

增氧提高蔬菜磷素吸收利用的作用机制研究进展^①

王 瑞, 施卫明, 李奕林*, 仲月明

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要: 磷素的吸收利用率低是制约蔬菜生产的重要障碍因子之一, 蔬菜根系形态和生理特性的适应性变化是高效利用土壤磷的主要生物学机制。当前磷肥的过量施用导致蔬菜根际环境的恶化, 而根际环境对蔬菜的根系形态结构、根系活力和植株生理反应也都会产生反馈影响。本文从氧营养的角度, 以根系为核心, 综述了国内外提高蔬菜磷素利用率的途径, 根系与根际环境互作对蔬菜磷素利用率的响应, 并剖析了增氧促进根系生长及改善根际环境提高蔬菜对磷的吸收及利用的生物学机制, 从而为提高蔬菜磷肥利用效率、减少蔬菜地磷肥投入量提供理论依据。

关键词: 蔬菜; 增氧; 磷肥; 磷素利用率

中图分类号: S158.3; Q945.12 文献标识码: A

蔬菜产业是我国农业生产的重要组成部分, 现在已经成为我国种植业中仅次于粮食的第二大农作物。蔬菜地作为农业高度集约化的土地利用方式之一, 其生产过程中化肥等农物资质的投入常常是一般粮食作物的数倍至数十倍, 过量施用化肥问题非常突出, 尤其是磷素投入过剩问题^[1]。通过调查河北省主要蔬菜种植区的菜地和粮田施肥状况发现, 塑料大棚磷肥用量为 $P\ 98.9 \sim 528.6\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 磷肥投入量是蔬菜需磷量的 2.3 倍 ~ 2.4 倍; 日光温室磷肥用量是 $P\ 1\ 034.9 \sim 1\ 426.6\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 是蔬菜需磷量的 24.3 倍 ~ 33.5 倍^[2]。刘兆辉等^[3]通过对山东寿光蔬菜肥料施用调查发现, 集约化设施菜田 P_2O_5 投入量达到 $2\ 022\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 远远超过作物对磷的吸收, 磷盈余量达到 $1\ 801\ \text{kg}/\text{hm}^2$; 设施蔬菜磷肥的表观利用率只有 11%^[4]。磷肥的施用, 虽然在一定程度上能缓解磷的不足, 但磷肥中 75% ~ 90% 的磷都会很快被吸附到土壤颗粒表面或与土壤中的金属离子(Fe、Al、Ca 等)结合生成难溶性的磷酸盐^[5]。由于土壤有效磷浓度较低, 磷向根系扩散成了植物吸收土壤磷的主要方式, 而蔬菜根系浅、密度低, 蔬菜根系与磷供应存在空间错位问题。因此即使大量施用化学磷肥, 也不能完全解决根系有效吸收磷素这一问题。磷肥施入土壤后如果不能被作物吸收, 就会造成磷流失而产生一系列的环境问题。据统计^[6], 太湖流域面源污染负荷占每年整个流域的

60%, 其中, 仅磷污染负荷量对太湖流域污染负荷的贡献就高达 21.6%, 而化肥的过量施用是引起面源磷污染的最直接原因。同时, 过量施用磷肥还将导致土壤理化性质发生改变从而恶化蔬菜根际环境, 影响蔬菜对磷的吸收。因此提高磷的利用率、减少磷肥施用是蔬菜产业可持续发展的关键问题之一。

近年来, 除了稻田增氧可提高水稻根系活力, 提高作物的产量^[7]外, 旱地作物氧营养也受到越来越多的关注。增氧可有效增加根际土壤含氧量, 创造更加和谐的根际环境, 从而促进植株根系生长, 增加根系活力, 提高根系养分吸收及利用能力。有研究表明, 通过对棉花和玉米进行有氧灌溉发现, 作物的根系分布发生了明显改变^[8]。因此推测增氧可能是提高蔬菜磷素利用率、优质高产的有效途径之一。本文综述了国内外提高磷素利用率的途径、当前蔬菜地的障碍因子, 并探讨增氧对改善蔬菜根系生长从而提高磷素利用的作用机制。

1 蔬菜对磷的吸收利用

1.1 根系高效吸收利用磷素的生物学机制

国内外关于植物根系高效吸收利用磷素的机制已有大量的研究, 目前主要包括以下几个方面: 根系形态学适应。植物主要通过向地性变化和根冠之间的能量(碳源)分配来改变根构型, 从而增加根系在土

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31872957, 31471948)和南京土壤研究所“一三五”计划和领域前沿项目(ISSASIP1608)资助。

* 通讯作者(ylli@issas.ac.cn)

作者简介: 王瑞(1993—), 女, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要从事蔬菜磷素高效利用生理机制的研究。E-mail: rwang@issas.ac.cn

壤中的分布以增强对土壤中磷的有效吸收^[9]；根系分泌物。根系分泌物通过降低根际 pH 和分泌小分子的有机酸活化难溶性磷酸盐^[10]。有研究表明，缺磷会刺激根系中独脚金内酯的合成。独脚金内酯作为内源性激素，会通过改变根系构型增加根系表面覆盖度从而增加对土壤磷的吸附^[11]；排根的形成。白羽扇豆形成的排根不仅增加根系与土壤的接触面积，其分泌大量质子使排根周围的土壤酸化，同时通过分泌有机酸将土壤中的难溶态磷释放出来^[12]；根际土壤微生物。菌根真菌、解磷菌和根瘤菌等微生物，通过各自的代谢过程或与植物根系形成功能互补来增强植物获取土壤磷的能力^[13]。因此，蔬菜根系形态和生理特性的适应性变化是高效利用土壤磷的主要生物学机制。

1.2 提高磷吸收利用率的有效途径

外源添加有机酸是改善土壤磷肥利用率低、磷素固定严重现状的有效途径之一，其通过与磷酸根离子竞争吸附位点，络合或螯合 Fe、Al 等与磷结合的阳离子，使有机磷脱磷酸化，通过酸化根际释放固定的磷从而使含磷化合物溶解，活化出土壤中的固定磷^[14]。梁玉英等^[15]通过试验发现，有机酸对菜地土壤磷的活化效果较明显，且随有机酸浓度的增加，土壤磷活化效果越显著，100 mmol 柠檬酸对土壤浸提 10 次的累积活化量可达全磷量的 17.02%。当前提高磷素利用率的途径还包括利用分子手段辅助育种，增强作物在低磷土壤的耐受性；培育磷高效利用的转基因作物，例如在烟草中引入柠檬酸合酶基因，增加柠檬酸的外流；利用植物根际促生菌(PGPR)溶解和矿化无机和有机磷中被固定的磷而增加土壤有效磷等^[16]。

2 蔬菜地根际环境与根系互作对磷吸收的影响

2.1 蔬菜地氧环境及其调控方法

2.1.1 蔬菜地氧环境 由于土壤中蔬菜根系的呼吸作用、好氧微生物的繁殖和生理活动以及有机物和其他还原性物质的氧化作用，土壤中 O₂ 的含量(10.35%~20.03%)低于近地大气(20.94%)，当含氧量降到 10% 以下，就会抑制植物根系的呼吸和土壤微生物的活动，从而影响植物根系的生长及生理功能^[17]。O₂ 充足，好气微生物活动旺盛，有机质分解迅速而彻底，土壤中有效养分含量高；而在 O₂ 匮乏的土壤环境中，土壤有机质分解可产生甲烷等有毒气体，危害蔬菜根系，易造成根腐病发生^[18]。一般认为，土壤中 O₂ 的不足与 CO₂ 过多是同时存在的^[19]。土壤空

气中 CO₂ 的浓度(0.15%~0.65%)比近地大气(0.03%)高几倍甚至几千倍。在通气不良的土壤中，CO₂ 的浓度可升至 5%~10%，将会抑制作物根系的发育，同时也会对作物产生毒害作用，破坏作物的呼吸功能，甚至导致作物窒息死亡^[17]。孙周平等^[20]通过研究根际不同 CO₂ 浓度对马铃薯植株生长的影响，结果表明，根际高 CO₂ 浓度(3 600 μmol/mol)富积处理对马铃薯植株的生长发育产生了显著的抑制作用。

蔬菜地盲目施肥、种植品种单一导致的土壤板结，暴雨和灌溉不当导致的淹水环境都会加剧土壤根际缺氧。土壤 O₂ 作为土壤肥力的要素之一，其含量会影响蔬菜根系呼吸和土壤养分状况。在根际缺氧条件下，根系有氧呼吸受到抑制，而无氧呼吸能效低，ATP 合成减少^[21]。因此细胞的耗能反应使细胞能量下降，最终导致根系生长(根尖分生组织的细胞分裂与细胞伸长)停止^[22]。同时由于根系对磷是逆浓度、主动吸收的耗能过程，能量供应不足会导致蔬菜吸磷的能力降低。

对蔬菜而言，O₂ 的缺乏不仅引起能量危机，还会产生还原逆境胁迫。根际缺氧会导致土壤的氧化还原电位降低。研究表明，氧化还原电位较低时，磷更容易被土壤吸附，土壤对磷的吸附量和吸附强度都较高，从而导致土壤中有效磷的含量下降^[23]。由于氧化还原电位的下降，还将导致还原性物质浓度上升，毒害植物根系^[24]。

在低氧胁迫下，一些植物激素水平会发生变化，最显著的是乙烯含量大幅度升高。Lei 等^[25]认为乙烯可以通过调控根的生长和构型参与磷信号途径，体内乙烯含量过高会抑制根系的生长，从而影响对磷的吸收。此外，根际缺氧会使植物体内脱落酸含量上升，赤霉素和细胞分裂素含量下降^[26]。植物激素的代谢紊乱会影响植物的生长。根中脱落酸含量的增高使 CO₂ 通过气孔进入叶组织内的扩散阻抗增大，导致叶片光合作用降低，生长减缓^[27]。

2.1.2 蔬菜地氧环境的调控方法 土壤氧化还原电位(Eh)反映土壤的氧化还原特性，Eh 值高表明土壤的氧化性强，氧的含量高，通气性好；反之，则还原性强^[28]。朱同彬等^[29]研究发现江苏省南京市麒麟门镇后村种植年限为 10 a 的蔬菜大棚土壤 Eh 为 362 mV，而安徽省蚌埠市淮上区露天茼蒿地土壤的 Eh 仅为 300 mV 以下^[30]。氧化性土壤的 Eh 一般界定为 400 mV 以上^[31]，因此，蔬菜地土壤处于相对缺氧的状态。目前，土壤增氧的方法主要包括增氧灌溉，如微/纳米气泡水增氧灌溉^[32-34]和施用过氧化钙、过氧化尿素

等遇到水能缓慢释放氧气的新型肥料(氧肥)^[35-36]。充氧微/纳米气泡水因其拥有较高的溶解氧浓度,且气泡分布均匀,保持时间较长等特点,常用于增氧灌溉^[32]。而氧肥施用的研究多集中于淹水稻田。沈维等^[37]通过对大棚黄瓜增氧灌溉的研究发现,增氧处理(A2处理:每2 h加1次氧;A4处理:每4 h加1次氧;A8处理:每8 h加1次氧)的土壤耕作层含氧量在同等深度的情况下明显高于对照组。土壤耕作层含氧量可以促进叶片可溶性糖、可溶性蛋白质的合成,并且提高叶片叶绿素含量、光合速率及黄瓜产量。赵峰等^[36]通过增施氧肥对水稻生长影响的研究发现,施氧肥后水稻淹水层溶氧量处于过饱和状态,以过氧化尿素作为追肥氮源处理的水稻淹水层溶氧量为8.95~12.83 mg/L,均高于对照组(6.41 mg/L)。在分蘖期和孕穗期追加过氧化尿素的增氧模式有利于水稻分蘖期形成较大的根系活性吸收面积和根冠比,同时又保持一定根系孔隙度,有利于根部氧的转运。不同作物根系对氧的需求存在较大差异,同一作物根系在不同生育期内对氧的需求也存在较大变化。目前对作物根系需求目标值的动态变化的相关研究较少,采用增氧的调控措施研究作物根系的最佳需氧浓度,为增氧促进根系生长提供理论基础。

2.2 蔬菜地板结

研究表明,连续多年大量施用磷肥会导致土壤板结^[38]。这是由于土壤中的阳离子以2价的Ca、Mg离子为主,向土壤中过量施入磷肥后,磷肥中的磷酸根离子与土壤中Ca²⁺、Mg²⁺等阳离子结合形成难溶性磷酸盐,从而使土壤溶液中的Ca²⁺、Mg²⁺减少,导致土壤团粒结构的稳定性下降^[39]。土壤板结会降低植物根系长度,使根系的贯入能力相对降低、下扎深度下降^[40]。试验表明,在有机质含量0.5 g/kg的板结土壤中,根系就无法穿透20 cm厚的土层^[41]。蔬菜根系分布浅、密度低^[42],由于磷素在土壤中的移动性差,所以土壤板结抑制蔬菜根系的生长,必然会对磷的吸收产生阻碍,同时将进一步加剧蔬菜地土壤氧耗竭。

2.3 蔬菜地酸化

研究发现,设施菜地土壤pH平均每年下降0.05~0.06,连续种植15 a黄潮土菜地由碱性变为中性,黑姜土菜地由中性变为酸性^[43]。由于大量施用氮肥,NH₄⁺被硝化成NO₃⁻时,会增加H⁺的释放,从而使H⁺留在土壤的交换点位,使土壤酸化;同时由于NO₃⁻增加,土壤中淋失的NO₃⁻增加,NO₃⁻易与土壤中的盐基阳离子结合,随着NO₃⁻的淋失引起土壤中盐基

阳离子的淋失,而土壤中盐基阳离子的减少也会进一步导致土壤酸化^[44]。国外有研究发现,蔬菜连作后土壤的pH与对照相比显著降低,并且这种酸化趋势与连作障碍有一定的相关性^[45]。酸沉降也会加剧土壤酸化。李其林等^[46]研究酸雨对重庆区域农业生态系统影响时发现菜地土壤有一定酸化趋势。

土壤酸化会加剧某些离子的毒害,抑制作物根系的发育,从而影响根系的吸收功能。如土壤中H⁺,Al³⁺,Mn²⁺的毒害会随土壤pH降低而加重,并会影响蔬菜根系的细胞分裂和呼吸作用^[47]。研究表明,土壤过氧化氢酶、脲酶活性及土壤磷酸酶活性均会随土壤pH的降低而显著降低^[48]。磷酸酶作为有机磷的矿化及植物的磷素营养关系最为密切的土壤酶,其活性的高低直接影响有机磷的分解转化及其生物有效性^[49],从而影响蔬菜对磷的吸收。

3 增氧的生物学意义

3.1 增氧营养与种子萌发

种子萌发期是植物个体发育的重要阶段之一,其良好程度直接影响植物的后期生长发育和产量形成。O₂是保证种子能够进行有氧呼吸,产生萌发所需能量的前提^[33]。胡德勇等^[50]以大棚秋黄瓜为研究对象进行增氧灌溉,结果表明,增氧对大棚秋黄瓜种子的发芽力指标、活力指标以及发芽整齐度均有显著影响。在第3天高峰发芽速率期增氧处理黄瓜种子发芽率高出对照7.5%,发芽势高出对照10.18%;第7天发芽率高出对照9.72%,发芽指数高出对照18.15%,活力指数高于对照27.73%,发芽整齐度高出对照36.04%。郑昀晔等^[51]通过增氧对烟草种子活力和萌发的试验中也发现,采用过氧化钙增氧显著促进种子的发芽和幼苗的生长,提高烟草种子活力。

3.2 增氧营养与蔬菜根系生长

根系作为植物与土壤之间的主要媒介,能够吸收、储存水分和养分,同时也能够为植物提供许多活性物质,根系形态的可塑性使植物在不断变化的环境条件下得以生存,所以根系对植物的生长发育产生一定的影响^[52]。研究表明,增氧能显著促进植物根系的生长。胡德勇等^[53]采用增氧灌溉技术进行秋黄瓜大棚盆栽试验研究,结果表明,增氧灌溉处理的秋黄瓜主根长、须根数、鲜根质量、干根质量均比对照处理高;并且从幼苗期后,加大对秋黄瓜耕作层土壤O₂补给力度,更有利于秋黄瓜根系的生长。这与张文萍等^[54]对烟草加氧灌溉的研究结果一致。相对于常规滴灌,机械加气滴灌和化学溶氧加气滴灌方式可

在烟草旺长期和现蕾期提高根鲜重、总根数、主根数,使根系体积扩大。增氧灌溉技术不仅在旱作中取得较好效果,在水稻生产中也显示出优势。肖卫华等^[55]发现,相比于对照,增氧灌溉处理组的水稻根总表面积、总体积、平均根粗和根尖数均具有显著优势;同时增氧灌溉处理组的根系活力还原强度均显著强于对照,说明增氧灌溉处理能明显提高根系活力。

根际溶氧量与植物根系生长密切相关。增氧改善根际氧环境,增加土壤呼吸,减少有毒物质对根胁迫,从而促进其生长。同时,增氧能显著增加根系的活跃吸收面积,因此富氧环境下根系活力显著增强^[56]。另一方面,根际增氧的直接结果是显著提高氧化还原电位和硝态氮含量,而这两个因素会影响最长根长及诱导侧根的形成^[57]。但增氧对根系形态结构变化的具体机制还需要进一步的研究。

3.3 增氧营养与磷素吸收利用

增氧对蔬菜磷吸收代谢有明显的促进作用。胡德勇等^[58]发现,增氧灌溉处理的秋黄瓜盆栽根区土壤中有效磷的含量出现波动,从幼苗期到初花期有小幅上升,从初花期到结瓜期又有小幅下降。说明增氧灌溉一方面能够通过促进土壤中磷酸酶和微生物含量的增加而促进有效磷的形成,同时也能够促进秋黄瓜对土壤中有效磷的吸收。研究表明,增氧处理的棉花磷吸收量比常规处理高 41.48%,土壤有效磷的含量比棉花种植前提高 47.76%^[59]。章永松等^[60]通过模拟试验研究水稻根系泌氧作用与磷素利用,结果表明,水稻泌氧作用可明显降低土壤对磷的吸附,增加根际土壤的磷解吸和离子交换树脂对磷的吸收量。

目前关于增氧与磷素吸收利用的报道相对较少,增氧对其影响机制也不明确。有研究证明,土壤有机磷的矿化速度与有机碳和有机氮的矿化速度呈正比^[61]。土壤有机磷是植物生长所需磷素重要来源,但有机态磷不能被植物直接吸收,大部分有机磷需要矿化作用转化为可以被植物吸收利用的无机态磷^[62]。Rumpel 等^[63]认为低浓度氧气水平可能是土壤有机碳周转速度慢的影响因子;赵霞等^[64]认为,增加根际溶氧量能加速土壤的矿化作用,提高土壤氮的矿化率。因此猜测增氧可能会加速有机磷的矿化,但关于氧对有机磷矿化的影响还需要进一步的研究。

4 展望

前人对氮氧互作机理研究取得一些进展,增氧能提高氮素利用率的原因主要集中在:良好根系的建成。提高根际氧浓度能够提高水稻根系活力和吸收面

积,促进根系形态建成;同时增强根系呼吸,为作物提供更多能量^[65]。有机氮的矿化。增加根际溶氧量能加速土壤的矿化作用,提高土壤氮的矿化率,为作物提供更多的有效氮源^[64]。酶活性提高。增氧处理具有提高脲酶活性的作用,脲酶活性上升也有利于尿素水解,提高土壤中铵盐浓度,为硝化作用提供充足底物,持续为水稻提供无机氮源^[65]。减少氮素流失。有研究表明,通过增氧处理,减缓了 NO、N₂O 的释放量^[66]。而关于增氧对蔬菜提高磷素利用率的机制还不明确,磷氧互作是通过改善根际通气环境促进植物良好根系形态建成提高了磷的利用率,还是增氧改变土壤,尤其是根际土壤的理化性质从而促进植物对磷的吸收,这需要进一步的探索。由于旱地土壤通常被认为是好气性土壤,目前关于增氧这一研究主要集中在淹水稻田土壤,对于旱地增氧的研究相对较少。因此蔬菜根系氧气浓度需求目标值的动态变化、蔬菜地根层缺氧现状及蔬菜不同生育期磷吸收的阻碍效应与机制等方面研究尚处于空白状态。开展菜地土壤增氧的研究以及蔬菜“磷氧互作”的研究可以为蔬菜提高磷素利用率,减少磷肥施用提供理论依据。

参考文献:

- [1] 李艾芬,章明奎. 浙北平原不同种植年限蔬菜地土壤氮磷的积累及环境风险评价[J]. 农业环境保护, 2010, 29(1): 122-127
- [2] 刘建玲,廖文华,张凤华,等. 菜园土各形态磷库的变化及空间分布[J]. 河北农业大学学报, 2004, 27(6): 6-11
- [3] 刘兆辉,姜丽华,张文君,等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 296-303
- [4] 贾可,刘建玲,廖文华,等. 磷肥在油菜和大白菜上的产量效应及土壤磷素的化学行为研究[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(4): 10-13
- [5] Hao X, Cho C M, Racz G J, et al. Chemical retardation of phosphate diffusion in an acid soil as affected by liming[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 64: 213-224
- [6] 席运官,田伟,李妍,等. 太湖地区稻麦轮作系统氮、磷径流排放规律及流失系数[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3): 534-540
- [7] 肖卫华,刘强,姚帮松,等. 增氧灌溉对杂交水稻根系生长及产量的响应研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(6): 68-71
- [8] Bhattarai S P, Su N H, Midmore D J. Oxygation unlocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments[J]. Advances in Agronomy, 2005, 88: 313-377
- [9] Péret B, Clément M, Nussaume L, et al. Root developmental adaptation to phosphate starvation: Better

- safe than sorry[J]. *Trends in Plant Science*, 2011, 16: 442–450
- [10] 周华君, 王校常, 吴文彬. 根系分泌物对几种难溶磷活化作用的研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2001, 23(5): 401–403
- [11] Czarnecki O, Yang J, Weston D J, et al. A dual role of strigolactones in phosphate acquisition and utilization in plants[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2013, 14: 7681
- [12] 梁瑞霞, 王国英, 李春俭. 排根的形成及其所分泌的有机酸的调节[J]. *植物生理学通讯*, 2003, 39(4): 303–307
- [13] Richardson A E, Simpson R J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus[J]. *Plant Physiol.*, 2011, 156: 989–996
- [14] Richardson A E, Hocking P J, Simpson R J, et al. Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus[J]. *Crop & Pasture Science*, 2009, 60: 124–143
- [15] 梁玉英, 黄益宗, 孟凡乔, 等. 有机酸对菜地土壤磷素活化的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(5): 1171–1177
- [16] Ramaekers L, Remans R, Rao I M, et al. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants[J]. *Field Crops Research*, 2010, 117: 169–176
- [17] 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
- [18] 陈全兴, 古东月, 史跃玲. 棚室土壤通气性不良的原因与调节[J]. *河北农业*, 2014(9): 25–26
- [19] 徐国强, 李杨, 史奕, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高 (FACE) 对稻田土壤微生物的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1358–1359
- [20] 孙周平, 李天来, 范文丽. 根际二氧化碳浓度对马铃薯植株生长的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2097–2101
- [21] 汪天, 王素平, 郭世荣, 等. 植物低氧胁迫伤害与适应机理的研究进展[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(4): 847–853
- [22] 梁永超. 土壤通气性与植物根系代谢[J]. *土壤学进展*, 1994, 22(3): 34–39
- [23] 苏玲. 水稻土淹水过程中铁化学行为变化对磷有效性影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001
- [24] 王文泉, 张福锁. 高等植物厌氧适应的生理及分子机制[J]. *植物生理学通讯*, 2001, 37(1): 63–70
- [25] Lei M, Zhu C, Liu Y, et al. Ethylene signalling is involved in regulation of phosphate starvation-induced gene expression and production of acid phosphatases and anthocyanin in *Arabidopsis*[J]. *New Phytologist*, 2011, 189: 1084–1095
- [26] 郭世荣, 李式军, 李娟, 等. 根际低氧逆境的危害和蔬菜作物的耐低氧性研究进展[C]. 中国园艺学会青年学术讨论会, 2000
- [27] Hurng W P, Lur H S, Liao C K, et al. Role of abscisic acid, ethylene and polyamines in flooding-promoted senescence of tobacco leaves[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1994, 143: 102–105
- [28] 黄伟强. 稻田晒田期土壤 Eh, rH 与土壤空气容量的相关分析[J]. *土壤*, 1985, 17(5): 40–43
- [29] 朱同彬, 孟天竹, 张金波, 等. 强还原方法对退化设施蔬菜地土壤的修复[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2619–2624
- [30] 周开胜. 厌氧还原土壤灭菌对设施蔬菜地连作障碍土壤性质的影响[J]. *土壤通报*, 2015(6): 1497–1502
- [31] 丁昌璞. 中国自然土壤、旱作土壤、水稻土的氧化还原状况和特点[J]. *土壤学报*, 2008, 45(1): 66–75
- [32] 吕梦华, 翟黄胜, 王楠, 等. 充氧微/纳米气泡水在白萝卜栽培中的应用效果研究[J]. *新疆农业科学*, 2014, 51(6): 1090–1096
- [33] 蒋程瑶, 赵淑梅, 程燕飞, 等. 微/纳米气泡水中的氧环境对叶菜种子发芽的影响[J]. *北方园艺*, 2013(2): 28–30
- [34] 周云鹏, 徐飞鹏, 刘秀娟, 等. 微纳米气泡加氧灌溉对水培蔬菜生长与品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(8): 98–100
- [35] 余喜初, 李大明, 黄庆海, 等. 过氧化钙及硅钙肥改良潜育化稻田土壤的效果研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 138–146
- [36] 赵锋, 王丹英, 徐春梅, 等. 水稻对过氧化尿素用量的响应特征[J]. *中国稻米*, 2010, 16(1): 4–8
- [37] 沈维, 胡德勇, 姚帮松, 等. 土壤耕作层含氧量对黄瓜叶片生长特性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(4): 47–52
- [38] 闫明宇, 张丽. 黑龙江省土壤磷肥施用实用技术[J]. *农业与技术*, 2007, 27(1): 119–120
- [39] 安晶. 东北地区棕壤和黑土旱田土壤板结机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016
- [40] Kristoffersen A Ø, Riley H. Effects of soil compaction and moisture regime on the root and shoot growth and phosphorus uptake of barley plants growing on soils with varying phosphorus status[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 72: 135–146
- [41] Bouwman L A, Wbm A. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 14: 213–222
- [42] Yan Z, Liu P, Li Y, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42: 982
- [43] 李粉茹, 于群英, 邹长明. 设施菜地土壤 pH 值、酶活性和氮磷养分含量的变化[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 217–222
- [44] 周生路, 陆春锋, 万红友. 苏南菜地土壤酸化特点及成因分析[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(1): 69–72, 91
- [45] Mubyana T, Krah M, Totolo O, et al. Influence of seasonal flooding on soil total nitrogen, organic phosphorus and microbial populations in the Okavango Delta, Botswana[J]. *Journal of Arid Environments*, 2003, 54: 359–369

- [46] 李其林, 魏朝富, 王显军, 等. 重庆农业生态系统中酸雨因子的特点及其影响[J]. 中国环境监测, 2008, 24(4): 70-74
- [47] 王瑞雪, 徐智, 汤利, 等. 设施菜地土壤质量主要障碍因子及其修复措施研究进展[J]. 浙江农业科学, 2015, 56(8): 1300-1305
- [48] 张昌爱. 大棚土壤模拟酸化对蔬菜根系生态环境的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2003
- [49] 李莹飞, 耿玉清, 周红娟, 等. 基于不同方法测定土壤酸性磷酸酶活性的比较[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1): 98-104
- [50] 胡德勇, 姚帮松, Su N H, 等. 增氧灌溉对秋黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 节水灌溉, 2015(11): 55-58
- [51] 郑昀晔, 牛永志, 马文广, 等. 增氧引发对烟草种子活力和萌发的影响[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(3): 104-107
- [52] Tian H, De S I, Ding Z. Shaping a root system: Regulating lateral versus primary root growth[J]. Trends in Plant Science, 2014, 19: 426
- [53] 胡德勇, 姚帮松, Su N H, 等. 增氧灌溉对秋黄瓜根系生长的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(8): 1224-1228
- [54] 张文萍, 姚帮松, 肖卫华, 等. 增氧滴灌对烟草根系发育状况的影响研究[J]. 现代农业科技, 2012(23): 9-11
- [55] 肖卫华, 张文萍, 李子豪, 等. 不同增氧灌溉对水稻根系生长的影响研究[J]. 湖南农业科学, 2016(2): 19-21
- [56] 王丹英, 韩勃, 章秀福, 等. 水稻根际含氧量对根系生长的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 803-808
- [57] Jampeetong A, Brix H. Oxygen stress in *Salvinia natans*: Interactive effects of oxygen availability and nitrogen source[J]. Environmental & Experimental Botany, 2009, 66: 153-159
- [58] 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
- [59] 饶晓娟, 王治国, 王萍莉, 等. 棉花膜下增氧滴灌应用效果初探[J]. 农村科技, 2013(10): 5-7
- [60] Zhang Y S, Lin X Y, Luo A C. Chemical behavior of phosphorus in paddy soil as affected by O₂ secretion from rice root[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2000, 14(4): 208-212
- [61] Dalal R C. 段平楣译. 土壤有机磷[J]. 土壤学进展, 1980(4): 15-28
- [62] 姜一, 步凡, 张超, 等. 土壤有机磷矿化研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014(3): 160-166
- [63] Rumpel C, Eusterhues K, Kögelknabner I. Non-cellulosic neutral sugar contribution to mineral associated organic matter in top- and subsoil horizons of two acid forest soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42: 379-382
- [64] 赵霞, 徐春梅, 王丹英, 等. 根际溶氧量对分蘖期水稻生长特性及其氮素代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3733-3742
- [65] 胡继杰, 朱练峰, 胡志华, 等. 土壤增氧方式对其氮素转化和水稻氮素利用及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 167-174
- [66] Kramer M, Conrad R. Influence of oxygen on production and consumption of nitric oxide in soil[J]. Biology & Fertility of Soils, 1991, 11: 38-42

Effect of Aeration on Improving Phosphorus Absorption and Utilization Efficiency by Vegetables

WANG Rui, SHI Weiming, LI Yilin*, ZHONG Yueming

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Low use efficiency of phosphorus (P) is one of key limiting factors in vegetable production. The root morphological and physiological plasticity of vegetable is the main biological mechanism to improve efficient use of P in soil. Currently, the excessive application of phosphate fertilizer leads to the deterioration of vegetable rhizosphere. Furthermore, rhizosphere has a feedback effect on the root morphology and activity and plant physiology of vegetables in return. This review based on the root system, from the point of view of oxygen nutrition, summarized the study progresses at home and abroad on the strategies of improving P efficiency, the responses of root and rhizosphere interaction to the P utilization of vegetables. Meanwhile, the biological mechanism for the effects of oxygenation on root growth and rhizosphere to improve the absorption and utilization of P in vegetables was expounded. These advances would provide basis for improving P use efficiency and reducing the input of P fertilizer in vegetable production.

Key words: Vegetable; Aeration; Phosphate fertilizer; Phosphorus use efficiency