

中图分类号: S532; S342.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2012)01-0005-06

栽培生理

# 隔沟交替灌溉对我国半干旱地区马铃薯水分利用的影响

谢开云<sup>1\*</sup>, 王晓雪<sup>1</sup>, 张若芳<sup>2</sup>, 巩秀峰<sup>2</sup>, 张世彪<sup>3</sup>, MARES Victor<sup>4</sup>,  
GAVILAN Carla<sup>4</sup>, POSADAS Adolfo<sup>4</sup>, QUIROZ Roberto<sup>4</sup>

( 1. 国际马铃薯中心北京办事处, 北京 100081; 2. 内蒙古大学, 内蒙古 呼和浩特 010020;  
3. 甘肃省农业局, 甘肃 兰州 730000; 4. 国际马铃薯中心, 利马 秘鲁 )

**摘 要:** 隔沟交替灌溉(Partial root-zone drying, PRD)被认为是一种节水灌溉的方法, 它可以提高多种作物的水分利用率。本研究开展于我国甘肃与内蒙两个半干旱马铃薯种植区, 比较常规灌溉与隔沟交替灌溉对马铃薯产量和水分利用率的影响。结果表明, 由于两个试验点的气候条件与土壤条件不同, 所以马铃薯产量存在显著的差异。但是在两试验点中, PRD<sub>50</sub>处理(隔沟交替灌溉, 灌水量为经验灌水量的1/2)的产量与常规灌溉处理(C<sub>100</sub>, 经验灌水量)的产量没有显著的差别, 水分利用率却显著提高。研究显示, 运用合理的灌溉方式, 可以在保证产量不变的基础上节省用水量。另外, 在易发生干旱的地区, 选用适合的品种, 同时采用覆膜技术对于增加马铃薯产量有着重要的作用。

**关键词:** 马铃薯; 隔沟交替灌溉; 半干旱地区

## Effect of Partial Root-zone Drying on Potato Water Utilization on Semi-arid Conditions in China

XIE Kaiyun<sup>1\*</sup>, WANG Xiaoxue<sup>1</sup>, ZHANG Ruofang<sup>2</sup>, GONG Xiufeng<sup>2</sup>, ZHANG Shibiao<sup>3</sup>,  
MARES Victor<sup>4</sup>, GAVILAN Carla<sup>4</sup>, POSADAS Adolfo<sup>4</sup>, QUIROZ Roberto<sup>4</sup>

( 1. International Potato Center Beijing Liaison Office, Beijing 100081, China 2. Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China 3. Gansu Agriculture Department, Lanzhou, Gansu 730000, China 4. International Potato Center (CIP), Lima, Peru )

**Abstract:** Partial root-zone drying (PRD) irrigation method was considered as a water-saving irrigation method which could increase the water use efficiency for many crops. To compare the partial root-zone drying as an alternative to the conventional irrigation method used in semi-arid potato producing areas in China and its impact on tuber yield and water use efficiency, field trials were conducted in Gansu and in Inner Mongolia where water was the main constraint to potato production. Due to different soil types and rainfalls, the yield of potatoes in two locations varied remarkably. However, the yield of PRD using half amount of water as conventional irrigation was very close to the yields of the full conventional irrigation method in the two locations. The results showed that water could be dramatically reduced in Inner Mongolia and Gansu without affecting the tuber yields by proper irrigation management. Results also supported the fact that the use of plastic mulching and a variety selected for drought-prone environments could increase the potato yield.

**Key Words:** potato; partial root-zone drying; semi-arid region

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是一种对水分十分敏感的作物, 每生成 1 kg 马铃薯块茎干重的需水量为 400~600 L<sup>[1]</sup>。在田间条件下, 马铃薯的需

水量受到生长期、环境条件、土壤类型及品种的影响, 在整个生长季的需水量约为 350~500 mm<sup>[2]</sup>, 每公顷的供水量每增加 2 cm, 产量就会增加 2 t<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2011-06-03

基金项目: 马铃薯和甘薯生产体系下的水分管理策略(Water management alternatives for potato and sweetpotato based system)(CIP 项目编号: 520104)。

作者简介: 谢开云(1965-), 男, 博士, 主要从事马铃薯病毒检测等相关研究和 CIP 在中国研究项目的管理和协调工作。

\* 通信作者(Corresponding author): 谢开云, E-mail: K.xie@cgiar.org。

块茎形成至成熟期是马铃薯需水的关键时期<sup>[4-5]</sup>, 在这段时间, 即使短期缺水也会对产量和品质造成严重的影响<sup>[6-7]</sup>。在世界上许多雨养马铃薯种植区, 灌溉对马铃薯的生产有着重要的作用。但是随着全球气候的变化, 环境污染的加重及其它用水量的增加, 在许多国家可用于农业生产的水量越来越少。因此, 提高干旱地区主要作物的水分利用率, 优化水分管理措施越来越受到人们的关注, 而合理的水分利用方法往往与降低灌水量和增加灌水次数密切相关<sup>[8-9]</sup>。

隔沟交替灌溉(Partial root dry, PRD)是一种通过控制植物对根区干燥的反应, 减少农业用水的灌溉方法。在PRD条件下, 仅对一半的根区进行灌溉, 而另一半根区处于水分胁迫的状态。然后在下一次灌溉时, 仅对上一次没有灌水的一侧进行灌溉, 另一侧处于干旱。当对作物进行隔沟交替灌溉时, 植株地下部分向地上部分的信号传导受到土壤缺水的影响而改变, 处于干旱条件下的根区释放脱落酸(ABA), 导致气孔开度减小, 而灌水一侧的根系则可以为植株的地上部分提供足够的水分。换言之, PRD使植株体内由于水分胁迫而产生的生物化学信号与水信号和缺水产生的物理影响相分离<sup>[10]</sup>。PRD的理论基础是, 一方面根系产生信号物质导致气孔开度减小, 蒸发量降低; 同时又不会对CO<sub>2</sub>的吸收及光合作用产生影响<sup>[11]</sup>。我们期望, 在PRD灌溉方式下, 根系产生干旱信号导致气孔开度减小, 水分蒸发量降低, 而不会对光合速率产生影响, 由灌水一侧的根系保持植物细胞的活力。运用这种方法, 可以在保证相对高产的基础上节约用水, 提高水分利用率(Water use efficiency, WUE), 对于缺水地区有着重要的意义。PRD还可以刺激次生根的生长, 减轻干旱带来的损失<sup>[12]</sup>。干湿交替能促进根系生长, 使根在土体中广泛分布, 增加了根系对水分和营养物质的吸收<sup>[13]</sup>。PRD方法已成功运用于番茄、葡萄、柑橘、橄榄、玉米、棉花等许多果实类作物上, 但是至今还没有关于块根块茎类作物的报道, 特别是在缺水的半干旱地区。来自果实类作物的报道指出, PRD不但不会对产量产生消极的影响, 而且还可以显著提高果实的品质, 同时减少一半以上的用水量<sup>[14]</sup>。但是, 有许多重要的问题, 如何进行隔沟交替灌溉才能在保持产量的同时提高水分利用率, 仍有待进一步研究<sup>[15-16]</sup>。Xu等<sup>[17]</sup>指

出, ABA还可以刺激块茎的形成; Jackson<sup>[18]</sup>也指出, ABA参与了块茎的形成过程, 但其直接影响还不完全清楚。且隔沟交替灌溉对块茎形成的影响也还没有明确的描述。

本研究通过研究常规灌溉与隔沟交替灌溉对半干旱地区马铃薯生产的影响, 对产量、水分利用率和土壤水分含量的变化进行讨论, 旨在为采用合理的灌溉方式, 提高马铃薯的产量和水分利用率提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

试验分别开展于我国的马铃薯主产区: 内蒙古自治区和甘肃省。均位于我国的半干旱地区, 水是制约这两个地区马铃薯生产的主要因素之一。

内蒙古自治区试验点位于呼和浩特市内蒙古大学试验基地(北纬 40°49', 东经 111°49', 海拔 1 063 m)。年降雨量 50~450 mm, 年蒸发量 1 200~3 200 mm。供试土壤为粘土, 有机质含量为 27.1 g/kg, pH 7.82, 有效氮 34.5 mg/kg, 有效磷 15.5 mg/kg, 有效钾 116 mg/kg。田间持水量为 44%~46%, 萎蔫点为 32%~35%。

甘肃省试验点位于兰州市秦王川(北纬 36°31', 东经 103°40', 海拔 1 818 m), 年降雨量为 36.6~734.9 mm, 年蒸发量为 700~2 000 mm。供试土壤为壤土, 有机质含量为 9.71 g/kg, pH 8.67, 有效氮 30.2 mg/kg, 有效磷 6.34 mg/kg, 有效钾 124 mg/kg。田间持水量为 22%~24%, 萎蔫点为 10%~12%。

### 1.2 试验设计

在两个试验点, 分别设置一个覆膜处理和一个不覆膜处理。采用随机完全区组设计, 设置 3 个马铃薯品种: 冀张薯 8 号, 大西洋和克新 1 号。5 种灌溉方式: C<sub>100</sub>(常规灌溉, 经验灌水量); C<sub>50</sub>(常规灌溉, 灌水量为经验灌水量的 1/2); PRD<sub>50</sub>(隔沟交替灌溉, 灌水量为经验灌水量的 1/2); PRD<sub>25</sub>(隔沟交替灌溉, 灌水量为经验灌水量的 1/4); RF(雨养, 无灌溉)(表 1)。由于两地区的气候条件和土壤条件均存在差异, 灌溉量及灌溉时间根据当地的实际情况确定。其中内蒙古自治区试验点的 C<sub>100</sub> 为 4168.6 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 分 3 次于播种后 50、60 和 100 d 灌溉。甘肃省试验点的 C<sub>100</sub> 为 4 444.4 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 分 4 次于播种后 40、70、95 和 120 d 灌溉。

表 1 两试验点不同灌溉处理  
Table 1 Water added to different treatments in two locations

灌溉处理 Irrigation treatment	呼和浩特 Hohhot (m <sup>3</sup> / ha)			兰州 Lanzhou (m <sup>3</sup> / ha)		
	灌水量 Irrigation amount	降雨量 Rainfall	总量 Total	灌水量 Irrigation amount	降雨量 Rainfall	总量 Total
C <sub>100</sub>	4168.6	1490	5658.6	4444.4	680	5124.4
C <sub>50</sub>	2084.3	1490	3574.3	2222.2	680	2902.2
PRD <sub>50</sub>	2084.3	1490	3574.3	2222.2	680	2902.2
PRD <sub>25</sub>	1042.2	1490	2532.2	1111.1	680	1791.1
RF	0	1490	1490	0	680	680

### 1.3 测定项目

产量：于收获期分别测定各处理块茎的鲜重和干重。

水分利用率(WUE)：水分利用率(WUE)= 块茎干重(kg / hm<sup>2</sup>) / 总耗水量(m<sup>3</sup> / hm<sup>2</sup>)

土壤含水量：在呼和浩特试验点，运用 Odyssey Green Light – Red Light™ 仪，测定各处理地下10、20、30、50 cm 处的土壤含水量。于播种30 d 后至收获期内，每12 h 测定1次。直接测定的数据以百分数(比重)表示，要根据土壤容重将其转化为水的体积。将土壤的田间持水量和萎蔫点分别定义为45%和32%。

### 1.4 数据处理

运用 SAS 统计分析软件，采用随机完全区组设计(RCBD)模型进行方差分析，运用 Duncan 法进行多重比较。运用最小二乘法对单因素效果和各因素间的交互作用进行估计。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对产量的影响

呼和浩特试验点的马铃薯产量是兰州的2倍。但两地常规灌溉(C<sub>100</sub>)和雨养(RF)条件下的产量均与各省(自治区)的实际产量相似。

#### 2.1.1 呼和浩特

在呼和浩特，覆膜对马铃薯产量没有显著的影响(表2)。虽然覆膜后的产量略高于不覆膜处理，但差异没有达到显著水平。然而，冀张薯8号的产量显著低于大西洋和克新1号，而大西洋和克新1号的产量间没有显著差别。

C<sub>100</sub> 处理的产量与 PRD<sub>50</sub> 的产量相似。虽然 C<sub>50</sub>

表 2 不同处理对马铃薯产量的影响( t FW / hm<sup>2</sup>)

Table 2 Effect of mulch, variety, and irrigation treatments on average potato yields

处理 Treatment		呼和浩特 Hohhot	兰州 Lanzhou
覆膜 Mulch	无 without	26.84 a	11.99 b
	有 with	28.46 a	15.23 a
品种 Variety	冀张薯 8 号 Jizhangshu 8	22.75 b	24.68 a
	大西洋 Atlantic	29.34 a	7.03 c
	克新 1 号 Kexin 1	30.85 a	9.13 b
灌溉 Irrigation	C <sub>100</sub>	32.91 a	15.67 a
	C <sub>50</sub>	28.54 b	16.93 a
	PRD <sub>50</sub>	30.00 ab	15.74 a
	PRD <sub>25</sub>	24.85 c	11.75 b
	RF	21.95 c	7.97 c

注：不同小写字母表示处理间差异显著，下同。

Note: Different letters after a yield value indicate significance of treatment difference; the same below.

的产量显著低于 C<sub>100</sub> 处理，但是与 PRD<sub>50</sub> 处理间没有显著差别。另外，在呼和浩特，RF 和 C<sub>25</sub> 处理的产量间也没有显著差别。在该试验点，品种、灌溉处理及覆膜处理间的交互作用不显著。

#### 2.1.2 兰州

与呼和浩特不同，覆膜能显著提高马铃薯的产量。覆膜处理的产量与不覆膜处理相比，增加了30%。冀张薯8号的产量是其它两品种的近3倍。克新1号的产量也显著高于大西洋。

在雨养条件下，马铃薯的产量最低。PRD<sub>25</sub> 处理的产量比 RF 处理增加了47%。C<sub>100</sub>、C<sub>50</sub> 和

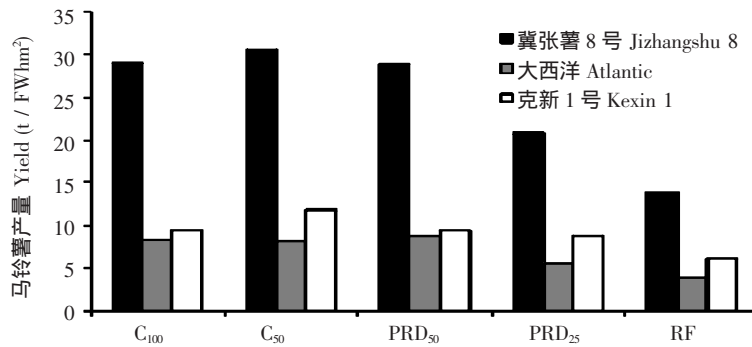


图1 不同品种和灌溉处理对兰州马铃薯产量的影响

Figure 1 Yield response of different varieties to irrigation treatments – Lanzhou

PRD<sub>50</sub> 处理的产量间没有显著的差别, 均为 RF 处理的 2 倍左右。

在兰州, 品种与灌溉处理间的交互作用十分显著。如图 1 所示, 在各处理中, 冀张薯 8 号的产量均高于其它两个品种。在兰州要保持其产量处于较高水平, 至少需要供水量达到 2 905 m<sup>3</sup> / hm<sup>2</sup> (C<sub>50</sub> 和 PRD<sub>50</sub>)。当供水量减少时, 产量显著降低。大西洋和克新 1 号的产量虽然较低, 但对水分的反应没有冀张薯 8 号敏感。

## 2.2 不同处理对水分利用率的影响

### 2.2.1 呼和浩特

品种、灌溉处理、覆膜与品种及灌溉与品种间的交互作用对马铃薯水分利用率(WUE)的影响均达到显著水平。在呼和浩特的粘土上, 覆膜对水分利用率没有显著的影响。RF 处理下, 水分利用率最大(表 3)。众所周知, 水分利用率与块茎干重和耗水量有关。在 RF 处理是, 虽然块茎干重仅为 4.12 t / hm<sup>2</sup>, 低于其它处理, 而其耗水量仅为最高产量(C<sub>100</sub> = 6.28 t / hm<sup>2</sup>)的 1 / 3, C<sub>100</sub> 处理的水分利用率仅为 0.93 kg / m<sup>3</sup>。而水分利用率在 C<sub>50</sub>, PRD<sub>50</sub> 和 PRD<sub>25</sub> 处理间没有显著的差别。虽然 PRD<sub>25</sub> 处理的水分利用率较高, 分别高出 C<sub>100</sub> 和 PRD<sub>50</sub> 处理 0.02 和 0.04 个单位, 但是却并不显著。

从覆膜与品种的交互作用方面来看, 在覆膜条件下, 冀张薯 8 号和克新 1 号的水分利用率要高于不覆膜处理。另一方面, 品种与灌溉间的交互作用可以用不同供水量下水分利用率变化函数的斜率来表示。当供水量减少时, 大西洋的反应最为迟缓, 而其它两个品种的水分利用率迅速增加。综合考虑以上两种交互作用, 可以推测, 在呼和浩特的土壤

气候条件下, 该品种在所有处理中的水分利用率均最高, 但在覆膜条件下或土壤湿度增加时, 其水分利用率显著降低。

### 2.2.2 兰州

覆膜、品种和灌溉三因素及它们间的交互作用均对马铃薯水分利用率有显著的影响。由于兰州气候条件干燥, 土壤的保水性又比较差, 所以覆膜处理的产量显著高于不覆膜处理。与呼和浩特相比, 兰州的温度较高, 相对湿度较小, 从而导致其蒸发量较高, 而覆膜对于减少蒸发有着重要的作用。

在兰州, 不同灌溉处理水分利用率的变化趋势与呼和浩特相似(表 3)。RF 处理的水分利用率最高, 而 C<sub>100</sub> 处理的水分利用率最低。C<sub>50</sub>, PRD<sub>50</sub> 和

表 3 不同处理对马铃薯水分利用率的影响(kg DM / m<sup>3</sup>)

Table 3 Effect of mulch, variety, and irrigation treatments on water use efficiency in Hohhot and Lanzhou

处理 Treatment		呼和浩特 Hohhot	兰州 Lanzhou
覆膜 Mulch	无 without	1.21 a	1.24 a
	有 with	1.27 a	1.41 b
品种 Variety	冀张薯 8 号 Jizhangshu 8	1.00 c	2.39 a
	大西洋 Atlantic	1.49 a	0.74 b
	克新 1 号 Kexin 1	1.21 b	0.86 b
灌溉 Irrigation	C <sub>100</sub>	0.93 c	0.61 c
	C <sub>50</sub>	1.17 b	1.17 b
	PRD <sub>50</sub>	1.19 b	1.09 b
	PRD <sub>25</sub>	1.28 b	1.32 b
	RF	1.59 a	2.45 a



PRD<sub>25</sub> 处理间的水分利用率也没有别显差别(表 3)。值得注意的是, 在两个试验点中, C<sub>50</sub>, PRD<sub>50</sub> 和 PRD<sub>25</sub> 处理间水分利用率的差异均不显著。虽然在雨养(RF)条件下, 兰州试验点的水分利用率要高于呼和浩特试验点, 但是在常规灌溉(C<sub>100</sub>)条件下, 兰州试验点的水分利用率却要低于呼和浩特。

与呼和浩特的结果相反, 在兰州, 冀张薯 8 号的水分利用率最高, 表现出很强的抗旱性。

除 RF 处理外, 覆膜均能提高各灌溉处理的水分利用率。在特定时间大量灌水时, 覆膜能显著降低蒸发量。但在少量多次灌溉条件下, 如雨养条件下, 这种作用不明显。另外, 由于兰州试验点的土壤为壤土, 保水性较差, 增加灌溉次数, 可以提高土壤的含水量。与雨养条件下相比, 覆膜在灌溉条件下的作用更为显著。

灌溉处理与品种间的相互作用与提高块茎干重有着密切的关系, 在冀张薯 8 号上表现的最为明

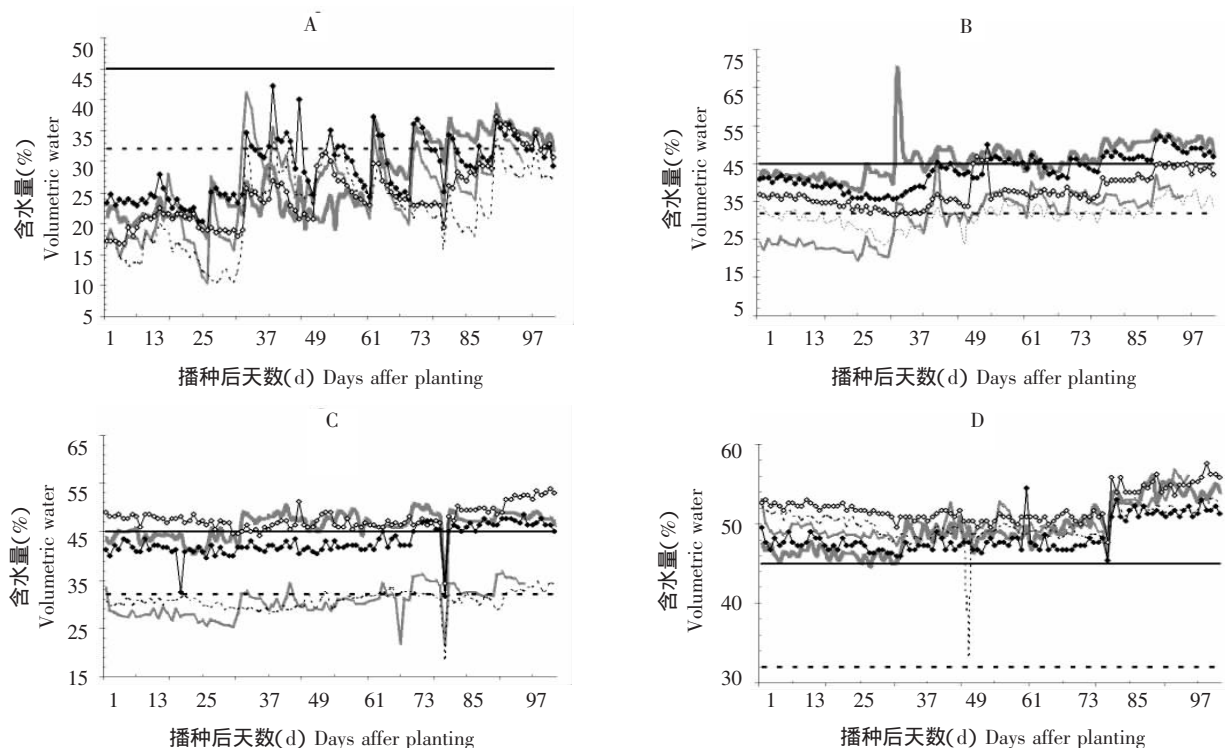
显。与其它品种相比, 灌溉对冀张薯 8 号产量的影响最大。

### 2.3 不同处理对呼和浩特土壤含水量的影响

土壤含水量与产量关系密切。如图 2 所示, 在地下 20、30、50 cm 的土层, 土壤含水量均高于或接近于粘土的田间持水量。而在地下 10 cm 土层的土壤含水量均低于萎蔫点, 表明该层的水分由于过度蒸发而大量损失, 但是由于处于此层的植株根系较少, 不会对植株产生严重的影响。

当灌溉量减少 50% 时, 即 C<sub>50</sub> 处理, 水分蒸发量增加。30 cm 土层的含水量处于萎蔫点以下, 由于水分从土壤颗粒表面离开的张力增加, 使该层的根系受到了水分胁迫的影响。然而, 由于该试验点的土壤为粘土, 50 cm 土层的土壤含水量较高, 使根区贮水的作用减弱。这也是为什么 C<sub>50</sub> 处理的产量低于 C<sub>100</sub> 处理的原因。

PRD<sub>50</sub> 处理的灌水量与 C<sub>50</sub> 处理相同, 但蒸发



注: A: 10 cm 土层, B: 20 cm 土层, C: 30 cm 土层, D: 50 cm 土层; C<sub>100</sub> (——), C<sub>50</sub> (——), PRD<sub>50</sub> (——), PRD<sub>25</sub> (——), RF (——); 田间持水量和萎蔫点分别为——和——。

Note: Soil water content at 10 cm (A), 20 cm (B), 30 cm (C) and 50 cm (D) depth for different irrigation systems. Conventional irrigation (——), Conventional 50 (——), Partial root-zone drying 50 (——), Partial root-zone drying 25 (——) and Rain-fed (——). Field capacity and wilting point values are represented as (——) and (——), respectively.

图 2 不同灌溉处理下土壤各土层含水量的变化曲线(呼和浩特)

Figure 2 Soil water dynamic for different irrigation treatments in Hohhot

面缩小了一半。该处理各土层的含水量与  $C_{100}$  处理相似, 只有地下 10 cm 土层中的含水量低于萎蔫点。从土壤剖面的水分含量来看,  $PRD_{50}$  处理中根系所受到的水分胁迫程度要低于  $C_{50}$  处理, 且产量与  $C_{100}$  处理的产量间没有显著差别。如进一步减少灌水量, 即  $PRD_{25}$  处理, 水分胁迫严重, 产量显著降低。可见, 基于土壤测试, 合理调整灌溉时间和灌溉量, 可以减轻缺水对作物的影响, 同时保持较高的产量水平。因此, 在根区缺水的情况下, 运用隔沟交替灌溉的方法可以显著减少灌水量。

在雨养(RF)条件下, 呼和浩特马铃薯的产量为  $20 \text{ t} / \text{hm}^2$ 。除 50 cm 土层外, 其它土层的含水量均低于萎蔫点, 导致根系严重缺水。

### 3 讨 论

灌溉对我国温带马铃薯种植有着重要的影响。本研究对呼和浩特和兰州两地区的马铃薯生产情况进行研究, 以期提高马铃薯的水分利用率。呼和浩特降雨相对较丰富, 土壤保水性较好; 而兰州降雨量较少, 土壤保水性差。通常, 在这两个地区农业习惯灌水量为  $5000 \text{ m}^3 / \text{hm}^2$ 。两地区鲜薯的产量差别较大, 呼和浩特鲜薯产量在  $22 \sim 33 \text{ t} / \text{hm}^2$  之间; 而兰州为  $8 \sim 17 \text{ t} / \text{hm}^2$ 。

在两种气候土壤条件下, 将灌水量减少一半后, 鲜薯的产量均没有受到明显的影响, 而水分利用率却显著提高。在灌水量减少一半, 同时采用隔沟交替灌溉的条件下, 水分在土壤中的分配得到改善, 同时由于蒸发面减小, 导致蒸发量下降。结果表明, 在保持产量的基础上, 进一步减少灌水量也是可行的, 但这需要对水分进行更为复杂的管理, 同时还需要综合考虑成本与利润间的比率。

总之, 在内蒙和甘肃, 保证产量不变的情况下, 均有可能减少灌水量。在降雨量小、土壤保水性差的干旱环境条件下, 采用隔沟交替灌溉的方法, 选择合适的品种, 同时运用覆膜技术, 不仅能保证相对较高的产量, 还能减少灌水量, 保护水资源。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Beukema H P, Vander Zaag D E. Potato improvement: some factors and facts [M]. Wageningen: International Agricultural Center, 1979: 224.
- [ 2 ] Sood M C, Singh N. Water management [M] // Khurana S M P, Minhas J S, Pandey S K. The potato: production and utilization in sub-tropics. New Delhi: Mehta Publishers, 2003: 111-120.
- [ 3 ] Harris P M. The potato crop production [M]. London: Chapman and Hall, 1978: 730.
- [ 4 ] Salter P J, Goode J E. Crop responses to water at different stages of growth [M]. England: Commonwealth Agricultural Bureaux, 1967.
- [ 5 ] Jensen C R, Jacobsen S E, Andersen M N, et al. Leaf gas exchange and water relation characteristics of field quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during soil drying [J]. European Journal of Agronomy, 2000, 13(1): 11-25.
- [ 6 ] Miller D E, Martin M W. Effect of irrigation regime and subsoiling on yield and quality of three potato cultivars [J]. American Potato Journal, 1987, 64(3): 109-117.
- [ 7 ] Kumar D, Minhas J S, Singh B. Abiotic stress and potato production [M] // Khurana S M P, Minhas J S, Pandey S K. The Potato: production and utilization in sub-tropics. Mehta Publishers: New Delhi (India), 2003: 314-322.
- [ 8 ] Vayda M E. Environmental stress and its impact on potato yield [M] // Bradshaw J E, Mackay G R. Potato genetics. Wallingford, UK: CAB International, 1994: 239-261.
- [ 9 ] Wright J L, Stark J C. Potato [M] // Stewart B A, Nielson D R. Irrigation of agricultural crops, Agronomy Monograph No. 30. USA: ASA-CSSA-SSSA, 1990: 859-888.
- [ 10 ] Bacon M A. Partial root-zone drying: a sustainable irrigation system for efficient water use without reducing fruit yield [R]. The Lancaster Environmental Center, Lancaster University, 2003.
- [ 11 ] Jones H G. Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology [M]. 2nd ed., Cambridge (UK): University Press, 1992: 428.
- [ 12 ] Zhang J, Tardieu F. Relative contribution of apices and mature tissues to ABA synthesis in droughted maize root system [J]. Plant and Cell Physiology, 1996, 37(5): 598-605.
- [ 13 ] Kang S, Liang Z, Hu W, et al. Water use efficiency of controlled alternate irrigation on root-divided maize plant [J]. Agricultural Water Management, 1998, 38(1): 69-76.
- [ 14 ] Loveys B, Grant J, Dry P, et al. Progress in the development of partial root zone drying [J]. Australian Grapegrower and Wine-maker. 2003, 402(July): 18-20.
- [ 15 ] Liu F, Shahnazari A, Andersen M 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(2): 113-117.
- [ 16 ] Liu F, Shahnazari A, Andersen M N, et al. Physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to partial root-zone drying: ABA signaling, leaf gas exchange, and water use efficiency [J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57 (14): 3727-3735.
- [ 17 ] Xu X, Van Lammeren A A M, Vermeer E, et al. The role of gibberellin, abscisic acid, and sucrose in the regulation of potato tuber formation in vitro [J]. Plant Physiology, 1998, 117(2): 575-584.
- [ 18 ] Jackson S D. Multiple signalling pathways control tuber induction in potato [J]. Plant Physiology, 1999, 119(1): 1-8.