

DOI: 10.5846/stxb201912312842

贺帅兵, 牟林云, 甄霖, 徐增让, 李建龙. 长江三角洲生态环境脆弱带生态修复技术研究进展. 生态学报, 2023, 43(2): 487-495.

He S B, Mou L Y, Zhen L, Xu Z R, Li J L. Research progress on ecological restoration technology of ecological fragile zone of the Yangtze River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2): 487-495.

长江三角洲生态环境脆弱带生态修复技术研究进展

贺帅兵¹, 牟林云¹, 甄霖², 徐增让², 李建龙^{1,*}

¹ 生命科学学院, 南京大学, 南京 210023

² 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院, 北京 100101

摘要: 我国长江三角洲作为中国第一大经济区, 综合实力最强的经济中心, 其城市化和工业化发展迅速, 但在人类活动的高强度影响和干预下, 该地区的资源环境问题日益突出: 生态环境脆弱性程度的增高, 脆弱性发展趋势的加快等一系列问题严重影响着长江三角洲的可持续发展, 该区域生态环境呈现出的脆弱性特征已成为我国新的生态环境脆弱带。基于长江三角洲自然、经济、社会和环境状况的数据基础, 及国内外脆弱性综合评价指标(自然因素和人为因素), 对长江三角洲进行生态环境评估发现该区域具体的生态环境问题主要为土壤污染、城区大气污染、水环境污染, 以及地面沉降等。通过剖析长江三角洲 4 类生态环境问题(土壤污染、大气污染、水环境污染、地面沉降)的现状、形成的具体原因及带来的影响, 结合国内外生态修复技术的研究成果, 详细论述了该区域 4 类生态环境问题的生态修复技术类型(物理方法、化学方法、生物方法、生态方法)、基本原理及各自的优缺点, 同时评估了不同生态修复技术在污染治理过程中的可行性、安全性、经济性, 旨在以上述理论研究为参照标准评估该区域环境污染治理过程中生态修复技术的修复潜力, 为长江三角洲生态环境问题的治理修复提供方案及理论参考。长江三角洲生态环境的健康发展需要多方面的努力, 需要全体社会成员增强生态环境保护意识, 需要建立健全的生态修复相关政策及法律法规, 需要运用多学科交叉综合修复技术, 需要修订生态修复理论体系和技术规范, 以上措施旨在为我国长江三角洲生态文明建设和可持续发展提供技术保障, 促进该区域生态环境保护与经济社会的协调发展。

关键词: 长江三角洲; 生态环境脆弱带; 生态修复技术; 研究进展

Research progress on ecological restoration technology of ecological fragile zone of the Yangtze River Delta

HE Shuaibing¹, MOU Linyun¹, ZHEN Lin², XU Zengrang², LI Jianlong^{1,*}

¹ School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

² Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: As the largest economic zone and the economic center with the strongest comprehensive strength in China, the Yangtze River Delta has developed rapidly in urbanization and industrialization. However, under the high-intensity influence and intervention of human activities, the resource and environmental problems in the region have become increasingly prominent: the increase of ecological environment vulnerability, the acceleration of vulnerability development trend and a series of problems have seriously affected the sustainable development of the Yangtze River Delta, the fragile characteristics of the regional ecological environment have become a new ecological environment fragile zone in China. Based on the data of the natural, economic, social and environmental conditions of the Yangtze River Delta and the comprehensive vulnerability assessment indicators at home and abroad (natural and human factors), the ecological environment assessment of the Yangtze River Delta was carried out. It was found that the specific ecological and environmental problems in the region

基金项目: 南京市政府重点科技专项(长江生态文明发展史与战略研究(043013005001)); 国家科技部重点专项项目(2018YF0800201)

收稿日期: 2019-12-31; **网络出版日期:** 2022-09-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jlli2008@nju.edu.cn

mainly included soil pollution, urban air pollution, water environment pollution, land subsidence and so on. By analyzing the current situation, specific causes and impacts of four types of eco-environmental problems (soil pollution, air pollution, water environment pollution and land subsidence) in the Yangtze River Delta, combined with the research results of ecological restoration technology at home and abroad, the types of ecological restoration technology (physical method, chemical method, biological method and ecological method), basic principles, advantages and disadvantages of four types of eco-environmental problems in the region were discussed in detail. At the same time, the feasibility, safety and economy of different ecological restoration technologies in the process of pollution control were evaluated aiming to evaluate the restoration potential of ecological restoration technologies in the process of environmental pollution control in the region with the above theoretical research as the reference standard, so as to provide a scheme and theoretical reference for the treatment and restoration of ecological environmental problems in the Yangtze River Delta. The healthy development of the ecological environment in the Yangtze River Delta requires various efforts, all members of society need to enhance their awareness of ecological and environmental protection, establish sound policies, laws and regulations related to ecological restoration, apply interdisciplinary comprehensive restoration technology, and revise the theoretical system and technical specifications of ecological restoration. The above measures were designed to provide technical guarantee for the construction of ecological civilization and sustainable development in the Yangtze River Delta, and promote the coordinated development of ecological and environmental protection and economy and society in the region.

Key Words: Yangtze River Delta; ecological fragile zone; ecological restoration technology; research progress

长江三角洲是中国第一大经济区,综合实力最强的经济中心、亚太地区重要的国际门户、全球重要的先进制造业基地、中国率先跻身世界级城市群地区^[1]。现以国务院发布的《关于进一步推进长江三角洲地区改革开放和经济社会发展的指导意见》中确定的江苏省、浙江省和上海市为论述对象,其介于 27°57′—35°20′N, 116°18′—122°45′E 之间;面积 21.07×10⁴km²,约占全国陆地面积的 2%;户籍人口 1.43×10⁸人(2018 年),约占全国人口总数的 10%,是我国人口最稠密的地区之一。

随着城市化和工业化进程的加快,人类活动高强度的影响和干预,资源环境问题日益突出^[2],长江三角洲生态环境已呈现出脆弱性的特征,成为我国新的生态环境脆弱带^[3-7],生态环境脆弱性程度及其发展趋势必将影响到该区域的可持续发展。基于长江三角洲自然、经济、社会和环境状况的数据基础,借鉴国内外脆弱性评价指标的内容^[8],选择自然成因和人为成因两大因素的综合指标进行评估研究,发现长江三角洲具体的生态环境问题主要为土壤污染^[8-10]、城区大气污染^[11-15]、水环境污染^[16-17]以及地面沉降^[18-20]等。在日趋严重的生态环境下以及“五位一体”生态文明建设和“绿水青山就是金山银山”的理念形势下,亟需梳理长江三角洲生态保护与修复技术的研究进展,为我国长江三角洲生态文明建设和可持续发展提供技术支撑。

1 修复技术研究

针对长江三角洲生态脆弱带的生态环境问题,我们主要从土壤污染、城区大气污染、水环境污染和地面沉降 4 个方面进行研究分析。

1.1 受污染土壤修复

1.1.1 土壤污染现状及原因

据环保部土壤污染调查数据可知,企业生产经营活动中排放的废气、废水、废渣含有的大量有毒化学物质及重金属(汞、镉、铅、铬、砷等)导致了长江三角洲地区的水源和土壤污染,致使大面积的土壤失去了基本的生产能力,严重威胁到该地区的生态环境、食品安全、农业的可持续发展和居民的健康^[21]。长江三角洲地区工业化、城市化及农业集约化程度较高,在高强度的土地利用形势下,土壤污染程度进一步加剧^[22]。

1.1.2 受污染土壤修复方法

长江三角洲土壤污染类型多种多样,新老污染物并存、无机有机复合污染,结合土壤污染本身的隐蔽性、滞后性、累积性、不均匀性、难可逆性和治理艰巨性的特点,土壤污染防治工作面临的形势严峻。选取适当的修复技术对污染物进行治理显得尤为重要,根据土壤污染物特点,改变土壤污染物的形态和直接去除污染物是目前生态修复应用较广的方法^[23]。目前土壤污染修复方法主要包括物理化学修复方法、生物碳修复方法和生态修复方法

(1) 物理化学修复

物理修复主要利用土壤理化性质与重金属特性的不同,对土壤中的重金属进行分离和固定,减少土壤中的污染物并降低污染物对环境进一步影响的风险。物理修复包括去深耕翻土法、换土法、热解吸法、表土法、客土法及玻璃化技术等。张煜行利用新鲜的未污染的土样的替换污染土样措施处理镉及邻苯二甲酸酯复合污染物达到较好的效果^[24]。物理修复能快速高效处理污染的土壤,但工程量大,成本较高。

化学修复是利用加入到土壤中的化学修复剂与污染物发生一定的化学反应,使污染物被降解或毒性被去除或降低的修复技术。其修复方式包括化学淋洗、化学固定、溶剂浸提、化学氧化、化学还原与还原脱氯和土壤性能改良。王东辉用草酸和柠檬酸作为复配淋洗剂淋洗 Cr(VI) 污染土壤达到很好的效果^[25];嵇佳伟采用异位化学氧化修复石油烃污染的土壤^[26];颜湘华采用改性芬顿试剂修复农药污染的土壤^[27]等。化学修复能有效的改善土壤污染状况,在土壤修复领域具有较大的发展空间,但其转化的物质有导致土壤的二次污染的风险^[28]。

(2) 生物碳修复

生物碳是将废弃木材或作物秸秆在无氧条件下经热解碳化形成的高碳固态物。因其具有较大比表面积、较高离子交换容量和发达的空隙率^[29],对污染土壤修复效果显著,尤其对重金属污染的土壤修复效果最佳。孙彤^[30]用改性生物碳对 Cd 污染土壤进行修复、李桂荣^[31]用茄子秆生物炭对 Cd-Pyrene 复合污染土壤进行修复、张鹏^[32]等利用水稻秸秆和猪粪制备的生物炭对铀污染土壤进行修复,均达到了较好的修复效果。该方法成本小,效果明显且有利于土壤有机质和土壤养分含量的提升,但目前试验规模及研究尺度较小,数据没有明显的代表性。

(3) 生物修复

生物修复方法是新形势下较为推崇的一种修复方法,该方法主要包括植物修复、动物修复和微生物修复,原理是通过生物内环境的效应去除污染物以达到修复治理的目的。

植物修复技术根据植物自身性质对污染物进行提取、挥发、吸收、净化、根系过滤等方式使污染物去除。如超积累植物东南景天能有效的将土壤中的重金属转移到地上部分^[33];蜈蚣草能吸收转化并挥发土壤中的砷^[34];青蒿和紫花苜蓿能提取金属铜和钼^[35];苜蓿或者黑麦草可修复多环芳烃等污染物质的污染;四川沿阶草、扁竹兰能很好的吸收土壤中的铀放射性核素,向日葵可以修复土壤中的铯放射性核素,尤其在添加柠檬酸等有机酸后可以加速植物对土壤中放射性核素的修复^[36]。

动物修复是通过动物直接吸收、转化和分解以及动物的调控作用(食物链效应)等方式对污染物进行处理。动物的重金属修复机制是通过生物体内的某金属硫蛋白与重金属作用后降低其活性,以及代谢生成的含-SH 基的多肽与重金属螯合生成低毒或无毒的复合物。相关研究表明蚯蚓可以通过自身的吸收富集重金属,从而降低土壤重金属含量;也可以通过自身的活动改善土壤中重金属的活化能力,从而促进植物的富集^[37]。

微生物修复主要运用细菌、真菌、原生动物等三大类微生物对环境中的有机污染物质进行降解和转化从而达到对土壤环境修复的目的。自 20 世纪 70 年代以来,随着微生物处理技术的发展及其在土壤污染治理中的广泛应用,土壤微生物修复法逐渐成为除物理化学修复法之外的核心技术。根据修复土壤的位置可分为原位修复技术和异位修复技术。

原位修复即在受污染的位置进行微生物修复,其地理位置保持不变,通过在其中直接添加微生物制剂、营养元素等提高土著微生物或外源微生物降解土壤中污染物的能力。原位修复技术主要有生物培养法、投菌法和生物通风处理法。生物培养法利用的是污染土壤中的土著微生物,因其能降解土壤中的有机污染物,故定期向受污染土壤中投加促进土著微生物生长繁殖所需要的营养物质及氢受体(氧和过氧化氢),旨在加速土著微生物的新陈代谢和生长繁殖,将污染物转化成二氧化碳和水,最终被分解^[38];投菌法是在土壤污染处添加外源微生物,以达到加速降解土壤污染物的目的,此种方法通常需要多种微生物的加入,如地衣杆菌(*B.licheniformis*)、青霉菌(*Penicillium* sp.)、曲霉(*Aspergillus* sp.)、黄杆菌(*Flavobacterium*)、链霉菌(*Streptomyces*)和酵母菌(*Saccharomyces*)等,同时还需提供这些微生物所需的营养物质,如:N、P、K、S、Fe、Mn等,其中N和P是微生物主要的营养元素^[39];生物通风处理法主要针对于地下水系统中有机污染物的生物降解和由地下油管破裂造成的轻度土壤污染的生物修复^[40],旨在提高土著微生物活性。空气或氧气的通入以加快微生物的新陈代谢,解除由于氧气浓度过低导致的生命活动的抑制,促进原位生物体的降解能力来达到降解污染物的目的^[41]。

异位修复是指将受污染的土壤挖出,移至他处进行集中生物修复处理的方法^[42]。该方法高效且便于监控,但在运输及处理过程中存在扩散的可能性,因此具有一定的局限性,常用于污染浓度较高且污染量不大的区域,异位修复主要包括土耕法、生物堆制法、土壤堆肥法、生物泥浆法和预制床法。土耕法是将受污染的土壤挖出移至土耕位点并放置在处理垫上,防止污染物的转移,同时定期翻动土壤以保证氧气充足来达到生物修复的目的,该方法时间短、费用低,但其中挥发性的有机物可能会进入大气,造成空气污染;生物堆制法是改进过后的土耕法,指将挖出的污染的土壤移至指定地点后进行堆放、通风、加入营养物质、加入微量元素、增加湿度等一系列操作,模拟好氧微生物的生存环境达到去除污染物的目的。该方法时间短,技术简单,但占地面积大,且土壤中若存在重金属可能会抑制生物的降解;土壤堆肥法是将受污染的土挖出移至指定位置后,还需加入土壤调理剂,该调理剂主要为稻草、粪便,旨在提供微生物需要的4种基本营养物质:碳、氮、氧、水。土壤堆肥法是一种在有氧条件下降解土壤有机污染物的微生物修复方法,且经过修复后的有机物质可以重复利用。该方法修复效率高,修复时间短,但处理费用偏高;生物泥浆法实质上是一个生物反应器,指将挖出的土壤去除石块、碎石等大颗粒杂质,与水混合后放入容器内,同时加入供微生物生长繁殖的营养物质,整个过程可以通过人为控制温度、混合强度和营养物质来达到降解效率最大化。处理过后的土壤干燥后可运回原地,实现可移动化。该方法已广泛用于被三硝基甲苯(TNT)污染土壤的生物修复中^[43];预制床法是将防渗漏的平台铺上石子和沙子,然后将土壤以20—30 cm厚度平铺于处理垫上,防止污染物转移,在表面洒上营养物质及水,同时定期翻动,以保证与氧气的充分接触,满足微生物的生长需要。处理中流出的液体可重新淋回土壤上,旨在使污染物得到有效降解。该方法降解效率较好,但操作复杂且成本较高。

目前,随着污染土壤微生物修复研究的不断深入,固定化微生物技术、微生物和植物联合修复技术和高效基因工程菌的开发逐渐成为环境科学、生命科学及其相关学科的研究重点。固定化微生物技术是利用物理或化学的方法将游离的微生物或酶与特定载体结合,固定于限定空间内,使其具有较高生物活性并能反复利用的技术^[44];微生物和植物联合修复技术是将土壤—植物—微生物作为复合体系对污染土壤进行修复的一种形式,以提高降解效率^[45];高效基因工程菌的开发是通过基因工程的手段构建高效环境工程菌以提高微生物对土壤污染物的降解效率^[46]。以上微生物修复技术是未来污染土壤修复研究的新方向,具有高效且低成本的优势,在土壤污染的修复实践中有广阔的前景和巨大的潜能。但这些技术受限于生物的种类、生存的环境^[47—48]、污染物种类和耐性大小^[49—50]等影响,相关解决方案还有待我们进一步的研究探索发现。

1.2 受污染大气修复

1.2.1 大气污染现状及原因

据环境保护部发布的《2015年中国环境状况公报》可知,长江三角洲的大气污染已随着城市群的扩张由局地污染演变为区域性、复合型污染^[51]。秋冬季节灰霾污染事件频现。区域较高的大气污染物排放强度和

排放密度增加,区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平总体较高,导致中国中东部地区出现长时间、大范围、高强度的灰霾天气,且污染面积广^[52-53]。夏秋季节臭氧污染现象突出。城市化、工业化、机动化的高速推进以及大气活性物质的大量排放,使得长江三角洲沿海城市群在夏秋季节面临严峻的以高浓度臭氧为典型特征的光化学污染问题^[54]。

1.2.2 受污染大气修复方法

大气污染是影响城市环境的重要因素,也是环境治理的重点内容。空气具有扩散性广泛,长距离迁移,干湿沉降以及大气污染源繁杂众多等特征,其类型主要为理性污染物(TSP , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1),生物性污染物(真菌、杆菌和某些病原微生物等)以及化学性污染物(CO_2 , CO , NO_x , SO_x , PAH_s 等),其中人类活动带来的大量细颗粒污染物正在不可避免的成为城市大气的主要污染物^[55-56]。受污染大气的修复方法主要包括植物修复、微生物修复和天然无机矿物材料修复。

(1) 植物修复

植物修复是一种以太阳能为动力,利用绿色植物及其相关的生物区对环境污染物质进行分解、去除、屏障或脱毒的方法。主要方式是植物的吸附与吸收、降解、转化以及同化和超同化。鲁敏等采用短时间(8 h)的熏气试验研究了 28 种园林植物对 SO_2 的净化能力,发现杨、花曲柳、臭椿等 12 种植物对 SO_2 的吸收量相对较高,银杏、柳杉、青冈栎等 10 余种树木吸收 O_3 的能力相对最强^[57];Gordon 等通过同位素标记实验表明,植物中的酶可以直接降解三氯乙烯^[58];植物体内的脂肪族脱卤酶也可以直接降解三氯乙烯^[59]。植物修复能很好的改善栖身地的大气环境,从而提高整体环境质量,造福于人类,但该修复方式也受到植物本身生长条件因素的影响,且存在生物放大污染的风险。

(2) 微生物修复

气态微生物的修复是利用微生物将废气中的污染物转化为低害甚至无害物质的处理方法。主要用于硫化物及氮氧化物的治理。德国和荷兰已大规模应用高效的 H_2S 废气生物膜过滤器^[60];欧美的研究组织发现微生物能在常压、低耗能条件下脱除煤炭中的硫^[61]。微生物修复具有设备要求简单,培养要求低,且无二次污染的优势,但菌种驯化时间存在差异。

(3) 天然无机矿物材料修复

天然矿物利用表面吸附、孔道过滤、分子筛、离子交换和热效脱硫除尘等净化功能实现污染物的净化。美国联合碳化物公司用人工合成沸石回收二氧化硫^[62];蛭石尾砂能在型煤燃烧过程中提高燃煤固硫效率,降低煤炭因不完全燃烧而形成的碳质飞灰,明显减少烟尘污染^[63]。低白度滑石制成的新型多微孔陶瓷专用微细粉,对汽车尾气有极高的净化率,且效果持续^[64]。天然无机矿物材料修复具有成本低,效果好,处理设备简单,不出现二次污染等特点,但该研究技术的实用化需进一步研究深入。

1.3 受污染水环境修复

1.3.1 水环境污染现状及原因

相关研究结果表明:长江三角洲地区的众多河湖随着工业化进程的不断发展逐步被污染,大量的工业废水排放导致该地区的水质越来越差,氨氮、石油类和总磷是影响水质的主要污染物。对长江下游而言,沿江各市河道污染严重,除少数几条紧靠长江的河流外,几乎全为 IV—V 类水质,部分河段已达不到农业灌溉要求。为加快治理的步伐,需对工业污染源、农业污染源、内源污染源进行任重而道远的治理^[65]。

1.3.2 受污染水环境修复方法

水污染程度加剧会导致水资源短缺,引发区域水质性缺水。同时,还会导致水体中和周围陆地动植物大量死亡,使水域的生态物种退化、生物多样性减少,进而产生一系列的水生态问题。针对这些问题,生态修复需综合治理、标本兼治、因地制宜,使环境影响趋于最小^[66]。目前,用于水环境污染治理生态修复技术主要有物理方法、化学方法、生物方法和生态方法四大类。

(1) 物理修复

物理方法修复主要以人工增氧、外源控制和底泥疏浚等方法提高水体中溶氧含量,加快水体中的黑臭污染物氧化还原反应的速率,避免营养物质过剩而引发的生物链某一环节的过量滋生,促进污染物的降解,提高水体的自净能力。谌建宇等采用曝气复氧的方式抑制河道底泥向上覆水释放污染物质,用于重污染河道水体修复^[67];吴沛沛等通过底泥疏浚削减沉积物内源负荷,降低了江苏漏湖北部发生蓝藻水华的风险^[68]。物理方法修复具有设施简单、管理技术要求低等优点,但存在暂时性、不稳定性及治标不治本等问题。

(2) 化学修复

化学方法修复采用化学品(二氧化氯、臭氧、硫酸铜等)控制藻类的生长。凝聚沉淀采用碳酸钙、硫酸铝和明矾等化学药品对水中内源性磷进行聚集和沉淀,实现对水体富营养化的控制。转化处理通过化学的氧化还原、中和等方法改变污染物的化学本性,使其从有害物质转化为无害或可分离物质,然后再从污染水体中分离^[69]。化学方法修复具有周期短、见效快等优点,但通过强行投加化学药剂等去除水体中污染物,易造成二次污染,因此需控制化学药品的用量且配合相应检测。

(3) 生物修复

生物方法修复包括生物修复、生物制剂和生物介质。生物修复通过细菌、藻类、微型动物及其生物膜法等生物技术处理污染的水体;生物制剂是通过向水体中投加微生物制剂,使其与水中的藻类处于营养竞争的关系,从而控制藻类的成长;生物介质为微生物提供栖息繁衍的场所,通过微生物代谢分解污染物^[66]。生物方法修复具有建设周期短、无二次污染等优点,但存在外来物种破坏水体生态系统的风险^[70]。

(4) 生态修复

生态方法修复包括生态塘法、人工湿地和植物净化。生态塘法通过建造人工生态系统的方式,以太阳能作为初始能源,将污水中的有机物进行降解和转化;人工湿地是运用物理、化学和生物的协调作用提高对有机污染物的降解能力来实现对污水的净化;植物净化主要是通过植物对水中污染物的吸收、吸附、降解、转化,最终以收获植物体的形式清除水中的有机污染物,达到治标治本的效果^[71]。生态方法基于生态原理,强化了大自然的自净能力,以可持续的方式治理,形成一个良性的水生态系统循环。

1.4 地面沉降防治

1.4.1 地面沉降现状及原因

中国已有多个城市出现了地面沉降的现象,长江三角洲就是其重灾区之一。相关调查报告显示,苏州、无锡等地,上海市区及杭州、湖州等地已经形成了三个区域性沉降中心,其危害给该区域带来了巨大的经济损失。地面沉降主要是人为过量开采地下水资源,导致地质结构松散,在地层重力作用下,形成沉降漏斗,多个沉降漏斗的集合,形成了大面积的沉降带^[72]。

1.4.2 地面沉降治理方法

地面沉降使本就地势低洼水网平原区的地势更加低洼,情况严重地段河水位已常年高出两侧地面,由此出现的内涝和洪涝等灾情,给区内的农业现代化带来了巨大的损失和影响。为了治理地面沉降,土地使用需由农业用地型向城市用地型转变,以降低需水强度;并引入地表水使回灌得以实施,使得地下水抽汲量减少;对沿海城市进行海岸加固,建造堤防防止洪水泛滥和海水入侵,建立一个合理性较强的评价体系尤为必要^[73]。

剖析了长江三角洲4大生态环境问题的现状及形成的具体原因,结合生态环境问题自身的特点及国内外科研人员的研究成果,本文阐述了治理相关生态环境问题的生态修复技术、修复原理、实际中的应用及其优缺点,目的是以上述理论研究为参照评估环境污染治理过程中生态修复方案的修复潜力,为长江三角洲生态环境问题的治理修复提供理论基础。

2 生态修复的实施过程

具体实施方案需要全面的分析长江三角洲生态环境脆弱带的特征、需要通过生态修复理论体系和技术规

- [3] 姜磊, 柏玲, 吴玉鸣. 中国省域经济、资源与环境协调分析——兼论三系统耦合公式及其扩展形式. 自然资源学报, 2017, 32(5): 788-799.
- [4] 李杰. 长三角循环经济发展的制度创新. 江苏农村经济, 2006(4): 53-54.
- [5] 张卫国, 董辰寅, 叶雷平, 董艳, 刘莹, 马洪磊, 俞立中. 长江三角洲沉积物环境磁学研究. 中国地球物理学会会议论文集, 2012, 152.
- [6] 赵娟, 范代读, 刘曙光, 李从先. 长江三角洲地区人地相互作用的若干问题. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(9): 1195-1200.
- [7] 张亚洲. 气候变化背景下上海市自然灾害社会脆弱性时空格局研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- [8] 徐庆勇, 黄玫, 陆佩玲, 李仁强. 基于 RS 与 GIS 的长江三角洲生态环境脆弱性综合评价. 环境科学研究, 2011, 24(1): 58-65.
- [9] Deng F C, Sun J T, Dou R N, Yu X L, Wei Z, Yang C P, Zeng X F, Zhu L Z. Contamination of pyrethroids in agricultural soils from the Yangtze River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 731: 139181.
- [10] Yang S H, Qu Y J, Ma J, Liu L L, Wu H W, Liu Q Y, Gong Y W, Chen Y X, Wu Y H. Comparison of the concentrations, sources, and distributions of heavy metal (loid)s in agricultural soils of two provinces in the Yangtze River Delta, China. *Environmental Pollution*, 2020, 264: 114688.
- [11] 杨丹丹, 王体健, 李树, 马超群, 刘冲, 杨帆. 基于走航观测的长江三角洲地区大气污染特征及来源追踪. 中国环境科学, 2019, 39(9): 3595-3603.
- [12] 邓发荣, 康娜, Kanike Raghavendra Kumar, 胡康, 蒋永成, 于兴娜. 长江三角洲地区大气污染过程分析. 中国环境科学, 2018, 38(2): 401-411.
- [13] Haque M M, Fang C, Schnelle-Kreis J, Abbaszade G, Liu X Y, Bao M Y, Zhang W Q, Zhang Y L. Regional haze formation enhanced the atmospheric pollution levels in the Yangtze River Delta region, China: implications for anthropogenic sources and secondary aerosol formation. *Science of the Total Environment*, 2020, 728: 138013.
- [14] Qiu W Y, Li S L, Liu Y H, Lu K D. Petrochemical and industrial sources of volatile organic compounds analyzed via regional wind-driven network in Shanghai. *Atmosphere*, 2019, 10(12): 760.
- [15] Wang J J, Lu X M, Yan Y T, Zhou L G, Ma W C. Spatiotemporal characteristics of PM_{2.5} concentration in the Yangtze River Delta urban agglomeration, China on the application of big data and wavelet analysis. *Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138134.
- [16] 高月香, 高汾, 张毅敏, 马梦洁, 丁轶睿. 长江三角洲水污染现状与相应对策. 中国环境科学学会学术年会论文集, 2015: 2262-2266.
- [17] Pueppke S G, Zhang W S, Li H P, Chen D Q, Ou W X. An integrative framework to control nutrient loss: insights from two hilly basins in China's Yangtze River Delta. *Water*, 2019, 11(10): 2036.
- [18] 种亚辉, 董少春, 胡欢. 基于时序 InSAR 技术的常州市地面沉降监测与分析. 高校地质学报, 2019, 25(1): 131-143.
- [19] 薛禹群, 张云. 长江三角洲南部地面沉降与地裂缝. 华东地质, 2016, 37(1): 1-9.
- [20] 陆燕燕. 基于多源 SAR 数据的苏锡常地区地面沉降监测与影响因素分析. 测绘学报, 2019, 48(7): 938.
- [21] 陆书玉, 宋鹏程. 长江三角洲地区土壤与地下水污染现状及防治对策. 第 11 届长三角科技论坛环境保护分论坛暨上海市环境科学学会第 18 届学术年会论文集, 2014: 229-234.
- [22] 杭小帅, 王火焰, 周健民. 长江三角洲地区土壤重金属污染的防治与调控. 土壤通报, 2013, 44(1): 245-251.
- [23] 夏立江, 王宏康. 土壤污染及其防治. 上海: 华东理工大学出版社, 2001.
- [24] 张煜行, 谯华, 何明靖, 魏世强, 张杨明稼, 郑雅伟. 镉及邻苯二甲酸酯复合污染农田土壤的修复技术研究进展. 当代化工, 2019, 48(9): 2167-2172, 2176.
- [25] 王东辉, 李广辉, 秦仕强, 蒋越, 陶伟光, 龚时慧, 王静. Cr(VI) 污染细粒土壤化学淋洗修复效果与经济成本分析. 生态学杂志, 2020, 39(7): 2309-2315.
- [26] 嵇佳伟, 江建斌, 宁银中. 异位化学氧化修复石油烃污染土壤的小试研究. 广州化工, 2020, 48(5): 82-84, 114.
- [27] 颜湘华, 刘星海, 王兴润, 赵彩云, 佟雪娇. 改性芬顿试剂修复农药污染土壤的工艺条件优化. 环境工程技术学报, 2020, 10(2): 288-292.
- [28] 曲智, 张庆波. 重金属污染土壤修复技术. 化工设计通讯, 2019, 45(10): 91, 101.
- [29] 李婉媛, 曹升, 周垂帆. 浅析生物炭修复土壤重金属污染研究进展. 内蒙古林业调查设计, 2019, 42(4): 98-100, 104.
- [30] 孙彤, 李可, 付宇童, 马文艳, 谢厦, 孙约兵. 改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤钝化修复效应和土壤环境质量的影响. 环境科学学报, 2020, 40(7): 2571-2580.
- [31] 李桂荣, 陈富凯, 贾胜勇, 王宗硕, 郭泽楠. 茄子秆生物炭联合黑麦草对土壤镉-苣复合污染修复的影响. 河南农业科学, 2020, 49(9): 51-61.
- [32] 张鹏, 元祥坤, 文杰, 刘金香. 水稻秸秆-猪粪生物炭对黑麦草修复铀污染土壤的影响与机制. 南华大学学报: 自然科学版, 2019, 33(2): 90-96.
- [33] 宋宇超. 复合型植物源活化剂强化植物提取修复重金属污染土壤及其效果评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [34] Sakakibara M, Watanabe A, Inoue M, Sano S, Kaise T. In Phytoextraction and phytovolatilization of arsenic from as-contaminated soils by *pteris vittata*. *Proceedings of the annual. Proceedings of the annual international conference on soils, sediments, water and energy*, 2010, 26.
- [35] Ghazaryan C A. Detection of the phytoextraction potential of *Artemisia vulgaris* and *Medicago coerulea* plants grown on copper and molybdenum soils.

- Hayastani Kensabanakan Handes, 2019, 71(2): 26-32.
- [36] 陈劲良. 土壤放射性污染源及相关修复技术分析. 乡村科技, 2019(21): 108-109.
- [37] 徐艳, 邓富玲. 土壤动物在土壤污染修复中的应用. 现代农业科技, 2018(23): 192-197.
- [38] 曾军, 吴宇澄, 林先贵. 多环芳烃污染土壤微生物修复研究进展. 微生物学报, 2020, 60(12): 2804-2815.
- [39] 许邦露, 张维清. 石油污染土壤微生物修复技术的研究发展. 江西化工, 2016(6): 8-10.
- [40] 张博凡, 熊鑫, 韩卓, 张秀霞, 刘泽阳, 马年, 刘会娥, 顾莹莹. 菌糠强化微生物降解石油污染土壤修复研究. 中国环境科学, 2019, 39(3): 1139-1146.
- [41] 唐金花, 于春光, 张寒冰, 杜茂安, 万春黎. 石油污染土壤微生物修复的研究进展. 湖北农业科学, 2011, 50(20): 4125-4128.
- [42] 梁小龙. 土壤修复中的微生物技术. 河南科技, 2011(14): 60.
- [43] 辛宝平, 卢佳新, 李是坤, 郭晓洁, 赵小鹭, 李玉平, 焦宏春. 泥浆体系中的 TNT 生物降解研究. 北京理工大学学报, 2008, 28(7): 638-642.
- [44] Guzik U, Hupert-Kocurek K, Marchlewicz A, Wojcieszynska D. Enhancement of biodegradation potential of catechol 1, 2-dioxygenase through its immobilization in calcium alginate gel. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2014, 17(2): 83-88.
- [45] 赵述华. 土壤环境中重金属与有机物复合污染修复对策研究. 广东化工, 2019, 46(4): 119-121.
- [46] 沈标, 洪青, 李顺鹏. 甲基对硫磷降解菌 DLL-1 的发光酶基因标记及在土壤中的变化. 农村生态环境, 2002, 18(1): 16-21.
- [47] 董雯娟, 赵保卫. 土壤污染的植物修复. 环境科学与技术, 2005, 28(S2): 128-130.
- [48] 王宏铨, 束文圣, 蓝崇钰. 重金属污染生态学研究现状与展望. 生态学报, 2005, 25(3): 596-605.
- [49] 陈承利, 廖敏. 重金属污染土壤修复技术研究进展. 广东微量元素科学, 2004, 11(10): 1-8.
- [50] 龙新宪, 杨肖娥, 倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望. 应用生态学报, 2002, 13(6): 757-762.
- [51] 张慧, 高吉喜, 宫继萍, 张毅敏. 长三角地区生态环境保护形势、问题与建议. 中国发展, 2017, 17(2): 3-9.
- [52] 王春梅, 叶春明. 长三角地区重雾霾污染的溢出效应. 城市环境与城市生态, 2016, 29(4): 7-11.
- [53] 王跃思, 姚利, 王莉莉, 刘子锐, 吉东生, 唐贵谦, 张军科, 孙扬, 胡波, 辛金元. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 15-26.
- [54] 易睿, 王亚林, 张殷俊, 史宇, 李名升. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2370-2377.
- [55] 贺瑶, 朱彬, 李锋, 康汉青, 高晋徽. 长江三角洲地区 PM_{2.5} 两种污染源对比分析. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1213-1222.
- [56] 李锋, 朱彬, 安俊岭, 康汉青, 高晋徽, 刘璇. 2013 年 12 月初长江三角洲及周边地区重霾污染的数值模拟. 中国环境科学, 2015, 35(7): 1965-1974.
- [57] 鲁敏, 李英杰. 部分园林植物对大气污染物吸收净化能力的研究. 山东建筑工程学院学报, 2002, 17(2): 45-49.
- [58] Gordon M, Choe N, Duffy J, Ekuan G, Heilman P, Muiznieks I, Ruszaj M, Shurtleff B B, Strand S, Wilmoth J, Newman L A. Phytoremediation of trichloroethylene with hybrid poplars. *Environmental Health Perspectives*, 1998, 106(Suppl 4): 1001-1004.
- [59] Anderson T A, Walton B T. Comparative fate of [14C] trichloroethylene in the root zone of plants from a former solvent disposal site. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1995, 14(12): 2041-2047.
- [60] Leson G, Winer A M. Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1991, 41(8): 1045-1054.
- [61] 林鑫, 胡筱敏, 李洪林. 微生物技术在环境保护中的应用. 有色矿冶, 2006, 22(1): 39-42.
- [62] 戴瑞, 郑水林, 贾建丽, 郑黎明. 非金属矿物环境材料的研究进展. 中国非金属矿工业导刊, 2009(6): 3-9, 14.
- [63] 陈从喜, 鲁安怀. 天然矿物治理污染物研究进展与展望. 中国非金属矿工业导刊, 2002(5): 29-33.
- [64] 翟斌. 环境矿物材料在污染治理中的应用. 北方环境, 2005, 30(2): 69-71, 76.
- [65] 高月香, 高汾, 张毅敏, 马梦洁, 丁铁睿. 长江三角洲水污染现状与相应对策. 中国环境科学学会学术年会论文集, 2015: 2262-2266.
- [66] 赵丰, 黄民生, 戴兴春. 当前水环境污染现状分析与生态修复技术初探. 上海化工, 2008, 33(7): 27-30.
- [67] 湛建宇, 许振成, 骆其金, 廖柏寒, 魏清伟, 黄博. 曝气复氧对滇池重污染支流底泥污染物迁移转化的影响. 生态环境, 2008, 17(6): 2154-2158.
- [68] 吴沛沛, 刘劲松, 胡晓东, 杨星, 翁松干, 李志清, 郭刘超, 吴苏舒. 漏湖北部底泥疏浚的生态效应研究. 水生态学杂志, 2015, 36(2): 32-38.
- [69] 张学勤, 曹光杰. 城市水环境质量问题与改善措施. 城市问题, 2005(4): 35-38.
- [70] 吕俊鹏, 付秋玥, 鲁斯唯, 陆文霞. 生物方法在水污染修复中的应用研究. 绿色科技, 2016(4): 66-68.
- [71] 胡晓东, 阮晓红, 宫莹. 植物修复技术在我国水环境污染治理中的可行性研究. 云南环境科学, 2004, 23(1): 48-50.
- [72] 陆燕燕. 基于多源 SAR 数据的苏锡常地区地面沉降监测与影响因素分析. 测绘学报, 2019, 48(7): 938.
- [73] 刘佳, 刘晒博, 吴昱荟. 地下水超采区关井压采对地下水环境修复效果评价体系研究. 科学技术创新, 2018(6): 50-51.
- [74] 殷培杰, 李培军. 生态修复过程中的若干问题——以 POPs 污染土壤为例. 生态学报, 2007, 27(2): 784-792.