

上海城市绿地的植被韧性数据集（2001–2022）研发

孙道千¹, 孙维然¹, 程小燕², 王洁^{2*}, 成方妍³

1. 国家林业和草原局产业发展规划院, 北京 100010; 2. 上海园林绿化建设有限公司, 上海 200335;
3. 浙江农林大学, 森林食物资源挖掘与利用全国重点实验室, 林业与生物技术学院, 杭州 311300

摘要: 植被韧性的高低是决定植被适应气候变化的重要因素, 目前已有少量研究对全球植被进行了综合评估, 但局域尺度的研究仍然有限。此外, 不同方法的评估结果也存在较大的不确定性。本文基于临界慢化理论, 利用 2001–2022 年 250-m 分辨率的 MODIS NDVI 数据, 采用基于局部加权回归的季节性和趋势分解方法以及基于滚动平均和谐波分析方法处理时间序列数据, 并采用方差或一阶自相关系数评估植被韧性, 构建了上海城市绿地的植被韧性数据集。该数据集共包含 3 种韧性评估结果, 不同评估结果之间具有较高的一致性, 表明该数据集的可靠性和稳定性。本数据集包含研究区范围数据、2001–2022 年上海市绿地空间分布及 3 种植被韧性评估结果。其中, 研究区范围存储为.shp 格式, 绿地分布及植被韧性评估数据以.tif 格式存储, 空间分辨率为 250 m。数据集由 28 个数据文件组成, 数据量为 812 KB(压缩为 1 个文件, 726 KB)。

关键词: 恢复力; 临界慢化理论; 绿地; 气候适应性; 植被韧性

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2025.01.07>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2025.01.07>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2024.12.04.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.12.04.V1>.

1 前言

极端气候变化加剧以及人类活动干扰, 造成了全球植被的退化和损失, 尽管人们已经加强并实施大量针对植被恢复和重建的项目工程, 但仍难以从根本上扭转植被的退化趋势^[1]。尤其是在城市生态系统中, 景观植物需要大量的人力和资源维持, 而极端气候变化等干扰已经对城市景观绿地造成了明显的影响^[2]。植被韧性是量化植被从扰动中恢复到平衡状态能力的重要指标, 城市绿地的韧性评估是揭示城市绿地对外界干扰响应的重要基础。近年来, 临界慢化理论在植被韧性评估中逐渐受到关注。该理论基于植被受到干扰后, 其

收稿日期: 2024-12-27; 修订日期: 2025-02-05; 出版日期: 2025-03-25

基金项目: 上海市科学技术委员会(22dz1209403); 上海建工集团股份有限公司(24JCSF-24); 浙江农林大学(2024LFR069)

*通讯作者: 王洁, 上海园林绿化建设有限公司, wjbear@126.com

数据引用方式: [1] 孙道千, 孙维然, 程小燕等. 上海城市绿地的植被韧性数据集(2001–2022)研发[J]. 全球变化数据学报, 2025, 9(1): 52–58. <https://doi.org/10.3974/geodp.2025.01.07>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2025.01.07>.

[2] 孙道千, 孙维然, 程小燕等. 上海城市绿地的植被韧性数据集(2001–2022, V1.0)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.12.04.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.12.04.V1>.

功能性指标的波动和恢复速率变慢的现象评估植被韧性^[3]。基于临界慢化理论估算的植被韧性通常基于长时间序列的连续空间数据生产，具有广泛的适用性，能够较好的解决扰动的叠加效应，并给出定量化的评估结果^[4]。例如，基于临界慢化理论的方法，通常使用方差或一阶自相关系数（Auto-Regressive (model) of order 1, AR(1)）衡量系统韧性^[3]。但是，基于该理论获取的植被韧性数据也具有较高的不确定性，这主要是由于不同研究所采用的消除时间序列数据线性趋势和季节性趋势的方法差异。基于临界慢化理论，方差与 AR(1) 对系统韧性的评估结果具有一致性，因此本文拟使用两种指标之间的偏差来量化评估结果的不确定性^[5]。此外，考虑到对时间序列数据的去趋势化处理复杂性，我们也选择了一种计算效率较高的简化去趋势化算法^[6]，并通过比较简化算法与常规算法之间结果的差异，评估简化算法的可靠性。综上，为了全面评估和比较不同方法的效果，本文基于 2001 年至 2022 年 250-m 分辨率的 MODIS NDVI 数据，采用多种基于临界慢化理论方法，构建上海市城市绿地的植被韧性数据集。

2 数据集元数据简介

《上海城市绿地的植被韧性数据集（2001–2022, V1.0）》^[7]的名称、作者、地理区域、数据年代、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

3 数据研发方法

3.1 数据源

本研究使用了 2001 年至 2022 年的 NDVI（归一化植被指数）数据评估植被韧性，NDVI 数据来自 NASA Terra 卫星 MODIS 传感器的 MOD13Q1 Version 6 数据产品¹。该数据集为 16 天合成，空间分辨率 250 m 的数据集。通过 MOD13Q1 数据产品的“像素可靠性”（Pixel Reliability）和“NDVI 质量”（NDVI Quality）波段筛选可靠数据，并排除植被生长状况较差的区域（NDVI 值长期低于 0.1 的区域）。土地利用数据来自 10-m 分辨率的全球土地环境数据集 Dynamic World²。研究区范围为上海市，上海市行政范围来源于 2024 年高德地图全国行政区范围。

3.2 算法原理

3.2.1 城市绿地提取

为了提取城市绿地，对 Dynamic World 数据集进行了重分类分析。首先，筛选近 10 年的数据（2015–2024 年），提取每个像元上最常出现的地类作为其土地覆盖类型。然后，提取绿地为主的土地覆盖类型，包括树木（trees, label=1）、灌丛（shrub and scrub, label=5）和草地（grass, label=2），并将其他地类重分类为“其他”地类。最后，对土地覆盖类型图重分类至 250 m。

¹ NASA. <https://www.earthdata.nasa.gov/search>.

² Google, WRI. <https://www.dynamicworld.app/explore/>.

表 1 《上海城市绿地的植被韧性数据集（2001–2022, V1.0）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	上海城市绿地的植被韧性数据集（2001–2022, V1.0）
数据集短名	SH_Green_Resilience_1.0
作者信息	孙道千, 国家林业和草原局产业规划院, 15501298321@163.com 孙维然, 国家林业和草原局产业规划院, 15501023599@163.com 程小燕, 上海园林绿化建设有限公司, 1160421734@qq.com 王洁, 上海园林绿化建设有限公司, wjbear@126.com 成方妍, 浙江农林大学, chengfangyan@zafu.edu.cn
地理区域	上海市
数据年代	2001–2022 年
空间分辨率	250 m
数据格式	.shp、.tif
数据量	726 KB（压缩后）
数据集组成	研究区范围数据；2001–2022 年上海城市绿地占比的空间分布，以及基于 3 种算法估算的绿地植被韧性数据
基金项目	上海市科学技术委员会（22dz1209403）；上海建工集团股份有限公司（24JCSF-24）；浙江农林大学（2024LFR069）
数据计算环境	Python
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[8]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS, GEOSS, PubScholar, CKRSC

3.2.2 植被韧性估算

本研究采用 3 种算法估算植被韧性，包括两种计算 AR(1)指数的方法和一种计算 VAR 指数的方法。第一种方法使用简化的 STL（Seasonal and Trend decomposition using Loess）处理时间序列数据^[6]。首先，对每个像素的 NDVI 时间序列计算月平均值和多年月平均值；其次，从月平均值中减去多年月平均值，去除季节性趋势；第三，对去除季节性趋势的数据进行移动平均，并从中减去该移动平均，去除长期趋势；第四，使用滑动窗口计算 AR(1)指数（后简称 STL_AR1）。

第二种方法结合滚动平均和谐波分析处理 NDVI 时间序列^[5]。首先，采用滚动窗口计算 NDVI 的平均值，捕捉长期趋势；其次，从原始 NDVI 数据中减去滚动平均值，得到去趋势的数据序列；第三步，对去趋势后的数据应用 3 阶谐波分析，拟合季节性模式；第四步，从去趋势数据中减去拟合的季节性模式，得到最终的残差序列；第五步，采用 5 年滑动窗口（每次移动 1 年）计算 AR(1)和方差（后简称 V2_AR1 和 V2_VAR）。

为了保证计算结果的可靠性，我们仅筛选了 V2_AR1 与 V2_VAR 比值位于 0.5–2.0 之

间的数据^[5]；并通过比较 STL_AR1 与 V2_AR1 数据趋势的一致性评估简化的韧性算法的可靠性。此外，由于 STL_AR1 使用了自回归模型，因此该数据中的负值代表了对应区域的数据不适合使用该方法进行评估，在分析中应去掉负值区域（占总统计面积的 14%）。V2_AR1 数据使用了自相关的方法，其负值越大，表示对应区域植被恢复到平衡状态的速度越快，韧性越强。V2_VAR 使用了基于方差的方法，其结果与 V2_AR1 相似，负值越大代表植被韧性越强。

3.3 技术路线

基于上述方法，首先收集 NDVI 数据、土地利用数据以及高德地图的行政范围数据进行初步数据整理。然后，提取土地利用数据中的绿地类型，进行重分类并重采样至 250-m 分辨率，结合行政范围数据生成上海市绿地范围。植被韧性的估算采用两种方法：简化 STL 和滚动平均及谐波分析，分别处理和分析 NDVI 时间序列数据。最后，将不同方法的结果整合，并裁剪得到最终的上海市绿地韧性数据（图 1）。

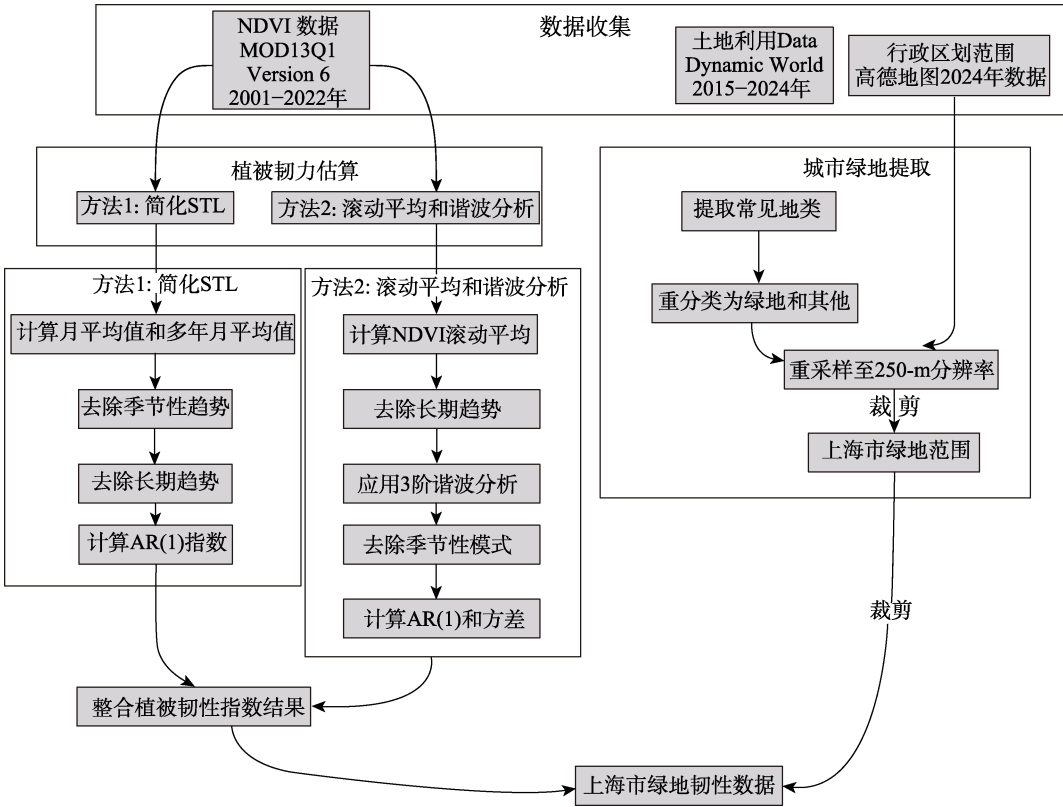


图 1 数据处理技术路线图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

本数据集共包含五个数据图层，具体包括 1 个研究区范围矢量数据（.shp 格式），以及 4 个栅格数据，.tif 格式，分别为 GREEN_R、STL_AR1、V2_AR1 和 V2_VAR 数据，空间

分辨率为 250 m。栅格数据的命名方式如下：GREEN_R 代表基于 2015–2024 年 Dynamic World 数据统计的栅格尺度绿地占比；STL_AR1 是基于简化 STL 方法处理，获取的 AR(1) 指数量化的植被韧性数据；V2_AR1 是基于滚动平均和谐波分析处理，获取的 AR(1) 指数量化的植被韧性数据；V2_VAR 是基于滚动平均和谐波分析处理，获取的方差指数量化的植被韧性数据。

4.2 数据结果

上海市绿地主要分布在郊区和城市外围，市中心区域的绿地占比相对较低。这种分布格局反映了上海作为大型城市的典型绿地空间结构。基于不同方法估算的植被韧性分布情况整体趋势表现一致（图 2）。在空间上，郊区和城市外围的绿地通常表现出较高的植被韧性（如青浦区外围、横沙岛等区域），而市中心区域的植被韧性相对较低。但浦东新区、金山区和奉贤区等滨海区域的绿地韧性也相对较低，这可能与滨海区域强风、盐分变化等环境压力因素有关^[9]。STL_AR1 的结果明显高于 V2_AR1 和 V2_VAR。这可能与 STL_AR1 对数据的处理和分析过程采用了简化的算法，可能会忽略部分区域之间微小的数值差异。此外，单位面积的绿地植被韧性的大小与其绿地占比之间的关系并不明显（图 3），在不同绿地占比下植被韧性的分布并没有明显的规律。不同的植被类型可能具有不同的适应能力和恢复能力，从而影响其整体韧性表现^[5]。

4.3 数据结果验证

比较不同方法估算的植被韧性，可以评估模型结果的可靠性。通过比较不同方法计算的 AR(1) 指数结果发现，两种方法的估算结果总体一致（图 4a），二者存在显著的线性关

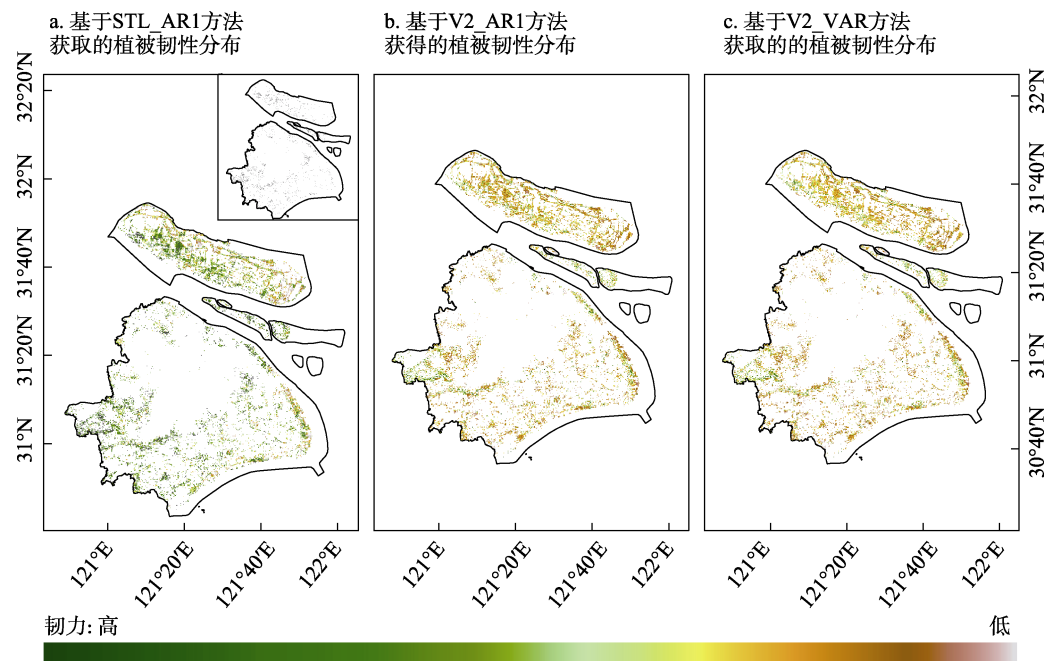


图 2 基于不同方法的上海城市绿地的植被韧性分布图
(注：图 a 右上附图所示黑色区域表示负值区域，表明该模型方法在这些区域不适用)

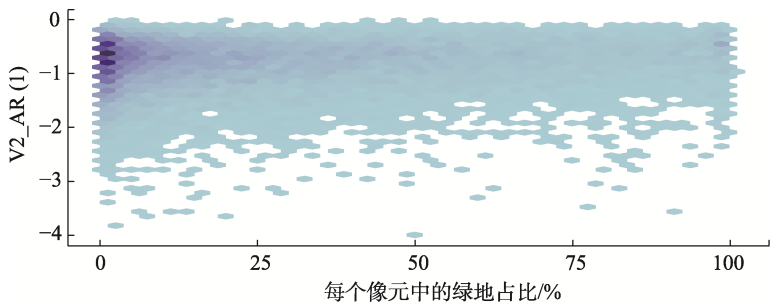


图 3 上海城市植被韧性与绿地占比关系对比图

系 ($p<0.000,1$), 但相关性较弱 (R^2 较低, $R^2=0.09$)。这表明, 简化的算法 (STL_AR1) 能够辅助判断植被的韧性高低, 为快速评估提供了一种可行的方法。然而, 该方法对时间序列数据采用了更加简单的处理方式, 这种简化虽然提高了计算效率, 但也容易忽略时间序列的细微变化。这导致其结果整体比较集中, 可能无法充分反映不同区域植被韧性的细微差异。相比之下, 更复杂的方法 (如 V2_AR1) 能够更精细地处理时间序列数据, 捕捉更多的变化细节, 从而提供更加细致和更准确的植被韧性评估。此外, 基于相同的滚动平均和谐波分析处理方法估算的两种韧性指标 (AR(1)指数和方差指数) 结果基本一致 (图 4b)。大量样点集中在 1:1 参考基准线附近, 这表明该方法具有较好的稳定性和一致性。

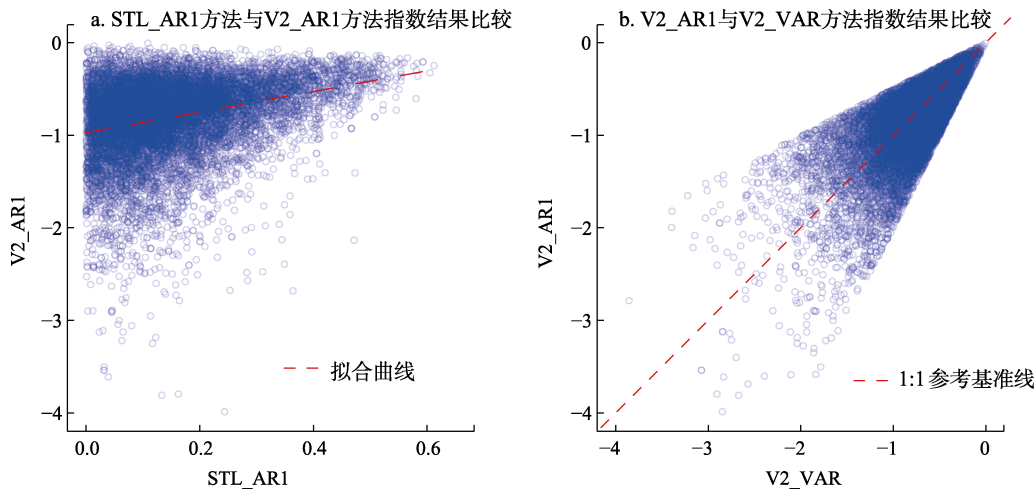


图 4 基于不同算法核算上海城市植被韧性结果的不确定性分析图

5 讨论和总结

本研究基于临界慢化理论, 利用 2001–2022 年的 MODIS NDVI 数据, 采用多种方法构建了上海市城市绿地的植被韧性数据集。该数据集中, 多种指标的评估结果具有高度一致性, 符合理论预期, 具有较高的稳定性和可靠性。

在研究中, 我们观察到部分区域存在两类值得注意的现象: 一是 STR_AR1 系数出现负值, 二是 AR(1)与方差趋势不一致。这些异常现象主要集中在热带雨林和北方高纬度地

区,可能源于多个因素:首先是数据质量问题,包括遥感信号饱和、噪声干扰或分辨率限制,特别是在高生物量区域和云覆盖频繁的地区;其次是生态系统本身的复杂性,如非线性动态特征或系统处于不稳定状态;第三是外部环境的影响,包括人为活动干扰和极端气候事件。此外,作为一种线性平稳模型,AR(1)模型的基本假设在某些生态系统中可能不成立,尤其是在那些正经历剧烈变化或处于生态过渡阶段的区域。这些现象也反映了当前模型对短时间序列数据和空间分辨率的敏感性。鉴于负值缺乏明确的生态学意义,且AR(1)与方差趋势不一致表明评估可能不可靠,我们将这些区域标记为模型不适用区域,并在数据分析中予以排除。未来研究可以考虑发展更适合复杂生态系统的非线性或非平稳时间序列方法,并结合多源数据提高评估的可靠性。

基于构建的数据集,发现上海市绿地主要分布在郊区和城市外围,市中心区域绿地占比较低,反映了典型的大城市绿地空间结构。郊区和城市外围绿地通常表现出较高的植被韧性,而市中心和部分滨海区域的植被韧性相对较低。绿地占比与植被韧性之间并无明显的相关性,表明植被韧性可能更多地受到植被类型和环境条件的影响,而非单纯的覆盖面积。本研究为上海市城市绿地管理和生态规划提供了重要的科学依据,为城市绿地植被韧性的定量评估提供了新的视角,对于提升城市生态系统的可持续性和气候适应性具有重要意义。

作者分工:孙道千、王洁对数据集的开发做了总体设计;孙维然、程小燕采集和处理了数据;孙道千、孙维然和成方妍设计了模型和算法;孙道千和成方妍做了数据验证;孙道千、孙维然、程小燕、王洁和成方妍撰写了数据论文。

利益冲突声明:本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] Overpeck, J. T., Breshears, D. D. The growing challenge of vegetation change [J]. *Science*, 2021, 372(6544): 786–787.
- [2] Vieira, J., Matos, P., Mexia, T., *et al.* Green spaces are not all the same for the provision of air purification and climate regulation services: the case of urban parks [J]. *Environmental Research*, 2018, 160: 306–313.
- [3] Dakos, V., van Nes, E. H., D’Odorico, P., *et al.* Robustness of variance and autocorrelation as indicators of critical slowing down [J]. *Ecology*, 2012, 93(2): 264–271.
- [4] Majumder, S., Tamma, K., Ramaswamy, S., *et al.* Inferring critical thresholds of ecosystem transitions from spatial data [J]. *Ecology*, 2019, 100(7): e02722.
- [5] Smith, T., Boers, N. Reliability of vegetation resilience estimates depends on biomass density [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2023, 7(11): 1799–1808.
- [6] Lenton, T. M., Buxton, J. E., Armstrong McKay, D. I., *et al.* A resilience sensing system for the biosphere [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2022, 377(1857): 20210383.
- [7] 孙道千, 孙维然, 程小燕等. 上海城市绿地的植被韧性数据集(2001–2022, V1.0)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.12.04.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.12.04.V1>.
- [8] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017年更新).
- [9] O’Leary, J. K., Micheli, F., Airoldi, L., *et al.* The resilience of marine ecosystems to climatic disturbances [J]. *BioScience*, 2017, 67(3): 208–220.