文章编号:1000-7601(2020)01-0166-07

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.22

# 苜蓿草田地下滴灌适宜冬灌量

杜建民,王占军,俞鸿千,季 波

(宁夏农林科学院荒漠化治理研究所,宁夏 银川 750002)

摘 要:为了研究不同冬灌量对苜蓿越冬和返青期土壤水热状况、返青期苜蓿生长及第一茬饲草产量的影响,采用随机区组设计,设置 4 个冬灌量水分梯度(T1 为 600 m³·hm⁻²、T2 为 900 m³·hm⁻²、T3 为 1 200 m³·hm⁻²,以 1 500 m³·hm⁻²为 CK),开展地下滴灌不同冬灌量单因素试验。结果表明:苜蓿草田不同冬灌量对土壤水热状况影响差异明显,各处理冻融期历时为 CK=T3<T2<T1,分别达 6、6、12 d 和 18 d,冻结期历时为 CK<T3<T2<T1,分别达 51、61、63 d 和 67 d,随灌水量的增加冻融期和冻结期历时变短且延迟;消融期随冬灌量增加历时延长且逐步提前,各处理消融期历时为 CK>T3=T2>T1,相差在 1~4 d 之间,以 CK 的 3 月 5 日结束期为最早。在苜蓿越冬期内,各处理 0~100 cm 土层土壤贮水消耗量随冬灌量的增加而增加,T1 耗水量为 53.70 m³·hm⁻²、T2 为 102.95 m³·hm⁻²,T3 为 301.5/hm²,CK 为 469.16 m³·hm⁻²,且以 40~60 cm 土层耗水量最高;60~100 cm 土层土壤贮水变化表现不一致,T1 和 T2 贮水量增加且增幅随冬灌量增加而下降,T3 和 CK 贮水量下降,且随冬灌量增加降幅增大。在苜蓿返青期始末,各处理 0~100 cm 土层土壤贮水均呈消耗状态,以冬灌量 900 m³·hm⁻²的 T2 土壤贮水消耗量为最高值,达212.87 m³·hm⁻²。越冬率、第一茬草产量均与冬灌量呈正相关关系,一级分枝数各处理间差异不显著;以苜蓿越冬率、一级分枝数、第一茬草产量、越冬期和返青期耗水量为指标,采用隶属函数法对各处理进行综合评价,各处理隶属函数平均值大小为:T2>T3>T1>CK,认为宁夏灌区苜蓿草田地下滴灌最优冬灌灌水量为 T2 处理(900 m³·hm⁻²),有利于提高冬灌灌溉水利用效率和改善苜蓿越冬、返青状况。

关键词:苜蓿;地下滴灌;冬灌量;土壤贮水量;土壤耗水量;冻融交替

中图分类号:S275.6 文献标志码:A

# Optimum winter irrigation amount of subsurface drip irrigation in alfalfa grassland

DU Jianmin, WANG Zhanjun, YU Hongqian, JI Bo

(Institute of Descriptionian Control, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002, China)

**Abstract**: In order to study the effects of different winter irrigation amounts on soil water content and temperature of over-winter and spring green-upstage, growth and hay yield of first stubble alfalfa (*medicago sativa*) were analyzed. Different winter irrigation single factor tests were carried out by a randomized block design including four water treatments (600 m³·hm⁻² as T1,900 m³·hm⁻² as T2,1 200 m³·hm⁻² as T3, 1 500 m³·hm⁻² as T4) of winter irrigation amounts were set up. The results showed that the effects of different winter irrigation amounts on soil water content and temperature were obvious and the duration of freezing-thawing ranked as CK=T3<T2<T1, respectively, up to 6 d,6 d,12 d, and 18 d; freezing period was as CK<T3<T2<T1, respectively, up to 51 d,61 d, 63 d, and 67 d. With the increase in winter irrigation amount, the duration of freezing-thawing and freezing period became shorter and delayed, the melting period was prolonged and gradually advanced 1 to 4 days; the duration of each treatment was as CK>T3=T2>T1, and the end of March 5 was the earliest. During the overwinter period, the soil water storage gradually decreased with the increase of winter irrigation amount in 0~100 cm layer, and the soil water consumption of T1, T2, T3 and CK were 53.70,102.95,301.5, and 469.16 m³·hm⁻², respectively. The 40

收稿日期:2019-01-21

修回日期:2019-06-25

 $\sim$ 60 cm layer was the highest, the change of soil water storage was different in 60  $\sim$  100 cm layer, T1 and T2 water storage increased and it was inversely proportional to winter irrigation, T3 and CK water storage decreased with the increase of winter irrigation. During the period of green-up stage, the soil water storage was consumed in 0  $\sim$  100 cm layer, and the highest value 212.87 m³ · hm⁻² storage was with 900 m³ · hm⁻² of T2. Overwinter rate and first stubble hay yield of alfalfa were positively correlated with winter irrigation, butthere was no significant difference in the number of primary branches among treatments. Taking the overwintering rate, the number of primary branches, the yield of the first stubble, the water consumption during the overwintering, and greening stages of medicago sativa as the indexes, the subordinate function method was used to comprehensively evaluate each treatment. It indicated that the average value of subordinate function of each treatment was in the order of T2>T3>T1>CK. It was concluded that the optimal winter irrigation amount was 900 m³ · hm⁻² of T2 for subsurface drip irrigation for alfalfa field in Ningxia area, which was conducive to the water use efficiency of winter irrigation and the overwintering and green-up stage of alfalfa.

**Keywords:** alfalfa; subsurface drip irrigation; winter irrigation amount; soil water storage; soil water consumption; freezing-thawing alternation

冬灌可有效改善越冬作物越冬期和返青期的土壤温度和水分条件<sup>[1-2]</sup>,对多年生牧草生长发育尤其是第一茬草的生长具有促进作用<sup>[3]</sup>,是北方具有灌溉条件苜蓿草田越冬期常规的水分管理措施。在传统漫灌条件下,苜蓿草田冬灌在越冬前深灌一次即可,灌水量多在 1 500 m³·hm⁻²,保证土壤封冻前地表湿润即可<sup>[4]</sup>。地下滴灌作为一种新兴的高效节水技术,具有自动化程度高、降低地表湿度并防止深层渗漏的优点<sup>[5]</sup>,利于作物早熟和越冬并提高产量品质<sup>[6]</sup>,其栽培苜蓿较常规灌溉增产近40%<sup>[7]</sup>,在苜蓿饲草生产中得到了推广应用。

目前,关于苜蓿草田生长季地下滴灌灌溉制度 方面已开展了大量研究,全炳伟等[8]提出了宁夏扬 黄灌区苜蓿地下滴灌灌溉制度,张松等[9]对内蒙古 毛乌素沙地苜蓿地下滴灌布设及灌溉关键技术参 数进行了研究并提出优化灌溉制度,但非生长季苜 蓿草田越冬期土壤水分变化及冬灌适宜灌水量研 究较少。孙洪仁等[10]和许翠平等[11]利用 Penman-Monteith 公式根据多年气象数据分别推求了阿鲁科 尔沁旗及北京地区苜蓿冬灌量;姚江华[12]对不同灌 水和覆盖时间对苜蓿越冬率及田间温、湿度影响进 行研究,但就冬灌引起农田水热变化和适宜冬灌量 方面未做探讨。本研究以宁夏农垦茂盛草业有限 公司地下滴灌苜蓿为试材,进行冬灌灌水量调控试 验,以越冬期土壤水热变化和返青期苜蓿越冬率、 分枝数等生长指标及第一茬草产量的监测为依据, 对地下滴灌灌水方式下苜蓿冬灌适宜灌水量进行 评价,以期为指导大田冬灌提供科学依据。

# 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

试验在宁夏农垦茂盛草业有限公司试验地开展,地处贺兰山东麓,属贺兰山冲积扇平原,地理位置  $38^{\circ}30' \sim 38^{\circ}39' N,105^{\circ}32' \sim 106^{\circ}9' E,海拔1 108 \sim 1 405 m,温带大陆性气候,干旱少雨,日照充足,年均气温 <math>8.5^{\circ}$ C,年均日照时数 3~000~h,多年平均降雨量  $150 \sim 202~mm$ ,无霜期 150~d 左右 $^{[13-14]}$ 。试验地土壤类型为淡灰钙土, $0 \sim 20~em$  土层土壤主要理化性状为:pH8.73,全盐  $1.25~g \cdot kg^{-1}$ ,有机质  $12.81~g \cdot kg^{-1}$ ,全磷  $0.36~g \cdot kg^{-1}$ ,全氮  $0.61~g \cdot kg^{-1}$ ,碱解氮  $22.44~mg \cdot kg^{-1}$ ,速效磷  $49.45~mg \cdot kg^{-1}$ ,速效钾80.18  $mg \cdot kg^{-1}$ ,1 m 土层土壤田间持水量 25.83%(体积含量),1 m 土层土壤容重  $1.47~g \cdot cm^{-3}$ ,试验地地下水埋深 2.8~m,一般年份冻土层深度在 60~cm左右,冻土层最深达到  $88~cm^{[15-16]}$ 。具备灌溉条件。

#### 1.2 试验设计

试验于 2017 年苜蓿冬灌时开展,采取单因素随机区组设计,设4个冬灌灌水量处理,分别为 600 m³·hm⁻²(处理 T1)、900 m³·hm⁻²(处理 T2)、1 200 m³·hm⁻²(处理 T3),以传统漫灌冬灌量 1 500 m³·hm⁻²为对照(CK),3次重复。供试苜蓿为皇冠,3 a生,2015 年机械条播,各处理在种植前完成地下滴灌的田间布设,采用内镶贴片式滴灌管(内径 16 mm,壁厚 0.6 mm,滴头间距 30 cm,额定流量 1.6 L·h⁻¹,额定工作压力 0.1 MPa),滴灌管布设间距 60 cm,埋深 15 cm,小区面积 6 m×10 m=60 m²,各小区四周留 1 m 宽隔离带并埋设 1.6 m 深防渗膜,各小区安装水表单独计量灌水量。于 2017 年 11 月 14

日开始冬灌,为避免单次灌水量过大造成田间积水,各处理灌水 3 次间隔 2 d,各处理单次灌水量为设计量的 1/3,至 11 月 20 日冬灌结束。2018 年苜蓿返青后各处理生产管理同常规。

#### 1.3 调查指标及方法

1.3.1 越冬率 在苜蓿草田 2017 年第 4 茬收获后 新植株生长出 5 cm 左右,在各试验小区内选取并固定 3 个 1 m²样点,调查各样点内成活的苜蓿植株数;于 2018 年 4 月 8 日苜蓿返青期结束(株高≥5 cm)时,在各小区固定样点内调查成活的苜蓿株数。越冬率[17]按下式计算:

越冬率(%)=返青后样方内成活株数/上年度 样方内成活株数×100

1.3.2 土壤含水量测定及贮水量计算 于 2017年 11月20日冬灌结束后 2 d(11月22日)和 2018年 春季土壤解冻(0~100 cm 土层土壤日均温≥0℃) 后的 3月9日、3月19日、3月29日和4月8日用 土钻对各处理 0~100 cm(以 20 cm 为1层)土层取 样,采用烘干法计算土壤水分质量百分含量,并按 下式计算各土层土壤贮水量:

$$W_i = W_{iff} \times p_i \times h_i \times 150 \times 0.667$$

式中, $W_i$ 为第 i 层土壤贮水量( $\mathbf{m}^3 \cdot \mathbf{h} \mathbf{m}^{-2}$ ); $W_{i \text{ f}}$  为第 i 层土壤质量含水量(%); $p_i$  为第 i 层土壤容重,取值见表 1; $h_i$  为第 i 层土层厚度( $\mathbf{m}$ )。试验区地下水埋深  $2.8 \, \mathbf{m} \, \mathbf{U}$  下,按照《灌溉试验规范 SL13 -2015》<sup>[18]</sup>,地下水埋深大于  $2.5 \, \mathbf{m} \, \mathbf{D}$  时地下水补给可忽略不计。

表 1 试验地各土层土壤容重/(g·cm<sup>-3</sup>)

Table 1 Soil bulk density of different layers

项目		土	层深度 S	oil depth/	cm	
Item	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	0~100
容重 Soil bulk density	1.42	1.61	1.50	1.39	1.44	1.47

1.3.3 气温及土壤温度测定 试验地气温采用 Adcon-Ws 自动气象站对距地面 2 m 处气温进行监测,数据收集步长为 30 min,取其日均值进行分析; 土壤温度采用 EM50 数据采集器连接 5TE 传感器进行自动测量,数据收集步长为 30 min,5TE 传感器于2017 年 11 月冬灌前埋设于各处理土壤 10、30、50、70 cm 和 90 cm 土层处,取各土层各时间点地温平均值作为当日 0~100 cm 土层地温平均值进行分析。

1.3.4 测产 于 2018 年第一茬苜蓿初花期的 5 月 26 日,在各处理小区内随机选取 1 m<sup>2</sup>样方进行人工

刈割,重复3次,留茬高度5cm左右,刈割后立即进行鲜样称重,取500g左右鲜样风干测干草产量,计算干鲜比。

#### 1.4 数据分析

采用隶属函数法对试验监测数据进行综合评价,与返青期苜蓿生长呈正相关的越冬率、一级分枝数、返青期耗水量和第一茬草产量用公式(1)计算隶属函数值,与返青期苜蓿生长呈负相关的越冬期耗水量用公式(2)计算。隶属函数值的计算公式为:

$$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$
 (1)

 $R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$  (2) 式中, $R(X_i)$  为第 i 处理某项指标的隶属函数值, $X_i$  为第 i 处理某项指标测定值, $X_{\min}$  和  $X_{\max}$  分别为各处理某项指标的最小值和最大值。

利用 SPSS 17.0 和 Microsoft Excel 2007 进行试验数据的统计分析。

# 2 结果与分析

#### 2.1 不同冬灌量对苜蓿草田越冬期和返青期地温 的影响

由图 1 知,试验地 2 m 处日均气温在 2017 年 11 月 22 日至 2018 年 4 月 8 日观测的 138 d 内,呈先下降后上升的过程,自 11 月 22 日冬灌结束后虽有波动但整体呈逐步下降趋势,至观测的第 68 天(2018 年 1 月 28 日)日均气温达最低值-16.95°C,后逐渐回升,至观测的第 86 天(2018 年 2 月 15 日)日均气温达-0.03°C后 2 m 处日均气温均高于 0°C。

从各处理 0~100 cm 土层平均地温的变化来看 (图1、表2),自11月22日冬灌结束至11月26日, 受不同灌水量影响,各处理平均地温下降程度不 同,且随灌水量增加降幅增大;而自11月27日开 始,随灌水量增加各处理平均地温降幅变小,以 CK 平均地温下降最为缓慢,灌水量最低的 T1 处理平 均地温下降最快,在12月12日T1处理0~100 cm 土层平均地温降至-0.41℃,最先进入冻融期,而 T2、T3及CK进入冻融期时间不同程度有所延迟。 在本试验冬灌灌水量条件下,各处理冻融期历时随 灌水量的增加而缩短,其中 T3 和 CK 均历时 6 d,低 于其它各处理。进入冻结期,各处理平均地温差异 极小,随灌水量的增加 0~100 cm 土层平均地温略 有升高,随冬灌量的增加冻结期历时缩短,在观测 76 d(2月5日)后,受气温升高的影响各处理平均 地温逐渐增加,至2月26日CK冻结期结束,历时 51 d,3 月 2 日 T2 和 T3 处理冻结期结束,分别历时

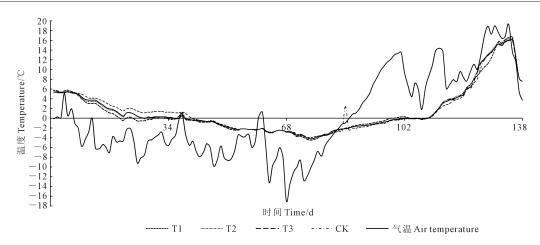


图 1 试验地 2 m 处气温及各处理 0~100 cm 土层地温变化(2017-11-22-2018-04-08)

Fig.1 Change of average soil temperature in  $0\sim100~\text{cm}$  underground and air temperature at 2 m

表 2 苜蓿草田越冬期各处理 0~100 cm 土层冻融状况

Table 2 Freeze-thawing status of  $0\sim100~\mathrm{cm}$  soil layer in medicago sativa field during overwintering

处理	灌水日期 Irrigation date		东融期(m-d ing-thawing	*		东结期(m-d reezing perio	*		肖融期(m-d Melting perio	*
Treatment	(m-d)	始 Start	末 End	历时/d Days	始 Start	末 End	历时/d Days	始 Start	末 End	历时/d Days
T1	11-22	12-12	12-29	18	12-30	03-06	67	03-07	03-09	3
T2	11-22	12-18	12-29	12	12-30	03-02	63	03-03	03-08	6
Т3	11-22	12-26	12-31	6	01 - 01	03-02	61	03-03	03 - 08	6
CK	11-22	12-31	01-05	6	01-06	02-26	51	02-27	03-05	7

63 d 和 61 d,T1 在 3 月 6 日冻结期结束,历时 67 d。受 3 月份气温回升较快影响,地温上升较快,各处理随冬 灌量增加消融期历时增加,但消融末期逐步提前。

进入返青期(3月9日—4月8日),冬灌量最低的T1处理0~100 cm 土层地温平均值波动大于其它各处理,而冬灌量最多的CK处理0~100 cm 土层地温平均值在相同时间点均低于T2和T3处理,T2和T3处理间土壤温度曲线几乎重合。

#### 2.2 不同冬灌量对苜蓿草田越冬期和返青期土壤 贮水量变化的影响

由表 3 知,冬灌结束后,各处理  $0\sim100$  cm 土层内土壤贮水量与灌前相比, T1 增加 580.94 m³·hm⁻², T2 增加 855.97 m³·hm⁻², T3 增加 1 144.23 m³·hm⁻², CK 增加 1 498.68 m³·hm⁻², 分别占其冬灌量的 96.82%、95.11%、95.35%和 99.91%,各处理冬灌水下渗深度随冬灌量增加而逐步增加,但均未下渗到 100 cm 以下土层。

苜蓿草田自冬灌后至翌年春季 3 月 9 日土壤消融结束的越冬期内,各处理受土壤热量状况不同而引发冻融期、冻结期和消融期历时差异,表层土壤水分蒸发及深层土壤水分运移不同,导致各处理随冬灌量的增加 0~100 cm 土层内土壤贮水消耗量逐步增加,其中 T1 在此阶段的耗水量为 53.70 m³·hm⁻²,T2 为 102.95 m³·hm⁻²,T3 为 301.5 m³·hm⁻²,

CK 为 469.16 m³·hm⁻²,分别占其冬灌量 600、900、1 200 m³·hm⁻²和 1 500 m³·hm⁻²的 8.95%、11.44%、25.13%和 31.28%;同时,在苜蓿草田越冬期内,各处理 0~60 cm 土层内土壤贮水均为下降状态,且以 40~60 cm 土层耗水量最高,而在 60~100 cm 土层内土壤贮水变化表现不一,T1 和 T2 贮水量增加,但增幅随冬灌量增加而下降,T3 和 CK 贮水量下降,且随冬灌量增加降幅增大。

在3月9日土壤消融期结束至4月8日的苜蓿 返青期内,T1 在 0~100 cm 土层内土壤贮水量呈先 下降后上升过程,在3月29日达最低值1606.12 m3 · hm<sup>-2</sup>, 而 T2、T3 和 CK 在 0~100 cm 土层内土壤贮 水量呈下降、上升再下降的3段式变化过程,在3月 29 日 0~100 cm 土层内土壤贮水量分别达到苜蓿返 青期内最高值:各处理 0~20 cm 土层内土壤贮水量 变化趋势相同,均呈先下降后上升再下降的过程, 而 20~100 cm 土层土壤贮水量变化不一。整体来 看,各处理在苜蓿返青期始末,0~100 cm 土层内土 壤贮水量均呈消耗状态,其中 T1 耗水量为 212.87 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, T2 为 248.55 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, T3 为 186.78 m<sup>3</sup> · hm<sup>-2</sup>, CK 为 145.60 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 分别占其冬灌量的 35.48%、27.62%、15.57%和9.71%,在返青期结束 时,各处理 0~100 cm 土层内土壤贮水量随冬灌量 增加而增大。

表 3 各处理苜蓿冬灌至返青期 0~100 cm 土层土壤贮水状况

Table 3 Soil water storage in 0~100 cm from winter irrigation to green-up stage of alfalfa	

 处理	日期		土	壤贮水量 Soil water	r storage/(m <sup>3</sup> ·hm	-2)	
Treatment	Date(m-d)	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm	0~100 cm
冬灌前							
Before winter	11-13	262.55	336.06	283.04	231.13	227.06	1339.84
irrigation							
	11-22	468.95	531.61	461.63	231.41	227.18	1920.78
	03-09	419.27	526.87	386.31	268.13	266.51	1867.08
T1	03-19	335.88	486.62	380.15	256.05	262.53	1721.22
	03-29	371.79	473.05	348.95	195.42	216.91	1606.12
	04-08	328.75	415.85	322.22	284.81	302.59	1654.22
	11-22	478.09	583.61	539.07	367.98	227.06	2195.81
	03-09	414.02	553.33	446.92	384.39	294.20	2092.86
T2	03-19	357.19	513.96	429.32	341.64	305.66	1947.77
	03-29	397.63	565.56	416.74	364.55	271.33	2015.81
	04-08	330.74	477.03	382.39	327.09	327.04	1844.30
_	11-22	499.24	592.22	610.51	454.20	327.91	2484.07
	03-09	429.18	551.67	481.74	395.24	324.74	2182.57
Т3	03-19	388.28	518.00	404.68	361.33	269.81	1942.10
	03-29	436.41	541.63	419.10	373.73	260.88	2031.74
	04-08	329.81	484.80	413.01	409.14	359.03	1995.79
	11-22	520.85	668.81	678.64	543.48	426.74	2838.52
	03-09	429.62	572.80	545.07	462.55	359.32	2369.35
CK	03-19	389.07	598.59	465.76	285.59	307.67	2046.67
	03-29	442.51	606.22	500.57	386.06	304.57	2239.93
	04-08	350.92	539.24	496.15	437.79	399.66	2223.75

在苜蓿草田冬灌结束至苜蓿返青的整个时间 段内,各处理 0~100 cm 土层贮水量在相同时间点 均随冬灌量的增加而增加,但土壤水分消耗量也随 冬灌量的增加而增加,其中 T1 耗水量为 266.56 m³·hm⁻²,T2 为 351.51 m³·hm⁻²,T3 为 488.28 m³·hm⁻²,CK 为 614.77 m³·hm⁻²,分别占其冬灌量的44.43%、39.06%、40.69%和 40.98%。

#### 2.3 不同冬灌量处理对苜蓿返青及第一茬干草产 量的影响

由表 4 知,各处理苜蓿越冬率为 CK>T3>T2>T1,以 CK 的 93.3%±3.1%为最高值,与其它各处理差异达显著水平,以 T1 处理的 87.3%±3.0%为最低值,T1 与 T2 处理间差异不显著。各处理随冬灌量的增加苜蓿越冬率逐步增加且呈线性相关,其回归方程为 y=2.04x+84.95,决定系数 R²=0.984,如图 2 所示。

各处理一级分枝数随冬灌量的增加呈先增加后下降的趋势,见表 4,以 T2 处理的 7.62±0.28 个·株一分枝数最高,CK 处理的 7.28±0.76 个·株一为最低值,但各处理间分枝数差异达不到显著水平。不同冬灌量对苜蓿第一茬干草产量影响较大,试验各处理第一茬干草产量大小为:CK>T3>T2>T1,以CK的 9061.65±187.5 kg·hm<sup>-2</sup>为最高值,与 T3 处理的产量 8 741.25±146.7 kg·hm<sup>-2</sup>向差异不显著,但与 T2 和 T1 处理间产量差异达显著水平,以 T1处理的 7 303.35±153.15 kg·hm<sup>-2</sup>为最低值,且与其

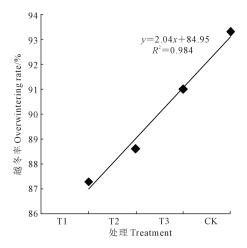


图 2 越冬率与冬灌量的相关性分析

Fig.2 Relativity between overwintering rate and winter irrigation amount

表 4 不同冬灌量对苜蓿返青及第一茬草产量的影响

Table 4 Effects of different winter irrigation amounts on hay yield of first stubble

处理 Treatment	越冬率/% Overwintering rate	一级分枝数/(个・株 <sup></sup> Primary branch number per plant	第一茬干草产量 Hay yield of first stubble /(kg·hm <sup>-2</sup> )
T1	87.3±2.4c	7.51±0.59a	7303.35±153.15c
T2	88.6±2.9c	$7.62 \pm 0.28a$	$8498.40 \pm 156.75$ b
Т3	$91.0 \pm 2.7 \mathrm{b}$	$7.45 \pm 0.36a$	$8741.25 \pm 146.70$ ab
CK	93.3±3.1a	$7.28 \pm 0.76a$	9061.65±187.50a

注:不同字母表示各处理在 0.05 水平下差异显著。

Note: Different letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level.

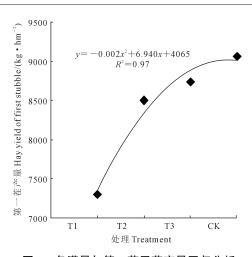


图 3 冬灌量与第一茬干草产量回归分析

Fig.3 Regression analysis relativity between hay yields of first stubble and winter irrigation amount

它各处理间差异达显著水平。对冬灌量与第一茬干草产量进行回归分析,其回归方程为 $y=-0.002x^2+6.94x+4065$ ,决定系数 $R^2=0.97$ ,见图 3,表明在试验取值范围内,随冬灌量的增加第一茬干草产量逐步增加,按照方程预测,在冬灌量为 1 735  $\mathrm{m}^3\cdot\mathrm{hm}^{-2}$ 时,第一茬干草理论产量达最高值 10 085.45 kg  $\cdot\mathrm{hm}^{-2}$ 。

#### 2.4 不同冬灌灌水量对苜蓿返青及第一茬草产量 影响的综合评价

如表 5 所示,各处理隶属函数平均值排列顺序为:T2>T3>T1>CK,以 T2 的 0.756 为最高值,说明冬灌灌水量 900 m³·hm⁻²为最优处理,有利于苜蓿草田越冬和返青生长,提高冬灌灌溉水利用效率。

#### 表 5 不同冬灌量处理苜蓿越冬、返青及第一茬草生长状况隶属函数值

Table 5 Subordinate function values of over wintering, turn green stage and growth of the first stubble alfalfa in different treatments in different treatments

处理 Treatment	越冬率 Overwintering rate	一级分枝数 Primary branch number	越冬期耗水量 Overwintering consumption	返青期耗水量 Green stage consumption	第一茬草产量 Hay yield of first stubble	均值 Mean	排序 Order
T1	0.000	0.622	1.000	0.794	0.000	0.483	3
T2	0.217	1.000	0.882	1.000	0.680	0.756	1
Т3	0.617	0.459	0.402	0.639	0.818	0.587	2
Ck	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.400	4

## 3 讨论

冬灌是北方季节性冻融地区提高苜蓿越冬率 和缓解春旱、促进幼苗生长发育的主要农业措施之 一。在冬灌后冻融期土壤水热的运移变化是非常 复杂的[19]。本研究表明,在冬灌结束土壤水热状况 经过短暂平衡后,受气温大幅下降的影响,各处理 土壤温度逐渐下降,由于水分热容量大于土壤[20], 导致灌水量多的处理地温下降缓慢,冻结期出现的 时间随灌水量的增加而出现迟滞,这与刘姗姗[21]的 研究结论相同;在进入冻结期后,冰的出现使土壤 导热能力提升[22],各处理 0~100 cm 土层平均温度 随灌水量的增加而升高,致使随灌水量的增加冻结 期缩短,灌水量最高的处理冻结期历时51d,比灌水 量最低的处理冻结期缩短 16 d,这与曹鹭<sup>[23]</sup>研究认 为土壤温度随灌水量的增加在冻结阶段升高且冻 结期缩短的结论相一致:而在消融期随灌水量增加 土壤温度增加趋缓,这与刘秀位等[24]的研究结论相 一致,但消融期结束时间随灌水量增加而提前。

在土壤水分变化方面,本研究认为苜蓿越冬期 土壤水分消耗量随冬灌量的增加而增加,在冬灌后 至冻融末期,0~100 cm 土层土壤平均温度 $\geq$ 0 $^{\circ}$ ,土 壤水分在温度梯度和重力作用下不断蒸发和向下扩散,随冬灌量增加各处理土壤温度下降趋缓而使得冻结期出现推迟,导致 0~100 cm 土层土壤贮水消耗量同冬灌量呈正比;进入冻结期后,气温低蒸发弱,土壤水分的耗损很小,这与刘帅等<sup>[25]</sup>的研究结论相一致;进入消融期,土壤温度的升高和消融期持续时间长短均与灌水量呈正相关,土壤自上而下逐渐解冻,土壤水由固相变为液相,下渗水分受未解冻土层截留而滞留在冻结带锋面上方<sup>[26]</sup>,致使土壤墒情增加<sup>[27]</sup>,土壤水分通过蒸发逐渐消耗,且消耗量随冬灌量增加而增加。在整个越冬期内,各处理在 0~60cm 土层内土壤贮水均为消耗状态,且以 0~20 cm 土层耗水量最高<sup>[28]</sup>。在苜蓿返青期土壤水分变化方面的研究少见报道。

在苜蓿冬灌适宜灌水量方面,本研究通过隶属函数法对不同灌水量下苜蓿越冬及返青生长状况进行综合评价,确定了900 m³·hm⁻²为试验区苜蓿草田的最优冬灌量,这与孙洪仁等[10]和许翠平等[11]利用Penman-Montieth公式推求的阿鲁科尔沁旗及北京地区苜蓿冬灌量分别为990 m³·hm⁻²和850 m³·hm⁻²的结论略有差异,可能是由试验区域土壤持水状况或气象环境条件不同造成的。

## 4 结 论

- 1)在地下滴灌灌溉条件下,苜蓿草田不同冬灌灌水量对 0~100 cm 土层土壤水热状况影响差异明显,冬灌后,各处理随灌水量的增加土壤温度下降趋缓,冻融期出现推迟且历时变短;在冻结期,0~100 cm 土层平均温度随灌水量的增加而略有降低,导致随灌水量的增加冻结期缩短;消融期历时较短,各处理相差在 1~4 d 之间,且随冬灌量增加消融期逐步提前。
- 2)在苜蓿越冬期内,随冬灌量的增加各处理 0~100 cm 土层内土壤贮水消耗量逐步增加,T1 为53.70 m³·hm⁻²,T2 为 102.95 m³·hm⁻²,T3 为 301.50 m³·hm⁻²,CK 为 469.16 m³·hm⁻²,分别占其冬灌量的 8.95%、11.44%、25.13%和 31.28%,各处理在 0~60 cm 土层内土壤贮水均呈消耗状态,且以 40~60 cm 土层柱水量最高;在苜蓿返青期内,各处理0~100 cm 土层内土壤贮水消耗量 T1 为 212.87 m³·hm⁻²,T2 为 248.55 m³·hm⁻²,T3 为 186.78 m³·hm⁻²,CK 为 145.60 m³·hm⁻²,分别占其冬灌量的 35.48%、27.62%、15.57%和 9.71%。
- 3)在本试验条件下,越冬率和第一茬草产量与 冬灌量呈正相关关系,一级分枝数则随冬灌量的增加呈先增加后下降的趋势,以 T2 的 7.62±0.28 个·株一分枝数为最高值,但各处理间差异未达到显著水平。采用隶属函数法对不同冬灌灌水量下苜蓿草田越冬率、一级分枝数、第一茬草产量、越冬期和返青期耗水量进行综合评价,结果表明在宁夏灌区苜蓿草田地下滴灌冬灌灌水量为 900 m³·hm⁻²时,最有利于提高冬灌灌溉水利用效率和改善苜蓿草田越冬、返青状况。

#### 参考文献:

- [1] 张殿发,郑琦宏.冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究[J].地理科学进展,2005,24(4):46-55.
- [2] 李子忠,王皓.冬灌对农牧交错带人工草地越冬期土壤水热状况的 影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):7-13.
- [3] 游永亮,李源,武瑞鑫,等.灌溉时期和灌水量对海河平原区紫花苜蓿生产性能的影响[J].草地学报,2019,27(1):227-234.
- [4] 孙洪仁,刘琳,邵光武,等.适宜中国草都紫花苜蓿安全越冬的理论和技术[J].中国奶牛,2015,23(1):1-3.
- [5] 廉喜旺.阿勒泰地区地下滴灌条件下苜蓿滴灌带布设方式及高效

- 用水研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.
- [6] 陶雪, 苏德荣, 寇丹, 等.西北旱区灌溉方式对苜蓿生长及水分利用 效率的影响[J].草地学报, 2016, 24(1); 114-120.
- [7] 王东,李富先,曹新成,等.地下滴灌苜蓿栽培的试验效果分析[J]. 新疆农垦经济,2004(5):65-66.
- [8] 全炳伟,张娜,鲍子云.地下滴灌条件下不同水肥处理对苜蓿生长和产量的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(3);35-40.
- [9] 张松·紫花苜蓿地下滴灌关键技术参数及灌溉制度优化研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [10] 孙洪仁,杨晓洁,吴雅娜,等.阿鲁科尔沁旗紫花苜蓿需水规律与灌溉定额[J].草业科学,2017,34(6):1272-1277.
- [11] 许翠平,刘洪禄,赵立新.应用 Penman-Monteith 方程推算北京地区苜蓿的灌溉定额[J].农业工程学报,2005,21(8);30-34.
- [12] 姚江华,刘惠青,杨涛,等.覆盖、灌水对准格尔苜蓿越冬率及田间 土壤温湿度的影响[J].内蒙古草业,2012,24(2):24-27.
- [13] 刘华,李东宁,杨东海,等.地下滴灌不同灌溉量对当年种植紫花苜蓿生长及产量的影响研究[J].宁夏农林科技,2017,58(1):13-14,31.
- [14] 胡伟,张亚红,李鹏,等.水氮供应对地下滴灌紫花苜蓿生长特征及草地小气候的影响[J].草业学报,2018,27(12):122-132.
- [15] 冯彦彪,张光弟,李玉鼎,等.宁夏贺兰山东麓葡萄材料覆盖越冬经济效益浅析[J].宁夏农林科技,2016,57(10):30-36.
- [16] 杜宏娟,张磊,赵立斌,等.贺兰山东麓酿酒葡萄适宜越冬埋土深度调查研究[J].现代农业科技,2010,(20):119-123.
- [17] 张仲娟,高润,李峰,等.土默川平原 13 个紫花苜蓿品种生产性能研究[J].中国草地学报,2018,40(6):64-71.
- [18] 李远华,崔远来,高峰,等.SL13-2015. 灌溉试验规范[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [19] 李晓宁.川西北高寒区冻融交替作用下土壤水—热运移研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2018.
- [20] 付强,侯仁杰,李天宵,等.冻融土壤水热迁移与作用机理研究[J]. 农业机械学报,2016,47(12):99-110.
- [21] 刘姗姗,郑秀清,刘萍,等.季节性冻融期灌溉水量对土壤温度时空变化的影响[J].节水灌溉,2016(5):12-16.
- [22] 韩炳宏,周秉荣,吴让,等.青海南部高寒草地土壤冻融交替期水热 特征分析[J].气象科技,2018,46(2):361-368.
- [23] 曹鹭.蓄水坑灌条件下果园冬季土壤水热动态研究[D].太原:太原理工大学.2018.
- [24] 刘秀位,苗文芳,王艳哲,等.冬前不同管理措施对土壤温度和冬小麦早期生长的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(9):1135-1141.
- [25] 刘帅,于贵瑞,浅沼顺,等蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤 含水量分布[J].土壤学报,2009,46(1):46-51.
- [26] 李晶,何志斌,杜军,等.冬灌对冻融期干旱区荒漠绿洲农田土壤水热状况的影响[J].农业工程学报,2018,34(11);105-112.
- [27] 王新路,冯丽宵,赵光辉,等.冀西北高原土壤冻融特征研究[J].土 壤通报,2011,42(3);528-533.
- [28] 赵显波,刘铁军,许士国,等.季节冻土区黑土耕层土壤冻融过程及水分变化[J].冰川冻土,2015,37(1):233-240.