

卢开东,王健健,马燮铤,等.基于 DPSIR 模型的芜湖市水生态承载力研究与建议[J].环境工程技术学报,2022,12(2):538-545.

LU K D,WANG J J,MA X Y,et al.Study and suggestions on water ecological carrying capacity of Wuhu City based on DPSIR model[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(2): 538-545.

基于 DPSIR 模型的芜湖市水生态承载力研究与建议

卢开东¹,王健健^{1*},马燮铤¹,汪俊²,张倩³

1.南京信息工程大学水文与水资源工程学院

2.芜湖市生态环境局综合行政执法支队

3.芜湖市环境监测中心站

摘要 《中华人民共和国长江保护法》要求流域产业结构和布局应与流域资源环境承载能力相适应。从社会、环境、经济、资源和生态 5 个方面出发,采用 DPSIR 模型,构建了芜湖市水生态承载力评价指标体系,通过熵权法和分级量化方法对芜湖市水生态承载力进行评价。结果表明:2011—2018 年,芜湖市及各区县水生态承载力总体呈上升趋势,市区和繁昌区承载力相对较好,无为市、南陵县和湾沚区呈基本可承载;对芜湖市水生态承载力影响较大的指标为万元 GDP 用水量、人均水资源量、工业废水排放量、生态环境用水量等;基于各区县的差异,市区需要优化供水结构,繁昌区需要增加生态用水量的投入,无为市、湾沚区和南陵县要进一步提高污水收集处理率。

关键词 水生态承载力;DPSIR 模型;熵权法;指标体系;芜湖市

中图分类号:X26 文章编号:1674-991X(2022)02-0538-08 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210666

Study and suggestions on water ecological carrying capacity of Wuhu City based on DPSIR model

LU Kaidong¹, WANG Jianjian^{1*}, MA Xieyao¹, WANG Jun², ZHANG Qian³

1.School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology

2.Integrated Administrative Enforcement Detachment, Wuhu Ecological Environment Bureau

3.Wuhu Environmental Monitoring Center Station

Abstract The *Yangtze River Protection Law* requires that the industrial structure and layout in the river basin should be adapted to the carrying capacity of resources and environment. From the five aspects of society, environment, economy, resources and ecology, the DPSIR model was used to build the evaluation index system of water ecological carrying capacity in Wuhu City, and the entropy weight method and hierarchical quantitative method were used to evaluate the water ecological carrying capacity in the city. The results showed that: from 2011 to 2018, the water ecological carrying capacity of Wuhu City and its districts and counties showed an overall upward trend, the carrying capacity of urban area and Fanchang district was relatively good, while that of Wuwei City, Nanling County and Wanji district was basically bearable. The indicators that had a great impact on the water ecological carrying capacity of Wuhu City were the water consumption of ten thousand yuan GDP, water resources per capita, industrial wastewater discharge, environmental water consumption, etc. Based on the differences among districts and counties, the urban area needed to optimize the water supply structure, Fanchang district needed to increase the input of ecological water consumption, and Wuwei City, Wanji district and Nanling County were required to further improve the sewage collection and treatment rate.

Key words water ecological carrying capacity; DPSIR model; entropy weight method; index system; Wuhu City

水生态承载力以可持续发展为原则,涵盖了水量、水质、水环境,强调的是水生态系统对人类社会

经济的可持续承载^[1-2]。随着社会经济的发展,区域水资源利用规模越来越大,结构越来越复杂,涉及面

收稿日期:2021-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41877158)

作者简介:卢开东(1994—),男,硕士研究生,研究方向为流域生态环境修复, lukaidong@outlook.com

* 责任作者:王健健(1988—),男,讲师,博士,主要从事湖泊富营养化机理研究, hhuwangjianjian@126.com

越来越广泛,以综合性的水生态系统为研究对象的水生态承载力研究具有重要的现实意义。评价和量化城市水生态承载力,不但有助于缓解城市水危机问题,而且对于指导城市人口、社会、经济和科技的协调发展具有积极意义^[3]。

水资源承载力涉及区域环境、人口和社会经济发展等方面,研究基础是水资源与经济社会的复合系统,它以水作为载体,人口、社会经济则是被载体^[4]。水环境承载力指从污染物排放的角度来看,水体最大能接纳的污染物排放的限度,以水量和水质作为载体,被载体则是经济社会系统,因此可以认为水环境承载力就是水量和水质对经济社会系统的支撑能力和支撑规模^[5]。水生态承载力是水资源承载力、水环境承载力概念的进一步发展,三者之间存在着紧密的联系。水生态承载力不仅满足水资源数量和保证水环境质量,同时更关注生态系统的健康发展。

目前,对于水生态承载力还没有统一的定义,不同学者有着不同的理解。胡文敏等^[6]认为水生态承载力是在保证某一流域水生态系统自身的健康发展和生态保护目标的前提下,水生态系统所能承载人类社会经济发展规模的阈值;李靖等^[7]认为水生态承载力是在一定历史阶段,某一流域的水生态系统在满足自身健康发展前提下,在一定的环境背景条件下,所能持续支撑人类社会经济发展规模的阈值;Zhang 等^[8]认为水生态承载力是区域水资源和水环境能力可以支撑的最大人口和社会经济规模,以实现区域水生态环境和世界经济的可持续发展。综上,笔者把水生态承载力定义为某一地区在一定的环境和资源背景下,满足其水生态系统健康发展时所能支撑社会经济发展的阈值。

20世纪80年代末,经济合作与发展组织(OECD)及联合国环境规划署(UNEP)^[9]为健康评价生态系统的环境质量共同提出了环境指标的PSR概念模型^[10-12],即压力(pressure)—状态(state)—响应(response)模型。1993年,OECD改进PSR模型,提出了DPSIR[驱动力(driving force)—压力—状态—影响(influence)—响应]模型^[13-17],此后被广泛应用于水资源^[18]、土地资源^[19]和生态安全评价^[20]等方面。该模型从社会、环境、经济和资源4个所属子系统中选取指标,是一种较为实用的多指标评价模型。然而,多数研究忽视了生态指标对水生态承载力的影响。

《中华人民共和国长江保护法》指出,产业结构和布局应当与流域生态系统和资源环境承载力相适

应,芜湖市作为安徽沿江发展的重要城市,同时也是长江下游段经济发展的主要城市之一,长江大保护(芜湖段)驻点研究中也明确提出了着力打造水清岸绿产业优美美丽长江(芜湖)经济带,提高城市水生态承载力以不断满足人民日益增长的优美生态环境需要,达到绿色可持续发展。笔者从社会、环境、经济、资源和生态5个所属子系统选取评价指标,运用DPSIR模型构建芜湖市水生态承载力评价指标体系,对2011—2018年芜湖市及其各区县的水生态承载力变化趋势和原因进行分析,以2025年为基准给出目标建议值,并提出水生态承载力改善建议。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

芜湖市地处长江下游,地跨长江两岸,位于安徽省东南部。总面积为5 988 km²,2019年总人口约为377.8万人,城镇化率为66.4%。2018年国内生产总值(GDP)为3 278.5亿元,人均GDP约为88 085元。2018年全市平均降水量为1 250 mm,水资源总量为34.3亿m³,人均水资源量为915 m³;全市供水量为30.03亿m³,人均综合用水量为801.2 m³,万元GDP用水量为91.6 m³,万元工业增加值用水量为101.2 m³。芜湖境内河道纵横、湖泊众多、沟塘密布,有各级河道48条,大小湖泊20多个(图1)。河道总长度为1 106 km,总水面面积为1 098.3 km²,水面率为18.3%^[21]。

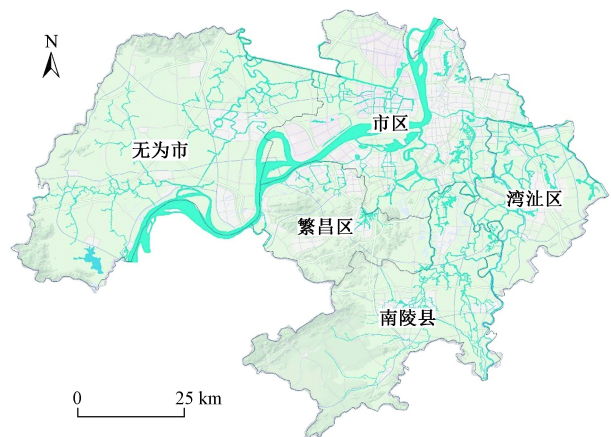


图1 芜湖市内水系分布

Fig.1 Water system map of Wuhu City

1.2 数据来源

人口、人均GDP等社会经济指标,绿化覆盖面积、自然保护区面积以及市政工程污水处理率(市政工程污水处理量/市政工程污水排放量)等数据来源于2012—2019年《芜湖市统计年鉴》(<http://tjj.wuhu.gov.cn/zhsj/tjnj/index.html>);用水量、供水量、产水系

数、水质达标率、年生态基流满足率等数据来源于 2011—2018 年《芜湖市水资源公报》(<http://shuiwuj.wuhu.gov.cn/tzgg/tzgg/8227109.html>); 工业废水、生活污水等污染物排放量, 生态保护红线面积比指数(生态保护红线面积/区域总面积)等数据来源于《生态环境状况公报》(<http://sthjj.wuhu.gov.cn/hbyw/hjzl/index.html>)以及芜湖市生态环境局提供的资料。

1.3 研究方法

1.3.1 评价指标体系构建

运用 DPSIR 模型框架, 从驱动力、压力、状态、影响和响应 5 个方面, 同时也考虑地区的社会、环境、经济、资源和生态 5 个子系统对芜湖市水生态承载力的评价指标体系进行构建。

1.3.2 分级量化评分方法

将选用指标进行归一化处理, 通过一系列公式计算出水生态承载力指数, 进而对承载力类型进行划分。

区域水生态承载力指标值使用极差标准化方法进行归一化处理, 公式如下。

$$\text{指标正相关: } \bar{E}_{i,j} = (E_{i,j} - E_{i,\min}) / (E_{i,\max} - E_{i,\min}) \quad (1)$$

$$\text{指标负相关: } \bar{E}_{i,j} = (E_{i,\max} - E_{i,j}) / (E_{i,\max} - E_{i,\min}) \quad (2)$$

式中: $\bar{E}_{i,j}$ 为水生态承载力指标 (i, j) 的标准化数值; $E_{i,j}$ 、 $E_{i,\max}$ 和 $E_{i,\min}$ 分别为水生态承载力指标 i 在第 j 年份的实测值、指标 i 的最大值和最小值。归一化处理后的数据分布在 0~1。

采用熵权法^[22-24] 确定权重。计算第 i 个指标下第 j 个年份的指标值的权重 ($P_{i,j}$), 公式如下:

$$P_{i,j} = \bar{E}_{i,j} / \sum_{j=1}^m \bar{E}_{i,j} \quad (3)$$

计算第 i 个指标的熵值 (e_i)、熵权 (w_i):

$$e_i = -k \sum_{j=1}^m P_{i,j} \cdot \ln P_{i,j} \quad (4)$$

$$w_i = (1 - e_i) / \sum_{i=1}^n (1 - e_i) \quad (5)$$

式中: m 为指标年份长度; $k=1/\ln m$; n 为水生态承载力指标个数。

水生态承载力评价指数 (E_j) 计算公式如下:

$$E_j = \sum_{i=1}^n w_i \bar{E}_{i,j} \quad (6)$$

将芜湖市水生态承载力评价指数划分为不同的等级, 可以直观地判断芜湖市水生态承载力综合状

况: $E < 0.2$, 不可承载; $0.2 \leq E < 0.4$, 弱可承载; $0.4 \leq E < 0.6$, 基本承载; $0.6 \leq E < 0.8$, 较好承载; $E \geq 0.8$, 良好承载^[25-27]。

2 结果与分析

2.1 指标体系

根据水生态承载力的定义, 区域水生态承载力的大小主要受该地区社会、经济、资源、环境和生态 5 个方面的影响。参考包蕊等^[28-30] 在社会和经济方面指标的选取以及《中华人民共和国长江保护法》在资源保护、水污染防治和生态环境修复等方面的要求, 本研究从下述 5 个方面选取指标: 1) 社会方面主要体现地区的人口数量以及城市化发展状况, 选取总人口和城镇化率 2 项指标。2) 经济方面体现地区的产业发展及 GDP 水平, 选取人均 GDP、万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、城镇常住居民人均可支配收入、工业和农林牧渔业增加值 6 项指标。3) 资源方面影响主要是地区供水量和用水量, 《中华人民共和国长江保护法》指出要优先满足城乡居民生活用水, 据此选取总供水量、人均水资源量、生活用水量和产流系数 4 项指标; 保障基本生态用水, 据此选取年生态基流满足率和生态环境用水率 2 项指标; 统筹兼顾农业及工业用水, 据此选取了工业用水量和农田灌溉用水量 2 项指标。4) 环境方面主要考虑污染物排放与治理以及当前的环境状态, 《中华人民共和国长江保护法》要求预防、控制和减少长江流域水环境污染, 加大点、面源污染防治, 据此选取了工业废水和生活污水排放量 2 项指标; 由于芜湖当地 COD 和 NH₃-N 浓度超标的问题较严重, 增加了 COD、NH₃-N 排放量 2 项指标; 提高城乡污水处理能力, 据此选取了市政工程污水处理率和排入污水处理厂的工业废水排放总量 2 项指标; 保障水质稳定达标, 实时监测饮用水水源的水环境质量, 设立国家公园、自然保护区等自然保护地, 据此选取了水功能区水质达标率、饮用水水源地水质达标率、湿地面积、自然保护区面积和绿化覆盖面积 5 项指标。5) 生态方面, 《中华人民共和国长江保护法》要求进行生态环境修复, 开展水生生物救护, 满足水生生物生态需求, 据此选取了水生生物多样性指数 1 项指标; 保障自然岸线比例, 恢复河湖岸线生态功能, 据此选取了生态保护红线面积和自然岸线比例 2 项指标。

共选取 30 项指标, 其中从社会、经济、资源、环境和生态 5 个方面选取的指标分别为 2、5、8、12 和 3 项。各项指标根据其特性又可以划分为驱动力、

压力、状态、影响和响应指标, 其中驱动力指标推动水资源变化和发展, 主要体现地区社会经济状况; 压力指标体现经济发展对水资源的需求, 描述了经济、工业、农业和居民日常生活对水资源的压力; 状态指标体现目前区域内能够人为控制的、并对承载力大小造成影响的指标; 影响指标体现水资源系统的状态对社会经济、生态环境的影响; 响应指标描述了生态系统表现出的对人类活动的反馈。根据指标性质又可分为正相关指标和负相关指标, 其中正相关指标的增长促进该地区水生态承载力的提升, 负相关指标则反之。评价指标具体分类见表 1。

2.2 承载力评价结果

图 2 为 2011—2018 年芜湖市水生态承载力变化趋势。从图 2 可以看出, 承载力总体呈上升趋势。其中, 2011—2014 年得分为 0.4~0.6, 呈基本承载状态, 2015—2018 年得分超过 0.6, 为较好承载, 但与良好承载(0.8)还存在一定距离。

2011—2018 年各区县水生态承载力变化趋势见图 3。从图 3 可以看出, 市区、无为市、繁昌区和南陵县的水生态承载力总体上呈上升趋势, 南陵县的波动性较大; 2018 年市区和繁昌区得分超过 0.6, 呈较好承载状态; 而无为市、湾沚区和南陵县的得分为 0.5~0.6, 呈弱可承载。其中繁昌区的水生态承载力评分值最大, 湾沚区最小。

2.3 主要影响指标

由于芜湖市各区县在社会资源、经济结构等方面存在很大差异, 因此相应的主要影响指标也存在不同, 根据各指标权重系数的大小采用排序法挑选出对各区县水生态承载力造成影响的主要指标(图 4), 并对其进行着重分析。

从图 4 可以看出, 各区县的水生态承载力主要影响指标具体表现: 1) 市区为生活污水排放量、生态环境用水量、人均水资源量、产水系数和总供水量; 2) 无为市为万元 GDP 用水量、COD 排放量、工业废水排放量、产水系数和人均水资源量; 3) 湾沚区为 COD 排放量、生活污水排放量、万元 GDP 用水量、人均水资源量和生态环境用水量; 4) 繁昌区为万元 GDP 用水量、工业废水排放量、人均水资源量、COD 排放量和生态环境用水量; 5) 南陵县为人均水资源量、产水系数、万元 GDP 用水量、COD 排放量和生态环境用水量。最终确定了 8 项各区县水生态承载力的主要影响指标, 分别为工业废水排放量、总供水量, COD 排放量、万元 GDP 用水量、产水系数、生态环境用水量、生活污水排放量和人均水资源量。各区县 8 项指标变化趋势如图 5 所示。资源

表 1 芜湖市水生态承载力评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of water ecological carrying capacity in Wuhu City

项目	指标	单位	所属子系统	指标性质
驱动力指标(D)	总人口	万人	社会	-
	城镇化率	%	社会	+
	人均GDP	元	经济	+
	城镇常住居民人均可支配收入	元	经济	+
	工业增加值	亿元	经济	+
	农林牧渔业增加值	万元	经济	+
压力指标(P)	工业用水量	亿m ³	资源	-
	生活用水量	亿m ³	资源	-
	农田灌溉用水量	亿m ³	资源	-
	万元GDP用水量	m ³	经济	-
	万元工业增加值用水量	m ³	经济	-
状态指标(S)	生活污水排放量	万t	环境	-
	工业废水排放量	万t	环境	-
	总磷排放量	t	环境	-
	废水中氨氮排放量	t	环境	-
	COD排放量	t	环境	-
	市政工程污水处理率	%	环境	+
	排入污水处理厂的工业废水排放总量	万t	环境	+
	人均水资源量	m ³	资源	+
影响指标(I)	总供水量	亿m ³	资源	+
	生态环境用水量	亿m ³	资源	+
	中水回用率	%	资源	+
	产水系数		资源	+
响应指标(R)	年生态基流满足率	%	资源	+
	生态保护红线面积比指数		生态	+
	水生生物多样性指数		生态	+
	自然岸线比例	%	生态	+
	湿地面积	hm ²	环境	+
	自然保护区面积	hm ²	环境	+
	绿化覆盖面积	hm ²	环境	+
	饮用水源水质达标率	%	环境	+
水功能区水质达标率	%	环境	+	

注: +表示正相关指标; -表示负相关指标。

和环境是影响芜湖市水生态承载力的主要因素, 相反, 选用的生态指标对水生态承载力的影响较小, 其原因可能是芜湖市生态保护红线面积、水生生物多样性指数和自然岸线比例在 2011—2018 年没有变化或变化幅度很小。

由图 5 可见, 各区县万元 GDP 用水量和产水系

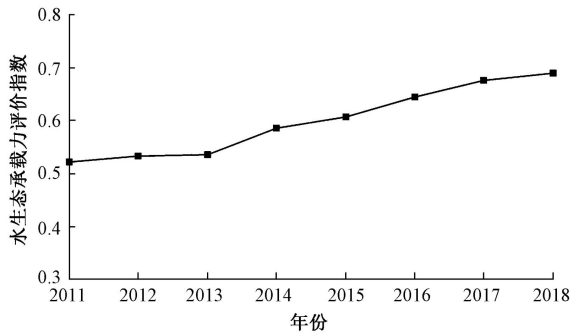


图 2 2011—2018 年芜湖市水生态承载力变化

Fig.2 Change trend of water ecological carrying capacity in Wuhu City from 2011 to 2018

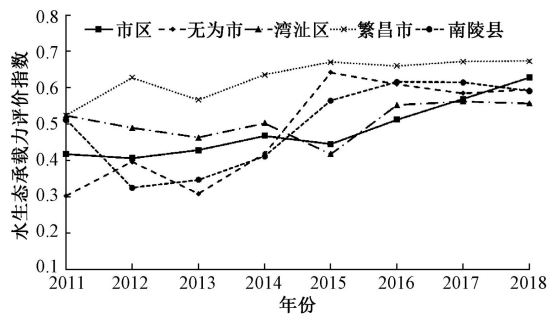


图 3 2011—2018 年芜湖市各区县水生态承载力变化

Fig.3 Change trend of the ecological carrying capacity of each district and county from 2011 to 2018

数 2 项指标总体上向有利方向发展。然而不同区县的各指标以及限制因素存在较大差异,如:1)市区的经济水平较高,但自然资源匮乏,具体表现为市区的人均 GDP 高、人均水资源量低,同时由于市区的人

口密度大,也导致了该地区的生活污水排放量大;2)无为市的工业废水排放量低,但 COD 排放量高,万元 GDP 用水量和产水系数处于较低水平;3)湾沚区总供水量较低,工业废水和生活污水排放量处于较高的水平;4)繁昌区的万元 GDP 用水量、工业废水排放量和生活污水排放量都较低,对环境造成的压力低,所以该地区的水生态承载力评分值最大;5)南陵县的自然资源丰富,人均水资源量大,但万元 GDP 用水量较低、工业废水排放量大。

2.4 建议值确定

为使芜湖市各区县达到良好承载状态,根据 2011—2018 年各项指标的变化趋势,以 2025 年为基准,采用指标外延法确定 8 项主要影响指标的目标建议值(图 5 虚线部分)。从图 5 可以看出,2011—2018 年市区的人均水资源量、工业废水和生活污水排放量较上一年的变化幅度分别为-50%~94%、-59%~64%和-32%~24%,2025 年建议值增幅分别为 6%、-4%和-4%,符合变化趋势。2011—2018 年无为市的生活污水排放量和 COD 排放量较上一年的变化幅度分别为-60%~126%和-61%~108%,2025 年建议值增幅为 4%,符合变化趋势。2011—2018 年湾沚区的总供水量和生活污水排放量较上一年变化幅度分别为-12%~26%和-7%~64%,2025 年建议值增幅为 6%和-4%,符合变化趋势。2011—2018 年繁昌区的生态环境用水量较上一年的变化幅度为-37%~58%,2025 年建议值增幅为 6%,

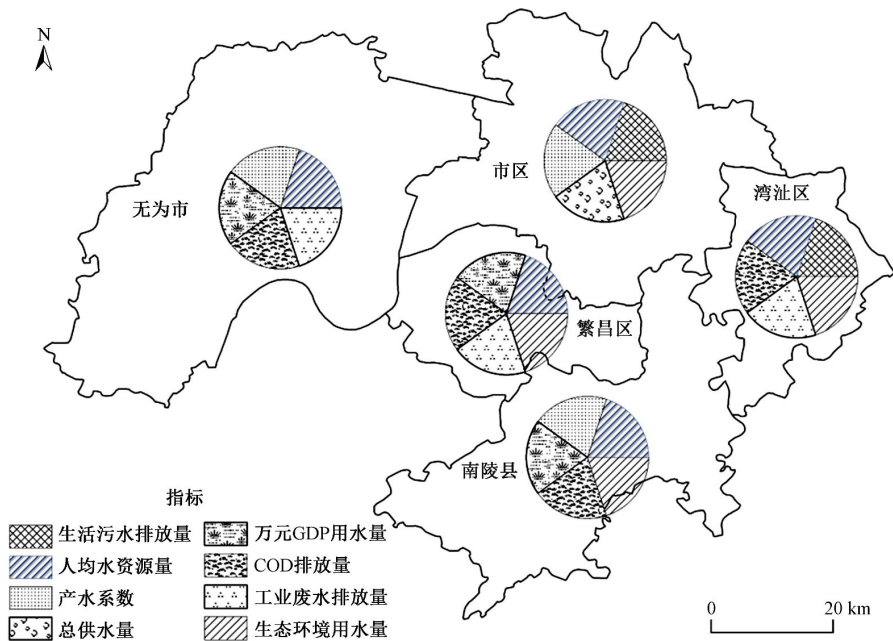


图 4 芜湖市各区县水生态承载力的主要影响指标

Fig.4 Main impact indicators of each district and county

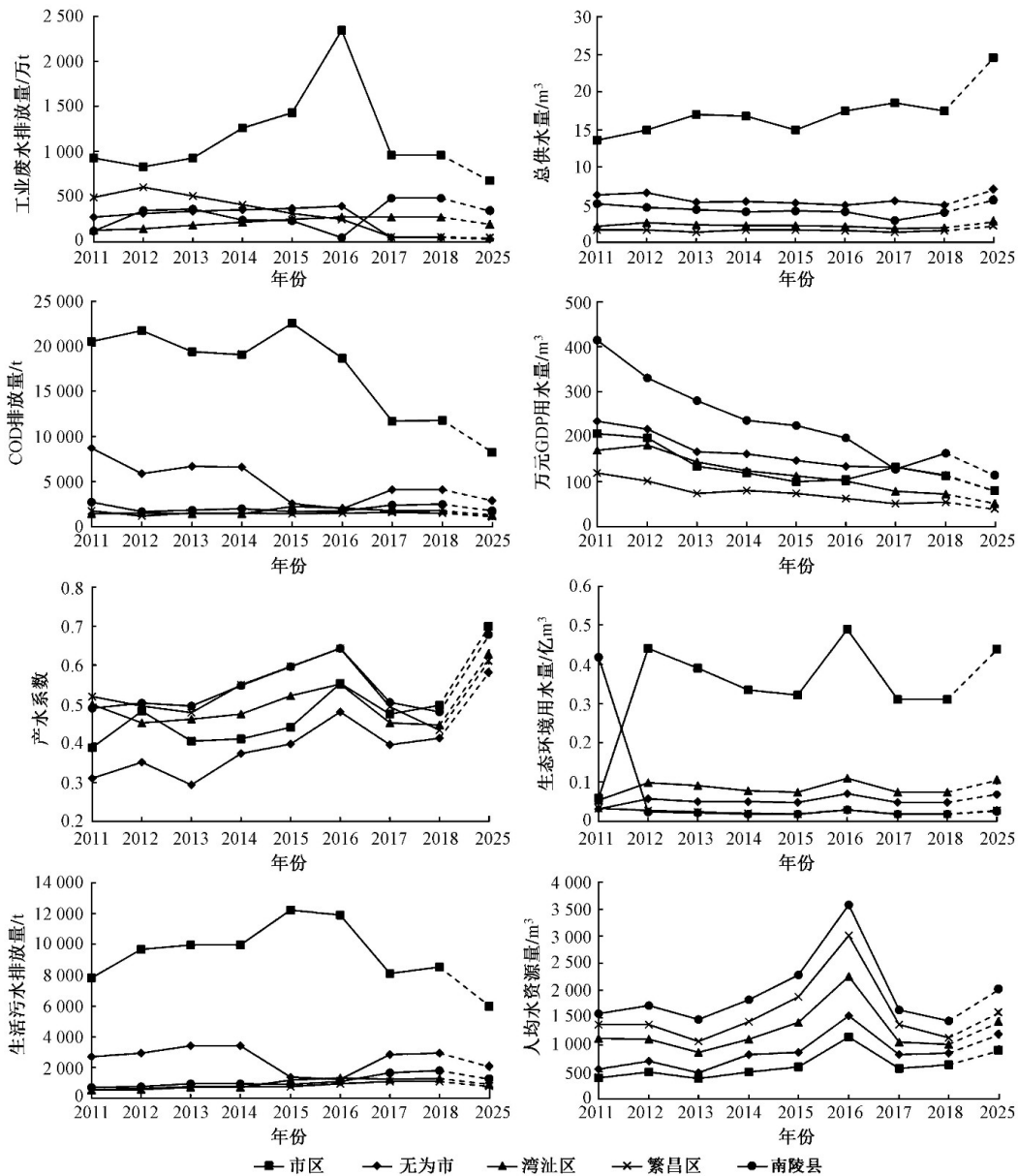


图 5 芜湖市各区县水生态承载力主要影响指标的变化趋势

Fig.5 Change trend of main impact indicators of each district and county in Wuhu City

符合变化趋势。2011—2018 年南陵县的生活污水排放量和万元 GDP 用水量较上一年的变化幅度为 -5%~53% 和 -35%~28%，2025 年建议值增幅为 -4% 和 -30%，符合变化趋势。

针对各区县提出以下水生态承载力改善建议:

1) 对于市区, 存在的问题主要是人均水资源量低以及工业废水、生活污水排放量大, 需要开辟新的备用水源, 如采取建地下水库、海绵城市等措施; 加强工业废水、生活污水治理, 对污水处理厂进行提标改造, 提高污水回用率, 并督促企业进行排污申报登记, 逐步完善污染在线监测系统。2) 无为市的生活污水排放量和 COD 排放量较高, 需要对一些 COD 高排放企业采取减排限排的措施, 对钢铁类企业、印

染类企业实施清洁化改造计划, 对高能耗、低用水效率的企业进行技改, 同时需要开展城乡污水集中处理设施及配套管网建设。3) 湾沚区需要积极发展新兴产业, 促进产业结构的升级优化, 对高排放企业进行减排限排, 对超标排放企业进行关停, 同时也需要加强备用水源建设。4) 繁昌区主要问题是生态用水量较低, 可以开展区级、社区级城市公园建设, 增大在生态用水方面的投入。5) 对于南陵县废/污水排放量大的问题, 需要提高污水回用率, 大幅度削减落后产能规模, 以钢铁、水泥、平板玻璃等行业为重点, 同时需要升级企业设备, 提高工业用水效率以降低万元 GDP 用水量。此外, 还需要加强对生态指标如生态保护红线面积比指数、自然岸线比例等指标的

管控。芜湖市生态保护红线面积比为 4.95%，市区、无为市、湾沚区、繁昌区和南陵县的面积比分别为 1.84%、5.82%、1.72%、6.46% 和 8.19%，在生态保护红线内按照禁止开发区域的要求进行管理，严禁不符合主体功能定位的各类开发活动，严禁任意改变用途，确保生态保护红线的生态功能不降低、面积不减少、性质不改变。

3 结论与建议

3.1 结论

(1) 总体来说，芜湖市及各区县的水生态承载力呈上升的趋势，市区和繁昌区的水生态承载力较好，无为市和南陵县次之，湾沚区最差。

(2) 选用的评价指标来自社会、环境、经济、资源和生态 5 个方面，根据权重系数大小采用排序法确定 8 项主要影响指标，分别为工业废水排放量、总供水量、COD 排放量、万元 GDP 用水量、产水系数、生态环境用水量、生活污水排放量和人均水资源量，其中环境和资源是影响芜湖市水生态承载力的主要因素。

(3) 针对各区县提出了相应的改善建议，从经济发展、产业结构调整、截污减排等方面提高水生态承载力。为了更好地落地实施改善方案，根据各区县的 8 项主要影响指标提出了目标建议值(以 2025 年为基准)，并确保所设定的建议值是可达到的。

3.2 建议

(1) 为缓解芜湖市内水资源分配不均的现状，建设重点水源配置工程，对青弋江、漳河等重要支流进行治理，对市内自来水厂实施管道改造工程。

(2) 针对污染物排放量大的问题，全力控制污染物排放，落实全市重点排放大户超低排放改造；严格控制新增污染源，坚持建设项目全过程管理，做到增产不增污、增产减污；统筹城乡污水集中处理设施及配套管网建设，并保障其正常运行，提高城乡污水收集处理能力和回用率。

(3) 全面推进社会节水工作，工农业进行节水改造工作，推广节水器具，加强对高耗水行业、重点用水单位的用水定额管理，严格控制高耗水项目建设，对高能耗、低用水效率的企业要进行技改，以缓解芜湖市区及其他区县水资源短缺的问题。

(4) 为有效保护芜湖地区的水生生物多样性和生态安全，需要进一步加强生态保护红线的管理，确保生态保护红线的生态功能不降低、面积不减少、性质不改变，围绕长江干流、主要支流及道路沿线建

设森林长廊，开展防护林建设工作。

致谢：感谢芜湖市长江生态环境保护技术与方案研究项目的支持。

参考文献

- [1] 王西琴, 高伟, 张家瑞. 区域水生态承载力多目标优化方法与例证[J]. 环境科学研究, 2015, 28(9): 1487-1494.
WANG X Q, GAO W, ZHANG J R. Multi-objective optimization for regional water ecological carrying capacity and case study[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(9): 1487-1494.
- [2] WOLVERTON S. Harvest pressure and environmental carrying capacity: an ordinal-scale model of effects on ungulate prey[J]. *American Antiquity*, 2008, 73(2): 179-199.
- [3] FENG Z M, SUN T, YANG Y Z, et al. The progress of resources and environment carrying capacity: from single-factor carrying capacity research to comprehensive research[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(2): 125-134.
- [4] 朱运海, 彭利民, 杜敏, 等. 区域水资源承载力评价国内外研究综述[J]. *科学与管理*, 2010, 30(3): 21-24.
ZHU Y H, PENG L M, DU M, et al. On the evaluation of regional water resources carrying capacity[J]. *Science and Management*, 2010, 30(3): 21-24.
- [5] 徐志青, 刘雪瑜, 肖书虎, 等. 珠江三角洲地区水环境承载力评价及障碍因素研究[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(1): 44-52.
XU Z Q, LIU X Y, XIAO S H, et al. Evaluation and obstacle factors study of water environmental carrying capacity in the Pearl River Delta[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(1): 44-52.
- [6] 胡文敏, 欧阳绿茵, 付钰珊, 等. 水资源、水环境、水生态承载力评价研究综述[J]. *产业科技创新*, 2020, 2(26): 109-111.
- [7] 李靖, 周孝德. 叶尔羌河流域水生态承载力研究[J]. *西安理工大学学报*, 2009, 25(3): 249-255.
LI J, ZHOU X D. Research on water ecological carrying capacity of Yarkant River Basin[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2009, 25(3): 249-255.
- [8] ZHANG Z, LU W X, ZHAO Y, et al. Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 275: 9-21.
- [9] 薄燕. 环境治理中的国际组织: 权威性及其来源: 以联合国环境规划署为例[J]. *欧洲研究*, 2007, 25(1): 87-100.
BO Y. International organization in environmental governance: the case of UNEP[J]. *Chinese Journal of European Studies*, 2007, 25(1): 87-100.
- [10] 逮元堂, 吴舜泽, 王金南, 等. 大气环境安全评估体系研究[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(3): 128-133.
LU Y T, WU S Z, WANG J N, et al. Study on assessment system of atmospheric environmental security[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(3): 128-133.

- [11] 全川. 环境指标研究进展与分析[J]. *环境科学研究*, 2000, 13(4): 53-55.
TONG C. Review on environmental indicator research[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2000, 13(4): 53-55.
- [12] MEN B H, LIU H Y. Water resource system vulnerability assessment of the Heihe River Basin based on pressure-state-response (PSR) model under the changing environment[J]. *Water Supply*, 2018, 18(6): 1956-1967.
- [13] 张型芳, 王文静, 罗宏, 等. 城市土地资源中生态环境承载力指标体系的构建及应用: 以北京市为例[J]. *环境工程技术学报*, 2017, 7(2): 209-215.
ZHANG X F, WANG W J, LUO H, et al. Construction and application of index system of ecological environment carrying capacity of urban land resources: a case study of Beijing[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2017, 7(2): 209-215.
- [14] MALEKMOHAMMADI B, JAHANISHAKIB F. Vulnerability assessment of wetland landscape ecosystem services using driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) model[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 293-303.
- [15] PAGAN J, PRYOR M, DEEPA R, et al. Sustainable development tool using meta-analysis and DPSIR framework: application to Savannah River Basin, US[J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2020, 56(6): 1059-1082.
- [16] LIU S D, DING P Y, XUE B R, et al. Urban sustainability evaluation based on the DPSIR dynamic model: a case study in Shaanxi Province, China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(18): 7460.
- [17] ZHAO J H, XIU H R, WANG M, et al. Construction of evaluation index system of green development in the Yellow River Basin based on DPSIR model[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 510(3): 032033.
- [18] 董四方, 董增川, 陈康宁. 基于DPSIR概念模型的水资源系统脆弱性分析[J]. *水资源保护*, 2010, 26(4): 1-3, 25.
DONG S F, DONG Z C, CHEN K N. Analysis of water resources system vulnerability based on DPSIR conceptual model[J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(4): 1-3, 25.
- [19] 张志苗, 孙金华, 王维, 等. 厦门港口规划土地资源承载力评价方法研究[J]. *环境工程技术学报*, 2016, 6(6): 607-612.
ZHANG Z M, SUN J H, WANG W, et al. Study on evaluation of land carrying capacity of Xiamen port planning[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2016, 6(6): 607-612.
- [20] 李玉照, 刘永, 颜小品. 基于DPSIR模型的流域生态安全评价指标体系研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(6): 971-981.
LI Y Z, LIU Y, YAN X P. A DPSIR-based indicator system for ecological security assessment at the basin scale[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(6): 971-981.
- [21] 芜湖市水务局. 2018年芜湖市水资源公报[A/OL]. (2020-04-03)[2021-05-06]. <http://shuiwujw.wuhu.gov.cn/tzgg/tzgg/8227109.html>.
- [22] 解钰茜, 张林波, 罗上华, 等. 基于双目标渐进法的中国省域生态文明发展水平评估研究[J]. *中国工程科学*, 2017, 19(4): 60-66.
- [23] 张捍民, 邹翔, 姜威. 城镇污水处理厂综合效益评价: 以辽河流域为例[J]. *环境工程技术学报*, 2017, 7(5): 573-579.
ZHANG H M, ZOU X, JIANG W. Evaluation of comprehensive benefits of urban sewage treatment plants: taking Liaohe River Basin as an example[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2017, 7(5): 573-579.
- [24] 高长波, 陈新庚, 韦朝海, 等. 熵权模糊综合评价法在城市生态安全评价中的应用[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1923-1927.
GAO C B, CHEN X G, WEI C H, et al. Application of entropy weight and fuzzy synthetic evaluation in urban ecological security assessment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1923-1927.
- [25] 高宝, 傅泽强, 杨俊峰. 水生态承载力评估技术指南初探[J]. *生态经济*, 2017, 33(9): 146-151.
- [26] 孙佳乐, 王颖, 辛晋峰. 汉江流域(陕西段)水生态承载力评估[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 80-86.
SUN J L, WANG Y, XIN J F. Water ecology carrying capacity evaluation on Shaanxi section of Hanjiang River Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(3): 80-86.
- [27] 任晓庆, 杨中文, 张远, 等. 滦河流域水生态承载力评估研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(5): 72-79.
REN X Q, YANG Z W, ZHANG Y, et al. Evaluation of hydro-ecological carrying capacity (HECC) in Luanhe River Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(5): 72-79.
- [28] 包蕊, 邱莎, 唐明方, 等. 基于DPSIR模型的锡林郭勒盟生态承载力评价[J]. *生态经济*, 2020, 36(8): 139-145.
BAO R, QIU S, TANG M F, et al. Evaluation of ecological carrying capacity in Xilingol League based on DPSIR model[J]. *Ecological Economy*, 2020, 36(8): 139-145.
- [29] 胡晋飞, 杨永刚, 秦作栋, 等. 基于主成分分析的晋西北水生态承载力评价[J]. *山西农业科学*, 2015, 43(8): 1021-1026.
HU J F, YANG Y G, QIN Z D, et al. Evaluation of water ecological carrying capacity in northwestern Shanxi on principal component analysis[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2015, 43(8): 1021-1026.
- [30] 蒋汝成, 顾世祥. 熵权法-正态云模型在云南省水生态承载力评价中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 118-123.
JIANG R C, GU S X. Application of entropy weight-normal cloud model in carrying capacity evaluation of water ecological environment in Yunnan Province[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(3): 118-123. □