

海南岛东寨港海域重金属含量检测及与海域 pH 和盐度之间的关系

张鑫, 郝宇* (海南地质综合勘察设计院, 海南海口 570206)

摘要 利用相关分析和通径分析考察了海南岛东寨港海水中重金属含量与海域 pH、盐度之间的关系。相关分析表明, Ni、Zn、Hg 含量与海域 pH 之间呈极显著或显著负相关; As 含量与海域 pH 之间呈极显著正相关; Ni、Zn、Cu 与海域盐度之间呈极显著或显著负相关; As 与盐度之间呈极显著正相关。通径分析表明: 重金属含量对海域 pH 的直接作用大小顺序为 As>Ni>Hg>Zn>Cu>Cd>Pb; 重金属含量对海域盐度的直接作用大小顺序为 Ni>Pb>Cu>As>Zn>Hg>Cd。

关键词 重金属含量; pH; 盐度; 相关分析; 通径分析

中图分类号 X55 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)02-0052-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.02.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Detection and Relationship between Heavy Metal Content and pH, Salinity Respectively in the Sea Area of Dongzhai Harbor of Hainan Island

ZHANG Xin, HAO Yu (Hainan Geological Survey and Design Institute, Haikou, Hainan 570206)

Abstract The relationship between heavy metal content and pH, salinity respectively in the sea area of Dongzhai Harbor of Hainan Island was studied by correlation analysis and path analysis. The result of correlation analysis showed that there was an extremely significant or significant negative correlation between content of Ni, Zn, Hg and pH of sea area respectively, as well as between content of Ni, Zn, Cu and salinity of sea area respectively, and there was an extremely significant positive correlation between content of As and pH, salinity respectively of sea area. The result of path analysis showed that, the order of direct effect of heavy metal on pH of sea area was As>Ni>Hg>Zn>Cu>Cd>Pb, and the order of direct effect of heavy metal on salinity of sea area was Ni>Pb>Cu>As>Zn>Hg>Cd.

Key words Heavy metal content; pH; Salinity; Correlation analysis; Path analysis

海南岛东寨港红树林自然保护区处于海口市和文昌市交界处, 属近海及海岸湿地类型中的红树林沼泽湿地, 其主要保护对象为红树林^[1]。在保护区内生长着我国面积最大、种类齐全、保存最完整的成片红树林, 且红树种类多达 32 种以上^[2]。海南岛东寨港红树林自然保护区是我国建立的第一个红树林保护区, 也是我国 7 个被列入国际重要湿地名录的保护区之一, 研究该地区环境指标之间的关系对红树林和湿地保护都有着重要的意义^[3-5]。研究表明, 海水中的 pH 和盐度是制约红树植物生长分布的一个重要因子, 东寨港部分红树植物生长在 pH 适宜且盐度高达 8‰~20‰的海滩上^[6-7], 其海水重金属含量高低直接影响到海域中的 pH 和盐度变化, 进而间接影响红树植物的生长^[8]。海水环境是海洋生态系统的重要组成部分, 它不仅能反映污染海域生态系统的稳定性, 而且还具有巨大的潜在环境修复功能^[9-10]。张际标等^[11]研究了不同初始 pH 下海水中重金属含量变化及其影响, 发现 pH 与水体重金属含量之间关系密切, pH 越低、重金属含量越高。李娟英等^[12]研究了 pH 对污水污泥中污染物浸出量的影响, 结果表明: Zn、Cd、Pb 和 As 在酸性和碱性条件下浸出量较高, Cu 在碱性条件下的浸出量比酸性条件下高。黄智伟^[13]研究了表层海水重金属的变化特征及影响因素, 发现重金属 Cr、Zn 在混合过程中, 固液分配系数会随着盐度的增加而减小。王艳等^[14]研究了水环境中重金属

污染行为和相关效应, 结果表明: 近海海域重金属由陆地向海洋方向, 随着海水盐度的增高, 重金属含量降低。综上所述, 海水中重金属含量是一个重要的环境参数且是影响环境指标的重要因素, 海水中重金属含量预示着该地区潜在的生态风险性^[15]。通过检测海南岛东寨港海域 pH、盐度和重金属含量, 利用相关分析和通径分析研究该地区重金属含量与海域 pH 和盐度之间的关系, 明确重金属含量对该海域 pH 和盐度的影响规律, 以期为该地区环境指标的修复和改善提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 海水样品的采集与制备 海水采样工作区的面积为 40 km², 均匀采集 30 件海水样品, 采样点的顺序依次编号为 HS01~HS30。海水采样在自然水流状态下进行, 不扰动水流与底部沉积物, 水样采集量满足分析所需水量及备用量, 采集水样要防止污染, 水样盛于带有内盖的聚乙烯塑料瓶中, 并隔开放置。带回实验室进行保存, 备用^[16]。

仪器: 电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)、原子吸收分光光度计、二乙基硫代氨基甲酸银分光光度计、电导仪、pH 计。

1.2 项目测定

1.2.1 海水中重金属含量的测定。 海水中重金属含量的测定方法见文献^[16]。

1.2.2 海水中 pH、盐度的测定。 海水中 pH、盐度的测定方法见文献^[16]。

1.3 数据处理 利用统计分析软件 SPSS17.0 进行相关分析和通径分析^[17]。

2 结果与分析

2.1 pH、盐度与重金属含量指标之间的相关性分析 由表 1 可知, 海水中 pH 为 6.63~8.75, 总体北部高于南部, 其高值区

基金项目 海南省自然科学基金面上项目(417295); 海南省国土资源厅地勘项目(HNZC15-023-002F); 海南省重点科技计划项目(ZDXM20110072)。

作者简介 张鑫(1989—), 男, 海南海口人, 工程师, 从事生态地球化学、土壤学研究。* 通信作者, 工程师, 硕士, 从事生态地球化学、土壤学研究。

收稿日期 2020-06-05; **修回日期** 2020-07-04

主要分布在铺前一演海一带,此处为较大河流入海口,其分布可能与海水潮水位有关。海水中盐度为 458 ~ 49 400 mg/L,属不均匀分布,高值点分布在靠近河流入海口。pH 总体分布与盐度大致相同并且地质背景为第四纪更新世八所组。在检测的 8 种重金属元素中,Cr 在该调查区域内未被检出;Pb、Cd、Hg、Cu、Ni、Zn 分布大致相同,地质背景为第四纪更新世多文组,高值区主要分布在西部演丰镇一三江镇一带;As 含量分布较均匀,总体北面高于南面,高值区主要分布在演海一铺前附近海湾,地质背景为第四纪更新世八所组。根据《海水水质标准》(GB 3097—1997)^[18],对重金属元

素指标各类标准值进行单因子环境质量评价发现,在重金属元素中,As、Cd、Cr 和 Cu 含量等级在该区域海水单因子环境质量评价中均属于 I 类水,单因子环境质量评价均为较好,对该区域海水水质影响不大。Zn 含量等级,除 HS10、HS15 属 II 类水标准外,在其余 28 个采样点均满足 III 类水(适用于一般工业用水区,滨海风景旅游区)标准,其元素含量的环境质量评价较差。Pb 元素含量分布不均匀,在 HS21 采样点环境质量评价最差,为 IV 类水标准,而在 HS02、HS10 等 8 处采样点环境质量评价最好,均为 I 类水标准。

表 1 pH、盐度及重金属含量指标
Table 1 pH, salinity and heavy metal content indexes

采样点号 Sampling point No.	pH	盐度 Salinity mg/L	Pb mg/L	Cd mg/L	Ni mg/L	Zn mg/L	Cu mg/L	As mg/L	Hg mg/L	Cr mg/L
HS01	8.32	23 500	0.000 015	0.000 600	0.012	0.053	0.000 12	0.001 18	0.000 055	—
HS02	8.71	32 600	0.000 015	0.000 300	0.007	0.088	0.000 19	0.001 30	0.000 054	—
HS03	8.69	32 600	0.004 500	0.000 400	0.005	0.071	0.000 16	0.001 22	0.000 050	—
HS04	8.75	32 600	0.002 200	0.000 005	0.004	0.053	0.000 21	0.001 32	0.000 074	—
HS05	8.73	32 300	0.003 900	0.000 100	0.003	0.066	0.000 22	0.001 16	0.000 041	—
HS06	8.70	32 300	0.002 300	0.000 100	0.002	0.066	0.000 20	0.001 21	0.000 063	—
HS07	8.73	32 600	0.002 800	0.000 400	0.002	0.056	0.000 22	0.001 23	0.000 064	—
HS08	8.10	19 000	0.003 900	0.000 300	0.005	0.066	0.000 13	0.001 39	0.000 048	—
HS09	8.03	19 000	0.004 500	0.000 400	0.005	0.056	0.000 15	0.001 00	0.000 047	—
HS10	8.50	17 600	0.000 015	0.000 100	0.007	0.046	0.000 15	0.001 21	0.000 070	—
HS11	8.57	32 600	0.000 015	0.000 500	0.004	0.056	0.000 14	0.001 29	0.000 073	—
HS12	8.17	19 200	0.008 400	0.000 005	0.006	0.054	0.000 15	0.001 17	0.000 093	—
HS13	7.15	6 550	0.005 400	0.000 005	0.012	0.064	0.000 20	0.000 48	0.000 098	—
HS14	8.70	32 600	0.007 000	0.000 400	0.004	0.054	0.000 15	0.001 12	0.000 077	—
HS15	8.71	32 300	0.004 000	0.000 300	0.003	0.038	0.000 13	0.001 21	0.000 072	—
HS16	8.49	32 300	0.006 200	0.000 005	0.005	0.059	0.000 18	0.001 10	0.000 059	—
HS17	8.45	32 300	0.007 500	0.000 400	0.005	0.055	0.000 18	0.001 42	0.000 082	—
HS18	8.13	31 000	0.002 300	0.000 005	0.004	0.070	0.000 20	0.002 12	0.000 078	—
HS19	7.39	49 400	0.004 400	0.000 200	0.005	0.054	0.000 14	0.000 51	0.000 061	—
HS20	7.28	3 210	0.002 900	0.000 300	0.016	0.057	0.000 18	0.000 67	0.000 073	—
HS21	7.18	4 410	0.011 000	0.000 005	0.014	0.076	0.000 30	0.000 58	0.000 092	—
HS22	7.72	28 100	0.000 400	0.000 300	0.009	0.069	0.000 19	0.000 75	0.000 066	—
HS23	7.93	29 100	0.006 400	0.000 400	0.005	0.065	0.000 20	0.000 87	0.000 092	—
HS24	7.35	5 340	0.008 300	0.000 400	0.015	0.073	0.000 23	0.000 50	0.000 054	—
HS25	7.09	3 340	0.000 600	0.000 005	0.019	0.075	0.000 26	0.000 58	0.000 100	—
HS26	8.09	28 100	0.000 015	0.000 200	0.008	0.065	0.000 24	0.000 88	0.000 048	—
HS27	7.99	23 800	0.000 800	0.000 100	0.016	0.071	0.000 22	0.000 81	0.000 043	—
HS28	7.18	32 100	0.003 100	0.000 200	0.014	0.059	0.000 18	0.000 52	0.000 093	—
HS29	6.75	735	0.007 500	0.000 005	0.021	0.081	0.000 21	0.000 42	0.000 067	—
HS30	6.63	458	0.007 500	0.000 005	0.032	0.076	0.000 19	0.000 33	0.000 081	—

注:— 未被测出
Note:— not measured

2.2 重金属含量指标与 pH、盐度的相关分析和通径分析 由表 2 可知,pH、盐度与重金属含量之间存在着不同程度的相关性^[19]。有的达到极显著负相关,如 pH 与 Ni、盐度与 Ni 之间的相关系数分别为-0.831和-0.770,而 pH 与盐度、pH 与 As 及盐度与 As 之间达到极显著正相关,其之间的相关系数达 0.697、0.803 和 0.534。另外,重金属指标之间也存在不同程度的相关性,有的达到极显著正相关,如 Ni 和 Zn、

Zn 和 Cu 之间的相关系数分别为 0.485 和 0.589,此外,Cu 和 Cd、As 和 Ni 之间存在极显著负相关,且相关系数分别为 -0.473 和 -0.716。

根据通径理论,各种因素不仅自身对结果产生直接影响,而且还通过与其他因素之间的关系对结果产生间接影响,从而明确这种相关性的来源。各种因素对结果的总作用是直接与间接影响的综合。相关性分析可以判断一个因素

对结果最终作用的大小,但是不能分析出这种作用的组成和来源,因此为了更准确分析重金属含量对 pH、盐度的影响,可进行通径分析,作出 pH、盐度与重金属含量之间的回归方程,则每个因素的标准化偏回归方程即为这个因素对结果产生的直接影响,为直接通径系数。而一个因素与另一个因素

的相关系数乘以另一个因素的直接通径系数,为这个因素通过另一个因素对结果产生的间接影响,即为间接的通径系数^[20]。根据通径系数的计算方法,进行重金属含量与 pH、盐度之间的通径分析,结果如表 3、4 所示。

表 2 pH、盐度与重金属含量指标的相关系数

Table 2 The correlation coefficient between pH, salinity and heavy metal indexes

项目 Item	pH	盐度 Salinity	Pb	Cd	Ni	Zn	Cu	As	Hg
pH	1								
盐度 Salinity	0.697**	1							
Pb	-0.340	-0.326	1						
Cd	0.353	0.312	-0.191	1					
Ni	-0.831**	-0.770**	0.195	-0.315	1				
Zn	-0.421*	-0.388*	0.105	-0.275	0.485**	1			
Cu	-0.351	-0.381*	0.179	-0.473**	0.333	0.589**	1		
As	0.803**	0.534**	-0.303	0.194	-0.716**	-0.279	-0.331	1	
Hg	-0.403*	-0.296	0.323	-0.316	0.246	-0.078	0.192	-0.222	1

注: ** 表示在 0.01 水平极显著相关; * 表示在 0.05 水平显著相关

Note: ** indicated extremely significant difference at 0.01; * indicated significant difference at 0.05

通过相关分析,可以将金属含量与 pH 之间相关性分解为直接作用和间接作用。根据通径分析(表 3)可知,重金属含量对 pH 的直接作用(直接通径系数绝对值)大小顺序为 As>Ni>Hg>Zn>Cu>Cd>Pb。As 对 pH 的直接作用为正向最大,同时还通过 Pb、Cd、Ni、Zn 及 Hg 的正向间接作用,使 As 与 pH 的相关性达到极显著水平($P<0.01$)。Ni 对 pH 的直接作

用为负向,并且通过 Pb、Cd、Zn、As 和 Hg 的负向间接作用,加强了 Ni 与 pH 之间的负相关性,并使之达到极显著水平($P<0.01$)。Zn 和 Hg 虽然对 pH 的直接作用不大,但是通过 Pb、Cd、Ni 和 As 的负向间接作用,使得它们与 pH 之间的相关性达到显著水平($P<0.05$)。其他金属含量的直接作用较小,并且间接作用互相抵消,因此与 pH 的相关性不显著。

表 3 重金属含量指标与 pH 之间的通径分析

Table 3 Path analysis between heavy metal indexes and pH

项目 Item	直接作用 Direct effect	相关系数 Correlation coefficient	间接作用 Indirect effect						
			Pb	Cd	Ni	Zn	Cu	As	Hg
Pb	-0.053	-0.340		-0.015	-0.076	-0.017	0.018	-0.132	-0.065
Cd	0.076	0.353	0.010		0.123	0.043	-0.047	0.085	0.063
Ni	-0.392	-0.831**	-0.010	-0.024		-0.077	0.033	-0.313	-0.049
Zn	-0.158	-0.421*	-0.006	-0.021	-0.190		0.059	-0.122	0.016
Cu	0.100	-0.351	-0.009	-0.036	-0.131	-0.093		-0.155	-0.038
As	0.437	0.803**	0.016	0.015	0.281	0.044	-0.033		0.044
Hg	-0.200	-0.403*	-0.017	-0.024	-0.096	0.012	0.019	-0.097	

注: ** 表示在 0.01 水平极显著相关; * 表示在 0.05 水平显著相关

Note: ** indicated extremely significant difference at 0.01; * indicated significant difference at 0.05

由表 4 可知,重金属含量对盐度的直接作用(直接通径系数绝对值)大小顺序为 Ni>Pb>Cu>As>Zn>Hg>Cd。Ni 对盐度的负向直接作用很大,其他金属含量的间接作用与之相比很小,因此 Ni 与盐度呈极显著负相关($P<0.01$)。Zn、Cu

和 As 对盐度的直接作用不大,但是通过其他金属的间接作用,使它们与盐度的相关性都具有显著性($P<0.05$)。Pb、Cd 和 Hg 的直接作用和间接作用都不大,使得它们与盐度的相关性不具有显著性。

表 4 重金属含量指标与盐度之间的通径分析

Table 4 Path analysis between heavy metal indexes and salinity

项目 Item	直接作用 Direct effect	相关系数 Correlation coefficient	间接作用 Indirect effect						
			Pb	Cd	Ni	Zn	Cu	As	Hg
Pb	-0.181	-0.326		0.004	-0.160	0.009	-0.032	0.045	-0.011
Cd	-0.023	0.312	0.035		0.258	-0.023	0.084	-0.029	0.011
Ni	-0.819	-0.770**	-0.035	0.007		0.040	-0.059	0.105	-0.009
Zn	0.082	-0.388*	-0.019	0.006	-0.397		-0.104	0.041	0.003
Cu	-0.177	-0.381*	-0.032	0.011	-0.273	0.048		0.049	-0.007
As	-0.147	0.534**	0.055	-0.004	0.586	-0.023	0.059		0.007
Hg	-0.035	-0.296	-0.058	0.007	-0.201	-0.006	-0.034	0.033	

注: ** 表示在 0.01 水平极显著相关; * 表示在 0.05 水平显著相关

Note: ** indicated extremely significant difference at 0.01; * indicated significant difference at 0.05

3 结论

海水重金属含量检测表明,HS10、HS15 属Ⅱ类水标准外,其余 28 个采样点均满足Ⅲ类水标准。HS21 采样点环境质量评价最差,为Ⅳ类水标准,而在 HS02、HS10 等 8 处采样点环境质量评价最好,均为Ⅰ类水标准。相关性表明: Ni、Zn、Hg 与 pH 之间呈极显著或显著负相关; As 与 pH 之间呈极显著正相关; Ni、Zn、Cu 与盐度之间呈极显著或显著负相关; As 与盐度之间呈极显著正相关。通径分析表明: 重金属含量对 pH 的直接作用大小顺序为 As>Ni>Hg>Zn>Cu>Cd>Pb; 重金属含量对盐度的直接作用大小顺序为 Ni>Pb>Cu>As>Zn>Hg>Cd。

参考文献

- [1] 吴端,詹夏菲,张光星,等.海南岛东寨港红树林研究进展[J].湿地科学与管理,2015,11(4):60-62.
- [2] 朱志伟.海上森林东寨港[J].环境经济,2015(26):57.
- [3] 陈淀国.海底森林天下奇——游东寨港红树林自然保护区[J].中国林业产业,2005(11):38-39
- [4] 严承高,苏文拔.“中德海南热带林保护与恢复项目”——东寨港、清澜港自然保护区和三亚市红树林保护与恢复子项目活动的基本设想[J].热带林业,1999,27(1):1-11.
- [5] WAKUSHIMA S, KURAIISHI S, SAKURAI N. Soil salinity and pH in Japanese mangrove forests and growth of cultivated mangrove plants in different soil conditions[J]. Journal of plant research, 1994, 107(1): 39-46.
- [6] 钟才荣,李诗川,杨宇晨,等.红树植物拉关木的引种效果调查研究[J].福建林业科技,2011,38(3):96-99.
- [7] VALDEZ-AGUILAR L A, GRIEVE C M, POSS J. Salinity and alkaline pH in irrigation water affect marigold plants: I. Growth and shoot dry weight

partitioning[J]. HortScience, 2009, 44(6): 1719-1725.

- [8] 廖岩,陈桂珠.盐度对红树植物影响研究[J].湿地科学,2007,5(3):266-273.
- [9] MCGOWAN J G, HERONEMUS W E. Ocean thermal and wind power: Alternative energy sources based on natural solar collection[J]. Environmental affairs, 1975, 4(4): 629-660.
- [10] 李海龙.海水入侵对近岸海域海水水质和生态系统的潜在影响[J].鞍山师范学院学报,2003,5(2):1-3.
- [11] 张际标,姚兼辉,刘加飞,等.不同初始 pH 下海水中重金属含量变化及其影响因素[J].广东海洋大学学报,2013,33(3):65-70.
- [12] 李娟英,陈洁芸,曹宏宇,等.pH 对污水污泥中污染物浸出的影响[J].环境工程学报,2013,7(12):4983-4989.
- [13] 黄智伟.表层海水重金属的变化特征及影响因素[J].科技传播,2014(6):129,127.
- [14] 王艳,黄玉明.我国环境中重金属污染行为和和相关效应的研究进展[J].癌变·畸变·突变,2007,19(3):198-201,218.
- [15] 刘国强,刘保良,青尚敏,等.防城港临时性海洋倾倒地沉积物重金属污染现状及其生态风险评价[J].生态科学,2013,32(2):177-182.
- [16] 中国地质调查局,广州海洋地质调查局.海岸带(海区)环境地质调查规范(1:100 000); DD 2012-06[S].中国地质调查局,2012.
- [17] 房凯,徐文耀,朱岗崑.通径分析方法简介[J].地球物理学报,1986,29(2):117-123.
- [18] 国家海洋局第三研究所.海水水质标准:GB 3097—1997[S].北京:中国标准出版社,1997.
- [19] RIBA I, GARCÍA-LUQUE E, BLASCO J, et al. Bioavailability of heavy metals bound to estuarine sediments as a function of pH and salinity values[J]. Chemical speciation & bioavailability, 2003, 15(4): 101-114.
- [20] 金忠民,郝宇,刘丽杰,等.扎龙湿地土壤中抗性菌株对 Pb 和 Cd 去除率与其生理生化特性的相关性及其通径分析[J].环境污染与防治,2015,37(7):66-70.

(上接第 51 页)

源与食物等需求明显大于农村人口,因此南宁市为了避免生态环境出现恶化的情况,应提高人口质量,控制人口数量,节约能源与生物资源。同时培养城市居民节约资源的意识,构建资源节约型社会,从个体上微小减少生态占用从而达到整体上的巨幅降低。

参考文献

- [1] 魏旭红,开欣,王颖,等.基于“双评价”的市县国土空间“三区三线”技术方法探讨[J].城市规划,2019,43(7):10-20.
- [2] REES W, WACKERNAGEL M. Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable-and why they are a key to sustainability[J]. Environmental impact assessment review, 1996, 16(4/5/6): 223-238.
- [3] WACKERNAGEL M, REES W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective[J]. Ecological economics, 1997, 20(1): 3-24.
- [4] 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳.生态经济系统能值分析[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [5] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. Environment and urbanization, 1992, 4(2):

121-130.

- [6] WACKERNAGEL M, REES W. Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth[M]. Gabriola Island, Canada: New Society Publishers, 1996.
- [7] 徐中民,张志强,程国栋.甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J].地理学报,2000,55(5):607-616.
- [8] 熊娜娜,谢世友.成都市水资源生态足迹及承载力时空演变研究[J].西南大学学报(自然科学版),2018,40(6):124-131.
- [9] 杨媚.广西南西江经济带发展的生态哲学研究[D].南宁:广西大学,2011.
- [10] 王靖磊.三河口煤矿可持续发展评价及战略研究[D].青岛:山东科技大学,2009.
- [11] 周宇,李月臣.基于改进生态足迹模型的重庆市生态承载力研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2018,35(2):56-63,145.
- [12] 蔡忠亮,魏媛,徐智熙,等.面向生命共同体健康的生态安全评价研究:以湖北省三峡库区为例[J].地理信息世界,2019,26(4):7-12.
- [13] 岳文泽,王田雨.资源环境承载力评价与国土空间规划的逻辑问题[J].中国土地科学,2019,33(3):1-8.
- [14] 谢鸿宇,王羚郦,陈贤生,等.生态足迹评价模型的改进与应用[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [15] 赵文晖,宁雅楠,杨伟州,等.基于改进生态足迹模型的保定市耕地生态安全时空变异分析[J].土壤通报,2015,46(4):796-802.
- [16] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1990.