

黄河三角洲地区 SAGE 潜在植被的验证和修订*

王发浩¹⁾ 叶瑜^{1,2)†} 韩宗轩¹⁾ 宋悦¹⁾ 李俊¹⁾ 江畅¹⁾ 李晗孙白¹⁾

(1)北京师范大学地理科学学部, 100875, 北京; (2)北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 100875, 北京)

摘要 采用植被野外调查方法, 结合黄河河道变迁及新旧黄河三角洲扩展过程, 辨识了黄河三角洲不同地貌位置的植被类型, 据此分析了黄河改道、三角洲扩展及人类土地利用活动对自然植被的影响; 参考植被类型分布及遥感影像资料, 评估并局部修订了黄河三角洲地区全球环境和可持续发展中心(center for sustainability and the global environment, SAGE)潜在植被数据。研究发现: 1)黄河三角洲自然植被格局呈由内陆向海岸的“环扇状”分布, 植被由内向外依次是落叶阔叶林、柽柳灌丛、芦苇和碱蓬草甸、荒漠; 2)黄河改道对黄河三角洲自然植被的影响主要表现在新三角洲地区, 新三角洲近黄河河道地区主要发育淡水植被景观, 远离河道地区发育耐碱植被景观; 3)人类土地利用活动对黄河三角洲自然植被影响存在沿海、内陆分异, 内陆地区主要表现为人工植被代替自然植被, 沿海地区主要表现为人工不透水面代替自然植被; 4)SAGE 潜在植被总体上反映了黄河三角洲植被空间分布格局, 但部分地区与自然植被差异显著。修订后的潜在植被数据更好地体现了黄河三角洲植被类型分布差异和圈层演变特征, 将为黄河三角洲人类-环境效应相关研究提供基础数据支持。

关键词 黄河三角洲; SAGE; 潜在植被; 野外植被调查; 验证

中图分类号 P935; Q948

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022004

0 引言

人类活动深刻地改变了地球自然环境, 重塑了地表景观和生态系统格局。据统计, 工业革命以来, 全球 42%~68% 的地表受到人类土地利用活动的影响, 约 41% 的天然植被被改造为农田和城镇建设用地^[1-2]。人类土地利用活动通过改变地表反照率、地表粗糙度、潜热通量、碳氮循环等形式, 影响地球生物物理和生物化学过程, 对区域乃至全球气候和环境产生深远影响^[3-4]。如何定量评估人类土地利用活动的环境效应是全球变化研究领域关注的热点问题。作为人类土地利用变化和碳收支模拟的“起点”, 潜在植被是在无人干扰下, 立地当前自然环境发育形成的顶级植被类型^[5], 是土地利用分布格局重建^[6-7]、生态系统碳收支核算^[8-10]、气候变化情景模拟研究^[11]的重要基础数据。潜在植被的准确与否, 直接关乎人类-环境效应的模拟结果。

目前, 国内外学者在潜在植被格局模拟方面开展了诸多研究工作, 构建了多套潜在植被空间分布数据集, 涵盖区域、国家、全球多个尺度^[12-14]。按照重建思路的不同, 潜在植被重建方法可分为样地调查法和气候-植被模型法。其中, 样地调查法以现状植被为依

据, 参考气候、土壤等基础资料, 复原样地潜在植被类型。因效率低且可重复性差, 此类方法多用于小尺度范围潜在植被的重建。为满足大时空尺度潜在植被模拟的需要, 包括生物地理模型、生物地球化学模型及大气-生物圈耦合模型在内的气候-植被模型法, 通过建立环境因子(气候、土壤)与样地植被空间属性之间的映射关系, 广泛应用于过去及未来情景下潜在植被的空间分布格局的模拟。如: 董卓瑶等^[15]采用基础气象和土壤数据, 利用生物地理耦合模型 BIOME4 模拟了中国东部南北样带森林的潜在分布; Fan 等^[16]基于气候数据, 采用 HLZ(holdridge life zone)模型模拟了未来气候变化情景下 2011—2100 年青藏高原不同梯度区的潜在植被分布。然而, 这些产品往往缺少区域尺度的精度检验, 小尺度范围内自然环境往往具有较强的一致性, 以气候因子为主要输入变量的气候-植被模型对局地不同植被类型的区分度低。当这些产品应用在自然环境变化较为剧烈、植被类型复杂多样的地区时, 需进一步验证数据的可靠性和精度。

黄河三角洲是中国陆地表层变化最为活跃的地区。1855 年黄河夺大清河河道恢复东流后, 黄河三角

* 国家重大研发计划资助项目(2017YFA0603304)

† 通信作者: 叶瑜(1979—), 女, 副教授。研究方向: 历史土地覆被变化研究。E-mail: yeyuleaffish@bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-01-10

洲地区成陆过程明显, 1855—2001 年间平均造陆速率约 $20.41 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 至今, 现代黄河三角洲面积已达 $5\,450 \text{ km}^2$ [17]。过去百余年间, 黄河尾间摆动频繁, 较大规模改道发生了 11 次 [18]。河道变迁对三角洲地区土壤、水分条件及自然植被分布的影响广泛而深刻。此外, 黄河三角洲形成历史较短, 在新的海岸线和三角洲形成后, 植被存在自然演替的过程。因而, 根据现代环境条件下模拟的潜在植被, 可能与新的海岸线和三角洲形成后发育的自然植被之间存在很大区别, 将以现代气候、土壤等参数模拟的潜在植被数据集, 直接应用于黄河三角洲等海岸带地区的历史土地覆被重建研究存在较大的不确定性。基于野外植被调查、遥感影像等资料, 设计一套适用于黄河三角洲地区多尺度潜在植被数据的验证和修订方案, 将有助于进一步提高黄河三角洲地区历史时期土地覆被变化及其气候环境效应研究结果的准确性。

鉴于此, 本研究结合新旧 2 期黄河三角洲扩展, 设计野外实地植被采样调查方案, 基于野外考察, 辨识新旧三角洲以及黄河故道不同地貌部位的植被类型, 分析黄河改道和三角洲扩展对自然植被的影响, 明确自然植被分布与现代土地利用的关系, 进而结合现代土地利用以及植被分布资料, 以历史土地覆被重建研究中常用的美国威斯康星大学 SAGE 潜在植被数据为例, 对黄河三角洲地区 SAGE 潜在植被数据进行精度评估和局地修正, 以期为黄河三角洲历史和未来情景下土地覆被变化及碳排放估算提供基础数据。

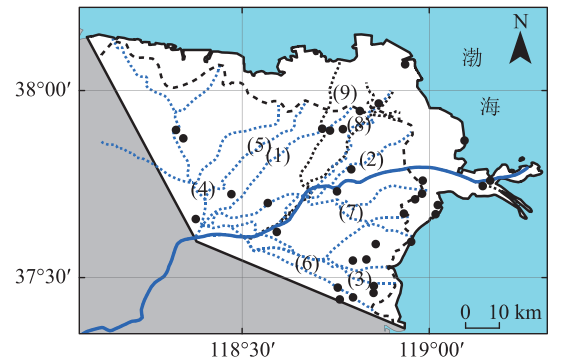
1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区为 1855 年黄河从铜瓦厢决口后夺大清河路形成的近代三角洲, 以宁海为顶点, 北起套儿河口, 南抵支脉沟口, 面积为 $5\,450 \text{ km}^2$ (图 1)。研究区以平原为主, 平均海拔约 5~6 m。受黄河河道改道和决口影响, 三角洲上形成了岗、坡、洼相间的地貌分布。黄河三角洲地区为温带大陆性季风气候, 雨热同期, 年平均降水量为 530~630 mm。该地区土壤形成时间短, 以沙土和黏土为主, 土壤盐渍化程度高。植被受水分、土壤盐分、人类活动影响大, 现有植被以草本植物为主, 木本植物较少, 多发育芦苇、怪柳、盐地碱蓬等。

1.2 数据源简介

采用的数据主要分为潜在植被数据和校验数据。潜在植被数据为 SAGE 潜在植被数据, 来源于美国威斯康星大学全球环境和可持续发展中心, 空间分辨率为 $5' \times 5'$ [19]。该数据以 DIScover 土地覆被数据为基础, 将土地覆被数据重分类为 15 种潜在植被类型、人工土地利用(城镇、耕地)、湿地及水



图例

- 采样点
 - 历史黄河河道
 - - - 1954 年海岸线
 - 近代黄河河道
 - - - 现代海岸线
 - 今黄河河道
- 河道行水时期:
 (1) 1885—1889 年 (4) 1904—1926 年 (7) 1934—1953 年
 (2) 1889—1897 年 (5) 1926—1929 年 (8) 1953—1964 年
 (3) 1897—1904 年 (6) 1929—1934 年 (9) 1964—1976 年

图 1 黄河三角洲范围及植被采样点分布

体等, 对于由自然植被主导的格网, 以卫星观测的植被作为其潜在植被类型; 对于人工土地覆被主导的格网, 以 BIOME3 陆地生态系统过程模型模拟的植被类型替换, 复原无人活动干扰情况下区域内的潜在植被类型, 从而构建全球潜在植被的空间分布。

校验数据包括野外植被调查样点数据、中国 1:100 万植被类型空间分布数据以及 2000 年土地利用遥感监测数据。其中: 野外调查植被样点数据来源于本课题组于 2021 年 6 月在黄河三角洲地区开展的植被调查采样, 本次采样共包含 32 个植被样点, 实地采集植物标本后, 以《山东植物志》中的植被图鉴为参考, 鉴别样点植被类型并记录成表 [20]; 1:100 万植被类型数据为《1:1 000 000 中国植被图集》的数字化产品, 主要用于未采样地区植被的识别, 该图集反映了我国 11 个植被类型组、54 个植被型的 833 个群系和亚群系植被的地理空间分布 [21]; 2000 年土地利用遥感监测数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。此外, SAGE 潜在植被数据修订过程中, 采用 LPJ-DGVM 模型模拟的中国地区潜在植被分布, 该数据使用的 LPJ-DGVM 模型由月温度、月降水等气候要素、土壤要素及 CO_2 浓度要素驱动, 首先通过循环使用气候资料场使模型达到平衡态, 进而以平衡态为初始值, 积分模型获取中国区域的潜在植被分布 [22]。相较于 SAGE 数据集中以 BIOME3 模型模拟的潜在植被本底, LPJ-DGVM 模型更加考虑了植被与环境的动态过程, 反映了植被生长对环境变化的动态反馈。

1.3 研究方法

1.3.1 黄河三角洲植被野外调查采样

近百年来黄河三角洲成陆和黄河尾间改道过程, 导致了该地区土

壤母质和盐分变化,对植被空间分布产生影响.因而,黄河三角洲植被野外调查采样方案侧重于考察不同地貌部位植被的类型和分布情况,采样地主要覆盖近代和现代 2 期三角洲岸线、黄河故道和现行河道.包含 2 个重点区域:一是利津、垦利的主要垦区,重点考察人类土地利用和自然植被的关系;二是黄河故道南北向、新旧三角洲东北—西南走向区域的植被类型和分布,主要考察黄河下游河道摆动对自然植被的影响.其中,覆盖近代三角洲岸线的采样点 6 个,现代三角洲岸线的采样点 6 个,黄河现行河道和故道地区的采样点 3 和 18 个,其他地区的采样点 4 个(图 1,部分采样点同属于不同地貌部位).

采样过程中,草本和灌木植物样地大小为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 格网,草本植物提取样地四周和中心 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 格网内植被样本,灌木群落则将样地 4 等分为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的格网后取样.考虑到黄河三角洲地区乔木的生长情况,适当地扩大乔木样地面积,乔木样地面积设定为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 格网,取样后,记录采样点地理坐标信息,并参考《山东植物志》鉴别样地优势植被科属,进而参照 SAGE 潜在植被数据的植被类型划分标准,对采样点植被进行分类记录,便于后续与 SAGE 潜在植被数据的比对.

1.3.2 SAGE 潜在植被的验证和修订方案 SAGE 潜在植被数据的验证主要采用野外实地调查的自然植被类型数据与中国 1:100 万植被分类数据交叉对比验证的方法.具体地,使用 ArcGIS 软件将野外采样点与 SAGE 潜在植被数据进行空间叠合分析,匹配植被采样点与 SAGE 潜在植被数据格网,对比采样点代表的植被类型与 SAGE 潜在植被数据类型,以此验证采样点覆盖地区 SAGE 潜在植被网格植被类型的准确性.对于采样点未覆盖的潜在植被格网,采用 1:100 万植被分类数据中的非人工植被类型验证.首先提取 1:100 万植被分类数据中的非人工植被类型,进而参照 SAGE 潜在植被类型划分标准,对 1:100 万植被分类数据中的非人工植被分类数据进行重分类,按植被类型面积占比最大的原则,将植被分类数据转化为与 SAGE 潜在植被栅格相同分辨率的格网,逐格网对比 SAGE 潜在植被和 1:100 万植被分布重分类数据的异同;对二者均未覆盖的地区,采用 2000 年黄河三角洲地区遥感影像并结合区域潜在植被重建结果与 SAGE 数据集进行对比验证,消除采样点分布不均以及人为土地利用活动干扰的影响.

黄河三角洲 SAGE 潜在植被数据中的误差格网的修正方案如下:对于有采样点覆盖的误差格网,以野外植被调查采样数据的植被类型替换 SAGE 潜在植被误差格网的植被类型;对于未有采样点覆盖的误

差格网,参照 SAGE 潜在植被的重建方法,进一步区分误差格网所属的现代土地利用类型.我们以 1 km 分辨率的格网为单位,计算每个 $5' \times 5'$ 潜在植被格网中人工植被和自然植被的面积占比.对于主要为自然植被覆盖的误差格网,植被类型的修订以 1:100 万植被重分类数据中的自然植被类型为基准,替换 SAGE 潜在植被误差格网的植被类型;对于主要为人工植被覆盖的误差格网,考虑到该区域内已基本无自然植被作为参考,且部分遗留的自然植被可能为人为土地利用后发育的次生植被;因此,这些格网植被类型的修订以 LPJ-DGVM 模型模拟的中国区域潜在植被类型为标准,并参考相邻地区潜在植被类型,替换 SAGE 潜在植被格网中的植被类型.

本文采用样地调查法与现有模型法相结合的修订思路,修订方法中使用了野外采样点数据和 1:100 万植被类型分布 2 类数据.在使用这 2 类数据前,首先排除数据中人工植被对潜在植被修订的影响,以野外调查和区域潜在植被模型模拟的潜在自然植被类型替换 SAGE 数据中误差格网的植被类型.因而修订后的植被图仍具有潜在植被的属性,反映了无人干扰下潜在的植物类型和分布属性.其与采用栽培植物和无植被区替换模型模拟的潜在植被分布方法构建的反映人类活动影响下的植被空间分布现状的现状植被图,有本质上的区别.

2 结果分析

2.1 新旧三角洲不同地貌部位自然植被类别 黄河三角洲由 1855—1934 年以宁海为顶点的近代黄河三角洲和从 1934 年至今以渔洼为顶点的现代三角洲组成,三角洲海岸线大致朝向东北方延伸.如图 2 所示,野外调查记录的植被类型与 1:100 万植被分类图的植被类型基本吻合,这表明近 20 年来黄河三角洲地区自然植被类型未发生较大规模的空间演替.黄河三角洲自然植被大致呈环扇状分布,以 1954 年海岸线为界,界线之内的旧三角洲与界线以外的新三角洲在自然植被类型上具有明显差异.在旧黄河三角洲,林地基本分布在旧三角洲成陆地时间较早的部位,林木类别为落叶阔叶林,林地外围的自然植被是以芦苇为优势物种的草甸.1954 年海岸线以外的新三角洲,最内侧的自然植被是以怪柳为优势物种的灌丛,新三角洲逐渐靠近海岸的地区,优势物种总体上由怪柳灌丛演替为以芦苇和碱蓬为优势物种的草甸;而在新三角洲新生成的部位,没有自然植被生长,形成滩涂景观.

2.2 黄河改道对自然植被的影响 已有研究发现,黄河三角洲的自然植被受地下水埋深与盐度影响^[23-24].黄河改道造成不同地区水温和盐分条件变化,对三角

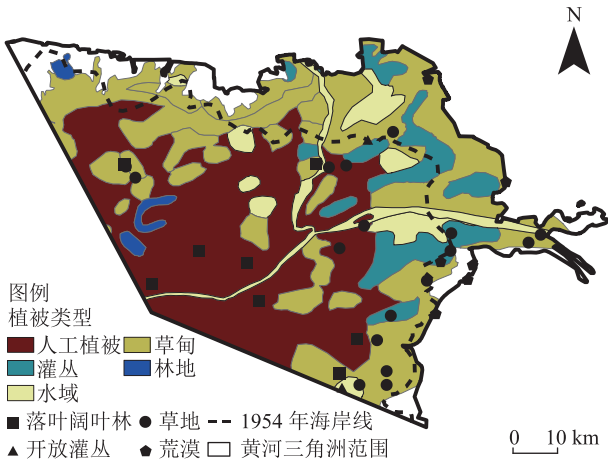


图 2 黄河三角洲野外采样点植被类型和 1:100 万植被类型空间分布

陆地, 植被类型从荒漠演变为碱蓬草甸。

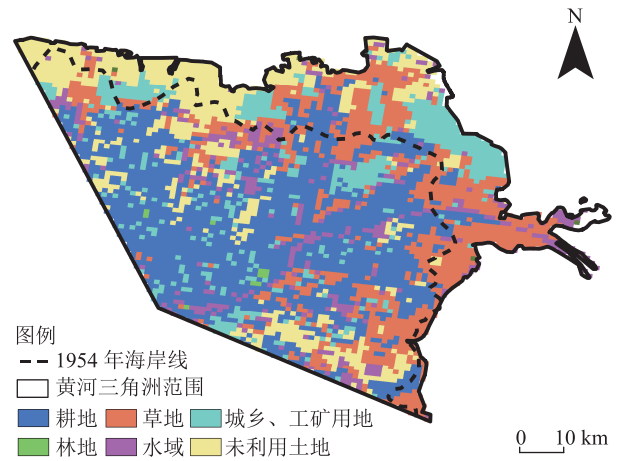


图 3 2000 年黄河三角洲土地利用遥感监测分类

洲自然植被的分布格局影响显著。根据野外调查发现: 在新三角洲, 远离黄河现行河道的三角洲东北部与东南部海岸线附近, 大多为裸露的盐碱荒地, 植被覆盖稀疏, 优势物种以耐盐碱的碱蓬为主; 在黄河河道清水沟两侧, 植被为淡水湿地景观, 优势物种为蒲草、芦苇、柽柳等。相对于新三角洲, 黄河改道对旧三角洲自然植被的影响相对不显著, 旧三角洲远离黄河现河道与靠近黄河现河道的地区, 自然植被没有明显差异, 其原因可能是旧三角洲成陆较早, 距海岸线较远, 人为土壤改造较完全, 盐碱化程度较低, 黄河早期改道对植被生长的影响较小。

2.3 黄河三角洲自然植被与现代土地利用的关系 如图 3 所示, 人类土地利用活动对黄河三角洲地区自然植被分布影响显著, 并呈现出明显的海岸和内陆差异。其中, 内陆地区最主要的人为土地利用类型为耕地, 面积为 1 828 km², 约占三角洲总面积的 33.54%, 主要分布在西南旧三角洲地区和黄河沿河地带。黄河旧三角洲地区成陆时间早, 1855 年黄河改道前, 大清河沿岸已有村落分布。这些地区因灌溉便利且土壤盐碱度较低, 农业开发历史悠久, 长期种植冬小麦、玉米、花生等人工作物, 人类对自然植被改造深刻而彻底, 大部分地区自然植被为人工植被取代。除耕地外, 人类活动最为集中的土地利用类型为城乡居民用地和工矿建设用地, 成规模的工矿用地主要分布在新黄河三角洲的海岸地区, 利用类型以港口、油田、盐田为主。其中, 港口等人工地表对自然植被影响大, 自然植被基本破坏殆尽, 油田和盐田的用地特点对自然环境干扰相对较小, 因而部分地区仍有少量自然植被存留。值得注意的是, 黄河三角洲部分岸线人工海防工程改变了海岸地区的植被类型, 如孤东海堤修建阻挡了海水的入侵, 使该地区由沿海滩涂变为

人类活动较少的三角洲东北部, 基本保持了原有的自然植被特征, 主要土地利用类型为草地和未利用土地。草地是黄河三角洲主要的自然界植被类型, 面积为 1 044 km², 广泛分布于黄河三角洲沿海地带及黄河入海口地区。这些地区主要位于近代三角洲, 成陆时间短, 多为盐碱地, 不适宜农业生产, 除部分地区被利用为盐田和养殖虾塘外, 绝大部分地区保留了原生植被。盐碱化程度较高的沿海地区植被发育了耐盐碱的碱蓬草甸、小獐茅草甸, 盐碱化程度较低的黄河入海口地区植被类型以芦苇草甸为主。

2.4 黄河三角洲潜在植被验证与修订 SAGE 潜在植被在黄河三角洲地区包含了 4 种类型, 分别为混交林、草地、开放灌丛和荒漠(图 4-a)。4 种潜在植被以黄河干道为轴线向两侧呈现明显的“环扇状”分布。潜在植被中混交林面积最大, 位于黄河三角洲的中心地带, 呈西南—东北走向, 延伸至黄河入海口的边缘地区。草地分布在混交林的外围, 主要位于旧黄河三角洲的两翼, 更为外围的新三角洲沿海地区的潜在植被呈现出明显的南北差异。新黄河三角洲北部沿海地区的潜在植被为荒漠, 而南部地区的潜在植被类型为开放灌丛。SAGE 潜在植被数据在黄河入海口地区并未划分明确的潜在植被类型, 究其原因, 是由于 SAGE 潜在植被数据的原始数据——DISCover 土地覆被数据对湿地的刻画能力差, SAGE 潜在植被重建中仅包含了陆上的植被类型, 未覆盖黄河入海口地区大范围的湿地。

SAGE 潜在植被数据总体上反映了黄河三角洲无人干扰下的植被空间分布格局, 然而部分地区潜在植被与自然植被之间存在显著差异。具体表现为: 1) SAGE 潜在植被中混交林面积更大, 且在新三角洲地区经今黄河河道向海延伸幅度更深; 2) 在三角洲北部沿海地区, 林地和荒漠之间存在明显的草地过渡带,

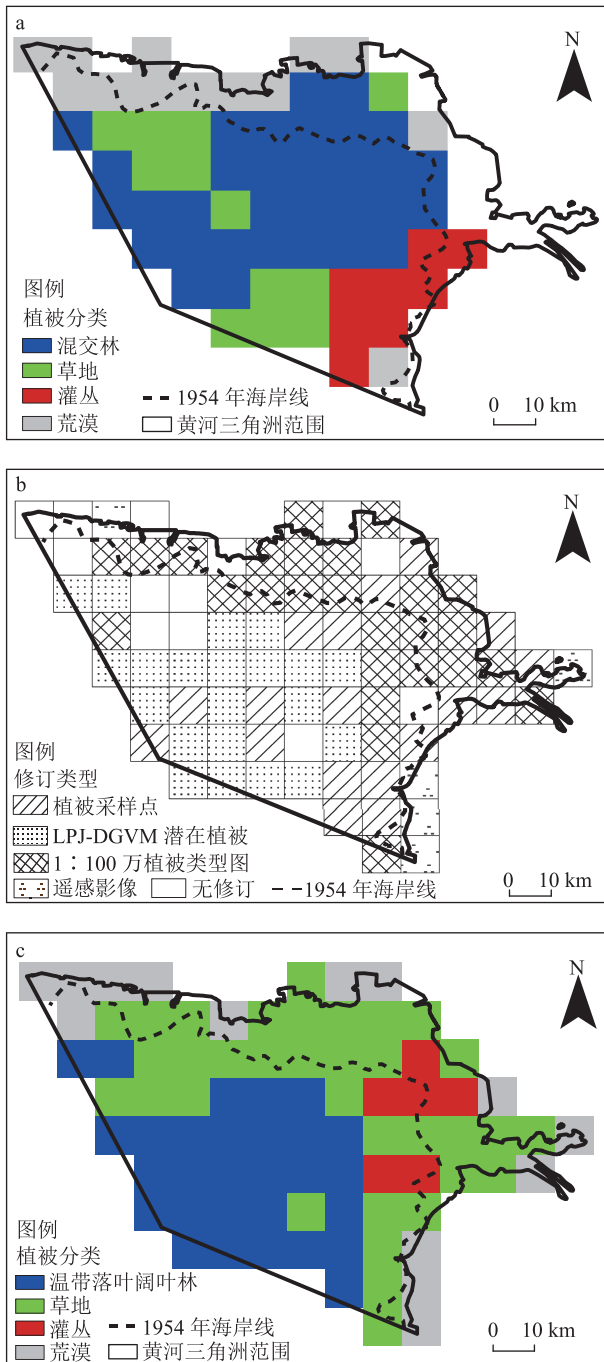


图 4 黄河三角洲 SAGE 潜在植被修订前(a)、修订标准(b)、修订后(c)的空间分布格局

SAGE 潜在植被仅在旧三角洲西北地区有所体现, 在新三角洲地区直接由林地过渡为荒漠; 3) 在三角洲南部沿海地区植被类型应为草甸和荒漠, SAGE 潜在植被类型为灌丛, 与实地调查不符。据笔者野外实地植被调查发现, 现代黄河三角洲黄河流经地区植被类型受黄河河道影响较大。黄河尾间河道沿岸土质以新积土为主, 新三角洲河道地区由于地势较低, 土壤湿度大, 不适宜林地生长, 采样时均发现该地区有林地涝死的现象, 当地的自然植被以芦苇草甸为主, 人工植被则以水稻为主。SAGE 潜在植被在新三角洲地区

混交林向海延伸部分的范围过大, 可能未考虑黄河流经导致的水分变化对区域植被的影响。

采用野外植被采样点、1:100 万植被分类图、LPJ-DGVM 模拟的区域潜在植被, 结合黄河三角洲地区 2000 年遥感卫星影像修订 SAGE 潜在植被数据。其中: 采用野外采样点修正的潜在植被格网数为 18 个; 1:100 万植被分类图修订的格网数为 26 个; 区域潜在植被数据修订的格网数为 21 个; 遥感卫星影像修订的格网数为 5 个(图 4-b)。图 4-c 为修订后的黄河三角洲潜在植被空间分布格局。与 SAGE 潜在植被相同, 修订后的潜在植被格局从内陆到沿海呈现出温带落叶阔叶林-草地-荒漠的“环扇状”植被空间分布特征。其中, 在旧黄河三角洲上, 潜在植被包括 3 类, 分别为温带落叶阔叶林、草地和荒漠。温带落叶阔叶林面积最大, 主要分布在旧三角洲的内陆地区; 草地面积位居第 2 位, 主要分布在旧黄河三角洲的边缘地区, 草地外围靠近海岸线的部分地区为荒漠。位于环形外围的新黄河三角洲潜在植被包括灌丛、草地和荒漠 3 类, 其中: 草地分布面积最大, 是新黄河三角洲的主要植被类型, 主要分布在三角洲内侧, 新旧 2 个三角洲的草地连接成片, 形成黄河三角洲主要的草地类型区; 在新三角洲黄河沿岸以及部分沼泽附近地带分布有部分灌丛格网, 优势种为耐碱的柽柳灌丛; 而新三角洲北部和南部沿海的滩涂地区由于土壤盐碱化程度高, 呈现大面积荒芜, 仅分布有少部分碱蓬草甸, 形成荒漠类型。

相较于 SAGE 潜在植被, 修订后的潜在植被数据的植被类型与林-草分界线位置均有明显的差异。在植被类型方面, 修订后的潜在植被数据与 SAGE 数据的差异主要体现在林地结构上。修订后的潜在植被以 LPJ-DGVM 模拟的潜在植被为基准, 并参考实地植被采样结果, 林地类型以温带落叶阔叶林替换了 SAGE 潜在植被中的混交林。在林-草分界线位置方面, 修订后的潜在植被数据的林草界线, 相较于 SAGE 潜在植被数据更靠近内陆, 体现了黄河三角洲地区黄河河道以及新、旧三角洲扩展对植被的影响, 更好地反映了当地植被从沿海到内陆地区的圈层分布特征。此外, 结合野外实地调查和土地利用遥感监测数据, 修订后的潜在植被数据补充了黄河三角洲湿地地区的潜在植被类型, 修订后的黄河三角洲湿地地区的潜在植被以草地为主, 入海口地区因成土时间短, 未发育植被群落, 为荒漠类型。

3 结论与讨论

本文采用野外植被调查采样方法, 结合中国 1:100 万植被分类图及土地利用遥感监测数据, 研究

了新旧黄河三角洲不同地貌部位自然植被类型,并分析了黄河河道变迁及岸线变化对自然植被分布格局的影响,进而评估并修订了黄河三角洲地区 SAGE 潜在植被数据,得到如下结论。

1)黄河三角洲自然植被格局大致呈由内陆向海岸的环扇状分布结构,旧黄河三角洲植被由内向外依次是落叶阔叶林、柽柳灌丛,以及以芦苇、碱蓬为优势物种的草甸、荒漠。

2)黄河改道对新旧三角洲自然植被的影响存在差异,对新三角洲影响显著,对旧三角洲影响不显著。在新三角洲地区,近黄河河道地区主要发育淡水植被景观,而远离河道地区发育耐碱植被景观。

3)黄河三角洲自然植被分布受人类土地利用活动影响,主要表现为人为土地利用代替自然植被,以内陆和海岸线地区最为显著。内陆主要表现为农业活动下人工植被代替自然植被,而海岸线地区则主要表现为油田、港口等人工不透水面代替自然植被。

4)SAGE 潜在植被数据总体上反映了黄河三角洲潜在植被的空间分布格局,但部分地区潜在植被类型与自然植被之间存在显著差异。修订后的潜在植被数据更好地体现了新旧黄河三角洲不同部位的植被类型差异,以及由内陆至沿海的植被圈层演化特征。

区别于以人工栽培植被为代表的现状植被类型,本研究以野外植被调查中立地现存自然植被演化形成的植被群落表达其潜在植被的类型特征,反映无人干扰情况下区域潜在植被的空间分布属性,以此结合遥感影像及区域潜在植被模拟成果修订的 SAGE 潜在植被数据,充分考虑了历史时期黄河河道及海岸带变化对潜在植被的影响,将为黄河三角洲地区以潜在植被空间分布为起点的历史土地覆被重建及基于土地覆被类型转换导致的碳排放核算研究提供更为精准的基础数据支持。同时,本研究设计的潜在植被数据的验证和修订方案,可为区域乃至全球尺度海岸带地区潜在植被数据的局地验证及修订提供方法借鉴。

本文采用的野外植被调查采样和潜在植被复原方法尚有如下不足之处。

1)本次野外植被采样侧重于考察新旧黄河三角洲不同地貌部位的植被类型,对植被类型变化较小的地区采样较少,仅以 1:100 万植被分类数据中的自然植被类型为参考,可能有部分人为土地利用后产生的次生植被,对潜在植被格局重建产生影响。

2)采用 LPJ-DGVM 模型模拟的潜在植被修订了部分人工植被覆盖的误差格网,修订后的植被类型受控于模型的模拟精度,后续研究中可采用多套潜在植被数据的一致性评价结果确定人工植被覆盖网格的潜在植被类型。

3)SAGE 潜在植被数据模拟的是 2000 年的黄河三角洲地区的潜在植被分布,而本文野外植被调查时间与 SAGE 潜在植被的重建时间并不相同。本文野外植被调查的对象为立地现存的自然植被群落,考虑到植被空间演替是一个长期的过程,这些自然植被分布在短时间内具有稳定性。

4)本文未考虑互花米草等外来入侵物种对潜在植被的影响,但野外入侵物种多改变植被种属结构,对潜在植被整体分类结果的影响不大。

4 参考文献

- [1] HURTT G C, FROLKING S, FEARON M G, et al. The underpinnings of land-use history: three centuries of global gridded land-use transitions, wood-harvest activity, and resulting secondary lands[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(7): 1208
- [2] PONGRATZ J, REICK C, RADDATZ T, et al. A reconstruction of global agricultural areas and land cover for the last millennium[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(3): GB3018
- [3] PITMAN A J, DE NOBLET-DUCOUDRÉ N, CRUZ F T, et al. Uncertainties in climate responses to past land cover change: first results from the LUCID intercomparison study[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(14): L14814
- [4] HONG C P, BURNEY J A, PONGRATZ J, et al. Global and regional drivers of land-use emissions in 1961-2017[J]. *Nature*, 2021, 589(7843): 554
- [5] 刘华民, 吴绍洪, 郑度, 等. 潜在自然植被研究与展望[J]. *地理科学进展*, 2004, 23(1): 62
- [6] 何凡能, 李士成, 张学珍. 清代西南地区森林空间格局网格化重建[J]. *地理研究*, 2014, 33(2): 260
- [7] YANG F, HE F N, LI S C. Spatially explicit reconstruction of anthropogenic grassland cover change in China from 1700 to 2000[J]. *Land*, 2020, 9(8): 270
- [8] HOUGHTON R A, HOUSE J I, PONGRATZ J, et al. Carbon emissions from land use and land-cover change[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(12): 5125
- [9] 李蓓蓓, 方修琦, 叶瑜, 等. 中国东北地区过去300年耕地开垦导致的碳收支[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(9): 1987
- [10] YANG X H, JIN X B, XIANG X M, et al. Carbon emissions induced by farmland expansion in China during the past 300 years[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(2): 423
- [11] GE Q S, ZHENG J Y, ZHANG X Z, et al. Simulated effects of cropland expansion on summer climate in Eastern China in the last three centuries[J]. *Advances in*

- Meteorology, 2013, 2013: 1
- [12] 李飞, 赵军, 赵传燕, 等. 中国潜在植被空间分布格局[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5347
- [13] HENGL T, WALSH M G, SANDERMAN J, et al. Global mapping of potential natural vegetation: an assessment of machine learning algorithms for estimating land potential[J]. PeerJ, 2018, 6: e5457
- [14] MICHLER B, FISCHER H, FISCHER A. High resolution predictive modelling of potential natural vegetation under recent site conditions and future climate scenarios: case study Bavaria[J]. TUENXENIA, 2020, 39: 9
- [15] 董卓瑶, 欧阳琰, 李航, 等. 基于BIOME4模拟未来中国东部南北样带生物群区的分布[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(3): 21
- [16] FAN Z M, BAI X Y. Scenarios of potential vegetation distribution in the different gradient zones of Qinghai-Tibet Plateau under future climate change[J]. Science of the Total Environment, 2021, 20(796): 148918
- [17] 尹延鸿. 现代黄河三角洲海岸的冲淤及造陆速率[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(7): 13
- [18] 邹逸麟, 张修桂. 中国历史自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 2013
- [19] RAMANKUTTY N, FOLEY J A. Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1999, 13(4): 997
- [20] 陈汉斌. 山东植物志: 上卷[M]. 青岛: 青岛出版社, 1990
- [21] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 1: 1 000 000中国植被图集[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [22] 孙国栋. LPJ模型对1981—1998年中国区域潜在植被分布和碳通量的模拟[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(4): 341
- [23] 宋创业, 刘高焕, 刘庆生, 等. 黄河三角洲植物群落分布格局及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2042
- [24] 安乐生, 周葆华, 赵全升, 等. 黄河三角洲植被空间分布特征及其环境解释[J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6809

Validation and revision of the SAGE potential natural vegetation data in the Yellow River Delta

WANG Fahao¹⁾ YE Yu^{1, 2)} HAN Zongxuan¹⁾ SONG Yue¹⁾ LI Jun¹⁾
JIANG Chang¹⁾ LI Hansunbai¹⁾

(1) Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

(2) Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Coupled with the changes of the Yellow River and the expansion of the old and new Yellow River Deltas, vegetation field survey method was used to identify the vegetation types in different geomorphic locations in the Yellow River Delta. Impact of the Yellow River change, delta expansion and human land use activities on natural vegetation was analyzed. SAGE potential vegetation data in the Yellow River Delta were evaluated and revised with reference to vegetation type distribution data and remote sensing images. The natural vegetation in the Yellow River Delta was found to show a circular distribution pattern, the vegetation type was deciduous broad-leaved forest, tamarisk scrub, reed and suaeda meadows, and desert from the inland to coast. The impact of the Yellow River on natural vegetation in the Yellow River Delta was mainly manifested in the new delta area, where freshwater vegetation mainly developed near the Yellow River and alkali-tolerant vegetation developed far from the Yellow River channel. Impact of human land use activities on natural vegetation in the Yellow River Delta had a coastal and inland distinction, with natural vegetation replaced by artificial vegetation and impervious surface in the inland and coast respectively. SAGE potential vegetation could generally reflect spatial distribution pattern of vegetation, but differed significantly from natural vegetation in some areas. Revised potential vegetation data could better represent spatial distribution differences in vegetation type and circular evolution characteristic of vegetation, and will provide basic data support for future studies related to human-environmental effects in the Yellow River Delta.

Keywords Yellow River Delta; SAGE; potential natural vegetation; vegetation field survey; validation

【责任编辑: 刘先勤】