

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载钼或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的蔡代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗砷内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性

马小亮¹, 刘桂民^{1*}, 吴晓东², 徐海燕¹, 叶琳琳³, 张晓兰¹, 白炜¹

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 冰冻圈国家重点实验室青藏高原冰冻圈观测研究站, 兰州 730000; 3. 南通大学地理科学学院, 南通 226019)

摘要: 选取青藏高原多年冻土区 12 条河流样品进行分析, 结合流域内植被类型、流量大小、多年冻土面积与河流溶解性有机碳 (DOC) 的质量浓度、化学组成、生物可利用性之间的关系及分解动力学进行讨论。结果表明, 分别在高寒草甸 (AM)、高寒沼泽草甸-高寒草甸 (ASM-AM)、高寒草甸-高寒草原 (AM-AS)、高寒草甸-高寒草原-裸地 (AM-AS-BL) 为主的流域内, 河流 DOC 的质量浓度依次为 (5.17 ± 0.21) 、 (5.02 ± 0.50) 、 (3.55 ± 0.25) 和 $(2.79 \pm 0.41) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DOC 的生物可降解性程度 (BDOC) 依次为 $(23.54 \pm 2.62)\%$ 、 $(23.66 \pm 3.31)\%$ 、 $(18.17 \pm 5.26)\%$ 和 $(11.72 \pm 15.56)\%$; 相应地, 流域内植被覆盖度越小, 河流 DOC 的芳香性程度越大, DOC 的可生物降解性和降解速率随着降低, 并且 BDOC 在培养的过程中的反应遵循一级反应动力学原理; 此外, 连续多年冻土区河流的 BDOC 大于非连续多年冻土区的河流 BDOC, 大河的 BDOC 小于源头小河的 BDOC。研究表明, 流域内植被类型是影响多年冻土区河流 BDOC 的主要影响因素, 同时, 流量大小和多年冻土对 BDOC 也有一定的影响。

关键词: 青藏高原; 河流; 植被类型; 溶解性有机碳 (DOC); 生物可降解溶解性有机碳 (BDOC); 多年冻土; SUVA_{254}

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2086-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201709280

Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau

MA Xiao-liang¹, LIU Gui-min^{1*}, WU Xiao-dong², XU Hai-yan¹, YE Lin-lin³, ZHANG Xiao-lan¹, BAI Wei¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Cryosphere Research Station on the Qinghai-Tibet Plateau, State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of the Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. School of Geography Science, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: Samples collected from 12 rivers with typical vegetation types in the permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau were incubated in the laboratory, and the relationships among the vegetation types, river discharges, the compositions of dissolved organic carbon (DOC), permafrost areas, riverine DOC concentration, biodegradability of dissolved organic carbon (BDOC), and the biodegradation kinetics were examined. The results showed that the DOC concentrations of typical vegetation types in the basin, such as alpine meadow (AM), alpine swamp meadow-alpine meadow (ASM-AM), alpine meadow-alpine steppe (AM-AS), and alpine meadow-alpine steppe-bare soil (AM-AS-BL), were (5.17 ± 0.21) , (5.02 ± 0.50) , (3.55 ± 0.25) , and $(2.79 \pm 0.41) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The values for the bioavailability of river DOC of different vegetation types were $(23.54 \pm 2.62)\%$, $(23.66 \pm 3.31)\%$, $(18.17 \pm 5.26)\%$, and $(11.72 \pm 15.56)\%$, respectively. Correspondingly, the riverine DOC aromaticity increased along with the vegetation cover, while the biodegradation and degradation rates decreased gradually. During the incubation, the reaction of BDOC was in accordance with the first-order kinetics equation. Furthermore, the BDOC in continuous permafrost regions of the rivers was greater than that in the non-continuous permafrost regions. The BDOC in higher discharges were lower than those with lower discharges. Taken together, the results suggested that the vegetation types were the main controlling factors for the BDOC, and BDOC was also related to the discharge and permafrost.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; river; vegetation types; dissolved organic carbon (DOC); biodegradability of dissolved organic carbon (BDOC); permafrost; SUVA_{254}

河流溶解性有机碳 (DOC) 的输移, 对水生生态系统的生物地球化学循环有着重要影响^[1]。在高纬度地区, 生态系统的碳平衡在很大程度上取决于区域内湖泊、湿地、河流的水生过程^[2~4]。河流每年向海洋输移的 DOC 通量达到 $205 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[5]。在北极

收稿日期: 2017-09-29; 修订日期: 2017-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (91547119, 41661013, 41563005); 兰州交通大学青年基金项目 (2015015)

作者简介: 马小亮 (1991 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为寒区水文生态, E-mail: mxl815815@163.com

* 通信作者, E-mail: liuguimin@mail.lzjtu.cn

圈, 河流平均每年向北冰洋输送的 DOC 达 $34 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[6,7], 其生物可降解溶解性有机碳(BDOC)达 $2.3 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[8].

多年冻土是世界上最大的陆地生态系统碳库. 气候变暖导致多年冻土退化, 这可能会影响到土壤有机碳(SOC)的可降解性^[9]和区域内水文地质条件, 进而引起流域内河流碳素赋存形态、质量浓度、输出通量及生物可利用性的变化^[10]. 多年冻土退化会使其储存的巨大有机碳库变得更容易分解, 同时也会加速 DOC 进入水生生态系统^[11]. 如果多年冻土 DOC 具有很强生物可利用性, 那么很大一部分将在进入海洋之前在淡水生态系统被降解, 最终以 CO_2 的形式转移到大气中^[11~13], 从而增加多年冻土向大气释放温室气体, 增强了多年冻土碳反馈^[14].

青藏高原是众多大河的发源地, 多年冻土面积约为 106 万 km^2 ^[15], 青藏高原多年冻土区的碳库对于我国乃至全球碳平衡和气候变化都有着重要的作用^[16]. 目前对青藏高原冻土区碳循环的研究主要集中在不同植被下土壤碳的含量和形态变化等方面^[17], 对该区的河流 DOC 以及 BDOC 研究数据还很少. 由于 BDOC 主要来源于陆地生态系统且受径流过程的影响, 本研究假设, 河流 BDOC 与流域内的植被条件密切相关, 且多年冻土和流量大小对

BDOC 也有影响. 在全球气候变暖的背景下, 了解该区不同植被类型下河流 DOC 的输移动态及其生物可利用性对于理解多年冻土区碳循环有一定的科学意义, 可为评估该区未来冻土和植被变化影响下的河流碳动态提供资料.

1 材料与方法

1.1 研究区概况和采样点设置

青藏高原是长江、黄河、澜沧江三大河流的发源地, 是具有全球意义的脆弱生态系统, 对气候变化极为敏感. 本研究区域位于青藏高原腹地三江源区(图 1), 气候寒冷, 多年冻土发育, 气候干燥少雨, 年内分配不均, 最大降雨量和最高温度出现在夏秋季, 且降雨约占全年 80% 左右, 植被类型简单, 主要分布着高寒沼泽草甸(ASM)、高寒草甸(AM)、高寒草原(AS)和高寒荒漠(AD)这 4 种典型的植被类型^[18]和裸地(BL), 见图 1, 在研究区的 12 条流域内, 这 4 种植被的覆盖面积占比非常高, 各流域均值达 93%. ASM 和 AM 以小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、藏嵩草(*Kobresia tibetica*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、异针茅(*Stipa aliena*)等为优势种群, 种类成分较为丰富, 覆盖度高; AS 以青藏苔草(*Carex moorcroftii*)和紫花针茅(*Stipa purpurea*)为主, 植被稀疏、覆盖度低; AD 以(*Carex*

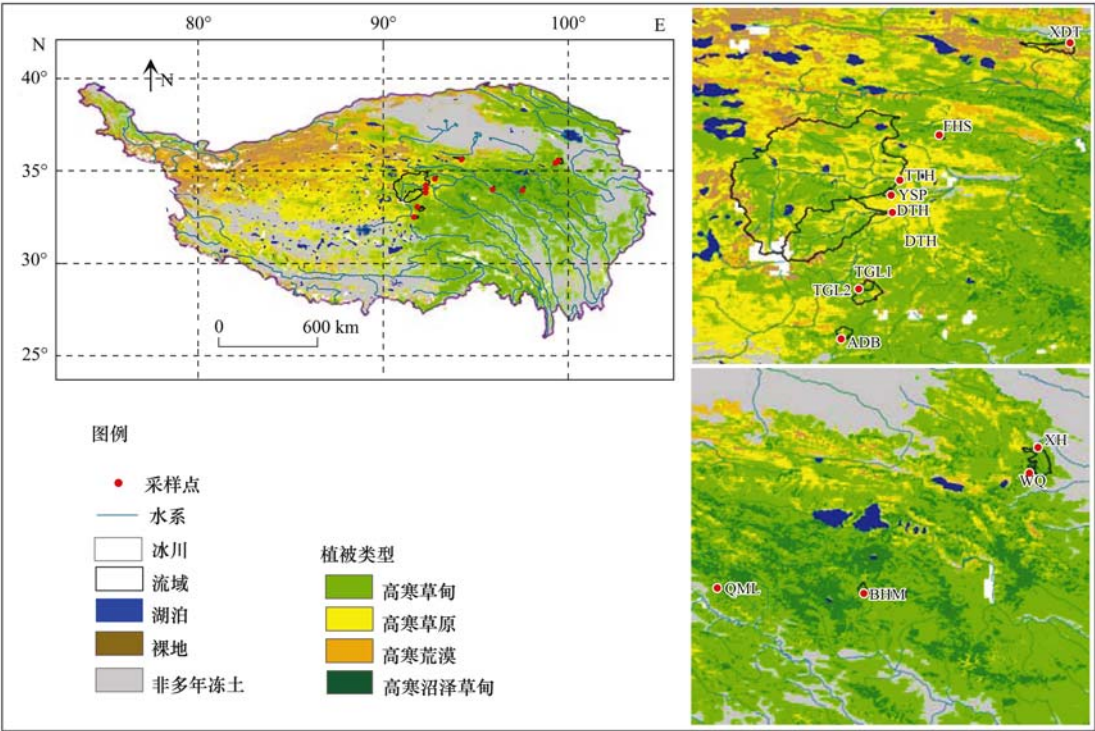


图 1 研究区植被类型和采样点位置示意

Fig. 1 Sampling sites and vegetation types on the Qinghai-Tibet Plateau

moorcroftii)、扁穗草 (*Brylkinia caudata*)、早熟禾 (*Poa annua* Linn.) 为主。通过空间分析, 根据青藏高原多年冻土、水系流域和植被分布特征^[19], 选取了不同植被类型下的 12 条不同流域进行研究。具体采样点如图 1 所示。

1.2 样品采集

野外工作于 2016 年 10 月中旬完成。使用手持式 GPS 确定采样点的位置 (图 1), 使用 pH < 2 的硫酸处理过的聚乙烯瓶, 戴手套在每个采样点水面下 30 cm (深度允许情况下) 深处收集 3 个平行水样 (样瓶用水样预冲洗 3 次), 现场用 0.45 μm 和 1.2 μm GF/F 滤膜 (预先在马弗炉中 450℃ 灼烧 5 h 除去有机质) 过滤, 样瓶在密封无气泡状态下 4℃ 低温黑暗保存运回, 并在一周之内进行分析。采样同时, 使用剖面流速仪 (Stream Pro ADCP) 在流量较大的河流直接获得流量; 在流量较小的河流选择均匀河流断面, 采用点流速仪 (Flowtracster) 进行测定流速, 并用卷尺取其宽度和深度进行流量计算。

1.3 分析测定方法

在实验室进行 4 周的培养实验测定 BDOC^[9]。首先, 使用无菌移液枪移取 30 mL 过 0.45 μm GF/F 滤膜的水样到无菌血清瓶中, 然后加入 3 mL 过 1.2 μm GF/F 滤膜水样作为接种微生物到血清瓶中, 再分别加入 100 μL NH₄NO₃ 和 K₂HPO₄ 溶液, 使得 NH₄⁺、NO₃⁻ 和 PO₄³⁻ 的浓度分别为 80、80 和 10 μmol·L⁻¹, 以降低营养盐对微生物活性的限制; 并用等体积去离子水加营养盐设置空白对照试验; 所有样放入恒温培养箱 20℃ 条件 黑暗培养, 每 24 h 打开瓶盖并摇晃一次, 以确保有氧条件; 分别在 0、2、7、14、28 d 取样, 用 0.45 μm GF/F 滤膜 (预先在马弗炉中 450℃ 灼烧 5 h 除去有机质) 过滤, 并立即测定 DOC 的质量浓度 (Elementra Vario TOC analyzer, Germany), 0.45 μm 滤膜重新过滤几乎可以过滤掉全部的微生物量, 所以最后测得 DOC 降解程度包括了微生物矿化作用和同化作用两部分的量^[9], 以上所有操作均在无菌超净台完成。

此外, 另取一份过 0.45 μm GF/F 滤膜的水样, 在紫外分光光度计 (UV-160A Shimadzu, Japan) 上测定 UV₂₅₄、a₂₅₀ 和 a₃₆₅ 的值, 计算特征参数 SUVA₂₅₄ [L·(mg·m)⁻¹] = UV₂₅₄/[DOC], 即波长为 254 nm 处的吸光值与 DOC 的质量浓度之比。

1.4 数据处理

流域划分基于 ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM) 数据, 精度 30 m (来源于青

藏高原科学数据中心 <http://www.tpedatabase.cn>), 在 ArcGIS 10.4 的环境下, 利用采样点坐标对采样点流域划分提取, 计算采样点流域面积和平均高程, 并提取植被数据^[19], 同样, 用 ArcGIS 10.4 进行计算采样点处流域内植被类型数据和多年冻土数据, 采样点各流域特征如表 1 所示。

本文用到的两种关系见公式 (1) 和 (2), 表述如下:

$$\text{BDOC}_t = \text{DOC}_{t=0} - \text{DOC}_t \quad (1)$$

$$\text{BDOC}(\%) = \frac{\text{DOC}_{t=0} - \text{DOC}_{t=28}}{\text{DOC}_{t=0}} \times 100\% \quad (2)$$

根据微生物对低浓度底物的利用遵循一级反应原理^[20], 即 BDOC 反应变化遵循公式 (3):

$$d(\text{BDOC})/dt = k \times \text{BDOC} \quad (3)$$

式中, BDOC 为任何时刻的微生物可降解溶解性有机碳; k 为反应动力学常数; t 为培养时间; 对上式积分得公式 (4):

$$\text{BDOC} = \text{BDOC}_u e^{-kt} \quad (4)$$

式中, BDOC_u 为基质中微生物可降解溶解性有机碳的总量; 所以, 任意培养时间 t 处的 BDOC_t 值可表示为公式 (5):

$$\text{BDOC}_t = \text{BDOC}_u (1 - e^{-kt}) \quad (5)$$

对 BDOC_t 进行非线性指数拟合, 得到反应动力学常数 k 值。

数据分析利用 SPSS 19 和 Origin 8.5 完成, 图片使用 Origin 8.5 和 ArcGIS 10.4 制作。其中, DOC 质量浓度、SUVA₂₅₄、a₂₅₀/a₃₆₅ 所有实验测定的指标均为 3 个平行样分析的平均值, 并获得标准误差。

2 结果与讨论

2.1 不同植被类型下河流 DOC(t₀)

如图 2 所示, 12 条河流 DOC 的质量浓度存在

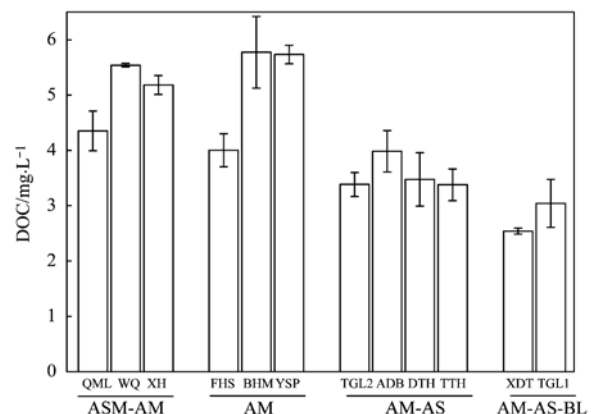


图 2 不同植被类型下河流 DOC(t₀) 的浓度

Fig. 2 Riverine DOC(t₀) contents for different vegetation types

较大的差异, 均值为 $(4.20 \pm 1.07) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其中 AM 和 ASM-AM 为主的流域内河流 DOC 的质量浓度较大, 其次是 AM-AS 为主的流域, AM-AS-BL 为主的流域 DOC 的质量浓度最低, 均值依次为 (5.17 ± 0.21) 、 (5.02 ± 0.50) 、 (3.55 ± 0.25) 和 $(2.79 \pm 0.41) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

表 1 采样点流域特征

Table 1 Vegetation cover and selected environmental factors for the catchments												
采样点编号	植被类型	面积 /km ²	高程 /m	经度 /(°)	纬度 /(°)	流量 /m ³ ·s ⁻¹	LB /%	ASM /%	AM /%	AS /%	AD /%	多年冻土 /%
QML	ASM-AM	21.54	4 622	95.996 13	34.142 03	0.070	0.00	90.52	9.48	0.00	0.00	100.00
WQ		55.30	3 984	99.467 24	35.420 51	0.144	0.00	42.20	55.72	2.07	0.00	100.00
XH		508.17	3 840	99.554 14	35.705 91	0.900	0.00	20.67	73.97	3.05	0.28	73.99
FHS	AM	26.30	4 783	92.884 67	34.716 24	0.360	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
BHM		93.98	4 663	97.614 55	34.085 43	0.300	0.00	0.83	97.51	1.09	0.00	100.00
YSP		66.92	4 705	92.340 65	34.045 9	0.020	0.00	0.89	82.47	16.64	0.00	100.00
TGL2	AM-AS	420.15	5 025	91.974 94	33.007 47	1.680	8.75	0.00	59.76	30.82	0.00	95.39
ADB		178.05	4 843	91.791 81	32.436 58	3.20	0.00	7.47	56.19	36.34	0.00	100.00
DTH		4 154.56	4 574	92.36 42	33.866 68	12.730	9.55	0.68	46.74	42.64	0.37	90.39
TTH	AM-AS-BL	17 690.11	4 542	92.444 92	34.219 2	40.290	8.70	0.94	45.14	37.95	7.22	93.22
XDT		404.24	4 075	94.330 4	35.754 39	1.275	35.63	0.69	23.79	30.00	6.94	78.82
TGL1		128.09	5 027	91.974 57	33.008 99	1.540	12.13	0.00	70.86	17.01	0.00	100.00

在流域内, 气候、地形、水文地质和植被类型都会影响河流 DOC 的输移和溶解性有机物(DOM)的化学组成以及浓度变化^[21~23]. 在青藏高原多年冻土区, 植被类型是影响土壤 DOC 含量的重要影响因素, 且 ASM、AM 含量较高, AS 和 AD 含量较低, 分别为 56.4~137.5、42.5~99.7、18.5~64.6 和 12.3~56.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[24]. 青藏高原 AM 和 ASM 区多年冻土普遍发育, 较浅的活动层厚度、较大的土壤水分和较高的植被生物量利于土壤有机碳的积累, 所以草甸下土壤 DOC 含量较高^[25]. 河流的水化学变化主要取决于地表水与土壤各物质的相互交

换过程^[26]. 因此, 草甸土壤 DOC 的输出质量浓度普遍大于干旱地生态系统的 DOC 输出质量浓度^[23,27]. 此外, 多年冻土退化降低土壤含水率, 导致土壤粒径组成增大, 并引起植被退化, 较低的含水率和较高的土壤温度增了加土壤有机质的分解, 而植被退化则导致土壤有机质的输入和积累速率降低, 从而导致有机碳的下降^[17].

2.2 BDOC

2.2.1 BDOC 的质量浓度

不同天数 0、2、7、14、28 d 的 BDOC 的质量浓度如表 2 所示.

表 2 不同培养时间下 BDOC_t 的变化

Table 2 BDOC _t variations during the laboratory incubation						
采样点编号	BDOC _{0 d}	BDOC _{2 d}	BDOC _{7 d}	BDOC _{14 d}	BDOC _{28 d}	RV ¹⁾ /%
QML	4.35	0.12	1.21	1.09	1.15	4.20~13.10
WQ	5.54	0.74	0.96	1.01	1.05	0.59~10.56
XH	5.18	1.02	1.65	1.36	1.33	3.28~12.31
FHS	4.00	0.50	0.46	0.94	0.86	2.01~7.88
BHM	5.77	0.46	1.49	1.63	1.57	1.44~15.97
YSP	5.73	0.92	1.13	1.10	1.25	3.23~14.15
TGL2	3.38	0.31	0.48	0.62	0.53	3.98~9.33
ADB	3.98	0.44	0.66	0.62	0.60	3.61~16.43
DTH	3.47	0.15	0.70	0.67	0.66	1.24~9.90
TTH	3.38	0.10	0.20	0.07	0.17	4.75~11.46
XDT	2.54	0.03	0.59	1.31	0.84	2.20~13.52
TGL1	3.04	0.04	0.06	0.09	0.07	2.88~15.90

1) RV 为 3 个平行样的相对偏差

如图 3(a)所示, 不同植被类型下河流 DOC 的生物可降解程度差异性较大, ASM-AM、AM 为主的流域内河流 DOC 降解程度较大, 分别为 $(23.66 \pm$

$3.31) \%$ 和 $(23.54 \pm 2.62) \%$, 其次为 AM-AS 为主的流域, 均值为 $(13.63 \pm 5.26) \%$, 在 XTD 和 TGL1 两个流域, 主要以 AM-AS-BL 为主要的植被类型,

其中靠近玉珠峰冰川的 XDT 流域,降解程度最高,为 $(33.14 \pm 2.20)\%$,而 TGL1 最小,为 $(2.02 \pm 1.41)\%$. XDT 降解程度异常高可能原因是冰川源 DOC 浓度很低,但 BDOC 很高,因为现代冰川将大量微生物来源的 BDOC 滞留埋藏^[28].

此外,河流中 DOC 和 BDOC 的质量浓度呈显著正相关[图 3(b)];青藏高原河流中较低的 DOC

质量浓度限制了微生物的生长^[29],DOC 是溪流中异养微生物的重要的碳源和能源物质^[30],细菌的活性和丰富度随着 DOC 的增加而增大^[31].因此,流域内的植被覆盖度越高,河流 DOC 的质量浓度越大,从而降低了微生物生命活动中碳的限制,随着微生物活性增强,DOC 的生物可降解程度也越高[图 3(a)].

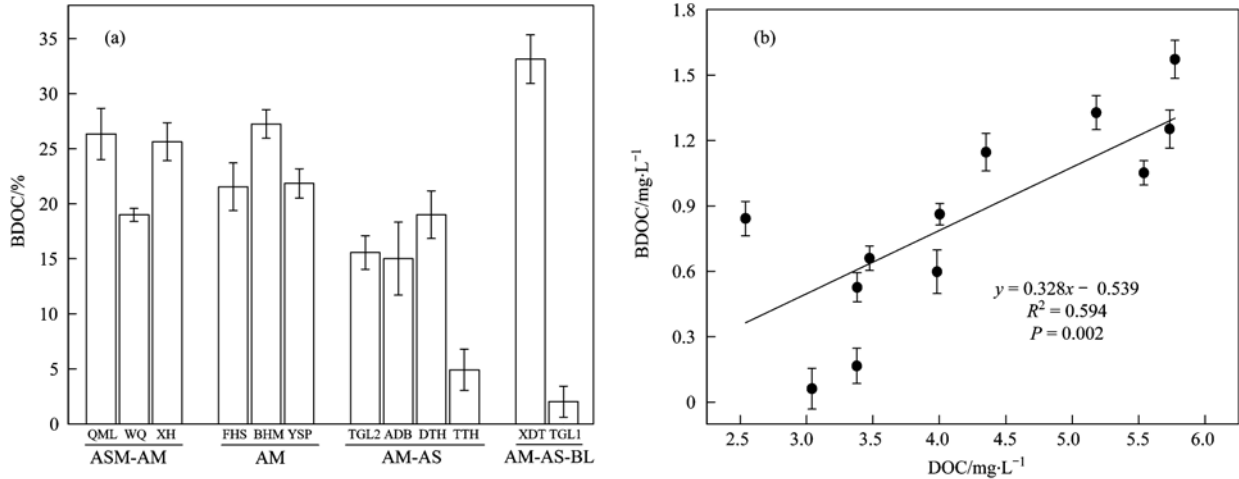


图 3 不同植被下河流 BDOC 和 DOC 的关系

Fig. 3 Relationship between BDOC and DOC for different vegetation types

2.2.2 BDOC 反应动力学

从表 3 可看出, BDOC_t 的各组分实测数据与拟合数据有着很强的相关性,表明 BDOC 在培养的过程中的反应遵循一级反应动力学原理. 在不同的植被类型下河流的 BDOC 降解速率常数整体上 $k(\text{ASM-AM}) > k(\text{AM}) > k(\text{AM-AS}) > k(\text{AM-AS-BL})$. 表明流域内植被覆盖度越高, BDOC 的降解速率越大^[32].

表 3 反应动力学常数 k 的测定

Table 3 Reaction velocity constants of different samples			
植被类型	采样点编号	k/d^{-1}	R^2
ASM-AM	QML	0.234	0.786
	WQ	0.655	0.992
	XH	0.653	0.916
AM	FHS	0.170	0.670
	BHM	0.248	0.953
	YSP	0.781	0.975
AM-AS	TGL2	0.359	0.947
	ADB	0.621	0.984
	DTH	0.258	0.869
	TTH	0.199	0.728
AM-AS-BL	XDT	0.147	0.884
	TGL1	0.358	0.777

从表 4 可见,在多年冻土区流域内的植被覆

盖度越大,河流 DOC、BDOC 的质量浓度、BDOC 和反应动力学常数 k 都随之增大. 通过表 4 结果对 4 组数据进行相关性分析,发现 4 组数据有很强的正相关性,其中 DOC 与 BDOC 质量浓度和 BDOC 都呈显著正相关的关系. 表明在多年冻土区植被类型是限制河流 BDOC 及其降解速率的最主要因素.

2.3 SUVA₂₅₄ 和 a_{250}/a_{365}

DOC 的芳香性对 DOC 的生物可利用性具有重要影响^[8]. DOC 的组成可以用 SUVA₂₅₄ 和 a_{250}/a_{365} 来表征, SUVA₂₅₄ 值越大表示其芳香性越强^[33], a_{250}/a_{365} 值越小,表示 DOC 芳香性和相对分子量越大^[34]. 如图 4(a) 所示,几种不同植被下河流 SUVA₂₅₄ 值从小到大依次为 ASM、ASM-AM、AM-AS、AM-AS-BL; 0 d 的 a_{250}/a_{365} 从大到小依次为 AM、ASM-AM、AM-AS、AM-AS-BL[图 4(b)]. 表明流域内植被覆盖度越低,所在河流 DOC 的芳香性程度和相对分子量越大.

DOC 的芳香性程度和分子量越大,往往意味着其生物可利用性越低^[35]. 在陆地和水生生态系统中,碳降解通常局限于 DOC 是溶解态形式,相对分子量低的 DOC 可以直接通过微生物细胞膜进行运输^[36],且分解氨基酸或糖类时微生物可以获得

较多的能量^[37]. 多年冻土的溶解性有机物 (DOM) 富含氮、脂肪族化合物, 可以在培养实验中优先降解^[38]. 对比 0 d 和 28 d 的 $SUVA_{254}$ [图 4(a)] 可以看出, 在培养过程中, DOC 的芳香程度明显地增

大, 说明在培养过程中微生物优先利用了相对分子质量较低的 BDOC, 而对芳香性碳素的利用效率极低, 随着在 BDOC 不断降解的过程中, DOC 的芳香程度也不断增加.

表 4 不同植被类型下 DOC、BDOC 质量浓度、BDOC 和 k 值¹⁾

Table 4 DOC, BDOC concentrations, BDOC and k values for different vegetation types					
植被类型	DOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	BDOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	BDOC/%	k/d^{-1}	n
ASM-AM	5.02 ± 0.50	1.18 ± 0.12	23.66 ± 3.31	0.514 ± 0.198	3
AM	5.17 ± 0.21	1.23 ± 0.29	23.54 ± 2.62	0.400 ± 0.272	3
AM-AS	3.55 ± 0.25	0.49 ± 0.19	18.17 ± 5.26	0.360 ± 0.162	4
AM-AS-AD	2.79 ± 0.41	0.45 ± 0.39	11.72 ± 15.56	0.252 ± 0.100	2

1) 表中数据为平均值 $\pm$ 标准误差

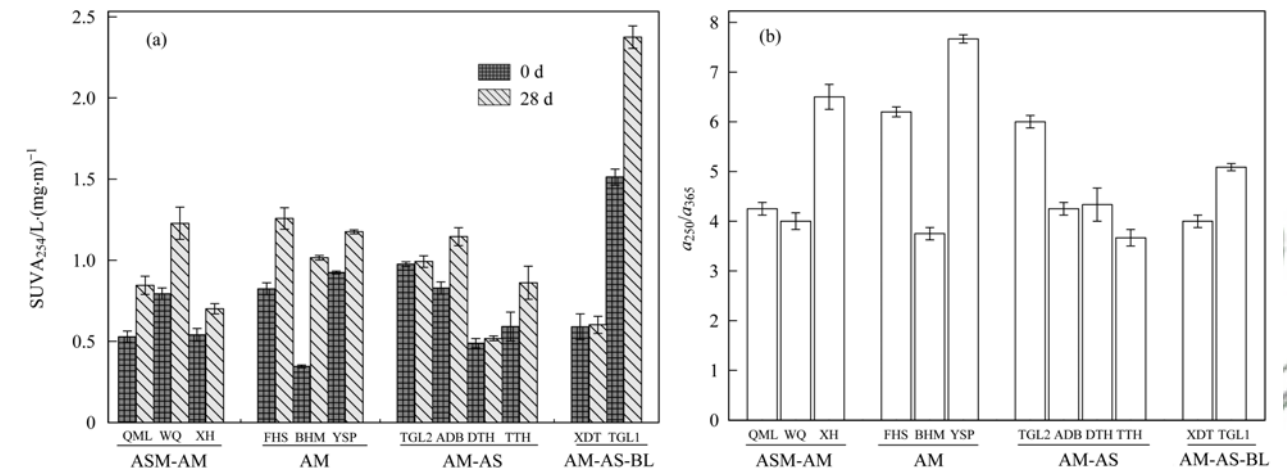


图 4 不同植被类型下河流 $SUVA_{254}$ 和 a_{250}/a_{365}
Fig. 4 $SUVA_{254}$ and a_{250}/a_{365} of rivers for different vegetation types

2.4 其他环境因素对 BDOC 的影响

如图 5(a) 所示, BDOC 与 DOC 的质量浓度呈显著正相关($R^2=0.456$, $P<0.05$), 这与 BDOC 跟 DOC 的变化呈一致性. 流域内气候、地形、水文地质和植被类型都会影响河流 DOC 的输移和 DOM 的化学组成以及质量浓度变化, 青藏高原腹地多年冻土区总体上属于半干旱半湿润地区, 自西向东, 降雨量呈增加趋势, 气温逐渐升高, 植被盖度增加, 植被生产力也随之增强. 因此, 尽管 BDOC 与经度的关系不显著, 但是自西向东河流 BDOC 也呈增大的趋势[图 5(b)].

流域内连续多年冻土的面积和流量的大小也是影响 BDOC 的重要因素. 由于 XDT 流域靠近冰川, 反应机制复杂, 因此分析时不包括 XDT. 如图 5(c) 所示, 在连续多年冻土区 (多年冻土面积为 100%)、不连续多年冻土区 (多年冻土面积 $<100\%$), BDOC 分别为 $(19.00 \pm 7.93)\%$ 和 $(16.28$

$\pm 7.49)\%$, 此结果与北极圈多年冻土区的研究结果 20% 和 15% 极为接近^[9]. 这反映了多年冻土对溶解性有机物组成的影响, 且多年冻土有利于 BDOC 的保存^[38]; 多年冻土矿质土壤对很难降解的疏水性碳素有很强的吸附能力^[39], 由于生物活性较低的化合物被深层矿物土壤吸附, 所以冻土融化将输出更高的 BDOC^[40]. 研究区 12 条河流中, 根据流量大小之间的差异, 以流量 $Q \geq 1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 划分为大河, 以 $Q < 1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 为小河; 小河和大河的 BDOC 分别为 $(23.60 \pm 2.99)\%$ 和 $(11.30 \pm 6.61)\%$ [图 5(d)]. 同样在北极圈多年冻土区河流水系中, 大河 DOC 的生物可降解程度也要明显低于河流源区的小河^[9,38,41]. 在 DOC 浓度较高多年冻土河源区, 大量生物不稳定成分的优先降解导致了更多相对分子量较大不易降解的成分富集^[42]在河流下游的土壤孔隙水中^[38], 表明在多年冻土区随着河流流量不断增大, 河流 DOC 的芳香性也不断增强,

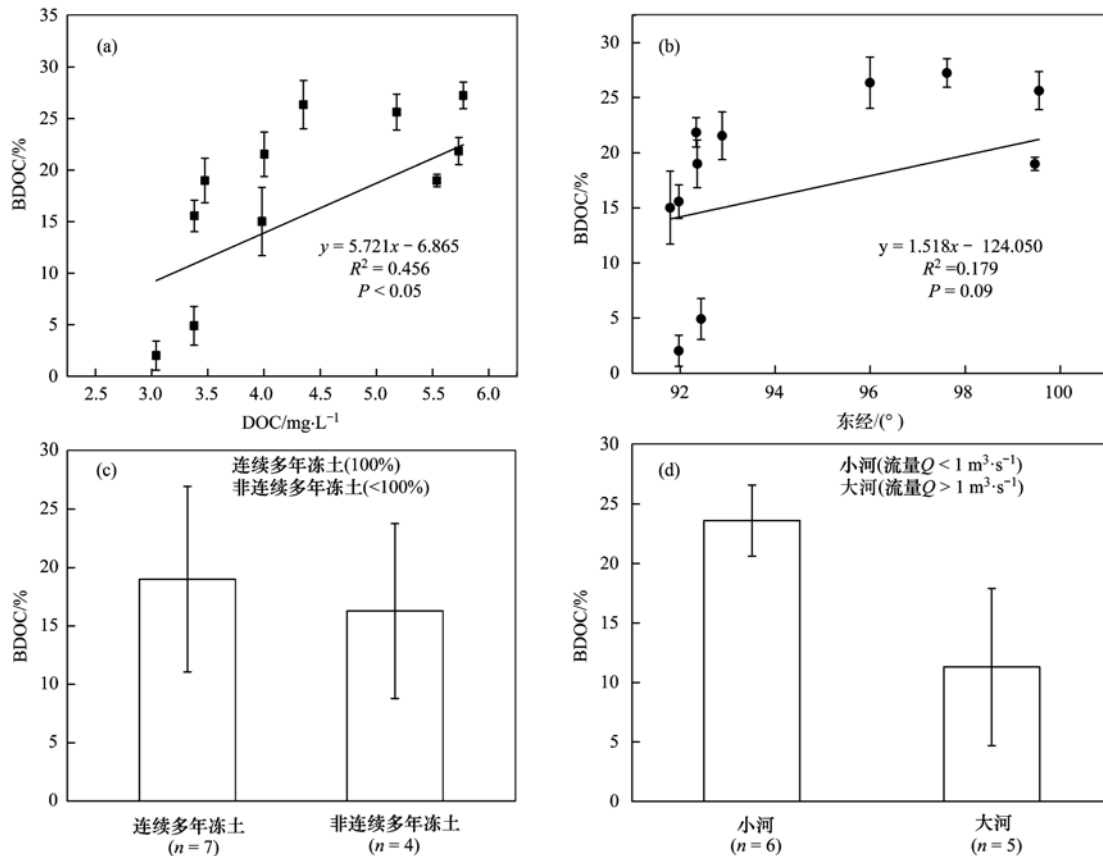


图5 环境因子与 BDOC 的关系

Fig. 5 Relationship between environmental factors and BDOC

DOC 的可进一步降解能力降低。

3 结论

(1)在青藏高原多年冻土区,流域内的植被类型是影响河流 DOC 和 BDOC 质量浓度的主要因素;以 AM 和 ASM-AM 为主的流域内 DOC 和 BDOC 的质量浓度较大,其次为 AM-AS 和 AM-AS-BL 为主的流域。此外,河流 DOC 的生物可降解程度随 DOC 的质量浓度变化一致。

(2)动力学结果表明:BDOC 在培养的过程中遵循一级反应动力学原理;相应地,河流 DOC 的质量浓度越高,DOC 的分解速率越大。

(3)随着流域内植被覆盖度的减小,DOC 的芳香性程度和分子量不断增大,DOC 的可进一步降解程度降低。

(4)河流 DOC 的生物可降解程度受流域内多年冻土和流量大小的影响。连续多年冻土区河流的 BDOC 大于非连续多年冻土的 BDOC;大河的 BDOC 小于源头小河的 BDOC。

参考文献:

- [1] Ågren A M, Buffam I, Cooper D M, *et al.* Can the heterogeneity in stream dissolved organic carbon be explained by contributing landscape elements? [J]. *Biogeosciences*, 2014, **11** (4): 1199-1213.
- [2] Striegl R G, Dornblaser M M, McDonald C P, *et al.* Carbon dioxide and methane emissions from the Yukon River system[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, **26**(4): GB0E05.
- [3] Aufdenkampe A K, Mayorga E, Raymond P A, *et al.* Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, **9**(1): 53-60.
- [4] Avis C A, Weaver A J, Meissner K J. Reduction in areal extent of high-latitude wetlands in response to permafrost thaw [J]. *Nature Geoscience*, 2011, **4**(7): 444-448.
- [5] Ludwig W, Amiotte-Suchet P, Probst J L. River discharges of carbon to the world's oceans: determining local inputs of alkalinity and of dissolved and particulate organic carbon [J]. *Oceanographic Literature Review*, 1997, **44**(8): 806-807.
- [6] Holmes R M, McClelland J W, Peterson B J, *et al.* Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas [J]. *Estuaries and Coasts*, 2012, **35**(2): 369-382.
- [7] McGuire A D, Anderson L G, Christensen T R, *et al.* Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change [J]. *Ecological Monographs*, 2009, **79**(4): 523-555.
- [8] Wickland K P, Aiken G R, Butler K, *et al.* Biodegradability of dissolved organic carbon in the Yukon River and its tributaries: seasonality and importance of inorganic nitrogen [J]. *Global*

- Biogeochemical Cycles, 2012, **26** (4), doi: 10.1029/2012GB004342.
- [9] Vonk J E, Tank S E, Mann P J, *et al.* Biodegradability of dissolved organic carbon in permafrost soils and aquatic systems: a meta-analysis [J]. *Biogeosciences*, 2015, **12** (23): 6915-6930.
- [10] Olefeldt D, Roulet N T. Effects of permafrost and hydrology on the composition and transport of dissolved organic carbon in a subarctic peatland complex [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, **117** (G1), doi: 10.1029/2011JG001819.
- [11] Abbott B W, Larouche J R, Jones Jr J B, *et al.* Elevated dissolved organic carbon biodegradability from thawing and collapsing permafrost [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, **119** (10): 2049-2063.
- [12] Thienpont J R, Rühland K M, Pisarcic M F J, *et al.* Biological responses to permafrost thaw slumping in Canadian Arctic lakes [J]. *Freshwater Biology*, 2013, **58** (2): 337-353.
- [13] Schaefer K, Lantuit H, Romanovsky V E, *et al.* The impact of the permafrost carbon feedback on global climate [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, **9** (8): 085003.
- [14] Bianchi T S. The role of terrestrially derived organic carbon in the coastal ocean: a changing paradigm and the priming effect [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108** (49): 19473-19481.
- [15] Zou D F, Zhao L, Sheng Y, *et al.* A new map of the permafrost distribution on the Tibetan Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2017, **11** (6): 2527-2542.
- [16] Mu C, Zhang T, Wu X, *et al.* Editorial: organic carbon pools in permafrost regions on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2015, **9** (2): 479-486.
- [17] Wu X D, Fang H B, Zhao L, *et al.* Mineralisation and changes in the fractions of soil organic matter in soils of the permafrost region, Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2014, **25** (1): 35-44.
- [18] Wu X D, Zhao L, Chen M J, *et al.* Soil organic carbon and its relationship to vegetation communities and soil properties in permafrost areas of the central western Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2012, **23** (2): 162-169.
- [19] Wang Z W, Wang Q, Zhao L, *et al.* Mapping the vegetation distribution of the permafrost zone on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, **13** (6): 1035-1046.
- [20] 顾夏声. 废水生物处理数学模式 [M]. (第二版). 北京: 清华大学出版社, 1993. 10-13.
- Gu X S. Mathematical modeling of biological wastewater treatment [M]. (2nd ed). Beijing: Tsinghua University Press, 1993. 10-13.
- [21] Mattsson T, Kortelainen P, Räike P A. Export of DOM from boreal catchments: impacts of land use cover and climate [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **76** (2): 373-394.
- [22] Johansson T, Malmer N, Crill P M, *et al.* Decadal vegetation changes in a northern peatland, greenhouse gas fluxes and net radiative forcing [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12** (12): 2352-2369.
- [23] Laudon H, Berggren M, Ågren A, *et al.* Patterns and dynamics of dissolved organic carbon (DOC) in boreal streams: the role of processes, connectivity, and scaling [J]. *Ecosystems*, 2011, **14** (6): 880-893.
- [24] Shang W, Wu X D, Zhao L, *et al.* Seasonal variations in labile soil organic matter fractions in permafrost soils with different vegetation types in the central Qinghai-Tibet Plateau [J]. *CATENA*, 2016, **137**: 670-678.
- [25] Hu G L, Fang H B, Liu G M, *et al.* Soil carbon and nitrogen in the active layers of the permafrost regions in the three rivers' headstream [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **72** (12): 5113-5122.
- [26] Bishop K, Seibert J, Köhler S, *et al.* Resolving the double paradox of rapidly mobilized old water with highly variable responses in runoff chemistry [J]. *Hydrological Processes*, 2004, **18** (1): 185-189.
- [27] Kaiser K, Kalbitz K. Cycling downwards-dissolved organic matter in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **52**: 29-32.
- [28] Hood E, Fellman J, Spencer R G M, *et al.* Glaciers as a source of ancient and labile organic matter to the marine environment [J]. *Nature*, 2009, **462** (7276): 1044-1047.
- [29] 任泽, 蒋祖耀, 蔡庆华. 青藏高原腹地溪流中的氮和有机碳及其相互关系 [J]. *应用与环境生物学报*, 2013, **19** (3): 532-536.
- Ren Z, Jiang Z Y, Cai Q H. Nitrogen and organic carbon and their relationship in streams of Qinghai-Tibet Plateau hinterland [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2013, **19** (3): 532-536.
- [30] Barnes R T, Smith R L, Aiken G R. Linkages between denitrification and dissolved organic matter quality, Boulder Creek watershed, Colorado [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, **117** (G1), doi: 10.1029/2011JG001749.
- [31] Sobczak W V, Findlay S. Variation in bioavailability of dissolved organic carbon among stream hyporheic flowpaths [J]. *Ecology*, 2002, **83** (11): 3194-3209.
- [32] Bernhardt E S, Likens G E. Dissolved organic carbon enrichment alters nitrogen dynamics in a forest stream [J]. *Ecology*, 2002, **83** (6): 1689-1700.
- [33] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37** (20): 4702-4708.
- [34] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, **337** (2): 133-149.
- [35] Mu C C, Abbott B W, Wu X D, *et al.* Thaw depth determines dissolved organic carbon concentration and biodegradability on the northern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44** (18): 9389-9399.
- [36] Battin T J, Kaplan L A, Findlay S, *et al.* Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**: 95-100.
- [37] Macko S A, Estep M L F. Microbial alteration of stable nitrogen and carbon isotopic compositions of organic matter [J]. *Organic Geochemistry*, 1984, **6**: 787-790.
- [38] Spencer R G M, Mann P J, Dittmar T, *et al.* Detecting the signature of permafrost thaw in Arctic rivers [J]. *Geophysical*

- Research Letters, 2015, **42**(8): 2830-2835.
- [39] Kawahigashi M, Kaiser K, Kalbitz K, *et al.* Dissolved organic matter in small streams along a gradient from discontinuous to continuous permafrost[J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(9): 1576-1586.
- [40] Schimel J P, Clein J S. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**(8): 1061-1066.
- [41] Mann P J, Eglinton T I, McIntyre C P, *et al.* Utilization of ancient permafrost carbon in headwaters of Arctic fluvial networks[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 7856.
- [42] Wickland K P, Neff J C, Aiken G R. Dissolved organic carbon in Alaskan boreal forest: sources, chemical characteristics, and biodegradability[J]. *Ecosystems*, 2007, **10**(8): 1323-1340.

欢迎订阅 2018 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2018 年为大 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)