

漠阳江流域水环境容量的时空分布特征研究

程翔^{1,2} 赵志杰^{1,2,†} 秦华鹏¹ 宋宝木¹ 余香英³ 何康茂¹

1. 城市人居环境科学与技术重点实验室, 北京大学环境与能源学院, 深圳 518055; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 3. 广东省环境科学研究院, 广州 510045; †通信作者, E-mail: zhaozhijie@pku.edu.cn

摘要 针对实测径流资料较缺乏的漠阳江流域, 通过流域水文模型 HSPF(hydrological simulation program-Fortran)模拟各支流和子流域详细的径流时空特征, 利用一维稳态水质数学模型计算不同时间和空间上化学需氧量(COD)和氨氮的水环境容量。结果表明: 1) 在漠阳江流域, HSPF 模型对年与月径流模拟的相对误差小于 15%, Nash-Sutcliffe 系数大于 0.9; 水质模型的相对误差在 10%左右, Nash-Sutcliffe 系数大于 0.8; 2) 在 90%, 50%和 10%保证率下, 漠阳江流域 COD 的环境容量分别为 16.45, 21.84 和 24.97 万 t, 氨氮的环境容量分别为 0.51, 0.88 万 t 和 1.14 万 t; 受径流季节波动影响, 枯水期与丰水期季节水环境容量差异明显; 1 月份的水环境容量及其变差最小, 6 月份的水环境容量及其变差最大; 3) 空间分布上, 漠阳江干流流域承载力较大, 一级与二级支流的承载力较小。因此, 在水文资料缺乏的流域, 可基于 HSPF 模型模拟的水文条件, 开展水环境容量的时空分布分析, 为水环境容量总量控制方案的制定提供指导。

关键词 漠阳江流域; 水环境容量; 水文; 时空分布

中图分类号 X522

Temporal and Spatial Distribution Characteristic Research of Water Environmental Capacity in Moyang River Basin

CHENG Xiang^{1,2}, ZHAO Zhijie^{1,2,†}, QIN Huapeng¹, SONG Baomu¹, YU Xiangying³, HE Kangmao¹

1. College of Environment and Energy, Peking University, Shenzhen 518055; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; 3. Guangdong Province Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045;

† Corresponding author, E-mail: zhaozhijie@pku.edu.cn

Abstract This study takes Moyang River basin, which is lack of hydrologic data, as the research object to simulate the temporal and spatial distribution of water flow through HSPF (hydrological simulation program-Fortran) model, and calculates the temporal and spatial distribution of chemical oxygen demand (COD) and ammonia nitrogen water environmental capacity using one-dimensional steady-state water quality mathematical model. Results show that 1) HSPF model's yearly and monthly hydrological errors are below 15%, Nash-Sutcliffe coefficient is over 0.9; the relative error of the water quality model is around 10%, Nash-Sutcliffe coefficient over 0.8. 2) Under 90%, 50% and 10% assurance rate, COD capacity of Moyang River basin is 164500 t, 218400 t and 249700 t respectively, and ammonia nitrogen is 5100 t, 8800 t and 11400 t respectively. Affected by seasonal runoff fluctuations, difference of water environment capacity between dry season and wet season is obvious. The variation of water environment capacity in January is minimum and June the maximum. 3) Bearing capacity of main stream of Moyang River is larger than that of the primary and secondary tributaries. Therefore, in some basins where hydrological data is lack, HSPF model can be applied to simulate the hydrology, analysis time and space distribution of water environmental capacity, and provide guidance for the establishment of total amount control scheme of water environmental capacity.

Key words Moyang River basin; water environmental capacity; hydrology; temporal and spatial distribution

国家科技重大专项课题(2013ZX07501005)和深圳市科技研发资金项目(JCYJ20130329180732262)资助

收稿日期: 2015-01-20; 修回日期: 2015-02-14; 网络出版日期: 2016-05-17

目前针对水环境容量的总量控制大多根据 90% 保证率最枯月降雨条件下的设计流量进行计算^[1], 这样可以保证河流在枯水期水质达标, 也可避免水环境保护的“不足”。实际上河流水文条件具有动态变化特征, 当水量增大(如丰水期)时, 按最枯设计流量条件下的水环境容量进行污染物总量控制, 会造成水环境“过保护”, 浪费一部分水环境的纳污能力^[2]。流域降雨径流形成的非点源污染的季节性差别很大, 目前尚无公认合适的水文设计条件, 同时适用于丰水期和枯水期的水环境容量计算, 以便进行合理的容量总量控制。流域水环境容量在空间上也呈现一定差异^[3]。现有研究侧重于干流的环境容量分析, 由于水文资料的缺乏, 很多流域对支流研究少, 在支流较多的情况下, 容量分配易出现不合理的情况^[4]。

掌握水环境容量时空分布特征是合理分配流域水环境容量的基础。但是, 在水文资料缺乏的流域, 无法利用实测的径流资料开展水环境容量时空分布的分析。

本文以漠阳江流域为对象, 在现有水文资料的基础上, 利用 HSPF 水文模型模拟得到各子流域不

同时间尺度的径流量, 然后利用一维稳态水质数学模型计算相应径流量下的漠阳江流域水环境容量, 进而开展水环境容量时空分布特征的分析。研究结果可为科学评价与合理利用漠阳江流域的水环境容量以及确定流域水环境承载力提供依据。

1 漠阳江流域概况

漠阳江(图 1)发源于广东省云浮市西南大云雾山南侧, 在阳江市的北津注入南海, 干流全长 199 km, 流域总面积 6091 km², 其中阳江市境内流域面积 5604.4 km², 占总流域面积的 93.1%, 境内流域面积占阳江市总面积的 71.7%。集水面积超过 100 km² 的一级支流有 11 条, 其中潭水河、西山河和那龙河集水面积较大; 二级支流有 6 条。漠阳江流域雨量充沛, 年均降水量为 2195 mm, 降水年内分配不均, 年际变化较大。年内分配具有干湿季分明、雨量集中于汛期特点。

漠阳江是阳江市最主要的饮用水源, 也是流域内城乡工农业生产的最重要水源。漠阳江干流下游水质控制目标为 III 类水, 上游与中游以及漠阳江各支流控制目标为 II 类水。目前漠阳江全河段水质虽

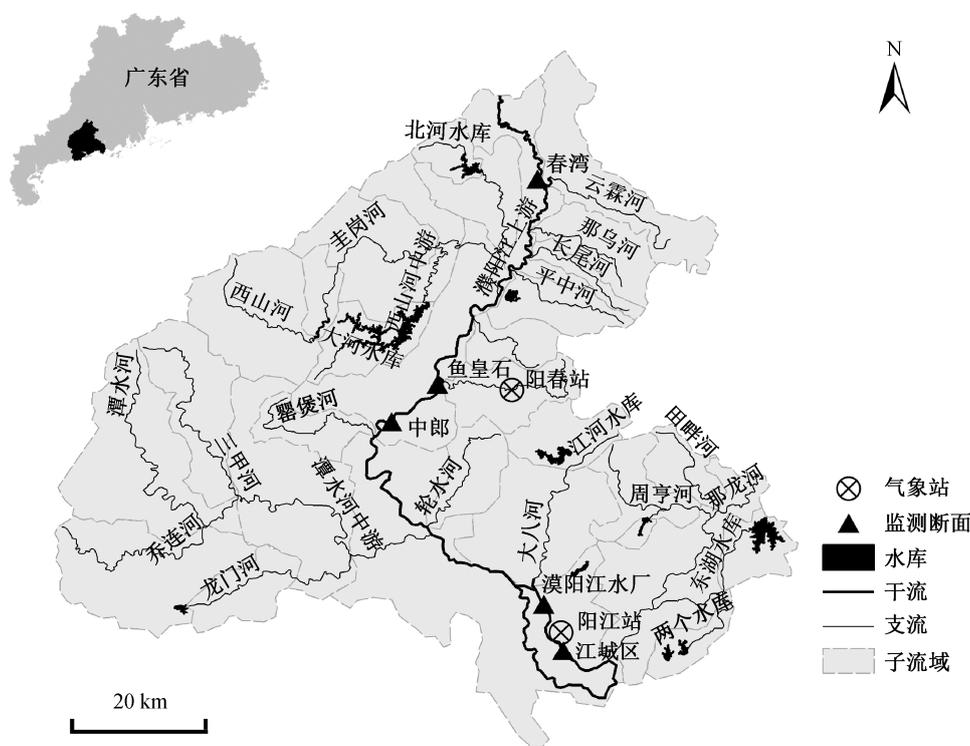


图 1 漠阳江流域水系
Fig. 1 Rivers of Moyang River basin

以Ⅱ类为主,但水污染防治形势不容乐观。近年来,社会经济的持续高速发展,对漠阳江水质产生较大的影响,水污染问题也逐渐显现,水环境承载力的压力越来越大。如果没有科学系统的水环境综合管理方案,流域水质保护的将越来越大,也将对漠阳江供水水源水质安全构成严重威胁。以分区域水环境容量为基础,单位面积的水环境容量可以表示水环境对区域社会经济发展的支持能力,即水环境承载力的高低。

2 数据和方法

漠阳江地理信息数据库包括 DEM (分辨率为 30 m 美国 NASA 的 ASTER GDEM)、河网(广东省科学研究院提供, ArcGIS 矢量数据)、土地利用矢量数据(广东省科学研究院提供, 包含水田、旱地等 16 类, 图 2)以及在此基础上划分的 31 个子流域(在 ArcGIS 中根据 DEM 图与河网图手动划分)。

气象数据来自国家气象信息中心, 包括 1983—2012 年阳春、阳江两个站(图 1)逐日(20—20 时)降水量、日最高气温、日最低气温、露点温度、云量、风速、相对湿度等, 用于水文模型建立时气象数据的输入。

水质监测数据来自阳江市监测站, 包括 2005—

2011 年 7 个监测断面(春湾、陂面、鱼皇石、中郎、河口、漠阳江水厂、江城)的数据(1—11 月, 每月 1 至 6 个监测日), 指标包括 COD(化学需氧量)、氨氮、重金属等 24 项, 用于水质模型的校准与验证。

2.1 水文模型

2.1.1 流域水文条件模拟

由于连续的实测水文资料缺乏, 考虑到各子流域空间异质性, 选用分布式水文模型 HSPF 模拟漠阳江各支流的径流量。在对 HSPF 模型完成验证的基础上, 将模拟得到的水文数据(各个子流域 30 年的逐月流量数据)用于分析研究漠阳江流域水环境容量时空分布。

HSPF 模型中水文模拟以 Stanford 水文模型为基础, 根据土地利用特征, 分为透水地面和不透水地面, 针对不同下垫面的水文过程进行模拟。透水地面的模拟考虑降水、截留、地表填洼、蒸发、蒸腾、渗透、地表径流、壤中流和地下水流等水文过程; 不透水地面的模拟包括降水、截留、地表径流、蒸发。HSPF 模型水文模块对于降雨径流复杂过程的描述, 能较好地再现流域实际水文过程^[5-6]。

国内外利用 HSPF 模型对降雨径流为主的水文

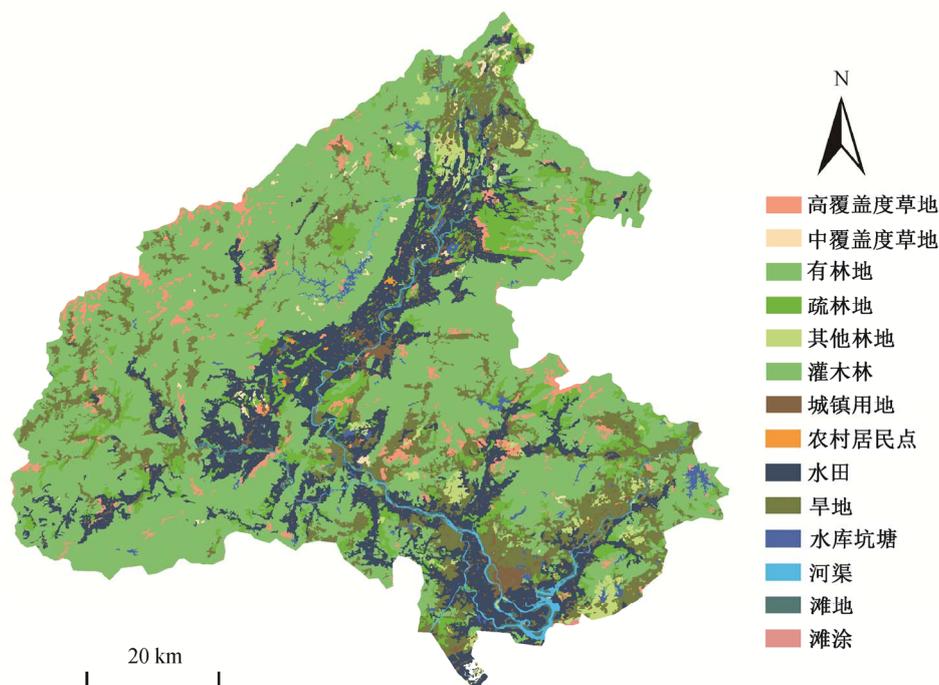


图 2 漠阳江流域土地利用类型分布
Fig. 2 Landuse of Moyang River basin

过程、气候变化以及土地利用变化对水文过程的影响开展了很多研究,表明 HSPF 模型在诸多地区水文过程的时空分布变化模拟中均有很好的表现,石赟赟等^[7]、李燕等^[8]、Cryer 等^[9]、Alarcon 等^[10]和董延军等^[11]在不同时间与空间尺度上模拟所得结果的相对误差均小于 15%, NASH 系数都在 0.8 以上,模拟效果良好。

2.1.2 漠阳江流域 HSPF 水文模型验证

漠阳江流域面积较大,水文过程复杂,水文敏感参数较多,对河流流量影响较大,水分平衡以及水文参数对整个流域非点源污染负荷模拟起着至关重要的作用。本文参考 HSPF 模型手册^[12]和 HSPFParm^[13]以及相关研究成果设定参数初值,然后对参数进行率定,水文部分主要参数的最终取值见表 1。

利用 2009 年漠阳江流域水文观测资料对水文模块进行参数率定,根据 HSPF 模型指定的参数范围,反复调整参数,使流域年出流总量的模拟值和实际出流总量趋于一致。以 2010 年实测资料验证模型,水文模拟首先从年度水分平衡开始,初步模拟年度水量低于测量值,因此适当减小下层额定存储量(LZSN),减少潜在蒸散,增加产流,从而增加降水引起的径流量。年水量模拟结果中,2009 年模拟值为 190.95 m³/s,实测值为 203.28 m³/s; 2010 年模拟值为 228.91 m³/s,实测值为 259.12 m³/s; 2009 年相对误差为 6.06%, 2010 年的相对误差为 11.7%, 相对误差均小于 15%。

2009 年和 2010 年的月水量模拟结果分析见图 3。除 2009 年 5 月模拟结果的相对误差为 52.7%外(漠阳江地区有较多水库,我们未得到相关数据或

表 1 水文部分主要参数取值
Table 1 Main parameters of hydrological part

参数	意义	调整范围	参数取值
AGWRC	地下水回归率	0.9~0.999	0.98
LZSN	下层土壤额定储水量	0.01~10	0.05
UZSN	上层土壤额定储水量	0.05~2.0	1.128
DEEPER	无活性地下水比例	0.01~0.5	0.1
INFILT	土壤下渗能力	0.001~0.5	0.1
UZS	初始上层土壤含水量	1.0~10	5
AGWS	初始活性地下水储量	0.001~0.1	0.01
INTFW	壤中流入渗系数	0.1~1.0	0.75
IRC	壤中流退水系数	0.30~0.85	0.5

说明,为了保持流域的完整性,没有扣除水库所在子流域,该月误差较大可能是由于水量激增引起的水库蓄水所致),其他月份模拟值与观测值的相对误差均小于 15%, Nash 系数在 0.9 以上,曲线走向一致,较好地反映了漠阳江流域的水文过程。

2.2 水质模型与环境容量估算方法

2.2.1 水质模型的建立与验证

对于研究河流水污染迁移转化过程,若主要关心污染物浓度的沿程变化,对断面上的变化情况没有太多要求时,可采用一维水质模型进行描述。水环境容量是在特定的水文设计条件下,稳定的污染源和水文特征时,河流能接受的最大污染物的负荷量。在河流流速、流量、水位都不随时间而变化,污染源排放连续稳定情况下,纵向分散作用远小于河流的移流和降解作用,同时不同时刻的纵向分散作用在宏观上可以相互抵消。在这种特定情况下,可以忽略纵向分散作用。考虑到国内,尤其是漠阳

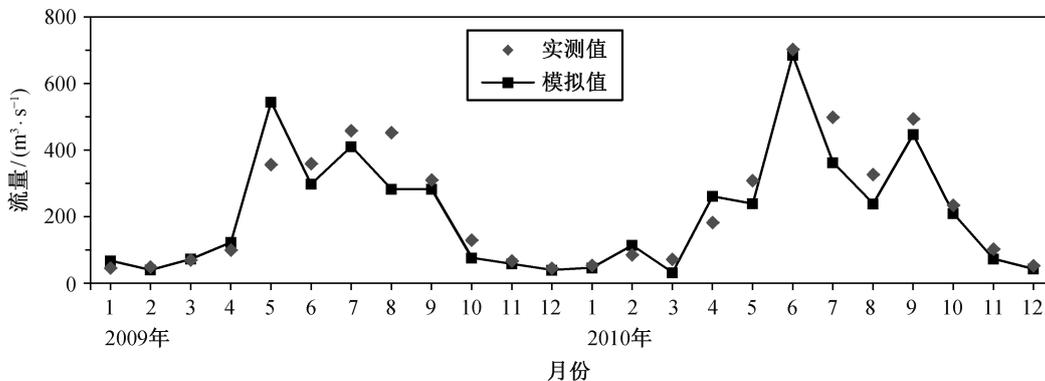


图 3 2009 年和 2010 年漠阳江流域径流的实测与模拟值(阳江站)

Fig. 3 Measured and simulated runoff (Yangjiang Station) of Moyang River basin in 2009 and 2010

江流域所在地区的水环境保护要求以及水环境容量计算的精度,同时考虑到稳态模型发展的成熟性,本文采用一维稳态模型计算水环境容量。

为保证水质模型能真实地反映污染物流入后的

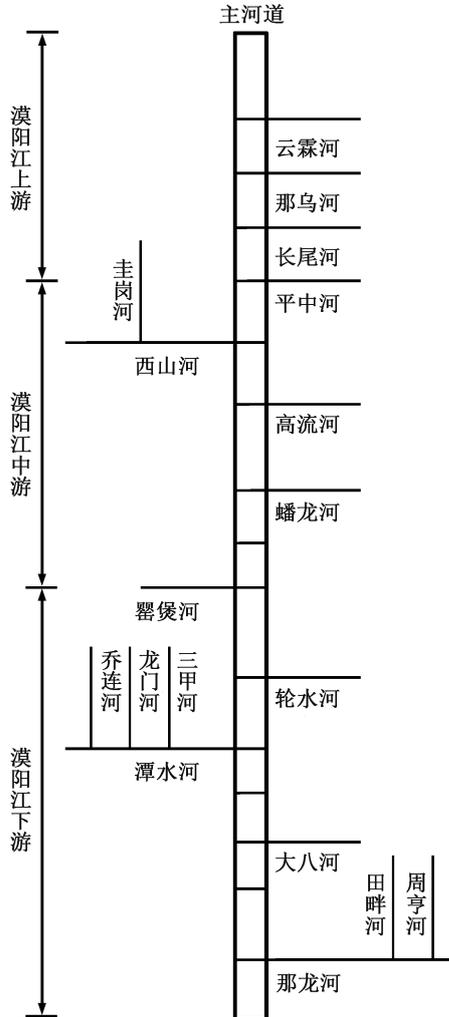


图4 漠阳江河道概化图

Fig. 4 Generalized channel of Moyang River

情形,我们验证了所建立的水质模型。将 199 km 的漠阳江干流及主要支流划分为 27 个河段共 81 个计算单元(图 4),每个计算单元的空间步长为 1 km。以 2010 年漠阳江流域污染负荷和水文条件输入所建立的河流水质模型,模拟出漠阳江干流沿程的 COD 和氨氮浓度值,选取 5 个断面的实测值作为模型验证的对比资料,选用相对误差(RE)和 Nash-Sutcliffe 标准来评估模型在校准和验证过程中的模拟效果。NASH 公式计算如下:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}, \quad (1)$$

Q_i 为第 i 时刻观测流量(m^3/s); Q'_i 为第 i 时刻模拟流量(m^3/s); n 为时段总数; \bar{Q} 为平均观测流量。

NASH 系数是描述计算值对目标值拟合精度的无量纲统计参数,一般取值在 $-\infty \sim 1$ 之间,本研究中, NASH 系数在 0.8 以上表明符合要求, 0.6 ~ 0.8 为基本符合要求, 低于 0.6 则认为偏差过大, 结果不适宜。

参考中山大学环境科学研究所编制的《粤西主要河流水质保护规划修编(研究报告)》,广东省粤西地区 COD 的衰减系数为 $0.08 \sim 0.1 \text{ d}^{-1}$, 氨氮的衰减系数为 0.07 d^{-1} , 经过模型验证, COD 的衰减系数 K_{COD} 取值为 0.1 d^{-1} , 氨氮的衰减系数 $K_{\text{氨氮}}$ 取值为 0.07 d^{-1} 。模拟结果见表 2。

将下游入海口作为距离基准,为 0 km, 上游发源地为 199 km, 从春湾监测点附近开始模拟, 根据水质监测数据, 得到验证结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 除中朗点氨氮实测值与模拟值误差较大(中朗位于阳春市中心的下游, 其实测数据具有很大的不确定性)外, 其余点的 COD 与氨氮的模拟值与实测值相对误差均在 10% 左右, Nash-

表 2 一维水质模型模拟值与实测值比较

Table 2 Comparison of COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ monitoring and simulation concentration of one-dimensional water quality model respectively

监测点	COD			氨氮		
	模拟值/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	实测值/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	相对误差/%	模拟值/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	实测值/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	相对误差/%
1	10.17	9.06	12.3	0.21	0.22	-2.9
2	11.74	10.53	11.5	0.34	0.30	12.0
3	17.32	16.37	5.8	0.43	0.52	-17.4
4	11.39	11.93	-4.5	0.30	0.26	17.1
5	12.91	14.49	-10.9	0.33	0.34	-3.7

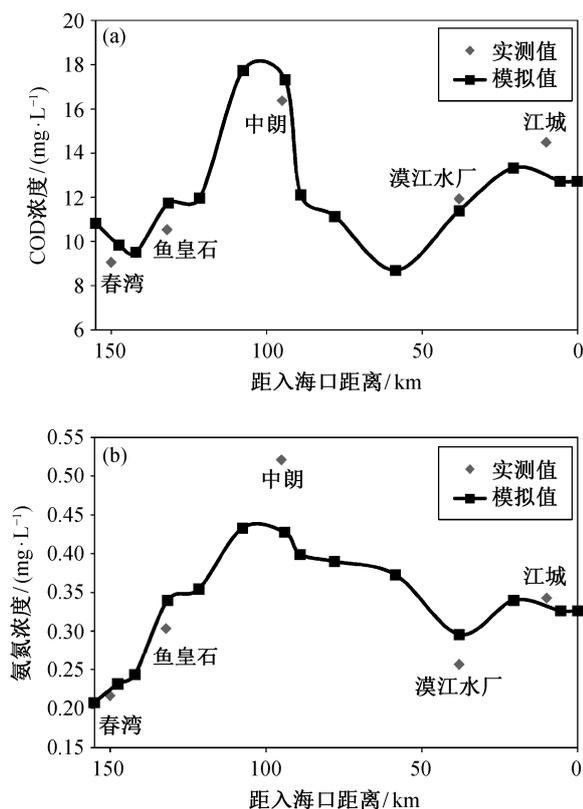


图 5 漠阳江干流 COD(a)与氨氮(b)浓度计算值与实测值比较

Fig. 5 Comparison of COD (a) and NH₃-N (b) monitoring and simulation concentration of main stream of Moyang River

Sutcliffe 系数在 0.8 以上, 且实测值与模拟值的沿河变化趋势基本相同, 说明模拟结果符合漠阳江干流的水质变化特征。由此表明, 该一维水质模型可适用于漠阳江流域水环境容量的计算。

2.2.2 水环境容量估算方法

根据漠阳江流域的实际情况, 以 COD 和氨氮为研究对象。对于漠阳江干流的混合输移过程, 研究重点是污染物浓度的沿程变化, 因此采用一维水质模型模拟水质变化和计算水环境容量。

一维稳态水质数学模型假定各排污口连续、均匀地排污^[14]。根据旁侧入流和污染源位置, 将对象河段分成若干段, 旁侧入流和污染源位于段首, 每段保证流速、流量定常, 在同一段内, 采用《环境影响评价技术导则》(HJ/T 2.1—2.3-93)^[15]推荐的斯特里特-菲立浦(Streeter-Phelps)模式:

$$C(x) = C_0 \exp \left[-K \left(\frac{x_{i-1}}{86400u_{i-1}} \right) \right], \quad (2)$$

式中, $C(x)$ 和 C_0 分别为 $x=x$ 和 $x=0$ 处河水 COD 或氨氮浓度(mg/L), x 为到排污口($x=0$)的河水流动距离(m), u 为河水平均流速(m/s), K 为 COD 或氨氮的综合降解系数(d⁻¹)。

本研究采用段首控制方法, 即控制上游断面(即段首)的水质达到功能区段的要求, 这样, 由于有机物的降解, 则在该段内的下游水质处处达到或优于功能区段的控制指标。段首控制方法严格控制功能区段的水质不超标。

在功能区段的段首, 由于来水中污染物的浓度和功能区段水质要求的差别, 为来水提供稀释容量:

$$E_0 = Q_0(C_s - C_0), \quad (3)$$

E_0 为功能区段首的稀释容量(t/d), C_s 为功能区段水质标准(mg/L), Q_0 为来水流量(m³/s), C_0 为来水浓度(mg/L)。

第 i 个断面处的环境容量为

$$E_i = (Q_i + q_i)C_s - Q_i C_s(x), \quad (4)$$

E_i 为第 i 个断面处的环境容量(t/d), q_i 为第 i 个断面处的排污流量(m³/s), Q_i 为混合后干流流量(m³/s), 其余符号意义同上。

功能区段内所具有的总环境容量为

$$E = E_0 + \sum E_i = Q_0(C_s - C_0) + \sum_1^n [(Q_i + q_i)C_s - Q_i C_s(x)]. \quad (5)$$

3 结果与讨论

3.1 径流变化特征

漠阳江流域径流量的年际变化主要受降水影响, 1983—2012 年共 30 年的径流量结果统计得出: 最大径流量为 537.7 m³/s (2001 年), 最小径流量为 166.6 m³/s (1989 年), 30 年平均值为 322.5 m³/s, 变差系数为 0.29。

漠阳江流域年内丰水期与枯水期径流差异明显, 其中枯水期最大径流量为 210.1 m³/s (1990 年), 最小径流量为 50.0 m³/s (2004 年), 30 年平均值为 105.1 m³/s, 变差系数为 0.4; 丰水期最大径流量为 990.2 m³/s (2001 年), 最小径流量为 235.2 m³/s (1999 年), 30 年平均值为 540.0 m³/s, 变差系数为 0.3。丰水期平均径流量是枯水期平均径流量的 5 倍, 且丰水期最大径流量与最小径流量与年际最大与最小径流量相同, 主要原因是丰水期降雨量大,

对漠阳江流域的径流量的产生量作用巨大。

漠阳江流域 360 个月中最小径流量为 $10.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (2005 年 2 月), 最大径流量为 $3042.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (2001 年 6 月), 月份差异巨大。

3.2 水环境容量的时间分布

3.2.1 年际变化

在完成 HSPF 模型验证之后, 模拟估算漠阳江流域各个子流域连续 30 年的径流量, 结合相关的河网、流速等物理数据, 利用验证后的水环境容量模型, 计算出漠阳江流域 COD 与氨氮的逐年环境容量变化曲线(图 6)。可以看出, COD 与氨氮的容量走势与年际降雨量走势基本上一致, COD 容量整体上是氨氮的 25 倍左右。1983—2012 年共 30 年的 COD 容量最大值为 27.42 万 t/a, 最小值为 15.44 万 t/a, 平均容量为 20.92 万 t/a, 变差系数为 0.15; 氨氮容量最大值为 1.35 万 t/a, 最小值为 0.45 万

t/a, 平均容量为 0.83 万 t/a, 变差系数为 0.27。

将 30 年 COD 与氨氮的容量数据对应的保证率进行统计, 结果如图 7 所示。可以看出: 1) 保证率随容量的增大而逐渐减小, 在 3% 左右的时候出现减缓拐点, 主要原因是高于 25.5 万 t/a 的容量 (3% 保证率) 需要较为极端的气象情况 (2001 年降雨量较为极端) 才会出现, 这个区间内容量的不确定性较大, 因此小于 3% 保证率的容量减缓趋势不明显; 2) 在 90% (传统的水文设计条件), 50% 和 10% 保证率水文年下, 漠阳江流域 COD 的环境容量分别为 16.45, 21.84 和 24.97 万 t/a, 氨氮的环境容量分别为 0.51, 0.88 和 1.14 万 t/a; 3) 利用该曲线可以在漠阳江流域科学地利用水环境容量, 以平水年 2010 年为例, 若全流域 COD 的排放量达到 COD 的容量 (21.4 万 t/a), 则漠阳江流域超负荷排放的概率是 50%。

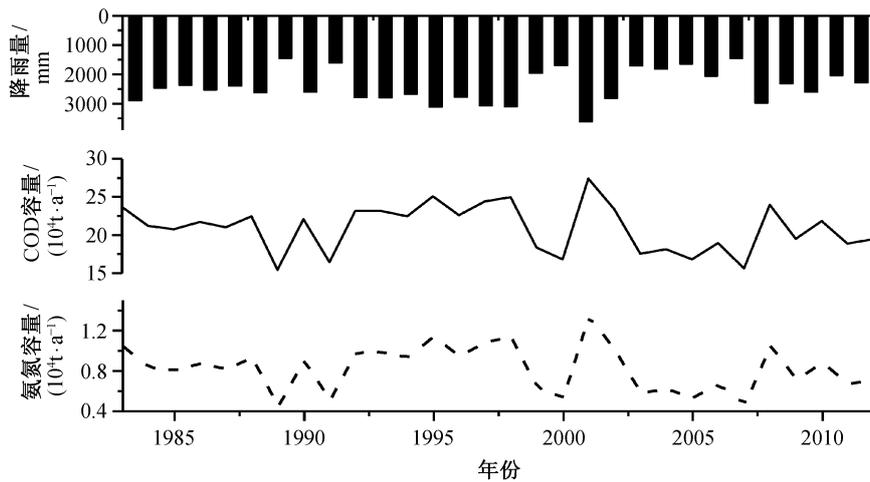


图 6 漠阳江流域 COD 与氨氮容量

Fig. 6 COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ capacity of Moyang River basin

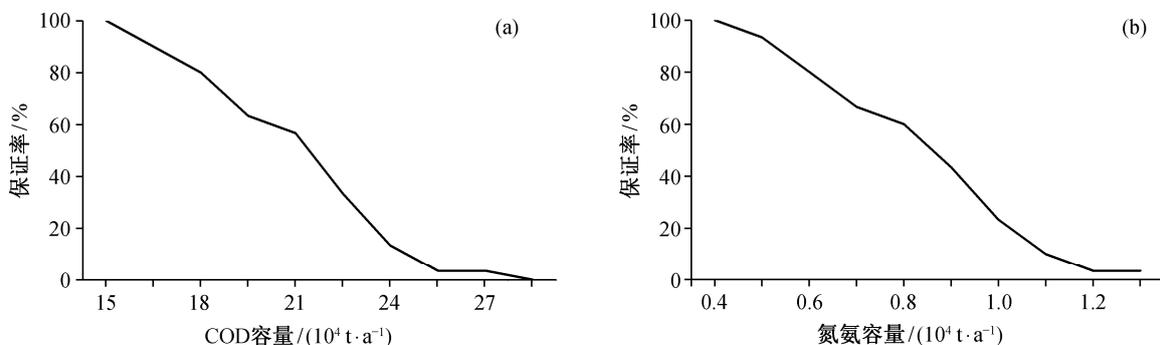


图 7 漠阳江流域 COD (a) 与氨氮 (b) 容量的保证率

Fig. 7 Assurance rate of COD (a) and $\text{NH}_3\text{-N}$ (b) capacity in Moyang River basin

3.2.2 季节变化

对漠阳江流域各个水文年枯水期(1—3 月以及 10—12 月)与丰水期(4—9 月)的环境容量进行统计,如图 8 所示。可以看出: 1) 相同保证率的 COD 丰水期的容量都是枯水期容量的 2 倍左右, 氨氮丰水期的容量是枯水期容量的 3 倍左右, 季节性明显; 2) 在 90%(传统的水文设计条件), 50%和 10%保证率水文年下, 漠阳江流域 COD 雨季的环境容量分别为 9.3, 12.92 和 15 万 t/a, COD 旱季的环境容量分别为 4.69, 5.73 和 7.35 万 t/a, 氨氮雨季的环境容量分别为 0.37, 0.69 和 0.9 万 t/a, 氨氮旱季的环境容量分别为 0.08, 0.14 和 0.23 万 t/a; 3) 保证率越小, COD 与氨氮的容量在丰水期与枯水期的差异越大, 主要原因是漠阳江流域降水季节分明, 丰水期降雨量大, 导致丰水期比枯水期容量大, 而枯水期的降雨量的影响在于基流(基流在年际变化中保持相

对稳定); 4) COD 与氨氮在枯水期和丰水期的变化趋势基本上一致, 且容量与降雨量的关系并非简单的线性关系, 雨季的保证率所对应的容量变化幅度较大, 旱季较小。

3.2.3 逐月变化

对漠阳江全流域 30 年逐月的 COD 与氨氮环境容量进行统计分析, 结果见图 9。可以看出: 1) 在逐月变化图中, 各月份平均数与中位数逐月变化走势一致, 以中位数为标准, COD 与氨氮的容量在 1 月最小, 分别是 0.7 和 101.84 t/a, 1 至 6 月逐月升高, 并在 6 月达到最大容量, 分别是 2.4 和 1385.27 t/a, 然后在 6 至 12 月逐月减少; 2) 对于 COD 容量的 12 个箱体数据, 丰水期(4—9 月)的容量较大, 枯水期(1—3 月, 10—12 月)的容量较小, 且丰水期容量数据之间的变幅大, 变差系数也大, 丰水期容量最大值为 5.44 万 t/a (2001 年 6 月), 最小值为 0.65

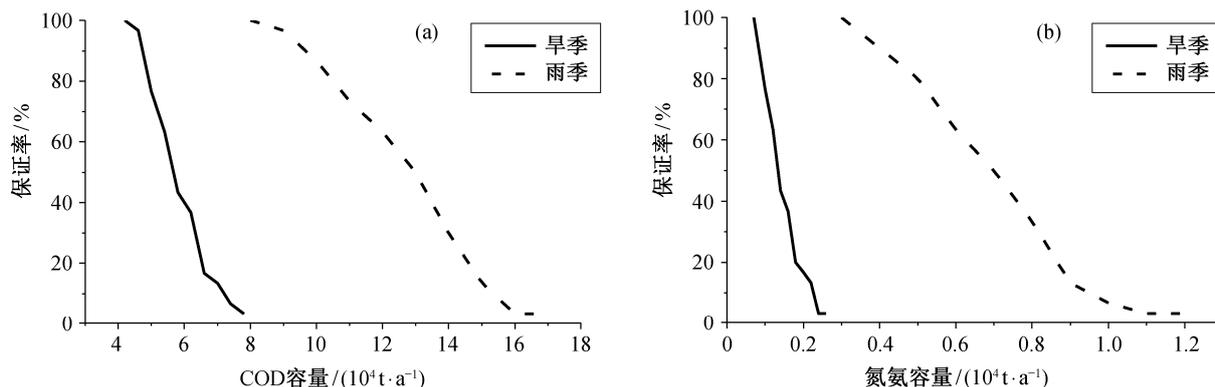


图 8 漠阳江流域丰水期与枯水期 COD (a)与氨氮(b)容量

Fig. 8 COD (a) and NH₃-N (b) capacity of wet seasons and dry seasons in Moyang River basin

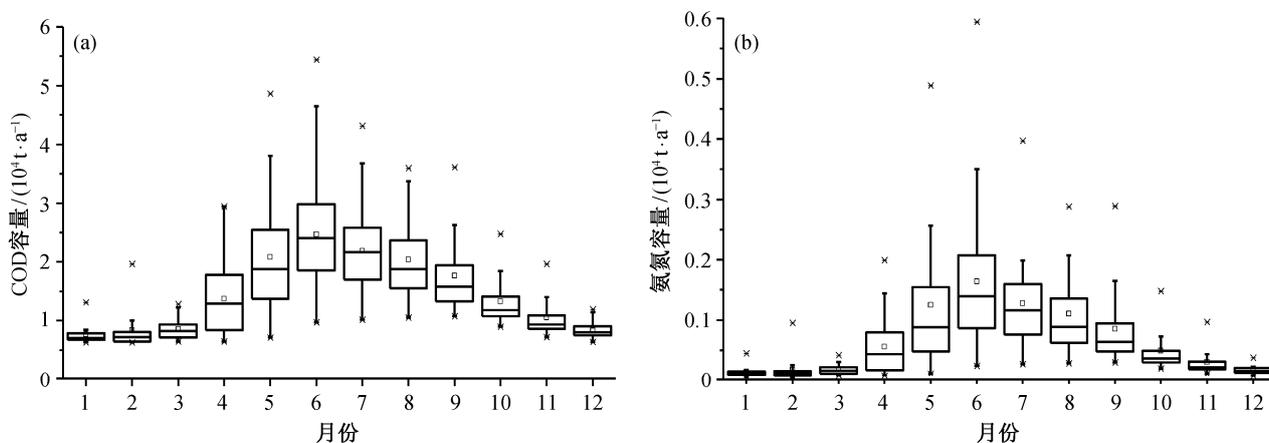


图 9 漠阳江流域 COD (a)与氨氮(b)环境容量逐月变化

Fig. 9 Monthly capacity of COD (a) and NH₃-N (b) in Moyang River basin

万 t/a (1994 年 4 月), 极差为 4.79 万 t/a, 变差系数为 0.44; 枯水期容量最大值为 1.97 万 t/a (1990 年 2 月), 最小值为 0.63 万 t/a (2005 年 2 月), 极差为 1.34 万 t/a, 变差系数为 0.34。主要原因是丰水期雨量较大, 丰水期容量的影响因素更多, 更为复杂。

3.3 空间分布

选取平水年 2010 年为空间分布研究的基准年, 漠阳江各个子流域 COD 与氨氮单位面积的环境容量统计结果见图 10。可以看出以下几点。1) 单位面积 COD 容量与单位面积氨氮容量的空间分布基本上相同。2) 以 COD 为例, 漠阳江干流的沿河变化是由漠阳江上游的 95.27 t/km^2 减小到漠阳江中游的 51.62 t/km^2 , 再增大到漠阳江下游的 77.32 t/km^2 。上游到中游 COD 的减小主要是由于漠阳江上游水质较好, 而在上游及中游的各条支流汇入一定浓度的 COD 后, 中游能容纳的 COD 量变小, 而面积又增大, 因此单位面积容量减小。中游到下游 COD 的增大是因为下游的水质目标是三类水, 而上游与中游的水质目标是二类水, 所以下游能容纳更多的 COD, 但因为其面积较大, 所以其单位面积的 COD 容量比中游大, 但没有上游大。3) 除去水库以及漠阳江的干流流域, 漠阳江一级支流与二级支流单位面积的 COD 容量较小。一级支流中西山河下游流域容量(77.83 t/km^2)最大, 主要原因是西山河下游流域有多条支流汇入, 流量大, 坡度大, 且流域面积小; 大八河流域容量(5.37 t/km^2)最小, 主要原因是大八河流域流量小, 坡度小, 面积大, 且城镇及居民用地所形成的不透水地面面积大。对

于漠阳江流域其他一级二级支流, 其承载力(以单位面积的环境容量表示)的大小由流域面积、流量、坡度以及土地利用等因素综合决定。

4 结论

根据漠阳江的实际情况, 在水文资料不足的情况下, 本文利用水文模型 HSPF 实现对各个子流域时间空间上水文数据计算, 并将水文模型与一维稳态水质数学模型相结合, 计算得到流域水环境容量总量的时空分布, 结论如下。

1) HSPF 模型对于水文过程的模拟结果中, 2009 年的相对误差为 6.06%, 2010 年的相对误差为 11.7%, 月模拟值与观测值相对误差均小于 15%, Nash 系数在 0.9 以上, 曲线走向一致, 可较好地反映漠阳江流域的水文过程。一维稳态水质数学模型的对比资料显示模拟值与实测值相对误差均在 10% 左右, Nash-Sutcliffe 系数在 0.8 以上, 且浓度沿河变化趋势基本上相同, 模拟结果符合漠阳江干流的水质变化情况。

2) 漠阳江 30 年的容量统计分析显示: 漠阳江流域雨量充沛, COD 与氨氮环境容量很大, 30 年容量变化曲线与降雨变化曲线走势基本上一致; 枯水期与丰水期季节差异明显, 丰水期容量远大于枯水期容量。对选取的 5 个代表性水文年的容量统计结果分析得出: 漠阳江流域环境容量随保证率增大呈现增长减缓的趋势; 漠阳江流域丰水期容量变幅较大, 变差系数大; 漠阳江流域最枯月为 1 月, 最丰月为 6 月。

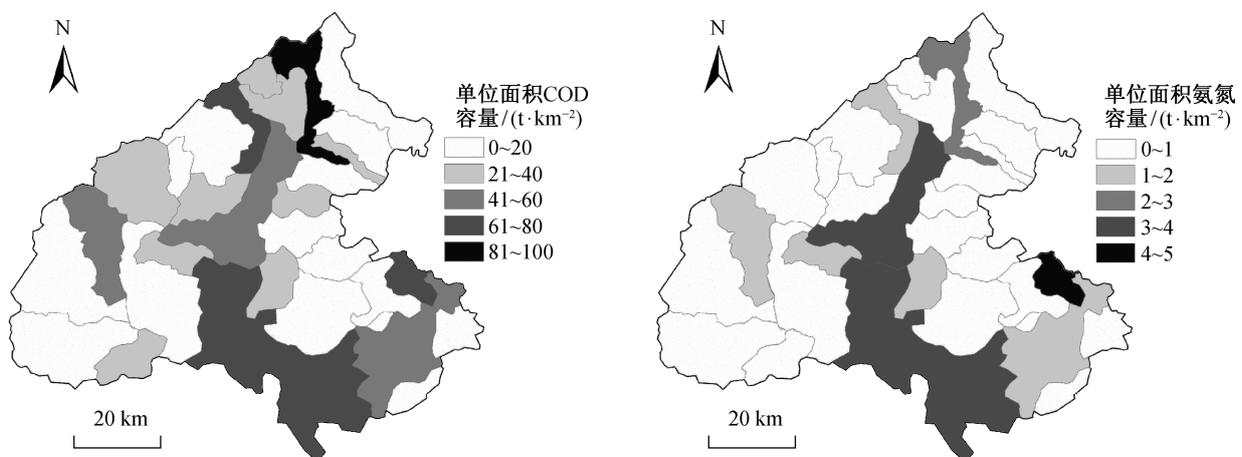


图 10 漠阳江流域单位面积 COD (a)与氨氮(b)容量的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of COD (a) and $\text{NH}_3\text{-N}$ (b) per unit in Moyang River basin

3) 以单位面积的环境容量表示漠阳江流域各个子流域的承载力, 统计结果表明: 漠阳江干流流域承载力较大, 漠阳江干流的一级与二级支流的承载力较小; 其水环境承载力由流域面积、流量、坡度以及土地利用等因素综合决定。

参考文献

- [1] 陈文颖, 方栋, 薛大知, 等. 总量控制优化治理投资费用分摊问题的分析与处理. 清华大学学报: 自然科学版, 1998, 38(4): 7-11
- [2] 陆海曙. 基于博弈论的流域水资源利用冲突及初始水权分配研究[D]. 南京: 河海大学, 2007: 4-31
- [3] 鲍全盛, 王华东, 曹利军. 中国河流环境容量区划研究. 中国环境科学, 1996, 16(2): 87-91
- [4] 张宇楠, 赵文晋. 水环境容量总量分配存在的问题及建议. 科学技术与工程, 2010, 10(4): 1088-1092
- [5] Johnson M, Coon W, Mehta V. Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hillslope dominated watershed in the northeastern US: a comparison of HSPF and SMR. *Journal of Hydrology*, 2003, 284: 57-76
- [6] 薛亦峰, 王晓燕, 王立峰, 等. 基于 HSPF 模型的大阁河流域径流量模拟. 环境科学与技术, 2009, 32(10): 103-107
- [7] 石赟赟, 董延军, 李杰, 等. 东江流域土地覆被变化的水文响应模拟研究. 人民珠江, 2009, 30(6): 27-30
- [8] 李燕, 李兆富, 席庆. HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究. 环境科学, 2013, 34(6): 2139-2145
- [9] Cryer S A, Fouch M A, Peacock A L, et al. Characterizing agrochemical patterns and effective BMPs for surface waters using mechanistic modeling and GIS. *Environmental Modeling & Assessment*, 2001, 6(3): 195-208
- [10] Alarcon V J, McAnally W, Ervin G, et al. Using MODIS land-use/land-cover data and hydrological modeling for estimating nutrient concentrations // *Computational Science and Its Applications-ICCSA 2010*. Berlin: Springer, 2010: 501-514
- [11] 董延军, 邓家泉, 李杰, 等. 基于 HSPF 的东江分布式水文模型构建. 长江科学院院报, 2011, 28(9): 57-63
- [12] Bicknell B R, Imhoff J C, Kittle J L, et al. *Hydrological Simulation Program — FORTRAN, User's Manual for version 12*. National Exposure Research Laboratory, US EPA, Georgia, 2001
- [13] Donigian A S Jr, Imhoff J C, Kittle J L Jr. *HSPFParm: an interactive database of HSPF model parameters version 1.0*. Washington DC: US EPA Office of Water, 1999
- [14] 彭进平, 逢勇, 李一平. 湛江市区域水环境容量的计算研究. 中国给水排水, 2006, 22(16): 98-102
- [15] HJ/T 2.1-93 环境影响评价技术导则[S]. 1993