

长江中游岸线资源与开发利用适宜性评价分析

肖攀^{1,2}, 彭轲², 赵幸悦子², 王新峰³, 梁川⁴, 程刚⁴

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205;
3. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051; 4. 湖北省地质环境总站, 武汉 430034)

摘要: 长江中游岸线资源丰富, 开发利用价值较大。通过充分分析长江中游岸线资源特征与地质环境条件, 从地质学角度构建港口码头、过江隧道与过江大桥等重大工程建设适宜性评价模型, 运用层次分析法(AHP)划定出三种工程类型一级岸线(适宜)、二级岸线(较适宜)、三级岸线(一般适宜)与四级岸线(非优先开发)区域范围。由结果可知: 长江中游岸线港口码头以非优先开发区域为主, 长度合计931.47 km, 占岸线总长的46.71%; 过江隧道与过江大桥以较适宜开发、一般适宜开发区域为主, 较适宜开发、一般适宜开发区长度合计分别为1550.75 km、1224.18 km, 占岸线总长的77.77%、61.39%。最后, 针对三种工程类型适宜性等级特征提出相应地学对策建议, 为重大工程部署规划提供地学理论依据, 促进长江中游岸线资源科学合理开发利用与有效保护, 以期推动长江经济带发展与国土空间规划, 保护大长江持续健康发展。

关键词: 长江中游; 岸线资源; 适宜性评价模型; 层次分析法(AHP); 开发与保护

岸线资源作为包括一定范围水域和陆域的综合体, 是特殊的土地类型, 不仅是重要的国土空间资源, 支撑港口码头、过江桥隧及仓储与工业场地建设, 服务沿江城市经济发展规划, 开发潜力巨大^[1,2], 同时也是生态环境脆弱区, 生态环境保护不容忽视。随着城市规划与经济发展, 岸线资源开发利用程度越来越高, 使用功能也不断转变, 由单一的小规模河道治理, 到如今依赖港口码头钢铁、化工等大运输量、大耗水量工业集聚的地段之一^[3,4], 岸线资源也成为沿江区域经济发展的重要支柱, 地位越显重要。如何高效利用长江中游岸线资源, 发掘与突出长江航运水道优势, 构建现代产业集聚群与水资源利用与保护示范带, 响应长江流域“共抓大保护、不搞大开发”的重要指示精神, 成为岸线资源合理利用与有效保护实现双赢的关键。

长江中游沿岸岸线地跨湘、鄂、赣、皖四省, 两岸岸线全长约1994.01 km, 行政区域主要涉及湖北宜昌、荆州、荆门、咸宁、武汉、黄石、黄冈、鄂州, 湖南岳阳, 江西九江、瑞昌以及安徽安庆等县市, 地域上承东启西、连接南北, 构成长江中游经济带的主体骨架, 为《全国主体功能区规划》的重点规划发展地区。随着社会、经济的快速发展, 长江中下游岸线开发利用速度加快^[5], 长江中游沿岸规划大量过江桥隧、码头港口及工业园区, 岸线资源开发利用程度不断提升, 盲目部署势必对安全性与经济效益无法保障, 岸线资源也无法充分利用与保护。因此, 合理评价才是科学开发利用这一宝贵资源的先决条件。段学军等^[6]基于遥感与GIS技术, 结合岸线资源条件与开发现状, 运用构造联表的适宜性分析方法, 对南通长江岸线资源功能区划; 曹玉红等^[7]以RS和GIS为工

收稿日期: 2019-01-09; 修订日期: 2019-04-07

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160250)

作者简介: 肖攀 (1984-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 工程师, 研究方向为水文地质与环境地质。

E-mail: xiaopanfree2008@163.com

具,运用资源综合评价方法,对长江安庆段岸线进行综合分析和评价;刘庆志等^[8]、马学明^[9]结合岸线自然禀赋的分析,对岸线资源进行功能区划;陈名等^[10]建立符合大丰港岸线特点的经济评价指标体系,从经济角度划定大丰岸线适宜进行港口开发和发展临港工业。前述研究从不同角度对岸线资源开展评价,为岸线资源开发利用提供了充足理论依据,但很少研究探讨地质因素对于工程建设的控制作用,以及综合安全性、经济性开展适宜性评价。本文通过查清长江中游沿岸岸坡结构类型、区域地壳稳定性、长江河势与岸带稳定性、工程地质条件及地下空间资源适宜性,从地质学角度分别构建港口码头、过江大桥与过江隧道等重大工程地质环境工程建设适宜性评价模型,采用层次分析法(AHP)划定工程建设场地适宜性等级分区,并从地学角度提出对策建议,保障工程建设的安全性与经济效益,以期推动长江中游岸线资源科学有效利用与国土空间合理规划。

1 研究方法与数据来源

1.1 长江中游岸线资源特征

1.1.1 岸线物质组成与类型

长江中游岸坡物质组成总体上分为基岩质、砂质和土质,以后两者为主。砂、土质岸坡多具二元结构,一般上部以细粒物质为主,下部为砂卵石或粉细砂等。基岩质岸坡主要分布于中部地区,包括基岩丘陵岸坡和基座阶地下部基岩岸坡,其抗冲刷能力强,岸坡稳定。土质岸坡分为阶地硬土质岸坡和松散沉积物岸坡,前者固结较好,抗冲刷能力较强,岸坡比较稳定;后者为近代河流变迁的沉积物,固结作用差,极易遭受冲刷而发生岸崩。砂质岸坡在上荆江河岸下部为卵石层,中部为砂层,上部为粘土层;下荆江河岸上部为粘性土层,下部为中、粉细砂层,岸坡稳定性差;下游及河口河段以砂质岸坡为主,岩性多为粉砂、细砂,岸坡不稳定;洲滩岸线岩性多为粉细砂,易造成岸线崩塌。

依据岸坡岩性组合特征、岩体结构类型和岸坡结构类型,三者相互组合形成岸坡地质结构基本模式,不同的结构模式对于岸线稳定与岸坡变形破坏起着决定作用。长江中游岸坡结构类型从工程地质角度划分为土质岸坡、砂质岸坡、砂土复合岸坡及岩质岸坡四种类型,划分依据如表1。其中,土质岸坡总长度为533.18 km,占两岸岸线总长的26.74%;砂质岸坡总长度为95.03 km,占两岸岸线总长的4.76%;砂土复合质岸坡分布

表1 岸坡结构类型划分依据表

Table 1 Basis of structure type classification for bank slopes

岸坡类型	岸坡结构特征	工程地质特征分类
岩质岸坡	主要由碎屑岩、碳酸盐岩组成	以坚硬层状碳酸盐岩为主的岩组(a) 软硬相间层状碳酸盐岩与碎屑岩互层岩组(b) 较坚硬至软弱至中至厚层状砂岩、砾岩、泥岩岩组(c)
土质岸坡	岩性以第四系冲洪积物和残坡积物为主,岩体结构松散,强度较低	冲积(Q ^{al})松散岩组(d) 冲洪积(Q ^{pml})松散岩组(e) 残坡积(Q ^{ch-dl})松散岩组(f) 人工堆积(Q ^{ml})松散岩组(g)
砂质岸坡	岸坡构成以粉砂和细砂为主	冲洪积(Q ^{pml})松散岩组(e)
砂土复合岸坡	下部为粉砂、细砂,上覆粘土、粉质粘土,土砂互层,二元结构	冲洪积(Q ^{pml})松散岩组(e)

广泛,总长度为996.0 km,占两岸岸线总长的49.95%;岩质岸坡总长度为369.8 km,占两岸岸线总长的18.55%。

1.1.2 岸线稳定性分析

综合分析岸线工程地质条件、地灾危险程度、岸线冲淤程度、河道形态特征、岸带物质组成及结构,开展长江中游岸线稳定性专项评价,将岸线稳定性划分为四个等级:稳定岸线、较稳定岸线、较不稳定岸线与不稳定岸线。稳定岸线总长度为581.05 km,自城陵矶以下,在特有水沙和边界条件作用下,形成相对比较稳定河势,岸线工程地质条件良好,地势平坦、开阔,河道顺直,岸线整体稳定性好;较稳定岸线总长度为579.93 km,岸线工程地质条件良好,地势平坦、开阔,多数无地灾危险,部分岸线存在一定程度冲淤,岸线较为稳定;较不稳定岸线总长度为270.09 km,武汉市范围内部分岸线存在岩溶塌陷危险,以及软土、液化砂土、膨胀土分布,为淤积岸,岸线稳定性较差;不稳定岸线总长度为562.94 km,区段河道弯曲、岸线冲淤严重,管涌、地面塌陷易发,岸崩频发,以及软土、液化砂土、膨胀土分布,岸坡不稳定。长江中游岸线总体以稳定岸线与较稳定岸线为主,合理部署才可得到充分利用。

1.1.3 岸线开发利用现状及问题

长江中游岸线主要以港口、工业、仓储及生活休闲等利用类型为主,根据收集的卫星遥感解译资料结合地形图上精确量算可知,长江中游已利用岸线长度为420.74 km,利用比例21.10%,整体利用程度不高,但部分岸线依托城市发展程度高,岸线开发利用程度较高,而许多岸段自然质量较好但城市依托条件一般,目前开发利用程度较低。对比各地岸线开发利用程度发现,武汉市、黄石市与九江市长江岸线利用程度最高,主要是城市依托条件较好,岸线均有较大程度开发,比如位于武汉市的洪山区、武昌区、青山区、江汉区和江岸区的长江岸线几乎利用殆尽。荆州市、咸宁市范围内长江岸线开发利用程度较低,具有进一步开发潜力,但需进行地质环境适宜性分析,保障合理有效开发。

1.2 适宜性评价模型方法

1.2.1 模型构建指导思想

建立工程建设适宜性评价模型,其指导思想是支撑服务岸线资源有效利用与工程建设合理规划,一方面考虑岸线资源综合利用的效益,将经济与安全作为准则因素(图1),又综合考虑场地工程地质条件诸因素以及长江特殊的江面特征及两岸城镇分布属性等^[11]。

1.2.2 评价方法

层次分析法(AHP)是将定性问题半定量化决策分析的方法,具有系统化、层次化特点^[10,12],工程场地地质环境适宜性影响因子多数复杂、模糊,层次分析法(AHP)适用于不易完全定量化问题的决策分析。通过将复杂问题分解为多个层次与指标因子,实现复杂过程模型化、定量化决策,能够较好适用于长江中游岸线工程建设适宜性评价,采用定性与定量结合,通过因子之间比较、计算,求出不同方案权重值,进一步计算综合评价分值,来划定各等级结果。

运用层次分析法进行工程建设适宜性评价,大体上分六个步骤进行^[13]:

(1) 确定评价指标因子。

(2) 构建层次结构评价模型;明确决策目标、准则因素与指标因子之间的层次结构关系,确定层次等级结构,划定最低层、中间层及最高层,最后,绘制适宜性评价模式

结构图。(图1)。

长江中游岸线工程适宜性评价中，最高层：工程建设适宜等级，作为终极目标。最低层：工程类型主控指标因子，为决策方案措施。中间层：经济性、安全性准则，实现目标中间环节。

(3) 构造各级层次的构造判断矩阵：比较 n 个因子 $X=\{x_1, \dots, x_n\}$ 对某因素 Z 的影响大小，通过指标因子相互之间对因素影响程度大小比较，赋予不同标度值，建立成对比较矩阵(表2)^[14,15]，得到下层各指标因子对上层目标的影响权重，将定性判断问题定量化处理，即构造因素判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 。

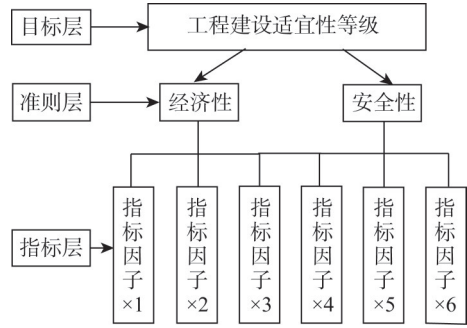


图1 适宜性评价模式结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of appropriateness evaluation model

表2 判断矩阵标度重要性对比

Table 2 Comparison of significance of judgment matrix scale

标度	判别依据与意义
1	因子重要性相互比较，重要性一样
3	因子重要性相互比较，前者略重要于后者
5	因子重要性相互比较，前者较重要于后者
7	因子重要性相互比较，前者非常重要于后者
9	因子重要性相互比较，前者绝对重要于后者
2、4、6、8	重要性位于前后相邻标度值之间，取中间值
倒数	若因子 i 与 j 重要性之比为 a_{ij} ，则因子 j 与 i 重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

(4) 层次单排序及判断矩阵一致性检验。计算求取判断矩阵最大特征值 λ_{max} 及其对应特征向量 W ，通过特征向量归一化处理后即得到下一层次各指标因子对于上一层次某一因素的相对重要性权重大小。一致性检验公式如下：

$$CR=CI/RI, CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{1}$$

式中： CR 为一致性比率； CI 为一致性检验指标； RI 为随机一致性指标，如果一致性比率 $CR < 0.1$ ，则一致性检验通过，归一化特征向量可作为权重值，否则不具备满意一致性，因此需重新调整^[16,17]。

(5) 层次总排序及其一致性检验。从最高层（总目标）向最低层（指标因子）逐层进行，计算获取指标因子层对于总目标层的影响权重大小，排序权重值选取权重最大方案作为最优方案^[18]。层次总排序一致性检验公式如式(2)^[17]：

$$CR = \frac{\sum_{j=1}^m a_j CI_j}{\sum_{j=1}^m a_j RI_j} \tag{2}$$

(6) 适宜性等级划定。适宜性等级划定主要是通过层次分析法(AHP)计算求取评价单元综合值，然后根据综合值大小排序，划定等级标准范围，确定出适宜性等级。在评价计算过程中，也部分考虑效益系数 λ ，单元综合评价价值 F 依据下式求取：

$$F = \lambda \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \quad (3)$$

式中： λ 为效益系数，具体数值由建设用地类型否定性因素赋值。如不发生地质灾害，取值1.0；工程使用有效期内存在地质灾害发生可能时，取值0.5；出现危害大地质灾害时，取值0.1，在活动断层发育地带，则视为地质灾害危险区。 X_{ij} 为第*i*指标基本分值； C_{ij} 为第*i*指标权重。

1.3 评价单元与指标

1.3.1 评价单元划分

划分适宜性评价单元时主要依托岸线资源自身属性特点与工程类型场地施工需求，要求一个因子作为划分标志，该因子既要最直接又能量化处理。本次评价范围包括长江中游沿岸段南北两岸外推1.5 km的陆域，根据工程建设类型特征与主控因子，分别对港口码头、过江大桥、过江隧道进行评价单元的划分，港口码头以岸线稳定性类型为标志，评价岸线划分为385个评价单元，其中，左岸195个单元，右岸190个单元；过江隧道以江槽下切深度为标志，将左、右岸线综合划分为190个评价单元，即左岸190个单元，右岸190个单元，且对称分布；过江大桥以桥间距为标志，将左、右岸线综合划分为190个评价单元，即左岸190个单元，右岸190个单元，且对称分布。

1.3.2 评价指标与评分标准

港口码头依据建港对场地条件要求，选择近岸航道水深、岸前航道水域宽度、岸线稳定性、后方场地陆域宽度、场地工程地质条件、场地地震基本烈度6指标因子构建港口码头建设适宜性评价模型，各指标因子及其评分标准如表3。

表3 港口码头评价指标与评分标准

Table 3 Evaluation indexes and scoring standards for port & wharf

评价因素	指标	评分标准
近岸航道水深/m	实际值→基本分	>10→80；10~5→60；5~2→40；<2→20
水域宽度/km	实际值→基本分	>10→80；10~5→60；5~2→40；<2→20
岸线稳定性/(m/a)	实际值→基本分	岸线后退0~10→80；岸线外推<30→60；岸线后退>10→40；岸线外推>30→20
腹地（陆域）宽度/m	实际值→基本分	>2000→80；1000~2000→60；500~1000→40；<500→20
场地工程地质条件	实际值→基本分	基岩、中—硬土，地势平坦、开阔→80；可—软塑土低膨胀性土，有斜坡但无陡坎→60；软土、液化砂土、膨胀土分布区→40；地质灾害发育/危及区→20
场地地震基本烈度/(°)	实际值→基本分	<6→80；6→60；7→40；>7→20

隧道工程的评价对象主要为盾构法，根据隧道场地建设施工条件要求及工程施工困难大小，以及综合施工经济成本，选取围岩体工程地质条件、河槽切割深度作为主要指标因子，将河面宽度、水下地形、场地工程地质特征、隧道轴线和断层线夹角以及场地地震基本烈度作为次要指标因子，构建过江隧道适宜性评价模型，各指标因子及其评分标准如表4。

过江大桥主要根据长江桥梁建设经验与国内桥梁建设相关规范要求，综合考虑长江中游岸线地理条件及河流水势特点，在安全、经济可行条件下，通过指标因子敏感性评价分析，优选河床剖面形态、两岸陆域地形、河面宽度、深泓线位置、优势持力层埋深

表4 过江隧道评价指标与评分标准

Table 4 Evaluation indexes and scoring standards for river-crossing tunnel

评价因素	指标	评分标准
河槽向下切割深度（与河床位置相比）/m	实际值→基本分	<20→80；20~25→60；25~30→40；>30→20
隧道轴线相交于软弱面夹角/(°)	实际值→基本分	无断裂→80；60~90→60；30~60→40；0~30→20
隧道围岩体工程地质条件	实际值→基本分	沉积连续/岩相稳定粘土→80；穿过2~3个工程地质岩层→60；穿过多余3个工程地质岩层→40；基岩破碎、砾石层、岩土结合带→20
江面宽度/km	实际值→基本分	<2→80；2~3→60；3~4→40；>4→20
隧道地面开挖段工程地质条件	实际值→基本分	地势开阔、平坦，围岩基岩或中一硬性土→80；斜坡、无陡坎，可塑—软塑土、低膨胀土→60；软土、液化砂土、膨胀土分布区→40；地质灾害发育/危及区→20
水域地下地形/m	实际值→基本分	地势平坦、河床起伏<5→80；河床起伏5~10→60；河床起伏10~15→40；河床起伏>15→20
场地地震基本烈度/(°)	实际值→基本分	<6→80；6→60；7→40；>7→20

与承载力（50 m以上）、岸坡稳定性、场地地震基本烈度及场地连接线工程地质特点8个指标因子，构建过江大桥工程建设适宜性评价模型，各指标因子及其评分标准如表5。

1.3.3 数据采集

区域地质资料采集主要以湖北、湖南、江西与安徽各省最新编制1:50万地质图，部分重点地区收集1:5万区域地质调查成果及钻探资料，综合分析岩土体类型与结构，地质构造特征与岸线稳定性等。

水文地质、工程地质资料采集主要来自长江中游沿线部署实施1:5万水文地质调查或工程地质调查成果及钻探资料，空白区采用湖北、湖南、江西与安徽各省编制1:50万水文地质图与工程地质图以及1:25万“江汉—洞庭平原地下水资源及其环境问题调

表5 过江大桥评价指标与评分标准

Table 5 Evaluation indexes and scoring standards for river-crossing bridge

评价因素	指标	评分标准
河床剖面形态	实际值→基本分	顺直河道、滩地窄、高的“V”型河谷→80；微弯、顺直分汊河道、江心洲稳定或洲身部位→60；弯曲或弯曲分汊河道、江心洲不稳定或洲头洲尾部位→40；弯曲河道的弯顶、河汊、汇流口、古河道部位；心滩、浅滩、沙丘发育→20
两岸陆域地形	实际值→基本分	两岸有山嘴、石梁、土矶临江→80；一岸有山咀、石梁、土矶临江→60；地面高程>历史高潮位5 m→40；地面高程<历史高潮位5 m→20
江面宽度/km	实际值→基本分	<2→80；2~3→60；3~4→40；>4→20
深泓线位置	实际值→基本分	居中→80；近岸30%~60%→60；近岸>60%→40；顶冲→20
优势持力层埋深及承载力值（50 m以浅）	实际值→基本分	基岩→80；顺直河道、滩地窄、高的“V”型河谷→60；软粘性土占50 m以浅土层比例15%~30%→40；软粘性土占50 m以浅土层比例>30%→20
岸线稳定性/(m/a)	实际值→基本分	稳定岸段→80；淤积岸段→60；弱冲蚀岸段：岸线后退0~10→40；强冲蚀岸段：岸线后退>10→20
场地地震基本烈度/(°)	实际值→基本分	<6→80；6→60；7→40；>7→20
两岸连接线工程地质条件	实际值→基本分	基岩、中一硬土，地势平坦、开阔→80；可一软塑土，低膨胀性土，有斜坡但无陡坎→60；软土、液化砂土、膨胀土分布区→40；地质灾害发育/危及区→20

查评价”项目资料及钻孔数据,综合评判岸线工程地质条件、水文地质条件及其富水性等。

地形条件资料主要借助于遥感解译图、大比例尺地形图,刻量水域、陆域宽度,两岸地形等。河势水文主要来自于数字化水下地形图,获取近岸航道水深、水下地形、河床剖面形态、深泓线位置等数据资料。

2 结果分析

2.1 评价结果

根据长江中游港口码头、过江大桥与隧道适宜性评价指标因子,依据经济性与安全性准则,分别构建适宜性评价模型,依据工程类型指标重要性,采用前述层次分析法(AHP)构建判断矩阵,进行权重计算及一致性检验。最后,结合每个评价单元评价指标值与权重,分别计算各工程类型每个评价单元的综合评价价值,排序划分各类型等级标准(表6),最后划定港口码头、过江大桥与隧道适宜开发、较适宜开发、一般适宜开发与非优先开发四个等级。港口码头、过江隧道与过江大桥适宜性评价结果分区见图2~图4。

2.2 结果分析

岸线港口码头一级岸线长度合计355.36 km,占岸线总长的17.82%,二级岸线长度合计386.96 km,占岸线总长的19.41%,三级岸线长度合计320.22 km,占岸线总长的16.06%,四级岸线长度合计931.47 km,占岸线总长的46.71%。综合对比分析及野外现

表6 工程建设适宜性评分等级划分

Table 6 Classification of project construction appropriateness

等级	分值	类型		
		港口码头	过江隧道	过江大桥
一级(适宜开发)	$Z > 70$	$Z > 70$	$Z > 70$	$Z > 70$
二级(较适宜开发)	$60 < Z \leq 70$	$60 < Z \leq 70$	$60 < Z \leq 70$	$60 < Z \leq 70$
三级(一般适宜开发)	$50 < Z \leq 60$	$50 < Z \leq 60$	$50 < Z \leq 60$	$50 < Z \leq 60$
四级(非优先开发)	$Z \leq 50$	$Z \leq 50$	$Z \leq 50$	$Z \leq 50$

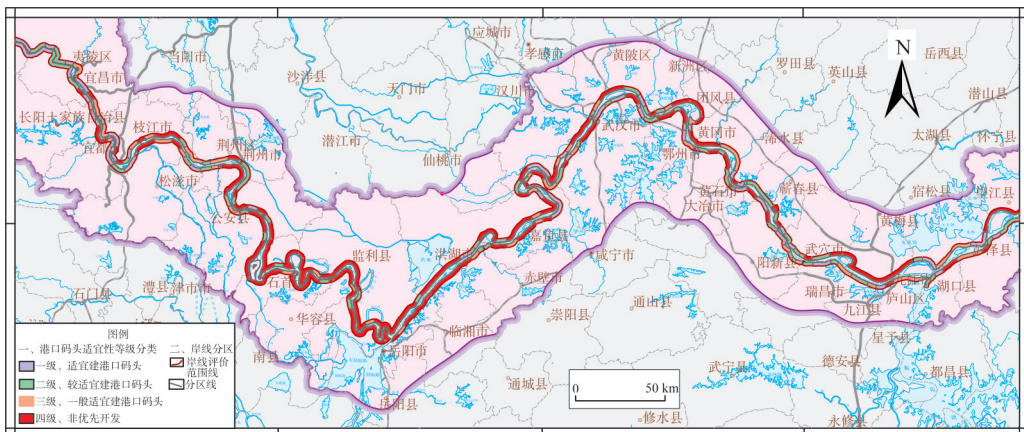


图2 港口码头工程建设适宜性评价分区

Fig. 2 Zoning plan for construction appropriateness evaluation of port & wharf

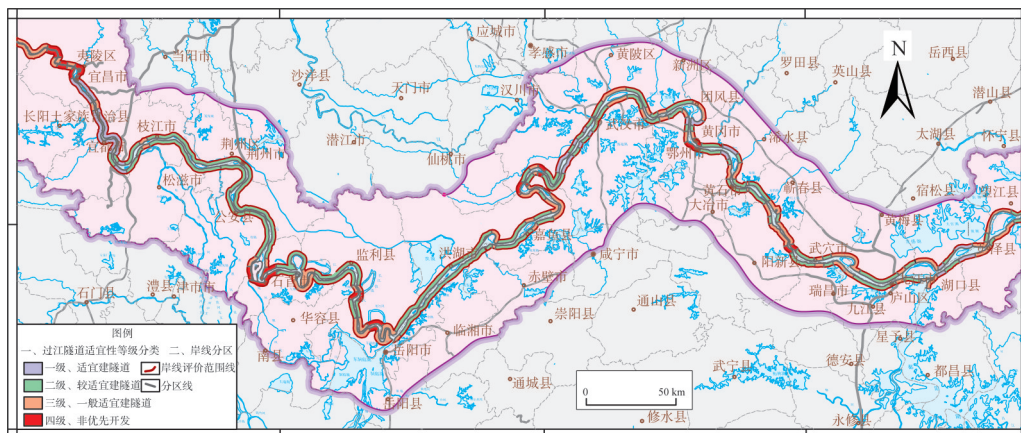


图3 过江隧道工程建设适宜性评价分区

Fig. 3 Zoning plan for construction appropriateness evaluation of river-crossing tunnel

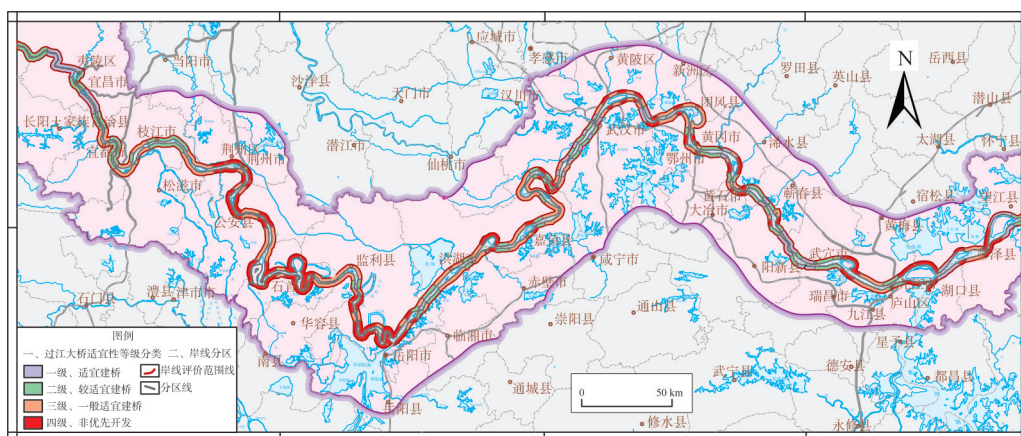


图4 过江大桥工程建设适宜性评价分区

Fig. 4 Zoning plan for construction appropriateness evaluation of river-crossing bridge

场验证, 岸线以非优先开发为主, 主要原因是江水流速放缓, 河床淤积, 包括河道拐弯处、分叉段, 造成岸前水深较浅, 港口码头建设条件差。

过江隧道一级岸线长度合计 241.26 km, 占岸线总长的 12.10%, 二级岸线长度合计 1079.97 km, 占岸线总长的 54.16%, 三级岸线长度合计 470.78 km, 占岸线总长的 23.61%, 四级岸线长度合计 202 km, 占岸线总长的 10.13%。综合分析, 长江中游岸线整体适宜建隧, 其江槽下切深度一般较小, 隧道轴线与软弱面大角度相交、围岩条件良好、水下地形对称, 建隧条件较好。

过江大桥一级岸线长度合计 392.81 km, 占岸线总长的 19.70%, 二级岸线长度合计 625.19 km, 占岸线总长的 31.35%, 三级岸线长度合计 598.99 km, 占岸线总长的 30.04%, 四级岸线长度合计 377.02 km, 占岸线总长的 18.91%。综合分析, 长江中游以二级、三级岸线为主, 主要与水域宽度、河床剖面形态及岸坡岩土体结构类型有关。河道相对比较顺直, 深泓线大多居于江心位置, 江面宽度较小, 岸坡比较稳定, 优势持力层较浅埋深, 较适宜桥梁建设, 如枝江市、宜都市、汉南区、武穴市、鄂州市及九江市等地区;

河道多拐弯、深泓线近岸线、江面宽度大、软土多分布、两岸地形复杂、优势持力层较大埋深岸线,建桥条件差,一般不适宜建桥,如江汉平原荆州市、公安县、监利县、洪湖县、嘉鱼县、团风县等地。

3 结论与讨论

长江中游岸线资源开发利用程度不均,地质条件差异大,查明理清地质条件对于岸线开发利用的支撑作用,成为科学合理开发利用长江中游岸线资源的理论依据,利用层次分析法(AHP)划定了港口码头、过江大桥与隧道工程建设适宜性等级区域,因地制宜,合理开发,既可以充分利用岸线资源,另一方面也能有效保护长江岸线资源。

港口码头应优先选址于工程建设一级(适宜开发)区域或二级(较适宜开发)区域,地质条件优越,利于施工。对于三级(一般适宜)区域或四级(非优先开发)区域,为保证工程安全,修建需综合考虑航道水深、水域宽度、陆域宽度,对于近岸航道水深、水域宽度可通过航道疏浚工程整治,满足航道需求,采用挖泥船或其他工具以及人工进行水下挖掘,在航道中清除水下泥沙作业,拓宽和加深水域,来增加和维护航道尺度。对于陆域宽度条件较差区域,可通过进一步拓宽陆域宽度可行性论证,适当回填造陆,增加陆域宽度,达到建港要求。岸坡稳定性、工程地质条件差的岸段,采取强夯法、加固土桩法及护坡加固法等工程手段,保障港口码头稳固安全。三级(一般适宜)区域或四级(非优先开发)区域必须充分考虑工程施工可行性,优选合适场址。

过江隧道应优先选址于工程建设一级(适宜开发)区域,具有围岩工程地质特征良好、无断裂、江面宽度较窄、江槽下切深度小于20 m等有利条件,有利隧道施工。二级、三级场地具备基本建隧条件,但存在围岩稳定性、明挖段工程地质条件差,建设施工过程中应注重围岩条件改善、地下水处理以及支护结构的合理设计,软土地层与液化砂土需加强超前支护法、换填法与强夯法等工程手段防护或加固,工程建设四级(非优先开发)区域一般位于峡谷或长江汇流处,下切深度较大、水下地形复杂、有断裂通过、围岩类型较差,整改操作性低,不建议作为建隧场址。

过江大桥应优先选址于工程建设一级(适宜开发)区域,具有顺直河道、窄小滩地,江面宽度小,深泓线多居于江心位置,两岸山咀临江,基岩浅埋深,岸坡比较稳定等多项有利条件,适宜于桥梁跨越。二级、三级场地虽然拥有桥梁建设基本条件,但是软土分布、易发地质灾害、岸线不稳定等多项不利条件,建设施工中软土地层可采取加载换填法、抛石挤淤法及灌浆法等,地质灾害应考虑岸坡加固,防治灾害发生,主要可以结合实际灾害类型与发展程度,采取强夯法、填堵清除法与钢筋格锚固等工程措施加固岸线,保证稳定。四级(非优先开发)岸线区域河道多弯曲分汊,深泓线顶冲,江面宽度大,沙洲严重不稳定,两岸地形条件差,优势持力层埋深大,不推荐作为桥梁建设场址。

参考文献(References):

- [1] 朱红云,杨桂山,万荣荣,等.长江城市岸线资源港口开发适宜性分析与合理利用:以南京市为例.长江流域资源与环境,2005,14(4):404-407. [ZHU H Y, YANG G S, WAN R R, et al. Analysis on the suitability for port and reasonable utilization of urban waterfront resource along the Yangtze River: A case study for Nanjing city. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(4): 404-407.]
- [2] 曹卫东,曹玉红,曹有挥,等.安徽无为县长江岸线资源评价与开发研究.安徽师范大学学报:自然科学版,2006,29

- (6): 586-590. [CAO W D, CAO Y H, CAO Y H, et al. Resources evaluation and development of waterfront along Changjiang River Mainstream: A sample on the Wuwei county metropolis. *Journal of Anhui Normal University: Natural Science*, 2006, 29(6): 586-590.]
- [3] 王传胜. 长江中下游岸线资源的保护与利用. *资源科学*, 1999, 21(6): 66-69. [WANG C S. Protection and exploitation of water-front resources along lower and middle reaches of the trunk stream of Yangtze River. *Resources Science*, 1999, 21(6): 66-69.]
- [4] 马荣华, 杨桂山, 陈雯, 等. 长江江苏段岸线资源评价因子的定量分析与综合评价. *自然资源学报*, 2004, 19(2): 176-182. [MA R H, YANG G S, CHEN W, et al. Assessment and quantitative acquirement of factors for evaluating bank resources of the Yangtze River in Jiangsu province. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(2): 176-182.]
- [5] 张细兵, 卢金友, 蔺秋生. 长江中下游岸线利用对防洪累积影响初步研究. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(9): 1138-1142. [ZHANG X B, LU J Y, LIN Q S. Preliminary study on accumulated influence of the bankline use on flood control in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(9): 1138-1142.]
- [6] 段学军, 陈雯, 朱红云, 等. 长江岸线资源利用功能区划方法研究: 以南通市域长江岸线为例. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(5): 621-626. [DUAN X J, CHEN W, ZHU H Y, et al. Method to make function division of waterfront resources along the Yangtze River: A sample on the waterfront for Nantong city. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(5): 621-626.]
- [7] 曹玉红, 曹卫东, 刘晨. 基于RS和GIS的长江安庆段岸线资源评价. *资源开发与市场*, 2007, 23(7): 577-580. [CAO Y H, CAO W D, LIU C. Riverbank resources evaluation along Anqing reaches of Changjiang River based on RS and GIS. *Resource Development & Market*, 2007, 23(7): 577-580.]
- [8] 刘庆志, 海显盛, 宋锬. 湖南长江岸线资源功能区划研究. *湖南交通科技*, 2014, 40(2): 163-166. [LIU Q Z, HAI X S, SONG K. Study on the function division of coastal line resources in Hunan province. *Hunan Communication Science and Technology*, 2014, 40(2): 163-166.]
- [9] 马学明. 赣江岸线资源现状分析及保护利用规划研究. *科技创新与应用*, 2017, (29): 178-179. [MA X M. Status analysis and study on protection and utilization planning of Ganjiang coastal line resource. *Technology Innovation and Application*, 2017, (29): 178-179.]
- [10] 陈名, 尹庆民, 许长新. 大丰港段岸线资源开发利用的经济评价研究. *重庆理工大学学报: 自然科学*, 2016, 30(4): 132-136. [CHEN M, YIN Q M, XU C X. Economic evaluation on development and utilization of Dafeng coastline resources. *Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science*, 2016, 30(4): 132-136.]
- [11] 杨泉宁. 江苏省长江岸线地质环境工程适宜性研究. 南京: 江苏省地质矿产调查研究所, 2005: 65-66. [YANG Q N. Study on the engineering suitability of geoenvironmental for the Yangtze River coastline in Jiangsu province. Nanjing: Jiangsu Institute of Geology and Minerals Investigation, 2005: 65-66.]
- [12] 郭金玉, 张志彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用. *中国安全科学学报*, 2008, 18(5): 148-153. [GUO J Y, ZHANG Z B, SUN Q Y. Study and applications of analytic hierarchy process. *China Safety Science Journal*, 2008, 18(5): 148-153.]
- [13] 张成凤, 粟晓玲, 蔡焕杰. 基于区间层次分析法的榆阳区水资源配置系统和谐性评价研究. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 1053-1063. [ZHANG C F, SU X L, CAI H J. Harmony evaluation of water resources allocation system in Yuyang Area based on IAHP. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 1053-1063.]
- [14] 肖攀, 喻望, 胡光明, 等. 江汉一洞庭平原地下水功能评价与区划. *人民长江*, 2017, 48(1): 6-11. [XIAO P, YU W, HU G M, et al. Assessment and zoning of groundwater functiona in Jianghan-Dongting Plain. *Yangtze River*, 2017, 48(1): 6-11.]
- [15] 杨澍, 初禹, 杨湘奎, 等. 层次分析法(AHP)在三江平原地质环境质量评价中的应用. *地质通报*, 2005, 24(5): 485-490. [YANG S, CHU Y, YANG X K, et al. Application of the analytic hierarchy process (AHP) in the evaluation of the geo-environmental quality in the Sanjiang Plain. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(5): 485-490.]
- [16] 许树柏. 层次分析法原理. 天津: 天津大学出版社, 1988: 51-59. [XU S B. Principle of Analytic Hierarchy Process. Tianjin: Tianjin University Press, 1988: 51-59.]
- [17] 朱建军. 层次分析法的若干问题研究及应用. 沈阳: 东北大学, 2005. [ZHU J J. Research on some problems of the analytic hierarchy process and its application. Shenyang: Northeastern University, 2005.]
- [18] 程文仕, 乔燕强, 刘学录, 等. 基于AHP-DEA模型的土地整治项目规划方案比选. *自然资源学报*, 2017, 32(9): 1615-

1626. [CHENG W S, QIAO H Q, LIU X L, et al. The plan of land renovation project compared based on the AHP-DEA model. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(9): 1615-1626.]

Evaluation and analysis on suitability of development and utilization of the bank line resources in the middle reaches of Yangtze River

XIAO Pan^{1,2}, PENG Ke², ZHAO Xing-yue-zi², WANG Xin-feng³,
LIANG Chuan⁴, CHENG Gang⁴

(1. School of Environmental Studies China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Geological Survey Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China; 3. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China;

4. Hubei Geological Environment Station, Wuhan 430034, China)

Abstract: Waterfront resources in the middle reaches of the Yangtze River are abundant, with quite high value of development and utilization. This paper establishes, based on sufficient analysis on characteristics of waterfront resources and geological environmental conditions in the middle reaches of the Yangtze River, the evaluation model for construction appropriateness of major projects such as port and wharf, river-crossing bridge and river-crossing tunnel etc. in the perspective of geology; classifies various project types into four levels i.e. appropriate for development, relatively appropriate for development, generally appropriate for development, and non-priority development by analytic hierarchy process (AHP) and conducts zoning evaluation. According to the results, the port terminal in the middle reaches of the Yangtze River is dominated by non-priority development areas, with a length of 931.47 km, accounting for 46.71% of the total length of the coastline; cross-river tunnels and cross-river bridges are mainly suitable for development and generally suitable for development areas, with the lengths being 1550.75 km and 1224.18 km, respectively, or 77.77% and 61.39% of the total length of the coastline. Finally, we put forward suggestions and rectification measures according to characteristics of each project level, so as to provide a theoretical basis for construction and deployment of major projects in terms of geology, promote the scientifically reasonable development and utilization as well as the effective protection of waterfront resources in the middle reaches of the Yangtze River, and further facilitate the development of Yangtze River Economic Zone and national spatial planning, and protect the sustainable and sound development of Yangtze River.

Keywords: middle reaches of Yangtze River; waterfront resources; evaluation model for appropriateness; analytic hierarchy process (AHP); development and protection