

三峡水库干流典型消落带泥沙沉积过程

唐强^{1,2}, 贺秀斌¹, 鲍玉海¹, 钟荣华^{1,3}, 阎丹丹^{1,3}, 高进长^{1,3}

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, 成都 610041
2. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 选择三峡水库中游干流典型消落带断面, 现场调查泥沙沉积速率随高程分布, 探讨三峡水库特定水位调节模式和长江上游泥沙输移的季节性特征对消落带泥沙沉积的影响。结果表明, 消落带泥沙净沉积主要发生在 145~168 m 高程, 2010 年累积净沉积厚度为 1.1~39.9 cm, 随高程增加逐渐减小, 145~155 m 平均泥沙沉积厚度为 14.9 cm, 155~168 m 平均泥沙沉积厚度为 2.6 cm; 2013 年累积净沉积厚度为 3~80 cm, 表明三峡水库干流消落带泥沙沉积过程迅速。泥沙粒径随高程增加逐渐变粗, 体现在砂粒体积分数和中值粒径逐渐增大。消落带下部沉积泥沙颗粒组成与干流悬移质泥沙接近, 而消落带上部沉积泥沙明显粗于干流悬浮泥沙。消落带泥沙沉积速率与水库水位调节密切相关, 雨季水库低水位运行, 长江悬移质输沙量的增加导致了消落带下部大量泥沙沉积; 旱季水库高水位运行, 长江悬移质输沙量减少导致消落带上部泥沙沉积速率降低, 消落带河岸侵蚀对沉积泥沙贡献逐渐增大。消落带淹水时间随高程增加而缩短, 长时间淹没有利于消落带下部泥沙沉积。综合推断, 三峡水库干流消落带下部泥沙主要来源于雨季河流悬移质泥沙的沉积, 而消落带上部沉积泥沙主要来自旱季消落带河岸侵蚀产沙。

关键词 泥沙沉积; 水库调节; 消落带; 三峡水库

中图分类号 S157

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.24.012

Sedimentation Processes in a Typical Riparian Zone Along the Yangtze Mainstream of the Three Gorges Reservoir

TANG Qiang^{1,2}, HE Xiubin¹, BAO Yuhai¹, ZHONG Ronghua^{1,3}, YAN Dandan^{1,3}, GAO Jinzhang^{1,3}

1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China
2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A typical transect of the riparian zone along the Yangtze mainstream of the middle Three Gorges Reservoir is selected to determine the lateral distribution of sedimentation rates against elevation, and to explore the effect of the reservoir water level regulation and the seasonal variation of suspended sediment concentrations of the Upper Yangtze River. It is found that the net sedimentation mainly takes place within the portions between 145–168 m. The cumulative net sediment depth ranges from 1.1–39.9 cm during the 2010 survey and it decreases with the increase of the elevation. The average sediment depth is 14.9 cm between the

收稿日期: 2014-05-04; 修回日期: 2014-06-25

基金项目: 《科技导报》博士生创新研究资助计划项目(kjdb2012007); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX-XB3-09); 国家自然科学基金项目(41171222, 41201272)

作者简介: 唐强, 博士研究生, 研究方向为流域侵蚀产沙与示踪, 电子信箱: qiangtang@imde.ac.cn; 贺秀斌(通信作者), 研究员, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持, 电子信箱: xiubinh@imde.ac.cn

引用格式: 唐强, 贺秀斌, 鲍玉海, 等. 三峡水库干流典型消落带泥沙沉积过程[J]. 科技导报, 2014, 32(24): 73-77.

elevations of 145–155 m, and 2.6 cm in the portions above. The sediment depth ranges from 3–80cm during the 2013 field survey, indicating the severity of the sediment accretion during the initial period of dam operation. The riparian sediments become coarser with the increase of the elevation, which indicates that the sandy fraction of the bulk sediment increases at a higher elevation. The sediment grain-size composition at lower elevations is close to that of the suspended sediment, while that at a higher elevation is coarser than the suspended sediment. The sedimentation in the riparian zone is closely related to the water level regulation induced by the regular dam operation. During a wet season when the reservoir water level is low, a high fluvial suspended sediment yield leads to a significant sedimentation in the lower portions of the riparian zone. During the dry season when the fluvial suspended sediment supply is limited, much fewer sedimentation occurs at the upper portions. Relatively longer inundation duration also contributes to a higher sediment depth in the lower portions of the riparian zone. It can thus be concluded that the sediment in the lower portions of the riparian zone is due to the fluvial suspended sediment yield during the wet season, while the sediment in the upper portions of the riparian zone originates from the bank erosion.

Keywords sedimentation; reservoir regulation; riparian zone; Three Gorges Reservoir

三峡工程位于长江上游出口湖北省宜昌市秭归县三斗坪镇长江干流河段上,坝址控制流域面积约100.5万km²^[1],具有发电、防洪和改善航道等综合效益。工程于1993年动工兴建,1998年大江截流,2003年实现135 m初期试验性蓄水,2006年第2次试验性蓄水到156 m,2008第3次试验性蓄水到172.6 m,2009年竣工投产,2010年首次实现175 m最高蓄水位。三峡水库采取“蓄清排浊”的运行模式,即冬季早期实行175 m高水位运行以满足发电需求,夏季雨期采取145 m低水位运行以腾空库容满足长江防洪需要,水库水位周期性地在145和175 m间季节性涨落^[2]。三峡水库蓄水运行在坝址宜昌至库尾重庆江津间形成了长达660 km、垂直落差达30 m,总面积达349 km²的水库消落带^[3,4]。三峡水库消落带淹水前具有典型的陆地生态系统特征,土地利用类型主要为耕地、林地、草地、荒地、城镇用地和农村宅基地^[5]。三峡水库蓄水运行初期,水库流速减缓和水位季节性波动导致消落带泥沙沉积^[6,7]。

三峡工程泥沙问题受到广泛关注^[8–11],泥沙淤积减少水库有效库容,缩短水库寿命。三峡水库消落带泥沙沉积在论证和设计阶段未充分涉及,为“后三峡”时期亟待认识的科学问题。消落带泥沙沉积覆盖植被生境,干扰出露期植被幼芽萌发,降低植被覆盖度,削减植被的护土固岸和缓冲截污功能^[12],伴随泥沙沉积过程存在污染物的累积^[13]。三峡水库消落带泥沙沉积相关科学问题包括:现有水库调节背景下消落带泥沙沉积的时空分布;水库水位调节、长江上游泥沙输移和消落带岸坡侵蚀对泥沙沉积的作用机制;消落带沉积泥沙的来源构成;长江上游水库群联合调度对三峡水库消落带泥沙沉积的影响;长江上游生态环境治理对三峡水库消落带泥沙沉积的影响;消落带泥沙沉积对地球化学元素富集和植被繁衍的影响;沉积-侵蚀的动态转化机制及其对消落带地貌演变的影响等。

三峡水库消落带泥沙沉积过程及影响因素目前尚无相关研究。相比于自然河段消落带,三峡水库消落带泥沙沉积受水库人为水位调节过程和长江上游泥沙输移的季节性特征共同作用。本文选择三峡水库中游干流典型消落带断面,

拟通过现场调查和泥沙颗粒组成分析相结合,探讨三峡水库干流消落带典型泥沙沉积过程,分析水库水位调节模式和长江上游泥沙输移季节性特征对三峡水库干流消落带泥沙沉积的影响。

1 研究区概况

三峡水库蓄水运行在坝址宜昌至库尾重庆江津间形成了长660 km,水域总面积达1080 km²的水库区。本文选择三峡水库中游重庆市忠县长江干流左岸消落带作为研究区(图1)。研究区属于丘陵地貌,地质岩层以侏罗纪蓬莱组沙页岩为主,气候为湿亚热带东南季风区,年降雨量1267 mm,年均温18.2℃,相对湿度81%^[14]。消落带土地利用类型为农地(水田和旱地),土壤为紫色土。植被类型主要为人工引种的狗牙根、双穗雀稗和扁穗牛鞭草等^[15]。

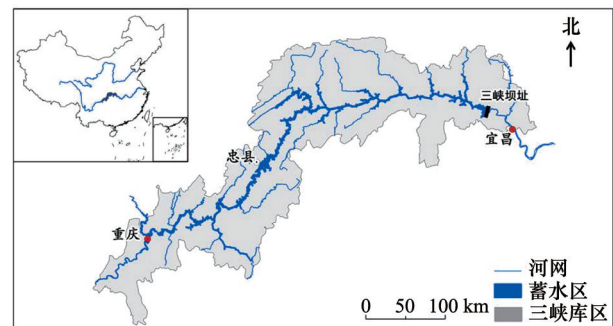


图1 三峡水库范围及研究区位置

Fig. 1 Sketch map of the Three Gorges Reservoir and the study area

2 研究方法

分别于2010和2013年沿消落带高程(145~175 m)选取采样点,开挖泥沙沉积剖面,通过表层沉积泥沙和消落带土壤在颜色和质地上呈现的差异鉴别泥沙-土壤界面,测量消落带泥沙沉积净厚度。沉积泥沙以10 cm为间隔采集分层

样,不足 10 cm 的采集整个剖面沉积泥沙。泥沙样品带回实验室经自然风干后,去除杂物,研磨过 2 mm 筛待测。粒径采用 Marlvern 2000 激光粒度仪测定,样品加双氧水和盐酸去除有机质和碳酸钙后上机测定。粒径组成为黏粒(小于 2 μm)、粉粒(2~50 μm)和砂粒(50 μm ~2 mm)。

3 结果与讨论

3.1 干流消落带泥沙沉积空间分布

通过文献调研和三峡水库消落带泥沙沉积面上调查,影响三峡水库干流消落带泥沙沉积速率及空间分布的因素主要有河岸平面形态(凹岸或凸岸)、消落带地形(高程、坡度和坡向)、水库特定水位调节模式下的水文条件(消落带淹水时间、频率和水位停留时间)、水动力条件(涌浪强度和频率)、水体泥沙含量、消落带岸坡侵蚀和消落带植被密度等^[6]。凹岸消落带易发生侵蚀,而凸岸消落带易发生泥沙沉积。坡度决定了消落带侵蚀和沉积的分布,泥沙沉积易发生在坡度较小的缓坡消落带,而坡度较大的陡坡消落带易发生侵蚀。不同高程消落带的淹水时间、频率和强度不同,导致泥沙沉积速率存在差异。水体悬浮泥沙和消落带侵蚀产沙是消落带沉积泥沙的重要物源,而消落带植被密度决定了地表粗糙度,影响泥沙沉积速率。

消落带位于长江干流左岸,局部地形由农台地(水田和旱地)和台间陡坡构成。现场调查表明,三峡水库运行初期,泥沙沉积主要发生在坡度较缓的平台地上,而坡度较陡的台间坡地在河流冲刷和涌浪侵蚀作用下主要发生侵蚀(图 2)。



(a) 2010年沉积平台



(b) 2013年沉积平台

图 2 消落带泥沙平台对比

Fig. 2 Comparative view of the sedimentary surface

坡度在消落带侵蚀和沉积的分布中占主导作用,泥沙沉积易发生在坡度较缓的消落带区域,而侵蚀容易发生在坡度较大的消落带岸坡。

3.2 干流消落带泥沙沉积厚度

两期消落带泥沙沉积厚度调查表明,泥沙净沉积主要发生在 145~168 m 高程范围的消落带。2010 年研究消落带泥沙沉积厚度为 1.1~39.9 cm,随消落带高程的增加明显递减。145~155 m 消落带泥沙沉积迅速,平均沉积厚度达 14.9 cm,而 155~168 m 消落带平均泥沙沉积厚度为 2.6 cm。2013 年消落带断面泥沙沉积厚度为 3~80 cm,也呈现出随高程增加明显递减的趋势。对比两期消落带泥沙沉积厚度调查结果,2013 年消落带泥沙净沉积厚度明显大于 2010 年,表明在三峡水库运行初期,干流消落带泥沙沉积过程强烈(图 3)。

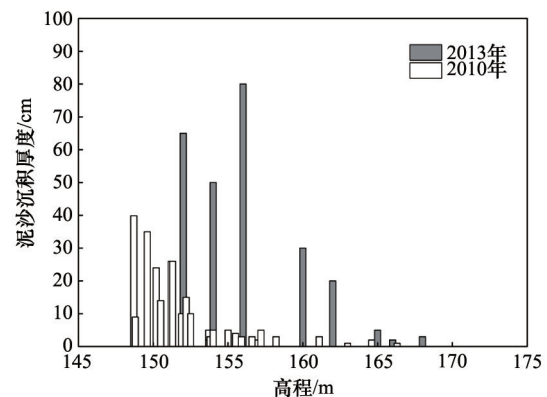


图 3 消落带泥沙沉积厚度分布

Fig. 3 Distribution of sediment depths along the selected transect of the typical riparian zone

3.3 消落带沉积泥沙颗粒组成

分析消落带沉积泥沙颗粒组成可知,沉积泥沙随高程增加表现变粗的趋势,体现为砂粒的体积分数逐渐增大,而中值粒径也呈现出相应的随高程增加而增大的趋势(图 4)。对比水体悬浮泥沙和消落带土壤颗粒组成,水体悬浮泥沙的颗粒组成与消落带下部沉积泥沙的颗粒组成接近,而消落带土壤砂粒的体积分数大于水体悬浮泥沙砂粒的体积分数,与消落带上部沉积泥沙的颗粒组成相近。对比消落带沉积泥沙、水体悬浮泥沙和消落带土壤的颗粒组成可推断出:雨季水库低水位运行时,消落带下部沉积泥沙主要来自水体悬浮泥沙,因此其颗粒组成与悬浮泥沙接近,旱季水库高水位运行时,消落带上部河岸侵蚀泥沙经水流筛选后,粗颗粒发生近源沉积,导致消落带上部沉积泥沙中砂粒的比重增加,而细颗粒组分随水流发生输移。

3.4 水库调节对干流消落带泥沙沉积的影响

三峡水库干流消落带泥沙来源主要为上游主要入库支流(长江干流、嘉陵江和乌江)来沙、三峡库区坡面侵蚀和小流域产沙、消落带河岸侵蚀产沙。泥沙沉积过程主要为水库

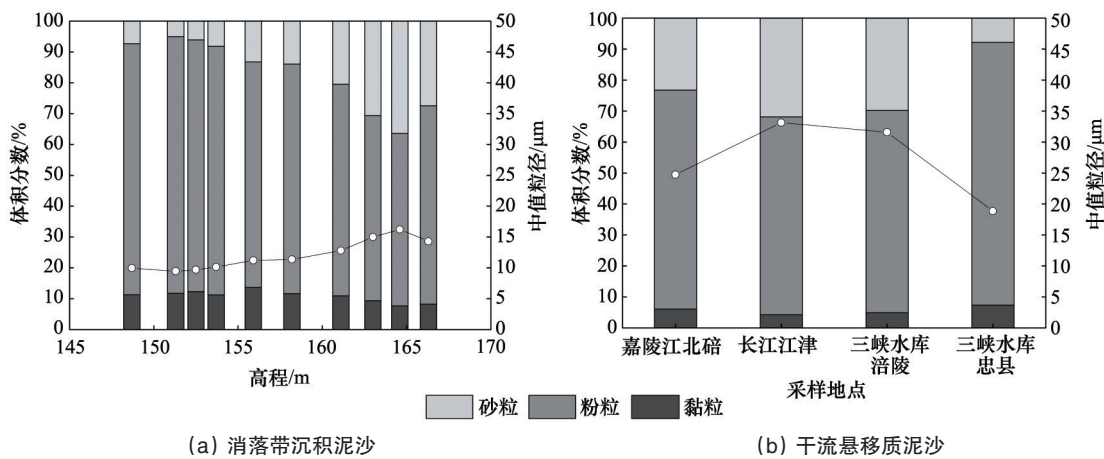


图4 颗粒组成对比

Fig. 4 Comparison of particle size composition

水体悬浮泥沙的沉积和消落带岸坡侵蚀泥沙的近源沉积。三峡水库干流水体悬浮泥沙主要来自雨季(5—9月)长江上游流域输沙和库区坡面及小流域侵蚀产沙,以表层侵蚀物源为主,航运形成的波浪导致消落带侵蚀贯穿全年,兼有表层(surface)侵蚀和表下层(subsurface)侵蚀。

干流水体悬浮泥沙质量浓度是决定干流消落带泥沙沉积速率的重要因素。2013年8月对三峡水库支流汝溪河口断面悬浮泥沙质量浓度采样调查表明,悬浮泥沙质量浓度沿河口处长江干流右岸从 0.085 kg/m^3 逐渐减小(图5),表明由上游输沙形成的干流水体悬移质泥沙是消落带沉积泥沙的重要物源,而三峡库区小流域输沙主要集中在雨季降雨后。

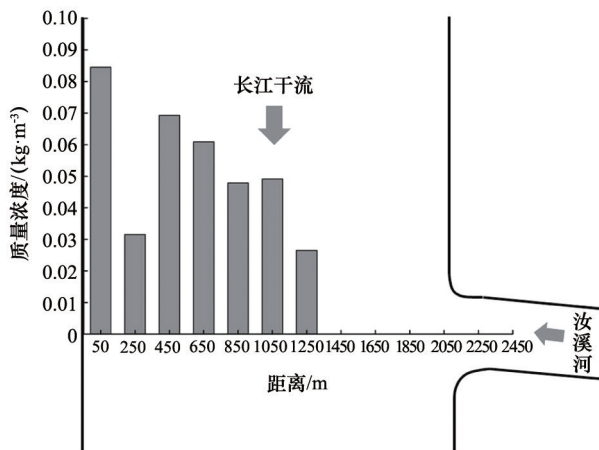


图5 三峡水库支流汝溪河口悬浮泥沙质量浓度的变化
Fig. 5 Change of suspended sediment concentration at the confluence of Ruxi tributary

进一步分析长江寸滩站月均悬浮泥沙质量浓度与2009—2010年三峡水库水位调节的关系可以看出,在水体悬

浮泥沙浓度显著增加的6—9月,三峡水库水位保持在低水位运行,水库蓄水导致的流速减缓造成河流输沙在消落带下部大量沉积。在水库高水位运行的当年10至次年5月,库区水体悬浮泥沙质量浓度显著降低,悬浮泥沙物源的减少限制了泥沙在消落带上部的沉积(图6)。

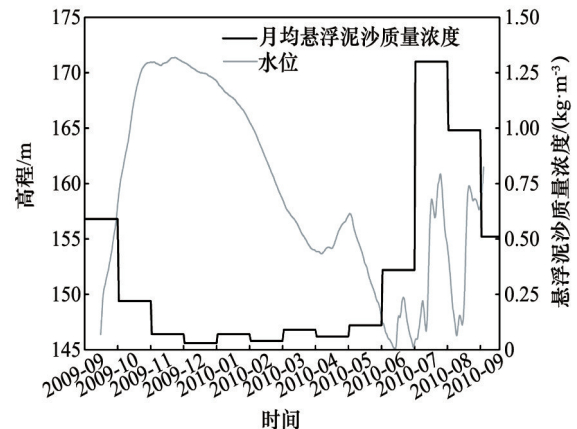


图6 水位和月均悬浮泥沙质量浓度变化
Fig. 6 Change of water level and monthly averaged suspended sediment concentration

三峡水库人为调节背景下消落带的淹没特性是决定消落带泥沙沉积的另一个重要因素。为探明水位调节对消落带泥沙沉积的影响,统计出消落带各高程自水库蓄水运行以来的淹没时间和水库水位在各高程的停留时间。消落带淹没时间随高层增加呈现出明显的递减趋势,在高程155 m左右处出现明显递减点。低海拔消落带长时间淹水有利于泥沙长时间大量沉积,而高程155 m以上淹水时间的骤减可能解释泥沙沉积厚度明显减少。淹水时间随高程缩短可以解释消落带泥沙沉积厚度随高层递减(图7)。

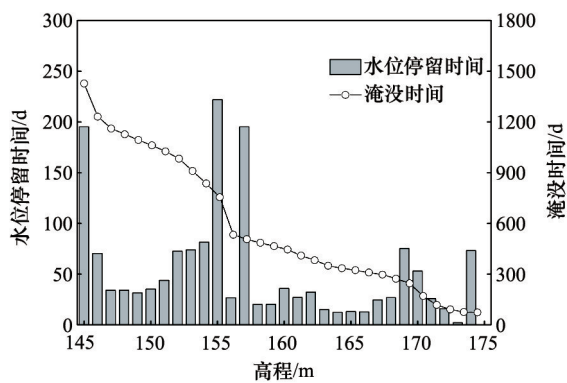


图7 淹水时间和水位停留时间随消落带高程变化
Fig. 7 Change of inundation duration and water level residence time

结合三峡水库水位调节模式和典型消落带沉积泥沙颗粒特征推断:三峡水库干流消落带沉积泥沙主要来自河流输沙和消落带岸坡侵蚀产沙,雨季当水库低水位运行时,河流输沙的显著增加导致消落带下部大量泥沙沉积;旱季水库高水位运行时,河流输沙的明显减少导致消落带上部淤积泥沙显著减少,沉积泥沙主要来自消落带岸坡侵蚀泥沙的沉积。特定的水位调节模式和长江上游流域输沙的季节性特征共同决定了消落带各高程下不同的泥沙沉积过程。

4 结论

三峡水库干流典型消落带断面泥沙沉积主要发生在145~168 m坡度较缓的平台地上。泥沙沉积速率随高程增加而递减,155 m以下平均沉积厚度为15.9 cm,155 m以上平均沉积厚度为2.6 cm。消落带下部沉积泥沙颗粒组成与长江干流悬浮泥沙颗粒组成接近,消落带上部沉积泥沙颗粒明显粗于长江干流悬浮泥沙,反映出消落带河岸侵蚀泥沙的输入。干流消落带各高程泥沙沉积速率随高程变化和泥沙沉积过程与三峡水库水位调节模式和长江上游输沙的季节性特征密切相关。雨季三峡水库低水位运行时,长江悬移质输沙量显著增加,消落带下部的沉积泥沙主要来自干流悬浮泥沙的沉积;旱季水库高水位运行,长江悬移质输沙量明显减少,消落带上部沉积泥沙主要来自消落带河岸侵蚀产沙的近源沉积。消落带河岸侵蚀产沙在沉积泥沙中的比重随高程增加逐渐增大。

参考文献 (References)

[1] 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(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(4): 59-66.

[2] Li B, Yuan X Z, Xiao H Y, et al. Design of the dike-pond system in the littoral zone of a tributary in the Three Gorges Reservoir, China[J].

Ecological Engineering, 2011, 37(11): 1718-1725.

- [3] Zhang Q F, Lou Z P. The environmental changes and mitigation actions in the Three Gorges Reservoir region, China[J]. Environmental Science and Policy, 2011, 14(8): 1132-1138.
- [4] Ye C, Li S Y, Zhang Y L, et al. Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 191(1-3): 366-372.
- [5] 张虹. 三峡重庆库区消落带基本特征与生态功能分析[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(3): 374-378.
Zhang Hong. Analysis of the characteristics and ecosystem service of the water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(3): 374-378.
- [6] 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: 258-266.
- [7] Bao Y H, Nan H W, He X B, et al. Sedimentation in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[C]//Proceedings of the ICCE symposium 2010. Warsaw, Poland: Sediment Dynamics for a Changing Future, 2010, 337: 224-228.
- [8] Fu B J, Wu B F, Lu Y H, et al. Three Gorges Project: Efforts and challenges for the environment[J]. Progress in Physical Geography, 2010, 34(6): 741-754.
- [9] Xu X B, Tan Y, Yang G S. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 124: 115-125.
- [10] Yuan X Z, Zhang Y W, Liu H, et al. The littoral zone in the Three Gorges Reservoir, China: Challenges and opportunities[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(10): 7092-7102.
- [11] Hu B Q, Yang Z S, Wang H J, et al. Sedimentation in the Three Gorges Dam and the future trend of Changjiang (Yangtze River) sediment flux to the sea[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(11): 2253-2264.
- [12] 李强, 丁武泉, 朱启红, 等. 三峡库区泥、沙沉降对低位狗牙根种群的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1567-1573.
Li Qiang, Ding Wuquan, Zhu Qihong, et al. Influence of silt deposition and sand deposition on Cynodon dactylon population in low-water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6): 1567-1573.
- [13] Zhang M, Xu Y Y, Shao M L, 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: 171-177.
- [14] 储立民, 常超, 谢宗强, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤重金属的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 192-196.
Chu Limin, Chang Chao, Xie Zongqiang, et al. Effect of impounding of the Three-Gorges Reservoir on soil heavy metals in its hydro-fluctuation belt[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 192-196.
- [15] 李兆佳, 熊高明, 邓龙强, 等. 狗牙根与牛鞭草在三峡库区消落带水淹结束后的抗氧化酶活力[J]. 生态学报, 2013, 33(11): 3362-3369.
Li Zhaojia, Xiong Gaoming, Deng Longqiang, et al. Dynamics of antioxidant enzyme activities in roots of Cynodon and Hemarthria altissima recovering from annual flooding[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(11): 3362-3369.

(责任编辑 王媛媛)