

HUANGHE SANJIAOZHOU  
ZAOZHI FEISHUI GUANGAI XIUFU SHIDI JISHU

# 黄河三角洲 造纸废水灌溉修复湿地技术

田家怡 李甲亮 孙景宽 等著



化学工业出版社

 HUANGHE SANJIAOZHOU  
ZAOZHI FEISHUI GUANGAI XIUFU SHIDI JISHU

# 黄河三角洲 造纸废水灌溉修复湿地技术

田家怡 李甲亮 孙景宽 等著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书采用造纸废水对芦苇种子萌发和幼苗生长的一系列室内胁迫试验方法,探讨了芦苇对造纸废水的抗性及其机制;采用造纸废水灌溉盐碱类芦苇湿地田间试验方法,研究了芦苇湿地对造纸废水的净化效果和脱盐效果,探讨了造纸废水灌溉处理后芦苇湿地主要离子的迁移变化,总氮、总磷、土壤有机质、生物活性、微生物、湿地酶、植物多样性、生物量等的动态变化以及芦苇湿地生态修复的过程和机理。在此基础上,提出了造纸废水灌溉修复盐碱类芦苇湿地生态工程工艺设计和生态产业化循环经济模式。

本书可供农业、环保、造纸行业的科研人员以及经济和国土资源等政府决策部门、科研单位、大中专院校的有关人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

黄河三角洲造纸废水灌溉修复湿地技术/田家怡, 李甲亮, 孙景宽等著. —北京: 化学工业出版社, 2010.12

ISBN 978-7-122-10114-3

I. 黄… II. ①田…②李…③孙… III. ①黄河-三角洲-造纸工业-废水综合利用②黄河-三角洲-灌溉-沼泽化地 IV. ①X793.03②P942.520.78

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 241857 号

---

责任编辑: 郎红旗 李姿娇

装帧设计: 周 遥

责任校对: 顾淑云

---

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张12 字数296千字 2010年12月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 45.00 元

版权所有 违者必究

# 《黄河三角洲造纸废水灌溉修复湿地技术》

## 编写人员名单

田家怡 李甲亮 孙景宽 谢文军 陆兆华

周志峰 张立波 杨红军 陈印平 李 玲

# 前 言

湿地生态恢复,是通过生态技术、生态工程对退化或消失的湿地进行修复、重建,再现干扰前的结构和功能,以及相关的物理、化学和生物学特性,使其发挥应有的作用。湿地生态修复和重建已成为 21 世纪国际湿地科学研究的热点和前沿之一。山东省现有盐碱地 21.77 万公顷,其中黄河三角洲地区占 82.9%。盐碱类湿地在山东滨海广泛分布,黄河三角洲地区现有 15 万公顷,占湿地总面积的 20%,因此盐碱类湿地生态修复成为发展黄河三角洲高效生态经济、打造山东半岛蓝色经济区和山东生态省建设的重要任务之一。为此,山东省环境保护局于 2006 年将“盐碱类湿地生态修复技术与示范”研究项目向全社会公开招标。经山东省环境保护局科顾委专家评审,滨州学院投标的该研究项目一举中标。2006 年 8 月 1 日,山东省环境保护局以《关于下达二〇〇六年山东省环境保护重点科技项目(第一批)的通知》(鲁环发[2006]184 号)形式正式下达该研究项目。2006 年 9 月 15 日,滨州学院与山东省环境保护局正式签订了该项目的科技合同书,项目编号为[2006]006-2。

该项目的研究内容为:根据山东省盐碱类湿地生态环境现状,在综合国内外盐碱类湿地退化机理和修复技术研究进展的基础上,结合黄河三角洲沾化、无棣等县拥有大量滨海盐碱类湿地的实际,按照循环经济“3R”原理,坚持技术研究和工程示范相结合,通过现场实验和室内模拟实验,廓清盐碱类湿地的生态修复过程和机理,研究可行的滨海盐碱类湿地生态修复技术路线和参数,建成生态修复工程并示范,提出发展“芦苇造纸—废水灌溉芦苇—芦苇造纸”生态产业化模式,促进生态纸业产业园的形成和发展,实现滨海盐碱类湿地的生态修复。重点研究内容为:资源化利用造纸废水修复退化盐碱类芦苇湿地关键技术与工程;盐碱类湿地生态产业化循环经济模式及示范。

该研究自 2006 年 10 月始至 2009 年 12 月止,历时三年多时间。该研究采用造纸废水对芦苇种子萌发和幼苗生长的一系列室内胁迫试验方法,探讨了芦苇对造纸废水的抗性及其机制。采用造纸废水灌溉盐碱类芦苇湿地田间试验方法,研究了芦苇湿地对造纸废水的净化效果和脱盐效果,探讨了造纸废水灌溉处理后芦苇湿地主要离子的迁移变化、总氮与总磷的动态变化和土壤有机质、生物活性、微生物、湿地酶、根际代谢物、植物多样性、生物量等的动态变化以及芦苇湿地生态修复的过程和机理,为造纸废水灌溉修复盐碱类芦苇湿地生态工程设计 and 建设提供了理论和试验依据。运用生态学、恢复生态学、生态工程学原理,结合系统工程的优化方法,设计了造纸废水梯级连续式灌溉、间歇式自然灌溉修复芦苇湿地生态工程的关键技术参数,研究了盐碱类湿地生态修复的工程技术,建成了 133.33hm<sup>2</sup> 生态修复示范工程,并重点研究了示范工程对造纸废水色度、悬浮物、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、总氮、总磷等的处理效果,土壤的脱盐效果,生态修复对土壤的改良效果以及芦苇光合特性和生物量的变化,为盐碱类芦苇湿地生态修复提供了成功的工程范例。研究提出并践行了“芦苇造纸—废水灌溉芦苇—芦苇造纸”的盐碱类湿地生态产业化循环经济模式,取得了显著的生态效益、经济效益和社会效益,可供山东乃至全国同类盐碱化湿地生态修复借鉴。

该研究得到山东省环境保护厅的组织领导和大力支持，滨州市和沾化县环境保护局、滨州市环境保护监测站给予积极帮助，滨州市环境保护局李锋副局长做了大量组织、协调工作，王福花、周桂芬、韩秀芬高级工程师帮助分析测定了大批水质、土壤和植物样品，在此一并表示衷心的感谢！

2009年11月23日，国务院正式批复了《黄河三角洲高效生态经济区发展规划》，标志着我国三大江河三角洲之一的黄河三角洲地区的发展上升为国家战略，成为国家区域协调发展战略的重要组成部分。作为全国第一个以高效生态为主题的经济区，必须突出高效生态特色，走高效、集约、低碳、环保、可持续发展的生态发展之路。该项目于2009年12月31日在济南通过了山东省科学技术厅组织的专家鉴定，专家给予了很高的评价。该研究成果可为黄河三角洲高效生态经济区盐碱类湿地生态修复和造纸行业发展循环经济提供很好的借鉴和经验，并对全国沿海盐碱类湿地生态修复具有指导意义。为此，根据专家提出的建议，我们经过8个多月的精心整理和加工修改，最终形成了本书书稿。由于水平所限，不足之处在所难免，敬请批评指正。

作 者  
2010年9月

# 目 录

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| <b>第一章 概况</b> .....                  | 1  |
| 第一节 黄河三角洲概况.....                     | 1  |
| 一、黄河三角洲的形成与演变.....                   | 1  |
| 二、黄河三角洲的经济地理界定.....                  | 2  |
| 三、黄河三角洲的比较优势和劣势.....                 | 4  |
| 第二节 黄河三角洲湿地及其研究概况.....               | 5  |
| 一、黄河三角洲湿地类型.....                     | 5  |
| 二、黄河三角洲湿地分布.....                     | 5  |
| 三、黄河三角洲湿地研究概述.....                   | 6  |
| 第三节 黄河三角洲盐碱类湿地概况 .....               | 16 |
| 一、黄河三角洲盐碱地面积与分布 .....                | 16 |
| 二、黄河三角洲盐碱类湿地的特征与退化原因 .....           | 16 |
| 第四节 盐碱类湿地生态修复研究概况 .....              | 18 |
| 一、生态系统恢复研究概述 .....                   | 18 |
| 二、湿地生态恢复研究概述 .....                   | 19 |
| 三、人工湿地处理污水研究概述 .....                 | 20 |
| 四、人工湿地微生物研究进展 .....                  | 26 |
| 五、人工湿地基质酶研究进展 .....                  | 29 |
| 六、湿地基质代谢产物研究进展 .....                 | 30 |
| 七、人工芦苇湿地处理造纸废水研究概述 .....             | 33 |
| 第五节 造纸废水灌溉修复盐碱类湿地项目概述 .....          | 33 |
| 一、项目来源 .....                         | 33 |
| 二、主要研究内容 .....                       | 34 |
| 三、技术路线 .....                         | 34 |
| 四、研究方法 .....                         | 35 |
| <b>第二章 造纸废水对芦苇胁迫的室内试验</b> .....      | 36 |
| 第一节 造纸废水对芦苇种子萌发影响的试验 .....           | 36 |
| 一、试验方法 .....                         | 36 |
| 二、试验结果与分析 .....                      | 37 |
| 三、小结 .....                           | 39 |
| 第二节 造纸废水对芦苇胁迫的试验 .....               | 40 |
| 一、造纸废水对芦苇光合特性及资源利用效率影响的试验 .....      | 40 |
| 二、造纸废水对芦苇生长特性和根系活力影响的试验 .....        | 43 |
| 三、造纸废水对芦苇保护酶和叶绿素荧光影响的试验 .....        | 46 |
| <b>第三章 造纸废水灌溉修复盐碱类芦苇湿地田间试验</b> ..... | 50 |
| 第一节 试验区和造纸企业概况 .....                 | 50 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 一、试验区概况 .....                       | 50  |
| 二、造纸企业概况 .....                      | 50  |
| 第二节 造纸废水灌溉修复盐碱类芦苇湿地田间试验设计与方法 .....  | 51  |
| 一、试验设计 .....                        | 51  |
| 二、试验方法 .....                        | 52  |
| 第三节 芦苇湿地对造纸废水的净化效果 .....            | 53  |
| 一、TS、VS 去除效果 .....                  | 53  |
| 二、COD <sub>Cr</sub> 去除效果 .....      | 54  |
| 三、BOD <sub>5</sub> 去除效果 .....       | 55  |
| 四、总氮、总磷去除效果 .....                   | 56  |
| 五、氯离子去除效果 .....                     | 57  |
| 六、硫酸根离子去除效果 .....                   | 58  |
| 七、小结 .....                          | 59  |
| 第四节 造纸废水灌溉盐碱类芦苇湿地土壤脱盐效果 .....       | 60  |
| 一、试验前芦苇湿地土壤与芦苇盐分本底值 .....           | 60  |
| 二、造纸废水不同灌溉方式对芦苇湿地土壤盐分的洗脱效果 .....    | 60  |
| 三、造纸废水灌溉芦苇湿地土壤盐分的垂直分布 .....         | 64  |
| 四、造纸废水灌溉芦苇体内氯离子的迁移变化 .....          | 66  |
| 五、造纸废水灌溉芦苇体内钠离子的迁移变化 .....          | 70  |
| 六、小结 .....                          | 75  |
| 第五节 造纸废水灌溉芦苇湿地主要离子的迁移变化 .....       | 76  |
| 一、锌离子、锰离子的迁移变化 .....                | 76  |
| 二、铜离子、铬离子的迁移变化 .....                | 80  |
| 三、钙离子、镁离子、钾离子的迁移变化 .....            | 83  |
| 四、硫酸根离子的迁移变化 .....                  | 92  |
| 五、小结 .....                          | 94  |
| 第六节 造纸废水灌溉芦苇湿地氮、磷的动态变化 .....        | 94  |
| 一、土壤氮、磷的动态变化 .....                  | 95  |
| 二、芦苇氮、磷的动态变化 .....                  | 97  |
| 三、湿地内氮、磷物质平衡分析 .....                | 101 |
| 四、小结 .....                          | 102 |
| 第七节 造纸废水灌溉芦苇湿地土壤有机质和生物活性的动态变化 ..... | 102 |
| 一、土壤有机质的变化 .....                    | 102 |
| 二、土壤生物活性的变化 .....                   | 103 |
| 三、小结 .....                          | 106 |
| 第八节 造纸废水灌溉芦苇湿地土壤微生物数量的动态变化 .....    | 107 |
| 一、土壤微生物本底值 .....                    | 107 |
| 二、造纸废水灌溉芦苇湿地土壤微生物数量的动态变化 .....      | 107 |
| 三、微生物与污染物去除相关性分析 .....              | 110 |
| 四、小结 .....                          | 112 |
| 第九节 造纸废水灌溉芦苇湿地土壤酶活性的动态变化 .....      | 112 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 一、脱氢酶活性的动态变化                  | 112 |
| 二、磷酸酶活性的动态变化                  | 113 |
| 三、纤维素酶活性的动态变化                 | 114 |
| 四、蔗糖酶活性的动态变化                  | 114 |
| 五、脲酶活性的动态变化                   | 115 |
| 六、芦苇湿地土壤酶的垂直分布                | 116 |
| 七、湿地土壤酶活性与造纸废水污染物去除率的相关性分析    | 117 |
| 八、基于湿地酶的造纸废水不同灌溉处理工艺综合评价      | 119 |
| 九、小结                          | 119 |
| 第十节 造纸废水灌溉对芦苇湿地根际代谢物的影响       | 120 |
| 一、有机酸(氨基酸)标样的色谱图              | 120 |
| 二、风干土壤样品中有机酸及 Pro 的液相色谱分析     | 121 |
| 三、湿地土壤提取液内 Pro 的定性定量分析        | 124 |
| 四、小结                          | 129 |
| 第十一节 造纸废水灌溉盐碱类湿地对植物多样性和生物量的影响 | 130 |
| 一、造纸废水灌溉对湿地植物种类和生物量的影响        | 130 |
| 二、造纸废水灌溉芦苇湿地对植物多样性的影响         | 132 |
| 三、造纸废水灌溉对芦苇生长与生物量的影响          | 132 |
| 四、小结                          | 135 |
| 第四章 造纸废水灌溉修复盐碱类芦苇湿地生态工程与示范    | 137 |
| 第一节 生态工程理论与设计                 | 137 |
| 一、生态工程理论                      | 137 |
| 二、造纸废水灌溉修复盐碱类芦苇湿地生态工程规划与设计程序  | 137 |
| 三、造纸废水灌溉修复盐碱类芦苇湿地生态工程设计       | 137 |
| 第二节 造纸废水灌溉修复盐碱类芦苇湿地生态工程与示范    | 141 |
| 一、分析测试与评价方法                   | 141 |
| 二、芦苇湿地生态修复工程对造纸废水的处理效果        | 142 |
| 三、芦苇湿地生态修复工程土壤脱盐效果            | 145 |
| 四、芦苇湿地生态修复工程土壤总有机碳和呼吸强度的变化    | 147 |
| 五、芦苇湿地生态修复工程土壤总氮、总磷的变化        | 148 |
| 六、芦苇湿地生态修复工程芦苇光合特性及生物量的变化     | 150 |
| 七、芦苇湿地生态修复工程经济和生态效益分析         | 153 |
| 八、造纸废水灌溉盐碱类芦苇湿地生态修复效果评价       | 153 |
| 九、小结                          | 155 |
| 第五章 盐碱类湿地生态纸业产业化循环经济发展模式      | 158 |
| 第一节 循环经济理论与原则                 | 158 |
| 一、循环经济理论基础                    | 158 |
| 二、循环经济与传统经济的比较                | 158 |
| 第二节 盐碱类湿地生态纸业产业化循环经济发展模式构建    | 158 |
| 一、生态纸业循环经济发展模式                | 159 |
| 二、盐碱类湿地生态纸业产业化循环经济发展模式构建      | 161 |

**第六章 结论**..... 165

    一、造纸废水灌溉对芦苇胁迫影响的室内试验..... 165

    二、造纸废水灌溉修复盐碱类芦苇湿地田间试验..... 165

    三、造纸废水灌溉修复盐碱类芦苇湿地生态工程与示范效果..... 167

    四、湿地生态纸业产业化循环经济发展模式的构建..... 169

**参考文献**..... 170

# 第一章 概 况

## 第一节 黄河三角洲概况

### 一、黄河三角洲的形成与演变

黄河三角洲是我国三大江河三角洲之一。黄河三角洲按形成年代可分为古代黄河三角洲、近代黄河三角洲和现代黄河三角洲。

#### 1. 古代黄河三角洲

据考证，黄河现代水系形式出现于距今 130 万~110 万年的全新世初，定型于 8 万~1 万年前。在悠久的历史时期，黄河决口改道频繁，迁徙无定。西起太行山下和颍河之滨，东达泰山之麓，北至天津，南迄淮河，都曾为黄河摆动和泛滥波及的地区，并与淮河等河流的

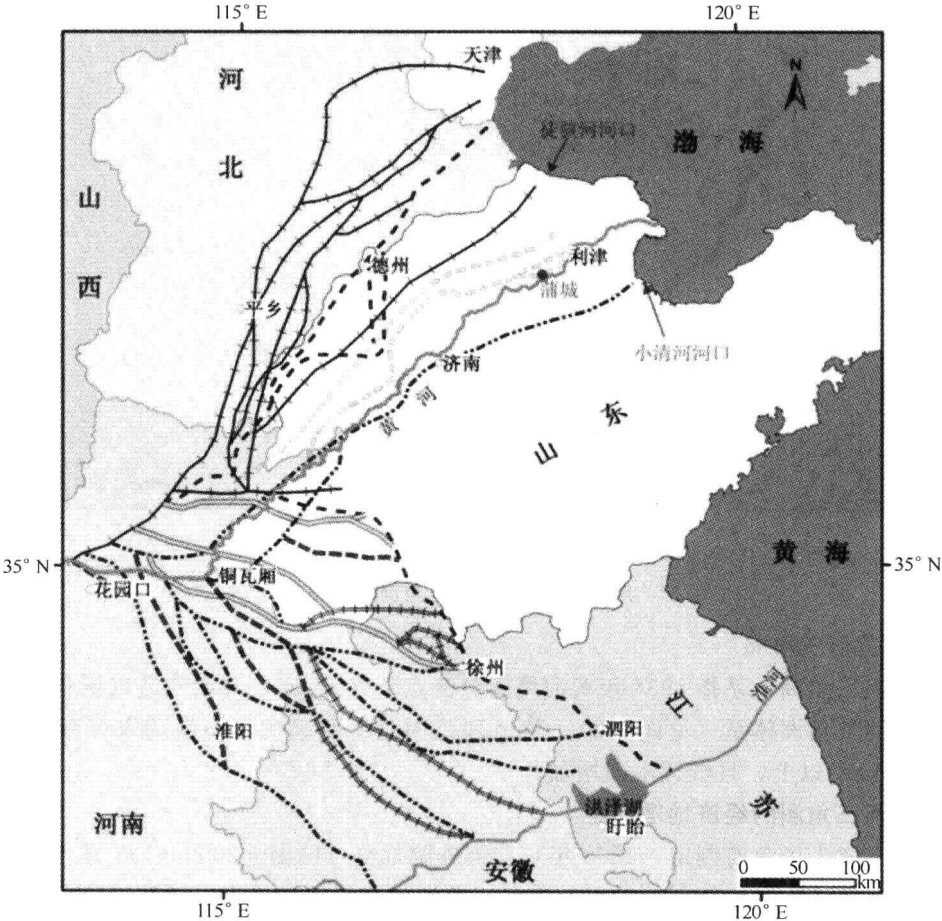


图 1-1 黄河近 3000 年来河道变迁示意图

—— 公元前 602 年    ..... 1048~1127 年    - - - 1391~1546 年  
- - - 公元前 602~公元 11 年    ===== 1127~1234 年    + + + + 1546~1854 年  
..... 11~1048 年    - - - - - 1234~1391 年    ——— 河流

冲积扇连成一片，逐渐形成了华北大平原。

古代黄河三角洲，系指黄河自远古至 1855 年（清咸丰 5 年）改道山东大清河入海之前，多次变迁中冲积而成的诸多三角洲的统称（见图 1-1）。其地理范围是：以河南省巩县为顶点，北至天津、南至徐淮的黄河冲泛地区（田家怡等，1999）。

2. 近代黄河三角洲

近代黄河三角洲，系指 1855 年（清咸丰 5 年）黄河于河南铜瓦厢决口，废弃徐淮流路，北夺山东大清河入海后冲积而成的黄河三角洲（见图 1-2）。其地理范围是：以垦利县宁海为顶点，北起套儿河口，南至支脉河的扇形淤积地区。土地总面积为 5400km<sup>2</sup>。

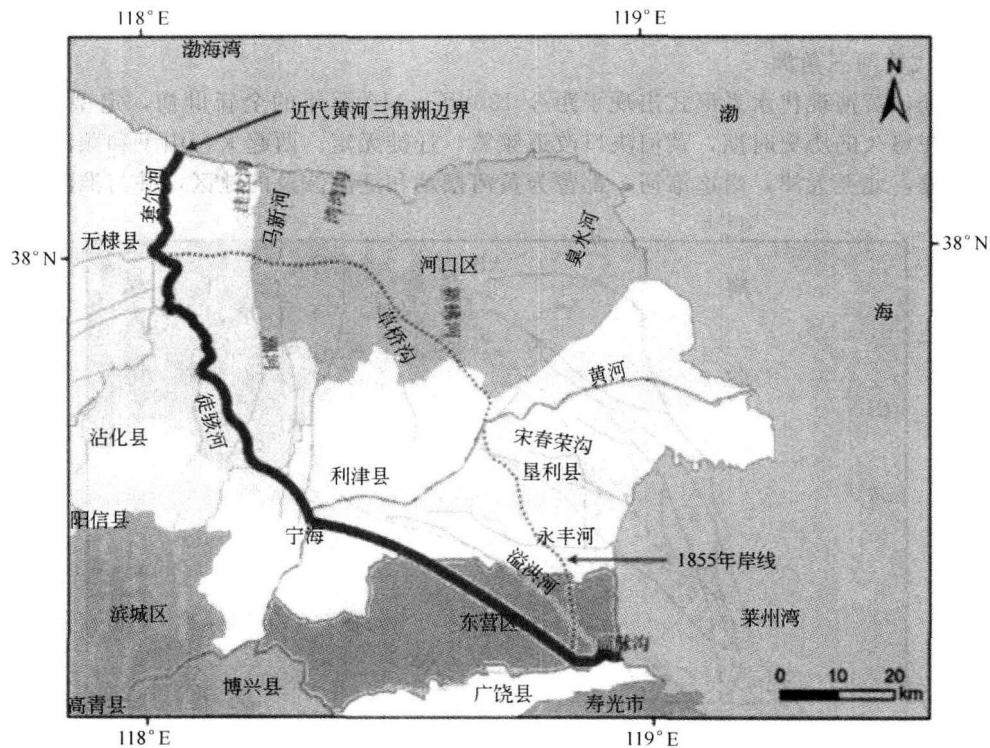


图 1-2 近代黄河三角洲示意图

3. 现代黄河三角洲

现代黄河三角洲，系指 1934 年黄河尾间分流点下移 26km，开始建造以垦利县渔洼为顶点的现代黄河三角洲体系（见图 1-3）。其地理范围是：西起挑河，南达宋春荣沟。土地面积已达 2200km<sup>2</sup> 以上，且继续不断增加。

二、黄河三角洲的经济地理界定

按照山东省人民政府制定（2008 年）和国务院批复（国函 [2009] 138 号）的《黄河三角洲高效生态经济区发展规划》对目前黄河三角洲的经济地理界定，黄河三角洲位于山东省西北部，地处山东半岛与辽东半岛的渤海南岸中心地带，地域范围包括：东营市和滨州市两市的全部，以及与其相毗邻、自然环境条件相似的潍坊北部寒亭区、寿光市、昌邑市，德州乐陵市、庆云县，淄博高青县和烟台莱州市（见图 1-4）。其涉及 6 个设区市的 19 个县（市、区），总面积 2.65 万平方公里，约占山东省总面积的 1/6。

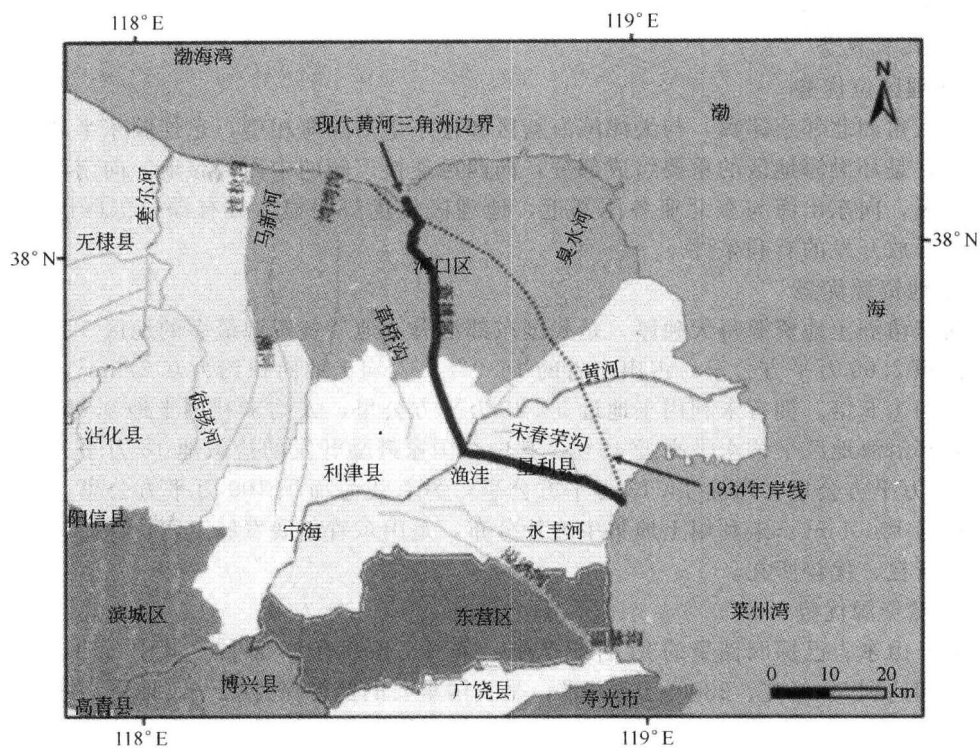


图 1-3 现代黄河三角洲示意图

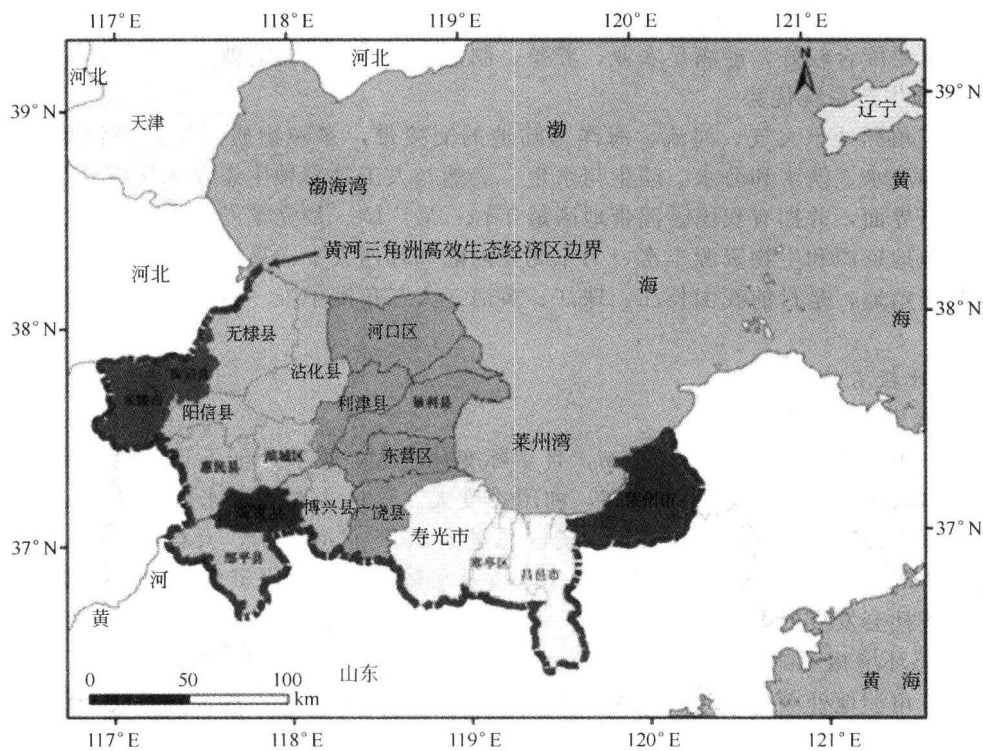


图 1-4 黄河三角洲高效生态经济区示意图

### 三、黄河三角洲的比较优势和劣势

#### (一) 比较优势

##### 1. 地理区位优势

黄河三角洲北邻京津冀,与天津滨海新区和辽东半岛隔海相望,东连胶东半岛,南靠济南都市圈,是环渤海地区的重要组成部分,向西可连接广阔的中西部腹地,向南可通达长江三角洲北翼,向东出海与东北亚各国邻近,地理区位优势明显,具有深化国际国内区域合作、加快开放开发的有利条件。

##### 2. 土地资源优势

黄河三角洲土地资源得天独厚,是我国东部沿海土地后备资源最多的地区。目前,该区土地总面积 2.65 万平方公里,占山东省的 16.9%。人均土地面积约为  $0.27\text{hm}^2$ ,是山东省平均水平的 1.6 倍。拥有未利用土地近 53.33 万平方公里,人均未利用土地  $0.05\text{hm}^2$  以上,比我国东部沿海地区平均水平高近 45%。其中,国家鼓励开发的盐碱地 18 万平方公里,荒草地 9.87 万平方公里,滩涂 14.13 万平方公里,另有浅海面积 100 万平方公里,黄河冲积年均新造地  $1000\text{hm}^2$ 。未利用土地集中连片分布,是山东省拓展发展空间,保持持续健康发展的潜力所在、优势所在。

##### 3. 自然资源优势

目前,山东省已探明储量的 81 种矿产中,黄河三角洲有 40 多种,其中石油、天然气地质储量分别达到 50 亿吨、2300 亿立方米,是我国重要的能源基地之一。地下卤水静态储量约 135 亿立方米,岩盐储量 5900 亿吨,是我国最大的海盐和盐化工基地。黄河三角洲海岸线长近 900km,约占山东省的 28%,是重要的海洋渔业基地。风能、地热等资源丰富,具有转化为经济优势的巨大潜力。该区域光、热资源比较丰富,全年日照时数 2750h,日照百分率达 62%,属北方长日照地区。年平均总辐射量为  $123\sim 130\text{kcal}\cdot\text{cm}^{-2}\text{●}$ ,光、热资源与农作物需要配合较好,能满足农业、养殖、制盐等多种生产的需要。

##### 4. 湿地生态系统优势

黄河三角洲处于大气、河流、海洋与陆地的交接带,多种物质交汇,多种动力系统交融,陆地和淡水、淡水和海水、陆生与水生、天然与人工等多种生态系统交错分布,是典型的多重生态界面,并拥有我国暖温带地区最年轻、最广阔、最完整的湿地生态系统,生态类型独特。湿地资源和生物资源丰富,为东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙重要的“中转站”、越冬地和繁殖地,是目前我国长江、珠江、黄河三大三角洲中唯一有保护价值的原始生态植被地区。

#### (二) 比较劣势

##### 1. 淡水资源相对短缺

黄河三角洲年均降水量为 577mm,且年际变化较大,季节分配不均,夏季降水量约占全年降水量的 70%。地下水含盐量高,利用难度大。该区主要客水来源为黄河,但受国家分配引水量指标限制。该区多年平均水资源总量为 29.5 亿立方米,人均  $303\text{m}^3$ ,比全省人均水平低  $41\text{m}^3$ ,约为全国平均水平的 1/8,属淡水贫乏地区。水资源短缺是长期制约黄河三角洲经济社会发展的因素。

##### 2. 生态环境相对脆弱

黄河三角洲地处渤海湾与莱州湾,特殊的地理位置、气候特点和生态环境条件,决定了

●  $1\text{kcal}=4.1868\text{kJ}$ ,后同。

其为我国多灾地区之一。风暴潮威胁较大，海岸蚀退明显，生态环境灾害不断显现，环境污染仍未得到有效控制。土地盐碱化程度较高，林木覆盖率低于全省平均水平。地质、地震构造背景复杂，面临潜在的安全问题。生态系统破坏严重，湿地退化速度加快，生态环境比较脆弱，生态环境治理和土地恢复整理难度较大。

此外，黄河三角洲传统农业所占比重较大，产业结构层次偏低。地方工业总量规模小，服务业发展滞后。高层次人才匮乏，劳动者素质较低。对外贸易和利用外资规模偏小，开放型经济水平不高。重大基础设施相对滞后，交通设施不够健全。经济社会与人口、资源、环境协调发展的任务繁重，发展高效生态经济面临较为严峻的挑战。

## 第二节 黄河三角洲湿地及其研究概况

### 一、黄河三角洲湿地类型

田家怡等（2005）根据黄河三角洲湿地的实际情况，借鉴 Ramsar 湿地名录分类系统，特别是《中国湿地调查纲要》中的湿地分类系统，将黄河三角洲湿地分为浅海湿地类、滩涂湿地类、河流湿地类、湖泊与水库湿地类、坑塘湿地类、水田湿地类、沟渠湿地类、沼泽和草甸湿地类、路边湿地类，共计 9 类。

### 二、黄河三角洲湿地分布

据田家怡等（2005）调查，黄河三角洲（东营市、滨州市）湿地面积达 74.66 万公顷，约占该区土地总面积的 24.45%（见表 1-1），湿地面积广大。各类湿地中，浅海湿地、滩涂湿地分居湿地总面积的前两位，分别占 41.27%、24.63%，共占湿地总面积的 65.90%。按县区统计，以东营市的河口区、滨州市的无棣县和沾化县、东营市的垦利县湿地面积分布最为集中，分别占总湿地面积的 21.68%、19.09%、19.07%和 18.95%，共占湿地总面积的 78.79%。黄河三角洲湿地的分布特点为：沿海湿地面积大于内陆，黄河两岸湿地面积大于其他区域；黄河携沙入海，使黄河每年平均向海延伸 2.2km，年均造陆 32.4km<sup>2</sup>，从而使黄河三角洲湿地成为世界上自然增长最快的湿地。

表 1-1 黄河三角洲湿地面积与分布

单位：万公顷

| 县区  | 河流湿地 | 湖泊与<br>水库湿地 | 坑塘湿地 | 水田湿地 | 沼泽和<br>草甸湿地 | 滩涂湿地  | 沟渠湿地 | 路边湿地 | 浅海湿地  | 合计    |
|-----|------|-------------|------|------|-------------|-------|------|------|-------|-------|
| 东营区 | 0.12 | 0.52        | 0.57 | 0.16 | 0.19        | 1.10  | 0.12 | 0.12 | 1.28  | 4.18  |
| 河口区 | 0.28 | 0.58        | 0.35 | 0.16 | 1.16        | 4.30  | 0.73 | 0.12 | 8.51  | 16.19 |
| 垦利县 | 0.71 | 0.52        | 0.39 | 0.87 | 0.79        | 3.27  | 1.08 | 0.14 | 6.38  | 14.15 |
| 广饶县 | 0.19 | 0.15        | 0.24 | 0    | 0.02        | 0.22  | 1.01 | 0.09 | 0.64  | 2.56  |
| 利津县 | 0.30 | 0.14        | 0.30 | 0.20 | 0.18        | 1.30  | 0.57 | 0.15 | 0     | 3.14  |
| 滨城区 | 0.15 | 0.07        | 0.13 | 0.09 | 0.18        | 0.04  | 0.69 | 0.13 | 0     | 1.48  |
| 惠民县 | 0.21 | 0.004       | 0.08 | 0    | 0.09        | 0.05  | 0.75 | 0.18 | 0     | 1.36  |
| 阳信县 | 0.01 | 0.007       | 0.02 | 0    | 0.007       | 0.005 | 0.67 | 0.08 | 0     | 0.80  |
| 无棣县 | 0.42 | 0.37        | 0.34 | 0    | 0.30        | 3.01  | 1.39 | 0.13 | 8.29  | 14.25 |
| 沾化县 | 0.51 | 0.32        | 0.94 | 0    | 0.26        | 5.01  | 1.35 | 0.14 | 5.71  | 14.24 |
| 博兴县 | 0.13 | 0.10        | 0.09 | 0.07 | 0.14        | 0.03  | 0.75 | 0.15 | 0     | 1.46  |
| 邹平县 | 0.11 | 0.06        | 0.02 | 0    | 0.03        | 0.06  | 0.41 | 0.16 | 0     | 0.85  |
| 合计  | 3.14 | 2.84        | 3.47 | 1.55 | 3.35        | 18.39 | 9.52 | 1.59 | 30.81 | 74.66 |

### 三、黄河三角洲湿地研究概述

黄河三角洲湿地是世界上最年轻、最具特色、面积自然增长最快的湿地。由于其具有海洋与河口交互性、海陆过渡性、新生性和生态脆弱性，被称为生态系统的“天然本底”和“物种基因库”，是湿地科学研究的天然实验室，引起了国内外学者的广泛关注。

#### （一）湿地资源、环境调查研究

黄河三角洲地处渤海湾和莱州湾，浅海和滩涂湿地资源与环境调查起步较早。1951年，黄海水产研究所就开始了黄河口海区渔业调查工作；1959~1960年，该所又开展了渤海主要河口附近海区的水文、化学、浮游生物、底栖生物及鱼类等调查（黄海水产研究所，1961）。1958~1959年，全国开展了首次海洋综合调查，包括黄河口海区的水文、化学、生物资源等，为以后海洋资源的开发提供了重要依据。1972~1973年，由于渤海污染的日益显现，国家卫生部组织辽宁、河北、山东、天津等四省市，对渤海近岸海域进行了历时两年的污染调查，这是我国进行的首次海洋污染调查（邹景忠，2004）。1976年，国家海洋局和辽宁、河北、天津、山东等四省市又联合进行了一次更大规模的渤海污染综合调查，基本摸清了包括黄河口附近海域在内的渤海污染现状及对海洋生物的影响；1978年，又开展了“渤海黄海污染源及其评价”研究（国家海洋局海洋监测中心等，1981）。1980~1981年，惠民地区在山东率先开展了浅海滩涂渔业自然资源调查。1983~1986年，山东省林业厅组织开展了全省鸟类资源普查工作，包括黄河三角洲地区。1984~1985年，山东省组织了海岸和海涂资源综合调查（山东省科学技术委员会，1991a、1991b）。1984~1986年，惠民地区组织了包括湿地在内的中药资源调查。1985~1997年，林育真等（1998）对孤岛周围进行了陆栖与淡水爬行动物的调查。1985~1987年，惠民地区开展了鲁北经济生物资源调查（惠民地区农业区划办公室，1990、1991）。1986~1991年，赛道建等（1992）对东营市鸟类资源进行了调查。纪加义等（1987）对黄河三角洲的珍稀野生动物作过调查。陈述彭（1989）采用卫星遥感资料，对黄河三角洲滩涂、草地、森林、水资源现状、黄河泥沙运移以及各亚三角洲的形成和地貌演化特征等进行分析研究，完成了《国土普查卫星资料应用研究：黄河三角洲地区国土资源与环境调查》著作。1990年，黄河三角洲自然保护区组织了对区内植物、动物的科学考察（赵延茂等，1995）。1990年，山东省科学技术委员会组织了山东海岛资源综合调查，包括惠民地区海岛植被与湿地生物资源的调查，出版了《山东海岛志》（1995a）、《山东海岛研究》（1995b）。1997年，国家环境保护总局会同江苏、山东、河北、天津、辽宁等六省市联合开展了渤海、黄海近岸海域环境综合调查。1999年，国家环保总局组织环渤海三省一市开展了“渤海碧海行动计划”环境专项调查。上述黄河三角洲湿地资源与环境重点调查，基本摸清了当时湿地资源和环境状况，为湿地的研究、保护和开发利用提供了科学基础资料。

#### （二）河口三角洲湿地演变动态研究

近几十年来，对黄河改道变迁、来水来沙作用下的河口河道演变、三角洲海岸演变，以及海洋动力作用等对河口海岸演变影响的研究较多（庞家珍等，1982；王恺忱，1985；成国栋，1987；吴秀杰等，1989；尹学良等，1993a、1993b；李殿魁，1993；李广雪等，1993；杨虎等，2001；尹延鸿等，2004；李安龙等，2004；陈沈良等，2004；时连强等，2005；李秀娟等，2006；崔步礼等，2007）。范兆木、郭永盛主编（1992）的《黄河三角洲沿岸遥感动态分析图集》详细分析了1976~1989年黄河河口与钓口河口地区海岸线的冲淤与侵蚀状况。吉祖德等（1994）运用遥感卫星照片研究了黄河口地区1975~1992年间清水沟沙嘴及其附近海岸的演变。李广雪等（1996）分析了黄河改道清水沟流路尾间河道及河口滨海区实

测资料,认为尾间河道河相关系趋向于转好,河口变化造成的溯源冲淤作用影响范围仅有 20 余公里,只有在汛期水流强度较大时,才发生溯源调整作用。由于河口嘴向海凸出,三角洲前缘形成强流带,加上波浪作用及异重流发育,河口沙嘴延伸速度明显减缓。曾庆华(1997)通过调研、实测、数学模型和卫星照片解析,对黄河口近期演变规律与发展趋势、治理方略作了系统研究。张士华(2003)、陈沈良等(2004)分别从海洋动力、潮流变化等方面分析了黄河三角洲岸线变迁及海岸侵蚀。崔步礼等(2007)运用 1976~2002 年间的 18 个年份的遥感影像,在遥感与 GIS 技术支持下,采用平均高潮线法分析了黄河口海岸线的变迁过程及其规律。王万战等(2007)总结了在黄河水沙、波浪、海岸工程等因素作用下,其河口海岸的演变规律,认为海岸演变不仅受黄河水沙、潮汐、潮流的影响,而且还明显受波浪、海岸工程的影响,海岸演变的趋势是朝着垂直于东北强浪的方向发展。

1976~1997 年,黄河几乎连年断流,其中 1997 年断流时间长达 226 天,直接影响到河口三角洲的发育和湿地生态系统的生存与发展。为此,国家环境保护局于 1997 年在北京召开了“黄河断流与流域可持续发展研讨会”,并出版了《黄河断流与流域可持续发展》一书。田家怡等(1997a、1997b)、叶青超(1998)、李宗尧(2000)、崔树强(2002)、杨立凯(2005)研究了黄河断流、水沙减少对三角洲演化及环境、湿地等的影响,提出了许多缓解对策和建议。

黄河流域自 1999 年统一配水以来,至今虽没有出现断流问题,但黄河口水沙条件发生了很大变化,很多学者开始研究该变化对黄河河口演变的响应(张世奇,2005;胡春宏等,2003a、2003b;王晓燕等,2006;袁祖贵等,2006)。徐美等(2008)以 2000 年为界,对黄河前后几年的来水来沙特征及河口变化特征进行了遥感监测、对比,分析了新、旧水沙环境下黄河口的变化特征及其与水沙条件改变的关系,表明水沙环境的改变导致黄河口出现了不同的发育特征。张长英等(2010)着重分析了黄河口变异对三角洲湿地生态环境的影响,结果表明,1986 年后黄河口来水来沙剧烈减少,水沙搭配关系恶化,阻滞了湿地生态环境的自然演替发展,恶化了湿地植被和水生生物的生存环境,加剧了海岸的侵蚀后退。

### (三) 湿地景观生态学研究

景观生态学是一门研究景观空间格局对生态过程影响的新兴学科。它除关注以往传统生态学中的自然因素外,更注重人类活动对景观格局及其演化过程的影响。国内对湿地景观格局变化的研究始于 20 世纪 90 年代,近 10 多年来,许多学者对黄河三角洲湿地景观变化及其成因作了研究(陈利项等,1996;刘高焕等,1997;布仁仓等,1999;赵庚星等,2000、2004;穆从如等,2000;刘庆生等,2001;叶庆华等,2002、2003a、2003b;李静等,2003;杨玉珍等,2004;郭笃发,2005;杨敏等,2009)。叶庆华等(2004)根据黄河三角洲新生湿地盐生、湿生、中生以及人工等不同生境的生态景观类型,将土地覆被类型分为 9 类,从遥感影像数据和专题矢量数据中提取了 1984、1991、1996 和 2000 年四期土地覆被数据,采用区域质心函数计算四个时期 9 类覆被的分布重心,并合成土地覆被重心演替过程图谱,归纳出湿地植被演替的陆进模式、海退模式、人类活动影响模式等三种模式。

王介勇等(2005)以垦利县为例,以 1987、2000 年两期遥感影像为基本信息源提取景观空间结构信息,利用景观类型空间结构信息破碎度、分维数、分离度和景观类型的敏感度、适宜度,构建了景观类型脆弱度指数(CEVI)和生态环境脆弱度指数(EVI);用连续覆盖全区的格网进行空间系统采样,采用统计学方法对区域生态环境脆弱度插值生成了区域生态环境脆弱度分布图;结果表明,研究区未利用地和盐荒地景观最脆弱,比较 1987 和 2000 年景观类型的脆弱度,旱田、水田、盐荒地和未利用地的 CEVI 指数减少,林草地、