

荒漠绿洲区临泽小枣及枣农复合系统需水规律研究*

苏培玺 解婷婷 丁松爽

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 临泽内陆河流域研究站 兰州 730000)

摘 要 在大田环境下,通过建造 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的封底观测池,利用水量平衡法,研究了甘肃省河西走廊中部黑河中游绿洲临泽小枣、春小麦、紫花苜蓿单作及临泽小枣/春小麦、临泽小枣/紫花苜蓿间作复合系统的需水规律。结果表明,内部绿洲和边缘绿洲的临泽小枣从根系开始活动到落叶的需水量分别为 497.2 mm 和 859.2 mm,春小麦从播种到收获需水量分别为 447.9 mm 和 809.9 mm,紫花苜蓿从返青到霜降需水量分别为 583.7 mm 和 945.7 mm,临泽小枣/春小麦复合系统需水量分别为 647.7 mm 和 1 009.7 mm,临泽小枣/紫花苜蓿复合系统需水量分别为 980.3 mm 和 1 342.3 mm。边缘绿洲临泽小枣/春小麦复合系统增加的需水量为枣树需水量的 17.5%,小麦需水量的 24.7%;临泽小枣/紫花苜蓿复合系统增加的需水量为枣树需水量的 56.2%,紫花苜蓿需水量的 41.9%。内部绿洲临泽小枣春季(4 月 25 日~5 月 31 日)需水量为 84.6 mm,夏季(6 月 1 日~8 月 31 日)为 351.3 mm,秋季(9 月 1 日~10 月 5 日)为 61.3 mm;7 月份需水强度最大,为 $4.8\text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,6 月份次之,为 $4.3\text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,生长期平均需水强度为 $3.1\text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。临泽小枣灌溉应保证 4 个关键水,即花前水、果实膨大水、丰果水和越冬水,灌水定额为 $1\,200\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

关键词 临泽小枣 春小麦 紫花苜蓿 农林复合系统 耗水量 绿洲 河西走廊

中图分类号: S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2010)02-0334-08

Water requirement regularity in Linze jujube (*Ziziphus jujuba* Mill. var. *inermis* Rehd. cv. *Linze jujube*) and jujube/crop complex systems in Linze oasis

SU Pei-Xi, XIE Ting-Ting, DING Song-Shuang

(Linze Inland River Basin Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract The water balance method was used to study water requirement regularity of Linze jujube, spring wheat, alfalfa monoculture system and Linze jujube/spring wheat, Linze jujube/alfalfa complex system in an 8 m^3 observation pool ($2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$) under field environment. The results show that water requirements in the inner and edge oases for Linze jujube from root-activation to leaf-shedding stage are respectively 497.2 mm and 859.2 mm, spring wheat from sowing to harvesting stage are 447.9 mm and 809.9 mm and those for alfalfa from greening to frosting are 583.7 mm and 945.7 mm. Water requirements in the inner and edge oases for Linze jujube/spring wheat complex system are respectively 647.7 mm and 1 009.7 mm and those for Linze jujube/alfalfa complex system are 980.3 mm and 1 342.3 mm. In the edge oasis, the increased water requirement of Linze jujube/spring wheat system is 17.5% and 24.7% of Linze jujube and spring wheat water requirement respectively. That of Linze jujube/alfalfa system is 56.2% and 41.9% of Linze jujube and alfalfa respectively. In the inner oasis, water requirement for Linze jujube is 84.6 mm in spring (April 25–May 31), 351.3 mm in summer (Jun. 1–Aug. 31) and 61.3 mm in autumn (Sep. 1–Oct. 5). For the growth period, water requirement is maximum ($4.8\text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) in July and $4.3\text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ in June, with an average water requirement of $3.1\text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$. Linze jujube irrigation should be ensured in the four key periods of before flowering, fruit swelling, accelerated fruit growth and over-wintering. Irrigation amounts for these periods of growth should be $1\,200\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$.

Key words Linze jujube, Spring wheat, Alfalfa, Agroforestry system, Water consumption, Oasis, Hexi Corridor region
(Received Oct. 7, 2009; accepted Nov. 9, 2009)

临泽小枣(*Ziziphus jujuba* Mill. var. *inermis* Rehd. cv. *Linze jujube*)作为区域珍贵品种^[1],在甘肃省临泽县及周边地区发展迅速。据临泽县统计局 2007 年统计年鉴资料,临泽县现有枣树面积 $6\,452.4\text{ hm}^2$,

* 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-04-01)和国家自然科学基金面上项目(40771005)资助

苏培玺(1964-),男,博士,研究员,主要从事绿洲节水农业生态与植物逆境生理生态研究。E-mail: supx@lzb.ac.cn

收稿日期: 2009-10-07 接受日期: 2009-11-09

占农田面积的 22%, 占包括林草在内的灌区面积的 14%。枣产业是临泽县的支柱产业之一, 现已形成村旁、路旁、渠旁、宅旁等四旁种植, 密植枣园和大行距长期枣粮间作、枣草间作等多种栽培模式。春小麦(*Triticum aestivum* L.)是绿洲的主要粮食作物, 临泽小枣/春小麦间作是当地枣粮复合系统的一种主要模式。紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)为全球最重要的优良豆科牧草之一^[2], 在绿洲区广泛栽培, 临泽小枣/苜蓿间作是当地枣草间作的模式之一。枣粮、枣草间作构成了节水型绿洲农林复合系统建设的重要模式。

提高水分利用效率和效益是农业生产的关键所在^[3-4], 是建立节水型绿洲, 实现绿洲可持续发展的保证。在干旱地区, 水是农业生产最主要的限制资源^[5]。农业水资源优化配置和高效利用都要以植物需水规律为依据。植物需水量的大小及其变化规律, 决定于气象条件、植物特性、土壤性质和农业技术措施等, 在特定的地域和环境条件下有其特有的变化范围和规律。植物在生长发育过程中, 对水分的需求表现在 2 个方面: 一是生理需水(Physiological water requirement)^[6], 即维持植物自身生理活动所必需的水分, 包括植物蒸腾、表面蒸发和构建植物体消耗的水分, 主要为植物蒸腾需水; 二是生态需水(Ecological water requirement), 即维持植物生长的外部环境条件所需要的水分^[6-7], 主要为土壤蒸发需水。二者之和为蒸散量, 即植物需水量, 通常通过叶面蒸腾和株间蒸发来表示。需水量和需水规律是指在给定的生长环境中能取得高产的条件下, 为满足植物蒸腾、株间蒸发和组成植物体的水量之和及其变化规律, 是耗水量和耗水规律的一个特例^[8]。本研究结合边缘绿洲和内部绿洲气象资料, 利用水量平衡方法, 在大田环境下研究了临泽小枣单种和复合种植下的需水规律, 为绿洲农田灌溉水管理和节水农业发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于甘肃省河西走廊中部黑河中游临泽县, 绿洲外为巴丹吉林沙漠南缘延伸带。绿洲依赖发源于祁连山的黑河水, 为典型的沙漠绿洲。研究区属干旱荒漠气候类型, 多年平均降水量 116.8 mm, 年蒸发量 2 390 mm; 年平均气温 7.6℃, 最高气温 39.1℃, 最低-27℃, 10℃年积温为 3 088℃, 初霜期 10 月 2 日, 终霜期 4 月 20 日, 无霜期 165 d; 主风向为西北风, 风沙活动集中在 3~5 月份, 年均风速 3.2 m·s⁻¹, 大于 8 级大风日数年均 15 d; 年日照时数 3 045 h; 冻土深度 1.0 m 左右^[9]。干旱、高温和多风是该区主要气候特点。地带性土壤为灰棕荒漠土。

试验区位于临泽绿洲北部边缘。选择两个典型地点: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽内陆河流域研究站(39°20'N, 100°07'E, 1 384 m), 位于绿洲边缘地区, 代表边缘绿洲; 国家气象局临泽县气象站(39°09'N, 100°10'E, 1 455 m), 位于绿洲内部, 代表内部绿洲。试验区土壤为灌溉风沙土, 结构差, 0~20 cm 耕作层粉粒、沙粒占 90%, 20 cm 以下土层 0.25~0.10 mm 的沙粒显著增加(表 1)。土壤贫瘠, 有机质含量在耕作层只有 11.4 mg·g⁻¹, 随土层加深急剧减少(表 2)。

2003 年 3 月中旬在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽内陆河流域研究站(边缘绿洲)的小麦/紫花苜蓿草粮间作地修筑观测池, 间作地紫花苜蓿带和小麦带宽各为 3 m。观测池为用砖、水泥、沙子及防渗材料修筑成的 2 m×2 m×2 m 封底防渗观测池, 共 6 个, 其中小麦带 3 个, 1 个为春小麦, 2 个为枣树/春小麦间作; 紫花苜蓿带 3 个, 1 个为枣树, 1 个为紫花苜蓿, 1 个为枣树/紫花苜蓿间作。4 月 13 日移栽 3 年生临泽小枣, 平均树高 2.1 m, 干径(距地面 30 cm 处直径)3.4 cm, 冠幅 1.1 m×1.2 m, 每个池子 1 株, 株行距为 3 m×3 m; 小麦条播, 行距 15 cm;

表 1 试验地土壤机械组成

Tab. 1 Soil particle size distribution in experimental field

%

深度 Depth (cm)	沙粒 Sand				粗粉粒 Coarse silt 0.05~0.02 mm	细粉粒 Fine silt 0.02~0.002 mm	黏粒 Clay < 0.002 mm
	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.10 mm	0.10~0.05 mm			
0~20	3.63	14.83	21.99	11.69	9.92	27.58	10.36
20~40	0	9.90	42.01	8.10	5.37	23.86	10.76
40~60	0.81	14.10	54.45	6.30	2.84	15.91	5.59

表 2 试验地土壤养分

Tab. 2 Soil nutrients in experimental field

深度 Depth (cm)	有机质含量 Organic content (mg·g ⁻¹)	pH	总盐量 Total salt (%)	全养分 Total nutrient (mg·g ⁻¹)			速效养分 Available nutrient (mg·kg ⁻¹)		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
0~20	11.4	8.7	0.11	0.40	0.44	20.5	24.8	14.1	116.6
20~40	5.5	8.9	0.12	0.17	0.37	19.8	17.7	7.1	87.5
40~60	2.6	9.1	0.11	0.07	0.32	18.9	13.6	2.4	78.1

紫花苜蓿 2004 年 4 月种植, 条播, 行距 30 cm。2006 年进行观测研究。

1.2 研究方法

本研究土壤水分保持在田间持水量的 70% 左右, 保证土壤水分适宜。用 L520 中子土壤水分仪(江苏农业科学院原子能农业利用研究所生产)监测土壤水分动态。每隔 5~10 d 测定 1 次, 其中植物生长旺季 5 d 测定 1 次, 试验前期、后期 10 d 测定 1 次, 灌水前后和降雨后(≥ 8 mm)各加测 1 次。测定土层深度为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm、100~120 cm、120~140 cm、140~160 cm、160~180 cm 和 180~200 cm。中子仪测定的含水率为体积含水率, 采用下式换算成以 mm 为单位的土壤含水量^[10]。

$$W = \theta h / 10 \quad (1)$$

式中, W 为含水量(mm), θ 为体积含水率(%), h 为土层厚度(cm)。

用水量平衡法计算单作枣树、春小麦、苜蓿和枣树/春小麦及枣树/苜蓿间作模式的需水量:

$$E_T = R + B - F \pm Q + \Delta W \quad (2)$$

式中, E_T 为蒸散量(需水量); R 为降水量, 采用附近气象观测场资料; B 为灌水量, 通过水表读数得到; F 为地表径流, Q 为上移或下渗量, 由于试验在防渗池进行, 消除了地表径流和水分上移或下渗的发生, $F=0$, $Q=0$; ΔW 为土壤贮水量的变化, 通过中子仪监测求得:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n (w_{i1} - w_{i2}) \quad (3)$$

式中, i 为土壤层次, n 为土壤层次总数目, w 为以 mm 为单位的土壤含水量, 1、2 分别代表前一次测定和后一次测定。

1.3 数据分析

采用气象站数据, 分析边缘绿洲和内部绿洲气候特点; 植物生物量均为干重, 通过称得鲜重, 然后抽取样品在 80 °C 下烘干 8 h 以上至恒重, 计算干物质质量得到。

2 结果与分析

2.1 降水量与蒸发量

从图 1 看出, 边缘绿洲和内部绿洲的年降水量不同, 内部绿洲年降水量为 98.1 mm, 边缘绿洲为 116.3 mm, 内部绿洲比边缘绿洲少 18.2 mm。从降水次数看出, 边缘绿洲年总降水次数为 46 次, 内部绿洲为 48 次。可以看出, 边缘绿洲和内部绿洲的年降水量和降水次数有差别, 但这种差别小于 20%。

从 20 cm 口径蒸发皿观测资料来看(图 2), 年蒸发量 6 月最大, 这与高温干燥的气候条件紧密相关;

其次是 5 月份; 高温强光的 7 月份蒸发量低于 6 月和 5 月, 与降水增加和植物的强烈蒸腾使空气湿度增大紧密关联。比较 4~10 月份, 内部绿洲蒸发量明显小, 比边缘绿洲少 144.8 mm, 其中 7 月份相差最大, 接近 40 mm, 10 月份相差不足 10 mm, 温度越低, 边缘绿洲和内部绿洲蒸发量相差越小。

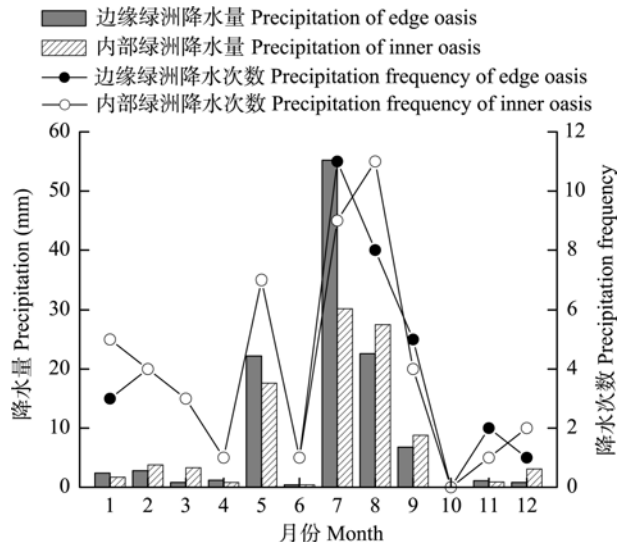


图 1 2006 年边缘绿洲和内部绿洲的降水量及降水次数
Fig. 1 Precipitation and its frequency in the edge and inner oases in 2006

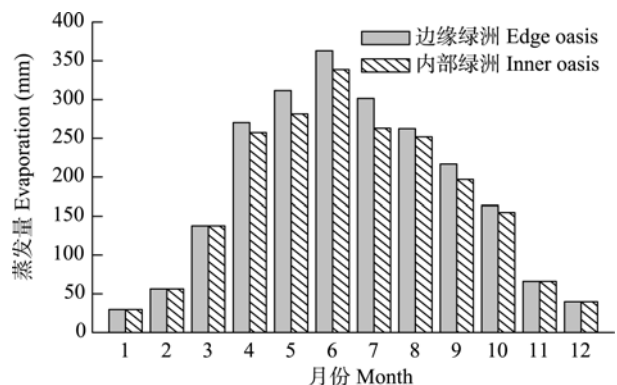


图 2 2006 年边缘绿洲和内部绿洲的蒸发量
(20 cm 蒸发皿)

Fig. 2 Evaporation in the edge and inner oases in 2006 (measured by 20 cm evaporating dish)

2.2 临泽小枣物候期和作物生育时期

临泽小枣在 4 月 25~30 日根系开始活动, 根系主要分布层平均温度 15.9 °C (表 3); 临泽小枣从根系开始活动到落叶, 生长期 163 d。临泽小枣耐高温和强光照, 在最高气温 40.5 °C, 最大光照强度 2 016 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的环境下能够正常生长^[1], 安全越冬的临界气温为 -20.0 °C。

春小麦出苗期一般在播后 10 d, 4 月 10 日左右出苗, 分蘖期在 4 月 23 日, 拔节期在 5 月 10 日, 孕穗期在 5 月 22 日, 抽穗期在 5 月 30 日, 开花期在 6

表 3 临泽小枣物候期及适宜温度¹⁾
Tab. 3 Phenophase and fitted temperature of Linze jujube

物候期 Phenophase	日期 (月-日) Date (month-day)	气温 Air tem- perature ()	平均气温 Average air temperature ()	地面温度 Ground temperature ()	平均地面温度 Average ground temperature ()	根系主要 分布层 温度 ²⁾ Temperature of root main distribution layer ()	根系主要 分布层平均温度 Average tem- perature of root main distribution layer ()
根系开始活动期 Elementary activating stage of root	04-25~04-30	9~15	11.9	13~26	21.5	13~20	15.9
根蘖开始发生期 Root sprouting stage	05-25~05-30	12~23	17.3	19~33	27.6	19~26	22.1
萌芽期 Germination stage	05-03~05-09	8~20	14.1	12~30	23.8	15~25	19.1
展叶期 Leaf expansion stage	05-06~05-13	8~21	16.4	14~32	24.2	15~25	19.2
初花期 Earlier flowering stage	06-11~06-15	19~24	22.0	21~37	32.0	23~29	25.8
开花期 Full flowering stage	06-11~08-20	17~29	21.9	19~40	30.9	20~32	26.9
枣头生长期 Current shoot growing stage	05-08~07-10	13~27	19.7	12~39	28.9	14~31	23.9
枣吊生长期 Fruit shoot growing stage	05-05~07-10	10~27	19.4	12~39	28.7	14~31	23.6
果实发育期 Fruit growth stage	06-20~09-23	10~28	20.3	13~40	29.0	17~33	26.1
果实着色期 Fruit coloring stage	08-26~09-20	10~22	16.9	13~32	25.1	17~29	24.2
果实采收期 Fruit harvesting stage	09-10~09-28	10~20	14.1	13~27	22.4	17~26	22.2
落叶期 Leaves shedding stage	10-05~10-26	1~14	6.9	4~18	11.8	7~19	14.2
冬季休眠期 Dormancy stage	12-01~02-28	-20~4	-6.0	-16~10	-4.8	-10~6	-1.8

1)温度数据根据临泽县气象局气象站资料和中国科学院临泽内陆河流域研究站气象观测场资料统计计算。2)根系主要分布在 20~60 cm 土层,根系主要分布层温度为土壤 20 cm、40 cm、60 cm 深处温度的平均值。1) The temperature data in the table are calculated by using data of the weather stations of Linze Meteorological Bureau, Gansu Province; and of the Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Academy of Sciences. 2) The root mainly distributes in 20~60 cm soil layer, and the temperature of root main distribution layer is the average temperature of those in 20 cm, 40 cm, 60 cm soil layer.

月 7 日, 灌浆期在 6 月 22 日, 乳熟期在 7 月 2 日左右。

紫花苜蓿生长的最适宜温度为 25℃ 左右, 根系在 15℃ 时生长最好, 在灌溉条件下, 可以耐受较高温度。紫花苜蓿耐寒性很强, 5~6℃ 即可发芽并能耐受-5℃ 的寒冷, 成年植株能耐-30℃ 的低温。

2.3 需水量和需水规律

需水量统计计算结果见表 4。边缘绿洲临泽小枣从根系开始活动到落叶需水量为 859.2 mm, 4 月 25~30 日根系开始活动期间的需水量最小, 主要为土壤蒸发, 为 1.6 mm·d⁻¹; 随着温度升高和枣树的萌芽展叶, 需水量逐渐增加, 5 月 6 日到 13 日的展叶期需水量平均为 4.4 mm·d⁻¹; 进入 6 月份, 需水量明显增大, 7 月 11 日到 7 月 15 日需水量最大, 平均 9.0 mm·d⁻¹; 随后需水量逐渐减少, 至霜降的 10 月初接近于 4 月末。5~9 月日均需水量分别为 4.4 mm·d⁻¹、7.5 mm·d⁻¹、8.2 mm·d⁻¹、4.1 mm·d⁻¹、3.2 mm·d⁻¹, 7 月份需水量最大, 其次为 6 月份。从季节来看, 春季(4 月 25 日~5 月 31 日)需水量为 146.1

mm, 夏季(6 月 1 日~8 月 31 日)为 607.0 mm, 秋季(9 月 1 日~10 月 5 日)为 106.1 mm。生长期平均需水量为 5.3 mm·d⁻¹。

春小麦生育期(从播种到收获)112 d, 需水量为 809.9 mm(表 4)。4 月、5 月、6 月需水强度分别为 4.7 mm·d⁻¹、7.7 mm·d⁻¹、9.4 mm·d⁻¹。春小麦需水量最小的阶段为播种到出苗期, 平均需水量为 2.3 mm·d⁻¹; 需水量最大的生育时期为灌浆期, 需水量为 10.0 mm·d⁻¹; 需水量最大的生育阶段为抽穗~灌浆阶段, 日均需水量为 9.4 mm·d⁻¹; 之后, 耗水量又有所减少。幼苗期和分蘖期, 叶面蒸腾量较小, 而且田面大部分未被叶片覆盖, 故以株间蒸发为主, 随着植株生长加快, 叶面积增加, 蒸腾量加大。当田面大部分被小麦叶片覆盖时, 株间蒸发量下降, 叶面蒸腾成为决定需水量大小的主要因素。孕穗开花期间, 叶面积最大, 叶面蒸腾达到高峰, 灌浆以后, 蒸腾量逐渐下降。生育期平均需水量为 7.2 mm·d⁻¹。

紫花苜蓿从 3 月 26 日返青到 10 月 5 日停止生长, 生育期 193 d, 需水量为 945.7 mm(表 4)。紫花

苜蓿生长的 4~9 月日均需水量依次为 $3.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $4.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $5.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $6.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $5.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $3.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 最大需水强度可达 $7.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。紫花苜蓿刈割后, 叶面积指数急剧下降, 进而影响蒸散作用, 从表 4 看出, 5 月 30 日第 1 次刈割和 7 月 20 日第 2 次刈割后需水量暂时减少。紫花苜蓿年平均需水强度为 $4.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。紫花苜蓿年鲜草产量为 $70\,749 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 干草产量为 $17\,151 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 按干草计算耗水系数为 551。

枣树/春小麦间作地从 3 月 28 日春小麦播种到 10 月 5 日枣树落叶, 共 191 d, 总需水量为 $1\,009.7 \text{ mm}$ (表 4), 4~9 月的需水量分别为 117.2 mm 、 206.3 mm 、 248.2 mm 、 222.6 mm 、 118.1 mm 和 82.2 mm ,

需水强度依次为 $3.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $6.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $8.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $7.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $3.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $2.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 6 月份需水量和需水强度最大。比较单种枣树和春小麦需水规律可以看出, 枣树的最大需水量在 7 月份, 春小麦在 6 月份, 而枣树/春小麦复合系统在 6 月份。枣树/春小麦复合系统年平均需水强度为 $5.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。枣树/春小麦复合系统增加的需水量为枣树需水量的 17.5%, 小麦需水量的 24.7%。

枣树/紫花苜蓿间作地从 3 月 26 日紫花苜蓿返青到 10 月 5 日紫花苜蓿停止生长和枣树落叶, 共 193 d, 总需水量为 $1\,342.3 \text{ mm}$ (表 4), 4~9 月的需水量分别为 104.1 mm 、 220.0 mm 、 259.8 mm 、 340.4 mm 、 232.9 mm 、 161.4 mm , 需水强度依次为 3.5

表 4 边缘绿洲临泽小枣、春小麦、紫花苜蓿及其不同间作模式需水量

Tab. 4 Water requirement of Linze jujube, spring wheat, alfalfa and their different complex systems in the edge oasis mm

日期(月-日) Date (month-day)	枣树 Jujube	春小麦 Spring wheat	紫花苜蓿 Alfalfa	枣树/春小麦间作 Jujube/spring wheat intercropping	枣树/紫花苜蓿间作 Jujube/alfalfa intercropping
03-26~03-31		7.1	11.6	5.5	10.1
04-01~04-10		22.9	35.1	18.4	30.7
04-11~04-20		58.3	37.8	47.9	34.3
04-21~04-30	9.8	60.5	44.2	50.9	39.1
05-01~05-05	10.2	27.1	23.1	25.3	29.1
05-06~05-10	21.2	33.9	24.6	28.2	33.5
05-11~05-15	22.8	40.2	25.2	32.7	34.7
05-16~05-20	22.9	41.6	24.4	36.5	36.8
05-21~05-25	24.9	42.2	25.4	37.9	38.8
05-26~05-31	34.3	53.4	28.8	45.7	47.1
06-01~06-05	31.9	45.3	20.3	38.4	33.7
06-06~06-10	35.4	47.0	21.6	39.0	36.0
06-11~06-15	37.8	47.3	25.1	41.3	40.2
06-16~06-20	38.9	48.6	27.5	42.5	44.7
06-21~06-25	39.7	49.9	31.3	44.6	50.3
06-26~06-30	41.0	45.3	34.1	42.4	54.9
07-01~07-05	43.1	42.9	36.0	41.3	59.7
07-06~07-10	43.9	41.3	38.8	40.0	64.7
07-11~07-15	45.0	39.6	37.8	39.2	62.5
07-16~07-20	43.1	15.5	32.6	36.1	59.5
07-21~07-25	41.0		31.3	35.0	43.2
07-26~07-31	38.9		38.3	31.0	50.8
08-01~08-05	29.5		32.8	24.8	42.7
08-06~08-10	23.4		32.3	22.0	40.0
08-11~08-15	21.0		31.4	21.4	37.1
08-16~08-20	17.6		26.9	16.1	36.0
08-21~08-25	16.2		24.4	15.7	35.2
08-26~08-31	19.6		29.0	18.1	41.9
09-01~09-10	33.8		42.8	31.0	67.8
09-11~09-20	33.4		34.5	27.9	54.5
09-21~09-30	28.9		25.7	23.3	39.1
10-01~10-05	10.0		11.0	9.6	13.6
合计 Total	859.2	809.9	945.7	1 009.7	1 342.3

春小麦 3 月 28 日播种, 7 月 18 日收获; 紫花苜蓿 3 月 26 日开始返青, 10 月 5 日停止生长。Spring wheat was seeded on Mar. 28 and harvested on Jul. 18. Alfalfa started turning green on Mar. 26 and stopped growth on Oct. 5.

$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $7.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $8.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $11.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $7.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $5.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 7 月份需水量和需水强度最大, 平均超过 $10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 明显高于单种枣树和紫花苜蓿的需水量。年平均需水强度为 $7.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。枣树/紫花苜蓿复合系统增加的需水量为枣树需水量的 56.2%, 紫花苜蓿需水量的 41.9%。

比较表 4 和图 2 可以看出, 蒸发量存在较大差别的 4~10 月份, 特别是 5~9 月份, 是植物生长需水的主要季节。小麦株间蒸发占需水量的 30%~40%, 叶面蒸腾占需水量的 60%~70%^[11]。夏玉米棵间蒸发量占蒸发蒸腾量的比例在 44%~53% 之间^[12]。荒漠地区空气干燥, 蒸发强烈, 根据图 2, 植物生长季节内部绿洲比边缘绿洲蒸发量要少 144.8 mm, 绿洲蒸发量占需水量按 40% 计算, 内部绿洲植物需水量比边缘绿洲要少 362 mm, 根据边缘绿洲需水规律得出内部绿洲需水量见表 5。

从表 5 看出, 内部绿洲临泽小枣从根系开始活动到落叶需水量为 497.2 mm, 在 4 月 25~30 日根系开始活动期, 主要为土壤蒸发, 需水强度为 $1.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$; 5~9 月需水强度依次为 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $4.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $4.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $2.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $1.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 7 月份需水量最大, 其次为 6 月份; 10 月初主要为土壤蒸发, 与 4 月末一致。从季节变化来看, 春季(4 月 25 日~5 月 31 日)临泽小枣需水量为 84.6 mm, 夏季(6 月 1 日~8 月 31 日)为 351.3 mm, 秋季(9 月 1 日~10 月 5 日)为 61.3 mm。生长期平均需水强度为 $3.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

内部绿洲春小麦生育期需水量为 447.9 mm(表 5)。4 月、5 月、6 月需水强度分别为 $2.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $4.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $5.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。从播种到出苗期, 平均需水强度为 $1.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$; 灌浆期需水强度为 $5.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。生育期平均需水强度为 $4.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

内部绿洲紫花苜蓿需水量为 583.7 mm(表 5)。紫花苜蓿生长的 4~9 月日均需水强度依次为 2.4

$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $3.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $3.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $4.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $3.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $2.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 最大需水强度可达 $4.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 年平均需水强度为 $3.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。内部绿洲产草量明显高于边缘绿洲, 按年鲜草产量 $70\ 749 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 干草产量 $17\ 151 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 计算, 干草耗水系数为 340。

枣树/春小麦间作在内部绿洲总需水量为 647.7 mm(表 5)。4~9 月的日均需水强度分别为 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $4.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $5.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $4.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $2.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $1.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 6 月份需水量和需水强度最大。年平均需水强度为 $3.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

枣树/紫花苜蓿间作在内部绿洲总需水量为 980.3 mm(表 5)。4~9 月日均需水强度分别为 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $5.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $6.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $8.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $5.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $3.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 7 月份需水量和需水强度最大, 需水强度达 $8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 明显高于单种枣树和紫花苜蓿。枣树/紫花苜蓿复合系统年平均需水强度为 $5.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.4 灌水时期及灌水定额

依据绿洲特点和植物生物学特性, 枣树和紫花苜蓿及春小麦尽量灌越冬水, 如冬灌水源不足可灌春水。根据物候期和需水规律得出的临泽内部绿洲不同种植模式的灌水时期和灌水定额, 见表 6。枣树生育期加冬灌共灌水 4 次, 以满足临泽小枣生长过程中 4 个关键时期的水分需求: 萌芽水、花前水、膨大水和丰果水, 以提高枣果品质和产量。入冬前灌溉可以蓄墒, 浇足越冬水, 枣树才能抵御冬季严寒和干风, 并且有利于春季萌芽生长。单作枣园采用小区灌溉方式, 枣农复合系统枣树采用沟灌方式或与农田一起采用小区灌溉方式。边缘绿洲应根据生长期需水量增加灌水次数, 一般增加 2~3 次。

春小麦生育期内, 包括播前水或冬灌水共灌水 4 次(表 6), 以满足春小麦生长发育过程中的 4 个关键时期的水分需求: 萌芽水、分蘖拔节水、孕

表 5 内部绿洲临泽小枣、春小麦、紫花苜蓿及其不同间作模式需水量

Tab. 5 Water requirement of Linze jujube, spring wheat, alfalfa and their different complex systems in the inner oasis mm

日期(月-日) Date (month-day)	枣树 Jujube	春小麦 Spring wheat	紫花苜蓿 Alfalfa	枣树/春小麦间作 Jujube/spring wheat intercropping	枣树/紫花苜蓿间作 Jujube/alfalfa intercropping
03-26~03-31		3.9	7.2	3.5	7.4
04-01~04-30	5.7	78.4	72.3	75.2	76.0
05-01~05-31	78.9	131.8	93.5	132.3	160.7
06-01~06-30	130.1	156.7	98.7	159.2	189.7
07-01~07-31	147.4	77.0	132.5	142.8	248.6
08-01~08-31	73.8		109.1	75.7	170.1
09-01~09-30	55.5		63.6	52.8	117.9
10-01~10-05	5.8		6.8	6.2	9.9
合计 Total	497.2	447.9	583.7	647.7	980.3

表 6 内部绿洲临泽小枣、春小麦、紫花苜蓿及其不同间作模式灌水时期(月-日)及灌水定额($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)
Tab. 6 Irrigating date (month-day) and quota ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) of jujube and its different complex systems in the inner oasis

临泽小枣 Linze jujube	灌水类别	Irrigating type	花前水		膨大水		丰果水		越冬水
			Before flowering		Fruit swelling		Accelerating fruit growth		Overwintering
	灌水时期	Irrigating date	06-05~06-07		07-05~07-09		08-07~08-10		10-20~10-30
	灌水定额	Irrigating quota	1 210		1 280		1 200		1 280
春小麦 Spring wheat	灌水类别	Irrigating type	播前水		拔节水		孕穗水		灌浆水
			Before seeding		Jointing		Booting		Filling
	灌水时期	Irrigating date	03-23~03-25		05-09~05-11		05-22~05-24		06-20~06-22
	灌水定额	Irrigating quota	1 200		1 040		1 200		1 040
紫花苜蓿 Alfalfa	灌水类别	Irrigating type	促长水		复壮水		生产水		越冬水
			Accelerating growth		Rejuvenation		Producing		Overwintering
	灌水时期	Irrigating date	04-15~04-20		05-18~05-22		06-15~06-19		07-21~07-25
	灌水定额	Irrigating quota	1 040		1 200		1 200		1 200
枣树/春小麦 间作 Jujube/spring wheat intercrop- ping	灌水类别	Irrigating type	小麦拔节水	小麦孕穗水	小麦灌浆水	枣果膨大水	丰果水	越冬水	
			Jointing of wheat	Booting of wheat	Filling of wheat	Fruit swell- ing of jujube	Accelerating fruit growth of jujube	Overwintering	
	灌水时期	Irrigating date	05-09~05-11	05-22~05-24	06-20~06-22	07-05~07-09	08-07~08-10	10-20~10-30	
	灌水定额	Irrigating quota	1 200	1 280	1 220	750	750	1 280	
枣树/苜蓿间 作 Jujube/alfalfa intercropping	灌水类别	苜蓿促长水	苜蓿复壮水	枣树花前水	苜蓿生产水	枣果膨大水	苜蓿增产水	枣树丰果水	越冬水
		Accelerating growth of alfalfa	Rejuvena- tion of alfalfa	Before flow- ering of jujube	Producing of alfalfa	Fruit swell- ing of jujube	Yield-incre asing of alfalfa	Accelerating fruit growth of jujube	Over- winter- ing
	灌水时期	04-15~ 04-20	05-18~ 05-22	06-05~ 06-07	06-20~ 06-24	07-05~ 07-09	07-21~ 07-25	08-07~ 08-10	10-20~ 10-30
	灌水定额	Irrigating quota	1 100	1 200	1 200	1 300	1 200	1 300	1 300

穗水和灌浆水。如果采用喷灌或滴灌等方式灌溉,应采取早灌、勤灌和轻灌的原则,增加灌水次数,适当减少灌水用量。水量有限条件下应优先保证作物敏感期用水,实现有限水量在作物全生长过程中的最优分配。

根据紫花苜蓿获得高产的需水量,在无地下水补给的情况下,其生育期需灌水 4 次,加上越冬水,年灌水 5 次,灌溉量为 $5\,840\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

枣树/春小麦复合系统灌溉需同时考虑枣树物候期和 wheat 生育时期,一般一年灌水 6 次(表 6),其中包括冬灌水,这样可以满足复合系统的水分需求。前期重点考虑小麦,采取小区灌溉的方式;后期只灌枣树,采用沿枣树带沟灌的方式,满足枣树需水关键期的水分需求。

枣树/紫花苜蓿复合系统需水量大,包括冬灌,一年需灌水 8 次(表 6),以保证枣树和紫花苜蓿生长发育的水分需求。

3 讨论与结论

绿洲农业也叫灌溉农业,灌溉或降雨后 2~3 d 土面蒸发强度较大,受大气蒸发力影响明显^[13],边缘绿洲受荒漠影响更大,大气蒸发力更强。临泽小枣在内部绿洲和边缘绿洲的需水量在 497~859 mm

之间,枣树整个生育期间,以花期和幼果迅速生长期需水量最大(表 4)。土壤含水量低于田间持水量的 50%时临泽小枣会出现较重的落花、落果现象,为保证枣树正常生长,要保证关键水。根据临泽枣树物候,6 月上旬要灌花前水,使根系分布层的土壤含水量达到田间持水量的 70%为宜;7 月上旬灌促果水,促进果实膨大和多座果;8 月上旬灌丰果水,促进果实后期生长。

春小麦在内部绿洲全生育期需水量为 447.9 mm,利用称重式电子蒸渗仪测定得到春小麦在正常供水(土壤含水量为田间持水量的 70%)时全生育期需水量为 436 mm^[14],本研究结果与其相似。从春小麦研究结果的一致性说明用边缘绿洲需水量得出的内部绿洲需水量是可靠的。

紫花苜蓿全生长季的需水量在 450~1 100 mm 之间^[15],范围更大在 400~2 250 mm 之间^[8],需水强度在 3~7 mm · d⁻¹^[8,15]。不同灌溉模式紫花苜蓿的耗水量不同,在一定范围内紫花苜蓿的耗水量随灌溉量的增加而提高^[16],属于高耗水牧草^[2,17]。紫花苜蓿根系发达抗旱能力很强,对水分的适应范围广,在不同的灌水量下均能生长,但产草量变化很大,鲜草产量变幅在 30~120 t · hm⁻²,干草变幅在 8~45 t · hm⁻²。紫花苜蓿可在土壤中固定氮约 270

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[18], 是草田轮作和发展畜牧业的主要牧草。本研究得出, 紫花苜蓿在内部绿洲和边缘绿洲需水量在 584~946 mm 之间, 年平均需水强度在 3~5 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。紫花苜蓿在边缘绿洲和与枣树间作时需水量明显增大。

从 2 种复合系统比较来看, 枣树/春小麦间作争水的矛盾不大, 枣树/紫花苜蓿间作明显加剧了水分的消耗, 需水量明显增大。间作套种是充分利用土地资源和气候资源来实现增产增收的重要途径, 只有利用植物间高株与矮株、深根与浅根、成熟早晚、喜阳耐阴等生长特性, 进行合理的搭配组合, 使各种植物占有一定的土地和空间, 最大限度地利用水、肥、光、热等资源, 才能达到农业生产的高产高效。春小麦 0~20 cm 土层内根量占总根量的 70% 左右, 枣树根系主要分布在 20~60 cm 土层, 枣树/春小麦复合系统可以充分利用不同土层水分养分, 实现资源的充分利用。紫花苜蓿是深根系多年生牧草, 适应性很强, 从单种枣树和紫花苜蓿及其复合种植的需水量可以看出, 枣树/紫花苜蓿复合系统不适应大面积发展, 间作系统的耗水量明显增加; 发展时应加大枣树带宽, 枣树带内不宜种紫花苜蓿。

枣农复合系统是绿洲水资源高效利用的主要模式, 枣树冠较矮, 枝疏、叶小、遮光程度小, 透光率较大, 基本上不影响间作物对光照强度和采光量的要求。南北行向栽植枣树, 冠下受光时间较均匀, 日采光量也大于东西行向的日采光量。枣粮间作时, 以枣树为主的枣树行距在 4~6 m, 以粮为主的枣树行距 12~15 m, 枣粮兼顾的枣树行距 8~10 m; 枣树株距均为 3~4 m。控制枣树高度 4 m 以下, 定干高度 0.8~1.0 m。枣粮间作, 留出 1 m 宽的枣树带; 枣树/紫花苜蓿间作至少要留出 2 m 的枣树带。采用小区灌溉和沟灌相结合的方式, 及时满足复合系统的水分需求。

绿洲小气候特征十分明显, 具有冷湿效应^[19-20], 土壤主要是灌耕土和灌淤土, 保水性能明显强于风沙土。本试验地位于绿洲边缘, 为风沙土, 种植的枣树、春小麦、紫花苜蓿、枣树/春小麦、枣树/紫花苜蓿的需水量为 859.2 mm、809.9 mm、945.7 mm、1 009.7 mm 和 1 342.3 mm。在绿洲灌溉管理中, 要以枣树、春小麦、紫花苜蓿、枣树/春小麦、枣树/紫花苜蓿在内部绿洲的需水量 497.2 mm、447.9 mm、583.7 mm、467.7 mm 和 980.3 mm 为依据, 根据灌溉

制度进行灌溉管理, 边缘绿洲或漏水漏肥严重的地段, 应增加灌水次数 2~3 次。

参考文献

- [1] Su P X, Liu X M. Photosynthetic characteristics of linze jujube in conditions of high temperature and irradiation[J]. *Scientia Horticulturae*, 2005, 104: 339-350
- [2] 山仑, 张岁岐, 李文尧. 论苜蓿的生产力与抗旱性[J]. *中国农业科技导报*, 2008, 10(1): 12-17
- [3] 山仑. 节水农业与作物高效用水[J]. *河南大学学报: 自然科学版*, 2003, 33(1): 1-5
- [4] Cao H X, Zhang Z B, Xu P, et al. Mutual physiological genetic mechanism of plant high water use efficiency and nutrition use efficiency[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, 57: 1-7
- [5] Ali M H, Talukder M S U. Increasing water productivity in crop production—A synthesis[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95: 1201-1213
- [6] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2001: 21-25
- [7] 姜德娟, 王会肖. 生态环境需水量研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1271-1275
- [8] 孙洪仁, 刘国荣, 张英俊, 等. 紫花苜蓿的需水量、耗水量、需水强度、耗水强度和水分利用效率研究[J]. *草业科学*, 2005, 22(12): 24-30
- [9] 苏培玺, 杜明武, 赵爱芬, 等. 荒漠绿洲主要作物及不同种植方式需水规律研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(2): 79-85
- [10] 苏培玺. 沙地葡萄需水规律研究[J]. *西北植物学报*, 2001, 21(5): 944-951
- [11] 李彩霞, 马三力. 小麦的需水规律[J]. *农业与技术*, 2005, 25(4): 68-69
- [12] 王健, 蔡焕杰, 康燕霞, 等. 夏玉米棵间土面蒸发与蒸发蒸腾比例研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 17-22
- [13] 孙景生, 康绍忠. 沟灌夏玉米棵间土壤蒸发规律研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2004, 35(5): 399-401
- [14] 冯金朝, 黄子琛. 春小麦蒸发蒸腾的调控[J]. *作物学报*, 1995, 21(5): 544-550
- [15] 李浩波, 高云英, 张景武, 等. 紫花苜蓿耗水规律及其用水效率研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(6): 163-167
- [16] Sammis T W. Yield of alfalfa and cotton as influenced by irrigation[J]. *Agronomy Journal*, 1981, 73: 323-329
- [17] 徐炳成, 山仑, 李凤民. 半干旱黄土丘陵区五种植物的生理生态特征比较[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 990-996
- [18] 张少华. 陇东黄土高原干旱草地利用方向和途径的探讨[J]. *草业科学*, 1997, 14(5): 4-7
- [19] 苏从先, 胡隐樵, 张永丰, 等. 河西地区绿洲小气候特征和冷岛效应[J]. *大气科学*, 1987, 11(4): 390-396
- [20] 张强, 王胜. 绿洲与荒漠背景夏季近地层大气特征的对比分析[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(2): 282-289