

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.9  
第41卷 第9期

目次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析.....肖致美,徐虹,蔡子颖,李鹏,刘彬,元洁,郑乃源,唐逊,陈魁,邓小文(3879)

基于高分辨率MARGA分析成都市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子污染特征.....尹寒梅,陈军辉,冯小琼,姜涛,钱骏,刘政(3889)

宿迁市PM<sub>2.5</sub>中水溶性无机离子的季节特征和来源分析.....  
.....马红璐,赵欣,陆建刚,王辉,许纯领,欧阳琰,朱新胜,殷堂兵,漆丹,陆亚秋,汪玖阳,陆声兴(3899)

鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布.....李安娜,温天雪,华维,杨员,孟泽,胡波,辛金元(3908)

鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析.....林孜,姬亚芹,林宇,国纪良,马妍,赵静琦(3918)

西安市冬季PM<sub>2.5</sub>中WSOC的光谱特性和来源解析.....杨毅,张亚楠,刘焕武,田萍萍,李亚飞,雷颖,王一博(3924)

长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测.....  
.....杜盈盈,陈军,张家洛,甘桂城,刘瑜存,苏明旭,楼晟荣,周敏,陶士康,乔利平(3932)

连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析.....崔金梦,王体健,李秋潼,董立文,黄丛吾,曹云擎(3941)

成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析.....王成辉,陈军辉,韩丽,徐晨曦,王波,李英杰,刘政,钱骏(3951)

德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案.....严茹莎(3961)

超低改造下中国火电排放清单及分布特征.....屈加豹,王鹏,伯鑫,薛晓达,董广霞,崔磊,康明雄,王彤,汤铃,朱法华,李时蓓(3969)

浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征.....赵睿东,于兴娜,侯新红,沈丽(3976)

垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选.....赵思岚,奚鹏飞,郭凤艳,邓双,贾建丽(3985)

兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源.....韩婷婷,张明军,王圣杰,杜勤勤,马转转,郭蓉,曹晏风(3993)

然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素.....张涛,王明国,张智印,刘廷,何锦(4003)

河套灌区地下水化学演变特征及形成机制.....崔佳琪,李仙岳,史海滨,孙亚楠,安海军,邢进平(4011)

石期河流域地下水化学特征及物质来源分析.....李笑,于爽,李亮,郭永丽(4021)

长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素.....季鹏飞,许海,詹旭,朱广伟,邹伟,朱梦圆,康丽娟(4030)

2016~2017年长荡湖流域湖库系统营养盐时空分布机制分析.....李新艳,李恒鹏,姜三元,马培,赖锡军,邓建才,陈东强,耿建伟(4042)

菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响.....康丽娟,许海,邹伟,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,陈洁(4053)

金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析.....刘明坤,童俊,朱慧峰,白晓慧(4062)

典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征.....孙琳婷,赵祯,唐建辉(4069)

微塑料对河水抗生素抗性基因的影响.....周昕原,王言仔,苏建强,黄福义(4076)

莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价.....廖杰,魏晓琴,肖燕琴,李青松,范洪勇,刘学军,庄马展,刘超翔(4081)

拟柱胞藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异.....叶金梅,赵莉,罗旭,彭亮,雷腊梅(4088)

奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟.....李亚娟,杜彦良,毕二平,王亮,陈翠柏(4095)

浅基质层干植草沟运行效果的现场实验.....张佳炜,李田,张庭秀(4105)

海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输.....李佳,谢文霞,姜智绘,单溪环,廖云杰,赵洪涛,李叙勇(4113)

天然黄铁矿吸附去除水中Sb(V):性能与机制.....石松,吴乾元,李新正,黄满红(4124)

过硫酸盐氧化处理含砷磷酸废水.....章晋门,卢钧,刘晓琛,陈泉源(4133)

温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响.....刘智斌,刘秀红,周桐,章世勇,李健敏,杨庆(4141)

ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能.....缪新年,汪倩,郭凯成,刘文如,沈耀良(4150)

低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能.....刘雨馨,王建芳,钱飞跃,陈倩苗,乔伟,沈聪(4161)

雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨.....郭志娟,周亚龙,杨峥,赵传冬,成杭新,孔牧,彭敏(4169)

基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例.....  
.....吴志远,张丽娜,夏天翔,贾晓洋,李慧颖,王世杰(4180)

基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价.....  
.....张富贵,彭敏,王惠艳,马宏宏,徐仁廷,成晓梦,侯召雷,陈子万,李括,成杭新(4197)

云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力.....张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳(4210)

水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期.....胡雨丹,周航,辜娇峰,霍洋,邓鹏辉,魏宾缤,刘俊,廖柏寒(4218)

田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率.....郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,周小勇,陈同斌,卞建林,孟晓飞,李玉峰(4226)

桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果.....  
.....段春燕,沈育伊,徐广平,滕秋梅,张德楠,何成新,张中峰,周龙武,孙英杰(4234)

秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响.....杨彩迪,卢升高(4246)

土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应.....王燕,程东会,檀文炳,余红,席北斗,姜永海,党秋玲(4253)

粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响.....理鹏,吴建强,沙晨燕,叶春梅,黄沈发(4262)

松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响.....张拓,徐飞,怀宝东,杨雪,隋文志(4273)

黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应.....李娜,王宝荣,安韶山,焦峰,黄倩(4284)

土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响.....程跃扬,靳振江,王晓彤,贾远航,袁武,周军波(4294)

黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系.....尚秋彤,黄瑞林,倪浩为,隋跃宇,孙波,梁玉婷(4305)

贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性.....王显,龙健,李娟,刘灵飞,廖洪凯,李宜蓉,杨睿(4314)

玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附.....刘玉玲,朱虎成,彭鸥,李丹阳,杨蕊蕊,彭晶,铁柏清(4322)

无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法.....梁杏,孙立群,张鑫,张洁,付鹏宇(4333)

《环境科学》征订启事(4061) 《环境科学》征稿简则(4132) 信息(4233, 4293, 4304)

# 2016 ~ 2017 年长荡湖流域河湖系统营养盐时空分布机制分析

李新艳<sup>1</sup>, 李恒鹏<sup>1\*</sup>, 姜三元<sup>1</sup>, 马培<sup>2</sup>, 赖锡军<sup>1</sup>, 邓建才<sup>1</sup>, 陈东强<sup>1</sup>, 耿建伟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所流域地理学重点实验室, 南京 210008; 2. 河南工程学院资源与环境学院, 郑州 451191)

**摘要:** 以江苏省常州市长荡湖流域河湖系统为研究对象, 基于野外监测与室内分析, 探讨了水体氮、磷等营养盐的时空分布特征及其影响因素。结果表明, 2016 ~ 2017 年长荡湖流域河湖系统氮、磷污染突出, 河流 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 和 Chla 平均质量浓度和高锰酸盐指数分别为 (3.70 ± 0.76) mg·L<sup>-1</sup>、(1.81 ± 0.42) mg·L<sup>-1</sup>、(1.03 ± 0.61) mg·L<sup>-1</sup>、(0.38 ± 0.31) mg·L<sup>-1</sup>、(25.74 ± 37.00) μg·L<sup>-1</sup> 和 (6.35 ± 0.81) mg·L<sup>-1</sup>。河流总氮污染季节差异明显, 表现为冬、春季劣于夏、秋季, 河流总磷污染表现为秋、冬季劣于春、夏季, 空间差异表现为北 > 西北 > 南 > 东部, 河流处于中 ~ 高度富营养化状态。湖区 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 和 Chla 平均质量浓度和高锰酸盐指数分别为 (2.25 ± 0.94) mg·L<sup>-1</sup>、(0.98 ± 0.47) mg·L<sup>-1</sup>、(0.19 ± 0.14) mg·L<sup>-1</sup>、(0.11 ± 0.03) mg·L<sup>-1</sup>、(18.71 ± 8.76) μg·L<sup>-1</sup> 和 (4.59 ± 1.09) mg·L<sup>-1</sup>, 氮、磷质量浓度均超过 III 类水标准, 在空间上表现为从西部向东、南部降低的趋势, 湖区处于轻 ~ 中度富营养状态。丹金溧漕河、通济河与薛埠河等河流是长荡湖流域河湖水系的主要污染物输送通道, 丹金溧漕河干流输送氮、磷年通量最大, 约为通济河和薛埠河年通量总和的 10 ~ 12 倍。长荡湖流域河流氮、磷污染同时受到农业面源污染物流失与城镇污水排放的影响。土地利用方式转变和大气沉降是导致长荡湖流域河湖系统氮、磷污染加剧的重要驱动因素。

**关键词:** 长荡湖流域; 河湖系统; 营养盐时空分布; 土地利用变化; 富营养化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)09-4042-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201912201

## Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017

LI Xin-yan<sup>1</sup>, LI Heng-peng<sup>1\*</sup>, JIANG San-yuan<sup>1</sup>, MA Pei<sup>2</sup>, LAI Xi-jun<sup>1</sup>, DENG Jian-cai<sup>1</sup>, CHEN Dong-qiang<sup>1</sup>, GENG Jian-wei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Schools of Resources and Environmental Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

**Abstract:** Eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River has become an increasingly serious problem. In this study, we investigated the temporal and spatial variations in nutrient loads (nitrogen, N and phosphorus, P) in the Changdang Lake Catchment located to the northwest of Lake Taihu through field sampling and laboratory analysis in 2016-2017. The results show the severity of the N and P pollution in the Changdang Lake catchment. The mean river water concentrations of TN, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP, Chla, and permanganate index are (3.70 ± 0.76) mg·L<sup>-1</sup>, (1.81 ± 0.42) mg·L<sup>-1</sup>, (1.03 ± 0.61) mg·L<sup>-1</sup>, (0.38 ± 0.31) mg·L<sup>-1</sup>, (25.74 ± 37.00) μg·L<sup>-1</sup>, and (6.35 ± 0.81) mg·L<sup>-1</sup>, respectively. N pollution in the river is more severe in winter and spring than in summer and autumn whereas P pollution in the river is worse in autumn and winter than in spring and summer. Spatially, the magnitude of river N and P pollution follows the order of northern > northwestern > southern > eastern part of the study area. The rivers are in a state of moderate to severe eutrophication. The mean lake water concentrations of TN, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP, Chla, and permanganate index are (2.25 ± 0.94) mg·L<sup>-1</sup>, (0.98 ± 0.47) mg·L<sup>-1</sup>, (0.19 ± 0.14) mg·L<sup>-1</sup>, (0.11 ± 0.03) mg·L<sup>-1</sup>, (18.71 ± 8.76) μg·L<sup>-1</sup>, and (4.59 ± 1.09) mg·L<sup>-1</sup>, respectively. The water quality in Changdang Lake is categorized as worse than class III for TN and TP concentrations, which show decreasing trends from the west to the east to the south of the lake. The lake is in a status of slight to moderate eutrophication. The lake water quality is affected by the combination of sewage discharge and non-point source pollutant losses. The inflow rivers including the Danjinlicao River, Tongji River, and Xuebu River are the dominant pollution sources for Changdang Lake. The Danjinlicao River transports 10-12 times the total N and P loads transported by Tongji and Xuebu rivers. Changes in land use and atmospheric deposition are the driving factors of the deterioration of water quality and eutrophication in the catchment.

**Key words:** Changdang Lake catchment; river-lake system; temporal-spatial variations in nutrient loads; land use changes; eutrophication

收稿日期: 2019-12-24; 修订日期: 2020-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671479, 41401549, 41201496); 江苏省自然科学基金项目(BK20151062); 中国科学院南京地理与湖泊研究所前沿探索与基础性研究项目(NIGLAS2016QY02)

作者简介: 李新艳(1978 ~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为流域营养盐输移模拟, E-mail: xyli@niglas.ac.cn

\* 通信作者, E-mail: hppli@niglas.ac.cn

随着全球气候变化加剧,极端降水事件的发生频率越来越高,氮、磷等营养元素随洪水冲刷进入地表河湖并输送至近海大陆架,加剧了水体富营养化的强度,已成为全球河流、湖泊以及近海水域的主要环境问题<sup>[1-3]</sup>. 水体富营养化会引起河湖生态结构和功能发生显著变化,导致生态系统退化,造成水质型缺水,严重制约流域经济的可持续发展<sup>[4-6]</sup>. 我国长江中下游浅水湖泊富营养化呈日益加重的趋势<sup>[6-9]</sup>,研究者从湖泊水环境演变<sup>[7,10]</sup>、水体与沉积物营养盐时空分布<sup>[8,11-13]</sup>、气候演变<sup>[14]</sup>、土地利用变化与河流水质污染的相关性<sup>[15]</sup>等方面,对长江中下游浅水湖泊及出入湖河流的富营养化特征与影响机制进行了广泛地研究,但是多局限于对河流或者湖体的独立研究,从河流-湖泊系统角度进行的研究相对较少.

长荡湖 (Changdang Lake, CDL) 位于太湖西北部,是江苏省第七大淡水湖,兼具供水、灌溉、水产等多种功能,是太湖上游重要的水源地. 湖区周围共有大小进出河流 44 条,东部通过河流与太湖连通,并最终流入太湖,是太湖入湖径流和污染物负荷的来源之一. 流域内河网密布,流向复杂,北部是以大运河为骨干河道的运河水系,中部是以长荡湖为中心的水系,南部是以南河干流为主的南河水系. 近年来,随着城市化、工业化、旅游业与水产养殖业的发展,长荡湖及环湖河流水质总体呈下降趋势,湖体已达到中度富营养状态<sup>[16,17]</sup>,河湖水生生态功能严重退化,严重危及流域城乡居民的饮水安全. 本研究从河流-湖泊系统的角度,分析长荡湖流域 (Changdang Lake catchment, CDL catchment) 水体营养盐的时空分布特征及其影响机制,这对于加强流域综合管理与河湖水污染治理、保障居民饮水安全并促进社会经济可持续发展具有重要的指导意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

长荡湖流域 ( $119^{\circ}04' \sim 119^{\circ}44' \text{E}$ ,  $31^{\circ}17' \sim 31^{\circ}59' \text{N}$ ) 位于江苏省常州市,属于亚热带季风气候,四季分明,年降水量在 1 000 ~ 1 400 mm 之间,多年平均降水量为 1 115.1 mm,降雨主要集中于 5 ~ 9 月<sup>[18]</sup>. 流域面积 2 161.46 km<sup>2</sup>,北起香草河和丹金溧漕河,南至淳溧河,西起茅山山脉,东以直线边界横跨出湖河流并流入太湖水系,最终流入太湖 (图 1). 地势西高东低,西部为山地,约占 43.3%; 北部、东部和南部为平原,约占 56.7%. 流域内河网密布,流向复杂. 丹金溧漕河来源于京杭大运河,纵贯流域南北,是流域最大的入湖河流,汇集了通济河和薛埠河

等河流后分流注入长荡湖. 湖区东部通过中干河、北干河和湟里河等河流与太湖连通,并转注太湖 (图 1). 长荡湖南北长约 15.5 km,东西宽约 9 km,湖泊面积 85.31 km<sup>2</sup>,平均水深 1.1 m,换水周期 55.7 d<sup>[18]</sup>.

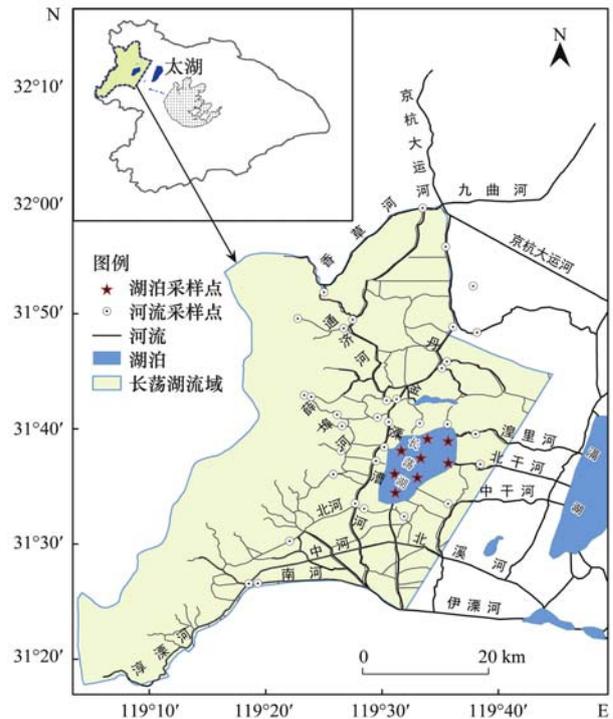


图 1 长荡湖流域在太湖流域位置、河湖水系及监测点分布示意

Fig. 1 Location of CDL catchment in the Lake Tai basin, river-lake system, and spatial sampling sites

### 1.2 样品采集与分析

#### 1.2.1 样品采集与数据来源

考虑了流域土地利用类型、地形、水系和乡镇分布等特征,在长荡湖流域骨干河网 (包括丹金溧漕河、通济河和薛埠河等入湖河道、北干河等出湖河道和南河等过境河道) 选取 33 个河流采样点,根据季节划分 (3 ~ 5 月为春季, 6 ~ 8 月为夏季, 9 ~ 11 月为秋季, 12 ~ 次年 2 月为冬季), 分别于 2016 年的 1、4、6、7、10 月和 2017 年的 4、6、7、10、12 月中旬开展了河流水质水量同步监测,夏季丰水期在 6 月加采一次. 长荡湖湖区水质监测时期为 2016 年 2 ~ 11 月和 2017 年 1 ~ 12 月的每月中旬,测定结果由江苏省水利科学研究院提供.

#### 1.2.2 样品分析方法

pH、温度、溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 和叶绿素 a (Chlorophyll a, Chla) 等参数在现场用 YSI 便携式水质监测仪进行测定. 总氮 (total nitrogen, TN)、总磷 (total phosphorus, TP)、硝态氮 ( $\text{NO}_3^- \text{-N}$ )、氨氮 ( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) 和磷酸盐 ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) 质量浓度按照国家标准方法测定; TN 质量浓度采用过硫酸钾氧化、紫

外分光光度法测定; TP 质量浓度采用过硫酸钾氧化、钼锑抗显色分光光度法测定;  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{PO}_4^{3-}$  质量浓度用流动分析、分光光度法测定(荷兰 Skalar SAN<sup>++</sup> 型流动分析仪). 高锰酸盐指数采用高锰酸钾氧化滴定法测定. 采用声学多普勒三维流速剖面仪(acoustic doppler current profilers, ADCP)对流域内骨干河网河道的流量、时均流速、河宽以及断面面积进行测量,每个断面往返测定两次,同时确定河流流向.

### 1.2.3 河流与湖泊(水库)营养状态评估方法

美国“河口营养状况评价”(NEEA-ASSETS)对利用 Chla 质量浓度评价河口富营养化状态进行了定义<sup>[19]</sup>:  $\text{Chla} > 60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 过度富营养化;  $20 \sim 60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 高度富营养化;  $5 \sim 20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 中度富营养化;  $< 5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 低度富营养化.

“湖泊(水库)富营养化评价标准”中的综合营养状态指数法(comprehensive trophic level index, TLI)以快捷性、准确性著称,因此,采用 TLI 指数法对长荡湖水体营养状态进行评价. 分别采用 Chla、TN、TP 质量浓度、透明度(secchi depth, SD)和高锰酸盐指数等 5 项指标计算单因子营养状态指数,通过加权计算得到综合营养状态指数. TLI 计算公式为<sup>[20]</sup>:

$$\text{TLI}(\sum) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot \text{TLI}(j) \quad (1)$$

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2} \quad (2)$$

式中,  $\text{TLI}(\sum)$  代表综合营养状态指数;  $\text{TLI}(j)$  代表第  $j$  种参数的营养状态指数的相关权重;  $W_j$  为以 Chla 为基准参数计算的第  $j$  种参数的营养状态指数的归一化相关权重,其取值来源于我国 26 个典型湖泊(水库)调查数据计算获得的相关系数<sup>[21]</sup>.  $r_{ij}$  为第  $j$  种参数与基准参数 Chla 的相关系数,取值见表 1;  $m$  为评价参数的个数.

表 1 中国湖泊(水库)部分参数与 Chla 的相关关系  $r_{ij}$  及  $r_{ij}^2$  值

Table 1 Correlations of  $r_{ij}$  and  $r_{ij}^2$  between some parameters and Chla in China's lakes (reservoirs)

参数	Chla	SD	TP	TN	高锰酸盐指数
$r_{ij}$	1	-0.83	0.84	0.82	0.83
$r_{ij}^2$	1	0.688 9	0.705 6	0.672 4	0.688 9

$$\text{TLI}(\text{Chla}) = 10 \times (2.5 + 1.086 \ln \text{Chla}) \quad (3)$$

$$\text{TLI}(\text{SD}) = 10 \times (5.118 - 1.94 \ln \text{SD}) \quad (4)$$

$$\text{TLI}(\text{TP}) = 10 \times (9.436 + 1.624 \ln \text{TP}) \quad (5)$$

$$\text{TLI}(\text{TN}) = 10 \times (5.453 + 1.694 \ln \text{TN}) \quad (6)$$

$$\text{TLI}(\text{高锰酸盐指数}) = 10 \times (0.109 + 2.661 \ln \text{高锰酸盐指数}) \quad (7)$$

式中, Chla 单位为  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; SD 单位为 m; 其他单位均为  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

根据富营养化分级标准,采用 0~100 的数字将湖泊营养状态分成 5 级: 贫营养(0, 30)、中营养[30, 50]、轻度富营养(50, 60]、中度富营养(60, 70]、重度富营养(70, 100).

### 1.2.4 空间插值方法

采用反距离权重(inverse distance weighted, IDW)法<sup>[22]</sup>,通过采样点的数值来推算未采样点的数值. 反距离权重法假定每个测量点都有一种局部影响,而这种影响会随着距离的增大而减小.

采用 ArcGIS 软件进行空间插值与土地利用分析, SPSS 软件进行数据相关性分析,相关分析采用皮尔森相关系数,并进行显著性双侧检验.

### 1.2.5 河流营养盐年通量的计算方法

基于现场监测的河流瞬时流量  $Q_i$ , 结合室内分析获取的河流监测断面营养盐质量浓度  $c_i$ , 采用公式(8)计算河流营养盐年通量.

$$\text{Load} = \sum k \times Q_i \times c_i \times (D_i \times 24 \times 3600) \times 3 \quad (8)$$

式中, Load 指河流营养盐年通量,  $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ ;  $Q_i$  指现场监测的河流瞬时流量,  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $c_i$  指河流监测断面营养盐质量浓度, 包括 TN、TP、 $\text{NH}_4^+$ -N 和高锰酸盐指数,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $D_i$  指监测月份的天数;  $i$  指监测月份;  $k$  为单位转换系数.

### 1.2.6 相关性分析

采用 IBM SPSS Statistics 19 统计软件进行 Pearson 系数相关性分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 河流水质参数与营养盐年通量的时空分布特征

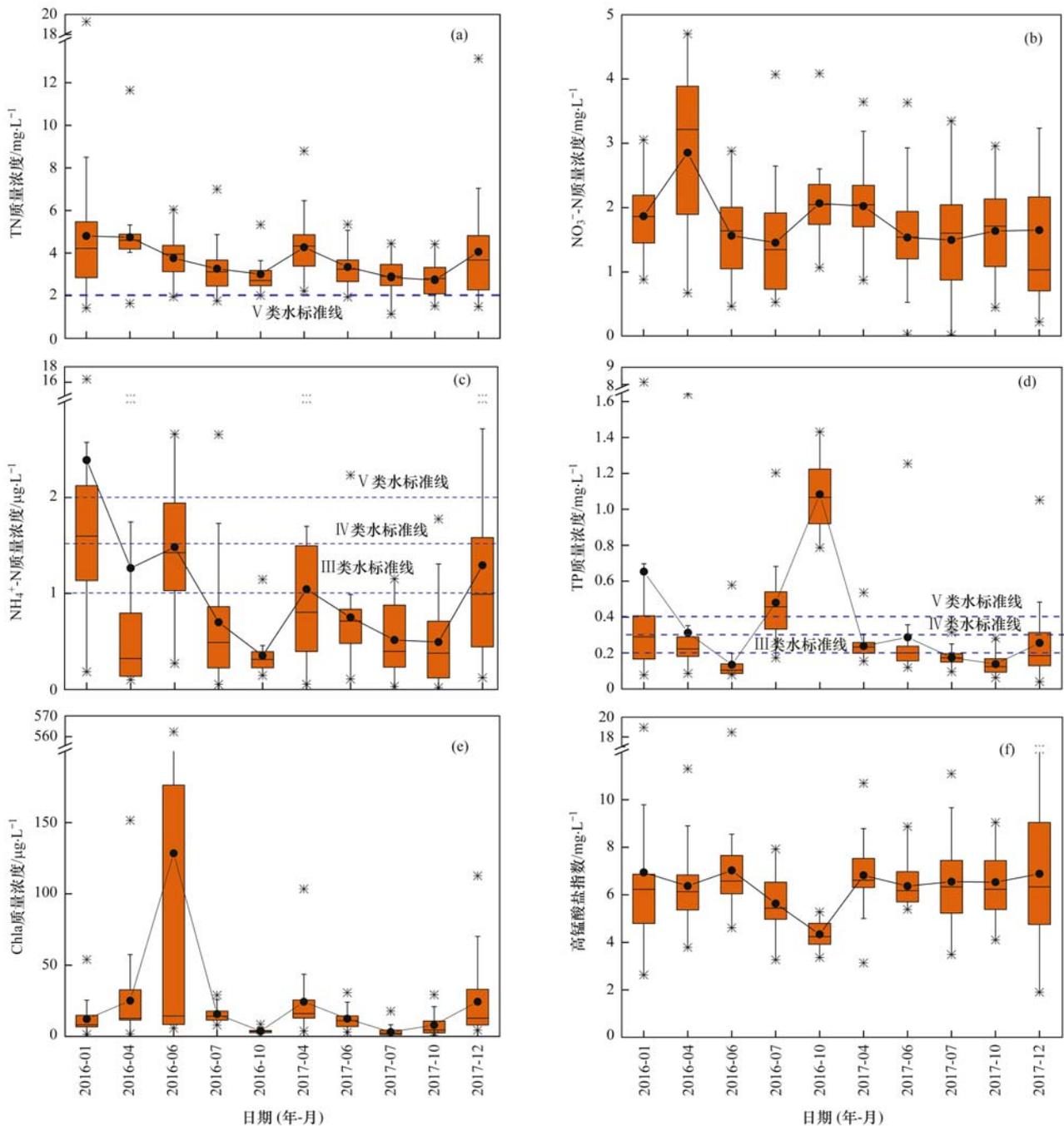
#### 2.1.1 河流营养盐质量浓度的时间分布特征

长荡湖流域河流监测点 TN 平均质量浓度变化范围在  $2.73 \sim 4.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 平均值为  $(3.69 \pm 0.76) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [ (图 2(a)) ]. 2016 年 TN 平均质量浓度以 1 月最高 ( $4.91 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 其次为 4 月 ( $4.74 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 然后是 6、7 月, 10 月最低 ( $3.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), TN 污染严重程度表现为冬 > 春 > 夏 > 秋季; 2017 年以 4 月最高 ( $4.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 其次为 12 月 ( $4.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 然后是 6、7 月, 10 月最低 ( $2.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), TN 污染严重程度表现为春 > 冬 > 夏 > 秋季. 可见近 2 年长荡湖流域河流 TN 污染均表现为冬、春季劣于夏、秋季.

长荡湖流域河流监测点 $\text{NO}_3^-$ -N平均质量浓度变化范围在 $1.46 \sim 2.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $(1.81 \pm 0.42) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [(图 2(b))]. 2016 年 $\text{NO}_3^-$ -N平均质量浓度以 4 月最高( $2.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),其次为 10 月( $2.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),然后是 1 月, 7 月最低( $1.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), $\text{NO}_3^-$ -N污染严重程度表现为春 > 秋 > 冬 > 夏季; 2017 年以 4 月最高( $2.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),其次为 12 月( $1.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),然后是 10 月, 7 月最低( $1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), $\text{NO}_3^-$ -N污染严重程度表现为春 > 冬 > 秋 > 夏季. 可见近 2 年长荡湖流域河流 $\text{NO}_3^-$ -N

污染严重程度均表现为春季最严重,秋、冬季居中,夏季最轻.

长荡湖流域河流监测点 $\text{NH}_4^+$ -N平均质量浓度变化范围在 $0.35 \sim 2.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $(1.03 \pm 0.61) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [(图 2(c))]. 2016 年 $\text{NH}_4^+$ -N平均质量浓度以 1 月最高( $2.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),其次为 6 月( $1.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),然后是 4 月, 10 月最低( $0.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). 2017 年 $\text{NH}_4^+$ -N平均质量浓度以 12 月最高( $1.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),其次为 4 月( $1.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),然后是 6 月和 7 月, 10 月最低( $0.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). 可见



黑色圆点代表水质参数的平均值,棕色柱子代表水质参数的主要分布范围,星号代表最高值与最低值

图 2 长荡湖流域河流营养盐质量浓度时间变化(2016 ~ 2017 年)

Fig. 2 Variations in river nutrient concentrations in CDL catchment from 2016 to 2017

近两年长荡湖流域河流 $\text{NH}_4^+$ -N污染均表现为冬>春>夏>秋季. 在冬、春季节污染最严重, 在夏、秋季节污染相对较轻, 水质表现为优于Ⅲ类水. 与2016年相比, 2017年冬季河流氨氮污染程度减轻了一个级别.

长荡湖流域河流监测点TP平均质量浓度变化范围在 $0.14 \sim 1.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(0.38 \pm 0.31) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图2(d)]. 2016年TP平均质量浓度以10月最高( $1.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 其次为1月( $0.65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 水质表现为劣V类水; 然后是7、4月, 6月最低( $0.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 河流TP污染严重程度表现为秋、冬季劣于春、夏季. 2017年TP平均质量浓度均在IV类水标准线( $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )以下, 河流TP污染严重程度表现为冬、春季劣于夏、秋季. 2017年河流TP污染明显比2016年有所减轻, 特别是7月和10月的TP平均质量浓度显著降低.

长荡湖流域河流监测点Chla平均质量浓度变化范围在 $(3.11 \sim 128.43) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(25.74 \pm 37.00) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ [图2(e)]. 2016年河流Chla平均质量浓度表现为夏、春季高于冬、秋季, 6月异常偏高, 2017年表现为冬、春季高于夏、秋季. 根据美国“河口营养状况评价”(NEEA-ASSETS)标准<sup>[19]</sup>, 2016~2017年长荡湖流域河流呈中-高度富营养化状态, 在2016年6月出现重度富营养化, 2016年4月以及2017年4和12月为高度富营养化, 2016年7月、2017年6月和10月表现为中度富营养化, 仅2017年7月出现低度富营养化.

长荡湖流域河流监测点高锰酸盐指数变化范围在 $4.34 \sim 6.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(6.35 \pm 0.81) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图2(f)], 根据地表水环境监测质量标准GB 3838-2002, 监测期高锰酸盐指数基本都低于I和II类水质标准限值( $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 季节差异不大.

### 2.1.2 河流营养盐年通量的空间分布特征

2017年长荡湖流域骨干河网TN、 $\text{NH}_4^+$ -N、TP和高锰酸盐指数年通量的空间分布如图3所示, 可看出, TN、 $\text{NH}_4^+$ -N、TP和高锰酸盐指数年通量较高的监测点都位于丹金溧漕河, 沿着丹金溧漕河干流从南向北分布. 丹金溧漕河干流、通济河和薛埠河TN年通量分别为 $3.42 \times 10^6$ 、 $1.82 \times 10^5$ 和 $9.74 \times 10^4 \text{ kg}$ , TP年通量分别为 $1.00 \times 10^6$ 、 $7.46 \times 10^4$ 和 $2.13 \times 10^4 \text{ kg}$ ,  $\text{NH}_4^+$ -N年通量分别为 $2.07 \times 10^6$ 、 $1.55 \times 10^5$ 和 $6.09 \times 10^4 \text{ kg}$ , 丹金溧漕河干流氮、磷年通量为通济河和薛埠河年通量总和的10~12倍. 出湖河流TN、TP和 $\text{NH}_4^+$ -N年通量分别为 $5.57 \times 10^5$ 、 $8.52 \times 10^4$ 和 $3.16 \times 10^5 \text{ kg}$ , 分别占丹金溧漕河

干流年通量的16.28%、8.48%和15.25%. 高锰酸盐指数年通量不仅在丹金溧漕河干流较高(平均为 $3.56 \times 10^6 \text{ kg}$ ), 在出湖河流北干河和中干河也比较高(平均为 $1.51 \times 10^6 \text{ kg}$ ), 分别为通济河和薛埠河年通量总和的7和3倍.

## 2.2 长荡湖水质参数与营养状态的时空分布特征

### 2.2.1 长荡湖水质参数的时间分布特征

长荡湖水体2016~2017年TN、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N、TP、Chla质量浓度和高锰酸盐指数逐月分布如图4所示. TN平均质量浓度在 $1.10 \sim 4.74 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(2.25 \pm 0.94) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 未达到地表湖库水质Ⅲ类标准. 2016年秋、冬季湖区TN污染最严重, 9、10和11月TN平均质量浓度均超过了V类水标准限值( $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ); 春季居中, 夏季TN污染最轻. 与2016年相比, 2017年冬(2月)、春(3~5月)和夏季(6月)TN污染加重; 秋季(9~11月)TN污染有所减轻[图4(a)].

湖区水体 $\text{NO}_3^-$ -N平均质量浓度变化范围在 $0.17 \sim 1.77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(0.98 \pm 0.47) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 2016年2月平均质量浓度最高( $1.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 8月最低( $0.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 按湖区 $\text{NO}_3^-$ -N污染严重程度表现为冬>秋>春>夏季. 2017年2月平均质量浓度最高( $1.77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 7月最低( $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 按湖区 $\text{NO}_3^-$ -N污染严重程度表现为冬>春>秋>夏季. 可见这两年长荡湖水体冬季 $\text{NO}_3^-$ -N污染最严重, 春、秋季居中, 夏季污染相对最轻[图4(b)].

湖区水体 $\text{NH}_4^+$ -N平均质量浓度变化范围在 $0.03 \sim 0.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(0.19 \pm 0.14) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 2016年2月平均质量浓度最高( $0.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 7月最低( $0.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 按湖区 $\text{NH}_4^+$ -N污染严重程度表现为冬>秋>春>夏季. 2017年1月平均质量浓度最高( $0.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 12月最低( $0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 按湖区 $\text{NH}_4^+$ -N污染严重程度表现为夏>冬>春>秋季. 近两年长荡湖 $\text{NH}_4^+$ -N污染总体较轻, 水质类别属于优于Ⅲ类水, 但是季节差异较大, 表现在2016年夏季 $\text{NH}_4^+$ -N污染相比较其它季节最轻, 而2017年夏季 $\text{NH}_4^+$ -N污染相比较其它季节最严重[图4(c)].

湖区水体TP平均质量浓度变化范围在 $0.06 \sim 0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(0.11 \pm 0.03) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 2016年9月平均质量浓度最高( $0.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 超过IV类水标准, 11月最低( $0.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 按湖区TP污染严重程度表现为秋>冬>春>夏季. 2017年7月平均质量浓度最高( $0.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 10月最

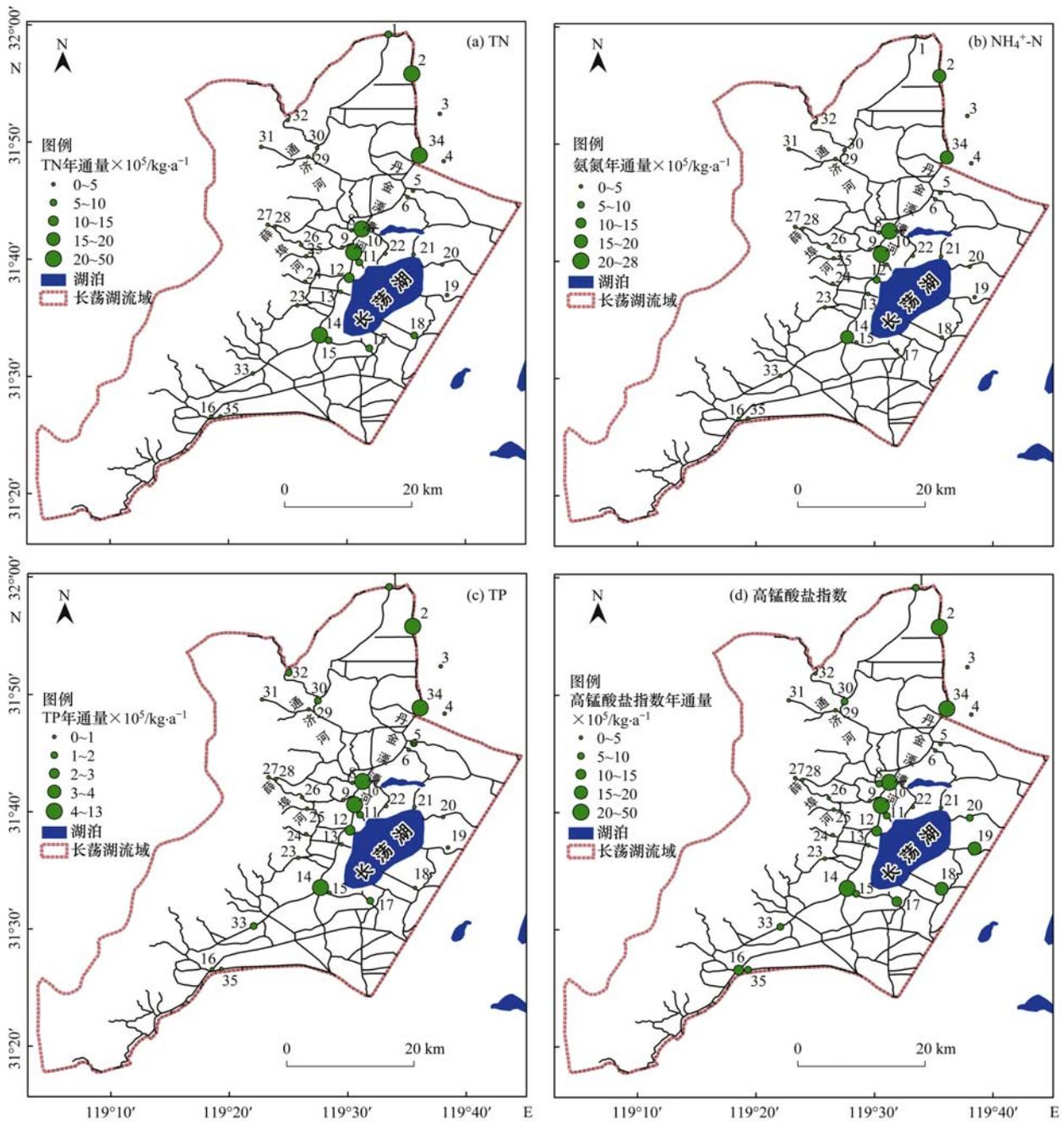


图 3 2017 年长荡湖流域河流污染物年通量空间分布

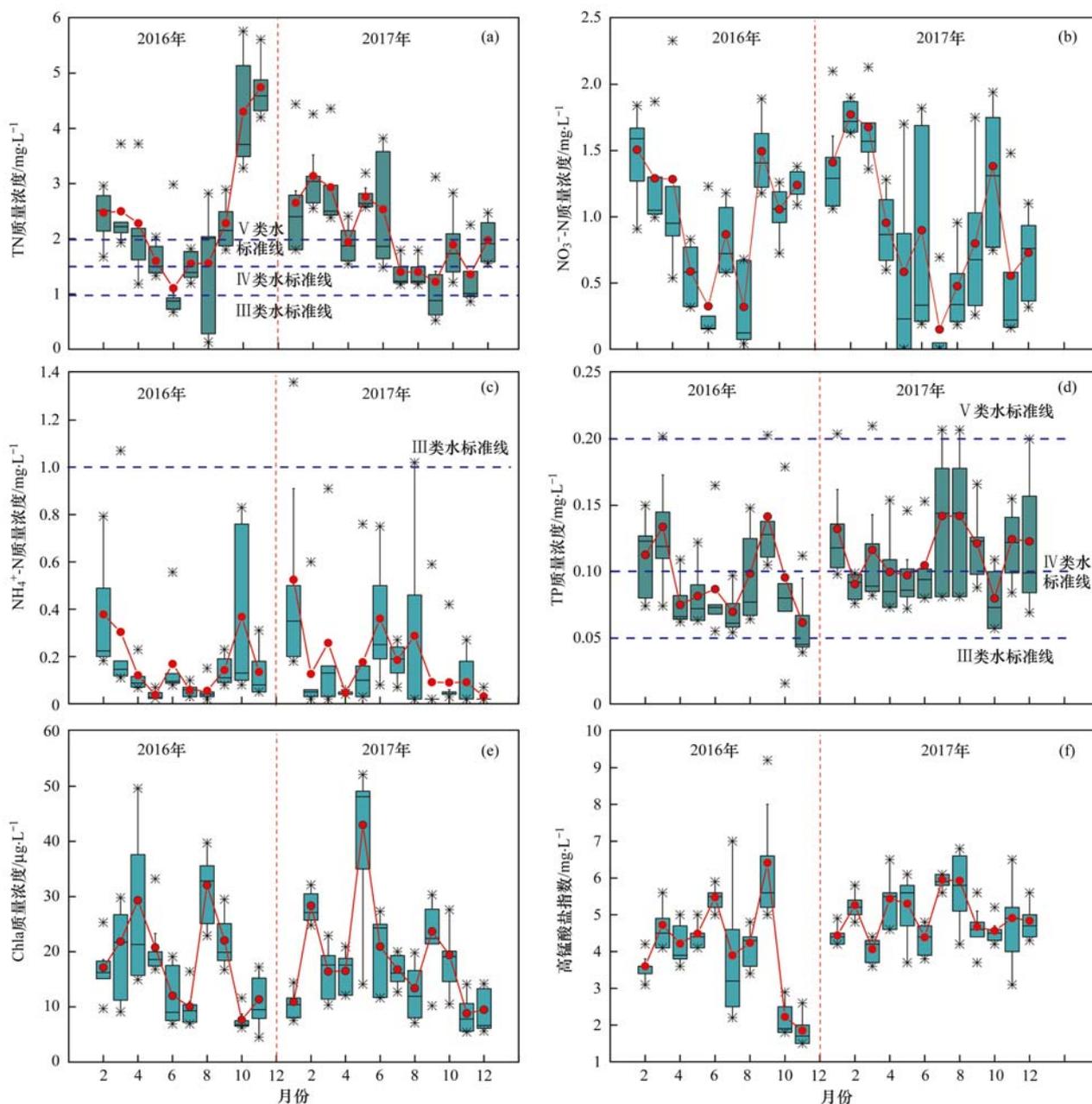
Fig. 3 Spatial distribution of river nutrient loads in CDL catchment in 2017

低( $0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),按湖区 TP 污染严重程度表现为夏 > 冬 > 秋 > 春季. 近两年冬季长荡湖区 TP 污染比较严重,夏季 TP 污染具有较大的差异,表现在 2016 年夏季 TP 污染相比较其它季节最轻,而 2017 年夏季 TP 污染相比较其它季节最严重[图 4(d)].

湖区水体 Chla 平均质量浓度变化范围在  $7.65 \sim 42.96 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  之间,平均值为  $(18.71 \pm 8.76) \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 2016 年 8 月平均质量浓度最高 ( $32.04 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 10 月最低 ( $7.65 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),按湖区 Chla 水平表现为春 > 夏 > 冬 > 秋季. 2017 年 5 月平均质量浓度最高 ( $42.96 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 11 月最低 ( $8.81$

$\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),按湖区 Chla 水平高低表现为春 > 秋 > 夏 > 冬季. 近两年春季是长荡湖区藻类高发期,其次为夏季[图 4(e)].

湖区水体高锰酸盐指数变化范围在  $1.85 \sim 6.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间,平均值为  $(4.59 \pm 1.09) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 2016 年 9 月高锰酸盐指数最高 ( $6.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 11 月最低 ( $1.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),按湖区高锰酸盐指数污染严重程度表现为夏 > 春 > 冬 > 秋季. 2017 年 7 月高锰酸盐指数最高 ( $5.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 3 月最低 ( $4.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),按湖区高锰酸盐指数污染严重程度表现为夏 > 春 > 冬 > 秋季



红色圆点代表水质参数的平均值,绿色柱子代表水质参数的主要分布范围,星号代表最高值与最低值

图4 长荡湖水质参数时间变化(2016~2017年)

Fig. 4 Temporal variations in water quality parameters in CDL from 2016 to 2017

[图4(f)]. 近两年长荡湖区高锰酸盐指数均低于  $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 水质类别为 I 类和 II 类水, 表明湖区水体受有机污染相对较轻.

### 2.2.2 长荡湖营养状态的时间变化

根据湖泊富营养化分级标准<sup>[20, 21]</sup>, 2016~2017 年长荡湖 TLI 指数均在 50 以上, 达到了富营养化状态(图5). 2016 年湖区整体处于轻度富营养化状态, 个别月份(3、8、9 和 10 月)处于中度富营养化状态. 2017 年湖区 TLI 指数呈下降趋势, 1~7 月处于中度富营养化状态, 8~12 月处于轻度富营养化状态.

### 2.2.3 2017 年长荡湖水质参数的空间分布特征

2017 年长荡湖的 TN、TP 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  平均质量浓度插值结果如图 6 所示. 可看出湖西部河流入湖区 TN、TP 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  平均质量浓度最高, 这里也是丹金溧漕河入湖的区域, 随着向湖区、南部和东部湖区的扩散, 氮、磷质量浓度逐渐降低, 东部湖区的质量浓度最低.

以 7 号监测点为代表的西部湖区 TN 年平均质量浓度为  $2.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 以 2 号和 8 号监测点为代表的东部出湖区 TN 年平均质量浓度为  $1.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 根据地表水环境质量标准 GB 3838-2002, 这两个湖

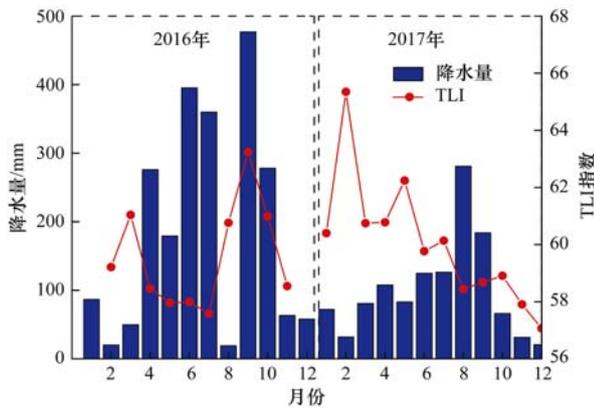


图5 长荡湖逐月 TLI 指数与降水量变化(2016~2017 年)

Fig. 5 Monthly variations in TLI and precipitation in CDL from 2016 to 2017

区的水质相差一个级别,分别属于劣 V 和 V 类水. 西部湖区  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  年平均质量浓度为  $0.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 东部出湖区  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  年平均质量浓度为  $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 水质相差 2 个级别, 分别属于 III 和 I 类水. 西部湖区 TP 年平均质量浓度为  $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 东部出湖区 TP 年平均质量浓度为  $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 水质相差 1 个级别, 分别属于 III 和 II 类水. 以 3 号监测点为代表的中部湖区 TN、TP 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  平均质量浓度仅次于西部湖区, 以 4 号监测点为代表的北部湖区因同时受到中部和东部湖水的中和作用影响, 氮、磷污染水平有所波动. 以 1 号监测点为代表的南部湖区氮、磷污染水平居中.

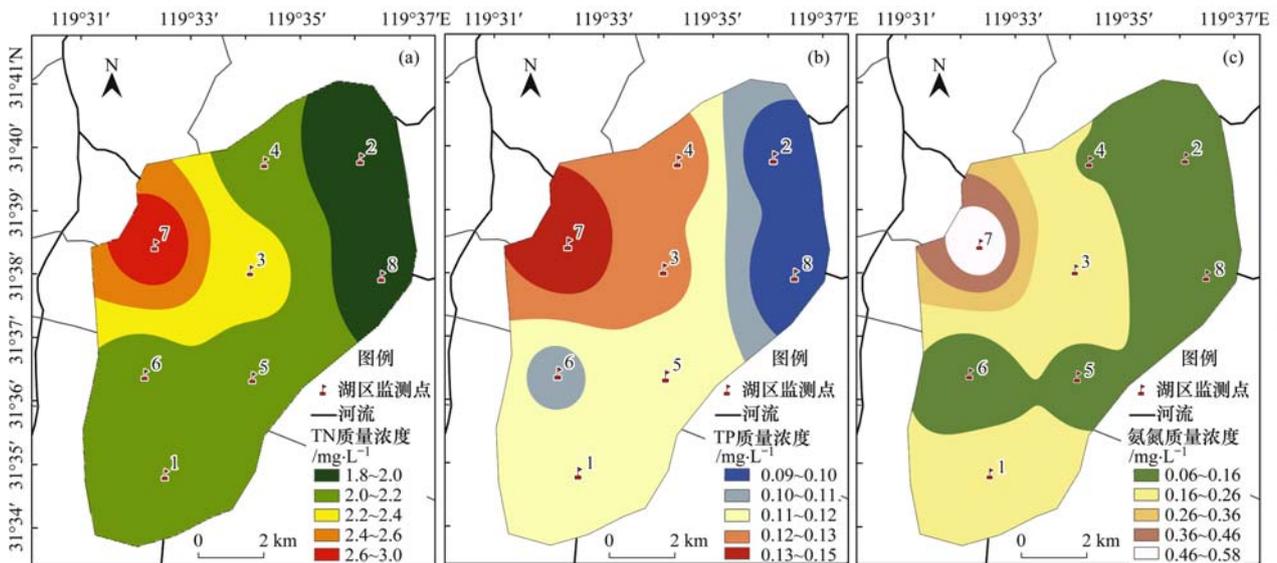


图6 2017 年长荡湖 TN、TP 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of total nitrogen, total phosphorus, and ammonia nitrogen concentrations in CDL in 2017

### 3 讨论

#### 3.1 河湖系统水质参数的相关性分析

与同期长荡湖湖体水质相比, 流域入湖河道 TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 质量浓度和高锰酸盐指数均值分别是湖体的 1.93、2.14、6.52、2.09 和 1.32 倍, 出湖河道 TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 质量浓度和高锰酸盐指数均值分别是湖体的 1.10、0.76、1.58、1.31 和 1.30 倍, 表明长荡湖流域入湖河流氮、磷污染严重, 而长荡湖具有强大的自净功能, 是太湖上游重要的水质净化库. 对长荡湖流域河湖系统水质参数进行相关性分析(表 2), 发现湖体 Chla 质量浓度与河流氮质量浓度之间呈较弱的正相关关系, 与河流 DO、pH 呈负相关关系, 表明湖体生物量受到入湖河流氮输入的影响, 而且入湖河流的氧气充足与弱碱性可能有助于降低长荡湖的 Chla 水平.

河流 pH(7.4~8.5) 与湖泊 TP 质量浓度之间呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ), 表明入湖河流的 pH 会显著影响湖体的磷含量, 并进而影响湖体营养状态.

河流  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  与湖泊  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度之间存在正相关关系, 表明河流输送是湖泊中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的重要来源之一. 湖体 TLI 指数与河流流量之间、湖体  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度与河流流量之间均在  $P < 0.05$  水平呈显著正相关关系(表 2), 表明河流的流量增加会促进湖泊氮、磷含量增长, 进而加剧湖泊富营养化. 但是湖体 TLI 指数与河流其他水质参数之间基本不存在显著的相关关系, 表明流域河流与长荡湖分属于不同的水生生态系统, 其水质和营养状态的发生发展有各自不同的特征与影响机制.

#### 3.2 流域土地利用变化与河流水质的相关性分析

长荡湖流域 2000、2005、2010 和 2015 年土地利用遥感解译结果如图 7 所示. 从中可知, 16 a 来

表 2 2016~2017 年长荡湖流域河流与湖泊水质参数相关性矩阵<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation matrix of river and lake water quality parameters in CDL Catchment during 2016-2017

相关系数	湖泊水质参数						
	TN	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TP	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	Chla	TLI
TN	-0.043	0.364	-0.076	-0.081	-0.543	0.370	-0.201
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.406	0.552	-0.011	-0.456	-0.563	0.487	0.076
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.220	0.228	0.072	0.026	-0.338	0.157	-0.355
TP	0.663 *	0.138	0.558	-0.208	0.018	-0.511	0.236
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	0.072	-0.289	0.356	-0.209	-0.199	-0.197	-0.018
高锰酸盐指数	-0.734 *	-0.131	-0.324	0.271	-0.114	0.365	-0.360
DO	-0.061	0.189	-0.443	0.147	-0.221	-0.296	-0.243
pH	-0.332	-0.482	-0.265	0.683 *	0.386	-0.412	-0.190
Chla	-0.467	-0.443	-0.182	-0.249	-0.442	-0.149	-0.381
水温	-0.418	-0.585	-0.175	-0.131	-0.014	0.023	0.023
流量	0.436	-0.217	0.319	0.294	0.688 *	-0.226	0.688 *

1) \* 表示在  $P < 0.05$  水平显著相关

流域内土地利用变化主要表现为耕地面积显著减少和建设用地急剧增加的特点,在 2000~2010 年间变化最显著,2010~2015 年变化不大.耕地面积从 2000 年的 1 594.8 km<sup>2</sup> 减少到 2015 年的 1 356.7 km<sup>2</sup>,减少了 14.9%.城市建设用地面积从 205.4 km<sup>2</sup> 增加到 347.8 km<sup>2</sup>,增长了 69.3%.林地面积从 110.8 km<sup>2</sup> 增加到 133.4 km<sup>2</sup>,水体面积从 308.4 km<sup>2</sup> 增加至 370.8 km<sup>2</sup>,湿地面积从 5.5 km<sup>2</sup> 增加至 8.4 km<sup>2</sup>,分别增长了 20.5%、20.2% 和 51.4%.2000 年耕地占流域面积的 71.6%,建设用地、水体和林地面积分别占 9.2%、13.8% 和 5%.耕地面积所占比例到 2010 年降低到 59.8%,到 2015 年有所回升,提高到 60.9%,而建设用地、水体和林地面积显著增加,在 2015 年所占比例分别提高到 15.6%、16.6% 和 6%.长荡湖流域 2000~2015 年间城镇建设用地的扩张和耕地面积的萎缩,与我国东部区域及太湖流域同期土地利用变化的空间格局基本一致<sup>[23,24]</sup>.

基于流域 2010 年以后的土地利用变化不大,对金坛市与溧阳市所辖乡镇不同类型土地利用的面积(2015 年)与河流水质参数(2017 年)的相关性进行了分析(表 3),发现流域土地利用面积与河流水质参数之间存在显著正相关关系.其中,耕地面积与河

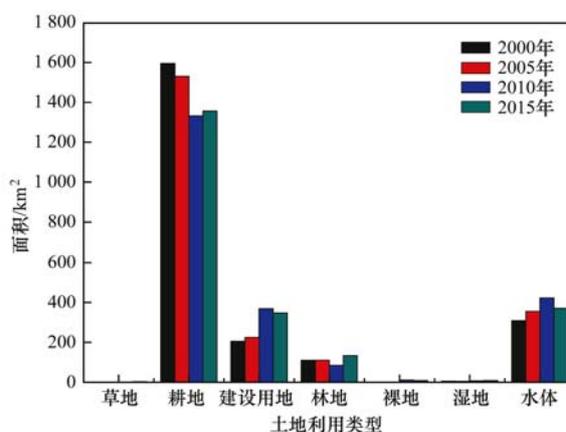


图 7 长荡湖流域不同土地利用类型面积的变化(2000~2015 年)

Fig. 7 Changes in different land use areas in CDL Catchment from 2000 to 2015

流 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 质量浓度之间呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ),说明农业面源污染物流失是河流 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 污染物的重要来源.建设用地面积与河流 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 质量浓度之间呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ),说明城镇污水排放是河流 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 的重要来源.可见长荡湖流域河流氮、磷污染同时受到农业面源污染物流失与城镇污水排放的影响.

表 3 长荡湖流域河流营养盐质量浓度与土地利用面积的相关关系<sup>1)</sup>

Table 3 Relationship between river nutrient concentrations and land use area

水质参数	耕地面积	建设用地面积	林地面积	水体面积
TN	0.649 **	0.681 **	0.169	0.155
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.788 **	0.542	0.152	0.128
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.534	0.717 **	0.121	0.308
TP	0.368	0.611 *	0.523	-0.04
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	0.261	0.328	-0.261	0.33

1) \* 表示在  $P < 0.05$  水平显著相关, \*\* 表示在  $P < 0.01$  水平极显著相关

### 3.3 大气沉降对河湖水质的影响

随着人类活性氮排放量的逐年增加,大气氮沉

降对地表水环境的污染效应日益受到国内外广泛关注<sup>[25~29]</sup>.据估算,2011~2015 年我国大气氮沉降量

约为  $(20.4 \pm 2.6) \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 其中干、湿沉降量各占一半, 主要来源于化石能源消耗、农业氮肥施用、畜禽养殖排放等<sup>[25]</sup>. 长荡湖流域位于我国大气氮沉降量最高的长三角地带, 该区域大气无机氮总沉降量达  $45 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ <sup>[29]</sup>, 照此推算, 长荡湖湖区无机氮总沉降量约为  $3.84 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 占丹金溧漕河 TN 年通量的 11.23%, 是通济河和薛埠河 TN 年通量总和的 1.37 倍.

长荡湖流域属于亚热带季风气候, 四季分明, 降雨量年内分配不均, 5~9 月降雨量占全年的 60%<sup>[14]</sup>. 2016 年属于气候异常年份, 全年降水量高达 2263 mm, 大约为近 30 年 (1978~2017 年) 降水量年平均值的 2 倍<sup>[14]</sup>; 其中, 2016 年的 4、6、7、9 和 10 月降雨量都在 279 mm 以上 (图 5). 强降雨不仅使得河流流量暴涨, 还导致强烈的土壤侵蚀冲刷, 引起面源污染物流失汇入地表河湖系统, 从而增加水体营养盐的输入量. 长荡湖流域河流 TP 质量浓度在 2016 年 10 月为全年最高 [图 2(d)], 与 2016 年 10 月的强降雨相对应 (图 5). 2016 年 8 月降雨量不高, 但是受 4~7 月连续降雨的累积影响, 长荡湖 TLI 指数自 8 月开始升高, 随着 9 月份的强降雨达到峰值, 之后随着降雨量的减少而降低 (图 5).

2017 年长荡湖流域年降水量只有 1210.3 mm, 比 2016 年减少了接近 50%, 降水量的减少引起直接输入的水量和营养盐减少, 以及通过径流流失进入水体的营养盐也相应减少. 因此, 与 2016 年相比, 2017 年河流  $\text{NH}_4^+$ -N、TP、Chla 和湖区 TN 质量浓度均明显下降 [图 2(c)~2(e) 和图 4(a)]. 2017 年上半年, 长荡湖为中度富营养化状态, 下半年湖泊营养状态由中度转为轻度富营养化状态, 这可能与常州市在 2016 年底至 2017 年实施了“263”专项整治行动, 加强大气与水环境综合整治工作取得实效有密切关系.

#### 4 结论

(1) 2016~2017 年, 长荡湖流域河湖系统氮、磷污染严重, 季节差异明显. 河流 TN 与 TP 质量浓度均未达到地表河流水质 V 类标准, 处于中~重度富营养化状态; 湖区 TN 与 TP 质量浓度均未达到地表湖库水质 III 类标准, 处于轻~中度富营养化状态. 丹金溧漕河干流氮、磷年通量是通济河、薛埠河年通量总和的 10~12 倍, 是流域主要的污染物输送通道.

(2) 流域河流与湖泊水质的时空分布有各自不同的特征与影响机制. 流域耕地、建设用地面积与河流水质参数之间存在显著正相关关系, 说明河流氮、磷污染同时受到农业面源污染物流失与城镇污水排

放的影响. 长荡湖的污染物来源多样, 其 TN、TP 和  $\text{NH}_4^+$ -N 质量浓度表现为从西部向东、南部降低的趋势, 湖区具有强大的自净功能.

(3) 与 2016 年相比, 2017 年河流  $\text{NH}_4^+$ -N、TP、Chla 和湖区 TN 质量浓度均有明显下降, 但是湖区富营养化状态由上半年的中度转为下半年的轻度, 这可能与常州市实施了“263”专项整治行动取得实效有关.

致谢: 感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所胡维平研究员进行野外工作指导, 博士研究生张英豪、顾炉华和李鹏程进行野外采样、数据分析与整理工作.

#### 参考文献:

- [1] Paerl H W, Hall N S, Hounshell A G, *et al.* Recent increase in catastrophic tropical cyclone flooding in coastal North Carolina, USA: long-term observations suggest a regime shift [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**: 10620.
- [2] Beaulieu J J, DelSontro T, Downing J A. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century [J]. *Nature Communications*, 2019, **10**: 1375.
- [3] Turner R E, Nancy N R. Coastal eutrophication near the Mississippi river delta [J]. *Nature*, 1994, **368** (6472): 619-621.
- [4] Zhang Y, Cheng L, Li K Y, *et al.* Nutrient enrichment homogenizes taxonomic and functional diversity of benthic macroinvertebrate assemblages in shallow lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2019, **64** (3): 1047-1058.
- [5] Zhang Y L, Liu X H, Qin B Q, *et al.* Aquatic vegetation in response to increased eutrophication and degraded light climate in Eastern Lake Taihu: Implications for lake ecological restoration [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 23867.
- [6] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探 [J]. *湖泊科学*, 2002, **14** (3): 193-202.  
Qin B Q. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, **14** (3): 193-202.
- [7] 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 等. 太湖 2007-2016 十年水环境演变及“以渔改水”策略探讨 [J]. *湖泊科学*, 2019, **31** (2): 305-318.  
Gu X H, Zeng Q F, Mao Z G, *et al.* Water environment change over the period 2007-2016 and the strategy of fishery improve the water quality of Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31** (2): 305-318.
- [8] 朱广伟, 秦伯强, 张运林, 等. 2005-2017 年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素 [J]. *湖泊科学*, 2018, **30** (2): 279-295.  
Zhu G W, Qin B Q, Zhang Y L, *et al.* Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005-2017 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30** (2): 279-295.
- [9] 杜冰雪, 徐力刚, 张杰, 等. 鄱阳湖富营养化时空变化特征及其与水位的关系 [J]. *环境科学研究*, 2019, **32** (5): 795-801.  
Du B X, Xu L G, Zhang J, *et al.* The spatial-temporal characteristics of eutrophication in Poyang Lake and its relationship with the water level [J]. *Research of Environmental*

- Sciences, 2019, **32**(5): 795-801.
- [10] 张运林, 秦伯强. 太湖水环境的演变研究[J]. 海洋湖沼通报, 2001, (2): 8-15.  
Zhang Y L, Qin B Q. Study on the evolvement of water environment in Taihu Lake[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2001, (2): 8-15.
- [11] 余员龙, 任丽萍, 刘其根, 等. 2007-2008 年千岛湖营养盐时空分布及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 684-692.  
Yu Y L, Ren L P, Liu Q G, *et al.* Temporal and spatial distribution of nutrients and the influence factors of Lake Qiandao during 2007-2008[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(5): 684-692.
- [12] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 954-960.  
Yuan H Z, Shen J, Liu E F, *et al.* Space distribution characteristics and diversity analysis of phosphorus from overlying water and surface sediments in Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2010, **31**(4): 954-960.
- [13] 朱林, 汪院生, 邓建才, 等. 长荡湖表层沉积物中营养盐空间分布与污染特征[J]. 水资源保护, 2015, **31**(6): 135-140.  
Zhu L, Wang Y S, Deng J C, *et al.* Spatial distribution and contamination characteristics of nutrients in surface sediment of Changdang Lake [J]. Water Resources Protection, 2015, **31**(6): 135-140.
- [14] 狄百花, 钱半吨, 杨明, 等. 1978-2017 年溧阳市降水特征分析[J]. 河南农业, 2018, (32): 27-29, 35.
- [15] 刘倩, 刘永杰, 余辉, 等. 太湖流域土地利用与河流水质污染状况的相关性研究[J]. 水污染防治, 2016, **34**(8): 11-17.  
Liu Q, Liu Y J, Yu H, *et al.* The correlation study of land use and water quality pollution condition in Taihu Lake watershed [J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(8): 11-17.
- [16] 王菲菲, 李小平, 陈小华, 等. 长荡湖近 15 年营养状态评价及限制因子研究[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(S1): 353-357.  
Wang F F, Li X P, Chen X H, *et al.* A study on the nutrition status evaluation and algal limiting factor in Lake Changdang the Last 15-years [J]. Environmental Science and Technology, 2012, **35**(S1): 353-357.
- [17] 赵苇航, 朱彧, 朱亮, 等. 长荡湖水环境变化趋势及其主要影响因子[J]. 水资源保护, 2014, **30**(6): 48-53.  
Zhao W H, Zhu Y, Zhu L, *et al.* Change trend of water environment in Changdang Lake and main impact factors [J]. Water Resources Protection, 2014, **30**(6): 48-53.
- [18] 彭俊翔, 伍永年, 胡维平, 等. 长荡湖近 61a 降水量演化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(2): 292-299.  
Peng J X, Wu Y N, Hu W P, *et al.* The evolution characteristics of precipitation in the past 61 years at the lake Changdanghu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, **25**(2): 292-299.
- [19] Bricker S B, Ferreira J G, Simas T. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status [J]. Ecological Modelling, 2003, **169**(1): 39-60.
- [20] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.  
Wang M C, Liu X Q, Zhang J H. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. Environmental Monitoring in China, 2002, **18**(5): 47-49.
- [21] 殷守敬, 吴传庆, 王晨, 等. 综合遥感与地面观测的巢湖水体富营养化评价[J]. 中国环境监测, 2018, **34**(1): 157-164.  
Yin S J, Wu C Q, Wang C, *et al.* Eutrophication assessment of Chaohu Lake using remote sensing and in-situ data [J]. Environmental Monitoring in China, 2018, **34**(1): 157-164.
- [22] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程 [M]. (第二版). 北京: 科学出版社, 2012. 289-291.
- [23] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报, 2018, **73**(5): 789-802.  
Liu J Y, Ning J, Kuang W H, *et al.* Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, **73**(5): 789-802.
- [24] 徐昔保, 杨桂山, 李恒鹏. 太湖流域土地利用变化对净初级生产力的影响[J]. 资源科学, 2011, **33**(10): 1940-1947.  
Xu X B, Yang G S, Li H P. Impacts of land use change on net primary productivity in the Taihu Basin, China [J]. Resources Science, 2011, **33**(10): 1940-1947.
- [25] Yu G R, Jia Y L, He N P, *et al.* Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade [J]. Nature Geoscience, 2019, **12**(6): 424-429.
- [26] Li Y, Schichtel B A, Walker J T, *et al.* Increasing importance of deposition of reduced nitrogen in the United States [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, **113**(21): 5874-5879.
- [27] Liu X J, Zhang Y, Han W X, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China [J]. Nature, 2013, **494**(7438): 459-462.
- [28] Galloway J N. Acid deposition: perspectives in time and space [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1995, **85**(1): 15-25.
- [29] Zhao Y H, Zhang L, Chen Y F, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition to China: a model analysis on nitrogen budget and critical load exceedance [J]. Atmospheric Environment, 2017, **153**: 32-40.

## CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020 .....	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> in Chengdu Based on the MARGA .....	YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> in Suqian City .....	MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, <i>et al.</i> (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu .....	LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, <i>et al.</i> (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan .....	LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, <i>et al.</i> (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of PM <sub>2.5</sub> in Winter of Xi'an .....	YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta .....	DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, <i>et al.</i> (3932)
Component Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City .....	CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, <i>et al.</i> (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area .....	WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer .....	YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction .....	QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, <i>et al.</i> (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province .....	ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, <i>et al.</i> (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas .....	ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, <i>et al.</i> (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City .....	HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin .....	ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, <i>et al.</i> (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area .....	CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, <i>et al.</i> (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin .....	LI Xiao, YU Shi, LI Liang, <i>et al.</i> (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River .....	JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017 .....	LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, <i>et al.</i> (4042)
Influence of <i>Potamogeton crispus</i> on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure .....	KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, <i>et al.</i> (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir .....	LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, <i>et al.</i> (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyfluoralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks .....	SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water .....	ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir .....	LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, <i>et al.</i> (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources .....	YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, <i>et al.</i> (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion .....	LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, <i>et al.</i> (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer .....	ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City .....	LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (4113)
Adsorption of Sb(V) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism .....	SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, <i>et al.</i> (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation .....	ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, <i>et al.</i> (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater .....	LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, <i>et al.</i> (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process .....	MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature .....	LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiong'an New District .....	GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, <i>et al.</i> (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example .....	WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, <i>et al.</i> (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China .....	ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, <i>et al.</i> (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province .....	ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, <i>et al.</i> (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress .....	HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Field Conditions .....	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (4226)
Effects of <i>Eucalyptus</i> Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a <i>Eucalyptus</i> plantation in Northern Guangxi .....	DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil .....	YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources .....	WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields .....	LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River .....	ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau .....	LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland .....	CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, <i>et al.</i> (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content .....	SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, <i>et al.</i> (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou .....	WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, <i>et al.</i> (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism .....	LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, <i>et al.</i> (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil .....	LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4333)