

国家重点基础研究发展计划（973 计划）资助项目
（项目编号：2007CB407306）

ECOSYSTEM VULNERABILITY AND
BIOREMEDIATION
IN COASTAL ZONES OF BOHAI BAY

渤海湾海岸带 生态系统的脆弱性及生物修复

郑丙辉 等著



中国环境出版社

国家重点基础研究发展计划（973 计划）资助项目
（项目编号：2007CB407306）

渤海湾海岸带生态系统的脆弱性及生物修复

郑丙辉 等著

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

渤海湾海岸带生态系统的脆弱性及生物修复/郑丙辉等著. —北京: 中国环境出版社, 2013.10

ISBN 978-7-5111-1494-5

I. ①渤… II. ①郑… III. ①渤海湾—海岸带—区域生态环境—生态环境建设—研究 IV. ①X321.220.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 135086 号

出版人 王新程
责任编辑 葛莉
责任校对 尹芳
封面设计 宋睿



出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67113412 (教育图书事业部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2013 年 11 月第 1 版
印 次 2013 年 11 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 16.25
字 数 378 千字
定 价 65.00 元

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换

前 言

渤海湾位于渤海以西，是京津的海上门户，华北海运枢纽，中国渤海三大海湾之一，是典型的半封闭缓坡淤泥质海湾。其三面环陆，与河北、天津、山东的陆岸相邻，东以滦河口至黄河口的连线为界与渤海相通，面积 1.59 万 km²，约占渤海面积的 1/5。海岸带作为海陆之间的过渡地带，陆海相互作用剧烈，人类活动影响频繁，尤以近年来大规模的围海造地活动为甚。近年来，随着渤海经济圈的迅速发展，排入渤海湾污染物的数量和总量不断增加，加之渤海湾海岸带的围垦工程，势必会对海岸带生境产生影响。

本书是继《海岸带生境退化诊断技术——渤海典型海岸带》一书提出海岸带生境退化诊断技术框架后的进一步研究工作，针对海岸带生态系统的脆弱性问题，系统研究了渤海湾海岸带的生境压力、生境退化的主控因子以及生态响应。

首先，对滩涂开发利用状况进行分析，进而采用数值模拟分析研究海岸线变化对渤海湾水动力和水中污染物（COD、总磷、总氮）的时空分布、输运路径产生的影响。其中调查研究渤海湾海岸带污染源的分布及排放特征；对水体中重金属及有机质的污染来源、污染水平和迁移规律进行研究；并对沉积物中有毒有机污染物（PAHs、OCPs、PCBs、PBDEs）在入海河流、河口和近岸海域沉积物中的污染水平、时空分布及迁移规律，以及多环芳烃菲在渤海湾沉积物上的吸附模式进行研究。用于探讨围海造地导致海岸带水动力条件的变化，及其对水体、沉积物生境理化因子的影响过程。

其次，从生物组织、生物个体、生物群落等不同层次，运用毒理学、分析化学、分子生物学、遗传学、群落生态学等技术，研究环境压力下的水生态系统变化状况，确定生境退化的主控因子。其中，通过分析野生鱼类体内金属硫蛋白的蛋白和基因表达水平及 AFLP 分析野生泥螺种群的遗传信息，探讨渤海湾复合污染对野生生物种群遗传的影响；进而分析研究痕量有毒有机污染物（PCBs、PBDEs）在渤海湾近岸海域生物体内的污染水平、组织分布以及生物指示物。调查浮游植物、浮游动物和大型底栖动物的物种数、生物量、丰度、丰富度指数、多样性指数的季节性和历史性变化，用于阐明海河口、近岸海域

受陆源排污及围海造陆、港口建设等人为影响程度。调查环境中微生物群落结构特征及污染物降解菌种类,以反映出环境的污染特征。采用 16S rDNA 克隆文库方法研究多环芳烃对微生物群落结构特征的影响。运用海岸带余流场诊断法、水质响应系数诊断法和水质数值模拟诊断法,富营养化指数、水质综合指数评价法以及应用较多的美国国家海洋大气管理局(NOAA)研究制定的泥沙质量生物毒性效应范围法, AMBI 法、浮游植物 Shannon-Wiener 生物多样性指数、Pielou 均匀度指数和浮游动物的 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 生物多样性指数、Pielou 均匀度指数,对渤海湾海岸带生境的退化进行诊断。

最后,针对渤海湾海岸带的损失特征,开展采用绿色与环境友好的生物修复的探索研究及污染控制对策研究。其中,结合渤海湾潮间带的污染特征,进行了植物翅碱蓬-微生物联合修复的盆栽实验和基于监测的自然修复研究。

本书共分两篇。第一篇论述海岸带生态系统对人类活动脆弱性的影响,由第 1 至第 4 章构成。其中,第 1 章渤海海岸带人类活动压力特征由中国环境科学研究院郑丙辉和天津大学赵新华共同执笔;第 2 章填海对渤海湾海岸带水动力和水质的影响由中国环境科学研究院郑丙辉、李小宝、陈浩和秦延文共同执笔;第 3 章人类活动对海岸带沉积物生境的影响由中国环境科学研究院陈浩、秦延文和赵兴茹共同执笔;第 4 章水生态系统对海岸带生境退化的响应由中国环境科学研究院刘录三、王丽平、安立会和赵兴茹共同执笔。第二篇阐述渤海湾海岸带生物修复与污染调控,由第 5 至第 7 章组成。其中,第 5 章复合污染潮间带沉积物的生物修复由中国环境科学研究院赵兴茹和王丽平共同执笔;第 6 章渤海湾海岸带生物修复技术现场示范由天津科技大学刘宪斌执笔;第 7 章区域复合污染调控原理由中国环境科学研究院郑丙辉和王丽婧执笔。全书由郑丙辉负责统稿。全书在成稿过程中虽数易其稿,多次校订,但错误和疏漏之处在所难免,恳望读者批评指正。

本书内容涉及物理、化学、生物和毒理等学科,学科间交叉内容较多,参阅文献量大,不得不有所取舍,对一些重要文献也难免有所遗漏,望读者见谅。在保证内容系统性的前提下,在撰写过程中主要以项目课题组的研究成果为主。希望本项目研究成果有助于本领域的研究人员参考。

郑丙辉

2013 年 8 月于北京

目 录

第一篇 渤海湾海岸带生态系统的脆弱性

第 1 章 渤海湾海岸带人类活动压力特征	3
1.1 渤海湾海岸带自然环境特征	3
1.2 渤海湾海岸带社会经济特征	7
1.3 渤海湾海岸带滩涂围垦与生境损失	9
1.4 渤海湾入海污染负荷排放特征	13
1.5 渤海湾典型入海排污河污染特征	32
1.6 结论	41
第 2 章 填海对渤海湾海岸带水动力和水质的影响	43
2.1 渤海湾海岸带水动力变化	43
2.2 渤海湾海岸带水体有机质变化	60
2.3 近岸海域水质理化变化特征	73
参考文献	85
第 3 章 人类活动对海岸带沉积物生境的影响	88
3.1 引言	88
3.2 研究区域与研究方法	90
3.3 渤海湾海岸带沉积物理化特征分析	96
3.4 沉积物有机质对多环芳烃的吸附模式	97
3.5 海岸带重金属的时空分布及污染评价	101
3.6 渤海湾海岸带典型 POPs 的时空分布	105
3.7 渤海湾典型污染物的沉积物风险分析	112
3.8 结论	112
参考文献	113
第 4 章 水生态系统对海岸带生境退化的响应	114
4.1 生物体内典型污染物分析	114
4.2 生物学效应	120

4.3 底栖生物对海岸带生境退化的响应	126
4.4 渤海湾底栖生物群落退化诊断	139
4.5 浮游植物对海岸带生境退化的响应	144
4.6 浮游动物对海岸带生境退化的响应	151
4.7 微生物对海岸带生境退化的响应	158
4.8 渤海湾浮游生物群落退化诊断	169
参考文献	174

第二篇 渤海湾海岸带的生物修复

第 5 章 复合污染潮间带沉积物的生物修复	181
5.1 引言	181
5.2 潮间带沉积物中污染物降解菌的筛选及其降解特征	183
5.3 植物-微生物联合修复污染沉积物	192
参考文献	197
第 6 章 渤海湾海岸带生物修复技术现场示范	200
6.1 引言	200
6.2 材料与方法	201
6.3 植物修复——盐生植物翅碱蓬修复石油烃污染的河口海岸带	205
6.4 植物修复——天津港碱渣山北侧潮间带碱蓬-互花米草生态示范区	215
6.5 动物修复——天津港东疆港区潮间带底栖生物生态系统重建	223
6.6 结论	244
参考文献	244
第 7 章 区域复合污染调控原理	250
7.1 引言	250
7.2 陆源污染防控策略	250
7.3 生态修复与建设策略	252
7.4 加强入海河流污染物监测和近岸海域生态环境的监测	254
7.5 建立海岸带综合管理体制	254



第一篇

渤海湾海岸带生态系统的脆弱性

第 1 章 渤海湾海岸带人类活动压力特征

1.1 渤海湾海岸带自然环境特征

渤海湾天津段海岸带及上游的海河流域处于渤海湾海岸带中心位置，也是本书设定的主要研究范围。本节将重点介绍该区域自然环境特征。

1.1.1 地理区位

渤海湾位于渤海以西，是京津的海上门户，华北海运枢纽，中国渤海三大海湾之一，是典型的半封闭缓坡淤泥质海湾。其三面环陆，与河北、天津、山东的陆岸相邻，东以滦河口至黄河口的连线为界与渤海相通，面积 1.59 万 km^2 ，约占渤海面积的 1/5。此外，渤海湾湾口亦有从河北省大清河口到黄河口的划法。海底地势由岸向湾中缓慢加深，平均水深 12.5 m。流入渤海湾的主要河流有黄河、海河和滦河（图 1-1）。

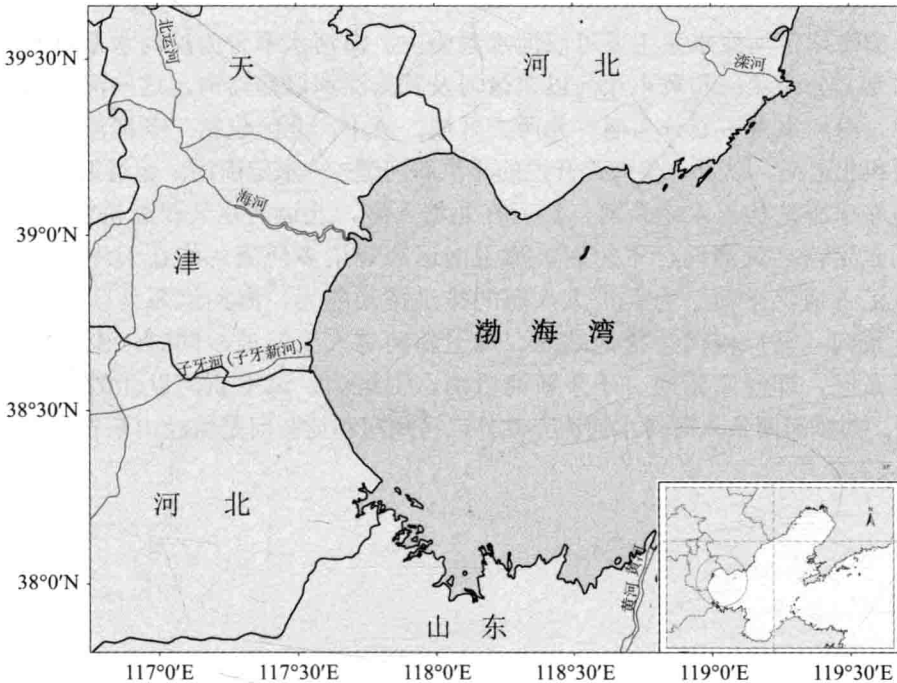


图 1-1 渤海湾区位图

天津市位于北纬 $38^{\circ}34' \sim 40^{\circ}15'$ ，东经 $116^{\circ}43' \sim 118^{\circ}04'$ ，全市面积 $11\,760.26\text{ km}^2$ ，市区面积 $4\,334.72\text{ km}^2$ ，建成中心城区面积 530 km^2 ，滨海新区城区面积 350 km^2 。天津海岸线北起涧河南至岐口，长约 152.8 km 。

1.1.2 地质地貌

渤海湾正处在中生代古老地台活化地区，位于冀中、黄骅、济阳三拗陷边缘，经历了各个地质时期的构造运动和地貌演变，形成湖盆，并在其上覆有 $1 \sim 7\text{ km}$ 的巨厚松散沉积层。沿岸几乎全为第三纪沉积物，形成典型的粉砂淤泥质海岸。又因几经海水进退作用，使海湾西岸遗存有沿岸泥炭层和 3 条贝壳堤。海底沉积物均来自河流挟带的大量泥沙，经水动力的分选作用，呈不规则的带状和斑块状分布。一般来说，沿岸粒度较粗，多粉砂和黏土粉砂，东北部沿岸多沙质粉砂；海湾中部粒度较细，多黏土软泥和粉砂质软泥。

天津市地质构造复杂，大部分被新生代沉积物覆盖，地势以平原和洼地为主，北部有低山丘陵，海拔由北向南逐渐下降。北部最高，海拔 $1\,052\text{ m}$ ；东南部最低，海拔 3.5 m 。地貌主要有山地、丘陵、平原、洼地、滩涂等。土壤主要有山地棕壤、山地淋溶褐土、褐土、潮土、沼泽土、水稻土、盐土 7 个土类。植被大致可分为针叶林、针阔叶混交林、落叶阔叶林、灌草丛、草甸、盐生植被、沼泽植被、水生植被、沙生植被、人工林、农田种植植物 11 种。

1.1.3 河流水系

渤海湾海岸带河流水系主要以海河水系为主。海河水系分为滦河水系和海河水系，而滦河水系又分为滦河和冀东滦河以东诸河及冀东滦河以西诸河，这些河流都是独立入海的河流。海河水系可划分为南、北两个区域，其中，北区包括三条河流，即蓟运河、潮白新河和北运河，以及一条人工开挖的排洪新河道——永定新河。蓟运河在北塘入海，潮白新河在宁车沽加入永定新河，然后在北塘入海，北运河在天津红桥汇入海河干流；南区包括永定河、大清河、子牙河、漳卫南运河等诸多河流，均在天津市以西先后汇合，然后汇入海河干流。为了扩大入海的排洪排沥能力，海河水系南区修建了独流减河、子牙新河、马厂减河、捷地减河、漳卫新河等人工河道。同时，南区中还包含黑龙港及运东区，即滏阳新河、子牙新河以南，卫运河、漳卫新河以北的地区，其中含有北排河、南排河两条入海排水河流。此外，马颊河和徒骇河是流经山东省独立入海的河流（图 1-2）。

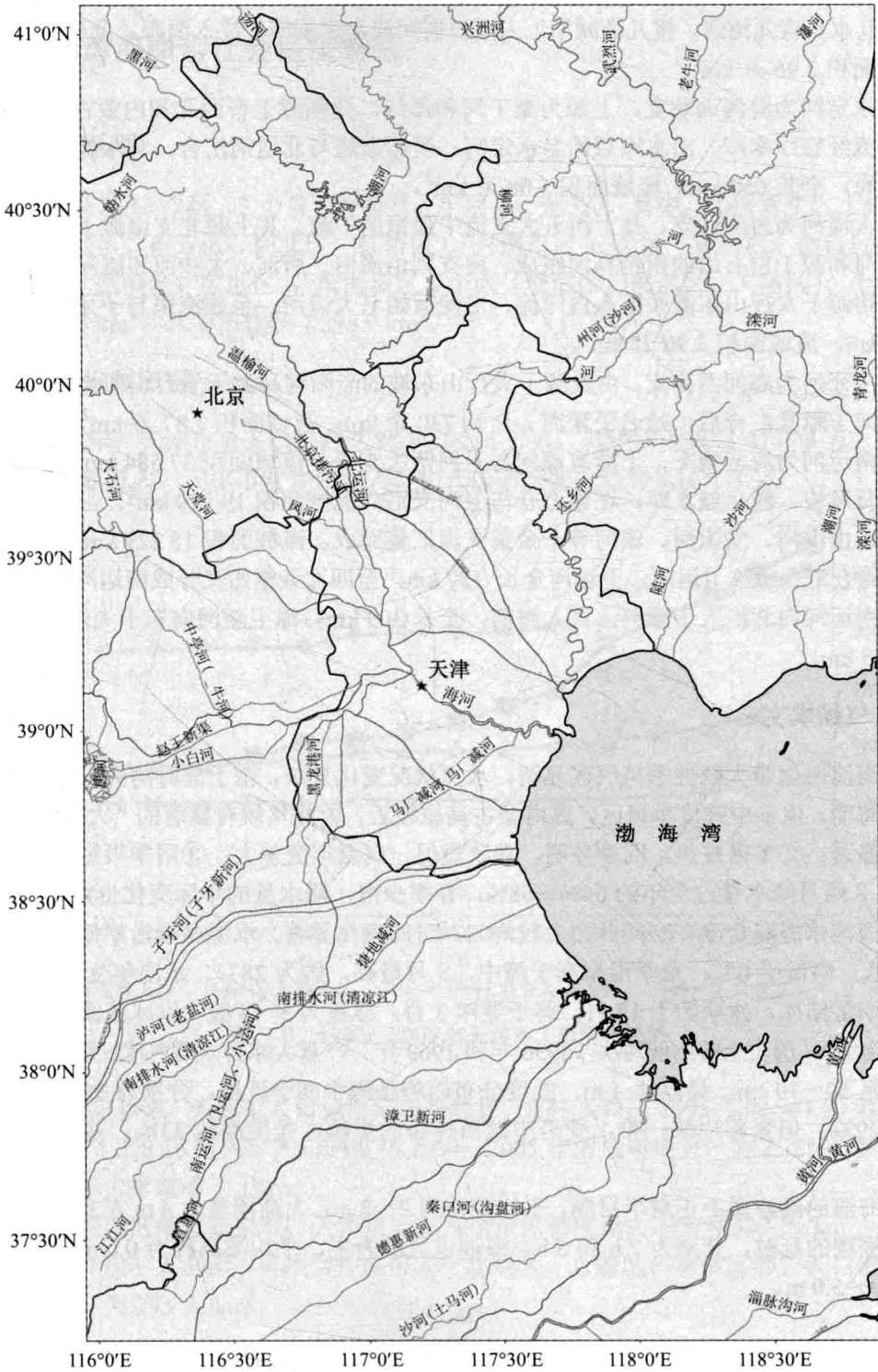


图 1-2 渤海湾海岸带水系分布图

①北运河为海河北支，源于北京市昌平区北部山区，上源名温榆河，通县以下始称北运河，其水自青龙湾河、筐儿港减河汇入潮白新河或永定新河，注入渤海。全长约 180 km，流域总面积 2.96 万 km²。

②永定河为海河西北支，上源为桑干河和洋河，分别源于晋西北和内蒙古高原南缘，两河均流经官厅水库，出水后始名永定河，至屈家店与北运河汇合，其水经永定新河由北塘入海。全长 650 km，流域面积 5.08 万 km²。

③大清河为海河西支，是上游五大支流中最短的干流。其上源北支由源于涞源县境的北拒马河和源于白石山的南拒马河组成，南支则由漕河、唐河、大沙河和磁河等十余支流组成，均源于太行山东麓并汇入白洋淀，出淀后始名大清河，至独流镇与子牙河汇合。全长 448 km，流域面积 3.96 万 km²。

④子牙河为海河西南支，由发源于太行山东坡的滏阳河和源于五台山北坡的滹沱河汇成，两河于献县汇合后，始名子牙河。全长 730 余 km，流域面积 7.87 万 km²。

⑤南运河为海河南支，上游有漳河与卫河两大支流，流域面积 37 584 km²。漳河源自太行山背风坡，经岳城水库，在徐万仓与卫河交汇，流域面积 19 220 km²。卫河源自太行山南麓，由淇河、安阳河、汤河等十余条支流汇集而成，流域面积 15 229 km²。漳河和卫河在徐万仓汇合后称卫运河，卫运河全长 157 km，至四女寺枢纽又分成南运河和漳卫新河两支，南运河向北汇入子牙河，再入海河，全长 309 km；漳卫新河向东于大河口入渤海，全长 245 km。

1.1.4 气候水文

渤海湾海岸带大陆性季风气候显著，水文状况变化复杂。由于渤海湾为三面环陆的半封闭性海湾，位于中纬度季风区，离内蒙古高原较近，因此气候有显著的“大陆性”特征：①季风显著；②冬寒夏热，四季分明，春秋短促，气温年变差大；③雨季很短，集中在夏季，7、8 两月降水量占全年的 64%~68%，春季少雨，降水量的年际变化也很大。

渤海湾水温和盐度在空间分布上较均匀，时间变化显著。水温冬季沿岸低于湾中，以 1 月最低，略低于 0℃；夏季沿岸高于湾中，8 月最高，约为 28℃，水温年变差在 28℃ 以上。冬季常结冰，冰期始于 12 月，终于翌年 3 月。冰量为 5~8 级（以冰盖面占总海面的十分比为级）。历史上曾出现两次（1936 年和 1969 年）严重大冰封，湾内冰丘迤邐，全被冻结，冰厚 50~70 cm，最厚达 1 m。盐度分布趋势是湾中高于近岸，分别为 29‰~31‰和 23‰~29‰。但紧邻岸滩一带，受沿岸盐田排卤的影响，盐度高达 33‰。盐度的年变差为 8‰。

渤海湾的潮汐属不正规半日潮，平均潮差为 2~3 m，大潮潮差为 4 m 左右。落潮的延时大于涨潮的延时，分别为 7 h 和 5 h。海浪以风浪为主，平均波高约为 0.6 m，最大波高可达 4.0~5.0 m。

1.2 渤海湾海岸带社会经济特征

1.2.1 行政区划

天津市共辖 15 个区、3 个县（静海县、宁河县、蓟县）。其中，市区 6 个区（和平区、河东区、河西区、南开区、河北区、红桥区），外围市区 6 个区（东丽区、西青区、津南区、北辰区、武清区、宝坻区），滨海新区 3 个区（塘沽区、汉沽区、大港区）。全市共计面积 11 760.3 km²，其中市辖区 7 398.9 km²。

1.2.2 人口发展概况

到 2009 年，天津市总人口已经达到 1 228.16 万人，其中农业人口 478.00 万人，非农业人口 750.16 万人。天津市常住户籍人口和人口密度变化趋势见图 1-3。

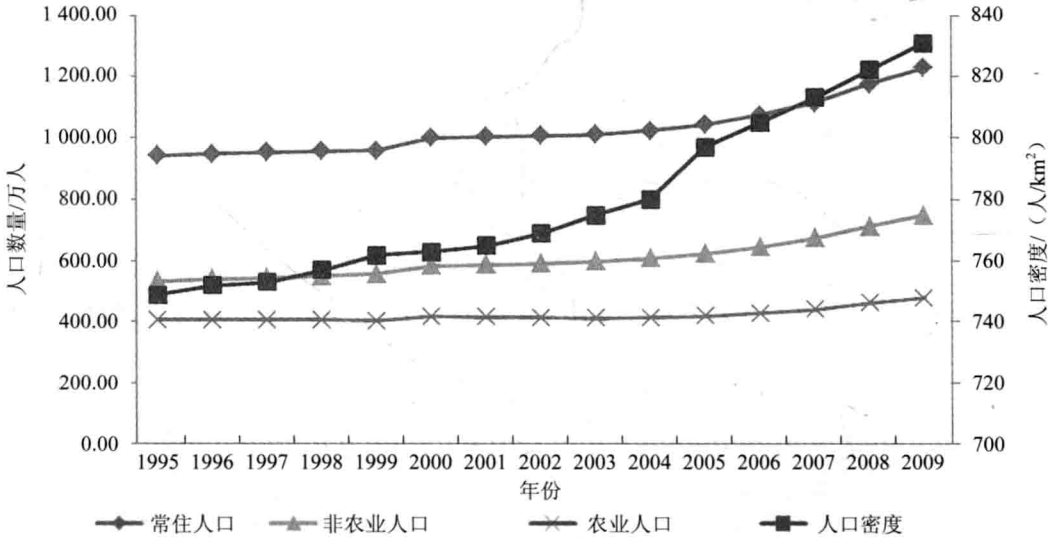


图 1-3 1995—2009 年天津市人口变化趋势

自 1995 年以来，天津市人口呈稳定增长趋势，常住人口从 1995 年的 941.83 万人增加到 2009 年的 1 228.16 万人。人口密度在 2004—2005 年增加率最大，为 2.18%，其他各个时期的增加率大多数小于 1%。

从人口密度区域分布来看：天津市所辖六个市区密度最大，为 4 523 人/km²；其次为津南区，为 1 061 人/km²；再次为外围市区：北辰区、东丽区、塘沽区等。人口密度最小的为宁河县，为 293 人/km²。

1.2.3 经济发展概况

截至 2009 年年末，天津市国内生产总值（GDP）7 521.85 亿元，比上年增长 12.0%，

第一、第二、第三产业 GDP 分别为 128.85 亿元、3 987.84 亿元、3 405.16 亿元。自 1978 年以来天津市经济发展状况见图 1-4。

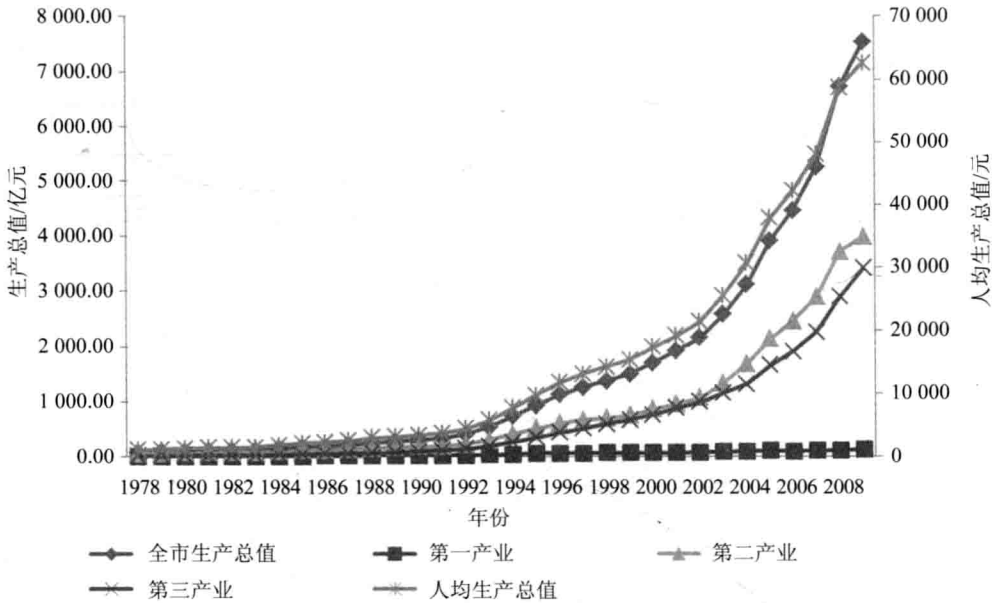


图 1-4 1978—2009 年天津市 GDP 及三产业变化趋势

从图可以看出，天津市 30 多年来生产总值及各产业总值呈稳步增长趋势。尤其在 20 世纪 90 年代以后，生产总值增长率不断增加，呈良好势头。人均生产总值不断增加，到 2009 年，已经超过 6 万元。

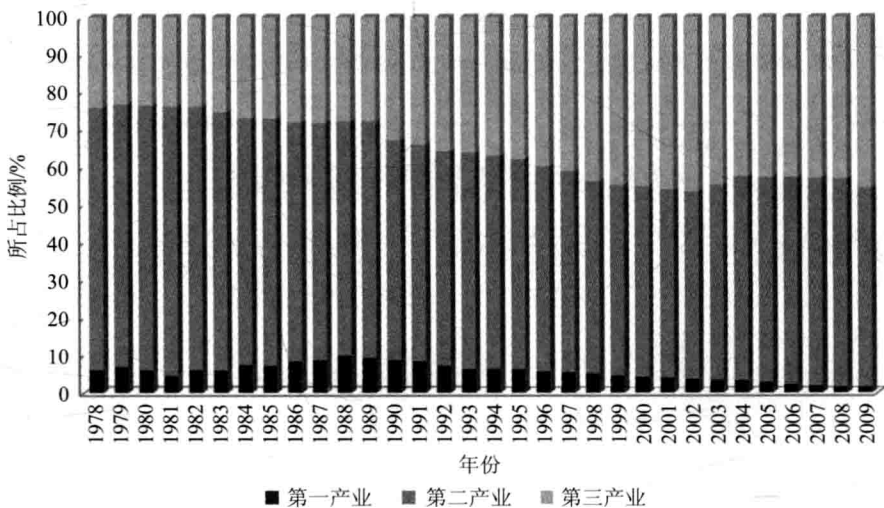


图 1-5 1978—2009 年天津市三大产业构成变化

图 1-4 和图 1-5 显示, 第一产业所占比例在 20 世纪 80 年代前不断增加, 到 90 年代后呈逐步减少的趋势, 然而第一产业 GDP 值稳中略有增加, 可见第一产业的技术革新等手段起到了很大的作用。第二产业稳中有减, 第三产业所占比例则大幅度提升。1978 年第一、第二、第三产业的构成比例为 6.1 : 69.6 : 21.3, 到 1988 年变为 10.1 : 62.0 : 27.9, 到 2009 年, 变为 1.7 : 53.0 : 45.3。三大产业构成发生了巨大的变化。

1.3 渤海湾海岸带滩涂围垦与生境损失

渤海典型海岸线范围包括从蓟运河口到青静黄排水渠口的区域, 即从东经 117°52'03"、北纬 39°10'00"至东经 117°36'46"、北纬 38°40'01"的海岸线。再以这条海岸线为基础, 利用 Arc/info 软件向陆地部分做一个 20 km 的缓冲区, 形成一个多边形区域, 从而确定了研究的范围, 即东经 117°22'59"~117°52'03", 北纬 38°40'01"~39°16'36", 面积 1 377.84 km²。向海岸线延伸 20 km, 是为了包括更多的农田、城镇等人类利用程度较高的地类, 而突出海岸带的滩涂开发利用情况。

1990 年以前的滩涂利用数据由 1 : 5 万的地形图获得。从国家基础地理信息中心购买天津海岸带 4 个年份 (1954 年、1970 年、1981 年和 1990 年) 的 1 : 5 万地形图, 包括北淮淀、汉沽、塘沽、蛭头沽、咸水沽、大沽、天津新港、南台子和滨海地区共 9 幅, 36 张, 以及 2000 年、2010 年分辨率为 30 m×30 m 的 Landsat TM 遥感影像图。通过对原始图像进行扫描、投影变换、几何纠正、数字化、滩涂分类等处理, 获取滩涂属性数据。

1.3.1 海岸带滩涂景观分类

根据人类对滩涂的利用强度以及生态功能的大小, 将研究区划分为 7 个一级景观单元: 农业用地、城镇居民建设用地、林地、草地、湿地、盐田和未利用地, 一级类型又进一步分为若干二级类型。天津海岸带的景观分类具体如表 1-1 所示。

表 1-1 天津海岸带地区景观类型

一级类型		二级类型		含义
代码	名称	代码	名称	
1	农业用地	11	耕地	指种植农作物的土地, 包括熟耕地、新开荒地、休闲地、轮歇地、草田轮作地; 以种植农作物为主的农果、农桑、农林用地; 耕地三年以上的滩地和滩涂
		12	养殖塘	人工修建或利用自然形成的养殖水生生物的池塘
2	城镇居民建设用地	21	城镇用地	指大、中、小城市及县镇以上建成区用地
		22	农村居民点	指镇以下的居民点用地
		23	工交建设 用地	指独立于城镇以外的厂矿、大型工业区、采石场等用地、交通道路、机场及特殊用地
		24	油田	指有石油生产井的地区

一级类型		二级类型		含义
代码	名称	代码	名称	
3	林地	31	有林地	指郁闭度大于 30%的天然林和人工林, 包括用材林、经济林、防护林等成片林地
		32	疏林地	指郁闭度为 10%~30%的林地
		33	园地	包括果园、桑园、茶园等
4	草地	41	高覆盖度草地	指覆盖度大于 50%的天然草地、改良草地和割草地, 此类草地一般水分条件较好, 草被生长茂密。地形图中的公园、陵园也属于此类草地
		42	中覆盖度草地	指覆盖度在 20%~50%的天然草地和改良草地, 此类草地一般水分不足, 草被较稀疏。研究区内的草地大部分属于此类草地
		43	低覆盖度草地	指覆盖度在 5%~20%的天然草地, 此类草地水分缺乏, 草被稀疏, 牧业利用条件差
5	湿地	51	河渠	指天然形成或人工开挖的河流及主干渠常年水位以下的土地
		52	湖泊水库	指天然和人工修建形成的积水区及常年水位以下的土地
		53	滩涂	指沿海大潮高潮位与低潮位之间的潮浸地带
		54	滩地	指河湖水域平水期水位与洪水期水位之间的滩涂
		55	芦苇地	指生长着芦苇的荡田
		56	沼泽	指地势平坦低洼、排水不畅、长期潮湿、季节性积水, 表层生长湿性植物的滩涂
6	盐田	61	盐田	人工修建的洼地, 导入海水后蒸发制盐的滩涂
7	未利用地	71	未利用地	包括沙地、裸岩石砾地、土堆和不明地类

1.3.2 滩涂开发利用状况分析

6 个年份的海岸带滩涂利用/土地覆盖解译结果见图 1-6。

按照景观斑块的生态功能高低, 把研究区的景观分为高功能景观斑块类型和低功能景观斑块类型。前者指人类干扰活动少的, 具有一定生产能力强, 并具有自我调节能力的景观类型; 反之为低功能景观斑块。农业用地主要是旱地和鱼塘, 通常属于中等功能的景观类型, 为了便于比较高、低功能景观斑块的变化关系, 把农业用地归类于低功能景观。高功能景观包括林地、草地和湿地, 低功能景观包括农业用地、建设用地、盐田和未利用地。从 1954 年、1970 年、1981 年、1990 年、2000 年和 2010 年 6 个时期的景观类型图得到面积数据, 如表 1-2 和图 1-7。