

耿润哲,殷培红,马茜. 基于关键源区识别的饮用水水源保护区划研究[J]. 环境科学研究, 2017, 30(3): 329-339.

GENG Runzhe, YIN Peihong, MA Qian. Drinking water source divisions based on identification of critical source areas [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(3): 329-339.

基于关键源区识别的饮用水水源保护区划研究

耿润哲, 殷培红*, 马茜¹

环境保护部环境与经济政策研究中心, 北京 100029

摘要: 准确划定饮用水水源保护区是实现饮用水安全精细化管理的重要前提。基于源头削减和全过程协同管理的思路, 将 GIS 平台、ArcSWAT 模型、成本-效益分析技术相结合, 以贵州省红枫湖饮用水水源保护区为例, 通过对近 5 年 (2010—2014 年) 水污染负荷特征进行模拟, 识别影响水环境污染控制的关键源区, 在此基础上划定水源保护区。结果表明: ①研究区总氮、总磷污染负荷主要来源为农业面源, 其中农业种植和畜禽养殖的负荷贡献分别达到 89.7% 和 91.8%, 总氮和总磷负荷高风险区主要集中在流域西北部地势较高且农业耕作活动频繁区域; ②污染控制措施的成本效益分析表明, 测土配方施肥、1°~15°坡耕地等高植物篱、保护性耕作、植被缓冲带的成本-效益比较高, 在该区域水环境污染控制中具有较高的推广应用价值; ③基于水污染关键源区识别结果, 划定饮用水源四级风险区, 其中一级、二级风险区总面积为 97.6 km², 仅占原饮用水水源一、二级保护区面积的 41.4%, 可削减总氮、总磷负荷的 60%~70%, 所需的搬迁成本仅为原划定方案的 35%。研究结果可为我国中西部人口密度大且逐水而居的地区饮用水水源保护区及管控政策的制订提供理论基础和技术参考。

关键词: 饮用水源; SWAT 模型; 关键源区识别; 面源污染

中图分类号: X321

文章编号: 1001-6929(2017)03-0329-11

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.01.72

Drinking Water Source Divisions Based on Identification of Critical Source Areas

GENG Runzhe, YIN Peihong*, MA Qian

Policy Research Center for Environment and Economy, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, China

Abstract: With safe drinking water essential for human well-being, a holistic and adaptive framework is necessary to protect drinking water sources and consumer supply infrastructure. In this paper, GIS technology, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) nonpoint source model, and remedial cost-effectiveness analysis were used to assess strategies for rezoning drinking water source areas in the upper watershed of the Hongfenghu Reservoir. This reservoir is the major drinking water source for Guiyang City. The results show that: (1) Agricultural non-point sources were the major cause of water pollution; Total nitrogen (TN) and phosphorus (TP) load from tillage and livestock sources accounted for 89.7% and 91.8%, respectively; TN and TP loads were primarily from the towns of Liuguang, Huangla, Jiuzhou and Baiyun, which were identified as the critical towns for water pollution control. (2) Soil testing and fertilizer recommendations, contour hedgerow strips, conservation tillage, and buffer strips were the most cost-effective control practices in the reservoir watershed; (3) Four grade zones for drinking water source protection in the reservoir watershed were divided into divisional zones. The area of first and second grade zones was 97.6 km² and accounted for 41.4% of the original drinking water protection zones, where a 60%-70% reduction in pollutant load could be achieved through implementation of best management practices (BMPs) in the identified critical source areas. In the first grade zones, district policy to protect the Hongfenghu Reservoir should be implemented, including enforcement of immigrant

relocation and reduction of livestock numbers, and returning land tilled for grain forestry. In the second grade zones, a series of less restrictive policies including optional partial migration (this policy can save 35% of the total cost for migration) and elimination of livestock should be implemented. In the third and fourth grade zones, a number of comprehensive policies should be implemented to achieve the most cost-beneficial actions balancing drinking water protection and local economic development. These include construction of manure storage facilities, soil testing to determine

收稿日期: 2016-11-22

修订日期: 2016-12-17

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41601551); 环境保护部第三批城环总规试点项目 (YGCQ-GGQY-201418); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07602-002)

作者简介: 耿润哲 (1987-), 男, 山西临汾人, 助理研究员, 博士, 主要从事流域水环境管理与控制研究, cnugengrunzhe@outlook.com.

* 责任作者, 殷培红 (1968-), 女 (回族), 北京人, 研究员, 博士, 主要从事环境演变与资源研究, yinpeihong@sina.com

appropriate fertilizer applications, and an improvement of sewage treatment facilities of rural communities. This research can provide a theoretical and technical basis for drinking water source area protection in similar regions of the country, where water quality is impaired and protection is required.

Keywords: drinking water sources; SWAT model; critical source areas identification; non-point source pollution

近年来,由于工业化进程的加快,国内很多饮用水源地周围环境遭到污染.2015年中国环境状况公报显示,全国967个地表水国控断面(点位)Ⅳ类以上水质断面占35.5%^[1],严重影响人民群众的身体健康,饮用水水源保护区划工作已迫在眉睫,而划定饮用水水源保护区则是一种行之有效的保护措施^[2-5].

目前国内外划定饮用水水源保护区的方法主要有经验值法和计算机模型法.经验值法具有使用简便、数据需求量低等特点,在我国饮用水水源保护区划分研究中应用较为普遍^[6-7].数学模拟法是根据研究水源地的水文、地质、污染等条件,建立数学模型,利用试验数据,按照不同保护区水质要求确定各级保护区的范围^[8-9].以上方法虽然对部分区域的饮用水源地保护发挥了重要作用,但还存在三个方面的不足:①划分的指导性原则不够精确,多基于HJT 338—2007《饮用水水源保护区划分技术规范》^[10],采用辐射性方法进行“一刀切”式的划分,空间上与流域整体特点匹配不够,也未考虑水环境污染的区域性差异和空间异质性,认为所规定范围内均为潜在的污染高风险区,不利于饮用水水源保护区范围内精细化管理措施的制订和实施^[11];②存在较高的政策执行风险,“一刀切”式的划分方法会导致库区民众的迁出问题,不但搬迁的经济成本较高,而且还存在较高的社会风险,尤其在在我国中西部逐水而居的地区,由于水源保护区及附近的人口密度较大,这一风险更为突出;③对流域整体管理的考虑不足,现行方法仅是针对湖泊、水库本身一定范围内的保护策略,并未考虑湖泊、水库所控制的上游流域集水区整体的污染物传输过程对水质的影响,常常出现饮用水水源保护区内严格管控、保护区外污染依旧的现象,导致饮用水源的水环境质量并未出现明显改善^[12].

研究表明,针对饮用水水源保护区所控制的流域整体而言,少数区域(通常只占流域总面积的20%~30%)的污染物输出量通常占据全流域负荷总量的绝大部分(约占污染物负荷总量的80%)^[13-14].水环境污染关键源区(critical source areas, CSAs)是指对流域内水环境整体状况有决定性影响的污染敏感区域^[15-17].从流域整体角度对水环境污染进行控制,明确水环境

污染物的主要来源和时空分布特征,已成为当前流域水环境污染控制核心理念和关键所在^[18-20].

通过对流域整体水污染控制关键源区的识别,对饮用水水源保护区进行精细化划分,是实现饮用水水源保护成本-效益最大化的有效途径.现有研究多是采用风险评价或模型模拟的方法来识别关键源区.风险评价通过确定污染物流失的风险水平,分级划分流域的关键源区.磷指数(Phosphorus Index, PI)法是比较有代表性的一种风险评价方法.Lemunyon等^[21-22]在综合考虑了多因子的相互作用后,首先提出了用磷指数评价法确定农业地区磷元素流失的风险性.磷指数法由于不使用复杂的数学模型,简便实用,主要应用于地块和小流域尺度的关键源区识别^[15,23].模型模拟方法是进行关键源区识别的另一种有效途径.此类研究多是将GIS与ANSWERS、AGNPS、HSPF、SWAT等机理模型集成,在空间和时间序列上对非点源污染的产生机理进行模拟分析,从而确定流域的关键源区.机理模型虽然相对较为复杂,对数据资料的种类和精度也有较高要求,但它可以得到污染物流失量,并且精度较高,因此被广泛应用于流域尺度的关键源区识别^[24-27].

该研究尝试构建基于水环境污染关键源区识别的饮用水水源保护风险区划方法,以机理模型和GIS平台为基础,对贵州省红枫湖水库饮用水水源保护区所辖流域整体的水环境污染关键源区进行识别,进而对不同情景下的污染控制措施效率进行评估,并采用工程经济分析方法对不同情景下的水源保护区风险控制方案进行成本-效益分析,提出成本-效益最优的饮用水水源保护风险区划方案,这对在我国人多地少的现实国情下实现饮用水水源保护区精细化管理具有一定的理论和现实意义.

1 研究区概况

研究区位于贵阳市西部(106°00'E~106°30'E、26°10'N~26°30'N),包括4个区县,共16个乡镇,流域面积约为1 124.6 km²(见图1).红枫湖是贵阳市最大的水源地,水源保护区一、二级面积235.7 km²,每天向贵阳市的城市供水量为4×10⁵ m³,供水量占贵阳市用水总量的70%以上,整个区域的中部地区

均为水环境高度敏感区,具有重要的生态和社会经济价值.区域内水环境的主要污染物为总氮和总磷,而

COD 和氨氮在大多数断面均不超标^[28],因此该研究仅针对总氮、总磷污染进行分析.

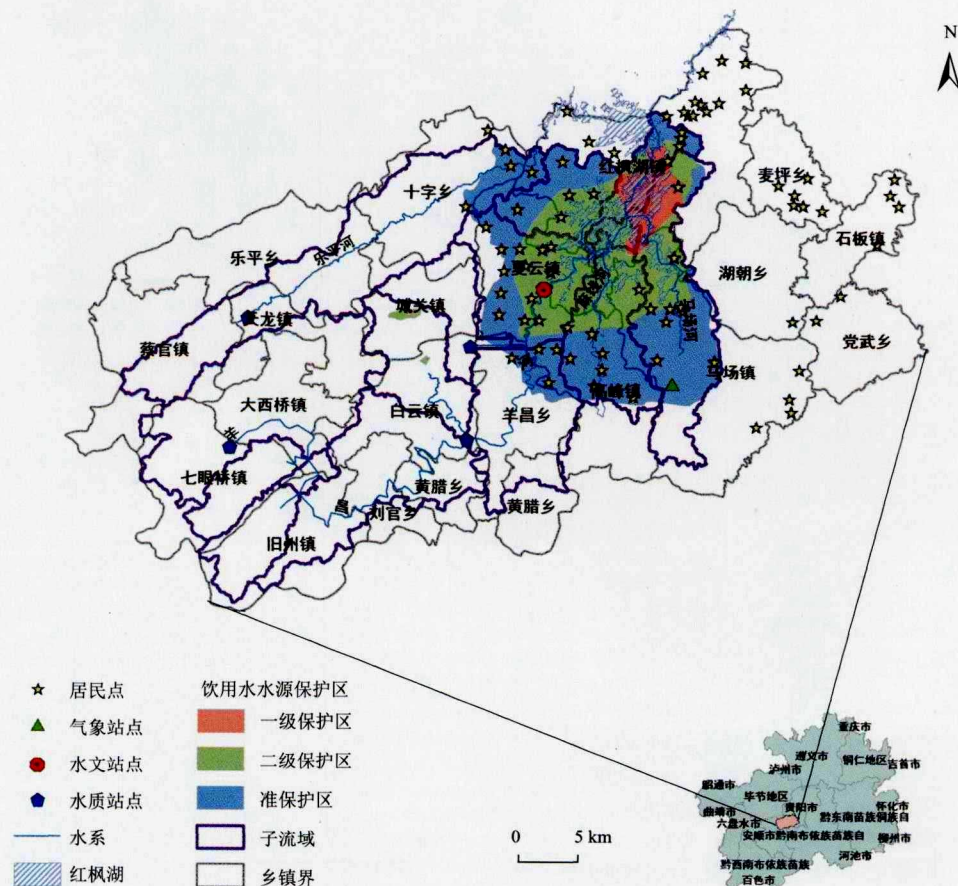


图1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

2 研究方法

2.1 数据来源

以 RS、GIS 技术为支持,建立红枫湖流域空间及社会经济数据库.空间数据库主要包括数字高程模型图(DEM)、土地利用类型分布图(见图2)、土壤类型图及相关属性数据等;社会经济数据库主要包括各乡镇人口、畜禽养殖、点源污染等(见表1).

2.2 研究方法

2.2.1 关键源区识别

该研究采用 ArcSWAT 模型作为流域水环境污染关键源区识别的工具,ArcSWAT 模型是一个连续的半分布式流域水文模型,在全球范围内应用广泛^[29-31].以红枫湖水库入库点黄猫村水文站 2010—2014 年的逐日流量和逐月泥沙、总氮及总磷监测数据,对建立的 SWAT 模型校准和验证,其中 2010—2012 年作为模型的校准期,2013—2014 年作为验证

期.计算纳什效率系数(NE)和相对误差(RE)对模型模拟效果进行评价(见表2),根据 Moriasi 的模型效率评价指标,确定径流模拟的精度相对误差在 25% 以内,泥沙和营养物的相对误差控制 50% 以内,并且 $Ens \geq 0.5$,表明模型模拟结果是可接受的,具体校验结果见笔者所在课题组发表的红枫湖流域水环境污染控制系列研究论文^[32].基于校验后的 ArcSWAT 模型识别红枫湖流域水环境污染的关键源区.

2.2.2 污染控制措施削减效率评估

基于流域水环境污染的关键源区配置最佳管理措施(best management practices, BMPs),是实现饮用水源保护成本—效益最大化的重要途径,而 BMPs 削减效率作为实现 BMPs 有效配置的基础数据,会受到不同区域下垫面条件、气候条件以及措施实施规模等的影响,需要对基于特定点-位的 BMPs 效率进行评估,ArcSWAT 模型作为一种较为成熟的半分布式水

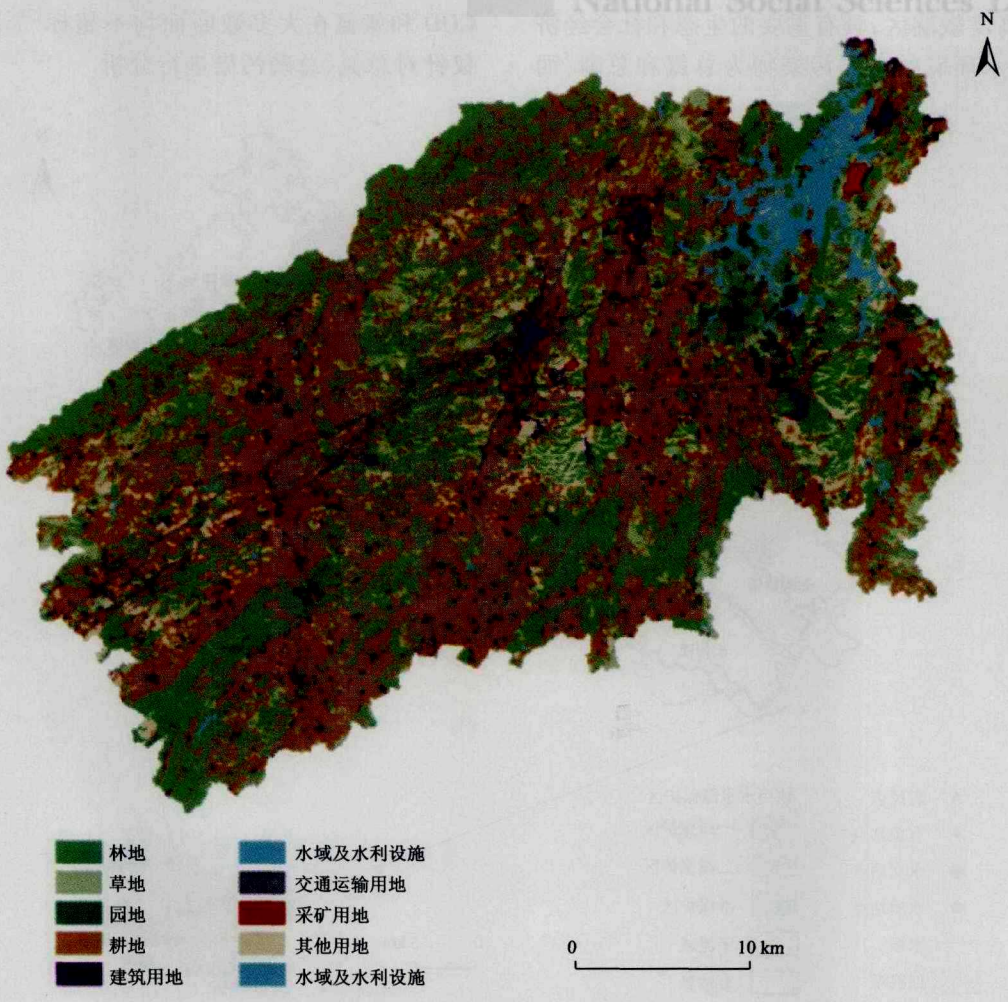


图 2 红枫湖流域土地利用分布
Fig. 2 Land use spatial distribution of the upper watershed of Hongfenghu Reservoir

表 1 基础数据库列表
Table 1 List of database

数据	比例尺/步长	格式	时间	来源
DEM	1: 50 000	栅格	2013 年	中国科学院资源环境科学数据中心
土地利用图	1: 100 000	矢量	2013 年	贵州省国土资源厅
土壤类型图	1: 1 000 000	矢量	2010 年	国际粮农组织 (FAO)
水系图	1: 250 000	矢量	2013 年	中国城市规划设计研究院
行政区划	1: 4 000 000 (县/省界)	矢量	2013 年	中国科学院资源环境科学数据中心
	1: 250 000 (贵州省乡界)	矢量	2013 年	中国科学院资源环境科学数据中心
降雨、温度、风速、 太阳辐射、相对湿度	5 站点, 日尺度		2000—2014 年	中国科学院地理科学与资源研究所
径流量、TN、TP	黄猫村, 月尺度		2010—2014 年	贵州省水文水资源局、贵州省两湖一库管理局
点源排放量	年尺度		2013 年	贵安新区环保局
统计年鉴	乡镇级别			贵州省统计局

表 2 红枫湖流域 SWAT 模型校验参数表
Table 2 Parameters of the calibration and validation for
in the upper watershed of Hongfenghu Reservoir

指标	纳什系数		相对误差/%	
	校准期	验证期	校准期	验证期
径流量(年尺度)	0.82	0.65	13.2	36.6
径流量(逐日)	0.86	0.82	13.8	24.6
泥沙(逐月)	0.79	0.81	26.5	30.9
总氮(逐月)	0.71	0.72	19.5	30.3
总磷(逐月)	0.84	0.87	12.1	29.3

表 3 ArcSWAT 模型中部分 BMPs 效率评估方法
Table 3 Methods for representation of BMPs in ArcSWAT model

措施类型	工作机制	SWAT 模型方法
25°以上坡耕地退耕还林		土地利用变化
15°~25°坡耕地变耕地为果园	降低农业活动土壤扰动,控制地表径流土壤侵蚀及营养物质流失	土地利用变化
1°~15°坡耕地部分保护性耕作		耕作措施:MGT_OP=6(*.mgt)、ZEROTILL(*.mgt)、CN 值降低 3(*.mgt)、ITNUM(till.dat):tillage number、EFFMIX(till.dat)为 0.05
1°~15°坡耕地设置等高植物篱	登高植物篱是指安装在养殖场地块周围以减少地表径流中的泥沙、营养物质、畜禽粪便、农药以及细菌、地表径流中的污染物负荷量被植被缓冲带所拦截	CN-3;USLE_P=90;FILTERW 选项来调整缓冲带的宽度 10 m
25°以上荒草坡还林	降低农业活动土壤扰动,控制地表径流土壤侵蚀及营养物质流失	土地利用变化
分散养殖户建设户用沼气池	通过粪肥的储存可使粪肥中 15% N 得到消解	削减粪肥中氮含量的 15%~30%
饮用水源保护区内采取禁养措施(约削减畜禽总量的 40%)	减少土壤中氮磷的输入量	削减粪肥施用量 40%
平衡施肥——测土配方施肥技术	减少土壤中氮磷的输入量	削减氮肥 70%、磷肥 25%、钾肥 25%
缓冲带	通过在河道两侧或河道两侧高坡度区域种植林地以减少地表径流中过量的泥沙、有机质、营养物质、农药及其他化学物质对受纳水体的影响	FILTERW 选项来调整缓冲带的宽度

资反映建造工程措施的一次性固定资产投入水平,主要包括人力资本、土地应用成本及建设费用三项内容。

$$C_{td} = C_0 \left\{ (1 + s)^{td} + rm \left[\frac{(1 + s)^{td} - 1}{s} \right] \right\} / td$$

式中: C_{td} 为措施总成本,元/($hm^2 \cdot a$); C_0 为固定资产投资,元/a; rm 为维护成本,一般以所占总成本的比例表示(如缓冲带为 1%)^[35]; s 为固定年利率,该研究中参考中国人民银行 2013 年一年期年利率为 6.40%; td 为措施生命周期,a。

在 BMPs 的成本-效益分析中,如何将措施的环境效益进行货币化表示,是成本-效益分析中的关键环节。该研究拟参考王晓燕等^[36-37]在密云水库水源

文模型,在世界各地的非点源污染 BMPs 配置工作中得到了广泛的应用^[23,33],并取得了不错的结果。该研究中拟实施 BMPs 的 ArcSWAT 模拟,主要基于各项措施的运行机制,进而调整模型中与之相对应的参数进行模拟,各项措施的运行机制及 ArcSWAT 模型模拟方法见表 3。

2.2.3 不同情景下饮用水源保护区划方案成本-效益分析

该研究所采用的 BMPs 成本主要包括固定资产投资和生命周期内的运行维护成本两部分^[34]。其中,固定投

保护区内 BMPs 效益的评价方法,采用影子成本法对红枫湖流域污染控制措施的环境效益进行货币化计算,并采用经济效益费用比(BECR)、内部收益率、经济净现值及经济净现值率等动态评价方法,在考虑资金时间价值的基础上,对不同情境下的水源保护区风险区划方案进行评价,筛选最优控制方案。

$$E_i = \sum_{i=1}^2 T_i \times S_i \times P_i$$

式中: E_i 为 N、P 养分流失所损失的价值,元; i 为 N、P 两种元素; T_i 为污染物流失总量,t; S_i 为 N、P 折算为磷酸二铵的系数; P_i 为磷酸二铵肥料的价格,元。根据课题组现场调研结果,目前贵州省磷酸二铵的市场价格为 3 600~4 000 元/t,该研究中取折中价 3 800

元/t;TN 和 TP 负荷量折算成纯氮、磷化肥的比例分别为 132/14 和 132/31^[38]。

3 结果与讨论

3.1 关键源区识别结果

3.1.1 重点污染源

红枫湖流域 2013 年总氮、总磷负荷产生量分别为 16 278.5 和 1 742.3 t/a,其中农业面源污染重的种植业污染负荷产生量最高,分别占负荷总量的 71.03% 和 47.40%,为水环境污染产生的关键来源;其次为养殖业,占负荷总量的 18.64% 和 44.36%;农村生活和点源污染负荷产生量较低,仅占污染负荷总量的 10.32% 和 8.23% (见图 3)。因此,可以认为红枫湖流域水环境污染主要来自于农业面源污染,并且主要污染源为种植业和畜禽养殖。

3.1.2 污染物风险空间分布特征

从污染物的空间分布特征 (见图 4) 来看,将总氮、总磷负荷量占流域面积 70% ~ 80% 的区域确定为水环境污染的关键区域。总氮污染的高风险区域集中于羊昌河流域的刘官乡、黄腊乡、旧州镇,经课题组实地调研发现,这些乡镇的农业活动较为频繁,并且

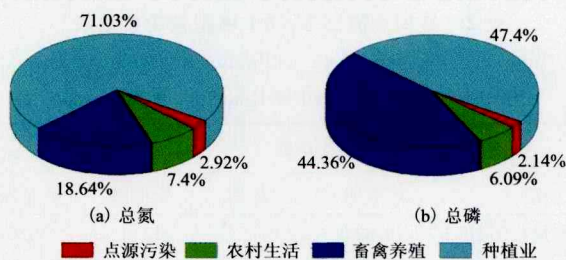


图 3 红枫湖流域水环境污染源分析

Fig. 3 Analysis of critical sources for pollutants loads on in the upper watershed of Hongfenghu Reservoir

距河道较近,是红枫湖上游流域主要粮食主产区,部分高风险区域化肥的施用量达到 750 kg/hm^2 ,化肥的过量施用是导致总氮负荷较高的主要因素。总磷污染的高风险区主要集中在蔡官镇、乐平乡、天龙镇及十字乡,这些乡镇的总磷负荷量均超过了磷流失的风险阈值 (2 kg/hm^2)^[18],这些乡镇多位于地形起伏较大的区域,多年来较为严重的采矿活动导致地表植被覆盖度较低,加速了土壤侵蚀的发生,作为面源污染的主要驱动因素,土壤侵蚀的加剧可能是导致这一区域总磷负荷量较高的主要因素。

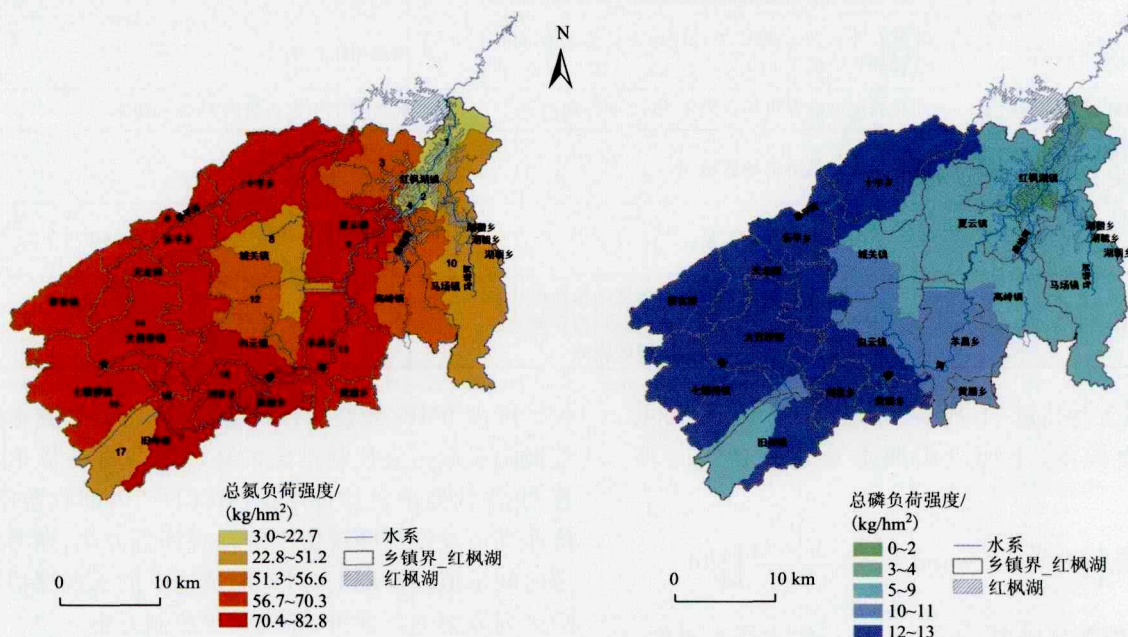


图 4 红枫湖流域总氮、总磷风险空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of TN and TP loads in the upper watershed of Hongfenghu Reservoir

3.2 BMPs 污染物削减效率评估

采用 ArcSWAT 模型对红枫湖流域水环境污染控制 BMPs 措施评估结果表明,平衡施肥技术对总氮的削减效率最高,达到了 66.7%;30 ~ 100 m 宽河岸缓冲带对总磷的削减效率最高,可达 72.1%。保护性耕

作技术的污控表现较为均衡,总氮、总磷的削减效率分别为 39.2% 和 30.1%。同时,这三项措施的自然资源保护价值也是最高的,完全实施后所获取的环境效益总价值达到了 15×10^8 元以上,具有较好的经济价值 (见表 4)。

表 4 红枫湖流域面源污染控制措施效率评估结果
Table 4 Environmental effectiveness analysis for various BMPs on in the upper watershed of Hongfenghu Reservoir

措施类型	措施内容	成本/10 ⁴ 元	TN 削减效率/%	TP 削减效率/%	环境效益/10 ⁴ 元
工程措施	100 m 宽河岸缓冲带	24 789.8	38.4	72.1	31 577.4
	户用粪便储存设施	7 405.2	16.1	34.6	12 481.3
	1°~15°坡耕地登高植物篱	9 183.9	12.0	26.1	15 312.6
管理措施	1°~15°坡耕地采取保护性耕作	29 681.3	39.2	30.1	95 937.8
	平衡施肥——测土配方施肥技术	33 820.6	66.1	22.3	111 764.6
	饮用水源保护区内采取畜禽禁养 (约削减畜禽粪便总量的 40%)	167 298.0	19.7	25.0	320 549.5
	15°~25°坡耕地变耕地为果园	20 989.1	11.6	7.7	23 372.8
	25°以上荒草坡还林	840.7	0.02	0.02	38.2
	25°以上坡耕地还林	14 105.7	6.7	4.4	12 927.6

3.3 不同情景下饮用水源保护区划方案成本-效益分析

综合对比分析选择的多项控制措施,从经济上和技术上综合分析方案的可行性,选择最优的非点源控制方法及组合,以期在经济效益最优的情况下,使污染物的削减达到最优。其中,技术因素包括对污染物的去除效率(总氮、总磷);经济因素包括控制措施的经济效益、成本-效益比、投资回收期、内部收益率、资金限制等。

各项措施累计净现值最高的三项措施为测土配方施肥、1°~15°坡耕地等高植物篱和保护性耕作,相应的这三项措施的效费比也是最高的,并且投资回收

期最短,均为 1 a 即可收回全部投资。但是畜禽粪便储存设施和 30 m 缓冲带的内部收益率是最高的,其次为 15°~25°坡耕地变果园和 25°以上坡耕地还林,并且有五项措施的内部收益率大于社会折现率(12%),表明这种情况下的方案在经济上是可接受的。对于禁养措施和 25°以上荒草坡还林而言,虽然其经济收益为负值且投资回收期超过 5 a,但是这两项措施的单位面积污染负荷削减效率是较高的,同时在水源保护区内实施禁养措施也可满足国家和地方有关政策规定的要求,因此,可在充分考虑居民可接受度的情况下进行推广使用(见表 5)。

表 5 BMPs 成本效益分析结果
Table 5 Cost-beneficial analysis of various BMPs

控制方案	总费用/10 ⁴ 元	环境效益/10 ⁴ 元	经济效益/10 ⁴ 元	经济净现值/10 ⁴ 元	回收期/a	效费比	内部收益率/%
测土配方施肥	1 694.5	111 764.6	676 411.5	519 002.1	<1	306.3	—
1°~15°坡耕地等高植物篱	9 183.9	15 312.6	145 821.9	104 975.4	<1	17.5	25.00
保护性耕作	29 681.3	95 937.8	62 415.6	78 377.1	<1	5.3	—
缓冲带	24 789.8	31 577.2		5 877.2	3.7	1.5	41.2
畜禽粪便储存设施	7 405.2	12 481.3	672.8	3 456.6	<1	1.8	112.00
15°~25°坡耕地变果园	20 989.1	23 372.8	3 413.9	2 356.8	3.5	1.3	29.10
25°以上坡耕地还林	14 105.7	12 927.6	1 910.0	296.5	3.7	1.1	29.70
25°以上荒草坡还林	840.7	38.2	391.5	-406.2	>5	0.5	-39.68
畜禽禁养措施	40 246.9	17 137.4		-19 653.2	3.2	0.4	—
合计	148 937.1	320 549.5	487 847.5				

3.4 基于关键源区识别的饮用水高风险区的划定

综合考虑用地规模的经济性和红枫湖饮用水水源保护区的划定和 BMPs 措施的成本效益评估结果,尝试以红枫湖上游流域水环境污染关键源区和河湖岸缓冲带为基础,结合原有饮用水水源保护区划定方式,重新划定红枫湖饮用水源风险控制分区,针对不

同污染源提出相应的分区管控措施并行政策成本核算(见表 6、7)。具体划定方法:①一级风险区,原一级保护区、原二级保护区内的河湖岸缓冲带;②二级风险区,原二级保护区内的水污染关键源区;③三级风险区,原二级保护区内除水污染关键源区和河湖岸缓冲带外的区域、原二级保护区外的河湖岸缓冲带;

④剩余的流域水污染关键源区(见图5)。

基于3.3节BMPs的成本效益分析结果,饮用水源高风险区内的污染控制措施拟采用测土配方施肥、农田保护性耕作、植被缓冲带建设、削减畜禽数量、畜禽粪便储存设施结合现有的分散式农村生活污水处理站建设及升级改造、农村生活污水、垃圾储运体系建设等共同构建红枫湖流域饮用水源高风险区污染控制措施体系。经过测算可知,措施配置的总体成本

约为 17×10^8 元,进一步按照已划定的红枫湖饮用水水源保护区方案计算政策成本,其中仅移民搬迁一项的总成本就高达 48×10^8 元,并且其所控制区域的总氮、总磷污染负荷量仅占流域总体负荷量的15.7%和13.2%,因此,采用极高的经济成本并承担相应的社会风险来针对饮用水水源保护区进行严格管控,对于进入红枫湖库区的污染物削减效率很低,不具备成本-效益上的可行性。

表 6 饮用水源高风险控制区措施成本核算
Table 6 Analysis of the cost for placement of BMPs

政策类型	一级风险区	二级风险区	三级风险区	四级风险区
农村生活污水处理站建设及升级改造	645.35	1 347.87	1 752.34	—
分散式污水处理设施	—	—	—	8 467.69
生活垃圾无害化处理设施	176.16	424.21	622.55	1 893.26
农田保护性耕作	6 016.13	2 959.13	—	—
测土配方施肥	—	8.41	23.98	49.85
畜禽粪便储存设施	—	—	55.43	1 222.54
畜禽禁养	158.4	1 178.21	—	—
植被缓冲带	2 860.53	2 221.83	—	—
工业企业搬迁	—	1 084.6	—	1 234.2
生态移民	44 006.01	96 157.1	—	—
合计	53 862.58	105 381.4	2 454.3	12 867.54

表 7 饮用水源环境风险控制分区及政策配置
Table 7 The placement of the policy for drinking water source protection in in the upper watershed of Hongfenghu Reservoir

风险 分级	管控政策			
	工业企业	养殖场	农田	村庄
一级风 险区	禁止准入区,实行最严格管理.严格禁止新设排污单位,以及经营外派废水、污水的餐饮、住宿	畜禽禁养区	全面实施退耕还林,建设生态截污带	生活污水、垃圾零排放,配置生态截污带,禁止人口迁入,积极引导人口迁出
二级风 险区	禁止准入区,实行最严格管理,搬迁工业企业,实施污染场地清理与生态修复工程.采取严格的准禁止新建、改建、扩建有污染的生产性建设项目	分散式、规模化养殖 场逐步退出	逐步实施退耕还林,逐步实施退耕还林,严禁施用农药化肥,发展有机农业,建设生态截污带	所有村庄设置分散式生活污水处理站,实行水污染物特别排放限值.生活垃圾零排放,100%无害化和资源化利用
三级风 险区	限制准入区,禁止新建、改建、扩建有污染的建设项目,允许生态农业、旅游开发、基础设施等项目,现有工业企业实施强制清洁生产	禁止分散养殖,规模化畜禽养殖场实现污水、粪便零排放和资源化处理	严禁施用农药化肥,发展有机农业	规模化居住区设置集中式生活污水处理厂,执行GB 18918—2002《城镇污水处理厂水污染物排放标准》中一级A类标准,其余村庄设置农村生活污水处理站,村镇、居民点垃圾无害化处置率和污水处理率达到100%.流经污控隔离带(植被缓冲带)的排水水质标准不能低于受纳水体的环境质量等级
四级风 险区	禁止新建、改建、扩建有污染的建设项目,如印染、造纸、酿造、制革、电镀等水污染重的项目鼓励现有工业企业实施清洁生产,所有企业配备污水处理设施,达到一级A出水标准、建立完善的污水排放应急预案	发展有机肥和有机 沼气生态产业链, 畜禽粪便无害化和 资源化利用率达到 100%	采取平衡施肥技术, 减少农业种植污染	设置分散式农村生活污水处理站,垃圾无害化处置率和污水处理率达到100%.流经污控隔离带(植被缓冲带)的排水水质标准不能低于受纳水体的环境质量等级

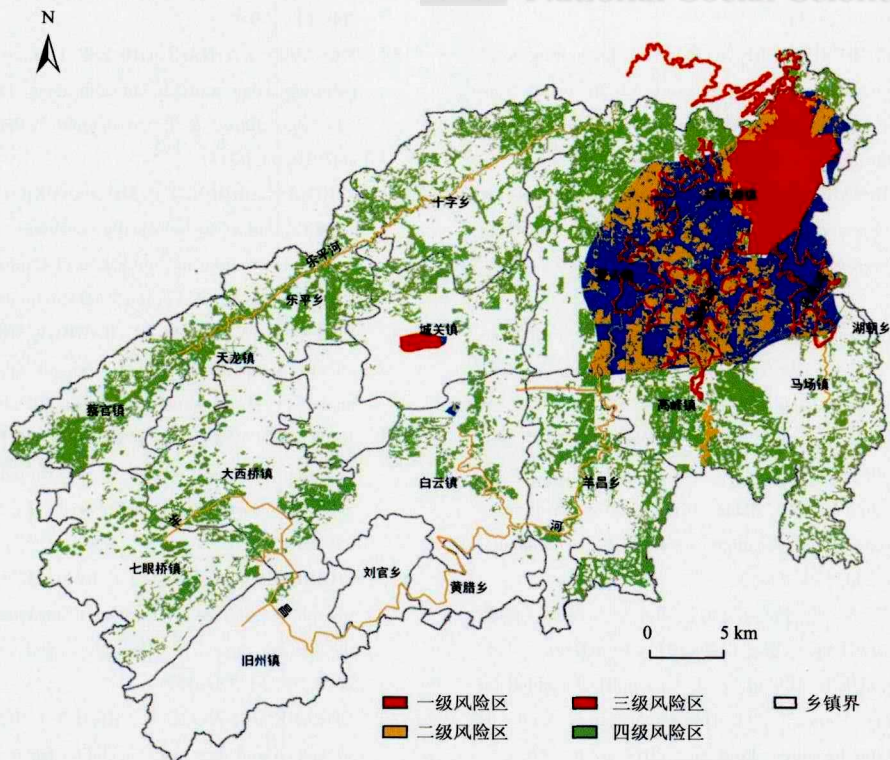


图5 红枫湖流域饮用水水源保护区划图

Fig. 5 Division of the drinking water source area on
in the upper watershed of Hongfenghu Reservoir

4 结论

a) 红枫湖流域水环境污染物的主要来源为农业面源,其中农业种植和畜禽养殖对总氮、总磷的贡献达到了89.7%和91.8%。水环境污染物的关键源区识别结果表明,流域水环境污染物空间差异较大,上游及中游偏下区域负荷较为严重,刘官乡、黄腊乡、旧州镇、蔡官镇、乐平乡、天龙镇及十字乡是水环境污染关键源区,考虑污染物的空间分布差异性,应当从流域整体的角度来划分饮用水水源保护区。

b) 污染控制措施的成本-效益分析结果表明,测土配方施肥、 $1^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 坡耕地等高植物篱、保护性耕作、植被缓冲带的成本-效益比较高,在该区域水环境污染控制中具有较高的推广应用价值,另外,由于畜禽养殖作为该区域水环境污染的主要来源,即使削减畜禽数量的成本较高,考虑到控制措施成本的差异性,应当在不同风险区内采取精细化的措施配置方案,但在关键源区还是需要采取严格的禁养措施来降低其对水环境安全的风险。

c) 水环境污染的自然属性特征决定了对其采用“一刀切”的管理方法会导致总成本投入的大幅度增加,而实际产生的生态效益却较为有限。考虑空间管

控和精细化管理原则,重新划定的饮用水水源一级、二级风险区的面积为97.6 km²,仅占原水源一级、二级保护区面积的41.4%,所产生的搬迁成本仅为原先的35%。有效地避免了由于搬迁成本过高所导致的资金投入及社会压力。

d) 基于水环境污染关键源区识别来划定饮用水水源保护高风险区是实现饮用水源保护成本效益最大化的有效途径,也是符合水环境自然属性规律的重要技术方法,可在今后的饮用水水源保护区规划及其他区域的相关问题研究中加以拓展应用。同时,受限于管理措施类型及部分社会经济数据的可获得性,该研究暂未能将包括地下水区划等在内的影响饮用水水源高风险区划的所有影响因素加以考虑,这也是课题组今后研究要解决的主要问题。

参考文献 (References):

- [1] 环境保护部. 2015年中国环境状况公报[R]. 北京: 环境保护部, 2016.
- [2] 匡耀求, 黄宁生. 中国水资源利用与水环境保护研究的若干问题[J]. 中国人口·资源与环境, 2013(4): 29-33.
KUANG Yaoqiu, HUANG Ningsheng. Several issues about the research on the water resources utilization and water environment protection in China[J]. China Population, Resources and

- Environment, 2013(4):29-33.
- [3] DUPAS R, PARNAUDEAU V, REAU R, *et al.* Integrating local knowledge and biophysical modeling to assess nitrate losses from cropping systems in drinking water protection areas[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 69:101-110.
- [4] WALCHER M, BORMANN H. On the transferability of the concept of drinking water protection zones from EU to Latin American countries[J]. Water Resources Management, 2015, 29(6):1803-1822.
- [5] ROUSE M J. Water worldwide-drinking water quality regulation: where are we in a continuing evolution? [J]. Journal-American Water Works Association, 2016, 108(8):20-24.
- [6] 汪林, 朱京海, 刘家斌. 饮用水水源保护区划分问题探讨[J]. 环境保护科学, 2005(5):71-73.
WANG Lin, ZHU Jinghai, LIU Jiabin. Discussion on partition of drinking water sources conservation areas[J]. Environmental Protection Science, 2005(5):71-73.
- [7] 易雯, 付青, 郑丙辉, 等. 非潮汐河流型饮用水水源保护区经验值划分法及实例应用[J]. 水资源保护, 2011(4):62-66.
YI Wen, FU Qing, ZHENG Binhui, *et al.* An empirical method for delineating riverine source water protection areas and its application[J]. Water Resources Protection, 2011(4):62-66.
- [8] 李云桢, 赵希锦, 佟洪金. 基于二维水质模型的饮用水水源保护区划分[J]. 水资源与水工程学报, 2013(1):181-184.
LI Yunzhen, ZHAO Yejin, TONG Hongjin. Partition of drink water protected zone based on two dimension water quality model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013(1):181-184.
- [9] 周贤宾, 吴建, 詹中英, 等. EFDC 模型在饮用水水源保护区划分中的应用研究:以杭嘉湖地区某水厂为例[J]. 环境科学导刊, 2009(2):30-32.
ZHOU Xianbin, WU Jian, ZHAN Zhongying, *et al.* Application study of EFDC on division of drinking water source conservation area by taking one drinking water plant in Hangjiahu region as a case [J]. Environmental Science Survey, 2009(2):30-32.
- [10] 张军锋, 张建永, 杨玉霞, 等. 湖库型饮用水水源地保护区划分技术研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2013(2):27-29.
ZHANG Junfeng, ZHANG Jianyong, YANG Yuxia, *et al.* Research on delineating drinking source water protection areas with the lake and reservoir type[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2013(2):27-29.
- [11] 陈学林, 胡兴林, 王双台, 等. 地下水饮用水水源地保护区划分关键技术研究[J]. 水文, 2013(6):68-71.
CHEN Xuelin, HU Xinglin, WANG Shuanghe, *et al.* Application of hydrologic basic data universal platform in flood forecasting and hydrologic data processing[J]. Journal of China Hydrology, 2013(6):68-71.
- [12] 侯俊, 王超, 兰林, 等. 我国饮用水水源地保护法规体系现状及建议[J]. 水资源保护, 2009(1):79-82.
HOU Jun, WANG Chao, LAN Lin, *et al.* Legal system for drinking water source protection in China[J]. Water Resources Protection, 2009(1):79-82.
- [13] MCCARTY J A, HAGGARD B E. Can we manage nonpoint-source pollution using nutrient concentrations during seasonal baseflow? [J]. Agricultural & Environmental Letters, 2016. doi: 10. 2134/ael2016.03.0015.
- [14] THOMAS I, JORDAN P, MELLANDER P E, *et al.* Improving the identification of hydrologically sensitive areas using LiDAR DEMs for the delineation and mitigation of critical source areas of diffuse pollution[J]. Science of the Total Environment, 2016, 556:276-290.
- [15] TRIPATHI M, PANDA R, RAGHUWANSHI N. Development of effective management plan for critical subwatersheds using SWAT model[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3):809-826.
- [16] HOWARTH R W, SHARPLEY A, WALKER D. Sources of nutrient pollution to coastal waters in the United States: implications for achieving coastal water quality goals[J]. Estuaries, 2002, 25(4):656-676.
- [17] SHARPLEY A N, WELD J L, BEEGLE D B, *et al.* Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the United States[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 58(3):137-152.
- [18] GHEBREMICHAEL L T, VEITH T L, HAMLETT J M. Integrated watershed-and farm-scale modeling framework for targeting critical source areas while maintaining farm economic viability[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 114:381-394.
- [19] BAIRD J, PLUMMER R, MORRIS S, *et al.* Enhancing source water protection and watershed management: lessons from the case of the New Brunswick Water Classification Initiative[J]. Canadian Water Resources Journal/Revue Canadienne des Ressources Hydriques, 2014, 39(1):49-62.
- [20] SHEN Z, ZHONG Y, HUANG Q, *et al.* Identifying non-point source priority management areas in watersheds with multiple functional zones[J]. Water Research, 2015, 68:563-571.
- [21] LEMUNYON J, GILBERT R. The concept and need for a phosphorus assessment tool[J]. Journal of Production Agriculture, 1993, 6(4):483-486.
- [22] HAYGARTH P M, CONDRON L M, HEATHWAITE A L, *et al.* The phosphorus transfer continuum: linking source to impact with an interdisciplinary and multi-scaled approach[J]. Science of the Total Environment, 2005, 344(1/2/3):5-14.
- [23] VEITH T, WOLFE M, HEATWOLE C. Cost-effective BMP placement: optimization versus targeting[J]. Transactions-American Society of Agricultural Engineers, 2004, 47(5):1585-1596.
- [24] FASSIO A, GIUPPONI C, HIEDERER R, *et al.* A decision support tool for simulating the effects of alternative policies affecting water resources: an application at the European scale[J]. Journal of Hydrology, 2005, 304(1):462-476.
- [25] HSIEH C D, YANG W F. Optimal nonpoint source pollution control strategies for a reservoir watershed in Taiwan [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(4):908-917.
- [26] PANAGOPOULOS Y, MAKROPOULOS C, BALTAS E, *et al.* SWAT parameterization for the identification of critical diffuse

- pollution source areas under data limitations [J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(19): 3500-3512.
- [27] SHEN Z, CHEN L, XU L. A topography analysis incorporated optimization method for the selection and placement of best management practices [J]. *Plos One*, 2013, 8(1): e54520.
- [28] 环境保护部环境与经济政策研究中心. 贵安新区环境保护规划(2013—2030) [R]. 北京: 环境保护部环境与经济政策研究中心, 2015.
- [29] ARABI M, GOVINDARAJU R S, HANTUSH M M. Cost-effective allocation of watershed management practices using a genetic algorithm [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(10): 2405-2411.
- [30] ARABI M, FRANKENBERGER J R, ENGEL B A, *et al.* Representation of agricultural conservation practices with SWAT [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 22(16): 3042-3055.
- [31] XIA T L, ZHANG S H. An improved non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization based on crowding distance, in computational intelligence, networked systems and their Applications [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2014: 66-76.
- [32] 耿润哲, 殷培红, 原庆丹. 红枫湖流域非点源污染控制区划 [J]. *农业工程学报*, 2016(19): 219-225.
- GENG Runzhe, YIN Peihong, Yuan Qingdan. Zonation for nonpoint source pollution control in Hongfenghu reservoir watershed [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016(19): 219-225.
- [33] 陈磊. 非点源污染多级优先控制区构建与最佳管理措施优选 [D]. 北京: 北京师范大学, 2013: 11-20.
- [34] 王西平. 区域水环境经济系统 DSS 的设计 [J]. *地理研究*, 2001(3): 266-273.
- WANG Xiping. Design of decision support system for regional water environment-economic system [J]. *Geographical Research*, 2001(3): 266-273.
- [35] MARINGANTI C, CHAUBEY I, POPP J. Development of a multiobjective optimization tool for the selection and placement of best management practices for nonpoint source pollution control [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(6): 51-53.
- [36] 王晓燕, 张雅帆, 欧洋, 等. 流域非点源污染控制管理措施的成本效益评价与优选 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 540-548.
- WANG Xiaoyan, ZHANG Yafan, OU Yang, *et al.* Optimization and economic evaluation on cost-benefit of Best Management Practices in nonpoint source pollution control [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(2): 540-548.
- [37] TUROIN N, BONTEMS P, ROTILLON G, *et al.* AgriBMPWater: systems approach to environmentally acceptable farming [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2005, 20(2): 187-196.
- [38] 许月卿, 蔡运龙. 土壤侵蚀经济损失分析及价值估算: 以贵州省猫跳河流域为例 [J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(4): 470-474.
- XU Yueqing, CAI Yunlong. Economic loss analysis on soil erosion and estimation of its values: a case study of Maotiaohe basin, Guizhou Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(4): 470-474.

声 明

为适应我国信息化建设,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊已被国内外多家检索数据库收录,并以数字化方式出版(优先出版)复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文,作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如果作者不同意文章被相关数据库收录或优先数字出版,请在来稿时向本刊做出纸面声明,以便做出适当处理。

特此声明!

《环境科学研究》编辑部