DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0247 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-10

长江典型沙质河段不同河型航道水资源利用率研究

刘林双[1],王欣霖[1],骆文广[2],李明[1],江凌[1]

(1. 长江航道规划设计研究院 国家内河航道整治工程技术研究中心,武汉 430040; 2. 武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室,武汉 430071)

摘要: 内河航道水资源是我国经济社会发展的重要支撑条件,河型是影响航道水资源利用程度的重要影响因素。本文以典型沙质河段-长江武汉至安庆河段为例,以2018-2022年枯水期实测地形为基础,采用断面宽度法和断面面积法,分析了不同河型航道水资源量、利用率分布规律。结果表明:不同河型航段的航道水资源量沿程均呈增加趋势,但顺直段增加最明显,弯曲段次之,分汊段最不明显。航道水资源利用率顺直段最高、弯曲段略低,分汊段最低。分汊段若主通航汊道分流比较大,主流较为集中,则利用率较高;若分流比较低,主流较为分散,则利用率较低,并揭示了不同河型航段航道水资源利用率较低的位置及原因,成果可为内河航道水资源的高效利用及复式航道构建提供技术支撑。

关键词: 等级航道;高等级航道;航道水资源;利用率;弯曲段;顺直段;分汊段

中图分类号: TV147.;5 **文献标志码:** A

Research on waterway resource utilization rate of different river types in typical sandy river of Yangtze River

Liu Linshuang[1], Wang Xinling[1], Luo Wenguang[2], Li Ming[1], Jiang Ling[1]

(1. National research center for inland waterway regulation engineering technology, Yangtze river waterway institute of planning and design, Hubei, Wuhan, 430040;
2. The State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Hubei, Wuhan, 430071)

Abstract: The inland waterways resources are an important supporting condition for China′s economic and social development, and the river type is an important factor affecting utilization degree of waterway resources. This work takes the typical sandy river section-Wuhan to Anqing section in Yangtze River as an example, and uses the measured terrain during the dry season from 2018 to 2022 as the basis for analysis. The section width method and section area method are used to analyze the distribution patterns of waterway resources and utilization rate in different river types. The results show that the waterway resources of different river types show an increasing trend along the route, but the increase is most significant in the straight section, followed by the curved section, and the least significant is the braided section. The utilization rate of waterway resources is highest in the straight section, slightly lower in the curved section, and lowest in the branching section. If the diversion of the main navigation channel is relatively large, the mainstream is more concentrated, and the

收稿日期: XXXX-XX-XX

作者简介: 刘林双(1986—),男,湖北宜都人,工学博士,高级工程师,主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: liu1965888@163.com.

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFC3203404);国家自然科学基金(U2340217).

本文引用格式: 刘林双,王欣霖,骆文广,等.长江典型沙质河段不同河型航道水资源利用率研究[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-10.

Citation: Liu Linshuang, Wang Xinling, Luo Wenguang, et al. Research on waterway resource utilization rate of different river types in typical sandy river of Yangtze River[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-10.

utilization rate is higher; If the diversion rate is low and the mainstream is dispersed, the utilization rate is low. Then it revealed the locations and reasons for lower resource utilization rates in different river types. The results could provide technical support for the efficient utilization of inland waterways resources and the construction of compound waterways. .

Key words: graded waterway; high graded waterway; waterway resources; utilization rate; curved section; straight section; bifurcated section

内河航道水资源是指河流水资源中被用作航道的部分,具有禀赋有限、可再生、季节性等资源属性,是我国经济社会发展的重要支撑条件[1-2]。我国《内河通航标准》(GB 50139-2004)[3]、《长江干线通航标准》(JTS 180-4-2020)[4]通过水深、航宽等要求对内河航道水资源范围进行了界定。长江大埠街以下至河口为沙质河段,长期以来具有河型多样、江湖关系复杂、河床演变剧烈等特点,导致碍航问题复杂[5-7];三峡水库蓄水以后,坝下沙质河段来沙减少,流量过程调平,退水过程加快,导致河道岸坡蚀退、洲滩冲刷,航道条件更趋复杂[8-9]。武汉至安庆河段("武安段")位于长江中下游河段中段,是典型的沙质河段,河段宽窄相间,呈藕节状,流路曲折,洲滩众多,航道演变较为剧烈,航道条件较为复杂[10-11]。前期为开发"武安段"航道水资源共开展了22项航道整治工程[12-13],2024年4月长江干线武汉至安庆河段6米水深航道整治工程竣工后,"武安段"航道尺度提升至6.0m提升至至提升至至,"武安段"航,实现了万吨级船舶直达武汉的目标。

河型是航道演变的重要影响条件。"武安段"河型包括弯曲[14]、顺直[15]和分汊[16]河型,局部存在多分汊河型[17-18]。从航道水资源的利用程度来看,目前"武安段"虽已达到I-4航道尺度,但I-4级航道外围仍有较多I-5、I-6级航道、II级、III级航道水资源,在分汊河段的非主通航汊道、顺直和弯曲河段边滩区域,仍存在较多航道水资源未得到有效利用。因此,本文以典型沙质河段—"武安段"为对象,对顺直、弯曲、分汊河段进行了划分,分析了不同河型航道水资源量、利用率的分布规律,揭示了航道水资源利用率较低的位置和原因。成果可为我国内河复式航道、航道水资源高效利用等建设提供借鉴。

1 "武安段"河道概况

"武安段"上起武汉市天兴洲长江大桥、下迄安庆市皖河口,全长约386.5km,共有25个水道(图1)。沿程分布有抗冲性极强的基岩、石山构成天然节点,在这些节点的控制下,河道平面形态呈宽窄相间的藕节状,主要有顺直段、弯曲段和分汊段河道,同时由于河床由沙质组成,致洲滩变迁频繁,河床演变剧烈,碍航情况频发。三峡蓄水后,来沙减少情况下河道局部岸线崩退,洲滩冲淤消长,航道条件极不稳定。随着一系列航道整治工程实施,航道条件明显改善,目前均已实现6.0m最小水深航道尺度,各水道均采用单等级通航,且航路均布置在单汊内,航道尺度总体较为稳定。

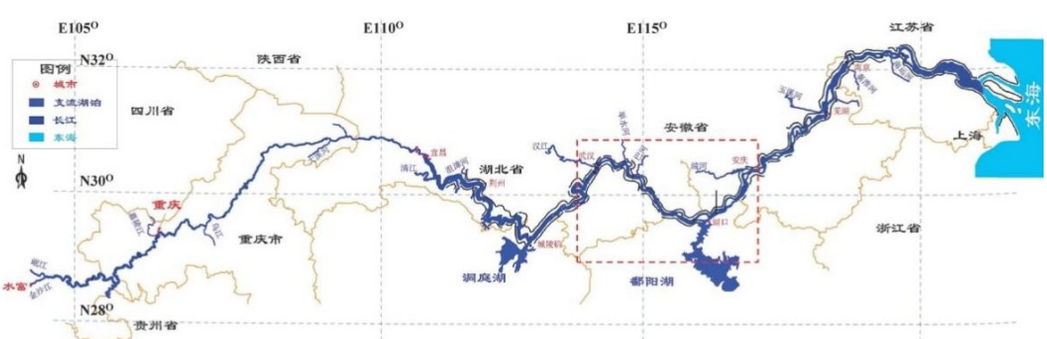


图1 武汉至安庆河段地理位置图

Fig. 1 Geographical location and river regime map of Wuhan to Anqing river section

为探明不同河型航道水资源利用特点,对"武安段"沿程河道进行断面布置,共划分为186个断面,断面间隔约为2~2.2km。从本次断面分布来看,位于顺直段、弯曲段和分汊段的断面分别有71、43、72个(图2,表1)。

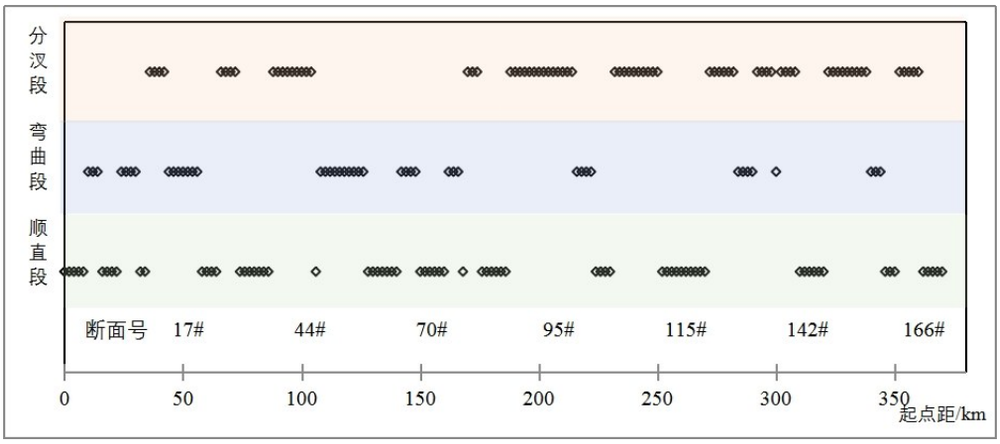


图2 断面在不同河型航道中的分布图

Fig.2 Distribution map of cross-sections in different river channel types

表1 断面沿程布置表

Table 1 Cross section layout table along the route

顺直段	水道	青山夹	阳逻	沙洲	巴河	蕲春	搁排矶	鲤鱼山
	断面号	1～4#	5#、9～12#、17～18#	30～33#、38～39#	40～44#、54#、65～68#	69#～71#、76#	77#～81#	85#、89#～91#
	水道	武穴	新洲	九江大桥	湖口	东北横	东流	官洲
	断面号	92#、93#	94#、113#	114～116#、127#、128#	129#～131#	132#～136#、156#～158#	159#～161#、174#	175#、176#、182～186#
弯曲段	水道	阳逻	牧鹅洲	罗湖洲	黄石	牯牛沙	马当南	马阻
	断面号	6～8#	13～16#、23#	24～29#	55～61#	62～64#、72～75#、82～84#、109～112#、143～144#	145～146#	151#、171～173#
分汊段	水道	湖广	戴家洲		九江	张家洲南		东流直
	断面号	19～22#、34～37#	45～53#、86～88#、95～102#		103～108#	117～126#、137～142#、147～150#、152～154#		155#、162～170#、177～181#

2 航道水深特征分析

水深分布分析表明,“武安段”沿程断面最深点范围为8～96m,主要集中在10～30m范围(图3),水深最深点小于10m的区域主要位于巴河水道下部分流段(43#、44#)、张家洲南水道中部分汊段(120#、121#、123#)、东北横水道中部分汊(138#)、马当南水道进口分汊(147#)、东流水道进口分汊(162#)。水深最深点大于30m的区域主要位于牧鹅洲水道出口顺直段(17#)、黄石水道出口顺直段(61#)、蕲春水道出口顺直段(76#)、搁排矶水道下段及出口顺直段(80#、81#、82#、84#)、东北横水道出口顺直段(144#)、马阻水道进口顺直段(151#)、东流水道出口顺直段(174#)、官洲水道进口及出口顺直段(175#、185#)。

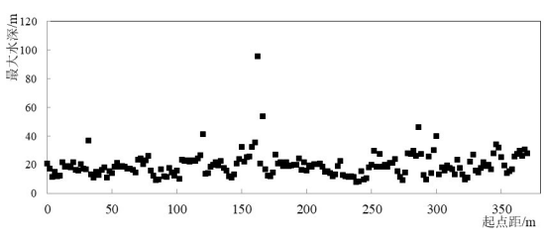


图3 武安段”沿程最大水深分布图

Fig.3 Distribution map of maximum water depth along

0m水深线宽度分析表明(图4),“武安段”沿程断面0m水深线宽度范围为570～2499m较宽(宽度大于2000m)的位置主要位于新洲水道出口(100#、101#)、张家洲南水道分汊段(119#、121#、126#)、

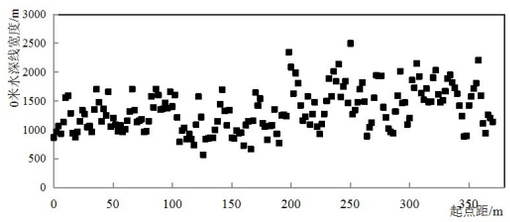


图4 武安段"沿程0米水深线宽度分布图

Fig.4 Distribution map of the width of the 0 meter

马当南水道分汊段(147#)、马阻水道出口分汊段(154#)、东流水道上分汊段(162#)、官洲水道中部分汊段(180#);较窄(宽度小于800m)的位置主要位于戴家洲水道出口汇流段(54#)、黄石水道出口段(60#)、牯牛沙水道中段(64#)、搁排矶水道出口段(81#、84#)、新洲水道进口顺直段(96#)。

结合水深分布和0m水深线宽度分布特点综合来看,水深较大区域为主要位于0m水深线宽度较小区域,即顺直束窄区域,该区域由于坡滩较陡,河道束窄,河道内水流集中,长期冲刷作用下,深水区域较为集中。而水深较小区域主要位于分汊段或分汊段前的分流段,分汊段汊道分流前后河道水流分散明显,水流冲沙动力不足,易出现水深较小区域。

3 不同河型航段的航道水资源量

本文所述内河航道水资源量是指河流水资源量中用作航道的水资源量,我国《内河通航标准》(GB 50139-2004)[3]、将内河航道划分为I~VII级7级,《长江干线通航标准》(JTS 180-4-2020)[4]中又将I级航道划分为I-1~I-6级航道,共12级。考虑航道等级较多,且各级航道之间水深差别较低,部分坡度较陡区域等深线较密集,密于目前长江常用的航道养护地形图密度,因此,本文主要考虑实际航道运行养护中关注的三类航道水资源,即已利用航道水资源、等级航道水资源和高等级航道水资源,分别如下:

(1)已利用航道水资源量:目前"武安段"已利用的6m水深航道水资源量;

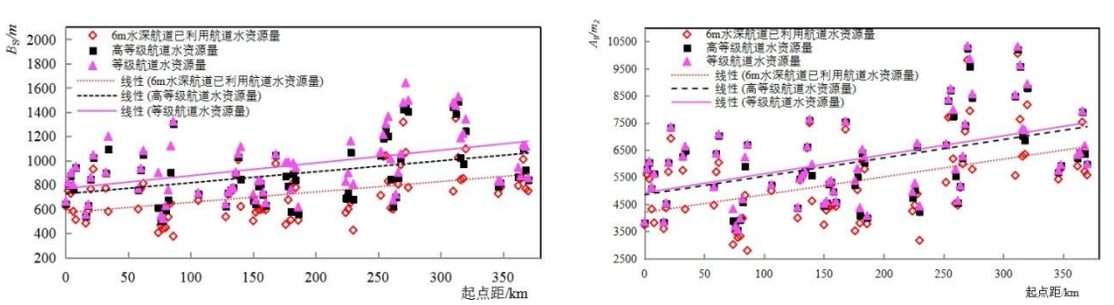
(2)等级航道水资源量:I~VII级航道水资源总量;

(3)高等级航道水资源量:I~III级航道水资源总量。

采用断面宽度法和断面面积法[19]计算航道水资源利用量。选取2018-2022年各年枯水期实测地形资料,沿河段布置各等级航道,选取各年份中包络最小航道作为最终分析航道,并利用前述已布置断面,分析顺直、弯曲和分汊航段的航道水资源量利用量。

3.1 顺直段航道水资源利用量

采用断面宽度法(图5),顺直段6m水深航道(已利用航道)、等级航道、高等级航道水资源量(B_S)范围分别为376~1350m、500~1484m、522~1641m,平均值分别为722m、887m、956m;采用断面面积法,顺直段6m水深航道、等级航道、高等级航道水资源量(A_S)范围分别为2797~10055m^2、3528~10246m^2、3563~10336m^2,平均值分别为5363m^2、6056m^2、6163m^2(图5)。断面宽度法和断面面积法计算出的顺直段三种航道水资源量总体变化趋势一致,即由于径流河段流量总体呈沿程增加趋势,航道水资源量沿程也均呈明显增加趋势。



断面宽度法

Section width method

断面面积法

Section area method

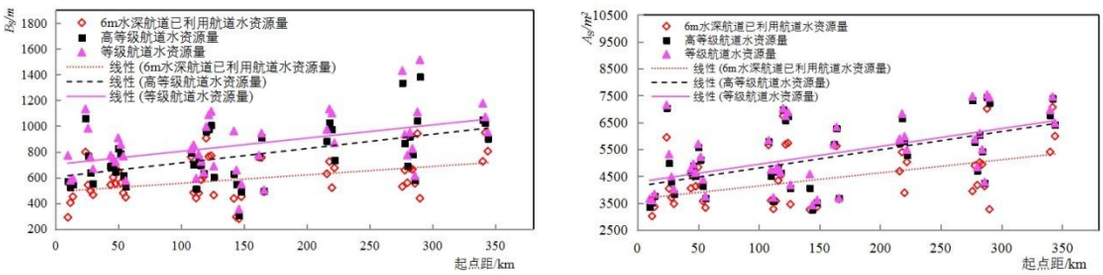
图5 顺直段航道水资源量沿程分布图

Fig.5 Distribution map of waterway resources of the straight section

3.2 弯曲段航道水资源利用量

采用断面宽度法(图6),弯曲段6m水深航道、等级航道、高等级航道水资源量范围分别为280~948m、310~1382m、354~1514m,平均值分别为

588m、769m、854m;采用断面面积法(图6),弯曲段6m水深航道、等级航道、高等级航道水资源量范围分别为2085~7064m²、2212~7432m²、2280~7538m²,平均值分别为4378m²、5141m²、5273m²。断面宽度法和断面面积法计算出的弯曲段三种航道水资源量总体变化趋势一致,即由于径流河段流量总体呈沿程增加趋势,水资源量沿程也均呈增加趋势。



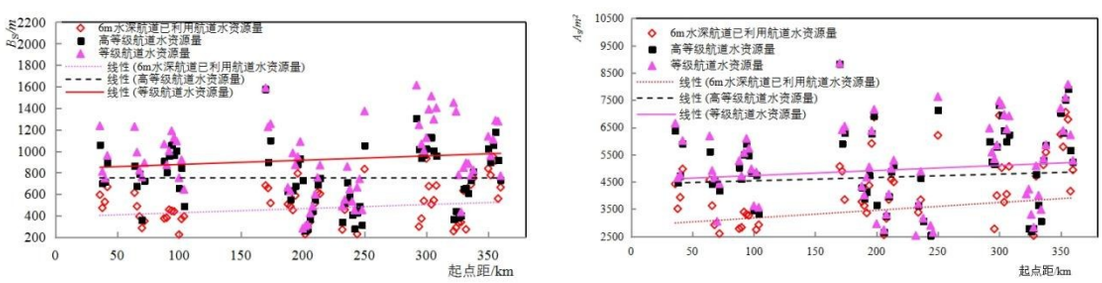
断面宽度法 Section width method　　断面面积法 Section area method

图6 弯曲段航道水资源量沿程分布图

Fig.6 Distribution map of waterway resources of the curved section

3.3 分汊段航道水资源利用量

采用断面宽度法(图7),分汊段6m水深航道、等级航道、高等级航道水资源量范围分别为61~947m、256~1576m、282~1613m,平均值分别为181m、229m、264m;采用断面面积法,分汊段6m水深航道、等级航道、高等级航道水资源量范围分别为458~7055m²、1543~8832m²、1813~8851m²,平均值分别为1348m²、1378m²、1367m²(图7)。断面宽度法和断面面积法计算出的分汊段三种航道水资源量总体变化趋势一致,即由于径流河段流量总体呈沿程增加趋势,水资源量沿程略呈增加趋势,但增加趋势明显小于顺直段和弯曲段。



断面宽度法 Section width method　　断面面积法 Section area method

图7 分汊段航道水资源量沿程分布图

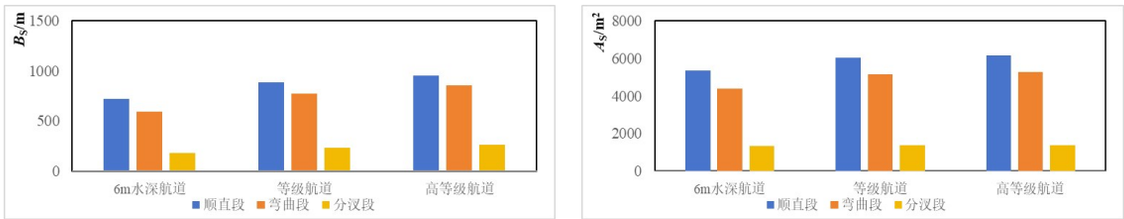
Fig.7 Distribution map of waterway resources of the bifurcated section

3.4 不同河型航段的航道水资源利用量对比分析

顺直段、弯曲段和分汊段航道水资源量对比分析表明,无论采用断面宽度法或断面面积法,顺直段航道平均水资源量均最高,弯曲段次之,分汊段最低(图8);从航道水资源量沿程变化特点来看,各河型航道水资源量沿程斜率均为正值,表明不同河型航道水资源量均呈沿程增加趋势,但从沿程增加程度来看,除采用断面宽度法等级航道的航道水资源量沿程增加程度呈现弯曲段大于顺直段,并大于分汊段外,其他情况下航道水资源量沿程增加程度均呈现顺直段大于弯曲段,并大于分汊段的变化规律(图9)。

4 不同河型航段的航道水资源利用率特征

航道水资源利用率(P)指目前航道条件下,已利用等级航道水资源量与航道水资源总量的比值。为计算沿程航道水资源利用率及可利用空间,采用

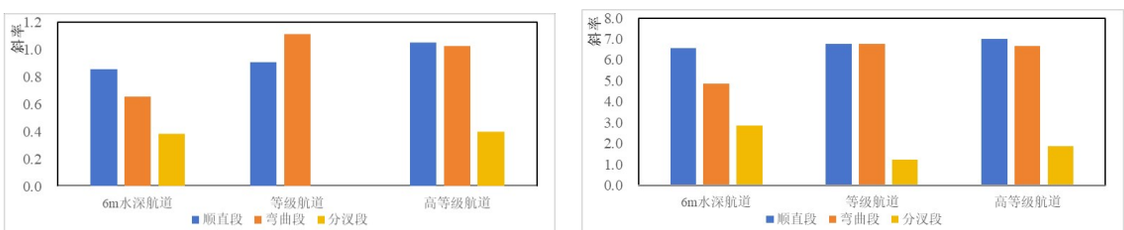


断面宽度法 断面面积法

Section width method Section area method

图8 不同河型航段航道平均水资源量对比图

Fig.8 Comparison of average waterway resources in different river types



断面宽度法 断面面积法

Section width method Section area method

图9 不同河型航段航道水资源量沿程增加斜率对比图

Fig.9 Comparison of slope increase of waterway resources along different river types

断面宽度法和断面面积法[19]分别计算不同河型的航道水资源利用率及可利用空间。

4.1 不同河型航段的航道水资源利用率对比分析

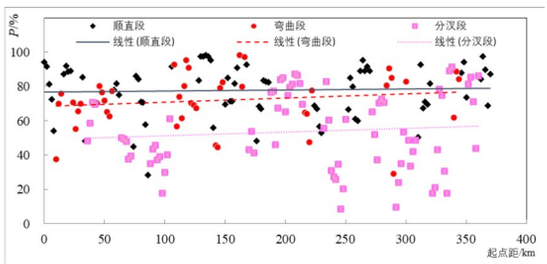
不同河型航段的航道水资源利用率差别较大,顺直段航道水资源利用率略大于弯曲段(图10),主要因弯曲段相对于顺直段,在布置航路时,弯曲半径仍是必须考虑的因素,因此弯曲段航道水资源利用率略小于顺直段。分汊段航道水资源利用率则明显低于顺直段和弯曲段,主要因为目前"武安段"目前均采用主通航汊道单汊通航,而分汊段的非主通航汊道中仍有大量航道水资源,导致其航道水资源利用率明显偏低。

不同河型航段的航道水资源利用率的平均值分析表明(表2),顺直段最高、弯曲段次之,分汊段最低,分汊段航道水资源仍是目前利用程度最低的河段。而从不同河型航段的航道水资源利用率的分散程度来看,由于分汊段受分流比影响较大,沿程各汊道分流比的无规则变化,导致分汊段相对于弯曲段和顺直段,航道水资源利用率最小值和最大值差值最大(表2),且从不同河型航段的航道水资源利用率方差值分析来看(表2),分汊段航道水资源利用率分散程度最大,弯曲段次之,顺直段最小,其中弯曲段和顺直段差别不大,而分汊段则明显大于顺直段和弯曲段。对于分汊段而言,若主通航汊道分流比较大,则主流较为集中,航道水资源利用率较高;而对于部分主通航汊道分流相对较低的水道,主流较为分散,航道水资源利用率则较低。

4.2 顺直段航道水资源利用率特征

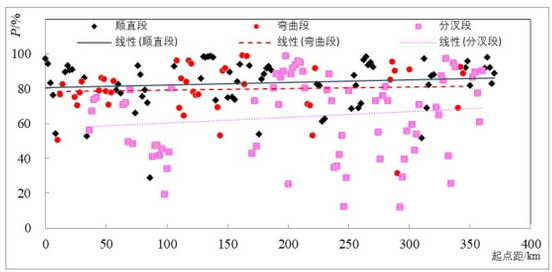
采用断面宽度法,顺直段等级航道、高等级航道水资源利用率范围分别为28.4%~98.1%、28.9%~98.9%,平均值分别为77.2%、83.3%;采用断面面积法,顺直段等级航道、高等级航道水资源利用率范围分别为41.6%~99.1%、41.8%~99.4%,平均值分别为87.6%、89.2%(图11)。

顺直段航道水资源利用率较高的区域主要位于两岸岸滩坡度较陡、河道窄深、无边心滩的河段,此类区域水流较为集中,6.0米水深航道、等级航道、高等级航道边界较近,航道水资源利用率较高。如阳逻水道中段(10#)、牯牛沙水道出口和蕲春水道进口(67#~70#)、搁排矶水道中段(81#)、鲤鱼山水道进口(85#)等区域。航道水资源利用率较低区域主要位于两类位置,一是河段存在明显中低边滩,导致上滩水流难以得到有效利用,航道水资源利用率较低。如牧鹅洲水道出口(18#)、沙洲水道出口(38#)、鲤鱼山水道出口(89#);二是位于心滩、洲体河段的分流口以前或汇流口以后,此类位置虽然从河型上看是顺直段,但由于前后河心存在洲滩,河



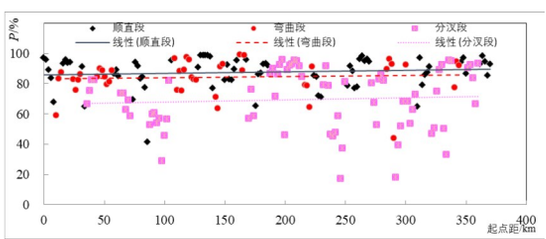
等级航道,断面宽度法

Graded waterway, section width method



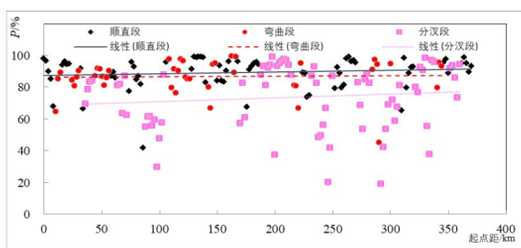
高等级航道,断面宽度法

High graded waterway, section width method



等级航道,断面面积法

Graded waterway, section area method



高等级航道,断面面积法

High graded waterway, section area method

图 10　不同河型航段的航道水资源利用率对比图

Figure 10　Comparison of waterway resource utilization rate for different river type navigation sections

表 2　不同河型航段的航道水资源利用率最大、最小值差值及方差表

Table 2　Maximum and minimum values differences and variances of waterway water resource utilization rate for different river sections

航段		断面宽度法		断面面积法	
		等级航道	高等级航道	等级航道	高等级航道
顺直段	最大值—最小值差(%)	77.2	83.3	87.6	89.2
	方差	0.024	0.019	0.011	0.010
弯曲段	最大值—最小值差(%)	71.8	79.6	84.4	86.7
	方差	0.026	0.021	0.014	0.012
分汊段	最大值—最小值差(%)	53.6	64.2	69.6	73.8
	方差	0.050	0.055	0.040	0.041

床仍起伏程度较大,存在水深较浅区域,航道水资源利用率较低。如巴河水道出口(44#)、东流直水道进口(156#)。

4.3　弯曲段航道水资源利用率特征

采用断面宽度法,弯曲段等级航道、高等级航道水资源利用率范围分别为 28.9%~98.2%、31.7%~99.1%,平均值分别为71.8%、79.6%;采用断面面积法,弯曲段等级航道、高等级航道水资源利用率范围分别为 43.9%~99.3%、45.2%~99.5%,平均值分别为84.4%和86.7%(图12)。

弯道段航道水资源利用率较高的区域主要位于两类位置,第一类是河道窄深、无边心滩的河段,6m水深航道、等级航道和高等级航道边线较近,致使航道水资源利用率较高。如黄石水道进口及出

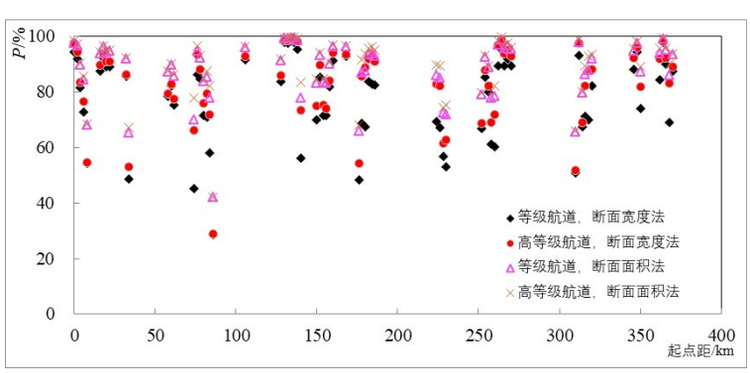


图 11　顺直段航道水资源利用率分布图

Fig. 11　Distribution of waterway resource utilization rate in straight section

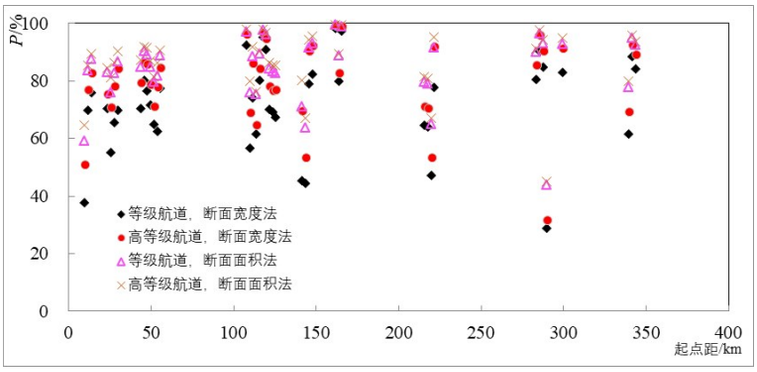


图12 弯曲段航道水资源利用率分布图

Fig. 12 Distribution of waterway resource utilization rate in curved section

口弯道(55#、60#、61#);第二类是弯曲半径较大、河道缩窄处的河段,航路较为顺畅,加之河道缩窄段水流较为集中,6米水深航道、等级航道和高等级航道边线较近,致使航道水资源利用率较高。如搁排矶水道出口弯道(82#、84#)、东北横水道出口弯道(144#)。航道水资源利用率较低的区域主要位于两类位置,第一类是河道宽浅、存在边滩的河段,6米水深航道、等级航道和高等级航道边线较远,航道水资源利用率较低。如蕲春水道中段弯道(73#)、东北横水道下段弯道(139#)、马当南水道进口弯道(146#);第二类是弯曲半径较小的河段,航路较为弯曲,航路设置时需考虑弯曲半径等因素,6米水深航道、等级航道和高等级航道边线较远,航道水资源利用率较低。如阳逻水道进口弯道(6#)、九江水道出口弯道(111#)。

4.4 分汊段航道水资源利用率特征

采用断面宽度法,分汊段等级航道、高等级航道水资源利用率范围分别为8.29%~91.0%、11.9%~98.9%,平均值分别为53.6%、64.2%;采用断面面积法,分汊段等级航道、高等级航道水资源利用率范围分别为17.3%~96.0%、19.4%~99.4%,平均值分别为69.6%、73.8%(图13)。

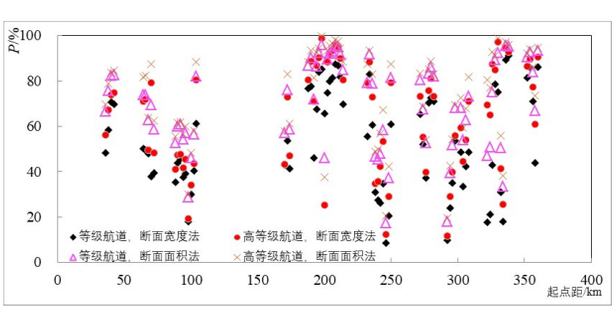


图13 分汊段航道水资源利用率分布图

Fig. 11 Distribution of waterway resource utilization rate in bifurcated section

分汊段航道水资源利用率较高区域主要位于两类位置,第一类是两汊分流比差距较大,且水流集中于主通航汊道的河段,航道水资源利用率较高。如新洲水道中段汊道(100#)、东流水道中下段汊道(166#、169#);第二类是河道内洲滩众多,存在散乱浅滩,近年来航槽不稳定,甚至存在航路断开、明显移位的情况,此类河段稳定的航道水资源总量较少,因此,航道水资源利用率较高。此类河段较少,主要为九江水道上段汊道段(105#、106#)。航道水资源利用率较低的区域主要位于三类位置,第一类是航道水资源量充足,但主通航汊道内存在边滩,导致6m水深航道水资源区域较少,利用率较低。如湖广水道进口分汊段(19#)、鲤鱼山水道中部汊道段(86#、88#)、东流水道中段汊道段(167#、168#);第二类是两汊分流比差距不大,非主通航汊道存在大量航道水资源,而目前"武安段"6米水深航路均为单线航路,布置在主通航汊道内,导致航道水资源利用率较低。如戴家洲水道(45#~52#)、沙洲水道中部分汊段(35#、37#);第三类为多汊河段,河段内航道水资源较为分散,而目前"武安段"6米水深航路仅利用单汊,因此航道水资源利用率较低。如张家洲水道中部汊道段(120#~125#)、马当南出口汊道段(147#~150#)、马阻水道出口汊道段(153#、154#)。

5 结论

(1)"武安段"不同河型航道平均水资源量,顺直段最高,弯曲段次之,分汊段最低;不同河型航道水资源量均呈沿程增加趋势,除断面宽度法等级航道的航道水资源量沿程增加程度呈现弯曲段大于顺直段,并大于分汊段外,其他情况下航道水资源量沿程增加程度均呈现顺直段大于弯曲段,并大于分汊段的变化规律。不同河型航道水资源利用率

差别较大，顺直段最高、弯曲段略低、分汊段最低。从利用率分散程度看，分汊段最大、弯曲段次之、顺直段最小。分汊段若主通航汊道分流比较大，则主流较为集中，航道水资源利用率则较高；而对于部分主通航汊道分流相对较低的水道，主流较为分散，则航道水资源利用率则较低。

（2）顺直段航道水资源利用率较低区域主要位于：第一类是存在明显中低边滩的航段，上滩水流难以得到有效利用，则航道水资源利用率较低。第二类位于心滩、洲体河段的分流口以前或汇流口以后，由于前后河心存在洲滩，本航段河床仍起伏程度较大，存在水深较浅区域，则航道水资源利用率较低。

（3）弯道段利用率较低区域主要位于：第一类是河道宽浅、存在边滩的航段，6米水深航道、等级航道和高等级航道边线较远，航道水资源利用率较低；第二类是航路较弯曲的航段，航路设置需考虑弯曲半径等因素，6米水深航道、等级航道和高等级航道边线距离较远，导致航道水资源利用率较低。

（4）分汊段利用率较低区域主要位于：第一类是航道水资源量充足，但主通航汊道内存在边滩的航段，导致已利用航道水资源较少，利用率较低；第二类是两汊分流比差距不大，非主通航汊道存在大量航道水资源的航段，而目前6米水深航路均仅布置在主通航汊道内，导致航道水资源利用率较低；三是多汊段，河段内航道水资源较分散，目前仅利用单汊，导致航道水资源利用率较低。

参考文献：

[1] 刘怀汉，黄召彪，高凯春．长江中游荆江河段航道整治关键技术[M]．人民交通出版社股份有限公司，2015.
LIU Huaihan, HUANG Zhaobiao, GAO Kaichun. Key Technologies for waterway improvement in the Jingjiang river section of the middle Yangtze River [M]. People's Transportation Press Co., Ltd., 2015.

[2] 赵家松．谈落实《航道法》依法保护航道资源[J]．中国海事，2017，0(1)：44-45.
ZHAO Jiasong. Discussion on the implementation of waterway law and protection waterway resource legally [J]. China Maritime Safety. 2017, 0(1): 44-45.

[3] GB 50139-2004，内河通航标准[S]．北京，人民交通出版社股份有限公司，2004.
GB 50139-2004, Inland navigation standards [S]. Beijing, People's Communications Publishing House Co., Ltd., 2004

[4] JTS 180-4-2020，长江干线通航标准[S]．北京，人民交通出版社股份有限公司，2020.
JTS 180-4-2020, Navigation standards for the Yangtze River main line[S]. Beijing, People's Transportation Press Co., Ltd., 2020.

[5] 韩剑桥．三峡水库蓄水后荆江沙质河段冲淤分布特征及成因[J]．水利学报，2014，(3)：277-285，295.
HAN Jianqiao. Features and causes of sediment deposition and erosion in Jingjiang reach after impoundment of the Three Gorges Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, (3): 277-285, 295.

[6] 张细兵．长江上游建库后武汉至安庆段航道条件变化分析[J]．人民长江，2014，(12)：65-69，92.
ZHANG Xibing. Analysis on navigation channel variation from Wuhan to Anqing of Yangtze River after construction of upstream reservoirs. [J]. Yangtze River, 2014, (12): 65-69, 92.

[7] 高清洋，李旺生，杨阳等．长江中下游河道崩岸研究现状及展望[J]．水运工程，2016，(08)：99-105.
GAO Qingyang, LI Wangsheng. Research progress and prospects of bank collapse in middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2016, (08): 99-105.

[8] 唐金武．三峡水库蓄水对长江中下游航道影响分析[J]．水力发电学报，2014，(1)：102-107.
TANG Jinwu. Impacts of the operation of Three Gorges reservoir on navigation conditions in middle and lower Yangtze[J]. RiverJournal of Hydroelectric Engineering, 2014, (1): 102-107.

[9] 张为．三峡水库运用后长江中下游造床流量变化及其影响因素[J]．水科学进展，2018，(3)：331-338.
ZHANG Wei. Changes in dominant discharge and their influential factors in the middle and lower reaches of Yangtze River after the Three Gorges Dam impoundment[J]. Advances in Water Science, 2018, (3): 331-338.

[10] 卢金友，张细兵，孙贵洲．长江宜昌至安庆段近期河道演变与黄金水道治理[J]．人民长江，2017，48(05)：1-7.
LU Jinyou, ZHANG Xibing, SUN Guizhou. River channel evolution of Yangtze River reach from Yichang to Anqing and Changjiang golden waterway regulation [J]. Yangtze River, 2017, 48(05): 1-7.

[11] 齐家露，夏军强，邓珊珊，周美蓉，李诺．三峡工程运行后荆江河段坡比的统计特征及稳定坡比确定[J]．武汉大学学报(工学版)，2022，55(10)：993-1001.
QI Jialu, XIA Junqiang, DENG Shanshan, ZHOU Meirong, LI Nuo. Statistical characteristics of bank slope in the Jingjiang reach and determination of critical slope after the Three Gorges Project operation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(10):

993-1001.

[12] 彭松柏,黄成涛,江凌.长江干线宜昌至安庆段航道尺度提升可行性研究[J].人民长江,2017,48(08):1-4.
PENG Songbai, HUANG Cheng tao, JIANG Ling. Feasibility study on waterway scale upgrading of Yangtze River stem from Yichang to Anqing[J]. Yangtze River, 2017, 48(08): 1-4.

[13] 马一,吕永兴.长江下游东流水道6m水深工程治理思路及方案设计[J].水运工程,2020,(04):92-97.
MA Yi, LV Yongxing. Regulation idea and scheme design of Dongliu waterway 6 m water depth projectin the lower Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2020, (04): 92-97.

[14] 方佳敏,於龙,田栋.长江中游鲤鱼山水道航道整治工程效果分析[J].水运工程,2021,(11):153-158.
FANG Jiamin, YU Long, TIAN Dong. Effect analysis of Liyushan waterway channel regulation project in middle reaches of the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2021, (11): 153-158.

[15] 李冬,王晓燕.长江中游蕲春水道航道整治工程方案[J].水运工程,2023,(04):155-160+173.
LI Dong, WANG Xiaoyan. Channel regulation project scheme of Qichun waterway in middle reaches of the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2023, (04): 155-160+173.

[16] 闫霞.鹅头分汊河段航道整治工程适应性分析[J].武汉大学学报(工学版),2017,(4):494-499.
YAN Xia. Adaptability analysis of waterway regulation engineering of goose-head braided reach[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, (4): 494-499.

[17] 邓晓丽,王学光,游强强等.长江下游张家洲水道6 m水深航道治理措施[J].水运工程,2019,(07):155-161.
DENG Xiaoli, WANG Xueguang, YOU Qiangqiang. Regulation measures for 6 m-depth Zhangjiazhou waterway in lower reaches of the Yangtze River. Port & Waterway Engineering. 2019, (07): 155-161.

[18] 于鹏杰,文杰,谈广鸣等.多分汊河型水流结构概化模型试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(05):385-393.
YU Pengjie, WEN Jie, TAN Guangmin. Experimental study on generalized model of braided river flow structure[J]. Engineering Journal of Wuhan University. 2020, 53(05): 385-393.

[19] 刘林双,王欣霖,骆文广,李明,江凌.长江干线武汉至安庆河段航道水资源可利用空间研究,武汉大学学报(工学版),先期出版,2024.
LIU Linshuang, WANG Xinling, LUO Wenguang, LI Ming, Jiang Ling. Study on the available space of waterway resources in Wuhan to Anqing reach of Yangtze River main line. Engineering Journal of Wuhan University, in press, 2024.