

# 第二松花江流域非点源污染输出负荷研究

杨育红<sup>1,2</sup>, 阎百兴<sup>1</sup>, 沈波<sup>3</sup>, 曹会聪<sup>1</sup>, 袁星<sup>4</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 水利部松辽水利委员会, 吉林 长春 130021; 4. 东北师范大学城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024)

**摘要:** 根据第二松花江流域水文具有明显季节变化和非点源污染主要发生在汛期, 点源排放量年内相对稳定的特点, 利用第二松花江流域出口控制水文站和水质控制断面监测数据, 分别计算了第二松花江流域 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 的非点源输出负荷。结果表明, 流域多年平均输出的非点源 COD 负荷为 99 930 t·a<sup>-1</sup>, 点源 COD 负荷为 174 743 t·a<sup>-1</sup>, 分别占流域总输出 COD 负荷的 36% 和 64%, 点源 COD 污染仍是第二松花江流域的主要污染源; 非点源 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 输出负荷为 9 888 t·a<sup>-1</sup>, 占总 NH<sub>3</sub>-N 负荷的 44%, 并呈增长趋势; 非点源污染输出负荷有明显的时空分布特征, 并与流量呈显著正相关。夏汛期非点源 COD 输出负荷(y)与同期流量(x)有  $y = -44\,849 + 161.682x$ 。因此可利用气象、水文动态预报数据进行流域非点源污染输出负荷的预报, 为非点源污染预防和控制提供科学基础。建议在继续加大流域内工业废水和生活污水处理力度的基础上, 对非点源污染防治也要进行更多关注。

**关键词:** 第二松花江; 非点源; 污染负荷; COD; NH<sub>3</sub>-N

**中图分类号:** X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)01-0161-05

## Study on Load of Nonpoint Source Pollution in the Second Songhua River Basin

YANG Yu-hong<sup>1,2</sup>, YAN Bai-xing<sup>1</sup>, SHEN Bo<sup>3</sup>, CAO Hui-cong<sup>1</sup>, YUAN Xing<sup>4</sup>

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun 130012, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Songliao Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, Changchun 130021 China; 4. College of Urban & Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

**Abstract:** Nonpoint source pollution (NPS) has been considering as a major environmental issue around the world. It is much more difficult to identify and control nonpoint source than point source (PS). This study was designed to estimate the loads of chemical oxygen demand (COD) and ammonia nitrogen (NH<sub>3</sub>-N) in the Second Songhua River Basin, where the hydrometeorological characters had distinguishingly seasonal wave and NPS pollution loads were mostly produced in the flood season. PS pollution was much more readily identifiable and its load was steady during a year and interannual years. On the basis of the long term real-time monitoring data of flow and river water quality in the control section (Ganshuigang Section), which was located in the watershed outlet, the loads of NPS and PS could be estimated. The result showed that mean pollution loads of COD from NPS and PS in 1985—2006 were 99 930 t·a<sup>-1</sup>, 174 743 t·a<sup>-1</sup>, which accounted for 36% and 64% of total output load, respectively. NH<sub>3</sub>-N load of NPS was 9 888 t·a<sup>-1</sup>, which occupied 44% and grew markedly during the last five years. PS was still greater pollution source in the research basin. There were significant positive correlation relationship between NPS load and flow, obvious temporal and spatial fluctuations of NPS pollution load in the river basin. The model of NPS load (y) for COD and the flow (x) was  $y = -44\,849 + 161.682x$  by using regression analysis method. Therefore, it was indispensable to dispose waste water from industrial and municipal sections and to control NPS from farmland runoff in order to protect water quality in the basin. Also, the study provide an useful method to forewarn NPS pollution loads by forecasting of precipitation and flow mass, which will afford a scientific and practical tool of watershed management and NPS pollution control in the Second Songhua River Basin.

**Keywords:** the Second Songhua River Basin; nonpoint source; load; COD; NH<sub>3</sub>-N

收稿日期: 2008-04-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB407205、2004CB418502); 水利部项目“东北黑土区水土流失与生态安全综合科学考察”(2005SBKK01)

作者简介: 杨育红(1971—), 女, 河南焦作人, 博士研究生, 主要研究方向是环境污染与防治。E-mail: yangyuhong1971@163.com

通讯作者: 阎百兴 E-mail: yanbx8@163.com

非点源污染是造成地表水体质量恶化的重要污染源。与点源污染排放时间的连续性、排放量的易知性、排放途径的固定性相比,非点源污染排放具有不确定时间、不确定途径、不确定量的特点。因此,非点源污染负荷量化研究是了解、掌握非点源污染状况和管理水环境的基础,也是非点源污染研究的重点和热点<sup>[1]</sup>。

非点源污染负荷量化模型常见的有经验模型和机理功能模型两大类。前者具有参数少,操作简单的优点。20世纪70年代初期,美国、加拿大等国在研究土地利用-营养负荷-湖泊富营养化关系的过程中,提出并应用了输出系数法<sup>[2]</sup>;根据典型流域的次暴雨水质水量同步监测资料,忽略非点源污染随地表径流迁移过程,利用统计分析方法,可建立水质水量相关关系<sup>[3]</sup>;污染分割法、降雨量差值法<sup>[4]</sup>、平均浓度法<sup>[5]</sup>等。后者有 HSPF、SWMM、ANSWERS、ARM、CREAMS、GLEAMS、SWRRB、ROTO、EPIC、SWAT<sup>[6]</sup>、AGNPS<sup>[7]</sup>、LOAD、LASCAM<sup>[8]</sup>、SLURP 模型<sup>[9]</sup>和 L-THIA 模型<sup>[10]</sup>等,这些模型要求的参数多、步长短、操作复杂,不适宜基础资料缺乏的国家和地区。我国非点源污染负荷研究多集中于“三湖”、“三河”国家重点控制流域和地区,东北地区非点源污染负荷研究集中在吉林省重要水源地新立城水库<sup>[11]</sup>、松花湖<sup>[12]</sup>、石头口门水库<sup>[13]</sup>,吉林西部、松嫩平原<sup>[14]</sup>农业区和辽西农业小流域<sup>[15]</sup>等,多为小流域或小区尺度的负荷研究,计算结果为流域不同土地类型汇入地表水的非点源污染负荷之和,而流域出口非点源污染负荷仅占输入河流总负荷的一部分。因此寻求准确的估算较大流域非点源污染输出负荷的方法十分迫切和必要。对具备长系列水质水量同步监测数据的大流域,本文提出的“二源分割法”仍不失其优点,是目前具有较高精度的理想方法。

2006年松花江流域纳入国家“十一五”重点治理流域规划,相对点源污染来说,对流域的非点源污染负荷仍知之甚少,因此,以第二松花江(以下简称二松)流域为研究对象,以国家“一控双达标”控制污染物化学耗氧量(COD)和主要非点源污染物  $\text{NH}_3\text{-N}$  为主要目标污染物,利用流域出口控制水文站扶余站和水质控制断面泔水缸断面多年的流量和水质监测数据,对二松流域非点源 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的输出负荷进行估算,为二松流域污染源管理和水污染综合防治提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

第二松花江流域贯穿吉林省中、东部地区,全长 790 km,流域面积 78 182 km<sup>2</sup>,位于东经 124°36′~128°50′,北纬 41°44′~45°24′(图 1)。主要支流有辉发河、伊通河、饮马河等,每年有近 5 个月的冰封期。流域多年平均径流量 172.6 亿 m<sup>3</sup>,其中 6—9 月份径流量占全年径流量的 68%~78%;每年 3—4 月,积雪融化形成的径流补给河流,常形成桃花汛。因此,二松有明显的春汛和夏汛。流域地处中纬度地带,属温带大陆性季风气候,降水的区域性和季节性变率大,造成二松的年径流变化也较大,连丰、连枯期也较长。流域人口总数 1 818 万人(2003 年),耕地面积 171.47 万 hm<sup>2</sup>,有效灌溉面积 46.47 万 hm<sup>2</sup>,单位面积化肥用量 219.2 kg·hm<sup>-2</sup>。中下游地区是我国重要的商品粮基地,也是重要的工业密集区,主要有化工城吉林、汽车城长春和石油城松原等。

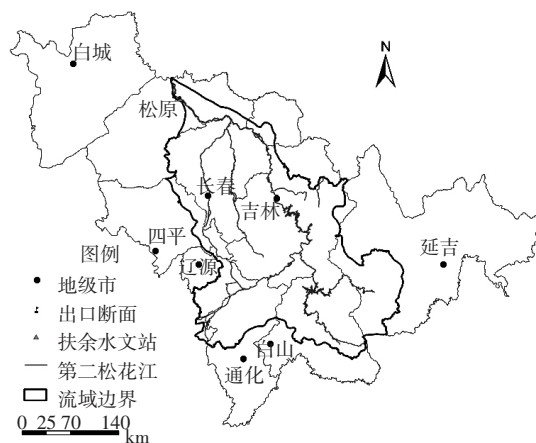


图 1 第二松花江流域自然地理位置

Figure 1 Location of the Second Songhua River basin

### 1.2 计算方法

非点源污染是指溶解性污染物或固体污染物在降水、径流冲刷或其他营力作用下,汇入水体而引起的污染。产生非点源污染的主要驱动力是地表径流和水田排水。对水体来说,只有进入水体的非点源,才是有效的,其负荷计算对水体的环境质量改善才有意义。研究表明,非点源污染主要是由汛期地表径流引起的<sup>[5,16]</sup>。第二松花江流域每年 11 月下旬至次年 3 月中下旬(即枯水期),土壤、地表水体处于封冻状态,土壤冻结深度 0.5~1.0 m,江河水面封冻深度 >0.5 m,没有

地表径流和随地表径流携带的非点源污染负荷进入地表水体。因此,可以认为,第二松花江流域汛期水环境质量是由点源和非点源共同引起的,而枯水期水质主要受点源影响。

对于整个流域,进入河流并对河流水质产生影响的污染源主要是非点源和点源,污染物由坡面经沟道、河道逐级迁移、转化、衰减及净化,最终经由流域出口断面输出。由于进行流域非点源观测或实地监测的难度很大,而模型操作复杂,需要大量的水文、气象、土壤背景资料和污染物实时监测数据输入,对污染物在产流-汇流过程中输移机理研究的缺乏和影响因素众多等原因,增加了对进入河道的有效非点源污染负荷经过长距离迁移、变化、输出的流域污染负荷研究的难度。本文拟采用“二源分割法”,避开污染物从产生到输出流域的迁移转化过程,直接从流域出口断面水质进行分析,将点源和非点源污染物概化于流域出口断面,按照完全混合水质模型,对水体质量有影响的污染源视为点源、非点源共同作用。流域点源污染负荷年内相对比较稳定,可通过枯季污染物实测浓度  $C_k$ 、枯季流量  $Q_k$  求得;汛期总的污染负荷,包括非点源和点源污染负荷,可通过实测汛期污染物浓度  $C_x$  乘以汛期流量  $Q_x$  求得;汛期和枯季污染负荷之差即为流域非点源污染输出负荷。计算公式为:

$$W_n = Q_x C_x - Q_k C_k \quad (1)$$

式中:  $W_n$  为非点源污染输出负荷,  $g \cdot s^{-1}$ ;  $Q_x$ 、 $Q_k$  分别为汛期、枯水期河流流量,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ;  $C_x$ 、 $C_k$  分别为汛期、枯水期污染物浓度,  $mg \cdot L^{-1}$ 。

### 1.3 出口断面选取

由于“二源分割法”是基于详细的水文资料和水质监测数据建立的经验计算方法,因此对出口断面的选取要求具备距离流域出口近,设有水文监测站和水质监测站,能提供多年连续的监测数据。研究选取的第二松流域出口断面泔水缸是省控水质监测断面,扶余水文站为二松控制水文站,二者相距较近,距流域出口均不到 10 km;且有长系列的监测资料,是理想的流域出口断面。

## 2 结果与讨论

### 2.1 流域输出污染负荷

二松流域水体季节性特征明显,通常夏汛期为

6、7、8、9 月份,春汛期为 3、4、5 月份,枯水期为 12、1、2 月份。根据 1985—2006 年扶余水文站月流量数据和 COD 监测浓度<sup>①②</sup>,应用“二源分割法”,得到流域出口断面总的输出负荷和不同水期点源、非点源 COD 输出负荷,见表 1 和图 2~图 5。

表 1 二松流域多年平均 COD 污染源输出负荷

Table 1 Mean Output COD Load of the Basin

污染源	水期	COD 负荷/ $t \cdot a^{-1}$	占年总负荷比例/%
点源	枯水期	174 743	64
	夏汛期	86 157	31
非点源	春汛期	13 773	5

二松流域 COD 点源污染输出负荷高于非点源污染输出负荷,占总负荷 64%;非点源占 36%,其中夏汛期 NPS 占 31%,春汛期占 5%。这与现有二松水体的污染情况一致,点源污染依然是主要污染源,同时也符合松花江流域水质研究的相关文献成果<sup>[17-18]</sup>。

### 2.2 输出负荷与流量的相关性

图 3~图 5 可见,COD 污染输出负荷与流量呈现一致的趋势变化。应用 SPSS 12.0 数据统计分析软件,在指定显著性水平 0.01 时,夏汛期非点源 COD 负荷与流量相关系数为 0.984、春汛期为 0.553、枯水期点源 COD 负荷与流量相关系数为 0.818。因此,仅对夏汛期数据通过 11 种曲线模型进行曲线估计,置信区

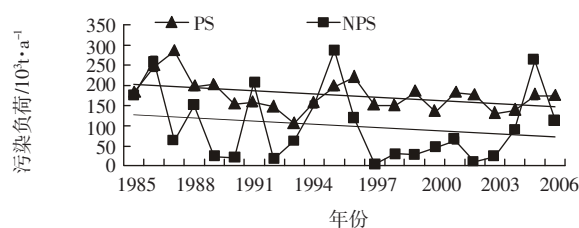


图 2 流域 1985—2006 年 COD 输出负荷

Figure 2 COD loads of the basin in 1985—2006

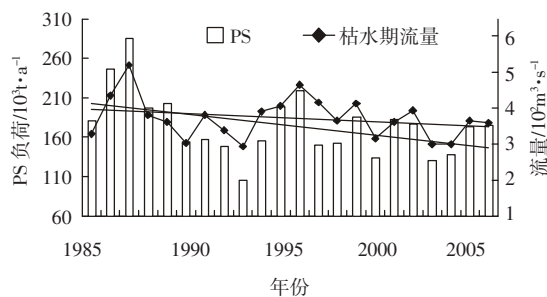


图 3 流域枯水期 COD 污染负荷

Figure 3 COD load of the basin in low flow

①《吉林省环境监测年鉴(1985—1997)》

②《吉林省环境质量报告书(1998—2006)》



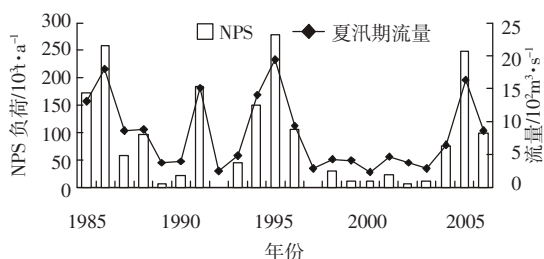


图4 流域夏汛期 COD 污染负荷

Figure 4 COD load in summer flood season

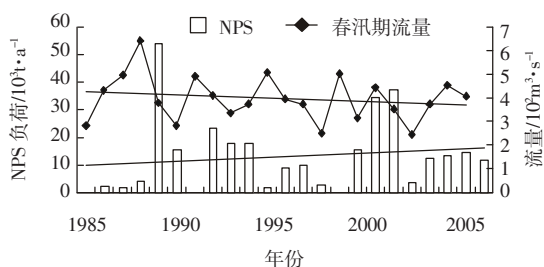


图5 流域春汛期 COD 输出负荷

Figure 5 COD load in spring flood season

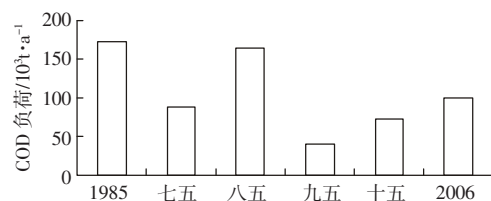


图6 1985—2006 阶段性 COD 输出负荷

Figure 6 COD load at five year interval

间 95%时,夏汛期非点源 COD 输出总负荷( $y, t \cdot a^{-1}$ )和同期平均流量( $x, m^3 \cdot s^{-1}$ )存在一元线性关系,回归模型为  $y = -44\ 849 + 161.682x$ ; 枯水期流量与 COD 点源污染负荷比较稳定,汛期 COD 非点源污染负荷随汛期流量波动,这与二松流域水文特征相吻合。通过回归模型可预测,在某些干旱年,由于降水因子驱动强度低,形成径流冲刷小,流域出口几乎没有非点源负荷输出。COD 污染输出负荷 5 年滑动平均分析(图 6)可以看出,“九五”期间是转折点,出现污染负荷大幅度降低后逐渐增长的趋势,与“九五”期间企业改制和流域主要城市重视城镇污水处理厂建设等政策有关。

### 2.3 非点源输出负荷年际变化及负荷率趋势预测

图 4、图 5 可以看出,夏汛期非点源 COD 负荷从 1985—1995 年、1995—2005 年呈现 W 型变化,而春汛期 COD 负荷则相反,出现 M 型变化。长时间序列

来看,在流域产业结构无大的变化情况下,中短期内输出非点源 COD 负荷 10 万  $t \cdot a^{-1}$  左右。

据《松花江流域水污染防治规划 2006—2010》污染控制指标,截至 2010 年,吉林省 COD 排放量控制在 22.5 万 t。COD 点源污染排放稳步下降。按吉林、长春、松原 3 市点源 COD 排放量占全省排放量的 38% (2000—2006 年平均),非点源污染负荷保持多年平均负荷计,到 2010 年 3 市排放点源 COD 85 500  $t \cdot a^{-1}$ ,占流域总 COD 负荷的 44%。二松流域非点源 COD 将超过点源,成为第二松花江水质的主要污染源。而吉林省中部玉米带“粮变肉”工程的实施和二松下游水稻商品粮基地的建设,农牧业非点源污染负荷排放将出现急剧增加趋势,因此,加强流域非点源污染的预防和控制是改善第二松花江水质的主要内容。

### 2.4 模型精度分析

利用枯水期水质和水文资料,计算流域多年平均输出点源 COD 输出负荷 174 743  $t \cdot a^{-1}$ ,与吉林、长春、松原 3 市 2000—2006 年统计的平均 COD 点源排放量 154 388  $t \cdot a^{-1}$  的偏差 < 20%,考虑到地表径流的复杂性和流域点源排放量统计有所遗漏等因素,这种误差是在可以接受的范围内的<sup>[9]</sup>。用本文提出的“二源分割法”计算 2002—2006 年流域输出氨氮污染负荷(图 7),点源  $NH_3-N$  负荷稳定,非点源氨氮负荷呈增长趋势,5 年平均非点源  $NH_3-N$  负荷占总负荷的 44%。这与吉林省环境质量报告点源与非点源  $NH_3-N$  污染负荷比率相吻合。可见,在流域出口断面,进行流域输出负荷计算的“二源分割法”操作简单,结果可信。

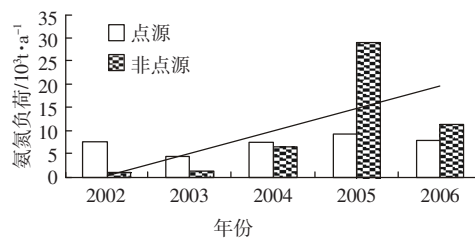


图7 流域氨氮输出负荷

Figure 7  $NH_3-N$  load of the research basin

## 3 结论

(1)目前第二松花江流域 COD 和  $NH_3-N$  点源污染依然是二松流域主要的污染源,年均输出污染负荷分别为总负荷的 64%和 56%,应继续加大吉林、长春和松原 3 市的工业废水和生活污水处理力度。

(2)“十一五”COD 减排目标的推进和实现,第二

松花江输出点源 COD 污染负荷将逐渐减少,即使非点源负荷不增加,到 2010 年流域输出的非点源污染负荷将占总负荷的 56%,非点源 COD 污染将超过点源污染,成为第二松花江流域主要污染源。而随着吉林省规模化养殖业的迅猛发展和吉林西部水稻商品粮基地的建设,非点源污染势必快速增加,非点源污染负荷所占比率还将升高。

(3)对于东北地区具有长达 5 个月冰封期的气候特征而言,以流域出口断面的流量、水质监测浓度为基准,提出的流域点源和非点源“二源分割法”原理明确,相对精度较高,适宜于有同步水质、水量资料的流域非点源污染输出负荷计算;利用污染负荷与流量的回归模型也可进行流域污染负荷预报。

#### 参考文献:

- [1] L F Leon, D C Lam, D A Swayne, et al. Integration of a nonpoint source pollution model with a decision support system[J]. *Environmental Modeling and Software*, 2000(15):249–255.
- [2] Omerinik J M. The influence of land use on stream nutrient levels[R]. Washington DC: USEPA, 1976.
- [3] 洪小康,李怀恩.水质水量相关法在非点源污染负荷估算中的应用[J].西安理工大学学报,2000,16(4):384–386.  
HONG Xiao-kang, LI Huai-en. Correlation method of water quality and quantity and its application to load estimation of nonpoint source pollution[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2000, 16(4):384–386.
- [4] 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):397–399.  
LI Huai-en. Mean concentration method for estimation of nonpoint source load and its application[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(4):397–399.
- [5] 蔡明,李怀恩,刘晓军.非点源污染负荷估算方法研究[J].人民黄河,2007,29(7):36–37,39.  
CAI Ming, LI Huai-en, LIU Xiao-jun. Study on estimation methods of non-point source pollution [J]. *Yellow River*, 2007, 29(7):36–37, 39.
- [6] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah Tsetal. Large area hydrologic modeling and assessment part II: Model application [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 43(1):91–101.
- [7] Young R, Onstad C, Bosch D, et al. Agricultural nonpoint source pollution model: A watershed analysis tool, model documentation, agricultural research service, U.S. Department of Agriculture, Morris, MN.
- [8] 徐力刚,张奇.流域非点源污染物输移模型研究现状及展望[J].农业环境科学学报,2006,25(增刊):306–322.  
XU Li-gang, ZHANG Qi. Status and prospects of models for non-point source pollution [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25 (Sup):306–322.
- [9] 梁常德,龙天渝,李继承,等.三峡库区非点源污染氮磷负荷研究[J].长江流域资源与环境,2007,16(1):26–30.  
LIANG Chang-de, LONG Tian-yu, LI Ji-cheng, et al. Importation loads of non-point source nitrogen and phosphorus in the Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(1): 26–30.
- [10] 金洋,李恒鹏,李金莲.太湖流域土地利用变化对非点源污染负荷量的影响[J].农业环境科学学报,2007,26(4):1214–1218.  
JIN Yang, LI Heng-peng, LI Jin-lian. The impact of non-point pollution load of land-use changes in Taihu Basin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1214–1218.
- [11] 杨爱玲.城市饮用水地表水源保护研究——以东北区为例[D].长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2000.  
YANG Ai-ling. Study on the protection of urban drinking water source—a case of Northeast area [D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, 2000.
- [12] 王宁.松花湖流域非点源污染研究[D].长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2001.  
WANG Ning. Study of agricultural nonpoint source pollution in Songhua Lake [D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, 2001.
- [13] 孟丹.基于GIS的石头口门水库流域农业非点源污染研究[D].长春:东北师范大学,2006.  
MENG Dan. Study of rural nonpoint source pollution in Shitoukoumen Reservoir based on GIS [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2006.
- [14] 阎百兴.松嫩平原农业非点源污染研究[D].长春:吉林大学,2004.  
YAN Bai-xing. Study of agricultural nonpoint source in the Songnen Plain [D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [15] 张水龙.基于流域单元的农业非点源污染负荷估算[J].农业环境科学学报,2007,26(1):71–74.  
ZHANG Shui-long. Calculating agricultural non-point source pollution load based on watershed unit [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):306–322.
- [16] 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.  
CHEN You-yuan, HUI Er-qing, JIN Chun-ji, et al. A hydrological method for estimation of non-point source pollution loads and its application [J]. *Research of Environment Sciences*, 2003, 16(1):10–13.
- [17] 岳勇,程红光,杨胜天,等.松花江流域非点源污染负荷估算与评价[J].地理科学,2007,27(2):231–236.  
YUE Yong, CHENG Hong-guang, YANG Sheng-tian, et al. Integrated assessment of non-point source pollution in Songhuajiang River Basin [J]. *Geographical Science*, 2007, 27(2):231–236.
- [18] 钱易,张杰,李圭白.东北地区水污染防治对策研究[M].北京:科学出版社,2007:135–138.  
QIAN Yi, ZHANG Jie, LI Gui-bai. Study on water pollution and control strategy in Northeast China [M]. Beijing: Science Press, 2007:135–138.
- [19] Novotny V, Chesters G. Handbook of nonpoint pollution: Sources and management [M]. Van Nostrand Reinhold Company, 1981.