

丁鑫, 姚帮松, 裴毅, 等. 增氧-调亏灌溉对芦笋根系生长的影响[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(3): 476-483.



增氧-调亏灌溉对芦笋根系生长的影响

丁鑫¹, 姚帮松^{1,2*}, 裴毅¹, 魏亚飞¹, 廖健程¹, 谭亮萍³

(1. 湖南农业大学 工学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南农业典型污染生态修复与湿地保护国际科技创新合作基地, 湖南 长沙 410128; 3. 湖南省蔬菜研究所, 湖南 长沙 410125)

摘要: 为探究增氧-调亏灌溉对芦笋根系生长的影响, 以芦笋为对象, 采用盆栽试验, 在 70%~80% 轻度水分胁迫下进行不同增氧处理, 对其不同生长阶段的根系生长进行观测与分析。结果表明, 对芦笋不同生育阶段进行增氧-调亏灌溉, 能促进其生长中后期根系发育, 并提高其根系活力。与对照相比, 幼苗期处理能提高其 49.2% 的根冠比, 幼年期处理能增加 27.3% 的叶绿素含量和 27.3% 的根系活力, 成株期处理能提高其 32.4% 的根系活力, 在采笋期进行的水分胁迫且增氧能增加芦笋 15.16% 的株高和 15.48% 的茎粗; 采笋期处理可促进芦笋根系的横向生长, 扩大 56.8% 的总根表面积、19.9% 的根平均直径、39.0% 的总根体积和 39.5% 的根尖数。因此, 增氧-调亏灌溉的协同作用能够刺激其根系生长, 进而促进芦笋的生长发育。

关键词: 增氧-调亏灌溉; 芦笋; 协同作用; 根系指标

中图分类号: S644.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2019)03-0476-08

Effect of Aeration and Regulating Deficit Irrigation on Root Growth of *Asparagus officinalis* L.

DING Xin¹, YAO Bang-song^{1,2*}, PEI Yi¹, WEI Ya-fei¹,
LIAO Jian-cheng¹, TAN Liang-ping³

(1. College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Hunan Agricultural Typical Pollution Ecological Rehabilitation and Wetland Protection International Scientific and Technological Innovation Cooperation Base, Changsha 410128, China; 3. Hunan Vegetable Research Institute, Changsha 410125, China)

Abstract: To explore the effects of aeration-regulating deficit irrigation on root growth of *Asparagus*. The root growth indexes of *Asparagus* used as the experimental material in pots in different growth stages were observed and analyzed under aeration and mild water stress. The results show that aeration and regulating irrigation at different growth stages can promote *Asparagus*' root development and improve its root activity in the middle and late stages. The root-shoot ratio of asparagus during the seedling period increased by 49.2% compared with that of the control group (CK); the chlorophyll and root activity of asparagus during the juvenile stage both increased by 27.3%, the root activity of asparagus during the mature stage increased by 32.4%. Aeration and 70%~80% water stress during the harvest period could promote the cross growth of asparagus root. Namely, it increased the total root surface area by 15.16%, root mean diameter by 19.9%, root volume by 39% and root tips

收稿日期: 2018-12-06 修回日期: 2019-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(31272248)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (31272248)

作者简介: 丁鑫(1994—), 女, 硕士生, 主要从事节水灌溉新技术研究, orcid.org/0000-0001-5657-3463, 710398610@qq.com; *通信作者: 姚帮松, 教授, 博士, orcid.org/0000-0003-0362-5498, 645626948@qq.com。

by 39.5%, respectively. Therefore, the synergistic effects of aeration-regulating deficit irrigation can stimulate the growth of roots, and then promote the growth and development of asparagus.

Keywords: aerobic-regulating deficit irrigation; *Asparagus officinalis* L.; synergism; root indicator

在水资源日益短缺的严峻趋势下,发展作物节水栽培是解决水资源缺乏的有效方法之一^[1]。对植物根系而言,灌溉会使水分占据土壤孔隙而降低土壤通气性,导致根系缺氧,有氧呼吸减弱限制作物生长潜力的发挥。由于土壤中大部分氧气是以气态形式存在^[2],因此土壤含水率的增大会减少土壤中氧气的储存量。针对该问题,相关学者提出了增氧灌溉方式,即通过各种途径向封闭的土壤中补充空气,以弥补作物根系氧气的不足^[3],增氧灌溉已经在甜瓜、菠萝和水稻^[4-6]等作物的实践中取得了良好的效果,表现为土壤呼吸作用加强,土壤通气性改善,根系活力增强,有利于作物对养分和水分的吸收利用,提高根系吸收和运输的功能,促进作物生长和营养元素吸收利用,进而有效提高作物产量和品质^[7-9]。灌水量和灌水方式也会对作物水分和养分吸收产生一定的影响。作物在调亏灌溉下,其根部是传递水分胁迫信息的重要器官。当其根部感受到水分亏缺时,作物内部将会重新分配光合产物在根与冠之间的比例,根部将会获得更多的光合产物,对其根部的生长更为有利。Blackman 等^[10]研究发现,在作物受到水分胁迫时,其根部可能会产生一种物质转送至叶片进而控制气孔的开闭程度,导致作物的光合及蒸腾等生理过程受到影响。调亏灌溉可以在保证产量不降低或者下降量很少的情况下,减少作物耗水,降低作物叶面积指数,增加产量,提高水肥利用效率,同时还能改善果蔬品质,增加果蔬可溶性固形物及维生素的含量^[11-14]。芦笋是一种旱地生长的蔬菜,被誉为“蔬菜之王”^[15],有着极高的经济价值,对水分亏缺较为敏感。增氧灌溉和调亏灌溉在单一作用下都取得了良好的效果,而目前有关增氧-调亏灌溉对芦笋生长影响方面的研究鲜有报道。因此,将两种新型灌溉技术相结合,探究两种灌溉技术的协同作用对芦笋生长的影响,以期发展为节水优质高效型芦笋生产提供科学合理的理论依据和技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2017年在湖南农业大学土肥高效利用国家工程实验室的温室内(N28°11', E113°4')进行,温室四周通风,温度与周围大气温度基本一致,温室内排除天然降雨的干扰影响。供试芦笋品种为湖南省蔬菜研究所提供的优质芦笋品种“锐力”,试验用土取自湖南农业大学耘园试验基地水稻土,属第四纪发育的红黄泥,其全氮含量、全磷含量和全钾含量分别为1.57, 3.28, 35.76 g/kg, 碱解氮含量、速效磷含量和速效钾含量分别为107.2, 56.7, 67.1 mg/kg, 有机质含量为21.21 g/kg, pH值为6.33, 田间持水量(FC)为0.267 g/g。

1.2 试验设计

试验于2017年3月1日开始育苗,5月1日开始移栽芦笋幼苗至试验盆中。试验盆下底面直径25 cm, 上表面直径30 cm, 高28 cm, 增氧处理预先在试验盆中埋置通气管, 试验盆内装12 kg过0.5 cm筛网的水稻土。芦笋幼苗期充分灌溉临界值以75 g营养土(肥沃的大田土与腐熟基质混合而成)吸水饱和和稳定入渗3 d保持的含水量(90 g)作为标准值, 低于临界值时即为水分亏缺。芦笋育苗完成后移栽至试验盆中, 每个试验盆栽有长势均一良好的幼苗1株, 增氧处理从移栽之日起开始增氧, 采用电磁式通气泵(功率20 W, 排气量为20 L/min, 6管分流)控制增氧, 每次增氧时间为10 min, 且1 d通4次气, 试验过程中给土壤所通气体为空气。为保证不透气, 盆底不进行打孔, 装土的同时埋入内径为4 mm、外径6 mm的进气管, 长度均为1.5 m。为了使水、气在土壤中均匀分布, 通气管一端打结捆好防止漏气, 每隔10 cm打4个直径为2 mm的小孔, 以螺旋形式埋入距离盆底5 cm的土壤中, 外留15 cm(不打孔)与通气泵相连。移栽当天各处理的灌水量相等, 均为4 L。

试验期间采用称重法进行补水, 其中灌溉水量利用烧杯计量并灌溉。本次试验以充分灌溉不增氧(CK)作为对照, 设置4个增氧-调亏处理, 即幼苗期调亏70%~80% FC的轻度水分胁迫(A处理)、幼年期

调亏70%~80% *FC*的轻度水分胁迫(B处理)、成株期调亏70%~80% *FC*的轻度水分胁迫(C处理)、采笋期调亏70%~80% *FC*的轻度水分胁迫(D处理)。各处理在非调亏期进行充分灌溉,灌水上限为*FC*。每个处理设12个重复,共计60株。盆中土壤水分含量根据天气情况每1~3 d观测1次,通过称重法测定,当土壤水分含量低于田间持水量的70%时开始灌水使其达到调亏设定值。

1.3 测定项目和方法

在幼苗期、幼年期、成株期、采笋期等各个生育阶段末分别选择长势相近的3株芦笋,测定每个处理芦笋的株高、茎粗、叶绿素含量。株高采用手持式激光高度仪测量,茎粗采用千分尺测量,每周测量一次并记录;叶绿素含量用分光光度计法进行测定^[6]。

每个处理在各生育阶段末设置3个重复,挖取地下部分根系,将根洗净后,利用EPSON express 11 000 xL扫描仪进行扫描,WinRhizo软件分析根系生长特征指标,得到根系的总根长、总根表面积、根平均直径、根体积及根尖数。取回样品放入烤箱中烘干称重,并用电子分析天平称量根与冠的鲜质量,计算得到根冠比,根系活力采用TTC还原法测定。

1.4 数据处理

使用Microsoft Excel进行处理数据,采用SPSS 22.0统计软件对各处理测定指标进行显著性检验,均值差异采用Duncan检验。

2 结果与分析

2.1 增氧-调亏灌溉对芦笋生长形态指标的影响

从图1和图2可知,芦笋株高、茎粗随时间呈逐渐增大趋势,表现为幼苗期株高增长速度较为缓慢,幼年期、成株期芦笋生长迅速,采笋期增长速度基本趋于平缓。增氧-调亏灌溉处理下,幼苗期和幼年期的株高和茎粗增长速度较为一致,成株期后的株高和茎粗分别比CK增加15.16%(104.2 cm)和15.48%(6.72 mm),且产生显著差异;采笋期的株高和茎粗分别比CK增加7.65%(120.19 cm)和17.67%(7.81 mm),未表现出显著差异。

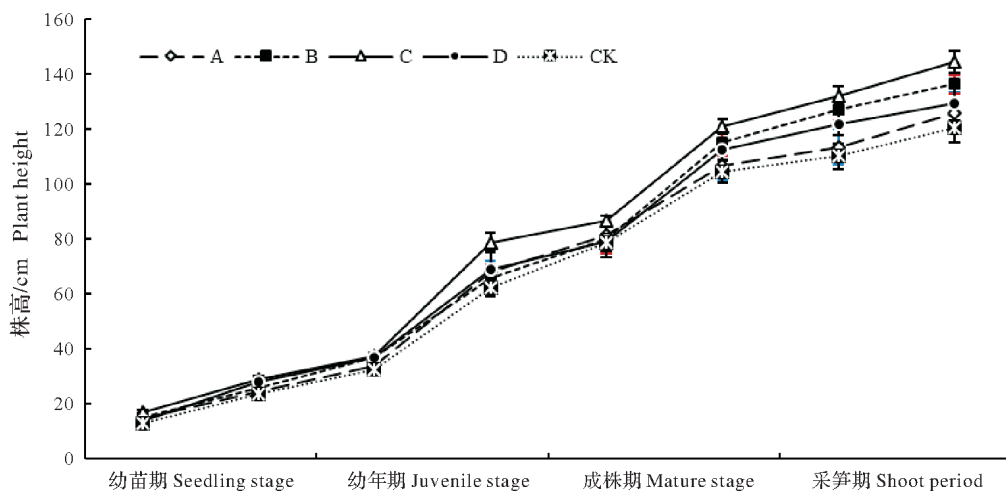


图1 增氧-调亏灌溉对不同生育期芦笋株高的影响

Fig.1 Effects of aeration and regulated deficit irrigation on plant height of asparagus in different growth stages

2.2 增氧-调亏灌溉对芦笋鲜质量和根冠比的影响

在芦笋整个生长发育过程中,芦笋的地上和地下部分鲜质量均随生长不断增加,根冠比整体呈现出先升后降的趋势(表1)。经过增氧处理后的芦笋根冠比较CK具有一定的优势,在幼苗期、幼年期、成株期、采笋期进行增氧-调亏灌溉会使得芦笋根冠比相比CK分别增加了49.2%,1.4%,11%,5.1%(表1)。主要是因为芦笋根系比较敏感,在幼苗期进行水分亏缺处理,会促使根系通过增加与土壤的接触面来获取水分,但在后期不同阶段进行水分亏缺芦笋根冠比并未产生显著性差异。

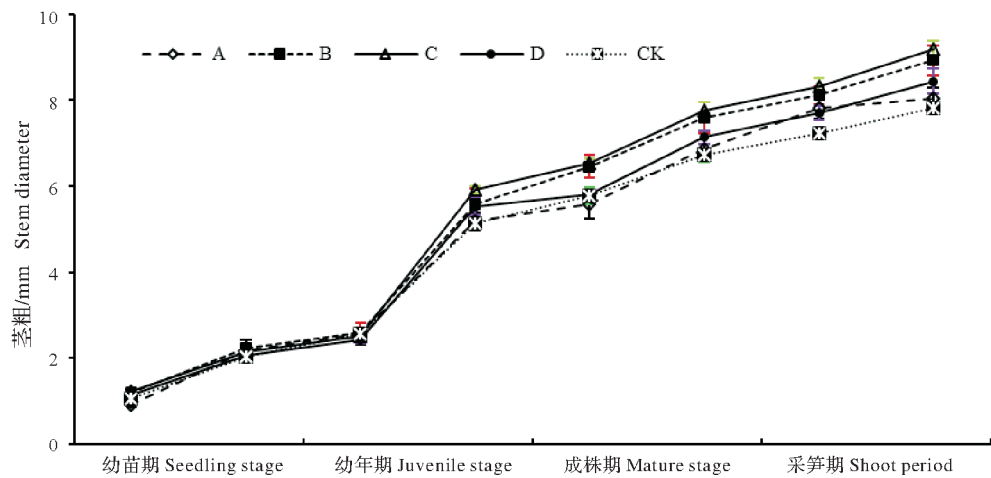


图2 增氧-调亏灌溉对不同生育期芦笋茎粗的影响

Fig.2 Effects of aeration and regulated irrigation on stem diameter of asparagus in different growth stages

表 1 增氧-调亏灌溉对不同生育期芦笋根冠比的影响

Tab.1 Effects of aeration and regulated irrigation on root to crown ratio of asparagus in different growth stages

生育期 Growth period	处理 Treatment	根鲜质量/g Root fresh weight	冠鲜质量/g Shoot fresh weight	根冠比 Root-shoot ratio	生育期 Growth period	处理 Treatment	根鲜质量/g Root fresh weight	冠鲜质量/g Shoot fresh weight	根冠比 Root-shoot ratio
幼苗期 Seedling stage	A	1.94±0.088 8 ^b	1.02±0.096 4 ^a	1.91±0.129 0 ^a	成株期 Mature stage	A	155.31±30.420 5 ^a	121.49±30.602 1 ^a	1.30±0.070 2 ^a
	B	2.07±0.201 1 ^{ab}	1.01±0.230 7 ^a	2.10±0.322 3 ^a		B	154.37±44.134 3 ^a	120.99±37.411 6 ^a	1.28±0.230 3 ^a
	C	2.04±0.195 2 ^{ab}	1.00±0.141 8 ^a	2.05±0.137 5 ^a		C	147.85±25.799 8 ^a	107.76±33.191 7 ^a	1.41±0.075 5 ^a
	D	2.23±0.080 0 ^a	1.17±0.049 3 ^a	1.90±0.100 7 ^a		D	160.99±25.755 6 ^a	118.21±21.195 4 ^a	1.37±0.190 4 ^a
	CK	1.37±0.124 9 ^c	1.08±0.143 6 ^a	1.28±0.079 4 ^b		CK	164.38±21.795 1 ^a	129.18±9.871 9 ^a	1.27±0.108 2 ^a
幼年期 Juvenile stage	A	22.61±4.876 1 ^a	14.10±3.418 4 ^a	1.61±0.055 1 ^a	采笋期 Harvest period	A	184.44±19.886 8 ^a	152.43±21.438 7 ^a	1.21±0.051 3 ^a
	B	24.66±2.664 0 ^a	17.45±2.390 6 ^a	1.42±0.086 6 ^a		B	181.33±25.757 1 ^a	154.12±34.549 2 ^a	1.19±0.101 5 ^a
	C	21.71±3.711 1 ^a	14.26±1.454 0 ^a	1.52±0.153 1 ^a		C	173.71±21.170 1 ^a	137.59±34.905 3 ^a	1.29±0.165 6 ^a
	D	20.24±4.619 8 ^a	13.30±2.656 1 ^a	1.56±0.470 6 ^a		D	180.24±27.288 1 ^a	146.63±18.305 4 ^a	1.23±0.036 1 ^a
	CK	16.85±3.890 0 ^a	12.23±3.187 5 ^a	1.40±0.259 7 ^a		CK	181.85±17.925 7 ^a	155.89±18.083 2 ^a	1.17±0.026 5 ^a

同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, $n=3$), 下同

Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$, $n=3$), the same as below

2.3 增氧-调亏灌溉对芦笋叶绿素含量的影响

表2表明,在幼苗期,增氧处理总叶绿素含量均大于CK,但增氧处理组间未表现出显著差异;幼年期进行增氧-调亏的B处理的总叶绿素为2.94 mg/g,较CK(2.31 mg/g)增长了27.3%,且与其他增氧处理组间产生显著差异;在成株期进行增氧-调亏处理较CK增长了5.3%,各处理组间未产生显著差异。在采笋期,各处理芦笋总叶绿素的差异不显著,保持在1.88~2.09 mg/g。

2.4 增氧-调亏灌溉对芦笋根系生长特征的影响

增氧-调亏灌溉对不同生育期芦笋根系特征指标的影响如表3所示,分析不同处理组根系情况可知,增氧处理会使得芦笋总根表面积、根平均直径、总根体积、根尖数表现出优势,但总根长却呈现出相反的规律。表明增氧灌溉会促进根系的横向生长,根尖数的增加又在一定程度上反映了根系的旺盛生长。在不同生育期对A、B、C、D处理进行增氧-调亏灌溉,会发现亏缺处理组在某些根系指标上与其他处理表现出显著差异。在幼苗期,A处理较CK的总根表面积、总根体积、根尖数分别增加了25.3%,29.4%,25.7%;在幼年期,B处理较CK的总根表面积、总根体积、根尖数分别增加了39.7%,25.7%,31%;

表 2 增氧-调亏灌溉对不同生育期芦笋叶绿素含量的影响

Tab.2 Effects of aeration and regulated on chlorophyll content of asparagus in different growth stages (mg·g⁻¹)

生育期 Growth period	处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	总叶绿素 Total chlorophyll	生育期 Growth period	处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	总叶绿素 Total chlorophyll
幼苗期 Seedling stage	A	1.87±0.235 2 ^a	0.57±0.055 7 ^a	2.43±0.290 5 ^a	成株期 Mature stage	A	1.76±0.111 4 ^b	0.54±0.023 1 ^a	2.30±0.133 2 ^{ab}
	B	1.84±0.176 2 ^a	0.32±0.070 2 ^b	2.15±0.225 0 ^a		B	2.08±0.098 7 ^a	0.40±0.055 1 ^{bc}	2.46±0.157 0 ^a
	C	1.83±0.020 8 ^a	0.34±0.075 1 ^b	2.17±0.062 5 ^a		C	1.83±0.020 0 ^{ab}	0.37±0.040 4 ^{bc}	2.20±0.025 2 ^{ab}
	D	1.94±0.153 1 ^a	0.26±0.086 6 ^b	2.20±0.145 7 ^a		D	1.88±0.115 9 ^{ab}	0.27±0.092 9 ^c	2.14±0.051 3 ^{ab}
	CK	1.11±0.061 1 ^b	0.62±0.113 6 ^a	1.72±0.065 6 ^b		CK	1.65±0.434 7 ^{ab}	0.45±0.112 4 ^{ab}	2.09±0.317 9 ^b
幼年期 Juvenile stage	A	2.21±0.043 6 ^b	0.47±0.043 6 ^b	2.67±0.090 7 ^b	采笋期 Harvest period	A	1.72±0.101 2 ^{ab}	0.34±0.015 3 ^{ab}	2.05±0.087 2 ^a
	B	2.36±0.050 0 ^a	0.58±0.023 1 ^a	2.94±0.071 0 ^a		B	1.67±0.100 2 ^{ab}	0.43±0.135 0 ^{ab}	2.09±0.035 1 ^a
	C	2.07±0.101 5 ^c	0.38±0.065 1 ^c	2.45±0.160 9 ^c		C	1.74±0.101 2 ^{ab}	0.25±0.095 4 ^b	1.98±0.185 2 ^a
	D	2.04±0.032 2 ^c	0.38±0.043 6 ^{bc}	2.41±0.078 1 ^c		D	1.82±0.136 5 ^a	0.26±0.121 0 ^b	2.07±0.026 5 ^a
	CK	1.97±0.065 1 ^c	0.34±0.055 1 ^{bc}	2.31±0.088 9 ^c		CK	1.37±0.390 0 ^b	0.51±0.081 5 ^a	1.88±0.304 1 ^a

在成株期,C处理较CK的总根表面积、根平均直径、总根体积、根尖数分别增加了42%,22.8%,19%,56%,总根长减少了27.5%;在采笋期,D处理较CK的总根表面积、根平均直径、总根体积、根尖数分别增加了56.8%,19.9%,39%,39.5%。

表 3 增氧-调亏灌溉对不同生育期芦笋根系特征指标的影响

Tab.3 Effects of aeration and regulated irrigation on root characteristics of asparagus in different growth stages

生育期 Growth period	处理 Treatment	总根长/cm Total root length	总根表面积/cm ² Total root surface area	根平均直径/mm Root mean	总根体积/cm ³ Root volume	根尖数/个 Root tip
幼苗期 Seedling stage	A	289.3±6.885 7 ^a	91.0±4.629 3 ^a	0.53±0.035 1 ^b	3.08±0.045 1 ^a	1 129±11.846 2 ^a
	B	276.9±2.218 9 ^b	76.4±6.851 5 ^{bc}	0.60±0.025 2 ^a	2.76±0.065 6 ^b	1 023±7.000 0 ^b
	C	281.9±2.913 8 ^b	83.0±3.551 1 ^{ab}	0.63±0.015 3 ^a	2.83±0.047 3 ^b	1 016±11.357 8 ^b
	D	275.9±3.507 6 ^b	79.3±1.761 6 ^{bc}	0.59±0.010 0 ^a	2.77±0.037 9 ^b	1 030±7.094 6 ^b
	CK	301.66±6.885 7 ^a	72.6±5.745 7 ^c	0.49±0.020 0 ^b	2.38±0.041 6 ^c	898±9.539 4 ^c
幼年期 Juvenile stage	A	604.5±7.011 7 ^d	287.3±5.372 5 ^b	1.38±0.020 8 ^c	8.86±0.171 6 ^b	4 778±32.470 5 ^c
	B	726.7±8.035 1 ^b	304.8±6.836 9 ^a	1.51±0.041 6 ^a	10.15±0.521 2 ^a	5 884±59.573 5 ^a
	C	688.9±7.148 7 ^c	275.3±5.774 4 ^b	1.49±0.047 3 ^{ab}	10.15±0.202 6 ^a	5 426±51.964 7 ^b
	D	679.2±9.079 8 ^c	282.0±4.174 1 ^b	1.47±0.045 8 ^{ab}	9.81±0.267 6 ^a	5 335±35.791 1 ^b
	CK	769.6±8.554 0 ^a	218.2±9.078 2 ^c	1.43±0.036 1 ^{bc}	8.07±0.147 3 ^c	4 490±84.524 2 ^d
成株期 Mature stage	A	1 860±17.364 6 ^e	1 138.7±19.069 9 ^b	1.95±0.073 7 ^{cd}	56.94±0.789 9 ^b	21 662±484.052 7 ^d
	B	2 174±31.501 8 ^c	1 086.4±11.787 4 ^c	2.03±0.083 3 ^{bc}	52.76±1.065 0 ^{cd}	27 156±615.615 4 ^b
	C	2 390±40.819 9 ^b	1 385.3±5.928 2 ^{ca}	2.26±0.083 3 ^a	60.95±1.006 5 ^a	28 595±507.491 9 ^a
	D	2 081±20.344 8 ^d	1 033.4±23.950 4 ^d	2.14±0.064 3 ^{ab}	54.35±0.572 4 ^c	25 651±523.312 8 ^c
	CK	2 565±4.561 1 ^a	975.9±4.866 2 ^c	1.84±0.055 1 ^d	51.24±1.934 4 ^d	18 330±726.844 6 ^c
采笋期 Harvest period	A	2 060±134.957 8 ^d	1 428.7±29.011 4 ^b	3.11±0.075 7 ^c	68.34±0.952 9 ^b	24 095±151.460 7 ^d
	B	2 314±54.071 5 ^c	1 533.8±40.742 4 ^a	3.32±0.106 0 ^b	62.18±0.921 8 ^d	29 590±511.157 8 ^b
	C	2 604±29.832 7 ^b	1 385.0±24.166 3 ^b	3.34±0.0755 ^b	64.18±0.648 6 ^c	28 795±663.737 9 ^c
	D	2 678±38.025 0 ^b	1 585.7±15.955 9 ^a	3.61±0.055 1 ^a	77.51±0.829 2 ^a	30 918±346.731 9 ^a
	CK	2 890±14.043 3 ^a	1 011.6±49.218 0 ^c	3.01±0.077 7 ^c	55.78±0.881 9 ^e	22 165±309.555 1 ^e

2.5 增氧-调亏灌溉对芦笋根系活力的影响

由表4可知,根系活力随着生育期的推进呈现逐渐减弱的趋势,各处理组幼苗期的根系活力表现为最强,幼年期及成株期次之,采笋期最弱。从幼苗期到成株期,进行增氧-调亏处理的根系活力较CK的分别提高了9.6%,27.3%,32.4%,且产生显著差异。采笋期D处理的根系活力为0.283 mg/(g·h),较CK的0.213 mg/(g·h)提高了32.86%,各处理根系活力未表现出显著差异,这是因为这个时期,芦笋已经进入生长后期,根系活力逐渐衰减,受水分与氧气的影响很小。增氧和亏水处理均可以通过增加土壤孔隙的通气量对根系活力产生影响,有利于根系的生长,但在幼苗期进行增氧-调亏处理会使芦笋在整个生育期的根系活力略弱于其他处理组。

表 4 增氧-调亏灌溉对不同生育期芦笋根系活力的影响

Tab.4 Effects of aeration and regulated irrigation on root activity of asparagus in different growth stages

处理 Treatment	幼苗期 Seedling stage	幼年期 Juvenile stage	成株期 Mature stage	采笋期 Harvest period
CK	0.530±0.004 3 ^c	0.444±0.005 0 ^d	0.373±0.007 9 ^d	0.213±0.005 5 ^a
A	0.581±0.002 5 ^b	0.533±0.004 7 ^c	0.480±0.003 0 ^c	0.277±0.006 0 ^b
B	0.617±0.002 6 ^a	0.565±0.003 6 ^b	0.517±0.004 5 ^a	0.295±0.091 8 ^a
C	0.622±0.004 0 ^a	0.588±0.003 6 ^a	0.494±0.008 0 ^b	0.286±0.003 0 ^a
D	0.623±0.003 6 ^a	0.584±0.006 2 ^a	0.504±0.003 6 ^b	0.283±0.008 3 ^a

3 讨 论

土壤增氧促进作物生长已有相关报道,前人研究发现加氧灌溉既能够促进水田作物水稻的生长,也能够促进油菜、烟草和马铃薯等旱地作物的生长。通过增氧处理能改变作物根系生长环境,有益于水生和旱地作物的根系生长延缓根系衰老^[17]。土壤通氧处理对作物生长主要是两方面的影响,一是促进作物的根系生长提高其吸收养分能力,二是改变了原来土壤微生物群落结构,促进了根区土壤中好氧微生物的增加,进而促进了土壤呼吸,有助于提高土壤中肥效元素的有效性^[18-20]。本研究发现,通过水分调控和增氧措施,不同处理下的芦笋生长发育过程中其农艺性状指标表现出了一定的差异性。在生长形态指标方面,生长初期芦笋植株体较小,需氧量较少,各个处理组无显著差异性,但随着植株的生长,根际土壤 O₂ 不断消耗,CO₂ 不断积累,增氧-调亏处理组则表现出明显的生长优势。这表明根际增氧会对作物生长起到促进作用,增氧灌溉可将氧气输送到根区,满足根系生长的要求,同时适当的水分亏缺也会促进植株的生长,朱艳等^[21]关于加气灌溉的研究同样证明了改善根区缺氧环境可促进植株的生长发育;在根冠比方面,增氧-调亏灌溉能够促进芦笋地下根系部分的生长,提高芦笋根冠比,这是由于水分亏缺和增氧处理,促使根系生成更多的侧根来吸收水分,并且通过根际增氧,提高土壤中的氧气含量,同样由于水分的亏缺会抑制地上部分的生长,使得茎上部分生长受到抑制,从而提高根冠比;在根系特征指标方面,水分胁迫以及根区气体环境的改善促进了根系的横向增长,有利于根系更好地从土壤中吸收水分和养分来满足自身生长,肖卫华等^[22]的研究指出,根区的低氧环境会抑制水稻根系的横向增长,增氧可以改善低氧胁迫;本试验对于芦笋根系活力检测分析得出,水分的胁迫更加刺激根尖分生与扩散,以便从土壤中吸收更多水分供植株运输营养物质以及参与有机质的合成,使芦笋根系活力得到增强,有效延缓芦笋根系衰老,这与廖健程等^[23]发现在控制灌溉下增氧能显著增强超级稻根系活力的结论相一致;本试验中,芦笋在幼年期的叶绿素含量达到峰值,后期又开始下降,主要是由于幼年期生长最为迅速,芦笋自身需要进行大强度的光合作用来满足自身的生长发育。

4 结 论

作物根际氧环境会影响芦笋的生长,芦笋根系对水分和氧气较为敏感,根区进行增氧-调亏灌溉可

以促进芦笋根系横向生长,增加总根表面积、根平均直径、总根体积和根尖数,提高芦笋的根系活力,有效延缓芦笋根系的衰老,从而促进芦笋植株的生长。

致谢:感谢湖南农业大学吴友杰讲师、谭帅讲师及福建省农科院张立成博士对论文写作给予的意见,谨致谢意!

参考文献:

- [1] 黄海霞,韩国君,陈延昭,等.调亏灌溉对绿洲干旱环境下辣椒叶片光合特性的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):108-113.
Huang H X, Han G J, Chen Y Z, et al. Effect of regulated deficit irrigation on photosynthetic characteristics of *Capsicum annuum* in dry oasis environment[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(4): 108-113.
- [2] Bhattarai S P, Midmore D J, Su N. Sustainable irrigation to balance supply of soil water, oxygen, nutrients and agro-chemicals [M]. Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture, 2010.
- [3] Bhattarai S P, Pendergast L, Midmore D J, et al. Root aeration improves yield and water use efficiency of tomato in heavy clay and saline soils[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 108(3): 278-288.
- [4] 谢恒星,吕海波,高志勇,等.加氧灌溉下温室甜瓜生长、品质和产量特征研究[J].灌溉排水学报,2017,36(12): 20-24.
Xie H X, Lv H B, Gao Z Y, et al. The growth, quality and yield of muskmelon under oxygation in greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(12): 20-24.
- [5] 肖卫华,刘强,姚帮松,等.增氧灌溉对杂交水稻分蘖期的影响研究[J].江西农业大学学报,2015,37(5):774-780.
Xiao W H, Liu Q, Yao B S, et al. Effects of different phosphoric fertilizer application on rice root system in tillering stage under oxygation[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2015, 37(5): 774-780.
- [6] 陈新明, Jay D, Surya B, 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 X M, Jay D, Surya B, et al. Impact of oxygation on soil respiration and crop physiological characteristics in pineapple [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 6(3): 543-547.
- [7] Bhattarai S P, Huber S, Midmore D J, et al. Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soils[J]. Annals of Applied Biology, 2015, 144(3): 285-298.
- [8] Lei H, Bhattarai S, Balsys R, et al. Temporal and spatial dimension of dissolved oxygen saturation with fluidic oscillator and mazzei air injector in soil-less irrigation systems[J]. Irrigation Science, 2016, 34(6): 1-10.
- [9] Zhu J, Liang J, Xu Z, et al. Root aeration improves growth and nitrogen accumulation in rice seedlings under low nitrogen[J]. Aob Plants, 2015, 7(3): 225-228.
- [10] Blackman P G, Davies W J, et al. Root to shoot communication in maize plants of the effects of soil drying[J]. Journal of Experimental Botany, 1985, 36(162): 39-48.
- [11] 刘静霞,张芮,成自勇,等.不同生育期水分亏缺对酿酒葡萄产量及品质的效应研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(3):78-83.
Liu J X, Zhang R, Cheng Z Y, et al. Effect research of water deficit in different growth stage on wine grape yield and quality [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(3): 78-83.
- [12] 陈瑛,邹颖,杨文,等.不同调亏处理对脐橙果实生长和品质的影响[J].节水灌溉,2017(9):38-42.
Chen Y, Zou Y, Yang W, et al. Effects of regulated deficit irrigation on navel oranges growth and quality [J]. Water Saving Irrigation, 2017(9): 38-42.
- [13] Ballester C, Castel J, El-Mageed T A A, et al. Long-term response of 'Clementina de Nules' citrus trees to summer regulated deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2014, 138(138): 78-84.
- [14] Kuşçu H, Turhan A, Demir A O. The response of processing tomato to deficit irrigation at various phenological stages in a sub-humid environment[J]. Agricultural Water Management, 2014, 133(2): 92-103.
- [15] 乜兰春,李保会,黄瑞虹,等.中国绿芦笋栽培研究进展[J].中国农学通报,2006,22(12):204-208.

- Nie L C, Li B H, Huang R H, et al. Advance in green asparagus cultivation in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(12): 204-208.
- [16] 李得孝, 员海燕, 王建辉, 等. 混合液浸提法测定玉米叶绿素含量的研究[J]. 玉米科学, 2006, 14(1): 117-119.
- Li D X, Yuan H Y, Wang J H, et al. Mixture solution soaking extraction efficiencies of chlorophyll from maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(1): 117-119.
- [17] 肖卫华, 姚帮松, 张文萍, 等. 根区通气增氧对杂交水稻根系及根际土壤微生物的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(8): 41-43.
- Xiao W H, Yao B S, Zhang W P, et al. Effects of hybrid rice root and rhizosphere microbes by aeration in root zone [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(8): 41-43.
- [18] 饶晓娟, 付彦博, 黄健, 等. 增氧灌溉对棉花营养特征及土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 797-803.
- Rao X J, Fu Y B, Huang J, et al. Effects of oxygenated irrigation on nutritional characteristics of cotton and soil fertility [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(4): 797-803.
- [19] Peterson J B. Relations of soil air to roots as factors in plant growth. [J]. Soil Science, 1950, 70(3): 175-186.
- [20] Yuan L, Niu W, Wang J, et al. Effects of artificial soil aeration volume and frequency on soil enzyme activity and microbial abundance when cultivating greenhouse tomato [J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(5): 1208.
- [21] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉对番茄植株生长、产量和果实品质的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 199-211.
- Zhu Y, Cai H J, Song L B, et al. Impacts of oxygation on plant growth, yield and fruit quality of tomato [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 199-211.
- [22] 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.
- Xiao W H, Zhang W P, Li Z H, et al. Effects of different oxygation treatments on rice root growth [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2016(2): 19-21.
- [23] 廖健程, 胡德勇, 裴毅, 等. 控制灌溉条件下增氧对超级稻根系生长及水分利用效率的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(9): 141-145.
- Liao J C, Hu D Y, Pei Y, et al. Effects of aeration on root growth and water use efficiency of super rice under controlled irrigation conditions [J]. Journal of Irrigation and Drainage Machinery Engineering, 2018, 36(9): 141-145.