

基于磷负荷削减的沙河水库流域生态修复措施配置研究

张耀方¹, 常国梁¹, 叶芝茵¹, 张守红², 何春利¹,
黄炳彬¹, 冯青郁³, 赵世伟⁴, 张龙涛⁵, 唐丽媛⁵

(1.北京市水科学技术研究院,北京 100048;2.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;3.中国科学院生态环境研究中心,北京 100085;4.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;5.河北工程大学水利水电学院,河北 邯郸 100088)

摘要: 水体磷浓度增加易导致水体中藻类大量繁殖等生态问题,磷负荷削减一直都是水环境治理的重点工作。以磷负荷削减为重点,以北京城市副中心上游沙河水库流域为研究对象,采用 SWAT 模型对 4 类 24 种源头控制—过程拦截生态修复措施进行分析模拟,评价生态修复措施对磷负荷的削减情况。结果表明:(1)对总磷的削减效率依次为退出畜禽养殖>分散污水处理>生态护岸>植草沟、植被缓冲带>城镇径流控制>节约节肥、林下结构提升,退出畜禽养殖、分散污水处理等源头控制措施效益十分显著。(2)针对农业面源污染,建议采取 5 m 宽生态沟渠,果园:过滤带面积比为 10:1 的植被过滤带,不使用除草剂,果园减少 50%有机肥施用量,100%养殖废弃物资源化利用并减少 30%污水量 5 项措施,削减农业生产过程产生的磷负荷;城镇建议采取提高 20%透水铺装率和提升 40%分散污染处理率 2 项措施;河道推荐采用高覆盖度生态护岸和布设 5 m 宽河道缓冲带。(3)空间上削减农业—城镇—河道磷负荷,要素上针对山水林田湖草生态要素进行系统治理,措施实施后总磷负荷削减率可达 53%,总磷达到 IV 类标准的流域面积增加 8.6%,效果尤为显著。研究成果为山水林田湖草系统治理措施布局提供了参考。

关键词: 沙河水库流域; SWAT 模型; 生态修复; 磷负荷

中图分类号: B240.1040

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0302-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.041

Study on Ecological Management Measures of Reducing Phosphorus Load in Shahe Reservoir Basin

ZHANG Yaofang¹, CHANG Guoliang¹, YE Zhihan¹, ZHANG Shouhong², HE Chunli¹,
HUANG Bingbin¹, FENG Qingyu³, ZHAO Shiwei⁴, ZHANG Longtao⁵, TANG Liyuan⁵

(1. Beijing Institute of Water Science and Technology, Beijing 100048; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 3. Research Center of Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100; 5. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Technology, Handan, Hebei 100088)

Abstract: The increase of phosphorus concentration in water is easy to made ecological problems such as the algae multiply greatly. Phosphorus load reduction has always been the key work of water environment treatment. Focusing on phosphorus load reduction and takes the Shahe reservoir basin upstream of Beijing Urban sub center as the research object, the SWAT model is used to analyze the effect of 24 items source control process interception ecological restoration measures of 4 categories on phosphorus load reduction. The results showed that: (1) The reduction efficiency of total phosphorus is in the order of withdrawing from livestock and poultry breeding> decentralized sewage treatment> ecological bank protection> grass ditch, vegetation buffer zone> urban runoff control> saving medicines and fertilizers, and improving the understory structure. The benefits of source control measures such as withdrawal from livestock and poultry breeding and decentralized sewage treatment are very significant. (2) It is recommended to adopt 5m wide ecological

收稿日期: 2021-07-09

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07102-001)

第一作者: 张耀方(1991—),女,工程师,主要从事流域生态修复研究。E-mail: ucaszyf@163.com

通信作者: 黄炳彬(1971—),男,教高,主要从事流域生态修复研究。E-mail: hbb@bwsti.com

ditches, orchard; a vegetation filter belt with a filter belt area ratio of 10:1, no herbicides, a 50% reduction in the amount of organic fertilizer, a 100% resource utilization of aquaculture waste, and a 30% reduction in the amount of sewage measures to reduce the agricultural production process phosphorus load generated. Reduce the phosphorus load generated by urban non-point source pollution by increasing the pervious paving rate by 20% and increasing the dispersive pollution treatment rate by 40%. The river is recommended to adopt high-coverage ecological bank protection and 5m wide river buffer zone. (3) Reduce the phosphorus load of agriculture-towns-rivers in space, and systematically manage the major ecological elements of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands. After the measures are implemented, the total phosphorus load reduction rate can reach 53%, and the area of watersheds with total phosphorus reaching the IV standard will increase 8.6%, the effect is particularly remarkable.

Keywords: Shahe Reservoir basin; SWAT model; ecological management measures; phosphorus

沙河水库流域人口高度密集,水环境问题凸显,尤其是磷输入量的增加易导致水体中藻类大量繁殖,采取生态修复措施削减磷负荷仍是目前水环境治理的重点工作。然而非点源污染作为水体中磷的主要来源之一,由于其分散性、随机性等特点,治理难度大^[1-3],围绕源头控制—过程拦截—末端治理的思路统筹空间、生态要素特点,进行山水林田湖草系统治理,是解决水体磷污染、进行流域生态修复的有效路径。但目前已有对磷负荷削减的研究^[4-10]多集中在单项措施削减及农业面源污染综合防治上,或多数集中在政策制度层面,鲜少从山水林田湖草整体出发,综合考虑源头控制—过程拦截系统治理效果。SWAT 模型作为经典分布式水文模型,在国内外研究中应用广泛,尤其详细的耕作数据库、植被数据库、城镇数据库,对用于研究流域山水林田湖草系统治理对磷负荷削减效果具有较强的适用性^[1,7-10]。鉴于此,本研究以沙河水库流域为研究对象,基于 SWAT 模型进行单项措施筛选,并分析评估山水林田湖草系统治理下流域磷负荷削减效果,为该流域山水林田湖草系统治理精准施策提供建议与依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为沙河水库流域(115°53′—116°20′E, 40°00′—40°26′N),位于北京市人口最集中、产业最聚集、城市化水平最高的北运河水系,主要涉及海淀北部、昌平中西部区域,加之处于北京城市副中心上游,是京津冀的核心区域,也是严格控污的重点区域。该区域分布有东沙河、北沙河、南沙河三大北运河源头主要支流,地势呈东低西高,蒸发量年均 1 185 mm,多年平均降水量 602 mm,其中 6—9 月降水约占全年总降水量的 90%。研究区内污染源类型多样复杂,流域现状已投入运行昌平、沙河、百善、南口工业区、马池口、稻香湖、翠湖等再生水厂,均分布

在城区且收集管网多为雨污合流、末端截污管线,存在极大溢流污染风险;村镇污水处理率仅为 60%左右,处理水平及能力滞后;农业方面该区域 2016—2017 年规模养殖场数量 54 家,基本农田总面积约 1 666 hm²,果园总面积超过 8 600 hm²,北京市重要的畜禽养殖业和种植业生产区,农业面源污染风险不容忽视。

1.2 研究方法

1.2.1 数据获取与处理 SWAT 模型构建以 2015—2019 年流域内雨量站点(8 个)和气象站点(1 个)数据作为驱动数据,污染源主要包括农业面源污染、再生水厂退水、分散村镇污染、排口溢流污染等,具体数据来源见表 1。

1.2.2 SWAT 模型构建 本研究中 2015—2016 年为 SWAT 模型的预热期,2017—2019 年为模拟年。模型构建依托 2011 北京水务普查河网水系,并以北京市划分的 1 048 条小流域边界为校正,基于 DEM 将项目区划分为 79 个子流域。依托 2017 年高分遥感数据解译生成的土地利用、土壤数据、坡度将其进一步划分为 894 个水文响应单元(HRU),并输入项目区农业管理措施、污染源等相关数据,搭建 SWAT 模型。

1.2.3 模拟情景及分析方法 结合“十三五”时期相关规划及现状问题,以源头控制—过程拦截为重点,设置 4 类山水林田湖草一体化生态修复措施(表 2)。系统治理措施根据单项措施模拟结果,选取每类措施中治理效果最佳的措施进行组合。效果分析采用实施治理措施后削减的总磷负荷与基准情景下总磷负荷的比值。计算公式为:

$$R_p = \frac{TP_{KB} - TP_{CS}}{TP_{KB}} \quad (1)$$

式中: R_p 为总磷削减效率(%); TP_{KB} 为基准情景下模型输出的总磷负荷(kg); TP_{CS} 为采取措施后模型输出的总磷负荷(kg)。

表 1 模型输入数据与来源

数据	来源
DEM	2017 年 30 m 分辨率 SRTM(www.91weitu.com)
土壤数据	中国科学院资源环境数据云平台(https://www.resdc.cn/)
土地利用	2017 年 30 m 精度的遥感影像解译
降雨	2015—2019 年阳坊、碓臼峪、德胜口、响潭水库、十三陵、温泉、沙河、王家园 8 个雨量站监测数据
其他气象数据	2015—2019 年中国气象数据网北京站数据(昌平站)(http://data.cma.cn/)
农业管理数据	2015—2019 年北京市畜牧业环境监测站、北京市土肥工作站等调查数据,其中畜禽养殖分为分散养殖、集中养殖进行统计,集中养殖采用畜牧业环境监测站测定的典型养殖场污染物进行统计,分散养殖参考郑艳侠等研究成果按照畜禽养殖年存栏量进行折算 ^[11]
村镇分散污染 排口	依据《2019 年全国第二次污染普查生活源产排污系数手册》污染物排放系数进行测算 海淀区 2019 年 31 个排口为实际监测数据,其余数据参考同雨强强度、雨量进行测算;昌平区 3 个排口根据海淀区同场次降雨排口流量及汇流面积进行测算
再生水厂数据	2015—2019 年北京水务统计年鉴及排水集团数据
水质数据	2018—2019 年现场采样、实验室检测
土壤侵蚀	2018 年北京市水生态保护与水土保持中心土壤侵蚀模数
水文数据	2018 年昌平区沙河水库逐日监测流量数据

表 2 生态修复措施情景设置

序号	代码	措施类型	描述
1	KB	无	基准情景
2	MON10	林地结构提升	优化林下结构 植被冠层密度增 10%
3	MON30		植被冠层密度增 30%
4	ZHD5	农业面源污染防治	布设植被缓冲带 每 5 hm ² 农田、果园布设 1 hm ² 过滤带
5	ZHD10		每 10 hm ² 农田、果园布设 1 hm ² 过滤带
6	ZHD50		每 50 hm ² 农田、果园布设 1 hm ² 过滤带
7	ZAT1	果园植草沟	植草沟渠 1 m 宽
8	ZAT2		植草沟渠 2 m 宽
9	ZAT5		植草沟渠 5 m 宽
10	ZAT10		植草沟渠 10 m 宽
11	NTF13	农田节肥	减少 13% 肥料施用量
12	NTF25		减少 25% 肥料施用量
13	ORC	果园节药节肥	不进行野草拔除、不使用除草剂
14	ORC25		减少 25% 肥料施用量
15	ORC50		减少 50% 肥料施用量
16	XQY30	退出畜禽养殖	畜禽养殖量减少 30%、养殖废弃物资源化利用量提升 30%
17	XQY50		畜禽养殖量减少 50%、养殖废弃物资源化利用量提升 50%
18	XQY		畜禽养殖量减少 30%、养殖废弃物 100% 资源化利用
19	URB	城镇面源污染防治	城镇径流控制 透水铺装增加 20%
20	UWB20	分散污水处理	提升 20% 分散污水处理能力
21	UWB40		提升 40% 分散污水处理能力
22	WAP20	河(沟)道生态修复	生态护岸 补植岸坡植被,提升 20% 植被覆盖度
23	WAP40		补植岸坡植被,提升 40% 植被覆盖度
24	WS5	河道缓冲带	5 m 宽河道缓冲带
25	WS10		10 m 宽河道缓冲带

2 结果与分析

2.1 SWAT 模型率定分析

采用 DMPOTAPEX 参数优化工具进行模型参

数率定,该工具由中国科学院生态环境研究中心冯青郁^[12]开发,通过 Python 的并行计算软件包及 Dynamic Dimensional Search 最优化算法,对目标过程的模型函数进行数值估计从而获取最优参数。选用

纳什系数 NSE 和相对误差 PBIAS 评价模型率定效果。径流依据 2018 年度 1—7 月沙河水库入库日流量进行率定,8—12 月入库日流量进行验证率定期 NSE 值、PBIAS 分别为 0.53, -5%, 验证期 NSE 值、PBIAS 分别为 0.59, 17%, $NSE > 0.50$, $PBIAS \leq \pm 40\%$ (图 1)。泥沙采用 2018 年度地类较为单一的小流域进行土壤侵蚀模数率定,子流域编号为 11, 47, 50, 74, 78 分别代表森林、城镇、森林+果园、非设施用地+城镇+设施农业、设施农业 5 类主要地块,率定土地利用对应参数,而后将小流域分为山区、平原,分别计算其土壤侵蚀模数,并进行验证(图 2)。为将土壤侵蚀模数数据与 SWAT 模型模拟结果进行匹配,依据已有文献资料^[13]采用面积法推算研究区泥沙输移比在 0.1~0.3,实测海河流域泥沙输移比为 0.1~0.26,综合以上结果,本次研究区泥沙输移比取平均值 0.16,将 SWAT 模型模拟结果转换为土壤

侵蚀模数。用于率定的子流域 11, 47, 50, 74, 78 对应的 PBIAS 值分别为 9%, 31%, 39%, 19%, 24%, 用于验证的流域研究区、山区、平原对应的 PBIAS 值分别为 21%, 35%, -38.7%, $PBIAS \leq \pm 40\%$ 。径流与泥沙实测值与模拟值均具有较高的一致性。水体中总磷的率定采用南沙河、北沙河入库口水质非汛期(3—5 月均值)及汛期(7—8 月均值)进行率定验证(图 3)。北沙河入库口率定期非汛期、汛期总磷负荷对应的 PBIAS 值分别为 43%, 34%, 验证期对应的 PBIAS 值分别为 -34%, -39%, 南沙河入库口率定期非汛期、汛期总磷负荷对应的 PBIAS 值分别为 2%, 10%, 验证期对应的分别为 -3%, -18%, 南沙河入库口总磷实测值与模拟值具有较高的一致性,北沙河入库口总磷实测值与模拟值一致性相对较南沙河入库口差,但总体上 $PBIAS \leq \pm 40\%$, 达到模拟精度要求^[1,14]。

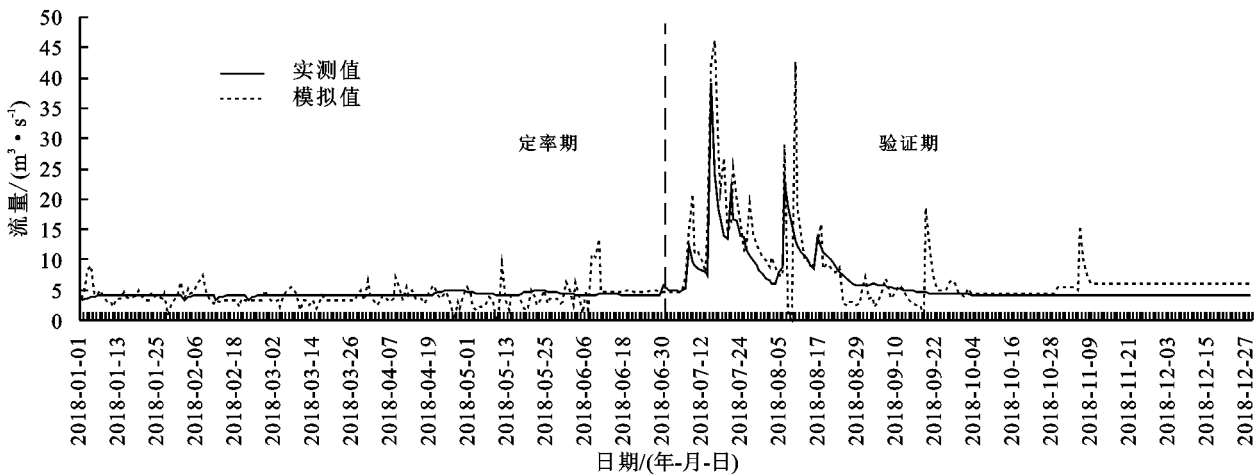


图 1 2018 年逐日流量数据的率定验证

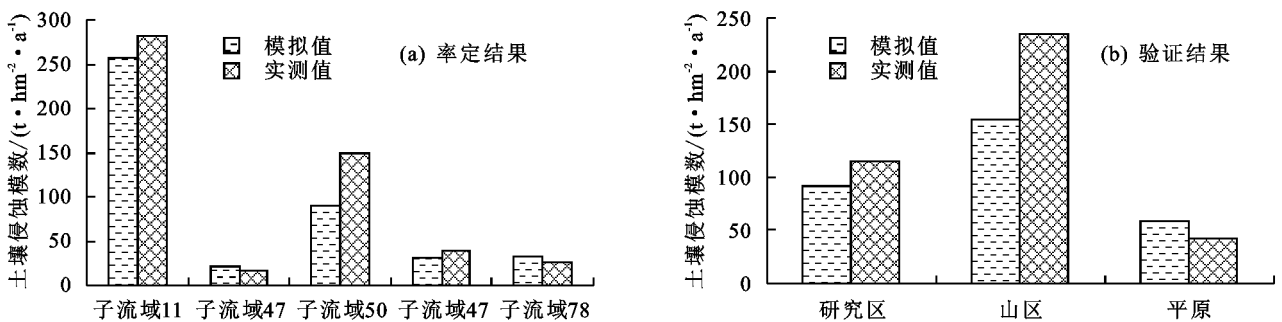


图 2 泥沙数据的率定验证

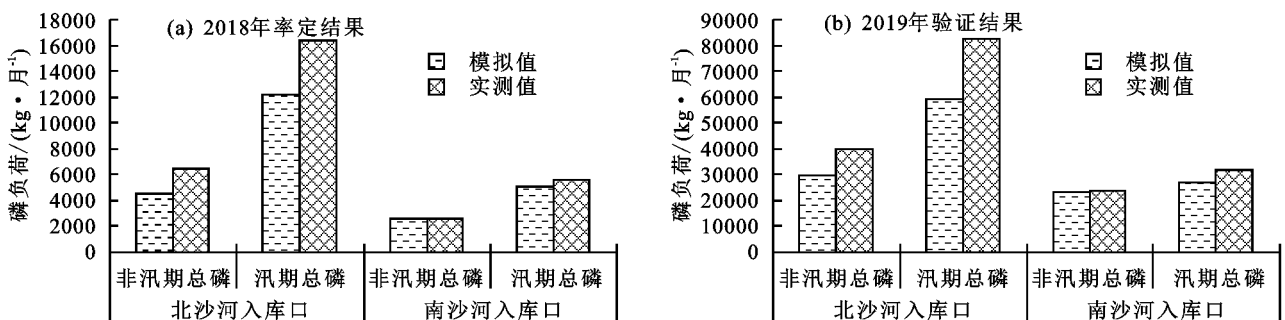


图 3 总磷率定验证

2.2 沙河水库流域污染空间分布特征

沙河水库流域 2017 年总磷浓度分布状况见图 4。总磷浓度在 0.3 mg/L 以下(IV 类标准)的流域面积占比 48.1%,总磷浓度在 0.3~0.4,0.4~1.0, >1.0 mg/L 的流域面积占比分别 1.1%, 20.4%, 30.4%。由图 4 和图 5 可知,总磷超出 IV 类标准限值的主要集中在南口地区、城南街道、城北街道、马池口地区、沙河地区、百善镇、阳坊镇等城镇用地。采用 SWAT 分析各类污染物对流域污染负荷的贡献,主要表现为城镇生活污染(74 716 g) > 养殖污染(69 686 g) > 溢流污染(14 956 g) > 农田果园(835 g)面源污染,其中城镇生活污染占总污染负荷的 50% 以上,这与上述总磷主要分布在城镇用地结论一致。

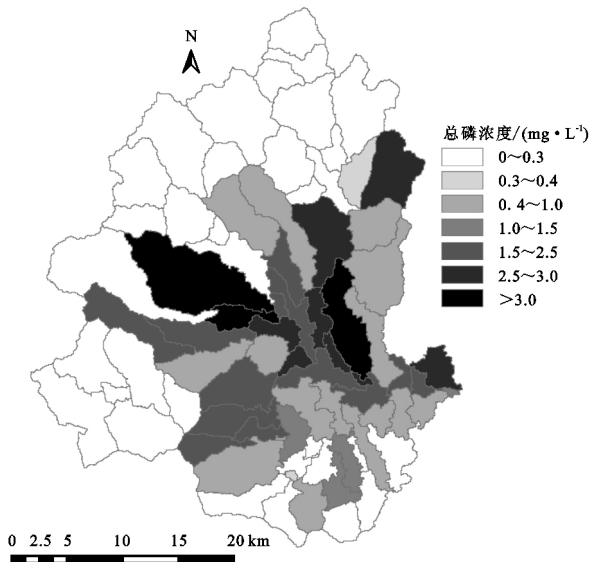


图 4 2017 年沙河水库流域总磷浓度分布

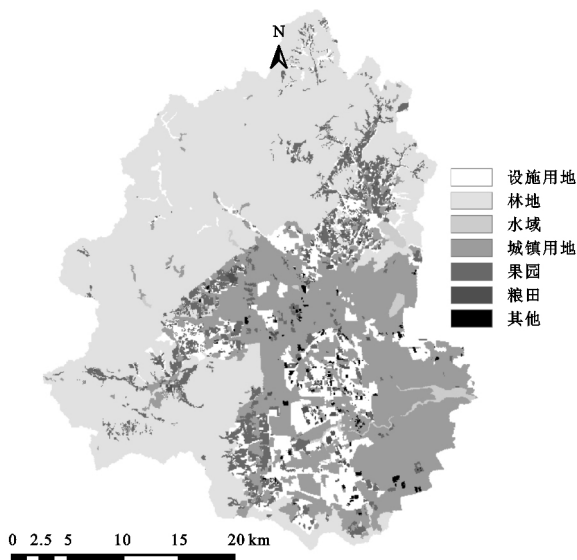


图 5 沙河水库流域土地利用分布

2.3 沙河水库流域单项生态修复措施污染削减效果分析

本研究评估了 4 类 10 项 24 种山水林田湖草单

项措施对总磷的削减效率(表 3),不同措施对总磷的削减效率依次为退出畜禽养殖 > 分散污水处理 > 生态护岸 > 果园植草沟 > 河道、农田植被缓冲带 > 城镇径流控制 > 果园节药节肥 > 农田节肥、林下结构提升。林下结构提升对总磷年复合几乎无影响,主要原因在于研究区林地初始磷负荷占比很小。

表 3 采取不同措施后总磷负荷变化及削减效果

措施代码	总磷负荷量/ ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	总磷削减量/ ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	总磷 削减率/%
MON10	183600	0	0
MON30	183600	0	0
ZHD5	181600	2000	1.09
ZHD10	181600	2000	1.09
ZHD50	182000	1600	0.87
ZAT1	181500	2100	1.14
ZAT2	181200	2400	1.31
ZAT5	181000	2600	1.42
ZAT10	181000	2600	1.42
NTF13	183600	0	0
NTF25	183600	0	0
ORC	182800	800	0.44
ORC25	183200	400	0.22
ORC50	182800	800	0.44
XQY30	162300	21300	11.60
XQY50	148000	35600	19.39
XQY	127100	56500	30.77
URB	182000	1600	0.87
UWB20	168700	14900	8.12
UWB40	157100	26500	14.43
WAP20	179100	4500	2.45
WAP40	159800	23800	12.96
WS5	181400	2200	1.20
WS10	181400	2200	1.20

农业面源污染控制方面,每 5,10,50 hm^2 农田、果园布设 1 hm^2 过滤带,对总磷负荷削减量分别为 2 000,2 000,1 600 kg/a ,过滤带:果园面积比超过 1:10 后,其增大对污染物的削减率,将不再有明显改变,在 1:10 以下时随着过滤带面积占比增加削减量增加。研究区内布设的农田监测小区表明,每公顷果园伴随水土流失产生的平均磷负荷为 0.9 kg ,按照过滤带:果园面积比为 1:10 布设过滤带,每公顷过滤带约可滞留 9 kg 的 P,这与已有研究^[15-16] 每公顷过滤带每年能滞留 0.8~14.5 kg 的 P 相符合。植草沟渠布设 1,2,5,10 m 宽,对总磷负荷削减量分别为 2 100,2 400,2 600,200 kg/a ,植草沟渠超过 5 m 后随宽度增加,其过滤、拦截效果变化不大,5 m 内过

滤、拦截效果随宽度增加而增加,这可能是由于植草沟对径流、泥沙的直接阻滞作用主要发生在缓冲带前5 m,磷素主要依赖物理吸附、拦截进行削减,这与有关研究^[17-21]认为5 m草本缓冲带对污染物拦截作用最好的研究结论一致,推荐采用5 m宽的植草沟渠。农田节肥13%,25%,对总磷削减量几乎为0,果园不进行野草拔除,不使用除草剂,对总磷削减量为800 kg/a,果园节肥25%,50%对总磷削减量分别为400,800 kg/a,农田采用节药节肥措施对研究区磷削减效果微小,果园节药节肥措施对总磷负荷具有一定的削减作用^[1,22],这可能和该研究区农业用地中以大棚种植设施用地占54.7%、且坡度多 $<5^\circ$,该类用地类型水土流失强度多为微度侵蚀有关。养殖污水量减少30%并资源化利用提升30%,污水量减少50%并资源化利用提升50%,养殖废弃物资源化利用率100%且污水量减少30%,对总磷负荷削减量分别为21 300,35 600,56 500 kg/a,养殖废弃物资源化利用对流域磷削减起到显著效果,这主要在于粪便等固体废弃物在养殖污染中占比较大,通过种养联动等方式充分利用固体废弃物,增加利用效率,节约成本的同时,减少污染。

城镇面源污染防治方面,城区透水铺装增加20%,总磷负荷削减量为1 600 kg/a,主要是由于研究区多为雨污合流,采取末端截污方式进行城镇面源污染治理,通过透水铺装率提升有效减少汛期城市径流,每年对应溢流污染量减少约100万 m^3 ,从而在源头上减少城镇总磷面源污染。分散污水处理率提升20%,40%,对总磷负荷削减量分别为14 900,26 500 kg/a,通过分散污水处理率提升,有效减少村庄污水,减少总磷负荷。相较农业面源污染防治磷负荷削减情况,城镇透水铺装、分散污水处理率提升对流域磷面源污染削减起到主要作用。

河(沟)道生态修复方面,配置河道缓冲带5,10 m,对总磷负荷削减量均为2 200 kg/a,这与农业面源污染防治中植被缓冲带布设宽度结论一致,可能是由于磷元素削减主要发生在缓冲带的前5 m处^[18-19,23]。岸坡植被覆盖度提升20%,岸坡林草优化且植被覆盖度提升40%,对总磷负荷削减量分别为4 500,23 800 kg/a,岸坡林草优化且植被覆盖度对磷负荷削减显著优于单纯提高植被覆盖度。岸坡植被覆盖度对磷的截留有显著影响,林分密度小截污能力不足,林分密度大不仅影响草本植物生长,且乔木落叶易增加径流水中磷含量,从而降低磷的去除效果^[24]。宋思铭^[25]认为,岸坡最适宜林分密度为1

074株/ hm^2 。本研究中建议植被覆盖度提升40%,同步进行植被群落结构、布局等优化,形成疏林+灌木+草植被配置模式,提升磷截留效果。

2.4 系统治理措施效果分析

结合2.3节单项措施效果分析,空间上围绕农业—城镇—河道磷负荷削减进行布局,山区林地以保护为主。农业面源污染防治推荐采用每10 hm^2 果园布设1 hm^2 过滤带,植草沟渠5 m宽,不使用除草剂,果园有机肥施用减少50%,养殖废弃物资源化利用100%并减少污水量30%等措施。城镇面源污染防治采取透水铺装提高20%,分散污水处理率提升40%等措施。河湖水系生态修复措施采取岸坡植被优化配置且覆盖度提升40%、布设5 m宽河道缓冲带。基于SWAT模拟通过山水林田湖草一体化措施布设,对总磷负荷削减率为53%,削减量为96 540 kg/a,削减量远大于各单项措施削减效果,系统治理大大提高了磷负荷削减强度。同时,系统治理削减量略小于9项措施削减之和(116 800 kg/a),这是由于山水林田湖草是一个有机整体,各要素之间是相互联系、互相影响的^[26],系统治理效果绝非简单的措施累加。通过系统治理,总磷浓度在0.3 mg/L以下(IV类标准)的流域面积增加8.6%,主要分布在农村地区及果园用地;总磷浓度在0.3~1.0 mg/L的流域面积占比增加6.3%,总磷浓度超过1.0 mg/L的流域面积占比减少14.8%,主要分布在城镇用地(图6、图7)。由此可见,上述系统治理生态修复措施对人口分布密度小及农业面源污染为主的区域具有良好的效果,对城镇区域能起到很大程度削减作用,但仅依靠面源污染治理尚不能完全解决磷超标问题,仍需进一步采取湿地净化、排口溢流污染治理等强净化措施,进一步加强磷负荷削减。

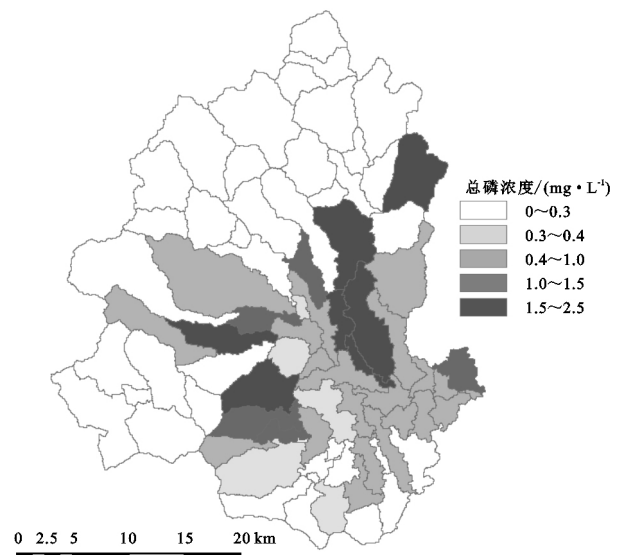


图6 2017年治理后总磷浓度分布

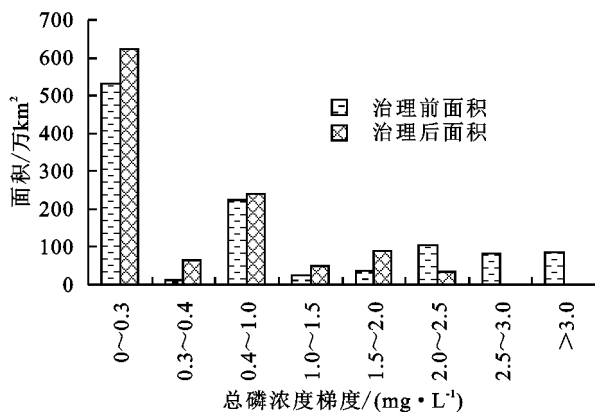


图 7 治理前后总磷浓度梯度对应面积变化

3 讨论

本研究分析了源头控制—过程拦截生态修复措施单项及系统治理生态效益,源头控制措施中退出畜禽养殖、提高分散污水处理率等源头控制措施效益显著,节肥节药等措施对总负荷削减效果微弱。孙浩然等^[1]在云南程海流域研究结果表明节肥 10%~50% 其磷素削减率在 0.1%~0.5%;常舰^[27]在西苕河流域研究结果表明磷肥施用量减少 10%和 20%对整个区域控磷效果几乎没有影响;Liu 等^[28]在香港河流域模拟化肥减量 20%和 50%,总磷负荷削减率达到 31%和 40%。由此可见,节肥节药措施效果存在着地域差异,受施肥节点、气象条件、土地利用分布、耕作方式等影响。研究区位于北京城市副中心上游,地处京津冀核心区域,经济发达、人口高度密集,磷负荷主要源于城镇生活,同时农业用地多位于平原区、地势平坦,占比少且多为大棚一类设施用地,产流产沙量远小于别的研究区,故而单纯采取节肥节药等措施对面源污染控制效果不显著。但对于农业用地为主、施肥节点与雨水节点一致的研究区,合理施用磷肥、提高磷肥利用率,减少磷素积累,对磷的削减仍有重要作用^[23]。

过程拦截措施中生态护岸、植草沟、植被缓冲带、城镇径流控制等措施,对磷素削减效果显著,林下结构提升对控磷效果几乎无影响。磷循环转化运移主要表现为在土壤、水体、植物、微生物中进行磷的吸收和释放,其中生态护岸、植草沟、植被缓冲带等过程拦截措施主要通过 3 种方式减少水体磷负荷:一是物理拦截径流泥沙减少水土流失从而间接减少水体磷负荷;二是土壤矿物质等吸附固定磷素;三是植物吸收氮磷等营养元素^[19],该措施对研究区内坡度较陡、水土流失较为严重的区域效益十分显著;城市径流控制措施针对研究区城镇地区效果显著,该区域现状为雨污合流,通过径流控制间接减少溢流量^[29],极大程度

减少磷负荷的积累;林下结构提升对磷负荷削减不显著,主要在于林地初始负荷占比小。

采取以源头控制—过程拦截为重点的山水林田湖草一体化生态修复措施效果十分显著,对总磷削减率达到 53%,在具体进行治理措施布局时,可结合资金、土地扭转、组织协调等实际条件进行措施组合。在受到资金限制时,可优先选取削减效果好的措施,本研究区内可优先在城镇用地提高雨水集蓄利用、提高污水处理率、退出畜禽养殖等措施,在坡度较陡果园采取植被缓冲带等措施,在河道采取高植被覆盖度的生态护岸措施。在受到土地扭转等限制时,可优先选择占地面积少的退出畜禽养殖、提高污水处理率、城镇透水铺装等措施。在受到组织协调等限制时,可优先治理水务部门管理范围内用地,采取河道高植被覆盖度的生态护岸、河道缓冲带等措施。以问题为导向,结合客观情况,因地制宜进行生态修复。

4 结论

(1)2017 年沙河水库流域总磷污染超过 IV 标准限制的面积达 51.9%,主要分布在果园、城镇用地,应重点加强该区域磷负荷削减。

(2)总磷负荷削减效率依次为退出畜禽养殖>分散污水处理>生态护岸>植草沟、植被缓冲带>城镇径流控制>节药节肥、林下结构提升。建议农业面源污染防治采取果园面积:过滤带面积占比为 10:1 的植被过滤带、5 m 宽生态沟渠、不使用除草剂、减少 50%有机肥施用量、养殖废弃物 100%资源化利用并减少 30%污水量等措施;城镇面源污染通过提高透水铺装等径流控制工程、分散污染处理率提升等措施;河道推荐采用高植被覆盖度的生态护岸、不少于 5 m 宽的河道缓冲带,进行末端净化提升。

(3)山水林田湖草一体化生态修复措施对总磷削减率达到 53%,总磷达到 IV 类标准的流域面积增加 8.6%,效果明显优于单项措施。

参考文献:

- [1] 孙浩然,边睿,李若男,等.基于 SWAT 模型的磷负荷削减最佳管理措施(BMPs)评估研究[J].环境科学学报,2020,40(7):2629-2637.
- [2] 崔力拓,李志伟,王立新,等.农业流域非点源磷素迁移转化机理研究进展[J].农业环境科学学报,2006(增刊1):353-355.
- [3] 张强.黑河流域磷素输出连续模拟[D].西安:西安理工大学,2005.
- [4] 张中秋,劳燕玲,王莉莉,等.广西山水林田湖生命共同体耦合评价[J].水土保持通报,2021,42(3):1-13.
- [5] 王随继,程维明,师庆三.流域尺度上山水林田湖草生命

- 共同体内在机制分析[J].新疆大学学报(自然科学版), 2021,38(3):313-320.
- [6] 刘晓青.坚持系统观念推进新时代生态文明建设[J].中国生态文明,2021(2):75-76.
- [7] 陈俊宏,张利华,马永明.基于 SWAT 模型的鄂西犍河流域非点源污染模拟[J].华中师范大学学报(自然科学版),2021,1-13.
- [8] Marahatta S, Devkota L P, Aryal D. Application of SWAT in hydrological simulation of complex mountainous river basin (Part I: Model Development)[J].Water, 2021,13(4):334-339.
- [9] 耿润哲,李明涛,王晓燕,等.基于 SWAT 模型的流域土地利用格局变化对面源污染的影响[J].农业工程学报, 2015,31(16):241-250.
- [10] 荣易,秦成新,杜鹏飞,等.基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析[J].环境科学,2021,42(6):2769-2777.
- [11] 郑艳侠,冯绍元,姜娜,等.北京市北运河流域农业非点源污染类型及贡献率分析[J].中国农村水利水电, 2010,30(8):30-33.
- [12] 冯青郁. dmpotapex[OL]. [2021-3-11]. <https://gitee.com/qingyufengmodel/dmpotapex>.
- [13] 谢旺成,李天宏.流域泥沙输移比研究进展[J].北京大学学报(自然科学版),2012,48(4):676-685.
- [14] Moriasi D N, Gitau M W, Pai N, et al. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria [J]. Transactions of the ASABE, 2015,58(6):1763-1785.
- [15] Kieckbusch J J, Schrautzer J. Nitrogen and phosphorus dynamics of a re-wetted shallow-flooded peatland[J]. Science of the Total Environment,2007,380:3-12.
- [16] Finnegan J, Regan J T, Eyto E, et al. Nutrient dynamics in a peat land forest riparian buffer zone and implications for the establishment of planted saplings [J].Ecological Engineering,2012,47:155-164.
- [17] 申小波,陈传胜,张章,等.不同宽度模拟植被过滤带对农田径流、泥沙以及氮磷的拦截效果[J].农业环境科学学报,2014,33(4):721-729.
- [18] 付婧,王云琦,马超,等.植被缓冲带对农业面源污染物的削减效益研究进展[J].水土保持学报,2019,33(2):1-8.
- [19] 郑斌.生态沟渠对农业面源氮磷污染的去除效率及影响因素[D].兰州:西北师范大学,2020.
- [20] 曾毅.基于“源—汇”模型的植被缓冲带构建技术研究:以重庆市开县为例[D].武汉:华中农业大学,2014.
- [21] 张明哲.城市湖泊植被缓冲带的构建技术研究[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [22] 徐刘凯.农业非点源的迁移规律及非点源污染负荷:以赣江下游为例[D].南昌:华东交通大学,2012.
- [23] 马啸.香溪河流域农业面源磷迁移转化及流失过程特征研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.
- [24] 查晶晶,吴永波,茆安敏,等.河岸人工林缓冲带对径流水磷素的截留效果[J].浙江农林大学学报,2020,37(4):639-645.
- [25] 宋思铭.河岸缓冲带净水效果及优化配置技术研究[D].北京:北京林业大学,2012.
- [26] 王雁林,马园园,陈新建,等.秦岭陕西段山水林田湖草一体化生态保护修复探讨[J].国土资源情报,2021(6):3-7.
- [27] 常舰.基于 SWAT 模型的最佳管理措施(BMPs)应用研究[D].杭州:浙江大学,2017.
- [28] Liu R M, Zhang P P, Wang X J, et al. Cost-effectiveness and cost-benefit analysis of BMPs in controlling agricultural nonpoint source pollution in China based on the SWAT model[J].Environmental Monitoring and Assessment,2014,186:9011-9022.
- [29] Wei Z Q, Shangguan H D, Zhan J J, et al. Water quality-based double-gates control strategy for combined sewer overflows pollution control[J/OL].Water,2021,13. DOI:10.3390/w13040529.