

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000 ~ 2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升铝压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究

庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧

(中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地, 北京 100012)

摘要: 采用空间分析和统计分析方法, 从综合农业用地和各类农业用地面积百分比两个层次研究洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系。结果表明, 研究区 10 个小流域入湖河流水质空间差异性显著, 流域西部入湖河流总磷污染严重, 北部和南部入湖河流 (D3 除外) 主要污染指标为有机物和氮; 流域农业用地面积百分比与入湖河流水质的关系密切, 综合农业用地面积百分比与雨季入湖河流高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 呈负相关, 相关系数分别为 -0.859 、 -0.565 、 -0.693 、 -0.181 , 与非雨季高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈负相关, 相关系数为 -0.384 、 -0.328 , 与非雨季 TN 和 TP 呈正相关, 相关系数为 0.221 、 0.146 ; 各类农业用地面积百分比对入湖河流水质表征作用较强, 耕地与 TN、TP 在雨季和非雨季均呈正相关, 与两者的相关系数雨季为 0.252 、 0.581 , 非雨季为 0.149 、 0.511 , 耕地与高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在雨季和非雨季分别呈正相关和负相关, 与两者的相关系数雨季为 0.388 、 0.053 , 非雨季为 -0.137 、 -0.147 , 林地与耕地的表现则正好相反, 与 TN、TP、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的相关系数雨季为 -0.526 、 -0.275 、 -0.469 、 -0.155 , 非雨季为 -0.012 、 -0.100 、 0.282 、 0.151 , 鱼塘对 TN 和 TP 的指示作用不显著, 草地和园地非雨季与耕地的表现类似, 非雨季与耕地的表现相反。可见, 洱海流域农业面源治理时应重点加强北部和南部在雨季时耕地、草地和园地的管控。

关键词: 洱海流域; 农业用地; 入湖河流; 水质; 冗余分析

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4005-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.009

Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin

PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, XUE Li-qiang, YE Bi-bi

(Research Center of Lake Eco-Environments, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: We studied the relationship between agricultural land and water quality of inflow river in Erhai Lake Basin, by means of spatial and statistical analysis, from the perspective of comprehensive agricultural land and the area percentage of different types of agricultural land. The obtained results indicated that inflow water quality showed a significant spatial difference, the inflow TP pollution in the western inflow rivers of Erhai Basin was serious. The major pollution indicators in the northern and southern inflow rivers (except for D3) were organic matter and nitrogen. The area percentage of agricultural land had a significantly indicative effect on the water quality of inflow river. The area percentage of comprehensive agricultural land negatively correlated with permanganate index, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN and TP contents in wet season, the correlation coefficients were -0.859 , -0.565 , -0.693 , -0.181 . It negatively correlated with permanganate index and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content in dry season, the correlation coefficients were -0.384 , -0.328 . It had positive relationships with and TN, TP content in dry season, the correlation coefficients were 0.221 and 0.146 . The area percentage of different types of agricultural land had an obviously indicative effect on the inflow water quality. Farmland positively correlated with TN and TP contents both in wet and dry seasons. The correlation coefficients between farmland and TN, TP were 0.252 , 0.581 in rainy season and were 0.149 , 0.511 in dry season. It had positive and negative relationships with permanganate index, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content in wet season and dry season, respectively. The correlation coefficients between farmland and permanganate index, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ were 0.388 , 0.053 in rainy season and were -0.137 , -0.147 in dry season. Forest land exhibited an opposite performance to that of farmland. The correlation coefficients between forest land and TN, TP, permanganate index, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ were -0.526 , -0.275 , -0.469 , -0.155 in rainy season and were -0.012 , -0.100 , 0.282 , 0.151 in dry season. Fishpond had a weakly indicative effect on TN and TP contents. Meadowland and orchard had a similar performance with that of farmland in wet season, but were opposite to that of farmland in dry season. Therefore, management for farmland, meadowland and orchard in the north and south during wet season should be emphasized during the agricultural nonpoint source control in Erhai Lake Basin.

Key words: Erhai Lake Basin; agricultural land; inflow river; water quality; redundancy analysis

土地利用方式对河流生态健康有着重大影响^[1~3], 土地利用尤其是农业用地方式的不合理, 加之农田管理模式的不恰当, 会导致土壤侵蚀, 过量氮、磷径流冲刷形成非点源污染, 威胁河流水质^[4,5]。Yu 等^[6]、Tong 等^[7]的研究表明土地利用变

化引起的非点源污染是导致河流水质下降的重要原

收稿日期: 2015-04-15; 修订日期: 2015-06-17

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07105-002)

作者简介: 庞燕 (1970 ~), 女, 副研究员, 主要研究方向为湖泊水污染控制及生态恢复, E-mail: 190068749@qq.com

因,剖析土地利用与河流水质的内在联系是非点源污染研究的关键内容之一。

农业面源作为非点源的重要组分,是导致河流、湖泊等水体水质恶化的重要原因^[8,9],其发生具有随机性、排放途径及排放污染物具有不确定性、形成机制复杂,是非点源污染管控的难点^[10,11]。目前关于农业面源与地表水环境关系^[12,13]的研究表明,农业面源对地表水质的影响作用显著、范围广,主要表现在:地表水质不仅受农田中化肥、农药使用量、农业耕作方式、地形条件等因子影响,还受到各类景观空间分布格局影响。这些研究的尺度涉及流域^[14]、子流域^[15]、缓冲区^[16]等多层次,研究手段多将空间分析方法如地理信息系统技术(GIS)^[17,18]、遥感技术(RS)^[19,20]等,同数理分析方法如输出系数法^[16]、模型估算法^[21,22]等结合,量化研究两者的关系。

洱海是云南省第二大淡水湖泊,农业是洱海流域的基础产业,种植业和畜禽养殖业则是农业经济的主导产业。近年随着流域经济发展,土地利用开发强度加剧,流域非点源污染尤其是农业面源污染对河流水质的威胁日趋加重。目前关于洱海流域农业面源对水环境影响的研究^[15,23~25]大多从农业面源污染产生、迁移、转化机制,污染负荷估算,污染过程模拟等方面进行水环境效应分析,很少考虑土地利用方式的不合理所导致的农业面源污染恶化问题。针对此问题,本研究采用空间分析和统计分析方法,从综合农业用地和各类农业用地面积百分比入手,揭示洱海流域农业用地方式与入湖河流水质的内在联系,以期为流域农业面源治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洱海流域(E99°32'~100°27'、N25°25'~26°16')位于云南省大理白族自治州,属澜沧江-湄公河水系,流域面积2 565 km²,湖泊面积251 km²,入湖河溪大小共计117条(图1)。

流域气候属典型的高原大陆性气候,干湿季分明,5~10月为雨季,11月~次年4月为非雨季,多年年均温度和降雨量分别为15.1℃和1 048 mm。2012年末流域农村人口548 471人,占总人口数的65.8%,居民主要经济来源为种植业和畜牧业。种植业主要包括粮食作物和经济作物,有水稻、小麦、玉米、蔬菜、烤烟等;畜牧业品种有大牲畜(牛马驴骡)、生猪、羊等。近年,流域经济作物种植规模明显增加,畜

牧业生产规模不断扩大,推动着农业经济快速发展的同时,给流域水环境也带来极大压力和影响^[26]。

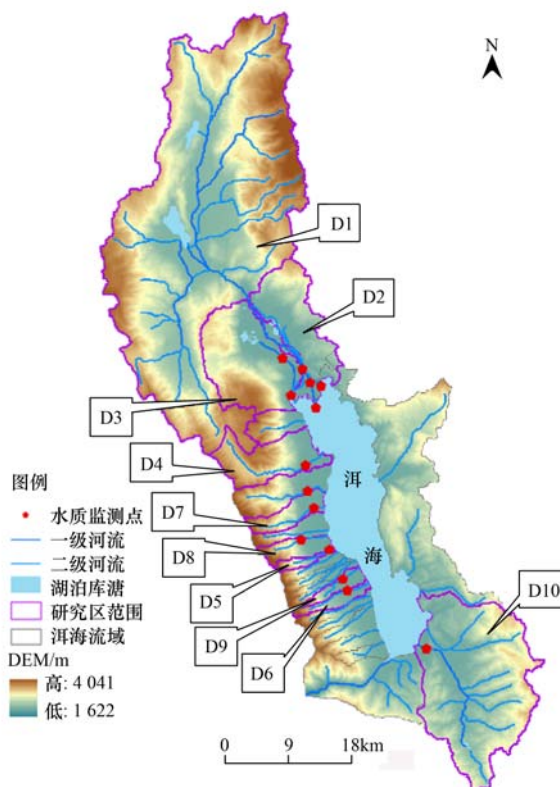


图1 研究区范围

Fig. 1 Scope of the study area

1.2 水质数据及分析

水质数据选用2013年洱海流域入湖河流雨季和非雨季的水质数据,雨季数据为5~10月的平均值,非雨季的数据为1~4月和11~12月的平均值,其中,D7~D9流域水质数据为实测值,其它各流域水质数据由大理州环境监测站提供。水质数据监测频率均为每月1次,选取以下6个代表性水质指标:pH、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数、总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)和总磷(TP)。

实测数据中pH值通过便携式pH计测定(pH56型,Martini instruments),DO值通过便携溶氧仪测定(YSI DO200),其它指标值通过实验室监测得到,监测方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版)。

1.3 空间分析

基础数据源为2012年资源一号02c卫星拍摄的2.36 m高精度卫片及中国科学院地理信息中心的30 m分辨率DEM,根据2012年全国土地分类(试行)标准,基于归一化植被指数(NDVI)、归一化建筑指数(NDBI)和归一化水体指数(MNDWI)这3

个归一化差异指数,采用面向对象分类方法^[27,28]提取流域农业用地(图2),包括耕地、园地、林地、牧草地、鱼塘等;在 Arcgis 10.1(ESRI)平台上基于流域 DEM 进行小流域划分,选取了流域内 10 条主要入湖河流及其小流域为研究对象,以 D(编号)表示。其中 D1~D3 分别为北部三条入湖河流弥苴河、永安江、罗时江所在流域,D4~D9 为西部苍山十八溪中的六条入湖河流所在流域,D10 为南部入湖河流波罗江所在流域。

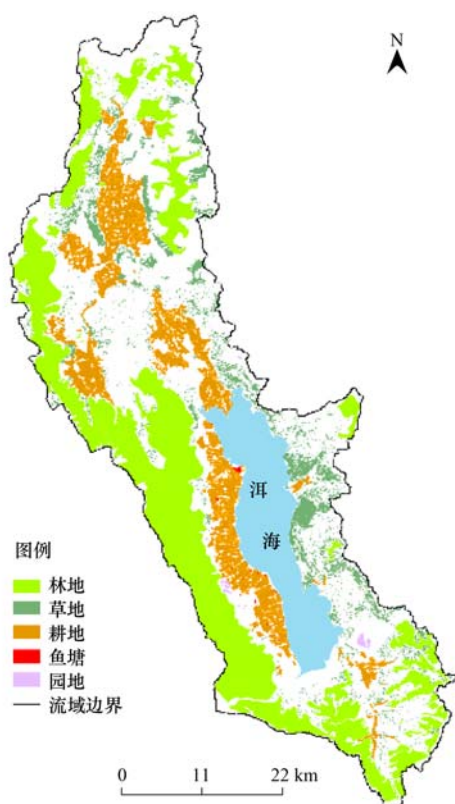
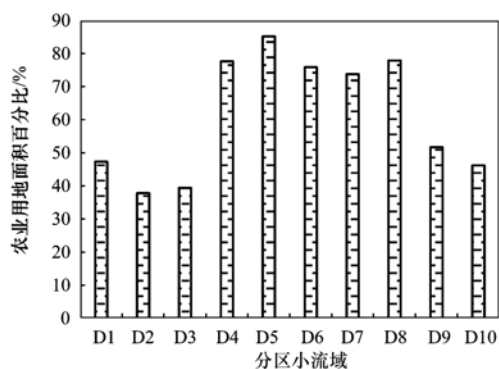


图2 洱海流域农业用地

Fig. 2 Land use of Erhai Lake Basin



1.4 统计分析

在进行分析之前,利用 SPSS 19 软件^[29]描述统计对数据进行缺失值查找、误差值排除及标准化去量纲,并采用单样本 K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验法检验所有数据的正态性,对非正态分布数据通过个案排秩进行正态性转换。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的条件下,采用单因素方差分析验后多重比较法分析 10 个小流域雨季和非雨季入湖河流水质特征。基于 SPSS 19,用因子分析法分析 10 个小流域雨季和非雨季入湖河流水质的空间特征及主要污染因子,分析方法采用 KMO 和球形 Bartlett 检验法。

利用 Canoco 4.5 排序软件^[30]分析农业用地与入湖河流水质的关系。首先对研究区雨季和非雨季 10 条入湖河流水质数据进行趋势对应 DCA 分析,发现两者梯度长度最大值分别为 0.692 和 0.299,均小于 1,即选用线性模型为排序模型,并选用目前线性模型最常用的冗余分析方法 RDA^[5] 进行两者关系研究。RDA 排序图中两者相关性正负取决于箭头的同向或异向,相关性大小由两者箭头投影的长短决定。

2 结果与分析

2.1 各小流域农业用地利用方式

研究区内 10 个小流域农业用地方式如图 2 和图 3 所示。研究区内农业用地在各小流域的面积占比为 37.84%~85.22%,空间差异明显。农业综合用地面积占比大的流域主要集中在西部 D4~D9 这 6 个小流域,且农业用地面积在 6 个小流域的占比均超过 50%。

各流域农业用地构成,以林地为主,占农业用地比例为 40.23%~80.84%(D2 除外),主要分布于山区;耕地次之,占农业用地比例为 11.87%~60.38%,主要分布于坡度较缓的平坝区;草地主要

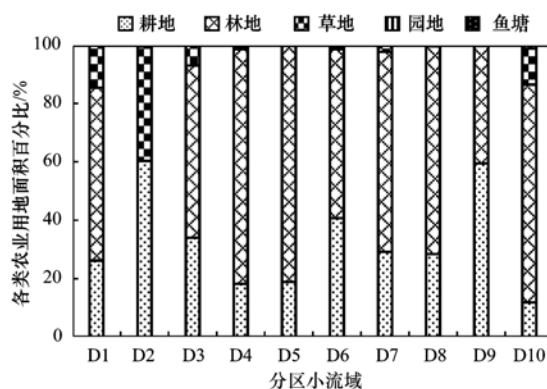


图3 小流域农业用地利用方式

Fig. 3 Farm land use patterns of sub-watersheds

分布于平坝区,面积居第三,其它地类占比较少.就各小流域而言,洱海西部流域(D4~D9)农业用地构成相对简单,主要为林地和耕地,且林地面积占比超过耕地;洱海北部和南部流域农业用地构成相对西部流域复杂,其主要农业用地包括林地、耕地和草地,除D3流域外,北部和南部其它各流域草地面积占比平均为22%.

2.2 各小流域水质特点

2.2.1 各小流域水质时空特征

研究区内10个主要小流域雨季和非雨季入湖河流水质如图4所示,其中D4和D5流域入湖河流为季节性河流,非雨季断流.经单因素方差分析发现,在5%的显著性水平下,除pH外,10个小流域其它各水质指标呈现明显的时空差异.主要表现为:pH和DO最大值出现在D6流域, NH_4^+ -N和TP最大值以及pH最小值出现在D9流域,高锰酸盐指数最大值和DO最小值出现在D3流域, NH_4^+ -N和TP最小值出现在D8流域.雨季,高锰酸盐指数、

NH_4^+ -N、TP出现最大值,pH、DO、高锰酸盐指数、TN出现最小值;非雨季,pH、DO、TN出现最大值, NH_4^+ -N、TP出现最小值.

2.2.2 各小流域水质的主要污染因子

采用因子分析法分析洱海流域入湖河流的水质主要污染因子,结果显示:在 $df=15$, $P<0.001$ 时,KMO和球形Bartlett检验法的结果为0.63和121.24;主成分分析法提取了特征值大于1的前两个主要因子,两因子方差累计贡献为58.24%;方差最大正交旋转法旋转得到因子荷载矩阵(表1).

研究区水质在10个小流域旋转因子如图5所示,从中可知D3~D9小流域水质状况类似,在第一个因子上的荷载较高,D1、D2和D10小流域水质状况类似,在第二个因子上的荷载较高,也即第一个因子能更好地解释洱海流域西部区域的水质状况,6个水质指标中总磷污染相对严重,第二个因子能更好地解释洱海流域北部和南部区域(除D3)的水质状况,有机物及氮污染突出.

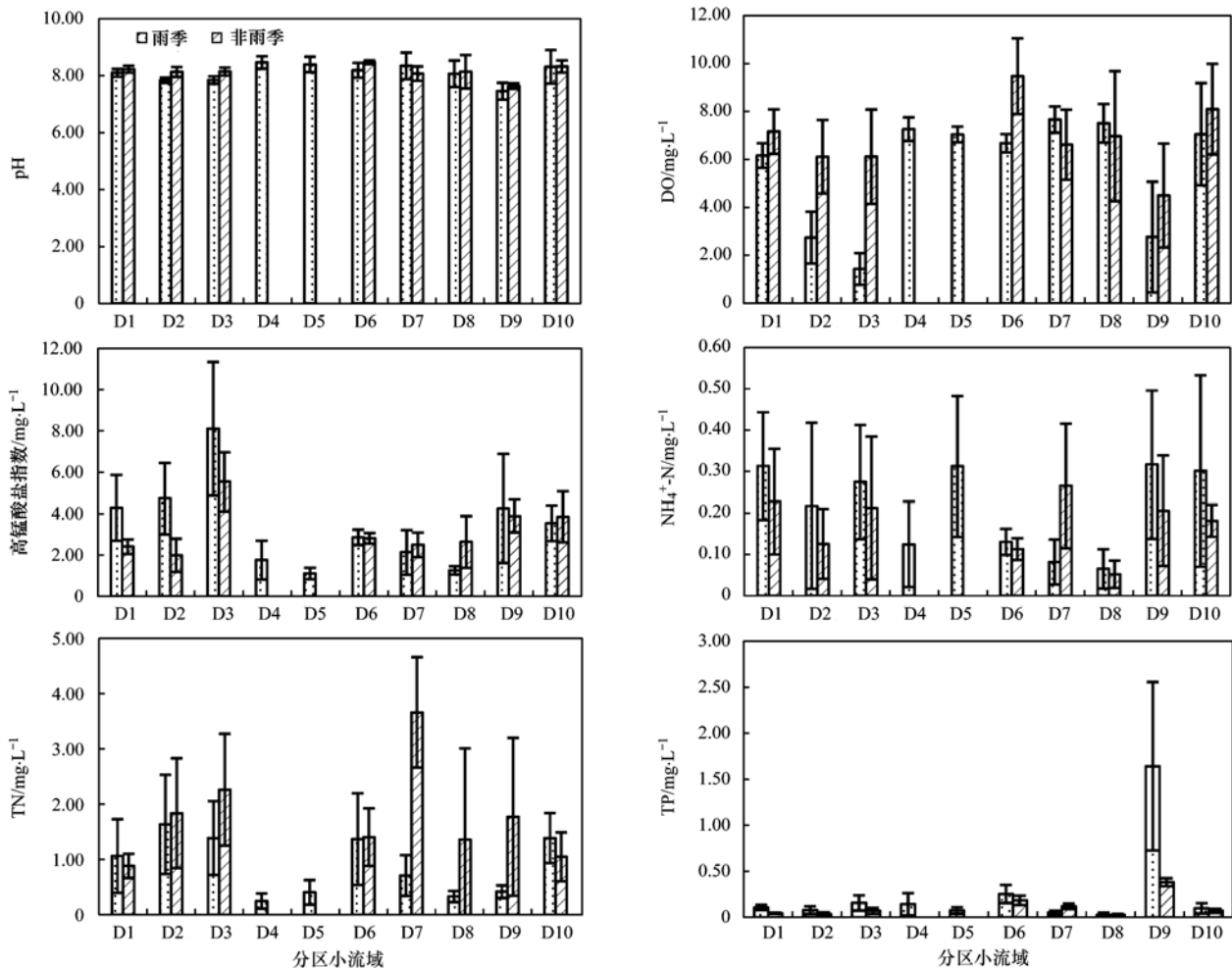


图4 小流域入湖河流水质

Fig. 4 Water quality in inflow rivers of sub-watersheds

表 1 洱海流域水质因子荷载矩阵¹⁾

Table 1 Rotated component matrix for all water quality data in the Erhai Lake Basin

变量	因子 1	因子 2
pH	0.789	-0.154
DO	0.741	-0.396
高锰酸盐指数	-0.24	0.775
NH ₄ ⁺ -N	-0.187	0.591
TN	0.251	0.706
TP	-0.718	-0.151
特征值	2.184	1.31
方差/%	36.41	21.83
累积/%	58.24	58.24

1) 黑体字代表因子荷载 > 0.500

对选取的入湖河流 6 个水质指标分析发现,洱海流域北部和南部入湖河流水质受农业面源污染影响较西部区域大,其有机物和氮污染严重,流域的绝大多数农田和草地分布于此区,范围广、面积大,入湖河流流程长,受干扰性大. 洱海流域西部区域农业用地中林地占绝对优势,且为入湖河流的发源地,入湖河流流程短促,受农业用地方式的影响较小,水质相对较好.

2.3 农业用地面积百分比与入湖河流水质的关系

2.3.1 综合农业用地面积百分比与入湖河流水质相关性

研究区综合农业用地面积百分比与入湖河流雨季和非雨季水质相关性如图 6,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时,农业用地面积百分比与雨季 pH 和 DO 呈正相关,与 DO 呈显著正相关,与高锰酸盐指数、NH₄⁺-N、TN、TP 呈负相关,相关系数分别为 -0.859、-0.565、-0.693、-0.181,与高锰酸盐指数和 TN 在 $\alpha = 0.01$ 和 $\alpha = 0.05$ 时呈显著负相关;在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时,农业用地面积百分

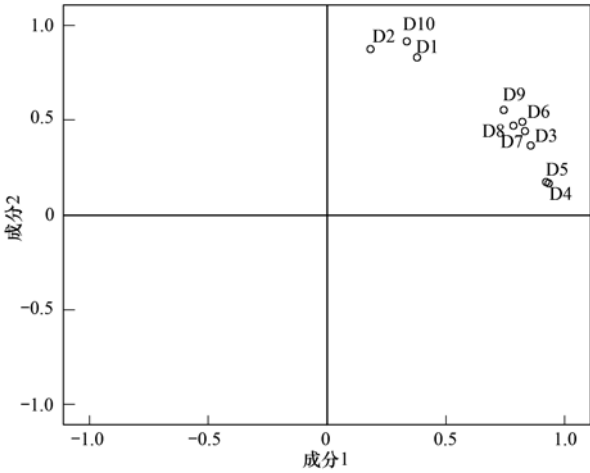


图 5 洱海流域各区水质旋转空间的因子

Fig. 5 Component plot in rotated space for all data in different zones of Erhai Lake Basin

比与非雨季 pH、DO、TN 和 TP 均呈正相关,相关系数为 0.310、0.179、0.221、0.146,与高锰酸盐指数和 NH₄⁺-N 呈负相关,相关系数为 -0.384、-0.328.

可见,综合农业用地并不能很好表征河流水质的变化,尤其是其对雨季高锰酸盐指数、TN 的显著正向效应,与许多研究结论^[2,3,31]不一致,这些研究认为农业用地化肥农药的施用是导致水体富营养、水质恶化的重要原因. 该文根据全国土地利用分类标准提取农业用地,由耕地、林地、草地、园地和鱼塘等构成,对水质的影响效应各异,因此综合分析的结果是各类农业用地作用结果的叠加效应,并不能很好地反映各类农业用地对河流水质的指示作用. 鉴于洱海流域是农业面源污染为主的典型区域,与河流水质关系密切,因此需对农业用地与河流水质的关系进行深入研究.

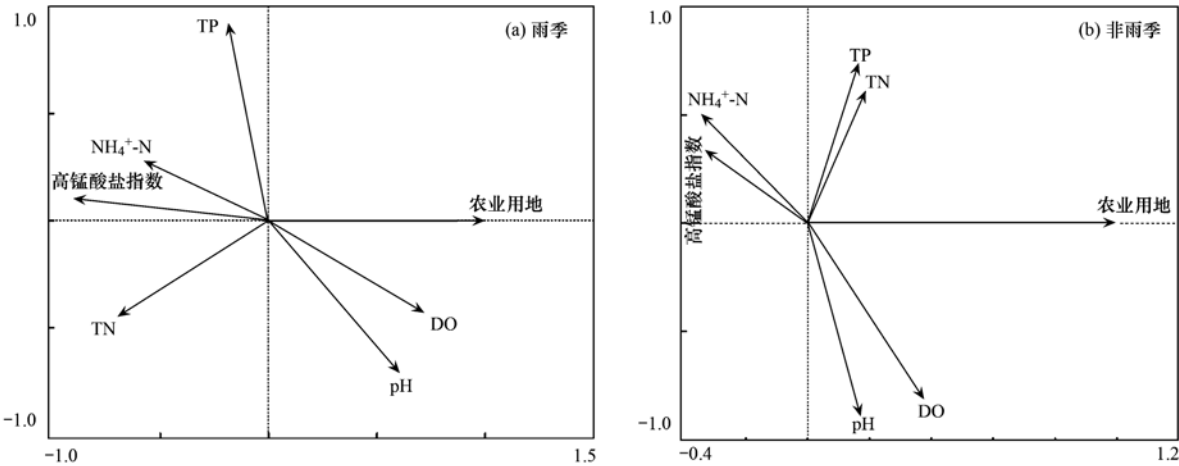


图 6 综合农业用地面积百分比与入湖河流水质的冗余性分析

Fig. 6 RDA analyses of comprehensive farm land percent and inflow rivers water quality

2.3.2 各类农业用地面积百分比与入湖河流水质相关性

为进一步研究洱海流域农业用地与河流水质的关系,从各类农业用地占各小流域总农业用地面积的百分比与入湖河流水质的关系进行分析,结果见图 7。从中可知,耕地与 TN、TP 在雨季和非雨季均呈正相关,与两者的相关系数雨季为 0.252、0.581,非雨季为 0.149、0.511,与高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在雨季和非雨季分别呈正相关和负相关,与两者的相关系数雨季为 0.388、0.053,非雨季为 -0.137、-0.147;林地与耕地的表现相反,林地与 TN、TP、

高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的相关系数雨季为 -0.526、-0.275、-0.469、-0.155,非雨季为 -0.012、-0.100、0.282、0.151;草地和园地 in 雨季与耕地的表现类似,非雨季与耕地的表现相反,主要表现为:雨季,草地和园地与高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 呈正相关,其中草地与 TN 在 $\alpha=0.05$ 的水平显著正相关;非雨季,草地与所有水质指标均呈负相关,园地与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 均呈负相关。鱼塘与高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 在雨季和非雨季均呈微弱负相关,对 TN 和 TP 的指示作用不显著,这可能与其在流域内所占比重大小有关。

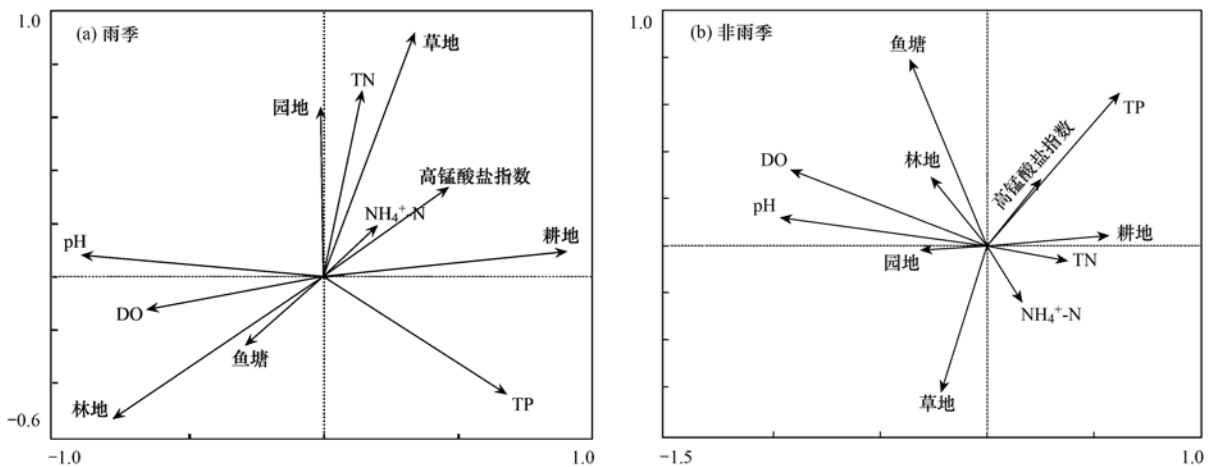


图 7 各类农业用地面积百分比与入湖河流水质的冗余性分析

Fig. 7 RDA analyses of all kinds of farm land percent and inflow rivers water quality

为定量揭示农业用地面积百分比对研究区入湖河流水质影响程度的大小,根据 RDA 分析结果绘制出各农业土地利用类型对水质指标的方差解释率图 8。从中可知,不同农业用地类型对入湖河流水质的影响不同,且存在季节性差异。具体表现为:耕地 > 林地 > 草地 > 园地 > 鱼塘;雨季 > 非雨季。

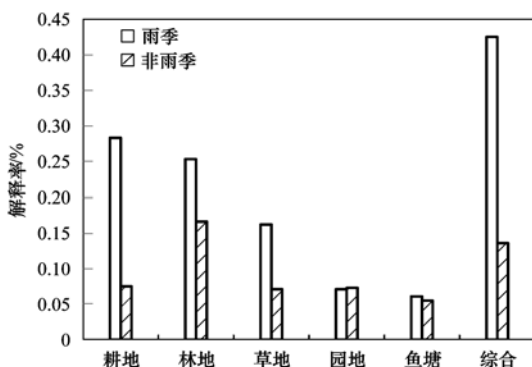


图 8 各农业用地面积百分比对水质参数变异的贡献率

Fig. 8 Contribution rate of agricultural land area proportion to water quality parameters variation

可见,研究区内耕地和林地对河流 TN、TP 效应稳定,不受季节影响,耕地面积扩张对河流水质产生负向效应,林地则有利于水质改善;草地和园地对河流水质的影响随季节性变化大,两者与河流水质的关系由雨季时正相关变成非雨季时微弱负相关;鱼塘对河流水质的指示作用不显著。

3 讨论

上述研究表明,受各类农业用地的叠加影响,各流域水质呈现空间差异性,流域北部和南部区域入湖河流水质受农业用地影响较西部区域大。研究发现流域西部农业用地类型相对简单,林地占绝对优势且主要位于坡度大的山区,同时林地为此区入湖河流的发源地,入湖河流流程短促,水质相对好,主要以总磷污染为主;流域北部和南部农业用地类型多样,流域大部分耕地和草地位于此区的平坝区域,且北部养殖业较多,入湖河流流程长,水质易受影响,河流水质差,主要污染指标为有机物和氮。这与

陈纬栋^[24]、翟玥等^[25]的研究结论一致,他们的研究结果表明洱海流域北部区域是农业面源污染发生和入湖的主要区域,南部次之。可见,流域入湖河流水质与农业用地方式关系密切,治理时应重点关注北部和南部不同农业用地对水质的联合效应,并采取针对性的管控措施。

农业用地与入湖河流水质的关系密切,相对于综合农业用地,各类农业用地面积百分比能更好地表征入湖河流水质变化,且存在季节性差异。耕地和林地与河流水质的关系稳定,表现为耕地与河流 TN 和 TP 在雨季和非雨季均呈正相关,林地与河流 TN 和 TP 雨季和非雨季均呈负相关,这与大多数研究^[2,3,12,31]结论一致,表明耕地氮磷施肥量增多会加重河流水质氮磷污染,而林地是水体潜在污染物的“汇”,具有削减暴雨径流、减少水土流失、吸附污染物等功能,可有效减少地表径流冲刷后带入河流的营养盐,减轻水质污染。草地和园地与河流水质的关系受季节影响较大,雨季时两者对水质均有不利影响,主要是由于畜牧及种植产生的氮、磷污染物随径流进入水体,影响水体水质,而非雨季时这种不利影响则变得不显著。研究区内鱼塘相对少,对 TN 和 TP 的指示作用被占绝对优势的林地掩盖,指示作用不显著。可见,加强流域农业源治理,特别要注意对雨季耕地、园地及草地的合理管控。

洱海流域是典型的农业面源为主导的流域^[23~25],作为农业面源污染研究的重要内容之一,其农业用地对入湖河流水质的影响复杂,不仅应考虑水文季节、农业用地面积等影响因素,还应考虑农业用地自然属性、空间配置及尺度的影响^[5,6,16,31]。

4 结论

(1)研究区各小流域入湖河流水质受各类农业用地的综合影响,空间差异性显著。洱海西部区域(D3~D9)入湖河流主要污染指标为总磷,洱海北部和南部区域(D1、D2 和 D10)主要污染指标为有机物和氮。

(2)流域综合农业用地面积百分比对入湖河流水质的表征不强。雨季,综合农业用地面积百分比与入湖河流 DO、pH 呈正相关,与高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 呈负相关,与高锰酸盐指数和 TN 呈显著负相关;非雨季,综合农业用地面积百分比与入湖河流 DO、pH、TN、TP 呈正相关,与其它水质指标呈负相关。

(3)流域各类农业用地面积百分比能很好地表征入湖河流水质。耕地与 TN、TP 在雨季和非雨季均呈正相关,与高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在雨季和非雨季分别呈正相关和负相关;林地与耕地的表现相反;鱼塘对 TN 和 TP 的指示作用不显著;草地和园地在雨季与耕地的表现类似,非雨季与耕地的表现相反。

参考文献:

- [1] Rhodes A L, Newton R M, Pufall A. Influences of land use on water quality of a diverse New England watershed [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35** (18): 3640-3645.
- [2] Meneses B M, Reis R, Vale M J, *et al.* Land use and land cover changes in Zêzere watershed (Portugal)-Water quality implications[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 439-447.
- [3] Teixeira Z, Teixeira H, Marques J C. Systematic processes of land use/land cover change to identify relevant driving forces: implications on water quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 1320-1335.
- [4] Buck O, Niyogi D K, Townsend C R. Scale-dependence of land use effects on water quality of streams in agricultural catchments [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **130**(2): 287-299.
- [5] Ouyang W, Song K Y, Wang X L, *et al.* Non-point source pollution dynamics under long-term agricultural development and relationship with landscape dynamics[J]. *Ecological Indicators*, 2014, **45**: 579-589.
- [6] Yu D Y, Shi P J, Liu Y P, *et al.* Detecting land use-water quality relationships from the viewpoint of ecological restoration in an urban area[J]. *Ecological Engineering*, 2013, **53**: 205-216.
- [7] Tong S T Y, Chen W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality [J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, **66**(4): 377-393.
- [8] Wang X H. Sustainable development in tibet requires control of agricultural nonpoint pollution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(16): 8944-8945.
- [9] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source Pollution assessment in China [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(5): 1159-1168.
- [10] 朱兆良, Norse D, 孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. 1-12.
- [11] 陈英旭, 梁新强. 氮磷在农田土壤中的迁移转化规律及其对水环境的影响[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 1-14
- [12] Guo W X, Fu Y C, Ruan B Q, *et al.* Agricultural non-point source pollution in the Yongding River Basin [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **36**: 254-261.
- [13] Chen M, Chen J, Sun F. Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China [J]. *Science of The Total Environment*, 2008, **405**(1-3): 140-152.
- [14] Chen D J, Lu J, Shen Y N, *et al.* Spatio-temporal variations of nitrogen in an agricultural watershed in eastern China: Catchment

- export, stream attenuation and discharge [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2989-2995.
- [15] 李文超. 凤羽河流域农业面源污染负荷估算及关键区识别研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014. 14-17.
- [16] Sliva L, Williams D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality [J]. *Water Research*, 2001, **35**(14): 3462-3472.
- [17] Wen Q C, Chen X, Shi Y, *et al.* Analysis on composition and pattern of agricultural nonpoint source pollution in Liaohe River Basin, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, **8**: 26-33.
- [18] León L F, Soulis E D, Kouwen N, *et al.* Nonpoint source pollution: a distributed water quality modeling approach [J]. *Water Research*, 2001, **35**(4): 997-1007.
- [19] Ding X W. The simulation research on agricultural non-point source pollution in Yongding River in Hebei Province [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 1770-1774.
- [20] Yang S T, Dong G T, Zheng D H, *et al.* Coupling Xinanjiang model and SWAT to simulate agricultural non-point source pollution in Songtao watershed of Hainan, China[J]. *Ecological Modelling*, 2011, **222**(20-22): 3701-3717.
- [21] Shen Z Y, Liao Q, Hong Q, *et al.* An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, **84**: 104-111.
- [22] 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 等. 小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2411-2418.
- [23] Shang X, Wang X Z, Zhang D L, *et al.* An improved SWAT-based computational framework for identifying critical source areas for agricultural pollution at the lake basin scale[J]. *Ecological Modelling*, 2012, **226**: 1-10.
- [24] 陈纬栋. 洱海流域农业面源污染负荷模型计算研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011. 58-60.
- [25] 翟玥, 尚晓, 沈剑, 等. SWAT 模型在洱海流域面源污染评价中的应用[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(6): 666-671.
- [26] 大理州统计局. 大理州统计年鉴[M]. 昆明: 云南民族出版社, 2013. 90-97, 417-418.
- [27] 张明月, 杨贵军, 宋伟东, 等. 遥感组合指数与不同分类技术结合提取农业用地方法[J]. *测绘科学*, 2011, **36**(5): 73-76.
- [28] Diaz-Varela R A, Zarco-Tejada P J, Angileri V, *et al.* Automatic identification of agricultural terraces through object-oriented analysis of very high resolution DSMs and multispectral imagery obtained from an unmanned aerial vehicle[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, **134**: 117-126.
- [29] 张红兵, 贾来喜, 李璐. SPSS 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009. 188-196, 261-276.
- [30] 赖江山. 生态学多元数据排序分析软件 Canoco5 介绍[J]. *生物多样性*, 2013, **21**(6): 765-768.
- [31] Bu H M, Meng W, Zhang Y, *et al.* Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **41**: 187-197.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	 ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	 LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	 KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	 REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行