

· 航道及通航建筑物 ·



长江下游湖口—南京分汊河段最大稳定航深研究*

李 鑫¹, 周正洋², 左利钦^{1,3}, 孙 猛⁴, 王洪杨¹, 黄廷杰^{1,3}

- (1. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029;
2. 江苏省淮沭新河管理处, 江苏淮安 223001; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210029;
4. 江苏省淮河入海水道工程管理处, 江苏淮安 223200)

摘要: 长江经济带快速发展对长江下游航道尺度提出更高要求, 探明该段航道自然禀赋条件下的最大稳定航深对航道规划和开发潜力研究具有重要意义。考虑到长江下游湖口—南京河段多为分汊河道的河势特征, 基于稳定航深估算方法提出汊道稳定航深计算方法。计算了典型碍航汊道最大稳定航深, 得到了各河段汊道稳定航深与分流比的关系。结果表明: 4个典型碍航汊道自然禀赋条件下的最大稳定航深分别为 11.2 m(马当南水道右槽)、9.6 m(东流西港)、12.0 m(贵池中港)、15.7 m(江心洲主汊)。

关键词: 最大稳定航深; 航道; 分汊河段; 湖口至南京河段; 长江下游

中图分类号: U 612; TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0116-06

Maximum stable channel depth of braided Hukou-Nanjing reach of lower Yangtze River

LI Xin¹, ZHOU Zheng-yang², ZUO Li-qin^{1,3}, SUN Meng⁴, WANG Hong-yang¹, HUANG Ting-jie^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. New Huai River Management Division of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China;

3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210029, China;

4. Huaihe River Sea-entering Channel Project Management Division of Jiangsu Province, Huai'an 223200, China)

Abstract: The rapid development of the Yangtze River Economic Belt has put forward higher requirements on the channel dimensions of the lower Yangtze River. Ascertaining the maximum stable channel depth of this reach under natural endowment is thus of great practical significance for channel planning and development potential research. Considering that the Hukou-Nanjing reach of the lower Yangtze River largely consists of braided reaches in terms of river regime characteristics, this paper proposes a calculation method for the stable channel depths of the branches on the basis of stable channel depth estimation. It then calculates the maximum stable channel depths of several typical navigation-obstructing branches and obtains a relation between the maximum stable channel depth and the flow diversion ratio of each branch of this reach. The results show that the maximum stable channel depths of the four typical navigation-obstructing branches are respectively 11.2 m (in the right branch of the Madangnan channel), 9.6 m (in the Xigang branch of the Dongliu reach), 12.0 m (in the Zhonggang branch of the Guichi reach), and 15.7 m (in the main branch of the Jiangxinzhou reach).

Keywords: maximum stable channel depth; channel; braided reach; Hukou-Nanjing reach; Lower Yangtze River

收稿日期: 2022-03-13

*基金项目: 国家自然科学基金项目(U2040219); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402103); 长江航道科技项目(Hs219003、Qs221001)

作者简介: 李鑫(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为河流动力学。

通讯作者: 左利钦(1980—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事水沙运动力学研究。E-mail: lqzuo@nhri.cn

长江下游沿江经济快速发展, 对航运及航道尺度的要求提高^[1-2], 亟需探明长江下游可开发的航道尺度, 以指导航道规划开发。马驰等^[3]研究了长江下游航道承载力的概念和指标体系, 指出自然条件下的最大稳定航深是评价航道承载力的基础。刘书伦^[4]提出以流量与比降为自变量的最大稳定航深计算公式, 但系数选择未与河道断面形态参数相关联。河道断面形态是河道水沙与河床相互作用的结果、是河床变化规律的体现^[5], 故进行航道尺度计算时不应忽略河道形态的影响。冯宏琳^[6]提出等级流量比较法与稳定航深估算法, 等级流量比较法通过将各航道等级需要的通航流量与河道的设计最低通航流量进行比较来确定航道开发等级; 稳定航深估算法将河相关系式^[7]与曼宁公式有机结合建立了最大稳定航深计算公式, 在西江、东江、长江泸渝段、长江叙渝段、岷江下游等河段得到成功应用^[8-9]。李文杰等^[10]利用几何相似原理将稳定航深计算公式中水深修正系数

表示为断面形状系数 k 与河宽 B 及航宽 b 的函数, 简化了求解过程。

但是过去对稳定航深的研究常针对非分汊河段, 而长江下游碍航段常出现在分汊河段, 分汊河段稳定航深的计算有待进一步研究。本文基于长江下游湖口—南京河段以分汊河段为主的特点, 引入分流比, 改进最大稳定航深估算法, 提出汊道稳定航深的计算方法, 计算了长江下游湖口—南京典型碍航河段自然禀赋下最大稳定航深, 给出了汊道最大稳定航深与分流比的关系。计算结果为长江下游湖口—南京段航道开发规划提供支撑。

1 河段概况

长江下游湖口—南京河段长约 432 km, 流经赣、皖、苏 3 省。沿江节点分布广泛, 节点处河道较窄深; 节点以外河道水流分散, 泥沙易淤积而形成汊道。典型的碍航河段有马当、东流、贵池、江心洲等, 见图 1。

稳定航深 计算分段	2020航道现 状维护尺度	2035航道 规划尺度
芜湖— 南京段	9.0 m×500 m	10.5 m×500 m
	7.5 m×500 m	10.5 m×500 m
安庆— 芜湖段	6.0 m×200 m	7.5 m×200 m
湖口— 芜湖段	5.0 m×200 m	6.0 m×200 m

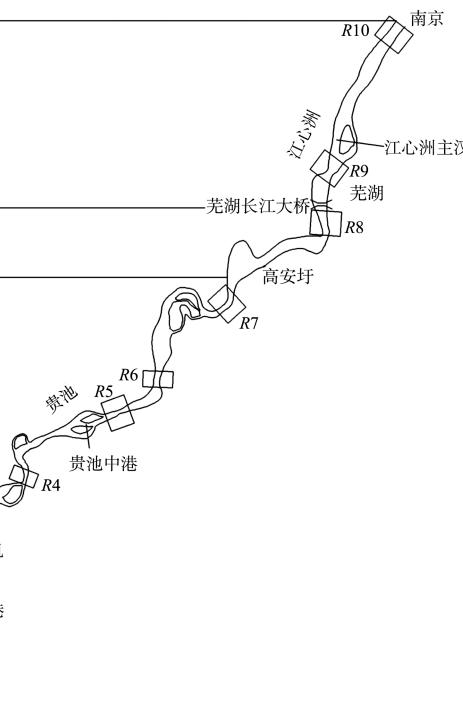


图 1 长江下游湖口—南京河段及优良河段($R1 \sim R10$)概况

依据河势特点以及航道维护尺度, 长江下游湖口—南京总体划分为 3 段: 湖口—安庆河段、安庆—芜湖

河段、芜湖—南京河段, 根据各河段 2035 年航道规划尺度(表 1), 各河段航宽定为 200、200、500 m。

表 1 长江下游湖口—南京河段航道尺度

子河段	航道尺度(航深×航宽×转弯半径)/(m×m×m)	
	2020 年	2035 年
湖口—安庆吉阳矶	5.0×200×1 050	6.0×200×1 050
安庆吉阳矶—芜湖高安圩	6.0×200×1 050	7.0×200×1 050
芜湖高安圩—芜湖长江大桥	7.5×500×1 050	10.5×500×1 050
芜湖长江大桥—南京燕子矶	9.0×500×1 050	10.5×500×1 050

2 数据来源及方法

2.1 研究方法

稳定航深估算法是一种估算航道开发潜能的方法, 该方法假定碍航河段在整治后具有与优良河段(顺直微弯、无分汊且通航条件好)相似的断面形态, 即河相关系数 α 、 β 与水深改正系数 η 相同, 获得稳定航深计算公式:

$$h_s = \frac{H}{\eta} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{nQ}{\alpha^2 J^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{2\beta+11}} \quad (1)$$

式中: h_s 为稳定航深(m)(无分汊河段); H 为断面平均水深(m); η 为水深改正系数(优良断面的断面平均水深与航道水深 h 拟合所得的相关系数); n 为枯水河床糙率; Q 为流量(m^3/s); α 、 β 为河相关系数; J 为枯水河床比降。由式(1)可见, 最大稳定航深 h_s 与流量 Q 、比降 J 密切相关。

分汊河段流量只占全河段流量的一部分, 若采用全河段流量 Q 值明显偏大, 故引入分流量, 采用汊道分流量和比降研究分汊河段最大稳定航深计算方法。

针对某汊道, 经典的曼宁流量公式为:

$$Q_i = \frac{1}{n} BH^{\frac{5}{3}} J_i^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: $Q_i = \lambda Q$ 为某汊道的分流量; J_i 为该汊道的比降; λ 为汊道分流比(%); B 为河宽。

假定理想情况下, 汊道的断面形态与优良河段断面形态相似, 即具有相同的河相关系:

$$\frac{\sqrt{B}}{H} = \alpha H^\beta \quad (3)$$

由式(2)(3)得到:

$$H = \left(\frac{nQ_i}{\alpha^2 J_i^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{2\beta+11}} \quad (4)$$

引入水深改正系数 η , 建立优良河段各断面

的平均水深 H 与给定航宽 b 下对应的航道水深 $h(b)$ 之间的关系式:

$$H = \eta h(b) \quad (5)$$

假定汊道具有与优良河段相同的 η , 且河道整治前后流量、比降、糙率不变, 可得分汊河道最大稳定航深计算公式:

$$h'_s(b) = \frac{H}{\eta} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{n\lambda Q}{\alpha^2 J^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{2\beta+11}} \quad (6)$$

式中: λ 为汊道分流比(%); $h'_s(b)$ 为航宽为 b 时的汊道最大稳定航深(m)。

2.2 研究资料

大通站为长江下游水文控制站, 2003 年三峡水库运行后枯水下泄流量增加, 向家坝等上游梯级水库 2013 年运行后下泄流量进一步增加, 故选择 2013 年以来的最小枯水流量 10 400 m^3/s (2014 年)作为最小流量进行河相关系分析和最大稳定航深估算; 湖口—安庆段采用 2014 年实测地形, 安庆—南京段采用 2012 年实测地形; 比降与糙率根据各河段的水文测验得到。

3 稳定航深计算

3.1 优良河段选取

长江下游分汊河段之间大都是航道尺度较大、通航水流条件较好的优良河段。在湖口—安庆段、安庆—芜湖段、芜湖—南京段共选取了 10 个优良河段(图 1)中的 56 个断面进行河相关系分析。

3.2 长江下游湖口—南京河段最大稳定航深估算

3.2.1 河相关系系数

图 2 为湖口—南京各河段河相关系。各河段由上至下河相关系系数 α 分别为 35.84、42.92、37.49, β 分别为 -1.05、-1.10、-1.02。湖口—安庆段与芜湖—南京段 R^2 均在 0.96 以上, 说明拟

合相关性较好; 安庆—芜湖段因河段较长, 优良断面选择的范围跨度较大, R^2 稍小。

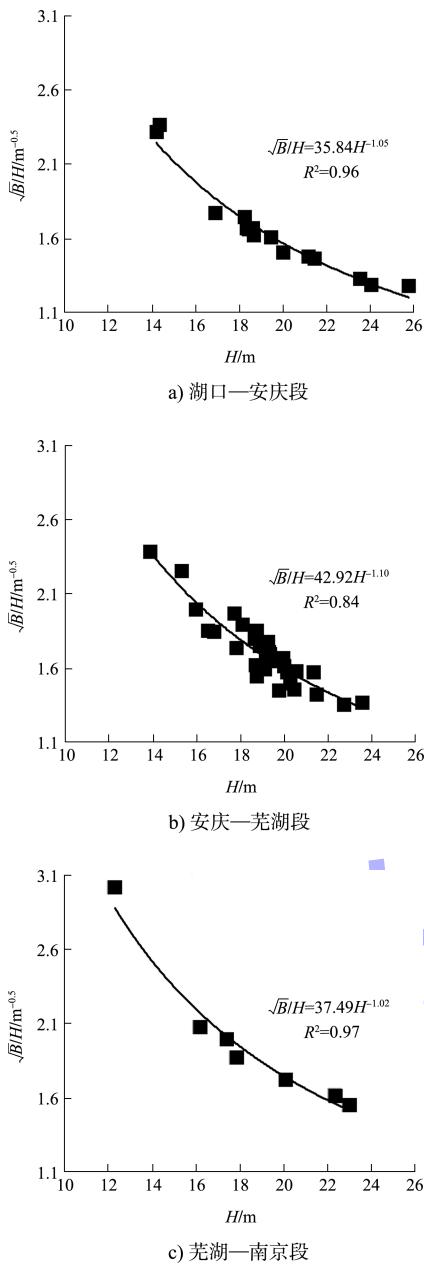


图 2 湖口—南京各段优良河段河相关系

3.2.2 水深改正系数

优良断面的断面下部与断面整体之间以及各断面相互之间的形状往往具有一定的相似性, 这使断面平均水深与某航宽下对应的航道水深常符合线性关系, 其比值为一常数, 即水深改正系数 η 。为求 η , 对 3 河段各自的优良断面进行 H 与 h 的拟合(图 3)。结果表明各河段水深改正系数分别为 0.66、0.68、0.82。

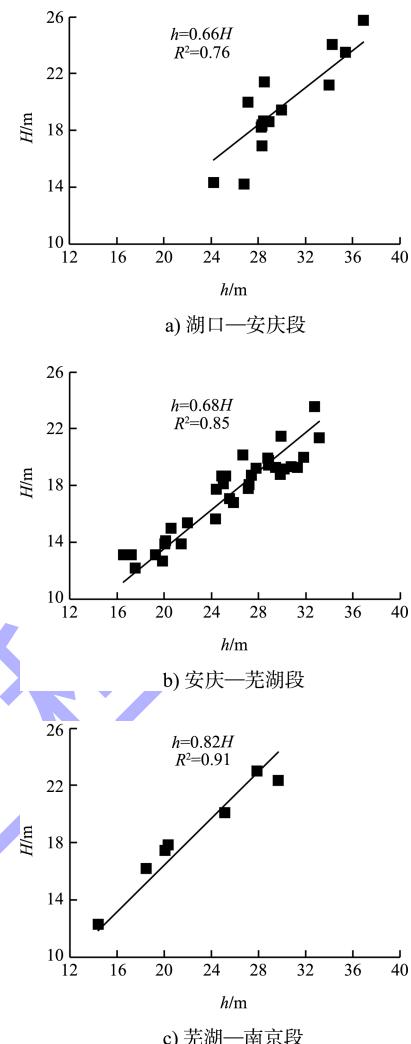


图 3 长江下游湖口—南京各段优良断面平均水深 H 与航道水深 h 关系

3.2.3 最大稳定航深计算结果

湖口—南京河段沿程比降较平缓, 湖口—安庆段、安庆—芜湖段、芜湖—南京段枯水平均比降分别约为 0.026‰、0.019‰、0.010‰, 河床糙率分别采用 0.030、0.031、0.035。分汊河段的主航道常为主汊, 其比降一般与河段平均比降相差不大, 为简便计算采用河段平均比降。

表 2 为湖口—南京各河段全断面流量下最大稳定航深, 长江下游最大稳定航深呈现沿程递增趋势。

表 2 长江下游湖口—南京各河段全断面流量下稳定航深

河段	航宽/m	平均水深 H/m	稳定航深 h_s/m
湖口—安庆	200	11.6	17.7
安庆—芜湖	200	12.4	18.2
芜湖—南京	500	15.2	18.5

表 3 为长江下游各通航汊道稳定航深, 因流量减小, 汊道最大稳定航深远小于全断面流量下

的稳定航深。

表 3 各河段典型碍航分汊河段最大稳定航深

典型河段	分流比 $\lambda/\%$	总流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	分流量 $Q_1/(m^3 \cdot s^{-1})$	H/m	η	h_s'/m
马当南水道右槽	48.8	10 400	5 075	7.4	0.66	11.2
东流西港	38.4	10 400	3 994	6.3	0.66	9.6
贵池中港	54.0	10 400	5 616	8.1	0.68	12.0
江心洲主汊	77.0	10 400	8 008	12.9	0.82	15.7

3.3 汊道稳定航深与分流比的关系

分汊河段的分流比是变化的, 故给出汊道稳定航深与分流比的关系非常重要。将式(6)改写为

$$h_s' = a\lambda^b, \text{ 其中系数 } a = \frac{1}{\eta} \left(\frac{nQ}{\alpha^2 J_i^{\frac{1}{3}}} \right)^{\frac{1}{2b+11}}, b = \lambda^{\frac{1}{2b+11}}$$

见分汊河段稳定航深与分流比成幂函数关系。经计算, 长江湖口—南京各段汊道稳定航深与汊道分流比的关系见图 4。

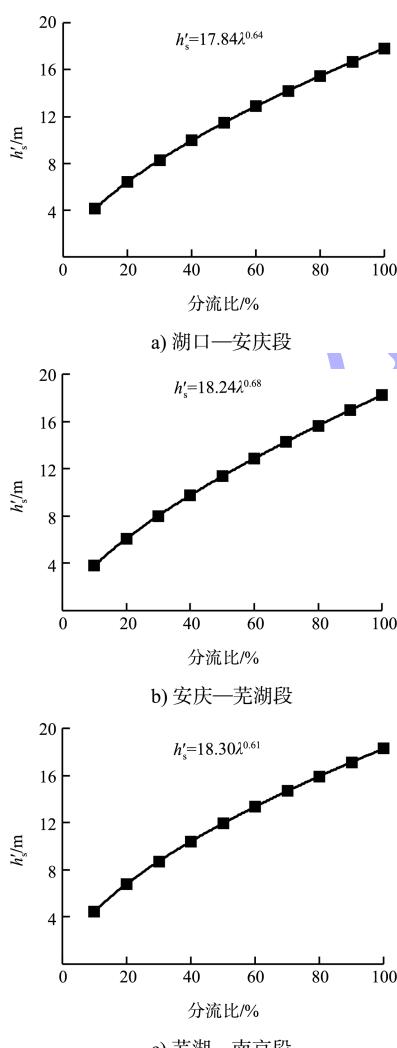


图 4 长江下游湖口—南京各段 λ 与 h_s' 关系

4 讨论

航深与汊道内的洲滩形态密切相关, 文献 [11-12] 研究表明: 三峡清水下泄引起的长江中下游河道冲刷已发展至大通以下, 滩槽冲淤趋势基本为滩槽均冲, 使河道滩槽高差有减小趋势。航槽一般为枯水河槽, 滩槽高差减小可能影响水流归槽, 从而影响航道条件。本文方法基于概化的河相关系式(河宽与断面平均水深为参数), 尚无法反映河段洲滩形态对最大稳定航深的影响, 值得进一步研究。另一方面, 滩槽均冲有可能使河槽宽度增大。自然禀赋下的最大稳定航深与航宽密切相关, 故对不同航宽下的最大稳定航深需进行探讨。

由式(5)可知, 航宽不同时系数 η 不同、稳定航深也不同。将式(6)中的系数 η 由常数改为航宽 b 的函数 $\eta(b)$, 即得到变化航宽下的稳定航深。以湖口—安庆段为例, 计算了航宽分别为 200、300、400、500、600 m 时的水深修正系数 η , 计算结果见表 4。对航宽 b 与 η 进行关系拟合(图 5), 可得:

$$\eta(b) = 10^{-6}b^2 - 0.0006b + 0.72 \quad (7)$$

将式(7)代入式(6), 即得湖口—安庆段变化航宽下的汊道稳定航深计算公式。

表 4 为不同航宽下湖口—安庆段的水深修正系数与马当南水道右槽的最大稳定航深, 航深随着航宽增大而减小。

表 4 各航宽下的湖口—南京河段水深修正系数及马当南右槽最大稳定航深

航宽 b/m	湖口南京段水深修正系数 η	马当南水道右槽稳定航深 h_s'/m
200	0.66	11.2
300	0.67	11.0
400	0.70	10.6
500	0.76	9.7
600	0.84	8.8

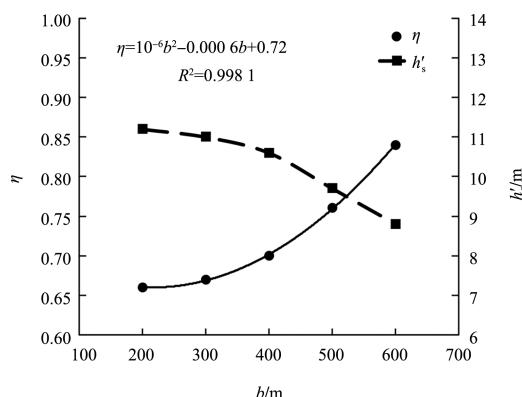


图 5 湖口—安庆段水深修正系数 η 及马当南水道右槽稳定航深与航宽 b 关系

5 结论

1) 基于稳定航深估算法, 提出长江下游分汊河段汊道稳定航深计算方法, 计算得到 4 个典型分汊碍航河段自然禀赋的最大稳定航深分别为: 马当南水道右槽 11.2 m、东流西港 9.6 m、贵池中港 12.0 m、江心洲主汊 15.7 m。

2) 给出长江下游湖口—南京河段汊道最大稳定航深与分流比的关系式, 根据碍航河段的分流比即可求出不同汊道自然禀赋下的最大稳定航深。以马当南水道右槽为例探讨了不同航宽下的最大稳定航深。

3) 本文给出的最大稳定航深基于汊道与优良断面具有相同的河相关系假定, 反映了一定水沙和河势条件下的河流自然禀赋, 是理想情况下能达到的稳定航深。然而在航道开发过程中, 受到整治技术以及防洪、生态等限制, 实际航道开发尺度要小于自然禀赋下的最大稳定航深。本研究为确定防洪、生态、水资源综合利用等多目标协同下的航道开发尺度研究提供了基础的上限值。三峡水库运行后长江中下游河道持续冲刷, 最大

稳定航深或随河相关系发生变化, 需跟踪研究最大稳定航深变化。

参考文献:

- [1] 苏磊, 孙寿保, 徐峰, 等. 长江下游江阴水道下段开通上行副航道可行性研究[J]. 水运工程, 2021(1): 136-141, 161.
- [2] 赵艺为, 张培林. 长江航道承载力概念研究[J]. 水运工程, 2018(3): 124-128, 165.
- [3] 马驰, 左利钦, 陆彦, 等. 长江下游航道承载力指标与评价方法研究[J]. 水利水运工程学报, 2019(1): 85-93.
- [4] 周冠伦. 航道工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [5] 唐存本, 贡炳生, 左利钦. 再论航道整治线宽度与整治水位的确定[J]. 水运工程, 2010(3): 85-90.
- [6] 冯宏琳. 西江航道尺度开发潜能研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [7] 姜继红, 冯宏琳, 张玮, 等. 西江(桂梧段)优良河段及其河相关系分析研究[J]. 水运工程, 2006(2): 70-73.
- [8] 朱代臣, 解中柱, 吕晓兵. 长江干线泸州至重庆河段航道开发潜能初探[J]. 人民长江, 2011, 42(19): 7-10.
- [9] 张有林, 吕彪, 李欢. 岷江下游龙溪口枢纽至合江门河段航道开发尺度估算研究[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(12): 256-258, 250.
- [10] 李文杰, 王皓, 龙浩, 等. 长江叙渝段航道最大开发尺度研究[J]. 水利水运工程学报, 2021(2): 20-26.
- [11] 许全喜. 三峡工程蓄水运用前后长江中下游干流河道冲淤规律研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 146-154.
- [12] 杨云平, 张明进, 孙昭华, 等. 基于河段单元尺度长江中游河床形态调整过程及差异性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(1): 70-84.

(本文编辑 武亚庆)

欢迎投稿

欢迎订阅