

基于污染物通量超标排放的生态补偿方法

刘军政¹, 犹伟², 祁芸泉², 赵钟楠³, 黄火建³, 张新华¹

(1. 四川大学水力学及山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;
2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 3. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100011)

摘要: 针对污染物通量核算生态补偿量方法中单位污染物削减成本忽略了污染物来源差异性以及污染物通量核算未考虑年内实际水文、水质特征的问题, 从污染物削减成本和污染物通量两个方面对该方法进行改进。污染物削减成本按照污染物来源分为点源污水(主要为工业废水、城市生活污水)和农村非点源污水(主要为农村生活污水、农业生产污水)削减成本两部分, 根据不同废水来源的处理成本, 按污染物排放量比重加权平均得到削减成本; 同时, 对年内划分水期, 分别核算污染物通量。选取沱江支流上的濑溪河渝川缓冲区进行实例验证。结果表明: 核算结果基本能够反映区域污染特征, 核算金额也更加真实可信。

关键词: 生态补偿; 污染物通量; 超标排放; 污染赔偿; 削减成本

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1003-9511(2018)04-0040-05

当前, 新实施的《中华人民共和国环境保护法》(自2015年1月1日起施行)和中国共产党第十九次全国代表大会均对实施生态补偿提出了明确的要求, 生态补偿制度已成为推进科学发展、加快生态文明制度建设的重要举措和生态环境保护管理体制改革创新的重要内容。我国从20世纪90年代末开始关注流域生态补偿, 如今已经形成了多种补偿类型和补偿方式并存的局面^[1]。目前, 江苏、福建、浙江、河北、河南、辽宁、山东、山西等省在全省范围内开展了污染赔偿型生态补偿试点工作^[2-3]。其中, 生态补偿标准是当前研究的热点与难点, 众多学者对此进行了研究, 如刘桂环等^[4]、冉涛等^[5]总结我国生态补偿的实践, 提出了2种对于污染赔偿型的生态补偿标准核算方法, 一种是按照水质浓度超标倍数扣缴一定数额的补偿金; 另一种是按照考核断面超标污染物通量的削减成本确定补偿金额。前者对生态补偿的核算简便, 但误差大。已有的研究和实践多数主张采用污染物通量核算补偿量, 污染物通量全面考虑了水质与总量的关系, 具有较强的科学性^[6-8]。然而, 目前该方法中单位污染物削减成本统一采用某一固定值, 没有考虑工业废水、城市生

活用水等不同废水处理成本的差异, 与实际值可能存在偏差。同时, 在污染物通量核算上忽略了年内各水期的实际水文、水质特点, 故也存在一定偏差。因此, 笔者在基于Webb等^[9]和郝晨林等^[10]研究污染物通量核算模型的基础上, 以濑溪河渝川缓冲区为研究对象, 从污染物削减成本和污染物通量两个方面进行改进研究。

1 研究方法

1.1 基于污染物通量超标排放量的生态补偿标准核算方法

该方法首先求得时段内超过目标水质的排放总量, 再与单位排放量补偿金额进行乘积求得补偿总金额, 该方法从宏观上把握了河流上下游断面污染物的迁移规律。补偿资金计算公式为

$$P_{\text{单}} = W_{\text{超}} S = \int_0^T [(C(t)_{\text{实测}} - C(t)_{\text{目标}}) Q(t)] dt S \quad (1)$$

式中: $P_{\text{单}}$ 为单因子补偿资金; $W_{\text{超}}$ 为考核断面实测水质超过目标水质的污染物排放量, 若实测水质浓度低于目标水质浓度则为负, 即此时下游向上游反向

基金项目: 国家自然科学基金(51579162, 51379137)

作者简介: 刘军政(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事水环境及水信息研究。E-mail: 843503651@qq.com

通信作者: 张新华(1965—), 男, 教授, 主要从事水力学及河流动力学、水环境研究。E-mail: xhzhang@scu.edu.cn

补偿; $C(t)_{\text{实测}}$ 为 t 时刻考核断面实测水质浓度; $C(t)_{\text{目标}}$ 为 t 时刻考核断面目标水质浓度; $Q(t)$ 为 t 时刻通过考核断面流量; S 为单位超标污染物排放通量的补偿金额, 可视为单位污染物削减的处理成本。

考虑到实际工作中很难取得河流每个瞬时的流量与污染物浓度值, 且我国当前多数水文水质监测站监测数据不匹配^[11], 多数水文站可达到流量每日一测, 而大多数水质监测站则只能做到每月一测。因水文、水质数据时间跨度大、不连续, 所以需对污染物通量估算公式进行离散。

$$P_{\text{单}} = W_{\text{超}} S = \sum_{i=1}^n [(C(i)_{\text{实测}} - C(i)_{\text{目标}}) Q(i)] S \quad (2)$$

式中: $C(i)_{\text{实测}}$ 为考核断面计算时期内第 i 次水质实测瞬时浓度值; $C(i)_{\text{目标}}$ 为考核断面计算时期内第 i 次水质目标浓度值; $Q(i)$ 为第 i 次监测代表时间段的流量; n 为代表监测时段内污染物监测次数。

若需考核多因子指标, 则最终补偿金额为将各单因子补偿金额进行正负叠加即可。

1.2 污染物通量估算方法

时段污染物通量是污染赔偿型生态补偿的重要依据, 它的计算可简化为以下 5 种方法^[9]。

$$W_1 = K \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n} \quad (3)$$

$$W_2 = K \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \right) \bar{Q}_r \quad (4)$$

$$W_3 = K \sum_{i=1}^n \frac{C_i Q_i}{n} \quad (5)$$

$$W_4 = K \sum_{i=1}^n (C_i \bar{Q}_p) \quad (6)$$

$$W_5 = K \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \bar{Q}_r \quad (7)$$

式中: W 为河流污染物通量; C_i 为污染物瞬时监测浓度; Q_i 为同步瞬时监测流量; \bar{Q}_p 为代表时段内河流平均流量; \bar{Q}_r 为时段平均流量; K 为时间转换系数。

由于实际工作中很难取得河流每个瞬时的流量与污染物浓度值, 数据相对比较稀缺。因此, 如何根据离散的水量、水质数据选择恰当的通量估算方法, 对提高通量估算的可靠性具有十分重要的意义。笔者在富国^[12] 和郝晨林等^[10] 对 5 种通量估算公式适用性研究的基础上, 对研究区域划分不同水期, 根据不同的水文、水质条件, 判定不同水期内

的污染物来源, 从而选择水期内相应的通量估算公式, 进行通量估算, 以此作为计算补偿金额的依据(表 1)。

表 1 5 种通量估算方法特征与适用性

编号	估算公式	公式特点	适用范围
(3)	$W_1 = K \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n}$	瞬时浓度与瞬时流量算术平均值乘积	适合河流对流影响远大于离散项影响的情况, 弱化地表径流影响
(4)	$W_2 = K \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \right) \bar{Q}_r$	瞬时浓度算术平均与时段平均流量的乘积	适合河流对流影响远大于离散项影响的情况, 强调地表径流影响
(5)	$W_3 = K \sum_{i=1}^n \frac{C_i Q_i}{n}$	实测瞬时通量的算术平均值, 代表计算时段通量	弱化了地表径流量的影响, 较适合点源污染占优势的河流
(6)	$W_4 = K \sum_{i=1}^n (C_i \bar{Q}_p)$	瞬时浓度与代表时段平均流量乘积, 代表样品监测时段间隔内的通量	强调了地表径流量的影响, 较适合非点源污染占优势的河流
(7)	$W_5 = K \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \bar{Q}_r$	时段通量平均浓度与时段平均流量的乘积	强调时段总流量的影响, 较适合非点源污染占优势的河流

1.3 单位污染物超标排放量补偿金额的确定

本文以单位污染物削减成本计算确定单项污染物的补偿金额。王佳伟等^[13]、王晓青^[14]、李焯楠等^[15]的研究表明: 不同来源的废水污染物削减成本不同, 工业废水显著高于城市生活污水削减成本。而目前污染物削减成本统一采用定值, 没有考虑工业废水、城市生活污水等不同类型废水处理成本的差异性。因此, 笔者将污染物削减成本按照污染物来源分为点源污水(主要为工业废水、城市生活污水)和农村非点源污水(主要为农村生活污水、农业生产污水)削减成本两部分。根据不同废水来源的处理成本, 按污染物排放量比重加权平均得到削减成本。

2 实例研究与结果分析

2.1 研究区域概况

濑溪河为沱江左岸一级支流, 发源于重庆市大足县, 流经荣昌县和四川省泸县, 最终在泸县注入沱江, 属于长江流域沱江水系。河流全长约 190 km, 平均坡降约 0.11%, 其中重庆市境内河长 123 km, 四川省境内长 65.5 km。流域总面积 3257 km², 多年平均径流量 11.67 亿 m³, 多年平均流量 37 m³/s, 枯水期多年平均流量 4.14 m³/s。濑溪河渝川缓冲区起始断面为重庆市荣昌县, 终止断面为四川省泸县(位于川渝省界交界处), 总长 16.5 km。泸县福集镇有一处水文站, 缓冲区出境断面设有水质监测断

表3 下游断面水质要求及容纳负荷通量

水质类别	污染物	
	高锰酸盐指数/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
I	2	0.15
II	4	0.5
III	6	1.0
IV	10	1.5
V	15	2.0

水质类别	下游断面年通量容纳限值/($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)	
	高锰酸盐指数	氨氮
III	6735	1122

表4 5种估算方法污染物超标情况

污染物	年超标量/($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)				
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
高锰酸盐指数	-475	-2310	471	-1764	-1677
氨氮	1279	575	558	153	58

注：“正值”代表上游污染物超标，“负值”代表上游污染物未超标，下同。

表4为采用不同污染物通量估算方法核算各污染物超标排放量,通过对比可知:式(3)、式(4)、式(6)、式(7)高锰酸盐指数核算结果均不超标(即表4中的 W_1 、 W_2 、 W_4 、 W_5 对应值);而式(5)中高锰酸盐指数核算结果超标471t(即表4中 W_3 对应值)。不同方法对于同一区域污染物超标核算结果大不相同,甚至出现矛盾。对于氨氮而言,虽然5种估算方法核算污染物是否超标未出现矛盾,但是超标总量核算结果差别较大。所以不同通量估算方法在补偿中会出现不同结果,甚至出现矛盾。

2.2.2 污染物通量估算改进

将该流域全年划分为丰、平、枯3个水期,考虑不同水期实际的水文、水质特征,选择相应的通量估算公式。最终得到高锰酸盐指数和氨氮的超标排放量,具体结果见表5。

表5 分水期改进后污染物超标情况

水期	月份	水文、水质特征	公式选择	污染物通量/t	
				高锰酸盐指数	氨氮
丰水期	6~10	非点源污染占优	(6)	1846	354
平水期	4、5、11	流速变化大,径流影响严重	(5)	1329	355
枯水期	12~次年3	点源污染占优	(5)	1782	544
超标排放量				-1778	131

方法改进后,将全年划分为丰水期、平水期、枯水期,根据不同水期污染物来源不同,采用相应的污染物通量估算公式,核算的高锰酸盐指数、氨氮年通量分别为4957t、1253t,与下游断面2种污染物年通量容纳限值6735t、1122t对比可知,高锰酸盐指数未超标,氨氮超标131t。根据2015年调查资料显示:高锰酸盐指数、氨氮年排放量分别为4870t、

面。濛溪河径流年内分配不均匀,汛期较长,多出现在6~10月,径流量占年径流总量的70%左右;平水期较短,多为4~5月和11月,径流量占年径流总量的20%左右;其余月份为枯水期,径流量很小,只占年径流总量的10%左右。濛溪河面临工业点源和农业非点源污染较重的情况,水质状况较差,常年达不到III类水质标准。流域主要超标水质项目为高锰酸盐指数、氨氮和 COD_{cr} ,属于有机污染型河流。污染源除受上游来水影响外,还受流域内密集工矿废水及农村面源污染影响,其中点源污染来源主要为工业废水和城市生活污水,非点源污染来源主要为农村生活污水、农田径流污染、畜禽养殖污染等。2015年调查数据显示,濛溪河流域泸县境内废水排放3061万t,高锰酸盐指数排放量4870t,氨氮排放量1244t。

2.2 污染物通量估算及其改进

2.2.1 污染物通量估算及存在的问题

四川省人民政府办公厅关于《在岷江沱江流域试行跨界断面水质超标资金扣缴制度的通知》(川办函[2011]200号)^[16]中规定:岷江、沱江流域,水质补偿项目选择高锰酸盐指数和氨氮两项指标。故笔者采用这两项污染物指标进行上、下游生态补偿金额的计算,所以只核算这两种污染物指标的通量。

濛溪河渝川缓冲区重庆出境断面处有一福集水文监测站,并有多年逐日流量监测数据,缓冲区下游四川入境断面设置有水质监测断面,监测频率为每月一次。笔者从多年流量系列中选取2015年监测的逐日流量数据和每月一次的水质数据,采用式(3)~(7)分别对渝川缓冲区进行污染物通量估算,具体结果见表2。

表2 5种污染物通量估算方法核算结果

污染物	年超标量/t				
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
高锰酸盐指数	6260	4425	7206	4971	5058
氨氮	2401	1697	1680	1275	1180

由基础资料可知,该省界缓冲区仅在下游断面布设有水文、水质站,下游断面要求水质达到III类标准,根据我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的规定可知,当水质类别为III类时,高锰酸盐指数和氨氮最大限值分别为6mg/L和1mg/L,2015年年均流量为35.5 m^3/s ,相应的最大容许污染物的年通量如表3所示。

将5种估算方法核算的结果与下游断面容许限值进行对比(表4),各污染物超标数据可作为上下游生态补偿赔偿金额的依据。

1144 t,可以看出污染物超标排放量核算结果比较接近实际调查情况,因此核算的补偿金额结果也会更加真实可信。

2.3 单位污染物超标排放量补偿金额的确定及其改进

四川省对岷江、沱江流域的主要污染物处理成本规定为:高锰酸盐指数1300元/t,氨氮17000元/t,污染物削减成本统一采用定值,没有考虑不同类型废水处理成本的差异性。因此,笔者将污染物削减成本按照污染物来源分为点源污水(主要为工业废水、城市生活污水)和农村非点源污水(主要为农村生活污水、农业生产污水)削减成本两部分。根据不同废水来源的处理成本,按污染物排放量比重加权平均得到削减成本。

工业废水处理成本按照重庆市典型企业污染物削减成本的加权均值分别为:高锰酸盐指数1600元/t、氨氮18000元/t;城市生活污水2种污染物削减成本分别为160元/t和9150元/t;农村生活污水2种污染物削减成本分别为190元/t和10000元/t;农业生产污水分别为1300元/t、15000元/t。不同污染源单位削减成本及排放比例见表6

表6 不同污染源削减成本

污染源		高锰酸盐指数		氨氮	
		成本/元	占比/%	成本/元	占比/%
点源	工业废水	1600	78	18000	65
	城市生活污水	160	22	9150	35
非点源	农村生活污水	190	73	10000	53
	农业生产污水	1300	27	15000	47

按照污染物排放量比例加权平均最终得到点源和非点源的单位削减成本。其中,点源中高锰酸盐指数总成本为1283元/t,氨氮总成本14903元/t;非点源中高锰酸盐指数总成本为490元/t,氨氮总成本12350元/t。由计算结果可知:不同废水来源的污染物削减成本不同,且对于高锰酸盐指数与氨氮而言,点源污染比非点源污染削减成本高。

2.4 补偿金额计算结果

2.4.1 统一削减成本补偿金额计算结果

方法改进后估算的污染物通量比较接近实际调查量,为了比较削减成本改进前后的效果,采用污染物通量估算方法改进后的污染物超标量核算补偿金额,具体补偿金额计算结果见表7。

表7 统一削减成本补偿金额计算结果

污染物	超标总量/t	削减成本/元	补偿金额/万元
高锰酸盐指数	-1778	1300	-231
氨氮	131	17000	223

由表7可看出,采用统一削减成本核算补偿金额,该省界缓冲区上游断面重庆市因超标排放氨氮需赔偿下游断面四川省223万元,少排放高锰酸盐指数又可获得补偿231万元,所以叠加后重庆市获得补偿8万元。

2.4.2 分水期改进后补偿金额计算结果

将该区域全年划分为丰水期、枯水期、平水期,分别计算不同水期内的污染物超标量和污染物削减成本,通过不同水期的补偿金额进行叠加,得到全年的补偿金额,具体污染物补偿结果见表8。

表8 分水期改进后补偿金额计算结果

污染物	超标总量/t			削减成本/元			补偿金额/万元
	丰水期	平水期	枯水期	丰水期	平水期	枯水期	
高锰酸盐指数	-960	-355	-463	490	490	1283	-124
氨氮	-113	74	170	12350	12350	14903	205

由表8可看出,该省界缓冲区上游断面重庆市因少排放高锰酸盐指数可获得补偿124万元,超标排放氨氮又需赔偿下游断面四川省205万元,所以叠加后需赔偿四川省81万元。而削减成本改进前四川省需赔偿重庆市8万元,显然不符合上游污染下游的实际情况。两者补偿金额结果出现差异性的主要原因是丰水期、平水期高锰酸盐指数主要污染源为非点源污染,单位污染物削减成本较低,而全年采用统一削减成本,会导致补偿金额计算较大。所以根据不同水期内实际水质特征,判定不同水期污染源,从而确定不同污染源的削减成本,不采用统一固定值,这样核算补偿金额更加合理。

3 结论

通过分析研究污染物通量超标排放量核算补偿量方法,根据年内水文、水质变化特征对污染物通量的估算和削减成本的确定进行了以下改进:

a. 根据流域的实际水文、水质特点划分丰、平、枯水期,判定不同水期的污染源,从而提出了根据不同污染物通量估算方法的适用条件选择不同水期内相应的污染物通量估算方法。

b. 根据不同废水来源其污染物削减成本不同,提出了补偿中可根据实际水文条件划分水期,判定不同水期污染源,按照污染物排放量比例加权平均确定不同污染源削减成本的方法。

通过以上改进计算的生态补偿金额比按常规方法计算的补偿金额更加科学、合理,对上下游的赔偿也会更加公平。因此,按笔者提出的方法实施污染型生态补偿能够促进流域水环境保护与水生态文明城市建设,保障上下游经济社会的可持续发展。

参考文献:

- [1] 禹雪中,冯时. 中国流域生态补偿标准核算方法分析[J]. 中国人口·资源与环境,2011,21(9):14-19.
- [2] 万本太,邹首民. 走向实践的生态补偿:案例分析与探索[M]. 北京:中国环境科学出版社,2008.
- [3] 黄立洪. 生态补偿量化方法及其市场运作机制研究[D]. 福州:福建农林大学,2013.
- [4] 刘桂环,文一惠,张惠远. 流域生态补偿标准核算方法比较[J]. 水利水电科技进展,2011,31(6):1-6.
- [5] 冉涛,袁秋平,曾嘉,等. 基于水质浓度超标倍数河流生态补偿量化的研究:以梁滩河为例[J]. 四川环境,2016,35(6):52-56.
- [6] 韩艳利,娄广艳,葛雷,等. 黄河流域与水有关生态补偿框架的探讨[J]. 水资源保护,2016,32(6):142-150.
- [7] 郭丽峰,刘明喆,张辉,等. 基于污染物通量的潘家口—大黑汀水源地水污染生态补偿量化研究[J]. 水资源保护,2016,32(5):146-151.
- [8] 周洁,逢勇. 江苏省流域生态补偿资金核算方法的优化[J]. 水资源保护,2016,32(6):151-155.
- [9] WEBB B W, PHILLIPS J M, WALLING D E, et al. Load estimation methodologies for British rivers and their relevance to the Loirac(r) programme[J]. The Science of the Total Environment, 1997, 194/195:379-389.
- [10] 郝晨林,邓义祥,汪永辉,等. 河流污染物通量估算方法筛选及误差分析[J]. 环境科学学报,2012,32(7):1670-1676.
- [11] 石成春. 基于水污染通量的小流域生态补水研究[J]. 地质灾害与环境保护,2011,22(2):99-102.
- [12] 富国. 河流污染物通量估算方法分析(I):时段通量估算方法比较分析[J]. 环境科学研究,2003,16(1):1-6.
- [13] 王佳伟,张天柱,陈吉宁. 污水处理厂 COD 和氨氮总量削减的成本模型[J]. 中国环境科学,2009,29(4):443-448.
- [14] 王晓青. 三峡工程蓄水对澎溪河回水区 COD_{Mn}、NH₃-N 和 TP 综合衰减系数的影响[J]. 安全与环境学报,2015,15(1):325-329.
- [15] 李焯楠,卢培利,宋福忠,等. 排污权交易定价下的 COD 和氨氮削减成本分析研究[J]. 环境科学与管理,2014,39(3):50-53.
- [16] 四川省人民政府办公厅. 在岷江沱江流域试行跨界断面水质超标资金扣缴制度的通知[EB/OL]. (2011-09-08) [2017-12-20]. <http://www.sc.gov.cn/10462/10883/11066/2011/9/13/10180449.shtml>.
(收稿日期:2018-01-17 编辑:方宇彤)
-
- (上接第 39 页)
- [9] PIRIE R L, DE LOË R C, KREUTZWISER R. Drought planning and water allocation: an assessment of local capacity in Minnesota[J]. Journal of Environmental Management, 2004, 73(1):25-38.
- [10] BARREDO J I. Major flood disasters in Europe: 1950 - 2005[J]. Natural Hazards, 2007, 42(1):125-148.
- [11] YOUSSEF A M, PRADHAN B, HASSAN A M. Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(3):611-623.
- [12] 廖永丰,聂承静,杨林生,等. 洪涝灾害风险监测预警评估综述[J]. 地理科学进展,2012,31(3):361-367.
- [13] 李加林,曹罗丹,浦瑞良. 洪涝灾害遥感监测评估研究综述[J]. 水利学报,2014,45(3):253-260.
- [14] 张勇,高克昌. 基于遥感和 GIS 的公路水毁监测和评估技术框架[J]. 交通运输工程学报,2010,10(3):28-34.
- [15] 郝振纯,鞠琴,王璐,等. 气候变化下淮河流域极端洪水情景预估[J]. 水科学进展,2011,22(5):605-614.
- [16] XU J, PENG S, DING J, et al. Evaluation and calibration of simple methods for daily reference evapotranspiration estimation in humid East China[J]. Archives of Agronomy & Soil Science, 2012, 59(6):1-14.
- [17] PRITCHARD A. Statistical Bibliography or Bibliometrics? [J]. Journal of Documentation, 1969, 25(4):348-349.
- [18] 高懋芳,邱建军,刘三超,等. 基于文献计量的农业面源污染研究发展态势分析[J]. 中国农业科学,2014,47(6):1140-1150.
- [19] 张树良,安培浚. 国际地震研究发展态势文献计量分析[J]. 地球学报,2012,33(3):371-378.
- [20] 宋丽萍,王建芳. 基于 F1000 与 WoS 的同行评议与文献计量相关性研究[J]. 中国图书馆学报,2012,38(2):62-69.
- [21] 汤建民. 基于文献计量的卓越科研机构描绘方法研究:以国内教育学科为例[J]. 情报杂志,2010,29(4):5-9.
- [22] 丁学东. 文献计量学基础[M]. 北京:北京大学出版社,1993.
- [23] THOMSON R. Subject Category Selection [DB/OL]. (2016-01-01) [2017-12-20]. <http://adminapps.webof-knowledge.com>.
- [24] 李迅,袁东敏,尹志聪,等. 2011 年长江中下游旱涝急转成因初步分析[J]. 气候与环境研究,2014,19(1):41-50.
(收稿日期:2018-03-17 编辑:陈玉国)