

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017051501

朱文婷, 钱新, 钱玮, 等. 基于 QUAL2K 模型的尾水生态净化方案设计[J]. 环境化学, 2018, 37(3): 600-608.

ZHU Wenting, QIAN Xin, QIAN Wei, et al. Application of QUAL2K model for ecological purification design of treated water[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(3): 600-608.

基于 QUAL2K 模型的尾水生态净化方案设计*

朱文婷^{1,2**} 钱新² 钱玮³ 李庆魁¹ 刘金根¹

(1. 苏州农业职业技术学院, 苏州, 215008; 2. 南京大学, 南京, 210023; 3. 苏州科技大学, 苏州, 215009)

摘 要 生态修复法常用于尾水生态河道的修复, 不同的净化单元需要合理搭配才能获得最优的处理效果. 本研究应用 QUAL2K 水质模型建立了针对某污水处理厂尾水河道的数值模型, 进而筛选出最优的生态净化单元, 并确定了单元所需的停留时间和布置密度. 通过数值模拟得到布置密度、停留时间与水质达标等级的定量关系, 可为今后进行设计方案优选和工程升级改造提供参考和支撑.

关键词 QUAL2K 模型, 生态修复, 停留时间, 布置密度.

Application of QUAL2K model for ecological purification design of treated water

ZHU Wenting^{1,2**} QIAN Xin² QIAN Wei³ LI Qingkui¹ LIU Jingen¹

(1. Suzhou Polytechnic Institute of Agriculture, Suzhou, 215008, China;

2. Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 3. Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, 215009, China)

Abstract: Ecological restoration method is commonly used in the restoration of the treated water, and different purification units need to be matched well to get the most effective treatment. In this study, QUAL2K model was applied to the treated water channel in a wastewater treatment plant, and the optimal ecological purification unit was selected. Meanwhile, the density of the layout and the residence time for purification units was calculated. Through the numerical simulation, quantitative relationship among the density of the layout, the residence time and the grade of the water quality were obtained. This study can provide a reference for the optimization of the design scheme and the upgrading of the project in the future.

Keywords: QUAL2K model, ecological restoration, residence time, layout density.

太湖流域是中国经济最为发达的地区之一, 每年有大量的尾水通过支流水系进入太湖, 造成富营养化现象严重, 进一步减少尾水中的 N 和 P 负荷是一项非常紧迫的任务. 尽管低污染水的浓度较低, 但是由于水量大, 容易造成严重的水体污染积累. 生态净化技术由于具有施工成本低, 易于维护, 综合效益好等优点, 目前已广泛应用于尾水的净化.

2017 年 5 月 15 日 (Received: May 15, 2017).

* 江苏省高等学校自然科学研究面上项目 (17KJB610011), 苏州市科技计划项目 (SNG2017059), 苏州农业职业技术学院青年提升计划项目 (PPN201710) 和江苏省大学生创新创业项目 (201712808007Y) 资助.

Supported by the University Science Research Project of Jiangsu Province (17KJB610011), Science and Technology Plan Project of Suzhou (SNG2017059), Youth Promotion Project of Suzhou Polytechnic Institute of Agriculture (PPN201710) and Innovation and Entrepreneurship Project for College Students of Jiangsu (201712808007Y).

** 通讯联系人, Tel: +86 20 051266098711, E-mail: dtzwt1987@126.com

Corresponding author, Tel: +86 20 051266098711, E-mail: dtzwt1987@126.com

对于生态净化单元的布置密度和停留时间,大多数应用都是根据实验室净化参数来估计,然而不同生态物种、不稳定的气候和环境条件变化会造成去除效果的不稳定.数学模型可以有效地解决上述问题,并且可以通过参数的调整模拟不同净化单元的净化效果.QUAL2K 是由美国环保局(EPA)开发的一个灵活且精确的水质模型,该模型已被广泛应用于流域污染物控制和水质管理^[1].

本文采用 QUAL2K 水质模型通过划分河段、确定边界条件、在不同的河道输入净化单元的净化参数、校准和验证,建立了针对漕桥污水处理厂尾水河道的数值模型,进而筛选出最优的生态净化单元.另外,针对已建立的尾水河道模型,通过确定的水质目标,可以计算所需的停留时间和布置密度,可为生态工程设计提供定量化的参考依据.本研究的主要目的是:(1) 研究水质模型用于生态净化工程评价的可行性;(2) 计算不同季节尾水河道所需的净化材料的布置量和停留时间.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区域

漕桥污水处理厂位于漕桥镇太滆运河旁,尾水生态净化工程利用厂区内全长约 351.9 m 的河道进行低污染水的深度处理.常州市漕桥污水处理厂尾水生态工程,全长 351.6 m,水深约为 1—1.5 m.目前,该污水处理厂的进水量约为 2500 t 左右,尾水在人工湿地内停留时间为 17 h.

应用 QUAL2K 模型建立污水处理厂尾水湿地模型,首先要进行尾水河道的划分^[2-4].如图 1 所示,QUAL2K 模型可将河流干流划分为一系列河段^[3].QUAL2K 模型首先将待漕桥污水处理厂尾水河道划分为几个恒定的非均匀流河段,然后将每个河段划分成若干相同长度的计算单元,模型假定同一河段具有相同的水力特性和水质参数.本研究的模拟对象是,常州市漕桥污水处理厂尾水生态工程,全长 351.6 m,水深约为 1—1.5 m,沿河流动方向分为 6 条河段(图 1),图中的 5 个点为水质取样点,所测水质指标供模型校准和验证用.研究中假设同一个河段具有相同的水力特性和水质参数.

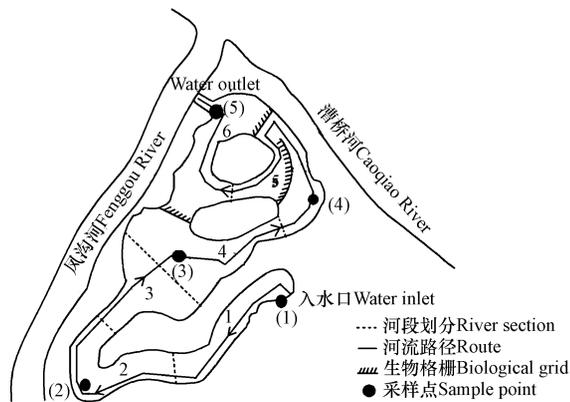


图 1 生态工程的污水流向及河段划分

Fig.1 Sewage flow direction in ecological engineering

1.2 模型数据输入

QUAL2K 模型构建时需输入的数据如下:控制数据、水力数据、系统定义数据、初始条件数据、源头和水质数据、气象数据等^[5].模型参数主要包括水力参数、水质参数、气象参数等 3 类.水力参数:流量、流速、水深、水流扩散系数等;水质参数:分解速率、降解系数、复氧系数、耗氧系数、和降解系数等;气象参数:河段气温、露点温度、风度等^[6-9].模型参数是建模工作的关键,可靠的参数是模型构建成败的主要影响因素.受篇幅所限本文仅列出最重要的输入参数.

1.2.1 源头水质和水量数据

根据漕桥污水处理厂的尾水量估算流量,入水的平均流量大约为 $0.23\text{—}0.29\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,而尾水湿地的容量大约为 4100 m^3 .本研究在不同季节测量了尾水水温,平均流量为 $0.26\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,夏季、秋季和冬季的平均水温分别为 $27.8\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $18.7\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $8.2\text{ }^\circ\text{C}$.源头水质数据采用 2015 年污水处理厂出水水质监测数据均值,

TN:9.71 mg·L⁻¹, NO₃⁻-N:5.13 mg·L⁻¹ NH₃-N:0.43 mg·L⁻¹ ON:2.41 mg·L⁻¹ TP:1.05 mg·L⁻¹ PO₄³⁻-P:0.69 mg·L⁻¹ OP:0.3 mg·L⁻¹.

1.2.2 水力参数与自然特征参数

(1)水力学参数在模型的计算中起决定性的作用,计算的精确程度直接关系到模型的精度范围,它主要用来确定河道的水力特性^[10].

曼宁系数:根据 Manning Equation 经验参数,漕桥尾水湿地为人工开挖水道,有弯曲和少量杂草,河段位于平原水网区,因此模拟河段的曼宁系数选择 0.02—0.06 之间.

纵向弥散系数 D_L 是另一个重要的水利参数^[11].根据经验公式计算得到,尾水生态净化工程的纵向弥散系数 D_L 数值为 41.58.

D_L 获取方法有:试验模拟,示踪剂法或经验公式^[12].模型给出了纵向弥散系数的计算公式:

$$D_L = 3.82Knud^{5/6} \quad (1)$$

式中, K 为纵向弥散常数,其经验平均值是 5000; n 为曼宁粗糙系数; u 为平均流速(m·s⁻¹); d 为平均水深(m).根据计算结果得到,尾水生态净化工程的纵向弥散系数 D_L 数值为 41.58.

(2)河段自然特征参数

①复氧参数(reaeration, d⁻¹):模型中有 4 个复氧模型可供选择:Internal、Churchill 计算公式、O'Connor-Dobbins 计算公式和 Owens-Gibbs 计算公式.本文选择模型的内置复氧计算模型 Internal 根据水力参数自动计算^[13].

②底藻类覆盖度(bottom algae coverage,%):根据现场勘查、河流水力特征以及相关文献资料,河段 1、2 底部砾石较多,藻类覆盖度较低,因此设定为 20%,3—6 河段与天然河道较为类似,设定为 70%.

③河底沉积物覆盖度(bottom SOD coverage,%):根据漕桥尾水生态净化工程的实地调查,水流平稳,除了砾石覆盖的河段 1、2 外,沉积物覆盖度可达到 100%.

1.2.3 降解参数

NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、ON(organic nitrogen)、PO₄³⁻-P Organic phosphorus 和 OP(organic phosphorus) 在不同季节的降解参数(表 1)是通过生态净化小试实验获得^[14].

表 1 不同季节的降解参数

Table 1 Degradation parameters in different seasons

季节 Seasons	参数 Parameters	挺水植物(美人蕉) Emergent plants(<i>Canna indica</i>)		沉水植物(金鱼藻/伊乐藻) Submerged plants (<i>Ceratophyllum demersum</i> Organic phosphorus Organic phosphorus Organic phosphorus Organic phosphorus.)		生物绳 Biological rope
		Organic phosphorus phosphorus	Organic phosphorus	Organic phosphorus	Organic phosphorus/ <i>Elodea nuttallii</i>)	
夏季	ON	0.467		0.459		0.393
	NO ₃ ⁻ -N	0.318		0.274		0.367
	NH ₄ ⁺ -N	0.173		0.082		0.230
	OP	0.508		0.429		0.380
	PO ₄ ³⁻ -P	0.521		0.463		0.436
秋季	ON	0.234		0.152		0.410
	NO ₃ ⁻ -N	0.224		0.246		0.270
	NH ₄ ⁺ -N	0.131		0.078		0.173
	OP	0.195		0.272		0.359
	PO ₄ ³⁻ -P	0.290		0.257		0.390
冬季	ON	0.159		0.199		0.152
	NO ₃ ⁻ -N	0.134		0.163		0.119
	NH ₄ ⁺ -N	0.144		0.074		0.097
	OP	0.136		0.106		0.127
	PO ₄ ³⁻ -P	0.181		0.101		0.130

1.3 模型校验

模型校验是通过调整 QUAL2K 模型中的经验参数取值,使模型的结果与实测值相接近的过程.将实

测的流量、营养负荷的指标值及水温等资料进行水质模拟的结果计算,验证模型结果与实际测量值能否较好的吻合^[15].表 2 显示了经试错法调整后,最终确定的尾水河道的参数,模型参数的取值均在文献及用户手册建议的变化范围之内^[16].参数调整校准结果见图 2 所示.

表 2 不同季节参数校准

Table 2 Parameter calibration in different seasons

参数 Parameters	取值 values			单位 Units	缩写 Abbreviation	参考取值范围 Reference range
	高温 High temperature	中温 Middle temperature	低温 Low temperature			
碳 Carbon	40	40	40	gC	C	30—50
氮 Nitrogen	7.2	7.2	7.2	gN	N	3—9
磷 Phosphorus	1	1	1	gP	P	0.4—2
干重 Dry weight	100	100	100	gD	D	100
叶绿素 Chlorophyll	1	1	1	gA	A	0.4—2
无机悬浮物沉降速度 ISS settling velocity	1	1	1	$m \cdot d^{-1}$	v_s	0—2
复氧模型 O_2 reaeration model						
CBOD _s 水解速率 Slow BOD hydrolysis rate	0.25	0.23	0.19	d^{-1}	k_{hc}	0—2
CBOD _f 水解速率 Fast BOD oxidation rate	0.25	0.23	0.19	d^{-1}	k_{dc}	0.02—4.2
有机氮水解速率 Organic N hydrolysis	0.31	0.25	0.22	d^{-1}	k_{hn}	0—5
有机氮沉降速率 Organic N settling velocity	0.05	0.05	0.05	$m \cdot d^{-1}$	v_{on}	0—2
氨氮硝化 Ammonium nitrification	0.34	0.31	0.26	d^{-1}	k_{na}	0—10
硝酸盐反硝化 Nitrate denitrification	0.26	0.24	0.25	d^{-1}	k_{dn}	0—2
转移系数 Sed. denitrification transfer coeff.	0.05	0.05	0.05	$m \cdot d^{-1}$	v_{di}	0—1
有机磷水解速率 Organic P hydrolysis	0.56	0.44	0.39	d^{-1}	k_{hp}	0—5
有机磷沉降速率 Organic P settling velocity	0.6	0.6	0.6	$m \cdot d^{-1}$	v_{op}	0—2
无机磷沉降速率 Inorganic P settling velocity	0.65	0.61	0.52	$m \cdot d^{-1}$	v_{ip}	0—2
底藻最大生长率 Max Growth rate	10	10	10	$mgA \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ or d^{-1}	C_{gb}	0—500
底藻一级速率模型 Bottom algae: First-order model carrying capacity	1000	1000	1000	$mgA \cdot m^{-2}$	$a_{b,max}$	1000
呼吸速率 Respiration rate	1	1	1	d^{-1}	k_{rb}	0.05—0.5
排泄速率 Excretion rate	0.5	0.5	0.5	d^{-1}	k_{cb}	0—0.5
死亡率 Death rate	0.25	0.25	0.25	d^{-1}	k_{db}	0—0.5
光照常数 Light constant	50	50	50	$langleys \cdot d^{-1}$	K_{lb}	1—100

注:以上参数的取值均在其他参考文献和用户手册给出的范围内^[17].Note: the values of the above parameters are all within the scope of other references and user manuals^[17].

2 结果与讨论 (Results and discussion)

根据已经建立好的针对漕桥河的 QUAL2k 模型,可以进行不同植物单元的出水水质模拟,从而得到不同季节的尾水生态净化方案.同时,根据实验的布置密度,通过模型进行反算,得到达标水质需要放置的生态净化材料布置密度.以下内容,从不同季节选用哪种组合和不同单元的布置密度两个角度应用 QUAL2K 模型来进行生态净化方案设计.

2.1 生态净化工程方案筛选

运用已验证的漕桥尾水生态净化工程的 QUAL2K 模型,在夏季、春/秋季和冬季等 3 个不同的季节,针对 3 种材料设计了 7 种场景来改善水质,包括:挺水植物单元(E)、沉水植物单元(S)、生物绳(B)、挺水植物单元+沉水植物单元(E+S)、挺水植物单元+生物绳单元(E+B)、生物绳单元+沉水植物单元(B+S)、挺水植物单元+生物绳单元+沉水植物单元(E+B+S).因此,不同组合的出水水质数据就可以通过已经建立好的 QUAL2K 模型来模拟.

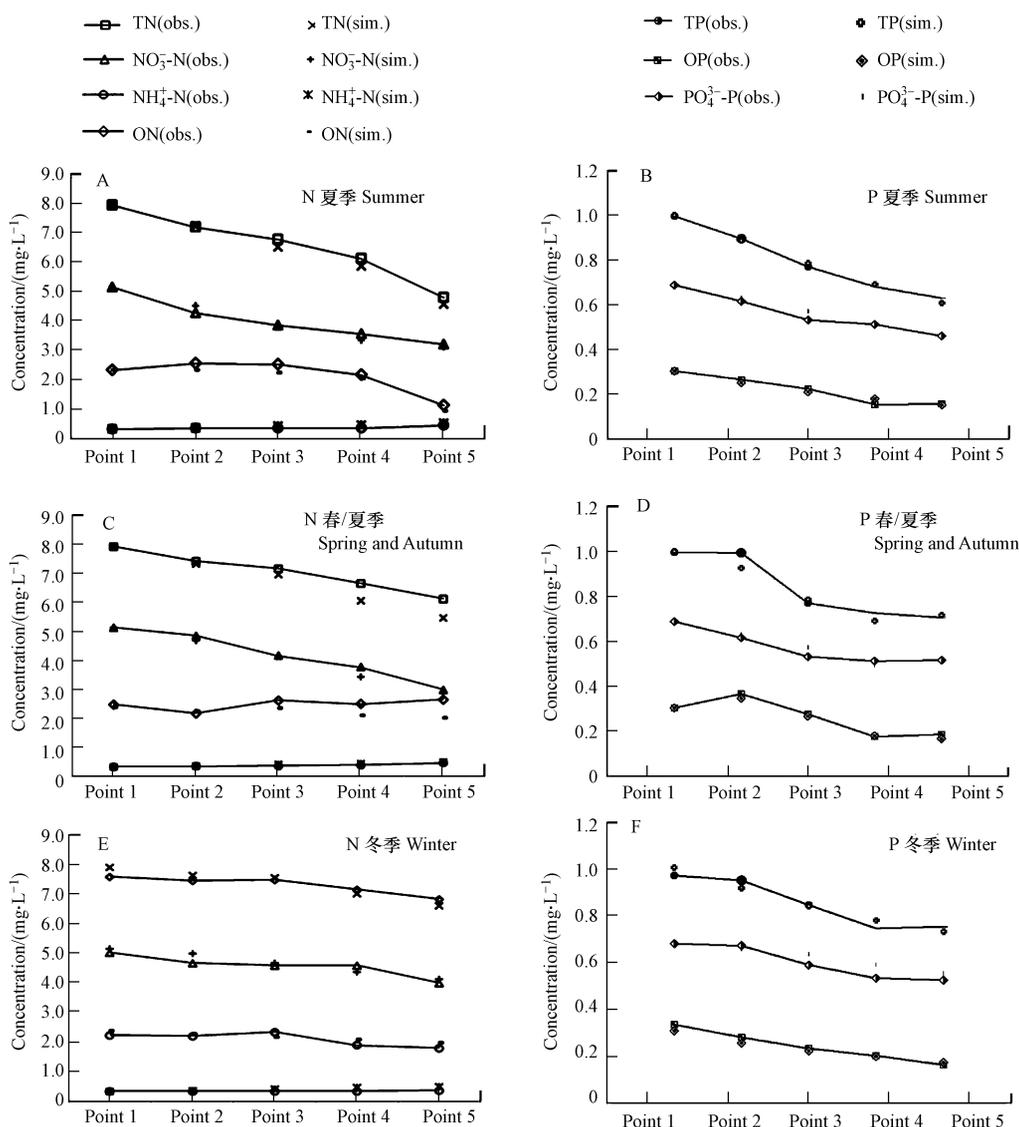


图2 不同季节模拟值和实测值对比

obs.代表实验值,sim.代表模拟值

Fig.2 Comparison between simulation and monitoring values in different regions

根据已经建立好的针对漕桥尾水湿地的QUAL2K模型,将小试试验获得的净化参数 K 值(表3),叠加到不同的河段,进行水质模拟.总的来说这些 K 值结果表明,不同的净化材料具有在总氮、氨氮、硝氮、总磷和正磷酸各项指标上具有各自的优势.如何在生态净化中进行合理的搭配,是需要水质模型来解决的问题.模拟结果如下,不同场景和季节下 NO_3^- -N、 NH_3 -N、ON、 PO_4^{3-} -P、OP、TN和TP的浓度以及去除率见表3.

按公式(2)计算不同场景下的综合污染指数.

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i/S_i \quad (2)$$

式中, P 综合污染指数, n 代表总的污染物类型, C_i 代表模拟的污染物浓度 i , S_i 代表污染物 i 的评估标准(所选用标准是城镇污水处理厂排放标准).

根据表4可得,在夏季、春/秋季和冬季污染指数最小的组合分别为挺(E)+绳(B)、挺(E)+沉(S)+绳(B)和挺(E)+沉(S).以夏季为例,挺水植物单元在去除ON、OP和 PO_4^{3-} -P方面的很有效,而对于 NH_3 -N和 NO_3^- -N的去除率却不如生物绳.因此,通过两个单元的组合可以获得更好的整体去除效果.QUAL2K模型有助于生态净化设计人员决定之间的这些单元的组合方式并选择最优方案.此外,模型可

以计算不同单元安排后尾水的出水水质.选择最优设计方案后,全年 TN 和 TP 的各自的削减率为 42.64%—78.4%和 30.98%—78.29%,出水水质见图 3.

表 3 不同季节不同单元的降解参数 K

Table 3 Degradation parameters K of different units in different seasons

季节 Seasons	参数 K Parameters	挺水植物 Emergent plant	沉水植物 Submerged plant	生物绳 Biological rope
夏季	ON	0.467	0.459	0.393
	NO_3^- -N	0.318	0.274	0.367
	NH_3 -N	0.173	0.082	0.230
	OP	0.508	0.429	0.380
	PO_4^{3-} -P	0.521	0.463	0.436
春/秋季	ON	0.234	0.152	0.410
	NO_3^- -N	0.224	0.246	0.270
	NH_3 -N	0.131	0.078	0.173
	OP	0.195	0.272	0.359
	PO_4^{3-} -P	0.290	0.257	0.390
冬季	ON	0.159	0.199	0.152
	NO_3^- -N	0.134	0.163	0.119
	NH_3 -N	0.144	0.074	0.097
	OP	0.136	0.106	0.127
	PO_4^{3-} -P	0.181	0.101	0.130

注:表中参数的试验和计算过程见文献[14].

Note: the calculation process of the parameters is shown in literature [14].

表 4 QUAL2K 模型模拟的不同方案的去除率和污染指数

Table 4 Removal rate and pollution index of different schemes

		ON	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	OP	PO_4^{3-} -P	TN	TP	Removal rate of /%		P
									TN	TP	
夏季	E	0.072	0.547	1.405	0.005	0.143	2.202	0.173	72.52	83.07	0.82
	S	0.074	0.641	1.178	0.008	0.171	2.071	0.204	74.16	80.03	0.792
	B	0.088	0.498	1.153	0.007	0.163	1.917	0.195	76.09	80.90	0.736
	E+B	0.105	0.483	0.965	0.010	0.186	1.731	0.221	78.40	78.29	0.688
	E+S	0.073	0.629	1.255	0.006	0.156	2.134	0.187	73.37	81.64	0.805
	S+B	0.087	0.614	1.039	0.009	0.179	1.918	0.213	76.06	79.15	0.746
	E+B+S	0.083	0.515	1.176	0.008	0.165	1.952	0.198	75.64	80.62	0.75
春/秋季	E	0.661	0.768	2.318	0.083	0.462	3.909	0.567	51.22	44.42	1.587
	S	0.975	0.597	2.120	0.058	0.513	3.855	0.594	51.90	41.79	1.582
	B	0.609	0.797	2.246	0.067	0.513	3.814	0.602	52.41	40.99	1.572
	E+B	0.795	0.710	2.211	0.070	0.489	3.878	0.582	51.60	42.94	1.584
	E+S	0.461	0.884	2.289	0.071	0.511	3.796	0.605	52.64	40.71	1.568
	S+B	0.564	0.824	2.219	0.059	0.536	3.771	0.618	52.95	39.44	1.566
	E+B+S	0.313	0.983	2.236	0.061	0.557	3.695	0.640	53.90	37.22	1.552
冬季	E	1.072	0.587	2.904	0.126	0.482	4.722	0.630	41.08	38.22	1.889
	S	0.989	0.696	2.816	0.134	0.511	4.660	0.667	41.85	34.61	1.887
	B	1.104	0.598	2.947	0.131	0.523	4.808	0.676	40.01	33.76	1.94
	E+B	1.087	0.604	2.915	0.128	0.503	4.765	0.653	40.54	35.96	1.915
	E+S	1.004	0.690	2.847	0.137	0.531	4.701	0.690	41.34	32.36	1.884
	S+B	0.904	0.761	2.772	0.143	0.538	4.597	0.704	42.64	30.98	1.912
	E+B+S	1.015	0.660	2.874	0.134	0.514	4.710	0.670	41.23	34.32	1.905

2.2 达标方案设计

根据 QUAL2K 模拟的结果显示,即使采用最佳组合方案,除了夏季出水水质可以满足地表水 V 类标准外,秋冬季节的出水水质指标依然不达标.经分析,发现现有方案不达标的原因:1) 布置密度不够; 2) 停留时间太短,需要减少入水负荷或者湿地扩容.

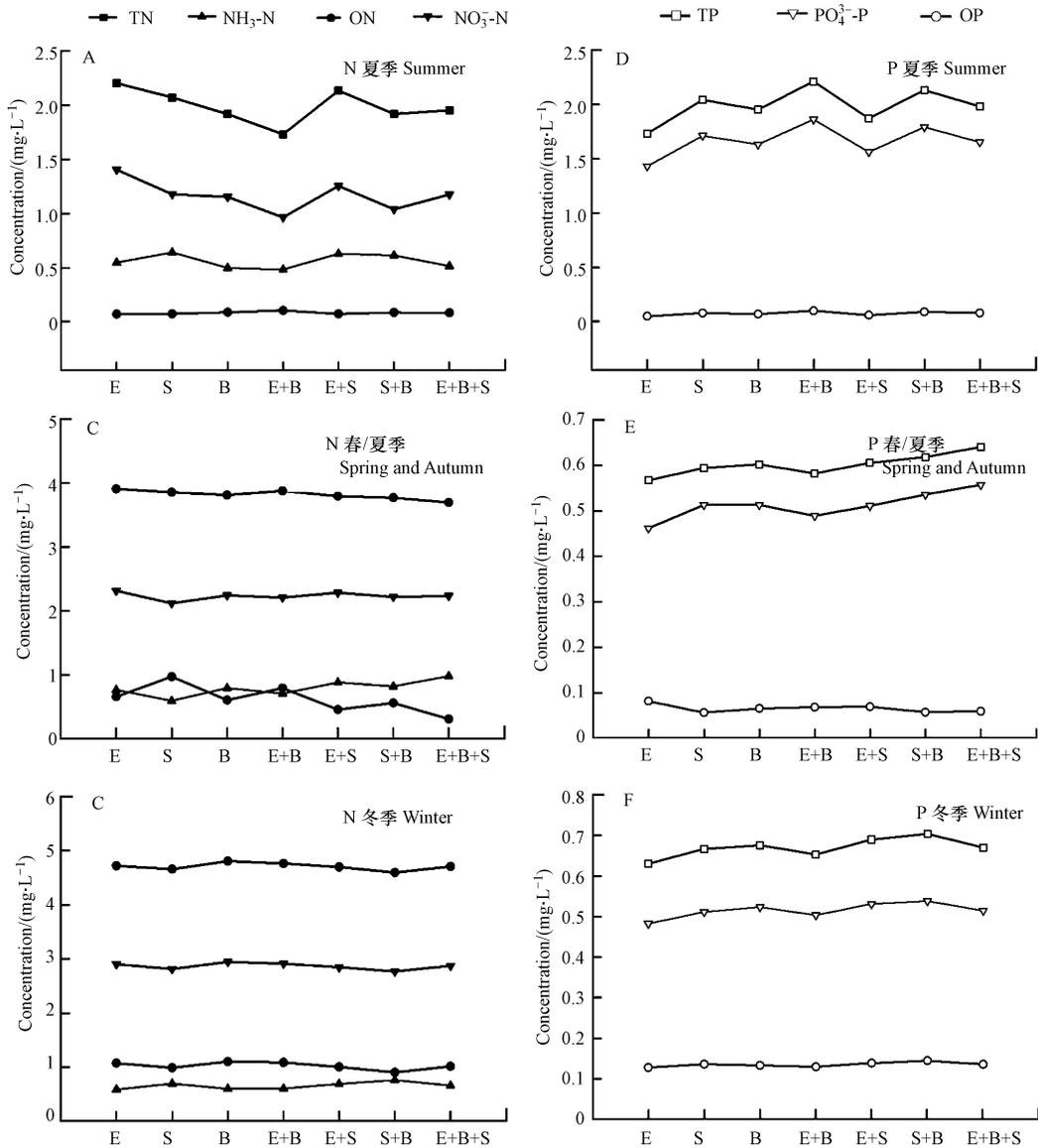


图3 推荐布置方案下模型模拟出水水质

Fig.3 Simulated water quality under the recommended layout scheme

本研究应用 QUAL2K 模型,分别模拟停留时间和布置密度在原有推荐方案的 1—5 倍,共 75 种情景下的出水水质,其水质达标等级见图 4.结果表明,夏季,采用原有方案即可达到满足地表水 V 类标准,通过提高种植密度和停留时间,水质指标甚至可以达到 IV 类水标准;优先考虑提高种植密度,春、秋、冬季节,密度布置为现有最优组合的 3 倍,水力停留时间为原先的 2 倍条件下可达标;冬季密度布置为现有最优组合的 4 倍,水力停留时间为原先的 3 倍条件下可达标(图 5).经过换算,春、秋、冬季节,水力停留时间为原先的 2 倍条件,密度布置为现有最优组合的 3 倍,即每平方米水域布置美人蕉:17.4 kg,金鱼藻:7.9 kg,生物绳 72.5 m 条件下可达标;冬季水力停留时间为原先的 3 倍条件,密度布置为现有最优组合的 4 倍,即每平方米水域布置伊乐藻 24.1 kg,生物绳 96.6 m 可达标.将本文中模型模拟的结果与其他研究对比,其结果是类似的.Yuan 等^[18]采用生物绳处理污染河道的,布置 100 m²的水面,在水力停留时间 6—24 h 条件下,可使得进水 TN 从 6.00—8.00 mg·L⁻¹降至 2—3mg·L⁻¹,TP 从 1.60—2.00 mg·L⁻¹降至 0.20—0.53 mg·L⁻¹. Wang 等^[19]采用美人蕉人工湿地处理城市污水处理厂尾水,在温度 10 °C 时,布置 15.0 kg·m⁻²,可使得出水 TN 和 TP 浓度低至 1.5 mg·L⁻¹和 0.3 mg·L⁻¹.Tian^[20]等采用伊乐藻在冬季低温条件下净化低污染水,在布置密度为 30 kg·m⁻²条件下,可使得出水 TN 和 TP 浓度低至 2.3 mg·L⁻¹和 0.35 mg·L⁻¹.

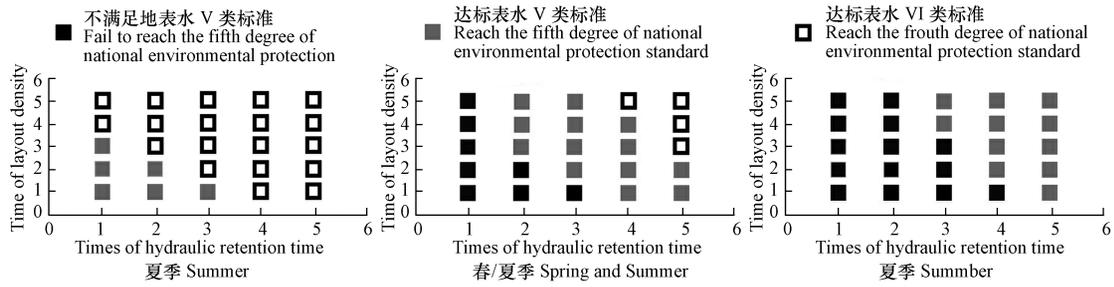


图 4 不同季节停留时间、植物布置密度与出水水质等级关系

Fig.4 Effluent quality in different residence time and plant density along seasons

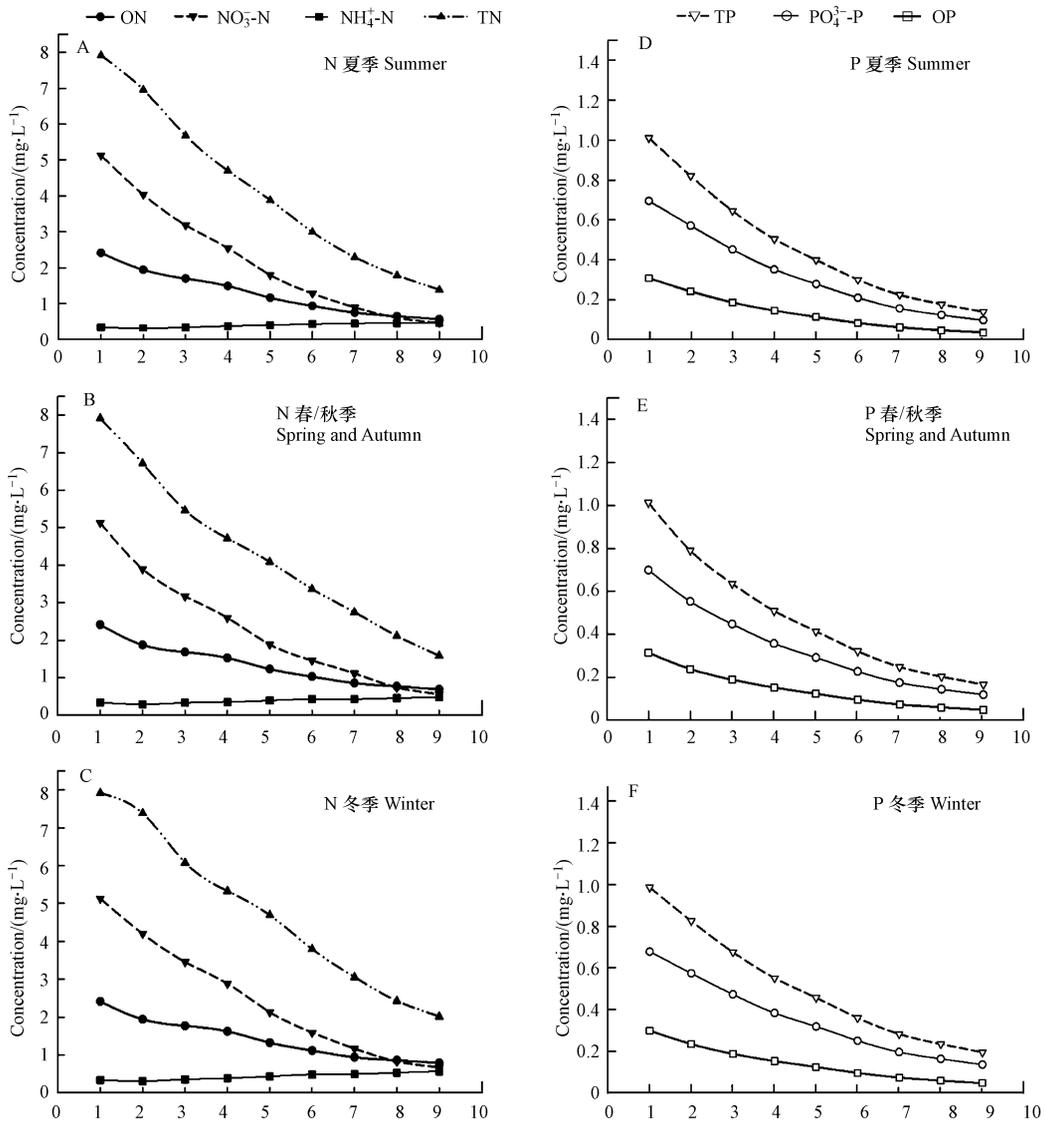


图 5 改进后的生态净化方案出水水质效果模拟

Fig.5 Simulated water quality under the improved scheme

3 结论 (Conclusion)

生态修复法常用于尾水生态河道的修复,不同的净化单元对于不同指标有各自不同的净化效率,需

要合理搭配才能获得最优的处理效果.QUAL2K 水质模型通过划分河段、确定边界条件、在不同的河道输入净化单元的净化参数、校准和验证,建立了针对漕桥污水处理厂尾水河道的数值模型,进而筛选出最优的生态净化单元.另外,针对已建立的尾水河道模型,通过确定的水质目标,可以计算所需的停留时间和布置密度.主要结论如下:

(1)所建立的漕桥低污染水生态净化工程的 QUAL2K 模型经验证分析,适用于水质预测和组合筛选.

(2)要使得全年 TN 和 TP 的出水水质指标达到地表水 V 类标准,需要在秋、冬季节提高布置密度和停留时间.QUAL2K 模型的模拟结果表明,春、秋、冬季节,水力停留时间为原先的 2 倍条件,密度布置为现有最优组合的 3 倍,即每平方米水域布置美人蕉:17.4 kg,金鱼藻:7.9 kg,生物绳 72.5 m 条件下可达标;冬季水力停留时间为原先的 3 倍条件,密度布置为现有最优组合的 4 倍,即每平方米水域布置伊乐藻 24.1 kg,生物绳 96.6 m 下可达标.

通过数值模拟得到布置密度、停留时间与水质达标等级的定量关系,可为今后进行设计方案优选和工程升级改造提供参考和支撑.

参考文献 (References)

- [1] KANNEL P R, LEE S, KANEL S R, et al. Application of QUAL2Kw for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati[J]. *Environment Monitoring Assessment*, 2007, 125(3): 201-211.
- [2] 陈月, 席北斗, 何连生, 等. QUAL2K 模型在西苕溪干流梅溪段水质模拟中的应用[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(7): 1000-1003.
CHEN Y, XI B D, HE L S, et al. Application of QUAL2K model for prediction of water quality in West Shaoxi[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(7): 1000-1003 (in Chinese).
- [3] CHAUDHURY R R, SOBRINHO J A H, WRIGHT R M, et al. Dissolved oxygen modeling of the blackstone river (Northeastern United States) [J]. *Water Research*, 1998, 32(8): 2400-2412.
- [4] 张瑞斌, 黄伟丽, 管红良, 等. 苏南河网水体负荷削减工程及其效果分析[J]. *环境化学*, 2011, 30(10): 1816-1817.
ZHANG R B, HUANG W L, GUAN H L, et al. Water load reduction project and its effect analysis in South of Jiangsu river network[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(10): 1816-1817 (in Chinese).
- [5] CHO J H, HA S R. Parameter optimization of the QUAL2K model for a multiple-reach river using an influence coefficient algorithm[J]. *Science of Total Environment*, 2010, 408(8): 85-91.
- [6] AZZELLINO A, SALVETTI R, VISMARA R, et al. Combined use of the EPA-QUAL2E simulation model and factor analysis to assess the source apportionment of point and non point loads of nutrients to surface waters[J]. *Science of Total Environment*, 2006, 371(1-3): 214-222.
- [7] 周华. 河流综合水质模型 QUAL2K 应用研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2010, 8(1): 71-75.
ZHOU H. Application research of a comprehensive river water quality model QUAL2K[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2010, 8(1): 71-75 (in Chinese).
- [8] STONE R. Ecology-From remarkable rescue to restoration of lost habit[J]. *Science*, 2008, 322(5899): 184.
- [9] PALIWAL R, SHARMA P, KANSA A. Water quality modelling of the river Yamuna (India) using QUAL2E-UNCAS[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 83(2): 131-144.
- [10] PALMIERI V, CARVALHO R J. Qual2E model for the Corumbatai River[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 198(1-2): 269-275.
- [11] PELLETIER G J, CHAPRA S C, TAO H. QUAL2Kw-A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2006, 21(3): 419-425.
- [12] YE H F, GUO S H, LI F M, et al. Water quality evaluation in Tidal River reaches of Liaohe River Estuary, China using a revised QUAL2K model[J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(3): 301-311.
- [13] YUCEER M, KARADURMUS E, BERBER R. Simulation of river streams; Comparison of a new technique with QUAL2E [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 46(1-2): 292-305.
- [14] 郭永彬, 王焰新. 汉江中下游水质模拟与预测 QUAL2K 模型的应用[J]. *安全与环境工程*, 2003, 10(1): 4-6.
GUO Y B, WANG Y X. Hydrochemical modeling and prediction of the middle and lower reaches of Hanjiang River: Application of QUAL2K model[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2003, 10(1): 4-6 (in Chinese).
- [15] 展巨宏, 李辉, 李强. 河流综合截污工程对昆明船房河水质的改善效果[J]. *环境化学*, 2014, 33(1): 148-153.
ZHAN J H, LI H, LI Q. Effect of comprehensive river sewage closure treatment project on water quality in Changfang River, Kunming[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(1): 148-153 (in Chinese).
- [16] JUNG S S, KIM K S. Evaluation and application of QUAL2E and QUAL2K models in Anyang stream[J]. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 2008, 30(5): 544-551.
- [17] 朱文婷. 低污染水生态净化技术方案研究与效果评估[D]. 南京: 南京大学, 2016.
ZHU W T. Research and effect evaluation of ecological purification for low pollution water[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016 (in Chinese).
- [18] YUAN, X, QIAN X, ZHANG R, et al. Performance and microbial community analysis of a novel bio-cord carrier during treatment of a polluted river[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 117: 33-39.
- [19] WANG D Q, BAI S Y, WANG M Y, et al. Effect of artificial aeration, temperature, and structure on nutrient removal in constructed floating islands[J]. *Water Environment Research* 2012, 84(5): 405-410.
- [20] TIAN X Y, LI Y, GUO X. Water quality purifying effect of five kinds of aquatic plants in winter[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2010, 11(7): 53-55 (in Chinese).