

QUAL2K_w 模型在新安江干流黄山段 水质模拟中的应用

赵 罡, 李 川, 陆宇超, 沙 健, 王玉秋

(南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘 要: 针对新安江干流当前水质状况与水生态功能分区要求不协调的问题, 首先通过对流域内的 12 个监测站点多年水质监测数据进行模糊综合评价分析, 确定水质现状并识别出各水质指标的污染贡献度矩阵。然后使用一维、稳态水质模型 QUAL2K_w 对河道水质进行模拟, 在遗传算法校准得到参数集的基础上, 对模型进行验证, 最后根据水功能区划计算目标河道的环境容量。结果表明: QUAL2K_w 模型可以很好地模拟现实水质状况, 但模拟结果显示, 新安江干流各河段的 TN 环境容量大部分为负值, 污染现状不容乐观; 水体对于 TP 则仍有少量的环境容量, 但由于 TP 为限制因子, 因此基于环境容量的营养盐污染控制亟需加强。

关键词: 环境容量; 模糊综合评价; QUAL2K_w 模型; 新安江

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)05-0001-05

Application of QUAL2K_w model to simulation of water quality in Huangshan section of Xin'an River

ZHAO Gang, LI Chuan, LU Yuchao, SHA Jian, WANG Yuqiu

(College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: In view of the inharmonious problems between the current situation of water quality and the goal of water function zoning in Xin'an River, the paper first determined the water quality situation and identified pollution contribution matrix of each water quality index by the fuzzy comprehensive assessment on the data of 12 monitoring stations in this area. Subsequently, QUAL2K_w model of one dimensional steady water quality was used to simulate the water quality in Xin'an River. Based on the parameters gotten by genetic algorithm calibration, the paper verified the model and then calculated water environmental capacity according to water function zoning. The results showed that QUAL2K_w model can simulate the practical situation of water quality well, but the environmental capacities of total nitrogen in most of the reaches of Xin'an River are negative. The present situation of nitrogen pollution is not optimistic. As to the total phosphorus, though there is a small amount of environmental capacity in water body, but because of the restriction of TP factor, the control of nutrition salt pollution based on environmental capacity need to strengthen.

Key words: environmental capacity; fuzzy comprehensive assessment; QUAL2K_w model; Xin'an River

新安江起源于皖南, 流经浙北, 经由富春江、钱塘江入海。本研究所涉及新安江流域位于安徽省境内, 流域面积为 5 914 km², 占总流域面积的 50.66%。新安江流域是重要的战略备用水源, 是长三角地区的重要生态安全屏障, 其流域包含 7 个饮用水源区, 且以 51% 的贡献比例汇入国家级饮用水源保护地千岛湖。2011 年 3 月, 新安江流域被确立

为我国第一个跨流域生态补偿试点地区。

新安江水质与居民用水安全息息相关, 但由于流域内存在点源排放, 面源污染严重, 且点、面源排放不稳定, 河道水质时空差异性较大, 饮用水供水安全风险显著。目前, 国内外对于河道水质的模拟通常使用一维水质模型, 但其重点模拟指标的选取基本上是定性给出, 而且很少报道有依据具体指标权

收稿日期: 2013-05-19; 修回日期: 2013-06-08

基金项目: 环保部环境规划院水污染防治综合项目 (2012A012)

作者简介: 赵 罡 (1991-), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 主要从事流域地表水环境模型研究。

通讯作者: 王玉秋 (1965-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 博士生导师, 主要从事水环境管理决策与技术支持, 流域及水源保护战略等研究。

重进行模型校准的研究^[1-5]。本研究针对新安江流域水体具体情况,综合运用模糊综合评价(Fuzzy Comprehensive Assessment, FCA)^[6]分析与 QUAL2Kw 模型^[7],在定量选取模拟指标且基于指标权重校准模型的基础上,对新安江干流水质进行模拟,并根据水功能区划计算目标河段主要污染物的环境容量,这对开展有针对性的污染物减排,流域水质管理,流域生态环境保护都具有重要意义。

1 水质现状及主要污染物的识别

本研究首先使用 FCA 对新安江水质现状进行评价,同时计算各水质指标的污染贡献度矩阵,并以此筛选出水体的主要污染物,为进一步水质模型的重点模拟和校准工作提供定量依据。

由于水质标准的不连续性,使连续的实测数据很难定量表征水质优劣,因此常规多指标综合评价方法^[8]在水质评价中具有一定的局限性^[9]。而 FCA 是以模糊数学的隶属度理论为基础,将一些模糊的、定性的问题定量化,进行综合评价的方法,因此其在水质评价上更具合理性与客观性^[10-11]。

本研究使用新安江流域 12 个站点 2000 年 1 月至 2011 年 6 月的监测数据进行 FCA 分析,得出模糊评价矩阵 M。为了能对多个样本进行比较排序,计算各站点评分矩阵(表 1):

$$S = \sum_{i=1}^n M_i \times \alpha \tag{1}$$

式中: n 为站点个数, α 为等级参数矩阵 {1,2,3,4,5}, 得分范围为 0 到 5, 得分越小表示水质越好。

表 1 各站点优劣得分			
站点	优劣得分	站点	优劣得分
横江大桥	2.328	浦口	2.313
黄山林校	1.575	黄口	1.849
率水大桥	2.590	篁墩	1.928
市自来水厂	1.725	南源口	2.071
新管	3.120	坑口	2.376
渔梁	2.457	街口	1.891

表 1 表明大部分站点水质的得分在 1 到 3 之间,即水质总体上能达到 III 类水标准,但同样存在水质比较差的断面,例如新管断面,为 IV 类水平。把各个站点隶属矩阵与权重矩阵 $\beta = \{1,2,3,4,5\}$ 复合,得到各个水质指标的贡献度矩阵:

$$\gamma = \begin{Bmatrix} 152.07 & 190.50 & 156.10 & 223.86 & 167.20 \\ 572.31 & 291.12 & 144.00 & 144.00 & 174.78 \end{Bmatrix}$$

γ 的各个数值分别代表溶解氧、高锰酸盐指数、BOD₅、氨氮、化学需氧量、总氮、总磷、阴离子表面活性剂、硫化物、粪大肠菌群的污染贡献度,以此识别出总氮和总磷为该流域的主要污染物。

2 QUAL2Kw 模型

QUAL2Kw 模型是一维、稳态河流水质模型,它是 2006 年由美国 Tufts 大学与华盛顿州生态管理署(Washington State Department of Ecology)合作在 QUAL2K 模型^[12]的基础上开发完成的,用于取代早期使用的简单一维水质模型 QUAL2E^[13]。相对于 QUAL2K 模型,QUAL2Kw 主要加入了遗传算法校准模块,从而实现了数据条件有限情况下的参数自动化校准^[14]。QUAL2Kw 模型是一个多用途的河流综合水质模型,其在北美、亚洲、欧洲应用广泛,可以模拟的参数包括水温、pH、碱度、电导率、悬浮性颗粒物、溶解氧、腐殖质、快速反应 CBOD 和慢反应 CBOD、有机氮、氨氮、硝态氮、有机磷、无机磷、浮游植物、底藻、病原体以及一个用户定义的指标^[5,15-17]。

QUAL2Kw 首先需要把真实河流概化,即划分成若干充分混合的河段,每个河段作为一个研究单元,其中每个单元内的水文、水质状况一致(图 1)。

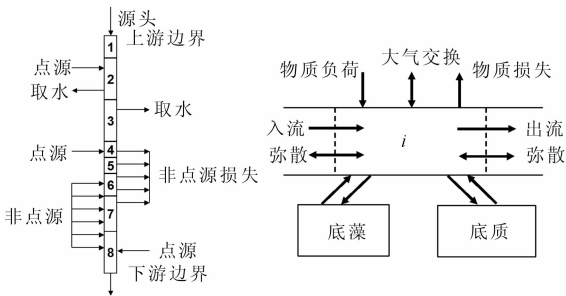
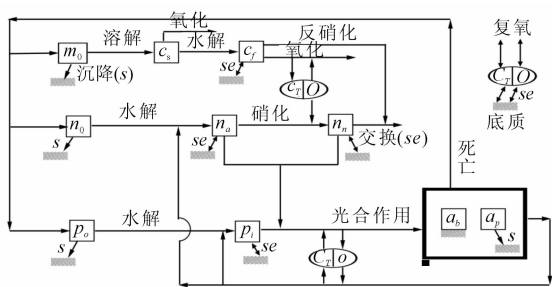


图 1 QUAL2Kw 模型河流概化及河段 i 的物质平衡

对于任意一种水质组分,其在第 i 个河段的物质平衡方程为:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i}c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i}c_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i}c_i + \frac{E_{i-1}}{V_i}(c_{i-1} - c_i) + \frac{E_i}{V_i}(c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i + \frac{E_{hyp,i}}{V_i}(c_{2,i} - c_i) \tag{2}$$

式中: c_i 为组分浓度, mg/L ; $c_{2,i}$ 为底质中组分浓度, mg/L ; Q_i 、 $Q_{out,i}$ 为河段 i 的流出、取出水量, L/d ; V_i 为河段 i 的容积, L ; E_i 为河段 i 的弥散量, L/d ; W_i 为组分在河段 i 的外部源和汇, mg/d ; S_i 为迁移和转化量, $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$; $E_{hyp,i}$ 为底质的交换系数 (L/d), 其中组分的迁移和转化关系见图 2。



图中： a_b 为底藻； a_p 为浮游植物； m_o 腐殖质；
 c_s 为慢反应 CBOD； c_f 为快反应 CBOD；
 c_T 为总无机碳； o 为氧气； n_o 为有机氮；
 n_a 为氨氮； n_n 为硝态氮； p_o 为有机磷； p_i 为无机磷。

图 2 模型动力学及物质转移过程

QUAL2Kw 模型是由若干复杂的微分方程组成,因此很难求得解析解,故模型使用有限差分法求其数值解^[18],用户可以根据计算精度的需求具体选择欧拉法、龙格-库塔法或者自适应步长算法进行求解。由于模型中参数较多,且相关关系复杂,手动校准难以得到最优解,因此引入遗传算法进行全局自动校准。

3 模型应用

3.1 模型数据的获取

选定率水大桥(118°17'28"E, 29°42'14"N)作为模型模拟上游边界,街口(118°42'50"E, 29°43'34"N)作为下游边界,把新安江干流全长 85.59km 依据水文条件的一致性划分为 43 个河段。模型输入数据包括水文数据和水质数据:其中水文数据包括河段的位置、海拔、Rating Curves 经验系数、气温、露点温度、风速、云覆盖率、阴影率和光照强度;水质数据包括水温、pH、溶解氧、电导率、硝态氮、生化需氧量、氨氮、磷酸盐、化学需氧量、叶绿素 a、总悬浮物、挥发性悬浮物、总磷和总氮。监测站点依据模型要求选取六个主要支流站点和六个干流站点(图 3),选定 2012 年 7 月为模型的参数率定期,9 月为模型验证期。

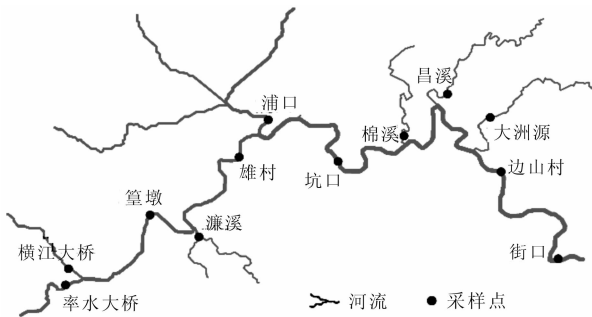


图 3 新安江干流黄山片及采样点

3.2 模型参数的确定

把 6 个支流站点的水质数据作为点源输入,各个河段的面源数据则通过广义流域负荷模型(Generalized Watershed Loading Functions, GWLF)对流域进行模拟得出^[19]。为了得到稳定的数值解,设定模拟步长为 11.25 min 以确保模拟过程的稳定。为了得到参数的全局最优解,同时保证率定效率与遍历性,遗传算法参数设定如下:遗传代数 200,每代 100 个个体,个体交叉概率 0.85,采用浮动变异算子以防止模型早熟,适应度函数则由下式给出:

$$f(x) = \left[\sum_{i=1}^n w_i \right] / \left\{ \left(\sum_{i=1}^n w_i \right) \left[\frac{\sum (O_{ij} - P_{ij})^2 / m}{\sum (O_{ij} + P_{ij}) / m} \right]^{1/2} \right\} \quad (3)$$

式中： w_i 为指标权重； O_{ij} 为观测值； P_{ij} 为模拟值； m 为观测值数量,其中各指标权重 w_i 基于模糊综合评价计算的贡献度矩阵 γ 给出。

以率定期的干流站点数据作为校准数据集,并借鉴相关文献^[4,12]选取合理的参数取值范围,使用遗传算法进行模型校准(图 4),得出与实测数据最佳拟合的模型参数。

3.3 模型的验证

保持率定出的模型参数不变,同时把验证期的各源和汇输入模型中,使用干流站点数据进行验证,验证参数包括流量、温度、电导率、溶解氧、总氮、总磷等关键模型参数(表 2)。

从表 2 可得出,6 个指标的平均相对误差为 7.95%,最大相对误差为河段 1 的总磷,为 27.78%,各个指标的 R^2 分别为 0.930,0.839,0.966,0.663,0.720,0.732,模拟值能够较准确地与实测值相拟合,因此模型能够较好的反映真实水质状况。

4 环境容量的计算

首先依据《水功能区划分标准》(GB 50594 - 2010),对目标河段进行水功能区划,从上游边界率水大桥到下游边界街口共划分为 5 个功能区(表 3)。根据各功能区的水质管理目标,结合《地表水环境质量标准》(GB3838 - 2002),计算主要污染物总氮和总磷的环境容量(图 5),公式如下:

$$EC = 86400 \times (C_s - C_0) \times \frac{Q}{L} \quad (4)$$

式中： EC 为河段内污染物的环境容量, $\text{kg}/(\text{d} \cdot \text{km})$ ； C_s 为相应的水质标准, mg/L ； C_0 为 QUAL2Kw 模型模拟的污染物浓度, mg/L ； Q 为水流流量, m^3/s ； L 为河段长度, m 。

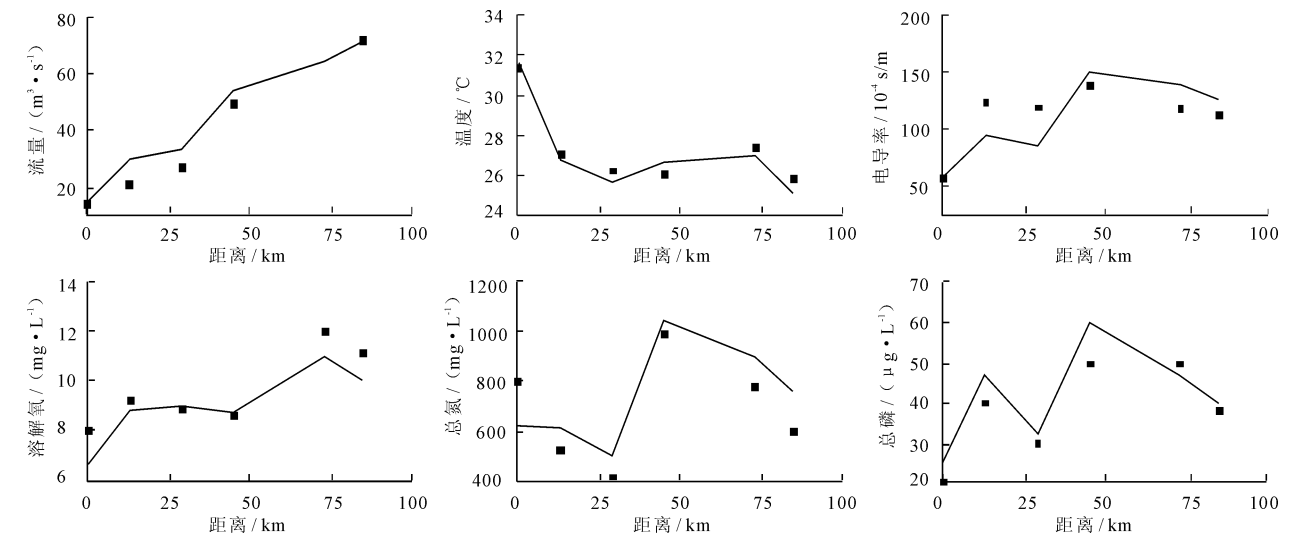


图4 模型校准期模拟值与实测值比较

表2 模型验证期模拟值与实测值比较

距离	流量		温度		电导率		DO		TN		TP	
	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测
0.00	16.80	16.80	24.40	24.10	51.88	60.00	6.78	8.15	1.00	1.02	39.72	28.00
13.00	31.01	23.30	23.14	23.80	114.14	122.00	8.52	9.01	1.37	1.14	59.95	53.00
29.00	32.04	32.34	25.13	25.70	111.84	112.00	8.85	9.20	1.24	1.23	45.83	41.00
45.00	43.93	45.10	25.17	26.10	157.88	142.00	8.49	7.80	1.15	1.21	48.67	53.00
73.00	46.86		24.97	25.90	154.09	153.00	10.13	10.00	0.93	0.92	35.36	36.00
84.79	47.85	50.30	21.30	22.90	150.90	140.00	10.09	9.71	0.85	0.90	21.82	27.00

表3 目标河段水功能区划

序号	一级功能区名称	二级功能区名称	所属区域	范围		长度	水质管理目标	区划依据
				起始断面	中止断面			
1	新安江屯溪开发利用区	屯溪景观用水区	黄山市屯溪区	率水大桥	花山谜窟	15.02	Ⅲ	城市规划、涉水景观
2	新安江歙县保留区	无	歙县	花山谜窟	中坑源	44.8	Ⅱ	开发利用程度较低
3	新安江歙县开发利用区	深渡饮用水源区	歙县	中坑源	深渡港	2	Ⅱ	城镇供水水源、涉水景观
4	新安江歙县开发利用区	深渡景观娱乐渔业用水区	歙县	深渡港	歙县三港	13.8	Ⅲ	旅游胜地、鱼类回游产卵集中区
5	新安江皖浙缓冲区	无	歙县	歙县三港	街口	9.97	Ⅱ	省界

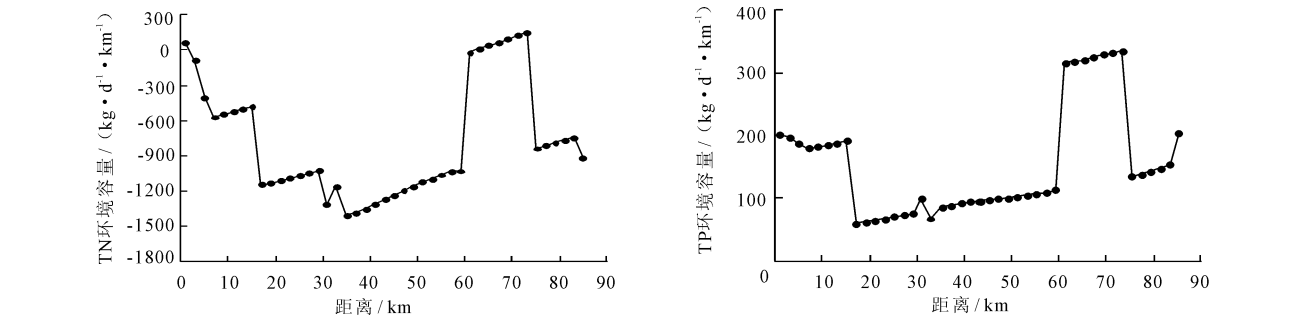


图5 总氮和总磷的环境容量

从图5可知,水体的环境容量由于水功能分区断点的设定出现较大落差,而其它河段则由于水体的自净作用而缓慢增长。从总氮的环境容量计算结果看,除了个别河段(1、32、33、34、35、36和37号)有少量的环境容量外,其它河段的环境容量均小于零,即水质现状已经超过相应水质标准,虽然从平均氮磷比25.05大于浮游植物平衡生长所需氮磷比16来看,总磷为限制因子,总氮的超标还没有具体外在表现,但其污染控制亟需加强,环境管理部门可以根据环境容量具体数值进行污染物削减;从总磷的环境容量看,所有河段都有一定的纳污能力,但由于总磷为限制因子,因此总磷的污染控制不容忽视。

5 结 语

(1)使用模糊综合评价法对新安江流域12个水质站点2000年1月至2011年6月的监测数据进行分析,得出各站点的水质优劣评分,定量地反映多指标作用下的水质状况,同时得出各指标的污染贡献度矩阵,识别出该流域的主要污染物总氮和总磷。

(2)分别使用2012年7月和9月的水质监测数据对一维水质模型QUAL2Kw进行校准和验证,结果表明QUAL2Kw能够较好的拟合现实水质状况。

(3)基于目标河段水功能区划及模型模拟结果,计算出目标河段的总氮和总磷的环境容量,水质管理部门可以根据具体的环境容量而进行有针对性的水质管理。其中总氮环境容量大部分为负值,污染现状不容乐观,水体对于总磷则仍有一定的环境容量,但由于总磷为限制因子,因此两种营养盐的污染控制都亟需加强。

综上所述,QUAL2Kw模型是一个实用有效的水质模型,适用于新安江流域点面源复合污染的水质模拟,能够为该流域的水质管理提供技术支持,从而实现水生态环境的改善。

参考文献:

[1] 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. *Science of the total environment*, 2006, 371(1-3): 214-222.

[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.

[3] 张宝,刘静玲,杨志峰. 北京城市水系水环境模拟及情景分析[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(1): 16-22.

[4] Park S S, Lee Y S. A water quality modeling study of the Nakdong River, Korea [J]. *Ecological Modelling*, 2002, 152(1): 65-75.

[5] Kannel P R, Lee S, Lee Y-S, et al. Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 202(3): 503-517.

[6] 于会泉. 模糊综合评价法在余姚江水质评价中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(1): 171-173+180.

[7] Pelletier G, Chapra S. QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1) [R]. Olympia: Washington State Department of Ecology, 2005.

[8] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门:厦门大学, 2000.

[9] 邱东. 多指标综合评价方法[J]. *统计研究*, 1990, 7(6): 43-51.

[10] 潘峰,付强,梁川. 模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究[J]. *环境工程*, 2002, 20(2): 58-61.

[11] 刘晓宁,贾忠华. 模糊综合评价在关中灌区干旱评价中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2005, 16(2): 62-65+68.

[12] Chapra S, Pelletier G. QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality: Documentation and user's manual [R]. Medford: Tufts University Civil and Environmental Engineering Department, 2003.

[13] Brown L C, Barnwell T O. The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E - UNCAS: documentation and user manual [R]. U. S. EPA, 1987.

[14] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence [C]//. Boston: MIT press, 1992.

[15] Pelletier G J, Chapra S C, Tao Hua. 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.

[16] Oliveira B, Bola J, Quinteiro P, et al. Application of Qual2Kw model as a tool for water quality management: Cértima River as a case study [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(10): 6197-6210.

[17] 张婷婷,王文勇. QUAL2Kw模型在岷江流域乐山段水质模拟中的应用研究[J]. *广东农业科学*, 2010, 37(6): 247-249.

[18] 吕同富,康兆敏,方秀男. 数值计算方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2008: 266-302.

[19] Sha Jian, Liu Min, Wang Dong, et al. Application of the ReNuMa model in the Shahe river watershed: Tools for watershed environmental management [J]. *Journal of environmental management*, 2013, 124: 40-50.