

多源数据视角下生态修复与气候变化对渤海湾北岸典型盐碱化地生态系统韧性影响研究

Investigating the Effects of Ecological Restoration and Climate Change on the Ecological Resilience of Saline-Alkali Soils in the Northern Bohai Sea: A Multi-Source Data Perspective on a Typical Coastal Site

刘家霖

LIU Jialin

(上海市园林科学规划研究院, 城市困难立地生态园林国家林业和草原局重点实验室, 国家林业和草原局城市困难立地绿化造林国家创新联盟, 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心, 上海 200232)

(Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Landscaping of Challenging Urban Sites, National Innovation Alliance of National Forestry and Grassland Administration on Afforestation and Landscaping of Challenging Urban Sites, Shanghai Engineering Research Center of Landscaping on Challenging Urban Sites, Shanghai, China, 200232)

文章编号: 1000-0283(2024)10-0131-06

DOI: 10. 12193 / j. laing. 2024. 10. 0131. 016

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-03-01

修回日期: 2024-04-11

摘要

滨海盐碱地(包括滩涂和盐碱土)作为海陆交错的重要生态过渡区和储备地,在维护中国东部沿海区域的生态环境平衡和保护农业生产方面发挥着关键作用。以渤海湾北岸典型的盐碱化地块为案例,基于多源地面观测数据,总结土壤本底状况和盐碱化情况,并量化人工生态修复和气候变化对该地块生态系统韧性的影响。研究结果表明,该区域的土壤盐碱化程度偏高,其中碱化土壤主要分布在陆地,盐碱化土壤则主要分布在近海区域。通过整合多源遥感数据、数字高程模型、再分析气候数据、国际土壤分层数据和土壤盐碱预测数据等,构建丰富的地球观测数据集,显示出对滨海盐碱地生态系统韧性评估具有潜在应用价值。进一步分析显示,该地区的生态系统稳定性受到土地利用变化历史和气候变化进程的协同调控。过去40年中多次土地覆盖和利用类型的显著变化明显削弱了该地块的植被生态系统韧性,导致近年开展的生态修复工程效果有限。此表现为修复后的植被呈中等丰度的灌草丛为主(NDVI约0.64),而未修复前则为高丰度植被状态(NDVI约0.74)。与此同时,与气候变化相关的极端气候事件(如洪涝和干旱)显著削弱了人工修复植被的生存能力(NDVI降至0.30),进而延缓了该地块的自然恢复进程。研究结果为滨海盐碱地的科学保护与可持续利用提供了重要的技术支撑。

关键词

滨海湿地; 盐碱地; 对地观测数据; 生态修复; 生态质量

Abstract

Specifically, coastal saline-alkali land, encompassing tidal flats and saline-alkali soil, serves as a vital transitional ecological zone and reserve area between sea and land, playing a pivotal role in maintaining environmental equilibrium and conserving agricultural production along China's eastern coastal regions. Focusing on a representative saline-alkalized block on the northern coast of Bohai Bay, this study used multi-source ground observation data to outline the soil background and salinization while quantifying the impact of artificial ecological restoration and climate change on the ecosystem's resilience in this area. The findings revealed a notably high degree of soil salinization, with alkaline soil primarily concentrated inland and saline-alkali soil predominantly distributed in the nearshore areas. By integrating many data sources, including remote sensing data, digital elevation models, reanalyzed climate data, international soil layer data, and soil salinity prediction data, the comprehensive earth observation dataset exhibited promising potential for assessing the ecological resilience of coastal saline-alkali land. Notably, the analysis underscored the joint influence of historical land use changes and climate change processes on the stability of the area's

刘家霖

1989年生/男/山东威海人/博士/工程师/

研究方向为生态系统生态学

基金项目:

上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目“碳足迹分析与固碳潜势定量模型”(编号: 22dz1202605); 上海建工集团股份有限公司重点科研项目“长三角一体化水绿协同生态修复及碳效益评估和示范”(编号: 22JCSF-28)

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: jialin.liu@outlook.com

ecosystem. Notably, the substantial shifts in land cover and land use types over the past four decades significantly diminished the resilience of the vegetation ecosystem, leading to limited effectiveness of recent ecological restoration endeavors. This was evidenced by the post-restoration dominance of medium-abundance shrub-grass vegetation (with NDVI of approximately 0.64), contrasting with the pre-restoration state characterized by high-abundance vegetation (with NDVI of roughly 0.74). Moreover, climate change-induced extreme weather events, such as floods and droughts, substantially compromised the survival capacity of artificially restored vegetation (resulting in an NDVI reduction to 0.30), thereby impeding the natural recovery process of the area. The outcomes of this study provide essential technical support for the scientific protection and sustainable utilization of coastal saline-alkali land.

Keywords

coastal wetland; saline-alkali land; earth observation data; ecosystem restoration; ecological quality

中国盐碱地总面积达9 913万hm²，约占全国土地面积的10%，主要包括东部滨海盐土与海涂、黄淮海平原的盐渍土、东北平原的盐渍土、半漠境内陆盐土和青新极端干旱的漠境盐土5种类型，广泛分布于23个省、市、自治区^[1]，已成为中国经济、社会和生态可持续发展的主要障碍因子，也是重要的后备土地资源^[2]。2024年2月3日发布的中央一号文件中提出“分区分类开展盐碱耕地治理改良”“支持盐碱地综合利用试点”等重要工作要求，指出盐碱地是保证国家粮食安全的重要储备资源^[3]。

滨海盐碱地（滩涂盐渍土）是中国东部地区最主要的盐碱地类型。据中国水产科学研究院东海水产研究所估计，以中国3 000 km的海岸线、15 m等深线计，中国保有浅海与滩涂约1 400万hm²。其中，长江口以北的江苏、山东、河北、辽宁诸省滨海盐土面积达100 万hm²（2018年数据）。而随着围填海造陆以及河口淤积等情况，中国现存的东部滨海滩涂盐碱地面积较难准确估计。滨海盐碱地是海陆交错带的重要生态过渡区，在维护生物多样性和生态平衡方面发挥着关键作用，也对维护海岸线稳定、保护生态环境以及净化海岸带环境等方面具有重大意义^[4-5]。

以往研究发现，滨海盐碱地绿化可以

提高生态系统稳定性、增强环境承载能力^[6]、美化环境、有效调节小气候^[7]；盐碱地绿化植物多数具有重要经济价值，在绿化的同时可为经济发展储备生产资料^[8]，通过适当的生态修复与开发利用，滨海盐碱地有望成为重要的农业生产基地和资源开发区。有研究总结了滨海盐碱地治理与修复实践过程中的常见难题，包括土壤高度盐碱化、浅层地下水、生态环境脆弱、初期植被恢复困难等^[9]，针对这些问题提出了合理建议，如结合土地整备来调整地下水位^[10]；通过客土覆栽及改良土壤养分来促进植被恢复^[11]；在充分考虑当地的土壤条件、气候特点和植被恢复的特殊需求前提下，选择适应性强的植物品种^[12]，并选择适应当地生境的生态恢复理念与植被保护措施等。

然而，当前相关行业关注的重点和难点在于如何对滨海盐碱地可持续利用的效果进行高效且准确的评估^[13-15]。尤其是亟需建立一套滨海盐碱地生态系统稳定性的评估方法，针对局域生态工程以及气候变化胁迫等对盐碱地的长期、短效影响进行有效评价^[16]。传统的评估方法主要基于实地调查、野外踏查和跟踪监测等方法手段，采用样线或者样带法，以季度为时间频度，围绕滨海盐碱地植被长势、生物多样性、土壤理化指标等指标^[17]。但上述手段无法有效掌握目标滨海盐

碱地块的历史成因，且不同指标间存在因调查方法导致的空间异质性问题。随着对地遥感观测技术与生态环境大数据的发展演化，利用多源遥感产品、地理信息系统和大数据分析工具，结合空间统计学方法，以相对统一的量化指标与评价体系对目标生态系统的结构组成、空间分布和生态价值进行快速核算，已成为相关领域的研究热点^[18]。

综上，本研究以渤海湾北部典型盐碱地地块为研究案例，利用多源对地观测数据和生态环境大数据产品，针对生态修复和气候变化对该地块生态系统韧性的影响进行综合评估。分析基于多源数据的综合评估方法在滨海盐碱地区域所具备的应用潜力，为中国滨海盐碱地科学利用与可持续保护提供重要技术支撑，为国家粮食安全保驾护航。

1 研究区概况

研究区域位于渤海湾北岸，毗邻河北省唐山市曹妃甸湿地景区西侧，地处华北理工大学（曹妃甸校区）校园北部。研究典型案例地块（即样地）的中心点地理坐标为北纬39.21°、东经118.586°。样地呈现出近似哑铃形的轮廓（图1），东西方向的平均长度约为525 m，南北方向的平均长度约为261 m。根据空间测算，样地的总面积为15.44 hm²。

2 数据来源与处理

2.1 数据来源

本研究的关键数据主要基于多源对地观测数据(集):(1)多光谱影像数据(Landsat、Sentinel-2);(2)对地观测照片集(Google Earth Archive);(3)国际土壤参考信息中心(ISRIC)土壤类型与属性数据集;(4)地球高程观测数据(SRTM、TanDEM-X mission);(5)土壤盐碱数据集^[19-20];(6)长时序气候变化数据集。文中卫星影像数据底片来源于国家地理信息公共服务平台(www.tianditu.gov.cn/)。

2.2 多光谱数据处理

多光谱影像数据预处理,包括辐射定标、正射校正、辐射校正、大气校正和图像裁剪拼接等,主要利用Google Earth Engine的在线超算服务完成;增强植被指数(EVI)、修正归一化差值水指数(MNDWI)、归一化植被指数(NDVI)和植被水分含量指数(LSWI)数据通过Google Earth Engine平台的Landsat系列卫星数据解译获得;帕默尔干旱指数(scPDSI)数据来源于Climatic Research Unit(<https://www.uea.ac.uk/groups-and-centres/climatic-research-unit>)。

植被和水体的分布情况通过植被频率和水体频率数据(2018–2022年的平均频率数据)来表示。以2018年样地内第*i*个像素点位为例,具体的计算过程如下:(1)去除2018年每张影像中的云和阴影,保留高质量的影像数据*N*张;(2)计算每张影像的EVI、MNDWI、NDVI和LSWI数据;(3)当 $EVI \geq 0.1$, $NDVI > 0.2$, 且 $LSWI > 0$ 时,认为*i*像素为植被;(4)当 $EVI < 0.1$, 且 $MNDWI > EVI$ 或 $MNDWI > NDVI$ 时,认为*i*像素为水体;(5)分别统计像素*i*为植被的次数*nveg*和像素*i*为水体的次数*nwater*;(6)2018年*i*点位的植被频率为*nveg/N*, 水体频率为*nwater/N*。

2.3 土壤数据处理

土壤类型与属性数据集主要提取0~5 cm、5~15 cm、15~30 cm、30~60 cm、60~100 cm、100~200 cm不同深度的数据。同时,盐化土壤(Saline)、碱化土壤(Sodic)和盐碱化土壤(Saline-Sodic)的划分基于1985年至2018年的全球土壤盐度和碱度数据(<https://data.mendeley.com/datasets/v9mgbmtnf2/1>)。其中,盐化土壤定义为在至少75%的年份中,土壤的电导率(ECe)值达到或超过4 dS/m的土壤。碱化土壤定义为在至少75%的年份中,土壤的交换性钠百分比(ESP)值达到或超过6%的土壤。盐碱化土壤则是指在至少75%的年份中,土壤同时满足ECe值达到或超过4 dS/m和ESP值达到或超过6%的土壤。

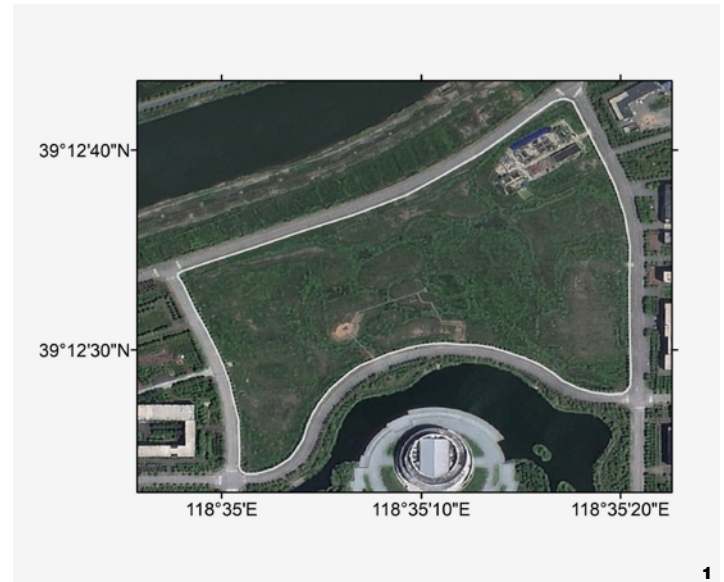


图1 研究区域
Fig. 1 Spatial illustration of the study area

2.4 生态韧性概念说明

本研究中的生态系统韧性指的是一个生态系统对外界压力、干扰或变化的适应能力和恢复能力。它衡量了一个生态系统在面临环境变化或干扰时的稳定性和持续发展的能力。一个具有高韧性的生态系统能够保持其功能和结构的稳定性,从而保证生物多样性和生态服务的持续性。韧性强的生态系统能够快速适应和恢复,减少生态破坏的影响并提高生态系统的可持续性。

3 结果与分析

3.1 基于多源对地观测数据的案例地块盐碱化定量分析

研究区域的土壤盐碱化程度偏高,尤其是在样地所在的局部环境中,土壤盐化和碱化程度均较高(图2)。基于多源对地观测数据的样地0~100 cm分层土壤物理性质分析显示,土壤平均砂粒含量约为 (391.2 ± 18.4) g/kg(平均值±标准差),平均粉粒含量约为 (378.0 ± 15.1) g/kg,平均黏粒含量约为 (231.5 ± 22.7) g/kg,平均土壤容重约为 (144.7 ± 10.0) cg/cm³。随着土壤深度的增加,土壤砂粒含量逐渐降低,土壤粉粒含量和土壤黏粒含量均先增加后降低,而土壤容重则呈增加趋势。样地土壤化学性质分析结果显示,平均土壤交换性阳离子容量约为 (391.2 ± 18.4) mmol(c)/kg,平均土壤有机碳含量约为 (159.3 ± 83.6) dg/kg,平均土壤全氮含量约为 (103.2 ± 49.5) cg/kg。随着

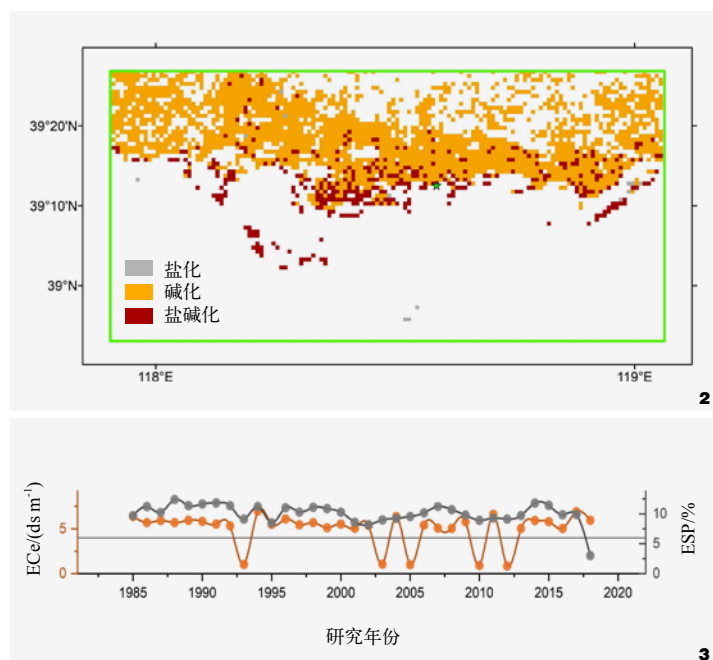


图2 研究区盐碱化土壤空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of salinized soil in the study area

图3 样地不同深度的土壤盐度 (ECe)、碱度 (ESP) 动态

Fig. 3 The dynamics of soil salinity (ECe) and alkalinity (ESP) at different depths of the plot

土壤深度的增加, 土壤的化学属性值通常呈下降趋势。同时, 样地所处区域的土壤pH值 (7.8 ± 0.15) 呈现出明显的空间分布规律, 近海侧的土壤pH值高于陆地方向的土壤pH值, 并且不同深度的土壤pH值差异明显。样地盐化土壤 (Saline) 约占总土壤的85%, 碱化土壤 (Sodic) 约占1%, 盐碱化土壤 (Saline-Sodic) 约占15%。其中, 碱化土壤主要分布在陆地方向, 而盐碱化土壤主要分布在近海区域。样地所处位置的土壤盐化和碱化程度均较高 (图3), 其多年平均土壤电导率 (ECe) 约为5.03 dS/m, 多年平均土壤交换性钠百分比 (ESP) 约为10.05%。

3.2 土地利用/覆盖变化对案例地块植被生态系统影响分析

在近40年里, 样地经历了多次土地覆盖/利用类型的改变 (图4)。在20世纪80年代时, 样地处于自然状态 (撂荒), 拥有相对高丰度的植被覆盖 (如1985年样地平均NDVI为0.74); 1988年, 样地被承租改造为虾塘; 2014年, 在“退渔还田”政策引导下, 样地再次被改造为建设用地。在建设用阶段, 由华北理工大学出资进行了生态修复与景观功能改造。调研资料显示, 根据盐碱地“盐水动态”特征, 有关生态工程通过地势改造 (改善排水) 进行了一系列的盐碱地整治。工程

结束后, 样地作为校园建设/绿化储备用地再次撂荒, 人工干预较少。样地还有部分永久性人造水体和季节性积水区域。

该样地目前的植被主要由自然恢复形成, 呈以灌草丛为主的中等丰度植被覆盖 (如2021年样地平均NDVI为0.64), 且植被覆盖率 (2018年至2022年期间植被频率不低于5%的区域) 高于90%。值得注意的是, 由于区域盐渍化背景情况, 样地的盐碱化水平并未随土地覆盖/利用类型的改变而显著改善。在经历长期水淹和系统性生态修复工程并自然野化近10年后, 该样地的植被水平仍较20世纪80年代时低, 突显了针对退化生态系统修复的复杂性与困难度。

地势变化会显著影响水盐动态, 进而影响地块的生态修复效果。数据显示样地的地势起伏情况也随着土地覆盖/利用类型的变化略有变化 (图5)。在未进行虾塘改造前, 样地整体地势较为平坦。虾塘改造后, 部分地表明显凹陷, 即地势起伏明显: 整体上, 平均地表高程约为 -1.11 ± 0.32 m, 最高地表高程约为0.02 m, 最低地表高程约为-1.93 m, 局部地区高程差最高约为1.56 m。在建设用地改造后, 区域整体地势呈现出东、西两侧地势较高, 中部地势略低, 且东北区域和中部修建有永久性人工水体。

3.3 气候变化对案例地块植被生态韧性影响分析

长时序归一化植被指数 (NDVI) 耦合帕默尔干旱指数 (PDSI) 分析结果显示 (图6), 样地的植被生态韧性受到极端气候 (洪涝/干旱) 的显著影响。例如1995年的洪涝事件和2002年的极端干旱事件, 导致样地NDVI出现下降, 平均植被生态韧性 (即极端事件暴露后NDVI恢复至原水平的时间) 为19个月。而2014年样地由虾塘改造为建设用地后, 极端气候同样对样地的植被自然恢复产生显著调控。如2016年发生的干旱事件导致样地的植被出现明显退化, 使2016年样地植被的平均NDVI降至0.30, 是近年来的最低水平, 且样地植被生态韧性恢复时间长达25个月。多次土地覆盖/利用类型的变化可能削弱了该地块的植被生态系统韧性, 延缓了地块的植被自然修复进程。

4 讨论

4.1 利用多源对地观测数据开展滨海盐碱地生态修复评估的优势

本研究采用多源对地观测数据开展人工生态修复和气候变化对华北典型滨海盐碱地块的生态系统韧性的影响研究。研究总结了利用多源对地观测数据开展滨海盐碱地生态修复评估的优势:

(1) 全面性。多源对地观测数据可以提供不同方面、不同时段

的数据，包括植被指数、土地利用变化、土壤盐碱化程度、降雨量等多个方面，使评估结果更全面，准确地反映生态系统的多方面特征。

(2) 时空一致性。多源对地观测数据能够提供跨越不同时间和空间尺度的信息，通过时序数据能够观测到生态系统的变化趋势和周期性变化，有助于全面了解生态系统状态的演变。

(3) 客观性。多源对地观测数据采集的信息更客观、全面，避免了主观调查和局限于特定点位观测的局限性，能够准确、客观地反映滨海盐碱地的生态修复情况。

(4) 科学性。多源对地观测数据经过科学的处理和分析，可以提供准确的定量信息，为科学决策提供数据支持，有助于制定科学合理的生态修复策略。

(5) 实时性。某些类型的对地观测数据具有较高的实时性，能够及时监测到生态系统的变化，及时调整修复策略和措施，保证生态修复工作的有效性。

4.2 基于多源对地观测数据开展滨海盐碱地生态修复评估的意义

基于多源对地观测数据开展滨海盐碱地生态修复评估对于科学、准确地评估生态系统韧性、监测生态修复效果以及指导未来的生态规划具有重要的意义。

(1) 综合评估。多源对地观测数据可以提供多方面的地理—时空与生态—结构功能信息，包括土地利用类型、植被覆盖情况、气候变化趋势、生态系统韧性等，从而为生态修复提供全面的综合评估，有助于全面了解地区生态系统的状况。

(2) 准确评估。利用多源数据进行评估能够提供更为准确的信息，避免了单一数据

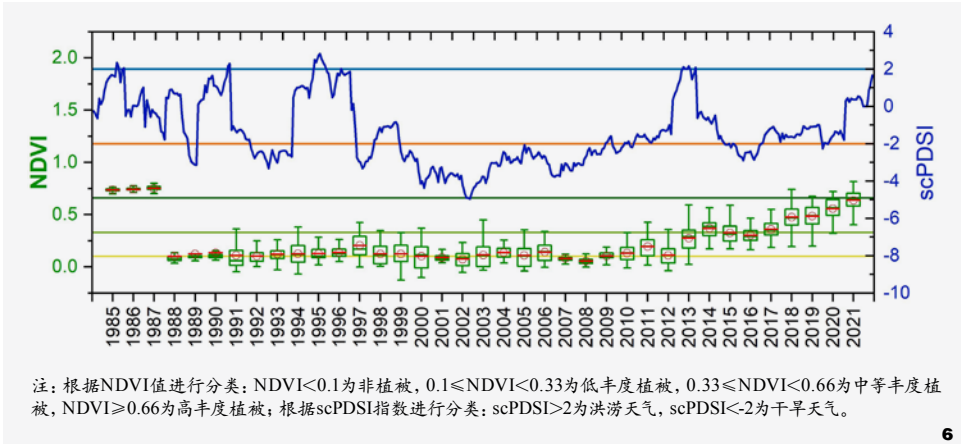
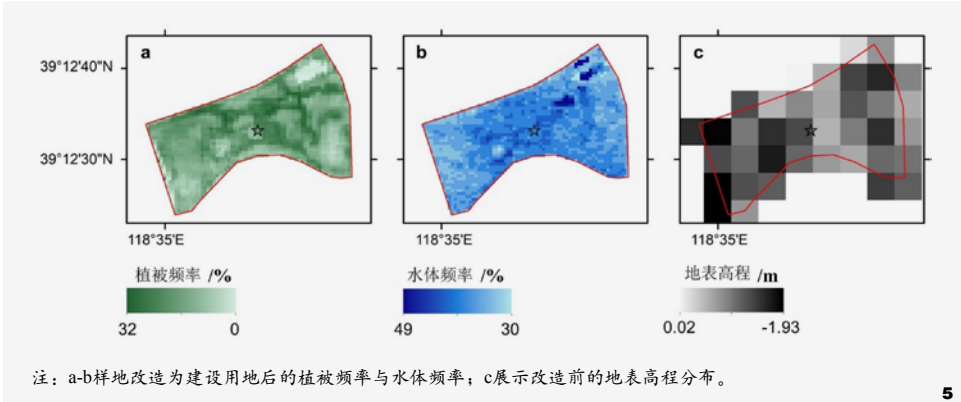


图4 研究区域土地利用/覆被变化情况 (1985至2022年)
Fig. 4 Dynamics of land use change in the study area from 1985 to 2022
图5 研究区域植被频率、水体频率与地表高程分布
Fig. 5 The distribution frequency of vegetation and water bodies and the distribution of land surface elevation in the study area

图6 极端气候事件对典型盐碱地地植被动态的调控作用
Fig. 6 The regulatory effect of extreme climate events on vegetation dynamics in typical salinity site

源可能存在的偏差和不足，有助于更准确地评估生态系统的韧性和修复效果。

(3) 科学决策。基于多源对地观测数据

进行生态修复评估有助于科学决策，可以为政府部门和相关研究机构提供科学依据，指导制定滨海盐碱地的生态修复规划和措施。

(4) 监测效果。多对地观测数据还可以用于长期的生态系统监测, 评估生态修复效果的持续性和稳定性, 为未来的管理和调整提供数据支持。

4.3 土地利用变化与气候变化对滨海盐碱地植被生态韧性的影响

研究发现土地利用变化和气候变化对滨海盐碱地植被生态韧性都有重要影响。土地利用变化可能导致生境破坏和生境丧失, 进而影响植被的生长和分布, 降低植被的稳定性和适应性。气候变化则会直接影响植被的生长季节、水分供应和温度条件, 导致植被面临更多的压力和挑战, 降低其生态韧性。土地利用变化和气候变化可能存在协同作用, 例如, 土地利用变化导致生境破坏可能加剧气候变化对植被的影响, 或者气候变化可能加速土地利用变化的影响。同时, 土地利用变化和气候变化对生态系统服务供给的变化产生共性的影响, 包括土壤保持、水文调节、碳储存等, 进而影响到植被的生态韧性。此外, 人类的干预如植被恢复、土地治理、水资源管理等也会对土地利用和气候变化产生反馈作用, 对植被生态韧性产生影响。在此, 研究建议后续的滨海盐碱地开发利用需要综合考虑土地利用变化历史和区域气候变化的影响, 对滨海盐碱地植被的生态韧性进行评估和监测, 有助于制定相应的生态修复措施和适应性管理策略, 以促进植被的稳定生长和生态系统的健康发展。

5 结论

本研究以渤海湾北岸典型盐碱化地块为案例, 基于多源对地观测数据, 总结了典型研究地块的土壤本底状况与盐碱化情况, 并量化人工生态修复和气候变化对该地块生态

系统韧性的影响, 进而对盐碱地块的生态系统结构功能进行评估, 为滨海盐碱地生态修复与可持续利用提供科学依据。结论如下:

(1) 整合多源遥感数据、数字化高程图、再分析气候数据、国际土壤分层数据以及土壤盐碱预测数据等对地观测大数据(集), 具备对滨海盐碱地生态系统韧性评估的应用潜力, 并可为不同历史成因的滨海盐碱地的生态修复方案筛选提供重要的技术指导。

(2) 研究典型地块的生态系统稳定性受到土地利用变化史与气候变化进程的协同调控。土地覆盖/利用类型的变化明显削弱了该地块的植被生态系统韧性, 导致已开展的生态修复工程效果有限。气候变化关联的极端气候事件也大幅度削弱了人工修复植被存活能力, 进而延缓了该地块的自然恢复进程。

(3) 本研究也存在一定的局限性, 如仅针对华北的滨海盐碱地地块进行了方法学的测试, 对于该方法在不同区域、不同成因的滨海盐碱地是否具有广泛的适用性还有待进一步研究。随着相关技术方法不断深入研究, 后续研究需要应用高光谱遥感和激光测绘等技术手段, 为滨海盐碱地绿化管理提供更加全面的数据支撑。

注: 文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] 王世平, 陈月, 潘大伟, 等. 盐碱地治理研究综述: 现状、问题与对策[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(11): 59-68.

[2] 徐成龙, 董奕岑, 卢家磊, 等. 我国滨海盐碱地土壤改良及资源化利用研究进展[J]. 世界林业研究, 2020, 33(06): 68-73.

[3] 云雪雪, 陈雨生. 国际盐碱地开发动态及其对我国的

启示[J]. 国土与自然资源研究, 2020(01): 84-87.

[4] 陈影影, 符跃鑫, 张振克, 等. 中国滨海盐碱土治理相关专利技术评述[J]. 中国农学通报, 2014, 30(11): 279-285.

[5] 赵英, 王丽, 赵惠丽, 等. 滨海盐碱地改良研究现状及展望[J]. 中国农学通报, 2022, 38(03): 67-74.

[6] 魏灼焜, 李时雨, 杨建英, 等. 天津滨海盐碱地盐胁迫对6种树木幼苗生长的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(03): 47-55.

[7] 朱建峰, 崔振荣, 吴春红, 等. 我国盐碱地绿化研究进展与展望[J]. 世界林业研究, 2018, 31(04): 70-75.

[8] 枚德新, 张德顺, 王振. 滨海盐碱地生态修复现状及趋势[J]. 中国农学通报, 2013, 29(05): 167-171.

[9] 张浪. 谈新时期城市困难立地绿化[J]. 园林, 2018(01): 2-7.

[10] 张群, 崔心红, 夏楠, 等. 上海临港新城近60a筑堤区域植被与土壤特征[J]. 浙江林学院学报, 2008(06): 698-704.

[11] 张琪, 夏楠, 王洪, 等. 污泥在滨海盐渍土绿化中的应用[J]. 园林, 2012(02): 54-55.

[12] 朱义, 崔心红, 张群, 等. 有机肥料对滨海盐渍土壤理化性质和绿化植物的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2012, 30(04): 91-96.

[13] 曾浩威, 凌成星, 刘华, 等. 基于关键指标优化的南瓮河国家级自然保护区生态系统质量变化评估[J]. 应用生态学报, 2023, 34(11): 3064-3072.

[14] 张琳, 宋创业, 袁伟影, 等. 基于地面调查的植被生态质量综合评估指标体系构建[J]. 生态学报, 2023, 43(01): 128-139.

[15] 任令祺, 任广波, 王建步, 等. 面向滨海湿地修复治理的生态系统服务净价值遥感评估研究——以黄河口湿地为例[J/OL]. 海洋开发与管理: 1-17[2023-11-06]. <https://doi.org/10.20016/j.cnki.hykyfjgl.20231103.002>

[16] 蒋德健, 杨倩, 阮艳婷, 等. 应用植被生态指标对安徽省生态系统质量动态遥感评估[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(03): 90-96.

[17] 余海东, 顾行发, 魏香琴, 等. 尼泊尔生态系统质量评估与时空格局变化——基于参照条件的评估方法[J]. 生态学报, 2023, 43(17): 7047-7059.

[18] 于贵瑞. 刊首语——“森林生态系统质量评估”专刊[J]. 陆地生态系统与保护学报, 2022, 2(05): 3.

[19] HASSANI A, AZAPAGIC A, SHOKRI N, et al. Predicting Long-term Dynamics of Soil Salinity and Sodicity on a Global Scale[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(52): 33017-33027.

[20] HASSANI A, AZAPAGIC A, SHOKRI N, et al. Global Predictions of Primary Soil Salinization Under Changing Climate in the 21st Century[J]. Nature Communications, 2021, 12: 6663.