

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.03.012

# 汤浦水库流域非点源污染的时空分布及情景分析

刘 鹤<sup>1</sup>, 王 敏<sup>1</sup>, 孟 婷<sup>1</sup>, 施练东<sup>2</sup>, 程 文<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;

2. 绍兴市汤浦水库有限公司, 浙江 上虞 312364)

**摘要:** 为了定量研究汤浦水库流域内非点源污染物的时空分布状况。建立了基于 SWAT 模型的流域非点源污染模型,并对模型中各参数进行率定和验证。模拟结果显示:流域内泥沙、有机氮和有机磷的流失主要与降雨相关,集中于汛期;空间上,各类污染物来源具有一致性,主要来自流域东部和南部地区;此外,不同土地类型年产污负荷各异,其中农业用地单位面积产污负荷较高。情景分析表明:农业生产方式和土地利用类型的改变对流域非点源负荷产生了一定影响。本研究成果将为控制汤浦水库流域非点源污染提供科学依据。

**关键词:** SWAT 模型; 非点源污染; 时空分布; 汤浦水库

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)03-0321-07

## Temporal-spatial distribution of non-point source pollution and scenario simulation of Tangpu reservoir watershed

LIU Hu<sup>1</sup>, WANG Min<sup>1</sup>, MENG Ting<sup>1</sup>, SHI Liandong<sup>2</sup>, CHENG Wen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaoxing Tangpu Reservoir Co. Ltd., Shangyu 312364, China)

**Abstract:** In order to explore the temporal-spatial distribution of non-point source pollution of Tangpu reservoir watershed. The non-point pollution model is established based on SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model. The model is first calibrated and then to be validated. The simulation result shows that in the reservoir watershed, the loss of sediment, organic nitrogen and organophosphorus related with precipitation occurring mainly in flood season. The non-point pollutions are mainly arising from the eastern and northern of the basin. The source shows the consistency in space. The contents of pollution are uneven in different lands. Maximum sediment load is agricultural land with Scenario analysis showing that farmer work and land use type have an effect on non-point source pollution load. These research results will provide a scientific basis for controlling non-point source pollution in Tangpu reservoir.

**Key words:** SWAT model; non-point pollution; temporal-spatial distribution; Tangpu reservoir

水环境污染已经成为当前普遍存在的一个世界性问题。水体污染源通常分为点源和面源(即非点源)。工业生产废水和城市生活污水的集中排放即为点污染源<sup>[1]</sup>;而非点源污染的来源更为复杂,地表的各类污染物都可以通过径流过程进入受纳水体并引起水质下降,其中以来自农业生产活动的非点源污染最为严重<sup>[2-3]</sup>。我国水体污染中,非点源污染所占比例为总氮 58%、总磷 87%、BOD 57%,各类非点源污染物主要通过降雨径流进入水环境中<sup>[4]</sup>。

非点源污染具有发生的随机性、影响的滞后性、影响因子的复杂性等特征<sup>[5-6]</sup>。早期的非点源污染模拟研究多为统计模型<sup>[7]</sup>,其缺点是难以描述污染物迁移路径与机理<sup>[8]</sup>。20 世纪 70 年代末,机理模型逐渐成为非点源模型开发的主要方向,模拟农业污染的 ARM 模型以及流域模型 ANSWERS 和 HSP 等应运而生。其中以美国农业部农业研究中心开发的 CREAMS 模型影响最大<sup>[9]</sup>。在此模型的基础上,各国科研工作者开发出一系列类似模型,其

收稿日期: 2016-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679192);广东省水利科技创新资助项目(2015-06);陕西水利科技计划资助项目(2014slkj-12)

作者简介: 刘鹤,男,博士生,研究方向为水污染控制。E-mail:1004761354@qq.com

通讯作者: 程文,女,教授,博导,研究方向为水污染控制原理与技术。E-mail:wencheng@xaut.edu.cn

中就包括 SWRRB 模型和 SWAT 模型等<sup>[10]</sup>。SWAT 模型主要用于对流域内非点源污染过程进行定量描述,对非点源污染的时空特征进行分析,并在此基础上为流域规划管理提供支持<sup>[11]</sup>。

本研究通过建立汤浦水库流域 SWAT 非点源模型,计算流域内非点源污染负荷的时空分布特征,并对非点源污染产生的主要时段和空间位置进行识别,研究不同土地利用类型和管理条件对流域非点源污染产生的影响,为流域非点源污染控制提供依据。

## 1 研究区概况

汤浦水库位于浙江绍兴,地形以低山丘陵为主。水库截流于小舜江下游汤浦镇,坝址北纬  $30^{\circ}52'$ ,东经  $120^{\circ}47'$ 。水库流域总面积  $460 \text{ km}^2$ ,水面面积  $14 \text{ km}^2$ ,总库容  $2.35 \text{ 亿 m}^3$ ,设计日供水规模达  $100 \text{ 万 t}$ 。汤浦水库淹没区及其周边  $1 \text{ km}$  内为水源一级保护区,面积约  $52 \text{ km}^2$ 。一级保护区外,上游流域内其它区域为二级保护区,面积  $408 \text{ km}^2$ ,涉及绍兴县、嵊州市 6 个乡镇,如图 1 所示。

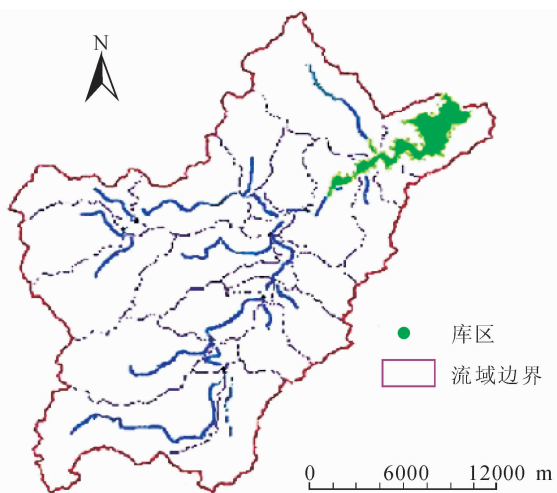


图 1 汤浦水库流域区划

Fig. 1 The basin map of Tangpu reservoir

汤浦水库流域多年平均降水量  $1564.4 \text{ mm}$ ,平均径流深  $795.2 \text{ mm}$ ,径流与降水的年际、年内变化一致。多年平均流量  $11.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,多年平均径流总量  $3.66 \text{ 亿 m}^3$ 。年内水量逐月分配后,通常呈现大、中、小三峰型。其中,大峰发生于 6 月,成因为梅雨;中峰发生于 9 月,成因为台风雨;小峰发生于 3 月,成因为春雨。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据及来源

非点源污染模型需要的数据包括空间数据和属性数据,具体如表 1 所示。

表 1 模型所需数据及来源  
Tab. 1 The required data and source for SWAT

数据名称	规格	数据来源	
空间数据	DEM 图	1:10 万 中国科学院南京地理研究所	
	土地利用图	1:5 万 绍兴国土资源局	
	土壤类型图	$30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ (分辨率) 国际科学数据服务平台	
类别	数据项	数据来源	
属性数据	土壤	土壤物理属性、土壤化学属性	浙江省土壤志
	水文水质	氮、磷含量及流量	汤浦水库水文站
	气象	降雨量、日最高最低气温、风速、相对湿度	汤浦水库气象站

### 2.2 子流域及水文响应单元的划分

取土地利用面积阈值为 5%、土壤类型阈值为 5%、坡度阈值为 5%。据此,将全流域共划分为 288 个水文响应单元。在子流域划分时,将分割阈值为  $10 \text{ km}^2$ ,选择汤浦水库库址作为流域出口,将研究区共划分为 27 个子流域,如图 2 所示。

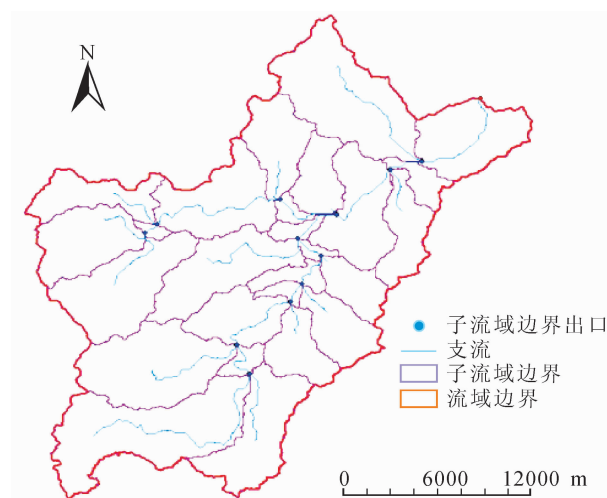


图 2 研究区子流域划分及河网示意图

Fig. 2 Subbasin in the study area and river network diagram

### 2.3 参数率定及验证

用 2002—2008 年数据率定模型,用 2009—2011 年数据对模型各参数进行验证。根据实测资料,以有机氮和有机磷为指标,采用 LH-OAT 方法对率定期进行敏感性分析。参数选择及校正结果如表 2 所示。

当各污染物、月径流量和泥沙量模拟值与实测值的相对误差  $RE$  小于 15%,决定系数  $R^2$  大于 0.6, Nash-Suttcliffe 模拟效率系数  $Ens$  大于 0.5,说明两者吻合较好,可以满足要求,参数评价结果如表 3 所示。经过参数率定之后,用 2009—2011 年的数据对模型进行验证。验证结果表明:月径流量、泥沙量、有机氮

和有机磷的实测值与模拟值的相对误差、决定系数及 Nash-Sutcliffe 模拟效率系数均满足要求。

表 2 模型校正参数阈值  
Tab. 2 The value of parameters

参数名称	取值范围	变量含义	率定值
CN <sub>2</sub>	35~98	径流曲线数	67
ESCO	0~1	土壤蒸发补偿系数	0.79
SOL_AWC	-0.05~0.05	土壤可利用蓄水量	0.02
K <sub>USLE</sub>	0.1~1.0	土壤侵蚀方程(USLE)中的土壤可蚀性因子	0.6
C <sub>USLE</sub>	0.001~0.500	USLE 中的作物经营管理因子	耕地 0.100;林地 0.018
SP <sub>CON</sub>	0~0.01	水流挟沙能力函数的线性系数	0.008
SP <sub>EXP</sub>	1.0~1.5	水流挟沙能力函数的幂指数	1.4
N <sub>PERCO</sub>	0~1	有机氮的下渗系数	1
P <sub>PERCO</sub>	10.0~17.5	有机磷的下渗系数	12

表 3 模型参数评价结果  
Tab. 3 Statistical parameters of observed and simulated data

项目	率定期					项目	验证期				
	月均量		RE	R <sup>2</sup>	Ens		月均量		RE	R <sup>2</sup>	Ens
	实测	模拟					实测	模拟			
径流量/(m <sup>3</sup> /s)	9.25	10.52	18.4	0.61	0.52	径流量/(m <sup>3</sup> /s)	11.66	12.75	9.4	0.83	0.81
泥沙量/(万 t)	0.95	1.09	14.7	0.73	0.70	泥沙量/(万 t)	1.18	1.32	11.9	0.84	0.81
有机氮/t	42.93	41.62	3.0	0.63	0.55	有机氮/t	46.3	40.5	12.5	0.69	0.64
有机磷/t	0.95	0.91	4.2	0.68	0.64	有机磷/t	1.02	0.92	9.8	0.71	0.65

### 3 非点源污染负荷的时间分布

用 SWAT 模型对汤浦水库流域三个不同水文年的非点源污染负荷进行模拟计算。水文年则根据库区气象站多年降雨资料确定。库区多年平均降雨量为 1 255.3 mm,其中 2002 年降雨总量为 1 694.7 mm,2003 年降雨总量为 879.3 mm,2006 年降雨总量为 1 240.4 mm。因此,确定 2002 年为丰水年、2003 年为枯水年、2006 年为平水年。非点源污染负荷的模拟结果如表 4 所示。

不同水文年降雨量不同,会产生不同的径流量,

故泥沙量、有机氮和有机磷等污染负荷也有差异;降雨量、径流量、泥沙量、有机氮和有机磷负荷均表现出丰水年最大,平水年次之,枯水年最小的规律。

图 3 为不同水文年非点源污染分布状况图。由图 3 可知,2002 年(丰水年)的降雨量、泥沙量、有机氮和有机磷产出都集中在汛期(3~9 月),降雨量呈不规则 W 形分布,有三个峰值,分布在 4 月、6 月、8 月,分别为春雨、梅雨、台风雨期间。汛期降水量占全年比例的 72.28%、泥沙量占全年比例的 81%、有机氮占全年比例的 84.45%、有机磷占全年比例的 85.38%。

表 4 不同水文年非点源污染模拟结果

Tab. 4 The simulation results of non-point source pollution load in different hydrological years

水文年	降雨量/mm	泥沙量/(万 t)	有机氮/t	有机磷/t
丰水年(2002 年)	1 694.716	11.51	266.4	33.0
平水年(2006 年)	1 240.411	7.16	134.2	16.3
枯水年(2003 年)	879.308	2.07	47.9	6.1

由于 2003 年(枯水年)降雨量小,10 月的降雨量仅为 9 mm,因此在模拟过程中,有机氮、有机磷及泥沙等污染物负荷均未出现。本年度降雨量相对较大的月份为 3 月、6 月、8 月、11 月,对应的有机氮、有机磷等污染物及泥沙产出都比较大。

汛期(4~9 月)降水量占全年比例的 64.18%、泥沙量占全年比例的 66.97%、有机氮占全年比例的 62.97%、有机磷占全年比例的 63.3%,与丰水年相比,所占比例均有所降低。

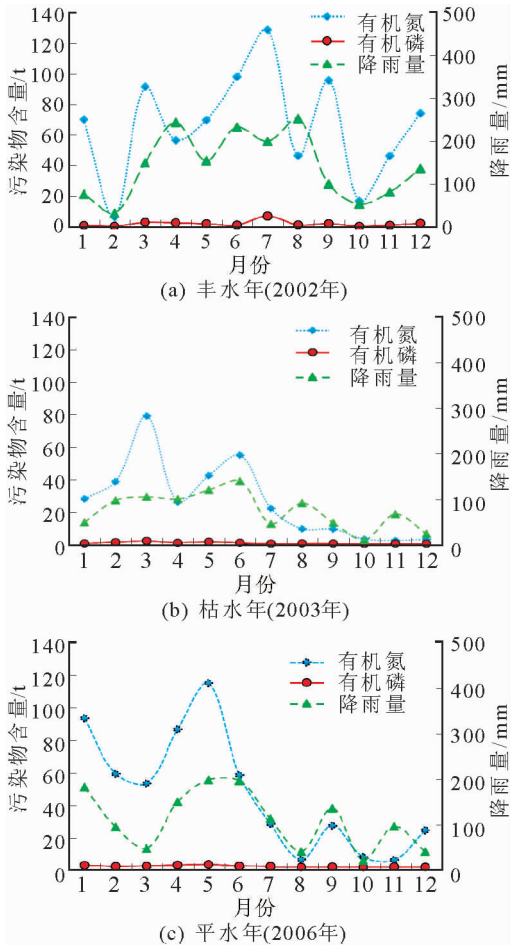


图3 不同水文年降雨量与非点源污染物的时间分布  
Fig. 3 Monthly distribution of rainfall and non-point source pollution in diverse hydrological years

2006年(平水年)的降雨量除汛期较大外,在非汛期的1月和11月降雨量也较大,相应的有机氮、有机磷和泥沙产量也大。虽然污染物及泥沙也随降

雨在非汛期有所分布,但汛期污染物负荷占比更大。汛期降水量占全年比例的64.18%、泥沙量占全年比例的66.97%、有机氮占全年比例的62.97%、有机磷占全年比例的63.3%。

非点源污染通常是伴随着降雨径流过程,尤其是暴雨过程而产生的,因此每年汛期都是各种非点源污染产生的主要时期<sup>[12]</sup>。在这一时段内,一般会有多场历时长、雨量大的降水过程,故由此产生的水土流失也更加严重。所以,流域内的降雨量、径流量和泥沙量呈明显的正相关,降雨量越大,地表径流就会越大,携带的泥沙量也越大,同时携带的非点源污染物也就越多。

综上所述,无论是泥沙还是其他污染物的产出,在降雨较多的月份都比降雨较少的月份多,这符合非点源污染物的产生规律。

#### 4 非点源污染负荷的空间分布

非点源污染负荷的产生与研究区域内的降雨量、土壤特性、土地利用类型以及地形等因素有着密切关系<sup>[13]</sup>。根据典型水文年资料,对流域内径流、泥沙和非点源污染负荷的空间变化规律进行深入分析。

##### 4.1 泥沙空间变化分析

图4为不同水文年泥沙负荷分布图。由图可见,在不同水文年,流域内主要产沙区的空间分布基本一致,主要集中于流域东南部,包括王院乡、谷米镇、王坛镇部分地区。这些地区的河段靠近山区,山地灌木草丛分布较广,土壤类型主要为黄壤、黄棕壤,可侵蚀性高,且该区地形坡度较大,土壤侵蚀量大,所以该区域泥沙产出较大。

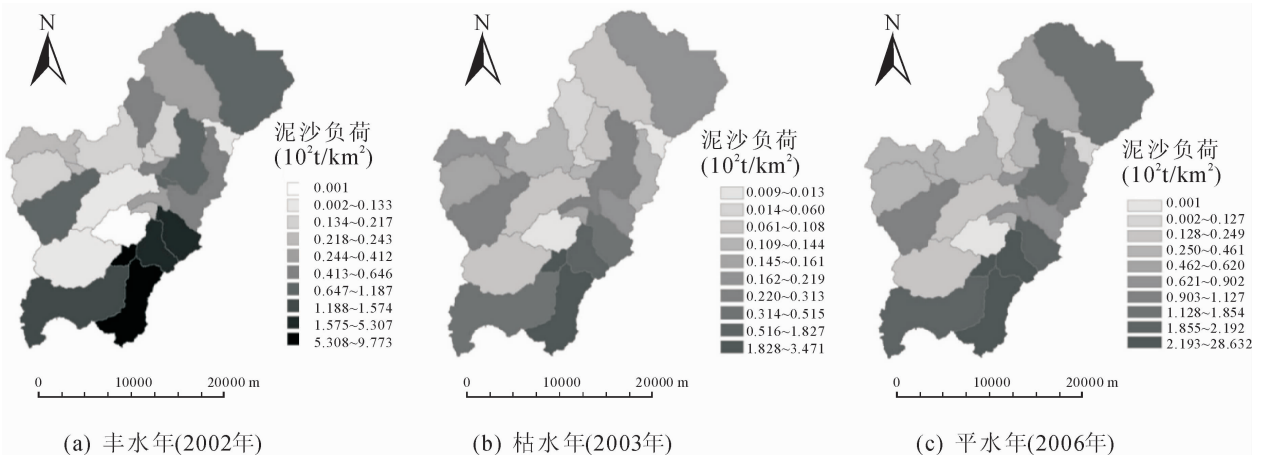


图4 不同水文年泥沙负荷分布图  
Fig. 4 The distribution of sediments in diverse hydrological years

##### 4.2 有机氮、有机磷的空间变化分析

图5、图6分别为不同水文年有机氮、有机磷负

荷分布图。由图可知,水库流域内有机氮、有机磷污染负荷的主产区位于东部和南部,与泥沙负荷分布

有很好的相关性。

这一方面是由于该地区土壤类型为黄壤和黄棕壤,在雨季容易发生水土流失;另一方面,这些地区也是流域内人口相对集中的区域,由于生活污水处

理不完全,在一定程度上增加了该区域的非点源污染负荷;此外,该地区农业用地所占比例较大,而农业生产活动使用大量化肥,这进一步增加了该地区的有机氮、有机磷负荷。

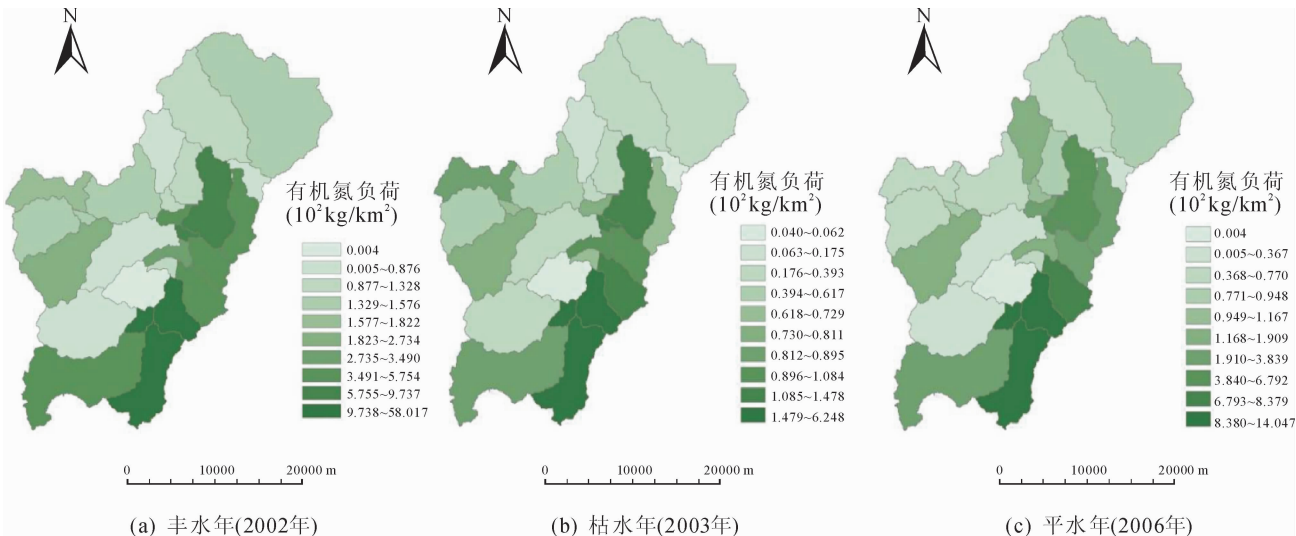


图5 不同水文年有机氮负荷分布图

Fig. 5 The distribution of organic nitrogen load in diverse hydrological years

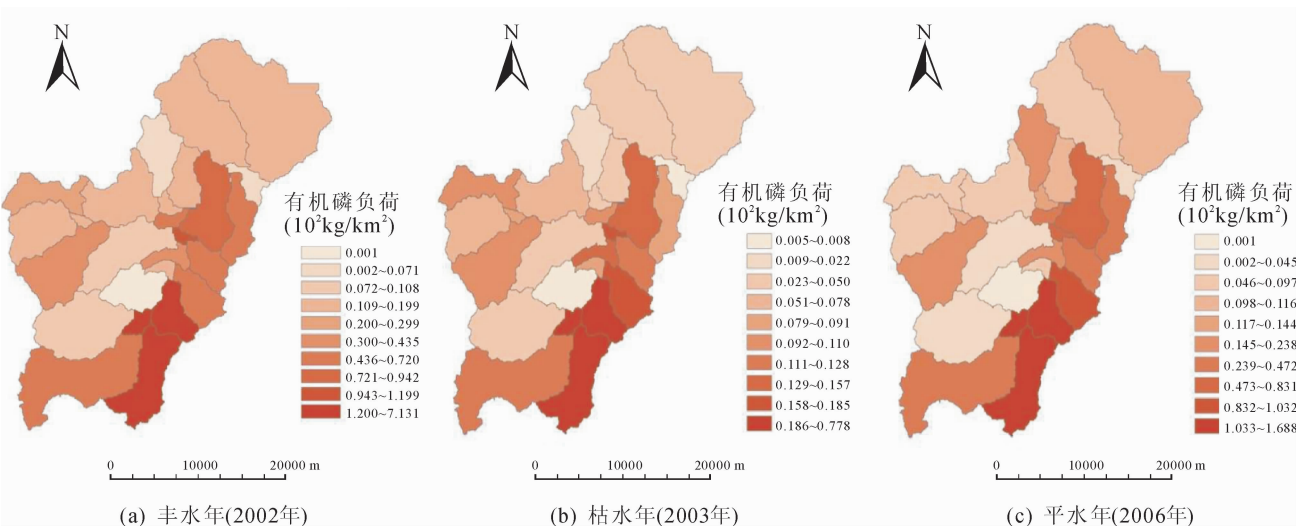


图6 不同水文年有机磷负荷分布图

Fig. 6 The distribution of organic phosphorus load in diverse hydrological years

#### 4.3 不同土地类型的非点源污染负荷

不同土地利用类型的非点源污染负荷不同。研究区内,四种主要土地利用类型的单位面积年污染负荷差异较大,如表5所示。

泥沙负荷从大到小依次为:耕地>城镇用地>林地>果园,泥沙负荷最大为耕地  $531 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,最小为果园  $54 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ;有机氮负荷从大到小依次为:耕地>城镇用地>果园>林地,有机氮负荷最大为耕地  $871 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,最小为林地  $161 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ;硝态氮负荷从大到小依次为:耕地>果园>林地>城

镇用地,硝态氮负荷最大为耕地  $815 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,最小为城镇用地  $905 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ;有机磷负荷从大到小依次为:耕地>城镇用地>果园>林地,有机磷负荷最大为耕地  $105 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,最小为林地  $20 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

耕地因受农业生产活动和施肥的影响,单位面积非点源污染负荷的贡献率最大,是非点源污染的主要来源。

城镇用地中除硝态氮污染负荷最低外,泥沙、有机氮和有机磷的负荷仅次于耕地。

表5 不同土地利用类型年污染贡献量  
Tab.5 Non-point source pollution load in diverse land use types

土地利用类型	面积/ (km <sup>2</sup> )	比例/ %	泥沙			有机氮			硝态氮			有机磷		
			单位面积 负荷/ (t/km <sup>2</sup> )	年度总 负荷/ t	贡献 率/ %	单位面积 负荷/ (kg/km <sup>2</sup> )	年度总 负荷/ t	贡献 率/ %	单位面积 负荷/ (kg/km <sup>2</sup> )	年度总 负荷/ t	贡献 率/ %	单位面积 负荷/ (kg/km <sup>2</sup> )	年度总 负荷/ t	贡献 率/ %
耕地	46.42	10.13	531	24649	52.5	871	40.4	39.3	2850	132.3	21.1	105	4.9	38.6
城镇用地	0.29	0.06	343	99	0.2	604	0.2	0.2	910	0.3	0.1	70	0.1	0.2
林地	312.39	68.18	59	18431	39.2	161	50.3	48.9	1230	383.9	61.2	20	6.2	49.5
果园	70.06	15.29	54	3783	8.1	171	12.0	11.6	1580	110.6	17.6	20	1.5	11.7
合计	429.16	93.66	—	46963	100.0	—	102.9	100.0	—	627.2	100.0	—	12.7	100.0

#### 4.4 非点源污染控制情景分析

汤浦水库流域的非点源污染主要来自林地和耕地。林地虽单位面积产污负荷较小,但面积最广,占整个流域总面积的68%,因此其非点源污染负荷的总量最大。耕地在流域内所占比例只有10.13%,但是单位面积的污染负荷却是四种土地利用类型中最大的。因此,控制来自耕地的非点源污染物,是减少流域内非点源污染总量的最可行和有效的途径。为研究不同控制措施下,非点源污染负荷的变化情况,本节设置两种情景,一是调整耕地化肥使用量,二是减少耕地面积,分别考察其对流域非点源污染产生的影响。

##### 4.4.1 改变化肥使用量

在项目区耕地实际化肥使用量的基础上,设置单位面积增加化肥使用量20%和减少化肥使用量20%两种情景,分别模拟各类污染物的变化情况,如图7所示。

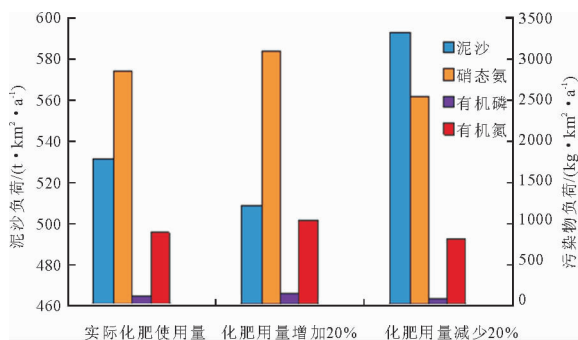


图7 不同施肥量下非点源污染负荷

Fig.7 Non-point source pollution load in diverse fertilizer rates

从图7可以看到,泥沙负荷随施肥量的增加而减小;有机氮、硝态氮、有机磷等营养物质负荷随着施肥量的增加而增大。施肥量增加20%,泥沙负荷减小4.33%,有机氮、有机磷和硝态氮都有所增加,其中有机氮增加最多,增加了17.91%。施肥量减少20%,泥沙负荷增加11.68%,有机氮、有机磷和硝态氮都有所减小,减小最多的是硝态氮,减少了11.15%。

合理施肥以后,增加了植物对营养物质的吸收

利用,植物生长更加旺盛,地表覆盖度就会增加,根系也会更加发达,其对降雨的拦蓄能力也越强,从而能更加有效地减少水土流失,减少泥沙产出。若施肥量过大,没能被作物有效利用的氮、磷等,就会随着降雨产生的径流进入河流湖泊,成为流域非点源污染的来源<sup>[14]</sup>。相反,若施肥量过小,作物的长势太弱,其水土保持能力就会下降。所以,农作物的施肥量一定要与作物的生长相适应,使之既能满足作物生长需要,又不产生污染。

##### 4.4.2 改变耕地面积

实际调研中发现,流域内约有37%的耕地适合退耕还林。模拟过程中,将此部分耕地类型调整为林地,研究该情景下流域内各污染负荷的变化情况,并将模拟结果与退耕还林前的做比较,如表6所示。

表6 退耕还林前后非点源污染负荷变化

Tab.6 The changing condition of non-point source pollution load before and after returning cropland to forest

情景及相对变化率	径流量/ (m <sup>3</sup> /s)	泥沙量/ (t/km <sup>2</sup> )	有机氮/ (kg/km <sup>2</sup> )	有机磷/ (kg/km <sup>2</sup> )
退耕还林前	11.09	531	871	105
退耕还林后	10.87	456	752	89
相对变化率/%	-2.0	-14.0	-13.7	-15.2

从以上结果可以看出,在流域内局部实施退耕还林以后,非点源污染负荷都有减少趋势。流域内月平均径流量减少2%,单位面积泥沙量减少14%,有机氮、有机磷分别减少13.7%和15.2%。

耕地减少以后,肥料的用量就会减少,这有利于非点源污染负荷的降低。耕地变为林地后,植被覆盖度增加,水土流失状况得到改善,泥沙量也会随之减小。可见,为控制流域内非点源污染负荷,继续实施退耕还林并控制农业生产活动中肥料的用量是非常必要的措施。

## 5 结论及建议

1) 汤浦水库流域非点源污染负荷年内产出不均,主要集中在汛期(4月~9月),汛期污染物负荷

占全年污染物负荷的70%~80%左右。

2) 非点源污染负荷较大的区域分布于流域的南部和东部地区。这些区域广泛分布的黄壤和黄棕壤容易被侵蚀,从而造成大量的水土流失;此外,这些地区又是人口集中区,农业用地多,进一步增加了该地区有机氮、有机磷污染物的负荷。

3) 不同土地利用类型单位面积的非点源污染产出率不尽相同。单位面积泥沙产量由大到小依次为:耕地>城镇用地>林地>果园;单位面积有机氮产量由大到小依次为:耕地>城镇用地>果园>林地;单位面积硝态氮产量由大到小依次为:耕地>果园>林地>城镇用地;单位面积有机磷产量由大到小依次为:耕地>城镇用地>果园=林地。

4) 情景分析结果表明,在流域内进一步实施退耕还林,改变传统农业生产方式,控制农业生产活动中的化肥使用量,可以有效减少非点源污染负荷。

因此,为确保水库水质安全,有效控制非点源污染,管理者应该着眼于整个流域,有计划地继续实施流域内人口外迁,在水土流失重点区域应该构筑水土保持设施,进一步控制水土流失,同时对流域内农业生产方式进行控制和优化,严控农业非点源污染。

#### 参考文献:

- [1] CAO W, HONG H, YUE S, et al. Nutrient loss from an agricultural catchment and soil landscape modeling in southeast China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, 71(4): 761-767.
- [2] GASSMAN P W, REYES M R, GREEN C H, et al. The soil and water assessment tool: historical development, application and future research directions [J]. *Transactions of the ASAE*, 2007, 50(4): 1211-1250.
- [3] WU Lei, LONG Tianyu, LIU Xia, et al. Impacts of climate and land-use changes on the migration of non-point source nitrogen and phosphorus during rainfall-runoff in the Jialing River Watershed, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 475(12): 26-41.
- [4] 王晓燕, 秦福来, 欧洋, 等. 基于 SWAT 模型的流域非点源污染模拟—以密云水库北部流域为例 [J]. *农业科学环境学报*, 2008, 27(3): 1098-1105.
- WANG Xiaoyan, QIN Fulai, OU Yang, et al. SWAT-based simulation on non-point pollution in the northern watershed of Miyun reservoir [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2008, 27(3): 1098-1105.
- [5] 张蕾, 卢文喜, 安永磊, 等. SWAT 模型在国内外非点源污染研究中的应用进展 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2387-2392.
- ZHANG Lei, LU Wenxi, AN Yonglei, et al. Advances in non-point source pollution modelling with SWAT

- [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2387-2392.
- [6] SALEH A, ARNOLD J G, GASSMAN P W, et al. Application of SWAT for the upper north Bosque watershed [J]. *Transactions of the ASAE*. 2000, 43(5): 1077-1087.
- [7] AKHAVAN A, ABEDI-KOUPAI J, MOUSAVI S F, et al. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran [J]. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 2010, 139(4): 675-688.
- [8] PIONKE H B, GBUREK W J, SCHNABEL R R, et al. Seasonal flow, nutrient concentrations and loading patterns in stream flow draining an agricultural hill-land watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 220(1-2): 62-73.
- [9] PANAGOPOULOS Y, MARKROPOULOS C, BAL-TAS E, et al. SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations [J]. *Ecological Modeling*, 2011, 222(19): 3500-3512.
- [10] 万超, 张思聪. 基于 GIS 的潘家口水库面源污染负荷计算 [J]. *水力发电学报*, 2003, 81(2): 62-68.
- WAN Chao, ZHANG Sicong. Calculation of non-point source pollution loading for the Panjiakou reservoir based on GIS [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2003, 81(2): 62-68.
- [11] 魏怀斌, 张占庞, 杨金鹏. SWAT 模型土壤数据库建立方法 [J]. *水利水电技术*, 2007, 38(6): 15-18.
- WEI Huaibin, ZHANG Zhanpang, YANG Jinpeng. Establishing method for soil database of SWAT model [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007, 38(6): 15-18.
- [12] TRIPATHI M P, PANDA R K, RAGHUWANSHI N S. Identification and prioritisation of critical sub-watersheds for soil conservation management using the SWAT model [J]. *Biosystems Engineering*. 2003, 85(3): 365-379.
- [13] 李家科, 刘健, 秦耀民, 等. 基于 SWAT 模型的渭河流域非点源氮污染分布式模拟 [J]. *西安理工大学学报*, 2008, 24(3): 278-285.
- LI Jiake, LIU Jian, QIN Yaomin, et al. Distributed simulation on nitrogen non-point source pollution in the Weihe River watershed based on SWAT model [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2008, 24(3): 278-285.
- [14] WANG Xuelei, WANG Qiao, QING Chuan, et al. A method coupled with remote sensing data to evaluate non-point source pollution in the Xin'anjiang catchment of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 430: 132-143.