

黄河的综合治理方略*

王兆印^{†1} 田世民²

(¹清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室

²中国水利水电科学研究院)

摘要: 黄河是我国第二长河, 为西北、华北地区提供了丰富的水资源。黄河灾害频繁, 是世界上最难治理的河流。经过几千年的治理, 目前黄河已经成了一条人工控制的河流。然而黄河仍然面临侵蚀严重、河床不稳定、水体污染以及生态脆弱等诸多问题。本文依据河流综合治理的原则, 为达到“维持黄河健康生命”的目标, 提出了控制沟道下切、增阻降速、建设通河湖泊湿地和控制点源污染等综合治理方略。

关键词: 黄河, 控制沟道下切, 增阻降速, 通河湖泊, 点源污染

INTEGRATED MANAGEMENT STRATEGIES IN THE YELLOW RIVER

Zhaoyin Wang¹, Shimin Tian²

(¹ Prof., State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China, E-mail: zywang@tsinghua.edu.cn

² Ph. D., China Institute of Water Resources and Hydro-Power Research, Beijing 100044, China)

Abstract

The Yellow River is the second longest river in China, which provides the north and north-west China with water resources. In history, the Yellow River was the most challenging river and had brought many calamities to the Chinese people. Although the river has been controlled by humans with numerous dams and hundreds kilometers of grand levees, there are still many problems to be solved: soil erosion, unstable channel, pollution and poor river ecology. Integrated river management strategies are proposed for improve the river health in the paper. The main viewpoints are: 1) Controlling the gully bed incision and headward erosion is essential for erosion control in the loess plateau; 2) Enhancing the resistance and reducing flow velocity may finally stabilize the river channel; 3) Construction of river-linked lakes and wetlands can improve the ecology; and 4) Controlling point-source pollution is the key to improve the water quality.

Key Words: Yellow River, Gully bed incision and headward erosion, Resistance, River-linked wetland, Point source pollution

* 本文获科技部国际科技合作项目(2004CB720402)和国家自然科学基金项目(50221903-3, 50409003)资助

[†] 王兆印: 1951, 男, 博士, 教授, 河流水沙生态综合管理。E-mail: zywang@tsinghua.edu.cn

河是我国第二长河，流经干旱、半干旱地区，为西北、华北地区提供了宝贵的水资源，是北方地区重要的生命之源。黄河流域侵蚀严重，河床不稳定，水体污染严重，生态环境脆弱，对黄河的治理是关系国计民生的大事，不同时代的专家、学者都提出和实施了不同的方略。汉明帝时期王景采用了筑堤和十里立一水门的方法（中国水利史稿编写组，1985），也就是宽河固堤、分流杀势的方略，使得泥沙在给定的地方落淤，整体河势稳定。其后黄河800年安流。明朝潘季驯提出束水攻沙的方略，即束窄黄河河道，提高流速和输沙能力。1565-1592年间，在潘季驯的领导下实施了这种治理的理念，使得泥沙顺利下排。从历史上看，潘季驯治河没有达到稳定黄河的目的。Freeman（1922）支持潘季驯的束水攻沙，他的意见再次引发长达数世纪的讨论，即束水攻沙还是宽河固堤、分洪减沙。受中国委托，Engles于1931-1934年经过物理模型试验得出，宽河固堤比束水攻沙对防洪更为有利（Engels, 1932; Yen, 1999）。经过几个世纪的治理，尤其是建国后一系列大型水利工程的建设，黄河已成为处于人工控制状态下的河流。但是，黄河下游仍然游荡，泥沙大量减少，但是仍有泥沙淤积并导致河道萎缩，污染严重，仅有的一些鱼类物种在减少。本文探索在新形势下黄河如何综合治理。

1、河流综合治理的概念

定义库容指数 RI 为水库总库容与年径流量的比值，即：

$$RI = \text{水库总库容} / \text{年径流量} \quad (1)$$

RI 小于10%为自然河流； $RI=10-50\%$ 为半自然河流； $RI=50-100\%$ ，为半控制河流；当 RI 大于100%时，河流为控制河流。图1是6条河流的 RI 值和总库容，从图中可以看出，黄河、密西西比河、科罗拉多河和尼罗河已经变成了人工控制的河流，长江和珠江仍处于半自然状态。对于自然河流和半自然河流，对河流健康最有利的方略是尽量减少人为干扰，在发展河流利用的时候尽量不改变河流的特性。对于人工控制的河流，必须以河流健康为中心进行综合治理。

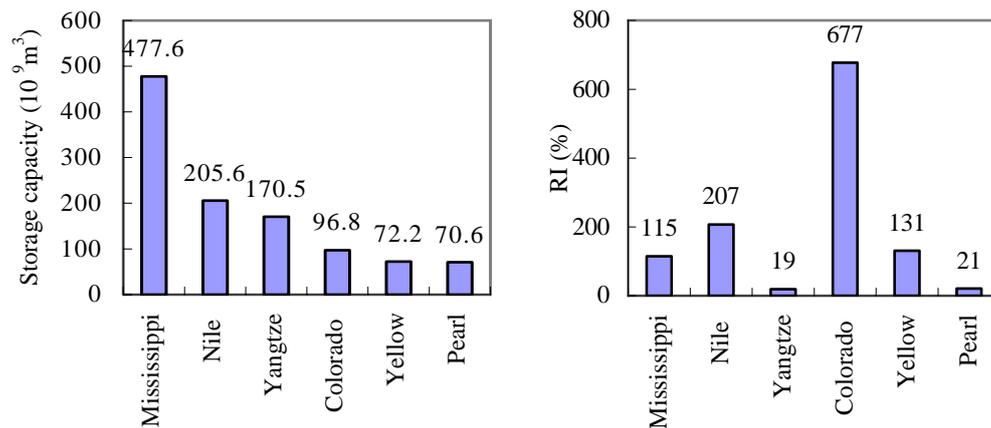


图1 几条主要河流的库容指数和总库容
Fig. 1 Total storage capacity and reservoir index for several major rivers

近年来，河流综合治理的观念被越来越多的人所接受。在黄河的治理上，黄河水利委员会提出了“维护黄河健康生命”的口号，将黄河的治理转向多目标治理，这种转变完全符合河流综合治理的原则。根据河流综合治理的原则，在河流治理工程中，应考虑输沙、河床演变、

生态保护和鱼类洄游等多种因素。河流综合治理包括三个方面：1) 对河流的上、中、下游及河口全盘考虑，统一规划，不因局部效益牺牲整体；2) 在通过水资源利用、防洪和发电等取得经济效益的同时，尽量减少对水文过程、侵蚀、河床演变、环境和生态的不利影响；3) 保护、修复和改善河流生态和河流景观。定义河流综合治理指数 I (Wang et al, 2007):

$$I = w_0R - w_1H - w_2S - w_3G - w_4E \quad (2)$$

式中： H ——水文管理指数； S ——泥沙管理指数； G ——河床演变和景观管理指数； E ——生态管理指数； R ——河流利用指数； w_i ——第 i 个指数的权重

指数 R 代表发电、航运、供水、旅游和娱乐等取得的经济效益， H 反映水文循环过程的变化， S 反映了对泥沙概算的复杂影响， G 反映对河流地貌和景观变化的影响， E 反映生物多样性的改变。每个指数的权重 w_i 要通过实例研究来获得。 I 值的大小反映河流综合治理的水平， I 值越大说明河流综合治理水平越高。

我们根据国内外河流治理的经验教训，提出黄河综合治理方略，主要有以下四个观点：

1) 控制沟道下切是控制侵蚀的根本；2) 增阻降速是稳定河势的重要措施；3) 建设通河湖泊湿地是改善黄河生态的链条；4) 控制点源污染是解决污染问题的重点。

2. 控制沟道下切是控制侵蚀的根本

黄河流经世界上水土流失最严重的黄土高原地区，过去每年约有 16 亿吨泥沙进入下游，约有 4 亿吨沉积在河床上 (熊贵枢等，2002；张涛等，2005)，对黄河下游两岸生命财产安全构成了极大的威胁。通常把由坡面径流集中冲蚀土壤和母岩并切入地面形成较大沟壑的这种侵蚀形态称为沟道侵蚀。沟道下切是细沟侵蚀和坡面侵蚀的诱因。沟道下切造成岸坡和支沟坡度变陡、细沟侵蚀和坡面侵蚀加剧，因此控制沟道下切是控制侵蚀的根本。侵蚀导致土壤中的营养元素流失，使土地变得贫瘠。同时，进入黄河的泥沙携带的营养物质使得河湖水质富营养化。

控制侵蚀的根本是控制沟道下切和沟头上溯，可以通过水利工程和生物工程进行联合控制。水利工程主要指建设淤地坝群，拦截上游侵蚀产生的泥沙，使其淤积在沟道内，抬升沟道河床，降低坡度，从而达到稳定沟道的目的。近年来，黄土高原地区的淤地坝建设在拦沙和控制沟道侵蚀方面起到了重要作用。生物工程是指在沟道内或沟道两侧的坡面上种植能够有效控制侵蚀的植被，以保护河道和边坡，防止冲刷和侵蚀。研究表明，坡面植被覆盖率恢复到 70% 就可以使沟道侵蚀产沙减少 75% 以上 (陈浩等，2006)。

生物工程控制侵蚀的关键在于选择适当的物种。物种选择得当不仅可以控制侵蚀，并能增加生物多样性。1986 年，钱正英通过调查研究提出了以开发沙棘资源为加速黄土高原治理突破口的科学建议，使沙棘灌木在黄土高原大面积种植 (钱正英，2000)。沙棘又名醋柳、酸刺、黑刺，系胡颓子科，是一种具有良好的生物学和生态学特性的植物，适应性强，根系发达，有极强的萌生能力，通过无性系生长实施种群扩散，并依靠生理整合和觅养行为提高基株适宜度和分株存活概率 (高志义等，1989)。沙棘根系具有较高的固氮能力，对增加土壤有机质及氮的含量、改善土壤结构、提高林地生产力等都具有重要意义 (李根前等，2000)。

研究发现，种植沙棘可以有效拦沙蓄水，促进当地其他物种的生长，提高生物多样性，具有良好的生态效应（张康等，2008）。图2显示内蒙古鄂尔多斯砒砂岩地区西昭沟流域种植的沙棘林拦沙蓄水效果。由于沟道淤积抬高，沟岸坡度降低，坡地侵蚀减少，整个小流域变得更加稳定，单位面积产沙量显著下降。



图2 鄂尔多斯砒砂岩地区西昭沟流域沟道里种植沙棘拦沙蓄水

Fig.2 Seabuckthorns planted in Xizhaogou valley in Pisha sandstone area in E'erduosi

3. 增阻降速是稳定河势的重要措施

稳定的河势对河流健康至关重要，而降低流速是稳定河势的重要措施。降低流速主要取决于河床的阻力结构。弯曲的河道、河道内的大卵石以及滩地上的植被等都是河床阻力结构的组成部分。这些阻力结构降低水流流速、防止河道冲刷和稳定河势。目前，一些河流治理工程破坏了河床的阻力结构，引起了很多问题。从河流综合治理的角度来看，河道裁弯取直、滩地清障减糙以及渠化工程等都是不利于河流健康的。当然，降低流速会导致泥沙落淤，所以增阻减速宜从上而下进行。从河流整体看，增阻降速从根本上减小泥沙侵蚀和搬运的动力，河床演变速率减小，河势逐渐稳定。

弯曲是河流的本性，将蜿蜒的河流改成顺直违背了河流的本性。裁弯取直集中了水流能量，引起河道冲刷和河岸侵蚀，导致河道不稳，并破坏了水生栖息地，影响了水生物的生存。滩地植被可以降低洪水流速，延长洪水推进时间。许多学者研究了滩地植被影响河流水力特征和地貌特征的机理（Ikeda and Izumi, 1990; Thorne, 1990; Ikeda et al., 1991; Thornton et al., 2000; Carollo et al., 2002）。Andrews（1984）和 Hey（Hey and Thorne, 1986）等研究得出，滩地植被可以通过增加阻力和降低近岸流速来保持河道地形的稳定，并通过其根系增加河岸稳定，加速滩地和岸边淤积（Waldron, 1977; Gray and Leiser, 1982; Abt et al., 1994; Lee et al., 1999; Elliott, 2000）。河道渠化工程对河流地貌和生态都产生不利影响，用混凝土硬化河道和河岸改变了河流原来的属性。光滑河岸相对于自然河岸糙率要小很多，导致近岸流速提高，威胁河岸和大堤安全。人们已经认识到光滑河岸不利于防洪安全，一些地方为控制近岸流速，

将大石块镶嵌在光滑护岸上以增加河岸糙率。图 3 为苏丹青尼罗河的硬化河岸，上面镶嵌石块以增加糙率。



图 3 苏丹青尼罗河加糙的硬化河岸

Fig. 3 Hardened bank is roughened by sticking stones on the surface on the Blue Nile River in Sudan

降低流速不仅有利于稳定河势，对河流生态也十分有利。通过对河流生物群落的研究发现，河流中水流流速小于 3m/s（洪水时也是如此）时，最利于水生物的生存，大多数水生物都生活在低流速的水域中。适合度指数 SI 为栖息地的物理化学条件对生物生存和繁殖的适宜程度。 $SI=1$ 和 $SI=0$ 分别代表最好与最差的生存条件。我们收集了大量关于流速对各种鱼类的适合度指数的研究文献。表 1 列出了对于这些鱼类的临界流速 U_{c1} 、 U_{c2} 、 U_{c3} 的值， U_{c1} 是适合度指数 SI 增加到 1 的临界流速， U_{c2} 是 SI 开始从 1 减小的临界流速， U_{c3} 是 SI 减小到零的临界流速。流速在 U_{c1} 和 U_{c2} 之间时最适合物种生存。不同种类的成鱼、幼鱼、鱼苗和产卵的适合度指数所对应的流速范围是不同的。图 4 给出了与成鱼、幼鱼、鱼苗和产卵对应的三个临界流速 U_{c1} 、 U_{c2} 、 U_{c3} 的分布特征。图中纵坐标为对应的临界流速小于 U_c 的物种的百分比。例如对于成鱼，大约 55% 的鱼类在静水中最适宜生存，97% 的鱼类在流速大于 3m/s 的水中最不适宜生存。图中条文状的阴影部分对应的适合度指数 SI 为 1，即最适宜生存或产卵的流速。图 4 表明，多数鱼类产卵需要较高的流速，幼鱼需要较低的流速。但是当流速大于 3m/s 时，无论是成鱼还是幼鱼，所有鱼类的适合度指数降到零，而产卵孵化和鱼苗的适合度指数降到 1 以下。

表 1 世界 36 种鱼对应的 U_{c1} 、 U_{c2} 和 U_{c3} (Wang et al., 2007)
Table 1 Critical velocities for SI increases to 1, begins to reduce and reduces to zero for 36 species of fishes in the world rivers

鱼种	成鱼			产卵和孵化			参考文献
	U_{c1} (m/s)	U_{c2} (m/s)	U_{c3} (m/s)	U_{c1} (m/s)	U_{c2} (m/s)	U_{c3} (m/s)	
中华鲟	0.15	0.45	1.52	1.15	1.5	2.6	Yi, et al., 2007
青鱼, 草鱼, 鲢鱼, 鳙鱼(四大家鱼)				0.27	0.9	4.15	Yi, et al., 2006
美洲鲟	0.2	0.9	1.5	0.3	0.9	1.3	Stier and Crance, 1986
斑鲮	0	0.2	1.2	0	0.1	0.6	Williamson and Nelson, 1985

北极河鱒	0.3	0.9	1.2				Hubert,et al., 1985
太阳鱼	0	0.09	0.43	0	0.08	0.36	Stuber,et al., 1982a,b,c
黑吻粗鲈	0	0.3	0.86	0.2	0.45	0.65	Trial,et al., 1983a,b
长吻粗鲈	0.45	0.65	1.23				Edwards, 1983a,b
溪红点鲑				0.3	0.6	0.9	Raleigh, 1982
褐鱒	0.2	0.2	1.8	0.2	0.5	1.2	Raleigh,et al., 1986a,b
割喉鱒				0.3	0.6	0.9	Hickman and Raleigh, 1982
虹鱒鱼	0.15	0.6	1.07	0.3	0.7	0.9	Raleigh,et al., 1984
普闪岁	0.15	0.2	0.5				Trial,et al., 1983a,b
扁头鲈	0	0.3	1.97				Lee and Terrell, 1987
叉尾鲈				0	0.15	0.43	McMahon, and Terrell, 1982
大鳞大马哈鱼				0.3	0.85	1.15	Raleigh,et al., 1986a,b
细鳞大麻哈鱼	0	1.22	2.04	0.5	0.7	1.5	Raleigh and Nelson, 1985
亚口鱼				0.3	1	2.7	Edwards, 1983a,b
绿鳃太阳鱼	0	0.1	0.25	0	0.1	0.15	Stuber,et al., 1982a,b,c
红耳鳞鳃太阳鱼	0	0.01	0.1				Beghart,et al., 1984
大口黑鲈	0	0.06	0.2	0	0.03	0.1	Stuber, et al., 1982a,b,c
小口黑鲈	0	0	0.6	0	0.4	0.9	Edwards,et al., 1983
细斑黑鲈	0	0.06	0.85	0	0	0.3	McMahon, et al., 1984a,b,c
内陆条纹鲈鱼				0.5	1.2	4	Crance, 1984
白鲟	0	0.1	0.7	0.6	3.7	4.6	Hubert and Anderson, 1984
黄鲈	0	0.03	0.12	0	0.09	0.15	Krieger,et al., 1983
短鼻鲟	0.16	0.45	1.52	0.3	0.76	1.52	Crance, 1983
斯劳鱈鲈	0	0.05	0.24				Edwards, 1982a,b
无鳔石首鱼	0.2	0.5	0.75				Sikora and Sikora, 1982
大眼狮鲈	0	0.06	0.9	0.76	0.9	1.1	McMahon,et al., 1984a,b,c
大口突鳃太阳鱼	0	0.06	0.25				McMahon, et al., 1984a,b,c
白鲤	0.1	0.15	0.4	0.3	0.6	0.9	Twomey,et al., 1984
白色刺盖太阳鱼	0	0.2	0.4				Edwards, 1982a,b

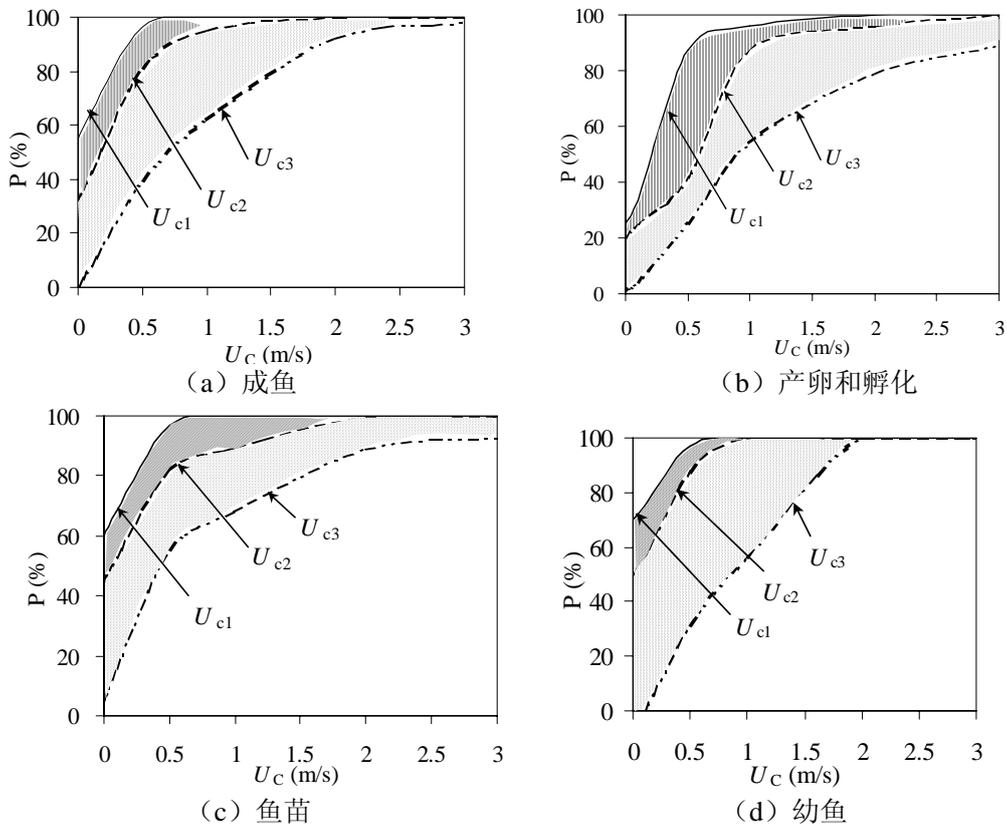


图 4 36 种鱼类的成鱼、产卵和孵化、鱼苗及幼鱼所对应的临界流速累积曲线
 Fig. 4 Statistical distributions of the critical velocities for SI increases to 1 (U_{c1}),

begins to reduce (U_{c2}), and reduces to zero (U_{c3}) for 36 species of adult fishes (a); spawning (b); fry fishes (c); and juvenile fishes (d)

4. 建设通河湖泊湿地是改善黄河生态的链条

河流是生命的载体，为各种水生生命提供栖息地。当前黄河处于严重污染的状态，60%以上的黄河水不能饮用（郭明珠，2007），黄河的生态也受到严重破坏。再加上黄河的河床底质都是细沙的特性，黄河中水生物种和生物量都远比长江少得多。作者曾带领研究小组到黄河下游以及黄河三角洲进行了实地生态考察，在黄河河床和河滩湿地中采集底栖动物样品，通过分析发现只有极少底栖动物在河道里生存，只有湿地生存物种较多。

研究表明，生物多样性与栖息地的多样性有着直接的关系。栖息地的多样性愈高，生物多样性愈高。河流治理工程应着力于提高栖息地的多样性，可以通过以下两方面实现：1）增加河道和滨河水域中的水面面积，并提高水体的连通度；2）增加低流速和不同水深的水域，如港湾和湖泊等。河流栖息地的主要物理特征包括底质、水深和流速三个方面（Gorman and Karr, 1978）。不同的栖息地支持不同的生物群落，多样化的栖息地意味着生物的多样化。我们提出栖息地多样性指数 H_D 来描述栖息地特征（王兆印等，2006）：

$$H_D = N_h N_v \sum_i \alpha_i \quad (3)$$

N_h 和 N_v 分别代表水深和流速多样性， α 代表底质多样性，不同的底质 α 取值不同。当底质为大石块和卵石时， $\alpha=6$ ；底质为水草时 $\alpha=5$ ；底质为卵石时 $\alpha=4$ ；底质为浮泥时 $\alpha=3$ ；底质为粉沙时 $\alpha=2$ ；底质为相对稳定的沙时 $\alpha=1$ ；底质为运动沙时 $\alpha=0$ 。当河流中有0-0.1m的浅水区、0.1-0.5m的中水区和超过0.5m的深水区，且每种水域所占面积都大于10%时， $N_h=3$ 。如果仅有浅水区和中水区，则 $N_h=2$ 。类似的，可以得到其他条件下的 N_h 值。当河流有小于0.3m/s的缓流区、0.3-1 m/s的中等流速区和大于1 m/s的激流区，且每种水域所占面积均大于10%时， $N_v=3$ 。如果仅有两种且每种所占面积大于10%，则 $N_v=2$ ，依次可得到其他条件下的 N_v 值。

通河湖泊湿地对河流生态有着极其重要的作用。在河流系统中，通河湖泊与河流干、支流构成一个完整的河湖复合生态系统。河道与通河湖泊作为不同类型的生态单元，发挥各自的生态功能。研究发现许多鱼类在河里产卵，在湖里长大。通河湖泊的河湖关系形式有利于底栖无脊椎动物以及鱼类的生存与发展。河道的流水环境具有较高的溶解氧，但营养物质和饵料生物贫乏；通河湖泊则具有较高的初级生产力，支撑着水体食物网的各个环节。反过来，湖泊生态也依赖河流。因此保持河湖的连通对于生态是非常重要的。研究表明，隔离的湖泊生物多样性降低。以长江为例，近50年来，长江许多通江湖泊群逐渐变小变隔离，底栖动物由46种减少到30种，鱼类由80种减少到50种（王宏筑，2005）。生态管理的一个原则是维持较高的河湖连通度。在黄河建设通河湖泊可以显著改善生态，例如小北干流、河南段的二级悬河的河滩、东平湖和北展和南展滞洪区都可以建设通河生态湖泊。

水生植被在河流生态系统中起着重要的作用。水生植被可以为底栖动物和鱼类提供饵料和休憩、产卵的场所，并且能够吸收河流中的有机物质，达到净化河流的目的。北京郊区拒马河是一条水生植被发育很好的河流，沿岸居民利用河水作为生活用水，排回河道的水体都

是携带大量有机物质的生活污水,这些有机物质不断地被河道中的植被吸收,经过一段距离的净化后,河水又变得十分清澈。在黄河的治理中,可以在有条件的河段培育水生植被,起到净化水质的目的。

在通河湿地和湖泊中引入合适的水生植物如沉水植物(如苔草、黑藻等)、挺水植物(如水烛和芦苇等)、浮水植物(如莲、芡和浮萍)等,以构建黄河生命必需的底栖动物群落,创建并维持黄河完整的水生生态系统。水体生态修复应当考虑整个生物链的修复。如当水体沉水植被修复后,同时考虑沉水植被的维护者和垃圾清理工,即水生昆虫、螺类和贝类等,继而放养鱼虾等。

5. 控制点源污染是解决污染问题的重点

近年来,黄河缺水严重、污染加剧。据 2001 年监测统计资料,黄河中下游水体中磷的超标率达 90%以上,氨氮超标率在 50%以上(张曙光等,2004)。目前黄河的污染既有面源污染又有点源污染。面源污染主要是营养物质,可以被水生动植物吸收或降解。但是点源污染包含许多有毒物质,往往杀死一些脊椎动物和无脊椎动物甚至植被,大大降低河流净化能力。许多实例说明,工业污水排放杀死较高级的生物后,一些细菌和藻类才能够大量繁殖,造成河水发臭。因此,控制点源污染是改善黄河水质的重点。另外,点源污染可以通过污水处理达标排放来控制。已有研究表明,如果点源污染得到全面控制,河流、湖泊、水库等地表水水质达标率最高可以达到 65%(韩凤朋等,2006)。

参考文献

- Abt S. R., Clary, W. P., and Thornton, C. I. Sediment deposition and entrapment in vegetated streambeds[J]. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 1994(120), No. 6, pp. 1098-1111
- Andrews, E. D. Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1984(95), pp. 371-378
- Carollo, F. G., Ferro, V., and Termini, D. Flow velocity measurements in vegetated channels[J]. *J. Hydraul. Eng.*, 2002(128), No. 7, pp. 664-673
- Elliott, A. H. Settling of fine sediment in a channel with emergent vegetation[J]. *J. Hydraul. Eng.*, 2000(126), No. 8, pp. 570-577
- Engels, H. Grossmodellversuche ueber das Verhalten eines geschiebefuehrenden gewundenen Wasserlaufes unter der Einwirkung wechseln der Wasserstaende und verschiedenartiger Eindeichungen[J]. *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, 1932(27), No. 3&4, pp. 25-31, pp. 41-43.
- Freeman, J. R. Flood problems in China[J]. *Transactions ASCE*, 1922(85), pp.1405-1460.
- Gorman, O. T. and Karr, J. R. Habitat structure and stream fish communities[J]. *Ecology*, 1978(59), pp. 507-515.
- Gray, D. H. and Leiser, A. T. Biotechnical slope protection[J]. *Van Nostrand-Reinhold*. New York, 1982,
- Hey, R. D. and Thorne, C. R. Stable channels with mobile gravel beds[J]. *J. Hydraul. Eng.*, 1986(112), No. 8, pp. 671-689
- Ikeda, S. and Izumi, N. Width and depth of self-formed straight gravel river with bank vegetation[J]. *Water Resour. Res.*, 1990(26), No. 10, pp. 2353-2364
- Ikeda, S., Izumi, N., and Ito, R. Effects of pile dikes on flow retardation and sediment transport. *J. Hydraul. Eng.*, 1991(117), No. 11, pp. 1450-1479
- Lee, S., Fujita, K., and Yamamoto, K. A scenario of area expansion of stable vegetation in a gravel-bed river based

- on the upper Tama river case. *Ann[J]. J. Hydraul. Eng., JSCE*, 1999(43), pp. 977-982 (in Japanese)
- Thorne, C. R. Effects of vegetation on river bank erosion and stability[J]. *Vegetation and erosion*, J. B. Thornes, ed., Wiley, Chichester, U. K., 1990, pp. 125-144
- Thornton, C. I., Abt S. R., Morris, C. E., and Fischenich, J. C. Calculating shear stress at channel-overbank interfaces in straight channel with vegetated floodplains[J]. *J. Hydraul. Eng.*, 2000(126), No. 12, pp. 929-936
- Waldon, L. J. Shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1977(41), pp. 843-849
- Wang, ZhaoYin, TIAN Shimin, YI Yujun and YU Guoan. Principles of river training and management, International Journal of sediment research[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2007, 22(4), pp.247-262.
- Yen, B. C. From Yellow River models to modeling of rivers[J]. *International Journal of Sediment Research*, 1999(2), pp. 85-91.
- 陈浩, 蔡强国. 坡面植被恢复对沟道侵蚀产沙的影响[J]. *中国科学D 辑, 地球科学*, 2006, 36 (1), 69-80
- Chen Hao and Cai Qiangguo. Effects of the restoration of vegetation in hillside on the gully erosion [J]. *Science in China, Serial D*. 2006, 36 (1), 69-80, (in Chinese)
- 高志义, 张玉胜. 沙棘根系特性的观察与研究[J]. *北京林业大学学报*, 1989, 11 (4), 53-59
- Gao Cunyi and Zhang Yusheng. Survey and research on the root system of seabuckthorn [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1989, 11 (4), 53-59, (in Chinese)
- 郭明珠. 亚洲破坏了河流[EB/OL]. *参考消息*, 2007-3-20, 第 15 版.
- Guo Mingzhu. Polluted river in Asia [EB/OL]. *Reference News*, 2007-3-20, 15th edition. , (in Chinese)
- 韩凤朋, 郑继勇, 张兴昌. 黄河 6 条支流域非点源污染分布现状[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2006, 34 (8), 75-81
- Han Fengpeng, Zheng Jiyong, and Zhang Xingchang. The distribution of non-point source pollution in Yellow River catchment [J]. *Journal of Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 2006, 34 (8), 75-81, (in Chinese)
- 李根前, 唐德瑞, 赵一庆. 沙棘的生物学与生态学特性[J]. *西北植物学报*, 2000, 20 (5): 892-897
- Li Genqian, Tang Derui, and Zhao Yiqing. The biological property and ecological habit of Hippophae[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20 (5): 892-897, (in Chinese)
- 钱正英. 以开发沙棘资源作为加速黄土高原治理的突破口[M]. *钱正英水利文选*, 北京: 中国水利水电出版社, 2000, 354-359, (in Chinese)
- Qian Zhengying. Exploiting the Seabuckthorn to promote the management in Loess Plateau [M]. Beijing, China WaterPower Press, (in Chinese)
- 王宏筑. 长江中游生物栖息地的破碎化. 科技部 973 课题“流域生态与水利工程优化调控”(2003CB415206) 报告, 2005
- Wang Hongzhu. Fragmentary habitats in the middle reach of Yangtze River. Department of Science and Technology, Report of 973 Project: Optimized Regulation of Watershed Ecology and Hydraulic Engineering (2003CB415206). , (in Chinese)
- 王兆印, 程东升, 何易平, 王洪铸. 西南山区河流阶梯-深潭系列的生态学研究[J]. *地球科学进展*, 2006, 21 (1): 409 - 416.
- Wang, Z. Y., Cheng, D. S., and He, Y. P. 2006, A study of the ecological functions of step-pool system in southwest mountain streams. *Advances in Earth Science*, Vol. 21, No. 4, pp. 409-416 (In Chinese).
- 熊贵枢, 李世明, 徐建华. 黄河河口镇至龙门区间水沙变化, 黄河水沙变化研究[M]. 汪岗, 范昭主编. 2002, 郑州: 黄河水利出版社, 74-127
- Xiong Shugui, Li Shiming, and Xu Jianhua. Change and Trend of Development of Streamflow and Sediment in the

- Reach Between Hekouzhen and Longmen of the Yellow River [M]. Wang Gang and Fan Zhao, Chief editor. 2002, Zhengzhou, Yellow River Water Conservancy Press, 74-127, (in Chinese)
- 张康, 徐梦珍, 王兆印, 段学花, 毕慈芬.沙棘在砒砂岩地区侵蚀治理中的生态效应研究[J]. 2008, 已投送
泥沙研究
- Zhang Kang, Xu Mengzhen, Wang Zhaoyin, Duan Xuehua, and Bi Cifen. Ecological impacts of seabuckthorn in the pisha sandstone area. 2008, Submit to *Sediment Research*.
- 张曙光, 张学奎, 王金玲.关于黄河非点源污染控制问题的思考. *中国水土保持*, 2004(8), 11-12
- Zhang Shuguang, Zhang Xuekui, and Wang Jinling. Pondering Over Non-Point Pollution Control in the Yellow River. *Soil and Water Conservation in China*, 2004(8), 11-12, (in Chinese)
- 张涛, 韩卫东.沟道侵蚀及泥石流[J]. *黑龙江水利科技*, 2005(2), 54-55
- Zhang Tao and Han Weidong. Gully erosion and debris flow [J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2005(2), 54-55, (in Chinese)
- 中国水利史稿编写组 (武汉水利电力学院、水利水电科学研究院中国水利史稿编写组).中国水利史稿上卷[M], 1985, 北京: 水利水电出版社.
- IWHR and WUHEE (China Institute of Water Resources and Hydro-Power Research and Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering). 1985, History of Chinese Water Resources. Water Resources and Hydro-Power Press (in Chinese).