

辽河口 湿地生态修复 理论与方法

赵阳国 白 洁 高会旺 编著



海洋出版社

辽河口湿地 生态修复理论与方法

赵阳国 白 洁 高会旺 编著



海洋出版社

2016年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

辽河口湿地生态修复理论与方法/赵阳国, 白洁, 高会旺编著. —北京: 海洋出版社, 2016. 11

ISBN 978-7-5027-9614-3

I. ①辽… II. ①赵… ②白… ③高… III. ①辽河流域-沼泽化地-生态恢复-研究-盘锦 IV. ①P942.313.78

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 270727 号

责任编辑: 杨传霞

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

http: //www. oceanpress. com. cn

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店发行所经销

2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 18.5

字数: 500 千字 定价: 118.00 元

发行部: 62147016 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

辽河口湿地被誉为中国最美的六大湿地之一，是以芦苇沼泽和翅碱蓬潮间带滩涂为主的自然湿地，分布着亚洲第一大苇场，拥有红海滩奇观，是丹顶鹤、黑嘴鸥等珍稀水禽的繁殖栖息地。同时，该区也是“苇田、稻田、油田”三田汇集区，受到强烈海陆共同作用的生态敏感区，也是辽河流域污染物入海的最后一道生态屏障。该区域生态环境的改善是辽河流域水污染治理效果的集中体现，也是对辽东湾海洋生态的有效保护。

20 世纪 80 年代至 21 世纪初的 20 多年间，受极端气候条件及人为因素综合影响，辽河口口区湿地景观格局波动剧烈，自然湿地斑块化严重，翅碱蓬湿地的面积减少了近 50%，自然湿地生态功能显著下降。在此背景下，自 2008 年以来，本课题组承担了国家水体污染控制与治理科技重大专项“辽河河口区大型湿地生态修复关键技术与示范（2008ZX07208-009）”和“辽河河口区水质改善与湿地水生态修复技术集成与示范（2013ZX07202-007）”课题，开展了基础与应用研究，以期为河口湿地生态修复提供理论依据和技术支撑。

本书汇集了课题组几十位环境领域学者关于辽河口湿地生态环境现状和演化趋势、湿地生态退化机制、生物地球化学循环与生态效应、辽河口湿地生态用水调控、芦苇和翅碱蓬退化湿地生态修复、生态价值评估等理论与技术方法，是对各位科研人员历时 8 年研究成果的总结。参与课题研究和本书编写的主要人员包括中国海洋大学马安青、王艳、田伟君、白洁、刘艳玲、米铁柱、李正炎、李辉、邹立、张学庆、林国庆、郑西来、罗先香、郎印海、赵阳国、胡泓、高会旺、姬光荣、潘进芬（以姓氏笔画为序，后同）；辽宁省环境科学研究院王延松、吕久俊、张恒明、满赢、郭宝东；沈阳大学孙铁珩、杨继松、陈红亮、侯永侠、董怡华、程全国；中国科学院东北地理与农业生态研究所吕宪国、佟守正、宋晓林；盘锦市芦苇科学研究所于长斌、王金爽、王德林、金明等。赵阳国副教授、白洁教授和高会旺教授负责全书统稿、审校。

本书是作者们齐心协力的结晶，在编写过程中更是得到了国家和地方水专项管理办公室、辽宁省和盘锦市环保部门领导、辽河流域水体污染综合治理技术集成与工程示范项目负责人和专家组的大力支持，许多专家学者和同仁也为本书提出了宝贵意见，在此谨呈衷心的感谢！

希望本书能够使读者了解辽河口湿地水生态环境现状及研究动态，并为相关领域的科学研究与教学提供有益的参考。由于编者水平所限，书中一定会有不少疏漏和不当之处，敬请提出宝贵意见。

编著者

2016 年 10 月

目 次

第 1 章 辽河口湿地环境现状与演化趋势	(1)
1.1 辽河口湿地生态环境现状	(1)
1.2 辽河口湿地水环境现状	(13)
1.3 辽河口湿地土壤环境现状	(24)
1.4 辽河口湿地景观多样性	(50)
第 2 章 辽河口湿地生态退化机制与过程	(62)
2.1 辽河口湿地生态退化特征与驱动机制	(62)
2.2 人类活动对河口湿地生态环境的影响	(69)
2.3 翅碱蓬湿地生物群落退化机制	(71)
2.4 芦苇湿地生物群落退化机制与生态影响	(77)
第 3 章 辽河口湿地的物质循环与生态效应	(84)
3.1 碳、氮、磷生物地球化学循环	(84)
3.2 重金属的迁移转化	(107)
3.3 有机物的转化及生态效应	(118)
3.4 污染物来源及入海通量分析	(130)
第 4 章 辽河口湿地生态用水调控技术	(138)
4.1 辽河口湿地的水文格局	(138)
4.2 辽河口湿地生态需水量	(151)
4.3 辽河口生态用水河网调控	(165)
第 5 章 辽河口湿地生态修复及环境效应	(187)
5.1 河口湿地生物群落修复机制	(187)
5.2 高抗逆生物品系的选育	(193)
5.3 辽河口退化翅碱蓬湿地生态修复技术	(198)
5.4 辽河口退化芦苇湿地生态修复技术	(199)
5.5 生态修复对辽河口湿地微生物群落的影响	(206)
第 6 章 辽河口湿地生态价值与生态功能评估	(222)
6.1 生态服务价值与变化趋势	(222)

6.2 生态功能评估 (229)

第7章 河口湿地生态评价方法与管理对策 (240)

7.1 河口湿地生态评价标准与应用 (240)

7.2 河口湿地生态系统管理对策 (252)

参考文献 (272)

第1章 辽河口湿地环境现状与演化趋势

辽河口湿地位于辽宁省盘锦市境内、辽河三角洲的最南端、辽河（双台子河）入海口处，著名的辽河口国家级自然保护区即分布于此。该区是以芦苇沼泽及潮间带滩涂为主的自然湿地，分布着亚洲第一大苇场；该区也是珍稀水禽重要的繁殖栖息地，被誉为中国最美的六大湿地之一。辽河口湿地是辽河入海的最后屏障，该区域生态环境的改善是辽河治理效果的集中体现，也是对海洋环境与生态的有效保护。

多重生态价值在同一时空背景下的相互冲突构成了本区域生态环境的鲜明特色，强烈的陆海作用和高强度的人为开发使辽河口湿地生态环境问题日益突出。具体表现为：生态系统脆弱化、湿地净化功能衰退、工业污染严重、局地污染与上游污染叠加，入海污染物增加和人为干预导致生态退化和近岸水质恶化。“九五”规划以来，辽河流域被纳入了国家重点治理的“三河”之一，辽河流域治理投入了大量人力、物力和财力，经过治理，积累了大量的流域水污染防治经验。2008年以来，通过水体污染控制与治理科技重大专项的实施以及全省上下的共同努力，至2012年，辽河全流域水质已经达到IV类水质，生态环境也有所改善。目前，生态环境存在的主要问题是河口湿地生物种群单一，芦苇湿地面积减少，种质明显退化；翅碱蓬湿地面积迅速萎缩，覆盖度显著下降；辽河流域和河口区生态用水量增加和水质性缺水之间的矛盾十分明显。

本章对辽河口湿地的环境现状以及演化趋势进行了调查分析，研究结果将对辽河口退化湿地生态修复、湿地生态系统的净污能力和服务功能改善提供理论依据。

1.1 辽河口湿地生态环境现状

1.1.1 辽河口湿地概况

1.1.1.1 位置与范围

辽河口湿地主要分布于辽河平原南端，渤海辽东湾北岸，集中分布于大凌河与大辽河之间，辽河口入海处。行政区域包括盘锦市和营口市及其老边区的全部，盘锦市是其主体和核心。地理位置坐标 $40^{\circ}40' - 41^{\circ}10'N$ ， $121^{\circ}25' - 122^{\circ}55'E$ ，总面积 $4\,000\text{ km}^2$ ，是辽河、绕阳河和大凌河等几条河流下游的沉积平原（肖笃宁等，2005）。

1.1.1.2 气候条件

研究区地处中纬度，属北温带大陆性半湿润季风气候，河口区内四季分明，年平均气温 $8.4^{\circ}C$ ，平均无霜期177 d，年平均降水量为 $611 \sim 640\text{ mm}$ ，年平均蒸发量 $1\,656 \sim 3\,476\text{ mm}$ ，全年平均风速 4.3 m/s ，年日照时数为 $2\,768.5\text{ h}$ 。灾害性天气主要有暴雨、大风、冰雹、低

温冻害、霜冻等, 11 月上旬至翌年 3 月中旬为冻土期。

该区四季分明, 春季气温回暖快, 降水少, 气候干燥, 多偏南风, 蒸发量大, 日照时数多, 由于受渤海的影响, 4—5 月时大于 8 级的大风日数为 14 d, 占全年大风日数的 35% 左右, 降水量 96.5 mm, 蒸发量 585 mm; 6—8 月炎热多雨, 空气潮湿, 降水集中, 平均降水量为 392.1 mm, 占全年降水量的 62.9%; 9—11 月多晴朗天气, 平均气温 10℃ 左右, 降水量 121 mm, 日照时数 670 h; 12 月至翌年 2 月寒冷干燥, 温度最低值出现在 1 月, 平均气温 -10.3℃, 极端最低气温为 -29.3℃, 降水量仅 4.1 mm。

1.1.1.3 地质地貌

辽河口湿地属地势平坦的冲海积—冲洪积平原, 属辽河平原南部边缘区。燕山运动时, 盆地开始形成。侏罗纪以前, 与华北台地同为一体, 三叠纪以后, 由于构造运动形成一些零星分割的侏罗系盆地, 随构造运动的加强, 产生了控制盆地形成和发育的“多”字形断裂构造, 同时伴随有剧烈的岩浆活动。第三纪时期, 在北东向“多”字形断裂构造的控制下, 盆地发生大幅度断陷式下沉, 并在其内部发生强烈的分异作用, 形成了一系列紧密相间的隆起和凹陷。各入海水系所携带的大量泥沙等碎屑物质, 为凹陷的堆积提供了丰富的物质来源, 凹陷内部有巨厚的老第三纪堆积, 厚度可达 6 000 m, 辽河口湿地的第四纪地层是在下辽河平原中生代断陷盆地基础上堆积形成的, 经过几次海侵沉积, 形成了分布广、面积大、时代齐全、成因类型复杂多变的第四纪沉积层。

辽河下游河道变化无常, 泥沙堆积作用强, 在入海处形成三角洲和河口沙洲。在辽河河口 -5 m 等深线间, 分布着规模不等的水下堆积体, 堆积物以砂质和细砂为主, 涨潮时淹没, 退潮时显出。

辽河口湿地地势平坦, 地貌类型单一, 地面高程小于 7 m, 坡降为 1/25 000~1/20 000, 海岸地带地势低洼, 湿地遍布, 潮沟发育。

地貌可分为两种类型: 一种为滨海平洼地, 地面高程为 1.5~3.5 m, 地面坡度小于 1/1 000, 地表组成物质为淤泥质亚黏土和黏土; 另一种为滨海平垄地, 地面高程为 2.5~4.5 m, 地面坡度小于 1/1 000, 地表组成物质为亚黏土, 部分为亚砂土, 是研究区地貌类型的主体。

根据环境地貌分区, 可分为三种类型区: 第一种类型为盐碱化低平地, 在辽河口湿地的中上部, 即老边、大洼一线的东北侧, 滨海平垄地的主体部分, 目前大部分开辟为水田; 第二种类型为滨海芦苇盐土低湿地, 在老边及大洼一线的西南, 目前已开辟为农田、城市, 建设有天和盐田; 第三种类型为芦苇盐碱湿地, 主要分布在盘锦的西北部。

1.1.1.4 海岸线

该区域内, 海岸线长 147.3 km, 由于上游水土流失, 泥沙下泄淤积, 海岸线不断南移。据考证, 辽河口湿地的古海岸线(新石器时代到汉代, 距今 10 000~3 000 年)约在大石桥、古城子、沙岭、盘山一线。目前, 湿地所处三角洲每年向海延伸 2~10 m 不等。据辽宁省勘测设计院《辽河干流盘山水利枢纽工程初步设计》估计, 从 1933—1954 年, 自辽河口到大辽河口海岸, 每年外延 95~330 m, 这说明海退的速度明显加快了。在 600 年前, 当时的辽河口已延伸至今日营口附近。《明史·志第十七》曾明确记载, “西北有梁房口关, 海运之舟由此入辽河, 旁有盐场”。梁房口即今日营口附近大白庙子。以上说明, 辽河变迁导致三角洲的形成, 河海泥沙淤积使三角洲面积逐渐扩大, 海岸线不断向南延伸, 使辽河口湿地的

面积得以扩展。

1.1.1.5 水文

辽河口湿地的集水主要来源于地表水和地下水，该区有大小河流 20 多条，汇集于辽河入海。辽河（包括大辽河）年净流量 $5.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，大凌河 $0.41 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于降水量少，地势平坦，年径流深不足 100 mm，当地产水量每平方千米不足 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，入海水量集中分布在汛期（6—9 月）。

辽河口湿地潮汐属非正规半日混合潮，平均潮差 2.7 m，最大可能潮差达 5.5 m，潮流的主流方向为东北至西南，冰期为 130 d 左右，是我国冰情最重的海域。水利工程对研究区的水文过程影响很大，本区水利灌排设施齐全，渠道总长度为 2 800 km，河流堤坝的长度约为 400 km，在海岸平均高潮线部位都修建了人工防潮堤，此外，还有水库、河流挡潮闸等水利工程。以上工程不仅减轻了潮水对陆地的影响，而且加重了淡水的停留脱盐过程。

1.1.1.6 土壤

本区土壤的成土物质主要由河水携带的大量泥沙沉积而成，主要土壤类型有水稻土、盐土、草甸土、沼泽土，此外还有风沙土和棕壤。水稻土是由于人类活动而改变了原有土壤的性质，经过长期水耕熟化而形成的土壤，分布较广，占本区全部土壤面积的 44%。水稻土可分为两个亚类：一是淹育型水稻土，是人类在草甸土上多年种稻发育而成，处于水稻土发育的初期阶段，主要分布在盘山县的大荒、喜彬、大洼县的西安、东风等农场及营口的部分地区；二是盐渍型水稻土，是盐土、盐化草甸土经垦殖后仍保持盐化特征的水稻土，分布在三角洲和辽河沿岸的低平地上，由于地势较低，地下水和水质矿化度较高。

盐土主要分布在西部和西南部沿海，占土壤面积的 27.9%，共分三个亚类：滨海盐土、草甸盐土和沼泽盐土。滨海盐土分布在西南近海地区，即海水能够到达的沿海地带，其成土母质为含盐较高的海积冲积物，地面高程 2.4~3.5 m，地下水位在 1 m 左右，矿化度 10~60 g/L，盐分在土壤剖面中几乎呈柱状分布，土壤较黏，质地较均一，层次分化不明显；草甸盐土中的盐分组成以氯化物为主，主要分布在距海较远，受河水影响较大的地带，地面高程 3~5 m，水质矿化度 5~15 g/L，pH 7.9 左右，有机质含量 0.49%~1.13%；沼泽盐土是分布在距海较近的低洼湿地的盐土，成土母质有两种：上为冲积物，下为海积物；地下水位接近地表，剖面特点为地表有盐化层，全盐量大于 1.0%，其下为腐殖质层、潜育层。

草甸土是辽河口地区的主要土壤之一，其分布范围也较为广泛，占总面积的 19.3%。根据成土过程中发育阶段的不同，可分为碳酸盐草甸土和盐化草甸土两个亚类。碳酸盐草甸土主要分布在辽河、大辽河及绕阳河的河漫滩、低阶地及冲积平原上；盐化草甸土分布在平原开阔地带，成土母质多为海积冲积物，地势较低，一般在 4 m 左右，地下水位 1~2 m，土壤含盐量较高，水质矿化度多为 1~10 g/L。

沼泽土主要分布在芦苇沼泽地区、河流沿岸的低洼地带或平原中心洼地上，占该区总面积的 8.5%，包括草甸沼泽土和盐化沼泽土两个亚类。草甸沼泽土一般分布在地势低洼，有季节性积水的地区，成土母质多为冲积物，土壤表层有机质含量最高可达 4%；盐化沼泽土约占该类土壤面积的 3/4，主要分布在大洼县的赵圈河、辽滨苇场等处，成土母质都为冲积海积物，地面植被以芦苇为主，地下水位普遍超过 1 m，每年约有 5 个月的灌溉时间，土壤处于脱盐和沼泽化初始阶段，可溶性盐含量较低，有机质含量高达 6%。

1.1.1.7 植被

本区植物区系特征属华北植物区，区内少有木本植物分布，偶见有零星的杨、柳、榆单株树，共有维管束植物 46 科 224 种。其特点为植物种类少，区系组成贫乏；木本植物少，草本植物多；喜湿耐盐植物多，中性植物少。由于独特的地质地貌、水文、土壤等条件，从而造成了植被的分异。本区植物群落类型中芦苇 (*Phragmites*) 群落为最重要类型。草甸芦苇生长在地势稍高的地段，地下水位较低，多在 1.0~1.5 m，地表积水时间较短，具有季节性积水或长期积水的地带，含盐量 0.2%~0.5%，群落中混生有付氏矾松 (*Limonium franchetii*)、翅碱蓬 (*Suaeda heteroptera*)、羊草 (*Aneunolepidium chinensis*)、拂子茅 (*Calamagrostis epigeios*)、东北茵陈蒿 (*Artemisia capillaris*)、抱茎苦卖菜 (*Lxeris sonchiflora*)、车前 (*Plantago asiatica*)、角碱蓬 (*Suaeda corniculata*)、狗尾草 (*Setaria viridis*) 等。

1.1.1.8 动物

辽河口湿地由于保留了大面积的天然湿地景观，动物资源丰富多样，分布有 40 余种国际和国家重点保护物种，又是水禽迁徙的重要停歇地和栖息地，在保护生物多样性，尤其是珍稀鸟类保护方面占有重要地位，更是天然的物种基因库。辽河口湿地所在的双台河口国家级自然保护区，面积 1 280 km²，是一个以保护丹顶鹤等珍稀水禽及其赖以生存的湿地生态环境为主的野生动物类型的自然保护区。

辽河口湿地在动物地理区划中属古北界东北亚界东北区的松辽平原亚区。据多年观察，区内共有涉禽、游禽为主的鸟类 256 种，兽类、两栖、爬行动物多种，其中有国家一级保护动物如丹顶鹤 (*Grus japonensis*)、黑嘴鸥 (*Larus saundersi*)、白鹤 (*Grus leucogeranus*)、白鹳 (*Ciconia boyciana*)、黑鹳 (*Ciconia nigra*)、金雕 (*Golden eagle*) 等，国家二级保护动物 29 种，如灰鹤 (*Grus grus*)、蓑羽鹤 (*Anthropoides virgo*)、大天鹅 (*Cygnus cygnus*)、白额雁 (*Anser albifrons*)、斑海豹 (*Pjoca viyulina*) 等，有《中日候鸟保护协定》规定保护的鸟类 145 种，《中澳候鸟保护协定》规定保护的鸟类 46 种。

1.1.1.9 社会经济概况

辽河口湿地的土地开发始于 1653 年清政府实施的《辽东拓民开垦条例》，鲁冀大批移民进驻垦荒。而水利设施的修建，最早始于 1905 年，修杜家台、黑渔沟两河，清朝末年到民国初年，共修辽河、大辽河、柳河等两岸堤坝 18 条，计 235.5 km，水沟 41 条。1931 年“九一八”事变后，一些日本人搞所谓的“开拓”，种植水稻，耕地面积有所增加，但单产仅 50 kg 左右。渔业的发展大约始于 19 世纪，至 1875 年，已有大小渔户 50 余家，船 70 余条。但到了新中国成立前夕，重点渔区二界沟只有渔户 27 户，船只 20 条左右，产量 100 余万千克。

由于辽河口湿地为大片退海之地，地势低洼，沼泽遍布，芦苇丛生，洪涝灾害时有发生，因此大片土地资源荒芜，大面积的开发还是在新中国成立之后，故有东北“南大荒”之称。20 世纪 50 年代末成立盘锦农垦局，60 年代中期，成立了盘锦垦区，同时渔业也得到了较大发展。1952 年盘山县渔民为 21 户，从业人员 1 671 人，船 514 条，网具 32 种，渔业生产兴旺，1990 年，盘锦市渔业产量 28 633 t，产值 15 995 万元。到 70 年代辽河油田油气资源被发现，为了更有利于油气资源的开发和利用，1984 年将营口市一分为二，成立盘锦市，这意味着对辽河口湿地自然和土地资源的进一步开发利用。

尽管该区域开发较晚,但开发程度和水平均较高,目前已经成为辽宁省重要的石油工业及农业基地。盘锦市自 1984 年建市以来,经济、社会面貌发生了巨大的变化,农林牧渔五业兴旺,“油气头、化工身、轻纺尾”的工业格局已初步形成,成为一座新兴石油化工城市。辽河油田现已累计探明石油地质储量千亿吨、天然气储量 $1\,500\times 10^8\text{ m}^3$,2011 年原油产量 $1\,019\times 10^4\text{ t}$ 。至 2014 年,盘锦市常住人口达到 143.8 万人,国民生产总值 1 426 亿元,人均国民生产总值在辽宁省仅次于大连,位居第二。位于辽东湾北部、盘锦市境内的辽滨沿海经济开发区成立于 2005 年 12 月,是辽宁沿海经济带重点发展区域、国家级化工新材料产业示范基地和辽宁省综合改革试验区,已成为盘锦向海发展、全面转型、以港强市战略的重要载体和对外开放的重要窗口;是促进辽宁沿海经济带发展战略实施、推进东北老工业基地振兴的重要增长极。2013 年 1 月,国务院正式批复同意盘锦辽滨沿海经济开发区升级为国家级经济技术开发区,定名为盘锦辽滨沿海经济技术开发区。

现有耕地 $13\times 10^4\text{ hm}^2$,其中水田 $11\times 10^4\text{ hm}^2$,年产粮食 $8.5\times 10^8\text{ kg}$ 左右,约占全省的 25%,是辽宁省重要商品粮基地和优质大米出口基地;有苇田 $8\times 10^4\text{ hm}^2$,年产芦苇 $40\times 10^4\text{ t}$,是世界最大的造纸原料和建材原料基地,占辽宁省造纸原料一半以上;此外,沿海拥有滩涂 $3.9\times 10^4\text{ hm}^2$,具有发展水产养殖的良好条件,地下还蕴藏着约 $16\times 10^8\text{ m}^3$ 的井盐,海盐、渔产品的产量均居全省前列。

随着人类活动的不断加大,该区也产生了一系列的环境生态问题。工业“三废”的排放、化肥农药的使用等均对水体、土壤及生态系统造成了污染和毒害。致使近年来一些珍稀物种濒于灭绝,大量的水产资源显著减少或质量下降,如辽河口原为斑海豹良好的栖息繁殖地,20 世纪 50 年代数量达千余只,1990 年仅剩不足 30 只。

1.1.2 辽河口湿地生态特征

1.1.2.1 河口湿地生态系统特征

利用野外调查和遥感植被指数,对辽河口湿地生态系统特征进行探讨。研究区域选择在 $40^{\circ}45'\text{—}41^{\circ}10'\text{N}$, $121^{\circ}30'\text{—}122^{\circ}00'\text{E}$ 的双台河口国家级自然保护区内。该保护区包含了河口区所有湿地植被类型,是河口湿地最主要的组成部分。根据人类活动干扰程度以及前人对该区域人类干扰影响程度的研究,将保护区分为滨海滩涂(A)、人为活动干扰较少的芦苇湿地(B)、油井密集的芦苇湿地(C)、油井和农业活动频繁的芦苇湿地(D)、沿河岸芦苇湿地(E)(图 1-1)。

(1) 河口湿地植被生态特征分析

不同区域植被群落的生态特征统计如表 1-1 所示。样地调查内容主要包括 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方的生物量,群落盖度,株高和株数。对于 A 区来说,其主要的植被群落类型为翅碱蓬群落。4 个样地的调查结果表明,翅碱蓬湿地的生物量在 $0.18\sim 0.97\text{ kg/m}^2$,平均生物量为 0.49 kg/m^2 。群落盖度在 20%~80%之间,平均盖度为 40%。植株的株高相

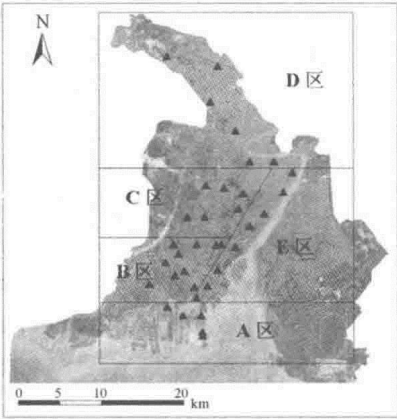


图 1-1 研究区示意图

A 区为滨海滩涂区; B 区为人为活动干扰较少的芦苇湿地区; C 区为油井密集的芦苇湿地区; D 区为油井和农业活动频繁的芦苇湿地区; E 区为沿河岸芦苇湿地区; ▲代表野外主要布设点

差不大，平均高度为 23.7 cm。调查表明 A 区翅碱蓬群落的每平方米株数在 23~452 株之间。与前人的研究相比，A 区翅碱蓬处在退化阶段，翅碱蓬群落的整体长势较差，且样方间的差异较大。

表 1-1 不同区域植被群落的生物量及生态特征

区域类型	生态特征	最小	最大	平均	标准误差
A 区（翅碱蓬） n = 4	生物量（kg/m ² ）	0.18	0.97	0.49	0.37
	群落盖度（%）	20	80	40	28.28
	株高（cm）	23.3	24.4	23.7	0.51
	株数	23	452	190	190.9
B 区（芦苇） n = 7	生物量（kg/m ² ）	1.54	1.78	1.67	0.083
	群落盖度（%）	75	100	87.86	8.59
	株高（cm）	248	330	284.71	31.61
	株数	30	85	56.14	18.08
C 区（芦苇） n = 10	生物量（kg/m ² ）	1.04	1.8	1.58	0.23
	群落盖度（%）	75	100	88	9.19
	株高（cm）	79	310	198.8	90.38
	株数	28	96	54.8	22.67
D 区（芦苇） n = 5	生物量（kg/m ² ）	1.13	1.67	1.51	0.23
	群落盖度（%）	65	85	79	8.94
	株高（cm）	170	300	237.4	62.35
	株数	46	94	70	21.12
E 区（芦苇） n = 6	生物量（kg/m ² ）	1.15	1.83	1.61	0.24
	群落盖度（%）	70	100	88.33	12.91
	株高（cm）	170	282	252	40.98
	株数	44	115	69.83	26.59

B 区芦苇生物量 1.54~1.78 kg/m²，不同样方间差异不大。群落盖度为 75%~100%，平均值为 87.86%。株高约为 284 cm，每平方米株数约为 56 株。总体来看，B 区芦苇长势较高，平均生物量也较高，样方间差异不大。

C 区和 D 区的芦苇生物量分别为 1.58 kg/m² 和 1.51 kg/m²。群落盖度分别为 75%~100%和 65%~85%，平均盖度为 88%和 79%，株高为 198.8 cm 和 237.4 cm，每平方米株数分别为 54.8 株和 70 株，从对比分析中发现，C 区生物量和群落盖度要高于 D 区，但 C 区的株高和株数要略小于 D 区。由于人类活动强度的不同，C 区芦苇的单株生物量（28.8 g）略高于 D 区（21.6 g）。

E 区芦苇生物量为 1.61 kg/m²。由于南北跨度相对较大，影响生物量的因子变化也较大，不同样地间的生物量差异较大。E 区平均群落盖度也要略高于其他芦苇湿地群落，但平均株高略小于 B 区，平均株数小于 D 区芦苇株数。由此可见，株高和株数不是反映生物量的绝对因素，芦苇的胸径大小是影响生物量的重要因素。

(2) 河口区芦苇湿地的空间分布格局

芦苇地上生物量不仅是河口植被重要的生态特征，指示着芦苇湿地生态状况的好坏，同时，也是当地造纸、畜牧和燃料的重要来源，具有很高的经济价值。因此，为进一步探讨河口区芦苇湿地生物量在空间上的分布特征，利用芦苇地上生物量和遥感植被指数建立回归模型，对双台河口国家级自然保护区的芦苇湿地生物量进行预测和评估。

研究选取了4种主要的植被指数进行计算，获得了4种主要植被指数的空间分布数据(图1-2)。

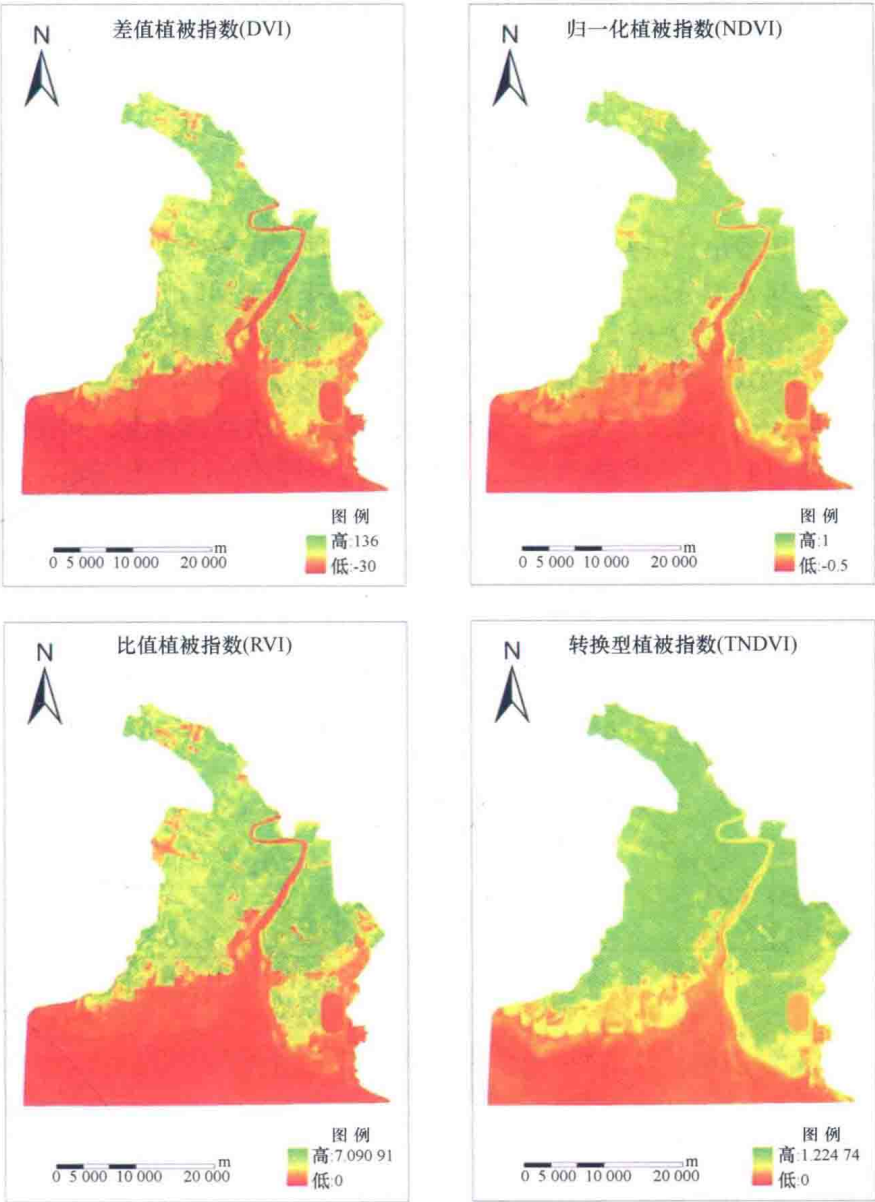


图 1-2 遥感波段不同植被指数的计算结果

以野外实测地上生物量为因变量，以4种植被指数作为自变量，建立生物量与植被指数的一次和二次回归模型，结果如表1-2所示。

表 1-2 研究区芦苇湿地地上生物量一次回归模型

自变量（植被指数）	生物量回归模型	R^2	F	P
NDVI	$Y=2.791\ 1X+0.119\ 4$	0.794	53.84	<0.0001
	$Y=0.719\ 2X^2+2.269\ 1X+0.175\ 7$	0.795	25.86	<0.0001
DVI	$Y=0.019\ 2X+0.328\ 1$	0.793	51.57	<0.0001
	$Y=-0.000\ 1X^2+0.028\ 4X+0.163\ 5$	0.808	27.41	<0.0001
RVI	$Y=0.073\ 7X+1.505\ 3$	0.047	0.54	0.477
	$Y=0.252X^2-0.002\ 48X-1.551\ 4$	0.049	0.26	0.776
TNDVI	$Y=5.030\ 7X-3.504\ 1$	0.788	42.02	0.001
	$Y=-0.000\ 1X^2+0.028\ 4X+0.163\ 5$	0.791	24.15	0.002

通过表 1-2 可以看出，以差值植被指数为自变量时，其与地上生物量的一次和二次方程拟合效果最差，其 P 值分别为 0.477 和 0.776，均高于其他回归方程的 P 值，且 R^2 较低。统计方程中，较大的 R^2 和 F 值，以及较小的 P 值对应的回归方程，拟合效果更好。因而，以 NDVI、DVI 和 TNDVI 为自变量的一元一次拟合方程中，NDVI 的一次回归模型（ $R^2 = 0.794$ ， $F=53.84$ ， $P<0.000\ 1$ ）要好于其他两个指数的一次回归模型，这说明了在一次方程中，与其他指数相比，归一化植被指数可以更好地表征研究区芦苇湿地的地上生物量特征。在二次回归模型中，以 DVI 指数为自变量的地上生物量回归方程的拟合效果最好（ $R^2 = 0.808$ ， $F=27.41$ ， $P<0.000\ 1$ ）。为进一步比较 NDVI 一次回归模型和 DVI 二次回归模型对地上生物量的拟合结果，分别将两个回归模型的预测值与野外实测值进行比较，结果如图 1-3 所示。

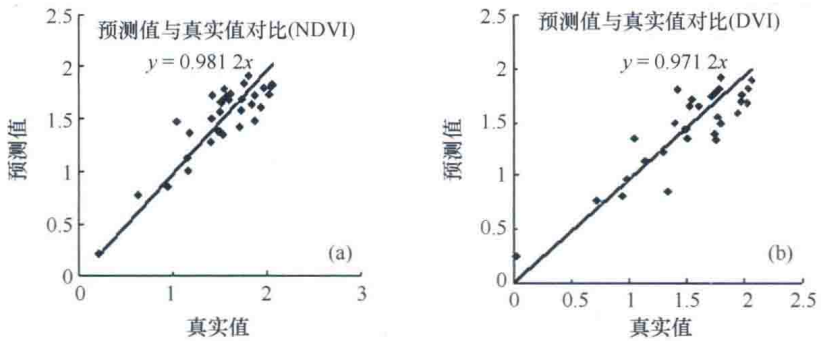


图 1-3 生物量回归模型预测值与真实值的散点图

(a) 以 NDVI 为自变量的一次回归模型预测值与真实值；(b) 以 DVI 为自变量的二次回归模型的预测值与真实值

从图 1-3a 和图 1-3b 的比较可以发现，以 NDVI 为自变量的一次线性方程和以 DVI 为自变量的二次曲线方程的地上生物量预测值和真实值都比较接近，拟合效果较好，其预测值与真实值的比值分别为 0.981 2 和 0.971 2，都小于 1，说明了两个回归模型的预测结果都小于真实值；但 NDVI 的预测值与真实值的比值大于 DVI 的比值，且更接近于 1，说明以 NDVI 为自变量的回归模型与 DVI 的回归模型相比，其预测值更加接近于真实值。可见，NDVI 的回归模型在预测生物量时准确性更高。

(3) 芦苇湿地地上生物量的评估

根据以上研究的结果，研究区内芦苇湿地的地上生物量评估主要采取以 NDVI 指数为自变量的一元线性回归模型 $Y=2.7911 \times (NDVI) +0.1194$ 。其生物量评估结果如图 1-4 所示。

从图 1-4 可见，研究区内芦苇地上生物量较高的区域（颜色较深区域）多位于研究区中靠近辽河淡水区，也是保护区中心地区和东部地区，而保护区南部靠近海岸带一侧以及靠近建成区（保护区西侧）的芦苇湿地区，芦苇地上生物量较低。

根据生物量分布图进一步计算表明，2008 年时，研究区内芦苇湿地面积为 469.4 km²，芦苇湿地的平均地上生物量为 1 456.65 g/m²，芦苇总地上生物量为 6.8×10⁷ t。

1.1.2.2 河口湿地的主要演化过程

(1) 河口区主要的土地利用类型

分别对 1978 年、1988 年、1998 年和 2008 年河口区遥感影像（1978 年为 MSS 遥感影像，其余为 TM 遥感影像）进行解译，结果表明，研究区内包含 14 种主要的土地利用类型，分别为建成区，旱地，林地，柽柳群落，库塘，河流，海岸带，盐田，水稻田，荒草地，翅碱蓬湿地，芦苇湿地，虾蟹池和香蒲湿地（图 1-5）。

(2) 河口湿地面积的变化

河口湿地面积的演变过程和趋势是人类活动引起的河口湿地的退化最直观反映。对 1978 年、1988 年、1998 年和 2008 年遥感解译结果进行土地利用类型的面积统计分析，结果如表 1-3。

表 1-3 不同土地利用类型面积 (hm²)

年份	柽柳	海岸带	旱地	建成区	林地	盐田	荒草地
1978	9 870.5	38 407.2	47 214.2	26 783.1	4 081.7	7 718.7	6 484.2.3
1988	45.0	9 684.1	34 785.3	31 001.4	3 425.4	237.6	12.2
1998	173.1	26 769	24 459.4	39 628.2	2 884.3	716.5	27.2
2008	174.0	35 287.6	19 773.1	43 947.7	2 447.3	648.5	9.8

年份	翅碱蓬	水稻田	河流	库塘	苇田	虾蟹田	香蒲
1978	11 829.5	141 870.7	8 301.2	9 396.7	82 518.4	1 149.3	67.8
1988	53 304.1	157 576.7	11 193.6	5 594.3	92 581.1	5 667.9	330.8
1998	37 094.7	176 356.2	9 898.9	5 890.6	85 760.8	11 690.8	812.2
2008	1 567	180 419.6	14 391.3	6 573.9	69 269.9	15 789.8	1 132.4

可见，翅碱蓬和芦苇湿地的面积在 1978—1988 年间呈现增加趋势，翅碱蓬面积的增加



图 1-4 芦苇湿地地上生物量分布

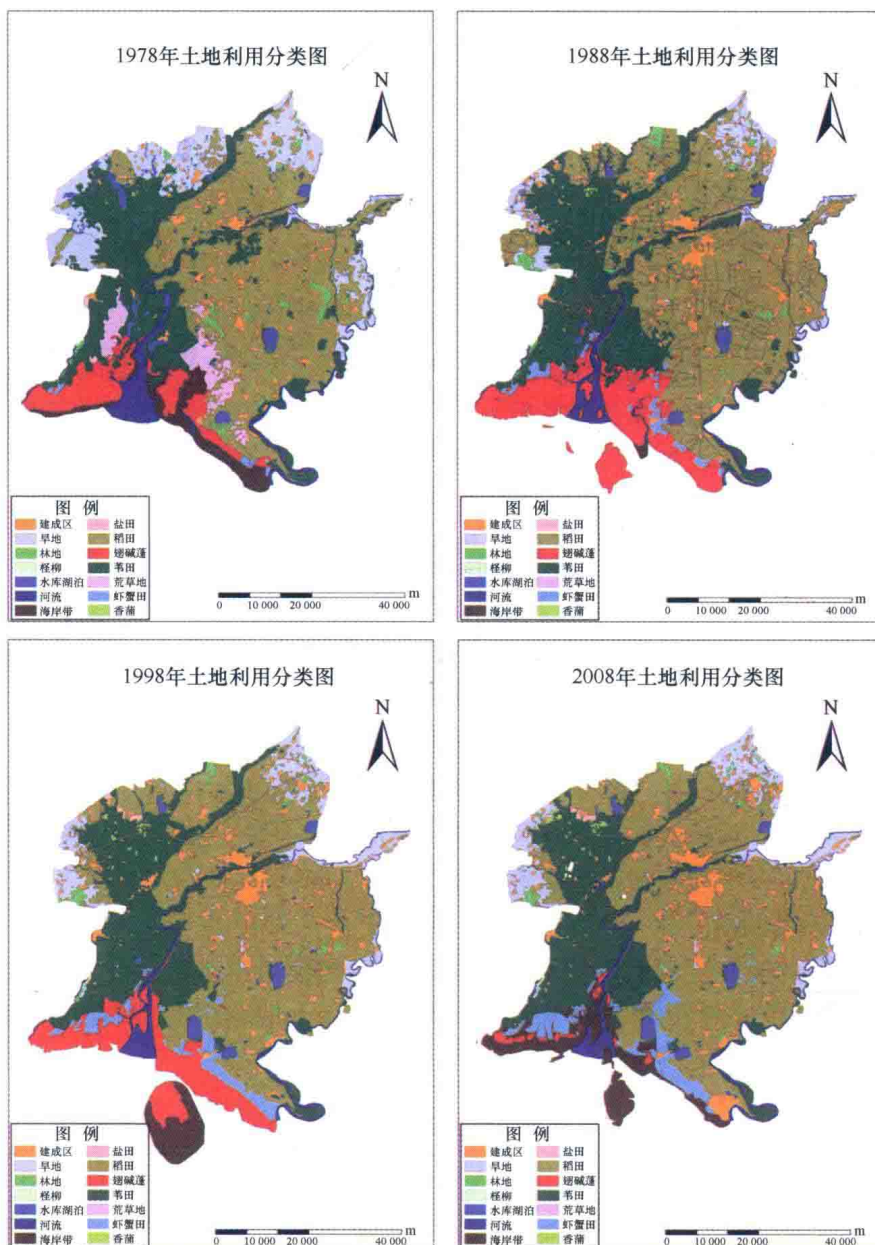


图 1-5 遥感解译河口区土地利用类型

是由于翅碱蓬群落在滩涂逐渐定居和演替的结果，而芦苇湿地的增加主要是荒地逐渐被开发为苇田的结果。

在 1988—1998 年间翅碱蓬和芦苇湿地的面积呈现减少趋势。对比遥感影像的土地利用分类结果可知，翅碱蓬面积的减小主要是虾蟹田增加以及翅碱蓬湿地转化为滩涂湿地的原因，而芦苇湿地的减少主要是由于水稻田和建成区两种土地利用类型增加的结果。

在 1998—2008 年间翅碱蓬和芦苇湿地的面积缩减比例最大，翅碱蓬面积仅有 $1\,567\text{ hm}^2$ ，芦苇湿地的面积也缩减至 $69\,269\text{ hm}^2$ 。从不同时段河口区土地利用的分类结果可以看出，翅碱蓬湿地严重退化为滩涂湿地，翅碱蓬适宜生境迅速减少，而水稻田面积的增加，侵占了原有芦苇湿地的面积。

芦苇湿地、翅碱蓬湿地、建成区、水稻田和虾蟹田在不同时间段的面积变化如图 1-6 所示。建成区、水稻田和虾蟹田面积在 1978—2008 年均呈现逐年增加的趋势，这也说明，在河口湿地人类的开发和经济活动是逐年增强的。

为进一步说明河口区翅碱蓬和芦苇湿地演变过程，利用 GIS 软件进行叠加分析，得到不同时段湿地向其他土地利用类型的转移比例。翅碱蓬湿地面积转移比例见表 1-4，1978—1988 年翅碱蓬湿地转移比率表明，至 1988 年时，翅碱蓬转化为虾蟹池的面积比例最大，为 11.32%；其次为芦苇湿地和建成区，分别为 4.49% 和 2.66%。向芦苇湿地转化是由于自然演替的结果；虾蟹池的开发，道路和居民点相应增加也加剧了翅碱蓬转移比率。因而，1978—1988 年 10 年间，出现了以经济开发为主的人类干扰活动侵占翅碱蓬湿地的趋势。1988—1998 年翅碱蓬湿地转移比例分析表明，在这 10 年间，翅碱蓬的保留率降低到 59.49%，主要转化为虾蟹池和水稻田，转移比率分别为 14.99% 和 14.85%；与 1978—1988 年这 10 年间相比，翅碱蓬不但向虾蟹池的转移比率有所增加，同时水稻田的开发也使翅碱蓬湿地的面积缩减了 14.85%。在 1988—1998 年这 10 年间，翅碱蓬具有向虾蟹池和水稻田继续演变趋势，水产养殖和农业种植的双重人类活动成为湿地退化的主要驱动因素。

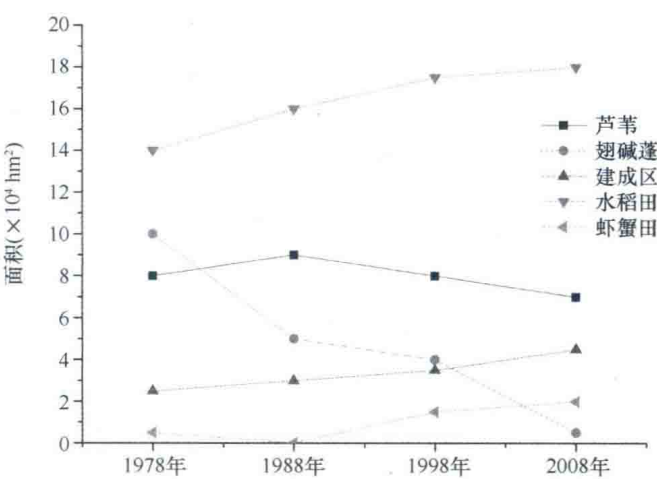


图 1-6 主要土地类型面积变化

表 1-4 翅碱蓬湿地面积转移比例 (%)

时段 (年)	翅碱蓬保留率	第一转化率	第二转化率	第三转化率	其他
1978—1988	79.23	虾蟹池	芦苇湿地	建成区	2.3
		11.32	4.49	2.66	
1988—1998	59.49	虾蟹池	水稻田	芦苇湿地	6.43
		14.99	14.85	4.24	
1998—2008	10.12	滩涂湿地	虾蟹池	河流	4.29
		69.79	10.9	4.95	

1998—2008 年翅碱蓬湿地转移比例表明，翅碱蓬面积的保留率仅有 10% 左右。翅碱蓬湿地约有 90% 的比例转化为滩涂湿地、虾蟹池和河流等土地利用类型。其中向虾蟹池演化的趋势没有转变，转移比率为 10.9%；而向滩涂湿地转变的比率高达 69.79%。这说明，1978—1998 年前 20 年时间虾蟹池养殖和水稻田开发等人类活动对翅碱蓬湿地的影响作用达到累积，翅碱蓬出现了逆向演替的趋势。需要说明的是，在 1998—2008 年 10 年间翅碱蓬向河流转移比例为 4.95%，且主要位于淡水与海水的交汇处，这说明海平面上升，淡水资源的缺乏也是导致翅碱蓬湿地退化的主要原因。