

## 非点源污染对太湖上游 西苕溪流域水环境的影响\*

于兴修<sup>1, 2</sup> 杨桂山<sup>1</sup> 欧维新<sup>1, 2</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2: 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**提 要** 水资源短缺是全球性关注的问题, 水质恶化更加剧了这一问题的严重性, 定量研究水质变化及其影响因素可为治理水环境提供基础依据. 与实测数据及综合污染指数的对比表明, 水质指数能够合理反映水质的变化程度和时空变化趋势. 利用西苕溪流域 1996-2000 年水质监测数据的研究结果如下: 西苕溪流域水质的空间变化趋势是自上游至下游逐渐恶化, 时间变化的总体趋势是逐年转好; 点污染源得到有效控制年份 (1999 年) 的水质指数比以前年份 (1996-1998 年) 有所提高但幅度不大, 说明非点源污染是影响西苕溪流域水质的重要因素; 流域水污染的主要形式是氮、磷污染, 其主要非点源是农田、经济竹林和城镇径流及居民生活污水等.

**关键词** 太湖流域 非点源污染 土地利用 水质指数 (WQI)

**分类号** X522

世界范围的淡水资源短缺已成为学术界、社会各阶层的共识, 水体污染导致河流水质下降及湖泊富营养化是水资源缺乏的重要原因之一. 在点污染源得到逐步治理或控制后, 非点源污染对水环境的巨大危害逐渐显露出来<sup>[1-3]</sup>. 欧美国家近二十年来治理非点源污染的实践表明, 由于非点源污染分布广泛且随机性大, 机理过程复杂, 污染物及其排放途径不确定, 污染负荷空间差异大, 因而治理难度很大<sup>[1,2]</sup>. 土地利用对水质影响的主要途径是非点源污染<sup>[4]</sup>, 不同土地利用类型和强度的非点源污染后果不同. 在我国, 系统研究非点源污染的机理并进行治理还处于起步阶段<sup>[3,4]</sup>. 其基础工作是通过水质监测, 分析水质时空变化规律, 找出重点污染源区, 进而提出相应的治理措施.

西苕溪是太湖上游的重要支流, 位于浙江省湖州市境内, 发源于安吉县永和乡的狮子山, 自西南向东北流向太湖, 是湖州市及其沿河居民的主要饮用水源. 因而, 监测本流域的水质状况对保证当地居民健康及其治理太湖富营养化具有重要意义. 到目前为止, 有关西苕溪流域水环境演化的报道少见. 本文利用 4 年的水质监测数据, 应用水质指数法研究西苕溪流域水质的时空变化, 并就非点源污染对水环境的影响作简要分析, 旨在为流域水环境治理提供基础依据.

\* 中国科学院知识创新工程方向性项目 (KZCX2-311, KZCX2-310) 与国家自然科学基金重点项目 (49831070) 联合资助.  
2002-04-24 收稿, 2002-09-17 收修改稿. 于兴修, 男, 1967 年生, 副教授, 博士研究生, E-mail: xxyu@niglas.ac.cn

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区及监测点概况

为了排除其它流域的干扰,便于分析西苕溪流域非点源污染对河流水环境的影响,本研究选择流域位于安吉县境内的中上游部分(图1)。由于其面积占全流域面积的82%,因而能够代表流域的基本状况。在该研究区内的主河道上共选择了4个监测点。上游赋石坎站之上的流域发育在中低山区,人口稀少,林地占土地总面积的90%以上,反映林地引起的非点源污染对水环境的影响。河流向下至塘浦站之间,为低山丘陵区,人口密度逐渐加大,农业活动增多,水质状况反映了较低强度农业及经济竹林非点源污染的影响。再向下至柴潭埠站,是研究区内人口密度最大的区域,安吉县城位于本河段,除农业非点源污染外,城镇径流和居民生活造成的非点源污染及工业生产对水质的影响加大。荆湾站反映较大强度农业面源污及其大支流浑泥港的影响。

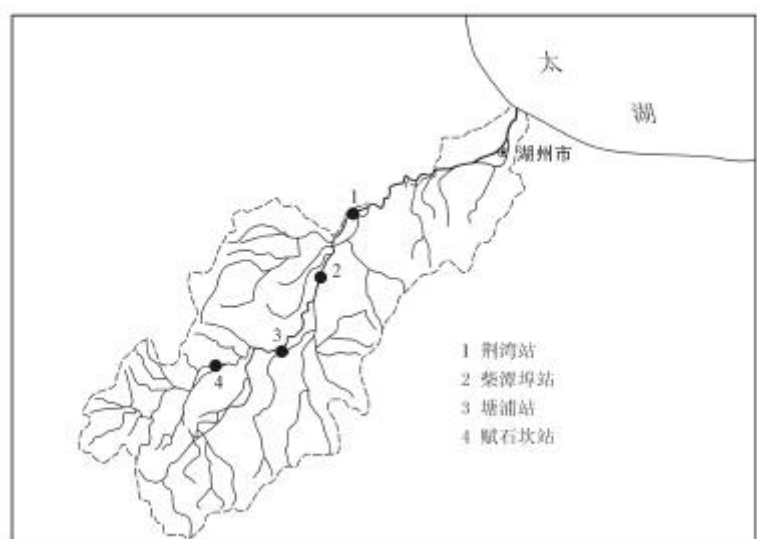


图1 西苕溪流域及水质监测点分布图

Fig.1 Map of Xitiao River Catchment with indication of monitoring stations

### 1.2 监测与分析指标

当地环境检测站于1996、1998、1999和2000年在各监测点进行了每月一次的同步监测,每次于水下重复取两个样品用于化验分析,取其平均值。监测指标包括:氨态氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、亚硝态氮( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、五日生化需氧量( $\text{BOD}_5$ )、溶解氧( $\text{DO}$ )、总硬度(Hard.)、高锰酸盐指数(Magn.)、总汞、As、Pb、 $\text{Cr}^{6+}$ 、挥发酚和HF、石油类(Oil)、pH值、总磷(TP)、总悬浮物(TSS)、水温(T)和浑浊度(Turb.)。所有指标均由当地环境监测站按国家环保局推荐的实验方法监测分析并提供。

### 1.3 水质指数计算方法

计算水质指数包括两个步骤:首先将所得指标值标准化,即按一定的标准把每个指标的监测值转换成0-100之间的一个数值,100表示水质最好,0则表示水质最差;然后根

据指标影响水质的重要程度, 赋给每一指标一定的权重, 进行加权计算。

各指标值的标准化参照了《地表水环境质量标准》(GHZB 1—1999)<sup>[7]</sup>, 该标准把地表水划分为5类, 并规定了每类水质中各监测指标的取值范围。然而, 该标准是根据地面水水域使用目的和保护目标制定的, 等级的划分比较粗略, 而且水质最差的第五类还可作农业用水, 因而不能反映水质的小幅度变化, 从而有可能忽略潜在的污染源。为了能够体现有可能出现的所有水质状况, 突出水质差异, 本研究将流域水质划分为10级, 缩小了每一级水质中各单项指标的取值范围。其中, 第一级水质相当于饮用矿泉水的标准; 劣于农业用水的水质又划分了两级, 分别为第九和第十级。然后, 给各级水质指标赋值, 第一级水质的指标赋值为100, 第二级水质指标赋值90, 依次类推。在此基础上, 根据各单项指标的实测值对应的水质级别进行标准化, 使其转化为0-100之间的相应值(表1)。

各指标的相对权重参考文献5并结合实际情况在专家咨询的基础上进行了必要修正, 突出了氮、磷等水体富营养化因子。首先根据各单项指标对水质影响的程度进行排序; 然后按对水质的影响程度将水质指标分为4类, 则相对权重分也为4级, 4对应于对水质影响最大的指标, 1则对应于对水质影响最小的指标, 由此得出各指标的相对权重值(表1)。

水质指数(WQI)的计算公式<sup>[5]</sup>为:  $WQI = \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$ 。式中,  $C_i$  表示第*i*项指标的标准值;  $P_i$  表示第*i*项指标的权重, 其取值范围为1-4。WQI 取值范围为0-100。本文应用水质指数目的在于反映水质变化的程度和趋势, 而不是用其对水质分级。

## 2 结果与分析

### 2.1 水质变化趋势及原因分析

2.1.1 水质指数法检验 国外已有研究表明<sup>[5,6]</sup>, 水质指数(WQI)能够定量反映水质的具体差异及其变化趋势, 可用来定量说明水质影响因子的作用。现以 1996 年的实测数据为例, 把 WQI 与综合污染指数(图 2 上)反映的水质变化趋势进行对比, 以检验其效果。可以看出, WQI 反映的西苕溪流域水质变化的趋势是: 自赋石坎至柴埠潭段, 河流水质逐步下降, 其中塘浦站之上水质下降较快, 塘浦站之下水质下降较慢; 自柴埠潭至荆湾段, 河流水质略有改善。水质的这一变化趋势与综合污染指数反映的结果一致。另外, 与一些重要水质单项指标实测数据进行对比(图 2 下), 发现 WQI 与无机氮及溶解氧反映的水质状况一致, 与 TP 反映的水质状况相近。因而, WQI 反映的水质状况及其变化趋势是合理的, 而且更直观。

2.1.2 水质时间变化 1996-2000 年各监测站的 WQI 结果如图 3 所示, 可以看出, 1996-2000 年各监测点水质变化过程相同, 即水质总体上呈好转的趋势。其中 1999 年水质最好, 而 2000 年水质又稍有下降。水质的这一变化趋势与黄文钰等人<sup>[8,9]</sup>的研究结果相吻合。各监测站 1999 年水质有所改善, 主要是 1998 年太湖流域治理点污染源“零点行动”的结果<sup>[8]</sup>, 但与 1996、1998 年相比, 水质指数增加的幅度很小, 平均增加 6.5%。其中, 塘浦站增加幅度最大, 也只有 8%。这说明除工矿企业等点污染源外, 农业及其居民生活造成的非点源污染也是西苕溪流域的重要污染源。

表1 计算水质指数指标 (WQI) 标准值对照表<sup>1)</sup>  
Tab. 1 Parameters considered for WQI calculation

指标	权重	标 准 值										
		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
NH <sub>4</sub> -N	3	<0.01	<0.10	<0.15	<0.20	<0.35	<0.50	<0.75	<1.00	<1.25	≤1.50	>1.50
NO <sub>3</sub> -N	2	<0.5	<1.0	<2.0	<3.0	<5.0	<10.0	<15.0	<25.0	<35.0	≤50.0	>50.0
NO <sub>2</sub> -N	2	<0.005	<0.01	<0.015	<0.02	<0.03	<0.05	<0.10	<0.15	<0.50	≤1.0	>1.00
BOD <sub>5</sub>	3	<0.5	<1	<1.5	<2	<2.5	<3	<4	<6	<8	≤10	>10
DO	4	≥7.5	>7.0	>6.5	>6.0	>5.0	>4.0	>3.5	>3.0	>2.0	≥1.0	<1.0
Hard	1	<25	<50	<75	<100	<150	<200	<300	<400	<600	≤1000	>1000
Magn	1	<1	<2	<3	<4	<6	<8	<9	<10	<12	≤15	>15
Oil	2	<0.005	<0.02	<0.04	<0.08	<0.15	<0.30	<0.50	<1.00	<2.00	≤3.00	>3.00
pH	1	7	7-7.5	7-8	7-8.5	7-9	6.5-7	6-9.5	5-11	3-12	2-13	1-14
TP	3	<0.01	<0.02	<0.03	<0.04	<0.05	<0.06	<0.10	<0.20	<0.30	≤0.50	>0.50
TSS	4	<10	<20	<30	<40	<60	<100	<200	<500	<800	≤1200	>1200
T	1	21/16	22/15	24/14	26/12	28/10	30/5	32/0	36/-2	40/-4	45/-6	>45/<-6
Turb	2	<5	<10	<15	<20	<25	<30	<40	<60	<80	≤100	>100

1) 表中 pH 值无单位, T 的单位为℃, 其余指标的单位均为 mg/L.

值得注意的是, 2000 年又呈现出水质下降的趋势(但仍好于 1996-1998 年), 原因可

可能是有些工业污染源的治理有所松懈 [8]. 说明点污染源治理的作用是有限的, 要从根本上改善流域水环境, 还需大力控制非点源污染.

2.1.3 水质空间变化 从图4可以看出, 尽管西苕溪流域各年度水质有差异, 但均表现为自上游向下游逐渐恶化的趋势, 其中荆湾站水质比柴埠潭稍好. 现以2000年的计算结果(图4)为例分析水质空间变化及其原因, 从图4可以看出, 上游赋石坎站WQI 为81.4, 向下游逐渐降低, 至荆湾站仅为56.1, 下降幅度达25.3%. 其中, 赋石坎至塘浦段河流流经低山丘陵地区, 水质指数下降了8.5%. 这一地区林为主, 耕地主要零星分布于河谷地带. 林地中以竹林为主, 其中低平地

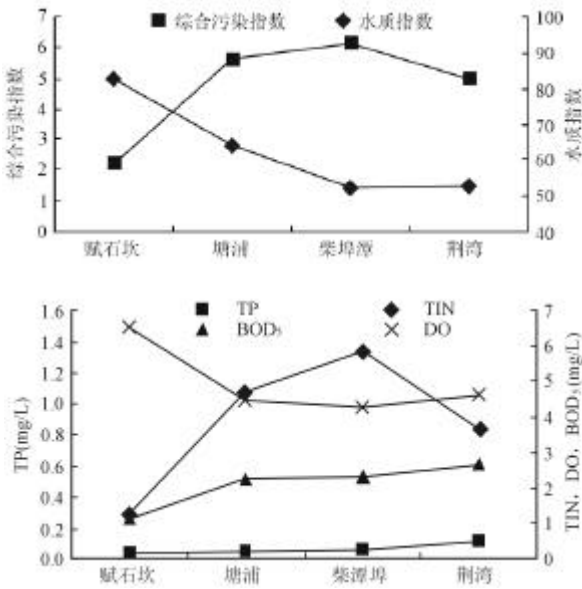


图 2 几种反映水质变化方法比较

Fig.2 Comparison of some parameters and indices

带的竹林既施绿肥又施化肥, 山丘地带的竹林每年使用一次化肥, 经济竹林和农田施肥流失是本段河流水质下降的主要原因。塘浦至柴潭埠段为低山丘陵区, 安吉县城位于本区, 是研究区内人口密度最大的河段, 工业企业明显增加。这一河段水质下降较快, 水质指数下降了18.3%, 主要是生活污水和工业废水的作用。柴潭埠至荆湾段, 丘陵和河谷平原相间排列, 林地和农田并重, 水质变化不明显。由于本段河流长度不到10km, 虽然受农业非点源污染影响的程度没有减轻, 但在荆湾站上游处, 河流右岸接纳了源部山区的支流—浑泥港, 起到了稀释的作用, 因而, 荆湾站水质并没有比其上游柴潭埠站水质下降。

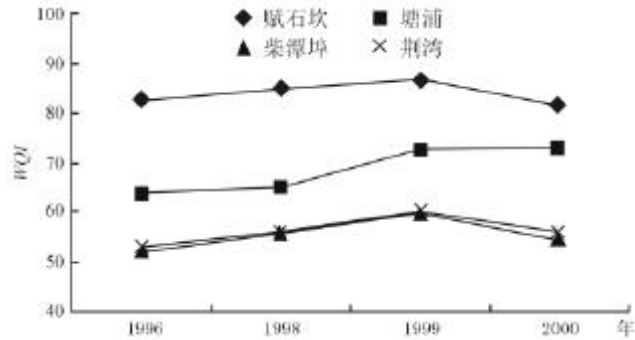


图3 水质指数(WQI)时间变化(1996-2000年)

Fig.3 Water quality indexes(WQI) variation in

## 2.2 主要污染物及其来源分析

对照《地表水环境质量标准》

(GHZB 1—1999) 进一步分析发现, Hg、As、Pb、Cr<sup>6+</sup>、挥发酚和氟化氢等指标的浓度均未超过 I 类水的标准, 因而西苕溪流域没有重金属污染及挥发酚和HF污染。导致水质发生变化的主要指标是TP、各种形态的氮、BOD<sub>5</sub>、DO、总硬度、高锰酸盐指数等指标, 可以看出本流域主要为N、P污染。1999和2000年塘浦、柴潭埠和荆湾站的TP浓度大多超过IV类水标准; 而氨态氮则是氮污染的主要形式, 如1996年塘浦站氨态氮的浓度超过IV类水标准。因此, 有必要对这些主要污染物质的分布作进一步分析并诊断其来源。

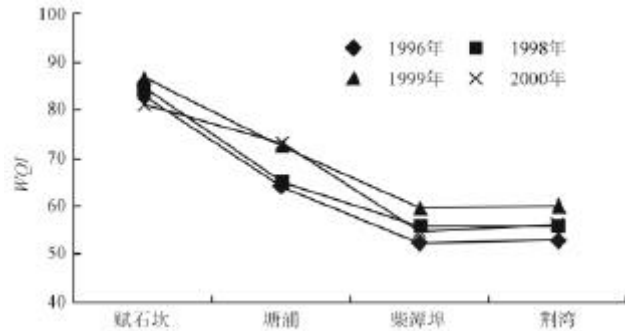


图4 水质指数(WQI)空间变化

Fig.3 Spatial variation of water quality in-

现以2000年的实测数据分析各种形态氮和TP的空间变化(图5)。可以看出, 从上游到下游, 无机氮(TIN)的浓度呈逐渐增大趋势, 但不同河段增加的幅度不同, 塘浦至柴潭埠段增加幅度最大, 柴潭埠至荆湾站之间增加非常平缓; TP的变化趋势与TIN基本一致, 所不同的是荆湾站TP浓度比柴潭埠站稍低。TIN和TP浓度在塘浦至柴潭埠段增加幅度大, 说明本河段是N、P的重要来源。正如前述, 本河段是研究区内工农业最发达的地区, 农田面积扩大且化肥施用量增加; 同时经济竹林在林地中的比例增大, 施肥现象普遍, 导致农田、林地N、P流失量的增加。另外, 安吉县城位于此河段, 除工矿企业外, 居民生活污水和城镇径流增多, 也是N、P的重要来源。柴潭埠站之下河段, 耕地和林地的利用情况与上一河段差别不大, 但人口密度, 城镇面积和工矿企业减少, N、P来源减少, 再加上支流浑泥港的稀释作用, 使得TIN和TP浓度增加不明显甚至有所降低。这一N、P来源的分析与前

人在其它地区的研究<sup>[4,10,11]</sup>基本一致.

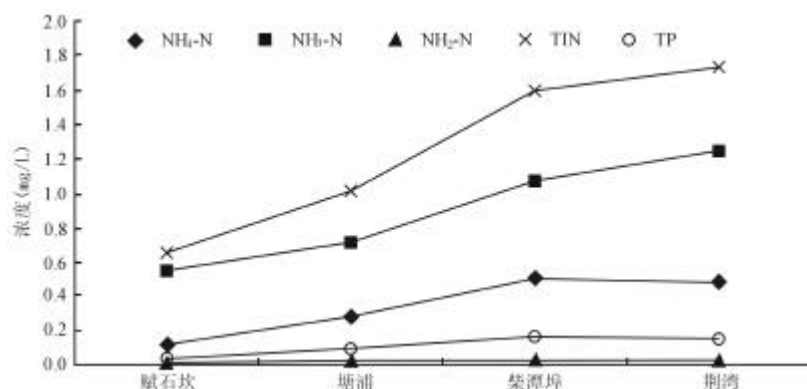


图5 不同形态氮和总磷的空间分布(2000年)

Fig.5 Spatial variation of TP and forms of nitrogen

分析不同形态氮的变化可以看出, 它们对TIN浓度总量及其变化贡献不同. 从图5还可以看出, NO<sub>2</sub>-N的浓度很低, 对TIN浓度变化的影响不大, 对其影响大的主要是NO<sub>3</sub>-N和NH<sub>4</sub>-N. TIN的变化趋势与NO<sub>3</sub>-N的变化趋势基本一致, 表明NO<sub>3</sub>-N对TIN含量浓度及其变化贡献最大. 但NH<sub>4</sub>-N是评价水质必须达标的十项指标之一<sup>[7]</sup>, 因而NH<sub>4</sub>-N浓度及其变化应该重视. NH<sub>4</sub>-N在塘浦至柴埠潭之间增加快且在柴埠潭站达最大值, 这一点尤其要注意, 今后应注意观测.

### 3 结语

通过以上分析可以看出, 水质指数能较好地反映西苕溪流域水质变化及其趋势: 水质在空间上自上游至下游逐步恶化; 在时间上则呈逐渐好转趋势, 但2000年又有所下降. 只控制点源污染并没有根本改变西苕溪流域的水环境状况, 表明土地利用变化等因素导致的非点源污染也是本流域水质恶化的重要原因. 西苕溪流域的主要污染物是 N, P, 重点来源区主要是塘浦至柴埠潭河段; 除点污染源外, 其来源主要是农田和竹林的肥料流失、城镇径流及居民生活污水等, 这是今后西苕溪流域水环境非点源污染研究及治理的重点.

### 参 考 文 献

- 1 Loen L F, *et al.* Non-point source pollution: A distributed water quality modeling approach. *Wat Res*, 2001, **35**(4):997-1007
- 2 Voutsas D, *et al.* A study of surface water quality in Macedonia, Greece: Speciation of nitrogen and phosphorus. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, **129**:33-44
- 3 鲍全盛, 王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望. *地理科学*, 1996, **16** (1): 66-71
- 4 陈利顶, 傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制. *环境科学*, 2001, **21**(2): 98-100
- 5 Silvia F. Pesce, Daniel A. Wunderlin. Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia River. *Wat Res*, 2001, **34**(11):2915-2926
- 6 Jonnalagadda S B, Mhere G. Water quality of the Odzi River in the eastern highlands of Zimbabwe. *Wat*

*Res.*, 2001, **35**(10): 2371-2376

7 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准, 1999 (<http://www.nies.org/law/navipage/index053.htm>)

8 黄文钰, 杨桂山, 许朋柱. 太湖流域“零点”行动的环境效果分析. 湖泊科学, 2002, **14** (1): 67-71

9 张运林, 秦伯强. 太湖水体富营养化的演变及研究进展. 上海环境科学, 2001, **20** (6): 263-265

10 李佩武. N、P 输出与土地利用类型相关性研究. 农业环境与发展, 1998, **15**(3): 42-46

11 李俊然, 陈利顶, 傅伯杰等. 于桥水库流域地表水非点源 N 时空变化特征. 地理科学, 2002, **22** (2): 238-242

## Impacts of Non-point Source Pollution on the Water Environment of Xitiaoqi Watershed, Upper Taihu Basin

YU Xingxiu<sup>1,2</sup>, YANG Guishan<sup>1</sup> & OU Weixin<sup>1,2</sup>

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R. China;*

*2: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P.R. China*)

### Abstract

The scare of fresh water has been becoming a focus issue in the world, while water quality deterioration enhances the seriousness of the problem. To assess the water quality and its impact factors can provide basic information for water resource management. This paper verified the usefulness of water quality indices (*WQI*) to assess the water quality from multiple measured parameters, and to evaluate the spatial and temporal change. The *WQI* which takes into consideration all the measured parameters not only shows a similar trend to the results of analyzing separate parameters and the index of compositive pollution, but also display the overall water quality and can predict precisely the change trend of water quality. As a case study, we use the *WQI* to evaluate spatial and temporal changes in the water quality from Xitiaoqi Catchment, upper reaches of Taihu Basin, and assess the degree of factors influencing water quality. The non-point source pollution caused by land use produces a serious and negative effect on the water quality because only controlling and management point sources only increase 6.5% of water quality. The water quality gradually deteriorated along the river from upper reaches to lower reaches mainly due to the land use change. So, in the future, the highest priority measure to improve water quality of Xitiaoqi Catchment should be controlling non-point pollution resources.

**Keywords:** Taihu Basin; land use; non-point source pollution; Water Quality Index(*WQI*)