

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芸, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪细炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响

王梦雪^{1,2}, 尹思成^{1,2}, 王振方^{1,2}, 陈锦贤^{1,2}, 张玮^{1,2*}, 王丽卿^{1,2*}

(1. 上海海洋大学水产与生命学院农业农村部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学水产与生命学院环境 DNA 技术与水生态健康评估工程中心, 上海 201306)

摘要: 附着藻类是水体重要的初级生产者,在维持水体生态功能和水质净化方面具有重要的作用。前期研究表明塑料是良好的附着藻类着生基质,不同塑料材质对附着藻类定植影响不同,但有关塑料颜色对附着藻类生长影响的研究还鲜见报道。以不同颜色的聚碳酸酯塑料(PC)为附着基质,通过测定附着藻类的生物量、光合作用活力和群落组成等,探究其对附着藻类生长和群落结构的影响。结果表明,整个实验周期内,茶色PC塑料会抑制附着藻类的生长,该组叶绿素a和干重含量显著低于其他实验组。绿色PC塑料会抑制附着藻类的光合活力,该组的实际光合效率(Yield)显著低于其他实验组。不同颜色PC塑料对附着藻类影响主要在前期定植/发育阶段,后期群落成熟时影响不显著。实验第7 d,透明PC塑料组和绿色PC塑料组附着藻类的群落组成有显著差异;第25 d和第40 d,各实验组的附着藻类的群落结构趋同,无显著差异。实验初期(第7 d),各实验组的优势属为蓝藻门伪鱼腥藻属,中后期(第25 d和40 d)为绿藻门转板藻属。本研究初步探讨了不同颜色的PC塑料对附着藻类生长和群落发育的影响,可为利用周丛生物技术开展水污染治理时,挑选合适颜色的附着基质,提供参考资料。

关键词: 附着藻类; 附着基质; 聚碳酸酯塑料; 颜色; 群落结构

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0243-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202203195

Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae

WANG Meng-xue^{1,2}, YIN Si-cheng^{1,2}, WANG Zhen-fang^{1,2}, CHEN Jin-xian^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2*}, WANG Li-qing^{1,2*}

(1. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrient (CREEFN) of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Engineering Research Center of Environmental DNA and Ecological Water Health Assessment, College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Periphytic algae are important primary producers in water bodies, which play an important role in maintaining ecological function and water purification. Previous studies have shown that plastic is a good substrate for periphytic algae, and different plastic materials have different effects on the colonization of periphytic algae; however, there are few reports on the effects of plastic color on the growth of periphytic algae. In this study, polycarbonate plastic (PC) of various colors were used as the substrate to study the effects of different colors on the growth and community structure of periphytic algae by measuring the biomass, photosynthetic activity, and community composition. The results showed that the growth of periphytic algae was inhibited by the brown PC plastic, and the contents of chlorophyll a and dry weight in this group were significantly lower than those in other groups. Green PC plastic inhibited the photosynthetic activity of periphytic algae, and the actual photosynthetic efficiency (Yield) of the group was significantly lower than that of the other groups. The influence of PC plastic with different colors on periphytic algae occurred mainly in the early colonization/development stage but was not significant in the late community maturity stage. On day seven of the experiment, the community composition of periphytic algae was significantly different between the transparent PC plastic group and the green PC plastic group. By contrast, on days 25 and 40, there were no significant differences in the community structure of periphytic algae. In the early stage of the experiment, the dominant genus was *Pseudoranea* (Cyanophyta), and in the middle and mature stages, the dominant genus was *Mougeotia* (Chlorophyta). In this study, the effects of different colors of polycarbonate plastics on periphytic algae were investigated, which provided new insights for selecting suitable substrates for water pollution treatment by using periphyton biotechnology.

Key words: periphytic algae; substrates; polycarbonate plastic; colors; community structure

附着藻类/附着藻膜(periphytic algae)是指生长在淹没于水体中的各种基质表面的层状藻类群落^[1~5]。附着藻类群落结构复杂,对生态环境变化具有独特的敏感性,可以快速地地进行群落重建,并对水环境的变化做出响应^[6,7]。因此,附着藻类常被认为是水质监测、生态系统健康指示和生态毒性评价的优良指示生物。此外,附着藻类还可以通过影响水体初级生产力、食物链和养分循环,在自然水生生态系统的物质转化和能量流动中发挥重要作用^[8,9];这也使得附着藻类在水质净化、污染物降解和生态

恢复等方面发挥巨大的应用潜能^[3,7]。谷雪维^[10]利用成熟期附着藻膜对抗生素的去除研究发现,在20 d内其对恩诺沙星的去除率高达90%,对磺胺的去除率也可达50%。孙沉沉等^[11]研究发现,当污水中加入吡啶乙酸时,7 d内附着藻膜对氮磷去除率超过80%。

收稿日期: 2022-03-22; 修订日期: 2022-04-21

基金项目: 上海市科委科研项目(19DZ1204504)

作者简介: 王梦雪(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为藻类生态学, E-mail: aquawangmx@163.com

* 通信作者, E-mail: weizhang@shou.edu.cn; lqwang@shou.edu.cn

附着藻类的生物量和群落组成和其生态功能密切相关,而影响附着藻类群落组成因素通常包括:附着基质的类型、淹没时间、水体的理化性质、光照和营养物质等^[2,12~14]. 其中,附着基质是附着藻类生长的首要条件,它影响着后续的生物定殖、群落演替、生产力动态变化和对水体污染物的净化能力等. Tsavatopoulou 等^[15]以 6 种不同材料(软木、海绵毛巾、牛仔布、有机塑料板、不锈钢和硅橡胶)作为基质研究了对栅藻(*Scenedesmus* spp.)生物膜形成的影响,结果表明有机塑料板可获得最大的附着藻类生物量. Oberbeckmann 等^[16]和 Ogonowski 等^[17]的研究表明,不同塑料聚合物类型(PET、HDEP 和 LDEP)上的附着藻类群落组成之间存在显著差异. 除了附着基质的材质之外,其本身的粗糙度、表面积等性质也是影响附着藻膜形成和发育的重要因素^[18]. 伍良雨等^[18]研究发现,具有粗糙表面、可以提供营养物质的载体可能会更有利于附着藻膜的形成和生长. Guo 等^[19]研究发现,附着基质的表面积越大,附着生物更易附着. 塑料基质除了材质和表面特征不同外,颜色也非常丰富. 近期调查发现,水体中的塑料制品或残片的颜色就多达十余种^[20,21]. 尽管 Xu 等^[22]研究发现,不同颜色的塑料膜遮光,会对水体浮游植物群落产生显著影响,然而,目前有关于塑料颜色对附着藻类生物膜生长发育和群落结构影响的研究还鲜见报道.

本研究选取了 5 种颜色的 PC 塑料(透明、绿色、蓝色、茶色和白色)作为附着基质,通过测定其上生长的附着藻类的叶绿素 a、干重、光合作用活力和群落结构组成,来探究不同颜色的 PC 塑料作为附着基质对附着藻类的生长和群落结构的影响,以期利用周丛生物技术开展水污染治理时,挑选合适颜色的附着基质提供参考资料.

1 材料与方法

1.1 实验设计

以 55 L 透明塑料筐(60 cm × 30 cm × 40 cm)作为实验水槽. 2021 年 8 月,在上海海洋大学校园内明湖(30°53'14"N, 121°53'23"E)采集实验用水. 实验用水使用前用浮游动物网(孔径 112 μm)过滤以去除水体中的浮游动物. 实验用水总体积为 48 L,实验期间,每天定时补水维持实验用水总体积不变. 箱底分别铺满透明、绿色、蓝色、茶色和白色 PC 塑料板(10 cm × 3 cm × 0.3 cm)作为附着藻类生长的附着基质,每组设 3 个平行,不同颜色对光的透射比见图 1. 静置培养 7 d 待附着藻类定植. 第 7 d 作开始实验的第一次采样,此后,每隔 2 d(即在第 7、

10、13、16、19、22、25、31、34 和 40 d 取样)进行采样.

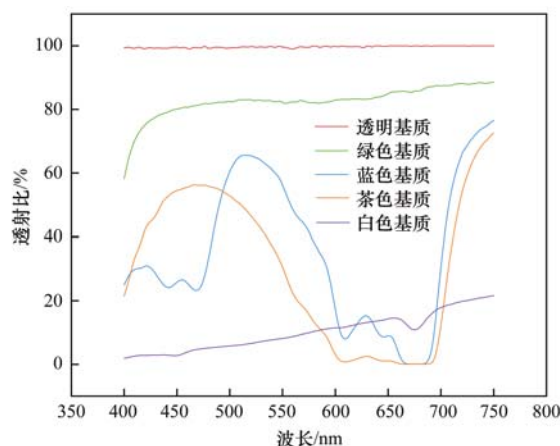


图 1 不同颜色 PC 塑料的透光性

Fig. 1 Light transmittance of PC plastics with different colors

1.2 指标测定

每次取 2 片 PC 板(总面积为 60 cm²),使用硬毛牙刷将其表面上的附着生物全部刷下,并用去离子水冲洗附着基和牙刷,将获得的藻水混合液定容至 100 mL. 用超声波振荡,使其分散,获得均匀藻液,用于后续分析. 丙酮法对附着藻类的叶绿素 a 含量进行测定^[23]. 干重法测定附着藻类干重含量^[10]. 使用浮游植物荧光分析仪(Phyto-PAM, Walz, Germany)测定光合系统 II(PS II)的最大光合效率(F_v/F_m)和实际光合效率(Yield)^[24,25].

选取第 7、25 和 40 d 的附着藻类样品分析鉴定物种组成. 样品分析鉴定前,先用 10% 的甲醛和 4% 的鲁格试剂进行固定^[26]. 然后,取 0.1 mL 固定好的样品于浮游植物计数框内,用普通光学显微镜(Olympus CX21)对藻类进行分类鉴定和计数. 藻类鉴定方法依据文献^[27~29].

1.3 数据分析

1.3.1 优势种

依据 McNaughton 优势度指数(Y),确定优势种,计算公式如下^[30,31]:

$$Y = (n_i/N) \times f_i$$

式中, f_i 为物种*i*出现的频率, N 为同一样点中的个体总数, n_i 为物种*i*的个体数; $Y > 0.02$ 则为优势种.

1.3.2 数据统计分析

利用 Microsoft Excel 2013 (Microsoft, America)对实验数据进行预处理,实验数据由平均值 ± 标准偏差(SD)表示,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较不同实验组间各指标差异的显著性,采用方差齐性检验检测正态分布, $P < 0.05$ 认为具有显著差异性, $P < 0.01$ 认为具有极显著的差异

性. 根据附着藻类群落结构之间的 Bray-Curtis 距离矩阵, 进行主坐标分析 (principal coordinates analysis, PCoA) 不同组别之间的群落 β 多样性. 所有统计分析均在 SPSS 26.0 和 R 中完成, 运用 Origin 2019 进行图表的绘制.

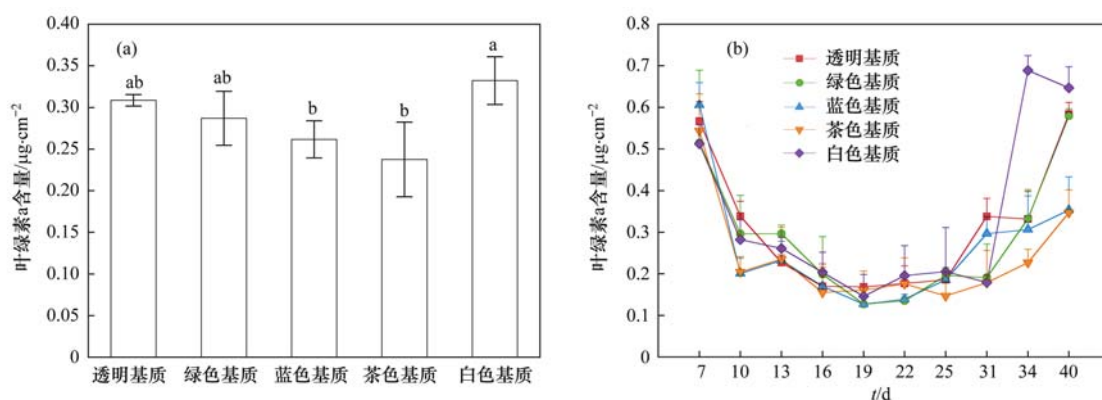
2 结果和分析

2.1 附着藻类生长量的变化

茶色组的叶绿素 a 含量显著低于透明组 ($P < 0.05$), 极显著低于白色组 ($P < 0.01$) [图 2(a)]. 白色组的叶绿素 a 含量显著高于蓝色组 [$P < 0.05$, 图 2(a)]. 所有实验组附着藻类的叶绿素 a 含量均呈现先

降低后升高的趋势[图 2(b)]. 白色组的叶绿素 a 含量在第 34 d 出现最大值 (0.69 ± 0.04) $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 且显著高于其他实验组 [$P < 0.05$, 图 2(b)].

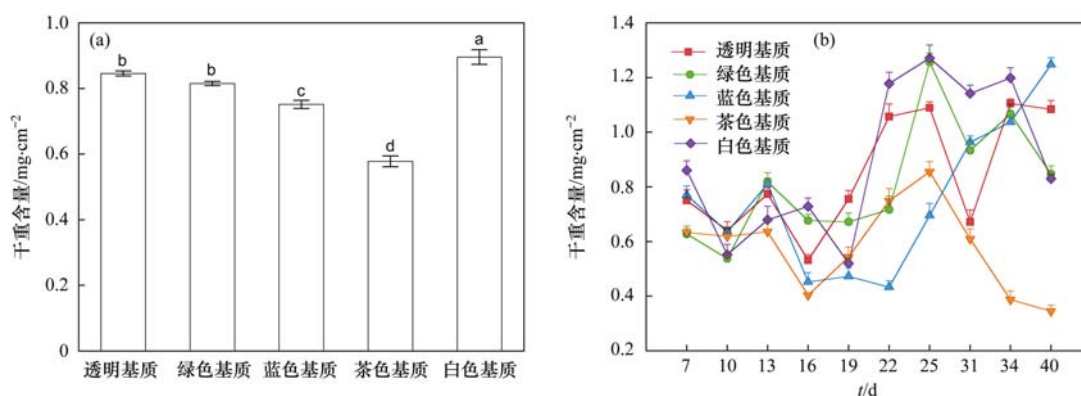
茶色组的干重含量极显著低于其他 4 个实验组 [$P < 0.01$, 图 3(a)]. 蓝色组的干重含量极显著低于透明组、绿色组和白色组 [$P < 0.01$, 图 3(a)]. 绿色组和透明组的干重含量极显著低于白色组 ($P < 0.01$), 绿色组和透明组的干重含量之间没有显著差异 [$P > 0.05$, 图 3(a)]. 茶色组的干重含量从第 25 d [$(0.86 \pm 0.04) \text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$] 开始持续降低, 蓝色组的干重含量从第 22 d [$(0.43 \pm 0.02) \text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$] 开始持续上升[图 3(b)].



(a) 整个实验周期内叶绿素 a 含量平均值, (b) 叶绿素 a 含量随时间的变化情况; 不同小写字母表示不同处理组之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 下同

图 2 不同颜色 PC 塑料板上附着藻类叶绿素 a 含量

Fig. 2 Chlorophyll a content of periphytic algae on PC substrates with different colors



(a) 整个实验周期内干重含量平均值, (b) 干重含量随时间的变化情况

图 3 不同颜色 PC 塑料板上附着藻类干重含量

Fig. 3 Dry weight content of periphytic algae on PC substrates with different colors

2.2 附着藻叶绿素荧光参数的变化

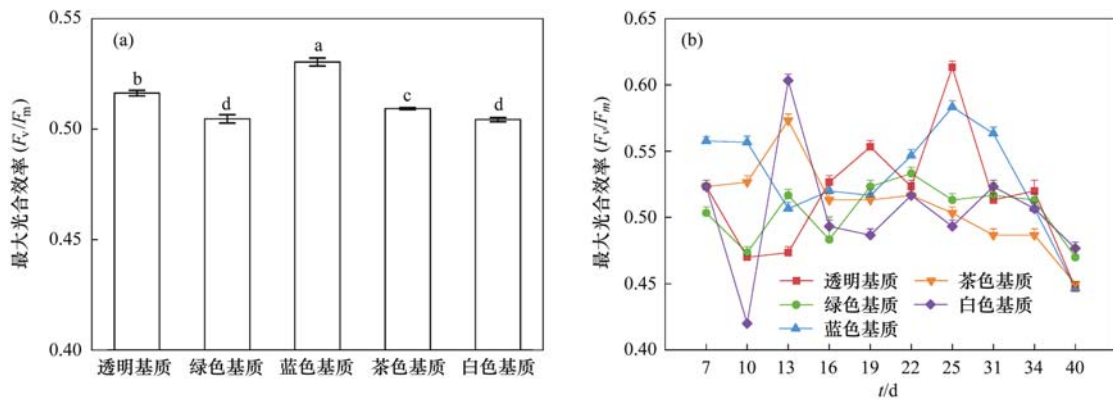
蓝色组的 F_v/F_m 显著高于其他 4 个实验组 [$P < 0.05$, 图 4(a)]. 从第 25 d 开始, 所有实验组的 F_v/F_m 呈持续下降趋势, 并在第 40 d 降到最低[图 4(b)]. 透明组第 25 d 的 F_v/F_m 达到整个实验周期的最大值 (0.61 ± 0.00) [图 4(b)]. 茶色组的 F_v/F_m

在第 13 d 达到最大值 (0.57 ± 0.00), 之后持续下降[图 4(b)].

随着时间的变化情况绿色组的 Yield 显著低于其他 4 个颜色组 [$P < 0.05$, 图 5(a)]. 所有实验组的 Yield 从第 10 d 之后均呈现先上升后下降的趋势[图 5(a)]. 透明组、绿色组、茶色组和白色组均在

第 10 d 出现最小值,而蓝色组在第 40 d 出现最小值 (0.45 ± 0.00) [图 5(b)]. 各实验组的 Yield 最大值

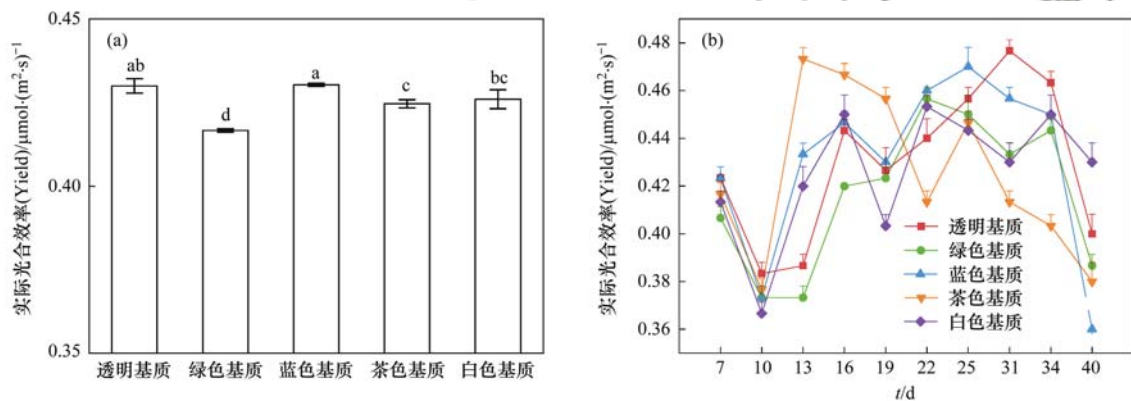
出现时间不同,大小依次为:透明组、茶色组、蓝色组、绿色组和白色组[图 5(b)].



(a) 整个实验周期内最大光合效率 (F_v/F_m) 平均值, (b) 最大光合效率 (F_v/F_m) 随时间的变化情况

图 4 不同颜色 PC 塑料板上附着藻类最大光合效率 (F_v/F_m)

Fig. 4 Maximum photosynthetic efficiency (F_v/F_m) of periphytic algae on PC substrates with different colors



(a) 整个实验周期内实际光合效率平均值, (b) 实际光合效率随时间的变化情况

图 5 不同颜色 PC 塑料板上附着藻类实际光合效率 (Yield)

Fig. 5 Actual photosynthetic efficiency (Yield) of periphytic algae on PC substrates with different colors

2.3 附着藻群落结构的变化

各实验组中附着藻类群落主要由蓝藻门、绿藻门和硅藻门组成。绿色组在第 7 d 的生物密度为 $4.91 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-2}$, 显著高于透明组的 $1.78 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($P < 0.05$, 图 6)。除绿色组外, 其他 4 个实验组的蓝藻门的相对丰度从第 7 d (实验初期) 到第 25 d 再到第 40 d (实验结束) 均呈现先减少再增加的趋势, 绿藻门则表现为先升高再减少的趋势 (图 6)。

本实验初期 (第 7 d), 透明、蓝色、茶色和白色这 4 个实验组中附着藻类相对丰度大小为: 绿藻门 > 蓝藻门 > 硅藻门, 而绿色组则是蓝藻门的相对丰度最高 (图 7)。绿色组在实验中期和后期, 绿藻门的相对丰度远大于其他门类 (图 7)。

主坐标分析 (PCoA 分析) 的结果显示, 实验第 7 d 透明组和绿色组的群落组成在 PCoA 1 上相距较远, 有显著性差异 [$P < 0.05$, 图 8(a)]。实验第 25 d

和实验第 40 d, 各实验组的群落组成有大量重叠, 表明在第 25 d 和第 40 d 各实验组的群落组成没有显著差异 [$P > 0.05$, 图 8(b) 和 8(c)]。

实验初期 (第 7 d) 蓝藻门的伪鱼腥藻属 (*Pseudoanabaena*) 为所有实验组的优势属, 在实验中后期 (第 25 d 和第 40 d) 绿藻门的转板藻属 (*Mougeotia*) 为优势属 (图 9)。

3 讨论

本研究中, 所有实验组附着藻类的物种主要是由蓝藻门、绿藻门和硅藻门这三大门类组成。实验中期, 蓝藻门的占比下降而绿藻门上升; 随着附着藻膜的成熟, 实验中后期硅藻门的占比持续降低 (图 6 和图 7)。定植初期 (第 7 d) 透明组和绿色组的附着藻类生物密度差别较大, PCoA 分析表明, 两处理组藻类群落有显著差异 ($P < 0.05$)。这可能是因为实验初期 (第 7 d) 定植者直接和附着基质表面接

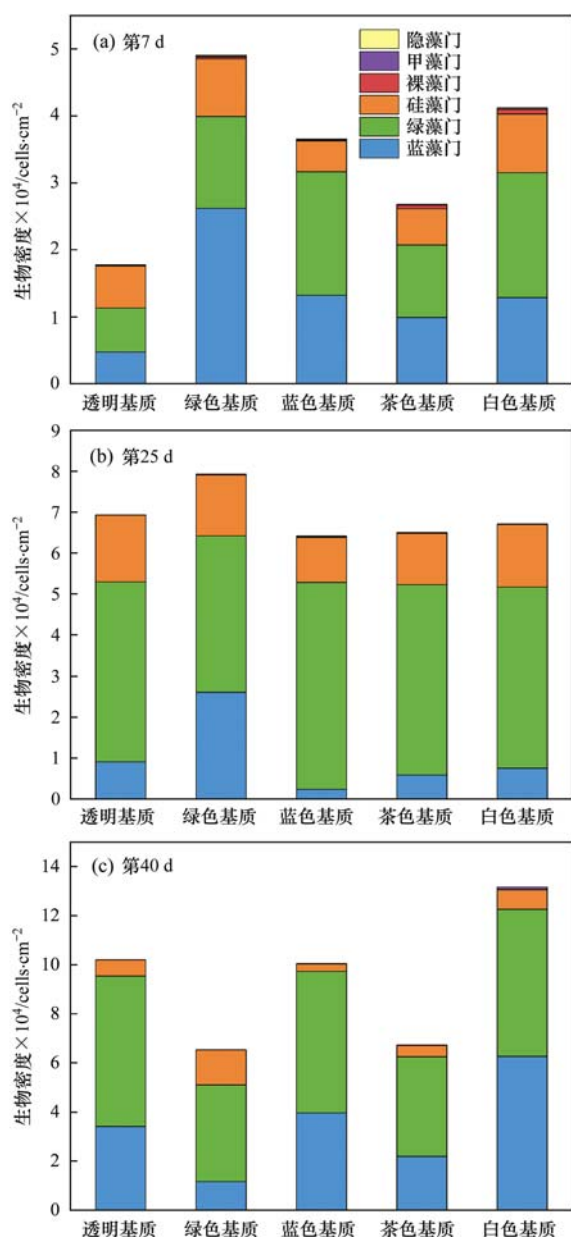
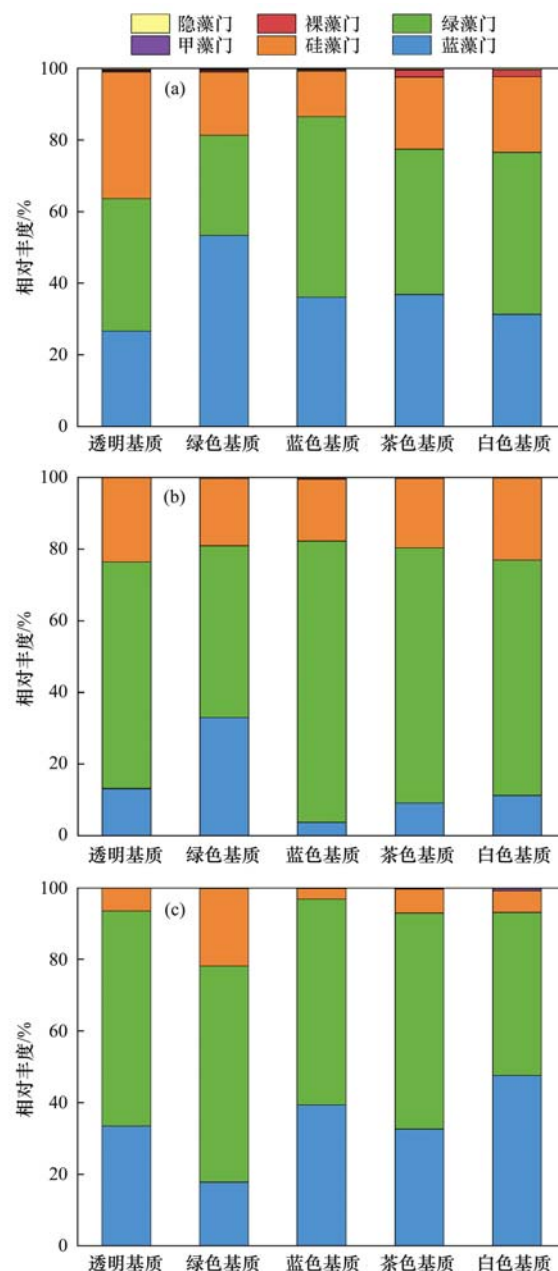


图6 附着藻类群落不同生长时间的生物密度

Fig. 6 Abundance of periphytic algae at different growth time

触,附着藻类更易受到附着基质颜色添加剂的影响,即不同藻类物种对不同的颜色添加剂的敏感度和耐受力不同,这可能会导致各实验组的附着藻类群落组成不同^[32].塑料制品在生产过程中,人为添加的添加剂,如增塑剂、阻燃剂、颜料、抗菌剂和热稳定剂等,可以确定和改变特定的塑料特性^[33].如 Oehlmann 等^[34]研究发现,塑化剂会干扰不同海洋生物群体的激素功能,影响其发育和繁殖. De Tender 等^[35]研究发现,塑料颗粒中的某些色素可以解释附着细菌定植的差异,如 *Mycobacterium frederiksbergense*,在蓝色和黄色的塑料上具有较高的丰度,而在其他塑料颗粒上几乎没有;这种差异的产生是因为这两种塑料上存在萘衍生物,从而影响了细菌的定植.本研究中后期(第25 d和40 d)附着

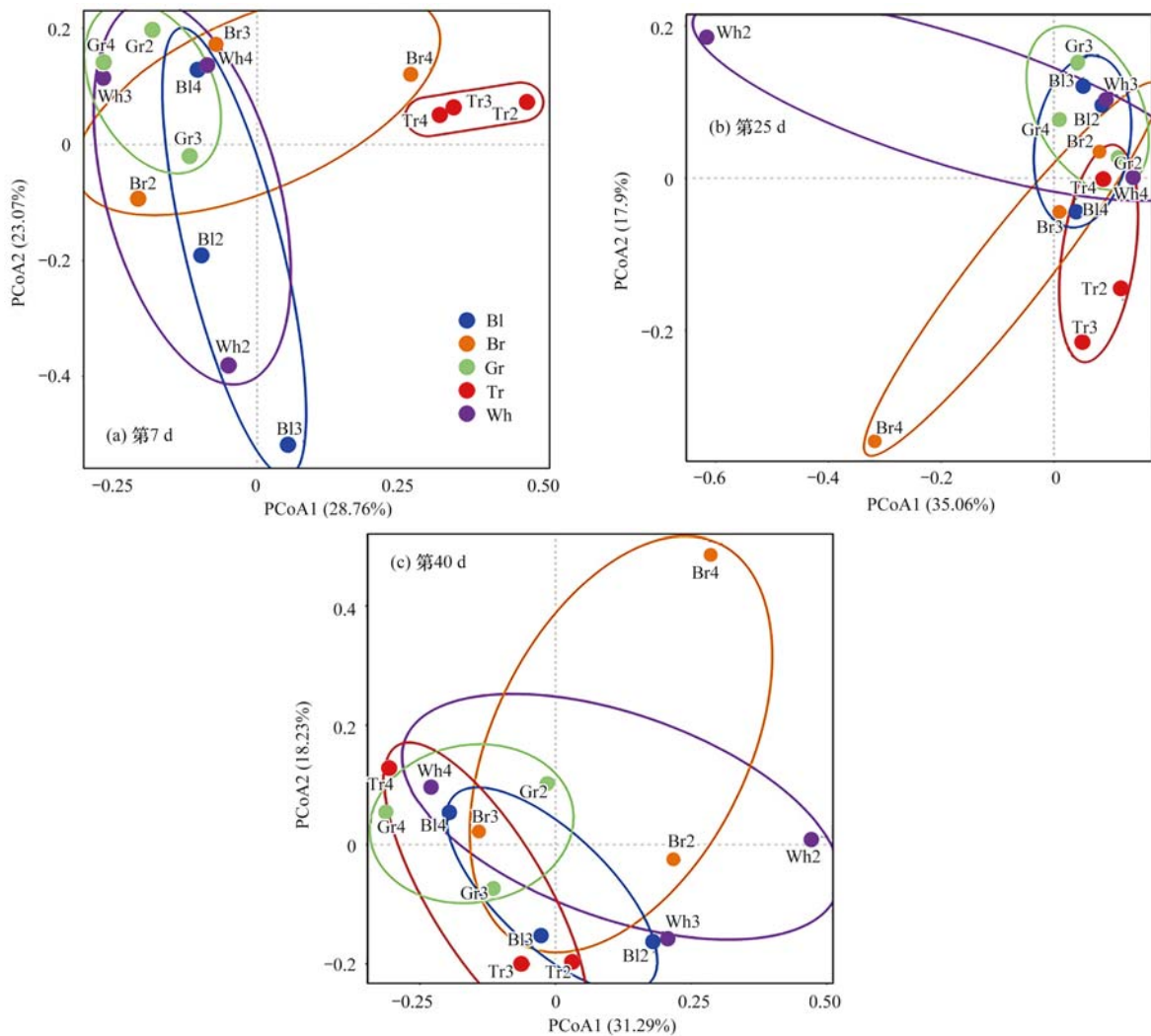


(a) 第7 d, (b) 第25 d, (c) 第40 d

图7 附着藻类不同生长时间的相对丰度

Fig. 7 Relative abundance of periphytic algae at different growth time

藻类总生物密度无显著差异($P > 0.05$); PCoA 分析也发现,各实验组附着藻类的群落结构趋同,虽有差异,但不显著($P > 0.05$).这可能是由于随着附着藻膜的逐步发育成熟,生物膜厚度不断增加^[36,37],后期定植的附着藻类不再直接和附着基质接触,基质本身化学特性对附着藻类群落组成的影响逐渐减小^[38,39]. Oberbeckmann 等^[40]研究发现,在 PS、PE 和木板上培养2周后,新的附着藻膜可能会直接定植到已形成的附着藻膜上形成次级附着藻层,主要和现有附着藻膜有关,而非附着基质本身.附着藻膜在自然水体中发育成熟一般需要3~4周时间,分为



Bl 表示蓝色(blue); Br 表示茶色(brown); Gr 表示绿色(green); Tr 表示透明(transparent); Wh 表示白色(white)

图8 附着藻类群落不同生长时间 PCoA 分析

Fig. 8 PCoA analysis of periphytic algae community at different growth time

两个阶段,第一个阶段是不同环境条件下附着生物在附着基质表面的定植,第二个阶段是后续的附着生物和基质表面已存在的附着藻之间的相互作用^[32]. 所以,只有早期的主要定植者,才有可能直接和附着基质相互作用,受到附着基质的影响较大.

本研究中,叶绿素 a 含量在初期(第 7 d)较高,叶绿素 a 和干重含量呈现先降低后上升的“U”现象(图 2 和图 3),这可能因为:本实验将附着基平铺于水槽底部,附着藻类的种源主要由水柱中的藻类沉降而来;水柱中浮游藻和真性附着藻类并存,在无水流运动的情况下,无鞭毛藻类会开始下沉^[41],在首次测定时,叶绿素 a 含量来源主要为水柱沉降的藻类,之后,一些不能适应附着/底栖生活的藻类会逐渐死亡,可营附着/底栖生活的藻类逐渐增加,演替为附着藻类群落. 本研究中,茶色 PC 塑料组会抑制附着藻类的生长,该组叶绿素 a 和干重含量显著低于其他实验组(图 2). 不同颜色的 PC 塑料上附着

藻类的生长的差异可能是由不同颜色对光的选择性吸收造成的. 唐青青等^[42]和魏群等^[43]研究都表明,红蓝光有利于蛋白核小球藻叶绿素 a 和 β -胡萝卜素的合成,而蓝光可促进叶绿素 b 的合成. 如韩军军等^[44]研究发现,藻类对可见光的吸收波长主要集中在 400 ~ 510 nm 的蓝紫光区和 610 ~ 720 nm 的红橙光区. 本实验中,透明组和绿色组在 400 ~ 750 nm 的透射比远高于其他实验组. 蓝色组、茶色组和白色组分别在 512、465 和 748 nm 出现峰值. 在 600 ~ 700 nm 范围内,白色组的透射比高于绿色组和茶色组(图 1). F_v/F_m 表示植物的最大光合效率,它反映的是植物的光合能力的强弱. Yield 表示植物叶片中光系统 II 的实际光合效率,反映了光系统 II 在部分反应中心关闭的情况下,植物叶片实际的光能捕获效率^[4]. 茶色组的 F_v/F_m 和 Yield 从第 13 d 起持续降低(图 4 和图 5),这反映了茶色组附着藻类 PS II 反应中心内光能转换效

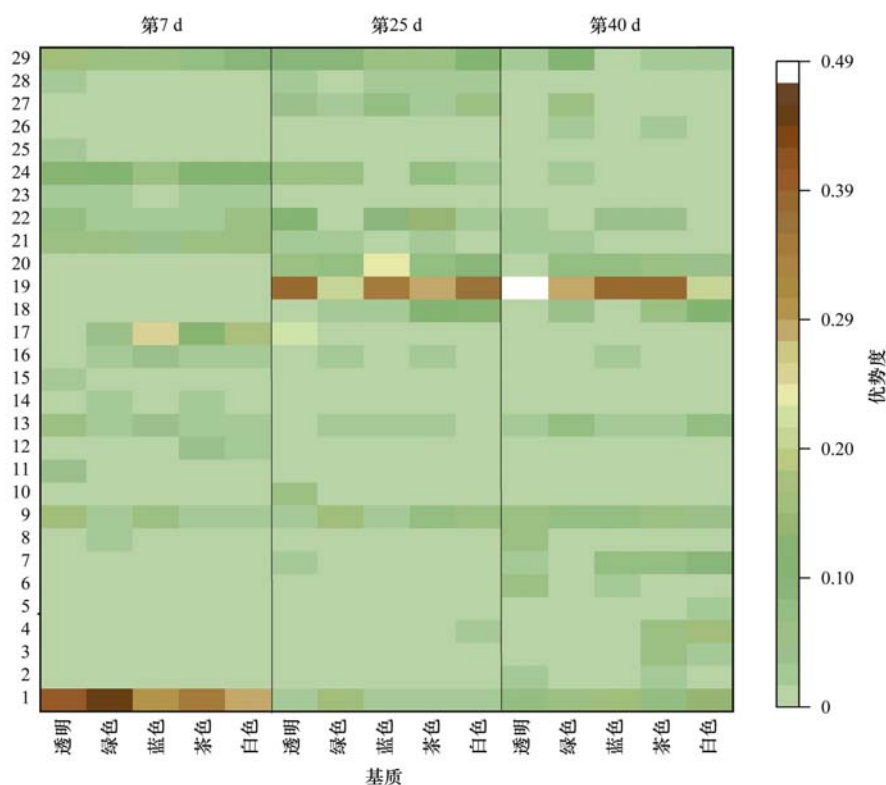


图9 不同颜色 PC 塑料板上第 7、25 和 40 d 附着藻类优势属

Fig. 9 Dominant genera of periphytic algae on day 7, 25, and 40 on PC substrates with different colors

率的下降. 茶色组 Yield 值在实验中后期低于其他组, 表明茶色组的最大光合效率 (F_v/F_m) 和实际光合效率 (Yield) 在中后期持续减弱, 从而使附着藻类的生长受到限制.

4 结论

PC 塑料颜色差异导致对附着藻类群落结构影响主要在发育/定植阶段, 对后期发育成熟阶段的影响不大. 群落发育初期 (实验第 7 d), 绿色组附着藻类的生物密度高于其他实验组, 而中后期 (第 25 d 和 40 d) 各实验组群落结构趋同, 密度无显著差异. 总体上, 茶色 PC 塑料会抑制附着藻类的生长, 而绿色 PC 塑料会抑制附着藻类的光合作用活力, 白色 PC 可获得最高生物量.

参考文献:

- [1] Dickman M. Changes in periphyton community structure following diatom inhibition[J]. *Oikos*, 1974, **25**(2): 187-193.
- [2] Azim M E, Wahab M A, Verdegem M C J, et al. The effects of artificial substrates on freshwater pond productivity and water quality and the implications for periphyton-based aquaculture [J]. *Aquatic Living Resources*, 2002, **15**(4): 231-241.
- [3] Wu Y H. Periphyton: functions and application in environmental remediation[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- [4] Larned S T. A prospectus for periphyton: recent and future ecological research [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, **29**(1): 182-206.
- [5] 陈重军, 韩志英, 朱荫涓, 等. 周丛藻类及其在水质净化中的应用[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(11): 2820-2826.
- [6] Chen C J, Han Z Y, Zhu Y M, et al. Periphyton and its application in water purification[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(11): 2820-2826.
- [7] Stevenson R J. Epilithic and epipellic diatoms in the Sandusky River, with emphasis on species diversity and water pollution [J]. *Hydrobiologia*, 1984, **114**(3): 161-175.
- [8] 梁霞. 周丛藻类环境响应与水质处理应用研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [9] Liang X. Effect of periphyton on water environment and its application in water quality treatment[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007.
- [10] Battin T J, Kaplan L A, Newbold J D, et al. Contributions of microbial biofilms to ecosystem processes in stream mesocosms [J]. *Nature*, 2003, **426**(6965): 439-442.
- [11] Cantonati M, Lowe R L. Lake benthic algae: toward an understanding of their ecology[J]. *Freshwater Science*, 2014, **33**(2): 475-486.

- [10] 谷雪维. 周丛生物对恩诺沙星和磺胺的生物降解研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
Gu X W. Study on biodegradation of enrofloxacin and sulfanilamide by periphyton [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [11] 孙沉沉, 马兰, 吴永红, 等. 吡啶乙酸对周丛生物去除水体中氮磷的影响及机理[J]. 中国农业科技导报, 2022, **24** (3): 204-209.
Sun C C, Ma L, Wu Y H, *et al.* Effects and mechanism of indoleacetic acid on the removal of nitrogen and phosphorus from water by peripheral organisms [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, **24** (3): 204-209.
- [12] Murdock J N, Dodds W K. Linking benthic algal biomass to stream substratum topography[J]. Journal of Phycology, 2007, **43** (3): 449-460.
- [13] Azim M E, Asaeda T. Periphyton structure, diversity and colonization[A]. In: Azim M E, Verdegem M C J, van Dam A A, *et al.* (Eds.). Periphyton: Ecology, Exploitation and Management[M]. Oxford: CABI, 2005.
- [14] Chessman B, Gowns I R, Currey J, *et al.* Predicting diatom communities at the genus level for the rapid biological assessment of rivers[J]. Freshwater Biology, 1999, **41** (2): 317-331.
- [15] Tsavatopoulou V D, Manariotis I D. The effect of surface properties on the formation of *Scenedesmus rubescens* biofilm[J]. Algal Research, 2020, **52**, doi: 10.1016/j.algal.2020.102095.
- [16] Oberbeckmann S, Loeder M G J, Gerdts G, *et al.* Spatial and seasonal variation in diversity and structure of microbial biofilms on marine plastics in Northern European waters[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2014, **90** (2): 478-492.
- [17] Ogonowski M, Motiei A, Ininbergs K, *et al.* Evidence for selective bacterial community structuring on microplastics[J]. Environmental Microbiology, 2018, **20** (8): 2796-2808.
- [18] 伍良雨, 吴辰熙, 康杜. 载体对周丛生物生物量和群落的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2019, **42** (1): 50-57.
Wu L Y, Wu C X, Kang D. Study on the effect of substrate on biomass and community of periphyton[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **42** (1): 50-57.
- [19] Guo K, Freguia S, Dennis P G, *et al.* Effects of surface charge and hydrophobicity on anodic biofilm formation, community composition, and current generation in bioelectrochemical systems[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47** (13): 7563-7570.
- [20] Zhao S Y, Zhu L X, Wang T, *et al.* Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: first observations on occurrence, distribution[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **86** (1-2): 562-568.
- [21] Nor N H M, Obbard J P. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **79** (1-2): 278-283.
- [22] Xu L, Pan W W, Yang G J, *et al.* Impact of light quality on freshwater phytoplankton community in outdoor mesocosms[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, **28** (41): 58536-58548.
- [23] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [24] Roháček K, Barták M. Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters, and some applications[J]. Photosynthetica, 1999, **37** (3): 339-363.
- [25] Zhang W, Jeppesen E, Wang M M, *et al.* Allelopathic effect boosts *Chrysosporium ovalisporum* dominance in summer at the expense of *Microcystis panniformis* in a shallow coastal water body [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24** (5): 4666-4675.
- [26] SL 733-2016, 内陆水域浮游植物监测技术规程[S].
SL 733-2016, Technical code of phytoplankton monitoring in inland waters[S].
- [27] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类-系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of China-systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [28] 魏印心. 中国淡水藻志-第七卷, 第1册-绿藻门, 双星藻目中带鼓藻科 鼓藻目 鼓藻科[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [29] 王全喜, 曹建国, 刘妍, 等. 上海九段沙湿地自然保护区及其附近水域藻类图集[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Wang Q X, Cao J G, Liu Y, *et al.* Atlas of algae in Shanghai Jiuduansha Wetland nature reserve and its adjacent waters[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [30] 潘成梅, 刘洋, 安瑞志, 等. 西藏麦地卡湿地的浮游植物——1. 优势种的时空生态位[J]. 湖泊科学, 2021, **33** (6): 1805-1819.
Pan C M, Liu Y, An R Z, *et al.* Phytoplankton in the Mitika Wetland, Tibet, China: 1. Spatio-temporal niche of dominant species[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, **33** (6): 1805-1819.
- [31] 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 等. 晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2022, **43** (9): 4576-4586.
Gao M D, Li Y F, Li Y L, *et al.* Characteristics of phytoplankton community structure and their relationships with environmental factors in autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region[J]. Environmental Science, 2022, **43** (9): 4576-4586.
- [32] Yang Y Y, Liu W Z, Zhang Z L, *et al.* Microplastics provide new microbial niches in aquatic environments [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2020, **104** (15): 6501-6511.
- [33] Smith M, Love D C, Rochman C M, *et al.* Microplastics in seafood and the implications for human health [J]. Current Environmental Health Reports, 2018, **5** (3): 375-386.
- [34] Oehlmann J, Schulte-Oehlmann U, Kloas W, *et al.* A critical analysis of the biological impacts of plasticizers on wildlife[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2009, **364** (1526): 2047-2062.
- [35] De Tender C A, Devriese L I, Haegeman A, *et al.* Bacterial community profiling of plastic litter in the Belgian part of the North Sea[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49** (16): 9629-9638.
- [36] Pinto M, Langer T M, Hüffer T, *et al.* The composition of bacterial communities associated with plastic biofilms differs between different polymers and stages of biofilm succession[J]. PLoS One, 2019, **14** (6), doi: 10.1371/journal.pone.0217165.
- [37] Wright R J, Erni-Cassola G, Zadjelovic V, *et al.* Marine plastic debris: a new surface for microbial colonization [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54** (19): 11657-11672.
- [38] Dudek K L, Cruz B N, Polidoro B, *et al.* Microbial colonization of microplastics in the Caribbean Sea[J]. PLoS One, 2020, **5** (1): 5-17.
- [39] Oberbeckmann S, Osborn A M, Duhaime M B. Microbes on a bottle: substrate, season and geography influence community composition of microbes colonizing marine plastic debris[J]. PLoS One, 2016, **11** (8), doi: 10.1371/journal.pone.

- 0159289.
- [40] Oberbeckmann S, Bartosik D, Huang S X, *et al.* Genomic and proteomic profiles of biofilms on microplastics are decoupled from artificial surface properties [J]. *Environmental Microbiology*, 2021, **23**(6): 3099-3115.
- [41] 张秋节. 浮游藻类和附着藻类生长特性的对比研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- Zhang Q J. The comparative study of growth characteristics about phytoplankton and attached algae [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [42] 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 等. 光质对蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 生长特征及生化组成的影响研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4212-4217.
- Tang Q Q, Fang Z G, Ji W W, *et al.* Effects of light quality on the growth characteristics and biochemical component of *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4212-4217.
- [43] 魏群, 毛瑞, 马湘蒙, 等. 光质对蛋白核小球藻膜生长及除镉效果的影响[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2021, **42**(1): 16-21.
- Wei Q, Mao R, Ma X M, *et al.* Effects of light quality on the growth of *Chlorella pyrenoidosa* biofilm and cadmium removal [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2021, **42**(1): 16-21.
- [44] 韩军军, 钟晨辉, 何培民, 等. 不同光质 LED 光源对坛紫菜自由丝状体生长和生理特性的影响[J]. *水产学报*, 2017, **41**(2): 230-239.
- Han J J, Zhong C H, He P M, *et al.* Effects of different light-qualities on growth and physiological characteristics of free living conchocelis of *Pyropia haitanensis* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, **41**(2): 230-239.

环境科学

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)