

苜蓿对农田耗水过程与盐分变化的影响

田德龙¹ 侯晨丽^{1,2} 徐冰¹ 李仙岳² 任杰¹

(1. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为了探究苜蓿对农田耗水过程及盐分变化的影响,以苜蓿农田为研究对象,以传统玉米农田为对照,分析传统玉米农田改种苜蓿后渗漏量、地下水补给量、蒸发量及蒸腾量变化特征;应用稳定氢氧同位素定量分析各潜在水源贡献率,并分析土壤中盐分变化规律。结果表明:改种苜蓿后农田总耗水量提高 20.17%,蒸发蒸腾量比平均值降低 66.64%,其中,蒸发量减少 6.21%、蒸腾量提高 35.80%、土壤贮水变化量减少 8.08%、渗漏量减少 39.68%、地下水对作物的补给量增加 153.45%。生育期内苜蓿农田与玉米农田相比,0~100 cm 各土层土壤体积含水率变化分为剧烈波动阶段和线性下降阶段,7月 0~60 cm 土壤体积含水率变化呈“U”形,而玉米农田 0~60 cm 土壤体积含水率变化呈“V”形。生育期内苜蓿农田 0~30 cm 平均土壤水分较玉米农田分布均匀。苜蓿农田对土壤水、灌溉水、地下水吸收利用无明确偏向性;而玉米农田水分利用具有偏向性,各潜在水源中主要利用 0~40 cm 土层土壤水。不同时间取样 0~100 cm 土层土壤水,苜蓿农田不同时期优先利用 0~40 cm 中某一土层土壤水,玉米农田主要固定利用 30~40 cm 土层土壤水。生育期内苜蓿农田、玉米农田 0~100 cm 土壤平均脱盐率分别为 53.90%、12.43%。苜蓿农田、玉米农田 10~30 cm 与 30~60 cm 土壤电导率差值绝对值分别在 0~0.06 mS/cm、0~0.13 mS/cm 之间,苜蓿农田 10~60 cm 土壤电导率较玉米农田相对集中且分布均匀。5 月苜蓿农田 10 cm 以下土层除 30~40 cm 均呈积盐状态,且平均土壤储盐变化率较玉米农田低;6—8 月苜蓿农田 0~100 cm 土壤盐分较玉米农田变化幅度大,呈积盐状态;9 月苜蓿农田不同土层土壤盐分整体呈脱盐状态,土壤最大储盐量变化率为 -15.31%,随深度增加,土壤储盐量变化率先增大后趋于稳定,而玉米农田整体呈积盐状态,80~100 cm 土壤储盐量变化率最大。改种苜蓿增强了地下水利用,降低了蒸发蒸腾比,抑制了土壤盐分,改盐增草(饲)兴牧发展苜蓿种植有利于盐渍化农田的改善。

关键词: 苜蓿; 农田耗水; 各潜在水源; 贡献率; 土壤盐分

中图分类号: S152.7; S156.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0291-11

Effect of Alfalfa on Water Consumption Process and Salt Changes in Fields

TIAN Delong¹ HOU Chenli^{1,2} XU Bing¹ LI Xian Yue² REN Jie¹

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Huhhot 010020, China

2. College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: It is significant to explore planting alfalfa on process of the water consumption and salt changes in fields. Taking alfalfa field as the research object and the corn field as the control, the variation of leakage, groundwater recharge, evaporation and transpiration in fields of alfalfa was analyzed. Stable hydrogen and oxygen isotope was used to analyze of the contribution rate of each potential water source, and the changes of salt in the soil was analyzed. The results showed that the total water consumption of alfalfa fields was increased by 20.17%, evapotranspiration ratio was decreased by 66.64% on average. among which the evaporation was decreased by 6.21%, the transpiration rate was increased by 35.80%, the variation of soil water storage was decreased by 8.08%, the leakage was reduced by 39.68% and the supply of groundwater to crops was increased by 153.45%. Relative to corn field, the change of soil volumetric water content was divided into severe fluctuation phase and linear decline phase in 0~100 cm soil layers during the growing period. In July, alfalfa field change of soil volume and water content in 0~60 cm presented a “U” shape, and the change of soil water content in 0~60 cm soil of corn field showed type of “V”. The average soil moisture of 0~30 cm in alfalfa field was more evenly distributed than that in corn field during the growing period. There was no clear bias in the absorption, utilization of soil

收稿日期: 2019-01-24 修回日期: 2019-02-18

基金项目: 中国水利水电科学研究院科研专项(MK2017J07)、国家自然科学基金项目(51409174)和内蒙古科技重大专项

作者简介: 田德龙(1982—),男,高级工程师,博士,主要从事节水灌溉理论及农田水土环境研究,E-mail: mkstdl@126.com

water, irrigation water and groundwater in alfalfa field. However, the water use of maize farmland was biased, and the soil water in soil layer of 0 ~ 40 cm was mainly used in each potential water sources. By studying soil water in soil layer of 0 ~ 100 cm at different times, it was flexible to use soil water in a certain soil layer of 0 ~ 40 cm in the different periods of alfalfa farmland. The corn farmland mainly used water in 30 ~ 40 cm soil. During the growing period, the average desalting rates of 0 ~ 100 cm in alfalfa field and corn field were 53.90% and 12.43%, respectively. The absolute difference values of soil salt were 0 ~ 0.06 mS/cm and 0 ~ 0.13 mS/cm of soil conductivity in 10 ~ 30 cm and 30 ~ 60 cm in the alfalfa field and corn field respectively. The soil conductivity of 10 ~ 60 cm in the alfalfa field was relatively concentrated and more evenly distributed compared with the corn field. In May, except for 0 ~ 10 cm and 30 ~ 40 cm soil layers of the alfalfa field were in a state of salt accumulation and the average rate of change of soil storage salt was smaller than that of corn farmland. From June to August, the soil conductivity of 0 ~ 100 cm in alfalfa field was larger than that in corn farmland, which was in the state of salt accumulation. In September, the overall soil salinity of different soil layers in the alfalfa field was in a desalted state, and the maximum salt storage rate of the soil was -15.31%. As the depth increase, the change of soil salinity was increased first, and then tended to be stable. However, the overall soil salinity of the corn field was in a salt accumulation state. The change rate of soil salinity was the largest in 80 ~ 100 cm soil. Therefore, replanting alfalfa was beneficial to enhancing the groundwater use, reducing evapotranspiration ratio, and inhibiting soil salinity. Changing and increasing forage yield (feeding) and developing alfalfa planting was beneficial to the local salinization of fields.

Key words: alfalfa; water consumption of fields; potential of water sources; contribution rate; soil salinity

0 引言

紫花苜蓿有“牧草之王”之称,营养价值高,耐盐及耐旱性较强,是我国种植面积较大、分布范围较广的牧草之一^[1-2]。目前河套灌区盐渍化耕地面积32.27万hm²,占总耕地面积的45.5%,利用盐渍化农田种植苜蓿,对解决粮经饲争地矛盾、调整种植结构、提升耕地质量等具有重要意义。

农业生产中,全面了解和掌握作物耗水规律,对节水农业的发展、水分利用效率的提高和生物产量的模拟预测均具有重要意义^[3]。目前,农田耗水研究仍习惯采用水量平衡法,一般通过土壤水分剖面分布或根系分布来确定作物对土壤水分的吸收利用^[4]。白珊珊等^[5]基于水量平衡法得出,冬小麦2年平均耗水量为387.9mm,其中灌溉水消耗占比最大,但水分分布只能说明可利用水分的多少,根系的存在并不等于这些根在水分吸收方面活跃^[4],采用水量平衡法无法定量分析不同土层水分及各潜在水源对农田耗水的贡献率。近年来,同位素技术在农田作物研究领域得到广泛应用,李丰琇等^[6]采用双作物系数法计算蒸腾量,并与稳定碳同位素法测得的耗水量进行比较,两者相关性较好,但稳定碳同位素法具有一定局限性,无法定性确定植物利用水分来源信息及不同水源的利用比例,而稳定氢氧同位素为植物水分来源和水分利用策略研究提供了新的技术方法^[7-10]。余绍文等^[7]对黑河戈壁区沙漠植物的水分来源研究显示,干旱区植物水分来源主要

依赖于降水。赵西宁等^[8]研究了黄土丘陵区4个树龄枣树对不同深度土层土壤水分利用特征,分析得到,浅层土壤水分相对充足时期,枣树主要吸收浅层土壤水分,浅层土壤水分匮乏时,深层土壤水分吸收比例增大,不同树龄枣树不同时期水分利用特征存在差异。邬佳宾等^[9]通过研究滴灌条件下紫花苜蓿对灌溉水的利用情况得到,灌水后作物迅速而高效地吸收利用了灌溉水,但对灌溉水的用水策略并不明确偏向于某一深度土层。孙宁霞^[10]基于稳定氢氧同位素方法分别研究了玉米不同生育期水分利用特征,结果表明,不同生育期不同深度土壤水贡献率差异显著。而在地下水埋深浅的灌区,有关水量平衡法与稳定氢氧同位素相结合解析农田耗水过程及不同水源(灌溉水、地下水、土壤水)水分贡献率的研究鲜有报道。苜蓿为密植型作物,较传统玉米(占河套灌区种植面积的77.9%)种植密度大,冠层覆盖度大,群体叶面积指数大,进而影响蒸散^[11-12]。文献[13-15]认为,地表覆盖增加,可减少地表蒸发,阻隔浅层盐分积累,使农田水分、盐分时空重新分布。试验区降雨少、蒸发强度大、地下水位埋深浅。明广辉等^[16]研究发现,随地下水位埋深的增加,土壤累积含盐量呈负指数降低;何子健等^[17]研究发现,棉花间作苜蓿可提高地下水利用效率,降低土壤盐分。

苜蓿根系深、覆盖度高,可增加地下水利用量,导致土壤剖面盐分发生变化。为此,本文以苜蓿农田为研究对象,以传统玉米农田为对照,分析种植苜

苜蓿对农田耗水过程、不同土层土壤水贡献率、各潜在水源贡献率及农田盐分的影响,旨在揭示苜蓿对水盐的调控效果和机制,为当地盐渍化农田苜蓿种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区磴口县坝楞村圣牧高科经济园区,属温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热少雨。年平均气温 10.5℃;无霜期 133 ~ 144 d;年平均降水量 132 mm,年平均蒸发量 2 258.5 mm。其中 5—10 月降雨量为 56.86 mm,地下水平均埋深为 1.4 m,参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)为 720.85 mm(图 1)。土壤 0 ~ 100 cm 初始平均含盐量为 1.64 g/kg,平均容重为 1.48 g/cm³,土质为粉砂壤土,粒径组成质量百分数:砂粒 36.10%、粉粒 57.78%、黏粒 6.12%,苜蓿农田、传统玉米农田初始土壤 0 ~ 100 cm 平均有机质质量比分别为 12.66、9.30 g/kg。

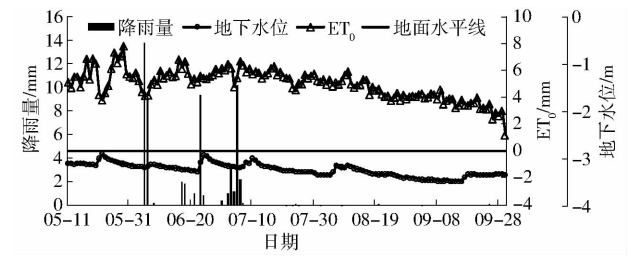


图 1 生育期降雨量、地下水位及 ET_0 变化

Fig. 1 Variation curves of rainfall, groundwater level and ET_0 during growing period

1.2 试验设计

供试紫花苜蓿品种为阿尔冈金,玉米品种为钧凯 918,生长周期大致相同(120 ~ 150 d)。苜蓿采用人工条播,行距 15 cm,播种量 22.5 kg/hm²;玉米播种行距 450 mm,株距 300 mm,不进行覆膜,试验于 2017 年开展,苜蓿种植年限为第 2 年。试验农田为相邻两地块,面积均为 35 m × 20 m,中间设置宽 1.5 m 小路,小路左边为苜蓿农田(MX),右边为玉米农田(YM),地块四周埋设 1 m 深塑料布,防止四周农田的侧漏补给,水盐自动监测仪平行于作物播种行地块中间位置安置,苜蓿农田灌水时间、灌水量、施肥量与玉米农田相同,灌溉水为黄河水,灌水时间按照当地黄河配水时间进行灌溉,分别为 5 月 20 日、6 月 22 日、7 月 8 日及 8 月 5 日,共 4 次灌水,每次灌水定额 105 mm,整个生育期共灌水 420 mm。玉米播种时施入底肥,其中磷 140 kg/hm²、氮 210 kg/hm²;苜蓿为多年生牧草,免耕,苜蓿第 1 水前施入相同量磷肥与氮肥。第 2 水及第 3 水两地块

同时进行追肥,追肥施 N 200 kg/hm²。苜蓿在初花期刈割,共收获 3 茬(6 月 21 日、7 月 26 日、9 月 25 日);玉米在成熟期(9 月 25 日)进行收获。

1.3 测定内容及方法

1.3.1 土样采集及测定

气象数据:试验田附近自设的气象站(HOBO-U30 型)自动采集,设定为 1 h 采集 1 次,采集数据包括气温、降雨量、湿度、太阳辐射、大气压等。

地下水位数据:试验区设置自动水位计(HOBO 型),每 6 h 自动记数 1 次,记录数据包括水体压强、水体温度。

土壤水势:两个地块中间分别埋设 80、120 cm 两根真空表型负压计,每 3 d 记录 1 次负压计度数,灌溉及降雨前后加测,每 1 d 记录 1 次,时间为 09:00。用于计算地下水补给量。

棵间蒸发数据:试验地块中间放置一套北京时域通科技有限公司生产的棵间蒸发器测量系统(型号:LYS20,精度:0.1 g),采用高精度传感器称量土柱中水分微量变化,蒸发桶面积为 314 cm²,每 2 h 自动记数 1 次。

作物生育期内含水率及电导率 EC:取样采用“S”形进行均匀采样,每次取样重复 3 次,10 d 左右取样 1 次,灌水降雨前后加测,0 ~ 40 cm 每 10 cm 取样,40 ~ 100 cm 每 20 cm 取样。含水率土样放入铝盒干燥,电导率土样取回阴干、磨细,过 2 mm 筛,按 1:5 的土水质量比混合制取土壤浸提液,采用 DDS-307W 型电导率仪测定。每个试验小区中间埋设一根沈阳巍图科技公司生产的自动水盐监测仪(型号:Fleb-30c,含水率精度:±4%),进行连续含水率监测,每 1 h 记录 1 次,测定前要进行标定(标定方法:根据仪器测定的土壤含水率和干燥法测定的土壤含水率,确定土壤水分标定曲线,进行相关性分析)。

氢氧同位素取样及分析:7 月为作物快速生长阶段(苜蓿:第 2 茬生育期,玉米:拔节期-灌浆期)及需求高峰期,土壤水分变化剧烈,土壤垂直剖面水分交换频繁,7 月前后共进行 3 次取样,分析土壤中水分吸收利用情况。取样时间分别为 6 月 24 日、7 月 11 日、8 月 9 日,包括降雨、灌溉水及地下水样、0 ~ 100 cm 不同土层土壤水、玉米和苜蓿的茎部水样品,植物样剪取 3 ~ 4 株距离地表 5 cm 的茎秆,土壤水取样深度为 0 ~ 40 cm 每 10 cm 取样,40 ~ 100 cm 每 20 cm 取样,样品采集后放入 10 mL 玻璃瓶密封,2℃ 冰箱储存,回到室内用真空抽提系统及时提取土壤水分和植物茎部水分,最后放入 2 mL 样品瓶进行检测。所有样品采用 Picarro L2140-i 型超高精度

液态水和水汽同位素分析仪进行氢氧同位素测定,该仪器测试 δD (氘含量)精度为 $0.04\text{‰}/300\text{ s}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $0.01\text{‰}/300\text{ s}$,且 ^{17}O 盈余精度优于 0.015‰ 。

1.3.2 农田耗水量计算

土壤土水势采用负压计测定,分别在两个地块中间埋设 80、120 cm 两根负压计,选定距地表 100 cm 处为作物根系层下边界,根据实测负压及室内试验得出的作物根系层各水力学参数^[18],采用达西定律计算地下水补给量与渗漏量。计算公式为

$$D = -k_{\theta} \frac{\psi_{m2} - \psi_{m1}}{z_2 - z_1} \Delta t \tag{1}$$

式中 D ——通过地下 100 cm 边界上的水量,mm
 ψ_{m1} ——80 cm 土层土壤水基质势,cm
 ψ_{m2} ——100 cm 土层土壤水基质势,cm
 z_1 ——80 cm 土层深度,cm
 z_2 ——100 cm 土层深度,cm
 k_{θ} ——非饱和土壤导水率,cm/d
 Δt ——时间步长,d

采用水量平衡法计算农田各月耗水量,计算公式为

$$ET = \Delta W + P + I - D - R \tag{2}$$

式中 ET ——农田耗水量,mm
 ΔW ——0 ~ 100 cm 土壤贮水变化量,mm
 P ——有效降雨量,mm
 I ——灌溉量,mm
 R ——径流量,mm

当 D 值为正,农田水分发生深层渗漏, D 值为负,地下水向上补给;试验期间试验区未发生持续性降雨,地面径流损失 R 可忽略不计;一般认为 $P < 5\text{ mm}$ 为无效降雨,降雨系数为 0; $5\text{ mm} \leq P \leq 50\text{ mm}$ 时,降雨系数为 1;当 $P > 50\text{ mm}$ 时,降雨系数为 $0.8^{[19]}$ 。

地表蒸发量及蒸腾量的计算公式为

$$\begin{cases} E = \sum_{i=1}^{12} \frac{\Delta S}{314} \\ T = ET - E \end{cases} \tag{3}$$

式中 E ——地表蒸发量,为单位面积上水分变化量,mm
 T ——蒸腾量,mm
 ΔS ——2 h 内土柱质量变化量,g

1.3.3 农田各潜在水源贡献率

试验区降雨少,蒸发强烈,6 月 23—24 日有效降雨总量为 9.4 mm,占灌水量的 9%,7 月 11 日及 8 月 9 日取样前后无降雨,氢氧同位素测定的结果中降雨对作物的贡献率为零,不易被植物吸收利用,因此在分析农田各潜在水源贡献率时将降雨忽略。试验区采用地面灌溉,水分来源包括:①灌溉水。②水

分渗入土壤形成土壤水,被根系吸收,0 ~ 100 cm 土层土壤水是作物水分来源。③浅埋深地下水,向上运移到不同土层,被作物吸收利用,是作物水分来源。将各潜在水源 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值输入 IsoSource 模型,模型中将来源增量设为 1%,质量允许度设为 0.1%。不同采样时间土壤水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 进行相关性分析,由表 1 可知, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关性显著,因此可基于 δD 计算不同土层土壤水分的贡献比例。

表 1 不同取样时间土壤水 $P_{\delta D}$ 、 $P_{\delta^{18}\text{O}}$ 决定系数

Tab.1 Correlation coefficient between $P_{\delta D}$ and $P_{\delta^{18}\text{O}}$ of soil water at different sampling times

时间	YM		MX	
	相关性方程	R^2	相关性方程	R^2
6 月 24 日	$P_{\delta D} = 6.05P_{\delta^{18}\text{O}} - 17.56$	0.993	$P_{\delta D} = 5.28P_{\delta^{18}\text{O}} - 22$	0.911
7 月 11 日	$P_{\delta D} = 6.15P_{\delta^{18}\text{O}} - 14.61$	0.996	$P_{\delta D} = 5.66P_{\delta^{18}\text{O}} - 18.46$	0.997
8 月 9 日	$P_{\delta D} = 7.07P_{\delta^{18}\text{O}} - 1.60$	0.976	$P_{\delta D} = 6.27P_{\delta^{18}\text{O}} - 11.16$	0.997

IsoSource 模型可以同时测定各种可能水源和植物茎秆水中至少一种同位素的值,利用同位素质量守恒原理来计算植物对水分的利用比例^[7],计算公式为

$$P_{\delta D} = \sum_{i=1}^n f_i P_{\delta D_i} \tag{4}$$

其中

$$\sum_{i=1}^n f_i = 1$$

式中 $P_{\delta D}$ ——植物茎部水中氘含量,‰
 $P_{\delta D_i}$ ——农田中潜在水源 i 氘含量,‰
 f_i ——植物对水源 i 的吸收比例,%

1.3.4 不同土层土壤储盐量变化率

土壤质量含盐量采用经验公式进行换算^[19],相关计算公式为

$$M = 3.471P_{EC} + 0.015 \tag{5}$$

式中 P_{EC} ——土壤电导率,mS/cm
 M ——土壤质量含盐量,g/kg

两次取样时段内第 n 层土壤储盐量变化率为

$$\delta_n = \frac{S_n^{m+1} - S_n^m}{S_n^m} \times 100\% \tag{6}$$

其中

$$S_n^m = 10hR_nM_n^m$$

式中 S_n^m 、 S_n^{m+1} ——第 m 、 $m+1$ 次取样所对应的第 n 层土壤单位面积储盐量,g/m²
 h ——土层深度,cm
 R_n ——土层土壤体积质量,g/cm³
 M_n^m ——第 m 次取样第 n 层土壤质量含盐量,g/kg

采用 Excel 2007 软件对数据进行计算并绘制图表,利用 SPSS 17.0 进行方差分析及邓肯式多重比较。

2 结果与分析

2.1 改种苜蓿对农田耗水过程的影响

生育期内(5—9月)苜蓿农田、玉米农田水分消耗情况见表2。由表2可知,改种苜蓿后较玉米农田,总耗水量增加20.17%,蒸发蒸腾量比平均值降低66.64%,其中0~100 cm土壤贮水变化量减少8.08%,地下水对作物补给量增加153.45%,渗漏量减少39.68%,蒸发量减少6.21%,蒸腾量增加35.80%。其中5月苜蓿农田较玉米农田耗水量偏高,主要用于作物蒸腾,蒸发蒸腾比为0.70,玉米农田蒸发蒸腾比为4.98。随作物生长苜蓿农田与玉米农田耗水量总体上先增加后减小,苜蓿农田最大耗水量集中在7月,为190.81 mm,8月玉米农田耗水量最大,为159.43 mm。7—8月农田蒸腾量均增

加,土壤贮水量较5、6月均显著减少($p < 0.05$),苜蓿农田土壤贮水变化量占蒸腾量比例平均值为40.77%,较玉米农田占比小19.79%;地下水补给量占蒸腾量比例平均值为19.38%,较玉米农田占比大16.99%;渗漏量占作物蒸腾量比例平均值为15.03%,较玉米农田占比小12.01%。9月苜蓿生长处于缓慢阶段,玉米生长处于停滞阶段,蒸腾量均显著减小,两块农田耗水量均大幅下降;其中玉米农田因作物细根衰老死亡,对土壤中毛管水的吸收利用减少,而苜蓿农田土壤中水分消耗量显著增加,较玉米农田提高168.41%;地下水补给量均显著高于其他月($p < 0.05$);与玉米农田相比,苜蓿农田渗漏量减少7.39 mm,蒸发蒸腾比减小1.2,表明生长后期苜蓿农田较玉米农田耗水强度仍较大。

表 2 生育期苜蓿农田与玉米农田水分消耗情况													
Tab.2 Water consumption in alfalfa and maize fields during growing period													mm
时间	土壤贮水变化量		地下水补给量		渗漏量		蒸发量		蒸腾量		有效	耗水量	
	MX	YM	MX	YM	MX	YM	MX	YM	MX	YM	降雨量	MX	YM
5 月	- 1. 02 ^d	4. 63 ^d	32. 21 ^b	13. 35 ^b	12. 88 ^c	20. 36 ^b	51. 83 ^b	77. 74 ^a	73. 53 ^c	15. 62 ^c	0 ^c	125. 36 ^d	93. 36 ^c
6 月	13. 02 ^c	- 7. 68 ^c	10. 46 ^d	0 ^d	25. 76 ^a	29. 50 ^a	13. 22 ^e	14. 43 ^d	95. 66 ^b	100. 96 ^b	32. 20 ^a	108. 88 ^c	115. 39 ^c
7 月	- 61. 34 ^a	- 54. 09 ^b	27. 50 ^b	0 ^d	13. 22 ^c	30. 56 ^a	24. 15 ^d	33. 49 ^c	166. 67 ^a	105. 24 ^a	10. 20 ^b	190. 81 ^a	138. 73 ^b
8 月	- 35. 83 ^b	- 76. 72 ^a	17. 82 ^c	5. 26 ^c	17. 73 ^b	27. 55 ^a	60. 83 ^a	49. 40 ^b	80. 09 ^b	110. 02 ^a	0 ^c	140. 92 ^b	159. 43 ^a
9 月	- 57. 60 ^a	- 21. 46 ^d	41. 50 ^a	32. 48 ^a	0 ^d	7. 39 ^c	43. 12 ^c	30. 88 ^c	55. 98 ^c	15. 67 ^e	0 ^c	99. 10 ^d	46. 55 ^d
总量	- 142. 77	- 155. 32	129. 49	51. 09	69. 59	115. 36	193. 15	205. 94	471. 92	347. 51	42. 40	665. 07	553. 46

注:同列不同字母表示差异达显著水平($p < 0.05$),下同。

图2为生育期不同土层土壤体积含水率变化曲线,生育期苜蓿农田土壤体积含水率变化可分为激烈变化阶段和线性下降阶段,玉米农田分为平稳变化阶段和平缓下降阶段。苜蓿农田0~100 cm平均土壤体积含水率较玉米农田下降了6.39个百分点;苜蓿农田0~10 cm与10~30 cm土壤体积含水率平均差值为1.01%,玉米农田为4.32%,表明苜蓿农田0~30 cm土壤水分较玉米农田分布相对均匀。5月初苜蓿农田较玉米农田受作物自身耗水影响显著,5月12日前,苜蓿农田土壤平均体积含水率较

玉米农田降低了22.33个百分点。随时间推移,农田水分消耗主要以蒸腾为主,土壤贮水量消耗增加,土壤体积含水率呈下降趋势,7月受灌溉及地面覆盖度影响,苜蓿农田0~60 cm土壤体积含水率呈“U”形变化,而玉米农田土壤体积含水率呈“V”形变化。8月9日后,农田无灌溉,农田水分消耗主要来源是土壤中贮存水量,到9月10日,苜蓿农田、玉米农田0~60 cm土壤体积含水率变化率平均值分别为-0.48、-0.23,之后苜蓿农田土壤体积含水率趋于平稳,平均变化率为-0.07。为了进一步了解

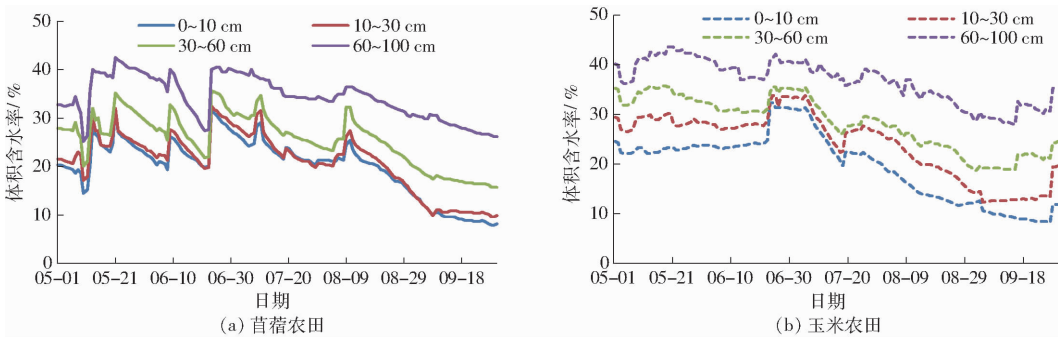


图2 生育期不同土层土壤体积含水率变化曲线

Fig.2 Changing curves of soil volume water content in different soil layers during growing period

改种苜蓿对农田土壤水分空间分布的影响,对不同土层土壤储水量变化进行分析,见表3。5月苜蓿农田、玉米农田30~40 cm土壤储水量均显著低于其他土层($p<0.05$),表明农田30~40 cm土壤水分易被作物根系吸收利用。随时间推移,蒸腾量增大,农田中土壤储水量明显减少,7月苜蓿农田60~80 cm土层土壤储水量显著低于其他土层($p<0.05$);而玉米农田0~10 cm土层土壤储水量显著低于其他

土层($p<0.05$),7月正是气温最高、蒸发最为强烈时候,此时土壤水分受温度影响,地表蒸发量增加。9月苜蓿农田土壤储水变化量相对8月增加,增加60.77个百分点,60~100 cm较0~40 cm土壤储水变化量减少了16.15 mm;而玉米农田土壤储水变化量相对8月减少,减少72.03个百分点。对生育期内各月0~100 cm土壤储水量变化量进行 t 检验,改种苜蓿后农田土壤储水变化量较玉米农田差异性

表 3 各月不同土层土壤储水量变化
Tab.3 Variation regularity of soil water storage in different soil layers in different months

土壤 深度/cm	5月		6月		7月		8月		9月		mm
	MX	YM	MX	YM	MX	YM	MX	YM	MX	YM	
0~10	(1.02±0.04) ^d	(-0.53±0.18) ^c	(4.53±0.18) ^c	(5.15±0.29) ^a	(-4.29±0.33) ^a	(-10.75±0.02) ^e	(-7.15±0.21) ^e	(-7.54±0.44) ^a	(-8.13±0.31) ^c	(-2.68±0.11) ^d	
	(-1.57±0.06) ^f	(-2.42±0.19) ^f	(4.65±0.31) ^c	(-0.33±0.25) ^c	(-7.59±0.22) ^c	(-7.04±0.10) ^b	(-6.04±0.01) ^d	(-8.41±0.29) ^a	(-5.37±0.34) ^b	(0.65±0.03) ^b	
10~20	(-0.84±0.03) ^e	(0.41±0.22) ^b	(5.29±0.37) ^b	(-1.41±0.20) ^d	(-9.11±0.20) ^d	(-6.96±0.02) ^b	(-4.97±0.06) ^c	(-11.84±0.28) ^{cd}	(-5.00±0.48) ^{ab}	(1.38±0.06) ^a	
	(-3.85±0.16) ^g	(-3.85±0.14) ^g	(3.53±0.44) ^d	(-3.00±0.15) ^e	(-10.67±0.17) ^e	(-8.19±0.16) ^c	(-3.57±0.12) ^b	(-10.64±0.33) ^b	(-4.23±0.43) ^a	(-0.73±0.03) ^c	
20~30	(3.43±0.14) ^e	(-2.00±0.31) ^e	(-7.59±0.22) ^f	(0.45±0.26) ^b	(-5.40±0.45) ^b	(-9.03±0.08) ^d	(-6.33±0.02) ^d	(-11.05±0.37) ^{bc}	(-11.06±0.45) ^e	(-6.98±0.29) ^f	
	(4.27±0.17) ^b	(-1.49±0.25) ^d	(6.17±0.49) ^a	(0.50±0.30) ^b	(-12.00±0.53) ^f	(-7.35±0.06) ^b	(-7.38±0.02) ^e	(-12.62±0.30) ^d	(-12.90±0.52) ^f	(-6.22±0.25) ^e	
30~40	(6.05±0.25) ^a	(8.18±0.15) ^a	(-3.56±0.41) ^e	(-9.04±0.02) ^f	(-9.95±0.45) ^e	(-1.64±0.33) ^a	(-0.39±0.37) ^a	(-14.62±0.07) ^e	(-10.91±0.60) ^d	(-6.88±0.28) ^f	
40~60											
60~80											
80~100											

显著($p<0.05$)。

2.2 改种苜蓿后各潜在水源贡献率变化的同位素分析

农田土壤中储存水分主要由灌溉水及地下水转化,最终被作物根系吸收。作物快速生长期,农田中不同土层水分交换频繁,利用直接对比法判根根系优先吸收某层土壤水分,图3为土壤水与茎部水 δD 对比图。6月24日取样,苜蓿农田、玉米农田土壤水 δD 范围分别为-79.12‰~-63.08‰、-120.04‰~-62.79‰;苜蓿农田20~30 cm土壤水 δD 与茎部水 δD 有一个交点,80 cm土壤水 δD 接近于茎部水,表明苜蓿农田耗水深度向下加深;玉米农田20~30 cm、30~40 cm土壤水 δD 与茎部水 δD 均有一个交点(图3a)。7月11日取样,苜蓿农田、玉米农田土壤水 δD 范围分别为-99.99‰~-53.58‰、-108.41‰~-67.20‰;其中苜蓿农田、玉米农田0~10 cm土壤水 δD 与茎部水 δD 均有交点,说明浅层土壤含水率增加时,优先被根系吸收利用;玉米农田30~40 cm土壤水 δD 与茎部水 δD 仍有一个交点(图3b)。8月9日取样,苜蓿农田、玉米农田土壤水 δD 范围为-100.38‰~

-36.40‰、-102.25‰~-59.67‰;其中苜蓿农田80 cm土壤水 δD 与茎部水有一个交点,而玉米农田30~40 cm土壤水 δD 与茎部水有一个交点(图3c)。可以看出,玉米农田不同时间30~40 cm土壤水 δD 与茎部水 δD 均有交点,而苜蓿农田不同时间土壤水 δD 与茎部水交点深度不同,表明苜蓿农田的土壤水利用具有灵活性,玉米农田土壤水利用具有一定的偏向性,主要吸收利用30~40 cm土壤水。

为了进一步分析农田中不同深度土壤水利用比例,利用IsoSource模型定量计算不同采样时间不同土层土壤水贡献率,如图4所示。随时间推移,深层土壤(大于40 cm)水贡献率呈增加趋势,不同土层贡献率整体趋于平稳。6月24日,苜蓿农田优先利用20~30 cm土壤水分,贡献率为78.10%,显著高于其他土层($p<0.05$);玉米农田优先利用0~40 cm土壤水分,贡献率在16%~20%,除20~30 cm,其他土层土壤水贡献率无显著差异($p>0.05$)。7月11日,苜蓿农田0~10 cm土壤水贡献率显著高于其他土层($p<0.05$),大于40 cm土壤水贡献率较6月提高6.1%;玉米农田30~40 cm土壤水贡献率较6月提高20.1%,为40.6%,显著高于其他土层($p<$

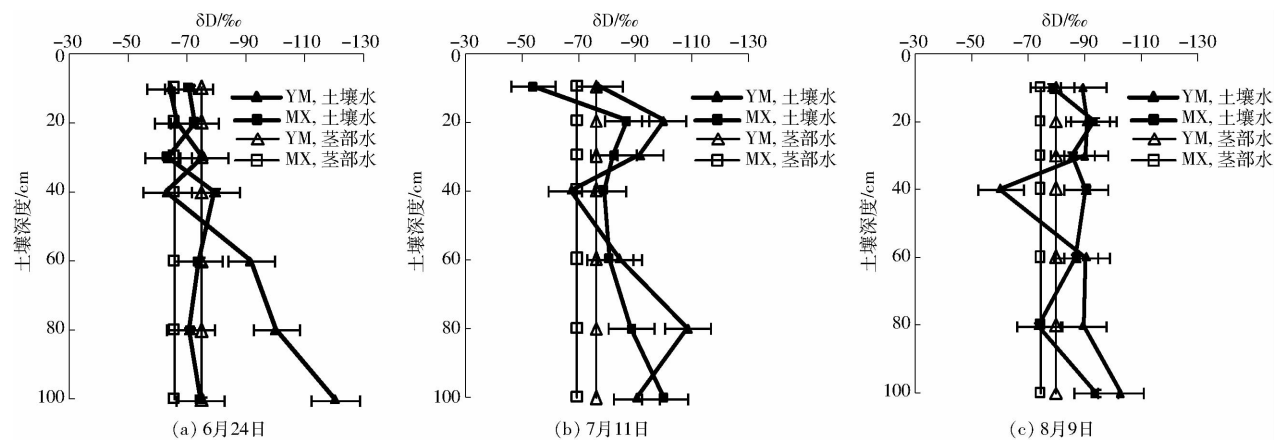


图 3 不同取样时间土壤水和茎部水 δD 比较

Fig. 3 Comparison of δD values of soil water and stem water at different sampling times

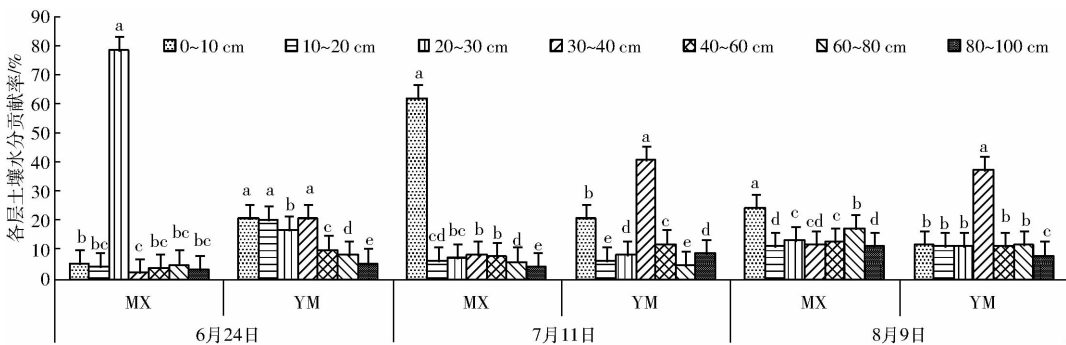


图 4 不同取样时间不同土层土壤水分贡献率

Fig. 4 Ratio of soil water use in different layers at different sampling times

0.05), 大于 40 cm 土层土壤水贡献率较 6 月提高 2.2%; 苜蓿农田深层土壤水贡献率较玉米农田提高比例较大。8 月 9 日, 苜蓿农田不同深度土壤水贡献率间差异减小, 苜蓿农田 0~10 cm 土壤水贡献率为 24.10%, 显著高于其他土层 ($p < 0.05$), 大于 40 cm 土层土壤水贡献率为 40.4%, 较 6、7 月平均增加 26.25%, 表明蒸腾作用水分消耗趋于深层; 玉米农田 30~40 cm 土壤水利用比例显著高于其他层 ($p < 0.05$), 贡献率为 37.10%, 其他土层水分贡献率均匀分布, 平均贡献率为 10.05%, 大于 40 cm 土层土壤水贡献率 29.8%, 较 6、7 月平均增加 6%。随时间推移蒸腾作用水分消耗均趋于深层土壤水分, 苜蓿农田深层土壤 (大于 40 cm) 水贡献率较玉米农田提高比例较大, 深层土壤水利用更为显著。

不同时间农田土壤水、灌溉水及地下水贡献率如表 4 所示。由表可知, 苜蓿农田 0~40 cm、40~100 cm 土壤水贡献分别为 3.18%~34.02%、1.21%~25.74%, 玉米农田 0~40 cm、40~100 cm 土壤水贡献分别为 25.69%~35.31%、24.47%~28.96%, 苜蓿农田土壤水贡献率较玉米农田差异较大, 可能是苜蓿根系对不同土层的水分吸收利用的灵活性所致。8 月较 6、7 月, 苜蓿农田、玉米农田的

灌溉水与地下水贡献率均减小, 苜蓿农田平均贡献率分别减少 24.95%、9.16%, 玉米农田平均贡献率分别减少 3.92%、5.33%, 地下水贡献率下降可能因深层渗漏量减小所致。苜蓿农田不同时间各潜在水源贡献率差异性显著, 6 月 24 日 40~100 cm 土壤水贡献率显著高于其他水源贡献率 ($p < 0.05$); 8 月 9 日 0~40 cm 土壤水贡献率显著高于其他水源贡献率 ($p < 0.05$); 7 月 11 日苜蓿农田灌溉水贡献率显著高于其他水源贡献率 ($p < 0.05$)。玉米农田不同时间 0~40 cm 土壤水贡献率均显著高于其他水源 ($p < 0.05$), 平均贡献率为 31.43%; 灌溉水与地下水贡献率均无显著差异 ($p > 0.05$)。不同时间苜蓿农田地下水贡献率明显高于玉米农田, 分别高 0.62%、11.01%、1.99%, 说明农田改种苜蓿增加了对地下水的消耗。

2.3 改种苜蓿对农田盐分的影响

图 5 为苜蓿农田、玉米农田不同土层土壤电导率变化曲线。由图可知, 生育期内苜蓿农田、玉米农田不同深度土壤电导率呈周期性上下波动变化, 60~100 cm 土壤电导率均大于或等于 10~60 cm 土层。苜蓿农田、玉米农田初始 0~100 cm 土壤平均电导率分别为 0.60、0.52 mS/cm; 收获时 0~100 cm 土壤平均电导率分别为 0.27、0.46 mS/cm, 平均脱

表 4 不同时间农田土壤水、灌溉水及地下水贡献率

Tab.4 Contribution rate of soil water, irrigation water and groundwater at different times						%
水分来源	6 月 24 日		7 月 11 日		8 月 9 日	
	MX	YM	MX	YM	MX	YM
0 ~ 40 cm 土壤水	29.33 ^a	25.69 ^a	3.18 ^c	33.28 ^a	34.02 ^a	35.31 ^a
40 ~ 100 cm 土壤水	17.59 ^c	24.47 ^a	1.21 ^c	26.62 ^b	25.74 ^b	28.96 ^b
灌溉水	26.54 ^b	23.92 ^a	64.05 ^a	19.55 ^c	20.35 ^c	17.81 ^c
地下水	26.54 ^b	25.92 ^a	31.56 ^b	20.55 ^c	19.90 ^c	17.91 ^c

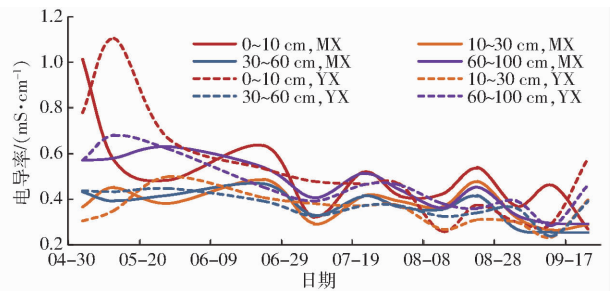


图 5 苜蓿农田、玉米农田不同土层土壤电导率变化曲线
Fig.5 Changing curves of soil conductivity in different soil layers of alfalfa fields and corn fields

盐率分别为 53.90%、12.43%，0 ~ 10 cm 土壤脱盐效果最明显，苜蓿农田、玉米农田 0 ~ 10 cm 土壤脱盐率分别为 73.46%、25.17%。土壤盐分受灌溉淋洗，浅层土壤盐分随水分向下运移，苜蓿农田 60 ~ 100 cm 土壤电导率增大，5 月 13 日、5 月 28 日较 0 ~ 10 cm 土壤电导率分别高 0.01、0.15 mS/cm。生育期内苜蓿农田、玉米农田 10 ~ 30 cm 与 30 ~ 60 cm 土壤电导率差值的绝对值分别为 0 ~ 0.06 mS/cm、0 ~ 0.13 mS/cm；苜蓿农田 10 ~ 60 cm 土壤盐分分布较玉米农田相对集中且分布均匀。为了进一步分析盐分时空变化规律，对农田不同时期不同深度土壤储盐量变化率进行计算，结果如表 5 所示。苜蓿农

田、玉米农田各月不同深度土壤储盐量变化率无显著差异($p>0.05$)。5 月苜蓿农田除 0 ~ 10 cm、30 ~ 40 cm 土层，其余土层土壤储盐量变化率为正值；玉米农田 0 ~ 100 cm 各深度土壤储盐量变化率均为正值，土壤盐分呈积盐状态。6—8 月苜蓿农田、玉米农田不同深度土壤储盐量变化率部分土层为负值；苜蓿农田、玉米农田 0 ~ 100 cm 平均土壤储盐量变化率分别为 10.69%、2.05%，苜蓿农田 0 ~ 100 cm 土壤盐分较玉米农田变化幅度较大，相对于玉米农田呈积盐状态。9 月，苜蓿农田不同深度土壤盐分整体呈脱盐状态，10 ~ 20 cm 脱盐效果最佳，土壤储盐量变化率为 -15.31%，20 ~ 30 cm 脱盐效果最差，土壤储盐量变化率为 -6.34%；30 ~ 60 cm 土层随深度增加，土壤储盐量变化率增加，60 ~ 100 cm 土壤储盐量变化率趋于稳定，平均为 -10.28%；玉米农田整体呈积盐状态，80 ~ 100 cm 土层积盐量最大，0 ~ 80 cm 随深度增加土壤积盐量较 0 ~ 10 cm 均有所减小，表明土壤底墒降低时，苜蓿农田较玉米农田土壤盐分呈脱盐状态。各月 0 ~ 100 cm 土层土壤储盐量变化率进行 t 检验，5、9 月苜蓿农田与玉米农田土壤储盐量变化率差异显著($p<0.05$)，表明改种苜蓿对农田盐分分布的影响较明显。

表 5 各月不同土层土壤储盐量变化率

Tab.5 Monthly variation rate of soil salt storage in different soil layers										%
土壤深度/ cm	5 月		6 月		7 月		8 月		9 月	
	MX	YM	MX	YM	MX	YM	MX	YM	MX	YM
0 ~ 10	(- 27.35 ± 0.45) ^b	(25.11 ± 0.88) ^a	(53.72 ± 0.12) ^a	(1.70 ± 0.20) ^a	(7.61 ± 0.20) ^a	(7.79 ± 0.41) ^a	(12.44 ± 0.03) ^a	(21.55 ± 0.13) ^a	(- 12.54 ± 0.35) ^a	(26.07 ± 0.43) ^a
	(0.87 ± 0.01) ^a	(36.88 ± 0.36) ^a	(22.34 ± 0.08) ^a	(1.38 ± 0.21) ^a	(5.03 ± 0.25) ^a	(- 5.57 ± 0.60) ^a	(13.16 ± 0.02) ^a	(3.96 ± 0.09) ^a	(- 15.31 ± 0.06) ^a	(16.41 ± 0.27) ^a
10 ~ 20	(12.72 ± 0.21) ^a	(25.90 ± 0.67) ^a	(40.91 ± 0.06) ^a	(8.74 ± 0.17) ^a	(3.40 ± 0.10) ^a	(- 10.92 ± 0.42) ^a	(10.68 ± 0.14) ^a	(8.95 ± 0.18) ^a	(- 6.34 ± 0.15) ^a	(20.72 ± 0.34) ^a
	(- 0.13 ± 0.01) ^a	(7.32 ± 0.62) ^a	(38.24 ± 0.06) ^a	(26.96 ± 0.07) ^a	(- 3.65 ± 0.22) ^a	(- 11.481 ± 0.12) ^a	(4.55 ± 0.44) ^a	(3.75 ± 0.19) ^a	(- 13.17 ± 0.06) ^a	(16.81 ± 0.27) ^a
30 ~ 40	(4.03 ± 0.07) ^a	(1.44 ± 0.16) ^a	(9.76 ± 0.04) ^a	(- 4.59 ± 0.01) ^a	(2.62 ± 0.16) ^a	(- 2.85 ± 0.02) ^a	(0.59 ± 0.07) ^a	(1.37 ± 0.05) ^a	(- 10.04 ± 0.02) ^a	(14.17 ± 0.23) ^{1a}
	(0.02 ± 0.00) ^a	(10.88 ± 0.15) ^a	(9.19 ± 0.03) ^a	(- 9.78 ± 0.01) ^a	(- 2.13 ± 0.17) ^a	(- 1.60 ± 0.18) ^a	(0.32 ± 0.16) ^a	(- 5.25 ± 0.03) ^a	(- 10.19 ± 0.09) ^a	(16.43 ± 0.27) ^a
60 ~ 80	(10.21 ± 0.17) ^a	(8.74 ± 0.25) ^a	(- 15.07 ± 0.13) ^a	(- 10.32 ± 0.05) ^a	(7.90 ± 0.17) ^a	(20.30 ± 0.14) ^a	(2.85 ± 0.17) ^a	(- 0.98 ± 0.33) ^a	(- 10.36 ± 0.02) ^a	(38.81 ± 0.63) ^a

3 讨论

3.1 改种苜蓿对农田耗水过程的影响

农田耗水过程主要包括渗漏、地下水补给、蒸发、蒸腾,相较于其他作物,苜蓿农田耗水较大,较玉米农田增加 20.17%,最大耗水量为 190.81 mm。苜蓿免耕留茬可增加土壤有机质含量,促进土壤微团聚体的形成,提高土壤的储水性^[20],本研究表明,苜蓿农田无效水分消耗减少,渗漏量及蒸发量均降低,农田对灌溉水利用效率提高。两年生苜蓿根系可生长达到 1 m 左右,可提高地下水利用^[1,17],研究结果证实苜蓿农田较玉米农田地下水补给量增加 78.40 mm。作物水分利用状况不仅取决于土层中的根系分布深度和根系密度,还取决于根系吸水活性以及土壤含水率等^[4],苜蓿细根是根系中最为活跃的部分,具有生长-凋亡-再生长的周期性变化^[23],进而影响苜蓿细根吸水活性,使得不同深度土壤水及各潜在水源利用比例存在差异,水分利用无明确偏向性;而玉米细根无周期性变化,玉米根系 85% 以上分布在 0~40 cm 的土层中^[19],0~40 cm 土层土壤水贡献率显著高于其他水源贡献率,这与孙宁霞^[10]研究结果有出入,水分利用具有明显的偏向性。本研究表明苜蓿农田不同时间段土壤水与灌溉水及地下水贡献率均存在显著性差异($p < 0.05$)。7 月 11 日取样苜蓿处于第 2 茬分枝期,细根发育生长,细根量增加,迅速而高效地优先利用灌溉水,导致苜蓿农田灌溉水贡献率显著高于其他水源贡献率($p < 0.05$),这与邬佳宾等^[9]研究结果一致。

3.2 改种苜蓿对土壤水分及盐分的影响

土壤中水分变化主要受灌溉、降水、蒸发及温度等外部水热因素影响^[21],盐碱地畦灌主要影响 0~60 cm 土层土壤含水率,对更深土壤含水率影响较小^[22],本研究表明,畦灌条件下苜蓿农田 0~100 cm 各深度土壤体积含水率分为激烈变化阶段和线性下降阶段,可能原因是试验区地下水埋深浅,苜蓿根系分布较深,可频繁吸收利用地下水,对深层 60~100 cm 土壤影响较大,导致苜蓿农田 60~100 cm 土壤含水率变化较活跃。苜蓿多次刈割且免耕留茬,免耕留茬可抑制浅层土壤温度激变^[20],土壤中水分变化受土壤温度影响,使得苜蓿农田 0~30 cm 土壤剖面水分整体均匀分布,这与鲁为华等^[23]漫灌水分主要在 0~15 cm 浅层土壤且均匀分布的研究结果相似。

土壤盐分受水分及温度双重影响,苜蓿农田 10~60 cm 土壤含盐量相对集中且均匀分布。土壤有机质可改善盐渍土壤的物理性质,增加土壤总孔隙度

和毛管孔隙度,增加土壤的入渗率,从而有利于盐渍土盐分的淋洗^[24],5 月苜蓿农田 60~100 cm 土壤电导率增加。6—8 月,由于此期间苜蓿有两次收获刈割致地表覆盖度降低,且试验区地下水位埋深浅,受强烈蒸发作用带动浅层地下水中可溶性盐分离子向上运移,使得苜蓿农田土 0~100 cm 土层平均土壤储盐量变化率较玉米农田大,呈积盐状态。生长后期苜蓿根系较玉米根系相对发达,发达的根系可增加根系分泌的可溶性糖,为微生物提供一定的碳源,微生物分泌有机物、死亡菌体的分解等使土壤有机成分增加,降低盐度^[24-25];另外,苜蓿第 3 茬刈割后免耕留茬可抑制浅层土壤温度激变^[22],农田地面残茬覆盖可有效减少土壤水分蒸发^[26],降低了土壤盐分的积累,使得 9 月苜蓿农田 0~100 cm 土层土壤盐分整体呈脱盐状态。

4 结论

(1) 改种苜蓿后农田总耗水量提高 20.17%、蒸发蒸腾量比平均值降低 66.64%,其中蒸发量减少 6.21%、蒸腾量提高 35.80%、土壤贮水变化量减少 8.08%、渗漏量减少 39.68%、地下水对作物补给量增加 153.45%,表明改种苜蓿后农田无效水分消耗减少,增强了地下水的消耗。生育期内苜蓿农田 0~100 cm 各土层土壤体积含水率较玉米农田变化波动幅度大,分为剧烈波动阶段和线性下降阶段,7 月苜蓿农田 0~60 cm 土壤体积含水率呈“U”形变化,玉米农田 0~60 cm 土壤体积含水率呈“V”形变化。生育期内苜蓿农田 0~30 cm 平均土壤水分较玉米农田高且分布均匀。

(2) 苜蓿农田对土壤水、灌溉水、地下水吸收利用无明确偏向性;玉米农田 0~40 cm 土壤水贡献率显著高于其他水源贡献率($p < 0.05$),水分利用具有偏向性。不同时间取样 0~100 cm 土壤水,苜蓿农田不同时期优先利用浅层 0~40 cm 中某一土层土壤水,而玉米农田主要利用 30~40 cm 土壤水。

(3) 生育期内苜蓿农田、玉米农田 0~100 cm 土壤平均脱盐率分别为 53.90%、12.43%;10~30 cm 与 30~60 cm 土壤电导率差值绝对值分别在 0~0.06 mS/cm、0~0.13 mS/cm 之间,苜蓿农田 10~60 cm 土层土壤电导率较玉米农田相对集中且分布均匀。5 月苜蓿农田除 0~10 cm、30~40 cm 土层,其余土层均呈积盐状态,平均土壤储盐变化率较玉米农田小。6—8 月苜蓿农田、玉米农田 0~100 cm 土壤平均储盐量变化率分别为 10.69%、2.05%,苜蓿农田 0~100 cm 土壤盐分较玉米农田变化幅度大,呈积盐状态。9 月苜蓿农田不同土层土壤盐分

整体呈脱盐状态,土壤最大储盐量变化率为-15.31%,随土层深度增加,土壤储盐量变化率先增

大、后趋于稳定;玉米农田整体呈积盐状态,80~100 cm土层积盐量最大,随深度增加,土壤积盐量减小。

参 考 文 献

[1] 郭彦军,徐恢仲,张家骅,等. 紫花苜蓿根系形态学研究[J]. 西南农业大学学报,2002,24(6):484-486.
GUO Yanjun, XU Huizhong, ZHANG Jiahua, et al. A study on the morphology of the root system of alfalfa[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2002, 24(6): 484-486. (in Chinese)

[2] 舒朝成,刘彤,王倩,等. 不同盐浓度下播种量对紫花苜蓿植物学特性的影响[J]. 草业科学,2017,34(9):1889-1897.
SHU Chaocheng, LIU Tong, WANG Qian, et al. Effects of seeding rate on botanical characteristics of *Medicago sativa* under different salt concentration[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(9): 1889-1897. (in Chinese)

[3] 张和喜,迟道才,刘作新,等. 作物需水耗水规律的研究进展[J]. 现代农业科技,2006(3):52-54.

[4] 程立平,刘文兆. 黄土塬区不同土层土壤水分对旱作冬小麦耗水的贡献[J]. 应用生态学报,2017,28(7):2285-2291.
CHENG Liping, LIU Wenzhao. Contribution of soil water at various depths to water consumption of rained winter wheat in the Loess tableland, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7): 2285-2291. (in Chinese)

[5] 白珊珊,万书勤,康跃虎,等. 华北平原滴灌施肥灌溉对冬小麦生长和耗水的影响[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):269-276.
BAI Shanshan, WAN Shuqin, KANG Yuehu, et al. Effects of drip fertigation on winter wheat growth and water use in North China Plain[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 269-276. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180234&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.034. (in Chinese)

[6] 李丰琇,马英杰. 基于双作物系数法的新疆覆膜滴灌夏玉米蒸散量估算[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):268-274.
LI Fengxiu, MA Yingjie. Evapotranspiration estimation of summer maize with plastic mulched drip irrigation based on dual crop coefficient approach in Xinjiang [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(11): 268-274. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181131&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.031. (in Chinese)

[7] 余绍文,孙自永,周爱国,等. 用D、¹⁸O同位素确定黑河中游戈壁地区植物水分来源[J]. 中国沙漠,2012,32(3):717-723.
YU Shaowen, SUN Ziyong, ZHOU Aigou, et al. Determination of water sources of gobi plants by D and ¹⁸O stable isotopes in middle reaches of the Heihe River [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(3): 717-723. (in Chinese)

[8] 赵西宁,李楠,高晓东,等. 基于¹⁸O示踪的不同树龄枣树土壤水分利用特征分析[J]. 农业工程学报,2018,34(3):135-142.
ZHAO Xining, LI Nan, GAO Xiaodong, et al. Characteristics of soil water utilization for different stand ages of jujube trees based on ¹⁸O tracking[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 135-142. (in Chinese)

[9] 邬佳宾,苗澍,徐冰,等. 滴灌紫花苜蓿根层水分稳定同位素特征分析[J]. 灌溉排水学报,2017,36(7):14-17,27.
WU Jiabin, MIAO Shu, XU Bing, et al. Distribution of stable hydrogen and oxygen isotopes in the root zone of alfalfa under drip irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(7): 14-17,27. (in Chinese)

[10] 孙宁霞. 基于同位素示踪的农田水分转化规律研究:以北京大兴为例[D]. 北京:中国地质大学,2015.
SUN Ningxia. Study on field water transformation using isotopes: a case of Daxing district, Beijing [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese)

[11] 肖继兵,刘志,孔凡信,等. 种植方式和密度对高粱群体结构和产量的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(22):4264-4276.
XIAO Jibing, LIU Zhi, KONG Fanxin, et al. Effects of planting pattern and density on population structure and yield of sorghum [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(22): 4264-4276. (in Chinese)

[12] 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,2005,24(12):24-30.
SUN Hongren, LIU Guorong, ZHANG Yingjun, et al. Water requirement, water consumption, water requirement rate, water consumption rate and water use efficiency of alfalfa [J]. Pratacultural Science, 2005,24(12): 24-30. (in Chinese)

[13] 赵永敢. “上膜下秸”调控河套灌区盐渍土盐运移过程与机理[D]. 北京:中国农业科学院,2014.
ZHAO Yonggan. The process and mechanism of integrated effects of plastic mulch and buried straw layer on soil water and salt movement in the Hetao irrigation district [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)

[14] TIAN F, YANG P, HU H, et al. Partitioning of cotton field evapotranspiration under mulched drip irrigation based on a dual crop coefficient model[J]. Water, 2016, 8(3): 72.

[15] TAIA A, WAEL M, MOHAMED H, et al. Effect of mulching on plant water status, soil salinity and yield of squash under summer-fall deficit irrigation in salt affected soil [J]. Agricultural Water Management, 2016,173(31): 1-12.

[16] 明广辉,田富强,胡宏昌,等. 地下水埋深对膜下滴灌棉田水盐动态影响及土壤盐分累积特征[J]. 农业工程学报,2018,34(5):90-97.
MING Guanghui, TIAN Fuqiang, HU Hongchang, et al. Effect of water table depth on soil water and salt dynamics and soil

- salt accumulation characteristics under mulched drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 90 – 97. (in Chinese)
- [17] 何子健, 史文娟, 杨军强, 等. 膜下滴灌间作盐生植物棉田水盐运移特征及脱盐效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 130 – 138.
- HE Zijian, SHI Wenjuan, YANG Junqiang, et al. Water and salt transport and desalination effect of halophytes intercropped cotton field with drip irrigation under film[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 130 – 138. (in Chinese)
- [18] 刘德平. 基于盐渍化灌区水土环境安全的优化施肥模式研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- LIU Deping. Study on optimal fertilization model based on soil and water environment security in salinized irrigated area [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [19] 倪东宁. 间作畦沟分灌模式下土壤水盐热迁移特征及灌水效果评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- NI Dongning. Characteristics of soil moisture-salt-heat transfer and evaluation of irrigation effect under intercropping and border furrow irrigation pattern [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [20] 孙建, 刘苗, 李立军, 等. 不同耕作方式对内蒙古旱作农田土壤水热状态的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1539 – 1547.
- SUN Jian, LIU Miao, LI Lijun, et al. Effects of different tillage systems on soil hydrothermal regimes in rain-fed field of Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(6): 1539 – 1547. (in Chinese)
- [21] 王素梅. 黄土高原地区不同生长年限苜蓿生产性能及对土壤环境效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- WANG Sumei. Study on the production performance of alfalfa with different growth years and its effect on soil environment in the Loess Plateau region [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)
- [22] 张昌爱, 辛淑荣, 王国良, 等. 不同灌水方式对盐碱地苜蓿生长及土壤水盐动态的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(3): 271 – 276.
- ZHANG Chang'ai, XIN Shurong, WANG Guoliang, et al. Effects of different irrigation methods on alfalfa growth and soil water and salt dynamics in saline-alkali soil [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(3): 271 – 276. (in Chinese)
- [23] 鲁为华, 任爱天, 杨洁晶, 等. 滴灌苜蓿田间土壤水盐及苜蓿细根的空间分布[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 128 – 137.
- LU Weihua, REN Aitian, YANG Jiejing, et al. Soil water and salt movement and spatial distribution of fine alfalfa roots under drip irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 128 – 137. (in Chinese)
- [24] 王婧, 逢焕成, 李玉义, 等. 微生物菌肥对盐渍土壤微生物区系和食葵产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2186 – 2191.
- WANG Jing, PANG Huancheng, LI Yuyi, et al. Effects of microbial fertilizer on soil microflora and sunflower yield in saline soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(11): 2186 – 2191. (in Chinese)
- [25] 卢培娜, 刘景辉, 赵宝平, 等. 菌肥对盐碱地土壤特性及燕麦根系分泌物的影响[J]. 作物杂志, 2017(5): 85 – 92.
- LU Peina, LIU Jinghui, ZHAO Baoping, et al. Effects of microbial fertilizer on soil characteristics and root exudates of oats in saline-alkali land [J]. Crops, 2017(5): 85 – 92. (in Chinese)
- [26] 郭晓霞, 刘景辉, 张星杰, 等. 不同耕作方式对土壤水热变化的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(5): 1059 – 1064.
- GUO Xiaoxia, LIU Jinghui, ZHANG Xingjie, et al. Effect of different tillage methods on soil water content and temperature change [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(5): 1059 – 1064. (in Chinese)