

坪头水电站岩溶砂化细晶白云岩的特性及围岩分类

田启文^{1,2}, 岳朝林³

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072;
3. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:为了能及时准确地对坪头水电站引水隧洞后段及厂址区内各水工建筑物洞室开挖揭示的围岩细晶白云岩进行围岩类别的确定,为工程设计提供科学合理的地质依据,在充分调查该区水文地质条件及岩溶发育特征和认识细晶白云岩岩溶砂化现象形成机制的基础上,通过大量的岩石磨片鉴定试验和物理力学性质试验,全面细致地查明了围岩细晶白云岩的物质组成及其在不同岩溶砂化情况下的物理力学特性。依据国家相关规程规范,结合各洞室实际开挖揭示情况和试验结果,对该区内岩体进行了围岩工程地质分类,总结出不同岩溶砂化细晶白云岩的围岩类别的特征及其综合评分情况,并对该区确定的Ⅲ类、Ⅳ类和Ⅴ类不同类别的围岩,有针对性地采取相应的工程处理措施,从而确保了各水工建筑物洞室的围岩稳定和安全运行。

关键词:细晶白云岩;溶蚀;砂化;围岩分类;坪头水电站

中图分类号:P642;P588.24⁺5 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)05-0045-05

Characteristics of karst sanded fine-crystalline dolomite and wall rock classification for Pingtou Hydropower Station//TIAN Qiwen^{1,2}, YUE Chaolin³ (1. *Environmental Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Chian*; 2. *Powerchina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China*; 3. *Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China*)

Abstract: The hydrological and karstification conditions at the Pingtou Hydropower Station were investigated aiming to identify the classification of the fine-crystalline dolomite of the wall rocks at the end of the diversion tunnel and hydraulic structure chamber for geological basis of the geological engineering design. Furthermore, the mechanism of the sanded fine-crystalline dolomite due to the intense karstification and corrosion effect was obtained. Based on a large quantity of rocks sections experiments for identification and physical property, material composition, physical and mechanical properties of the wall rocks of different karst corrosion extent were fully surveyed. In accordance with the national standards, combined with experimental results and actual conditions in the excavation process of cave chambers, engineering geological classifications and categories of the wall rocks were determined by Ⅲ, Ⅳ and Ⅴ, which could serve as focused engineering measurements on the different categories, respectively, to maintain the stability and safe functioning of wall rock of the hydraulic structures.

Key words: fine-crystalline dolomite; karst; sanded; classification of wall rock; Pingtou Hydropower Station

坪头水电站位于四川省凉山州境内,在金沙江左岸一级支流的美姑河上。该电站采用闸坝引水式开发,库容 62.09 万 m³,最大闸坝高 38.5 m,左岸引水隧洞长 12.716 km,左岸地下厂房布置 3 台发电机组,装机容量共 180 MW。厂址区主要水工建筑物有调压井及其上室、蝶阀室、压力管道、地下厂房、主变室、尾水洞和通风洞等。坪头水电站引水隧洞后段(即引水隧洞 5 号支洞控制段—调压井段)及厂址区位于美姑河左岸,地处莫红背斜核部附近,该区出

露的岩体为震旦系灯影组细晶白云岩及含磷灰岩等,在对引水隧洞后段及厂址区各水工建筑物洞室的开挖过程中,发现在水平埋深 130~460 m、垂直埋深 50~310 m 范围内的围岩细晶白云岩多呈“砂包石”状,部分呈“砂土”状,散体结构,洞室塌方、掉块现象严重,自稳能力极差,严重影响了施工安全和工程进度。针对该区围岩细晶白云岩的这种特殊的地质现象,进行了勘探试验和专题研究工作^[1-2]。综合分析认为该现象是细晶白云岩在地表水入渗和地下

水径流的过程中,遭受了强烈岩溶作用影响的结果,将该现象称之为细晶白云岩岩溶砂化现象^[1-2]。岩溶砂化后的细晶白云岩对该区各水工建筑物洞室的块体稳定影响极大,故认清不同岩溶砂化程度的细晶白云岩的特性,以及科学合理确定其工程地质类别,对工程有效的设计影响极大,对工程正常施工和将来安全运行也意义重大^[3]。为此,本文在充分调查该水文地质条件及岩溶发育特征以及认识细晶白云岩岩溶砂化现象形成机制的基础上,通过大量的岩石磨片鉴定试验和物理力学性质试验,全面查清了不同岩溶砂化程度的围岩细晶白云岩的物质组成及其物理力学特性;依据国家相关规程规范,结合各洞室实际开挖揭示情况和试验成果资料,科学地对该区岩体进行围岩工程地质分类及综合评分,确定该区的细晶白云岩的围岩类别,从而为工程设计提供科学合理的地质依据,以确保各洞室的围岩稳定和各个水工建筑物的安全运行。

1 引水隧洞后段及厂址区基本地质条件

坪头水电站引水隧洞后段及厂址区(以下简称研究区)位于美姑河左岸,该段河谷受美姑河切割,呈不对称深切“V”形谷,左岸为相对宽缓的顺向坡,右岸为陡峻的反向坡。该段河谷左岸 580(河水面)~610 m 高程为大片覆盖层斜坡,主要为崩坡积堆积物孤块碎石土,地形坡度为 30°~40°;610~715 m 高程为 65°~80°的基岩陡壁;790~1 100 m 高程为大片覆盖层缓坡,地形坡度 20°~30°。右岸 580(河水面)~1 150 m 高程为 60°~80°的基岩陡壁。

研究区出露的地层为震旦系灯影组上段(Zbd³)灰黑色含磷灰岩和灰白色细晶白云岩,以及灯影组中段(Zbd²)浅灰~灰白色细晶白云岩、斑状细晶白云岩。坪头水电站厂址区的主要水工建筑物均置于灯影组中段的岩体内(图 1)。

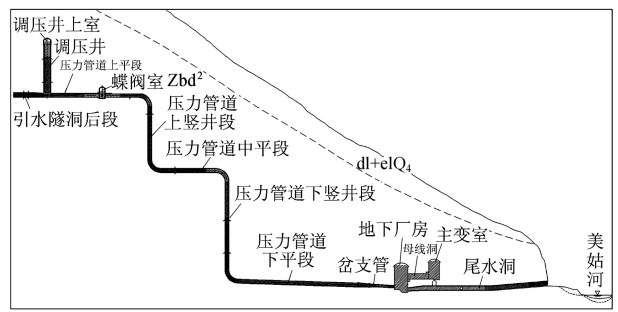


图 1 研究区各水工建筑物布置示意图

研究区地处莫红背斜,其中引水隧洞后段大多处于莫红背斜北西翼,厂址区水工建筑物大多处于莫红背斜核部和南东翼,研究区围岩内未见发育有大的断层,但岩体中发育有小的顺层挤压破碎带,且

裂隙发育。

研究区所处岸坡为斜顺向坡,坡面岩体中裂隙发育,岸坡卸荷作用强烈。在引水隧洞后段尔古沟至万波沟一线发育有古滑坡体;在厂址区万波沟至龙头沟一线斜坡上裸露的基岩体岩多松弛、破碎。研究区内发育有第四系孔隙水、基岩裂隙水及岩溶水,其中最发育的岩溶地下水主要是下游的龙头沟补给,经过岩体中的溶蚀裂隙,最后在厂址区美姑河边沿泉点排泄^[4]。厂址区内天然地下水位为 584~585 m 高程,水质类型为 Ca-SO₄ 型,其对混凝土有硫酸盐型的弱腐蚀性。

2 细晶白云岩岩溶砂化现象

研究区地貌上为深切峡谷,卸荷作用强烈,又地处莫红背斜核部附近,各种裂隙发育,这些裂隙又为地下水的入渗和径流提供了良好的通道。围岩细晶白云岩在地表水入渗和地下水径流的过程中遭受了强烈的岩溶作用^[4]。

根据对研究区地表地质条件的调查,结合钻孔勘探及各工程部位地下洞室开挖揭示情况,不同高程、不同工程部位围岩细晶白云岩表现出的岩溶砂化现象如下:

a. 引水隧洞后段长 1 411 m,水平埋深为 180~460 m,垂直埋深为 50~185 m,围岩为弱风化浅灰~灰白色细晶白云岩,岩体受岩溶作用影响强烈,岩溶砂化现象明显,多呈“砂包石”状,部分呈“砂土”状,散体结构,稳定性极差,如图 2 所示。

b. 厂址区各水工建筑物洞室的水平埋深为 130~450 m,垂直埋深为 90~310 m。调压井及其上室、蝶阀室、压力管道围岩为弱风化浅灰~灰白色细晶白云岩,岩体受岩溶作用影响较强烈,岩溶砂化现象明显,多呈“砂包石”状,部分沿结构面有岩溶砂化现象,充填有灰白色粉砂土,多呈碎裂~散体结构,少部分为镶嵌结构,稳定性差,如图 2 所示。

c. 地下厂房和主变室围岩多为弱风化灰~深灰色斑状细晶白云岩,部分为弱风化浅灰~灰白色细晶白云岩,岩体受岩溶作用影响较弱,仅沿个别结构面或顺层挤压破碎带有岩溶砂化现象,充填有粉砂土,多呈镶嵌结构,局部碎裂结构,稳定性较好,如图 3 所示。

d. 尾水洞和通风洞围岩为弱风化浅灰~灰白色细晶白云岩,岩体受岩溶作用影响相对较强,溶蚀现象较明显,部分呈“砂包石”状,部分沿结构面有岩溶砂化现象,充填有粉砂土,多呈碎裂~散体结构,少部分为镶嵌结构,稳定性差,如图 2 所示。

从不同高程、不同工程部位地下洞室开挖揭示



图2 细晶白云岩整体岩溶砂化现象



图3 细晶白云岩结构面岩溶砂化现象

的情况来看,围岩受岩溶作用影响的强弱程度,从高高程 855 m 洞室(引水隧洞后段)到低高程 585 m 洞室(尾水洞)有所降低;同时也与岩性有关,浅灰~灰白色细晶白云岩受岩溶作用影响相对较强,岩溶砂化现象较明显,多呈“砂包石”状,部分呈“砂土”状,而灰~深灰色斑状细晶白云岩受岩溶作用影响相对较弱,仅见沿少量结构面两侧发生岩溶砂化现象^[3-4]。

由上述岩溶砂化现象可见,研究区开挖揭示的围岩细晶白云岩强度大部分丧失,多呈“砂包石”状或“砂土”状的特殊地质现象是岩溶作用的结果,将这种特殊的地质现象称为细晶白云岩的岩溶砂化现象^[5-6]。

3 细晶白云岩岩石特性试验结果

在研究区不同高程、不同工程部位已开挖洞室内和地表分别对浅灰~灰白色细晶白云岩取样,按相关规程规范^[7-8]进行岩石磨片鉴定试验和物理力学性质试验。

3.1 磨片鉴定试验结果

研究区各工程部位围岩浅灰~灰白色细晶白云岩磨片鉴定试验结果表明:细晶白云岩主要由碳酸盐矿物组成,含少量不规则粒状铁矿。碳酸盐矿物占 90%~95% (质量分数,下同)以上,其中白云石占 90%~95%,石英占 2%,铁质矿物占 2%。该岩石为细粒不等粒结构,块状构造。细晶白云岩岩石化学成分有 CaO、MgO、SiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃ 等,其中 CaO 占 28%~29%,MgO 占 19%~20%,SiO₂ 占 4%~5%,

Fe₂O₃ 占 1.0%~1.1%,Al₂O₃ 占 0.4%~0.5%,碱占 0.01%~0.02%,烧失量占 44.38%~47.59%。

3.2 物理力学试验结果

经调查研究发现,研究区各工程部位的围岩细晶白云岩受风化作用、岩溶作用影响的程度有所不同,综合分析认为研究区内的围岩细晶白云岩可以分为 A、B、C 3 种类型,分别取样进行岩石室内物理力学试验。具体物理力学试验结果如表 1 所示,其中 C 类土工定名为粉土质砾,其粉土质量分数一般为 70%~90%,在 0.1~0.2 MPa 压力下,压缩模量为 18.0~19.9 MPa,饱和固结快剪状态下黏聚力为 34~46 kPa,内摩擦角为 22°~28°。

4 细晶白云岩洞段(室)围岩工程地质分类

4.1 细晶白云岩不同的岩溶砂化现象

研究区各工程部位开挖揭示显示,围岩细晶白云岩受岩溶作用影响的程度不同,其岩溶砂化现象表现主要有 3 种状态^[7-8]:①仅在岩体中个别结构面有岩溶砂化现象,充填有少量粉砂土;②在岩体中主要结构面都有岩溶砂化现象,充填有粉砂土;③岩体整体有岩溶砂化现象,多呈散体结构的“砂包石”状,部分呈“砂土”状。

4.2 围岩工程地质分类原则及分类结果

以 GB 50287—2006《水力发电工程地质勘察规范》^[7]附录 J 围岩工程地质分类为依据,结合细晶白云岩岩溶砂化的不同表现状态,及其物理力学试验成果资料,综合分析后,最终确定研究区细晶白云岩洞段(室)内的围岩工程地质分类原则,如表 2 所示。

根据表 2 中相关内容,结合各工程部位洞段(室)开挖揭示情况,得到研究区细晶白云岩洞段(室)不同类别围岩的特征及综合评分如表 3 所示。

5 不同类别围岩采取的处理措施

根据研究区不同工程部位各开挖洞室确定的不

表 1 研究区不同类型的细晶白云岩室内物理力学试验结果

类型	风化情况	岩溶砂化情况	干密度/ (g·cm ⁻³)	饱和吸水率/%	抗压强度/MPa		抗拉强度/MPa		软化系数	弹性模量/ GPa	泊松比
					湿	干	湿	干			
A	多弱风化、部分新鲜	岩体多无岩溶砂化现象,部分岩体沿个别结构面有岩溶砂化现象,充填有少量灰白色的粉砂土	2.74~2.84	0.4~1.2	65~120	82~150	6~15	8~16	0.80~0.84	40~50	0.20~0.24
B	多弱风化、部分强风化	沿主要结构面有岩溶砂化现象,充填有灰白色的粉砂土	2.52~2.72	1.3~2.7	35~58	61~79	3~5	4~7	0.70~0.75	20~38	0.26~0.28
C	多强风化、部分弱风化	岩溶砂化现象多呈“砂包石”状,部分呈“砂土”状	1.60~1.92								

表2 研究区细晶白云岩洞段(室)围岩工程地质分类原则

分类因素	地质描述	评分
岩石强度	新鲜的细晶白云岩为坚硬岩,其岩石饱和单轴抗压强度为 80 ~ 120 MPa	26 ~ 28
	弱风化的细晶白云岩为坚硬岩,其岩石饱和单轴抗压强度为 60 ~ 80 MPa	20 ~ 24
	多弱风化、部分强风化的细晶白云岩为中硬岩,其岩石饱和单轴抗压强度为 35 ~ 58 MPa	12 ~ 18
	多强风化、局部弱风化的细晶白云岩为软质岩,其岩石饱和单轴抗压强度为 5 ~ 25 MPa	0 ~ 8
岩体完整程度	多弱风化、部分新鲜的细晶白云岩且岩溶砂化情况为第一种状态时,完整程度为较完整	22 ~ 28
	多弱风化、部分强风化的细晶白云岩且岩溶砂化情况为第二种状态时,完整程度为完整性差	16 ~ 20
	多强风化、局部弱风化的细晶白云岩且岩溶砂化情况为第三种状态时,完整程度为破碎	0 ~ 8
结构面状态	细晶白云岩岩体岩溶砂化情况为第一种状态时,结构面状态为微张、充填岩屑、平直粗糙	17(≤10 m ^①) 3 ~ 17(>10 m)
	细晶白云岩岩体岩溶砂化情况为第二种状态时,结构面状态为张开、充填岩屑	12(≤10 m) 3 ~ 12(>10 m)
	细晶白云岩岩体岩溶砂化情况为第三种状态时(无结构面)	0
地下水状态	研究区细晶白云岩洞段(室)内总体干燥,仅个别处渗、滴水	-6 ~ -12 ^②
主要结构面产状	仅新鲜或弱风化、较完整且岩溶砂化情况为第一种状态的细晶白云岩岩体,才进行主要结构面产状的评分	-5 ~ -12 ^③

注:①括号内数值为结构面延伸长度;②一般在前三项评分相加后,取地下水活动状态的渗、滴水项中的中偏低的分值;③依据 GB50287—2006《水力发电工程地质勘察规范》附录 J 的相关规定进行主要结构面产状的评分修正。

表3 研究区细晶白云岩洞段(室)不同类别围岩的特征及综合评分

围岩类别	风化情况	岩溶砂化情况	裂隙发育情况	岩体结构	稳定性	综合评分
Ⅲ	多弱风化、部分新鲜	岩溶作用较弱,仅在个别结构面上有岩溶砂化现象,充填有少量粉砂土	不发育	多呈镶嵌~次块状结构	较好	50 ~ 56(岩石强度 20 ~ 22,完整性 22 ~ 26,结构面状态 17 ~ 3,地下水-6)
Ⅳ	多弱风化、部分强风化	岩溶作用较强,多沿层面和陡倾角裂隙等主要结构面发生岩溶作用,岩溶砂化现象明显,充填有粉砂土	发育	镶嵌~碎裂结构	差	32 ~ 42(岩石强度 12 ~ 18,完整性 16 ~ 20,结构面状态 12,地下水-6 ~ -8)
Ⅴ	多强风化、局部弱风化	岩体受溶蚀作用强烈,整体岩溶砂化现象明显,多呈“砂包石”状,部分呈“砂土”状		散体结构,局部碎裂结构	极差	-12 ~ 4(岩石强度 0 ~ 8,完整性 0 ~ 8,结构面状态 0,地下水-12)

同围岩分类情况,结合内水压力的分布情况,有针对性地进行工程设计(包括临时和永久的支护设计),具体采取的处理措施如下:

a. Ⅲ类围岩洞段。开挖中局部采取了喷 5 ~ 10 cm 厚 C20 混凝土的临时支护处理措施;开挖后采取了挂网喷锚的永久支护处理措施,即边墙顶拱网喷 15 cm 厚 C25 混凝土,底板浇筑 20 cm 厚 C15 素混凝土。

b. Ⅳ类围岩洞段。开挖中采取工字钢(间距 0.8 ~ 1.2 m)和挂网喷 10 cm 厚 C20 混凝土相结合的临时支护处理措施;开挖后采取了钢管(厚度 16 ~ 24 mm)衬砌或钢筋混凝土(C20 混凝土衬砌厚度 40 cm)衬砌措施,钢管衬砌或钢筋混凝土衬砌以外均进行回填灌浆及固结灌浆的永久支护处理。

c. Ⅴ类围岩洞段。开挖中采取工字钢(间距 0.5 ~ 1.0 m)和挂网喷 15 cm 厚 C20 混凝土相结合的临时支护处理措施;开挖后采取了钢管衬砌(厚度 18 ~ 36 mm)或钢筋混凝土(C20 混凝土衬砌厚度 50 cm)衬砌措施,钢管衬砌或钢筋混凝土衬砌以外均进行回填灌浆及固结灌浆的永久支护处理。

在所有洞室的开挖中均采取了“短进尺、弱爆

破、强支护”的施工原则和“边开挖、边支护”的施工方法。

6 结 语

坪头水电站引水隧洞后段及厂址区内岩体细晶白云岩受岩溶作用影响强烈,岩溶砂化现象明显,围岩多呈“砂包石”状,部分呈“砂土”状。该岩溶砂化现象对洞室的块体稳定影响极大,对工程设计和施工安全、进度影响都非常严重。

通过对该区内不同岩溶作用影响程度下的细晶白云岩进行大量的试验,探明了细晶白云岩岩石矿物成分主要由碳酸盐矿物白云石,也查明了该区内 3 种不同岩溶砂化类型的细晶白云岩的物理力学特性。依据 GB50287—2006《水力发电工程地质勘察规范》相关规定,结合各洞室开挖揭示实际情况和试验结果资料,得出该区内细晶白云岩不同类别围岩的特征和综合评分,并对该区内细晶白云岩进行了工程地质分类,确定了各洞室开挖揭示的围岩类别,为工程设计提供了科学合理的地质依据,从而确保了各水工建筑物洞室的围岩稳定、施工安全和工程进度。目前坪头水电站已正常发电 2 年多,期间经过停机放

水安全检查,未发现引水隧洞后段及厂址区各水工建筑物结构有任何异常状况,运行情况良好。

参考文献:

[1] 赵其华,王兰生,何文秀,等. 四川省美姑河坪头水电站厂区岸坡特殊地质现象及其对工程的影响[R]. 成都:成都理工大学,2008.

[2] 何文秀. 美姑河坪头水电站厂址区白云岩砂化成因及其对工程影响研究[R]. 成都:成都理工大学,2008.

[3] 田启文,陈东升,王雅雯. 细晶白云岩溶蚀“砂化”现象对坪头水电站工程的影响[J]. 水电站设计,2012,28(2): 40-46. (TIAN Qiwen, CHENG Dongsheng, WANG Yawen. The impacts of the fine-grained dolomite karstic sandification characteristic for the pingtou hydropower project [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2012,

28(2):40-46. (in Chinese))

[4] 万军伟,梁杏,潘欢迎. 四川省美姑河坪头水电站厂址区岩溶水文地质条件及对工程的影响研究报告[R]. 武汉:中国地质大学(武汉),2008.

[5] 张良喜,赵其华,胡相波,等. 某地区白云岩室内溶蚀试验及微观溶蚀机理研究[J]. 工程地质学报,2012,20(4): 576-584. (ZHANG Liangxi, ZHANG Qihua, HU Xiangbo, et al. Laboratory dissolution test on dolomite and its micro-dissolution mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 576-584. (in Chinese))

[6] 张倬元,王仕天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1980:359-379.

[7] GB 50287—2006 水力发电工程地质勘察规范[S].

[8] DL/T 5338—2006 水电水利工程喀斯特工程地质勘察技术规程[S].

(收稿日期:2014-03-07 编辑:熊水斌)

(上接第 38 页)

[5] 刘晓燕,侯素珍,常温花. 黄河内蒙古河段主槽萎缩原因和对策[J]. 水利学报,2009,40(9): 1048-1054. (LIU Xiaoyan, HOU Suzhen, CHANG Wenhua. Cause of main channel shrinkage occurred to the Inner Mongolia [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1048-1054. (in Chinese))

[6] 赵文林,程秀文,侯素珍. 黄河上游宁蒙河道冲淤变化分析[J]. 人民黄河,1996,21(6): 11-14. (ZHAO Wenlin, CHENG Xiuwen, HOU Suzhen. Analysis of scouring and sedimentation in the channel from Ningxia to Inner Mongolia in the upper Yellow River [J]. Yellow River, 1996, 21(6): 11-14. (in Chinese))

[7] 侯素珍,常温花,王平,等. 黄河内蒙古河段河道萎缩特征及成因[J]. 人民黄河,2007,29(1): 25-26. (HOU Suzhen, CHANG Wenhua, WANG Ping, et al. Characteristics and cause of formation of channel atrophy at Inner Mongolia section of the Yellow River [J]. Yellow River, 2007, 29(1): 25-26. (in Chinese))

[8] 王海兵,贾晓鹏. 大型水库运行下内蒙古河道泥沙侵蚀淤积过程[J]. 中国沙漠,2009,29(1): 189-192. (WANG Haibing, JIA Xiaopeng. Channel deposition and erosion processes of Inner Mongolian Reach of Yellow River following upstream reservoirs' operation [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(1): 189-192. (in Chinese))

[9] 王随继,范小黎,赵晓坤. 黄河宁蒙河段悬沙冲淤量时空变化及其影响因素[J]. 地理研究,2010,29(10): 1879-1888. (WANG Suiji, FAN Xiaoli, ZHAO Xiaokun. Spatial and temporal variations of suspended sediment capacity by erosion or deposition in the Ningmeng reach of the Yellow River and its influencing factors [J]. Geographical Research, 2010, 29(10): 1879-1888. (in Chinese))

[10] 唐德善. 黄河上游干流水库建成后河道的冲淤变化[J]. 水利水电科技进展,1996,16(1): 38-41. (TANG Deshan. Change of the upper Yellow River after reservoir building in the main stream [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1996, 16(1): 38-41. (in

Chinese))

[11] 王彦成,冯学武,王伦平,等. 黄河上游干流水库对内蒙古河段的影响[J]. 人民黄河,1996(1): 5-10. (WANG Yancheng, FENG Xuewu, WANG Luning, et al. Influence of reservoirs in main stream or the upper Yellow River on the reach within Inner Mongolia autonomous region [J]. Yellow River, 1996(1): 5-10. (in Chinese))

[12] 申冠卿,张源锋,侯素珍,等. 黄河上游干流水库调节水沙对宁蒙河道的影响[J]. 泥沙研究,2007(1): 67-75. (SHEN Guanqing, ZHANG Yuanfeng, HOU Suzhen, et al. Impact of water and sediment regulation by reservoirs in the upper Yellow River on Inner-Mongolia reaches [J]. Journal of Sediment Research, 2007(1): 67-75. (in Chinese))

[13] QIN Y, ZHANG X, WANG F, et al. Scour and silting evolution and its influencing factors in Inner Mongolian reach of the Yellow River [J]. J Geogr Sci, 2011, 21(6): 1037-1046.

[14] 吴守信,王彦成. 黄河内蒙古平原段近期河势演变遥感调查及对策[J]. 内蒙古水利,1996(1): 22-25. (WU Shouxin, WANG Yancheng. Investigation and countermeasure of river regime change of the Inner Mongolia reach of the Yellow River in recent years [J]. Inner Mongolia Water Resources, 1996(1): 22-25. (in Chinese))

[15] 冉立山,王随继. 黄河内蒙古河段河道演变及水力几何形态研究[J]. 泥沙研究,2010(4): 61-67. (RAN Lishan, WANG Suiji. Study on channel evolution and hydraulic geometry in the Inner Mongolia reach of the Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2010(4): 61-67. (in Chinese))

[16] 侯素珍,王平,楚卫斌. 2012 年黄河上游洪水及河道冲淤演变分析[J]. 人民黄河,2013,35(12): 15-18. (HOU Suzhen, WANG Ping, CHU Weibin. Study on the flood and the river bed evolution of upper Yellow River in 2012 [J]. Yellow River, 2013, 35(12): 15-18. (in Chinese))

(收稿日期:2013-08-15 编辑:熊水斌)