

率水流域非点源污染分析及施肥措施模拟

王媛¹, 楚春礼¹, 刘夏¹, 鲁海宁², 毕孟飞³, 王玉秋¹

(1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 黄山市生态环境局, 安徽 黄山 245000; 3. 黄山市环境监测站, 安徽 黄山 245000)

摘要: 率水流域周边农业用地施用的大量化肥为流域内非点源负荷主要来源之一, 研究该流域内不同施肥措施对其下游千岛湖水体中氮磷污染控制具有重要意义。通过搭建率水流域 SWAT 模型, 设置化肥减量, 粪肥替代和深层施肥 3 种施肥情景, 探究其对流域非点源污染输出的响应特征。结果表明: 化肥减量 50% 可减少约 9.77% 的总氮负荷和 4.42% 的总磷负荷, 粪肥替代化肥对于氮磷负荷的削减率较低, 深层施肥的总氮负荷削减率远低于总磷, 化肥减量和深层施肥联合措施可分别降低 10.11% 和 3.38% 的总氮、总磷负荷, 即为流域内施肥措施的最佳方案, 同时基于 SWAT 模型的施肥情景模拟对削减流域非点源污染具有参考意义。

关键词: 非点源污染; 施肥措施; 负荷分析; SWAT 模型; 情景分析; 率水流域

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0006-08

Non-point source pollution analysis and fertilizer management simulation in Shuaishui Basin

WANG Yuan¹, CHU Chunli¹, LIU Xia¹, LU Haining², BI Mengfei³, WANG Yuqiu¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Huangshan Ecological Environment Bureau, Huangshan 245000, China.; 3. Huangshan Environment Monitoring Station, Huangshan 245000, China)

Abstract: The large amount of fertilizers applied on the agricultural land around the Shuaishui Watershed is one of the main sources of the non-point source (NPS) load; therefore, it is of great significance to study different fertilization management for NPS - TN and NPS - TP control for the downstream Qiandao Lake water. The SWAT model was established to simulate NPS pollution under three fertilization scenarios: fertilizer reduction, manure substitution and deep fertilization. The results showed that the fertilizer reduction can reduce about 9.77% of the TN and 4.42% of the TP load. The NPS - TN load removal rate under deep fertilization is lower than that of the NPS - TP. Reduction rate of nitrogen and phosphorus load of manure substitution is low. The combined measure of fertilizer reduction and deep fertilization could reduce 10.11% for NPS - TN load and 8.38% for NPS - TP load, which is the best solution for fertilization management in the basin. In addition, the model-based fertilizer simulation management have guiding significance for reducing NPS pollution.

Key words: non-point source pollution; fertilization measures; load analysis; SWAT model; scenario analysis; Shuaishui River Basin

1 研究背景

作为农业大国, 中国已成为当今世界最大的化肥生产国和消费国^[1]。但由于不合理的施肥措施

导致当季化肥利用率低, 产生了水体富营养化风险, 给生态环境带来了巨大压力^[2]。

我国对于化肥管理措施的评价方法部分依赖于数据分析^[3-4] 与环境库兹涅茨曲线模型的构

收稿日期: 2019-01-17; 修回日期: 2019-03-11

基金项目: 黄山市科学技术项目 (NHZCG2017Z159); 南开大学亚洲研究中心课题 (AS1812)

作者简介: 王媛 (1993-), 女, 黑龙江佳木斯人, 硕士研究生, 研究方向为水质模型。

通讯作者: 楚春礼 (1980-), 男, 河北秦皇岛人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为流域水环境评估与管理决策支持 (环境规划与管理)。

建^[5-6],虽可发现施肥管理措施与农业非点源氮磷污染的静态响应关系,但难以克服流域尺度污染输入与输出之间的非线性关系及其造成的不确定性问题,导致无法建立以流域调控为目标的施肥管理方案。为寻求削减流域非点源污染的有效方法,部分学者通过田间实验^[7-8]来研究施肥后氮磷的动态特性,通过田间实验可得到污染输出的控制方案,为小尺度流域施肥管理提供了方法借鉴,但大部分实验规模较小,在大尺度流域的应用还需进行大量的实验分析。

SWAT模型是由美国环保署认可,在世界范围内应用最广泛的流域尺度模型之一,广泛应用于环境管理研究^[9-10]。大量研究已表明,SWAT模型是科学研究和政策制定的有效工具^[11],在美国、非洲、澳大利亚和中国等地区均已广泛应用^[12]。已有研究利用SWAT模型分别模拟化肥减量措施^[13-14]、生物肥料部分替代化肥^[15]和深层施肥^[16]对流域非点源总氮、总磷负荷的削减情况,但在同一流域比较不同化肥措施模拟效果的研究却很少。

率水为千岛湖的北源头,是长三角地区重要的生态屏障。流域内多数居民以种植业为生,施肥以化学肥料为主,化肥的大量施用是新安江流域上游水体非点源污染的主要原因之一^[17],部分禽畜粪便的不合理处置也成为当地的污染隐患,引发了水体富营养化风险^[18-19]。

本研究针对率水流域非点源污染问题构建SWAT模型,探究了流域非点源污染的时空分布,设置化肥减量、粪肥替代和深层施肥3种施肥管理措施,比较了各措施对流域氮磷负荷的削减效果,并提出了建议。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

率水流域位于安徽省南部,介于东经117°36′~118°26′,北纬29°27′~29°51′之间(图1),流域面积1520 km²,多年平均降雨量1983 mm^[20]。率水河是率水流域的主干河道,发源于六股尖,全长约159 km,河道较陡,汇流迅速,流至黄山市屯溪区后与横江汇合,再经新安江汇入千岛湖,其水质优劣在很大程度上影响着千岛湖水质的的好坏。流域内林地占比较高,茶树种植较为分散,以丛栽栽种方式为主^[17]。茶树施用的肥料单一,以尿素和复混肥为主,利用率不高,有机肥使用较少^[21]。流域内设有水文监测站点月潭站和水质监测站点率水大桥站。

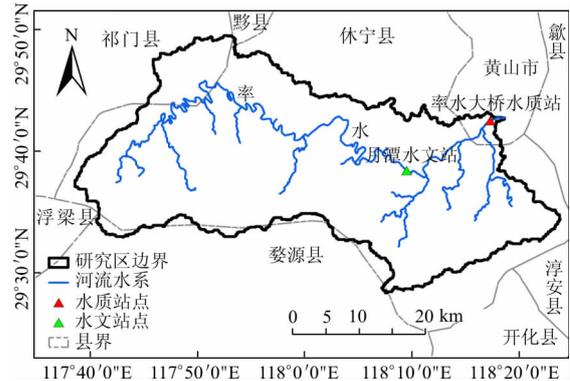


图1 研究区位置与站点分布示意图

2.2 基础数据获取及预处理

SWAT模型所需基础资料大致可分为空间数据、属性数据和实测数据3部分。其中数据精度会对流域径流、泥沙、污染物的产生量及HRU的划分等产生影响,更精确的数据有助于增加模型预测的准确性^[10]。

空间数据主要包括数字高程图DEM,土地利用图和土壤分类图,均为栅格数据。DEM图来自地理空间数据云网站提供的SRTM数据,分辨率90 m × 90 m。土地利用图来源于地理科学与资源研究所,比例尺1:1000000,其中林地在流域内占比约为80%,水稻和茶园占比分别为7%左右,其余土地类型为小麦、城镇、水体等(图2)。土壤类型图来自第二次全国土壤普查数据,比例尺1:1000000,其中红壤为当地优势土种,占比超过60%,其余为粗骨土(11.33%),黄壤(8.89%),潯育水稻土(8.24%)等(图3)。

属性数据主要包括土壤物理属性数据和天气发生器。其中土壤物理属性数据通过中国土壤数据库网站获取当地主要土壤及其基础数据,天气发生器是利用WGNmaker软件导入1956-2010年屯溪站气象数据生成。

实测数据包括气象数据,水文水质数据和污染源数据。气象数据来自国家气象信息中心,时间范围为2010-2016年,降雨数据采用流域内13个雨量站逐日降水数据,屯溪气象站则提供最高/最低气温、相对湿度、辐射和风速的逐日数据。水文水质数据分别来自安徽省水文年鉴和黄山市环境监测站提供的逐月数据。率水流域经济发展模式主要以农业为主,其所在的休宁县内农业人口占总人口的80%以上,流域内无大型规模化养殖场,山区居民地较为分散。因此,施肥操作是流域内重要的非点源污染源,本研究通过文献查阅^[23]和实地调研的方法,建

立了当地农作物管理数据库(表1)。

表1 率水流域主要农作物管理措施

作物	操作	施肥日期/ (月-日)	施肥量/(kg·hm ⁻²)	
			尿素	复混肥
茶园	基肥	11-02	375	300
	催芽肥	02-01	300	0
	春肥	03-15	225	0
	夏肥	07-11	225	0
水稻	基肥	07-05	225	225
	追肥	08-01	150	0
小麦	基肥	11-02	375	300
	追肥	01-15	375	0

2.3 SWAT 模型构建

SWAT 模型根据流域的数字高程图和设定的流域最小集水面积阈值生成河网,再通过总流域出口确定流域边界并进行子流域划分;在子流域划分完毕后根据流域土地利用、土壤分布以及坡度特征的同质性,再将子流域划分为多个水文响应单元,对各个水文响应单元的蒸散发、地表径流和传输损失等进行模拟,并将它们重新组合回子流域^[22]。

本研究以率水河与横江交汇处作为流域出口,将流域划分 0~2°、2~6°、6~12°、12~25°和 25°以上 5 类坡度,据此共将率水流域划分为 46 个子流域

和 1 026 个水文响应单元(图 4)。

3 结果与讨论

3.1 模型适用性分析

使用 SWAT-CUP 内置的 SUFI-2 算法进行率水流域径流和总氮总磷的参数率定,并选用相对误差 (Re)、决定系数 (R^2) 以及 Nash-Sutcliffe 系数 (NS) 3 个指标用于径流和水质模拟的适用性评价。当 NS 和 $R^2 > 0.75$ 且 $\pm Re < 10\%$ 时模型拟合精度令人满意; NS 和 $R^2 \leq 0.50$ 且 $\pm Re \geq 25\%$ 时模型适用性较差;介于两者范围之间认为模型适用性和拟合精度可以接受^[24]。

设定模型预热期、率定期和验证期分别为 2010、2011-2014 年和 2015-2016 年。参数率定依据以下原则:先调整地表径流,再调土壤水、蒸发和地下径流^[25];先调整总氮负荷,再调节总磷负荷。

径流和总氮总磷模拟过程调整的参数及其敏感性分析见表 2。

月潭水文站径流模拟的评价指标 NS 和 R^2 均大于 0.95, Re 在 10% 以内(图 5),率水大桥水质站的总氮和总磷负荷从率定和验证结果来看(图 6、7),评价指标 NS 、 R^2 和 Re 均令人满意^[13]。总体来说,SWAT 模型对率水流域径流、总氮和总磷的模拟结果准确,适用性较好,可用于施肥措施改变下的水文响应及总氮、总磷变化研究。

表2 率水流域径流和营养盐率定参数值

参数名	物理意义	率定范围		t-Stat	P-Value
		上限	下限		
CN2. mgt	SCS 径流曲线数	35	98	-17.43	0.00
CH_K2. rte	主河道的曼宁系数	0	500	-12.07	0.00
CH_N2. rte	河道有效水力传导系数	0	0.3	-4.77	0.00
SOL_AWC(). sol	土壤有效含水量	0	1	-3.10	0.00
SOL_K(). sol	土壤饱和渗透系数	0	2000	2.38	0.02
CANMX. hru	植被冠层截留量	0	100	-1.61	0.11
ALPHA_BF. gw	基流 α 因子	0	1	1.42	0.16
OV_N. hru	坡面曼宁系数	0.01	1	-1.18	0.24
CDN. bsn	反硝化指数速率系数	0	3	-31.67	0.00
ERORGP. hru	泥沙运移的有机磷富集比	0	5	4.30	0.00
P_UPDIS. bsn	磷吸收分布参数	0	100	-2.43	0.02
RSDIN. hru	初始残留物覆盖量	0	10000	-1.30	0.20
SHALLST_N. gw	浅层含水层中硝酸盐初始浓度	0	1000	-1.25	0.21
FIXCO. bsn	固氮系数	0	1	1.24	0.22
PPERCO. bsn	磷的渗流系数	10	17.5	1.00	0.32
PSP. bsn	磷的可利用指数	0.01	0.7	-0.82	0.41

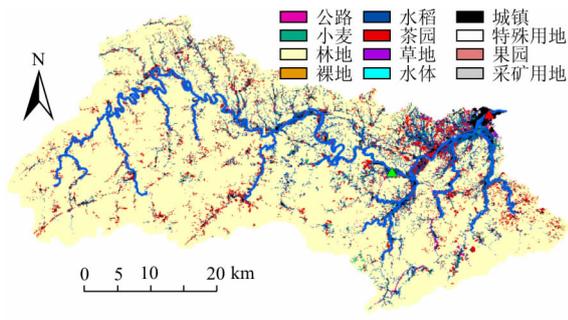


图2 研究区土地利用类型图

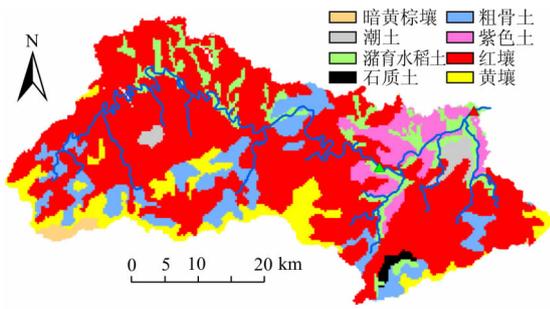


图3 研究区土壤类型分布图

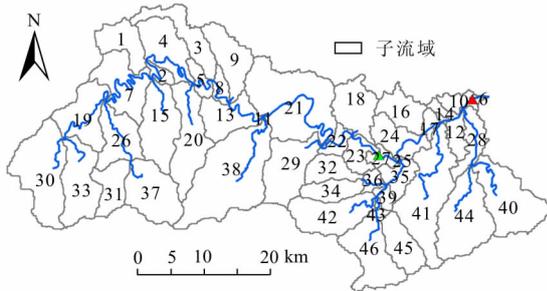


图4 研究区子流域分布图

3.2 非点源污染物输出时空特征

非点源污染的空间差异性与土地类型有着密切关系,研究土地类型与非点源污染之间的联系,对流域内的非点源污染管理具有重要意义^[26]。基于校准后的 SWAT 模型,得到流域氮磷输出系数的空间

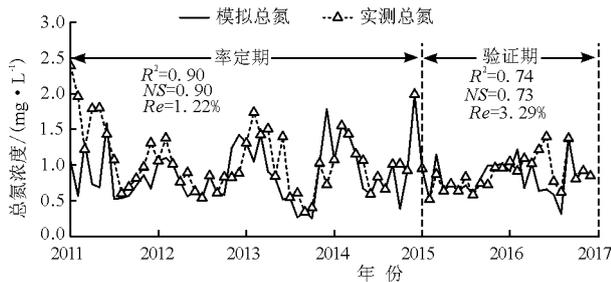


图6 率水大桥水质站月总氮率定和验证结果

分布和不同土地类型的逐年污染物通量。

流域氮磷输出系数空间差异较大,北部略大于南部,从上游到下游输出系数递增(图8)。总氮和总磷的输出系数较大值集中在流域出口附近,达到了19.81kg/hm²和2.30 kg/hm²。因流域中种植用地和城镇主要集中于下游,大量施肥与人为活动的干扰导致氮磷输出系数较高。

不同土地利用类型输出的氮磷负荷随时间变化见图9。在模拟周期内,流域内总氮负荷通量约1707.75 t/a,其中约45.63%来自林地,林地在全流域中面积占比超过80%,林地氮沉降产生较高的氮负荷;茶园年均总氮负荷贡献占比约为33.93%,茶树种植是溶解态氮和泥沙吸附态氮通量的主要来源;水稻总氮负荷贡献率为17.12%,城镇约为2.28%,小麦约为1.03%。流域内总磷负荷通量约79.41 t/a,其中约32.07%的总磷负荷来自茶园,林地和水稻的贡献率分别为27.54%和27.87%,城镇和小麦的总磷贡献率相比于总氮贡献率均有所上升,达到8.20%和4.32%。

农业用地(茶园、水稻、小麦)面积约为流域总面积的15%,却贡献了超过50%的总氮负荷和60%的总磷负荷,施肥较多为氮磷来源的主要原因之一,因此采取适宜的施肥管理措施已刻不容缓。

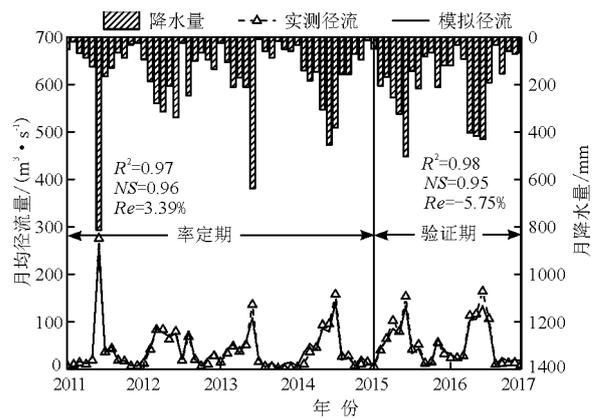


图5 月潭水文站月降雨和月流量变化

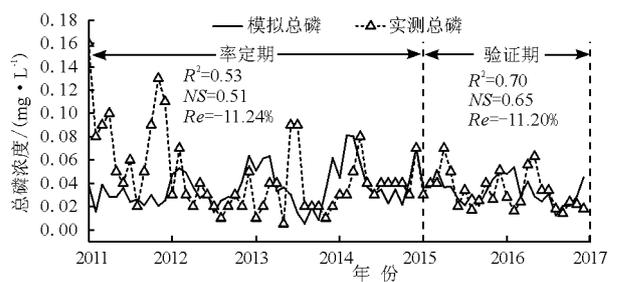


图7 率水大桥水质站月总磷率定和验证结果

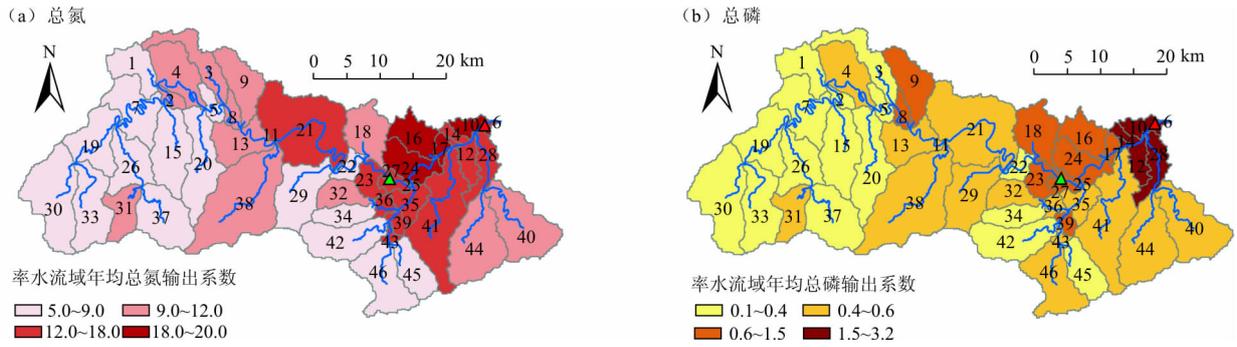


图8 流域内氮磷输出系数空间分布图(图中数字为子流域编号)(单位:kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$))

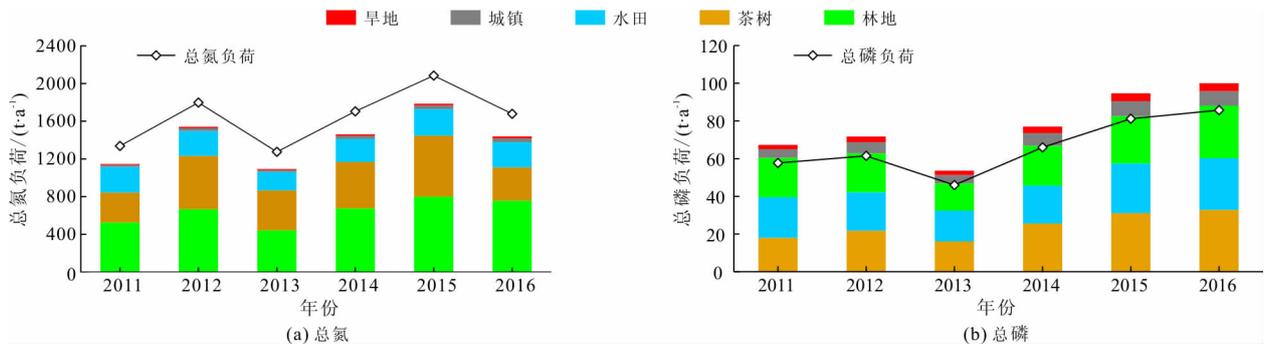


图9 不同土地类型输出的氮磷负荷随时间变化图

3.3 施肥管理措施设置

种植用地因化肥大量施用导致氮磷负荷较高,因此选择适宜的施肥管理措施尤为重要。

首先考虑化肥减量措施,施用过多化肥可导致地表水质恶化^[28],减少化肥用量可作为降低流域非点源污染的根本措施^[16],因此分别设置化肥减量20%和50%两种情景(情景1和2)。

其次考虑畜禽养殖废弃物资源化利用,禽畜粪便中含有大量有机质和作物生长所需的营养元素,是优质的有机肥源^[27],以有机肥替代常规化肥可在保持茶叶产量的同时减少土壤中氮磷损失^[28],同时会部分缓解化肥对土壤生物活动的负面影响^[29]。率水流域养殖业主要以鸡、猪和牛为主,同时查阅年鉴得知该流域内猪的养殖量最多,因此选用 SWAT 肥料数据库中猪粪肥数据进行化肥替代模拟,在保证施用的肥料中氮磷总量不变的情况下,将粪肥替代量分别设置为10%和20%。因此共有两种粪肥与化肥联合施用情景:10%猪粪肥+90%化肥和20%猪粪肥+80%化肥(情景3和4)。

最后考虑当地土壤及气候情况。率水流域属于南方红壤丘陵区,坡度变化较大,土壤易发生水力侵蚀,夏季雨量集中易洪涝,强降雨条件下表层土壤中溶解态氮磷流失率较高,若改为深层施肥处理,将提高土壤中的氮素利用率^[30]。SWAT模型将20%肥

料默认施用于表层土壤,若要模拟深层施肥措施,可将表层土壤中的肥量由20%改为10%、5%和1%,并设为情景5、6和7。

比较3种施肥管理措施,选择氮磷去除率较高的措施联合模拟设置为情景8,因此共设8种措施情景模拟非点源污染去除情况(表3),带入校准后的SWAT模型模拟后分析流域内氮磷负荷的变化情况。

表3 化肥管理措施及具体操作

情景设置	具体措施	操作
情景1	化肥减量20%	减少.mgt文件中农业用地施肥量
情景2	化肥减量50%	
情景3	10%猪粪肥+90%化肥	在.mgt文件中以猪粪肥代替部分化肥
情景4	20%猪粪肥+80%化肥	
情景5	表层土壤肥量10%	改变.mgt文件中FRT_SURFACE数值
情景6	表层土壤肥量5%	
情景7	表层土壤肥量1%	选择氮磷去除率最高的措施联用
情景8	施肥综合管理措施	

3.4 化肥减量措施模拟与分析

通过化肥减量措施模拟,2011-2016年流域氮磷负荷均有所削减(图10)。情景1可使流域减少3.99%~5.31%的总氮负荷和1.79%~2.52%的总磷负荷,情景2可使流域减少8.48%~10.86%

的总氮负荷和 3.83% ~5.33% 的总磷负荷。情景 2 的年均总氮去除量约为 160.76 t,年均总磷去除量约为 3.42 t,去除效果较好。化肥减量可从源头控制流域氮磷输入,是改善流域水质状况的有效措施。

3.5 粪肥替代措施模拟

粪肥部分替代化肥后的流域氮磷负荷削减率较低,其中情景 3 和情景 4 的年均总氮负荷削减率仅为 0.55% 和 1.22%,年均总磷负荷削减率仅为 0.22% 和 0.45% (图 11)。虽然粪肥与化肥配施后氮磷削减率较低,但粪肥与普通化肥相比,其含有的有机物可调节土壤理化性质^[31],改善作物根系的生长与构形分布,提高作物产量^[32],使养殖废弃物得到资源化利用。

3.6 深层施肥措施模拟

深层施肥可有效削减流域总磷负荷,在情景 5、6 和 7 中,总磷的削减率分别达到了 3.46%、5.20% 和 6.60%,而总氮削减率只有 0.24%、0.37% 和 0.54% (图 12)。随着进入深层土壤的化肥量增多,流域非点源氮磷的削减率也增加。土壤可吸附固定一定量的磷素,因此化肥施用后磷素的输出浓度在土层垂直方向上呈现递减的趋势,而氮素施用后于土壤中大部分呈现溶解状态,在降雨和径流的作用下向深层土壤下渗^[33],因此深层施肥对于总氮的去除率远低于总磷,是一种有效的流域总磷削减措施;同时化肥深施也可提高肥料中氮磷利用率,增加作物产量^[34]。

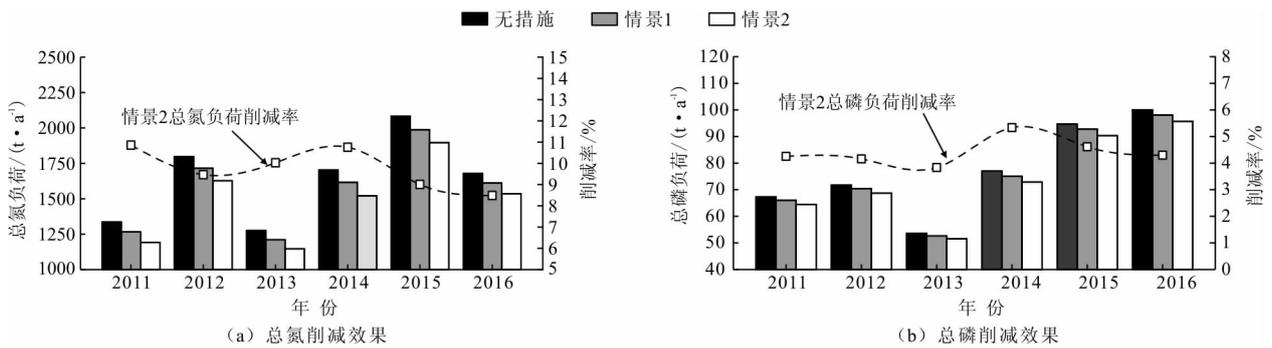


图 10 化肥减量模式下的总氮总磷削减效果

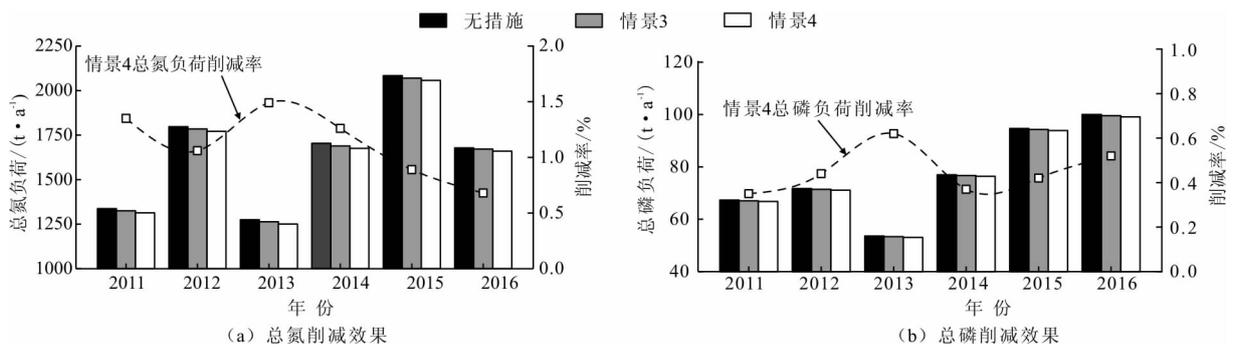


图 11 粪肥替代模式下总氮总磷削减效果

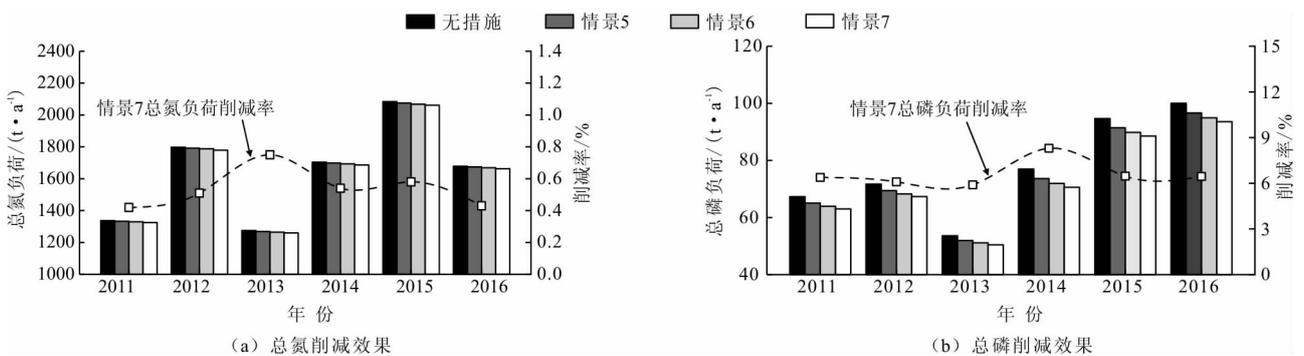


图 12 深层施肥模式下的总氮总磷削减效果

3.7 比较与建议

多种管理措施联合应用可提高流域非点源污染

的削减率^[26],故设置情景 8 为“化肥减量 50% + 表层施肥量 1%”,模拟后,流域总氮、总磷负荷及其削

减率的时空特征如图 13 所示。

在不同子流域中总氮年均削减率为 0 ~ 21.31%,总磷年均削减率为 0 ~ 14.21%。氮磷削减率较高的子流域大部分含有比例较高的农业用地,集中于流域下游,采用施肥综合管理措施可有效削减其氮磷负荷,从而降低化肥进入千岛湖水体的

的风险。

对于不同年份来说,情景 8 的总氮削减率为 8.28% ~ 11.92%,削减量约为 164.32 t/a;总磷削减率为 6.51% ~ 10.22%,削减量约为 6.59 t/a(图 14)。其中以 2014 年氮磷的去除效果最佳,施肥综合管理措施对于流域氮磷负荷削减具有积极意义。

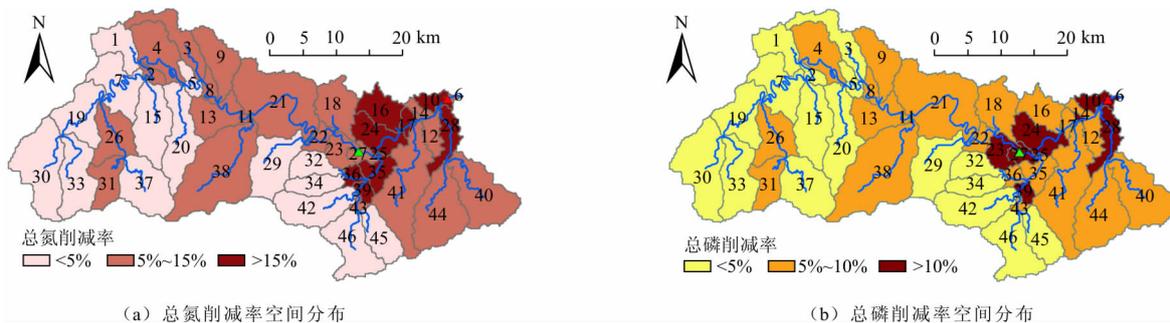


图 13 施肥综合管理措施下的氮磷削减率空间分布

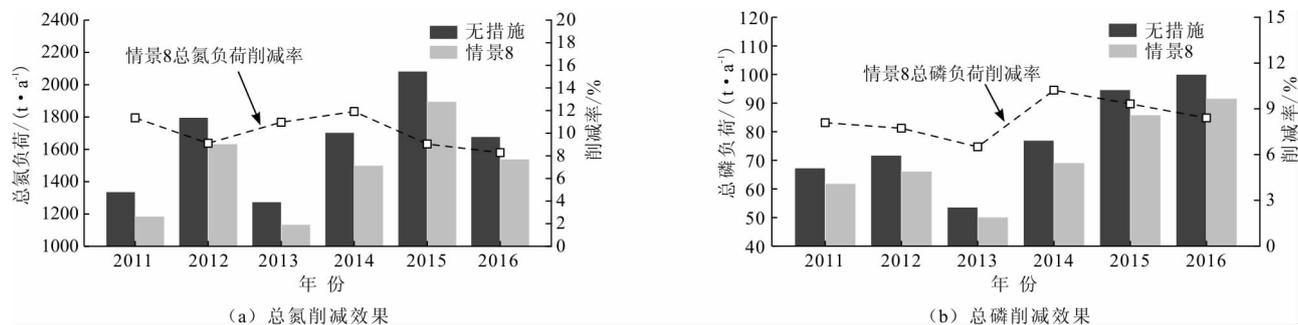


图 14 施肥综合管理措施下的总氮总磷削减效果

综上所述,建议采取如下施肥管理措施控制率水流域非点源污染,改善流域水质:

(1)在氮磷营养满足作物需求的条件下,减少传统肥料的施用,从源头控制非点污染。

(2)集中流域周边禽畜粪便,经无害化处理后生产有机肥,与传统肥料合理配施,实现养殖废弃物的减量化、资源化和无害化。

(3)因地制宜选择肥料的氮磷配比,利用测土配方施肥技术,推广深层施肥,追肥等,有效地提高科学施肥水平。

(4)加强合理施肥的宣传力度,发挥当地种植业大户的示范效应,使农户以科学正确的方式进行施肥管理。

4 结 论

通过构建率水流域 SWAT 模型,分析了非点源污染物时空分布特征,其中农业用地的大量施肥为流域内主要氮磷负荷来源,依据校准后的模型模拟不同施肥管理措施以了解其对流域非点源污染的削

减情况。模拟结果表明:其中化肥减量 50%可削减流域约 9.77%的总氮负荷,深层施肥(表层土壤肥料 1%)可削减约 6.60%的总磷负荷,两种措施联合可削减流域约 10.11%总氮负荷和 8.38%的总磷负荷,为率水流域较有效的施肥管理措施。粪肥替代化肥的氮磷负荷削减率较低,但适宜的替代量可增加作物产量,符合养殖废弃物循环利用的要求。

本文应用流域模型模拟不同施肥管理措施是研究非点源污染削减的重要手段,为流域科学管理提供了参考。

参考文献:

- [1] 粟晓万,杜建军,贾振宇,等.缓/控释肥的研究应用现状[J].中国农学通报,2007,23(12):234-238.
- [2] 武艳.浅谈土壤肥料在农业可持续发展中的重要作用及其存在问题与建议[J].农业开发与装备,2016(12):113.
- [3] 张舰,亚伯拉罕·艾宾斯坦,玛格丽特·麦克米伦,等.农村劳动力转移、化肥过度使用与环境污染[J].经济社会体制比较,2017(3):149-160.
- [4] 刘志欣.近十年来重庆三峡库区农业面源污染变化研

- 究[D]. 重庆:重庆师范大学,2016.
- [5] 李湘林,颜建军. 基于环境库兹涅茨曲线模型的郴州市农业面源污染治理研究[J]. 湖南商学院学报,2013,20(2):53-57.
- [6] 韦佳妮,李晓玉. 化肥投入与环境库兹涅茨曲线的关系检验与分析——以贵州省南盘江流域为例[J]. 湖北农业科学,2017,56(5):996-1001.
- [7] LU Yamin, WU Yuhong, LI Hongda, et al. Effects of dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface water of paddy field under different fertilizer rate[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018,34(4):349-355.
- [8] WANG Feng, ZHAI Zhongwei, SHEN Shizhou, et al. Effect of fertilizer types on nitrogen surface runoff losses from plateau paddy fields[J]. *Bangladesh Journal of Botany*, 2015,44(5):859-868.
- [9] GASSMAN P W, SADEGHI A M, SRINIVASAN R. Applications of the SWAT model special section: overview and insights[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014,43(1):1-8.
- [10] ABBASPOUR K C, ROUHOLAHNEJAD E, VAGHEFI S, et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model[J]. *Journal of Hydrology*, 2015,524:733-752.
- [11] GASSMAN P W, REYES M R, GREEN C H, et al. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions[J]. *Transactions of the Asabe*, 2007,50(4):1211-1250.
- [12] QI Zuoda, KANG Gelin, CHU Chunli, et al. Comparison of SWAT and GWLF model simulation performance in humid southland semi-arid north of China [J]. *Water*, 2017,9(8):567.
- [13] LIU Ruimin, ZHANG Peipei, WANG Xiujuan, et al. Assessment of effects of best management practices on agricultural non-point source pollution in Xiangxi River watershed [J]. *Agricultural Water Management*, 2013,117:9-18.
- [14] JANG S S, AHN S R, KIM S J. Evaluation of executable best management practices in Haean highland agricultural catchment of South Korea using SWAT[J]. *Agricultural Water Management*, 2017,180:224-234.
- [15] 马放,姜晓峰,王立,等. 基于 SWAT 模型的阿什河流域径流模拟适用性研究[J]. 中国给水排水,2014,30(17):96-99.
- [16] 唐莉华,张思聪,林文婧,等. 北京温榆河流域水污染控制情景模拟与分析[J]. 水力发电学报,2012,31(4):156-161.
- [17] 许家宏. 新安江流域茶园农业面源污染研究[J]. 安徽农学通报,2014,20(9):107-108.
- [18] 严丽丽. 千岛湖及新安江流域水资源保护的对策建议[J]. 绿色科技,2017(8):74-75.
- [19] 马常宝,史梦雅. 我国主要畜禽粪便资源利用现状与分析研究[J]. 中国农技推广,2016,32(11):7-11.
- [20] 赵越,卢诚,谢阳村,等. 未来气候变化影响下的流域面源污染负荷特征响应评估[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):40-45.
- [21] 钱晓华,廖万友,胡荣根,等. 安徽省茶园施肥现状与对策分析[J]. 茶业通报,2015,37(3):108-113.
- [22] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment - Part 1: Model development[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998,34(1):73-89.
- [23] ZHAI Xiaoyan, Zhang Yongyong, WANG Xuelei, et al. Non-point source pollution modelling using soil and water assessment tool and its parameter sensitivity analysis in Xin'anjiang catchment, China[J]. *Hydrological Processes*, 2014,28(4):1627-1640.
- [24] 李泽利,吕志峰,赵越,等. 新安江上游流域 SWAT 模型的构建及适用性评价[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(1):25-31.
- [25] 朱新军,王中根,李建新,等. SWAT 模型在漳卫河流域应用研究[J]. 地理科学进展,2006,25(5):105-111+133.
- [26] 姜晓峰. 阿什河流域非点源污染分布特征解析与防控策略[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [27] 李旭. 滇池流域不同种植条件下化肥与农药使用对土壤氮磷库的影响[D]. 昆明:云南大学,2016.
- [28] LIU Zong'an, YANG Jingping, YANG Zhengchao, et al. Effects of rainfall and fertilizer types on nitrogen and phosphorus concentrations in surface runoff from subtropical tea fields in Zhejiang, China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012,93(3):297-307.
- [29] GUO Liyue, WU Guanglei, LI Yong, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat - maize rotation system in Eastern China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016,156:140-147.
- [30] LIU T Q, FAN D J, ZHANG X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no - tillage paddy fields in central China [J]. *Field Crops Research*, 2015,184:80-90.
- [31] 谢巧娟. 三种有机肥对土壤理化性质与草莓生长结果的影响[D]. 重庆:西南大学,2017.
- [32] 李欣伦,屈晓泽,李伟彤,等. 有机肥与化肥施肥对黑土理化性质及玉米产量的影响[J]. 国土与自然资源研究,2017(4):45-48.
- [33] 李丹. 不同化肥用量及降雨强度下磷素流失特征研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [34] 林玉萍,聂录,姜灏,等. 水稻侧深施肥技术研究[J]. 现代化农业,2017(3):19-21.