

文章编号: 1009 - 3087 (2009) 02 - 0125 - 06

## 太湖五里湖非点源污染的时空变化分析

李英杰<sup>1,2,3</sup>, 年跃刚<sup>2\*</sup>, 宋英伟<sup>4,5</sup>, 胡社荣<sup>1</sup>, 聂志丹<sup>2</sup>, 闫海红<sup>2</sup>, 殷勤<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 中国环境科学研究院 水污染控制创新基地, 北京 100012;  
3. 陕西省环境科学研究设计院, 西安 710061; 4. 华东师范大学 环境科学系, 上海 200062;  
5. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

**摘要:** 从非点源污染的产生过程入手, 研究了五里湖非点源污染随降雨类型、下垫面特征和季节的变化特征。研究发现: 连续型降雨径流中污染物浓度具有先快速升至最高值、再随降雨历时逐渐减小的特征, 降水初期雨滴的溅蚀力是径流中污染物浓度升高的限制因子, 降水中后期限制因子转变为下垫面残存的非点源污染物数量; 间歇型降雨污染物浓度随整个降雨历时呈现锯齿状变化的特征, 原因是间歇型降雨持续时间较长, 降雨期间某些集水区污染源将新的污染物质输送到地表, 污染物累积效应被凸现出来; 非点源污染物浓度的月份变化曲线呈锯齿状, 是污染物累积作用、消减作用、前次降雨的影响、雨强等因素综合作用的结果; 非点源污染物的空间变化特征主要是由下垫面性质的差异、污染物来源的不同、污染程度和管理方式的差异造成的。

**关键词:** 五里湖; 非点源; 时空变化

中图分类号: X522

文献标识码: A

## Spatio-temporal Variation of Non-point Source Pollutants in Wuli Lake, Taihu Lake

LI Ying-jie<sup>1,2,3</sup>, NIAN Yue-gang<sup>2</sup>, SONG Ying-wei<sup>4,5</sup>, HU She-rong<sup>1</sup>, NIE Zhi-dan<sup>2</sup>, YAN Hai-hong<sup>2</sup>, YIN Qin<sup>2</sup>

(1. Inst. of Resources and Safety Eng., China Univ. of Mining and Technol., Beijing 100083, China;  
2. Research Center for Water Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sci., Beijing 100012, China;  
3. Shanxi Provincial Academy of Environmental Sci. Research and Design, Xi'an 710061, China;  
4. Dept. of Environmental Sci., East China Normal Univ., Shanghai 200062, China;  
5. Beijing Municipal Research Inst. of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The spatio-temporal variation of non-point source pollutants in Wuli Lake was studied through analyzing the production process of non-point source pollutants. The results showed that: the concentration of pollutants reached a peak immediately for the continuous rainfall, and then reduced gradually along with the time. At the beginning of rainfall, the limiting factor for pollutant concentration in runoff water is splash erosion force, while it changed to pollution amount on underlying surface during the mid-late period. The curve of the pollutant concentration seemed serrate for the intermittent rainfall because this kind of rainfall generally last for a long time, during which there are accumulated new pollutant in some drainage basins. The monthly variation curve of pollutants concentration seemed serrate, influenced by the accumulation and attenuation of pollutants, former rainfall, and the intensity of the rainfall, et al. The spatial variation of pollutants was influenced by the characteristics of the ground, sources of pollutant, pollutant degree, et al.

**Key words:** Wuli Lake; non-point source; spatio-temporal variation

收稿日期: 2008 - 07 - 22

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 资助项目 (2006AA06Z343; 2008ZX07012 - 002; 2002AA601013)

作者简介: 李英杰 (1978 - ), 男, 博士, 研究方向: 水环境工程。

\*通讯联系人 Email: nianyg@sohu.com

近年来,中国许多城市和城郊浅水湖泊富营养化状况不断加剧,结果造成严重的经济和生态环境问题<sup>[1]</sup>。随着对点源污染的有效控制,非点源污染对水体富营养化的贡献日益突出,目前在一些水域已成为水质恶化的主要原因<sup>[2-5]</sup>。非点源污染控制研究逐渐成为湖泊、河流生态系统恢复的研究重点。非点源污染控制需要估算非点源污染负荷,其常用方法是平均浓度法和直线斜割法<sup>[6-7]</sup>。这一方法必须以分析非点源污染物浓度的时空变化和了解年内降水分布为基础。目前国内外学者估算非点源污染负荷,大多研究土地利用方式、土壤类型、降雨量及其时空分布等因素对非点源污染负荷的影响<sup>[8-12]</sup>。五里湖是太湖流域污染最重的湖湾之一,近年来先后实施了入湖点源污染控制的截污工程,内源污染控制的环保疏浚工程,以及恢复生态系统功能的生态重建工程。工程实施后五里湖污染物浓度有了较大的降低,非点源污染逐渐成为主要矛盾。为掌握五里湖非点源污染负荷的产生情况,作者从非点源污染的产生过程入手,研究不同降雨类型、不同下垫面特征和不同季节情况下非点源污染的时空变化特征,为五里湖及其类似区域非点源污染负荷估算提供科学依据。

## 1 研究区概况

五里湖地处长江下游太湖流域,位于无锡市郊,属北亚热带湿润季风气候区。夏季炎热多雨,冬季干燥,春秋为过渡季节。据 1952~1999 年资料统计,研究区多年平均降水量为 1112.3 mm,平均年降水日数 125 天。降水量年内变化大,5~9 月汛期降水量占年降水量的 60% 以上。五里湖是太湖伸入无锡陆地的一片水域,周围以平原为主,仅西南一侧为山地,将其与梅梁湾分隔开来。因五里湖定位于景观旅游功能,湖周交通便利,湖滨带内游人通道纵横交错,不同集水小区之间地形地貌、土地利用、人类活动和径流类型差异较大,形成复杂的景观特征,为研究不同生态环境类型下的非点源污染特征提供了条件。

## 2 材料与方法

对区域而言,降雨具有空间差异性。同时,五里湖地区降雨具有连续型和间歇型两种类型,且具有季节、月份差异。因此本研究在采样点选取和采样时考虑了所选观测小区的代表性、各观测小区间样品的可比性及降雨期间所取样品的典型性 3 个方面

的问题。为此,根据五里湖流域的生态环境特征和非点源入湖途径选取了距离较近、取样方便、边界清晰的 6 个观测小区(图 1 和表 1)。各集水小区土壤类型均为黄棕壤,土壤质地从砂壤至粘壤,粘化明显。各集水小区的水样采集点为地表入湖口或入湖前最后一个排水检查井内。分别于 2005 年 4 月 9 日、5 月 13 日、6 月 10 日、6 月 27 日、7 月 5 日、7 月 9 日、7 月 29 日进行了非点源样的采集,每个样点每次取水样 500ml,密封冷藏至测定。同时在研究区附近 4 层楼顶采集雨水水样,用于对比研究。研究时间段内每次降雨量(表 2)通过自制简易雨量计获得。

测定的水样指标包括 pH、EH、电导率、COD(Mn)、悬浮颗粒物(SS)、氨氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )、亚硝态氮( $\text{NO}_2^- - \text{N}$ )、总氮(TN)和总磷(TP) 10 项。氮磷指标采用荷兰 SKALAR - SAN<sup>+</sup> 化学分析仪测定,pH 值利用酸度计测定,Eh 采用 Thermo Orion model 250A plus 精密型便携式氧化还原电位测量仪测定,电导率采用 DDS - 11A 电导率仪测定,按国家环保局标准<sup>[13]</sup>,SS 用 0.45  $\mu\text{m}$  膜滤烘干法测定,COD(Mn)采用酸性高锰酸钾法。



图 1 观测点位置示意图

Fig 1 Location of the studied area

## 3 结果与讨论

由于有时降雨量较小,在某些样点未形成有效径流,因此本研究仅选取部分既有代表性又取样完整的样点加以讨论分析。

### 3.1 非点源污染物时间变化特征

#### 3.1.1 连续降雨

连续降雨为该地区的主要降雨形式。由图 2 可知,随降雨历时的变化,同一个样点非点源污染物的

表 1 各观测小区基本特征

Tab 1 Characteristics of every sub-watershed

样点编号	集水区类型	主要特征
1	山脚公路	交通繁忙, 有专人负责卫生, 雨后路面积水经常被清扫。地表径流以冲沟方式入湖, 主要为路面积水。路边乔木树冠茂密, 径流入湖前流经草地过滤带。汇水路面面积 200m <sup>2</sup> , 草地面积约 200 m <sup>2</sup> 。
2	山脚公路	交通繁忙, 有专人负责卫生, 雨后路面积水经常被清扫。路面有起伏, 地表径流汇集后通过间隔暗管直排入湖, 主要为路面积水。路边乔木树冠茂密, 但地下草皮覆盖较差。汇水路面面积 500 m <sup>2</sup> 。
3	湖边乔草复合绿地	该区为干扰景观绿地, 区内排水沟 (深约 0.5 m, 宽约 0.25 m) 纵横交错, 沟间距离约 10 m, 排水通畅。因 2005 年春新栽许多乔木, 且经常灌溉, 地表草皮遭到一定程度的破坏。汇水面积 4200 m <sup>2</sup> 。
4	湖边乔草复合绿地	该区为景观绿地, 区内散步休闲观光的人相对较多。地表径流通过健全的地下排水系统排入湖中, 汇有观光公路路面积水。植被状况较好。总面积 15000m <sup>2</sup> , 其中草坪占 1/3, 乔草复合区占 2/3。
5	湖边乔灌草复合绿地	该区为景观绿地, 位置相对较偏, 游人数量少。地表径流通过健全的地下排水系统排入湖中, 汇有观光公路路面积水。植被状况较好。汇水面积约 13000 m <sup>2</sup> 。
6	湖边乔灌草复合绿地	该区为景观绿地, 区内有一家咖啡馆, 游人相对较多, 地表径流通过健全的地下排水系统排入湖中。植被状况较好。汇水面积 40000 m <sup>2</sup> , 其中草地占 1/6, 乔草复合区 2/3, 乔灌复合区 1/6。

表 2 2005 年 4~7 月研究区降雨记录

Tab 2 Rainfall of studied area from April to July in 2005

日期	4月 9日	4月 29日	5月 13日	6月 10日	6月 27日	7月 5日	7月 9日	7月 11日	7月 26日	7月 29日
降雨量 /mm	16.7	13.0	24.7	18.2	80.0	22.0	30.0	22.0	13.0	18.0

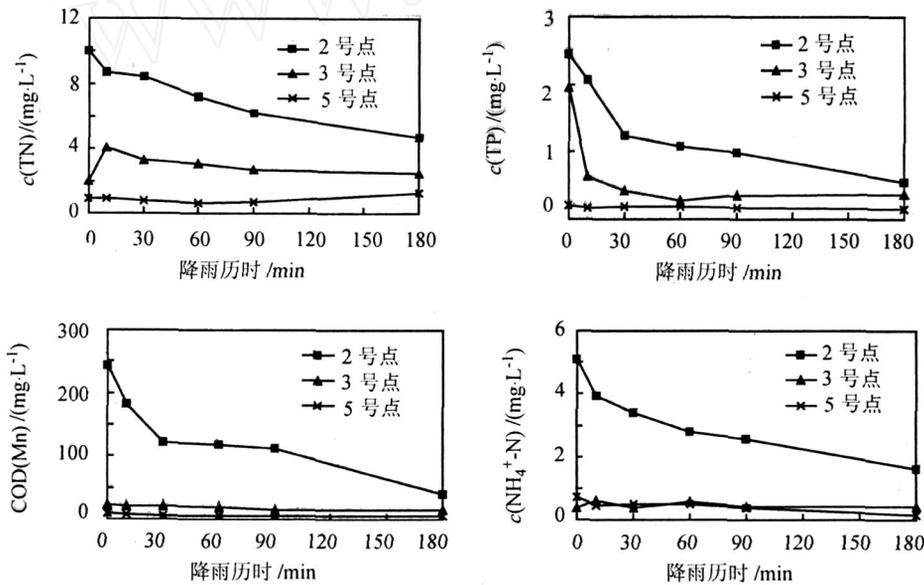


图 2 2005 年 4 月 9 日非点源污染物随降雨历时的浓度变化

Fig 2 Variation of pollutant concentration of NPS with runoff time on April 9th, 2005

浓度有很大不同, 3 个样点均表现为, 初期地表径流中污染物浓度快速升至最高值, 之后污染物浓度下降, 随降雨历时的延长, 曲线逐渐变的平缓; 各污染物中 TP 浓度随降雨历时变化曲线最为陡峭。各样点污染物浓度相差较大, 降雨初期 2 号样点 TN、TP、COD (Mn)、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度分别是 5 号的 9、15、28 和 13 倍, 降雨后期分别为 3、3、7、6、5 和 10 倍; 且各个

样点又各具特点, 2 号样点各污染物浓度减少速度相对较快, 浓度变化曲线较陡; 在降雨初期, 3 号样点径流 TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度有一升高的过程, 并很快达到峰值; 5 号样点 TN、TP、COD (Mn)、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度均较低, 随降雨历时呈近乎直线下降, 但曲线变化非常平缓, 并略有起伏。

非点源污染物浓度随降雨历时变化曲线呈降低

趋势且逐渐平缓是因为降雨初期下垫面积的非点源污染物较多,随着雨滴溅蚀和径流的冲蚀污染物逐渐减少。降水初期由于下垫面污染物较多,雨滴的溅蚀力和径流冲蚀力是径流中污染物浓度升高的限制因子,降水中后期其限制因子转变为下垫面残存的非点源污染物数量。TP曲线表现的最为陡峭可能因为降雨初期下垫面积积累的TP数量多,且多来源于交通运输和春季绿地所施肥料,易于被径流携带。与其它样点相比,2号样点各污染物浓度变化曲线较陡是因为2号样点下垫面是公路,污染物浓度高,降雨形成径流过程短且其上的污染物易于被径流携带,在较短时间内,径流携带的非点源污染物即可汇集至取样点。本研究仅3号样点TN和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N指标存在前期快速升高到峰值的特征,可能一是因为当时雨下的又大又急,初始取样前径流已形成一段时间,二是因为水泥路面径流形成所需时间少,结果造成这一过程极短。5号样点各污染物浓度随降雨历时的变化非常平缓,原因是此集水小区非点源污染物少,各污染物浓度较低,甚至低到与降雨全过程雨水中的污染物浓度接近。

3.1.2 间歇降雨

间歇降雨也是一种重要的降雨类型,长江流域

的梅雨即属于这一类型。

图3显示了这类降雨非点源污染物浓度随降雨历时的变化特征,1号样点呈现较明显的锯齿状变化特征,且各种污染物表现出一致的变化规律;3号样点除TP浓度变化较大外,其它污染物浓度变化不大;4号样点除NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N外其它污染物浓度变化均比较平缓。出现这些新特征的原因是,与连续降雨不同,这类降雨持续时间相对较长,雨强一般不大,降雨期间某些集水区污染源将新的污染物质输送到地表,污染物积累效应被凸现出来。结果,间歇降雨期间,受到污染物持续输入的区域,每次降雨初期均出现污染物浓度高值,非点源污染物浓度随整个降雨历时呈现较明显的锯齿状变化特征。特别是人类干扰强度大、干扰频繁的地区(如公路和城区),这种情况更加突出,而人类干扰较少的绿地则不存在这一情况。再者由于间歇降雨期间水与下垫面之间相互作用的时间相对较长,有利于深部污染物的释放和冲蚀。

因此,间歇降雨情况下,非点源污染物浓度随降雨历时的变化受降雨期间污染物累积过程、降水强度、径流冲蚀和降水对下垫面理化性质的改变等多种因素的综合影响。

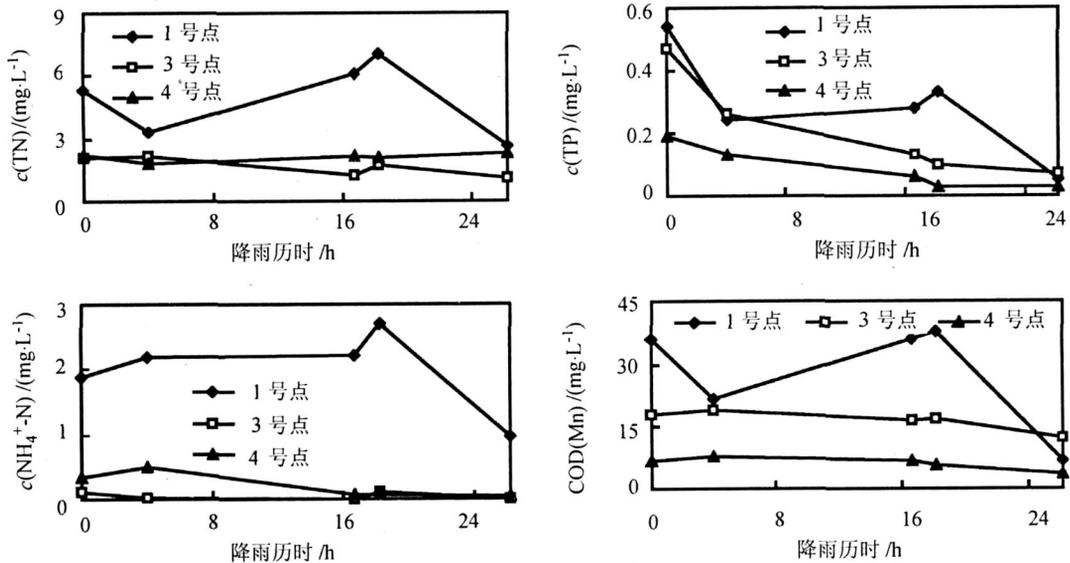


图 3 2005年 5月 13日非点源污染物随降雨历时的浓度变化

Fig 3 Variation of pollutant concentration of NPS with runoff time on May 13th, 2005

3.1.3 不同月份降雨

图4显示了非点源污染的月份变化特征,污染物浓度变化呈锯齿状。3个监测点均表现为4月9日入夏第一场降雨非点源污染物浓度较高,之后径流中非点源污染物浓度降低,再之后至6月27日降

雨径流中多数污染物浓度突然升高,7月29日降雨污染物浓度又升高。3号样点作为景观绿地第一场降雨污染物浓度异常高,特别是TP浓度。这些非点源污染的月份变化特征可解释为,4月9日之前长时期没下形成径流的降雨,非点源污染物长期积

累;6月27日降雨雨强较大,达暴雨水平,表现出降雨强度大污染负荷随之也大的规律;7月29日污染物浓度的升高是因为其前7月26至27日的短时降雨未形成有效径流,但其溅蚀作用促进了7月29日非点源污染物的释放。3号样点第一场降雨污染物浓度异常高是因为春季栽树破坏了草皮,土壤松软,颗粒物易被挟带。此外,该图并未表现出前人得出的距前一场降雨的时间越长,地面污染物就积累越

多,降雨径流污染越严重的规律<sup>[14]</sup>。这是因为非点源污染物随时间既有一个积累的过程,同时也存在一个消减的过程,如微生物的生化降解和反硝化作用、植物的吸收作用、污染物的物理消减作用(污染物的人为清扫和颗粒物在风力作用下的飘移)等,还与前次降雨对下垫面的淋洗程度有关。径流中污染物浓度的月份变化是污染物累积作用、消减作用、前次降雨的影响、雨强等因素综合作用的结果。

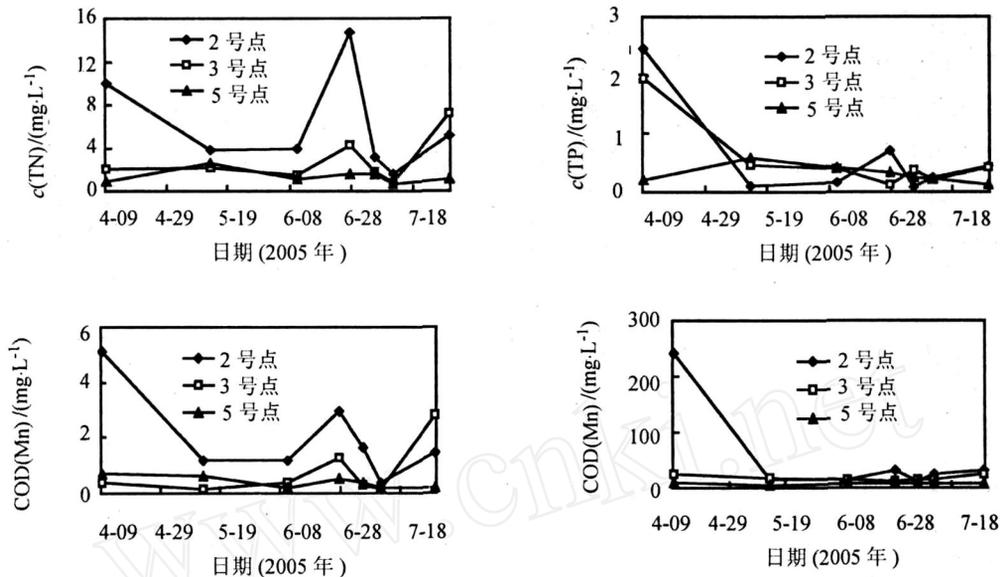


图 4 2005年4月至7月非点源污染物浓度的月份变化

Fig 4 Variation of pollutant concentration of NPS from April to July

### 3.2 非点源污染物的空间变化特征

从图2、图3和图4可以看出五里湖区域不同降雨类型和月份变化情况下各种污染物的空间变化特征。本研究选择的6个监测小区可分为交通繁忙的公路、干扰景观绿地和景观绿地3种类型。公路径流中污染物浓度最高,且月份变化曲线及间歇降雨变化曲线呈锯齿状,起伏较大。干扰景观绿地由于春季栽树草皮刚被破坏,土壤裸露且松散,随后的4月9日降雨径流污染物浓度明显高于植被状况好的景观绿地。污染物浓度高的公路和严重干扰的绿地污染物浓度随降雨历时变化曲线较陡峭。4月9日全过程雨水样TN、TP和COD(Mn)浓度分别为0.76 mg/L、0.09 mg/L、2.67 mg/L,且各样点距离较近,周围又没有大的大气污染源,所以雨水样应该没有太大的差异,径流中的大部分污染物不是来自大气,而是来自下垫面。

从非点源污染的产生过程可知,非点源污染物的空间变化特征主要是由下垫面性质的差异、管理方式的差异、污染物来源和污染程度的不同造成的。

植被的截留作用降低了地面的受雨量,且有效削弱了雨滴的溅蚀作用。含根土壤层由于其透水和贮水性能,减少了径流量,阻碍了径流的快速形成。土壤中的密集根网能加固根际土层,增强土壤粘聚力,从而降低径流对污染物的挟带作用,土壤中的植物和微生物具有吸收转化污染物的功能。人类干扰少的林地和草地具有降低非点源污染的作用,随着林地、草地所占比例的增加,非点源污染减少<sup>[15]</sup>。绿地的可达性及其中路的密度和游人的季节性增减也是很重要的影响非点源的因素。而公路地面径流易于形成,排水通畅的路面雨后淋洗的比较彻底,且繁忙的交通道路的污染物引入是连续的,有的路面还被定期清扫。在英国,林业区的耕作和排水活动使大面积土壤暴露,是造成水污染的主要原因;20世纪90年代早期苏格兰开展的一项研究表明,繁忙的公路可使公路表面沉积物增加2-10倍<sup>[16]</sup>。

## 4 结论

从非点源污染的产生过程入手,研究了五里湖

非点源污染的时空变化特征及其产生机理。研究发现:1)连续型降雨径流中污染物浓度具有先快速升至最高值、再随降雨历时逐渐减小的特征,降水初期雨滴的溅蚀力是径流中污染物浓度升高的限制因子,降水中后期限因子转变为下垫面残存的非点源污染物数量;2)间歇型降雨污染物浓度随整个降雨历时呈现锯齿状变化的特征,原因是间歇型降雨持续时间较长,降雨期间某些集水区污染源将新的污染物质输送到地表,污染物累积效应被凸现出来;3)非点源污染物浓度的月份变化曲线呈锯齿状,是污染物累积作用、消减作用、前次降雨的影响、雨强等因素综合作用的结果;4)非点源污染物的空间变化特征主要是由下垫面性质的差异、污染物来源的不同、污染程度和管理方式的差异造成的。

### 参考文献:

- [1] Qiu D R, Wu Z B, Liu B Y, et al The restoration of aquatic macrophytes for improving water quality in a hypertrophic shallow lake in Hubei Province, China [J]. Ecological Engineering, 2001, 18 (2): 147 - 156
- [2] Wang X J, Zhang W, Huang Y N, et al Modeling and simulation of point-nonpoint source effluent trading in Taihu Lake area: perspective of non-point sources control in China [J]. Science of the Total Environment, 2004, 325 (1): 39 - 50
- [3] Yang Ailing, Zhu Yanming. The study of nonpoint source pollution of surface water environment [J]. Advances in Environmental Science, 1998, 7 (5): 60 - 67. [杨爱玲, 朱颜明. 地表水环境非点源污染研究 [J]. 环境科学进展, 1998, 7 (5): 60 - 67.]
- [4] Yan Weijin, Yin Chengqing, Sun Pu, et al Phosphorus and nitrogen transfers and runoff losses from rice field wetlands of Chaohu Lake [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10 (3): 312 - 316 [晏维金, 尹澄清, 孙濮, 等. 氮磷在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程 [J]. 应用生态学报, 1999, 10 (3): 312 - 316.]
- [5] Wang Shaoping, Yu Zhongli, Xu Shiyuan, et al Research of Non-point sources pollution loading in Suzhou Creek [J]. Research of Environmental Sciences, 2002, 15 (6): 20 - 27. [王少平, 俞中立, 许世远, 等. 苏州河非点源污染负荷研究 [J]. 环境科学研究, 2002, 15 (6): 20 - 27.]
- [6] LI Huaian Mean concentration method for estimation of nonpoint source load and its application [J]. Acta Scientiae Circumstantia, 2000, 20 (4): 397 - 400. [李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用 [J]. 环境科学学报, 2000, 20 (4): 397 - 400.]
- [7] Chen Youyuan, Hui Erqing, Jin Chunji, et al A hydrological method for estimation of non-point source pollution loads and its application [J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16 (1): 10 - 13. [陈友媛, 惠二青, 金春姬, 等. 非点源污染负荷的水文估算方法 [J]. 环境科学研究, 2003, 16 (1): 10 - 13.]
- [8] Hao Fanghua, Ren Xiyan, Zhang Xuesong, et al Uncertain affecting factor of the non-point source pollution load [J]. China Environmental Science, 2004, 24 (3): 270 - 274. [郝芳华, 任希岩, 张雪松, 等. 洛河流域非点源污染负荷不确定性的影响因素 [J]. 中国环境科学, 2004, 24 (3): 270 - 274.]
- [9] Bohn B A, Kershner J L. Establishing aquatic restoration priorities using a watershed approach [J]. Environmental Management, 2002, 64 (1): 355 - 363.
- [10] Yan Wujiu Bao Xiang Study on agricultural movement of Chaohu Lake basin and Nonpoint Source pollution [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15 (4): 129 - 132. [阎伍玖, 鲍祥. 巢湖流域农业活动与非点源污染的初步研究 [J]. 水土保持学报, 2001, 15 (4): 129 - 132.]
- [11] Hu Xuetao, Chen Jining, Zhang Tianzhu. A study on non-point source pollution models [J]. Environmental Science, 2002, 23 (3): 124 - 128. [胡雪涛, 陈吉宁, 张天柱. 非点源污染模型研究 [J]. 环境科学, 2002, 23 (3): 124 - 128.]
- [12] Wang Xiahui, Yin Chengqing, Yan Xiao, et al Three patterns of interaction between soil and Non-point source pollutants in agricultural watershed [J]. Environmental Science, 2004, 25 (4): 123 - 128. [王夏晖, 尹澄清, 颜晓, 等. 流域土壤基质与非点源磷污染物作用的 3 种模式及其环境意义 [J]. 环境科学, 2004, 25 (4): 123 - 128.]
- [13] Ministry of environmental protection of PRC. Methods for the Monitoring of water and wastewater [M]. 4th ed Beijing: China Environmental Science Publishing Company, 2002: 1 - 784. [国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 1 - 784.]
- [14] Shen Guifen, Zhang Jingdong, Yan Xiaoxuan Characteristics of runoff water quality in Wuhan and its main influencing factors [J]. Water Resources Protection, 2005, 21 (2): 57 - 58. [沈桂芬, 张敬东, 严小轩. 武汉降雨径流水质特性及主要影响因素分析 [J]. 水资源保护, 2005, 21 (2): 57 - 58.]
- [15] Li Junran, Chen Liding, Guo Xudong, et al Effects of land use structure on non-point source pollution [J]. China Environmental Science, 2000, 20 (6): 506 - 510. [李俊然, 陈利顶, 郭旭东, 等. 土地利用结构对非点源污染的影响 [J]. 中国环境科学, 2000, 20 (6): 506 - 510.]
- [16] Nisbet T R. The role of forest management in controlling diffuse pollution in UK forestry [J]. Forest Ecology and Management, 2001, 143 (3): 215 - 226

(编辑 黄小川)