

# 基于“三线一单”指标体系的生态承载力与 产业布局一致性评价

陆文涛<sup>1,2</sup> 尹彩春<sup>3</sup> 张扬<sup>4</sup> 付正辉<sup>5</sup> 郭怀成<sup>4</sup> 于雷<sup>2,†</sup> 刘毅<sup>1,†</sup>

1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 生态环境部环境规划院, 北京 100012; 3. 北京师范大学陆地表层系统科学与可持续发展研究院, 北京 100875; 4. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 5. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; † 通信作者, E-mail: yulei@caep.org.cn (于雷), yi.liu@tsinghua.edu.cn (刘毅)

**摘要** 结合我国正在开展的“三线一单”编制工作, 构建基于“三线一单”的生态承载力与产业布局一致性评价指标体系, 并选取上海市青浦区为案例研究区, 利用单因素和综合生态承载率法进行区域生态承载力与产业布局一致性评价。结果表明: 1) 单因素生态承载率法能反映关键限制性因素, 综合指数能直观地说明区域产业对生态承载力的累积影响; 2) 青浦区产业布局与生态空间和土壤环境生态承载力的冲突较小, 但是对水环境和大气环境造成的生态压力较大, 生态环境整体上呈超载状态, 生态承载力与产业布局一致性较弱; 3) 评价一致性问题突出的区域与环境管控单元的重点管控单元基本上一致, 表明该指标体系客观可行, 具备全国推广的普遍性, 因此建议加强对重点管控单元的污染物排放管控。

**关键词** 三线一单; 指标体系; 生态承载力; 产业布局; 一致性评价

## Consistency Evaluation of Ecological Carrying Capacity and Industrial Layout Based on “Three Lines One Permit” Index System

LU Wentao<sup>1,2</sup>, YIN Caichun<sup>3</sup>, ZHANG Yang<sup>4</sup>, FU Zhenghui<sup>5</sup>, GUO Huaicheng<sup>4</sup>, YU Lei<sup>2,†</sup>, LIU Yi<sup>1,†</sup>

1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084; 2. Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012; 3. Institute of Land Surface System and Sustainable Development, Beijing Normal University, Beijing 100875; 4. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; 5. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012; † Corresponding authors, E-mail: yulei@caep.org.cn (YU Lei), yi.liu@tsinghua.edu.cn (LIU Yi)

**Abstract** Combined with the work of “Three Lines One Permit” in China, this study constructed a corresponding index system, and selected Qingpu District of Shanghai as the case study area to evaluate the consistency of regional ecological carrying capacity and industrial layout by both single factor and comprehensive index methods. The results show that: 1) the single factor ecological carrying rate can reflect the key limiting factors, while the comprehensive index can directly show the cumulative impact of regional industries on ecological carrying capacity; 2) the conflict between industrial layout and ecological space and soil environmental quality is less in Qingpu District, but the contradiction between industrial layout and water, atmospheric environment is prominent, which results in the overload of ecological environment and the disharmony between ecological carrying capacity and industrial layout; 3) the regions with prominent consistency problems are basically the same as the key units of environmental control, indicating that the index system is objective and feasible, can provide reference for relevant evaluation and research work, and has the feasibility of nationwide promotion. It is suggested to strengthen pollutant emission control for the key control units.

**Key words** Three Lines One Permit; index system; ecological carrying capacity; industrial layout; consistency evaluation

在资源环境保护与人类经济社会活动之间的矛盾愈发突出的背景下,作为区域可持续发展研究的重要命题,生态承载力与产业布局之间的关系备受环境生态学、资源与环境经济学等学界的关注<sup>[1-3]</sup>。生态承载力是生态系统的自我调节能力、资源与环境子系统的供容能力、可维持的社会经济活动强度和一定生活水平的人口数量<sup>[4-5]</sup>,与产业布局有双向作用的关系,生态承载力是区域产业发展的基础,同时约束着产业的布局、类型及规模<sup>[6]</sup>,区域产业布局也影响着生态承载力的状态和可持续性<sup>[7]</sup>。对两者的一致性评价,主要指基于生态承载力的理论与方法以及国家和地区对生态环境空间的管控要求,评价或判断某一区域自然生态系统对产业布局的支撑能力和状态<sup>[8]</sup>。已有研究主要利用生态足迹法<sup>[9]</sup>、供需平衡法<sup>[3]</sup>、综合指标评价法<sup>[4]</sup>和生态承载力评估模型<sup>[5]</sup>等方法,对区域产业布局现状与生态承载力状况进行综合评价<sup>[10]</sup>,并提出相应的协调和优化策略<sup>[11]</sup>。现阶段针对特定产业或某一地区的案例较多,缺少一套具有普适性的方法或指标体系,部分指标缺少全国尺度的数据支撑,因此,需要进一步探索可行性高、全国范围内适用以及符合当前我国生态环境评价工作的方法和指标体系。

2017年10月,原环境保护部印发《长江经济带战略环境评价工作》,启动“生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和环境准入负面清单”(简称“三线一单”)编制工作。预计全国范围内的“三线一单”编制与成果入库工作将于2021年年底完成。“三线一单”工作采用统一的技术规范,全国统一开展工作,建立全国尺度统一的指标体系和空间基础数据,为其他领域的科研工作提供全国范围内统一的指标体系和部分指标的阶段性阈值(分阶段的大气、水、土环境质量目标,大气和水的环境容量,以及资源承载能力等)。此外,划定生态空间为区域产业布局提供关键生态限制因素。“三线一单”工作作为评价产业布局与生态承载力一致性提供了新的思路,使不同地区的生态承载力评价具有较为统一的数据平台、指标选取标准以及指标阈值,使得评价工作在全国不同地区均具有可行性和可比性。

本文选取上海市青浦区为研究对象,结合目前国家大力开展的区域“三线一单”编制工作,基于“三线一单”指标体系,分别计算青浦区单因素生态承载率和综合生态承载率,进而识别区域产业布局

的关键生态限制因素,对研究区生态承载力与产业布局的一致性进行评价研究,为区域产业结构空间布局调整和优化提供决策支持。

## 1 研究区域概况

青浦区是中国上海市市辖区,位于东经120°53′—121°17′,北纬30°59′—31°16′之间,地处上海市西部,太湖下游,黄浦江上游,总面积为668.54 km<sup>2</sup>。东与虹桥综合交通枢纽毗邻,西连江苏省吴江、昆山两市,南与松江区、金山区及浙江省嘉善县接壤,北与嘉定区相接,为长江三角洲经济圈中心地带。境内辖有上海市最大的淡水湖泊——淀山湖,辖区内水域面积占全区土地总面积的18.6%。近年来,区域经济运行总体平稳,2019年实现地区生产总值1166.25亿元,比上年增长5.8%,产业结构以第二、第三产业为主。全区共有8个镇,3个街道,分别是赵巷镇、徐泾镇、华新镇、重固镇、白鹤镇、朱家角镇、练塘镇、金泽镇、夏阳街道、盈浦街道和香花桥街道(图1)。

## 2 研究方法数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 构建评价指标体系

“三线一单”包括一套覆盖全域的生态环境分区管控体系,“三线”也包含一套全国尺度上统一的指标体系,为评估区域生态承载力与产业布局一致性提供基础,同时为全国范围内生态环境资源承载能力的评价工作构建统一平台。本文结合《“生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和环境准入负面清单”编制技术指南》、《“三线一单”编制技术要求》等指导原则和说明文件,结合各省份“三线一单”编制经验,在已有指标体系的基础上进行取舍和细化,提出本套指标体系(表1)。

指标落地说明: 1) 大气环境指标。如果未超载,按照区县尺度的实际数值进行计算;如果超载,根据污染源排放清单,选取排放强度较大的区域作为超载区,若没有污染源排放清单数据,选择大气高排放区作为超载区,按实际情况赋值,其他区域采用各指标均值。2) 水环境指标。按照控制单元的尺度赋值。以上数据均可在“三线一单”成果中获取,但是考虑到部分区域生态环境的实际情况以及不同区域之间数据可获取性的差异,部分指标可能缺失,应根据各地区实际情况以及“三线一单”工作

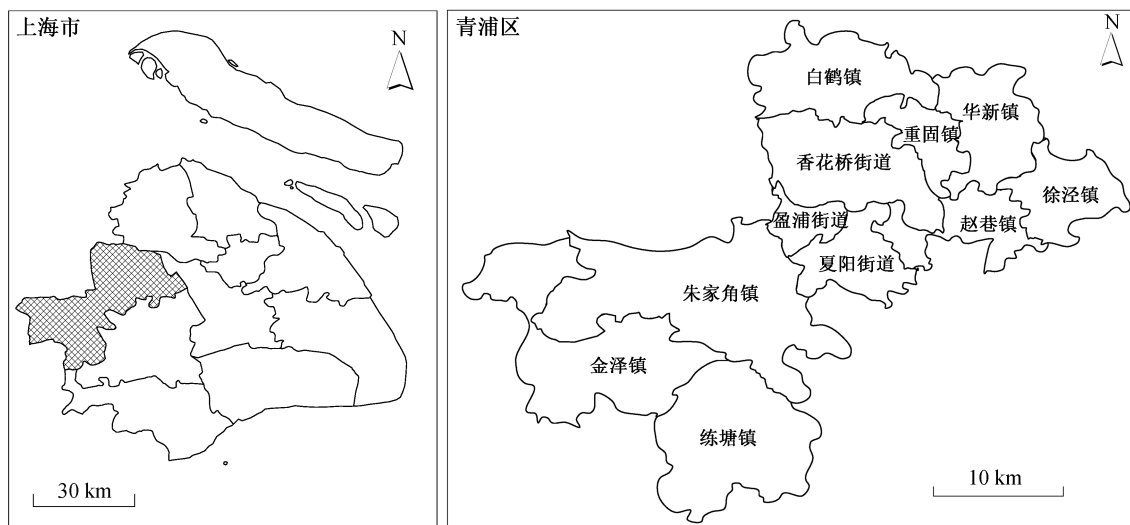


图1 青浦区位置(a)和行政区划(b)

Fig. 1 Geographical location (a) and administrative division (b) of Qingpu District

基础进一步确定。

### 2.1.2 一致性评价方法

根据青浦区实际情况确定具体指标后,将“三线一单”成果中确定的允许排放量和规划期指标作为评价的标准阈值,评价区域的承载力情况。

#### 1) 单因素生态承载力指数:

$$C_i = A_i / L_i,$$

式中,  $C_i$  为指标  $i$  的承载力情况,  $A_i$  为目前该指标的现状值,  $L_i$  为目前该指标在“三线一单”成果中的计算值。

#### 2) 生态承载力综合指数:

$$IC = \sqrt{\frac{(\max(C_i))^2 + (\text{mean}(C_i))^2}{2}}, \forall i = 1 \sim n,$$

式中,  $n$  为因子数,  $IC$  用于表征评价区域的总体承载力情况。当  $0 \leq IC \leq 1$  时, 区域产业发展强度没有超过区域生态承载力,  $IC$  越小表明区域越有开发潜力; 当  $IC > 1$  时, 表明区域产业发展强度超过生态承载力。

### 2.2 数据来源

生态保护红线指标数据主要来自自然资源部门的生态保护红线优化调整成果和“三线一单”工作划定的一般生态空间; 环境质量底线指标数据主要来自第二次污染源普查或环境统计数据、本地大气源清单数据、“三线一单”环境容量或允许排放量计算结果、土壤详查工作成果等; 资源利用上线指标主要来自发改委统计数据、节能减排工作综合实施方案、土地利用规划(国土空间规划)、用水总量控制

方案和水资源“三条红线”等相关文件和规划。

研究数据采用地理信息系统软件进行处理。空间尺度为区县/乡镇、控制单元类别的数据需要先录入到矢量数据中, 再转化为栅格数据进行计算; 空间尺度为空间网格的指标则直接参加计算。数据准备过程中需要确保所有数据分辨率和空间范围一致。所有数据转化为栅格数据后, 采用栅格计算器进行计算。

## 3 上海市青浦区生态承载力与产业布局一致性评价

### 3.1 评价指标的选取

结合“三线一单”技术指南和上海市“三线一单”编制成果, 本研究在上海市青浦区案例中, 选取生态空间、大气环境、水环境和土壤环境4个方面的指标, 通过  $C_i$  分析各单项指标的承载情况, 通过  $IC$  分析区域综合生态承载情况。能源、水资源和土地资源的部分现状指标尚不明确, 因此未将其纳入分析过程。其中生态保护红线和生态空间范围指标, 主要通过空间尺度上分析产业是否布局在生态红线及生态空间内, 进而判定其布局的一致性, 不参与具体承载力指标的计算。

### 3.2 单因素生态承载力评价

青浦区生态保护红线和一般生态空间的空间分布范围如图2所示, 青浦区西部集中分布着淀山湖生物多样性维护红线、青浦大莲湖生物多样性维护红线、黄浦江上游金泽水源涵养红线以及黄浦江上

表 1 基于“三线一单”的区域生态承载力与产业布局一致性评价指标体系

Table 1 Index system of regional ecological carrying capacity and industrial layout consistency based on “Three Lines One Permit”

“三线”	生态环境要素	指标	阈值(判定依据)	单位	类型	尺度
生态保护红线	生态空间分布	生态保护红线占用	生态保护红线		是否	空间网格
		一般生态空间占用	一般生态空间		是否	空间网格
环境质量底线	大气环境	PM <sub>2.5</sub> 年均浓度/ PM <sub>2.5</sub> 排放量	PM <sub>2.5</sub> 浓度目标/允许排放量	μg/m <sup>3</sup> (t/a)	—	区县
		SO <sub>2</sub> 年均浓度/ SO <sub>2</sub> 排放量	SO <sub>2</sub> 浓度目标/允许排放量	μg/m <sup>3</sup> (t/a)	—	区县
		NO <sub>x</sub> 年均浓度/NO <sub>x</sub> 排放量	NO <sub>x</sub> 浓度目标/允许排放量	μg/m <sup>3</sup> (t/a)	—	区县
		O <sub>3</sub> 年均浓度	O <sub>3</sub> 浓度目标	μg/m <sup>3</sup>	—	区县
		VOCs 排放量	VOCs 允许排放量	t/a	—	区县
		NH <sub>3</sub> 排放量	NH <sub>3</sub> 允许排放量	t/a	—	区县
	水环境	化学需氧量排放量	化学需氧量允许排放量	t/a	—	控制单元
		氨氮排放量	氨氮允许排放量	t/a	—	控制单元
		TP 排放量	TP 允许排放量	t/a	—	控制单元
		TN 排放量	TN 允许排放量	t/a	—	控制单元
		存在农用地污染风险重点管控区	农用地污染风险重点管控区		是否	空间网格
	土壤环境	存在污染地块或疑似污染地块	污染地块或疑似污染地块		是否	空间网格
资源利用上线	能源	能源消耗总量	阶段考核目标	万吨标准煤	+	区县
		煤炭消费总量	阶段考核目标	万吨标准煤	—	区县
		万元 GDP 能耗/万元 GDP 能耗降低	阶段考核目标	吨标准煤/%	+	区县
	水资源	用水总量	阶段考核目标	亿 m <sup>3</sup>	—	区县/乡镇
		地下水用水量	阶段考核目标	亿 m <sup>3</sup>	—	区县/乡镇
		万元工业增加值用水量/万元工业增加 值用水量下降幅度	阶段考核目标	m <sup>3</sup> /%	+	区县/乡镇
		万元 GDP 用水量/万元 GDP 用水量 下降幅度	阶段考核目标	m <sup>3</sup> /%	+	区县/乡镇
		农田灌溉水有效利用系数	阶段考核目标		+	区县/乡镇
		建设用地总规模	阶段考核目标	km <sup>2</sup>	—	区县/乡镇
	土地资源	耕地保有量	阶段考核目标	万亩	+	区县/乡镇
		永久基本农田面积	阶段考核目标	万亩	+	区县/乡镇

说明: “+”、“-”类指标中, “+”、“-”代表相应指标对生态承载力与产业布局一致性的作用方向。“+”代表指标越大, 越有利于两者间的一致性; “-”代表指标越大, 越不利于两者间的一致性; “是否”类指标中, 如果是, 就定义为超载; 如果不是, 该指标不参与一致性评价。阈值设定为“阶段考核目标”的指标, 该阈值采用其主管部门(自然资源部门和水利部门等)确定的阶段目标。

游饮用水水源保护区(青浦区)等生态空间, 属于环境管控的优先保护区, 通过遥感影像和土地利用类型判定是否存在冲突区域。分析结果表明, 青浦区目前不存在冲突区域, 生态空间维持良好。该区域注重淀山湖及黄浦江上游水源地生态保护, 严格实施项目准入及现有项目退出, 禁止设置畜禽养殖场等污染性生产活动, 区域环境管控要求严格, 产业园区布局与生态空间的一致性较好。

青浦区主要涉及淀峰、黄渡、临江和太浦河桥 4 个水环境控制单元, 根据“三线一单”成果和《青浦区生态环境状况公报》等统计结果可知, 青浦区

的主要水环境污染物为氨氮、总磷和化学需氧量, 故单因素生态承载力主要考虑这 3 个指标(表 2)。图 3 显示, 4 个水环境控制单元对氨氮、总磷和化学需氧量的承载率均大于 1, 水环境整体上呈超载状态, 主要是由于人口和产业承载压力大, 城镇生活污染、农村面源污染及工业污染物的排放没有得到有效的管控和处理。工业方面, 存在废水直接排入环境的情况; 农业方面, 青浦区仍然存在规模化畜禽养殖场, 同时有大量设施菜地等高污染种植方式需要调整, 农业面源导致的水体污染现象仍然存在, 农业面源污染控制力度有待加强。

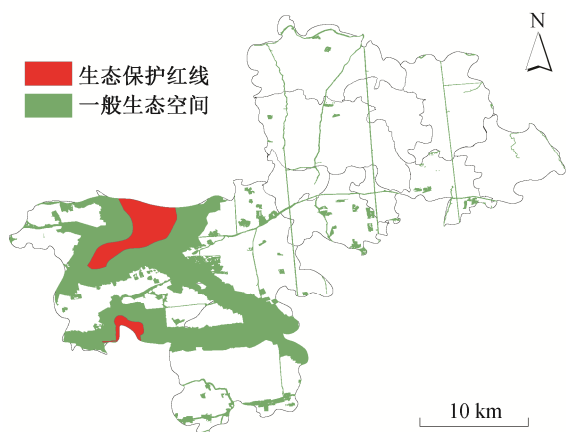


图2 青浦区生态空间分布  
Fig. 2 Ecological spatial distribution of Qingpu District

大气环境主要考虑  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和 VOCs 四项指标。由于缺少污染源排放清单数据，故本研究选择大气高排放区作为超载区进行赋值计算，其他区域采用各指标均值。根据青浦区大气环境主要指标的排放现状以及“三线一单”中规定的大气污染物允许排放量，计算得到大气环境单因素生态承载率(表3)。结果显示，在承载率大小方面，除  $\text{PM}_{2.5}$  的承载率小于1外，其他三项污染物均使大气环境存在超载情况，其中  $\text{SO}_2$  和 VOCs 超载最严重；在空

间分布方面，以上污染物带来的生态超载问题集中在青浦区工业园区范围内(图4)。目前，青浦区正处于产业转型升级的阶段，但仍然以传统工业类型为主，涂料生产、合成材料、有机化工、设备涂装、电子设备、木材加工和家具制造等行业对大气环境的生态承载力影响较大。

对于土壤环境，主要考虑产业布局是否与农用地污染风险重点管控区、污染地块或疑似污染地块产生空间上的冲突。根据“三线一单”已有成果和工业园区布局范围，青浦区不涉及产业布局侵占土壤污染风险重点管控区的问题。由于涉及“三线一单”成果属于保密资料，本文不展示相关数据和图件。

3.3 综合生态承载力评价

基于上述单因素生态承载力评价的结果计算区域综合承载力，结果如图5所示。青浦区生态承载力绝大部分呈超载状态，东部、北部和西部综合生态承载力指数均大于1，说明产业发展对当地的大气环境、水环境造成较大的承载压力，超载较为严重的区域集中在工业园区范围内；仅南部的练塘镇存在综合指数小于1的不超载区域，说明其开发强度与其生态承载力基本上协调。整体而言，青浦区的生态承载力受到产业布局的显著影响，生态承

表2 水环境控制单元主要指标排放现状、容量和生态承载率(万吨)  
Table 2 Discharge status, capacity and ecological carrying rate of main indicators of water environment control units ( $10^4$  tons)

控制单元	氨氮			总磷			化学需氧量		
	排放现状	容量	生态承载率	排放现状	容量	生态承载率	排放现状	容量	生态承载率
淀峰	0.022	0.016	1.3750	0.009	0.008	1.1250	0.488	0.414	1.1787
黄渡	0.126	0.094	1.3404	0.038	0.033	1.1515	2.382	2.040	1.1676
临江	0.305	0.227	1.3436	0.088	0.076	1.1579	5.694	4.875	1.1680
太浦河桥	0.012	0.009	1.3333	0.004	0.004	1.0000	0.195	0.167	1.1677

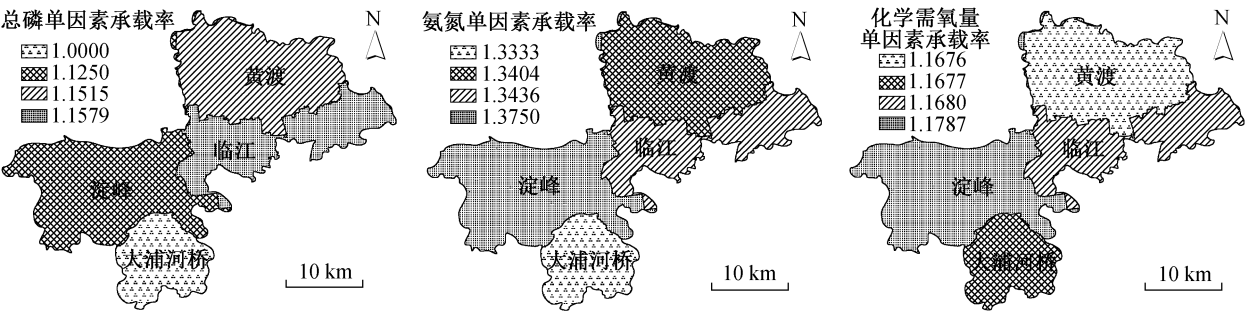


图3 水环境控制单元及单因素承载率分布情况  
Fig. 3 Distribution of water environment control units and single factor carrying rate

**表 3 大气环境主要指标排放现状、容量和承载率(万吨)**  
Table 3 Discharge status, capacity and ecological carrying rate of main indicators of atmospheric environment ( $10^4$  tons)

大气环境指标	排放现状	容量	生态承载率
二氧化硫	0.07	0.0447	1.5656
氮氧化物	0.05	0.0396	1.2626
PM <sub>2.5</sub>	0.02	0.0228	0.8772
VOCs	3.12	2.0008	1.5594

载力与产业布局的一致性较差。

将综合生态承载力超载严重的区域与“三线一单”成果中青浦区的环境管控单元(图略)相比较,可知大气环境和水环境生态超载范围与重点管控区及一般管控区的空间范围整体上吻合,淀山湖和黄浦江上游水源地的生态保护红线范围为青浦区环境管控的优先保护区,体现关键限制因素对生态承载力的重要影响。整体而言,本研究的综合生态承载力评价结果与青浦区环境管控单元以及未来生态环境管理的方向一致,选取的评价指标符合当地实际情况且较为关键,能客观地反映产业布局与生态承载力间的关系。

在青浦区未来的发展中,应该重点加强青浦工业区的管控,提高污染物治理水平,加强污染物排放控制,严格执行污染物总量替代要求,同时强化

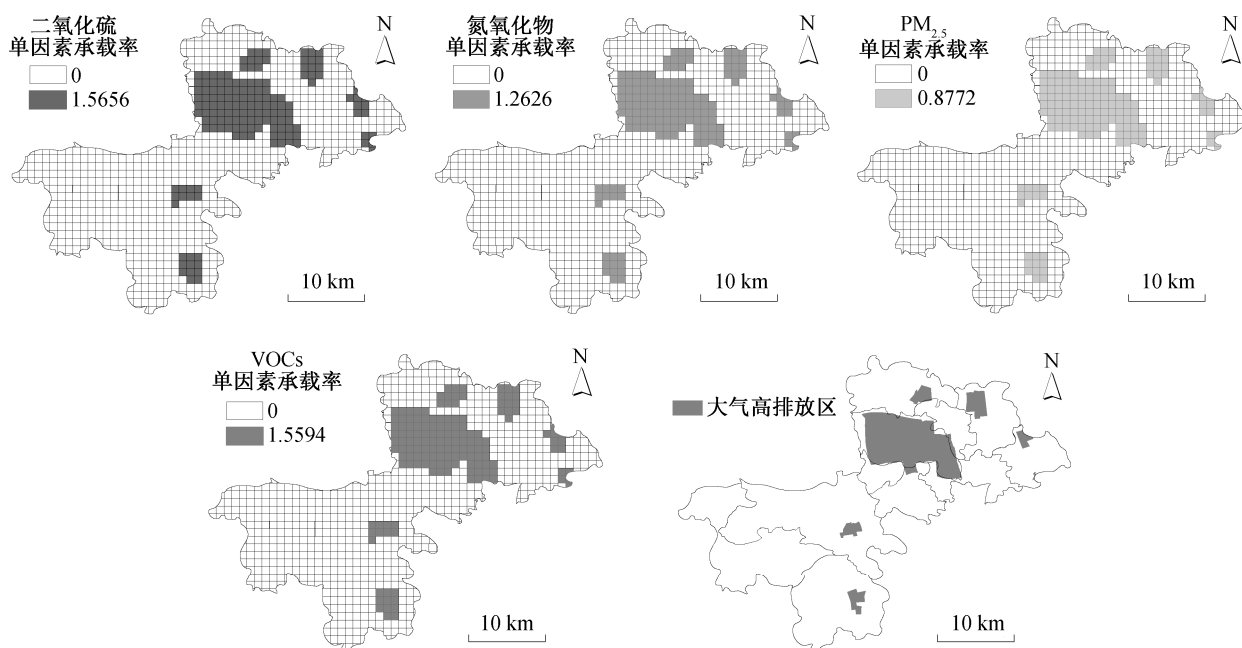
白鹤镇工业园区、华新工业园区、徐泾绿色工业园区、练塘镇绿色产业园和朱家角产业地块的管控,持续降低污染物排放水平。

## 4 结论与建议

用单因素生态承载率法分别量化各个指标,能够清晰地反映区域社会经济活动与资源环境的协调程度以及关键限制性因素。基于单因素生态承载率,计算综合生态承载率指数,能更加直观地说明区域产业对生态承载力的累积影响。

单因素生态承载率计算结果表明,青浦区产业布局与生态空间和土壤环境生态承载力的冲突较小,但是产业发展造成的污染物排放问题给水环境和大气环境带来较大的环境压力。综合生态承载率计算结果表明,青浦区生态环境整体上呈超载状态,生态承载力与产业布局的一致性较弱。

产业布局一致性评价结果与青浦区环境管控单元划定成果的一致性较高,超载的重点区域集中在重点管控单元,表明该指标体系客观可行,可为相关评价和研究工作提供参考,可推广至全国。对于一致性问题突出区域,建议加强主要工业园区的污染物排放管控,结合区域生态承载力的实际情况,制订相应的产业准入门槛、产业规模控制以及产业发展方向引导等调控对策。



**图 4 大气环境单因素承载率分布情况**

**Fig. 4 Distribution of single factor carrying rate of atmospheric environment**

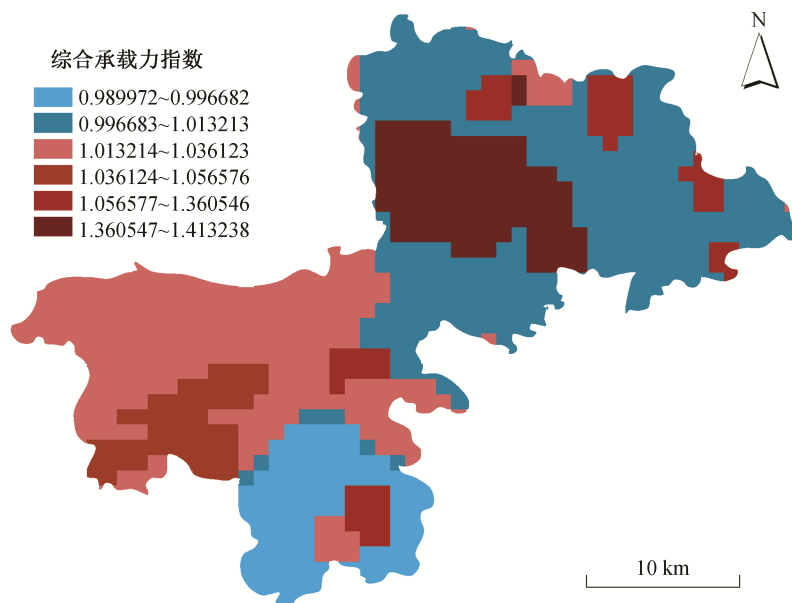


图5 青浦区综合承载力评价结果(1 km 分辨率)

Fig. 5 Comprehensive ecological carrying capacity of Qingpu District (1 km resolution)

### 参考文献

- [1] 邬娜, 傅泽强, 谢园园, 等. 基于生态承载力的产业布局优化研究进展述评. 生态经济, 2015, 31(5): 21-25
- [2] 高吉喜, 陈圣宾. 依据生态承载力优化国土空间开发格局. 环境保护, 2014, 42(24): 12-18
- [3] 覃玲玲, 周兴. 基于生态承载力的产业布局与结构优化研究. 安徽农业科学, 2011, 39(16): 9822-9826
- [4] 高吉喜. 可持续发展理论探索: 生态承载力理论、方法与应用. 北京: 中国环境科学出版社, 2001
- [5] 霍文敏, 陈甲斌. 资源开发区生态承载力与产业一致性评价——以鄂尔多斯市为例. 中国国土资源经济, 2020, 33(3): 75-81
- [6] 王维, 江源, 张林波, 等. 基于生态承载力的成都产业空间布局研究. 环境科学研究, 2010, 23(3): 333-339
- [7] 韩永伟, 高吉喜, 李辉, 等. 宁东能源化工基地规划产业布局的生态适宜性分析. 环境科学管理, 2007, 32(11): 142-147
- [8] 牟雪洁, 饶胜, 张箫, 等. 产业发展与生态承载力一致性评价的理论与技术框架构建. 生态经济, 2020, 36(3): 45-50
- [9] 张雪花, 李建, 张宏伟. 基于能值-生态足迹整合模型的城市生态性评价方法研究——以天津市为例. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(2): 344-352
- [10] 陆文涛, 付正辉, 郭怀成, 等. 基于空间网格的区域生态承载力与产业布局一致性评价. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(5): 971-974
- [11] 曹智, 闵庆文, 刘某承, 等. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用. 自然资源学报, 2015, 30(1): 1-11