

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.001

鄱阳湖流域水资源生态安全状况及承载力分析

夏军^{1,2},刁艺璇^{1,2},余敦先^{1,2},李森³,张勇奋⁴,丁文璐^{1,2},姚成慧^{4,5},刘昭⁴

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北武汉 430072; 2. 海绵城市建设与水系统科学湖北省重点实验室,湖北武汉 430072; 3. 水利部发展研究中心,北京 100038; 4. 江西省水利科学院,江西南昌 330029; 5. 北京林业大学水土保持学院,北京 100083)

摘要:为系统评估鄱阳湖流域水资源生态安全状况,基于水资源生态足迹模型计算了流域所在地市水资源生态足迹和水生态承载力,并通过水资源生态盈余和生态赤字、万元GDP水资源生态足迹及水资源生态经济协调指数评估了水资源生态压力状况。结果表明:研究区内农业用水是产生水资源生态足迹的主要类型,宜春市是产生水资源生态足迹最多的地区;各市均处于生态盈余状态,但多数地区水生态承载力有所降低;在产生水资源生态足迹的因素中,应重点关注农业用水和水污染因素;研究区万元GDP水资源生态足迹逐年降低,萍乡市和吉安市水资源的生态经济协调性下降。各市应以绿色发展为目标,注意水资源消耗强度,通过建立健全农业水价形成机制、持续加强水环境治理等措施,保障水资源的可持续利用。

关键词:鄱阳湖流域;水资源生态足迹;水生态承载力;水资源生态安全;江西省

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)03-0001-08

Analysis on ecological security and ecological carrying capacity of water resources in the Poyang Lake Basin//XIA Jun^{1,2}, DIAO Yixuan^{1,2}, SHE Dunxian^{1,2}, LI Miao³, ZHANG Yongfen⁴, DING Wenlu^{1,2}, YAO Chenghui^{4,5}, LIU Zhao⁴
(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan 430072, China; 3. Development Research Center of the Ministry of Water Resource of P. R. China, Beijing 100038, China; 4. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China; 5. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to systematically evaluate the water ecological security in the Poyang Lake Basin, the water ecological footprint and water ecological carrying capacity were calculated based on the ecological footprint model. In addition, the ecological pressure of water resources was evaluated from the dimensions of water ecological surplus, water ecological footprint of GDP, and eco-economic coordination index. The results show that agricultural water resources ecological footprint is the main type of water ecological footprint in the study area, and Yichun City is the region with the most ecological footprint. All cities are in the state of an ecological surplus, while the water ecological carrying capacity in most areas decreased. Agricultural water and water pollution should be paid more attention to among the factors producing water ecological footprint. The water ecological footprint of GDP decreased year by year, and the eco-economic coordination of water resources in Pingxiang City and Ji'an City declined. All cities should aim for green development, pay attention to the consumption intensity of water resources, and ensure the sustainable use of water resources by establishing and improving the mechanism of agricultural water price, and continuously strengthening water environment management.

Key words: Poyang Lake Basin; water ecological footprint; water ecological carrying capacity; water ecological security; Jiangxi Province

基金项目:江西省水利厅科技计划(201922ZDKT17);江西省水利厅科技成果重点推广计划(202123TGKT07);中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA23040304)

作者简介:夏军(1954—),男,中国科学院院士,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

通信作者:刁艺璇(1996—),女,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: dyx_zzu@163.com

水资源作为人类生存和发展的基础自然资源,其生态安全状态及承载力水平决定了经济社会未来发展的空间^[1]。我国水资源存在数量短缺和分布不均等问题,同时在经济增长、城市建设等过程中出现了水环境恶化、水质性缺水、重要湿地萎缩等新的水问题,进一步影响了水资源的生态安全和承载能力,限制了相关区域的发展^[2-3]。随着创新、协调、绿色、开放、共享五大发展理念的提出,绿色发展成为重要的发展方式,其强调坚持可持续发展,是重视人与自然和谐发展的现代化新格局。在水资源方面,维持水资源的生态安全、保障水资源可持续利用是实现人与自然和谐发展的重要环节。开展水生态承载力研究,是认识人水关系、掌握水资源可持续发展情况的前提,也是推动生态文明建设、实现地区绿色发展的基础。

当前,对水生态承载力的概念界定尚处于完善阶段,大多数研究认为,水生态承载力是指在一定阶段,某一区域的水生态系统在维持自身及其所支持环境系统健康的状况下,所能承载的最大人口数量和经济规模^[4-5],包含自然和社会双重属性,是水资源、水环境和水生态承载力的结合,具有综合性、动态性的特点^[6-7]。水生态承载力的量化评价方法主要包括水生态足迹法^[8-9]、系统动力学法^[10]、评价指标体系法^[11-12],以及系统动力学法和评价指标体系法结合构建的集成系统进行的综合研究^[13]等。生态经济学家 Rees^[14]于 20 世纪 90 年代提出生态足迹(ecological footprint, EF)的概念,即指人类发展过程中的废物排放和资源消费所占用的生物生产性土地面积^[15]。水资源生态足迹法是在生态足迹概念的基础上发展的量化方法,因其可操作性强、能够较为直观地反映水生态承载力状态及水资源开发利用情况,在国内外水资源领域应用广泛^[16-19]。

鄱阳湖是我国第一大淡水湖,鄱阳湖流域的水资源生态安全是我国东南腹地和长江中下游地区生态安全、粮食安全和用水安全的重要保障;同时,鄱阳湖自然保护区已被确认为国际重要的湿地之一,其独特的湿地生态系统对改善当地气候、维护地区的生态平衡起到了关键的作用^[20]。近年来,由于人类活动的影响,鄱阳湖出现水质下降、富营养化日趋严重等生态问题^[21],造成了经济社会发展和环境状况的不平衡^[22],因此流域的生态保护及绿色发展尤为重要。目前,关于鄱阳湖流域的湿地生态^[23-25]、水环境污染^[26]、水资源生态安全^[27]、资源环境安全^[28-29]、人类活动或气候变化对流域生态的影响^[30]等研究已有丰富成果,但综合水资源生态安全及水生态承载力方面的研究结果相对较少。鉴于当前区域社会经济迅速发展的时代现状,应立足于新的发

展阶段,系统综合地评估鄱阳湖流域水资源生态安全状况及水生态承载力情况。因此,本文通过综合考虑农业、工业、生活、生态用水及水污染要素,采用生态足迹模型计算鄱阳湖流域所在地市 2010—2019 年水资源生态足迹及水生态承载力水平,并从水资源生态盈余、水资源生态赤字、万元 GDP 水资源生态足迹及水资源生态经济协调指数多个维度评估水资源生态压力状况,了解研究区水资源生态安全的现状及发展情况,以期为鄱阳湖流域未来的水资源生态安全和区域绿色发展提供参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

鄱阳湖位于江西省北部(115°49'E ~ 117°46'E, 28°24'N ~ 29°46'N)。从地形上看,流域东、南、西三面有山地环绕,北部地势较为平坦,中部丘陵起伏,整体呈现为向北开口的盆地格局。赣江、抚河、修河、饶河、信江等河流自南向北流动,在九江市湖口县石钟山附近汇入长江,年入江流量大约占长江水量的 15.6%^[31]。鄱阳湖流域面积约 16.22 万 km²,涉及江西、安徽、浙江、福建、广东、湖南六省。由于其绝大部分(流域总面积的 96.9%)位于江西省内,且流域范围与江西省行政区边界大致重合,因此选择江西省所辖地市,研究其水资源生态安全状态及水生态承载力水平(图 1)。在气候上,研究区四季气温普遍较高,年平均气温 19.0℃(2020 年),但频发强寒潮、倒春寒等阶段性低温事件。在全球气候变暖的大背景下,近 60 年来,其年平均气温呈现显著上升趋势,平均每 10 年增加 0.2℃。另外,研究区降水量较为充足,平均年降水量为 1896.8 mm(2020 年),但降水时空分布不均,整体表现为北多南少、秋多冬少的特点。

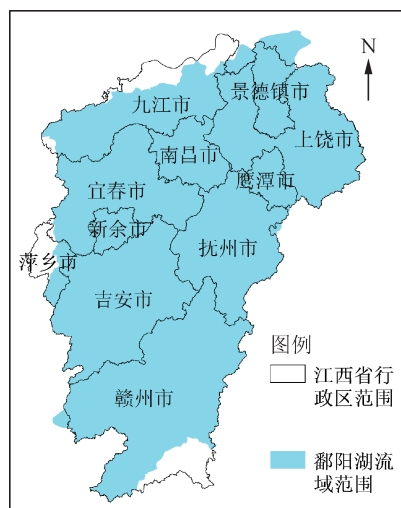


图 1 鄱阳湖流域范围

Fig.1 Range of the Poyang Lake Basin

1.2 数据来源

数据主要来源于《江西省统计年鉴》(2010—2019年)、GB 8978—1996《污水综合排放标准》和中国科学院资源环境科学与数据中心网站。其中,使用的农业用水量为农田灌溉用水和林牧渔畜用水之和,生活用水量为城镇公共用水和居民生活用水之和。

2 研究方法

2.1 思路框架

鄱阳湖流域是城镇化和工业化快速发展的地区,在发展过程中,人类活动造成了生态压力增大、环境污染等问题,影响了水资源和生态系统的安全,成为限制区域可持续发展的主要因素^[32]。针对鄱阳湖流域经济欠发达,人湖、人地矛盾尖锐,环境污染和生态脆弱等发展问题,立足于快速城镇化、工业化发展,生态经济区建设及提高地区人民生活水平的地区发展驱动需求,通过构建水资源生态足迹模型,分别考虑农业、工业、生活、生态4类用水账户和水污染账户,综合评估水资源生态足迹(water ecological footprint, WEF)和水生态承载力(water ecological capacity, WEC),掌握地区水资源生态安全程度。为全面掌握水资源-经济社会-生态环境的协调发展情况,具体选取水资源生态赤字(water ecological deficit, WED)和水资源生态盈余(water ecological surplus, WES)反映水资源消耗水平,以万元GDP水资源生态足迹(water ecological footprint of GDP, WEFG)刻画水资源的开发潜力和利用效率,并以生态经济协调指数(eco-economic coordination index, EECI)分析地区经济社会和生态环境发展的

协调水平(图2)。

2.2 计算方法

2.2.1 水资源生态足迹

水资源生态足迹是区域消耗的水资源量转化为用地面积,包括区域用水及水污染产生的水资源生态足迹两部分。计算公式^[33]如下:

W_{EF} = W_{EFR} + W_{EFQ} (1)

其中

W_{EFR} = ∑_{i=1}⁴ W_{WEFRi} = ∑_{i=1}⁴ N w_{EFRi} = ∑_{i=1}⁴ Nγ q_i/P
W_{EFQ} = γmax(W_{EFCOD}, W_{EFNH₃}) =
γmax(L_{COD}/ρ_{COD}, L_{NH₃}/ρ_{NH₃}) × 100/P

式中:W_{EF}为水资源生态足迹,万hm²;W_{EFR}为区域用水产生的水资源生态足迹,万hm²;W_{EFQ}为水污染产生的水资源生态足迹,包括排放的生活污水中COD和氨氮所产生的污染足迹,万hm²;W_{WEFRi}为第i类用水账户的水资源生态足迹,包括4类用水,i=1,2,3,4分别代表农业、工业、生活、生态用水账户,万hm²;N为人口数,万人;w_{EFRi}为第i类用水账户人均水资源生态足迹,hm²;q_i为第i类用水的人均用水量,m³;γ为水资源全球均衡因子,根据已有研究取值5.19;P为水资源全球平均产量,取值3140m³/hm²^[34];W_{EFCOD}、W_{EFNH₃}分别为排放的生活污水中COD和氨氮所产生的污染足迹,万hm²;L_{COD}、L_{NH₃}分别为区域内生活污水中COD和氨氮排放量,t;ρ_{COD}和ρ_{NH₃}分别为国内单位面积水域COD和氨氮的排放达标质量浓度,根据GB 8978—1996《污水综合排放标准》中的二级排放标准,ρ_{COD}和ρ_{NH₃}分别取120mg/L、25mg/L^[35]。

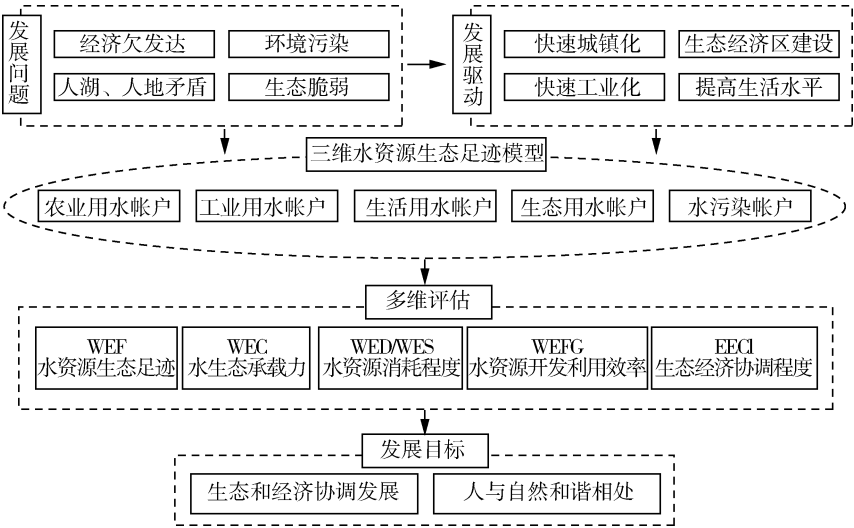


图2 鄱阳湖流域水资源生态足迹模型及多维评估框架

Fig.2 Water ecological footprint model and multidimensional evaluation framework in the Poyang Lake Basin

2.2.2 水生态承载力

基于水资源生态足迹模型的水生态承载力被定义为:在一定历史阶段,特定区域内的水资源最大供给量对该区域资源、环境和社会提供的可持续发展能力^[36]。计算公式^[37]如下:

W_{EC} = Nw_{EC} = Nφγ(q/P)(1 - α) (2)

式中:W_{EC}为区域水生态承载力,万hm²;w_{EC}为人均水生态承载力,hm²;φ为水资源产量因子,取值3.07^[36];q为区域人均水资源量,m³。由于在地区发展中,对水资源的开发利用若超过总量的30%~40%,会产生生态环境的潜在影响,因此在水生态承载力中需保留用于维持地区生态环境状况的水资源,即在水生态承载力计算公式中加上系数1 - α,其中α取值0.6^[33]。

2.2.3 水资源生态赤字和水资源生态盈余

使用水资源生态赤字和水资源生态盈余指标对水资源是否可持续利用进行量化。将地区产生的水资源生态足迹与水生态承载力进行比较,若水资源生态足迹大于水生态承载力,说明发展所需消耗的水资源超出地区水生态承载能力,产生了水资源生态赤字;反之则说明消耗量小于承载量,水资源处于生态盈余状态。

W_{ER} = W_{EF} - W_{EC} (3)

式中:W_{ER}为水资源生态平衡指数,万hm²。当W_{ER} > 0时,表示产生了水资源生态赤字,用W_{ED}表示;当W_{ER} < 0时,表示产生了水资源生态盈余,用W_{ES}表示;当W_{ER} = 0时,表示水资源生态平衡处于临界点。

2.2.4 水资源开发利用效率

利用万元GDP水资源生态足迹(W_{EFG})对水资源开发利用效率进行量化。计算公式^[38]如下:

W_{EFG} = W_{EF}/Q_{GDP} (4)

式中:W_{EFG}为万元GDP水资源生态足迹,hm²/元;Q_{GDP}为国内生产总值,万元。

2.2.5 水资源生态经济协调程度

使用生态经济协调指数来反映经济社会和生态环境之间的协调程度,计算公式^[39]如下:

E_{ECI} = (W_{EF} + W_{EC})/√(W_{EF}² + W_{EC}²) (5)

式中:E_{ECI}为生态经济协调指数,取值范围为[1,1.414]。当E_{ECI} = 1.414时,生态经济协调性较好,生态安全得到保障,水资源生态实现供求平衡;当E_{ECI}取值越接近1,经济社会发展越不可持续,生态安全性越低。

3 结果与分析

3.1 水资源生态压力状况分析

3.1.1 水资源生态足迹

2019年,区域用水量产生的水资源生态足迹占

总量的87%,水污染产生的水资源生态足迹占总量的13%。在用水方面,农业、工业、生活、生态4类用水账户产生的水资源生态足迹中,农业类占比56%,工业和生活类分别占比20%和10%,生态类仅占1%左右,因此农业是江西省水资源生态足迹产生的主要贡献类型(图3)。

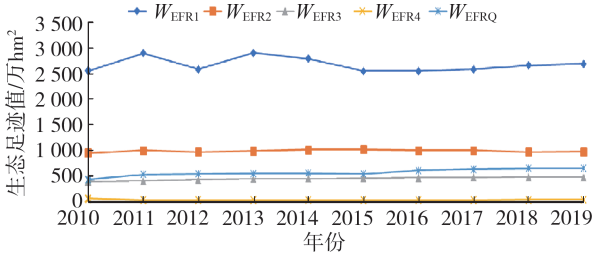


图3 江西省各类型用水账户的2010—2019年水资源生态足迹

Fig.3 Water ecological footprint in Jiangxi Province from 2010 to 2019

具体到各市,江西省宜春市是产生水资源生态足迹最多的地区,其次是赣州市、南昌市、上饶市和吉安市。农业用水账户水资源生态足迹主要产生地区为宜春市、上饶市、赣州市和吉安市;工业用水账户水资源生态足迹主要产生地区为宜春市、南昌市和九江市;生活用水账户水资源生态足迹主要产生地区为赣州市、南昌市、上饶市和宜春市;生态用水账户水资源生态足迹主要产生地区为南昌市和赣州市;水污染账户水资源生态足迹主要产生地区为赣州市和上饶市(表1)。

表1 江西省2019年水资源生态足迹组成情况

Table 1 Composition of water ecological footprint in Jiangxi Province in 2019

地区	水资源生态足迹占比/%					
	万元GDP	农业	工业	生活	生态	水污染
南昌市	13	11	15	17	27	12
景德镇市	4	3	4	4	7	6
萍乡市	3	2	5	5	3	3
九江市	9	8	14	10	8	8
新余市	3	3	5	3	5	3
鹰潭市	3	3	3	3	5	3
赣州市	14	15	8	18	14	19
吉安市	12	14	10	9	7	11
宜春市	16	15	25	11	7	11
抚州市	9	11	4	8	7	8
上饶市	13	14	7	13	9	16

3.1.2 水生态承载力

由表2可以看出,2019年江西省水生态承载力较高的地区是赣州市、吉安市、上饶市、抚州市和宜春市,水生态承载力达4500万hm²以上,其余地市在800万~2500万hm²之间。在人均水生态承载力方面,抚州、吉安、赣州、鹰潭、上饶等市较高,为

9 万~15 万 hm^2 , 南昌市较低, 低于 5 万 hm^2 。可以看出, 赣州、吉安、抚州这些地区水资源量相对丰富, 且植被覆盖率较高, 其水生态承载力的总量和人均值均位居前列, 是水生态承载力状况最好的地区; 鹰潭市和新余市水生态承载力总量最低, 但人均值较高, 水生态承载力状况也较好。近 10 年来, 江西省大部分地区水生态承载力降低, 如上饶、抚州、宜春、九江等市, 其水资源总量下降。

表 2 江西省各市 2010 年和 2019 年水生态承载力情况

Table 2 Water ecological capacity in Jiangxi Province in 2010 and 2019				
地区	水生态承载力/ 万 hm^2		人均水生态承载力/ 万 hm^2	
	2019 年	2010 年	2019 年	2010 年
赣州市	9 354.78	8 663.45	10.74	10.37
吉安市	7 049.01	6 517.63	14.21	13.57
上饶市	6 177.45	7 804.48	9.04	11.89
抚州市	5 947.48	6 705.38	14.65	17.17
宜春市	4 740.82	4 983.37	8.49	9.21
九江市	2 474.43	4 405.30	5.03	9.33
南昌市	1 499.15	2 107.46	2.68	4.20
萍乡市	1 319.32	1 034.55	6.80	5.59
景德镇市	1 140.50	1 716.53	6.79	10.84
鹰潭市	1 084.28	1 429.33	9.18	12.75
新余市	854.71	818.79	7.16	7.20

3.1.3 水资源生态赤字和水资源生态盈余

整体看来, 江西省水生态承载力大于水资源生态足迹, 均表现为生态盈余状态, 水资源禀赋较好, 未出现过分透支水资源的情况。由图 4 可知, 江西省赣州市、吉安市、上饶市、抚州市是水资源生态盈余较多的地区, 水资源生态现状对地区发展有较好的支持能力, 未来水资源可开发利用水平较高。

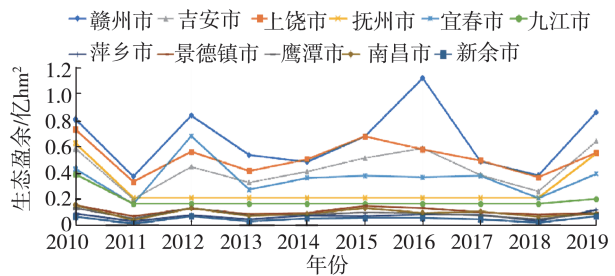


图 4 江西省各市 2010—2019 年水资源生态盈余

Fig.4 Water ecological surplus in Jiangxi Province from 2010 to 2019

3.1.4 水资源生态足迹影响因素分析

近 10 年来, 江西省农业用水账户产生的水资源生态足迹略有上升, 相比 2010 年增加了 131.57 万 hm^2 ; 工业用水账户产生的水资源生态足迹整体表现平稳, 变动幅度不大; 生活用水账户产生的水资源生态足迹 2010—2019 年持续上升, 相比 2010 年增加了 84.30 万 hm^2 ; 生态用水账户产生的水资源生态足

迹略有下降; 水污染账户产生的水资源生态足迹略有上升, 相比 2010 年增加了 218.78 万 hm^2 , 在地区水资源生态足迹中的占比从 2010 年的 10% 上升为 2019 年的 13%。因此应关注江西省农业类用水及水污染所产生的水资源生态足迹数量。

通过各因素生态足迹占水资源生态足迹比值的变化量来分析影响水资源生态足迹变化的主要因素^[40](表 3)。由表 3 可以看出, 水污染账户产生的水资源生态足迹变化对水资源生态足迹有较普遍的促进作用, 除了萍乡市外, 其余地市水污染账户产生的水资源生态足迹的贡献值均为正值。景德镇市水污染账户产生的水资源生态足迹占水资源生态足迹总量的比值由 15% 上升到 23%, 是导致其水资源生态足迹上升的主要原因, 因此景德镇市应持续加强水环境治理设施建设, 以绿色发展为目标, 改善水体环境, 促进生活方式的转变, 减少入河污染^[41]。吉安市水污染账户水资源生态足迹占水资源生态足迹总量的比值由 7% 上升到 12%, 上饶市由 10% 上升到 17%, 这些地区城镇生活污水所带来的水污染同样需要被重点关注。

表 3 江西省各地市水资源生态足迹影响因素分析

Table 3 Analysis of influencing factors of water ecological footprint in Jiangxi Province					
地区	各因素变化量占水资源生态足迹变化总量的比值/%				
	农业	工业	生活	生态	水污染
南昌市	-4.2	2.3	2.7	-5.7	4.8
景德镇市	3.7	-13.2	1.4	0.3	7.8
萍乡市	-1.7	0	2.7	0	-1.0
九江市	0.2	-3.9	1.7	0.1	1.9
新余市	11.0	-15.3	1.7	0.2	2.5
鹰潭市	-0.9	-0.9	0.1	0.7	1.0
赣州市	-2.4	0.6	-1.2	0.1	3.0
吉安市	-6.3	-0.1	1.3	0.1	4.9
宜春市	-1.0	-0.5	0.2	-0.1	1.4
抚州市	-4.4	2.0	0.7	0.1	1.5
上饶市	-7.6	0.9	-0.6	0	7.4

在用水所产生的水资源生态足迹中, 生态用水账户和生活用水账户产生的水资源生态足迹比例普遍为正值, 但数值较小, 说明其变化在水资源生态足迹总量的增加中作用不明显。工业用水账户和农业用水账户产生的水资源生态足迹比例变化较为明显, 如作为江西省的新兴工业城市, 新余市、景德镇市近年来积极发展新能源和进行产业转型, 因此工业用水账户所产生的水资源生态足迹占水资源生态足迹总量的比例明显降低。而南昌市和抚州市 W_{EFR2} 增加较为明显, 说明其工业用水量和用水效率有进一步控制的空间。由于工业发展是南昌市发展规划中的重要部分, 其将进一

步做强工业实力,构建新工业发展格局,因此在地区未来发展过程中,应注重工业用水量的管控,并提高工业废水循环利用水平,以控制水资源生态足迹总量。在农业方面,新余市和景德镇市农业用水账户产生的水资源生态足迹占比明显增加,新余市应建立健全农业水价形成机制,在农业产业化过程中注重提高农业用水利用效率;景德镇市应改变农业粗放式用水情况,聚焦农业节水减排改革目标,通过农业水价改革和完善农业用水管理等措施,实现农业用水统筹控制及用水效率有效提高。

3.2 水资源开发利用效率分析

利用万元 GDP 水资源生态足迹表示区域内经济发展中水资源开发利用效率,其值越大,说明单位经济产出产生的水资源生态足迹越多,水资源利用效率越差。由图 5(a)可以看出,江西省各地市万元 GDP 水资源生态足迹逐年降低。特别是吉安市、九江市、宜春市,其万元 GDP 水资源生态足迹与 2010 年相比下降超过 60%,水资源利用效率明显提升。整体来看,在研究时段内江西省经济运行平稳,新动能增长加快,2019 年 1—9 月,全省规模以上工业增加值增长 8.7%,高于全国平均 3.1%。同时,经济社会发展中能源结构有所改善,工业用水重复利用率提高,最严格水资源管理制度得到了有效实施^[42]。

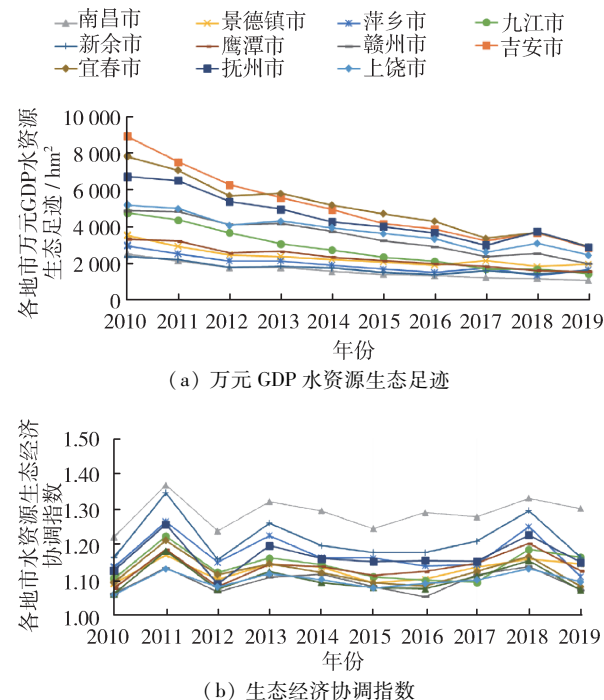


图 5 江西省各地市 2010—2019 年万元 GDP 水资源生态足迹和生态经济协调指数

Fig.5 Water ecological footprint of GDP and eco-economic coordination index in Jiangxi Province from 2010 to 2019

在 2019 年,江西省万元 GDP 水资源生态足迹最低的地区是南昌市,吉安市、宜春市、抚州市相对较高。

3.3 水资源生态经济协调分析

生态经济协调指数反映了区域水资源和生态经济的协调性。2019 年,南昌市生态经济协调指数值为 1.30,是水资源生态经济协调性最佳地区;赣州市、抚州市、吉安市、上饶市生态经济协调指数较低,均低于 1.0,水资源的生态经济协调性相对较差。同时,研究时段始末生态经济协调指数值的变化反映出萍乡、吉安两市水资源的生态经济协调性降低,需要重视这些地区水资源的生态安全状态,提高水资源的生态经济协调水平(图 5(b))。

4 结 论

a. 对于水资源生态足迹,农业用水账户是产生水资源生态足迹的主要类型;宜春市是江西省产生水资源生态足迹最多的地区。

b. 对于水生态承载力,赣州市、吉安市、上饶市和宜春市水生态承载力较高;江西省水生态承载力大于水资源生态足迹,均表现为生态盈余状态,水资源禀赋较好,未出现过分支水资源的情况。但研究时段内,江西省大部分地区水生态承载力降低,如上饶、抚州、宜春、九江等市,其水资源总量下降。

c. 近 10 年来,江西省农业和水污染产生的水资源生态足迹略有上升,应关注省内各市农业类型用水产生的水资源生态足迹数量,同时重点关注景德镇市、吉安市和上饶市水资源污染问题,持续加强水环境治理设施建设,改善水体环境,促进生活方式转变,减少入河污染。

d. 研究时段内,各地市水污染产生的水资源生态足迹均逐年降低,江西省的能源结构改善、工业用水重复率提高等措施使得水资源开发利用效率有明显提升;对于水资源的生态经济协调性,南昌市最佳,赣州市、抚州市、吉安市和上饶市较低,同时在研究时段始末,萍乡市和吉安市生态经济协调性下降。

参考文献:

[1] 金菊良,汤睿,周戎星,等. 基于联系数的城市水生态文明建评价方法[J]. 水资源保护,2021,37(4):1-6. (JIN Juliang, TANG Rui, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation method for urban water eco-civilization construction based on connection number[J]. Water Resources Protection,2021,37(4):1-6. (in Chinese))

[2] 赵衡,闫旭,王富强,等. 基于 PSR 模型的三门峡库区湿地生态系统健康评价[J]. 水资源保护,2020,36(4):21-25. (ZHAO Heng, YAN Xu, WANG Fuqiang, et

- al. Assessment on ecosystem health of Sanmenxia Reservoir wetland based on PSR model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 21-25. (in Chinese))
- [3] 王慧亮, 申言霞, 李卓成, 等. 基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 12-17. (WANG Huiliang, SHEN Yanxia, LI Zhuocheng, et al. Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on emergy theory [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 12-17. (in Chinese))
- [4] 王西琴, 高伟, 何芬, 等. 水生态承载力概念与内涵探讨[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 41-46. (WANG Xiqin, GAO Wei, HE Fen, et al. Discussion on the conception and connotation of water ecological carrying capacity [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011, 9(1): 41-46. (in Chinese))
- [5] 张盛, 王铁宇, 张红, 等. 多元驱动下水生态承载力评价方法与应用: 以京津冀地区为例[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4159-4168. (ZHANG Sheng, WANG Tieyu, ZHANG Hong, et al. Using a multivariate-driven model to evaluate water ecological carrying capacity: method-building and application in the Beijing-Tianjin-Ji (Hebei Province) region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(12): 4159-4168. (in Chinese))
- [6] 焦雯珺, 闵庆文, 李文华, 等. 基于 ESEF 的水生态承载力: 理论、模型与应用[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1041-1048. (JIAO Wenjun, MIN Qingwen, LI Wenhua, et al. Measuring water ecological carrying capacity with the ecosystem-service-based ecological footprint (ESEF) method: theory, models and application [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(4): 1041-1048. (in Chinese))
- [7] 魏俊, 张中旺, 燕鑫. 基于 ESEF 的汉江生态经济带水生态承载力评估[J]. 水资源开发与管理, 2020(3): 29-34. (WEI Jun, ZHANG Zhongwang, YAN Xin. ESEF-based assessment of water ecological carrying capacity in Hanjiang eco-economic zone [J]. Water Resources Development and Management, 2020(3): 29-34. (in Chinese))
- [8] 刘子刚, 郑瑜. 基于生态足迹法的区域水生态承载力研究: 以浙江省湖州市为例[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1083-1088. (LIU Zigang, ZHENG Yu. Evaluation of water ecological carrying capacity based on ecological footprint theory: a case study of Huzhou [J]. Resources Science, 2011, 33(6): 1083-1088. (in Chinese))
- [9] 冷建飞, 张倩. 基于生态足迹模型的水资源可持续利用研究: 以江苏省为例[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(7): 54-59. (LENG Jianfei, ZHANG Qian. Research of sustainable utilization of water resources based on ecological footprint model: taking Jiangsu Province as example [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(7): 54-59. (in Chinese))
- [10] 谭红武, 杜强, 彭文启, 等. 流域水生态承载力及其概念模型[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 1-8. (TAN Hongwu, DU Qiang, PENG Wenqi, et al. Watershed aquatic ecological carrying capacity and its conceptual model [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011, 9(1): 1-8. (in Chinese))
- [11] 沈鹏, 傅泽强, 杨俊峰, 等. 基于水生态承载力的产业结构优化研究综述[J]. 生态经济, 2015, 31(11): 23-26. (SHEN Peng, FU Zeqiang, YANG Junfeng, et al. Research review of the industrial structure optimization based on water ecological carrying capacity [J]. Ecological Economy, 2015, 31(11): 23-26. (in Chinese))
- [12] 张远, 周凯文, 杨中文, 等. 水生态承载力概念辨析与指标体系构建研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 42-53. (ZHANG Yuan, ZHOU Kaiwen, YANG Zhongwen, et al. The definition and index system of hydro-ecological carrying capacity (HECC) [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(1): 42-53. (in Chinese))
- [13] 刘晓波, 彭文启, 董飞, 等. 流域水生态承载力与总量控制技术集成系统研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 16-28. (LIU Xiaobo, PENG Wenqi, DONG Fei, et al. Integrated system of water ecology carrying capacity and water pollution control of river basin [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011, 9(1): 16-28. (in Chinese))
- [14] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. Environment & Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [15] 张义, 张合平, 李丰生, 等. 基于改进模型的广西水资源生态足迹动态分析[J]. 资源科学, 2013, 35(8): 1601-1610. (ZHANG Yi, ZHANG Heping, LI Fengsheng, et al. Dynamic analysis of the water resource ecological footprint of Guangxi based on an improved model [J]. Resources Science, 2013, 35(8): 1601-1610. (in Chinese))
- [16] 方恺. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 267-274. (FANG Kai. Ecological footprint depth and size: new indicators for a 3D model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 267-274. (in Chinese))
- [17] VAN OEL P R, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The external water footprint of Netherlands: geographically-explicit quantification and impact assessment [J]. Ecological Economics, 2009, 69(1): 82-92.
- [18] YU Y, HUBACEK K, FENG K S, et al. Assessing regional and global water footprints for the UK [J]. Ecological Economics, 2010, 69(5): 1140-1147.
- [19] 方恺, 李焕承. 基于生态足迹深度和广度的中国自然资

- 本利用省际格局[J]. 自然资源学报,2012,27(12): 1995-2005. (FANG Kai,LI Huancheng. Provincial pattern of China's natural capital use; a modification and application of ecological footprint depth and size[J]. Journal of Natural Resources,2012,27(12): 1995-2005. (in Chinese))
- [20] QI L Y,HUANG J C,HUANG Q,et al. Assessing aquatic ecological health for Lake Poyang, China: Part I index development[J]. Water,2018,10(7):943.
- [21] ZHANG L, LIU J T, ZHANG D W, et al. Seasonal and spatial variations of microcystins in Poyang Lake, the largest freshwater lake in China[J]. Environmental Science and Pollution Research,2018,25(7):6300-6307.
- [22] YAN B Y, XING J S, TAN H R, et al. Analysis on water environment capacity of the Poyang Lake[J]. Procedia Environmental Sciences,2011,10:2754-2759.
- [23] 崔丽娟. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究[J]. 生态学杂志,2004,23(4):47-51. (CUI Lijuan. Evaluation on functions of Poyang Lake ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(4): 47-51. (in Chinese))
- [24] 崔丽娟,赵欣胜. 鄱阳湖湿地生态能值分析研究[J]. 生态学报,2004,24(7):1480-1485. (CUI Lijuan,ZHAO Xinsheng. Researches on the emergy analysis of Poyanghu wetland[J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(7):1480-1485. (in Chinese))
- [25] 李仁东,刘纪远. 应用 LandsatETM 数据估算鄱阳湖湿地植被生物量[J]. 地理学报,2001,56(5):531-539. (LI Rendong, LIU Jiyuan. An estimation of wetland vegetation biomass in the Poyang Lake using LandsatETM data[J]. Acta Geographica Sinica,2001,56(5):531-539. (in Chinese))
- [26] 弓晓峰,陈春丽,周文斌,等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. 环境科学,2006,27(4):732-736. (GONG Xiaofeng, CHEN Chunli, ZHOU Wenbin, et al. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Poyang Lake[J]. Environmental Science,2006,27(4): 732-736. (in Chinese))
- [27] 席海燕,王圣瑞,郑丙辉,等. 流域人类活动对鄱阳湖生态安全演变的驱动[J]. 环境科学研究,2014,27(4): 398-405. (XI Haiyan, WANG Shengrui, ZHENG Binghui, et al. Ecological security evolvement in Poyang Lake influenced by basin human activity[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(4): 398-405. (in Chinese))
- [28] 宋艳春,余敦. 鄱阳湖生态经济区资源环境综合承载力评价[J]. 应用生态学报,2014,25(10):2975-2984. (SONG Yanchun, YU Dun. Evaluation of comprehensive capacity of resources and environments in Poyang Lake eco-economic zone[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(10):2975-2984. (in Chinese))
- [29] 刘晓,范琳琳,王红瑞,等. 基于 GRACE 反演水量和生态服务价值的鄱阳湖区水资源承载力评价[J]. 南北水调与水利科技,2014,12(6):12-17. (LIU Xiao, FAN Linlin, WANG Hongrui, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Poyang Lake area based on GRACE water quantity inversion and ecological service value[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 12-17. (in Chinese))
- [30] 闵骞,刘影,马定国. 退田还湖对鄱阳湖洪水调控能力的影响[J]. 长江流域资源与环境,2006,15(5):574-578. (MIN Qian, LIU Ying, MA Dingguo. Impact of restoring lake by stopping cultivation on flood control capacity of Poyang Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(5): 574-578. (in Chinese))
- [31] WU Z S, ZHANG D W, CAI Y J, et al. Water quality assessment based on the water quality index method in Lake Poyang: the largest freshwater lake in China[J]. Scientific Reports,2017,7(1):17999.
- [32] XIE H L, WANG P, HUANG H S. Ecological risk assessment of land use change in the Poyang Lake eco-economic Zone, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2013,10(1): 328-346.
- [33] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报,2008(3):398-405. (HUANG Linnan, ZHANG Weixin, JIANG Cuiling, et al. Ecological footprint method in water resources assessment[J]. Acta Ecologica Sinica,2008(3):398-405. (in Chinese))
- [34] 孙才志,陈栓,赵良仕. 基于 ESDA 的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析[J]. 自然资源学报,2013,28(4):571-582. (SUN Caizhi, CHEN Shuan, ZHAO Liangshi. Spatial correlation pattern analysis of water footprint intensity based on ESDA model at provincial scale in China[J]. Journal of Natural Resources,2013,28(4):571-582. (in Chinese))
- [35] 孙才志,韩琴,郑德凤. 中国省际灰水足迹测度及荷载系数的空间关联分析[J]. 生态学报,2016,36(1):86-97. (SUN Caizhi, HAN Qin, ZHENG Defeng. The spatial correlation of the provincial grey water footprint and its loading coefficient in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(1):86-97. (in Chinese))
- [36] 孙才志,张智雄. 中国水生态足迹广度、深度评价及空间格局[J]. 生态学报,2017,37(21):7048-7060. (SUN Caizhi, ZHANG Zhixiong. Assessment of water ecological footprint size, depth, and spatial pattern in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7048-7060. (in Chinese))

(下转第24页)