



Advances in the Vegetations' Ecohydrology of Estuarine Wetland in China

Wang Tianci, Wang Fang*

Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China

Email address:

wtianci_hohai@163.com (Wang Tianci), wangf@iwhr.com (Wang Fang)

*Corresponding author

To cite this article:

Wang Tianci, Wang Fang. Advances in the Vegetations' Ecohydrology of Estuarine Wetland in China. *Asia-Pacific Journal of Earth Sciences*. Vol. 1, No. 1, 2019, pp. 8-16.

Received: December 21, 2018; Accepted: February 13, 2019; Published: April 3, 2019

Abstract: The natural environment of estuarine wetlands are located in marine-terrestrial and seawater-fresh water interlaced zone where vegetation is the primary productive force and the main builder of habitats for birds and spawning fish. In the late 1970s and early 1980s, a national wide survey of estuarine wetlands' vegetation was conducted in China to identify the dominant phytocoenosis in each main estuary. Since the beginning of this century, with the in-depth study of the demand related to freshwater ecological, the research on the water-salt interaction of vegetation in estuarine wetland has developed rapidly. In this paper, we review the rule for three climate zones of China from north to south. In warm temperate zone of north China, the dominant community of estuarine supratidal zone is *Phragmites* Adans community. In the intertidal zone, the dominant community is *Phragmites* Adans community and *Suaeda* community. The law from inland to sea is as follows. When salinity of soil is between 5-6‰ and soil moisture content is about 20%, the dominant community is *Calamagrostis* community, *Phragmites* Adans community dominants when soil moisture content is more than 40%. When the salinity increased to 7-15‰ and the soil moisture content is about 40%, the dominant community is *Suaeda* community. Among which, there is an obvious *Triarrhena* Nakai. community transition zone between the soil water content of 20-40% in the Yellow River estuary wetland and when salinity is less than 10‰, there exists a transition zone of *Tamarix* Linn community, which is between the community of *Phragmites* Adans community and *Suaeda* community. In the subtropical monsoon region, the dominant community in the supra tidal zone is also *Phragmites* Adans community, which is same as the dominant community in warm temperate zone of north China. And the dominant community in the intertidal zone is *Phragmites* Adans-*Spartina* community. The law in this zone from estuary to ocean is that when salinity is less than 20‰ and average submerged depth is about 30cm, the dominant community is *Phragmites* Adans community. When salinity is 20-35‰ and the average submergence depth is 40cm, the dominant community is *Phragmites* Adans community or *Spartina* community. When salinity is 35-45‰ and the average submergence depth is 50cm, *Scirpus* Linn. community dominants or exists a shoal or bare ground. Mangrove plants are the dominant community of subtropical-tropical estuarine wetland. When salinity is between 0-5mg/g, the dominant community is *Acanthus* L community. As salinity increased to 7.5-21mg/g, the dominant community is *Kandelia* community. When salinity is between 11-15mg/g, the dominant community is *Aegiceras* Gaertn community. And when salinity is up to 8.8-17.5 mg/g, the dominant community is *Avicennia* L community.

Keywords: Estuarine Wetlands, Phytocoenosis, Salinity, Soil Moisture Content

我国河口湿地植被生态水文研究进展

王天慈, 王芳*

中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京, 中国

邮箱

wtianci_hohai@163.com (王天慈), wangf@iwhr.com (王芳)

摘要: 河口湿地海陆交错, 咸淡水作用。植被是主要的第一性生产力, 也是鸟类栖息和鱼类产卵育幼环境的主要营造者。上世纪70年代末80年代初, 我国进行了河口湿地植被全国性调查, 明确各大河口的主要优势植物群落。本世纪以来, 随着淡水生态需求研究的深入, 河口湿地植被水盐作用关系的研究发展较快。按照我国河口自北向南分属的3个气候带, 华北暖温带河口潮上带湿地植被优势种群为芦苇, 潮间带优势种群为芦苇、翅碱蓬, 沿入海方向的植被水盐规律是: 当盐度5-6‰、土壤含水量20%时优势群落是拂子茅, 土壤含水量>40%时优势群落是芦苇; 当盐度升高到7-15‰、土壤含水量40%时, 优势群落是翅碱蓬, 其中, 黄河口湿地在土壤含水量20-40%之间存在着明显的荻群落过渡带, 在盐度<10‰的芦苇-翅碱蓬过渡带存在柽柳群落。亚热带季风区, 潮上带优势植物群落依然是芦苇, 潮间带优势群落是芦苇-互花米草, 从河口向海洋方向植被的发育规律是: 在盐度<20‰和平均淹没深度30cm时, 优势群落是芦苇; 当盐度20-35‰和平均淹没深度40cm时, 优势群落是芦苇或互花米草; 当盐度35-45‰和平均淹没深度50cm时, 是蔗草、光滩或裸地。亚热带-热带河口湿地则以红树植物为优势种, 植物群落随盐度增加依次为: 土壤含盐量0-5mg/g时, 优势群落是老鼠簕属, 当土壤含盐量7.5-21mg/g时, 优势群落是秋茄, 当土壤含盐量11-15mg/g时, 优势群落是桐花树属, 当土壤含盐量8.8-17.5mg/g时, 优势群落是白骨壤属。

关键词: 河口湿地, 植物群落, 盐度, 土壤含水量

1. 前言

我国海岸线北起辽宁鸭绿江口, 南至广西北仑河口, 全长18400km, 如果考虑岛屿, 海岸线长32000km, 具有大小河口1800多个, 其中河流长度大于100km的河口60个[1]。按照自然综合区划[2]、生态区划[3]与水文区划[4], 自北至南我国河口分属于暖温带湿润-半湿润落叶阔叶林、亚热带湿润常绿阔叶林、热带湿润雨林-季雨林三个地带性植被大区。2015年编写的《中国湿地资源总卷》[5]考虑沉积类型, 指出以杭州湾为界, 以北的海岸多为淤泥质海滩, 以南的海岸以岩石性海滩为主。

河口湿地作为海陆连通的过渡性地带, 受潮汐作用, 咸淡水交汇过程复杂。陆健健以土壤、植被及淹水程度为分类要素, 将我国滨海湿地分为潮上带淡水湿地、潮间带滩涂湿地、潮下带近海湿地及河口沙洲离岛湿地[6-7]。赵焕庭从沉积学、地貌学及生态学出发, 依据湿地形态、物质组成及演变阶段将我国海岸湿地分为淤泥质滨海湿地、砂砾质滨海湿地、基岩滨海湿地、水下岸坡湿地、泻湖湿地、红树林湿地及珊瑚礁湿地七个类型[8]。多数学者[9-10]沿用潮上带、潮间带和潮下带分区的海洋水文概念[11-12]。

河口湿地生态水文是研究咸淡水环境与湿地生物的相互作用关系, 其中植被是湿地生态系统第一性生产力, 也是湿地生物的主要栖息地。随着我国陆域淡水资源过度利用与防潮蓄淡工程对水文过程的改变, 河口湿地从鸟类觅食到鱼类产卵各方面的问题凸显, 相比国外研究更多关注营养盐的作用[26-28], 我国河口湿地生态水文规律研究发展较快。本文按照南北自然地理分区、东西潮汐作用分带, 进行湿地植被生态水文研究综述, 归纳不同自然区域潮汐作用下河口湿地植被水盐演化规律, 以期支撑流域水资源的合理开发利用与防潮工程的科学调度。

2. 华北暖温带河口湿地

我国对华北暖温带河口的研究多集中在辽河口和黄河口区域, 暖温带河口湿地植物受水、盐关系影响显著,

水盐动态决定植物群落的分布格局[13], 水体盐度和土壤含盐量的改变可使植物群落按不同方向演替[14-15], 部分地区由于海水入侵潮上带, 可能会导致淡水植物或陆生植物的死亡从而改变滩涂植物群落的分布及演替过程, 使原生演替变为次生演替[16]。

2.1. 潮上带

华北暖温带河口区潮上带植被总体以芦苇(*Phragmites Adans*)为主, 但随着具体环境的差异, 潮上带优势群落组成不同。其中, 辽河口湿地植被分布的主要影响因素为盐分含量[17], 优势植物为芦苇及翅碱蓬(*Suaeda heteroptera*)。Wang等人根据植物耐盐性将其分为盐生、中性与甜土植物3种功能型[18]。辽河口湿地潮上带主要为中性植物及甜土植物, 水体盐度约3.33‰、土壤含水量约22.8%时植物群落以芦苇为优势[19]。董厚德等人对土壤含盐量进一步分析研究发现, 当含盐量小于6‰、土壤含水量约20%时, 辽河口潮上带的优势植物群落为拂子茅(*Calamagrostis epigeios*) [20]和羊草(*Anenrolepidium chinensis*) ; 当含盐量小于5‰、土壤含水量约50%时, 潮上带则以香蒲(*Typha przewalskii*) [21]和芦苇[22]为优势植物群落[23]。

黄河三角洲潮上带主要分布以芦苇(*P. australis*)、柽柳(*Tamarix spp.*)及翅碱蓬为优势种的植物群落[24], 黄河河道漫滩地区主要分布以旱柳(*Salix matsudana*)、芦苇、荻(*Triarrhena sacchariflora*)为优势种的植物群落[25]。吴勇泉等对黄河三角洲大汶流管理区植被调查结果显示, 土壤盐分较低时优势种为芦苇、碱蓬(*S.salsa*)、香蒲(*T.orientalis*)等[26]。崔保山等人综合考虑水深与盐分条件的影响, 发现以穗状狐尾藻为优势种的植物群落明显聚集在高水深、低盐分地区, 以翅碱蓬-柽柳为优势种的群落则分布在低水深、高盐分地区, 而以芦苇、旱柳(*Salix matsudana*)、荻等为优势种的群落主要分布在两者之间的过渡地带[27]。在此研究基础上, 崔保山等[28]进一步对潮上带植被的生态位进行分析, 发现假苇拂子茅(*C.dophragmites*)、碱蓬(*S.glauc*)、补血草(*Limonium sinense* (Girard) Kuntze)、罗布麻(*A. venetum* L)等在水深适

中(-1.01~-0.1m)或较低(<-1.0m)的环境中均有分布(以地面为0m,向上为正方向),生态位宽度(0.27~0.42)。谭学界、赵欣胜等人采用模糊数学排序方法分析黄河三角洲不同水深梯度下湿地植物分布,结果表明在潮上带水深梯度下植物生境和群落类型都表现出较大差异:以地面为水深0cm基线,水深40~70cm时植物群落为蒲草(*T. L. angustifolia*)、芦苇,以蒲草为优势种;水深0~40cm时为单一芦苇群落;水深-30~0cm时植物群落组成包括芦苇、翅碱蓬、狗尾草(*Setaria glauca*)、獐茅(*Angiospermae*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)等,以芦苇为优势种;水深-50~-30cm为水陆过渡地带,旱生、水生植物并存,物种最为丰富,植物群落组成包括芦苇、翅碱蓬、狗尾草等,以翅碱蓬为优势种;水深低于-50cm时地表较为干旱,盐碱化程度有所降低,植被类型被耐旱生植被代替,主要植物群落为荻(*T. Miscanthus sacchariflor*)、獐茅、芦苇、补血草、鹅绒藤、白茅(*Imperata cylindrical var. major*)和翅碱蓬,以荻、白茅为优势种[29]。

2.2. 潮间带

暖温带潮间带的植物群落以翅碱蓬为优势种,从北部辽河口的翅碱蓬[30-31]单一优势种发展到黄河口以怪柳[32-33]、翅碱蓬为优势种。

(1) 辽河口

辽河口湿地潮间带以翅碱蓬为优势种。董厚德对辽河口湿地植被及其水盐关系进行的调查表明:在土壤含盐量5%以上、含水量40%左右时,多分布有滩涂硅藻群落(*Bacillariophyta*)和翅碱蓬群落,当土壤含盐量为1-3%,水分达到40%以上时,潮间带上部以芦苇为优势群落[34]。大凌河口湿地潮间带植被的研究中发现翅碱蓬生物量自然对数与土壤盐分、水分含量之间存在极显著的一元二次曲线拟合关系,高斯模型求解出的大凌河口湿地翅碱蓬随土壤水盐变化的生态阈值表明翅碱蓬群落生存的最适土壤盐分含量为12.14g/kg,最适土壤水分含量为59.82%[34]。由上述研究可知,土壤含盐量3-5%为潮上带和潮间带之间的过渡带,含盐量高于15%时芦苇群落开始消失,翅碱蓬群落开始出现。

(2) 黄河口

黄河三角洲湿地潮间带主要以怪柳、翅碱蓬为优势种[28,35,36]。潮间带翅碱蓬群落随着水深、土壤盐分的梯度变化发生显著变化,自海岸向内陆延伸大致可分为3个群落:在土壤盐分高于24.25g/kg时,群落组成以陆地滩涂延伸的先锋植物群落--翅碱蓬群落为主[37],主要分布在近海滩地,尤以黄河入海口最为集中,该群落类型中翅碱蓬的盖度可达15-82%,以怪柳和芦苇伴生。随着地势的抬升,地下水埋深的增加,翅碱蓬群落发展到一定阶段,在土壤盐分达到12.60-24.25g/kg时为怪柳-翅碱蓬优势群落,主要分布在潮间带中上部的盐碱荒地,土壤盐分含量较高,该群落类型中怪柳和翅碱蓬的盖度分别为20%-50%、10%-48%,主要伴生芦苇及獐茅。当土壤盐分下降至8.06-12.60g/kg时,开始出现芦苇-怪柳群落,主要位于潮间带上部高地,土壤盐分含量较怪柳-碱蓬群落类型低,该

群落类型中芦苇和怪柳的盖度分别为8-90%、5-40%,主要伴生翅碱蓬[32-34]。

崔保山认为植物群落中不同植物种在某些环境维度上不发生生态位分化,并不能说明不存在生态位分化的现象,通过计算生态位宽度,如以水深梯度进行分析,芦苇的生态位宽度最大,在水深较大处芦苇优势度较高,怪柳、翅碱蓬的生态位宽度也较大,翅碱蓬优势度通常在低湿区域达到最大值,穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、香蒲以及一些喜低湿环境的植物生态位宽度均较小;以盐分梯度进行分析,盐地碱蓬生态位宽度最大,怪柳生态位宽度也较大,其耐盐能力均较强,芦苇、香蒲、穗状狐尾藻等生态位宽度较小,耐盐能力较差[24-25]。

3. 亚热带季风区河口湿地

长江口地区是我国重要的河口盐沼湿地分布区,包括沿江沿海滩涂湿地和河口沙洲岛屿湿地两种湿地类型[38],主要分为崇明东滩、九段沙湿地及长江口北支湿地三个区域。崇明东滩[39-40]与九段沙[41-42]滩涂湿地的植物群落类型主要是芦苇、互花米草(*Spartina alterniflora*)与蔗草群落(*Scirpus*)。北支湿地的植物优势群落为海三棱蔗草(*Scirpus mariqueter*)、蔗草(*Scirpus triqueter*)及芦苇群落。

3.1. 潮上带

位于亚热带季风区的长江口湿地潮上带主要分布有芦苇群落[34-45]。长江口崇明东滩的芦苇群落与湿地水盐关系密切,以土壤电导率反映土壤水含盐量,通过Pearson相关性分析可知[43]:土壤电导率与芦苇生态特征呈显著负相关,地下水埋深则与芦苇生态特征呈显著正相关,在土壤电导率小于5ms/cm(含盐量5%),土壤含水量大于70%时为芦苇单优势群落,土壤电导率大于5ms/cm,土壤含水量下降至50-70%时为芦苇(*P. australis*)-白茅(*I. cylindrical*)-苔草(*C. tristachya*)群落。崇明东滩南部的芦苇群落主要分布在潮滩高程(3.75±0.57)m、土壤盐度(2.12±0.57)g/kg的区域,伴生白茅群落分布在高程(3.85±0.32)m、土壤盐度不超过1.5g/kg的中上部潮滩[35]。九段沙湿地芦苇群落在上、中、下沙均有分布,主要在潮上带形成单优势群落。长江口北支湿地的芦苇群落主要分布在潮上带地势平坦,仅大潮高潮时被淹没的区域[43]。

3.2. 潮间带

在崇明东滩的潮间带,沿高程梯度从高到低,优势植物群落依次为芦苇群落、莎草科植物(*Cyperus rotundus* L.)群落、硅藻群落;在九段沙湿地潮间带为芦苇群落[44-45]、互花米草群落、蔗草群落或海三棱蔗草群落[46]、硅藻群落[47-48];长江口北支湿地由内陆到沿海依次为芦苇单优势群落,海三棱蔗草、蔗草群落,硅藻群落[15]。

崇明东滩大堤以外植被呈现明显的条带状分布,通过显著性差异分析发现,互花米草分布区土壤盐度最高,达到3.21±0.51g/kg,分布高程约3.55±0.73m,海三棱蔗草分布区土壤盐度2.86±0.64g/kg,高程约3.25±0.72m,芦苇分布区

为 $2.12\pm 0.57\text{g/kg}$, 高程约 $3.75\pm 0.57\text{m}$ 。蔗草分布带盐度为 $2.10\pm 0.37\text{g/kg}$, 高程 $3.26\pm 0.57\text{m}$ [35], 同时考虑潮滩高程变化对植被分布的影响, 低潮滩分布的主要植物群落为受潮汐影响频繁的海三棱蔗草带。海三棱蔗草内带与蔗草交错生长, 随着高程增加, 海三棱蔗草逐渐被芦苇和互花米草取代。在接近海三棱蔗草带的区域, 芦苇一般为单优势群落, 少有伴生种, 而在高程 3m 以上的高潮滩[44,49,50]芦苇群落中伴生有碱菀(*Tripolium vulgare*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia* DC)等1年生植物及柳叶箬(*Isachne globosa*)、马兰(*Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz)等多年生植物, 互花米草群落常与芦苇群落斑块状交错分布, 但在互花米草群落内一般无伴生种[43]。

长江口盐沼湿地中的九段沙属于新生河口盐沼湿地, 处于演替的早期阶段, 尚未形成地带性植被[32], 该湿地中大部分滩涂以海三棱蔗草、蔗草、芦苇等盐沼草本植物为优势种。其中, 海三棱蔗草几乎在所有高程较低的潮滩均有分布, 是潮滩先锋物种, 适生土壤含盐量为 $2\sim 4.8\%$ [38]。芦苇和互花米草群落分布于高潮带中、上部, 与潮间带相比盐度下降, 潮水淹没时间短[51]。考虑水深对植被类型的影响, 当盐度处于中等水平($\leq 15\%$)且水淹较少、水位较低时, 芦苇比互花米草更具竞争优势, 但当淹水进一步增加时, 水位上升, 互花米草相对于芦苇的竞争优势变得更加明显[52,53,54]。芦苇和互花米草对盐度的响应不同, 在高盐度胁迫的情况下, 互花米草表现出更强的耐受能力。还有一些研究表明, 在盐度高于 15% 时, 芦苇开始死亡; 当盐度为 35% 时, 芦苇将完全死亡[55]。

长江口北支河口湿地植被演替处于早期阶段, 低潮滩和中潮滩下部分布盐渍藻类, 中潮滩中上部及高潮滩中下部主要分布有蔗草、海三棱蔗草, 高潮滩上部及以上区域植物优势群落逐渐被芦苇取代[43]。

4. 亚热带-热带河口湿地

亚热带-热带河口湿地雨量丰沛, 多为岩石型海区, 主要河口包括珠江口、漳江口、泉州湾河口及九龙江口等, 该河口区以分布在潮间带的红树林为优势。Boto等人将红树林潮滩分为高程 $0\sim 0.3\text{m}$ 的低潮滩, $0.3\sim 1.1\text{m}$ 的中潮滩和 $1.1\sim 1.4\text{m}$ 的高潮滩[56]。低潮滩是红树林先锋植物生长的区域, 盐度高达 $20\sim 35\%$, 中潮滩是红树植物生长茂盛的区域, 盐度介于 $10\sim 25\%$, 高潮滩受淡水冲刷影响盐度较低, 仅 $5\sim 15\%$ [57]。林鹏根据耐寒程度对红树植物进行等级区分, 共分为7个等级, I级为秋茄(*Kandelia candel*), II级为桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)、黄槿(*Hibiscus tiliaceus* Linn), III级为木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)、海漆(*Excoecaria agallocha* Linn)、厦门老鼠簕(*Acanthus xiamenensis* R. T. Zhang), IV级为红海榄(*Rhizophora stylosa*)、红茄苳(*Rhizophora mucronata* Poir)、角果木(*Ceriops tagal* (Perr.) C. B. Rob)、榄李(*Lumnitzera racemosa* Willd)、海芒果(*Cerbera manghas*), V级为海莲(*Bruguiera sexangula*)、尖瓣海莲(*Bruguiera sexangula* (Lour) Poir. var. *rhynchoptala* Ko)、

小花老鼠簕(*Acanthus ebracteatus* Vahl. var. *ebracteatus*)、银叶树(*Heritiera littoralis* Dryand)、玉蕊(*Barringtonia racemosa* (L.) Spreng), VI级为海桑(*Sonneratiacaseolaris* (L.))、海南海桑(*Sonneratia hainanensis* KO, E.Y. Chen et W.Y. Chen)、瓶花木(*Scyphiphora hydrophyllacea* Gaertn)、红树(*Rhizophoraceae*), VII级为红榄李(*Lumnitzera littorea* (Jack) Voigt)、水芫花(*Pemphis acidula* J. R. et Forst.), 等级越高耐寒程度越低[48]。对红树植物而言, 泉州湾属于高纬度低温地区, 适宜生长的红树林树种耐寒等级只能为1-3级, 即抗低温广布种, 主要树种有秋茄、桐花树、白骨壤、老鼠簕。其中, 海岸先锋植物白骨壤耐盐度最高, 成年植株可以耐受盐度 90mg/g 的条件, 主要分布在中低潮带滩涂处; 典型红树植物桐花树[58]多分布于河口中潮带滩涂, 是盐分较低区域的先锋树种, 自然条件下在土壤盐度 $11\sim 15\text{mg/g}$ 的淤泥质滩涂上生长最好; 秋茄一般位于白骨壤和桐花树的内缘, 耐盐能力介于 $7.5\sim 21\text{mg/g}$ [59]; 老鼠簕耐盐性最差, 主要位于有淡水输入的高潮带滩涂[16,60]。

泉州湾河口湿地植物的适应性研究表明: 红树植物的盐度适应范围较广[61], 在含盐度约 $2.17\sim 34.5\%$ 的河口海岸均可生长。其中洛阳江受江水和海潮的相互影响, 盐度从海湾河口向内陆逐渐下降, 盐度范围 $3.5\sim 28.9\%$, 适宜红树植物生长。但红树植物在淡水及盐度较高的海水中较难生长且不同种属的红树植物对盐度的适应范围也不同: 秋茄为拒盐植物[62], 最适生的盐度范围为 $7.5\sim 21\%$ [63], 高于或低于这个盐度秋茄的生长都会受到胁迫; 老鼠簕、桐花树属、白骨壤属则具有泌盐性质, 即植物体内只能容纳一定范围内的盐度, 随环境盐度升高, 植物体内盐分吸入量增加到一定范围后通过自身的泌盐机制将多余盐分排出体外, 因而该类植被能在较高盐度环境下生存。但在盐度过高的环境下, 易有藤壶附生在红树林植物的树干上, 导致红树林植株因输导困难死亡[64]。

5. 讨论

从上述检索文献发现, 河口湿地控制性环境条件的水盐表征差异较大, 不易进行统一比较, 尤其是表征潮间带湿地的环境要素更易产生偏差。

5.1. 暖温带河口湿地控制性水文要素

河口湿地受潮汐作用及淡水汇入影响, 其淹没水深、土壤含盐量等水文要素均处在动态变化中, 湿地植物的生长、演替是湿地水文过程的直接响应。国外对湿地植被控制性水文要素的研究自70年代就已出现, Klopatek[65]及Breen [66]指出河口沼泽植物带状分布与水文要素有关; Day指出水深等要素影响植被分布规律[67]; Coops等人对默兹河口及莱茵河口植被与水文要素的关系进行研究, 分析了随水深梯度的植被演替[68]。国内已有研究根据不同控制性要素分析河口湿地植物群落分布规律, 部分学者使用水体盐度, 土壤含盐量、含水量划分植物群落, 也有学者根据水深梯度划分潮上带植

物群落。考虑到河口湿地淹没状态始终处于动态变化过程中, 以及调查季节、潮位等情况的差异, 用水深表征湿地水分要素可能存在偏差, 故在总结华北暖温带河口湿地植被演替规律时使用土壤含水量表征湿地水分条件更为准确。同时, 考虑到潮上带盐度变化较小, 这里根据土壤含水量梯度划分优势植物群落, 潮间带由于淹没次数及时间均较长, 土壤水基本饱和, 故以土壤含盐量为控制要素归纳优势植物群落演替规律。

5.2. 亚热带季风区、亚热带-热带河口湿地控制性水文要素

许多学者将潮间带淹没状态的变化纳入考虑, 进行了更细致的划分。Boorman.L.A.指出, 潮间带根据潮汐影响时间可分为大多数时间受潮汐影响的低潮滩、受大潮潮汐影响的中潮滩以及仅受大潮最高潮潮汐影响的高潮滩[69]。我国南方河口区淡水输入量大, 因此薛志勇及孙永涛分别在对九龙江口湿地及长江口北支湿地的研究中根据不同潮位高低, 将河口潮间带划分为最低低潮位到平均低潮位之间的低潮滩、平均低潮位以上到平均高潮位之间的中潮滩以及平均高潮位以上到最高高潮位之间的高潮滩, 研究表明中潮滩下部到高潮滩下部为红树植物生长茂盛区[70-71]。谭芳林、崔丽娟等人对红树林的研究中根据浸淹次数, 将潮间带划分为每月浸淹45次以上的低潮带、浸淹次数20-45次的中潮带和浸淹次数少于20次的高潮带, 指出每种红树植物分别属于潮间带的某个或某几个等级[72]。亚热带季风区河口淡水汇入量大, 潮间带盐度梯度不明显, 优势植物生态阈值接近, 主要根据潮滩高程进行划分, 综合已有研究认为潮滩高程低于2.5m为低潮滩, 2.5-3.5m为中潮滩, 高于3.5m为高潮滩。亚热带-热带河口综合考虑已有的红树植物潮间带划分, 认为低潮滩是红树林先锋植物生长的区域, 潮滩高程小于0.3m, 盐度高达20-35‰, 中潮滩是红树植物生长茂盛的区域, 潮滩高程0.3-1.1m, 盐度区间10-25‰, 高潮滩高程>1.1m, 受淡水冲刷影响, 盐度仅5-15‰。

6. 结论与展望

与我国河口湿地植被生态水文研究相比, 国外河口湿地植被的研究多为定性调查。从全球范围来看, 地处

亚寒带的阿拉斯加[73], 其盐沼植物群落可分为靠近内陆的苔草植物群落及靠近海湾、潮沟的泥滩植物; 处于地中海型气候类型的南加州[74], 靠近陆地盐度过高无植被生长, 往海岸延伸的中高潮带是海蓬子 (*Arthrocnemum subterminale*), 中低潮带是弗吉尼亚盐角草 (*Salicornia virginica*); 属于温带大陆性气候的新英格兰盐沼[75], 随着滩涂高程的逐渐降低, 形成了金鸡纳 (*Iva frutescens*)-灯芯草 (*Juncus gerardi*)-狐米草 (*Spartina patens*)-互花米草 (*Spartina alterniflora*) 的分布模式[73-76]。

为了在现有研究基础上, 能更清晰地认识我国河口湿地植被分布水文规律, 根据上述综述结果进行一定程度概括。考虑到河口湿地水分条件较好, 与水热条件相适应的地带性植被不纳入分析, 仅总结我国河口非地带性植被在不同气候带及潮汐作用下的分异规律。

6.1. 河口湿地植被生态水文规律

华北暖温带河口潮上带盐度普遍低于5-6‰, 根据土壤含水量的差异形成不同优势植物群落, 综合考虑各植物的适生水盐范围, 当土壤含水量<20%时, 以拂子茅和羊草为优势群落, 由于羊草属于地带性植被, 这里不予考虑; 当土壤含水量约22%时白茅占优势, 约25%时荻占优势[77], 因此归纳为土壤含水量提升至20%以上时, 荻和白茅开始在群落中占优势; 随着土壤含水量进一步提升至40%, 达到翅碱蓬的最适水分区间, 优势群落再次演替; 当含水量达到50%以上, 香蒲逐渐取代翅碱蓬占优势。盐分较低时, 芦苇对水分适应范围较广, 在不同含水量条件下均以优势种存在。暖温带河口潮间带受潮汐影响长期淹水, 土壤水分基本饱和, 根据不同盐度范围呈现出不同植被分布规律, 考虑到单次调查可能存在偏差, 需结合植物适生盐度范围进行归纳, 上述综述表明潮间带芦苇在含盐量1-3‰之间生长最好, 柽柳耐盐度高达25g·kg⁻¹, 翅碱蓬最适盐度约13g·kg⁻¹, 因此, 以含盐量5g·kg⁻¹及10g·kg⁻¹为界, 在土壤含盐量小于5‰的潮间带上部以芦苇为优势群落, 5-10‰时优势群落为芦苇-柽柳, 进一步提高到10-25‰时柽柳-翅碱蓬占优势。具体规律见表1。

表1 我国华北暖温带河口湿地水盐含量及优势植物分布规律。

主导因素	潮上带				
	盐度<5-6‰				
	饱和含水层深度/m (地面为0m, 地上为正)				
	-0.6--0.5	-0.5--0.3	-0.3-0	0-0.4	0.4-0.7
综述演替规律	荻 (<i>Triarrhena Nakai</i>) +白茅 (<i>Imperata Cyr.</i>) 土壤含水量/% 0-20	翅碱蓬 (<i>Sueada</i>) 20-40	芦苇 (<i>Phragmites Adans.</i>) 40-50	芦苇 (<i>Phragmites Adans.</i>)	香蒲 (<i>Typha Linn.</i>)
总结演替规律	拂子茅 (<i>Calamagrostis</i>) /芦苇 (<i>Phragmites Adans.</i>)	荻 (<i>Triarrhena Nakai</i>) +白茅 (<i>Imperata Cyr.</i>) /芦苇 (<i>Phragmites Adans.</i>)	翅碱蓬 (<i>Sueada</i>) /芦苇 (<i>Phragmites Adans.</i>)	香蒲 (<i>Typha Linn.</i>) / 芦苇 (<i>Phragmites Adans.</i>)	

主导因素	潮间带				
	土壤含水量≥40%				
	盐度/‰				
	1-3	>5	8.06-12.6	12.6-24.5	>24.5
综述演替规律	芦苇 (<i>Phragmites</i> Adans.)	滩涂硅藻 (<i>Bacillariophyta</i>) + 翅碱蓬 (<i>Suaeda</i>)	芦苇+柽柳 (<i>Phragmites</i> Adans.- <i>Tamarix</i> Linn.)	柽柳+翅碱蓬 (<i>Tamarix</i> Linn.- <i>Suaeda</i>)	翅碱蓬 (<i>Suaeda</i>)
总结演替规律	盐度/g·kg ⁻¹				
	<5	5-10		10-25	
	芦苇 (<i>Phragmites</i> Adans.)	芦苇 (<i>Phragmites</i> Adans.) + 柽柳 (<i>Tamarix</i> Linn.)		柽柳 (<i>Tamarix</i> Linn.) + 翅碱蓬 (<i>Suaeda</i>)	

亚热带季风区河口淡水汇入量大，以芦苇、蘆草属植被占优势，互花米草作为入侵种，生态幅较宽，自海三棱蘆草带至芦苇带均有单优势群落分布。上述综述表明：潮上带土壤含水量均高于50%，含盐量以5g·kg⁻¹为界，低于该值形成单一芦苇优势群落，高于该值则形成芦苇-白茅-苔草群落；潮间带盐度约2-5g·kg⁻¹时，同时受潮滩高程影响，莎草科植物生长的潮滩高程低于禾本科植物，禾本科

的芦苇主要分布在高程3.5m以上的高潮滩，莎草科的海三棱蘆草和蘆草群落分布在高程2-3.5m的中低潮滩，海三棱蘆草适生盐度区间2.86±0.64g/kg，略高于蘆草生长的平均盐度2.10±0.37g/kg，因而海三棱蘆草多位于蘆草外侧，更接近潮下带，这里考虑到两者均为蘆草属，故统称为蘆草群落。概化规律见表2。

表2 我国亚热带季风区河口湿地水盐含量及潮滩高程与优势植物分布规律。

潮上带		潮间带		
土壤含水量>50%		盐度2-5g·kg ⁻¹		
盐度/g·kg ⁻¹		潮滩平均高程/m		
<5	>5	>3.5 (高潮滩)	2.5-3.5 (中潮滩)	<2.5 (低潮滩)
芦苇 (<i>Phragmites</i> Adans.)	芦苇 (<i>Phragmites</i> Adans.) + 白茅 (<i>Imperata</i> Cyr.) + 苔草 (<i>Carex</i> L.)	芦苇 (<i>Phragmites</i> Adans.) / 互花米草 (<i>Spartina</i>)	蘆草 (<i>Scirpus</i> Linn.) / 互花米草 (<i>Spartina</i>)	海三棱蘆草 (<i>Scirpus</i> Linn.) / 互花米草 (<i>Spartina</i>)

亚热带-热带河口潮上带多为常绿阔叶林，本文不予考虑。潮间带以红树植物占优势，在盐度2.17-34.5‰的盐度范围均可生长。综合考虑潮滩高程及红树植物适生盐度范围，老鼠簕幼苗生长的理想盐度范围为0-5g·kg⁻¹，秋茄在盐度7.5-21g·kg⁻¹的中潮滩生长繁茂，桐花树最适生盐度为11-15g·kg⁻¹，海榄雌（白骨壤）在盐度35g·kg⁻¹时仍能正常发芽。因此认为高潮滩盐度低于15‰，老鼠簕为优势群落，中潮滩盐度介于10-25‰，以秋茄、桐花树为优势群落，盐度更高的低潮滩则以先锋植物海榄雌占优势。

表3 我国亚热带-热带河口湿地盐度含量及潮滩高程与优势植物分布规律。

潮间带			
潮滩高程/m	1.1-1.4 (高潮滩)	0.3-1.1 (中潮滩)	0-0.3 (低潮滩)
盐度/g·kg ⁻¹	5-15	10-25	20-35
优势种	老鼠簕 (<i>Acanthus</i> L.)	秋茄 (<i>Kandelia</i>) + 桐花树 (<i>Aegiceras</i> Gaertn)	海榄雌 (<i>Avicennia</i> L.)

6.2. 河口湿地植被的演替机制

河口湿地植被演替是对河口水文过程的直接响应。我国对湿地植被演替的研究[78-79]主要集中于其时空变化[80-81]，早在20世纪80年代，就有学者在对我国东南部海岸红树林演替的综述中总结出海南岛、雷州半岛及福建沿海河口红树植物群落的空间演替规律[57]，指出演替前、中、后期的主要植物群系以及沿海陆方向的演替过程。90年代以来，对红树林的研究进一步深入，出现红树植物适应多样性机制方面的研究。同时，对河口湿地植物演替的研究逐渐向北发展，已有研究表明辽河口湿地植物群落演替的一般模式从海滩裸地或湖泊开始，随着土壤盐分或湖泊水深的变化，自滨海盐渍裸地演替到盐生植被，再逐渐演替到中生植被[19,23]。21世纪以来，我国主要河口植物群落演替受诸多学者关注，这一阶段对长江口九段沙、崇明东滩及北支湿地的植物群落空间演替规律的研究以及对黄河三角洲河口湿地植被自然演替规律的研究逐渐增多[26-29,35-53]。然而对植被时空演替的研究大多仍停留

在植物群落随水文要素变化的演替规律，研究多集中于对调查结果的统计分析，对发生演替的机制关注不足。考虑到环境污染[82-83]与工程建设[84-85]的影响，以及生态修复的需要[86-87]，应加强对演替机制方面的研究。

基金项目

“水利部行业科技计划项目”全国重要江河湖泊生态流量(水位)保护(编号:126301001000160014-2)”。

参考文献

[1] 刘宁.我国河口治理现状与展望[J].中国水利,2007(1):34-38。
[2] 罗开富.中国自然地理分区草案[J].地理学报,1954(4):379-394。

- [3] 傅伯杰,刘国华,陈利顶,等.中国生态区划方案[J].生态学报,2001,21(1):1-6。
- [4] 熊怡.中国水文区划[M].科学出版社,1995。
- [5] 国家林业局组织.中国湿地资源[M].北京:中国林业出版社,2015。
- [6] 陆健健.中国滨海湿地的分类[J].环境导报,1996(1):1-2。
- [7] 陆健健.何文珊,童春富,王伟.湿地生态学[M].高等教育出版社,2006。
- [8] 赵焕庭,王丽荣.中国海岸湿地的类型[J].海洋通报,2000,19(6):72-82。
- [9] 牟晓杰,刘兴土,阎百兴,等.中国滨海湿地分类系统[J].湿地科学,2015,13(1):19-26。
- [10] 张晓龙,李培英,李萍,等.中国滨海湿地研究现状与展望[J].海洋科学进展,2005,23(1):87-95。
- [11] 中国海洋湖沼科学会议.第四次中国海洋湖沼科学会议论文集[M].科学出版社,1991。
- [12] 倪晋仁,殷康前,赵智杰.湿地综合分类研究: I .分类[J].自然资源学报,1998(3):214-221。
- [13] Lei K (雷坤), Zheng BH (郑丙辉), Meng W (孟伟), Qin YW (秦延文), Su YB (苏一兵) (2007) Distributions and the factors influenced of nitrogen and phosphorus nutrients in the Daliaohe Estuary. Marine Environmental Science (海洋环境科学), 26, 19-27. (in Chinese with English abstract).
- [14] Jiang YW (蒋岳文), Guan DM (关道明), Chen SM (陈淑梅), Fu YZ (付宇众) (1996) Distribution and change characteristics of the nutrients in Liaohe estuary in summer. Marine Science Bulletin (海洋通报), 15(3), 92-96. (in Chinese with English abstract).
- [15] M. Allaby.牛津生态学词典[M].上海外语教育出版社,2001.M.Allaby.牛津生态学词典[M].上海外语教育出版社,2001。
- [16] 赵延茂,宋朝枢.黄河三角洲自然保护区科学考察集[M].北京:中国林业出版社, 1995。
- [17] Ji Y, Zhou G, New T. Abiotic Factors Influencing the Distribution of Vegetation in Coastal Estuary of the Liaohe Delta, Northeast China[J]. Estuaries & Coasts, 2009, 32(5):937-942.
- [18] Wang Y, Liu R, Gao H, Bai J, Ling M (2010) Degeneration mechanism research of Suaeda heteroptera wetland of the Shuangtaizi Estuary National Nature Reserve in China. Procedia Environmental Sciences, 2, 1157-1162.
- [19] 李有志,崔丽娟,潘旭,等.辽河口湿地植物多样性及物种功能型空间分布格局[J].生物多样性,2015,23(4):471-478。
- [20] 田文达.水盐环境调控抑杀苇田恶性杂草拂子茅的研究[J].现代农业,2007(11):181-182。
- [21] 吴晓东,王国祥,李振国,等.干旱胁迫对香蒲生长和叶绿素荧光参数的影响[J].生态与农村环境学报,2012,28(1):103-107。
- [22] 韩鹏.黄淮海湿地典型挺水植物及群落对生态水文过程的响应[D].华中科技大学,2011。
- [23] 董厚德,全奎国.辽河河口湿地自然保护区植物群落生态的研究[J].应用生态学报,1995,6(2):190-195。
- [24] Ming-juan, Jia-zhen, CHEN, et al. The Distribution of Vegetation and Its Relationship with Environmental Factors in the Yellow River Estuarine Wetland[J]. Meteorological and Environmental Research, 2012(10):15-19.
- [25] Qiang H E, Cui B S, Zhao X S, et al. Relationships between salt marsh vegetation distribution/diversity and soil chemical factors in the Yellow River Estuary,China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2):676-687.
- [26] 吴勇泉.黄河三角洲湿地典型挺水植物对水盐环境的响应机制[D].华中科技大学,2009。
- [27] 贺强,崔保山,赵欣胜,等.水盐梯度下黄河三角洲湿地植被空间分异规律的定量分析[J].湿地科学,2007,5(3):208-214。
- [28] 贺强,崔保山,赵欣胜,等.水、盐梯度下黄河三角洲湿地植物种的生态位[J].应用生态学报,2008,19(5):969-975。
- [29] TanX-J(谭学界),ZhaoX-S(赵欣胜).Spatial distribution and ecological adaptability of wetland vegetation in Yellow River Delta along a watertable depth gradient.Chinese Journal of Ecology(生态学杂志),2006, 25(12): 1460- 1464(in Chinese).
- [30] 赵强,李忠波,盘锦『红海滩』退化与翅碱蓬耐盐性探讨[J].北方水稻,2003(5):42-44。
- [31] 曹晟阳,谢欠影,伊凯,等.翅碱蓬耐盐机制研究进展[J].现代农业科技,2018(5)。
- [32] 徐先英,张孝仁.柽柳耐盐性水培试验研究[J].甘肃林业科技,1993(4):1-3。
- [33] 苏德喜,田生昌,徐芸,等.“鲁柽1号”柽柳耐盐碱性试验[J].陕西林业科技,2017(3):19-21。
- [34] 王摆,韩家波,周遵春,等.大凌河口湿地水盐梯度下翅碱蓬的生态阈值[J].生态学报,2014,33(1):71-75。
- [35] 王伟,陆健健.长江口与黄河口湿地植物多样性比较研究[C]//全国生物多样性保护与持续利用研讨会.2002。
- [36] 安乐生.黄河三角洲地下水水盐特征及其生态效应[D].中国海洋大学,2012。
- [37] 崔保山,贺强,赵欣胜.水盐环境梯度下翅碱蓬(Suaeda salsa)的生态阈值[J].生态学报,2008,28(4):1408-1418。
- [38] 陈家宽,上海九段沙湿地自然保护区科学考察集,北京科学出版社。
- [39] Zhu Z, Zhang L, Wang N, et al. Interactions between the range expansion of saltmarsh vegetation and hydrodynamic regimes in the Yangtze Estuary, China[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2012, 96(1):273-279.
- [40] 丁文慧,姜俊彦,李秀珍,等.崇明东滩南部盐沼植被空间分布及影响因素分析[J].植物生态学报,2015,39(7):704-716。

- [41] Gao Z G, Zhang L Q. Multi-seasonal spectral characteristics analysis of coastal salt marsh vegetation in Shanghai, China[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2006, 69(1):217-224.
- [42] 唐承佳,陆健健.长江口九段沙湿地原生植被的保护及开发利用[J].上海环境科学,2002(4):210-212。
- [43] 戚志伟,高艳娜,樊同,等.崇明东滩围垦湿地芦苇生态特征与水盐因子的关系[J].应用与环境生物学报,2016,22(5):739-746。
- [44] 陈秀芝.长江口九段沙湿地盐沼植物群落生态特点研究[D].上海师范大学,2012。
- [45] LiX, Ren L, Liu Y, et al. The impact of the change in vegetation structure on the ecological functions of salt marshes: the example of the Yangtze estuary[J]. Regional Environmental Change, 2014, 14(2):623-632.
- [46] 李希之.长江口滩涂湿地植被变化模拟及其生态效应[D].华东师范大学,2015。
- [47] 黄华梅.上海滩涂盐沼植被的分布格局和时空动态研究[D].华东师范大学,2009。
- [48] 闫芊,陆健健,何文珊.崇明东滩湿地高等植被演替特征[J].应用生态学报,2007,18(5):1097-1101。
- [49] 严格,葛振鸣,张利权.崇明东滩湿地不同盐沼植物群落土壤碳储量分布[J].应用生态学报,2014,25(1):85-91。
- [50] 曹浩冰,葛振鸣,祝振昌,等.崇明东滩盐沼植被扩散格局及其形成机制[J].生态学报,2014,34(14):3944-3952。
- [51] 唐承佳,陆健健.长江口九段沙植物群落研究[J].生态学报,2003,23(2):399-403。
- [52] 王卿.长江口盐沼植物群落分布动态及互花米草入侵的影响[D].复旦大学,2007。
- [53] 何文珊,刘文亮,陆健健.长江口潮滩湿地的分布规律与变化趋势探讨[C]//中国生态学会2006学术年会论文荟萃.2006。
- [54] Li H, Shao J, Qiu S, et al. Native Phragmites, dieback reduced its dominance in the salt marshes invaded by exotic Spartina, in the Yangtze River estuary, China[J]. Ecological Engineering, 2013, 57:236-241.
- [55] 肖燕,汤俊兵,安树青.芦苇、互花米草的生长和繁殖对盐胁迫的响应[J].生态学杂志,2011,30(2):267-272。
- [56] Boto K G, Robertson A I. The relationship between nitrogen fixation and tidal exports of nitrogen in a tropical mangrove system[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 1990, 31(5):531-540.
- [57] 林鹏.中国东南部海岸红树林的类群及其分布[J].生态学报,1981,1(3):89-96。
- [58] 刘荣成,洪志猛,叶功富,等.泉州湾洛阳江滨海湿地的生态恢复与重建对策[J].福建林业科技,2004,31(3):75-78。
- [59] 赵萌莉,林鹏.红树植物多样性及其研究进展[J].生物多样性,2000,8(2):192-197。
- [60] 王文卿,陈琼.南方滨海耐盐植物资源.一[M].厦门大学出版社,2013。
- [61] 林鹏.中国红树林生态系[M].科学出版社,1997。
- [62] Khan M A, Aziz I. Salinity tolerance in some mangrove species from Pakistan[J]. Wetlands Ecology & Management, 2001, 9(3):229-233.
- [63] 张尧挺,林鹏.中国海岸红树植物区系研究[J].厦门大学学报:自然科学版,1984(2):102-109+136。
- [64] 刘荣成.泉州湾河口湿地植物环境适应性研究及其应用[D].江苏大学,2011。
- [65] Stern M K, Day J W, Teague K G. Nutrient transport in a riverine-influenced, tidal freshwater bayou in Louisiana[J]. Estuaries, 1991, 14(4):382-394.
- [66] Breen C M, Rogers K H, Ashton P J. Vegetation Processes in Swamps and Flooded Plains[M]// Vegetation of inland waters. Springer Netherlands, 1988.
- [67] Day R T, Keddy P A, McNeill J, et al. Fertility and Disturbance Gradients: A Summary Model For Riverine Marsh Vegetation[J]. Ecology, 1988, 69(4):1044-1054.
- [68] Coops H, Velde G G V D. Helophyte zonation in two regulated estuarine areas in the Netherlands: Vegetation analysis and relationships with hydrological factors[J]. Estuaries, 1999, 22(3):657-668.
- [69] Boorman. Saltmarsh Review:An overview of coastal saltmarshes, their dynamic and sensitivity characteristics for conservation and management.[J]. 2003.
- [70] 薛志勇.福建九龙江口红树林生存现状分析[J].福建林业科技,2005,32(3):190-193。
- [71] 孙永涛,张金池.长江口北支湿地分类及生境特征[J].湿地科学与管理,2010,06(2):49-52。
- [72] 谭芳林,叶功富,崔丽娟,等.泉州湾河口湿地红树林立地类型划分[J].湿地科学,2010,8(4):366-370。
- [73] 王卿,汪承煊,黄沈发,等.盐沼植物群落研究进展:分布、演替及影响因子[J].生态环境学报,2012,21(2):375-388。
- [74] Babcock C A, Ely C R. Classification of vegetation communities in which geese rear broods on the Yukon – Kuskokwim delta, Alaska[J]. Canadian Journal of Botany, 1994, 72(9):1294-1301.
- [75] Daniels J S, Cade B S, Sartoris J J. Measuring bulrush culm relationships to estimate plant biomass within a southern California treatment wetland.[J]. Wetlands, 2010, 30(2):231-239.
- [76] Bertness M D. The Ecology of a New England Salt Marsh[J]. American Scientist, 1992, 80(80):260-268.
- [77] 李兴东.黄河三角洲植物群落与环境因子的典范分析和主分量分析[J].植物学报:英文版,1993(A00):139-143。
- [78] 韦翠珍,张佳宝,周凌云.沿黄河下游湖泊湿地植物群落演替及其多样性研究[J].生态环境学报,2011,20(1):30-36。

- [79] 王灵艳,郑景明,罗菊春,等.洞庭湖湿地植被演替规律研究[J].环境保护,2009(8):47-49。
- [80] 汲玉河,吕宪国,杨青,et al.三江平原湿地植物物种空间分异规律的探讨[J].生态环境学报,2006,15(4):781-786。
- [81] 江婷.南京城市湿地公园植物造景研究[D].南京林业大学,2007。
- [82] 谢小平,王兆印.人类活动对河流泥沙及长江河口潮滩湿地生态环境的影响[C]//中国水利学会学术年会.2005。
- [83] 王萃,孙野青,贾宏亮,等.辽宁省大凌河口沉积物重金属污染及生态风险评价[J].海洋环境科学,2013,32(1):28-32。
- [84] 康勤书,吴莹,张经,等.崇明东滩湿地重金属分布特征及其污染状况[J].海洋学报,2003(s2):1-7。
- [85] 林桂兰,黄惠明,左玉辉,等.河口湿地围填造地的适宜性和资源环境问题——以福建三沙湾湾顶河口区为例[J].南京大学学报(自然科学),2007,43(2):178-186。
- [86] 李荫玺,胡耀辉,王云华,等.云南星云湖大街河口湖滨湿地修复及净化效果[J].湖泊科学,2007,19(3):283-288。
- [87] 宋晓林,吕宪国.中国退化河口湿地生态恢复研究进展[J].湿地科学,2009,7(4):379-384。