

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

PM _{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例	吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化	郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响	韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)
北京山谷风环流特征分析及其对PM _{2.5} 浓度的影响	董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征	薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征	吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O ₃ 与SOA的生成潜势	邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰(2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析	王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降	王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性	王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林(2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估	杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征	张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性	王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性	楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义	许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程	韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较	姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征	王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算	罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平(2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价	张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成	齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用	王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊(2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验	金建荣,李田,时珍宝(2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚	张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)
超声、紫外增强H ₂ O ₂ /KI降解磺胺甲基嘧啶	魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)
不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比	姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果	郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄(2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析	张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响	张玲,彭党聪,常蝶(2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性	冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析	周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响	周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制	秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)
外源Ca ²⁺ 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响	任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析	张崇森,牛全睿,徐丽梅,王陇梅,王岱,武少华(2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析	谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制	李欢,王磊,王亚楠(2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征	乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析	陈秀端,卢新卫(2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例	佟瑞鹏,杨校毅(2522)
Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制	钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系	陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果	陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果	田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)
大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性	王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响	杨宁伟,毕二平(2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响	罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N ₂ O排放的影响	郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径	袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价	王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响	甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏荒,周俊(2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展	王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)	

滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征

王一茹^{1,2,3}, 王圣瑞^{2,3}, 焦立新^{2,3*}, 张云^{2,3}, 高秋生^{2,3}, 杨枫^{2,3}

(1. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650500; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊生态环境创新基地, 北京 100012)

摘要: 本文连续 12 个月监测了滇池草海柱状沉积物间隙水和上覆水不同形态氮磷浓度的垂向变化, 揭示了不同季节间隙水与上覆水氮磷浓度差异及其形态组成贡献率, 探讨了间隙水氮磷组成及氮/磷比值在湖泊富营养化及内负荷控制中的重要意义。结果表明: ①草海间隙水 NH_4^+ -N 浓度显著高于上覆水, 而上覆水中 NO_3^- -N 浓度显著高于间隙水, 春、夏和秋季 (2~11 月) 间隙水 SRP 浓度显著高于上覆水, 而冬季 (12 月和 1 月) 则与之恰好相反; ②草海间隙水以 NH_4^+ -N 和 SRP 贡献为主, 分别占 DTN 和 DTP 的 61% 和 78%, 而上覆水则以 DON 和 DOP 贡献为主, 分别占 DTN 和 DTP 的 44% 和 81%, 与春季和冬季相比, 夏、秋季节间隙水 NH_4^+ -N 和 SRP 贡献率显著增加, 而 NO_3^- -N、DON 和 DOP 贡献率明显下降; ③草海间隙水 DTN/DTP、 $(\text{NH}_4^+$ -N + NO_3^- -N)/SRP 和 DON/DOP 比值均表现为春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季, 而上覆水氮/磷比值则以春季较高, 夏、秋和冬季相对较低。

关键词: 滇池草海; 沉积物间隙水; 时空分布; 氮磷组成; 氮/磷比

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2336-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201611098

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake

WANG Yi-ru^{1,2,3}, WANG Sheng-rui^{2,3}, JIAO Li-xin^{2,3*}, ZHANG Yun^{2,3}, GAO Qiu-sheng^{2,3}, YANG Feng^{2,3}

(1. School of Environment Science and Engineer, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Research Center of Lake Eco-Environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The vertical variation in the contents of nitrogen and phosphorus with different forms in pore water and overlying water was continuously measured for twelve months in Dianchi Caohai Lake. The research revealed the difference of N or P concentration between pore water and overlying water and the contribution of nitrogen and phosphorus forms. It is significant to understand the formation of N and P and the ratio of N/P in pore water in the fields of lake eutrophication and the control of internal nutrient-loading. The results demonstrated that: ①Sediment pore water $\rho(\text{NH}_4^+$ -N) was significantly higher than that in overlying water. But for NO_3^- -N, it obeyed the opposite rule. From Feb. to Nov., $\rho(\text{SRP})$ was higher than that in overlying water, while the opposite rule was found in Dec. and Jan.. ②In sediment pore water, $\rho(\text{NH}_4^+$ -N) or $\rho(\text{SRP})$ presented the maximum contribution ratio of DTN (78%) or DTP (61%), respectively. While, in overlying water, the maximum contribution ratio was DON (44%) or DOP (81%), respectively. Compared to those in spring and winter, the contribution of $\rho(\text{NH}_4^+$ -N) and $\rho(\text{SRP})$ increased distinctly and the contribution of $\rho(\text{NO}_3^-$ -N), $\rho(\text{DON})$ and $\rho(\text{DOP})$ dropped obviously in summer and autumn. ③The temporal variations for the ratios of DTN/DTP, $(\text{NH}_4^+$ -N + NO_3^- -N)/SRP and DON/DOP in pore water were all in the following sequence: spring > winter > summer > autumn. In overlying water, the N/P ratio in spring was relatively higher than that in the other three seasons.

Key words: Dianchi Caohai Lake; sediment pore water; temporal and vertical distribution; nitrogen and phosphorus forms; N/P ratio

沉积物释放是湖泊上覆水氮磷等营养的重要来源之一, 其对湖泊生态系统氮磷循环及富营养化具有重要影响^[1]. Pitkänen 等^[2] 和 Berelson 等^[3] 对不同区域湖泊研究表明, 沉积物氮磷释放进入水体的负荷量与外源氮磷负荷入湖量相当, 因此, 在外源污染负荷得到控制的情况下, 沉积物内源释放将在一定范围内, 较长时间尺度上影响湖泊水质和水生态系统健康, 进而导致富营养化^[4]. 间隙水是沉积物释放氮磷的主要载体, 直接影响着上覆水氮磷浓度和沉积物-水界面氮磷交换过程^[5]. 通常, 间隙水的

移动与沉积物氮磷的迁移、释放及转化密切相关^[6], 间隙水氮磷浓度的高低是沉积物氮磷释放能力和强度的直接反映. 显然, 间隙水氮磷也是最活跃的, 易受沉积物本身性质、水动力、温度、pH、氧化还原条件及生物活动等影响而发生变化^[7]. 本研究从时间

收稿日期: 2016-11-12; 修订日期: 2016-11-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07102-004); 国家自然科学基金项目 (U1202235)

作者简介: 王一茹 (1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊富营养化机制, E-mail: 18468091815@163.com

* 通信作者, E-mail: 287559418@qq.com

和空间的角度研究了草海间隙水氮磷浓度及其组成变化,对比了间隙水与上覆水之间的差异,一方面揭示了草海沉积物氮磷的迁移及释放的季节性变化规律,另一方面阐明了间隙水与上覆水氮磷组成差异及其可能的来源,研究成果对进一步评估草海沉积物内负荷及湖泊富营养化过程具有重要意义。

随着湖泊富营养化水平的加重,近些年蓝藻水华大面积暴发,氮/磷比理论逐渐受到学者们的关注。很多研究表明,氮/磷比与浮游植物的群落结构关系密切,Bulgakov 等^[8]认为水体中较高的 TN/TP (20~50)有助于绿球藻目的生长,TN/TP 降至 5~10 以下时,优势藻类更替为蓝藻门。Smith^[9]基于 17 个湖泊的调查发现,TN/TP 低于 29 时,湖泊水华暴发的风险更大。Downing 等^[10]认为,氮/磷比随着湖泊水体营养水平的增加而减小。可见,氮/磷比对浮游植物结构以及湖泊营养水平有明显的指示作用。草海沉积物间隙水中的 TN/TP 比值变化与上覆水中营养状态的关系密切,同时也对分析草海上覆水富营养化状态变化有一定的帮助。

草海位于滇池东北部,是目前滇池污染最严重的区域为劣 V 类水。周圆等^[11]通过综合水质指数法分析得到第二类污染物(DO、BOD₅、氨氮、总磷、粪大肠菌)是草海水体中的主要污染因子,评价为严重污染,不安全级别。近些年针对草海已有一些报道研究,史静等^[12]研究了草海沉积物中磷的赋存形态及空间分布;刘震等^[13]认为草海沉积物中磷素主要以无机磷形态赋存,其中活性较高的铁铝结合态磷居多,使得沉积物有较大的磷释放潜力;王建军等^[14]通过对比发现草海沉积物-水界面营养盐释放通量远高于抚仙湖和滇池湖心。特殊的地理环境导致草海沉积物中的 TP、TN、TOC 远高于外海,该地区的沉积物中的氮磷释放特点具有典型性值得深入研究。目前,对于沉积物-水界面氮磷释放影响因素的文章已有一定数量,但鲜有讨论关于沉积物间隙水氮磷浓度时空变化的报道。本文首先将从沉积物间隙水中氮磷浓度的季节性变化特征入手,揭示不同季节间隙水与上覆水氮磷浓度差异及其形态分布特征。以氮磷比变化的角度讨论间隙水氮磷浓度对湖泊富营养化的影响,以期对滇池内负荷控制提供数据支持与理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

滇池草海湖面积 10.25 km²,湖容 0.188 亿 m³,

平均水深 3.21 m。滇池草海属于高原断陷湖泊具有入湖河流多,出水河流少,换水周期长,营养物质易堆积、生态系统脆弱的特点。西北部位毗邻永盛村,大面积农事活动使得全磷大量沉积;北部大观河入流,该河常年接纳城区污水;东部毗邻旅游区,有大量生活垃圾与红嘴鸥粪便^[12],因特殊的地理位置,滇池草海是滇池湖区污染程度最高的区域。经过检测,本文研究点位沉积物中的 TN 含量高达 11 772 mg·kg⁻¹远高于滇池全湖的沉积物氮含量水平(3 646 mg·kg⁻¹)^[15],其中 EN(可交换氮)的贡献率为 7%。沉积物中的 TP 含量为 2 346 mg·kg⁻¹,潜在可移动形态的磷(NH₄Cl-P、BD-P、NaOH-nrp)占 TP 总量的 66%。因此草海湖区的沉积物具有氮磷埋藏量大,沉积物磷释放风险高的特点。

本文根据草海沉积物分布状况,选择滇池草海中心区域(E102°38'34",N24°59'30")采集沉积物柱状样。样品采集时间为 2013 年 5 月至 2014 年 4 月。每月在该点位使用柱状采泥器采集柱状沉积物样品收集表层 0~20 cm 的样品,并现场切层装入清洁的聚乙烯自封袋中保存。样品带回实验室后,一部分离心收集间隙水部分,一部分冷冻干燥,研磨后过 100 目筛后保存备用。同时,每月在该点位使用有机玻璃采水器采集表层水,中层水,底层水装入聚乙烯瓶中,带回实验室立即过膜(滤膜孔径为 0.45 μm)随后冷藏储存。

1.2 分析方法

沉积物磷的形态采用改进的 Psenner 法,将沉积物磷分为 5 种形态分别是潜在可移动的 NH₄Cl-P、BD-P、NaOH-nrp 与稳定态的 HCl-P 和 Res-P,具体操作方法参见文献[16]。沉积物总磷使用 SMT 法测定^[17],沉积物总氮通过凯氏定氮法(方法来源 GB 7173-87)测定。

其他测定项目包括表层水,中层水,底层水及沉积物间隙水中的 TN、TP、SRP、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 浓度,其具体测定方法如表 1。

1.3 数据统计分析

实验数据均使用 Excel 处理,采用 SPSS 11.0 双尾 Pearson 检验分析指标间的相关性。图表使用 Origin 8.5 或 Surfer 11.0 制作。

2 结果与讨论

2.1 草海间隙水与上覆水氮磷浓度的时空变化

滇池草海间隙水与上覆水不同形态氮浓度垂向差异及其季节性差异显著。由图 1 和表 2 可见,草

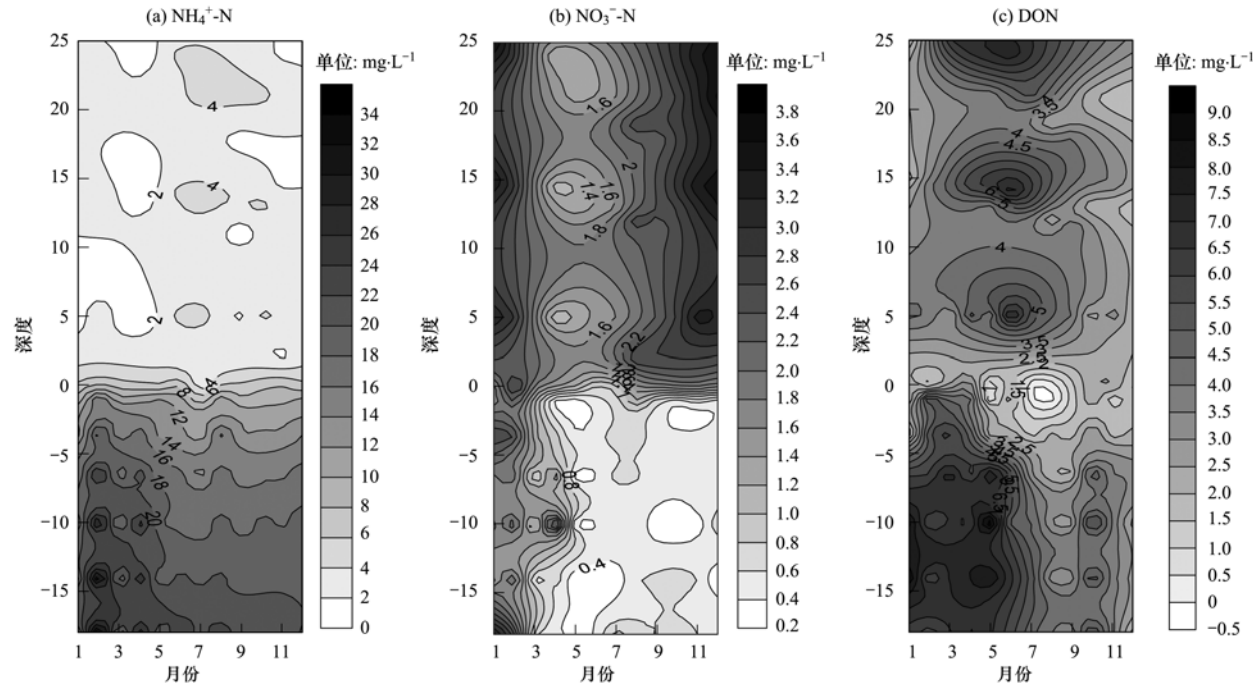
表 1 沉积物间隙水指标测定方法
Table 1 Methods for determination of pore water indexes

样品类型	检测项目	分析方法	方法来源
上覆水(三层)、沉积物间隙水	TN	碱性过硫酸钾消解紫外光度法	GB 11894-89
	TP	钼酸铵分光光度法	GB 11893-89
	NO ₃ ⁻ -N	紫外吸收法	GB 7480-87
	NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂光度法	GB 7479-87
	SRP	钼酸铵分光光度法	GB 11893-89

海不同月份间隙水 NH₄⁺-N 浓度变化在 14.05 ~ 27.09 mg·L⁻¹ 之间, 平均为 17.29 mg·L⁻¹, 上覆水 NH₄⁺-N 浓度变化在 3.00 ~ 5.78 mg·L⁻¹ 之间, 平均为 3.99 mg·L⁻¹, 全年均表现为间隙水显著高于上覆水 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 并且间隙水 NH₄⁺-N 浓度随深度增加呈现增加趋势 (图 1), 表明草海沉积物-水界面 NH₄⁺-N 垂直扩散趋势明显, 不同季节均表现为释放状态. 草海不同月份间隙水 NO₃⁻-N 浓度变化在 0.26 ~ 2.26 mg·L⁻¹ 之间, 上覆水 NO₃⁻-N 浓度变化在 1.17 ~ 2.98 mg·L⁻¹ 之间, 除 1 和 4 月间隙水与上覆水 NO₃⁻-N 浓度无显著差异外, 其它各月份均表现为间隙水显著低于上覆水 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 表明沉积物-水界面 NO₃⁻-N 主要表现为吸附状态. 草海不同月份间隙水 DON 浓度变化在 2.31 ~ 6.34 mg·L⁻¹ 之间, 上覆水 DON 浓度变化在 1.64 ~ 6.02 mg·L⁻¹ 之间, 除 2、3 和 10 月间隙水 DON 浓

度显著高于上覆水外 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 其它各月份间隙水和上覆水 DON 浓度之间差异不显著 ($P > 0.05$). 尽管如此, 不同月份间隙水 DON 随深度增加总体表现为增加趋势 (图 1), 表明沉积物间隙水 DON 垂向扩散趋势明显, 主要表现为释放状态.

草海间隙水和上覆水磷浓度垂向变化及季节性差异显著 (图 2 和表 3). 总体来讲, 间隙水磷浓度由表层至下层呈现先增加后下降的趋势, 间隙水磷浓度最高值主要分布在 6 cm 左右, 但不同月份表现不尽一致. 由表 3 可见, 草海不同月份间隙水 SRP 浓度变化在 0.01 ~ 2.32 mg·L⁻¹ 之间, 平均值为 0.85 mg·L⁻¹, 上覆水 SRP 浓度变化在 0.01 ~ 0.59 mg·L⁻¹ 之间, 平均浓度为 0.10 mg·L⁻¹, 除 1、12 月间隙水 SRP 浓度显著低于上覆水外 ($P < 0.05$), 其它各月份均表现为间隙水 SRP 浓度显著高于上覆水 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 尤其 6 ~ 9 月表现最为突



0 以下的深度单位为 cm, 0 以上单位为 dm

图 1 间隙水与上覆水不同形态氮浓度时空变化

Fig. 1 Temporal and spatial variation of nitrogen forms in pore water and in overlying water

表 2 滇池草海间隙水氮浓度差异显著性分析/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Significance analysis of nitrogen concentration in pore water/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$									
月份	NH_4^+-N			NO_3^--N			DON		
	上覆水	间隙水	<i>P</i>	上覆水	间隙水	<i>P</i>	上覆水	间隙水	<i>P</i>
1	3.85	14.09	0.00	2.96	1.99	0.10	2.43	5.41	0.11
2	5.27	27.09	0.00	2.82	2.26	0.00	3.26	5.76	0.00
3	3.00	14.92	0.00	1.85	0.82	0.00	4.07	6.34	0.04
4	2.34	21.76	0.00	1.17	1.19	0.97	5.27	5.92	0.45
5	3.47	16.15	0.00	1.27	0.26	0.00	2.95	5.66	0.20
6	5.78	17.30	0.01	1.29	0.45	0.00	6.02	4.56	0.33
7	4.04	14.05	0.02	1.41	0.64	0.00	3.91	3.18	0.64
8	3.89	18.49	0.00	2.34	0.74	0.00	1.91	2.44	0.53
9	3.11	14.84	0.01	2.08	0.50	0.00	3.36	2.31	0.18
10	5.47	16.36	0.01	2.41	0.52	0.00	2.16	4.70	0.01
11	3.79	15.87	0.01	2.98	0.50	0.00	3.22	2.88	0.61
12	3.85	16.64	0.00	2.96	0.51	0.00	1.64	2.39	0.06

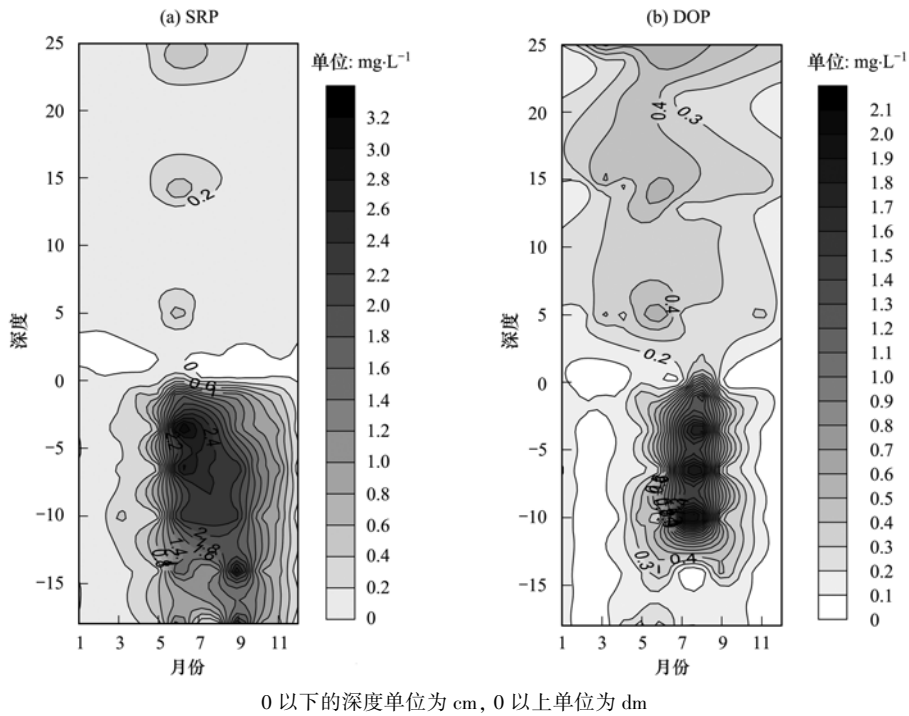


图 2 间隙水与上覆水不同形态磷浓度时空变化

Fig. 2 Temporal and spatial variation of phosphorus forms in pore water and in overlying water

表 3 滇池草海间隙水磷浓度差异显著性分析/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Significance analysis of phosphorus concentration in pore water/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						
月份	SRP			DOP		
	上覆水	间隙水	<i>P</i>	上覆水	间隙水	<i>P</i>
1	0.04	0.02	0.00	0.19	0.19	0.74
2	0.00	0.01	0.03	0.08	0.04	0.06
3	0.04	0.27	0.02	0.43	0.05	0.01
4	0.07	0.25	0.01	0.20	0.15	0.32
5	0.11	0.31	0.00	0.42	0.28	0.21
6	0.59	2.32	0.00	0.48	0.34	0.28
7	0.06	1.68	0.01	0.20	1.02	0.10
8	0.04	1.52	0.01	0.47	1.26	0.16
9	0.04	2.11	0.00	0.24	0.32	0.37
10	0.08	0.88	0.00	0.18	0.22	0.44
11	0.04	0.81	0.00	0.28	0.08	0.03
12	0.05	0.01	0.03	0.10	0.03	0.00

出。不同月份间隙水 DOP 浓度变化在 $0.03 \sim 1.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均为 $0.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,上覆水 DOP 浓度变化在 $0.08 \sim 0.48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均为 $0.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,分别在 3、11 和 12 月间隙水 DOP 浓度显著低于上覆水($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),而其他月份间隙水与上覆水差异不显著($P > 0.05$)。间隙水与上覆水 SRP 浓度的差异反映了沉积物-水界面磷酸盐的迁移过程,春、夏和秋三季草海沉积物磷酸盐主要由间隙水向上覆水迁移及扩散为主,起到了“源”的作用^[18],而在冬季则主要表现为上覆水磷酸盐向间隙水的迁移和扩散过程,表现为“汇”的作用^[18]。全年沉积物溶解性有机磷释放趋势不明显,

在冬季主要表现为吸附状态。

2.2 滇池草海间隙水与上覆水氮磷形态组成贡献

氮磷形态组成反映了水体氮磷的赋存特征及其循环过程^[19]。由图3可见,草海上覆水 NH_4^+ -N贡献率变化在16%~36%,平均为29%, NO_3^- -N贡献率变化在14%~45%,平均为27%,DON贡献率变化在26%~63%,平均为44%;草海间隙水 NH_4^+ -N贡献率变化在71%~87%,平均为78%, NO_3^- -N贡献率变化在1%~8%,平均为4%,DON贡献率变化在7%~26%,平均为18%;可见,草海上覆水主要以DON为主,而间隙水主要以 NH_4^+ -N为主。DON主要包括蛋白质、肽、氨基酸、核酸及相关的色素、腐殖质等^[20]。滇池入湖河流中的氮素主要以无机氮为主,DON次之占TN浓度的20.26%^[21],小于草海上覆水中DON的贡献率。但有文献报道草海浮游植物生长过程中通过吸收上覆水氨氮和硝氮将其转化为DON^[22]。因此除入湖河流输入的DON以外,富营养化所引起的藻类增值过程很可能是上覆水DON所占比重显著增加的原因。与之相反,沉积物有机氮在微生物作用下可矿化出大量的 NH_4^+ -N,厌氧环境中 NH_4^+ -N以铵离子的形式储存在间隙水中或吸附在沉积物矿物表面^[23],从而提高了沉积物间隙水 NH_4^+ -N浓度及其份额,而沉积物 NH_4^+ -N释放则成为上覆水氮素的重要来源。另外,间隙水和上覆水均以夏季和秋季 NH_4^+ -N贡献率较高,冬季次之,春季最低,间隙水 NO_3^- -N贡献率则与之相反,以春季和冬季较高,夏季和秋季相对较低,上覆水 NO_3^- -N贡献率表现为冬季>秋季>春季>夏季;间隙水和上覆水DON贡献率以春季和夏季较高,秋季

和冬季相对较低。可见,春季和夏季上覆水 NO_3^- -N所占比重显著下降,而DON所占比重显著增加,春季和夏季藻类的生长过程加速了无机氮向有机氮的转化过程,进而提高了上覆水中DON含量。而夏季和秋季间隙水和上覆水 NH_4^+ -N贡献率增加则表明该季节有机氮的矿化作用明显。有研究表明,沉积物-水界面处存在大量的硝化细菌,可将氨氮转化为硝氮^[24],而厌氧氨氧化细菌也会将一部分氨氮氧化为硝氮或亚硝氮^[25]。因此,沉积物-水界面是硝化作用与有机氮矿化作用的主要发生场所^[26]。

由图4可见,草海上覆水SRP贡献率变化在10%~29%,平均为19%,DOP贡献率变化在71%~90%,平均为81%;草海间隙水SRP贡献率变化在36%~89%,平均为61%,DOP贡献率变化在11%~63%,平均为39%;总体来讲,不同季节间隙水SRP的贡献率由下层至上层呈现降低趋势,主要表现为秋季>夏季>春季>冬季,而上覆水SRP的贡献率垂向变化不明显,主要表现为夏季>冬季>秋季>春季,DOP与之恰好相反。可见,DOP在间隙水和上覆水中均扮演着重要角色。与氮赋存形态相似,上覆水较高的DOP主要来源于藻类的生长对磷酸盐的转化过程,不同的是上覆水DOP贡献率显著高于间隙水DOP的贡献率(1.8倍),而且二者季节性分布规律不尽一致。湖泊上覆水中的DOP可能来源于藻类死亡分解、原生动物代谢或细菌裂解,沉积物释放以及外源污水输入等原因^[27]。结合上文讨论沉积物间隙水与上覆水中的DOP浓度差异并不明显,因而沉积物间隙水中的DOP不存在强烈的向上释放趋势。根据李乐的报道滇池入湖河中的

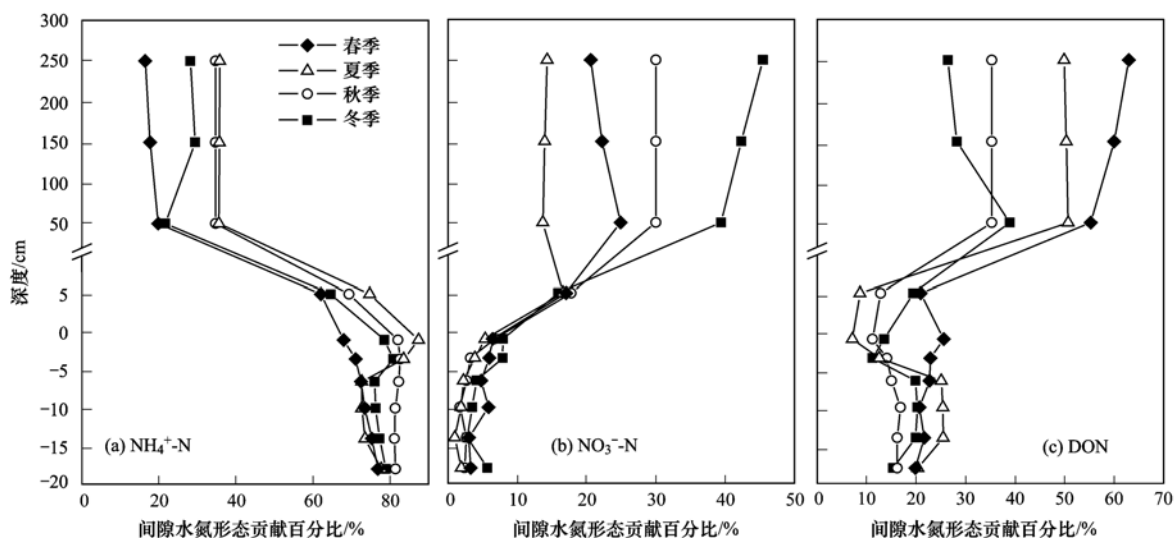


图3 间隙水与上覆水氮形态组成贡献

Fig. 3 Contribution of various nitrogen forms in pore water and overlying water

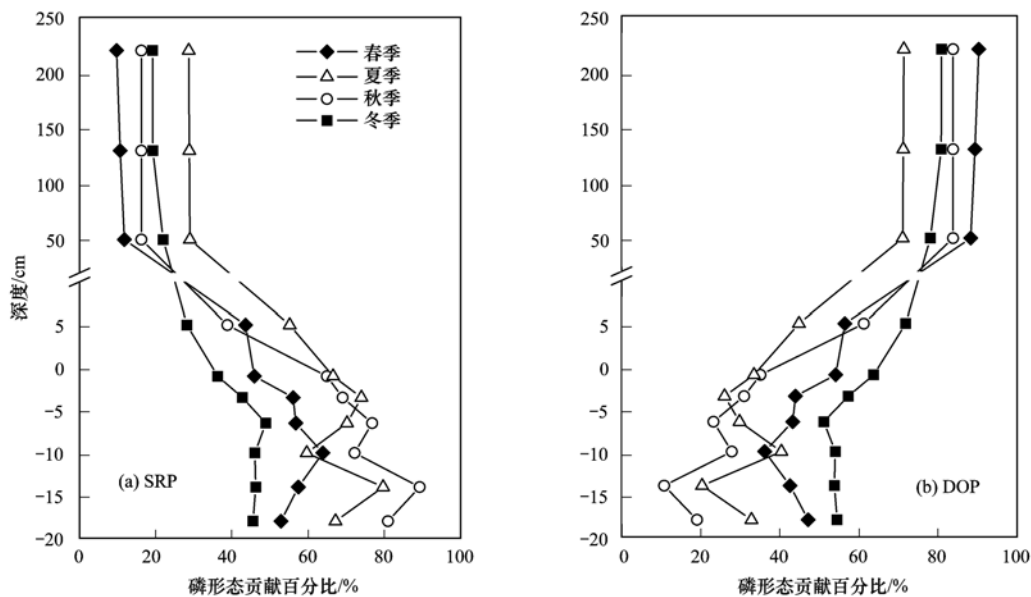


图4 间隙水与上覆水磷形态组成贡献

Fig. 4 Contribution of various phosphorus forms in pore water and overlying water

磷素主要无机氮为主, DOP 仅占 DTP 浓度的 36.3%^[21]. 因此,藻类的死亡分解或原生动物代谢可能是上覆水 DOP 的主要来源. 相比之下,间隙水 DOP 贡献率比上覆水显著降低,以夏季和秋季表现更为突出,沉积物间隙水 DOP 多以磷酸单酯、磷酸二酯、核酸和聚合磷酸盐形成存在^[20]. Suzumura 等研究表明^[28],厌氧条件下磷酸酯被有效且快速地矿化成无机磷,而且其转化速率与沉积物氧化还原条件密切相关. 春季和冬季沉积物氧穿透深度增大、溶解氧含量升高,沉积物厌氧环境遭到破坏有机磷矿化作用进行缓慢,夏季受藻类与水生植物生长的影响,沉积物-水界面溶解氧含量下降,从而导致了厌氧条件下的有机磷矿化作用.

有机氮磷的生物有效性及其对湖泊富营养化的影响机制已成为国际上的研究热点. 已有研究表明,湖泊上覆水溶解性有机氮可占总溶解氮的 5%~65%^[29],其中 12%~72%^[30]可迅速被生物利用;溶解性有机磷最高可占到总磷的 50%~90%^[31],藻类不仅可吸收水体中溶解性有机磷,加速其生长,而且部分藻类还可优先利用沉积物释放的有机磷. 湖泊水体有机氮磷还可通过光解、酶解和生物降解等过程转化为无机氮磷而提高其生物有效性. 草海间隙水和上覆水氮磷形态组成贡献之间存在较大的差异, NH_4^+ -N 和 SRP 是间隙水氮磷的绝对主体,而 DON 和 DOP 在上覆水中则占有更高的比重,沉积物有机氮磷矿化作用是间隙水 NH_4^+ -N 和 SRP 的主要来源,其释放过程在氮磷内负荷形成过程中扮演

者重要作用,而浮游植物对氮磷吸收及转化过程则是上覆水 DON 和 DOP 的主要来源,藻类增值引起的 DON 和 DOP 增加及其循环过程很可能在湖泊富营养化过程中起到举足轻重的作用.

2.3 滇池草海间隙水与上覆水氮/磷比时空变化

草海间隙水与上覆水氮/磷比时空差异明显,尤其受季节性变化影响较大. 由图 5 可见,上覆水中 DTN/DTP 比值范围在 21~214 之间, $(\text{NH}_4^+-\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N})/\text{SRP}$ 比值范围在 51~847 之间, DON/DOP 比值范围在 10~69 之间,主要表现为:春季>冬季>秋季>夏季. 间隙水中 DTN/DTP 比值范围 9~501 之间, $(\text{NH}_4^+-\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N})/\text{SRP}$ 比值范围在 9~1 611 之间, DON/DOP 比值范围在 3~233 之间,主要表现为:春季>冬季>夏季>秋季. 表明草海间隙水和上覆水氮/磷比均以春季和冬季显著高于夏季和秋季,而且以间隙水氮/磷比随时间和空间的变化幅度较大,氮磷浓度更易受环境条件变化的影响^[32]. 前人研究指出,富营养状态下夏季沉积物氮的反硝化作用强烈, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 通过反硝化作用产生 N_2O 和 N_2 ,从而降低了水体中氮含量^[33,34]. 因此,夏、秋季微生物活动引起的强烈反硝化作用很可能是草海间隙水和上覆水氮/磷比降低的原因之一. 另外,夏、秋季蓝藻水华所引起的沉积物季节性厌氧有助于沉积物中铁结合态磷解吸^[35]和有机磷的矿化^[36],因此沉积物磷释放量增加,进而导致草海间隙水和上覆水氮/磷比降低.

湖泊水体中氮磷是藻类植物光合作用、合成有机化合物的基础成分,同时氮磷含量很大程度上影响藻类植物的生长速率以及藻类群落结构. 近 50 年来,滇池草海水体氮磷浓度逐渐上升,水质由 I 类水恶化至劣 V 类水. 与之伴随的是滇池浮游植物数量增长了近 3 000 倍,浮游植物优势种由绿藻和硅藻演替为蓝藻与微囊藻^[37]. 但诸多模拟实验结果证实,氮磷浓度并不是浮游植物生长的唯一影响因素^[8,38]. 氮/磷比与氮磷浓度三者耦合与藻类生长、群落结构演变关系密切,也可反映富营养化水体氮、磷限制状态. 有研究表明浮游植物的生长易受氮、磷营养盐限制,春季和冬季浮游植物生长主要受磷限制,而夏季和秋季浮游植物生长受氮、磷共同限制^[39]. Xie 等^[40]通过围栏实验结果得出,总磷与 SRP 会随蓝藻的暴发急剧升高,但 TN 浓度未发生明显变化. Søndergaard 等^[41]对丹麦 200 多个湖泊水氮磷季节性变化研究发现,春夏两季(生长季节)磷浓度有升高的趋势,水体磷浓度与浮游植物生长繁殖密切相关. Bulgakov 等^[8]研究认为,水体中较高的 TN/TP (20~50) 有助于绿球藻目的生长, TN/TP 降至 5~10 以下时,优势藻类更替为蓝藻门. Smith 等^[9]基于 17 个湖泊的调查发现, TN/TP 低于 29 时,湖泊水华暴发的风险更大. Downing 等^[10]认为,氮/磷比随着湖泊水体营养水平的增加而减小.

本研究发现,浮游植物生长活跃的夏秋两季,沉积物间隙水及上覆水中的氮/磷比明显降低,草海水体处于较高的营养状态.

Quirós^[42]提出氮/磷比小于 29 的湖泊应划分为富营养或超富营养水平,有利于浮游植物迅速繁殖. 吴世凯等^[43]研究表明,蓝藻在较高氮/磷比(>12)的环境中具有较好的生长潜力,可见,氮/磷比在湖泊富营养化过程中意义,本研究除 5、6 月上覆水体 TN/TP 比较低外(<12),其余月份 TN/TP 比均处于较高水平,尤其间隙水($\text{NH}_4^+-\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N}$)/SRP 处于更高的水平,春季和冬季($\text{NH}_4^+-\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N}$)/SRP 比平均水平为 959,最高可达到 1611. 春季和冬季间隙水氮/磷比的显著增加不仅反映了沉积物氮磷释放的季节性差异,而且反映了浮游植物对氮磷的利用能力. 而夏秋两季间隙水中的氮/磷比相对较低说明夏、秋季是滇池草海蓝藻易暴发季节,间隙水氮/磷比很可能在湖泊富营养化过程中扮演重要作用. Schindler 等^[44]通过多个湖泊长时间的治理结果中得出,在磷限制水体中削减磷的进量或通过物理、化学手段抑制内源磷的释放均能缓解湖泊的富营养化程度. 因此,在外源得到控制的情况下,有针对性地削减沉积物内源氮磷污染,控制沉积物磷释放,是降低草海富营养化程度,抑制蓝藻水华的可能途径.

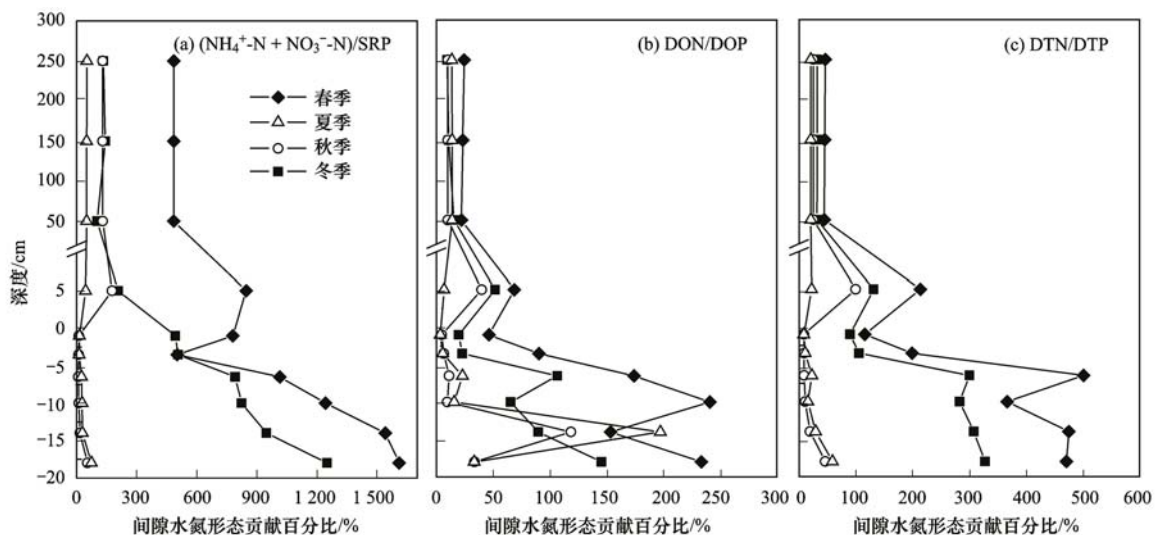


图 5 草海间隙水与上覆水氮/磷比时空变化

Fig. 5 Temporal and spatial variation in N to P ratio of Dianchi Caohai Lake

3 结论

(1) 草海间隙水 NH_4^+-N 浓度显著高于上覆水($P < 0.05$ 或 0.01), NO_3^--N 则以上覆水显著高于间隙

水($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$); 春、夏和秋季(2~11 月)间隙水 SRP 浓度显著高于上覆水,而冬季(12 月和 1 月)则与之恰好相反,表明草海沉积物 NH_4^+-N 周年呈现释放状态,而磷释放主要发生在春、夏和秋季,

冬季呈现吸附状态。

(2) 草海间隙水以 NH_4^+-N (78%) 和 SRP (61%) 贡献为主, 而上覆水则以 DON (44%) 和 DOP (81%) 贡献为主, 夏、秋季间隙水 NH_4^+-N 和 SRP 贡献率显著增加, 而 $\text{NO}_3^- -\text{N}$, DON 和 DOP 贡献率明显下降, 间隙水与上覆水氮磷形态组成贡献之间的差异间接反映了氮磷的生物转化过程。

(3) 草海间隙水 DTN/DTP、($\text{NH}_4^+-\text{N} + \text{NO}_3^- -\text{N}$)/SRP 和 DON/DOP 比值均表现为春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季, 而上覆水氮/磷比值则以春季较高, 夏、秋和冬季相对较低, 夏、秋季沉积物强烈硝化反硝化作用是间隙水氮/磷比值降低的主要原因。

参考文献:

- [1] SanClements M D, Fernandez I J, Norton S A. Soil and sediment phosphorus fractions in a forested watershed at Acadia National Park, ME, USA[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**(10): 2318-2325.
- [2] Pitkänen H, Lehtoranta J, Räsänen A. Internal nutrient fluxes counteract decreases in external load: the case of the estuarial eastern gulf of Finland, Baltic Sea[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2001, **30**(4-5): 195-201.
- [3] Berelson W M, Heggie D, Longmore A, *et al.* Benthic nutrient recycling in Port Phillip Bay, Australia[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, **46**(6): 917-934.
- [4] 刘臣伟, 汪德耀. 湖泊富营养化内源污染的机理和控制技术研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(S): 814-818.
Liu C W, Wang D G. Principle and control of eutrophication for lakes polluted by internal origin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(S): 814-818.
- [5] 胡俊, 刘永定, 刘剑彤. 滇池沉积物间隙水中氮、磷形态及相关性的研究[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(10): 1391-1396.
Hu J, Liu Y D, Liu J T. Studying on the form and the relativity of nitrogen and phosphorus in the pore water of sediment in Dianchi Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(10): 1391-1396.
- [6] Enell M, Löfgren S. Phosphorus in interstitial water: methods and dynamics[J]. *Hydrobiologia*, 1988, **170**(1): 103-132.
- [7] 袁文权. 西沥水库内源污染及其控制[D]. 北京: 清华大学, 2004.
Yuan W Q. Study on the internal pollution in Xili reservoir and its control[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [8] Bulgakov N G, Levich A P. The nitrogen: phosphorus ratio as a factor regulating phytoplankton community structure[J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1999, **146**(1): 3-22.
- [9] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton[J]. *Science*, 1983, **221**(4611): 669-671.
- [10] Downing J A, McCauley E. The nitrogen: phosphorus relationship in lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(5): 936-945.
- [11] 周圆, 杨树平, 黄俊, 等. 滇池草海水质变化趋势和特征污染物分析[J]. *环境科学导刊*, 2015, **34**(2): 20-25.
- Zhou Y, Yang S P, Huang J, *et al.* Variation trend of water quality and analysis of specific pollutants of Caohai Lake of Dianchi Lake [J]. *Environmental Science Survey*, 2015, **34**(2): 20-25.
- [12] 史静, 俎晓静, 张乃明, 等. 滇池草海沉积物磷形态、空间分布特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(10): 1808-1813.
Shi J, Zu X J, Zhang N M, *et al.* Sediment phosphorus form, space distribution characteristic and influencing factor of Cao Hai in Dian Lake, Yunnan, China [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(10): 1808-1813.
- [13] 刘震, 金相灿, 卢少勇, 等. 滇池湖滨带沉积物磷的空间分布[J]. *环境科学与技术*, 2009, **32**(8): 1-5.
Liu Z, Jin X C, Lu S Y, *et al.* Phosphorus distribution in sediments of Dianchi Lakeshore area [J]. *Environment Science & Technology*, 2009, **32**(8): 1-5.
- [14] 王建军, 沈吉, 张路, 等. 云南滇池和抚仙湖沉积物-水界面营养盐通量及氧气对其的影响[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(5): 640-648.
Wang J J, Shen J, Zhang L, *et al.* Sediment-water nutrient fluxes and the effects of oxygen in Lake Dianchi and Lake Fuxian, Yunnan Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(5): 640-648.
- [15] 米娟. 滇池沉积物-水界面中氮的赋存形态及其在循环中的作用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
Mi J. Forms of nitrogen existing in sediments-water interface and their functions in recycling of Dianchi Lake [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [16] 黎睿, 王圣瑞, 肖尚斌, 等. 长江中下游与云南高原湖泊沉积物磷形态及内源磷负荷[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(6): 1831-1839.
Li R, Wang S R, Xiao S B, *et al.* Sediments phosphorus forms and loading in the lakes of the mid-lower reaches of the Yangtze River and Yunnan Plateau, China [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(6): 1831-1839.
- [17] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—a synthesis of recent works [J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, **370**(2-3): 224-228.
- [18] 范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化——2. 磷释放的热力学机制及源-汇转换[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(3): 207-217.
Fan C X, Zhang L, Bao X M, *et al.* Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu: II. Chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source-sink transition [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(3): 207-217.
- [19] 刘峰, 高云芳, 王立欣, 等. 水域沉积物氮磷赋存形态和分布的研究进展[J]. *水生态学杂志*, 2011, **32**(4): 137-144.
Liu F, Gao Y F, Wang L X, *et al.* Review on nitrogen and phosphorus forms and distribution in sediments [J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, **32**(4): 137-144.
- [20] 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(1): 1-7.
Wu F C, Jin X C, Zhang R Y, *et al.* Effects and significance of organic nitrogen and phosphorus in the lake aquatic environment

- [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(1): 1-7.
- [21] 李乐, 王海芳, 王圣瑞, 等. 滇池河流氮入湖负荷时空变化及形态组成贡献[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(6): 829-836.
- Li L, Wang H F, Wang S R, *et al.* Spatial and temporal changes in nitrogen loading of rivers into Dianchi Lake and contributions of different components[J]. *Research of Environmental Science*, 2016, **29**(6): 829-836.
- [22] Jones D L, Healey J R, Willett V B, *et al.* Dissolved organic nitrogen uptake by plants—an important N uptake pathway? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(3): 413-423.
- [23] 王圣瑞, 焦立新, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态铵的赋存特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(1): 37-43.
- Wang S R, Jiao L X, Jin X C, *et al.* Distribution of total, exchangeable and fixed nitrogen in the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(1): 37-43.
- [24] Pauer J J, Auer M T. Nitrification in the water column and sediment of a hypereutrophic lake and adjoining river system[J]. *Water Research*, 2000, **34**(4): 1247-1254.
- [25] Hanaki K, Wantawin C, Ohgaki S. Nitrification at low levels of dissolved oxygen with and without organic loading in a suspended-growth reactor[J]. *Water Research*, 1990, **24**(3): 297-302.
- [26] Wu F, Qing H, Wan G. Regeneration of N, P and Si near the sediment/water interface of lakes from Southwestern China Plateau[J]. *Water Research*, 2001, **35**(5): 1334-1337.
- [27] 熊强. 滇池不同来源有机磷特征及其生物有效性[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- Xiong Q. Characteristics and bioavailability of organic phosphorus from different sources of Dianchi Lake [D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.
- [28] Suzumura M, Kamatani A. Mineralization of inositol hexaphosphate in aerobic and anaerobic marine sediments: implications for the phosphorus cycle [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**(5): 1021-1026.
- [29] 黎文, 吴丰昌, 傅平青, 等. 贵州红枫湖水体溶解有机质的剖面特征和季节变化[J]. *环境科学*, 2006, **27**(10): 1979-1985.
- Li W, Wu F C, Fu P Q, *et al.* Profile characteristics and seasonal variation of dissolved organic matter in Hongfeng Lake, Guizhou[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(10): 1979-1985.
- [30] Bronk D A, Glibert P M, Ward B B. Nitrogen uptake, dissolved organic nitrogen release, and new production [J]. *Science*, 1994, **265**(5180): 1843-1846.
- [31] Minear R A. Characterization of naturally occurring dissolved organophosphorus compounds [J]. *Environmental Science & Technology*, 1972, **6**(5): 431-437.
- [32] 范成新, 相崎守弘. 好氧和厌氧条件对霞浦湖沉积物-水界面氮磷交换的影响[J]. *湖泊科学*, 1997, **9**(4): 337-342.
- Fan C X, Morihiro A. Effects of aerobic and anaerobic conditions on exchange of nitrogen and phosphorus across sediment-water interface in Lake Kasumigaura [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1997, **9**(4): 337-342.
- [33] 刘东山, 罗启芳. 东湖氮循环细菌分布及其作用[J]. *环境科学*, 2002, **23**(3): 29-35.
- Liu D S, Luo Q F. Distribution and role of denitrifying, nitrifying, nitrosation and ammonifying bacteria in East Lake[J]. *Environmental Science*, 2002, **23**(3): 29-35.
- [34] 张兴正, 陈振楼, 邓焕广, 等. 长江口北支潮滩沉积物-水界面无机氮的交换通量及季节变化[J]. *重庆环境科学*, 2003, **25**(9): 31-34.
- Zhang X Z, Chen Z L, Deng H G, *et al.* Nitrogen fluxes and seasonal change at the sediment-water interface in Northern Yangtze River Estuary [J]. *Chongqing Environmental Science*, 2003, **25**(9): 31-34.
- [35] Mortimer C H. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes[J]. *Journal of Ecology*, 1941, **29**(2): 280-329.
- [36] Lü C W, Wang B, He J, *et al.* Responses of organic phosphorus fractionation to environmental conditions and lake evolution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(10): 5007-5016.
- [37] 王圣瑞. 滇池水环境[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [38] Neill M. A method to determine which nutrient is limiting for plant growth in estuarine waters—at any salinity [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(9): 945-955.
- [39] 林洪瑛, 韩舞鹰. 南沙群岛海域营养盐对浮游植物生长的限制研究[A]. 见: 第七届全国海洋湖沼青年学者学术研讨会论文摘要集[C]. 青岛: 中国海洋湖沼学会, 2000.
- [40] Xie L Q, Xie P, Li S X, *et al.* The low TN:TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms? [J]. *Water Research*, 2003, **37**(9): 2073-2080.
- [41] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes [J]. *The Scientific World Journal*, 2001, **1**: 427-442.
- [42] Quirós R. The relationship between nitrate and ammonia concentrations in the pelagic zone of lakes[J]. *Limnetica*, 2003, **22**(1-2): 37-50.
- [43] 吴世凯, 谢平, 王松波, 等. 长江中下游地区浅水湖泊群中无机氮和 TN/TP 变化的模式及生物调控机制[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, **35**(S2): 111-120.
- Wu S K, Xie P, Wang S B, *et al.* Changes in the patterns of inorganic nitrogen and TN/TP ratio and the associated mechanism of biological regulation in the shallow lakes of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Science in China Series D*, 2006, **49**(S1): 126-134.
- [44] Schindler D W, Carpenter S R, Chapra S C, *et al.* Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(17): 8923-8929.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of $\delta^{18}\text{O}$ and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao, <i>et al.</i> (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die, <i>et al.</i> (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen, <i>et al.</i> (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, <i>et al.</i> (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping, <i>et al.</i> (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (2617)