

滨海湿地潮沟演变及其生态效应研究进展

艾熙航^{1,2,3}, 辛琨^{1,3}, 曾书军^{1,3,4}

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520; 2. 南京林业大学, 江苏 南京 210037;
3. 海南东寨港红树林湿地生态系统定位研究站, 海南海口 571129; 4. 海南大学, 海南海口 570100)

摘要:潮沟作为潮滩上特殊的连通性地貌单元,其承担的水文连通、物质运输以及保护生物多样性等功能逐渐受到关注。潮沟能够保持潮滩水盐平衡,运输海—陆沉积物,为滨海植物种子提供传播通道,并作为众多海洋生物的生境和庇护所,对维护潮滩系统稳定做出重要贡献。在受到极端气候、人类活动等扰动后,潮沟形态和生物多样性的稳定是潮滩生态系统恢复平衡的标志,故研究其形态变化以及对生物的影响具有重要意义。基于近年来潮沟演变和生态效应的主要研究成果,从潮沟分级方法、潮沟形态特征变化、潮沟变化影响因素以及潮沟的生态效应等方面进行综述,并提出了未来需要加强研究的3个方面:滨海湿地潮沟空间分布和形态特征及其影响因素研究;滨海湿地潮沟植物种子运输功能模拟及预测;滨海湿地潮沟形态差异对水文连通及生态效应的影响。

关键词:潮沟;形态特征;影响因素;生态效应

中图分类号:Q142.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-5948(2024)04-603-14

潮沟广泛分布于坡度和缓、波浪作用较弱
的淤泥质或粉砂质滨海潮滩^[1-2],经海洋动力周期性
地运输海底沉积物,在涨、退潮的不断侵蚀下,逐
渐发育演化而成的一种潮滩微地貌类型^[3-6]。潮
沟通常起始于潮下带的潮滩边缘,不断向陆地延
伸,往往在潮间带形成“树枝状”或“羽状”的支潮
沟;末端最终会到达高潮滩,止于盐沼或海堤,有
些与陆源水通道相连接^[7]。作为潮滩上最活跃
的地貌单元,潮沟会随着潮滩上水动力和沉积物
之间持续的相互作用而发育,主要方式为溯源侵
蚀和边壁侵蚀^[8];同时,由于涨落潮流的不对称
性,不规则运动的潮水使得潮沟发育曲流,为其
横向迁移提供动力。因此,潮沟是潮滩演变的重
要标志^[3,9-14]。

在环境复杂的淤泥质潮滩上,潮沟还充当
着陆—海之间物质(沉积物、有机质以及生物等)
、能量(水文动力等)与信息(海平面升高、水温
变化和气候异常等)的“交换通道”^[14-22],不
仅为潮滩沉积过程提供物质来源,保障无机环
境的水盐平衡,还能

产生显著的生态效应^[23],例如,通过潮沟的水
文连通功能帮助种子扩散,在潮滩植被扩张中
起到媒介作用^[13,24];可以成为鱼类等生物的
生存、繁殖和育幼场所,为海洋濒危物种的延
续提供庇护,也为河口区域渔业带来经济效益^[25]
;还能根据水文连通强度和沉积作用强度的不
同,在垂直于潮沟的方向上生成“潮沟底—潮
沟边滩—草滩”这类生态交错区,增强潮滩的
生境异质性,有助于适应性不同的生物选择合
适的栖息地,为潮滩系统生物多样性的提高创
造有利条件等(图1)^[26-27]。潮沟不仅是潮滩
演变的指示性地貌类型,其在水文、生态等方
面对潮滩环境的调控能力也让潮沟成为连接整
个潮滩生态系统各部分的“纽带”。

作为一种受潮汐作用影响的地貌类型,潮
沟的形态会随水文动力的差异而发生变化,这
也是潮沟与周边物质发生相互作用的直接方式。
在研究初期,国内外研究者主要关注潮沟的形
成和演化过程^[19,28-30]、物质转移以及沉积
和动力特征^[31-33];随着数据获取方法的不断
进步^[34-40],对潮沟动态变

收稿日期:2023-07-19; 修订日期:2023-10-24

基金项目:国家重点研发计划项目(20230207)资助。

作者简介:艾熙航(1997—),男,甘肃省兰州人,硕士研究生,从事红树林湿地生态研究。E-mail: aixihang@caf.ac.cn

通讯作者:辛琨,教授。E-mail: xinkun@caf.ac.cn

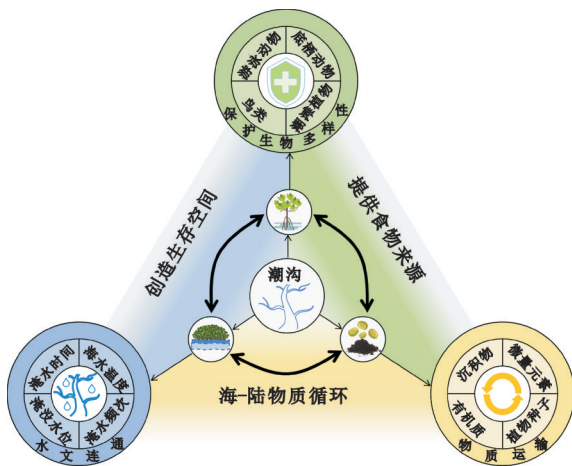


图1 潮沟功能及其相互关系示意图

Fig.1 Diagram of tidal creek functions and their interrelationships

化的研究逐渐成为热点,如对潮沟的长度、宽度、深度、宽深比、横断面积、曲率、密度、分维值、分汊率等形态特征进行时间和空间上的监测、对比和分析^[41-44]。国外研究者对潮沟生态效应的研究最早可追溯到20世纪20年代,研究者提到了海湾以及沿岸的潮沟是海洋生物的“食物库”^[45],潮沟环境深刻影响着水生生物的生存与分布;国内相关研究始于2001年,研究者对潮沟底栖动物群落进行研究,分析了潮沟生境异质性与底栖动物群落的关系^[26]。由于互花米草(*Spartina alterniflora*)快速扩张,本地盐沼植物的生存空间被侵占,潮沟与植物的关系也逐渐被人们关注^[46-49],潮沟不再被视作一种独立的地貌单元,而是与整个潮滩的生态过程紧密联系在一起。

在以往综述的基础上,进一步关注潮沟的分级方法,以及长度、密度、分汊率、曲率、宽深比和分维值等形态特征的变化过程,综述了主导潮沟变化的重要因素和相关作用机制,提出了关于潮沟生态效应的新观点,分析了目前研究的不足并提出未来发展方向。

1 潮沟形态特征及其变化

1.1 潮沟分级方法

对潮沟进行分级可以更好地描述潮沟发育演变过程和形态特征,对比不同时间、不同区域潮沟的形态变化,是定量研究潮沟动态演变的前提。相同级别潮沟具有相似的物理特征,如宽度、深度等,这些特征影响潮沟的水文情势和生境特性^[25,50-54]。

潮沟等级可以反映潮沟的发育程度,潮流作用越强,潮沟的级数越多,发育就越成熟^[35]。

最早提出潮沟的分级方法的学者将靠海侧最宽的潮沟定义为一级潮沟,任何汇入一级潮沟的支流为二级潮沟,汇入二级潮沟的支流为三级潮沟^[55]。国内相关研究也使用了该方法对潮沟进行分级^[49,56-57]。这种方法在潮沟分汊位置进行等级变更,同一分汊点后的两条或多条潮沟等级相同,与陆地水系的分级方法相似,即随着等级的升高,潮沟形态越小,水文连通能力越弱。

在对江苏中部海岸潮沟进行分级时,重点关注潮沟的长度,认为一条潮沟上分出的几条支流往往具有不同的长度,不能划分为同一级^[58]。在统计研究区内所有潮沟的长度后,将长度相近的潮沟归为同一级别。主潮沟(以潮下带的潮滩边缘为起点)为一级潮沟,主潮沟上分出的“较大”分支为二级潮沟,主潮沟上和二级潮沟上的“较小”分支为三级潮沟,以此类推。这一方法能将长度相似的潮沟分为同一级,并使得各个等级之间潮沟长度差异最大化,以此来缩小相同等级潮沟的形态特征差异,被众多研究者效仿^[38,59,60]。

HORTON R E^[61]对潮沟分级的方向从“由海向陆”转变为“由陆向海”,用新的视角来观察潮沟发育情况。在其分级方法中,将最小的、不再分汊的潮沟定义为一级,多个一级潮沟汇入的为二级,多个二级潮沟或者一级潮沟和二级潮沟共同汇入的为三级,以此类推。这种方法的创新性在于对一级潮沟的划分。潮滩上的普遍情况为最小的、无分汊的潮沟主要分布在潮滩中上部接近陆地一侧,由于地势较高,涨落潮水对潮沟的侵蚀较少,这类潮沟无法再分出支流,形态也基本类似。使用这种方法进行分级的潮沟,其等级结构的复杂性取决于分汊率的大小,潮沟分汊越多,结构就越复杂^[30,62]。

其他研究者在HORTON R E的基础上,对潮沟分级方法进行了调整,将不再分汊、处于潮沟树状结构末端的支流定义为一级潮沟,两条一级支流汇入的潮沟定义为二级,两条不同级支流汇入的潮沟定义为两条支流中的较高等级^[63]。这种方法基于一个推断:在潮滩上,较高级的潮沟,不可能伸展到潮沟的末梢部分。这种分级方法显然是在潮沟整体结构层面形成了新的理解,使得同级别的潮沟具有相似的物理特征,如高程、宽度、深

度等。该方法被称为Horton-Strahler分级法,是目前潮沟研究中较合理的方法^[64-65]。

1.2 潮沟形态特征

作为受海陆交互作用显著影响的地貌类型,潮沟的形成及演变与周期性的潮水冲刷关系密切,潮水对潮滩沉积物的补充和搬运使得潮沟形

态发生了各种变化。为分析潮沟形成及演化过程,探讨潮沟的生态效应,国内外研究者对潮沟形态特征进行了多方面的研究^[19,28-30,62,66],研究方法也不断丰富^[67-69]。通常用长度、密度、分叉率、曲率、宽深比和分维值等形态特征来反映潮沟发育程度以及整体结构(表1)。

表1 潮沟形态特征的概念及其计算公式

Table 1 Concepts and calculation formulas of tidal creek morphological characteristics

潮沟形态特征	概念	计算公式
长度(Length)	指研究区域内所有潮沟的总长	$L = \sum_{i=1}^n l_i$, 其中, L 为潮沟长度; l_i 为单条潮沟长度; n 为潮沟数量
密度(Density)	指单位面积潮滩上的潮沟总长度	$D = \sum_{i=1}^n l_i / A$, 其中, D 为潮沟密度; A 为潮滩面积
分叉率(Branchrate)	指单位面积潮滩上潮沟分叉点的数量	$B = N_b / A$, 其中, B 为潮沟分叉率; N_b 为分叉点数量
曲率(Curvature)	指潮沟实际长度与其两 endpoint 间的直线长度之比	$C = l_i / d_i$, 其中, C 为潮沟曲率; d_i 为单条潮沟两 endpoint 间的直线距离
宽深比(W/D)	潮沟宽度与深度的比值	$r = W / DP$, 其中, r 为潮沟宽深比; W 为潮沟宽度, DP 为潮沟深度
分维值 (Fractal Dimension)	以数学方法描述潮沟形态复杂程度	$FD = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln 1/r}$, 其中, FD 为潮沟分维值; r 为包含整个潮沟的数个紧邻小矩形的边长, $N(r)$ 为包含潮沟所需的最少盒子数

1.2.1 潮沟长度

潮沟长度一般指研究区域内所有潮沟的总长。对一条潮沟长度进行描述时,不同研究为长度赋予的意义不同。有些研究仅将长度作为描述潮沟发育情况的参数^[49,59,70];另有研究将长度定义为潮沟中某一点到海洋的距离,以此来描述该点处的水文连通强度^[71-72]。不同区域内的潮沟,其平均长度差异显著。研究发现,不同类型植被区域中的潮沟长度各有不同,长度与植被类型表现出较好的对应关系^[37];在相同区域内,平均长度与潮沟等级之间正相关^[62,73]。在江苏省中部海岸潮沟定量研究中,以潮沟长度作为等级划分标准,发现植被扩张和人类活动对不同级潮沟长度产生的影响存在差异,一级、二级潮沟的长度在10 a间不断减小,三级潮沟的长度不断增加。这说明植被与人类活动改变了潮滩的水沙条件,研究区潮滩不再适合高等级潮沟发育^[58]。以江苏中部粉砂淤泥质潮滩潮沟系统为原型,建立了用来模拟潮沟完整发育过程的降比尺物理模型,从潮沟演变初期到动态平衡阶段,长度变化先快后慢^[74]。由此可见,潮沟从形成到消亡的整个进程中,其长度会对外界的变化产生响应,是评价潮沟发育中基本且重要的参数。

1.2.2 潮沟密度

潮沟密度是指单位面积潮滩上的潮沟总长度,用来描述潮沟发育的密集程度以及潮沟网络的覆盖程度。在滨海湿地,潮汐的周期性淹没使得潮滩集水区域边界较难识别^[75],因此在潮沟密度的计算过程中,通常用沿岸河流间的潮滩斑块来替代^[50]。在江苏省中部海岸,不同潮带内的潮沟密度受到植被覆盖或人为活动影响的程度各有差异,高潮滩上潮沟密度小于低潮滩密度,中潮滩潮沟密度最大^[58]。有研究认为,植被发育制约着潮沟的发育,植物长势越好,潮沟密度越小^[76],潮沟密度与绿度、归一化植被指数负相关,前人的研究结果同样证实了这一观点^[22,77-78]。对比了江苏省盐城淤泥质潮滩多个年份的卫星影像,发现盐沼中的潮沟密度无论在哪一年都大于光滩,甚至在互花米草滩发育初期,盐沼中互花米草滩内的潮沟密度约为相同水动力条件下光滩潮沟的两倍^[13]。可见,在不同研究区内对相同对象进行研究,结果不同,说明潮沟密度与植物间并非线性关系。在潮滩植物群落的不同演替阶段,其地上部分(枝叶、茎秆及地上根系)对潮水的阻碍程度以及对潮水中所携带沉积物的捕获能力都不同,对潮沟形态和数量的影响也不同。

1.2.3 潮沟分汊率

分汊率是指单位面积潮滩上潮沟分汊点的数量,反映了潮沟的稳定程度。在研究潮沟系统的分汊率时,总分汊率应是各级潮沟分汊率的加权平均值^[63]。潮沟分汊率是潮沟演变的标志,其值在不同时期的变化程度能够反映出潮沟是否在迅速发展。当各级潮沟的分汊率趋于稳定,潮沟系统也就具有了成熟、稳定的形态^[79]。研究人员通过实地调研的方式,发现潮沟的深度和潮沟分汊率相关,潮沟分汊时潮沟深度会缩减一半^[80]。潮沟分汊率与潮滩植被间有着反馈作用。一方面,随着高程逐渐增加,潮滩环境适合植物生长,中潮带的植被覆盖区往往会抑制潮沟的分汊发育^[58],分汊率降低;但与此同时,相比于潮沟的其他形态特征,植被对分汊率的变化最敏感,植物群落的演替又会受到潮沟分汊率大小的影响^[81]。

1.2.4 潮沟曲率

潮沟曲率是指潮沟实际长度与其两端点间的直线长度之比,反映潮沟形态的弯曲程度。潮沟曲率越大,表明潮沟形态越蜿蜒;当潮沟曲率等于1时,潮沟形态呈直线形。研究发现,潮沟弯曲程度较高的地方一般在潮沟上游处或者下游处^[82]。对黄河三角洲潮沟形态参数的计算发现,不同等级潮沟的曲率存在差异^[59],这是因为潮沟等级不同,在潮滩上受到水动力的强度不同。按照其分级方法,一级潮沟受海水冲刷作用较强,弯曲程度往往大于三级潮沟;同时各级潮沟的曲率方差都比较小,说明黄河三角洲潮沟在研究的时间尺度上发育较稳定。此外,潮滩植物的定植与扩张都会对潮沟曲率产生影响。根据调查,黄河三角洲湿地中的植被覆盖区的潮沟曲率明显大于整个研究区的潮沟曲率^[83],另有一些研究同样证明了这一观点^[78,84-85]。对热带沿海滩涂的研究表明,红树林面积与潮沟的曲率呈反比^[86]。在红树林扩张前,潮汐作用使得潮沟形态较为蜿蜒;在红树林扩张期间,潮水进入红树林后动力受阻,潮沟曲率逐渐减小;当红树林占据了大部分潮滩后,潮水无法对潮滩进行持续而有力的改造,潮沟将保持笔直的稳定形态。不同类型植物由于各自生物学特征的差异(如根系和植被密度),对潮沟曲率的影响也存在差异,如互花米草群落中潮沟的曲率小于盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)和芦苇(*Phragmites australis*)群落中的潮沟曲率^[83];不同芦苇面积占比及芦苇

破碎化度与潮沟曲率之间也显著正相关^[87]。

1.2.5 潮沟宽深比

潮沟宽深比是潮沟两侧滩面与潮沟边壁形成交线,二者之间的宽度与潮沟的最大深度的比值。宽深比是潮沟形态特征的一个重要方面,也是反映潮流水动力条件和下垫面相互作用的重要指标^[46]。通常情况下,研究者会根据需要在不同等级潮沟或不同区域潮沟上设置样线或断面,以此为基准测量潮沟的宽度和深度。有学者将潮沟深度和宽度定义为“从潮沟入口至末端,沿潮沟主轴,每隔10 m 齐岸深度和深度的平均值”,以此反映潮沟的大小,并进一步计算潮沟的宽深比、截面积、容积和流量比^[25]。

不同滩面上潮沟宽深比差异显著,光滩的宽深比最大,盐地碱蓬次之,互花米草最小^[13];相比于高而浓密的互花米草群落,发育于低矮稀疏的海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)群落中的潮沟段宽度显著增大而深度明显减小,导致宽深比剧增^[88]。互花米草生长区的潮沟宽深比较小,这是因为互花米草根系发达,导致底部沉积物结构较紧实,水流不易对潮沟两侧进行侵蚀从而生成曲流,故潮沟逐渐向相对容易被侵蚀的底部扩张^[46]。另外,潮沟宽深比又与沉积物黏结能力负相关。沉积物中含泥量越多,黏结能力越强,水流在破坏泥沙团聚体时受到的阻力就越大;在水流重力作用和沉积物黏结能力的协同作用下,潮沟宽度变化小,深度变化大,宽深比减小。潮沟宽深比对于潮沟级别梯度的响应也较为明显,主潮沟宽深比较大,支潮沟宽深比较小^[89]。潮沟宽深比是反映潮沟纳潮量的重要指标,在潮沟水文连通研究中占据重要地位。与其他潮沟形态参数不同,潮沟宽深比无法通过遥感手段进行观测和分析,在实地调查难度又极大,故目前针对潮沟宽深比的研究仅限部分地区的单条潮沟。

1.2.6 潮沟分维值

分维特征的研究可以追溯到20世纪70年代,由美籍数学家提出的分形理论^[90]。国外研究者利用该理论,对河流及河网的分形特征进行计算与分析^[91-93]。中国对于潮沟分维特征的研究起步较晚,研究者借助分形分维的思想,采取“盒子维”(Box-counting dimension)的形式,对黄河三角洲广泛发育的树枝状潮沟进行了分维数的计算^[94-95],分维值能够反映潮沟的复杂程度,会随着潮沟的发

育而变大。郭永飞等^[96]利用 SPOT-5 遥感影像,针对所提取的长江口潮滩的潮沟信息进行了分维研究,计算了不同区域潮沟的分维值,结合长江口深水航道的建设,分析了不同区域分维值不同的原因。潮沟系统的分维值与潮沟分叉性之间有显著的相关性,而单支潮沟的分维值随潮沟蜿蜒率的减小而线性降低^[97]。

在潮沟发育的过程中,其分维值受诸多因素影响,水动力、潮滩沉积物性质以及植物群落分布的差异都会影响分维值的大小。潮沟分维值与潮沟密度之间同样相关,其显著程度取决于人类活动的强度。在没有人类活动的区域中,潮沟分维值与潮沟密度正相关^[96];在人工修筑堤坝或进行围垦的区域,潮沟分维值与密度不相关^[76]。

2 影响潮沟变化的因素

潮滩沉积物能够直接决定潮沟发育状态^[9],人类活动^[98]和植被覆盖^[85]也会对潮沟形态特征产生一定的影响。分析影响潮沟发育的因素及其作用机制,将为探究潮沟的发育机理和演变趋势提供方向。

2.1 沉积物

依据沉积物泥沙颗粒组分的不同,其可以分为淤泥质、砂质或砂泥混合质等若干类型,通常在淤泥质潮滩上,潮沟发育状态相对较好^[99]。潮滩是潮沟的承载体,潮沟发育必然受到潮滩沉积物性质的影响。泥沙等海底沉积物借助潮汐作用被搬运至潮滩,再通过缓慢沉降或被植物体捕获等方式变成潮滩的一部分^[100];落潮水流动力又对潮滩进行侵蚀而形成潮沟,其难易程度取决于沉积物的侵蚀特性,特别是沉积物泥沙颗粒组分所产生的影响。研究发现,沉积物中粘性泥沙含量较多时,沉积物往往更难侵蚀。黏土含量在 17.8%~33.7% 范围时,沉积物稳定性较强,平均峰值侵蚀率大幅下降^[101-102];沉积物中黏性泥沙含量较少、非黏性泥沙较多时,沉积物通常更易被侵蚀。有研究认为,中粗粉沙级沉积物潮滩最有利于潮沟发育^[9]。沉积物中含泥量大于 20% 或含沙量大于 40% 的潮滩都不利于潮沟发育,沉积物黏结能力过强,会阻碍潮沟的溯源侵蚀和横向迁移;黏结能力太弱,则滩面渗漏将使滩面水不易归槽,导致水动力不足,对潮沟的冲刷作用减弱。

2.2 人类活动

为了缓解人地矛盾,人类开始在沿海滩涂地区开展围垦、开辟航道和修建堤坝等。在中国,对潮滩的改造持续了近 60 a 的时间。人类活动使得滩涂资源锐减,海岸动力、地貌环境发生急剧变化^[103]。潮沟作为沿海滩涂上典型的地貌类型,在人类活动影响下,原有的形态、位置和规模都发生了较大的改变^[104]。例如,修建堤坝和滩涂围垦等活动不仅会直接导致潮沟的面积、长度、宽度和分维值等形态参数减小^[97,105],呈现出明显的退化和消亡趋势,而且会造成潮沟分维值与密度在空间上的相关性减弱^[76];随着围垦活动的进行,水动力不再均匀地作用于潮滩,与自然状况下的潮沟发育相比,围垦后潮沟的变化速度将大幅加快^[6]。对黄河三角洲潮沟变化的分析表明,人类活动已成为影响三角洲潮滩发育的重要因素,导致整个三角洲的潮滩体系严重退化,自然形成的潮沟时空谱系不复存在^[34]。在人类活动后,无论是否在堤坝上留有潮水进出口,堤内滩涂都会因潮汐动力减弱而发生生境的改变,堤内滩涂由于失去潮流影响迅速淤高,土壤盐度、含水量更加适合植物生长;而植被密度和水文条件的突变使得堤内潮沟不再发生动态形变,潮沟整体形态逐渐萎缩,堤外高等级潮沟向着低等级潮沟退化^[56]。

可以将人类活动对潮沟的影响总结为以下几个方面:(1)破坏潮沟形态。构筑堤坝截断了潮沟,减小汇水面积,使潮沟失去主要动力来源;(2)增加潮滩高程。围垦前后,潮滩各处沉积速率差异显著^[106],极大程度改变了潮滩地形地貌,潮沟需改变自身形态才能适应新的水沙环境;(3)改变潮滩环境。导致海堤内外水动力不均,生态系统失衡。目前,全球超过半数人口在海岸带地区定居,重要的人类活动都发生在这片区域^[107]。同时,随气温变暖而上升的海平面,使沿海用地进一步萎缩,潮沟在“双向挤压”下的形态变化将会对潮滩环境造成难以预料的影响。

2.3 潮滩植被

在中国长约 1.8×10^4 km 的大陆海岸中,淤泥质潮滩约占 1/4 的长度^[99]。无论是天然生长还是人工引种,植物在海陆交错、复杂多变的滨海生态系统中是极重要的组成部分。分布在这 1/4 的潮滩中的植物种类主要有芦苇、盐地碱蓬、互花米草、怪柳 (*Tamarix chinensis*)、白茅 (*Imperata cylindrical*)、海

三棱蔗草以及中国南部沿海潮滩上的红树林群落。不同的植被覆盖类型对潮沟的影响存在差异^[48,108],主要体现在以下4个方面。

首先,潮滩植被覆盖区能够改变水动力条件,起到缓流和消浪的作用^[99],使潮汐水流的能量降低,无法对潮滩及潮沟进行以物质沉积与迁移为主的改造。在潮滩上,水流经过盐沼植被区受到了高摩擦力影响,植物可以使底层流速降低20%~60%,在任何时候都小于非植被区^[109-112],这也是盐沼植被区内潮沟形态窄而深的原因之一。对红树林生长区的研究也验证了这一观点^[113-117]。在潮间带红树林中,红树林密集的植物枝干和稳固的气生根结构增强了对水流的阻力,而林内潮沟为水流提供了低阻力通道,使得潮水对潮滩的作用力降低^[118]。在没有红树林的情况下,潮水对潮滩的作用强度增大,潮沟呈现明显的树状结构;当该地区生长红树林,潮流经过红树林后减弱了80%的强度,低流速提高了潮滩沉积物的稳定性,导致在红树林中潮沟难以发育^[119-120]。因此,潮滩上的植被覆盖区可以削弱水流能量,阻碍水流对潮滩的改造,从而间接干扰潮沟的形成及变化过程。

其次,植被覆盖区对悬浮泥沙有显著的黏附捕捉和沉降作用,垂向沉积速率比非植被区高出数倍,滩面表层沉积物稳定性较高^[121-123]。水动力强度的降低和植株茎叶的捕沙作用使细颗粒泥沙更易于在盐沼中沉积下来,从而导致盐沼环境中表层沉积物泥沙颗粒组分明较相邻光滩细。这种加快沉积、抑制侵蚀的特点^[124]使得植物覆盖区中潮沟不易发育,滩面较为平整。

另外,植物根部对沉积物的固化作用增加了沉积物的稳定性,使得潮沟迁移速率变小^[125-127]。许多研究已经指出,植物根系与土壤在力学上的相互作用是防止地表水土流失、崩塌、浅层滑坡等地质灾害的关键,这一观点在滨海潮滩植被覆盖区中同样得以体现。淤泥质潮滩植物根系在生长过程中会对周围沉积物产生轴向压力,使根系与沉积物的接触变得更加紧密^[128-131];同时,植物地下生物量越高,根系结构越复杂,与沉积物的接触面积就越大,对沉积物的固化效果就越强,增强了沉积物的抗侵蚀能力,水流在潮沟区域进行边壁侵蚀时要对抗更大的摩擦力。因此植物根系能够起到加固沉积物的作用,使得植被覆盖区内的潮沟

不易发生横向扩张,水流对潮沟的侵蚀只能在垂直方向上作用于已经存在的潮沟,故该区域中的潮沟宽深比往往较小^[113,22,132]。

最后,植物根系从生长介质中摄取养分和水分,同时也不断地向生长介质中分泌低分子有机化合物、高分子胶黏物质和无机化合物及离子等根系分泌物^[133]。其中,高分子黏胶物质如糖类、有机酸以及生物酶类等的产生,能够加强根系与粗糙的土粒表面的联结,增加了土壤抗冲击、分散的能力^[134]。潮滩植被生长区内的沉积物受到植被根系分泌物的胶结作用,结构变得更加稳定,因此潮沟能够在潮汐水流的反复冲击下不被侵蚀。

3 潮沟的生态效应

以景观生态学的角度来看,潮沟系统可以被看作滨海湿地生态系统的“廊道”,主要功能包括为潮滩生物提供生境和迁移通道,承担潮滩生态系统中物质能量运转的功能,是生物、物质和能量的“源”和“汇”。潮汐的周期性淹没、水流的不断侵蚀、植被的持续扩张、极端天气的破坏以及人类活动的影响,这些对潮滩和潮沟改造能力或大或小的环境因素,使得以潮沟为主体的景观类型(如“潮沟-边滩-草滩”系统)成为潮滩上复杂的生态交错区。异质性的生境带来多样性的生物类群,在这样的生态交错区内有着不同种类的植物和底栖动物,他们因水文动力、沉积物特性、食物来源、生境稳定性以及自身生物学特征等原因占据着不同的生态位。频繁变化的环境因素增强了这一景观中的异质性,环境梯度的差异将直接影响生物分布^[135]。这些变化反映在潮滩生物群落结构和多样性指标上,即为潮沟所带来的生态效应。

3.1 潮沟对植物的生态效应

目前,潮沟对植物的生态效应研究主要集中于潮滩植被分布格局的差异与机制。植物空间分布格局、群落结构以及生长状况等都会受到潮滩水文连通强度和土壤理化性质的影响^[136]。潮水淹没高度、时间和频率的变化将会塑造不同的含氧量和光照条件;土壤盐度直接制约了潮滩植物的光合和呼吸速率^[137]。这些环境因素之间存在相关关系,如土壤盐度及含水量都会与潮流强度同时变化。但总体来说,它们都会在以潮沟侧向距离为变量而形成的梯度上协同变化^[71,138-139],从而影响潮滩植物群落的空间分布。此外,潮沟因其贯穿

高、中、低潮带的空间分布特征,能够借助潮水将植物种子运送至潮滩的大部分区域,这为植物演替和扩张提供了基本的物理条件。

在以草本植物为主的盐沼湿地中,潮沟作为潮滩与外界进行物质交换的通道,维持着潮滩的水盐平衡,而滨海湿地潮沟的动态变化改变了潮滩生境,这对于潮滩植物的空间分布规律有着深远的影响^[14,71,138]。例如,潮沟对植被扩张有着非常重要的引领作用,互花米草可以利用这种“潮沟引导”模式快速占据潮沟附近区域,并侵占本地种的生存空间^[140-142]。扩张的宽度和幅度取决于该区域潮沟的发育程度,潮沟发育越好(呈现“树状”形态或等级越多),互花米草的扩散范围就越大^[83]。潮沟等级、分汊率、密度和宽度上的差异也会引起植物空间分布格局的变化,但是相关性依次降低^[81,143]。除形态产生的影响外,潮沟的水文连通性同样控制着互花米草的扩张,更强的横向水文连通可有效调节土壤的盐分、含水率以及坚硬程度,从而扩大互花米草沿潮沟边缘入侵的范围^[144]。

在红树林湿地中,潮沟对红树植物也产生了显著的生态效应。相关研究表明,在受低温侵扰的红树林中,由于土壤表层温度缓冲带的存在^[145-147]以及较高温度海水的持续淹没^[148],潮沟在水体保温作用的影响下,能够在小尺度范围内有效地增加土壤温度,有效缓解冬季夜间低潮位与低温共同作用对植物生长的胁迫,为生长在潮沟附近的红树植物创造更好的生存条件。在进行红树林修复时,水文条件也应是率先考虑的因素,即为了保证在修复前期红树植物种子或幼苗的淹水时间和频次,也为了完善修复后期红树植物群落的水文连通性,科学合理地规划潮沟是必要的。根据国外红树林生态恢复的相关实践案例^[149],在植物种子自然供应充足的淤泥质滩涂^[150],通过开凿人工潮沟,创造一个拥有适宜水文条件的潮间带地区,依靠潮沟水文连通功能所带来的红树植物种子(红树植物胚轴)来进行天然更新的方法,在节约成本、定植规模以及种子成活率等方面的表现比人工种植更加优秀。

根据潮沟侧向距离的不同,潮沟周围环境具有梯度特征,这在一定程度上影响潮滩植物空间格局,但二者间关系并不一定呈线性表示。植物对外界干扰的响应以及种间竞争都会作用于空间格局的形成^[151]。潮沟固然是植物空间格局形成和

改变的驱动因素^[152-153],但植物的分布、生长与格局也会以改变流体动力微环境的方式,作用于潮沟的发育与演变^[58,132]。因此,潮沟与潮滩植物间存在着复杂的相互作用,需要综合水文、土壤和植物等各方面特征来分析。

3.2 潮沟对动物的生态效应

3.2.1 底栖动物

底栖动物是滨海湿地中的重要生物类群,其主要生态功能是作为鸟类、鱼类、蟹类的食物来源,以及通过生物扰动影响潮滩沉积物理化性质^[154-156]。有学者认为,在潮沟系统这一整个生态交错区内,潮沟底、潮沟边滩和草滩等生境依次呈梯度分布,这提高了淤泥质河口潮滩的生境异质性,使得每种生境中底栖动物的优势种、生活型组成、生物量、密度以及生物多样性都有所差异,说明了潮沟系统在维持河口生态系统底栖动物物种多样性中的重要作用。国外研究者探讨了螃蟹洞穴密度与潮沟生境异质性的关系^[157]。根据水文和土壤条件的不同,潮沟附近区域可分为沟底、斜坡、边缘和台地4个区域。沟底通常为泥质沉积物,不利于螃蟹建造洞穴;斜坡区洞穴小而密集,适合幼蟹或体型较小的蟹类,为其早期生长发育提供充足的水和有机物质;边缘和台地洞穴大而稀疏,土壤硬度高,更有利于成熟、体型更大的螃蟹,为其提供丰富的食物和安全的庇护所,免受大部分捕食者的侵害。蟹洞结构又具有增加沉积物气液通道、提高有机分解速率等功能^[158]。因此,潮沟环境异质性对蟹穴分布的调控可能会深刻影响整个盐沼生态系统的物质循环和能量流动。有学者认为,在潮沟尽头(靠近陆地一侧)、潮间带和潮下带这样的纵向方向上,大型底栖动物的分布同样具有差异。经人类活动(如围垦)影响后,潮滩高程、沉积物理化性质、水文条件以及植物等都会产生相应的改变,这会影响物种的分布、密度和多样性,引起底栖动物群落结构的变化^[160-162]。

3.2.2 鱼类

在潮滩上,潮沟是鱼类进出潮滩的主要通道,也是鱼类的重要生境^[25]。研究表明,盐沼潮沟是一些重要渔业物种的重要育幼场所^[163-166]。发育成熟的潮沟拥有复杂的树状网络结构,在潮汐作用下,物质和营养要素在上下级潮沟之间进行纵向交换,同时在潮沟和其邻近斑块之间进行横向交换^[167],为鱼类提供了重要的栖息生境和进出的主

要通道;潮沟内通过潮汐作用在海陆间循环的物质,也成为了近海鱼类稳定的食物来源^[168-169]。

国外研究者探究潮沟对鱼类物种分布影响较多。他们认为,潮沟级别不同,其地貌形态特征之间也存在差异,而这些特征与鱼类物种数、密度、生物量和分布格局密切相关^[170],特别是在深度、边坡倾斜度、截面面积、水流和所处位置等方面,会影响鱼类对潮沟的利用模式^[171-172],这导致鱼类将根据生存需要选择合适的栖息地。研究表明,高级别潮沟鱼类总丰度、生物量显著高于低级别潮沟;而造成鱼类群落在不同等级潮沟内分布差异的原因可能与距潮沟入口的距离以及截面面积这两个潮沟地貌因子相关;同时,潮沟无植被边缘对定居和暂时物种的觅食和躲避敌害有重要意义^[54,173]。

4 展望

近年来,随着观测方法的丰富和生态理念的更新,人们对潮沟的研究重心逐渐转移,潮沟不再作为一个独立的地貌单元,它与周围生物、环境的关系引人关注。值得探讨的方面如潮沟内生物地球化学过程、潮沟形态自动识别与提取、潮沟演化过程模拟、潮沟生物-物理过程、潮沟在滨海湿地生态系统中的功能与价值以及潮沟的生态效应等,而定量描述潮沟形态特征已经成为研究的必要手段。因此,针对潮沟变化和生态效应的研究还需在以下几个方面加强。

(1)滨海湿地潮沟空间分布和形态特征及其影响因素研究。在滨海湿地中,红树林湿地是最为重要的生态系统之一,具有较高的碳汇能力和水质净化能力,为沿海地区抵御风暴作出了显著贡献。红树林潮沟作为红树植物群落内部物质循环和外部物质交换的重要通道,在形态、功能上与盐沼潮沟存在差异。在形态方面,由于红树植物通常生长在波浪较弱海湾或瀉湖内的淤泥质潮滩上,密集的茎干和气生根阻碍了水流的运动,发达的地下根系固定沉积物结构,这些因素使潮水动力减弱并增加了沉积物被侵蚀的难度,故林内潮沟形态不易发生较大改变;在功能方面,由于红树植物生物量较盐沼植物更大,需要更多营养物质来维持生长,各类元素被吸收和被释放的机制更加复杂,对环境因子的响应也存在差异,因此红树林潮沟的功能更加倾向于为红树植物群落提供服务,如种子运输、养分供给以及物质交换等。目前对红树林潮沟的空间分

布、形态特征及其影响因素方面的研究较少,在今后的研究中需要更多关注红树林潮沟的空间分布与功能之间的关系,以及不同形态潮沟的水文情势与两侧红树植物、沉积物的相互作用,开展长时序实地监测及水文模型动态模拟,探究红树林潮沟空间格局形成机制以及影响因素,这些研究将对红树林湿地生态系统保护、修复与重建产生重要价值。

(2)滨海湿地潮沟植物种子运输功能模拟及预测。滨海湿地是地球上生产力最高的生态系统之一。作为影响滨海湿地植物群落发展的主要因素,种子的传播及种子库的形成在维持其生态系统功能方面发挥着关键作用。在滨海湿地中,种子传播主要由潮流决定,植物种子如互花米草、盐地碱蓬、芦苇等盐沼植物的种子以及部分红树植物的胚轴都会随着潮汐水流在潮滩上传播扩散,这对潮滩植物空间分布格局的塑造有着重要意义,是滨海湿地生态系统受到外界胁迫后稳定性和恢复能力的保障。在滨海湿地修复过程中,除人工种植方法外,天然更新(种源来自其他区域植物群落)可以起到良好的补充作用,而这一过程正是由潮沟的种子运输功能完成的。种子运输功能是潮沟影响潮滩植物空间格局的重要途径,潮沟作为种子扩散的主要通道,其等级、形态的变化会对种子运输功能产生相应的影响。目前,由于滨海湿地植物种子在潮沟系统内的传播行为较为复杂,对其研究相对较少,尚不清楚盐沼植物种子漂浮、传播、定植能力以及扩散机制。调查潮滩植物候期和种子产量,建立相关水文动力模型,模拟不同种类植物种子的漂浮能力以及潮沟对种子的运输能力,预测潮滩植物种子的传播路径,探究潮滩植物群落演替过程,可为滨海湿地生态修复提供指导。

(3)滨海湿地潮沟形态差异对水文连通及生态效应的影响。潮沟形态具有时空异质性。从时间尺度来看,潮沟会随着河流改道、植被扩张、极端气候以及人类活动的影响而发生形变,这一过程或剧烈或缓慢,主要形式为各级潮沟的发育和消亡;从空间尺度来看,在同一时期,由于滩面地形、沉积物性质以及盐沼植被等因素对水文情势的影响,不同等级潮沟的形态参数存在差异。同时,潮沟本身也承担着潮滩湿地水文连通的功能,即以水为媒介的物质、能量及生物体在水循环各单元

内或各单元间迁移的过程,它是生态过程的主要非生物驱动因子。潮沟形态在时空上的变化会引起水文连通结构和功能的转变,进而影响潮滩地形、理化性质和生境分布等环境因子;随着生态系统稳态转换,最终会使得潮滩动物植物微生物的空间分布、生物量以及多样性也将被改变。但目前这种连锁型的生态效应尚未有相关研究。对比潮沟形态的时空差异,综合考虑潮沟与周围环境间的相互作用关系,建立潮沟形态参数与水文连通强度之间的定量关系,探明不同形态潮沟对动物、植物和微生物群落的生态效应,对潮滩湿地生态系统保护和重建具有重要意义。

参考文献

- [1]HUGHES Z J. Tidal channels on tidal flats and marshes[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012: 269-300.
- [2]SULLIVAN J C, TORRES R, GARRETT A, *et al.* Complexity in salt marsh circulation for a semienclosed basin[J]. *Journal of geophysical research: Earth surface*, 2015, **120**(10): 1973-1989.
- [3]邵虚生. 潮沟成因类型及其影响因素的探讨[J]. *地理学报*, 1988, **43**(1): 35-43.
- [4]张国栋, 朱静昌, 王益友, 等. 苏北强港现代潮沟沉积研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 1984, **6**(2): 223-234, 279-280.
- [5]尹延鸿, 丁东. 初探海岸带奇特地貌景观: 潮沟[J]. *海洋地质动态*, 1993(11): 9-11.
- [6]SYMONDS A M, COLLINS M B. The establishment and degeneration of a temporary creek system in response to managed coastal realignment: The wash, UK[J]. *Earth surface processes and landforms*, 2007, **32**(12): 1783-1796.
- [7]范代读, 高抒. 崇明东滩潮沟体系形成演变及其对沉积物分布的控制[C]//中国海洋学会2005年学术年会论文集汇编. 中国海洋学会, 2005: 397-409.
- [8]龚政, 王客予, 赵堃, 等. 渗流与侧向流共同作用下的潮沟边壁侵蚀研究进展[J]. *海洋与湖沼*, 2022, **53**(4): 797-805.
- [9]张忍顺, 王雪瑜. 江苏省淤泥质海岸潮沟系统[J]. *地理学报*, 1991, **46**(2): 195-206.
- [10]BAYLISS-SMITH T P, HEALEY R, LAILEY R, *et al.* Tidal flows in salt marsh creeks[J]. *Estuarine and coastal marine science*, 1979, **9**(3): 235-255.
- [11]MALVAREZ G, NAVAS F, JACKSON D W T. Investigations on the morphodynamics of sandy tidal flats: a modeling application [J]. *Coastal engineering*, 2004, **51**(8/9): 731-747.
- [12]DE SWART H E, ZIMMERMAN J T F. Morphodynamics of tidal inlet systems[J]. *Annual review of fluid mechanics*, 2009, **41**(1): 203-229.
- [13]侯明行, 刘红玉, 张华兵. 盐城淤泥质潮滩湿地潮沟发育及其对米草扩张的影响[J]. *生态学报*, 2014, **34**(2): 400-409.
- [14]赵欣胜, 崔保山, 孙涛, 等. 黄河三角洲潮沟湿地植被空间分布对土壤环境的响应[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(8): 1855-1861.
- [15]SAINTILAN N, ROGERS K, KELLEWAY J J, *et al.* Climate change impacts on the coastal wetlands of Australia[J]. *Wetlands*, 2019, **39**(6): 1145-1154.
- [16]HUGHES R G. Climate change and loss of saltmarshes: consequences for birds: Consequences of climate change and saltmarsh loss on birds[J]. *Ibis*, 2004, **146**: 21-28.
- [17]ADAM P. Saltmarshes in a time of change[J]. *Environmental conservation*, 2002, **29**(1): 39-61.
- [18]汪亚平, 高抒, 张忍顺. 论盐沼—潮沟系统的地貌动力响应[J]. *科学通报*, 1998(21): 2315-2320.
- [19]VANDENBRUWAENE W, MEIRE P, TEMMERMAN S. Formation and evolution of a tidal channel network within a constructed tidal marsh[J]. *Geomorphology*, 2012, **151/152**: 114-125.
- [20]PIETERSE A, PULEO J A, MCKENNA T E. Hydrodynamics and sediment suspension in shallow tidal channels intersecting a tidal flat[J]. *Continental shelf research*, 2016, **119**: 40-55.
- [21]王雪宏, 栗云召, 孟焕, 等. 黄河三角洲新生湿地植物群落分布格局[J]. *地理科学*, 2015, **35**(8): 1021-1026.
- [22]ALLEN J. Morphodynamics of Holocene salt marshes: A review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe[J]. *Quaternary science reviews*, 2000, **19**(12): 1155-1231.
- [23]MALLIN M A, LEWITUS A J. The importance of tidal creek ecosystems[J]. *Journal of experimental marine biology and ecology*, 2004, **298**(2): 145-149.
- [24]王娟, 刘红玉, 李玉凤, 等. 入侵种互花米草空间扩张模式识别与景观变化模拟[J]. *生态学报*, 2018, **38**(15): 5413-5422.
- [25]金斌松. 长江口盐沼潮沟鱼类多样性时空分布格局[D]. 上海: 复旦大学, 2010.
- [26]袁兴中, 陆健健. 长江口潮沟大型底栖动物群落的初步研究 [J]. *动物学研究*, 2001, **32**(3): 211-215.
- [27]袁兴中, 陆健健, 刘红. 河口盐沼植物对大型底栖动物群落的影响[J]. *生态学报*, 2002, **22**(3): 326-333.
- [28]吴晓东, 高抒. 长江口潮间带九段沙滩潮沟形态分析[J]. *海洋学报(中文版)*, 2012, **34**(6): 126-132.
- [29]HOOD W G. Tidal channel meander formation by depositional rather than erosional processes: Examples from the prograding Skagit River Delta (Washington, USA)[J]. *Earth surface processes and landforms*, 2010, **35**(3): 319-330.
- [30]VLASWINKEL B M, CANTELLI A. Geometric characteristics and evolution of a tidal channel network in experimental setting [J]. *Earth surface processes and landforms*, 2011, **36**(6): 739-752.
- [31]ALLEN J R L. Simulation models of salt-marsh morphodynamics: Some implications for high-intertidal sediment couplets related to sea-level change[J]. *Sedimentary geology*, 1997, **113**(3/4): 211-223.
- [32]CHRISTIANSEN T, WIBERG P L, MILLIGAN T G. Flow and sediment transport on a tidal salt marsh surface[J]. *Estuarine, coastal and shelf science*, 2000, **50**(3): 315-331.
- [33]BRIDGES P H, LEEDER M R. Sedimentary model for intertidal

- mudflat channels, with examples from the Solway Firth, Scotland [J]. *Sedimentology*, 1976, **23**(4): 533-552.
- [34]黄海军, 樊辉. 黄河三角洲潮滩潮沟近期变化遥感监测[J]. *地理学报*, 2004, **59**(5): 723-730.
- [35]陈秀法, 杨晓梅, 王敬贵, 等. 高分辨率遥感下的盖州滩潮沟发育分维特征和贝类生境区信息研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 2005, **27**(3): 39-45.
- [36]刘燕春, 张鹰. 遥感中轴线法在江苏辐射沙洲潮沟演变监测中的应用[J]. *海洋科学*, 2011, **35**(2): 72-76, 81.
- [37]郑宗生, 周云轩, 田波, 等. 植被对潮沟发育影响的遥感研究: 以崇明东滩为例[J]. *国土资源遥感*, 2014, **26**(3): 117-124.
- [38]刘玉安, 丛丕福, 李晋, 等. 黄河三角洲海岸潮沟形态特征的遥感分析[J]. *海洋环境科学*, 2020, **39**(3): 393-398.
- [39]LIU Y, ZHOU M, ZHAO S, *et al.* Automated extraction of tidal creeks from airborne laser altimetry data[J]. *Journal of hydrology*, 2015, **527**: 1006-1020.
- [40]ZHAO B, LIU Y, XU W, *et al.* Morphological characteristics of tidal creeks in the central coastal region of Jiangsu, China, using LiDAR[J]. *Remote sensing*, 2019, **11**(20): 2426.
- [41]YANAN K, XIANRONG D. 3D Simulation of tidal creek in Jiangsu coast[J]. *Image in agriculture engineering*, 2013, **7**: 88-89.
- [42]WANG X, SUN J, ZHAO Z. Effects of river discharge and tidal meandering on morphological changes in a meso tidal creek[J]. *Estuarine, coastal and shelf science*, 2020, **234**: 106635.
- [43]MOU K, GONG Z, QIU H. Spatiotemporal differentiation and development process of tidal creek network morphological characteristics in the Yellow River Delta[J]. *Journal of geographical sciences*, 2021, **31**(11): 1633-1654.
- [44]CHEN X, ZHANG M, JIANG H. Morphological characteristics and hydrological connectivity evaluation of tidal creeks in coastal wetlands[J]. *Land*, 2022, **11**(10): 1707.
- [45]BATCHELDER C H. An ecological study of a brackish-water stream[J]. *Ecology*, 1926, **7**(1): 55-71.
- [46]沈永明, 张忍顺, 王艳红. 互花米草盐沼潮沟地貌特征[J]. *地理研究*, 2003, **22**(4): 520-527.
- [47]李加林, 杨晓平, 童亿勤, 等. 互花米草入侵对潮滩生态系统服务功能的影响及其管理[J]. *海洋通报*, 2005, **23**(5): 33-38.
- [48]王爱军, 高抒, 贾建军. 互花米草对江苏潮滩沉积和地貌演化的影响[J]. *海洋学报(中文版)*, 2006, **28**(1): 92-99.
- [49]宗影, 阳佳伶, 刘红玉, 等. 互花米草入侵对盐城淤泥质潮滩湿地潮沟系统影响研究[J]. *海洋科学进展*, 2023, **41**(1): 109-122.
- [50]吕亭豫, 龚政, 张长宽, 等. 粉砂淤泥质潮滩潮沟形态特征及发育演变过程研究现状[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2016, **44**(2): 178-188.
- [51]ROZAS L P, ODUM W E. Use of tidal freshwater marshes by fishes and macrofaunal crustaceans along a marsh stream-order gradient[J]. *Estuaries*, 1987, **10**(1): 36.
- [52]ROZAS L, MCLVOR C, ODUM W. Intertidal rivulets and creekbanks: corridors between tidal creeks and marshes[J]. *Marine ecology progress series*, 1988, **47**: 303-307.
- [53]DESMOND J S, ZEDLER J B, WILLIAMS G D. Fish use of tidal creek habitats in two southern California salt marshes[J]. *Ecological engineering*, 2000, **14**(3): 233-252.
- [54]GRANADOS-DIESELDORFF P, BALTZ D M. Habitat use by nekton along a stream-order gradient in a Louisiana Estuary[J]. *Estuaries and coasts*, 2008, **31**(3): 572-583.
- [55]GRAVELIUS H. Grundriss der gesamten Gewasserkunder[J]. *Flusskunde*, 1914, **1**: 170-179.
- [56]陈才俊. 江苏中部海堤大规模外迁后的潮水沟发育[J]. *海洋通报*, 2001, **19**(6): 71-79.
- [57]李昱蓉, 武海涛, 张森, 等. 互花米草入侵和持续扩张下黄河三角洲滨海湿地潮沟的形态特征及其变化[J]. *湿地科学*, 2021, **19**(1): 88-97.
- [58]吴德力, 沈永明, 方仁建. 江苏中部海岸潮沟的形态变化特征[J]. *地理学报*, 2013, **68**(7): 955-965.
- [59]于小娟, 张仲胜, 薛振山, 等. 1989年以来7个时期黄河三角洲潮沟的形态特征及连通性研究[J]. *湿地科学*, 2018, **16**(4): 517-523.
- [60]郝昕. 江苏辐射沙洲陆岸潮沟形态特征及演变研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2021.
- [61]HORTON R E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology [J]. *Geological society of America bulletin*, 1945, **56**(3): 275.
- [62]NOVAKOWSKI K I, TORRES R, GARDNER L R, *et al.* Geomorphic analysis of tidal creek networks: Tidal creek networks[J]. *Water resources research*, 2004, **40**(5): 1-13.
- [63]STRAHLER A N. Dynamic basis of geomorphology[J]. *Geological society of America bulletin*, 1952, **63**(9): 923.
- [64]许宝荣, 杨太保, 邹松兵. 基于DEM的干旱区河网系统模拟: 以柴达木盆地流域为例[J]. *遥感技术与应用*, 2004, **19**(5): 315-319.
- [65]牟奎南, 宫兆宁, 邱华昌. 黄河三角洲潮沟网络形态特征的时空分异规律及其发育过程[J]. *地理学报*, 2021, **76**(9): 2312-2328.
- [66]MARANI M, LANZONI S, ZANDOLIN D, *et al.* Tidal meanders: Tidal meanders[J]. *Water resources research*, 2002, **38**(11): 1-14.
- [67]CHEN L, HAN Z. Study of the Influence of the deep-water channel project in the Yangtze River Estuary on ecological landscape and fractal dimensions of Jiudian shoal tidal channels [J]. *Journal of coastal research*, 2015, **73**: 146-154.
- [68]袁爽. 近35年长江口潮滩演变遥感研究[D]. 南昌: 江西理工大学, 2018.
- [69]和思海. 长江口九段沙潮沟遥感信息提取和摆动率分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- [70]劳聪聪, 辛沛, 左寅, 等. 1996—2020年长江口九段沙湿地植被覆盖对潮沟演变规律的影响[J]. *水科学进展*, 2022, **33**(1): 15-26.
- [71]骆梦, 王青, 邱冬冬, 等. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通特征及其生态效应[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, **54**(1): 17-24.
- [72]MAN Y, ZHOU F, CUI B. Process-based identification of key tidal creeks influenced by reclamation activities[J]. *Sustainability*,

- 2023, **15**(10): 8123.
- [73]SEMINARA G, LANZONI S, TAMBRONI N, *et al.* How long are tidal channels?[J]. *Journal of fluid mechanics*, 2010, **643**: 479-494.
- [74]龚政, 吕亭豫, 耿亮, 等. 开敞式潮滩-潮沟系统发育演变动力机制: I. 物理模型设计及潮沟形态[J]. *水科学进展*, 2017, **28**(1): 86-95.
- [75]RINALDO A, FAGHERAZZI S, LANZONI S, *et al.* Tidal networks: 2. Watershed delineation and comparative network morphology[J]. *Water resources research*, 1999, **35**(12): 3905-3917.
- [76]陈勇, 何中发, 黎兵, 等. 崇明东滩潮沟发育特征及其影响因素定量分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, **43**(1): 212-219.
- [77]YANG S L, FRIEDRICH C T, SHI Z, *et al.* Morphological response of tidal marshes, flats and channels of the Outer Yangtze River mouth to a major storm[J]. *Estuaries*, 2003, **26**(6): 1416-1425.
- [78]SCHWARZ C, YE Q H, VAN DER WAL D, *et al.* Impacts of salt marsh plants on tidal channel initiation and inheritance: salt marsh plants channel development[J]. *Journal of geophysical research: Earth surface*, 2014, **119**(2): 385-400.
- [79]GONG Z, MOU K, WANG Q, *et al.* Parameterizing the Yellow River Delta tidal creek morphology using automated extraction from remote sensing images[J]. *Science of the total environment*, 2021, **769**: 144572.
- [80]WILLIAMS P B, ORR M K, GARRITY N J. Hydraulic geometry: A geomorphic design tool for tidal marsh channel evolution in wetland restoration projects[J]. *Restoration ecology*, 2002, **10**(3): 577-590.
- [81]武亚楠, 王宇, 张振明. 黄河三角洲潮沟形态特征对湿地植物群落演替的影响[J]. *生态科学*, 2020, **39**(1): 33-41.
- [82]FAGHERAZZI S, BORTOLUZZI A, DIETRICH W E, *et al.* Tidal networks: 1. Automatic network extraction and preliminary scaling features from digital terrain maps[J]. *Water resources research*, 1999, **35**(12): 3891-3904.
- [83]FAN Y, ZHOU D, KE Y, *et al.* Quantifying the correlated spatial distributions between tidal creeks and coastal wetland vegetation in the Yellow River Estuary[J]. *Wetlands*, 2020, **40**(6): 2701-2711.
- [84]VANDENBRUWAENE W, TEMMERMAN S, BOUMA T J, *et al.* Flow interaction with dynamic vegetation patches: Implications for biogeomorphic evolution of a tidal landscape: Flow interaction with dynamic patches[J]. *Journal of geophysical research: Earth surface*, 2011, **116**(F1): 1-13.
- [85]KEARNEY W S, FAGHERAZZI S. Salt marsh vegetation promotes efficient tidal channel networks[J]. *Nature communications*, 2016, **7**(1): 12287.
- [86]LEE K Y, SHIH S, HUANG Z Z. Mangrove colonization on tidal flats causes straightened tidal channels and consequent changes in the hydrodynamic gradient and siltation potential[J]. *Journal of environmental management*, 2022, **314**: 115058.
- [87]于小娟, 薛振山, 张仲胜, 等. 潮沟对黄河三角洲湿地典型景观格局的影响[J]. *自然资源学报*, 2019, **34**(12): 2504-2515.
- [88]刘建华, 杨世伦, 史本伟, 等. 长江口崇明东滩潮沟地貌形态和演变[J]. *海洋学研究*, 2012, **30**(2): 43-50.
- [89]ZEFF M L. Salt marsh tidal channel morphometry: Applications for wetland creation and restoration[J]. *Restoration ecology*, 1999, **7**(2): 205-211.
- [90]MANDELBROT B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. *Science*, 1967, **156**(3775): 636-638.
- [91]ROSSO R, BACCHI B, LA BARBERA P. Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks[J]. *Water resources research*, 1991, **27**(3): 381-387.
- [92]SCHULLER D J, RAO A R, JEONG G D. Fractal characteristics of dense stream networks[J]. *Journal of hydrology*, 2001, **243**(1/2): 1-16.
- [93]FAC-BENEDA J. Fractal structure of the Kashubian hydrographic system[J]. *Journal of hydrology*, 2013, **488**: 48-54.
- [94]孙功效, 赵海虹, 崔承琦. 黄河三角洲潮滩潮沟体系的分维特征[J]. *海洋与湖沼*, 2001, **42**(1): 74-80.
- [95]FAN H, HUANG H. Spatial-temporal changes of tidal flats in the Huanghe River Delta using Landsat TM/ETM+ images[J]. *Journal of geographical sciences*, 2004, **14**(3): 366-374.
- [96]郭永飞, 韩震, 张琨. 长江口九段沙潮沟信息区域生长法提取及分维研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, **31**(2): 31-35.
- [97]时海东, 沈永明, 康敏. 江苏中部海岸潮沟形态对滩涂围垦的响应[J]. *海洋学报*, 2016, **38**(1): 106-115.
- [98]BOST M C, DEATON C D, RODRIGUEZ A B, *et al.* Anthropogenic impacts on tidal creek sedimentation since 1900[J]. *Plos one*, 2023, **18**(1): e0280490.
- [99]陈思明. 粉砂淤泥质潮滩表层沉积物侵蚀特性探讨[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- [100]时钟, 陈吉余. 潮滩盐沼物理过程的研究进展综述[J]. *地球科学进展*, 1995, **10**(1): 19-30.
- [101]HOUWING E J. Determination of the critical erosion threshold of cohesive sediments on intertidal mudflats along the Dutch Wadden Sea Coast[J]. *Estuarine, coastal and shelf science*, 1999, **49**(4): 545-555.
- [102]陈思明, 王宪业, 孙健伟, 等. 粉砂淤泥质潮滩表层沉积物可侵蚀性研究[J]. *泥沙研究*, 2020, **45**(1): 45-51.
- [103]燕守广. 江苏淤长型淤泥质潮滩上潮沟的发育与演变[D]. 南京: 南京师范大学, 2002.
- [104]李明亮, 杨磊, 龚绪龙, 等. 围垦工程影响下的淤涨型潮滩演化: 以江苏弶港潮滩为例[J]. *海洋通报*, 2016, **35**(6): 683-693.
- [105]GREGORY HOOD W. Indirect environmental effects of dikes on estuarine tidal channels: Thinking outside of the dike for habitat restoration and monitoring[J]. *Estuaries*, 2004, **27**(2): 273-282.
- [106]陈才俊. 围垦对潮滩动物资源环境的影响[J]. *海洋科学*, 1990, **15**(6): 48-50.
- [107]骆永明. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展[J]. *中国科学院院刊*, 2016, **31**(10): 1133-1142.
- [108]GAROFALO D. The Influence of Wetland Vegetation on Tidal

- Stream Channel Migration and Morphology[J]. *Estuaries*, 1980, **3**(4): 258.
- [109]杨世伦, 陈吉余. 试论植物在潮滩发育演变中的作用[J]. *海洋与湖沼*, 1994, **25**(6): 631-635.
- [110]时钟, 杨世伦, 缪莘. 海岸盐沼泥沙过程现场实验研究[J]. *泥沙研究*, 1998, **23**(4): 30-37.
- [111]史本伟, 杨世伦, 罗向欣, 等. 淤泥质光滩-盐沼过渡带波浪衰减的观测研究: 以长江口崇明东滩为例[J]. *海洋学报(中文版)*, 2010, **32**(2): 174-178.
- [112]吉晓强, 何青, 刘红, 等. 崇明东滩水文泥沙过程分析[J]. *泥沙研究*, 2010, **35**(1): 46-57.
- [113]陈玉军, 廖宝文, 黄勃, 等. 红树林消波效应研究进展[J]. *热带生物学报*, 2011, **2**(4): 378-382.
- [114]朱小伟, 侯棚, 陈俊昂, 等. 红树林生态系统中潮滩与植物消浪特性试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, **51**(6): 99-106.
- [115]CHEN Y, LI Y, CAI T, *et al.* A comparison of biohydrodynamic interaction within mangrove and saltmarsh boundaries: Bio-hydrodynamics within mangrove and saltmarsh boundaries [J]. *Earth surface processes and landforms*, 2016, **41**(13): 1967-1979.
- [116]沈颖, 刘洁. 滩地红树林引起的波浪衰减特性实验分析[J]. *科学技术与工程*, 2016, **16**(22): 100-104.
- [117]蒋昌波, 管喆, 陈杰, 等. 红树林对规则波作用下岸滩剖面变化影响实验研究[J]. *热带海洋学报*, 2017, **36**(1): 95-105.
- [118]HORSTMAN E M, BRYAN K R, MULLARNEY J C. Drag variations, tidal asymmetry and tidal range changes in a mangrove creek system[J]. *Earth surface processes and landforms*, 2021, **46**(9): 1828-1846.
- [119]AZEER A, GNANAPPAZHAM L, MURALEEDHARAN K R, *et al.* Multi-decadal changes of mangrove forest and its response to the tidal dynamics of thane creek, Mumbai[J]. *Journal of sea research*, 2022, **180**: 102162.
- [120]江锐捷, 程鹏, 高建华, 等. 红树林对潮流底边界层动力过程的影响[J]. *海洋地质前沿*, 2020, **36**(4): 37-44.
- [121]WANG C, ZHENG S sha, WANG P fang, *et al.* Interactions between vegetation, water flow and sediment transport: A review[J]. *Journal of hydrodynamics*, 2015, **27**(1): 24-37.
- [122]庄武艺, J. 谢佩尔. 海草对潮滩沉积作用的影响[J]. *海洋学报(中文版)*, 1991, **13**(2): 230-239.
- [123]YANG S L, LI H, YSEBAERT T, *et al.* Spatial and temporal variations in sediment grain size in tidal wetlands, Yangtze Delta: On the role of physical and biotic controls[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, **77**(4): 657-671.
- [124]杨世伦, 时钟, 赵庆英. 长江口潮沼植物对动力沉积过程的影响[J]. *海洋学报(中文版)*, 2001, **23**(4): 75-80.
- [125]FRUERGAARD M, ANDERSEN T J, NIELSEN L H, *et al.* Punctuated sediment record resulting from channel migration in a shallow sand-dominated micro-tidal lagoon, Northern Wadden Sea, Denmark[J]. *Marine geology*, 2011, **280**(1/4): 91-104.
- [126]BRYCE S, LARCOMBE P, RIDD P V. Hydrodynamic and geomorphological controls on suspended sediment transport in mangrove creek systems, a case study: Cocoa Creek, Townsville, Australia[J]. *Estuarine, coastal and shelf science*, 2003, **56**(3/4): 415-431.
- [127]SHI Z, LAMB H F, COLLIN R L. Geomorphic change of saltmarsh tidal creek networks in the Dyfi Estuary, Wales[J]. *Marine geology*, 1995, **128**(1/2): 73-83.
- [128]王可钧, 李焯芬. 植物固坡的力学简析[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, **17**(6): 687-691.
- [129]张莹鑫, 张文祥, 史本伟, 等. 淤泥质潮间带植被-光滩沉积物稳定性研究: 以长江口崇明东滩为例[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2022(6): 169-177.
- [130]李国荣, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原东北部黄土区草本与灌木植物根-土相互作用力学机理及其模型研究[J]. *中国水土保持*, 2013(7): 37-41.
- [131]杜钦, 杨淑慧, 任文玲, 等. 植物根系固岸抗蚀作用研究进展[J]. *生态学杂志*, 2010, **29**(5): 1014-1020.
- [132]DAVIDSON-ARNOTT R G D, VAN PROOSDIJ D, OLLERHEAD J, *et al.* Hydrodynamics and sedimentation in salt marshes: examples from a macrotidal marsh, Bay of Fundy[J]. *Geomorphology*, 2002, **48**(1-3): 209-231.
- [133]张豆豆, 梁新华, 王俊. 植物根系分泌物研究综述[J]. *中国农学通报*, 2014, **30**(35): 314-320.
- [134]吴彦, 刘世全, 王金锡. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 1997, **3**(2): 119-124.
- [135]LIKENS G E, BORMANN F H. Linkages between Terrestrial and Aquatic Ecosystems[J]. *Bioscience*, 1974, **24**(8): 447-456.
- [136]CRAIN C M, SILLIMAN B R, BERTNESS S L, *et al.* Physical and biotic drivers of plant distribution across estuarine salinity gradients[J]. *Ecology*, 2004, **85**(9): 2539-2549.
- [137]XUE L, JIANG J, LI X, *et al.* Salinity affects topsoil organic carbon concentrations through regulating vegetation structure and productivity[J]. *Journal of geophysical research: Biogeosciences*, 2020, **125**(1): 1-14.
- [138]TANG Y N, MA J, XU J X, *et al.* Assessing the Impacts of tidal creeks on the spatial patterns of coastal salt marsh vegetation and its aboveground biomass[J]. *Remote sensing*, 2022, **14**(8): 1839.
- [139]WU Y, LIU J, YAN G, *et al.* The size and distribution of tidal creeks affects salt marsh restoration[J]. *Journal of environmental management*, 2020, **259**: 110070.
- [140]王娟, 刘红玉, 李玉凤, 等. 入侵种互花米草空间扩张模式识别与景观变化模拟[J]. *生态学报*, 2018, **38**(15): 5413-5422.
- [141]CALLAWAY J C, JOSSELYN M N. The Introduction and spread of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) in south San Francisco Bay[J]. *Estuaries*, 1992, **15**(2): 218.
- [142]ROSSO P H, USTIN S L, HASTINGS A. Use of lidar to study changes associated with *Spartina* invasion in San Francisco Bay marshes[J]. *Remote sensing of environment*, 2006, **100**(3): 295-306.
- [143]陈秀芝, 郭水良, 朱莉莉, 等. 长江口九段沙不同等级潮沟附近主要植物种群的分布格局[J]. *湿地科学*, 2011, **9**(1): 52-60.
- [144]NING Z H, CHEN C, ZHANG S Y, *et al.* Lateral hydrological

- connectivity driven by tidal flooding regulates range-expansion of invasive *Spartina alterniflora* in tidal channel- salt marsh systems[J]. Journal of environmental informatics, 2023, **41**(1): 16.
- [145]CHEN L, WANG W, LI Q Q, *et al.* Mangrove species' responses to winter air temperature extremes in China[J]. Ecosphere, 2017, **8**(6): 1-14.
- [146]WANG W, YOU S, WANG Y, *et al.* Influence of frost on nutrient resorption during leaf senescence in a mangrove at its latitudinal limit of distribution[J]. Plant and soil, 2011, **342**(1/2): 105-115.
- [147]OSLAND M J, HARTMANN A M, DAY R H, *et al.* Microclimate influences mangrove freeze damage: Implications for range expansion in response to changing macroclimate[J]. Estuaries and coasts, 2019, **42**(4): 1084-1096.
- [148]CHEN Y, CHEN L, ZHANG Z, *et al.* Tidal creeks mediate micro- climate within artificial mangroves at their northmost boundary in China[J]. Ecological engineering, 2023, **192**: 106970.
- [149]ERFTEMEIJER P L A, WYLIE N, HOOPER G J. Successful mangrove establishment along an artificially created tidal creek at Port Hedland, Western Australia[J]. Marine and freshwater research, 2018, **69**(1): 134.
- [150]LEWIS R R. Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests[J]. Ecological engineering, 2005, **24**(4): 403-418.
- [151]EMERY N C, EWANCHUK P J, BERTNESS M D. Competition and salt- marsh plant zonation: Stress tolerators may be dominant competitors[J]. Ecology, 2001, **82**(9): 2471-2485.
- [152]BINO G, SISSON S A, KINGSFORD R T, *et al.* Developing state and transition models of floodplain vegetation dynamics as a tool for conservation decision-making: A case study of the macquarie marshes Ramsar wetland[J]. Journal of applied ecology, 2015, **52**(3): 654-664.
- [153]崔保山, 蔡燕子, 谢焜, 等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, **52**(6): 738-746.
- [154]HAMPEL H, CATTRIJSSE A, ELLIOTT M. Feeding habits of young predatory fishes in marsh creeks situated along the salinity gradient of the Schelde estuary, Belgium and the Netherlands [J]. Helgoland marine research, 2005, **59**(2): 151-162.
- [155]JING K, MA Z, LI B, *et al.* Foraging strategies involved in habitat use of shorebirds at the intertidal area of Chongming Dongtan, China[J]. Ecological research, 2007, **22**(4): 559-570.
- [156]LEVIN L, BLAIR N, DEMASTER D, *et al.* Rapid subduction of organic matter by maldivian polychaetes on the North Carolina slope[J]. Journal of marine research, 1997, **55**(3): 595-611.
- [157]WANG J Q, TANG L, ZHANG X D, *et al.* Fine- scale environmental heterogeneities of tidal creeks affect distribution of crab burrows in a Chinese salt marsh[J]. Ecological engineering, 2009, **35**(12): 1685-1692.
- [158]LEE S Y. Ecological role of grapsid crabs in mangrove ecosystems: A review[J]. Marine and freshwater research, 1998, **49**(4): 335.
- [159]WASHBURN T, SANGER D M. Microhabitat variability of macrobenthic organisms within tidal creek systems[J]. Hydrobiologia, 2013, **702**(1): 15-25.
- [160]葛宝明, 鲍毅新, 郑祥. 灵昆岛围垦滩涂潮沟大型底栖动物群落生态学研究[J]. 生态学报, 2005, **25**(3): 446-453.
- [161]胡知渊, 鲍毅新, 葛宝明, 等. 围垦滩涂潮沟秋季大型底栖动物群落和生态位分析[J]. 动物学报, 2006(4): 800-809.
- [162]李强, 马长安, 吕巍巍, 等. 围垦对崇明东滩潮沟大中型浮游动物群落结构的影响[J]. 复旦学报(自然科学版), 2012, **51**(4): 515-522.
- [163]BOZEMAN E L, DEAN J M. The abundance of estuarine larval and juvenile fish in a south Carolina intertidal creek[J]. Estuaries, 1980, **3**(2): 89.
- [164]ROUNTREE R A, ABLE K W. Fauna of polyhaline subtidal marsh creeks in southern New Jersey: Composition, abundance and biomass[J]. Estuaries, 1992, **15**(2): 171.
- [165]CATTRIJSSE A, MAKWAIA E, DANKWA H, *et al.* Nekton communities of an intertidal creek of a European estuarine brackish marsh[J]. Marine ecology progress series, 1994, **109**: 195-208.
- [166]PATERSON A W, WHITFIELD A K. The fishes associated with three intertidal salt marsh creeks in a temperate southern African estuary[J]. Wetlands ecology and management, 2003, **11**(5): 305-315.
- [167]ZHANG J, WU Y, JENNERJAHN T C, *et al.* Distribution of organic matter in the Changjiang (Yangtze River) estuary and their stable carbon and nitrogen isotopic ratios: Implications for source discrimination and sedimentary dynamics[J]. Marine chemistry, 2007, **106**(1/2): 111-126.
- [168]COSENTINO B J, SCHOOLEY R L, PHILLIPS C A. Spatial connectivity moderates the effect of predatory fish on salamander metapopulation dynamics[J]. Ecosphere, 2011, **2**(8): 1-14.
- [169]CALÒ A, DI FRANCO A, DE BENEDETTO G, *et al.* Propagule dispersal and larval patch cohesiveness in a Mediterranean coastal fish[J]. Marine ecology progress series, 2016, **544**: 213-224.
- [170]LARKIN D J, MADON S P, WEST J M, *et al.* Topographic heterogeneity influences fish use of an experimentally restored tidalmarsh[J]. Ecological applications, 2008, **18**(2): 483-496.
- [171]ALLEN D, HAERTEL- BORER S, MILAN B, *et al.* Geomorphological determinants of nekton use of intertidal salt marsh creeks[J]. Marine ecology progress series, 2007, **329**: 57-71.
- [172]LA PEYRE M, BIRDSOING T. Physical variation of non-vegetated marsh edge habitats, and use patterns by nekton in Barataria Bay, Louisiana, USA[J]. Marine Ecology Progress Series, 2008, **356**: 51-61.
- [173]VISINTAINER T, BOLLENS S, SIMENSTAD C. Community composition and diet of fishes as a function of tidal channel geomorphology[J]. Marine ecology progress series, 2006, **321**: 227-243.

A Review on Evolution and Ecological Effects of Tidal Creeks

AI Xihang^{1,2,3}, XIN Kun^{1,3}, ZENG Shujun^{1,3,4}

(1. *Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, P.R.China;*

2. *Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, P.R.China;* 3. *Dongzhaigang Long-term Research Station for*

Mangrove Wetland Ecosystem in Hainan Island, Haikou 571129, Hainan, P.R.China;

4. *Hainan University, Haikou 570100, Hainan, P.R.China*)

Abstract: Tidal creeks, as unique components of coastal landform, have gradually attracted attention for their abilities of hydrological connectivity, material transportation and biodiversity. They can maintain the salt-and-water balance of tidal flats, transport sediments between ocean and land, be a spreading channel for plant seeds of coastal wetland, and provide habitats for marine organisms, which benefit the stability of coastal ecosystems. After extreme climate events and human activities, unchangeable shape and increasing biodiversity of tidal creeks is a signal of the restoration of coastal ecosystem. Therefore, it is of great significance to explore their morphological changes and ecological impact. Based on several researches of dynamic changes and ecological effects of tidal creeks in recent years, this paper reviews the classification methods, morphological characteristics, influencing factors and ecological effects of them, and puts forward three directions that need to be followed in the future: Spatial distribution and morphological characteristics of tidal creeks in different coastal wetlands with different influencing factors; Simulation and prediction of coastal seed transportation in tidal creeks. The relationships between the morphology, hydrological connectivity and ecological effect of tidal creeks.

Keywords: tidal creeks; morphological characteristics; influence factors; ecological effects