

再生水分根交替滴灌对马铃薯根-土系统环境因子的影响研究

乔冬梅^{1,2}, 齐学斌¹, 樊向阳¹, 李平¹, 胡超¹, 樊涛¹, 黄仲冬¹, 赵志娟¹

(1.中国农科院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453003; 2.中国农科院研究生院, 北京 100081)

摘要:分根交替(PRD)滴灌技术是很有节水潜力的灌水技术。利用再生水,采用分根交替滴灌技术对马铃薯根长密度、根重密度及土壤水盐的空间分布影响进行了研究。结果表明,马铃薯根系主要分布在0~60 cm的土层内,以植株为中心,呈放射状沿不同方向减小。通过研究所建马铃薯根长密度的空间分布函数能较好地反映根系的三维分布趋势。PRD灌溉可以刺激马铃薯根系生长,水分利用效率提高39%。进行PRD灌溉时应重点考虑滴头位置处及垄坡上的水盐变化,最好能起到节水控盐的双重作用。再生水PRD地下滴灌是对传统地表滴灌的优化和提升。

关键词:地下滴灌;分根交替灌溉(PRD);根长密度(*RLD*);根重密度(*RWD*);土壤水盐

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)11-2359-09

Effect of Partial Root Zone Drying Subsurface Drip on the Environmental Factors of Potato Root-soil System by Reclaimed Water Irrigation

QIAO Dong-mei^{1,2}, QI Xue-bin¹, FAN Xiang-yang¹, LI Ping¹, HU Chao¹, FAN Tao¹, HUANG Zhong-dong¹, ZHAO Zhi-juan¹

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Partial root zone drying (PRD) subsurface drip irrigation is a very potential water-saving technique. The effect of PRD subsurface drip irrigation on spatial distributions of potato root length density (*RLD*), root weight density (*RWD*), soil water and soil salt was studied by using reclaimed water. The results showed the soil layer of 0~60 cm was the main root layer of potato, the roots decreased and kept emission in different direction around the plant. The spatial distribution function of potato root length density could simulate the root distribution trend in 3D coordinate. PRD subsurface drip irrigation stimulated potato root growth and root density. Irrigation water use efficiency was increased by 39% under PRD subsurface drip irrigation. Soil water moisture and salt of emitter and middle of ridge slope should be taken into account by PRD irrigation in order to save irrigation water amount and control salinity. Water saving and salinity controlling were the dual-goal in PRD subsurface drip irrigation.

Keywords: subsurface drip irrigation; partial root zone drying; root length density; root weight density; soil water and salt

我国水资源时空分布及水土资源组合不均,干旱缺水呈不断加剧趋势。为了确保农业生产,必须寻求最优节水灌溉技术。分根交替(Partial Rootzone Drying,

PRD)灌溉是近年发展起来的一种节水灌溉技术^[1]。PRD灌溉使土壤垂直剖面或水平面的某个区域保持干燥,另一部分区域保持湿润,使不同区域的根系交替经受一定程度的水分胁迫锻炼,产生根源信号脱落酸(ABA),进而调节气孔导度,减少作物蒸腾,而处于湿润区域的根系吸收水分保证作物光合。PRD灌溉可在不牺牲作物光合产物积累的同时减少蒸腾耗水,同时还可减少棵间土壤蒸发及深层渗漏,最终达到提高水分利用效率的目的^[1-2]。

目前,PRD灌溉已在葡萄、苹果、梨和玉米等作

收稿日期:2009-03-13

基金项目:欧盟第六框架项目(PL023168SAFIR);国家自然科学基金资助项目(50809074);国家科技支撑计划项目(2006BAD17B02);中国农业科学院农业资源与农业区划研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2008-16)

作者简介:乔冬梅(1978—),女,内蒙古包头人,博士研究生,助研,主要从事水资源与水环境研究。E-mail:Qiaodongmei78@163.com

通讯作者:齐学斌 E-mail:qxb6301@yahoo.com.cn

物上进行了研究和应用^[1,3],应用到马铃薯上的研究相对较少。在中国北方,马铃薯一般采用垄畦灌,这种灌水方式容易造成水分深层渗漏,脊垄顶部土壤却处于干旱或半干旱状态,大大降低了灌溉水分利用效率。2006 年刘福来将这种灌水方式应用到马铃薯上,并得出 PRD 灌溉能刺激马铃薯根系生长,减小光合速率,气孔导度和蒸发蒸腾速率以及叶面积指数和生物量^[4-5]。在作物-土壤系统研究中,根系生长规律及水土因子变化是核心内容,尤其在水分亏缺的情况下^[6],已有很多学者对地表滴灌下的根系分布进行了研究。Kang Yaohu 对不同频率地表滴灌马铃薯的根系二维分布进行了研究,得出表层 0~10 cm 是根系密集区,而且根重密度较根长密度能更好地表征根系分布^[7]。地表滴灌和地下滴灌(滴灌管埋深为地下 45 cm)根长密度的差别表现在,地下滴灌的最大根长密度在 30~45 cm 的深度,而地表滴灌的最大根长密度集中在表层 0~30 cm 的土层^[8]。目前对地下滴灌根系分布的研究主要针对一维和二维分布进行^[9-10],针对再生水 PRD 地下滴灌马铃薯根系三维分布的研究鲜见报道。本研究针对再生水 PRD 地下滴灌根-土系统的根系三维分布及土壤环境效应进行研究,其目的是探求再生水 PRD 地下滴灌对马铃薯根长密度、根重密度和水盐在三维分布上的影响,分析再生水分根交替地下滴灌对作物-水-环境的影响,对发展先进和环境友好的灌溉技术有重要的意义,同时也是对再生水灌溉技术的补充。

1 试验材料与方法

1.1 试验区概况

试验田设在中国农业科学院农田灌溉研究所洪门试验场,地处 N35°19',E113°53',海拔 73.2 m。多年平均气温 14.1 °C,无霜期 210 d,日照时数 2 398.8 h。多年平均降水量 588.8 mm,多年平均蒸发量 2 000 mm。土壤干容重为 1.55 g·cm⁻³,田间持水率为 24%(质量含水量),土壤质地为砂壤土。

1.2 试验设计

供试作物为马铃薯(津引 8 号),于 2007 年 3 月 29 日播种,为了确保出苗,播种后对全部处理进行充分灌溉。4 月 26 日至 5 月 6 日为出苗期,5 月 9 日开始 PRD 灌溉处理,6 月 28 日收获。总生育期长 90 d。试验设计 2 个处理,分根交替(PRD)灌溉和充分灌溉(Fully irrigation, FI)。灌溉系统采用耐特菲姆公司的自动灌溉控制系统(由加压泵,过滤设备,施肥系统,

田间管网,滴灌系统等组成)。

充分灌溉灌水量 R 计算公式为 $R=K_c \times ET_0$ (K_c 为作物系数(经验数据), ET_0 为参考作物需水量)。PRD 处理的灌水量为充分灌溉的 70%,由智能灌溉系统控制,灌水时间与充分灌溉处理一致,每个处理 3 次重复。灌水方式为地下滴灌,滴灌带埋设在脊垄顶部用土层覆盖,土层厚度 7 cm,并用小夹子固定,见图 1。滴灌管直径 17 mm,管壁厚 1.2 mm。滴头之间的距离为 30 cm(充分灌溉:1 条滴灌管,滴灌管滴头之间距离为 30 cm;PRD 灌溉:共 2 条滴灌管,每条滴灌管滴头之间的距离为 60 cm,2 条滴灌管之间用小夹子固定,使相邻 2 滴头之间的距离控制到 30 cm,见图 2。),滴头流速为 1.0 L·h⁻¹,灌溉水质为再生水(二级处理污水),取自新乡市污水处理厂,灌溉水水质见表 1。分别在垄上,垄坡和垄沟位置埋设 TDR 探头(以色列提供整套设备 TDR100,整个生育期内探头一直埋

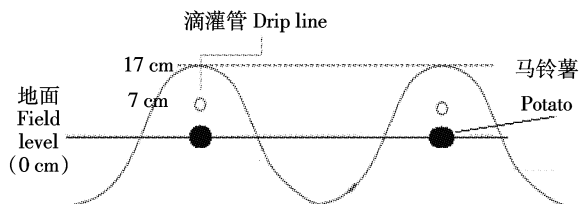


图 1 滴灌管及马铃薯布置图

Figure 1 The position of drip pipe and potato

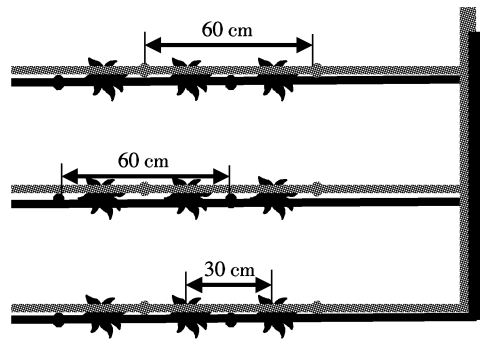


图 2 PRD 滴灌系统

Figure 2 Drip system of PRD

表 1 再生灌溉水水质测定指标

Table 1 The water quality index of reclaimed irrigation water

日期	硝态氮/ mg·L ⁻¹	铵态氮/ mg·L ⁻¹	pH	EC/dS·m ⁻¹	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹
2007-5-9	3.13	24.35	7.79	2.52	36.26	0.25
2007-5-20	4.41	42.44	7.65	2.51	63.61	0.18
2007-6-10	5.81	16.71	7.60	2.36	65.47	0.23

于土壤中), 深度为 0~20 cm 和 0~40 cm, 充分灌溉 TDR 探头埋到马铃薯种植处, PRD 灌溉埋设在滴头位置和马铃薯种植处(图 3, 图 4)。试验小区宽 6 m, 长 11.7 m。每个小区种植马铃薯 8 行, 行距 75 cm, 株距 30 cm, 脊垄高 30 cm。播前施复合肥和尿素, 折合 N、P、K 的含量分别为 168.9、58.2、58.2 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 5 月 17 日追尿素和 KH_2PO_4 , 折合 N、P、K 的含量分别为 28.5、16.2、16.2 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。各小区施肥情况一致。播前测定土壤农化性状分析结果, 见表 2。试验田内设有农田微气象站, 定时测定各气象因子。

1.3 观测项目及方法

灌溉水中硝态氮、铵态氮采用流动分析仪测定(德国 BRAN LUEBBE AA3), pH 值采用 PHS-1 型酸度计测定, 电导率采用电导仪测定, TN 采用过硫酸钾氧化流动分析仪法, TP 采用硫酸、高氯酸氧化流动分

析仪法。

土壤中硝态氮、铵态氮分析方法: 称取鲜土样 10 g, 加入 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$ 溶液 50 mL, 振荡 0.5 h 后, 静置 1 h, 取上清液, 采用流动分析仪测定。全氮采用硒粉硫酸铜、硫酸消解流动分析仪法, 全磷采用高氯酸、硫酸溶流动分析仪法, 水解氮采用扩散吸收法, 速效磷采用碳酸氢钠法, 速效钾采用乙酸铵提取法, 有机质采用低温外热重铬酸钾氧化比色法。

每 2 d 观测 1 次土壤含水率, 采用 TDR 系统测定。土壤 EC 采用土水比 1:5 的浸提液测定, 灌溉水的 EC 直接测定。灌水量及时间采用自动灌溉系统控制和记录, 施肥采用自动灌溉系统进行。

收获前 2 周(2007-6-12)按三维坐标取样, 测定各处理马铃薯根长、根重及土壤盐分。采用大口径根钻取样, 钻头长 15 cm, 直径 7 cm。步骤如下:

用铁锹在距作物 7.5 cm 处打剖面, 剖面深度大约 100 cm。用根钻按三维网格坐标取样, 即 X、Y、Z 方向。X 方向: 沿脊垄方向, 取样点坐标分别为 $x=0, x=15$ (从植株前 7.5 cm 处取第 1 个样, 土样长度为 15 cm, 即 $x=0$, 接着取第 2 个样, 土样长度仍然为 15 cm, 即 $x=15$); Y 方向: 水平垂直脊垄方向, 取样点坐标分别为 $y=0, 18.75, 37.5$ cm(即脊垄顶端 T, 脊垄斜坡中点 M, 沟底 B); Z 方向: 深度方向, 取样点坐标分别为 $z=15, 25, 35, 45, 55, 65, 75$ cm(图 5)。

取回土样后先用清水浸泡数小时, 倒入孔径为

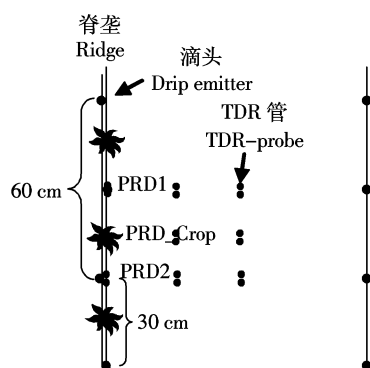


图 3 PRD 处理 TDR 埋设俯视图

Figure 3 Top view of TDR probe of PRD treatment

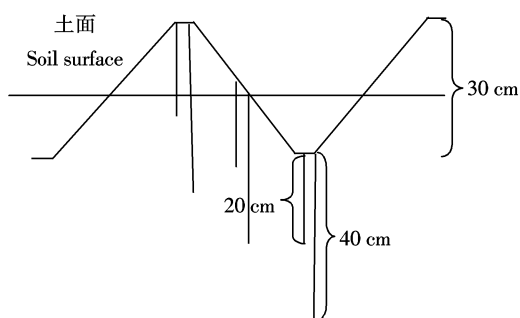


图 4 PRD 处理 TDR 埋设剖面图

Figure 4 Cutaway diagram of TDR probe of PRD treatment

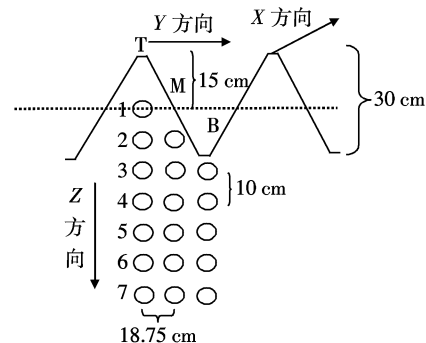


图 5 根系取样图

Figure 5 Soil scheme of taking root samples

表 2 土壤农化性状分析结果

Table 2 The analysis results of soil agricultural chemistry property

深度/cm	硝态氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	铵态氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	水解性氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	土壤有机质/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	EC/ $\text{dS} \cdot \text{cm}^{-1}$
0~20	14.10	0.34	631.2	631.2	113.53	20.03	258.99	7.73	7.81	0.36
20~40	27.80	0.13	384.85	384.85	81.95	7.52	133.42	4.01	7.71	0.38
40~60	27.73	0.24	290.55	290.55	59.40	5.47	120.34	3.48	7.88	0.35

0.25 mm 的土壤标准筛冲洗,再用清水漂洗,将洗净的根样置于 1% 刚果红溶液中浸泡,剔除杂质,采用网格交叉法测定根长^[11-12],烘干后用万分之一的天平称重。

2 结果与分析

2.1 整个生育期内含水率分析

作物生长及环境变化是外界条件与自身因素长期共同作用的结果,因此本研究给出整个生育期内不同处理不同位置的含水率变化。图 6 给出 PRD 处理两个滴头 (PRD1, PRD2, 具体位置见图 3)、马铃薯种植处 (PRD_crop, 见图 3) 及 FI 处理马铃薯种植处 0~40 cm 的土壤体积含水率 (0~20 cm 与 0~40 cm 规律相似)。前期各处理的含水率基本一致,4 月 18 日对各小区进行灌溉 (为确保出苗未进行 PRD 处理),5 月 9 日开始进行 PRD 处理。

由图 6 可知,整个生育期内无论是垄上、垄坡还是垄沟都表现出 FI 处理的含水率高于 PRD 处理,这是由灌水量不同所致。对比 PRD 处理滴头 1 (PRD1)、滴头 2 (PRD2) 和马铃薯种植处 (PRD_crop) 的土壤含水率可知,在进行实施 PRD 灌溉之前 (5 月 9 日之前),因作物生长吸收水分,使得作物种植处 (PRD_crop) 的含水率较低。实施 PRD 灌溉之后,PRD1 和 PRD2 的含水率交替起伏变化,PRD_crop 处的含水率处于两者之间,这是由于 PRD 交替灌溉,使得作物种植处的土壤含水率交替受到两个滴头处含水率变化的影响,处于一个中等含水率水平。这一规律在垄上表现最明显 (图 6a)。可见,PRD 灌溉在节水 30% 的情况下作物种植处的土壤含水率不会处于极度干旱状态。

从图 6 中还可以看出,在整个生育期内 FI 处理不同位置处的含水率一直保持一个较高的水平,而 PRD 处理整个生育期内垄沟的含水率最高,垄坡次之,垄上最小,这也说明 PRD 处理对脊垄上的含水率影响最大。FI 处理和 PRD 处理含水率的差异在垄上最明显,差距最大,垄坡次之,垄沟最小。再次说明了 PRD 灌溉对土壤水分的影响在脊垄中心位置最大,且随水平距离的增加影响程度减小,而马铃薯根系也主要集聚在脊垄位置,因此脊垄中心位置处含水率状况是进行节水灌溉的关键控制指标。

2.2 根长密度在三维方向上的分布规律及分布函数

以 PRD 处理为例分析马铃薯根系在三维坐标上的分布规律,由图 7 可知,马铃薯根系主要分布在 0~

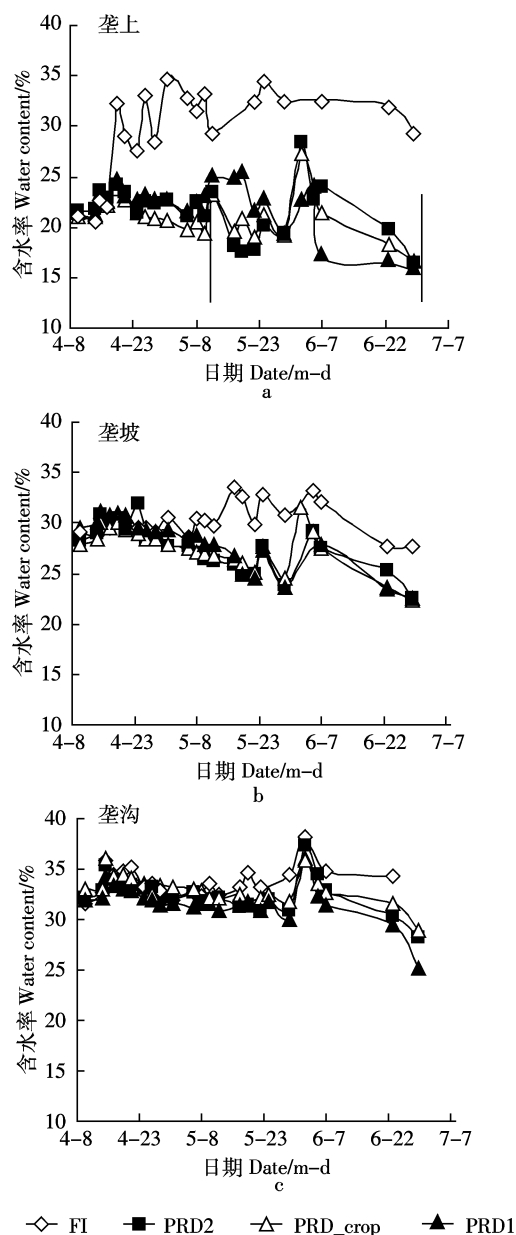


图 6 含水率变化图

Figure 6 Figure of water content

60 cm 土层内。沿 x 轴方向, $x=0$ 处的根长密度大于 $x=15$ 处;沿 y 轴方向, $y=0$ 处 (脊垄上) 的根长密度最大, $y=18.75$ 处 (坡上) 次之, $y=37.5$ 处 (沟底) 最小, 即随 y 坐标的增加, 根长密度呈减少的趋势;在 z 方向, 马铃薯根长密度随深度的增加而减少。总体规律是以植株为中心, 呈放射状沿不同方向减小。

为了减少田间采样的工作量, 也是为了使马铃薯根系在三维方向上的分布规律更形象, 本研究根据马铃薯根长密度的空间分布规律, 假定马铃薯根长密度分布函数为指数形式 (初步拟合分析所得结论), 具体表

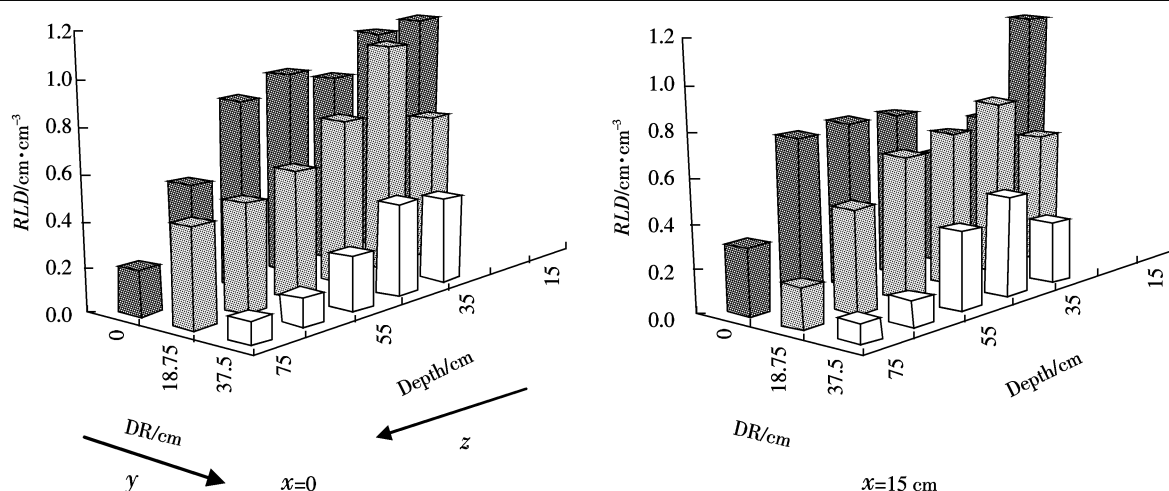


图 7 PRD 不同坐标处根长密度分布

Figure 7 RLD distribution of PRD treatment in different coordinate

达式如下:

$$RLD(x, y, z) = e^{a_0 + a_1(x+15) + a_2(y+18.75) + a_3z} \quad (1)$$

式中 $RLD(x, y, z)$ 为根长密度, $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$; x 为水平方向(沿脊垄方向), y 为垂直方向(水平垂直脊垄方向), z 为土层深度方向; a_0, a_1, a_2, a_3 均为拟合系数。考虑到坐标点为零对拟合有影响, 本研究将 x 坐标加 15, y 坐标加 18.75, 如公式(1)所示。

将公式两边取对数线性化后, 进行多元线性回归分析, 经方差分析, 相关系数均大于 0.83, 显著水平 $\alpha=0.05$ 。拟合结果见下式:

$$RLD(x, y, z) = e^{1.195 - 0.00574(x+15) - 0.02285(y+18.75) - 0.02053z} \quad (2)$$

实测值和模拟值对比结果如图 8 所示, 可见在三维坐标内所建模型能基本反映根长密度分布趋势。

2.3 不同处理根长密度分析

对比 PRD 处理和 FI 处理可知(图 9), 总体上 PRD 处理的根长密度大于 FI 处理, 但在 $x=0, y=0; x=15,$

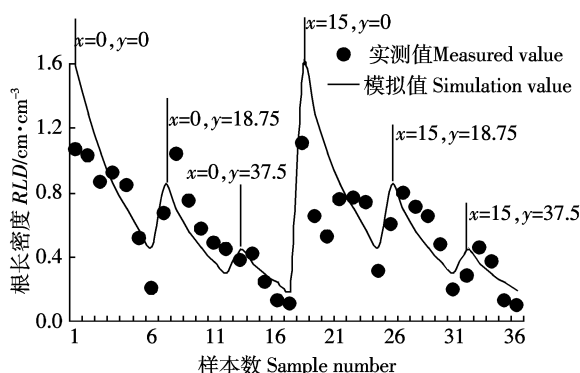


图 8 根长密度三维坐标实测值和模拟值对比

Figure 8 RLD comparison between measured value and simulated value in 3D coordinate

$y=0$ 坐标处(图 9a,d), 45~55 cm 为分界层, 这一层以上 FI 处理大于 PRD 处理, 以下 PRD 处理大于 FI 处理, 这是根系的向水性所致, FI 处理的水分充足根系主要分布在表层土壤中, 而 PRD 处理存在一定的水分亏缺, 根系为吸收水分向更深更远的方向生长, 因此, 除了 $y=0$ 坐标处的表层土壤, 其他坐标处 PRD 处理的根长密度均大于 FI 处理。可见 PRD 灌溉所产生的水分亏缺能刺激马铃薯根系生长, 增加根部生物量, 进而增加根系对土壤水分和养分的吸收量。

2.4 不同处理根重密度分析

PRD 处理根重密度在三维坐标上的分布规律及分布函数与根长密度相似(图 10, 图 11), 仍然是以植株为中心, 呈放射状沿不同方向减小。两处理间的对比结果也与根长密度相似(图 11), 只有 $x=15, y=0$ 坐标处(图 11d)与根长密度的规律不同, 这可能是由于这一坐标处某些根系较粗所导致的差异。因此, 在不强调根系吸水, 仅侧重研究作物生物量的情况下, 可以采用根重密度来分析根系生长发育状况^[7]。

2.5 土壤 EC 分析

在节水 30% 的情况下, PRD 地下滴灌有利于马铃薯根系生长, 本研究分析了土壤盐分的三维分布, 图 12 和图 13 分别给出了 FI 和 PRD 处理的土壤 EC 分布, 其中 $x=0$ 为种植马铃薯处, $x=15$ 为滴头所在处(坐标同上文中根系取样三维坐标), 从图中可以看出, 沿 Y 轴方向(水平垂直脊垄方向), FI 处理土壤盐分随水平距离的增加而减小, 即距离脊垄中心越远土壤盐分值越小, 且土壤 EC 变幅也随水平距离的增加而减小。对于 PRD 处理, $x=0$ 处土壤盐分变幅随水平

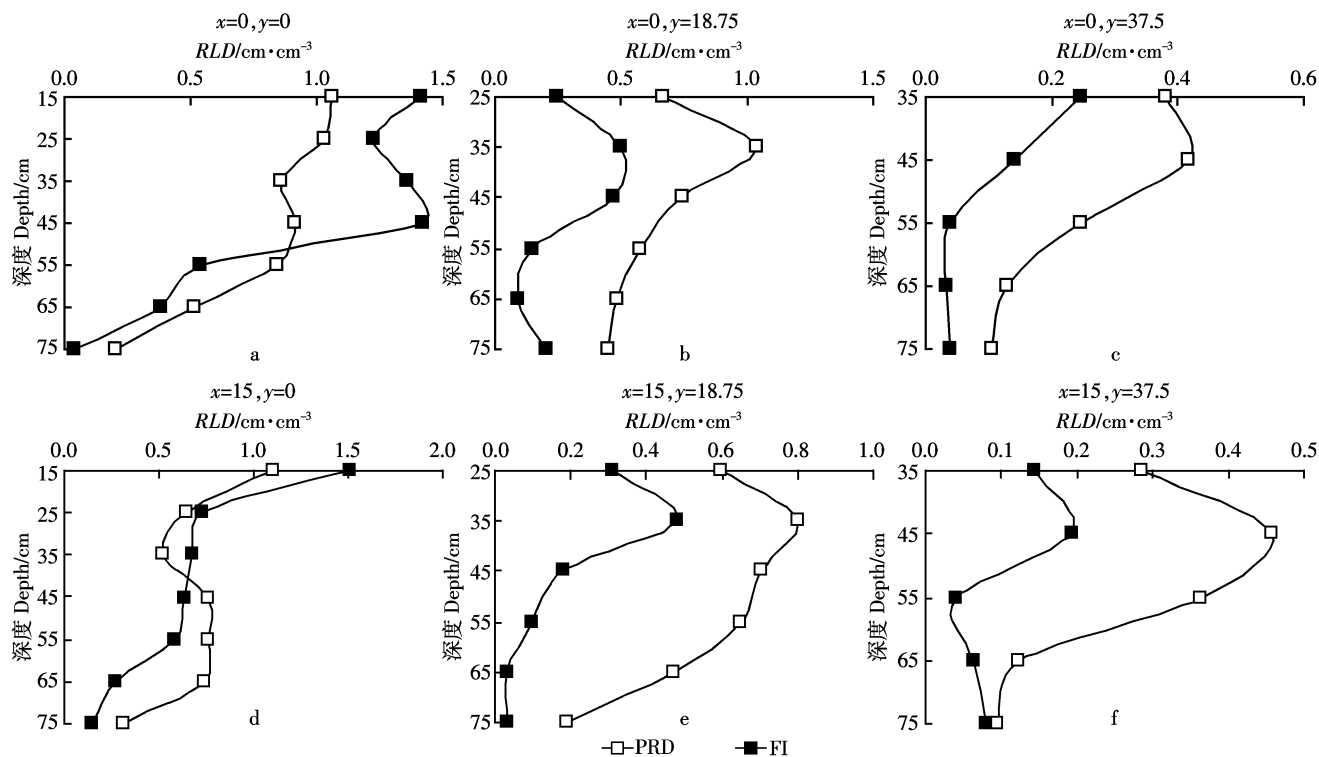


图9 PRD和FI处理根长密度对比分析

Figure 9 RLD comparison between PRD treatment and FI treatment

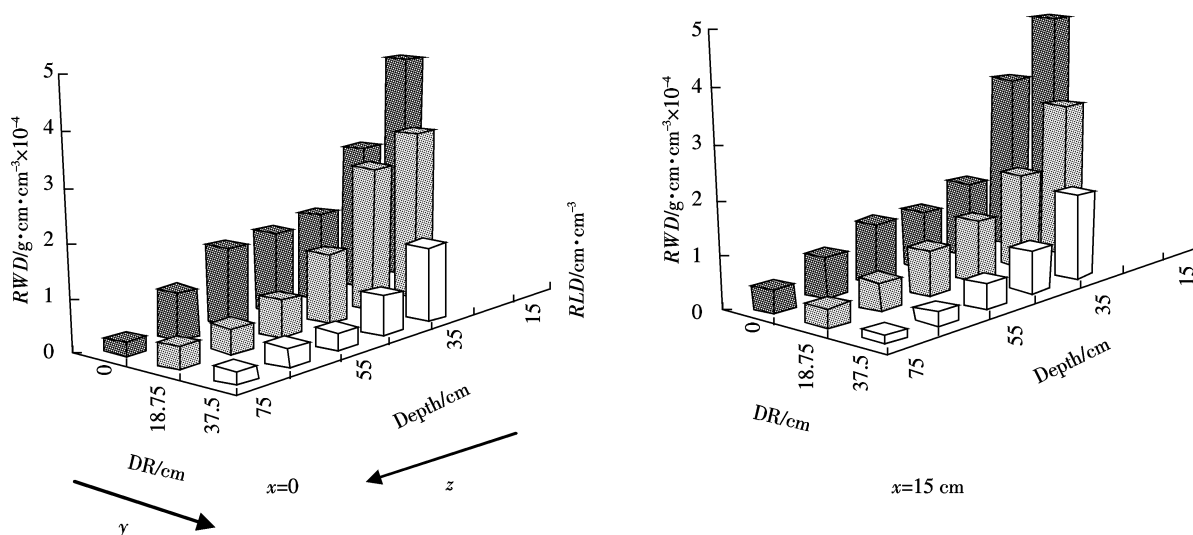


图10 PRD处理不同坐标处根重密度分布

Figure 10 RWD distribution of PRD in different coordinate

距离的增加而减小, $x=15$ 土壤 EC 最大值在 $y=18.75$ 处, 这主要受两个因素的影响, 首先, PRD 处理灌水量小, 不能起到很好的淋洗作用, 使得土壤盐分在水平方向交替运移, 导致了盐分聚集到中间位置。其次, 受 PRD 灌水方式的影响, 由于交替灌溉使土壤部分根区干旱, 在干旱时段内, 土壤盐分受土面蒸发的影响向上层运移, 而在滴灌湿润时段, 受水分淋洗的影

响向下层运移, 使得 PRD 处理 $x=15$ 坐标处盐分主要聚集在垄坡位置, 即 $y=18.75$ 处。

无论是 $x=0$, 还是 $x=15$ 处, PRD 处理和 FI 处理土壤 EC 值均随土层深度的增加而减小, 即表层最大, 75 cm 处最小。土壤 EC 的变幅随深度的增加而减小, 0~40 cm 的土层内 EC 值较大, 且变幅较大, 40~75 cm 土层内变幅较小, 这是由于表层土壤水分时空

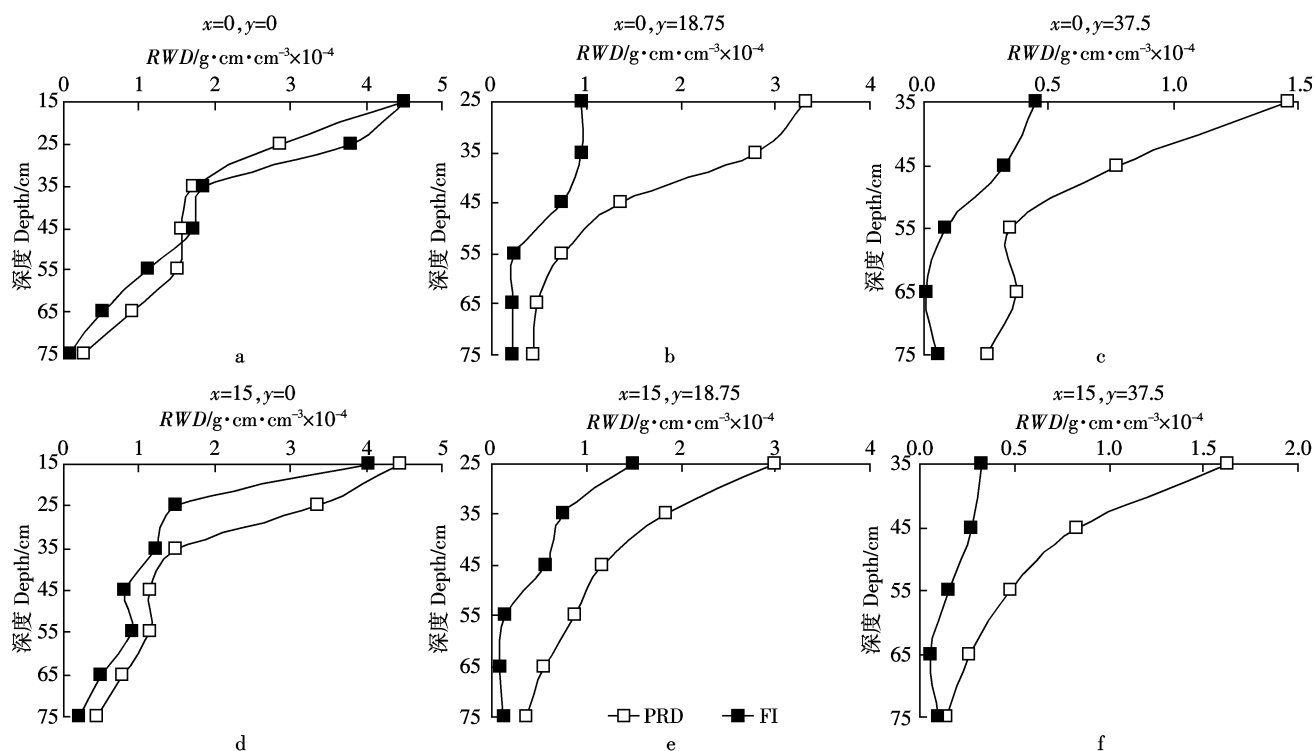


图 11 PRD 和 FI 处理根重密度对比分析

Figure 11 RWD comparison between PRD treatment and FI treatment

变异性较大所致。相同深度,滴头处的 EC 稍大于作物种植处,即 $EC_{x=15} > EC_{x=0}$,这是由于水、盐首先经滴头进入土壤,然后再向其他方向运移,滴头处土壤盐分滞留最多。对比 PRD 处理和 FI 处理可知,相同深度内,FI 处理的盐分值小于 PRD 处理,这是由于 FI 处理灌水量较 PRD 处理大,使得 FI 处理的土壤盐分淋洗效果较 PRD 处理的明显。综上所述,PRD 灌溉对土壤盐分的影响在滴头和垄坡处表现最明显,因此进行 PRD 灌溉时应重点考虑这两个位置处的盐分分布变化。

3 结论与讨论

水资源紧缺使节水灌溉成为将来农业发展的主流,地下滴灌与地表滴灌相比有其独特的优势,将 PRD 灌溉与地下滴灌结合是一种比较优化的节水技术。以往的研究是分别针对清水条件下 PRD 灌溉和 PRD 地表滴灌进行的,而且仅从地上作物生理及发育指标方面进行了研究,而再生水灌溉条件下将 PRD 灌溉与地下滴灌技术相结合的研究目前还很薄弱,特别是针对土-根系统环境因子在三维空间上分布的研究鲜见。本研究分析了再生水 PRD 地下滴灌对马铃薯根长密度、根重密度、土壤水盐在三维空间

分布上的影响。

(1)PRD 处理对垄上的土壤水分影响最大,且随水平距离的增加影响减小,因马铃薯根系主要集聚在垄位置,因此垄中心位置处土壤含水率的控制是进行节水灌溉的关键问题。

(2)通过对根系分析研究得出,马铃薯根系主要分布在 0~60 cm 的土层内。以植株为中心,呈放射状沿不同方向减小。基于马铃薯根长密度空间分布规律所建立的马铃薯根长密度的空间分布函数,能基本反映根长密度在三维坐标内的分布趋势。对比不同处理得出,除了 $y=0$ 坐标的表层土壤,其他坐标处 PRD 根长密度大于 FI 处理,由此证明,PRD 灌溉所产生的水分亏缺能刺激马铃薯根系生长。这与 2000 年梁宗锁得出的隔沟交替灌溉能提高玉米 40 cm×40 cm×60 cm 土体内的根密度的结论一致^[13]。在侧重研究作物生物量的情况下,可采用根重密度来分析说明根系生长发育状况^[7]。

(3)通过对土壤盐分的分析得出,沿水平方向,FI 处理土壤盐分随水平距离的增加而减小,变幅也随水平距离的增加而减小。PRD 处理滴头处盐分主要集聚在垄坡位置。PRD 处理和 FI 处理土壤 EC 值和变幅均随土层深度的增加而减小。相同深度,FI 处理的

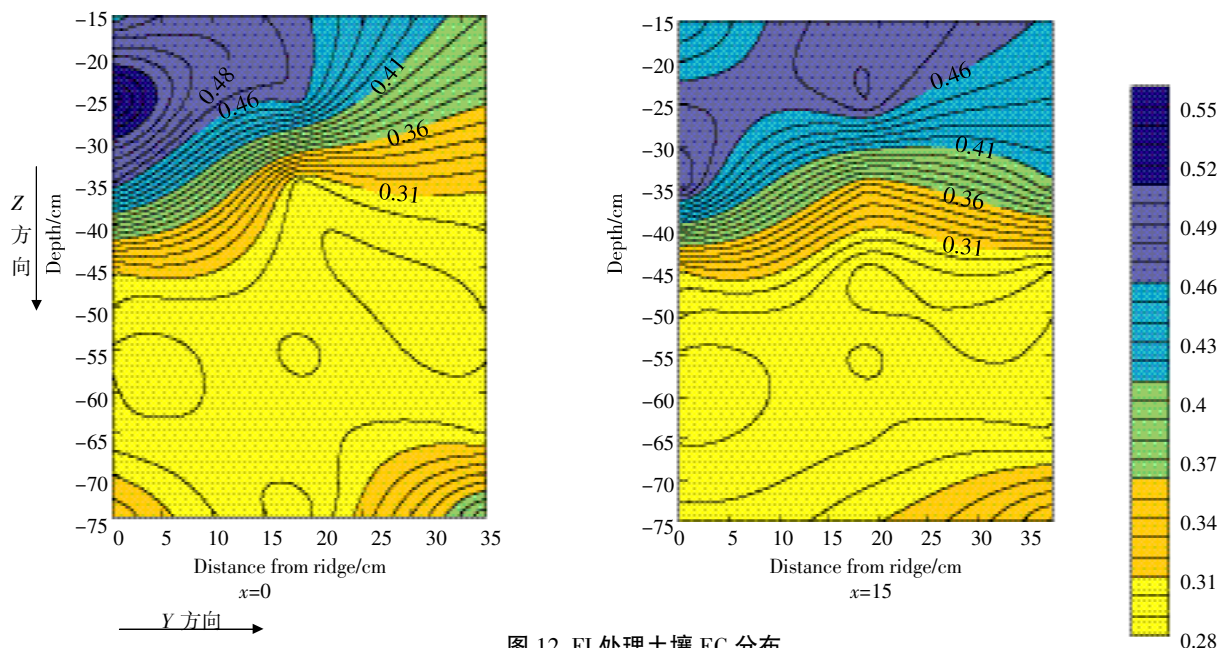


图 12 FI 处理土壤 EC 分布

Figure 12 EC distribution of FI treatment

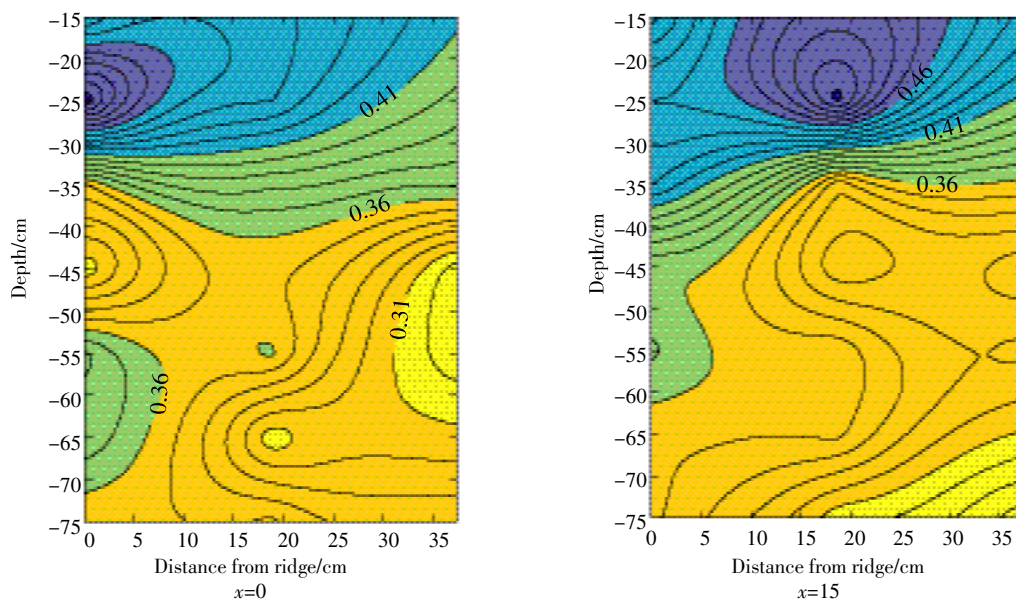


图 13 PRD 处理土壤 EC 分布

Figure 13 EC distribution of PRD treatment

盐分值小于 PRD 处理, 滴头处的 EC 稍大于作物种植处。最终得出 PRD 灌溉对土壤盐分的影响在滴头和垄坡处表现最为明显, 因此在进行 PRD 灌溉时应考虑其对土壤环境的影响。由水盐变化综合分析得出, 进行 PRD 灌溉时应重点考虑脊垄上滴头位置处及垄坡上的水盐变化, 防止灌溉对土-根环境造成不必要的污染, 达到节水控盐的双重目的, 至于如何控盐还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Kang S Z, Zhang J H. Controlled alternate partial root-zone irrigation; its physiological consequences and impact on water use efficiency[J]. *J Exp Bot*, 2004, 55: 2437-2446.
- [2] Dry P R, Loveys B R, Doring H. Partial drying of the rootzone of grape. 2. Changes in the patterns of root development[J]. *Vitis*, 2000, 39: 9-12.
- [3] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 等. 控制性分根交替灌水对作物水分利用

- 率的影响及节水效应[J]. 中国农业科学, 1998, 31(5):88-90.
- LIANG Zong-suo, KANG Shao-zong, SHI Pei-ze, et al. Effect on water use efficiency and water-saving by controlled root-divided alternative irrigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31(5):88-90.
- [4] Liu Fulai, Shahnazari Ali, Mathias N. et al. Effects of deficit irrigation (DI) and partial root drying (PRD) on gas exchange, biomass partitioning, and water use efficiency in potato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, 109:113-117.
- [5] Davies W J, Hartung W. Has extrapolation from biochemistry to crop functioning worked to sustain plant production under water scarcity?[C] //Proceeding of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia, 2004.
- [6] Asseng S, Ritchie J T, Smucker A J M, et al. Root growth and water uptake during water deficit and recovering in wheat[J]. *Plant and Soil*, 1998, 201:265-273.
- [7] Kang yaohu, Wang fengxin, Liu shiping. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and root distribution of potato in north china plain[J]. *An ASAE Meeting Presentation*, 2002, July:28-31.
- [8] Phene C J, Davis K R, Hutmacher R B. et al. Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn[J]. *Irrigation Science*, 1991, 12:135-140.
- [9] Eugenio F Coelho, Dani Or. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation[J]. *Plant and Soil*, 1999, 206:123-136.
- [10] Zuo qiang, Shi jianchu, Li yulan, et al. Root length density and water uptake distributions of winter wheat under sub-irrigation[J]. *Plant and Soil*, 2006, 285:45-55.
- [11] Marsh B a'B. Measurement of length in random arrangements of lines[J]. *J Appl Ecol*, 1971, 8:265-267.
- [12] Newman E I. A method of estimating the total length of root in a sample[J]. *J Appl Ecol*, 1966a, 3:139-145.
- [13] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 等. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益[J]. 中国农业科学, 2000, 33(6):26-32.
- LIANG Zong-suo, KANG Shao-zhong, SHI Pei-ze, et al. Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water-saving benefit[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(6):26-32.
- [14] Ouïam Lahlou. Root mass and depth, stolons and roots formed on stolons in four cultivars of potato under water stress[J]. *Europ J Agronomy*, 2005, 22:159-173.
- [15] Shahnazari Ali, Fulai Liu, Mathias N. et al. Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions[J]. *Field Crop Research*, 2007, 100:117-124.
- [16] 刘 坤, 陈新平, 张福锁, 等. 不同灌溉策略下冬小麦根系的分布与水分养分的空间有效性[J]. 水土保持学报, 2003, 40(5):697-703.
- LIU Kun, CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo, et al. Winter wheat root distribution and soil water and nutrient availability[J]. *ACTA Pedologica Sinica*, 2003, 40(5):697-703.
- [17] 张吴平, 李保国. 均质壤土下玉米根系三维空间分布的模拟与参数分析[J]. 水土保持学报, 2007, 44(5):949-955.
- ZHANG Wu-ping, LI Bao-guo. Simulation of spatial distribution and parameter analysis of maize root system in homogeneous loam soil[J]. *ACTA Pedologica Sinica*, 2007, 44(5):949-955.