

# 城市再生水利用风险评价指标体系初探

李金娜, 陆丽芳, 左岩岩

(张家口职业技术学院, 河北 张家口 075000)

**摘要:** 水的再生利用是破解我国水资源短缺问题的重要途径之一, 但是再生水利用对人体健康和环境的影响也是生活污水处理必须面临的挑战, 从而受到人们普遍关注。根据我国再生水回用途径和天津市纪庄子再生水厂的出水水质情况, 构建了再生水利用风险评价指标体系(包括健康风险指标和生态环境风险指标), 并对纪庄子再生水厂的出水与景观用水和地表水分别进行了风险评价, 得出再生水用在不同用途时存在的不同环境风险。

**关键词:** 再生水; 污水回用; 风险评价指标

**中图分类号:** X703   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0052-05

## Discussion of Risk Assessment Index System of Utilization of Urban Reclaimed Water

LI Jina, LU Lifang, ZUO Yanyan

(Department of Civil Engineering, Zhangjiakou Vocational and Technical College, Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** An evaluation index system was developed based on the reuse approaches and quality of reclaimed water from Jizhuangzi reclaimed wastewater treatment plant in Tianjin, and this index system can be used to performed the risk assessment of the reclaimed water from the landscape water and surface water. The environmental risks for the use of reclaimed water under different conditions were obtained, which can provide a better evaluation of the environmental risks of utilization of reclaimed water. The risk assessment index system of urban reclaimed water( including the health risk index and ecological environmental risk index) can provide references for the evaluation of reuse of urban reclaimed water.

**Key words:** reclaimed water; wastewater reuse; risk assessment

城市再生水利用指的是生活和工业污水经过处理后, 作为工业用水或市政用水的水源<sup>[1]</sup>。据统计, 城市污水中除不可利用的污染物之外, 99%以上的是可利用的水, 且城市污水具有就近提取、水量稳定、易于收集等优点。因此, 污水的再生利用是减少水体中的污染物质含量、解决城市缺水问题、改善生态环境的有效途径之一<sup>[2-3]</sup>。

国外污水再生利用起步较早, 在许多缺水较严重的国家建立了污水回用工程, 已经形成了以以色列、日本、美国等国家为代表的几类典型回用模式<sup>[4]</sup>。我国在20世纪50年代已经开始用污水进行农田灌溉, 而将污水回用于城市生活用水及工业生产用水是在近二十多年才发展起来的。“七五”攻关项目“水污染防治及城市污水资源化技术”, 就是对污水再生工艺、不同回用对象的回用技术、回用的技术经济政策等进行了系统研究<sup>[5]</sup>。国内, 在大连市已建成的回用示范工程现运行了十余年, 污水厂排出的二级出水经深度处理后供给附近几家工厂作为工业冷却水, 还作为施工工地用水、园林绿地用水、办公楼冲厕用水<sup>[6]</sup>。其他不少城市也相继建

成或将建设不同规模的污水回用工程。

随着再生水利用范围、规模的不断扩大, 其健康风险逐渐受到国内外广泛关注, 健康风险评估方法逐步开始应用在再生水利用的健康风险评估中。利用风险评估技术研究再生水对人体健康的影响及对环境的影响还是一个崭新的研究领域, 在我国尚处于起步阶段, 即使在国外该项研究也未能达到成熟。近年来, 在污水资源化越来越受到重视的形势下, 有必要构建一个适合国内实际的风险评价体系, 对污水回用的环境和人体健康风险进行正确评价, 使得城市污水再生利用与环境协调<sup>[7]</sup>。只有把再生水风险评估研究作为水资源再生利用理论体系的重要组成部分, 才能保障污水回用的顺利实施, 才能保障水环境的可持续协调发展。

## 1 再生水风险评估组成

环境风险不能简单地被看作是污染事故释放的危险物质造成的危险后果, 它是由风险产生、风险控制、受体暴露等因素所构成的一个系统<sup>[8]</sup>。再生水回用的风险评估系统主

要由以下三部分组成。

(1) 再生水风险识别。再生水风险指的是再生水回用过程中所产生的所有健康风险的源头。再生水风险源是指在再生水的生成过程中使用的及产生的有毒有害的化学物质,如在为水消毒时使用的氯气、二氧化氯等,又如在再生水中已经存在的各类重金属、病菌及有机污染物等<sup>[9]</sup>。再生水风险大小是判断是否发生相关环境事故的先决条件。

(2) 再生水风险评价机制。农业灌溉采用再生水灌溉时,首先亟待解决的问题是,是否对人体健康存在风险问题。污水中存在的肠道病毒及致病菌均会对人体健康造成危害。其次,用于农业灌溉的再生水还必须考虑其对农业生产的影响,比如,再生水中的含氯成分过多,会造成农作物生长期长、果实不丰满、植物晚熟、味道减弱、糖分含量减少和土豆中的淀粉成分减少<sup>[10]</sup>。再生水用于农业灌溉及在回用过程中保证环境和人体健康安全需考虑的因素主要包括四项重要指标:稳定有机物、病原体、重金属和矿物质的总含量<sup>[11]</sup>。再生水用于景观娱乐用水时,主要包括水景回用(如喷泉、水塘、瀑布)和娱乐性回用。其中,水景回用是一种“无身体接触”的行为<sup>[12]</sup>,如划船、钓鱼等活动。而娱乐性回用具有身体接触性,如游泳等。对有身体接触的再生水的制定标准要

比与无身体接触的再生水标准要高的多,通常需要进行三级处理。而城市污水与人体接触机会较多,从人体健康角度考虑,对于回用于城市的再生应进行严格消毒处理。

(3) 再生水风险受体。再生水风险的承受者被称为再生水风险受体。那些与再生水生产、使用有关的人即为再生水风险受体的核心,其次再生水风险受体还包括再生水使用影响范围内的空气、土壤、水、动植物等,这些要素相互联系、相互影响。

## 2 天津纪庄子再生水水质情况

目前,我国在再生水利用的水质要求上,按照回用方向的不同,分别执行相关的水质标准。例如:回用农业时执行《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2005);回用景观环境用水时,对列入水功能区划分范围的水域,执行《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中与划定的功能区相一致的水质标准,对没有列入水功能区划分范围的水域,在不对相邻的水功能区域水体产生影响的情况下,推荐执行《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921-2002);回用城市杂用时推荐执行《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920-2002)。纪庄子污水处理厂出水及城镇污水处理厂污染物排放一级 A 标准和一级 B 标准的水质情况见表 1。

表 1 再生水水质与地表水环境质量标准的比较

Table 1 Comparison of environmental quality standards between the reclaimed water and surface water

单位: pH 无量纲,其余为 mg/L

分析项目	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	纪庄子污水处理厂出水		一级 A 标准	一级 B 标准	纪庄子再生水厂出水
				2001 年和 2002 年平均值	2004 年范围值			
pH 值	6~9	6~9	6~9	6.95		6~9	6~9	7.18
溶解氧 ≥	5	3	2	1.92				6.40
化学需氧量(COD) ≤	20	30	40	65.58	37~78	50	60	
五日生化需氧量(BOD <sub>5</sub> ) ≤	4	6	10	18.40	3.3~13.4	10	20	5
氨氮(NH <sub>3</sub> -N) ≤	1.0	1.5	2.0	23.28	3.66~24.4	5(8)	8(15)	6.75
总磷(以 P 计) ≤	0.2(湖、库 0.05)	0.3(湖、库 0.1)	0.4(湖、库 0.2)	3.32		0.5~1	1~1.5	
铜 ≤	1.0	1.0	1.0	0.09		0.5	0.5	
锌 ≤	1.0	2.0	2.0	0.0585		1.0	1.0	
砷 ≤	0.05	0.1	0.1	0.025	0.0005L - 0.0034	0.1	0.1	
汞 ≤	0.0001	0.001	0.001	0.001	0.00001L 0.000116	0.001	0.001	
镉 ≤	0.005	0.005	0.01	0.00082		0.01	0.01	
铬(六价) ≤	0.05	0.05	0.1	0.0185	0.004L	0.05	0.05	

注:“L”表示低于方法检出限,L前面的数字为方法检出限。

## 3 再生水利用风险评价指标体系

### 3.1 再生水利用风险评价指标体系构成

本文采用层次分析和模糊综合评价相结合的方法,建立了一个多因素、多层次的模糊综合评价模型,利用该评价模型进行再生水利用风险评价,对再生水利用风险程度的高低做出判断,从而为再生水风险管理提供依据。

根据天津市的经济状况、环境质量现状及水资源配给情况等,结合对研究对象健康风险评价和风险源分析的结果和天津纪庄子污水处理厂的出水结果,建立再生水利用风险评价指标体系见图 1。

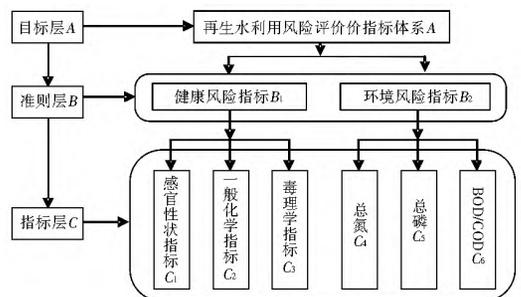


图 1 再生水利用风险评价指标体系

Fig. 1 The risk assessment index system of utilization of reclaimed water

(1) 健康风险评价指标  $B_1$ 。可持续水资源管理指标体系核心内容是建立健康风险指标体系, 主要包括再生水的感官性状指标  $C_1$ 、一般化学指标  $C_2$ 、毒理学指标  $C_3$ 。根据对纪庄子再生水厂出水的监测, 对单项指标进行以下分类。感官性状指标: 色度、pH、臭、悬浮物等; 一般化学指标: Al、Fe、Mn、Zn、氨氮、硫酸盐、氯化物等; 毒理学指标: 氰化物、氟化物、Hg、As、Cr、Ag、挥发性酚类、氯仿等。

(2) 环境风险评价指标  $B_2$ 。根据研究结果, 再生水的总氮、总磷含量超标, 是造成水体富营养化的主要原因。而 BOD/COD 的含量则直接反映了水中有机污染物的多少。所以, 生态环境风险的控制指标为总氮  $C_4$ 、总磷  $C_5$ 、BOD/COD 含量  $C_6$ 。

### 3.2 确定评价指标权重集

本文利用特尔菲法与层次分析相结合的方法确定各项指标的权重, 请专家打分, 统计所有专家意见, 作为确定权重的依据<sup>[13]</sup>。

#### 3.2.1 构造判断矩阵

分层次构造判断矩阵。如系统层  $B$  的 2 个指标对目标层  $A$  可构造出 1 个判断矩阵。

依据再生水利用风险评价指标体系图中的各项因素对上一层各指标的影响程度大小, 运用 9 级标度法, 发放专家意见表, 构造出两两相比较的判断矩阵, 用标度 1、3、5、7、9 表示  $i$  和  $j$  两两因素相比, 其中某一因素比另一因素的重要程度采用同等、稍微、明显、非常、绝对来表示, 用标度 2、4、6、8 表示相邻判断的中值, 因素  $i$  与  $j$  比较的标度和  $j$  与  $i$  比较的标度互为倒数。现以系统  $B_1$ 、 $B_2$  层与目标层  $A$  为例, 构造如下判断矩阵(表 2)。

表 2 判断矩阵  
Table 2 Judgment matrix

$A$	$B_1$	$B_2$
$B_1$	$b_{11}$	$b_{12}$
$B_2$	$b_{21}$	$b_{22}$

$b_{ij}$  表示对  $A$  而言,  $b_i$  相对  $b_j$  的重要性。同理, 可构造其它各层次判断矩阵。

#### 3.2.2 确定各层指标相对权重

利用和法确定下层次元素相对于上层次重要性的权重值:

$$\omega_i = \frac{1}{n} \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{\sum_{k=1}^n b_{kj}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

在计算单准则下排序权向量时, 还必须进行一致性检验。检验方法如下。

(1) 根据公式(2)<sup>[14]</sup> 计算  $CI$  值。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

式中:  $\lambda_{\max}$  为该矩阵最大特征值;  $n$  为矩阵阶数。

(2) 根据判断矩阵阶数查找下表(见表 3) 得出相应的平均随机一致性指标  $RI$ 。

(3) 计算一致性比例  $CR$ 。

$$CR = CI / RI \quad (3)$$

若  $CR < 0.1$ , 说明此矩阵具有满意的一致性, 反之, 若

$CR > 0.1$  需专家重新评分, 并需调整判断矩阵直至具有满意的一致性为止。

表 3 平均随机一致性指标

Table 3 The average random consistency index

判断矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$RI$	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

### 3.2.3 各项指标权重

计算总权重后, 通过专家打分, 根据再生水利用风险评价指标体系, 结合纪庄子再生水厂出水情况, 得到各项指标权重见表 4。

表 4 各项评价指标权重

Table 4 The weights of each evaluation index

目标层	系统层		指标层		总权重
	因素	权重	因素	相对权重	
再生水利用风险评价指标体系	健康风险指标	0.667	感官性状指标	0.571	0.381
			一般化学指标	0.143	0.095
			毒理学指标	0.286	0.191
	环境风险指标	0.333	总氮	0.454	0.151
			总磷	0.455	0.152
			BOD/COD	0.091	0.030

### 3.3 确定评价集 $V$ 和模糊综合评价矩阵 $R$

通过评价集可以反映出再生水利用风险的高低, 依据各评价要素对再生回用过程中的影响程度的大小及发生不利影响因素的可能性大小, 可将再生水利用风险分为 4 个等级, 即: 低风险( $v_1$ )、较低风险( $v_2$ )、较高风险( $v_3$ )、高风险( $v_4$ )。

根据划分的 4 个等级, 由专家组各级指标进行等级评价, 则其隶属度为  $r =$  判断某指标属于  $v_j$  专家个数/专家总数<sup>[15]</sup>。设图 1 中的第  $i$  个指标对评价集  $V$  中第 1 个等级  $v_1$  的隶属度为  $r_{i1}$ 。第  $i$  个指标单因素评价的结果采用模糊集合来表示:  $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}) (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

将指标权重集与评价矩阵相乘即得最终评价结果  $T = R \cdot \omega \cdot V^T$ , 并且给定评价集  $V$  中的值为  $V = (v_1, v_2, v_3, v_4) = (3, 5, 7, 9)$ 。可根据得出的评价数值进行合理的建议。具体内容见表 5。

表 5 再生水利用风险评价结果

Table 5 The risk assessment results of utilization of reclaimed water

评价结果( $T$ )	风险性	考虑建议
$T > 9$	高	否决
$9 > T > 7$	较高	优化改进
$7 > T > 5$	较低	采取防范措施
$T < 5$	低	可实施

## 4 纪庄子再生水利用风险评价

### 4.1 纪庄子出水厂用于景观用水的环境风险评价

采用本文上述研究方法, 根据纪庄子再生水景观用水的水质监测情况, 通过向专家征询, 将各种意见集中, 得到景观用水的评价集, 见表 6。

表6 用于景观用水评价集

Table 6 The evaluation sets for landscape water

指标	评价集			
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>
感官性状指标	0.467	0.267	0.166	0.100
一般化学指标	0.200	0.500	0.233	0.067
毒理学指标	0.200	0.267	0.400	0.133
总氮	0.033	0.300	0.467	0.200
总磷	0.034	0.200	0.533	0.233
BOD/COD	0.100	0.333	0.400	0.167

由表4知,权重  $\omega = (0.381, 0.095, 0.191, 0.151, 0.152, 0.030)$

由表6知,  $R = \begin{bmatrix} 0.467 & 0.267 & 0.166 & 0.100 \\ 0.200 & 0.500 & 0.233 & 0.067 \\ 0.200 & 0.267 & 0.400 & 0.133 \\ 0.033 & 0.300 & 0.467 & 0.200 \\ 0.034 & 0.200 & 0.533 & 0.233 \\ 0.100 & 0.333 & 0.400 & 0.167 \end{bmatrix}$

所以,  $R \cdot \omega = (0.2483, 0.2859, 0.3253, 0.1405)$

$T = R \cdot \omega \cdot V^T = (0.2483, 0.2859, 0.3253, 0.1405) \times (3, 5, 7, 9)^T = 5.7160$

从表5中可以看出,纪庄子再生水用于景观用水时,利用风险水平较低。

#### 4.2 纪庄子再生水排入地表水的环境风险评价

采用专家打分法得出评价集,见表7。

表7 再生水排入地表水评价集

Table 7 The evaluation sets for surface water

指标	评价集			
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>
感官性状指标	0.400	0.467	0.100	0.033
一般化学指标	0.433	0.467	0.067	0.033
毒理学指标	0.133	0.200	0.500	0.167
总氮	0.033	0.133	0.634	0.200
总磷	0.067	0.233	0.567	0.133
BOD/COD	0.133	0.433	0.234	0.200

同上,由表4知,权重  $\omega = (0.381, 0.095, 0.191, 0.151, 0.152, 0.030)$

由表7知,  $R = \begin{bmatrix} 0.400 & 0.467 & 0.100 & 0.033 \\ 0.433 & 0.467 & 0.067 & 0.033 \\ 0.133 & 0.200 & 0.500 & 0.167 \\ 0.033 & 0.133 & 0.643 & 0.200 \\ 0.067 & 0.233 & 0.567 & 0.133 \\ 0.133 & 0.433 & 0.234 & 0.200 \end{bmatrix}$

所以  $R \cdot \omega = (0.2381, 0.3290, 0.3289, 0.1676)$

$T = R \cdot \omega \cdot V^T = (0.2381, 0.3290, 0.3289, 0.1676) \times (3, 5, 7, 9)^T = 6.17$

即,纪庄子再生水排入地表水的环境风险也介于5和7之间,处于较低水平,在利用时可采取一定的防范措施。

以上两个评价的例子结果表明,以层次分析法为基础构建的评价体系能较好的反映出再生水利用的风险性,通过结

合污染物的研究结果,就可以采用相应的风险管理措施,将风险降至可接受的水平。

## 5 结语

在对天津市纪庄子污水处理厂出水水质进行分析的基础上,针对不同用途的水体,构建再生水风险评价指标,即健康风险指标和环境风险指标。将层次分析法和模糊综合评价相结合,建立了再生水利用风险综合评价模型,对用于景观用水、相对于地表水的风险进行了评价,该评价结果在回用评价的基础上更清楚地反应了再生水利用的风险性,可以据此有针对性地采用相应的风险管理的措施,降低风险水平。

本文只提出了再生水利用风险综合评价模型与评价指标,对单个指标的评价对风险综合评价的反映并不直观和准确,在具体评价工作中还需要提出针对性的指标,综合利用各指标的权重针对问题做出评价。

### 参考文献(References):

- [1] 马志毅. 城市污水回用概述[J]. 给水排水 1997, 23(12): 61-63. (MA Zhiyi. City Sewage Reuse Overview [J]. Water & Wastewater Engineering 1997, 23(12): 61-63. (in Chinese))
- [2] 周彤. 污水回用是解决城市缺水的有效途径[J]. 给水排水. 2001, 27(11): 1-6. (ZHOU Tong. Wastewater Reuse is to Solve Water Shortage City Effective Way [J]. Water Supply and Drainage. 2001, 27(11): 1-6. (in Chinese))
- [3] 陈家琦, 于浩, 杨小柳. 水资源学[M]. 科学出版社. 2002: 29-44. (CHEN Jiaqi, YU Hao, YANG Xiaoliu. Water Resources Science[M]. Science Press. 2002: 29-44. (in Chinese))
- [4] 周军, 王佳伟. 城市污水再生利用现状分析[J]. 中国给水排水, 2004, 30(2): 12-17. (ZHOU Jun, WANG Jiawei. Discussion on Municipal Wastewater Reclamation [J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(2): 12-17. (in Chinese))
- [5] 陈秀荣, 张杰, 陈旭. 污水再生回用方向及其水质标准的探讨[J]. 中国给水排水, 2003, 19(1): 92-94. (CHEN Xiurong, ZHANG Jie, CHEN Xu. Directions of Wastewater Reclamation and Reuse and Quality Standard [J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(1): 92-94. (in Chinese))
- [6] 江雄志, 李超, 姜立安. 石家庄市污水回用现状及发展构想[J]. 中国给水排水, 2001, 17(9): 62-64. (JIANG Xiong zhi, LI Chao, JIANG Lian. The Status Quo of City's Wastewater Reuse and the Developing Countermeasure of Shijiazhuang [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(9): 62-64. (in Chinese))
- [7] 仇付国. 污水再生利用发展趋势及其风险评价[J]. 大众科技, 2005, 4(78): 85-86. (QIU Fur guo. Sewage Recycling Development Trend and Risk Assessment [J]. Popular Science, 2005, 4(78): 85-86. (in Chinese))
- [8] 顾传辉, 陈桂珠. 浅议环境风险评价与管理[J]. 新疆环境保护, 2001, 23(4): 38-41. (GU Chuar hui, CHENG Gui zhu. The Study of Environmental Risk Assessment and Management [J]. Environment Protection in Xinjiang, 2001, 23(4): 38-41. (in Chinese))
- [9] 刘洪禄, 吴文勇, 师彦武. 等. 北京市再生水利用潜力与配置方案研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 289-291. (LIU Hong lu, WU Wen yong, SHI Yan wu, et al. Reclaimed Wastewater

- 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))