

铬胁迫对烟草的影响及其控制措施

王慧¹, 王婷², 赵孔阳³, 张素蕙¹, 段冬冬¹, 吴振华¹

(1. 邯郸学院教务处, 河北邯郸 056005; 2. 邯郸学院数理学院, 河北邯郸 056005; 3. 邯郸市邯山区芳园实验中学, 河北邯郸 056108)

摘要 介绍了环境中铬的存在形态, 烟草对铬的吸收, 分析了铬胁迫对烟草光合作用、抗氧化酶系统以及基因调控和蛋白质表达的影响; 最后从化学修复、生物修复等方面提出了控制铬胁迫的措施, 以期对铬污染区烟草种植提供指导。

关键词 铬胁迫; 烟草; 影响; 控制措施

中图分类号 X 503. 231 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)11-0013-03

doi: 10. 3969/j. issn. 0517-6611. 2021. 11. 004



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Influence of Chromium Stress on Tobacco and Control Measures

WANG Hui¹, WANG Ting², ZHAO Kong-yang³ et al (1. Office of Teaching Affairs, Handan University, Handan, Hebei 056005; 2. Institute of Mathematics and Physics, Handan University, Handan, Hebei 056005; 3. Handan City Hanshan District Fangyuan Experimental Middle School, Handan, Hebei 056108)

Abstract In this paper, we introduced the forms of chromium in the environment and the absorption of chromium by tobacco and analyzed the effects of chromium stress on tobacco, including the effects on photosynthesis, antioxidant enzyme system, gene regulation and protein expression. In the end, we put forward many measures to control chromium stress from the aspects of chemical remediation and bioremediation, in order to provide guidance for tobacco cultivation in chromium polluted areas.

Key words Chromium stress; Tobacco; Influence; Control measures

随着我国社会经济的快速发展和城镇化水平的提高, 工农业生产大力发展, 因此产生的三废大量排放、农药化肥大量施用, 导致重金属(如镉、铅、铬、汞等金属及类金属砷)等污染物随着人类活动进入环境, 造成环境污染, 破坏土壤生态平衡^[1]。土壤中的重金属被植物根系吸收, 在植物体内富集, 损害植物的细胞膜和细胞器, 影响光合作用等生理生化活动, 影响其生长发育^[2]; 重金属还会通过食物链或其他方式进入动物和人类体内, 最终危害人体健康甚至生命^[3]。

随着电镀、纺织、制药等行业的发展, 全球每年约有 1 000 万 t 的含铬废水排入环境中, 铬污染已成为一种严重的重金属污染^[4]。在我国, 铬主要排放区多为粮食主产区, 主要集中在河北、山东、广东、浙江等地^[5]。

作为一种重要的经济作物, 烟草(*Nicotiana tabacum*)易于吸收和富集重金属, 对其产量和品质造成严重影响; 另一方面烟草叶子中积累的重金属, 会在吸烟时进入人体支气管系统, 危害人类健康^[6]。我国是世界上最大的烟草生产国和消费国, 烟草种植面积超过 100 万 hm^2 ^[7], 全国吸烟人数超 3 亿。吸烟是人体摄入重金属的主要来源之一, 可能与多种疾病有关^[8]。因此, 研究烟草对 Cr 胁迫的响应机制及其缓解措施已成为当务之急。

1 铬在环境中的存在情况

自然界本身存在铬源, 如成土母岩。Cr 是地球上第七大元素, 其含量占地壳元素总量的 0. 02%, Cr 是不活泼金属, 在

自然界中基本没有游离状态的铬, 多存在于铬铁矿中^[4], 主要通过工业三废排放等人类活动被释放入环境中。采矿、冶炼、电镀、制革、制药、印染等工业废水、废气、废渣的排放, 是土壤铬的主要来源。当使用含铬的工业废水灌溉农田时, 仅有不到 15% 的铬被植物吸收, 85% 以上的铬会在土壤耕作层积累^[9]。此外, 化肥、农药的施用和农膜的使用, 也会造成铬等重金属排放入土壤中^[10]。

铬通常以三价 Cr(III) 和六价 Cr(VI) 的稳定形态存在于土壤中^[11]。其中 Cr(VI) 活性高, 易溶于水, 难以被土壤胶体吸附, 更容易对烟草等植物产生毒害。Cr(III) 活性较低, 易于沉淀被土壤胶体吸附。Cr(III) 也是人类必需的微量元素, 在糖代谢和脂代谢中发挥重要作用, 维持体内糖脂代谢平衡, 对人类基本没有毒害作用^[5]。对于植物而言, 低浓度的铬会促进植物的生长, 增加产量, 但其并不是植物必需的元素。土壤中的 Cr(III) 在二氧化锰的催化下与游离氧结合, 可以被氧化为 Cr(VI)。铬在植物中积累, 过量会降低植物的光合效率和呼吸作用, 影响植物对水和矿物质的吸收, 影响植物体内的碳、氮代谢, 抑制植物生长, 严重时会引起植物死亡^[12]。铬通过食物链的富集作用, 直接或间接对动物和人类的健康造成危害。铬在六大有毒重金属中排在第二位, 具有致癌、致畸、致突变的作用^[13]。

2 烟草对铬的吸收

一般认为, 烟草吸收铬等重金属的途径有 2 条: 主要途径为烟草植株根系从土壤中吸收; 另一途径是烟草叶片通过呼吸作用和光合作用等从大气中吸收。一般情况下, Cr 在植株各部位的含量表现为根>茎>叶>种子^[14]。鲁黎明等^[15]通过将烟苗移栽到含铬 68 mg/kg 的供试土壤中, 发现在移栽 75 d 后, 烟株根中铬含量达到最高, 在其余各个时期变化不大, 但都是烟草各部位中含铬最高的, 可以推断根是铬的主

基金项目 邯郸市科学技术研究与发展计划自筹经费项目“化学制剂对烟草铬胁迫效应的缓解”(1722201001ZC); 河北省教育科学“十三五”规划课题重点资助项目“新高考视角下河北高中地理研学旅行课程实施究”(1902012)。

作者简介 王慧(1985—), 女, 河北邯郸人, 讲师, 硕士, 从事细胞生物学研究。

收稿日期 2020-11-05

要储存器官;茎对铬的积累在移栽 60 d 达到最高;烟草下部叶的铬含量显著高于中部叶和上部叶;随着叶片的逐渐成熟,中部叶中铬会转移到上部叶。

柳均等^[16]研究发现铬在烟叶中含量顺序为下部叶>中部叶>上部叶,与鲁黎明等^[15]的研究结果一致;烟叶部位间铬含量的分布表现为叶尖部、叶基部、叶边缘>叶中部>主脉。

研究发现,当土壤中 Cr 浓度为 20 mg/kg 时,铬在烟草不同部位的含量表现为根>叶>茎;但当 Cr 浓度增加到 40 mg/kg 时,铬在烟草中的含量表现为根>茎>叶,且在烟叶中分配率逐渐降低,可见铬在烟叶中的富集能力较弱^[17]。

除烟株根系从土壤中吸收铬外,大气沉降对上部烟叶样品 Cr 的平均贡献率约为 80%,且烟株中部叶的铬含量高于上部叶,这可能与中部叶生长周期长、叶片面积大、受大气沉降影响时间长等因素有关^[18]。

3 铬胁迫对烟草的影响

铬影响植物光合作用、呼吸、水分和养分的吸收等许多重要生理过程,从而抑制植物的生长发育。Cr 通过直接干扰酶或活性氧(ROS)的积累降低了与淀粉和氮代谢相关的各种酶活性^[19]。

吴敏兰等^[20]研究发现,铬胁迫对烟草叶片叶绿素荧光特性造成一定程度的影响,导致 PSII 对光能的吸收和电子传递受到影响,光合反应中心活性显著降低。低浓度 Cr(VI)对烟草叶片 SOD 活性有促进作用,高浓度 Cr(VI)则表现为抑制作用,呈先促进后抑制的变化趋势。

赵明香等^[21]研究发现,不同价态的铬离子对烟草幼苗的抗氧化关键酶影响不同,Cr(III)处理 15 d 后,烟草幼苗叶片的 POD、SOD、PPO 3 种酶活性随着铬离子浓度增加而升高;Cr(III)处理 30 d 及 Cr(VI)分别处理 15、30 d 后,3 种酶活性随着铬离子浓度增加呈先升高后降低的变化趋势。高浓度铬离子胁迫时,烟草幼苗的根系活力显著降低,与吴敏兰等^[20]的研究结果一致。

Bukhari^[19]通过温室水培铬胁迫试验发现,100 $\mu\text{mol/L}$ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 处理 10 d 后,烟草的株高、根长以及根、叶片的干重和鲜重显著降低,铬胁迫显著抑制了烟草植株的生长。铬胁迫降低了叶片叶绿素含量、净光合速率(P_n)和光系统II最大光化学效率(F_v/F_m)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和细胞间 CO_2 浓度(C_i)。100 $\mu\text{mol/L}$ Cr 处理 5 d 后,观察烟草叶片的超微架构,发现叶绿体膜破坏,淀粉粒减少但体积增大,类囊体结构改变。此外铬胁迫还影响烟草幼苗的矿质元素含量,根中的 Fe、Zn 和 Mn 含量显著降低,而叶片中的 Fe 含量增加,Zn 含量略有降低,Mn 含量基本不变。铬胁迫可能是通过影响矿质元素吸收而影响烟草的株高和根长。

铬胁迫除影响烟草等植物的生理过程外,还会影响植物的基因表达和调控。miRNAs 是一组内源性的非编码小 RNA (sRNAs, 21~25 nt),通过引导靶基因 mRNA 的切割或翻译抑制,在转录和转录后水平上调控基因表达^[22]。除在植物发育过程中发挥作用外,miRNA 在胁迫反应中也发挥重要作用,包括重金属胁迫^[23]。铬胁迫显著促进了烟草根细胞

中 miRNA 的表达。从铬胁迫的根细胞中分离出了 164 种保守 miRNA(属于 53 个已知 miRNA 家族)和 42 种新型 miRNA(属于 29 个家族)。在这 53 个保守的 miRNA 家族中,主要为 miR169、miR156 和 miR172。164 个经鉴定的已知 miRNA 中,108 个 miRNA 的长度为 21 nt,其次长度分别为 22、20 和 24 nt,分别包含 37、13 和 6 个 miRNA。在这 29 个新 miRNA 家族中,主要为 miR12 和 miR13 家族,长度在 20~23 nt。其中,长度 22 nt 的 miRNA 最多,包含 17 个成员;其次是 21、23 和 20 nt 分别包含 13、11 和 1 个 miRNAs。

铬处理的烟草根中,发现来自 41 个保守 miRNA 家族的 116 个 miRNA 在应对 Cr 胁迫时表达不同。其中 26 个保守家族的 57 个 miRNA 表达上调,而 miR166 家族的 8 个 miRNA 表达下调。在鉴定的 29 个新型 miRNA 家族中有 14 个 miRNA 在铬胁迫下产生差异性表达。通过 COD 功能类别分析,发现一些预测的目标转录体对 ABA、干旱、渗透胁迫等生物和非生物胁迫有响应。

Bukhari^[19]通过对铬胁迫下烟草叶片蛋白表达谱的分析,发现在 100 $\mu\text{mol/L}$ 铬胁迫下,有 80 多种蛋白质表达上调,70 多种蛋白质表达下调,并鉴定出了 12 种耐铬相关蛋白,包括超氧化物歧化酶、线粒体肽酶、线粒体苹果酸脱氢酶、脱水蛋白、腺嘌呤转磷酸核糖基酶等与胁迫响应、能量代谢相关的蛋白质。

4 植烟土壤应对铬胁迫的控制措施

据统计^[24],2017 年我国废水中总铬排放量高达 100 t,六价铬的排放量约为 28 t。我国已有超过 2 000 万 hm^2 的耕地受到铬等重金属的污染,部分地区土壤中 Cr(VI)浓度大于 500 mg/kg。烟草产业大省贵州等地的植烟土壤被重金属污染严重。因此,铬污染土壤的治理迫在眉睫。

土壤重金属的修复措施一般有物理措施、化学措施和生物修复措施。一般治理重金属污染的途径有 2 个:去除化和稳定化^[1]。前者是将土壤中的重金属转移;后者则是通过改变重金属的离子形态和活度,降低毒性,如将六价铬还原为毒性低的三价铬。

刘绪坤等^[25]向琼北铬污染的土壤中添加生物炭和石灰,可以稳定土壤中 38%~60% 的有效态铬,提高土壤的 pH,有效降低 Cr(VI)的含量。土壤 pH 是控制铬在土壤中氧化-还原、吸附-解吸、沉淀-溶解的主要因素,通过影响土壤中铬的溶解度、形态和土壤胶体颗粒的表面电荷来影响土壤对铬的吸附。提高土壤 pH 可以降低有效态 Cr 的含量及其迁移性。3 种钝化剂对土壤铬的钝化效率表现为生物炭+石灰>石灰>生物炭。生物炭表面含有许多—CHO、—OH、—COOH 和—C=O 等含氧基团和官能团^[26],可以吸附和钝化铬;加入石灰也会提高土壤的 pH,增加土壤对铬的吸附能力,降低土壤中有有效铬的含量。在植烟土壤中施用生物炭等土壤改良剂,可以提升烟叶品质,促进烟株的生长发育,烟草的株高、茎围、叶面积等均有不同程度的提高^[27-28]。

烟草施用硅肥后,土壤 pH 升高,株高、茎围、叶面积等显著提高,烟草产量高、产值大,质量提升^[29]。此外,硅肥可以

提高烟草的抗旱、抗盐能力,还对青枯病表现出一定的抗性诱导,有效降低烟叶中铅、汞、镉等重金属的含量。硅会减少烟草对重金属的吸收和转运,还会促进叶绿素的生成和光合作用,硅促进植物在重金属胁迫下营养元素的积累,降低重金属对氮素代谢酶的抑制,提高烟草的生物量,稀释金属在植物体内的占比,降低重金属毒性^[30]。因此,在植烟土壤中施用硅肥这种土壤改良剂,可以缓解烟草的重金属胁迫。

施用有机肥可以将土壤中 Cr(VI) 还原为 Cr(III),显著降低土壤重金属的迁移性和环境毒性^[31],土壤 pH 稳定在 5.4~5.6,土壤蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶、脱氢酶的活性均有所提升;土壤中微生物的活性也相应提高^[32]。

生物修复法一般是利用特定的植物、微生物或动物来吸收、转化或清除、降解土壤中的铬,操作相对简单,成本相对较低,不会产生二次污染,修复效果好。

植物修复主要是利用一些富铬植物对土壤铬的吸收,添加一定的化学调控剂,降低土壤中铬含量。李氏禾^[33]、芦竹^[34]、牧豆树^[35]、阿根廷米草^[36]、黄豆^[37]、小白菜^[38]等均对铬有一定的富集作用。李廷轩等^[39]研究发现,籽粒苋与烟草间作可以降低烟草叶片中的铬含量。芒属植物在我国广泛分布,根系发达、生物量大,可以固定重金属又具有较高的经济价值,在生态改良重金属方面应用前景广阔^[24]。

微生物修复一般是向原土壤中添加驯化的高效微生物,控制一定的环境条件,将 Cr(VI) 还原为 Cr(III),降低土壤中的有效铬,修复被污染的土壤。韩建均等^[40]利用硫酸盐还原菌对六价铬污染的土壤进行原位修复,土壤 Cr(VI) 含量的下降率高达 85%,其缓解效果约为化学还原法的 2 倍。

动物修复一般是利用土壤中的蚯蚓、线虫、鼠类、节肢动物甲螨等动物吸收土壤中重金属的特性,使土壤中的重金属转移,然后采用电激等方法从土壤中驱赶这些动物,降低土壤中的重金属污染。土壤中的有机物经过蚯蚓消化后氮、磷、钠等营养元素逐渐增加,而有机碳含量、碳氮比则呈下降趋势,锌、铁、锰含量增加,其他重金属含量均显著下降。蚯蚓粪可以改善土壤的特性,提高土壤阳离子交换量、有机质含量,提高土壤中微生物的活性。蚯蚓粪处理增加了烟草的根长、鲜重、体积等,显著提高了致香物质(除新植二烯外)总量,提升了烟草品质^[41]。

跨界联合物理、化学、生物等修复技术,充分利用微生物、植物、动物以及土壤钝化剂等,通过它们之间的相互作用,可以取得较好的修复效果。

参考文献

- [1] 赵明香,保志娟.烟草中重金属的分布·影响及控制措施[J].安徽农业科学,2018,46(7):30-32,102.
- [2] 许嘉阳,宋鹏飞,刘春奎,等.烟草重金属及其修复措施研究进展[J].安徽农学通报,2015,21(17):29-32.
- [3] 肖艳霞.几种重金属对烟草生长发育的影响[J].吉林农业,2016(4):120.
- [4] CERVANTES C, CAMPOS-GARCÍA J, DEVARAS S, et al. Interactions of chromium with microorganisms and plants [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2001, 25(3): 335-347.
- [5] 赵纪新,尹鹏程,岳荣,等.我国农田土壤重金属污染现状·来源及修复技术研究综述[J].安徽农业科学,2018 46(4):19-21,26.
- [6] RODGMAN A, PERFETTI T A. The chemical components of tobacco and

- tobacco smoke [M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013.
- [7] ZVOBGO G, HU H L, SHANG S H, et al. The effects of phosphate on arsenic uptake and toxicity alleviation in tobacco genotypes with differing arsenic tolerances [J]. Environmental toxicology and chemistry, 2015, 34(1): 45-52.
- [8] ORCEN N, NAZARIAN G R, GHARIBKHANI M. The responses of stomatal parameters and SPAD value, in Asian tobacco exposed to chromium [J]. Polish journal of environmental studies, 2013, 22(5): 1441-1447.
- [9] 黄鹏,朱列书.土壤铬对烟草的影响及其生物修复技术研究进展[J].现代农业科技,2014(9):255-256.
- [10] 穆青,刘洋,展彬华,等.我国植烟土壤主要问题及其防控措施研究进展[J].江苏农业科学,2018,46(21):16-20.
- [11] 魏益华,何俊海,冯小虎,等.土壤重金属处理对烟草中 As, Cd, Hg 和 Pb 的累积与分布的影响[J].中国烟草学报,2016,22(1):47-54.
- [12] GILL R A, ZANG L L, ALI B, et al. Chromium-induced physico-chemical and ultrastructural changes in four cultivars of *Brassica napus* L. [J]. Chemosphere, 2015, 120: 154-164.
- [13] SINGH H P, MAHAJAN P, KAUR S, et al. Chromium toxicity and tolerance in plants [J]. Environmental chemistry letters, 2013, 11(3): 229-254.
- [14] TIWARI K K, DWIVEDI S, SINGH N K, et al. Chromium (VI) induced phytotoxicity and oxidative stress in pea (*Pisum sativum* L.). Biochemical changes and translocation of essential nutrients [J]. Journal of environmental biology, 2009, 30(3): 389-394.
- [15] 鲁黎明,顾会战,彭毅,等.烟草对重金属铬砷汞积累分配特性分析[J].华北农学报,2013,28(S1):366-370.
- [16] 柳均,肖少红,陈慧.重金属铬、镍在烟草叶片的分布特征[J].湖北民族学院学报(自然科学版),2014,32(1):39-42.
- [17] 王晓敏.贵州植烟区土壤重金属污染状况及其对烟叶安全的影响评价[D].贵阳:贵州大学,2009.
- [18] 翟振,张艳玲,杨欣,等.大气沉降对烟叶重金属含量的影响及溯源分析[J].烟草科技,2019,52(6):9-15.
- [19] BUKHARI S A H. 烟草响应铬胁迫 microRNA 与蛋白质的鉴定[D].杭州:浙江大学,2015.
- [20] 吴敏兰,贾洋洋,李蕊钰,等.铬胁迫对烟草叶片叶绿素荧光特性和活性氧代谢系统的影响[J].江苏农业科学,2014,42(8):92-95.
- [21] 赵明香,张琦,赵德国,等.不同价态铬离子对烟草幼苗抗氧化关键酶和根系活力的影响[J].南方农业学报,2018,49(11):2155-2161.
- [22] TURNER M, YU O, SUBRAMANIAN S. Genome organization and characteristics of soybean microRNAs [J]. BMC Genomics, 2012, 13: 1-16.
- [23] CHEN L, WANG T, ZHAO M, et al. Identification of aluminum-responsive microRNAs in *Medicago truncatula* by genome-wide high-throughput sequencing [J]. Planta, 2012, 235(2): 375-386.
- [24] 钟曼依,张新全,杨昕颖,等.植物对重金属铬胁迫响应机制的研究进展[J].草业科学,2019,36(8):1962-1975.
- [25] 刘绪坤,徐文,黄一伦,等.利用生物炭与石灰钝化(修复)琼北土壤中的铬污染[J].海南大学学报(自然科学版),2020,38(3):254-259.
- [26] 黄代宽,李心清,董泽琴,等.生物炭的土壤环境效应及其重金属修复应用的研究进展[J].贵州农业科学,2014,42(11):159-165.
- [27] 胡蓉花,李小勇,凡中良,等.不同土壤改良剂对吉安烟区烤烟生长及产质量的影响[J].农业与技术,2019,39(22):37-42.
- [28] 邱岭军,张翔,李亮,等.生物炭施用量对土壤特性和烟叶产质量的影响[J].安徽农业科学,2020,48(18):153-156.
- [29] 舒照鹤,王婧,尹虎成,等.有机硅肥对云烟 87 产质量的影响[J].浙江农业科学,2020,61(9):1762-1764.
- [30] 李京蕾.硅肥对烟草生长及品质性状的影响[D].泰安:山东农业大学,2019.
- [31] 宁皎莹,周根娣,周春儿,等.农田土壤重金属污染钝化修复技术研究进展[J].杭州师范大学学报(自然科学版),2016,15(2):156-162.
- [32] 刘叶.有机肥影响六价铬污染土壤微生物群落结构和缓解对红苋菜毒害的机理研究[D].湛江:广东海洋大学,2019.
- [33] 张学洪,罗亚平,黄海涛,等.一种新发现的湿生铬超积累植物——李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz) [J]. 生态学报,2006,26(3):950-953.
- [34] 韩志萍.铬铜镍在芦竹中的富集与分布[J].环境科学与技术,2006,29(5):106-108,121.
- [35] BUENDÍA-GONZÁLEZ L, OROZCO-VILLAFUERTE J, CRUZ-SOSA F, et al. *Prosopis laevigata* a potential chromium (VI) and cadmium (II) hyperaccumulator desert plant [J]. Bioresource technology, 2010, 101(15): 5862-5867.

- 工程学报,2010,26(11):237-244.
- [35] 陈建平,曹冬冬. 水处理微滤机过滤能力和堵塞问题的研究[J]. 天津工业大学学报,2013,32(5):57-60.
- [36] 宿墨,刘晃,宋红桥,等. 转鼓式微滤机颗粒去除率及能耗的运行试验研究[J]. 渔业现代化,2008,35(5):9-12.
- [37] 傅雪军,马绍赛,朱建新,等. 封闭式循环水养殖系统水处理效率及半滑舌鲷养殖效果分析[J]. 环境工程学报,2011,5(4):745-751.
- [38] 林中凌. 两种鱼类工厂化循环水养殖过程的水质调控及水中悬浮颗粒物分类[D]. 大连:大连海洋大学,2016.
- [39] CHEN S L, TIMMONS M B, ANESHANSLEY D J, et al. Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and design implications[J]. Aquaculture, 1993, 112(2/3):143-155.
- [40] 郑杰民,叶乐,朱小明. 对虾池塘养殖生态系统的研究进展[J]. 福建水产,2006,28(3):73-79.
- [41] 李德尚,董双林. 对虾与鱼、贝类封闭式综合养殖的实验研究[J]. 海洋与湖沼,2002,33(1):90-96.
- [42] 虞为,李卓佳,朱长波,等. 我国对虾生态养殖的发展现状、存在问题与对策[J]. 广东农业科学,2011,38(17):168-171.
- [43] 黄国强,李德尚,董双林. 一种新型对虾多池循环水综合养殖模式[J]. 海洋科学,2001,25(4):48-49,57.
- [44] 申玉春,叶富良,梁国藩,等. 虾—鱼—贝—藻多池循环水生态养殖模式的研究[J]. 湛江海洋大学学报,2004,24(4):10-16.
- [45] KONGKEO H. Comparison of intensive shrimp farming systems in Indonesia, Philippines, Taiwan and Thailand[J]. Aquac Res, 1997, 28(10):789-796.
- [46] LI D S, DONG S L. Summary of studies on closed-polyculture of penaeid shrimp with fishes and moluscans[J]. Chin J Oceanol Limnol, 2000, 18(1):61-66.
- [47] 宋奔奔,吴凡,倪琦. 国外封闭循环水养殖系统工艺流程设计现状与展望[J]. 渔业现代化,2012,39(3):13-18,39.
- [48] 张鸿雁,李德尚,王岩. 缢蛭对对虾池浮游生物群落结构的影响[J]. 青岛海洋大学学报,1998,28(2):210-216.
- [49] 田相利,李德尚,董双林,等. 对虾—罗非鱼—缢蛭封闭式综合养殖的水质研究[J]. 应用生态学报,2001,12(2):287-292.
- [50] 颜天,傅萌,刘卫,等. 双壳类清除率在海洋污染物毒性研究中的应用[J]. 海洋科学,2003,27(1):50-53.
- [51] 秦培兵,卢继武. 滤食性贝类对浅海养殖系统中营养盐循环的影响[J]. 海洋科学,2001,25(5):27-29.
- [52] 卜雪峰. 贝藻处理海水养殖废水的应用研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2004.
- [53] 许永安,廖登远,章超桦,等. 贝类净化中试生产工艺技术[J]. 福建水产,2007,29(3):14-18.
- [54] 王吉桥,靳翠丽,张欣,等. 不同密度的石莼与对虾的混养实验[J]. 水产学报,2001,25(1):32-37.
- [55] BOROWITZKA M A, BOROWITZKA L J. Micro-algal biotechnology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1988:305.
- [56] 刘思俭,揭振英,曾淑芳. 中国江蕨的商品生产及其与对虾混养[J]. 湛江海洋大学学报,1997,17(2):27-30.
- [57] 王焕明. 藻虾混养的研究 I. 江蕨与新对虾、青蟹在鱼塘中混养的试验[J]. 海洋湖沼通报,1994(3):52-59.
- [58] 李禄康. 湿地与湿地公约[J]. 世界林业研究,2001,14(1):1-7.
- [59] 毛雪慧,易科浪. 人工湿地对危险废物处理站尾水处理效果评价[J]. 中国农村水利水电,2020(3):83-86,90.
- [60] REVITT D M, WORRALL P, BREWER D. The integration of constructed wetlands into a treatment system for airport runoff[J]. Water Sci Technol, 2001, 44(11/12):469-476.
- [61] 杨旭,于水利,张洪洋,等. 潜流人工湿地低温下黄河原水预处理效果研究[J]. 生态环境,2008,17(1):70-73.
- [62] 朱文玲,崔理华,朱夕珍,等. 混合基质垂直流人工湿地净化废水效果[J]. 农业工程学报,2009,25(S1):44-48.
- [63] 曹大伟,沙玥,金秋,等. 多级复合型人工湿地工艺对污水厂尾水处理净化效果的试验研究[J]. 环境科技,2019,32(3):12-16.
- [64] 李晓东,孙铁研,李海波,等. 人工湿地除磷研究进展[J]. 生态学报,2007,27(3):1226-1232.
- [65] 王荣,贺锋,徐栋,等. 人工湿地基质除磷机理及影响因素研究[J]. 环境科学与技术,2010,33(S1):12-18.
- [66] 卢少勇,金相灿,余刚. 人工湿地的磷去除机理[J]. 生态环境,2006,15(2):391-396.
- [67] 陈迪,杨勇,郑祥,等. 人工湿地对病原微生物去除的研究进展[J]. 农业环境科学学报,2013,32(9):1720-1730.
- [68] 刘学功,李金中,李学菊. 人工湿地填料结构对水质净化效果影响研究[J]. 海河水利,2008(4):40-42.
- [69] 周炜,黄民生,谢爱军,等. 人工湿地净化富营养化河水试验研究(二):基质层及流态对氮素污染物净化效果的影响[J]. 净水技术,2006,25(4):40-44.
- [70] 李志杰,孙升梅,刘宝山. 人工湿地脱氮除磷机理及其研究进展[J]. 工业水处理,2012,32(4):1-5.
- [71] BREEN P F. A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment[J]. Water Res, 1990, 24(6):689-697.
- [72] HABERL R, PERFLER R. Nutrient removal in a reed bed system[J]. Water Sci Technol, 1991, 23(4/5/6):729-737.
- [73] 吴长淋. 人工湿地处理含重金属废水的研究现状及展望[J]. 化学工程师,2009,23(3):38-41.
- [74] 朱学宝,谭洪新,罗国芝. 封闭循环工厂化水产养殖水质净化系统的技术构成[J]. 内陆水产,2000,25(10):24-25.
- [75] 雷霖霖. 海水鱼类养殖理论与技术[M]. 北京:中国农业出版社,2005:365-408.
- [76] 胡金成,杨永海,张树森,等. 循环水养殖系统水处理设备的应用技术研究[J]. 渔业现代化,2006,33(3):15-16,18.
- [77] 周阳,陈有光,段登选,等. 砂滤罐处理工厂化养鱼循环水效果[J]. 农业工程学报,2009,25(12):254-258.
- [78] 臧维玲,戴习林,徐嘉波,等. 室内凡纳滨对虾工厂化养殖循环水调控技术与模式[J]. 水产学报,2008,32(5):749-757.
- [79] 祝莹,杨绍斌. 臭氧配合复合光合细菌对虹鳟鱼病的防治研究[J]. 水产科技情报,2009,36(1):27-30.
- [80] SCHROEDER J P, CROOT P L, VON DEWITZ B, et al. Potential and limitations of ozone for the removal of ammonia, nitrite, and yellow substances in marine recirculating aquacultural systems[J]. Aquac Eng, 2011, 45(1):35-41.
- [81] 宋奔奔,倪琦,张宇雷,等. 臭氧对大菱鲆半封闭循环水养殖系统水质净化研究[J]. 渔业现代化,2011,38(6):11-15.
- [82] DAVIDSON J, GOOD C, WELSH C, et al. The effects of ozone and water exchange rates on water quality and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance in replicated water recirculating systems[J]. Aquac Eng, 2011, 44(3):80-96.
- [83] 韩永望,李健,潘鲁青,等. 微孔管增氧和气石增氧对凡纳滨对虾室内养殖影响的比较研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2012,42(4):41-47.
- [84] 徐勇,张修峰,曲克明,等. 不同溶氧条件下亚硝酸盐和氨氮对半滑舌鲷的急性毒性效应[J]. 海洋水产研究,2006,27(5):28-33.
- [85] 王娟,曲克明,刘海英,等. 不同溶氧条件下亚硝酸盐和氨氮对中国对虾的急性毒性效应[J]. 海洋水产研究,2007,28(6):1-6.

(上接第15页)

- [36] REDONDO-GÓMEZ S, MATEOS-NARANJO E, VECINO-BUENO I, et al. Accumulation and tolerance characteristics of chromium in a cordgrass Cr- hyperaccumulator, *Spartina argentinensis* [J]. Journal of hazardous materials, 2011, 185(2/3):862-869.
- [37] 郑芝梅,叶华,华平. 黄豆发芽过程中铬的生物富集效应的研究[J]. 食品工业科技,2005,26(6):101-103.
- [38] 徐胜光,周建民,刘艳丽,等. 几种化肥对外源 Cr(VI)形态和小白菜吸收铬的影响[J]. 南京农业大学学报,2007,30(4):52-57.
- [39] 李廷轩,马国瑞. 籽粒苋—烟草间作对烟叶部分矿质元素含量及品质的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(1):138-140,143.
- [40] 韩建均,柴陆军,张娟,等. 硫酸盐还原菌原位修复六价铬污染土壤[J]. 化工环保,2020,40(6):613-618.
- [41] 李本晟. 蚯蚓粪对植烟土壤与烤烟根系特性及烟叶品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.