ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双效期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 38 卷 第 2 期
2017 年 2 月 15 日

目 次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 …… 姚利,刘进,潘月鹏,田世丽,王振波,韦霞,张国忠,周保华,王跃思(423)
海西城市群 $PM_{2.5}$ 中重金属元素的污染特征及健康风险评价 …… 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
嵊泗地区大气 $PM_{2.5}$ 中汞形态污染及其与碳组分的关系 …… 程娜,钱冠磊,段炼,赵梦飞,修光利(438)
泰山夏季 $PM_{2.5}$ 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 …… 孟静静,侯战方,刘晓迪,邢继钊(445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 …… 张玉欣,安俊琳,王健宇,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 …… 尤翔宇,罗达通,刘湛,苏艳蓉(461)
南京城市交通甲烷排放特征 …… 张雪,胡凝,刘寿东,王淑敏,高韵秋,赵佳玉,张圳,胡勇博,李旭辉, 张国君(469)
2003 ~ 2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析…… 张宸赫,赵天良,王富,徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好(476)
基于增强回归树的城市 $PM_{2.5}$ 日均值变化分析: 以常州为例 …… 葛跃,王明新,孙向武,齐今笛(485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 …… 张成,张雅惠,王永敏,王定勇,徐凤,杨熹,何秀清(495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 …… 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠(502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 …… 高敏,仇天雷,秦玉成,王旭明(510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 …… 吴亚林,李帅东,江俊武,沈胤胤,黄昌春,黄涛,杨浩,余艳红,罗玉(517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 …… 李丽,蒲俊兵,李建鸿,张陶(527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 …… 张佳磊,郑丙辉,刘德富,王丽婧,谭纤茹(535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 …… 邱晓鹏,黄廷林,曾明正,史建超,曹占辉(547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 …… 林俊杰,刘丹,张帅,于志国,何立平,余顺慧(555)
湖泊水体中铁(Ⅲ)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 …… 蒋永参,彭云霄,刘广龙,周易勇,朱端卫(563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 …… 王卫东,郝瑞霞,张晓娴,万京京,钟丽燕(572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 …… 吴鹏,陆爽君,徐乐中,梁奇奇,沈耀良(580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 …… 姚程, 胡小贞,卢少勇,耿荣妹(589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 …… 何沅洁,刘江,江韬,黄京晶,成晴,陈宏(600)
TiO_2/膨润土复合材料对 Hg^{2+} 的吸附性能研究 …… 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇(608)
氨氮及 H_2O_2 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 …… 王永京,杜旭,金萌,冯思捷,杨凯,张明露,于建伟(616)
配水管网细菌活性影响因素 …… 王晓丹,赵新华(622)
施氏矿物的化学合成及其对含Cr(Ⅵ)地下水吸附修复…… 朱立超,刘元元,李伟民,牟海燕,王婉玉,石德智,王涛(629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 …… 侯瑞,金鑫,金鹏康,王晓昌(640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N_2O 的产生特性 …… 郭昌梓,张凤燕,刘富宇,朱超,裴立影(647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 …… 管勇杰,于德爽,李津,齐泮晴,魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 …… 王硕,徐巧,张光生,李激(665)
颗粒 + 絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 …… 孙延芳,韩晓宇,张树军,李星,曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 …… 戴晓虎,何进,严寒,李宁,丁月玲,董滨,戴翎翎(679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 …… 顾琼,金文标,陈远清,郭仕达,万超凡(688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 …… 魏欣,薛顺利,杨帆,李响,刘振鸿,薛罡,高品(697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价 …… 王静,刘明丽,张士超,鲁垠涛,姚宏(703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 …… 陈轶楠,马建华,段海静,魏林恒(711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 …… 杨雷峰,尹华,彭辉,李跃鹏(721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 …… 叶茜琼,吴蔓莉,陈凯丽,李炜,袁婧(728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 …… 罗路云,金德才,左晖,张卓,谭新球,张德咏,卢向阳,刘勇(735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 …… 邸琰茗,王广煊,黄兴如,郭逍宇(743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 …… 贺龙,李艳琴,李彬春,李君剑(752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 …… 刘琼,魏晓梦,吴小红,袁红朝,王久荣,李裕元,葛体达,吴金水(760)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 …… 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,张霞,王旭东,张阿凤(769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 …… 聂文翰,戚志萍,冯海玮,孙玉静,支月娥,张进忠,张丹(783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 …… 成功,陈静,刘晶晶,张阿凤,王旭东,冯浩,赵英(792)
1 株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 …… 叶杰旭,林彤晖,骆煜昊,陈东之,陈建孟(802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 …… 谭文勃,马晓丹,黄聪,陈川,王爱杰(809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 …… 孙娜, 商和平,茹淑华,苏德纯(815)
施氮对小麦硒(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响 …… 陈玉鹏,彭琴,梁东丽,宋卫卫,雷凌明,喻大松(825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响 …… 李金丽,王振红,严雅萌,黄兵,罗专溪(832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 …… 马锋锋,赵保卫(837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征

吴亚林[1],李帅东[1],江俊武[1],沈胤胤[1],黄昌春[1,2,3*],黄涛[1*],杨浩[1],余艳红[4],罗玉[4]
(1. 南京师范大学地理科学学院,南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,南京 210023; 3. 江苏省物质循环与污染控制重点实验室,南京 210023; 4. 云南省环境科学研究院,中国昆明高原湖泊国际研究中心,昆明 650000)

摘要: 为探讨百年来滇池沉积物氮的组成、分布以及埋藏特征,2014 年 7 月在滇池采集 6 根沉积柱进行氮形态及年代测定. 结果表明滇池沉积物总氮含量高,为1 263.68 ~ 7 155.17 mg·kg^{-1},硝氮及氨氮含量低,分别为 10.00 ~ 144.00 mg·kg^{-1}和 9.20 ~ 146.50 mg·kg^{-1}. 沉积物中有机氮为主要存在形态,含量为 255.80 ~ 5 644.25 mg·kg^{-1},平均占总氮含量的 91.26%; 滇池沉积物总氮污染严重,于 70 年代开始形成且 90 年代后期加剧,并呈现滇池南部 > 北部 > 中部的分布特征; 近 100 年来滇池沉积物平均沉积速率为 0.092 ~ 0.187 g·(cm^2·a)$^{-1}$,随时间先增加后降低再升高,空间上由北向南逐渐降低. 沉积物中总氮埋藏速率则随时间逐渐增加,在 1990 年后几乎呈直线增长,且由南向北逐渐降低; 据估算, 1900 ~ 2014 年滇池沉积物总氮埋藏量达92 139.15 t,其中有机氮埋藏量为86 745.62 t,硝氮埋藏量为2 464.16 t,氨氮埋藏量为2 929.37 t.

关键词:滇池; 沉积物; 沉积速率; 氮污染; 氮埋藏
中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)02-0517-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201605232

Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century

WU Ya-lin[1], LI Shuai-dong[1], JIANG Jun-wu[1], SHEN Yin-yin[1], HUANG Chang-chun[1,2,3*], HUANG Tao[1*], YANG Hao[1], YU Yan-hong[4], LUO Yu[4]
(1. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Materials Cycling and Pollution Control, Nanjing 210023, China; 4. Kunming China International Research Center for Plateau Lake, Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650000, China)

Abstract: In order to analyze the composition, distribution and burial characteristics of nitrogen in sediments of Dianchi Lake in the last hundred years, 6 sediment cores were sampled in July 2014 to determine the contents of different nitrogen species and sedimentary age sequence. The integrated results demonstrated a high content of total nitrogen in sediments ranging from 1 263.68-7 155.17 mg·kg^{-1}. The contents of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen were low, which were 10.00-144.00 mg·kg^{-1} and 9.20-146.50 mg·kg^{-1}, respectively. Organic nitrogen was the main component in the sediments, ranging from 255.80 to 5 644.25 mg·kg^{-1}, composing a large average percentage of 91.26%. In addition, the nitrogen pollution of sediment in Dianchi Lake has reached a high level and is becoming serious since 1970s, which surged in the late 1990s. The spatial difference of total nitrogen was obvious, with comparably the most in the south, less in the north and least in the center. The average deposition rate was changing from 0.092 g·(cm^2·a)$^{-1}$ to 0.187 g·(cm^2·a)$^{-1}$ in the last 100 years and increased first, then declined, finally showed a slight upward trend over time. The burial rate of total nitrogen in sediment increased over time and almost grew up straightly after 1990, which decreased from the south to the north of Dianchi Lake in space. It was estimated that the reserves of total nitrogen, organic nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen in the sediment were 92 139.15 t, 86 745.62 t, 2 464.16 t, 2 929.37 t, respectively, from 1900 to 2014.

Key words: Danchi Lake; sediment; burial rate; nitrogen pollution; nitrogen bury

沉积物是湖泊营养盐的重要储蓄库[1],在整个湖泊的氮循环中起着至关重要的作用. 氮元素是造成湖泊水体富营养化的重要限制性因子,显著影响着湖泊生态系统的生产力水平,已成为国际全球变化问题研究的热点之一[2~4]. 湖泊沉积物氮具有多种存在形态,不同氮存在形态表现出不同的地球化学行为,也决定着其在湖泊生态系统中起着不同的地球化学功能[5]. 沉积物中氮的研究最早开始于 80 年代,其形态可以分为总氮、有机氮、氨氮以及硝氮. 硝氮及氨氮是沉积物中较为活跃的部分,最

收稿日期: 2016-05-30; **修订日期**: 2016-09-03
基金项目: 国家自然科学基金项目(41571324); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41503075); 中国博士后科学基金项目(2015M581826); 云南省环境科学研究院(中国昆明高原湖泊国际研究中心)开放基金项目
作者简介: 吴亚林(1992 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤环境化学,E-mail:wylcdut@163.com
* 通信作者, E-mail: huangchangchun@njnu.edu.cn; huangtao198698@126.com

易于释放到上覆水,促进滇池水体富营养化;有机氮则是湖泊沉积物中氮素的主要存在形式,在还原条件下经矿化作用形成可交换态的氨氮,增强沉积物氮向水体的释放能力.

滇池位于云贵高原中部,是典型的浅水型高原湖泊,也是我国污染最为严重的3个湖泊之一,已被列为"三湖三河"的重点治理对象[6,7]. 在近40年来,由于经济的快速发展以及人口的急剧增加,滇池氮负荷日益增强,水体富营养化严重,蓝藻水华频繁暴发[8],严重危害人类身体健康. 朱元荣等[9]采用连续分级提取法研究滇池8个沉积柱,将沉积物氮分为5种形态,且各形态相对比例为残渣态氮 > 强氧化剂可提取态氮 > 离子交换态氮 > 弱酸可提取态氮 > 强碱可提取态氮;李辉[10]的研究得出滇池沉积物总氮在平面上具有南部 > 北部 > 中部的特征;王书锦等[11]对洱海湿地干湿季沉积物污染风险差异性进行评价,结果表明沉积物氮污染水平干季高于湿季. 现阶段对于滇池沉积物氮的研究主要集中于氮的形态组成以及分布特征,而对沉积物氮的沉积埋藏特征还未见有报道. 本文对滇池沉积物进行氮形态分析和^{210}Pb定年,研究了滇池沉积物氮的时空分布特征,同时讨论了滇池百年来沉积物氮污染情况与时空埋藏特征,以期为滇池内源氮负荷问题的解决提供依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2014年7月在滇池布设6个沉积柱采样点位,由北向南各采样点分别靠近明通河(DC-26)、宝象河(DC-24)、洛龙河(DC-19)、大河(DC-14)、柴河(DC-11)、古城河入湖口(DC-10)(图1). 使用重力采样器采集6个柱状沉积物,采样器直径为8.3 cm,DC-14长为60 cm,其余采样器长度均为50 cm. 样品采集后立即运回实验室 -50℃冷藏保存,所有沉积柱均以1 cm间隔切样,将样品置于密封袋中冷冻干燥后分析备用. 环滇池采集26个湖水样,并对总氮含量进行分析(送至云南省环境科学研究院).

1.2 实验与方法

本实验对沉积物总氮、氨氮、硝氮、有机氮这4种氮形态进行分析. 沉积物总氮(TN)采用过硫酸盐消化法[12]进行测定,氨氮采用ISO 7150/1-1984水杨酸-次氯酸盐分光光度法[13]进行分析,硝氮经酸化后(1 + 11 HCl)利用紫外分光光度计直接测定;有机氮(TON)为总氮与氨氮和硝氮的差值. 实

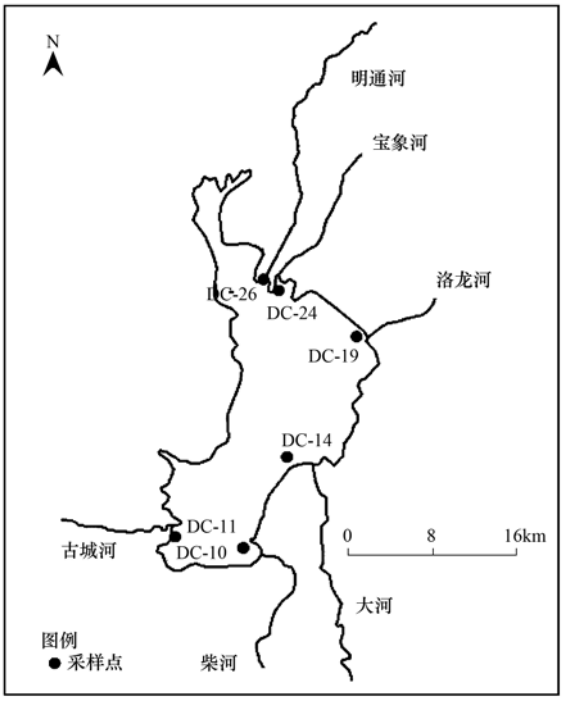

图1 滇池沉积柱采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Dianchi Lake

验所用分析仪器为岛津公司生产的UV-3600紫外分光光度计.

沉积物定年采用^{210}Pb测年法[14],测定仪器为美国EG&GORTEC公司生产的高纯锗探测器. ^{210}Pb半衰期为22.3年,是百年尺度内测定沉积物年代很好的元素,在当前湖泊沉积速率的研究中得到广泛的应用[15,16]. 通过对沉积物样品中$^{210}Pb_{ex}$比活度进行分析,采用^{210}Pb CRS计年模式计算各分层沉积物年代,结果如图2.

2 结果与分析

2.1 沉积物各形态氮垂向分布特征

2.1.1 沉积物总氮及有机氮垂向分布特征

滇池沉积物TN含量高,为1 263.68 ~ 7 155.17 mg·kg^{-1},其含量随时间逐渐增加(图3),各采样点TN含量从90年代后期开始均维持在高污染水平. 1899 ~ 2013年大河入湖口沉积物TN含量由402.30 mg·kg^{-1}增加至4 473.18 mg·kg^{-1};柴河、宝象河及洛龙河入湖口沉积物TN变化特征相似,1985年后TN含量均快速增加;明通河入湖口沉积物TN含量从1906 ~ 1995年快速增加,其后含量较为稳定. 古城河入湖口沉积物TN变化经历了4个阶段:1889 ~ 1967年TN含量较低且缓慢增加,1967 ~ 1986年快速增加,由2 222 mg·kg^{-1}迅速增加到5 239 mg·kg^{-1},1986 ~ 2009年沉积物TN含量增幅较小,

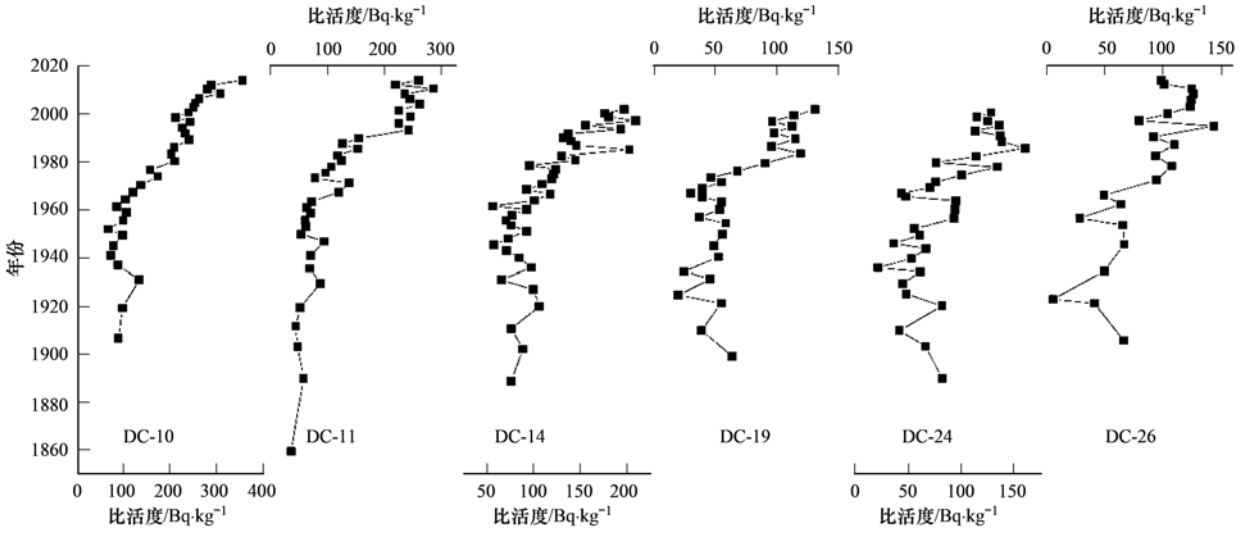

图 2　滇池沉积柱^{210}Pb比活度与年份结果

Fig. 2　Age and ^{210}Pb specific activity in sediments of Dianchi Lake

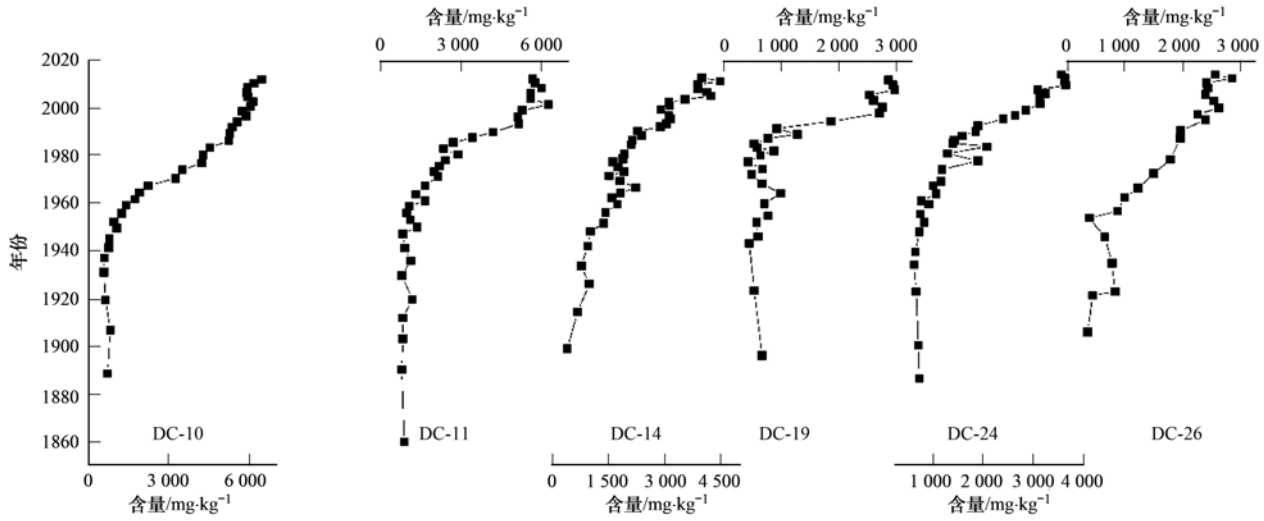

图 3　滇池沉积物总氮垂向分布特征

Fig. 3　Vertical distribution of TN in sediment of Dianchi Lake

维持在5 300 ~ 6 000 mg·kg^{-1}间,2009 年以后 TN 含量再次呈现快速的增加.

沉积物中 TON 为主要存在形态,含量为 255.80 ~ 5 644.25 mg·kg^{-1},占总氮平均质量分数为 91.26%,宝象河入湖口沉积物 TON 所占比例最高达 95.67%,古城河入湖口最低为 86.93%. 各采样点沉积物 TON 含量分别为 431.29 ~ 5 789.23 mg·kg^{-1}(DC-10)、595.52 ~ 2 567.97 mg·kg^{-1}(DC-11)、255.80 ~ 2 989.82 mg·kg^{-1}(DC-14)、293.96 ~ 2 848.27 mg·kg^{-1}(DC-19)、569.00 ~ 3 565.43 mg·kg^{-1}(DC-24)、297.78 ~ 2 752.41 mg·kg^{-1}(DC-26). TON 在垂向上的分布与 TN 具有相似特征,随时间增加含量逐渐升高.

2.1.2　沉积物无机氮垂向分布特征

本研究将滇池沉积物中无机氮分为氨氮及硝氮,是沉积物中最活跃的氮组分,也是优先被浮游植物利用的氮形态. 沉积物氨氮含量为 9.20 ~ 146.50 mg·kg^{-1},硝氮为 10.00 ~ 144.00 mg·kg^{-1},占总氮平均质量分数分别为 4.77%、4.04%,与卢少勇等[17]的研究结果类似. 各样点硝氮及氨氮垂向分布特征如图 4. 沉积物氨氮含量随时间逐渐降低,在宝象河入湖口略有不同. 宝象河入湖口沉积物氨氮含量在 1887 ~ 1993 年含量逐渐增加, 1993 年后氨氮含量逐渐降低,这可能与宝象河的大力治污有关[18]; 除柴河及古城河入湖口外,各采样点沉积物硝氮含量随时间缓慢

升高. 古城河入湖口沉积物硝氮在 1889 ~ 1945 年含量逐渐降低,在 1945 以后含量略有升高; 柴河入湖口沉积物硝氮含量在 1860 ~ 1988 年保持稳定,1988 年后则逐渐降低.

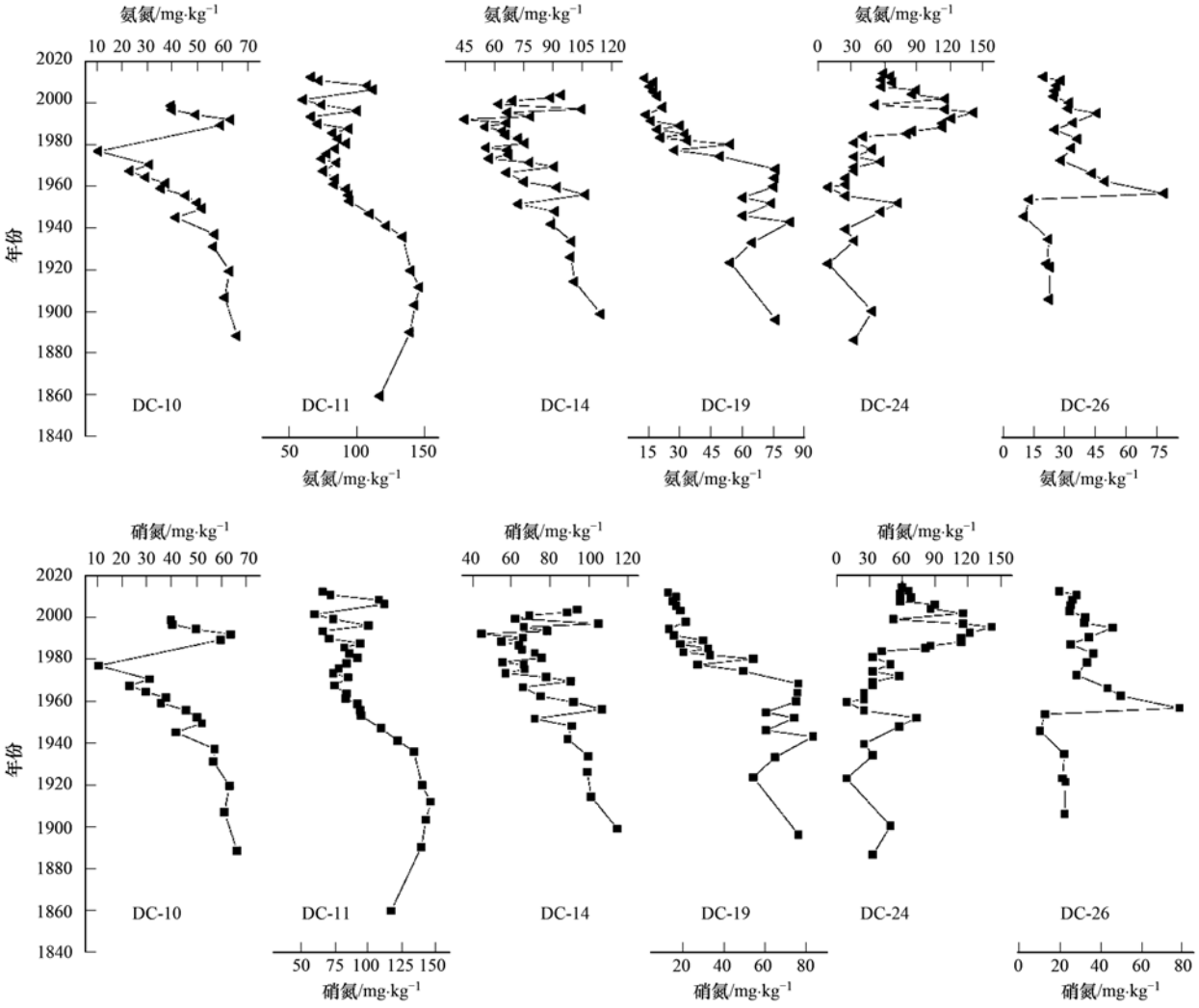

图 4 滇池沉积物无机氮垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of inorganic nitrogen in sediment of Dianchi Lake

2.2 沉积物各形态氮空间分布特征

2.2.1 沉积物总氮及有机氮空间分布特征

由于滇池流域不同的沉积环境以及人为活动的影响,不同的采样点各形态氮表现出不同的分布特征. 从表 1 可知, TN 平均含量为 1 266.85 ~ 3 642.66 mg·kg^{-1},呈现 DC-10 > DC-11 > DC-14 > DC-24 > DC-26 > DC-19 的特征; 南部古城河入湖口 TN 含量最高,最大值可达7 155.17 mg·kg^{-1},平均含量为3 642.66 mg·kg^{-1},中部洛龙河入湖口 TN 含量最低,平均值为1 263.68 mg·kg^{-1}; 各采样点 TN 含量相差较大,变异系数为 0.35,表明滇池沉积物氮含量在空间分布上具有较大差异,整体上呈现滇池南部沉积物 TN 含量高,北部次之,中部低的特征.

沉积物中 TON 含量高,为1 128.54 ~ 2 567.97 mg·kg^{-1},与 TN 具有相似的分布特征,与文献[18,19]的研究结果一致. 对沉积物中 TN 和 TON 进行相关分析,R^2 = 0.86,表明 TN 与 TON 分布具有显著的相似性. 位于滇池南部的古城河入湖口与柴河入湖口,沉积物有机氮含量最高,其平均值分别为 2 567.97 mg·kg^{-1}和2 388.83 mg·kg^{-1},滇池中部洛龙河入湖口 TON 含量较低为1 128.54 mg·kg^{-1},而滇池北部明通河及宝象河入湖口沉积物 TON 含量大于中部,分别为 1 574.86 mg·kg^{-1} 和 1 794.38 mg·kg^{-1},这与沉积物 TN 分布具有一致性.

2.2.2 沉积物无机氮空间分布特征

沉积物中氨氮及硝氮含量低,氨氮平均值为 30.30 ~ 96.06 mg·kg^{-1},硝氮为 19.92 ~ 66.92 mg·kg^{-1}. 柴河入湖口沉积物氨氮及硝氮含量相对

其他采样点均较高，氨氮含量最高值可达 146.50 mg·kg^{-1}，大河入湖口沉积物硝氮含量高，为 144.00 mg·kg^{-1}. 柴河、大河以及宝象河入湖口沉积物无机氮主要以氨氮形式存在，明通河、洛龙河与古城河入湖口沉积物无机氮主要以硝氮形式存在，这可能与明通河长期接纳昆明城区生活污水有关，而洛龙湖临近斗南花卉市场与蔬菜生产基地，农业面源污染对其 N 组成具有一定影响. 李清光等[20]对滇池流域硝酸盐进行氮氧同位素示踪研究发现，滇池氮氧同位素组成与河流相似，表明生活污水以及农业面源是硝酸盐污染的主要来源.

表 1　滇池沉积物各形态氮含量/mg·kg^{-1}

Table 1　Contents of different forms of nitrogen in Dianchi Lake/mg·kg^{-1}

项目		DC-11	DC-14	DC-19	DC-24	DC-26	DC-10
总氮	平均值	2 816.64	2 438.11	1 266.85	1 876.27	1 646.20	3 642.66
	最大值	6 264.37	4 798.85	2 959.77	3 649.43	2 854.41	7 155.17
	最小值	795.02	402.30	421.46	622.61	354.41	574.71
硝态氮	平均值	64.00	51.19	66.92	19.92	41.52	56.50
	最大值	84.00	144.00	120.00	32.00	94.00	120.00
	最小值	40.00	16.00	10.00	10.85	10.00	32.00
氨氮	平均值	96.06	78.27	42.40	62.59	30.30	45.58
	最大值	146.50	114.50	83.50	142.00	78.50	66.00
	最小值	60.00	44.50	13.00	9.20	10.63	10.50
有机氮	平均值	2 567.97	1 792.37	1 128.54	1 794.38	1 574.86	2 388.83
	最大值	6 140.37	2 989.82	2 848.27	3 565.43	2 752.41	5 789.23
	最小值	595.52	255.80	293.96	569.00	297.78	431.29

2.3　滇池沉积物氮埋藏特征

2.3.1　滇池沉积物氮埋藏时间分布特征

利用^{210}Pb测年法对沉积物进行定年，最终计算得到各层沉积物对应的沉积速率. 滇池沉积物沉积速率平均值为 0.092 ~ 0.187 g·(cm^2·a)$^{-1}$，随时间变化具有一致的特征，其沉积过程经历了 3 个阶段，即沉积速率随时间呈现先增加后降低再升高的变化特征. 根据测得各分层沉积物氮含量以及定年后所得沉积速率，可求得滇池沉积物氮年平均沉积通量，如图 5. 从中可见，滇池沉积物 TN 具有相同的埋藏特征，总氮埋藏速率随时间增长逐渐加快，其沉积通量最高可达 1.287 mg·(cm^2·a)$^{-1}$. 根据沉积物中氮沉积通量随时间的变化，估算了 1900 ~ 2014 年滇池沉积物氮埋藏储量，各形态氮储量分别为 TN 92 139.15 t、TON 86 745.62 t、氨氮2 929.37 t、硝氮2 464.16 t. 进入 90 年代后，滇池人口与 GDP 激增，20 年间人口增加近一倍[21]，受人类活动影响 90 年代后 TN 沉积通量几乎呈直线增长. 由表 2 可知，滇池沉积物 TON 与 TN 沉积通量在 90 年代前后相差较大，尤其在古城河、柴河、洛龙河增长速率最

表 2　90 年代前后滇池沉积物氮沉积通量变化

Table 2　Variation of sedimentary nitrogen burial rates before and after 1990s in Dianchi Lake

氮形态	时间	DC-10	DC-11	DC-14	DC-19	DC-24	DC-26	平均值
TN/mg·(cm^2·a)$^{-1}$	90 年代后	0.569	0.640	0.650	0.314	0.484	0.297	0.492
	90 年代前	0.195	0.155	0.296	0.143	0.205	0.112	0.184
硝氮/μg·(cm^2·a)$^{-1}$	90 年代后	5.407	6.672	11.641	15.137	4.102	7.408	8.395
	90 年代前	5.992	6.654	7.660	12.315	3.238	4.080	6.656
氨氮/μg·(cm^2·a)$^{-1}$	90 年代后	4.606	9.344	11.671	2.530	15.215	3.887	7.875
	90 年代前	4.803	10.352	14.306	11.722	8.321	3.661	8.861
TON/mg·(cm^2·a)$^{-1}$	90 年代后	0.559	0.624	0.627	0.296	0.465	0.286	0.476
	90 年代前	0.184	0.138	0.274	0.119	0.193	0.104	0.169

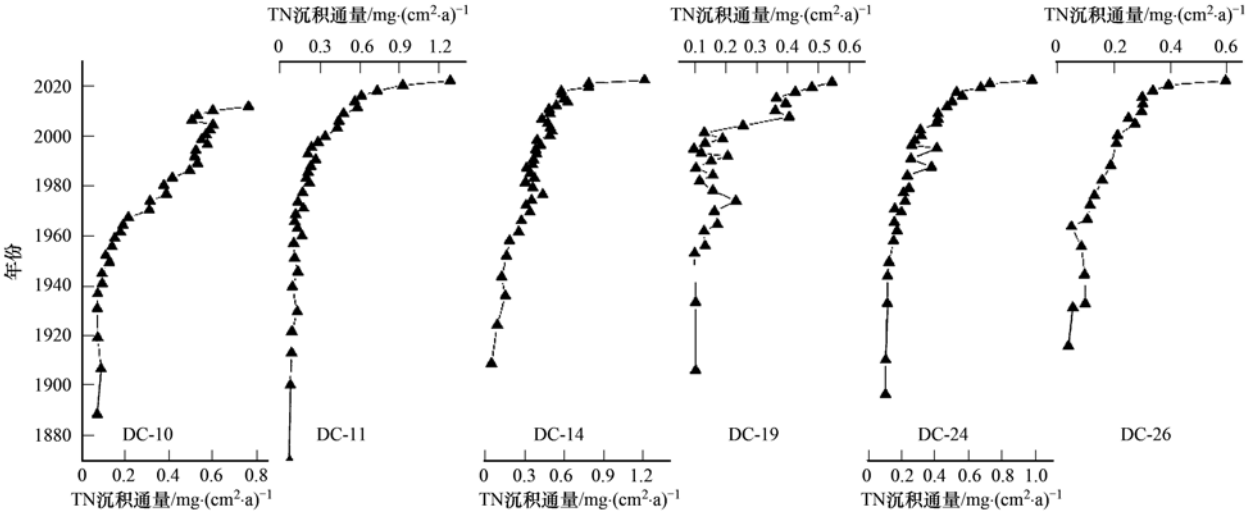

图 5 滇池总氮年平均沉积通量

Fig. 5 Annual average TN burial rates in the sediment of Dianchi Lake

快,90 年代后 TN 沉积通量分别为 90 年代前的 2.67 倍和 2.82 倍,TN 埋藏量可达35 151.89 t; 沉积物中硝氮及氨氮沉积通量在 90 年代前后差异相对较小,沉积通量平均增加 0.889 μg·(cm²·a)⁻¹,埋藏量为 563.09 t. 氨氮沉积通量在 90 年代后呈现减小趋势,埋藏量为 594.37 t.

2.3.2 滇池沉积物氮埋藏空间分布特征

滇池沉积物沉积速率由南到北分别为 0.101、0.106、0.176、0.195、0.194 和 0.124 g·(cm²·a)⁻¹,百年来滇池沉积物在北部较南部沉积更快,但在洛龙河入湖口具有最大的沉积速率. 沉积物各形态氮平均沉积通量空间分布如图 6,从中可知沉积物中 TN 沉积通量由南向北降低,与沉积物沉积速率空间分布特征相反. 大河入湖口沉积最快,明通河入湖口沉积最慢,沉积通量分别为 0.419 mg·(cm²·a)⁻¹ 和 0.205 mg·(cm²·a)⁻¹. 沉积物有机氮与氨氮空间分布具有相似特征,大河入湖口沉积通量最高,明通河最低,硝氮则在洛龙河沉积通量最高,且北部较南部低. 根据同时采集的入滇河流数据分析可得,柴河、大河、宝象河及明通河水体 TN 平均含量分别为 9.14、11.11、4.66 和 5.53 mg·L⁻¹. 滇池南部河流柴河及大河 TN 含量明显高于滇池北部明通河及宝象河,且各河流水体含氮量从上游到下游逐渐增加,这与沉积物 TN 的沉积分布特征有显著的相关性; 滇池南部属于农业密集区,由于氮肥的使用导致 NH_4^+ 很容易通过硝化作用转化为 NO_3^-, NO_3^- 容易随地表径流进入湖泊,从而致使南部入湖口沉积物硝氮沉积通量高于北部[22].

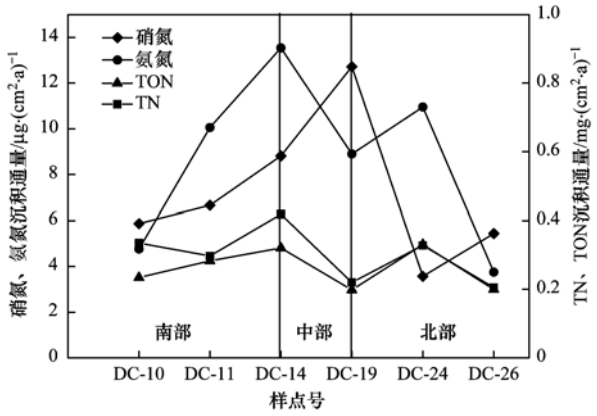

图 6 氮沉积通量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of nitrogen burial rates

3 讨论

3.1 沉积物氮污染特征

根据美国 EPA 沉积物总氮评价标准[12],当沉积物 TN > 2 000 mg·kg⁻¹时,湖泊处于严重污染状态. 滇池自 90 年代开始,沉积物 TN 平均含量均大于2 000 mg·kg⁻¹,说明滇池处于严重污染等级. 结合王书杭等[23]、王磊等[24]的研究,滇池沉积物 TN 含量远高于污染同样严重的太湖和巢湖. 滇池是典型的高原型静水湖泊,具有水体滞留时间长的特点[25,26],外源污染物在进入湖泊后更容易沉积下来,在环境条件发生改变时沉积物中的氮将再次释放到上覆水,这也是滇池较巢湖、太湖氮污染更加严重的原因之一. 滇池南部是农业密集区,由于水土流失大量氮肥通过河流进入湖泊,因此滇池南部沉积物呈现高氮含量,与邓伟明等[27]的研究契合.

滇池北部紧邻昆明城区，是主城区大量城市污水及工业废水的汇集地，由于城市污水及工业废水中含有大量的有机氮及氨氮，导致滇池北部沉积物氮污染也较为严重.

采集沉积物时，同时采集了 26 个滇池湖水样，并对其 TN 含量进行分析，水体 TN 空间分布特征如图 7. 水体总氮污染呈现由北向南逐渐递减的趋势，沉积物总氮污染表现为南部 > 北部 > 中部，水体与沉积物总氮污染的分布特征不一致. 沉积物与水体总氮污染的差异分布很可能是由沉积物具有“源”和“汇”的双重特性所引起. 滇池北部由于受到人类活动影响大于南部，对于沉积物的扰动作用也增大，使得北部沉积物 “源”的作用相比南部更加明显，导致水体氮污染增加，这一推论与滇池富营养化状况以及余丽燕等[28]的研究结果一致.

滇池氮污染是造成滇池水质恶化的一个重要原因，滇池水体从 60 年代至 90 年代水质条件已从Ⅱ类下降为Ⅴ类甚至劣Ⅴ类[29]. 滇池环境的急剧恶化与昆明市人口的增长以及快速的经济发展密切相关，滇池流域占云南省土地面积的 0.7%，却创造了全省 GDP 的 24%[18,21]. 近 50 年来滇池沉积物氮污染逐渐加重，从 20 世纪 90 年代开始滇池总体上都处于严重污染状态(图 2)，同样位于云贵高原的洱海，其沉积物氮污染也是从 20 世纪 70 年代开始形成并在 20 世纪 90 年代后逐渐加剧[30]. 查询昆明市 1970 ~ 2010 年统计年鉴，分析结果显示昆明市地区生产总值自 70 年代开始不断攀升，尤其从 1990 年后其生产总值几乎呈直线增长，这与滇池氮污染的形成时间是契合的. 从 80 年代中期开始，滇池流域第一产业所占比值逐渐降低，农业发展十分迅速，以农业为主的非点源污染所占比例加大[31]. 如图 8 所示，从 2000 ~ 2013 年昆明市氮肥施用量大大增加，农业生产中化肥的施用对滇池氮污染的贡献也逐渐增大.

3.2　沉积物氮埋藏分析

湖泊沉积物中氮来源丰富，其外源主要有土壤侵蚀、大气沉降及人为排放[32]，内源主要是湖内生物的排泄废物以及各种动植物残体，不同的氮来源造成了滇池沉积物氮在空间及时间上的不同埋藏特征. 城镇生活点源是滇池最大的污染源，占沉积物氮来源的 72.7%[33]，滇池北部紧邻昆明市主城区，受人为扰动影响大于南部，从而造成了滇池沉积物沉积速率由南到北逐渐增加的特征. 自改革开放以来，昆明市的经济快速发展，城市化进程加快，随经济的快速发展，滇池水体从 20 世纪 70 年代呈现富营养化，沉水植物开始死亡，藻类开始生长[34]，90 年代后富营养化加剧，同时滇池沉积物 N 的埋藏速率也逐渐增加，氨氮作为最易被藻类吸收利用的无机氮被大量消耗，从这一时期开始其沉积速率逐渐下降而相反地有机氮沉积则逐渐增加.

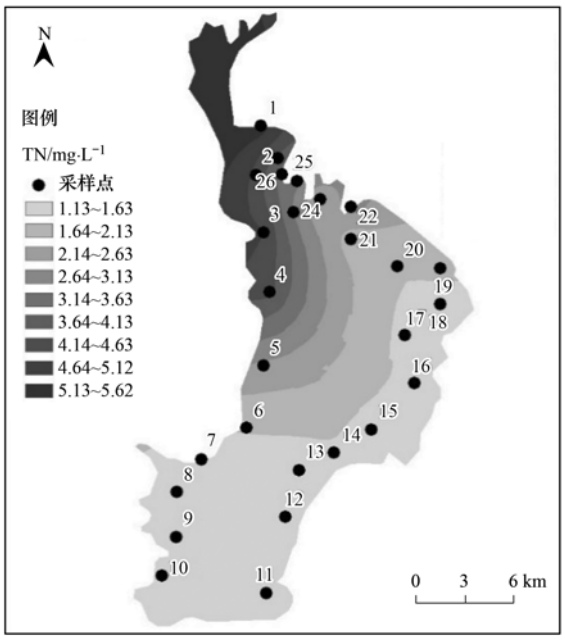

图 7　滇池水体总氮空间分布

Fig. 7　TN spatial distribution in the water of Dianchi Lake

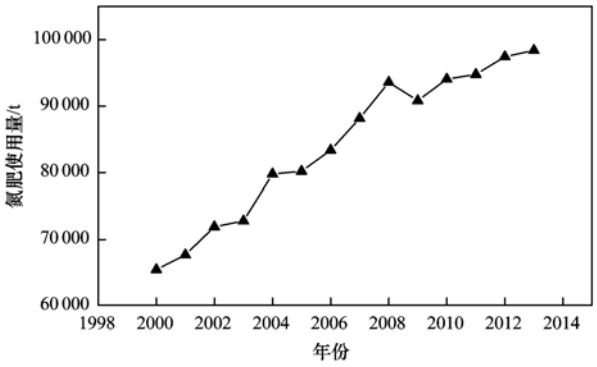

图 8　昆明市 2000 ~ 2013 年氮肥施用情况

Fig. 8　Nitrogenous fertilizer application from 2000 to 2013 in Kunming City

滇池沉积物沉积速率呈现由南向北逐渐增加的特征，而沉积物中氮的埋藏速率则表现为由南向北逐渐降低，说明沉积物沉积的快慢与沉积物中氮沉积的快慢没有绝对的正相关关系，这可能与沉积物的来源以及沉积物所处的环境条件有关. 从图 9 可以看出，1991 年后昆明市工业废水排放量逐渐降低，工业来源的氮沉积得到控制，2000 年后，工业排

放以及降雨量均降低,然而滇池沉积物氮的埋藏却在2000年后快速增加,这期间环境条件的变化起着十分重要的作用. 有研究表明温度的增加将促进生物生长并延长其生长期[35~37],根据气象数据滇池流域年平均气温逐年升高,这将提高滇池生物生产力水平同时促进氮的沉积. 滇池沉积物氮埋藏是一个十分复杂的过程,外部人为活动对氮的沉积有很大贡献,而内部各种生物活动对氮埋藏过程的促进作用也是不可忽视的,尤其是对于有机氮. 生物能迅速吸收利用无机氮以及水体12% ~72%的溶解有机氮[38],导致水体中的氮最终以有机氮形式随生物体残骸及排泄物沉积埋藏. 因此,在今后应加强生物对沉积物氮埋藏的影响研究.

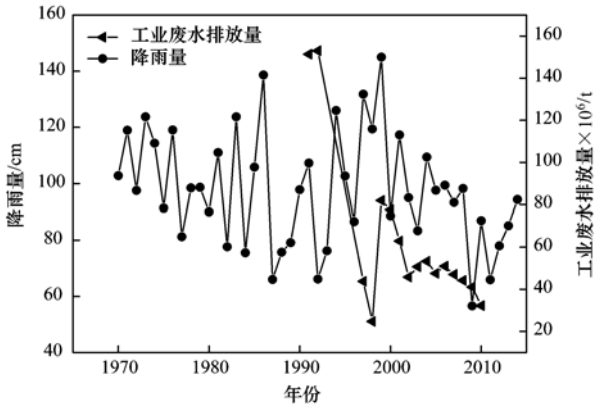

图9 昆明市历年降雨量及工业废水排放量

Fig. 9 Annual rainfall and industrial wastewater discharge in Kunming City

4 结论

(1)滇池沉积物氮含量高,有机氮为主要赋存形态,滇池沉积物有机氮与总氮含量均表现为滇池南部>北部>中部的空间分布特征.

(2)滇池沉积物氮百年来埋藏速率逐渐增加,沉积通量最高值为1.287 mg·(cm²·a)⁻¹,TN埋藏量可达92 139.15 t,内源氮负荷问题日益严重.

(3)滇池沉积物处于严重氮污染状态,氮污染在70年代逐渐形成,至90年后期开始加剧,内源氮污染的治理需要进一步加强.

参考文献:

[1] 陈永川, 张德刚, 汤利. 滇池沉积物铵态氮的时空变化特征研究[J]. 土壤学报, 2010, **47**(6): 1180-1187.
Chen Y C, Zhang D G, Tang L. Spatial and temporal variations of ammonium nitrogen in sediments of Lake Dianchi, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, **47**(6): 1180-1187.

[2] 傅国斌, 李克让. 全球变暖与湿地生态系统的研究进展[J]. 地理研究, 2001, **20**(1): 120-128.
Fu G B, Li K R. Progress in the study on the relationship between global warming and wetland ecological system[J]. Geographical Research, 2001, **20**(1): 120-128.

[3] Xia X H, Wu Q, Zhu B T, *et al*. Analyzing the contribution of climate change to long-term variations in sediment nitrogen sources for reservoirs/lakes[J]. Science of the Total Environment, 2015, **523**: 64-73.

[4] Liu X J, Li Z B, Li P, *et al*. Changes in carbon and nitrogen with particle size in bottom sediments in the Dan River, China[J]. Quaternary International, 2015, **380-381**:305-313.

[5] 吕昌伟, 何江, 高兴东, 等. 岱海表层沉积物中氮素的水平分布及环境意义[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(6): 2305-2308.
Lv C W, He J, Gao X D, *et al*. Spatial distribution of nitrogen in surface sediments of Daihai Lake and its environmental significance[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26**(6): 2305-2308.

[6] 李辉, 展巨宏, 王莹, 等. 滇池柱状沉积物氮营养盐赋存形态及其分布特征[A]. 见: 第六届全国环境化学大会暨环境科学仪器与分析仪器展览会摘要集[C]. 上海: 中国化学会, 2011.

[7] 李跃勋, 徐晓梅, 何佳, 等. 滇池流域点源污染控制与存在问题解析[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 633-639.
Li Y X, Xu X M, He J, *et al*. Point source pollution control and problem in Lake Dianchi basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(5): 633-639.

[8] 王丽芳, 熊永强, 吴丰昌, 等. 滇池的富营养化过程: 来自结合态脂肪酸 $C_{16:0}$ $\delta^{13}C$ 的证据[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(4): 456-464.
Wang L F, Xiong Y Q, Wu F C, *et al*. The eutrophication process of Lake Dianchi: evidences from the $\delta^{13}C$ value of the bound $nC_{16:0}$ fatty acid[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, **21**(4): 456-464.

[9] 朱元荣, 张润宇, 吴丰昌. 滇池沉积物中氮的地球化学特征及其对水环境的影响[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(6): 978-983.
Zhu Y R, Zhang R Y, Wu F C. Geochemical characteristics and influence to overlying water of nitrogen in the sediments from Dianchi Lake[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(6): 978-983.

[10] 李辉. 滇池柱状沉积物中氮赋存形态及其分布特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.

[11] 王书锦, 刘云根, 王妍, 等. 洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4615-4625.
Wang S J, Liu Y G, Wang Yan, *et al*. Vertical distribution and pollution risk assessment of sediments nitrogen, phosphorus, and organic matter in sediment of inflowing rivers of Erhai Lake estuarine wetland in wet and dry seasons[J]. Environmental Science, 2016, **37**(12): 4615-4625.

[12] 钱君龙, 张连弟, 乐美麟. 过硫酸盐消化法测定土壤全氮全磷[J]. 土壤, 1990, **22**(5): 258-262.

[13] 卢玉棋. 水杨酸盐-次氯酸盐分光光度法测定水中氨氮[J]. 环境与健康杂志, 1999, **16**(5): 296-298.

[14] 王小雷, 杨浩, 赵其国, 等. 利用^{210}Pb、^{137}Cs和^{241}Am计年法测算云南抚仙湖现代沉积速率[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(1): 136-142.

Wang X L, Yang H, Zhao Q G, *et al*. Radionuclide dating (^{210}Pb, ^{137}Cs, ^{241}Am) and modern sedimentation rate in Lake Fuxian[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(1): 136-142.

[15] 王福, 杨彪, 田立柱, 等. 开放潮坪地区$^{210}Pb_{exc}$测年 CIC 和 CRS 计算模式的选择[J]. 地球科学, 2016, **41**(6): 971-981.
Wang F, Yang B, Tian L Z, *et al*. The choice of CIC and CRS models of $^{210}Pb_{exc}$ dating for Tidal Flat area[J]. Earth Science, 2016, **41**(6): 971-981.

[16] 张瑞, 潘少明, 汪亚平, 等. 长江河口水下三角洲^{210}Pb分布特征及其沉积速率[J]. 沉积学报, 2009, **27**(4): 704-713.
Zhang R, Pan S M, Wang Y P, *et al*. Sedimentation rates and characteristics of radionuclide ^{210}Pb at the subaqueous delta in Changjiang estuary[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, **27**(4): 704-713.

[17] 卢少勇, 蔡珉敏, 金相灿, 等. 滇池湖滨带沉积物氮形态的空间分布[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(4): 1351-1357.
Lu S Y, Cai M M, Jin X C, *et al*. Spatial distribution of nitrogen species in sediment of lakeside zone of Lake Dianchi [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, **18**(4): 1351-1357.

[18] 文航, 蔡佳亮, 苏玉, 等. 滇池流域入湖河流丰水期着生藻类群落特征及其与水环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(1): 40-48.
Wen H, Cai J L, Su Y, *et al*. Characteristics of periphytic algal community and its relationship with aquatic environmental factors in streams of Lake Dianchi watershed in wet season[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, **23**(1): 40-48.

[19] 孟亚媛, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 471-480.
Meng Y Y, Wang S R, Jiao L X, *et al*. Characteristics of nitrogen pollution and the potential mineralization in surface sediments of Dianchi Lake[J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 471-480.

[20] 李清光, 王仕禄. 滇池流域硝酸盐污染的氮氧同位素示踪[J]. 地球与环境, 2012, **40**(3): 321-327.
Li Q G, Wang S L. Nitrogen and oxygen isotopic tracing of nitrate pollution in the Dianchi Lake basin [J]. Earth and Environment, 2012, **40**(3): 321-327.

[21] 倪兆奎, 王圣瑞, 金相灿, 等. 云贵高原典型湖泊富营养化演变过程及特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(12): 2681-2689.
Ni Z K, Wang S R, Jin X C, *et al*. Study on the evolution and characteristics of eutrophication in the typical lakes on Yunnan-Guizhou Plateau[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(12): 2681-2689.

[22] McDowell W H, Asbury C E. Export of carbon, nitrogen, and major ions from three tropical montane watersheds[J]. Limnology and Oceanography, 1994, **39**(1): 111-125.

[23] 王书航, 姜霞, 钟立香, 等. 巢湖沉积物不同形态氮季节性赋存特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 946-953.
Wang S H, Jiang X, Zhong L X, *et al*. Seasonal occurrence characteristics of different forms of nitrogen in the sediments of Chaohu Lake[J]. Environmental Science, 2010, **31**(4): 946-953.

[24] 王磊, 李冬林, 丁晶晶, 等. 太湖湖滨湿地沉积物氮磷与 2 种挺水植物氮磷的关系[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(10): 1523-1529.
Wang L, Li D L, Ding J J, *et al*. Relationship between N and P contents in sediments and two emerged plants in Taihu Lakeside wetland[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(10): 1523-1529.

[25] 毛建忠, 王雨春, 赵琼美, 等. 滇池沉积物内源磷释放初步研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, **3**(3): 229-233.
Mao J Z, Wang Y C, Zhao Q M, *et al*. Preliminary study on phosphorus release of internal load in Dianchi Lake sediment[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005, **3**(3): 229-233.

[26] 陈永川, 汤利, 张德刚, 等. 滇池沉积物总氮的时空变化特征研究[J]. 土壤, 2007, **39**(6): 879-883.
Chen Y C, Tang L, Zhang D G, *et al*. Spatial and temporal dynamic variation of nitrogen in sediment of Dianchi Lake[J]. Soils, 2007, **39**(6): 879-883.

[27] 邓伟明, 徐晓梅, 陈春瑜, 等. 滇池表层沉积物铵态氮吸附特征[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 75-85.
Deng W M, Xu X M, Chen C Y, *et al*. Sorption and desorption characteristics of ammonium in the surface sediments of Lake Dianchi[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(1): 75-85.

[28] 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 等. 夏季滇池和入滇河流氮、磷污染特征[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(5): 961-971.
Yu L Y, Yang H, Huang C C, *et al*. Characteristic of nitrogen and phosphorous pollution in Lake Dianchi and its inflow rivers in summer[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(5): 961-971.

[29] 汪淼, 严红, 焦立新, 等. 滇池沉积物氮内源负荷特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 218-226.
Wang M, Yan H, Jiao L X, *et al*. Characteristics of internal nitrogen loading and influencing factors in Dianchi Lake sediment [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(1): 218-226.

[30] Ni Z K, Wang S R. Historical accumulation and environmental risk of nitrogen and phosphorus in sediments of Erhai Lake, Southwest China[J]. Ecological Engineering, 2015, **79**: 42-53.

[31] 吴瑛, 董学荣. 滇池流域人口社会分化与水环境空间结构变迁[A]. 见: 中国民族学学会汉民族学会年会暨荆楚文化学术研讨会[C]. 武汉: 中国民族学学会, 2012.

[32] 王俊杰, 朱德清, 臧淑英. 松嫩平原中西部湖泊底泥营养盐的空间变异特征[J]. 地理与地理信息科学, 2011, **27**(2): 92-95.
Wang J J, Zhu D Q, Zang S Y. Spatial variability characteristics of lake sediments nutrients in the mid-west of Songnen plain[J]. Geography and Geo-Information Science, 2011, **27**(2): 92-95.

[33] 王小雷, 杨浩, 顾祝军, 等. 不同营养湖泊沉积物中$^{210}Pb_{ex}$和营养盐垂向分布特征及相关性分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2565-2571.
Wang X L, Yang H, Gu Z J, *et al*. Vertical distribution and relationship between $^{210}Pb_{ex}$ activities and nutrients in sediment Cores of two different eutrophication level lakes [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2565-2571.

[34] 祝艳. 滇池水质演替趋势及防治对策分析[J]. 云南环境科学, 2004, **23**(S): 97-100.
Zhu Y. Succession tendency of water quality of Dianchi Lake and prevention countermeasures[J]. Yunnan Environmental Science, 2004, **23**(S): 97-100.

[35] Dong X H, Anderson N J, Yang X D, *et al*. Carbon burial by

shallow lakes on the Yangtze floodplain and its relevance to regional carbon sequestration[J]. Global Change Biology, 2012, **18**(7): 2205-2217.

[36] Houghton R A. Balancing the global carbon budget[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2007, **35**(1): 313-347.

[37] Yu Z T, Wang X J, Zhao C Y, *et al*. Carbon burial in Bosten Lake over the past century: impacts of climate change and human activity[J]. Chemical Geology, 2015, **419**: 132-141.

[38] 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 phosphorous in the lake aquatic environment [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(1): 1-7.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www. hjkx. ac. cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目. 图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1,1. 1,1. 1. 1 的形式,左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地:出版社,年. 起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In):编者. 文集名[C]. 出版地:出版社(单位),年. 起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地:保存单位,年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等. 编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@ rcees. ac. cn;网址:www. hjkx. ac. cn

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 2

Feb. 15, 2017

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing ····· YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, *et al.* (423)

Pollution Characteristics of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China ····· CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, *et al.* (429)

Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric $PM_{2.5}$ in Shengsi Region ····· CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, *et al.* (438)

Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in $PM_{2.5}$ from Mt. Taishan ····· MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, *et al.* (445)

Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing ····· ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, *et al.* (453)

Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region ····· YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, *et al.* (461)

Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing ····· ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, *et al.* (469)

Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014 ····· ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, *et al.* (476)

Variation Analysis of Daily $PM_{2.5}$ Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou ····· GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, *et al.* (485)

Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing ····· ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, *et al.* (495)

Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong ····· FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, *et al.* (502)

Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations ····· GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, *et al.* (510)

Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century ····· WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, *et al.* (517)

Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge ····· LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, *et al.* (527)

Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors ····· ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, *et al.* (535)

Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer ····· QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, *et al.* (547)

Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone ····· LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, *et al.* (555)

Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(Ⅲ)-oxalate Complex in Lake Water ····· JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, *et al.* (563)

Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO ····· WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, *et al.* (572)

Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland ····· WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, *et al.* (580)

Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants ····· YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, *et al.* (589)

Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir ····· HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, *et al.* (600)

Experimental Research of Hg^{2+} Removal by TiO_2/Bentonite Composite ····· TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, *et al.* (608)

Impact of Ammonia and H_2O_2 on Bromate and Disinfection By-products Control ····· WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, *et al.* (616)

Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks ····· WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua (622)

Adsorptive Remediation of Cr(Ⅵ) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite ····· ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, *et al.* (629)

Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation ····· HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, *et al.* (640)

Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes ····· GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, *et al.* (647)

Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources ····· GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, *et al.* (654)

Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System ····· WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, *et al.* (665)

Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance ····· SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, *et al.* (672)

Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge ····· DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, *et al.* (679)

Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using *Mucor circinelloides* ····· GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, *et al.* (688)

Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge ····· WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, *et al.* (697)

Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City ····· WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, *et al.* (703)

Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China ····· CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, *et al.* (711)

Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes ····· YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, *et al.* (721)

Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil ····· YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, *et al.* (728)

Effects of *Rhodopseudomonas palustris* PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure ····· LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, *et al.* (735)

Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment ····· DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, *et al.* (743)

Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas ····· HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, *et al.* (752)

Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils ····· LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, *et al.* (760)

Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances ····· ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, *et al.* (769)

Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity ····· NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, *et al.* (783)

Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain ····· CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, *et al.* (792)

Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics ····· YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, *et al.* (802)

Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain ····· TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, *et al.* (809)

Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat ····· SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, *et al.* (815)

Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat ····· CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, *et al.* (825)

Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure ····· LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, *et al.* (832)

Sorption of *p*-Nitrophenol by Biochars of Corncob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures ····· MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei (837)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：赵进才

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　刘　毅　汤鸿霄　孟　伟　周宗灿　林金明

赵进才　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）

2017 年 2 月 15 日　第 38 卷　第 2 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 38　No. 2　Feb. 15, 2017

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	赵进才	**Editor-in -Chief**	ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	**Printed**	by Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 （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：140.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行

ISSN 0250-3301