

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国4个WMO/GAW本底站大气CH ₄ 浓度及变化特征	方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳	(2917)
我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源	李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙	(2924)
2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析	李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海	(2932)
厦门市冬春季灰霾期间大气PM ₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源分析	钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红	(2939)
气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用	王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J	(2946)
松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征	张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超	(2953)
河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究	赵亚娟,龚巍巍,栾胜基	(2960)
印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选	马英歌	(2967)
烹调油烟中挥发性有机物的排放初探	何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕	(2973)
生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究	胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟	(2979)
分期布液生物滴滤床净化H ₂ S废气性能研究	刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪	(2987)
粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究	孟阳,王书肖	(2993)
太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价	刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁	(3000)
巢湖水质与流域农业投入的关联性研究	张燕,高翔,张洪	(3009)
巢湖十五里河水花生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性	李如忠,李峰,周爱佳	(3014)
巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价	刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉	(3024)
巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性	陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼	(3031)
丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究	雷沛,张洪,单保庆	(3038)
水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响	刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤	(3046)
平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究	杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波	(3051)
江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析	刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功	(3057)
太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价	甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩	(3064)
南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究	刘静,路风,杨廷钊,徐娜,王田妮	(3070)
珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系	何洪威,周达诚,王保强,梁艳红	(3076)
东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价	王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙	(3083)
深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究	孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉	(3089)
福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响	高文华,杜永芬,王丹丹,高抒	(3097)
渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨	蔡文倩,刘录三,乔飞,林岍璇,周娟	(3104)
地下水污染防治区划体系构建研究	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮	(3110)
北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(3117)
川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO ₃ ⁻ 的存储和运移	杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风	(3124)
改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究	董锡臻,石宝友,解岳,王东升	(3132)
水溶液中臭氧和溴离子的反应研究	俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇	(3139)
HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布	张晗,董秉直	(3144)
不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC _s)产生机制研究	卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才	(3152)
不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响	况烨,周琰,王清萍,陈祖亮	(3160)
多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水	李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶	(3167)
三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究	徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮	(3172)
改性花生壳对水中镉的动态吸附研究	龙腾,易筱筠,党志	(3177)
硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能	王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军	(3182)
海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型	罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰	(3189)
营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复	张著,高大文,袁向娟,勾倩倩	(3197)
生物表面活性剂强化污泥水解的研究	易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平	(3202)
厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定	刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波	(3208)
阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究	李绍峰,朱静,李铁晶	(3214)
农业废物堆肥中高产漆酶菌株的分离鉴定及酶学性质研究	任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明	(3220)
糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定	李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云	(3228)
餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析	刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕	(3236)
共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究	吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳	(3241)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究	邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳	(3247)
单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应	武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷	(3253)
金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价	杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新	(3261)
环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响	董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵	(3266)
地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究	金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳	(3272)
焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯转化特征	刘敬勇,孙水裕	(3279)
城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例	于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞	(3288)
NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析	连静,刘俊新	(3295)
《环境科学》征订启事(3037)	《环境科学》征稿简则(3151)	信息(2999,3030,3096,3227)

巢湖水质与流域农业投入的关联性研究

张燕, 高翔, 张洪*

(南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093)

摘要: 为探讨巢湖富营养化与流域农业生产投入资源的关联性, 选择了化肥剩余、节水灌溉面积、农膜、水土流失治理等可能影响水体富营养化的因子; 研究中采用相关分析与逐步回归的方法, 同时, 提出了一种结合 Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) 法计算化肥剩余量的方法。结果表明, 巢湖流域农业生产投入的各种资源中, 对巢湖水体富营养化影响较大的是化肥剩余、节水灌溉面积和农膜, 并且化肥剩余的影响还存在 1 a 的滞后期。因此, 有必要从提高化肥利用效率、改进灌溉排水方式并减少农业用水入手, 以求节约资源, 同时降低农业生产对巢湖水质的影响。

关键词: 富营养化; 农业资源; 化肥剩余; TOPSIS 法; 相关分析; 巢湖

中图分类号: X592 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-3009-05

Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin

ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: In order to discuss the association between the water quality of Chaohu Lake and the resources input in agriculture of the basin, factors that may affect the lake eutrophication are chosen, such as surplus fertilizer, irrigated area with saved water, agricultural films, water and soil loss control and so on. The methods of correlation analysis and stepwise regression are used. Furthermore, a new method, combined with the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method, calculating the surplus fertilizer is designed. The results indicate that among various resources input in agriculture of the basin the surplus fertilizer, irrigated area with saved water and agricultural films have a great influence on Chaohu Lake eutrophication. And one year's lag phase between the water quality of Chaohu Lake and the surplus fertilizer is confirmed. Therefore, it is necessary to raise the utilization efficiency of fertilizer, to improve the irrigation way and to decrease the agricultural water consumption in order to conserve resources and to reduce the influence of agricultural production on the water quality of Chaohu Lake.

Key words: eutrophication; resources input in agriculture; surplus fertilizer; TOPSIS method; correlation analysis; Chaohu Lake

环境问题产生于资源利用效率不高, 农业资源利用经常成为面源污染的源头, 这些观点已成为人们的普遍认识, 许多学者从不同角度研究了此问题, 如农业非点源污染的关键源区识别^[1], 流域农业耕作与流域水质响应关系^[2], 入湖河流污染特征及分类^[3], 流域下垫面因素对面源污染物输出强度的影响^[4,5], 农田生态系统磷代谢分析等^[6]。但农业资源投入及利用效率究竟与湖泊水质之间有着怎样的关联性, 这方面的定量研究却不多见。

巢湖湖泊水体已处于富营养化状况, 有研究通过溯源调查与分析认为, 非点源污染已成为巢湖水体富营养化的主要原因^[5]。基于巢湖流域人多地少、农业经济发达、土地利用强度高、土地复种指数达 215.3%^[7]、农业生产投入的资源量大的现状, 本研究以巢湖水质为对象, 定量分析巢湖流域农业生产中的农业资源投入及利用效率对湖泊水质的影响。

1 材料与方法

1.1 指标选择

1.1.1 描述水体富营养化的指标

本研究以巢湖水体水质富营养化为调查对象, 描述水体富营养化的指标为高锰酸盐指数、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a 年均浓度和营养状态指数^[8]。数据来源于 2003~2009 年的中国环境年鉴^[9]。

1.1.2 水体富营养化的影响因子

考虑到农业投入对水体水质富营养化的影响主要应来自于化肥的残留(剩余), 途径则主要为降雨径流与灌溉排水引起的流失, 因此, 本研究选择了化

收稿日期: 2011-11-13; 修订日期: 2012-02-06

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK2001040); 国家自然科学基金项目(40930103, 40771186)

作者简介: 张燕(1962~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为资源与环境。

* 通讯联系人, E-mail: zhongnju@yahoo.com.cn

肥剩余、节水灌溉面积、农用塑料薄膜用量、水土流失治理作为水体富营养化的影响因子。数据来源于 2001~2011 年的安徽统计年鉴^[7]。

(1) 化肥剩余的计算 笔者认为,导致农田面源污染的原因是投入的资源有富余,多余的资源由径流或流失土壤携带汇入了水体,可见,有剩余才有可供流失的物质,即相对于产出而言,未被完全利用的资源是引起水环境问题的根源。具体到化肥,它是农作物生长中不可或缺的营养元素的主要来源之一,其提供的营养元素会转化成农作物最终产物的组成部分,因此,化肥施用量的多少并不是造成环境问题的根源,只有它的利用效率才会引发环境问题:过量施用化肥可能导致营养元素未被作物吸收,产生化肥剩余,并造成营养元素在耕地土壤表层富积,化肥中这部分未得到充分利用(没能转化成农作物最终产物)而残留于土壤中的营养元素才可能成为湖泊营养的“源物质”。因此,须考虑的化肥剩余量为:

$$r_s(t) = r(t) - \eta(t) \times r(t) = r(t) \times [1 - \eta(t)] \quad (1)$$

式中, $r_s(t)$ 为 t 年未被利用的化肥剩余量; $r(t)$ 为 t 年化肥投入量; $\eta(t)$ 为 t 年农作物对化肥的利用效率, $\eta(t) \times r(t)$ 则是 t 年化肥投入量中已经转化成农作物最终产物的部分。 $\eta(t)$ 很难直接测量,因而缺少相关数据,但考虑到作物对资源的利用效率与生产力呈正比,故可用产出与资源投入的对比(资源的生产力)来间接度量作物对资源的利用效率,因此,本研究用间接方式测算 $\eta(t)$: 单位资源形成的综合产出 Q/r 越多,则作物对资源的利用效率越高; t 时期的生产力 $Q(t)/r(t)$ 对应该时期的效率 $\eta(t)$, 基准期 t_0 的生产力则对应当时的效率 $\eta(t_0)$, 即有:

$$\eta(t)/\eta(t_0) = [Q(t)/r(t)] / [Q(t_0)/r(t_0)] = b(t) \quad (2)$$

$$\text{即: } \eta(t) = b(t) \times \eta(t_0) \quad (3)$$

式中的综合产出 Q 用 Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) 方法计算,该法的基本原理、具体应用和计算步骤参见文献^[10,11]。

于是,当用资源生产力的相对变化代替效率的相对变化来探讨农田投入化肥未被利用的剩余量时, t 年未被利用的剩余量 $r_s(t)$ 为:

$$\begin{aligned} r_s(t) &= r(t) \times [1 - \eta(t)] \\ &= r(t) \times [1 - b(t) \times \eta(t_0)] \end{aligned} \quad (4)$$

(2) 灌排水因素 要有动力,农田投入资源中未被利用的剩余物质才会发生流失并进入湖泊,在巢湖地区,主要的动力便是灌排水量。

因为总用水量 W 取决于单位面积用水量 w 和总灌溉面积(有效灌溉面积) S , 即 $W = w \times S$, 如果 w 不变,则 $W \propto S$ 。进一步可以将 W 分为两部分: $W = w_1 \times S_1 + w_2 \times S_2$, 前一项代表节水灌溉用水量,后一项代表非节水灌溉用水量,且 $w_1 < w_2$, $S = S_1 + S_2$; 当 S 保持一定时, S_1 增加则 S_2 减少,总用水量 W 也会随 S_1 的增加而减少。所以,在缺少灌排水直接数据的条件下,为考察节水灌溉措施的环保效果,本研究用节水灌溉面积 S_1 来间接度量灌排水量。

(3) 农用塑料薄膜 塑料大棚与地膜覆盖既可减少用水量从而影响 W , 也能减少土壤侵蚀与养分流失,进而降低径流与土壤流失,减少进入湖泊的营养物质,因而,农用塑料薄膜用量也被选作水体富营养化的影响因子。

(4) 水土流失治理 农田投入资源中未被利用的剩余物质或溶于水或附着在土壤颗粒上随水或土壤迁移,最终沉积于湖泊中,成为污染湖泊的物质;且水土流失量与水土流失面积成正比,水土流失治理则可有效减少土壤流失量这种面源污染物,因而,要计量土壤流失量对水体富营养化的影响,又无法得到水土流失治理前后土壤流失量的直接数据时,以水土流失治理面积来间接度量土壤流失量不失为一种可用之法。

1.2 相关系数和滞后相关系数的计算

本研究用相关系数讨论湖泊水体水质与流域农业投入的关联性。而且,因为农田土壤中的养分进入水体需要一定的时间,故还用滞后相关系数探讨了化肥剩余量影响湖泊水体水质的滞后期。所用的具体算式如下。

(1) 2 个要素 x 与 y , 样本值分别为 x_i 与 y_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 要素 x 与 y 的相关系数 r_{xy} 的计算式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad r_{xy} \in [0, 1] \quad (5)$$

其中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$; $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$

$r_{xy} > 0$ 表示 x 与 y 正相关(同向相关), $r_{xy} < 0$ 表示 x 与 y 负相关(异向相关)。 r_{xy} 的绝对值越接近 1, 两要素关系越密切; 越接近 0, 两要素关系越不密切。

(2)当要素 x 与 y 的相关关系存在 k 期滞后期,即样本值分别为 $x_t(t=1,2,\cdots,n)$ 与 $y_t(t=1+k,2+k,\cdots,n+k)$,要素 x 与 y 的 k 阶滞后相关系数 r'_{xy} 的计算式为:

$$r'_{xy} = \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x}_t)(y_{t+k} - \bar{y}_{t+k})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x}_t)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (y_{t+k} - \bar{y}_{t+k})^2}}$$

$r'_{xy} \in [0,1]$

(6)

其中: $\bar{x}_t = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t$; $\bar{y}_{t+k} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_{t+k}$

2 结果与分析

巢湖位于安徽省中部长江流域下游左岸,在 117°16'54"~117°51'46"E、31°25'28"~31°43'28"N 之间,湖区面积 760 km²,是我国五大淡水湖之一,也是合肥市和巢湖市重要的饮用水源地,具有工业用水、农业灌溉、防洪、渔业、旅游等多种功能. 巢湖流域面积13 486 km²,包括合肥市、肥东县、肥西

县、舒城县、巢湖市、庐江县、含山县、无为县、和县 9 个辖区^[12]. 当地农业较发达,是安徽省重要的商品粮油生产基地,2009 年粮食、油料及棉花等主要农产品产量分别占安徽全省的 10.6%、21.5% 及 23.5%. 2009 年流域化肥平均用量达 368.2 kg·hm⁻²,高于同期安徽省 347.2 kg·hm⁻²^[7] 和全国化肥平均用量 340.7 kg·hm⁻²^[13],更高于国际公认的化肥安全施用上限 225 kg·hm⁻²^[14].

以忠庙-姥山-齐头嘴为界,可将巢湖划分为东、西两大湖区^[15],西湖区流域辖合肥市、肥东县、肥西县、舒城县. 2009 年巢湖水体总体营养状态为轻度富营养,其中东半湖水体呈轻度富营养状态,而西半湖水体则呈中度富营养状态^[9],因而本研究着重关注巢湖西湖区的富营养状态与农业投入及利用效率间的关系.

表 1 为 2000~2010 年巢湖流域西区农业投入与产出^[7],以及用 TOPSIS 方法综合粮食、棉花与油料得到的农业综合产出 Q . 表 2 则为 2003~2009 年巢湖西半湖主要水质指标^[9].

表 1 2000~2010 年巢湖流域西区农业投入与产出

Table 1 Resources inputs and outputs in agriculture of western basin of Chaohu Lake from 2000 to 2010

年份	投入				产出			
	化肥/t	节水灌溉面积 ×10 ³ /hm ²	农膜/t	水土流失治理面积 ×10 ³ /hm ²	粮食 ×10 ⁴ /t	棉花 ×10 ⁴ /t	油料 ×10 ⁴ /t	综合产出 Q
2000	126 413	42. 62	2 344	84. 10	123. 32	1. 06	24. 48	0. 420 9
2001	139 577	47. 05	4 853	86. 10	127. 28	1. 06	27. 76	0. 566 8
2002	154 331	48. 38	2 421	87. 23	137. 82	0. 92	23. 71	0. 413 7
2003	140 404	50. 08	2 186	89. 10	94. 90	0. 89	21. 11	0. 080 0
2004	123 651	51. 00	2 125	89. 60	151. 60	1. 11	29. 58	0. 720 0
2005	129 235	53. 01	3 813	90. 51	139. 52	1. 02	29. 00	0. 627 4
2006	136 845	57. 22	3 787	92. 07	157. 98	1. 52	28. 50	0. 944 0
2007	139 422	57. 60	6 060	92. 64	158. 18	1. 32	22. 46	0. 609 4
2008	144 292	58. 97	2 977	93. 87	167. 27	1. 51	27. 78	0. 946 8
2009	150 893	60. 31	3 774	95. 41	169. 96	1. 55	28. 29	0. 990 9
2010	152 932	61. 963	3 929	96. 44	173. 48	1. 54	24. 06	0. 770 2

表 2 2003~2009 年巢湖西半湖主要水质指标

Table 2 Main water quality indexes of western Chaohu Lake from 2003 to 2009

年份	高锰酸盐指数 /mg·L ⁻¹	总磷 /mg·L ⁻¹	总氮 /mg·L ⁻¹	叶绿素 a /mg·L ⁻¹	营养状态指数
2003	5. 84	0. 36	4. 16	0. 035 9	67. 3
2004	5. 70	0. 33	3. 77	0. 035 9	67. 0
2005	5. 80	0. 34	2. 78	0. 031 0	65. 0
2006	7. 00	0. 19	1. 55	0. 043 0	64. 0
2007	6. 40	0. 22	1. 39	0. 033 0	63. 0
2008	5. 80	0. 22	2. 48	0. 052 0	66. 1
2009	5. 40	0. 13	2. 10	0. 034 0	62. 6

根据我国化肥利用效率的已有研究^[16]以及发达国家化肥施用量^[17]对比得到的间接结果,式

(4)中化肥的 $\eta(t_0)$ 取 0.35, $Q(t_0)/r(t_0)$ 取 2000~2010 年 $Q(t)/r(t)$ 的平均值. 由式(4)计算得到化

肥剩余量与化肥利用率,结果见图 1。从中可见,巢湖流域西区的化肥利用率在波动中逐步提高,最高为 52.3% (2006 年);而 2003 年化肥利用率很低是因该年巢湖流域大面积受灾^[7]造成农业综合产出低所致。

利用表 2 主要水质指标、表 1 农业投入、图 1 化肥利用剩余数据,由式(5)和式(6)算得巢湖西半湖水水质指标与流域农业投入指标的单相关系数、滞后相关系数,并计算了复相关系数(表 3)。

3 讨论

巢湖流域西区农业生产中的农膜、节水灌溉面积、水土流失治理面积、化肥剩余与西半湖水体的

表 3 巢湖西半湖水水质指标与流域农业投入指标的单相关系数、滞后相关系数与复相关系数¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficient, lag correlation coefficient and multiple correlation coefficient between water quality indexes of western Chaohu Lake and resources inputs in agriculture of western basin

水质指标	化肥剩余	滞后 1 a 化肥剩余	节水灌溉	农膜	水土治理	复相关系数
高锰酸盐指数	-0.142	-0.259	0.130	0.423	-0.084	0.954
总磷	0.492	0.592 *	-0.951 ***	-0.482	-0.932 ***	0.957
总氮	0.496	0.848 **	-0.833 ***	-0.838 ***	-0.712 **	0.987 *
叶绿素 a	-0.312	0.153	0.370	-0.279	0.308	0.915
营养指数	0.351	0.868 ***	-0.769 **	-0.823 **	-0.729 **	0.929

1) *** 表示极显著相关 $P < 0.01$; ** 表示显著相关 $P < 0.05$; * 表示相关 $P < 0.10$; 样本数 $n = 7$

富营养化指标存在明显相关性。总体来说,水质与农膜使用量、节水灌溉面积、水土流失治理面积负相关,与滞后 1 a 的化肥剩余量正相关。这正说明,农膜覆盖有助于减少营养元素流失,降低面源污染;节水灌溉面积的增加却能有效减少人为排水,降低营养元素的流失,从而降低水体富营养化的风险;随着水土流失治理面积加大,土壤流失量降低,土壤颗粒携带营养元素进入河道与湖泊水体的量将减少,也可有效减少面源污染,改善水环境质量;化肥剩余是水体富营养化的物质来源,剩余越多则水体污染越严重。

由表 3 可见,高锰酸盐指数与叶绿素 a 的复相关系数比单相关系数高,说明这 2 项指标受多种农业投入因素影响,是多因素共同作用的结果。

由表 3 可见,水质与当年化肥剩余量的相关系数很小,而与滞后 1 a 的化肥剩余量的相关系数显著提高,表明巢湖流域西区农业生产中使用化肥产生的剩余与西半湖水水质指标间存在 1 a 的滞后期,即化肥剩余量进入水体对水质产生影响有 1 a 的滞后期。原因可能是化肥中的营养元素从陆地农田迁移至水体需要经历一定时间;尤其磷元素通常被吸附于土壤颗粒表面,不随水移动,只有发生土壤随地

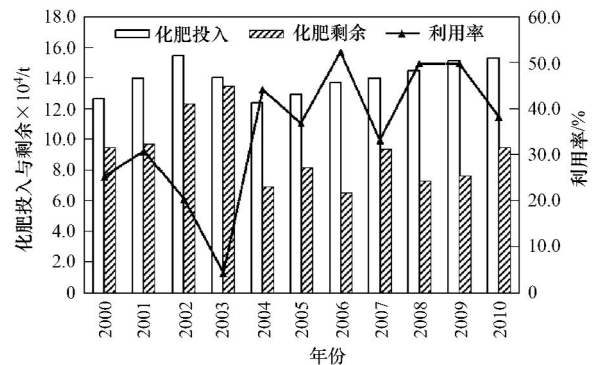


图 1 2000 ~ 2010 年巢湖流域西区化肥投入、化肥剩余与化肥利用率

Fig. 1 Input, surplus and utilization efficiency of fertilizer in agriculture of western basin of Chaohu Lake from 2000 to 2010

表径流和人为排水流失,土壤颗粒才携带着磷元素随水迁移进入水体,引起水体富营养化。应该说明的是,化肥剩余与水质间存在 1 a 的滞后期与本研究采用年数据进行分析有关,即从宏观角度探讨巢湖流域农业投入与巢湖水质间的关系时,受资料间隔时间所限,本研究取的时间尺度为“年”,但如采用时段更短的数据,化肥剩余与水质间的滞后关系不一定是一年而可能只有几个月滞后期。

用逐步回归方法建立巢湖西半湖水水质指标与流域西区农业投入间的线性关系如下:

$$TP = 1.400 - 0.021 \times S_1 \quad (7)$$

$$R = 0.951, P = 0.001; t = -6.855, d_f = 6$$

从式(7)看,水体总磷浓度 TP 主要取决于节水灌溉面积 S_1 ,且两者负相关,这也正是“磷元素的迁移主要受人为排水产生的径流冲刷影响”应有的结果,说明节水灌溉可有效减少人为排水,降低农业面源污染。

$$TN = 11.813 - 0.139 \times S_1 -$$

$$4.294 \times 10^{-4} \times F \quad (8)$$

$$R = 0.949, P = 0.01;$$

$$t = -2.807, -2.865, d_f = 5$$

从式(8)看,水体总氮浓度 TN 主要取决于节水

灌溉面积 S_i 与农膜使用量 F , 且节水灌溉面积越大, 农膜使用量越高, 总氮浓度越低, 这间接说明氮元素主要随水迁移, 减少灌溉水量、增加农膜覆盖可降低水体中总氮浓度。

式(7)、(8)中都包含灌排水因素, 参考 2004 年居巢区环保站的水稻灌溉调查(平均排水量 $9\,046.5\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 灌溉次数 4.46 次, 且大部分地区仍采用传统的大水漫灌方法)^[12], 说明灌排水是影响巢湖水体中 TP、TN 的重要因素之一, 灌溉方式落后会加剧湖泊水体污染, 因此, 农业生产中应推广先进灌溉技术, 既可节约水资源又能降低水体富营养化的风险。

$$I(t) = 59.538 + 5.99 \times 10^{-5} \times r_s(t-1) \quad (9)$$

$$R = 0.868, P = 0.01; t = 3.914, d_f = 6$$

从式(9)看, 营养指数 $I(t)$ 主要取决于滞后 1 a 的化肥剩余量 $r_s(t-1)$, 且两者正相关, 这表明水体营养指数高低取决于营养元素的多少, 即农业面污染源的一个主要来源是化肥利用效率低下产生的剩余。要减少化肥剩余, 办法之一是采用测土配方施肥, 即根据土壤肥力、土壤性质、作物品种、植物生长特性、生长季节和目标产量确定合理的化肥施用量; 并采用科学的施肥技术, 在恰当时间、合理位置施用数量恰当的肥料, 决不过量施肥, 以便既满足植物生长所需, 减少养分剩余与资源浪费, 又降低水体富营养化的风险。

高锰酸盐指数、叶绿素 a 与文中选择的因子没有很强的相关性, 表明文中农业资源因子可能不是这 2 种水质指标的主要影响因子。

4 结论

(1) 研究表明, 巢湖水体富营养化的主要影响因子有化肥、节水灌溉面积、农膜使用量。尤其巢湖流域是我国中部地区典型的农业生产区域, 当地农业增产的主要措施之一是提高化肥施用强度, 但利用效率低致使化肥剩余多, 并导致氮、磷等营养元素流失; 加上灌溉方式不合理造成灌溉用水量及随之产生的大量排水, 加剧了巢湖水体富营养化的风险。

(2) 要控制并改善巢湖水体富营养化, 在当地农业生产中, 特别要注意提高化肥利用效率(以减少化肥剩余)和改进灌溉方式(包括增加节水灌溉面积、减少灌溉水量、增加农膜覆盖), 从而达到提高经济效益、节约资源、保护环境多重功效。

参考文献:

- [1] 周慧平, 高超. 巢湖流域非点源磷流失关键源区识别[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2696-2702.
- [2] 蒋鸿昆, 高海鹰, 张奇, 等. 抚仙湖梁王河流域农业耕作与流域水质响应关系研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2294-2300.
- [3] 王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖入湖河流分类及污染特征分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 2834-2839.
- [4] 李恒鹏, 杨桂山, 黄文钰, 等. 不同尺度流域地表径流氮、磷浓度比较[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(4): 389-396.
- [5] 阎伍政. 巢湖流域不同土地利用类型地表径流污染特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 1998, **7**(3): 274-277.
- [6] 武慧君, 袁增伟, 毕军. 巢湖流域农田生态系统磷代谢分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(12): 1658-1663.
- [7] 安徽省统计局编. 安徽统计年鉴 2001~2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2011.
- [8] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [9] 中国环境年鉴编辑委员会编. 中国环境年鉴 2003~2009[M]. 北京: 中国环境年鉴社, 2003-2009.
- [10] Hwang C L, Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications[M]. New York: Springer-Verlag, 1981.
- [11] 张燕, 高翔, 张洪. 农业综合产出对投入资源的敏感性研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, **16**(6): 169-173.
- [12] 刘洁, 马友华, 石润圭, 等. 巢湖流域农业面源污染现状分析及防治对策思考[J]. 农业环境与发展, 2008, **25**(6): 13-16.
- [13] 中华人民共和国国家统计局编. 中国统计年鉴 2010[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.
- [14] Syers J K, Johnston A E, Curtin D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.
- [15] 吴跃东. 巢湖的形成与演变[J]. 上海地质, 2010, **31**(增刊): 152-156.
- [16] 陈同斌, 曾希柏, 胡清秀. 中国化肥利用率的区域分异[J]. 地理学报, 2002, **57**(5): 531-538.
- [17] FAO (Food and Agriculture Organization). Fertilizer use by crop[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 9 Sep. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in-Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行