

## 基于 SWAT 模型的南四湖流域非点源氮磷污染模拟<sup>\*</sup>

李 爽<sup>1,2</sup>, 张祖陆<sup>2\*\*</sup>, 孙媛媛<sup>2</sup>

(1: 济南大学酒店管理学院, 济南 250002)

(2: 山东师范大学人口·资源与环境学院, 济南 250014)

**摘 要:** 本文利用 SWAT 模型结合实测数据, 对南四湖流域 2001—2010 年年均非点源氮磷污染进行模拟, 分析了南四湖流域非点源氮磷负荷空间分布特征, 计算各河流域对南四湖湖区污染的贡献率, 并对非点源氮磷污染严重的关键区进行识别. 研究表明: (1) 先模拟湖东和湖西的两个典型小流域的非点源氮磷污染, 并将模型推及整个南四湖流域, 该方法不仅提高了计算效率, 且得到了较好的模拟结果. 通过对比发现, 湖东的模拟效果要好于湖西, 一定程度上说明 SWAT 模型在起伏较大的地区能取得更高的精度. (2) 南四湖流域非点源氮磷污染严重, 几乎所有区域的氮负荷超标, 40% 以上的区域磷负荷超标严重. 湖东非点源氮磷污染较湖西严重, 其中洸府河流域是南四湖湖区非点源氮磷污染的主要贡献者. (3) 通过对径流量、泥沙负荷、氮负荷、磷负荷的相关分析可以得出, 南四湖流域非点源氮负荷以溶解态为主, 随径流进入水体; 非点源磷负荷以吸附态为主, 随泥沙进入水体.

**关键词:** SWAT 模型; 南四湖流域; 非点源污染; 典型小流域

## Simulation of non-point source pollution of nitrogen and phosphorus in Lake Nansi watershed using SWAT model

LI Shuang<sup>1,2</sup>, ZHANG Zulu<sup>2</sup> & SUN Yuanyuan<sup>2</sup>

(1: College of Hotel Management, University of Jinan, Jinan 250002, P. R. China)

(2: College of Population, Resource and Environmental, Shandong Normal University, Jinan 250014, P. R. China)

**Abstract:** SWAT model and measured data were used to simulate the Non-Point Source (NPS) N and P pollution from 2001 to 2010 in Lake Nansi watershed. The spatial distribution of the pollution was analyzed, and the contribution of all the rivers in watersheds to the pollution of Lake Nansi were calculated. The key areas with serious pollution were distinguished. The results indicated that: (1) typical watersheds were simulated with SWAT model, and then the derived models were used to simulate the Lake Nansi watershed. This method can not only improve efficiency, but also with higher simulation accuracy. The simulation results in the east of the lake were better than those in the west part of the lake, which indicated that SWAT model was suitable for the hilly areas. (2) The NPS pollution was serious in Lake Nansi watershed. The nitrogen loading exceeded the criteria in almost all regions, and the phosphorus loading exceeded the criteria in more than 40% of the region. The NPS pollution was more serious in east than that in west of the lake. The Guangfu River watershed was the major contributor to the NPS pollution in Lake Nansi watershed. (3) The soluble nitrogen, flowed into the lake through streams, is the main form of loading in Lake Nansi watershed. While, the P loading in Lake Nansi watershed was mainly in the form of adsorption, which ran into river with sediment.

**Keywords:** SWAT model; Lake Nansi watershed; non-point source pollution; typical watershed

随着点源污染控制能力的提高, 非点源污染目前成为造成我国水环境污染的主要原因<sup>[1]</sup>. 据研究, 北京密云水库、太湖地区、黑河流域、天津于桥水库、安徽巢湖等江河湖泊和水库非点源污染已成为其水环境污染的重要因素<sup>[2-4]</sup>.

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2009ZX07210-007-01)和济南大学科研基金项目(XHY1227)联合资助. 2012-03-26 收稿; 2012-07-18 收修改稿. 李爽, 女, 1984 年生, 博士研究生; E-mail: ls8412519@163.com.

\*\* 通信作者; E-mail: zulzhang@126.com.

SWAT 模型作为较成熟的模拟流域非点源污染的模型,已经成为水资源保护管理规划中不可或缺的工具,在美洲、欧洲、亚洲等许多国家和地区得到了广泛的应用验证<sup>[1,5-10]</sup>. GIS 和 SWAT 模型的耦合,使 SWAT 具备了更强的空间数据处理和分析的能力<sup>[11]</sup>. 国内外许多学者成功将 SWAT 模型应用于流域非点源污染的模拟中,取得了较好的结果<sup>[12-14]</sup>.

随着南四湖流域工业化、城市化进程的加快,大量工业废水、生活污水、农业回水等未经处理注入河流和湖泊中,使得湖泊污染严重<sup>[15]</sup>. 据长期监测和有研究表明,非点源污染已成为南四湖流域水体污染的主要污染源<sup>[16-17]</sup>. 以往对南四湖流域污染的研究主要集中在对湖区和几个主要入湖河流水质的监测评价或定性的分析污染源是点源居多还是非点源占优<sup>[18-21]</sup>;而关于南四湖整个流域氮磷污染的研究主要对历年年鉴的统计<sup>[22]</sup>,流域内非点源污染定量模拟方面的还有待进一步研究.

本文采用野外采样、室内分析和数值模拟等多种研究手段,利用 SWAT 模型对南四湖流域非点源污染进行定量模拟,分析南四湖流域非点源污染物产出的时空分布特征,并对关键污染区进行识别. 为南水北调东线南四湖湖区和南四湖流域生态环境的整治与改善提供参考性的信息,进而对控制水质富营养化具有重要的现实意义及指导价值.

1 研究区概况

南四湖流域(34°24′~35°59′N,114°52′~117°42′E)属于淮河流域的重要组成部分,整个湖区和绝大多数河流位于山东省境内<sup>[15]</sup>,考虑到 SWAT 模型模拟所需资料和流域内水质监测数据的可获性和完整性,本文研究区选择南四湖流域山东省境内的所有区域,包括菏泽市、济宁市、枣庄市和泰安的宁阳县,流域面积约为  $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ . 整个南四湖流域有 53 条大大小小的河流以南四湖为中心,从四面八方呈辐射状汇入南四湖. 流域地处暖温带、半湿润地区,属暖温带大陆性冬夏季风气候<sup>[15]</sup>,年平均气温约 14℃,年均降水量为 750 mm 左右. 流域以南四湖和京杭大运河为界,湖东为鲁中南低山丘陵和山前冲洪积平原区,湖西为黄河中下游冲击而成的黄泛平原,地势西高东低.

2 研究方法

2.1 数据库构建

SWAT 模型需要输入的数据分为两类,一类是空间数据,一类是属性数据. 包括的主要空间和属性数据及其相关信息见表 1,所用的空间数据采用 Albers 等面积割圆锥投影.

表 1 空间和属性数据  
Tab. 1 The spatial and attribution data

空间数据			属性数据	
数据	来源	精度	数据	来源
DEM	ASTER_GDEM	30 m × 30 m	土地利用类型属性	SWAT 自带
土地利用类型图	TM 数据解译	30 m × 30 m	土壤类型属性	山东省土种志
土壤类型图	纸质地图矢量化	1: 100000	气象数据	山东省气象局
河网水系图	纸质地图矢量化	1: 380000	水文水质资料	济宁市水利局

2.2 典型小流域 SWAT 模型构建

2.2.1 典型小流域选取 南四湖流域以南四湖为中心,53 条入湖河流呈辐射状分布,包含 53 个出水口,但 SWAT 模型只允许研究流域存在一个总出水口,且南四湖湖区面积大,在 SWAT 模型中不能作为一个子流域进行模拟,因此,本研究先选取典型小流域进行模拟,再将校准、验证后的模型推广至其它河流流域,以简化计算、提高效率.

由于南四湖湖东和湖西的自然地理条件存在较大差异,因此湖东和湖西各选集水面积最大的泗河流域和东鱼河流域作为典型流域进行模拟,这样也便于模型的校准和验证.

考虑到河流集水面积、河流的位置分布等因素,共选取 30 条河流流域模拟,各河流流域总范围基本覆

盖整个南四湖流域. 湖东 21 条河流流域, 使用泗河流域验证后模型进行南四湖流域湖东的模拟; 湖西 9 条河流流域, 使用东鱼河流域验证后的模型进行南四湖流域湖西的模拟. 30 条河流流域分布图见图 1.

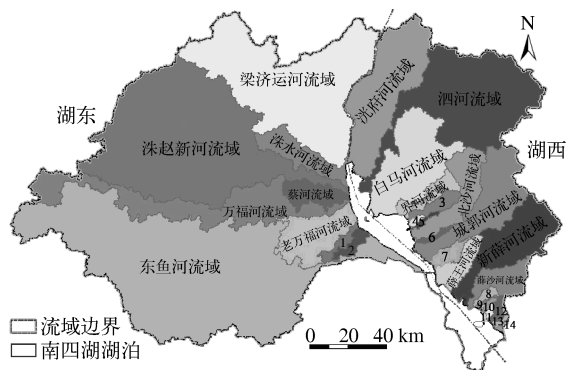


图 1 南四湖流域各河流流域划分(1 惠河流域、2 西支河流域、3 小龙河流域、4 辛安河流域、5 徐楼河流域、6 荆河流域、7 房庄河流域、8 蒋集河流域、9 潘渡河流域、10 解放河流域、11 张庄河流域、12 蒋官庄河流域、13 赵庄河流域、14 石庄沟流域)

Fig. 1 The dipartition of the river watershed in Lake Nansi watershed

通过对土地利用类型图、土壤类型图、坡度图进行叠加分析, 将泗河流域划分成 33 个子流域和 407 个 HRUs; 东鱼河流域划分成 51 个子流域和 256 个 HRUs.

2.2.2 数据空间离散化 空间离散化包括子流域的划分和水文响应单元(HRU)的划分. 根据出入水口的位置和各支流之间的位置关系, 将流域划分为多个子流域. 每个子流域又可分成一个或多个 HRUs, HRU 是 SWAT 模型运行的最小单元, 它具有单一的土地利用类型、土壤类型和坡度, 可以反映不同组合的水文效应的差异.

2.2.3 模型校准和验证 通过参数敏感性分析, 得到对径流量敏感的参数主要有: CN2、Rchrg\_Dp、Esco 等; 对泥沙负荷敏感的参数主要有: Spcon、CN2、USIE\_P 等; 对非点源氮磷负荷敏感的参数主要有: CN2、Rchrg\_Dp、Sol\_Awc 等.

参数敏感性分析结束后, 需要结合实测数据

对模拟的结果进行校准和验证. 模型校准即对敏感性参数取值进行调整, 使模拟值与实测值趋于一致, 本文采取手动校准和自动校准相结合的方式, 取 2001—2007 年为校准期. 模型验证即评价校准后模型的可靠性, 选 2008—2010 年为验证期. 利用相对误差 ( $Re$ )、决定系数 ( $R^2$ ) 和 Nash-Sutcliffe 系数 ( $E_{ns}$ ) 这 3 个指标对模拟结果进行评价.

(1) 径流量校准和验证. 通过参数调整, 使模拟值和实测值趋于一致, 保证年均误差的绝对值在 15% 以内,  $R^2 \geq 0.6$ ,  $E_{ns} \geq 0.5$ . 泗河流域和东鱼河流域的模拟年径流量过程线和实测年径流量过程线基本一致, 且年均误差、 $R^2$ 、 $E_{ns}$  都满足评价指标要求 (图 2).

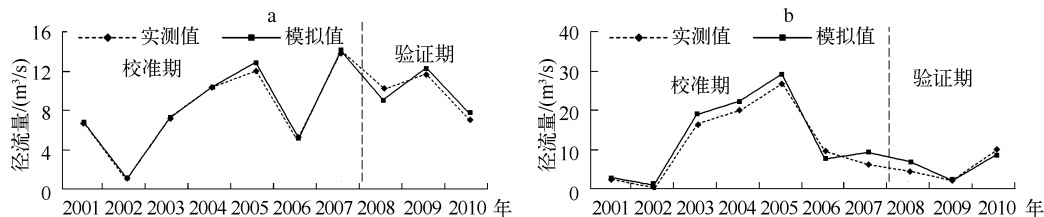


图 2 泗河流域 (a) 和东鱼河流域 (b) 年径流量校准和验证

Fig. 2 The calibration and verification of annual runoff in Si River watershed (a) and Dongyu River watershed (b)

(2) 泥沙负荷校准和验证. 通过参数调整, 使得泥沙负荷模拟值和实测值趋于一致, 保证年均误差的绝对值在 20% 以内,  $R^2 \geq 0.6$ ,  $E_{ns} \geq 0.5$ . 泗河流域书院站和东鱼河流域鱼台站年泥沙负荷的模拟效果虽不及年径流量, 但模拟的年泥沙负荷过程线和实测年泥沙负荷过程线基本一致, 且年均误差、 $R^2$ 、 $E_{ns}$  都控制在要求范围之内, 满足研究需要 (图 3).

(3) 营养元素校准和验证. 由于营养元素实测值的限制, 总氮负荷选 2008—2009 年为校准期, 2010 年为验证期; 总磷负荷选 2004—2007 年为校准期, 2008—2010 年为验证期.

通过参数调整, 使泗河流域和东鱼河月非点源总氮和总磷负荷的模拟值和实测值趋于一致, 保证月均

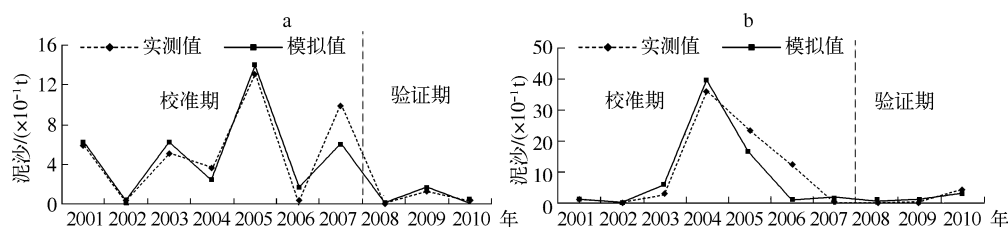


图3 泗河流域(a)和东鱼河流域(b)年泥沙负荷校准和验证

Fig. 3 The calibration and verification of annual sediment load in Si River watershed(a) and Dongyu River watershed(b)

误差的绝对值在 30% 以内,  $R^2 \geq 0.6$ ,  $E_m \geq 0.5$ . 泗河流域书院站和东鱼河流域鱼台站校准期和验证期的总氮、总磷负荷模拟结果和实测值对比见图 4.

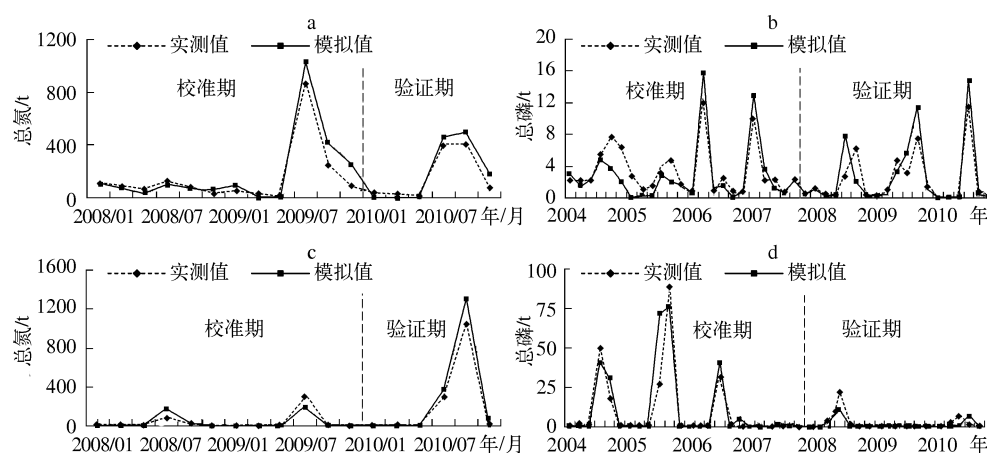


图4 泗河流域(a,b)和东鱼河流域(c,d)总氮、总磷负荷校准和验证

Fig. 4 The calibration and verification of TN and TP load in Si River watershed(a,b) and Dongyu River watershed(c,d)

由于年径流和年泥沙负荷的累积误差都会对非点源 N、P 负荷值产生影响,泗河流域和东鱼河流域非点源氮磷负荷的模拟效果不及年径流量和年泥沙负荷,但年均误差、 $R^2$ 、 $E_m$  都满足要求. 相比而言,总氮负荷的模拟效果要好于总磷负荷的模拟效果.

## 2.3 南四湖流域 SWAT 模型构建

为评价泗河流域和东鱼河流域的模型参数校准方法运用到南四湖流域湖东和湖西其它河流流域的可行性,湖东和湖西各选一条河流流域进行模拟,以评价模型校准方法的适用性.

根据所获监测数据,湖东选洸府河流域利用泗河流域的模型进行模拟,湖西选洙赵新河流域利用东鱼河流域的模型进行模拟(图 5). 由于只获取到年径流量数据,因此只对洸府河流域(湖东)和洙赵新河流域(湖西)进行 2001—2010 年径流量模拟结果的评价(表 2). 洸府河和洙赵新河流域年径流量模拟效果较好,满足研究需要. 虽然受到 2003 年年降水量近 10 年最大而 2004 年年降水量较小的影响(图 5b),洙赵新河流域 2004 年模拟值较实测值偏小较多,但其它年份模拟结果较好,因此认为泗河流域和东鱼河流域模型参数的校准方法可运用于湖东和湖西其它河流流域的非点污染氮磷负荷的模拟.

## 3 结果与分析

### 3.1 非点源氮磷负荷空间分布

以 30 个河流流域的 354 个子流域为单元,分析 2001—2010 年均非点源氮磷负荷的空间分布规律,得到

流域内非点源氮磷负荷空间分布图(图6). 年均总氮负荷湖东大于湖西, 湖东总氮负荷严重地区主要集中在浠府河流域、泗河流域、白马河流域等区域(图6a). 湖西主要集中在老万福河流域、蔡河流域、梁济运河流域等区域. 这些地区人口密度较大, 耕地面积较广, 畜禽养殖量较多. 年均总磷负荷湖东略大于湖西, 湖东总磷负荷较严重地区主要集中在浠府河流域、泗河流域、白马河流域及沿湖的几个河流域. 湖西各流域总磷负荷较为平均, 高值出现在洙水河流域上游、老万福河流域和蔡河流域区域(图6b). 这些地区是耕地和禽畜养殖较为集中的地区.

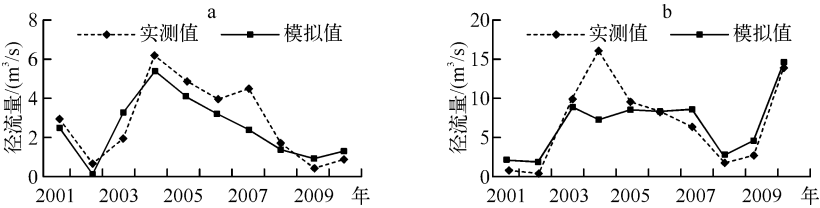


图5 浠府河流域(a)和洙赵新河流域(b)年径流量验证  
Fig. 5 The calibration and verification of annual runoff in Guangfu River watershed(a) and Zhuzhaoxin River watershed(b)

表2 浠府河流域和洙赵新河流域年径流量模拟评价

流域	时期	累年均值/(m <sup>3</sup> /s)		Re/%	R <sup>2</sup>	E <sub>ns</sub>
		实测值	模拟值			
浠府河流域	验证期(2001—2007年)	2.845	2.450	-13.89	0.7927	0.740
洙赵新河流域	验证期(2001—2010年)	6.853	6.565	-14.42	0.6821	0.663

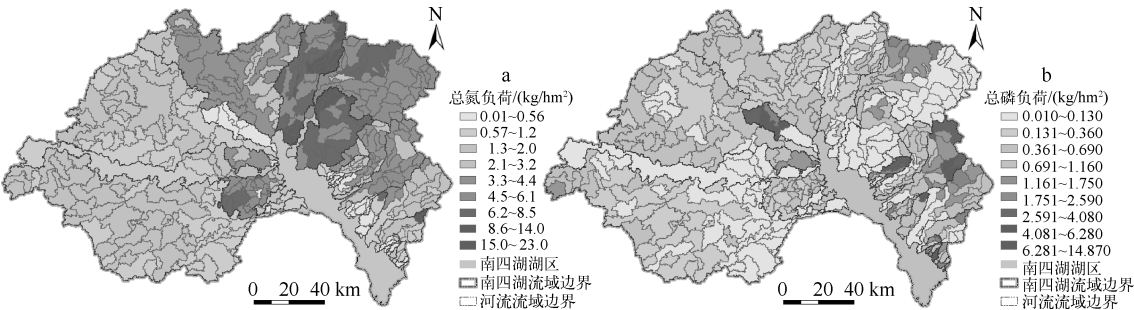


图6 流域内非点源氮(a)和磷(b)负荷分布  
Fig. 6 The distribution of NPS nitrogen(a) and phosphorus(b) load in Lake Nansi watershed

总氮和总磷负荷分为两种状态,一种为溶解态,随径流进入河道;一种为吸附态,随泥沙进入河道. 为进一步探讨流域内非点源氮磷元素的形态,对产流、产沙、总氮负荷、总磷负荷做了相关性分析,结果表明总氮和产流在 0.01 水平下呈显著正相关,相关系数为 0.733,而和产沙相关性不显著,相关系数仅为 0.089.

表3 各值相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis of the values				
	产流	产沙	总氮	总磷
产流	1	0.766 **	0.733 **	0.251 **
产沙		1	0.089	0.970 **
总氮			1	0.060
总磷				1

\*\* 表示在 0.01 水平下显著相关.

这说明流域内总氮负荷中以溶解态(硝态氮)为主,吸附态(有机氮)较少;总磷和产沙量在 0.01 水平下呈显著正相关,相关系数为 0.970,和产流量相关系数在 0.010下呈显著正相关,但是相关系数较小,仅为 0.251. 这说明流域内总磷负荷吸附态(有机磷和矿物

质磷)较多,溶解态较少(表3).

3.2 各河流域非点源污染贡献率

南四湖流域内的各条河流所携带的氮磷是南四湖非点源污染的主要贡献者.南四湖流域内总氮负荷湖东明显大于湖西,由于流域内氮以溶解态居多,而湖东的径流量大于湖西,因此湖东的总氮负荷较湖西要大.其中洸府河流域贡献率最大,其次是白马河流域、老万福流域、泗河流域、梁济运河流域、洙赵新河流域、东鱼河流域,城郭河流域,其它流域相对较小.总磷负荷湖东略大于湖西,其中以洸府河流域贡献率最大,其次是洙赵新河流域、万福河流域、白马河流域、梁济运河流域,其它流域相对较小(表4).

表 4 各河流域对南四湖非点源污染的贡献率

Tab. 4 Contributions of all river watersheds to NPS pollution in Lake Nansi watershed

流域		总氮贡献率/%	总磷贡献率/%	流域		总氮贡献率/%	总磷贡献率/%
湖西	东鱼河流域	7.26	4.90	湖东	泗河流域	9.91	5.10
	梁济运河流域	9.59	9.14		洸府河流域	13.80	12.30
	洙赵新河流域	7.34	11.88		白马河流域	12.05	9.80
	洙水河流域	0.08	5.65		北沙河流域	3.49	2.16
	蔡河流域	1.58	2.56		城郭河流域	5.67	4.78
	万福河流域	2.18	10.94		薛王河流域	4.42	2.59
	老万福河流域	11.32	2.38		新薛河流域	6.04	5.72
	其它小流域	0.36	0.47		薛沙河流域	3.25	1.70
	总计	39.71	47.92		其它小流域	1.66	7.93
				总计		60.29	52.08

3.3 非点源氮磷污染关键区识别

对南四湖流域总氮总磷负荷分布进行分析,根据国家环境保护总局和国家质量监督检验检疫总局 2001 年发布的《地表水环境质量标准》(GB/T 3838—2002)和《生活饮用水卫生规范》,对南四湖流域总氮总磷流失状况进行分级,确认总氮总磷流失关键区.本研究所用的地表河流分类中总氮和总磷标准见表 5. 研究区非点源氮磷污染关键区见图 7.

表 5 地表水环境质量标准总氮、总磷标准限值

Tab. 5 Standard value of water quality level of total nitrogen and total phosphorus

	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
总氮/(mg/L)	≤0.2	≤0.5	≤1.0	≤1.5	≤2.0
总磷/(mg/L)	≤0.02	≤0.1	≤0.2	≤0.3	≤0.4

南四湖流域总氮浓度整体偏高,大部分地区的总氮浓度高于 2 mg/L,达不到 V 类水的标准.总氮浓度最高的地区集中在老万福河流域、洸府河流域、白马河流域(图 7a).南四湖流域总磷负荷大于 0.4 mg/L 的地区约占总流域面积的 40%,这些达不到 V 类水的标准.主要集中分布在洸府河流域、洙赵新河流域、梁济运河流域和下级湖湖东周边河流流域(图 7b).

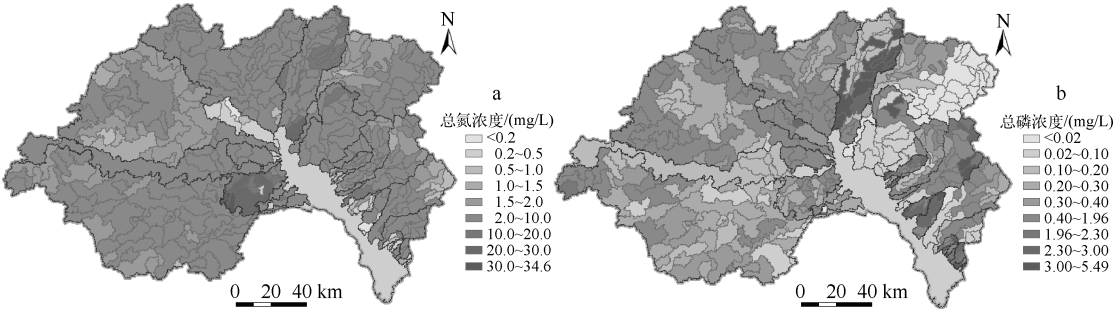


图 7 南四湖流域非点源总氮(a)和总磷(b)浓度分类

Fig. 7 Classification of concentration of NPS total nitrogen(a) and total phosphorus(b) in Lake Nansi watershed

## 4 结论

利用 SWAT 模型模拟泗河流域(湖东)和东鱼河流域(湖西)典型小流域,误差( $Re$ )都在 10% 以内,再将模型推至整个南四湖流域,通过对洸府河和洙赵新河流域的验证, $Re$  都在 15% 以内,模拟精度较高,满足研究需要. 对比发现湖东的模拟效果要好于湖西,即 SWAT 模型在地形起伏较大的地区更能获得较高的模拟精度. 南四湖流域非点源氮磷污染严重,湖东污染较湖西严重. 非点源氮负荷以溶解态为主,几乎全流域的氮浓度都超标严重. 非点源磷负荷以吸附态为主,40% 以上的区域磷浓度超标. 所有河流流域中,洸府河流域是南四湖流域非点源氮磷污染的主要贡献者.

## 5 参考文献

- [1] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型:理论方法与应用. 北京:中国环境科学出版社,2006.
- [2] 王晓燕,王一岫,蔡新光等. 北京密云水库流域非点源污染现状研究. 环境科学与技术, 2002, **25**(4): 1-3.
- [3] 于水. 公共突发事件应急管理研究——以太湖流域农业面源污染为例. 管理观察, 2009, (12): 92-95.
- [4] 李家科,李怀恩,李亚娇等. 基于 AnnAGNPS 模型的陕西黑河流域非点源污染模拟. 水土保持学报, 2008, **22**(6): 82-88.
- [5] Bouraoui F, Benabdallah S, Jrad A *et al.* Application of the SWAT model on the Medjerda River basin (Tunisia). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2005, **30**(8/9/10): 497-507.
- [6] Luo Y, Zhang M. Management oriented sensitivity analysis for pesticide transport in watershed-scale water quality modeling using SWAT. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(12): 1-9.
- [7] Chanasyk DS, Mapfumo E, Willms W. Quantification and simulation of surface run off from fescue grassland watersheds. *Agricultural Water Management*, 2003, **59**(2): 137-153.
- [8] Schomberg JD, Host G, Johnson LB *et al.* Evaluating the influence of landform, surficial geology, and land use on streams using hydrologic simulation modeling. *Aquatic Sciences-Research Across Boundaries*, 2005, **67**(4): 528-540.
- [9] Arabi M, Govindaraju RS, Hantush MM *et al.* Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of best management practices with SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, **42**(2): 513-528.
- [10] Tripathi MP, Panda RK, Raghuwanshi NS. Development of effective management plan for critical subwatersheds using SWAT model. *Hydrol Process*, 2005, **19**: 809-826.
- [11] 王伟武,朱利中,王人潮. 基于 3S 技术的流域非点源污染定量模型及其研究展望. 水土保持学报, 2002, **16**(6): 39-49.
- [12] 范丽丽,沈珍瑶,刘瑞民等. 基于 SWAT 模型的大宁河流域非点源污染空间特性研究. 水土保持通报, 2008, **28**(4): 133-137.
- [13] 王晓燕,王晓峰,汪清平等. 北京密云水库小流域非点源污染负荷估算. 地理科学, 2004, **24**(2): 227-231.
- [14] 万超,张思聪. 基于 GIS 的潘家口水库面源污染负荷演算. 水力发电学报, 2003, (2): 62-68.
- [15] 沈吉,张祖陆,杨丽原等. 南四湖——环境与资源研究. 北京:地震出版社, 2008.
- [16] 李吉学,李金玉,李平. 南四湖水质有机污染评价及趋势分析. 治淮, 1999, (7): 38-39.
- [17] 孙娟. 南四湖湿地功能变化及评价分析研究[学位论文]. 济南:山东师范大学, 2002.
- [18] 张祖陆,彭利民,孙庆义. 南四湖水质污染综合评价及水质分区. 地理学与国土研究, 1998, **14**(4): 30-33.
- [19] 王晓军,潘恒健,杨丽原等. 南四湖表层沉积物重金属元素的污染分析. 海洋湖沼通报, 2005, (2): 23-29.
- [20] 杨丽原,沈吉,张祖陆等. 南四湖表层底泥重金属和营养元素的多元分析. 中国环境科学, 2003, **23**(2): 206-209.
- [21] 杨丽原,沈吉,张祖陆等. 南四湖表层底泥重金属污染及其风险性评价. 湖泊科学, 2003, **15**(3): 252-256.
- [22] 宋涛. 南四湖沿岸农业面源污染研究[学位论文]. 济南:山东师范大学, 2010.