

植物生态护岸技术的效果分析

——以漳河下游陈村险工为例

李婷婷¹, 黄津辉¹, 侯思琰², 林超²

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;
2. 水利部 海河水利委员会 海河流域水资源保护局, 天津 300170)

摘要: 根据植物护岸机理, 以漳河下游河道陈村险工为具体研究对象, 通过数学模型模拟, 分析了植物根部的加筋作用和植物地面以上部分对水流拖曳力的分担作用, 及其对减缓丁坝冲刷的贡献。研究发现: 种植植物后水流对丁坝附近土壤的有效拖曳力虽然随流量的增大而增大, 但增幅减缓, 说明植物的阻滞作用也随流量的增大而增大; 在研究的流量范围内, 种植植物后丁坝的冲刷深度比种植植物前减少了 40~126 cm。

关键词: 植物技术; 抗剪强度; 丁坝; 冲刷; 拖曳力; HEC-RAS; 漳河

中图分类号: TV11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0031-04

Effect Analysis of Plant Ecological Technology on Bank Protection

——A Case Study in the Lower Reach of Zhang River

LI Tingting¹, HUANG Jinhui¹, HOU Siyan², LIN Chao²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Haihe River Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resource, Tianjin 300170, China)

Abstract: In this paper, the bank protection mechanism and effects of plant technology were introduced. A mathematical model was developed to analyze the soil reinforcement by the plant root system and the reductions of flow drag force and scouring around spur dike by the above ground parts of plant based on a flood control construction (spur dike) located in the downstream reach of Zhang River at Chengcun. The results showed that although the effective flow drag force near the soil of spur dike increases with the increasing of flow rate after the planting, the increment decreases, which indicated that the reduction function of the plants increases with the increasing of flow rate. Moreover, the study concluded that the scour depth of the flood control construction (spur dike) reduced by 40 to 126 cm in the range of studied flow rates.

Key words: plant technology; shear strength; spur dike; scour; drag force; HEC-RAS; Zhang River

20世纪70年代, 慕智增^[1]根据海河流域河道的具体情况, 提出用柳治河的措施, 对河道来水进行控制和引导, 减少来水对堤岸的冲刷以及河道横流的产生, 该方法在安平县滹沱河段进行了试验^[2], 取得了良好效果。近年来, 植物技术被大量应用于河道护岸与生态修复, 其中植物根系发挥着重要作用, 国内外研究学者^[3-9]从抗冲性、渗透性等多角度出发, 结合植物根系的力学特征, 研究了植物根系对土体的加筋、锚固作用。聂影等人^[7]认为植物根系一般不改变土体的

内摩擦角, 但能够使土体的黏聚力提高 10 kPa 左右。姚喜军^[9]通过试验发现, 生长初期的柳树根系能明显地提高土壤抗剪强度, 在 0.8 m 土层范围内根土复合体的抗剪强度较无根素土的增加率可达 30.71%, 黏聚力增加率可达 37%。不过, 现有研究大多数考虑的是植物根系对土体强度的增强, 而很少注意植物整体作用对冲刷深度的影响, 也很少涉及对植物的量化种植提出具体建议。

本文在前人研究结果的基础上, 深入分析丁坝的冲刷机

收稿日期: 2012-11-30 修回日期: 2013-04-22 网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1016.015.html>

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划基金项目(NCET-09-0586); 海河流域典型河流生态水文效应研究(201101018); 水利部公益性项目(201201114); 国家国际科技合作专项(S2013BGR0244)

作者简介: 李婷婷(1989), 女, 山西运城人, 硕士生, 主要从事水文水资源研究工作。E-mail: litingting_star@163.com

通讯作者: 黄津辉(1969), 女, 教授, 博士, 主要从事城市生态水文研究工作。E-mail: huangj@tju.edu.cn

理,利用 HEG-RAS 建立一维恒定流数学模型,用于模拟漳河下游河道陈村险工的冲刷。在考虑植物对土壤有效拖曳力影响的情况下,研究种植植物前后丁坝冲刷深度的变化,为植物技术在工程上使用效果的量化评价提供理论支持。

1 模型与方法

1.1 丁坝冲刷的模拟

很多数学模型都可模拟水流对水中建筑物的冲刷,然而很少有专门针对丁坝设置的模块。已有研究表明^[10],河道与海岸工程中丁坝的冲刷与长薄型桥墩冲刷之间具有相似性,因此本文在 HEG-RAS 模型中,将丁坝作为桥墩进行模拟。

对桥墩冲刷的计算,分为压缩冲刷和桥墩局部冲刷两部分。

桥墩作为水中结构,局部阻挡过流,压缩过流宽度,产生水流侧向收缩,减少了断面宽度和过水面积,使水流单宽流量增加,引起河床冲刷,即压缩冲刷。根据来水情况,压缩冲刷又有清水冲刷和动床冲刷之分。设床料的均匀流起动流速为 V_c ,若行近流速 $V < V_c$,属于清水冲刷,反之,则为动床冲刷。在 HEG-RAS 模型中,采用 Laursen(1963)公式计算床沙起动流速 V_c (m/s)。

$$V_c = K_u y_1 D_{50}^{1/2} \quad (1)$$

式中: y_1 为行近水流平均水深(m); D_{50} 为床沙中值粒径(m); K_u 取 6.19。

模型中采用 Laursen(1960)公式计算动床冲刷。

$$y_2 = y_1 \left[\frac{Q_2}{Q_1} \right]^{6/7} \left[\frac{w_1}{w_2} \right]^{k_1} \quad (2)$$

$$y_{s1} = y_2 - y_0 \quad (3)$$

式中: y_{s1} 为平均压缩冲刷深度(m); y_2 为冲刷后压缩断面平均水深(m); y_0 为冲刷前压缩断面平均水深(m); Q_1 、 Q_2 分别为行近段和收缩段断面处的流量(m^3/s); w_1 、 w_2 分别为行近水流与压缩断面水流底宽(m),在 HEG-RAS 中均近似于有效水流在行近段和收缩处的水面宽。 k_1 为床沙输移模式指数,其值参照表 1,其中 $V^* = (g y_1 S_1)^{1/2}$ 为行近段摩阻流速(m/s), ω 为床沙沉速(m/s), g 为重力加速度(m/s^2), S_1 为行近水流的能量梯度(m/m)。

表 1 床沙输移模式指数取值

Table 1 The values of k_1 under different bed sediment transport modes

V^*/ω	k_1	床沙输移模式
< 0.05	0.59	主要为接触质输移
$0.05 \sim 0.20$	0.64	部分悬移质运动
> 0.20	0.69	主要为悬移质输移

清水冲刷是基于 Laursen(1963)的理论,采用以下公式计算:

$$y_2 = \left[\frac{Q_2^3}{C D_m^{2/3} W_2^3} \right]^{3/7} \quad (4)$$

$$y_{s1} = y_2 - y_0 \quad (5)$$

式中: D_m 为压缩段未发生移动床沙颗粒的最小粒径(m),本文在应用中取 $1.25 D_{50}$, C 取 40。

在 HEG-RAS 压缩冲刷的计算过程中,需要使用者输入

的变量只有 D_{50} 和用于计算指数 k_1 的水温,其余变量及计算公式的选取均可由恒定流的计算结果自动获得。由于桥墩阻水使水流结构发生变化,在桥墩周围引起的冲刷称为桥墩局部冲刷。在计算局部冲刷深度时,同样分为动床和清水冲刷两种形式,对于桥墩动床冲刷而言,当桥墩入水长度 L 与行近水流的水深 y_1 之比 $\frac{L}{y_1} > 25$ 时,使用 HIRE 公式(Richardson, 1990)进行计算,当 $\frac{L}{y_1} \leq 25$ 时,使用 Froehlich 公式(Froehlich, 1989)计算。根据本文研究的实际情况(不同流量时比值 L/y_1 的最小值为 29.5),采用 HIRE 公式计算桥墩局部冲刷:

$$y_{s2} = 4 y_1 \left(\frac{k_2}{0.55} \right) k_3 F_r^{0.33} \quad (6)$$

式中: y_{s2} 为桥墩局部冲刷深度(m); y_1 为桥墩趾处水深(m); k_2 为桥墩形状系数; k_3 为来流与桥墩作用角度系数; F_r 为桥趾处上游断面弗劳德数。

桥墩冲刷总深度即为压缩冲刷与桥墩局部冲刷之和,即:

$$y_s = y_{s1} + y_{s2} \quad (7)$$

1.2 植物影响因素的考虑

由于植物的存在,土壤抗剪强度和河道断面的糙率发生改变,同时不同流量下土壤的有效拖曳力也将发生变化。

1.2.1 对土壤抗剪强度及断面糙率的影响

险工周围种植植物后,由于根系的固土作用,土壤黏聚力增强。本研究在模拟中,采用调整土壤粒径来改变相应起动流速的方法来反映黏聚力的变化。具体操作如下:根据现场土壤考察资料,获得土壤级配曲线;由抗剪试验得到种植植物后不同土层不同粒径下土壤的黏聚力和内摩擦角;根据上述结果,利用种植植物后的土壤黏聚力反算得到对应的土壤粒径大小,最后反映到模型中。

另外,河道中存在的植物会对水流产生阻力,影响水流流速分布,并改变断面原有的糙率,已有研究^[11-13]表明,河道种植植物后,糙率的范围大致在 0.020~0.090,结合研究的实际情况,本研究采用 0.04。

1.2.2 有效拖曳力的计算

采用 Yoshiharu Ishikawa^[14]的研究方法计算种植植物条件下的土壤有效拖曳力,该研究旨在阐明不同推移质输移条件下岸栖植物种植密度对有效拖曳力的影响,计算公式如下:

$$F_0 = \beta Q_g H' I \quad (8)$$

$$\beta = 0.0709(a H' + 0.02)^{-0.670} \quad (9)$$

$$a = D/S^2 \quad (10)$$

式中: F_0 为有效拖曳力(N/m^2); β 为有效拖曳力衰减系数; ρ 为水的密度(kg/m^3); H' 为丁坝坝头处水深(m); I 为河床比降; a 为植物粗糙度(m^{-1}); D 、 S 分别为植物胸径和种植间距(m)。

需要强调的是,在计算种植植物后丁坝附近的冲刷深度时,原水流对土壤颗粒造成的拖曳力一部分现由植物承担,因此直接作用于土壤颗粒的有效拖曳力大大降低。HEG-RAS 模型本身不具备自动分离上述两者的功能,为解决这一问题,

本文通过计算土壤有效拖曳力,将不种植植物情况下的总水流拖曳力扣除土壤有效拖曳力得到植物承担的水流拖曳力,再将不同流量下的土壤有效拖曳力通过调整流量大小等价反馈到模型中,由此计算种植植物后丁坝的冲刷深度。

2 模型的建立

漳河发源于太行山区,流域面积 $19\,537\text{ km}^2$,河流全长 460 km ,于岳城水库以下进入平原河道,平原河道自1966年开始断流,长期的连续断流对河道工程及河流生态环境造成了严重影响。陈村险工区位于河北省临漳县陈村北,对应漳河右堤桩号(17+ 100~ 18+ 400),全长约 $1\,300\text{ m}$,现有主要工程:土石丁坝5道,堆石坝1道,围堤245 m,混凝土网格坝4道。1990年岳城放水 $500\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时出险,2、3坝间坍塌 220 m ,抢险时做了盘头坝3道和部分柳厢工程,随后又做圈堤 245 m 。1991年、1998年、2004年先后对该险工进行加固处理,陈村险工为漳河上重要的险工群。各丁坝之间滩地较平坦,高程基本位于 $62.5\sim 67.5\text{ m}$ 。研究所选取的丁坝长 60

m,宽 3 m ,高 2 m 。

利用 HEC-RAS 建立漳河河道的稳定流模型,共涵盖岳城水库以下至徐万仓以上的漳河下游河段,该河段总长约 116.8 km 。利用实测地形资料以及 HEC-RAS 模型断面选取基本原则,自上游之下游,在计算河段上共设置岳城水库、邺镇、明古寺、南尚村、蔡小庄等13个断面,见图1,其中陈村为8号断面(xs8);根据漳河来水情况使用 $Q=500\text{ m}^3/\text{s}$ 确定主河槽位置,以及相应的位距;河床比降为 0.0005 ,平均水温为 $16\text{ }^\circ\text{C}$ 。以2002年、2004年-2006年、2008年蔡小庄水文站5年的实测数据对 HEC-RAS 模型参数进行率定,确定种植植物前曼宁值为 0.04 ;研究丁坝位于陈村和明古寺断面之间,距陈村 492 m ;如前所述,在已建好的河道模型中添加桥台来模拟丁坝。本研究考虑的最大流量为 $800\text{ m}^3/\text{s}$,该工况下最高水位为 68.32 m ,将桥台桥面的最低水平设置为 70 m ,满足河面最高水位不超过桥面最低水平从而不影响水流的条件。由现场考察资料得到土壤颗粒级配,知该险工附近裸地土样的中值粒径 D_{50} 为 0.14 mm 。

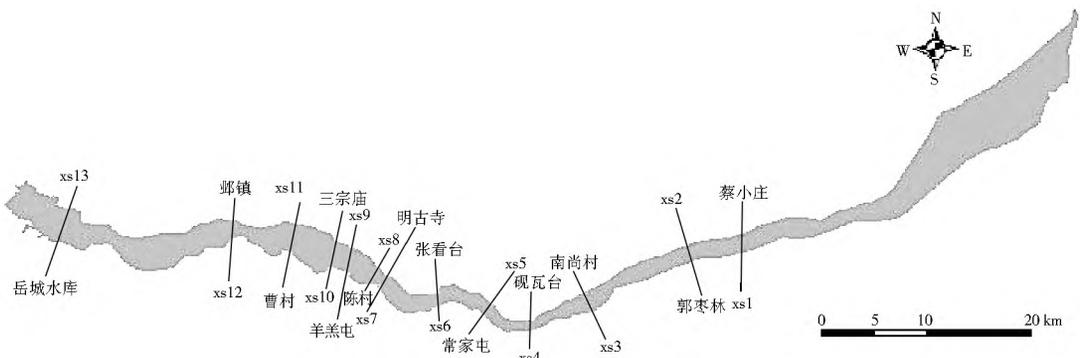


图1 模型中采用的漳河河道断面分布

Fig. 1 Distribution of cross sections in the Zhang River used in the HEC-RAS model

徐林波对漳河丁坝坝头的冲刷进行了深入研究^[15],研究成果得到广泛认可,因此本文采用徐林波公式验证 HEC-RAS 模型模拟丁坝冲刷的有效性和可行性。利用模型计算未栽种植物前丁坝在 $50\sim 800\text{ m}^3/\text{s}$ 流量情况下的冲刷深度,所得结果与徐林波公式^[15]所计算的结果进行比较,见图2所示,可见两者十分相近,因此,利用此模型对丁坝冲刷进行模拟是可行的。

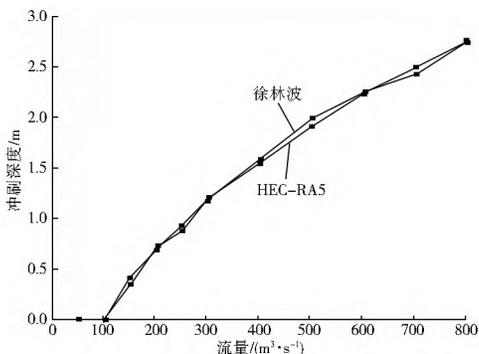


图2 利用模型与徐林波公式对丁坝冲刷深度的计算结果比较
Fig. 2 Comparison of the calculated scour depths using the model and Xu Linbo Formula

3 结果与分析

以漳河下游陈村险工某一丁坝为研究对象,在周围种植

柳树,种植密度为 2.96 m ,柳树平均胸径为 7.87 cm ,平均株高 2.51 m 。种植柳树后,模型中曼宁值相应取为 0.08 ,由于柳树根系提高了土体的黏聚力,结合土壤级配曲线和由试验得到的粒径-土壤黏聚力关系,通过计算在模型中等价地取土壤中值粒径 D_{50} 为 0.16 mm ,反映黏聚力的增加。

种植柳树后,土壤有效拖曳力计算结果见表2,陈村险工丁坝附近土壤拖曳力及植物承担的水流拖曳力分别随流量的变化情况见图3和图4。由图3可知,土壤的有效拖曳力随流量的增大而增加,但增幅逐渐减小,说明植物分担水流拖曳力的作用随流量的增大而增大。由图4可得,不同流量下植物承担的水流拖曳力基本随着流量的增大而增加。

将土壤颗粒的有效拖曳力等价到 HEC-RAS 模型后,计算有植物保护时丁坝附近的冲刷深度,与无植物的冲刷深度进行比较,结果见图5。由图可见,不同流量下,有植物保护时丁坝的冲刷深度有明显减少,减少幅度在 $40\sim 126\text{ cm}$ 之间,这表明植物防护对增强土体抗剪强度,降低土壤颗粒的有效拖曳力,从而起到防护丁坝冲刷的作用。且由图6可知,植物防护对丁坝冲刷的减少程度与流量基本呈正相关关系,说明在一定范围内,流量越大,植物保护丁坝免受冲刷的效果越明显。

表 2 土壤有效拖曳力计算结果

Table 2 The calculated results of effective drag force of the soil

流量 ($m^3 \cdot s^{-1}$)	50	100	150	200	250	300	400	500	600	700	800
丁坝坝头 处水深/m	0	0	0.19	0.32	0.43	0.52	0.69	0.83	0.95	1.07	1.17
有效拖曳 力/($N \cdot m^{-2}$)	0	0	0.86	1.4	1.82	2.16	2.75	3.21	3.58	3.93	4.21

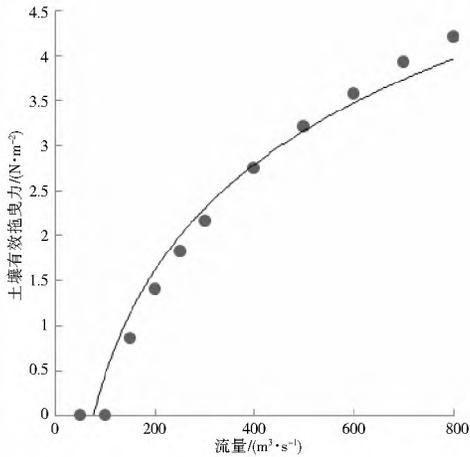


图 3 土壤有效拖曳力随流量的变化趋势
Fig. 3 Variation trend of the effective drag force of soil with the increasing of river flow

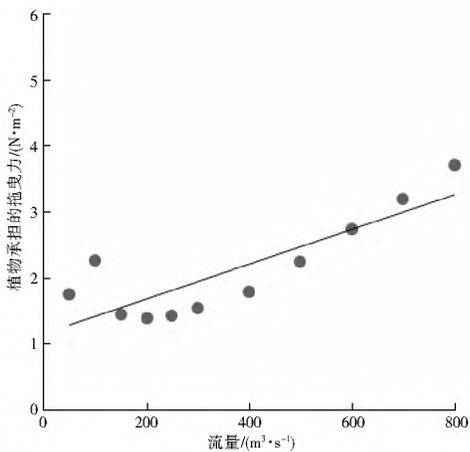


图 4 植物承担的拖曳力与流量的关系
Fig. 4 Relationship between the river flow and drag force imposed on the plant

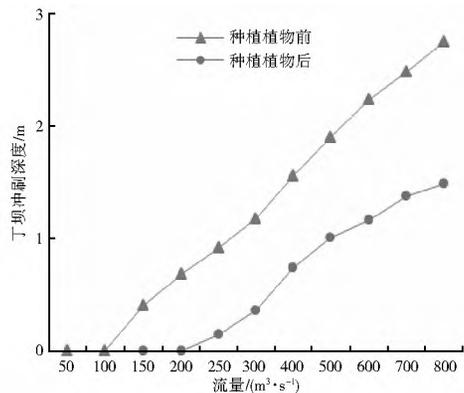


图 5 植物种植前后丁坝冲刷深度
Fig. 5 Comparison of the scour depths of spur dike before and after planting willow

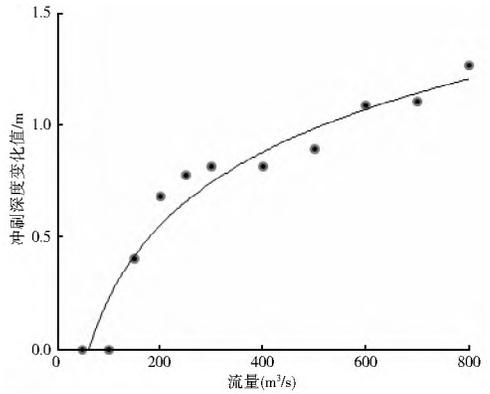


图 6 丁坝冲刷深度的减少值随流量的变化
Fig. 6 Variation trend of the scour depth decrement of spur dike with the increasing of river flow

4 结论

本文以漳河下游陈村险工为例,应用 HEG RAS 模型模拟丁坝有无植物保护时的冲刷情况,主要结论如下。

- (1) 丁坝在植物防护下,冲刷深度减少,减少的幅度约为 40~126 cm。
- (2) 在一定范围内,冲刷深度的减少幅度随流量的增大而增大,说明植物防护技术在大流量时产生的防护效应更加明显。

本研究不仅拓宽了河道水力学模型的应用范围,也为量化地评估植物技术在护岸工程中的影响提供了新的方法和参考依据,是水力学与生态修复相结合的一个新尝试。

对于裸坝和种植植物后的模型中植物密度为零这两种情况下丁坝的冲刷深度问题,本文未做充分研究,因此下一步重点应验证模型从丁坝过渡到植物坝的连续性,并探讨不同植物密度下冲刷深度的变化趋势,从而给出实际工程应用中合理植物种植的具体建议。

参考文献(References):

- [1] 慕智增,董兴启,翟贵邦,等.生物治河工程—深栽柳树坝[J].泥沙研究,1983,(2):38-47. (MU Zhizeng, DONG Xingqi, ZHAI Guibang, et al. Biological River Regulation Project—Deep Planted Willow Dam[J]. Journal of Sediment Research, 1983, (2): 38-47. (in Chinese))
- [2] 慕智增.用柳坝护滩治河的成果报告[J].河北水利水电技术,1998,(3):129-130. (MU Zhizeng. Report of Beach Protection and River Regulation by Using Willow Dam[J]. Hebei Hydropower Technology, 1998, (3): 129-130. (in Chinese))
- [3] 毛久成,陈洪儒,毛新宇.潮河生态修复治理措施及效果分析[J].南水北调与水利科技,2009,7(5):1672-1683. (MAO Jiucheng, CHEN Hongru, MAO Xinyu. Administrable Measure and the Effect Evaluation of Eco-restoration for Chaohe River[J]. South to North Water Transfer and Water Science & Technology, 2009, 7(5): 1672-1683. (in Chinese))
- [4] 王库.植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J].土壤与环境,2001,10(3):250-252. (WANG Ku. Effects of Plant Roots on Soil Anti-erosion[J]. Soil and Environment Sciences, 2001, 10(3): 250-252. (in Chinese))

(下转第 56 页)

- Use Potential and Collocation Scheme for Different Industries in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2): 289-291. (in Chinese)
- [10] 闻常玲, 王莉红, 贺徐蜜, 等. 水库型饮用水水源地生态安全评价及应用[J]. 水资源保护, 2008, 24(3): 91-94. (WEN Changling, WANG Lihong, HE Xumi, et al. Ecological Security Assessment and its Application in Drinking Water Source Reservoirs[J]. Water Resources Protection, 2008, 24(3): 91-94. (in Chinese))
- [11] 石璇, 杨宇, 徐福留, 等. 天津地区地表水中多环芳烃的生态风险[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 619-624. (SHI Xuan, YANG Yu, XU Fuli, et al. Tianjin Area of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water Ecological Risk[J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 24(4): 619-624. (in Chinese))
- [12] 于卉, 郭勇, 刘德文, 等. 武清县污水灌溉情况及影响分析[J]. 水资源保护, 2000, 62(4): 3-6. (YU Hui, GUO Yong, LIU De
- wen, et al. Wastewater Irrigation in Wuqing County and its Impact Assessment[J]. Water Resources Protection, 2000, 62(4): 3-6. (in Chinese))
- [13] 肖伟华, 许新发, 梅亚东. 城市节水指标体系及其评价研究[J]. 江西水利科技. 2005, (3): 14-16. (XIAO Weihua, XU Xirfa, MEI Yandong. Discussion About the Rationality of the Index System of Urban Water Conservation Estimation[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology. 2005, (3): 14-16. (in Chinese))
- [14] (美)T. L. 萨蒂(许树柏等译). 层次分析法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1988: 9. 12-15. (T. L. Saaty (XU Shubai). The Layer Analysis Method[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1988: 9. 12-15. (in Chinese))
- [15] 殷浩文. 水环境生态风险评价程序[J]. 上海环境科学, 1995, 14(2): 11-14. (YIN Haowen. Procedure of Ecological Risk Assessment for Water Environment[J]. Shanghai Environmental Science, 1995, 14(2): 11-14. (in Chinese))

(上接第 34 页)

- [5] 程洪, 谢涛, 唐春, 等. 植物根系力学与固土作用机理研究综述[J]. 水土保持通报, 2006, 26(1): 97-102. (CHENG Hong, XIE Tao, TANG Chun, et al. Overview of Mechanism of Plant Roots Improving Soil Reinforcement and Slope Stabilization[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(1): 97-102. (in Chinese))
- [6] 余芹芹, 乔娜, 胡夏嵩, 等. 植物根-土复合体固坡力学效应及模型研究现状与进展[J]. 中国水土保持, 2011, (7): 51-54. (YU Qinqin, QIAO Na, HU Xiaosong, et al. Slope Fixation Mechanical Effects of Plant Root-Soil Composite System and Present Status and Development of Its Model Study[J]. Soil and Water Conservation in China, 2011, (7): 51-54. (in Chinese))
- [7] 聂影, 陈晓红, 付征耀, 等. 生态护坡根系纤维土强度和变形特性实验研究[J]. 铁道工程学报, 2011, (7): 6-8. (NIE Ying, CHEN Xiaohong, FU Zhenyao, et al. Experimental Research on Strength and Deformation of Root Fiber Stabilized Soil of Ecology Slope[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, (7): 6-8. (in Chinese))
- [8] Chir Cheng Fan, Chir Feng Su. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content[J]. Ecological Engineering, 2008, 33: 157-166.
- [9] 姚喜军. 四种植物根系提高土体抗剪强度有效性研究[D]. 内蒙古农业大学, 2009. (YAO Xijun. Study on the Availability of Four Kinds of Plant Roots to Improve Shear Strength[D]. Inner Mongolia Agricultural University, 2009. (in Chinese))
- [10] 尹则高, 徐统, 迟万清, 等. 浮泥床面桥墩绕流冲刷的数值模拟[J]. 水电能源科学, 2012, 30(11): 81-84. (YIN Zega, XU Tong, CHI Wanqing, et al. Numerical Simulation of Flow around Piers under Fluid Mud Bed[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(11): 81-84. (in Chinese))
- [11] Xin Sun, Koji Shiono. Flow resistance of one-line emergent vegetation along the floodplain edge of a compound open channel[J]. Advances in Water Resources, 2009, 32: 430-438.
- [12] 拾兵, 王川源, 尹则高, 等. 淹没植物对河道糙率的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(2): 295-298. (SHI Bin, WANG Chuanyuan, YIN Zega, et al. Effect of Vegetation Submerged in River on the Roughness Coefficient[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(2): 295-298. (in Chinese))
- [13] 张玮, 钟春欣, 应翰海. 草皮护坡水力糙率实验研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 483-489. (ZHANG Wei, ZHONG Chunxin, YING Hanghai. Experimental Study on Hydraulic Roughness of Revetment with Grass Cover[J]. Advances In Water Science, 2007, 18(4): 483-489. (in Chinese))
- [14] Yoshitaru Ishikawa, Toyokazu Sakamoto, Kunio Mizuhara. Effect of density of riparian vegetation on effective tractive force[J]. The Japanese Forestry Society and Springer Verlag Tokyo. 2003, 8: 235-246.
- [15] 徐林波. 漳河丁坝坝头极限冲刷深度计算方法[J]. 水利工程管理技术, 1992, (4): 42-45. (XU Linbo. Computational Method for Ultimate Scour Depth of Head of Spur Dike on Zhang River[J]. Water Management Technology, 1992, (4): 42-45. (in Chinese))