

呼伦湖主要入湖河流克鲁伦河丰水期污染物通量(2010—2014)*

李卫平¹, 陈阿辉¹, 于玲红^{1**}, 杨文焕¹, 殷震育¹, 杨培峰¹, 焦丽燕²

(1: 内蒙古科技大学能源与环境学院, 包头 014010)

(2: 山东晖泽水务(青州)有限公司, 潍坊 262500)

摘要: 为控制呼伦湖的水体恶化趋势, 利用2010—2014年的水质监测数据首次对呼伦湖的主要入湖河流——克鲁伦河丰水期(6—8月)氨氮、总氮、总磷和化学需氧量等污染物的入湖通量进行详细研究。采用单因子指数法对水质进行评价, 通过等标污染负荷确定入湖口的首要污染物, 利用相关性分析研究水质、水量、污染物通量三者之间的相互关系。结果表明: 克鲁伦河入湖口水体受总氮与化学需氧量污染较为严重, 均处于V类或劣V类水平, 总磷浓度整体处于Ⅲ~Ⅳ类水平。污染物入湖通量有逐年递增之势, 2014年稍有下降, 总氮的等标污染负荷最高, 为入湖口的主要污染物。入湖口水质与水量呈现出一定的正相关关系, 水量是影响污染物入湖通量的关键因子, 而入湖水质则是影响入湖通量的主要影响因子。控制总氮及化学需氧量的入湖通量是当前的首要任务, 合理控制放牧、将村镇的污水处理后达标排放是减轻河湖水体污染的当务之急。

关键词: 呼伦湖; 克鲁伦河; 水质; 水量; 污染物通量

Pollutant influx from the main river (Kherlen River) of Lake Hulun in wet seasons, 2010 – 2014

LI Weiping¹, CHEN Ahui¹, YU Linghong^{1**}, YANG Wenhuan¹, YIN Zhenyu¹, YANG Peifeng¹ & JIAO Liyan²

(1: Inner Mongolia University of Science and Technology Institute of Energy and Environment, Baotou 014010, P.R.China)

(2: Shandong Huize Water Corporation in Qingzhou, Weifang 262500, P.R.China)

Abstract: In order to control the water deterioration of Lake Hulun, using the water quality monitoring data of Kherlen River which is the main river into Lake Hulun in the wet seasons (from June to August) of 2010 – 2014 to study the pollutant influx of ammonia nitrogen, total nitrogen, total phosphorus and COD_{Cr} in detail. Single factor index method was used in water quality evaluation and the primary pollutant was found out by the equal standard pollution load in the estuary. Correlation analysis was used to study the relationship among water quality, water quantity and pollutant influx. The results showed that during the study period the water in estuary was polluted by total nitrogen and chemical oxygen demand seriously, all stayed in class V or substandard V level. Total phosphorus was at a level of class Ⅲ to Ⅳ. Pollutant influx were increasing year by year and there was a slight decline in 2014. The equal standard pollution load of total nitrogen was the highest of all and became the primary pollutant in the estuary. There was certain positive correlation between water quality and water quantity in the estuary. Water quantity was the key factor affecting the pollutant influx, while water quality was the main factor. At present, control the influx of TN and COD_{Cr} is the primary task. Reasonable controlling of grazing and making the wastewater of town up to the discharging standard after processing are imperative to reduce the water pollution of river and lake.

Keywords: Lake Hulun; Kherlen River; water quality; water quantity; pollutant influx

呼伦湖位于内蒙古呼伦贝尔草原西部的新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗和满洲里市之间, 是中国第四大

* 国家自然科学基金项目(41263010)、内蒙古科技大学创新基金项目(2011NCL028)和2015内蒙古科技计划项目联合资助。2015-05-08收稿; 2015-06-23收修修改稿。李卫平(1973~), 男, 博士, 副教授; E-mail: sjlwp@163.com.

** 通信作者; E-mail: ylh0730@163.com.

淡水湖,也是内蒙古第一大湖.近年来由于气候变化和人类活动的影响湖体水质不断恶化,水位持续下降,湿地萎缩,水域污染严重,目前水体已呈中度富营养化水平,严重威胁着周边地区的水环境安全.入湖河流是湖泊污染物的主要来源^[1-2],陆源污染物随河流输送到湖体会导致湖体富营养化、生态系统受损等一系列环境问题的发生^[3-5],因此研究主要入湖河流的水质变化趋势、污染物入湖通量及其主要影响因子对湖体污染治理工作具有重要意义^[6-8].克鲁伦河是呼伦湖的主要入湖河流,目前对其研究主要集中在流域不同草场利用方式下土壤性状的变化方面,没有对其国内河段水体进行过详细研究.由于气候原因,克鲁伦河10月底至次年4月处于断流状态,因此研究其丰水期(6—8月)污染物入湖通量及其主要影响因素可为呼伦湖水体的治理与保护提供一定的理论依据.



图1 呼伦湖主要入湖河流示意
Fig.1 Schematic diagram of the main rivers of Lake Hulun

1 研究区域概况

呼伦湖(48°30'40"~49°20'40"N, 117°0'10"~117°41'40"E)位于呼伦贝尔市,呈不规则斜长方形,湖面面积为2339 km²,长度为93 km,最大宽度为41 km,平均水深为5.7 m,最大水深为10 m.其湖水补给除大气降水外主要靠克鲁伦河和乌尔逊河注入(图1).但近年来乌尔逊河由于气候等因素的影响径流量不断减小接近断流,所以克鲁伦河成为呼伦湖的主要入湖河流.

克鲁伦河发源于蒙古人民共和国的肯特山东麓,在中游乌兰恩格尔西端进入中国境内,流经呼伦贝尔盟新巴尔虎右旗,东流注入呼伦湖,全长1264 km,在我国境内206 km,流域面积7153 km².

2 研究方法

2.1 样品采集

为避免湖体对入湖河流造成的影响,根据入湖通量计算的水文水质断面布设原则^[9],水质监测断面设置在距入湖口1000 m处(图1),开展为期5年(2010—2014年)的水质、水量监测.依据《水和废水监测分析方法》(第四版)中的方法进行采样^[10],水样采集后于低温下保存立即送回实验室进行监测分析.

2.2 监测频率与方法

2010—2014年对克鲁伦河丰水期(6—8月)的水质、水量进行监测,水质监测频率为每月1次,监测时间避开了降雨等恶劣天气,水质较为稳定,水量监测频率为每天1次,采用每年丰水期水质、水量监测结果的平均值进行分析研究.主要的监测指标为氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD_{Cr})和流量等,因克鲁伦河的主要污染源之一即为沿途发达畜牧业导致的大量有机物,COD_m只能反映部分有机污染物的污染水平,因此实验选用COD_{Cr}作为监测指标更能反映克鲁伦河水体受有机物污染的状况.具体测定方法如表1所示.

表1 监测项目与测定方法
Tab.1 Monitoring items and methods

监测项目	测定方法	标准号	检出限/(mg/L)
NH ₃ -N	纳氏试剂光度法	GB 7479—1987	0.02
TN	过硫酸钾氧化-紫外分光光度法	GB 11894—1989	0.05
TP	钼锑抗分光光度法	GB 11893—1989	0.01
COD _{Cr}	重铬酸钾法	GB 11914—1989	5

2.3 首要污染物及污染分担率计算方法

采用单因子指数法对克鲁伦河的水质进行评估,单因子污染指数(P_i)表示污染物实测浓度与水质标准的比值,可通过式(1)计算;污染分担率(K_i)为第*i*项污染因子在诸污染因子中的分担率,可用式(2)计算^[11]:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

$$K_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^m P_i} \times 100\% \tag{2}$$

式中, i 为污染因子; P_i 为污染指数; m 为参与评价的污染因子基数; C_i 为污染因子 i 的实测浓度; S_i 为污染因子 i 的评价标准值,采用国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的 III 类水质标准。

2.4 污染物通量估算方法

污染物通量是指水体中的各污染物在单位时间内通过某一断面的总质量,是水环境水文、地质、化学及生物等综合作用的结果^[12]。克鲁伦河在我国境内无支流汇入,也不受工农业及矿业等污染源的影响,水质水量总体较为稳定,所以采用月积累法对其污染物入湖量进行估算,具体计算方法为^[13-14]:

$$W_{ij} = \sum_{k=1}^3 (C_{ij} \cdot Q_{ij} \times 10^{-6}) \tag{3}$$

式中, W_{ij} 为第 i 种污染物第 j 年丰水期的总通量(t), C_{ij} 为第 i 种污染物第 j 年丰水期的月平均浓度(mg/L), Q_{ij} 为第 j 年丰水期的月平均流量(m^3), k 为月份数。

3 结果与讨论

3.1 水质状况分析

根据 2010—2014 年监测期间克鲁伦河入湖口断面处丰水期的水质监测结果对其水质进行评价(以国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)为评价标准),评价结果和水质因子污染分担率(表 2)表明,克鲁伦河入湖口水体受 TN 和 COD_{Cr} 污染较为严重,均处于 V 类或劣 V 类水平,是由于河岸两侧发达畜牧业导致的大量有机物入河所致。 NH_3-N 2012 年污染最严重,与当年居民生活废水入河量增大有关。TP 浓度整体处于 III~IV 类水平。2010 年水体的首要污染物为 COD_{Cr} ,分担率为 38.14%,2011—2014 年首要污染物为 TN,污染分担率为 34.93%~39.84%,其次为 COD_{Cr} ,水质有恶化的趋势。

表 2 2010—2014 年克鲁伦河丰水期水质评价结果和入湖口各污染物的分担率

Tab. 2 The results of water evaluation and K_i values in estuary of Kherlen River in the wet season during 2010—2014

时间	水质评价				污染物分担率/%			
	NH_3-N	TN	TP	COD_{Cr}	NH_3-N	TN	TP	COD_{Cr}
2010 年	III	V	IV	劣 V	13.56	29.97	20.34	38.14
2011 年	III	劣 V	III	V	16.43	35.87	14.25	33.45
2012 年	劣 V	劣 V	III	V	28.99	39.84	9.93	21.24
2013 年	IV	劣 V	IV	劣 V	20.65	34.93	15.25	29.18
2014 年	V	劣 V	IV	V	21.67	36.44	16.25	25.64

3.2 入湖水量变化趋势分析

由 2010—2014 年丰水期克鲁伦河入湖水量变化趋势可见(图 2a),2013 年入湖水量猛增,最高达 $24.88 \times 10^7 m^3$,最低值出现在 2010 年,为 $9.85 \times 10^7 m^3$,是 2013 年的 39.6%,丰水期年均入湖水量为 $16.07 \times 10^7 m^3$ 。2010 年以来有逐年上升的趋势,这主要是由当地气候变化所致,2012 年以后当地雨水增多,径流量明显增大。

3.3 水质水量相关性分析

一般情况下水质与水量呈明显的负相关关系,即水量越大污染物被稀释,浓度会越低。但 2010—2014 年丰水期克鲁伦河的水质与其入湖水量呈正相关(图 2b),这是因为克鲁伦河水体的主要污染源为沿途克尔伦苏木及新巴尔虎右旗居民排放的生活污废水及两岸发达畜牧业带来的大量污染物,径流量大的年份降雨较多,雨水将河流两岸土壤中久积的污染物冲入河水中,引起水体中污染物浓度发生改变,点源污染常年固定排放而非点源污染变化性较强,从而导致水体中水质与水量无显著相关性($P>0.05$),符合水体受点、面源共同影响的特点。

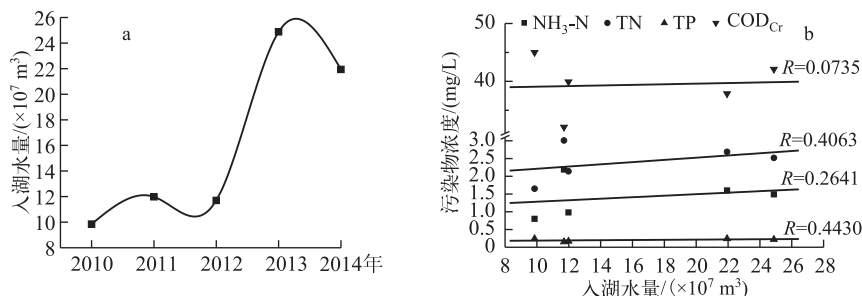


图 2 2010—2014 年克鲁伦河丰水期入湖水量变化(a) 及水质与水量的相关关系(b)

Fig.2 The change of water quantity into lake(a) and the correlations of water quality and water quantity(b) in Kherlen River in the wet season during 2010 – 2014

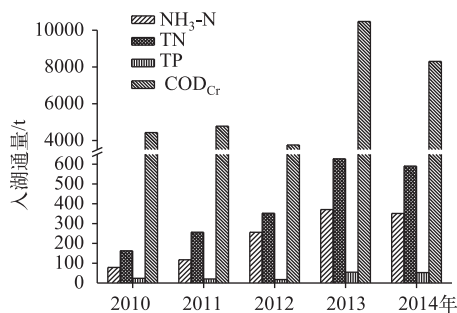


图 3 2010—2014 年克鲁伦河丰水期污染物入湖通量

Fig.3 Pollutant influxes in Kherlen River in the wet season during 2010 – 2014

3.4 污染物入湖通量分析

2010—2014 年克鲁伦河丰水期污染物入湖通量计算结果见图 3。从整体来看,2010—2013 年污染物入湖通量逐年递增,2014 年稍有下降趋势。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 和 COD_{Cr} 的入湖通量分别为 78.79 ~ 370.71、162.5 ~ 626.97、17.55 ~ 54.74、3754.73 ~ 10474.37 t。入湖断面的污染输出是所在河道和流域的点源与非点源污染的综合表现,因此在污染物入湖通量估算的基础上计算河流入湖口的等标污染负荷比可识别入湖口的主要污染物,从而确定需重点控制的污染因子^[15]。对丰水期各污染物年均通量按Ⅲ类水质标准进行等标计算,结果可知,TN 的等标污染负荷最高(为 397.63 t),丰水期年均通量为 397.63 t,占呼伦湖总污染物入湖量的 5.67%,且有逐年上升的趋势; COD_{Cr} 等标污染负荷为 317.48 t,年均通量为 6349.54 t; $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 等标污染负荷分别为 234.83、168.95 t,年均通量分别为 234.83、33.79 t。

呼伦湖现已处于中度富营养化水平,水体自净能力下降,污染物的输入一定程度上影响湖体营养盐水平及结构。因此,欲控制呼伦湖的水体污染首先应控制克鲁伦河 TN 和 COD_{Cr} 的入湖量。

3.5 污染物入湖通量与水质、水量相关性分析

污染物入湖通量估算的误差主要来源于水质、水量、采样点的代表性、水质分析方法、监测频率等因素^[16],而水质和水量是影响污染物入湖通量的 2 个主要因素,通过相关性分析可以了解其对入湖通量的影响,进而找出入湖通量的关键影响因素。

2010—2014 年丰水期各污染物入湖通量与入湖河道水质的相关系数分析可知(图 4),入湖通量与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP 浓度的相关性较好,相关系数在 0.6268 ~ 0.6691 之间,与 COD_{Cr} 的相关性较差,相关系数仅为 0.2752。

2010—2014 年丰水期各污染物入湖通量与入湖水量的相关系数分析可知(图 5),各污染物入湖通量与入湖水量之间的相关性非常显著,相关系数在 0.8920 ~ 0.9772 之间。

通过水质、水量与污染物入湖通量的相关性分析可以看出,水量是影响污染物入湖通量的关键因子,而入湖水质则是影响入湖通量的主要影响因素。2010—2014 年丰水期克鲁伦河水量变化幅度较大而水质则相对较为稳定,从而加大了水量对入湖通量的影响权重(表 2,图 2a)。克鲁伦河在中国境内河段无支流汇入,径流量的增大主要由降雨引起,其水质受点源和面源污染共同影响,在丰水期径流量较大的年份,由降雨冲刷地表带来的非点源污染物对其入湖通量的贡献很明显。水量的变化是人为无法控制的,因此合理控制放牧、将村镇的污水处理后达标排放是减轻河湖水体污染的当务之急。

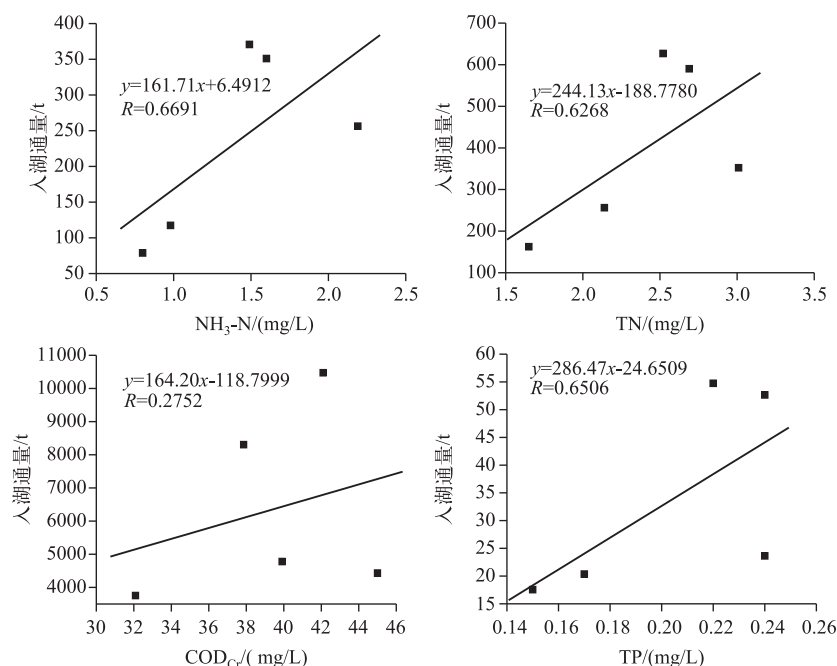


图4 2010—2014年克鲁伦河各污染物入湖通量与浓度的相关关系

Fig.4 Correlation between pollutant influxes and pollutant concentrations in Kherlen River during 2010–2014

3.6 污染物入湖通量精度分析

河流污染物的瞬时通量是该时刻河流流量与污染物浓度的乘积,但获得长时段的通量则需要对长时段的瞬时通量进行累积.大多数水文站均可对河流的流量进行连续积累的监测,但无法对水质进行长时间连续监测,从而导致污染物通量的计算存在一定的偏差^[17].上述分析可知,克鲁伦河污染物入湖通量与入湖水量呈显著正相关,径流量的变化对污染物的入湖通量影响非常显著.由于监测时间避开降雨等恶劣天气,沿途点源排放入河量较稳定,经实验测定由降雨引起的非点源污染物入河对水质的影响较小,因为降雨同时导致河流径流量的增加,从而使克鲁伦河水体水质整体变化幅度不大,水质较为稳定.另外,克鲁伦河水体的主要污染源之一即为沿途发达畜牧业导致的非点源污染,因此采用公式(3)对丰水期克鲁伦河污染物的入湖通量进行计算,更能突出径流量时均变化对估算结果的影响,同时也能突出非点源污染对污染物通量的贡献,这与 Moatar 等^[18]的研究结果一致.

克鲁伦河在中国境内河段两侧人口稀少,流域内放牧规律,河流水质总体比较稳定.影响污染物入湖通量的主要是入湖水量的变化,计算中径流量的测定为每天1次,由于条件所限不可能完成对水质进行每天的监测,因此将每月监测的水质浓度作为月平均浓度来计算入湖通量对计算结果确实会带来一定偏差,但对于克鲁伦河水体来说,其水质相对较为稳定变化较小,所以计算结果的误差也相对较小,可以真实反映

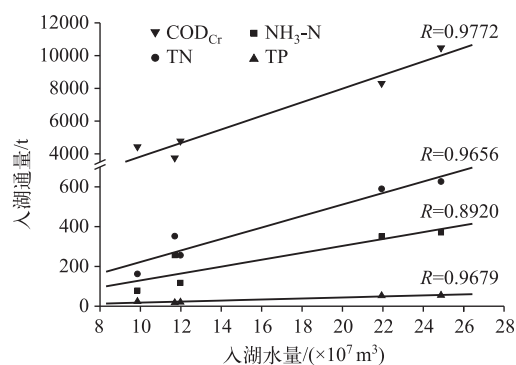


图5 2010—2014年克鲁伦河各污染物入湖通量与入湖水量的相关关系

Fig.5 Correlation between pollutant influxes and water quantity in Kherlen River during 2010–2014

入湖通量水平,估算结果较为准确,符合水体实际污染水平.

4 结论

1) 2010—2014 年丰水期(6—8 月)克鲁伦河入湖口水体受 TN 和 COD_{Cr} 污染较为严重,均处于 V 类或劣 V 类水平,TP 浓度整体处于 III~IV 类水平,水体的主要污染源为沿途居民的生活污水及发达畜牧业导致的大量污染物.

2) 2010 年水体的首要污染物为 COD_{Cr} , 2011—2014 年首要污染物为 TN,其次为 COD_{Cr} . 污染物入湖通量逐年递增,2014 年稍有下降趋势,TN 的等标污染负荷最高,入湖通量的计算结果较为准确,与实际污染状况相符合.

3) 水量是影响污染物入湖通量的关键因子,而入湖水质则是影响入湖通量的主要影响因子. 克鲁伦河水质受点源和面源污染共同影响,控制 TN 和 COD_{Cr} 的入湖量是当前的首要任务,合理控制放牧、将村镇的污水处理后达标排放是减轻河湖水体污染的当务之急.

5 参考文献

- [1] Li LQ, Shan BQ, Yin CQ. Stormwater runoff pollution loads from an urban catchment with rainy climate in China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2012, **6**(5): 672-677.
- [2] Luo LC, Qin BQ, Yang LY *et al.* Total inputs of phosphorus and nitrogen by wet deposition into Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 63-70.
- [3] Zhou JL. Fluxes of organic contaminants from the river catchment into, through and out of the Humber Estuary, UK. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, **37**(3-7): 330-342.
- [4] Zhou MJ, Shen ZL, Yu RC. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang(Yangtze) River. *Continental Shelf Research*, 2008, **28**(12): 1483-1489.
- [5] Gao XL, Song JM. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(3): 327-335.
- [6] Bao X, Watanabe M, Wang QX *et al.* Nitrogen budgets of agricultural fields of the Changjiang River basin from 1980 to 1990. *Science of the Total Environment*, 2006, **363**(1/2/3): 136-148.
- [7] Gao L, Li DJ, Ding PX. Nutrient budgets averaged over tidal cycles off the Changjiang (Yangtze River) Estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2008, **77**(3): 331-336.
- [8] Grimvall A. Time scales of nutrient losses from land to sea—a European perspective. *Ecological Engineering*, 2000, **14**(4): 363-371.
- [9] 奚旦立, 孙裕生, 刘秀英. 环境监测: 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 37-39.
- [10] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第 4 版. 北京: 科学出版社, 2002.
- [11] 杨 哲, 钟晓辉, 次新波等. 苕溪污染物入湖通量研究. 浙江大学学报: 理学版, 2013, **40**(2): 196-201.
- [12] 田泽斌, 王丽婧, 李小宝等. 洞庭湖出入湖污染物通量特征. 环境科学研究, 2014, **27**(9): 1008-1015.
- [13] 翟淑华, 张红举. 环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000—2002 年). 湖泊科学, 2006, **18**(3): 225-230. DOI 10.18307/2006.0305.
- [14] 马 倩, 刘俊杰, 高朋远. 江苏省入太湖污染量分析(1997—2007 年). 湖泊科学, 2010, **22**(1): 29-34. DOI 10.18307/2010.0104.
- [15] 郑 一, 王学军, 江耀慈等. 环太湖河道水质分析与入湖污染物负荷量估算. 地理学与国土研究, 2001, **17**(1): 40-44.
- [16] 纪小敏, 闻 亮, 张 鸣等. 洪泽湖入湖污染物通量分析. 江苏水利, 2012, (7): 45-47.
- [17] 郝晨林, 邓一祥, 汪永辉等. 河流污染物通量估算方法筛选及误差分析. 环境科学学报, 2012, **32**(7): 1670-1676.
- [18] Moatar F, Meybeck M. Riverine fluxes of pollutants: Towards prediction of uncertainties by flux duration indicators. *Comptes Rendus Geosciences*, 2007, **339**(6): 367-382.