

沿海港湾区域陆源污染物定量估算方法研究^{*}

涂振顺, 黄金良, 张珞平, 潘灿民

(厦门大学环境科学研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要: 基于 GIS 和 RS 技术, 应用经验模型探讨沿海港湾区域陆源污染物计算方法, 旨在定量估算沿海港湾区域陆源污染物的来源、贡献, 为区域环境规划与管理提供依据。该方法首先采用 GIS 技术划分汇水区边界和汇水单元, 然后利用 RS 技术解译获得区域的土地利用/覆被变化, 并进一步利用经验模型 SCS-CN、USLE 和污染物流失方程、排污系数法来进行陆源污染物负荷估算。以罗源湾为例, 研究结果表明, 基于 GIS 技术, 以汇水区为单元对港湾区域陆源污染物来源贡献的计算方法可有效地辅助区域的环境规划与管理。

关键词: 陆源污染; GIS/RS 估算; 罗源湾

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2009)02-0202-06

Study on evaluation method of pollutants amount from land in bay region

TU Zhen-shun, HUANG Jin-liang, ZHANG Luo-ping, PAN Can-min

(Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract An approach to estimate the land-based pollution loads in a bay region by the integration of Geographic Information System (GIS), Remote Sensing (RS) technology, empirical models and discharge coefficient was proposed. In this approach, the sub-catchments were firstly delineated by GIS and then land use and cover change in the study area was obtained by RS. Furthermore, the SCS-CN, USLE model, the Pollutant Loss Equation and pollutant discharge coefficient were coupled to estimate the land-based pollution loads. Luoyuan Bay was further taken as a case study to illustrate this approach. It shows that such approach is an effective means to estimate the land-based pollution loads and it is beneficial to gain knowledge for the environmental plan and management.

Key words land-based pollution loads; GIS/RS estimate; Luoyuan Bay

陆源污染物主要是通过河流输送及人为作用进入海洋, 是引起海洋污染的主要原因。据相关报道, 海洋污染物中 80% 是陆源污染物^[1]。随着沿海经济的快速发展, 我国近岸海域几乎都面临着富营养化等环境问题的威胁^[2]。控制陆源污染是防治海洋污染的关键, 而陆源污染物定量估算则是控制陆源污染的基础。

本研究以福建省典型港湾区域—罗源湾作为案例, 开展区域陆源污染物来源贡献定量估算, 以便进一步开展区域环境保护规划、生态保育以及海湾水质环境管理工作。福建的海岸线长度在全国居第二位, 水域面积 226.7 km², 平均潮差 4.98 m, 最大潮差 8 m 以上, 是颇具开发前景的港湾^[3]。罗源湾作为福建省重要的港湾资源, 目前正面临着日益突出的经济发展与环境压力的矛盾, 从 20 世纪 80 年代罗源湾水质贫营养转变为目前的富

营养化^[4]。本研究通过利用遥感、GIS 技术和环境模型, 以汇水区为单元定量估算罗源湾的陆源污染物来源与贡献, 为罗源湾的环境规划、合理开发利用与生态系统保育, 构建罗源湾生态港口城市并作为海峡西岸经济区的重要有机组成部分提供科学支撑。

1 陆源污染物定量估算方法

本研究基于 GIS 技术划分汇水单元, 然后利用 RS 技术解译获得区域的土地利用/覆被变化, 并进一步利用经验模型 SCS-CN、USLE 和污染物流失方程、排污系数法将陆源污染物负荷分为点源和非点源两方面进行估算。点源主要是工业污水排放, 非点源主要是生活污染、畜禽养殖污染、农田径流污染、水土流失等。技术路线如图 1 所示。

* 收稿日期: 2008-07-21 修订日期: 2008-09-18

基金项目: 福建省青年人才项目 (2007F3093)

作者简介: 涂振顺 (1980-), 男, 福建省漳浦县人, 硕士研究生, 研究方向为环境规划与管理, E-mail: zstu@xmu.edu.cn

通讯作者: 黄金良, 副教授, E-mail: jhuang@xmu.edu.cn

1.1 汇水单元划分

根据研究区域的自然地形地貌属性、行政区范围以及数据搜集的可行性,应用 GIS 技术划分汇水单元。

1.2 点源污染估算

点源污染来源主要包括工厂污水和城市生活污水集中排放。估算方法主要是通过点源污染排放数据收集,按照各汇水区进行叠加汇总。考虑污水排放沿途的降解和沉降等去除作用,根据相关研究^[5], COD、NH₄-N 的入

海量以排放量的 50% (平均)概略计算。

1.3 非点源污染估算

非点源一般分为生活污染、畜禽养殖污染、农田径流污染、水土流失污染。

1.3.1 生活污染估算

本研究采用排污系数法,即由试验研究得到的人均排污系数乘以人口数量得到生活污水产生量。根据相关研究^[6]确定生活排污系数的取值。

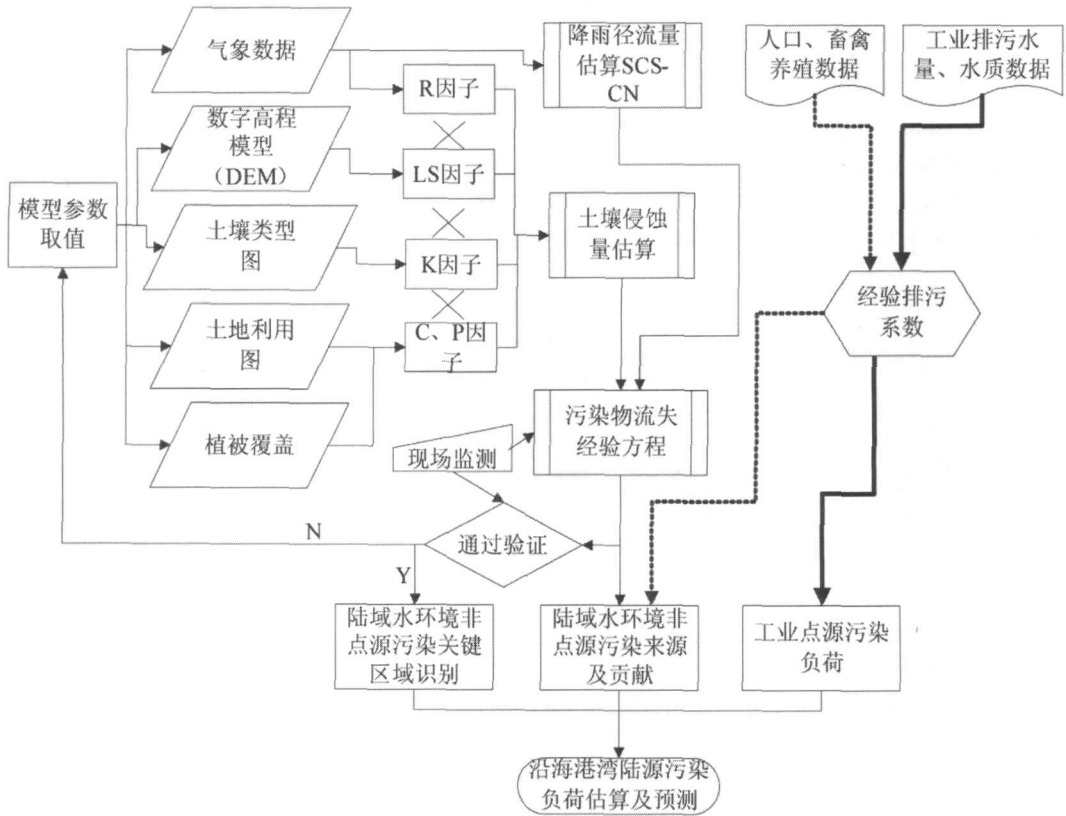


图 1 港湾陆源污染物估算技术路线

Fig 1 Flow chart of this study

1.3.2 畜禽养殖污染估算

与生活污染负荷计算方法相似, 畜禽养殖污染负荷也采用排污系数法进行估算, 综合相关文献^[5-9]归纳牛、羊、猪、家禽、兔等 COD、BOD、TN 及 TP 的不同排放系数。部分汇水区家禽的调查资料中, 有鸡鸭及蛋禽肉禽的分类统计, 这里为简化计算, 按照鸡和鸭各占 80% 和 20%、蛋禽和肉禽各占 50% 计算得到家禽的各污染物排放系数。将排放系数乘以调查得到的各汇水区的畜禽数, 即可计算出畜禽污染物产生总量。计算畜禽污染物的入海量, 要再考虑各污染物的流失率和降解率。根据相关研究^[6-11], 流失率和降解率分别取 30% 和 50%。

1.3.3 农田径流污染估算

农田径流引起的进入水体的污染物负荷的估算需要各汇水区氮肥和磷肥施用量。在具体计算时, 应在折纯后计算其入海量。根据国家环保总局中东部生态环境现状调查研究, 氮肥平均折纯率以 30% 计, 磷肥折纯率以

20% 计^[12]; 流失率分别取 20% 和 5%^[13-15]。计算时, 流失部分即为进入水体。

1.3.4 水土流失带来的氮磷流失估算

水土流失的污染物可分为固态(吸附态)和溶解态两类。固态污染物常常是附着在泥沙颗粒上, 随泥沙一起迁移。溶解态污染物则溶于地表径流中。本研究选用美国土壤保持局 (SCS) 经验模型 - 径流曲线数法 (curve number method) 进行年径流量的估算^[16], 运用美国通用土壤流失方程 (USLE) 进行土壤侵蚀量的估算^[17], 在此基础上, 结合污染物流失经验模型估算了降雨引起的水土流失给港湾区域水环境带来的氮磷流失负荷。

(1) 年径流量计算 - SCS 曲线方程: SCS 曲线方程已被广泛的应用到在水文、土壤侵蚀和水质模型当中, 如: AGNPS 和 EPC 等。它是美国土壤保持局根据 3000 多份试验资料制定的计算降雨过程径流深度 Q 的经验公式, 全年日径流深的和就是年径流深^[16]。公式为:

$$\begin{cases} Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) & P > 0.2S \\ Q = 0 & P \leq 0.2S \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q 为径流量 (mm); R 为降雨量 (mm); S 为水土保持参数。式中只有一个未知参数 S , 由于其影响因素复杂, 不便取值。为此, SCS 在归纳了 3000 多种土壤资料的基础上, 提出了一个无量纲参数 CN , 即径流曲线数 (runoff curve number), 并规定如下关系:

$$S = (25400/CN) - 254 \quad (2)$$

CN 是用来综合反映降雨前流域特征的一个综合参数, 它与流域前期土壤湿润状况 (AMC)、植被、坡度、农业耕作方式、水文条件、土地利用和土壤类型等因素有关。根据研究区域的土壤、水文状况和土地利用类型, 参照 SCS 曲线计算方法提供的取值条件, 确定了不同土地利用方式的 CN 值。该表征值是中等含水量时的 CN 值, 当土壤处于干旱或饱和含水量状态时, 则需分别用公式 (2-3)、(2-4) 进行校正。土壤湿度由前五日降水量确定, 水田蓄水期均视为“湿”。

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{0.4036 + 0.59CN_{II}} \quad (3)$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{2.334 - 0.01334CN_{II}} \quad (4)$$

其中: CN_I 为土壤处于干旱状态时的 CN 值; CN_{II} 为土壤中等含水量时 CN 值; CN_{III} 为土壤饱和含水量状态时的 CN 值。

(2) 土壤侵蚀量估算—通用土壤流失方程 (USLE): 上世纪 60 年代 Wischmeier 提出的通用土壤流失方程 (USLE) [17], 这是目前预测土壤侵蚀广泛应用的方法。该方程包含了影响水土流失的 6 个因子, 表达式为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot P \quad (5)$$

其中: A 为年土壤流失量; R 为降雨和径流因子; K 为土壤可蚀性因子; L 和 S 分别为坡度坡长因子; C 为植被与经营管理因子; P 为水土保持因子。模型中参数的具体取值和确定见文献 [18]。

(3) 污染物输出模型

① 颗粒态氮磷污染物负荷模型: 参照相关研究 [19-21], 负荷模型为:

$$LS_{ki} = a \cdot CS_{ki} \cdot X_{ki} \cdot TS_{ki} \cdot Sd \quad (6)$$

式中: a 为单位换算常数; LS_{ki} 为颗粒态氮磷污染物负荷 (kg/hm^2); CS_{ki} 为土壤氮磷污染物浓度 (mg/kg); X_{ki} 为土壤流失量 (t/km^2); TS_{ki} 为污染物富集比; Sd 为流域泥沙输移比, 本研究采用的 Sd 为 0.3。

侵蚀出的泥沙在向入海口运动时, 会发生沉积等过程, 不可能全部流到入海口处, 实际流失量与侵蚀量的比值称为泥沙流失率, 或输沙比。通常认为, 输沙比与地面土壤性质、源距出口的距离以及流域面积等有关, 但其准确计算目前尚处于初始摸索阶段。我国马联春等人认为长江中上游地区输沙比为 0.25 [21]。近年来, 史德明等人对三峡库区 4871 km^2 的典型地区研究得出其平均输沙率

为 0.28 [23]。根据研究区实际情况类比可确定泥沙迁移比。

② 溶解态氮磷污染物负荷模型: 参照相关研究 [18-20], 负荷模型为:

$$LD_{ki} = b \cdot CD_{ki} \cdot Q_{ki} \quad (7)$$

式中: LD_{ki} 为溶解态污染物负荷 (kg/hm^2); CD_{ki} 为径流溶解态污染物浓度 (mg/L); Q_{ki} 为径流量 (mm); b 为单位换算系数。

1.3.5 水土流失引发的 COD 流失量估算

本研究通过研究区域年径流深与降雨-径流、水土流失等综合过程携带的地表径流污染物 COD 值的乘积, 来概略估算降雨径流引发的水土流失携带进入水体的 COD 流失量。计算公式如下:

$$L_{COD} = b \cdot M_{COD} \cdot Q_{ki} \quad (8)$$

式中: L_{COD} 为 COD 污染物负荷 (kg/hm^2); M_{COD} 为地表径流中 COD 值 (mg/L); Q_{ki} 为径流量 (mm); b 为单位换算系数。

根据研究区域 (土地利用类型以林地、农田和农村居民点为主) 的干期监测结果, 结合九龙江流域、巢湖流域、辽河流域、上海市郊等研究成果 [24-27] 确定不同土地利用降雨径流中 COD 取值范围。由于海水、滩涂和养殖区是水土流失所引发 COD 的接纳区, 故其值都设为 0。耕地、园地、林地、居民建设用地及未利用地 COD 值分别为 15.0、12.0、6.0、7.0 mg/L 。基于 TM 卫片解译的研究区土地利用现状图, 结合污染估算年份的全年逐日雨量数据。采用 ARCGIS 的栅格数据运算功能, 基于式 (8) 进行空间运算, 获得区域降雨冲刷水土流失进入水体的 COD 的负荷空间分布图。然后进一步统计各汇水单元的 COD 污染负荷。

2 案例研究

2.1 研究区域概况

罗源湾地理范围为东经 119°36'42" ~ 119°50'12", 北纬 26°19'05" ~ 26°28'50", 是福建省六大深水港湾之一, 面积 860 km^2 , 位于福建省东北部沿海, 北邻三都澳, 南隔黄岐半岛与闽江口连接, 湾北侧、西北侧为罗源县, 西侧、南侧为连江县, 如图 2 所示。罗源湾是一个山地基岩海湾, 周边均为构造侵蚀低山和丘陵环抱, 山地丘陵迫近岸边, 构成基岩岬角和小型海湾, 海蚀地貌发育。陆域地形以低山、中山为主。主要土壤类型有水稻土、红壤、黄红壤、粗骨性红壤、酸性石质土、滨海潮滩盐土等几种土壤类型。该区域地跨南、中亚热带两个植被带。

2.2 数据源

本研究数据包括: (1) 2006 年罗源、连江县人口数据、畜禽养殖、化肥施用量、工业点源数据 [28, 29]; (2) 2006 年罗源湾逐日降雨量数据; 罗源、连江县土壤 N、P 含量数据; 福州市环保局提供的 DEM 数据 (分辨率为 10 m)、2007 年 ETM 卫星影像数据。

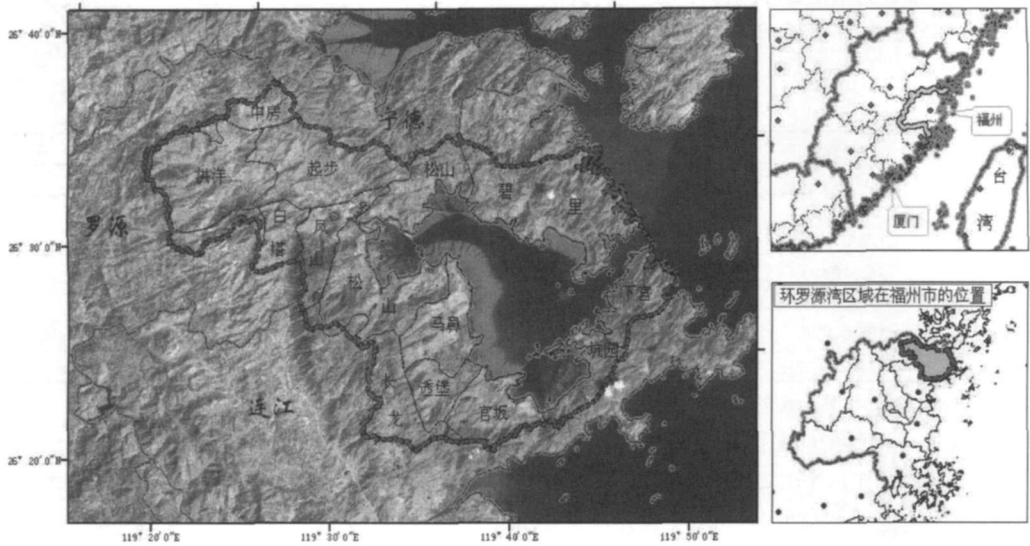


图 2 罗源湾区域地理位置

Fig 2 Location of Luoyuan Bay

2.3 汇水单元划分

根据汇水区、行政边界, 综合考虑环罗源湾区域的自然属性与数据收集的可操作性, 运用 GIS 手段划分了 25 个汇水区和 3 个海区, 单元分布如图 3 所示。



图 3 罗源湾陆域与海域生态环境汇水单元

Fig 3 Sub-watersheds delineation in Luoyuan Bay

2.4 陆源污染负荷估算

根据 1.2.1.3 章节所述的估算方法, 对罗源湾区域进行分汇水区估算陆源污染负荷, 并最后叠加计算汇入海区 1、2、3 的陆源污染物的量。

2.5 计算结果验证

本研究选取一典型水区进行计算结果验证。如图 3 中汇水区 8 即为碧里小流域, 面积 12.23 km², 是一个

封闭的小流域 (图 4)。土地利用 / 土地覆被以天然林地、农田和村庄为主。在碧里小流域的下游两处断面分别开展水质水量监测, 其中上游基本可作为流域水质的背景值, 下游即流域的总出水口的水质则会受村庄生活污水和农田径流的影响。水质监测分干期与暴雨事件。通过碧里小流域的水质水量实地监测数据, 旨在验证污染源负荷的计算结果。

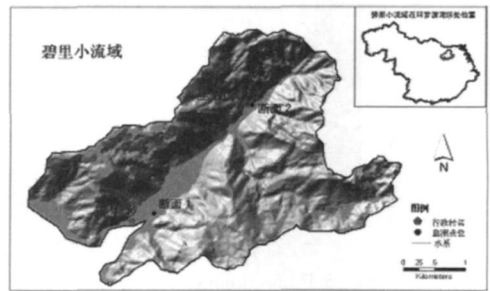


图 4 碧里小流域监测点位

Fig 4 Monitoring sites of Bili sub-watershed

3 结果与分析

将各汇水区污染负荷计算结果汇入个海区, 结果如表 1 所示。

表 1 罗源湾各海区陆源污染情况表

Tab 1 Land-based pollution loads of each parts of sea in Luoyuan bay

海区	入海量 / t a ⁻¹				
	COD	BOD ₅	TN	TP	污染物总量
海区 1	3420.58	1140.16	975.44	126.12	5662.3
海区 2	2116.39	903.67	763.12	98.52	3881.7
海区 3	176.22	65.17	47.0	10.55	298.94
合计	5979.33	2154.07	1853.53	246.08	10233.01

由表 1 可见, 在所划分的 3 个海区中, 以海区 1 所接纳的陆源污染为最多, 海区 2 次之, 两者合占环罗源湾总

陆源污染物总量 93.3%。海区 3 和湾外所接纳的各种陆源污染物所占比例分别为 2.9% 和 3.8%。

将罗源湾周边汇水区的陆源污染按工业、生活、畜禽、化肥和水土流失分类汇总, 见表 2。

表 2 罗源湾周边汇水区污染物来源汇总

Tab 2 Land-based pollution sources

陆源污染	污染物 / $t \cdot a^{-1}$							
	COD	比例 /%	BOD ₅	比例 /%	TN	比例 /%	TP	比例 /%
工业	243.11	4.26	-	-	-	-	-	-
生活污染	1258.07	22.02	730.06	34.62	159.26	8.92	35.18	15.80
畜禽养殖	623.57	10.91	1378.96	65.38	404.82	22.67	47.83	21.48
化肥流失	-	-	-	-	494.92	27.72	40.31	18.10
水土流失	3588.42	62.81	-	-	726.56	40.69	99.34	44.62
合计	5713.17		2109.02		1785.56		222.66	

注: 此处统计不包括海湾以外的陆源污染物输入; “-”表示缺数据。

由表 2 可知, 进入罗源湾的主要陆源污染物的量以 COD、BOD 有机污染物为主, TN 次之, TP 为最小。从陆源污染物的来源构成看(表 2), COD 的主要污染来源为水土流失和生活污染, 分别占 62.81% 和 22.02%, 工业点源所占比例最小(仅占 4% 左右)。BOD 主要污染来 畜禽养殖。TN、TP 的污染来源以水土流失为主。显然, 水土流失、生活污染和畜禽养殖等非点源污染构成了环罗源湾区域的主要陆源污染。

TP 为例加以说明, 见图 5。由图 5 可见, 环罗源湾各海区水体 TN 与 TP 的陆源污染都以水土流失为主, 其中对于 TP 污染物, 海区 1、海 3 和罗源湾外水土流失占 50% 以上, 而对于 TN, 海区 2 除外的其它海区水土流失占总污染来源的 40% 以上。各海区的 TN 与 TP 的污染来源构成有所差别, 表现在畜禽养殖是仅次于水土流失的 TP 的第二大污染来源, 而总氮第二大陆源污染基本都是化肥流失。该结论与相关研究较为类似。

分析环罗源区域各海区陆源污染物构成, 以 TN 和

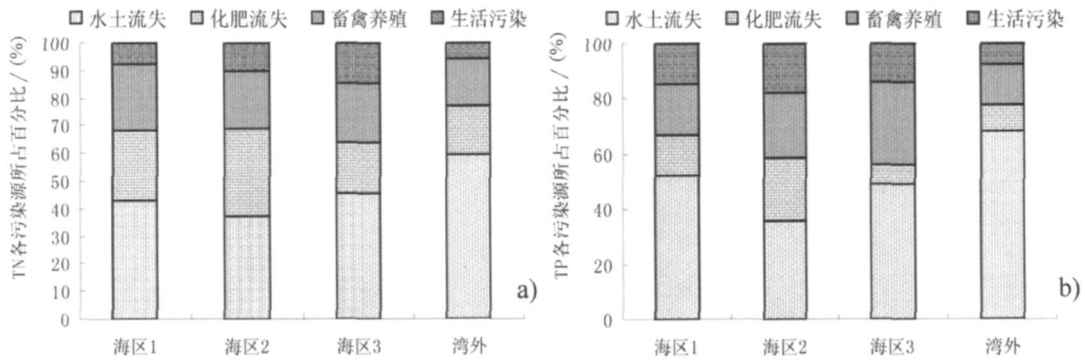


图 5 罗源湾各海区水体 TN a) 和 TP b) 的陆源污染结构比例

Fig. 5 Proportionment of N and P from land-based pollution in each sea of Louyuan gulf region

本研究由罗源县环境监测站协助监测的 3 次水质数据(见表 3), 对上述模型计算结果进行了验证。

表 3 碧里小流域出水口地表水质监测数据

Tab 3 Water quality data at outlet of Bili sub-waters

时间	监测点位	pH	$mg \cdot L^{-1}$						流量 / $m^3 \cdot s^{-1}$
			SS	COD	NH ₃ -N	TN	TP	NO ₃ -N	
2007-08-20	大桥	7.12	104	5.0	0.728	0.968	0.195	0.357	
	农场	6.91	7	4.1	0.177	0.231	0.001	未检出	
2007-09-17	大桥	7.02	113	7.6	1.26	1.55	0.331	0.584	
	农场	6.59	15	4.5	未检出	0.126	0.004	未检出	

2007-09-17 晴天采样补测流域水质的同时, 对大桥的流量进行了测定, 流量为 $0.426 m^3/s$ 。参照当天的水质数据, 概略算出流域污染负荷的年流失量, 并与计算结果进行了对照(如表 4), 以验证模型计算结果。

表 4 计算结果与实测结果对照

Tab 4 Comparison of calculation results and monitoring data

项目	负荷 / $t \cdot a^{-1}$		
	TN	TP	COD
实测值	20.82	4.45	102.10
模拟值	24.84	3.26	102.29
偏差 /%	-19.31	26.74	-0.18

由表 4 可见, 模型计算结果获得的 TN、TP 和 COD 的污染负荷与计算值偏差分别为 -19.31%、26.74% 和 -0.18%。模型计算误差均属可接受范围之内。

4 讨 论

由于实测的水量水质值为非降雨时期, 而降雨径流带来的水量与污染物浓度将会是干期水量水质的若干倍甚至更大, 特别是暴雨或大暴雨。因此, 据此计算的进入水环境的非点源污染物的年负荷为最保守的估算, 与之相对应的进入水环境的污染物负荷量也为保守值。

由于 2006 年雨量数据 (2 356.3 mm, 罗源县气象站提供) 远高于年平均雨量数据 (1 650 mm), 属雨量较多的年份, 据 2006 年逐日雨数据和 SCS-CN 方程计算的年径流深与非点源污染物—可溶态 N、P、COD 污染物负荷因此比正常年份水平高, 即模拟计算的结果比正常情况偏高。

另外需要说明的是, 基于栅格 GIS、USLE 和污染物流失经验模型的降雨径流—水土流失引发的 N、P、COD 污染物流失负荷的估算结果较难与基于经验排污系数计算的生活污染、畜禽养殖污染和化肥流失污染完全割裂开来, 导致计算的污染物负荷会存在重复, 模拟结果可能高估了进入受纳水体的非点源污染负荷量。

综上所述, 非降雨时期的偏低估算与 2006 年的偏高估算和由于少量可能的重复计算在某种程度上存在一定的抵消, 计算结果应该误差不大。尽管存在较多不确定性, 但本研究计算的进入罗源湾的污染物负荷为保守值, 且验证结果可信, 可支持下一步相关研究工作的开展。

5 结 论

(1) 进入罗源湾的主要陆源污染物以 COD、BOD 有机污染物为主, TN 次之, TP 为最小。从陆源污染物的来源构成看, COD_{cr} 的主要污染来源为水土流失和生活污染, 分别占 62.8% 和 22%, 工业点源仅占 4% 左右。TN、TP 的污染来源以水土流失为主。显然, 水土流失、生活污染和畜禽养殖等非点源污染构成了环罗源湾区域的主要陆源污染。

(2) 罗源湾各海区水体 TP 与 TN 的陆源污染都以水土流失为主, 其中对于 TP 污染物, 海区 1、海 3 和罗源湾外水土流失占 50% 以上, 而对于 TN, 海区 2 除外的其它海区水土流失占总污染来源的 40% 以上。各海区的 TN 与 TP 的污染来源构成有所差别, 表现在畜禽养殖是仅次于水土流失的 TP 的第二大污染来源, 而总氮第二大陆源污染基本都是化肥流失。

(3) 基于 GIS 技术, 以汇水区为单元对港湾区域陆源污染物来源贡献的计算方法可有效地辅助区域的环境规划与管理。

参考文献:

- [1] 付青, 吴险峰. 我国陆源污染物入海量及污染防治策略 [J]. 中央民族大学学报 (自然科学版), 2006, 15(3): 213-217.
- [2] 陈可亮, 朱晓东, 王金坑, 等. 厦门市海岸带水污染负荷估算及预测 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2091-2096.
- [3] 胡建宇. 罗源湾的潮流、余流特征 [J]. 海洋环境科学, 1996, 15(4): 12-16.
- [4] 郑小宏. 罗源湾氮磷营养盐变化状况分析 [J]. 福建水产,

- 2006, 2: 29-32.
- [5] 厦门大学环境科学研究中心. 象山港环境容量和污染总量控制研究报告 [R]. 厦门: 厦门大学环境科学研究中心, 2002.
- [6] 张大弟. 上海市郊区非点源污染综合调查评价 [J]. 上海农业学报, 1997, 13(1): 31-36.
- [7] 黄秀珠, 叶长兴. 持续畜牧业的发展与环境保护 [J]. 福建畜牧兽医, 1998, 5: 27-29.
- [8] 谢蓉. 上海市畜牧业污染控制与黄浦江上游水源保护 [J]. 农村生态环境, 1999, 15(1): 41-44.
- [9] 汪耀斌. 黄浦江上游沪、苏、浙边界地区污染源与水质调查分析 [J]. 水资源保护, 1998, 4: 37-40.
- [10] 日本机械工业联合会, 日本产业机械工业会. 水域的富营养化及其防治对策 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987.
- [11] 应文晔, 江天久, 牛涛, 等. 深圳市农业面源污染与近岸水体富营养化关系研究 [J]. 海洋环境科学, 2006, 25(2): 26-29.
- [12] 国家环保总局. 中东部地区生态环境现状调查 [J]. 环境保护, 2003, 26(8): 3-8.
- [13] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化 [J]. 土壤, 2000, 4: 188-193.
- [14] 杨斌, 程巨元. 农业非点源氮磷污染对水环境的影响研究 [J]. 江苏环境科技, 1999, 12(3): 19-21.
- [15] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域河网水质研究 [R]. 上海: 水利部太湖流域管理局, 1997.
- [16] U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service Hydrology [A]. SCS National Engineering Handbook, Section 4 U. S. Gov. Print [C], Washington D. C.: U. S. Department of Agriculture, 1972.
- [17] WISCHMEIER W. H., SMITH D. D. Agricultural handbook No. 537 [M]. Washington D. C.: Science and Education Administration, United States Department of Agriculture, 1978.
- [18] 黄金良, 洪华生, 张珞平. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 75-79.
- [19] 焦荔. USLE 模型及营养物流失方程在西湖非点源污染调查中的应用 [J]. 环境污染与防治, 1991, 13(6): 5-8, 17.
- [20] 王晓燕. 非点源污染定量研究的理论与方法 [J]. 首都师范大学学报 (自然科学版), 1996, 17(1): 91-95.
- [21] 施为光. 四川省清平水库流域非点源污染负荷计算 [J]. 重庆环境科学, 2000, 22(2): 33-36.
- [22] 马联春. 试论四川特大洪灾与森林植被的关系 [J]. 大自然探索, 1982, 1: 37-41.
- [23] 史德明, 杨艳生, 吕喜玺, 等. 长江三峡区土壤侵蚀规律及泥沙来源分析 [J]. 水土保持学报, 1991, 5(3): 9-21.
- [24] 洪华生, 黄金良, 曹文志. 九龙江流域农业非点源污染机理与控制研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [25] 张之源, 王培华, 张崇岱. 巢湖营养化状况评价及水质恢复探讨 [J]. 环境科学研究, 1999, 12(5): 45-48.
- [26] 徐文丰, 张宏图. 辽河 COD 形态分布特征研究 [J]. 环境保护科学, 2002, 111(28): 23-24.
- [27] 张大弟, 张晓红, 戴育民. 上海市 4 种地表径流污染负荷调查与评价 [J]. 上海环境科学, 1997, 16(9): 7-11.
- [28] 《罗源年鉴》编委会. 罗源县 2006 年统计年鉴 [Z]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [29] 《连江年鉴》编委会. 连江县 2006 年统计年鉴 [Z]. 北京: 中国统计出版社, 2007.