ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

# ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第4期
2014年4月15日

# 目 次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 …… 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭(1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 …… 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶(1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 …… 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣(1230)
某焦化厂周边大气 $PM_{10}$ 重金属来源及健康风险评价 …… 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽(1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 …… 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔骁勇,许群,宋现锋(1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 …… 孙成玲,谢绍东(1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 …… 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山(1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 …… 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强(1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 …… 王燕,朱春刚,许笛,丁士明(1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 …… 傅玲, 赵凯,王国祥,欧媛,范娴, 毛丽娜,张佳, 韩睿明(1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 …… 孙法圣,程品,张博(1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 …… 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬(1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 …… 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁(1297)
苦草(*Vallisneria natans*)根系对沉积物中各形态磷的影响 …… 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞(1304)
循环流廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 …… 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明(1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 …… 段伦超,王风贺,纪菅雪,张帆,赵斌,王国祥(1318)
再生水中5种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 …… 黄晶晶,汤芳,席劲瑛,庞宇辰,胡洪营(1326)
二级处理出水的 UV-$TiO_2$ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验 …… 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜(1332)
水中 $C_{60}$ 纳米颗粒的稳定性研究 …… 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛(1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 …… 赵应许, 纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽(1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复4-氯硝基苯污染地下水的研究 …… 付融冰(1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 …… 王琪,刘辉,姜林,唐军(1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 …… 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾运, 杨宏(1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 …… 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英(1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 …… 陈燕,黄芳,谢鑫源(1377)
电活性生物膜介导 $Cu^{2+}$ 生物还原的试验研究 …… 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志(1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 …… 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳(1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 …… 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹(1399)
化学合成施氏矿物与 $H_2O_2$ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 …… 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥(1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 …… 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅(1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 …… 董慧峪,季民(1421)
锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 …… 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋轶锋(1428)
1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 …… 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊(1437)
碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 …… 徐冰洁,高品,薛罡,何梦琦,吴凡(1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解菲过程中细菌表面特性的变化 …… 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛(1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 …… 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建(1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 …… 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国(1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 …… 王娓敏,邓珀,邹华,梁婵娟(1468)
东北春大豆品种东生1号对臭氧胁迫的响应 …… 张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠(1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 …… 吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香(1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 …… 陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华(1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 …… 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯芩,吴国平,魏复盛(1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 …… 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞(1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 …… 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊(1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 …… 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭(1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 …… 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赟,王美娥(1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 …… 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬(1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 …… 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡(1531)
SDBS/$Na^+$ 对红壤胶体悬液稳定性的影响 …… 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹(1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 …… 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎(1548)
藻类水体 $Cd^{2+}$ 毒性快速监测新方法研究 …… 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽(1555)
用于1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 …… 龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武(1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 $BrO_3^-$ 吸附性能的研究 …… 钟琼, 李欢(1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 …… 廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤(1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 …… 杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹(1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 …… 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志(1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展 …… 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧(1602)
农副食品加工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 …… 魏源送, 郁达伟,曹磊(1613)
《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

# 生物结皮的发育演替与微生物生物量变化

吴丽[1,2], 张高科[1], 陈晓国[1], 兰书斌[2], 张德禄[3], 胡春香[2*]

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 中国科学院水生生物研究所藻类生物学重点实验室, 武汉 430072; 3. 武汉理工大学理学院, 武汉 430070)

**摘要**: 生物结皮在荒漠地区的生态恢复中具有重要的生态学意义,且不同发育演替阶段的结皮具有不同的生态功能. 通过野外调查、显微观察结合微生物定量分析对腾格里沙漠东南缘沙坡头地区生物结皮的发育演替进行了研究. 结果表明该地区的生物结皮一般按照"藻结皮——>地衣结皮——>藓结皮"的模式发育演替. 随着结皮的发育演替,光合生物生物量逐渐增加,微藻生物量却呈现先增加后减少的趋势. 其中,具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)作为结皮藻类中的第一优势种,在藻结皮中生物量最大,达到 0.33 $mm^3 \cdot g^{-1}$,而爪哇伪枝藻(*Scytonema javanicum*)和(一种)念珠藻(*Nostoc* sp.)在晚期的地衣结皮中生物量达到最大. 另外,研究发现异养微生物生物量在藻结皮中开始增加,但在地衣结皮中呈下降的趋势,最后在藓结皮中异养微生物生物量再次增加并达到最大. 其中细菌数量的增加与结皮有机碳、$Na^+$ 含量的增加显著相关($P < 0.05$),真菌数量的增加与 $K^+$、$Na^+$ 含量的增加显著相关($P < 0.05$). 本研究观察了沙坡头地区生物结皮发育演替的模式,并从环境适应与功能需求的角度探讨了生物结皮发育演替过程中微生物生物量的变化特征,对于理解结皮的发育演替以及荒漠化地区生态恢复过程中结皮的维护管理具有重要的理论与实践意义.

**关键词**:荒漠化; 生物结皮; 发育演替; 微生物; 腾格里沙漠

**中图分类号**: X172 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)04-1479-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2014.04.040

# Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses

WU Li[1,2], ZHANG Gao-ke[1], CHEN Xiao-guo[1], LAN Shu-bin[2], ZHANG De-lu[3], HU Chun-xiang[2]

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Algal Biology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3. School of Sciences, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract**: Biological soil crusts (BSCs) play important ecological roles in vegetation and ecological restoration in desert regions, and different crust developmental and successional stages have different ecological functions. In this experiment, the BSCs in Shapotou region (at southeast edge of Tengger Desert) were investigated to study crust development and succession through field investigation, microscopic observation combined with quantitative analysis of microbial biomasses. The results showed that BSCs in this region generally developed and succeeded from algal crusts, lichen crusts to moss crusts. With the development and succession of BSCs, crust photosynthetic biomass gradually increased, while microalgal biomass showed a first increasing and then decreasing trend. Among the crust algae (cyanobacteia), *Microcoleus vaginatus*, as the first dominant species, occupied the most algal biomass and reached a maximum of 0.33 $mm^3 \cdot g^{-1}$ crusts in algal crusts; while *Scytonema javanicum* and *Nostoc* sp. have their maximal biomasses in the later lichen crusts. In addition, it was found that the heterotrophic microbial biomass began to increase in algal crusts, and then decreased in lichen crusts; followed by another increase and the increase achieved the maximum at last in moss crusts. Through the correlation analysis, it was found that bacterial biomass significantly positively correlated with crust organic carbon and $Na^+$ content, while fungal biomass positively correlated with $K^+$ and $Na^+$ content ($P < 0.05$). In conclusion, this study investigated the developmental and successional patterns of BSCs in Shapotou region, and discussed the effects of crust development and succession on several microbial biomasses from the point of view of environmental adaptation and functional requirement, which may be helpful for us to understand crust development and succession, and provide theoretical and practical significances for crust maintenance and management in ecological restoration of desertification regions.

**Key words**: desertification; biological soil crusts (BSCs); development and succession; microorganisms; Tengger Desert

全世界干旱、半干旱荒漠地区占到陆地面积的 33% ~40%,在这些地区有限的水分承载力限制了大多维管植物的生存,然而生物结皮却能够广泛分布,甚至在一些地区占到生物覆盖的 70% 以上[1,2]. 生物结皮是由藻类、地衣、苔藓、真菌及异养细菌

**收稿日期**: 2013-08-07; **修订日期**: 2013-09-29

**基金项目**: 国家自然科学基金项目(31300100; 31170464); 林业公益性行业科研专项(201404204); 中国博士后科学基金项目(2013M542077)

**作者简介**: 吴丽(1983 ~), 女, 博士, 主要研究方向为藻类环境生物学, E-mail: wuli774@126.com

* 通讯联系人, E-mail: cxhu@ihb.ac.cn

等生物组分胶结土壤颗粒在地表形成的一层易剥离的复合生物土壤层,它们在荒漠地区的土表稳定、营养改善、水分循环等方面起着非常重要的作用[1,3,4]. 同时,促进生物结皮的生长发育也被认为是抑制沙尘、改善荒漠生境最有效的方法之一[5,6]. 正是由于其重要的生态功能以及对荒漠环境独特的贡献,生物结皮在近些年来引起了国内外众多研究人员的广泛关注[1,2,5~8].

生物结皮作为荒漠地区典型的生命存在形式,自身一直处在不断的发育演替过程当中. 在结皮的发育演替过程中,根据优势种类的不同,一般将生物结皮划分为藻结皮、地衣结皮和藓结皮这 3 种主要的演替类型[8,9]. 藻结皮的优势类群为丝状蓝藻,但随着结皮的发育,地衣、藓类逐渐成为结皮表面的优势类群,结皮发育演替至地衣结皮或藓结皮[10,11]. 随着结皮的发育演替,结皮中生物群落结构不断变化[4,9],而不同的生物类群势必会影响结皮的生态功能. 已有研究证实,不同发育演替阶段生物结皮在固碳、固氮效率[11]、抗压强度[5]、土壤质地、土壤孔隙度[4]等方面存在明显差别. 然而目前对于导致结皮这些生态功能及理化特性方面差异的内在机制并没有进行深入的研究. 尤其在结皮的发育演替过程中,微生物组成及生物量变化方面的研究非常缺乏. 而开展此方面的研究,将有助于从本质上揭示不同发育演替阶段生物结皮在生态功能、理化特性及各属性之间的差异.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况与样品采集

试验区位于腾格里沙漠东南边缘的沙坡头地区(37°32′N,105°02′E,海拔1 339 m),处于阿拉善高原荒漠与荒漠草原过渡地带,属典型的大陆性季风沙漠气候. 该地区年平均气温 9.6℃,平均降雨量为 180 mm,降雨主要集中在 7 ~9 月; 空气平均相对湿度为 40%,年平均蒸散量大于3 000 mm,主要集中在生长季节(5 ~9 月). 该地区的年平均风速为 2.6 $m \cdot s^{-1}$,大于 5 $m \cdot s^{-1}$的起沙风每年有 200 d 左右. 包兰铁路从这里经过,为确保铁路正常运行,从 1956 年开始该地区进行人工植被恢复. 经过长期的演替,该地区目前生态环境得到了改善,大量的生物结皮在沙土表面形成[4,12].

实验所用结皮及流沙样品于 2010 年 6 月采集于沙坡头地区的人工植被恢复区,样品基本特征见表 1. 结皮及流沙样品用环刀和无菌铲采集后装于无菌培养皿中,Parafilm 膜封口,所有样品快速运回实验室后一个月内进行相关的实验分析.

**表 1 实验样品基本特性描述**

Table 1 Basic characteristics of experimental samples

| 特性 | 流沙 | 藻结皮 | 地衣结皮 | 藓结皮 |
|---|---|---|---|---|
| 含水量/% | 0.23 ±0.02 | 0.40 ±0.05 | 0.54 ±0.02 | 0.67 ±0.15 |
| 沙粒含量/% | 99.49 ±0.05 | 86.90 ±2.58 | 63.98 ±4.67 | 58.92 ±2.54 |
| 粉粒含量/% | 0.34 ±0.04 | 12.63 ±2.44 | 34.46 ±4.43 | 39.96 ±1.79 |
| 黏粒含量/% | 0.17 ±0.01 | 0.48 ±0.15 | 1.56 ±0.35 | 1.13 ±0.75 |
| 结皮厚度/mm | — | 4.73 ±0.65 | 6.81 ±0.49 | 14.54 ±4.66 |
| 结皮颜色 | — | 灰白色 | 黑色或褐色 | 黑色、褐色或深绿色 |
| 结皮微地势 | — | 平坦 | 高低不平 | 地毯状 |
| 主要分布地形 | — | 阳面 | 阳面 | 阴面 |

### 1.2 叶绿素 a 含量的测定

结皮中的光合生物量用叶绿素 a 表示. 叶绿素 a 测定时,将同一样品分为两份,一份直接测定结皮中总的叶绿素 a 含量,另一份则先去除地衣叶状体和藓类“茎叶”部分,之后再测定其中的叶绿素 a 含量. 测定时,样品先用研钵充分研磨,之后取 1 g 左右土样加入 10 mL 丙酮在 4℃提取过夜,叶绿素 a 含量按照 Carcia-Pichel 等[13]的三色公式进行计算.

### 1.3 优势藻类的直接观察鉴定

结皮中优势藻类的确定利用结皮-水混合液在显微镜下直接观察鉴定并计数. 首先将结皮样品过 150 目筛,然后取 0.1 g 过筛结皮样品加入 10 mL 蒸馏水,混匀后在暗处放置 12 h. 之后取 0.1 mL 结皮-水混合液在显微镜下观察,根据藻类的显微形态特征对其鉴定,同时计算各种藻的生物体积,计算方法参照文献[14]的方法.

### 1.4 异养微生物数量的确定

将结皮样本在无菌条件下过 150 目筛,然后将过筛后的结皮样品用无菌水稀释成不同浓度梯度的结皮-水混合液,混匀后在暗处放置 12 h. 之后在每一稀释浓度的结皮-水混合液中分别取 3 份 0.1 mL

结皮-水混合液涂布于牛肉膏蛋白胨培养基、马丁氏培养基和高氏 I 号培养基培养，用于培养结皮中的细菌、真菌和放线菌. 培养细菌的平板置于 37℃ 培养，培养放线菌和真菌的平板置于 28℃ 培养. 培养 3 ~5 d 后进行菌落计数.

**1.5**　结皮理化特性测定

结皮的理化特性包括含水量、质地组成（其中沙粒、粉粒、黏粒的直径分别为 >0.05 mm、0.005 ~0.05 mm、<0.005 mm）、有机碳、总氮及总磷含量按照文献[15]中所描述的方法进行测定. 结皮厚度用游标卡尺进行测定；结皮 pH 和电导率在结皮 5∶1水土比浸出液中用 YSI-Proplus 型多参数水质分析仪进行测定；结皮 $K^+$、$Na^+$、$Ca^{2+}$、$Mg^{2+}$、$Mn^{2+}$ 含量在 M3 土壤浸提液中用原子吸收分光光度法进行测定[12].

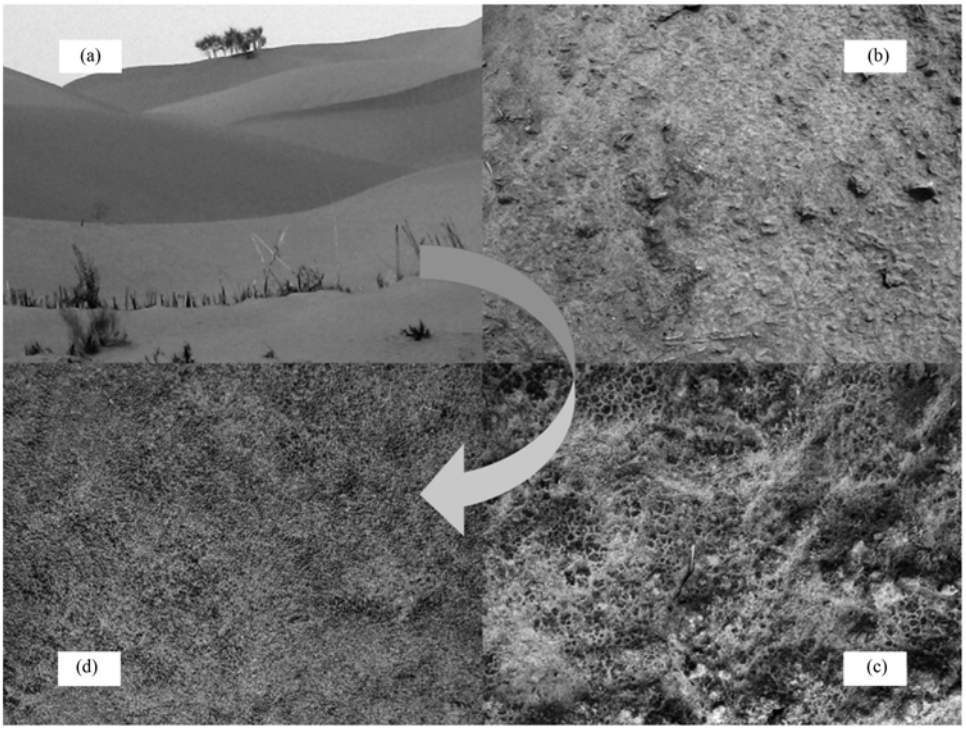
**1.6**　统计分析

本研究中不同演替阶段生物结皮中叶绿素 a 含量、藻类生物体积及异养微生物菌落数量之间的方差分析利用 One-Way ANOVA 进行分析；藻类生物体积及异养微生物菌落数量与结皮理化特性之间的相关性分析用 Bivariate Correlations 进行分析. 所有的数据分析在 SPSS 13.0 软件上进行.

## 2　结果与分析

**2.1**　生物结皮的发育演替

藻结皮以蓝藻为优势群落，尤其是丝状蓝藻，如具鞘微鞘藻（*Microcoleus vaginatus*）、爪哇伪枝藻（*Scytonema javanicum*）. 藻结皮较薄，平坦、易碎，表面颜色较浅，藻类盖度一般 >80%. 地衣结皮中以胶质状地衣为主，如坚韧胶衣（*Collema tenax*）. 地衣结皮厚度增加，表面较粗糙，表面颜色加深，地衣叶状体分布在结皮表面，且此时藓类很少出现，干燥时地衣最大盖度可达到 80%，湿润时则覆盖整个结皮表面. 藓结皮中以真藓和对齿藓为主，如银叶真藓（*Bryum argenteum*）、黑对齿藓（*Didymodon nigrescens*）等. 藓结皮厚度可达到 15 mm，表面被地毯状的藓类植物体所覆盖，盖度有时可达到 100%. 调查显示该试验区生物结皮一般按照“藻结皮——→地衣结皮——→藓结皮”的模式进行发育演替. 在一些情况下，藓类也可直接在藻结皮上萌发生长，从而从藻结皮直接演替到藓结皮（图 1）.




（a）流沙；（b）藻结皮；（c）地衣结皮；（d）藓结皮；图中箭头所指为结皮发育演替的方向

**图 1　生物结皮发育演替的一般模式**

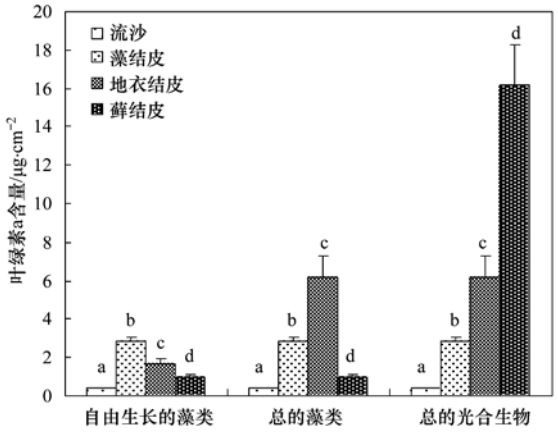
Fig. 1　General model of development and succession in biological soil crusts

**2.2**　结皮中光合生物生物量变化

作为结皮中重要的生物类群，光合生物是结皮有机碳的主要贡献者，在结皮的生长、发育、演替、恢复过程中都起着重要作用. 本研究同样发现，随着

结皮的发育演替,结皮中的光合生物量呈逐步增加的趋势(图 2). 当把地衣的叶状体和藓类的"茎叶"部分去除后,结皮中的光合生物则仅剩下自由生长的藻类. 由图 2 结果显示,自由生长的藻类在藻结皮、地衣结皮到藓结皮的演替过程中呈下降的趋势. 然而尽管从藻结皮到地衣结皮,自由生长的藻类生物量有所下降,但总的藻类生物量却呈逐渐增加. 这说明,当演替到地衣结皮阶段时,大部分藻类是以共生状态存在的,叶状体中的共生藻是光合生物量的主要贡献者.

具鞘微鞘藻(*M. vaginatus*)在所有结皮类型中都是自由生长藻类群落中的第一优势种,其生物量(以结皮计,下同)最大可达到 0.33 $mm^3 \cdot g^{-1}$,从藻结皮到藓结皮逐渐减少($P < 0.05$). 爪哇伪枝藻(*S. javanicum*)在结皮中的生物量仅次于微鞘藻,为第二优势种. 伪枝藻(*S. javanicum*)在藻结皮和藓结皮中的生物量均较低,在地衣结皮中的生物量较高,最大可达到 0.13 $mm^3 \cdot g^{-1}$. 念珠藻(其中一种: *Nostoc* sp.)在藻结皮、地衣结皮以及藓结皮中的生物量都很低,大多情况其生物量都 < 0.02 $mm^3 \cdot g^{-1}$,但在地衣结皮中念珠藻(*Nostoc* sp.)生物量却明显高于其他两种演替类型($P < 0.05$),最高可达到 0.06 $mm^3 \cdot g^{-1}$(图 3).



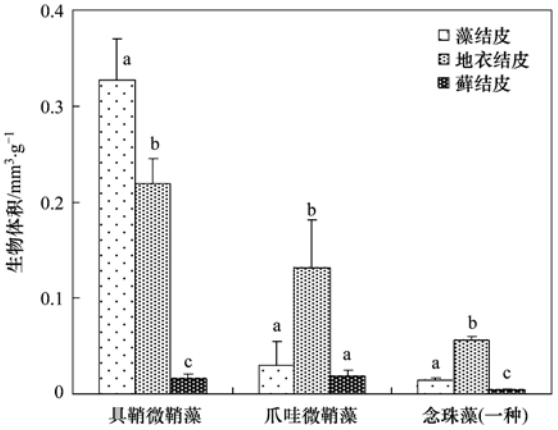

不同的字母代表在 0.05 水平存在显著差异; 自由生长的藻类不包括地衣中共生的藻类; 总的藻类钟包括自由生长的藻类与地衣中共生的藻类; 总的光合生物则既包括自由生长的藻类,也包括地衣、藓类

**图 2 不同演替阶段生物结皮中自由生长的藻类、总的藻类及总的光合生物生物量变化**

Fig. 2 Biomass changes of free living algae, total algae and photosynthetic organisms in different successional biological soil crusts

## 2.3 结皮中异养微生物生物量变化

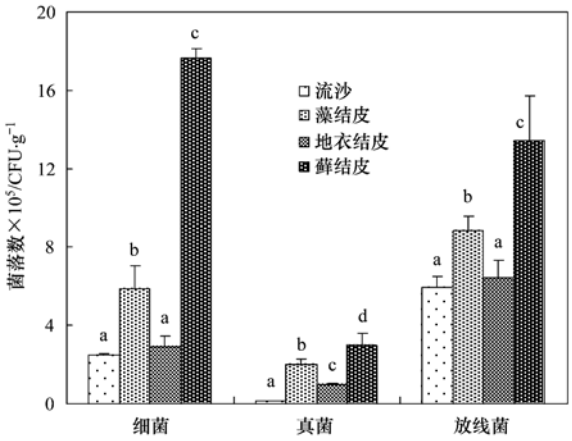
3 种异养微生物在不同演替阶段结皮中的生物量呈现相似的变化规律(图 4),即从流沙到藻结皮,3 种异养微生物的生物量都出现一次增加,之后到地衣结皮,它们的生物量又呈现下降的趋势,最后演替到藓结皮,3 种异养微生物的生物量再次增加,而且它们的生物量均在藓结皮阶段达到最大值,细菌(以菌落/结皮计,下同)达到 $18 \times 10^5$ $CFU \cdot g^{-1}$,真菌达到 $3.4 \times 10^5$ $CFU \cdot g^{-1}$,放线菌达到 $16.5 \times 10^5$ $CFU \cdot g^{-1}$.




不同的字母代表在 0.05 水平存在显著差异

**图 3 不同演替阶段生物结皮中优势藻种生物量的变化**

Fig. 3 Biomass changes of the dominant algal species in different successional biological soil crusts




不同的字母代表在 0.05 水平存在显著差异

**图 4 不同演替阶段生物结皮中异养微生物生物量的变化**

Fig. 4 Biomass changes of heterotrophic microbes in different successional biological soil crusts

## 2.4 结皮微生物生物量与土壤理化特性之间的关系

随着结皮的发育演替,结皮厚度、含水量逐渐增加,结皮质地中沙粒含量逐渐减少,粉粒、黏粒含量增加(表 1). 同时结皮中有机碳、总氮、总磷含量也逐渐增加,各种离子在结皮土壤积累(数据未显示). 通过结皮微生物生物量与土壤理化指标相关分析发现,微鞘藻(*M. vaginatus*)生物量与结皮厚度及含水量呈显著负相关($P < 0.05$); 伪枝藻(*S. javanicum*)、念珠藻(*Nostoc* sp.)生物量都

与 pH 呈显著正相关($P<0.05$)；细菌数量与结皮厚度、有机碳及 $Na^+$ 含量呈显著正相关($P<0.05$)；真菌数量与 $K^+$、$Na^+$ 含量呈显著正相关($P<0.05$；表 2).

**表 2　结皮不同微生物生物量与土壤理化特性之间的相关性分析**[1)]

Table 2　Correlation analysis between different crust microbial biomasses and soil physicochemical properties

| 相关性分析因子 | 具鞘微鞘藻 | 爪哇伪枝藻 | 念珠藻(一种) | 细菌 | 真菌 | 放线菌 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 含水量 | -0.580* | 0.058 | 0.346 | 0.494 | 0.311 | 0.174 |
| 沙粒 | 0.057 | -0.422 | -0.335 | -0.318 | -0.275 | -0.068 |
| 粉粒 | -0.077 | 0.420 | 0.349 | 0.321 | 0.281 | 0.074 |
| 黏粒 | 0.374 | 0.324 | -0.085 | 0.142 | 0.062 | -0.082 |
| 结皮厚度 | -0.562* | 0.102 | 0.359 | 0.652* | 0.485 | 0.416 |
| 有机碳 | -0.207 | 0.282 | 0.277 | 0.553* | 0.442 | 0.264 |
| 总氮 | -0.087 | 0.339 | 0.194 | 0.455 | 0.420 | 0.254 |
| 总磷 | 0.139 | 0.468 | 0.269 | 0.244 | 0.287 | 0.046 |
| 电导率 | 0.359 | 0.211 | -0.128 | 0.258 | 0.488 | 0.406 |
| pH | -0.077 | 0.544* | 0.598* | -0.216 | -0.243 | -0.475 |
| $K^+$ | 0.198 | -0.042 | 0.015 | 0.264 | 0.552* | 0.496 |
| $Na^+$ | -0.095 | 0.102 | 0.063 | 0.592* | 0.590* | 0.442 |
| $Ca^{2+}$ | 0.423 | 0.325 | 0.232 | 0.220 | 0.512 | 0.193 |
| $Mg^{2+}$ | 0.173 | 0.531 | 0.337 | 0.103 | 0.161 | -0.072 |
| $Mn^{2+}$ | 0.359 | 0.489 | 0.210 | 0.087 | 0.219 | -0.074 |

1)表中数据为相关性分析的相关系数,其中 * 表示相关性在 0.05 水平显著

## 3　讨论

在干旱、半干旱荒漠地区,由于水分的缺乏大部分植被很难生存,而生物结皮由于其独特的生理生态特性却可以在该地区广泛分布[16,17]. 在生物结皮发育演替的过程中,很多研究已证实蓝藻(尤其是丝状蓝藻)由于其对荒漠环境极强的适应性能够优先在沙土表面拓殖生长,并最先形成藻结皮[11,18,19]. 藻结皮代表结皮发育演替的初级阶段,但它们却能够通过改善表土微环境来增加晚期结皮物种拓殖生存的可能性,从而促进结皮的发育演替[14,20,21]. 在本实验中发现,沙坡头地区的生物结皮一般按照"藻结皮——>地衣结皮——>藓结皮"的模式发育演替,但在一些微环境条件下,藓类也可直接在藻结皮上萌发生长,从而从藻结皮直接演替到藓结皮.

结皮的发育演替受很多周围微环境的影响(如土壤结构、类型,辐射强度,地形等)[10,11,14],甚至由于一些资源条件的限制(如水分、营养等),会使结皮停留在某一发育演替阶段[4,11,16]. 在沙坡头地区,本实验研究发现总体上生物结皮在从早期的藻结皮向晚期的地衣结皮、藓结皮发育演替,而且随着结皮的发育演替,土壤质地逐渐改善,结皮表面特征也相应发生变化(如颜色加深、表面更加粗糙). 这些变化一方面改善了结皮区域的土壤微环境,另一方面由于土壤微环境(如土壤营养、理化性质等)的改善进一步促进了结皮的发育演替[22~24]. 尽管整体上研究区域的生物结皮在不断向晚期阶段发育演替,但也有研究表明一些不利的因素仍可能致使晚期的结皮逆向演替到早期阶段(如干扰,长期的干旱、高温等)[25~27]. 因此,即使在同一研究区域,由于微环境的差异仍可能导致不同的结皮发育演替模式,从而在同一区域呈现多种不同发育演替阶段的生物结皮.

随着结皮的发育演替光合生物量逐渐增加,因此结皮光合生物量被认为是评价结皮发育水平的一个良好指标[12,25]. 在结皮光合生物中,藻类、地衣、藓类在不同的结皮演替阶段成为结皮的优势类群. 在演替初期的藻结皮中,地衣、藓类的生物量较低,主要的光合生物为具鞘微鞘藻(*M. vaginatus*)和爪哇伪枝藻(*S. javanicum*);但当结皮演替到晚期时,地衣、藓类逐渐成为结皮的优势类群,如地衣结皮中的坚韧胶衣(*C. tenax*)以及藓结皮中的银叶真藓(*B. argenteum*)和黑对齿藓(*D. nigrescens*). 此时,地衣或藓类生物量显著超过藻类,占据结皮大部分光合生物量,但如果将地衣叶状体和藓类"茎叶"部分去除后,自由生长的藻类便是结皮中仅有的光合生物类群. 本实验研究发现地衣结皮中(地衣盖度约 70% ~80%)自由生长的藻类生物量不到光合生物量的 30%;藓结皮中(藓类盖度 100%)藻类生物量还不到光合生物量的 10%.

地衣是藻类与真菌形成的共生体,因此就藻类

生物量而言,尽管本研究发现自由生长的藻类生物量从藻结皮到地衣结皮有所下降,但总的藻类生物量却明显增加. 这就表明在地衣结皮中,大部分藻类是以共生状态存在的,地衣叶状体中的共生藻是光合生物量的主要贡献者. 之后,随着结皮进一步向藓结皮发育演替,实验结果显示结皮中的藻类生物量呈下降的趋势,这可能是由于随着藓类的出现,藻类的生存空间逐渐被占据所致. 然而由于藓类的出现,结皮厚度、含水量明显增加($P < 0.05$),因此本实验中微鞘藻(*M. vaginatus*)生物量显示与结皮厚度及含水量呈负相关关系. 另外,本实验中微鞘藻(*M. vaginatus*)生物量随着结皮的发育演替逐渐下降,这也表明微鞘藻(*M. vaginatus*)胶结、捆绑土壤颗粒的作用逐渐被地衣、藓类所取代. 伪枝藻(*S. javanicum*)和念珠藻(*Nostoc* sp.)为固氮种类,它们在晚期地衣结皮中生物量的增加则可能是由于结皮发育演替对氮需求的增加所致.

随着结皮的发育演替,表土微环境被逐渐改善,而各种土壤理化特性(如有机质含量、土壤质地等)又是影响土壤微生物生物量的重要因素[28,29]. 本实验研究发现异养微生物生物量(细菌、真菌、放线菌菌落数)随着结皮的发育呈现先增加后减少,最后再次增加的趋势,而且在不同演替阶段结皮中的关系为:藓结皮 > 藻结皮 > 地衣结皮. 与藻结皮相比,异养微生物生物量在地衣结皮中明显下降,这可能是由于大量地衣的出现所致. 因为有研究报道地衣中大量的假根(共生真菌)不容易被培养[12],而这些假根也有可能通过分泌化学物质来抑制其他异养微生物的生长. 实验中细菌、真菌以及放线菌的数量都与总的异养微生物生物量呈一致的变化规律,其中细菌数量的增加与有机碳、$Na^+$ 含量的增加有关,真菌数量的增加与 $K^+$、$Na^+$ 含量的增加有关($P < 0.05$).

## 4 结论

(1) 通过对腾格里沙漠东南缘沙坡头植被恢复区生物结皮的调查发现,该地区的生物结皮按照一定的模式进行发育演替,从早期到晚期有藻结皮、地衣结皮和藓结皮 3 个主要的结皮发育演替阶段.

(2) 随着结皮的发育演替,结皮光合生物生物量逐渐增加. 当藻结皮演替为地衣结皮时,结皮中虽然藻类生物量(包括地衣中共生的藻类生物量)增加,但自由生长的藻类(不包括地衣中共生的藻类)生物量却下降,此时大部分藻类处于共生状态; 当藓类大量出现后,藻类的生存空间被占据,因此藓结皮中藻类生物量进一步下降.

(3) 随着结皮的发育演替,土壤微环境被逐渐改善,为异养微生物的生长提供了良好条件. 结皮中不同微生物类群生物量的变化一方面是对土壤微环境变化的响应; 另一方面也体现了结皮不同发育演替阶段生态功能的需求,这对结皮在荒漠地区的适应性生存有着重要的意义.

**参考文献:**


[1] Evans R D, Johansen J R. Microbiotic crusts and ecosystem processes [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1999, **18**(2): 183-225.

[2] Elbert W, Weber B, Büdel B, *et al*. Microbiotic crusts on soil, rock and plants: neglected major players in the global cycles of carbon and nitrogen? [J]. Biogeosciences Discussions, 2009, **6**(4): 6983-7015.

[3] Eldridge D J, Greene R S B. Microbiotic soil crust: a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia [J]. Australian Journal of Soil Research, 1994, **32**(3): 389-415.

[4] Lan S B, Wu L, Zhang D L, *et al*. Successional stages of biological soil crusts and their microstructure variability in Shapotou region (China) [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, **65**(1): 77-88.

[5] Hu C X, Liu Y D, Song L R, *et al*. Effect of desert soil algae on the stabilization of fine sands [J]. Journal of Applied Phycology, 2002, **14**(4): 281-292.

[6] 魏江春. 沙漠生物地毯工程——干旱沙漠治理的新途径 [J]. 干旱区研究, 2005, **22**(3): 287-288.

[7] 饶本强,李华, 熊瑛, 等. 实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2793-2803.

[8] Su Y G, Li X R, Zheng J G, *et al*. The effect of biological soil crusts of different successional stages and conditions on the germination of seeds of three desert plants [J]. Journal of Arid Environments, 2009, **73**(10): 931-936.

[9] Wu L, Lan S B, Zhang D L, *et al*. Small-scale vertical distribution of the Algae in Lichen soil crusts [J]. Microbial Ecology, 2011, **62**(3): 715-724.

[10] Lange O L, Kidron E L, Büdel B, *et al*. Taxonomic composition and photosynthetic characteristics of the 'biological soil crusts' covering sand dunes in the western Negev Desert [J]. Functional Ecology, 1992, **6**(5): 519-527.

[11] Zaady E, Kuhn U, Wilske B, *et al*. Patterns of $CO_2$ exchange in biological soil crusts of successional age [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, **32**(7): 959-966.

[12] Lan S B, Wu L, Zhang D L, *et al*. Assessing level of development and successional stages in biological soil crusts with biological indicators [J]. Microbial Ecology, 2013, **66**(2): 394-403.

[13] Garcia-Pichel F, Castenholz R W. Characterization and

biological implications of scytonemin, a cyanobacterial sheath pigment [J]. Journal of Phycology, 1991, **27**(3): 395-409.

[14] Hu C X, Liu Y D. Parimary succession of algal community structure in desert soil [J]. Acta Botanica Sinica, 2003, **45**(8): 917-924.

[15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.

[16] Zaady E, Karnieli A, Shachak M. Applying a field spectroscopy technique for assessing successional trends of biological soil crusts in a semi-arid environment [J]. Journal of Arid Environments, 2007, **70**(3): 463-477.

[17] Kidron G J, Barzilay E, Sachs E. Microclimate control upon sand microbiotic crusts, western Negev desert, Israel [J]. Geomorphology, 2000, **36**(1-2): 1-18.

[18] Garcia-Pichel F, Pringault O. Cyanobacteria track water in desert soils [J]. Nature, 2001, **413**(6854): 380-381.

[19] Zhang Y M, Wang H L, Wang X Q, *et al*. The microstructure of microbiotic crust and its influence on wind erosion for a sandy soil surface in the Gurbantunggut Desert of Northwestern China [J]. Geoderma, 2006, **132**(3-4): 441-449.

[20] Acea M J, Prieto-Fernández A, Diz-Cid N. Cyanobacterial inoculation of heated soils: effect on microorganisms of C and N cycles and on chemical composition in soil surface [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, **35**(4): 513-524.

[21] Langhans T M, Storm C, Schwabe A. Regeneration processes of biological soil crusts, macro-cryptogams and Vascular plants pecies after fine-scale disturbance in a temperate region: Recolonization or successional replacement? [J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2010, **205**(1): 46-60.

[22] Li X R, Wang X P, Li T, *et al*. Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **35**(3): 147-154.

[23] Li X R, Xiao H L, Zhang J G, *et al*. Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in the Tengger Desert, northern China [J]. Restoration Ecology, 2004, **12**(3): 376-390.

[24] Li X R, He M Z, Duan Z H, *et al*. Recovery of topsoil physicochemical properties in revegetated sites in the sand-burial ecosystems of the Tengger Desert, northern China [J]. Geomorphology, 2007, **88**(3-4): 254-265.

[25] Büdel B, Darienko T, Deutschewith K, *et al*. Southern African biological soil crusts are ubiquitous and highly diverse in drylands, being restricted by rainfall frequency [J]. Microbial Ecology, 2009, **57**(2): 229-247.

[26] Housman D C, Powers H H, Collins A D, *et al*. Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert [J]. Journal of Arid Environments, 2006, **66**(4): 620-634.

[27] Kidron G J, Vonshak A, Abeliovich A. Recovery rates of microbiotic crusts within a dune ecosystem in the Negev Desert [J]. Geomorphology, 2008, **100**(3-4): 444-452.

[28] 饶本强, 王伟波, 兰书斌, 等. 库布齐沙地三年生人工藻结皮发育特征及微生物分布[J]. 水生生物学报, 2009, **33**(5): 937-944.

[29] 吴楠, 潘伯荣, 张元明, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮中土壤微生物垂直分布特征[J]. 应用与环境生物学报, 2005, **11**(3): 349-353.

# HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 4

Apr. 15, 2014


## CONTENTS


Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012 ····· WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, *et al.* (1215)

Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi ····· LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, *et al.* (1223)

Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban ····· WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, *et al.* (1230)

Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air $PM_{10}$ from One Coking Plant ····· DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, *et al.* (1238)

Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration ····· LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, *et al.* (1245)

Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta ····· SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)

Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process ····· LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, *et al.* (1256)

Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China ····· ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, *et al.* (1263)

Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes ····· WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, *et al.* (1271)

Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input ····· FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, *et al.* (1278)

Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area ····· SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)

Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing ····· YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, *et al.* (1290)

Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing ····· LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, *et al.* (1297)

Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of *Vallisneria natans* ····· LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, *et al.* (1304)

Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland ····· PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, *et al.* (1311)

Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions ····· DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, *et al.* (1318)

Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water ····· HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, *et al.* (1326)

Photoreactivation of *Escherichia coli* and *Enterococcus faecalis* in the Secondary Effluent Disinfected by UV-$TiO_2$ ····· WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, *et al.* (1332)

Stability of $C_{60}$ Nanoparticles in Aquatic Systems ····· FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, *et al.* (1337)

Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions: XDLVO Approach ····· ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, *et al.* (1343)

Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide ($H_2O_2$) ····· FU Rong-bing (1351)

Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene ····· WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, *et al.* (1358)

Research on Removal Efficiency of Cd(Ⅱ)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter ····· WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, *et al.* (1366)

Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance ····· JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, *et al.* (1372)

Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of *Acidithiobacillus ferrooxidans* ····· CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)

Microbial Reduction of $Cu^{2+}$ Mediated by Electroactive Biofilms ····· LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, *et al.* (1384)

Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards ····· CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, *et al.* (1391)

Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons ····· HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, *et al.* (1399)

Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and $H_2O_2$ ····· WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, *et al.* (1407)

Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater ····· YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, *et al.* (1414)

Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge ····· DONG Hui-yu, JI Min (1421)

Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium *Aminobacter* sp. H1 and Its Oxidation Mechanism ····· YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, *et al.* (1428)

Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(Ⅱ)-Oxidizing Bacteria ····· WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, *et al.* (1437)

Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain *Pseudomonas* sp. I-24 via Co-Metabolism ····· XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, *et al.* (1443)

Using Flow Cytometry to Explore the Changes of *Sphingomonas* sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene ····· ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, *et al.* (1449)

Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and *Chlorella vulgaris* ····· CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, *et al.* (1457)

Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride(TAG) Accumulation of *Chlorella vulgaris* ····· WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, *et al.* (1462)

Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots ····· WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, *et al.* (1468)

Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different $O_3$ Concentrations in Northeast China ····· ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, *et al.* (1473)

Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses ····· WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, *et al.* (1479)

Effects of Lead on the Growth and Reproduction of *Eisenia fetida* with Aged Soils ····· CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, *et al.* (1486)

Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research ····· ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, *et al.* (1491)

Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet ····· BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, *et al.* (1498)

Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area ····· XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, *et al.* (1502)

Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park ····· LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, *et al.* (1509)

Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area ····· ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, *et al.* (1516)

Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator ····· XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, *et al.* (1523)

Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai ····· ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, *et al.* (1531)

Impact of SDBS/$Na^+$ on Red Soil Colloidal Stability ····· TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, *et al.* (1540)

Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues ····· ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, *et al.* (1548)

Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of $Cd^{2+}$ by Algal in Water ····· DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, *et al.* (1555)

Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene ····· LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, *et al.* (1561)

Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate ····· ZHONG Qiong, LI Huan (1566)

Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites ····· LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, *et al.* (1576)

A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils ····· YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, *et al.* (1586)

Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment ····· ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, *et al.* (1597)

Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium ····· LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, *et al.* (1602)

Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength ····· WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

# 《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　汤鸿霄　陈吉宁　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）

2014 年 4 月 15 日　35 卷　第 4 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 4　Apr. 15, 2014

| | | | |
|---|---|---|---|
| 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）<br>北京市环境保护科学研究院<br>清 华 大 学 环 境 学 院 | **Co-Sponsored** by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085）<br>电话：010-62941102，010-62849343<br>传真：010-62849343<br>E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | **Edited** by | The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE）<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343<br>E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出　　版 | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码：100717 | **Published** by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话：010-64017032<br>E-mail：journal@ mail. sciencep. com | **Distributed** by | Science Press<br>Tel：010-64017032<br>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<br>（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：90.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行