

丁 健, 吴晓斐, 黄治平, 等. 巢湖流域厌氧-土壤净化床工艺处理农村生活污水生态补偿标准测算[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(5): 584-591.

DING Jian, WU Xiao-fei, HUANG Zhi-ping, et al. Ecological compensation standard assessment for the anaerobic tank-soil bed system in treating the rural domestic sewage in Chaohu Lake basin area[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(5): 584-591.

巢湖流域厌氧-土壤净化床工艺处理农村生活污水生态补偿标准测算

丁 健, 吴晓斐, 黄治平*, 郑宏艳, 米长虹, 郑宏杰

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要:为制定巢湖流域厌氧-土壤净化床工艺处理农村生活污水生态补偿标准,通过额外成本、生态服务价值增量和环境成本测算方法,确定肥东县牌坊乡中心社区应用土壤净化床的生态补偿标准。结果表明,应用土壤净化床系统处理该地区农村生活污水所需理论生态补偿量为 $123.24 \text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中额外成本 $58.89 \text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,生态服务价值增量 $68.11 \text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,环境成本 $-3.76 \text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在土壤净化床运行过程中,农户可获得收益 $5.45 \text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,无需得到额外补偿;水源涵养区政府自行承担额外成本投入的 $58.89 \text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,下游地区政府需向水源涵养区政府补偿环境成本 $3.76 \text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;土壤净化床工艺以47.78%额外成本补偿量在消纳废弃物上作出50.84%的补偿量贡献,同时对生态环境服务价值和环境改善作出贡献;根据生态补偿测算,尽管农村生活污水处理投入的额外建设成本较高,但通过消纳废弃物产生的生态服务价值远远大于额外成本。在水源涵养区,特别是流域保护中,厌氧-土壤净化床工艺处理农村生活污水生态补偿标准能起到较好的生态示范作用,在水源涵养等生态敏感区需要地方政府给予相关政策支持,加强生态型农村污水处理系统的推广。

关键词:农村生活污水;土壤净化床;生态补偿标准;巢湖流域;生态服务价值

中图分类号:X505

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)05-0584-08

doi: 10.13254/j.jare.2018.0205

Ecological compensation standard assessment for the anaerobic tank-soil bed system in treating the rural domestic sewage in Chaohu Lake basin area

DING Jian, WU Xiao-fei, HUANG Zhi-ping*, ZHENG Hong-yan, MI Chang-hong, ZHENG Hong-jie

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: The extra costs, value of ecological compensation services and environmental costs were taken into account, which was to study the ecological compensation standard index system and assessment method for soil bed in the central community of Paifang Township, Feidong County as a case. The results showed that: Theoretically, the ecological compensation standard for the treatment of rural domestic sewage in Feidong County was $1.2324 \times 10^6 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and the extra costs, value of ecological compensation services and environmental costs were 5.889×10^5 , 6.811×10^5 , $-3.76 \times 10^4 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ respectively. During the operation of the soil bed system, farmers could obtain a return of $5.45 \times 10^4 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and need not extra compensation. The $5.889 \times 10^5 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ of extra costs would be undertaken by the government of water source conservation district, which should gain the compensation of $3.76 \times 10^4 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ of the environmental

收稿日期:2018-08-09 录用日期:2018-10-15

作者简介:丁 健(1984—),男,助理研究员,主要从事专业算法的具体设计和软件研发工作。E-mail:107586720@qq.com

*通信作者:黄治平 E-mail:bjhuangzp@126.com

基金项目:中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTCX2016015);水源涵养和生态保育清洁小流域技术综合集成应用推广项目(2017ZX07603-002)

Project supported: Science and Technology Innovation Project from the Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-XTCX2016015); Project of National Water Issues Chaohu Special(2017ZX07603-002)

costs from the government of downstream region; The soil bed technology made up 50.84% compensation share to eliminate the waste with the 47.78% extra costs compensation, which contributed to the increment of ecological environment service value and environment improvement at the same time. According to the ecological compensation calculation, although the extra construction investment of the rural domestic sewage treatment plant was relatively high, the value of ecological service for eliminating the waste water was far greater than the extra costs. Therefore, it can play a good ecological demonstration role in the water conservation area, especially in the basin protection area. And, the relevant policy need be offered to spread ecological rural sewage treatment system in the local governments of ecological sensitive areas such as water conservation.

Keywords: rural domestic sewage; soil bed system; ecological compensation standard; Chaohu Lake basin; ecological service value

农村生活污水处理应结合农村特点,注重污水及其所含有机物和营养物质的资源化利用,建立与农业生产相适应的农村污水治理系统,充分利用农村环境容量来消纳处理居民生活污水,构建适宜的农村污水生态治理体系^[1]。对水源涵养区农户进行生态补偿激励其转变生活方式、应用生态型污水处理技术、减轻生活污水中氮磷等污染物对流域水质的负面影响,对于振兴乡村、协调水源涵养区的环境与经济发展以及维护上游水环境安全具有重要意义,而如何量化地确定生态型污水处理技术的生态补偿标准,将在很大程度上影响当地政府和农户选择该技术的动力。

土地处理系统可满足公众健康和环境保护要求,且设计较简单,价格相对便宜,在美国的污水就地处理中较流行^[2],亦适于我国农村生活污水处理^[3-4]。土壤净化床作为土地处理技术之一,将污水处理和农作生产过程相衔接,农作过程即为污水处理系统的维护管理过程,作物生产收益补偿污水处理系统的运行费用,可解决农村生活污水处理系统运行费用和管理问题,保障农村污水处理系统的稳定运行。其原理为:以土壤的饱和区和不饱和区含水层作为物理化学和生物反应的媒介,通过作物吸收、土壤过滤、微生物降解等作用,降低污水中COD、N、P和SS等有机物和无机物的浓度,COD去除率一般在70%以上,最高达90%;TN去除率一般在50%以上,最高达80%; $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率一般在50%~70%;TP去除率一般在60%左右^[5]。

生态补偿实践中由于部分生态服务没有交易价格,计算生态收益存在主观性,大多以成本尤其是机会成本作为生态补偿标准确定的主要依据,而生态补偿为资源在利用方式或用途上发生利益冲突而引起的。生态补偿标准的测算是生态补偿研究的核心,目前国内外应用较多的生态补偿标准测算方法主要有机会成本法、费用分析法、条件价值评估法、生态系统服务价值评估法和水资源价值法等,确定好农村污水

处理工程的生态补偿标准,可以保障水源涵养区政府和农户的相关利益,增强水源涵养区政府和农户进行生态型农村污水处理建设的积极性,而任何一个单一方法均不能完全将生态补偿测算客观^[6-8]。赵桂慎等^[9]从额外价值、生态服务功能和环境成本三方面测算了有机板栗生态补偿标准,但各收益和成本承担主体不明确。

本文以巢湖流域肥东县牌坊乡中心社区应用土壤净化床技术处理生活污水为案例,从额外价值、生态服务功能和环境成本三方面测算应用土壤净化床的生态补偿标准,并对各分项的收益主体和成本承担方予以明确,以期土壤净化床技术的推广和水源涵养区的水环境安全提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究对象

巢湖位于长江流域下游左岸,长江中下游地区水环境问题已成为严重制约流域社会经济可持续发展的关键因素之一,为支撑“大湖名城、创新高地”发展战略,合肥市委、市政府把巢湖治理与保护摆上突出重要议事日程,提出了“治湖先治河、治河先治污、治污先治源”的治水方略和“因水施策、师法自然、系统保护、综合治理”的治水理念,修复流域生态,促进巢湖休养生息,2012年合肥市全面启动了环巢湖地区水环境治理与生态修复工程建设。

肥东县南濒巢湖,牌坊乡中心社区采用生态型污水处理工艺处理生活污水,通过地下管网收集居民生活污水,污水经过三级厌氧池预处理后进入土壤净化床进行处理,厌氧-土壤净化床工程位于牌坊乡中心社区千柳公园西,涉及人口约1500人,污水处理设计规模 $100\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,土壤净化床设计水力负荷为 $0.125\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,占地面积 600 m^2 。对土壤净化床系统进行连续18个月的监测,平均进水COD为 $192.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水COD低于 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均出水COD 45.98

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD平均去除率为74.57%;平均进水TN含量为 $36.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均出水TN含量低于 $11.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN的平均去除率超过68.94%;平均进水氨氮为 $17.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均出水氨氮低于 $7.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氮平均去除率56.30%;平均进水TP含量为 $2.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均出水TP低于 $0.78\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均去除率61.08%^[10],出水水质达《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B标准。

1.2 生态补偿测算方法

机会成本法一般指流域环境保护方为全流域生态全局放弃部分工农业发展而失去获得相应效益的机会^[11],土壤净化床系统主要利用农村废弃撂荒地,一般不将机会成本列入生态补偿范围。本文主要从应用土壤净化床系统处理农村生活污水的额外成本、生态服务价值和环境成本三方面来建立其生态补偿指标,并确定其生态补偿标准。

(1) 额外成本

额外成本主要包括建设成本、运行成本和推广成本,如公式(1)所示:

$$\Delta\text{EC}_i = C_c + C_o + C_s \quad (1)$$

式中: ΔEC_i (EC_i , Total of extra cost)为污水处理后和处理前的额外成本差值; C_c (Cost of construction)为污水处理系统建设成本; C_o (Cost of operation)为污水处理系统的运行成本; C_s (Cost of spreading)为污水处理系统在技术推广应用中的成本。

(2) 生态服务价值

生态系统服务是由生态系统提供的、能直接或间接提升人类福利的产品和服务,从人类角度简单阐释为人类从生态系统获得的所有好处,生态型生活污水处理系统与农业生产相衔接,可参照生态农业补偿方法,建立生态服务价值评价指标。根据千年生态系统评估(The millennium ecosystem assessment, MA),以及生态型污水处理系统提供服务的机制、类型和效用,可以把土壤净化床系统的生态服务功能分为供给功能、调节功能、支持功能和文化功能四大类^[12-13]。其中,供给功能主要是指污水处理系统上直接的农产品供给;调节功能包括固碳释氧、保持土壤养分、农田生态系统消纳废弃物价值等;支持功能包括提高生物多样性、减少土地废弃价值等;文化功能包括保留乡村文化遗址和自然文化遗产等^[9],见公式(2):

$$\Delta\text{ESV}_i = \Delta V_p + \Delta V_r + \Delta V_s + \Delta V_c \quad (2)$$

式中: ΔESV_i (ESV_i , Total value of eco-system)为污水处理后和处理前生态系统服务价值的差值,即应用生

态型污水处理系统的生态系统服务价值总值变化量,元 $\cdot\text{hm}^{-2}$; ΔV_p (Value of price)为供给价值变化量,元 $\cdot\text{hm}^{-2}$; ΔV_r (Value of regulation)为调节价值变化量,元 $\cdot\text{hm}^{-2}$; ΔV_s (Value of supporting)为支持价值变化量,元 $\cdot\text{hm}^{-2}$; ΔV_c (Value of culture)为文化价值变化量,元 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(3) 环境成本

水源涵养区对水体环境污染高度敏感,量化评估生态型污水处理系统的环境成本,对确定应用生态型污水系统处理生活污水的生态补偿标准很关键。本研究主要应用生命周期评价的方法对污水处理前后进行环境成本评估,主要采用 ReCiPe 2008 将各种污染物统一转化为人体健康的潜在危害值这一终点(End-point)指标,用伤害因子来计算伤残生命年(Disability adjusted life years, DALY),再将 DALY 用 人力资本法转化为环境成本^[9],见式(3)、式(4):

$$\text{DALY}_i = \text{Cd}_i \times \text{Dose}_i \quad (3)$$

$$\text{LCEC} = \text{PCNI} \times \sum \text{DALY}_i \quad (4)$$

式中: DALY_i 表示第*i*种污染物引起的 DALY; Cd_i 指第*i*种污染物的伤害因子($\text{DALY}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$); Dose_i 表示第*i*种污染物的生命周期排放量。LCEC(Life cycle environmental cost)表示生命周期环境成本,元 $\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; PCNI(Per capita national income)表示某年人均国民收入。

1.3 测算方法及说明

测算方法及说明见表1。根据表1的指标和涉及的补偿内容,建立土壤净化床系统处理农村生活污水的生态补偿计算模型,见式(5):

$$\text{EC}_i = \Delta\text{EC}_i + \Delta\text{ESV}_i + \Delta\text{LCEC} \quad (5)$$

式中: EC_i 为建设土壤净化床系统生态补偿标准; ΔLCEC 为建设土壤净化床系统的环境成本增减量。

2 结果与讨论

2.1 额外成本

(1) 建设成本

$100\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 厌氧-土壤净化床组合工艺工程建设成本0.49万元 $\cdot\text{t}^{-1}$,折合816.66万元 $\cdot\text{hm}^{-2}$,按不变价20年折算为每年408 333.33元 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。由于建设成本一次性投入较高,在额外成本核算时按照折旧年限处理所有污水的均值计算^[10]。

(2) 运行成本

$100\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 厌氧-土壤净化床组合工艺技术运行成本为每年2000元的清理厌氧池的人工养护费,再

表1 厌氧-土壤净化床工艺处理农村生活污水生态补偿标准测算方法及说明
Table 1 The algorithm and illustrations of ecological compensation standard for the anaerobic tank-soil bed system on treating rural domestic sewage

一级指标 Indicator I	二级指标 Indicator II	三级指标 Indicator III	评估方法 Evaluation methodology	计算公式 Formula	公式说明 Formula description
额外成本	建设成本		直接市场法	$C_c=C_{ic}/S$	C_c 为单位面积土壤净化床建设成本,元·hm ⁻² ; C_{ic} 为土壤净化床折算20年的年建设总成本(含厌氧系统成本),元·a ⁻¹ ; S 为土壤净化床总面积, hm ²
	运行成本		直接市场法	$C_o=C_{io}/S$	C_o 为单位面积土壤净化床运行成本,元·hm ⁻² ; C_{io} 为土壤净化床运行总成本(含厌氧系统运行成本),元·a ⁻¹ ; S 为土壤净化床总面积, hm ²
	推广成本		直接市场法	$C_s=(C_c+C_o)/3$	根据欧盟的经验,推广成本占总额外成本的25%~30%,本文取25%。
生态系统服务价值	供给功能	农产品供给	直接市场法	$V=\sum Y \times P-P_c$	V 为单位面积农作物产品价值,元·hm ⁻² ; Y 为农作物的单产, kg·hm ⁻² ; P 为农作物的市场价格,元·kg ⁻¹ ; P_c 为生产成本,元·hm ⁻²
	调节功能	固碳释氧	碳交易法	$V=1.63 \times NPP \times C$; $NPP=P/H \times (1-M)$	V 为作物固定CO ₂ 的价值,元·hm ⁻² ; NPP 为作物的净初级生产量(可实测), C 为CO ₂ 的交易价格,采用国家发改委规定的碳交易保护价80元·t ⁻¹ ; P 为作物的经济产量; H 为作物的经济系数,取值为0.25; M 为作物的含水率
		保持土壤养分	直接市场法	$V_a=Sh \times (C_N \times P_N + C_P \times P_P + C_K \times P_K)$	V_a 为保持土壤中养分价值,元·hm ⁻² ·a ⁻¹ ; Sh 为研究区单位面积农田土壤保持量,为130 t·hm ⁻² [14]; C_N 、 C_P 、 C_K 分别为单位面积土壤速效氮、磷、钾含量,土壤净化床处理系统运行1年后土壤为0.95、16.84、152.95 mg·kg ⁻¹ ,原土壤为0.78、16.93、187.30 mg·kg ⁻¹ (0~50 cm); P_N 、 P_P 、 P_K 分别为氮、磷、钾市场价格(以尿素2300元·t ⁻¹ 、过磷酸钙1400元·t ⁻¹ 、硫酸钾2300元·t ⁻¹ 再折纯氮、P ₂ O ₅ 和K ₂ O计算),分别为4 928.22、2 307.95、8139.10元·t ⁻¹
	支持功能	农田生态系统消纳废弃物	替代成本法	$V_w=W \times C$	V_w 为农田生态系统消纳废弃物价值; W 为农业生产中处理污水量; C 为城市生活污水处理成本,平均为1.03元·t ⁻¹ [15]
		提高生物多样性	替代成本法	$\Delta V_s=G \times C_p$	ΔV_s 为单位面积农药减量化; G 为常规农业中所用农药的价格; C_p 为单位面积常规农业中的农药用量
		减少土地废弃价值	机会成本法	$V_b=Sh \times B \div (H \times 10\,000 \times \rho)$	V_b 为减少土地废弃的经济效益; Sh 为土壤保持量; B 为单位土地年平均收益; H 为表土厚度,取值0.50 m; ρ 为土壤容重,取值1.30 g·cm ⁻³
	文化功能	减轻泥沙淤积	影子工程法	$V_c=Sh/\rho \times 24\% \times C$	V_c 为减轻泥沙淤积的经济效益; Sh 为土壤保持量; 24%为全国侵蚀的泥沙24%淤积于江河、水库、湖泊; C 为1 m ³ 库容的水库建设费用,取0.67元[16]。
		保留乡村文化遗址和自然文化遗产	旅行费用法	$V=I/R$	V 为保留乡村文化遗址和自然文化遗产的价值,元·a ⁻¹ ; I 为旅游的直接收入; R 为旅游收入占社会综合收入的比例
环境成本			生命周期评价法	$DALY_i=Cd_i \times Dose_i$; $LCEC=PCNI \times \sum DALY_i$	$DALY_i$ 表示第 <i>i</i> 种污染物引起的DALY; Cd_i 指第 <i>i</i> 种污染物的伤害因子(DALY·kg ⁻¹ ·a ⁻¹); $Dose_i$ 表示第 <i>i</i> 种污染物的生命周期排放量; $PCNI$ 表示2017年我国人均可支配收入(25 974元)

无其他运行费用,年运行成本为0.06元·t⁻¹[10],折合为每年33 333.33元·hm⁻²。

(3)推广成本

年推广成本为(408 333.33+33 333.33)/3=147 222.22元·hm⁻²。

2.2 生态服务价值

(1)供给功能

100 m³·d⁻¹土壤净化床占地面积600 m²,未用于污水处理系统时为村头撂荒地,现在农户每年在土壤

净化床污水处理系统上种植辣椒、黄瓜、苦瓜、油菜、白萝卜等,1年种植2茬。以1茬青椒和1茬白萝卜轮作为例,青椒产量7500 kg·hm⁻²,600 m²土壤净化床产量450 kg,批发价2.00元·kg⁻¹,每茬收益0.09万元;白萝卜产量37 500 kg·hm⁻²,600 m²土壤净化床产量2250 kg,批发价1.00元·kg⁻¹,每茬收益0.23万元,年收益约0.32万元,年收益折合53 333.33元·hm⁻²[10]。

(2)调节功能

固碳释氧:该地块在改造为土壤净化床系统前后

净初级生产量相当,因此该部分功能忽略不计。

水土保持:土壤净化床的修建减少了水土流失,增加了土壤养分,根据表1参数,计算其养分增加价值为 $72.54 \text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

消纳废弃物:以处理农村生活污水核算,根据表1参数,土壤净化床消纳废弃物价值为 $626\,583.33 \text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(3)支持功能

提高生物多样性价值:杂草与蔬菜种植在提高生物多样性方面无明显差异,土壤净化床的该部分功能暂忽略不计。

减少土地废弃价值:根据表1参数,可计算出土壤净化床减少土地废弃价值为 $1\,066.67 \text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

减少泥沙淤积价值:根据表1参数,可计算出土壤净化床减少泥沙淤积价值为 $16.08 \text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(4)文化功能

通过土壤净化床对生活污水的处理,牌坊中心村脏乱差的村容村貌彻底得到了改变,以前的恶臭地表水体变得清澈,生态环境得到极大改善,生态文明建设也得到加强。尽管该污水处理工程对中心村的文化功能为正反馈作用,但由于其体量小,文化功能暂忽略不计。

2.3 环境成本

根据文献[9,17-18]和表1参数,将环境影响划分为土壤、大气和水体3类,由于生活污水特征污染物主要为COD、氮、磷,一般不涉及重金属和农药等,其对大气影响的响应主要有 CH_4 和 N_2O ,由于硝态氮、铵态氮及可溶性磷酸盐主要存在于水体中,主要考虑对水体环境影响的响应,暂不考虑其他特征污染物对土壤环境的响应,具体核算见表2。其中 CH_4 的计算以 $0.044 \text{g} \text{CH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{COD}$ 计^[9],其他污染产生剂量分析参考文献[17],见表3。由表2可知,处理前农村生活污水产生的环境成本为 $57\,241.32 \text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,应用土壤净化床后生活污水产生的环境成本为 $19\,648.63 \text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,建设土壤净化床后环境成本的减少量为 $37\,592.69 \text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,减幅达65.67%。

2.4 测算结果

测算结果见表4。从表4可知,土壤净化床系统处理肥东地区农村生活污水所需理论生态补偿量为 $123.24 \text{万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中额外成本 $58.89 \text{万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,生态服务价值增量 $68.11 \text{万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,环境成本 $-3.76 \text{万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

额外成本占整个生态补偿的47.78%,其中建设

成本占整个生态补偿的33.13%,运行成本占整个生态补偿的2.70%;生态服务价值增量占整个生态补偿55.27%,消纳废弃物价值占整个生态补偿50.84%,占生态服务价值增量的91.99%;环境成本占整个生态补偿的-3.05%,说明应用土壤净化床后环境成本得到降低。由此可看出,土壤净化床工艺尽管建设成本相对较高,但运行成本较低,以47.78%额外成本补偿量在消纳废弃物上作出50.84%的补偿量贡献,同时对生态环境服务价值和环境改善作出贡献,在水源涵养区,特别是流域保护中能起到较好的生态示范作用,值得在农村地区进行推广应用。

为了更好地确定生态补偿的成本承担主体或受益主体,分别对各分项成本或收益分类账户进行分担,见表4。对于农产品供给而言,其收益一般归农户所有,农户主要在生态系统服务价值的农产品供给、保持土壤养分和减少土地废弃价值取得收益,其收益为 $5.45 \text{万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,这也使得农户愿意将废弃荒地用作生态型生活污水处理的土地,减少了农村征地的阻力,无需对农户进行额外补偿。

由于农村生活污水处理系统为公益性事业,其建设一般由政府投资,因此政府主要是额外成本的承担方,其受益主要在于生态系统服务价值中的调节功能中的消纳废弃物和固碳释氧、支持功能中的提高生物多样性和减轻泥沙淤积、文化功能以及减轻了当地的环境成本,其中消纳废弃物产生的价值 $62.66 \text{万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,高于额外成本 $58.89 \text{万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,有效解决了水源涵养区农村生活污水对下游的影响,对当地生态环境的改善也起到积极的影响。由于生态补偿是解决流域水污染问题的有效措施之一,在确定了上游地区生态环境保护成本等生态补偿标准的核心内容基础上,则下游城市应该对上游地区给予的生态补偿量就基本得到确定^[11]。土壤净化床设施主要通过去除污水中COD、氮、磷对下游做贡献,可以考虑由下游地区政府对水源涵养区政府环境成本减少的部分进行补偿,即下游地区政府需向水源涵养区政府补偿环境成本 $3.76 \text{万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,而水源涵养区政府自行承担额外成本投入的 $58.89 \text{万元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。为便于理解,对上游政府、下游政府、农户和环境的相关利益主体进行图示,见图1。

3 结论

(1)通过额外成本、生态服务价值增量和环境成本测算出应用土壤净化床系统处理肥东地区农村生

表2 土壤净化床系统处理生活污水环境成本核算

Table 2 The environmental cost of treating rural sewage by soil bed system

分类 账户 Categor- ories	污染物 类型 Pollutants/ kg·t ⁻¹	危害类型 Type of hurt	影响强度 (以伤残年计) Impact intensity/ a·kg ⁻¹	是否 响应 Response	影响剂量 Impact dose/kg		伤残年 DALYs/a		环境成本 The environmental cost/ 元·hm ⁻² ·a ⁻¹	
					处理后 After treating	处理前 Before treating	处理后 After treating	处理前 Before treating	处理后 After treating	处理前 Before treating
大气	CO	光化学氧化物	1.78×10 ⁻⁹							
	CO ₂	气候变化	1.40×10 ⁻⁶							
	CH ₄	气候变化	3.50×10 ⁻⁵	√	1.23×10 ³	5.15×10 ³	0.04	0.18	1.12×10 ³	4.68×10 ³
	SO ₂	微粒物质	5.20×10 ⁻⁵							
	NH ₃	酸雨,呼吸系统	8.32×10 ⁻⁵							
	N ₂ O	温室效应,气候 变化	4.17×10 ⁻⁴	√	1.36×10 ³	4.41×10 ³	0.57	1.84	1.47×10 ⁴	4.77×10 ⁴
	NO _x	温室效应,呼吸 系统	5.72×10 ⁻⁵							
土壤	农药(空气)	人体毒性	4.34×10 ⁻⁶							
	农药(土壤)	人体毒性	1.58×10 ⁻⁶							
	As	人体毒性	1.04×10 ⁻²							
	Cu	人体毒性	7.33×10 ⁻⁶							
	Zn	人体毒性	3.09×10 ⁻⁴							
	Cd	人体毒性	6.66×10 ⁻²							
	Pb	人体毒性	4.20×10 ⁻⁴							
	硝酸盐	地下水污染, 盐渍化	4.90×10 ⁻⁵							
	硫酸盐	土壤酸化, 土壤板结	1.70×10 ⁻⁶							
	Cd	重金属污染	6.09×10 ⁻⁴							
水体	农药(水体)	人体毒性	7.76×10 ⁻⁶							
	硝态氮	富营养化, 致癌效应	3.05×10 ⁻⁵	√	2.42×10 ³	0	7.37×10 ⁻²	0	1.91×10 ³	0
	铵态氮	富营养化	1.67×10 ⁻⁵	√	4.36×10 ³	1.09×10 ⁴	7.28×10 ⁻²	0.18	1.89×10 ³	4.72×10 ³
	磷酸盐	富营养化	3.60×10 ⁻⁶	√	4.75×10 ²	1.25×10 ³	1.71×10 ⁻³	4.51×10 ⁻³	44.40	1.17×10 ²
小计	DALY/a						0.76	2.20		
小计	LCEC/ 元·hm ⁻² ·a ⁻¹								19 648.63	57 241.32
合计	LCEC/ 元·hm ⁻² ·a ⁻¹									-37 592.69

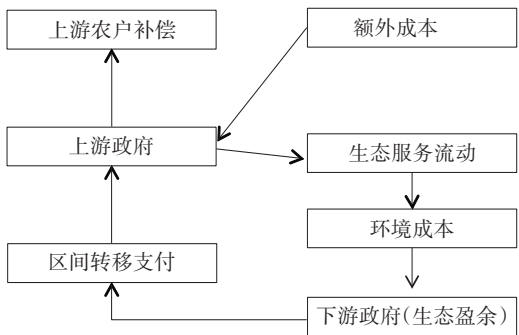


图1 上游政府、下游政府与农户间示意图

Figure 1 Diagram of the relationship among upstream government, downstream government and farmers

生活污水所需理论生态补偿量为 123.24 万元·hm⁻²·a⁻¹, 其中额外成本 58.89 万元·hm⁻²·a⁻¹, 生态服务价值增量 68.11 万元·hm⁻²·a⁻¹, 环境成本 -3.76 万元·hm⁻²·a⁻¹。在土壤净化床运行过程中, 农户可获得收益 5.45 万元·hm⁻²·a⁻¹, 无需得到额外补偿; 水源涵养区政府自行承担额外成本投入的 58.89 万元·hm⁻²·a⁻¹, 下游地区政府需向水源涵养区政府补偿环境成本 3.76 万元·hm⁻²·a⁻¹。

(2) 土壤净化床工艺以 47.78% 额外成本补偿量在消纳废弃物上作出 50.84% 的补偿量贡献, 同时对生态服务价值和环境改善作出贡献, 因此在水源涵养

表3 营养物质流向和污染物产生剂量估算

Table 3 The flow of nutrients and contamination dose

化肥养分运移转化 Transfer and transformation of fertilizer nutrient	系数 Coefficient	流向 Flow direction	剂量分析 Contamination dose
N 肥	35%	作物利用	作物利用率20%~50%,平均35%
	20%	大气流失	大气流失率10%~30%,平均20%
	34.50%	土壤残留	流向土壤约30%~40%,平均土壤残留率34.5%
	0.50%	地下淋溶	流向土壤约30%~40%,平均地下淋溶率0.5%
	10%	地表径流	流向土壤约30%~40%,平均地表径流率10%
P 肥	11%	作物利用	植物吸收7%~15%,平均11%
	5%	大气扩散	
	65%	土壤吸附固定	吸附固定55%~75%,平均65%
	1%	地下水流失	<1%
	7.50%	地表径流	5%~10%

表4 废弃荒地土壤净化床生态服务价值(元·hm⁻²·a⁻¹)Table 4 The ecological environment service value of uncultivated land and soil bed system(yuan·hm⁻²·a⁻¹)

一级指标 Indicator I	二级指标 Indicator II	分类账户 Indicator III	土壤净化床系统 Soil bed system	废弃荒地 Uncultivated land	补偿测算 Value of ecological compensation	成本承担主体或受益主体 Cost charged or benefit body		
						政府 Government	农户 Farmer	
生态系统 服务价值	供给功能	额外成本	运行成本	33 333.33	0	33 333.33	√	
			建设成本	408 333.33	0	408 333.33	√	
			推广成本	147 222.22	0	147 222.22	√	
			额外成本小计	588 888.88	0	588 888.88	588 888.88	0
	调节功能	农产品供给	53 333.33	0	53 333.33			√
		固碳释氧	—	—	—	√		
		保持土壤养分	775.52	702.98	72.54			√
		农田生态系统消纳 废弃物	626 583.33	0	626 583.33	√		
	支持功能	提高生物多样性	—	—	—	√		
		减少土地废弃价值	1 066.67	0	1 066.67			√
减轻泥沙淤积价值		16.08	0	16.08	√			
文化功能		保留乡村文化遗址和 自然文化遗产	—	—	—	√		
环境成本		生态系统服务价值小计	681 774.93	702.98	681 071.95	626 601.41	54 472.54	
		暂主要考虑去除污水中 COD、氮和磷	19 648.63	57 241.32	-37 592.69	-37 592.69	0	
合计					1 232 368.14	1 177 897.60	54 472.54	

区,特别是流域保护中能起到较好的生态示范作用。

(3)根据生态补偿测算,尽管农村生活污水处理投入的额外建设成本较高,但在消纳废弃物的过程中产生的生态服务价值远远大于额外成本,因此在水源涵养等生态敏感区需要地方政府给予相关政策支持,加强生态型农村污水处理系统的推广。

参考文献:

[1] 刘俊新.因地制宜,构建适宜的农村污水治理体系[J].给水排水,

2017,43(6):1-3.

LIU Jun-xin. According to local conditions, build the rural sewage treatment suitable system[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(6):1-3.

[2] 田泽源,吴德礼,张亚雷.美国分散型生活污水治理的经验与启示[J].给水排水,2017,43(5):52-57.

TIAN Ze-yuan, WU De-li, ZHANG Ya-lei. Experience and enlightenment of decentralized domestic sewage treatment in the United States [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(5):52-57.

[3] 张曼雪,邓玉,倪福全.农村生活污水处理技术研究进展[J].水处理技术,2017,43(6):5-10.

- ZHANG Man-xue, DENG Yu, NI Fu-quan. Research progress of rural domestic sewage treatment technology[J]. *Technology of Water Treatment*, 2017, 43(6):5-10.
- [4] 刘雪美. 我国农村生活污水处理现状及展望[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(12):58-60.
- LIU Xue-mei. Treatment status and prospect of rural domestic sewage in China[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2017, 45(12):58-60.
- [5] 黄治平, 龚明波, 张克强, 等. 土壤净化床系统处理巢湖农村生活污水应用研究[J]. 水处理技术, 2013, 39(6):105-108, 118.
- HUANG Zhi-ping, GONG Ming-bo, ZHANG Ke-qiang, et al. Study on the effect of the soil bed system in treating the rural domestic sewage in Chaohu Lake basin area[J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(6):105-108, 118.
- [6] 常书铭. 汾河水库上游水源涵养区水生态补偿标准研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(9):56-58.
- CHANG Shu-ming. Study on the water ecological compensation standard of upstream of Fenhe reservoir[J]. *Yellow River*, 2016, 38(9):56-58.
- [7] 李国平, 李 潇. 国家重点生态功能区的生态补偿标准——支付额度与调整目标[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2017, 37(2):1-9.
- LI Guo-ping, LI Xiao. Ecological compensation standard, payment amount and adjustment target in national key ecological function areas [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences)*, 2017, 37(2):1-9.
- [8] 谭秋成. 资源的价值及生态补偿标准和方式——资兴东江湖案例[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 24(12):6-13.
- TAN Qiu-cheng. Resource value and eco-compensation standard and ways: A case of Dongjiang reservoir in Zixing City[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 24(12):6-13.
- [9] 赵桂慎, 李彩恋, 彭 澎, 等. 生态敏感区有机板栗生态补偿标准及其估算——以北京市密云水库库区为例[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(6):50-56.
- ZHAO Gui-shen, LI Cai-lian, PENG Peng, et al. Ecological compensation standard assessment for organic chestnut production in ecological sensitive areas: A case study on Miyun reservoir areas[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(6):50-56.
- [10] 黄治平, 杨大川, 朱昌雄, 等. 厌氧-土壤净化床工艺处理农村生活污水的工程应用及运行成本分析研究[J]. 环境保护前沿, 2018, 8(4):302-307.
- HUANG Zhi-ping, YANG Da-chuan, ZHU Chang-xiong, et al. The engineering application and operation cost analysis of the anaerobic tank-soil bed system in treating the rural domestic sewage in Chaohu Lake basin area[J]. *Advances in Environmental Protection*, 2018, 8(4):302-307.
- [11] 林秀珠, 李小斌, 李家兵, 等. 基于机会成本和生态系统服务价值的闽江流域生态补偿标准研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2):314-319.
- LIN Xiu-zhu, LI Xiao-bin, LI Jia-bing, et al. Research on ecological compensation standard in Minjiang River basin based on opportunity cost and ecosystem service values[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2):314-319.
- [12] Van Jaarsveld A S, Biggs R, Scholes R J, et al. Measuring conditions and trends in ecosystem services at multiple scales: The Southern African Millennium Ecosystem Assessment (SAfMA) Experience [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 2005, 360(1454):425-441.
- [13] Millennium Assessment (MA). Ecosystems and human well-being: A framework for assessment[M]. Washington: Island Press, 2003:56-70.
- [14] 陈 锐. 新安江上游生态系统服务综合评估及管理应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014.
- CHEN Rui. Study on management and application of ecosystem services and comprehensive evaluation of Xin'anjiang River upstream [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [15] 谭 雪, 石 磊, 马 中, 等. 基于污水处理厂运营成本的污水处理——基于全国227个污水处理厂样本估算[J]. 中国环境科学, 2015, 35(12):3833-3840.
- TAN Xue, SHI Lei, Ma Zhong, et al. Institutional analysis of sewage treatment charge based on operating cost of sewage treatment plant: An empirical research of 227 samples in China[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(12):3833-3840.
- [16] 孙新章, 谢高地, 陈升魁, 等. 中国农田生产系统土壤保持功能及其经济价值[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4):156-159.
- SUN Xin-zhang, XIE Gao-di, CHEN Sheng-kui, et al. Services for soil conservation and its monetary value of Chinese cropping system [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4):156-159.
- [17] 赖 力, 黄贤金, 王 辉, 等. 中国化肥施用的环境成本估算[J]. 土壤学报, 2009, 46(1):63-69.
- LAI Li, HUANG Xian-jin, WANG Hui, et al. Estimation of environmental costs of chemical fertilization utilization in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1):63-69.
- [18] Goedkoop M, Spriensma R. The eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology annex[R]. 2001.
- [19] 蔡博峰, 高庆先, 李中华, 等. 中国污水处理厂甲烷排放研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(12):3810-3816.
- CAI Bo-feng, GAO Qing-xian, LI Zhong-hua, et al. Estimation of methane emissions of wastewater treatment plants in China[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(12):3810-3816.