

穆 艳, 赵国庆, 赵巧巧, 等. 活化水灌溉在农业生产中的应用研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 403-411.

MU Yan, ZHAO Guo-qing, ZHAO Qiao-qiao, et al. Advances in the application of activated water irrigation[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 403-411.

活化水灌溉在农业生产中的应用研究进展

穆 艳^{1,2}, 赵国庆², 赵巧巧², 刘 皓², 王全九^{3*}

(1. 西北农林科技大学风景园林艺术学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘 要:活化水技术可使水的理化性质发生显著改变,提升水分子活性,其中磁化、去电子、增氧等灌溉水活化技术能够改良土壤理化性质,提高水肥利用效率,促进农田作物生长及增产,并且因其具有低耗能、无毒无害且高效快速的特点已受到广泛关注。本文介绍了磁化、去电子、增氧三种较常见的灌溉水活化技术对普通水理化性质的改善效果,及其应用于农业生产过程中对土壤理化性质的改良作用;同时着重介绍了磁化水灌溉对作物生长的影响以及对土壤盐渍化的改良效果,并指出其中存在问题,以促进活化水灌溉技术在农业中的推广应用,这对正处于淡水资源短缺、土地质量下降的我国干旱半干旱区实现农业节水增效、可持续发展具有重要的理论和实践意义。

关键词:活化水;灌溉;磁化;去电子;增氧;理化性质;土壤盐渍化;农业生产

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)04-0403-09

doi: 10.13254/j.jare.2019.0106

Advances in the application of activated water irrigation

MU Yan^{1,2}, ZHAO Guo-qing², ZHAO Qiao-qiao², LIU Hao², WANG Quan-jiu^{3*}

(1. College of Landscape Architecture and Arts, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Water Conservancy and Hydropower College, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Activated water technology can significantly change the physicochemical properties of water and enhance the activity of water molecules. Magnetization, de-electronation, and oxygenation techniques can improve the physicochemical properties of soil, promote water-use efficiency, and soil nutrient-utilization efficiency, and increase the growth and yield of farmland crops. Activated water technology has attracted the attention of many researchers for its low energy consumption, innocuity, and high efficiency. This paper introduced the benefits of three common irrigation water activation technologies—magnetization, de-electronation, and oxygenation—and their effects on the physicochemical properties of soil in agricultural production. We described the influence of magnetized water irrigation on crop growth and improvements in soil salinization. In addition, we highlighted existing problems in the popularization and application of activated water irrigation technology in agriculture. This study was of considerable theoretical and practical significance for the realization of agricultural water conservation, efficiency, and sustainable development in arid and semi-arid areas where freshwater resources were scarce and land quality was declining.

Keywords: activated water; irrigation; magnetization; de-electronation; oxygenation; physicochemical properties; soil salinization; agricultural production

收稿日期:2019-03-01 录用日期:2019-05-22

作者简介:穆 艳(1979-),女,讲师,主要从事农田水文、城市生态水文研究。E-mail: muyanyl@126.com

*通信作者:王全九 E-mail: wquanjiu@163.com

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41830754)

Project supported: The Key Program of the National Natural Science Foundation of China(41830754)

随着人口数量持续增加、社会经济快速发展,水资源短缺已成为全球性问题^[1]。在我国,水资源匮乏已经成为工农业发展的重要制约因素,对国内用水安全、粮食安全、土地安全及生态安全构成了直接或潜在威胁^[2]。我国长江以北是重要的农产品产区,以年降水量为衡量标准,该区自东向西分别属半湿润带、半干旱带及干旱带。水资源的时空分配不均、加之存在较广范围内的作物生长与雨季不同步的现象^[3],致使水资源成为该区农业可持续发展的主要限制因子,其中黄土高原地区农业发展受水资源限制尤其明显,土壤水分成为限制该区农林产业可持续发展的关键因子^[4]。除此之外,该区在农业生产过程中,存在灌溉方式粗放以及灌溉水量不合理等系列问题^[5],导致该区灌溉水利用效率较低。对于粮食作物而言,提高水分利用效率(Water use efficiency, WUE)成为半干旱、干旱区挖掘作物高产潜力的主要措施^[6]。因此,在现有水资源情况下寻找提高水资源利用率的新途径,发展节水高效农业已成为我国农业可持续发展的重要切入点。

针对目前所面临的水资源匮乏、污染严重、时空分配不均等问题,诸多学者就如何提高灌溉水资源利用率进行了相关研究,且多关注于改善灌溉方式与制度、加强田间管理(如覆膜、套作等措施)等^[7-8],但土壤次生盐碱化问题依然存在,水资源质量问题(如微咸水)也对农业发展存在较大程度的限制性。自19世纪上叶至今,相关研究表明通过物理技术处理后得到的活化水可应用于农业生产过程中,其对土壤环境及作物生长具有改善与促进作用^[9-10],同时不会对作物、土壤及土壤微生物产生毒害作用,也无任何化学残留及污染,加之其处理过程快速、效果明显^[11],使该类水处理技术备受关注^[12]。本文对国内外活化水在农业生产中的常见类型与制备方法及其理化性质特性进行总结,分析活化水灌溉对土壤环境与作物生长发育的影响,鉴于其在农业生产中的应用尚不广泛,且其影响机制尚不明确,在总结前人研究的基础上,明确活化水灌溉的影响,以期对未来开展更为全面的相关研究提供借鉴。

1 活化水概念及常见活化水理化性质

1.1 活化水概念及常见活化技术

农业生产中活化水制备技术是利用物理技术对水进行处理(如使其通过特定场强的磁场),促使水分子结构及水环境组成发生一定变化(如水分子偶极矩

增大、水中含氧量增多等),形成特定的小分子团水,以提高水活性(水与其他物质作用能力的变化,如溶解度、反应速度等^[13-14]),此即为活化水。这些变化可能会有利于作物植株的生长发育,也对土壤环境有改良提升作用^[15],从而间接提升作物水、肥、土有效利用率^[16]。常见的灌溉水活化技术有磁化、去电子、增氧等方式,因其在农业生产领域的应用较广泛,逐渐得到重视^[11]。

1.2 常见活化水理化性质

在永久磁铁或电磁铁所形成的固定磁场环境下,普通水以一定流速,沿着与磁力线垂直方向通过,受磁场处理而发生理化性质变化,即为磁化水。经磁化后,水分子间平均距离增大,部分氢键变弱甚至断裂,使大的缔合水分子簇变小,成为自由的单体分子和二聚体分子,增加了水中自由单体水分子和二聚体水分子的数量^[17];化学键角、水-离子胶合体半径减少,渗透压及溶解度增大,黏滞系数和表面张力下降,pH值升高等^[18]。张立红^[19]研究表明,在优化磁场作用下,除水的表面张力系数和黏滞系数降低外,渗透性和流动性也有所增强。Khoshnavesh等^[20]的研究结果同样验证了磁化水的土壤入渗能力显著优于未磁化处理的普通水。有学者研究显示,经500 G场强的磁场磁化后,水滴表观接触角由处理前的 $117^{\circ}\pm 1.3^{\circ}$ 减少到 $105^{\circ}\pm 0.4^{\circ}$,且接触角随磁场强度增大表现为线性递减趋势^[21]。聂百胜等^[22]研究表明,表面张力较高的水样经磁化处理后,其表面张力下降7.2%~27.1%,同时磁场参数变化使其表现为一定的波动性。李铮^[16]研究表明自来水磁化后pH值由7.2增加为7.5,电导率由 $135\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 增加为 $143\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。王艳红等^[23]分析磁化水处理技术在农业上的应用时发现,磁场不同,电导率增幅不同,磁化处理可提升水对一般盐类的溶解度(20%~70%),使溶解氧增加3~6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,渗透压提升34%左右。

利用物理或化学增氧技术,使普通水中的溶解氧含量得到明显提升(6~10倍),即为增氧水。目前常见的物理增氧是通过微纳米气泡发生器或文丘里管空气射流器等方法实现增氧效果;化学增氧是利用过氧化氢可完全分解为水与氧气的性质,将过氧化氢溶液通过一定灌溉方式输送到作物根区以实现增氧^[24]。但刘鑫等^[25]研究不同增氧方式下春小麦的生长及产量状况表明,过氧化氢溶液增氧方式对春小麦根系生长及植株长势存在一定的负面影响。有研究表明微咸水利用微纳米发泡器结合增氧泵的方式可使溶解

氧提升74%左右^[26]。张慧娟等^[27]研究结果显示,微米气泡发生器以空气为气源,经1.5 h的曝气可使水体溶解氧含量由 $1.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提升至 $8.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且72 h后水体溶解氧值为 $8.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,仅下降 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

去电子水是指经去电子器处理后所得到只剩正离子与正电荷的水,在同性电荷互斥作用下,使水盐发生分离,进而改善水活性。去电子水处理技术最早由美国ECO1ST科技公司提出,广泛用于工业水油分离,在农业生产过程中,主要利用其可中和劣质灌溉水高盐度的特性,从而降低劣质水灌溉对作物的不利影响,以更好地促进作物植株生长。去电子处理器主要采用不锈钢结构,无需人为操作及外接电源,对流量无限制要求,且其中加入镁合金等合金材料可产生不同功能的去电子效果^[28]。目前国内外对去电子水灌溉及其理化性质研究的文献较少^[29]。王全九等^[13]对去电子微咸水理化特性的初步研究结果显示,去电子活化技术可以减小微咸水的表面张力、增加溶氧量,且效果随微咸水矿化度的不同而产生差异。在微咸水矿化度为 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 环境下,微咸水表面张力相对减少9.14%~13.84%,溶氧量相对提高8.04%~10.23%。

农业生产过程中活化水技术对灌溉水理化性质的改变具有积极作用,受到诸多学者的关注,但是关于磁化水的生物学效应及其影响机制尚不清晰,且有些论证并未得到广泛的认可,限制了其在农业生产上的推广应用^[30]。在国内,对磁化水生物学负效应的报道极少,磁化水灌溉对作物种子萌发及生长的促进作用是其生物学效应的基本表现,大量关于小麦、玉米、大豆、番茄等作物的磁化水灌溉实验均可证实其生物学正效应^[19],但多为定性分析,还需深入验证和论证磁化水灌溉的促生增产机理。

2 活化水农用的影响

2.1 活化水灌溉对土壤理化性质的影响

土壤盐渍化是土壤深层或地下水中的盐分在土壤毛管水作用下运移到地表,随水分的逐渐蒸发,土壤表层中的盐分逐步积累所造成^[31],是社会经济发展下所逐渐形成的土地退化现象^[32],其原因主要是在特定的自然环境下农业生产过程中不合理的人为灌溉,多出现于干旱半干旱地域及滨海湿润地区^[33]。目前全球约有 $4.50 \times 10^6 \text{ km}^2$ 耕地受土壤盐渍化威胁,占全球耕地面积的19.57%^[34]。我国第二次土壤普查结果表明,我国盐碱地主要分布在西北地区、华北地区以及东北地区,总面积达到 $3.60 \times 10^5 \text{ km}^2$ 左右,占全

国可利用土地面积总量的4.88%^[35]。土壤盐分胁迫影响植物的生理代谢和生长发育,严重制约农林业发展^[36]。作为一种高效的水处理技术,活化水处理不仅可以对土壤盐渍化起到缓冲改善作用,还可以缓解淡水资源短缺的问题,缓解土壤盐渍化对土地可持续利用与农业可持续发展的威胁。

磁化水处理技术作为间接改善土壤环境的措施,在20世纪60年代就开始应用于农业灌溉^[37]。Yi等^[38]研究表明,灌溉磁化水可以使盐土及棕壤中的永久电荷总量减少,有利于土壤团聚体结构的形成,降低土壤黏着力,改善土壤物理性质。室内盐碱地模拟试验研究结果表明,磁化水较普通水灌溉处理脱盐率有所增加,且磁化水灌溉可在一定程度上削弱土壤水分的蒸发,阻碍土壤次生盐渍化现象的出现。在室内研究的基础上,有学者通过田间试验得出磁化水灌溉较普通水灌溉对盐碱地土壤的脱盐率更高^[39]。Mostafazadeh-Fard等^[40]通过磁化水灌溉实验得出磁化水除对 Cl^- 的淋洗起促进作用外,也能够使 HCO_3^- 和 Na^+ 的淋出量有所提高。张瑞喜等^[9]通过田间膜下滴灌与室内土柱模拟实验相结合的方法,研究得出磁化水能够提高土壤水分入渗速率,有利于土壤盐分向深层土壤运移。这主要是由于经磁化处理后,在优化磁场的作用下,下水表面张力系数及黏滞系数都会有所降低;同时,磁化水灌溉土壤利于盐分在土壤水中扩散系数的增大^[13,29],使水扩散能力增强的同时提高土壤渗透率,进而有利于土壤中盐分溶解及运移。

近地大气与土壤空气组成的差异很大, O_2 含量分别约占二者气体组成的20.94%及10.35%(最低含量占比),而 CO_2 在土壤空气中的含量高出近地大气数十倍^[41]。土壤环境空气组成会受到大气环境及人为因素的干扰,土壤中微生物繁殖和生理活动及作物根系生长等过程会间接受到影响,导致土壤通气不良,较容易出现土壤 O_2 与 CO_2 浓度失衡的问题,即土壤中 O_2 浓度降低、 CO_2 浓度升高^[42]。 O_2 浓度在土壤环境中的降低,也会反向作用于土壤中作物根系以及微生物的正常生长与生存。增氧技术在农业灌溉过程中的应用则有效地缓解了灌溉后地表与土壤界面之间空气交换受到抑制的问题^[43],使土壤之中 O_2 含量升高,通气性能得到一定程度的改善,以满足作物根系与土壤微生物群体的耗氧需求。除此之外,有学者研究表明,土壤环境通气不良、 O_2 浓度较低会削弱根系代谢速率及土壤微生物群体对土壤中有机质的分解程度,降低土壤中有效养分的含量,产生有害气体,破坏土

壤环境气、液、固三相比比例^[44]。同时,钾、氮、磷、钙、镁等元素在土壤中的含量也会随土壤通气性改变而发生变化,这主要是因为土壤通气性的改变会影响土壤生物分泌土壤酶的过程,而土壤酶的存在可以影响土壤中物质转化与能量交换,改变土壤中物质存在形态,进而影响土壤环境^[45]。

去电子水在农业灌溉过程中的应用近年来才开始受到关注^[28]。有研究表明,去电子水灌溉对土壤盐分胁迫有一定的缓解效果^[46]。目前有关去电子水在农业中应用的研究较少,且其对土壤环境的影响机制尚不十分明确。王全九等^[29]通过室内土柱试验,探究去电子处理微咸水对土壤水盐运移的影响,研究结果表明经去电子处理后的微咸水中的负电荷及负离子被有效剔除,正电荷与正离子所占比例得到大幅提升,进而影响土壤水盐运移特性;除此之外,研究表明去电子水灌溉可以使土壤的持水性能得到一定程度的改善。目前,去电子水在农业灌溉与生产中的影响机制缺乏定量分析与数学描述。

2.2 活化水灌溉对作物生长的影响

水在作物细胞中大量存在,是细胞的重要组成部分,它作为植株体物质运移与摄取的载体,存在于植株体整个生长过程,且参与植物的新陈代谢,是代谢过程重要的反应物质^[47]。活化水(如磁化水、去电子水及增氧水)在一定程度可以改变水的理化特性(表面张力、黏滞系数、溶氧量、缔合度、电导率、pH值等)^[48],这些变化对植株体的正常新陈代谢具有一定的促进作用,例如缔合度的降低会便于水分穿过半透性的植株体细胞膜,利于细胞对营养物质的摄取,进而对作物生长产生一定影响^[44]。目前有关活化水对作物生长影响的研究中磁化水涉及最多,近年来增氧水在农业中的应用也逐渐受到关注,去电子水相关研究相对较少^[11]。

2.2.1 作物种子萌发、产量及品质对活化水灌溉的响应

Savostin^[49]较早提出磁场可以促进作物地上部分的生长。近年来,国内外不少学者研究指出磁场具有生物学效应,并且已经有诸多学者围绕种子萌发处理、农业灌溉水磁化等农业生产领域进行了相关研究^[9]。基于磁处理技术易操作、成本投入低且对作物本身损伤小的特点,林仁荣^[50]研究得出,磁化水应用于农业生产过程中对作物种子萌发、幼苗生长具有积极作用,并且一定程度上可以提升作物产量。徐卫辉等^[51]通过实验分析核磁共振对水稻胚超微结构的影响表明,特定磁场会促使植株细胞内线粒体的数量增

加,进而使种子的内部代谢能力与呼吸强度有所提升,为细胞的生长发育过程提供能量供应,提高种子活力,促进种子萌发。肖望等^[52]研究发现普通水经过一定场强的磁场后可以使苦瓜种子的出芽率得到提升,并且可以促进苦瓜幼苗的生长。邱念伟等^[30]研究表明小麦种子用磁化水处理后,其种子出芽率提高了13.3%。

除此之外,磁化水处理对作物产量及其品质的影响也引起了国内外学者的关注。卜东升等^[15]研究了磁化水灌溉对棉花生长发育过程的影响,结果表明磁化水灌溉后不仅降低了土壤含盐量,也对棉花生长发育起到促进作用,有助于棉花产量和品质的提升。Khristyuk^[53]分析大麦麦芽糖含量对低频电磁场的响应,结果显示经电磁场处理过的大麦种子所产大麦的麦芽糖淀粉活性提升50%左右。朱练峰等^[10]以两种杂交水稻为对象进行磁化水灌溉研究,发现磁化水处理下水稻的结实率、有效穗数及产量较普通水处理分别提高3.9%~8.7%、4.0%~7.9%及5.2%~9.3%,且两种水稻垩白粒率分别降低11.4%和7.7%,碱消值分别提高4.3%和4.8%,胶稠度分别提高6.0 mm和4.0 mm,表明磁化水灌溉处理对水稻的产量及品质有促进作用。李夏等^[54]研究表明,磁化水灌溉可以增加棉花的地上生物量,促进棉花增产,增产率最高可达15.32%。但是,目前磁化水的生物学效应机制尚不清楚,相关研究成果并未得到广泛的认可,甚至存在一定的质疑^[19],有待进一步深入探究。

为了保持土壤正常呼吸并为作物提供良好的生长环境,近年来增氧灌溉技术得到了广泛的应用,即通过灌溉系统将氧气或含氧物质输送到作物根区,满足根系生长发育的需要,改善土壤通气性^[55]。有研究表明,不同生育期增氧灌溉均可以明显促进果实生长、提高产量,利用文丘里计增氧,与对照组相比,增氧处理后的瓜果增产约18%^[56]。雷宏军等^[57]利用循环曝气滴灌也同样证明增氧灌溉利于番茄增产,且对番茄品质有改善效果。Bhattarai等^[58]利用化学增氧方式增加南瓜根区O₂含量,南瓜结果数提高29%,产量提高25%。陈涛等^[59]采用盆栽实验方法,分析增氧灌溉下马铃薯产量差异,结果表明不同量的增氧灌溉使马铃薯的产量增加了11.23%~16.05%。也有学者研究了增氧灌溉对菠萝生长的影响,结果显示增氧灌溉较普通灌溉下产量提高4.3%,单果质量提高17.3%^[60]。

2.2.2 作物根系对活化水灌溉的响应

根系是作物直接与土壤接触的重要器官,影响作

物吸收土壤水分及养分过程,根系是否正常生长发育对作物生长及产量起直接作用^[61]。有国外学者发现,磁场处理对作物根系的生长和发育有促进作用,且根系对活化水的响应大于地上部^[62]。我国学者通过研究也发现,磁化水灌溉农作物后,农作物根系生长和发育情况优于普通水灌溉作物^[37]。赵黎明等^[63]研究表明,磁化水处理水稻秧苗一段时间后水稻根数、根长及根冠比分别增加21.74%、20.62%及20.18%。刘歆等^[64]验证了低频磁场环境下,洋葱根系在一定程度上较普通环境下有所增长。特定磁场环境下,磁场效应利于植物根系的细胞分裂指数增大,进而对植株根与胚轴起到促进生长发育的作用。也有国内学者通过荧光动力学方法监测磁化水及一定强度磁场(0.1、0.2、0.3、0.4 T)处理后的杉木幼苗生长状况发现,磁化水对杉木幼苗根系生长均表现为促进作用,其中经0.4 T感应强度磁化后的磁化水效果最明显,较对照组根系平均根长提高30%左右;而磁场处理对植株根系生长均起抑制作用,且表现为先减弱后增强,其中磁场强度为0.1 T时对根系生长的抑制作用最强,较对照组根系平均根长降低33.64%,这可能是由两种磁化处理技术作用机理差异所致^[65]。

土壤肥力受土壤通气性的影响较为突出,良好的土壤通气对作物的正常生长至关重要^[66]。与传统的灌溉方式相比,以增氧水对作物进行灌溉避免了灌溉水驱替土壤空隙中空气所产生的作物根区低氧胁迫问题^[67],更利于磁化水对作物根系进行正常的有氧代谢,保证作物各生理过程正常进行,防止因根区缺氧而导致作物减产。赵旭等^[68]研究表明增氧栽培可以使番茄根区环境得到改善,提高根系对水分及养分的吸收能力,增强根系活力。卢泽华等^[56]在番茄不同生育期对其进行增氧处理,研究表明番茄坐果期增氧处理促进其根系生长,提高根冠比,根系增粗5.6%。刘鑫等^[25]也通过研究得出循环曝气滴灌对提高春小麦根系根长密度、根质量密度及分叉数等指标有积极作用,进而显著促进春小麦根系生长。

2.2.3 作物生理特性对活化水灌溉的响应

磁化水处理对作物生长过程也具有一定影响。有研究表明,番茄植株经磁化水灌溉后,植株体内叶绿素、蛋白质以及可溶性糖的含量有所增加^[69],李铮^[16]利用磁化水灌溉番茄植株幼苗,结果显示番茄叶片总叶绿素含量增加15.2%,且蒸腾速率与净光合速率分别提升31.6%和8.9%。Anand等^[70]将玉米种子在土壤水分胁迫条件下分别于100 mT与200 mT场强

下磁化处理2 h和1 h,结果显示磁化处理利于幼苗生长发育,且提高了光合速率。Marei等^[71]对不同品种的黄椒与红鲜椒进行磁化水灌溉,研究结果表明磁化水灌溉下水分利用效率提高15%,同时叶绿素含量也有所增加。Moussa^[72]研究表明磁化水灌溉可明显促进豆科类作物植株生长发育,并且光合速率也有所提升。Sadeghipour等^[73]研究结果显示,磁化水灌溉后豇豆的光合速率、水分利用效率、气孔导度等均有不同程度的提高。综上可知,磁化水处理较普通水处理可以提高作物光合性能,对作物生长发育过程中诸多生理特性表现为积极作用,利于营养物质的输送,进而使生物体活性增强。

关于增氧灌溉对作物生理特性的影响,诸多学者进行了相关研究。作物根区 O_2 含量较低,易造成根际低氧胁迫,致使作物细胞内的氧化磷酸化电子的传递过程受到影响,进而削弱细胞色素氧化还原能力,使叶绿素含量降低^[74]。低氧胁迫环境下,叶片的生理过程将受到直接影响,气孔关闭,蒸腾速率降低,光合作用被抑制^[75]。有学者研究表明,地下增氧滴灌使番茄的叶面积、叶片蒸腾速率等有所提升,进而促进番茄植株生长与番茄结果^[58]。张玉方^[76]研究发现增氧灌溉能够对枣树果实横纵径、单果质量、Vc含量具有显著促进作用,但对果实糖含量的积累与可溶性固性物的形成影响不显著,其中溶解氧含量为7~9 $mg \cdot L^{-1}$ 时效果较好。有学者试验结果表明增氧灌溉可以一定程度提高小麦气孔导度、蒸腾速率及净光合速率,且这三个指标在春小麦不同生育期对增氧灌溉响应存在差异,其中在拔节孕穗期分别增加25.46%、3.15%和12.80%,在抽穗扬花期分别增加15.63%、13.00%和14.47%^[25]。朱练峰等^[77]研究发现,水稻叶片的光合速率在增氧灌溉条件下较空白对照组提高4.13%,并且叶片叶绿素含量也显著增加。张荣萍等^[78]研究得出,一定程度的增氧灌溉利于水稻叶片可溶性蛋白质和叶绿素的合成,并且可以使其叶片气孔导度增大,进而提升其叶片蒸腾作用,也使叶片的光合能力得到提升。

3 结语与展望

3.1 结语

(1)目前,国内外学者针对磁化水、增氧水以及去电子水的理化性质等方面已经开展了诸多研究,表明普通水经活化处理后的理化性质发生了明显变化,对土壤水、盐及营养物质的运移具有一定影响。但对活

化水影响土壤环境的机理和程度的评估仍然需要进一步深入分析。

(2)活化水虽然对某些作物的生理特征具有改善提升作用,但其增产促生机制尚不明确,在农业生产中的推广应用程度有限,尤其去电子水灌溉方面的研究较少,且有限的研究多关注于表观现象分析,缺乏对其影响机理的系统分析与定量描述。今后需要系统研究活化水的作用机制,进而充分发挥活化水处理技术在农业生产中的功效。

3.2 展望

未来活化水在农业生产中的相关研究应着重关注以下三点:

(1)充分发挥活化水技术对土壤环境的改良作用,以促进土地可持续利用与农业可持续发展。

(2)活化水的生物学效应机制尚不明确,需进一步关注其影响机制,并进行定量分析与数学描述。

(3)构建活化水灌溉下土壤物质传输和作物生长模型,最大程度地优化活化水灌溉技术并推广应用。

参考文献:

- [1] Islam M R, Eneji A E, Ren C, et al. Oat-based cropping system for sustainable agricultural development in arid regions of northern China[J]. *Journal of Agriculture Biotechnology & Ecology*, 2010, 3(3): 1-8.
- [2] World Water Council. World water vision 2025[M]. London: Earthscan Publications Ltd., 2000.
- [3] 肖国举, 王 静. 黄土高原集水农业研究进展[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 1003-1011.
XIAO Guo-ju, WANG Jing. Research on progress of rainwater harvesting agriculture on the Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 1003-1011.
- [4] 李鹏展, 王 力, 王 隽. 黄土旱塬区冬小麦土壤水库动态[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3653-3662.
LI Peng-zhan, WANG Li, WANG Di. Dynamics of soil water reservoir of wheat field in rain-fed area of the loess tableland, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(11): 3653-3662.
- [5] 吴普特, 冯 浩, 牛文全, 等. 中国节水农业战略思考与研发重点[J]. *科技导报*, 2006, 24(5): 86-88.
WU Pu-te, FENG Hao, NIU Wen-quan, et al. Research emphasis and reflection of strategy for water saving agriculture in China[J]. *Science and Technology Review*, 2006, 24(5): 86-88.
- [6] Fang Y, Liu L, Xu B C, et al. The relationship between competitive ability and yield stability in an old and a modern winter wheat cultivar[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1/2): 7-23.
- [7] 丁锐钦, 丁 亨, 裴雪霞, 等. 不同年份下播期对旱地小麦产量及水分利用率的影响[J]. *山西农业科学*, 2013, 41(4): 342-344, 350.
DING Rui-qin, DING Heng, PEI Xue-xia, et al. Effect of sowing date on dry land wheat yield and water use efficiency in different years[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2013, 41(4): 342-344, 350.
- [8] 段爱旺, 张寄阳. 中国灌溉农田粮食作物水分利用效率的研究[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(4): 41-44.
DUAN Ai-wang, ZHANG Ji-yang. Water use efficiency of grain crops in irrigated farmland in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(4): 41-44.
- [9] 张瑞喜, 王卫兵, 褚贵新. 磁化水在盐渍化土壤中的入渗和淋洗效应[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(8): 1634-1641.
ZHANG Rui-xi, WANG Wei-bing, CHU Gui-xin. Impacts of magnetized water irrigation on soil infiltration and soil salt leaching[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(8): 1634-1641.
- [10] 朱练峰, 张均华, 禹盛苗, 等. 磁化水灌溉促进水稻生长发育提高产量和品质[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 107-114.
ZHU Lian-feng, ZHANG Jun-hua, YU Sheng-miao, et al. Magnetized water irrigation enhanced rice growth and development, improved yield and quality[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19): 107-114.
- [11] Maheshwari B L, Grewal H S. Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(8): 1230-1236.
- [12] Ambashra R D, Sillanpää M. Water purification using magnetic assistance: A review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 180(1): 38-49.
- [13] 王全九, 张继红, 门 旗, 等. 磁化或电离化微咸水理化特性试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 60-66.
WANG Quan-jiu, ZHANG Ji-hong, MEN Qi, et al. Experiment on physical and chemical characteristics of activated brackish water by magnetization or ionization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(10): 60-66.
- [14] 银永安, 陈 林, 李兰海, 等. 活化水对膜下滴灌水稻农艺性状的影响[J]. *中国稻米*, 2018, 24(6): 70-72.
YIN Yong-an, CHEN Lin, LI Lan-hai, et al. Effects of activated water on agronomic characteristics of rice by drip irrigation under mulch film[J]. *China Rice*, 2018, 24(6): 70-72.
- [15] 卜东升, 奉文贵, 蔡利华, 等. 磁化水膜下滴灌对新疆棉田土壤脱盐效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(S2): 163-166.
BU Dong-sheng, FENG Wen-gui, CAI Li-hua, et al. Effects of magnetization water on desalinization in cotton farmland of under-film dripping irrigation in Xinjiang Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(S2): 163-166.
- [16] 李 铮. 不同水处理对番茄幼苗生长及其质量的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
LI Zheng. Effects of the different water treatment on tomato seedling growth and quality[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [17] Su L J, Wang J, Qin X Q, et al. Approximate solution of a one-dimensional soil water infiltration equation based on the Brooks-Corey model[J]. *Geoderma*, 2017, 297: 28-37.
- [18] Yang T, Wang Q, Wu L, et al. A mathematical model for the transfer of soil solutes to runoff under water scouring[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570: 332-341.

- [19] 张立红. 磁化水灌溉促进作物增产机理的MD模拟研究[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2005, 18(1): 58-62.
ZHANG Li-hong. Molecular dynamics simulation of mechanism of increasing vegetable yield by irrigated magnetization water[J]. *Journal of Qingdao University(Natural Science Edition)*, 2005, 18(1): 58-62.
- [20] Khoshravesh M M, Kiani A R. Effect of magnetized water on infiltration capacity of different soil textures[J]. *Soil Use and Management*, 2014, 30(4): 588-594.
- [21] Zhou Q, Ristenpart W D, Stroeve P. Magnetically induced decrease in droplet contact angle on nanostructured surfaces[J]. *Langmuir*, 2011, 27(19): 11747-11751.
- [22] 聂百胜, 郭建华, 袁少飞, 等. 外加磁场与表面活性剂对水表面张力影响程度对比[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(4): 48-52.
NIE Bai-sheng, GUO Jian-hua, YUAN Shao-fei, et al. Comparison study on influence of external magnetic field and surfactant on surface tension of water[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(4): 48-52.
- [23] 王艳红, 杨小刚. 磁化水处理技术及其在农业上的应用[J]. 农业工程, 2014, 4(5): 74-77.
WANG Yan-hong, YANG Xiao-gang. Magnetized water treatment technology and its application in agriculture[J]. *Agricultural Engineering*, 2014, 4(5): 74-77.
- [24] Lu J, Li X N, Yang Y L, et al. Effect of hydrogen peroxide on seedling growth and antioxidants in two wheat cultivars[J]. *Biologia Plantarum*, 2013, 57(3): 487-494.
- [25] 刘 鑫, 刘智远, 雷宏军, 等. 不同增氧灌溉方式春小麦生长及产量比较[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(9): 813-819.
LIU Xin, LIU Zhi-yuan, LEI Hong-jun, et al. Comparisons of growth and yield of spring wheat treated with different oxygation techniques [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2017, 35(9): 813-819.
- [26] 欧阳赞, 田军仓, 邓慧玲, 等. 不同加气方式对微咸水和水中溶解氧的影响[J/OL]. 排灌机械工程学报. (2017-10-31). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20171031.1552.002.html>.
OUYANG Zan, TIAN Jun-cang, DENG Hui-ling, et al. Impacts of different aerated methods on dissolved oxygen in brackish water and reclaimed water[J/OL]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*. (2017-10-31). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20171031.1552.002.html>.
- [27] 张慧娟, 薛晓莉, 林少航, 等. 微纳米气泡发生技术及其在水培增氧上的应用[J]. 蔬菜, 2019(1): 59-65.
ZHANG Hui-juan, XUE Xiao-li, LIN Shao-hang, et al. Micro-nano bubble generating technology and its application in hydroponics with aeration[J]. *Vegetables*, 2019(1): 59-65.
- [28] 韦 开. 去电子微咸水膜下滴灌盐运移及棉花生长特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
WEI Kai. Research on soil water-salt distribution and cotton growth characteristics using de-electronic brackish water drip irrigation with plastic mulch [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [29] 王全九, 许紫月, 单鱼洋, 等. 去电子处理微咸水矿化度对土壤水盐运移特征的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 125-132.
WANG Quan-jiu, XU Zi-yue, SHAN Yu-yang, et al. Effect of salinity of de-electronic brackish water on characteristics of water and salt movement in soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(4): 125-132.
- [30] 邱念伟, 谭廷鸿, 戴 华, 等. 磁化水对小麦种子萌发、幼苗生长和生理特性的生物学效应[J]. 植物生理学报, 2011, 47(8): 803-810.
QIU Nian-wei, TAN Ting-hong, DAI Hua, et al. Biological effects of magnetized water on seed germination, seedling growth and physiological characteristics of wheat[J]. *Plant Physiology Journal*, 2011, 47(8): 803-810.
- [31] 韩建均. 滨海盐渍土地土壤水盐调控和改良措施的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
HAN Jian-jun. Study of soil water-salinity regulations and soil improvement in the coastal area[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [32] 李凤全, 吴樟荣. 半干旱地区土地盐碱化预警研究——以吉林省西部土地盐碱化预警为例[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 57-59.
LI Feng-quan, WU Zhang-rong. A study on soil salinization early-warning in semi-arid area: As a sample in west Jilin Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(1): 57-59.
- [33] Li J, Pu L, Han M, et al. Soil salinization research in China: Advances and prospects[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(5): 943-960.
- [34] 王佳丽, 黄贤金, 钟太洋, 等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 673-684.
WANG Jia-li, HUANG Xian-jin, ZHONG Tai-yang, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 673-684.
- [35] 李发虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
LI Fa-hu. Physical chemistry of soil[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [36] Stavi I, Lal R. Achieving zero net land degradation: Challenges and opportunities[J]. *Journal of Arid Environments*, 2015, 112 (Part A): 44-51.
- [37] 毕思圣. 磁化水灌溉对桑树硬枝扦插生根的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
BI Si-sheng. Effect of magnetized water on hardwood cuttings rooting of *Morus alba*[D]. Tai'an: Shandong Agriculture University, 2018.
- [38] Yi Y L, Liu X Y. Study on soil magnetic effect[J]. *Pedosphere*, 1995, 5(3): 215-220.
- [39] Constable S. Marine electromagnetic methods: A new tool for offshore exploration[J]. *Society of Exploration Geophysicists*, 2006, 25(4): 438-444.
- [40] Mostafazadeh-Fard B, Khoshravesh M, Mousavi S F, et al. Effects of magnetized water on soil chemical components underneath trickle irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2012, 138(12): 1075-1081.
- [41] 胡德勇. 增氧灌溉改善秋黄瓜生长及土壤环境的机理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
HU De-yong. Studies of the mechanisms of improvement in the growth of autumn cucumbers and soil environment with aerated irrigation[D]. Changsha: Hunan Agriculture University, 2014.

- [42] Brady N C. The nature and properties of soil[M]. 8th Edition. New York: Macmillan, 1994: 221-225.
- [43] Goorahoo D, Carstensen G, Zoldoske D F, et al. Using air in subsurface drip irrigation (SDI) to increase yields in bell peppers[J]. *International Water and Irrigation*, 2002, 22(2): 39-42.
- [44] 胡德勇, 姚帮松, 苏宁虎, 等. 增氧灌溉对大棚秋黄瓜生长特性的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 122-124.
HU De-yong, YAO Bang-song, SU Ning-hu, et al. Effect of oxygation irrigation on growth characteristics of autumn cucumber cultivated in plastic shelter[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(3): 122-124.
- [45] 邱莉萍, 刘 军, 王益权, 等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 277-280.
QIU Li-ping, LIU Jun, WANG Yi-quan, et al. Research on relationship between soil enzyme activities and soil fertility[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(3): 277-280.
- [46] 陈 勇. 活化微咸水膜下滴灌下施氮量对棉花生长影响的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
CHEN Yong. Experimental study on effects of nitrogen fertilizer rate on cotton growth under drip irrigation under activated brackish water film[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [47] 李生秀. 植物营养与肥料学科的现状与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 193-205.
LI Sheng-xiu. The current state and prospect of plant nutrition and fertilizer science[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(3): 193-205.
- [48] 丁 明, 邹志荣, 黄丹枫. 臭氧水浸种对黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40(6): 686-688.
DING Ming, ZOU Zhi-rong, HUANG Dan-feng. Effect of seed soaking with ozonic water on germination and seedling growth of cucumber[J]. *Plant Physiology Communications*, 2004, 40(6): 686-688.
- [49] Savostin P V. Magnetic growth relations in plants[J]. *Planta*, 1964, 12: 327.
- [50] 林仁荣. 磁处理技术在农业中的应用[J]. 福建农业大学学报, 1999, 28(4): 509-512.
LIN Ren-rong. Application of magnetic treatment in agriculture[J]. *Journal of Fujian Agricultural University*, 1999, 28(4): 509-512.
- [51] 徐卫辉, 石歆莹, 邓国础, 等. 核磁共振对水稻胚超微结构的影响[J]. 激光生物学, 1994(1): 400-403.
XU Wei-hui, SHI Xin-ying, DENG Guo-chu, et al. Effects of nuclear magnetic resonance on ultrastructure of embryo in rice seeds[J]. *Laser Biology*, 1994(1): 400-403.
- [52] 肖 望, 王玉玲, 关志琼. 磁化水浸种对苦瓜种子萌发及对其幼苗生理指标的影响[J]. 现代生物医学进展, 2004, 4(2): 39-41.
XIAO Wang, WANG Yu-ling, GUAN Zhi-qiong. The effect of magnetized water on seed germination and physiologic norm of *Balsam pera* [J]. *Biomagnetism*, 2004, 4(2): 39-41.
- [53] Khristyuk V T. Effect of a low-frequency electromagnetic field on growth and malt quality of brewer's barley[J]. *Russian Agricultural Sciences*, 2009, 35(6): 429-431.
- [54] 李 夏, 乔 木, 周生斌. 磁化水滴灌对棉田土壤脱盐效果及棉花产量的影响[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 431-436.
LI Xia, QIAO Mu, ZHOU Sheng-bin. Effects of drip irrigation with magnetized water on soil desalinization in cotton field and cotton yield [J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(2): 431-436.
- [55] Friedman S P, Naftaliev B. A survey of the aeration status of drip-irrigated orchards[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 115(12): 132-147.
- [56] 卢泽华, 蔡焕杰, 王 健, 等. 不同生育时期根际加气对温室番茄生长及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(7): 1330-1337.
LU Ze-hua, CAI Huan-jie, WANG Jian, et al. Effects of rhizosphere ventilation at different growth stages on plant growth and yield of greenhouse tomato[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(7): 1330-1337.
- [57] 雷宏军, 臧 明, 张振华, 等. 循环曝气地下滴灌的温室番茄生长与品质[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(3): 253-259.
LEI Hong-jun, ZANG Ming, ZHANG Zhen-hua, et al. Growth and quality of greenhouse tomato under cycle aerated subsurface drip irrigation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2015, 33(3): 253-259.
- [58] Bhattarai S P, Midmore D J, Pendergaet L. Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygation treatments in vertisols[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26(5): 439-450.
- [59] 陈 涛, 姚帮松, 肖卫华, 等. 增氧灌溉对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农村水利水电, 2013(8): 70-72.
CHEN Tao, YAO Bang-song, XIAO Wei-hua, et al. Effect of aerobics irrigation on potato yield and water use efficiency[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013(8): 70-72.
- [60] 陈新明, Dhungel J, Bhattarai S, 等. 加氧灌溉对菠萝根区土壤呼吸和生理特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(6): 543-547.
CHEN Xin-ming, Dhungel J, Bhattarai S, et al. Impact of oxygation on soil respiration and crop physiological characteristics in pineapple [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010, 28(6): 543-547.
- [61] 张永清. 几种谷类作物根土系统的研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2005.
ZHANG Yong-qing. Studies on root-soil systems of several grain crops[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2005.
- [62] Vashisth A, Nagarajan S. Exposure of seeds to static magnetic field enhances germination and early growth characteristics in chickpea (*Cicer arietinum* L.)[J]. *Bioelectromagnetics*, 2008, 29(7): 571-578.
- [63] 赵黎明, 顾春梅, 王士强, 等. 日光温室下磁化水对水稻秧苗生长发育的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(12): 34-38.
ZHAO Li-ming, GU Chun-mei, WANG Shi-qiang, et al. Effects of magnetized water on growth of rice seedlings in solar greenhouse[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(12): 34-38.
- [64] 刘 歆, 祝 建, 钟季康, 等. 低频磁场对洋葱根的生物学效应[J]. 同济大学学报(医学版), 2002, 23(2): 110-113.
LIU Xin, ZHU Jian, ZHONG Ji-kang, et al. Biological effect on root of onion influenced by low magnetic field[J]. *Journal of Tongji University (Medical Science)*, 2002, 23(2): 110-113.

- [65] 王德军. 两种磁处理技术对杉木种子发芽及幼苗叶绿素荧光参数的效应[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- WANG De-jun. Effects of two different magnetic treatments on Chinese fir seed germination and seedling's chlorophyll fluorescence [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.
- [66] Rajashekar C B, Baek K H. Hydrogen peroxide alleviates hypoxia during imbibition and germination of bean seeds (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2014, 5(24): 3572–3584.
- [67] Lamm F R, Manges H L, Stone L R, et al. Water requirement of sub-surface drip-irrigated corn in northwest Kansas[J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(2): 441–448.
- [68] 赵 旭, 李天来, 孙周平. 番茄基质通气栽培模式的效果[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 74–78.
- ZHAO Xu, LI Tian-lai, SUN Zhou-ping. Effects of substrate-aeration cultivation pattern on tomato growth[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 74–78.
- [69] 张建民, 韩晓弟, 王 刚, 等. 不同浓度的磁化水浇灌番茄幼苗生理指标的研究[J]. 中国农学通报, 2002, 18(3): 52–54.
- ZHANG Jian-min, HAN Xiao-di, WANG Gang, et al. The study of physiologic norm of tomato seedling irrigated with different concentration magnetized water[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2002, 18(3): 52–54.
- [70] Anand A, Nagarajan S, Verma A P S, et al. Pre-treatment of seeds with static magnetic field ameliorates soil water stress in seedlings of maize (*Zea mays* L.) [J]. *Indian Journal of Biochemistry & Biophysics*, 2012, 49(1): 63–70.
- [71] Marei A, Rdaydeh D, K arajeh D, et al. Effect of using magnetic brackish water on irrigated bell pepper crop (*Capsicum annuum* L.) characteristics in lower Jordan Valley/West Bank[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology A*: 2014, 4(10): 830–838.
- [72] Moussa H R. The impact of magnetic water application for improving common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) production[J]. *New York Science Journal*, 2011, 4: 15–20.
- [73] Sadeghipour O, Aghaei P. Improving the growth of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) by magnetized water[J]. *Journal of Biodiversity & Environmental Sciences*, 2013, 3(1): 37–43.
- [74] Guo S R, Nada K, Katoh H, et al. Differences between tomato and cucumber in ethanol, lactate and malate metabolisms and cell sap pH of roots under hypoxia[J]. *Journal of Japanese Society for Horticultural Science*, 1999, 68(1): 152–159.
- [75] Else M A, Davies W J, Malone M, et al. A Negative hydraulic message from oxygen-deficient roots of tomato plants? Influence of soil flooding on leaf water potential, leaf expansion, and synchrony between stomatal conductance and root hydraulic conductivity[J]. *Plant Physiology*, 1995, 109(3): 1017–1024.
- [76] 张玉方. 枣园施用秸秆与麦壳对土壤养分、灵武长枣生长及果实品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- ZHANG Yu-fang. Effect of applying straw and wheat husk into jujube orchard on soil nutrient, growth and fruit quality of *zizyphus jujube* Mill.cv.lingwuchangzao[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016.
- [77] 朱练峰, 刘 学, 禹盛苗, 等. 增氧灌溉对水稻生理特性和后期衰老的影响[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(3): 257–263.
- ZHU Lian-feng, LIU Xue, YU Sheng-miao, et al. Effects of aerated irrigation on physiological characteristics and senescence at late growth stage of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2010, 24(3): 257–263.
- [78] 张荣萍, 马 均, 王贺正, 等. 不同灌水方式对水稻结实期一些生理性状和产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(3): 486–495.
- ZHANG Rong-Ping, MA Jun, WANG He-zheng, et al. Effects of different irrigation regimes on some physiology characteristics and grain yield in paddy rice during grain filling[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(3): 486–495.