

沙湖的水环境容量和污染物总量控制

李延林¹, 邱小琮²

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 生命科学学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: [目的] 探明宁夏回族自治区沙湖富营养化状态及计算主要污染的水环境容量, 为沙湖人湖污染负荷的削减和水环境保护提供一定依据。[方法] 于 2015—2017 年冬(1 月)、春(4 月)、夏(7 月)、秋(10 月)监测了沙湖水体理化指标。采用综合营养状态指数法对其富营养化状态进行了评价, 采用沃伦威德(Vollenweider)模型和狄龙(Dillon)模型计算了 4 种不同水质目标情景下的高锰酸盐指数、总氮和总磷的水环境容量。[结果] 2015—2017 年沙湖富营养化状态总体上为春、冬季轻度富营养化, 夏、秋季中度富营养化; 情景二和三水质目标下沙湖 2015—2017 年高锰酸盐指数、总氮和总磷水环境容量剩余量均为 0; 情景四水质目标下沙湖 2015—2017 年总磷的水环境容量剩余量均为 0, 高锰酸盐指数的水环境容量有剩余量, 总氮的水环境容量 2015 年有剩余量, 2016—2017 年剩余量为 0。在 2017 年水质现状的基础上, 达到Ⅲ类水质要求高锰酸盐指数、总氮和总磷分别消减 655.97 t, 39.27 t 和 1.41 t, 消减率分别为 112.89%, 45.58% 和 37.60%; 达到Ⅳ类水质要求高锰酸盐指数、总氮和总磷分别消减 0, 15.83 t 和 0.94 t, 消减率分别为 0, 18.37% 和 25.07%。[结论] 沙湖水体呈现一定程度的污染, 已达到富营养化状态, 高锰酸盐指数、总氮和总磷的水环境容量大于目标要求的水环境容量, 应该及时进行治理和保护。

关键词: 沙湖; 富营养化; 综合评价; 水环境容量; 污染物总量控制

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)05-0272-06

中图分类号: X832

文献参数: 李延林, 邱小琮. 沙湖的水环境容量和污染物总量控制[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 272-277. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.038; Li Yanlin, Qiu Xiacong. Environmental capacity and total pollutant control in Shahu Lake[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 272-277.

Environmental Capacity and Total Pollutant Control in Shahu Lake

Li Yanlin¹, Qiu Xiacong²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan,

Ningxia 750021, China; 2. School of Life Science, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: [Objective] This study aims to determine the eutrophication status of Shahu Lake, Ningxia Hui Autonomous Region, and to calculate the environmental capacity of the lake for major pollution as a means of providing a basis for reducing the pollution load and improving the environmental protection of Shahu Lake. [Methods] Water samples were collected in January, April, July, and October during 2015—2017 to measure physical and chemical parameters. A comprehensive eutrophic state index was applied to assess the trophic status, and the Vollenweider and Dillon model was used to analyze the environmental capacity of permanganate index(COD_{Mn}), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) of the lake under four different water quality target scenarios. [Results] During 2015—2017, Shahu Lake was mildly eutrophic in spring and winter, and moderately eutrophic in summer and autumn. In scenarios two and three of the water quality targets, the remaining environmental capacities for COD_{Mn}, TN and TP were zero. In scenario four, the remaining environmental capacity of the lake for TN was zero, whereas that for COD_{Mn} still had a remaining capacity. The environmental capacity of TN had a surplus in 2015, but this was reduced to zero in 2016—2017. On the basis of the water quality in 2017, to attain class Ⅲ water quality requirements, COD_{Mn}, TN, and TP should

收稿日期: 2019-02-28

修回日期: 2019-04-03

资助项目: 宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)项目“宁夏引黄灌区河湖湿地水环境承载力及其生态模型研究”(NXYLXK2017A03)。

第一作者: 李延林(1993—), 男(汉族), 青海省民和县人, 硕士研究生, 研究方向为水资源与水环境调控。E-mail: 1697170064@qq.com。

通讯作者: 邱小琮(1971—), 男(汉族), 浙江省湖州市人, 博士, 教授, 主要从事水域生态学及水环境调控方面的教学与研究。E-mail: qxc7175@126.com。

be reduced to 655.97, 39.27, and 1.41 tonnes, respectively, which correspond to reduction rates of 112.89%, 45.58%, and 37.60%, respectively. In order to attain class IV water quality requirements, the COD_{Mn}, TN and TP should be reduced by 0.0, 15.83, and 0.94 tonnes, respectively, which correspond to reduction rates of 0%, 18.37%, and 25.07%, respectively. [Conclusion] Shahu Lake has certain degree of pollution and has reached a state of eutrophication, the environmental capacities of COD_{Mn}, TN, and TP in the lake are greater than the target requirement, and should be managed and protected.

Keywords: Shahu Lake; eutrophication assessment; comprehensive assessment; environmental capacity; total pollutant control

随着人口增长、工业和旅游产业发展,湖泊的污染越来越严重,特别是湖泊的富营养化^[1-2]、水生态环境功能退化^[3]和水化学变化^[4]问题尤为突出。湖泊富营养化会使藻类或水生植物异常生长,破坏水生生态系统的生态平衡,导致水中溶氧量下降,鱼类等生物死亡;同时,鱼类等生物尸体又会使水体产生臭味、产生颜色,降低水体的透明度^[5]。湖泊富营养化主要是由于氮磷过量输入^[6],同时与水体氮磷含量有关,而且氮磷比也是一个重要的影响因子^[7]。因此,控制湖泊富营养化的关键在于制定科学合理的湖泊氮磷等污染防治措施,而氮磷等特征污染物的水环境容量是制定科学合理的流域污染防治措施的主要依据^[8-9],水体富营养化评价与水环境容量分析已逐渐成为水环境管理的一种重要手段^[10]。

沙湖原名红渠洼,又称鱼湖,原为宁夏回族自治区银川平原西大滩的一处蝶形洼地,其周边地带属于地下水停滞带,径流不畅,地下水几乎无法排泄,沙湖就成为地下水排泄的重要通道。宁夏沙湖自然保护区位于宁夏回族自治区石嘴山市平罗县西南部,地理坐标为东经 106°19',北纬 38°45',东北距平罗县县城 19 km 处,南距银川市市区 56 km,北距石嘴山市 26 km。沙湖自然保护区属典型的大陆性气候,按温度的划分属中温带,按降水和干湿情况划分则属半干旱荒漠地区,气候特点是热量丰富,日照充足,干旱少雨,蒸发强烈,春暖快,夏热短,秋凉早,冬寒长,年均降水量 174.7 mm,蒸发量 1 755.1 mm,为降水量的 10 倍。

近年来,随着当地经济和沙湖旅游业的发展,沙湖游客数量逐年增加,使旅游区燃油快艇数量和垃圾增多^[11];湖区有 10 余家宾馆、饭店,存在向湖中片、块、点状分布芦苇施肥和向湖区经济鱼类投饵行为^[12],这些现象造成沙湖旅游区水体污染逐渐加重、水质恶化,水体呈现富营养化状况。同时,沙湖自然保护区属于蒸发强烈地区,在干旱气候条件的影

响下,沙湖在蒸发浓缩作用下,水体含盐量增加,矿化度升高^[12]。任学蓉等^[13]采用营养状态指数法对沙湖营养状况进行综合评价,得出磷和有机污染物是沙湖富营养化限制因子;赵红雪等^[14]采用综合营养状态指数(TLI)、Shannon-Wiener 指数(H)和 Margalef 指数(D)对沙湖水体进行富营养化分析与评价;陈珂等^[15]对沙湖水体富营养化变化特征、成因进行了分析。以上研究都对沙湖富营养化进行了评价与分析,但对沙湖水环境研究较少,本研究对宁夏回族自治区沙湖富营养化状态进行评估且计算主要污染物的水环境容量,旨在为沙湖入湖污染负荷的削减和水环境保护提供支撑。

1 材料与方

1.1 监测调查

根据沙湖形状特征与开发利用情况,共设置了 5 个监测点,分别为 S₁(五号桥)、S₂(湖中心)、S₃(鸟岛)、S₄(养殖区)、S₅(码头)。采样时间为 2017 年冬(1 月)、春(4 月)、夏(7 月)、秋(10 月)。

现场测定水体的 pH 值和透明度指标。用 5.0 L 采水器采集水样保存,带回实验室当天测定总氮、总磷、高锰酸盐指数和叶绿素 a 指标。总氮使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89),总磷使用过硫酸钾氧化-磷钼蓝法(GB 11893-89),高锰酸盐指数使用酸性高锰酸钾法(GB 11892-92),叶绿素 a 使用紫外分光光度法。

1.2 富营养化评价

(1) 采用综合营养状态指数法评价沙湖营养状态,综合营养状态指数计算式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI(j) \quad (1)$$

式中:TLI(Σ)——综合营养状态指数;W_j——第 j 种参数的营养状态指数的相关权重;TLI(j)——第 j 种参数的营养状态指数。

各评价因子营养状态指数计算式^[16]为:

$$TLI(\text{叶绿素 a}) = 10(2.5 + 1.086 \ln \text{叶绿素 a})$$

$$TLI(\text{总磷}) = 10(9.436 + 1.624 \ln \text{总磷})$$

$$TLI(\text{总氮}) = 10(5.453 + 1.694 \ln \text{总氮})$$

TLI(透明度) = 10(5.118 - 1.94ln 透明度)

TLI(高锰酸盐指数) = 10(0.109 + 2.661ln 高锰酸盐指数)

式中:叶绿素 a 单位为 mg/m³,透明度单位为 m;其他指标单位均为 mg/L。

以叶绿素 a 作为基准参数,则第 j 种参数归一化的相关权重计算公式为:

$$W_j = r_{ij}^2 / \sum r_{ij}^2 \quad (2)$$

式中: r_{ij} ——第 j 种参数与基准参数叶绿素 a 的相关系数; m ——评价参数的个数。

营养状态评价标准^[17]见表 1。各评价因子参数与基准参数叶绿素 a 的相关系数^[18]见表 2。

表 1 综合营养状态指数评价标准

评分值	<30	(30,50]	(50,60]	(60,70]	>70
营养程度	贫营养	中营养	轻度营养化	中度营养化	重度营养化

表 2 中国湖泊水体部分水质参数与基准参数 Chl. a 的相关系数

参数	叶绿素 a	总磷	总氮	透明度	高锰酸盐指数
r_{ij}	1	0.84	0.82	0.83	0.83
r_{ij}^2	1	0.705 6	0.672 4	0.688 9	0.688 9
W_j	0.266 3	0.187 9	0.179 0	0.183 4	0.183 4

注: r_{ij} ——第 j 种参数与基准参数叶绿素 a 的相关系数; W_j ——第 j 种参数的营养状态指数的相关权重。

1.3 水环境容量计算

1.3.1 化学需氧量水环境容量计算 沙湖地处内陆深处是河流古道型湖泊,也属于沙漠中的湖泊,根据温度带划分属中温带,按降雨和干湿地区划分属半干旱荒漠地区,由于贺兰山的屏障作用,西北的冷空气难以长驱直入,形成了热量丰富、日照充足、干旱少雨、多风、蒸发量大的气候特征。沙湖全年蒸发量约为降雨量的 10 倍,一年中水体交换频繁,因此,需要对沙湖进行人工补水。黄河水是沙湖的主要地表水源,沙湖 80% 以上的水源补给直接或间接地来源于黄河水。沙湖高锰酸盐指数水环境容量采用沃伦威德(Vollenweider)模型^[10]进行计算,其计算式为:

$$W = \frac{1}{\Delta t} (C_s - C_0)V + KC_s V + C_s q \quad (3)$$

式中: W ——湖泊水体有机污染物的最高允许排放量(g/d); Δt ——湖泊维持其设计水量的天数(或枯水时段天数,d); C_s ——湖泊水体应执行的水质标准或该水质指标的目标控制浓度(mg/L); C_0 ——湖泊的实测浓度(mg/L); V ——湖泊的设计水量(设计库容

或按死库容)(m³); K ——湖泊中有机物的综合衰减系数(d⁻¹); q ——安全库容期间湖泊平均每天的流出水量(m³/d),不考虑蒸发时,应等于入湖(库)废水量、入湖地表径流量与上游河道来水量之和。下同。

1.3.2 总氮、总磷水环境容量计算 目前,营养盐水环境容量计算模型有:沃伦威德(Vollenweider)模型、狄龙(Dillion)模型、OECD 模型和合田健模型^[10]等。狄龙(Dillion)模型适用于富营养化的湖泊(水库)^[19],沙湖总氮、总磷水环境容量采用狄龙(Dillion)模型^[20]进行计算,其计算式为:

$$M = AL_s = \frac{AC_s h Q_{出}}{V(1-R)} \quad (4)$$

式中: M ——水体氮或磷的纳污能力(g/a); L_s ——单位湖(库)水面积对氮或磷的纳污能力[g/(m²·a)]; A ——计算时期湖(库)水面积(m²); C_s ——湖(库)中氮或磷的年平均控制浓度(水质目标值)(mg/L); h ——计算时期水域的平均水深,由计算时期的库容/水深面积得到(m); $Q_{出}$ ——稳态时湖库的年出水量(m³/a); R 为氮、磷在湖(库)中的滞留系数,无量纲, $R = 1 - W_{出}/W_{入}$; $W_{出}/W_{入}$ ——氮、磷的年出、入湖量(指通过各种途径带出湖体的量,包括水草打捞、捕鱼、下泄等带出的量)(t/a)。

1.3.3 模型参数值的选取 入库水量根据沙湖年降雨量和人工补水量计算得到,出库水量根据沙湖年蒸发量计算得到; $R_{总氮}$, $R_{总磷}$ 根据现状污染负荷及监测点氮磷浓度和流量数据估算获得;高锰酸盐指数的 K 值确定方法有试验法、反推法和类比法,本文采用类比法确定,综合考虑已有类似研究后, K 值按保守的 0.004 d⁻¹ 进行估计;计算沙湖水环境容量的各项指标见表 3。

表 3 模型参数及赋值

参数	符号	单位	数值
湖泊容积	V	10 ⁶ m ³	32.4
水面面积	A	km ²	18.0
平均水深	h	m	1.8
入库水量	$Q_{入}$	10 ⁴ m ³ /d	10.65
出库水量(蒸发量)	$Q_{出}$	10 ⁴ m ³ /d	8.67
衰减系数	K	1/d	0.004
滞留系数	$R_{总氮}$	—	0.46
滞留系数	$R_{总磷}$	—	0.46

2 结果与分析

2.1 沙湖水体理化指标特征

沙湖 2015—2017 年主要水体理化指标特征变化情况见表 4。沙湖 2015—2017 年 pH 值变化范围为 8.51~8.84;透明度变化范围为 37.5~47.5 cm;叶

绿素 a 浓度变化范围为 14.07~22.1 mg/m³;高锰酸 变化范围为 1.19~1.69 mg/L;总磷浓度变化范围为 盐指数浓度变化范围为 6.58~9.45 mg/L;总氮浓度 0.05~0.28 mg/L。

表 4 2015—2017 年沙湖水体理化指标特征

年份	采样点	pH 值	透明度/ cm	叶绿素 a/ (mg · m ⁻³)	高锰酸盐指数/ (mg · L ⁻¹)	总氮/ (mg · L ⁻¹)	总磷/ (mg · L ⁻¹)
2015	五号桥 S ₁	8.77	42.00	16.67	7.23	1.25	0.10
	湖中心 S ₂	8.84	41.00	17.28	7.48	1.28	0.28
	鸟岛 S ₃	8.79	38.75	17.67	7.93	1.43	0.13
	养殖区 S ₄	8.63	38.75	16.83	6.90	1.31	0.12
	码头 S ₅	8.76	37.50	15.20	6.58	1.19	0.10
2016	五号桥 S ₁	8.60	38.75	14.07	8.00	1.57	0.09
	湖中心 S ₂	8.52	40.00	14.24	8.25	1.69	0.10
	鸟岛 S ₃	8.55	39.00	18.10	8.53	1.69	0.12
	养殖区 S ₄	8.55	38.75	16.26	9.45	1.61	0.11
	码头 S ₅	8.51	40.00	14.83	8.18	1.49	0.09
2017	五号桥 S ₁	8.79	46.50	17.70	7.10	1.46	0.06
	湖中心 S ₂	8.71	47.50	16.40	7.18	1.45	0.07
	鸟岛 S ₃	8.75	43.75	22.10	8.13	1.63	0.08
	养殖区 S ₄	8.64	40.00	20.20	7.23	1.48	0.06
	码头 S ₅	8.63	40.00	18.30	7.15	1.35	0.05

2.2 富营养化综合评价

沙湖富营养化按照湖泊(水库)营养评价标准进行等级评价,评价结果见表 5。2015—2017 年沙湖综合营养状态指数均在 50~70 之间,沙湖营养状态水

平在轻度至中度营养状态之间。沙湖富营养化状态,总体上呈春、冬季为轻度富营养化,夏、秋季为中度富营养化。单因子营养状态指数中,沙湖营养状态最高的是透明度;其次是总氮和总磷。

表 5 沙湖富营养状态评价结果

时间	各因子的营养状态指数(TLI)					TLI(Σ)	营养水平
	叶绿素 a	总磷	总氮	透明度	高锰酸盐指数		
2015 年	冬	47.45	56.64	57.67	64.63	55.27	轻度营养化
	春	43.99	53.74	53.23	66.41	54.63	轻度营养化
	夏	63.13	63.33	65.10	75.19	66.38	中度营养化
	秋	57.41	57.60	57.16	72.22	60.29	中度营养化
2016 年	冬	46.23	56.64	60.66	64.24	55.4	轻度营养化
	春	45.16	47.55	55.71	67.64	53.79	轻度营养化
	夏	61.47	65.58	63.34	78.55	65.72	中度营养化
	秋	57.42	55.61	68.31	69.45	61.56	中度营养化
2017 年	冬	55.46	52.51	61.29	61.75	56.41	轻度营养化
	春	43.47	33.79	55.1	72.69	51.19	轻度营养化
	夏	63.3	56.3	54.5	72.69	60.75	中度营养化
	秋	57.4	48.12	69.16	64.55	58.49	轻度营养化

2.3 水环境容量分析

为充分了解湖体在不同水质目标情景下的环境容量,共设置以下 4 种水质目标情景。情景一:保持现状水质不再恶化,即水质控制目标等于现状水质;情景二:达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[21]中Ⅱ

类水质目标;情景三:达到自然保护区水质目标要求,即达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅲ类水质目标;情景四:达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅳ类水质目标。沙湖 2015—2017 年高锰酸盐指数、总氮和总磷水环境容量见表 6。

表 6 沙湖水环境容量计算结果 t/a

年份	水环境容量	情景一	情景二	情景三	情景四
2015	高锰酸盐指数	570.02	-953.53	-7.23	1 885.37
	总氮	75.60	29.30	58.60	87.90
	总磷	8.44	1.47	2.93	5.86
2016	高锰酸盐指数	669.49	-1 450.22	-503.92	1 388.68
	总氮	94.35	29.30	58.60	87.90
	总磷	6.09	1.47	2.93	5.86
2017	高锰酸盐指数	581.07	-1 008.71	-62.42	1 830.18
	总氮	86.15	29.30	58.60	87.90
	总磷	3.75	1.47	2.93	5.86

2.4 污染物总量控制目标

污染物排放总量控制目标既不能太高,也不能太低。控制目标太高,经济代价可能很大,经济上不合理,同时污染物治理水平也可能达不到;控制目标太低,湖泊水质得不到有效的治理。根据现有的治污工程经验,可达到的污染物削减率最高在 60%~80% 之间,超过这个范围则技术经济上将不合理^[22]。

根据沙湖水环境容量计算结果,以 2017 年为基准年,按照 20% 预留容量,确定沙湖主要污染物高锰酸盐指数、总氮和总磷的总量控制目标,对比污染物输入量提出污染物的削减量和削减比例,详见表 7 和表 8。沙湖达到自然保护区水质目标要求,即达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅲ类水质目标,高锰酸盐指数、总氮和总磷的削减量 655.97, 39.27, 1.41 t, 消减比例分别为 112.89%, 45.58% 和 37.60%; 沙湖达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅳ类水质目标,高锰酸盐指数、总氮和总磷的削减量 0, 15.83 和 0.94 t, 消减比例分别为 0, 18.37%, 25.07%。

表 7 沙湖污染物总量控制目标(情景三)

项目	高锰酸盐指数	总氮	总磷
污染物输入总量/t	581.07	86.15	3.75
纳污能力/t	-62.42	58.6	2.93
总量控制目标/t	-74.90	46.88	2.34
削减量/t	655.97	39.27	1.41
消减比例/%	112.89	45.58	37.60

表 8 沙湖污染物总量控制目标(情景四)

项目	高锰酸盐指数	总氮	总磷
污染物输入总量/(t·a ⁻¹)	581.07	86.15	3.75
纳污能力/(t·a ⁻¹)	1 830.18	87.9	5.86
总量控制目标/(t·a ⁻¹)	1 464.14	70.32	4.69
削减量/(t·a ⁻¹)	—	15.83	0.94
消减比例/%	—	18.37	25.07

3 讨论与结论

(1) 2015—2017 年沙湖综合营养状态指数均在 50~70 之间,沙湖营养状态水平在轻度至中度营养状态之间。沙湖富营养化状态,总体上呈春、冬季为轻度富营养化,夏、秋季为中度富营养化。单因子营养状态指数中,沙湖营养状态最高的是透明度;其次是总氮和总磷。造成沙湖 2015—2017 年沙湖富营养化季节变化特征明显主要原因是沙湖的补水水源为黄河生态补水,补水随灌期进行,随着补水将大量氮、磷等营养盐带入湖泊,不断累积,进而湖水水质逐年下降,造成湖泊富营养化。另外,沙湖作为宁夏著名旅游景区,每年夏、秋季来到沙湖旅游的人数不断增加,将大量的污染物带到沙湖,最终累积在湖底,造成沙湖水水质下降。沙湖总氮/总磷 2015—2017 年的平均比值为 13.55,超过了淡水藻类体内的 N/P 值(约为 7)。当湖泊(水库)N/P 比大于 10~15 时,认为 P 是影响藻类异常生长限制性营养元素,决定湖泊的生产力^[23-24],因此,限制 P 元素输入是控制沙湖水体富营养化的关键,P 元素的持续增量输入会使其富营养化程度加剧。

(2) 根据沙湖水环境容量计算结果,2015 年沙湖在《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅳ类水质目标下高锰酸盐指数和总氮的水环境容量有剩余量,2016—2017 年沙湖在《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅳ类水质目标下高锰酸盐指数的水环境容量有剩余量,总氮的水环境容量剩余量为 0,2015—2017 年沙湖在《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅳ类水质目标下总磷的水环境容量剩余量均为 0;在《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅲ类水质目标下高锰酸盐指数、总氮和总磷的水环境容量剩余量都为 0。在 2017 年水质现状的基础上控制高锰酸盐指数、总氮和总磷的排放量,达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅲ类水质要求,高锰酸盐指数需削减 655.97 t,消减率 112.89%,总氮需削减 39.27 t,消减率 45.58%,总磷需削减 1.41 t,消减率 37.60%;达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅳ类水质要求,高锰酸盐指数需削减 0,消减率 0,总氮需削减 15.83 t,消减率 18.37%,总磷需削减 0.94 t,消减率 25.07%。

(3) 参考国内外湖库污染防治研究以及沙湖实际情况,建议以下措施:从源头上减少污染物的输入,加强并完善沙湖的旅游管理制度,在养殖区和禁养区采取集中管理和治理,达标后排放;建立湖泊周边生态防护带,提高对地表径流的截留和农田退水的渗漏,

减少入湖污染物总量;同时,加强监测,研究沙湖的水环境变化规律,防止发生水华等突发性水污染事件。

[参 考 文 献]

- [1] Phillips G, Kelly A, Pitt J, et al. The recovery of a very shallow eutrophic lake, 20 years after the control of effluent derived phosphorus[J]. *Freshwater Biology*, 2010,50(10):1628-1638.
- [2] Guo L. Ecology: Doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. *Science*, 2007,317(5842):1166-1166.
- [3] Xu Fuli, Tao Shu, Dawson R W, et al. Lake ecosystem health assessment: indicators and methods[J]. *Water Research*, 2001,35(13):3157-3167.
- [4] Yu Tao, Zhang Yuan, Wu Fengchang, et al. Six-decade change in water chemistry of large freshwater lake Taihu, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013,47(16):9093-9101.
- [5] 何德进,邢友华,姜瑞雪,等.东平湖水体中氮磷的分布特征及其富营养化评价[J]. *环境科学与技术*, 2010,33(8):45-48,61.
- [6] Baulch H M. Asking the right questions about nutrient control in aquatic ecosystems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013,47(3):1188-1189.
- [7] 张晟,李崇明,郑坚,等.三峡水库支流回水区营养状态季节变化[J]. *环境科学*, 2009,30(1):64-69.
- [8] 金相灿.湖泊富营养化控制和管理技术[M].北京:化学工业出版社,2001.
- [9] 王霞,吕宪国,闫伯茹,等.基于富营养化阈值的松花湖水环境容量分析[J]. *湖泊科学*, 2006,18(5):503-508.
- [10] 郝芳华.流域水质模型与模拟[M].北京:北京师范大学出版社,2008.
- [11] 罗燕珠,曠向宁.宁夏沙湖历年水质变化趋势分析[J]. *水土保持通报*, 2011,31(5):246-249.
- [12] 鲁小珍,刘茂松,胡海波,等.宁夏沙湖风景区的生态环境问题与对策[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2001,25(3):89-92.
- [13] 任学蓉,郎勇设,金辉.沙湖水体富营养化评价及防治对策[J]. *干旱区资源与环境*, 2007,21(2):118-122.
- [14] 赵红雪,邱小琮,杨艳梅,等.宁夏沙湖水体富营养化分析与评价[J]. *湖北农业科学*, 2010,49(10):2414-2417.
- [15] 陈珂,张健,李娇,等.宁夏平罗沙湖水体富营养化变化特征分析及防治对策[J]. *宁夏农林科技*, 2016,57(11):56-58,63.
- [16] 张小东.福建省棉花滩水库富营养化状况评价及分析[J]. *水生态学杂志*, 2012,33(5):20-24.
- [17] 王明翠,刘雪芹,张建辉.湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. *中国环境监测*, 2002,18(5):47-49.
- [18] 金相灿.中国湖泊环境[M].北京:海洋出版社,1995.
- [19] 中国标准化管理委员会,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T25173-2010 水域纳污能力计算规程[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [20] 逢勇,陆桂华.水环境容量计算理论及应用[M].北京:科学出版社,2010.
- [21] 国家环境保护总局,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [22] 于凤存,方国华,徐佳,等.中小型湖库型饮用水水源地污染负荷总量控制探讨[J]. *水文*, 2015,35(4):42-46,19.
- [23] Martin J R, Keller C H, Jr C R, et al. Long-term performance summary for the Boot Wetland treatment system[J]. *Water Science & Technology*, 2001,44(11/12):413-420.
- [24] 刘信安,湛敏,马艳娥.三峡库区流域藻类生长与营养盐吸收关系[J]. *环境科学*, 2005,26(4):95-99.
- [20] 闫萧萧,李晶,杨震.2000—2016年陈巴尔虎旗植被覆盖度时空变化遥感动态监测[J]. *中国农业大学学报*, 2018,23(06):121-129.
- [21] 李丽丽,王大为,韩涛.2000—2015年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应[J]. *中国沙漠*, 2018,38(5):1108-1118.
- [22] 王良玉,杜会石.近35年松嫩沙地风沙—植被动态演变及模拟预测[J]. *水土保持研究*, 2018,25(4):380-385.
- [23] 赵建军,张洪岩,乔志和,等.基于CA-Markov模型的向海湿地土地覆被变化动态模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2009,24(12):2178-2186.
- [24] 郑青华,罗格平,朱磊,等.基于CA-Markov模型的伊犁河三角洲景观格局预测[J]. *应用生态学报*, 2010,21(4):873-882.
- [25] 邢龙飞,黄超,雷少刚,等.锡林浩特市胜利矿区近30a植被覆盖度变化研究[J/OL]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2019(03):61-69.
- [26] 洪园园,春风,包玉海,等.近57年锡林浩特市和阿巴嘎旗气温变化特征比较分析[J]. *草原与草业*, 2015,27(3):15-21.
- [27] 焦全军,付安民,张肖,等.基于MODIS数据的锡林郭勒草原植被覆盖变化及驱动因子分析[J]. *北京工业大学学报*, 2017,43(5):659-664.
- [28] 赵汝冰,肖如林,万华伟,等.锡林郭勒盟草地变化监测及驱动力分析[J]. *中国环境科学*, 2017,37(12):4734-4743.
- [29] 胡碧松,张涵玥.基于CA-Markov模型的鄱阳湖区土地利用变化模拟研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018,27(6):1207-1219.

(上接第 256 页)