

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0143

杨玉麟,李俊峰,刘伟伟,等.基于SMS水质模型的蘑菇湖水环境容量分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):127-137.
YANG Y L,LI J F,LIU W W,et al. Water environmental capacity analysis of Moguhu reservoir based on SMS water quality model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(6):127-137. (in Chinese)

基于 SMS 水质模型的蘑菇湖水环境容量分析

杨玉麟¹,李俊峰^{1,2},刘伟伟¹,宋东宝¹,杨 捷¹,陶俊宏¹,滕小磊¹

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆石河子 832003;2.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆石河子 832000)

摘要:蘑菇湖水库是典型的西北干旱区山前洪积扇平原水库,水质长期处于严重污染状态,在污染源调查和污染负荷估算的基础上,基于 SMS 水质模型对不同规划年份的蘑菇湖水水质进行模拟,通过得出的各类污染物浓度场分布特征及演变趋势,分析水库水环境容量,并针对性地提出了污染负荷削减总量的防治方案。结果表明,目前蘑菇湖水环境持续恶化为劣 V 类水体,为保障未来年份蘑菇湖水水质的提升和改善,必须削减流域内污染物的排放量。污染物浓度场模拟结果显示,控制南部的上游入库口污染物排入是蘑菇湖水主要污染负荷削减的关键。根据削减后污染物浓度场分布预测,可以看出水质的明显改善,说明污染控制方案有效。

关键词:蘑菇湖;污染削减;SMS 模型;水质模拟;水环境容量

中图分类号:X524 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Water environmental capacity analysis of Moguhu reservoir based on SMS water quality model

YANG Yulin¹,LI Junfeng^{1,2},LIU Weiwei¹,SONG Dongbao¹,YANG Jie¹,TAO Junhong¹,TENG Xiaolei¹

(1. College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang production and Construction Corps, Shihezi 832000, China)

Abstract: The Moguhu reservoir is a typical piedmont alluvial fan plain reservoir situated in the arid area of northwest China. The water quality of Moguhu reservoir has been seriously polluted for a long time. Based on the pollution source survey and estimation of pollution load, the water quality of Moguhu reservoir was simulated by using SMS water quality model in different planning years. The water environmental capacity of the reservoir was analyzed through the distribution characteristics and evolution trends of various pollutant concentrations. The prevention and control plan for the total amount of pollution load reduction was proposed in a targeted manner. The results showed that water quality of the Moguhu reservoir continued to deteriorate into a worse than Grade V. To ensure the improvement of the water quality of the Moguhu reservoir in the future, it is necessary to reduce the discharge of pollutants in the watershed. The simulation results of the pollutant concentration field showed that controlling the upstream inlet port of the south was the key to the main pollution load reduction of the Moguhu reservoir. According to the prediction of the pollutant distribution concentration field after reduction, the water quality was obviously improved which indicated that the pollution control scheme was effective.

Key words: Moguhu reservoir; pollution reduction; SMS model; water quality simulation; water environmental capacity

收稿日期:2019-01-22 修回日期:2019-06-23 网络出版时间:2019-09-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190903.1420.004.html>

基金项目:国家自然科学基金新疆联合基金(U1803244);国家重点研发计划水资源高效利用专项(2017YFC0404304)

作者简介:杨玉麟(1994—),男,陕西商洛人,主要从事生态水文学方面研究。E-mail:yang19941219yyl@qq.com

通信作者:李俊峰(1977—),男,四川内江人,副教授,博士生导师,主要从事生态水文学研究。E-mail:ljfshz@126.com

干旱地区水资源及生态环境保护研究是一项世界性的重要课题^[1],开展干旱区水环境研究对可持续发展十分重要^[2-5]。新疆位于欧亚大陆中心,气候干旱,水资源短缺已成为该地环境与发展的主要制约因子之一^[6-7]。由于水环境在人类生存和社会经济发展中的重中之重的作用,因此就要求重视水环境的保护,充分了解水环境的最大承载能力。2017 年 8 月中央第八环保督查组对市水污染防治工作督察过程中,重点对蘑菇湖水库进行督导,提出加快污染治理的要求。目前利用水质模型、水环境容量计算及水环境评价等方法对水资源丰富地区的水体污染控制研究较多^[8-12],但是运用地表水模拟系统(SMS)对干旱区平原水库的水环境研究较少,对蘑菇湖的研究也只停留在单一的水环境评价^[13-14]。因此,本文在污染源调查和污染负荷估算的基础上,基于 SMS 水质模型对不同规划年份的蘑菇湖水质进行水质模拟,旨在通过得出的各类污染物浓度场分布特征及演变趋势,分析水库水环境容量,并针对性地提出了污染负荷削减总量的防治方案,综合提出可行性水环境保护措施。

1 研究区概况及模型介绍

1.1 研究区概况

蘑菇湖水库位于新疆石河子市西北处的自然洼地,距离石河子市 21 km,地理坐标为东经 $84^{\circ}46'30''\sim 86^{\circ}51'14''$,北纬 $43^{\circ}26'36''\sim 44^{\circ}37'17''$ 。蘑菇湖水库是一座天然洼地型人工内陆平原水库,水库最大蓄水面积 31.61 km^2 ,见图 1。近年来随着农业、工业和城市废水量的增加及种类多样化,污染日益严重,蘑菇湖水质已降为劣 V 类^[15-17]。目前,蘑菇湖水库水环境的主要问题:一是上游污水处理厂规模不足,处理效率低,导致大量生活污水、工业污水未处理达标或直接排入蘑菇湖,导致水质恶化;二是污染物长期累积,内源污染严重,水库呈现重度富营养化。点源污染主要是上游生活污水、工业污水,通过石河子市污水处理厂处理排入蘑菇湖水库。面源污染主要是农田灌溉排水、畜禽、养殖污水及周边居民生活污水通过排水渠管直接进入蘑菇湖水库。内源污染包括水下沉积物的污染释放、水产养殖业源。水体由于长时间的污染和破坏,使得水体处于“病态”,本身自净功能几乎丧失,根据《农田灌溉水质标准》,蘑菇湖水库水质已不能满足农田灌溉要求,已经严重影响下游 120 万亩农田灌溉安全,也导致水库周边的生态和水环境的持续恶化。



图 1 蘑菇湖水库地理位置

Fig. 1 The Geographic Map of Moguhu Reservoir

综合考虑蘑菇湖流域水系特征、各支流汇水范围及乡镇级行政区划等因素,将规划范围划分为 6 个控制单元(图 2),即主城区控制单元、城镇控制单元、南山组团控制单元、农村控制单元、工业园区控制单元与蘑菇湖水库控制单元。蘑菇湖水库入库排干(排口)主要有磨引渠、新材料工业园区污水处理厂排水口、西干排、双泉集主干排。水库水源主要包括:引蓄玛纳斯河、沙湾河和千泉湖洪水、冬闲水、上游泉水、灌溉余水,同时接纳石河子市工业及生活污水^[18]。根据蘑菇湖水库特点,共设有 5 个监测点位,即进水区、出水区、湖心区、浅水区、岸边区(图 1)。根据取样范围,这几个区域所占水库水域面积分别为 20%、20%、40%、10%、10%。根据 2011—2016 年水质监测结果显示:首要污染物为化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD_5)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)。本文采用现状调查结果,水质采用调查期间取样检测结果。为保证数据的同期性,蘑菇湖水库、排污口采用同期监测数据。根据



图 2 蘑菇湖水库控制单元分布

Fig. 2 The Distribution map of the sub districts

2016 年 6 月 30 日的采样数据,对不同区域监测值进行加权平均,蘑菇湖水各检测区域首要污染物浓度指标见表 1。

表 1 2016 年主要污染物浓度指标

Tab. 1 Concentration of major pollutants in 2016 单位:mg/L	污染物	COD	BOD ₅	TP	TN	NH ₃ -N
进水区(20%)	46.90	19.24	0.820	6.99	0.62	
出水区(20%)	32.12	12.37	0.761	5.88	0.59	
湖心区(40%)	35.61	13.26	0.764	5.54	0.68	
浅水区(10%)	32.53	12.12	0.802	5.10	0.78	
岸边区(10%)	29.67	11.84	0.748	5.39	0.71	
加权平均值	36.268	14.022	0.777	5.839	0.663	

1.2 水质分析模型

1.2.1 模型简介

SMS (surface water modeling system) 软件是用于一维、二维、三维水动力模拟的软件,可用来模拟水体的流场和浓度场^[19-21],本次模拟主要基于 SMS 软件的 RMA2(水动力)与 RMA4(水质)两个模块开展^[22-24]。

1.2.2 控制方程

水平方向采用正交网格,垂向采用 σ 分层系统,控制方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} + \frac{\partial h\omega}{\partial \sigma} = hs \quad (1)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} + \frac{\partial hu\omega}{\partial \sigma} F_v = -F_v h -$$

$$gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + hF_u + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\nu_v}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + hu_s \quad (2)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} + \frac{\partial h\omega}{\partial \sigma} = -fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} -$$

$$\frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + hF_v +$$

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\nu_v}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + hv_s \quad (3)$$

垂向流速定义为

$$\omega = \frac{1}{h} \left[w + u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} - \sigma \left(\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] \quad (4)$$

水平扩散项定义为

$$hF_u \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(2hA \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (5)$$

$$hF_v \approx \frac{\partial}{\partial y} \left(2hA \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (6)$$

$$hF_c \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (7)$$

在水面上,即 $\sigma=1$ 时

$$\omega = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (8)$$

在河床上,即 $\sigma=0$ 时

$$\omega = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_b} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (9)$$

式中: h 为水位(m); s 为河床坡度; ρ 为流体密度(kg/m^3); H 为水深(m); w, u, v 为 x, y, z 向的流速分量(m/s); A 为单元面积(m^2); t 为时间(s); g 为重力加速度(m/s^2); C 为污染物浓度(kg/m^3); hF_u 和 hF_v 分别是 x, y 方向的扩散系数; D_h 为湍流混合扩散系数; τ_s, τ_b 为水面、河床涡动黏滞系数($\text{kg}/\text{m}/\text{s}$)

2 污染负荷估算

污染负荷是进行蘑菇湖水环境容量分析的基础^[25-26]。为准确估算各类污染负荷在集水区内的分布,将整个蘑菇湖集水区分为 3 个次区(磨大引水渠、西干排一双全集主干排、新材料园区干排,如图 2)。为了评估排入蘑菇湖的污水对水质的影响,预测在不同规划时间蘑菇湖集水区的污染量,本文选取 2020 年和 2025 年两个未来模拟年份,分别估算出两个规划年份蘑菇湖的污染负荷。

2.1 流域人口预测

流域基准年石河子市人口数据来源于 2016 年《石河子市统计年鉴》,参照近年来石河子市人口增长情况及石河子市“十三五”规划,研究区人口年增长率为 2.43%,采用指数增长模型预测,其计算公式为^[27-28]

$$P_t = P_0 (1 + \delta)^t \quad (11)$$

式中: P_t 为规划目标年的人口(人); P_0 为基准年(2016 年)的统计人口(人); δ 为规划目标年与基准年之间的人口平均增长率; t 为规划目标年与基准年之间的时间间隔(a)。

按照现有发展模式、人才吸引能力等水平不变的前提下,城镇规划率根据各自的规划确定。2020、2025 年人口预测见表 2。

表 2 人口预测

Tab. 2 Population forecasted data 单位:人	集水区	2020 年	2025 年
城市人口	411 487	463 972	
村镇人口	37 845	42 672	
总计	449 332	506 644	

2.2 工业污染预测

采用工业生产总产值增长率法预测各控制单元

2020 年和 2025 年工业排放情况和入库情况^[29]

$$Q=Q_{2016}(1+\beta\times C_B)^{n-2016} \quad (12)$$

式中: Q 为预测年份工业污水排放量(万 t); Q_{2016} 为 2016 年工业污水排放量(万 t); β 为工业产值增长率; C_B 为系数, 根据现状年工业生产总产值和废水排放量计算, 0.618(全国经验值); n 为预测年份。近年来石河子市工业生产总产值年均增长率为 5.9%。工业污染物负荷预测结果见表 3。

表 3 工业污染物负荷预测

年份	COD	NH ₃ -N	TN	TP
2020 年	6 381.8	1 291.2	1 655.0	166.9
2025 年	10 277.9	2 079.6	2 665.4	268.8

2.3 主城区控制单元污染预测

根据《石河子市城市总体规划(2016—2030)》, 假定 2020 年和 2025 年, 主城区控制单元工业污水收集率分别为 90% 和 100%, 城镇生活污水收集率

均为 85%, 废水经污水处理厂处理后排放, 出水水质符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准, 结合区域人口数量(2020 年和 2025 年分别为 34.4 万和 38.7 万人), 预测不同规划期主城区控制单元污染物入库量, 结果见表 4。

2.4 城镇控制单元污染预测

根据《石河子市城市总体规划(2016—2030)》, 假定 2020 年和 2025 年, 城镇控制单元工业污水收集率分别为 90% 和 100%, 城镇生活污水收集率均为 85%, 废水经污水处理厂处理后排放, 出水水质符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准, 结合区域人口数量, 2020 年和 2025 年城镇人口数量分别为 4.92 万和 5.55 万人, 农村人口数量分别为 0.82 万和 0.96 万人, 预测不同规划期城镇控制单元污染物入库量, 结果见表 5。

表 4 市区控制单元污染物入库量预测

Tab. 4 City control unit pollutant load forecasted data

单位:t/a

污染源类别	2020 年				2025 年			
	COD	NH ₃ -N	TN	TP	COD	NH ₃ -N	TN	TP
工业污染	1 102.6	223.1	285.9	28.8	1 775.7	359.3	460.5	46.4
城市生活	3 592.7	518.7	747.7	64.0	4 051.0	584.9	843.1	72.2
村镇生活	0	0	0	0	0	0	0	0
农业面源	2.3	0.7	1.1	0.4	2.3	0.7	1.1	0.4
畜禽养殖	278.4	36.6	53.4	6.8	301.6	39.6	57.9	7.4
水产养殖	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	4 976.0	779.1	1 088.2	100.1	6 130.6	984.5	1 362.6	126.4

表 5 城镇控制单元污染物入库量预测

Tab. 5 Town control unit pollutant load forecasted data

单位:t/a

污染源类别	2020 年				2025 年			
	COD	NH ₃ -N	TN	TP	COD	NH ₃ -N	TN	TP
工业污染	5 262.7	1 064.8	1 364.8	137.6	8 475.7	1 714.9	2 198.0	221.6
城市生活	393.7	56.8	81.9	7.0	443.9	64.1	92.4	7.9
村镇生活	52.0	4.2	5.9	1.5	58.6	4.7	6.7	1.6
农业面源	20.4	6.3	9.9	3.9	20.4	6.3	9.9	3.9
畜禽养殖	1 596.6	209.8	306.5	39.0	1 729.7	227.3	332.1	42.3
水产养殖	12.5	5.6	12.5	2.5	0	0	0	0
合计	7 338.0	1 347.5	1 781.5	191.5	10 728.4	2 017.3	2 639.0	277.4

2.5 农村控制单元污染预测

根据农村控制单元 2020 年及 2025 年人口数量和畜禽养殖数量, 在不考虑减少种植面积的基础上, 以不同规划期人口增长预测结果为基准, 采用人均综合排污系数法预测农村生活污染负荷。根据《给

水排水工程快速手册》, 农业人口生活污水排放量按 80 L/(人·d) 计, 其中 COD、NH₃-N、TN 和 TP 污染物产生量依次为 30、2.43、3.4 和 0.84 g/(人·d), 排放系数为 0.5。预测不同规划年农村控制单元污染物入库量, 结果见表 6。

表 6 农村控制单元污染物入库量预测
Tab. 6 Rural control unit pollutant load forecasted data

单位: t/a

污染源类别	2020 年				2025 年			
	COD	NH ₃ -N	TN	TP	COD	NH ₃ -N	TN	TP
工业污染	0	0	0	0	0	0	0	0
城市生活	225.6	32.6	47.0	4.0	254.4	36.7	52.9	4.5
村镇生活	22.5	1.8	2.6	0.6	25.4	2.0	2.9	0.7
农业面源	37.4	11.5	18.1	7.2	37.4	11.5	18.1	7.2
畜禽养殖	435.3	57.2	83.6	10.6	471.6	62.0	90.5	11.5
水产养殖	73.6	32.9	73.2	14.6	73.6	32.9	73.2	14.6
合计	794.4	136.0	224.4	37.0	862.4	145.2	237.6	38.5

2.6 南山组团控制单元

根据方案实施范围内 2020 年和 2025 年南山组团控制单元人口数量和畜禽养殖数量,计算该控制单元污染物排放情况,参考近年来石河子市畜禽数量年均增长率,对不同规划期畜禽数量进行预测,以

不同规划期畜禽数量预测结果为基准,采用综合排污系数法预测畜禽养殖污染负荷。根据污染源普查资料,牲畜粪便中 COD、NH₃-N、TN、TP 污染物的排放系数分别为 27、1.1、3.3、0.42 g/(头·d)。规划年南山组团控制单元污染物入库量预测,结果见表 7。

表 7 南山组团控制单元污染物入库量预测
Tab. 7 Nanshan Mountain control unit pollutant load forecasted data

单位: t/a

污染源类别	2020 年				2025 年			
	COD	NH ₃ -N	TN	TP	COD	NH ₃ -N	TN	TP
工业污染	16.5	3.3	4.3	0.4	26.6	5.4	6.9	0.7
城市生活	15.1	2.2	3.2	0.3	17.1	2.5	3.6	0.3
村镇生活	3.6	0.3	0.4	0.1	4.0	0.3	0.5	0.1
农业面源	83.4	25.8	40.3	6.0	83.4	25.8	40.3	6.0
畜禽养殖	447.0	58.7	526.4	10.9	484.3	63.6	570.2	11.8
水产养殖	0	0	0	0	12.5	5.6	12.5	2.5
合计	565.6	90.3	574.5	17.7	627.8	103.1	633.9	21.4

2.7 污染负荷入库量预测汇总

根据预测,按照控制单元和污染源类型对方案实施范围内 2020 年和 2025 年 COD、NH₃-N、TN 和 TP 入库污染负荷进行汇总,结果见表 8。预测结果表明在未来年份里各类污染物入库量将逐年增多,蘑菇湖水质将持续下降。该预测结果为后续水质模拟和污染物削减方案提供依据。

3 水质模拟分析

3.1 模型建立

根据蘑菇湖湖面的自动格网划分结果,通过手工调整形成最终的计算格网(图 3)。格网划分质量较好,且在后续的实际计算过程中未出现数值发散或异常的现象。

经统计,格网划分共 1 877 个单元,节点共 5 108 个。其中:湖区西侧形变较为复杂,格网划分较密,用于保证计算精度;其他部分形变较为平滑,格网划

分较为松散,利于计算的速度与稳定性。

3.2 水质模拟及分析

3.2.1 水质模型参数选取

依据模拟值与实测值相差最小的原则,采用试错法进行模型参数的选取^[30]。采用稳态模拟方法,保障数据的可获取性。经多次模拟比较得出,蘑菇湖 COD_{Mn}降解系数为 0.13 1/d, BOD₅降解系数为 0, TN 降解系数为 0.55 1/d, TP 降解系数为 0.1 1/d, NH₃-N 降解系数为 0.99 1/d。

3.2.2 模拟效果分析

针对 COD、BOD₅、TN、TP、NH₃-N 五项指标进行了模拟。模拟结果见图 4 至 8。当输入源持续对湖区进行来水汇入,湖区的水质状况将趋于稳定,对各项指标的估算见图 4 至 8。

COD 模拟效果。根据模型对蘑菇湖 COD 质量浓度的估算,其中:进水区模拟值与观测值差别较大,误差为 14%,原因是进水区水量水质不稳定所

表 8 污染物入库量预测汇总

Tab. 8 Pollutant load forecasted summary data

单位: t/a

年份	河流	控制单元	COD	NH ₃ -N	TN	TP
2020 年	磨引渠	主城区控制单元	4 976.0	779.1	1 088.2	100.1
		城镇控制单元	7 338.0	1 347.5	1 781.5	191.5
		南山组团控制单元	565.6	90.3	574.5	17.7
		小计	12 879.7	2 216.9	3 444.3	309.3
	西干排-双泉集主干排	农村控制单元	794.4	136.0	224.4	37.0
	新材料园区排水口	工业园区控制单元	0	0	0	0
合计			13 674.1	2 352.9	3 668.6	346.4
2025 年	磨引渠	主城区控制单元	6 130.6	984.5	1362.6	126.4
		城镇控制单元	10 728.4	2 017.3	2 639.0	277.4
		南山组团控制单元	627.8	103.1	633.9	21.4
		小计	17 486.8	3 104.9	4 635.5	425.2
	西干排-双泉集主干排	农村控制单元	862.4	145.2	237.6	38.5
	新材料园区排水口	工业园区控制单元	0	0	0	0
合计			18 349.2	3 250.1	4 873.2	463.7

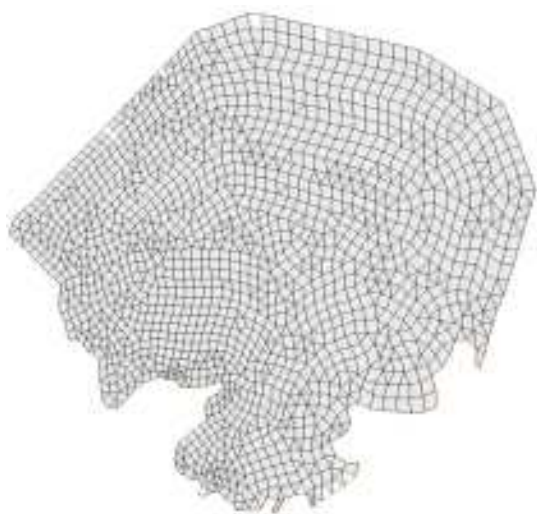


图 3 网格划分

Fig. 3 Meshing diagram

造成;其他区域误差均小于 10%。整体而言,库区 5 个监测点分布在斜线两侧,说明模拟效果好(图 4)。

BOD₅ 模拟效果。根据模型对蘑菇湖 BOD₅ 质量浓度的估算,库区 5 个监测点的模拟值普遍偏低,误差为 30%左右,可能是由于内源污染释放造成的(图 5)。

TN 模拟效果。根据模型对蘑菇湖 TN 质量浓度的估算,其中:进水区模拟值与观测值差别较大,误差为 20%,原因是进水区水量水质不稳定所造成;其他区域误差均小于 10%。整体而言,库区 5 个监测点分布在斜线两侧,说明模拟效果好(图 6)。

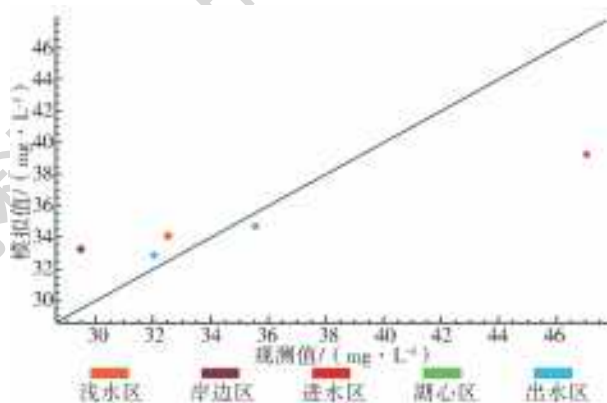


图 4 蘑菇湖水域内各监测点位置 COD 模拟效果

Fig. 4 COD simulation results of monitoring points in Moguhu reservoir

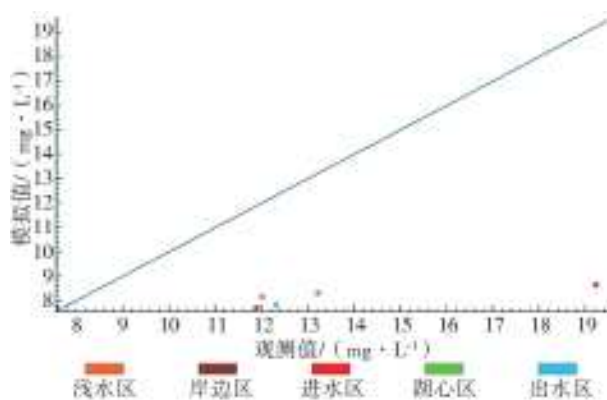


图 5 蘑菇湖水域内各监测点位置 BOD₅ 模拟效果

Fig. 5 BOD₅ simulation results of monitoring points in Moguhu reservoir

TP 模拟效果。根据模型对蘑菇湖 TP 质量浓度的估算,库区 5 个监测点的模拟值普遍偏低,误差为 30%左右,可能是由于内源污染释放造成的

(图 7)。

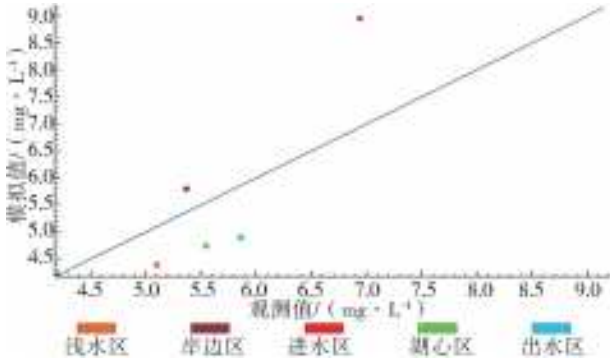


图 6 蘑菇湖水域内各监测点位置 TN 模拟效果

Fig. 6 TN simulation results of monitoring points in Moguhu reservoir

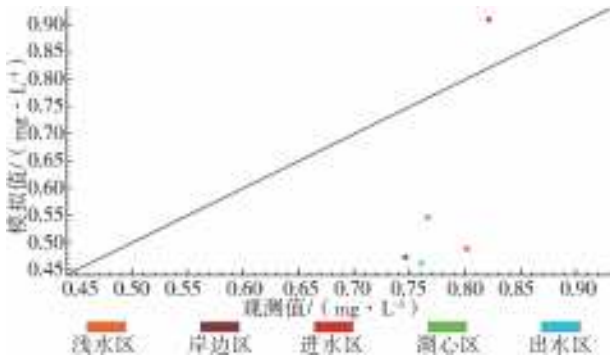


图 7 蘑菇湖水域内各监测点位置 TP 模拟效果

Fig. 7 TP simulation results of monitoring points in Moguhu reservoir

NH₃-N 模拟效果。根据模型对蘑菇湖 NH₃-N 浓度的估算,潜水区和进水区模拟误差超过 50%,分析原因可能是由于内源释放估计不足和进水区水质水量不稳定造成的;其余三点误差均小于 10%,模拟效果较好(图 8)。

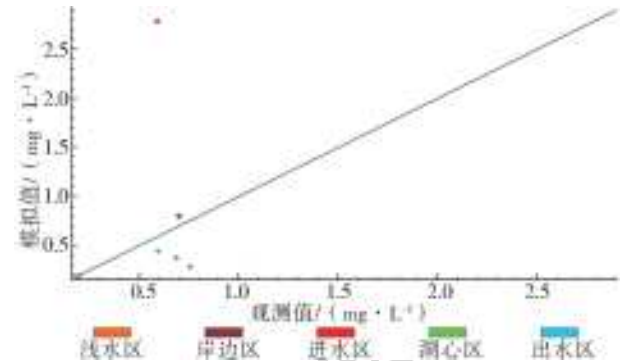


图 8 蘑菇湖水域内各监测点位置氨氮模拟效果

Fig. 8 NH₃-N simulation results of monitoring points in Moguhu reservoir

3.2.3 蘑菇湖各类污染指标浓度场分布状况

根据对蘑菇湖 COD、BOD₅、TN、TP、NH₃-N 等指标的模拟,可得到在稳定源强排放条件下,各污染指标在湖内的二维浓度场结果见图 9。

从模拟污染场来看,由于磨引渠、西干排、双泉集主干排等渠道的污染物汇入,导致蘑菇湖南部区域水质较差,同时东部区域的工业区汇入的 NH₃-N、

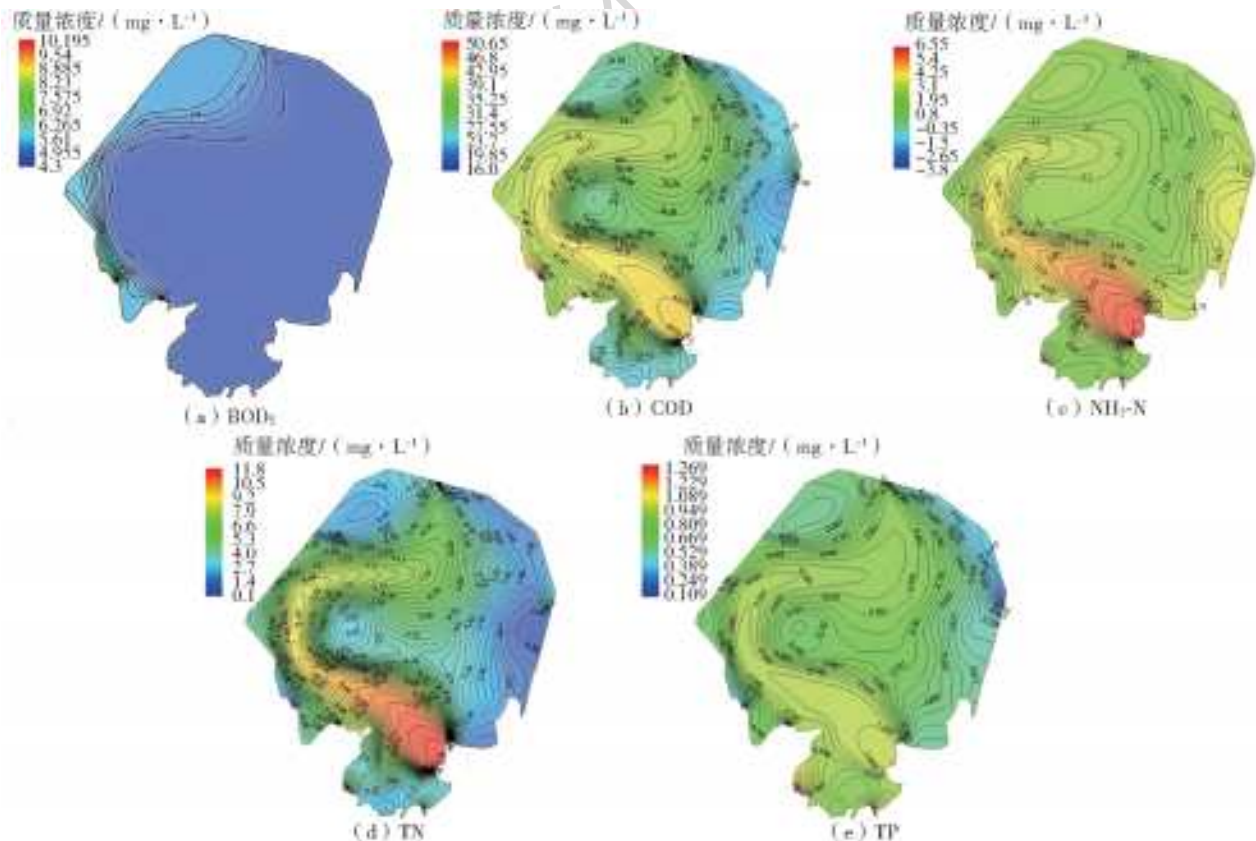


图 9 不同污染指标模拟结果

Fig. 9 The simulation results of different pollution indicators

TN 污染物较高,使得此两项指标在东部也出现了污染较严重的状况。总体而言,水质模型的模拟效果较好,基本能够反映出各项污染物在库区的变化趋势,为后续削减方案的制定提供依据。

4 蘑菇湖污染物削减方案确定

根据前文针对库区的水质模拟结果,制定污染物削减方案。由于主要污染物来自于南部的入库口,且以磨大引水渠的负荷量最大,因此主要负荷削减应当由南部的入库口上游的源头来承担。根据地表水 V 类水体的要求,COD 质量浓度应低于 40 mg/L, BOD₅ 应低于 10 mg/L, TN 低于 2.0 mg/L, TP 低于 0.2 mg/L, NH₃-N 低于 2.0 mg/L。按照现有入库水量根据多次模拟尝试,确定负荷削减量如下:

要求磨引渠和南部两农排干渠 COD 的汇入质量浓度为 43 mg/L;

BOD₅ 目前模拟值偏低为 8 mg/L,已达到要求;

要求磨引渠和南部两农排干渠 TN 汇入的质量

浓度为 3.5 mg/L;

要求磨引渠和南部两农排干渠 TP 的汇入质量浓度为 0.22 mg/L;

当前磨引渠 NH₃-N 排放质量浓度为 7.31 mg/L, 双泉集主干排、西干排为 5.30 mg/L。根据当前水质状况,在现有排放强度下,蘑菇湖可达到 IV 类水体标准,因此各控制单元 NH₃-N 排放可不进行削减。

根据蘑菇湖各指标的污染负荷量-水质响应关系,对污染负荷削减方案的效果进行模拟。预测方案实施后各污染物质量浓度场分布情况见图 10。从削减后模拟效果图中可明显看出,蘑菇湖水库南部进水口区域各污染物浓度最高,但均达到地表 V 类水体标准,说明削减方案有效。此外,削减后南部的上游入库口的水质明显上升,但在整个水库区域中水质仍最差,由此可知南部入水口为污染物控制的关键。

根据流域污染物入库量预测和水质模拟分析,确定 2020 年和 2025 年各控制单元的污染物削减目标,结果见表 9。

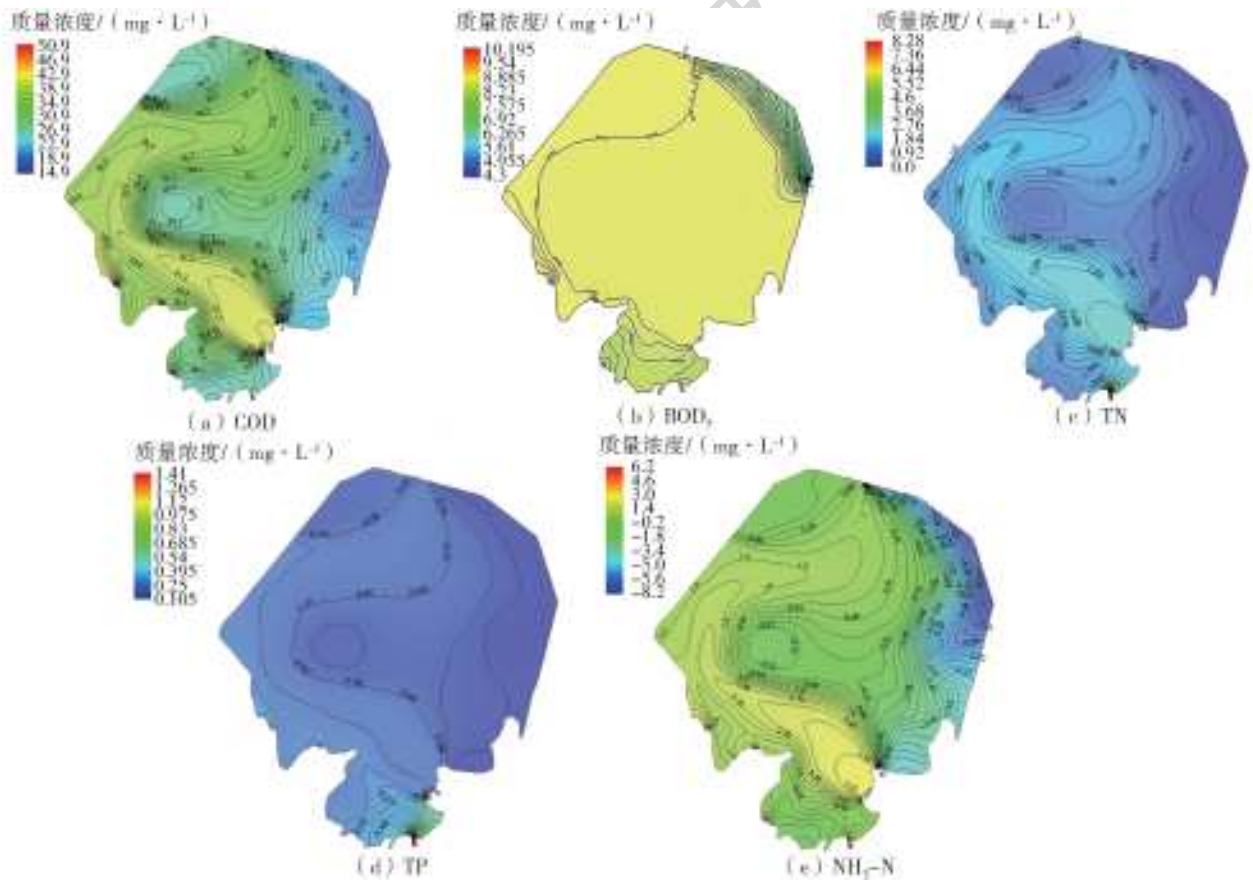


图 10 削减后污染物质量浓度场分布情况预测

Fig. 10 The prediction of pollutant mass concentration field distribution after reduction

5 结论

在污染源调查和污染负荷估算的基础上,基于

SMS 水质模型对不同规划年份的蘑菇湖水水质进行水质模拟,分析不同规划时间蘑菇湖的水质情况,得出各类污染物浓度场分布情况以及污染负荷削减总

表 9 2020 及 2025 年污染物削减总量

Tab.9 The pollutant reduction in the years of 2020 and 2025

单位:t/a

年份	河流	控制单元	COD	NH ₃ -N	TN	TP
2020 年	蘑菇引渠	主城区控制单元	1 017.5	169.7	825.6	84.0
		城镇控制单元	1 500.5	293.5	1 351.5	160.8
		南山组团控制单元	115.6	19.7	435.9	14.9
	西干排-双泉集主干排	农村控制单元	162.4	29.6	170.2	31.1
	新材料园区排水口	工业园区控制单元	0	0	0	0
小计			2 796.0	512.4	2 783.2	290.7
2025 年	蘑菇引渠	主城区控制单元	2 496.1	427.0	1 115.0	111.2
		城镇控制单元	4 373.3	877.3	2 169.7	246.3
		南山组团控制单元	250.5	42.3	508.5	16.7
	西干排-双泉集主干排	农村控制单元	351.1	63.0	194.5	33.9
	新材料园区排水口	工业园区控制单元	0	0	0	0
小计			7 471.1	1 409.6	3 987.7	408.1

量。结论如下。

(1)影响蘑菇湖水库水质的污染源主要有:城区和农村的生活污水、工业污水,水产养殖业污水以及畜禽养殖污水等。蘑菇湖水库的水质为劣 V 类水质,为重度污染水体,呈重度富营养状态,根据所制定的污染负荷削减方案,在 2020 年和 2025 年将达到地表 V 类水体。水环境治理重点任务为生态修复、内源治理和加强监测。主要措施:一是加强对蘑菇湖南岸滩地生态系统管理维护;二是开展入库口底泥疏浚;三是合理水量调蓄,保障生态需水;四是加强水库及主要入库排干水质和生态监测。针对不同控制单元的污染排放情况和水环境问题,因地制宜地综合运用水污染治理和水生态保护等措施,提高污染防治的科学性、系统性和针对性。

(2)基于 SMS 水质模型对蘑菇湖水库各污染物浓度场进行模拟结果,根据各类污染指标浓度场的分布情况,可以看出南部的蘑菇引渠以及两个农排干渠是影响蘑菇湖水水质污染物的主要输入渠道;其次是东部的工业园区的排水口,显著影响 TN、NH₃-N 两项指标。整体湖区的水质状况呈现北优、南劣的特点。在 5 个监测点中,进水区的水质最差,其余各点均不同程度地优于该点。根据对库区的现状模拟,可以看出,由于东部排污口流量较小,判断主要污染物来自南部的入库口,且以蘑菇引渠的负荷量最大,因此可知,控制南部的上游入库口是蘑菇湖主要污染负荷削减的关键。

参考文献(References):

[1] CHEN Y N,LI B F,LI Z,et al. Water resource formation and conversion and water security in arid region of

northwest China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016,26(7):939-952. DOI:10. 1007/s11442-016-1308-x.

[2] 张兴榆,曹明明,黄贤金. 基于综合评判模型的干旱半干旱地区水资源承载力评价研究:以黄河中游延安市为例[J]. 南京大学学报(自然科学版),2008,44(6): 674-682. (ZHANG X Y, CAO M M, HUANG X J. Water resource carrying capacity in arid and semiarid area based on the comprehensive assessment model: A case study of Yanan City [J]. Journal of Nanjing University,2008,44(6): 674-682. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn:0469-5097. 2008. 06. 011.

[3] 鲍超,方创琳. 干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究进展与展望[J]. 地理科学进展,2008(3): 38-46. (BAO C, FANG C L. Impact of water resources exploitation and utilization on eco-environment in arid area: progress and prospect [J]. Progress in Geography, 2008(3): 38-46. (in Chinese)) DOI:10. 11820/dlkxjz. 2008. 03. 006.

[4] SONG C, YUAN L, YANG X, et al. Ecological-hydrological processes in arid environment: Past, present and future [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(12): 1577-1594. DOI:10. 1007/s11442-017-1453-x.

[5] 刘文祥,李喜俊,郭海燕. 新疆博斯腾湖水环境容量研究[J]. 环境科学研究,1999,12(1):35-38. (LIU W X, LI X J, GUO H Y. Study of water environmental capacity in lake Bosten in Xinjiang [J]. Research of Environmental sciences,1999,12(1):35-38. (in Chinese)) DOI:10. 3321/j. issn. 1001-6929. 1999. 01. 010.

[6] Osman Abdalla,CHEN M J. Special issue on water resources in arid areas[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017 (10):6. DOI:10. 1007/s12517-016-2797-8.

[7] CHEN M X. Rational development and utilization of water resources related to prevention of desertification

- in arid area of Northwest China[J]. *Journal of Earth Science & Environmental*, 2005, 27(4): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6561.2005.04.001.
- [8] 杨钧婷, 陈秋波, 彭黎旭. 基于联合层次分析法和“模加和”法的海南水环境承载力评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(3): 47-51. (YANG J T, CHEN Q B, PENG L X. Assessment of water environmental carrying capacity of Hainan Province using the combined method of analytic hierarchy process and "Mode and Sum"[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(3): 47-51. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.03047.
- [9] 邹彬, 车秀珍, 陈晓丹, 等. 深圳水环境容量及其承载力评价[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(8): 953-958. (WU B, CHE X Z, CHEN X D, et al. Evaluation of water environment capacity and carrying capacity in Shenzhen [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(8): 953-958. (in Chinese)) DOI: 10.13198/j.res.2012.08.112. wub. 018.
- [10] 喻良, 刘遂庆, 王牧阳. 基于水环境模型的水环境容量计算的研究[J]. *河南科学*, 2006, 24(6): 874-876. (YU L, LIU S Q, WANG M Y. Research on SMS-based water environment capacity[J]. *Henan Science*, 2006, 24(6): 874-876. (in Chinese)) DOI: 10.13537/j.issn.1004-3918.2006.06.025.
- [11] 栗苏文, 李红艳, 夏建新. 基于 Delft 3D 模型的大鹏湾水环境容量分析[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(5): 91-95. (LI S W, LI H Y, XIA J X. Dapeng bay water environment capacity analysis on the base of delft 3d model[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(5): 91-95. (in Chinese)) DOI: 10.13198/j.res.2005.05.93. lisw. 023.
- [12] QIN X S, HUANG G H, CHEN B, et al. An interval-parameter waste-load-allocation model for river water quality management under uncertainty [J]. *Environmental Management*, 2009, 43(6): 999-1012. DOI: 10.1007/s00267-009-9278-8.
- [13] 卞玮. 石河子蘑菇湖水库富营养化成因及防治对策[J]. *干旱环境监测*, 2006, 20(4): 223-226. (BIAN W. Study on the cause and countermeasure of eutrophication in Mogu Lake of Shihezi [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2006, 20(4): 223-226. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-1504.2006.04.009.
- [14] 肖艳阳. 石河子蘑菇湖水库富营养化成因及防治对策[J]. *山西建筑*, 2006(2): 180-181. (XIAO Y Y. Causes on rich nutrition of Moguhu reservoir in Shihezi and its countermeasures [J]. *Shanxi Architecture*, 2006(2): 180-181. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-1504.2006.04.009.
- [15] 赵显波, 雷晓云, 沈志伟, 等. 蘑菇湖水库水环境容量总量控制研究[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(2): 86-89. (ZHAO X B, LEI X Y, SHEN Z W, et al. Study on Moguhu reservoir water environmental capacity and total content control[J]. *Journal of Irrigation & Drainage*, 2007, 26(2): 86-89. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-3317.2007.02.022.
- [16] 刘建江, 陈静, 杨永胜, 等. 蘑菇湖水库现状水质评价及保护对策研究[J]. *新疆水利*, 2003(5): 32-41. (LIU J J, CHEN J, YANG Y S, et al. Present situation of water environment in Moguhu reservoir and countermeasures for its protection [J]. *Water Resources Protection*, 2003(5): 32-41. (in Chinese))
- [17] 吴心蓉, 刘焕芳, 张向东. 蘑菇湖水库水资源的污染现状和保护对策[J]. *石河子大学学报*, 2006, 24(2): 107-110. (WU X R, LIU H F, ZHANG X D. The current polluted situation and protection countermeasures of water resources in Moguhu reservoir [J]. *Journal of Shihezi University*, 2006, 24(2): 107-110. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-7383.2006.02.029.
- [18] 刘力辉, 常浩娟. 石河子蘑菇湖水库污染现状及治理[J]. *吉林水利*, 2016(11): 39-41. (LIU L H, CHANG H J. Pollution status and treatment of ShiHezi Moguhu reservoir [J]. *Jilin Water Conservancy*, 2016(11): 39-41. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-2846.2016.11.014.
- [19] Scientific Software Group. *Surface water modeling system (SMS)* [R]. John Wiley & Sons, Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470848944.hsa288.
- [20] 陈跃燕. SMS 在镇江内江水水质模拟与预测中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2007. (CHENG Y Y. Application of SMS model for water quality simulating and predicting in Zhengjiang Neijiang [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y1079576.
- [21] 张明进, 张华庆. SMS 水动力学软件[J]. *水道港口*, 2006, 27(1): 63-65. (ZHANG M J, ZHANG H Q. Hydrodynamic software SMS [J]. *Journal of Waterway & Harbor*, 2006, 27(1): 63-65. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-8443.2006.01.014.
- [22] 陈春燕, 汤子扬, 张丽萍. SMS 软件 RMA2 模块固边界的处理研究[R]. *中国水论坛*, 2008. (CHEN C Y, TANG Z Y, ZHANG L P. Study on the treatment of solid boundary of RMA2 module in SMS software [R]. *China Water Forum*, 2008. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2008.05.024
- [23] FEI J H, MA X O, XU J B, et al. Research on application of RMA2 and RMA4 models in water quality simulation in DaShahe reservoir [J]. *Guangzhou Environmental Science*, 2016, 31(1): 31-35.

- [24] GALEK, MONIKA, HACHAJ, et al. Application of the RMA2/RMA4 models to simulate pollution transport in a retention reservoir [J]. *Geo Planet-Earth and Planetary Sciences*, 2013, (11): 301-313. DOI: 10.1007/978-3-64-30209-1_21.
- [25] CHEN K L, ZHU X D, WANG J K, et al. water pollution load in coastal zone of Xiamen; Estimation and forecast[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(9): 2091-2096.
- [26] DENG Y, WANG S, LI Z C. Application of a water quality model in pollution load estimation in Dongguan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiate*, 2009, 29 (11): 2458-2464.
- [27] 郑辉军, 马玉香, 赵奎, 等. 石河子垦区人口增长预测与可持续发展研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(21): 9110-9113. (ZHEN H J, MA Y X, ZHAO K, et al. On prediction of population growth and sustainable development in Shihezi[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41 (21): 9110-9113. (in Chinese)) DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2013.21.063.
- [28] 刘畅. 玛纳斯河流域水污染控制规划研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (LIU C. Research on water pollution control programming of Manasi River drainage basin [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [29] 陈茹, 王兵, 卢金勇. 环境管制与工业生产率增长: 东部地区的实证研究[J]. *产经评论*, 2010 (2): 74-83. (CHEN R, WANG B, LU J Y. Environmental regulation and industry productivity growth: An empirical study of the eastern region[J]. *Industrial Economic Review*, 2010(2): 74-83. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-8298.2010.02.009.
- [30] 翟家瑞. 流域单位线的推求方法——分析试错法[J]. *水文*, 1982 (5): 35-36. (ZHAI J R, Watershed unit hydrograph derived method of trial and error [J]. *Journal of China Hydrology*, 1982 (5): 35-36 (in Chinese))

.....

(上接第 126 页)

- [18] 杜守营, 鹿帅, 杜尚海. 基于 GMS 的地下水流数值模拟及参数敏感性分析[J]. *中国农村水利水电*, 2013 (8): 77-80. (DU S Y, LU S, DU S H. Numerical simulation of groundwater and sensitivity analysis of parameters based on GMS[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013(8): 77-80. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2013.08.020.
- [19] 张会兴, 张征, 宋莹. 地下水污染健康风险评价理论体系研究[J]. *环境保护科学*, 2013, 39 (3): 59-63. (ZHANG H X, ZHANG Z, SONG Y. Research on theoretical system of groundwater pollution health risk assessment[J]. *Environmental Protection Science*, 2013, 39(3): 59-63. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6216.2013.03.015.
- [20] U. S. EPA (Environmental Protection Agency). Health effects assessment summary tables. FY 1997 Update EPA-540-R-97-036[S].