

我国农村生活污水污染排放及环境治理效率

王俊能¹, 赵学涛², 蔡楠^{1*}, 陈敏敏³, 汪浩¹

1.生态环境部华南环境科学研究所, 广东 广州 510530

2.生态环境部环境规划院, 北京 100012

3.中国环境监测总站, 北京 100012

摘要: 当前我国农村生活污水治理形势依然严峻. 利用第二次全国污染源普查成果, 分析了我国 2017 年农村生活污水排放情况, 并基于熵值法和数据包络分析(DEA) 模型从技术效率、经济效率两个角度对治理效率进行评价. 结果表明: ①我国农村生活污水中 COD 排放量约占生活源排放总量的 50.8%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP 排放量分别占生活源排放总量的 35.0%、30.5%、38.7%, 污水及污染物排放去向以直排入水体、直排入农田和其他途径为主, 三者占 80% 以上. ②我国沿海用水量较大地区的水冲式厕所比例超过 80%, 且农村生活污水有效治理比例仅为 11.0%, 导致我国农村生活污水治理的技术效率仅为 8.6%, 且区域差异较大, 其中有 23 个省份小于 10%, 技术效率普遍较低. ③相比浙江省、上海市、山西省、内蒙古自治区、青海省、西藏自治区等地(经济效率均为 1), 我国其他省份农村生活污水治理的经济效率有很大改善空间. 农村生活污水中人均 COD 排放强度、人均 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放强度与农村居民人均可支配收入之间的环境库兹涅茨曲线(EKC) 均呈一定的倒“U”型关系, 人均 TN 排放强度、人均 TP 排放强度与农村居民人均可支配收入之间的 EKC 则均呈“N”型特征, 有波动上升趋势. 研究显示, 我国农村生活污水治理效率存在较大的提升空间, 与城镇相比, 农村的环境保护基础设施建设还比较落后, 应以源头减量、分类处理、循环利用为导向, 加强统筹规划, 梯次推进, 加快提升我国农村污水治理水平.

关键词: 治理效率; 数据包络分析(DEA); 熵值法; 环境库兹涅茨曲线(EKC); 农村生活污水

中图分类号: X323; F323

文章编号: 1001-6929(2020) 12-2665-10

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.11.08

Pollution Discharge and Environmental Treatment Efficiency of Rural Domestic Sewage in China

WANG Junneng¹, ZHAO Xuetao², CAI Nan^{1*}, CHEN Minmin³, WANG Hao¹

1.South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510530, China

2.Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China

3.China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China

Abstract: At present, the situation of rural domestic sewage treatment in China is still severe. Based on the results of the second national census on pollution sources, the situation of rural domestic sewage discharge in 2017 was analyzed and the technical efficiency and economic efficiency of rural domestic sewage pollutant treatment were evaluated with the entropy method and data envelopment analysis (DEA) model. The results showed that COD discharge of rural domestic sewage accounted for 50.8% of the total domestic sewage discharge, while $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP accounted for 35.0%, 30.5% and 38.7% respectively. More than 80% of the pollutants were discharged directly into water bodies, farmland and other ways. Because the effective treatment ratio of rural domestic sewage was only 11.0%, and the areas with more than 80% of flush toilets were mainly located in the coastal areas with high water consumption, the average technical efficiency of rural domestic sewage treatment in China was only 8.6%, and the regional differences among provinces were significant, of which 23 provinces were less than 10%, and the technical efficiency was generally low. Compared with Zhejiang Province, Shanghai City, Shanxi Province, Inner Mongolia Autonomous Region, Qinghai Province and Tibet Autonomous Region, where economic efficiency was 1, the economic efficiency of rural domestic sewage treatment in other provinces of China still had great room for improvement. The Environmental Kuznets Curve (EKC) between the per capita pollutant discharge intensity of COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ in rural

收稿日期: 2020-08-10 修订日期: 2020-10-31

作者简介: 王俊能(1984-) 男, 广东揭阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事水环境科学研究, wangjunneng@scies.org.

* 责任作者: 蔡楠(1966-) 女, 广东汕头人, 研究员, 硕士, 主要从事环境监测研究, cainan@scies.org

基金项目: 第二次全国污染源普查项目(No.144028000000175027)

Supported by Second National Census on Pollution Sources, China (No.144028000000175027)

domestic sewage and the per capita disposable income of rural residents showed a certain inverted-U trend, while the EKC between the per capita pollutant discharge intensity of TN and TP in rural domestic sewage and the per capita disposable income of rural residents showed a N shape with a fluctuating upward trend. This study shows that there is a great potential for improving the treatment efficiency of domestic sewage in rural China. Compared with the urban areas, the rural areas still lag behind in terms of infrastructure for environmental protection, rural sewage treatment must be improved rapidly in the coming years.

Keywords: treatment efficiency; data envelopment analysis (DEA); entropy method; Environmental Kuznets Curve (EKC); rural domestic sewage

农村生活污水具有产生量大、范围广、处理率低、氮磷排放负荷高等特点,与农村饮用水源安全及环境质量密切相关^[1-2]。农村生活污水主要由厨房炊事、洗漱、洗涤和洗浴等活动产生的污水(俗称“灰水”)和水冲式厕所产生的冲厕污水(俗称“黑水”)组成。目前我国大部分农村污水仅通过简易的沟渠或经化粪池简单处理后就直接排入河道和农田,对周边环境造成污染^[3-4]。自 2008 年以来,农村环境综合整治专项虽然取得一定成效,但农村生活污水治理设施不足、治理水平地域分布不均、资金筹措力度不够等问题仍是农村生活污水治理的短板^[5-6]。

由于长期缺乏对我国农村生活污水处理现状的全面调查,大部分学者在农村生活污水治理效率评价方面主要集中在流域或地区尺度上^[7-8],采用数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)模型进行评价,并用 Tobit 回归模型分析其影响因素^[9-13]。从指标的选取上看,这些方法主要用于测算治理的经济效率,且指标也并非农村生活污水污染物排放指标,而是如卫生厕所普及率、乡镇环保机构人数、农村改水投资、农村自来水比重、水土流失治理面积等间接指标^[11-13],因此难以直接、准确反映农村生活污水的治理效率。为进一步揭示环境质量和经济增长之间的演进关系,国内外学者多借助环境库兹涅茨曲线(Environmental Kuznets Curve, EKC)开展分析,且多数研究主要在工业污染排放领域,而农村领域则集中在农业环境问题与农业经济增长关系的 EKC 研究上^[14-17]。此外,在多指标综合评价中,常运用熵值法进行指标赋权^[18-19],该方法根据各项指标观测值的信息熵来测算指标权重,信息熵越小,其信息的效用值越大,指标的权重也相应越大。为此,该研究将利用第二次全国污染源普查成果,分析我国农村生活污水污染排放情况,并基于熵值法和 DEA 模型从技术效率、经济效率两个角度对治理效率进行评价,以期为我国实行分区控制、分类指导的农村环境管理,全面提升我国农村污水治理水平,改善农村环境质量提供决策依据。

1 研究方法

1.1 熵值法

该研究采用熵值法确定 COD、NH₃-N、TN 和 TP 去除率的权重,再将其加权成一个综合技术指标,以反映农村生活污水治理的综合技术效率^[18-19]。首先构建 m 个评价对象 n 个评价指标的决策矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于该研究 4 项评价指标均为 $[0, 1]$ 的污染物去除率,因此无需进行无量纲化处理。计算第 j 个指标的熵值(H_j)为

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (P_{ij} \ln P_{ij}) \quad (2)$$

$$P_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij} \quad (3)$$

式中 r_{ij} 为第 i 个省份第 j 项指标的去除率, P_{ij} 为第 j 项指标下第 i 个评价对象的贡献度。评价指标权重为

$$w_j = d_j / \sum_{j=1}^n d_j \quad (4)$$

式中: w_j 为评价指标权重; d_j 为第 j 项指标下各评价对象贡献度的一致性程度,即 $d_j = 1 - H_j$ 。

1.2 DEA 模型

DEA 模型是以相对效率概念为基础,评价同一类型的组织或部门在多投入、多产出的决策单元下是否有效的非参数前沿效率分析方法^[20]。相对效率在 $[0, 1]$ 区间内分布,处于效率前沿的决策单元的效率值为 1。为描述我国农村生活污水治理的经济效率,该研究将我国 31 个省(自治区、直辖市)看作决策单元,选取 COD、NH₃-N、TN 和 TP 人均排放强度作为投入(负产出),农村居民人均可支配收入作为产出,利用规模报酬可变(VRS)条件下的 BCC 投入导向型效率模型进行综合分析^[9]。该模型可表示为

$$\begin{aligned} & \min \theta \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_{i=1}^m X_i \lambda_i + S^- = \theta X_0 \\ \sum_{i=1}^m Y_i \lambda_i - S^+ = Y_0 \\ \sum_{i=1}^m \lambda_i = 1, \lambda_i \geq 0 \\ S^- \geq 0, S^+ \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: s.t.表示公式的约束条件; X_i 为第 i 个省份的投入向量(即 COD、NH₃-N、TN 和 TP 人均排放强度); Y_i 为第 i 个省份的产出向量(即农村居民人均可支配收入); X_0 、 Y_0 分别为待评价省份的投入、产出向量; λ_i 为第 i 个省份的权重向量; S^- 为投入松弛变量; S^+ 为产出松弛变量; θ 为效率值,若 $\theta < 1$,则决策单元非 DEA 有效。

1.3 EKC

国内外对经济增长与环境质量演变的 EKC 假说进行激烈的讨论,一些学者对 EKC 假说提出了质疑,认为我国的 EKC 并不是必然存在的,不同环境污染指标与经济的关系存在显著差异^[21-23]。因此,EKC 除了存在倒“U”型等曲线特征外,还可能存在“N”型、倒“N”型等其他三次曲线关系。为此,该研究选用三次多项式计量模型进行拟合。

$$X_{ij} = \beta_0 + \beta_1 Y_i + \beta_2 Y_i^2 + \beta_3 Y_i^3 + \varepsilon \quad (6)$$

式中 X_{ij} 为第 i 个省份的第 j 个指标的人均排放强度, β_0 、 β_1 、 β_2 、 β_3 为模型参数, ε 为随机误差项。模型参数 β_1 、 β_2 、 β_3 具有重要意义,根据其取值的不同可反映环境质量状况与经济发展之间关系。当 $\beta_1 \neq 0$ 、 $\beta_2 = 0$ 、

$\beta_3 = 0$ 时,环境状况与经济发展之间呈线形关系;当 $\beta_1 > 0$ 、 $\beta_2 < 0$ 、 $\beta_3 = 0$ 时,环境状况与经济发展之间符合倒“U”型 EKC;当 $\beta_1 < 0$ 、 $\beta_2 > 0$ 、 $\beta_3 = 0$ 时,环境状况与经济发展之间呈“U”型曲线关系;当 $\beta_1 > 0$ 、 $\beta_2 < 0$ 、 $\beta_3 > 0$ 则环境状况与经济发展之间呈“N”型曲线;当 $\beta_1 < 0$ 、 $\beta_2 > 0$ 、 $\beta_3 < 0$,则环境状况与经济发展之间呈倒“N”型曲线。

1.4 数据来源

该研究基于 2017 年 31 个省(自治区、直辖市)的统计调查数据,其中农村常住户数、农村常住人口、农村厕所类型、粪尿处理情况、生活污水排放去向、污染物产生与排放量等基础数据来自第二次全国污染源普查成果,农村居民人均可支配收入来源于 2018 年《中国统计年鉴》。

2 结果与讨论

2.1 农村生活污水污染排放

2.1.1 污水排放情况

农村生活污水排放量与村庄饮水条件、卫生设施水平、污水管网系统完善程度以及城乡结构等因素相关。于法稳等^[24]按照生活用水量的 40%~90% 计算农村生活污水排放量,估算出我国 2016 年农村生活污水排放量在 $55.67 \times 10^8 \sim 125.26 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间。而根据第二次全国污染源普查数据,全国农村生活污水排放量为 $75.91 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中广东省排放量最大,为 $7.15 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国的 9.4%(见图 1)。

2.1.2 污染物排放情况

根据第二次全国污染源普查数据,我国农村生活污水 COD 排放量占生活源排放总量的 50.8%,NH₃-N、TN 和 TP 排放量分别占生活源排放总量的 35.0%、

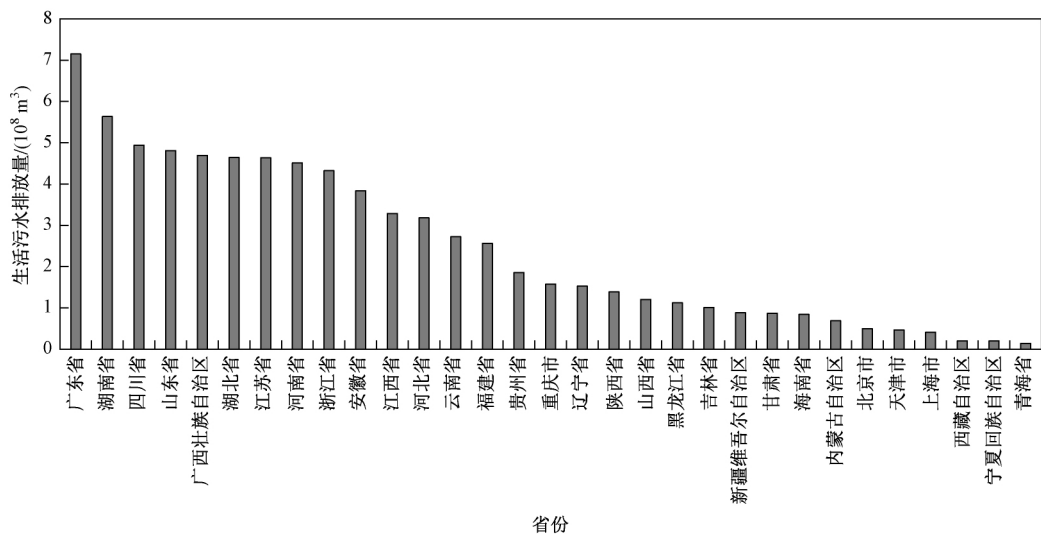


图 1 我国各省份农村生活污水排放情况

Fig.1 Rural domestic sewage discharge in China

30.5%、38.7%。由表 1 可见,农村生活污水普遍缺乏有效治理,各项污染物去除率不足 11%,远低于城镇(超过 50%)。因为城镇污水管网较为完善,城镇污水及其污染物收集率高,大部分排向集中式污水处理厂,而城镇集中式污水处理厂平均去除率要大幅高于农村各类污染治理措施。相比之下,尽管农村无水冲式厕所比例较高,粪尿中的氮磷并未全部排入环境,但由于农村缺少治理设施以及存在管网不完善等因素^[25],导致农村环境质量改善缓慢,农村生活污水的处理形势依然很严峻。因此,“十四五”期间应统筹城乡、分区管控,加大农村环境治理投入,实现从点源为主转变为点源、面源并举,从以城镇为主转变为城乡并重的格局,全面提升我国农村污水治理水平,改善农村环境质量。

表 1 我国城乡生活污水污染排放情况
Table 1 Discharge of domestic sewage pollutants in urban and rural areas in China

指标	农村		城镇	
	排放量/(10 ⁴ t)	去除率/%	排放量/(10 ⁴ t)	去除率/%
COD	499.62	8.7	483.82	66.7
NH ₃ -N	24.50	10.7	45.41	70.2
TN	44.65	7.9	101.87	50.9
TP	3.69	7.7	5.85	68.1

2.1.3 排放去向

根据第二次全国污染源普查数据,我国农村生活污水及污染物的排放去向占比大小依次为其他途径>直排入水体>直排入农田>进入农村集中式处理设施>进入市政管网>排入户用污水处理设备(见图 2)。个别指标因厕所类型、粪污处理情况的差异稍有差别,如 COD 排放去向中直排入农田>直排入水体,

NH₃-N 排放去向中直排入水体>其他途径。总体上,我国农村生活污水及污染物排放去向以直排入水体、直排入农田和其他途径为主,三者占 80%以上。根据 2016 年《中国城乡建设统计年鉴》,2016 年年末全国开展生活污水处理的行政村比例仅为 20%。因此,我国农村生活污水整体处理水平较低,污水治理仍有待规范化^[26],存在很大的减排潜力。

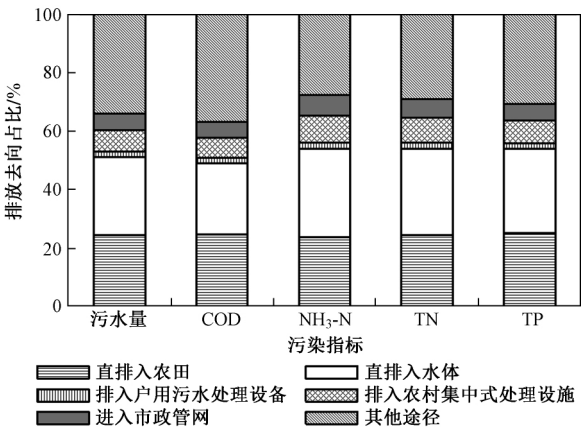


图 2 我国农村生活污水及污染物排放去向构成

Fig.2 Composition of rural domestic sewage and pollutants discharge in China

2.2 农村生活污水治理效率

该研究从污染物治理的技术效率和经济效率两个角度来考察农村生活污水的治理效率。技术效率和经济效率都是生产效率问题,但前者是从生产技术的角度考虑技术的可达性问题,而后者则是从投入产出的关系来衡量是否“值得投入”。

2.2.1 技术效率

由图 3 可见:全国农村生活污水治理的平均技术效率仅为 8.6%,各地区技术效率差异较大。其中浙江省最高,达到 46.6%;上海市次之,为 30.6%;部

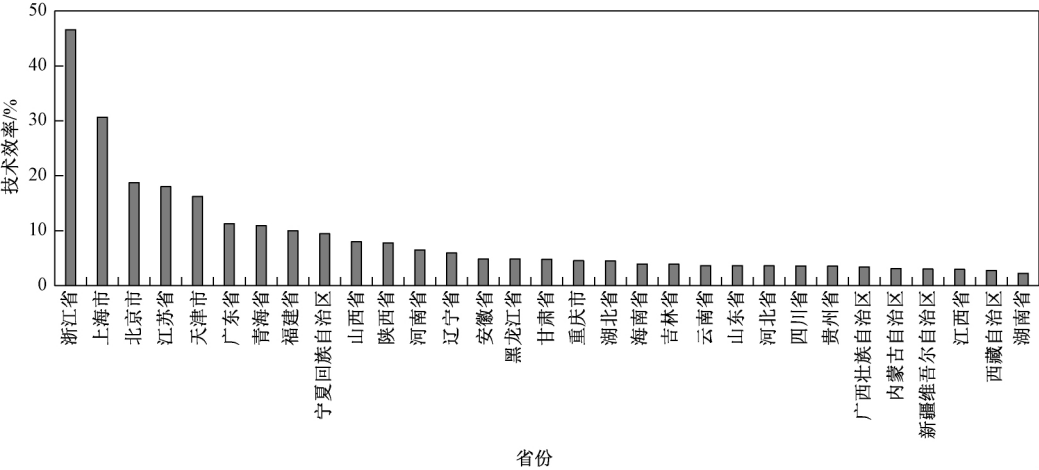


图 3 我国各省份农村生活污水治理技术效率

Fig.3 Technical efficiency of rural domestic sewage treatment in China

分地区如北京市、江苏省、天津市、广东省、青海省、福建省的技术效率分别为 18.8%、18.0%、16.2%、11.3%、10.9%、10.0%，均高于 10%；而其余 23 个省份均小于 10%，技术效率普遍较低。

污染物去除率与厕所类型、粪污处理情况以及污水治理水平有关^[27]。根据第二次全国污染源普查数据，农村生活污水有效治理途径包括进入市政管网、进入农村集中式处理设施和排入户用污水处理设备。其中浙江省、上海市、北京市、江苏省、天津市、福建省和广东省的农村生活污水有效治理比例分别为 86.2%、51.0%、32.7%、24.2%、23.0%、20.4% 和 17.8%，其余 24 个省份普遍在 9% 以下，全国平均仅为 11.0%。根据 2016 年《中国城乡建设统计年鉴》，东部地区开展生活污水处理的行政村比例为 28%，高于中部地区（15%）和西部地区（14%）。这反映了我国农村生活污水治理水平区域差异显著，且与经济发展水平密切相关^[16]。因此，应因地制宜选取处理技术和模式^[28-29]，梯次推进农村生活污水治理。

厕所类型可分为水冲式厕所和无水冲式厕所两大类，其中无水冲式厕所的粪污不产生污水，因此农村生活污水产生量与厕所类型密切相关^[30-31]。由图 4 可见，农村生活污水人均污染物产生强度与水冲式厕所比例呈正相关，但随着水冲式厕所比例的增加，农村生活污水人均污染物产生强度的离散程度增加，即

受其他因素如人口规模、经济水平等因素的干扰越大，空间异质性越加显著^[23]。根据 2018 年《中国卫生健康统计年鉴》，我国卫生厕所中水冲式厕所比例为 62.3%，沿海及经济发达地区水冲式厕所比例较高，而东北地区气候寒冷、西北地区干旱则较少选择水冲式厕所^[32]。由图 5 可见，上海市、浙江省、广东省、福建省、广西壮族自治区、海南省等沿海用水量较大的地区水冲式厕所比例均超过 80%。这些地区水系发达、河流密布，水域周边村庄分布广泛，因此加强农村生活污水的整治对于保持和改善流域生态环境具有重要的意义。

无水冲式厕所和有效治理措施分别是源头减量和末端治理两方面减少农村生活污水污染物的主要途径，为此综合考虑厕所类型和有效治理水平，绘制农村生活污水治理评价矩阵（见图 6）。由图 6 可见：我国各地区农村生活污水治理状况主要集中在“低旱厕-低治理”和“高旱厕-低治理”，仅浙江省、上海市处于“低旱厕-高治理”；对于“低旱厕-低治理”地区，如北京市、江苏省、天津市、福建省、广东省等经济发达地区，其有效治理比例与浙江省相比，仍存在较大差距。因此，在推进“厕所革命”时，不能只放在“改”上，一味强调卫生厕所数量以及卫生厕所普及率，忽视厕所粪污的“治”^[33]，而应将改厕与粪污处理作为系统来考虑^[34]，构建改厕-粪污处理-资源化的

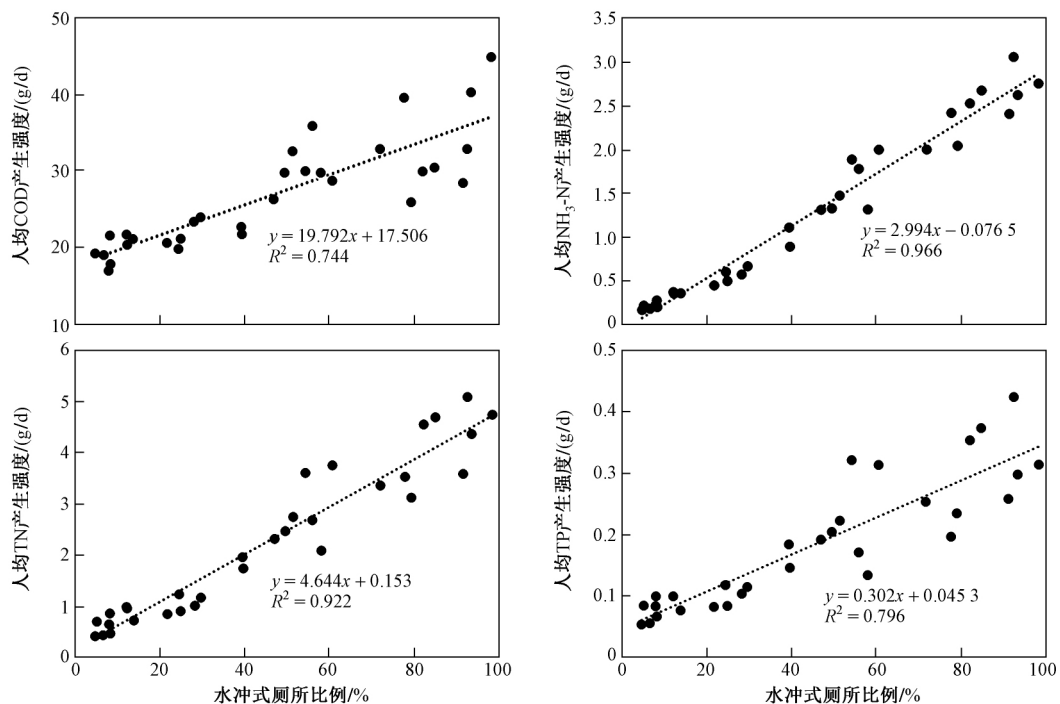


图 4 农村生活污水污染物产生强度与水冲式厕所比例的关系

Fig.4 Relationship between pollutant production intensity of rural domestic sewage and the proportion of flush toilets

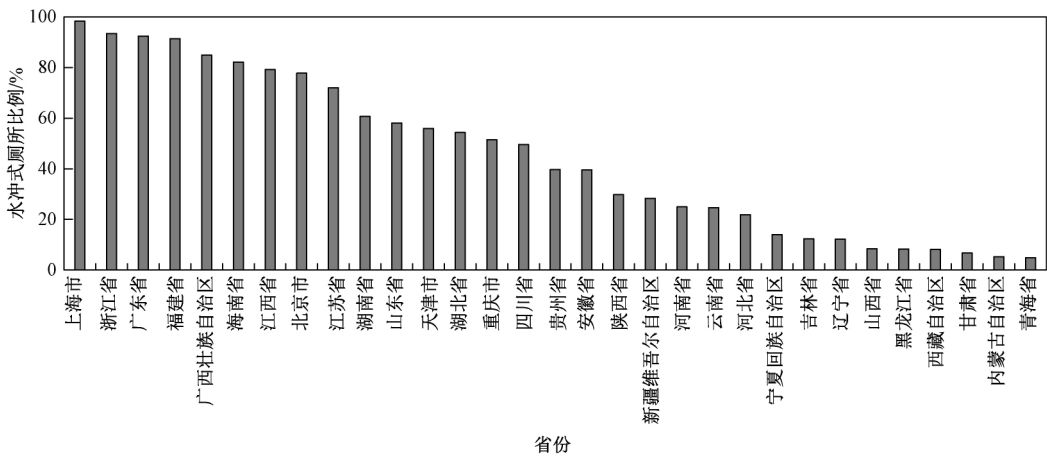


图 5 我国各省份农村水冲式厕所比例

Fig.5 Proportion of rural flush toilets in China

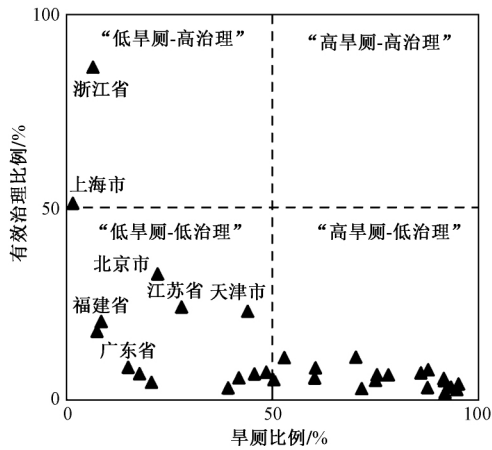


图 6 农村生活污水治理评价矩阵

Fig.6 Evaluation matrix of rural domestic sewage treatment

系统^[35-36],才能真正改善农村生态环境和人居环境。而对于“高旱厕-低治理”地区,其有效治理比例较低,可能是无水冲厕比例较高,粪污产生量较少,或是对农村生活污水治理不够重视,治理水平较低导致。

2.2.2 经济效率

通过 DEA 模型计算得到 2017 年我国各地区农村生活污水治理的经济效率如图 7 所示。由图 7 可见:浙江省、上海市、山西省、内蒙古自治区、青海省、西藏自治区处于前沿面上,即经济效率均为 1;其他地区经济效率均小于 1,其中经济效率在 0.85~0.95 之间的有 10 个省份,占比为 32.3%;经济效率在 0.65~0.85 之间的有 7 个省份,占比为 22.6%;而山东省、广东省、湖南省、湖北省、海南省、四川省、广西壮族自治区和重庆市经济效率均在 0.65 以下,有很大改善空间^[10]。上述农村生活污水治理的经济效率测算的是决策单元之间的相对效率,是投入产出比,与地区经济发展程度并不完全对应,也并不意味着各地区农村水环境状况的优劣^[37]。

经济效率高的地区可分为两类,一类是“低收入-低排放”地区,如青海省、西藏自治区等地,其农村居民人均可支配收入在 31 个省(自治区、直辖市)中位列第 29 位、第 26 位,但由于这些地区以无水冲式厕

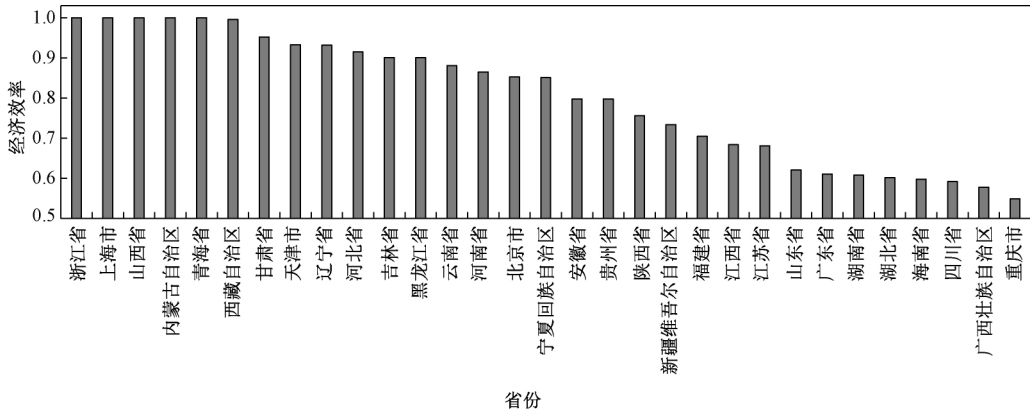


图 7 我国各省份农村生活污水治理经济效率

Fig.7 Economic efficiency of rural domestic sewage treatment in China

所为主,人均污染物排放强度较低,因此其经济效率相对较高;另一类是“高收入-低排放”地区,如浙江省人均可支配收入为 24 956 元,位居全国第 2 位,但其人均 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放强度分别位列第 26 位、第 13 位,因此经济效率也相对较高。经济效率较低的地区中一类是“高收入-高排放”地区,如广东省人均可支配收入为位居第 7 位,但其人均 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放强度则分别位列第 6 位、第 1 位;另一类是“低收入-高排放”地区,如广西壮族自治区人均可支配收入位列第 22 位,但其人均 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放强度分别位列第 4 位、第 2 位。

由图 8 可见,农村生活污水中人均 COD 排放强度、人均 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放强度与农村居民人均可支配收入之间的 EKC 均呈一定的倒“U”型关系,人均 TN 排放强度、人均 TP 排放强度与农村居民人均可支配收入之间的 EKC 则均呈“N”型特征。生活水平对农村污水排放量的影响并非是单向的,如生活水平的提高既可因资源消耗多,导致污染物排放量增加,也可因受教育程度高,环保意识增强,导致污染物排放量减少,因此居民生活消费模式是影响环境质量的一个重要方面^[38]。目前我国农村居民以吃、穿等基本生存需求为主的消费结构正逐步向注重生活质量的享受

型和发展型的新型消费模式过渡,因此应提高公众的环保意识,促进消费观念的转变,倡导可持续消费^[39]。环境质量是一种公共物品,具有外部性,污染物排放受政府管制影响比较显著^[4, 23, 34]。我国政府管制中最有代表性的 2 个制度是总量控制制度和排污许可证制度。COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 是“十二五”和“十三五”期间污染排放总量控制的约束性指标,各地区多措并举全力推进污染物减排工作,COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 两项指标的 EKC 特征在一定程度上体现了我国总量控制取得的成效。而“十三五”期间,TN、TP 两项指标仅在部分流域、区域展开总量控制^[40]。从 TN、TP 两项指标的 EKC 特征看,农村生活污水中人均 TN 排放强度、人均 TP 排放强度均随农村居民人均可支配收入的增加有波动上升趋势,应引起重视。

2.2.3 综合分析

综合考虑技术效率和经济效率,绘制农村生活污水治理效率评价矩阵(见图 9)。由图 9 可见:我国各省份都集中在“低技术-高经济”象限。青海省、山西省、内蒙古自治区、西藏自治区虽然经济效率均趋于 1,但技术效率却很低;而北京市、江苏省、天津市、广东省、福建省等经济发达地区虽然技术效率比大部分省份高,但与浙江省等地区仍有较大差距,并且这些地

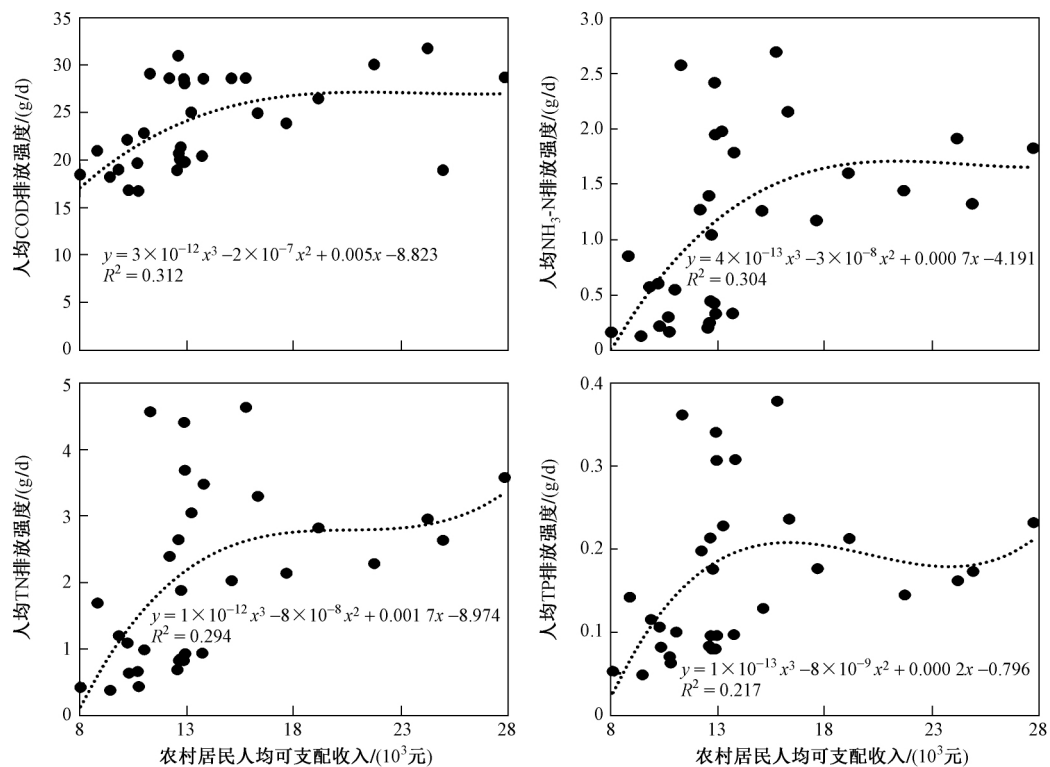


图 8 农村生活污水污染物排放强度与人均可支配收入的 EKC 特征

Fig.8 EKC characteristic of pollutant discharge intensity of rural domestic sewage and per capita disposable income

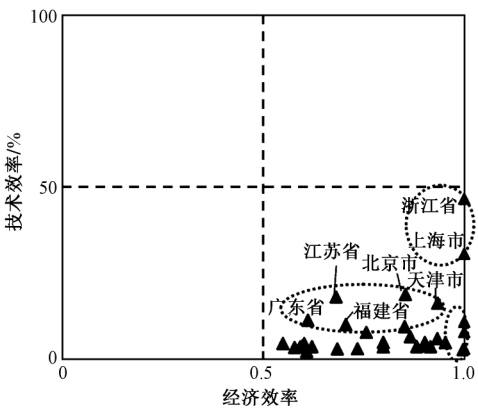


图 9 农村生活污水治理效率评价矩阵
Fig.9 Evaluation matrix for rural domestic
sewage treatment efficiency

区的经济效率也并不高,仍有较大提升空间,应注重经济发展与环境保护双重目标协调发展.结合实际情况进一步挖掘潜力,确保既抓好农村经济发展又推进污染治理.

为了探索农村生活污水治理效率改进途径,根据

各地区厕所类型、有效治理比例、人均可支配收入和人均污染物排放强度的排序大小,对我国农村生活污水治理进行初步分区(见表2).以“高收入-低排放”和“低收入-低排放”的经济效率高的地区为改进目标,本着环境优先的原则,对于江西省、湖北省、湖南省、广西壮族自治区、海南省、重庆市等“低收入-高排放”地区以及北京市、天津市、江苏省、福建省、山东省、广东省等“高收入-高排放”地区,应优先减少污染排放,而这些区域属于“低旱厕-低治理”,因此可以源头减量、分类处理、循环利用为导向,因地制宜采取纳管、集中、分散处理模式,同时鼓励农村黑、灰水分别处理回用,优先选择资源化与尾水利用技术,充分利用坑塘沟渠、湿地、农田等自然处理系统,让污水自然净化、循环利用、变废为宝^[41].而对于安徽省、四川省、陕西省、新疆维吾尔自治区等“低收入-高排放”地区,因其属于“高旱厕-低治理”,则应着力强化污水治理,科学选取处理技术和工艺,按照“一村一策”的要求,推进农村生活污水治理工程.

表 2 我国农村生活污水治理分区

Table 2 Zoning division of rural domestic sewage treatment in China

区域类型	“低收入-低排放”地区	“低收入-高排放”地区	“高收入-低排放”地区	“高收入-高排放”地区
“低旱厕-低治理”	—	江西省、湖北省、湖南省、 广西壮族自治区、海南省、 重庆市	—	北京市、天津市、江苏省、 福建省、山东省、广东省
“低旱厕-高治理”	—	—	浙江省	上海市
“高旱厕-低治理”	河北省、山西省、内蒙古自治区、 辽宁省、吉林省、黑龙江省、河南 省、贵州省、云南省、西藏自治区、 甘肃省、青海省、宁夏回族自治区	安徽省、四川省、陕西省、 新疆维吾尔自治区	—	—

3 结论

a) 我国农村生活污水中 COD 排放量占生活源排放总量的 50.8%,NH₃-N、TN 和 TP 排放量分别占生活源排放总量的 35.0%、30.5%、38.7%;污水及污染物排放去向以直排入水体、直排入农田和其他途径为主,三者占 80%以上,污水处理水平较低,农村污水治理形势仍然严峻,问题依然突出.

b) 我国农村生活污水治理的技术效率仅为 8.6%,且区域差异较大,其中有 23 个省份均小于 10%,技术效率普遍较低.主要原因是我国农村生活污水普遍缺乏有效治理,全国有效治理比例仅为 11.0%,同时沿海用水量较大的地区如上海市、浙江省、广东省、福建省、广西壮族自治区等水冲式厕所比例超过 80%.

c) 相比浙江省、上海市、山西省、内蒙古自治区、

青海省、西藏自治区等地区(经济效率均为 1),我国其他省份农村生活污水治理的经济效率较低,有很大改善空间.农村生活污水中人均 COD 排放强度、人均 NH₃-N 排放强度与农村居民人均可支配收入之间的 EKC 均呈一定的倒“U”型关系,人均 TN 排放强度、人均 TP 排放强度与农村居民人均可支配收入之间的 EKC 则均呈“N”型特征,有波动上升趋势,应引起重视.

d) 为进一步改进农村生活污水治理效率,我国农村地区应从提升技术效率入手,协同改进经济效率,立足当地农村实际,以源头减量、分类处理、循环利用为导向,加强统筹规划,梯次推进,突出重点区域,选择适宜模式,强化管护机制,加快补齐农村污染治理基础设施“短板”,推进农村生活污水治理,改善农村环境质量.

参考文献(References):

- [1] CHENG Jianhua, TANG Xiangyu, LIU Chen. Occurrence and distribution of antibiotic resistance genes in various rural environmental media [J]. *Environmental Science and Pollution Research* 2020, 27(23): 29191-29203.
- [2] LI Xi, LI Yuyuan, LV Dianqing, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal performance and bacterial communities in a multi-stage surface flow constructed wetland treating rural domestic sewage [J]. *Science of the Total Environment* 2020, 709: 136235.
- [3] SHENG Xiaolin, QIU Songkai, XU Feng *et al.* Management of rural domestic wastewater in a city of Yangtze Delta Region: performance and remaining challenges [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2020, 11: 100507.
- [4] CHENG Hong, ZHANG Mingmei. Occurrence and removal of antibiotic resistance genes in municipal wastewater and rural domestic sewage treatment systems in eastern China [J]. *Environment International* 2013, 55: 9-14.
- [5] 贾小梅, 于奇, 王文懿, 等. 关于“十四五”农村生活污水治理的思考 [J]. *农业资源与环境学报* 2020, 37(5): 623-626.
JIA Xiaomei, YU Qi, WANG Wenyi *et al.* Considerations for rural domestic sewage treatment during the ‘14th Five-Year Plan’ [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment* 2020, 37(5): 623-626.
- [6] ZHANG Rui, ZHENG Huawei, ZHANG Hui, *et al.* Study on the influence of social capital on farmers’ participation in rural domestic sewage treatment in Nanjing, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2020, 17(7): 2479.
- [7] 卢贤飞, 林常春, 陈刚亮. 浙江省农村生活污水处理工程现状调研及症结剖析 [J]. *中国给水排水* 2019, 35(18): 6-9.
LU Xianfei, LIN Changchun, CHEN Gangliang. Investigation on current situation of rural domestic sewage treatment projects in Zhejiang Province and analysis of its main crux [J]. *China Water & Wastewater* 2019, 35(18): 6-9.
- [8] 王敏, 许枫, 宋小燕, 等. 农村生活污水处理设施优先控制区域识别与监管策略 [J]. *中国环境科学* 2019, 39(12): 5368-5376.
WANG Min, XU Feng, SONG Xiaoyan, *et al.* Priority control area identification and supervision scheme for rural domestic sewage treatment facilities [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(12): 5368-5376.
- [9] 王俊能, 许振成, 胡习邦, 等. 基于 DEA 理论的中国区域环境效率分析 [J]. *中国环境科学* 2010, 30(4): 565-570.
WANG Junneng, XU Zhencheng, HU Xibang, *et al.* Analysis of environmental efficiencies and their changes in China based on DEA theory [J]. *China Environmental Science* 2010, 30(4): 565-570.
- [10] CHENG Panpan, JIN Qiang, JIANG Hui, *et al.* Efficiency assessment of rural domestic sewage treatment facilities by a slacked-based DEA model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122111.
- [11] 刘浩, 何寿奎, 王娅. 基于三阶段 DEA 和超效率 SBM 模型的农村环境治理效率研究 [J]. *生态经济* 2019, 35(8): 194-199.
LIU Hao, HE Shoukui, WANG Ya. Research on rural environmental governance efficiency based on three-stage DEA and super efficiency SBM model [J]. *Ecological Economy* 2019, 35(8): 194-199.
- [12] 岑一峰. 我国农村环境治理效率评价及影响因素分析 [D]. 蚌埠: 安徽财经大学 2018.
- [13] 黄英, 周智, 黄娟. 基于 DEA 的区域农村生态环境治理效率比较分析 [J]. *干旱区资源与环境* 2015, 29(3): 75-80.
HUANG Ying, ZHOU Zhi, HUANG Juan. The management efficiency of rural ecological environment in different regions [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(3): 75-80.
- [14] 曹大宇, 李谷成. 我国农业环境库兹涅茨曲线的实证研究: 基于联立方程模型的估计 [J]. *软科学* 2011, 25(7): 76-80.
CAO Dayu, LI Gucheng. An empirical research on the agricultural Environmental Kuznets Curve in China [J]. *Soft Science*, 2011, 25(7): 76-80.
- [15] 沈能, 张斌. 农业增长能改善环境生产率吗? 有条件“环境库兹涅茨曲线”的实证检验 [J]. *中国农村经济* 2015(7): 17-30.
- [16] KORHAN K G, NIGAR T, MOHAMAD K. Agriculture-induced Environmental Kuznets Curve: the case of China [J]. *Environmental Science and Pollution Research* 2019, 26(36): 37137-37151.
- [17] WANG Yan, SHENG Neng. Agricultural environmental efficiency and agricultural Environmental Kuznets Curve based on technological gap: the case of China [J]. *Polish Journal of Environmental Studies* 2016, 25(3): 1293-1304.
- [18] ZAMEER H, YASMEEN H, WANG Rong, *et al.* An empirical investigation of the coordinated development of natural resources, financial development and ecological efficiency in China [J]. *Resources Policy* 2020, 65: 101580.
- [19] XIAO Qinlin, TIAN Chao, WANG Yanjun *et al.* Measurement and comparison of urban haze governance level and efficiency based on the DPSIR model: a case study of 31 cities in North China [J]. *Journal of Resources and Ecology* 2020, 11(6): 549-561.
- [20] CHARNES A, COOPER W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [21] HAO Yu, LIU Yiming, WENG J H, *et al.* Does the Environmental Kuznets Curve for coal consumption in China exist? new evidence from spatial econometric analysis [J]. *Energy*, 2016, 114: 1214-1223.
- [22] SIRAG A, MATEMILOLA B T, LAW S H, *et al.* Does Environmental Kuznets Curve hypothesis exist? evidence from dynamic panel threshold [J]. *Journal of Environmental Economics and Policy* 2018, 7(2): 145-165.
- [23] SAMUEL A S, VLADIMIR S. Empirical study of the Environmental Kuznets Curve and environmental sustainability curve hypothesis for Australia, China, Ghana and USA [J]. *Journal of Cleaner Production* 2018, 201: 98-110.
- [24] 于法稳, 侯效敏, 郝信波. 新时代农村人居环境整治的现状与对策 [J]. *郑州大学学报(哲学社会科学版)* 2018, 51(3): 64-68.
YU Fawen, HOU Xiaomin, HAO Xinbo. The current situation and

- counter measures of rural residential environment in the new era [J]. Journal of Zhengzhou University (Philosophy and Social Sciences Edition) 2018 51(3) : 64-68.
- [25] 朱木兰, 黄永福, 李地金, 等. 农村不同排污方式水质调查与治污新策略[J]. 水利学报, 2020, 51(2) : 245-252.
- ZHU Mulan, HUANG Yongfu, Li Dijin, *et al.* Water quality survey for different drainage ways of sewage and new strategy for pollution control in rural areas[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2020, 51(2) : 245-252.
- [26] LUO Xiang, LI Yungui, WU Qingsong, *et al.* Characteristics of internal ammonium loading from long-term polluted sediments by rural domestic wastewater [J]. International Journal of Environmental Research And Public Health 2019, 16(23) : 4657.
- [27] SONG Xiaoyan, LIU Rui, YU Qiangqiang *et al.* Management mode construction for operation and supervision of rural sewage treatment facilities: towards the information-to-intelligence strategy [J]. Bioresource Technology Reports 2020, 11: 100481.
- [28] WANG Tao, ZHU Bo, ZHOU Minghua. Ecological ditch system for nutrient removal of rural domestic sewage in the hilly area of the central Sichuan Basin, China [J]. Journal of Hydrology 2019, 570: 839-849.
- [29] 沈丰菊, 张克强, 李军幸, 等. 基于模糊积分模型的农村生活污水治理模式综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15) : 272-280.
- SHEN Fengju, ZHANG Keqiang, LI Junxing, *et al.* Evaluation method for engineering technology of rural domestic sewage treatment based on fuzzy integral model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2014, 30(15) : 272-280.
- [30] LOURENCO N, NUNES L M. Review of dry and wet decentralized sanitation technologies for rural areas: applicability, challenges and opportunities [J]. Environmental Management 2020, 65(5) : 642-664.
- [31] MARTÍNEZ-SANTOS P, MARTÍN-LOECHES M, GARCÍA-CASTRO N, *et al.* A survey of domestic wells and pit latrines in rural settlements of Mali: implications of on-site sanitation on the quality of water supplies [J]. International Journal of Hygiene & Environmental Health 2017, 220(7) : 1179-1189.
- [32] 王永生, 刘彦随, 龙花楼. 我国农村厕所改造的区域特征及路径探析[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(5) : 553-560.
- WANG Yongsheng, LIU Yansui, LONG Hualou. Regional characteristics and pathway optimization of China's rural toilet improvement [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment 2019, 36(5) : 553-560.
- [33] 于法稳. 农村厕所革命: 路在何方? [J]. 群言, 2019(9) : 11-14.
- [34] CHENG Shikun, ZHAO Mingyue, MANG H P, *et al.* Development and application of biogas project for domestic sewage treatment in rural China: opportunities and challenges [J]. Journal of Water Sanitation & Hygiene for Development 2017, 7(4) : 576-588.
- [35] RANDALL D G, NAIDOO V. Urine-the liquid gold of wastewater [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering 2018, 6(2) : 2627-2635.
- [36] WALD C. The economy in the toilet [J]. Nature 2017, 549(7671) : 146-148.
- [37] 刘浩, 何寿奎, 王娅. 基于三阶段 DEA 和超效率 SBM 模型的农村环境治理效率研究[J]. 生态经济, 2019, 35(8) : 194-199.
- LIU Hao, HE Shoukui, WANG Ya. Research on rural environmental governance efficiency based on three-stage DEA and super efficiency SBM model [J]. Ecological Economy 2019, 35(8) : 194-199.
- [38] MA Lin, VELTHOF G L, WANG Fanghao, *et al.* Nitrogen and phosphorus use efficiencies and losses in the food chain in China at regional scales in 1980 and 2005 [J]. Science of the Total Environment 2012, 434: 51-61.
- [39] 戴红军, 孙涛. 城乡一体化进程中农村生态环境污染影响因素分析: 基于江苏省 1990—2009 年的数据 [J]. 生态经济, 2013(11) : 177-181.
- DAI Hongjun, SUN Tao. Influencing factors analysis of ecological environmental pollution in rural areas in the process of urban-rural integration: based on statistical data of Jiangsu Province from 1990 to 2009 [J]. Ecological Economy 2013(11) : 177-181.
- [40] 童克难. “十三五”水污染物总量怎么控制? [J]. 环境经济, 2015(19) : 44.
- [41] 王波. 县域农村生活污水治理规划编制的几点建议 [N]. 中国环境报, 2020-08-28(003) .

(责任编辑: 刘 方)