

太湖地区旱季、雨季水体污染影响因素分析

朱红霞^{1,2}, 陈效民¹, 方 堃¹

(1.南京农业大学资源与环境学院, 江苏 南京 210095; 2.南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

摘 要:面源污染物越来越成为导致太湖地区富营养化的主要原因之一,利用 SPSS 进行基于因子分析的主成分分析法,研究了太湖地区旱季和雨季水质污染状况的差异及其主导影响因子。结果表明,研究区总磷、总氮、铵态氮超标最为严重,其中总氮含量雨季明显大于旱季;辛庄地区地下水中总磷平均含量明显高于宜兴和王庄的地下水。研究区域内太湖的磷污染比灌溉水和城市河水严重,且长期处于富营养化状态。地表水水质最大的影响因素是氮、磷营养盐以及 COD_{Mn},影响地表水质的主要氮盐为铵态氮。

关键词:太湖地区;旱季;雨季;水体污染状况

中图分类号:X524 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2396-05

Water Pollution Impact Analysis in the Dry Season and the Rainy Season of Taihu Lake Region

ZHU Hong-xia^{1,2}, CHEN Xiao-min¹, FANG Kun¹

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China ;2.Nanjing University of Information Science & Technology , Nanjing 210044, China)

Abstract:Non-point source pollution is one of the main causes of eutrophication in Taihu Lake region. The goal of this study was to identify, analyze and compare different factors that impacted water pollution in the rainy and dry season of Taihu Lake .The results showed that concentration of total phosphorus, total nitrogen, ammonium was at serious level. Total nitrogen content in the rainy season was greater than that in dry season and average total phosphorus content in xin Zhuang was significantly higher than in Wang Zhuang and Yixing. The phosphorus pollution in Taihu Lake region was at serious level than irrigation water and urban water. The significant factors of surface water were nitrogen, phosphorus and COD_{Mn} while most influential factor of ground water was ammonium nitrogen.

Keywords: :Taihu Lake region; dry season; rainy season; water pollution

随着居民生活水平的提高,人们对农产品的品种和数量的要求也越来越高。农药、化肥和农膜大量使用,造成了巨大的经济损失^[1],而且产生了环境污染,对土壤、水、生物、大气及人体健康产生了严重的危害^[2]。在太湖地区,排入太湖的氮、磷等营养物质也不断增加,农业面源污染已成为该地区水体中最主要的污染源之一^[3-4]。黄宗楚等对上海旱地氮磷径流流失的研究表明,随径流排出农田的氮素中有 37.7%是当季施用的氮素化肥,磷素中有 26.9%是当季施用的磷

素^[5]。王鹏等对环太湖典型丘陵区不同土地利用方式下土壤磷素随地表径流迁移特征进行了研究,结果表明,各场降雨水相总磷的“次降雨径流平均浓度”呈对数正态分布^[6]。目前大量研究表明,水体污染物越来越成为导致江河湖库富营养化的主要原因之一^[7]。环境是一个多因子复合体,环境质量受到多种因子的影响。运用因子分析中的主成分分析方法,对影响环境质量的因子进行多元系统分析,不仅能给出环境质量的综合评价结果,而且能从各种因子中找出影响环境质量的主导因子。由于研究区域内地表水水体类型不一样,而且研究区域跨度较大,因此存在很大差异,难以用一种评价方法分析评价研究区域内地表水的污染程度和各个污染因子的贡献程度。本文利用 SPSS 进行基于因子分析的主成分分析法研究区域雨季和旱季水质污染状况的差异及其主导影响因子,从而深

收稿日期:2008-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目“硝态氮在含有大孔隙的农田土壤中运移机理及数学模拟”(40371055)

作者简介:朱红霞(1978—),女,讲师,博士研究生,从事水土资源利用与管理方面的研究。E-mail:yqzhx@nuist.edu.cn

通讯作者:陈效民(1957—),男,江苏张家港人,教授,博士生导师,从事土壤物理学的教学与科研工作。E-mail:xmchen@njau.edu.cn

了解不同农田生态系统对太湖地区水质恶化的主要影响因素,并为该研究区的污染控制和治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样位点

样品采集点设置为太湖地区的宜兴、常熟王庄和辛庄的农村附近诸水体,采样点分布见图 1,其田间水体众多,并且与太湖相连接。以这三地作为反映太湖流域典型水稻种植地区农村水环境研究对象具有一定的代表性。

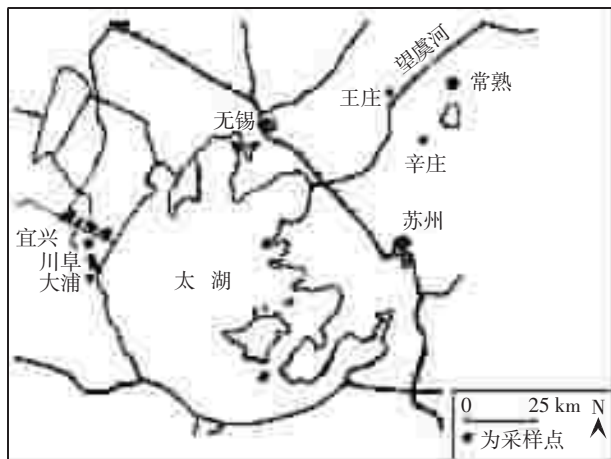


图 1 采样点分布情况

Figure 1 Distribution of sampling sites in Taihu Lake typical region

宜兴市地区:宜兴市南部川阜镇稻田附近,土壤类型为白土,滞水性能强,下渗能力弱,地下水位 1.2 m 左右。灌溉排放水、浅层地下水采自稻田附近的川阜河和莲花荡,井水采集自农田附近的居民区。太湖水采自位于太湖东岸的大浦镇稻田附近,城市河水采自宜兴市区边缘、城乡结合处的团洧和城南河,其连接诸多河流,水网较发达。该地区共设置地表水监测点 5 个,地下水监测点 4 个。

常熟地区,(1)王庄:水样采自常熟市王庄农田附近,土壤类型为黄泥土,保水保肥能力强,通体质地均匀,为壤质粘土^[8],地下水位 1.5 m 左右。井水采集点在农田附近。(2)辛庄:辛庄采样区域位于中科院常熟农业生态站附近,该地区土壤类型为乌栅土,地下水位约为 0.7 m。井水采集在农田附近的居民生活区。该地区共设置地表水监测点 10 个,地下水监测点 6 个。王庄和辛庄两地居民区紧邻农田,生活污水以及粪便等排泄物直接向地表水体排放。

1.2 方法

1.2.1 采样方法

采集具有代表性的灌溉水、排放水、地下水水样,其中地下水水样采集于农田附近居民区的水井,井深一般大于 5 m。采样时间是 2006 年 3 月到 2007 年 1 月,每两个月采样一次,一年共 6 次,从每个采样点采取 4 个水样,取其平均值。水样冷藏后,立即送至实验室分析测定。

1.2.2 水样的测定项目

总氮、硝态氮、亚硝态氮、铵态氮、总磷、高锰酸钾指数、氯化物、总硬度、硫酸盐、COD_{Cr} 等。具体方法如下^[9]:总磷(TP),过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法;硝态氮,紫外分光光度法;铵态氮,蒸馏滴定法;氯化物,硝酸银滴定法;高锰酸钾指数(COD_{Mn}),酸性加热法;总氮,碱性过硫酸钾消解分光光度法;COD_{Cr},重铬酸钾法。

1.2.3 主成分分析法

(1)原始数据标准化

SPSS 软件默认对数据矩阵进行标准化处理,标准化的目的是为了消除原始数据量纲和数量级的影响。采用 Z-Score 变换进行标准化,其标准化公式为:

$$x_{ij}^* = (x_{ij} - \bar{x}) / \sigma_i, i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, P \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个指标第 j 个分区的原始数据, $\bar{x}$ 和 σ_i 分别为第 i 个指标的样本均值和标准。

(2)计算相关系数矩阵的特征根及相应的特征向量

根据标准化数据表 $(x_{ij}^*)_{n \times p}$, 计算相关系数矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$, 其中 $r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j) / \sigma_i \sigma_j$ 。用雅可比方法根据特征方程 $|R - \lambda I| = 0$, 计算特征根 λ_i , 并使其从大到小排列: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$, 同时可得对应的特征向量 $u_1, u_2, \dots, u_n$ 。它们标准正交, $u_1, u_2, \dots, u_n$ 称为主轴。

(3)计算贡献率和累计贡献率

确定主成分个数,选择特征根大于某个值时的个数做为主成分个数或计算各主成分的方差贡献率及累积方差贡献率,当累积方差贡献率大于一定要求(累积方差贡献百分比)时来确定主成分个数。选择主成分个数的目的在于将为数较多的变量转化为少数几个综合变量,而且尽可能多地保留原始数据的信息,从而减少综合评价的工作量。所以一方面要保持主成分个数尽可能少,另一方面累积方差贡献率要尽可能大。本文中采用特征根大于 1 时的个数作为主

成分个数。贡献率 $e_i=\lambda_i/\sum_{i=1}^n\lambda_i$, 累计贡献率

$$E_j=\sum_{j=1}^m\lambda_j/\sum_{i=1}^n\lambda_i$$

(4)计算主成分,并进行综合分析

主成分 $Z_j=\sum_{j=1}^p\sum_{i=1}^nu_{ij}x_{ij}^*$, 由主成分与主成分累积方

差贡献率计算主成分加权综合评价,并进行排序和比较。

2 结果与讨论

2.1 旱季、雨季主要污染物及对比研究

近年来的研究表明,磷是水体产生富营养化的限制因素,如果磷素未达到一定含量,仅有氮、碳等元素

不会引起水体富营养化^[10]。因此,水体中总磷含量是水体污染,特别是水体富营养化污染的一个重要指标。

利用 SPSS 软件默认对原始数据矩阵进行标准化处理,以消除原始数据量纲和数量级的影响。雨季和旱季地表水各个指标的含量见表 1 和表 2。

参照中华人民共和国国家标准(GB 3838—2002)地表水环境质量标准,可知所有测定数值除氯化物外均有超过标准的,尤其以总磷、总氮、铵态氮最为严重。对比雨季与旱季所测的地表水水质指标平均值,可以看出总氮含量雨季大于旱季。这应与季节有关,雨季雨水多,导致土壤中大量的氮由于淋溶转移到水体中。雨季降雨和灌溉对地下水磷含量的影响比较大,地下水氮、磷均值在雨季和旱季差异明显。影响地

表 1 雨季地表水质指标平均值(mg·L⁻¹)

Table 1 Average of water quality indexes for surface water during rainy season(mg·L⁻¹)

采样点	总磷	硝态氮	铵态氮	氯化物	COD _{Mn}	总氮	COD _{Cr}
1	0.05	2.94	1.29	25.54	4.93	13.56	21.40
2	0.28	1.70	2.49	66.36	6.80	13.15	38.16
3	0.34	0.43	2.89	31.36	41.20	15.99	53.81
4	0.74	1.00	12.23	69.96	52.83	16.38	84.91
5	0.22	2.65	1.01	68.73	6.22	13.89	51.28
6	0.30	0.81	1.26	46.11	2.36	15.49	75.91
7	0.14	0.77	6.33	72.09	7.93	15.63	64.44
8	0.10	1.32	4.38	68.60	10.62	15.76	42.02
9	0.17	2.30	1.95	74.15	9.34	14.23	113.78
10	0.70	0.51	1.75	89.88	8.59	15.73	61.83
11	0.29	0.30	4.37	84.23	7.88	15.47	57.22
12	0.33	0.75	1.61	54.64	10.71	14.82	89.79

表 2 旱季地表水水质指标平均值(mg·L⁻¹)

Table 2 Average of water quality indexes for surface water during dry season(mg·L⁻¹)

采样点	总磷	硝态氮	铵态氮	氯化物	COD _{Mn}	总氮	COD _{Cr}
1	0.06	3.62	0.41	14.16	3.53	6.30	64.61
2	0.25	0.93	4.01	87.30	6.39	7.19	74.92
3	1.45	1.18	15.66	62.70	14.40	5.92	43.75
4	0.45	0.72	6.68	58.55	5.23	6.04	32.57
5	0.25	1.51	2.12	95.40	5.95	6.44	59.68
6	0.14	0.51	1.14	84.25	6.10	5.50	43.46
7	0.15	1.42	0.62	75.13	4.14	5.66	63.10
8	0.20	1.21	2.25	156.31	18.39	6.84	56.00
9	0.07	0.45	0.04	75.02	4.22	1.08	87.25
10	0.45	0.72	2.62	157.44	6.82	6.56	85.96
11	0.33	0.80	4.46	137.44	5.16	6.71	58.53
12	0.25	1.12	2.33	63.26	19.89	5.58	71.08

表水氮、磷含量的因素较多,雨季地表水中的总磷均值含量没有明显的差异,但是采样处地表水中藻类等水生植物的爆发间接反映了农田排放的氮、磷污染物的增加。冬季地表水体的雨水稀释和植物吸收作用降低,在人为活动的影响下,地表水总磷含量会出现较高值。

有研究表明,该区域地表水长期处于严重的磷污染状态^[1]。宜兴和王庄两地地表水总磷年均含量高于地下水,总磷的淋失作用大于渗漏作用。辛庄受到较高地下水水位的影响,地下水中总磷平均含量明显高于宜兴和王庄地下水。研究区域内太湖的磷污染比灌溉水和城市河水严重且长期处于富营养化状态。

2.2 雨季地表水水质主成分分析

表 3 显示,第 1、2 主成分特征值都大于 1,累计贡献率达到 65.94%,说明前 2 个因子包含了以上 7 个指标的大部分信息。故抽取前 2 个因子作为分析对象。

表 3 雨季地表水质特征值、贡献率及累计贡献率

Table 3 Eigenvalue and contribution of surface water quality in rain

主成分	特征值	百分比 /%	累积百分比 /%
1	3.35	47.81	47.81
2	1.27	18.13	65.94
3	0.87	12.37	78.31
4	0.74	10.52	88.83
5	0.53	7.57	96.40
6	0.15	2.10	98.50
7	0.11	1.50	100.00

经过 Varimax 旋转后,因子载荷矩阵如表 4 所示。从因子载荷大小看,第 1 主成分方差累计贡献率达 47.81%。与第 1 主成分密切相关的水质参数是 COD_{Mn}、总氮、铵态氮。总氮和铵态氮与第 1 主成分密切相关,说明总氮和铵态氮是雨季水质富营养化的最

表 4 雨季地表水质方差极大正交旋转后因子载荷矩阵

Table 4 Factor load matrix of surface water quality

污染因子	主成分 1	主成分 2
COD _{Cr}	0.198	0.619
COD _{Mn}	0.912	-0.178
铵态氮	0.792	0.116
氯化物	-0.027	0.876
总磷	0.661	0.431
硝态氮	-0.589	-0.458
总氮	0.801	0.318

重要因素,营养盐除来自外源负荷外,即农田化肥使用流失直接进入地面水体,可能还有一部分来自水体微生物的厌氧分解,即含氮有机物被反硝化细菌还原产生铵态氮以及来自工业排放。因为对于多数农田附近水域,COD_{Mn} 处于主导因子,可以估计该时间段区域内有较为严重的工业类污染。

旋转后第 2 主成分因子载荷占 18.13%,与第 2 主成分密切相关的是水体氯化物指标,反映了该区域内夏季土壤脱盐程度。除土壤脱盐外,地表水中的氯化物还可能来自雨水、灌溉水以及大气,地表水中氯化物含量较高亦将反作用影响到土壤性质,在旱季蒸发大于降水时,盐分将主要积聚在表土,尤其是 3—5 月,表土中氯化物的累计将影响叶期水稻的生长,高浓度时引起中毒^[12]。累计贡献率第 1 主成分大于其他成分的总贡献率,所以 COD_{Mn}、总氮、铵态氮是控制雨季地表水质的主要因素,其次是氯化物的含量。

2.3 旱季地表水水质主成分分析

旱季地表水质分析结果见表 5 和表 6,前 3 个因子的特征值都大于 1,而且累计贡献率也达到 76.68%,因此抽取前 3 个主成分进行分析。

经过 Varimax 旋转后,从因子载荷大小看,第 1

表 5 旱季地表水质特征值、贡献率及累计贡献率

Table 5 Eigenvalue and contribution of surface water quality in dry season

主成分	特征值	百分比 /%	累积百分比 /%
1	2.55	36.48	36.48
2	1.62	23.09	59.57
3	1.20	17.11	76.68
4	0.84	12.00	88.68
5	0.60	8.62	97.30
6	0.17	2.43	99.73
7	0.02	0.27	100.00

表 6 旱季地表水质方差极大正交旋转后因子载荷矩阵

Table 6 Eigenvalue and contribution of surface water quality in dry season

污染因子	主成分 1	主成分 2	主成分 3
COD _{Cr}	-0.629	0.226	-0.288
COD _{Mn}	0.368	0.411	0.266
铵态氮	0.968	0.072	0.038
氯化物	-0.187	0.899	0.235
总磷	0.935	0.119	-0.003
硝态氮	-0.160	-0.760	0.466
总氮	0.164	0.088	0.936

主成分因子载荷占 36.48%，与第 1 主成分密切相关的是铵态氮和总磷。因此，水体中总磷含量是地表水特别是水体富营养化的一个重要指标。第 2 主成分因子载荷占 23.09%，与第 2 主成分密切相关的是氯化物。第 3 主成分因子载荷占 17.11%，与其密切相关的指标是全氮，同样反映了氮肥流失的问题，过量氮肥的使用对于附近水体氮富集有较大影响。

从方差贡献率可以看到，第 1 主成分与第 3 主成分贡献率达到 53.59%，说明小麦地表水质主要受到与富营养化密切相关的总磷、总氮、铵态氮的影响。小麦期内的水质受三者共同影响，反映了该时期内水体的营养盐富集、水质恶化的现状。

3 结论

(1)研究区总磷、总氮和铵态氮超标最为严重，其中总氮含量雨季明显大于旱季。辛庄地区地下水中总磷平均含量明显高于宜兴和王庄地下水。研究区域内太湖的磷污染比灌溉水和城市河水严重，且长期处于富营养化状态。

(2)地表水分析中，雨季受较为严重的工业类污染影响，而旱季的第 1 主成分和第 3 主成分均反映了以氮、磷等面源污染物作为主导因子对地表水体的污染影响状况。

(3)综合地表水水质状况可以发现，地表水水质最大的影响因素是氮、磷营养盐以及 COD_{Mn}，影响地表水质的主要氮盐为铵态氮。而 COD_{Mn} 的主导效应则表明研究区受到周边工业污染的影响较为严重，苏锡常工业三角区对于太湖水体的污染已经进一步波及到周边农田系统。

参考文献：

[1] 徐亦钢, 俞飞, 张孝飞, 等.我国农村环境污染的主要特点与成因[J]. 农业环境与发展,2006(6),37-39.
XU Yi-gang,YU Fei,ZHANG Xiao-fei, et al. The main features and causes of environmental pollution in Chinese rural areas[J]. *Agricultural Environment and Development*, 2006 (6):37-39.

[2] 张雪绸.我国农村环境污染问题研究[J].安徽农业科学,2007,35(2): 519-520.
ZHANG Xue-chou.Reseach of environmental pollution in Chinese rural areas[J]. *Anhui Agricultural Science*, 2007,35 (2) :519-520.

[3] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措

施[J].生态学报,2002,22(3):291-299.

QUAN Wei-Min, YAN Li-Jiao. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure[J]. *Acta Ecologica Sinaca*, 2002,22(3):291-299.

[4] 沃飞, 陈效民, 吴华山, 等.太湖流域典型地区农村水环境氮、磷污染状况的研究[J].农业环境科学学报[J]. 2007,26(3):819-825.
WO Fei,CHEN Xiao-min,WU Hua-shan, et al.Pollution situation of nitrogen and phosphorus in rural water environment in typical region of Tai Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007,26(3):819-825.

[5] 黄宗楚,郑祥民,姚春霞.上海旱地农田氮磷随地表径流流失研究[J].云南地理环境研究,2007,19(1):6-10.
HUANG Zong-chu, ZHENG Xiang-min, YAO Chun-xia. The study of nonirrigated farmland nitroged and phosphorus loss with surface runoff in Shanghai[J]. *Yun Nan Geographic Enviroment Research*, 2007,19(1): 6-10.

[6] 王鹏,高超,姚琪,等.环太湖典型丘陵区不同土地利用方式下土壤磷素随地表径流迁移特征[J]. 农业环境科学学报[J]. 2007,26(3):826-830.
WANG Peng,GAO Chao,YAO Qi, et al. Characteristics of agricultural phosphorous losses with surface runoff under different land uses in hill area around Taihu Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):826-830.

[7] 段亮,段增强,夏四清.农田氮、磷向水体迁移原因及对策[J].中国土壤与肥料, 2007(4):6-10.
DUAN Liang,DUAN Zeng-qiang,XIA Si-qing.The reason and solution of nitrogen and phosphorus release to water from farmland[J]. *Chinese soil and fertilizer*, 2007(4):6-10.

[8] 朱克贵.中国土种志[M].北京:农业出版社,1993.
ZHU Ke-gui. Territories of China[M]. Beijing: Agricultural Publishing House .1993.

[9] 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[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,1997.
State Environmental Protection Administration, "water and wastewater monitoring and analysis methods" the editorial board. Water and wastewater monitoring and analysis methods(fourth edition)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1997.

[10] 鲁如坤.植物营养与施肥原理[M].北京:农业出版社,2000.201-202.
Lu Ru-kun. Principle of plant nutrition and fertilization[M]. Beijing: Agricultural Publishing House .2000.201-202.

[11] 沃飞.太湖地区典型农田水环境质量现状分析与评价[D].南京:南京农业大学, 2007.
WO Fei. Analysis and Evaluation of TyPical Rural Water Quality Situationin Taihu Region [D].Nanjing:Nanjing Agrieultural University, 2007.

[12] 陆景陵.植物营养学[M].北京:中国农业大学出版社,2003.106-107.
LU Jing-ling. Plant nutrition[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003.106-107.