

立体种植农田不同生育期及土壤水分的根系分布特征*

李仙岳 史海滨 龚雪文 彭遵远 李 祯 闫建文

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 在立体种植农田中,作物根系分布是影响作物间水肥竞争及利用效率的首要因素。针对滴灌条件下番茄套种玉米立体种植农田设置高(T1)、中(T2)、低(T3)3个土壤水分处理,研究不同水分处理对立体种植农田不同位置土壤含水率、作物根系分布的影响,探讨立体种植农田根系在不同生育期生长发育特征。结果显示:立体种植农田番茄侧土壤含水率平均值显著低于玉米侧,膜内土壤含水率明显高于膜外土壤含水率,膜内不同位置土壤含水率无明显差异;随着生育期的推进作物间根系呈“不交叉—轻度交叉—完全交叉—轻度交叉”规律;随着土壤含水率的增加根系总量呈增长趋势,在0~30 cm的滴灌湿润区,作物根系分布最密集,约占总根系的60%~70%,且高水分处理根量显著大于低水分处理,根长密度、根表面积密度、根体积密度以及根重密度均呈现T1>T2>T3的趋势,而在非滴灌主要湿润区则正好相反;累积根系分布曲线分析显示随着土壤含水率增加根系向土壤下层生长,随着生育期推进根系向作物中间发展。立体种植农田作物在不同生育期根系分布变化明显,同时土壤水分对根系分布影响较大。

关键词: 立体种植 根系分布 土壤水分 累积根系分布曲线

中图分类号: S274; S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)03-0140-08

引言

立体种植主要通过间作套种,在同一块土地上同时种植2种或2种以上的作物,是作物在时间和空间上的集约化^[1-2]。立体种植在世界各地都有较大种植面积^[3]。然而立体种植农田不同作物之间存在水分、养分、光热等竞争,从而导致立体种植农田不同作物蒸散存在差异;而立体种植农田不同作物根系分布特征对于作物水肥竞争及利用效率起关键作用,水肥利用效率又间接影响了作物株高和叶面积。掌握立体种植农田根系分布特征对于明确作物间水肥竞争机理,提高立体种植农田水肥高效利用都具有重要意义。

目前作物根系研究大多集中在根系分布^[4-5]、根系分形^[6]、根构型^[7]、根系吸水^[8]、根系生长^[9]等方面,根系分布研究主要针对单作农田,对于多作物间作条件下根系研究主要以农林交错区根系分布为主^[10]。尽管国内外对立体种植进行了大量研究,但主要限于立体种植的农业栽培、灌溉制度以及需水规律等方面^[11-12],对立体种植条件作物间根系在土

壤中的空间分布以及变化过程研究相对较少。目前立体种植农田主要以传统地面灌溉为主,没有考虑不同作物根系吸水能力差异,也无法实现几种作物同时达到水分高效利用^[13],滴灌能根据不同作物需水量进行适时适量灌溉,易于实现多作物农田水分高效利用,然而对滴灌条件下立体种植农田作物根系分布的研究目前还较缺乏。尽管Gao等^[14]对立体种植条件下根系在不同生育期生长过程的研究显示不同生育期作物根系分布存在明显差异,Sampathkumar等^[15]对滴灌和立体种植条件下的土壤水分和根系生长的研究显示在0~30 cm土壤含水率的差异直接影响立体种植农田根系的生长量,但这些研究主要针对麦、棉、玉米、小麦等传统作物立体种植的根系,而对于干旱区滴灌条件下经济作物立体种植农田不同水分处理对根系分布的影响以及根系在不同生育阶段的发展规律等内容研究较少。

本文主要针对内蒙古干旱区番茄套种玉米农田滴灌条件下水分空间分布特征,研究不同水分处理对立体种植农田根系空间分布的影响以及立体种植

收稿日期: 2013-03-31 修回日期: 2013-04-14

* 国家自然科学基金资助项目(51109105,51349003)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B03)、内蒙古高等学校“青年科技英才支持计划”资助项目和中国博士后科学基金资助项目(2011M500547,2012T50250)

作者简介: 李仙岳,副教授,主要从事节水灌溉及节水农业研究,E-mail: lixianyue80@126.com

通讯作者: 史海滨,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉原理及应用研究,E-mail: shi_haibin@sohu.com

农田根系在不同生育阶段的发育特征,旨在立体种植农田高效灌溉制度的制定奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区情况

田间试验于2012年在内蒙古磴口县坝楞节水试验站(40°20'15''E,107°1'45''N,海拔高度2 004 m)进行。该地区光热资源丰富,全年日照时长达2 190 h,多年平均降水量为198 mm,多年平均蒸发量达2 460 mm,是典型的内陆干旱地区。试验田0~100 cm内平均容重为1.50 g/cm³,土壤质地为夹砂粘土,田间持水量为36.2%(体积含水率)。

1.2 试验设计

供试作物为番茄(屯河48)和玉米(中地77),采用4行番茄套2行玉米的立体种植模式,滴头流量为2.4 L/h,采用“一膜一管两行”的滴灌灌水方式,具体见图1所示(图中数据单位为cm)。不同处理以及不同作物均设置独立阀门,并在阀门前安装水表(精度0.001 m³)用以控制灌水量,共6个阀门及水表。根据番茄、玉米需水量不同,每个处理番茄、玉米灌水定额不同,试验过程玉米共滴灌9次,番茄滴灌6次,在当地灌水经验及往年灌溉试验基础上,设置了充分(T1)、轻亏(T2)、亏缺(T3)3种灌溉处理,每个处理设3个重复,具体见表1。

表1 不同处理试验设计

Tab.1 Design of different treatments mm

处理号	灌水定额	
	番茄	玉米
T1	22.5	30.0
T2	16.5	22.5
T3	10.5	15.0

1.3 观测项目及方法

气象数据:离试验区500 m的空旷地中设有自动气象站(HOBO),每30 s测量一次,每30 min取一次平均值,记录降水、气温、湿度、太阳辐射、大气压等。

土壤含水率:在每个处理的膜外番茄与番茄之间(P1)、膜内番茄与番茄之间(P2)、膜内番茄主根处(P3)、膜外番茄与玉米之间(P4)、膜内玉米主根处(P5)、膜内玉米与玉米之间(P6)共6个位置埋设时域反射仪(TDR)探头,具体见图1,每隔3 d测量1次,定期用取土加热干燥法校正,测量深度分别是0~10 cm,10~20 cm,20~40 cm,40~60 cm,60~80 cm,80~100 cm。

根系:通过剖面法研究立体种植农田根系分布,分别在6月6日、6月22日、7月21日、8月20日,以T1处理为典型选择生长状况良好的番茄、玉米植株研究番茄套种玉米根系在不同生育阶段的变化特征,并在生长旺期(7月21日)对T1、T2、T3处理均取根系研究不同水分对立体种植农田根系的影响,考虑取样工作量和实际情况,每次取根2次重复。

取根位置从番茄主根到玉米主根整个区域(P3~P5),由于0~50 cm土层内,根系较多,水平和垂直方向均以5 cm为单位一层,再往下根系减少,逐渐加大间距以减少工作量,水平和垂直方向均以10 cm为单位一层取根,直到没有根系为止。并将土样带回实验室,过3 mm筛后将根系从土样中分离出来,装入保鲜袋保存,然后用水冲洗根系,挑取小于2 mm根系采用Epson Perfection V700 PHOTO型彩色图像扫描器扫描根样,再经Win RHIZO软件分析得到根系相关参数,扫描结束后,将根系在70℃下加热干燥至质量恒定称量。

1.4 数据处理

利用Excel进行数据处理、分析并制图表,采用SPSS 13.0软件进行方差分析。

利用Gale和Neykova等^[16-17]提出的累积根系分布非线性数学模型计算并绘制累积根系分布曲线,定量分析不同水分处理根系在垂直方向分布特征和不同生育期根系在水平方向分布特征,累积根系分布非线性模型公式为

Y=1-β^d (1)

式中 Y——累积根系分数(在0~1之间)

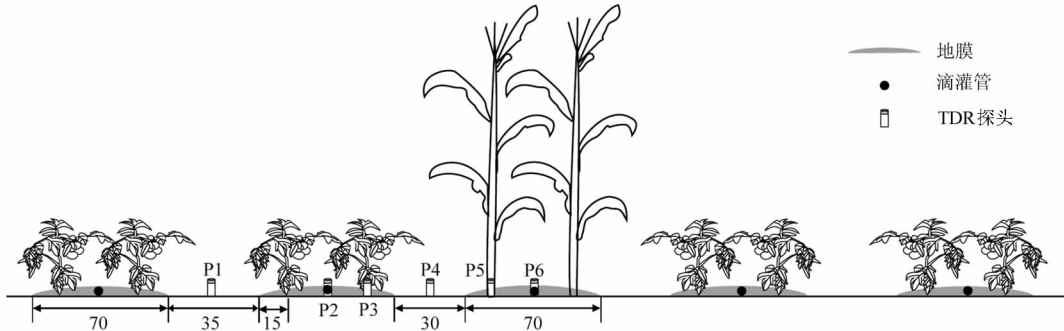


图1 田间试验布置图

Fig.1 Field experiment arrangement

d ——土壤深度,cm
 β ——拟合参数

垂直方向 Y 的计算从土壤表层开始一直计算到土壤最深层,水平方向 Y 的计算从作物主根一直到番茄玉米分界处。 β 参数利用 SPSS 软件,基于 Levenberg - Marquardt 算法的非线性最小二乘法拟合得到。

2 结果与分析

2.1 滴灌与立体种植耦合作用下不同水分处理土壤水分分布特征

立体种植农田生育期内 0 ~ 60 cm 平均土壤含水率分析显示(表 2),在整个生育期内番茄侧土壤含水率(P1、P2、P3)明显高于玉米侧土壤含水率(P4、P5、P6),达到极显著差异($F = 10.716, p = 0.005$),平均约大 12.47%,这是由于番茄侧地上茎叶覆盖度大于玉米侧,导致番茄侧土壤蒸发减少,从而整个生育期番茄侧平均需水强度明显低于玉米侧,而正是由于番茄侧与玉米侧土壤含水率的差异为玉米根系扩展到番茄侧奠定了基础。对于均位于膜内的番茄侧 P2、P3 位置,和玉米侧 P5、P6 位置,尽管一个位于滴头下方,另一个位于作物茎秆下方,但由于两者间距小,而且地表均覆膜,故土壤含水率差异不显著,其中 P2、P3 方差显示 $F = 0.004, p =$

0.954, P5、P6 方差显示 $F = 0.567, p = 0.493$ 。覆膜明显提高了土壤含水率, P1、P4 分别处于番茄与番茄未覆膜区,番茄与玉米未覆膜区,其平均含水率明显低于对应的覆膜区平均含水率,对应的未覆膜区含水率仅为覆膜区含水率的 93%。可见番茄套种玉米立体种植农田番茄侧土壤含水率高于玉米侧,覆膜区不同位置含水率无差异,未覆膜区含水率低于覆膜区含水率。

表 2 不同位置平均含水率

Tab.2 Average soil water of different positions %						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
T1	31.03	33.32	32.88	26.61	29.54	27.86
T2	27.98	30.44	30.52	24.77	27.33	25.82
T3	25.49	27.59	27.53	22.69	24.82	24.05
平均值	28.17	30.45	30.31	24.69	27.23	25.91

不同水分处理平均含水率差异较明显,高灌溉定额处理土壤水分大于低灌溉定额处理,各位置平均含水率大小顺序与灌溉定额的大小一致,从大到小依次为 T1、T2、T3。从不同水分处理平均含水率在生育期的变化过程可知(图 2),在 4 月 20 日—6 月 14 日,番茄移苗后处于缓苗期,同时该时期作物需水量少,降雨多,不同处理平均土壤水分没有差异,随着 6 月 14 日进行不同水分处理后,可以看出高水分处理平均含水率明显大于低水分处理。

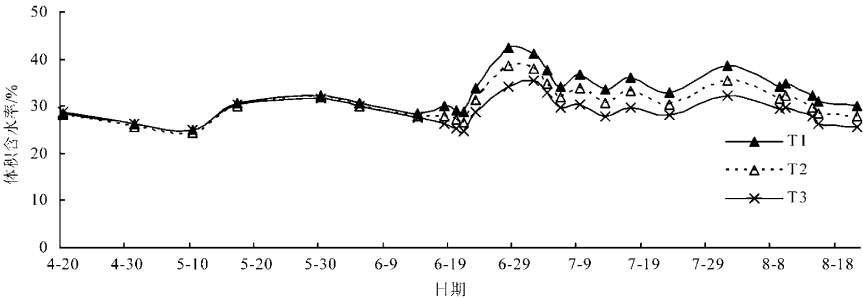


图 2 不同处理平均土壤含水率在生育期的变化趋势

Fig.2 Variation of average soil water in growth period for different treatments

2.2 不同生育期番茄玉米根系二维分布特征

立体种植农田区别于单作农田主要在于同一农田中有多种作物同时生长,作物利用水分和养分存在竞争关系,这种竞争关系主要受作物根系在不同时期分布的影响。立体种植农田根系分布二维图(图 3)显示,作物生长初期(6 月 6 日)两种作物根系间相互不交叉,两种作物根量主要集中在约半径 15 cm 的土体内,该时期两作物生长基本无竞争关系。随着生长进入快速生长期(6 月 22 日)根系出现小范围竞争状态,作物根系不断进行横向、垂向扩展,在两作物的中间地带根系间出现了少部分交叉现象,但主要根系仍集中在约半径 20 cm 的土体内。

在作物生长旺期(7 月 21 日)作物耗水量大,作物根量已经达到最大阶段,同时根系进一步在横向和垂向扩展,两作物根系在横向继续相互渗透,呈现完全交叉现象,可见任何一侧两作物都会对水、肥产生相互竞争。而到了生长后期(8 月 20 日),该时期番茄侧灌溉停止,地上生物量部分已凋萎,导致根系死亡数远大于新生数,根系趋于萎缩态势,而玉米该阶段由于需水量仍然较大,需要较多水分,故玉米根系主要向下层发展且明显增多。由此,根系生长交叉现象减少,最终导致不交叉。由试验可见,整个生育期立体种植农田两种作物根系生长的特征呈现“不交叉—轻度交叉—完全交叉—轻度交叉”过程。

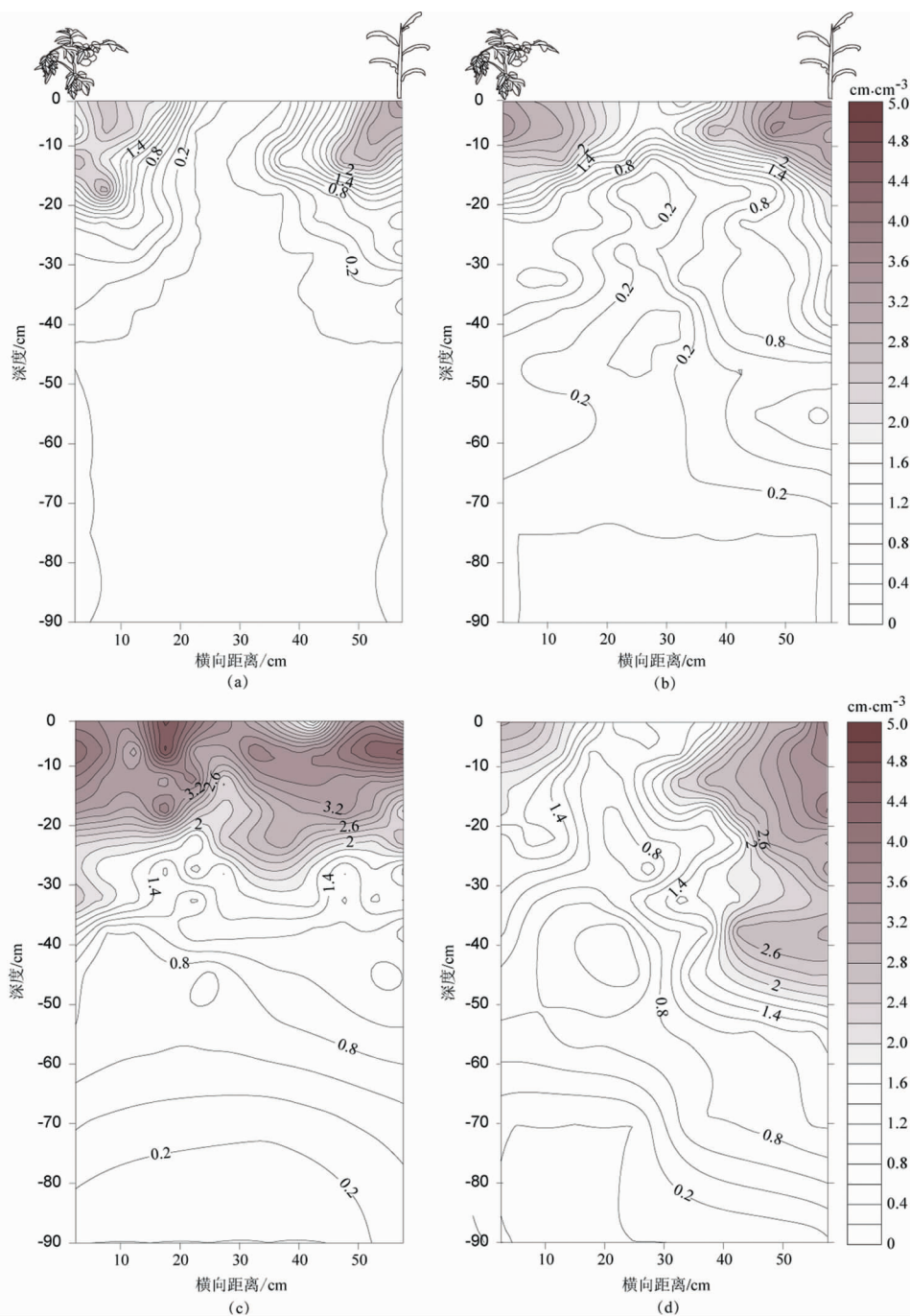


图 3 不同生育期立体种植农田根长密度二维分布

Fig. 3 Two dimensional root length density distribution for different growth periods

(a) 生长初期 (b) 快速生长期 (c) 生长旺期 (d) 生长后期

不同生育期根系横向所占比例分析能进一步明确立体种植农田根系交叉规律(图 4)。生长初期到生长后期两作物根系主要交叉区(横向 20 ~ 40 cm)的根系比重呈“小—增大—继续增大—减小”的变化过程,该区域根量占总根量的百分比呈现 3.06%—17.98%—32.71%—26.68% 变化,两作物交叉的中心点并不在两作物水平中心点,而在离番茄 25 cm 左右位置,可见整个生育期玉米根系较番茄发达,在相同条件下玉米需水量大于番茄。在生长初期(6 月 6 日)半径 15 cm 范围土体内根量占全

部根量的 83.89%;在作物生长快速期(6 月 22 日)半径 20 cm 范围土体内根量占了全部根量的 82.02%,另外该时期玉米根量占总根量的 60%,玉米根量明显大于番茄;而在生长旺期(7 月 21 日),根系呈现完全交叉现象,根系横向比重曲线几乎是一水平线,故该时期横向根系分布较均匀;而到了生长后期(8 月 20 日)由于番茄已收获,根系基本停止生长,灌溉也停止,故玉米根系占整个根系主要部分,约为 65%,且集中在主根附近。综上所述,玉米根量总体大于番茄,从而奠定了玉米侧灌水定额应

大于番茄侧的理论依据,从根系横向所占比重可知,随着生育期的发展,立体种植农田作物根系横向半径由小变大再变小的过程,若灌水定额能随着根系发展作相应调整,使根系分布与土壤湿润体相适应将有利于提高立体种植农田的水分利用率,也体现了滴灌在立体种植农田中的应用价值。

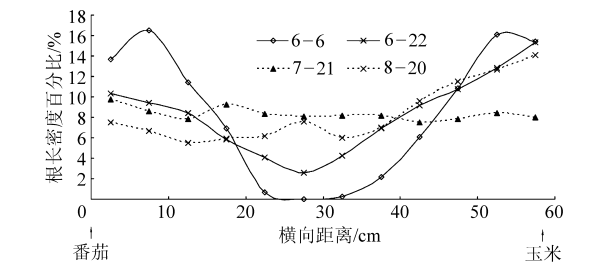


图4 不同生育期番茄玉米根长在横向位置所占百分比
Fig.4 Horizontal percentage of root length for different growth periods

2.3 不同水分处理对根系生长的影响

生长旺期(7月21日)作物需水量大,两种作物根系完全交叉,明确不同水分处理对根系在垂向分布的影响有利于制定合理灌溉制度。本文对每层不同横向位置的番茄、玉米吸水根(直径小于2 mm)进行平均后,得到根长密度、根体积密度、根表面积密度以及根重密度垂向分布图(图5),不同处理根系分布主要集中在土壤上层,其中0~30 cm 土层的滴灌湿润区,作物根系分布最密集,约占总根系的60%~70%,而0~20 cm 土层根系占总根量的50%以上,其中根系密度最大位置出现在距地表10 cm,之后呈线性下降。不同水分处理对根系的影响较明显,由于滴灌湿润体主要在0~30 cm 土层,故高水分处理在0~30 cm 土层土壤含水率较高,根长密度、根体积密度、根表面密度以及根重密度在0~30 cm 土层范围有T1>T2>T3的规律。T3处理在

0~30 cm 土层含水率较小,根系密度小,所以吸水量小,难以满足生长旺期作物生长,故根系在土壤下层生长较T1、T2处理旺盛^[18],导致40~100 cm 土层根系密度从大到小依次为T3、T2、T1。故适度水分胁迫有助于提高土壤下层吸水根量。

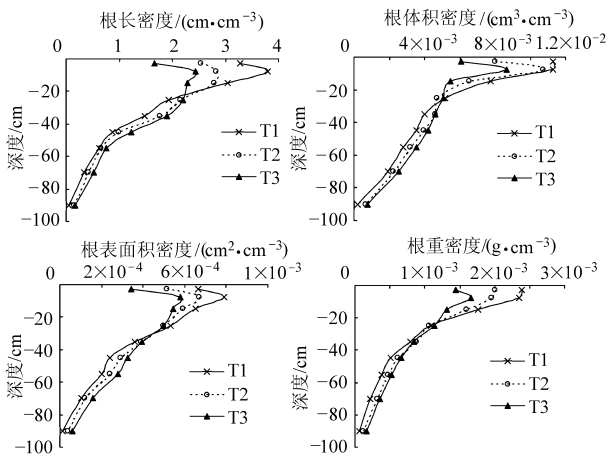


图5 不同水分处理立体种植农田根系垂向分布规律
Fig.5 Vertical distribution of root system for different treatments

不同处理各土层根系各参数列表分析显示(表3),不同处理根系在0~10 cm、10~20 cm 差异最显著,其中不同处理根系参数在0~10 cm 土层差异达到极显著($p<0.01$),且不同根系参数有相同结果,在10~20 cm 土层不同水分处理根系都存在显著差异($p<0.05$),而在20~30 cm、30~40 cm 土层各处理根系基本无显著差异,可见滴灌的高频小流量灌溉方式主要对湿润体内根系产生显著影响。在土壤下层40~100 cm,不同水分处理对根系生长有影响,其中T1充分水分处理与T3亏缺水处理存在显著差异($p<0.05$),而T2轻度亏缺水处理与其他处理的差异并不明显。可见,T1处理在土壤

表3 不同水分处理对立体种植农田根系分布的影响

Tab.3 Effect of different soil water treatments on root distribution

参数	处理	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm	50~60 cm	60~80 cm	80~100 cm	0~100 cm
根长密度/ ($\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$)	T1	3.53 ^A	3.05 ^a	1.94 ^a	1.47 ^a	0.88 ^b	0.63 ^b	0.34 ^b	0.06 ^b	2.09 ^a
	T2	2.68 ^B	2.80 ^{ab}	2.15 ^a	1.76 ^{ab}	0.99 ^{ab}	0.65 ^b	0.42 ^{ab}	0.14 ^a	1.99 ^{ab}
	T3	2.05 ^C	2.29 ^b	2.20 ^a	1.89 ^a	1.22 ^a	0.75 ^a	0.52 ^a	0.17 ^a	1.82 ^b
根体积密度/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	T1	1.1×10^{-2A}	7.8×10^{-3a}	5.2×10^{-3a}	4.0×10^{-3b}	3.6×10^{-3b}	2.8×10^{-3b}	1.9×10^{-3b}	2.1×10^{-4b}	5.4×10^{-3a}
	T2	9.4×10^{-3B}	6.5×10^{-3b}	5.1×10^{-3a}	4.6×10^{-3a}	3.9×10^{-3ab}	3.2×10^{-3ab}	2.2×10^{-3ab}	6.7×10^{-4ab}	5.0×10^{-3ab}
	T3	7.4×10^{-3C}	5.5×10^{-3c}	5.1×10^{-3a}	4.6×10^{-3a}	4.2×10^{-3a}	3.5×10^{-3a}	2.5×10^{-3a}	7.8×10^{-4a}	4.5×10^{-3b}
根表面积密度 ($\text{cm}^2\cdot\text{cm}^{-3}$)	T1	7.3×10^{-4A}	6.5×10^{-4a}	5.3×10^{-4a}	3.6×10^{-4a}	2.4×10^{-4b}	2.0×10^{-4b}	1.0×10^{-4b}	1.0×10^{-5b}	4.0×10^{-4a}
	T2	5.9×10^{-4B}	5.9×10^{-4ab}	5.0×10^{-4a}	3.9×10^{-4a}	2.9×10^{-4ab}	2.4×10^{-4ab}	1.2×10^{-4a}	4.0×10^{-5ab}	3.7×10^{-4a}
	T3	4.6×10^{-4C}	5.5×10^{-4b}	5.0×10^{-4a}	4.0×10^{-4a}	3.3×10^{-4a}	2.8×10^{-4a}	1.6×10^{-4a}	6.0×10^{-5a}	3.5×10^{-4a}
根重密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	T1	2.4×10^{-3A}	1.8×10^{-3a}	1.1×10^{-3a}	8.0×10^{-4a}	5.1×10^{-4b}	3.8×10^{-4b}	2.2×10^{-4b}	6.0×10^{-5b}	1.1×10^{-3a}
	T2	2.0×10^{-3B}	1.6×10^{-3ab}	1.1×10^{-3a}	8.8×10^{-4a}	6.2×10^{-4ab}	4.7×10^{-4ab}	3.2×10^{-4a}	1.2×10^{-4a}	1.0×10^{-3ab}
	T3	1.6×10^{-3C}	1.3×10^{-3b}	1.1×10^{-3a}	8.4×10^{-4a}	6.6×10^{-4a}	5.2×10^{-4a}	3.6×10^{-4a}	1.6×10^{-4a}	9.0×10^{-4b}

注:同列不同字母表示差异达5%显著水平。

上层根系生长最好,T2 处理存在一定的水分亏缺,影响了根系生长,T3 处理缺水程度增大,故对根系生长的影响程度也加大。

2.4 不同水分处理及不同生育期根系分布特征

通过累积根系曲线对不同水分处理根系在垂向累积分布的影响分析结果显示,在相同深度高水分处理根系累积分数总是大于低水分处理根系累积分数(图 6),比如 T1 处理 0~20 cm 土层的根量约占总根量 60%,T2 约占总根量的 50%,T3 约占总根量的 42%,差异非常明显。从回归得到的非线性模型参数(β)也可看出, β 值存在显著差异(表 4),T1、T2、T3 处理的 β 值分别为 0.948、0.956、0.962($p < 0.05$),可见随着灌水量减少、土壤含水率降低,农田吸水根系将往土壤下层生长,呈现随土壤水分的下降土壤下层根系比重提高的趋势; β 值与土壤平均含水率的关系显示,从 T1 处理到 T3 处理土壤平均含水率下降了 15%,而 β 值提高了 1.5%,可见利

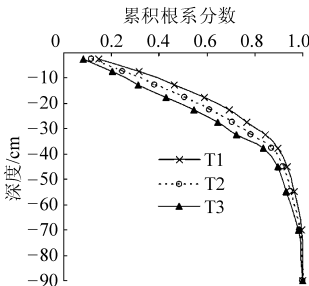


图 6 不同水分处理累积根系分布曲线特征
Fig.6 Curves of cumulative root distribution characteristics for different treatments

用累积根系分数能定量描述不同含水率对根系垂向分布的影响。

不同生育期立体种植农田根系在横向生长规律也可以用累积根系曲线的渐近式非线性模型进行定量分析,本文根据图 7 分析得到番茄套种玉米农田离番茄 25 cm 处是番茄玉米的横向分界点,本文将番茄 0~25 cm 范围由于根系以番茄为主称作番茄侧,将离玉米 0~35 cm 范围称作玉米侧。上文研究可知从 6 月 6 日到 7 月 21 日根系在横向方向扩展,在立体种植农田根系主要交叉区的根系比重呈增加趋势,不同生育期累积根系曲线也呈明显差异(图 7),从 6 月 6 日到 7 月 21 日累积根系分数也出现减少趋势,模型参数 β 值明显增大,呈显著差异($p < 0.05$)(表 4)。在 8 月 20 日由于番茄早已收获,番茄根系基本停止生长,故番茄侧 β 值无显著差异,但玉米侧根系仍在生长,且主要向垂向发展,故 β 值与 7 月 21 日比较呈下降趋势,可见玉米侧根系在横向方向呈收缩态势。

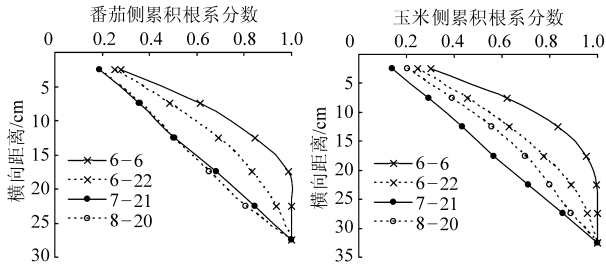


图 7 不同生育期番茄侧和玉米侧累积根系曲线特征
Fig.7 Curves of of cumulative root distribution characteristics in tomato and corn sides for different growth periods

表 4 不同水分处理及不同生育期累积根系曲线参数 β 值

Tab.4 Parameters (β) for different soil water and different growth periods

水分处理	β	标准差	R^2	番茄侧	β	标准差	R^2	玉米侧	β	标准差	R^2
T1	0.948 ^a	0.001	0.995	6-6	0.866 ^a	0.009	0.978	6-6	0.867 ^a	0.006	0.989
T2	0.956 ^b	0.002	0.986	6-22	0.904 ^b	0.006	0.978	6-22	0.914 ^b	0.005	0.977
T3	0.962 ^c	0.002	0.974	7-21	0.931 ^c	0.007	0.927	7-21	0.945 ^d	0.006	0.925
				8-20	0.934 ^c	0.007	0.922	8-20	0.930 ^c	0.004	0.971

3 结论

(1)立体种植农田不同作物侧及不同水分处理的土壤含水率呈显著差异。番茄侧含水率明显高于玉米侧含水率,平均高 12.47%;番茄侧或玉米侧膜内不同位置土壤含水率无显著差异;两侧未覆膜区含水率约是覆膜区含水率的 92%~93%,且存在显著差异;高灌溉定额处理平均土壤含水率高于低灌溉定额处理。

(2)立体种植农田不同生育期根系具有明显的交叉,分离变化规律,结果显示两作物根系在生育期呈现“不交叉—轻度交叉—完全交叉—轻度交叉”

变化规律。根系横向比重分析显示立体种植根系中心靠近番茄侧,玉米根量大于番茄根量。

(3)土壤含水率显著影响立体种植农田作物根系生长。滴灌条件下立体种植农田根系主要分布在 0~30 cm 范围,约占总根量的 60%~70%,其中根系密度最大出现在距表层 10 cm 内,之后呈线性下降;由于滴灌湿润范围主要集中在 0~30 cm 土层,故高水分处理在该区域根系生长量大于低水分处理,根长密度、根体积密度、根表面密度以及根重密度均有 T1>T2>T3 的规律,在 40 cm 以下呈相反趋势。

(4)累积根系分布曲线分析显示随着土壤水分

增加根系向土壤下层发展,随着生育期推进根系向作物中间发展,在生长后期玉米侧根系向土壤下层发展趋势。随着土壤含水率的降低,累积根系曲线模型参数 β 值逐渐增大;随着生育期的推进番茄侧、

玉米侧 β 值逐渐增大,而玉米侧在生长后期由于番茄侧土壤水分降低,整体根系向下发展趋势导致 β 值变小。

参 考 文 献

1 王仰仁,李明思,康绍忠. 立体种植条件下作物需水规律研究[J]. 水利学报,2003(7):90-95.
Wang Yangren, Li Mingsi, Kang Shaozhong. Efficient water use in strip intercropping production[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(7):90-95. (in Chinese)

2 刘翼浩,高旺盛. 集约持续农业工程技术[M]. 郑州:河南科学技术出版社,2000.

3 Zhang Fusuo, Li Long. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency [J]. Plant and Soil, 2003, 248(1-2): 305-312.

4 Jongrungrklang N, Toomsan B, Vorasoot N, et al. Classification of root distribution patterns and their contributions to yield in peanut genotypes under mid-season droughtstress [J]. Filed Crops Research, 2012, 127:181-190.

5 周青云,王仰仁,孙书洪. 根系分区交替滴灌条件下葡萄根系分布特征及生长动态[J]. 农业机械学报,2011,42(9):58-69.
Zhou Qingyun, Wang Yangren, Sun Shuhong. Distribution characteristic and growing dynamic of grape vine roots under alternate partial root zone dripirrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(9):58-69. (in Chinese)

6 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报,1993,38(20):1896-1899.

7 Bingham I, Wu L. Simulation of wheat growth using the 3D root architecture model SPACSYS: validation and sensitivity analysis [J]. European Journal of Agronomy, 2011, 34(3):181-189.

8 Green S R, Kirkham M B, Clothier B E. Root uptake and transpiration:from measurements and models to sustainable irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1-2):165-176.

9 Coelho M B, Villalobos F J, Mateos L. Modeling root growth and the soil-plant-atmosphere continuum of cotton crops [J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(2): 99-118.

10 Radersma S, Kong C. Spatial distribution of root length density and soil water of linear agroforestry systems in sub-humid Kenya: implications for agroforestry models [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 188(1-3): 77-89.

11 刘晓丽,汪有科,马理辉,等. 密植枣林地深层土壤水分垂直变化与根系分布关系[J]. 农业机械学报,2013,44(7):90-97.
Liu Xiaoli, Wang Youke, Ma Lihui, et al. Relationship between deep soil water vertical variation and root distribution in dense Jujube plantation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7):90-97. (in Chinese)

12 孙景生,康绍忠,张寄阳,等. 霍泉灌区冬小麦夏玉米高产节水灌溉制度[J]. 农业工程学报,2000,16(4):50-53.
Sun Jingsheng, Kang Shaozhong, Zhang Jiyang, et al. Schedules of irrigation for the high-yield and water-saving cultivation of winter wheat and summer maize in Huoquan irrigation district of Shanxi province [J]. Transactions of the CSAE, 2000,16(4): 50-53. (in Chinese)

13 Mushagalusa G N, Ledent J F, Draye X. Shoot and root competition in potato/maize intercropping effects on growth and yield [J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 64(2):180-188.

14 Gao Y, Aiwang D A, Qiua X, et al. Distribution of roots and root length density in a maize soybean strip intercropping system [J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(1):199-212.

15 Sampathkumar T, Pandian B J, Mahimairaja S. Soil moisture distribution and root characters as influenced by deficit irrigation through drip system in cotton-maize cropping sequence[J]. Agricultural Water Management, 2012, 103: 43-53.

16 Gale M R, Grigal D F. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successionalstatus [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1987, 17(8):829-834.

17 Neykova N, Obando J, Schneider R, et al. Vertical root distribution in single-crop and intercropping agricultural systems in Central Kenya [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, 174(5):742-749.

18 胡晓棠,陈虎,王静,等. 不同土壤湿度对膜下滴灌棉花根系生长和分布的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(5):1682-1689.
Hu Xiaotang, Cheng Hu, Wang Jing, et al. Effects of sol water content on cotton root growth and distribution under mulched drip irrigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009,42(5):1682-1689. (in Chinese)

Root Distribution in Strip Intercropping Field under Different Growth Period and Different Soil Water

Li Xianyue Shi Haibin Gong Xuwen Peng Zunyuan Li Zhen Yan Jianwen
(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: It is the primary factor to influence the completion and utilization efficiency of water and fertilizer for the root distribution in strip intercropping field. The effects of 3 treatments of high, middle and low irrigation quotas on soil water of different positions and root distribution were studied, and the characteristics of root distribution in different growth period were investigated, as well as the pattern of root distribution in vertical and horizontal direction based on cumulative root distribution curves. The results show that the average soil water in tomato side is obviously higher than corn side, and the soil water under mulch is also obviously higher than that under outside mulch; however, there is no significant difference for the soil water of different positions under mulch. With crop growth, there are the pattern of “no cross—small cross—full cross—small cross” for roots of tomato and corn; 60% ~ 70% root concentrates in 0 ~ 30 cm soil, and the quantity of total roots and the roots in 0 ~ 30 cm soil are all increasing with the soil water, whatever root length density, root surface area density, root volume density and root weight density, yet there is the inverse for root distribution in 40 ~ 100 cm soil. The cumulative root distribution curves show that the root grows down with the soil water increase and the root grows to the district among crops with crop growth except for corn in the last stage. The root distribution is large variation in different growth periods, and the soil water is also main factor to influence root distribution in strip intercropping field.

Key words: Strip intercropping Root distribution Soil water Cumulative root distribution curve

(上接第 133 页)

Pilot Preparation Technology and Properties of New Biochar-based Nitrogenous Fertilizers

Zhang Wen Geng Zengchao He Xusheng Chen Xinxiang
(College of Nature Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China)

Abstract: Three kinds of biochar-based nitrogenous fertilizer (BBNF), which were composited with ammonium nitrate by simple-blending process, adsorbent process and reactive process, respectively, were produced. After that properties of the new BBNF were determined and their sustained release characteristics were evaluated. The results show that the pH values of all the three BBNF are all lower than that of the raw biochar. The BBNF prepared by reactive process loads maximum ammonium nitrate, followed by the BBNF prepared by adsorption process; the least is the BBNF prepared by blending process. The retention capacity of BBNF prepared by reactive process is better than the other two. The cumulative release rate of the three BBNF in aqueous solution is in line with the “S”-type release model. Compared with ammonium nitrate, all of the three BBNF have effectively controlled-release effect on nitrogen, and the BBNF produced by reactive process has the best effect.

Key words: Biochar Biochar-based nitrogenous fertilizers Preparation technology Property analysis