

基于 GIS 的近海剩余环境容量计算模型

柯丽娜¹, 王权明², 徐丽雯¹, 姜 昕³, 杨山力¹

(1. 辽宁省自然地理与空间信息科学重点实验室, 辽宁 大连 116029; 2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

摘要: 探讨一种基于 GIS 克里格插值方法的剩余环境容量计算方法, 通过 GIS 地统计分析插值模型将水质模拟问题转化为数学统计问题, 充分利用水质水体、沉积物监测数据, 采用克里格插值法对污染物浓度和水深在局部海域内进行插值, 将研究区域离散为一个个的均匀栅格单元, 比较每个单元污染物浓度与水质目标之间的差值, 从而估算得到研究海域的剩余环境容量。通过 2009 年 8 月锦州湾剩余环境容量的计算实例表明, 基于 GIS 的剩余环境容量初步计算方法在资料缺乏地区是十分简便、有效的, 这为海域开发利用区环境管理与规划提供了参考。

关键词: 剩余环境容量; 克里格插值法; GIS; 锦州湾

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)07-0112-06

doi: 10.11759/hyxx20140830001

为改善水和大气环境的质量, 日本学者吉川博将环境容量的概念引入到环境保护领域, 并定义为“环境容量是由自然还原能力、人工处理设施和人们对环境的意见等所规定的整个生物圈内所容许的活动容量”^[1]。1986 年联合国海洋污染专家小组将水环境容量定义为: 水环境容量是指在不影响水的正常用途的情况下, 水体所能容纳的污染物的量或自身调节净化并保持生态平衡的能力^[2]。目前海域水环境容量的计算多是在对污染物输移、扩散和转化规律研究的基础上, 建立多维水质方程、水动力学方程, 确定研究区平衡浓度场, 从而与监测区水质目标进行比较, 最终确定研究区水环境容量^[3-6]。李适宇等^[7]提出基于二维扩散的分区达标控制法, 并将分区达标控制法用于求解海域环境容量。鲍琨等^[8]综合考虑水文、水体污染来源等因素, 建立了控制断面水质与污染源的响应关系, 进而进行控制单元水环境容量的计算。谢蓉蓉等^[9]以江苏省沿海区域作为研究对象, 根据入海排污口排污方式的不同建立了两种水环境容量计算方法——沿岸排污区域水环境容量计算方法和离岸区域水环境容量计算方法。蔡惠文等^[10]提出考虑风向风速联合频率订正及污染带控制的水环境容量计算方法、王华等^[11]提出了基于非均匀分布系数的水环境容量计算方法。可以看出水环境容量的计算方法繁多, 对水环境科学管理有着重要意义。但是这些研究方法虽然拥有较强的机

理性, 能体现出研究区局部的水质变化信息, 由于污染物在实际环境的变化非常复杂^[12], 研究区污染物的扩散与衰减机理性的监测实验难以进行, 且在近海开发利用区的环境管理中, 要更关心海域现状条件下的剩余环境容量。因此, 探讨如何能够针对不同的研究目标和区域情况, 结合不同的资料条件, 用不同的模型方法建立可行的海洋剩余环境容量的计算方法, 为控制水环境污染决策服务具有重要的现实意义。因此, 本文将将以锦州湾海域为研究对象, 探讨一种新的水环境容量计算方法, 通过地理信息系统(GIS)地统计分析插值模型对研究区污染物浓度和水深数据进行离散插值, 从而与控制水质目标比较, 估算锦州湾海域的剩余环境容量, 以期在资料匮乏条件下水环境容量的估算提供一种参考。

1 基于 GIS 的水环境容量计算模型

GIS 在水文水资源、气象领域等多个领域有着非常广泛的应用, 尤其适合于将点源数据插值成连续空间表面数据, GIS 表现出无可比拟的优势, 例如数字高程模型插值分析、降雨信息插值、气温空间分

收稿日期: 2014-05-19; 修回日期: 2015-01-14

基金项目: 国家海洋局海域管理技术重点实验室开放研究基金(201303)

作者简介: 柯丽娜(1978-), 女, 辽宁大连人, 博士, 副教授, 主要从事海洋环境科学、海洋遥感及地理信息系统应用, 电话: 0411-86483206, E-mail: kekesunny@163.com

布插值、气象要素信息插值等，这些插值分析方法为水环境容量的计算提供了一种新的解决方案：把水环境容量计算模型中的污染物浓度和水深作为空间插值模型中的要素等指标进行插值模拟计算，通过插值模型和参数优化模型建立基于 GIS 的水环境容量计算模型。

1.1 基于 ArcGIS 空间插值

地统计学是以区域化变量理论为基础，借助变异函数，研究既具有随机性又具有空间相关性的自然现象的一门学科^[13]。ArcGIS 地统计分析模块是一个完整的地理信息系统地统计分析的工具包，通过工具条提供地统计分析向导，建立在大量随机样本的基础上，分析样本间规律，进行相关预测，帮助用户实现合理的表面插值^[14]。ArcGIS 地统计分析模块提供了两类插值方法：确定性内插法和克里格插

值法。

克里格插值(Kriging)又称空间局部插值法，广泛地应用于地下水模拟、土壤制图等领域，是一种很有用的地质统计格网化方法。它通过协方差函数和变异函数确定空间变量随距离变化的规律，以距离为自变量的变异函数，计算相邻变量间的关系权值，从而在有限区域内对变量进行无偏最优估计。它是一种光滑的内插方法，在数据点较多，且区域化变量存在空间相关性时，其内插的结果可信度较高。

克里格方法用公式可表示为：

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (1)$$

x_1, \dots, x_n 为区域上的系列观测点， $z(x_1), \dots, z(x_n)$ 为对应的观测值， $z^*(x_0)$ 为区域化变量在 x_0 处的值。

克里格插值的主要步骤如图 1 所示。

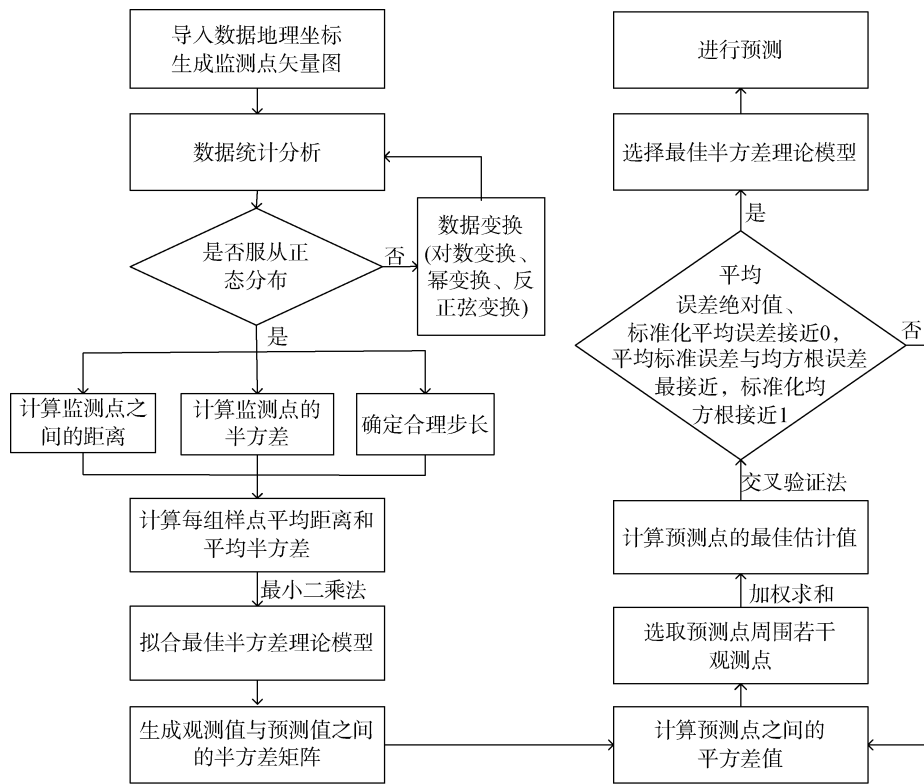


图 1 克里格插值主要步骤
Fig. 1 The main steps of Kriging

1.2 基于 GIS 的水环境容量计算

海洋环境容量实际上是研究目标海域在规定环境目标下容纳的污染物的最大负荷问题，受到水体环境要素特征、生物化学衰减机理、污染物稀释方式、污染物扩散等多个因素影响^[15-16]。本文将该问

题简化研究，将水质模拟问题转化为数学统计问题，充分利用水体水质、沉积物监测数据，利用克里格插值法对污染物浓度和水深数据进行插值，将研究区域离散为一个个的均匀栅格单元，同时栅格单元内污染物均匀分布，那么该栅格单元的剩余环境容量

计算就可以概化为单个栅格内的剩余水体环境容量及沉积物环境容量, 再根据质量守恒原理及文献^[14, 17-18]的研究结果, 该栅格单元的剩余水环境容量计算公式应为:

$$w = \alpha \times ((\beta_s - \beta_i) \times A \times h + (k_1 - d_1) \times A \times h_1 \times \rho) \quad (2)$$

式中: w 为栅格单元的剩余环境容量, mg; β_s 为污染物的控制浓度目标, mg/L; β_i 为污染物的插值模拟值浓度, mg/L; α 为不均匀系数; A 为栅格单元面积, cm^2 ; h 为栅格单元水深, cm; k_1 为单位重量沉积物释放/吸附量, mg/g; h_1 为沉积物释放有效深度, cm; d_1 为当前沉积物的污染物浓度, mg/g; ρ 为沉积物密度, g/cm^3 。

该公式没有考虑单元格之间的水量与物质交换, 忽略了污染物的迁移扩散及水体的自净能力, 因此, 仅在一些水动力条件及水体交换能力较差的滞缓区, 在资料匮乏条件下, 该公式可以作为剩余环境容量的一种初步计算方法。因滞缓区与外水体交换较弱, 其不均匀系数参考文献^[17]的湖泊水域纳污能力, 具体参数取值见表 1。

表 1 不同水域面积及不均匀系数取值
Tab. 1 The receiving pollution capacity and uneven coefficient of different areas

面积(km^2)	不均匀系数	面积(km^2)	不均匀系数
5	0.6~1.0	500~1000	0.09~0.11
5~50	0.4~0.6	1 000~3 000	0.05~0.09
50~500	0.11~0.4		

在计算出每一个单元格的剩余环境容量后, 确定水环境容量最容易超标的区域, 以最易超标区域的环境容量为区域水环境控制标准, 最终计算出研究海域剩余环境容量。

2 实例应用

2.1 研究区域概况

2.1.1 总体概况

锦州湾位于葫芦岛市和锦州市之间, 三面被陆地包围, 湾口开敞, 朝向东南, 常年平均气温 $9.4\text{ }^\circ\text{C}$, 多年平均降雨量 637.6 mm , 常风向为 NNW, 次风向为 SW, 葫芦岛和锦州市是国家重要的工业基地, 拥有锦西炼油厂、葫芦岛锌厂、锦西化工总厂等, 2009 年葫芦岛市工业企业总产值 684.5 亿元 ^[18]。作为葫芦岛市和锦州市社会经济发展重要支撑的锦州湾海域, 同时承担着容纳两市排放污水的重任, 有必要研究

锦州湾的环境容量问题。

2.1.2 水质概况

锦州湾监测点位分布如图 2 所示, 共布设了 20 个监测点, 监控海域面积 160 km^2 , 水质监测指标为化学需氧量、叶绿素、氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐、活性磷酸盐、pH、盐度、溶解氧、石油类、汞、镉、铅、铬、砷、锌铜, 沉积物监测指标为石油类、有机碳、硫化物、汞、镉、铅、砷、铜、锌、多氯联苯、六六六、滴滴涕, 监测频率为每年的 5 月、8 月、10 月。经过对锦州湾海域水质进行综合分析, 发现无机氮、化学需氧量、活性磷酸盐、铅、镉、锌等几个指标对海湾水质影响较大^[19-21], 本文对这些指标的剩余环境容量进行计算, 为水环境的治理与管理提供依据。

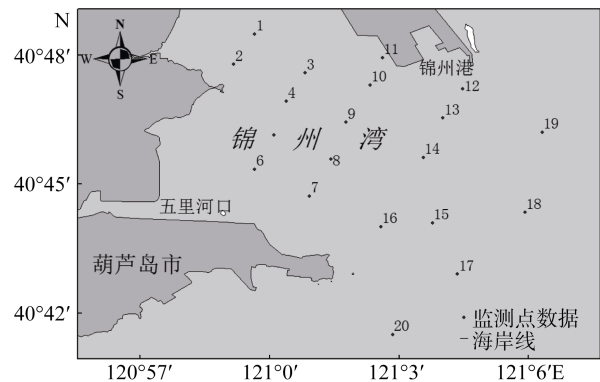


图 2 锦州湾监测及研究区域图

Fig. 2 The monitoring area and research region graph of Jinzhou Bay

2.2 无机氮等指标剩余环境容量计算

无机氮是近岸海域主要的污染物之一, 赤潮、富营养化事件都和无机氮有密切的关系, 一般 8 月份是最容易发生富营养化的季节^[19-21], 分析监测水质资料也说明 8 月份的水质状况较差, 因此在本次水环境容量计算中, 以 2009 年 8 月为基准计算该区域的水环境容量。

由于研究海域 160 km^2 , 参照表 1 取不均匀系数为 0.380, 无机氮、活性磷酸盐、化学需氧量、石油类等指标不考虑沉积物的吸附或者释放, 取 k_1 为 0, 以方便管理人员从不同的需求进行环境管理与控制。

利用 2.1 节所述步骤对水深以及无机氮、活性磷酸盐、化学需氧量、石油类等污染物浓度进行插值, 输出水深和无机氮插值结果如图 3 所示。

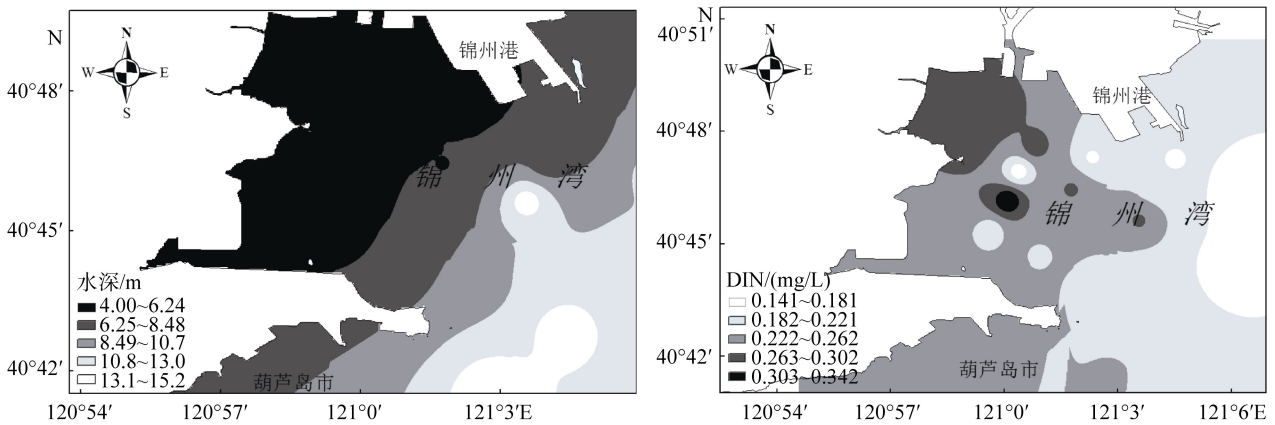


图 3 水深与无机氮插值结果

Fig. 3 The interpolation results of water depth (left) and inorganic nitrogen (right)

利用 GIS 栅格计算模块, 将不均匀系数, 单元格面积, 水深栅格数据, 污染物浓度插值数据代入公式(2), 计算得到无机氮、活性磷酸盐、化学需氧量、石油类等剩余环境容量见表 2。

2.3 重金属剩余环境容量计算

由于锦州湾海域靠近葫芦岛锌厂及来自五里河入海口陆源排污, 沉积物中重金属污染较为严重, 其中尤其 Cu、Zn、As、Cd 元素重金属含量较高, 超过 50% 的站位超出一类沉积物质量标准, 重金属大部分以非残渣态存在, 易于进入水相或被生物所利用再次释放出来, 造成二次污染^[19-24]。

由于进入水体的大部分重金属常常转移至悬浮颗粒物或底层沉积物中, 因此在对重金属环境容量进行计算时考虑沉积物的吸附作用, 即这里剩余环境容量计算既包括海域海水中重金属的剩余环境容量又包括沉积物中重金属的剩余环境容量。

重金属剩余环境容量计算中不均匀系数参照表 1, 取不均匀系数为 0.380; 锦州湾属于港口航运区, 执行 Ⅲ类海水水质标准, 计算对应海水水质标准下重金属的水环境容量; 参考文献[21-25], 不同粒径的沉积物对重金属吸附作用的影响是不同的, 粒径越小, 沉积物对重金属的吸附作用越大, 按粒径从小到大的最大吸附量分别为 28.760、20.121、15.038、12.579 mg/g, 这里取 k_1 为其平均值为 19.12 mg/g; 参考文献[21-25]确定沉积物湿密度为 1.65 g/cm^3 , 含水量为 70%, 由此确定沉积物干密度 ρ 为 0.5 g/cm^3 。由于沉积物吸附和释放在表层 10 cm 内的影响最大^[23], 因此这里沉积物深度取为 10 cm, 由此得到重金属的总环境容量见表 2。

表 2 基于 GIS 的水环境容量计算结果(单位: t)

Tab. 2 The computing result of water environmental capacity by GIS(unit: t)

水质目标	无机氮	活性磷酸盐	化学需氧量	锌	铅	镉
类	281	31	3971	527.8	46.7	10.34

3 结论

以锦州湾海域为研究对象, 通过 GIS 地统计分析插值模型对研究海域污染物浓度和水深进行离散插值, 建立基于地理信息系统的近海剩余环境容量计算方法, 从而达到对海域剩余环境容量的直接估算。锦州湾海域水环境容量计算结果为无机氮 281a, 活性磷酸盐 31a, 化学需氧量 3971a, 锌 527.8a, 铅 46.7a, 镉 10.34a。由于受来自大兴河和连山河的陆源污染影响, 锦州湾海域的溶解无机氮(DIN)浓度呈现北部高, 南部低的特点, 大兴河、连山河一带海域的 DIN 浓度高于其他区域。受靠近葫芦岛锌厂及来自五里河入海口陆源排污的影响, 锦州湾海域沉积物中重金属污染较为严重, 尤其 Cu、Zn、As、Cd 等元素含量较高。

基于 GIS 的水环境容量计算方法不依赖于水动力扩散和污染衰减条件, 将整个研究区域看作均匀混合的水体, 较其他水环境容量计算方法计算过程比较简单。虽然忽略了各点之间污染物的对流扩散, 没有考虑排污口的影响, 计算得到的是瞬时的剩余环境容量, 但该环境容量计算方法对水环境管理仍有一定的参考价值, 可以作为海域水环境容量的初步调查分析, 或是资料匮乏条件下作为一种先行的计算方法。本研究中由于锦州湾剩余环境容量计算

采用不均匀系数参考湖泊环境容量计算方法,所以得到的锦州湾的海洋环境容量的结果不够精准,有待进一步完善。

参考文献:

- [1] 王华东,夏青.环境容量研究进展[J].环境科学与技术, 1983, (1): 32-36.
- [2] 周密,王华东.环境容量[M].长春:东北师范大学出版社, 1987.
- [3] 张永良,刘培哲.水环境容量综合手册[M].北京清华大学出版社, 1991.
- [4] 陈阳,施介宽,陈亮.水质管理容量的计算[J].环境导报, 1991, (1): 19-21.
- [5] 中国环境科学学会.实施主要污染物总量控制的理论与实践[M].北京:中国环境科学出版社, 1996.
- [6] 国家环保局.环境背景值和环境容量研究[M].北京:科学出版社, 1993.
- [7] 李适宇,李耀初,陈炳禄,等.分区达标控制法求解海域环境容量[J].环境科学, 1999, 4: 96-99.
- [8] 鲍琨,逢勇,孙瀚.基于控制断面水质达标的水环境容量计算方法研究——以殷村港为例[J].资源科学, 2011, 33 (2): 249-252.
- [9] 谢蓉蓉,逢勇,屈健,等.江苏省沿海区域水环境容量计算研究[J].海洋通报, 2012, 27(3): 214-222.
- [10] 胡开明,逢勇,王华,等.大型浅水湖泊水环境容量计算研究[J].水利发电学报, 2011, 30(4): 135-141.
- [11] 王华,逢勇,丁玲.滨江水体水环境容量计算研究[J].环境科学学报, 2007, 27 (12) : 2067-2073.
- [12] 关道明.我国近岸典型海域环境质量评价和环境容量研究[M].北京:海洋出版社, 2011.
- [13] 牟乃夏,刘文宝,王海银,等.地理信息系统教程[M].北京:测绘出版社, 2012.
- [14] 牛志广.近岸海域水环境容量的研究[D].武汉:武汉大学, 2004.
- [15] 逢勇.水环境容量计算理论及应用[M].北京:科学出版社, 2010.
- [16] 彭泰.大连凌水湾海域环境容量研究[D].大连:大连海事大学, 2012.
- [17] 郝嘉亮.近岸海域水质动态评价及环境容量方法研究[D].大连:大连海事大学, 2013.
- [18] 柯丽娜.辽宁省近岸海域环境问题与承载力分析研究[D].大连:大连理工大学, 2013.
- [19] 钱轶超.浅水湖泊沉积物磷素迁移转化特征与生物作用影响机制研究[D].浙江大学, 2011.
- [20] 张玉凤,宋永刚,王立军,等.锦州湾沉积物重金属生态风险评价[J].水产科学, 2011, 30(3): 156-159.
- [21] 范文宏,张博,陈静生,等.锦州湾沉积物中重金属污染的潜在生物毒性风险评价[J].环境科学学报, 2006, 26 (6): 1000-1005.
- [22] 葛成凤.铜、镉及磷在海洋沉积物上的吸附、解吸行为研究[D].青岛:中国海洋大学, 2012.
- [23] 武倩倩.渤海近岸海域沉积物对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 吸附及 AVS 的研究[D].青岛:中国海洋大学, 2006.
- [24] 李晋昌,张红,石伟.汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布[J].环境科学, 2013, 25(1): 116 -120.
- [25] 朱静.近岸海域水污染物输移规律及环境容量研究[D].南京:河海大学, 2007.

The coastwise surplus water environment capacity computing model based on GIS

KE Li-na¹, WANG Quan-ming², XU Li-wen¹, JIANG Xin³, YANG Shan-li¹

(1. Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Dalian 116029, China; 2. National Marine Environment Monitoring Center, Dalian 116023, China; 3. China School of Hydraulic Engineering Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Received: May, 19, 2014

Key words: water environment capacity; kriging interpolation; GIS; Jinzhou Bay

Abstract: By now the water environment capacity was predicted and calculated based on pollution diffusion and the attenuation mechanism by means of the multi-dimensional water quality equation, which requires huge amounts of men and material input to conduct huge amounts of indoor stimulations and monitoring experiments and then obtains the required parameters of the model. However, the pollution mechanism is a very complicated process and the variations of parameters are inconsistent, so the results obtained by the traditional method of calculating water environment capacity are not entirely satisfactory. This paper explores a new method of water environmental capacity calculation based on Kriging method, through the pollutant concentration and depth discrete interpolation to determine the capacity of the water environment in the study area. By August 2009, Jinzhou Bay calculation examples show that in the area lack of information, the water environmental capacity preliminary calculation method based on GIS is very simple and effective, which provides a calculation way to control the water environmental pollution.

(本文编辑: 康亦兼)