

城市湿地生态系统服务动态演化及其权衡关系 ——以杭州西溪湿地为例^{*}

潘明欣¹⁾ 张力小^{1)†} 胡潭高²⁾ 郝岩¹⁾

(1)北京师范大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,100875,北京;

2)杭州师范大学遥感与地球科学研究院,浙江省城市湿地与区域变化研究重点实验室,311121,浙江杭州)

摘要 以杭州西溪湿地为例,基于1984—2018年的高分辨率遥感数据,利用InVEST模型和当量因子法核算了该区域生态系统服务的动态变化,分析了生态系统服务间的权衡关系。结果表明:1)除固碳服务外,研究期内西溪湿地生态系统服务整体呈退化趋势;2)国家湿地公园的建设,使公园内外固碳服务与生物多样性服务呈现不同的变化趋势,这2种服务类型在公园内呈现增加、而公园外受城市化过程持续影响呈现降低趋势;3)受降水量增加、不透水地面扩大等因素影响,公园内外的产水量与营养物输出量等均呈现增加趋势,旅游开发和生态保护之间的矛盾并没有完全缓解;4)生态系统服务之间存在显著的权衡关系,主要是产水服务与固碳服务、生物多样性保护服务、娱乐和文化服务之间,空间上在城市不透水地面周围更为显著。

关键词 城市湿地;西溪湿地;生态系统服务;InVEST模型;高分遥感;权衡关系

中图分类号 X87

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021169

0 引言

湿地有“地球之肾”之称,它是介于陆地和水体之间的过渡性生态系统,具有不可替代的多重生态系统服务,包括调节气候、蓄洪防旱、为人类提供游憩娱乐等多种服务^[1-2]。Costanza等对全球生态系统服务的核算表明,湿地提供的价值占全球总价值的45%。自1900年以来,全球湿地面积减少了近50%,而城市化、农业垦殖和环境污染等人类活动是湿地退化的主要驱动力^[3-5]。在城市中,由于与居住人群的近距离界面关系,使得城市湿地的服务功能更具社会价值^[6]。但与此同时,城市湿地也更容易受到商业活动和城市建设等高强度人类活动的胁迫与挤压,呈现面积减少、生境破碎化及生物多样性降低等退化问题^[7-8]。不同于自然保护区的封闭式保护,城市管理部门一般通过建设湿地公园来对城市湿地进行保护,希望通过有序开发与管理的促进其保护。

当前,对城市湿地生态系统服务的研究,主要是利用遥感数据,针对整个城市区域或者连片城市群进行研究。从研究方向上来看,有学者对湿地生态系统服务进行核算和主导功能的研究,例如:肖涛^[9]对环杭州城市群湿地进行生态系统服务评估发现,湿地生

态系统总价值为 1.39×10^8 万元;荔琢等^[10]使用Landsat影像源对京津冀城市群湿地的主导生态系统服务功能(即水文调节、水资源供给和净化环境)进行了研究。与此同时,也有学者对湿地生态系统服务的变化和影响因素进行了研究,例如,陈莹等^[11]使用Landsat影像数据研究了武汉城市湿地破碎化对生态系统服务价值的影响,发现城市湿地的破碎化趋势与调节、支持和文化服务存在显著相关关系。同样,在城市群尺度上诸多学者利用Landsat、AVHRR、MODIS等遥感数据,开展了城市化过程对城市湿地生态服务功能胁迫的研究^[12-14]。陈万旭等^[15]使用Landsat影像源对长江中游城市群地区的研究发现,湿地生态系统可以缓解城市化过程中生态系统功能的退化。

从上述分析不难发现,目前研究多采用Landsat、AVHRR等中分辨率的遥感数据,而基于高分辨率的精细化研究较少,为数不多的研究包括对加拿大波特纳夫拉切夫罗蒂埃流域湿地的研究^[16](WV-2卫星图像)、对深圳市湿地的研究^[17](Quickbird数据源)等。需要说明的是,高分辨率数据可以减少由于解译精度而导致的结果误差,从而能够更细致地揭示城市湿地生态系统服务变化的微观机制。

^{*} 国家杰出青年科学基金资助项目(52225902);国家自然科学基金资助项目(52070022)

[†] 通信作者:张力小(1977—),男,博士,教授。研究方向:城市生态系统分析与协同管理。E-mail: zhanglixiao@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-09-17

从时序上看,目前的研究主要通过多期遥感数据进行比较分析,例如武汉 1987—2016 年城市湿地生态系统服务变化^[18](Landsat 数据源)、印度查特拉湿地 2000—2018 年的退化研究^[19](Landsat 数据源)、上海 1987—2007 年湿地资源及其生态服务价值变化^[20](Landsat 数据源)、重庆市 2000—2015 年生态保护红线区生态价值演变^[21](EOS/MODIS 数据产品)等.受制于免费遥感数据获取的限制,目前大多能够获取的数据可到 20 世纪 80 年代末,无法反映 80 年代城市化初期阶段的起始状态.长时序的生态系统服务研究,可以更有效更完整地探究生态系统服务的时空动态演变特征,避免突发因素造成误判^[22].

因此,本文通过多元数据融合,建立起长时序、高分辨率的遥感数据集,对杭州市西溪湿地 1984—2018 年的生态系统功能进行分析,力图反映城市湿地及其生态系统服务的动态变化规律,揭示各服务功能之间的权衡关系及其空间分布特征,以期为城市湿地保护、城市湿地公园建设及相关政策制定提供精细化量化依据.

1 研究区域和数据准备

1.1 研究区概况 西溪湿地位于浙江省杭州市区西部(120°00'26"~120°09'27"E,30°03'35"~30°21'28"N),横跨西湖区和余杭区,位于杭嘉湖平原和浙西丘陵山地的交界地带,年平均降水量为 1 454 mm,年平均气温为 15.17 °C,气候温和^[23].由于降水量大、地势低平,利于沼泽湿地形成,原生的西溪湿地由苕溪及其支流和众多泥沼地构成.此后,在渔耕经济的改造和城市化过程影响下,逐步形成以网状河流和“鱼鳞状”水塘为主的次生湿地^[24].21 世纪初城市房地产开发热潮,带动了西溪湿地及其周边地区的居民住宅、商业建筑面积增加^[25],使得西溪湿地生态系统面临着湿地面积锐减、功能衰退等诸多问题,并使城市湿地的公共属性产生排他性影响.

鉴于此,杭州市于 2003 年启动西溪湿地综合保护工程,2005 年西溪湿地被列入国家湿地公园试点,2009 年加入国际重要湿地名录.目前,西溪湿地位于规划的环杭州湾产业带,周边地区经济发展迅速,规划中有杭州未来科技城,来自公园外部压力的影响将持续显著.

1.2 数据来源与处理 采用多源高分辨率遥感数据,主要包括航拍影像、IKONOS、QuickBird 以及 Google Earth 影像,各期数据来源、时间及分辨率等信息见表 1.对多期高分遥感数据进行标准化处理,包括正射纠正、配准、融合、镶嵌、裁切等处理,使得几何精

度均方误差在 0.5 个像元以内.采用面向对象的计算机分类和目视解译相结合的方法获取土地利用矢量图,相关分类说明、解译方法与精度检验见文献 [26].其中,2018 年的解译结果如图 1 所示.在生态服务核算中,碳密度数据来自学者对于杭州地区的植被土壤的实测数据^[27-29],降水数据等来自中国科学院资源环境科学与数据中心.

表 1 高分辨率遥感影像信息

数据类型	获取时间	分辨率/m
航空影像	1984年1月12日	0.5
航空影像	1995年1月16日	0.5
IKONOS	2000年1月20日	1.0
Google Earth	2005年12月31日	0.5
QuickBird	2007年1月28日	0.6
Google Earth	2009年12月20日	0.5
Google Earth	2013年12月30日	0.5
Google Earth	2018年11月23日	0.5

2 研究方法

2.1 生态系统服务核算 研究中城市湿地的生态系统服务主要考虑了固碳服务、产水服务、土壤保持服务、净化服务、生物多样性服务、娱乐和文化服务 6 种类型.其中,固碳服务、产水服务、净化服务等通过 InVEST 模型中的相关模块进行计算,而生物多样性服务与娱乐和文化服务等采用当量因子法核算.

1)固碳服务.固碳服务考虑土壤中的碳储存主要包括 4 个碳库:地上生物量、地下生物量、土壤和死亡有机物.碳密度数据来自学者对于杭州地区的植被土壤的实测数据^[27-29]和相关数据库.

2)产水服务.产水量的计算参照了 ZHANG 等^[30]Budyko 曲线和年平均降水量,确定每个子流域的产水量.景观中每个栅格 x 的年产水量 Y_x 为:

$$Y_x = \left(1 - \frac{A_{ETx}}{P_x}\right) \times P_x, \quad (1)$$

$$\frac{A_{ETx}}{P_x} = 1 + \frac{P_{ETx}}{P_x} - \left[1 + \left(\frac{P_{ETx}}{P_x}\right)^\omega\right]^{\frac{1}{\omega}}, \quad (2)$$

$$P_{ETx} = K_c(l_x) \times E_{T0x}, \quad (3)$$

$$\omega(x) = Z \times \frac{A_{WCx}}{P_x} + 1.25, \quad (4)$$

式中: A_{ETx} 是每个栅格的年实际蒸散量; P_x 为每个栅格的年降水量; P_{ETx} 是潜在蒸散量; $\omega(x)$ 为描述气候-土

壤属性的非物理参数; $E_{T0,i}$ 是参考蒸散量; $K_c(I_x)$ 是栅格上的蒸散系数; A_{WCx} 为植被可利用的体积含水量; Z 是经验常数, 与季节和降雨量相关性较大. 模型输

入的参数包括中国科学院资源环境科学与数据中心、CGIAR CSI 数据库、国家青藏高原科学数据中心和相关数据库.

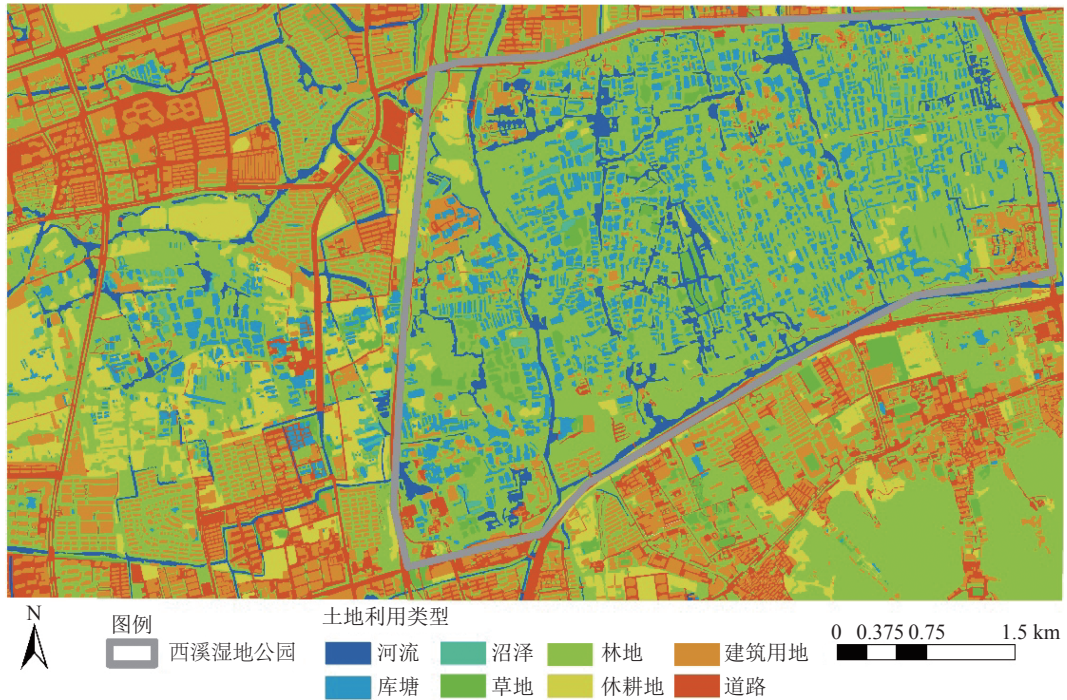


图 1 2018 年西溪湿地公园及周边地区土地利用类型

3) 土壤保持服务. 通过计算栅格的平均土壤流失量、向河流输送的泥沙量, 估算每个栅格的土壤保持能力. 每年的土壤流失量可以由 RUSLE 模型计算.

$$U_{SLE} = R \times K \times L_S \times C \times P, \quad (5)$$

$$S_{DRi} = S_{DR0,i} \left(1 + \exp\left(\frac{I_{Ci} - I_{C0}}{k}\right) \right)^{-1}, \quad (6)$$

$$E_i = u_{slei} \cdot S_{DRi}, \quad (7)$$

$$E = \sum_i E_i, \quad (8)$$

式中: U_{SLE} 为平均面积土壤流失量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可侵蚀性因子; L_S 为坡度坡长因子; C 为植被覆盖管理因子; P 为水土保持措施因子; I_{Ci} 、 I_{C0} 和 k 是校准参数; S_{DRi} 为每个栅格的沉积物输送率; 沉积物输出 E_i 是栅格经侵蚀到实际流量的沉积物量; E 为输沙总量. 模型输入的数据源来自地理空间数据云、国家气象科学数据中心、国家青藏高原科学数据和相关数据库.

4) 净化服务. 采用流域营养物来源和营养物向河流输送绘制, 进而评估植被对营养物的净化服务. 根据质量守恒定律, 模拟营养物的空间迁移过程.

$$x_{exp_{tot}} = \sum_i x_{exp_i}, \quad (9)$$

$$x_{exp_i} = x_{surf,i} \cdot N_{surf,i} + x_{surs,i} \cdot N_{surs,i}, \quad (10)$$

式中: $x_{exp_{tot}}$ 是该流域营养物输出量; x_{exp_i} 为每个栅格的营养物输出量; $x_{surf,i}$ 是地表营养物负荷量; $N_{surf,i}$ 是地表营养物输送速率; $x_{surs,i}$ 是地下营养物负荷量; $N_{surs,i}$ 是地下营养物输送速率. 模型输入的数据源来自地理空间数据云、中国科学院资源环境科学与数据中心和相关数据库.

5) 生物多样性服务、娱乐和文化服务. 结合 Costanza 等^[31]、Xie 等^[32]、Wu 等^[33] 学者修订的生态服务价值当量因子法及相关参数, 对生态系统服务进行核算.

$$V_{ES} = \sum (A_k \times C_{vk}), \quad (11)$$

式中: V_{ES} 为研究区生态系统服务价值总量, A_k 是第 k 种土地利用类型的面积, C_{vk} 是第 k 种土地利用类型的生态系统服务价值系数. 土地利用类型数据来自多源高分辨率遥感数据解译的土地利用矢量图.

2.2 生态系统服务权衡关系分析 首先, 运用 ArcGIS 软件在研究区内随机生成 500 个采样点, 提取采样点的各类生态系统服务数值, 然后利用相关性分析方法对其权衡关系进行分析. 常见的相关分析方法为 Pearson 和 Spearman 相关. Pearson 相关要求数据集的各个变

量符合连续且正态分布特征,而地理空间数据的分布往往呈现非线性和非正态等特征.因此,研究采用 Spearman 相关性来分析生态系统服务的相互关系,相关系数 <0 则表示 2 种生态系统服务为权衡关系, >0 则表示 2 种生态系统服务为协同关系^[34].

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (12)$$

式中: ρ 为 Spearman 相关系数; d_i 为相应变量秩之间的差异; n 为取点个数.

3 结果分析

3.1 西溪湿地生态系统服务的动态变化 由图 2 所示,除固碳服务外,研究期内西溪湿地公园内外各类生态系统服务功能总体呈现较为一致性变化趋势.公园内,固碳服务总体上呈现增长-稳定-再增长的变化趋势,从 221.78 增加到 447.53 $t \cdot hm^{-2}$,而公园外固碳服务呈现倒 U 形变化趋势,2000 年的高值点主要受该时段西湖片区绿化的提升作用.就产水服务而言,其受降水量变化影响较大,呈现波动式变化,但公园内显著低于公园外,面积平均差值约为 242.30 $m^3 \cdot hm^{-2}$.产水量的低值区集中分布于公园内部的沼泽、库塘

地区,产水量的高值区主要是建筑、道路等不透水地面.不透水面更易产生地表径流,而草地、林地、库塘等土地利用类型,通过植被截留降水,增加下渗,从而可以减少地表径流^[35].研究期内,营养物输送量呈现持续增高趋势,从 0.11 增加到 0.19 $kg \cdot hm^{-2}$,低值区位于公园内部的湿地,高值区位于公园外南部片区的的天水面.同产水服务一样,公园内的营养物输送量低于公园外,这主要是由于公园内湿地生态系统在养分循环过程中改善了水体的水质,因此营养物输出量较小,水质净化功能较强^[36].而研究区内土壤保持量在 6.94~12.16 $t \cdot hm^{-2}$ 内呈波动趋势,变化的影响因素与降水量和林地的变化相关^[37],由于研究区东南部林地植被根系对土壤较强的固定作用,土壤保持服务较高.由图 2 还可以发现,湿地公园的建设使生物多样性保护功能得到很大程度的提升,尤其是在 2009 年以后.受城市绿化建设的影响,公园外生物多样性服务在 2000 年达到一个峰值 4362.10 $元 \cdot hm^{-2}$,此后总体呈现下降趋势.研究期内,娱乐和文化服务总体呈先上升后下降趋势,公园内外在 2000 年分别达到峰值 4899.10 和 3193.82 $元 \cdot hm^{-2}$,公园内显然高于公园外,研究期内公园内服务是公园外的 1.53~2.10 倍.

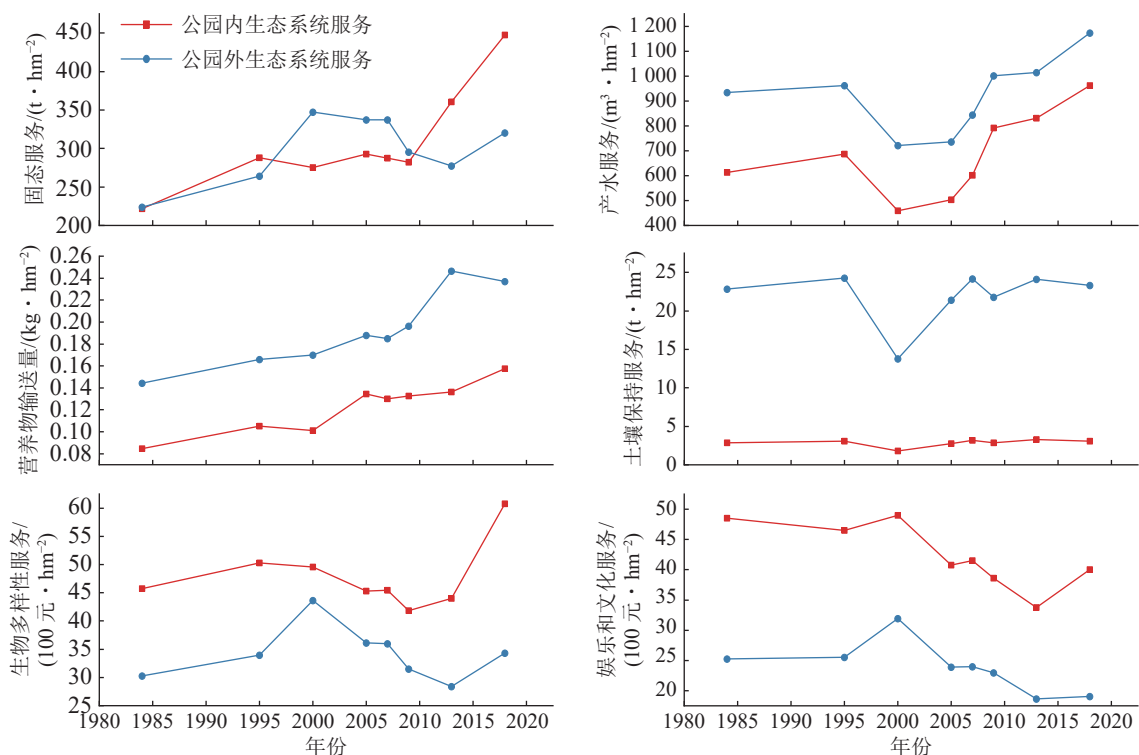


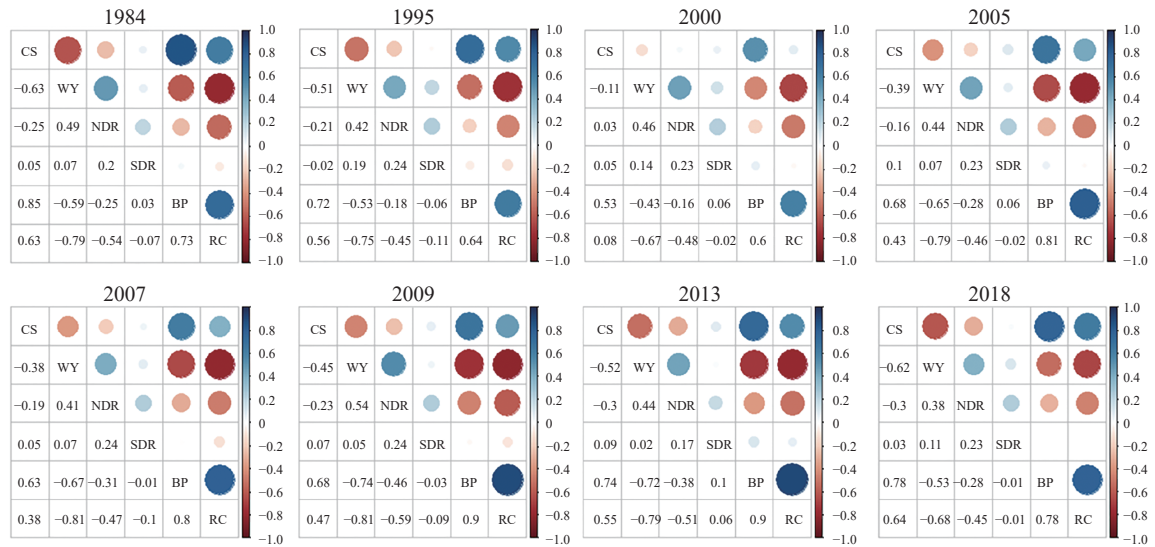
图 2 研究期内西溪湿地不同生态系统服务变化

3.2 权衡协同关系分析 由图 3 可见,西溪湿地各类生态服务功能之间呈现不同的权衡与协同关系,且具有明显的时间与空间变化特征,尤其是产水量分别与

固碳服务、生物多样性保护服务、娱乐和文化服务之间.研究期内,固碳服务与产水量一直表现为权衡关系,经历了 1984—2005 年的弱化趋势后又持续变强

的过程. 另外, 产水量与生物多样性、娱乐与文化服务之间也呈现明显的权衡关系, 除了 2000 年的低值 (相关系数为 -0.43、-0.67) 外, 总体上呈现增强趋势,

相关系数维持在 -0.7 左右. 产水量与营养物输送量呈现较为一致的弱协同关系, 相关系数在 0.38~0.54 之间波动.



*注: CS(carbon storage)表示固碳量、WY(water yield)表示产水量、NDR(nutrient delivery ratio)表示营养物输送量、SDR(sediment delivery ratio)表示土壤保持服务、BP(biodiversity protection)表示生物多样性保护服务、RC(recreation and cultural services)表示娱乐和文化服务。

图 3 研究期内西溪湿地生态系统服务权衡关系

对西溪湿地进行双变量自相关分析, 结果如图 4 所示, 从空间分布来看, 生态系统服务权衡协同关系空间异质性显著. 固碳量和产水量的权衡区域 (图 4-a) 主要集中在公园外西北部和南部不透水区域, 占总面积的 20.7%, 这些区域主要是城市化、绿化水平较高的居民小区, 固碳量与产水量在该区域产生权衡关系. 同样, 生物多样性服务和产水量 (图 4-b)

的权衡区域主要零散分布在公园内、外的湿地、建筑及道路区域的边缘区域, 占比 5.5%, 在一定程度上也反映出经济发展与生态环境保护之间深层次的权衡冲突特征. 因此, 公园内外的建筑、道路等不透水地面, 尤其是位于公园外的不透水地面, 为潜在的生态系统服务冲突矛盾区域, 在今后可以进一步实施重点保护.

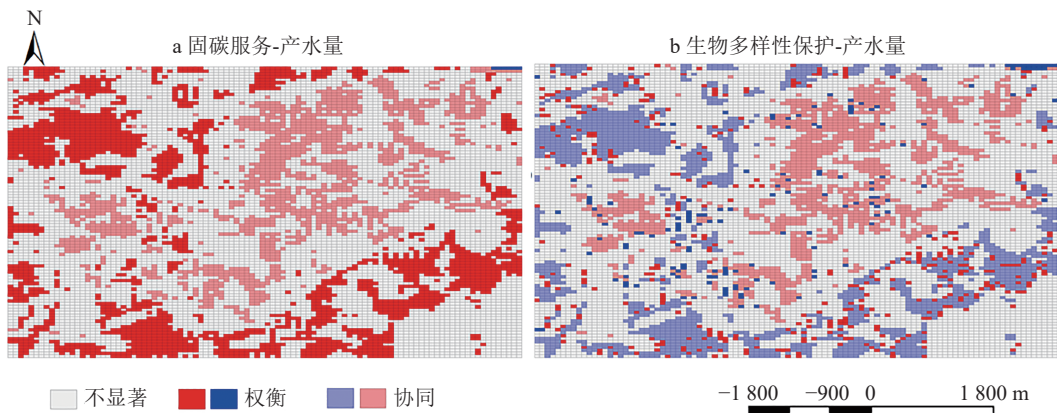


图 4 2018 年生态系统服务 LISA 集聚图

4 讨论

4.1 西溪湿地生态服务功能变化的原因分析 图 5 为研究期内不同土地利用变化的总体趋势, 不难发现西溪湿地公园内先后经历了沼泽化—草地化—乔木化 3 个过程. 具体来说, 沼泽面积从 1995 年 0.02 km² 增加

到 2000 年的 0.35 km², 随后面积呈波动式减少. 紧接着草地面积从 2000 年 1.45 km² 开始增加, 到 2013 年达到峰值 (4.86 km²), 然后迅速减少至 2018 年的 0.30 km². 而林地面积从 2013 年 2.26 km² 快速增加到 2018 年的 6.97 km², 公园内从沼泽到草地和从草地到林地的转变过程显著, 尤其是乔木化现象十分明显. 随着公园内的

沼泽化—草地化—乔木化过程, 公园内的各项服务都呈现相应的变化, 其中, 变化显著的是乔木化过程. 在该过程中, 公园内固碳服务由 2013 年的 $360.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增

加到 2018 年的 $447.53 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 公园内生物多样性服务在 2013—2018 年增加了 $1677.72 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与此同时公园内娱乐和文化服务也增加了 $630.33 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$.

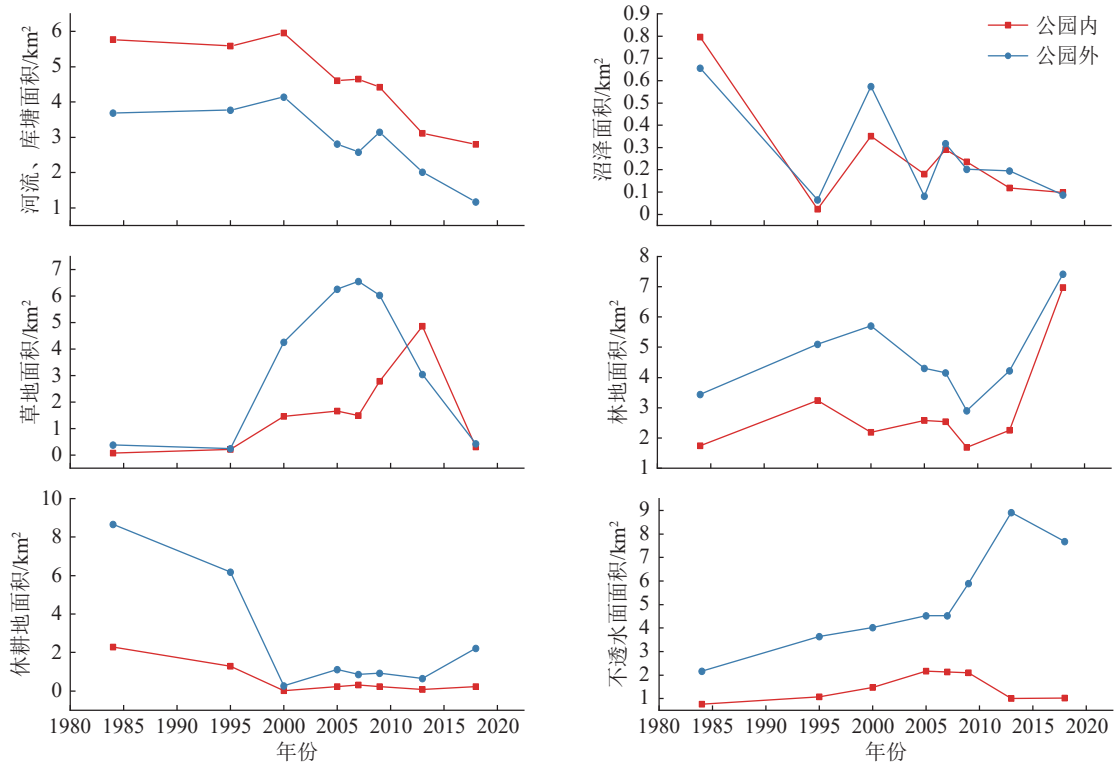


图 5 研究期内西溪湿地不同土地利用类型占比变化

4.2 湿地公园保护效果分析 根据 2005 年国家湿地公园试点建设的时间节点, 可将研究期分为 2005 年政策实施前与 2005 年政策实施后 2 个阶段. 西溪国家湿地公园的建设, 使得城市化等社会作用力对保护区内外区域的生态服务功能干扰方式发生一定的变化. 公园的保护政策促使公园内不透水面面积保持在较低的水平, 固碳服务持续增强, 而公园外固碳服务则呈现减弱趋势. 公园内外固碳服务在 2009 年即西溪湿地加入国际重要湿地名录时出现交点, 反映出公园内外绿化建设的反向差异, 到 2018 年公园内的固碳服务达到公园外的 1.4 倍. 虽然总体上公园内生物多样性服务一直高于公园外, 但在湿地公园建设后, 二者之间的差异呈现增大趋势.

然而, 湿地公园建设的保护政策对公园生态系统服务的积极作用是有限的. 虽然公园内的娱乐和文化服务显著高于公园外的娱乐和文化服务, 但娱乐和文化服务受到湿地面积缩减的影响, 娱乐和文化服务呈现持续下降趋势. 同样, 对于产水服务、净化服务来讲, 虽然公园内产水量和营养物输送量分别都低于公园外产水量和营养物输送量, 但从变化趋势来讲, 2005 年后公园内外的产水量和营养物输送量总体均

呈上升趋势, 公园的保护作用并没有抑制住产水量、营养物输出量增加的趋势. 对于产水服务而言, 受降水量影响, 在公园内外分别增加了 0.02 、 $0.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 公园内外产水量均呈持续增加态势. 2005 年后受不透水面持续增加的影响, 营养物输送量持续增加, 从 2005 年的 0.15 增加到 $0.19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 在 2009—2013 年间公园内呈现不透水面和湿地面积共同减少的趋势, 而营养物输送量受湿地萎缩影响更大, 呈持续增高趋势. 由此可见, 2005 年西溪湿地作为首批国家湿地公园试点, 在多项生态系统服务增强的同时, 仍存在湿地面积缩减, 旅游商业用地等不透水面面积扩大等问题, 这些问题导致产水量、营养物输出量增加. 因此对于公园保护来讲, 旅游开发和保护之间的矛盾并没有完全化解.

5 结论

利用高分辨遥感影像数据, 对 1984—2018 年西溪湿地生态系统服务时空变化及权衡关系进行了分析, 主要结论如下:

1) 研究期内除固碳服务外, 该区域生态系统服务整体呈退化趋势. 公园内, 固碳服务呈现增长—稳定—

再增长的变化趋势,而公园外固碳服务呈现倒U形变化趋势。研究区域内,产水服务和土壤保持服务受降水影响呈波动趋势。研究期内,营养物输送量呈现持续增高趋势,生物多样性保护服务、娱乐和文化服务总体呈先上升后下降趋势。

2)生态系统服务间之间存在显著的权衡关系,尤其是产水服务分别与固碳服务、生物多样性保护服务、娱乐和文化服务之间,相关系数分别为-0.63、-0.74、-0.81,空间上在城市建设用地周围更为显著。

3)国家湿地公园的建设使得固碳服务与生物多样性服务呈现公园内增加而公园外降低的趋势。公园内经历了沼泽化—草地化—乔木化过程。2005—2018年固碳服务在公园内增加了 $154.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,在公园外减少了 $16.95 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,同时生物多样性在公园内增加了 $15.51 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$,在公园外减少了 $1.78 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$,公园内外服务呈现显著分化特征。

4)受降水量增加、不透水面扩大等因素影响,公园内外的娱乐和文化服务降低,产水量与营养物输出量等均呈现增加趋势,2005—2018年在公园内分别增加了 458.97 、 $0.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,在公园外分别增加了 436.73 、 $0.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由此可见,公园的保护作用有限,旅游开发和生态保护之间的矛盾并没有完全缓解。

6 参考文献

- [1] WANG J Q, WANG W M, XIONG J B, et al. A constructed wetland system with aquatic macrophytes for cleaning contaminated runoff/storm water from urban area in Florida[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280: 111794
- [2] CAO L, FOX A D. Birds and people both depend on China's wetlands[J]. *Nature*, 2009, 460(7252): 173
- [3] GÓMEZ-BAGGETHUN E, TUDOR M, DOROFTEI M, et al. Changes in ecosystem services from wetland loss and restoration: An ecosystem assessment of the Danube Delta (1960–2010)[J]. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100965
- [4] 杨志峰, 崔保山, 黄国和, 等. 黄淮海地区湿地水生态过程、水环境效应及生态安全调控[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(11): 1119
- [5] BRADY S J, FLATHER C H. Changes in wetlands on nonfederal rural land of the conterminous United States from 1982 to 1987[J]. *Environmental Management*, 1994, 18(5): 693
- [6] CHAIKUMBUNG M, DOUCOULIAGOS H, SCARBOROUGH H. The economic value of wetlands in developing countries: a meta-regression analysis[J]. *Ecological Economics*, 2016, 124: 164
- [7] NEMUTAMVUNI K, MCKAY T J M, TANTOH H B. Active citizenry, community-Based organisations and the protection of urban wetlands: the case of colbyn, Tshwane, South Africa[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 24: e1244
- [8] DU X, HUANG Z. Spatial and temporal effects of urban wetlands on housing prices: evidence from Hangzhou, China[J]. *Land Use Policy*, 2018, 73: 290
- [9] 肖涛. 环杭州湾城市群湿地生态系统服务价值评估研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020
- [10] 荔琢, 蒋卫国, 王文杰, 等. 基于生态系统服务价值的京津冀城市群湿地主导服务功能研究[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1654
- [11] 陈莹, 郑锦志. 武汉市湿地破碎化对生态系统服务价值的影响研究[J]. *资源开发与市场*, 2021, 37(3): 257
- [12] 杨青, 刘耕源. 湿地生态系统服务价值能值评估: 以珠江三角洲城市群为例[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(11): 4527
- [13] LIU W, ZHAN J, ZHAO F, et al. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: a case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 228
- [14] HU M, LI Z, WANG Y, et al. Spatio-temporal changes in ecosystem service value in response to land-use/cover changes in the Pearl River Delta[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 149: 106
- [15] 陈万旭, 刘志玲, 李江凤, 等. 长江中游城市群生态系统服务和城镇化之间的空间关系研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(15): 5137
- [16] NOVOA J, CHOKMANI K, LHISSOU R. A novel index for assessment of riparian strip efficiency in agricultural landscapes using high spatial resolution satellite imagery[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 1439
- [17] HUANG X, HAN X, MA S, et al. Monitoring ecosystem service change in the City of Shenzhen by the use of high-resolution remotely sensed imagery and deep learning[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30:
- [18] 谢启姣, 刘进华. 1987—2016年武汉城市湖泊时空演变及其生态服务价值响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 7840
- [19] DAS A, BASU T. Assessment of peri-urban wetland ecological degradation through importance-performance analysis (IPA): a study on Chatra Wetland, India[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106274
- [20] 尹占娥, 田娜, 殷杰, 等. 基于遥感的上海市湿地资源与生态服务价值研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(6): 925
- [21] 邓伟, 周渝, 张勇, 等. 重庆市生态保护红线区生态系统服务价值时空演变特征及其驱动[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(1): 79
- [22] DALLIMER M, DAVIES Z G, DIAZ-PORRAS D F, et al. Historical influences on the current provision of multiple ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 2015, 31: 307
- [23] HU Y, JIN Z, HU Q, et al. Using stable isotopes to identify

- nitrogen transformations and estimate denitrification in a semi-constructed wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 720: 137628
- [24] 蒋昕怡. 西溪国家湿地公园驳岸调查研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016
- [25] 程乾, 吴秀菊. 杭州西溪国家湿地公园1993年以来景观演变及其驱动力分析[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(9): 1677
- [26] 娄艺涵, 张力小, 潘骁骏, 等. 1984年以来8个时期杭州主城区西部湿地格局研究[J]. *湿地科学*, 2021, 19(2): 247
- [27] 蔚芳, 詹小稳. 基于生境质量与碳储量的城市刚性开发边界划定[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(8): 1478
- [28] 朱超, 赵淑清, 周德成. 1997—2006年中国城市建成区有机碳储量的估算[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1195
- [29] DELANEY M, BROWN S, LUGO A E, et al. The quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in Six Life Zones of Venezuela[J]. *Biotropica*, 1998, 30: 2
- [30] ZHANG L X, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701
- [31] COSTANZA R, D'ARGE R, GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*. 1997, 387(15): 253
- [32] XIE G, LIN Z, LU C X, et al. Applying value transfer method for eco-service valuation in China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(1): 51
- [33] WU C, CHEN B, HUANG X, et al. Effect of land-use change and optimization on the ecosystem service values of Jiangsu province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106507
- [34] 王瑶. 基于InVEST的查干湖自然保护区生态系统服务评估及权衡与协同关系研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020
- [35] 杨旭. 气候和土地利用变化背景下中国西北干旱区产水和水质净化服务评估: 以博斯腾湖流域为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2020
- [36] 燕怡云. 土地利用和气候变化情景下的九龙江流域非点源氮输出模拟[D]. 厦门: 厦门大学, 2018
- [37] ZHOU M, DENG J, LIN Y, et al. Identifying the effects of land use change on sediment export: integrating sediment source and sediment delivery in the Qiantang River basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 686: 38

Temporal and spatial changes and trade-offs analysis of urban wetland ecosystem services: a case study of Xixi wetland in Hangzhou

PAN Mingxin¹⁾ ZHANG Lixiao¹⁾ HU Tangao²⁾ HAO Yan¹⁾

(1) State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;
2) Zhejiang Provincial Key Laboratory of Urban Wetlands and Regional Change, Institute of Remote Sensing and Geosciences, Hangzhou Normal University, 311121, Hangzhou, Zhejiang, China)

Abstract Elucidating temporal and spatial changes in urban wetland ecosystem services, especially of long time series and at high resolution, is vitally important for the formulation of urban wetland protection policy. InVEST model and economic valuation methods were applied to land-use maps with high resolution, to estimate changes in ecosystem services and trade-offs between ecosystem of Xixi wetland from 1984 to 2018. Ecosystem services showed an overall declining trend except carbon sequestration, and wetlands continued to deteriorate. An increase trend of carbon sequestration and biodiversity protection services was identified inside park, but a decrease trend outside the park. Rise in precipitation and expansion in impervious ground resulted in higher water yield and nutrient export inside and outside the park. Contradiction between tourism development and ecological protection has not been completely alleviated. Analysis of interactions between pairs of ecosystem services identified that trade-offs occurred mainly between water yield and carbon sequestration services, biodiversity protection services, recreation and cultural services, especially around urban impervious ground.

Keywords urban wetland; xixi wetland; ecosystem services; InVEST model; high resolution remote sensing; tradeoff

【责任编辑: 刘先勤】