

基于InVEST模型的淀山湖片区生境质量评估及景观优化研究

Assessment of Habitat Quality and Landscape Optimization in Dianshan Lake Area Based on the InVEST Model

周维世 翟 俊*
ZHOU Weishi ZHAI Jun*

(苏州大学金螳螂建筑学院, 苏州大学—苏州园科集团建筑与城市环境协同创新中心, 苏州 215127)
(Gold Mantis School of Architecture, Soochow University, Soochow University-Suzhou Garden Science Group Architecture and Urban Environment Collaborative Innovation Center, Suzhou, Jiangsu, China, 215127)

文章编号: 1000-0283(2024)02-0062-10
DOI: 10. 12193/j. laing. 2024. 02. 0062. 008
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2023-08-04
修回日期: 2023-11-08

摘 要

随着城市化和农业规模化加剧, 自然流域遭到破坏, 生态环境面临严重威胁。基于开源软件InVEST模型对淀山湖片区2015年和2022年的生境质量进行评估。结果表明, 城市化与农业扩张对生态系统造成了较大影响, 导致淀山湖生境质量整体下降。针对不同的威胁因素与退化程度, 总结出5种景观优化策略, 并以柳河上游沿岸为例, 进行景观设计改造。总体上说, 采用的生态模型评估方法提供了淀山湖片区生境质量的时空分布信息, 并以案例设计为决策者提供参考, 有助于改进城市规划和 development, 促进城市河湖沿线生境保护。

关键词

土地利用变化; InVEST模型; 生境质量; 景观策略; 生态修复; 淀山湖

Abstract

With the intensification of urbanization and agricultural scale, natural watersheds have been damaged, and the ecological environment faces serious threats. Therefore, the open-source software InVEST was used to assess the habitat quality in the Dianshan Lake area in 2015 and 2022. The results showed that urbanization and agricultural expansion had a significant impact on the ecosystem, leading to an overall decline in habitat quality in Dianshan Lake. According to different threat factors and degradation degree, five landscape optimization strategies are summarized and conducted landscape design renovation along the upstream coast of the Liu River as an example. In general, the adopted ecological model assessment method provides the spatial and temporal distribution information of habitat quality in Dianshan Lake area, and provides reference significance for decision makers with case design, which is helpful to improve urban planning and development to improve habitat conservation along the urban rivers.

Keywords

land-use change; InVEST model; habitat quality; landscape strategies; ecological restoration; Dianshan Lake

周维世

1999年生/男/安徽合肥人/在读硕士研究生/研究方向风景园林规划与设计

翟 俊

1962年生/男/江苏南京人/教授/研究方向为景观都市主义、景观城市、景观基础设施、长三角生态绿色一体化

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: info@eastscape.com

健康的生态环境是生物多样性和人类生存的基础^[1]。通过生态系统过程产生的物质和服务以直接和间接的效益对人类具有不可替代的价值^[2]。然而, 当今世界人口数量与社会经济的快速发展, 人类活动频繁, 城市化加剧, 导致许多地区生态环境退化, 生态系统服务能力降低。自1970年以来, 由人类活动导致的土地利用变化对陆地和淡水生态

系统的相对负面影响最大^[3]。在淡水生态系统中, 涉及土地利用变化的一系列综合威胁普遍存在, 包括水的开采、开发、污染、气候变化和入侵物种, 人为基础设施如道路网络、城市建设、工业开采等的扩张, 农田的开垦都可能会带来高昂的环境压力和社会成本, 从而导致生境质量的降低。研究表明, 生境质量可以在一定程度上

表征区域生物多样性水平^[4]，反映自然资源及人类赖以生存的环境的优劣情况，是生态系统健康水平的重要表征^[5]。对于生境质量的研究，开源软件InVEST（环境服务和权衡综合评估）提供了一个生境质量评估模型，将土地利用覆被图与生境受威胁和响应能力相结合，并评估整个景观中生境范围及其退化状态^[6]。当今国内外学者对于该模型应用于土地利用的生态保护方面的研究已较为全面，从小型河流流域^[7-9]到陆地生态系统^[9-10]再到大型河流流域^[11-12]不同的研究区位，已取得较多研究成果，但以上都是基于数据结果提出具有普适性的景观策略，缺乏针对性的景观改造的落实方案，而运用生态学模型与设计思维结合的跨学科方式对于景观设计会更加具有针对性和说服力^[13]。

河流及其沿岸是城市与其周围生态系统之间最重要的生物物理和生态连接（作为生态走廊连接），往往是发展中城市（或地区）仅存的自然空间^[14]。对于大多数景观来说，人类活动的扩张会导致土地使用的改变，尽管该区域经常因城市化的扩张而遭受破坏，但其依然是人类活动当中不可分割的生态特征和维持生物多样性的栖息地。所以在河流湖泊完全丧失生态系统服务的潜力之前，提出关键的解决策略是至关重要的。

为此，本研究的目的是基于InVEST模型评估淀山湖片区的生态环境和景观质量，并分析人类活动对生境的具体影响，据此针对性地选取场地进行景观设计改造。通过研究结果的分析，为环境保护和自然资源管理提供支持，有助于制定可持续的土地利用策略，为设计者提供量化、有依据的景观设计方法。本研究的创新点在于采用生态学模型与设计思维结合的跨学科方式对景观设计进行针对性和说服力的改造，提出重要的解决

策略以保护河流湖泊生态系统服务的潜力。该研究可以为生态保护和景观设计提供有效的支持和指导，为实现可持续发展目标作出贡献。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

淀山湖，旧名薛淀湖，位于苏州与上海交界处，属于太湖流域，河网水系发达，水域面积62 km²，平均水深约2.1 m，最大水深3.6 m，是上海最大的淡水湖泊，也是上海的母亲河——黄浦江的源头之一。淀山湖位于30° 57′ -31° 20′ N，120° 37′ -121° 19′ E，总面积约1 617.04 km²^[15-16]。该片区一直以来都是上海制造业向外转移的重要承接地，导致沿湖周边聚集成片的企业工厂，虽经政府多年的生态修复工程改造，但因受上海、江苏两地行政分隔的限制导致管控不到位，发展不统一等问题，形成区域发展的洼地^[17]。

1.2 数据采集与处理

本研究从开放数据源地理空间数据云（<http://www.gscloud.cn/>）获取苏州市和上海市2015年和2022年的Landsat8遥感影像资料，对研究区遥感影像现状的预处理包括利用ENVI5.3进行图像融合、镶嵌配准校正，空间分辨率为30 m。根据LULC现状分类（GB/T21010-2017）^[18]和研究目的，采用支持向量机法进行监督分类，将研究区景观类型划分为耕地、旱地、林地、草地、水体、建设用地（城镇、农村、工业用地）、沼泽、裸地8种土地利用类型，并结合谷歌地图、百度地图等高分影像目视校正以及ROI分离检测修改后得到研究区土地利用数据，分类精度为94.90%，Kappa系数0.91，满足本研究需要。

1.3 研究方法

1.3.1 生境适宜性分析工具

本研究使用InVEST生境质量模块对淀山湖片区生态系统服务进行建模研究，模拟了人类活动威胁引发的生境退化以及这些威胁导致的生境质量分布变化的量化结果。该模型通过评估某一地区各种生境类型或植被类型的范围和这些类型各自的退化程度来表达^[19]。生境质量会随着人类土地利用的接近程度和强度而降低，并根据土地利用类型而变化，一般来说，随着人类活动、土地利用强度的增加，生境质量会随之发生不同程度的退化^[20]。为得到生境质量，需要先计算不同土地利用类型的退化程度，计算见公式（1）。

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} (w_r / \sum_{r=1}^R w_r) r_y i_{rxy} \beta_x S_j r \quad (1)$$

其中， D_{xj} 为LULC的j中x栅格的生境退化度， R 为胁迫因子数量， Y_r 为r胁迫图层中的一组栅格数量， w_r 为胁迫因子r的权重， r_y 为土地利用类型图中每个栅格上胁迫因子的个数， β_x 为法律保护程度， S_j 为生境类型j对胁迫因子r的敏感性， i_{rxy} 为栅格y对x的胁迫水平（包括指数衰减和线性衰减函数），其计算见公式（2）（3）。

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{线性衰退}) \quad (2)$$

$$i_{rxy} = \exp\left(\frac{-2.99d_{xy}}{d_{rmax}}\right) \quad (\text{线性衰退}) \quad (3)$$

其中， d_{xy} 为栅格像元x与y之间的距离， d_{rmax} 为胁迫源r的最大威胁距离。最终通过公式（4）计算出生境质量指数。

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right) \right) \quad (4)$$

其中， Q_{xj} 为LULC的j中栅格x的生境质量指数， H_j 为LULC的j的生境适宜性， k 和 z 为比例参数。

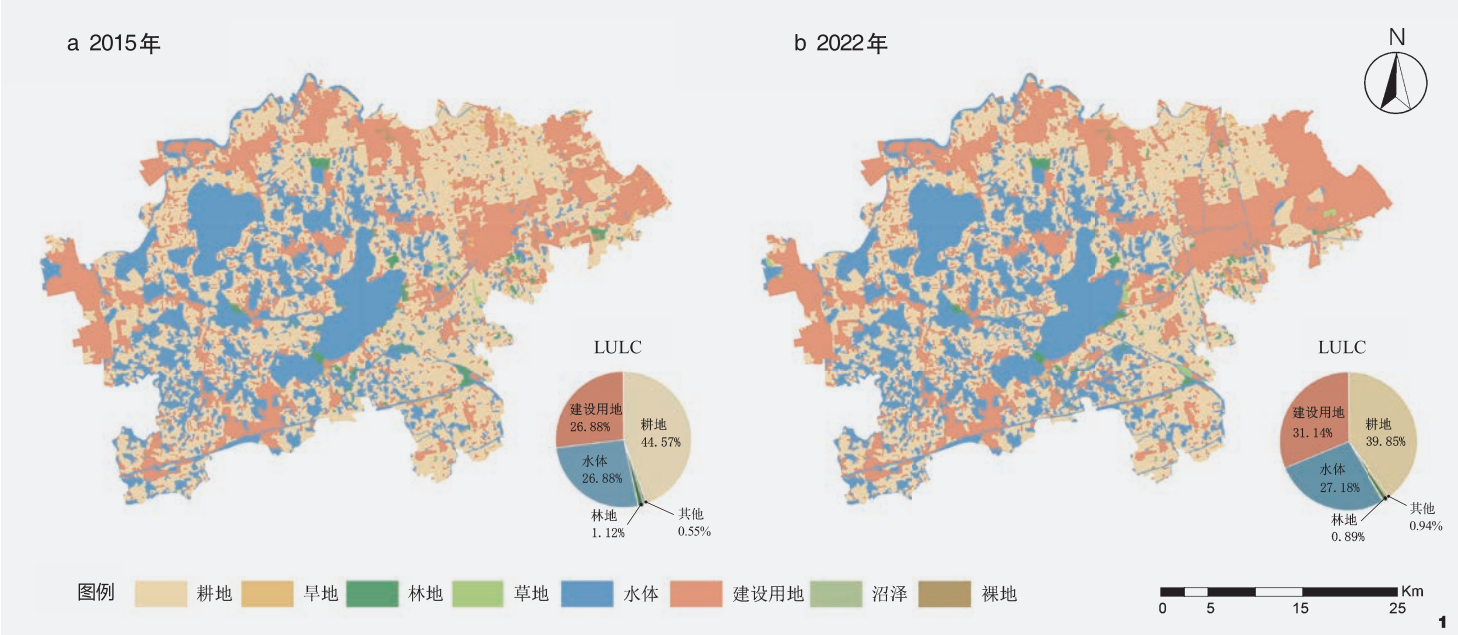


图1 淀山湖片区土地利用分布
Fig. 1 Land use distribution in Dianshan Lake area

1.3.2 模型参数化

本研究在生境质量评估模块中，根据不同生境对威胁源的响应程度，计算生境分布与退化情况。从2015年、2022年栅格土地利用数据（图1）可以看出，研究区基本以耕地、建设用地和水体为主的LULC，总占比约98%，其余占比过小，不作威胁源考虑。淀山湖水体在近年来政府的各类保护政策当中，认为具有较好的生态环境，对周边环境呈现正面作用^[21]，所以不宜作为威胁源，而耕地对于自然环境来说具有一定的负面影响，且植被作物单一，不适宜动物生存，所以考虑为一种威胁源。建设用地作为城市化的一种呈现，不同的用地性质会带来不同的影响，即分为城市、农村、工业用地三种威胁源。而交通路网（不在土地利用数据分类当中）是车辆行驶和货物运输的必经环境，其对周边生境质量具有较为直观的影响，且随着路网的密集而增加，随着道路的远离而减少。

综上，本研究考虑了5种可能对研究区生境产生负面影响的威胁源：耕地、城市用地、农村用地、工业用地、交通路网。同时结合InVEST用户手册推荐值^[4]、与研究区地理位置相似的长江中下游地区^[21-22]以及现状相似的相关文献^[23-24]等，对威胁因子属性和威胁因子敏感性进行赋值，具体参数如表1，表2。

2 研究结果与分析

2.1 生境退化评估结果与分析

生境质量的下降被认为是土地利用强度

增加的结果。生境退化的空间变化反映了区域生境质量退化的严重程度。InVEST3.12.0模型的生境质量模块分析得出2015年、2022年生境退化分布图（图2），根据ArcGIS中的自然断点分类法将评价结果分为6类，现概括为三类：低度退化分布区（0 ~ 0.04）、中度退化分布区（0.04 ~ 0.08）、高度退化分布区（0.08 ~ 0.12）。从空间分布来看，不同年份的淀山湖片区退化分布呈现相似性，中北部退化程度较高，其次是西部地区，而南部以及东部地区退化程度较低。

表1 威胁因子属性
Tab. 1 Attributes of threat data with different land use

威胁因子 Threat	最大影响距离/km Max_dist	权重 Weight	衰减类型 Decay
耕地	3	0.3	线性
城市用地	6	0.9	指数
农村用地	4	0.8	指数
工业用地	5	1.0	指数
交通路网	2	0.8	线性

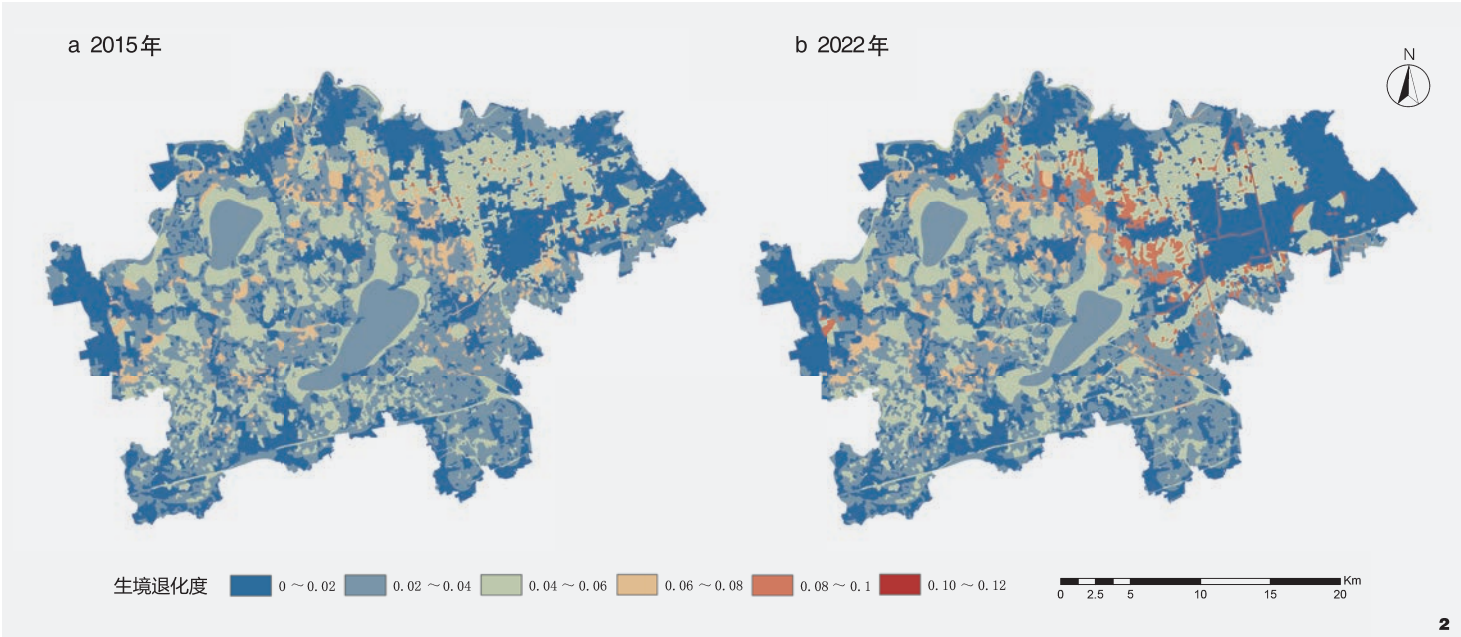


图2 生境退化分布图
Fig. 2 Habitat degradation distribution

表2 不同土地利用类型生境适宜度及其对各威胁源的敏感度
Tab. 2 Habitat suitability of different landscape types and sensitivity of LULC types to each threat

土地利用类型 LULC type	生境适宜性 Habitat	耕地 Farm	城市用地 Urban	农村用地 Rural	工业用地 Mine	交通路网 Road
耕地	0.40	0.30	0.50	0.40	0.10	0.45
旱地	0.30	0.30	0.50	0.70	0.10	0.30
林地	1.00	0.60	0.70	0.50	0.85	0.70
草地	0.70	0.50	0.70	0.50	0.75	0.60
河流湖泊	0.90	0.65	0.90	0.70	0.90	0.60
建设用地	0	0	0	0	0	0
湿地	1.00	0.80	1.00	0.80	1.00	0.90
裸地	0.10	0.10	0.20	0.20	0.10	0.20

而随着城市化的进程加剧了这一退化程度，图2可以看出：(1) 低度退化区大多位于建设区域、南部耕地区域以及澄湖、淀山湖中心区域。这些区域退化程度较低的原因被认为主要有两点，一是环境更为复杂的区域（类似建设区、裸地），其本身生境适宜性较低，自我修复能力强，对威胁源敏感性较差，因此即使身处城市、路网密集区也没有

受到太大影响；二是距离威胁源平均距离较远，受到的干扰较小，更多的是远离城市、工业以及路网密集的区域，因此其退化程度较小。(2) 中度退化区大多位于河流湖泊以及耕地区域。其本身生境适应性较高，受村庄、少量交通路网影响，更多受耕地影响，由于耕地对土地利用强度的增加有限，所以退化程度处于中等水平。(3) 高度退化区大

多位于北部河流湖泊区域，其脆弱的生态系统对威胁源敏感较高，受城市、工业用地以及密集的交通路网综合影响，出现极大程度的退化，从2015年至2022年间，高度退化区受干扰程度不断增加，这一结果不仅没有得到改善，反而扩大影响程度，随着时间的推移，若不加以重视与修复，该片区的生态环境将会成为隐患。

2.2 生境质量评估结果与分析

InVEST模型一般用生境质量表示生态环境的优劣，生境质量越好，生态系统功能越完善，越有利于生物多样性的维持，具体表现为每个单元栅格（数值越高表明生境越适宜）的生境质量评分介于0 ~ 1之间。为了更好地揭示淀山湖片区2015-2022年的生境质量变化，通过ArcGIS中重分类的自然断点分类法，将生境质量分为9类，现概括为三类：低生境适宜性（0 ~ 0.3）、中生境适宜性（0.3 ~ 0.6）、

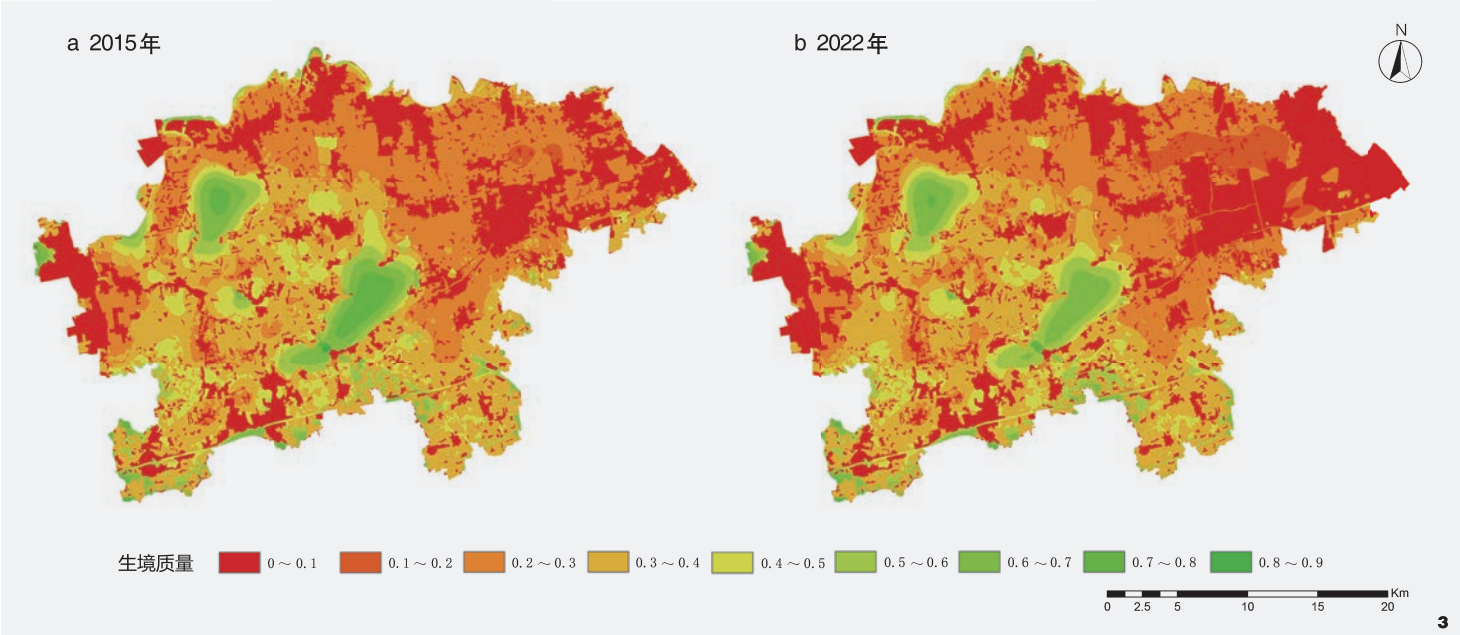


图3 生境质量分布图
Fig. 3 Habitat quality distribution

高生境适宜性(0.6 ~ 0.9) (图3)。

从空间尺度上来看,研究区总体生境质量较低,具体表现为两极(澄湖、淀山湖)高并向外递减,东北低、西南高的分布特征,低生境适宜性区域主要围绕人类活动密集的东北部区域,而高生境适宜性区域主要分布在河流湖泊等自然生态系统周边。从时间尺度上来看(表3),2015–2022年研究区生境质量呈下降趋势,尤其是以澄湖、淀山湖及其周边湿地为主,高生境适宜性的用地比例大幅度下降,占比为25.56%,而部分低生境适宜性的用地增加,这里被认为是中、高

生境适宜性的用地主要受不同程度的退化所致,特别是靠近北部建设用地的林地、湿地面积的减少以及东部城镇面积的扩张。

本研究通过生境质量和生境退化分布,推测现存以及潜在威胁对生态环境的影响,不仅需要关注城市、工业用地等生境质量低的区域,同时还要关注现存及潜在退化程度较高的水体、森林、草地等,此类区域主要集中在中北部千灯镇、张浦镇、淀山湖镇,以及少量东南部柳河段,西部同里镇区域。因此为了恢复生态环境,提升生境质量,本文提出一系列生态修复方法以增加生态环境

韧性和提高生物多样性。

3 生境提升的景观设计应用

3.1 生境退化特征及修复策略

综合以上内容,针对2022年退化分布图中不同退化区域,选取典型性地块(图4),采取针对性的生态修复策略以提升生境质量(表4)。

对于低度退化区,选取两类不同性质地块:一是具有复杂环境的人类活动区域,该地块具有较好的自我恢复能力,对威胁源敏感性较差,如地块A(同里镇区域)。该地块作为典型的建设用地,尽管其退化程度较低,但生境质量也较低,因此在保持较低退化程度的同时,通过绿色智慧城市营建的方式,重新绿化城市以提高其生态环境。有研究表明,智慧城市扩张情景可能会减轻甚至消除城市化的负面影响^[9]。二是远离城市、工矿用地以及道路等威胁源的区域,该地块

表3 2015年、2022年不同等级生境比例
Tab. 3 Proportion of different habitats in 2015 and 2022

分类等级 Classification	分值区间 Score interval	2015年		2022年		变化比例/% Change ratio
		面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion	
低生境适宜性	0~0.3	600.08	37.11	641.63	39.68	6.92
中生境适宜性	0.3~0.6	892.28	55.18	882.59	54.58	-1.09
高生境适宜性	0.6~0.9	124.67	7.71	92.81	5.74	-25.56

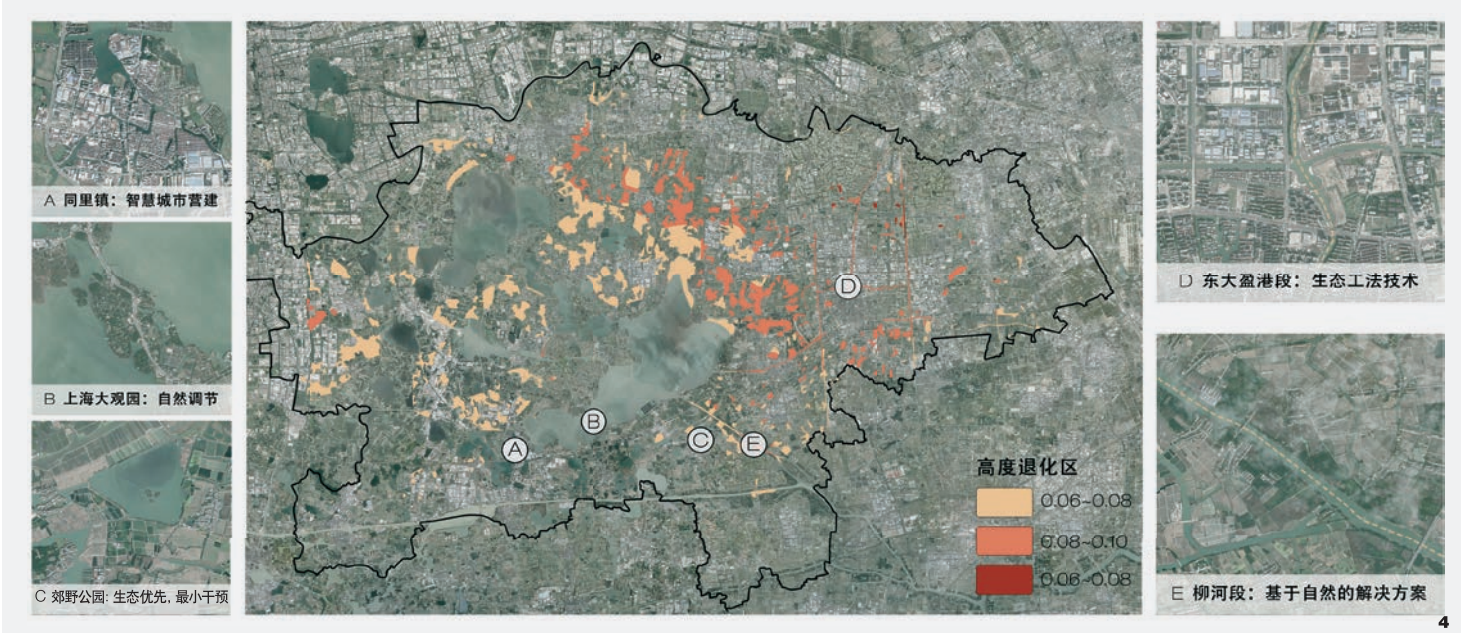


图4 典型退化区分布图
Fig. 4 Typical degenerated differentiated layout

表4 典型退化区修复策略
Tab. 4 Typical restoration strategies of degraded areas

退化等级 Degradation	地块性质 Property of block	典型退化区 Typical region	修复策略 Restoration strategie
低度	人类活动区	A同里镇区域	智慧城市营建
低度	远离威胁区	B上海大观园	自然调节
中度	具有较好抵抗能力	C上海青西郊野公园	生态优先, 最小干预
高度	受城市路网威胁	D东大盈港段	生态工法技术
高度	受农业入侵威胁	E柳河段	基于自然的解决方案 (NbS)

可以避免长时间受威胁的干扰, 即使受到间接性或短暂性干扰时也可以很好地从中恢复, 如地块B (上海大观园区域)。该地块横穿淀山湖, 由许多小型河流与林地组成, 作为一处自然旅游景点, 尽量利用自然调节的能力, 维持其自身的生态平衡, 减少人类活动入侵。

对于中度退化区, 在面临环境威胁时具有较好的抵抗和恢复能力, 其本身也具有一定的生境适宜性, 如地块C (上海青西郊野公园)。该地块作为自然湿地公园, 密集分布着许多小型河流以及湖泊, 具备较好的

生态环境和适宜性。在这里, 将遵循生态优先、最小干预的原则, 保持公园的原生风貌, 修复生态驳岸, 保留原生乔木, 并设置保护分级, 限制人类活动边界。通过自然的手法梳理地形, 营造绿地和活动场地, 以较低强度的方式开发公园, 保护其生态基础和生物种群。

对于高度退化区, 基本以河流湖泊及其沿岸湿地为主, 由于其敏感性, 对威胁响应能力较高, 并且难以回到稳定状态, 而研究区存在由两类威胁导致的高度退化区: 一是

受城市和密集路网影响下的高度退化河流域, 如地块D (东大盈港段)。该地块是一段流经城市的河流, 由于过多的人类活动入侵, 因此需要更多的人工手段介入。这里应用生态工法技术, 运用自然材料与工程技术相结合, 并且其中融入雨洪管理设计, 将自然与城市相结合, 让植物和动物种群回归城市, 在加强城市韧性的同时, 很好地恢复了走向退化的河流生态系统。二是受零星分布的农村以及大面积耕地影响的高度退化河流域, 如地块E (柳河段)。该地块远离城市与密集的交通路网, 具有良好的生态基础, 但受农业扩张与渔事作业的双重影响, 因此需要在保护本身生态环境的基础上介入人工手段。

3.2 高度退化区的景观优化研究——以柳河上游沿岸湿地景观改造为例

3.2.1 场地调研及分析

本研究选取柳河上游段作为设计改造对

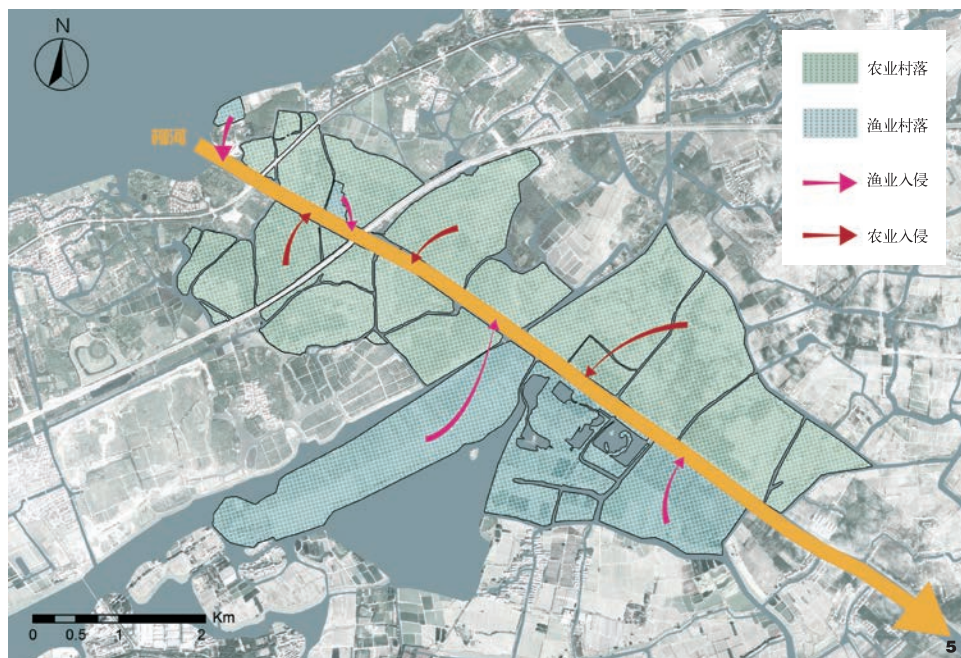


图5 柳河上游水系分布及生态影响
Fig. 5 Water system distribution and ecological impact of upstream segment of the Liu River

象，场地水系长约7 km，支流、河塘分布密集，同时该河段也是通往上海黄浦江的主要水上航线，承担着重要的海路枢纽。周边土地类型以湿地和田田为主，滋养着淀峰村、淀山湖一村、莲湖村等以生产性湿地为主的渔耕文化村落，因此柳河长期以来受着沿岸渔事、农耕生产性活动入侵，极大影响着生态环境^[25]（图5）。

柳河上游沿岸的养殖渔业与现代农耕的历史背景遗留了如下问题：（1）单一的景观空间。铺设的混凝土硬质围墙不利于植物生长与动物停留，阻碍了自然景观的交融。（2）无序的渔事空间。沿岸渔村机电渔船杂乱停靠，一些打捞的渔业产品堆积随处可见，河鲜残骸流入河中，造成水体污染，富营养化严重，水生栖息地遭到严重破坏。（3）规模的农业空间。横平竖直的农田塘埂展现了严重的人工干预痕迹，而新建造的配套服务设

施也未能与原有的肌理和谐相融，未经处理的农业废水严重污染水体。

3.2.2 基于NbS的景观优化方案

基于自然的解决方案（Nature-based Solutions, NbS）是既符合自然规律，又能有效促进经济社会可持续发展的绿色方案和方法^[26]。本方案针对场地问题，引入NbS理念，强调通过保护、修复、管理或新建生态系统，利用自然提供的生态系统服务有效应对复杂挑战^[27]。在尊重自然的基础上加以人工手段介入，缓慢、自然、连续地改善当地生态环境，以平衡河流生态与村落生产生活之间的持续发展，顺应淀山湖区域发展规划^[28]。本方案采取“保留—打破—更新”的策略，以最小干预来最大程度地提升场地的生态功能。其中，“保留”是指保留现有村庄肌理外貌以及即将被人为干扰的生态堤埂；“打破”是为

增加场地与自然的连接，打破原有硬质围墙，断开塘埂以扩展水体在湿地中的流动线路，净化水质；“更新”则是指改善现状渔业与农业村落，减少对水体环境的破坏性活动，增加场地吸引力，活化传统村落（图6）。

（1）保留肌理，野化生态堤埂。此方案没有选择填方或修路等重新塑造新的自然和村落肌理，柳河段周边丰富的自然和村落，经多年生产遗留的历史痕迹应当被保留，给予后人完整的原始风貌，因此主要在宏观的土地利用布局、建筑肌理和面域功能方面选择沿用，保持渔村特色面貌以及村民的生活习性，尽可能降低对村民生活秩序的改变。同时保留当地具有防涝要求且植被较为丰富的堤埂，减少人为干预，使其植物再野化，通过草坡、草沟以及乔木的生长，可以有效地涵养、净化水源，提升水质。

（2）打破隔断，重塑生态环境。为了塑造多样的自然景观空间，增加场地与自然的交融，打破原有驳岸的硬质围墙，构建自然草坡与石块，改动车行系统，保证双向车道连贯性，增加骑行系统的专用道，提升道路沿岸景观植被，丰富骑行体验。同时为了增加不同水塘之间的水体流动，打破各小水塘之间的塘埂以扩展水体的流动路线，加强区域生态连通性。

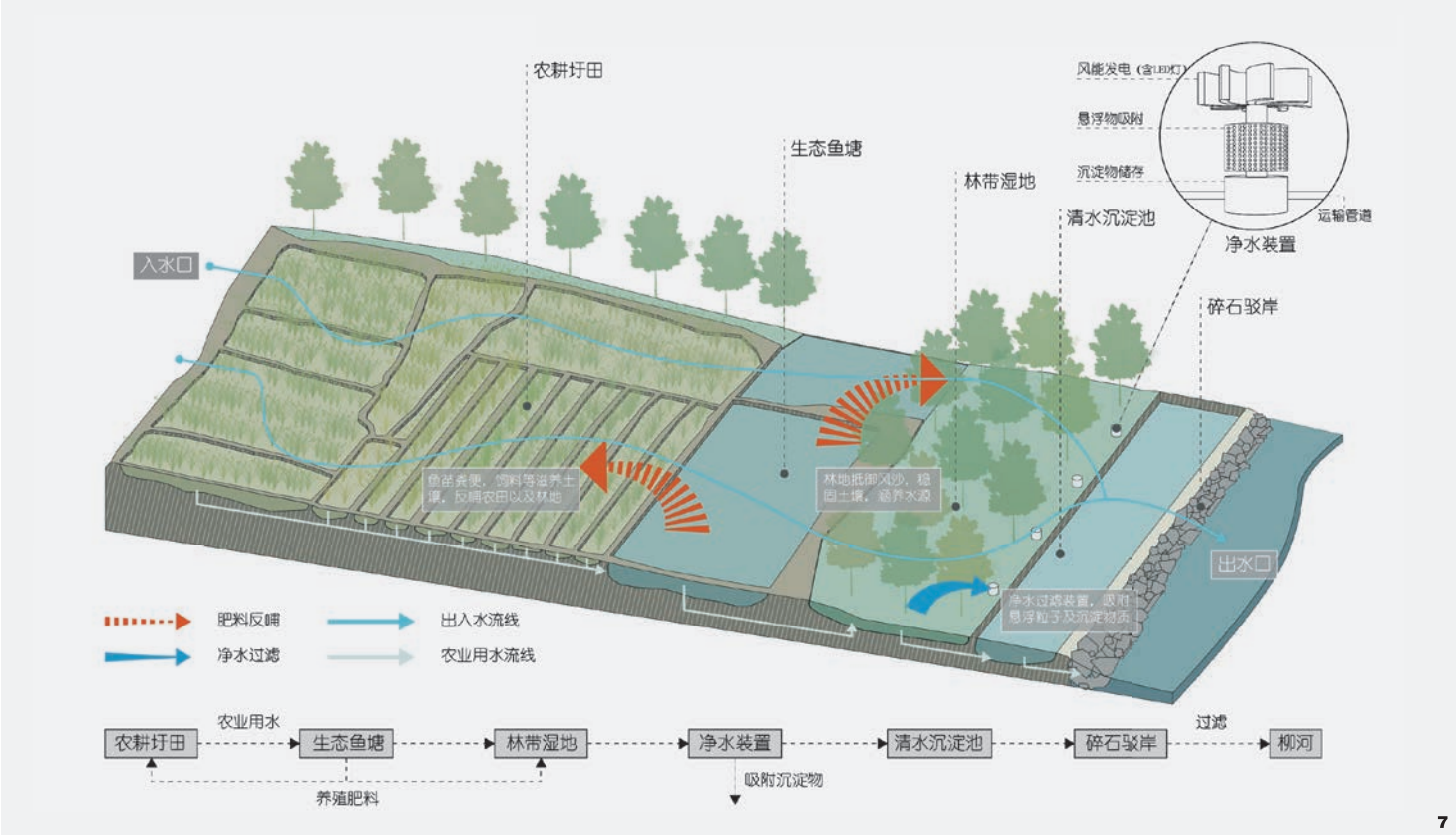
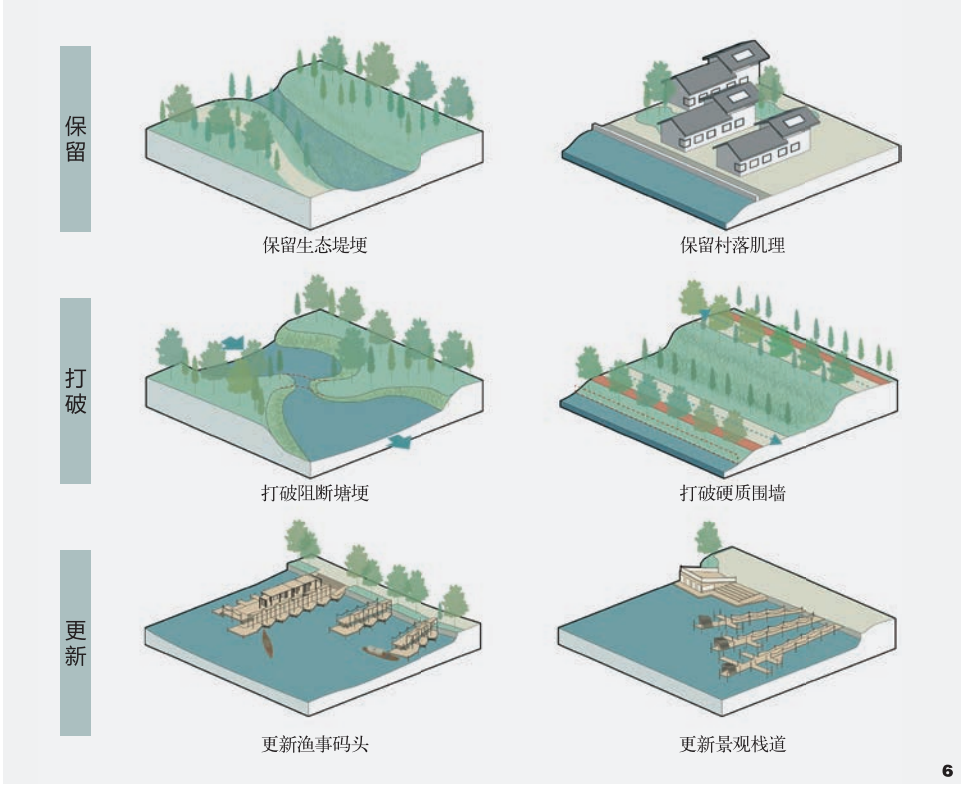
为了营造更好的生态环境，提升生境质量，需要改善因农业、渔事生产活动造成的水体污染问题，因此本方案利用现有的圩田鱼塘布局形式，采用基塘农业的生产模式，形成既净化水质又能循环利用的作业模式（图7）。其原理如下：首先农耕作业用水通过径表以及地下渗入生态塘，将生态塘中的各类生物进行第一次净化，同时鱼苗粪便、饲料等产物会充当肥料滋养土壤，反哺作用于田地以及林地；经过第一道净化的用水再流

入林带湿地，被土壤吸收净化，形成第二道过滤；经过上述自然生态的处理，农业用水可利用的物质大体被吸收，而后再通过人工净水装置，埋藏于土壤中，可以进行自我风力发电，吸附水中悬浮物、沉淀物；经装置过滤后的水通过管道运输，流入清水沉淀池，最后透过碎石驳岸流入河中，完成水质的净化。

该模式的优点在于通过自然、人工五重过滤，使得农业用水可利用物质被回收，且污染物得到净化，同时兼顾鱼塘和农田作业。另外由于鱼塘对于农田肥力的反哺，又可以减少化学肥料的使用，节约成本。

图6 生态修复策略
Fig. 6 Ecological restoration strategy

图7 基塘农业模式的净水系统
Fig. 7 Water purification system for dike-pond agriculture model



(3) 更新村落，重建文化联系。柳河沿岸的传统村落正面临着时代发展的冲击，走向衰亡的命运。本方案在设计中深深根植苏南水乡文化，致力于在保持当地生态基础不受破坏的前提下，改善现状中无序与杂乱的渔事空间。为了更好地延续当地渔业民俗风貌，计划对渔事空间进行小范围改造，完善内外有机连通性。结合渔村、栈道等特色景观，更新民俗空间，充分挖掘特色风貌，如渔事码头、景观栈道等，以打造极具当地特色的趣味节点。同时，开辟货运路线，将渔民和游客的出行路线分开，以提供多样的水岸文化，吸引外来游客关注即将消亡的传统村落，以延续村落的生存和发展。

综上所述，柳河上游沿岸湿地采用了大面积保留、局部区域打破以及传统村落更新的策略，始终坚持基于自然的解决方案，并充分尊重本地特色，以重塑自然风貌为目标。本方案采用基塘农业的作业模式，通过层层过滤改善水质，提升当地生境质量。

生态修复是一个持续演变的过程，需要给予设计以呼吸的空间。它是一种缓慢、自然、连续的过程，旨在展现其原有的自然生态风貌。本方案的实施将逐步呈现出生态系统的复苏与完善，实现自然与人文的和谐共生，同时也为当地传统村落的保护与传承提供了坚实的基础。通过这一持续的生态修复过程，相信柳河上游段将焕发出新的生机与活力，成为可持续发展的典范。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究使用InVEST模型来评估生态系统的服务价值，但是由于模型的结果输出受到威胁因子敏感度和威胁因子属性等参数的设定影响，同时受到地理空间和时间的

影响，存在一定的局限性。为了得到更合理的研究结果，本研究从地理空间的相似和土地利用现状的相似两个维度选择专家打分，并结合InVEST用户手册进行相对合理的赋值。

为了提高模型的参数化水平，需要更多基于野外的长期生态学的研究，科学准确的实地研究可以帮助改进模型的参数化^[29]。另外，纳入更详细的土地覆被类型可以得到更加真实的场地现状，但需要更加真实复杂的赋值系统以及准确的土地利用数据。在本研究中，由于研究主要针对城市化和农业的扩张，并考虑人类活动对于河流湖泊的整体影响，因此将二级土地利用分类整合成一级分类，并且不考虑占比过小的二级分类土地。

此外，本研究还考虑了额外的生态系统服务，如土壤保持和碳储存，为保护和恢复受威胁或恶化的生态系统提供进一步的论据。因此，模型的应用需要综合考虑多种因素，包括生态系统服务、地理空间和时间因素、土地利用类型和威胁源等，以得到更准确和全面的研究结果。

当然，在景观优化方案中，不仅需要重视生态用地的增加与保护，也要注重耕作技术改良和农业种植结构调整，变革低产田，再造优质田，权衡不同土地利用方式，调整作业模式，引入生态工程，如Li^[30]在研究保护和人类发展政策对利益相关者的影响时指出，生态工程可能在短期内有高昂的初始成本，但从长远利益来看，无论是当地政府还是人与环境，都能收获长期有效的生态价值。除此之外，政府在探索生态系统服务空间配置的同时，还应重视多种生态系统服务、生物多样性保护以及给予土地所有者市场回报之间的权衡^[31]。

4.2 结论

随着城市快速更新发展，政府与相关设计者已意识到生境保护的重要性。而本研究的独特之处在于提供了一种借助景观途径提升生境质量的新思路，通过运用生态学建模的方法，从空间、时间尺度评估上海市淀山湖片区生境质量，并总结出以下结论：

(1) 探索城市河湖生境质量研究的评估方法。以模型评估代替野外调查和层次分析等复杂方法，对生境质量的数据可视化和精细化分析可以快速获得评估结果。

(2) 量化研究场地的生境质量在空间上的分布。通过对淀山湖片区生境质量可视化空间制图发现：2015–2022年，研究区生境质量呈下降趋势，尤其是以澄湖、淀山湖及其周边湿地为主的高生境适宜性用地比例大幅度下降，2022年与2015年相比减少了25.56%，并且研究区的退化随着人类活动的入侵明显加剧。

(3) 探究城市河湖生境不同退化程度的景观优化策略。基于城市生物多样性保护原则和生态学原理，针对典型性地块，根据威胁因素以及退化程度的不同，探究了5种优化策略，为生境提升提供了规划依据与设计框架。

(4) 实证生境质量提升的优化策略在设计方案中的运用。以高度退化区柳河段地块为例，结合实地考察，验证修复策略，基于自然的解决方案进行景观改造设计。

未来，随着遥感技术以及相关研究领域的进步，InVEST模型的生态系统评估会越来越准确，可以更加广泛地运用于景观量化设计中，提供前期的量化分析，以便更科学、更有针对性地指导设计和实施。IAAI

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] BOJIE F U, ZHANG L W, WANG Z L, et al. Land-use Change and Ecosystem Services: Concepts, Methods and Progress[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(4): 441-446.
- [2] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [3] BONGAARTS J. Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services[J]. *Population and Development Review*, 2019, 45(3): 680-681.
- [4] SHARP R, CHAPLIN-KRAMER R, WOOD S, et al. InVEST User's Guide[EB/OL]. (2020-02-26) [2023-10-04]. https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/en/habitat_quality.html
- [5] 李晓秀. 北京山区生态环境质量评价体系初探[J]. *自然资源*, 1997(05): 33-37.
- [6] Natural Capital Project Stanford University. Habitat Quality[EB/OL]. (2020-02-26)[2023-10-04]. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/invest/habitat-quality>
- [7] HACK J, MOLEWIJK D, BEILER M R. A Conceptual Approach to Modeling the Geospatial Impact of Typical Urban Threats on the Habitat Quality of River Corridors[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(8): 1345.
- [8] ZHANG Y, ZHANG C, ZHANG X, et al. Habitat Quality Assessment and Ecological Risks Prediction: An Analysis in the Beijing-Hangzhou Grand Canal (Suzhou Section)[J]. *Water*, 2022, 14(17): 2602.
- [9] BHAGABATI, NIRMAL K, RICKETTS, et al. Ecosystem Services Reinforce Sumatran Tiger Conservation in Land Use Plans[J]. *Biological Conservation*, 2014, 169: 147-156.
- [10] SHARMA R, RIMAL B, STORK N, et al. Spatial Assessment of the Potential Impact of Infrastructure Development on Biodiversity Conservation in Lowland Nepal[J]. *International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(9): 365.
- [11] XU L, CHEN S S, XU Y, et al. Impacts of Land-Use Change on Habitat Quality during 1985-2015 in the Taihu Lake Basin[J]. *Sustainability*, 2019, 11(13): 3513.
- [12] TERRADO M, SABATER S, CHAPLIN-KRAMER B, et al. Model Development for the Assessment of Terrestrial and Aquatic Habitat Quality in Conservation Planning[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 540: 63-70.
- [13] MAKHZOUMI J M. Landscape Ecology as a Foundation for Landscape Architecture: Application in Malta[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 50: 167-177.
- [14] BEILER M R, HACK J. A Combined Field and Remote-Sensing Based Methodology to Assess the Ecosystem Service Potential of Urban Rivers in Developing Countries[J]. *Preprints*, 2019, 11(14): 1697.
- [15] 莫丹锋, 肖群, 何金林. 上海市淀山湖水环境调查分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(04): 160-162.
- [16] 张天弛. 除了“一江一河”, 市民未来慢行休憩还有这“一湖”[N]. *文汇报*, 2022-02-11(002).
- [17] 丁丽莲, 王奇, 陈欣, 等. 近30年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2973-2985.
- [18] 土地利用现状分类GB/T 21010-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [19] HALL L S, KRAUSMAN P R, MORRISON M L. The Habitat Concept and a Plea for Standard Technology[J]. *Wildlife Society Bulletin*, 1997, 25(1): 173-182.
- [20] MCKINNEY M L. Urbanization, Biodiversity, and Conservation[J]. *BioScience*, 2002, 52: 883-890.
- [21] 王超, 常勇, 侯西勇, 等. 基于土地利用格局变化的胶东半岛生境质量时空演变特征研究[J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(10): 14.
- [22] 欧阳晓, 王坤, 魏晓. 城乡建设用地关联对生态系统服务的影响——以洞庭湖地区为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(21): 8713-8722.
- [23] OUYANG X, TANG L S, WEI X, et al. Spatial Interaction Between Urbanization and Ecosystem Services in Chinese Urban Agglomerations[J]. *Land Use Policy*, 2021, 109(4): 105587.
- [24] 耿建伟, 余坤勇, 谢祯, 等. 基于生境质量模型的福州市绿色基础设施网络优化研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2023, 43(1): 1-8.
- [25] WANG S B, MA X X, FAN Z Q, et al. Impact of Nutrient Losses from Agricultural Lands on Nutrient Stocks in Dianshan Lake in Shanghai, China[J]. *Water Science and Engineering*, 2014, 7(4): 373-383.
- [26] EESIA. 碳达峰碳中和与标准/基于自然的解决方案(NbS)及标准[EB/OL]. (2021-06-29)[2023-10-04]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1703894357342584466&wfr=spider&for=pc>
- [27] (英)李程, 廖菁菁. 探索基于自然的解决方案中景观设计的角色变化: 对20年专业实践的反思[J]. *风景园林*, 2022, 29(6): 33-37.
- [28] 苏蓉蓉, 罗坤, 周国锋. 长三角一体化背景下环淀山湖地区高质量发展路径研究[C] // 活力城乡 美好人居——2019中国城市规划年会论文集(16区域规划与城市经济). 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [29] GONG J, XIE Y C, CAO E J, et al. Integration of InVEST-Habitat Quality Model with Landscape Pattern Indexes to Assess Mountain Plant Biodiversity Change: A Case Study of Bailongjiang Watershed in Gansu Province[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(7): 1193-1210.
- [30] LI C, ZHENG H, LI S Z, et al. Impacts of Conservation and Human Development Policy Across Stakeholders and Scales[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(24): 7396-7401.
- [31] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ, et al. Modeling Multiple Ecosystem Services, Biodiversity Conservation, Commodity Production, and Tradeoffs at Landscape Scales[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.