

三峡水库消落带泥沙沉积强度 影响因素的分析研究

俞幸池 苏琴琴 谢姣姣 苏晓磊 林锋 阿依巧丽 曾波¹

(三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市三峡库区植物生态与
资源重点实验室, 西南大学西南山地生态循环农业国家级培育基地,

西南大学生命科学学院, 重庆 400715)

【摘要】: 三峡水库在带来经济效益的同时也引发了一系列生态环境问题, 其中包括由于水库拦蓄所导致的泥沙沉积问题。水库泥沙沉积对水库消落带生态环境产生明显影响: 一方面, 沉积在消落带的泥沙会直接改变消落带的地形地貌; 另一方面, 泥沙沉积也给消落带带来了营养物质, 有利于土壤瘠薄区域的消落带的植被生长和生态保护。为了揭示三峡水库蓄水期间消落带泥沙沉积强度的影响因素, 为消落带生态环境保护和管理工作提供科学依据, 在三峡水库选择了 12 个典型消落带样点, 采用实地检测法, 于 2017 年 8 月至 2018 年 6 月对各样点消落带的泥沙沉积强度及其自然环境特征进行检测研究。研究结果表明: (1) 三峡水库蓄水期间消落带泥沙沉积强度受消落带距大坝里程、海拔高程、河岸形态、坡度、植被覆盖度的影响; (2) 对于影响三峡水库蓄水期间消落带泥沙沉积强度的自然因素而言, 消落带距大坝里程是影响消落带泥沙沉积强度的最主要因素, 其余按影响程度由大到小依次为海拔高程、植被覆盖度、河岸形态, 坡度对消落带泥沙沉积强度的影响最弱。

【关键词】: 三峡水库 消落带 泥沙沉积 影响因素

【中图分类号】: TV145 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)11-2746-09

三峡水库作为迄今为止世界上最大的水利工程, 自 2008 年实施 175m 试验性蓄水以来, 从库首湖北宜昌三斗坪至库尾重庆江津花红堡形成了长约 660km、水面面积达 1084km² 的河道型水库。根据三峡水库的水位运行调度安排, 在每年 10 月末蓄水升至高水位 175m 并持续运行至来年 2 月以满足发电需求, 随后在 6 月初泄水降至低水位 145m 以满足防洪需求, 由此在 145~175m 海拔高程之间形成了垂直落差高达 30m 的狭长型水库消落带^[1]。受水库运行调度的影响, 库区消落带具有秋季蓄水-冬季淹水-春季泄水落干-夏季出露-秋季再蓄水的反季节水位涨落特点, 由此消落带的自然环境发生了剧烈变化^[2]。

三峡水库成库运行以来, 在发挥发电、防洪、供水等功能的同时, 也引发了一系列生态环境问题, 其中包括由于水库拦蓄所导致的泥沙沉积问题^[3]。水库泥沙沉积对水库消落带生态环境产生明显影响: 一方面, 沉积在消落带的泥沙会直接改变消落带的

作者简介: 俞幸池(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态学。E-mail:1304274959@qq.com; 曾波, E-mail: bzeng@swu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505301); 国家自然科学基金项目(31770465); 重庆市技术创新与应用示范专项重点研发项目(cstc2018jszx-zdyfxmX0021-01)

地形地貌^[4],泥沙沉积的物理覆盖和掩埋对消落带中的植物种子萌发、植被形成和生长产生不利影响^[5],沉积泥沙中携带的有害物质会对消落带造成污染^[6];另一方面,泥沙沉积也给消落带带来了营养物质,有利于土壤瘠薄区域的消落带的植被生长和生态保护^[7],同时泥沙沉积过程中可能会有伴随着某些从上游带来的种子在消落带上沉积,退水出露后逐渐萌发,提高消落带植被的生物多样性^[8]。因此厘清三峡水库消落带泥沙沉积的影响因素对消落带的生态环境保护和修复及消落带管理具有积极意义。

三峡水库的泥沙沉积由水库低水位期发生的泥沙沉积和水库蓄水期发生的泥沙沉积组成,由于三峡水库消落带在水库低水位期出露而在水库蓄水期被淹没,因此三峡水库消落带上的泥沙沉积是在水库蓄水期形成的。消落带泥沙沉积过程相比于河床泥沙沉积过程除了受水中悬移质泥沙含量^[9]、水体流速^[10]等水文因素的影响外,理论上还受消落带自然环境特征的影响,如(1)海拔高程,当水体悬移质泥沙含量一定时,不同时长沉积的泥沙量不同,而消落带受水位调度影响使得不同海拔高程所面临的水淹时间各有不同;(2)消落带河道的平直与弯曲状况,河流水流速度受河道的弯曲与平直程度影响,从而影响泥沙沉积;(3)坡度^[11];(4)植被覆盖度^[12];(5)植被类型^[13]。然而,到目前为止,三峡水库消落带自然环境特征对消落带泥沙沉积的影响作用并不明确,虽已有学者探究了三峡水库消落带泥沙沉积部分影响因素的空间变异性^[14],但三峡水库蓄水期间消落带泥沙沉积强度与自然环境特征间有着怎样的关系,影响消落带泥沙沉积的因素间相对作用有多大这些问题仍缺乏足够的认知。

针对上述三峡水库蓄水期间消落带泥沙沉积影响因素不清的问题,采用实地监测的方法,我们对三峡水库从上游到下游全库区消落带在水库蓄水期的泥沙沉积强度与其自然环境特征进行了研究,拟回答以下问题:(1)三峡水库消落带泥沙沉积受哪些因素影响?(2)影响消落带泥沙沉积的因素间相对作用有多大?

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

三峡水库消落带东起湖北宜昌三斗坪,西至重庆江津花红堡,总面积约 349km²,涉及重庆市 22 个区县与湖北省 4 个区县,地理位置为 105° 11' E~110° 38' E,28° 10' N~31° 13' N^[15]。三峡库区具有典型的亚热带湿润季风性气候,在水库泄水消落带出露期间的降雨量超过 700mm,占年均降雨量的 70%左右,日均温在 18℃~30℃之间。消落带土壤类型主要为石灰土、水稻土、紫色土和壤土。

根据三峡水库高水位蓄水和防洪控制水位蓄水形成的回水区可以将库区分为变动回水区与常年回水区^[16],常年回水区指当三峡水库蓄水位为最低水位 145m 时,从大坝前缘到 145m 回水末端之间的河段;变动回水区指从常年回水区末端到最高蓄水位 175m 回水末端之间的河段。因此,我们相应地将三峡水库消落带分为常年回水区消落带与变动回水区消落带。

1.2 研究方法

1.2.1 研究样点确定与研究样带设置

根据长江三峡水库的河道形态与流向特征,在充分考虑长江左右岸、变动回水区与常年回水区的条件下,于 2017 年 8 月在变动回水区选取了大渡口跳磴镇、南岸广阳镇、涪陵蔺市镇 3 个典型消落带样点,在常年回水区选取了涪陵百胜镇、丰都三合镇、忠县乌杨镇、万州新田镇、云阳云阳镇、奉节永安镇、巫山城关镇、巴东官渡口镇和秭归归州镇 9 个典型消落带样点,一共 12 个样点,较为均匀地分布于三峡水库长江干流上(图 1)。样点选择的原则是样点受人为干扰小,且应位于支流入河口上游以减小支流泥沙输入的干扰。

| | | | | |
|---------|-------|------|-------|---------------------|
| 忠县-乌杨镇 | 374.0 | 弯曲河道 | 17.50 | 172 167 162 157 152 |
| 万州-新田镇 | 293.0 | 弯曲河道 | 15.50 | 172 167 162 157 152 |
| 云阳-云阳镇 | 223.0 | 平直河道 | 21.25 | 172 167 162 157 152 |
| 奉节-永安镇 | 165.0 | 弯曲河道 | 20.00 | 172 167 162 157 152 |
| 巫山-城关镇 | 126.0 | 弯曲河道 | 32.10 | 172 167 162 157 152 |
| 巴东-官渡口镇 | 71.0 | 平直河道 | 25.75 | 172 167 162 157 152 |
| 秭归-归州镇 | 35.0 | 弯曲河道 | 27.50 | 172 167 162 157 152 |

在 2018 年 1 月底至 6 月初三峡水库退水消落带出露期间，当三峡水库退水至各消落带样点上的每条研究高程样带刚出露后，对高程样带中每个位点测量杆上的油漆标记线被沉积的泥沙掩埋的厚度进行测定，该厚度即为该位点在三峡水库蓄水期间的泥沙沉积强度。

1.2.2 数据分析

用消落带上发生泥沙沉积的各位点厚度分别与各河岸自然环境特征(消落带距大坝里程、坡度、河岸形态、植被覆盖度、植被类型、海拔高程)作偏相关分析(Partial Correlation),具体方法为在分析某个自然因素与泥沙沉积厚度时控制其余自然因素,以明确影响消落带泥沙沉积厚度的自然因素,其中河岸形态这一自然因素分为平直河岸与弯曲河岸,分别赋值 1、2 与对应的各位点泥沙沉积厚度进行分析,而植被类型这一自然环境特征分为一年生植被占优势的群落环境、多年生植被占优势的群落环境、一年生与多年生共同占优势的群落环境以及无植被生长的群落环境,分别赋值 1、2、3、4 与对应的各位点泥沙沉积厚度进行分析;采用多元线性逐步回归(Multiple Linear Stepwise Regression)对消落带泥沙沉积厚度与河岸自然环境特征间的关系进行分析,以明确影响泥沙沉积厚度自然因素间的影响程度。作图使用 Origin9.1 软件。

2 研究结果

2.1 消落带泥沙沉积强度与自然环境特征间的关系

2.1.1 消落带泥沙沉积强度与各自然因素间的相关关系

以各消落带样点上发生泥沙沉积的各位点沉积强度与其距大坝里程进行分析,研究表明,三峡水库蓄水期间,从大坝至涪陵百胜约 460km 的区域内,消落带泥沙沉积强度从下游到上游逐渐增高,从涪陵百胜到水库库尾消落带泥沙沉积强度呈降低的趋势(图 2a)。以各消落带样点上发生泥沙沉积的各位点沉积强度与其所在海拔高程进行分析,研究表明,三峡水库消落带泥沙沉积强度与海拔高程间呈负相关关系,海拔高程越高,泥沙沉积强度就越少(图 2b)。以各消落带样点上发生泥沙沉积的各位点沉积强度与其所在河岸形态进行分析,研究表明,位于平直河道的消落带上泥沙沉积强度小于位于弯曲河道消落带上的泥沙沉积强度(图 2c)。以各消落带样点上发生泥沙沉积的各位点强度与其坡度进行分析,研究表明,三峡水库消落带泥沙沉积强度与坡度呈负相关关系,坡度越大,泥沙沉积强度就越小,且泥沙沉积主要发生在坡度小于 20° 的环境中(图 2d)。以各消落带样点上发生泥沙沉积的各位点沉积强度与其植被覆盖度进行分析,研究表明,三峡水库消落带泥沙沉积强度与植被覆盖度间呈负相关关系(图 2e)。以各消落带样点上发生泥沙沉积的各位点沉积强度与其植被类型进行分析,研究表明,三峡水库消落带上以一年生植物与多年生植物共同占优势的群落环境的泥沙沉积强度>以多年生植物占优势的群落环境的泥沙沉积强度>以一年生植物占优势的群落环境的泥沙沉积强度(图 2f)。

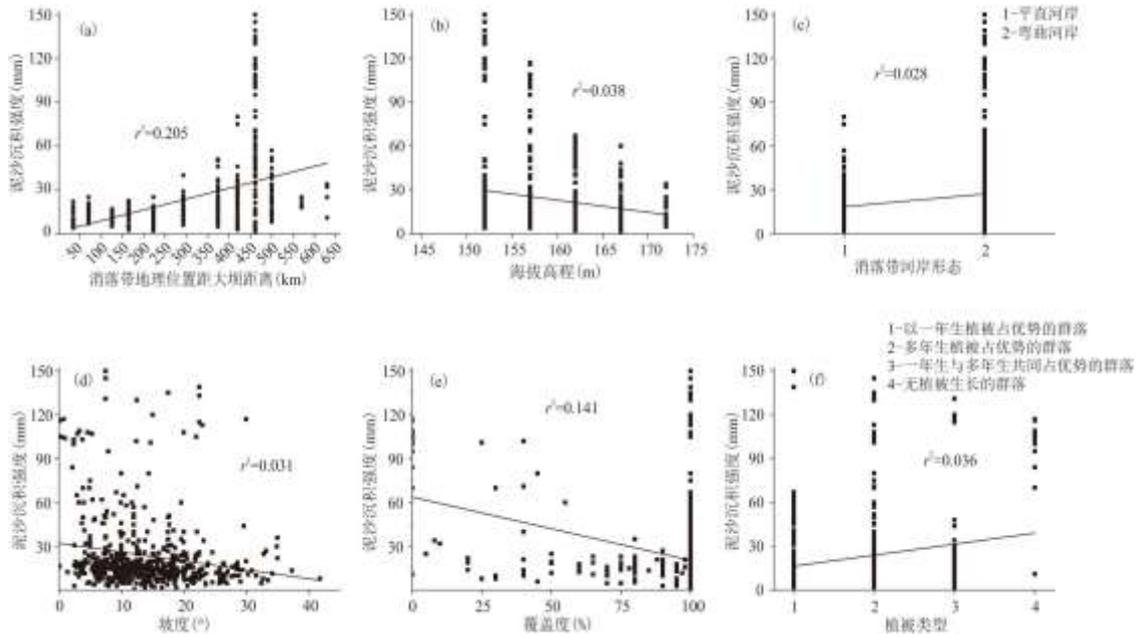


图 2 三峡水库消落带泥沙沉积强度与各自然因素的相关关系

2.1.2 消落带泥沙沉积强度与各自然因素间的偏相关分析

对各消落带样点上发生泥沙沉积的各位点沉积强度与各河岸自然因素作偏相关分析, 结果表明, 消落带距大坝里程、海拔高程、河岸形态、植被覆盖度与消落带泥沙沉积强度间均显著相关 ($p < 0.05$), 其中消落带泥沙沉积强度与坡度这一环境因素不相关的显著性水平为 0.05, 而消落带泥沙沉积强度与植被类型间无显著相关关系 ($p > 0.05$)。

表 2 三峡水库消落带泥沙沉积强度与各自然因素的偏相关分析

| 自然因素 | R | p | N |
|----------|--------|-------|-----|
| 消落带距大坝里程 | 0.572 | 0.000 | 545 |
| 海拔高程 | -0.422 | 0.000 | 545 |
| 河岸形态 | 0.241 | 0.000 | 545 |
| 坡度 | -0.084 | 0.050 | 545 |
| 植被覆盖度 | -0.338 | 0.000 | 545 |
| 植被类型 | 0.006 | 0.890 | 545 |

注: R 代表偏相关系数; p 代表泥沙沉积强度与该自然因素之间不相关的显著性水平; N 代表用于分析的位点数。

2.2 消落带泥沙沉积强度与自然环境特征间的多元线性回归分析

选取回归分析三峡水库消落带泥沙沉积强度的影响因素有消落带距大坝里程(X1)、海拔高程(X2)、河岸形态(X3)、坡度(X4)、植被覆盖度(X5)、植被类型(X6)。采用逐步回归方法进行分析，剔除了植被类型这一自然因素，一共建立了5个模型(表3)。

表3 采用的回归方法及模型引入变量汇总

| 模型 | 引入变量 | 方法 |
|----|----------------|-------|
| 1 | X1 | 逐步回归法 |
| 2 | X1、X2 | 逐步回归法 |
| 3 | X1、X2、X5 | 逐步回归法 |
| 4 | X1、X2、X5、X3 | 逐步回归法 |
| 5 | X1、X2、X5、X3、X4 | 逐步回归法 |

5个回归模型的拟合程度如表4所示，其中模型5的复相关系数R和调整后的决定系数 R^2 最大，分别为0.686和0.470，表示该模型可以解释变异的47.0%。

表4 模型拟合程度汇总

| 模型 | R | R^2 | 调整后的 R^2 | 估计标准误差 | DW 统计量 |
|----|-------|-------|------------|----------|--------|
| 1 | 0.453 | 0.205 | 0.203 | 22.54553 | |
| 2 | 0.575 | 0.331 | 0.328 | 20.70422 | |
| 3 | 0.659 | 0.434 | 0.431 | 19.06227 | |
| 4 | 0.683 | 0.466 | 0.462 | 18.52008 | |
| 5 | 0.686 | 0.470 | 0.465 | 18.47117 | 0.415 |

对模型5的方差分析如表5所示，模型检验的原假设为总体回归系数与零无显著差异，该模型的显著性检验水平小于0.05，说明拒绝原假设，因此表明泥沙沉积与引入模型的自然因素间存在线性关系，即模型中泥沙沉积强度与多个自然因素(消落带距大坝里程、海拔高程、河岸形态、植被覆盖度、坡度)间存在显著线性关系($p < 0.05$)。

表5 模型5方差分析汇总

| 模型 | | 平方和 | 自由度 | 均方 | F | Sig. |
|----|----|------------|-----|-----------|--------|-------|
| 5 | 回归 | 163211.779 | 5 | 32642.356 | 95.674 | 0.000 |
| | 残差 | 183898.311 | 539 | 341.184 | | |

| | | | | | | |
|--|----|------------|-----|--|--|--|
| | 总计 | 347110.090 | 544 | | | |
|--|----|------------|-----|--|--|--|

模型 5 的非标准化回归系数、标准化回归系数以及回归系数检验与共线性统计如表 6 所示，容差和方差膨胀系数 VIF 值均表示模型无多元共线性问题。因此，从回归系数表可以得出非标准化的回归方程即：消落带泥沙沉积强度=261.829+0.09×消落带距大坝里程-1.553×海拔高程-0.333×植被覆盖度+9.604×河岸形态-0.216×坡度。但由于非标准化回归方程包含常数项，无法比较多个自然因素(消落带距大坝里程、海拔高程、河岸形态、植被覆盖度、坡度)间的相对重要性，所以按标准系数将原始方程转化为标准化回归方程即：消落带泥沙沉积强度=0.547×消落带距大坝里程-0.366×海拔高程-0.29×植被覆盖度+0.185×河岸形态-0.063×坡度。由此，说明消落带地理位置距大坝远近是影响消落带泥沙沉积强度的最重要因素，其余依次是海拔高程、植被覆盖度、河岸形态，消落带坡度对泥沙沉积强度的影响最弱。

表 6 回归系数及共线性诊断汇总

| 模型 | 非标准化回归系数 | | 标准化的回归系数 | 回归系数检验 | | 共线性统计 | | |
|----|----------|---------|----------|--------|---------|-------|-------|-------|
| | B | 标准误差 | Beta | t | Sig. | 容差 | VIF | |
| 5 | 常数 | 261.829 | 22.477 | | 11.649 | 0.000 | | |
| | X1 | 0.090 | 0.006 | 0.547 | 16.215 | 0.000 | 0.864 | 1.158 |
| | X2 | -1.553 | 0.140 | -0.366 | -11.061 | 0.000 | 0.897 | 1.115 |
| | X5 | -0.333 | 0.037 | -0.290 | -8.976 | 0.000 | 0.944 | 1.060 |
| | X3 | 9.604 | 1.661 | 0.185 | 5.782 | 0.000 | 0.963 | 1.038 |
| | X4 | -0.216 | 0.110 | -0.063 | -1.965 | 0.050 | 0.964 | 1.038 |

3 讨论

三峡水库成库运行以来，库区水位随着蓄水防洪不同需求涨落的同时，水体中带来的泥沙颗粒随着水流从上游到下游移动，最终沉积在河床和河岸消落带上，而沉积在消落带上的泥沙相比于沉积在河床上的泥沙还受消落带库岸环境的影响。

三峡水库蓄水期间，原有河道型水体变为湖泊型水体，入库流速迅速降低，水中悬移质泥沙开始大量沉积^[18]，但进入库区的悬移质泥沙含量是有限的^[19]，库区上游水中悬移质泥沙的大量沉积可能会导致水流流向库区下游时，水体中已无太多的悬移质泥沙，导致位于水库常年回水区上游的消落带泥沙沉积强度高于位于常年回水区下游的消落带(p<0.05)(表 2)。河岸土壤动态变化还受水库水位波动的影响^[20]，对于三峡水库而言，一方面，三峡水库水位调度模式导致蓄水期间消落带不同海拔高程水淹时长存在巨大差异；另一方面，长江上游来水中悬移质泥沙含量受季节影响，夏季含量高而冬季含量低^[21]，所以三峡水库夏季低水位运行，冬季高水位运行的水位调度模式使得水库蓄水过程中水位上升的同时水中悬移质泥沙由于汛期期的结束在减少，这就导致消落带上高高程区域发生泥沙沉积的物源在减少。当三峡水库开始蓄水时由于变动回水区消落带自身河床海拔较高仍处于自然河段，不受水库蓄水影响，此时受水库蓄水影响的常年回水区消落带由于进入回水末端的水体流速急剧减缓而发生明显沉积，随着水库蓄水的进行，水库回水末端逐渐延伸至变动回水区，但此时的水中悬移质泥沙含量受季节影响已明显降低，沉积物源的减少是变动回水区消落带(大渡口跳磴镇、南岸广阳镇、涪陵蔺市镇)整体上泥沙沉积厚度不如涪陵百胜消落带的原因(图 2b)。

河道形态与水沙运动特性密切相关^[22],水流运动过程中弯曲河道由于自身蜿蜒形状使得边界阻力较强,水体紊动作用减弱,有利于水中悬移质泥沙的沉积,因此位于平直河道的消落带区域比位于弯曲河道的消落带区域泥沙沉积强度少(图 2c)。

传统研究表明^[23],坡度越大,越不利于泥沙沉积。这与本研究发现一致(图 2d),即三峡水库消落带坡度与泥沙沉积强度间呈负相关关系,但显著性水平 $p=0.05$,这可能是因为重复位点数不足所导致的。

本研究发现,三峡水库消落带植被覆盖度与泥沙沉积强度间呈负相关关系($p<0.05$)(表 2),但有研究表明^[14],三峡水库消落带植被覆盖度与泥沙沉积量之间不存在任何显著关系,原因是蓄水期间消落带植物大量死亡,导致泥沙沉积过程中并没有生长足够的植被对泥沙沉积作用造成影响,这与本研究结果不符。进一步比较发现,该研究是根据经验判断水库蓄水至调查当年的泥沙沉积总量与调查当年对应的植被覆盖度进行分析,但水库运行至今过程中伴随着消落带植被演变,同一位置消落带植被覆盖在经历多年水淹后也会出现差异;本研究则是针对一个水库蓄水周期消落带泥沙沉积与之对应植被覆盖度进行分析,这是研究的不同之处。同时根据野外现场发现,水库蓄水刚淹没植物时,植物并不会立即死亡,也有大量研究表明,耐淹植物能凭借一系列生理活动在水淹环境中长时间存活而不会死亡^[24]。因此可以明确,在三峡水库蓄水期间泥沙沉积过程中,植被覆盖度的高低是影响泥沙沉积的因素之一。但三峡水库消落带泥沙沉积强度与植被覆盖度的散点图(图 2e)表明,绝大多数泥沙沉积发生在植被覆盖度为 100%的河岸环境中,查询原始数据以及现场拍摄的消落带样点照片发现,大多数样点消落带植被覆盖度较高,在所布置的 1146 个位点中,有 740 个位点环境植被覆盖度为 100%,这就对泥沙沉积与植被覆盖度的分析造成了一定的影响。已有研究表明,不同植被类型对土壤动态变化影响不同^[25,26],但针对河岸植被类型与土壤动态变化的现有研究主要是木本植物间或木本植物与灌木及草本植物间的比较,对三峡水库消落带植被类型与泥沙沉积的研究还未见报道。本研究结果表明,三峡水库消落带植被类型与消落带泥沙沉积强度无显著关系(表 2),主要原因可能是三峡水库特殊的水位调度方式导致消落带植被逐年遭受反季节高强度水淹逐渐演变为以草本植物为主的一年生与多年生植物,而草本植物的茎通常较细,使得在水库蓄水过程中对水流的阻挡作用较弱甚至对水流几乎没有阻挡作用。

泥沙沉积过程较为复杂^[27],实验操作中难以实现对航行船只、风浪等水文因素与在此过程中的受影响的泥沙沉积量进行监测,而本研究也着重于对三峡水库整个蓄水期间的泥沙沉积量与消落带的自然环境特征进行探讨,因此未对蓄水期间的泥沙沉积过程与航行船只、风浪等水文因素等进行研究。未来有待从水利学方面与生态学方面多角度结合开展研究,以建立较为精确的消落带泥沙沉积有关模型。

4 结论

总体而言,三峡水库消落带众多自然因素中消落带距大坝里程、河岸形态、海拔高程、坡度以及植被覆盖度会对消落带泥沙沉积强度造成影响,其中,消落带距大坝远近是影响消落带泥沙沉积强度的最重要因素,其余影响因素的影响程度由大到小依次为海拔高程、植被覆盖度、河岸形态、坡度。

参考文献:

- [1]BAO Y H,GAO P,HE X B.The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir — a unique geomorphological unit[J].Earth-Science Reviews,2015,150:14-24.
- [2]WANG Y J,CHEN F Q,ZHANG M,et al.The effects of the reverse seasonal flooding on soil texture within the hydro-fluctuation belt in the Three Gorges reservoir,China[J].Journal of Soils Sediments,2018,18(1):109-115.
- [3]REN J Q,ZHAO M D,ZHANG W,et al.Impact of the construction of cascade reservoirs on suspended sediment peak transport variation during flood events in the Three Gorges Reservoir[J].Catena,2020,188:1-13.

-
- [4]STEIGER J,GURNELL A M,PETTS G E.Sediment deposition along the channel margins of a reach of the middle River Severn,UK[J].Regulated Rivers:Research and Management,2001,17(4-5):443-460.
- [5]李强,王书敏,丁武泉,等.泥沙掩埋和干旱对三峡库区消落带双穗稗草生长的影响[J].生态学杂志,2017,36(3):649-654.
- [6]孙虹蕾,张维,崔俊芳,等.基于文献计量分析的三峡库区消落带土壤重金属污染特征研究[J].土壤,2018,50(5):965-974.
- [7]穆晓辉.三峡水库沉积物基本属性研究[D].宜昌:三峡大学,2017.
- [8]TICKNER D P,ANGOLD P G,GURNELL A M,et al.Riparian plant invasions:hydrogeomorphological control and ecological impacts[J].Progress in Physical Geography,2001,25(1):22-52.
- [9]程金文.陕北黄土洼天然聚淤泥沙沉积层理特征及其泥沙来源研究[D].西安:陕西师范大学,2017.
- [10]仲金龙.基于空间视角的不同剖面水流运动速度变化研究[J].黑龙江水利科技,2017,45(11):47-49.
- [11]QIAN F,CHENG D B,DING W F,et al.Hydraulic characteristics and sediment generation on slope erosion in the Three Gorges Reservoir Area,China[J].Journal of Hydrology and Hydromechanics,2016,64(3):237-245.
- [12]孙佳美.覆被坡面的水文、侵蚀及生源要素过程研究[D].北京:北京林业大学,2018.
- [13]ROOD S B,BIGELOW S G,POLZIN M L,et al.Biological bank protection:Trees are more effective than grasses at resisting erosion from major river floods[J].Ecohydrology,2015,8(5):772-779.
- [14]王彬俨,文安邦,严冬春.三峡水库干流消落带泥沙沉积影响因素[J].中国水土保持科学,2016,14(1):12-20.
- [15]常直杨,王建,白世彪,等.基于 SRTM DEM 数据的三峡库区地貌类型自动划分[J].长江流域资源与环境,2014,23(12):1665-1670.
- [16]易振友.大型库区常年回水区架空直立式码头结构的可靠度分析[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [17]许炯心.砂质河床与砾石河床的河型判别研究[J].水利学报,2002,10(10):14-20.
- [18]徐国宾.河流动力学专论[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [19]王彬俨.三峡水库干流消落带泥沙沉积时空变化及其来源研究[D].北京:中国科学院大学,2016.
- [20]VILMUNDARDÓTTIR O K,MAGNÚSSON B,GÍSLADÓTTIR G,et al.Shoreline erosion and aeolian deposition along a recently formed hydro-electric reservoir,Blöndulón,Iceland[J].Geomorphology,2010,114(4):542-555.
- [21]LU X X,ASHMORE P,WANG J F.Seasonal Water Discharge and Sediment Load Changes in the Upper Yangtze,China[J].

Mountain Research Development, 2003, 23(1) :56-64.

[22]李涛, 陆晓艳. 浅析黄河流域高含沙水流对河型转化的影响[J]. 科技经济导刊, 26(36) :89-90.

[23]SHEN H O, ZHENG F L, WEN L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155:429-436.

[24]叶甜甜. 狗牙根应答干旱、盐和水淹胁迫机制的比较研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.

[25]徐立君. 目平湖冲淤演变与植被分布关系研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006.

[26]吴敏, 吴立勋, 汤玉喜, 等. 滩地芦苇和杨树群落对汛期水流及泥沙沉积的影响[J]. 湖南林业科技, 2014, 41(4) :13-17.

[27]SCHLEISS A J, FRANCA M J, JUEZ C, et al. Reservoir sedimentation[J]. Journal of Hydraulic Research, 2016, 54(6) : 595-614.