

# 水生态空间时空演变特征与驱动机制研究

## ——以2000—2020年长三角地区为例

张培贤<sup>1\*</sup>, 米梓豪<sup>1</sup>

(1.中南大学建筑与艺术学院, 湖南省长沙市, 410083; \*通讯作者, 2078809223@qq.com)

**摘要:**本研究以长三角城市群为研究对象, 基于2000—2020年多源空间数据, 综合运用空间分析与回归模型, 系统揭示水生态空间格局演变特征及其驱动机制。结果表明: 长三角水生态空间呈现“先减后增”的阶段性演变特征, 与长江经济带生态保护战略形成时空响应; 水生态空间与农业、城镇空间交互转换剧烈, 经济发达区域空间冲突尤为突出; 空间演变受自然地理与社会经济因素双重驱动, 地形地貌与气候条件则调控特定区域的转换强度。研究建议建立基于主体功能区划的差异化管控体系, 重点协调城镇扩张与生态保护矛盾, 为长三角生态空间治理提供科学支撑。

**关键词:** 长三角城市群; 水生态空间格局演变; 国土空间转换; 驱动机制

## 引言

水生态空间是生态文明的载体, 生态空间的关键组成部分, 是国土空间的核心构成要素。严格水生态空间管控, 是建立“多规合一”空间规划体系和推动生态文明建设的重要内容[1]。然而, 近年来频繁剧烈人类活动深刻改变了国土空间格局, 对水生态空间服务功能影响深远[2]。同时目前国内水生态空间的研究多服务于管控体系层面与管理目的, 缺乏时间与空间上对水空间格局演变的探究。探索长时间序列水空间格局的变化规律以及影响要素, 能够为“三生”功能分类体系与用途管制探索高效实践路径。

国外学者对于江河流域附近水空间格局的研究主要集中在水生态空间产生的空间效应以及生境检测[3], 水生态空间治理[4], 生态修复等方面[5]。国内研究主要针对水生态空间的管控[6], 针对长时间序列的分析不足。研究多局限于当前时间段或某一特定时间段的功能格局分析, 缺乏时空演变整体规律的探析。同时, 现有成果仍多集中构建的在水利部、国土资源部构建的水生态管控体系框架与流域水生态空间用途管控机制[7], 对于演变规律及其影响因素的探究不足。随着长三角地区城镇化和工业化的推进, 水生态空间日益缩减, 由此导致的“四水问题”——水环境恶化、水生态受损、水资源不均和水旱灾害频发逐渐成为制约区域经济社会发展的瓶颈。

鉴于此, 本文以长三角城市群为研究对象, 基于江苏省、浙江省、安徽省、上海市《主体功能区规划》分析2000—2020年水生态空间格局时空演变特征, 探究其转换规律以及影响因素, 以期弥补长三角地区长时间序列语境下水生态空间的研究缺失, 为生态环境治理、水生态空间用途管控以及相关规划编制提供有益借鉴。

## 1. 研究区域概况与资料来源

### 1.1. 研究区概况

长三角地区水资源与水空间类型丰富, 主要分布有长江流域、淮河流域和东南诸河3个水资源一级区, 面积分别占总面积的35%、37%、28%[8]。包括上海、南京、杭州、合肥等共26个地级、直辖市。

### 1.2. 资料来源

三期(2000、2010、2020年)长三角国土空间分区以及水生态空间分布格局基础地表覆盖数据来源于自然资源部全球30m地表覆盖数据产品GlobeLand30数据集, 通过将原始数据在ArcGIS pro中处理后得到研

究区各期水生态空间及其他空间类型分布以及规模数据。社会经济数据来源于各年度《中国县域统计年鉴（县市卷）》和所涉及三省一市统计年鉴；气温、降水量、日照时数等自然数据来源于国家气象科学数据中心。行政边界分区以及水系、道路情况等数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心。

## 2. 研究方法

### 2.1. 水生态空间格局变化测度

#### 2.1.1. 水生态空间时空变化特征

针对水生态格局整体演化特征，本文采用标准差椭圆法（SDE）分析长三角地区水生态空间的分布范围、方位以及聚集程度，利用标准差椭圆来汇总水生态空间的空间特征，即中心趋势、离散和方向趋势。椭圆表示数据分布方向、分布范围，椭圆中心点表示水生态空间分布中心点。通过重心分析法的重心点偏移方位以及偏移距离刻画水生态空间变动的方向性特征。（见图1，图2，图3）此外，针对空间变化程度的测度，定义水生态空间变化强度指数（WCI），得到变化强度情况（见图4，图5，图6），计算公式（1）为：

$$WCI = \frac{S_{t1} - S_{t0}}{S_{t0}} \times 100 \quad (1)$$

（式（1）中： $S_{t1}$ 、 $S_{t0}$ 分别是后期、前期的水生态空间规模， $WCI$ 越大，说明水空间变化强度越大， $WCI$ 越小，则说明该地水空间变化强度越小， $WCI$ 取值范围为[-1,1]）

#### 2.1.2. 水生态空间与其他空间转化特征

对于水生态空间与其他类型空间转化的方向和规模情况，本文采用空间转移矩阵进行分析，采用 ArcGIS pro的空间统计工具对水生态空间转换进行处理，并在 Excel中构建转移矩阵，具体公式不再赘述。

### 2.2. 水生态格局变化影响要素分析方法

对于影响因子的选取，本文综合考虑水环境自身的演化特点以及水空间与其他类型空间交叉转换特征，采用整体视角将水空间置入国土空间体系中分析研究，并从自然地理因素与社会经济因素两个维度选取了共12个指标进行分析，分别为总人口数、城镇化率、地区生产总值、一产增加值、二产增加值、三产增加值、平均人口密度7个社会经济指标以及平均海拔、平均坡度、地形起伏度、平均降水量、平均气温、平均日照时数5个自然地理指标。

本文选用最小二乘回归模型（OLS）进行初步回归分析，根据回归结果比较Lagrange Multiplier（error）和Lagrange Multiplier（lag），如果前者较后者在统计上更加显著，说明转换规模存在空间依赖性，选择空间滞后模型（SLM）进行进一步分析；反之，则说明转换规模随空间效应影响到其他单元，选择空间误差模型（SEM）进行进一步分析。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 整体格局演化特征

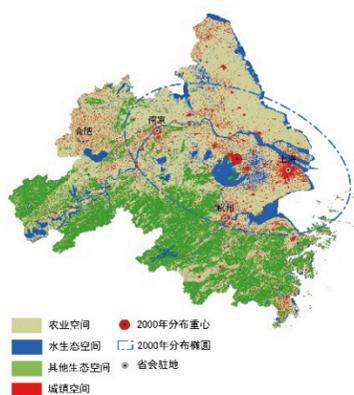


图1 2000 水生态空间时空分布格局

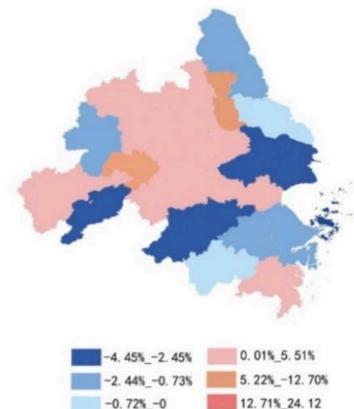


图4 00-10 水生态空间变化强度

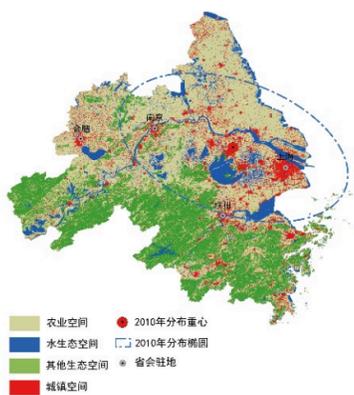


图2 2010 水生态空间时空分布格局

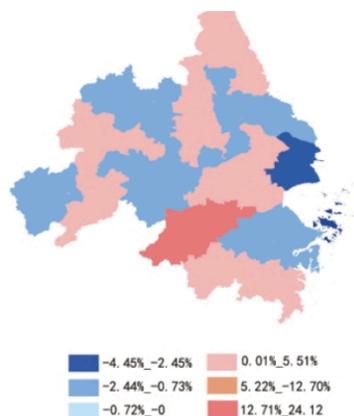


图5 10-20 水生态空间变化强度

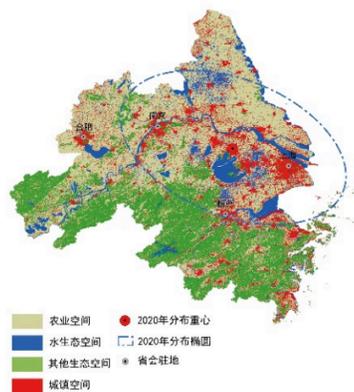


图3 2020 水生态空间时空分布格局

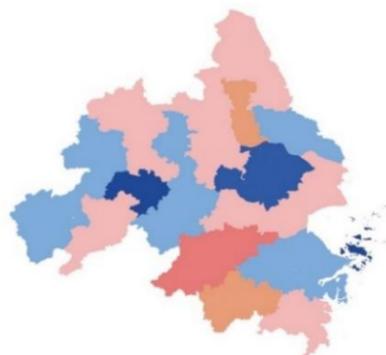


图6 00-20 水生态空间变化强度

表1 2000、2010、2020 年长三角地区水生态空间数据

水生态 空间分类	2000年 空间面积 (km <sup>2</sup> )	2010年 空间面积 (km <sup>2</sup> )	2020年 空间面积 (km <sup>2</sup> )	2000~2020 年 空间面积总量变化 (km <sup>2</sup> )	2000~2020 年 空间面积变化幅度 (%)
水域空间	24147.85	23416.17	24376.80	228.95	0.9
湿地空间	5621.36	5512.66	5729.35	107.99	1.9

2000年, 长三角地区水域面积为24147.85平方公里, 2010年水域面积下降到23416.17平方公里, 减少了731.68平方公里, 下降比例为3%, 2000年, 长三角地区湿地面积为5621.36平方公里, 2010年湿地面积下降到5512.66平方公里, 减少了108.7平方公里, 下降比例为1.9%。相较于2010年, 2020年水域面积增加至24376.80平方公里, 增加了960.63平方公里, 上升比例为4.1%。湿地面积增加至5729.35平方公里, 增加了216.69平方公里, 上升比例为3.9%。2000年到2020年, 水域面积增加了228.95平方公里, 增加比例为0.9%。湿地面积增加了107.99平方公里, 上升比例为1.9% (见表1)。

由2000—2020年长三角地区水生态空间的时空分布及变化强度可见, 近20年长三角地区水生态空间的空间分布重心在常州, 未发生明显变动。在快速城市化的沿海城市及皖北和苏北的黄淮平原地区存在部分退化情况, 而与之相对应的就是城市用地的大幅增加。比较特别的是, 扬州地区水生态空间有比较明显的增多, 这得益于二十一世纪扬州古运河以及生态江河的保护与合理开发。整体来看, 长三角地区2010—2020年水生态空间规模变化较2000—2010年更为剧烈, 且存在着明显的前十年水生态空间略微减少, 后十年略微增加的态势。这也与长江经济带同时期所强调的“共抓大保护、不搞大开发, 以生态优先、绿色发展为引领”的生态发展战略契合。

### 3.2. 时空交叉转换特征

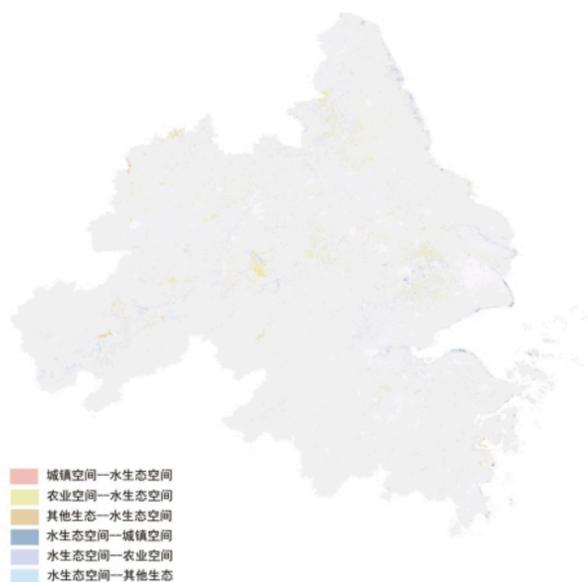


图7 2000-2020年水生态空间转换情况

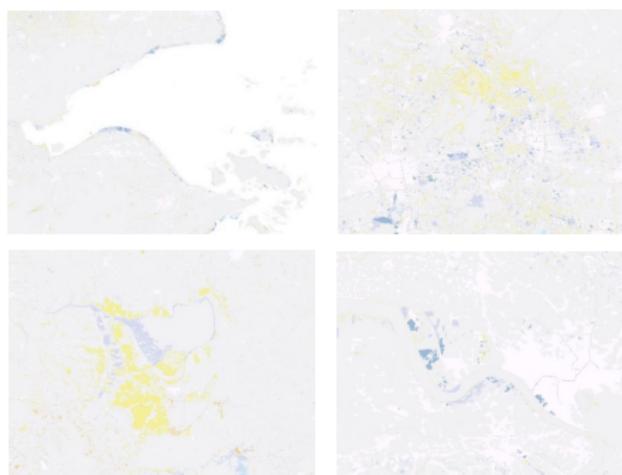


图8 水生态空间局部转换情况

总体格局上, 长三角地区水生态空间转化活跃, 近20年长三角地区农业空间向水生态空间转入6423.10km<sup>2</sup>, 同时水生态空间向农业空间转化了5252.81km<sup>2</sup>, 主要发生在东部沿海发达城市以及省会城市附

近。水生态空间主要被城镇空间侵占，在转出2021.24km<sup>2</sup>的同时仅有283.73km<sup>2</sup>城镇空间转入水生态空间（见表2）。生态空间向其他类型空间的转换主要发生在沿江沿海地区，与长江保护性开发相契合。水生态空间与城镇空间的交叉转换面积总体呈上升趋势，表明城镇化进程对水生态空间的影响逐渐增强。而水生态空间与农业空间的交叉转换面积略有波动，但仍保持相对较高水平，表明农业活动对水生态空间的影响仍然存在。综合来看，长三角地区农业空间、城镇空间与水生态空间之间存在剧烈冲突，经济发达、城市化水平高的地区水生态空间受其他因素干扰程度更为剧烈。（见图7，图8）

表2 2000—2020年长三角地区水生态空间转换数据

转换情况	水生态空间转入			水生态空间转出		
	城镇→ 水生态空间	农业→ 水生态空间	其他生态→ 水生态空间	水生态→ 城镇空间	水生态→ 农业空间	水生态→ 其他生态空间
转换规模 (km <sup>2</sup> )	283.73	6423.10	1457.41	2021.24	5252.81	561.26

## 4. 驱动因素分析

### 4.1. 模型选择

通过研究表3可以得出，在空间依赖性检验中发现不同方向的水生态空间交叉转换显著性不同，应综合两种模型共同解释。其中：水生态空间与城镇空间之间转换规模随空间效应影响到其他单元，选择SEM模型进行解释，农业空间、其他生态空间和水生态空间之间转换规模存在空间依赖性，选择SLM模型进行解释。具体分析结果见表4。

表3 长三角地区水生态空间交叉转换的空间依赖性检验

空间依赖性检验	城镇→ 水生态空间	农业→ 水生态空间	其他生态→ 水生态空间	水生态→ 城镇空间	水生态→ 农业空间	水生态→ 其他生态空间
LM-Error	38.41 <sup>***</sup>	355.29 <sup>***</sup>	185.65 <sup>***</sup>	75.91 <sup>***</sup>	293.49 <sup>***</sup>	92.56 <sup>***</sup>
LM-Lag	45.39 <sup>***</sup>	351.65 <sup>***</sup>	176.37 <sup>***</sup>	91.06 <sup>***</sup>	284.19 <sup>***</sup>	82.20 <sup>***</sup>
Robust LM-Error	1.30	8.74 <sup>***</sup>	9.42 <sup>***</sup>	0.04	11.42 <sup>***</sup>	16.76 <sup>***</sup>
Robust LM-Lag	8.28 <sup>***</sup>	5.10 <sup>**</sup>	0.14	15.19 <sup>***</sup>	2.12	6.40 <sup>**</sup>

（\*表示在10%置信水平下显著；\*\*表示在5%置信水平下显著；\*\*\*表示在1%置信水平下显著；其他无显著相关性。）

表4 长三角地区水生态空间交叉转换与影响分子的空间回归分析结果

因子类型	影响类型	城镇→ 水生态空间		农业→ 水生态空间		其他生态→ 水生态空间		水生态→ 城镇空间		水生态→ 农业空间		水生态→ 其他生态空间	
		SLM	SEM	SLM	SEM	SLM	SEM	SLM	SEM	SLM	SEM	SLM	SEM
自然地理	平均海拔	-202.95**	-301.49**	-2480.40	-7123.46**	89.99	1419.90	-526.33	-1366.05	-1159.36	-6367.82	6504.01***	13579.10***
	平均坡度	15757.70	16341.80	259519.00	151977.00	898288.00***	-1307000.00***	-106941.00	-7446.12	-166171.00	317113.00	1200320.00***	1782660.00**
	地形起伏度	-69.01	-76.60	-1104.31	1366.39	4647.22	6281.28	311.39	-416.32	-1327.64	-2323.29	5846.74***	6915.23***
	平均降水量	20.09	12.82	44871.00	-184.56	498.07	710.61	106.44	149.42	378.25	231974.00	1096.16***	1896.59**
	平均气温	-62750.60**	72046.70**	-715343.00	-688848.00	-783117.00	1049090.00	-314334.00	-413109.00	-539619.00	-799196.00	12489.60**	19492.50**
	平均日照时数	419.23***	575.80***	5606.71**	10948.40*	165.35	1895.38	2656.08***	4686.65***	5937.62*	11257.30	-1692.26	-2637.34
	总人口	-0.19	-0.19	-8.23**	-9.48**	-0.89	-0.4	0.8	0.84	-1.08	-0.96	-2.3	-127
社会经济	城镇化率	91953.20	-172968.00	573278.00	2831150.00	38920.20	40485.60	11655.80	8937.68	-1353350.00	-3259920.00	-62187.80	-66961.90
	地区生产总值	81.24	66.67	3712.76	4904.81	-1899.12	-86.70	-2890.84*	-5009.79***	20207.80***	25905.70***	-190.12	227.85
	一产增加值	8385.30***	9564.29***	25217.60***	30119.10***	33472.40	54266.90	30881.20**	30645.20*	117220.00**	136507.00**	27492.80	-18406.30
	二产增加值	462.19	456.99	-858.61	-3020.99	1224.84	71.99	13056.9***	14394.50***	21111.10**	-27815.10***	3053.62	2563.43
	三产增加值	379.14	423.66	-3610.77	-4844.85	-15.87	-2630.85	614.9	2914.26	-23929.90***	31748.20***	923.53	-753.74
平均人口密度	-55.86**	-58.99**	-585.61	-940.49	-58.35	14.27	-371.23**	-433.66**	-1162.96*	-1303.10	-141.71	7.99	

(\*表示在10%置信水平下显著；\*\*表示在5%置信水平下显著；\*\*\*表示在1%置信水平下显著；其他无显著相关性。)

#### 4.2. 水生态空间—城镇空间

水生态空间与城镇空间之间的相互转换受到社会经济因素与自然地理因素的双重影响，具体表现为水生态空间转城镇空间与平均日照时数、二产增加值在1%置信水平下显著正相关，与一产增加值在5%置信水平下显著正相关，与平均气温和地区生产总值在10%置信水平下显著负相关。综合来看受社会经济因素的影响更为显著；沿江沿湖以及沿河适宜开发的区域优先开发为城镇用地，以解决快速城镇化带来的用地问题，以杭州为代表的水网密集型城市这种转变尤为显著，以财政支出为支撑的“填海、填湖造地”是其主要表现形式；另一方面城镇空间向水生态空间退化与平均日照时数和一产增加值在1%置信水平下显著正相关，与平均海拔、平均气温和平均人口密度在5%置信水平下显著负相关。该类集聚发生在皖北、苏北等平均人口密度小、远离区域中心的地区，这些地区平均人口密度小、远离区域中心，大量人口向城市转移，导致用地的需求减少，气候条件合宜的城镇空间由于长时间荒废，自然演化为水生态空间，形成多样动植物群落。

### 4.3. 水生态空间—农业空间

农业空间—水生态空间之间的交叉转换是长三角城市群近二十年来用地转换的主导类型，水生态空间向农业空间转化从研究成果可以看出其仅受社会经济因素的影响：与地区生产总值在1%置信水平下显著正相关，与二产增加值和三产增加值在1%置信水平下显著负相关，与一产增加值在5%置信水平下显著正相关，说明在以第一产业为主要产业、二三产业不发达的地区更加关注水生态空间的农业效益，因此更加倾向于将水生态空间改造为农业空间以实现农业生产总值增加与经济发展；而另一方面农业空间向水生态空间转化受到自然环境与社会经济因素的共同驱动：与一产增加值在1%置信水平下显著正相关，与平均海拔和总人口在5%置信水平下显著负相关，与平均日照时数在10%置信水平下显著正相关。表现为在交通较为发达，环境较好的农村地区由于农村人口大量涌入城市，农田废置，转化为水生态空间，以皖北、苏北地区为典型。

### 4.4. 水生态空间—其他生态空间

自然地理条件是水生态空间与其他生态空间（主要为林地）交叉转换主导影响因素。其他生态空间向水生态空间转化在自然地理因素中，与地形起伏度在1%置信水平下显著正相关，与平均坡度在1%置信水平下显著负相关，与平均气温在10%置信水平下显著负相关。而在社会经济方面仅与一产增加值在10%置信水平下呈正相关；而水生态空间向其他生态空间转化仅受自然地理因素影响：与平均海拔、地形起伏度和平均降水量在1%置信水平下显著正相关，与平均坡度在1%置信水平下显著负相关，与平均气温在5%置信水平下显著负相关。长三角地区中水生态空间向其他生态空间转化主要发生在海拔高、地形落差大、降水丰富、坡度较小的区域，这些区域较少受到人为因素的干扰，地势落差较大，不易形成大规模的地表蓄水空间。

## 5. 结论与展望

### 5.1. 结论

本研究系统揭示了2000—2020年长三角地区水生态空间格局的时空演变特征与驱动机制，主要结论如下：

（1）水生态空间规模呈现“先减后增”的阶段特征，与长江经济带生态保护战略形成时空响应。前十年（2000—2010年）受城镇化快速扩张影响，水域与湿地空间分别减少3%和1.9%；后十年（2010—2020年）在“共抓大保护”政策驱动下，水域与湿地面积分别回升4.1%和3.9%，空间分布重心保持稳定，但变化强度显著增强，表明生态修复政策对空间格局具有重塑作用。

（2）水生态空间与农业、城镇空间交互转换剧烈，空间冲突呈现区域分异。近20年水生态空间被城镇侵占面积达2021.24 km<sup>2</sup>，而农业空间与水生态空间双向转换规模超1.1万km<sup>2</sup>，经济发达地区冲突尤为突出。扬州等局部区域通过生态修复实现水空间增长，揭示了人为干预对空间优化的可能性。

（3）空间演变受自然-社会要素耦合驱动，社会经济因素主导转换方向，自然条件调控转换强度。产业升级（二产增加值）与人口集聚推动城镇空间扩张，而一产增加值驱动农业与水生态空间互转；地形起伏度、降水量等自然因子通过坡度阻隔与水资源赋存，约束高海拔区域的空间转换强度，形成“社会需求引导方向—自然基底限制规模”的驱动机制。

### 5.2. 展望

（1）研究局限性：当前驱动机制分析基于县域尺度统计数据，未能深入解析微观主体=行为对空间转换的影响；长时序遥感数据受分辨率限制，可能低估小规模水域的动态变化；此外，政策文本量化与空间规划的传导效应尚未纳入模型，可能弱化制度性因素的解释力。

（2）未来研究方向：从三方面深化研究：①构建多尺度嵌套分析框架，融合遥感大数据与社会感知数据，揭示“宏观政策—中观规划—微观行为”的级联驱动效应；②引入机器学习模型（如随机森林、地理加权回归），解析自然与社会要素的非线性交互机制；③拓展“水—陆—气”耦合模拟，评估碳中和目标下生态空间演变的气候反馈效应，为国土空间适应性规划提供理论支撑。

（3）实践启示：亟需建立“分区—分类—分级”管控体系，对长三角核心城市群实施城镇开发红线刚性约束，在皖北、苏北等农业主导区推行生态农田占补平衡机制，并通过生态补偿制度协调跨行政区利益冲突，最终实现水生态空间“量—质—效”协同提升。

## 参考文献

- [1] 李胜华, 罗欢, 吴琼, 胡秀花. 珠江河口水生态空间管控研究意义及研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学)

- [2] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系 [J]. 生态学报, 2017, 37(02):341-348.
- [3] Aina G. G, Bárbara O, Araceli P, et al. Environmental risk assessment of water quality in harbor areas: A new methodology applied to European ports [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 155: 77-78.
- [4] Chitresh S, Binaya K M, Pankaj K. Integrated urban water management scenario modeling for sustainable water governance in Kathmandu Valley, Nepal [J]. *Sustainability Science*, 2017, 12(6): 1037-1053.
- [5] Baltodano A, Agramont A, Reusen I, et al. Land cover change and water quality: How remote sensing can help understand driver-impact relations in the Lake Titicaca Basin [J]. *Water*, 2022, 14(7):1021-1021.
- [6] 刘伟, 杨晴, 张梦然, 赵伟, 翟媛. 构建以流域为基础的水生态空间管控体系研究 [J]. *中国水利*, 2018, (05):27-31.
- [7] 卜慧, 王政祥, 李季琼, 季俊杰, 刘海滢. 长三角地区水资源空间格局及配置公平性研究 [C]//中国水利学会. 中国水利学会2021学术年会论文集第一分册. 长江水利委员会水文局, 武汉长科设计有限公司, 长江水利委员会长江科学院, 江苏省河道管理局, 中国水利水电科学研究院. 2021:8. DOI:10. 26914/c. cnkihy. 2021. 057351
- [8] 姚国慧, 李海东, 吴京, 王楠, 刘臣炜. 基于遥感生态指数和综合夜间灯光指数的生态文明示范区生态环境与城市化耦合协调度研究:以长江三角洲为例 [J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(11):1386-1398. DOI:10. 19741/j. issn. 1673-4831. 2023. 0131