

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.01.007

鸭绿江流域水沙运输的“源-汇”特征及其影响因素的集成分析

王燕^{1,2}, 陈斌^{1,2}, 印萍^{1,2}, 刘健^{1,2}

1. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266071

2. 国土资源部油气资源和环境地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

摘要:以鸭绿江流域为尺度,对鸭绿江流域上中下游水沙数据进行综合性分析。结果显示:鸭绿江流域径流量中游比上游年径流量增加一倍左右,下游比上游的年径流量增加倍数为一个数量级以上;大部分年份下游的年输沙量小于上游;随着中下游水利工程等人类活动的加剧,鸭绿江下游径流量和输沙量都有阶段性的减少,年际径流量和年际输沙量差异幅度逐渐增大,且输沙量减小的幅度和年际差异幅度比径流量更大,尤其是自 20 世纪 60 年代中期以来人类活动对输沙量影响比较显著。结合 ENSO 事件特征,指出气候变化引起的降雨量的减少是直接影响流域径流量减少的主要原因,也一定程度上造成了流域输沙量的减少。

关键词:鸭绿江;水沙运输“源-汇”特征;人类活动;气候变化;生态环境演变;国际河流

中图分类号:X141 **文献标识码:**A

An integrated study of “source to sink” process for runoff and sediment discharge of the Yalu River drainage and influence factors

WANG Yan^{1,2}, CHEN Bin^{1,2}, YIN Ping^{1,2}, LIU Jian^{1,2}

1. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

2. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China

Abstract: Taking the drainage basin of the Yalu river as a whole, this paper makes an integrated study of water and sediment discharges for the upstream, midstream and downstream of the river respectively. Results show that the annual runoff of the midstream is about two times higher than that of the upstream, and the annual runoff of the downstream is in an order of magnitude higher than that of the upstream. In most of the years, the amount of sediment in the downstream is less than that in the upstream. With the effects of the human activities such as the construction of water conservation projects in the middle and lower reaches, the downstream runoff and sediment transport of the Yalu river are stepwisely reducing. The difference between annual runoff and inter-annual sediment yield increases gradually, and the decrease and annual difference of sediment transport volume is greater than that of runoff. Especially since the mid-1960s, human activities have become stronger and rendered significant impacts on sediment transport. According to the characteristics of ENSO event, the decrease in rainfall influenced by climate change is the main cause of the decrease in runoff, and to some extent, effecting the decrease in sediment transport.

Key words: Yalu River; the “source to sink” characteristics of runoff and sediment discharge; effect of human activity; climatic change; eco-environmental evolvement; the international rivers

河流是陆源物质向海输送的主要路径之一,陆源大量淡水通过河流注入海洋,以悬浮体的形式传输大量陆源细颗粒沉积物和营养盐物质入海,对整

个河口海岸带地形地貌及生态环境有着不可忽视的影响作用^[1-3]。全球 286 条国际河流共涉及 151 个国家,影响范围涵盖世界人口的 90% 和可利用淡水

资助项目:国家自然科学基金“渤海湾季节性悬浮体运输过程与机制”(41606082)

作者简介:王燕(1983—),女,副研究员,博士,从事河口海岸沉积动力及环境演化等研究,E-mail:wangyan_hds@163.com

通讯作者:陈斌(1979—),男,副研究员,博士,从事河口海岸沉积动力及环境演化等研究,E-mail:chenbin1007@hotmail.com

收稿日期:2017-06-26; **改回日期:**2017-12-20. 周立君编辑

资源的 60%，在气候变化和人类活动双重影响下，国际上将水危机被列入未来 10 年世界风险之首，而针对国际河流水文及生态过程对气候变化和人类活动的响应规律，从流域尺度开展的综合性研究较少^[4,5]。中国作为全球最重要的上游水道国，发育着亚洲大陆主要的国际河流，其中源自中国的还包括一些重要世界级大河，其径流量远大于全国用水总量^[6-11]。目前，虽然国内外对中国的国际河流开展了大量的研究^[12-19]，但与黄河流域、长江流域的研究程度相比^[20-31]，以流域为尺度对中国国际河流在水文水资源、环境与生态等方面的综合研究程度亟待提高。

鸭绿江作为中国和朝鲜的国界河，发源于长白山脉白头山南麓。鸭绿江流域自北向南流经长白、临江、集安等地区，经过云峰、渭源、水丰水电站后，经辽宁省丹东市注入北黄海海域(图 1)。鸭绿江流域面积 61887km²，河长 790km，中朝两国在流域内共建共享了数个梯级水库和水电站，两国通过水利工程调水调沙，对流域径流量和输沙量的时空分配进行人工调节，且流域内日益加剧的工业、农业污染物和生活废物的排放，对河道、河口海岸带及近海地貌地形和生态环境影响显著^[32,33]。自 20 世纪 80 年代以来，众多学者对鸭绿江流域的水沙输运及河

口地貌、生态环境等方面做了大量研究。本文将以鸭绿江整个流域为尺度，基于前人的研究成果，阐述径流和泥沙的“源-汇”特征及河口地貌特征，了解人类活动和气候变化对水沙输运特征及地貌特征的影响，并在此基础上进一步阐明流域生态环境对来水来沙、人类活动的响应，为鸭绿江流域水资源管理、海岸防护和生态环境治理提供科学依据。

1 鸭绿江流域径流的“源-汇”特征

鸭绿江流域位于北温带大陆性气候区，多属山区，流域内径流主要来自降雨，降雨量的地理分布总趋势是由南向北递减。流域中上游地区存在气候季节性差异，春、夏两季气候温热，降雨量丰富而集中；冬季干冷，降雨量明显不如春夏两季。中上游地区多年平均降水约 800mm，多年平均蒸发量比降水量少 100mm 左右^[34,35]。流域下游位于温带湿润气候区，夏季气温高，冬季气候干冷，多年平均降雨量比中上游高，为 1000~1200mm，且多集中在夏汛期，7—8 月降雨量一般占全年降雨量的 50% 左右^[36,37]。鸭绿江水系比较发达，各支流径流量充沛，平均每年鸭绿江下游流入黄海的水量超过 250

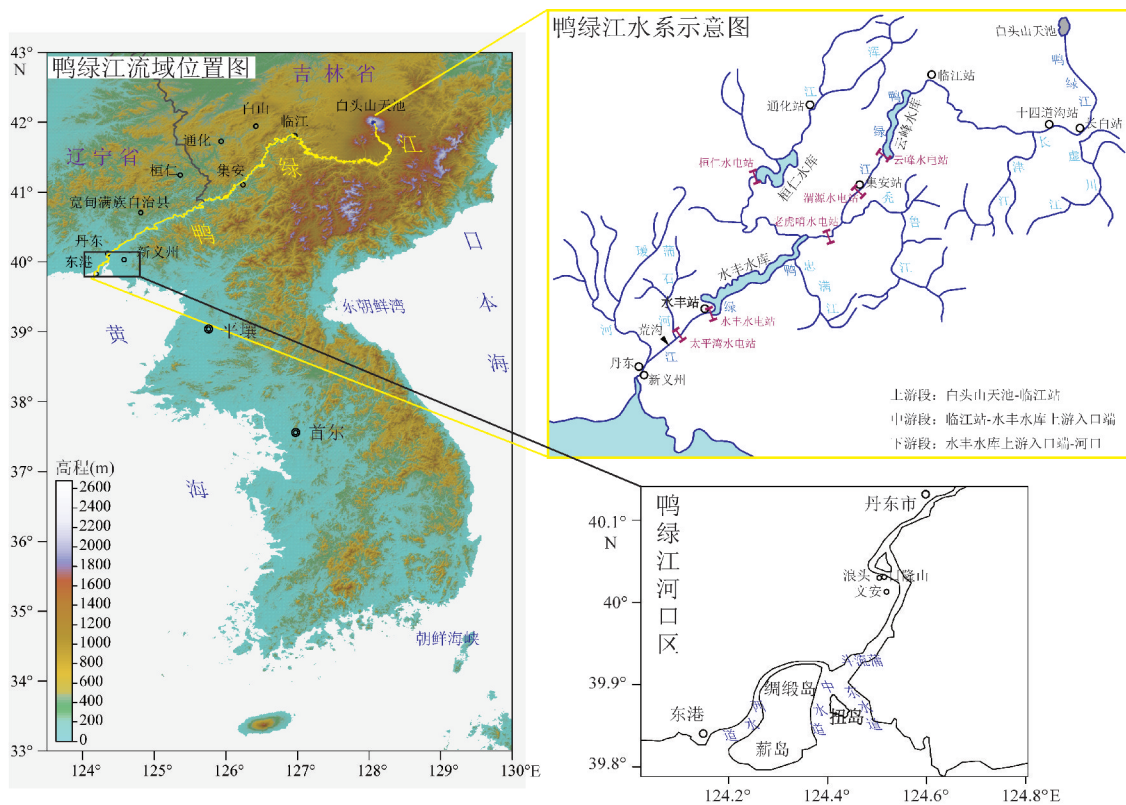


图 1 鸭绿江流域简图

Fig.1 The schematic map of Yalu River drainage basin

$\times 10^8 \text{ m}^3$, 在中国东北和华北入海河流中鸭绿江径流量最大, 其径流量仅次于长江和一些东南沿海河流^[38]。受降雨量区域分布不均的影响, 鸭绿江年径流量自上游向下游、自北向南显著增大。上游干流长白站^[39]、中游支流通化站^[40]和下游干流荒沟站^[36]年径流量变化趋势几乎一致, 中游比上游年径流量增加一倍左右, 下游比上游的年径流量增加倍数为一个数量级以上(图2)。

1.1 中上游流域径流特征

长白站是鸭绿江流域最上游的水文监测站(图1), 属于温带大陆性季风气候区, 降雨量汛期占全年的70%左右, 多年平均径流量接近 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。长

白站径流量的年际变化和年内变化不均匀; 年径流量存在连续丰水年和连续枯水年交替的现象, 还存在连续枯水年和连续平水年连续交替的现象^[39,41](图3)。

临江站(图1)以上河段具有山溪性河流的特征, 明显受大陆性季风气候影响。春季汛期的径流主要来源为高山积雪融水, 夏季洪水的主要来源为降雨量, 径流量主要集中在夏汛的7、8月份^[42]。

云峰水库(图1)位于吉林省集安市青石镇境内, 是中国和朝鲜两国共同投资修建的大型水电站。其集水面积超过 $1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 年径流量为 $87.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 径流量的主要来源为地区降雨。该地区降雨量季节性特征明显, 七成以上降雨量集中在6—9月, 其中主要集中在7—8月^[43-47]。

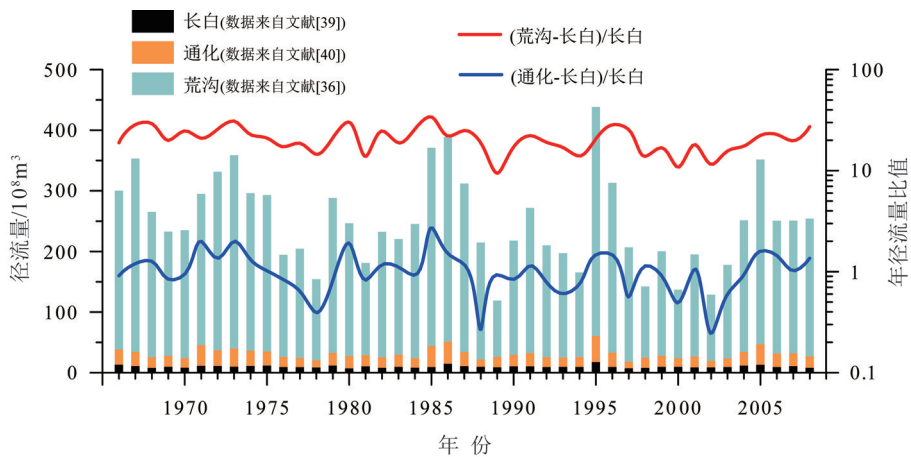


图2 鸭绿江长白站、通化站、荒沟站年径流量变化

Fig.2 The annual runoff changes at Changbai station, Tonghua station, and Huanggou station along Yalu river

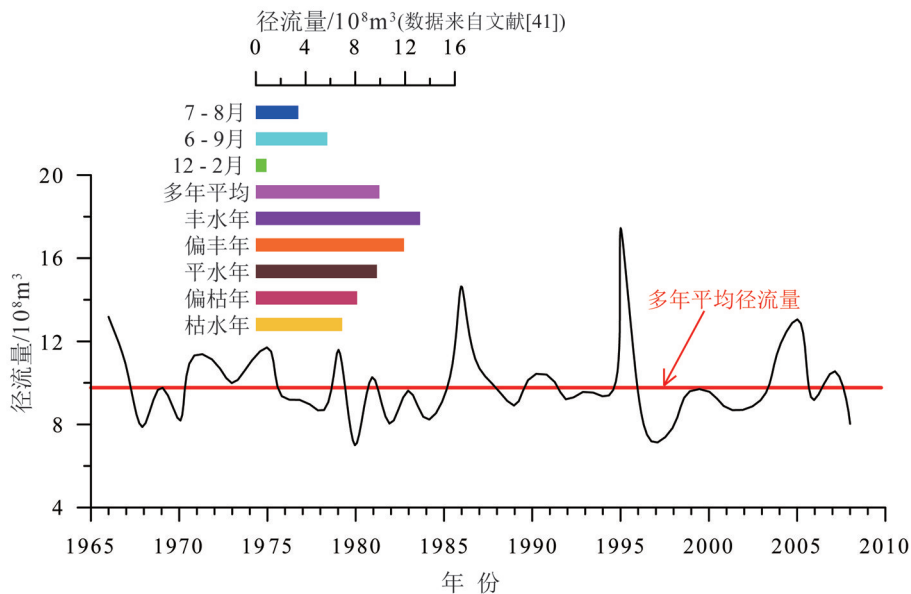


图3 鸭绿江长白站年径流量变化

Fig.3 The annual runoff changes at Changbai station

浑江是鸭绿江中游的一条大支流(图 1),其径流量的主要来源为降雨和积雪融水,存在丰水年和枯水年连续出现的特点。浑江流域的降雨量具有明显的季节性变化特征,夏汛 6—9 月平均降雨量是 12—2 月的 5 倍,这一点与上游长白山类似(图 3),7—8 月降雨量超过全年的 45%。受气候季节性变化的影响,浑江径流量的季节性特征明显,一年内最大的洪峰多在 7、8 月出现,其来源多为强降雨造成的洪水;有时因冬季降雪过多,春汛的径流量大于夏汛,流域内洪水平均每年发生 1.35 次^[48]。通化水文站是浑江干流中游重要控制站,受温带大陆季风性气候影响,径流量呈明显的季节性变化特征,多年平均径流量约为 $20 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均径流量 45%集中在夏汛的 7、8 月份,春汛时期月均径流量受融雪影响,比 6 月夏汛时期略高(图 4)。从年径流量变化趋势来看(图 5),通化站年径流量自 20 世纪 50 至

60 年代,径流量从偏枯平水期转为丰水期,自 70 年代至 21 世纪初,径流量从平水偏丰进入枯水阶段。丰水阶段和平水偏丰阶段的平均径流量相对增加;平水偏枯期和枯水期,平均径流量相对减少^[40]。

1.2 下游流域径流特征

水丰水电站是鸭绿江中下游重要的水电站(图 1),其控制流域面积超过 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,地区多年平均径流量约 $800 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[49]。

蒲石河为鸭绿江下游一条支流(图 1),发源于辽宁省宽甸县北四方顶子,由北向南流经宽甸县全境,于太平湾水库坝址下游约 5km 处汇入鸭绿江。蒲石河流域属于沟溪型河流,受半湿润季风气候影响,流域降雨量非常充沛,季节性差异较大,每年一半以上的降雨主要集中在 7—8 月;1—2 月占年降雨量 2%左右。蒲石河多年平均径流量 $8.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,

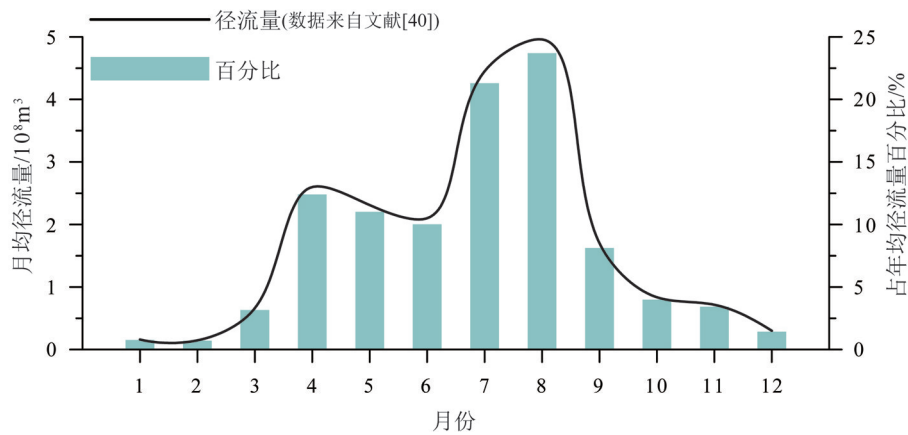


图 4 鸭绿江通化站月径流量变化

Fig.4 The monthly runoff changes at Tonghua station

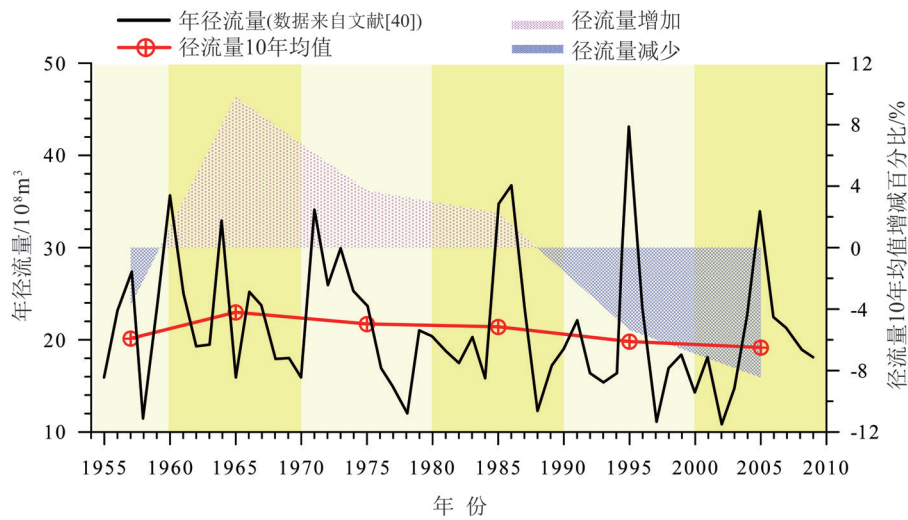


图 5 鸭绿江通化站年径流量变化

Fig.5 The annual runoff changes at Tonghua station

多年平均径流深超过 600mm^[50,51]。

荒沟站是鸭绿江最下游的水文站(图 1),其径流量可以反映入海径流量特征。在多年径流量变化过程中,丰水、枯水和平水年份的出现频率相当,鸭绿江下游的径流整体上变少,究其原因,主要是流域降雨量的减少造成的(图 6)^[36,52]。

1.3 鸭绿江口入海径流特征

鸭绿江口处于北黄海西朝鲜湾的湾顶(图 1),河口湾呈喇叭形,鸭绿江口入黄海的多年平均径流量约 $250 \times 10^8 \text{m}^3$, 约占黄海总入海径流量的 45%^[53]。河口海域潮流为正规半日潮,其中主要以 M2 分潮影响为主,其次为 S2 分潮,且存在潮高日不等和涨落潮历时不等的现象。落潮历时比涨潮历时长,涨落潮历时差值自上游向下减小。鸭绿江口属于强潮河口,平均潮差为 4.6 m,喇叭形河口湾存在潮差增大效应,且小于河道变浅、摩擦力增加的潮差减小效应。强风的风向与河口潮流方向、河口朝向大致平行,增水和风暴潮在河口区较频繁。河口附近的潮流、余流流速均较大,最大潮流流速为 50cm/s 以上,夏季余流流速大于春季,约 26cm/s^[54,55]。以 1986 年为界,鸭绿江口出现盐水界上移,1986 年以前文安滩作为鸭绿江口盐水界,盐度约 2‰,而 1986 年以后,其实测盐度超过 5‰,而浪头日隆山盐度超过 3‰。其主要原因是流域径流量逐渐减少,尤其在枯水年份,河口最大浑浊带会随着海水向上游入侵,将盐水界上推至浪头以上,且令过去主要为淡水的丹东港的盐度达 0.17‰^[56]。

2 鸭绿江流域沉积物输运的“源-汇”特征

鸭绿江流域年平均输沙量超过 $180 \times 10^4 \text{t}$ ^[57],泥沙的主要来源为暴雨冲刷,输沙量的季节变化显著,冬季干冷,造成陆地土壤结冰,不易冲刷,再加上冬季降雨量减少,径流量较小,所以河水含沙量小;春汛时期,随着积雪融化,径流量虽有所增加,但由于土壤仍未完全解冻,流域内含沙量仍比较小;夏汛时期,降雨集中,流域年输沙量约 80%主要集中在夏汛时期^[38],其输沙量及输沙特征对流域整年的入海物质都具有指示意义。对比鸭绿江上游和下游输沙量(图 7),除 1985、1987、1995、2006 年等下游丰水、偏丰年(图 6)时输沙量高于上游之外,其余年份上游输沙量均高于下游,这一点与年径流量的区域分布规律不同(图 2),由此可见鸭绿江流域年输沙量的变化不仅决定于年降雨量和径流量的变化,而且也与气候条件、径流来源、洪水以及人类活动等因索有关^[42],尤其是流域中下游大型水利工程的投入使用,对中上游粗颗粒泥沙的拦截,大大减少了泥沙向下游的输送量。

2.1 上游流域输沙特征

鸭绿江上游在白山市境内有 2 个悬浮泥沙测站,分别是十四道沟站和临江站。上游河道较顺直,比降大,使得径流大量冲刷河床底质泥沙向下游输送,因此其输沙量在下游站位比上游站位高,自十四

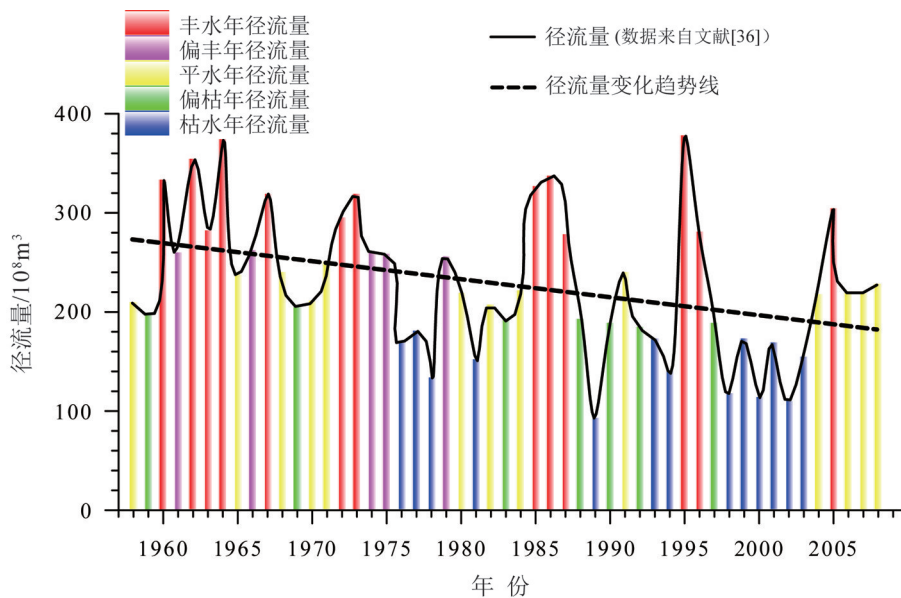


图 6 鸭绿江下游年径流量年际变化及其累计距平均值变化

Fig.6 The annual runoff changes and its cumulative average distance of the downstream of Yalu River

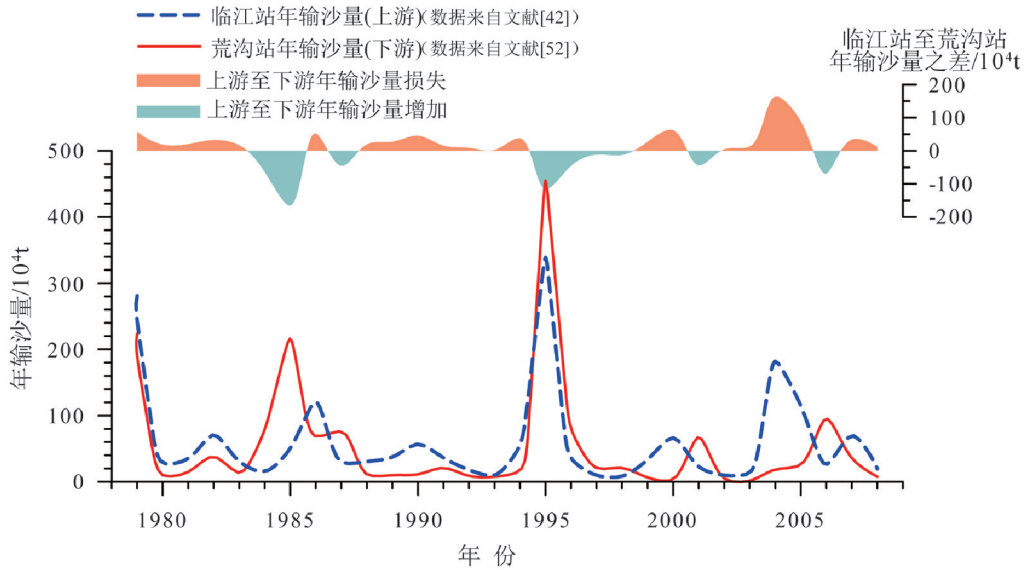


图 7 鸭绿江临江站、荒沟站年输沙量变化对比

Fig.7 The comparison of the annual variations of the sediment discharge at Linjiang station and Huanggou station

道沟站到临江站的多年平均输沙量增加,增大量超过 $60 \times 10^4 \text{t}$ 。自 1979 年至 2008 年的 30 年输沙量资料中,鸭绿江上游自上向下的河段除了其中 3 年出现河道淤积现象外,其余年份河道均以冲刷为主,冲刷量最大超过 $200 \times 10^4 \text{t}$ (图 8)^[42]。

2.2 下游流域及鸭绿江口入海的输沙特征

鸭绿江下游浪头河段以上含沙量较小,河流水体比较清澈,即使汛期该河段的含沙量也较小。鸭绿江口海域受潮汐、风浪及盐淡水混合等因素的影响,其入海的大量粗颗粒泥沙主要在东水道和中水道沉积下来,细颗粒悬浮泥沙可随径流扩散至西水

道海域。斗流蒲至薪岛海域的盐淡水混合作用比较剧烈,径流输沙和底质再悬浮作用使得该海域含沙量较大,最大含沙量可达 1.97kg/m^3 (图 9)^[57,58]。西水道两侧的浅滩处,底质泥沙在波浪作用下再次悬浮,并随潮流传输,最终沉积在西水道内,滩槽泥沙交换和底质泥沙再悬浮是西水道海域悬浮泥沙的主要来源。西水道两侧的滩面既是泥沙沉积的“汇”,又是航道回淤泥沙的“源”^[59]。

鸭绿江口年平均入海输沙量超过 $150 \times 10^4 \text{t}$ ^[60],以鸭绿江下游荒沟站的年径流量和年输沙量对比,来反映入海径流量和输沙量的年际变化规律,如图 10 所示^[52],输沙量的年际变化幅度较径流

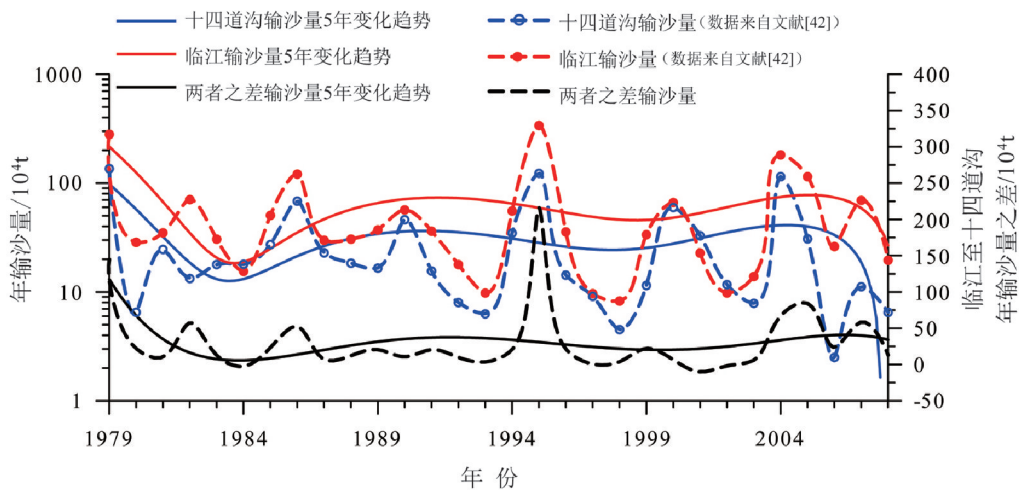


图 8 鸭绿江上游十四道沟站、临江站输沙量的年际变化

Fig.8 The annual changes in sediment discharge at the Shisidaogou station and Linjiang station in upstream basin of Yalu River

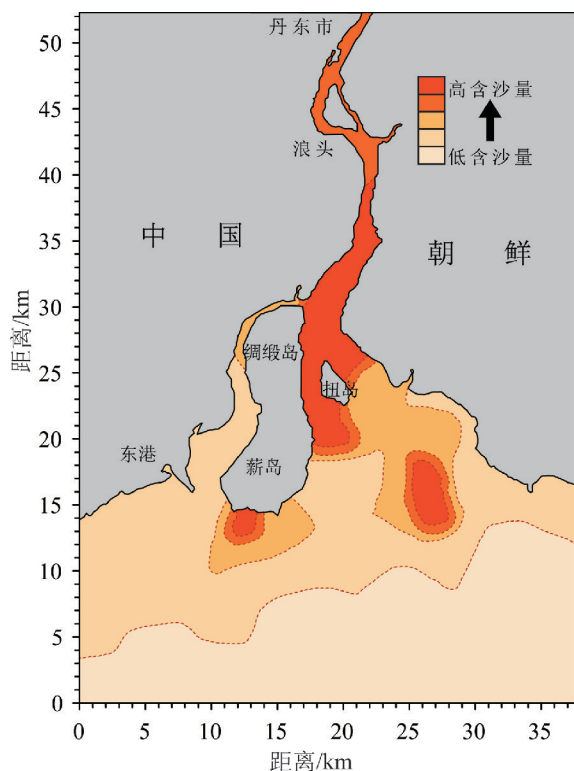


图9 鸭绿江下游及河口段悬沙扩散分布图^[57]

Fig.9 The suspended sediment distribution in the downstream and estuary of Yalu River

量剧烈,因为输沙量变化不仅受径流变化的影响,还同时受人类活动等因素影响。流域有超过70%的泥沙是以悬浮体形式向下游传输的,而大部分悬浮体属于细颗粒物质,很难在下游河道沉积下来,往往随径流输运到河口以外或口外高滩面上沉积下来,其中粒度较细的粉砂和黏土可以扩散到浅海区,沿海岸线向西南方向进行输沙,有利于北黄海淤泥质海岸浅滩的堆积(表1)^[58, 61]。

3 鸭绿江口地貌特征及其动力机制

鸭绿江河床底质泥沙大多来自径流冲刷的疏松沙砾、粗砂和中细砂沉积物,这些粗颗粒泥沙较易沉积在河床底部,使得河床粒径比河岸明显粗一些,因此,河床泥沙自上游向下游细化。鸭绿江口底质类型主要是砂、粉砂质砂、砂质粉砂和黏土质粉砂。鸭绿江口东水道、中水道作为径流的主要入海通道,其底质沉积物主要来源于鸭绿江中下游各支流的输沙;西水道多年来已演化为潮流通带,受径流和潮汐、波浪等海洋动力作用的影响,西水道与辽东浅滩底质沉积物来源于径流和浅海。其底质类型分布情况为:东水道与西水道交汇处底质类型以细砂为主;

水深较浅的海域底质类型以粒径更细的细砂为主;绸缎岛东侧深槽区底质类型以黏土质粉砂为主;西水道大东港上游底质类型主要为粉砂和黏土质粉砂,其下游以细砂为主(图11)^[57-63]。

鸭绿江口在海洋动力作用下具有独特的地貌特征,潮流沙脊广泛分布,河口潮沟发育比较好,拦门沙可上推至斗流蒲附近。潮流沙脊为受潮流作用影响,呈北北东至南南西向延伸,潮流沙脊沙体平行排列,高差为7至25m不等。受波浪尤其是风暴潮的影响,鸭绿江口存在典型的浪蚀穴、浪蚀柱,鸭绿江口外潮流沙脊上也有明显的大沙波存在,可见波浪尤其是风暴潮对鸭绿江口浅滩发育具有重要的影响作用^[57, 63-67]。

4 人类活动和气候变化对鸭绿江流域水沙输运及河口地貌特征的影响

4.1 人类活动的影响

(1) 水利工程调控下的径流与输沙变化

鸭绿江流域重大的开发活动对流域水沙输运起着重要的影响,植树造林等水土保持工程在一定程度上减少了流域入海泥沙量,而中上游的一系列大中小水电站的兴建使用,对水沙输运量及河口地貌地形的影响更为显著。鸭绿江下游径流量和输沙量呈阶段性减少趋势(图10),其中径流量主要受降雨量影响,降雨量减少,径流也随之减少,其受人类活动影响较小。而输沙量的减少幅度与径流量相比受降雨量影响不太显著,可见气候影响不是输沙量减少的主因,人类活动对输沙量的影响可能更为显著,而且人类活动对输沙量的阶段性变化的影响很大。由于流域主要的水利工程集中在中下游,以中下游干支流建设的水丰(1941年运行)、云峰(1965年运行)、桓仁(1967年运行)和太平湾(1987年运行)四大水电站投入使用的时间为依据,将1958至2008年荒沟站年径流量和年输沙量分为3个阶段,分别是1958—1964年、1965—1984年和1985—2008年。综合来看(图10,图12),随着中下游水利工程等人类活动的加剧,鸭绿江下游径流量和输沙量都有一定程度的减少,年际径流量和年际输沙量分散程度和变化幅度逐渐增大,且输沙量减小的幅度、分散程度、变化幅度均比径流量更大。可见,人类活动对输沙量减少的影响作用自20世纪60年代中期以来比较显著^[52]。

(2) 河口沉积物粒度变化

随着鸭绿江中下游大规模地修建水库和水电

表 1 鸭绿江口单位样品粒度分析^[60]

Table 1 The unit sample particle size analysis of Yalu River estuary

采样区域	采样个数	细砂/%	粉砂/%	黏土/%	说明
三角洲滩地	6	83.5	6.3	10.2	采自西汉道东西边滩下部(低潮线附近)
潮沟底质	4	76.9	13.9	7.2	采自港区入海航道和东港市潮沟
鸭绿江单位水样	23	25.8	53.9	20.3	荒沟水文站多年洪水期水样数据
鸭绿江航道底砂 1	4	80.6	19.0	0.4	枯水期斗流蒲航道清淤船上采集
鸭绿江航道底砂 2	6	76.5	22.6	0.9	平水期中水道采砂船上采集

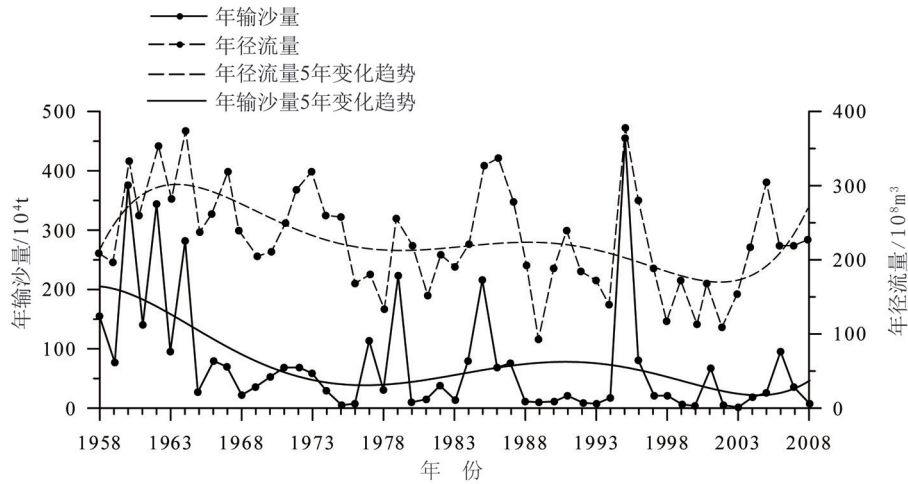


图 10 鸭绿江下游输沙量与径流量的年际变化^[52]

Fig.10 The annual changes in the sediment discharge and runoff in the downstream of Yalu River

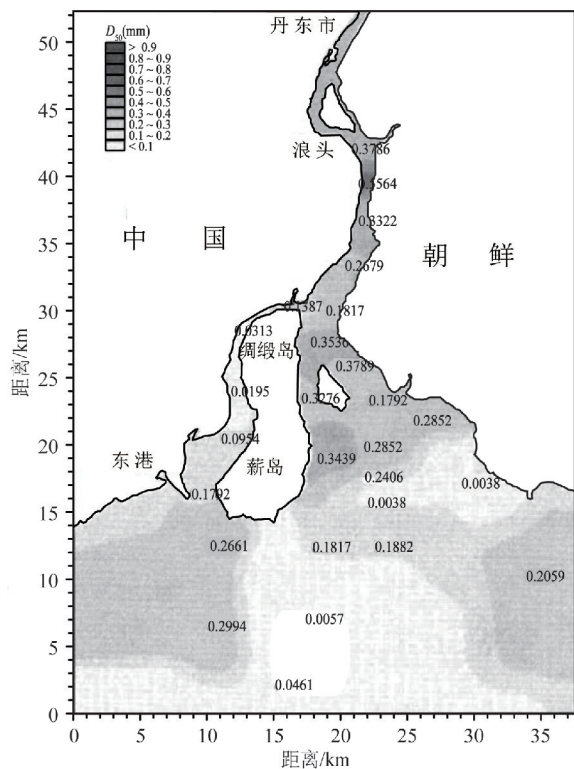


图 11 鸭绿江下游及河口段底质中值粒径分布图^[57]

Fig.11 The median grain size distribution of the sediment in downstream and estuary of Yalu River

站,造成流域入海径流量和输沙量呈阶段性减少,鸭绿江口地貌形态也发生了显著变化^[52,61],造成鸭绿江河口沉积物类型在近几年相应地发生阶段性变化,其中以距河口较近的潮滩对流域变化的敏感度最高。1940—1970年的沉积物组分中砂的含量逐渐减少,粉砂的含量逐渐增加,底质沉积物平均粒径减小,粗颗粒敏感组分逐渐降低,而细颗粒敏感组分逐渐增高。究其原因,主要是由于流域水库对粗颗粒泥沙的拦截作用强于细颗粒泥沙,大量粗颗粒泥沙难以向下游输送,使得河流向下游输送的粗颗粒泥沙量大大减少造成的(图 7,图 10)。1970年至 90 年代中期,人类活动影响下流域水沙输运量变化不大,与此对应的河口底质沉积物类型变化也比较小。90 年代以来,随着人类活动影响的加剧,鸭绿江口入海输沙量进一步减少,盐水界上移,来自径流的细颗粒物质难以沉降在河口区,向浅海区扩散,受盐淡水混合和潮汐、波浪等海洋动力作用,河口区沉积物较细的物质再悬浮再搬运,使得靠近河口区的沉积物明显粗化,粗颗粒泥沙的敏感组分含量升高,细颗粒敏感组分含量减少,并且出现中等敏感组分^[68]。

(3)河口地貌特征变化

鸭绿江流域水利工程的兴建使河口区来沙量减

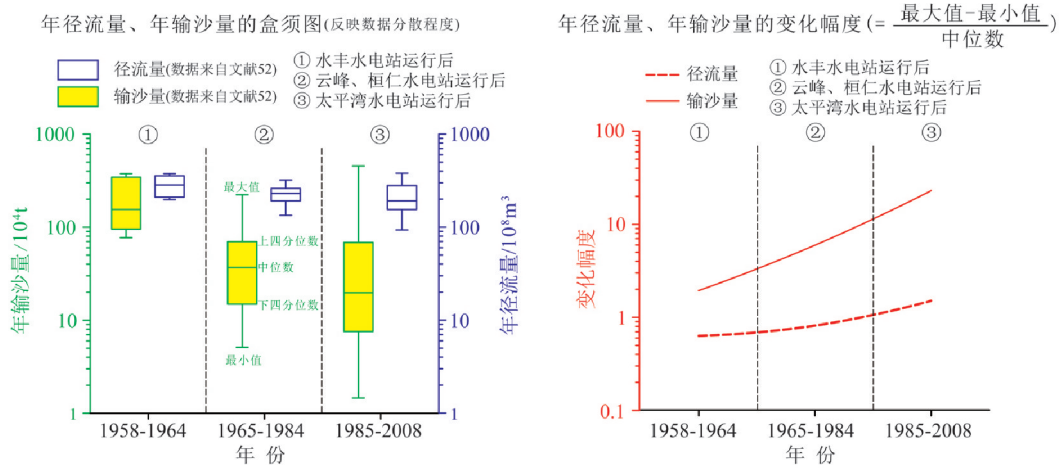


图 12 鸭绿江荒沟站年径流量和年输沙量的阶段性变化

Fig.12 The stepwise variation in the annual runoff and the annual sediment discharge at Huanggou station

少,导致河口三角洲的侵蚀加剧;大面积围垦使鸭绿江口西水道的纳潮量大幅减少,淤积现象严重^[69]。1968至2008年近40年间,鸭绿江口地区朝方岛屿和河岸的面积共增加量超过80km²,增长速率逐渐加快。相对应的中方的增加量不足1km²,国土面积下降,后来虽有小幅增长,但增长速率不足朝方的1/10。朝方面积大幅度增长的主要是由于朝方在各岛屿上兴建丁坝,使河水对中方岸线的冲刷力加剧,从而增加朝方国土面积,其中对中方损害最严重的地区是西水道地区^[70],鸭绿江口西水道多年的遥感影像显示,该海域岸线不断变化,部分区域变化显著。随着中方对岸线维护的重视,对鸭绿江口进行大量围

海养殖、港口建设及海岸开发,中方一侧海岸侵蚀后退减弱,其中黄金坪-内岛和绸缎岛-薪岛西侧对应的岸段较为稳定,东港市岸段显著向海延伸,尤其是2005—2010年五年间东港市岸线前进速度最快^[71]。

4.2 气候变化的影响

鸭绿江流域径流量的变化主要受降雨量的影响,从图13可以看出,全球气候变化影响下,厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)事件影响的年份^[24,72],上中下游径流量均有不同程度的减少趋势,可见气候变化引起的降雨量的减少是直接影响流域径流量减少的主要原因,也一定程度上造成了流域输沙量的减少^[52]。

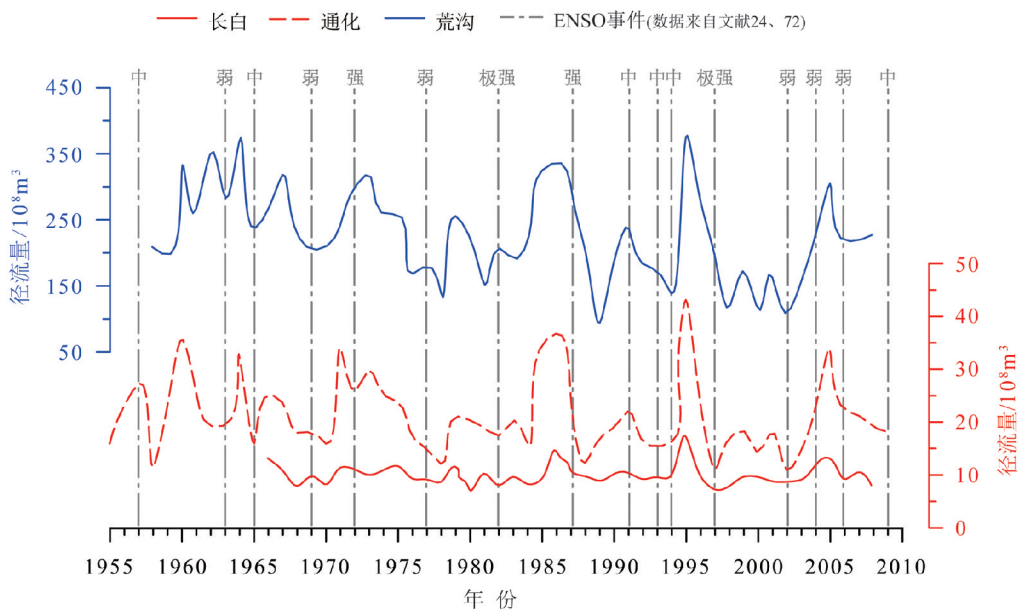


图 13 鸭绿江长白站、通化站、荒沟站年径流量变化及 ENSO 事件强弱特征

Fig.13 The annual runoff changes at Changbai station, Tonghua station, Huanggou station along Yalu river and the strength of the ENSO events

受全球气候变暖影响,海平面缓慢升高^[73],鸭绿江流域平均气温亦呈升高趋势,冬季升温比较明显,年降雨量和夏汛时期降雨量减少,出现异常天气、局部地区暴雨和强风暴现象增多^[74]。气候变化引起的海平面上升和强风暴天气,会使鸭绿江口区域遭受风暴潮及盐碱化侵袭,造成河口地貌的显著变化,这会严重影响港口发展和城市建设,而鸭绿江水质和生态环境也会进一步恶化^[75]。

5 讨论

5.1 生态环境对鸭绿江流域变化和人类活动的响应

(1) 水质变化

鸭绿江水质经历了一个“50 年代淘米洗菜,60 年代洗衣灌溉,70 年代水质变坏,80 年代鱼虾绝代”的演变过程,宋胤卿和曲忠艳^[76]、刘成珍和张丽杰^[77]均以《地表水环境质量标准》GB3838-2002 为标准,评价鸭绿江水质变化,将水体功能依次划分为五类(I 类至 V 类高锰酸盐指数 COD_{Mn} 分别为 2、4、6、10、15mg/L),其中 I 类水质最好,V 类水质最差。2003—2006 年段和 2010—2013 年段的水质监测资料显示,中上游的水质适合于集中式生活饮用水、地表水水源地、二级保护区、鱼虾类越冬、水产养殖区等渔业水域以及适合做游泳区,且水质有向好趋势^[76,77]。鸭绿江下游主要污染物以有机污染型为主,石油类是水体中最主要的污染物。自 1976 年起近 30 年时间内,因为企业排污量少,鸭绿江下游荒沟断面水质变化不大,几乎均在 II 类—III 类水范围

内;浪头、绸缎岛两断面因受城市大量工矿企业排污和居民生活污水的影响,其水质变化明显(图 14);丹东地区在 70 年代到 80 年代,化工业兴盛,大量污染物被排放至流域内,使得下游水质一般在 III 类至 IV 类水范围,水质严重恶化区域水质类型可达 V 类,从图 14 可以很明显看出,自荒沟经浪头至绸缎岛, COD_{Mn} 逐渐升高,水质明显变差。至 90 年代,污染性较强的企业大量倒闭,排污量明显减少,且污水处理加强,其水质有向好趋势,尤其是浪头和绸缎岛附近,水质控制在 II 类—III 类水范围内(图 14)^[78,79]。2001—2005 年间,鸭绿江口海域污染类型发生显著改变,曾经作为主要污染物的石油类和活性磷酸盐含量下降,主要污染物类型转变,其水质质量符合国家标准,这一改变与丹东市许多污染重的企业被关闭、停产或转产、排污量锐减措施有关^[80]。从图 14 中径流、输沙和 COD_{Mn} 变化对比来看,鸭绿江水质变化受径流、输沙影响较小,对其产生关键作用的还是人为因素。

(2) 生物群落变化对流域变化和人类活动的响应

20 世纪 80 年代中期以前,鸭绿江上游支流较适合细鳞鱼冷水鱼繁殖和生活,但随着山区、林区的开发和人类的乱捕滥获,对水域环境改变明显,冷水鱼资源急剧下降^[81]。

水丰水库位于鸭绿江中游,其上游水急,下游水深,水位和流速一年内剧烈变动,这对底栖生物生存不利,底栖生物种类和数量在水库筑坝后显著减少,螺类和水生维管束植物将近绝迹。筑坝后常栖于急流的重唇鱼等常集中洄游到上游,而常栖于缓流的鳊、鲤、鲫等常集中在水库中游,且鳊的大量繁殖占

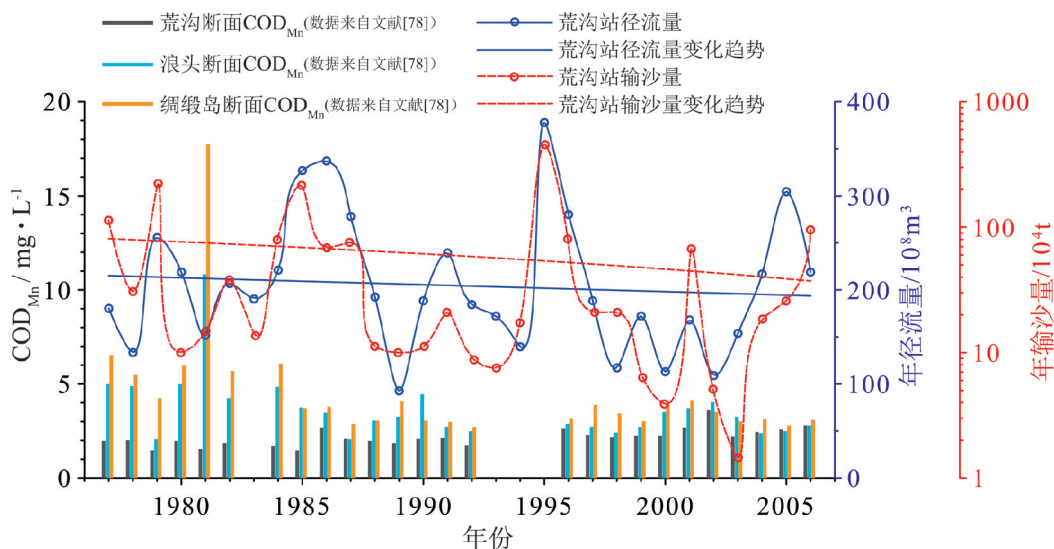


图 14 鸭绿江下游水质变化

Fig.14 The water quality in downstream of Yalu River

优势对鲤和鲫产生不良影响,而且水库条件对后两者产卵不利,鲤和鲫产量逐年减少。另外,筑坝后溯河性鱼类洄游路线被截断,幼鱼不能进入水库,产量越来越少^[82]。

孙德树等^[78]、王极刚^[79]、苏婷和苏琼芳^[83]和高明^[84]研究指出,自20世纪70至90年代,鸭绿江口绸缎岛断面水体污染严重(图14),生态环境破坏严重,水生生物明显减少,90年代以后部分高污染企业关停,污水排放受到控制,水质逐渐好转。农业开垦,建设冷冻厂房,筑坝修堤,扩建道路等人类活动,使湿地退化,对大多数鸟类的繁殖、栖息影响很大。河道与港口的油渍污染、居民点附近的垃圾污染,海水赤潮的蔓延、耕地中农药和化肥的渗入等因素影响下,湿地的洁净、滤清功能日渐衰退,珍贵生物种类逐渐减少,湿地食物链、生态系统变得单调、脆弱,给鸟类的栖息、繁殖造成严重影响。

(3) 污染物排放和环境演变对流域变化和人类活动的响应

李富祥等将鸭绿江河口地区的环境演变过程分为3个阶段:①1941年水丰水库建成以前,污染物含量变化幅度较大,是因为这段时期没有水库拦截,鸭绿江径流年度变化很大;②水丰水库建成到20世纪80年代初,由于水库的截流作用,鸭绿江年径流量变化幅度较小(图6,图12),污染物含量变化也相

对较小;③80年代中后期至今,由于工农业和城市建设污染物的大量排放,流域污染物含量出现明显增加趋势^[85]。

相对于潮滩断面和毗邻浅海断面,鸭绿江口河流断面的生源要素和重金属元素的污染程度较大,李富祥等指出径流输送是河口地区环境污染的主要来源。鸭绿江口和潮滩表层沉积物的生源要素污染程度比较严重,重金属污染程度较轻,受鸭绿江上游铜矿开采的影响,重金属元素中Cu的污染状况较为严重。最大混浊带的细颗粒物对生源要素和重金属具有较强的吸附作用,造成最大浑浊带附近的沉积物中生源要素和重金属的高浓度分布^[86]。

5.2 鸭绿江入海细颗粒物对北黄海泥质沉积的贡献

北黄海是渤海与南黄海物质交换的场所,受该海域复杂的沉积动力环境影响,其沉积物主要物源比较复杂,目前大量针对北黄海表层沉积物、柱状样和钻孔沉积物的物源研究证实,北黄海的沉积物主要来自黄河、鸭绿江、大洋河以及北上的黄海暖流输送的长江物质^[87-89],其余周边山东半岛、辽东半岛和朝鲜半岛入海河流输沙也有一定的影响作用^[90,91]。

北黄海泥质沉积包括北黄海中部泥质区、山东

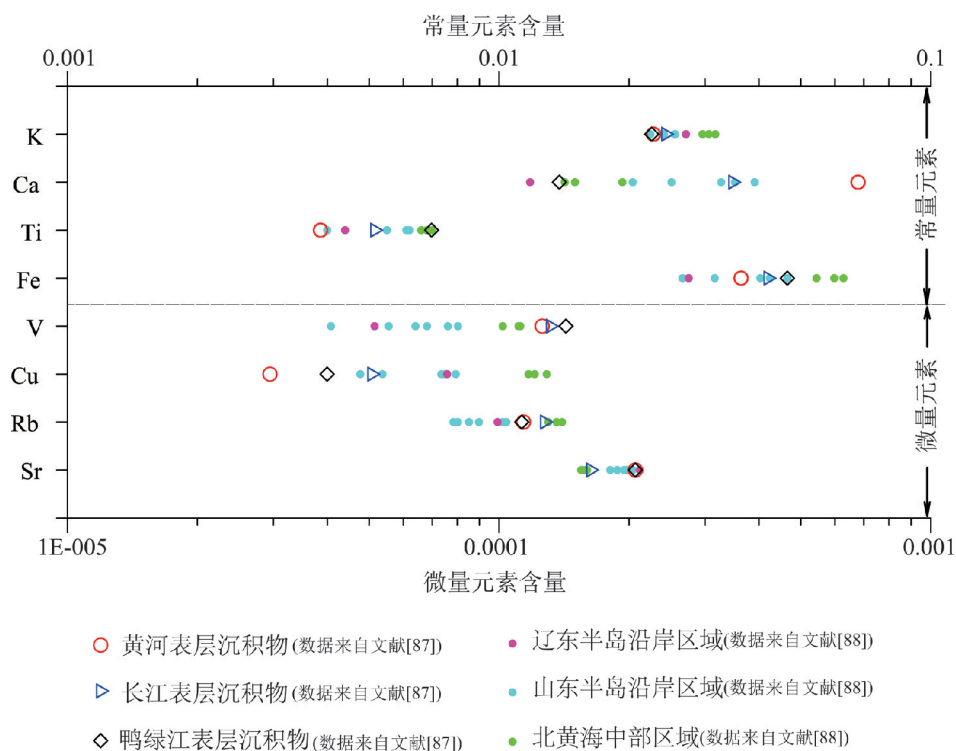


图 15 北黄海表层沉积物物源分析

Fig.15 The source analysis of surface sediment in the North Yellow Sea

半岛沿岸泥质区和辽东半岛东南沿岸泥质沉积区^[87-93],目前表层沉积物化学元素分析结果显示(图 15),黄河、长江、鸭绿江由于源岩组成不同,其常量元素含量和微量元素含量分布特征不同,齐君等^[88]根据北黄海不同区域沉积物化学元素含量分布特征指出鸭绿江对北黄海总的沉积物输入的贡献小于 10%~17%,长江的贡献为 10%~17%,黄河约占 66%~80%,其中:辽东半岛沿岸沉积物贫 Ca 富 Sr 的特点说明物质可能多来自鸭绿江,这与陈晓辉等^[89]对辽东半岛东南沿岸泥质沉积区物源分析结果相似;北黄海中部沉积物贫 Ca、Sr、富含其他元素的特点说明其黄河源物质较少,其细颗粒物可能来自鸭绿江,部分可能来自北上黄海暖流输送的长江物质;山东半岛沿岸沉积物富含 Ca、Sr,其他元素含量比北黄海中部低,其化学元素分布特征显示该海域沉积物多来自黄河物质(图 15)。

6 结论

(1)受降雨量的影响,鸭绿江流域自上游向下游,自北向南,径流量逐渐增加,中游比上游年径流量增加一倍左右,下游比上游的年径流量增加倍数为一个数量级以上

(2)与径流量主要受降雨量影响不同,输沙量受人类活动影响更为明显,流域中下游大型水利工程的投入使用,对中上游粗颗粒泥沙的拦截,大大减少了泥沙向下游的输送量,使得除下游个别的丰水、偏丰年时年输沙量大于上游之外,大部分年份下游的年输沙量小于上游。

(3)以流域中下游干支流的水丰、云峰、桓仁和太平湾四大水电站投入使用的时间为依据,分三个阶段分析 1958—2008 年鸭绿江下游年径流量和年输沙量,指出随着中下游水利工程等人类活动的加剧,鸭绿江下游径流量和输沙量都有阶段性的减少,年际径流量和年际输沙量差异幅度逐渐增大,且输沙量减小的幅度和年际差异幅度比径流量更大,尤其是自 20 世纪 60 年代中期以来比较显著。

(4)结合该区域 ENSO 事件特征,指出气候变化引起的降雨量的减少是直接影响流域径流量减少的主要原因,也一定程度上造成了流域输沙量的减少。

参考文献 (References)

- [1] Martin J M, Meybeck M. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers[J]. *Marine Chemistry*, 1979, 7 (3):173-206.
- [2] Milliman J D, Meade R H. World-Wide Delivery of River Sediment to the Oceans[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91 (1):1-21.
- [3] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[J]. *Global & Planetary Change*, 2003, 39(1):111-126.
- [4] UNEP. Transboundary river basins: status and trends (summary for policy makers)[R]. Nairobi: UNEP, 2016:3-12.
- [5] 何大明, 刘恒, 冯彦, 等. 全球变化下跨境水资源理论与方法研究展望[J]. *水科学进展*, 2016, 27(6):928-934. [HE Daming, LIU Heng, FENG Yan, et al. Perspective on theories and methods study of transboundary water resources under the global change[J]. *Advances In Water Science*, 2016, 27(6): 928-934.]
- [6] 何大明, 刘昌明, 冯彦, 等. 中国国际河流研究进展及展望[J]. *地理学报*, 2014, 69(9):1284-1294. [HE Daming, LIU Changming, FENG Yan, et al. Progress and perspective of international river researches in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9):1284-1294.]
- [7] 何大明, 刘昌明, 杨志峰. 中国国际河流可持续发展研究[J]. *地理学报*, 1999(s1):1-10. [HE Daming, LIU Changming, YANG Zhifeng. Study for the sustainability of international rivers in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999(s1):1-10.]
- [8] 何大明, 汤奇成. 中国国际河流[M]. 科学出版社, 2000. [HE Daming, TANG Qicheng. *International River Researches in China*[M]. Science Press, 2000.]
- [9] 杨明. 云南省国际河流现状及问题[J]. *云南地理环境研究*, 1998(2):49-55. [YANG Ming. Status and problems of international rivers in Yunnan Province[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 1998(2):49-55.]
- [10] 刘天仇. 西藏高原河流水资源特征及应用前景[J]. *西藏大学学报:社会科学版*, 1998(3):14-20. [LIU Tianchou. River water resources characteristic and the application prospect of the Tibetan plateau[J]. *Journal of Tibet University*, 1998(3):14-20.]
- [11] 中国大百科全书总编辑委员会. 中国大百科全书[M]. 中国大百科全书出版社, 1987. [China Encyclopedia Editor Committee. *Encyclopedia of China* [M]. Encyclopedia of China Publishing House, 1987.]
- [12] 黄国标. 气候变化对我国东北国际河流的影响研究[J]. *地理学报*, 1999(b06):152-156. [HUANG Guobiao. Impact of climate change on water resources of international rivers in northeastern china[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999(b06): 152-156.
- [13] 李雪, 李运刚, 何娇楠, 等. 1956-2013 年元江-红河流域径流变化及其影响因素分析[J]. *资源科学*, 2016, 38(6):1149-1159. [LI Xue, LI Yungang, HE Jiaonan, et al. Analysis of variation in runoff and impacts factors in the Yuanjiang-Red River Basin from 1956 to 2013[J]. *Resources Science*, 2016, 38(6):1149-1159.]
- [14] Connell E, Scott P, Davletov B. A luminescence dating study of loess deposits from the Yili River basin in western China

- [J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10:50-55.
- [15] He C. Assessment of hydrological alterations from 1961 to 2000 in the Yarlung Zangbo River, Tibet[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2012, 12(2):93-103.
- [16] Fan H, He D, Wang H. Environmental consequences of damming the mainstream Lancang-Mekong River: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 146:77-91.
- [17] Jin G, Cong L, Fang Y, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in air particulates and its effect on the Tumen river area, Northeast China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 60(6):298-304.
- [18] Liu L L, Jiang T, Jin-Ge X U, et al. Responses of hydrological processes to climate change in the Zhujiang River Basin in the 21st century[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2012, 3(2):84-91.
- [19] Gu X, Zhang Q, Singh V P, et al. Temporal clustering of floods and impacts of climate indices in the Tarim River basin, China[J]. *Global & Planetary Change*, 2016, 147:12-24.
- [20] Yang S, Zhang F, Wang Z. Grain size distribution and age population of detrital zircons from the Changjiang (Yangtze) River system, China[J]. *Chemical Geology*, 2012, 296-297(6):26-38.
- [21] Yang S, Jung H S, Li C. Two unique weathering regimes in the Changjiang and Huanghe drainage basins: geochemical evidence from river sediments[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 164(1):19-34.
- [22] Yang S. Reconstruction of flood events over the last 150 years in the lower Changjiang Valley[J]. *Footwear Science*, 2009, 1(12):34-35.
- [23] Wang H, Yang Z, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950—2005): Impacts of climate change and human activities[J]. *Global & Planetary Change*, 2007, 57(3):331-354.
- [24] Wang H, Yang Z, Saito Y, et al. Interannual and seasonal variation of the Huanghe (Yellow River) water discharge over the past 50 years: Connections to impacts from ENSO events and dams[J]. *Global & Planetary Change*, 2006, 50(3):212-225.
- [25] Wang H, Yang Z, Wang Y, et al. Reconstruction of sediment flux from the Changjiang (Yangtze River) to the sea since the 1860s[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3-4):318-332.
- [26] Hu B, Wang H, Yang Z, et al. Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) basin and their implications[J]. *Quaternary International*, 2011, 230(1):34-43.
- [27] Chen J, Wang F, Meybeck M, et al. Spatial and temporal analysis of water chemistry records (1958-2000) in the Huanghe (Yellow River) basin[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(3):2299-2310.
- [28] Huang Y, Cai J, Yin H, et al. Correlation of precipitation to temperature variation in the Huanghe River (Yellow River) basin during 1957-2006[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 372(1):1-8.
- [29] Liu S M. Response of nutrient transports to water-sediment regulation events in the Huanghe basin and its impact on the biogeochemistry of the Bohai[J]. *Journal of Marine Systems*, 2015, 141:59-70.
- [30] Fan B L, Zhao Z Q, Tao F X, et al. The geochemical behavior of Mg isotopes in the Huanghe basin, China[J]. *Chemical Geology*, 2016, 426:19-27.
- [31] Yan W, Zhang S, Sun P, et al. How do nitrogen inputs to the Changjiang basin impact the Changjiang River nitrate: A temporal analysis for 1968-1997[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4):2-10.
- [32] 高建华, 李军, 王珍岩, 等. 鸭绿江河口及近岸地区沉积物中重金属分布的影响因素分析[J]. *地球化学*, 2008, 37(5):430-438. [GAO Jianhua, LI Jun, WANG Zhenyan, et al. Heavy metal distribution and their influence factors in sediments of Yalu River Estuary and its adjacent sea area[J]. *Geochimica*, 2008, 37(5):430-438.]
- [33] 刘琦, 刘玉机. 鸭绿江重金属入海通量研究[J]. *海洋环境科学*, 1992(2):19-27. [LIU Qi, LIU Yuji. Research of the heavy metal flux delivered from Yalu River into the sea[J]. *Marine Environmental Science*, 1992(2):19-27.]
- [34] 宋树东, 付卫东. 鸭绿江流域中上游区水资源分析[J]. *吉林水利*, 2008(3):15-17. [SONG Shudong, FU Weidong. Analysis for the water resources in the central and upstream Yalu River basin[J]. *Jilin Water Resources*, 2008(3):15-17.]
- [35] 管延海, 姜淑坤. 鸭绿江中上游水环境分析与评价[J]. *吉林水利*, 2009(11):48-49. [GUAN Yanhai, JIANG Shukun. analysis and evaluation of water environment in the central and upstream Yalu River basin[J]. *Jilin Water Resources*, 2009(11):48-49.]
- [36] 刘敬伟, 李富祥, 刘月, 等. 鸭绿江下游径流时序变化特征研究[J]. *人民黄河*, 2011, 33(10):34-36. [LIU Jingwei, LI Fuxiang, LIU Yue, et al. Researches on the Characteristics of Sequential Variation of Runoff in the Lower Valley of the Lower Yalu River[J]. *Yellow River*, 2011, 33(10):34-36.]
- [37] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第十四分册)[M]. 海洋出版社, 1998. [China's Gulf Compilation Committee. Chinese Bay(the 14th booklet)[M]. China Ocean Press, 1998.]
- [38] 王子臣, 冯天琼. 鸭绿江流域的水文概况[J]. *水文*, 1983(1):49-53. [WANG Zichen, FENG Tianqiong. The hydrological situation of the Yalu River basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 1983(1):49-53.]
- [39] 楚林海, 楚志东. 鸭绿江上游径流特性分析[J]. *东北水利水电*, 2012, 30(12):39-40. [CHU Linhai, CHU Zhidong. The analysis of the runoff characteristics in the Yalu River upstream[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2012, 30(12):39-40.]
- [40] 刘德鹏, 宦家宾, 赵东辉. 浑江流域通化水文站年径流量特性分析[J]. *黑龙江水利科技*, 2011, 39(1):22-22. [LIU Depeng, HUAN Jiabin, ZHAO Donghui. The annual runoff characteristic analysis at the Tonghua station in Hunjiang ba-

- sin[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2011, 39(1):22-22.]
- [41] 吕素琴, 张立. 鸭绿江上游长白站年径流特性分析[J]. 东北水利水电, 2007, 25(4):36-37. [LU Suqin, ZHANG Li. The analysis of the annual runoff characteristics at Changbai Station in the Yalu River upstream[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2007, 25(4):36-37.]
- [42] 付卫东, 张立. 鸭绿江上游河道沙量平衡分析[J]. 东北水利水电, 2010, 28(2):27-28. [FU Weidong, ZHANG Li. Balance Analysis of the suspended sediment in the Yalu River upstream[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2010, 28(2):27-28.]
- [43] 孙成海, 田伟. 水文气象预报在云峰水库调度工作中的应用[J]. 吉林气象, 1995(jl):21-22. [SUN Chenghai, TIAN Wei. Hydrologic forecast application in yunfeng reservoir dispatching work[J]. Jilin Weather, 1995(jl):21-22.]
- [44] 孙成海, 范垂仁. 云峰水电站长期水文预报方法的研究[J]. 吉林水利, 1994(10):17-20. [SUN Chenghai, FAN Chuiren. The long-term hydrological forecast method research of the Yunfeng hydropower station[J]. Jilin Water Resources, 1994(10):17-20.]
- [45] 高萌隆, 付亚波. 云峰水库调度自动化系统现状分析[J]. 吉林电力, 2007, 35(3):46-47. [GAO Menglong, FU Yabo. Yunfeng reservoir scheduling automation system analysis[J]. Jilin Electric Power, 2007, 35(3):46-47.]
- [46] 王国利, 梁国华, 朱永英. 云峰水库汛限水位动态控制决策支持系统设计与开发[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(1):47-49. [WANG Guoli, LIANG Guohua, ZHU Yongying. Decision-making support system of dynamic operation on Yunfeng Reservoir normal elevation in flood season [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(1):47-49.]
- [47] 孙成海, 田伟. 对云峰水库调度的回顾与展望[J]. 东北水利水电, 1993(10):32-37. [SUN Chenghai, TIAN Wei. Retrospect and prospect of Yunfeng reservoir scheduling[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 1993(10):32-37.]
- [48] 李学勤, 管利群. 浑江流域降水径流变化浅析[J]. 吉林水利, 2001(3):20-22. [LI Xueqin, GUAN Liqun. The analysis of Hunjiang basin rainfall and runoff change[J]. Jilin Water Resources, 2001(3):20-22.]
- [49] 宋恩来. 水丰、云峰水电站大坝加固及其效果[J]. 大坝与安全, 1997(4):1-6. [SONG Enlai. Shuifeng, Yunfeng hydropower station dam reinforcement and its effect[J]. Dam & Safety, 1997(4):1-6.]
- [50] 王铁锋. 蒲石河水沙特性及已建成水库泥沙淤积概况[J]. 东北水利水电, 1993(7):26-28. [WANG Tiefeng. Pushi river sediment characteristics and reservoir sedimentation profiles [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 1993(7):26-28.]
- [51] 张弘, 张青山, 高文元. 蒲石河流域降水特性分析[J]. 东北水利水电, 2014, 32(4):35-36. [ZHANG Hong, ZHANG Qingshan, GAO Wenyuan. The rainfall characteristics analysis of Pushi River basin[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2014, 32(4):35-36.]
- [52] 刘敬伟, 程岩, 李富祥, 等. 人类活动对鸭绿江下游水沙变化的影响[J]. 辽东学院学报:自然科学版, 2015(1):27-32. [LIU Jingwei, CHENG Yan, LI Guoxiang, et al. Influence of human activities on changes of runoff and sediment downstream Yalu River[J]. Journal of Eastern Liaoning University (Natural Science), 2015(1):27-32.]
- [53] 程天文, 赵楚年. 我国主要河流入海径流量、输沙量及对沿岸的影响[J]. 海洋学报, 1985, 7(4):460-471. [CHENG Tianwen, ZHAO Chunian. The runoff and sediment discharged from China's major rivers into the sea and their coastal influence[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1985, 7(4):460-471.]
- [54] 白凤龙, 高建华, 汪亚平, 等. 鸭绿江口的潮汐特征[J]. 海洋通报, 2008, 27(3):7-13. [BAI Fenglong, GAO Jianhua, WANG Yaping, et al. Tidal characteristics at Yalu River Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2008, 27(3):7-13.]
- [55] 刘恒魁, 王锡侯, 吴冠. 鸭绿江口西侧浅海区某些水文特征的初步分析[J]. 海洋通报, 1989(2):25-30. [LIU Hengkui, WANG Xihou, WU Guan. The preliminary analysis of the hydrological characteristics in the west shallow sea of Yalu River estuary[J]. Marine Science Bulletin, 1989(2):25-30.]
- [56] 程岩. 鸭绿江河口地貌的形成与演变[D]. 东北师范大学学位论文, 2007. [CHENG Yan. The geomorphological formation and evolution of the Yalu River estuary[D]. Northeast Normal University, 2007.]
- [57] 高峰, 毛爱华, 曹玉芬. 鸭绿江下游航道水流泥沙问题研究现状与分析[C]// 国际航运协会 2008 年会暨国际航运技术研讨会. 2008. [GAO Feng, MAO Aihua, CAO Yufen. The research and analysis of the runoff and sediment in the downstream channel of the Yalu River[C]// PIANC 2008 Annual Meeting and International Shipping Technology Seminar. 2008.]
- [58] 张嘉军, 潘琼芝. 鸭绿江下游河道演变分析[J]. 丹东海工, 2006(00). [ZHANG Jiajun, PAN Qiongzi. The evolution analysis of the downstream river channel of Yalu River[J]. Dandong Marine Engineering, 2006(00).]
- [59] 李富祥. 鸭绿江河口区沉积特征及其环境记录[D]. 辽宁师范大学学位论文, 2012. [LI Fuxiang. The record of the sedimentary characteristics and environment in the Yalu River estuary[D]. Liaoning Normal University, 2012.]
- [60] 程岩, 毕连信. 鸭绿江河口浅滩的基本特征和动态变化[J]. 泥沙研究, 2002(3):59-63. [CHENG Yan, BI Lianxin. Primary character and motive change of shallow beach in Yalu River Mouth[J]. Journal of Sediment Research, 2002(3):59-63.]
- [61] 程岩, 张毅. 鸭绿江下游河道演变及其对港口的影响[J]. 泥沙研究, 1990(2):77-84. [CHENG Yan, ZHANG Yi. The evolution of the downstream river channel of the Yalu River and its influence on port[J]. Journal of Sediment Research, 1990(2):77-84.]
- [62] 夏东兴, 刘振夏. 潮流脊的形成机制和发育条件[J]. 海洋学报, 1984, 6(3):361-367. [XIA Dongxing, LIU Zhenxia.

- Formation mechanism and the development condition of tidal ridge[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1984, 6(3):361-367.]
- [63] 刘振夏, 夏东兴. 潮流脊的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 1983, 14(3):286-296. [LIU Zhenxia, XIA Dongxing. A preliminary study of tidal current ridges[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1983, 14(3):286-296.]
- [64] 石勇, 高建华, 杨旸, 等. 鸭绿江河口西岸潮滩沉积特征对流域变化的响应[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(6):1221-1233. [SHI Yong, GAO Jianhua, YANG Yang, et al. Responses of depositional characteristics of tidal flats on the west bank of the Yalu River estuary to catchment changes[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(6):1221-1233.]
- [65] 林天岩. 鸭绿江下游航道洪水前后浅滩变化分析[J]. *水运工程*, 1986(9):30-33+46. [LIN Tianyan. Shallow change analysis of the downstream river channel of the Yalu River before and after the flood[J]. *Port & Waterway Engineering*, 1986(9):30-33+46.]
- [66] 李光天, 符文侠, 贾锡钧. 辽东潮间浅滩的综合特征[J]. *地理学报*, 1986(3):262-273. [LI Guangtian, FU Wenxia, JIA Xijun. The comprehensive characteristic of the Liaodong peninsular tidal flat[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1986(3):262-273.]
- [67] 张寒元, 刘红, 龚鸿锋, 等. 鸭绿江口西水道水沙输移特征 [C]// 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 2011. [ZHANG Hanyuan, LIU Hong, GONG Hongfeng, et al. The water-sediment transport characteristics of the western channel of the Yalu River estuary[C]// The Proceedings of the 15th China Ocean (shore) International Symposium. 2011.]
- [68] 冉隆江, 石勇, 高建华, 等. 鸭绿江河口地区沉积物的粒度变化及影响因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(2):31-42. [RAN Longjiang, SHI Yong, GAO Jianhua, et al. Grain size variation and its influencing factors in the sediment cores of Yalu River estuary[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(2):31-42.]
- [69] 王昊, 张志全, 胡远满, 等. 鸭绿江流域水利工程对河口三角洲的影响 [J]. *生态学杂志*, 2011, 30(8):1799-1804. [WANG Hao, ZHANG Zhiquan, HU Yuanman, et al. Impacts of water conservancy project on Yalu River delta[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8):1799-1804.]
- [70] 闻雅, 姜琦刚, 李远华, 等. 近 40 年来鸭绿江口地区动态变化研究 [J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(25):6262-6268. [WEN Ya, JIANG Qigang, LI Yuanhua, et al. Dynamic changes of Yalujiang River mouth in the recent 40 years[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(25):6262-6268.]
- [71] 李琳, 张杰, 马毅, 等. 1976—2010 年鸭绿江口西水道岸线变迁遥感监测与分析 [J]. *测绘通报*, 2012(s1):386-390. [LI Lin, ZHANG Jie, MA Yi, et al. Remote sensing monitoring and analysis of the coastline evolution of the western channel of Yalu River estuary from the year 1976 to 2010[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012(s1):386-390.]
- [72] 柳莎莎. 气候变化和人类活动对现代黄河输沙量影响的甄别 [D]. 中国海洋大学, 2013. [LIU Shasha. Identification of impacts from climate change and human activities to sediment change of Yellow River [D]. Ocean University of China, 2013.]
- [73] 任美镔. 全球气候变化及海平面上升问题研究的现状与发展趋势——为《地理科学》创刊十年而作 [J]. *地理科学*, 1990, 10(3):195-207. [REN Meie. Recent development in study on global climatic changes and sea level rise[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1990, 10(3):195-207.]
- [74] 丁艳丽. 浅谈集安市气候变化 [J]. *吉林气象*, 2003(4):12-15. [DING Yanli. Discussion of the climate change in Ji'an[J]. *Jilin Climate*, 2003(4):12-15.]
- [75] 李雪铭, 程岩, 汪毅. 未来海面上升对鸭绿江河口地区的影响 [J]. *地理与地理信息科学*, 1992(2):22-25. [LI Xueming, CHENG Yan, WANG Yi. The effects of future sea rise to the Yalu River estuary area[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 1992(2):22-25.]
- [76] 宋胤卿, 曲忠艳. 鸭绿江中上游水质现状评价及变化趋势分析 [J]. *吉林水利*, 2008(6):8-9. [SONG Yinqing, QU Zhongyan. The water quality evaluation and trend analysis of the upper and middle reaches of Yalu River[J]. *Jilin Water Resources*, 2008(6):8-9.]
- [77] 刘成珍, 张丽杰. 鸭绿江中上游水质现状评价及变化趋势分析 [J]. *硅谷*, 2014(16):195-195. [LIU Chengzhen, ZHANG Lijie. The water quality evaluation and trend analysis of the upper and middle reaches of Yalu River[J]. *Silicon Valley*, 2014(16):195-195.]
- [78] 孙德树, 李景玉, 何东, 等. 鸭绿江河口水质 30 年变化综合评价 [C]// 中国水利学会 2007 学术年会人类活动与河口分会场论文集. 2007. [SUN Deshu, LI Jingyu, HE Dong, et al. The comprehensive evaluation of the water quality changes of Yalu River estuary nearly 30 years[C]// Proceedings at the Human Activity and the Estuary Venue of CHES's Annual Academic Meeting in the Year 2007. 2007.]
- [79] 王极刚. 鸭绿江下游及河口附近水质现状评价及变化趋势 [J]. *海洋环境科学*, 1997(3):53-58. [WANG Jigang. A water quality assessment and change trend of the pollution Yalujiang in the lower reach and estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 1997(3):53-58.]
- [80] 王极刚, 赵杰. 2001-2005 年鸭绿江河口及邻近海域水质评价 [J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(5):499-501. [WANG Jigang, ZHAO Jie. Evaluation on water quality in Yalu River estuary and Northern Huanghai Sea, 2001-2005[J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(5):499-501.]
- [81] 盛连喜, 高燕, 金香琴, 等. 鸭绿江上游细鳞鱼的生境现状及资源退化原因分析 [J]. *四川环境*, 2005, 24(6):50-53. [SHENG Lianxi, GAO Yan, JIN Xiangqin, et al. Eco-environmental Observation on *Brachymystax lenok* in the Upper Reaches of Yalu River and Analysis of Resource Decrease[J]. *Sichuan Environment*, 2005, 24(6):50-53.]
- [82] 水丰水库中朝共同调查团. 水丰水库渔业生物学的基础调查 [J]. *动物学杂志*, 1959(1):30-31. [China and the DPRK bilateral common mission of the Shuifeng reservoir. The basic

- investigating of the fisheries biology in Shuifeng reservoir[J]. Chinese Journal of Zoology, 1959(1):30-31.]
- [83] 苏婷, 苏琼芳. 人与湿地关系的演变-以丹东鸭绿江口滨海湿地为例[J]. 东方企业文化, 2012(11):182. [SU Ting, SU Qiongfang. The relationship evolution between humans and wetlands, taking Dandong coastal wetland of Yalu River as example[J]. Oriental Enterprise Culture, 2012(11):182.]
- [84] 高明. 鸭绿江河口湿地鸟类生境的破坏与修复[J]. 生态科学, 2003, 22(2):186-188. [GAO Ming. Habitat restoration for birds migration in Yalu River mouth wetlands[J]. Ecological Science, 2003, 22(2):186-188.]
- [85] 李富祥, 李雪铭, 高建华, 等. 基于垂向沉积的近百年来鸭绿江河口环境演变分析[J]. 环境污染与防治, 2012(10):26-30. [LI Fuxiang, LI Xueming, GAO Jianhua, et al. Analysis of environmental evolution during last hundred years according to vertical sediment in the Yalu River estuary[J]. Environmental Pollution & Control, 2012(10):26-30.]
- [86] 李富祥, 王路, 郑存德, 等. 基于表层沉积物的鸭绿江口环境质量状况分析[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(2):37-42. [LI Fuxiang, WANG Lu, ZHENG Cunde, et al. The analysis of environmental quality conditions according to surface sediment in the Yalu River estuary[J]. Environmental Pollution & Control, 2014, 36(2):37-42.]
- [87] 韩桂荣, 徐孝诗, 辛春英. 黄海、渤海埋藏古河道区沉积物的地球化学特征[J]. 海洋科学集刊, 1998(1):79-87. [HAN Guirong, XU Xiaoshi, XIN Chunying. Geochemical characteristics of the sediment in buried paleoriver channel area in the Huanghai Sea and Bohai Sea[J]. Studia Marina Sinica, 1998(1):79-87.]
- [88] 齐君, 李凤业, 宋金明, 等. 北黄海沉积速率及其沉积通量[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2):9-14. [QI Jun, LI Fengye, SONG Jingming, et al. Sedimentation rate and flux of the north Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(2):9-14.]
- [89] 陈晓辉. 北黄海陆架晚第四纪地层结构与物源环境演变研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2014. [CHEN Xiaohui. Sedimentary stratigraphic structure and provenance environmental evolution in the North Yellow Sea during the late Quaternary[D]. The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2014.]
- [90] Yang S Y, Jung H S, Lim D I, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea[J]. Earth Science Reviews, 2003, 63(1):93-120.
- [91] Liu J, Saito Y, Kong X, et al. Geochemical characteristics of sediment as indicators of post-glacial environmental changes off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(7):846-855.
- [92] CHEN Xiaohui, LI Tiegang, ZHANG Xunhua, et al. A Holocene Yalu River-derived fine-grained deposit in the southeast coastal area of the Liaodong Peninsula[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013, 31(3):636-647.
- [93] Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2007, 240(1-4):169-176.