

引水对三垱湿地水体总磷影响的生态模型研究

张修峰^{1,2}, 童春富¹, 陆健健¹

(1.华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062; 2.暨南大学水生生物研究所, 广州 510642)

摘要:采用 STELLA 软件, 构建了三垱湿地水体 TP 随时间变化的模型并通过此模型模拟了消除外源污染前后引水水体 TP 的变化。结果表明, 内外污染源共存时, 当前水体 TP 会进一步增加, 水质继续恶化, 即便引入较好的水质, TP 含量也将继续增加, 富营养化状况得不到彻底解决; 若消除外源污染, 对当前水体 TP 含量的迅速增加起到一定的减缓作用, 但因内源污染的作用, 引入不同的水质, TP 仍会增加。因此, 仅通过引水来解决三垱湿地水体富营养化问题的作用是有限的。

关键词:湿地; 水体污染; 营养盐; 富营养化; 生态模型

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2005)05-0924-05

Ecological Model of the Effects of Drawing Water on TP Concentration in Sanyang Wetland

ZHANG Xiu-feng^{1,2}, TONG Chun-fu¹, LU Jian-jian¹

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Using STELLA software, a model was constructed to study the influences of drawing different types of water to Sanyang wetland on TP concentration of water body, and simulated the change of TP in water before and after the exterior pollution sources were cut off through the model. Results showed that when the exterior and interior pollution sources coexisted, the current TP concentration would keep on rising, the water quality continued worsening, and even if better quality of water, such as III, IV and V types of water quality, were introduced into the wetland, the TP would continue increasing, up to 890.57 mg·m⁻³, 891.06 mg·m⁻³ and 891.57 mg·m⁻³ after 230, 260 and 282 days later, respectively, and exceeded the present TP concentration. If exterior pollution sources were cut off, the increasing rate of TP in water slowed down, but the TP in water maintained rising since the interior pollution sources, the current water continued deteriorating in 270 days later, with the TP being 1008.31mg·m⁻³. The TP would be 890.67 mg·m⁻³, 892.00 mg·m⁻³ and 890.59 mg·m⁻³ when V, IV and III type of water were introduced 300 days, 318 days and 342 days later, exceeding the current concentration. These results implied that cutting off the exterior pollution sources by drawing water to the wetland only played a limited role to solve eutrophication problem in Sanyang wetland.

Keywords: wetland; water pollution; nutrients; eutrophication; ecological model

湿地被称为“自然之肾”, 在降解污染、净化水质等方面发挥着重要作用。目前随着大量 N、P 和生物残体的排入, 大多数湿地遭受不同程度的污染, 导致水体富营养化^[1]。P 是水体富营养化过程中极为重要的指标, 因此控制水体中的 P 含量是防治水体富营养化的关键因素之一^[2]。

自水体富营养化出现以来, 人们就设法通过构建模型来管理和认识这一问题^[3]。现已建立了大量的复杂程度不同的模型^[4-5], 许多模型在认识和管理富营养化方面发挥了重要作用^[6-7]。对于截污、引水等方式来治理水体富营养化已经进行了大量研究^[8], 并且这方面的模型也越来越多^[9,10], 而通过构建 STELLA 模型研究引水对富营养化影响的文章较为少见。STELLA 是一种广泛用于生态和环境建模的软件^[11], 国内尚未见到这方面的报道。因此, 本文采用 STELLA 软件构建了三垱湿地水体总磷变化的模型并模拟了内外污染源共存和消除外源污染后引水总磷的变化, 为湿地

收稿日期: 2004-12-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40131020); 国家 973 科技攻关项目(2002CB412406)

作者简介: 张修峰(1977—), 安徽人, 博士研究生。
E-mail: wetlandxfz@163.com

水体富营养化的治理及湿地生态系统的修复与重建提供参考具有重要意义。

1 湿地概况与建模方法

1.1 概况

三垟湿地位于浙江省温州市瓯海区，湿地面积 11.4 km²，内部水网密布，由 160 余座岛屿组成。该区属亚热带海洋性季风气候，年平均温度 17.9℃；雨热同季，7~9 月气温较高，同时台风活动频繁，也是降水的高峰期，年均降雨量 1 800 mm。三垟湿地水体和底泥采样点见图 1。

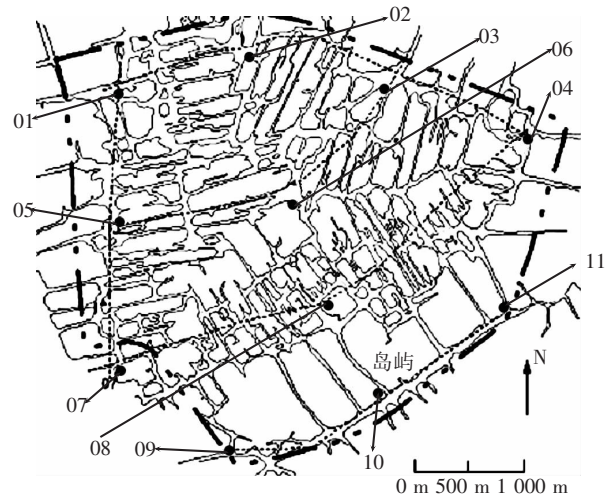


图 1 三垟湿地及采样点(01~11)

Figure 1 Sanyang wetland and the location of sampling sites (01~11)

1.2 建模过程

1.2.1 模型结构

模型以三垟湿地水体总磷为研究对象，遵循物质守恒原理，即水体中 P 的增加等于进入水体 P 的总量减去离开水体 P 的总量。模型由状态变量、过状态方程以及参数组成。状态变量共设 3 个，即水体总磷(P1)、底泥全磷(P2)含量和浮游生物总磷(P3)。

1.2.2 模型假设

由于富营养化过程非常复杂，涉及的因素众多，因此构建模型时，必须进行必要的简化，重点考虑主要因素，如水体营养物质浓度等，次要因素则忽略不计。本模型的简化如下：

- (1)引水需在短时间内完成且引水后水位无变化。
- (2)水体外泄量速率引水前后无变化。
- (3)由于数量较少，未考虑大型植被对水体中 P 的影响；另外，在建立模型时，未将消费者列入状态变量，而是将各级消费者所摄取的 P 全部归入浮游植物 P 的损失。
- (4)未考虑湿地水文条件。

1.2.3 模型构建

基于上述结构和假设，模型采用 STELLA 软件构建，概念图见图 2，其中：过程 E 为排污输入到水体的 P；C 为底泥输入到水体中的 P；A 为泄流输出的 P；B 为沉积等输出水体的 P；F 为沉积输入底泥的 P；G 为从底泥释放输出的 P；H 为从底泥表层到深层的 P 转移埋藏等损失的 P；I 为从水体中吸收的浮游植物 P；J 为浮游植物 P 的沉降，K 为泄流输出的浮游植物 P。

1.2.4 方程与参数

模型所用的过程方程、状态方程见表 1；状态变量初始值和参数见表 2。

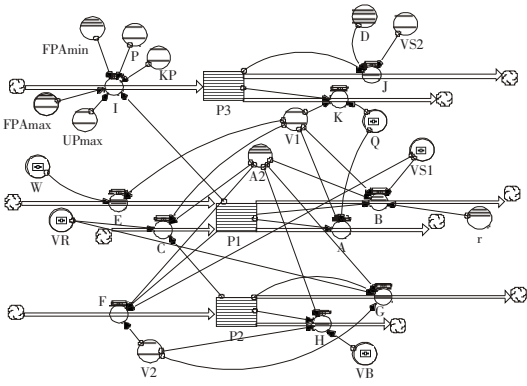


图 2 三垟湿地水体总磷浓度的 STELLA 模型

Figure 2 STELLA model of water TP in Sanyang wetland

表 1 STELLA 模型中所用到的方程

Table1 Equations in the STELLA model

状态方程	过程方程	
	输入	输出
$P1(t)=P1(t-dt)+(E+C-A-B)dt$	$E=W/V1$	$A=Q \times P1/V1$
	$C=VR \times A2 \times P2/V1$	$B=VS \times A2 \times P1 \times r / V1$
$P2(t)=P2(t-dt)+(F-G-H)dt$	$F=VS \times A2 \times P1/V2$	$G=VR \times A2 \times P2 / V2$
		$H=VB \times A2 \times P2 / V2$
$P3(t)= P3 (t-dt)+(I-J-K)dt$	$I=UP_{max} \times (PFA_{max}-P1)/(PFA_{max}-PFA_{min}) \times P/(P+KP) \times P1$	$J= P3 \times VS2 \times D$
		$K= P3 \times Q/V1$

表 2 模型参数、状态变量及其初始值

Table 2 Parameters, state variables and initial values in the model

符号	含义	单位	数值	来源
P1	水体总磷浓度	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	610	实测
P2	底泥全磷含量	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	4 408 000	实测
P3	浮游植物磷	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	35.1	文献 ^[12]
P	正磷酸盐浓度	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	480	实测
W	负荷量	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	30 000 000	校正
Q	水体外泄量速率	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	1 000	校正
V1	湿地水体容积	m^3	8 250 000	实测
A2	沉积区表面积	m^2	3 300 000	实测
VR	再悬浮速率	$\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	0.000 01	校正
VB	从底泥表层到深层磷转移埋藏系数	$\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	0.000 1	校正
V2	沉积区容积	m^3	1 320 000	实测
VS1	沉积速率	$\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	0.000 05	校正
r	水体中可沉积的颗粒态总磷的比例		35%	校正
VS2	藻类沉降速率	$\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	0.05	文献 ^[20]
D	水深	m	2.50	实测
UPmax	藻类细胞对磷的最大摄取率	$\text{l} \cdot \text{d}^{-1}$	0.01	文献 ^[4]
PFAmax	藻类细胞最高含磷量	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	14.3	文献 ^[4]
PFAmin	藻类细胞最低含磷量	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	2	文献 ^[4]
KP	藻类摄磷的 Michaelis 常数	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	22	文献 ^[4]

2 结果与分析

2.1 模型校准及有效性检验

采用 STELLA 软件运行, 步长 1 d, 用 STELLA 辅助进行灵敏度分析。按 2003 年 4—10 月间的实测数据校准, 见表 3。建模过程确定模型参数用 2003 年 4 月实测数据进行。

表 3 三垱湿地水体总磷浓度的实测值与模拟计算值的比较

Table3 Comparisons between observed and simulated values of TP concentration in Sanyang wetland

时间/d	实测值/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	模拟值/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	相对误差/%
0	610	610	0.0
30	671	680.24	1.4
60	701	740.93	5.7
150	848	877.83	3.5
180	890	911.65	2.4
平均	744	764.13	2.7

注: $r^2=0.988\ 6, n=5$ 。

由表 3 可以看出, 实测值和模拟值的相对误差都在 10% 以内; 实测值和模拟值之间的复相关系数为 0.988 6, 达到相当高的精度。因此, 可以认为模型是可靠的, 具有预测价值。

2.2 模拟与分析

引水是解决富营养化的重要措施之一。为此将三垱湿地的引水分 2 种情况, 即: 内、外源污染共存时直

接引水; 外源污染消除后引水。引水分为: 当前水质, 即 $\text{TP}\ 890\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; V 类水, 即 $\text{TP}\ 400\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; IV 类水, 即 $\text{TP}\ 300\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; III 类水, 即 $\text{TP}\ 200\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2.2.1 内、外污染源共存引水总磷变化

图 4 显示了直接引入不同水体总磷浓度的变化。由于底泥和外源污染的存在, 水体 TP 浓度迅速增加: 引入当前水质, 90 d 增至 $974.14\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 180 d 达 $1\ 028.41\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 引入 V 类水, 230 d 超过目前水体浓度, 为 $890.57\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 一年后达 $1\ 000.56\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 引入 IV 类水, 30 d 可增至 $412.32\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 超过 V 类水标准,

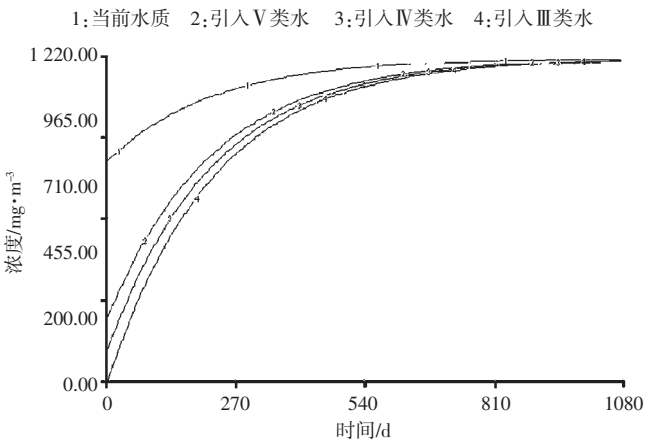


图 4 引入不同类型水体后浓度的变化

Figure 4 Changes of TP concentration in water after drawing different water

260 d 增加到 $891.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 超过当前浓度;引入Ⅲ类水,24 d 即超过Ⅳ类水的含量,51 d 增至 $403.17 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 超过Ⅴ类水标准,282 d 超过当前水体浓度,达 $891.57 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

总之,在内源污染和外源污染共存的情况下,仅通过引水方式来治理三垟湿地的水质问题,水体富营养化是得不到彻底解决的。

2.2.2 切断外源污染后引水总磷变化

切断外源污染,引入不同水体,其浓度变化见图5。因内源的释放,TP 浓度仍会进一步增加,其中:当前水质,90d 达 $947.73 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,比截污前同期下降 $26.14 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,3 年后为 $1051.31 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,达到Ⅴ类水含量的2倍多;引入Ⅴ类水,300d 达 $890.67 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,超过当前水体含量,3 年后达 $1048.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,比截污前同期下降 $74.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;引入Ⅳ类水,30d 就可超过Ⅴ类水标准,比不截污同期下降 $10.11 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,318 d 超过目前水体含量,比截污前推迟,57 d 出现;引入Ⅲ类水,27 d 含量超过Ⅳ类水的标准,比同期不截污降低 $9.17 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;57 d 超过Ⅴ类水的标准,比同期不截污下降 $18.03 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,342 d 超过当前水体总磷含量,比不截污达到这一浓度推迟近 100 d。

总之,对切断外源污染后引水水体总磷浓度变化的模拟可知,即便切断外源污染,仅通过引水方式来治理三垟湿地的水质问题,水体的富营养化依然得不到彻底解决。

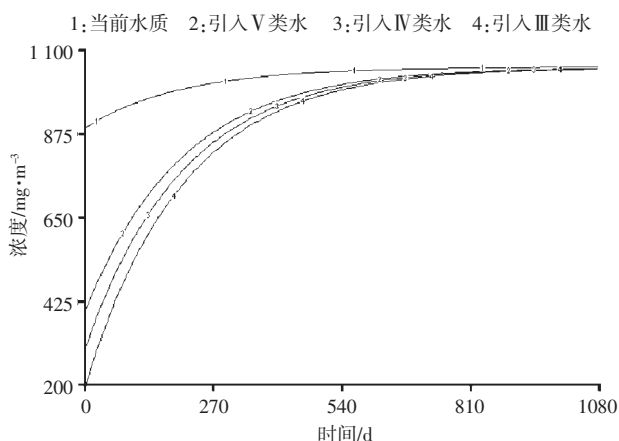


图5 外源污染切断后引入水体浓度随时间变化

Figure 5 Changes of TP when different water poured into after cutting off exterior pollution sources

3 讨论

富营养化治理有多种措施,较常用的有截流、引水、清淤、治污和恢复水生生态系统等,其中截流、引

水是治理水体富营养化的一项重要措施,杭州西湖、太湖、滇池等富营养化水体治理过程中都采用过。然而该措施对于内源污染严重的湿地、湖泊等,当外部污染源被控制以后,由于沉积物中营养盐内负荷的存在,水体仍会发生富营养化^[13],致使引水效果不显著。因为底泥是湿地中营养物质的蓄积库,在沉淀和释放污染物方面起着重要作用^[14],底泥中营养盐的释放会对水体形成二次污染^[15],是水体的潜在污染源。

采用 STELLA 软件构建了温州三垟湿地水体总磷浓度随时间变化的模型,结果显示:在不消除外源的情况下,水体浓度迅速增加,达不到改善水质的目的;而消除外源污染后,其效果依然不明显。这是因为三垟湿地紧邻温州市中心区,由于长期的污染沉积,底泥中全磷含量高达 0.27%~0.60%,平均为 0.38%,即便外源得到控制,如不进行内源治理或进行水生植被的恢复,湿地的富营养化问题仍得不到彻底解决。因此,要进一步提高三垟湿地水质,仅靠消除外源污染和引水是不够的,必须进行底泥疏浚或恢复水生生态系统,提高湿地自身对水质的净化功能。

4 结论

对三垟湿地水体内外源污染共存的情况下的模拟表明,仅通过引水方式来治理三垟湿地的水质问题,水体富营养化问题得不到解决。由切断外源污染后引水水体总磷浓度变化的模拟结果可知,仍将长期处于富营养化状态。

参考文献:

- [1] White J S, Suzanne E, et al. Sediment storage of phosphorus in a northern prairie wetland receiving municipal and agro-industrial wastewater [J]. *Ecological Engineering*, 2000, 14(1):127-138.
- [2] Jørgensen S E, Vollenweider R A. Guidelines of lake management, Volume 1: Principles of Lake Management. International Lake Environment Committee and The United Nations Environment Programme. 1989.
- [3] Jørgensen S E. A general model of nitrogen removal by wetlands. In: Mitch W Jed. Global wetlands: Old World and New [J]. *Elsevier Science*, 1994, 575-583.
- [4] Jørgensen S E, Bendoricchio G. Fundamental of ecological modeling [M]. *Elsevier*, 2001. 280-289.
- [5] Malmaeus J M. Development of a Lake Eutrophication model [J]. *Ecological Modelling*, 2004, 171(1-2):35-63.
- [6] Jørgensen S E. State the art management of models for lakes and Reservoirs [J]. *Lakes and Reservoirs: Research and mangement*, 1995, 1(2): 79-87.
- [7] Marco A Janssen. An exploratory integrated model to assess management of lake eutrophication [J]. *Ecological Modelling*, 2001, 140(1-2):

928	张修峰等:引水对三垌湿地水体总磷影响的生态模型研究	2005年 10 月
111–124.	New York: Elsevier Scientific Publishing Company,2001. 3–10.	
[8] 王国祥, 成小英, 濮培民. 湖泊藻型富营养化控制技术、理论及应用[J].湖泊科学,2002,14(3):273–282.	[12] 裴洪平, 王维维, 何金土,等,杭州西湖引水后生态系统中磷循环模型[J].生态学报, 18(6):648–653.	
[9] Wang N, William J Mitsch. A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands[J]. <i>Ecological Modelling</i> ,2000, 126(2–3):101–130.	[13] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J].湖泊科学,2002,14(3):193–202.	
[10] Renan U Goetz, Zilberman D.The dynamics of spatial pollution:The case of phosphorus runoff from agricultural land[J]. <i>Journal of Economic Dynamics & Control</i> ,2000, 24(1):43–163.	[14] Yoshida T, Fukushima T. Mathematical model of phosphorus release from lakes sediments[J]. <i>Environment International</i> , 1982, 7(2):143–150.	
[11] Jørgensen S E, Bendoricchio G. Fundamental of ecological modeling[M].	[15] Boers P C M, Raaphorst W V. Phosphorus retention in sediments[J]. <i>Wat Sci Tech</i> , 1998, 37(3): 31–39.	