

# 流域非点源磷素输出负荷估算方法研究

张 丽<sup>1,2</sup>, 邹 鹰<sup>2</sup>, 陆海明<sup>2</sup>, 张 鸿<sup>3</sup>, 彭 辉<sup>4</sup>, 田 英<sup>3</sup>

(1.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098;2.南京水利科学研究院 水文水资源与水利科学国家重点实验室,江苏 南京 210029;3.辽宁省水文水资源勘测局,辽宁 沈阳 110003;4.水利部水文局,北京 100053)

**摘 要:**目前水质常规监测频率较低,难以客观反映流域非点源污染物浓度随降雨径流过程的变化情况,结果会低估了流域非点源污染物的输出负荷。本文利用流域次降雨过程的连续水质水量同步监测资料,研究分析次降雨过程与流域非点源磷素输出负荷之间的因果关系,并建立次降雨总量与磷素输出负荷的定量相关关系。研究表明,流域次降雨总量与非点源磷素输出负荷之间存在较好的相关关系。通过这种定量关系,以流域次降雨总量为输入,可以更为合理地估算出流域非点源磷素输出负荷。

**关键字:**磷素;次降雨事件;非点源;负荷估算

中图分类号:X522

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2013)06-0011-05

## 1 引言

水体富营养化是指在人类活动影响下氮、磷等营养物质大量进入湖泊、河口、海湾等缓流水体,引起藻类及其他浮游生物迅速繁殖,水体溶解氧量下降,水质恶化,鱼类及其他生物大量死亡的现象。如果湖泊中可能被藻类吸收的氮和磷质量浓度比率大于7,磷就是可能的限制性营养盐<sup>[1]</sup>。天然水体中缺磷现象普遍,因此,水体富营养化在很大程度上取决于磷素含量。据2007~2010年对东部平原湖区、东北平原与山地湖区和云贵高原湖区138个面积大于10km<sup>2</sup>湖泊水质调查,分析结果显示:138个面积大于10km<sup>2</sup>湖泊中有85.4%的湖泊超过富营养化标准,达到重富营养化标准的占40.1%,东北平原与山地湖区湖泊富营养化比例最高,达96.0%,其次是东部平原湖区的长江中下游地区,为85.9%,云贵高原湖区相对较低,为61.5%<sup>[2]</sup>。相关研究表明,在点源污染得以有效控制的条件下,非点源磷素是导致水体富营养化的主要因素。因此,控制非点源磷素向水体的排放是减轻水体富营养化的重要途径之一。

我国对非点源磷素污染的研究起步较晚,基础薄弱,很大程度上借鉴外国经验与方法。主要的流域非点源磷素污染负荷估算方法包括实测资料法、输出系数

法、相关关系法和模型估算法。其中,实测资料法<sup>[3-4]</sup>常被认为是最准确的估算方法,也是其他非点源负荷估算校正的依据,但是它需要开展水质水量同步监测,耗费大量人力物力财力。输出系数法<sup>[5]</sup>资料需求相对较少,计算方法简便,但未考虑水文响应单元与受纳水体之间的水力联系程度,只能反映非点源污染负荷的多年平均情况。相关关系法<sup>[6]</sup>未涉及污染物复杂的迁移转化机制<sup>[7]</sup>,在年时间尺度上寻求水质水量相关关系,考虑年降雨量或径流量与磷素输出的关系,但却弱化了雨强对磷素输出的影响。模型估算法能通过模拟非点源污染物迁移过程,计算污染负荷及其时间和空间分布,但模型的建立和运行不仅需要大量基础数据支撑,而且模型参数的率定也需要水质水量同步观测数据<sup>[8]</sup>。

本文针对流域非点源磷素的流失规律,提出一种新的估算方法,该方法利用流域水质水量连续同步观测资料分析次降雨过程与磷素非点源输出负荷之间的因果关系,据此建立次降雨量与磷素输出负荷的定量相关关系。

## 2 磷素流失特点

磷素是一种附着能力很强的物质,极易被水合铁、

收稿日期:2013-07-19

基金项目:国家自然科学基金项目(50809040);水利部公益性行业科研专项经费项目(201101031,201201026)。

作者简介:张丽(1987-),女,山东滕州人,硕士研究生,研究方向为生态水文与环境保护。E-mail:zhangli871028@163.com

铝氧化物吸附,也常吸附于黏土矿物、氢氧化物及方解石中。国内外在自然或者人工降雨条件下关于磷素输出规律的研究证明磷素从土壤向地表水体的迁移大部分是以颗粒态形式流失<sup>[9-12]</sup>。地表径流通过雨蚀动能剥离土壤表层,雨蚀动能首先作用于粒径较小的土壤颗粒,如土壤粘粒、土壤胶体等,由于这些小颗粒的比表面积较大,吸附能力很强,使得地表径流中固体物质的

磷素明显高于径流发生的土壤,具有显著的养分富集特征<sup>[13]</sup>。颗粒态磷素流失主要是通过径流中固体物质对磷的这种富集作用进行。因此,降雨径流是磷素从土壤流入流域出口的动力因素和载体。美国东北部一个面积为 7.4km<sup>2</sup> 的农业小流域的观测资料表明,尽管暴雨事件中暴雨径流时段占总降雨径流时段很短,但颗粒态磷素与溶解态磷素却在此时段拥有最高的输出浓度<sup>[14]</sup>。由此说明,暴雨事件最大程度影响磷素流失量。

在我国东北辽宁抚顺境内的社河流域开展的水质水量同步监测资料也反映了降雨径流过程对磷素流失有显著影响,如图 1 所示。图中显示,在一次降雨过程中,径流滞后于降雨表现为先增大后减小,而磷素浓度一般先于流量达到峰值,之后表现为跳跃式下降。在多年非降雨时期的常规水质监测结果则显示磷素浓度检出很低或者未检出。国内其他研究结果也表明流域出口污染物浓度随汇水区域降雨径流变化而变化<sup>[15-16]</sup>。

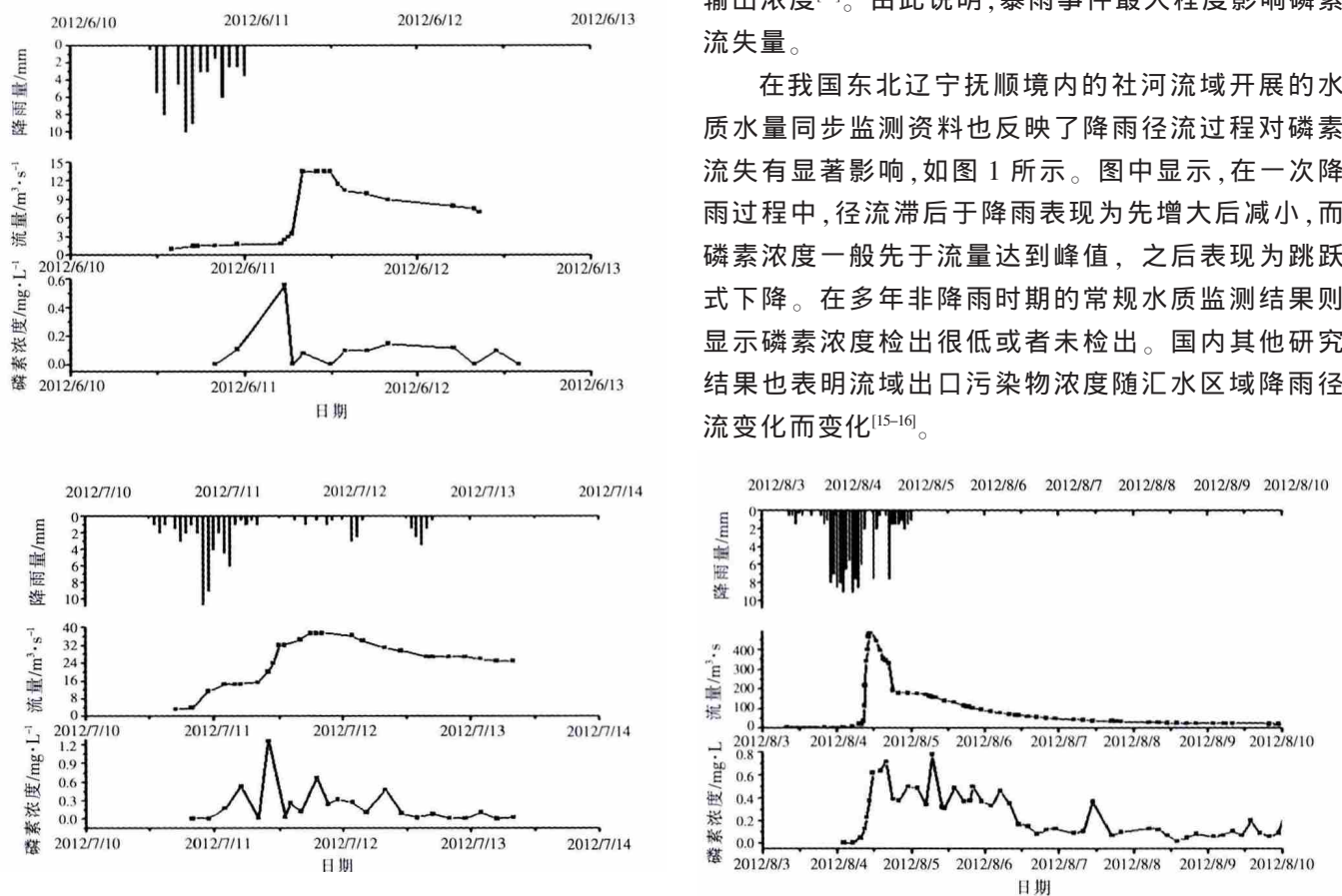


图 1 社河流域 3 次降雨事件降雨径流及磷素浓度变化

Fig.1 The rainfall-runoff and phosphorus concentration variation of the 3 rainfall events in the Shehe River basin

### 3 非点源磷素污染负荷估算方法

在我国,水质监测频率一般为每月一次,常规监测日期一般在非降雨期,监测浓度难以代表所在月份的污染物浓度,更不能反映其变化特征。因此这对估算流域磷素负荷不利,常被低估,这就需要增加数据资料来解决估算非点源污染负荷的估算问题。

流域水体磷素污染物的来源主要分为点源和非点源,流域某一出口断面磷素负荷  $L_T$  由点源负荷  $L_P$  和非点源负荷  $L_N$  组成。用公式表示如下:

$$L_T = L_P + L_N \quad (1)$$

点源负荷可通过非降雨期的磷素平均浓度与估算时段的基流量的乘积表示。

非点源负荷受降雨直接影响,当暴雨发生时出口断面不仅流量增大,磷素浓度也有所升高。非点源负荷跟降雨强度、降雨持续时间、前期影响雨量等降雨因素都有很大关系。雨强越大,前期影响雨量越大、土壤含水量越高,降雨持续时间越长,非点源负荷输出增长就越高。因此,可以假设非点源负荷主要是由年内几次量级较大的降雨事件所形成的。

将年内次降雨量超过一定阈值的降雨过程产生的磷素负荷的总和作为流域非点源磷素输出负荷。用公

式表示如下:

$$L_N=\sum_i L_i$$

(2)

基于降雨对磷素负荷输出的影响,研究降雨量与负荷输出的相关关系。对流域进行若干年的水质水量同步监测,收集具备大、中、小等级的降雨、径流和水质数据。对次降雨量与次降雨过程磷素负荷  $L_i$  进行分析,对超过一定降雨量阈值的暴雨进行次降雨量与磷素输出负荷的相关分析,并建立两者之间的定量相关关系。当已知某次降雨过程的降雨量时,就可求得此次降雨过程产生的磷素输出负荷。

4 实例计算

4.1 研究区概况

社河发源于辽宁省抚顺县五龙乡西川岭,流域面积 516km<sup>2</sup>。本项研究的水质水量同步监测断面为南章党水文站和台沟桥水质监控断面,两站相距 8.5km,南章党水文站实际控制流域面积 223km<sup>2</sup>。社河流域的生产活动主要为种植业和少量畜禽养殖业,水体污染以农业非点源污染为主。

南章党监测控制断面至今为止共有 5 年的流量观测数据(2008~2012 年),8 年的降雨数据(2005~2012 年),同时具备 2011~2012 年汛期(6~9 月)的水质水量同步监测数据,台沟桥水质监测断面具有 8 年(2005~2012 年)每月一次的非暴雨期常规监测数据。

4.2 水质水量同步监测方案

观测时间和地点:2011~2012 年汛期在南章党断面和台沟桥断面开展了水质水量同步观测。

流量观测:在南章党水文站现有的洪水过程测量基础上,适当增加观测频次,能够准确得到南章党断面洪水及非洪水流量过程。

水样采集:

(1)洪水过程地表水样采集方式。

南章党水文站形成洪水过程时开始采集地表水样。第 1 个水样在河流水位还未超过前日水位 1cm 时采集;在涨水和落水过程随着水位每上升或下降 1cm 在河流断面采集 1 个混合水样;在洪峰到达,水位最高时适当加密采样,采集 2~4 个样品;整个样品采集过程持续到断面水位回到洪水过程前水位或在超过 12h 时水位变幅不超过 1cm。在样品采集过程中,若洪水水位上升或者下降 1cm 的时间少于 20min,则每 20min 采集 1 个混合水样;若洪水水位上升或者下降 1cm 的

时间多于 2h,则每 2h 采集 1 个混合水样。根据洪水过程长短和洪峰流量大小,每个降雨-流量过程采集 20~30 个水样。

(2)非洪水过程地表水样采集方式。

在上游没有洪水、断面流量稳定时,每 1 个星期采集 1 次水样。

4.3 流域非点源磷素负荷与次降雨量的相关关系

社河流域在非降雨期间,流域出口断面磷素浓度检出很低或者未超出检出限,因此,磷素输出负荷基本为非点源输出负荷。

选取 2011 年和 2012 年降雨量大小不同的 9 次降雨事件,对比分析 9 次降雨事件的径流总量、磷素输出负荷随次降雨量的变化趋势,见表 1 和图 2。由图 2 可以看出:次降雨事件的径流总量、磷素输出负荷随着次降雨量增加最初保持稳定,当次降雨量超过 50mm 后,径流总量开始波动式增长,磷素输出负荷小幅度增长,当次降雨量继续增加时,径流总量、磷素负荷都具有迅速增长的趋势。因此,将次降雨量为 50mm 以上的暴雨事件用来进行次降雨量与磷素输出负荷的相关分析。

表1 2011~2012年9次降雨事件降雨径流特征与磷素负荷对比  
Table1 Comparison between the rainfall-runoff characteristics and phosphorus load among the 9 rainfall events from 2011 to 2012

日期	次降雨量/mm	洪峰/m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	径流总量/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	磷素输出负荷/kg
2011/7/20	45	5.8	77	6
2011/7/30	10.9	1.35	14	6
2011/8/15	65.3	47.3	751	365
2011/8/28	55.3	16.8	324	37
2012/6/10	59.5	12.6	177	152
2012/7/03	62.5	16.3	337	306
2012/7/10	73.5	39.4	1015	1655
2012/7/22	38.5	10.5	133	333
2012/8/03	120	479	4464	18026

选取 2011 年、2012 年汛期超过 50 mm 的降雨事件 6 次,进行次降雨量与磷素输出负荷的相关分析,见图 3。经回归模拟得出社河流域次暴雨事件磷素流失方程,即为社河流域磷素输出方程:

$$L_{TP}=4.1625p^2-451.28p+12243,R^2=0.9998$$

(3)

式中: $L_{TP}$  为次降雨过程磷素输出负荷; $p$  为次降雨量; $R$  为相关系数。



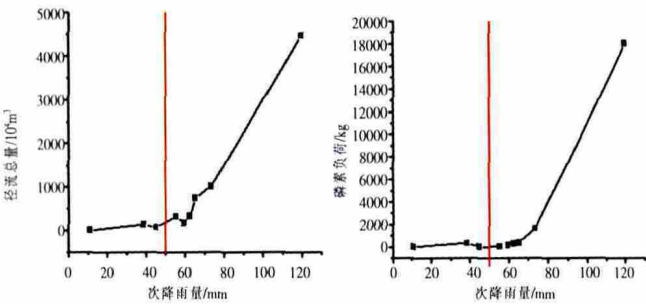


图2 次降雨径流总量、磷素输出负荷随次降雨量变化趋势分析  
Fig.2 The variation trend of the runoff and phosphorus load with single time rainfall

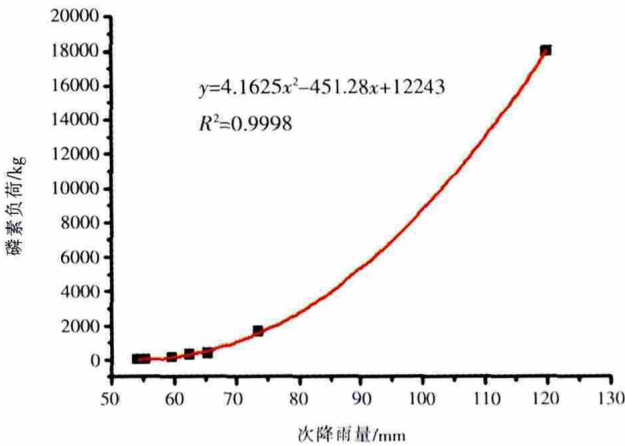


图3 次降雨磷素输出负荷与次降雨量相关分析  
Fig.3 Correlation analysis between the phosphorus load and rainfall

4.4 流域非点源磷素输出负荷估算

选取 2008 年~2010 年降雨量超过 50mm 的暴雨事件 7 次。利用公式,将 7 次暴雨事件降雨量代入,可得出每次暴雨事件引起的磷素负荷估算值,计算结果见表 2。最后,由公式可得出 2008~2010 年非点源磷素输出总负荷,见表 2。

同时,利用常规监测数据计算法估算的非点源磷素输出负荷与此方法进行对比。这里只针对雨季径流总量与磷素浓度都较高的 7~10 月采用公式(4)进行磷素总负荷计算,未检出磷素浓度按照检出限 0.01g/ml 的一半来计算。其他月份由于磷素基本未检出,视为点源污染不存在。将 7~10 月 4 个月的磷素总负荷作为年非点源磷素输出负荷值,估算结果见表 3。

$$L=\sum_{i=1}^m C_iQ_i \tag{4}$$

式中: $L$  是年非点源磷素输出总负荷,kg; $C_i$  是指磷素第  $i$  个月的平均浓度,mg/l;  $Q_i$  是指第  $i$  个月的径流总量; $m$  是指总共计入的月数。

本文研究方法和利用常规监测数据计算法估算非

表2 2008~2010年7场暴雨降雨径流情势与磷素输出负荷估算结果  
Table2 The rainfall-runoff characteristics and estimation of phosphorus load among the 7 rainfall events from 2008 to 2010

次降雨	降雨历时/h	降雨量/mm	洪峰/ $m^3 \cdot s^{-1}$	磷素输出负荷/kg
2008/7/31	24	58.7	7.76	96
2008/8/11	15	63.5	6.84	371
2009/7/20	15	54.2	14.4	12
2010/7/30	16	203.7	915	93035
2010/8/05	13	90.8	221	5585
2010/8/19	46	98.3	266	8104
2010/8/26	49	108.6	202	12326

表3 两种方法磷素非点源输出负荷估算值  
Table3 Estimation of the non-point source phosphorus load with the 2 methods

年份	磷素非点源负荷/kg	
	本研究方法	利用常规监测数据计算法
2008	467	79
2009	12	10
2010	119050	534

点源磷素输出负荷的结果,表明常规监测数据明显低估流域磷素非点源负荷,常规监测数据只能片面反映每个月某一时间点污染物浓度值,不能真正体现流域非点源污染状况。

5 结语

磷素作为水体富营养化的控制因素,研究其输出负荷估算具有十分重要的意义。水质常规监测数据大大低估了流域磷素年负荷输出值,有可能影响到非点源磷素污染防控技术的开发与应用。本文根据磷素流失与降雨径流的内在联系,提出一种简便有效的估算非点源磷素输出负荷的方法。该方法利用若干年的水质水量同步监测资料,建立次降雨事件的磷素输出负荷与次降雨量的相关关系,然后利用这种相关关系,可以较为合理地估算出流域非点源磷素输出负荷。

因研究条件和时间的限制,本文所依据的水质水量同步监测资料稍显不足,今后将争取创造条件继续开展社河流域的水质水量同步监测,以进一步完善流域非点源磷素输出负荷与次降雨量的相关关系。

参考文献:

[1] 戴照福,王继增,程炯.土壤磷素非点源污染及其对环境的影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (z1): 323-327. (DAI Zhaofu, WANG Jizeng, CHENG Jiong. A study on soil phosphorus non-point source pollution and environmental influence [J]. Journal of Agro-environment Science, 2006, 25(z1): 323-327.(in Chinese))

[2] 杨桂山,马荣华,张路,等.中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策

- 略[J]. 湖泊科学, 2010, 22 (6): 799–810. (YANG Guishan, MA Ronghua, ZHANG Lu, et al. Lake status, major problems and protection strategy in China [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 799–810. (in Chinese))
- [3] 李家科, 李怀恩, 沈冰, 等. 渭河干流典型断面非点源污染监测与负荷估算[J]. 水科学进展, 2011, 22 (6): 818–828. (LI Jiak, LI Huaen, SHEN Bing, et al. Monitoring and estimating non-point source pollution on typical sections along the Weihe River [J]. Advance in Water Science, 2011, 22(6): 818–828. (in Chinese))
- [4] 李家科, 李怀恩, 董雯. 渭河关中段典型支流非点源污染监测与负荷估算[J]. 环境科学学报, 2011, 31 (7): 1470–1478. (LI Jiak, LI Huaen, DONG Wen. Monitoring and load estimation of non-point source pollution on typical tributaries in the Guanzhong reach of the Weihe River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(7): 1470–1478. (in Chinese))
- [5] 薛利红, 杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展[J]. 生态学杂志, 2009, 28(4): 755–761. (XUE Lihong, YANG Linzhang. Research advances of export coefficient model for non-point source pollution [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(4): 755–761. (in Chinese))
- [6] 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 Xiaokang, LI Huaen. 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. (in Chinese))
- [7] 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. (CAI Ming, LI Huaen, LIU Xiaojun. Study on methods of non-point source pollution load estimation [J]. Yellow River, 2007, 29(7): 36–37. (in Chinese))
- [8] 程炯. 非点源污染模型研究进展[J]. 生态环境, 2006, 15 (3): 641–644. (CHENG Jiong. Advance in the research on non-point source pollution models [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(3): 641–644. (in Chinese))
- [9] Sharpley A N, Smith S, Jones O, et al. The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff [J]. Journal of Environmental Quality, 1992, 21(1): 30–35.
- [10] 王鹏, 高超, 姚琪, 等. 环太湖丘陵地区农田磷素随地表径流输出特征[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 165–169. (WANG Peng, GAO Chao, YAO Qi, et al. Agricultural phosphorus losses with overland runoff in hilly area around Tai Lake [J]. Journal of Agro-environment Science, 2006, 25(1): 165–169. (in Chinese))
- [11] 单保庆. 小流域磷污染物非点源输出的人工降雨模拟研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(1): 33–37. (SHAN Baoqing. Study on phosphorus load from a watershed with rainfall simulation method [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(1): 33–37. (in Chinese))
- [12] 梁涛, 王浩, 章申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下磷素随暴雨径流的迁移特征[J]. 环境科学, 2003, 24(2): 35–40. (LIANG Tao, WANG Hao, ZHANG Shen, et al. Characteristics of phosphorous losses in surface runoff and sediment under different land use in West Tiaoxi Catchment [J]. Chinese Journal of Environment Science, 2003, 24(2): 35–40. (in Chinese))
- [13] Sharpley A N, Chapra S, Wedepohl R, et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options [J]. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(3): 437–451.
- [14] Pionke H, Gburek W, Sharpley A, et al. Flow and nutrient export patterns for an agricultural hill-land watershed [J]. Water Resources Research, 1996, 32(6): 1795–1804.
- [15] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2): 326–331. (XU Qigong, LIU Hongliang, SHEN Zhenyao. Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Georges Reservoir area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(2): 326–331. (in Chinese))
- [16] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量[J]. 水利学报, 2009, 40 (6): 659–666. (JIANG Rui, ZHU Bo, TANG Jialiang, et al. Transportation processes and loss fluxes of nitrogen and phosphorous through storm runoff in a typical small watershed in the hilly area of purple soft [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 659–666. (in Chinese))

## A Method for Non-Point Source Phosphorus Load Estimating in River Basin

ZHANG Li<sup>1,2</sup>, ZOU Ying<sup>2</sup>, LU Haiming<sup>2</sup>, ZHANG Hong<sup>3</sup>, PENG Hui<sup>4</sup>, TIAN Ying<sup>3</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003, China; 4. Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

**Abstract:** At present, conventional monitoring frequency of water quality is relatively low, and it is difficult to objectively reflect the variation of the non-point source pollutants with rainfall-runoff process. In this circumstance, the export load of non-point source pollutants in a basin is sometimes underestimated. This paper used the synchronous monitoring data of water quality and volume in a basin to study the causal relationship between an individual rainfall event and the export phosphorus load and establish relevant relation between the individual rainfall amount and export phosphorus load. The results show that they have good quantitative relationship. Making use of this kind of quantitative relationship and individual rainfall amount, the export phosphorus load in the basin can be reasonably estimated.

**Key words:** phosphorus; individual rainfall event; non-point source; load estimation