

黄河宁夏段河道冲淤预测及治理措施

宋天华, 杨 聪, 李颖曼

(宁夏大柳树水利枢纽工程前期工作办公室, 宁夏 银川 750001)

摘要:利用河道冲淤数学模型、经验公式和实测断面法,将模拟结果与实测水沙系列进行对比,并选取代表年份结果进行分析计算,预测未来黄河宁夏段仍将呈现淤积态势。并根据预测结果提出黄河宁夏河段应采取综合治理措施,解决水沙关系不协调问题。

关键词:淤积预测;经验公式;治理措施;黄河宁夏段

中图分类号:TV214

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2016)S1-0083-05

1 研究区概况

1.1 流域概况

黄河宁夏段自中卫市南长滩入境,到石嘴山市头道坎出境,全长397 km,由西向东转南偏西向北偏东流向,境内河势差异明显,下河沿以上61.5 km为峡谷段,下河沿至青铜峡河段长度为119.2 km,河道迂回曲折,河心滩地多,该河段河宽0.2~3.3 km,比降0.8‰~0.9‰,为粗砂卵石河床;青铜峡至石嘴山河段河宽0.2~6.0 km,比降0.1‰~0.2‰,为粗砂河床,该河段沿岸大部分属于干旱地区,降水量少,蒸发量大,加之灌溉引水量大,且无较大支流加入,黄河水量有所减少^[1]。

黄河上游的水利工程尤其是大型水利工程分布较为集中。安宁渡以上已建成龙羊峡、刘家峡、盐锅峡、八盘峡等水库,下河沿至石嘴山河段建有沙坡头和青铜峡水利枢纽,上述工程均以发电为主,其中龙羊峡水库具有多年调节能力,刘家峡水库具有年调节能力,对黄河宁夏段水沙影响较大。其余工程为径流式电站,对黄河宁夏段水沙基本没有影响。除此之外,黄河宁夏段规划的控制性枢纽还有黑山峡水库,该水库是黄河开发利用规划中具有承上启下作用的控制性枢纽工程,位于黄河黑山峡河段的出口,总库容114.8亿m³,工程开发任务以反调节、防洪(防冲)为主,兼顾供水、发电、水资源合理配置等综合利用。

1.2 河道特性

黄河宁夏全河段由峡谷段、库区段和平原段3

部分组成。峡谷段由黑山峡峡谷和石嘴山峡谷组成,总长86.1 km,其中黑山峡峡谷段规划有大柳树水利枢纽;库区段为青铜峡水库及回水区段,自中宁县枣园至青铜峡水利枢纽,全长44.1 km;平原段总长266.74 km,为黄河宁夏段规划治理河段,均为冲积性平原河道。黄河宁夏段从上至下,按其河道特性可分为以下5个河段。

a. 南长滩—下河沿段。该河段为黄河黑山峡峡谷尾端,长61.5 km,河槽束缚于两岸高山之间,河宽150~500 m,平均河段长200 m,纵比降为0.87‰,弯曲率为1.8。受两岸山体挟持,主流常年基本稳定。

b. 下河沿—仁存渡段。该河段长158.9 km,其中下河沿至枣园段长75.1 km,枣园至青铜峡枢纽段长44.1 km(青铜峡水库库区段),青铜峡至仁存渡段长39.7 km。由于黄河出峡谷后,水面展宽,卵石推移质沿程淤积,洪水漫溢时,悬移质泥沙落淤于滩面,河岸具有典型的二元结构,下部为砂卵石,上部覆盖有砂土。河道内心滩发育,汊河较多,水流分散,流势多为2~3汊。该河段为砂卵石河床,河宽500~3000 m,主槽宽300~600 m,青铜峡库区以上河道纵比降为0.80‰,库区以下为0.61‰,弯曲率为1.16。

c. 仁存渡—头道墩段。该河段为平原冲积河道,河床组成由下河沿至仁存渡的砂卵石过渡为砂质,受鄂尔多斯台地控制,右岸形成若干处节点。平面上出现多处大的河湾,心滩较少,边滩发育。其河床演变主要表现为单向侧蚀,主流摆动较大。抗冲能

力弱的一岸,主流坐湾时常造成滩岸坍塌,出现险情,属于弯曲型河道。该河段长 69.2 km,河宽1000~4000 m,平均河宽为 2500 m。主槽平均宽约 1010 m。河道纵比降为 0.15‰,弯曲率为 1.21,主流多靠右岸,左岸顶冲点变化不定,平面变化较大。

d. 头道墩—石嘴山段。该河段受右岸台地和左岸堤防控制,平面上宽窄相间,呈藕节状,断面宽浅,水流散乱,沙洲密布,河床河岸抗冲性差,冲淤变化较大,主流摆动剧烈,两岸主流顶冲点不定,经常出现险情,属于游荡型河道。本河段长 82.8 km,河宽 1800~6000 m,平均河宽约 3300 m。主槽宽 500~1000 m,主槽平均宽约 650 m。河道纵比降为 0.18‰,弯曲率为 1.23。

e. 石嘴山—麻黄沟段。该河段黄河穿行于右岸桌子山及左岸乌兰布和沙漠之间,长 24.6 km,属峡谷河道,河宽约 400 m,纵比降为 0.56‰,受右岸山体和左岸高台地制约,平面外形呈弯曲状,弯曲率为 1.5,主流常年基本稳定。

2 冲淤预测

2.1 设计水沙系列

以 2014 年为现状水平年,2025 年为设计水平年。下河沿水文站为宁夏河段的入口水文站,宁夏河段设计水平年的来水来沙条件以下河沿水文站来水来沙条件作为设计分析基准^[2]。

a. 设计来水量。下河沿水文站径流系列采用新的黄河流域水资源综合规划研究成果,即 1956 年 7 月—2000 年 6 月 44 年系列,该系列是根据 1956—2000 年天然径流过程并考虑设计水平年的工农业

用水及水库调节进行计算,日流量过程是根据设计水平年历年逐月水量与实测历年逐月水量的比值,对历年逐月实测日流量过程进行同倍比缩放求得。设计来水量成果见表 1。

b. 设计来沙量。采用下河沿断面实测水沙资料分析,建立该断面的月沙量和月水量关系,关系式为

$$W_s = kW^a \quad (1)$$

式中: W_s 为月沙量,亿 t; W 为月水量,亿 m^3 ; k 、 a 分别为系数、指数。

根据设计来水量,利用式(1)计算得到设计来沙量,1956—2000 年系列下河沿年均水沙量分别为 299.21 亿 m^3 、1.10 亿 t,其中汛期水沙量占年水沙量的比例分别为 46.2%、82.1%。与同期实测水沙量相比,水量偏少 10.6 亿 m^3 ,沙量偏少 0.24 亿 t,汛期及全年含沙量相差不大。

2.2 计算水沙系列

在《黄河流域综合规划》50 年系列中,泥沙冲淤计算起始年按 2008 年考虑。水沙代表系列长度为 22 年,设计代表系列为 1968—1979 年及 1987—1996 年。本次水沙预测参考《宁夏二期可研》成果,在 22 年系列中,选择 1975—1979 年及 1987—1991 年(对应水沙预测年份为 2015—2025 年)10 年系列,作为宁夏河段的设计水沙系列见表 2^[3]。

设计水沙代表系列 2015 年 7 月—2025 年 6 月,下河沿断面年均水量为 305.66 亿 m^3 ,其中汛期、非汛期水量分别为 143.34 亿、162.32 亿 m^3 ,汛期水量占全年水量比例为 46.90%;年均沙量为 1.11 亿 t,其中汛期、非汛期沙量分别为 0.94、0.17 亿 t,汛期

表 1 下河沿站 1956—2000 年水沙特征值

项目	径流量/亿 m^3			输沙量/亿 t			含沙量/($kg \cdot m^{-3}$)		
	汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年
设计系列	138.08	161.13	299.21	0.90	0.20	1.10	6.6	1.2	3.7
实测系列	164.60	145.19	309.79	1.13	0.21	1.34	6.9	1.4	4.3

表 2 下河沿站设计水沙量成果

年份	对应时段	下河沿水量/亿 m^3			下河沿沙量/亿 t			含沙量/($kg \cdot m^{-3}$)		
		汛期	非汛期	年	汛期	非汛期	年	汛期	非汛期	年
1975	2015.7—2016.6	222.2	182.8	405	1.7	0.26	1.96	7.65	1.42	4.84
1976	2016.7—2017.6	233.4	170.3	403.7	3.08	0.22	3.3	13.2	1.29	8.17
1977	2017.7—2018.6	102.4	149.6	252	0.31	0.12	0.43	3.03	0.8	1.71
1978	2018.7—2019.6	124.3	163.9	288.2	0.4	0.16	0.56	3.22	0.98	1.94
1979	2019.7—2020.6	163.4	160.6	324	1.01	0.16	1.17	6.18	1	3.61
1987	2020.7—2021.6	91.6	148.4	240	0.24	0.11	0.35	2.62	0.74	1.46
1988	2021.7—2022.6	93.51	131.26	224.77	0.65	0.26	0.91	7.00	1.96	4.06
1989	2022.7—2023.6	211.17	174.24	385.41	0.94	0.17	1.11	4.45	1.00	2.89
1990	2023.7—2024.6	104.31	192.63	296.94	0.46	0.12	0.58	4.40	0.65	1.97
1991	2024.7—2025.6	87.14	149.43	236.56	0.60	0.15	0.75	6.89	1.00	3.17
系列平均		143.34	162.32	305.66	0.94	0.17	1.11	5.86	1.08	3.38

沙量占全年沙量比例为 84.39%。

1956—2000 年系列下河沿断面年均水量、沙量分别为 299.21 亿 m³、1.10 亿 t，其中汛期水量为 138.1 亿 m³，占全年水量的 46.15%，汛期沙量为 0.90 亿 t，占全年沙量的 81.82%。由此可见，设计系列与长系列的统计值十分接近，进一步说明了系列选择的合理性。

2.3 河道冲淤量预测

2.3.1 数学模型法

采用经验数学回归模型，根据宁夏河段的河道冲淤演变特性，宁夏河段按 1 个河段计算河道冲淤情况，青铜峡水库按冲淤平衡考虑。依据 1972—2004 年下河沿和石嘴山水文站的实测水沙资料，建立下站输沙率与流量及上站含沙量的关系式：

$$Q_{s下} = KQ_{下}^{\alpha} S_{上}^{\beta} \quad (2)$$

式中： $Q_{s下}$ 为下站输沙率，t/s； $Q_{下}$ 为下站流量，m³/s； $S_{上}$ 为上站含沙量，kg/m³； K 、 α 、 β 分别为公式系数、下站流量指数、上站含沙量指数。各断面率定的输沙率与流量及上站含沙量的相关性较好，各断面汛期相关系数平均为 0.96，非汛期相关系数平均为 0.81。

河段冲淤量的计算如下式：

$$\Delta W_s = (Q_{s上} - Q_{s下} \pm Q_{s区间})T \quad (3)$$

式中： ΔW_s 为河段冲淤量，亿 t； $Q_{s上}$ 为上站输沙率，t/s； $Q_{s下}$ 为下站输沙率，t/s； $Q_{s区间}$ 为区间输沙率，t/s，区间引沙用负号表示，区间支流来沙用正号表示； T 为计算时段，月。

本模型主要用于计算宁夏河段汛期和非汛期冲淤量，考虑了河段内的引水引沙、排水沟排沙、区间支流来水来沙和风积沙。采用 1972 年 11 月—2004 年 10 月下河沿水文站 32 年的实测来水来沙资料对模型进行验证，结果见表 3 和图 1。

表 3 黄河宁夏段年平均冲淤量计算值与实测值比较

河段	实测值			计算值		
	亿 t					
	非汛期	汛期	全年	非汛期	汛期	全年
下河沿—石嘴山	-1.45	3.22	1.77	-1.40	3.20	1.80

由图 1 可见，除极个别特殊年份计算冲淤量与实测冲淤量有较大出入外，其他年份计算冲淤量与实测冲淤量都能很好吻合。因此，该数学模型可用于黄河宁夏段冲淤计算。

2.3.2 经验公式法

《宁夏二期可研》报告中已点绘出下河沿—石嘴山河段汛期和非汛期单位水量冲淤量与来沙系数（包括区间支流来沙、引水引沙、排水沟排沙）的关系，见图 2。

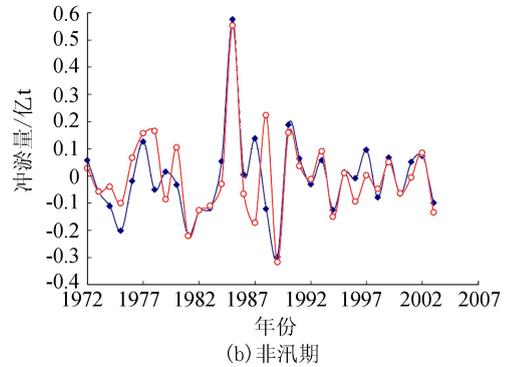
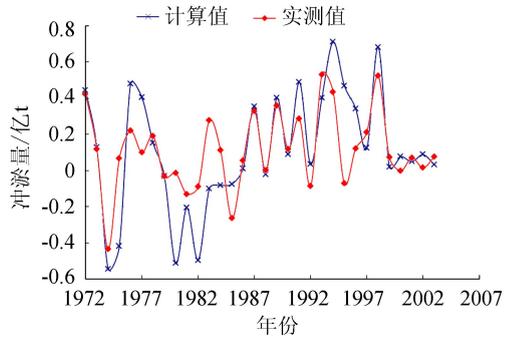


图 1 下河沿—石嘴山河段汛期、非汛期冲淤量计算值与实测值比较

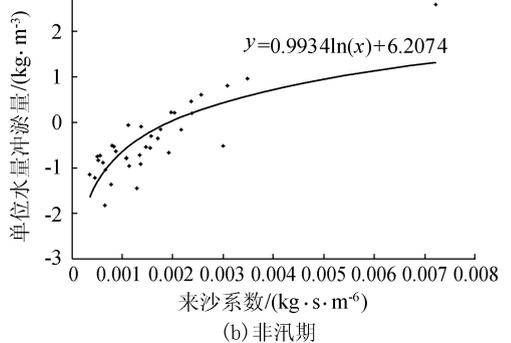
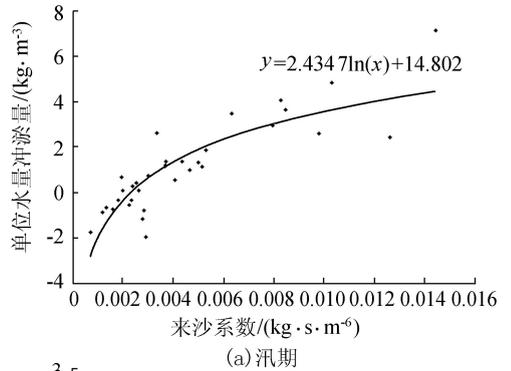


图 2 下河沿—石嘴山河段汛期、非汛期单位水量冲淤量与来沙系数的关系

由图 2 可见，汛期和非汛期单位水量淤积量与来沙系数之间均具有较好的关系，汛期单位水量淤积量随来沙系数的增大而增大，当来沙系数较小时，还可能发生冲刷。由图 2 得到汛期和非汛期单位水量冲淤量与来沙系数的相关关系为

汛期：

$$\Delta W_{s1} = 2.4347 \ln(\zeta_1) + 14.802 \quad (4)$$

非汛期:

$$\Delta W_{s2} = 0.9934 \ln(\zeta_2) + 6.2074 \quad (5)$$

式中: ΔW_{s1} 为采用汛期冲淤量除以下河沿水量得到的单位水量冲淤量, kg/m^3 ; ΔW_{s2} 为采用非汛期冲淤量除以下河沿水量得到的单位水量冲淤量, kg/m^3 ; ζ_1 为下河沿站汛期来沙系数, $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$; ζ_2 为下河沿站非汛期来沙系数, $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 。

采用宁夏河段 1980—2010 年汛期和非汛期水

表 4 黄河宁夏河段汛期冲淤量预测结果

预测时段	水量/ 亿 m^3	沙量/ 亿 t	含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	来沙系数/ ($\text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-6}$)	单位水量冲淤量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	冲淤量/ 亿 t
2015-07—2016-06	222.20	1.70	7.65	2090.86	0.0037	1.1421	0.2538
2016-07—2017-06	233.40	3.08	13.20	2196.25	0.0060	2.3495	0.5484
2017-07—2018-06	102.40	0.31	3.03	963.57	0.0031	0.7709	0.0789
2018-07—2019-06	124.30	0.40	3.22	1169.64	0.0028	0.4478	0.0557
2019-07—2020-06	163.40	1.01	6.18	1537.56	0.0040	1.3711	0.2240
2020-07—2021-06	91.60	0.24	2.62	861.94	0.0030	0.6905	0.0633
2021-07—2022-06	93.51	0.65	7.00	879.93	0.0080	3.0318	0.2835
2022-07—2023-06	211.17	0.94	4.45	1987.07	0.0022	-0.0551	-0.0116
2023-07—2024-06	104.31	0.46	4.40	981.52	0.0045	1.6365	0.1707
2024-07—2025-06	87.14	0.60	6.89	819.93	0.0084	3.1647	0.2758
系列平均	143.34	0.94	5.86	1348.83	0.0046	1.4550	0.1942

表 5 黄河宁夏河段非汛期冲淤量预测结果

预测时段	水量/ 亿 m^3	沙量/ 亿 t	含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	来沙系数/ ($\text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-6}$)	单位水量冲淤量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	冲淤量/ 亿 t
2015-07—2016-06	182.80	0.26	1.42	874.27	0.0016	-0.1713	-0.0313
2016-07—2017-06	170.30	0.22	1.29	814.49	0.0016	-0.1965	-0.0335
2017-07—2018-06	149.60	0.12	0.80	715.49	0.0011	-0.5412	-0.0810
2018-07—2019-06	163.90	0.16	0.98	783.88	0.0012	-0.4368	-0.0716
2019-07—2020-06	160.60	0.16	1.00	768.10	0.0013	-0.3964	-0.0637
2020-07—2021-06	148.40	0.11	0.74	709.75	0.0010	-0.6116	-0.0908
2021-07—2022-06	131.26	0.26	1.96	627.78	0.0031	0.4769	0.0626
2022-07—2023-06	174.24	0.17	1.00	833.31	0.0012	-0.4711	-0.0821
2023-07—2024-06	192.63	0.12	0.65	921.31	0.0007	-1.0036	-0.1933
2024-07—2025-06	149.43	0.15	1.00	714.67	0.0014	-0.3173	-0.0474
系列平均	162.32	0.17	1.08	776.31	0.0014	-0.3669	-0.0632

分析计算结果可知,该河段历年有冲有淤,多年平均呈淤积状态,年均淤积量为 0.1310 亿 t,其中汛期年均淤积 0.1942 亿 t,非汛期年均冲刷 0.0632 亿 t。

3 河道综合治理措施

下河沿—仁存渡河段属非稳定性分汉型河段,河床质为砂卵石。该河段长 158.9 km,除青铜峡库区段 44.1 km,整治河段长 114.8 km。多年来,在中常洪水长期作用下,心滩发育,河势趋于恶化,险情迭出,工农业生产受到严重影响。应采取有效措施,强化工程控制手段,加强该段河道整治。通过两岸修建工程,强化工程控制能力,在调整水流的同时,根据需要采用封堵汉河、修建潜坝、透水丁坝等方法进行“塞支强干”,促使一汉河道发育,另一汉萎缩。

沙资料验证了经验公式,除个别年份计算冲淤量与实测冲淤量有出入外,其他年份计算冲淤量与实测冲淤量吻合较好。

2.4 预测结果

根据确定的设计水沙系列和宁夏河段汛期和非汛期单位水量冲淤量与来沙系数的相关关系,优选《宁夏二期可研》所述经验公式法,计算得到汛期、非汛期历年河道冲淤量,见表 4~5。

也可以通过疏浚、“抽心”、开挖引河,另劈水道等措施,强化工程导流作用,保证送流到位。此外,在心滩稳定河段,可采用节点汉河方案,顺应河道自然特点,固守节点、按两汉行护岸整治,逐步整治成 2 条稳定的汉河^[4]。

仁存渡—头道墩河段属弯曲型河段,河床质为沙质。其河床演变主要表现为单向侧蚀,主流摆动较大。抗冲能力弱的一岸,在主流坐湾时,常造成滩岸坍塌,出现险情。根据河段形势,弯曲型河段的整治措施可分为稳定现状措施和改变现状措施。当河湾发展至适度弯曲时,实施护岸工程对弯道凹岸加以保护,以防止弯道继续恶化,只要弯道的凹岸稳定了,过渡段也可随之稳定;改变现状措施就是因势利导,通过人工裁弯工程将迂回曲折的河道改变为有

适度弯曲的连续河湾,将河势稳定。该段河道整治的重点首先是对凹岸进行防护,避免主流坐湾,按微弯整治方案优化工程布局^[5]。

头道墩—石嘴山河段属游荡型河段,河床河岸抗冲性能差,冲淤变化较大,主流摆动剧烈,两岸主流顶冲点不定,经常出现横河、斜河顶冲大堤险情。针对游荡型河道特点,该河段按中水整治方案布置各种整治工程。采取工程措施,控导住主流,使其游荡摆动范围缩小,避免出现横河、斜河顶冲大堤险情,最终目标是整治成微弯河道。

4 结 语

多年治河工程 and 实践经验表明,河道治理工程措施的建设可以从一定程度上起到稳定河槽、控制河势、减免灾害的作用,但不能彻底解决河道泥沙淤积根源问题。黄河宁夏段上游来水来沙不协调的变化是造成该河段泥沙淤积增加态势的根本原因,而大型水利枢纽在协调黄河水沙关系、减少河道淤积、维持中常洪水河槽行洪能力、保障河段防凌(防洪)安全等方面将发挥重要作用。比如小浪底水利枢纽工程通过科学合理的调水调沙,利于下游河道冲刷,在稳定下游河槽、控制河势、扭转下游河道萎缩局面发挥着至关重要的作用,同时利用河段防洪

(上接第 72 页)

因而限制了人工湿地技术的发展和应用,特别是在与景观建设相结合的潜流人工湿地系统设计中。揭示人工湿地水力学特点对污水净化效果的影响和人工湿地内污染物随水流运移规律,对人工湿地的优化设计和长效运行具有重要的理论指导作用。

参考文献:

- [1] 付贵萍,吴振斌,任明迅,等.垂直流人工湿地系统中水流规律的研究[J].环境科学学报,2001,21(6):720-725.
- [2] SURHONE L M, TENNOE M T, HENSSONOW S F. Treatment wetland[M]. New York: Betascript Publishing, 2010.
- [3] 芦秀青.垂直流人工湿地水力学规律与数学模型研究[D].武汉:华中科技大学,2010.
- [4] 朱伟,华国芬,赵联芳.人工湿地“布水”设计与思考[EB/OL]. [2015-11-22] <http://wenku.baidu.com/view/84f70248c850ad02de80415d.html>
- [5] 宋新山,严登华,陈燕,等.不同布水方式下水平潜流人工湿地水动力学机制研究[J].水利学报,2008,39(7):818-825.
- [6] 宋新山,张涛,严登华,等.不同布水方式下水平潜流

防凌工作,兴利除害。因此,为根本性解决黄河宁夏段水沙关系改变造成的泥沙淤积问题,建议借鉴小浪底水利枢纽工程实际成功经验,在宁夏黄河河道上游修建大的控制性枢纽工程,通过合理调水调沙彻底改变河道淤积及其带来的一系列负面问题。

参考文献:

- [1] 黄河勘测规划设计有限公司,宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司.黄河宁夏河段近期防洪工程建设可行性研究报告[R].银川:宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司,2009.
- [2] 黄河勘测规划设计有限公司,宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司.黄河宁夏河段二期防洪工程初步设计报告[R].银川:宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司,2015.
- [3] 黄河勘测规划设计有限公司,宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司.黄河宁夏河段二期防洪工程可行性研究报告[R].银川:宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司,2014.
- [4] 朱思远,陆立国,顾靖超.黄河宁夏段河道淤积发展趋势分析[J].宁夏工程技术,2010,9(1):79-82.
- [5] 黄河勘测规划设计有限公司,宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司.黄河宁夏河段河道整治规划报告[R].银川:宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司,1991.
(收稿日期:2016-08-24 编辑:王芳)
- [6] 人工湿地的水力效率[J].环境科学学报,2010,30(1):117-123.
- [7] 尹海龙,徐祖信,李松.垂直潜流人工湿地布水方式对水流运动影响探讨[C]//第二十届全国水动力学研讨会文集.北京:海洋出版社,2007.
(收稿日期:2016-11-15 编辑:陈玉国)

