

基于径流量模拟的渭河流域有机污染负荷削减方案研究^{*}

赵串串¹, 王晓昌², 马宏瑞¹, 张荔²

(1. 陕西科技大学资源与环境学院 西安 710021; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院 西安 710055)

提 要: 采用分布式水文模型(GBHM₂), 基于GIS/RS平台, 按照渭河流域现状地理、地貌、土地利用类型、植被覆盖条件和2004年社会经济情况, 构建了模型需要的空间数据库与属性数据库, 模拟了研究区域渭河流域现状条件下, 9个子流域日径流量的变化, 取得了满意的成果。在此基础上, 借助GIS技术, 分析了流域工业与生活污染源COD_{Cr}在各模拟子流域中的分布情况, 结合流域丰、枯水期COD_{Cr}这一特征指标的变化, 同时考虑了流域点源与面源有机污染负荷的影响, 确定了各模拟子流域年COD_{Cr}污染负荷削减系数, 实现流域水环境功能目标, 流域模拟年COD_{Cr}污染负荷削减总量为15.7万t。

关 键 词: 分布式水文模型; GBHM₂; 渭河流域; 径流模拟; 污染负荷; 削减

中图分类号: X52

文献标识码: A

1 背景

渭河是黄河的最大一级支流, 也是陕西关中地区唯一的废污水承纳和排泄通道, 全省80%以上的工业废水和生活污水通过渭河排泄。按国家要求渭河出境水达IV类标准计算, 渭河的环境容量(包含稀释容量和自净容量)为COD_{Cr}每年7万t^[1], 但2004年渭河流域的COD_{Cr}实际排放量超过27万t, 占全省排放量的80%以上, 超过环境容量的3倍左右。

基于以上事实分析, 有机污染负荷削减是保护该流域水环境达标的有效途径。实际案例表明, TMDL计划对于改善水体质量是行之有效的。美国许多州已对受损水体实施了最大日负荷总量(TMDL, Total Maximum Daily Loads)^[2-3]计划。为此, 在渭河流域有机污染负荷削减量探讨方面, 引入美国环保(EPA)局提出的最大日负荷总量(TMDL, Total Maximum Daily Loads)和最大年负荷总量(TMYL, Total Maximum Yearly Loads)计划。选用清华大学杨大文教授开发的分布式水文模型GBHM₂(Geomorphology-based hydrological model), 在现状条件下, 模拟流域水文信息的日变化情况。结合流域丰、枯水期COD_{Cr}这一特征指标在整个河段达标与否的情况, 同时考虑了流域点源与面源有机污染负荷的影响, 确定了各模拟子流域年COD_{Cr}污染负荷削减系数, 探讨研究渭河流域按功能区达标的情况下, 各子流域模拟年污染负荷削减量。

2 GBHM₂模型在渭河流域水文信息模拟中的应用

2.1 GBHM₂模型

GBHM₂模型, 是杨大文教授1998年开发的, 模型^[4]首先将整个流域逐级划分为若干单元流域; 然后利用面积函数和宽度函数概化流域地形特性, 将每个单元流域划分为一系列“流带-坡面”单元。坡面流单元即是GBHM₂中的基本计算单元。这样, 一方面大大减少了计算单元的数目, 另一方面又能够充分反映土地利用类型等除地形特性以外的流域空间特性。相对于TOPMODEL来说, GBHM₂对水文要素的空间变异性考虑更为完善, 但是计算用时增加不多; 相对于MIKESHE模型, GBHM₂的计算耗时又大幅度缩短。因此, GBHM₂可以应用于大流域的长系列水文过程模拟。

^{*} 收稿日期: 2009-2-2。

基金项目: 日本科学技术振兴机构(JST)国际合作项目资助。

作者简介: 赵串串(1976-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事流域水资源与生态环境保护研究。E-mail: sxkjdxzcc@126.com

GBHM₂ 模型的"流带-坡面"划分体系(图 1)。定义 x 为距离单元流域出口的流距(流距:沿水流方向的流线长),面积函数为自单元流域出口至流带 dx 的累积面积对流距 x 的微分(式 1)。面积函数 A(x) 的量纲与流距 x 的量纲相同,均为(L)。

$$A(x)=\frac{dAc(x)}{dx}=\frac{Ac(x)-Ac(x-dx)}{dx}$$

(1)

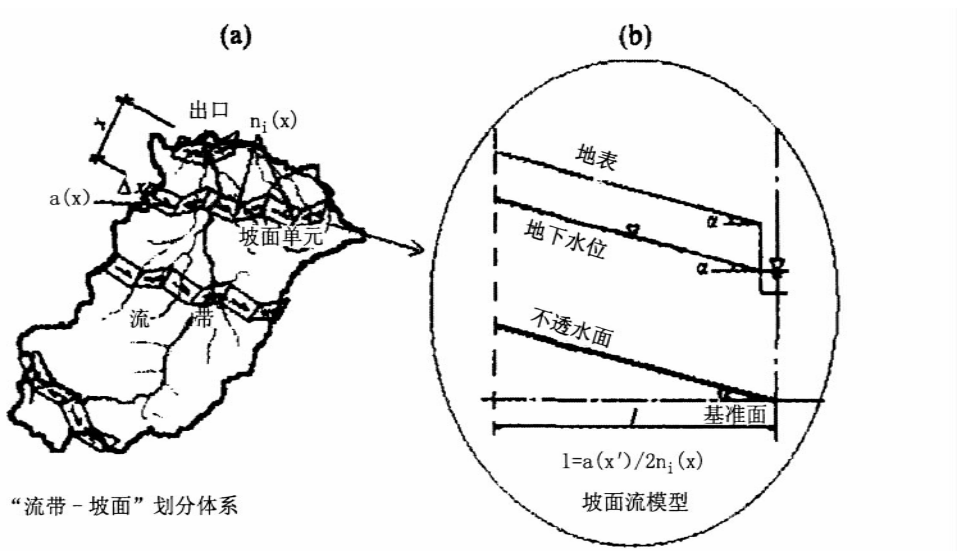


图 1 GBHM₂模型的"流带-坡面"划分体系

Fig.1 Hillslope elements as the minimum study unit of GBHM₂

2.2 模型数据库构建

GBHM₂ 模型需要在每个网格单元上运行,因此数据库文件需按 DEM 网格单元构建。该文依据渭河流域 12 张 1:250000 电子全要素地图,基于 arcgis9.0 获取流域数字高程模型 DEM^[5-8]。其栅格大小取 2500m×2500m,即模型的空间分辨率为 2.5km。在流域 DEM 模型建立的基础上,借助 Arcgis9.0 应用软件的 Spatial Analysis 模块^[9-10],假定流域的给水面

积为 300m²,提取了栅格水流流向、流域分水线、流域直径、河网、流域面积、沟壑深度、沿河道比降和河段槽蓄量等。

依据 DEM 提取的渭河流域水系分布,按照流域三级划分方法,共获得 65 个子流域。采用巴西工程师 Pfafstetter 提出的河网分级编码方法,对所划分的三级子流域进行编码,依次为 100,210,220,230,...,990(图 2)。其中 9 个一级子流域的编码分别记作 ws_100,ws_200,ws_300,ws_400,...,ws_900。9 个主要子流域的相关信息(表 1)。

GBHM₂ 模型的空间数据库(如地形数据库、下垫面数据库等)构建,主要借助 GIS/RS 软件;属性数据库构建,借助于相关统计年鉴资料,基于同等比例尺的流域行政区划图获取相关信息,与空间数据库的网格单元相叠加所得。

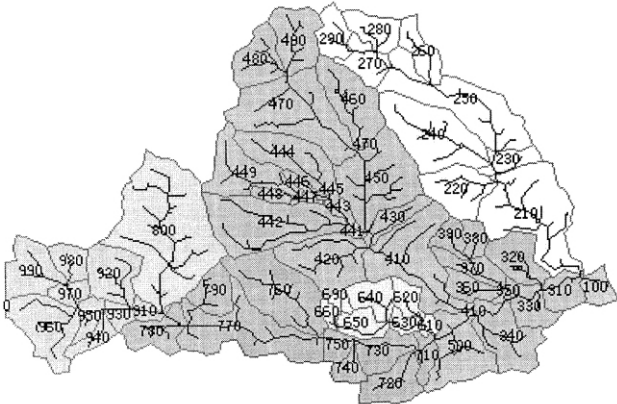


图 2 渭河流域水系及子流域划分

Fig.2 Extraction of sub-watershed in Weihe basin

表 1 渭河 9 个主要子流域相关信息

Tab.1 Characteristic of 9 main sub-watersheds in Weihe basin

子流域 编码	子流域面积 (km ²)	面积比例 %	控制城镇
ws_100	912.5	1	潼关
ws_200	27256.25	20	华阴、华县
ws_300	12462.5	9	临渭县
ws_400	44293.75	32	高陵县
ws_500	3450	3	咸阳、西安市区
ws_600	5106.25	4	武功、兴平
ws_700	19881.25	15	岐山、扶风县
ws_800	10800	8	宁夏
ws_900	12981.25	9	甘肃

2.2.1 流域地形数据库

在流域 DEM 网格基础上,通过 Arc gis9.0 软件的 Grid 模块^[1],把等高线数据转化为 ASCII 格式的栅格数据文件,生成模型所需要的. asc 文件数据,作为 GBHM₂ 模型的空间地形数据。

2.2.2 流域土壤类型数据

研究区域的土壤分类源于国际粮农组织和国际教科文组织 (FAO - UNESCO) 的全球土壤分类。原始地图的比例尺为 1:500 万,提供了数字地图 (全球坐标 5 分网格) 及土壤的物理参数^[2-13]。每个网格对应的土壤类型水力参数的选取和确定是土壤中水分运动和污染物迁移转化的基础。

渭河流域土壤类型比较复杂,分为 15 类。按照 GBHM₂ 模型程序运行的需要,流域内的每个网格对应一种土壤类型代码 (图 3)。其代码按照每个网格内面积比例最大的一类土壤类型确定,生成 GBHM₂ 模型所需的土壤类型代码数据文件。

2.2.3 流域气象数据库

(1) 平均降雨量。采用泰森多边形法,依据陕西省 2001 年 12 个气象站的日降雨数据,插值得到流域气象站降雨泰森多边形 (图 4)。在此基础上,推求得到 GBHM₂ 模型所需的降雨数据文件。

(2) 平均蒸发量。GBHM₂ 模型所需蒸发数据是流域内各种下垫面条件下的总蒸散 (发),属广义的陆面蒸散 (发),包括水面蒸发和狭义的陆面蒸发。模型中的实际蒸散发数据在考虑叶面指数、土壤含水量及根系分布的基础上,由潜在蒸发量计算确定;模型中的平均蒸发量则依据单元实际蒸散发,用泰森多边形插值确定。

2.3 模型模拟结果

以 2001 年为模拟水平年,输入 GBHM₂ 模型所需的各类数据文件,在 Compaq Visual Fortan 6.5 软件上运行模型程序,输出了模拟水平年各子流域日径流量。

为验证模型模拟结果的有效性,选用渭河干流陕西段上、中、下游 3 个水文站 (渭河林家村站、咸阳水文站和华县站) 2001 年的日径流量实测数据为依据,对 GBHM₂ 模型输出的渭河上游 (ws_700)、中游 (ws_500)、下游 (ws_200) 3 个子流域的日径流量模拟结果进行了对比分析。图 5、图 6 和图 7 是渭河流域 2001 年三个子流域日径流量的模拟值与实测值对比图。

以日径流量的模拟值与实测值的拟合程度作为控制指标,将反映拟合程度的确定性系数 R 作为目标函数,该确定性系数 R 按照 (2) 式计算,用计算得到的 R 值来检验模型的模拟效果^[6-8]。R 越趋近于 1 说

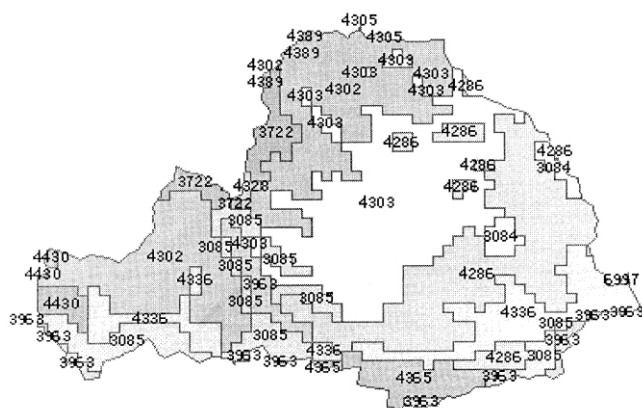


图 3 渭河流域土壤类型代码

Fig. 3 Codes of soil types in Weihe basin



图 4 渭河流域气象站降雨泰森多边形

Fig. 4 Distribution of Thiessen Polygon on rain station in Weihe basin

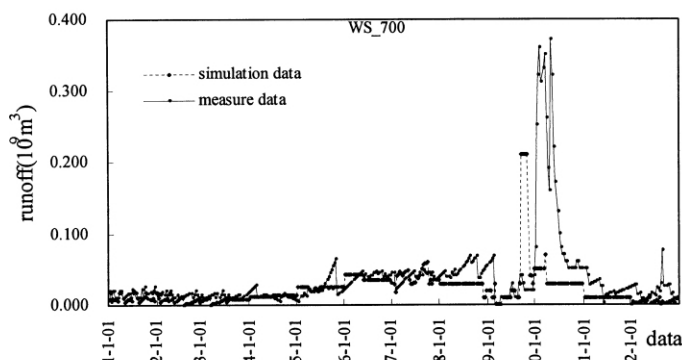


图 5 子流域 ws_700 日径流量的模拟值与实测值对比 (2001 年)

Fig. 5 Contrast of simulation and observation values of runoff per day in sub - watershed ws_700 (2001)

明模型对流域的日径流量模拟效果越好。

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{1i} - Q_{2i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{1i} - \overline{Q}_{2i})^2} \quad (2)$$

式中： Q_{1i} :模拟年第*i*天的实测径流量;
 Q_{2i} :模拟年第*i*天的模拟径流量; $\overline{Q}_{2i}$:模拟年
实测径流量的日平均值; n :模拟年天数。

带入 3 个子流域日径流量模拟数据,结果
表明,GBHM₂ 模型的确定性系数都达到了
75% 以上,丰水期模拟值与实测值出现时间顺
序有所偏差,枯水期模拟值与实测值基本上是
趋于吻合的。

3 各子流域污染负荷削减量分析

3.1 子流域污染负荷削减系数确定

对比分析了渭河流域近 7 年来丰、枯水期
实测水质指标 COD_{Cr} 的变化趋势,结果表明,
丰水期整个河段都达到地表水 III 类标准;枯
水期整个河段 COD_{Cr} 均是劣 V 类水。

基于该流域 2000 年 - 2005 年实际监测资
料分析,丰水期 COD_{Cr} 整个河段水环境均能够
按照功能区达标,枯水期整个河段水环境标准
COD_{Cr} 均不能达标,结合各子流域日径流量的
模拟结果,计算各子流域在丰、枯水期径流量
的平均值。以丰水期水环境按功能区达标为
参考基础,计算各子流域 COD_{Cr} 污染负荷削减
系数,同时考虑了流域点源与面源有机污染负
荷的影响,计算公式如式(3)所示。

$$\text{COD}_{Cr} \text{ 削减系数} = 1 - \frac{\text{子流域枯水期径流量的平均值}}{\text{子流域丰水期径流量的平均值}} \quad (3)$$

3.2 子流域污染负荷削减量的确定

根据本次日径流模拟结果,依据公式 2 确定的各子流域削减系数,同时考虑该流域工业和生活 COD_{Cr}
负荷的分布特征,确定各子流域工业和生活 COD_{Cr} 负荷削减计算量(表 2)。

表 2 各子流域入河工业和生活 COD_{Cr} 负荷及其削减量

Tab.2 Current and reducing COD_{Cr} pollution load in each sub watershed

子流域	子流域 面积(km ²)	入河工业 COD _{Cr} (万 t/a)	入河生活 COD _{Cr} (万 t/a)	总入河 COD _{Cr} (万 t/a)	削减 系数	削减 COD _{Cr} (万 t/a)
ws _100	913	0.00	0.01	0.01	0.697	0.0
ws _200	27256	0.98	0.62	1.60	0.456	0.7
ws _300	12463	2.38	4.16	6.54	0.730	4.8
ws _400	44294	0.02	1.43	1.45	0.524	0.8
ws _500	3450	2.74	4.03	6.77	0.921	6.2
ws _600	5106	2.09	0.92	3.01	0.286	0.9
ws _700	19881	2.22	2.43	4.65	0.392	1.8
ws _800	10800	0.00	0.00	0.00	0	0.0
ws _900	12981	0.00	0.00	0.00	0	0.0
Total	137144			24.03		15.7

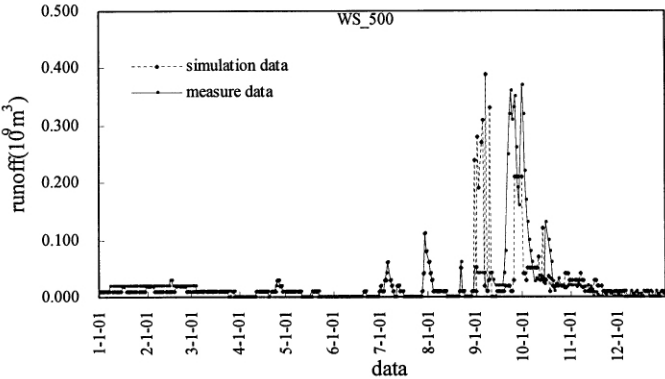


图 6 子流域 ws _500 日径流量的模拟值与实测值对比(2001 年)
Fig.6 Contrast of simulation and observation values of
runoff per day in sub - watershed ws _500 (2001)

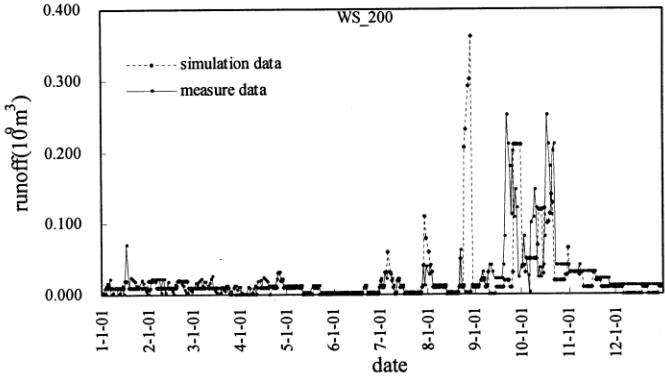


图 7 子流域 ws _200 日径流量的模拟值与实测值对比(2001 年)
Fig.7 Contrast of simulation and observation values of
runoff per day in sub - watershed ws _200 (2001)

由表2可以看出,流域 COD_{Cr} 负荷削减主要集中在 ws_{500} 、 ws_{300} 、 ws_{700} 、 ws_{600} 、 ws_{400} 和 ws_{200} 六个子流域中,其模拟年削减负荷量分别为6.2万t、4.8万t、1.8万t、0.9万t、0.8万t、0.7万t。 ws_{100} 、 ws_{800} 和 ws_{900} 三个子流域模拟年削减量为0t,即不需要削减。

4 结论与建议

通过应用分布式水文模型 $GBHM_2$ 对流域日径流信息的模拟结果分析,参考流域实测有机污染负荷 COD_{Cr} 丰枯水期的水质变化特征,针对各子流域点源有机污染负荷量的分布情况,计算了各子流域点源有机污染负荷模拟年对应削减量(表2)。渭河流域 COD_{Cr} 污染负荷削减,主要集中在 ws_{500} 和 ws_{300} 两个子流域中,即主要集中在咸阳市辖区和西安市辖区附近,且生活和工业 COD_{Cr} 负荷几乎各占一半。确定出各子流域点源有机污染负荷削减系数,以实现流域水环境按功能达标的要求。

综合以上分析,在流域污染防治方面,为更好地完成《国家环境保护"十一五"规划》确保到2010年化学需氧量比2005年削减10%的目标提供借鉴方法。建议应用子流域的日径流量信息,建立流域尺度的最大日排污负荷(TMDL)总量管理计划,实现流域点源与非点源污染问题的动态管理。如在渭河流域污染控制方面,可以根据子流域日径流量的时空分布特征,确定流域污染负荷削减系数;同时依据流域内的有机污染分布特征,综合考虑子流域污染负荷削减问题。

参考文献

- [1] 陕西省统计局. 陕西省统计年鉴 1993-2003 [M]. 北京:中国统计出版社 1994-2004.
- [2] USEPA. Overview of current TMDL program and regulations [OL]. <http://www.epa.gov/owow/tmdl.html>, 2003.
- [3] 刑乃春,陈捍华. TMDL计划的背景、发展进程及组成框架 [J]. 水利科技与经济, 2005, 11(9): 534-537.
- [4] Yang Dawen. Comparison of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability [J]. Hydrol. Process, 2000(14): 403-416.
- [5] 章孝灿. 快速高精度DEM生成技术研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2002.
- [6] 熊立华,郭生练, Kieran MIO'Connor. 利用DEM提取地貌指数的方法述评 [J]. 水科学进展, 2002, 13(6): 775-780.
- [7] 李丽,郝振纯. 基于DEM的流域特征提取综述 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 251-256.
- [8] 马彦涛,薛金凤,梁涛,等. 基于GIS的溶解态氮磷负荷模型研究 [J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1765-1769.
- [9] 王中根,刘昌明,吴险峰. 基于DEM的分布式水文模型研究综述 [J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 168-173.
- [10] 王加虎,郝振纯,李丽. 基于DEM和主干河网信息提取数字水系研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(2): 119-122.
- [11] 孙友波. 基于DEM的水文特征信息的提取和可视化的研究与实现 [D]. 北京:首都师范大学, 2005.
- [12] FAO. Land and Water Digital Media Series N-1, December, ISBN92-5-104050-8, 1999.
- [13] IGBP-DIS. Global Soil data products CD-rom. International geosphere-Biosphere Programme, Data and Information System, Potsdam, Germany [M]. Available from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U. S. A., 2000.

Runoff simulation approach as a framework for mitigation of COD_{Cr} pollution loading in Weihe Basin

ZHAO Chuanchuan¹, WANG Xiaochang², MA Hongrui¹, ZHANG Li²

(1. College of Resource & Environment, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, P. R. China; 2. School of Environment and Municipal Engineer, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: According to the need of $GBHM_2$ model, with the assistance of GIS and some other statistical literatures, two categories of database including the spatial and attributive information of the Weihe River basin were obtained. This model was applied to simulate the total water quantity of the Weihe River in different inputs and the spatial and temporal distribution characteristics of the current runoff and precipitation of each sub-watershed. The study results were sound. Finally, based on the pollution load and distribution characteristics of each sub-watershed, together with the analysis of simulated results of daily runoff, the program of reducing pollution load for each sub-watershed was put forward respectively. To protect such water environment, reducing total amount of pollution load was 0.157 billion ton in simulation year. The thesis could be a valuable reference to the policy-making body of the Weihe River basin. Moreover, the thesis provided a detailed technical pattern for an overall pollution harnessing and management of water resources concerning the basin.

Key words: distributed hydrological model; $GBHM_2$; the Weihe river basin; runoff simulation; pollution load; mitigation