

根系局部施肥与肥水耦合技术研究综述

李翠红, 张永茂, 冯毓琴, 陈大鹏, 慕钰文, 魏丽娟

(甘肃省农业科学院农产品贮藏加工研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 肥水耦合研究一直是节水技术和合理施肥研究的一个重要方面。从根系分区施肥技术、肥水耦合对植物根系影响及其作用机理、局部施有机肥与肥水耦合结合对植物叶片光合特性的影响等方面综述了肥水耦合相关研究。

关键词: 根系局部施肥; 肥水耦合; 综述

中图分类号: S147.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1463(2016)07-0061-06

doi: 10.3969/j.issn.1001-1463.2016.07.020

Research Summary of Local Root Fertilization and Water-fertilizer Coupling Technology

LI Cuihong, ZHANG Yongmao, FENG Yuqin, CHEN Dapeng, MU Yuwen, WEI Lijuan

(Institute of Agricultural product Storage and Processing Research, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: The research of water-fertilizer coupling is always an import part of water-saving technology and rational fertilization. This paper aim to describe the current situation of water-fertilizer coupling by the analysis of partition fertilization, the influences and mechanism of action that the water-fertilizer coupling, partition fertilization effected on the root of plant, and the photosynthetic characters of leaves effected by the partition organic-fertilization. Meanwhile, this paper looks forward to the future of apple trees partition organic-fertilization.

Key words: Local root fertilization; Water-fertilizer coupling; Summary

耦合多用在现代物理学上,指两个(或两个以上) 体系或运动形式之间通过各种相互作用彼此影响

收稿日期: 2016-03-24

基金项目: 甘肃省科技重大专项 (1203NKDA016); 国家级星火计划重大项目 (2013GA860001); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-28); 柱形苹果引种试验及特性研究示范(1309NKDE040-001)

作者简介: 李翠红(1981—), 女, 宁夏中卫人, 硕士, 研究实习员, 研究方向为果树栽培。联系电话: (0) 15609315559。

E-mail: slc_258@163.com。

通信作者: 张永茂(1957—), 男, 甘肃庆阳人, 研究员, 主要从事果树栽培研究。E-mail: zhangym57@126.com。

regulation of the cell cycle[J]. J. Cell. Biochem., 2004, 93(2): 242-250.

[2] BIECHE I, MAUCUER A, LAURENDEAU I, *et al.* Expression of stathmin family genes in human tissues: non-neural-restricted expression for SCLIP[J]. Genomics, 2003, 81: 400-410.

[3] TOGANO T, KURACHIM, WATANABE M, *et al.* Role of Ser50 phosphorylation in SCG10 regulation of microtubule depolymerization [J]. J. Neurosci. Res., 2005, 80: 475-480.

[4] LI Y H, GHAVAMPUR S, BONDALLAZ P, *et al.* Rnd1 regulates axon extension by enhancing the microtubule destabilizing activity of SCG10 [J]. J. Biol. Chem., 2009, 284(1): 363-371.

[5] 莫萍, 施瑞华, 张红杰, 等. 膜联蛋白 A10 在人食管鳞癌及其癌旁组织中的表达及临床意义[J]. 南京医

科大学学报 (自然科学版), 2008, 28(5): 658-660.

[6] GONZALO D H, LAI K K, SHADRACH B, *et al.* Gene expression profiling of serrated polyps identifies annexin A10 as a marker of a sessile serrated adenoma/polyp [J]. J. Pathol., 2013, 230: 420-429.

[7] RAYNALP, POLLARD H B. Annexins: the problem of assessing the biological role for a gene family of multi-functional calcium-and phospholipid-binding proteins [J]. Biochim Biophys Acta, 1994, 1197: 63-93.

[8] GERKEV, MOSS S E. Annexins: from structure to function [J]. Physiol. Rev., 2002, 82: 331-371.

[9] 王维民, 李发弟, 潘香羽. 绵羊 LHB 基因生物信息学分析 [J]. 甘肃农业科技, 2013(10): 14-16.

[10] 张小雪, 潘香羽, 李发弟, 等. 绵羊 ESR 基因生物信息学分析 [J]. 甘肃农业科技, 2014(9): 30-33.

(本文责编: 郑立龙)

以至联合起来的作用。水肥耦合是物理学概念的借用,它是指农业生态系统中,水分和土壤矿物元素这两个体系的相互作用,其相互作用所产生的结果或现象。在我国20世纪80年代农学界就提出了“以肥调水”的观点,即通过合理施肥改善作物的营养条件,提高作物对土壤贮水的利用能力,从而提高作物的产量和水分利用效率。近些年来,研究人员从水分和营养关系进一步进行了多学科的试验研究,从不同层面更加系统地揭示其机理,以期较好地协调作物和土壤水肥的关系,协同利用土壤中有效水肥资源,使作物度过水分亏缺期,获得稳定的生产效应。有机肥俗称农家肥,广义上的有机肥包括各种动物废弃物、植物残体和各种农产品下脚料经过一定时期发酵腐熟后形成的一类肥料,具有培肥土壤、改善植物营养、供肥时间长等多种优点,是农业生产中的重要肥源^[1-2]。

1 国内外根系局部施肥技术的研究现状

近年来,国际上发达国家利用全球卫星定位系统(GPS)和地理信息系统(GIS)等先进技术来研究土壤养分管理,并已成为土壤科学研究的热点之一^[3-4],国内也有一些研究者应用GIS等从事有关方面的研究^[5-6],但利用GIS和GPS对土壤养分进行管理是一种宏观的技术,适用范围比较大,比较粗放。根系分区施肥是一种对植物养分和土壤养分进行微观调节的方法,近年来,国内对根系分区施肥研究比较多的集中在黄瓜、番茄、玉米、水稻等作物上,对果树上研究的比较少见。肖深根等^[7]以黄瓜品种津绿露优与中农203为试材,采用自主设计的根系分区栽培槽(钵),研究了黄瓜植株各1/2根区不同浓度、不同营养组分、不同施肥水平的营养液组合供肥方式对黄瓜干物质生产的影响,结果表明,在黄瓜植株各1/2根区采用高低不同倍数的标准营养液组合施肥方式,可达到节约肥料,提高植株干物质生产与果实产量的目的。王丽琴^[8]将苹果实生苗进行分根栽培研究发现,不均一供氮处理的根系密生于富氮区,富氮区根系密度极显著高于均一高、低氮处理。然而,对1/2根系供应高氮营养的植株,植株总干重、地上部生长量显著高于全根低氮处理,而与全株高氮处理接近,地上部干重仅与高氮区根量相关,而与另外1/2低氮区的根系无关。王小兵等^[9]研究在分根处理中,水稻的氮含量与分根处理

中供氮一侧的平均侧根长度存在显著正相关,这表明在养分不均的介质中,侧根长度对水稻氮素吸收具有十分重要的作用。史正军、樊小林^[10]采用全根、分根培养系统,研究根构型参数对氮素供应方式和水平的适应性变化,结果表明:分根供氮时,无论供氮量高低,供氮均能诱导根系生长发育,表现为供氮侧侧根长、根表面积、根系体积、根重等根构型参数明显高于无氮一侧,但是根系平均直径明显变小。一些研究表明,局部供应水分或养分条件下,供应区根系的吸收能力、水分传导速率明显增大,根系生长也受到促进。高明霞等^[11]试验研究分根条件下常规灌溉、交替灌溉和固定灌溉玉米苗期根际硝态氮的分布,研究表明,不同灌水方式下,玉米根际硝态氮的分布不同。在这3种灌水方式的湿润区,硝态氮的累积趋势为:交替灌水>固定灌水>常规灌水。韩艳丽等^[12]试验研究根系分区灌水与常规灌水时玉米养分吸收的影响。结果表明:根系分区交替灌水的氮、磷利用效率比常规方式分别提高25.1%和25.3%;节约灌水量10.3%,水分利用效率比常规灌水增加20.1%。胡田田等^[13]研究认为根系分区交替供水、氮明显的促进玉米的干物质积累、地上部和根系的生长,使玉米地上部和根系生长比较协调,并且可以减小作物对氮素的奢侈吸收,提高氮素生产效率。

国外关于植物对养分局部供应响应的实验研究可追溯到20世纪初^[14],但一度未曾引起人们的注意。20世纪70年代初,Drew等^[15]详细研究了大麦种子根系对大量元素离子 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 PO_3^{4-} 、 K^+ 局部供应的反应,发现养分供应区根系生长受到促进,而其他地方的根系生长受到抑制,认为这是植物生长对养分非均匀分布的一种补偿。Allerton^[16]认为植物根系对水分与养分的吸收是两个相对独立的过程,如将作物根系分成两半,分别放置在高低不同Ec值的营养液中,则水分优先从低浓度的营养液中吸取,而养分则优先从高浓度的营养液中吸取。Sonneveld^[17]报道了将番茄根系一半放在标准Ec值,而另一半放在低Ec值的营养液中,根系只从低浓度营养液中吸收有限的硝酸根、磷酸根与钾离子,而不吸收钙离子与镁离子。然而,比较将根系全放在标准浓度营养液中的处理,番茄的产量并没有差异。该结论也与Klapwijk和Wubben^[18]的研究结果相一致,他们将

生长在岩棉基质中的番茄植株的根系切掉一大部分,但并未观察到任何植株的不良反应。

De Jager^[19]研究指出,营养在根系之间运输是可能的。Sonneveld^[17]也指出,在部分根系环境处于低(或者高)的Ec值的营养液的处理中,其叶片与果实中元素的含量有向标准Ec值营养液处理调整的趋向。Drew和sake^[20]认为当养分供应被限制在局部根系时,可以通过增加供应区根系的生长或养分吸收效率而得到补偿。庞欣等^[21]研究结果表明,当小麦和黄瓜幼苗部分根系供磷时,缺磷处理根系中含磷量也略高于全磷处理根系的含磷量,说明供磷根系吸收的磷有一部分运向了缺磷根系,而且部分根系供磷可促进供磷根系对磷的吸收,植株总的吸磷量显著提高,可以说部分根系缺磷可提高植物的养分吸收效率。王小兵等^[9]指出,在水稻分根处理与全株加氮处理中地上部氮浓度、可溶性总糖含量及氮含量的差异均不显著,表明分根处理也能基本满足植株正常生长对氮的需求。

2 局部施肥肥水耦合对植物根系影响及其作用机理

作物根系对水分与养分的吸收是两个相对独立的过程^[22],水分优先从低浓度的营养液中吸取,养分则优先从高浓度的营养液中吸取^[23-25]。假设营养在作物根系之间的运输是可能的,根系有自身调整植株营养吸收达到最佳状态的趋向,如果将作物根系采用1/2根区高浓度,而另1/2根区不施肥分区栽培,作物将能动态地根据自身不同生长时期的特点,从高低不同浓度的营养液中调配出适宜自身生长的最佳营养配方。

长期以来人们对局部施肥的机制仍不清楚。Agrel^[26]认为局部供肥促进了侧根生长的同时,也增加了根系作为库的能力,因此根对碳水化合物的需求增加^[27]。Thoms^[28]发现玉米根系局部供氮时,根区3-甲基胸苷含量比对照增加,同时IAA含量也较多。这表明根细胞分裂加速,需IAA征集碳水化合物,作为呼吸底物,促进了呼吸速率的增加^[29]。有人推测也许碳水化合物、3-甲基胸苷、IAA是根系发生上述反应的信号。Kauiper等人^[30-31]则认为因为氮磷直接参与CTK的生物合成,植物激素对根系形态的翻译可能起间接作用。Sernith^[32]、Cram^[33]认为营养元素本身就可以作为信使存在,尤其对韧皮部中能自由游离的离子来说,它们在筛管中的浓度与叶组织中的浓度有关,

它们在根系中的浓度可以反馈抑制影响根系对离子的吸收。有学者把根茎内离子浓度的变化归结为一种信息流控制,认为这种信息流有如下特点:①可能有许多特征,并含有糖;②本身有1~2种形式;③同化过程中只生成一定的量;④刺激根系生长的同时促进了根系的吸收;⑤此信息的作用是直接的^[34]。目前局部供肥对根系的影响的机制尚无定论,大多数人倾向于激素论,进一步的机制尚需进一步的研究。

3 局部施有机肥肥水耦合对植物叶片光合特性的影响

3.1 对植物叶绿素含量的影响

叶绿素是一切绿色植物通过光合作用合成有机物的必需物质。叶绿素的含量反映了植株进行光合作用的能力。叶协锋^[35]认为施用有机肥能够提高烟株生长前期叶片叶绿素的含量,从而增强光合作用强度,加速光合作用产物的合成与积累。这可能是有机肥可以调节土壤养分在烟株旺长期内的有效供应,从而促进烟株的营养生长。弓建国等^[36]研究氮、磷、钾、有机肥4因子对叶绿素含量影响的主效应得出,氮影响最大,其曲线斜率最大,与叶绿素含量的关系呈凸型二次曲线;磷对叶绿素含量的影响最小,其关系近于直线且平坦;钾主效应稍大于磷。在低施肥量范围内,叶绿素含量随着施用量的增加而呈递增趋势,当叶绿素含量达到最高点后,随着施肥量的增加,叶绿素含量不再增加。但随着有机肥施用量的增加叶绿素仍有增加的趋势,说明有机肥用量还未达到最高点。因此,施肥应掌握增加有机肥的用量,控制化学性氮肥、补充钾肥。有研究结果表明,稻草和膨化鸡粪按适当比例配合撒施处理可以提高叶绿素含量,增强光合,抑制呼吸,加快羧化,从而显著提高番茄产量。农家肥和饼肥分别加化肥施用或两者混合加化肥施用均能明显降低烟叶中多酚氧化酶(PPO)的活性,增加烟叶中叶绿体色素的含量,明显提高脯氨酸(Pro)含量,降低丙二醛(MDA)含量,大幅度提高硝酸还原酶(NR)活性,从而有利于改善烟叶品质和提高烟株抗逆性^[37]。总之,有机肥能够调节叶绿素的合成,从而达到提高植物光合作用的目的。

3.2 对植物叶片光合作用的影响

3.2.1 对植物叶片光合作用影响机理 植物在逆境胁迫或衰老过程中,细胞内活性氧代谢的平衡

被破坏而发生积累。丙二醛(MDA)是细胞膜脂过氧化作用的产物之一,其产生数量的多少能够代表膜脂过氧化的程度,也可间接反映植物组织抗氧化能力的强弱^[38]。植物对活性氧伤害的抵抗依赖于其自身的抗氧化防御系统,过氧化物酶(POD)是其中的重要酶类之一。过氧化物酶广泛存在于植物体中,是活性较高的一种酶,它与植物的呼吸作用、光合作用及一些代谢酶类等都有密切关系^[39]。目前,关于养分种类及供应量对作物抗氧化防御系统影响的研究较多,而关于养分供应方式等方面的研究鲜见报道。原丽娜、胡田田等人^[40]在玉米局部施肥上的研究表明,与均匀施肥相比,固定施肥下玉米叶片的MDA含量显著增大,交替施肥明显减小。POD活性表现为交替施肥显著增大,固定施肥只在高肥水平下有明显增加。氮素提高作物过氧化物酶活性、减缓细胞膜脂过氧化伤害的效果,与施氮方式和施氮量关系密切。总体来看,采用交替施氮方式能够提高玉米叶中的过氧化物酶活性,降低MDA含量,对抗氧化能力的提高起到一定的积极作用。其内在的生理机制尚需进一步实验研究。

3.2.2 对植物叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度的影响

光合作用是一个十分复杂的过程,植物的净光合速及蒸腾速率与自身因素,如叶绿素含量、叶片厚度、叶片成熟程度密切相关,又受光照强度、气温等外界因子影响^[41-42]。目前,研究肥水耦合对光合作用影响最多的主要在粮食作物,在果树上研究的还比较少见。金剑等^[43]研究表明,不同水肥耦合处理的条件下,春小麦灌浆期的光合速率不同,其中,增施有机肥处理的光合速率高于不施有机肥的无机肥处理,且光合速率衰减率较小,表现出良好的产量潜力,尽管仅施化肥的处理在充足水分条件下,光合速率衰减较自然水处理缓慢,但却没有表现出明显的产量差异,在自然降水条件下,有机、无机肥配合施用可使春小麦既高产又优质。尹光华等^[44]研究表明:叶片光合速率与籽粒产量正相关,水肥单因子对叶片光合速率影响从大到小顺序是N、水、P,交互耦合作用对叶片光合速率影响从大到小顺序为N与水耦合、N与P耦合、P与水耦合。水肥耦合促进叶片光合速率提高的主要原因是扩大了叶面积、提高了叶片蒸腾速率、增大了叶片气孔导度、提高了胞内水浓度、降低了胞内二氧化碳浓度。张依章等^[45]的研究指出,不同

的水肥耦合处理中,冬小麦的光合速率、气孔导度、细胞间隙CO₂浓度有所不同,三者之间有很好的平衡关系。其中,深层施肥处理的小麦在生长后期能够维持较高的光合速率,但气孔导度却有所降低,有效地减少了水分散失,表现出很好的节水潜力。同样水分条件下维持同样高的光合速率时,深层施肥的肥上灌水与肥下灌水相比,其受水分影响小,叶绿素含量下降快。深层施肥20 cm处灌水处理,在开花后小麦叶片光合作用最强,气孔导度小,细胞间隙CO₂浓度高,具有更好的节水潜力。

3.3 对植物养分利用效率的影响

水分一方面可加速肥料的溶解和有机肥料的矿化,促进养分的释放;另一方面稀释土壤中养分的浓度,并加速养分的流失。Viets^[46]研究认为尽管根系吸收水分和养分是两个独立的过程,然而水分的有效性影响着整个土壤的物理化学过程和微生物、植物的生理过程,使得土壤水分和养分密切而复杂地联系在一起。土壤中的养分只有溶解在水中,才能通过质流或扩散到达根系表面而为植物吸收,随着土壤含水量的降低,离子的扩散速度也变慢,养分在土壤中移动的速度和距离与土壤含水量密切相关。

合理施肥可增加蓄水保墒能力,抑制土壤蒸发,提高水分利用率,增加作物产量。一般土壤越肥沃,土壤的矿物质养分供应充足,植物的蒸腾系数越小,水分利用效率越高。主要原因是:①施肥能提高产量,使水分利用率显著提高;②施肥促进植物根系生长发育,提高植物根系活性及吸水能力,提高植物忍耐干旱胁迫性;③合理施肥,能促进植物生长发育和良好冠层盖度的形成,减少田间植物株间的无效蒸发,从而提高水分的利用效率^[47]。

大量研究认为,水肥之间的交互作用除了与土壤水分状况以及与之相适应的肥料用量有关之外,还与土壤肥力以及作物不同生育阶段的需水需肥规律有密切关系。低肥力田块增大施肥量能使作物产量成倍提高,而水分的增产效果不显著;高肥力田块施肥的增产效果明显降低,施肥与灌水效果接近,且灌水与施肥对产量有耦联效应^[48]。程宪国^[49]研究了不同水分条件下氮素对冬小麦生长发育及产量的影响,结果显示,水分缺乏,养分的截获、质流和扩散均受到抑制,加剧了作物生长过程中的营养不良状况;养分不足,作物生

长缓慢,有限的水分也不能充分利用。有人进一步指出,小麦对N、P的吸收随土壤含水量的增加而增加;土壤相对含水量在54%~67%时,水肥交互作用属李比希协同作用类型;土壤相对含水量达80%时,水肥交互作用则转变为顺序加和性类型^[50]。同时,翟丙年^[51]通过模拟试验研究发现,冬小麦越冬期施氮与土壤含水量的交互作用比苗期施氮与土壤含水量的交互作用更为显著。

4 讨论

我国无公害苹果生产技术规程要求果园土壤有机质含量要在15 g/kg以上,最好达到50~80 g/kg。日本的果园土壤有机质含量平均在30~40 g/kg,高者达136 g/kg,而我国多数果园土壤有机质含量平均不到10 g/kg,土壤有机质缺乏是造成果树产量低、品质差、抗逆性差的主要原因^[2]。同时由于种植区域集中,有机肥源相对短缺,有机肥施用仍以传统表面撒施或轮换沟施等方法为主,导致土壤改良效果慢、肥料利用率低,施肥方法及用量缺少科学依据,土壤肥力低下、树木营养缺乏、产量不稳、品质下降。

目前,肥水耦合在果树上面研究的比较少,大部分主要是在粮食作物,且在果树上研究肥水耦合的试验方法还不完善、试验效果也不明显;结合施有机肥的肥水耦合试验在果树上几乎没有相关文献,所以今后要加强有机肥对果树生理特性、果实品质和果实产量等方面影响的研究;进一步研究有机肥对果树叶片光合作用机理影响。加强研究在肥水耦合试验中施用有机肥与施用其他肥料对植物生理、形态、产量等方面有利的影响。与此同时,在建立模型时,应注重构建更具通用性的水肥耦合模型,除建立产量—水分—肥料的二次回归模型外,还应当建立作物生长机理模型,即通过土壤—植物系统内的质流、蒸腾、光合及同化作用的关系建模,根据模型计算不同水分、养分条件下的作物产量,这种模型的优点是便于进行多变量条件下产量形成因素的分析;进一步加强施肥对农产品品质和生态环境影响的研究;加强与计算机等高新技术的结合。

参考文献:

[1] 全国农业推广服务中心. 中国有机肥料资源[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 2-7.
 [2] 杨成明, 米彩艳, 李忠训, 等. 增加果园土壤有机质含量的措施[J]. 烟台果树. 2007(4): 27.
 [3] 金继运. “精确农业”及其在我国的应用前景[J]. 植

物营养与肥料学报, 1988, 4(1): 1-7.

- [4] 石元春. 土壤学的数字化和信息化革命[J]. 土壤学报, 1996, 37(3): 289-295.
 [5] 周惠珍, 龚子同, LAMP J. 土壤空间变异性研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(3): 232-24.
 [6] 张有山, 林启美, 秦耀东, 等. 大比例尺区域土壤养分空间变异定量分析[J]. 华北农学报, 1998, 13(1): 122-128.
 [7] 肖深根, 施晋杰, 郑志华, 等. 根系分区施肥对黄瓜干物质生产的影响[J]. 湖南农业大学学报, 2007, 33(5): 614-616.
 [8] 王丽琴. 苹果根系生物学研究及应用[EB/OL]. <http://www.sdau.edu.com/sdauweekly/private/688/688-3.htm>, 1998.
 [9] 王小兵, 吴平, 胡彬, 等. 硝态氮(NO₃)对水稻侧根生长及其氮吸收的影响[J]. 植物学报, 2002, 44(6): 678-683.
 [10] 史正军, 樊小林. 水稻根系生长及根构型对氮素供应的适应性变化[J]. 西北农林科技大学, 2002, 30(6): 1-5.
 [11] 高明霞, 王国栋, 胡田田, 等. 不同灌溉方式下玉米根际硝态氮的分布[J]. 西北植物学报, 2004, 24(5): 881-885.
 [12] 韩艳丽, 康绍忠. 控制性分根交替灌溉对玉米养分吸收的影响[J]. 灌溉排水, 2001, 20(2): 5-7.
 [13] 胡田田, 康绍忠, 高明霞, 等. 玉米根系分区交替供应水、氮的效应与高效利用机理[J]. 作物学报, 2004, 30(9): 866-871.
 [14] GILE PL, CARRERO J O. Absorption of nutrients as affected by the number of roots supplied with the nutrient[J]. Agri. Res., 1917(9): 73-95.
 [15] DREW M C. Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium, and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot in barley[J]. New Phytologist, 1975, 75: 479-490.
 [16] ALLERTON, F. W. In: Tomato Growing[M]. London: FaberandFaber. 1954: 87-96.
 [17] SONNEVELD, C. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture [D]. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Agricultural University. 2000.
 [18] KLAPWIJK, D. WUBBEN, C. F. M. The effete of root pruning and additional root growth on production of tomato[M]. Naaldwijk, The Netherlands: Glasshouse Crops Research Station, Annual RePort, 1988, 19, 1989.
 [19] JAGER, A DE. Effects of localized supply of H₂PO₄, NO₃, Ca and K on the concentration of that nutrient in the plant and the rate of uptake by roots in oung maize

- plants in solution culture[J]. *Neth. J. Agric. Sci.*, 1984, 32: 43-56.
- [20] DREWM C, SAKERI R. Nutrient supply and the growth of the seminal root system in barley III. Compensatory increase in growth of lateral roots, and in rates of phosphate uptake, in response to localized supply of phosphate[J]. *J. Exp. Bot.*, 1978, 29: 435-451.
- [21] 庞欣, 李春俭, 张福锁. 部分根系供磷对小麦幼苗生长及同化物分配的影响[J]. *作物学报*, 2000, 26(6): 719-724.
- [22] ALLERTON F W. *Tomato Growing*[M]. London: Faber and Faber, 1954: 87-96.
- [23] LUNIN J, GALLATIN M H. Zonal salinization of the root system in relation to plant growth[J]. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1965, 29: 608-612.
- [24] BINGHAM F T, GARBER M J. Zonal salinization of the root system with NaCl and boron in relation to growth and water uptake of corn plants[J]. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1970, 34: 122-126.
- [25] SONNEVELD C. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture [D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 2000.
- [26] AGRELL D, OSCARSON P, LARSSON C M. Translocation of N to & from barley roots: its dependence on local nitrate supply in split root culture[J]. *Physiol. Plant*, 1994, 90: 467-477.
- [27] SATTELMACHER B, THOMES K. Morphology and physiology of the seminal root system of young maize (*Zea Mays*) plants as influenced by a locally restricted nitrate supply[J]. *Plant Nutrition-physiology and Application*, 1989, 25: 29-32.
- [28] THOMS K, SATTELMACHER B. Influence of nitrate placement on morphology and physiology in maize (*Zea Mays*) root system [J]. *Plant Nutrition-physiology and Application*, 1990, 23: 29-32.
- [29] GRANATO T T C, RAPER C D J R. Proliferation of maize (*Zea Mays*) roots in response to localized supply of nitrate[J]. *J. Exp. Bot.*, 1989, 40: 263-275.
- [30] KUIPER D. Effect of internal cytokinin concentrations on root growth and shoot to root ratio of plantago major ssp pleiosperma[J]. *Physiol. Plant*, 1988, 75: 511-517.
- [31] KUIPER D. Cytokinin concentration in mineral nutrition and benzy ladenine treatment in plantago major ssp pleiosperma[J]. *Physiol. Plant*, 1989, 76: 511-517.
- [32] SERNITH F A. The internal control of nitrate uptake in excised barley roots with different salt contents [J]. *New Phytologic*. 1973, 72: 769-782.
- [33] GRAMW J. Internal factors of nitrate and chloride influx in plant cells[J]. *J. Exp. Bot.*, 1973, 24: 328-341.
- [34] PIMAN M G. Effect of previous water stress on ion uptake and transport in barley seedlings[J]. *Aust. J. Plant Physio.*, 1974b, 1: 337-385.
- [35] 叶协锋, 凌爱芬, 喻奇伟, 等. 活化有机肥对烤烟生理特性和品质的影响[J]. *华北农学报*, 2008, 23(5): 190-193.
- [36] 弓建国, 徐松鹤. 氮磷钾有机肥对马铃薯叶绿素含量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(23): 10940-10942.
- [37] 邓接楼, 涂晓虹, 王爱斌, 等. 生物有机肥在烟草上的应用研究[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(29): 9289-9290
- [38] 高俊凤. *植物生理学实验技术*[M]. 西安: 世界图书出版社, 1999.
- [39] 曹翠玲, 李生秀. 氮素对植物某些生理生化过程的影响[J]. *西北农业大学学报*, 1999, 27(4): 96-101.
- [40] 原丽娜, 胡田田, 等. 局部施氮对玉米生理生化特性和产量的影响[J]. 2008, 26(4): 49-52.
- [41] 时晓伟, 洪霞. 小麦早熟高产品种光合生理特性分析[J]. *华北农学报*, 2002, 17(2): 5-10.
- [42] 姜霞, 张喜, 谢双喜, 等. 木兰科主要树种幼苗的光合生理特征比较[J]. *贵州农业科学*, 2005, 33(3): 12-15.
- [43] 金剑, 刘晓冰, 李艳华, 等. 水肥耦合对春小麦灌浆期光合特性及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2001, 21(1): 65-68.
- [44] 尹光华, 刘作新, 陈温福, 等. 水肥耦合条件下春小麦叶片的光合作用[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(1): 40-43.
- [45] 张依章, 张秋英, 孙菲菲, 等. 水肥空间耦合对冬小麦光合特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(2): 57-60.
- [46] VIETS F. G. *Water Deficits and Nutrient Availability* [A]. Kozlowski, T.T *Water Deficits and Plant Growth* [C]. New York: Academic Press, 1972: 217-236.
- [47] 穆兴民. *水肥耦合效应与协同管理*[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999: 18-38.
- [48] 汪德水. *旱地农田肥水关系原理与调控技术研究*[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1995: 233-237.
- [49] 程宪国, 汪德水, 张美荣, 等. 不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响[J]. *中国农业科学*, 1996, 29(4): 71-74.
- [50] 天军锋, 李广敏. 干旱条件下施肥效应及其作用机理[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(1): 59-61.
- [51] 翟丙年, 李生秀. 冬小麦产量的水肥耦合模型[J]. *中国工程科学*, 2002, 4(9): 69-71.