

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0092

张志浩, 杜兆林, 雷晓辉, 等. 南水北调中线干渠藻类增殖潜势的数学分析方法与建议[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 123-128. ZHANG Z H, DU Z L, LEI X H, et al. Mathematical analysis methods and suggestions on algae proliferation potential in main canal of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 123-128. (in Chinese)

南水北调中线干渠藻类增殖潜势的 数学分析方法与建议

张志浩¹, 杜兆林^{1,2}, 雷晓辉³, 权锦³, 曹慧哲¹, 郑彤¹, 王鹏¹

(1. 哈尔滨工业大学 环境学院, 哈尔滨 150090; 2. 农业部 环境保护科研监测所, 天津 300191;
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 针对南水北调中线干渠存在的藻类增殖风险问题, 基于氮磷等营养物质及藻类孢子的大气沉降为汇入源的前提假设, 采用沃伦韦德尔模型以及河南、山东、京津冀地区氮沉降平均值及全国磷沉降平均值, 对中线干渠全线的营养物质累积趋势进行了估算。结果表明, 渠水到达监测点三里屯后, 渠水中的营养物质累积浓度会超过富营养化阈值; 综合考虑大气中藻类孢子沉降的影响, 结合藻类增殖的 Monod 模型, 对文献报道的中线藻类数量空间分布数值进行了拟合, 估算出中线干渠藻类生长速率在 0.21~0.46 个/d 范围内波动, 取得了相对中值误差为 23.71% 的估算结果; 并在此基础上, 提出了可提高预测结果精确度的监测方案。

关键词: 南水北调中线干渠; 藻类繁殖; 大气沉降; 孢子沉降; 累积浓度

中图分类号: X171 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Mathematical analysis methods and suggestions on algae proliferation potential in main canal of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project

ZHANG Zhihao¹, DU Zhaolin^{1,2}, LEI Xiaohui³, QUAN Jin³, CAO Huizhe¹, ZHENG Tong¹, WANG Peng¹

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Addressing the algal proliferation risk in the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project, the trend of the accumulation of nutrients is estimated for the entire Middle Route by applying the Vollenweider model and assuming nitrogen and phosphorus nutrients and the atmospheric deposition of algae spores as the source of sinking and averaging nitrogen deposition in Henan, Shandong and Beijing-Tianjin-Hebei regions and phosphorus deposition of the whole country. The results show that the cumulative concentration of nutrients in the canal exceeds the eutrophication threshold at Sanlitun monitoring point and beyond. Taking into account the effects of algae spore settlement in the atmosphere, the reported spatial distribution of algae is fitted by coupling with the Monod model. In the main canal of the Middle Route, algae grow at the rate of 0.21/d~0.46/d, with the relative median error of 23.71%. Based on the results achieved, a monitoring scheme is proposed to improve the accuracy

收稿日期: 2018-08-28 修回日期: 2019-04-25 网络出版时间: 2019-05-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190510.1601.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51779066); 水污染事件预警及应急处置技术与示范(2012ZX07205-005)

作者简介: 张志浩(1994—), 男, 吉林双阳人, 主要从事环境管理与规划等方面的研究。E-mail: zzh847398325@163.com

通信作者: 郑彤(1967—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 主要从事难降解有机污染物高级氧化处理、突发水污染应急处置、环境系统的数学模拟与分析等方面的研究。E-mail: zhengtong@hit.edu.cn

of algal bloom forecasting.

Key words: Middle Route of South-to-North Water Transfer Project; algal bloom; atmospheric deposition; spore settlement; cumulative concentration

近年来,随着我国经济的高速发展、居民生活水平的不断提高与污染控制措施跟进的差距,氮磷等营养物质向环境中的排放量在持续增加,这为湖库、缓流明渠等自净能力差的水体营造了富营养化的充分内部条件,一旦温度光照等外部环境因素满足条件,这些水体中的藻类就会大量繁殖而爆发大面积水华^[1],给生产生活带来巨大危害。

南水北调中线工程是世界上最大的跨流域调水工程,是缓解我国北方地区水资源短缺、实现水资源合理配置、保障经济社会可持续发展、全面建设小康社会的重大战略性基础设施^[2]。工程途径河南、河北、北京各地,在每年的春季初,河南郑州平均最高温度 19~24 ℃,河北石家庄平均最高温度 18~25 ℃,均达到了适宜硅藻繁殖生长的温度条件。另外中线干渠明渠占多数,渠旁鲜有树冠等有效阳光遮蔽物,渠水清澈透明,白天阳光可直达渠底,有着充足的水体光通量,如果再在一定时空阶段出现缓流,则会为藻类增殖构建完美的外部环境条件。南水北调中线干渠源头丹江口水质总体优良,其 DO 年平均值为 7.70 mg/L, COD 年平均值为 12 mg/L,总磷年平均值为 0.01 mg/L,均符合地表水 I 类标准,但其总氮浓度为 1.59 mg/L,为地表水 V 类标准,综合评价结果为中营养状态^[3]。

由于中线干渠全程无支流汇入,大气干湿沉降是营养物质输入的唯一途径。河北地区集中有众多的高产氮企业,加之农业中氮肥的大量使用,化石燃料的燃烧等因素的存在,均可加剧南水北调中线干渠大气营养物质的干湿沉降量。南水北调中线沿线雨水多集中于春夏两季,通过大气沉降输入水体中的营养物质含量在这两个季节明显偏高,春季中线干渠冰面融化,积累了整个冰封期的营养物质亦会随融冰进入渠段,这些都将会导致南水北调中线干渠水体富营养化风险在春夏季节呈现出增长趋势。因此,对中线干渠营养物质的源汇进行系统分析,建立其水体营养物质累积变化及藻类增殖的数学模型,研究其水华风险的时空分布规律与影响因素,可为南水北调中线水质安全保障策略的制定与实施提供重要的技术信息支持,具有重要的社会、环境和经济意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源与研究范围

本研究根据 2016 年 6 月对丹江口水库及南水北调中线干渠沿线的藻类密度调研结果^[4](见表 1),对南水北调中线干渠的藻类增殖模型中比增长率进行估计。因其中丹江、汉江属于丹江口水库水源,为中线干渠外的研究区域,且位置未明确说明,所以在计算时只取陶岔、南阳、磁县、保定四个点的藻类数据。

表 1 丹江口水库及南水北调中线干渠沿线藻类密度分布^[4]
Tab. 1 Algal density distribution along Danjiangkou Reservoir and main canal of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project^[4]

采样地点	陶岔	丹江	汉江	南阳	磁县	保定
硅藻/(万个·L ⁻¹)	12.25	7.90	7.90	55.27	300.05	1 152.82

根据《南水北调中线一期工程长距离调水水利调配与控制技术研究及应用》总干渠输率论证报告,确定研究对象为从丹江口水库至北京颐和园团城湖的南水北调中线工程,全线输水干渠跨越 4 个省、直辖市(河南、河北、北京、天津);重点研究区域为南水北调中线沿线的 18 个研究监测点^[5](陶岔、石家、大寨、四家营、马庄、孟坡、三官庙、贾寨、郑湾泵站、如寨、苏蔺、老道井、三里屯、南流寺、郭河、南大郭、田庄、京石段)。根据国家地表水环境质量标准(GB 3823—2002)^[14],丹江口水库水质虽然达到地表水 II 类水体,但是其中氮量超标严重,水体已经是中营养化状态。2015 年 4 月 17 日对丹江口水库陶岔渠首的水质监测结果显示:从渠底 11.43 m 到水面 0.55 m 深度范围内,氨氮质量浓度范围 0.3~0.5 mg/L,硝酸盐氮质量浓度范围 1.7~3.5 mg/L。

1.2 研究方法

(1) 干渠营养物质浓度的估算方法

由于研究对象为长距离输水明渠,水力停留时间较长,在考察污染物干湿沉降对渠水中营养物质浓度的影响时,采用沃伦威德尔零维水质模型^[6]计算出水流到各渠段时氮磷营养物质的平衡质量浓度。此状态下水体中的氮磷质量浓度变化可表示为氮磷输入、输出和水体中沉积三者的累计效果。根据沃伦威德尔模型,在水体的入流、出流及营养物质的输入稳定的条件下,水中营养物可以达到的平衡质量浓度为

$$C = \frac{I_c}{(r+s)V} \quad (1)$$

式中: V 表示水体的容积(m^3); C 表示某种营养物质的质量浓度(g/m^3); I_c 表示某种营养物质的输入总负荷(g/a); s 表示该营养物质在水体中的沉降速度常数(a^{-1}); r 为冲刷速度常数。

(2) 干渠藻类生长速率估算方法

根据 Liebig 的最小值定理:任何一种有机物的产率都由该种有机物所必需的、在环境中丰度最低的物质所决定^[9],借此采用 Monod 模型描述生物生长速率与营养物质质量浓度的关系为

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} \quad (2)$$

式中: μ 表示某种生物的生长速率; μ_{\max} 表示某种生物的最大生长速率; S 表示营养物质的实际质量浓度; K_s 表示营养物质的半饱和质量浓度。

藻类生长受到不止一种因素的制约,在一种营养物消耗殆尽之前,藻类是以一个较低速率消耗着各种成分^[9]。影响藻类生长的营养物质主要为氮和磷,所以藻类的生长速率可以表示为

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S_p}{K_p + S_p} \times \frac{S_N}{K_N + S_N} \quad (3)$$

式中: S_p 、 S_N 分别表示用于光合作用的磷和氮; K_p 、 K_N 分别表示磷和氮的半饱和质量浓度。

(3) 干渠藻类增殖模型选取

常用的藻类增殖模型有指数增长模型与逻辑斯蒂增长模型。因为实际监测数据中末尾监测点保定的藻类密度为1 152.82万个/L,还未若达到水华爆发的临界密度值 10^4 万个/L^[7],资源和空间限制尚未形成,其增殖速率还未达到最大值,不在考虑了抑制效应的逻辑斯蒂模型的适用范围之内,而采用指数增长模型 $N = N_0 e^{\mu t}$ 更为符合实际;式中, μ 是藻类的比增长率。藻类的比增长率受生长环境营养物质含量、水温、光照等环境条件及浮游植物群落中种类间的竞争和演替影响,其数值拥有上限值,即是比增长率最大值,也称为藻类的内禀增长率 μ_{\max} ^[8]。

2 结果与讨论

2.1 氮磷沉降对干渠水体水质影响分析

中线干渠为形状规则、相对封闭的明渠,其营养盐的来源主要为丹江口水库源水携带、沿途大气沉降持续汇入和内排段地下水间歇汇入。由于内排段地下水只有在汛期时会汇入,多数时间内排段地下水水量较少,并且内排段地下水污染物进入干渠后,由于稀释扩散作用,其浓度在短时间内即可降低到地表水Ⅱ类水质以下^[11]。所以,本研究中不考虑内

排段地下水对干渠水质的影响,而只考虑大气氮磷沉降及水库原有的氮磷含量。由《丹江口库区及上游水环境质量月报》(2013年3月)获知,丹江口水库的5个测点均为中营养。由郑丹楠等^[12]的研究获知,河南、山东、京津冀地区的大气氮沉降多数在 $30 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 以上。由首都师范大学的学者阎恩松^[13]研究获知,全国大气磷沉降速率为 $25 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。假设目前中线干渠流量为 $60 \text{ m}^3/\text{s}$,水位为 8 m ,渠面上方大气氮沉降速率为 $30 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,大气磷沉降速率为 $25 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;营养物质在水体中的沉降速度常数为 0 ;利用根据沃伦威德模型,可估算出由大气沉降给中线干渠各渠段带来的总氮和总磷负荷,估算结果见表2,从表中可知,南水北调中线干渠从渠首陶岔至北京沿线过程中,水体的营养物质浓度不断累积升高。

2.2 藻类增长速率的计算

不同藻类的半饱和常数与最大生长速率都不尽相同,因为水源地丹江口水库中水体主要来自于长江支流汉江和丹江,所以在计算时选取同为长江水系的三峡库区库尾的次级河流——临江河的藻类生长数据。在适宜条件下,藻类的最大生长率为 $0.912 \text{ 个}/\text{d}$,氮和磷营养盐的半饱和质量浓度分别为 $K_N = 0.326 \text{ mg}/\text{L}$, $K_p = 0.163 \text{ mg}/\text{L}$ ^[15]。由 Monod 模型可计算得到南水北调中线干渠各渠段的藻类平均生长速率(表3)。公式表示为

$$\mu = 0.912 \times \frac{S_p}{0.163 + S_p} \times \frac{S_N}{0.326 + S_N} \quad (4)$$

2.3 沿线藻类数量估算

我国很多湖库等水体富营养化情况严重,水华问题频发。水华发生时,藻类会产生休眠孢子至空气中,用以空气传播繁殖,致使空气中藻类的孢子含量成为一个不容忽视的方面。因为休眠孢子繁殖成新的藻类细胞需要 $1 \sim 3 \text{ d}$ 的萌发过程,所以沉降到水面的孢子不会马上成为硅藻细胞,而需在适宜条件下经历萌发期萌发成新的藻类细胞,这一部分细胞对水体中藻类密度也会有一定程度的影响。为方便计算,设定中线干渠水体流速为设计流速 $1 \text{ m}/\text{s}$,某一河段的沉降的孢子不会在本河段萌发,而加入下一河段藻类个数的计算。鉴于本研究中参数变量较多,采用网格搜索法进行辅助运算;研究中事先并不清楚干渠的孢子沉降量的确切范围,所以考虑沉降量在 $0 \sim 20 \text{ 亿个}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 范围内取值,如输出结果在边界处,再扩大边界取值,最后确定各段藻类孢子沉降量(见表4)。

表 2 南水北调中线干渠大气沉降致总氮、总磷贡献估算

Tab. 2 Total nitrogen and total phosphorus contributed by atmospheric deposition in main canal of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project

渠段	程长/km	底宽/m	最大暴露面积/hm ²	冲刷速度常数/d ⁻¹	氮贡献值/(mg·L ⁻¹)	磷贡献值/(mg·L ⁻¹)
陶岔—石家	48.9	56.0	610.03	0.148	0.010	0.008
陶岔—大寨	102.1	53.5	1 259.84	0.072	0.020	0.017
陶岔—四家营	208.5	50.8	2 516.10	0.036	0.040	0.033
陶岔—马庄	298.8	45.4	3 536.91	0.026	0.056	0.047
陶岔—孟坡	334.6	40.7	3 930.09	0.024	0.062	0.052
陶岔—三官庙	393.5	38.9	4 562.73	0.020	0.072	0.060
陶岔—贾寨	428.0	35.9	4 925.06	0.019	0.078	0.065
陶岔—郑湾泵站	438.4	34.1	5 033.09	0.019	0.080	0.066
陶岔—如寨	452.7	33.6	5 180.73	0.018	0.082	0.068
陶岔—苏蒯	531.8	32.9	5 978.55	0.016	0.095	0.079
陶岔—老道井	609.4	28.8	6 730.19	0.014	0.107	0.089
陶岔—三里屯	657.7	24.9	7 182.50	0.013	0.114	0.095
陶岔—南流寺	712.7	22.4	7 683.04	0.013	0.122	0.102
陶岔—郭河	778.0	19.6	8 257.27	0.012	0.131	0.109
陶岔—南大郭	835.2	16.3	8 742.37	0.011	0.139	0.116
陶岔—田庄	865.7	13.3	8 994.21	0.011	0.143	0.119
陶岔—京石段	959.5	11.8	9 738.93	0.010	0.154	0.129
陶岔—北京	1 267.0	7.0	12 860.05	0.008	0.204	0.170

表 3 南水北调中线干渠藻类生长速率估算

Tab. 3 Algae growth rate in main canal of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project

渠段	氮质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	磷质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	生长速率/ (个·d ⁻¹)	渠段	氮质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	磷质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	生长速率/ (个·d ⁻¹)
陶岔—石家	2.010	0.018	0.21	陶岔—苏蒯	2.095	0.089	0.35
陶岔—大寨	2.020	0.027	0.23	陶岔—老道井	2.107	0.099	0.36
陶岔—四家营	2.040	0.033	0.27	陶岔—三里屯	2.114	0.105	0.37
陶岔—马庄	2.056	0.047	0.29	陶岔—南流寺	2.122	0.112	0.38
陶岔—孟坡	2.062	0.062	0.30	陶岔—郭河	2.131	0.119	0.39
陶岔—三官庙	2.072	0.070	0.32	陶岔—南大郭	2.139	0.126	0.40
陶岔—贾寨	2.078	0.075	0.33	陶岔—田庄	2.143	0.139	0.40
陶岔—郑湾泵站	2.080	0.076	0.33	陶岔—京石段	2.154	0.149	0.41
陶岔—如寨	2.082	0.078	0.33	陶岔—北京	2.204	0.180	0.46

表 4 南水北调中线干渠沿线藻类数量估算

Tab. 4 Algae quantity in main canal of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project

渠段	石家	大寨	四家营	马庄	孟坡	三官庙	贾寨	郑湾	如寨
起始处藻类数量/(万个·L ⁻¹)	12.25	13.77	15.84	21.97	29.85	33.85	42.04	47.89	49.82
孢子沉降量/(亿个·hm ² ·a ⁻¹)	19.10	3.90	3.80	3.50	3.30	5.50	3.30	3.50	4.00
终点处藻类数量/(万个·L ⁻¹)	13.77	15.84	21.97	29.85	33.85	42.04	47.89	49.82	52.63
渠段	苏蒯	老道井	三里屯	南流寺	郭河	南大郭	田庄	京石段	北京
起始处藻类数量/(万个·L ⁻¹)	52.63	72.42	100.37	123.57	157.47	211.56	275.46	317.55	497.87
孢子沉降量/(亿个·hm ² ·a ⁻¹)	4.50	3.60	0	0	0	0	0	0	0
终点处藻类数量/(万个·L ⁻¹)	72.42	100.37	123.57	157.47	211.56	275.46	317.55	497.87	2 525.66

由表 4 可知,孢子沉降量在南水北调源头处相比于其他渠段大很多,而从渠首至南阳之前的渠段孢子沉降量都大致在 3~5 亿个/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$),相比于后续渠段沉降量较大,分析原因是这些渠段地理位置偏南,周边水库、湖泊较多,空气比较湿润,有利于藻类孢子的形成和扩散;进入北方后,由于水库湖泊的减少,空气也越发干燥,空气中孢子数量会相对减少。而在三里屯以后,孢子沉降参数率定值均为 0,分析其原因是三里屯之后水体中藻类的生长速率较大,其生长曲线的斜率已经满足实际测量值,不需再额外增加孢子沉降这个参数变量。将表 4 计算的藻类数量做出曲线见图 1,在不考虑孢子沉降时,模型的中值误差为 35.74%。通过加入孢子沉降量这一影响因素后,模型的中值误差降低为 23.71%,拟合精度显著提高,表明考虑藻类孢子沉降对水体藻类数量估计的影响具有一定的合理性。

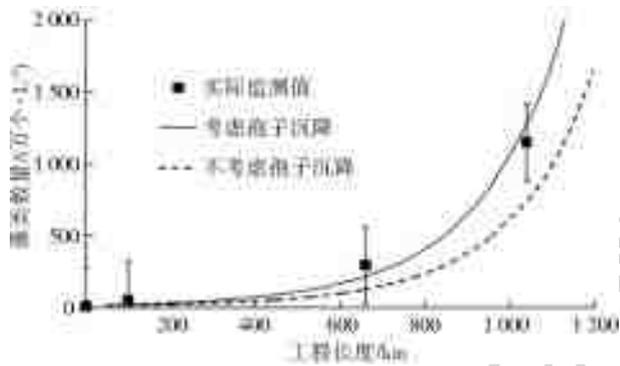


图 1 南水北调中线干渠藻类密度拟合

Fig. 1 Fitting curve of algae quantity in main canal of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project

3 结论与建议

3.1 结论

(1)根据考虑氮磷大气沉降对南水北调中线干渠输入的估算结果,即使到渠首的水体处于中营养状态,按大气氮磷沉降的全国平均值计算,到达监测点三里屯时,经过沿途的积累,水体中总氮质量浓度亦可达到 2.114 mg/L,总磷质量浓度可达到 0.105 mg/L,导致干渠水体氮磷质量浓度超过富营养化质量浓度阈值,为总干渠带来水华暴发风险。

(2)根据考虑空气中孢子沉降是否对南水北调中线干渠藻类增殖产生影响的研究发现,基于孢子沉降后的藻类增殖模型的中值误差为 23.71%,精度较不考虑孢子沉降因素的估算结果显著提高,可以推知,孢子沉降对干渠水体的藻类增殖情况存在较大影响。

3.2 建议

为提高南水北调中线干渠藻类增殖趋势的预测精度,须对率定模型参数所需数据进行系统性监测。

(1)中线干渠全线大气氮磷沉降速率时空分布的监测。根据建模精度需要,在中线干渠沿程设置相应数量监测点,遵照相应标准采样原则,对全年各月大气氮磷干湿沉降平均速率进行采样检测。

(2)中线干渠全线水体氮磷质量浓度时空分布的监测。在表 4 所列各渠段节制闸后渠宽的二次方距离处采集检测全年各月渠水中氮磷质量浓度。

(3)中线干渠全线大气藻类孢子沉降速率时空分布的监测。在中线干渠大气氮磷沉降采样点同时采集并检测全年各月大气藻类孢子沉降速率,并观察其萌发速率与增长速率。

(4)中线干渠全线水体藻类密度时空分布的监测。在中线干渠全线水体氮磷质量浓度采样处采集的水样中同时测定其藻类密度,并对其中藻类的优势种群进行观测,观测其内禀增长率与半饱和常数。

用以上监测数据对模型参数进行率定和校核,探究更深层次的藻类增殖机制,并据此对模型进一步修正,以建立更高精度的中线干渠藻类增殖模型,为南水北调中线水质安全保障提供信息支撑。

参考文献(References):

- [1] 李瑞贤. A/O 膜生物反应器脱氮特性研究[D]. 天津: 天津大学,2010. (LI R X. Research on characteristic of nitrogen removal by A/O MBR[D]. Tianjing: Tianjin University,2010. (in Chinese))
- [2] 梁建奎,辛小康,卢路,等. 南水北调中线总干渠水质变化趋势及污染源分析[J]. 人民长江,2017,48(15):6-9,61. (LIANG J K, XIN X K, LU L, et al. Analysis of water quality variation and potential pollution sources in main channel of Middle Route Project of South to North Water Diversion[D]. Yangtze River, 2017, 48(15): 6-9, 61. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2017. 15. 002.
- [3] 胡兰群,冯精兰,李怡帆,等. 南水北调中线工程水源地丹江口水库生物监测试点研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2014,42(3):100-104. (HU L, FENG J L, LI Y F, et al. Pilot study on bio-monitoring in Danjiangkou reservoir of the water source area in the Middle Route of China's South to North Water Diversion Project[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2014, 42(3): 100-104. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2017. 15. 002.
- [4] 黄慧婷,王敏,李玉仙,等. 南水北调水源条件下的藻类

- 生长成因及控制技术探究[J]. 城镇供水, 2016(6):73-78. (HUANG H T, WANG M, LI Y X, et al. Study on the genesis and control technology of algae growth under water source conditions in the South-to-North Water Transfer Project[J]. City and Town Water Supply, 2016(6):73-78. (in Chinese)) DOI:10.14143/j.cnki.czgs.2016.06.016.
- [5] 马吉明, 史哲. 南水北调典型宽浅渠道糙率系数研究[J]. 水力发电学报, 2007(5):75-79. (MA J M, SHI Z. Research on the absolute roughness of the typical channel of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007(5):75-79. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1003-1243.2007.05.015s.
- [6] 万金保, 李媛媛. 湖泊水质模型研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 2007(6):805-809. (WAN J B, LI Y Y. Progress in the research of lake water quality model[J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2007(6):805-809. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1004-8227.2007.06.022.
- [7] 李颖, 施择, 张榆霞, 等. 关于用藻密度对蓝藻水华程度进行分级评价的方法和运用[J]. 环境与可持续发展, 2014, 39(2):67-68. (LI Y, SHI Z, ZHANG Y X, et al. Evaluation method and application on cyanobacteria bloom degree classification with algal density[J]. Environment and Sustainable Development, 2014, 39(2):67-68. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1673-288X.2014.02.020.
- [8] 陈德辉, 章宗涉, 陈坚. 藻类批量培养中的比增长率最大值[J]. 水生生物学报, 1998(1):26-32. (CHEN D H, ZHANG Z S, CHEN J. Maximum specific growth rate (μ_{MAX}) of six algal species determined in batch culture[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1998(1):26-32. (in Chinese))
- [9] 程声通. 环境系统分析教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016. (CHENG S T. Environmental systems analysis course[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016. (in Chinese))
- [10] 陈磊. 专家回应南水北调中线输水三大质疑[N]. 科技日报, 2014-12-25(001). (CHEN L. Experts respond to three questions on the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project[N]. Science and Technology Daily, 2014-12-25(001). (in Chinese))
- [11] 王兴伟, 陈家军. 地下水内排对南水北调中线干渠水质的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5):858-861, 887. (WANG X W, CHEN J J. Impact of groundwater internal discharge on the water quality of open channel in the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2015, 13(5):858-861, 887. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.05.009.
- [12] 郑丹楠, 王雪松, 谢绍东, 等. 2010 年中国大气氮沉降特征分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(5):1089-1097. (ZHENG D N, WANG X S, XIE S D, et al. Simulation of atmospheric nitrogen deposition in China in 2010[J]. China Environmental Science, 2014, 34(5):1089-1097. (in Chinese))
- [13] 王晓燕, 阎恩松, 欧洋. 基于物质流分析的密云水库上游流域磷循环特征[J]. 环境科学学报, 2009, 29(7):1549-1560. (WANG X Y, YAN E S, OU Y. Material flow analysis of the phosphorus cycle in the upper watershed of the Miyun reservoir in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(7):1549-1560. (in Chinese)) DOI:10.13671/j.hjkxxb.2009.07.003.
- [14] GB 3838—2002, 地表水环境质量标准[S]. (GB 3838—2002, Environmental quality standards for surface water[S]. (in Chinese))
- [15] 卜发平. 临江河回水河段富营养化特性、机制及人工浮床控制技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011. (BU F P. Study on eutrophication characteristics, mechanism and its countermeasures with artificial floating beds in the backwater of the Linjiang River[D]. Chongqing University, Chongqing, 2011. (in Chinese))