

巢湖万年埠沿岸浮游植物与环境因子关系

宗梅,郑西强,王翔宇 (安徽省环境科学研究院,安徽合肥 230071)

摘要 [目的]研究沿岸浮游植物与环境因子的关系。[方法]于2015年1~12月在巢湖西半湖万年埠进行了浮游植物统计和相关环境因子监测分析。应用CANOCO 4.5软件对获得的浮游植物数据和环境因子数据进行了RDA分析,并作出了物种分布和环境因子关系的二维排序图。[结果]共鉴定出浮游植物8门43属63种,群落组成以蓝藻、硅藻、隐藻和绿藻为主,月藻类密度为 $1.51 \times 10^6 \sim 200.00 \times 10^6$ 个/L。RDA分析表明,1~4月,微囊藻和鱼腥藻主要受TN和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的影响,而5~10月,微囊藻和鱼腥藻主要受T、pH、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、DTP和TN的影响。[结论]该研究为巢湖水华治理提供了科学依据。

关键词 巢湖;浮游植物;环境因子;RDA分析

中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)27-0102-04

The Relationship between Phytoplankton and Related Environmental Factors in the Littoral Zone of Wannianbu, Chaohu Lake
ZONG Mei, ZHENG Xi-qiang, WANG Xiang-yu (Anhui Academy of Environmental Sciences, Hefei, Anhui 230071)
Abstract [Objective] To study on the relationship between phytoplankton and related environmental factors. [Method] Statistics and environmental factors analysis of phytoplankton were carried in the littoral zone of Wannianbu, Chaohu Lake from January to October in 2010. Redundancy analysis was applied to explore the relationship between phytoplankton and related environmental factors using CANOCO 4.5. The species-environment biplots were drawn based on the result of RDA. [Result] The results showed that phytoplankton had 63 species belong to 43 genera of 8 phyla. The phytoplankton community was dominated by Cyanophyta, Cyanophyta, Cryptophyta and Chlorophyta. The phytoplankton had an abundance ranging from 1.51×10^6 to 200.00×10^6 cells/L. Microcystis and Anabaena were remarkably affected by TN and $\text{NO}_3\text{-N}$ during Jan. - Apr. . However, Microcystis and Anabaena were remarkably affected by T, pH, TP, $\text{PO}_4\text{-P}$, DTP and TN During May - Oct. [Conclusion] The study can provide scientific basis for algal bloom control in Chaohu Lake.
Key words Chaohu Lake; Phytoplankton; Environmental factors; Redundancy analysis

浮游植物是淡水生态系统中重要的初级生产者,在淡水生态系统的能量流动、物质循环和信息传递中起着至关重要的作用^[1]。浮游植物与环境之间有着密切关系,其种类的组成和分布变化对环境的变化具有指示作用,同时环境条件的改变也直接或间接地影响浮游植物的群落结构^[2]。由于人类活动、生活污水和工业废水的排放,使浅水湖泊氮、磷含量急剧增加,藻类大量繁殖,形成水华^[3-5],巢湖受到富营养化的危害。

巢湖是我国五大淡水湖泊之一,水域面积800 km²^[6]。巢湖西半湖受城市污染较多,水质处于劣V类水标准。近年来,西半湖水华发生时间提前,持续时间延长,严重影响人们的生产生活。有关水华暴发的原因很多,至今尚无确切的理论。笔者对巢湖浮游植物群落的种类组成、优势种及浮游植物密度的时空分布规律进行研究,并结合相关环境因子数据,探讨了浮游植物密度与环境因子之间的关系,旨在为水华暴发成因研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究地点与采样时间 万年埠位于巢湖西半湖,常年受东南风影响,水体严重富营养化,无水生植被。夏季蓝藻水华暴发,优势种为铜绿微囊藻和水华鱼腥藻。为研究浮游植物群落结构与环境因子的关系,于2015年1~12月进行定点采样。为减少采样时间不同带来的误差,每天(重要节日除外)的采样工作于8:30开始,采样点S(坐标31.687 3,

117.309 9)设置如图1所示。

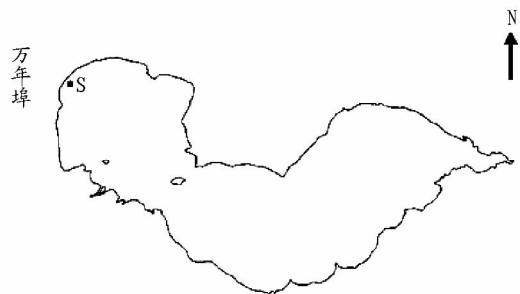


图1 巢湖万年埠采样点位置示意

Fig.1 Sampling sites in the Wannianbu, Chaohu Lake

1.2 样品采集与分析 按《淡水浮游生物研究方法》^[7],浮游藻类定性样品用25#浮游生物网采集表层水。定量样品用德国进口柱状采水器在图1中S采样点取水样500 mL,用鲁哥氏液固定,固定剂用量为水样的1%,带回实验室沉淀48 h后,用虹吸法吸取上清液,浓缩至30~50 mL。镜检时用量筒量取浓缩样品,充分摇匀,取0.1 mL浓缩液置于浮游植物计数框中,在40倍物镜下全片计数。夏季蓝藻水华暴发时,用细胞破碎仪将藻类群体打散为单个细胞,然后采用视野法计数,种类鉴定依据《中国淡水藻类》^[3]。

1.3 水样理化指标的测定 采集水样的同时,现场测定采样点的水温(T)、pH、溶氧量(DO)和透明度(SD)。根据《水和废水监测分析方法》^[8],测定总磷(TP)、可溶性磷(DTP)、正磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)、总氮(TN)、氨态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)和亚硝态氮($\text{NO}_2\text{-N}$)。

1.4 数据统计 在Excel 2007中对数据进行整理,利用CANOCO 4.5软件包进行浮游植物种类与环境的关系分析。先对物种数据进行DCA分析,分析完成后在“Log View”窗口

基金项目 国家“水体污染控制与治理”科技重大专项(2012ZX07103-003)。
作者简介 宗梅(1981-),女,安徽濉溪人,工程师,硕士,从事水污染控制研究。
收稿日期 2016-07-20

找到各特征值分布部分“Lengths of gradient”信息,4 个轴中梯度最大值小于 3,因此选择线性模型中的冗余分析方法(RDA)。为使浮游植物的细胞密度数据获得正态分布,将其进行 $\log(x+1)$ 转换。

2 结果与分析

2.1 水体理化指标 由表 1 可知,不同季节水温变化幅度较大,从 1 月开始逐渐上升,到 8 月最大,平均为 31.0 ℃,然后随着时间的推移水温逐渐下降;pH 变化幅度不大,全年平

均为 7.84,呈弱碱性;DO 先下降,8 月降至最低,平均为 4.35 mg/L,其后随着水温的下降,DO 逐渐上升;8 月藻类大量繁殖,使 SD 降低为 8 cm。TP、DTP 和 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 随时间的推移呈先升高后降低的趋势。TP 变化范围为 0.183 ~ 0.352 mg/L,最高值出现在 7 月;DTP、 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 的最高值均出现在 6 月,其变化范围分别为 0.030 ~ 0.083、0.010 ~ 0.047 mg/L。 TN 、 $\text{NH}_4 - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 最高值均出现在 2 月,分别为 4.520、1.507 和 1.217 mg/L。

表 1 巢湖万年埠水质理化指标
Table 1 Physico chemical indicators of water quality in the Wannianbu of Chaohu Lake

月份 Month	水温 Water temperature ℃	pH	溶氧量 (DO) Dissolved oxygen mg/L	透明度(SD) Transparency cm	总磷(TP) Total phosphorus mg/L	可溶性总磷(DTP) Soluble total phosphorus mg/L	正磷酸盐($\text{PO}_4 - \text{P}$) Orthophosphate mg/L	总氮(TN) Total nitrogen mg/L	氨态氮($\text{NH}_4 - \text{N}$) Ammonia nitrogen mg/L	硝态氮($\text{NO}_3 - \text{N}$) Nitrate nitrogen mg/L	亚硝态氮($\text{NO}_2 - \text{N}$) Nitrite nitrogen mg/L
1	5.0	7.01	10.44	34	0.183	0.030	0.010	3.818	0.798	1.214	0.023
2	7.4	7.07	9.47	36	0.200	0.058	0.030	4.520	1.507	1.217	0.094
3	7.5	6.76	8.72	32	0.224	0.056	0.038	4.276	0.978	1.124	0.058
4	14.7	7.80	6.46	19	0.228	0.063	0.040	2.772	1.119	1.015	0.115
5	22.4	8.44	5.12	19	0.261	0.031	0.017	2.344	0.418	0.717	0.019
6	26.2	8.67	5.84	15	0.316	0.083	0.047	2.311	0.898	0.413	0.029
7	29.3	8.47	4.93	12	0.352	0.050	0.021	2.742	0.386	0.627	0.089
8	31.0	8.95	4.35	8	0.339	0.061	0.027	2.273	0.322	0.237	0.043
9	25.3	7.94	5.12	11	0.200	0.052	0.018	1.743	0.364	0.430	0.132
10	18.9	7.73	5.68	9	0.285	0.038	0.020	1.827	0.342	0.898	0.086
11	11.6	7.62	6.59	19	0.223	0.042	0.031	2.103	0.412	0.873	0.073
12	7.9	7.59	7.98	26	0.216	0.036	0.027	2.568	0.512	1.125	0.080

2.2 浮游植物种类组成及细胞密度 2015 年定性、定量鉴定的浮游植物包括蓝藻门、绿藻门、硅藻门、甲藻门、金藻门、裸藻门、隐藻门和黄藻门 8 个门类,共计 43 属 63 种(含变种)。其中,以绿藻的种类数最多,为 15 属 26 种;其次是硅藻,10 属 12 种;蓝藻的种类数位居第 3,6 属 10 种;裸藻 4 属

6 种,隐藻 2 属 3 种,甲藻 3 属 3 种,金藻 2 属 2 种,黄藻 1 属 1 种。由表 2 可知,巢湖万年埠沿岸浮游植物种类数以 5 月为多,达到 56 种,8 月种类数最少,为 26 种。这是由于一般情况下随着水温的升高,浮游植物繁殖加快,种类也增加,而当气温非常高时,优势种占主导地位,导致其他物种减少。

表 2 2015 年浮游植物组成及其数量变化
Table 2 Variation of phytoplankton community composition and quantity in 2015

月份 Month	蓝藻门 Cyanophyta	绿藻门 Chlorophyta	硅藻门 Bacillariophyta	甲藻门 Pyrrophyta	金藻门 Chrysophyta	裸藻门 Euglenophyta	隐藻门 Cryptophyta	黄藻门 Xanthophyta	合计 Total
1	7	15	9			2	3		36
2	8	18	8			3	3		40
3	8	20	10		2	4	3	1	48
4	10	24	7	3	2	4	3	1	54
5	12	22	7	3	2	6	3	1	56
6	11	24	5						40
7	7	12	4			6			29
8	5	10	5			6			26
9	5	20	6			3	3		37
10	6	22	8	3		3	3		45
11	5	17	10			4	3		39
12	5	15	10			4	3		37

浮游植物细胞密度是水生生态系统功能和水质评价的重要指标之一,通过镜检计数,计算巢湖万年埠沿岸周年浮

游植物的细胞密度。由表 3 可知,巢湖万年埠沿岸浮游植物细胞密度以 8 月最高,达 200.00×10^6 个/L,3 月最少,为

1.51 × 10⁶ 个/L。从全年浮游植物细胞密度来看,巢湖万年埠沿岸富营养化现象严重。

表3 浮游植物主要种类及细胞密度

Table 3 The main species and cell density of phytoplankton		
月份 Month	主要种类组成 Main species	细胞密度 Cell density ×10 ⁶ 个/L
1	微囊藻、鱼腥藻、小环藻	2.46
2	微囊藻、鱼腥藻、栅藻、隐藻、蓝隐藻	1.54
3	微囊藻、鱼腥藻、栅藻、隐藻、蓝隐藻、直链藻	1.51
4	微囊藻、鱼腥藻、隐藻、蓝隐藻、小环藻	3.20
5	鱼腥藻、盘星藻	43.00
6	微囊藻、鱼腥藻、舟行藻	140.00
7	微囊藻	121.00
8	微囊藻	200.00
9	微囊藻	110.00
10	微囊藻、鱼腥藻、束丝藻	149.00

2.3 浮游植物种类与环境因子 RDA 分析 根据浮游植物密度,选取 14 种浮游植物(表 4),并以浮游植物密度为响应变量,以 T、pH、DO、TP、DTP、PO₄ - P、TN、NH₄ - N 和 NO₃ - N 9 种环境因子为解释变量,用 CANOCO 4.5 进行冗余分析(RDA)。

由表 5 可知,水华前和水华后 1 轴中浮游植物种类与环境因子的相关性均较高,分别为 0.790 和 0.681。从图 2 可以看出,巢湖水华前,与微囊藻、鱼腥藻、束丝藻和小环藻呈显著正相关的是 TN、NO₃ - N 和 DO,呈显著负相关的是 TP、PO₄ - P 和 DTP;与隐藻、蓝隐藻呈显著正相关的是 TP 和 PO₄ - P;与栅藻、盘星藻和舟行藻呈显著正相关的是 NO₃ - N、DTP 和 pH。从图 3 可以看出,巢湖发生水华后,与微囊藻、鱼腥藻、颤藻、舟行藻和空球藻呈明显正相关的是 T、pH、TP、DTP 和 TN;与栅藻、盘星藻、裸藻和针杆藻呈明显正相关的是 NO₃ - N。

表4 RDA 分析浮游植物种类

Table 4 Phytoplankton species for RDA			
中文名 Chinese name	拉丁文名 Latin name	中文名 Chinese name	拉丁文名 Latin name
微囊藻	<i>Microcystis</i>	针杆藻	<i>Synedra</i>
鱼腥藻	<i>Anabaena</i>	直链藻	<i>Melosira</i>
束丝藻	<i>Aphanizomenon</i>	小环藻	<i>Cyclotella</i>
颤藻	<i>Oscillatoria</i>	栅藻	<i>Scenedesmus</i>
隐藻	<i>Cryptomonas</i>	盘星藻	<i>Pediastrum</i>
蓝隐藻	<i>Chroomonas</i>	裸藻	<i>Euglena</i>
舟行藻	<i>Navicula</i>	空球藻	<i>Eudorina</i>

表5 浮游植物种类与环境因子 RDA 分析的统计信息

Table 5 Summary of redundancy analysis (RDA) between phytoplankton species and environmental factors							
阶段 Stage		特征值 Eigenvalue	浮游植物与环境因子 相关关系 Relationship between phytoplankton and environmental factors	浮游植物种类的累 积百分数 Cumulative percentage of phytoplankton species//%	浮游植物与环境因子 相关性的累积百分数 Cumulative percentage of correlation between phytoplankton and environmental factors//%	特征值总和 Sum of eigenvalues	典型特征值总和 Sum of typical eigenvalues
水华前 Before algal bloom	1 轴	0.140	0.790	14.0	48.7	1.000	0.288
	2 轴	0.054	0.587	19.4	67.5		
	3 轴	0.044	0.664	23.9	82.9		
	4 轴	0.021	0.454	26.0	90.1		
水华后 After algal bloom	1 轴	0.108	0.681	10.8	48.7	1.000	0.221
	2 轴	0.063	0.641	17.1	77.3		
	3 轴	0.018	0.440	18.9	85.5		
	4 轴	0.013	0.423	20.2	91.6		

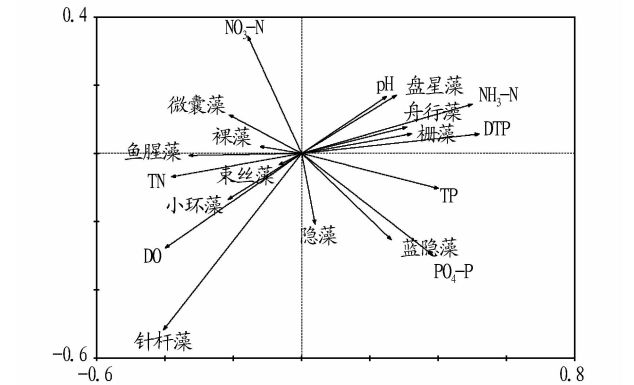


图2 巢湖水华前浮游植物与环境关系的 RDA 排序
Fig.2 RDA biplot of phytoplankton species and environmental factors before algal bloom in Chaohu Lake

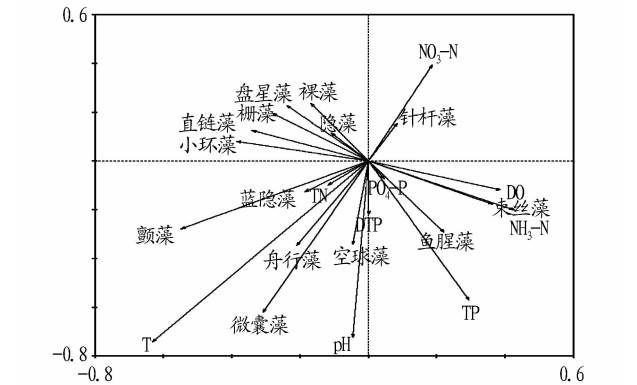


图3 巢湖水华后浮游植物与环境关系的 RDA 排序
Fig.3 RDA biplot of phytoplankton species and environmental factors after algal bloom in Chaohu Lake

3 结论与讨论

(1) 该研究结果表明,巢湖万年埠沿岸微囊藻和鱼腥藻主要受 TN 和 $NO_3 - N$ 的影响,而 5 ~ 10 月微囊藻和鱼腥藻主要受 T 、 pH 、 TP 、 $PO_4 - P$ 、 DTP 和 TN 的影响。从全年浮游植物细胞密度来看,巢湖万年埠沿岸带富营养化严重,其细胞密度高于 1.00×10^6 个/L。水华前浮游植物主要种类有蓝藻、硅藻、隐藻和绿藻,发生水华后主要种类是蓝藻中的微囊藻,隐藻和绿藻较少出现。水华前和水华后浮游植物主要种类存在差异,这一方面是由于微囊藻可以分泌他感物质并使其其他藻类具有较低的生长率^[9-10];另一方面,巢湖万年埠水华前平均 TN/TP 值为 16.1,发生水华后 TN/TP 值为 7.7。因此,微囊藻分泌的他感物质和较低 TN/TP 值可能是发生水华后隐藻和绿藻较少出现的原因。

(2) Steinberg 等^[11] 研究表明,在 TP 浓度超过 $10 \mu g/L$ 时,蓝藻的生长很大程度上受物理因子的影响。孔繁翔等^[12] 研究提出,形成水华的主导因子是水文条件、气象因素。该研究中,湖水中 TP 处于富营养化水平,浓度远远超过 $10 \mu g/L$,因此, TP 不是巢湖浮游植物生长的限制因素。发生水华后,微囊藻与 T 相关性最高,这与 Steinberg 等^[11-12] 的结论相吻合。水华前,巢湖水体中出现大量的鱼腥藻,可能与巢湖水体 TN/TP 值较低有关^[13]。

(3) 巢湖万年埠位于西半湖,属亚热带气候,发生水华一般在 7 ~ 8 月,但 2013 年水华提前在 5 月发生。蓝藻水华发生的水温条件一般大于 $20.0^\circ C$ 。在温室效应的影响下,2013 年 5 月平均水温为 $22.4^\circ C$,且这一时期降水量小,为 $91.8 mm$,水体稳定性强,并具备营养盐基础,因此蓝藻迅速

繁殖,形成水华。

(4) 研制环保型化肥,提高土壤对氮、磷的吸收率,从而控制氮、磷流向水体。要求巢湖流域周边企业实行达标排放,施行对外源污染的控制,以控制氮、磷水平。采用人工捞取、生物操纵、底质清淤和种植湿地植物方法,控制浮游植物大量繁殖。然而,对于大型浅水湖泊富营养化问题,不能单方面考虑,须因地制宜,因时制宜,统筹兼顾。

参考文献

- [1] 张婷. 熊河水库浮游藻类群落结构的周年变化[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2971 - 2979.
- [2] LEPISTÖ L, HOLOPAINEN A L, VUORISTO H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes[J]. Limnologia, 2004, 34: 236 - 248.
- [3] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [4] SCHLESINGER W H. Biogeochemistry: An analysis of global change [M]. San Diego: Academic Press, 1991.
- [5] VITOUSEK P M, MOONEY H A, LUBCHENKO J, et al. Human domination of earth's ecosystems[J]. Science, 1997, 277: 494 - 499.
- [6] 王成贵, 曹勇, 汪海波. 巢湖西半湖水体富营养化污染状况及防治对策[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(8): 1475 - 1476.
- [7] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[S]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] WALSBY A E, KINSMAN R, GEORGE K I. The measurement of gas vesicle and buoyant density in planktonic bacteria[J]. Journal of microbiology methods, 1992, 15: 293 - 309.
- [10] WALSBY A E. Gas vesicles[J]. Microbiol research, 1994, 58: 94 - 101.
- [11] STEINBERG C E W, HARTMANN H M. Plankton bloom-forming cyanobacteria and the eutrophication of lakes and rivers[J]. Freshwater biology, 1988, 20: 279 - 287.
- [12] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589 - 594.
- [13] 姜霞, 王书航, 钟立香. 巢湖藻类生物量季节性变化特征[J]. 环境科学, 2010, 31(9): 2056 - 2062.

(上接第 101 页)

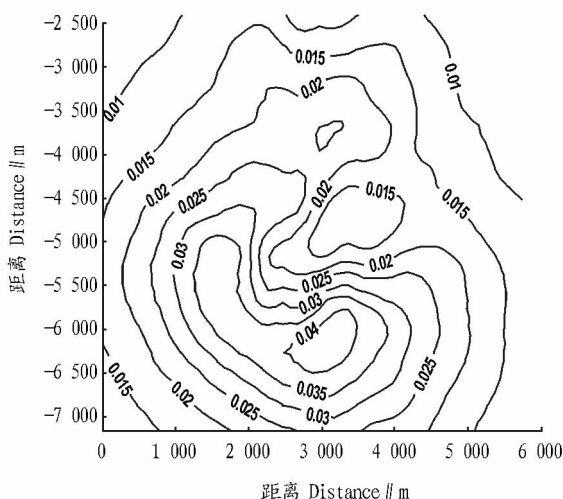


图 4 调整后污染源地面浓度贡献值

Fig. 4 Ground contribution to concentration after adjustment

通过以上分析,证明实施削减方案后区域环境质量有一定的

改善。

3 结论

尽管基尼系数理论可以量化评价总量分配合理性,但在指标选取、警戒线设置方面未进行深入研究。评价指标关乎能否建立科学的评价体系,对分配合理性影响重大,不同的指标体系评价结果就会存在一定差异。警戒线同样至关重要,前人只是借鉴了经济学基尼系数警戒线,但其在总量分配方面应用是否合适尚无定论,因此直接影响总量分配合理性结果。

参考文献

- [1] 翟腾腾, 郭杰, 欧名豪. 基于基尼系数的江苏省建设用地总量分配研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015(4): 84 - 91.
- [2] 刘娜, 谢绍东. 中国不同经济区域大气污染总量分配方法的选择研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(6): 803 - 807.
- [3] 刘耀, 吴仁海, 廖瑞雪. 大气污染物总量分配公平性评价研究[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(9): 159 - 162.
- [4] 张有贤, 李炳宏, 荀彦平. 西部地区 SO_2 总量控制指标分配合理性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(6): 44 - 47.
- [5] 刘娜, 谢绍东. 城市点源大气污染物总量分配方法及其进展[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(6): 824 - 828.
- [6] 兰州大学资源环境学院. 甘肃省金昌市大气环境容量核定技术报告[R]. 兰州, 2004.