

基于 BP 神经网络水质模型的城市安全距离研究 ——以芜湖和马鞍山为例

贾 宁,董 欣,宁 雄,刘 毅* (清华大学环境学院,北京 100084)

摘要: 快速的城镇化使城市间距不断减小,上下游城市间水质的相互影响愈发显著.本研究提出基于水质的城市安全距离概念,建立基于 BP 神经网络水质模型的城市安全距离量化方法,并选择长江沿岸相邻的芜湖、马鞍山两市为案例,评估未来两市建成区扩张后城市间距的安全性,计算两市建成区的最小安全距离.结果显示,2020 年芜湖与马鞍山 4.6km 的间距属于安全距离,能够保证下游城市马鞍山上游控制断面地表 II 类的水功能要求.但与 2010 年相比,控制断面水质变差,COD 与氨氮浓度分别提高了 29.2%与 23.2%.为了保证控制断面的水功能要求,芜湖与马鞍山两市的最小安全距离为 3.2km.

关键词: 城市安全距离; 城市空间增长边界; BP 神经网络; 水质模型

中图分类号: X321 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2016)06-1905-08

Safe distance between cities based on the BP neural network water quality model: a study on Wuhu and Ma'anshan. JIA Ning, DONG Xin, NING Xiong, LIU Yi* (School of Environment, Tsinghua University, Beijing 10084, China). *China Environmental Science*, 2016,36(6): 1905~1912

Abstract: As a result of decreasing distance between cities during the rapid urbanization, the water quality of cities located in upper and lower reaches has closer interactions. This paper proposes the concept of safe distance between cities to ensure the water quality in downstream cities, which is quantified based on the BP neural network model for water quality. Two adjacent cities along the Yangtze River, Wuhu and Ma'anshan, are chosen as the representative case to evaluate the safety of water quality and quantify the minimum safe distance after city expansion. The results reveal a safe distance of 4.6km between the two cities in 2020, which could ensure the water quality of the control section in upper reaches of Ma'anshan (the downstream city) to meet the class II standard of surface water. However, compared with the year 2010, the water quality of the control section will decline, where the COD concentration is projected to increase by 29.2% and $\text{NH}_3\text{-N}$ by 23.2%. In order to ensure the water function of the control section, the minimum safe distance between the two cities needs to be 3.2km.

Key words: safe distance between cities; urban growth boundary; BP neural network; water quality model

中国正经历着快速的城镇化^[1],城市规模逐渐扩大,建设用地不断扩张,城市连片分布,随之而来的,是日益凸显的资源环境压力^[2-3].研究表明,土地由非建设用地转变为建设用地,将加大水资源需求^[4],加剧暴雨径流^[5],增大污水排放^[6],成为入湖河流水质污染的主要来源^[7].与此同时,城市的扩张使得相邻城市建成区的间距不断缩小,上游城市的污染排放对下游城市饮用水安全的威胁不能通过河流自净而消除,上下游城市间的水安全影响越发显著.由此可见,在设定城市空间增长边界(UGB)并将其作为一种控制城市无序扩张、引导城市合理发展的手段^[8]时,不仅需要考

虑城市扩张对本地水资源与水环境的压力,还需要考虑对下游城市水安全的影响,特别是在城市密集的区域.

现有针对城市空间增长边界的研究大多是对单个城市空间边界的量化^[9-11],模拟过程中以本地的生态安全格局^[12-14]和资源环境承载力^[15]等为约束,很少涉及城市间的相互影响.贾滨洋等^[16]提出在确定城市空间增长边界时,应当考虑城市间的最小生态安全距离.

收稿日期: 2015-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71473148)

* 责任作者, 教授, yi.liu@tsinghua.edu.cn

在上述城市空间增长边界的研究中,对城市间相互影响的考虑基本集中在概念探讨与定性分析层面,缺少定量化的研究.

基于此,本研究在城市空间增长边界设定中引入安全距离的概念,综合考虑城市扩张对其自身污染排放的影响及上下游城市间的水质响应关系,以

下游城市水环境功能定位为约束目标,利用基于BP神经网络的水质模型^[17-19],确定上下游城市间的合理距离,进而确定城市空间增长的合理边界.

1 基于 BP 神经网络水质模型的城市安全距离量化方法

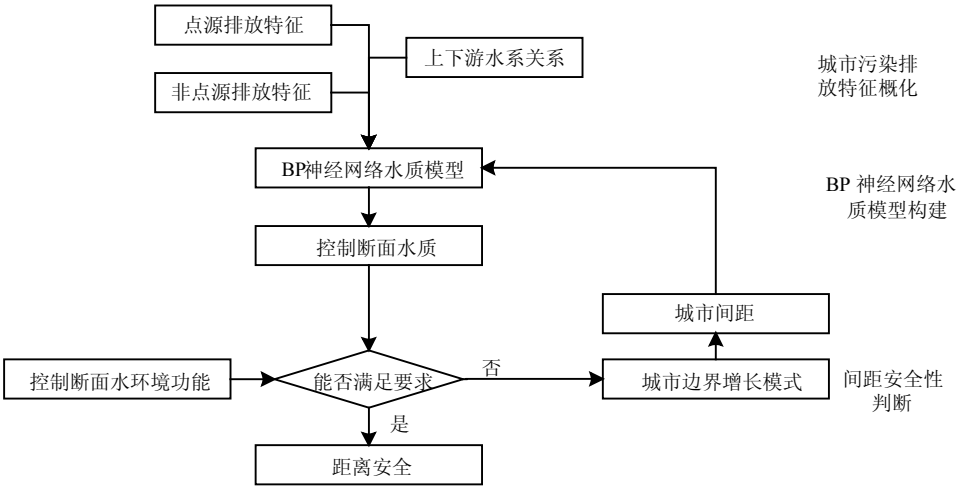


图 1 基于 BP 神经网络水质模型的城市安全距离量化方法

Fig.1 BP neural network model for water quality to quantify the safe distance between cities

安全距离的概念常见于石油化工业建设项目的环评影响评价^[20-21].在本研究中,安全距离是基于水环境质量的距离,指上游城市的正常排放不会影响下游城市水环境功能的城市间距.对于具体城市而言,本研究所定义的安全距离不具有唯一性,但具有最小值:当上下游城市间距小于最小安全距离时,上游城市正常的污染排放就会威胁到下游城市的水环境质量.本研究构建的基于BP神经网络水质模型的城市安全距离量化方法如图1所示,包括3部分:城市污染排放特征概化、BP神经网络水质模型构建和城市间距安全性判断.

1.1 城市污染排放特征概化

城市污染排放特征概化是基于城市土地利用变化模拟结果对研究区域点源与面源排放强度及空间分布进行的量化.点源包括生活源与工业源两类,其排放量通过研究区域的居民生活强度与工业行业特征确定.非点源指雨水冲刷建成

区和城市之间非建成区产生的地表径流带入水体的污染物,其排放量通过场次降雨平均冲刷模型进行计算.在本研究中,假设点源均通过污水管网收集至污水处理厂,处理后就近排入城市水环境;非点源则以线源的形式沿程排入水体.

1.2 BP神经网络水质模型构建

河流某断面的污染物浓度 c 与断面所在位置 y 以及上游污染物排放位置 x 和排放量 P_x 之间存在着某种函数关系,如式(1)所示.BP神经网络水质模型就是通过监测数据的样本训练确定函数关系 f ,进而实现断面污染物浓度的预测.

$$c = f(x, P_x, y) \tag{1}$$

在本研究中,BP神经网络水质模型的输入即其输入层包括:河流上游来水的污染物浓度与流量,点源排放量及排放位置,非点源线型排放强度及排放起始点位置,以及模拟断面的位置;输出即其输出层为模拟断面的污染物浓度;隐含层神经元的个数依据输入输出神经元的个数具体确

定.本研究采用串行训练的方式对 BP 神经网络水质模型的所有训练样本同时进行训练,如果总体误差值满足收敛要求,则训练终止;如果不满足要求,则进行反向的权值修正过程,具体过程见图 2.

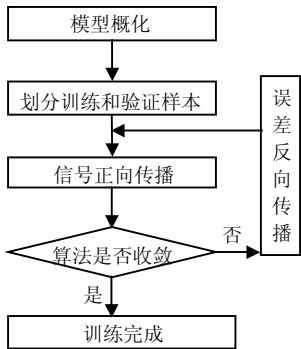


图 2 BP 神经网络水质模型的训练流程

Fig.2 Training process of the BP neural network water quality model

1.3 城市间距安全性判断

利用 BP 神经网络水质模型,对下游城市控制断面的污染物浓度进行预测.如果控制断面污染物浓度满足下游城市水环境功能的要求,则上下游城市的间距属于安全距离,也就是说,城市间河段的环境容量与自净能力可以缓解由上下游城市空间扩张、间距缩小而引发的水环境压力.如果控制断面污染物浓度不能满足下游城市水环境功能的要求,则需要重新选择上下游城市空间增长模式,重新设定城市空间增长边界,直至下游城市控制断面水质满足要求,此时得到的上下游城市间距为安全距离.

2 案例应用与结果

2.1 案例区域基本情况

选取芜湖和马鞍山市作为研究对象.两市位于安徽省东南部,是安徽省重要的经济中心,也是长江下游重要的港口城市.2012 年,两市人口分别为 356.6 万和 218.8 万,城镇化率分别达到 58.0%和 61.2%.2000 年以来,两市建设用地增长迅速.芜湖市建设用地总面积由 2000 年的 68km² 增长到 2010 年的 135km²,马鞍山市的增长更为

迅速,从 36km² 增长至 92km².

快速的城镇化使得两市建成区呈现沿江相向扩张的趋势、间距不断缩小.2010 年国家发改委批复的《皖江城市带承接产业转移示范区规划》^[22]中提出,“加快芜(湖)马(鞍山)同城化进程”,“建设现代化滨江组团式大城市”.可以预见,未来两地建成区将进一步相向扩张,城市间距将进一步缩小.而两地主要的饮用水源和污水去向均为长江干流,因此这种城市间距的不断减小会使上游芜湖的污染排放给下游马鞍山市的水安全带来潜在威胁.

本研究综合考虑芜湖市区与马鞍山市建成区的分布,提取长江东岸 1063km² 的城市用地密集区作为研究区域.该区域 2020 年的用地情况如图 3 所示,建设用地预计达到 490km².

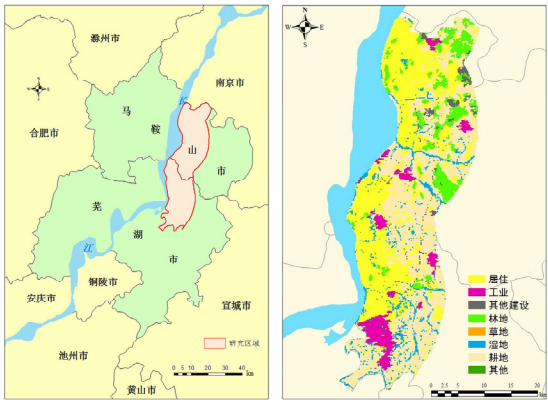


图 3 研究区域地理位置及 2020 年用地情况

Fig.3 Location of the study area and its land use in 2020

2.2 案例区域污染排放特征概化

研究区域内包括 8 个水质监测断面与 5 个污水处理厂服务区.根据芜湖市与马鞍山市建成区的范围、污水处理厂排放口等信息,可将研究区域污染排放的空间特征概化,如图 4 所示.研究选取下游城市马鞍山市的上游断面为控制断面,以此断面水质表征城市间距变化对水环境质量的影响.本研究以最上游监测断面为起点,江岸任意点至起始点的沿江距离为该点的坐标.由于长江江面较宽,因此,本研究假设岸边的水质仅受同侧岸边污染排放的影响,忽略江对岸排放的影响.

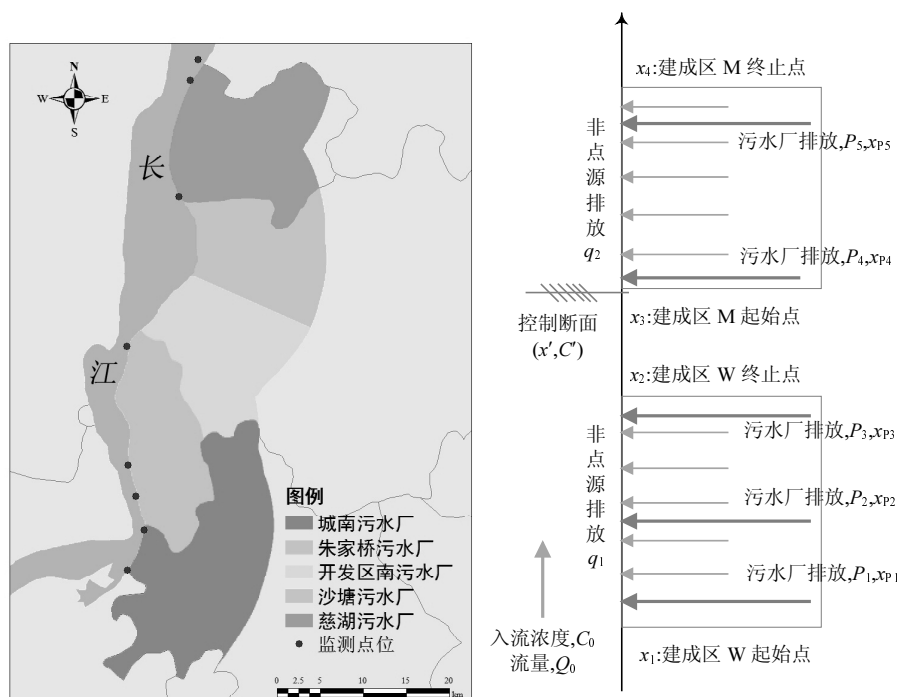


图 4 研究区域污染排放空间特征示意

Fig.4 Generalization of the spatial characteristics of the regional effluent emissions

研究区域内的点源为 5 座污水处理厂的尾水.污水厂的污水来源于生活排放和工业排放.

生活排放的计算基于人口,如式(2):

$$Q_1 = 365Pqac \quad (2)$$

式中: Q_1 为生活污染物排放总量; P 为区域人口数量; q 为人均日用水量, L/d ; a 为产污系数,即污水排放量与用水量的比值; c 为排放的污水中污染物的浓度, mg/L .

工业排放基于工业用地面积计算,如式(3):

$$Q_2 = pA \quad (3)$$

式中: Q_2 为工业污染物排放总量; p 为单位工业用地面积的污染物排放量, t/km^2 ,考虑技术进步因素,排放强度呈逐年下降趋势; A 为工业用地面积,基于实际 2005、2010 年以及预测得到的 2020 年数据,采用线性插值法得到逐年工业的用地面积.

假设生活污水和工业废水均经处理后达一级 B 标准排放^[23].自 2006 年以来,研究区域内的 5 座污水处理厂均是在原有基础上不断扩建,并未改变位置,因此,假设到 2020 年,5 座污水处理厂

仍在原位置扩建以满足城市扩张的需求,即点源的排放量发生变化,但位置不变.基于此,在后续构建的 BP 神经网络水质模型中,对于点源,仅将 5 个排放量作为输入变量,数据见表 1.

区域内的非点源排放以行政区为单元进行量化.本文采取场次降雨径流平均浓度计算非点源污染物的排放量,见式(4):

$$Q = \psi AP \cdot EMC \quad (4)$$

式中: Q 指污染物排放总量; ψ 指径流系数, A 指建设用地面积; P 指降雨量,数据来自地方部门; EMC 为场次降雨平均浓度.

假设 2 个区域的非点源分别以均匀线型源的形式沿城市边界排入长江,则非点源沿江排放强度 q 的计算方法见式(5):

$$q = Q/L \quad (5)$$

式中: q 为沿江排放强度; Q 为建成区非点源污染物排放总量; L 为建成区沿江跨度.

此外,还要考虑非点源污染物排放的位置.研究区域的建成区可分为芜湖和马鞍山两段.运用 GIS 平台将建成区转换成矩形,则建成区的起

点、终点可用坐标表示.基于实际 2005、2010 年以及预测 2020 年的坐标值,采用线性插值的方法获得其他年份的坐标信息.

因此,在后续构建的 BP 神经网络水质模型中,对于非点源,需要将排放强度及建成区的起、终点信息作为输入变量,数据见表 2.

2.3 “芜湖—马鞍山”段 BP 神经网络水质模型构建

表 1 研究区域内不同年份点源排放强度(t/a)

Table 1 Discharge intensities of regional point sources in different years (t/a)

年份	城南(P_1)		朱家桥(P_2)		开发区南(P_3)		沙塘(P_4)		慈湖(P_5)		总计	
	COD	氨氮	COD	氨氮	COD	氨氮	COD	氨氮	COD	氨氮	COD	氨氮
2006	8418	575	13609	1723	3577	314	3995	391	12075	1447	41675	4451
2007	9229	615	15764	1999	4148	297	4502	377	12739	1443	46382	4731
2008	8066	592	16077	2063	4175	271	4559	359	13089	1460	45965	4744
2009	7999	626	16522	2130	3683	292	4186	385	13138	1553	45528	4985
2010	7769	679	17992	2339	3504	291	4018	382	12845	1536	46128	5227
2011	7072	711	16975	2225	4171	381	4266	480	13322	1675	45805	5472
2012	7498	748	17408	2280	3826	338	4134	465	13335	1678	46200	5508
2013	7622	764	17799	2332	4090	344	4311	473	13706	1711	47528	5624
2020	7927	779	18229	2385	3972	334	4295	474	13859	1735	48282	5707

表 2 研究区域内不同年份非点源排放强度及位置

Table 2 Discharge intensities and positions of regional non-point sources in different years

年份	芜湖段				马鞍山段			
	起点 x_1	终点 x_2	COD q_1	氨氮 q_1	起点 x_3	终点 x_4	COD q_2	氨氮 q_2
	(km)	(km)	[t/(km·a)]	[t/(km·a)]	(km)	(km)	[t/(km·a)]	[t/(km·a)]
2006	2.62	23.88	323.1	4.8	44.71	63.19	477.9	7.2
2007	1.97	25.26	343.2	5.1	43.57	63.44	411.8	6.2
2008	1.31	26.65	383.2	5.7	42.42	63.70	446.1	6.7
2009	0.66	28.03	488.0	7.3	41.27	63.96	595.8	8.9
2010	0.00	29.41	538.2	8.1	40.12	64.21	658.8	9.9
2011	0.00	29.93	391.7	5.9	40.04	64.21	479.6	7.2
2012	0.00	30.46	441.2	6.6	39.95	64.21	534.0	8.0
2013	0.00	30.98	379.3	5.7	39.86	64.21	474.9	7.1
2020	0.00	34.63	533.8	8.0	39.27	64.21	706.9	10.6

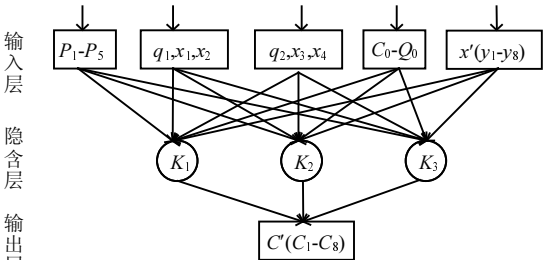


图 5 “芜湖—马鞍山”段 BP 神经网络水质模型结构

Fig.5 Structure of the BP neural network water quality model in Wuhu-Ma'anshan River Reach

根据上述污染特征概化结果,“芜湖—马鞍山”段水质模型的输入变量共有 14 个:作为点源

的 5 座污水处理厂的污染排放量($P_1\sim P_5$),非点源污染线型排放强度(q_1,q_2)及排放区域起点终点坐标($x_1\sim x_4$),上游来水流量(Q_0)及污染物浓度(C_0),断面位置.模型训练和验证时,断面位置输入图 4 所示 8 个监测断面之一的坐标($y_1,y_2, \dots$,或 y_8).用模型预测时,断面位置输入控制断面的坐标(x').水质模型的输出变量为断面污染物浓度.模型训练和验证时,输出为某个监测断面的污染物浓度($C_1, C_1,\dots$,或 C_8);预测时,输出为控制断面浓度(C').模型对 COD 和氨氮两种污染物进行模拟.所构建的 BP 神经网络水质模型如图 5 所示.

整理 2006~2013 年间长江干流芜湖马鞍山

段 8 个监测断面的 COD 和氨氮年均浓度数据,剔除部分未检出的情况,共得到 37 组“年份-断面位置-浓度”数据. 每轮随机选出 30 组样本用于模型训练, 剩余 7 组样本用于模型验证. 重复进行 500 轮训练, 每轮产生的 30 组训练样本不完全相同. 设置训练的收敛条件为: 总误差小于 0.01, 或迭代次数达 2000 次, 满足其中之一即可.

模型训练过程中模拟误差的收敛轨迹如图 6(a)所示. 500 轮训练的结果表明, 样本的选择对模型模拟误差的影响不大, COD 的模拟误差集中在 0.01~0.03 之间, 氨氮的模拟误差集中在 0.01~0.04 之间, 见图 6(b). 可见该模型具有较高的稳定性和可靠性.

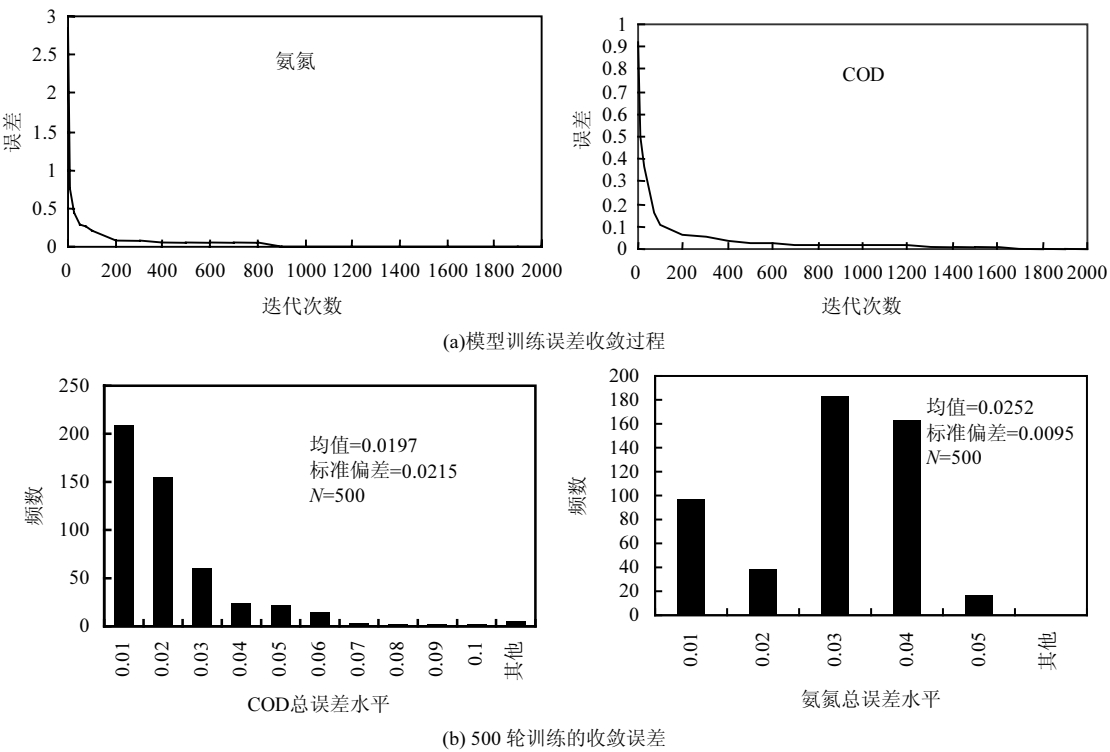


图 6 “芜湖—马鞍山”段 BP 神经网络水质模型训练误差

Fig.6 Training errors of the BP neural network water quality model in Wuhu-Ma'anshan River Reach

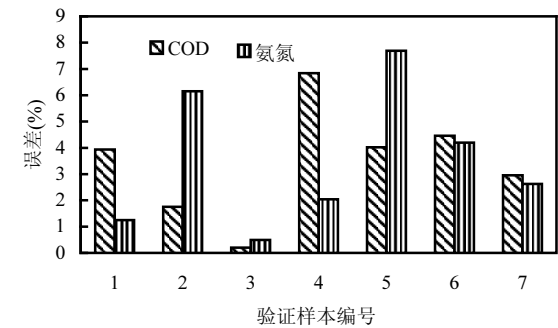


图 7 “芜湖—马鞍山”段 BP 神经网络水质模型验证误差

Fig.7 Validating errors of the BP neural network water quality model in Wuhu-Ma'anshan River Reach

从图 7 可知, COD 与氨氮浓度的模拟误差均可以控制在 10% 以内, 模型性能较好.

2.4 “芜湖—马鞍山”间距安全性判断

以芜湖市建成区末端与马鞍山市建成区起始点之间的距离表征 2 个城市的间距. 2010 年, 两城市间距为 9.85km; 2020 年, 两城市间距则缩短为 4.64km. 利用上述 BP 神经网络水质模型可以对控制断面的水质进行预测, 结果表明, 2020 年控制断面的 COD 年均值为 12.80mg/L, 氨氮浓度年均值为 0.31mg/L. 马鞍山市对控制断面的水功能定位为地表 II 类, 从 COD 和氨氮 2 个指标

的年均值来看,2020 年控制断面水质能够满足水功能要求,也就是说未来芜湖市与马鞍山市 4.6km 的间距属于安全距离,现阶段两市城镇化过程中建成区相向扩张的模式较为合理.然而与 2010 年相比,2020 年控制断面 COD 提高了 29.2%,氨氮的浓度提高了 23.2%.由此可见,虽然 2020 年控制断面的水质能够满足当地的水功能要求,但与现状相比,恶化较快,如果按照现有的城市扩张模式发展,未来控制断面的水质将不能满足水功能要求.

上述模型结果表明,控制断面的 COD 增长较快,因此,本研究以 COD 为控制目标,进一步对芜湖与马鞍山两市间的最小安全距离进行了分析.假设 2020 年 2 个城市的社会经济发展情景不变,可以认为 2 个城市的点源与非点源排放总量不变,仅调整上游芜湖市建成区的终点位置,即调整两个城市建成区的间距,模拟分析不同城市间距下控制断面的 COD,结果如图 8 所示.

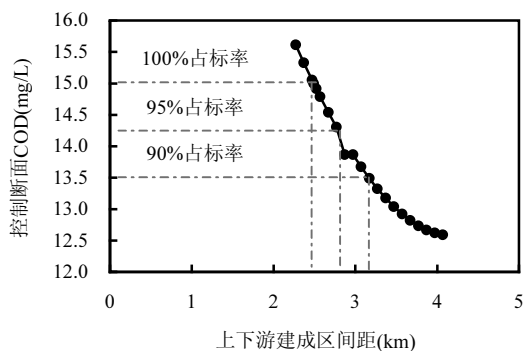


图 8 控制断面 COD 浓度与城市间距的关系

Fig.8 Relationship between the COD concentration in the control section and the distance between two cities

从图 8 可以看出,控制断面的 COD 浓度随着两市建成区间距的减小而升高.当两市建成区的间距小于 2.5km 时,下游马鞍山市的控制断面将不能满足地表 II 类水的功能要求.考虑到突发性污染事故、城镇化速度过快等因素对控制断面水质的影响,选取水功能要求浓度限值的 90%对应的建成区间距为 2 个城市的最小安全距离,可以得到芜湖与马鞍山两市建成区的最小安全距离

为 3.2km.也就是说,为了保证控制断面的水功能要求,两城市在未来城市边界增长过程中应保持大于 3.2km 的间距.已有研究对芜湖与马鞍山两市 2020 年城市扩张情景进行了预测,预计到 2020 年两市建成区间距为 4.6km,可见按照现有的城市建设模式发展,到 2020 年马鞍山控制断面的水质能够满足当地的水功能需求,仍有空间可供两个城市相向扩张,见图 9.

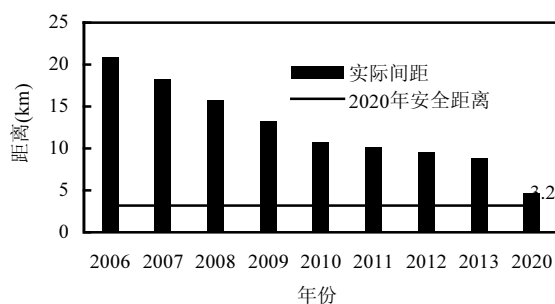


图 9 历年两市建成区间距及 2020 年安全距离

Fig.9 Actual distance between two built-up areas in different years and the safe distance in 2020

在城市边界增长的过程中考虑水环境质量与上下游城市间距的响应关系,量化基于水环境质量的城镇安全距离,既可以判断城市间距离是否合理、是否预留足够的缓冲地带,也能够为识别城市发展空间格局的环境影响、实现可持续的城镇化提供技术支持与决策依据.

3 结语

本研究在提出基于水环境质量的城镇安全距离的基础上,建立了包括污染排放特征概化、BP 神经网络水质模型构建及城市间距安全性判断三步的基于 BP 神经网络水质模型的城镇安全距离量化方法,并以长江流域“芜湖—马鞍山”区域为案例,进行了两市建成区间距安全性的分析,量化了两市建成区的最小安全距离.结果显示,2020 年芜湖与马鞍山 4.6km 的间距属于安全距离,能够保证下游城市马鞍山上游控制断面地表 II 类的水功能要求.但与 2010 年相比,控制断面水质变差,COD 与氨氮浓度分别提高了 29.2% 与 23.2%.为了保证控制断面的水功能要求,芜湖

与马鞍山两市的最小安全距离为 3.2km.研究为芜湖、马鞍山 2 个城市的空间边界增长与空间格局开发提出了约束.

参考文献:

- [1] Gregory B. Aspects of Urbanization in China: Shanghai, Hong Kong, Guangzhou [M]. Amsterdam: Amsterdam University Press, 2012:13-24.
- [2] Tang Z, Engel B A, Pijanowski B C, et al. Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale [J]. *Journal of environmental management*, 2005,76(1):35-45.
- [3] Duh J D, Shandas V, Chang H, et al. Rates of urbanisation and the resiliency of air and water quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2008,400(1):238-256.
- [4] Liu G, Yang Z, Chen B, et al. Emergy-based dynamic mechanisms of urban development, resource consumption and environmental impacts [J]. *Ecological Modelling*, 2014,271:90-102.
- [5] Fletcher T, Burns M. Urban stormwater runoff: a new class of environmental flow problem [J]. *PLoS ONE* [P]. 2012,7(9):1-10.
- [6] Dong Y, Liu Y, Chen J. Will urban expansion lead to an increase in future water pollution loads?—a preliminary investigation of the Haihe River Basin in northeastern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014,21(11):7024-7034.
- [7] 孙金华,曹晓峰,黄 艺.滇池流域土地利用对入湖河流水质的影响 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(12):2052-2057.
- [8] Benfield F K, Terris J, Vorsanger N. Solving sprawl: Models of smart growth in communities across America [M]. Washington, DC: Island Press, 2003:137-138.
- [9] 徐 康,吴绍华,陈东湘,等.基于水文效应的城市增长边界的确定——以镇江新民洲为例 [J]. *地理科学*, 2013,8:979-985.
- [10] Tayyebi A, Pijanowski B C, Tayyebi A H. An urban growth boundary model using neural networks, GIS and radial parameterization: An application to Tehran, Iran [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011,100(1):35-44.
- [11] Bhatta B. Modelling of urban growth boundary using geoinformatics [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2009, 2(4):359-381.
- [12] 李咏华.生态视角下的城市增长边界划定方法——以杭州市为例 [J]. *城市规划*, 2011,12:83-90.
- [13] 周 锐,王新军,苏海龙,等.基于生态安全格局的城市增长边界划定——以平顶山新区为例 [J]. *城市规划学刊*, 2014,4:57-63.
- [14] 张晓瑞,贺岩丹,方创琳,等.城市生态环境脆弱性的测度分区与调控 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(7):2200-2208.
- [15] 王振波,张 蕾,张晓瑞,等.基于资源环境承载力的合肥市增长边界划定 [J]. *地理研究*, 2013,12:2302-2311.
- [16] 贾滨洋,曾九利,李 玫,等.“多规融合”下的城市开发边界与最小生态安全距离 [J]. *环境保护*, 2015,Z1:23-26.
- [17] 宋国浩.人工神经网络在水质模拟与水质评价中的应用研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2009.
- [18] Zhao Y, Nan J, Cui F, et al. Water quality forecast through application of BP neural network at Yuqiao reservoir [J]. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2007,8(9):1482-1487.
- [19] 王 玮,李静文,邵 雪,等.基于计算智能的流域污染排放优化模式研究 [J]. *中国环境科学*, 2012,32(1):173-180.
- [20] 李 娜,张 震,冷 飞.油田生产设施环境安全距离理论与案例分析 [J]. *油气田环境保护*, 2012,22(6):76-80.
- [21] 刘艳菊,张 震,李 巍,等.油田生产设施环境安全距离理论与估算——以胜利油田东辛采油厂为例 [J]. *安全与环境工作*, 2006,13(1):77-84.
- [22] 国家发展改革委.关于印发皖江城市带承接产业转移示范区规划的通知 [EB/OL]. http://www.gov.cn/jzwgk/2010-03/24/content_1563507.htm, 2010-3-24/2015-12-1.
- [23] GB18918-2002 城镇污水处理厂污染物排放标准 [S].

作者简介: 贾 宁(1992-),女,山西太原人,清华大学博士研究生,主要研究方向为战略环境影响评价.发表论文 1 篇.