

“十二五”国家重点图书出版规划项目

典型生态脆弱区退化生态系统恢复技术与模式丛书

黄河三角洲退化湿地 生态恢复

—理论、方法与实践

陆兆华 等著



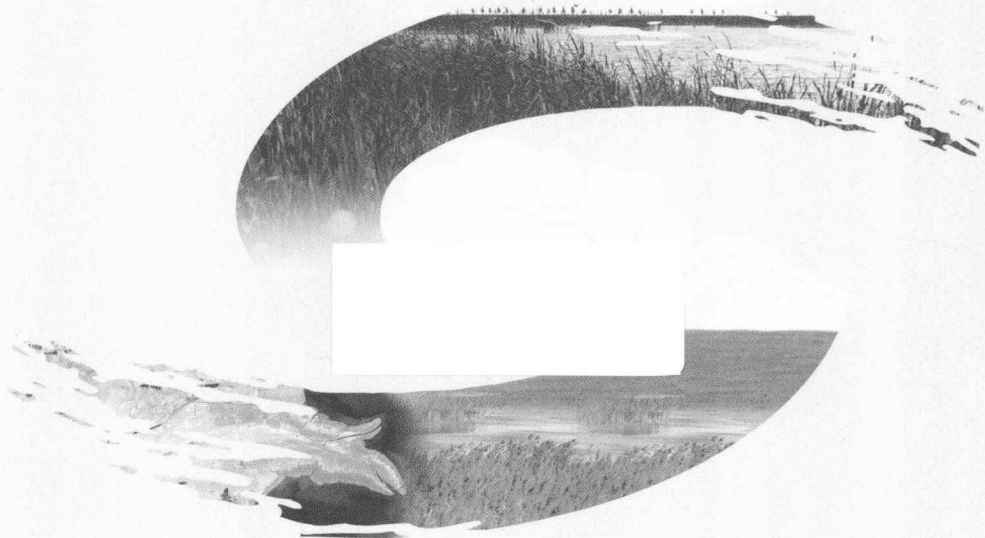
“十二五”国家重点图书出版规划项目

典型生态脆弱区退化生态系统恢复技术与模式丛书

黄河三角洲退化湿地 生态恢复

—理论、方法与实践

陆兆华 等著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以黄河三角洲退化湿地为研究对象,以水为主线,对黄河三角洲湿地生态系统退化类型和退化机制、不同水源(淡水、咸水及废水)恢复退化湿地关键技术及退化湿地生态系统恢复模式进行了研究,并对区域湿地中人类影响最为剧烈的滨海湿地生态安全进行了评价,以期为黄河三角洲退化湿地生态系统的恢复提供方法和技术支撑。

本书可供生态学、农学、林学、水土保持、环境科学与环境工程等领域的人员和高校师生使用,亦可供环境保护、生态建设、自然保护区及区域可持续发展方面有关部门的管理工作者和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄河三角洲退化湿地生态恢复:理论、方法与实践/陆兆华等著.

—北京:科学出版社,2013

(典型生态脆弱区退化生态系统恢复技术与模式丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-036766-2

I. 黄… II. 陆… III. 黄河—三角洲—沼泽化地—生态恢复—研究
IV. P942.520.78

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第035787号

责任编辑:李敏 张菊/责任校对:李影

责任印制:钱玉芬/封面设计:王浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年3月第一版 开本:787×1092 1/16

2013年3月第一次印刷 印张:19 1/4 插页:10

字数:490 000

定价:96.00元

如有印装质量问题,我社负责调换

目 录

总序

前言

第 1 章 黄河三角洲湿地生态系统	1
1.1 湿地研究概述	1
1.2 黄河三角洲湿地资源及其分类	2
1.3 黄河三角洲湿地面临的生态环境问题	9
第 2 章 黄河三角洲湿地景观格局变化及其驱动因素	12
2.1 景观格局研究概述	12
2.2 黄河三角洲湿地景观格局变化	14
2.3 黄河三角洲湿地退化驱动因子	23
第 3 章 黄河三角洲湿地植被环境梯度分析	29
3.1 植被数量分析方法	29
3.2 植被分布与环境因子之间的关系	33
3.3 黄河三角洲植物生态位和生态幅	43
3.4 结论和讨论	50
第 4 章 黄河三角洲湿地植被模拟	53
4.1 理论基础	54
4.2 广义回归分析与空间预测工具简介	55
4.3 植被与环境数据获取与处理	58
4.4 植被及环境因子数据分析	64
4.5 初始模型的构建及模型的选择	66
4.6 模型解释	68
4.7 潜在植被空间预测	71
4.8 结论	75
第 5 章 淡水水源区退化湿地恢复技术	76
5.1 研究方法	76
5.2 退化淡水湿地恢复配水技术	79
5.3 退化淡水湿地恢复效应评价	91
5.4 结论	107
第 6 章 咸水水源区退化湿地恢复技术	108
6.1 主要盐生植物的室内水盐模拟调控技术	108

6.2	咸水退化湿地水盐调控技术	119
6.3	咸水水源区三种盐生植物水盐调控技术规程	140
第7章	废水水源区废水灌溉盐碱化退化湿地恢复技术	143
7.1	废水灌溉量对盐碱化退化湿地土壤性质的影响	143
7.2	废水灌溉频率对盐碱化退化湿地土壤性质的影响	162
7.3	结论	172
第8章	废水水源区清废轮灌盐碱化退化湿地恢复技术	175
8.1	材料与amp;方法	175
8.2	废水灌溉方式对盐碱化退化湿地土壤性质的影响	177
8.3	不同浓度废水灌溉对土壤理化性质的影响	188
8.4	结论	189
第9章	造纸废弃物综合利用恢复盐碱化退化湿地技术	191
9.1	盐分胁迫对芦苇种子萌发的影响	191
9.2	造纸废弃物综合利用对退化湿地恢复的影响	195
9.3	造纸废水灌溉对退化湿地植物的影响	210
9.4	造纸废弃物与再生水联合修复重度盐碱化土壤中营养元素迁移规律及修复机制研究	218
第10章	黄河三角洲滨海湿地生态安全评价	230
10.1	黄河三角洲滨海湿地概况	231
10.2	生态安全评价指标体系	233
10.3	生态安全评价方法	236
10.4	评价指标获取	240
10.5	生态安全评价结果	256
10.6	黄河三角洲滨海湿地保护对策	260
第11章	黄河三角洲湿地生态安全格局与生态管理	262
11.1	黄河三角洲湿地生态安全格局设计	262
11.2	黄河三角洲湿地生态系统管理	270
11.3	黄河三角洲多源数据库建设与管理	277
参考文献	283
彩图		

第 1 章 黄河三角洲湿地生态系统

1.1 湿地研究概述

湿地与森林、海洋一起并列为全球三大生态系统，它是陆生生态系统与水生生态系统之间的过渡带，是水陆相互作用形成的独特生态系统，是地球上重要的生存环境和自然界最富生物多样性的生态景观之一。湿地在调节气候、涵养水源、蓄洪防旱、控制土壤侵蚀、促淤造陆、净化环境、维持生物多样性和生态平衡等方面均具有其他生态系统所不能替代的作用，被誉为“地球之肾”、“生命的摇篮”、“文明的发源地”和“物种的基因库”。

湿地的水文条件是湿地属性的决定性因子。湿地既不像陆生系统那样干燥，也不像水生系统那样有永久性深水层，而是经常处于土壤水分饱和或有浅水层覆盖的动态状态。由于其水文条件多变，难以确定积水湿地与水域的界限及无水湿地与陆地的界限，因而至今对其还没有一个统一的定义。最早关于湿地的定义之一是由美国鸟类和野生动物保护协会于 1956 年提出的，即湿地是指被浅水或暂时性积水所覆盖的低地，一般包括草本沼泽、灌丛沼泽、苔藓泥炭沼泽、湿草甸、泡沼、浅水沼泽及滨河泛滥地，也包括生长挺水植物的浅水湖泊或浅水水体，河、溪、水库和深水湖泊等稳定水体不包括在内；湿地较为综合的定义是美国鱼类和野生动物保护协会于 1979 年提出的，即湿地是处于陆地生态系统和水生生态系统之间的转换区，通常其地下水位达到或接近地表，或处于浅水淹覆状态，湿地必须至少具有以下三个特点中的一个：①至少是周期性以水生植物生长为优势；②基质以排水不良的水成土为主；③土层为非土质化土，并且在每年生长季的部分时间水浸或水淹。目前国际比较公认的湿地定义是《湿地公约》中的定义：“湿地是指不问其为天然或人工、长久或暂时性的沼泽地、泥炭地、水域地带，静止或流动的淡水、半咸水、咸水，包括低潮时水深不超过 6 m 的海水水域”。《湿地公约》对湿地的定义有助于湿地的保护和管理，它比较具体，具有明显的边界，具有法律的约束力，在湿地管理工作中易于操作（杨永兴，2002）。另外，凡签署加入国际湿地公约的缔约国都已经接受这一定义，在国际上具有通用性（王丽荣和赵焕庭，2000）。

湿地科学是研究湿地形成、发育、演化、生态过程、功能及其机制和保护与利用的科学。是地理科学、环境科学、水文科学、生态科学和资源科学等多学科交叉形成的边缘学科。其研究对象是湿地生态系统，主要任务是揭示湿地的特征、形成、发育和演化规律与机制以及湿地的功能，探索人类活动对湿地生态系统的影响与响应，提出科学保护与合理利用湿地的对策和措施（张晓龙，2005）。1982 年在印度召开了第一届国际湿地会议，标志着全球湿地研究进入了一个新的发展阶段。自此，世界湿地研究掀起了高潮，从发达国

家到发展中国家都对湿地研究越来越重视。当前国际湿地科学研究的前沿和热点集中反映在每4年一届的国际湿地会议上。由国际生态学会举办的国际湿地会议，到目前已成功举办了7届。第5届国际湿地会议在澳大利亚西海岸的佩斯（Perth）举行，大会的主题是“湿地的未来”（wetlands for the future）。会议旨在讨论增强湿地效益，防止和解决湿地丧失、功能衰退、生物多样性减少等问题及保护与重建湿地的策略和措施。第6届国际湿地会议正值新千年，所以也称“国际千年湿地会议”。会议在加拿大的魁北克举行，主题是“湿地、泥炭地的可持续发展”。这次会议上，湿地保护与管理受到普遍重视。最突出的特点是在湿地保护的战略、方针、政策与技术方面提出了新的观点和见解，提供了湿地保护示范区建设的方法与技术，提出了世界上重要湿地保护的计划与方案。第7届国际湿地会议于2004年7月在荷兰乌得勒支举行，会议汇集了湿地科学各主要分支学科的最新研究进展，并回顾在世界范围内有关水资源综合管理的主要研究热点。会议内容包括综合水资源管理中湿地的作用、环境管理中的湿地科学、湿地的生物地球化学功能、湿地环境中植物的作用、湿地的保护和管理、湿地恢复和重建、湿地和全球气候变化、湿地对改进水质的作用、热带湿地的功能和合理利用9个部分（张永泽，2001）。

从最近的三届国际湿地会议议题可以看出，湿地的管理和保护一直是湿地研究的前沿及重要内容。湿地与人类生存息息相关，它不仅为人类提供多种资源，而且具有巨大的生态价值和环境效益。然而，20世纪60年代以来，随着全球人口的急剧增加，以及工农业的快速发展，人类对湿地的不合理开发利用加剧，天然湿地日益减少，功能和效益急剧下降。随之而来的一系列生态与环境问题，使各国政府认识到加强湿地管理和保护的重要性。其中，湿地生态系统退化过程及机制一直是湿地管理、保护与研究的热点问题之一。

1.2 黄河三角洲湿地资源及其分类

1.2.1 黄河三角洲湿地资源概况

黄河三角洲位于渤海湾南岸和莱州湾西岸，主要分布于山东省东营市和滨州市境内，即 $117^{\circ}31' \sim 119^{\circ}18'E$ 和 $36^{\circ}55' \sim 38^{\circ}16'N$ ，是由古代、近代和现代的三个三角洲组成的联合体。由于黄河独特水沙条件和渤海弱潮动力环境的共同作用，黄河三角洲形成了中国温带最广阔、最完整和最年轻的原生湿地生态系统。三角洲呈掌状辐射的河床高地与河间洼地、辽阔的滩涂与浅海和人为、地貌因素，孕育了多种多样的湿地生态系统。黄河三角洲湿地主要以滨海湿地、河流及河漫滩湿地为主，主要分布在东部和北部地区（图1-1）。

黄河三角洲作为中国唯一的三角洲湿地自然保护区，已列入世界及中国生物多样性保护和湿地保护名录。黄河三角洲遍布天然草场、天然实生柳林和天然怪柳灌木林，有393种野生植物，其中野大豆等国家二级保护植物有广泛分布，是目前中国三大三角洲中唯一具有保护价值的原始生态植被地区。该保护区各种野生动物1524种，其中水生动物641种，水生动物中属国家一级保护的有2种，属国家二级保护的有7种。鸟类有269种，其中属国家一级重点保护的有丹顶鹤、白头鹤、白鹤、大鸨、金雕、白尾海雕、中华秋沙鸭

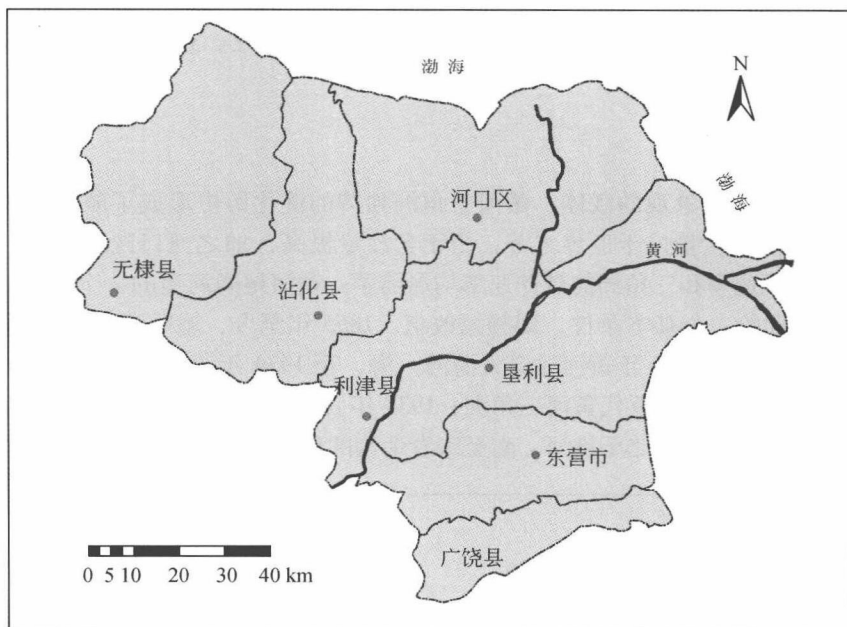


图 1-1 研究区范围

7 种；属国家二级保护的有大天鹅、灰鹤、白枕鹤等 34 种；有 40 种是列入《濒危野生动植物种国际贸易公约》中的鸟类，152 种是《中日保护候鸟及其栖息环境的协定》中的鸟类，51 种是《中澳保护候鸟及其栖息环境的协定》中的鸟类。黄河三角洲是我国丹顶鹤越冬的最北界，也是世界珍稀濒危鸟类黑嘴鸥的重要繁殖地。据湿地国际亚太组织专家 1997 年和 1998 年的实地调查认定，每年经过该区的鸟类仅鹈类就达 100 余万只，其中数量达到国际湿地标准的就有 17 种。黄河三角洲丰富的河口湿地资源，使其在全球生物多样性保护中的地位与日俱增（赵延茂和吕卷章，1996）。

1.2.2 黄河三角洲湿地生态系统特点

黄河三角洲的新生湿地生态系统由于成陆时间短、土壤含盐量高，且经常受到黄河断流和风暴潮的影响，因此具有如下特点。

1) 不稳定性。由于黄河主河道游荡多变，尚未得到有效控制，同时还有遭遇大洪水的可能，因此河道湿地也时有变化，一些河道湿地也可能因生产堤的修建被农民改造为耕地；在“人造洪峰”的作用下，也能形成一些新的河道湿地。

2) 原生性。黄河河道湿地大多处于湿地发展的初期阶段，土壤潜育化程度较低，土壤有机质积累不多的状况明显有别于典型的湿地水文生态系统。

3) 生态环境的脆弱性。特殊的成因使黄河下游河道湿地的生态环境较为脆弱。黄河自 1972 年开始发生断流，进入 20 世纪 90 年代，断流河长及断流时间均迅速增加，甚至在汛期也经常发生断流。黄河断流对黄河下游河道湿地危害极大，使河道湿地不断萎缩甚

至大片消亡。

4) 水生植物贫乏。黄河下游河道湿地水生植物较为贫乏，这是由黄河水含沙量较高及河道湿地的不稳定性决定的。

1.2.2.1 地貌

地貌是黄河三角洲景观的载体，黄河三角洲独特的演化历史形成了颇具特色的地形地貌格局。黄河径流含沙量位于世界之首，由于含沙量极高，加之河口区坡降小，海域作用较弱，黄河的淤积速率和三角洲的延伸速率均居前茅。黄河尾间河道的一个显著的特点，也是形成黄河三角洲的一个基本条件，即频繁改道。1855 年至今，尾间流路共发生了 10 次大的改道过程，其中，自 1855 年黄河改道大清河入海，至 1934 年黄河分流点自宁海下移至渔洼之前形成的三角洲，称为近代黄河三角洲；1934 年后，黄河三角洲的摆动点由宁海下移至渔洼，形成以渔洼为顶点，北至挑河、南至宋春荣沟的现代黄河三角洲（图 1-2）。

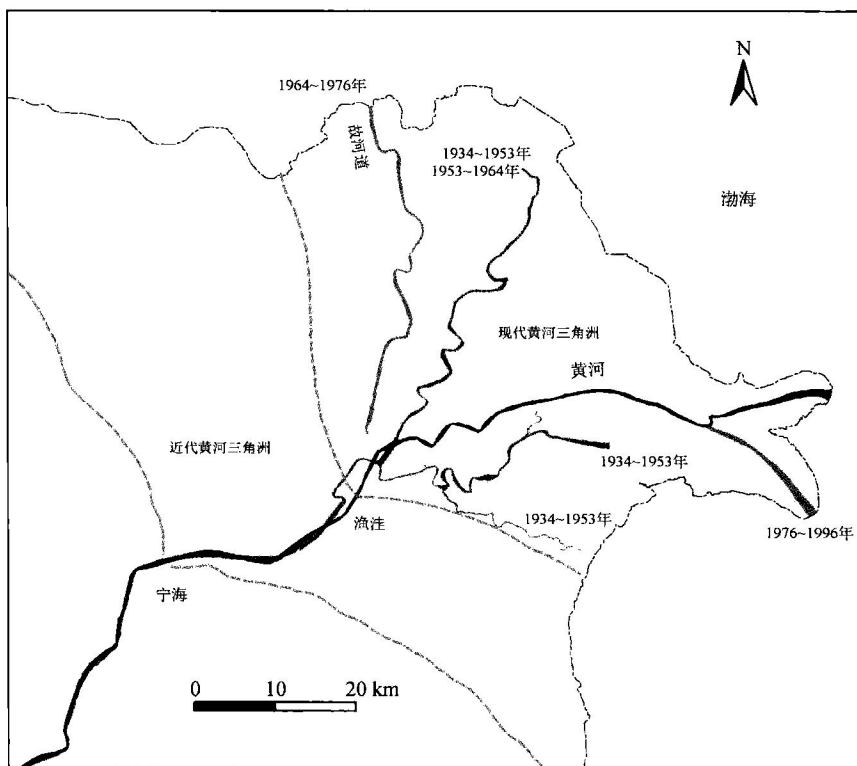


图 1-2 现代黄河三角洲河道变迁

黄河是黄河三角洲地貌类型的主要塑造者。地貌发育直接受近代黄河三角洲的形成和演变控制。黄河三角洲地势低平，自西南向东北微倾。三角洲各期数十条大小分流河道均为地上河，河床及两侧的堆积体（天然堤、决口扇）高出周围地面 1~2m，自三角洲顶点向海指状辐散（图 1-3，见彩图）。分流河道之间为河间洼地，河道相对密集叠合的地带形成较宽大的指状岗地。岗地向三角洲顶点宁海—于洼附近辐聚汇合成高程 6~7m 的掌

状高地，向海辐射伸出，形成上部冲积平原地貌格架（崔承琦等，1994）。

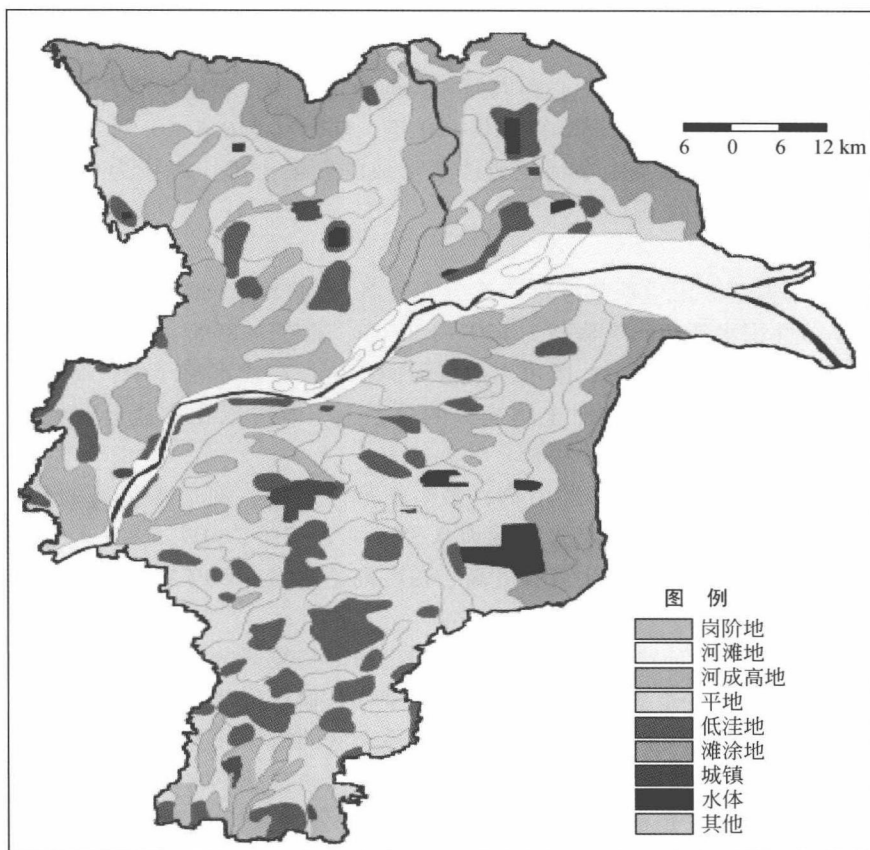


图 1-3 黄河三角洲地貌类型图（刘高焕和汉斯·德罗斯特，1997）

1.2.2.2 土壤

土壤的形成发育是在三角洲成陆过程中，不断受到黄河泛滥改道和尾间摆动塑造的微地貌形态、海岸线变迁、海水侵袭、潜水浸润、大气降水、地面蒸发、植被演替以及人为垦殖等多种因素的影响，使它发育演替的方向不断变化，从而形成了各种不同类型的土壤，并且新生陆地目前还在不断加入到土壤演替的系列中，从而表现出各成土类型、不同成土阶段并存的分布格局。表现在纵向上，顺黄河而下依次分布着潮土和盐土，潮土类中的潮土亚类多分布在境内现行黄河入海流路的中上段和黄河故道的上段，向下则为盐化潮土而且盐化程度随离海距离减少而加重。盐土类中以滨海潮盐土为主，近海为滩地盐土；在横向上，以黄河或以黄河故道为基轴，向两侧延伸，盐化程度也随之加重，土壤类型也基本上依次分布着潮土、盐化潮土、潮盐土；在质地上由于黄河决口泛滥时的水选作用，近河多为砂质，渐远为壤质或黏质，河滩高地主要是砂质土，微斜平地多为壤质土，浅平洼地多分布着黏质土（刘庆生等，2003）。

1.2.2.3 植被

(1) 落叶阔叶林

刺槐林主要分布在黄河北侧中心路以西和黄河故道东侧。黄河口管理站刺槐林林龄在10年以下,黄河故道东侧刺槐林林龄为10~20年,郁闭度为0.4~0.9,形成自然保护区森林的主体。其分布生境多系由黄河泛滥改道形成的新淤土地,海拔为2~3m,土壤肥沃,土壤含盐量在0.3%以下。

(2) 沼泽植被

1) 沼生芦苇群落。沼生芦苇群落广泛分布于各种河口湿洼地和滨海沼泽地,群落生境一般都有季节性积水现象,芦苇高为120~150cm,盖度为85%~98%。芦苇的生态适应幅度相当广,在对水的关系上,既可以成群大面积生长在浅水沼泽中,又可以在季节性积水的各种环境下繁茂生长;在对土壤盐分的关系上,既可以在含盐量较低的土壤中生长期,又可以在含盐量较高的土壤中生长。

2) 杞柳群落。杞柳属喜光喜湿植物,多生于低洼草地、河边水位高的砂质滩地上。杞柳微耐盐碱,在10~15cm土层含盐量为0.38%~1.17%、pH7.5~8.5的盐渍化较低的土地以及滨海潮盐土地带,仍生有频度高、盖度高达40%~60%的杞柳群落。

(3) 盐生植被

盐生植被主要分布于年高潮线内侧,常与湿生植被呈复区分布。以盐生植物为主构成的群落主要有怪柳群落、碱蓬群落、獐毛群落、中华补血草群落等类型。

1) 怪柳群落。怪柳群落面积约10000m²,是天然的海岸灌丛,一般分布在平均海水高潮线以上的近海滩涂上,地势平坦,土壤为淤泥质盐土,地下水埋深1.5~2.5m,土壤含盐量0.25%~2.76%,是在盐地碱蓬群落的基础上发展起来的植被类型。怪柳具有耐旱、耐水湿(耐涝)、耐瘠薄、耐寒、耐盐碱、抗风沙等特性,是盐碱地造林的优良树种。

2) 碱蓬群落。碱蓬群落是淤泥质潮滩和重盐碱地段的先锋植物,向陆地方向可与怪柳群落呈复区分布,生境一般比较低洼,地下水埋深一般为0.5~3.0m或常有季节性积水,土壤多为滨海盐土或盐土母质,土壤盐分较重。碱蓬和怪柳、黄须一并被称为盐碱地的“三件宝”。

1.2.2.4 水文

黄河三角洲入海河流有20多条,黄河是流经三角洲地区最长、影响最深刻的河流,还有小清河等客水河道,黄河入海年总径流量占各河入海总径流量的94.2%,年输沙量占各河总输沙量的99.8%,除黄河外,其他多是排涝河道,多年平均总径流量为3.25亿m³。地表水多为季节性河流,黄河4~6月也常出现断流现象,1995年黄河利津以下从3月4日到7月27日断流122天,1997年断流达到226天。黄河三角洲浅层地下水主要靠大气降水补给,在形成过程中一方面受黄河侧渗和下渗的影响;另一方面受海洋潮汐顶托、淹没作用的制约,受含盐土体和海水影响,形成近代黄河三角洲高矿化度地下水的主要特征。地下水流向与三角洲地面坡向一致,水力坡度小于万分之一,从西南流向东北,地下水水位与大气降水关系密切,夏季7~9月丰水期地下水水位最高(2~4m),3~6月

最低(4~6 m)。浅层水矿化度为7.7~167.5 g/L,平均为24.6 g/L。所以,地下水基本为松散岩类孔隙水,因地处滨海,系黄河冲积退海平原且地面高程不大,地下水埋深浅,矿化度高,地下咸水分布面积占地下水总面积的70%以上,地下淡水资源严重缺乏。

1.2.2.5 生态系统演替

生态系统演替是指在特定的地段,一个生态系统依次被另外一个生态系统所取代,它包括空间演替系列和时间演替系列两种类型。生态系统的演替实质上就是系统自身发育和外界环境因素综合作用的结果。

土壤盐分和土壤水分是影响现代黄河三角洲植被空间分异最主要最直接的因素(赵延茂等,1994):黄河三角洲生态系统演替总是伴随着地下水埋深和土壤盐分的不同而变化,区域内的地势、地形、潮汐、改道、河道摆动、堆积与侵蚀乃至人为干扰往往都是通过改变土壤含盐量和土壤水分来影响植物的生长、发育和繁殖的。从空间上看,在地势低的地带,潜水埋藏浅,矿化度高,土壤含盐量也高,分布着为强度耐盐的植物群落,如盐地碱蓬群落(Form. *Suaeda salsa*)、怪柳群落(Form. *Tamarix chinensis*);随着地势的升高,潜水埋藏深,矿化度变低,土壤含量减少,分布着中度耐盐的植物群落,如獐毛群落(Form. *Aeluropus littoralis* var. *sinesis*)和轻度耐盐的植物群落,如白茅群落(Form. *Imperata cylindrica*)、茵陈蒿群落(Form. *Artemisia capillaris*)、拂子茅群落(Form. *Calamagrostis epigejos*)和狗尾草群落(Form. *setaria viridis*)等杂草群落(赵善伦等,1993)。从时间上看,在无人为干扰的条件下,生态系统总是伴随着土壤的脱盐过程向暖温带落叶阔叶林生态系统方向演替。随着泥沙的淤积,浅海抬高变成滩涂。一年生盐生植物开始侵入,海洋生态系统演替为滩涂湿地和一年生盐生植物生态系统。一年生盐生植物的生长又为其他植物的侵入提供了条件,同时由于黄河来水和天然降水,形成了大面积湿地,因此,在一些积水洼地形成了咸水植物生态系统和沼生盐生植物生态系统。随着陆地不断向海推进,地面不断抬高,咸水植物生态系统和沼生盐生植物生态系统逐渐脱水旱化,为盐生植物的侵入和生长创造了条件。由于盐生植物的生长,地面不断抬高,土壤不断脱盐,一些较耐盐的非盐生植物逐渐取代盐生植物而成为群落优势种,直至演替为暖温带落叶阔叶林生态系统。

1.2.3 黄河三角洲湿地分类

湿地分类作为湿地研究的基础,分类系统合理与否直接影响湿地资源调查、湿地管理与保护和湿地评价等多方面的研究工作。但由于所采用的湿地概念、研究目的和方法以及湿地的地域性差异等原因,不同的国家,甚至同一国家不同的研究学者在湿地分类上也可能表现出明显的不同,从不同的角度出发可以对湿地进行不同的分类。因此同湿地概念一样,目前世界上还没有形成统一公认的湿地分类系统。

最早的湿地分类开始于1900年左右对欧洲和北美泥炭地的分类。从20世纪初到现在,不同国家和地区根据他们的研究实际提出了各自不同的湿地分类系统。50年代初,美国鱼和野生动物管理局对湿地进行了一次调查和分类,结果发表于《39号通告》上,

该分类把湿地划分为四大类：内陆淡水湿地、内陆咸水湿地、海岸淡水湿地、海岸咸水湿地。在每一类中，按水深和淹水频率增加的顺序，再划分为 20 个湿地类型。这个湿地分类系统在 1979 年之前，在美国得到广泛应用。此后 Cowardin 等（1979）提出了成因分类体系，采用系统、亚系统、类、亚类、主体型、特殊体六级体系将美国湿地分为 5 个系统 [滨海湿地 (marine)、河口湿地 (estuarine)、河流湿地 (riverine)、湖泊湿地 (lacustrine)、沼泽湿地 (palustrine)]、10 个亚系统和 55 个类。Brinson (1993) 提出了水文地貌分类法。目前美国是对湿地分类体系研究最深入也最为完整的国家。

加拿大国家湿地工作组 1987 年召开了湿地分类专题会议，提出了加拿大类、型、体三级分类系统，首先根据湿地生态系统的成因分为 5 类（藓类沼泽 bog；草本泥炭沼泽 fen；河、湖滨湿地或腐泥沼泽 marsh；森林泥炭沼泽或湿地 swamp；浅水湿地 shallow water），再根据湿地地表形态、模式、水源补给类型和土壤性状又分为 70 个湿地型，然后根据植被外貌再细分为更多的基本类型（体）。澳大利亚对湿地分类也进行了较多的研究，主要有北部的湿地植物和地理学分类系统、南部的湿地植被分类系统，另外还有 Mills 和 Norman 的假分级、Kirlpatrick 湿地分类系统等。

近年来，随着我国湿地研究的深入，我国学者亦开始研究湿地分类，湿地分类思想也呈现出多元化的趋势。传统上根据水源补给、地貌类型、水动力条件和优势生物种群的不同类型，将海岸带滩涂湿地划分为潮上带湿地、潮间带湿地、潮下带湿地 3 类和 12 个湿地自然与人工综合体。陆健健在《中国湿地》中按照《湿地公约》确定的湿地定义，将中国湿地分为 22 种类型，并在《中国滨海湿地分类》一文中，将海平面 6 m 至大潮高潮位之上与外流江河流域相连的微咸水和淡水湖泊、沼泽以及相应的河段间的区域分为潮上带淡水湿地、潮间带滩涂湿地、潮下带近海湿地、河口沙洲离岛湿地 4 个子系统及若干型，并对各个子系统和型进行了界定。易朝路等（1998）在开展江汉—洞庭湖平原湖泊调查中就曾进行了湿地分类和制图工作，分类原则主要有两条：一条是分类系统必须反映湿地的本质特征，另一条是分类系统要保证分类单元能从遥感图像上分辨出来。陈建伟等（1995）提出针对实施湿地调查工作的 6 种湿地类型，分别是沼泽湿地、河流草丛湿地、湖边浅水水生植物湿地、红树林湿地、盐碱滩涂湿地、浅海滩涂湿地。2000 年国家林业局颁布的《中国湿地保护行动计划》中，将湿地分为 5 种类型，即人工湿地、沼泽湿地、河流湿地、湖泊湿地、浅海滩涂湿地。刘红玉等（1995）在研究湿地景观生态制图分类原则的基础上，对三江平原湿地建立了一套完整的景观生态制图分类系统：第一级按人类活动影响程度划分为：自然湿地景观、半自然湿地景观、人工湿地景观；第二级按地貌划分为：河漫滩、阶地、湖滨、洼地、谷地；第三级对沼泽湿地植被 25 种类型进行模糊聚类归并，得出不同比例尺的地图制图景观类型。另外，黄桂林等（2000）对辽河三角洲湿地作了四级分类系统、刘红玉等（2000）对辽河三角洲作了三级分类系统以及陈建伟等（1995）的中国湿地分类系统等。总的来说，目前还没有形成既能与《湿地公约》接轨，又符合我国国情的湿地分类系统。

黄河三角洲湿地分类系统所遵循的分类原则如下所述。

1) 湿地分类的结构是分级式的。由大到小，一些主要层次应符合《湿地公约》建议采用的湿地分类系统，并与现有全国湿地调查与监测中采用的湿地分类体系相结合。

- 2) 要包括所有主要湿地类型, 适合各湿地类型的实际情况。
- 3) 要具有方法上的可操作性和实用性, 各类型可以通过人工判读法和专家判断法。
- 4) 由于是大尺度范围内的湿地分类, 各类型可以进行粗放分类, 但不宜偏离过大。
- 5) 着重整合湿地所在区域的地形地貌、湿度带、水分带、土壤以及植被等属性数据。

在《湿地公约》中的湿地分类系统的基础上, 借鉴国内外研究成果, 结合黄河三角洲湿地景观的自身特点, 提出了黄河三角洲湿地分类系统。该系统共分为三级。第一级根据成因的自然属性将湿地分为天然湿地和人工湿地两大类。第二级根据土地覆被的不同分为水库、坑塘水面、人工水渠、养殖水面、盐田、上农下渔、裸滩涂、河流、草甸湿地、沼泽湿地和灌草丛湿地 11 类。第三级根据典型湿地植被类型分为 12 类。黄河三角洲湿地分类系统见表 1-1。

表 1-1 黄河三角洲湿地分类系统

一级分类	二级分类	三级分类
人工湿地	水库	
	坑塘水面	
	人工水渠	
	养殖水面	
	盐田	
	上农下渔	
天然湿地	裸滩涂	
	河流	
	草甸湿地	芦苇草甸 翅碱蓬草甸
	沼泽湿地	芦苇沼泽
	灌草丛湿地	怪柳灌草丛
非湿地	农田	
	林地	
	居民点	
	公路	
	未利用地	

制定黄河三角洲湿地分类体系时, 要根据黄河三角洲的形成特点和变化规律, 既能充分反映湿地本质特征, 还要便于湿地资源的调查和管理。目前湿地遥感调查手段已经得到广泛应用, 制定的湿地分类系统也要保证基本分类单元能从遥感图像上分辨出来, 只要能够从遥感照片上分辨出的最小湿地单元, 原则上就可以作为一个类型。

1.3 黄河三角洲湿地面临的生态环境问题

由于黄河三角洲湿地淡水补给水源严重缺乏和区域城市化发展及农业开发所带来的土

地围垦行为影响,目前黄河三角洲湿地萎缩和生态功能破坏问题极为严重,出现了淡水湿地面积快速萎缩、生态构架体系改变和功能退化问题。具体表现为湿地在三角洲土地面积中的比例持续和快速减小,以湿生沼泽植物带、挺水植物带和浮叶及沉水植物带为代表的淡水湿地生态结构与功能受到侵害,淡水水生维管束植被被盐生和人工耕作植被所替代,淡水湿地景观逐渐演变为耕地和盐沼湿地,产生了河口水盐水平衡及生态系统格局与发育演替破坏、河口湿地面积和生态功能萎缩、湿地生物量和生物多样性水平下降、鸟类栖息环境恶化等一系列问题,河口生态结构与演替出现了逆向发展的危险局面,湿地乃至河口生态安全受到严重威胁。

目前黄河三角洲湿地生态系统所面临最为严重的生态环境问题主要包括以下几个方面。

(1) 湿地退化、面积萎缩

根据遥感卫星图片调查资料,黄河三角洲在20世纪80年代中期前,陆域湿地面积达到400余万公顷,长期以来土地格局的变化主要是盐碱地向耕地演变,其淡水湿地受城市化发展和黄河缺水的影响并不十分突出,淡水湿地面积长期稳定在200万 hm^2 左右,其中水生植被面积达到160万 hm^2 ,有20余万 hm^2 的淡水湿地由黄河直接补水,河口湿地生态功能长期处于危害影响的基线以下,其功能属于良好等级的范畴。而进入90年代以后,黄河三角洲陆域湿地萎缩现象加剧,淡水湿地向盐沼湿地逆向演替的速率加快,至21世纪初,三角洲陆域湿地总面积已减少为260万 hm^2 ,淡水湿地的水生植被面积大规模萎缩、生物量减少,淡水湿地面积减少100万 hm^2 左右,水生植被面积下降48万 hm^2 。在河口区具备依靠黄河水直接补给条件的陆域淡水湿地面积7.9万 hm^2 (水生植被面积3.3万 hm^2),单位生物量水平减少40%左右,对河口三角洲的稳定构成威胁。

另据最新的研究表明,由于受渤海湾海洋动力等因素的影响,黄河三角洲北部沿岸的蚀退面积从1996年开始已大于黄河入海口新增土地面积。据山东省地质矿产勘查开发局测算,1996年以来黄河三角洲正以每年平均7.6 km^2 的速率在蚀退,并且呈恶化趋势;至2004年,累计减少陆地面积68.2 km^2 。三角洲地区的滨海湿地生态系统受到严重损害。虽然黄河三角洲自然保护区的建立和发展对盐碱化湿地的保护发挥了巨大作用,但并不能遏制整个三角洲盐碱化湿地退化的趋势。据统计,黄河三角洲在20世纪50年代初期,柽柳与芦苇面积曾达2000 km^2 ,而目前仅剩324.48 km^2 ,还有继续减少的趋势。

(2) 湿地盐碱化趋势加重

黄河三角洲位于滨海湿润-半湿润海水浸渍盐渍区渤海氯化物盐渍土片,属于现代积盐过程。土壤盐渍过程先于成土过程,是在盐渍淤泥的基础上逐渐成陆发育而成。陆地形成以后又受到海水经常性的淹没和侧向侵渍,在强烈的蒸发积盐作用下形成高矿化度的滨海盐渍土。随着陆地形成过程的进一步发展和自然植被的繁衍,土壤形成过程加强,积盐过程减弱,逐渐演化为各种草甸盐土。因此,黄河三角洲原生土壤盐渍化现象非常普遍。黄河三角洲地区主要利用黄河水发展灌溉农业。地势低平造成排水不畅,再加上黄河水侧渗和海水浸润顶托,导致该地区次生土壤盐碱化现象也非常严重。

据统计,在1985~2004年,湿地退化为盐碱地的面积由1985年的4.93亿 m^2 增加为

2004年的6.31亿 m^2 ，增加了7.9%。盐碱化湿地已成为黄河三角洲湿地退化面积最大、最具代表性、同时亦是最难恢复的湿地类型，并且正在不断加剧恶化。

(3) 湿地植被退化、生物多样性降低

芦苇、怪柳、杞柳、翅碱蓬等草本和灌丛植被在黄河三角洲滨海及淡水湿地广泛分布，是构成黄河三角洲湿地生态系统的重要组成成分，但自20世纪60年代以来的毁林开垦，使杞柳、怪柳等灌丛面积减少了75%。黄河三角洲天然草甸湿地约有18.5万 hm^2 ，现因滩涂开发、水产养殖、人工水库和道路建设以及毁草种粮，天然草地面积减少了15%以上。

第2章 黄河三角洲湿地景观格局变化及其驱动因素

湿地景观格局及其动态变化是湿地生态研究的热点，在“3S”基础上以数量分析方法研究湿地景观格局的空间特征与变化过程是最常用的研究方法。土地利用与土地覆盖变化对湿地景观的结构和功能产生深刻的影响。采用定量分析的方法研究景观格局在土地利用方面的时空演变，揭示景观格局的演变趋势及其内在机制，进而实现该地区景观生态系统的良性循环和可持续发展，可为湿地生态恢复工程提供理论指导和技术支持。

认识景观格局与复杂生态过程之间的内在机制、准确预测景观变化及其后果，以及实现景观格局和生态过程优化途径，景观模型是解决这些问题的重要途径。近年来，景观格局优化更多地考虑景观要素的空间分布、数量配置，概念模型、数学模型等传统生态过程模拟方法难以实现景观格局优化多目标要求。而GIS技术可以实现景观要素空间化和生态过程在空间上模拟。例如，Holzkamper等（2007）提出LUPolib景观格局优化方法，通过语言程序实现生态过程模拟，改变景观斑块的拓扑关系优化景观的空间状况，实现生态过程和景观空间格局优化的统一。Saroinsong等（2007）综合土壤侵蚀风险、土地适宜性和经济现状三个方面的信息，采用土地资源信息系统对农业景观格局优化。Seppelt等（2000）也对农业土地景观格局与营养盐流失进行模拟，提出格局优化途径。Quine等（2009）应用最小网络耗费评价破碎化林地生态恢复效果和不同格局优化方案对景观连通性的影响；Moilanen（2007）将景观区域、功能优化和目标规划三者统一于选择保护策略，而优化景观格局和功能也是一种选择保护途径。以上研究为景观格局优化提供了新的思路和方法，能够从空间上反映景观的空间差异和变化规律，有利于对空间格局和复杂生态过程的理解，但对景观格局优化的效果和对生态过程的影响缺乏评价。

2.1 景观格局研究概述

格局（pattern）一词应用非常广泛，在各个领域均有体现，如地理学、地质学、生态学、市场经济学等，其主要表达了研究对象在空间和时间范围内的分布、配置关系和对比状况。格局既是静态概念，也表现出动态的特征，分析各个时段某景观的分布格局，就可以得出它的变化轨迹。

景观格局一般是景观元素斑块和其他结构成分的类型、数量以及空间分布与配置模式，包括景观的空间特征（如景观组分的大小、形状及结构等）和非空间特征（如景观元素的类型、面积、比例等）两部分。景观格局研究的目的是剖析异质地表不同景观组分的组成情况和构建特点，总结景观异质性的内在规律，从表面上无序的景观中发现潜在