

河流线型对河流自净能力的影响

何嘉辉^{1,2}, 潘伟斌^{1,2}, 刘方照^{1,2}

(1.华南理工大学环境与能源学院, 广东 广州 510006;

2.广州市水资源与水环境行业工程技术研究中心, 广东 广州 510006)

摘要:为研究河流线型对河流自净能力的影响,选取5条具有不同河流线型的河涌进行研究,以弯曲度和分形维数表征河流线型,以TP、NH₃-N、NO₂-N、NO₃-N、COD_{Cr}、TOC、DOC、叶绿素(Chlorophyll)和蓝绿藻藻蓝蛋白(BGA-PC)等9项水质指标沿程削减率表征河流自净能力,并分析各研究河段的悬浮微生物生物量和生物活性,探讨河流线型影响河流自净能力的作用机制。结果表明:多项水质指标沿程削减率随河流线型蜿蜒程度的增加而提升。在直立式浆砌石挡墙河段,河流线型通过提高悬浮微生物生物活性,进而增强河流自净能力,使TP、NH₃-N、NO₃-N、DOC、Chlorophyll和BGA-PC的沿程削减率显著提升;而在格宾石笼挡墙河段,河流线型通过增加悬浮微生物生物量和生物活性,进而增强河流自净能力,使NO₂-N、COD_{Cr}、TOC和DOC的沿程削减率显著提高。

关键词:河流线型;弯曲度;分形维数;自净能力

中图分类号:X522;X171.4

文献标志码:A

Influences of the River Linear Forms on River Self-purification Capacity

He Jiahui^{1,2}, Pan Weibin^{1,2}, Liu Fangzhao^{1,2}

(1.School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2.Engineering and Technology Research Centre of Guangzhou Water Resource and Water Environment, Guangzhou 510006, China)

Abstract: 5 stream segments with different river linear forms were investigated to reveal the influence of the river linear forms on river self-purification capacity. River linear forms were characterized by sinuosity and fractal dimension. Furthermore, along-path reduction rates of 9 water quality indicators including TP, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, COD_{Cr}, TOC, DOC, Chlorophyll and Blue-green algae phycocyanin (BGA-PC) were used for characterization of the river self-purification capacity. Suspended microbe biomass and bioactivity was analyzed and mechanism of the influence of river linear forms on the river self-purification capacity was discussed. The results indicated that most of the along-path reduction rates of water quality indicators rose with the meander increase of river linear forms. In the stream segment with the river bank of vertical masonry retaining wall, such river linear form affected the river self-purification capacity by enhancing suspended microbe bioactivity, significantly increasing the along-path reduction rates of TP, NH₃-N, NO₃-N, DOC, Chlorophyll and BGA-PC. In the stream segment with the river bank of gabion retaining wall, the river linear form affected the river self-purification capacity by increasing suspended microbe biomass and bioactivity, significantly improving the along-path reduction rates of NO₂-N, COD_{Cr}, TOC and DOC.

Keywords: River Linear Form; Sinuosity; Fractal Dimension; Self-purification Capacity

CLC number: X522; X171.4

天然河流的线型通常是蜿蜒曲折的,在许多河流修复案例、河流健康评价体系以及水生生态系统的相关研究中,均将河流线型作为主要考

虑因素^[1-6],但关于河流线型对河流自净能力影响的定量研究却少有报导^[7-8]。本研究通过分析具有不同河流线型河段的水质指标沿程削减率、悬浮

收稿日期:2014-11-12

基金项目:广东省科技计划项目(2009B030801003);中山市科技计划项目(20092A142)基金资助

作者简介:何嘉辉(1988-),男,硕士研究生。研究方向:生态工程与环境修复。E-mail: jiahui.he@foxmail.com

通信作者:潘伟斌, E-mail: ppwbpan@scut.edu.cn

微生物生物量和生物活性,探讨河流线型对河流自净能力的影响,以为河流生态化整治提供参考。

1 研究对象与方法

1.1 研究河段概况

在探讨河流线型对河流自净能力影响的同

表1 研究河段概况

河段名称	河宽/m	水深/m	中心线长度/m	流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	起始点坐标	护岸形式
磨碟沙涌东段	7.0	2.1	248	0.03	N 23° 06'16.40" E 113° 20'40.10"	直立式
磨碟沙涌西段	7.0	2.1	206	0.03	N 23° 06'16.60" E 113° 20'32.50"	浆砌石挡墙
裕丰涌	12.8	1.7	283	0.50	N 22° 56'54.69" E 113° 28'52.99"	格宾石
金紫涌	27.0	1.9	460	0.17	N 23° 05'39.61" E 113° 33'23.65"	笼挡墙
南派涌	16.7	1.7	183	0.62	N 22° 56'39.41" E 113° 28'51.54"	

磨碟沙涌位于海珠区,西段为东段下游;裕丰涌和南派涌位于番禺区,通过亚运城内莲花湖连通;金紫涌位于黄埔区。研究所选择的河段均已完成河涌整治,整治内容包括截污和清淤,研究河段沿程除雨水排水口外,无其他的点源或面源污染源。为减少因河宽或宽深比的变化给研究带来的误差^[8],选择河宽沿程变化在10%以内的河段进行调查,河宽和宽深比可近似视为沿程不变。根据Snow的统计^[9],河流在大于河宽1~2个数量级的区间上具有分形性质,所以调查河段的长度确定为河宽的1~2个数量级。

1.2 河流线型和自净能力表征指标

1.2.1 河流线型表征指标 选择在国内外相关文献中常用于描述河流平面形态的弯曲度和分形维数作为河流线型的表征指标。弯曲度作为河流线型蜿蜒程度的一个表征指标被广泛使用和接受,弯曲度计算公式为^[10]:

$$S = \frac{L_T}{L_0}$$

式中: L_T 为沿河道中心线测量的河道长度; L_0 为上下游断面间的直线距离。

分形理论自诞生以来,被广泛用于河流形态的分析^[11]。文章采用计算盒维数的方法计算研究河道的分形维数。调查河段的河道中心线从河涌整治工程设计图中获得;利用Arc GIS 10.0软件计算河道中心线长度和上下游断面间的直线距离,结合Arc GIS 10.0和Excel软件计算河

时,为了解在不同护岸形式下河流线型对河流自净能力影响的差异,选择直立式浆砌石挡墙和格宾石笼挡墙两种不同的护岸形式进行研究。

在广州市选择了5条河段开展调查研究,调查河段概况见表1。

段分形维数^[12]。

1.2.2 河流自净能力表征指标 采用TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 COD_{Cr} 、TOC、DOC、叶绿素(Chlorophyll)和蓝绿藻藻蓝蛋白(BGA-PC)等9项水质指标的沿程削减率作为河流自净能力的表征指标^[13],其计算公式为:

$$R = \frac{c_0 - c_1}{c_0 L_T} \times 10^4$$

式中: c_0 、 c_1 为河段上游和下游断面水质指标的浓度。

1.3 分析指标和方法

2014年1月16日和22日,先后对各研究河段开展水质监测,用有机玻璃采水器采集河流中心线水面以下0.5 m处水样进行分析。采样在晴天下进行,且采样时段为旱季,能较好的排除因降雨而带来的干扰。监测项目包括水温、pH、ORP、DO、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 COD_{Cr} 、TOC、DOC、Chlorophyll、BGA-PC、悬浮微生物的生物量和生物活性。水温、pH、ORP、DO、Chlorophyll和BGA-PC等水质指标用美国xylem公司YSI EXO2多参数在线水质分析仪现场测定;悬浮微生物生物量采用磷脂法测定^[14];悬浮微生物生物活性用荧光素双醋酸酯(FDA)水解酶活性表征^[15],FDA液显色分析^[16];各项水质指标的采样、保存和分析方法均严格按照标准方法进行^[17]。使用SPSS Statistics 17.0处理所得数据,

并用Origin 9.0作图。

2 结果与分析

2.1 各河段河流线型表征结果

各研究河段的弯曲度与分形维数见表2。

表2 研究河段弯曲度和分形维数		
河段	弯曲度	分形维数
磨碟沙涌东段	1.0000	1.0001
磨碟沙涌西段	1.0539	1.0099
裕丰涌	1.0008	1.0001
金紫涌	1.0069	1.0014
南派涌	1.0452	1.0023

各研究河段的弯曲度和分形维数所反映的河流线型，与各河段的实际河流线型吻合，表明弯曲度和分形维数能较好的体现各研究河段的河流线型。直立式浆砌石挡墙河段河流线型蜿蜒程度为：磨碟沙涌东段<磨碟沙涌西段。格宾石笼挡墙河段河流线型蜿蜒程度依次为：裕丰涌<金紫涌<南派涌。

2.2 河流线型对水质指标沿程削减率的影响

2.2.1 研究河段水质指标分析结果 各采样断面水质参数见表3。

表3 各采样断面水质参数								
河 段	断面	水温 /℃	pH	ORP/mV	DO /mg · L ⁻¹	NH ₃ -N /mg · L ⁻¹	NO ₂ -N /mg · L ⁻¹	NO ₃ -N /mg · L ⁻¹
磨碟沙涌东段	上游	16.36	6.87	71.4 ± 1.8	2.17 ± 0.08	7.083 ± 0.066	0.313 ± 0.004	1.43 ± 0.02
	下游	16.85	6.81	66.6 ± 0.6	2.69 ± 0.02	7.712 ± 0.195	0.337 ± 0.013	1.06 ± 0.00
磨碟沙涌西段	上游	16.85	6.81	66.6 ± 0.6	2.69 ± 0.02	7.712 ± 0.195	0.337 ± 0.013	1.06 ± 0.00
	下游	16.88	6.70	70.9 ± 0.8	1.48 ± 0.02	7.824 ± 0.000	0.489 ± 0.008	0.32 ± 0.02
裕丰涌	上游	16.38	6.67	81.1 ± 0.2	6.82 ± 0.01	5.879 ± 0.456	0.276 ± 0.004	1.24 ± 0.15
	下游	16.51	6.57	86.9 ± 0.3	6.57 ± 0.01	5.513 ± 0.195	0.281 ± 0.004	1.19 ± 0.15
金紫涌	上游	17.69	6.77	85.9 ± 1.1	5.38 ± 0.03	2.529 ± 0.026	0.257 ± 0.004	5.31 ± 0.04
	下游	18.33	6.96	84.2 ± 0.3	4.95 ± 0.00	2.297 ± 0.105	0.240 ± 0.004	5.35 ± 0.02
南派涌	上游	16.34	6.77	81.5 ± 0.1	6.38 ± 0.03	5.539 ± 0.567	0.278 ± 0.006	1.24 ± 0.15
	下游	16.29	6.57	81.1 ± 0.4	6.45 ± 0.03	5.138 ± 0.762	0.267 ± 0.006	1.19 ± 0.03
河 段	断面	TP /mg · L ⁻¹	Chlorophyll /μg · L ⁻¹	BGA-PC /μg · L ⁻¹	TOC /mg · L ⁻¹	DOC /mg · L ⁻¹	COD _{Cr} /mg · L ⁻¹	
磨碟沙涌东段	上游	0.28 ± 0.02	7.26 ± 0.32	0.42 ± 0.01	7.93 ± 0.29	5.83 ± 0.26	15.96 ± 0.11	
	下游	0.38 ± 0.05	7.37 ± 0.30	0.47 ± 0.02	8.65 ± 0.39	6.95 ± 0.07	25.50 ± 0.51	
磨碟沙涌西段	上游	0.37 ± 0.00	7.37 ± 0.30	0.47 ± 0.02	8.65 ± 0.39	6.95 ± 0.07	25.50 ± 0.51	
	下游	0.42 ± 0.07	5.44 ± 0.15	0.38 ± 0.01	9.69 ± 0.63	6.76 ± 0.40	37.74 ± 0.50	
裕丰涌	上游	0.18 ± 0.04	6.92 ± 0.30	0.37 ± 0.03	22.26 ± 0.61	21.71 ± 0.01	50.06 ± 1.71	
	下游	0.14 ± 0.04	5.63 ± 0.36	0.28 ± 0.02	22.23 ± 0.52	21.84 ± 0.14	49.37 ± 0.00	
金紫涌	上游	0.45 ± 0.00	2.28 ± 0.05	0.14 ± 0.01	22.35 ± 0.21	21.53 ± 0.19	41.20 ± 0.00	
	下游	0.41 ± 0.00	2.11 ± 0.14	0.13 ± 0.02	22.11 ± 0.23	21.24 ± 0.27	35.20 ± 0.00	
南派涌	上游	0.14 ± 0.00	5.36 ± 0.36	0.32 ± 0.01	21.97 ± 0.09	21.84 ± 0.08	93.32 ± 1.73	
	下游	0.12 ± 0.06	3.73 ± 0.65	0.24 ± 0.06	21.70 ± 0.21	21.34 ± 0.18	87.50 ± 1.71	

根据《中华人民共和国地表水环境质量标准》（GB3838—2002），各采样断面水质均属于劣Ⅴ类水，主要超标项目有NH₃-N，COD_{Cr}和TP。

2.2.2 河流线型对直立式浆砌石挡墙河段水质指标沿程削减率的影响 对水质指标沿程削减率R进行独立样本t检验，分析结果见表4。

表4 直立式浆砌石挡墙河段水质指标沿程削减率及差异性分析

m⁻¹

水质指标	磨碟沙涌东段	磨碟沙涌西段	水质指标	磨碟沙涌东段	磨碟沙涌西段
TP	-15.334 ^a	-5.503 ^b	BGA-PC	-5.421 ^a	10.883
NH ₃ -N	-3.573 ^a	-0.830 ^b	COD _{Cr}	-23.769 ^a	-23.337 ^a
NO ₂ -N	-3.347 ^a	-21.512 ^b	TOC	-3.666 ^a	-5.863 ^b
NO ₃ -N	10.337 ^a	40.891 ^b	DOC	-7.714 ^a	1.089 ^b
Chlorophyll	-0.691 ^a	14.333 ^b			

注：同一行中上标相同字母表示各河段无显著性差异，不同字母表示有显著性差异，显著性 $P<0.05$ 。

除COD_{Cr}、TOC和NO₂-N外，各水质指标沿程削减率均随河流线型蜿蜒程度增加得到显著提升。西段NO₃-N的沿程削减率提高为东段的3.96倍（ $P<0.05$ ）；而TP和NH₃-N浓度的沿程上升趋势分别下降为东段的1/2.79（ $P<0.05$ ）和1/4.30（ $P<0.05$ ）；DOC、Chlorophyll和BGA-PC浓度由东段的沿程升高转变为沿程降低。水质指标沿程削减率的变化表明，河流线型对直立式浆砌石挡墙河段的河流自净能力有显著影响，且河流线型蜿蜒程度更高的河段具有更高的自净能力。

2.2.3 河流线型对格宾石笼挡墙河段水质指标沿程削减率的影响 对水质指标沿程削减率 R 进行单因素实验分析，分析结果见表5。

表5 格宾石笼挡墙河段水质指标沿程削减率及差异性分析

m⁻¹

水质指标	裕丰涌	金紫涌	南派涌
TP	7.523 ^a	1.822 ^b	7.255 ^a
NH ₃ -N	2.187 ^a	1.995 ^a	3.971 ^a
NO ₂ -N	-0.645 ^a	1.384 ^b	2.286 ^c
NO ₃ -N	1.353 ^a	-0.170 ^a	2.033 ^a
Chlorophyll	6.554 ^d	1.631 ^b	16.383 ^c
BGA-PC	7.908 ^a	3.657 ^a	13.336 ^a
COD _{Cr}	0.483 ^a	3.168 ^b	3.418 ^c
TOC	0.057 ^a	0.240 ^a	0.666 ^b
DOC	-0.201 ^a	0.291 ^b	1.249 ^c

注：同一行中上标相同字母表示各河段无显著性差异，不同字母表示有显著性差异，显著性 $P<0.05$ 。

除TP、NH₃-N、NO₃-N、Chlorophyll和BGA-PC外，各水质指标沿程削减率均随河流线型蜿蜒程度增加有显著提高。在河流线型蜿蜒程度最高的南派涌，COD_{Cr}和TOC的沿程削减率是次蜿蜒的金紫涌的1.08倍（ $P<0.05$ ）和2.78倍（ $P<0.05$ ）；是顺直的裕丰涌7.78倍（ $P<0.05$ ）和11.68倍（ $P<0.05$ ）。南派涌的NO₂-N和DOC沿程削减率为金紫涌的

1.65倍（ $P<0.05$ ）和2.78倍（ $P<0.05$ ），而在裕丰涌，NO₂-N和DOC浓度却沿程升高。TP、NH₃-N、NO₃-N、Chlorophyll和BGA-PC这5项水质指标中，除TP外，其余4项水质指标均在河流线型蜿蜒程度最高的南派涌取得最高的沿程削减率，而且南派涌的Chlorophyll沿程削减率显著高于裕丰涌和金紫涌。分析结果表明，河流线型对格宾石笼挡墙河段的河流自净能力有显著影响，且河流线型蜿蜒程度越高的河段具有越高的河流自净能力。

2.2.4 河流线型对水质指标沿程削减率的相关性分析 利用SPSS软件统计裕丰涌、金紫涌和南派涌各项水质指标沿程削减率 R 与弯曲度和分形维数的相关性，分析结果见表6。

表6 格宾石笼挡墙河段水质指标沿程削减率对与弯曲度和分形维数的相关性

水质指标	弯曲度	分形维数
TP	0.330	0.138
NH ₃ -N	0.621	0.504
NO ₂ -N	0.816 [*]	0.993 [*]
NO ₃ -N	0.458	0.206
Chlorophyll	0.757 [*]	0.512
BGA-PC	0.535	0.352
TOC	0.943 [*]	0.906 [*]
DOC	0.969 [*]	0.951 [*]
COD _{Cr}	0.651	0.922 [*]

注：*是显著性 $P<0.05$ 时的相关系数。

由分析结果看出，DOC和TOC的沿程削减率与河流线型的两个表征指标有显著正相关关系，说明在格宾石笼挡墙河段中河流线型对有机污染物的降解有显著影响。此外，分形维数与NO₂-N和COD_{Cr}的沿程削减率，以及弯曲度与NO₂-N和Chlorophyll的沿程削减率的相关关系也较显著。

2.3 不同河流线型下各河段悬浮微生物生物量和生物活性

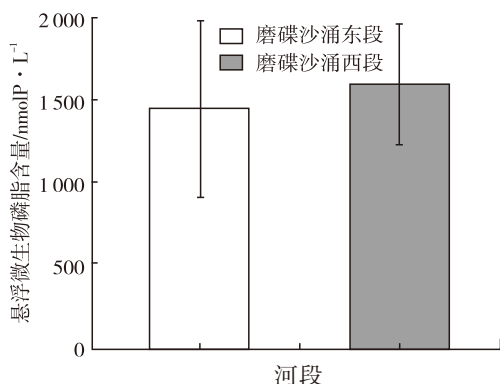


图1 不同河流线型下直立式浆砌石挡墙河段悬浮微生物磷脂含量

磨碟沙涌东段和西段的悬浮微生物磷脂含量无显著性差异；而在格宾石笼挡墙河段中，河流线型蜿蜒程度最高的南派涌，其悬浮微生物磷脂含量是金紫涌的3.28倍（ $P<0.05$ ）和裕

各河段悬浮微生物磷脂含量见图1和图2。

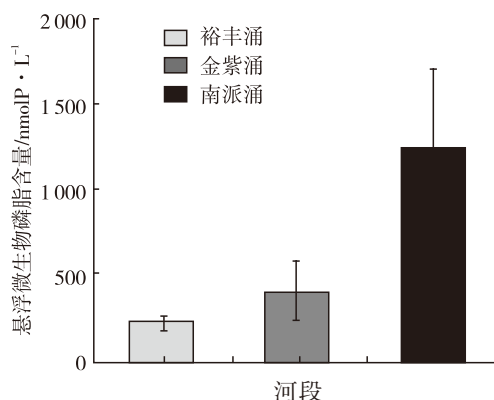


图2 不同河流线型下格宾石笼挡墙河段悬浮微生物磷脂含量

丰涌的5.70倍（ $P<0.05$ ）。

各研究河段悬浮微生物FDA水解酶活性见图3和图4。

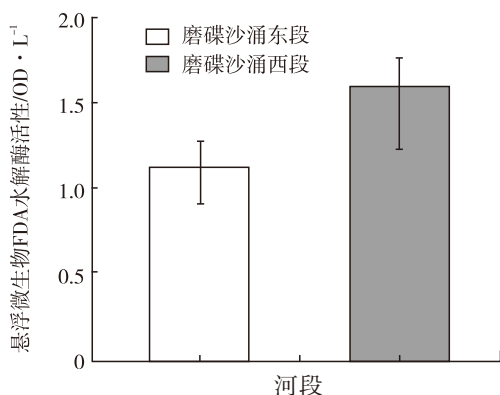


图3 不同河流线型下直立式浆砌石挡墙河段悬浮微生物FDA水解酶活性

河流线型蜿蜒程度越高的河段，悬浮微生物FDA水解酶活性也越高。在直立式浆砌石挡墙河段中，蜿蜒程度更高的磨碟沙涌西段是顺直的东段的1.55倍（ $P<0.05$ ）。而在格宾石笼挡墙的河段中，蜿蜒程度最高的南派涌悬浮微生物FDA水解酶活性是金紫涌的1.07倍（ $P<0.05$ ）和裕丰涌的1.15倍（ $P<0.05$ ）。

河流线型的蜿蜒性使河道中的水流形态增多，从而创造更多的生境^[18]。通过分析具有不同河流线型河段的悬浮微生物生物量和生物活性，可以看出河流线型对不同护岸形式河段的自净能力产生影响的作用机制不同。在直立式浆砌石挡

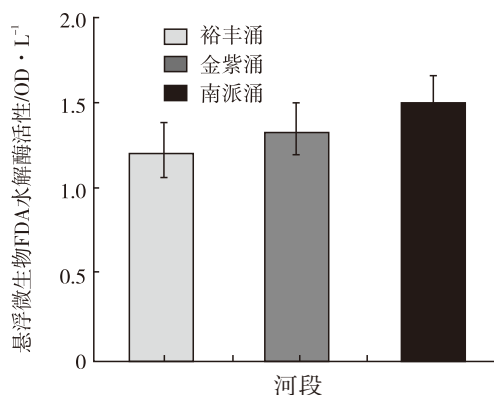


图4 不同河流线型下格宾石笼挡墙河段悬浮微生物FDA水解酶活性

墙河段，河流线型通过影响河流中悬浮微生物的生物活性，进而影响河流自净能力；而对于格宾石笼挡墙河段，则是通过影响河流中悬浮微生物的生物量和生物活性，从而对河流自净能力产生影响。

3 结论

（1）河流线型对直立式浆砌石挡墙和格宾石笼挡墙两种护岸形式河道的自净能力均有显著影响，在所考察河流线型蜿蜒程度范围内，蜿蜒程度越高的河段，其河流自净能力也越高，因此河流生态修复工程应对河流线型予以重视。

（下转第113页）

属Hg的污染最为严重。上游地区其他主要重金属污染物有Cd和Zn, 无As、Cr、Cu污染; 中游地区其他主要重金属污染物有Cu和Zn, 7种重金属污染物均有; 下游地区其他主要重金属污染物有Cd和As, 无Cr、Cu、Zn污染。

参考文献

- [1]王淑军, 刘佩楼, 徐世鹏, 等. 临沂市武河湿地的设计及其水质净化效果分析[J]. 中国给水排水, 2011, 27(22): 61–64.
- [2]周晓铁, 韩宁宁, 孙世群. 安徽省河流和湖床型饮用水水源地水质评价[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 176–180.
- [3]张微微, 孙丹峰, 李红. 北京密云水床流域1980—2003地表水质评价[J]. 环境科学, 2010, 31(7): 1483–1491.
- [4]容跃, 金健. 用模糊集理论计算水环境综合评价指数[J]. 环境科学, 1982, 3(2): 69–72.
- [5]代大煜, 徐铭照, 彭庆初. 水质标准级别法在河流重金属污染评价中的应用[J]. 重庆大学学报, 1993, 16(3): 99–103.
- [6]刘有才, 钟宏, 刘洪萍. 重金属废水处理技术研究现状与发展

(上接第47页)

(2) 在格宾石笼挡墙河段中, 弯曲度和分形维数与TOC和DOC的沿程削减率有较强相关性, 表明在格宾石笼挡墙河段中, 河流线型对有机污染物的降解有显著影响。

(3) 河流线型对不同护岸形式河段的自净能力产生影响的作用机制不同。在直立式浆砌石挡墙河道中, 河流线型通过提高悬浮微生物的生物活性, 进而提升河流自净能力; 而在格宾石笼挡墙河段中, 河流线型通过增加悬浮微生物的生物量和提高悬浮微生物的生物活性, 从而提升河流自净能力。

参考文献

- [1]Nakano D, Nakamura F. The significance of meandering channel morphology on the diversity and abundance of macroinvertebrates in a lowland river in Japan[J]. Aquatic Conservation—Marine and Freshwater Ecosystems, 2008, 18(5): 780–798.
- [2]刘大鹏. 基于近自然设计的河流生态修复技术研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2010: 12–13.
- [3]Xia T, Zhu W, Xin P, et al. Assessment of urban stream morphology: an integrated index and modelling system[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 167(1–4): 447–460.

趋势[J]. 广东化工, 2005, (4): 36–39.

- [7]李爱琴, 王阳峰, 杨珊娇. 浅谈重金属污染对健康的危害[J]. 河南机电高等专科学校学报, 2005, 13(4): 49–50.
- [8]张敏, 王德淑. 长江同龄段表层水中重金属含量及存在形态分布研究[J]. 安全与环境学报, 2003, (3): 61–65.
- [9]王宏宾, 束文圣, 蓝崇任. 重金属污染生态学研究现状与展望[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 596–605.
- [10]胡茂永. 湿地治污系统在洞庭湖区的应用研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2003.
- [11]周群英, 高廷耀. 环境工程微生物学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [12]张毅敏, 张永春. 利用人工湿地治理太湖流域小城镇生活污水可行性探讨[J]. 农业环境保护, 1998, 17(5): 232–234.
- [13]李现坡. 人工湿地去除重金属的动力学研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [14]陈玲. 环境监测[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [15]张尧旺. 水质监测与评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [16]傅兴启. 地面水质综合评价的一种新方法—水质标准级别法[J]. 中国环境科学, 1988, 8(2): 66–71.

- [4]吴阿娜, 车越, 徐启新, 等. 上海地区河流健康评价方法探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4): 90–94.
- [5]Elosegi A, Diez J, Mutz M. Effects of hydromorphological integrity on biodiversity and functioning of river ecosystems[J]. Hydrobiologia, 2010, 657(1): 199–215.
- [6]Garcia X F, Schnauder I, Pusch M T. Complex hydromorphology of meanders can support benthic invertebrate diversity in rivers[J]. Hydrobiologia, 2012, 685(1): 49–68.
- [7]Deng Z Q, Singh V P. Optimum channel pattern for environmentally sound training and management of alluvial rivers[J]. Ecological Modeling, 2002, 154(1–2): 61–74.
- [8]蔡峰. 平原地区城市内河河道结构与水质恢复关系的实验研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2007: 29–32.
- [9]Snow R S. Fractal sinuosity of stream channels[J]. Pure and Applied Geophysics, 1989, 131(1–2): 99–109.
- [10]亚历山德拉. 任松长, 李胜阳, 译. 河流蜿蜒分析与模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011: 10.
- [11]白玉川, 黄涛, 许栋. 蜿蜒河流平面形态的几何分形及统计分析[J]. 天津大学学报, 2008, 41(9): 1052–1056.
- [12]蔡建楠. 城市河流形态与河流自净能力的关系[D]. 广州: 华南理工大学, 2008: 15–17.
- [13]蔡建楠, 潘伟斌, 曹英姿, 等. 广州城市河流形态对河流自净能力的影响[J]. 水资源保护, 2010, 26(5): 16–19.
- [14]崔玉雪, 袁琦, 唐媛, 等. 水源水生物预处理中填料生物量的测定方法探讨[J]. 给水排水, 2009, 35(11): 29–31.
- [15]刘叶, 邹立, 刘陆, 等. FDA水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 3818–3824.
- [16]赵素. 河岸河床材料对水体自净能力的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 11.
- [17]水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18]董哲仁. 河流形态多样性与生物群落多样性[J]. 水利学报, 2003, 34(11): 1–6.