

DOI: 10.5846/stxb201105100610

黄金良, 李青生, 黄玲, 王菊英, 胡莹莹, 冯媛. 中国主要入海河流河口集水区划分与分类. 生态学报 2012, 32(11): 3516–3527.

Huang J L, Li Q S, Huang L, Wang J Y, Hu Y Y, Feng Y. Preliminary delineation and classification of estuarine drainage areas for major coastal rivers in China. Acta Ecologica Sinica 2012, 32(11): 3516–3527.

中国主要入海河流河口集水区划分与分类

黄金良^{1,2,*}, 李青生², 黄玲², 王菊英³, 胡莹莹³, 冯媛²

(1. 厦门大学海洋与海岸带发展研究院, 厦门 361005; 2. 厦门大学环境科学研究中心, 厦门 361005;

3. 国家海洋环境监测中心, 大连 116021)

摘要:采用 GIS 技术开展中国主要入海河流的流域边界及其汇水单元、河口集水区的划分及其分类。基于 ArcGIS 水文分析模块划分出 15 条入海河流的汇水单元, 并通过 5 种不同汇水单元面积等级的划分来表达各入海河流汇水单元的详细程度; 划分的流域面积与相关文献资料对比偏差在 10% 以内; 在流域与汇水单元划分的基础上, 基于感潮河段的数据收集, 确定出 88 个中国主要入海河流的河口集水区。通过建立分类指标体系, 采用聚类分析方法, 划分出 5 类河口: 第一类 EDA 主要分布在环渤海地区、山东半岛和广东沿海; 第二类 EDA 主要分布在长江口和杭州湾周围; 第三类 EDA 主要分布在江苏北部沿海和辽东半岛; 第四类包括山东江苏交界处沿海、江苏南部沿海; 第五类主要分布在福建浙江沿海、珠江口、长江口、海河口附近、辽河河口附近, 并利用快速生物评价法验证河口分类的合理性。研究成果可为进一步开展我国近海河口和海域营养盐基准制订与生态分区提供基础空间数据与方法借鉴。

关键词:近海流域; 河口集水区; 分类; GIS

Preliminary delineation and classification of estuarine drainage areas for major coastal rivers in China

HUANG Jinliang^{1,2,*}, LI Qingsheng², HUANG Ling², WANG Juying³, HU Yingying³, FENG Yuan²

1 Coastal and Ocean Management Institute (COMI), Xiamen University, 361005, China

2 Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China

3 National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116021, China

Abstract: Classification of estuarine and coastal waters has been recognized as a critical step for natural resource managers to describe and inventory coastal systems, understand constraints, predict the most sensitive systems, manage and protect coastal resources. However, the research on ecological classification in China is still in infancy, especially the classification of estuarine and coastal waters at regional or nationwide scale. This research employed Geographical Information System (GIS) and multivariate statistical analyses to delineate and classify the watersheds and estuarine drainage areas from fifteen major coastal rivers in China. The Hydrology module in ArcGIS environment was used to delineate the sub-watersheds from the fifteen coastal rivers, represented by spatially different details with five thresholds. The watershed boundaries of fifteen coastal rivers were further delimited and validated with literature documents. The deviation was less than 10%. Based on the analysis of spatial distribution of tide heads for fifteen rivers and the previously delineated sub-watersheds, 88 estuarine drainage areas (EDAs) were further defined. A five-class classification system was developed with the hierarchical cluster analysis, based on the physical, biological and chemical properties of EDA. Estuaries having the smallest total EDA were grouped as class one, and they are located in Bohai Bay, Shandong peninsula and coastal areas of Guangdong; estuaries

基金项目: 国家海洋局海洋公益性行业科研专项(200805090); 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室基金(201005)

收稿日期: 2011-05-10; 修订日期: 2012-02-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jlhuang@xmu.edu.cn

having the lowest average salinity range and the highest concentration of total suspended solid were grouped as class two, and they are located in Yangtze River estuary and Hangzhou bay; estuaries having the highest average depth and the highest wind speed were grouped as class three, and they are located in coastal areas of Northern Jiangsu and Liaodong peninsula; estuaries having the lowest dissolved oxygen and highest tidal range were grouped as class four, and they are located in coastal areas between Shandong and Jiangsu, coastal areas of Southern Jiangsu; estuaries having the largest average EDA and highest freshwater flow were grouped as class five, and they are located in coastal areas of Fujian and Zhejiang, Pearl river estuary, Haihe River estuary, and Liaohe River estuary. A rapid bio-assessment procedure was successfully employed to validate the classified result based on the collected data from literatures. The findings in this study provided the basic geospatial data for further developing nutrient criteria and eco-regionalization in estuarine and coastal waters in China.

Key Words: coastal watershed; estuarine drainage area; classification; GIS

海岸带包括河口与近海的分类是近年来的研究热点^[1]。该地区混合着淡水、咸水、泥沙、有机和无机化学物质,这些在给当地生物、人类和群落带来机遇的同时,也给他们带来了危险^[2]。在人口和经济压力下,众多的河口、近海面临富营养化问题。掌握河口与近海水体类型、生境及其对营养盐富集的响应的差异对于进行有效制订河口与近海水环境管理策略具有重要意义。因此,多年以来,科学家与管理者对流域、河口与近海生态系统的分类框架开展大量的研究。

20 世纪 60 年代,国际上即开始关注河口的分类^[3-4]。开始于 1972 年的美国清洁水法案中的日最大负荷 (TMDL) 则参照海湾与河口分类的结果: 每个海湾、河口生态分区具有其相应的物理、化学和生物标准。该研究同时显示,尽管调查的海湾众多,但应用海湾分类法可以很快地从众多的因素中判断出污染源^[5]。具有代表性的是美国 NOAA 和 USEPA 等开展的海岸带评价框架 (Classification Framework for Coastal Systems, CAF) 项目。该项目开展了一系列有关海岸带生态分区、河口分类的研究工作^[1]。Engle 等利用 NOAA 和 USEPA 的数据获得了美国 138 个河口流域的物理和水文数据,通过聚类分析将这 138 个河口区域分成了 9 类^[6]。

我国近年来,在陆域和淡水系统生态分区方面开展了全国陆域生态分区^[7]、全国河流水生态分区^[8]、全国河流生态水文分区^[9]和辽河流域的水生态分区^[10]等等。但海岸带生态分区、河口与近海水体分类与分区的研究仍然鲜见报道。

鉴于此,本研究拟采用 GIS 技术开展中国主要入海河流的流域边界、河口集水区的划分与分类,以期为进一步开展我国近海河口的水体营养物质基准等提供基础空间数据。

1 材料与方法

1.1 研究的入海河流

本研究所涉及的 15 条中国主要入海河流包括: 鸭绿江、辽河、大凌河、滦河、海河、黄河、淮河、长江、钱塘江、灵江、甌江、闽江、九龙江、韩江以及珠江。

1.2 研究方法

1.2.1 GIS 技术

本研究采用 GIS 技术,结合全国尺度的数字高程模型、水系分布空间数据开展中国主要入海河流的流域边界、汇水单元和河口集水区的划分。所使用软件是 ERSI 公司的 ARCGIS,利用水文模块 Hydrology module 开展流域边界和汇水单元的划分^[11-12]。

1.2.2 统计分析

(1) 数据预处理

本研究采用 K-S 方法检验数据是否呈正态分布。并通过取对数转化 $x' = \ln(x)$ 使数据变幅减少且变均匀。最后将对数后的数据进行标准化处理,消除量纲的不同,并使其均值为 0,方差为 1。

(2) 聚类分析

层次聚类分析是聚类分析中应用最为广泛的探索性方法,其实质是根据观察值或变量之间的亲疏程序,以逐次聚合的方法,将最相似的对象结合在一起,直到聚成一类。本研究采用此方法进行河口集水区空间相似性分析,采用的计算方法是欧氏距离平方和离差平方法。

(3) 判别分析

判别分析可通过判别函数判别聚类分析结果和识别显著性的污染指标,方法分为3类:标准式、前进式和后退式。相比之下,后退式判别分析方法具有更好的指标降维能力和判别能力。本研究用后退式判别分析方法进行河口集水区空间差异性的分析,并采用交叉验证法来检验此方法的判别能力。相应的判别函数表达式如下:

$$f(G_i) = k_i + \sum_{j=1}^n w_{ij} p_{ij}$$

式中 i 为类型 G 的个数, n 为污染指标个数, w_{ij} 为权重系数, p_{ij} 为显著性污染指标的浓度, f 为判别函数值, k_i 为常数。

1.3 基础数据及其分析处理

本研究的主要基础数据包括:

(1) 美国国家地质局(USGS)下载的 DEM 数据(3 arc second,空间分辨率约为 90 m,ASCII 文件格式)经 GIS 数据导入、拼图(共 66 幅 DEM)、投影转换和切边等空间操作,获得中国陆域范围的 DEM。考虑到计算与统计的方便,再重采样为空间精度为 100 m 的全国 DEM。

(2) 从中国国家基础地理信息中心下载获得中国 1—5 级水系和各级行政边界等 GIS 图层(shp 格式)。

(3) 其它数据包括中国沿海主要入海河流的潮区界位置和主要沿海港湾河口区大型底栖动物调查数据,主要是通过文献查阅和网络资料搜集获得。

在数据处理中,在 ArcGIS 支持下进行 GIS 图层的坐标投影转换,所有的 GIS 图层投影都采用 Albers 等积圆锥投影。投影参数为:双标纬线分别为 25°和 47°,中央经线为东经 105°,坐标起始纬度为 0°,椭球体为克拉索夫斯基,单位:m。

1.4 河口集水区分类验证的方法及其数据收集

本研究采用快速生物评价法来验证主要河口集水区分类的合理性。常用于水质生物评价的底栖生物学指数约有 30 多个参数,本研究选取了与群落功能和结构有关的 Shannon-Wiener 指数进行水质快速生物评价,其公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^s \left(\frac{n_i}{N} \right) \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right)$$

式中 H' 为香农-威纳多样性指数, S 为种类数, n_i 为样品中第 i 种生物个体数, N 为样品中生物个体总数。

通过文献查阅获取环渤海地区^[13]、长江口和杭州湾^[14]、苏北地区^[15]和辽东半岛^[16]、浙江沿海^[17]和珠江口^[18]地区的大型底栖动物调查数据。其中,环渤海地区于 2008 年 4 月下旬进行调查,调查范围为 117.69°—118.00°E, 38.55°—39.13°N, 共计 21 个调查站位,调查时采用面积为 0.1 m² 的静力式采泥器采样,每站成功采样 2 次合并为 1 个样品;长江口和杭州湾地区于 2005 年进行采样,范围在 32.00°—29.30°N, 123°E 以西的长江口及其附近海域,调查共设 49 个站位,定量用 0.1 m² 的静力式采泥器采样,每站成功采样 2 次;苏北地区采样时间于 2007 年 5 月和 8 月,调查范围在 32.00—32.30°N, 121.10—122.00°E, 共计 24 个调查点,调查渔具采用阿氏拖网(网口面积 1.5 m×0.75 m),阿氏拖网每次拖网时间为 10 min,拖速 2 kn 左右;辽东半岛地区于 2007 年 7 月下旬在辽东湾进行了 29 个站位的大型底栖动物调查;浙江沿海地区采用 2003 年 4 月—5 月浙江省近岸海域 27°15′—30°49′N, 121°02′—123°0′E 范围内的,的调查资料,调查共设拖网站位 31 个,并使用阿氏拖网对每个站位进行 1 次拖网,拖网时间 10 min,定量取样使用抓斗式采泥器,取样面积为 0.1 m²,每站取样 2 次;珠江口地区于 2006 年夏季和冬季进行底栖生物调查,公布设 29 个调查站,每个站位用 0.1 m²

的表层采泥器重复取样两次。

2 结果

本研究利用 GIS 技术通过中国 1—5 级河流空间分布图层和经处理生成的全国数字高程模型(DEM) 数据, 确定了 15 条主要入海河流的汇水单元、流域边界和河口集水区。

2.1 中国主要入海河流汇水单元的划分

利用 ArcGIS 的水文分析模块, 结合经处理生成的全国 DEM, 经过多次调试, 以阈值(单位: 栅格数) 为 500、1000、2000、4000 和 10000 的水流累积量, 获得不同汇水单元面积等级的 5 组中国主要入海河流流域的汇水单元。阈值为 500、2000 和 10000 的 3 组不同汇水单元面积等级的汇水单元划分结果, 分别对应于图 1。

从图 1 中可以看出, 五种不同阈值的设置, 基本可反映出各大入海河流域不同汇水单元面积等级的差异。面积较大的流域如长江、黄河、珠江、辽河、海河等流域在不同阈值间汇水单元划分的详细程度差异明显, 而面积较小的流域如灵江流域, 不同阈值的汇水单元数量上差别不大。各流域中, 长江流域的汇水单元数目最多, 在阈值为 500 时更是达到了 2057 个, 黄河流域次之; 灵江流域的数目最少, 在阈值为 500 时仅为 5 个汇水单元。相比较而言, 因为流域面积较小, 九龙江流域、瓯江流域、大凌河流域的汇水单元数目也较少。

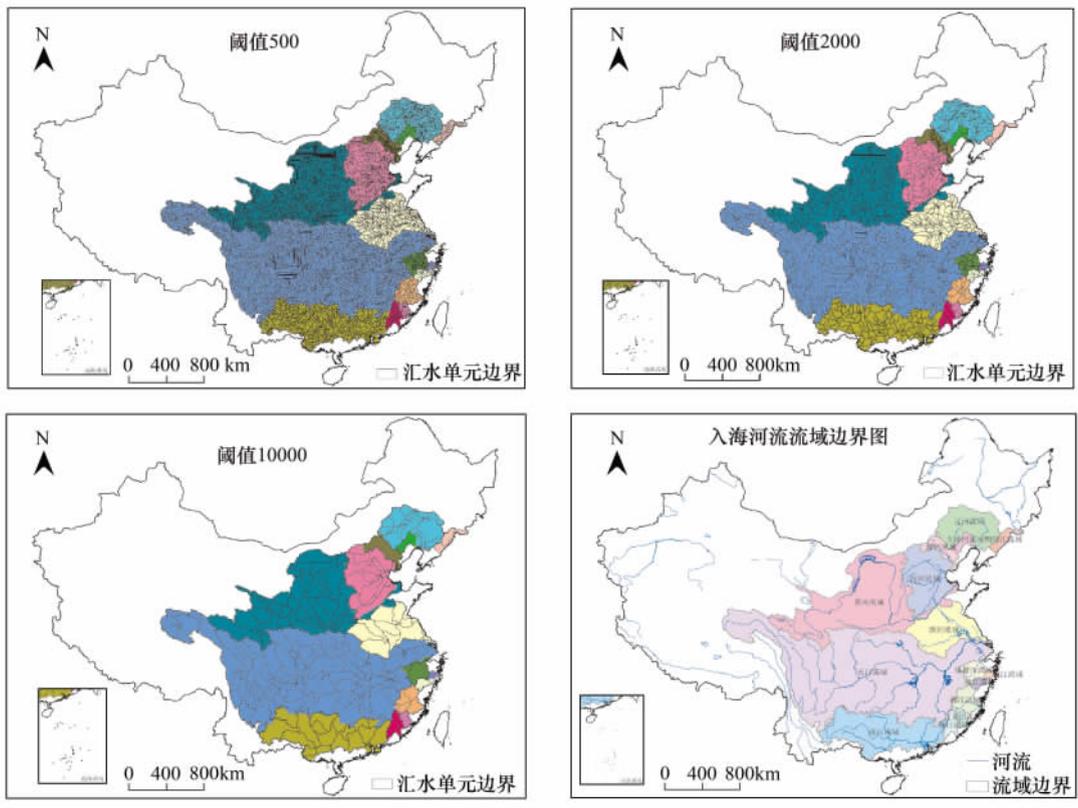


图 1 中国主要入海河流流域汇水单元与边界划分图

Fig. 1 Delineation of major coastal rivers watersheds in China

2.2 中国主要入海河流流域边界的划分

在中国主要入海河流汇水单元划分的基础上, 结合中国 1—5 级水系分布空间数据及其属性资料, 进一步确定了中国主要入海河流的流域边界, 划分结果如图 1 所示。

2.3 中国主要入海河流的河口集水区的划分

相关研究表明^[6], EDA 的生成是在入海河流流域边界和汇水单元划分的基础上根据各入河流域的感潮河段划分的。感潮河段的划分, 尤其是潮汐能影响的河流的最上限是划分各主要入海河河口集水区的关键。

在潮区界资料收集的基础上(表 1) 结合生成的汇水单元空间信息,进行了中国主要入海河流河口集水区的划分,其结果如图 2 所示。

表 1 中国沿海部分河流的潮区界

Table 1 location of Tidehead for some coastal rivers in China

海区 Sea-area	河流 River	潮区界 Tidal limit	纬度/(°) Latitude	经度/(°) Longitude	资料来源 Data sources
渤海区域	浑河	三界泡	41.1776	122.5961	[19]
	太子河	官草	41.0257	122.5606	[19]
	滦河	标上村	39.4637	119.1417	[20]
	徒骇河	坝上闸	37.6730	118.0883	[21]
	马颊河	辛集闸	37.9453	117.5794	[22]
黄海区域	鸭绿江	马市店	40.2172	124.5075	[23]
东海区域	长江	大通	30.8133	117.7392	[24]
	钱塘江	芦茨埠	29.7128	119.6531	[25]
	灵江	毛良店	28.8761	120.8199	[26]
	甌江	青田县城	28.1296	120.3031	[27]
	闽江	竹岐	26.1395	119.1283	[28]
	九龙江北溪	郭坑铁桥	24.5720	117.7212	[29]
	九龙江西溪	漳州新桥	24.4923	117.6640	[29]
	韩江	莲阳桥闸	23.4853	116.7717	[30]
	南海区域	珠江东江	铁岗	23.0799	114.1468
珠江北江		芦苞	23.2723	112.8509	[31]
珠江西江		德庆	23.1364	111.2812	[31]

表中数据部分潮区界的经纬度借助 Google Earth 进行概略定位

由图 2 可以发现,中国主要入海河流中,大部分的河口集水区都不只一个。其中:黄河 EDA 包括黄河 1、黄河 2、黄河 3 和黄河 4 等 4 个 EDA;淮河 EDA 包括灌河、黄沙港、兴盐界河、丰蜒河、斗龙港等 10 个 EDA;长江 EDA 包括长江口、蕴藻浜、上海地区、新浏河和海盐塘 5 个 EDA;珠江 EDA 包括北江、西江、东江和深圳地区 4 个 EDA。造成这种现象可能与大江大河下游地势平坦、河网复杂,河流由几条水道入海有关(如黄河、珠江等)。另外一些河流的河口地区为了防范洪水的侵袭,人工开挖了一些入海河道,使得河水入海更加顺畅,这使得河口水系变得复杂,同时也导致河口地区的流域划分更加复杂。

2.4 中国主要入海河流的河口集水区的分类

2.4.1 河口分类指标体系的构建

综合考虑河口的物理特征、水文特征、化学特征与生态特征,对划分的入海河流的河口集水空间单元进行分类,需考虑的因素主要包括^[6]: 水体交换能力: 包括系统稀释、水体留存时间和冲刷速率等; 单位面积河口(海域)的营养物质负荷; 水体的垂直混合和分层情况; 以叶绿素 a 表征的藻类生物量; 风浪; 盐度和深度分布情况; 河口区围填海面积; 化学特征,如: 浊度、DIN、DIP。这些因素可以用相关的物理和水文动力学指标来衡量,如,河口体积、河流流量、潮棱体积、淡水经停时间、河口地貌形态等指标可以反应水体交换能力,盐度、水温等指标可以反应水体的垂直混合和分层情况

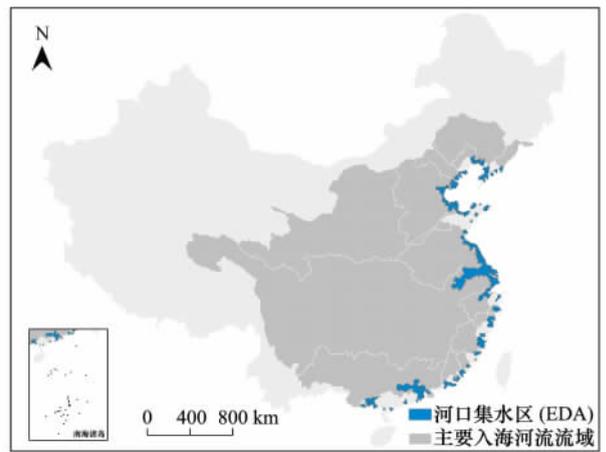


图 2 中国主要入海河流河口集水区

Fig. 2 Delineation of estuarine drainage areas (EDAs) for major coastal rivers in China

等等。

根据以上需要考虑的因素,收集空间分类单元的物理及水文动力学数据,包括河口流域面积、河流流量、河口体积、水深、潮高、潮棱体积、盐度、水温、气温等数据,以及反应水体对营养物干扰或变化的响应敏感程度的相关资料,如叶绿素 a 表征的藻类生物量等。受限于资料,本次研究仅用 EDA 面积、流量、河口体积、河口水深、潮差、纳潮量、河口平均风力、平均水温、平均盐度、活性磷酸盐、叶绿素 a、无机氮、悬浮物、活性硅酸盐、水色和透明度等 17 个参数进行分析。

在进行聚类分析之前,采用 Pearson 相关性分析对 17 个河口分类参数之间的独立性进行了检验,发现用之于河口分类的变量间的相关性并不显著。

2.4.2 中国主要入海河流河口集水区聚类分析

在经过对数转化之后,17 个指标中大部分能通过 K-S 检验,潮差、盐度、溶解氧和水色 4 个指标未通过 K-S 检验,但考虑到这 4 个指标的重要性,仍用这 4 个指标。本研究选取经对数转化过的 17 个河口分类指标开展中国主要入海河流河口集水区的聚类分析。

图 3 为中国主要入海河流 88 个河口集水区的聚类分析结果。在连锁距离为 110 处将 88 个河口集水区分为 5 类。

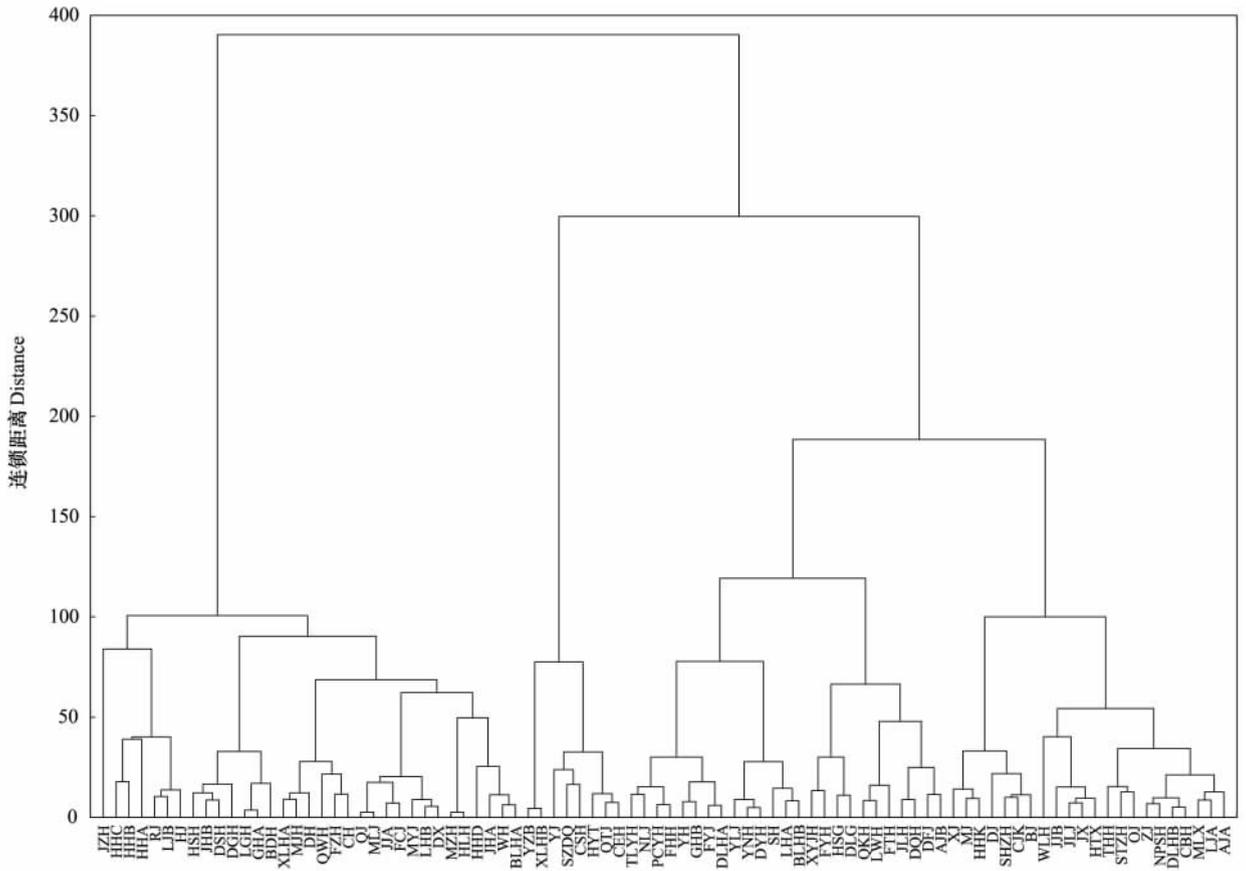


图 3 中国主要入海河流 EDA 聚类分析结果

Fig. 3 Spatial cluster analysis of EDAs for major coastal rivers in China

- AJA: 敖江; AJB 鳌江; BLHA: 白浪河; BDH: 北戴河洋河; BJ: 北江; BLHB: 碧流河; CEH: 曹娥江; CJK: 长江口; CSH: 长山河; CBH: 潮白河; CH: 潮河; DFJ: 大风江; DGH: 大沽河; DLHA: 大辽河; DLHB: 大凌河; DQH: 大清河; DSH: 大石河; DYH: 大洋河; DJ: 东江; DX: 东溪; DLG: 斗龙港; DH: 陡河; FCJ: 防城江; FYJ: 飞云江; FHH 废黄河; FYH: 丰蜒河; FTH: 付瞳河; FZH: 复州河; GHA: 狗河; GHB: 灌河; HHK: 海河口; HYT: 海盐塘; HJ: 韩江; HHA: 黄河 1; HHB 黄河 2; HHC: 黄河 3; HHD: 黄河 4; HHL 黄磊河; HSG: 黄沙港; HSH: 黄水河; HTX 霍童溪; JJA 鉴江; JX: 交溪; JHA: 胶河; JLH: 胶莱河; JHB 界河; JJB: 晋江; JLJ: 九龙江; JZH: 九州河; LJA: 灵江; LGH: 六股河; LJB: 龙江; LWH: 龙王河; LHA: 滦河; LHB 滦河; MJH 马颊河; MLJ: 茅岭江; MJ: 闽江; MYJ 漠阳江; MZH: 母猪河; MLX: 木兰溪; NLJ 南流江; NPSH: 南排水河; OJ: 瓯江; PCYH: 拼茶运河; QTJ: 钱塘江; QWH: 蔷薇河; QJ: 钦江; QKH: 青口河; RJ: 榕江; SH: 沙河; SHZH: 上海诸河; SZDQ: 深圳地区; STZH: 双台子河; TLYH: 通吕运河; THH: 徒骇河; WH: 潍河; WLH: 五龙河; XJ: 西江; XLHA 小凌河; XLHB: 新浏河; XYJH: 兴盐界河; YLJ: 鸭绿江; YH: 盐河; YNH: 英纳河; YJ: 甬江; YZB: 蕴藻滨; ZJ: 漳江

第一类 EDA 为九州江、黄河 1、黄河 2、黄河 3、黄河 4、榕江、龙江、韩江、黄水河、界河、大石河、大凌河、六股河、狗河、北戴河、小凌河、马颊河、陡河、蔷薇河、复州河、潮河、瓯江、茅岭江、鉴江、防城河、漠阳河、漯河、东溪、母猪河、黄磊河、胶河、潍河、白浪河。

第二类 EDA 包括了蕴藻滨、新浏河、甬江、深圳地区、长山河、海盐塘、钱塘江、曹娥江。

第三类 EDA 是通吕运河、南流江、拼茶运河、废黄河、盐河、灌河、飞云江、大辽河、鸭绿江、英纳河、大洋河、沙河、滦河、碧流河。

第四类 EDA 包括兴盐界河、丰蜒河、黄沙港、斗龙港、清河口、龙王河、付瞳河、胶莱河、大清河、大风江、鳌江。

第五类 EDA 包括西江、闽江、海河口、东江、上海地区、长江口、北江、五龙河、晋江、九龙江、交溪、霍童溪、徒骇河、双台子河、瓯江、漳江、南排水河、大辽河、潮白河、木兰溪、灵江、敖江。

图 4 给出了中国主要入海河流的 EDA 分区图。由图 4 可见,第一类 EDA 主要分布在环渤海地区、山东半岛和广东沿海;第二类 EDA 主要分布在长江口和杭州湾周围;第三类 EDA 主要分布在江苏北部沿海和辽东半岛;第四类包括山东江苏交界处沿海、江苏南部沿海;第五类主要分布在福建浙江沿海、珠江口、长江口、海河口附近、辽河河口附近。

2.4.3 中国主要入海河流 88 个河口集水区判别分析

根据聚类分析结果获得的 5 组河口集水区类型,进行后退式判别分析。在后退式判别分析的过程中以 $F=2$ 为下限剔出变量,剩下河口体积、河口深度、潮差、EDA 面积、水温、盐度、悬浮物、活性磷酸盐、无机氮和活性硅酸盐 10 个参数,基于这 10 个参数的样本分类判别正确率为 82.95%。

Wilks 系数是组间离差阵与总离差阵的比值,Wilks 系数越小则参数在组内差异相对于组间差异越小,也就是组间差异大。从表 2 中可知,后退式判别分析的结果中各个参数组间差异的排序是潮差 = EDA 面积 > 活性磷酸盐 > 盐度 > 河口深度 > 无机氮 > 悬浮物 > 水温 > 活性硅酸盐 > 河口体积。判别分析结果表明,河口体积、河口深度、潮差、EDA 面积、水温、盐度、悬浮物、活性磷酸盐、无机氮和活性硅酸盐 10 个参数是影响河口集水区与河口分类的主要指标。

表 2 88 个河口集水区 10 个参数指标判别分析结果

Table 2 Discriminant analysis results of EDA in terms of ten parameters

参数 Parameters	河口体积 Estuary volume	河口深度 Estuary depth	潮差 Tidal range	EDA 面积 Area of EDA	水温 Water temperature	盐度 Salinity	悬浮物 Suspended solids	活性磷酸盐 Active phosphate	无机氮 Inorganic nitrogen	活性硅酸盐 Active silicate
wilks	0.89	0.77	0.73	0.73	0.84	0.75	0.80	0.74	0.79	0.88
F	2.30	5.61	6.89	7.00	3.45	6.26	4.62	6.56	4.98	2.55

2.4.4 河口集水区分类的验证

(1) 五类河口综合分析

尽管中国主要入海河流河口复杂多样,但它们仍在地形地貌、理化性状、水动力模式等方面有相似之处,可用于分类。尤其是中国主要入海河流河口存在对压力响应的灵敏性方面的共性特征,这种具有共性的特征可用作分类的指标,用于辅助预测中国主要入海河流河口生态状况和诊断生态问题的诱因。综合分析物理特征、生化指标等,5 类河口特征综合分析归纳如表 3 所示。由表 3 可知,五类河口的水质特征有明显的区别。总体而言,第一、三、四类 EDA 水质较好;第二、五类 EDA 水质较差。

EDA 分类的结果是由 EDA 自身的特征(如潮差、河口水深、纳潮量等)和人类活动影响(如营养盐排放、泥沙含量等)共同决定的,有着相似特征的 EDA 在营养盐排放、稀释和扩散,以及水动力条件等方面具有相似的特征,因此在分类上具有相似性,在管理上也具有相似性。

(2) 大型底栖动物水质快速生物评价法



图4 中国主要入海河流 EDA 分区

Fig. 4 EDAs delineation for major coastal rivers in China

通过收集整理相关文献资料,获取五类 EDAs 主要分布区的 S-W 指数,如表 4 所示。

由表 4 可见,第一类 EDA 的香农-威纳指数范围在 0—4.18,平均值为 2.99,生物多样性较高,生态环境相对稳定,大型底栖动物处于较健康的状态,水质良好;第二类 EDA 的香农-威纳指数小于 1.00,平均值为 0.33,生物多样性差,种类分布极不均匀,底栖动物的生存环境恶劣,水质差;第三类 EDA 中,江苏北部的香农-威纳指数范围在 0.47—2.98 之间,平均值为 2.17,辽东半岛介于 0 到 3.4 之间,平均值为 2.41,由此可见,第三类 EDA 的生物多样性较高,生态环境、水质状况较好;第四类 EDA 处于山东和江苏交界沿海和江苏南部沿海,与第三类 EDA 相近,生态环境良好,大型底栖动物较健康,水质较好;第五类 EDA 包含浙江沿海、长江口大部分以及珠江口等处在内,各主要分布区的香农-威纳指数平均值均小于 2.00,可见其生物多样性差,生态环境较恶劣、水质状况较差。

结合表 3 和表 4 通过对理化监测所获得的 17 个参数进行聚类分析及判别分析所得五类 EDA 的水质状况与经由大型底栖动物水质快速生物评价法获得的水质状况,结果基本吻合,反映了本研究中关于中国主要入海河流河口分类的结果基本合理、可信。

表 3 中国主要入海河流 5 类河口集水区的特征

Table 3 Characteristics analysis of 88 EDAs of major coastal rivers in China

类别 Category	河口体积 Estuary volume	河口深度 Estuary depth	EDA 面积 Area of EDA	潮差 Tidal range	纳潮量 Tidal prism	流量 Flow	水温 Water temperature	风速 Wind velocity
第一类	低	低	低	低	低	低	低	低
第二类	高	低	中	中	高	低	高	低
第三类	高	高	中	中	高	中	低	高
第四类	低	中	中	高	中	低	中	中
第五类	中	低	高	中	高	高	中	中

类别 Category	无机氮 Inorganic nitrogen	活性磷酸盐 Active phosphate	活性硅酸盐 Active silicate	盐度 Salinity	叶绿素 Chl-a	悬浮物 Suspended solids	溶解氧 Dissolved Oxygen	透明度 Transparency	水色 Water color
第一类	低	低	中	高	中	低	高	高	高
第二类	高	高	高	低	低	高	中	低	低
第三类	低	低	中	高	中	低	中	中	中
第四类	低	低	低	高	高	低	低	中	低
第五类	中	中	高	中	中	低	中	中	中

表 4 五类 EDAs 主要分布区 Shannon-Wiener 指数

Table 4 Shannon-Wiener index for five classes of EDAs

	环渤海 ^[13] Bohai Sea	长江口、杭州湾 ^[14] Yangtze River Estuary and Hangzhou Bay	江苏北部 ^[15] North of Jiangsu	辽东半岛 ^[16] LiaoDong Peninsula	浙江沿海 ^[17] Coastal Areas of Zhejiang	珠江口 ^[18] Pearl River Estuary
H'	0—4.18	<1.00	0.47—2.98	0—3.40	0—2.84	1.40—1.80
\bar{H}'	2.99	0.33	2.17	2.41	1.42	1.65

3 讨论

3.1 本研究中入海河流流域边界划分与其它相关文献的比较

本研究划定的主要入海河流的流域面积与其与相关的研究及官方公布的数据进行了比较,结果如表 5 所示。

表 5 本研究划分的流域面积与其它研究结果的比较

Table 5 comparison of watersheds defined between this study and other literatures

流域 Watersheds	流域面积 Drainage area			相对偏差 Relative Deviation/%	
	本研究的结果 /km ² The result of our study	其他研究的结果 /km ² The result of other studies			
辽河	218894	228960 ^[32]	219000 ^[34]	-4.4	-0.048
海河	287303	262631 ^[32]	263631 ^[35]	9.39	8.98
黄河	823164	752443 ^[32]	752000 ^[36]	9.4	9.46
淮河	271013	269283 ^[32]	270000 ^[37]	0.64	0.38
长江	1775818	1808500 ^[32]	1800000 ^[38]	-1.81	-1.34
九龙江	14621	14741 ^[33]	14741 ^[39]	-0.81	-0.81
珠江	429974	453690 ^[32]	463700 ^[40]	-5.23	-7.27

由表 5 可以看出,7 条河流的流域面积与官方及其它研究资料的计算偏差的绝对值都保持在 10% 以内,说明本研究的流域边界划定结果具有较高的可信度。

3.2 有关河口分类的基础空间单元

根据 NOAA 和 USEPA 的相关文献^[1 41], 河口分类的基础是河口集水区(EDA)的划分, 而 EDA 是在 CAF 框架内, 参照 HUC 等基础空间数据的进一步划分。

海岸评价框架(CAF)是 20 世纪 90 年代中期由美国 NOAA 特别项目办公室建立的一种为资源管理与分析者提供国家海岸带和海洋资源信息组织与管理的数字空间框架。CAF 在空间上不仅包含河口集水区(Estuarine Drainage Areas, EDA)、海岸地区(Coastal Drainage Area, CDA), 还包括了河流上游地区(Fluvial Drainage Area, FDA)等^[41]。

美国地质调查局(USGS)将美国划分出一系列的水文单元, 这些水文单元可分为四个等级: regions、sub-regions、accounting units 和 cataloging units, 其中 region 最大, 而 cataloging units 最小。每个水文单元都有特定的水文单元代码(HUC), regions、sub-regions、accounting units 和 cataloging units 分别由 2、4、6 和 8 位数字来编码^[42]。

CAF 与 HUC 之间存在着密切的关系: (1) 它们的初始划分单元是一样的, 都是 cataloging units; (2) CAF 中的 EDA 是由部分的 cataloging unit 或一个 cataloging unit, 或多个 cataloging units 及与其相邻的若干个 cataloging units 的部分共同组成, 并在此基础上考虑到潮汐的影响而划分得到的^[6]。

综上, CAF、EDA 与 HUC 三者关系密切: EDA 是 CAF 的一个组成部分, HUC 为 CAF 和 EDA 提供了最基础的空间分类单元——8 位水文单元代码。本研究提及的流域边界和汇水单元可对应于 HUC 中的不同等级, 比如: 流域边界可对应于 regions, 而划分很细的汇水单元则可对应于 cataloging units。显然, 流域边界和汇水单元划分是河口集水区划分的基础。

3.3 工作展望

由于近海区域地势较为平坦、河网复杂、人工对水系干扰较多, 从而造成近海流域边界与河口集水区的划分非常困难, 这是造成划分的近海流域面积与相关部门研究有出入的主要原因之一。本研究的下一步将采用更高分辨率的 DEM(如美国宇航局 2009 年发布的 30 m 分辨率的 DEM 图)和水系图, 并广泛收集各河口区域本地调查研究成果, 通过改进 GIS 地表水文模拟技术如利用 ArcHydro 水文模块的地表校正和河道烧录与人工校准相结合等方法, 对平原河网地区的流域边界与河口集水区边界进行修正。

另外, 在河口分类的研究上, 本研究下一步工作, 将采用专家咨询与典型河口调查等方法进一步验证分类结果的合理性, 并借此进一步完善河口分类指标体系, 以使最终划分的各类河口单元对不同的干扰包括营养盐富集的响应有明显的区别, 对制订我国河口与近海水环境管理策略等有实际的意义。

4 结论

(1) 基于 GIS 划分出 15 条入海河流的汇水单元, 并通过 5 种不同汇水单元面积等级的划分来表达各入海河流流域的汇水单元的详细程度。所划分出 15 条中国主要入海河流的流域边界, 与相关文献资料的面积计算偏差在 10% 以内。

(2) 基于汇水单元和感潮河段的资料, 确定出 88 个中国主要入海河流的 EDA, 并采用聚类分析将中国主要入海河流河口分为 5 大类: 第一类 EDA 主要分布在环渤海地区、山东半岛和广东沿海; 第二类 EDA 主要分布在长江口和杭州湾周围; 第三类 EDA 主要分布在江苏北部沿海和辽东半岛; 第四类包括山东江苏交界处沿海、江苏南部沿海; 第五类主要分布在福建浙江沿海、珠江口、长江口、海河口附近、辽河河口附近。采用大型底栖动物水质快速生物评价法, 验证了中国主要入海河流五类河口生态分区的合理性。

(3) 判别分析结果表明, 河口体积、河口深度、潮差、EDA 面积、水温、盐度、悬浮物、活性磷酸盐、无机氮和活性硅酸盐 10 个参数是影响河口集水区与河口分类的主要指标。

References:

- [1] United States Environmental Protection Agency. Classification Framework for Coastal Systems, EPA/600/R-04/061. Research Triangle Park: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Health and Environmental Effects Laboratory, 2004.

- [2] Hobbie J E. Executive summary // Hobbie J E, ed. Estuarine Science: A Synthetic Approach to Research and Practice. Washington DC: Island, 2000.
- [3] Pritchard D W. What is an estuary: physical viewpoint // Lauff G H, ed. Estuaries, Publication. Washington DC: American Association for the Advancement of Science, 1967.
- [4] Odum H T, Copeland B J. A functional classification of the coastal systems of the United States // Odum H T, Copeland B J, McMahan E A, eds. Coastal Ecological Systems of the United States, Volume I. Washington DC: The Conservation Foundation, 1974.
- [5] Kurtz J C, Detenbeck N D, Engle V D, Ho K, Smith L M, Jordan S J, Campbell D. Classifying coastal waters: current necessity and historical perspective. Estuaries and Coasts, 2006, 29(1): 107-123.
- [6] Engle V D, Kurtz J C, Smith L M, Chancy C, Bourgeois P. A classification of U. S. estuaries based on physical and hydrologic attributes. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 129(1/3): 397-412.
- [7] Fu B J, Liu G H, Lü Y H, Chen L D, Ma K M. Ecoregions and ecosystem management in China. International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 2004, 11(4): 397-409.
- [8] Yang A M, Tang K W, Wang H, Cheng J H. Eco-hydrological regionalization in China. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(3): 332-338.
- [9] Yin M, Yang Z F, Cui B S. Eco-hydrological regionalization of river system in China. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(4): 423-428.
- [10] Meng W, Zhang Y, Zheng B H. Study of aquatic ecoregion in Liao River Basin. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(6): 911-918.
- [11] Tang G A, Yang X. ArcGIS Geographical Information System Spatial Analysis Experimental Textbook. Beijing: Science Press, 2006: 429-451.
- [12] Huang J L, Hong H S, Du P F, Zhang L P. Surface water hydrology simulation of Jiulong River Basin based on GIS and DEM. China Rural Water and Hydropower, 2005, (2): 44-46.
- [13] Wang Y, Liu L S, Liu C Q, Zhu Y Z, Xu H M. Community structure characteristics of macrobenthos in the coastal seawaters of Bohai bay in Spring. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(4): 430-436.
- [14] Hu H Y, Shi J R, Liu Z G, Tang J L, Huang B, Song J H, Wang J H, Wei N. Research on benthic ecology in the Yangtze estuary and its adjacent waters. Environmental Pollution and Control, 2009, 31(11): 84-87.
- [15] Zhang H, Guo Z R, Liu P T, Tang J H, Zhong X M. Distribution characteristics of macrobenthos in the shoal-water area along the northern coast of Jiansu Province. South China Fisheries Science, 2009, 5(1): 29-35.
- [16] Liu L S, Meng W, Li X Z, Li Z C, Zheng B H, Lei K, Li Z Y. Studies on macrobenthos in the northern waters of Liaodong Bay: II. Biodiversity and community structure. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2): 155-161.
- [17] Hu H Y, Tang J L, Li Q L, Huang B, Chen Y H, Mao H Y, Zhang L. Studies on benthic ecology in Zhejiang coastal waters. Journal of Marine Sciences, 2006, 24(3): 76-89.
- [18] Zhang J H, Gao Y, Fang H D, Xu Z B. Ecological characteristics of macrobenthin communities in Pearl River Estuary. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2989-2999.
- [19] Chen K M, Lin Y, Yang Y. Primary discussions on the development and governance in the Liao River estuary. 8th Workshop on Cross-Strait Hydraulic Engineering and Technology, 2004: 516-525.
- [20] Sun T, Yang Z F, Liu J L. Study on the ecological water demands for typical estuaries in Haihe River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2707-2715.
- [21] Li R J, Wei S L, Wang H J. Numerical simulation of sedimentation processes in Tuhaihe estuary. Transaction of Oceanology and Limnology, 1999, (4): 14-20.
- [22] Li R J. Countermeasure consideration about enhancing estuary management of Zhangweixin River. Haihe Water Resources, 2009, (3): 5-7.
- [23] Cheng Y, Bi L X. Primary character and motive change of shallow beach in Yalu River Mouth. Journal of Sediment Research, 2002, (3): 59-63.
- [24] Fu R B, Shen H T, Liu X C. Fluxes of the dissolved inorganic nitrogen and phosphorus at tidal limit in the Changjiang estuary. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(1): 64-68.
- [25] Fang X B, Zhang J Y, Chen W, Xu X Y, Chen Y X. Assimilative capacity of the Qiantang river watershed based on a QUAL2K model. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(8): 1402-1407.
- [26] Zhu Y K. Some characteristics of the Jiao Jiang Mountain River estuary under strong tides in Zhejiang province. Geographical Research, 1986, (1): 27-33.
- [27] Zeng J N. Influence analysis of Qingtian key water control project to urban flood control. Zhejiang Hydraulics, 2007, (5): 56-58.
- [28] You X W. Detection of riverbed change and early warning of drinking water security in the downstream of Minjiang River. Introduction and Consultation, 2006, (9): 69, 72.
- [29] Lin T S. Reclamation and its impact on the downstream of the Jiulong River watershed. The Journal of Chinese Social and Economic History, 1984, (4): 78-87.
- [30] Ou J L. Study on water level-discharge relation of the tidal reach in the lower Han river. Shanxi Architecture, 2008, 34(16): 11-12.
- [31] Lu Y J, Jia L W, Mo S P, Han L X, Ji R Y, Zuo L X. Changes of Low Water Level in the Channel Network System of the Pearl River Delta. Beijing: China WaterPower Press, 2008.
- [32] National Bureau of Statistics of China. 2008 China Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2008: 156-156.

- [33] Fujian provincial database website. <http://www.fjsq.gov.cn/showtext.asp? ToBook=178&index=48>.
- [34] China WaterPower Press. <http://www.waterpub.com.cn/jhdb/DetailRiver.asp? ID=8>.
- [35] National Bureau of Statistics of China. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2009/indexch.htm>.
- [36] Zhangwei Nan Canal Burea of Hai River water conservancy committee, the Ministry of Water Resources of the Republic of China. <http://www.zwnj.gov.cn/yhjj/hhgk.asp>.
- [37] Huai river water conservancy committee website. <http://www.hrc.gov.cn/detail? model=00000000000000006575&documentid=13486>.
- [38] Changjiang River Water conservancy committee website. <http://node.cjw.com.cn/index/river/liuyugk.asp>.
- [39] Rural Power Department of Fujian Provincial Water Conservancy Agency, Fujian Provincial Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute. Fujian Rural water resources investigation and evaluation plan. 2007.
- [40] Pearl River water conservancy committee website. <http://www.pearlwater.gov.cn/zjgk/>.
- [41] National Oceanic and Atmospheric Administration. ORCA's Coastal Assessment Framework. 2003. <http://spo.nos.noaa.gov/projects/caf/caf.html>.
- [42] Seaber P R, Kapinos F P, Knapp G L. Hydrologic unit maps. Water-Supply Paper 2294. Reston: US Geological Survey, 1987.

参考文献:

- [8] 杨爱民,唐克旺,王浩,程金花. 中国生态水文分区. 水利学报,2008,39(3): 332-338.
- [9] 尹民,杨志峰,崔保山. 中国河流生态水文分区初探. 环境科学学报,2005,25(4): 423-428.
- [10] 孟伟,张远,郑丙辉. 辽河流域水生态分区研究. 环境科学学报,2007,27(6): 911-918.
- [11] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社,2006: 429-451.
- [12] 黄金良,洪华生,杜鹏飞,张珞平. 基于 GIS 和 DEM 的九龙江流域地表水文模拟. 中国农村水利水电,2005,(2): 44-46.
- [13] 王瑜,刘录三,刘存歧,朱延忠,徐海明. 渤海湾近岸海域春季大型底栖动物群落特征. 环境科学研究,2010,23(4): 430-436.
- [14] 胡颖琰,施建荣,刘志刚,唐静亮,黄备,宋继红,王婕好,魏娜. 长江口及其附近海域底栖生物生态调研. 环境污染与防治,2009,31(11): 84-87.
- [15] 张虎,郭仲仁,刘培延,汤建华,仲霞铭. 苏北浅滩生态监控区大型底栖生物分布特征. 南方水产,2009,5(1): 29-35.
- [16] 刘录三,孟伟,李新正,李子成,郑丙辉,雷坤,李中宇. 辽东湾北部海域大型底栖动物研究: II. 生物多样性与群落结构. 环境科学研究,2009,22(2): 155-161.
- [17] 胡颖琰,唐静亮,李秋里,黄备,陈逸华,毛宏跃,张立. 浙江省近岸海域底栖生物生态研究. 海洋学研究,2006,24(3): 76-89.
- [18] 张敬怀,高阳,方宏达,徐志斌. 珠江口大型底栖生物群落生态特征. 生态学报,2009,29(6): 2989-2999.
- [19] 陳柯明,林洋,楊禕. 淺談遼河口治理開發. 第八屆海峽兩岸水利科技交流研討會,2004: 516-525.
- [20] 孙涛,杨志峰,刘静玲. 海河流域典型河口生态环境需水量. 生态学报,2004,24(12): 2707-2715.
- [21] 李瑞杰,魏守林,王厚杰. 徒骇河感潮河段冲淤变化的数值模拟. 海洋湖沼通报,1999,(4): 14-20.
- [22] 李瑞江. 加强漳卫新河河口管理的对策思考. 海河水利,2009,(3): 5-7.
- [23] 程岩,毕连信. 鸭绿江河口浅滩的基本特征和动态变化. 泥沙研究,2002,(3): 59-63.
- [24] 傅瑞标,沈焕庭,刘新成. 长江河口潮区界溶解态无机氮磷的通量. 长江流域资源与环境,2002,11(1): 64-68.
- [25] 方晓波,张建英,陈伟,徐向阳,陈英旭. 基于 QUAL2K 模型的钱塘江流域安全纳污能力研究. 环境科学学报,2007,27(8): 1402-1407.
- [26] 祝永康. 浙江椒江山溪性强潮河口的若干特征. 地理研究,1986,(1): 27-33.
- [27] 曾金年. 瓯江青田水利枢纽对城区防洪影响分析. 浙江水利科技,2007,(5): 56-58.
- [28] 游小文. 闽江下游河床变迁与饮水安全预警. 引进与咨询,2006,(9): 69,72.
- [29] 林汀水. 九龙江下游的围垦与影响. 中国社会经济史研究,1984,(4): 78-87.
- [30] 欧军利. 韩江下游感潮河道水位与流量关系的研究. 山西建筑,2008,34(16): 11-12.
- [31] 陆永军,贾良文,莫思平,韩龙喜,季荣耀,左利钦. 珠江三角洲网河低水位变化. 北京: 中国水利水电出版社,2008.
- [32] 中华人民共和国国家统计局. 2008 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社,2008: 156-156.
- [33] 福建省情资料库. <http://www.fjsq.gov.cn/showtext.asp? ToBook=178&index=48>.
- [34] 中国水利水电出版社. <http://www.waterpub.com.cn/jhdb/DetailRiver.asp? ID=8>.
- [35] 中国统计年鉴 2009. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2009/indexch.htm>.
- [36] 水利部海委漳卫南运河管理局. <http://www.zwnj.gov.cn/yhjj/hhgk.asp>.
- [37] 淮河水利网. <http://www.hrc.gov.cn/detail? model=00000000000000006575&documentid=13486>.
- [38] 长江水利网. <http://node.cjw.com.cn/index/river/liuyugk.asp>.
- [39] 福建省水利厅农电处,福建省水利水电动测设计研究院. 福建省农村水力资源调查评价工作大纲. 2007.
- [40] 珠江水利网. <http://www.pearlwater.gov.cn/zjgk/>.