

李祚泳,刘韵,梁晓龙,等.2014.基于指标规范值的环境质量引力普适指数公式[J].环境科学学报,34(2):496-506

Li Z Y, Liu Y, Liang X L, et al. 2014. Gravitational universal index formulae of environmental quality based on normalized index value[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(2):496-506

基于指标规范值的环境质量引力普适指数公式

李祚泳*,刘韵,梁晓龙,汪嘉杨,余春雪

成都信息工程学院,成都 610225

收稿日期:2013-04-10 修回日期:2013-07-10 录用日期:2013-08-13

摘要:为了建立物理意义明确、科学合理、计算简单和普适通用的环境质量评价模型,借鉴自然界普遍存在的万有引力现象和物理学中的规范对称性(不变性)原理,提出环境样本之间也存在类似万有引力的聚类相互作用引力,并在适当设定指标参照值和指标值的规范变换式及“参照级”样本基础上,定义了环境样本的“规范质量”和“规范坐标”的概念,进而分别建立了基于指标规范值的水环境质量和空气环境质量的引力普适指数公式.通过若干实例对公式的实用性进行了效果检验,结果表明,基于指标规范值的环境质量的引力普适指数公式具有形式简洁、规范统一、计算简便和普适通用的特点.

关键词:环境质量;规范变换;指标规范值;万有引力定律;普适指数公式

文章编号:0253-2468(2014)02-496-11 中图分类号:X32 文献标识码:A

Gravitational universal index formulae of environmental quality based on normalized index value

LI Zuoyong*, LIU Yun, LIANG Xiaolong, WANG Jiayang, YU Chunxue

Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

Received 10 April 2013; received in revised form 10 July 2013; accepted 13 August 2013

Abstract: This study aims to set up a model of environmental quality evaluation, which is clear in physical meaning, scientific, reasonable, universal, and simple to calculate. In reference to the universal gravitation existed commonly in nature and the gauge symmetry principle in physics, it is argued that there are also the interactive gravity of cluster among environmental samples that are similar to the universal gravitation. This study sets the proper reference values and normalized transformation forms as well as “reference grade samples” for all indexes, and proposes the concepts of “normalized quality” and “normalized coordinate” for environmental samples. Therefore, it is possible to build the gravitational universal index formulae of water quality and air quality, respectively, based on normalized index values. The applicability of the formulae were verified by some samples. The results shows that the gravitational universal index formulae of environmental quality based on normalized index values exhibits the characteristics of simplicity in form, normalization and unity, convenience during calculation, universality and commonness.

Keywords: environmental quality; normalized transform; normalized index value; universal gravitation law; universal index formula

1 引言(Introduction)

环境质量分析与评价方法主要有指数评价法、不确定评价法和智能评价模型等数十种之多(Flores, 2002; Sanchez *et al.*, 2007; Bokar *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2011; Cai *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2007; Kuo *et al.*, 2004; Dang *et al.*, 2010; 邵磊等, 2010), 这些方法和模型各有其特点(李祚泳等, 2012). 其中, 不确定评价法虽然在环境质量分析评价过程中能在一定程度上反映系统的模糊性、灰色

性和不相容性等特性, 但评价函数的设计和计算工作量皆很大, 且评价函数设计无规律可循, 主观性较大; 人工神经网络等智能评价法虽然在建模过程中模拟了人类大脑思维, 但无明确的物理意义, 且模型参数需要优化, 编程较复杂, 使用不便; 传统的指数评价法虽然形式简洁、计算简单、结果直观, 但评价结果有时难以反映真实污染状况. 已有的各种环境质量分析评价公式、模型和方法均存在一个共同局限: 可比性、普适性和通用性较差. 环境质量分析评价过程实际上是将待评价样本与各级标准样

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51209024)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51209024)

作者简介: 李祚泳(1944—), 男, 教授; * 通讯作者(责任作者), E-mail: lizuoyong@cuit.edu.cn

Biography: LI Zuoyong(1944—), male, professor; * Corresponding author, E-mail: lizuoyong@cuit.edu.cn

本进行相似性比较,按其综合特征值大小进行聚类 and 识别。

万有引力存在于一切自然现象中。牛顿的万有引力定律描述为:任何两个物体之间存在相互作用的万有引力,其数值大小与它们的质量 m_1 和 m_2 的乘积成正比,与它们之间的距离 r_{12} 的平方成反比。由于客观世界在某种意义上具有同一性,因此,已有学者将万有引力定律应用于图像识别和数据挖掘等问题的处理(顾丽敏等,2008;李卫平等,2006)。受到上述研究的启迪,亦可认为:任何两个环境样本之间也存在类似万有引力的潜在的聚类相互作用的引力。因而只要将规范对称性(不变性)思想与万有引力定律相结合,在适当设定指标参照值和指标值的规范变换式及环境“参照级”样本的基础上,定义环境样本的“规范质量”及“规范坐标”的概念后,就可将万有引力定律引入环境质量评价、聚类和识别中,建立基于指标规范值的环境样本(或环境标准样本)与“参照级”样本之间的相互吸引的环境质量的万有引力指数公式(简称引力指数公式),本文并将其应用于4类不同功能水体环境(地表水、地下水、海水和湖泊富营养化水体)质量及室内、外空气环境质量的实例分析评价。以期建立物理意义明确、科学合理、和谐统一、简洁直观、普适通用的环境质量评价指数公式,为环境保护、规划、污染防治技术和管理决策提供理论基础和技术手段。

2 环境指标的选取和指标参照值及指标值的规范变换式(Section and benchmarks set of indexes as well as normalized transformed forms)

依照国家制订的地表水环境质量标准(GB3838—

a. 地表水指标值变换式:

$$x_j = \begin{cases} (c_0/c_j)^2 & c_j \leq c_0 & \text{对 DO} \\ (c_j/c_0)^2 & c_j \geq c_0 & \text{对 COD}_{Cr}、Fe、BOD_5 \\ (c_j/c_0)^{0.5} & c_j \geq c_0 & \text{对 Zn、Hg、Oil、Phenol、CN 和大肠杆菌} \\ c_j/c_0 & c_j \geq c_0 & \text{对其余 14 项指标} \\ 1 & c_j > c_0 & \text{对 DO} \\ 1 & c_j < c_0 & \text{对除 DO 以外的其余 23 项指标} \end{cases} \quad (2)$$

b. 地下水指标值变换式:

2002)、地下水环境质量标准(GB/14848—1993)、海水环境质量标准(GB3097—1997)、适用于我国湖泊水体的富营养化标准及室外空气环境质量标准(GB3095—1996)和室内空气质量标准(GB/T18883—2002),分别选取了4类水体的95项指标(其中,地表水、地下水、海水和富营养化水体分别有24项、33项、23项和15项指标)和空气的29项指标(其中,室内空气15项指标和室外空气7项指标的年、日2种不同分级标准情形)作为水环境和空气环境的评价指标体系。

由于同类环境的不同指标的单位、量纲和同级标准数值都存在差异,因此,若直接依据各指标值描述环境质量不具有可比性和规范性,而采用“规范质量”表示环境质量较为方便。为此,对各指标 j 分别设定一个适当“参照值” c_0 和相对于参照值 c_0 的规范变换式(1)~(7)。各指标参照值 c_0 和指标值的规范变换式的设定原则为:通过对4类水体95项指标各级标准值的观察、分析、比较和提炼,使4类水体不同指标的同级标准值经规范变换后的同级标准规范值 x'_{jk} 差异尽可能小,而不同标准之间的标准规范值差异尽可能大。这一过程需要对选择的 c_0 和规范变换式反复设置、试算和调整,直至满足要求为止。从而可以认为用规范值表示的4类水体的所有95项指标皆可与某个规范指标“等效”;类似,用规范值表示室内、外空气环境的29项指标也与某个规范指标“等效”。

$$x'_j = \frac{1}{10} \ln x_j \quad (1)$$

式中, x'_j 为指标 j 的规范值; x_j 为指标 j 的变换值,对4类水体和空气指标 j 设定的变换式分别如式(2)~式(7)所示。

$$x_j = \begin{cases} (c_j/c_{j0})^2 & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 COD}_{Cr} \\ (c_j/c_{j0})^{0.5} & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 NH}_4^+-\text{N、NO}_2^--\text{N、CN、Mn、Zn、Mo、Co、Cd、Ba、Cu 和 Hg} \\ c_j/c_{j0} & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 其余 21 项 指 标} \\ 1 & c_j < c_{j0} \text{ 对 全 部 33 项 指 标} \end{cases} \quad (3)$$

c. 海水指标值变换式:

$$x_j = \begin{cases} (c_{j0}/c_j)^3 & c_j \leq c_{j0} \text{ 对 DO} \\ (c_j/c_{j0})^2 & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 COD}_{Mn}、\text{DIN(无机氮)、PO}_4^{3-}\text{-P、As、Se、TP(总磷)} \\ (c_j/c_{j0})^{0.5} & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 Cu、Pb、Cd、Hg、Zn、苯酚、SS、Oil、Cr、CN、细菌数} \\ (c_j/c_{j0})^{1/3} & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 有机氯农药} \\ c_j/c_{j0} & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 Chla、PP、BOD}_5 \\ |c_j - 8.0|/c_{j0} & c_j \geq 8.05 \text{ 或 } c_j < 7.95 \text{ 对 pH} \\ 1 & 8.05 > c_j \geq 7.95 \text{ 对 pH} \\ 1 & c_j > c_{j0} \text{ 对 DO} \\ 1 & c_j < c_{j0} \text{ 对 除 pH 和 DO 以外的其余 21 项 指 标} \end{cases} \quad (4)$$

d. 富营养化指标值变换式:

$$x_j = \begin{cases} (c_{j0}/c_j)^{0.5} & c_j \leq c_{j0} \text{ 对 SD、DO} \\ c_j/c_{j0} & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 ppro} \\ (c_j/c_{j0})^{0.5} & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 其余 12 项 指 标} \\ 1 & c_j > c_{j0} \text{ 对 SD、DO} \\ 1 & c_j < c_{j0} \text{ 对 除 SD、DO 以外的其余 13 项 指 标} \end{cases} \quad (5)$$

e. 室外空气环境指标值变换式:

$$x_j = \begin{cases} (c_j/c_{j0})^2 & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 DF(降尘) 和 NO}_2 \\ c_j/c_{j0} & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 除 DF 和 NO}_2 \text{ 以外的其余 5 项 指 标} \\ 1 & c_j < c_{j0} \text{ 对 全 部 7 项 指 标} \end{cases} \quad (6)$$

f. 室内空气环境指标值变换式:

$$x_j = \begin{cases} c_j/c_{j0} & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 SO}_2、\text{CO}_2、\text{NH}_3、\text{甲苯、二甲苯、苯并(a) 芘(BaP)、可吸入颗粒物(IP) 和 氡(Rn)} \\ (c_j/c_{j0})^2 & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 CO、O}_3 \text{ (臭氧)、甲醛(HCHO)、苯(C}_6\text{H}_6\text{)、挥发性有机污染物(TVOC)} \\ (c_j/c_{j0})^{0.5} & c_j \geq c_{j0} \text{ 对 NO}_2、\text{菌落总数} \\ 1 & c_j \leq c_{j0} \text{ 对 所 有 15 项 指 标} \end{cases} \quad (7)$$

式(2)~(7)中, c_j 为指标 j 的实测值或标准值; 参照值 c_{j0} 和室内、外空气 29 项指标的参照值 c_{j0} 分别为设定的指标 j 的参照值, 4 类水体 95 项指标的 别如表 1 和表 2 所示。

表 1 4 类水体 95 项指标的参照值 c_{j0}

Table 1 Benchmarks c_{j0} of 95 items indexes for 4 classified water bodies

地表水		地下水		海水		富营养化水体			
指标	c_{j0}	指标	c_{j0}	指标	c_{j0}	指标	c_{j0}		
DO	20	色度	0.5	Pb	0.001	DO	12	Chl-a	0.05
COD _{Mn}	0.2	浑浊度	0.2	Ni	0.001	COD _{Mn}	0.8	TP	0.1
COD _{Cr}	5	矿化度	30	Mn	0.0005	无机氮(DIN)	0.08	TN	0.001
BOD ₅	1	氯化物	7	Be	5×10^{-6}	PO ₄ ³⁻ -P	0.0065	COD _{Mn}	0.01
NH ₄ ⁺ -N	0.03	氟化物	0.05	Hg	5×10^{-7}	油(oil)	0.0005	BOD ₅	0.01
TP	0.005	碘化物	0.01	Se	0.001	Cu	0.00005	NH ₄ ⁺ -N	0.001
TN	0.03	挥发酚	0.0001	Fe	0.015	Zn	0.0002	BIO	0.2
NO ₃ ⁻ -N	0.5	氨氮	0.0002	COD _{Cr}	4	Pb	0.00002	SD	500

续表 1

地表水		地下水		海水		富营养化水体			
指标	c_{j0}	指标	c_{j0}	指标	c_{j0}	指标	c_{j0}		
NO ₂ ⁻ -N	0.01	硫酸盐	7	COD _{Mn}	0.2	Cd	0.00001	DO	3000
Zn	0.001	亚硝酸盐	5×10^{-5}			Hg	5×10^{-7}	ppro	0.1
CN	0.0001	总硬度	15			As	0.008	NO ₃ ⁻ -N	0.01
Cr ⁶⁺	0.001	硝酸盐	0.3			苯酚	0.00005	NO ₂ ⁻ -N	0.001
Oil	0.0002	有机磷	0.005			总磷(TP)	0.0065	PO ₄ ³⁻ -P	0.0001
Mn	0.01	氰化物	5×10^{-5}			SS(悬浮物)	0.1	TOC	0.002
Cd	1.5×10^{-4}	六价铬	0.001			Chla	0.25	悬浮物	0.01
Pb	0.001	细菌总数	10			PP(浮游植物)	3		
HDS	10	溶固	30			BOD ₅	0.125		
Hg	5×10^{-7}	As	0.001			细菌	0.1		
SO ₄ ²⁻	0.01	Zn	0.002			Cr	0.0005		
Fe	0.1	Mo	5×10^{-5}			Se(硒)	0.005		
溶固	40	Co	0.0002			CN(氰化物)	0.0004		
非离子氨	0.0015	Cd	4×10^{-6}			有机氯农药	2×10^{-6}		
粪大肠菌	0.005	Ba	0.0004			pH	0.05		
挥发酚	1×10^{-5}	Cu	0.0004						

注:地表水中的粪大肠菌和地下水中细菌总数单位均为 10^3 个·L⁻¹,其余指标单位皆为 mg·L⁻¹;海水中 pH 无单位,PP(浮游植物)和细菌总数的单位为 10^4 个·m⁻³;其余指标单位为 mg·L⁻¹;富营养化水体中 chla 和 TP 单位为 μg·L⁻¹,ppro 单位为 g·m⁻²·d⁻¹,SD 单位为 m,BIO 单位为 10^4 个·L⁻¹,其余指标单位为 mg·L⁻¹.

表 2 室内、外空气 29 项指标的参照值 c_{j0} Table 2 Benchmarks c_{j0} of 29 items indexes for the indoor air and outdoor air

室外空气指标参照值			室内空气指标参照值			
指标	c_{j0} (年平均)	c_{j0} (日平均)	指标	c_{j0}	指标	c_{j0}
SO ₂	0.004	0.010	SO ₂	0.03	甲苯	0.015
NO _x	0.004	0.008	NO ₂	0.0015	二甲苯	0.015
NO ₂	0.018	0.030	CO	4.0	苯并(a)芘(BaP)	0.10
PM ₁₀	0.006	0.010	CO ₂	0.008%	IP(颗粒物)	0.01
TSP	0.015	0.020	NH ₃	0.02	TVOC	0.20
DF(降尘)	3	4	O ₃	0.05	菌落总数	15
CO	0.20	0.25	HCHO(甲醛)	0.03	Rn(氡)	30
			C ₆ H ₆ (苯)	0.033		

注:表中 DF 单位为 t·km⁻²·月⁻¹,菌落总数单位为 cfu·m⁻³,Rn 单位为 Bq·m⁻³,其余指标单位为 mg·m⁻³.

3 基于指标规范值的环境质量的引力普适指数公式 (Universal index formulae of environmental quality represented with normalized index value based on universal gravitation)

3.1 环境质量引力普适指数公式

由于环境质量类别的有序性,因此,将万有引力定律用于描述环境质量时,需设定指标 j 的环境质量的“参照级”样本,此“参照级”样本的“规范质量”为 $M_{j\infty}$. 设“参照级”样本对环境各级标准样本或其他环境样本有潜在的聚类作用力,这种力可用引力公式来表示. 依据万有引力定律,其引力大小与指标 j 的“参照级”样本的“规范质量” $M_{j\infty}$ 和指标 j 的样本的“规范质量” M_j (或指标 j 的各级标准样本

的“规范质量” M_{jk}) 的乘积成正比,与它们之间的距离平方成反比. 若以横坐标表示样本的“规范质量”,并用指标 j 的规范值 x'_j 表示,即 $M_j = x'_j$,并规定任意指标 j 的“参照级”样本的“规范质量” $M_{j\infty}$ 皆等于“单位质量”,即有 $M_{j\infty} = x'_{j\infty} = 1$ ($j = 1, 2, \dots, m$). $x'_{j\infty} = 1$ 的意义为“参照级”样本的指标 j 的变换值 $x_{j\infty}$ 足够大. 此外,以纵坐标表示样本的“规范坐标”,并置“参照级”样本的“规范坐标”于纵坐标轴上 $r'_{j\infty} = 1$ 处. 因此,指标 j 的“参照级”样本应位于 $x'_{j\infty} = 1$ 和 $r'_{j\infty} = 1$ 两条直线的交点 P,而各级标准样本(或样本)应位于坐标原点 O 与点 P 的连线上. 其余各级标准样本(或样本)的“规范坐标”可用 r'_{jk} (或 r'_j) 表示. 因此,各级标准样本(或样本)

与“参照级”样本之间的“规范距离”应为 $1 - r'_{jk}$ (或 $1 - r'_j$)。然后依据万有引力原理,指标 j 的各级标准样本(或待评价样本)与“参照级”样本之间聚类相互吸引的环境质量引力指数公式为:

$$I_j = G \frac{M_{j\infty} \cdot M_j}{(r'_{j\infty} - r'_j)^2} = G \frac{x'_j}{(1 - r'_j)^2} \quad (8)$$

式中, M_j 和 $M_{j\infty}$ 分别为指标 j 的样本“规范质量”和“参照级”样本“规范质量”; r'_j 为指标 j 的样本的“规范坐标”,显然 $r'_j = x'_j$; G 为环境质量引力常数,其取值大小只是为了控制指数 I_j 的尺度范围,对评价结果无任何影响,为简单起见,在此取 $G = 1$ 。从而式(8)可表示为:

$$I_j = \begin{cases} \frac{x'_j}{(1 - x'_j)^2} & x'_j < x'_b \\ \frac{x'_b}{(1 - x'_b)^2} & x'_j \geq x'_b \end{cases} \quad (9)$$

式中, x'_j 为指标 j 的规范值;分母中 $(1 - x'_j)$ 为环境样本到设定的“参照级”样本的规范距离; I_j 为指标 j 的环境质量引力普适指数; x'_b 为对不同类型的环境设置的指标规范值的阈值。这是因为引力指数值 I_j 近似呈规范值 x'_j 的三次幂增大,为了限制过大的 x'_j 对综合引力指数 I_j 的影响,而设置了阈值 x'_b 。 x'_b 一般设置为某类环境最严重污染等级的所有指标规范值均值 \bar{x}'_j 的 1.1 ~ 1.3 倍。因此,对水质指标分 5 级标准,其最严重污染的第 5 级标准的所有指标规范值均值 $\bar{x}'_5 \approx 0.45$,故取其均值的 1.1 倍,即取阈值 $x'_b = 0.5$;而对空气指标分 3 级标准,其严重污染的第 3 级标准所有指标规范值均值 $\bar{x}'_3 \approx 0.31$,近似取其均值的 1.3 倍,即取阈值 $x'_b = 0.4$ 。若污染物浓度的规范值 $x'_j \geq x'_b$,则表明其对环境污染的危害程度已趋于饱和。从而得到 4 类水体的任一水质指标 j 的规范值 x'_j 所表征水体样本与指标 j 的“参照级”样本之间的引力指数公式如式(10)所示。

$$I_{j,w} = \begin{cases} \frac{x'_j}{(1 - x'_j)^2} & x'_j \leq 0.5 \\ 2 & x'_j > 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

式中, x'_j 为水质指标 j 的规范值。

类似地,任一空气指标的规范值所表征的室内、外空气环境样本与空气指标的“参照级”样本之间的引力指数公式如式(11)所示。

$$I_{j,A} = \begin{cases} \frac{x'_j}{(1 - x'_j)^2} & x'_j \leq 0.4 \\ 1.1111 & x'_j > 0.4 \end{cases} \quad (11)$$

式中, x'_j 为室内、外空气指标 j 的规范值。

分别将 4 类水体 95 项指标的各级标准规范值 x'_{jk} 代入式(10),对第 1 ~ 4 级标准,将 4 类水体各级标准的所有 95 项指标的引力指数值求平均;对第 5 级标准,将地表水、地下水和富营养化 3 类水体的 72 项指标的引力指数值求平均。由于海水只分 4 级,因此,得到 4 类水体总体的引力普适指数值的分级标准值 I_k ,具体如表 3 所示。类似,将室内、外空气的 29 项指标的引力指数值求平均,得到室内、外空气质量的引力普适指数值的 3 级分级标准值 I_k ,具体如表 3 所示。而 m 项指标的水质引力综合指数公式和空气质量引力综合指数公式皆为:

$$I = \sum_{j=1}^m w_j I_j \quad (12)$$

式中, I_j 为由式(10)或式(11)计算得到的指标 j 的引力指数值; w_j 为指标 j 的归一化权值,即满足 $\sum_{j=1}^m w_j = 1$,它可以视实际问题需要,采用某种方法确定。一般情况下,只要各指标的规范值 x'_j 差异不大,可视各指标为等权即可;但若最大指标规范值 $x'_{j,\max}$ 与最小指标规范值 $x'_{j,\min}$ 差异较大,则可采用如式(13)所示的对各指标规范值 x'_j 的线性加权计算权值。

$$w_j = x'_j / \sum_{j=1}^m x'_j \quad (13)$$

表 3 4 类水体及室内外空气环境的引力普适指数的分级标准值 I_k
Table 3 Grade standard values of universal indexes for classified water bodies and air environment based on universal gravitation

环境类型	I_k				
	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$
陆地 3 类水体	0.3114	0.5163	0.7715	1.0750	1.4489
海水水体	0.3114	0.5163	0.7715	1.0750	
室内、外空气环境	0.2465	0.4553	0.6234		

3.2 引力普适指数公式的可靠性分析

由于不同的环境指标的单位、量纲和数值大小往往都不相同,因此,无论采用何种方法作综合评价,都不可避免地必须对原始指标数据进行变换(比如极差归一化变换、标准差变换和本文采用的规范化变换等),并将变换后的指标值代入模型、方法或公式进行分析、计算。因此,经多次变换后难免数据不失真,对公式的计算结果的可靠性有一定影响,此种影响程度可以通过对引力指数公式的灵敏度分析来确定。

由式(10)或式(11),可得:

$$\frac{\Delta I}{I} = \left(\frac{1+x'_j}{1-x'_j}\right) \frac{\Delta x'_j}{x'_j} \quad (14)$$

又由式(1),可得:

$$\frac{\Delta x'_j}{x'_j} = \frac{1}{\ln x_j} \frac{\Delta x_j}{x_j} = \frac{1}{10x'_j} \frac{\Delta x_j}{x_j} \quad (15)$$

而变换式(2)~(7)皆可表示为如式(16)所示的一般形式.

$$x_j = \left(\frac{c_j}{c_p}\right)^n \quad (16)$$

式中, n 为可正、可负的实数. 由式(16)可得:

$$\frac{\Delta x_j}{x_j} = n \frac{\Delta c_j}{c_j} \quad (17)$$

将式(17)、(15)代入式(14)得:

$$\frac{\Delta I}{I} = \left[\left(\frac{1+x'_j}{1-x'_j}\right) \frac{n}{10x'_j}\right] \frac{\Delta c_j}{c_j} \quad (18)$$

根据系统灵敏度定义,引力指数 I 对指标测值 c_j 的灵敏度 S_c 如式(19)所示.

$$S_c = \frac{\Delta I}{I} / \frac{\Delta c_j}{c_j} \quad (19)$$

式中, $\frac{\Delta I}{I}$ 和 $\frac{\Delta c_j}{c_j}$ 分别表示引力指数的相对误差和指标测值的相对误差. 式(19)可写为:

$$\frac{\Delta I}{I} = S_c \frac{\Delta c_j}{c_j} \quad (20)$$

比较式(18)和式(20),可得如式(21)所示的灵敏度计算式.

$$S_c = \left(\frac{1+x'_j}{1-x'_j}\right) \frac{n}{10x'_j} \quad (21)$$

若 n 固定,将 S_c 对 x'_j 求导,并令 $S'_c = 0$, 得 $x'_j = \sqrt{2} - 1 \approx 0.4142$ 时, S_c 有极小值 $0.5828n$. 由于变换式(2)~(7)中,对多数指标只取 $n = \pm 2, \pm 1, \pm 0.5$. 而公式(10)和式(11)中, x'_j 取值范围为 $x'_j \in [0, 0.5]$ (对水体), $x'_j \in [0, 0.4]$ (对空气). 当 n 为上述值时, x'_j 分别取为如表 4 所示值时,由式(21)计算得灵敏度 S_c 值如表 4 所示.

表 4 相应于不同规范值 x'_j 的引力指数 I 对于指标监测数据 c_j 的灵敏度 S_c

Table 4 Sensitivity of gravitational index I corresponding to different normalized index values x'_j for the monitoring data c_j

n	S_c							
	$x'_j = 0.5$	$x'_j = 0.45$	$x'_j = 0.4142$	$x'_j = 0.40$	$x'_j = 0.30$	$x'_j = 0.20$	$x'_j = 0.10$	$x'_j = 0.05$
± 0.5	± 0.30	± 0.2930	± 0.2914	± 0.2917	± 0.3095	± 0.3750	± 0.6111	± 1.1053
± 1	± 0.60	± 0.5859	± 0.5828	± 0.5833	± 0.6190	± 0.75	± 1.2222	± 2.2105
± 2	± 1.20	± 1.1718	± 1.1656	± 1.1666	± 1.2380	± 1.50	± 2.4444	± 4.4210

从表 4 可见,当变换式的参数 $n \in [-1, 1]$ 时,其各级标准范围内模型灵敏度 $S_c \leq 1$,即引力指数 I 对指标测值 c_j 的灵敏度 S_c 为低灵敏度模型,表明实测值的相对误差 $\frac{\Delta c_j}{c_j}$ 不会被放大,反而被缩小;只有当 $n = \pm 2$ 的变换,才有可能被放大,但引力指数 I 的相对误差 $\frac{\Delta I}{I}$ 也仅是 $\frac{\Delta c_j}{c_j}$ 的 1~2 倍,故引力指数公式具有可靠性.

4 实例分析(Cases study)

为了验证式(10)和式(11)用于水体环境质量和空气环境质量评价的可行性和实用性,以下应用 6 个实例对式(10)和式(11)进行验证.

4.1 地表水水质评价实例分析

2008 年图们江干流 6 个断面的 6 项地表水水质指标监测数据 c_j (唐立新等,2010),以及由式(1)和式(2)计算得到的指标规范值 x'_j 如表 5 所示. 对

表 5 图们江各断面水质指标监测数据 c_j ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及规范值 x'_j 和评价结果

Table 5 Monitoring values c_j ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) of water quality indexes and normalized values x'_j as well as assessment results of water quality for the Tumen River basen in China

断面	DO		COD _{Mn}		COD _{Cr}		BOD ₅		NH ₄ ⁺ -N		Phenol		引力指数公式		密切值法 评价结果
	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	I_w	级别	
1	9.2	0.1553	2.03	0.2317	6.7	0.0585	1.0	0.0000	0.100	0.1204	0.001	0.2303	0.2034	1	1
2	7.8	0.1883	16.10	0.4388	37.5	0.4030	6.0	0.3584	0.090	0.1099	0.002	0.2649	0.8949	4	4
3	7.7	0.1909	26.00	0.4868	63.1	0.5071	8.5	0.4280	0.160	0.1674	0.003	0.2852	1.3214	5	5
4	7.7	0.1909	3.65	0.2904	9.6	0.1305	1.0	0.0000	0.035	0.0154	0.001	0.2303	0.2409	1	1
5	8.0	0.1833	8.70	0.3773	23.7	0.3112	2.2	0.1577	0.110	0.1299	0.001	0.2303	0.4477	2	2
6	5.0	0.2773	18.00	0.4500	48.1	0.4528	9.0	0.4394	1.970	0.4185	0.007	0.3276	1.1485	5	5

断面2和3,采用式(13)对引力指数值进行加权计算;其余断面在视指标为等权的情况下,用式(10)和式(12)计算得到各监测点水质引力综合指数值,并根据表3中3类陆地水体的引力综合指数值的分级标准做出水质类别判断结果(表5).表5中还列出了参考文献(唐立新等,2010)中用密切值法作出的评价结果.可以看出,利用引力普适指数公式和用密切值法对6个断面水质做出的评价结果,完全一致.

4.2 地下水水质评价实例分析

丰县5个监测点的5项地下水指标监测数据 c_j (刘洪等,2009),以及由式(1)和式(3)计算得到的指标规范值 x'_j 如表6所示.在视各指标为等权情况下,用式(10)和式(12)计算得到各监测点水质引力综合指数的指数值,并根据表3中3类陆地水体的综合指数值分级标准做出水质类别判断结果(表6).表中还列出文献(刘洪等,2009)中用多属性决策分析法(TOPSIS)做出的评价结果,可以看出,2种方法做出的评价结果完全一致.

表6 丰县5个地下水监测点的指标监测数据 c_j ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)及其规范值 x'_j 和评价结果

Table 6 Monitoring values c_j ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) of water quality indexes and normalized values x'_j as well as assessment results of groundwater quality for Feng city in China

测点	HDS		TDS		F^-		Cl^-		SO_4^{2-}		引力指数公式		TOPSIS 评价等级
	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	I_w	级别	
1	379.0	0.3229	1735	0.4058	2.22	0.3793	128.0	0.2906	209	0.3396	0.8389	4	4
2	140.0	0.2234	1040	0.3546	0.56	0.2416	85.2	0.2499	175	0.3219	0.5572	3	3
3	92.1	0.1815	1108	0.3609	2.96	0.4081	101.0	0.2669	146	0.3038	0.6886	3	3
4	351.0	0.3153	1059	0.3564	3.54	0.4260	105.0	0.2708	112	0.2773	0.7732	3~4	3
5	1146.0	0.4336	4505	0.5012	1.61	0.3472	534.0	0.4334	1819	0.5560	1.5033	5	5

4.3 海水水质评价实例分析

珠江口2002—2003年3个站点8项海水指标监测数据 c_j (李占东等,2005)如表7所示.由式(1)和式(4)计算出的指标规范值 x'_j 如表8所示.由于站点1的2003-8和站点2的2002-5,2002-8和2003-5样本不同指标的规范值 x'_j 相差较大,因而需用式(13)对引力指数值进行加权计算外,其余日期

采样点则视各指标为等权,再用式(10)和式(12)计算得到各站点海水水质引力综合指数值,并根据表3中海水水质引力指数分级标准做出评价结果(表8).表中还列出文献(李占东等,2005)中用BP神经网络评价法做出的评价结果.可以看出,全部12个样本2种方法的评价级别完全一致.

表7 珠江口2002—2003年3个站点水质指标监测数据 c_j

Table 7 Monitoring values c_j of sea water indexes at Pearl River Estuary in China(2002—2003)

站点	采样日期 (年-月)	c_j ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)							
		DO	无机氮	活性磷酸盐	石油类	COD	Cu	Pb	Zn
1	2002-5	5.38	0.538	0.007	0.054	1.11	0.0046	0.0018	0.073
	2002-8	5.86	0.178	0.022	0.032	2.72	0.0176	0.0035	0.032
	2003-5	5.86	0.378	0.032	0.025	1.52	0.006	0.0011	0.019
	2003-8	4.03	1.126	0.027	0.166	1.83	0.0082	0.0224	0.041
2	2002-5	5.74	0.346	0.003	0.002	0.99	0.0062	0.0002	0.099
	2002-8	5.96	0.075	0.026	0.059	1.73	0.0065	0.0031	0.026
	2003-5	4.58	0.721	0.032	0.033	1.22	0.0027	0.0005	0.033
	2003-8	4.01	1.464	0.103	0.06	1.76	0.0113	0.0176	0.147
3	2002-5	7.05	0.129	0.005	0.062	1.4	0.0096	0.002	0.127
	2002-8	6.86	0.059	0.01	0.014	2.6	0.0108	0.0024	0.045
	2003-5	6.63	0.316	0.024	0.002	0.65	0.0032	0.0014	0.008
	2003-8	5.7	0.81	0.034	0.089	1.01	0.0054	0.0219	0.034

表 8 珠江口 2002—2003 年 3 个站点水质指标规范值 x'_j 和评价结果Table 8 Normalized values x'_j of sea water indexes and assessment results at Pearl River Estuary in China (2002—2003)

站点	采样日期	x'_j								引力指数公式		BP 网络
		DO	无机氮	活性磷酸盐	石油类	COD	Cu	Pb	Zn	I_w	级别	
1	2002-5	0.2407	0.3812	0.0148	0.2341	0.0655	0.2261	0.2250	0.2950	0.4060	2	2
	2002-8	0.2150	0.1600	0.2438	0.2079	0.2448	0.2932	0.2582	0.2538	0.4093	2	2
	2003-5	0.2150	0.3106	0.3188	0.1956	0.1284	0.2394	0.2004	0.2277	0.4087	2	2
	2003-8	0.3273	0.5289	0.2848	0.2903	0.1655	0.2550	0.3511	0.2662	0.8915	4	4
2	2002-5	0.2212	0.2929	0.0000	0.0693	0.0426	0.2410	0.1151	0.3102	0.4486	2	2
	2002-8	0.2100	0.0000	0.2773	0.2385	0.1543	0.2434	0.2522	0.2434	0.4137	2	2
	2003-5	0.2890	0.4397	0.3188	0.2095	0.0844	0.1994	0.1609	0.2553	0.6618	3	3
	2003-8	0.3288	0.5814	0.5526	0.2394	0.1577	0.2710	0.3390	0.3300	0.9234	4	4
3	2002-5	0.1596	0.0956	0.0000	0.2410	0.1119	0.2629	0.2303	0.3227	0.3099	1~2	2
	2002-8	0.1678	0.0000	0.0862	0.1666	0.2357	0.2688	0.2394	0.2708	0.3018	1	1
	2003-5	0.1780	0.2747	0.2613	0.0693	0.0000	0.2079	0.2124	0.1844	0.2870	1	1
	2003-8	0.2233	0.4630	0.3309	0.2591	0.0466	0.2341	0.3499	0.2568	0.6163	3	3

4.4 湖库富营养化评价实例分析

长江中下游 45 个湖泊的 5 项富营养化指标监测值 c_j (李祚泳等, 2010), 以及由式(1)和式(5)计算出的指标规范值 x'_j 如表 9 所示. 在视各指标为等权情况下, 用式(10)和式(12)计算出引力综合指数

的指数值, 并根据表 3 中 3 类水体的综合指数值分级标准作出的水质类别判断结果(表 9). 表中还列出文献(李祚泳等, 2010)用营养状态指数公式 TSI_c 作出的评价结果. 可以看出, 2 种方法作出的评价结果完全一致.

表 9 长江中下游 45 个湖泊富营养化指标监测数据 c_j 及其规范值 x'_j 和引力指数公式评价结果Table 9 Monitoring values c_j of water quality indexes and normalized values x'_j as well as assessment results of eutrophication for 45 lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

湖区	Chla		TP		TN		COD _{Mn}		SD		引力指数公式		TSI _c 评价级别
	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	I_w	级别	
淀山湖	32.8	0.3243	168	0.3713	2.939	0.3993	7.55	0.3313	0.53	0.3425	0.8579	4	重富
元荡湖	24.08	0.3089	150	0.3657	2.441	0.3900	6.83	0.3263	0.43	0.3529	0.8331	4	重富
澄湖	57.62	0.3525	292	0.3990	2.837	0.3975	7.29	0.3296	0.51	0.3444	0.9150	4	重富
阳澄湖	6.98	0.2469	88	0.3390	0.753	0.3312	5.52	0.3157	1.13	0.3046	0.6512	3	富
金鸡湖	77.02	0.3670	230	0.3870	3.532	0.4085	8.58	0.3377	0.51	0.3444	0.9369	4	重富
独墅湖	72.05	0.3637	290	0.3986	3.542	0.4086	8.76	0.3388	0.43	0.3529	0.9573	4	重富
梅梁湖	17.45	0.2928	172	0.3725	2.654	0.3942	7.99	0.3342	0.51	0.3444	0.8321	4	重富
太湖	7.89	0.2531	108	0.3492	1.771	0.374	5.12	0.3119	0.58	0.338	0.7325	3	富
濠湖	6.27	0.2416	59	0.3190	1.051	0.3479	5.95	0.3194	1.06	0.3078	0.6516	3	富
长荡湖	25.77	0.3122	116	0.3528	2.275	0.3865	6.00	0.3198	0.54	0.3415	0.8017	4	重富
天目湖	11.32	0.2711	73	0.3297	0.885	0.3393	3.79	0.2969	1.38	0.2946	0.6427	3	富
南漪湖	9.83	0.2641	86	0.3378	2.339	0.3879	5.45	0.3150	0.84	0.3194	0.7309	3	富
固城湖	4.29	0.2226	48	0.3087	0.617	0.3212	4.12	0.3011	2.75	0.2602	0.5606	3	富
石白湖	4.83	0.2285	51	0.3117	0.611	0.3208	3.83	0.2974	1.56	0.2885	0.5819	3	富
玄武湖	77.02	0.3670	189.8	0.3774	2.0973	0.3824	8.16	0.3352	0.44	0.3518	0.8976	4	重富
莫愁湖	71.78	0.3635	515.4	0.4274	3.2364	0.4041	9.60	0.3433	0.42	0.3541	0.9967	4	重富
巢湖	15.67	0.2874	192.5	0.3781	3.035	0.4009	5.60	0.3164	0.36	0.3618	0.8452	4	重富
石塘湖	10.4	0.2669	71.1	0.3283	1.003	0.3455	4.90	0.3097	0.47	0.3485	0.7004	3	富
菜籽湖	13.81	0.2811	93.5	0.3420	0.6711	0.3254	3.50	0.2929	0.65	0.3323	0.6760	3	富
武昌湖	7.15	0.2481	65.1	0.3239	0.5234	0.3130	4.10	0.3008	0.75	0.3251	0.6280	3	富
麻塘湖	4.37	0.2235	47.5	0.3082	0.4166	0.3016	3.30	0.2900	1.74	0.2830	0.5517	3	富

续表 9

湖区	Chla		TP		TN		COD _{Mn}		SD		引力指数公式		TSI _c 评价级别
	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	I_w	级别	
黄湖	2.26	0.1906	49.3	0.3100	0.7366	0.3301	3.60	0.2943	0.95	0.3133	0.5866	3	富
大官湖	4.05	0.2197	56.3	0.3167	0.7414	0.3304	3.60	0.2943	0.81	0.3213	0.6129	3	富
泊湖	3.45	0.2117	66.8	0.3252	0.598	0.3197	3.06	0.2862	0.76	0.3245	0.6036	3	富
花凉亭水库	7.52	0.2507	36	0.2943	0.3174	0.2880	2.4	0.2740	3.72	0.2450	0.5111	2	中
龙感湖	3.71	0.2153	51	0.3117	0.7743	0.3326	4.1	0.3008	0.84	0.3194	0.6119	3	富
鄱阳湖	2.65	0.1985	47	0.3076	0.6170	0.3212	1.3	0.2434	1.53	0.2895	0.5293	3	富
甘棠湖	24.64	0.3100	548.9	0.4305	2.8649	0.3980	5.6	0.3164	0.36	0.3618	0.9285	4	重富
八里湖	11.66	0.2726	113.6	0.3518	1.2096	0.3549	3.6	0.2943	0.53	0.3425	0.7176	3	富
太白湖	4.72	0.2274	125.5	0.3567	1.4293	0.3632	4.6	0.3066	0.37	0.3604	0.7315	3	富
武山湖	35.80	0.3287	207.4	0.3819	2.3589	0.3883	8.3	0.3361	0.41	0.3553	0.8767	4	重富
赤东湖	16.72	0.2906	68	0.3261	0.764	0.3319	3.7	0.2957	0.63	0.3338	0.6775	3	富
策湖	3.19	0.2078	38	0.2970	0.997	0.3452	3.2	0.2884	0.94	0.3138	0.5947	3	富
磁湖	59.36	0.3540	141	0.3626	1.872	0.3767	4.3	0.3032	0.49	0.3464	0.8291	4	重富
大冶湖	7.22	0.2486	72	0.3290	1.705	0.3721	2.7	0.2799	0.59	0.3371	0.6843	3	富
保安湖	5.58	0.2357	36	0.2943	0.348	0.2926	2.2	0.2697	1.54	0.2891	0.5314	3	富
梁子湖	5.53	0.2353	38	0.2970	0.491	0.3098	2.4	0.2740	1.36	0.2954	0.5537	3	富
东湖	48.98	0.3444	172	0.3725	1.865	0.3766	5.1	0.3117	0.86	0.3183	0.8117	4	重富
汤逊湖	5.95	0.2390	43	0.3032	1.452	0.3640	2.2	0.2697	0.88	0.3171	0.6245	3	富
鲁湖	9.89	0.2644	51	0.3117	0.600	0.3198	2.3	0.2719	0.82	0.3207	0.6091	3	富
斧头湖	4.27	0.2224	35	0.2929	0.532	0.3138	2.7	0.2799	0.97	0.3123	0.5640	3	富
西凉子湖	2.14	0.1878	30	0.2852	0.439	0.3042	1.7	0.2568	1.53	0.2895	0.5019	2	中
黄盖湖	14.60	0.2838	50	0.3107	1.139	0.3519	4.5	0.3055	0.69	0.3293	0.6821	3	富
洪湖	31.02	0.3215	62	0.3215	1.295	0.3583	4.6	0.3066	1.19	0.3020	0.7049	3	富
洞庭湖	3.90	0.2178	44	0.3043	1.087	0.3496	2.1	0.2674	0.53	0.3425	0.6203	3	富

注:Chla 和 TP 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,SD 单位为 m,其余指标单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;两种评价结果对应关系:1 级(贫营养)、2 级(中营养)、3 级(富营养)、4 级(重富营养)、5 级(极富营养).

4.5 室外空气质量评价实例分析

武汉市不同测点的空气指标日平均浓度监测数据 c_j (郭绍英等,2009),以及由式(1)和式(6)计算出的指标规范值 x'_j 如表 10 所示.在视各指标为等权的情况下,将表 10 中的 3 项指标规范值 x'_j 分别代入式(11)和式(12)所示的引力指数公式,计算

得到武汉市各测点空气质量引力综合指数值,并根据表 3 中空气质量综合指数值分级标准作出的判断结果(表 10).表中还列出了参考文献(郭绍英等,2009)中用集对分析法作出的评价结果.可以看出,引力指数公式评价结果与集对分析评价结果完全一致.

表 10 武汉市不同测点空气质量监测数据 c_j 及其规范值 x'_j 和评价结果Table 10 Monitoring values c_j of outdoor air quality indexes and normalized values x'_j as well as assessment results of air quality for Wuhan city in China

监测点	SO ₂		NO ₂		TSP		引力指数公式		集对分析法 评价结果
	$c_j/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	x'_j	$c_j/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	x'_j	$c_j/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	x'_j	I_w	级别	
1	0.075	0.2015	0.046	0.0855	0.362	0.2896	0.3307	2	2
2	0.107	0.2370	0.124	0.2838	0.661	0.3498	0.5960	3	3
3	0.166	0.2809	0.105	0.2506	0.537	0.3290	0.5734	3	3
4	0.063	0.1841	0.059	0.1353	0.392	0.2976	0.3535	2	2
5	0.037	0.1308	0.026	0	0.194	0.2272	0.1845	1	1
6	0.061	0.1808	0.040	0.0575	0.420	0.3045	0.3212	2	2
7	0.032	0.1163	0.027	0	0.314	0.2754	0.2245	1	1
8	0.012	0.0182	0.021	0	0.171	0.2146	0.1223	1	1

注:SO₂、NO₂ 和 TSP 均为日平均监测数据.

4.6 室内空气环境质量评价实例分析

2002 年 11—12 月长春市 30 个室内样本 5 项指标监测数据 c_j (汤红岩等,2005),以及由式(1)和式(7)计算出的指标规范值 x'_j 如表 11 所示. 由于样本 1、11~15、26 和 27 的不同指标计算得到的规范值相差较大,因此,在用式(12)计算引力综合指数时,需用式(13)对引力指数值进行加权计算,其余 22 个样本的指标视作等权,计算得到各样本引力综合指数值,并根据表 3 中空气质量引力指数分级标准做出评价结果(表 11). 表中还列出文献(汤红

岩等,2005)中用层次分析评价法做出的评价结果. 由于文献(汤红岩等,2005)中的层次分析评价法将室内空气污染划分为清洁(1*级)、未污染(2*级)、轻污染(3*级)、中污染(4*级)和重污染(5*级)等 5 级;而本文引力指数法将其划分为 1 级、2 级、3 级. 二者对应关系为:(1*级清洁、2*级未污染)对应 1 级,(3*级轻污染)对应 2 级,(4*级中污染、5*级重污染)对应 3 级. 由表 11 可以看出,二种方法评价结果完全一致.

表 11 长春市 30 个室内样本监测数据 c_j 及其规范值 x'_j 和评价结果Table 11 Monitoring values c_j of indoor air quality indexes and normalized values x'_j as well as assessment results of air quality for Changchun city in China

样本	甲醛		氨		苯		二甲苯		氡		引力指数公式		层次分析	
	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	c_j	x'_j	I_w	级别	法级别	法级别
1	0.089	0.2175	1.060	0.3970	0.0890	0.1984	0.0270	0.0588	71.0	0.0861	0.6106	3	中污染	中污染
2	0.039	0.0525	0.348	0.2856	0.0770	0.1695	0.2700	0.2890	32.7	0.0086	0.2889	2	轻污染	轻污染
3	0.069	0.1666	0.210	0.2351	0.3320	0.4617	0.8400	0.4025	98.1	0.1185	0.6033	3	中污染	中污染
4	0.184	0.3627	0.850	0.3750	0.5490	0.5623	0.1300	0.2159	67.0	0.0803	0.6821	3	中污染	中污染
5	0.120	0.2773	0.580	0.3367	0.5860	0.5754	1.7450	0.4756	65.4	0.0779	0.7220	3	重污染	重污染
6	0.100	0.2408	0.198	0.2293	0.0280	0.0000	0.0400	0.0981	57.2	0.0645	0.1996	1	未污染	未污染
7	0.099	0.2388	0.146	0.1988	0.0310	0.0000	0.0470	0.1142	87.6	0.1072	0.2004	1	未污染	未污染
8	0.136	0.3023	0.173	0.2158	1.1500	0.7102	0.4040	0.3293	143.0	0.1562	0.6069	3	重污染	重污染
9	0.150	0.3219	0.056	0.1030	0.0250	0.0000	0.2600	0.2853	60.0	0.0693	0.2933	2	轻污染	轻污染
10	0.124	0.2838	1.010	0.3922	0.0770	0.1695	0.4200	0.3332	95.0	0.1153	0.5515	3	中污染	中污染
11	0.091	0.2219	0.930	0.3839	0.0970	0.2156	0.0310	0.0726	87.0	0.1065	0.5654	3	中污染	中污染
12	0.094	0.2284	0.880	0.3784	0.0950	0.2115	0.0310	0.0726	73.0	0.0889	0.5571	3	中污染	中污染
13	0.080	0.1962	1.150	0.4052	0.0820	0.1820	0.0280	0.0624	67.0	0.0803	0.6169	3	重污染	重污染
14	0.090	0.2197	1.230	0.4119	0.0710	0.1532	0.0250	0.0511	56.0	0.0624	0.6423	3	重污染	重污染
15	0.081	0.1994	0.780	0.3664	0.0250	0.0000	0.0210	0.0336	64.0	0.0758	0.5988	3	中污染	中污染
16	0.040	0.0575	0.376	0.2934	0.0810	0.1796	0.2100	0.2639	32.7	0.0086	0.2830	2	轻污染	轻污染
17	0.046	0.0855	0.370	0.2918	0.0680	0.1446	0.1760	0.2462	35.2	0.0160	0.2663	2	轻污染	轻污染
18	0.184	0.3627	0.850	0.3750	0.5490	0.5623	1.8720	0.4827	65.7	0.0784	0.8335	3	重污染	重污染
19	0.120	0.2773	0.586	0.3378	0.5800	0.5733	1.7650	0.4768	68.0	0.0818	0.7240	3	重污染	重污染
20	0.155	0.3284	0.660	0.3497	0.6440	0.5942	0.1300	0.2159	87.0	0.1065	0.6302	3	中污染	中污染
21	0.099	0.2388	0.200	0.2303	0.0360	0.0174	0.0530	0.1262	73.5	0.0896	0.2184	1	未污染	未污染
22	0.223	0.4012	0.193	0.2267	0.0410	0.0434	0.0560	0.1317	83.0	0.1018	0.3677	2	轻污染	轻污染
23	0.136	0.3023	0.173	0.2158	1.1500	0.7102	0.4040	0.3293	87.3	0.1068	0.5898	3	重污染	重污染
24	0.131	0.2948	0.126	0.1841	0.9450	0.6709	0.3680	0.3200	148.0	0.1596	0.5797	3	重污染	重污染
25	0.150	0.3219	0.150	0.2015	0.0270	0.0000	0.3100	0.3029	66.0	0.0788	0.3464	2	轻污染	轻污染
26	0.143	0.3123	0.228	0.2434	0.0260	0.0000	0.0380	0.0930	65.0	0.0773	0.4508	2	轻污染	轻污染
27	0.099	0.2388	1.260	0.4143	0.0540	0.0985	0.0360	0.0875	96.0	0.1163	0.6250	3	重污染	重污染
28	0.104	0.2486	1.150	0.4052	0.0560	0.1058	0.3000	0.2996	100.0	0.1204	0.4900	3	中污染	中污染
29	0.123	0.2822	1.200	0.4094	1.0720	0.6962	0.5060	0.3518	78.6	0.0963	0.7451	3	重污染	重污染
30	0.128	0.2902	0.667	0.3507	1.6220	0.7790	0.7170	0.3867	101.0	0.1214	0.7409	3	重污染	重污染

注:除氨的 c_j 单位为 $Bq \cdot m^{-3}$ 外,其余指标的 c_j 值单位均为 $mg \cdot m^{-3}$.

5 结论(Conclusions)

基于“万有引力”原理和“规范变换”思想的水环境质量及空气环境质量的引力普适指数公式,物理意义明确,理论依据充分,对用规范值表示的4类水体任意水质指标和室内、外空气指标皆普适、通用.对于除表1中4类水体的95项指标或表2中室内、外空气的29项指标以外的其他水质指标和空气指标,只要能适当设定其参照值和指标值的规范变换式,使由规范变换式计算出的各级标准的规范值在表1或表2中指标的同级标准规范值变化范围内,则水环境或空气环境质量的引力指数公式(10)和公式(11)及表3中给出的引力普适综合指数分级标准对这些指标同样适用.因此,环境质量引力指数公式具有更广泛意义的普适性.通过多个实例验证了环境质量引力指数公式的合理性、实用性和可行性,从而为环境质量评价提供了一种新方法.同时,本文提出的“规范质量”、“规范坐标”,“规范指标”,“等效指标”等新概念及环境质量规范变换思想、方法和引力普适指数公式易于拓广用于生态环境、水资源的可持续利用、水资源承载力、水安全和可持续发展等相关学科和领域的研究.

责任作者简介:李祚泳(1944—),男,教授,博士生导师,四川省学术带头人,享受国务院特殊津贴,中国环境学会高级会员,主要从事水环境信息分析计算和水资源安全评价等研究. E-mail: lizuoyong@cuit.edu.cn.

参考文献(References):

- Bokar H, Tang J, Lin N F. 2004. Groundwater quality and contamination index mapping in Changchun City, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 14(1): 63-70
- Cai Q H, Liu J K, Lorzen K. 2002. A comprehensive model for assessing lake eutrophication [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13(12): 1674-1678
- Dang Y, Li Z Y, Zou Y L. 2010. Lake eutrophic evaluation based on bee immune evolutionary algorithm [J]. *Agricultural Science & Technology*, 11(4): 156-158, 188
- Flores J C. 2002. Comments to the use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia river [J]. *Water Res*, 36(18): 4664-4666
- 顾丽敏, 吴小俊, 王士同, 等. 2008. 基于万有引力定律的人脸识别方法 [J]. *计算机工程*, 34(11): 181-182, 210
- 郭绍英, 张江山, 郑育毅. 2009. 集对分析法在大气环境质量评价中的应用 [J]. *环境工程*, 27(4): 113-116, 42
- Kuo Y M, Liu C W, Lin K H. 2004. Evaluation of the ability of an artificial neural network model to assess the variation of groundwater quality in an area of blackfoot disease in Taiwan [J]. *Water Research*, 38(1): 148-158
- 刘洪, 孙国曦. 2009. 应用集对分析法评价丰县地下水水质 [J]. *地下水*, 31(1): 38-41
- 李卫平, 张志鸿. 2006. 万有引力定律在聚类中的应用 [J]. *安阳工学院学报*, (4): 40-43
- Li X, Liu C F, Wang L, *et al.* 2011. Intergated assessment of sea water quality on BP artificial neural network [J]. *Marine Science Bulletin*, 13(2): 62-71
- 李占东, 林钦. 2005. BP神经网络模型在珠江口水质评价中的应用 [J]. *南方水产*, 1(4): 47-54
- 李祚泳, 汪嘉杨, 郭淳. 2010. 富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式 [J]. *环境科学学报*, 30(3): 664-672
- 李祚泳, 张正健, 汪嘉杨, 等. 2012. 基于水环境信息规范变换的水质普适指数公式 [J]. *环境科学学报*, 32(3): 668-677
- Sanchez E, Colmenarejo M F, Vicente J, *et al.* 2007. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution [J]. *Ecological Indicators*, 7(2): 315-328
- 邵磊, 周孝德, 杨方廷, 等. 2010. 基于自由搜索的投影寻踪水质综合评价方法 [J]. *中国环境科学*, 30(12): 1708-1714
- 汤红岩, 孙胜龙, 隋延婷, 等. 2005. 层次分析室内评价模型及其应用 [J]. *云南环境科学*, 24(2): 52-55
- 唐立新, 李东日. 2010. 改进的密切值法在图们江干流地表水水质评价中的应用 [J]. *吉林水利*, (6): 36-38
- Yang M N, Li D F, Yang J B. 2007. Fuzzy-based surface water quality evaluation model and application in the Shaoguan area [J]. *Geospatial Information Science*, 10(4): 303-310