

QUAL2K_w - GWLF 模型联用在 新安江干流黄山段的应用研究

刘艳¹, 曹碧波¹, 李川¹, 王玉秋¹, 赵越²

(1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 环境保护部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 在新安江干流黄山段进行通用流域污染负荷模型(GWLF)与一维河道水质模型(QUAL2K_w)模型联用研究,以实现水质模型在面源污染为主导的河段开展应用。将GWLF模型的面源负荷结果作为QUAL2K_w模型的面源输入,结合点源排放数据,进行水质模拟。结果表明:通过与GWLF模型联用,QUAL2K_w模型能够较好地模拟出河道水质状况。干流面源污染对街口断面活性CBOD、总氮、氨氮、硝态氮的占有比例最为显著,分别占到全部负荷的31.78%、45.85%、23.11%、70.86%。上述各污染源对街口断面污染物的占有比例有利于相关水质管理部门开展有针对性的污染减排措施,实现对流域水环境的有效保护。

关键词: 水污染; GWLF模型; QUAL2K_w模型; 污染负荷; 新安江

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)06-0163-06

Application of QUAL2K_w and GWLF model in Huangshan segment of Xin'an River main stream

LIU Yan¹, CAO Bibo¹, LI Chuan¹, WANG Yuqiu¹, ZHAO Yue²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. Chinese Academy for Environment Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: The linkage of Generalized Watershed Loading Functions model(GWLF) and one dimensional water quality model(QUAL2K_w) was applied in the main stream of Xin'an River located in Huangshan segment so as to realize the water quality model to apply in the river segment of a non-point oriented watershed. The paper took the result of non-point source load as the input data of GWLF model, and combined the release records of point source to carry out water quality simulation. The results indicated that through the linkage of GWLF and QUAL2K_w model, QUAL2K_w model can better simulate the status of the river water quality. The proportion of non-point source pollution contribution to each pollutants of Jiekou section is notable. The proportions of each pollutants are CBOD (31.78%), total nitrogen (45.85%), ammonia nitrogen (23.11%) and nitrate nitrogen 70.86%. Such contribution apportionments to Jiekou section could be used by local water quality management agency to adopt specific pollution reduction measures so as to achieve effective protection of water environment.

Key words: water pollution; GWLF model; QUAL2K_w model; pollution load; Xin'an River

1 研究背景

新安江起源于黄山市休宁县的六股尖,经浙江省淳安县流至建德市,是黄山市的主要过境河流,也是我国目前为数不多的健康河流之一^[1]。新安江地跨皖浙两省,本文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%。新安江流域对其下游新安江水库及浙江省的生态安全和资源有着重要的作用,尤其对于下游水质水量的调节作用更加不可忽视^[2]。为保护新安江流域水环境,2011年全国首例跨省流域生态补偿机制试点在新安江正式启动,并以新安江流域

收稿日期:2014-06-09; 修回日期:2014-09-12

基金项目:环保部水污染综合防治项目(2013A009);环保部国家环境保护规划研究项目(2013A218)

作者简介:刘艳(1991-),女,云南昭通人,硕士研究生,主要从事流域地表水环境模型研究。

通讯作者:赵越(1978-),男,辽宁沈阳人,博士,副研究员,主要研究方向为流域水环境管理与规划。

的国控出口断面—街口(位于安徽省境内)作为生态补偿实施效果判别的参考断面。因此,面向街口断面的水质状态评估与污染负荷解析,具有重要的管理需求和现实意义。

随着经济的快速发展,人类活动逐渐加剧,导致工业点源、农业源、生活源污染日益严重,如今面源污染逐步成为新安江流域的主要污染问题^[3]。无论是点源还是面源中的污染物质,都会通过地表径流和地下水等途径进入到河道,最终汇入到湖泊中,从而对河流、湖泊水质产生影响。综合应用水质模型技术,分析上述污染物质在流域水环境中的迁移转化过程,是国际通用且有效的管理决策支持技术手段。考虑到目前我国水质监测数据缺乏的现状,河道中物质的变化过程多采用一维稳态机理水质模型模拟其水质变化情况^[4]。然而,面源污染一般很难进行直接准确地监测,在河道水质模型的模拟过程中,存在难以准确地评估面源污染这一问题。为了克服水质模型的这一缺点,结合新安江流域面源负荷显著的实际特征,本文主要通过流域模型和河道水质模型联用,实现面源负荷与河流水质的耦合,达到更加准确地模拟河流水质状况的目的。此外,通过水质模型模拟出各河段的水质情况,计算出各河段对污染物的削减率,并由此计算出上游点源、干流面源污染对目标区段污染物的贡献率,这在实现有针对性的污染物减排、提高流域环境管理工作有效性、改善点源、非点源污染的状况及预测河流水质浓度变化等方面具有积极作用。

2 模型选取

水质模型是描述水体中各组分之间发生物理、化学、生物和生态等方面的变化规律及相互作用的数学模型^[5],是一种预测未来水质状况的工具和手段。水质模型依据物质的质量守恒和能量守恒原理,结合流体力学中的连续方程,水体中物质的迁移、转化等规律模拟水质随时间空间的变化趋势,从而成为水环境质量预测、水环境规划管理和水污染综合防治的重要工具^[6-7]。自 1925 年以来,水质模型的相关研究兴起并不断发展,经历最初涉及简单的生物需氧量和溶解氧两个水质指标的 Streeter-Phelps 发展到目前涉及多介质、多指标的 QUAL2Kw 水质模型。然而,由于面源污染具有分布范围广、随机性强、变化范围大等特点,一般无法直接对进入水体的面源污染物进行监测,因而在水质模型发展历程中,一直以来未能很好的解决这一问

题。因此,考虑水质模型与面源模型联用^[6,8]。本研究通过选用一维河道水质模型(QUAL2Kw)(以下简称 QUAL2Kw)与广义流域负荷模型(GWLF)(以下简称 GWLF)联用,利用 GWLF 模型模拟出面源负荷结果作为 QUAL2Kw 模型的面源负荷的输入,从而解决面源污染负荷问题,再利用 QUAL2Kw 模型更加准确地对河道进行水质模拟。

2.1 通用流域污染负荷模型

GWLF (Generalized Watershed Loading Function)模型是由美国康奈尔大学的 Haith 和 Shoemaker 于 1987 年共同开发的一个流域负荷模型^[9]。目前, GWLF 已在不同的平台上根据实际情况进行开发,并已经在全世界范围内得到了广泛应用^[10-11]。GWLF 模型是一个半分布式半经验式的中尺度流域负荷模型,能够评估负荷流域水系中的溶解态氮磷和总氮、总磷的月负荷量,此外,该模型还提供月均土壤侵蚀、沉积物量、河川径流量以及非点源污染源解析。

GWLF 模型相比其他流域模型,如 SWAT 模型,复杂度适中,运行模型需要土地利用数据、气象数据、传输参数、营养盐参数四类基础数据^[12]。该模型的数据需要量适合目前中国的数据情况,且模拟结果能够满足我国的环境管理需求。

2.2 一维河道水质模型

QUAL2Kw 模型是美国华盛顿生态局的 Gregory Pelletier 与塔夫斯大学的 Steven Chapra、Hua Tao 合作并在 QUAL2K 模型的基础上开发完成的,用于代替早期水质模型 QUAL2E^[13]。该模型属于一维、稳态河流水质模型^[14],用于模拟预测点源与非点源污染负荷的影响^[15]。QUAL2Kw 以河段作为其最小计算单元,且假定每个河段具有相同的水文、水质特征。相比 QUAL2K 模型,QUAL2Kw 模型在模拟算法上没有较大的改变,但增加遗传算法的校准模块 PIKAIA,能对参数进行全局最优优化^[16]。此外,QUAL2Kw 也增加了对潜流水质和孔隙水的模拟,通过基于水相、潜流孔隙水层、沉积物相以及水面外界各相间物质反应的机理(图 1),并采用有限差分法求解其数值解,模拟出河段在特定状态下的水质情况。QUAL2Kw 可以模拟的参数包括水温、pH、电导率、碱度、悬浮性颗粒物、溶解氧、腐殖质、活性 CBOD 和惰性 CBOD、有机氮、硝态氮、氨氮、有机磷、无机磷、浮游植物、底藻、病原体等参数^[17-19]。

QUAL2Kw 模型的水质基本方程是一维平流—扩散物质迁移方程,在河段 i 中的物质浓度为 C_i 的

平衡方程^[13-14]如下:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i}C_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i}C_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i}C_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i}(C_{i-1} - C_i) + \frac{E'_{i+1}}{V_i}(C_{i+1} - C_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i + \frac{E'_{hyp,i}}{V_i}(C_{2,i} - C_i) \quad (1)$$

式中: C_i 为第 i 河段物质组分浓度,mg/L; Q_{i-1} 为河段 i 的流入流量, m^3/s ; Q_i 为河段 i 的流出流量, m^3/s ; $Q_{out,i}$ 为河段 i 的取水量, m^3/s ; V_i 为河段 i 的体积,L; E_i 为河段间的弥散系数,L/d; W_i 为河段 i 的外源负荷量,mg/d; S_i 为因化学反应或物质交换的负荷量,mg/L; $E'_{hyp,i}$ 为河段 i 的底质交换系数,L/d; t 为时间,s。

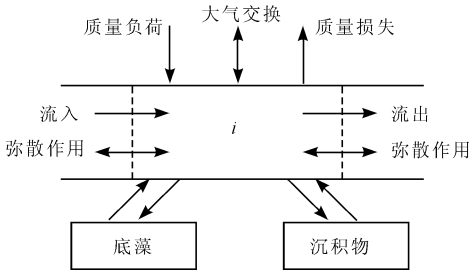


图 1 QUAL2Kw 河段 i 的物质平衡

河段 i 的外源负荷量 W_i 包括点源和面源污染负荷,面源污染物质通过地表径流、地下水补给等途径可全部或部分进入到河段 i ,河段 i 所涉及的面源中面源 j 流入河段 i 的直接污染负荷量 $W_{nps,i,j}$ 可依据下列公式进行相关计算:

$$W_i = \sum_{j=1}^{ps} Q_{ps,i,j}C_{ps,i,j} + \sum_{j=1}^{nps} W_{nps,i,j} \quad (2)$$

$$W_{nps,i,j} = \frac{Q_{nps,i,j}C_{nps,i,j}}{l_{i,j}}\Delta x_{ij} \quad (3)$$

式中: $W_{nps,i,j}$ 为河段 i 所涉及的第 j 个面源对河段 i 的直接输入负荷,mg/d; $C_{ps,i,j}$ 为河段 i 中的第 j 个点源的物质组分浓度,mg/L; $C_{nps,i,j}$ 为河段 i 中的第 j 个面源的物质组分浓度,mg/L; $Q_{ps,i,j}$ 为河段 i 中的第 j 个点源出流量, m^3/s ; ps 为河段 i 所涉及的点源个数; $Q_{nps,i,j}$ 为河段 i 所涉及的第 j 个面源的出流量, m^3/s ; nps 为河段 i 所涉及的面源个数; $l_{i,j}$ 为第 i 个河段所涉及的第 j 个面源的面源覆盖长度,m; Δx_{ij} 为河段 i 与其所涉及面源中第 j 个面源的重叠长度,m。

3 模型联用

3.1 研究区域

本文选定新安江流域的率水大桥($29^{\circ}42'14''N$, $118^{\circ}17'28''E$)作为模型模拟上游边界,街口($29^{\circ}43'34''$

N , $118^{\circ}42'50''E$)作为下游边界,依据水文条件的一致性将新安江干流全长 85.59 km 划分为 43 个河段。

3.2 数据获取及输入

GWLF 模型需要输入土地利用数据、气象数据、传输参数、营养盐参数。其中营养盐参数、传输参数所用的 DEM 数据来源于中国科学院科学数据库,为 90m 分辨率的栅格数据、1km 的网格人口数据及土地利用类型;气象数据从当地气象站点获取 2012 - 2013 年逐日的降雨量和平均气温数据。

QUAL2Kw 模型需要输入的数据分为水文数据和水质数据。水文数据中河段物理参数的位置、海拔可通过 ArcGIS 软件获得,Rating Curves 经验系数根据河宽河深、流量和流速的关系确定。气温、风速和云层覆盖率可根据气象监测站相关数据确定,阴影率根据监测时天气状况设定为 5.0%,露点温度根据马格拉斯公式和相对湿度计算。水质数据是依据模型要求选取的 12 个监测站点测得的数据(图 2)。以 2013 年 10 月的水质数据作为模型的率定数据,2012 年 10 月的水质数据作为模型验证数据。

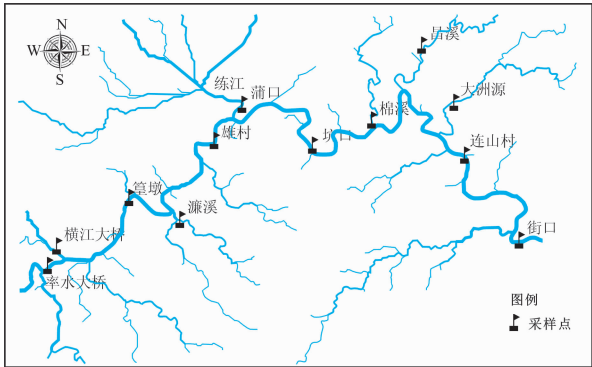


图 2 新安江干流黄山段采样点

3.3 联用模型的建立

为实现流域模型与水质模型的联用,结合各自的特点与原理,开发了二者联用的平台,编写相关代码程序,其程序基于 Visual Basic Application (VBA) 语言,以 Excel 作为图形用户界面。其流程如下:

- (1) 根据划分的河段数目,确定流域模型的面源个数。本研究中划分 43 个河段,即 43 个子流域。
- (2) 确定流域模型参数并计算面源负荷。参考 GWLF 手册、案例及当地相关资料,确定 GWLF 模型中的各参数初始值及校准范围,并校准传输参数和营养盐参数,计算各个面源的水文、沉积物及总营养物质。
- (3) 面源负荷结果输入 QUAL2Kw 模型。将 GWLF 模型计算出的面源负荷数据,包括总氮、总

磷、径流量、沉积物、水温,结果经处理后,作为 QUAL2Kw 模型的面源输入。

(4)使用水质模型模拟河道水质状况。输入 QUAL2Kw 模型的必要参数,如计算的时间步长、河段参数、微分数值解法等,其中设定计算时间步长为 11.25 min,采用欧拉法(Euler)作为水质模拟方法,采用二分法(Bisection)作为 pH 的模拟方法,其它 QUAL2Kw 模型所需参数可依据模型原理、手册获取相应的参数值。完成 QUAL2Kw 模型所需参数的输入,运行模型,输出表征该河流水质状况的水文结果以及水质结果。

通过以上步骤(图 3)运行 QUAL2Kw 模型,并依据相关水质模型资料^[13,16]设定率定参数,通过遗传算法校准,所得结果为新安江 2013 年 10 月的河流水质状况(图 4)。保持率定参数不变,以 2012 年 10 月的监测数据输入模型中进行验证,模型参数的验证结果见表 1,从表 1 可知,温度、溶解氧、流量、总氮、活性 CBOD、总磷、有机氮、氨氮、硝态氮 9 个指标的 R^2 分别为 0.76、0.84、0.94、0.80、0.85、0.78、0.87、0.82、

0.84,说明模拟值与实测值能够较好拟合,因此,该模型能够准确地反映河道实际水质状况。

4 污染贡献率的计算

本研究中,应用 QUAL2Kw 模型模拟支流点源、工业点源、干流面源污染对河道水质的影响,其中支流点源是支流上的点源和其子流域内汇水过程所产生的面源污染的综合结果。假设该河道处于无暴雨以及无突发状况,河道水质水量无剧烈改变,重点考虑所研究河段的污染物输入、输出量(图 5),计算出各点源、面源污染、源头水对街口活性 CBOD、总氮、

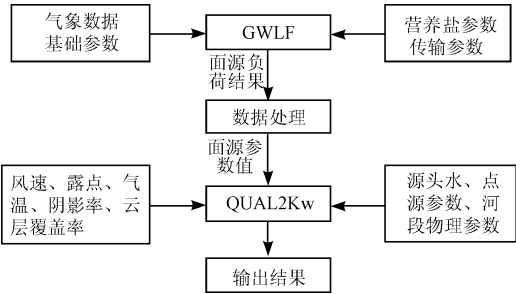


图 3 模型联用流程

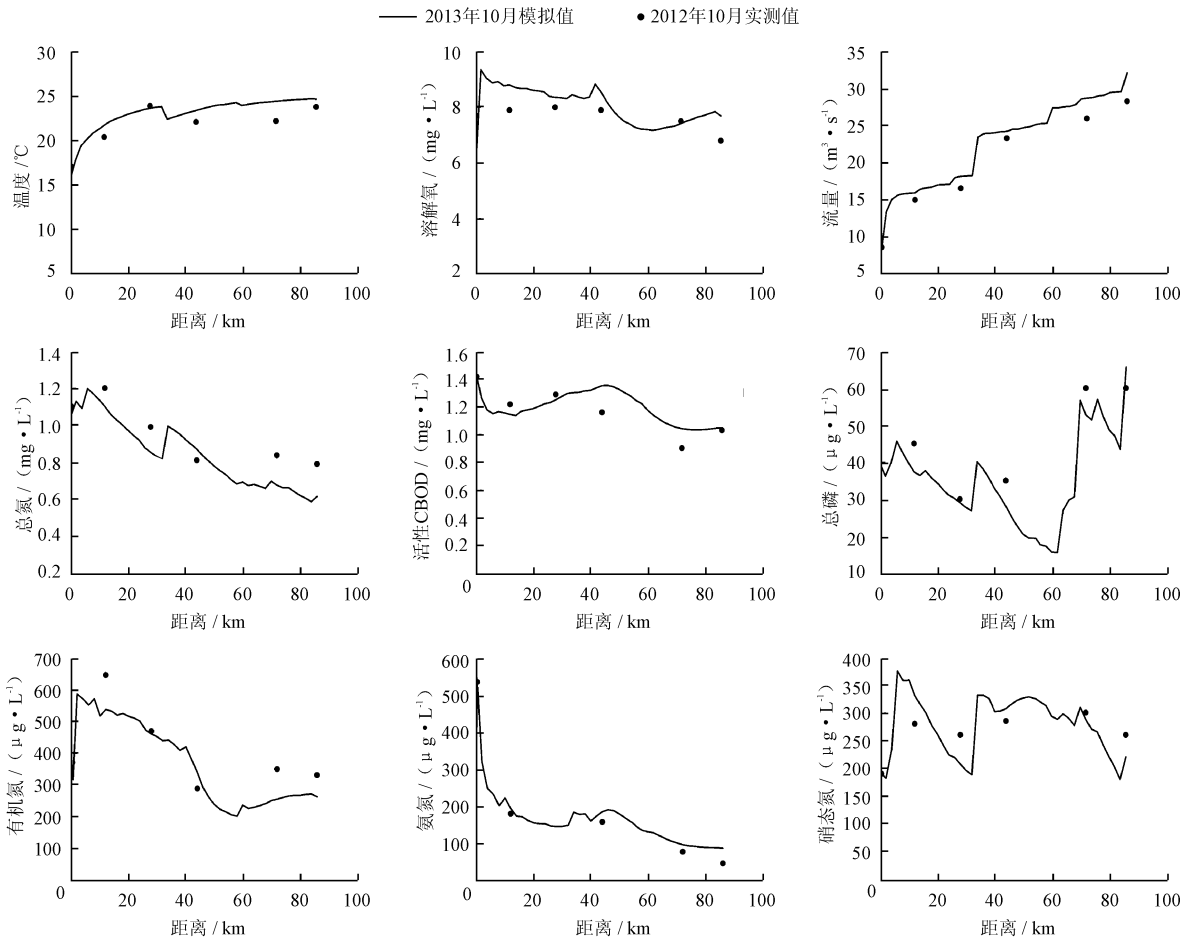


图 4 模型校准期实测值与模拟值比较

表 1 模型验证期实测值与模拟值比较

距离 /km	温度/℃		溶解氧/ (mg · L ⁻¹)		流量/ (m ³ · s ⁻¹)		总氮/ (mg · L ⁻¹)		活性 CBOD/ (mg · L ⁻¹)		总磷/ (ug · L ⁻¹)		有机氮/ (ug · L ⁻¹)		氨氮/ (ug · L ⁻¹)		硝态氮/ (ug · L ⁻¹)	
	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测	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	16.99	18.10	6.63	7.02	7.86	7.86	1.26	1.12	1.80	1.80	38.93	33.31	558.86	641.63	498.00	498.00	160.00	160.00
11.49	21.76	19.40	8.76	8.96	16.92	12.00	1.32	1.48	1.36	1.26	34.66	49.23	630.46	756.88	299.20	162.00	356.17	290.00
28.11	23.74	21.60	8.29	8.16	18.71	19.86	1.08	1.04	1.33	1.29	28.01	32.28	493.41	479.81	222.70	140.00	328.40	370.00
44.09	23.80	22.70	8.21	8.05	24.71	26.33	1.03	0.97	1.39	1.13	26.14	30.64	347.58	409.14	213.97	190.00	426.76	390.00
71.03	24.69	25.10	6.76	6.10	30.12	30.40	0.75	0.83	0.94	1.06	10.02	16.82	182.04	390.61	139.24	169.00	403.01	430.00
85.59	24.96	25.90	6.75	6.89	32.54	31.18	0.62	0.78	0.81	0.90	7.78	8.68	106.14	145.54	108.65	97.00	395.11	410.00

氨氮、硝态氮的污染贡献率,结果如图 6,计算公式如下:

$$E_{in,i} = C_{in,i,up}Q_{in,i,up} + C_{in,i,p}Q_{in,i,p} + C_{in,i,np}Q_{in,i,np} \quad (4)$$

$$\eta_i = 1 - \frac{C_{out,i}Q_{out,i}}{E_{in,i}} \quad (5)$$

$$\zeta_{ps,i,j,n} = \frac{\prod_{k=1}^n (1 - \eta_k) (C_{ps,i,j}Q_{ps,i,j})}{C_{out,n}Q_{out,n}} \quad (6)$$

$$\zeta_{nps,i,j,n} = \frac{\prod_{k=i}^n (1 - \eta_k) W_{nps,i,j}}{C_{out,n}Q_{out,n}} \quad (7)$$

式中: η_i 为河段 i 的削减率; $\zeta_{ps,i,j,n}$ 为河段 i 中第 j 个点源对目标河段 n 的污染贡献率; $\zeta_{nps,i,j,n}$ 为第 i 个河段中所涉及的第 j 个面源的直接污染负荷量对目标河段 n 的污染贡献率; $E_{in,i}$ 为河段 i 的污染物通量, L/d; $Q_{in,i,up}$ 为河段 i 上一个河段的入流量, m³/s; $Q_{in,i,p}$ 为河段 i 的点源入流量, m³/s; $Q_{in,i,np}$ 为河段 i 的面源入流量, m³/s; $C_{in,i,up}$ 为河段 i 上一个河段中物质组分浓度, mg/L; $C_{in,i,p}$ 为河段 i 中的点源物质组分浓度, mg/L; $C_{in,i,np}$ 为河段 i 中的面源物质组分浓度, mg/L; $C_{out,i}$ 为河段 i 的输出物质组分浓度, mg/L; $Q_{out,i}$ 为河段 i 的出流量, m³/s; $Q_{out,n}$ 为研究目标河段的出流量, m³/s; $C_{out,n}$ 为研究目标河段的出流物质组分浓度, mg/L; $W_{nps,i,j}$ 、 $Q_{ps,i,j}$ 、 $C_{ps,i,j}$ 意义同上; 本研究 $n = 43$ 。



图 5 河段输入与输出示意图

根据以上公式计算出不同污染源的贡献率为:

(1) 支流点源的贡献率。考虑到本研究中支流点源是支流点源和面源污染的综合结果, 支流点源

包括横江、濂溪、练江、棉溪、昌溪、大源洲。从图 6 可知, 在所有的支流点源中, 练江支流对街口活性 CBOD、总氮、氨氮、硝态氮的贡献率分别为 16.02%、20.13%、28.92%、20.07%, 是对街口断面污染贡献最大的支流点源, 说明练江支流对新安江干流的水质影响较大, 为保证新安江干流水质达标, 相关环境管理部门应采取有效措施优先对练江进行水环境管理。

(2) 工业点源的贡献率。从图 6 可知, 工业点源包括黄山市善孚化工厂、黄山污水处理厂、歙县友谊化工厂, 其中黄山污水处理厂对街口断面污染贡献大于其他工业点源, 对街口活性 CBOD、总氮、氨氮、硝态氮的贡献率分别为 1.60%、3.85%、1.12%、4.03%, 表明工业点源对新安江干流的影响不大, 但也不容忽视。对于上游工业点源污染, 应采取源头治理的方法, 各个排污单位应严格按照国家相关行业的排污标准执行; 另一方面, 各个排污单位不仅按照浓度达标排放, 也应符合总量达标排放的标准, 将会有效地控制工业点源所引起的污染。

(3) 源头水的贡献率。本研究以率水大桥作为源头, 从图 6 可知, 源头水对街口活性 CBOD、总氮、氨氮、硝态氮的贡献率分别为 28.98%、13.31%、38.79%、2.15%, 其中氨氮的污染贡献率最高, 根据实测数据(图 4、表 1), 说明源头水中的氨氮浓度值较高, 经各河段逐渐削减。

(4) 干流面源的贡献率。根据图 6 可知, 上游干流面源污染对街口断面活性 CBOD、总氮、氨氮、硝态氮的贡献最为显著, 污染贡献率分别为 31.78%、45.85%、23.11%、70.86%, 尤其是对街口硝态氮的贡献最大, 原因是干流面源污染中污染物之间复杂的转化机制, 如: 硝化反应等, 说明干流面源污染对新安江干流水质具有较大的影响, 表明了应用 GWLF 模型对新安江流域进行面源负荷估计, 并与 QUAL2Kw 模型联用进行水质评价, 具有重要的意义。

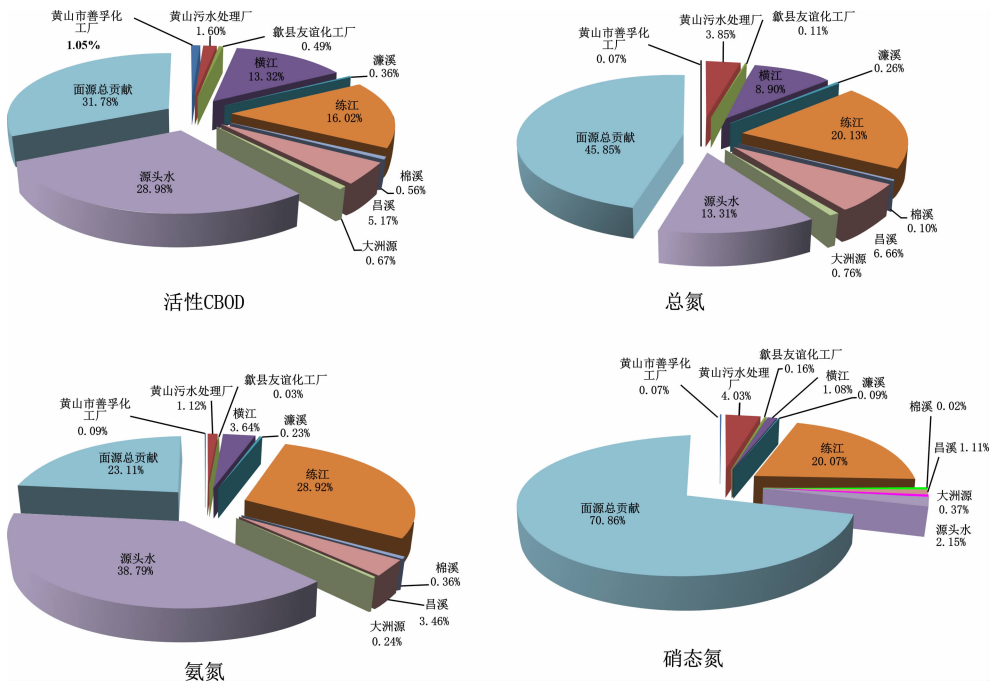


图6 污染贡献率结果

5 结 语

(1)通过 GWLF 与 QUAL2Kw 模型的联用,将 GWLF 模型模拟出的面源污染负荷作为 QUAL2Kw 模型的面源输入,解决水质模型发展中面源污染负荷输入难以获取的问题,实现流域负荷 - 水质响应的耦合,从而使 QUAL2Kw 模型在模拟河流过程中的准确性以及科学性得以提升。

(2)使用 2013 年 10 月和 2012 年 10 月的水质监测数据分别进行 QUAL2Kw 模型的校准与验证,结果表明模型的模拟值与实测值拟合度较好,能够反映出实际河道水质状况。

(3)根据上游支流点源、工业点源、干流面源污染、源头水对流域出口 - 街口国控断面的活性 CBOD、总氮、氨氮、硝态氮污染贡献结果,在无暴雨以及无突发状况下,上游干流面源污染对街口断面污染的贡献最为显著;在支流点源中,练江支流点源对街口的污染贡献最大;黄山污水处理厂对街口断面污染贡献大于其他工业点源;源头水对街口氨氮的污染贡献率最高。相关水质管理部门可根据计算出的污染贡献率进行有针对性的污染减排,达到对环境更好的保护。

(4)根据 QUAL2Kw 模型的水质结果对污染物进行占有率计算,该方法能够初步分析污染物在空间上的变化特性。根据本研究中占有率计算结果可知,新安江流域面源污染占有率高于其他污染,表明

在类似新安江流域中应使用相关流域模型对面源负荷进行估计。

参考文献:

[1] 程 蔚. 低碳高新让经济发展与生态保护齐头并进——谈新安江流域生态保护[J]. 安徽科技, 2011(6): 32 - 33.

[2] 柯来章, 阎伍玖. 黄山市新安江流域水环境质量评价与管理措施[J]. 资源开发与市场, 2007, 23(1): 7 - 9 + 52.

[3] 洪 剑, 叶长林. 黄山市新安江流域农业面源污染现状及防治措施[J]. 安徽农学通报, 2013, 19(15): 101 + 107.

[4] 田 炜, 王 平, 谢 洁, 等. 地表水质模型应用研究现状与趋势[J]. 现代农业科技, 2008(3): 192 - 195.

[5] 李云生, 刘伟江, 吴悦颖, 等. 美国水质模型研究进展综述[J]. 水利水电技术, 2006, 37(2): 68 - 73.

[6] 苏长岭, 丁书红, 白继平, 等. 河流水质模型研究现状及发展趋势[J]. 河南水利与南水北调, 2010(7): 83 - 85.

[7] 曹永中, 周孝德, 吴秋平, 等. 水质模型研究概述[J]. 水利科技与经济, 2008, 14(3): 197 - 199 + 206.

[8] 周 华. 地表水质模型研究进展综述 [C] // 中国环境科学学会 2010 年学术年会论文集. 北京: 中国科学出版社, 2010: 3123 - 3129.

[9] Haith D A, Shoenaker L L. Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1987, 23(3): 471 - 478.

12个供需水方案。

(2)利用专家概率咨询法对不同方案进行分项排列打分,得到2020年社会经济发展高速、水利工程建设低速发展的方案四为最大概率方案,2030年方案七(2020年社会经济高速发展的基础上,2030年社会经济低速发展、水利工程高速建设)为最大概率方案。

(3)采用专家概率咨询法进行流域水资源供需平衡分析,得到了合理的分配结果,按照供需平衡方案进行水资源分配,可促使流域综合缺水率逐年减少,促使流域的水资源能够更好地为高速发展的社会经济服务,从而提高流域的供水、用水水平,为流域生产、生活安全提供强有力的保障和支撑。

参考文献:

- [1] Hall WA, Buras N. The dynamic programming approach to water resources development [J]. Journal of Geophysical Research, 1961, 66(2): 517-520.
- [2] 吴泽宁,索丽生. 水资源优化配置研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 1-5.

- [3] 汤奇成,张捷斌,程维明. 中国西部地区水资源供需平衡预测[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 327-332.
- [4] 李雪萍. 国内外水资源优化配置研究概述[J]. 海河水利, 2002(5): 13-15.
- [5] 程吉林,孙学华. 模拟技术、正交设计、层次分析与灌区优化规划[J]. 水利学报, 1990, 21(9): 36-40.
- [6] 蔡喜明,翁文斌,史慧斌. 基于宏观经济的区域水资源多目标集成系统[J]. 水科学进展, 1995, 6(2): 139-144.
- [7] 王浩,陈建敏,秦大庸,等. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2003: 34-36.
- [8] 冯耀龙,韩文秀,王宏江,等. 面向可持续发展的区域水资源优化配置研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(2): 133-138.
- [9] 王浩,秦大庸,郭孟卓,等. 干旱区水资源合理配置模式与计算方法[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 689-693.
- [10] 赵军凯,赵秉栋,李九发,等. 城市水资源供需平衡及预测分析——以开封市为例[J]. 水文, 2009, 29(6): 50-57.
- [11] 董耀华,李凌云,杨春花. 突泉县水资源调配工程方案及关键技术研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 66-70+76.

(上接第168页)

- [10] 何因,秦保平,李云生,等. GWLF模型的原理、结构及应用[J]. 城市环境与城市生态, 2009, 22(6): 24-27.
- [11] 王东,赵越,徐敏,等. 区域营养盐管理模型在沙河流域的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(5): 98-101.
- [12] 王玉秋,沙健,谢阳村,等. 通用流域负荷模型(GWLG模型)理论方法与应用案例[M]. 北京:中国环境出版社, 2012, 6-11.
- [13] 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.
- [14] 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(3-4): 503-517.
- [15] 赵罡,李川,陆宇超,等. QUAL2Kw模型在新安江干流

黄山段水质模拟中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 1-5.

- [16] 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 and Software, 2006, 21(3): 419-425.
- [17] Santos S, Vilar V J, Alves P, et al. Water quality in Minho/Miño River (Portugal/Spain). [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(4): 3269-3281.
- [18] 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.
- [19] 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.