

# 水生态修复技术在徐州小沿河水源地保护中的应用

王小赞<sup>1</sup>, 尚化庄<sup>2</sup>, 李玉前<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116; 2. 江苏省水文水资源勘测局徐州分局, 江苏徐州 221006)

**摘要** [目的] 探讨水生态修复技术在徐州小沿河水源地保护中的应用效果。[方法] 根据 2012 年监测资料, 对徐州市小沿河水源地水生态修复工程措施的修复能力及效果进行分析评价。[结果] 如果用去除率表示, 修复工程对高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、氨氮(NH<sub>4</sub>-N)和总磷(TP)的修复能力分别大于等于 41.57%、79.49% 和 71.18%。修复工程实施后, 综合水质类别由原来的Ⅳ类提升为Ⅲ类。[结论] 水生态修复工程对水源地水质具有明显的提升作用。

**关键词** 水生态修复; 水源地; 去除量; 去除率; 修复能力

**中图分类号** S181 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)16-0185-04

## Application of Water Ecological Restoration Technology in Protection of Xiaoyanhe Water Source in Xuzhou

WANG Xiao-zan<sup>1</sup>, SHANG Hua-zhuang<sup>2</sup>, LI Yu-qian<sup>2</sup> (1. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116; 2. Xuzhou Sub-Bureau of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Xuzhou, Jiangsu 221006)

**Abstract** [Objective] The aim was to explore the application of water ecological restoration technology in protection of Xiaoyanhe water source in Xuzhou. [Method] On the basis of the monitoring data of 2012, the restoration capacity and restoration effect of water ecological restoration system of Xiaoyanhe water source in Xuzhou were evaluated. [Result] If represented using decreasing rate, the restoration capacity to COD<sub>Mn</sub>, NH<sub>4</sub>-N and TP was greater than or equal to 41.57%, 79.49% and 71.18%, respectively. Water quality was improved from level IV to level III. [Conclusion] The application of water ecological restoration system can significantly improve water quality.

**Key words** Water ecological restoration system; Water source; Decreasing volume; Decreasing rate; Restoration capacity

水生态修复是利用生态系统原理, 按照自然界的自身规律使水体恢复自我修复功能, 采取各种工程、生物和生态措施, 修复或恢复受损伤的水体生态系统的生物群体及结构, 增强水体的自净能力, 重建健康的水生态系统<sup>[1]</sup>。目前, 水生态修复技术主要有 3 种, 即物理修复技术(外源控制、底泥疏浚、水动力循环治理)、化学修复技术(化学除藻、沉淀净化)和生物修复技术(生物过滤技术、微生物技术)。物理修复技术中的水动力循环治理和生物修复技术是目前水源地保护区采用的主要途径之一<sup>[2]</sup>。现有的水动力循环治理技术主要是太阳能水生态修复系统, 生物修复技术主要是植物措施<sup>[3-9]</sup>。植物措施具体包括植被缓冲带、沉水植物和植物浮床<sup>[10-12]</sup>。植被缓冲带可以控制地表径流, 削减面源污染, 沉水植物和植物浮床可以利用植物的茎和根部吸附吸收水体中的氮、磷等营养元素以及有机污染物, 消减水体中的污染物。Koichi 等<sup>[13]</sup>、刘足根等<sup>[14]</sup>研究表明, 水生植物的根部能吸收底质中的氮、磷, 植物体能吸收水中的氮、磷, 所以在沉水植物分布的区域, 总磷、氨氮都低于无沉水植物分布的区域。刘足根等<sup>[14]</sup>研究表明, 不同生活型的水生植物物种的合理镶嵌组合所形成的水生植物群落比单一生活型水生植物氮磷去除率更高, 且净化效果更稳定, 这在实际修复工程中也有部分佐证<sup>[15]</sup>。

小沿河水源地是徐州市目前唯一的地表水集中饮用水源地, 承担着徐州市北区 100 万人口的饮用水供水任务。由于水源地为开放式河道型水源地, 水质易受外部突发性污染事故的影响, 抗风险能力较低。为使小沿河水源地水质稳定

达标, 徐州市水务局从 2010 年起, 在保护区内采用了太阳能、水生植物及种植生态悬床等多种形式相结合的水生态修复系统, 改善提升水源地水质。笔者对小沿河水源地这些水生态修复措施的修复能力及修复效果进行了分析。

### 1 小沿河水源地保护区概况

小沿河饮用水源地位于江苏省徐州市铜山区柳新镇境内, 上至微山湖深湖区, 下至微山湖湖西航道, 属于河道型地表水源地。取水口位于柳新镇北部的小沿河上, 通过小沿河与微山湖湖区大水面连通(图 1)。

小沿河河道总长 15.5 km, 河宽 50~80 m, 水深 4~5 m。取水口至上游 1.6 km 处为一级保护区, 1.6 km 处至上游 3.1 km 处为二级保护区, 上游 3.1 km 处到微山湖入湖口为淮保护区。

水源内的污染物主要来自微山湖集水区域内的工业污水和农业面源污染以及小沿河沿线周边的农田退水、工业废水、村庄污水。

### 2 生态修复工程建设

**2.1 太阳能生态修复工程** 太阳能水生态修复系统的主要功能是在水体中提供好氧和纵向循环环境, 为好氧微生物的生长创造有利条件, 加速好氧微生物对有机污染物的分解、吸收和转化, 降低水体有机污染负荷和氮、磷养分。

作为一种有效控藻、复氧、节能、低成本的环保工程措施, 在小沿河工程中, 太阳能水生态修复系统主要应用在一级保护区。2010—2011 年, 每年安装 2 台太阳能生态修复系统, 每台水循环量为 10 万 L/d, 2012 年增设为 8 台。

**2.2 水生植物工程** 水生植物在水生态系统中的修复过程主要是通过枝叶和根系形成天然的过滤层, 对水中污染物吸附、分解或转化, 促进水体中的养分平衡, 同时, 水生植物释

放的氧气可以增加水体中的溶解氧,抑制有害菌的生长。

水生植物工程主要采取了在二级保护区构建滨岸带(植被缓冲带)及生态悬床相结合的技术。小沿河工程河段设计全长约4.2 km,全线两岸高程30.5~32.8 m,2011年设置湿生—挺水—沉水植物滨岸带,其中沉水植物(包括伊乐藻、刺苦草、龙须眼子菜、水毛茛、轮叶黑藻、狐尾藻)带位于河道两

侧高程30.5~31.2 m的水域;挺水植物(包括再力花、水葱、茭草和黑三棱)带位于河道两侧高程31.2~32.3 m的水陆交错带;湿生植物(梭鱼草、西伯利亚鸢尾、黄菖蒲和千屈菜)带位于河道两侧高程32.3~32.8 m的区域,共布置植物滨岸带约10万m<sup>2</sup>。2012年在河道中心处布设生态悬床6000m<sup>2</sup>,所用植物主要为伊乐藻和刺苦草。

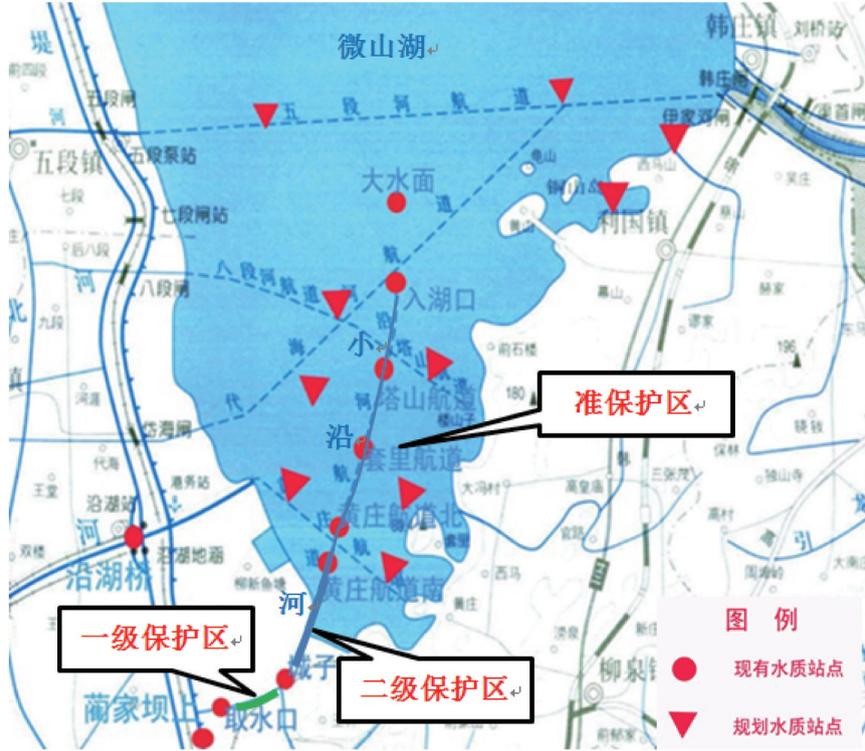


图1 小沿河水源地位置

Fig.1 The location of Xiaoyanhe water source

### 3 成效分析

**3.1 资料选取及处理** 江苏省水环境监测中心徐州分中心对小沿河取水口至微山湖湖区大水面沿线布设了8个断面进行日常监测,其中一级保护区、二级保护区和准保护区均布设1个监测断面,监测频次为每月3次,上、中、下旬各1次,特殊情况进行加测。该研究采用2011—2012年监测资

料,对入湖口断面(上级湖来水)和经过生态修复工程修复过的取水口断面(一级保护区)水质进行对比分析,分析项目包括溶解氧、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、氨氮(NH<sub>4</sub>-N)、总磷(TP)。采用去除率表示修复工程的实际修复效果,式(1)为去除率的计算公式。所用监测资料及相关计算结果见表1和表2。

表1 2011年监测及计算数据

Table 1 The monitoring and calculating data in 2011

日期 Date	COD <sub>Mn</sub>			氨氮 NH <sub>4</sub> -N			总磷 TP		
	取水口 Intake mg/L	入湖口 Estuary mg/L	去除率 Removal rate// %	取水口 Intake mg/L	入湖口 Estuary mg/L	去除率 Removal rate// %	取水口 Intake mg/L	入湖口 Estuary mg/L	去除率 Removal rate// %
02-25	5.9	6.0	1.67	0.16	0.23	30.43	0.038	0.091	58.24
03-06	5.1	5.4	5.56	0.10	0.24	58.33	0.034	0.041	17.07
03-25	5.7	6.0	5.00	0.15	0.26	42.31	0.064	0.100	36.00
04-15	5.9	5.9	0.00	0.13	0.15	13.33	0.022	0.022	0
10-07	5.5	6.9	20.29	0.06	0.18	66.67	0.017	0.033	48.48
10-14	5.8	6.7	13.43	0.13	0.32	59.38	0.093	0.097	4.12
10-25	5.8	6.6	12.12	0.24	0.28	14.29	0.047	0.065	27.69
11-06	5.9	6.5	9.23	0.11	0.15	26.67	0.043	0.046	6.52
11-15	5.9	6.1	3.28	0.15	0.20	25.00	0.053	0.059	10.17
12-14	5.9	6.1	3.28	0.15	0.20	25.00	0.053	0.059	10.17
平均值 Average value	5.7	6.2	7.39	0.14	0.22	36.14	0.046	0.061	21.85
最大值 The maximum value			20.29			66.67			58.24

表 2 2012 年监测及计算数据

Table 2 The monitoring and calculating data in 2012

日期 Date	COD <sub>Mn</sub>			氨氮 NH <sub>4</sub> -N			总磷 TP		
	取水口 Intake mg/kg	入湖口 Estuary mg/kg	去除率 Removal rate//%	取水口 Intake mg/kg	入湖口 Estuary mg/kg	去除率 Removal rate//%	取水口 Intake mg/kg	入湖口 Estuary mg/kg	去除率 Removal rate//%
07-15	6.0	8.4	28.57	0.13	0.29	55.17	0.058	0.087	33.33
07-25	6.0	8.5	29.41	0.12	0.47	74.47	0.038	0.077	50.65
08-06	5.2	8.9	41.57	0.11	0.46	76.09	0.035	0.057	38.60
08-15	5.1	7.7	33.77	0.11	0.46	76.09	0.046	0.072	36.11
08-25	5.8	6.6	12.12	0.13	0.27	51.85	0.049	0.170	71.18
09-05	5.2	8.7	40.23	0.15	0.51	70.59	0.037	0.077	51.95
09-14	4.8	7.0	31.43	0.15	0.51	70.59	0.041	0.080	48.75
09-24	5.3	8.2	35.37	0.08	0.39	79.49	0.038	0.087	56.32
10-15	5.3	6.9	23.19	0.10	0.39	74.36	0.045	0.052	13.46
10-25	5.3	6.9	23.19	0.15	0.45	66.67	0.033	0.070	52.86
11-15	5.7	6.1	6.56	0.15	0.45	66.67	0.023	0.059	61.02
11-26	5.3	5.3	0	0.05	0.10	50.00	0.026	0.070	62.86
12-05	5.3	6.0	11.67	0.10	0.34	70.59	0.034	0.052	34.62
平均值 Average value	5.4	7.3	24.39	0.12	0.39	67.89	0.039	0.078	47.05
最大值 The maximum value			41.57			79.49			71.18

$$C = \frac{I-O}{I} \times 100\% \quad (1)$$

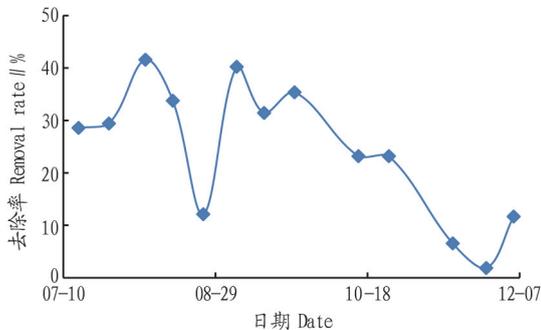
式中,  $C$  为去除率;  $I$  为入湖口处污染物含量, mg/L;  $O$  为取水口处污染物含量, mg/L。

### 3.2 高锰酸盐指数、氨氮、总磷去除效果分析

**3.2.1 去除效果年际分析。**入湖口断面处的水体在淮水源地保护区上游须经过淮保护区、二级保护区、一级保护区及各区内水生态修复工程修复后才能到达取水口处。2011、2012 年监测资料分析结果表明, 修复工程启用后, COD<sub>Mn</sub>、氨氮、总磷含量都有明显的去除效果。COD<sub>Mn</sub> 的平均去除率由 7.39% 增大到 24.39%, 最大去除率由 20.29% 增大到 41.57%; 氨氮的平均去除率由 36.14% 增大到 67.89%, 最大去除率由 66.67% 增大到 79.49%; 总磷含量平均去除率由 21.85% 增大到 47.05%, 最大去除率由 48.48% 增大到 71.18%。

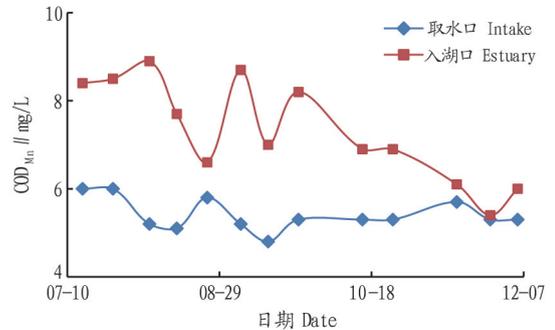
#### 3.2.2 去除效果年内变化。

**3.2.2.1 COD<sub>Mn</sub>。**由表 2 可知, 2012 年 COD<sub>Mn</sub> 去除率最大值为 41.57%, 最小值为 0, 年内变幅较大, 去除率的变化与入湖口 COD<sub>Mn</sub> 年内变化趋势一致(图 2、3)。

图 2 2012 年 COD<sub>Mn</sub> 去除率变化Fig.2 The removal rate of COD<sub>Mn</sub> in 2012

分析认为, 实际去除率的大小并非仅与季节气候条件直接相关, 还与入湖口水体的污染物浓度相关, 入湖口水体污

染物浓度越大, 去除效果越明显。若用去除率来表示修复效果, 则小沿河水生态修复工程对 COD<sub>Mn</sub> 的修复能力  $\geq 41.57\%$ 。

图 3 2012 年 COD<sub>Mn</sub> 年内变化Fig.3 The change of COD<sub>Mn</sub> in 2012

**3.2.2.2 氨氮。**由表 2 可知, 2012 年氨氮去除率的最大值为 79.49%, 最小值为 50.00%, 氨氮的去除率与入湖口氨氮浓度有很好的相关关系, 含量越高, 去除率越大(图 4)。

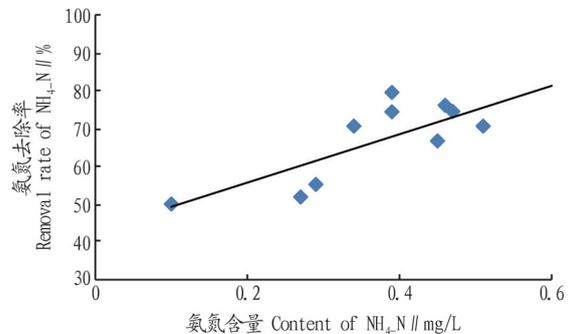


图 4 氨氮去除率与入湖口氨氮含量之间的关系

Fig.4 The relation between removal rate and content of NH<sub>4</sub>-N in estuary

**3.2.2.3 总磷。**由表 2 可知, 2012 年总磷去除率的最大值为

71.18%,最小值为 13.46%,去除率与入湖口总磷年内变化趋势一致,含量越高去除率越大(图 5)。若用去除率来表示,则小沿河水生态修复工程对总磷的修复能力 $\geq 71.18\%$ 。

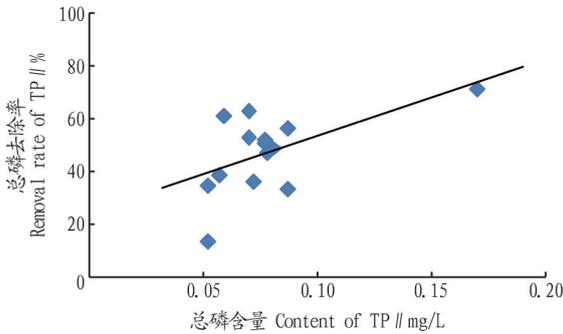


图 5 总磷去除率与入湖口总磷含量的关系

Fig.5 The relation between removal rate and content of TP in estuary

马井泉等<sup>[16]</sup>研究表明,在监测的 30 d 内,梭鱼草、茭草、香蒲和苦草湿地内氨氮的净化效率分别达 88.0%、87.4%、92.2%和 97.0%。挺水植物湿地和沉水植物湿地对磷的净化效果均非常显著。梭鱼草、茭草、香蒲和苦草湿地内总磷的净化效率分别为 90.0%、97.0%、90.0%和 98.0%。小沿河保护区内所布设的水生植物都包含有梭鱼草、茭草、香蒲和苦草,同时与其他植物物种合理镶嵌组合有着更明显的效果。

**3.3 溶解氧变化分析** 选用取水口断面 2012 年 5—9 月资料与 2011 年同期资料进行对比分析。由图 6 可知,由于水生植物可以释放氧气,增加水中的溶氧量,所以溶解氧含量有明显增加,平均增长率为 18.48%。因为植物光合作用与气温、日照强度、日照时数等有关,所以夏季 7—9 月增幅明显大于 5—6 月。但溶解氧同时受到大气复氧等气候条件影响,导致其变化规律不特别明显。

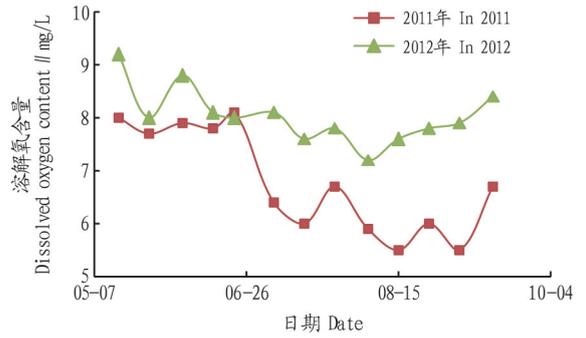


图 6 取水口断面溶解氧对比

Fig.6 The comparison of dissolved oxygen in the section of intake

**3.4 水质分析评价** 参照我国地表水环境质量标准,依据表 2 中的监测结果对入湖口和取水口水质进行对比分析评价,根据各水质指标的水质类别对比见表 3。从  $COD_{Mn}$ 、氨氮、总磷含量 3 个方面进行分析。

**3.4.1  $COD_{Mn}$** 。在 13 个监测时间点,入湖口的 III 类占 15.38%,IV 类占 84.62%,取水口均为 III 类。可以看出,仅据  $COD_{Mn}$  来看,水生态修复工程运行后,84.62%的时间点水质级别由 IV 类提升为 III 类。

**3.4.2 氨氮**。在 13 个监测时间点,入湖口的 III 类占 15.38%,II 类占 76.92%,I 类占 7.69%,取水口均为 I 类。可以看出,仅据氨氮来看,水生态修复工程运行后,76.92%的时间点,水质级别由 II 类提升为 I 类,15.38%的时间点水质级别由 III 类提升为 I 类。

**3.4.3 总磷**。在 13 个监测时间点,入湖口的 II 类占 92.31%,III 类占 7.69%;取水口均为 II 类。仅据总磷来看,尽管 92.31%的时间点水质级别没有提升,但从总磷含量可以看出水质本身还是有明显的改善。

表 3 水质指标对比

Table 3 The comparison of water quality indicators

日期 Date	$COD_{Mn}$		$NH_4-N$		TP	
	取水口 Intake	入湖口 Estuary	取水口 Intake	入湖口 Estuary	取水口 Intake	入湖口 Estuary
07-15	IV	III	II	I	II	II
07-25	IV	III	II	I	II	II
08-06	IV	III	II	I	II	II
08-15	IV	III	II	I	II	II
08-25	IV	III	II	I	III	II
09-05	IV	III	III	I	II	II
09-14	IV	III	III	I	II	II
09-24	IV	III	II	I	II	II
10-15	IV	III	II	I	II	II
10-25	IV	III	II	I	II	II
11-15	IV	III	II	I	II	II
11-26	III	III	I	I	II	II
12-05	III	III	II	I	II	II

**3 结论**

自 2010 年 5 月,小沿河水源地陆续建设了太阳能以及水生植物等水生态修复工程,根据入湖口和取水口的水质监测资料,对水生态修复工程的修复能力及修复效果进行分析

研究,得出以下结论:

(1)小沿河水生态修复工程对污染物指标去除效果明显。根据对 2012 年监测资料分析计算,若用去除量来表示, (下转第 191 页)

**2.3 茎流的小波方差图** 小波方差图是时间序列下小波方差随尺度  $a$  的变化过程。由式(5)可知,小波方差图能反映信号波动随尺度  $a$  的分布情况。因此,小波方差图可用来确定信号的主周期,且通过小波方差图可以查找一个时间序列中起主要作用的尺度。由图 5 可知,茎流序列在 09:00、13:30、17:00 左右尺度的小波方差极值表现较为显著,说明南方避雨番茄日茎流量变化过程存在 09:00、13:30、17:00 时间附近的主要周期,这 3 个周期的波动决定着番茄茎流速率在一天时间内的变化特征。

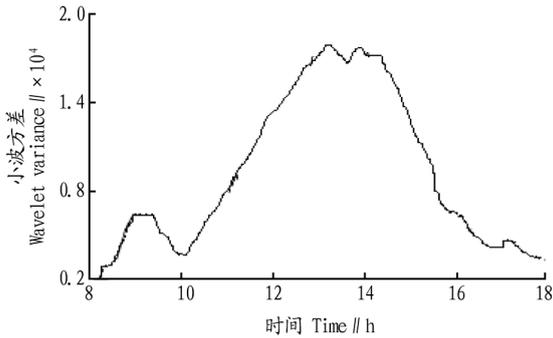


图 5 南方地区避雨栽培番茄日茎流量变化的的小波方差

Fig.5 Morlet wavelet variance of tomato daily stem flow of rain cultivation in the southern region

**3 结论** 小波分析具有时频局部化特性,可以用来描述茎流时间序列的精细结构特征,为分析其时间尺度变化及分布情况提供一种新途径。利用 Morlet 小波变换对南方地区避雨栽培番茄日茎流变化做时间尺度分析。结果显示,日茎流量在 09:00、13:30、17:00 左右存在着显著的周期变化。

(上接第 188 页)

小沿河水生态修复工程对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的修复能力  $\geq 3.7 \text{ mg/L}$ ;对氨氮的修复能力  $\geq 0.36 \text{ mg/L}$ ;对总磷的修复能力  $\geq 0.121 \text{ mg/L}$ 。如用去除率来表示,则小沿河水生态修复工程对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的修复能力  $\geq 41.57\%$ ;对氨氮的修复能力  $\geq 79.49\%$ ;对总磷的修复能力  $\geq 71.18\%$ 。

(2)小沿河水生态修复工程对水质有显著提升作用。根据对 2012 年入湖口和取水口水质监测资料对比分析可以发现,单项指标  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的水质类别可由原来的 IV 类提升为 III 类;单项指标氨氮的水质级别可由原来的 III 类提升为 I 类;单项指标总磷的水质级别可由原来的 III 类提升为 II 类;综合水质类别由原来的 IV 类提升为 III 类。

#### 参考文献

[1] 颜雷,田庶慧.水生态环境修复研究综述[J].水利科技与经济,2011,17(9):73-75.  
 [2] 叶建锋,操家顺.生态修复技术在保护水库水源地中的应用[J].环境科学与技术,2004,27(2):61-63.  
 [3] 鲁巍,郑燕秋,张韵.太阳能水生态修复系统在水库水质保障体系中的应用研究[J].给水排水,2012,38(S2):73-75.  
 [4] 王文林,殷小海,卫臻,等.太阳能曝气技术治理城市重污染河道试验研

究[J].中国给水排水,2008,24(17):44-48.  
 [5] 陈江,汪丽,王东洲,等.水动力循环复氧控藻技术在城市景观水体富营养化治理中的应用研究[J].安徽农业科学,2013,41(10):4439-4441.  
 [6] 关小侠,李钢,李家振,等.太阳能水生态修复系统在水源地保护工程中的应用[J].中国资源综合利用,2014,30(4):45-47.  
 [7] 宋旭,蔡继杰,丁学锋,等.富营养化水体的物理-生态修复技术发展综述[J].农业环境科学学报,2007,26(S1):465-468.  
 [8] 李文朝.富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究[J].中国环境科学,1997,17(1):53-57.  
 [9] 陈煜权.河道型水源地水体原位生态净化工程研究:以小沿河为例[J].浙江水利科技,2012(4):15-17.  
 [10] 张建春,彭补拙.河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建[J].生态学报,2003,23(1):56-63.  
 [11] 游灏.五种沉水植物对富营养化水体的生态适应性研究[D].南京:南京农业大学,2006.  
 [12] 张宇,王圣瑞,李重祥,等.沉水植物对富营养化水体的修复作用及其研究展望[J].内蒙古草业,2009,21(1):17-21.  
 [13] TAGUCHI K, NAKATA K. Evaluation of biological water purification functions of inland lakes using an aquatic ecosystem model [J]. Ecological modelling, 2009, 220(18): 2255-2271.  
 [14] 刘足根,张萌,李雄清,等.沉水-挺水植物镶嵌组合的水体氮磷去除效果研究[J].长江流域资源与环境,2015,24(S1):171-181.  
 [15] 张萌,曹特,过龙根,等.武汉东湖水生植被重建及水质改善试验研究[J].环境科学与技术,2010,33(6):154-159.  
 [16] 马井泉,周怀东,董哲仁.水生植物对氮和磷去除效果的试验研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2005,3(2):130-134.

#### 参考文献

[1] 张鲁鲁,蔡焕杰.温室膜下滴灌甜瓜茎流变化规律研究[J].吉林水利,2011(5):18-21.  
 [2] 庞鸿宾.节水农业工程技术[M].郑州:河南科学技术出版社,2000.  
 [3] 李国臣,于海业,马成林,等.作物茎流变化规律的分析及其在作物水分亏缺诊断中的应用[J].吉林大学学报(工学版),2004,34(4):573-577.  
 [4] BUNDE A, HAVLIN S, KOSCIELNY-BUNDE E, et al. Long term persistence in the atmosphere: Global laws and tests of climate models[J]. Physica A, 2001, 302(1/2/3/4):255-267.  
 [5] 谢先红,崔远来,周玉桃.参考作物腾发量时间序列的长程相关性和多重分形分布[J].水利学报,2008,39(12):1327-1333.  
 [6] 张艳艳,钟德钰,吴保生.黄河流域流量的多时间尺度现象[J].水科学进展,2012,23(3):302-309.  
 [7] LABAT D, RONCHAIL J, GUYOT J L. Recent advances in wavelet analyses; Part 2. Amazon, Parana, Orinoco and Congo discharges time scale variability [J]. Journal of hydrology, 2005, 314: 289-311.  
 [8] COULIBALY P, BURN D H. Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows [J]. Water resources research, 2004, 40(3): 1-14.  
 [9] LABAT D. Recent advances in wavelet analyses; Part 1. A review of concepts [J]. Journal of hydrology, 2005, 314: 275-288.  
 [10] 高成. Matlab 小波分析与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.  
 [11] 邵光成,蓝晶晶,仝道斌,等.灌排方案对避雨番茄需水特性与产量的影响[J].排灌机械工程学报,2013,31(1):75-80.  
 [12] 黄磊,张志山,吴攀.沙坡头地区多年降水量时间序列的小波分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2010,46(5):63-66.  
 [13] 邵晓梅,许月卿,严昌荣.黄河流域降水序列变化的小波分析[J].北京大学学报(自然科学版),2006,42(4):503-509.  
 [14] 关履泰.小波方法与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.