

中国农业大学

---

硕士学位论文

---

干旱荒漠绿洲区根系分区交替灌溉对葡萄生长和品质的影响

---

姓名：闫博远

---

申请学位级别：硕士

---

专业：农业水土工程

---

指导教师：康绍忠

---

20070601

## 摘 要

甘肃河西走廊石羊河流域干旱荒漠绿洲区位于巴丹吉林和腾格里沙漠之间，降雨稀少，农业用水的浪费及地下水的过度开采，导致沙生植被枯萎死亡，沙尘暴肆虐，生态环境恶化，农业与生态用水矛盾突出。但该区光照资源丰富、昼夜温差大，是我国优质葡萄产区之一。因此，如何高效利用有限的水资源进行灌溉是当地葡萄生产中一个重要课题。

基于节水灌溉技术原理与作物感知缺水的根源信号理论而提出的根系分区交替灌溉，是交替对作物部分根区进行正常的灌溉，其余根区受到适度水分胁迫的灌溉方式，在干旱地区具有较大的应用潜力。本文以葡萄为供试作物，于 2006 年在中国农业大学石羊河流域农业与生态节水试验站进行了葡萄根系分区交替灌溉对作物生理调控与气孔响应、作物系数和耗水规律、经济产量、品质及水分利用效率等的影响进行了较系统的研究。

试验研究证实了根系分区交替灌溉可诱发葡萄的水分保护机制，在不明显降低光合速率的条件下降低植株叶片的奢侈蒸腾耗水，提高叶片水分利用效率。

根系分区交替滴灌灌水量较常规滴灌减少 1/2，其产量未有显著下降，而且显著提高了浆果  $V_c$  含量，使果酸含量降低，提高了可溶性固形物含量和成熟度。同时改善了葡萄的色泽和口感，提高了葡萄的营养价值。

研究表明在干旱荒漠绿洲区对葡萄应用根系分区交替灌溉具有较大的节水增产潜力，可以达到大量节水、提高葡萄品质和成熟度而不明显降低产量的目的，可以作为西北旱区果园有效的节水优质高效灌溉调控途径。

关键词：干旱区，根系分区交替灌溉，葡萄，品质，水分利用效率

## Abstract

The oasis region of Shiyang River basin in the Gansu Province of northwest China locates in an arid sandwiched by Tenggle and Badanjilin deserts. Scarce rainfall in this area and irrational competition for surface water between its upper and lower reaches have resulted in large-scale loss of natural vegetation, frequent dust storm, serious soil salinization and a much deteriorated ecosystem. Although there exists serious water shortage for both agriculture and ecological water demand, this area is highly productive with its good quality grape due to the abundant lighting and large day/night temperature difference. How to use the limited water resource efficiently for grape has become an important issue in this area.

Alternate Partial Root-zone Irrigation(APRI) is a new irrigation technique, which requires that approximately half of the root system is exposed to drying soil while the remaining half is irrigated as in full irrigation. The wetted and dried sides the root system are alternated in a frequency according to crops, growing stages and soil water balance. It has the potential to reduce plant "luxury" water use, decrease canopy vigour and maintain yields when compared with conventional irrigation methods. Earlier work on horticulture crops has showed that APRI has great potential in arid areas. In this study, Grape field experiment was conducted at Shiyang River Basin Experimental Station for Agricultural and Ecosystem Water Saving of China Agricultural University. In 2006, effects of APRI on grape were studied with the analysis of physiological control and stomata response, crop coefficient and daily variation characteristic, yield, product quality and water use efficiency. The main results are:

In the oasis field experiment, APRI reduce "luxury" transpiration without much reduction in photosynthesis rate by slightly limiting stomatal opening. Leaf water potential showed that grape under APRI had more ability of osmotic regulation to maintain higher leaf turgor.

Compared with conventional drip irrigation (CDI), alternate partial root-zone drip irrigation (ADI) saved half irrigation water with no significant yield reduction. ADI had almost the same fruit yield and higher total soluble solids concentration than control but with redder colour and earlier maturity, lower titrated acid and much higher  $V_c$  content. Furthermore, ADI plants had increased irrigation water use efficiency compared to control plants.

In summary, application of APRI on grape crops in the oasis had greater potential in saving irrigation water, maintaining economic yield and improving product quality. This is particularly important for the oasis agriculture where all the crops itself if unlimited exploitation of water resources cannot be control. Our research has provided some practical methods about APRI in such areas.

**Key Words:** Arid area, Alternate partial root-zone drip irrigation, Grape, Quality, WUE

# 独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国农业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名： 闫博远

时间： 2007 年 6 月 20 日

# 关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国农业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国农业大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名： 闫博远

时间： 2007 年 6 月 20 日

导师签名： 

时间： 2007 年 6 月 20 日

# 第一章 绪论

## 1.1 研究目的与意义

### 1.1.1 研究背景

面对 21 世纪我国的资源、环境问题，尤以水问题最为严峻。水少与水浪费并存，水多与生态失衡并存，水脏与水管理不善并存<sup>[1]</sup>。

水是一切生命的源泉，是人类生存环境中最主要的基本要素和物质基础，是人类生存和发展不可缺少、不可替代的自然资源。当今世界正面临着人口、资源、环境三大问题，水资源问题尤为重要。就全世界来说，干旱和半干旱耕地约占世界总耕地面积的 43%，涉及到 50 多个国家和地区水资源短缺已经成为限制可持续发展的主要因素。目前，世界上的水资源日益紧张，各国都非常重视水资源的合理分配、有效利用及水资源保护等问题。

我国多年平均水资源总量为 2.81 亿  $\text{m}^3$ ，居世界第 6 位，水资源总量较丰富。但是，中国人均淡水资源量为 2200  $\text{m}^3$ ，不足世界平均水平的 1/4<sup>[2]</sup>。我国水资源不仅总量缺乏，而且时空分布也很不均匀，具有南多北少、夏多冬少、年际变化大等特点。此外，水资源利用率很低，浪费严重，这种现实已成为我国国民经济建设和农业发展中的一个严重制约因素。在西北地区，由于对经济发展和改善生态环境关系认识不充分，加上气候变化，西北地区自然环境不断恶化，特别是水资源短缺引起的生态环境危机，以及水土流失、土地荒漠化和风沙灾害逐年加剧，并不断向东部和京津发达地区扩展，对西北地区的经济发展造成了严重威胁，改善生态环境、合理用水资源已成为西北地区经济发展的首要任务。

我国是农业大国，在全国的用水量中农业用水占到很大比重。据我国水资源公报 2004 年全国总用水量 5567 亿  $\text{m}^3$ ，农业用水量为 3825.73 亿  $\text{m}^3$ ，占总用水量的 68.7%，其中农田灌溉用水 3459.24 亿  $\text{m}^3$ ，占总用水量的 62.6%<sup>[2]</sup>。中共中央、国务院关于技术创新和发展高技术实现产业化的决定中提出：“特别要在优良品种培育和节水农业两大领域集中力量尽快实现新的突破，为我国农业现代化提供强有力的科技支撑”。因此，制定合理的灌溉制度、开发利用高效的节水灌溉技术、采用切实可行的节水措施，对缓解我国日益突出的水资源供需矛盾、实现水资源利用的可持续发展具有十分重要的现实意义。

### 1.1.2 研究的目的和意义

随着人口的增长和工农业的迅速发展，水资源短缺日益严重，干旱缺水已成为我国干旱半干旱地区，特别是西北地区经济发展的主要限制因素。

石羊河系甘肃省三大内陆河之一，位于甘肃河西走廊东端，河流起源于南部祁连山，消失于巴丹吉林和腾格里沙漠之间的民勤盆地北部。该河由东向西，主要由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河、西大河等八条河流组成。该流域属典型的内陆干旱性气候，具有降水量少、降水变率大、年内分配不均、蒸发量大和干旱时段明显等特点。年降水量在

50~80mm之间,而蒸发量却在2000~2600mm之间,降水不足,蒸发过大,而且降水年内分布不均,大部分集中在7、8、9三个月,与农作物生长的需水期严重错位,旱灾发生频繁。

因此,分析石羊河流域水资源利用现状,研究本地区水资源合理利用模式,水资源承载能力,作物耗水规律等内容是进入二十一世纪石羊河流域急需解决的问题。

石羊河流域的武威市种植葡萄的历史已有两千多年,葡萄种植区位于东经 $101^{\circ}43'104^{\circ}43'$ ,北纬 $36^{\circ}46' \sim 38^{\circ}09'$ ,正处于世界种植葡萄的“黄金”地带。该区属典型温带干旱荒漠、半荒漠区,海拔1250~1700m,气候干燥,降水稀少,蒸发强烈,昼夜温差大,日照充足。7月平均气温 $21.9^{\circ}\text{C}$ ,9月平均气温 $14.9^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温1209.5~1509 $^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温2800~3200 $^{\circ}\text{C}$ ,年日照时数长达2683~3088h,年降水量在200mm以下,农业生产用水以灌溉补给为主。武威与法国波尔多以及河北、山东等产区对比分析,自然地理条件有许多相近之处,但武威有其独特的优势,比如空气相对湿度武威在45~60%之间,葡萄不施用或少施用农药,即可获得良好的产品。

目前,甘肃武威被农业部规划为我国优质葡萄产地之一,甘肃省政府把该市葡萄基地建设列为西部大开发和农业产业化的重点建设项目。葡萄产业已成为武威市培植财源、增加农民收入的四大支柱产业之一。武威市葡萄产业已初具规模,2004年葡萄种植面积已达0.56万 $\text{hm}^2$ 。随着规划的实施,武威将成为中国葡萄酒行业的一个重点产地,葡萄产业也将真正成为武威经济发展的重要支柱产业,更是广大农民增加收入、脱贫致富的重要渠道。

葡萄作为石羊河流域主要的支柱产业,对该地区的经济发展起着举足轻重的作用。随着人口增长和生活水平日益提高,人们不但对数量上的需求增加,而且对品质提出了更高的要求。适时适量的水分供给是保证葡萄树优质高产的重要条件。然而石羊河流域水资源日趋紧张、水环境日益恶化,这势必影响到葡萄的产量和品质,进一步制约葡萄产业的可持续发展。因此,在河西荒漠绿洲区进行酿酒葡萄的根系分区交替灌溉技术试验研究,极有可能为当地酿酒葡萄生产确定一个节水、优质、高产的灌溉新技术,这对于解决当地水资源短缺、提高葡萄品质、增加农民收入都具有重要的现实意义,为当地葡萄产业的发展提供理论和实践指导,使当地的葡萄产业走可持续发展的道路。

## 1.2 根系分区交替灌溉的基本原理

根系分区交替灌溉(Alternate Partial Root-zone Irrigation 简称APRI),是康绍忠等于1996年系统提出的一种节水灌溉新方法<sup>[3]</sup>。其基本概念与传统的概念根本不同。传统的灌水方法追求田间作物根系层的充分和均匀湿润,而APRI则强调利用作物水分胁迫时产生的根信号功能,即人为保持或控制根系活动层的土壤在垂直剖面或水平面的某个区域干燥,使作物根系始终有一部分生长在干燥或较干燥的土壤区域中,限制该部分的根系吸水,让其产生水分胁迫的信号传递到叶气孔,形成最优的气孔开度;同时,通过人工控制,使在垂直剖面或水平面上的干燥区域交替出现,即该次灌水湿润的区域,下次灌水让其干燥,而上次灌水干燥的区域,下次让其湿润,这样就可以使不同区域或部位的根系交替经受一定程度的干旱锻炼,既可减小棵间全部湿润时的无效蒸发损失和总的灌溉用水量,亦可提高根系对水分和养分的利用率,以不牺牲作物的光合产物积累而达到节水的目的<sup>[3]</sup>。

作物根系分区交替灌溉在田间可通过水平方向和垂直方向交替给局部根区供水来实现，它主要适用果树和沟灌的宽行作物与蔬菜等。主要包括田间隔沟交替灌溉系统、交替滴灌系统、水平分区交替隔管地下滴(渗)灌系统、交替隔畦灌溉系统、垂向分区交替灌水系统等供水方式。在生产中简便易行，并已在中国河西走廊、澳大利亚维多利亚州和南澳得到了实施，已取得了节水增益的明显效果。特别是最近几年，已在西班牙、英国、丹麦、土耳其、美国、南斯拉夫和中国新疆等地得到了广泛的研究和应用。APRI作为一种新的农业节水灌溉技术，其理论依据主要是：

(1) 光合与蒸腾对气孔开度的反应不同。一般条件下，光合速率随气孔开度增加而增加，但当气孔开度达到某一值时，光合速率增加不再明显；而蒸腾速率则随气孔开度增大而线性增加。康绍忠等(1993)试验表明，在充分供水的条件下，会出现一种气孔开度的变小，此时光合速率虽有下降，而蒸腾失水大量减小。因此，以不牺牲作物光合产物积累而达到最大节水的目的是可行的。

(2) 局部干燥区域的根信号能帮助改变作物的气孔开度从而调节水分消耗。作物有一种检测土壤中有效水量的生理机制，并据此改变它们的气孔开度和调节其水分消耗。有研究表明，当作物根系生长在干燥土壤中时，产生一种根信号，主要是脱落酸(ABA)，它主要是在土壤干燥带的根中产生，且逐渐传输到枝叶。因此，枝叶的气孔开度和叶扩张率将被调节。根源ABA之所以作为一种水分胁迫信号，是因为它的强度随干旱的加剧而增加，它能帮助植物检测土壤中的有效水量，且据此调节其水分消耗。

木质部ABA作为信号物质或者一种测度具备以下特点：①ABA浓度的变化能对土壤干旱程度作出即时响应，且能定量反映土壤环境的变化；②ABA浓度的变化能在数量和时间上解释由其所引发的地上部分生理过程的变化；③地上部叶片能够快速代谢或周转ABA(例如通过韧皮部将ABA运输到根系)，从而可避免由于ABA的累积而影响效应的灵敏度。

因此，APRI将始终控制有一部分根系干燥，使植物的水分胁迫防卫系统在所有的时间都被触发，根源ABA作为一种水分胁迫的根信号连续的供给到作物的叶片，以减小气孔开度来最优调节气孔状况，使作物减少蒸腾耗水损失，以不牺牲作物的光合产物积累提高作物水分利用效率。

(3) 交替控制使部分根系经受一定程度的水分胁迫，能刺激根系的补偿功能，提高根系传导能力。康绍忠等(1996)研究表明，作物在经过一段时间的水分胁迫，重新复水后，新根大量出现，其根系的传导还要高于充分供水的处理。因此，交替使不同区域的根系经历一段生长在干燥土壤中的过程，能提高根系的传导能力。

(4) 交替湿润局部根区可减小棵间土壤蒸发和根区深层渗漏，提高贮存在根区的水分有效性。交替湿润局部根区减少了棵间土壤湿润面积，因此减少了棵间土壤蒸发，同时，由于局部区域干燥和局部区域湿润，存在局部湿润区域向干燥区域的侧向水分运动，加之总灌水量的减小，使灌水入渗深度减小，因而有更多的水分被保持在根区范围内，减小了深层渗漏。提高灌水-根系土壤贮水-作物根系吸水之间的转化效率和水的有效性，有利于提高水分利用效率。

### 1.3 根系分区交替灌溉的国内外研究进展

### 1.3.1 分根试验和根源干旱信号研究

自 20 世纪 60 年代末期发现外施 ABA 能引起叶片气孔关闭以来, 植物干旱信号传导和响应机理研究一直是一个热点问题。Cadenas 研究表明, 水分胁迫下柑橘根系合成了大量的 ABA<sup>[4]</sup>, Mun 和 Sharp 则发现在水分胁迫下植物体内 ABA 水平迅速上升, ABA 的积累降低了气孔开度, 减少了干旱条件下植物的水分散失, 抑制茎、叶生长, 促进根系生长, 使根冠比增加<sup>[5]</sup>。Gowing 等给樱桃离体叶柄饲喂 ABA 的试验则表明, ABA 的浓度和通量对气孔开度都有显著的抑制作用。ABA 还能抑制苹果树新梢生长, 促进花芽分化<sup>[6]</sup>。为了研究 ABA 对土壤干旱的响应机理, 植物生理学家们借鉴水分倒流现象研究中的方法, 设计了一些分根试验, 比如“左干右湿”和“上干下湿”模式<sup>[7]</sup>, 只给 1/2 根区供水, 另 1/2 根区保持干燥, 但处理时间长以后, 长期干燥的 1/2 根系会受影响, 或者死亡。Tan 和 Buttery 等人的分根试验仅作为研究植物水分胁迫传导信号 ABA 的手段, 没有更多的考虑与灌溉技术结合的问题<sup>[8]</sup>。根系分区交替灌溉的提出正是传统的分根试验和根源干旱信号研究与农田水利学相结合的产物。

Tan 和 Buttery 等的分根试验结果表明, 只向一半根区土壤供水即可满足桃树幼苗所需水分, 且对水分利用效率无明显影响<sup>[8]</sup>; Green 和 Clothier 在葡萄和苹果树上进行的分根试验也得到了类似的结论<sup>[9, 10]</sup>。这些研究表明, 只要部分根系处于湿润状态, 植物仍然可以得到足够的水分供应。此外, 在经受干旱期间, 植物的根系水分传导虽然可能下降 50%~70%, 但复水后, 由于新根的大量出现, 其根系水分传导可以迅速恢复, 并超过一直充分供水的处理。对 ABA 的研究表明, 干旱诱导的根系中 ABA 能提高根系的水分传导。Crisosto 等的分根试验表明, 在咖啡树的花芽处于次生木质部的发育阶段时, 若在水分亏缺后重新灌水, 不管黎明或中午的叶片水分状况如何, 来自根部的信号均能刺激花芽开花<sup>[11]</sup>。Gowing 等将苹果根系种植在两个分离的容器中, 每个容器有一半根系, 使一半根系保持干燥, 另一半根系充分供水, 各叶片伸展及新叶展出均受抑制, 24d 后对干燥部分的根系恢复供水, 结果发现其叶片生长与持续干燥的处理相比有明显的恢复。该试验说明改变苹果根系的供水方式可以有效调控地上部生长<sup>[12]</sup>。Cornish 等用热空气流和渗透溶液处理番茄的离体根, 发现积累了大量的 ABA<sup>[13]</sup>, Zhang 和 Davies 的试验也证实离体根尖在经受渗透胁迫时能合成大量的 ABA, 而且土壤干旱的一半根系与湿润的另一半根系相比, ABA 含量明显增加<sup>[14]</sup>。Neales 等用苹果幼苗做的分根试验也表明, 干旱时根、木质部、叶片中的 ABA 都增加, 而且一半根不灌水时叶片膨压不降低, 说明叶片的 ABA 可能来源于木质部, 木质部 ABA 增加则来源于另一半干旱处理的根系<sup>[15]</sup>。Claudio 等对葡萄进行的分根试验结果表明, 水分胁迫促使 ABA 积累, 影响气孔传导和蒸腾速率, 但叶、茎水势并不降低<sup>[16]</sup>。上述分根试验结果均表明, 对果树进行根系分区供水可以调控地上部植株的生长过程, 通过水分胁迫信号 ABA 改变叶片气孔开度, 调控光合作用, 提高水分利用效率。

目前, 酶联免疫测定技术已广泛用于 ABA 的定量分析, 为人们对 ABA 的作用及其机理的深入研究提供了有效手段, 现在用 RIA 技术可以快速、微量、精确的测定 ABA, 甚至可对单个细胞的 ABA 定量研究, 荧光探针、影像技术和膜片钳等先进手段的采用, 使深入研究水分调控与 ABA 信号传导的关系成为可能<sup>[17]</sup>。但这些技术普遍代价太高, 操作难以掌握, 限制了其应用范围, 使分根试验和根源 ABA 的研究仍还处于室内试验和水分生理研究方面, 热脉冲技术也为人们深入研究

植物根茎液流动态变化提供了条件,如何在空间上主动的改变水分供应方式,刺激根系补偿生长功能,调控地上部生长过程和光合作用,已经成为植物生理科学和灌溉科学的热点问题。

### 1.3.2 国外部分根区干燥 (PRD) 技术研究进展

近几年来,在对传统的分根试验和根源干旱信号进行研究的基础上衍生的部分根区干燥 (Partial Root-zone Drying, 简称PRD) 作为一种调控灌溉技术引起了人们极大的兴趣, PRD技术起源于植物生理学家对传统的分根试验和根源干旱信号的探索研究,后来又发展为干湿交替供水的模式,但其名称仍沿用部分根区干燥 (PRD) 一词<sup>[18-22]</sup>。笔者认为,部分根区干燥 (PRD) 技术的称谓没有强调交替,没有作为一种灌溉调控技术提出来,容易与固定隔行灌、宽行灌、跳行灌等传统的灌水技术相混淆,因此更宜称之为根系分区交替灌溉技术 (简称APRI),后者更能从技术要点和内涵方面揭示该技术的实质。但为了与外文文献对应和叙述方便,下文中涉及到外文文献中的PRD仍沿用其称谓。

PRD技术起源于植物生理学家对传统的分根试验和根源干旱信号的探索,后来又发展为干湿交替供水,但没有作为一种灌溉方式进行深入研究。20世纪80年代末、90年代中期以前,植物生理学中传统的分根试验只是作为一种试验手段对根系部分进行干燥、部分进行湿润处理以研究根冠信号传导,始终只给1/2根区供水,让另1/2根区干燥,但处理时间长以后,长期干燥的1/2根系会受影响,或者死亡。后来又发展为干湿交替供水,但没有作为一种灌溉方式进行深入研究。

国外部分根区干燥技术的应用研究现在主要集中于该技术对果树产量、用水量、水分利用效率以及品质等应用效果方面,并逐步由室内盆栽试验向保护地和大田应用方向发展。Dry、Loveys和Stoll等人于1998年开始在酿酒葡萄上进行PRD应用研究,他们在葡萄行两侧各布设一根滴灌管,交替控制部分根区湿润,部分根区干燥,研究内容涉及葡萄的气孔传导、光合作用、生长状况、修剪量、产量、品质以及葡萄酒酿制等内容。研究表明,部分根区干燥的处理修剪量明显减少而葡萄产量不下降,葡萄口感、颜色有所改善,酿制的葡萄酒色泽、口感、品评等级也都有所提高<sup>[23]</sup>。康绍忠等于1999年在澳大利亚维多利亚州Tatura附近的梨园中进行了PRD技术研究,对梨树的根茎液流、土壤水分分布、水果数量、产量、水分利用效率进行分析的结果表明,分区交替灌溉中湿润侧根系存在强烈的吸水补偿效应。分区交替灌溉处理的土壤水分剖面分布是上低下高型,即可利用少量地下水,又不会产生深层渗漏;交替灌水使水果个数明显增加,产量提高,耗水量相对减少<sup>[24]</sup>。Gu等以常规滴灌和PRD滴灌相比较,首次在美国研究了PRD对酿酒葡萄水分利用、植株生长、矿物质含量、产量以及浆果内容物的影响及其适应性。研究表明,PRD处理气孔导度、蒸腾速率、植株侧向生长和修剪量都相对减小,WUE提高,相同灌水量时灌水方式并不影响植株生长;不同灌水量PRD处理的葡萄产量和果实内容物含量没有显著差异<sup>[25]</sup>; Zegbe等发现PRD技术能使西红柿早熟,颜色较红且固形物含量高,PRD可促进糖分向果实运移,保证果实生长,提高口味和感官品质<sup>[26]</sup>。

目前,Davies等也注意到这种技术在节水农业中应用的广阔前景,发起成立了PRD 联合研究小组(The IRR ISPL IT Consortium),在地中海地区的柑橘、橄榄、柚子、西红柿、葡萄、草莓、苹果等植物上对PRD 技术进行室内盆栽和大田的系统研究,研究小组的科学家来自英国、澳大

利亚、南斯拉夫、葡萄牙、土耳其、摩洛哥等。他们的研究表明, PRD技术可以达到大量节水的目的, 产量保持同等水平或略有下降, 但可促进糖分向果实运移, 保证果实生长, 提高口味和品质。PRD还可应用于盆栽景观树种的节水栽培, 控制土壤交替干旱以保持树型紧凑浓密, 提高观赏价值。如Loveys等在澳大利亚SHIRAZ的葡萄园所做的研究表明<sup>[27]</sup>, 地表交替滴灌的处理水分利用效率比对照(地表滴灌) 提高了58.97%, 耗水量减少了46.0% 而产量仅减少了13.8%, 但葡萄和葡萄酒品质大大改善。Claudia等研究了大田酿酒葡萄在PRD与不灌溉、充分灌溉、亏缺灌溉条件下的茎液流以及气孔导度与光合、蒸腾作用, 研究表明, 采用PRD技术能保持植株水势与充分灌溉相当, 但可以降低气孔开度而不明显降低光合产物, 使水分利用效率提高1倍<sup>[28]</sup>。Tiago等的研究表明PRD可使葡萄水分利用效率提高80%, 而产量基本相当<sup>[29]</sup>。土耳其的Kirda等连续两年研究了温室条件下西红柿PRD以及其他常规水分亏缺对产量的影响, 结果表明应用根系分区交替灌溉技术可节水50% 而产量稍有下降, 相同灌水量条件下交替灌溉处理比其他亏缺灌溉处理的产量高7%~10%, 而其水分利用效率比充分灌溉提高了44.66%~56.31%, 商品果产量在品质不变的情况下则增加了10%~27%。他们对叶片ABA 测定结果表明交替灌溉处理的明显高于充分灌溉和其他亏缺灌溉处理, 为这一灌溉技术的根冠通讯理论提供了更明确的证据<sup>[30]</sup>。等研究表明根系分区交替灌溉能使西红柿早熟, 颜色较红且固形物含量提高, 还可促进其糖分向果实运移。Ali等对马铃薯的研究表明, 相对于充分灌溉, PRD处理节水30%, 水分利用效率提高了60%, 而产量无显著差异<sup>[31]</sup>。

### 1.3.3 国内根系分区交替灌溉技术研究进展

在国内, 康绍忠和张建华等于1996年系统提出了根系分区交替灌溉的概念<sup>[3]</sup>, 阐明了其概念、理论基础和实现方式, 并在节水机理、室内盆栽、试验小区、大田应用等方面开展了系统深入的研究。近年来众多学者对这种灌溉方式下的气孔响应、补偿生长效应、地上地下生物量变化、产量、水分利用效率和品质等方面开展了大量的试验研究, 研究作物涉及玉米、水果和蔬菜等作物。

康绍忠等<sup>[3, 32, 33]</sup>从光合与气孔的关系、根冠干旱信号传递、根系补偿效应与根区土壤水分有效性方面分析了根系分区交替灌溉的理论依据, 即: 光合与蒸腾对气孔开度的反应不同; 局部干燥区域的根系信号能帮助改变作物的气孔开度和调节其水分消耗; 交替控制使部分根系经受一定程度的水分胁迫能改善土壤通透状况和提高根系传导能力; 交替湿润局部根区可减小棵间土壤蒸发和根区深层渗漏从而提高根区土壤水分的有效性。张建华等<sup>[34]</sup>则从光合与气孔的关系角度进一步指出其节水机理: 植物蒸腾失水与气孔导度是线性关系, 而光合作用与气孔导度呈一种渐趋饱和的关系, 使气孔导度从最大值适当降低, 可显著减少蒸腾, 但对光合影响较小。室内试验的结果已经很好的证明了上述结论, 但是在在大田条件下作物的蒸腾失水不仅受气孔控制, 还受界面层扩散阻力的影响, 因此, 大田条件下根系干旱信号可否长期地产生和调控气孔及其节水效果和机理仍需进一步的试验证明。

康绍忠等在甘肃河西民勤沙漠绿洲区连续三年进行的地膜玉米隔沟交替灌溉试验结果<sup>[3]</sup>表明, 采用隔沟交替灌水方式, 在同等灌水量水平下, 可增产2.85%~3.96%, 而同等产量下隔沟交替灌溉比常规灌溉可节水33.3%以上。孙景生等<sup>[35, 36]</sup>研究了隔沟交替灌溉中灌水控制下限对大田夏玉米叶片水分利用效率的影响, 结果证明, 隔沟交替灌溉的玉米气孔导度显著下降, 蒸腾速率

降低, 而光合速率无显著变化, 叶片水分利用效率有所增加; 研究结果显示, 隔沟交替灌溉条件下夏玉米全生育期需水量、棵间土壤蒸发与作物蒸腾量分别较常规沟灌减少了25.36%、35.62%和20.29%, 其结果表明采用隔沟交替灌溉, 灌水下限控制在田间持水量的70%时, 水分利用效率达 $2.432\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 比常规沟灌的最优水分处理提高22.9%, 而产量只降低了2.01%~3.20%。潘英华等<sup>[37]</sup>对地膜玉米的研究也发现隔沟交替灌不降低光合速率而蒸腾速率有所下降, 并有利于提高蒸腾效率, 其中次灌水量低于 $450\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 的两个处理, 全生育期各次灌水前后测定的叶片光合速率都是以隔沟交替灌溉处理的为最高。从上述研究结果来看, 隔沟交替灌溉优化了作物叶片气孔行为, 使光合速率不降低而蒸腾速率明显下降, 大量节水而产量不降低或略有下降, 从而达到提高水分利用效率的目的。

杜社妮等<sup>[38]</sup>对日光温室中常规灌溉、固定灌溉、隔沟交替灌溉三种灌溉方式下茄子生长和水分利用效率的研究则表明, 隔沟交替灌溉的茄子株高最低, 而光合速率最高; 隔沟交替灌溉处理茄子产量较常规灌溉和固定灌溉分别增产19.52%和25.35%, 水分利用效率分别提高了139.17%和25.39%。胡笑涛等<sup>[129]</sup>进行的温室西红柿垂向交替滴灌试验结果则表明, 中等水分处理的交替滴灌其水分利用效率和生产效率分别是同等水分条件下常规地面滴灌处理的1.43倍和1.61倍。中等水分处理的地表滴灌的产量仅比交替滴灌高6.64%, 而灌水量却高出1.73倍。赵志军等<sup>[39]</sup>于2004年研究了全部灌溉(灌水量 $500\text{kg}\cdot\text{株}^{-1}$ )、1/2区域交替灌溉(灌水量 $300\text{kg}\cdot\text{株}^{-1}$ )、1/2区域固定灌溉(灌水量 $300\text{kg}\cdot\text{株}^{-1}$ )三种不同灌水方式和灌水量对梨水分利用效率的影响, 其产量分析结果表明根系分区交替灌溉处理的产量和单果重与常规灌溉无显著差异, 二者均显著高于固定灌溉, 而常规灌溉、分根交替灌溉、分区固定灌溉的灌溉水生产效率分别为 $23.30\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $39.58\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $30.17\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

周军等研究了不同灌溉方式对葡萄叶片行为和果实品质的影响, 其研究表明, 在膜上灌溉、滴灌、保水剂土施、漫灌等灌溉方式中, 交替灌溉的气孔开度日变化幅度最小, 交替灌溉显著提高了葡萄果皮花萼苷的含量, 供试两个品种的果实中铁含量都是交替灌溉处理的最高<sup>[40]</sup>。杜太生研究了不同灌溉模式对葡萄经济产量和品质的影响, 研究表明, 沟灌和滴灌条件下根系分区交替灌溉均显著提高了鲜食葡萄 $V_c$ 含量, 不覆膜沟灌和滴灌条件下根系分区交替灌溉均使葡萄浆果果酸含量明显降低, 而可溶性固形物含量显著提高, 与对照相比明显改善葡萄的口感, 总体上提高了葡萄的营养价值<sup>[41]</sup>。

目前国内对APRI的概念与技术体系、APRI的节水效应、水肥利用及其对WUE的影响等均进行了系统深入的研究。但更多的是偏重于室内试验和玉米等大田作物, 主要应用方式是隔沟交替灌溉, 对大田交替滴灌的应用模式和技术尚未见报道, 研究内容则多侧重于产量和水分利用效率的研究, 而对该灌水方式下农作物或水果品质指标的研究较少。

#### 1.4 果树根系分区交替灌溉需要进一步研究的问题

与一般大田作物相比, 果树具有较宽大的根系, 且采用宽行距种植, 水果的产量、品质等对灌溉调控的响应更敏感, 更具有进行根系分区交替灌溉的条件, 是未来非充分灌溉研究的重点。目前对果树节水灌溉技术的研究主要集中在采用具体的节水技术及其应用效果方面, 而对如何利

用根区湿润方式调控根系微生态系统的功能而有效利用水分和养分的机理研究方面还属空白。

探索果树根区交替灌溉的最佳湿润方式和供水模式,将会从传统的灌溉方式和节水思路中走出来,实现节水理论与技术的创新和突破,对于提高果园水的利用率和果树水分利用效率,促进节水增效,无疑具有重要的理论与现实意义。果树根系分区交替灌溉技术的深入研究将会促进植物水分生理、土壤物理、农业气象、农田水利等多学科之间的相互交叉渗透,使此项技术的研究更加系统化和量化,以增加根系分区交替灌溉的量化和可操作性。

果树根系分区交替灌溉是一项节水潜力很大的新的灌溉方式,具有广泛的适应性,对现有灌溉技术稍加改造或在灌水管理上适当改进即可实现根系分区交替灌溉。

目前还需要进一步研究的问题有以下几个方面:①根系分区交替灌溉节水机理研究,包括根源干旱信号 ABA 对气孔行为、光合、蒸腾、植株生长与产量形成等生理生态过程的影响,不同供水方式→土壤水分→ABA 的传输→光合作用之间的调控机制,根系分区交替灌溉对植物叶水势、根系水分传导、根系分布和补偿生长效应及生理生化过程的影响;②根系分区交替灌溉对大田作物或果树生长、水分利用效率以及农产品或水果产量、品质的影响等问题的研究;③根系分区交替灌溉条件下果树根茎液流的测定及其变化规律分析和果树蒸腾模拟方法,以及依据果树蒸腾模型精量控制灌溉的研究;④适宜不同地区采用的大田根系分区交替灌溉制度和灌水模式的研究,具体包括不同土质、不同作物或果树品种和气候条件下的适宜土壤水分调控方法、含水率下限指标、交替灌溉的最佳起始与终止时间(生育期)、交替周期、灌水量、灌水深度、水流入渗特性的研究,根系分区交替灌溉灌水技术要素的最优组合设计方法,以及不同地区不同作物根系分区交替灌溉的适用模式及相应的田间管理技术等问题的研究;⑤根系分区交替灌溉在盐碱化地区的适用性,该灌水方式下盐分的积累和相应的排盐问题等的研究;⑥根系分区交替灌溉自动化技术研究,包括实施根系分区交替灌溉的田间灌水管道和灌水器的最优构造,控制灌水管出水口水流的交替阀、控制毛管交替供水的自动控制器等设备的研制。

## 第二章 研究方法 with 试验方案

本论文主要针对根系分区交替灌溉 (APRI) 这一新的节水灌溉技术于甘肃河西走廊石羊河流域干旱荒漠绿洲区在葡萄上的应用问题, 围绕 APRI 的节水机理、应用模式、节水效果及其对生长、光合速率、蒸腾速率与气孔响应、产量与品质、水分利用效率的影响等科学问题进行试验研究和机理分析。本章是对论文的研究方法、技术路线、试验方案与布设、观测指标与测定方法等进行详细的说明。

### 2.1 研究方法 with 技术路线

本论文采用田间小区试验方法, 力求通过田间试验研究和示范推广, 发展经济作物葡萄生理节水调控与水分高效利用的新理论和新技术, 紧密结合石羊河流域干旱荒漠绿洲区产业结构调整和水资源严重短缺的实际, 以提高作物水分生产效率、节水优产和改善品质为最终目标, 开拓旱区农业节水的新途径。

### 2.2 研究目标 with 研究内容

本论文的主要研究目标是探求干旱荒漠绿洲区根系分区交替灌溉对葡萄生长、产量、品质和 WUE 的影响及其应用模式。

本论文的研究内容主要包括以下三个方面: ①探求适合甘肃石羊河流域沙漠绿洲区葡萄的 APRI 灌水模式及其对葡萄生长发育及产量、特别是品质指标的影响; ②通过对葡萄光合、蒸腾速率及气孔导度、叶水势、等水分生理指标的测定, 研究 APRI 对葡萄生理指标的影响; ③结合  $ET_0$  和气象数据等推求 APRI 条件下的  $K_c$  值及作物需水量, 分析葡萄耗水规律。

通过大田试验研究, 分析根系分区交替灌溉条件下葡萄作物生理调控与气孔响应、作物系数和耗水规律以及经济产量、品质 and 水分利用效率, 在此基础上探求干旱荒漠绿洲区葡萄高效用水生理调控的机理和对作物生长、产量形成和品质影响的调控机制, 寻求适合甘肃河西走廊石羊河流域干旱荒漠绿洲区葡萄的适宜灌水模式和灌溉制度, 为干旱半干旱地区农业高效用水提供有效途径和合理模式, 缓解当地水资源紧缺的状况, 以取得更大的经济、生态和社会效益。

### 2.3 试验区概况

葡萄田间试验于 2006 年 3 月~2006 年 10 月在中国农业大学石羊河流域农业与生态和节水试验站 (37°52'20"N, 102°50'50"E) 进行, 试验区位于甘肃省武威市凉州区清源镇, 地处腾格里沙漠边缘, 为典型的内陆荒漠气候区, 地处黄羊河、杂木河、清源灌区交汇带, 海拔 1581m。该地区光热资源非常丰富, 全年日照时数达 3000h 以上, 无霜期 150d 以上, 年平均气温为 8℃, 大于 0℃的积温达 3550℃以上, 昼夜温差大。但水资源相对匮乏, 多年平均降水量仅为 164.4mm 左右, 而多年平均水面蒸发量达 2000mm 左右。土壤质地为灰钙质轻砂壤土和湖积土, 地面向下 1m 内土壤干容重为 1.45g·cm<sup>-3</sup>, 孔隙率为 52%, 田间持水率为 36.58%, 凋萎系数为 10% (上述

两者均为体积含水量)。地下水埋深达 25m~30m。土壤肥力水平较低，速效磷肥含量  $5\sim 8\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，有机质含量 0.4%~0.8%，土壤 PH 值约为 8.2，矿化度  $0.71\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，土壤速效性盐离子含量 0.12%~0.56%。灌溉水源为地下水。

## 2.4 试验方案设计与实施

以当地主栽鲜食葡萄品种里扎玛特 (*Vitis vinifera L. cv Rizamat*) 为供试作物，葡萄园于 1999 年建国，2000 年定植，按东西方向种植，行距与株距分别为 2.9m 和 1.8m，葡萄行长度为 24 米，葡萄园总面积约为  $17500\text{m}^2$ ，试验区位于葡萄园的中部。采用沟灌和滴灌两种灌水技术。

### 2.4.1 沟灌葡萄试验设计与实施

为实现根系分区交替灌溉，在葡萄行两侧分别开沟，灌水沟近似为梯形，上、下底宽、沟深分别为 30、70、30cm，垄宽 40cm；试验前对葡萄园进行土壤成分和养分分析，在园中心位置选取长势均匀且土壤结构和肥力一致的葡萄进行试验，设隔沟交替灌溉 (AF)、常规沟灌 (CF)，和变更灌水制度即相较前二者灌水强度减半，灌水周期缩短一半，灌水总量保持一致的隔沟交替灌溉 (AF2)、常规沟灌 (CF2)，共四种处理，隔沟交替灌溉与常规沟灌的布设方式如图 2-1 所示。为监测葡萄不同根区土壤水分动态变化，在每棵供试葡萄植株两侧灌水沟内分别布设一根 Diviner2000 土壤水分测管，不同灌溉模式处理的灌溉时间参照当地葡萄园常规灌溉时间确定，隔沟交替灌溉的灌水定额取常规沟灌灌水定额的 2/3。灌溉时用软管直接进行灌水，水管末端安装水表以精确控制灌水量，在每种灌水方式处理内，随机选择长势一致的葡萄树进行相关指标的测定与分析。试验期间除灌水外，各处理锄草、施肥、修剪等田间管理均保持一致。

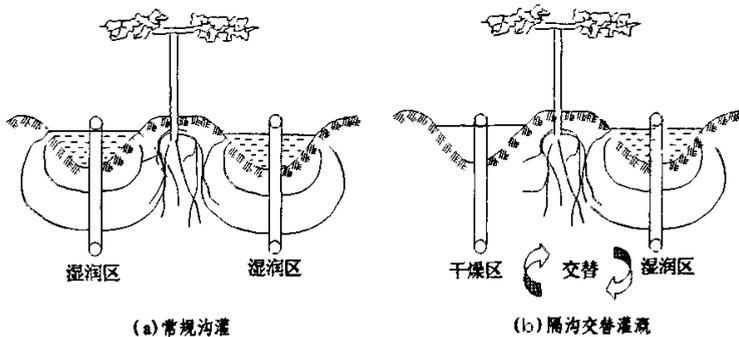


图 2-1 葡萄不同沟灌灌水模式示意图

### 2.4.2 滴灌葡萄试验设计与实施

葡萄滴灌试验以一行葡萄作为一个处理，在每行选择 3 株长势均匀健壮的植株进行土壤含水率、长势、生理指标等的观测。滴灌管布设采用分支控制法，为了便于控制，在每个毛管前加装阀门。支管前安装压力表和水表，系统工作压力为 0.1MPa。采用压力补偿式滴头，流量为  $4\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 。系统安装时先将毛管沿葡萄行铺设，再在每株葡萄的东西两侧根据不同灌水方式安装滴头。

设单管交替滴灌 (ADI)、常规滴灌 (CDI)、固定一侧滴灌 (FDI) 三种灌水方式。ADI 处理和 FDI 处理在每株葡萄的东侧安装一个滴头, CDI 处理在每株葡萄的东西两侧各安装一个滴头。在毛管首部预留 2m 形成一个圆环, 以便前后拖动毛管实现交替灌溉。各处理布设情况如图 2-2 所示。其中 ADI 处理第 1、3、5 次灌水时滴头在各葡萄植株的东侧 40cm 处, 第 2、4、6 次灌水前将毛管向西移动 80cm; FDI 和 CDI 处理毛管则不移动。各处理选择 3 株葡萄在其东、西侧各 45cm 处分别布设土壤水分测管, 监测 0~100cm 深度每 10cm 层次的土壤水分动态变化。

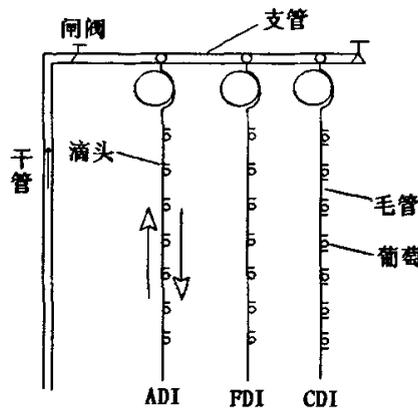


图 2-2 不同根区滴灌系统布设示意图

试验期间实际的降雨和灌水情况如表 2-1。试验期间的追肥措施为: 各处理灌水前每株穴施磷酸二氢钾 0.5kg, 中间施两次尿素, 施肥量相同。其它田间管理措施如锄草、施肥、修剪等均保持一致。

表 2-1 葡萄全生育期降水与灌水情况 (甘肃武威, 2006)

灌水技术	处理	全生育期降雨量(mm)	灌水情况		
			灌水次数	灌水定额 (mm)	灌水日期 (月/日)
滴灌	ADI	174 (153.0)	6	9.9	5/16,5/30,6/12,6/25,7/18,8/17
	CDI	174 (153.0)	6	19.8	5/16,5/30,6/12,6/25,7/18,8/17
	FDI	174 (153.0)	6	9.9	5/16,5/30,6/12,6/25,7/18,8/17
沟灌	AF	174 (153.0)	9	10	5/15,5/17,6/12,6/21,6/27,7/04,7/19,8/01,8/17
	CF	174 (153.0)	8	14	5/15,6/12,6/21,6/27,7/04,7/19,8/01,8/17
	AF2	174 (153.0)	6	20	5/15,5/17,6/12,6/27,7/19,8/17
	CF2	174 (153.0)	5	28	5/15,6/12,6/27,7/19,8/17

注: ADI、CDI、FDI 分别表示根系分区交替滴灌、常规滴灌和固定一侧滴灌, AF、CF 分别表示隔沟交替灌溉和常规沟灌。全生育期降雨量一系列括号内数字表示每次降雨量在 5mm 以上的有效降雨之和。

2006 年生育期划分情况如表 2-2。

表 2-2 葡萄生育期划分情况 (甘肃武威, 2006)

年份	新梢生长期	开花期	浆果生长期	浆果成熟期	新梢成熟及落叶期	全生育期
2006	5/01-5/08	5/09-6/10	6/11-7/03	7/04-8/14	8/15-9/10	9/11-10/07

## 2.5 观测指标与测定方法

### 2.5.1 常规气象资料

用距葡萄园 200m 处的自动气象站 (Weather Hawk, Campbell Scientific, U.S.A.) 观测日最高、最低气温, 风速、风向、相对湿度、太阳辐射、降雨量等指标, 参照作物蒸发蒸腾量  $ET_0$  采用 FAO 推荐的计算时段为小时的 Penman-Monteith 公式计算<sup>[42]</sup>:

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_w + 273} u_2 (e^0(T_w) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)_2} \quad (2-1)$$

式中:  $ET_0$ ——参考作物蒸发蒸腾量 (mm/d);  $R_n$ ——作物表面的净辐射量 ( $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ );  $G$ ——土壤热通量 ( $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ );  $T_w$ ——时段平均气温, ( $^{\circ}C$ );  $u_2$ ——2 m 高处的平均风速, (m/s);  $e^0$ ——饱和水汽压, (kPa);  $e_a$ ——实际水汽压, (kPa);  $\Delta$ ——饱和水汽压与温度曲线的斜率, (kPa/ $^{\circ}C$ );  $\gamma$ ——干湿表常数, (kPa/ $^{\circ}C$ )。

### 2.5.2 生长发育性状观测

观测各处理葡萄生长发育状况; 各处理随机选择 3 株分别测定不同生育期的新梢生长量和主干基部直径 (标记并用游标卡尺测定)、结实束数、果实着色及生长速度等指标。平时注意记录各处理葡萄的长势、病虫害等情况。

### 2.5.3 土壤含水率

用土壤水分廓线仪 (Diviner2000, Sentek Pty Ltd., Australia) 测定 0~100cm 土壤含水率分布 (包括供水区和干燥区), 每 10mm 测定一次。试验期间每 3~5d 测定一次土壤含水率, 灌水前后和降雨后加测。

### 2.5.4 水分生理指标

用便携式光合作用测定系统 (LCi Portable Photosynthesis System, ADC BioScientific Ltd., England) 测定, 每个处理均选择测定含水率的相应 3 株进行定点测定, 于每株葡萄外围光照充足部位挂牌标记倒 3 节主梢叶片, 选定晴朗无云的天气测定不同处理叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度日变化, 每两小时测定一次, 各次测定在 30min 内完成。单叶水分利用效率 (WUE) 用叶片通过蒸腾消耗一定量的水所同化的  $CO_2$  量来表示, 即:

$$WUE = P_n / T_r \quad (2-2)$$

式中： $WUE$  为单叶水分利用效率 ( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{mmol}^{-1}\text{H}_2\text{O}$ )， $P_n$ 、 $T_r$  分别代表光合速率 ( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 和蒸腾速率 ( $\text{mmolH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。

选择典型生育期分别在日出前 (6:30~7:00) 和正午 (12:00~13:00) 用植物压力室 (Model 3005, PMS Instrument Company, Albany, USA) 测定顶端完全展开叶片的黎明前叶水势和正午叶水势, 每株葡萄随机选择 3 片向阳叶进行离体测定, 并选择晴朗无云天气测定叶水势日变化, 测定时将待测叶片挂牌标记。

## 2.2.5 耗水量与作物系数 ( $K_c$ ) 的计算

不同处理葡萄耗水量由水量平衡公式计算:

$$ET_c = R + I - F \pm Q + \Delta W \quad (2-3)$$

式中： $ET_c$  为作物蒸发蒸腾量 (mm)， $R$  为降水量 (mm)， $I$  为灌水量 (mm)， $F$  为地表径流 (mm)，考虑到葡萄园试验期间无地表径流发生，此处取  $F=0$ ； $Q$  为上移或下渗量 (mm)，根据预试验开挖土壤剖面的观测结果，沟灌条件下最大灌水定额 (28.0mm) 下土壤最大湿润深度为 50~60cm，滴灌条件下最大灌水定额 (19.8.0mm) 下土壤最大湿润深度为 40~50cm，土壤水分实测资料也表明 90cm 和 100mm 相临深度处土壤水分变化不明显，因此取  $Q=0$ ； $\Delta W$  为土壤贮水量的减少量 (mm)，用 Diviner2000 土壤水分廓线仪测定的土壤含水量由下式求得：

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n (W_{i1} - W_{i2}) \quad (2-4)$$

式中： $i$  为土壤层次数， $n$  为土壤层次总数目。Diviner2000 土壤水分廓线仪测定的含水率为每 10cm 一层的体积含水率，测定深度为 100cm，因此  $n$  值取为 10。

为了方便水量平衡计算，将体积含水率换算为以 mm 为单位的土壤含水量  $W$ ：

$$W = \theta \cdot h / 100 \quad (2-5)$$

式中： $W$  为土壤含水量 (mm)， $\theta$  为土壤体积含水率 (%)， $h$  为土层厚度 (mm)。

## 2.2.6 产量与品质指标测定

每个处理小区随机选择 5 株，按上、中、下三个部位随机选择 10 个果穗，分别用常规方法测定单株产量、平均果穗重、穗粒数、穗体积、平均单果重，并由此估算理论产量。在果实成熟时每个处理取 2000g 用于测定平均果粒重，用排水法测定平均果粒体积，量测果穗大小，并对典型观测植株进行实际产量测定。葡萄品质指标的测定是在每个小区选择 5 株代表性植株，按上、中、下三个部位随机选择 10 个果穗，再从中随机选取 2000g，分别用于可溶性固形物含量、可滴定酸（果酸）含量和维生素 C ( $V_c$ ) 含量的测定。

### 可溶性固形物含量

用 WT-IV 型手持式折光仪进行测定，用左手四指握住橡胶圈，右手调节目镜，以防体温传

入仪器，打开进光板，用柔软绒布将折光棱镜擦拭干净，将蒸馏水滴在折光棱镜上，轻轻合上进光板，使溶液均匀分布于棱镜表面，并将仪器进光板对准光源或明亮处，通过目镜观察视场，如视场明暗分界不清楚，则旋转目镜使视场清晰，再旋转较零螺钉，使明暗分界线置于零位。然后擦拭蒸馏水，取 20g 新鲜果肉，研磨均匀后，用移液管汲取原汁液滴在折光棱镜上，此时观察视场明暗分界线，该线所处分划刻度值即为所测溶液可溶性固形物含量的百分数值，各处理 5 次重复。

### 可滴定酸含量（果酸）

果实去籽打浆后，采用滴定法测定可滴定酸含量，测定步骤为：

① 新鲜果肉中游离有机酸的提取 称取葡萄 5~10g，置于研钵中研成糊状，用蒸馏水洗入 250ml 三角瓶中，使溶液体积在 100ml 以内。于 80℃ 恒温水浴中浸提 30min，不断搅拌，取出冷却后用滤纸过滤，用蒸馏水冲洗残渣 2~3 次，合并滤液和上清液，用蒸馏水定容至 100ml，混匀备用。

② 滴定 去稀释后的试液 20ml，转入 100ml 三角瓶中，加酚酞指示剂 2~3 滴，用  $0.1\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 NaOH 标准溶液滴定至浅粉红色不褪为止。记录滴定所用 NaOH 标准溶液的 ml 数。

③ 结果计算 设滴定值为 a ml， $0.1\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 NaOH 效价为 f，稀释体积为 V (ml)，则标准的  $0.1\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 NaOH 的滴定值 x (ml) 为：

$$x = a \times f \quad (2-6)$$

对于试液的滴定值 y (ml) 为：

$$y = a \times f \times V / \text{滴定时取用的试液 ml 数} \quad (2-7)$$

葡萄中的有机酸常以酒石酸为代表，1ml  $0.1\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 NaOH 标准液相当于苹果酸 0.0075g，由此可以计算有机酸含量占鲜重百分数：

$$\text{有机酸含量 (\%)} = \frac{a \times f \times 0.0075 \times V}{a \times W} \times 100 \quad (2-8)$$

式中：V 为提取液总体积 (ml)；a 为滴定时取用试液体积 (ml)；W 为样品重量 (g)。

各处理样品重复测定 4 次。

### 维生素 C 含量 ( $V_c$ )

果实去籽打浆后，采用 2,6-二氯酚测定法测定  $V_c$  含量，该方法的原理是根据  $V_c$  和 2,6-二氯酚之间的氧化还原反应。氧化型的 2,6-二氯酚在酸性溶液中呈红色，在中性和碱性溶液中呈蓝色。因此，当用 2,6-二氯酚滴定含有抗坏血酸的酸性溶液，而抗坏血酸尚未被全部氧化时，滴下的 2,6-二氯酚立即呈现无色。所以，溶液从无色转为微红色时，即表示溶液中的抗坏血酸刚刚被全部氧化，此时即为滴定终点。测定步骤为：

① 称取 4.0g 新鲜的葡萄果肉，置于研钵中，加 5ml 的 2% 草酸溶液研成匀浆，通过漏斗将

样品提取液转移到 50ml 容量瓶内，残液再用 2% 草酸溶液提取 2-3 次，将提取液及残渣一并转入容量瓶。提取用的 2% 草酸溶液总量为 35ml，最后用 1% 草酸溶液定容。如果溶液中泡沫较多，可加几滴乙醚消除泡沫后再定容摇匀过滤，滤液备用。

② 吸取滤液 10ml，置于 50ml 三角瓶中，立即用 2,6-二氯酚溶液滴定至出现明显的粉红色，在 15 秒内不消失为止。记录所用滴定液体积。

③ 在另一只 50ml 容量瓶内，放入 35ml 2% 草酸，并用 1% 草酸溶液定容，摇匀。取此液 10ml，放入另一只 50ml 三角瓶内，用 2,6-二氯酚钠滴定至终点。并记录滴定液用量，测定结果可用下式计算：

$$V_c = \frac{(V_1 - V_2) \times K \times V}{W \times V_3} \times 100 \quad (2-9)$$

式中： $V_c$  为样品中维生素 C 的含量 ( $\mu\text{g} \cdot 100\text{gF/W}$ )； $W$  为样品鲜重 (g)； $V_1$  为滴定样品用滴定液 ml 数； $V_2$  为滴定空白液所用滴定液 ml 数； $V_3$  为测定样品所用滤液 ml 数； $V$  为样品提取液稀释总体积 (50ml)； $K$  为滴定液所能氧化  $V_c$  的 mg 数，可由结果算出。

各处理样品重复测定 3 次。

### 第三章 根系分区交替灌溉对葡萄生理生态指标的影响

#### 3.1 根系分区交替灌溉对大田葡萄叶片水分状况的影响

植物水势的测定被认为是了解植物水分亏缺程度的最直接方法，其中叶水势的测定被多数研究作为衡量植物水分状况的指标。表 3-1 是 2006 年 8 月 21 日测定的不同灌溉模式下葡萄叶水势的日变化。由图 3-1 可以看出不同灌溉模式下葡萄叶水势的日变化趋势基本一致，早上 6:00 葡萄的叶水势在 -0.34~-0.49MPa 之间，8:00 后随日出后气温的升高和太阳辐射的增强，叶水势迅速降低，10:00~12:00 叶水势下降趋势趋缓，至 12:00~14:00 之间达到最低值，14:00~18:00 葡萄叶水势缓慢回升，18:00 以后随太阳逐渐落山而迅速升高，至晚上 20:00 时左右回升至 -0.45~-0.61MPa。

不同沟灌模式的叶水势则表现为隔沟交替灌溉低于常规沟灌，在下午 14:00 时 AF 和 CF 处理显著低于 AF2 和 CF2 处理，18:00 时 CF2 处理显著高于其它处理，其它时段各处理叶水势值差异不显著。

不同滴灌模式的叶水势值在 6:00~12:00 左右未表现出明显差异，在 12:00 时 CDI 和 FDI 处理的叶水势值达到最低值 -1.88MPa 和 -1.78MPa，而 ADI 处理在 14:00 时达到最低值 -1.84MPa；此后各处理叶水势值均回升，18:00 时叶水势值大小顺序为 CDI>FDI>ADI；18:00~20:00 叶水势迅速回升，至 20:00 时恢复到略高于早 7:00 时的水平。

表 3-1 葡萄不同灌溉模式下叶水势的日变化 (2006-08-21, 单位: MPa)

处理	测定时间							
	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
ADI	-0.36	-0.44	-1.66	-1.81	-1.84	-1.77	-1.66	-0.51
FDI	-0.34	-0.51	-1.71	-1.78	-1.74	-1.58	-1.35	-0.55
CDI	-0.47	-0.43	-1.62	-1.88	-1.85	-1.67	-1.56	-0.65
AF	-0.49	-0.44	-1.34	-1.70	-1.97	-1.59	-1.52	-0.51
CF	-0.43	-0.38	-1.31	-1.67	-1.99	-1.59	-1.50	-0.61
AF2	-0.39	-0.34	-1.51	-1.59	-1.82	-1.68	-1.59	-0.52
CF2	-0.36	-0.38	-1.38	-1.58	-1.78	-1.59	-1.23	-0.45

黎明前水势代表植物水分恢复状况，从而可以用来判断植物水分亏缺程度。一般来说，受到水分胁迫的植物其清晨水势会发生明显的下降<sup>[43]</sup>，但也有文献指出用黎明前叶水势判断植物水分状况有两个问题，一是黎明前有露水时的叶水势值远高于无露水时，而大多数天气情况下都有露水；二是黎明前叶水势随生育期下降，应进行趋势判别<sup>[44]</sup>。

试验期间在葡萄浆果成熟期于 2006 年 8 月 18 日~24 日分别测定了葡萄不同灌溉模式下灌水后第 1、4、7d 的黎明前叶水势 (图 3-2)，结果表明，除灌水后第一天外，交替滴灌处理的葡萄黎明前叶水势均略低于常规滴灌，差异达显著水平。这说明随着灌水后天数的增加，由于白天蒸腾失水造成植物体内水分过多散失，晚上水分得到恢复。另外，本试验中测定黎明前叶水势是叶面也有露水，叶面露水是否会对叶水势产生影响有待进一步研究。

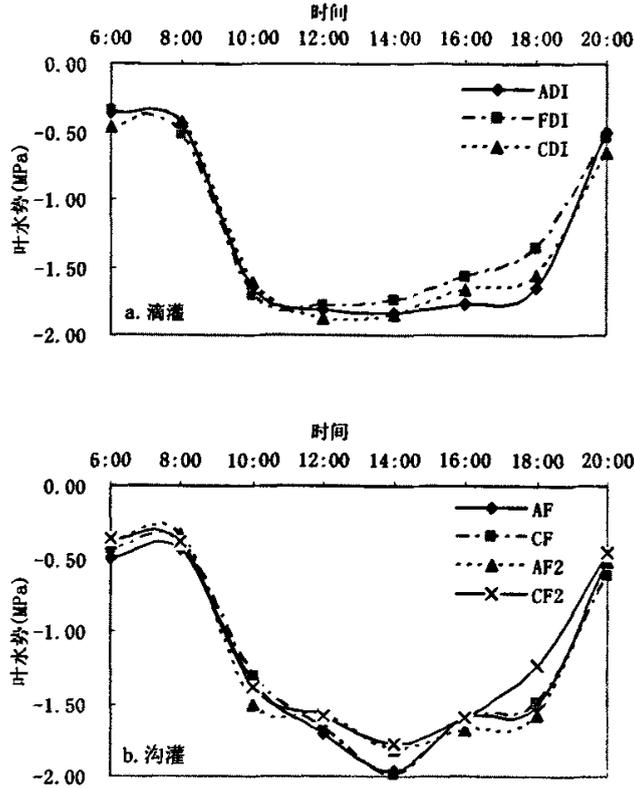


图 3-1 葡萄不同灌溉模式下叶水势的日变化 (2006-08-21)

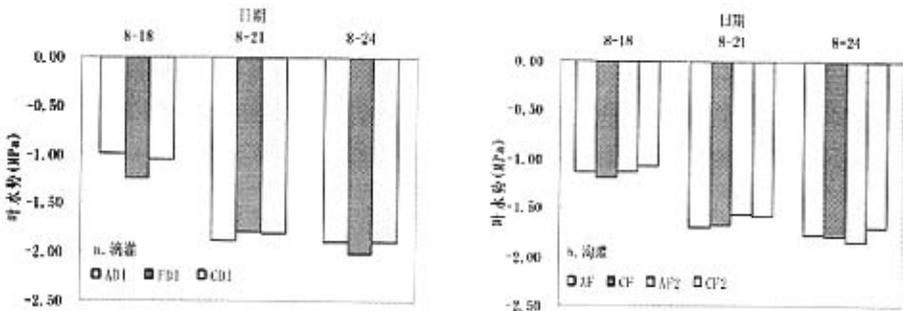


图 3-2 葡萄不同灌溉模式下凌晨 6:00 时的叶水势变化 (2006)

从葡萄叶水势的日变化规律可看出，其最低值一般出现在 12:00~13:00，此时的叶水势值代表着作物一天中经受的最强水分胁迫程度。为了研究不同灌溉模式下一个灌水周期内正午叶水势值的变化规律，于 2006 年 8 月 18 日~24 日分别测定了葡萄不同灌溉模式下灌水后第 1、4、7d 的正午叶水势变化情况 (图 3-3)。结果表明，葡萄不同灌溉模式下，灌水后 1d 正午叶水势表现为  $FDI < ADI < CDI$ ，差异达显著水平；灌水后第 4d 和第 7d 各处理的正午叶水势基本接近，统计分析差异均未达显著水平。不同沟灌模式条件下，各处理正午叶水势也基本相近，差异均未达显著水

平。

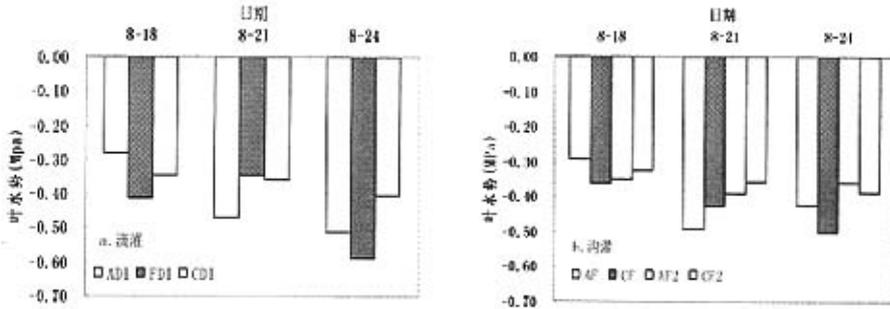


图 3-3 葡萄不同灌溉模式下正午 12:00 时的叶水势变化

### 3.2 不同灌溉模式对大田葡萄光合、蒸腾、气孔导度与 WUE 的影响

于 2006 年 8 月 3 日对不同滴灌模式下葡萄叶片光合、蒸腾速率和气孔导度日变化的测定结果 (表 3-2) 表明, 在一天的动态变化过程中, 常规滴灌处理的叶片光合速率和蒸腾速率均高于 ADI 和 FDI 处理, 但这种较高的光合速率是以更多的水分消耗为代价的, 其水分利用效率一致处于较低水平。研究结果表明, 根系分区交替滴灌可以保证作物一部分根区处于较湿润状态, 另一部分根区处于相对于干燥状态, 干旱区域的根系产生干旱信号传递至地上部, 使气孔开度减小、气孔导度降低, 光合速率略有降低或下降不显著, 而蒸腾速率明显下降, 减少了水分的无效散失, 从而提高了水分利用效率。

由图 3-4 可以看出, 葡萄叶片光合速率日变化呈双峰形, 峰值分别出现在 9:00 和 13:00 左右, 且在一天之内呈逐渐降低趋势; 蒸腾速率则呈淡风曲线变化, 在 13:00 左右叶片蒸腾速率达到最大值; 气孔导度与光合速率的日变化趋势其本一致, 同样为双峰曲线, 峰值分别出现在 9:00 和 13:00 左右; 水分利用效率日变化呈现为“U”形, 在上午 7:00 和傍晚 17:00 较高, 在午间 11:00~15:00 最低。由图中还可看出, 滴灌条件下三种灌溉模式的葡萄叶片光合速率、蒸腾速率和气孔导度均表现为  $CDI > FDI > ADI$ , 各处理的大会分利用效率尽管比较接近, 但仍表现为  $ADI > FDI > CDI$ 。

### 3.3 讨论与小结

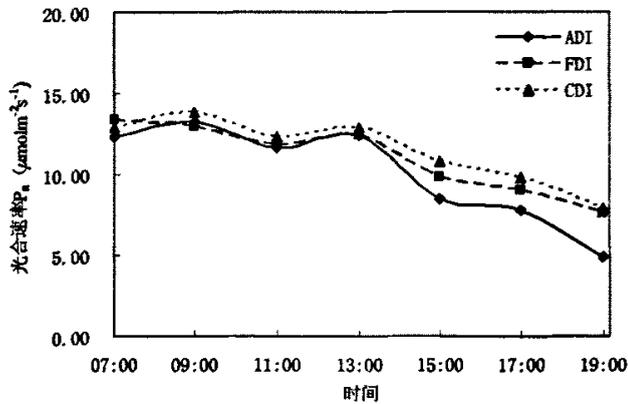
植物的生长发育是不同内激素平衡调节的结果, 影响植物生长发育的植物激素有生长素类、赤霉素类、细胞分裂素类、脱落酸和乙烯。在水分胁迫状态下, 植物激素的平衡调节作用往往受到干扰甚至破坏, 从而对植物的各种生理过程和生长发育产生影响, 但植物在长期经受干湿交替的环境后也会产生一定的适应性变化, 即生长速度的降低和叶面积的减少。这些适应性均是通过改变植物激素平衡进行调节的结果<sup>[44]</sup>。研究表明当植物生长在干燥土壤中时将产生一种根信号, 主要是脱落酸(ABA), 它主要是在土壤的干燥区的根中产生, 且逐渐传输到枝叶, 而脱落酸(ABA)是一种对植物生长、发育、抗逆性、气孔运动和基因表达等都有重要调节功能的植物激素, 因此, 通过不同的灌溉模式调控植物体内激素平衡并影响其生长发育状况具有较大的可行性。

表 3-2 不同滴灌模式下葡萄叶片光合、蒸腾速率、气孔导度与水分利用效率的日变化 (2006-08-03)

测定指标	处理	测定时间						
		07:00	09:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00
$P_n$	LAD	11.33	13.25	12.63	12.44	8.45	7.80	4.92
	LFD	12.37	13.00	11.84	10.45	10.82	9.04	7.62
	LCD	12.92	13.82	12.28	12.86	10.81	9.79	7.85
$T_r$	LAD	7.73	10.24	11.61	12.62	10.79	8.17	2.71
	LFD	6.41	11.96	13.23	14.22	11.77	8.85	3.70
	LCD	6.61	11.81	15.88	14.46	11.86	10.66	3.49
$g_s$	LAD	0.49	0.43	0.39	0.46	0.21	0.14	0.08
	LFD	0.52	0.53	0.34	0.46	0.29	0.16	0.13
	LCD	0.37	0.54	0.55	0.39	0.28	0.22	0.11
WUE	LAD	1.92	1.29	1.00	0.99	0.78	0.95	1.82
	LFD	2.09	1.09	0.89	0.88	0.83	1.02	2.06
	LCD	1.95	1.17	0.77	0.83	0.84	0.92	2.25

注:  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $g_s$ 、WUE 分别代表光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率, 单位分别为  $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ;  $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ;  $\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ;  $\mu\text{mol}^{-1}\text{CO}_2 \text{mmol}^{-1}\text{H}_2\text{O}$ , 表中数据均为相同位置叶片 3 次测定的平均值。

在根系分区交替灌溉条件下, 由于始终有一部分根系生长在较干燥的区域, 该区域根系水分胁迫后产生的 ABA 可随着蒸腾流输送至地上部, 促使气孔关闭, 使叶片气孔导度下降, 从而减少了“奢侈”的蒸腾损失, 使水分利用效率大大提高<sup>[45, 46]</sup>。在干旱荒漠绿洲区对葡萄进行不同灌溉模式试验研究结果表明, 尽管气象条件比较复杂, 通过不同灌溉模式调节作物气孔运动进而调控其水分利用过程同样是可行的。



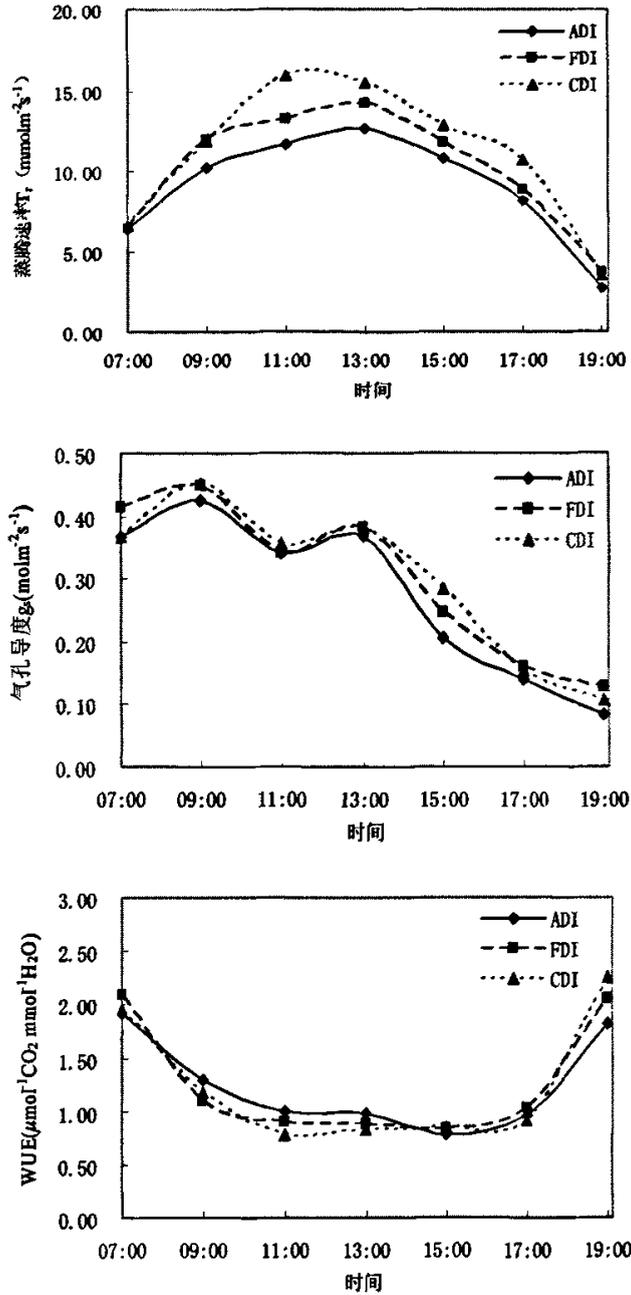


图 3-4 葡萄不同灌溉模式下水分生理指标的日变化 (2006-08-03)

对葡萄叶水势测定的结果表明,根系分区交替灌溉条件下作物的黎明前叶水势略低于常规灌溉,但统计分析结果未达显著水平,叶水势日变化趋势均呈“U”或“V”字型变化。

国外在大田酿酒葡萄的研究表明,采用 PRD 技术可保持植株水势与充分灌溉相当,气孔开度降低而不明显降低光合产物,这与人们普遍接受的气孔导度通过根的化学信号受土壤含水量控

制而并非依赖于叶水势的观点一致。根冠通讯理论的核心是土壤出现一定程度干旱时，植物根系迅速感知干旱，产生化学信号将干旱的信息传递到地上部分，在叶片水分状况尚未发生改变时即主动降低气孔开度，降低叶片生长速率，抑制蒸腾作用，平衡植物的水分利用。在大田条件下验证了根冠通讯理论的正确性<sup>[47]</sup>，证实了其在农业节水中应用的巨大潜力和生态效益。

## 第四章 不同灌溉模式下葡萄耗水规律与作物系数

作物需水量是指作物在适宜的土壤水分和肥力水平下, 维持作物正常发育、获得高产时的植株蒸腾、裸间蒸发以及储存在植株体内的水量之和。由于构成植株体的水量与裸间蒸发相比很小, 可忽略不计, 在实际计算中一般认为作物需水量在数量上近似等于高产水平条件下的植株蒸腾和裸间蒸发以及构成植株体的水量之和, 作物需水量是在特定(适宜)条件下的作物耗水量<sup>[48]</sup>。作物耗水规律是确定灌水量、灌水时期、灌水方式和灌水部位的依据, 是确定精准灌溉工程、制定大田作物灌溉制度、提高水分利用效率的理论基础。

作物系数( $K_c$ )是计算作物需水量的重要参数, 它反映了作物本身的生物学特性、产量水平、土壤水分状况以及管理水平等对作物需水量的综合效应, 目前, 国际上较通用的作物需水量计算方法是: 首先计算参考作物蒸发蒸腾量  $ET_0$ , 然后再用作物系数  $K_c$  修正得到作物某阶段的实际需水量。可见作物系数对于灌溉水管理决策有着极为重要的作用, 而得到特定地理、气候条件下主要农作物的作物系数分布规律已成为节水灌溉技术研究和推广中重要的技术参数<sup>[49]</sup>。

### 4.1 葡萄全生育期参考作物蒸发蒸腾量变化规律

依据 2006 年度自动气象站所测的气象资料, 计算出葡萄生育期内参考作物蒸发蒸腾量  $ET_0$  如图 4-1 所示。可以看出, 葡萄全生育期内  $ET_0$  总体上呈前期稍有增加而中后期逐渐下降的趋势, 全生育期平均值为  $3.33\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ , 某一生育期内  $ET_0$  的值主要受该时期天气状况影响; 萌芽期平均  $ET_0$  为  $3.67\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ , 而后随着日照时数和太阳辐射强度的增加,  $ET_0$  逐渐变大, 在新梢生长期和开花期平均  $ET_0$  分别和  $4.09\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$  和  $4.17\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ , 浆果生长期和浆果成熟期由于阴雨天气较多, 平均  $ET_0$  下降为  $3.44\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$  和  $2.45\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ , 此后随着气温降低和日照时数的减少, 新梢成熟及落叶期平均  $ET_0$  降为  $2.25\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

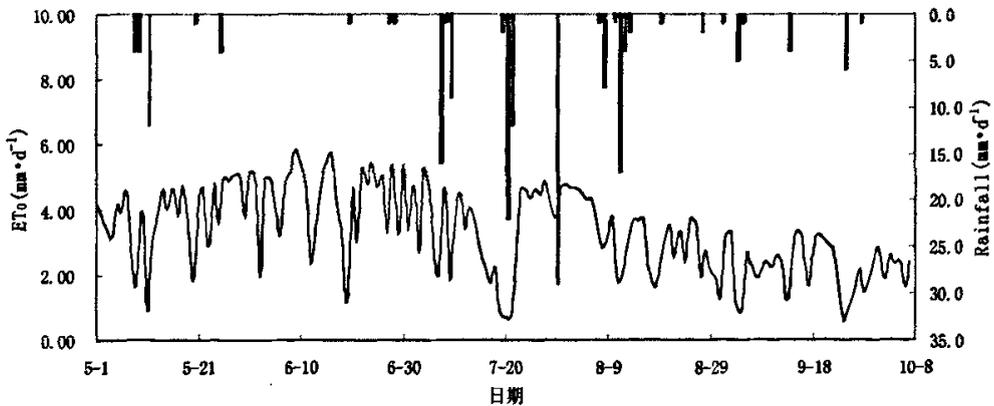


图 4-1 葡萄全生育期降雨量和参考作物蒸发蒸腾量 (甘肃武威, 2006)

### 4.2 不同灌溉模式下葡萄耗水规律及作物系数的变化

根据 2006 年度常规滴灌 (CDI)、固定滴灌 (FDI) 和交替滴灌 (ADI) 的试验资料分析计算的葡萄各生育阶段蒸发蒸腾量、耗水强度和耗水模数列于表 4-1。结果表明, CDI 处理的全生育期蒸发蒸腾量为 294.39mm, 主要取决于灌溉水量和降雨量; ADI 和 FDI 处理的葡萄总灌水定额仅为 CDI 处理的 1/2, 其全生育期蒸发蒸腾量则相应下降了 20.7%。

各处理的耗水强度最大值均出现在浆果生长期, 这是气象因素和葡萄生物量综合作用的结果。ADI 和 FDI 处理较 CDI 灌水量减少一半, 其全生育期平均耗水强度相应下降了 20.76%。在沟灌模式下, 葡萄两侧均匀供水的常规沟灌处理的耗水强度都显著大于隔沟交替灌溉, 其变化趋势主要受灌水时间、灌水量和气候条件差异的影响。

耗水模数反映了不同生育期耗水所占比重的大小。由表 4-1 中数据分析可知, 葡萄耗水模数最大的时期是浆果生长期, 该时期持续时间长达 43d, 大气蒸发能力强, 营养生长和生殖生长均很旺盛, 耗水量约占全生育期耗水总量的 50%~60%左右, 其次为新梢生长期, 该时期持续时间为 33d, 天气晴朗, 气温逐渐升高, 营养生长迅速, 滴灌条件下耗水量占全生育期耗水总量的 17%~20%左右。

表 4-1 不同灌溉模式下葡萄各生育期耗水规律 (2006)

项目	处理	萌芽期	新梢生长期	开花期	浆果生长期	浆果成熟期	新梢成熟及落叶期	全生育期	
ET <sub>c</sub> (mm)	ADI	5.0	41.3	7.5	138.8	25.1	15.8	233.5	
	FDI	5.0	59.6	28.2	147.6	36.7	17.3	294.4	
	CDI	5.0	40.4	7.8	138.6	25.3	16.0	233.1	
	AF	5.0	32.7	27.2	158.1	25.8	16.4	265.2	
	CF	5.0	33.0	37.5	169.9	30.5	17.0	292.8	
	AF2	5.0	42.9	35.5	148.3	36.3	16.8	284.8	
	CF2	5.0	44.0	50.3	156.3	44.9	17.4	317.9	
	耗水强度 (mm·d <sup>-1</sup> )	ADI	0.6	1.3	0.3	3.2	0.9	0.6	1.5
		FDI	0.6	1.8	1.2	3.4	1.4	0.6	1.8
		CDI	0.6	1.2	0.3	3.2	0.9	0.6	1.4
AF		0.6	1.0	1.2	3.7	1.0	0.6	1.6	
CF		0.6	1.0	1.6	4.0	1.1	0.6	1.8	
AF2		0.6	1.3	1.5	3.4	1.3	0.6	1.8	
CF2		0.6	1.3	2.2	3.6	1.7	0.6	2.0	
耗水模数 (%)		ADI	2.14	17.69	3.21	59.44	10.75	6.77	100.00
	FDI	1.70	20.24	9.58	50.14	12.47	5.88	100.00	
	CDI	2.15	17.33	3.35	59.46	10.85	6.86	100.00	
	AF	1.89	12.32	10.26	59.62	9.74	6.18	100.00	
	CF	1.71	11.26	12.80	58.02	10.41	5.80	100.00	
	AF2	1.76	15.05	12.45	52.07	12.76	5.91	100.00	
	CF2	1.57	13.83	15.82	49.16	14.14	5.47	100.00	

表 4-2 中列出了不同灌溉模式下葡萄全生育期内作物系数的计算结果。由表中数据分析可知, 各处理作物系数变化趋势基本一致, 由于灌水量的差异, 常规滴灌 (CDI) 的 K<sub>c</sub> 值均显著大于固

定滴灌 (FDI) 和交替滴灌 (ADI), 而 FDI 和 ADI 处理的  $K_c$  值之间没有显著差异。作物系数最高的生育期均出现在浆果生长期, 其次为浆果成熟期、新梢生长期和新梢成熟及落叶期, 开花期的作物系数最低。

对不同沟灌供水模式下葡萄全生育期作物系数的计算结果表明 (表 4-2), 葡萄的作物系数与耗水强度表现为一致的变化趋势, 浆果生长期作物系数最高, 其次为浆果成熟期和开花期。

表 4-2 不同灌溉模式下葡萄各生育期作物系数 (2006)

灌水技术	新梢生长期	开花期	浆果生长期	浆果成熟期	新梢成熟及落叶期	全生育期
ADI	0.29	0.18	0.94	0.39	0.26	0.44
FDI	0.28	0.19	0.94	0.40	0.26	0.44
CDI	0.42	0.29	1.00	0.58	0.29	0.54
AF	0.23	0.28	1.07	0.41	0.27	0.48
CF	0.23	0.39	1.15	0.48	0.28	0.53
AF2	0.30	0.37	1.00	0.57	0.28	0.52
CF2	0.31	0.52	1.06	0.71	0.29	0.58

### 4.3 讨论与小结

Williams 等<sup>[50]</sup>在美国加利福尼亚用称重式蒸渗仪对一种无核葡萄的耗水规律和作物系数进行了连续三年的试验研究结果表明, 定植前三年的耗水量分别为 300mm、406mm 和 584mm, 第三年的耗水强度平均为  $6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 而其作物系数均在 1.0 以下。

国内苏培玺等<sup>[51]</sup>在地下水位较浅、全年平均降水量为 616mm 的地区对 5 年生巨峰葡萄的研究表明, 葡萄年耗水量为 644.5mm, 其中 6 月~11 月耗水量为 486.5mm, 其沟灌和滴灌灌水量分别为 288mm 和 84mm, 而葡萄单产提高 14.4%, 含糖量增加 1.5%。米孟恩等<sup>[52]</sup>在新疆哈密葡萄园进行的幼龄葡萄滴灌试验结果表明, 当地葡萄沟灌灌水定额达 897.75mm, 而采取滴灌技术可节水 60%~80%。林华等<sup>[53]</sup>在新疆克拉玛依干旱荒漠地区对 3 年生红地球葡萄上进行的沟灌和滴灌试验进行结果则表明, 尽管沟灌用水量为滴灌的 2 倍, 但其生长状况无显著差异。

本研究结果表明, CDI 处理的葡萄灌水 6 次, 总灌水定额 118.80mm, 其全生育期蒸发蒸腾量为 294.39mm, 而 ADI 和 FDI 处理的葡萄总灌水定额仅为 CDI 处理的 1/2, 而全生育期蒸发蒸腾量下降了 20.7%, 全生育期平均作物系数则分别为 0.54 和 0.44。以上数值的差异主要是由叶面积指数、气候条件、葡萄品种和灌溉水平等因素决定的。但全生育期耗水规律和作物系数的变化趋势基本一致。

FAO 推荐的半湿润地区充分灌溉条件下鲜食和制干葡萄初期、中期和后期的作物系数分别为 0.30、0.85 和 0.45<sup>[42]</sup>, 本研究得到的滴灌和沟灌条件下葡萄初期、中期和后期的作物系数分别为 0.30、0.75 和 0.28 之间, 与 FAO 推荐的结果基本处于同一数值范围。国内有关葡萄作物系数的报道较少, 据文献<sup>[54]</sup>报道, 葡萄全生育期中 4~9 月各月日平均需水强度分别为 1.65、1.74、2.22、3.17、2.78 和 2.51  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 本研究得到的各种沟灌和滴灌条件下葡萄耗水强度均在 4mm 以下,

该结果与文献<sup>[54]</sup>中报道的需水强度基本一致。

## 第五章 根系分区交替灌溉对葡萄产量、品质及水分利用效率的影响

传统的灌溉方法大多考虑的是如何从时间上分配有限的水量而被动的实行补充灌溉或限水灌溉来达到提高水分利用效率的目的,没有从刺激作物根系吸水功能和改变根区剖面土壤湿润方式的角度出发来提高作物的水分利用效率<sup>[55]</sup>。根系分区交替灌溉是利用作物生命需水信号进行主动时空调控的灌溉方式,国外的大量研究表明<sup>[18-22]</sup>,部分根区干燥技术(PRD)可减少营养生长冗余,大量节水而不减产或减产较小,酿造的葡萄酒品质提高。但在大田应用中模式比较单一,多为双管交替灌溉。在石羊河流域干旱荒漠绿洲区特殊的环境下,人们更为关注应用根系分区交替灌溉技术在大量节水的同时是否会造成经济作物减产或者品质下降。

为了进一步探讨在西北旱区经济作物葡萄上应用根系分区交替灌溉的潜力和可行性,于2006年5月~10月在甘肃河西走廊石羊河流域干旱荒漠绿洲区开展了葡萄根系分区交替灌溉对经济产量、品质和水分利用效率的试验研究,以期根系分区交替灌溉在干旱地区的推广应用提供理论依据。

### 5.1 根系分区交替灌溉对葡萄产量构成要素的影响

表5-1中列出了2006年度葡萄产量构成要素的考种结果,由表中数据分析可见,交替滴灌的单株果穗数、单穗果粒数要多于固定滴灌和常规滴灌,单株产量交替滴灌>常规滴灌>固定滴灌;沟灌条件下常规灌水次数的处理单株产量明显高于灌水次数多的处理,隔沟交替灌溉的单株产量略高于常规沟灌。

交替滴灌下交替滴灌和固定滴灌的果穗重、果穗体积均略低于常规滴灌,但差异未达显著水平。

表5-1 不同灌溉模式下鲜食葡萄的产量构成要素测定与计算结果

灌溉模式	公顷均株数 (株·hm <sup>-2</sup> )	单株果穗数 (穗·株 <sup>-1</sup> )	果穗重 (g·穗 <sup>-1</sup> )	果穗体积 (cm <sup>3</sup> ·穗 <sup>-1</sup> )	单穗果粒数 (个·穗 <sup>-1</sup> )	平均单粒重 (g·粒 <sup>-1</sup> )	单株产量 (kg·株 <sup>-1</sup> )
AF	1935	23.91 b	427.75 c	373.50 d	48.93 d	8.74 a	9.71 b
CF	1935	18.60 c	474.65 ab	447.64 a	55.79 c	8.51 b	8.65 c
AF2	1935	25.33 a	479.72 a	418.15 c	61.93 ab	7.75 c	11.90 a
CF2	1935	25.00 a	473.88 ab	441.49 ab	63.44 a	7.47 d	11.80 a
ADI	1935	25.30 b	355.82 b	339.88 ab	66.08 a	5.38 b	8.94 a
FDI	1935	23.50 a	360.22 b	323.23 b	50.56 b	7.13 a	8.40 b
CDI	1935	19.75 b	445.83 a	415.82 a	57.80 ab	7.71 a	8.83 a

注:表中a、b、c、d不同字母表示同一测定时期内同列相同项目在P<sub>0.05</sub>水平上的差异显著性。

### 5.2 根系分区交替灌溉对葡萄产量和水分利用效率的影响

不同灌水模式下鲜食葡萄产量与水分利用效率的计算结果表明(表 5-2),滴灌条件下固定部根区滴灌处理其单株产量和平均产量均显著低于常规灌溉和交替滴灌,结合表 5-1 中数据可知其主要原因是固定滴灌降低了结果穗数和单穗果粒数。常规滴灌尽管灌水量为交替滴灌的 2 倍,但其经济产量却未见显著提高,相反交替滴灌的产量还略高于常规灌溉,从而使其总水分利用效率和灌溉水利用效率分别较常规滴灌提高了 26.60%和 102.51%,而固定滴灌的总水分利用效率和灌溉水利用效率居于交替滴灌和常规滴灌之间。

沟灌条件下隔沟交替灌溉的产量和水分利用效率显著高于常规沟灌处理。由表 5-2 可知,两种沟灌条件下,隔沟交替灌溉的灌水量为常规沟灌的 2/3,而产量却略高于常规沟灌,其总水分利用效率和灌溉水利用效率分别较常规沟灌提高了 12.67%和 32.96%。

表 5-2 不同灌水模式下鲜食葡萄的产量与水分利用效率

灌溉模式	单株产量 (kg·株 <sup>-1</sup> )	平均产量 (t·hm <sup>-2</sup> )	总耗水量 (mm)	灌溉水量(mm)	WUE <sub>ET</sub> (kg·m <sup>-3</sup> )	WUE <sub>t</sub> (kg·m <sup>-3</sup> )
AF	9.71 b	18.79 b	265.23	81.90	7.08 b	22.94 a
CF	8.65 c	16.73 c	292.83	109.30	5.71 c	15.31 bc
AF2	11.90 a	23.03 a	284.78	102.30	8.09 a	22.51 a
CF2	11.80 a	22.83 a	317.85	134.80	7.18 b	16.93 b
ADI	8.94 a	17.30 a	243.45	59.40	7.11 a	29.12 a
FDI	8.40 b	16.25 b	243.10	59.40	6.69 b	27.36 ab
CDI	8.83 a	17.08 a	304.39	118.80	5.61 c	14.38 c

注:表中 a、b、c、d 不同字母表示同一测定时期内同列相同项目在 P<sub>0.05</sub> 水平上的差异显著性。

### 5.3 根系分区交替灌溉对鲜食葡萄品质的影响

不同灌溉模式下葡萄浆果 V<sub>c</sub> 含量结果(图 5-1)表明,根系分区交替灌溉显著提高了葡萄浆果 V<sub>c</sub> 的含量,滴灌条件下葡萄浆果 V<sub>c</sub> 含量则表现为 FDI>ADI>CDI,交替滴灌的葡萄浆果 V<sub>c</sub> 含量为 0.109μg\*100gF/W,略低于固定滴灌的 0.128μg\*100gF/W,而比常规滴灌提高了 0.048μg\*100gF/W。以上分析均表明根系分区交替灌溉可显著提高葡萄浆果 V<sub>c</sub> 含量,明显提高了葡萄的营养价值。

葡萄中的果酸能帮助消化、增进食欲,防止肝炎后脂肪肝的发生,而且有助于去除死皮、收紧及滋润肌肤,适当多吃一些葡萄,能帮人健胃消食、美容养颜,因此果酸是葡萄浆果中主要的营养成分。不同灌溉模式下葡萄浆果果酸含量的测定结果表明(图 5-2),沟灌条件下里扎玛特品种的果酸含量范围为 2.68~3.38mg/100FWg。滴灌条件下交替滴灌与常规滴灌的果酸含量基本持平,而略低于固定滴灌,各处理之间的差异未达到显著水平。

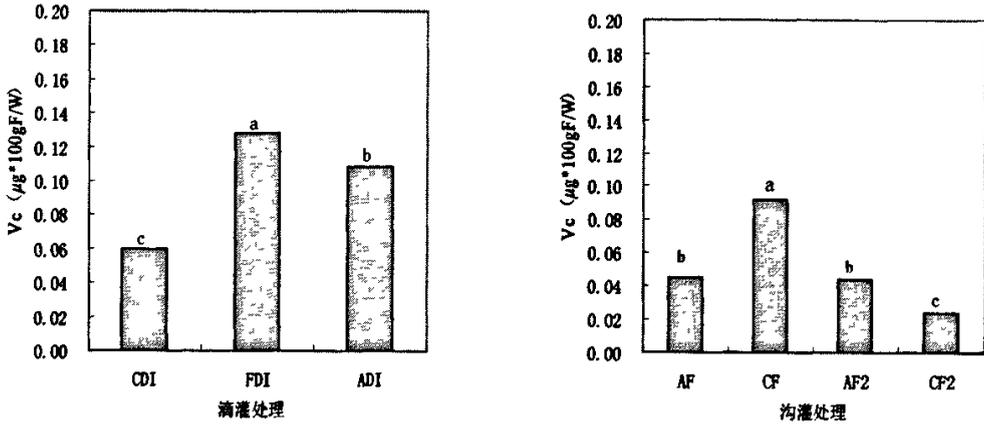


图 5-1 不同灌溉模式对葡萄浆果 V<sub>c</sub> 含量的影响

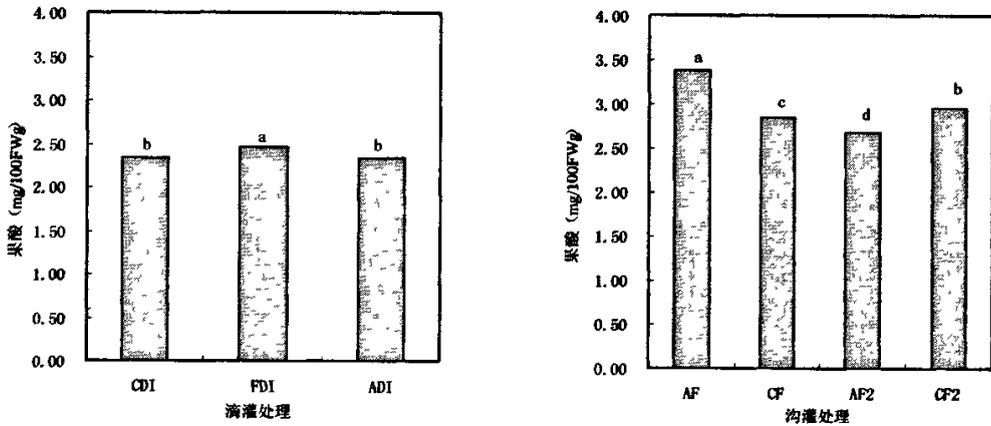


图 5-2 不同灌溉模式对葡萄浆果果酸含量的影响

不同灌溉模式下葡萄的可溶性固形物含量均在 12.7%~13.6%之间，沟灌条件下不同灌溉模式的可溶性固形物含量差异较小，均未达显著水平；滴灌条件下交替滴灌处理的可溶性固形物含量最高，其次为常规滴灌和固定滴灌（图 5-3）。

决定果实味道甜酸的因素不仅在于糖和果酸的绝对含量，更重要的是糖酸比。糖酸比可以反映不同灌溉模式下葡萄的成熟度，一般将糖酸比作为评价葡萄成熟度的具体指标，而且适宜的糖酸比有助于改善葡萄的口感，本研究中以可溶性固形物含量与果酸的比值近似反映不同灌溉模式下葡萄糖酸比（即成熟度）的差异。由图 8-4 可见，沟灌条件下的各处理葡萄糖酸比表现为 AF2>CF>CF2>AF；滴灌条件下葡萄糖酸比表现为 ADI>CDI>FDI。

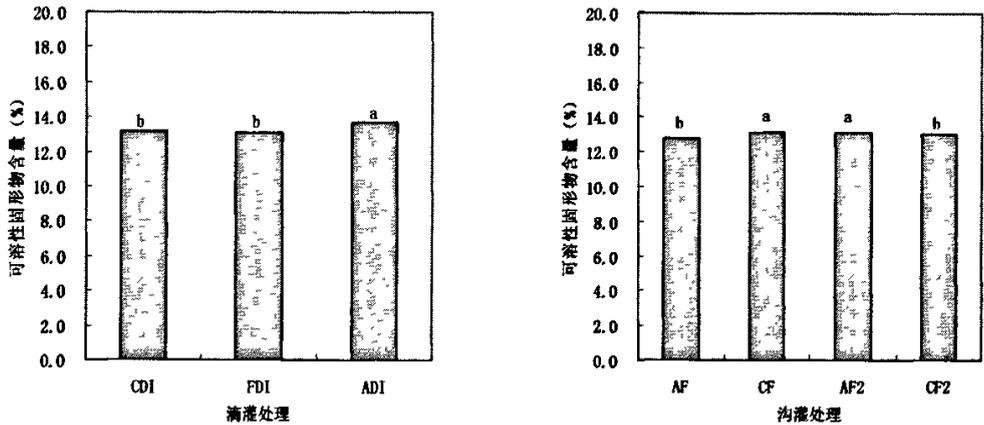


图 5-3 不同灌溉模式对葡萄浆果可溶性固形物含量的影响

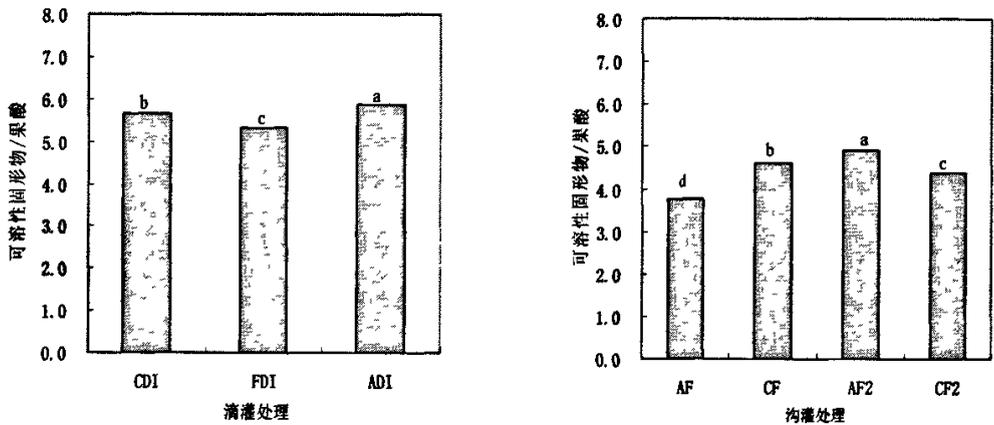


图 5-4 不同灌溉模式对葡萄浆果成熟度的影响

综合以上分析可以看出，根系分区交替灌溉可以提高葡萄浆果  $V_c$  含量，提高糖酸比，与对照相比明显改善了葡萄的口感，提高了葡萄的营养价值。

## 5.4 讨论与小结

葡萄是一种色艳味美且富有营养的水果，深受人们喜爱。全世界葡萄的栽培面积和总产量在各种果树中都占首位。葡萄适应性很强，在我国广大地区均在种植。

鲜食葡萄味美、多汁营养丰富，具有良好的保健功能，其色泽、口感、营养元素含量、成熟度等直接影响着葡萄的营养价值和销售价格。

本章分析了2006年度甘肃石羊河流域干旱荒漠绿洲区葡萄根系分区交替灌溉对其经济产量、品质和水分利用效率的影响，并重点对根系分区交替灌溉在以水调质中应用的潜力进行了探讨，取得如下主要成果：

(1) 根系分区交替灌溉可以以不牺牲产量为代价, 实现产量和水分利用效率的同步提高。在相同灌溉定额条件下与常规灌溉相比, 根系分区交替灌溉仍具有一定的增产能力。

(2) 鲜食葡萄交替滴灌的总水分利用效率和灌溉水利用效率分别较常规滴灌提高了 26.60% 和 102.51%, 而固定滴灌由于单株果穗数和单穗果粒数明显减少, 产量下降, 其总水分利用效率和灌溉水利用效率均低于交替滴灌。沟灌条件下各处理均表现为隔沟交替灌溉的葡萄产量和水分利用效率显著高于常规沟灌的处理。

(3) 根系分区交替灌溉在以水调质过程中可以作为一种重要的灌溉调控途径, 应用该技术可显著提高葡萄浆果  $V_c$  含量, 果酸含量基本不变, 而可溶性固形物含量则显著提高, 与对照相比明显改善葡萄的口感, 提高了葡萄的营养价值和成熟度。

## 第六章 结论与建议

### 6.1 主要结论

针对甘肃河西走廊石羊河流域干旱荒漠绿洲区农业产业结构调整和水资源紧缺的现状, 本文以该地区主要经济作物葡萄为研究对象, 分析了根系分区交替灌溉对葡萄生理生态指标的影响, 较系统的研究了根系分区交替灌溉条件下葡萄的耗水规律、作物系数、经济产量与品质。取得如下几个方面的主要成果:

1、研究表明根系分区交替灌溉条件下葡萄叶片水分状况尚未发生改变时即主动降低气孔开度, 降低叶片生长速率, 抑制蒸腾作用, 平衡植物的水分利用, 说明在田间实施根系分区交替灌溉可以达到不显著影响植物水分状况而有效调控气孔运动, 从而提高水分利用效率的目的, 证实了其在农业节水中应用的巨大潜力。

2、分析了干旱荒漠绿洲区葡萄不同灌溉模式下的耗水规律和作物系数, 研究结果表明常规滴灌的葡萄耗水强度明显大于交替滴灌和固定滴灌, 交替滴灌和固定滴灌处理较常规滴灌灌水量减少一倍, 其全生育期蒸发蒸腾量下降了 20.06%。

3、通过大田试验证明了在干旱荒漠绿洲区对葡萄应用根系分区交替灌溉具有较大的节水增产潜力, 发现应用根系分区交替灌溉技术可以以不牺牲产量为代价, 实现经济产量和水分利用效率的同步提高。

田间试验研究表明, 应用交替灌溉技术可节水 50% 而产量不变, 使总水分利用效率和灌溉水利用效率分别提高 26.60% 和 102.51%; 隔沟交替灌溉条件下灌水定额为常规沟灌的 2/3 时, 葡萄产量略有提高, 而总水分利用效率和灌溉水利用效率分别提高 12.67% 和 32.96%。

4、进一步分析和证实了根系分区交替灌溉提高葡萄品质的效应。研究表明根系分区交替灌溉显著提高了葡萄浆果  $V_c$  含量, 交替滴灌的葡萄浆果  $V_c$  含量较常规滴灌提高了 78.72%, 可溶性固形物含量和葡萄糖酸比也略有提高, 同时改善了葡萄的色泽和口感, 提高了葡萄的营养价值。

根系分区交替灌溉是一种以植物高效用水调控为核心的局部灌溉技术, 在大田推广应用中最有潜力的灌溉方式是隔沟交替灌溉与根系分区交替滴灌。随着水资源短缺问题的日益加剧, 以作物生理节水为核心的节水优质高效灌溉理论和模式研究越来越占有举足轻重的地位, 如果建立适当的水价机制以及节水效益补偿机制, 根系分区交替灌溉将会发挥出更大的推广和应用潜力。

### 6.2 进一步研究的建议

1、开展考虑种植模式的根系分区交替灌溉制度优化试验研究, 进一步讨论根系分区交替灌溉条件下的最优灌溉制度和适宜的种植模式。

2、根系分区交替灌溉节水机理研究, 包括根源干旱信号 ABA 对气孔行为、光合、蒸腾、植

株生长与产量形成等生理生态过程的影响及其调控机制，根系分区交替灌溉对植物根系水分传导、根系分布和补偿效应及生理生化过程的影响。

3、根系分区交替灌溉对果树根茎液流的测定及其变化规律分析和果树蒸腾模拟方法，以及依据果树蒸腾模型精量控制灌溉的研究。

4、研究适宜不同地区采用的果园根系分区交替灌溉制度和灌水模式，包括不同土质、不同果树品种和气候条件下的适宜土壤水分调控方法、含水率下限指标、交替灌溉的最佳起始与终止时间(生育期)、交替周期、灌水量、灌水深度、水流入渗特性的研究，隔沟交替灌溉灌水技术要素的最优组合设计方法，以及不同地区不同作物根系分区交替灌溉的适用模式及相应的田间管理技术。

5、进一步研制简单实用、质优价廉、适合田间推广的根系分区交替灌溉自动控制设备和新产品。

## 参考文献

- [1] 刘昌明. 中国 21 世纪水供需分析:生态水利研究. 中国水利, 1999, (10): 18~20
- [2] 沈振荣, 苏人琼. 中国农业水危机对策研究. 北京: 中国农业科技出版社
- [3] 康绍忠, 蔡焕杰. 作物根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论及实践. 北京: 中国农业出版社, 2002
- [4] Gomez-Cadenas A., Tadeo F. R., Talon M, et al. Leaf abscission induced by ethylene in water stressed intact seedling of Cleopatra Mandarin requires previous abscisic acid accumulation in root. *Plant Physiology*, 1996, 42(17): 1876~1881
- [5] Mun S. R., Sharp R. E. Involvement of abscisic acid in controlling plant growth in soil of low water potential. *Aust J Plant Physiol*. 1993, 20: 425~437
- [6] 杨洪强, 接玉玲. 果树对地上部的调控及其与水分利用效率的关系. 园艺学报, 2001, 28 (增): 603~608
- [7] 许旭旦, 朱涵素. 植物根部的水分倒流现象. 植物生理学通讯, 1995, 31(4): 241~245
- [8] Tan C. S., Buttery B. R. Response of stomatal conductance, transpiration, photo synthesis, and leaf water potential in peach seedlings to different watering regimes. *Horticultural Science*, 1982, 17(2): 222~223
- [9] Green S. R., Clothier B. E. Root water up take by Kiwifruit vines following partial wetting of the root zone. *Plant and Soil*, 1995, 173: 317~328
- [10] Green S. R., Clothier B. E. Water use of Kiwifruit vines and apple trees by heat-pulse technique. *Journal of Experimental Botany*, 1988, 39(198): 115~123
- [11] Crisosto C. H. Effects of water potential on flower opening in coffee. *Tree Physiology*, 1992, 10 (2): 127~139
- [12] Gowing G., Davies W. J., Jones H. G. A positive root-sourced signal as an indicator of soil drying in apple, *Malus domestica* Borkh. *Journal of Experimental Botany*, 1990, 41(233): 1535~ 1540
- [13] Cornish K., Zeevart J. A. D. Abscisic acid accumulation by roots of *Xanthium strumarium* L. and *Lycopersicon esculentum* Mill. In relation to water stress. *Plant Physiology*, 1985, 79: 653~658
- [14] Zhang J, Davies W J. Increased synthesis of ABA in partially dehydrated root tips and ABA transport from roots to leaves. *Journal of Experimental Botany*, 1987, 38 (197): 2015~2023.
- [15] Neales T. F., Masia A., Zhang J., et al. The effects of partial drying part of the root system of *Helianthus annuus* on the abscisic acid content of the roots, xylem sap and leaves. *Journal of Experimental Botany*, 1989, 40: 1113~1120
- [16] Claudio Lovisolo, Wolfram Hartung and Andrea Schubert. Whole-plant hydraulic conductance and root-to-shoot flow of abscisic acid are independently affected by water stress in grapevines. *Functional Plant Biology*, 2002, 29: 1349~1356
- [17] 梁建生, 张建华. 根系逆境信号 ABA 的产生和运输及其生理作用. 植物生理学通讯, 1998, 34(5): 329~338

- [18] Dry P. R., Loveys B. R. Factors influencing grapevine and potential for control with partial rootzone drying. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 1998, (4): 140~148
- [19] Loveys B.R., Stoll M., Dry P. R., et al. Partial root-zone drying stimulates stress responses in grapevine to improve water use efficiency while maintaining crop yield and quality. *Australian Grapegrower and winemaker*, 1998, 414, Technical issue: 108~114
- [20] Claudia R. de Souza, Joao P. Maroco, Tiago P. dos Santos, et al. Control of stomatal aperture and carbon uptake by deficit irrigation in two grapevine cultivars. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 106: 261~274
- [21] Kirda C., Cetin M., Dasgan Y., et al. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 2004, 69:191~201
- [22] Zegbe-Dominguez J. A., Behboudian M. H., Clothier B. E. Partial rootzone drying is a feasible option for irrigating processing tomatoes. *Agricultural Water Management*, 2004, 68:195~206
- [23] Paul E. Kriedeman, Ian Goodwin. Regulated Deficit Irrigation and Partial Rootzone Drying [R]. *Irrigation Insights (Number 4)*. 2003
- [24] Kang Shaozhong, Hu Xiaotao, Peter Jerie, et al. The effects of partial rootzone drying on root, trunk sap flow and water balance in an irrigated pear (*Pyrus communis* L.) orchard. *Journal of Hydrology*, 2003, 280 (1~4): 192~206
- [25] Gu S. L., David Z., Simon G., et al. Effect of partial rootzone drying on vine water relations, vegetative growth, mineral nutrition, yield and fruit quality in field-grown mature sauvignon blanc grapevines. *Research Notes*, #000702, 2000, California Agricultural Technology Institute, California State University, Fresno.
- [26] Zegbe J. A., Behboudian M. H., Clothier B. E. Partial rootzone drying is a feasible option for irrigating processing tomato. *Agricultural Water Management*, 2004, 68: 195~206
- [27] Brian Loveys, Jim Grant, Peter Dry, et al. Progress in the development of partial rootzone drying. *The Australian Grape Grower and Winemaker*, 1997, 404: 18~20
- [28] Claudia R. de Souza, Joao P. Maroco, Tiago P. dos Santos, et al. Partial rootzone drying: regulation of stomatal aperture and carbon assimilation in field-grown grapevines (*Vitis vinifera* cv. Moscatel). *Functional Plant Biology*, 2003, 30 (6): 653~662
- [29] Tiago P. dos Santos, Carlos M. Lopes, M. Lucilia Rodrigues, et al. Partial rootzone drying: effects on growth and fruit quality of field-grown grapevines (*Vitis vinifera*). *Functional Plant Biology*, 2003, 30 (6): 663~671
- [30] Kirda C., Cetin M., Dasgan Y., et al. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 2004, 69: 191~201
- [31] Ali Shahnazari, Fulai Liu, Mathias N., et al. Effect of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions. *Field Crops Research*, 2007, 100: 117~124
- [32] 康绍忠, 张建华, 梁宗锁, 等. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路. *干旱地区农业研究*, 1997, 15 (1): 1~6

- [33] 康绍忠, 张建华, 石培泽, 等. 控制性作物根系分区交替灌溉的理论及试验. 水利学报, 2001, 32(11): 80~86
- [34] 张建华, 贾文锁, 康绍忠. Partial rootzone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. 西北植物学报, 2001, 21(2): 191~197
- [35] 孙景生, 康绍忠, 蔡焕杰, 等. 控制性交替灌溉技术的研究进展. 农业工程学报, 2001, 17(4): 1~5
- [36] 孙景生, 康绍忠, 蔡焕杰, 等. 交替隔沟灌溉提高农田水分利用效率的节水机理. 水利学报, 2002, 33(3): 64~68
- [37] 潘英华, 康绍忠. 交替隔沟灌溉水分入渗规律及其对作物水分利用的影响. 农业工程学报, 2000, 16(1): 39~43
- [38] 杜社妮, 梁银丽, 翟胜, 等. 不同灌溉方式对茄子生长发育的影响. 中国农学通报, 2005, 21(6): 430~432
- [39] 赵志军, 程福厚, 田春雨, 等. 不同灌溉方式和灌水量对梨水分利用效率的影响. 灌溉排水学报, 2005, 24(6B): 150~151
- [40] 周军. 不同灌溉方式对葡萄叶片行为和果实品质的影响; [硕士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2000
- [41] 杜太生. 干旱荒漠绿洲区作物根系分区交替灌溉的节水机理与模式研究; [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2005
- [42] Allen R.G., Smith M., Perrier A., et al. Crop Evaporation, Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998
- [43] 曾凡江, Andrea Foetzki, 李向义. 策勒绿洲多枝桤柳灌溉前后水分生理指标变化的初步研究. 应用生态学报, 2002, 13(7): 849~853
- [44] Hsiao T. C. Plant responses to water stress. Ann. Rev. Plant Physiol., 1973, 24: 519~570
- [45] Davies W. J., Bacon M. A., Thomson D. S. Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: exploitation of the plant chemical signaling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water use in agriculture. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(350): 1617~1626
- [46] Davies W. J., Sally W., Loveys B. R. Stomatal control by chemical signaling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. New Phytologist, 2002, 153: 449~460
- [47] Blackman P. G., Davies W. J. Root to shoot communication in maize plants of the effect of soil drying. Journal of Experimental Botany, 1985, 36: 39~48
- [48] 肖娟, 雷廷武, 李光永, 等. 西瓜和蜜瓜咸水滴灌的作物系数和耗水规律. 水利学报, 2004, 35 (6): 119~124
- [49] 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚, 等. 陕西省作物需水量及分区灌溉模式. 北京: 水利电力出版社, 1992
- [50] Williams L.E., Phene C.J., Grimes D.W., et al. Water use of young Thompson Seedless

grapevine in California. *Irrigation Science*, 2003, 22:1~9

[51] 苏培玺, 施来成. 塑料薄膜滴灌带在沙地葡萄节水中的应用研究. *干旱地区农业研究*, 2000, 18 (4): 94~98

[52] 米孟恩, 冯广平. 幼龄葡萄滴灌试验. *新疆农业科学*, 1994, 26(5): 223~224

[53] 林华, 李疆. 干旱荒漠地区葡萄滴灌试验. *新疆农业大学学报*, 2003, 26(4): 62~64

[54] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉. 北京: 水利电力出版社, 1995

[55] 杜太生, 康绍忠, 胡笑涛, 等. 果树根系分区交替灌溉研究进展. *农业工程学报*, 2005, 21 (2): 172~178

## 致 谢

本论文是在导师康绍忠教授的悉心指导下完成的。从论文的选题与论证、试验设计、数据的分析与整理到论文的撰写和修改，导师都付出了大量的心血和劳动。导师渊博的学识、深邃的学术思想、严谨的治学风格、宽以待人的胸怀、正直的为人品格和对科学的无私奉献精神将使学生铭记于心 and 终生受益。两年来导师在学业上对我谆谆教诲，生活上给予无尽关怀，在此谨向尊敬的康老师表示最诚挚的谢意。

在试验的设计与实施、数据的分析及论文的修改上得到杜太生老师的悉心指导与帮助，杜老师不仅在研究思路给我启发，在论文写作方面给予了热情的帮助，而且在生活上也给予极大的关怀，谨向杜老师表示由衷的钦佩和感谢。

在论文的开题论证和写作过程中，冯绍元教授、黄冠华教授、张昕教授、王凤新副教授等都提出了宝贵的意见和建议。甘肃武威市水利局石培泽副局长、武威市水利科学研究所杨秀英所长在野外试验布置和生活中给予了全力的支持和协助。在田间试验的实施阶段中国农业大学师兄刘晓志、张宝忠、李思恩、吕廷波、朱向明，师姐周青云、许小燕、王春梅，以及胡萌、刘晓东、侯晓燕、曾懿婷，西北农林科技大学王锋、王振昌、杨磊等同学都付出了辛勤的劳动。在此，向所有给予我支持和帮助的老师、同学和朋友表示衷心的感谢。

感谢我的家人，在我学习和工作的同时给予我最大的关心、理解和支持，作为坚实的后盾，支持完我的学业。

最后，向论文评阅人和答辩委员会的所有专家、老师致以衷心的感谢。

中国农业大学 闫博远

2007年6月于北京

## 作者简历

闫博远，男，1984年11月17日生，甘肃省武山县人。2005年7月毕业于中国农业大学水利与土木工程学院农业水利工程专业，获工学学士学位；2005年9月至2007年7月在中国农业大学攻读农业水土工程硕士学位，研究方向为灌溉排水理论与新技术。

研究生期间参加的主要课题：国家自然科学基金重点项目“西北旱区农业与生态节水应用基础研究”，课题编号：50339030。