

张 剑,张东岭. 基于信息熵的太湖重污染区水污染物总量分配研究[J]. 江苏农业科学,2016,44(9):426-429.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.120

基于信息熵的太湖重污染区水污染物总量分配研究

张 剑,张东岭

(河南水利与环境职业学院,河南郑州 450008)

摘要:以中国太湖西北部重污染区为研究区,在综合考虑重污染区内各地区间客观差异的情况下,筛选出总量分配的特征指标,建立基于信息熵的水污染物总量分配模型。通过制定分配模型的计算方法、最优化目标与约束条件,最终求解出最优的重污染区总量分配方案。经过求解后的最终分配结果表明该方法可将各地区特征指标量化,可使各地区分配的污染物排放量与其自然经济属性之间的差异缩小,更大程度上体现了分配的公平性。研究成果对于开展重污染区内污染物总量控制研究具有一定的指导意义。

关键词:水污染物;信息熵;总量分配;优化;太湖重污染区

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)09-0426-03

经过 40 多年的发展,水污染物总量控制技术已在各国推广,实践经验已证明其是行之有效的流域水污染控制管理技术,在防治水环境污染、改善水体环境工作中发挥了重要作用^[1]。水污染物总量控制以污染物排放量核算为出发点,以水环境容量为约束,最终落脚点为实现污染物允许排放量在各单位或地区的归属。因此实行总量控制的重要环节,在于将污染物允许排放量依据科学、公平原则实现各地区间的分配。如何科学、公平地实现污染物排放量在各个地区间的分配,成为众多学者、环境管理者、政策制定者关注的重要方面^[2]。围绕污染物排放量分配的研究,国外学者多关注于在系统学的框架下引入随机理论制定污染物分配方案^[3]。国内对总量分配的研究,从最初的主要侧重于经济优化原则逐步过渡到注重经济、效率、公平原则并重的分配方法^[4]。上述研究多局限于基于经济和效率原则的优化分配模型设计,众多优化分配模型中指标选取受人为主观干扰较大,在实际应用过程中存在诸多争议。本研究利用信息熵理论,以太湖重污染区为研究区域,筛选当地能够表征系统特征的指标,开展了污染物总量优化分配研究。

1 研究区概况

太湖作为维系江浙交界处经济、社会发展的重要水体,2007 年太湖蓝藻事件后太湖湖体的健康牵动了各方的关注。通过近几年对太湖污染源的溯源解析研究,结果显示太湖西北部的常州、无锡作为太湖上游的汇水区域,以占太湖流域 14% 的面积贡献了 80% 的人太湖污染物负荷^[5],是太湖流域的重污染区,亦为水污染防治工作的重点地区。该地区涵盖的湖泊水体包括太湖竺山湾、梅梁湾、五里湖、贡湖的部分及滆湖,涵盖的河道为入太湖的主要河道,包括武进港、太湖运河、殷村港、官渎港、陈东港等,涉及行政区包括无锡市的市区

6 个区(除锡山区)、宜兴市和常州市的武进、新北等 5 个区,面积为 5 272 km²。该地区内人口密集,工业产业集聚,单位面积人口密度及生产总值差异不大,但各地区水资源量差异明显,各行政区间污染源削减及总量控制矛盾突出,鉴于该地区水污染防治工作的现实矛盾与严峻形势,开展重污染区水污染物总量分配研究,不仅对该地区社会经济发展具有现实意义,而且对整个太湖流域的水污染防治作用重大。研究区域范围见图 1。

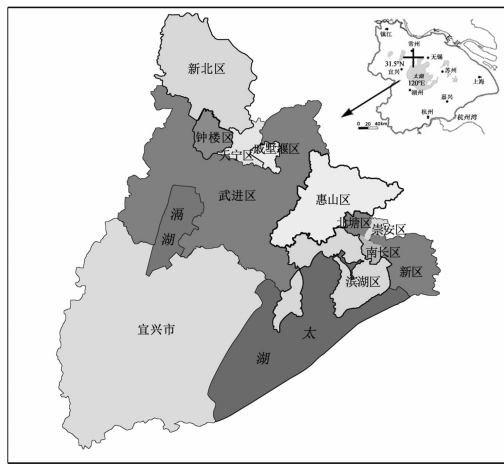


图1 研究区域范围

2 基于信息熵的分配优化模型

2.1 信息熵简介

“熵”的概念出现于 1850 年,是对系统能量密度分布均匀程度的度量,即“熵”反映了系统所处状态的均匀程度,系统状态有序、不均匀,则表示熵值小,反之系统无序、均匀,则表示熵值大。目前,任何可以概化为“系统”的学科领域,均有“熵”的理论活跃其中。熵在其他学科领域的普及应用,首先归功于 Shannon 将熵引入信息论,并将其称为“信息熵”^[6]。信息熵是指在一个不确定的系统中,筛选出能反映系统状态特征的指标并确定为随机变量 X ,随机变量 X 包含系统内各个个体的具体指标值,即 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} (n \geq$

收稿日期:2016-02-28

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:122102310561)。

作者简介:张 剑(1983—),男,河南郑州人,硕士,讲师,主要从事水环境修复和水处理技术研究。E-mail:ahjian2008@163.com。

2), 各个个体指标值对应的概率为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ($0 \leq p_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, n$), 且有 $\sum_{i=1}^n p_i = 1$, 则该系统的信息熵为:

$$e = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i^{[7]}。$$

2.2 信息熵原理在水污染物总量分配中的引入

基于信息熵可实现系统均衡性评价及指标权重确定的作用, 可将其用于污染物分配公平性的研究。在运用信息熵进行污染物优化分配研究中, 引入单位指标负荷污染量 (X_{ij}) 的概念, 即地区污染物排放量与各地区指标大小的比值, 理想的公平状态是各地区污染物排放量与各地区指标大小的比值均相等。利用信息熵评价系统均衡性时, 由信息熵的定义可知, 若各地区单位指标所负荷污染量的差异越小, 则该指标对应的信息熵越大, 表示各地区间污染物分配越公平; 反之若信息熵越小, 则表示地区间差异较大, 分配越不公平。在利用信息熵确定不同指标之间的重要程度时, 将各个指标 (即 j) 的信息熵进行比较, 较小信息熵的指标则表示此指标的单位指标负荷污染量在各地区间的差异较大, 地区分布不均匀, 相比其他指标, 在决定污染物分配公平方面具有更突出的作用, 需赋予较大的权重。若实现各地区间污染物分配更趋公平, 则需增加权重较大的指标的信息熵, 从而缩小地区差异。

2.3 水污染物总量分配优化模型建立

立足重污染区内各地区现状社会发展、自然禀赋等条件, 制定单位人口 (城镇人口)、GDP、水资源及水环境容量指标所负荷污染量的信息熵总和最大化的目标函数, 在相应的算法及约束条件下, 设定污染物分配方案, 求解目标规划方程, 得出各方案对应的污染物地区间削减分配情况。基于信息熵的水污染物总量优化分配的技术路线如图 2 所示。

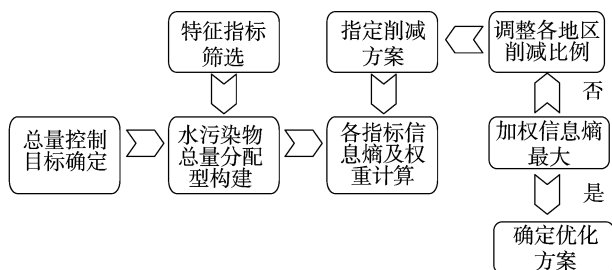


图2 基于信息熵的水污染物总量分配技术路线

分配模型中指标的选择需重点关注与水污染物排放密切相关且体现地区间自然、社会、经济差异的指标。本研究选取地区人口、GDP、水环境容量、水资源量作为污染物总量分配的特征指标 (Z_{ij}), 用以计算单位指标负荷污染量。基于信息熵的水污染物总量优化分配的具体方法如下:

(1) 分地区列出人口、GDP、水环境容量及水资源量为特征指标 (Z_{ij}) 的指标矩阵 (表 1)。

表 1 指标矩阵

	人口数	GDP	COD 水环境容量	水资源量
地区 1	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}	Z_{14}
地区 2	Z_{21}	Z_{22}	Z_{23}	Z_{24}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
地区 n	Z_{n1}	Z_{n2}	Z_{n3}	Z_{n4}

(2) 计算各单位指标负荷污染量及各地区单位指标负荷污染量所占该指标总量的概率, 计算公式如下:

$$X_{ij} = \frac{W_i}{Z_{ij}}; \quad (1)$$

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}}。 \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为指标矩阵中第 i 个地区第 j 项指标的单位负荷污染量; W_i 为第 i 个地区内分配污染物排放量即决策变量; Z_{ij} 为第 i 个地区内第 j 项指标的实际值, 分别为人口数、GDP、环境容量、水资源量; P_{ij} 为第 j 项指标下第 i 个区域的值在此指标中所占的概率。

(3) 信息熵计算。为便于比较各指标的信息熵, 需将实际信息熵进行归一化处理, 即以实际信息熵与最大信息熵 $\ln n$ 的比值作为每项控制指标的单位负荷污染量的信息熵, 经过处理后信息熵大小在 0~1 之间。经过处理后, 可得出若信息熵值越趋近于 1, 则表示研究区域内各地区之间存在较小差距, 指标数值越平均; 信息熵值越趋近于 0, 则表示各地区间差距显著, 指标数值分布极不平均。

$$e_j = - \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \cdot \ln P_{ij}。 \quad (3)$$

式中: e_j 为修正情况下的单位指标负荷污染量的信息熵。

(4) 熵值法确定权重 ω_j :

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^4 (1 - e_j)}。 \quad (4)$$

式中: ω_j 为各指标权重。

(5) 目标函数:

$$\max E = \sum_{j=1}^4 e_j \omega_j。 \quad (5)$$

式中: E 为各个指标单位负荷污染量的信息熵总和。

(6) 约束条件

总量约束条件:

$$\sum_{i=1}^n W_i = (1 - q) \sum_{i=1}^n W_{o(i)}。 \quad (6)$$

各地区基于现状的可实现的削减比例约束:

$$r_{i0} \leq \frac{W_{o(i)} - W_i}{W_{o(i)}} \leq r_{i1}。 \quad (7)$$

式中: $W_{o(i)}$ 为第 i 个地区内污染物排放量现状值; q 为目标总量的削减比例; r_{i0} 、 r_{i1} 为第 i 个地区污染物削减比例的可行上下限。其中 q 和 r_{i0} 、 r_{i1} 需根据当地水污染物总量控制目标及可实现的削减潜力情况确定。

3 太湖重污染区污染物总量分配优化研究

3.1 方案设定

根据国家及地方对总量控制首选水污染物的要求, 本研究选取 COD 为研究水污染物。根据《江苏省太湖流域水环境综合治理实施方案》, 2015 年 COD 排放量比 2010 年减少 13%, 重污染区内污染物也执行上述削减目标 ($q_{\text{COD}} = 13\%$)。当以水环境容量作为削减比例约束条件时, 则水污染物削减压力较大, 在 5 年规划期间实现难度较大。在立足现状、远近结合、逐步实现的原则下, 本研究设定了 3 种方案, 在不同可行的上下限削减比例的约束条件下, 进行重污染区主要水污染物总量分配优化的研究。本研究设定的 3 种方案如下: 方案一, 各地区削减比例上下限设定为: $r_{i0} = 1\%$, $r_{i1} = 20\%$; 方案二, 设定 $r_{i0} = 1\%$, $r_{i1} = 25\%$; 方案三, 设定 $r_{i0} =$

1%, $r_{il}=30\%$ 。

3.2 基础数据及现状分析

指标矩阵中各项指标(Z_{ij})选取太湖流域重污染区内 2011 年各地区人口、GDP、COD 环境容量(陆域)、水资源量及 COD 排放量数据。

3.2.1 人口、GDP、水资源量 依据《2011 年无锡市统计年鉴》《2011 年常州市统计年鉴》。

3.2.2 COD 排放量 工业 COD 排放量根据研究区域内各工业污染源普查数据核算得到;城镇生活源与农村生活源根据各地区统计年鉴中人口资料,运用排污系数法计算得到,其中城镇生活 COD 排污系数为 85 g/(人·d),农村生活 COD 排污系数为 40 g/(人·d);畜禽养殖污染负荷根据行业统计资料,依据浓度实测法获得的排污系数计算得到,排污系数为 COD 17.9 g/[头(只)·d];农田面源测算利用分布式污染负荷模型计算得到,并运用排污系数法进行检验,其中污染物的排污系数为 COD 150 kg/(hm²·年)^[8]。

3.2.3 水环境容量 根据重污染区内水体特征,建立重污染区水环境数学模型,根据研究区域内水文站数据资料及水文水质同步监测数据,对模型进行率定验证,进而逐河段逐时间段计算出研究区域内的水环境容量值,最终汇总出研究区域的水环境容量值^[9]:

$$W_{\text{水环境容量}} = \alpha_{ij} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_{0ij} (C_{sij} - C_{0ij}) + KV_{ij} C_{sij} \circ \quad (8)$$

式中: α_{ij} 为不均匀系数; $0 < \alpha_{ij} \leq 1$; Q_{0ij} 为进口断面的入流流量; C_{0ij} 为进口断面的水质浓度; C_{sij} 为水体水质标准; K 为水质降解系数; V_{ij} 为水体体积。

汇总得到的各基础数据见表 2。

根据加权信息熵的分配模型,计算出 2011 年各项指标单位负荷污染物的信息熵及加权信息熵总和,计算结果见表 3。

由上述计算结果可知,水资源量指标所负荷的污染物的信息熵显著低于其他指标的信息熵值,说明各地区间水资源量存在较大差异,各地区间水资源量与排污量不协调,是污染物优化分配需重点关注指标。宜兴市具有最多的水资源,南长区水资源最少,两者的水资源比值达到 126.3,但宜兴市与南长区的 COD 排放量比值为 4.4,说明水资源量与 COD 排放量地区间分布极不协调。南长区虽然水资源最少,但其 COD 排放量要大于水资源量多于其 4 倍的钟楼区;宜兴市水资源量为北塘区、崇安区、南长区等地区的近 50 倍,但其 COD 排放量与上述各地区的比值要远小于水资源的比值。

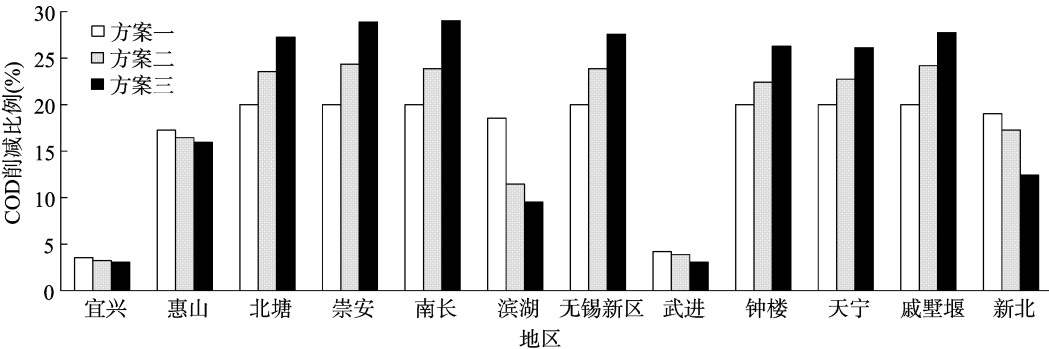


图3 基于最大加权信息熵模型的 3 种方案各地区削减比例

表 2 2011 年太湖重污染区各地区基础数据汇总

地区	人口 (万人)	GDP (亿元)	水资源量 (亿 t)	COD 水环境 容量(t)	COD 排放量(t)
宜兴市	107.6	980.39	15.15	10 329	14 891
惠山区	42.5	518.81	4.59	3 987	7 840
北塘区	25.4	209.4	0.28	549	4 450
崇安区	18.5	372.58	0.18	654	3 890
南长区	32.9	190.03	0.12	623	3 420
滨湖区	46	585.01	5.23	5 008	6 978
无锡新区	32.3	1 115.5	0.34	1 230	8 895
武进区	159.3	1 376.96	11.2	9 971	13 865
钟楼区	31.3	326.51	0.56	1 089	3 293
天宁区	52.1	350.63	0.38	956	3 989
戚墅堰区	10.7	81.85	0.35	560	3 065
新北区	60.6	623.15	4.04	4 948	6 496

表 3 2011 年太湖重污染区各指标信息熵及信息熵加权

年份	信息熵				信息熵加权
	人口	GDP	水资源量	水环境容量	
2011 年	0.965	0.956	0.814	0.924	0.872

从不同指标的信息熵来看,人口、GDP 及水环境容量这 3 项指标的信息熵均超过 0.85,说明各地区污染物的排放量与社会经济指标(人口、GDP)及自然属性指标中的水环境容量具有较高的相符性。

3.3 结果分析

依据构建的污染物分配优化模型,在约束条件下,通过求解目标函数,得到 3 个方案中信息熵的优化结果(表 4)及相对应的太湖重污染区各地区不同方案下水污染物分配量相对于现状排放量的削减比例(图 3)。表 4 结果表明,从方案一至方案三,放宽削减比例约束区间,优化信息熵值逐渐增大,说明污染物在各地地区间分配的公平性增强。图 3 结果显示,在 3 种方案中,除宜兴市、武进区外,其他地区的削减比例

表 4 信息熵优化结果

方案	指标	人口	GDP	水资源量	环境容量	加权总熵
现状	信息熵	0.965	0.956	0.814	0.924	0.872
方案一	优化信息熵	0.968	0.959	0.818	0.930	0.875
	变化幅度	0.003	0.003	0.004	0.006	0.003
方案二	优化信息熵	0.968	0.960	0.825	0.938	0.880
	变化幅度	0.003	0.004	0.011	0.014	0.008
方案三	优化信息熵	0.970	0.963	0.833	0.946	0.885
	变化幅度	0.005	0.007	0.019	0.022	0.013

马悦,郭年冬,张瑞芳,等. 石灰岩坡面花生不同覆盖度水土及养分流失规律[J]. 江苏农业科学,2016,44(9):429-434.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.121

石灰岩坡面花生不同覆盖度水土及养分流失规律

马悦^{1,2}, 郭年冬¹, 张瑞芳^{2,3,4}, 王红^{2,3,4}, 周大迈^{2,3,4}, 张爱军^{2,3,4}

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071000; 2. 河北省山区研究所, 河北保定 071001;

3. 国家北方山区农业工程技术研究中心, 河北保定 071000; 4. 河北省山区农业工程技术研究中心, 河北保定 071000)

摘要:通过室内人工模拟降水的方法,研究花生不同覆盖度石灰岩坡面水土流失和养分流失特征。结果表明:随着覆盖度的增加,坡面产流、产沙量减少,养分流失量与产流产沙量成正比关系;与对照相比,20%覆盖度径流量、泥沙量分别减少22.22%、44.07%;覆盖度增加到95%,径流量、泥沙量分别减少61.11%、80.49%;与对照相比,95%覆盖度坡面有效减少了86.25%氮损失量、91.38%磷损失量、89.57%钾损失量;径流泥沙中各养分含量随着覆盖度的增加而减少。通过对不同处理因素下坡面养分流失量变化进行方程拟合,结果表明:采用三项式方程模拟石灰岩坡面土壤养分流失比较适宜,且20%覆盖度的全效养分与泥沙量拟合系数均超过0.99,呈显著相关。

关键词:石灰岩坡面;花生;水土流失;径流;养分流失量;土壤覆盖度

中图分类号: S158.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)09-0429-06

河北省内太行山岩石裸露面积较大,在漫长的地壳构造运动中造成岩层破损严重,在夏季暴雨季节,泥石流发生频繁,属泥石流发生高危区^[1]。太行山区森林覆盖率低,土壤干旱贫瘠,裸岩区比例高,山地较陡^[2],山区岩石类型以石灰岩、花岗岩、片麻岩为主,其中石灰岩占30.2%。多年来,由于自然因素及人类活动干扰,石灰岩区坡地水土流失情况日

收稿日期:2016-03-31

基金项目:河北省自然科学基金(编号:C2015204155)。

作者简介:马悦(1992—),女,吉林白城人,硕士研究生,主要从事植物营养生态研究。E-mail:mayuehebau@163.com。

通信作者:张爱军,博士,硕士生导师,研究员,主要从事植物营养生态与山区数字化研究。E-mail:zhangaijun@hebau.edu.cn。

接近削减上限,是污染物削减压力较大的区域。对比表2可以发现污染物削减压力较大地区的特征指标占整个重污染区的比例相对并不大,尤其上述地区的水资源量平均比例仅为0.7%,水环境容量比例为0.6%,但其污染物排放量比例却相对偏大,显示出这些地区在较少的自然禀赋下却是重点削减区域。

4 结论

构建了求解信息熵加权总和最大的模型,对太湖重污染区内各地区间水污染物优化分配问题进行了研究。该模型计算步骤简练,指标权重赋值客观,可减少污染物总量分配的人为干扰。研究结果显示,经过上述优化分配,各地区自然经济特征指标所负荷的污染物排放量差异程度降低,更大程度上体现了分配的公平性。研究成果对于开展太湖重污染区污染总量控制研究具有一定的指导意义,同时为当地水环境污染防治工作提供决策依据。

参考文献:

[1] 张修宇,陈海涛. 我国水污染物总量控制研究现状[J]. 华北水

益加重。蔡崇法等对紫色土坡地养分流失的研究中发现,在影响养分流失的植被覆盖度、坡度、降水强度3个因子中,植被覆盖度是影响土壤侵蚀及养分流失程度最大的因子,其次是降水强度,坡度的影响程度相对最小^[3]。本试验采用室内人工模拟降水装置,对降水条件下石灰岩坡地不同覆盖度水土、养分流失情况进行分析,以期对太行山区石灰岩坡耕地水土流失治理、小流域面源污染的防控和山区生态环境治理提供科学依据^[4]。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土为河北省满城县石灰岩山坡土壤,填土时不进行

利水电学院学报,2011,32(5):142-145.

[2] 马中, Dan Dudek, 吴健, 等. 论总量控制与排污权交易[J]. 中国环境科学, 2002, 22(1): 89-92.

[3] Burn D H, McBean E A. Optimization modeling of water quality in an uncertain environment[J]. Water Resources Research, 1985, 21(7): 934-940.

[4] 毛战坡, 李怀恩. 总量控制中削减污染物合理分摊问题的求解方法[J]. 西北水资源与水工程, 1999, 10(1): 25-30.

[5] 边博, 夏明芳, 王志良, 等. 太湖流域重污染区主要水污染物总量控制[J]. 湖泊科学, 2012, 24(3): 327-333.

[6] Weber B H, Depew D J, Smith J D. Entropy, information and evolution: new perspectives on physical and biological evolution[M]. Cambridge: MIT Press, 1988: 173.

[7] 张妍, 杨志峰, 何孟常, 等. 基于信息熵的城市生态系统演化分析[J]. 环境科学学报, 2005, 25(8): 1127-1134.

[8] 姚亚洲. 盐城经济开发区东区污水排放方案研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.

[9] 胡开明. 基于太湖水质达标及溯源方法的人湖污染物减排分配技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2012.