

含沙量和悬沙粒径变化对长江宜昌 - 汉口 河段年冲淤量的影响

许 炯 心

(中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 依据三峡水库修建以前的资料, 运用数理统计方法对含沙量和悬沙粒径变化对长江宜昌 - 汉口河段年冲淤量的影响进行研究, 以期对三峡水库修建以后库下游河道冲淤特性的预测提供参考。建立了 1980 - 1997 年间宜昌 - 汉口[#]河段年冲淤量与宜昌站年均含沙量 $C_{宜昌}$ 之间的回归方程, 据此估算出使宜昌 - 汉口[#]河段处于不冲不淤状态的宜昌站临界年均含沙量为 0.734 kg/m^3 。以宜昌 - 汉口冲淤量作为因变量, 以宜昌站的含沙量、悬沙中径 D_{50} 、最大流量和三口分流比作为影响变量, 建立了多元回归方程。基于 1980 - 1997 年资料的方程表明, 宜昌站含沙量越高, 悬沙中径越粗, 宜昌站洪水流量越大, 宜昌 - 汉口河段年淤积量越大; 三口分流比越小, 宜昌 - 汉口河段年淤积量越大。

关 键 词: 河道泥沙淤积; 含沙量; 悬移质泥沙粒径; 长江

中图分类号: TV142.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2006)01-0067-07

长江上游的水沙变化, 不仅表现为径流量和输沙量的变化, 而且表现为含沙量和悬移质泥沙粒径的变化。水流挟沙力可定义为一定水力条件下水流的饱和含沙量, 即处于不冲不淤即输沙平衡状态下的含沙量。冲积河道的冲淤取决于河流含沙量与挟沙力的对比关系, 泥沙的粒径是决定挟沙力的重要因子。因此, 含沙量与泥沙粒径的变化将会引起河道淤积状态的变化。对于长江上游的水沙变化, 已有不少研究成果问世^[1~3], 对于长江中游荆江段和城陵矶至武汉段的河道冲淤, 前人也进行了荆江人工裁弯、三口分流分沙量的变化及洞庭湖水系来水来沙的变化对河道泥沙输移、淤积河床演变的影响等研究^[4~8]。在文献[9]中, 以大量实测资料为基础, 研究了长江宜昌 - 武汉河段泥沙年冲淤量对水沙变化的响应, 建立了长江宜昌 - 武汉河段泥沙年冲淤量与宜昌站的径流量、输沙量、年最大流量、三口分水比和分沙比之间的多元回归方程。迄今, 未见前人对长江上游来水的含沙量和泥沙粒度的变化对中游河道冲淤的影响的研究。三峡水库修建后, 由于水库对水沙过程的调节, 将使进入长江中游径流的含沙量和泥沙粒度发生改变, 由此引起冲淤过程的变化。本文依据三峡水库修建前的资料, 对含沙量和悬沙粒径变化对长江宜昌 - 汉口河段年冲淤量的影响进行研究, 以期对三峡水库修建以后库下游河道冲淤特性的预测提供参考。

1 河道概况

湖北省宜昌为长江中游与上游的分界点。宜昌以下, 长江由山区进入中下游平原, 河道也变为冲积性河床。下荆江在历史上曾多次发生自然裁弯。1967 年和 1969 年, 分别在中洲子河段和下车湾河段实施了人工裁弯工程, 1972 年又发生了沙滩子自然裁弯, 共缩短河长 78 km, 使下荆江的弯曲系数由 3.0 下降为 $2.0^{[7]}$ 。

宜昌站的水沙条件受长江上游流域因素的控制, 该站的径流量和输沙量可以视为长江中下游河道的水沙的输入。宜昌站所控制的流域面积为 100.5 万 km^2 , 按 1950 - 1997 年平均, 宜昌站年悬移质输沙量为 5.115 亿 t。

收稿日期: 2004-11-01; 修订日期: 2005-02-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (2003CB415202)

作者简介: 许炯心 (1948 -), 男, 四川绵阳人, 中国科学院地理科学与资源研究所研究员, 博士生导师。主要从事河流地貌研究工作。E-mail: xujx @igsr.ac.cn

宜昌站和以下水文站均未进行推移质泥沙的测验。在荆江河段所进行的零星观测表明,推移质输沙量只占悬移质输沙量1%~2%。由于推移质泥沙只占极小的比例,在研究河段的泥沙收支平衡时,不考虑推移质泥沙所导致的误差是可以忽略的。

2 研究方法 with 资料

由于受河道-湖泊耦合关系的影响,宜昌-汉口河段的泥沙收支平衡关系比较复杂。荆江两岸筑有高堤,河面高出地面数米。为了防洪的需要,大堤上留有分水口,以分泄洪水。历史上分流口较多,1950年尚存松滋口、太平口、藕池口和调弦口。1959年在调弦口建闸,1970年调弦口封闭。故上述分水口习称“四口分流”或“三口分流”。洞庭湖水系的来水来沙,以及经四口或三口分泄入洞庭湖的水沙,经调蓄和沉积之后,再由入江水道进入长江干流,其控制站为城陵矶站。

长江中游的主要支流汉江,在汉口汇入长江,其控制站为汉江仙桃站。由于汉江仙桃站的资料系列不完整,一般以汉江皇庄(碾盘山)站作为汉江的水沙控制站。长江汉口站为本河段的出口控制站,该站位于汉江汇

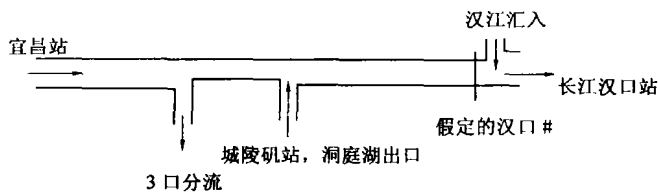


图1 宜昌至汉口河段的输入、输出关系概化图^[9]

Fig. 1 A diagram showing input and output of the Yichang - Hankou reach of Yangtze River

口以下不远处,既可控制该站以上的干流水沙量,又可控制汉江汇入的水沙量。枝城以上宜都处有支流清江入汇,清江多年平均年径流量为135亿 m^3 ,仅占宜昌站年平均径流量的3.1%。沙市附近有支流沮漳河入汇,年径流量仅为20亿 m^3 左右,对荆江的水量影响很小。清江和沮漳河的输沙量较小,分别占宜昌站的1.7%、0.4%^[4]。由于缺少长系列资料,忽略了这两条支流的来流量和来沙量。

宜昌至汉口河段的输入、输出关系可概化为图1^[9]。

基于泥沙收支平衡的概念,可确定宜昌-汉口河段的年冲淤量^[9]。可写为

$$\text{宜昌 - 汉口河段冲淤量} (S_{\text{dep}, Y-H}) = \text{河段输入沙量} - \text{河段输出沙量} = (Q_{s, \text{宜昌}} + Q_{s, \text{城陵矶}} + Q_{s, \text{皇庄}}) - (Q_{s, \text{三口分流}} + Q_{s, \text{长江汉口}}) \quad (1)$$

由于汉江来沙汇入的地点接近于河段末端,刚输入即予输出,对整个河段的淤积几乎没有影响。考虑到这一点,为了使问题简化,设想在紧靠汉江汇口以上处,存在一个控制断面,设为“汉口#”,该点可作为宜昌-汉口河段的末端。引入汉口#以后,在考虑本河段的冲淤过程时,汉江的来沙即可排除在外。在进行了上述处理以后,进行本河段泥沙输移比计算时会更为合理。

汉口#的输沙量为长江汉口站的输沙量减去汉江皇庄站的输沙量。引入控制点汉口#后,泥沙平衡方程可以简化为:

$$\begin{aligned} \text{宜昌 - 汉口# 河段冲淤量} (S_{\text{dep}, Y-H}) = \\ \text{河段输入沙量} - \text{河段输出沙量} = (Q_{s, \text{宜昌}} + \\ Q_{s, \text{城陵矶}}) - (Q_{s, \text{三口分流}} + Q_{s, \text{长江汉口}}) \end{aligned} \quad (2)$$

按式(2)可以计算出宜昌-汉口河段的历年泥沙冲淤量,式中所涉及到的各个水文站的输沙资料均来自有关水文站。在确定了泥沙冲淤量之后,运用统计学方法,将泥沙冲淤量与河段输入的含沙量与悬沙粒径相联系,建立经验统计关系。

3 宜昌站含沙量和悬沙粒径的变化

宜昌站的来水量、来沙量可视为长江中游河道水沙的输入。在荆江段有一系列的分流河道将长江与洞庭湖相联系, 将来自宜昌站以上流域的水沙中的一部分, 分流至洞庭湖。这在一定意义上等价于河段水输入水沙量的减少, 并可导致三口分流以下河段含沙量的变化。因此, 在考虑本河段冲淤特性时, 必须考虑三口分流比的变化及其对干流含沙量的影响。图 2 点绘了宜昌站的年均含沙量、悬沙中径和三口分流的年均含沙量随时间的变化。可以看到, 从 1955 - 1979 年, 宜昌站和三口分流含沙量的波动较大, 但无趋势性的变化; 1980 年后表现出明显的减小趋势。宜昌站悬沙中值粒径则从 1955 年以来一直有减小的趋势。可以认为, 除了水量和沙量以外, 含沙量和悬沙粒径的变化也会导致宜昌 - 汉口[#]河段年冲淤量的变化。

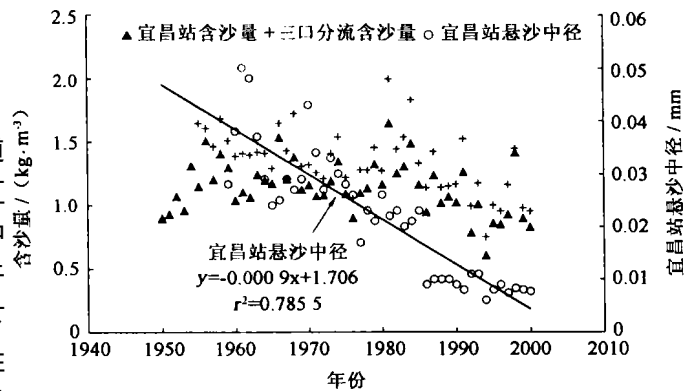


图 2 宜昌站的年均含沙量、悬沙中径和三口分流的年均含沙量随时间的变化

Fig. 2 Temporal variations in the annual suspended sediment concentration and median grain size of suspended load at Yichang station, and the mean suspended sediment concentration of the Yangtze River after the flow diversion through the "three outfalls" to the Dongtinghu Lake

4 宜昌 - 汉口[#]河段年冲淤量与含沙量和悬沙粒径的关系

河流的冲淤过程取决于水流挟沙能力与含沙量的对比关系, 严格地说取决于床沙质(造床质泥沙)的挟沙能力与床沙质泥沙的含沙量之间的对比关系。张瑞瑾将挟沙能力与流速 v 、水深 h 和泥沙沉速 w 相联系, 得到如下的挟沙能力公式^[10]:

$$= k \left(\frac{v^3}{gh} \right)^m \quad (3)$$

式中 g 为重力加速度; w 为泥沙沉速。泥沙沉速取决于泥沙的粒径。由此可见, 可将河道的冲淤过程与水流的含沙量与泥沙粒径联系起来。由于泥沙冲淤主要在汛期发生, 故应将汛期的床沙质含沙量与床沙质泥沙的代表粒径相联系。由于资料限制, 作为一种近似, 以年平均悬沙含沙量和中值粒径来反映床沙质含沙量与床沙质泥沙的代表粒径, 研究含沙量和悬沙粒径对冲淤量的影响。

在图 3(a) 和图 3(b) 中分别点绘了宜昌 - 汉口[#]河段年冲淤量与宜昌站年平均悬移质含沙量和悬移质中径之间的关系。从图 3(a) 中可看到, 年冲淤量与宜昌站年平均悬移质含沙量呈正相关关系, 但点子较为分散。经计算, 相关系数的平方为 0.42, 超过了显著性程度为 0.01 的临界值 0.1546。由于来沙条件和河道调整的差异, 可分为 1955 - 1979 年和 1980 - 1997 年两个不同的时段。以不同的符号区分不同时期的点子后可看到, 在图 3(a), 前一时期的点子比较分散, 相关系数的平方为 0.5022; 后一时期的点子则很集中, 相关系数的平方分别为 0.8071, 是极为显著的。

从图 3(b) 中可以看到, 在总体上年冲淤量与宜昌站悬沙中径之间的关系十分分散, 二者不相关。但是, 以不同的符号区分 1955 - 1979 年和 1980 - 1997 年两个不同的时段后可以看到, 对于后一时段而言, 年冲淤量与宜昌站悬沙中径之间存在着密切的正相关关系, 相关系数的平方为 0.6006, 是很显著的。

1955 - 1979 年和 1980 - 1997 年是两个不同的时段, 其泥沙冲淤量和 D_{50} 的差异十分明显。这种差异与以下因素有关: 长江上游水沙变化。长江上游主要产沙区嘉陵江流域的来沙量, 从 20 世纪 80 年代以来有所减

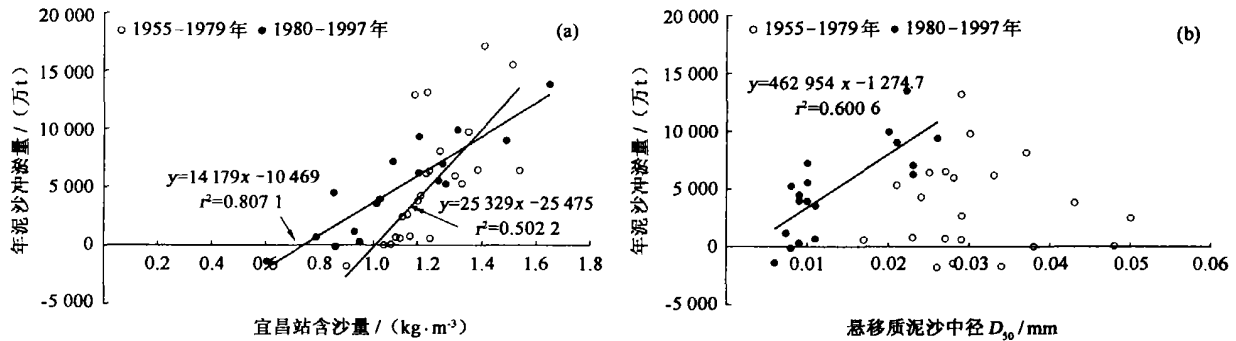


图3 宜昌-汉口#河段年冲淤量与宜昌站年平均悬移质含沙量(a)和悬移质中径(b)的关系

Fig.3 Relationship of annual sediment deposition in the Yichang-Hankou# reach with annual suspended load (a) and annual suspended sediment concentration at Yichang station (b)

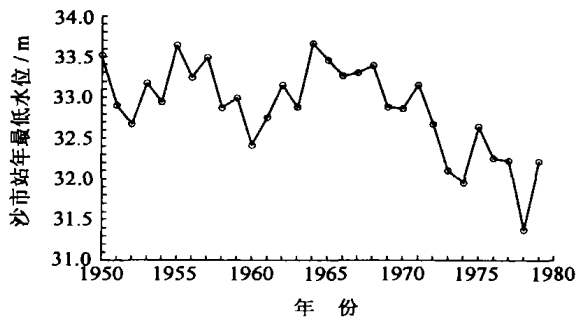


图4 长沙沙市站历年最低水位随时间的变化^[3]

Fig.4 Plotted yearly lowest water stage at Shashi station

游河道发生淤积。图4点绘了长沙沙市站历年最低水位随时间的变化。可以看到,1950-1967年,尽管年际间波动较大,年最低水位不随时间而变化。从1968年起,年最低水位迅速降低,至1980年才有稳定的趋势。可见人工裁弯导致河床冲刷,使得水位明显下降。河道冲刷的另一个后果是三口分流的水沙量减少,因而使三口以下河段的水沙量相对增加,也会导致河段内部的调整。上述调整在完成之前,河道处于非平衡状态,因而河段的年冲淤量与含沙量和悬沙粒径之间的相关程度较低。

依据1980-1997年间宜昌-汉口#河段年冲淤量 $S_{\text{dep}, Y-H} (10^4 \text{t/a})$ 与宜昌站年均含沙量 $C_{\text{宜昌}} (\text{kg/m}^3)$ 的资料,计算出了二者之间的回归方程为

$$S_{\text{dep}, Y-H\#} = 14179 C_{\text{宜昌}} - 10469 \quad (r^2 = 0.8071) \quad (4)$$

令式(4)左端为0,可得 $C_{\text{宜昌}} = 0.734 \text{ kg/m}^3$, 此即为使宜昌-汉口#河段处于不冲不淤状态的宜昌站临界年均含沙量。应该指出,这一临界值有一定的适用条件,即以宜昌站年径流量较稳定为前提。

5 多元回归分析

5.1 相关分析

含沙量和悬沙粒径只是影响冲淤量的众多因素中的两个。除了这两个因素以外,宜昌站的径流量、输沙量、年最大洪峰流量,三口分沙比与分流比、从洞庭湖流入长江的径流量、输沙量和含沙量(以城陵矶站为代表)也有一定的影响。为此,计算了宜昌-汉口#河段年冲淤量 $S_{\text{dep}, Y-H}$ 与上述各个影响因素之间的相关关系,以评判这些因素对 $S_{\text{dep}, Y-H}$ 影响的重要程度。1980年后与以前的情况有较大差异,故按1980-1997年和1955-

少^[1,2]; 葛洲坝水库的影响。葛洲坝水库1980年建成蓄水,拦截了来自上游的部分泥沙,水库中发生淤积。1981-1998年,葛洲坝水库淤积量为1.01亿 m^3 ,折算成输沙量为1.313亿t,平均每年拦沙730万t^[11]。对上荆江的河道冲淤有一定的影响; 下荆江河道裁弯。1967年和1969年,分别在中洲子河段和下车湾河段实施了人工裁弯工程,1972年又发生了沙滩子自然裁弯,共缩短河长78km,使下荆江的弯曲系数由3.0降为2.0。人工裁弯和自然裁弯打破了原有的平衡,导致河道的自我调整。增大了局部河段的比降,使河道的挟沙能力增大,导致了裁弯点以下的冲刷下切,并引起逐渐向上游发展的溯源侵蚀,使得河床降低。冲刷产生的泥沙向下游搬运,使下

- 1997 年两个系列分别计算，所得到的相关系数矩阵列于表 1 和表 2。

从表 1 中可看到，各因素对宜昌 - 汉口[#]河段年冲淤量都有影响。如果按相关系数的大小来表示各因素对 $S_{dep, Y-H}$ 影响的重要程度，按重要性依次为：宜昌站年输沙量；宜昌站的年含沙量；三口分沙比；

三口分流比；宜昌站年洪峰流量；宜昌站悬沙中值粒径；城陵矶站的年输沙量；宜昌站的年径流量；城陵矶站的年平均含沙量；城陵矶站的年径流量。

从表 2 可看到，只有部分因素对宜昌 - 汉口[#]河段年冲淤量有影响。如按相关系数的大小来表示各因素对 $S_{dep, Y-H}$ 影响的重要程度，排在前 3 位的依次为：宜昌站年输沙量；宜昌站的年含沙量；宜昌站年洪峰流量。其余因素与 $S_{dep, Y-H}$ 的相关系数都小于 0.30，未通过显著性程度 < 0.05 的检验。可见，对于 1955 - 1997 年系列，宜昌站悬沙中值粒径、城陵矶站的年径流量、宜昌站的年径流量、城陵矶站的年平均含沙量、城陵矶站的年径流量均无明显影响。这主要是由于在 1955 - 1980 年，由于下荆江裁弯以及四口分流比、分沙比迅速变化，导致了河道处于剧烈调整的河道，并未达到准平衡状态，因而各个因素与冲淤量的相关系数均不高，某些因素并不具有相关性。1980 年后，可认为经过一定时间的调整，河道已接近准平衡状态，故各个影响因素的相关性显著提高。

表 1 1980 - 1997 年宜昌 - 汉口[#]年冲淤量 $S_{dep, Y-H}$ 和水沙因素之间的相关系数矩阵

Table 1 Correlation matrix among the annual sediment deposition $S_{dep, Y-H}$ and sediment and river flow factors, based on data in 1980 - 1997

	Q_w 宜昌	Q_s 宜昌	C 宜昌	R 三口分沙	R 三口分流	C 城陵矶	Q_{max} 宜昌	Q_s 城陵矶	Q_w 城陵矶	D_{50} 宜昌	$S_{dep, Y-H}$
Q_w 宜昌	1.00	0.76	0.62	0.75	0.82	0.19	0.57	0.42	0.40	0.59	0.73
Q_s 宜昌	0.76	1.00	0.98	0.89	0.86	0.59	0.81	0.68	0.22	0.73	0.93
C 宜昌	0.62	0.98	1.00	0.85	0.78	0.65	0.82	0.67	0.12	0.69	0.90
R 三口分沙	0.75	0.89	0.85	1.00	0.97	0.48	0.68	0.71	0.43	0.83	0.86
R 三口分流	0.82	0.86	0.78	0.97	1.00	0.42	0.66	0.69	0.49	0.82	0.86
C 城陵矶	0.19	0.59	0.65	0.48	0.42	1.00	0.46	0.77	- 0.26	0.66	0.56
Q_{max} 宜昌	0.57	0.81	0.82	0.68	0.66	0.46	1.00	0.56	0.19	0.53	0.80
Q_s 城陵矶	0.42	0.68	0.67	0.71	0.69	0.77	0.56	1.00	0.41	0.83	0.74
Q_w 城陵矶	0.40	0.22	0.12	0.43	0.49	- 0.26	0.19	0.41	1.00	0.34	0.35
D_{50} 宜昌	0.59	0.73	0.69	0.83	0.82	0.66	0.53	0.83	0.34	1.00	0.77
$S_{dep, Y-H}$	0.73	0.93	0.90	0.86	0.86	0.56	0.80	0.74	0.35	0.77	1.00

注：宜昌站的年径流量为 Q_w 宜昌、年输沙量为 Q_s 宜昌、年平均含沙量为 C 宜昌、年最大洪峰流量为 Q_{max} 宜昌、悬沙中径为 D_{50} 宜昌；三口分沙比为 R 三口分沙、三口分流比为 R 三口分流；城陵矶年径流量为 Q_w 城陵矶、年输沙量为 Q_s 城陵矶、年平均含沙量为 C 城陵矶。

表 2 1955 - 1997 年宜昌 - 汉口[#]年冲淤量 $S_{dep, Y-H}$ 和水沙因素之间的相关系数矩阵

Table 2 Correlation matrix among the annual sediment deposition $S_{dep, Y-H}$ and sediment and river flow factors, based on data in 1955 - 1997

	Q_w 宜昌	Q_s 宜昌	C 宜昌	R 三口分沙	R 三口分流	C 城陵矶	Q_{max} 宜昌	Q_s 城陵矶	Q_w 城陵矶	D_{50} 宜昌	$S_{dep, Y-H}$
Q_w 宜昌	1.00	0.74	0.43	0.44	0.47	- 0.13	0.52	0.20	0.54	0.18	0.60
Q_s 宜昌	0.74	1.00	0.92	0.47	0.52	0.23	0.69	0.36	0.33	0.31	0.79
C 宜昌	0.43	0.92	1.00	0.39	0.44	0.40	0.64	0.38	0.14	0.33	0.70
R 三口分沙	0.44	0.47	0.39	1.00	0.98	0.67	0.26	0.89	0.63	0.82	0.20
R 三口分流	0.47	0.52	0.44	0.98	1.00	0.68	0.26	0.89	0.62	0.80	0.26
C 城陵矶	- 0.13	0.23	0.40	0.67	0.68	1.00	0.01	0.83	0.06	0.72	0.01
Q_{max} 宜昌	0.52	0.69	0.64	0.26	0.26	0.01	1.00	0.14	0.24	0.13	0.65
Q_s 城陵矶	0.20	0.36	0.38	0.89	0.89	0.83	0.14	1.00	0.60	0.81	0.16
Q_w 城陵矶	0.54	0.33	0.14	0.63	0.62	0.06	0.24	0.60	1.00	0.44	0.27
D_{50} 宜昌	0.18	0.31	0.33	0.82	0.80	0.72	0.13	0.81	0.44	1.00	0.03
$S_{dep, Y-H}$	0.60	0.79	0.70	0.20	0.26	0.01	0.65	0.16	0.27	0.03	1.00

5.2 多元回归方程

按数理统计中建立多元回归方程的要求，应满足如下条件：各影响变量间应相互独立，即不应该将彼此密切相关的变量同时引入回归方程；相对于样本容量而言，自变量个数不能太多，样本数应为自变量个

数的4~6倍。根据以上原则,由于宜昌站含沙量与宜昌站来沙量、宜昌站径流量均有密切相关,不宜同时选入;四口分流比与分沙比之间密切相关,也不宜同时选入。同时,1980-1997年系列的样本数为18,只能选入4个自变量。基于以上考虑,选入了宜昌站的含沙量 $C_{宜昌}$ 和悬沙粒径 $D_{50宜昌}$ 以及三口分流比 $R_{三口分流}$ 、宜昌站的洪峰流量 $Q_{max,宜昌}$ 等4个变量。三口分流比越大,则分流后干流的流量和挟沙能力越小,会增大干流的淤积。考虑到洪水特性对河道冲淤也有较大影响,在影响变量中也包括了宜昌站的历年最大流量 $Q_{max,宜昌}$ 。

以年冲淤量 $S_{dep, Y-H^{\#}}$ (万t)作为因变量,以宜昌站的含沙量 $C_{宜昌}$ (kg/m^3)、悬沙中径 $D_{50,宜昌}$ (mm)、年最大流量 $Q_{max,宜昌}$ (m^3/s)和三口分流比 $R_{三口分流}$ 作为影响变量,运用1980-1997年的资料,可得到方程为

$$S_{dep, Y-H^{\#}} = -13563 + 6537.5C_{宜昌} + 104344D_{50} + 0.085829Q_{max,宜昌} + 35638R_{三口分流} \quad (5)$$

式(5)的数据组数 $N=18$,复相关系数 $R=0.9423$,检验结果 $F=25.74$,显著性概率 $p=4.49 \times 10^{-6}$,剩余标准差 $SE=1540.6$ 。上式表明,宜昌站含沙量越高,悬沙中径越粗,宜昌站洪水流量越大,宜昌-汉口#河段年淤积量越大;三口分流比越大,宜昌-汉口#河段年淤积量越大。运用式(5),可粗略估算所研究河段年淤积量对含沙量和悬沙粒径变化所作出的响应。

由于上式中各变量的数量级相差很大,不能直接根据回归系数的大小来判定各变量贡献的大小。为此,对数据进行了标准化,使之变化在0~1,然后重新进行计算,建立常数项为0的回归方程为

$$S_{dep, Y-H^{\#}} = 0.4142C_{宜昌} + 0.1747D_{50宜昌} + 0.1969Q_{max,宜昌} + 0.2604R_{三口分流} \quad (6)$$

式(6)中各变量系数绝对值的大小反映该变量对因变量贡献率的大小。由此可以求得,当4个变量的总贡献率为100%时, $C_{宜昌}$ 、 D_{50} 、 $Q_{max,宜昌}$ 和 $R_{三口分流}$ 的贡献率分别为39.59%,16.70%,18.82%和24.89%。

以1955-1997年的数据进行了回归分析。在显著相关的3个因素中,宜昌站的输沙量与含沙量的相关系数达0.92,不宜于都选入回归方程。本文的目的是研究含沙量的影响,故未选入宜昌站输沙量这一变量。为了反映三口分流变化的影响,还选入了三口分流比这一变量;该变量与冲淤量的相关系数为0.26,在0.10水平上是显著的,因此是可以接受的。

经计算后,建立了 $S_{dep, Y-H}$ 与宜昌站的含沙量 $C_{宜昌}$ 和年最大流量 $Q_{max,宜昌}$ 以及三口分流比 $R_{三口分流}$ 之间的多元回归方程为

$$S_{dep, Y-H^{\#}} = -18358 + 9854.1C_{宜昌} + 0.1988Q_{max,宜昌} - 9132.5R_{三口分流} \quad (7)$$

式(7)的数据组数 $N=43$,复相关系数 $R=0.7621$,检验结果 $F=18.00$,显著性概率 $p=1.17 \times 10^{-7}$ 剩余标准差 $SE=3232$ 。

数据标准化后所建立的常数项为0的回归方程为

$$S_{dep, Y-H^{\#}} = 0.4217C_{宜昌} + 0.3387Q_{max,宜昌} + 0.1310R_{三口分流} \quad (8)$$

式(8)中各变量系数绝对值的大小反映该变量对因变量贡献率的大小。由此可求得,当4个变量的总贡献率为100%时, $C_{宜昌}$ 、 $Q_{max,宜昌}$ 和 $R_{三口分流}$ 的贡献率分别为47.31%,38.00%和14.69%。

6 结 论

依据三峡水库修建以前的资料,对含沙量和悬沙粒径变化对长江宜昌-汉口河段年冲淤量的影响进行研究,研究表明:

(1) 从1955-1979年,宜昌站和三口分流含沙量的波动较大,但无趋势性的变化;1980年后表现出明显的减小趋势。宜昌站悬沙中值粒径则从1955年以来一直有减小的趋势。建立了1980-1997年间宜昌-汉口#河段年冲淤量与宜昌站年均含沙量 $C_{宜昌}$ 之间的回归方程,根据此方程估算出使宜昌-汉口#河段处于不冲不淤状态的宜昌站临界年均含沙量为 $C_{宜昌}=0.734 kg/m^3$ 。

(2) 以宜昌-汉口#冲淤量作为因变量,以宜昌站的含沙量、悬沙中径 D_{50} 、最大流量和三口分流比作为影响变量,建立了多元回归方程。基于1980-1997年资料的方程表明,宜昌站含沙量越高,悬沙中径越粗,

宜昌站洪水流量越大, 宜昌 - 汉口[#]河段年淤积量越大; 三口分流比越大, 宜昌-汉口河段年淤积量越大。宜昌站的含沙量、悬沙中径 D_{50} 、最大流量和三口分流比的变化对宜昌-汉口河段年淤积量变化的贡献率分别为 39.59%, 16.70%, 18.82% 和 24.89%。

(3) 应该指出, 本文是在宏观的尺度上, 分析了宜昌-汉口河段年冲淤量的变化。实际上, 此河段的 4 个子河段即宜昌-枝城、上荆江、下荆江、城陵矶 - 汉口河段, 其冲淤变化并不完全同步, 不同位置上的冲淤变化可能会互相抵消, 本文的结果只是全河段的净冲淤量。

参考文献:

- [1] 张信宝, 文安邦. 长江上游干流和支流河流泥沙近期变化及其原因[J]. 水利学报, 2002(4): 56 - 59.
- [2] 张信宝. 长江上游河流泥沙近期变化、原因及减沙对策——嘉陵江与金沙江的对比[J]. 中国水土保持, 1999(2): 22 - 25.
- [3] 许炯心. 长江上中游的水沙变化及其与森林破坏的关系[J]. 水利学报, 2000(1): 72 - 80.
- [4] 李义天, 倪晋仁. 泥沙输移对长江中游水位抬升的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 1998, 6(3): 5 - 11
- [5] 李义天, 李 荣, 邓金运. 长江中游泥沙输移规律及对防洪影响研究[J]. 泥沙研究, 2000(3): 12 - 20.
- [6] 李义天, 邓金运, 孙昭华, 等. 泥沙淤积与洞庭湖调蓄量变化[J]. 水利学报, 2000(12): 48 - 52.
- [7] 卢金友. 荆江三口分流分沙变化规律研究[J]. 泥沙研究, 1996(4): 54 - 61.
- [8] 熊治平. 上荆江河床演变规律探讨[J]. 泥沙研究, 1996(2): 39 - 44.
- [9] 许炯心. 长江宜昌-武汉河段泥沙年冲淤量对水沙变化的响应[J]. 地理学报, 2005, 60(2): 337 - 348.
- [10] 张瑞瑾. 河流动力学[M]. 北京: 中国工业出版社, 1961. 58 - 60.
- [11] 长江三峡水文水资源勘测局. 葛洲坝下游宜昌河段河道演变分析[A]. 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙课题专家组、中国长江三峡工程开发总公司工程泥沙专家组. 长江三峡工程泥沙问题研究(1996 - 2000) [C]. 第 6 卷, 长江三峡工程坝下游泥沙问题, 北京: 知识产权出版社, 2002. 35 - 58.

Influence of variations in suspended sediment concentration and grain size on sediment deposition of Yichang - Hankou reach of Yangtze River^{*}

XU Jiong-xin

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Based the data measured before the construction of the Three Gorge Dam and using the empirical statistical approaches, this paper studies influence of variations in suspended sediment concentration and grain size on the sediment deposition of Yichang - Hankou reach of Yangtze River. And a regression equation between the annual sediment deposition in the Yichang - Hankou reach and the annual average suspended sediment concentration ($C_{\text{mean, Yichang}}$) at Yichang station is established in 1980 - 1997. According to this equation, a threshold of $C_{\text{mean, Yichang}}$ is estimated as 0.734 kg/m^3 , at which this river reach is in a non-scour and fill state. A multiple regression equation is also established, which relates the annual sediment deposition in the Yichang-Hankou reach and the influencing variables including the annual suspended sediment concentration, median grain size of suspended load and annual flood at Yichang station, and the ratio of the flow diverted through the “three outfalls” to the total. The equation based on the data in 1980 - 1997 indicates that the sediment deposition in Yichang - Hankou reach increased with the increases in sediment load, median grain size of suspended sediment and annual flood at Yichang station, and with the decrease in the ratio of the flow diverted through the “three outfalls” to the total.

Key words: channel sediment deposition; sediment concentration; grain size of suspended sediment; Yangtze River

^{*} The study is financially supported by the National Key Basic Research Programme of China (2003CB415202).