load index of water resources has been increasing year by year. The results are helpful to the integrated management of water resources and provide a quantitative basis for the regulation and use of water resources in the Yangtze River Economic Belt.

Keywords: Yangtze River Economic Belt; Hu Line; water resources; ecological footprint; ecological capacity