

洋河水库流域面源污染负荷的空间分布特征

陈平^{1,2}, 傅长锋², 及晓光², 李大鸣¹

(1. 天津大学建筑工程学院暨港口与海洋工程教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 河北省水利水电勘测设计研究院, 天津 300250)

摘要:为探究洋河水库流域面源污染的空间分布特征,基于气象、土地利用、农业管理等数据资料,计算 2013 年洋河水库流域农村生活污水、固体废弃物、畜禽养殖流失、化肥流失、水土流失污染和城镇地表径流污染源中总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、化学耗氧量(COD)的污染物排放负荷,并通过 GIS 空间分析反映流域内的污染分布情况。结果表明,畜禽养殖污染物排泄量对研究区污染负荷贡献最大,年产生量 51 621.34 t,入河量 2 961.52 t,占比分别为 92%和 85%;从总量上看,洋河水库流域的面源污染负荷分布在西洋河支流;单位面积负荷最大的区域是迷雾河支流区域范围。据此确定了西洋河和迷雾河流域为今后洋河水库流域面源污染重点治理的区域,此研究结果可为洋河水库流域面源污染防治及消减提供理论依据。

关键词:洋河水库;污染负荷;空间分布

中图分类号:X508 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2018)06-0058-07

随着社会经济的快速发展,流域水环境污染问题显得日益突出,已成为当今社会面临的主要环境问题之一(马广文等,2015)。流域生态环境恶化引起的湖泊、水库富营养化,严重影响着生态、经济的可持续发展以及人类自身的安全,尤其是作为城市供水水源地水库水体的污染。为了缓解流域水环境问题、改善流域水环境健康、促进流域水资源更加合理利用,实现我国社会经济与环境资源的和谐发展,对流域实施污染物总量控制刻不容缓。面源污染逐渐成为水环境污染的重点,也是目前水质控制和水环境管理的首要目标(杨林章等,2013)。通过水质监测探究其空间分布规律,找出重点污染源区,是研究非点源污染影响的基础(Zhang et al,2011)。由于面源污染在迁移过程受区域地理条件、气候条件、土壤条件、土地利用、坡度等流域特征的交叉影响,在空间上表现出一定的差异,增加了对其定量研究的难度(Jayakrishnan et al,2005;张丹等,2014)。借助 GIS 技术构建流域系统下的污染物运移数学模型,定量描述污染物的产生量,并模拟污染物空间分布特征(Geza et al,2008;康启燕等,2015);对重点区域水环境保护、改变流域水质恶化现象以及保障该地区城市防洪安全具有重要意义。

洋河水库是秦皇岛市的主要城市供水水源地之一。近年来,随着洋河水库上游及周边地区人口的不断增加、周边村社城镇化速度不断加快以及流域内农牧业的增长,流域内人均排污量以及各种农牧业污染物的排放量也不断增加,大量的农药、化肥、牲畜粪便、垃圾等进入库区,致使水库水质不断恶化,严重影响城市供水安全(刘娜,2005)。研究洋河水库面源污染物产生量以及主要污染物的空间分布特征,旨在为面源污染负荷消减与控制提供指导依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

洋河水库位于河北省秦皇岛市抚宁区大湾子村北,1959 年 10 月兴建,1961 年 8 月建成并投入使用,总库容 3.86 亿 m³,是一座以防洪为主,兼顾城市供水、灌溉及发电等综合利用任务的大(二)型水利枢纽工程。洋河水库流域位于东北向西南走向不规则的狭长矩形区域,东西长约 42.7 km,南北宽约 37.7 km,流域覆盖面积 755 km²。洋河流域地势东北高西南低,境内较大支流主要有东洋河、西洋河、迷雾河和麻姑营河。

洋河流域属暖温带半湿润大陆性季风型气候,四季分明,早晚温差大,极端最高气温 39.9℃,极端最低气温-24℃,流域年均气温 10.2℃,全年小于 4℃约 124 d,4℃以上至平均气温约 48 d,一般在 10

收稿日期:2017-02-28

基金项目:博士后科研项目择优资助(B2016005007)。

作者简介:陈平,1983 年生,女,博士,工程师,研究方向为水环境治理与恢复。E-mail:chenping120105@163.com

月下旬至 11 月中上旬以及 3 月下旬至 4 月上旬; 大于平均气温约 193 d, 其中超过 20℃ 的约 92 d。封冻期自 12 月中旬至翌年 2 月底, 长约 80 d, 冻土层深度 0.8~1.2 m。流域位于燕山迎风山区, 多年平均降水量 750 mm, 水量比较充沛, 洋河水库以上多年平均径流量 1.69 亿 m³; 全年降水量约 80% 集中于汛期 6-9 月, 较大暴雨多出现在 7-8 月。

洋河水库流域包括抚宁、卢龙和青龙 3 县 7 个乡镇 242 个村庄。流域上游农民的经济收入来源主要由农林产品收入、外出务工和在当地发展养殖业构成。

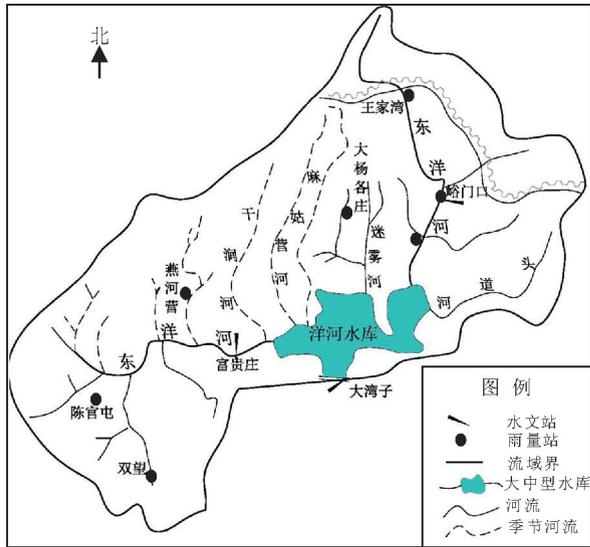


图 1 洋河水库流域水系分布
Fig.1 Yanghe Reservoir watershed

1.2 数据收集与调查

以村为单元, 以 2013 年为基准年, 分类收集各项农事活动与人居活动涉及到的原始数据。具体数据来源包括全国第一次污染源普查数据(秦皇岛市)、《2014 年秦皇岛统计年鉴》、《2014 年卢龙统计年鉴》、《2014 年青龙县统计年鉴》、《2014 年抚宁统计年鉴》、《2014 年河北农村统计年鉴》以及实地调研、问卷调查和相关部门统计数据资料, 同时收集用于负荷核算的相关参数。洋河水库流域的气象数据主要来源于该流域水文站、气象站的实测数据, 其中包括 1970-2015 年的气象数据。

1.3 数据分析和统计

1.3.1 子流域划分 通过 ArcGIS 软件对洋河水库流域数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM) 进行分析和处理, 得出栅格水流流向、流域分水线、自动生成的河网及子流域、河道与子流域编码、河网结构拓扑关系等。

在 ArcGIS 中, 经过投影变换、网格重分和流域界限划分等步骤得到 DEM 图。基于流域地貌及水文特征进行子流域的划分, 获取入库负荷计算基本控制单元。根据设定的子流域面积阈值和子流域出水口及进水口位置, 将流域划分为 237 个子流域, 并对每个单元进行编号(图 2)。

1.3.2 污染物负荷计算 本文依据污染源形成特点, 将研究区域非点源污染源划分为农村生活污水、固体废弃物、畜禽养殖、化肥流失、水土流失和城镇地表径流携带物共计六大类。

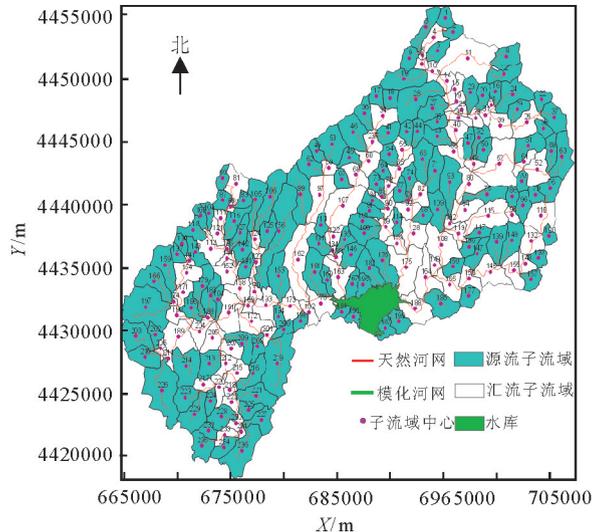
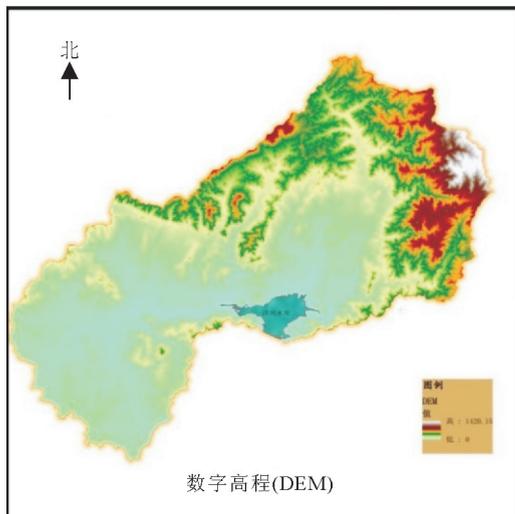


图 2 洋河水库流域数字高程和子流域划分

Fig.2 Subwatersheds of the Yanghe Reservoir watershed extracted from digital elevation model (DEM) data

各类污染负荷的估算系数根据李怀恩和李家科(2013)及《2004年河北省水资源评价》确定。基于输出系数负荷计算,采用清单分析方法,核算五类面源污染来源的TN、TP、NH₃-N、COD的排放负荷。

$$(1) \text{生活源污染负荷产生量: } W_1 = n \times C \quad (1)$$

式中: W_1 为生活源污染负荷产生量(kg/a); n 为人口数(人); C 为生活污水或固体废弃物污染人均排放量[kg/(a·人)]。

$$(2) \text{畜禽污染物排放量: } W_2 = \sum m \times \alpha \times \beta \quad (2)$$

式中: W_2 为畜禽污染物排放量(kg/a); m 为某畜禽养殖量(只); α 为某畜禽粪便排泄系数; β 为某畜禽粪便中污染物平均含量[kg/(a·只)]。

(3)化肥流失量,化肥施用量采用《河北经济年鉴》(2014年)中统计值的折中量。

$$\text{TN} = (\text{氮肥} + \text{复合肥} \times 0.3 + \text{磷肥} \times 0.185) \times 20\%$$

$$\text{TP} = (\text{磷肥} + \text{复合肥} \times 0.3) \times 15\%$$

$$\text{NH}_3 = \text{TN} \times 10\%$$

(4)水土流失污染物:

$$W_3 = \sum W_i \times A_i \times ER_i \times C_i \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中: W_3 为流域随泥沙运移输出的污染物(t); W_i 为某一种土地利用类型单位面积泥沙流失量(t/km²); A_i 为某一种土地利用类型面积(km²); ER_i 为污染物富集系数; C_i 为土壤中TN、TP平均含量(mg/kg)。

(5)城镇地表径流污染:

$$L = R \times C \times A \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中: L 为城镇地表径流年负荷量(kg); R 为年径流量(mm); C 为径流污染物平均浓度(mg/L); A 为集水区面积(m²)。

对于洋河水库流域,没有直接可供使用的当地污染物排放系数,主要依赖于类比方法,对流域面源污染进行分析,各种污染物污染参数见表1。

表1 各污染物污染系数

Tab.1 Pollution coefficients of various pollutants

编号	污染源	排放系数				入河系数				
		TN	TP	COD	NH ₃ -N	TN	TP	COD	NH ₃ -N	
1	生活污水	35.00 mg/L	3.50 mg/L	320.00 mg/L	25.00 mg/L	0.15	0.15	0.15	0.15	
2	固体废弃物	0.21%	0.22%	-	0.02%	0.07	0.07	-	0.07	
3	化肥流失	折中量	折中量	-	TN×0.1		0.60			
4	畜禽养殖	猪	0.59%	0.34%	5.20%	0.31%	5.25%	5.25%	5.58%	3.04%
		牛	0.44%	0.12%	3.10%	0.17%	5.68%	5.50%	6.16%	2.22%
		禽类	0.99%	0.58%	4.50%	0.28%	8.47%	8.42%	8.59%	4.15%
		大牲畜	0.42%	0.12%	3.10%	0.17%	5.68%	5.50%	6.16%	2.22%
		羊	0.70%	0.28%	0.46%	0.08%	5.30%	5.20%	5.50%	4.10%
5	水土流失	0.07%	0.05%	-	TN×0.1		1.00			
6	城镇地表径流	2.40 mg/L	0.42 mg/L	70.00 mg/L	0.24 mg/L		0.50			

1.3.3 分析方法 以美国环境研究所(Environment System Research Institute, ESRI)研制的ArcGIS平台和Office系列Excel工具为空间特征数据管理与分析平台。

2 结果与分析

2.1 面源污染物负荷量

依照上述污染物负荷计算公式得出洋河水库流域污染物TN、TP、NH₃-N、COD的产生量和入河量(表2)。2013年洋河水库流域6个面源污染来源(农村生活污水、固体废弃物、畜禽养殖流失、化肥流失、水土流失污染和城镇地表径流污染)、4个污染物指标(TN、TP、NH₃-N、COD)的排放负荷总量为55 900.55 t,入河量为3 476.70 t;其中,COD的排

放量和入河量最大,分别为41 645.72 t和2 519.53 t,占比均超过70%;其次为TN,排放量和入河量分别为7 798.94 t和567.43 t,占比分别为13.95%和16.32%;TP和NH₃-N占比较少,约为5%左右。由此可见,对洋河水库流域污染影响较大的污染物是COD和TN。

表2可见,在6种面源污染源输出量中,洋河水库流域污染主要贡献源是畜禽养殖,每年产生量为51 621.34 t,入河量为2 961.52 t,占比分别为92%和85%;其次是化肥流失,每年产生3 279.64 t,占比5.87%,入河量为377.00 t,占比为10.84%;农村生活污水产生量、固体废弃物物量、水土流失量和城镇地表径流污染产生量和入河量所占比较低,约为2%左右。

表 2 2013 年洋河水库流域污染负荷产生量与输出量

Tab.2 Pollutant discharges in the Yanghe Reservoir watershed

污染源	产生量/t					占比/ %	入河量/t					占比/ %
	COD	NH ₃ -N	TN	TP	合计		COD	NH ₃ -N	TN	TP	合计	
农村生活污水	710.24	55.49	77.68	7.77	851.18	1.52	106.54	8.32	11.65	1.17	127.68	3.67
固体废弃物	—	6.90	69.01	72.29	148.20	0.27	—	0.48	4.83	5.06	10.37	0.30
化肥流失	—	226.51	2265.05	788.08	3279.64	5.87	—	135.90	241.10	0.00	377.00	10.84
畜禽养殖	40935.36	2444.87	5387.15	2853.95	51621.34	92.34	2412.94	74.77	309.80	164.01	2961.52	85.18
水土流失	—	0.00	0.04	0.02	0.07	0.00	—	0.00	0.04	0.02	0.07	0.00
城镇地表径流	0.12	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00
总计	41645.72	2733.77	7798.94	3722.12	55900.55	100	2519.53	219.49	567.43	170.26	3476.70	100
占比/%	74.50	4.89	13.95	6.66	100		72.47	6.31	16.32	4.90	100	

2.2 面源污染空间分布特征

在 GIS 支持下, 将研究流域内各个村庄的行政区划范围与污染物排放量、土地利用类型等进行关联, 采用 ArcGIS 叠加分析工具, 将各村庄范围内污染物负荷分配到各个流域子单元中, 其中考虑村庄驻地所在流域子单元污染物权重不小于 50%。得出每个计算单元(出口)以及水库入河口处的污染物在空间上的分布。图 3 为每个子流域单元不同污染物指标(TN、TP、COD、NH₃-N)2013 年负荷量直方图, 结合洋河水库流域各支流的不同污染物负荷输出量(表 3)进行空间负荷量分析。

由图 3 和表 3 可见, 流域内 COD、TN、TP 和 NH₃-N 各类污染总量负荷以西洋河支流水系最大, 各个污染指标均占总流域 50% 左右; 其次为迷雾河支流, 各个污染指标所占比均超过 20%, 东洋河和麻姑营河相对较小。污染负荷强度体现的是单位面积上污染物的输出量, 可以用来进一步分析面源污染的空间差异特征及其形成原因。从流域内各个支流单位面积污染负荷量来看, COD、TN、TP 和 NH₃-N 单位面积负荷量均显示迷雾河支流最大, 东洋河支流最小。

表 3 2013 年洋河水库流域各支流污染指标负荷状况

Tab.3 Pollutant loading for each tributary of Yanghe Reservoir

指标	河名	COD	TN	TP	NH ₃ -N
占总 负荷量/ %	西洋河	50.62	47.91	48.75	50.19
	东洋河	7.03	18.94	10.56	10.25
	麻姑营河	16.50	12.45	15.66	15.20
	迷雾河	25.84	20.71	25.03	24.36
单位面 积负荷量/ t · km ⁻²	西洋河	3.75	0.88	0.31	0.19
	东洋河	0.60	0.40	0.08	0.04
	麻姑营河	8.38	1.58	0.68	0.38
	迷雾河	10.58	2.12	0.88	0.50

3 讨论

3.1 畜禽养殖为洋河流域最大的污染源

污染负荷大小一方面受流域面积大小的制约, 另一方面也受各流域人口密度、产业结构特征等因子影响。经计算分析得出对洋河水库流域污染影响较大的污染物是 COD 和 TN, 其 2013 年洋河水库流域负荷量分别为 2 519.53 t、567.43 t。在各类面源污染物的负荷量中, 畜禽养殖污染物贡献率最大, 其中污染物产生量和入河量占比分别为 92% 和 85%。该结果与冯建社(2014)的研究结论一致。其原因是由于在洋河水库上游集水区有大量养殖场, 有的养殖场将粪便露天堆放, 雨天时粪便随地表径流排入河内, 对洋河水库水质有很大程度上的影响。因此, 洋河水库流域面源污染防治的首要任务是提高粪便的资源化利用率, 加大养殖污染的治理力度, 减少污染物对水质的影响。

3.2 洋河水库流域面源污染的空间分布特征

根据研究流域面源污染 GIS 空间特征分析, 可见西洋河支流范围内各项污染物指标均较高, 4 种主要污染物指标(TN、TP、COD、NH₃-N)均占流域内污染物总量的 50% 左右。这主要是因为西洋河上游的卢龙县内, 分布着许多淀粉加工企业及农村小作坊, 大量的淀粉加工废水直接排入河道, 致使含有大量氮磷等营养盐的淀粉加工废水对水体产生了较大的污染。刘娜(2008)通过对洋河水库流域水质监测发现, 淀粉废水的短期排入, 在一定程度上提高了水体中污染物的浓度, 因此认为淀粉废水是洋河水库受污染的主要污染源之一。污染负荷强度体现的是单位面积上污染物的输出量, 可以用来进一步分析面源污染的空间差异特征及其形成原因。从面源负荷强度来分析, 单位面积所产生面源污染负荷最大的为迷雾河水系, 这些区域将是洋河水库流域面源污染进行重点治理的范围。

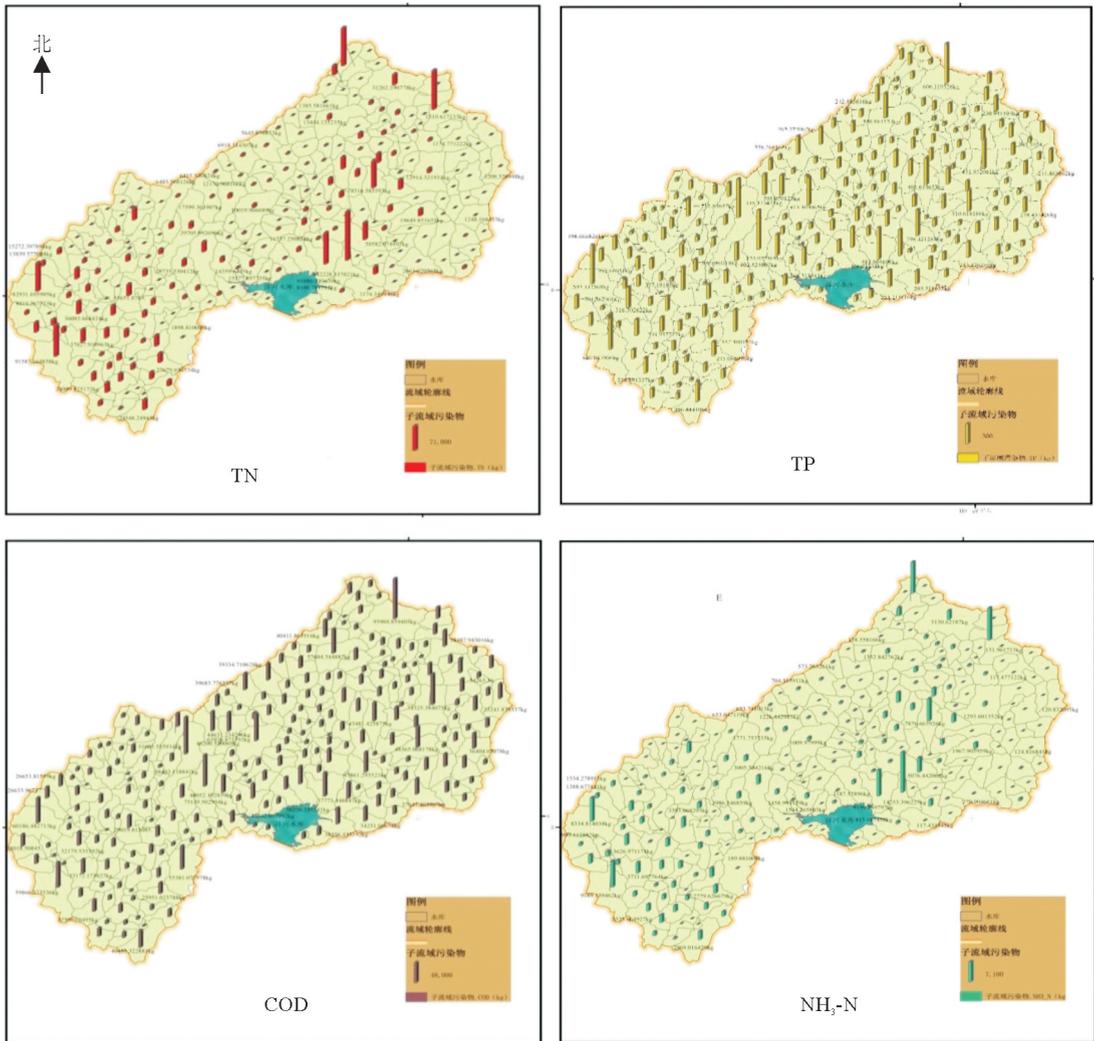


图3 2013年洋河水库流域主要污染物的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the primary pollutants in Yanghe Reservoir watershed

3.3 洋河水库流域面源污染治理措施

根据洋河水库水质现状及污染负荷消减目标,本着重点治理、防治结合的原则,结合前人的研究治理方法以改善洋河水库水质现状(栾建国等,2008;薛亚东,2009;邹曦等,2014;戴会超等,2015;和晓荣等,2015),提出以下治理措施:

(1)针对洋河水库流域淀粉加工废水的产生量、污染物浓度及流域缺水的特点,淀粉加工废水应采用集中收集处理与分散处理相结合,采用生物接触氧化工艺处理,处理后废水可用于农田水利灌溉。

(2)畜禽粪便的处置应在优化畜禽养殖产业的基础上,通过集中收集,采用制肥厂、堆粪发酵池和粪便回收池等控制工艺。

(3)针对洋河水库流域村庄比较分散的特点,在流域内集中建设生活污水处理设施,处理工艺采用生物接触氧化、厌氧生物滤池、曝气生物滤池、生物转盘等技术。

(4)控制农业面源污染可采用“源头控制与节流相结合”的方法进行治理。“源头控制”即对农田采取科学的施肥方式,使农田中的养分保持平衡,减少氮磷等营养物质的积累量与流失量;“节流”即控制水土流失,减少氮磷等营养物质的流失量。

(5)采取末端治理的方法,将重点河道入河口处的滩地合理利用,建成人工湿地或者生物廊道,利用水生生物及水生态环境生物链系统,达到去除水体中氮磷和其他污染物质的目的。

参考文献

- 戴会超,毛劲乔,张培培,等,2015.河道型水库富营养化及水华调控方法和关键技术[J].水利水电技术,46(6):54-58,66.
- 冯建社,凌绍华,2014.洋河水库污染现状及防治对策探讨[J].环境与发展,26(3):109-111.
- 河北省人民政府,2014.河北经济年鉴[M].北京:中国统计出版社.

- 版社.
- 河北省水文水资源勘测局, 2004. 2004 年河北省水资源评价 [R]. 石家庄: 河北省水文水资源勘测局.
- 和晓荣, 王秀英, 和武, 2015. 金沙江中游库区水污染综合防治措施研究 [J]. 水利水电技术, 46(12): 71 - 76.
- 康启燕, 张富, 陈瑾, 等, 2015. 安家沟流域面源污染空间分布特征 [J]. 四川农业大学学报, 33(4): 415 - 421.
- 李怀恩, 李家科, 2013. 流域非点源污染负荷定量化方法研究与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 622.
- 刘娜, 2005. 洋河水库底泥氮磷释放规律实验研究 [D]. 太原: 太原理工大学.
- 栾建国, 陈文祥, 李永祥, 等, 2008. 水库小流域生态修复对策初步研究 [J]. 水生态学杂志, 1(1): 678 - 684.
- 马广文, 王圣瑞, 王业耀, 等, 2015. 鄱阳湖湖流域面源污染负荷模拟与氮和磷时空分布特征 [J]. 环境科学学报, 35(5): 1285 - 1291.
- 薛亚东, 2009. 松华坝水库上游牧羊河氮、磷主要来源研究 [J]. 水生态学杂志, 2(6): 132 - 134.
- 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等, 2013. 我国农业面源污染治理技术研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 21(1): 96 - 101.
- 张丹, 杨洪霞, 段慧, 等, 2014. 我国非点源污染的基本特征与时空分布规律研究综述 [J]. 四川环境, 33(4): 140 - 145.
- 邹曦, 郑志伟, 张志永, 等, 2014. 二级生物措施削减面源污染负荷的初步试验 [J]. 水生态学杂志, 35(6): 93 - 98.
- Geza M, McCray J E, 2008. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions [J]. Journal of Environmental Management, 88(3): 393 - 406.
- Jayakrishnan R, Srinivasan R, Santhi C, et al, 2005. Advances in the application of the SWAT model for water resources management [J]. Hydrological Processes, 19(3): 749 - 762.
- Zhang Y F, Tao C Y, Huang Y, 2011. Study on control counter measures of agricultural non-point source pollution in lakeside belt of Poyang Lake [J]. Meteorological and Environmental Research, 2(7): 62 - 65.

(责任编辑 万月华)

Spatial Distribution of Non-point Source Pollution Loading in Yanghe Reservoir Watershed

CHEN Ping^{1,2}, FU Chang-feng², JI Xiao-guang², LI Da-ming¹

(1.Tianjin University Key Laboratory of Harbor & Ocean Engineering, Ministry of Education,
School of Civil Engineering, Tianjin 300072,P.R.China;

2.Hebei Research Institute of Investigation & Design of Water Conservancy
& Hydropower, Tianjin 300250,P.R.China)

Abstract: Yanghe Reservoir is one of the primary drinking water sources for Qinhuangdao City. The four largest reservoir tributaries are Dongyang River, Xiyang River, Miwu River and Maguying River. The aim of this study was to characterize the spatial distribution of non-point source (NPS) pollution in the Yanghe Reservoir watershed and provide a theoretical basis for controlling NPS loading to the reservoir. Data on weather, land use and agricultural management in the basin for 2013 was used to calculate the load of four pollutants (TN, TP, NH₃-N and COD). Pollutant sources included domestic wastewater, solid waste, livestock and poultry breeding, chemical fertilizer loss, soil erosion and urban runoff. The spatial distribution of sources was analyzed using ArcGIS. Release of the four pollutants to the watershed amounted to 55 900.55 t and river loading totaled 3 476.70 t. The main pollutants reaching the rivers were COD (2 519.53 t) and TN (567.43 t), with breeding of poultry and livestock identified as the primary source. Pollutant production at breeding facilities was 51 621.34 t/a and the amount carried into Yanghe River was 2 961.52 t/a, accounting for 92% and 85% of the calculated totals. The pollutant load from the Xiyang River watershed was the largest, followed by the Miwu River watershed. The Miwu watershed had the highest pollutant production per unit area and priority areas identified for NPS pollution control were the watersheds of the Xiyang and Miwu Rivers.

Key words: Yanghe Reservoir; pollutant loading; spatial distribution