35 卷第 2 期 151 ~ 159 页
2017 年 4 月

山 地 学 报
MOUNTAIN RESEARCH

Vol. 35, No. 2 pp 151 ~ 159
Apr., 2017

文章编号: 1108 - 2786 - (2017) 2 - 151 - 09
DOI: 10.16089/j.cnki.1008 - 2786.000207

三峡水库干支流悬移质泥沙及支流泥沙沉积特征
——以忠县段为例

王永艳[1,2], 文安邦[1*], 张信宝[1], 史忠林[1], 严冬春[1]

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 山地表生过程与生态调控重点实验室, 610041, 成都;
2. 中国科学院大学, 100049, 北京)

摘　要: 长江上游水库群的开发和利用, 导致上游入库泥沙的减少, 坡面侵蚀产沙贡献增加, 造成三峡水库入库泥沙沉积及其来源的变化; 同时, 大坝蓄水使干支流之间存在水流和物质能量的交换作用, 缓慢的流速导致三峡水库支流富营养化现象较突出。所以, 三峡水库入库泥沙的构成, 库区干支流悬移质泥沙特征以及消落带泥沙沉积过程是迫切需要研究的问题。本文选择三峡库区中游忠县境内长江干流和一级支流汝溪河作为研究对象, 采集雨季 7—9 月长江干流和支流汝溪河悬移质泥沙和汝溪河库湾消落带沉积泥沙剖面分层样品, 并测试样品的颗粒组成和 Cs - 137 活度。结果表明: 7 月份低水位时期, 干流和支流悬移泥沙的中值粒径分别为 12.81 μm 和 18.87 μm, 且支流砂粒体积百分比较干流高, 说明支流悬移泥沙比干流粗; ^{137}Cs 比活度分别为 0.87 和 0.65 Bq/kg, 均较低。而 8 月份和 9 月份, 干流悬移泥沙颗粒粗细和 7 月份相当, 而支流悬移泥沙的平均中值粒径仅为 6.05 μm, 与干流悬移质泥沙相比偏细; ^{137}Cs 比活度分别为 1.23 和 2.16 Bq/kg。可以发现无论是干流还是支流, ^{137}Cs 比活度变化均表现为 8 月份比 7 月份偏高, 且 8 月份支流 ^{137}Cs 比活度比干流偏高。这是因为 7 月份是暴雨导致的表下层侵蚀泥沙, 泥沙颗粒较粗且 ^{137}Cs 比活度较低; 而 8 月份的悬移泥沙主要归结于频繁的中小雨引起的坡面表层侵蚀产沙, 泥沙颗粒较细且富含 ^{137}Cs。对于支流典型泥沙沉积剖面的研究表明, 从 2008 至今, 汝溪河库湾消落带泥沙总淤积厚度在 7 cm 左右, 中值粒径介于 4.6 ~ 13.7 μm 之间, ^{137}Cs 比活度的范围为 1.39 ~ 1.97 Bq/kg。根据 ^{137}Cs 比活度结合河流输沙颗粒组成的旋回分层特征, 可以大致区分出雨季和旱季的沉积泥沙, 初步弄清支流消落带泥沙沉积过程。

关键词: 悬移质; 沉积泥沙; 颗粒组成; 三峡库区
中图分类号: X131　　文献标志码: A

土壤侵蚀和河流泥沙传输的变化是全球变化的重要组成部分, 土壤侵蚀、泥沙的传输和再沉积会重塑地球表面形态, 并且会影响生态系统的结构和功能[1]。河流系统中河道和河漫滩上细颗粒泥沙的沉积和储存对于营养物质和污染物的传输及聚集具有重要的影响[2-3]。首先, 在下游位置获取的泥沙吸附的营养物质和传输来的污染物的估算可能会低估上游的污染程度, 携带污染物的泥沙在河流系统的传输带来的潜在环境问题都可能被低估。第二, 细颗粒泥沙的沉积和储存可能会导致河道和河漫滩的环境污染[4]。第三, 河漫滩上沉积的泥沙由于库岸侵蚀和河道形态改变会发生再次剥离, 会再次携带营养物和污染物进入河流系统, 直到很久以后这种污染才会停止。从流域管理的视角, 河流传输的

收稿日期(Received date): 201605035; 修订日期(Accepted date): 2016 - 12 - 26。
基金项目(Foundation item): 国家自然科学重点基金(41430750; 41671286; 41301293) [National Natural Sciences Foundation of China(41430750; 41671286; 41301293)]
作者简介(Biography): 王永艳(1989 -) 女, 博士研究生, 主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。[Wang Yongyan, (1989 -), female, Ph. D. candidate, mainly engaged in soil erosion and soil and water conservation] E-mail: wyyhu2008@126.com
* 通信作者(Corresponding author): 文安邦(1964 -), 男, 研究员, 主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。[Wen Anbang, (1964 -), male, professor, mainly engaged in soil erosion and soil and water conservation] E-mail: wabang@imde.ac.cn

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

悬移质泥沙是不同空间位置和不同类型的集水流域的综合贡献，悬移质泥沙来源信息对于弄清泥沙传输的路径和流域泥沙沉积历史的反演具有重要意义[5-6]，弄清泥沙来源有助于采取合理的策略来控制泥沙的剥离和运移效应如河岸泥沙和水库泥沙的沉积。同时，泥沙既扮演着携带污染物的重要角色，还是引起水体污染和水生生态系统的重要因素[7-8]，所以弄清泥沙来源对于河流系统维持水质安全、生态安全乃至社会安全具有重要的意义。^{137}Cs 是区分流域表层侵蚀和河岸侵蚀的理想示踪剂，雨季有效降雨事件导致流域表层侵蚀量增加，流域输出泥沙含有 ^{137}Cs，^{137}Cs 作为一种很好的示踪泥沙来源元素能较好反映泥沙物源的分异，已被广泛使用[9-10]。悬移质泥沙由于流速、流量和地形的因素会沉积在缓坡区域，被保存在河岸的沉积泥沙的颗粒组成结合 ^{137}Cs 的比活度则可以判定沉积泥沙过程和历史水文事件。

三峡地区在我国，特别是长江流域的社会经济、生态屏障和水质安全方面具有重要的战略地位[11]。作为世界上最大的水利水电工程，关乎三峡库区的生态环境、水土保持、水质保护以及社会经济等任何问题都是中国乃至世界性的课题。由于长江上游水库群的开发和利用，导致上游入库泥沙的减少，坡面侵蚀产沙贡献增加，造成三峡水库入库泥沙沉积及其来源的变化[12-13]。三峡库区坡耕地坡度较陡，地块小而破碎，70% 以上降水集中在夏秋季节，强降雨诱发库区土壤侵蚀和严重的水土流失。土壤侵蚀和水土流失导致耕地破坏及土地生产力下降；河流水库泥沙淤积，河床抬升威胁航运安全；入库泥沙吸附携带着大量污染物、农药和养分，污染水质，导致水体富营养化[14]。有研究[15]表明三峡大坝蓄水导致干支流之间存在水流和物质能量的交换作用。初步监测结果显示，尽管长江干流水质与蓄水前相比基本稳定，但支流或库湾受江水顶托，一些养分元素如磷出现富集现象[16]。蓄水后支流断面监测结果表明，80% 以上的支流、库湾达到中度－重度富营养状况，水华几乎年年春季爆发[17]。蓄水后支流水质达标情况逐年降低，2010 年稍好，2011—2013 年库区支流水质均较差，以Ⅳ和劣Ⅴ类为主[18]。而携带污染物的悬移泥沙会部分沉积在消落带，位于三峡水库中游的汝溪河是典型缓坡型消落带的代表，支流泥沙的汇入和干流挟沙以及库岸侵蚀产沙是三峡水库泥沙的重要构成，故本研究选择汝溪河支流及其邻近干流，阐明库区干支流悬移质泥沙以及支流消落带泥沙沉积过程对于分析库区生态环境影响十分必要，对于全面评价库区水环境质量，保护三峡水库“一泓清水”具有重要意义。

1 试验材料与研究方法

1.1 研究区概况

三峡库区是因建设三峡水利工程而出现的一个新地理区域（29° 16′ ~ 31° 25′ N，106° 50′ ~ 110°51′ E），它包含长江流域因三峡水库大坝建成后，受回水影响的水库淹没区和移民安置所涉及的 20 余个县（市、区）（图 1）。三峡库区属中亚热带湿润气候区，高程差异性显著，坡耕地较多，水土流失较严重。三峡水库基于防洪排沙的运行调度，从 2003—2010 年历经 7 年形成三期蓄水水位（135，156，175 m），于 2010 年形成了 145 ~ 175 m 的 30 m 垂直落差带，具有秋季蓄水—冬季淹水—春季泄水落干—夏季出露—秋季再蓄水的受人为调控的反自然季节性水位涨落特点[19]。本文选择靠近三峡库区水土保持站的三峡库区腹心长江一级支流汝溪河（下文统称支流）和距汝溪河河口以上 3 km 处的坪山村干流消落带（下文统称干流）作为研究对象（图 1a）。汝溪河的缓坡消落带约占 80%，流域面积 720 km^2，土地利用以林地、耕地、果园等为主，其中有林地和疏林地面积占流域总面积的 47% 和 7% 左右，旱地和水田分别占 28% 和 16%，其它为水体和城镇等用地（图 1c）。

1.2 样品采集与测试

在干流和支流控制断面（图 1b）每条采样线上分别布设 3 个采集桶，悬移质样品采集频率为每月 1 次，每次收集泥沙样品后，将采样桶还原，自然沉降过滤获得悬移泥沙样品，样品装袋后送实验室待测。本研究分析 2015 年雨季 7—9 月干支流悬移质泥沙的特征，7、8、9 月分别指 7. 10—8. 10、8. 10—9. 10 和 9. 10—10. 10。于 2015 年 7 月 10 日在汝溪河 155 m 高程的平缓消落带挖取泥沙剖面，用分层采样器按 3 mm 为间距进行分层取样（图 2），共取得 24 个分层样。图 2 为 2015 年 7 月在龙滩大桥附近长江一级支流汝溪河消落带的沉积剖面采集情况，通过肉眼辨别沉积泥沙和消落带表下层土壤，发现采样点从蓄水形成消落带以来泥沙沉积厚度大概为7 ~ 8 cm。样品经自然风干，手工拣除枯枝落叶、

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

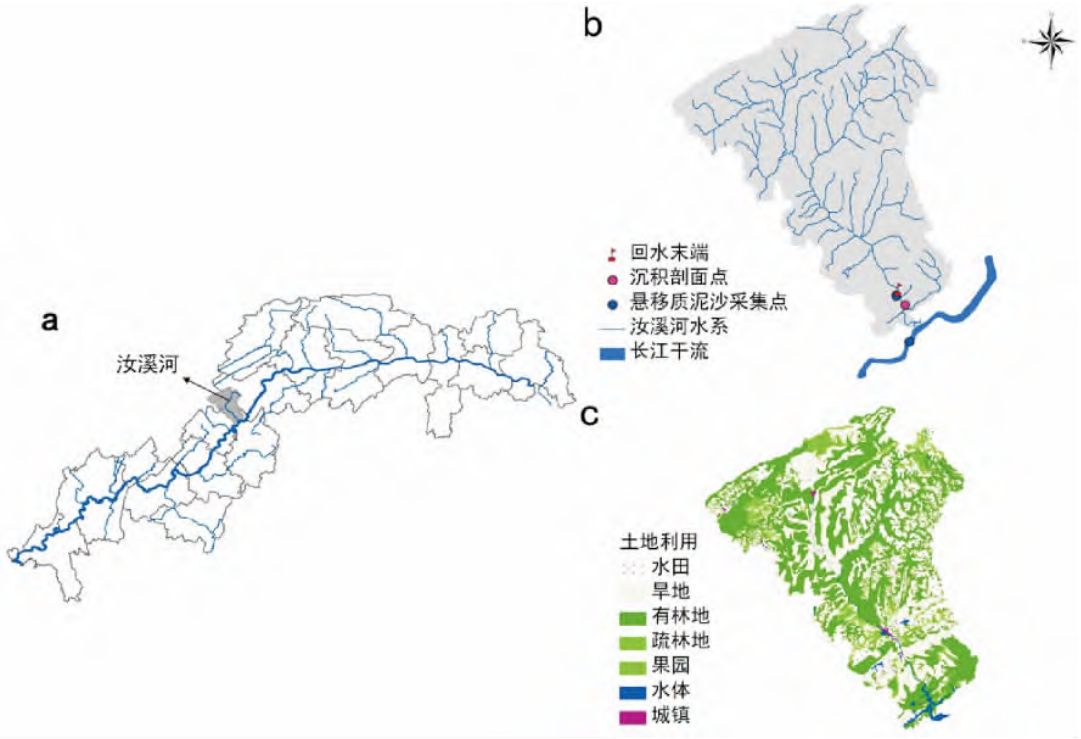

图 1　(a) 汝溪河在三峡库区的位置；(b) 采样点位置；(c) 汝溪河流域土地利用信息

Fig. 1　(a) Location of the Ruxi River in the Three Gorges reservoir; (b) Distribution of sampling points; (c) Land use information of the Ruxi watershed

图 2　沉积泥沙剖面采样照片

Fig. 2　Photos of sampling sediments

作物根系及粗砾石等，过 2 mm 干筛备试。颗粒组成测定分析采用英国马尔文公司研制生产的 MasterSizer 2000 型激光粒度仪测定。核素含量测定采用美国 ORTEC 公司生产的配备 n 型高纯锗探头(LOAX HPGe)低能量、低本底多道 γ 能谱仪。

2　结果与分析

2.1　干支流雨季悬移质泥沙颗粒特征

从不同月份来看，7 月份(平均水位 145 m)干流悬移泥沙黏粒、粉粒和砂粒的含量分别为 3.17%、85.25% 和 11.58%，支流悬移泥沙则为 2.72、75.01、22.27%；8 月份干流 5.81、86.30、7.90%，支流 10.67、82.89、6.44%，干流和支流悬移质泥沙的颗粒组成表现为干流砂粒体积百分比低于支流，干流悬移泥沙中值粒径(12.81 μm)小于支流(18.87 μm)；而 8 月份(平均水位 150 m)和 9 月份(平均水位 160 m)，支流悬移质泥沙与干流悬移质泥沙相比偏细，尤其是 9 月份，明显偏细。从流域类型来看，干流悬移泥沙的中值粒径在 7、8、9 三个月基本没有变化，而支流泥沙则变化显著，表现为 7 月份颗粒较粗，中值粒径达到 18.87 μm，8、9 月份粒径较细，尤其是 9 月份，泥沙中值粒径仅为 4.83 μm。

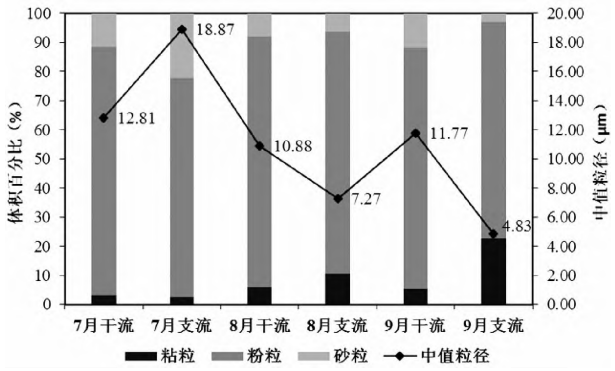

图 3 干支流悬移质泥沙颗粒特征

Fig. 3 Grain-size composition of sediment samples suspended in the Yangtze mainstream and tributary

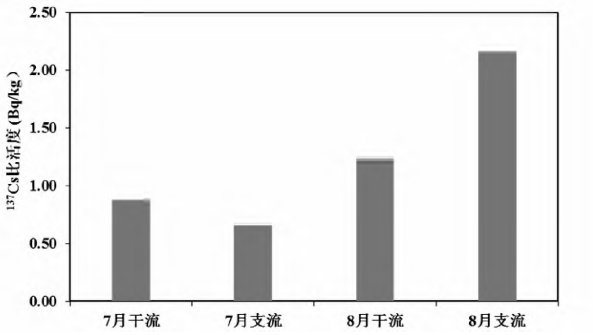

图 4 干支流^{137}Cs 比活度时间变化特征

Fig. 4 The ^{137}Cs activity of suspended sediment samples in the Yangtze mainstream and tributary

2.2 干支流雨季悬移质泥沙^{137}Cs 特征

通过比较源地表层土壤和悬移泥沙^{137}Cs 含量可以分析悬移泥沙的来源。由于 8 月和 9 月份收集的悬移质泥沙量偏少达不到测试的要求，所以把二者混合为一个样品进行测试，作为 8 月份的^{137}Cs 比活度。如图 4 所示，无论是干流还是支流，^{137}Cs 比活度变化均表现为 8 月份比 7 月份偏高。从不同月份看，7 月份，干流和支流^{137}Cs 比活度分别为 0.87 和 0.65Bq/kg，均较低，8 月份干支流^{137}Cs 比活度分别为 1.23 和 2.16Bq/kg，均较高，尤其是支流悬移泥沙^{137}Cs 比活度明显比 7 月份偏高。说明这两个月的悬移泥沙的物源可能发生了变化。

2.3 支流消落带沉积泥沙时间序列

三峡水库从 2003 年 6 月开始蓄水，2006—2007 年蓄水至 156 m，2008—2009 年蓄水至 172.5 m，2010 年 10 月 26 日正式蓄水至 175 m。沉积剖面的海拔是 155 m 左右，淹没前土地利用信息是水田，也即是说该沉积剖面是从 2008 年以后开始沉积。分层泥沙的^{137}Cs 比活度深度分布、颗粒组成及中值粒径（d_{50}）深度分布如图 5 所示。结果表明：从 2008 至今，泥沙总沉积厚度在 7 cm 左右，泥柱的粘粒含

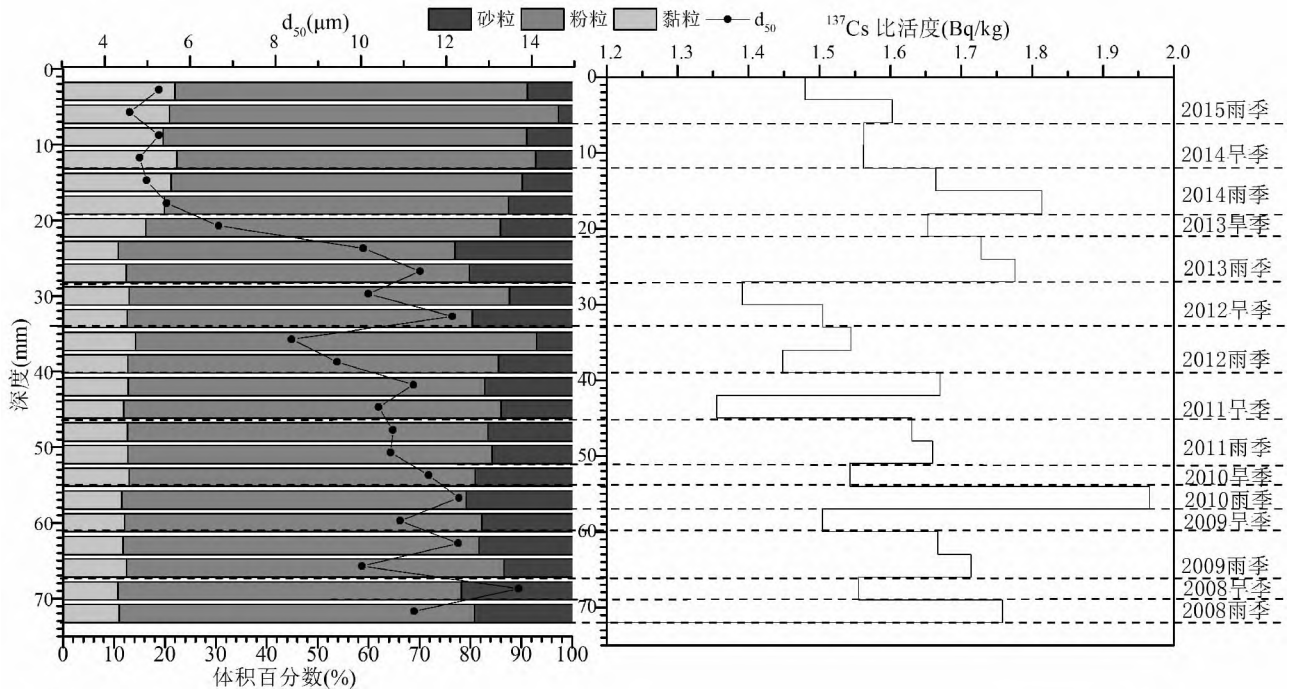

图 5 泥沙沉积剖面的^{137}Cs 活度和颗粒组成的季节性分布特征及沉积时代的判断

Fig. 5 Seasonal sedimentary differentiation and chronology determination of profile based on the depth distribution of ^{137}Cs activity and grain-size composition.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量介于 10.7 ~ 22.3% 之间，中值粒径介于 4.6 ~ 13.7 μm 之间。^{137}Cs 主要来源于大气沉降，主要分布在表层土壤中或表层侵蚀泥沙中，在河流沉积泥沙和河岸侵蚀泥沙中无分布或分布较低，沉积泥沙剖面^{137}Cs 比活度为 1.39 ~ 1.97 Bq/kg。三峡水库雨季、旱季周期性的落干 - 淹水调节模式决定了通过对比沉积泥沙序列^{137}Cs 比活度和粒径组成的深度分布，能较好判别旱季、雨季交替泥沙沉积序列。由于三峡水库运行周期为每年 9—10 月蓄水，次年 3 月初放水，再到下一周期的蓄水，所以本文所提的夏季和冬季不是严格意义上的季节划分，夏季代表水库腾空库容的大致 5—9 月，而冬季代表水库蓄水的 10 月至次年 4 月。

消落带沉积泥沙未受人为扰动，泥沙逐年累积剖面完整保存了泥沙来源特性和水库特定调节模式下的泥沙沉积过程，通过泥沙的粒径组成特征结合^{137}Cs 比活度呈现出的旋回分层特征能反演出泥沙沉积的时间序列特征，最上层即为 2015 年的沉积，底层为 2008 年的沉积，由此沉积剖面的时间序列为：2015 年雨季：0 ~ 6 mm；2014 年旱季：6 ~ 12 mm；2014 年雨季：12 ~ 18 mm；2013 年旱季：18 ~ 21 mm；2013 年雨季：21 ~ 27 mm；2012 年旱季：27 ~ 33 mm；2012 年雨季：33 ~ 39 mm；2011 年旱季：39 ~ 45 mm；2011 年雨季：45 ~ 51 mm；2010 年旱季：51 ~ 54 mm；2010 年雨季：54 ~ 57 mm；2009 年旱季：57 ~ 60 mm；2009 年雨季：60 ~ 66 mm；2008 年旱季：66 ~ 69 mm；2008 年雨季：69 ~ 72 mm。结合河流输沙颗粒组成和^{137}Cs 的季节性变化趋势，可以大致区分出雨季和旱季的沉积泥沙，初步弄清支流消落带泥沙沉积变化特征。

3　讨论

3.1　雨季干支流悬移泥沙特征解析

水体悬浮泥沙是消落带沉积泥沙的重要物源，悬浮泥沙含量越高，消落带发生泥沙沉积的物源越充足，泥沙沉积速率越大。三峡库区干流悬浮泥沙主要是由长江干流、上游主要入库支流（嘉陵江、乌江）悬浮泥沙输入以及区间内坡面侵蚀产沙综合贡献的结果，在 7—9 月份汛期，颗粒粗细变化不大，7 月份悬移泥沙颗粒略偏粗。而支流（库湾）消落带沉积泥沙除汇合口一定距离河段内受干流悬浮泥沙影响外，主要来源为雨季库区坡面侵蚀和小流域产沙。长江上游的主要支流（金沙江和嘉陵江）进入库区中部的粗颗粒泥沙已优先沉积在变动回水区，当悬移泥沙到达常年库区的中部忠县，水流中砂粒含量不足 8%[20]，但区间内侵蚀的入库泥沙中 d ≥ 100 μm 的占 18.62%[21]，所以 7 月份干支流的粗颗

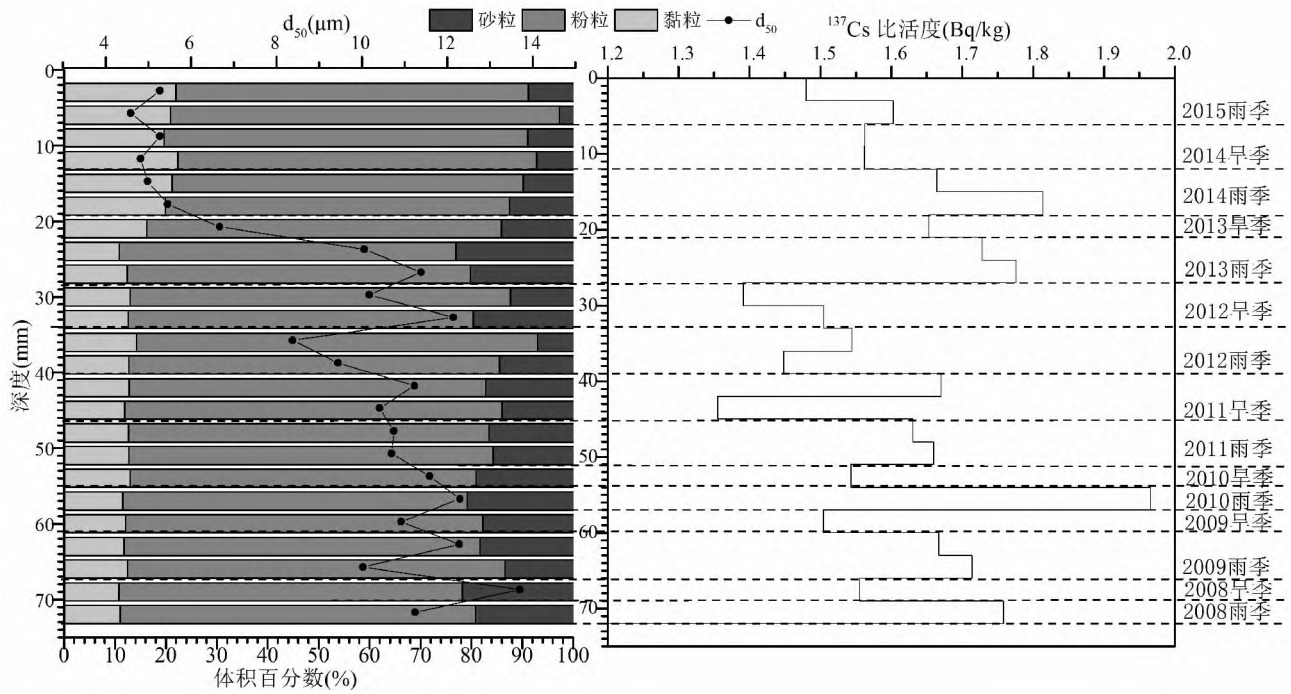

图 6　研究区 2015 年 7—9 月日降雨数据

Fig. 6　Daily rainfall data of study sites from July to September, 2015

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

粒泥沙可能主要以区间内产沙为主。同时,对于同一位置而言,水位较低时(7 月份)河流悬移质路径推移较远,粗颗粒能够到达较远的地方,水位升高时(9 月份)水流阻力变大,粗颗粒发生近源沉积,所以到达同一位置时沉积下来的颗粒相对较细,这就是同一断面支流 9 月份悬移质泥沙颗粒组成比 7 月份偏细的原因。

另外,本文整理了采样点附近的气象站 7—9 月的降雨数据(1 小时为间隔采集),发现 7 月份降雨集中在 7 月 14 日、15 日、22 日以及 8 月 2 日等 4 天,该月降雨次数较少且降雨以暴雨和大雨为主,表下层土壤侵蚀(冲沟侵蚀)发育比较强烈,沟蚀产沙比重相比坡面侵蚀贡献高,而表下层土壤^{137}Cs 比活度较低;8、9 月份降雨较频繁且降雨以中雨和小雨为主,坡面侵蚀强烈、沟蚀发育相对微弱[22-23],所以干流和支流^{137}Cs 比活度均较高,尤其是支流悬移泥沙^{137}Cs 比活度明显偏高,表明雨季 8 月份和 9 月份坡面侵蚀产沙贡献率较高;而雨季干流的悬移泥沙主要来源之一是区间众多的支流流域坡面侵蚀贡献,所以干流 8 月份的悬移泥沙^{137}Cs 比活度比 7 月偏高。

3.2 支流库湾消落带泥沙沉积过程

流量和流速是悬移质泥沙颗粒组成的重要参数,暴雨时,河流流量增加、流速变快,河道粗颗粒泥沙被带进河流悬移泥沙,同时悬移泥沙和消落带沉积泥沙会发生交换作用,所以保存在消落带上沉积泥沙的颗粒特征可以用来推断历史洪水的量级和频率[24-25]。沉积的粗颗粒泥沙一般是暴雨期间较大的水动力作用传输的[26]。然而,对于三峡水库消落带而言,由于沉积泥沙不同季节的主要物源不同,消落带沉积呈现出明显的季节分异规律。雨季流域坡面侵蚀产沙是主要来源且物源量丰富,流速较快且水动力足,粗颗粒泥沙才有可能被传输到支流回水区并沉积下来,且沉积率较高;而旱季,沉积泥沙主要物源转变为干流来沙,悬移泥沙偏少,前文已提到长江上游悬移泥沙传输到库区中部时,基本是细颗粒泥沙,再倒灌到支流,所以旱季沉积泥沙颗粒偏细,且沉积速率小。

关于三峡库区消落带泥沙沉积的相关研究表明[27]:干流消落带泥沙沉积速率明显大于支流(库湾)消落带泥沙沉积速率,原因是物源输入通量在三峡水库干流和支流间存在显著差异。消落带泥沙沉积速率与水库水位调节和支流上游泥沙输移的季节性特征密切相关。唐强[28]表明干流雨季的悬移泥沙主要来自于长江上游的主要河流如嘉陵江、乌江和库区支流流域的表面侵蚀,长距离的泥沙搬运造成粗颗粒泥沙的沿程沉积,增加库区中部细颗粒泥沙的富集;旱季则主要来自于由船行波导致的库岸侵蚀。而对于支流悬移质来说,雨季处于低水位,悬移泥沙主要来源于流域上游暴雨事件造成的侵蚀产沙,旱季的悬移泥沙主要是干流来沙的贡献。所以悬移泥沙的季节性颗粒组成特征可以作为沉积泥沙剖面断代的依据。

本研究结论可以为大型水库运行对于河流系统泥沙运移和传输过程的干扰提供理论依据,水库独特的季节性运行模式对于沉积泥沙的季节性沉积特征扮演着重要的角色。当然长江上游水库群的建设和利用以及长江上游水土保持等工程的生态恢复造成的入库泥沙持续偏少,库区支流流域侵蚀产沙或许是未来入库泥沙的主要来源。但是,三峡库区消落带沉积泥沙是一个受多方面及长时期因素影响的过程,淹水时间、频率和强度与消落带的植被覆盖、地形等共同影响着消落带泥沙沉积过程,各种因素的影响方式及影响过程都有待于进一步研究。同时,关于消落带沉积泥沙的不同物源定量贡献研究在以后的研究中还要结合数理统计模型如复合指纹识别技术等来实现,以支撑本文的研究结论。

4 结论

(1) 7 月份(平均水位 145 m)长江干流和汝溪河支流悬移质泥沙,表现为支流砂粒体积百分比比干流高,中值粒径支流比干流大,支流悬移泥沙颗粒比干流粗;而 8 月份(平均水位 150 m)和 9 月份(平均水位 160 m),支流悬移质泥沙与干流悬移质泥沙相比偏细,尤其是 9 月份,颗粒明显偏细。根据泥沙水动力学相关原理,支流 9 月份悬移质泥沙比 7 月份的颗粒偏细。

(2) 降雨强度和降雨次数的不同导致悬移泥沙物源的不同。无论是干流还是支流,^{137}Cs 比活度变化均表现为 8 月份比 7 月份偏高。7 月份以暴雨为主,沟蚀造成的表下层物源占主要贡献,干流和支流^{137}Cs 比活度均较低。8、9 月份以中小雨为主且降雨频繁造成坡面表层侵蚀产沙是悬移泥沙的主要来源,所以干流和支流^{137}Cs 比活度均较高,尤其是支流悬移泥沙^{137}Cs 比活度明显偏高。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(3) 结果表明从 2008 年至今，汝溪河库湾消落带泥沙总沉积厚度在 7 cm 左右，泥柱的粘粒含量介于 10.7 ~ 22.3% 之间，中值粒径介于 4.6 – 13.7 μm 之间，^{137}Cs 比活度范围为 1.39 – 1.97 Bq/kg。雨季沉积泥沙颗粒较细富含^{137}Cs，旱季则反之。根据沉积泥沙剖面分层样的^{137}Cs 比活度特征结合河流输沙颗粒组成变化的旋回分层特征，可以大致区分出雨季和旱季的沉积泥沙，初步弄清支流消落带泥沙沉积过程。

参考文献(References)

[1] WANG S, FU B J, PIAO S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. Nature Geoscience, 2016, **9**(1): 38 – 41

[2] BEECHIE T, OLDEN J D, PESS G R, et al. Process-based principles for restoring river ecosystems [J]. Bioscience, 2010, **60**(3): 209 – 222,

[3] SYVITSKI J, KETTNER A. Sediment flux and the Anthropocene [J]. Philosophical Transactions, 2011, **369**(1938): 957 – 75

[4] COLLINS A L, WALLING D E. Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects [J]. Progress in Physical Geography, 2004, **28**(2): 159 – 196.

[5] MINELLA, JEAN P G, WALLING D E, et al. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields [J]. Journal of Hydrology, 2008, **348**(3): 546 – 563

[6] WALLING, D E, FANG D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers [J]. Global and Planetary Change, 2003, **39**(1 – 2): 111 – 126

[7] OLLEY J, CAITCHEON G. Major element chemistry of sediments from the Darling-Barwon River and its tributaries: implications for sediment and phosphorus sources [J]. Hydrological Processes, 2000, **14**(7): 1159 – 1175.

[8] 贺秀斌，张信宝，WALLING D E. 基于湖库沉积剖面^{137}Cs 变化的流域表层侵蚀速率计算模型 [J]. 自然科学进展，2005，**15**(4): 495 – 498. [HE Xiubin, ZHANG Xinbao, WALLING D E. The calculation model of erosion rate in basin surface based on ^{137}cs change in lake sedimentary section [J]. Natural ScienceProgress, 2005, **15**(4): 495 – 498]

[9] 齐永青，张信宝，贺秀斌，等. 川中丘陵区和三峡地区小流域侵蚀产沙的塘库沉积^{137}Cs 断代 [J]. 地理研究，2006，**25**(4): 641 – 648. [QI Yongqing, ZHANG Xinbao, HE Xiubin, et al. A study on soil erosion induced sediment yield by reservoir and pond deposits dating with ^{137}Cs in small catchments of the hilly Sichuan Basin and the Three Gorges Region [J]. Geographical Research, 2006, **25**(4): 641 – 648]

[10] XU X B, TAN Y, YANG G S. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions [J]. Earth-Science Review, 2013, **124**(9): 115 – 125.

[11] 重庆市统计局. 重庆市统计年鉴 [M]. 北京：中国统计出版社，2001，345 – 380，342 – 381. [Chongqing Statistics Bureau. Statistical yearbook of Chongqing City [M]. Beijing: China Statistics Press, 2001, 345 – 380, 342 – 381]

[12] 张信宝，文安邦，WALLING D E，等. 大型水库对长江上游主要干支流河流输沙量的影响 [J]. 泥沙研究，2011，**8**(4): 59 – 66 [ZHANG Xinbao, WEN Anbang, WALLING D E, et al. Effects of large-scale hydropower reservoirs on sediment loads in Upper Yangtze River and its major tributaries [J]. Journal of Sediment Research, 2011, **8**(4): 59 – 66]

[13] FU B J, WU B F, LU Y H, et al. Three Gorges Project: Efforts and challenges for the environment [J]. Progress Physical Geography, 2010, **34**(6): 741 – 754.

[14] TANG Q, BAO Y H, HE X B, et al. Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Science of the Total Environment, 2014, **479 – 480**(1): 258 – 266

[15] ZHANG M, XU Y, SHAO M, et al. Sedimentary nutrients in the mainstream and its five tributary bays of a large subtropical reservoir (Three Gorges Reservoir, China) [J]. Quaternary International, 2012, **282**(60): 171 – 177.

[16] 邱光胜，胡 圣，叶 丹，等. 三峡库区支流富营养化及水华现状研究 [J]. 长江流域资源与环境，2011，**20**(3): 311 – 316 [QIU Guangsheng, HU Sheng, YE Dan, et al. Investigation on the present situation of eutrophication and water bloom in the branches of Three Gorges reservoir [J]. Resources Environment in the Yangtze Basin, 2011, **20**(3): 311 – 316]

[17] 王海云，程胜高，黄磊，等. 三峡水库"藻类水华"成因条件研究 [J]. 人民长江，2007，**38**(2): 16 – 18 [WANG Haiyun, CHENG Shenggao, HUANG Lei, et al. Influence of sediment retaining in Manwan reservoir on sedimentation in Dachaoshan reservoir [J]. Yangtze River, 2007, **38**(2): 16 – 18]

[18] 封丽 封雷 张君 张韵 黄健盛. 三峡库区典型支流水质综合评价及污染特征分析，《2015 年中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷)》，2015，46 – 51. [Feng Li, Feng Lei, Zhang Jun, et al. A synthetic evaluation on water quality and characteristics of pollutants in typical tributaries of the Three Gorges reservoir area. [C]. Chinese Society for Environmental Sciences. The Chinese conference proceedings, 2015, 2: 46 – 51]

[19] 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.

[20] 阎丹丹，鲍玉海，贺秀斌，等. 三峡水库蓄水后长江干支流及消落带泥沙颗粒特征分析 [J]. 水土保持学报，2014，**28**(4): 289 – 292 [YAN Dandan, BAO Yuhai, HE Xiubin, et al. Particle size characterisitics of sediment in draw down area of upper Yangtze River and its tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(4): 289 – 292]

[21] 郭 进，文安邦，严冬春，等. 三峡库区紫色土坡地土壤颗粒流失特征 [J]. 水土保持学报，2012，**26**(3): 18 – 21 [GUO Jin, WEN Anbang, YAN Dongchun, et al. Particle characterisitics of eroded purple soil from slope land in the Three Gorges Reservoir Region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, **26**(3): 18 –

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

21]

[22] 王志伟,陈志成,艾钊,等. 不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(6):17-19[WANG Zhiwei,CHEN Zhicheng,AI Zhao,et al. Erosion and desertification with mountain Yimeng typical surface soil caused by different rainfall intensity and slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2012,26(6):17-19]

[23] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等. 细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展[J]. 地理科学进展 2010,29(11):1319-1325[LI Junlan,CAI Qiangguo,SUN Liying,et al. Reviewing on factors and critical conditions of rill erosion[J]. Geograph science in Progess,2010,29(11):1319-1325]

[24] DRAUT A E,RUBIN D M. Assessing grain-size correspondence between flow and deposits of controlled floods in the Colorado River,USA[J]. Journal of Sediment Resource,2013,83:963-974

[25] SCHILLEREFF D N,CHIVERRELL R C,MACDONALD N,et al. Flood stratigraphies in lake sediments: a review[J]. Earth-Science Review,2014,135:17-37

[26] TOONEN W H J.,WINKELS T G,COHEN K M,et al. Lower Rhine historical flood magnitudes of the last 450 years reproduced from grain-size measurements of flood deposits using end member modelling[J]. Catena,2015,130:69-81

[27] BAO Y H,TANG Q,HE X B,et al. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir,China[J]. Hydrology Research 2015,46(2):212-221

[28] TANG Q,BAO Y H,HE X B,et al. Flow regulation manipulates contemporary seasonal sedimentary dynamics in the reservoir fluctuation zone of the Three Gorges reservoir,China[J]. Science of Total Environment,2016,548-549(1):410-420

Sedimentary Characteristics of Suspending Particles in the Mainstream of the Three Gorges Reservoir and Its Tributaries

—A Case Study in Zhong County

WANG Yongyan[1,2],WEN Anbang[1],ZHANG Xinbao[1],SHI Zhonglin[1],YAN Dongchun[1]

(1. *Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation,Institute of Mountain Hazards and Environment,Chinese Academy of Sciences,Chengdu,Sichuan* 610041,*China*; 2. *Chinese Academy of Sciences*)

Abstract: Construction of cascade dams along the main stream and tributaries of the Upper Yangtze River is leading to a considerable reduction in the amount of suspending sediments,as discharged into the upper reaches of the Three Gorges Revoir. However,with the increase of sediment yield caused by sloping surface,the Three Gorges reservoir is constantly fed with reservoir sedimentation and alter its sediment origins. The impounding of Three Gorges Dam produces interaction of biological,physical and chemical matter between the main stream and tributaries and lasting sedimentation in riparian zone. Decreasing flow velocity caused by impoundment in tributaries has caused noticeable eutrophication. Therefore,there is an urgent need to investigate composition,characteristic of suspending sediment and deposition processes in riparian zone of the Three Gorges Reservoir. The Ruxi River,a tributary of the Yangtze River located at Zhong County,as well as an adjacent section of the mainstream near its confluence,were chosen as the study area. Monthly suspending sediments in the mainstream and tributary were trapped for testing from July to September,2015. Stratified sediment samples in riparian zone of the Ruxi River were collected in July,2015 and the Grain-size composition and ^{137}Cs activity were analyzed. Results indicated that the median particle size of the suspending sediments collected in the mainstream and tributary were 12.81 μm and 18.87 μm,respectively. The sand percentage of tributary sediment samples was higher than those of the mainstream samples in July,implying that the particle size of tributary sediment was coarser than those of the main stream sediment. The grain-size composition of sediments in the mainstream during August and September was identical with those in July. As to suspending sediments in the tributary,it had a finer size than those in July. ^{137}Cs activities of suspended sediment collected in July were 0.87 and 0.65Bq/kg in the mainstream and tributary,respectively. They were both lower than those of sediments collected in August,especially ones collected in the tributary with an average ^{137}Cs activity of

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.16Bq/kg. The coarser particles and lower ^{137}Cs activity of suspending sediment in the tributary in July could be ascribed to subsurface erosion from heavy rainstorm events, whereas finer sediment composition and higher ^{137}Cs activity in August could be attributed to surface erosion caused by frequent light rain. The stratified sediment instrument was installed in 2008 in the riparian zone of the Ruxi River, which trapped a sediment layer with a thickness of 7 cm till the sampling date. The median size and ^{137}cs activity of cored stratified sediment ranged between 4.6 – 13.7 μm and 1.39 – 1.97 Bq/kg, respectively. According to the distribution of ^{137}Cs activities combining with sediment grain-size composition, the sediment deposition processes in riparian zone of the Three Gorges Reservoir during rainy and dry seasons were roughly distinguished.

Key words: suspending sediment; deposited sediment; riparian zone; Three Gorges reservoir Region

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net