

水分管理调控水稻镉污染的研究与应用进展

张燕¹ 江建锋² 黄奇娜¹ 邵国胜^{1*} 王宏航^{3*}

(¹ 中国水稻研究所, 杭州 310006; ² 衢州市衢江区农业技术推广中心, 浙江 衢州, 324022; ³ 衢州市农业农村局农业技术推广中心, 浙江 衢州, 324000; 第一作者: zhangyan11@caas.cn; * 通讯作者: shaoguosheng@caas.cn; 807099788@qq.com)

摘 要:我国稻田镉污染严重, 稻米安全问题突出, 发展能够有效调控水稻镉污染的产品与措施尤为迫切。稻田生态系统高度复杂, 并易受多种因素影响, 水稻镉污染调控难度大。大量研究表明, 合理的水分管理不仅能够保障水稻正常的生长发育、产量和稻米品质, 同时还能有效减少水稻镉积累。本文综述了水分对土壤理化性质、微生物动态变化以及植物生长发育的影响, 阐述了水分管理降低水稻镉积累的主要机理, 总结和展望了目前水分管理模式相关研究进展以及未来研究方向, 旨在为实际生产上通过优化水分管理技术降低镉污染提供理论依据, 更有效实现水稻安全生产。

关键词:水稻; 水分管理; 镉污染; 土壤; 机理

中图分类号: S511.07 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8082(2021)03-0010-07

水稻是我国的主要粮食作物之一, 全国约 65% 的人口以稻米为主食^[1]。我国耕地土壤重金属污染物超标严重, 其中, 重金属镉(Cd)污染最为突出^[2-3]。水稻对 Cd 具有较强的富集作用, 土壤 Cd 被水稻根系吸收后跟随水分运输至地上部并积累。调查发现, 我国相当比例的市售大米存在 Cd 含量超过国家限定标准的现象^[4-5]。由于 Cd 具有一定的毒性, Cd 含量超标的大米严重威胁我国人民的生命健康。因此, 推进 Cd 污染稻田修复, 控制水稻 Cd 污染, 对保障粮食安全尤为迫切。

水分管理是指依据水稻各生育期需水特性对稻田进行适宜的灌排水, 以保障水稻产量和稻米品质。近年来, 有关水分影响水稻 Cd 积累的报道不断出现, 适宜的田间水分管理被证明能够有效降低水稻对 Cd 的吸收与积累^[6-9]。由于水分管理操作方便、经济、高效、无二次污染且不影响水稻的正常生长, 目前在生产上已被广泛应用。然而, 稻田生态系统组成成分丰富, 稻田土壤重金属污染极具复杂性, 运用水分管理调控水稻 Cd 污染的效果具有不确定性。本文从水分影响土壤理化性质、微生物生命活动以及植物生长发育的角度, 综述了水分管理调控水稻 Cd 积累的作用机理, 总结和展望了近年来水分管理模式的研究进展及未来研究方向, 旨在为实际生产上应用并优化水分管理措施提供理论支持, 以期更有效降低水稻 Cd 污染, 促进水稻安全生产。

1 水稻各生育期需水特性

水稻整个生长周期耗水较多, 且各生育期对水分

的需求存在差异。为培育壮苗, 水稻苗期田间土壤应保持湿润(水分在 80% 以上), 以促进根、芽的生长, 而生长过程中适当降低土壤水分可以促进水稻根系生长。分蘖期水稻因生长迅速, 对水、肥需求较大, 根系需保障供氧以保证根系的发育以及对水肥的吸收, 此时田间应实行浅水勤灌。分蘖后期为控制无效分蘖, 应当适量减少水分供应并适时排水晒田。孕穗期、抽穗期皆是水稻生长过程的需水高峰期, 该时期水稻进行花粉母细胞减数分裂、花粉形成以及授粉等生命活动, 对水分要求十分敏感, 田间水层应维持在 3~5 cm, 水分供给过少或过多都会导致水稻减产。灌浆期水稻同样对水分较为敏感, 此时既要满足水稻对水分的需求, 又要保障水稻根系供氧以维持水稻根系生理机能和促进光合产物向籽粒运输以提高产量, 因此, 该时期应该实行干湿交替、以湿为主的水分管理。进入蜡熟期的水稻对水分的需求量减少, 此时只需保持土壤湿润, 以促进水稻茎叶营养物质随水分向籽粒中运输, 从而提高水稻产量和品质。综上可知, 了解水稻不同生育期的需水特性并进行科学地田间水分管理, 对保障水稻稳产高产至关重要^[10-11]。

2 土壤理化性质变化及其对水稻 Cd 积累的影响

收稿日期: 2021-03-25

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0801102); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CPSIBRF-CNRR-202121)

2.1 土壤胶体变化及其对水稻 Cd 积累的影响

土壤中存在丰富的土壤胶体(粒径在 1 nm~1 μ m 之间的固体颗粒),可分为无机胶体(含水氧化物、层状硅酸盐)、有机胶体(高分子有机化合物,如腐殖质、木质素、蛋白质等)和无机-有机复合胶体。胶体作为土壤中最细小、最活跃的物质成分,具备巨大的比表面积和表面能,对带电荷的离子具有较强的吸附力^[12]。Cd²⁺易被土壤胶体吸附,但这种吸附作用并不稳定,易受土壤环境影响,其中水分就是一个重要的影响因素。由于水分运动能够引起土壤胶体的凝聚和分散,即一部分土壤胶体被释放至土壤溶液并分散成溶胶,一部分溶胶微粒在水分运动带动下下沉并凝聚成凝胶,对胶体吸附的物质元素的迁移具有重要影响^[13-14]。此外,淹水灌溉后土壤中金属阳离子易与羟基结合并以羟基络合物形式存在,可被胶体吸附的金属阳离子浓度大幅降低,与 Cd²⁺竞争胶体吸附位点作用减弱,一定程度上促进了土壤胶体对 Cd²⁺的吸附固定,植株可吸收的 Cd 含量减少;而当稻田排水后,金属阳离子重新被析出并与 Cd²⁺竞争土壤胶体的吸附位点,导致土壤溶液 Cd²⁺含量增加,水稻 Cd 积累增加^[15-16]。

2.2 土壤氧化还原势、酸碱性变化及其对水稻 Cd 积累的影响

2.2.1 土壤氧化还原势变化

淹水土壤与通气良好土壤最大的一个区别在于氧化还原电位(Eh)的改变。淹水土壤氧化还原电位约 200~400 mv,而通气良好土壤则为 800~300 mv^[17]。

稻田淹水灌溉后,被水淹没的耕作层其土壤与空气之间的气体交换大幅下降,O₂等气体只能通过水分子间隙缓慢扩散进入土壤,同时土壤中微生物的代谢活动加速了土壤中 O₂含量的消耗,随着淹水时间的增长,O₂逐渐消耗殆尽^[18-19]。土壤缺乏 O₂,兼性、专性厌氧菌成为参与土壤有机质分解与同化的主要微生物,但由于其能量水平低,导致有机质分解缓慢且不完全,易造成有机质的积累以及甲烷、甲酸、乙酸、丙酸和丁酸等有害中间产物的产生^[20]。不能被及时分解的有机质能够借助自身的功能团螯合 Cd²⁺,从而降低土壤中有效态 Cd 含量^[21]。此外,分解的有机质一定程度增加了土壤中可溶性有机物的含量,可溶性有机物对 Cd²⁺同样具备较强的螯合力^[22]。研究认为,有机-Cd 配合物能够提高或降低 Cd 的活性和迁移能力,从而对土壤吸附 Cd 产生不同影响^[23-24],具体作用效果很可能与土壤类型、可溶性有机物类型等有关。由于土壤缺乏 O₂,厌氧

细菌分解有机质产生大量还原性物质,导致土壤 Eh 下降,土壤环境整体呈现还原状态。

2.2.2 土壤酸碱性变化

淹水土壤氧化还原状态的改变会引起土壤酸碱性(pH)变化。研究发现,淹水能够改变酸性、碱性土壤 pH,并且最终都趋于中性^[17,25]。淹水初期,由于好氧微生物的呼吸作用导致土壤中 CO₂急剧积累,酸、碱性土壤 pH 均迅速降低至最低值。酸性土壤 pH 后期上升并趋于中性,主要因为有机质分解产生的还原性物质与铁、锰等氧化物发生还原作用消耗大量质子导致 pH 上升,同时产生并积累的有机酸和 CO₂又能降低 pH,两者的缓冲作用使得酸性土壤 pH 最终趋于中性。碳酸盐等物质的不断溶解造成 CO₂积累,使得碱性土壤 pH 降低并趋于中性^[26]。

2.2.3 基于 pH、Eh 的元素形态变化及其对水稻 Cd 积累的影响

稻田持续淹水导致土壤 Eh 不断降低,土壤中元素因还原作用逐步发生形态变化。O₂作为淹水后第一个被还原的成分,当 Eh 降低至约 330 mv 时彻底消失。土壤中氮(N)主要以 NO₃⁻形式稳定存在于土壤中,NO₃⁻作为非专性吸附阴离子,易与 Cd 配位形成可溶性的离子化合物。随着 Eh 的不断下降,NO₃⁻会被大量自养、异养细菌反硝化还原成 NO₂⁻、N₂O 以及 N₂等产物,大量淋失的 NO₃⁻使得土壤有效态 Cd 含量减少^[27]。

随后,高价铁锰化合物被相继还原溶解,由于锰对还原性物质更为敏感,其还原溶解优先于铁^[28-29]。铁锰氧化物是土壤中的重要物质成分,作为土壤中较为活跃的固相胶体,有着较高的比表面积和吸附性,是土壤中重要的吸附载体,对土壤中阴、阳离子以及包括 Cd²⁺在内的重金属离子的迁移与沉淀具有重要作用^[30]。铁锰氧化物的还原溶解,导致水溶性 Fe²⁺、Mn²⁺浓度在土壤溶液中大幅提高,同时原先被吸附的 Cd²⁺也因还原作用被释放^[31]。由于 Cd 与植物生长必需元素如 Fe、Mn、Zn 等具有相似的地球化学行为,Cd²⁺进入植物体内主要是借助植株 Fe²⁺、Mn²⁺、Zn²⁺等二价金属离子转运蛋白(NRAMP 家族蛋白、ZIP 家族蛋白等)^[32-33]。因此,Fe²⁺、Mn²⁺能够与 Cd²⁺竞争进入水稻体内的通道,从而减少水稻根系对 Cd 的吸收。另一方面,土壤中可溶性 Fe²⁺、Mn²⁺有助于释放被胶体吸附的碱金属元素阳离子(NH₄⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺和 K⁺等)^[17],这些阳离子能够与 Cd²⁺竞争土壤表面的吸附位点,导致土壤中有效态 Cd 含量增加。随着淹水时间的延长,土壤 pH 上升到一定

程度, Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 会被重新氧化形成新的铁锰氧化物, Cd^{2+} 也因此被重新吸附, 最终以铁锰氧化物结合形成共沉淀, 土壤溶液有效态 Cd 含量降低, 水稻 Cd 积累减少^[34-36]。

当 Eh 降低至 -150 mV 以下, 含硫(S)有机化合物在专性厌氧细菌作用下被氧化分解, 土壤中 SO_4^{2-} 作为电子受体被还原, 产生 HS^- 、 S^{2-} 和 H_2S 等产物^[37-38]。还原产生的 S^{2-} 可与 Cd^{2+} 反应生成难溶的 CdS 沉淀。同时, S^{2-} 还能与 Fe^{2+} 形成 FeS 并与 Cd 共沉淀, 这些反应均有效减少了土壤有效态 Cd 含量和水稻 Cd 积累^[39-40]。排水后, 空气重新进入土壤, 含 Cd 的硫化物被重新氧化, Cd^{2+} 被重新释放进入土壤溶液; 此外, 排水后土壤 pH 的下降促使土壤固相表面吸附的 Cd^{2+} 被解吸并重新进入土壤溶液, 土壤有效态 Cd 含量和水稻 Cd 积累增加^[41-42]。

淹水后土壤溶液中的可溶性磷(P)浓度大幅提高, 这主要是由于土壤中化合态磷酸盐水解、铁锰氧化物与有机物吸附或共沉淀的 PO_4^{3-} 被释放导致^[43]。 PO_4^{3-} 之所以能够固定 Cd, 主要基于其表面对 Cd 的直接吸附、被诱导吸附以及与 Cd 生成沉淀或矿物等作用^[44]。其中, 与 Cd 生成沉淀或矿物是主要的作用机理, 而表面直接吸附只针对难溶性的磷灰石、磷矿石。诱导吸附是指由于无定形铁氧化物的存在, PO_4^{3-} 被土壤表面吸附并进一步诱导 Cd 被土壤吸附^[45]。因此, 淹水后 PO_4^{3-} 的大幅增加能够有效减少水稻对 Cd 的吸收。

3 土壤微生物动态变化及其对水稻 Cd 积累的影响

土壤微生物作为土壤生态系统中最活跃的组成部分, 对土壤结构的形成与改变、物质和能量的转化、土壤肥力和植物养分利用等具有重要作用^[46]。不同类型土壤中的微生物呈现特征性的群落结构差异, 它们能够迅速响应环境变化从而适应生存环境并发挥相应生态功能^[47]。水分对土壤微生物的数量、活性和功能等动态变化具有重要影响^[48]。水稻土壤中微生物主要由细菌、放线菌和真菌组成, 数量占比依次递减, 其中需氧或兼性厌氧菌约占细菌总数的 95%。淹水一方面能够促使土壤团聚体破裂释放有机碳源, 微生物以此为呼吸底物, 自身代谢能力提高; 另一方面, 水势对微生物造成的生理压力和淹水导致的低氧条件, 均导致大部分需氧细菌、放线菌以及真菌难以生存, 淹水后稻田土壤微生物数量大大减少^[49-50]。此外, 淹水一定程度上能

够促进土壤中厌氧型微生物的生长, 如硫酸盐还原菌、异化铁还原菌等^[51-52]。硫酸盐还原菌可将土壤中的 SO_4^{2-} 还原成 S^{2-} , S^{2-} 会与土壤中迁移性强、活性高的 Cd^{2+} 结合生成 CdS 沉淀, 从而导致土壤中有效 Cd 含量减少^[53]。异化铁还原菌能够结合并氧化有机物, 以其作为电子供体, 将 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} , Fe^{2+} 的增加一方面与 Cd^{2+} 竞争被植物根系所吸附; 另一方面由于被重新氧化, 新形成的铁氧化物对 Cd^{2+} 进行吸附固定, 土壤溶液中可交换态 Cd 含量下降^[54]。由于水稻的需水特性, 稻田需经历间歇性灌溉, 土壤环境也经历有氧、无氧状态的交替, 厌氧菌、好氧菌都难以成为维持稻田生态系统稳定的优势菌, 更难以被稳定应用于水稻 Cd 积累的调控, 旱地作物则可考虑使用。

植物内生菌是指部分或全部生活史都在健康植物细胞内部或间隙中的一类微生物, 与宿主植物存在复杂又巧妙的互作机制^[55-56]。水稻内生菌 *Stenotrophomonas maltophilia* R5-5 被发现能够降低水稻体内编码 Cd 吸收和转运蛋白基因 (*OsNRAMP5*、*OsHMA2*) 的表达, 从而减少水稻 Cd 积累^[57]。不同水稻品种、定殖器官、土壤环境以及气候条件等都会对内生菌多样性产生影响。研究发现, 淹水能够提高水稻体内尤其是根部内生细菌的多样性^[58-59], 对水稻抵抗外界胁迫具有重要影响。此外, 水稻内生菌与根际微生物群落结构具有一定的相关性^[60-61], 根系分泌物就是其中植物调节根际微生物群落结构的重要信使之—^[62]。

4 水稻植株生长发育对水稻 Cd 积累的影响

除水稻和湿地植物外, 淹水会对植物造成一定损害, 主要是因为淹水后气体在水中扩散缓慢, 氧气难以进入土壤, 土壤微生物对氧气的快速消耗, 导致被水淹没的组织由于需氧得不到满足而发生细胞死亡。水稻等水生植物之所以能够在低氧环境下正常生长, 主要依靠体内发达的、纵向连通的气腔(通气组织)将氧气从地上部输送到根部以确保对根系的供氧^[63-64]。由于根系向根际环境泌氧, 较高的根际氧化还原电位导致根系表面形成铁锰氧化物胶膜(即铁膜)^[65]。铁膜对有害金属具有吸附或共沉淀作用, 能够有效限制有毒物质对根系的侵害, 例如重金属 Cd, 而抑制效果则与水稻品种、生育期以及铁膜形成量等密切相关^[66-69]。同时, 为了优先保障水稻根系对氧气的需求, 淹水低氧条件能够诱导根系表皮层形成一层排列紧密的厚壁细胞作为

阻碍泌氧的屏障,降低根表通透性以防止输送途中发生氧气损失^[70]。根表皮层厚壁组织与根系通气组织共同调节植物内的氧气浓度,且该厚壁组织被认为同样具有能够有效阻止水稻吸收土壤中潜在毒素的作用^[71-73]。淹水除通过影响水稻根系形态与生理结构减少水稻对Cd的吸收外,还能进一步降低水稻根系相关Cd吸收与转运蛋白基因 *OsLCD* 和 *OsNRAMP1* 的表达,减少水稻根系对Cd的吸收^[9]。

根系分泌物是植物生长过程中向外界环境分泌的各种有机和无机物的总称,是植物与土壤信息传递和物质交换的重要媒介,对植物的生长发育和根际环境具有调控作用。水稻根系分泌物对水稻Cd积累具有一定影响。淹水后,由于营养元素缺乏,水稻根系会分泌大量低分子量有机酸导致根系附近酸化,从而活化溶解Cd,导致有效态Cd含量增加^[74-75]。与此同时,其他元素(Fe、Mn、Zn等)也会被有机酸解吸,这些元素与Cd竞争进入植物体内的通道,从而影响植物对Cd的吸收。有机酸对不同元素的解吸作用存在差异,这很可能与土壤类型、有机酸类型等相关,这种差异会进一步影响水稻Cd积累含量,而目前相关研究尚缺。

5 水稻Cd积累的水分调控管理模式研究进展

在水稻生长发育过程中,根据其需水特性进行合理水分管理,有利于提高水稻产量和品质,不仅如此,水分管理还与水稻Cd积累密切相关,且不同的水分管理模式对水稻Cd积累影响不同。崔晓荧等^[76]研究发现,水稻生长整个生育期干湿交替的水分管理较淹水处理能够大幅提高土壤有效态Cd浓度,促使水稻根系增加对Cd的吸收。杨小粉等^[8]通过对比3种水分灌溉方式(长期淹水灌溉、湿润灌溉以及阶段性湿润灌溉)下2个水稻品种糙米中Cd含量发现,长期淹水灌溉处理水稻糙米Cd富集系数最低。HU等^[77]利用多个水稻品种研究湿润灌溉、间歇性灌溉、常规灌溉以及淹水灌溉等4种不同水分管理模式对水稻Cd积累的影响,发现湿润灌溉模式下所有品种的地上部(包括稻米)Cd含量皆表现最高,间歇性灌溉与常规灌溉Cd含量相对较低,淹水灌溉仍然是降低水稻Cd积累最有效的灌溉方式。以上研究表明,全生育期淹水灌溉是降低水稻Cd积累最有效的一种水分管理模式,这主要是由于淹水灌溉使得稻田土壤环境氧气缺乏,发生pH、Eh、元素形态、微生物动态以及植物生长发育等变化,有效减少

了土壤中有效态Cd含量;而湿润灌溉确保了维持水稻根部发育所需的氧气,一方面并未对土壤环境造成较大改变,另一方面,由于水稻根系发育好,根系活力提高,水稻根系吸收Cd的能力也有所增强。

然而,全生育期淹水灌溉模式耗费水资源多,缺水地区难以得到应用,且易造成水稻无效分蘖增加、病虫害易发生等导致水稻减产的不利影响以及其他重金属(Hg)含量超标等弊端^[78]。TIAN等^[79]进一步对水稻全生育湿润灌溉、灌浆前湿润灌溉灌浆后淹水灌溉、灌浆前淹水灌溉灌浆后湿润灌溉和全生育期淹水灌溉等4种灌溉方式进行研究,发现相较于全生育期湿润灌溉,另外3种灌溉模式均显著降低了成熟期水稻各组织部位的Cd含量,说明在水稻灌浆期进行淹水灌溉有利于减少水稻Cd积累。易镇邪等^[80]发现,全生育期淹水处理是最能降低早、晚双季稻Cd积累量的一种灌溉方式。此外,孕穗至齐穗、齐穗至灌浆中期间歇灌溉处理也能有效降低水稻地上部Cd积累量。在水资源较为缺乏情况下,可采取齐穗至灌浆中期间歇灌溉方式。分蘖期、抽穗期和灌浆期被认为是能够有效降低水稻Cd积累的关键生长时期^[81-82]。这主要是由于水稻生长的分蘖、抽穗、灌浆时期均是水稻需水最大的生长发育时期,该时期水稻需从土壤中大量吸收水分以保证自身的生长发育。在吸收水分的同时,重金属Cd也会跟随水分被大量输送至地上部,导致地上部Cd积累大幅增加。此时进行淹水灌溉,既能保证水稻对水分的需求,又能有效降低土壤中可被水稻吸收的有效态Cd含量,因此能够达到减少水稻Cd积累的调控效果。

6 总结与展望

水分管理调控水稻Cd污染已被理论和实践证实是经济有效的措施。综上所述,水分管理调节水稻Cd积累涉及多种因素,是一个较为复杂的过程。例如,土壤pH对土壤中阳离子浓度的影响直接影响土壤胶体对Cd的吸附作用;淹水导致的铁锰氧化物溶解,一方面能够增加土壤溶液中有效态Cd含量,促进水稻根系对Cd的吸收,另一方面可溶性的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 又与 Cd^{2+} 形成竞争,减少水稻根系对Cd的吸收;有机-Cd配合物对Cd的活性和迁移以及对水稻Cd积累的影响同样具有双重作用。不同类型水稻、不同生育期、不同地区以及不同模式的水分管理对水稻Cd积累的调控效果往往存在差异。此外,土壤重金属污染往往是多元素的复合污染,在利用水分管理进行水稻Cd污染调控时,还

应当充分考虑水稻对其他重金属元素的响应差异。例如,在淹水状态下,还原条件和升高的 pH 虽然能有效降低有效态 Cd 含量,减少植株对 Cd 的吸收;但同时也会导致 As^{5+} 被还原为 As^{3+} ,亚砷酸盐的溶解度大于砷酸盐,使得土壤溶液中砷溶解度大大增加,水稻增加对重金属 As 的吸收^[83]。因此,完善对土壤污染元素的监测,掌握水分对各项污染元素的影响机理,因地制宜选择合适的管理模式,才能更有效地控制当前农田环境的重金属污染。

目前利用水分管理进行水稻 Cd 污染的调控,主要是基于水分对土壤理化性质及土壤中 Cd 形态和有效态 Cd 含量的影响。稻田生态系统复杂,组成成分丰富。相较于土壤,目前针对水分管理对植物、微生物以及土壤-生物之间的互作影响,以及对水稻 Cd 积累的相关作用原理与应用研究尚且缺乏,未来可进行深入研究,以丰富和完善水分管理调控水稻 Cd 积累的理论知识。通过建立并发展相关生物指标的监测与评价制度,并基于相关理论知识进行应用探索以优化和创新水分管理模式,最终能够更有效地调控水稻 Cd 污染。

参考文献

- [1] 于红燕,刘世义.我国水稻产业发展现状、趋势及对策[J].农村经济与科技,2016,27(9):7-9.
- [2] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J].农业环境科学学报,2017,36(9):1 689-1 692.
- [3] 周江明.中国耕地重金属污染现状及其人为污染源浅析[J].中国土壤与肥料,2020(2):89-98.
- [4] QIAN Y Z, CHEN C, ZHANG Q, et al. Concentrations of cadmium, lead, mercury and arsenic in chinese market milled rice and associated population health risk[J]. *Food Control*, 2010, 21(12): 1 757 - 1 763.
- [5] CHEN H P, TANG Z, WANG P, et al. Geographical variations of cadmium and arsenic concentrations and arsenic speciation in chinese rice[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 482-490.
- [6] 张丽娜,宗良纲,付世景,等.水分管理方式对水稻在 Cd 污染土壤上生长及其吸收 Cd 的影响 [J]. 安全与环境学报,2006(5): 49-52.
- [7] 杨定清,雷绍荣,李霞,等.大田水分管理对控制稻米镉含量的技术研究[J].中国农学通报,2016,32(18):11-16.
- [8] 杨小粉,吴勇俊,张玉盛,等.水分管理对水稻镉吸收的影响[J].中国稻米,2019,25(4):34-37.
- [9] 陈江民,杨永杰,黄奇娜,等.持续淹水对水稻镉吸收的影响及其调控机理[J].中国农业科学,2017,50(17):3 300-3 310.
- [10] 曲世勇,郭丽娜.水稻各生育期需水规律及水分管理技术[J].吉林农业,2012(2):100.
- [11] 李龙昌.水稻田水分管理及节水栽培技术 [J]. 吉林农业,2014(22):23.
- [12] JONGE L W D, KJAERGAARD C, MOLDRUP P. Colloids and colloid-facilitated transport of contaminants in soils [J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(2): 321-325.
- [13] LI X, ZHANG P, LIN C L, et al. Role of hydrodynamic drag on microsphere deposition and re-entrainment in porous media under unfavorable conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(11): 4 012-4 020.
- [14] 刘冠男,刘新会.土壤胶体对重金属运移行为的影响[J].环境化学,2013,32(7):1 308-1 308.
- [15] 何振立,周启星,谢正苗.污染及有益元素的土壤化学平衡[M].北京:中国环境科学出版社,1998.
- [16] LI Z, ZHOU L. Cadmium transport mediated by soil colloid and dissolved organic matter: A field study[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(1): 106-115.
- [17] PONNAMPERUMA F N. The chemistry of submerged soils [J]. *Advances in Agronomy*, 1972, 24: 29-96.
- [18] BOIVIN P, FAVRE F, HAMMECKER C, et al. Processes driving soil solution chemistry in a flooded rice-cropped vertisol: Analysis of long-time monitoring data[J]. *Geoderma*, 2002, 110: 87-107.
- [19] GAO S, TANJI K K, SCARDACI S C, et al. Comparison of redox indicators in a paddy soil during rice-growing season [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 805-817.
- [20] HAO R J, LI Z P, CHE Y P. Differences in organic C mineralization between aerobic and submerged conditions in paddy soils of southern Jiangsu Province, China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(9): 1 410-1 418.
- [21] 宋波,曾炜铨.土壤有机质对镉污染土壤修复的影响[J].土壤通报,2015,46(4):1 018-1 024.
- [22] 李廷强,杨肖娥.土壤中水溶性有机质及其对重金属化学与生物行为的影响[J].应用生态学报,2004,15(6):1 083-1 087.
- [23] LI T, LIANG C, HAN X, et al. Mobilization of cadmium by dissolved organic matter in the rhizosphere of hyperaccumulator sedum alfredii [J]. *Chemosphere*, 2013, 91: 970-976.
- [24] 李妍,刘静,朱俊,等.水溶性有机质对 Cd 和 Zn 在土壤表面竞争吸附的影响[J].广东农业科学,2012,39(21):79-81.
- [25] PONNAMPERUMA F N, MARTINEZ E, LOY T. Influence of redox potential and partial pressure of carbon dioxide on pH values and the suspension effect of flooded soils [J]. *Soil Science*, 1966, 101(6): 421-431.
- [26] CHIMNER R A, COOPER D J. Influence of water table levels on CO₂ emissions in a colorado subalpine fen: An in situ microcosm study[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2003, 35(3): 345-351.
- [27] PENG S Z, YANG S H, XU J Z, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements[J]. *Paddy and Water Environment*, 2011, 9(3): 333-342.
- [28] MANSFELDT T. In situ long-term redox potential measurements in a dyked marsh soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, 166: 210-219.
- [29] PATRICK W H, HENDERSON R E. Reduction and reoxidation cycles of manganese and iron in flooded soil and in water solution[J].

- Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(5): 855-859.
- [30] 董玉良,高晓慧,孙娅婷,等.铁锰复合氧化物吸附作用研究进展[J].矿物学报,2015,35(3):288-292.
- [31] TACK F M G, RANST E V, LIEVENS C, et al. Soil solution Cd, Cu and Zn concentrations as affected by short-time drying or wetting: The role of hydrous oxides of Fe and Mn [J]. *Geoderma*, 2006, 137: 83-89.
- [32] NAKANISHI H, OGAWA I, ISHIMARU Y, et al. Iron deficiency enhances cadmium uptake and translocation mediated by the Fe^{2+} transporters *OsIRT1* and *OsIRT2* in rice [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52(4): 464-469.
- [33] ISHIMARU Y, TAKAHASHI R, BSHIR K, et al. Characterizing the role of rice NRAMP5 in manganese, iron and cadmium transport[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 286.
- [34] DAVIS J A, LECKIE J O, Surface ionization and complexation at the oxide/water interface ii. surface properties of amorphous iron oxyhydroxide and adsorption of metal ions [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 1978, 67(1): 90-107.
- [35] DAVRANCHE M, BOLLINGER J C. Heavy metals desorption from synthesized and natural iron and manganese oxyhydroxides: Effect of reductive conditions [J]. *Journal of Colloid Interface Science*, 2000, 227(2): 531-539.
- [36] KASHEM M A, SINGH B R. Transformations in solid phase species of metals as affected by flooding and organic matter [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, 35 (9-10): 1 435 - 1 456.
- [37] THAMDRU B, FOSSING H, JORGENSEN B B. Manganese, iron, and sulfur cycling in a coastal marine sediment, aarhus bay, Denmark[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(23): 5 115 - 5 129.
- [38] OEHM N J, LUBEN T J, OSTROFSKY M L. Spatial distribution of acid-volatile sulfur in the sediments of canadohta lake, PA [J]. *Hydrobiologia*, 1997, 345(1): 79-85.
- [39] LIVERA J D, MCLAUGHLIN M J, HETTIARACHCHI G M, et al. Cadmium solubility in paddy soils: Effects of soil oxidation, metal sulfides and competitive ions [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(8): 1 489-1 497.
- [40] BOULEGUE J. Equilibria in a sulfide rich water from enghien-les-bains, France[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1977, 41(12): 1 751-1 758.
- [41] BURGESS R M, KESTER D R. Release and phase partitioning of metals from anoxic estuarine sediments during periods of simulated resuspension [J]. *Environmental Science Technology*, 2002, 36(24): 5 328-5 334.
- [42] EGGLETON J, THOMAS K V. A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events[J]. *Environment International*, 2004, 30(7): 973-980.
- [43] STUMM W, MORGAN J J. Aquatic chemistry [M]. 3rd ed. Wiley, New York: Academic Internet Publishers, 1996.
- [44] 周世伟,徐明岗.磷酸盐修复重金属污染土壤的研究进展[J].生态学报,2007,27(7):387-394.
- [45] TIBERG C, GUSTAFSSON J P. Phosphate effects on Cadmium (II) sorption to ferrihydrite[J]. *Journal of Colloid Interface Science*, 2016, 471: 103-111.
- [46] SPARLING G P. Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health [M]. In C. E. Pankhurst, B. M. Doube and V. V. S. R. Gupta (Eds.). *Biological Indicators of Soil Health*. Wallingford: CAB International, 1997: 97-119.
- [47] MACINTOSH K A, DOODY D G, WITHERS P J A, et al. Transforming soil phosphorus fertility management strategies to support the delivery of multiple ecosystem services from agricultural systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 649: 90-98.
- [48] MANZONI S, SCHIMEL J P, PORPORATO A. Responses of soil microbial communities to water stress: Results from a meta-analysis[J]. *Ecology*, 2012, 93(4): 930-938.
- [49] WATANABE I, FURUSAKA C. Microbial ecology of flooded rice soils[J]. *Advances in Microbial Ecology*, 1980, 4: 125-168.
- [50] SAWADA K, FUNAKAWA S, KOSAKI T. Effect of repeated drying-rewetting cycles on microbial biomass carbon in soils with different climatic histories[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 120: 1-7.
- [51] 易维洁,曲东,黄婉玉,等.淹水培养时间对水稻土中 Fe(III) 异化还原能力的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(9):1 723 - 1 729.
- [52] 黄森.淹水时间对水稻土中4种铁还原功能微生物丰度的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2013.
- [53] 范文宏,姜维,王宁.硫酸盐还原菌修复污染土壤过程中镉的地球化学形态分布变化 [J].环境科学学报,2008,28 (11):2 291 - 2 298.
- [54] 黎慧娟,彭静静.水稻土中铁还原菌多样性 [J].应用生态学报,2011,22(10):2 705-2 710.
- [55] BUSBY P E, RIDOUT M, NEWCOMBE G. Fungal endophytes: Modifiers of plant disease [J]. *Plant Molecular Biology*, 2016, 90(6): 645-655.
- [56] STROPBEL G, DAISY B. Bioprospecting for microbial endophytes and their natural products [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2003, 67(4): 491-502.
- [57] ZHOU J Y, LI P, MENG D L, et al. Isolation, characterization and inoculation of Cd tolerant rice endophytes and their impacts on rice under Cd contaminated environment [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 113 990.
- [58] BERTANI I, ABBRUSCATO P, PIFFANELLI P, et al. Rice bacterial endophytes: Isolation of a collection, identification of beneficial strains and microbiome analysis[J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2016, 8(3): 388-398.
- [59] FERRANDO L, SCAVINO A F. Strong shift in the diazotrophic endophytic bacterial community inhabiting rice (*Oryza sativa*) plants after flooding[J]. *Fems Microbiology Ecology*, 2015, 91(9): fiv104.
- [60] 刘波,胡桂萍,朱育菁,等.水稻内生细菌与根系土壤细菌群落结构的相关性[C].中国植物病理学会学术年会,2010.
- [61] 胡桂萍.水稻内生菌及其根系土壤微生物群落多样性的研究[D].福州:福建农林大学,2010.
- [62] YANG B, WANG X M, MA H Y, et al. Fungal endophyte phomopsis

- liquidambari affects nitrogen transformation processes and related microorganisms in the rice rhizosphere[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, 6: 982.
- [63] COLMER T D. Long-distance transport of gases in plants: A perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots[J]. *Plant Cell & Environment*, 2003, 26(1): 17-36.
- [64] COLMER T D, PEDERSEN O. Oxygen dynamics in submerged rice (*Oryza sativa*) [J]. *New Phytologist*, 2008, 178(2): 326-334.
- [65] 傅友强, 于智卫, 蔡昆争, 等. 水稻根表铁膜形成机制及其生态环境效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1 527-1 534.
- [66] 刘侯俊, 胡向白, 张俊伶, 等. 水稻根表铁膜吸附镉及植株吸收镉的动态[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 425-430.
- [67] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 不同生育期水稻根表铁膜的形成及其对水稻吸收和转运 Cd 的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 432-437.
- [68] LIU H, ZHANG J, CHRISTIE P, et al. Influence of iron plaque on uptake and accumulation of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 394(2-3): 361-368.
- [69] LIU J, CAO C, WONG M, et al. Variations between rice cultivars in iron and manganese plaque on roots and the relation with plant cadmium uptake [J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2010, 22(7): 1 067-1 072.
- [70] NISHIUCHI S, YAMAUCHI T, TAKAHASHI H, et al. Mechanisms for coping with submergence and waterlogging in rice[J]. *Rice*, 2011, 5(1): 2.
- [71] JEAN A, WILLIAM A. Rice: Sulfide-induced barriers to root radial oxygen loss, Fe^{2+} and water uptake, and lateral root emergence[J]. *Annals of Botany*, 2005, 96(4): 625-638.
- [72] Armstrong W D. Aeration in higher plants [J]. *Advances in Botanical Research*. 1979, 7: 225-332.
- [73] ARMSTRONG J, AFREEN-ZOBAYED F, ARMSTRONG W. Phragmites die-back: Sulphide- and acetic acid-induced bud and root death, lignifications, and blockages within aeration and vascular systems[J]. *New Phytologist*, 2010, 134(4): 601-614.
- [74] 徐卫红, 黄河, 王爱华, 等. 根系分泌物对土壤重金属活化及其机理研究进展[J]. 生态环境, 2006, 15(1): 184-189.
- [75] 刘源, 徐仁扣. 低分子量有机化合物对 MnO_2 和土壤氧化锰的还原溶解作用[J]. 环境化学, 2015, 34(6): 1 037-1 042.
- [76] 崔晓炎, 秦俊豪, 黎华寿. 不同水分管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2 177-2 184.
- [77] HU P J, HUANG J X, OUYANG Y N, et al. Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars[J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2013, 35(6): 767-778.
- [78] 王惠明, 林小兵, 黄欠如, 等. 不同灌溉模式对稻田土壤及糙米重金属积累的影响[J]. 生态科学, 2019, 38(3): 152-158.
- [79] TIAN T, ZHOU H, GU J F, et al. Cadmium accumulation and bioavailability in paddy soil under different water regimes for different growth stages of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2019, 440: 327-339.
- [80] 易镇邪, 苏雨婷, 谷子寒, 等. 不同生育阶段间歇灌溉对镉污染稻田双季稻产量构成与镉累积的影响 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 364-368.
- [81] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 水分管理模式对水稻吸收累积镉的影响及其作用机理[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 908-914.
- [82] ARAO T, KAWASAKI A, BABA K, et al. Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(24): 9 361-9 367.
- [83] 吴佳, 纪雄辉, 魏维, 等. 水分状况对水稻镉吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1 427-1 434.

Advances in Research and Application of Water Management Related to Cadmium Contamination in Rice

ZHANG Yan¹, JIANG Jianfeng², HUANG Qina¹, SHAO Guosheng^{1*}, WANG Honghang^{3*}

(¹ China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China; ² Agricultural Technology Extension Center of Qujiang District, Quzhou, Zhejiang 324022, China; ³ Agricultural Technology Extension Center of Agricultural and Rural Bureau of Quzhou City, Quzhou, Zhejiang 324000, China; 1st author: zhangyan11@caas.cn; *Corresponding author: shaoguosheng@caas.cn; 807099788@qq.com)

Abstract: Cadmium (Cd) contamination of paddy field is serious which threaten to the rice safety of China. It is urgently to develop products and measures which can control the Cd contamination effectively in rice. It is difficult to prevent and control Cd contamination of rice without fail because paddy ecosystem is highly complex and susceptible to various factors. Numerous studies have shown that reasonable water management technology can not only ensure the good growth and yield of rice, but also effectively reduce Cd accumulation in rice. In this paper, the effects of water on soil physical and chemical properties, microbial dynamics and plant growth were reviewed, and the relevant main principles of water management to reduce cadmium accumulation in rice were expounded. What's more, the current research progress related to water management models was summarized and future research direction was prospected. The aim is to provide a theoretical basis for optimizing the application of water management technology to reduce cadmium contamination in actual production, which leads to the realization of rice safety production more effectively.

Key words: rice; water management; cadmium contamination; soil; mechanism