

灌溉和施磷对紫花苜蓿土壤水分动态及根重的影响

霍海丽¹, 王琦¹, 张恩和², 师尚礼¹, 王田涛², 刘青林²

(1. 甘肃农业大学 草业学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学 农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 采用完全随机裂区设计, 常规灌溉量(330 mm), 节水 20% 灌溉量(264 mm)和节水 40% 灌溉量(198 mm)作为主处理, 施磷量(0, 60, 120 和 180 kg/hm²)作为副处理, 研究了不同灌溉量和施磷量对紫花苜蓿土壤贮水量、耗水强度、水分利用效率和根重的影响。结果表明, 土壤贮水量、紫花苜蓿耗水强度和根重随灌溉量增加而增加, 水分利用效率随灌溉量增加而降低。施磷对紫花苜蓿土壤贮水量和耗水强度影响不明显。紫花苜蓿水分利用效率和深度 0—40 cm 根重随施磷量的增加表现为先增加后降低, 当施磷量达到 120 kg/hm² 时, 紫花苜蓿水分利用效率 ζ 26.50 kg/(mm·hm²) 和全生育期平均根重(1 320.78 g/m²)达到最大值。

关键词: 灌溉; 施磷; 紫花苜蓿; 土壤水分; 根重

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)04-0159-07

中图分类号: S27, S54

Effect of Irrigation and Phosphorus Supply on Dynamic Changes of Soil Moisture Under Alfalfa Plant and Root Weight of Alfalfa

HUO Hai-li¹, WANG Qi¹, ZHANG En-he², SHI Shang-li¹, WANG Tian-tao², LIU Qing-lin²

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: According to the complete random split spot design, the effects of different irrigation water amount and phosphorous supply on the water storage, water consumption rate, water utilization efficiency(WUE) of soil under alfalfa, and root weight of alfalfa were analysed taking irrigation water(330 mm of normal irrigation, 164 mm of 20% saved irrigation and 198 mm of 40% saved irrigation) as the main factors and phosphorus supply(0, 60, 120 and 180 kg/hm²) as the cofactor. It was indicated that the soil water storage, the water consuming capacity and root weight of alfalfa increased with the irrigation water increasing while the water utilization efficiency decreased with it. Phosphorus supply did not significantly affect soil water storage and water consumption rate. The WUE and dry root weights of alfalfa at 0—40 cm depth increased with P supplies' increasing at first, and decreased later while the WUE and the whole life dry root weight reached its maximum value at 26.50 kg/(mm·hm²) and 1 320.78 g/m² when the phosphorous application rate was 120 kg/hm².

Keywords: irrigation; phosphorus application; alfalfa; soil moisture; root weight

甘肃省河西走廊石羊河流域是人口较密集、水资源开发利用程度较高、用水矛盾较突出、生态环境问题较严重的流域之一。由于地下水位下降和矿化度上升使区域土地沙漠化和盐渍化较严重^[1-2]。该地区农业主要采取大水漫灌, 造成水资源短缺, 水分利用效率低, 不仅影响农作物生产潜力的发挥, 而且加剧灌溉用水的日趋紧张程度, 同时, 大量灌溉引起土壤和地下水污染^[3]。近年来, 随着我国西部生态环境建

设、农业产业结构调整 and 奶业发展, 紫花苜蓿在甘肃省河西走廊的种植面积逐年增加^[4]。通常认为紫花苜蓿是养地和农田倒茬牧草, 不进行精细灌溉和施肥, 但粗放管理限制了紫花苜蓿的正常生长发育和产量形成^[5]。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是我国栽培历史悠久和分布面积较广的多年生深根优质牧草, 具有适应性, 产量高, 蛋白质丰富, 适口性好等特点, 是我国半干旱区农业结构转型和生态环境建设中大力

收稿日期: 2012-10-09

修回日期: 2012-11-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“沟垄集雨种植与可持续发展机理及优化设计”(41161090)

作者简介: 霍海丽(1987—), 女(汉族), 河南省叶县人, 硕士研究生, 主要从事干旱区农作物节水研究。E-mail: hhl8599118@163.com。

通信作者: 王琦(1970—), 男(汉族), 甘肃省陇西人, 副教授, 主要从事作物、草坪草和牧草节水技术研究。E-mail: wangqigsau@gmail.com。

推广的优良牧草^[6]。一些研究表明^[7],在有限供水条件下,种植紫花苜蓿的土壤贮水量和耗水量随灌溉量增加呈线性增加,水分利用效率(WUE)则随灌溉量的增加而降低^[8]。适当施肥可以有效保持土壤水分,提高土壤贮水量,降低紫花苜蓿对水分的吸收和消耗^[9]。根系是紫花苜蓿吸收养分和水分的主要器官,紫花苜蓿根系生长状况直接制约着其地上部分的生长^[10],同时,其根系的生长状况与灌溉、施肥和其他耕作措施等有关^[11]。磷肥施入土壤后大部分以无效态存在,磷肥转化和吸收率较低,紫花苜蓿是一种根系较深和需磷量较大的豆科牧草,土壤含磷状况影响紫花苜蓿根系生长发育和根系形态^[12-14]。近些年,国内外学者关于灌溉和施肥对紫花苜蓿影响的研究多集中于地上部分^[15],而关于对地下根系影响研究较少,尤其是施磷对紫花苜蓿根系的影响。因此,本试验以紫花苜蓿甘农 1 号为研究对象,结合土壤水分运移规律,探讨灌溉和施磷对紫花苜蓿根系分布状况的影响,以期对紫花苜蓿灌溉和施肥管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于甘肃省河西绿洲石羊河流域武威市凉州区,甘肃农业大学试验站(101°49'E,36°29'N),该区常年平均地下水位 65 m 以下,主要依赖石羊河水和地下水灌溉,地下水对紫花苜蓿根系层的补给可忽略不计^[16]。该区域深居大陆腹地,属大陆性温带干旱气候,太阳辐射强和日照充足,昼夜温差较大、降水较少和蒸发较强烈,空气干燥(干旱指数 15~25),春季风沙大,夏季偶发干热风。地势平坦,平均海拔高度 1 776 m,季节和年际降水变化均较大,年平均降水量 160 mm,主要集中在 7—9 月份,春冬季较干旱,年蒸发量约 2 021 mm,年平均气温 7.7 °C,1 月份最低气温 -27 °C,7 月份最高气温 34 °C,≥10 °C 年积温 2 985.4 °C。全年无霜期约 155 d,太阳总辐射量 140~158 kJ/cm²,年日照时数平均 3 050 h。土壤以绿洲灌淤土为主,粉砂壤质,土层深厚。有机质含量 80.05 g/kg,全氮 0.40 g/kg,全磷 0.29 g/kg,全钾 6.22 g/kg,速效磷 21.00 mg/kg,速效钾 119.32 mg/kg。

1.2 试验设计

供试材料为甘肃农业大学草业学院提供紫花苜蓿甘农 1 号。试验采用完全随机裂区设计,灌溉为主处理,施磷为副处理。灌溉量的 3 个水平为当地紫花苜蓿节水 40% 灌溉量 198 mm,节水 20% 灌溉量 264

mm 和常规灌溉量 330 mm,代表符号分别为 $I_{0.6}$, $I_{0.8}$ 和 $I_{1.0}$,4 个施磷水平分别为 0, 60, 120 和 180 P kg/hm²,代表符号分别为 P_0 , P_{60} , P_{120} 和 P_{180} 。灌溉水平中常规灌溉作为对照,施磷水平中不施磷作为对照,共有 12 个处理组合(4 个施磷水平×3 个灌溉水平),重复 3 次,36 个小区,小区规格为 9 m×4 m。为了减小磷素和水分侧向移动的影响,主区间设置宽 1.25 m 走道,副区之间设置宽 1 m 走道。灌溉量用水表进行计量,灌溉时间和灌溉量详见表 1。

表 1 紫花苜蓿生育期灌水量及灌水时间 mm

日期	生育时期	节水 40% 灌溉	节水 20% 灌溉	常规灌溉
20090328	返青期	48	64	80
20090427	分枝期	48	64	80
20090614	第 1 茬刈割后	51	68	85
20090728	第 2 茬刈割后	51	68	85
	灌溉量	198	264	330

1.3 种植管理

紫花苜蓿播种时间为 2009 年 3 月 24 日,播种量为 18 kg/hm²,行间距 15 cm,采用条播方式按行播种,称取每行播种量,播种深度为 1~2 cm。播种前根据当地农民施基肥经验,各处理 P 肥和 K 肥施加量相同,纯 P(过磷酸钙,含 P₂O₅ 为 16%) 和纯 K(硫酸钾,含 K₂O 为 50%) 用量分别为 41 和 39 kg/hm²。2011 年进行灌溉和施磷试验,供试肥料为粒状过磷酸钙,其 P₂O₅, S 和 Ca 的含量分别为 12%, 10% 和 10%。在紫花苜蓿分枝期(2011 年 4 月 26 日)和第 1 茬刈割后(2011 年 6 月 13 日)进行施磷,分枝期和第 1 茬刈割后施磷量各占总施磷量 50%。开沟施入磷肥,开沟深度为 10 cm,施磷后进行灌溉。在紫花苜蓿返青期(2011 年 3 月 28 日)、分枝期(2011 年 4 月 27 日)、第 1 茬刈割后(2011 年 6 月 14 日)和第 2 茬刈割后(2011 年 7 月 28 日)进行灌溉(表 1)。建植 3 年紫花苜蓿刈割 3 次,3 次刈割时间分别为 2011 年的 6 月 11 日、7 月 26 日和 10 月 5 日。分别于 2011 年 5 月 8 日、6 月 1 日、6 月 20 日和 7 月 15 日手工除草。2011 年紫花苜蓿生育期降雨量为 214.7 mm。

1.4 样品采集及测定

土壤含水量采用烘干法测定,测定深度 0—140 cm,按 20 cm 分层,测定日期为返青期(2011 年 3 月 27 日);收获后 1 d(2011 年 6 月 12 日,7 月 27 日,10 月 6 日);灌溉前和灌溉后 24 h。土壤贮水量计算公式为:

$$\text{土壤贮水量(mm)} = \text{土层厚度(cm)} \times \text{土壤容重} \\ (\text{g/cm}^3) \times \text{土壤质量含水量}(\%) \times 10$$

按照田间水分平衡方程 $WU = I + W + P$ 计算紫花苜蓿全生育期的耗水量(式中: WU ——紫花苜蓿生育期耗水量; I ——生育期内灌溉量; W ——土壤供水,即前一茬收获后与后一茬收获后 2 时段 0—140 cm 土壤贮水量的差值; P ——生育期降水量)。在计算紫花苜蓿全生育期的耗水量时没有考虑地表径流和深层渗漏等因素。试验区地势平坦,很少产生径流,同时小区地埂高度为 30 cm,可以阻止不同小区发生径流互换。通过土壤容重测定结果显示,土层 80—120 cm 土壤容重(1.69 g/cm^3)较大,结构致密,土壤颗粒之间的空隙较小,水分运动阻力较大,形成一个隔水层,灌溉水深层渗漏忽略不计。

$$\text{耗水强度(mm/d)} = \text{耗水量(mm)} / \text{天数(d)}$$

$$\text{水分利用效率 } (\text{WUE, kg/(hm}^2 \cdot \text{mm)}) = \\ \text{干草产量(kg/hm}^2) / \text{耗水量(mm)}$$

2011 年紫花苜蓿刈割 3 次,在每茬苜蓿刈割后 1 d(6 月 13 日,7 月 28 日和 10 月 7 日)取根,测定根系分布状况。选取紫花苜蓿生长均匀 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 的样方,先刈割植株地上部分,然后用平铲将该样方周围挖开,挖取深度 40 cm,然后用平滑削土刀削平样方四周,样方规格为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 的立方体,按 10 cm 分层挖取根系,分层土壤和根系装网袋(网袋网孔径约 0.5 mm),将网袋放在水流中进行冲洗,将大部分泥土冲洗走,然后将剩余泥土和根系放在装有清水的培养皿(培养皿口径大约 20 mm)中,用手和镊子将培养皿中的杂质挑出,然后再用清水冲洗根系,根系洗净后放在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中杀青 1 h,然后置于 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温下烘 48 h,冷却后取出称重。

1.5 数据分析

利用完全随机模型分析灌溉和施磷对紫花苜蓿土壤贮水量、耗水强度、水分利用效率和根重的影响,将 3 次重复收集的参数采用 SPSS 15.0 与 Excel 软件进行方差分析和显著性检验;方差分析多重比较采用 Duncan 法($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 灌溉和施磷对土壤贮水量的影响

在同一灌溉水平下,将 4 个施磷处理(每个施磷处理有 3 重复,4 个施磷共 12 个重复)土壤贮水量统计求均值,得到灌溉量 198,264 和 330 mm 的平均土壤贮水量分布(图 1a)。从图 1a 可以看出,返青前(3 月 27 日),3 个灌溉处理的土壤贮水量差异不明显。在紫花苜蓿返青期(3 月 29 日)—分枝期(4 月 27

日),各灌溉处理土壤贮水量逐渐下降,该阶段紫花苜蓿进入生长期和该时期降雨量较少使各灌溉处理土壤含水量降低,并且各灌溉之间差异明显。在紫花苜蓿分枝期(4 月 27 日)—孕蕾期(5 月 19 日),3 个灌溉处理的土壤贮水量差异减小,此阶段紫花苜蓿进行营养生长,盖度高达 90% 以上,土壤无效蒸发较低,降雨量(该期降雨量 25.8 mm)较大,使 3 个灌溉处理的土壤贮水量差异不明显。在紫花苜蓿孕蕾期(5 月 19 日)—初花期(6 月 13 日),各灌溉处理土壤贮水量急剧下降,该阶段紫花苜蓿生理上处于需水高峰期,高温大量蒸腾使各灌溉处理土壤水分呈现出低谷。第 2 茬和第 3 茬的土壤贮水量变化规律与第 1 茬类似。在土壤贮水量出现差异的时期,如 3 月 29 日,4 月 28 日,6 月 15 日和 7 月 30 日,常规灌溉的土壤贮水量高于节水 20% 灌溉,20% 灌溉的土壤贮水量高于节水 40% 灌溉,土壤贮水量的上升主要由于灌溉引起的,灌溉后大量蒸散使土壤贮水量下降。为了比较施磷对土壤贮水量的影响,在同一施磷水平下,将 3 个灌溉处理(每个灌溉处理有 3 重复,3 个灌溉共 9 个重复)的土壤贮水量求均值,得到施磷 0, 60, 120 和 180 kg/hm^2 的平均土壤贮水量分布(图 1b),从图 1b 可以看出,在紫花苜蓿整个生育期,施磷之间土壤贮水量差异不明显,说明施磷对土壤贮水量影响不显著。经过方差分析,紫花苜蓿整个生育期,3 个灌溉处理间或 4 个施磷处理间土壤贮水量差异不显著(文中没有列出),说明灌溉与施磷对建植 3 a 紫花苜蓿土壤水分保持无显著性影响。

2.2 灌溉和施磷对紫花苜蓿耗水强度的影响

由表 2—3 可以看出,在节水 40% 灌溉(198 mm),节水 20% 灌溉(264 mm)和常规灌溉(330 mm)水平下,第 1 茬、第 2 茬、第 3 茬和全生育期,不同施磷处理的紫花苜蓿耗水强度之间差异不显著。在同一灌溉水平下,将 4 个施磷处理(每个施磷处理有 3 重复,共 12 个重复)每茬耗水强度统计求均值得到灌溉量 198,264 和 330 mm 的平均耗水强度(平均值),可以看出,随着灌溉量的增加,紫花苜蓿耗水强度随之增加。灌溉促进植物生长,增加蒸腾耗水和蒸散损耗。

第 1 茬和第 2 茬,常规灌溉的耗水强度显著高于节水 20% 灌溉,节水 20% 灌溉的耗水强度显著高于节水 40% 灌溉。由于紫花苜蓿第 3 茬降雨量(131.6 mm)较大和气温较低使 3 个灌溉处理的紫花苜蓿耗水强度差异不显著。在同一施磷水平下,将 3 个灌溉处理(每个灌溉处理有 3 重复,共 9 个重复)耗水强度统计求均值得到施磷 0, 60, 120 和 180 kg/hm^2 的

平均耗水强度(平均值),可以看出,施磷 60,120 和 180 kg/hm² 的耗水强度高于不施磷处理,但处理之

间的差异未达到显著性水平,即施磷对紫花苜蓿耗水强度影响不显著。

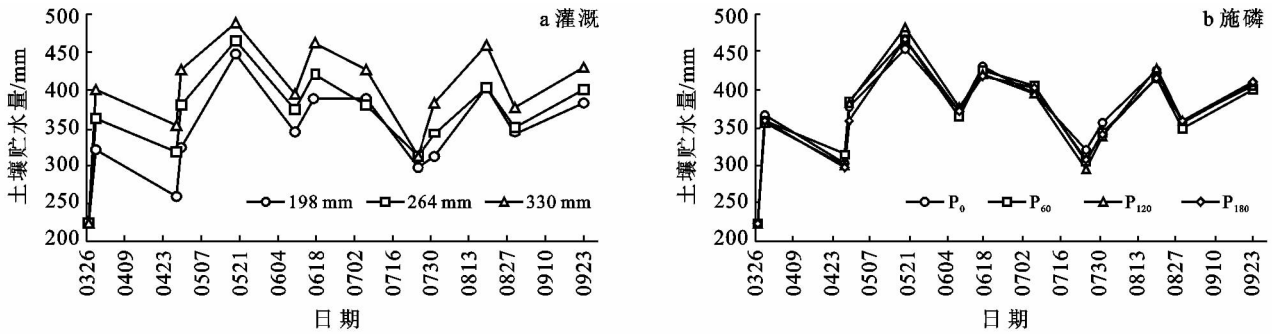


图 1 不同灌溉和施磷量对紫花苜蓿土壤贮水量动态的影响

表 2 灌溉和施磷对紫花苜蓿耗水强度的影响

mm/d

灌溉量/ mm	施磷量/ (kg · hm ⁻²)	第 1 茬 (0329—0609)	第 2 茬 (0609—0725)	第 3 茬 (0725—0903)	全生育期 (0329—0903)
198	0	1.21 ^a	2.82 ^a	1.65 ^a	1.89 ^a
	60	1.44 ^a	2.96 ^a	1.93 ^a	2.01 ^a
	120	1.63 ^a	3.63 ^a	2.00 ^a	2.07 ^a
	180	1.43 ^a	3.61 ^a	1.53 ^a	1.96 ^a
264	0	1.89 ^a	3.70 ^a	1.40 ^a	2.43 ^a
	60	2.23 ^a	3.90 ^a	1.41 ^a	2.59 ^a
	120	2.17 ^a	4.26 ^a	1.75 ^a	2.53 ^a
	180	1.97 ^a	3.92 ^a	1.99 ^a	2.47 ^a
330	0	2.66 ^a	4.46 ^a	1.51 ^a	2.91 ^a
	60	2.89 ^a	4.84 ^a	1.98 ^a	2.92 ^a
	120	2.89 ^a	5.18 ^a	2.17 ^a	2.98 ^a
	180	2.72 ^a	4.41 ^a	1.85 ^a	2.94 ^a

注:根据 Duncan 多重比较,同一列中相同灌溉水平下施磷处理和平均(灌溉或施磷)后的不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

表 3 单一处理对紫花苜蓿耗水强度的影响

mm/d

灌溉量/ mm	施磷量/ (kg · hm ⁻²)	第 1 茬 (0329—0609)	第 2 茬 (0609—0725)	第 3 茬 (0725—0903)	全生育期 (0329—0903)
灌溉量/ mm	198	1.42 ^c	3.26 ^c	1.63 ^a	1.98 ^c
	264	2.06 ^b	3.95 ^b	1.69 ^a	2.51 ^b
	330	2.79 ^a	4.72 ^a	1.89 ^a	2.94 ^a
施磷量/ (kg · hm ⁻²)	0	1.92 ^a	3.66 ^a	1.38 ^a	2.41 ^a
	60	2.18 ^a	3.90 ^a	1.77 ^a	2.51 ^a
	120	2.23 ^a	4.36 ^a	1.98 ^a	2.53 ^a
	180	2.04 ^a	3.98 ^a	1.79 ^a	2.46 ^a

2.3 灌溉和施磷对紫花苜蓿 WUE 的影响

在各施磷水平下,将紫花苜蓿全生育期 WUE 与灌溉量进行回归分析,得到施磷 0, 60, 120 和 180 kg/hm² 的 WUE 与灌溉量的关系直线,直线回归结果表明,WUE 与灌溉量之间具有很好的相关性($R^2 = 0.9272 \sim 0.9999$),紫花苜蓿 WUE 随其生育期各

阶段灌溉量增加直线下降,节水 40% 灌溉的水分利用效率明显高于节水 20% 灌溉,节水 20% 灌溉的水分利用效率明显高于常规灌溉。同理,在相同灌溉条件下将紫花苜蓿全生育期 WUE 与施磷量进行回归分析,得到节水 40% 灌溉、节水 20% 灌溉和常规灌溉的 WUE 与施磷量的关系曲线,由回归结果可以看出,

WUE与施磷量之间具有很好的相关性($R^2=0.9643\sim 0.9944$)。在各灌溉处理下,水分利用效率随着施磷量增加而先增加后降低,当施磷量为 120 kg/hm^2 的水分利用效率达到最大值[$26.50\text{ kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$]。在河西绿洲石羊河流域种植紫花苜蓿,当施肥量达到 120 kg/hm^2 时,种植3a紫花苜蓿水分利用率达到最大值,施磷量过高或者过低都会降低紫花苜蓿对土壤水分的利用。

2.4 灌溉和施磷对紫花苜蓿0—40 cm根重的影响

由表4—5可见,在节水40%灌溉(灌溉量 198 mm)水平下,将第1茬、第2茬和第3茬紫花苜蓿0—40 cm根重求平均值得到紫花苜蓿全生育期根重,施磷 120 kg/hm^2 的根重显著大于施磷 60 kg/hm^2 ,施磷 60 kg/hm^2 的根重显著大于施磷 180 kg/hm^2 ,施磷 180 kg/hm^2 的根重显著大于不施磷处理。在节水20%灌溉(灌溉量 264 mm)水平下,施磷 120 kg/hm^2 的根重显著大于施磷 180 kg/hm^2 ,施磷 180 kg/hm^2 的根重显著大于施磷 60 kg/hm^2 ,施磷 60 kg/hm^2 的根重显著大于不施磷处理。在常规灌溉(灌溉量 330 mm)水平下,各施磷处理的根重显变化规律与灌溉量 198 mm 类似。尽管不同灌溉水平施磷的根重变化有所差异,但总规律是施磷 120 kg/hm^2 的根重达到最大值。

在同一灌溉水平下,将4个施磷处理(每个施磷处理有3重复,共12个重复)每茬0—40 cm根重求均值(平均值),可以看出,紫花苜蓿根重随着灌溉量增加而增加,节水40%灌溉,节水20%灌溉和常规灌溉的紫花苜蓿全生育期平均根重分别为 894.89 , $1\ 073.11$ 和 $1\ 202.22\text{ g/m}^2$ 。就全生育期而言,常规灌溉和节水20%灌溉的根重显著高于节水40%灌溉,节水20%灌溉与常规灌溉之间差异不显著。轻度的水分亏缺可以诱发紫花苜蓿产生大量的侧根,增加根重,节水20%灌溉有利于侧根生长,从而使节水20%灌溉和常规灌溉的根重差异不显著。

在同一施磷水平下,将3个灌溉处理(每个灌溉处理有3重复,共9个重复)的每茬0—40 cm根重求均值(平均值)可以看出,就全生育期而言,紫花苜蓿根重随施磷量增加而呈现先增加再降低。施磷 0 , 60 , 120 和 180 kg/hm^2 的紫花苜蓿全生育期平均根重分别为 796.11 , $1\ 094.78$, $1\ 320.78$ 和 $1\ 015.44\text{ g/m}^2$ 。施磷 120 kg/hm^2 的根重显著高于施磷 60 kg/hm^2 和施磷 180 kg/hm^2 ,施磷 60 kg/hm^2 和施磷 180 kg/hm^2 根重显著高于不施磷,施磷 60 kg/hm^2 与施磷 180 kg/hm^2 之间差异不显著。施磷能显著增加紫花苜蓿根重,但过量施肥反而抑制根系的生长,导致施磷 180 kg/hm^2 的根重低于施磷 120 kg/hm^2 。

表4 灌溉和施磷对紫花苜蓿0—40 cm根重的影响

g/m^2

灌溉量/ mm	施磷量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	第1茬 (0329—0609)	第2茬 (0609—0725)	第3茬 (0725—0903)	全生育期 (0329—0903)
198	0	373.33d	704.89 ^d	737.33 ^d	605.22 ^d
	60	596.44 ^b	1 174.78 ^b	1 225.44 ^b	998.56 ^b
	120	828.00 ^a	1 308.22 ^a	1 367.56 ^a	1 167.89 ^a
	180	403.89 ^e	963.89 ^c	1 055.56 ^c	807.78 ^c
264	0	540.56 ^d	887.11 ^d	1 065.11 ^c	830.89 ^d
	60	698.44 ^b	1 043.89 ^c	1 080.78 ^c	941.00 ^c
	120	978.78 ^a	1 582.22 ^a	1 679.89 ^a	1 413.67 ^a
	180	627.67 ^c	1 190.67 ^b	1 502.67 ^b	1 106.89 ^b
330	0	576.78 ^c	1 049.78 ^d	1 229.78 ^d	952.11 ^d
	60	782.11 ^a	1 615.78 ^b	1 635.67 ^b	1 344.56 ^b
	120	792.78 ^a	1 666.44 ^a	1 682.89 ^a	1 380.67 ^a
	180	720.67 ^b	1 327.00 ^c	1 347.22 ^c	1 131.67 ^c

从表4—5可以看出,在整个生育期内,紫花苜蓿根重随生育期延伸逐渐递增。第2茬的根重比第1茬增加 $65\%\sim 109\%$,第3茬的根重比第2茬增加 $2\%\sim 15\%$,第3茬紫花苜蓿根重增长速度明显低于第2茬。

紫花苜蓿返青后,气温逐渐升高,呼吸消耗能量较多,光合产物主要用于地上部分生长,可供地部下

分生长的碳水化合物较少,第1茬紫花苜蓿根重小于第2茬。第2茬紫花苜蓿生长期间,适宜温度和光照促使侧根和毛根生长,吸收更多土壤水分用于地上部分生长,第2茬紫花苜蓿根重较第1茬显著增加。第3茬紫花苜蓿生长期间,光照强度较小、气温较低和生长期较短使地上部分生长缓慢,光合产物积累较少,第3茬根系较第2茬增长幅度较低。

表 5 单一处理对紫花苜蓿 0—40 cm 根重的影响

g/m²

项目	第 1 茬 (0329—0609)	第 2 茬 (0609—0725)	第 3 茬 (0725—0903)	全生育期 (0329—0903)
198	550.11 ^b	1 037.89 ^b	1 096.44 ^b	894.89 ^b
灌溉量/ mm	264	711.33 ^a	1 176.00 ^a	1 073.11 ^a
330	718.11 ^a	1 414.78 ^a	1 473.89 ^a	1 202.22 ^a
0	496.89 ^c	880.56 ^c	1 010.78 ^c	796.11 ^c
施磷量/ (kg·hm ⁻²)	60	692.33 ^b	1 278.11 ^b	1 094.78 ^b
120	866.56 ^a	1 519.00 ^a	1 576.78 ^a	1 320.78 ^a
180	584.11 ^b	1 160.44 ^b	1 301.78 ^b	1 015.44 ^b

3 结果讨论

紫花苜蓿是一种需水量较高的牧草,在干旱地区,为确保紫花苜蓿正常生长,需适时适地浇灌和施肥^[17]。杨启国^[18]研究表明,紫花苜蓿土壤贮水量随灌溉量的增加而增加,在全生育期内变化较大。高灌溉经常导致紫花苜蓿耗水量提高,进而引起耗水强度增加。陈林等^[6]研究发现,不灌溉处理的总耗水量和耗水强度显著低于灌溉处理。本研究结果表明,土壤贮水量和紫花苜蓿耗水强度随灌溉量增加而增加,常规灌溉的耗水强度显著高于节水 20% 灌溉,节水 20% 灌溉的耗水强度显著高于节水 40% 灌溉,常规灌溉、节水 20% 灌溉和节水 40% 灌溉的全生育期耗水强度分别为 2.94, 2.51 和 1.98 mm/d。孙洪仁等^[19]研究表明,灌水量从 0 增至 400 mm,紫花苜蓿水分利用效率从 10.5 降至 6.8 kg/(hm²·mm)。本研究结果表明,水分利用效率随灌溉量增加呈下降趋势,在各施磷水平下节水 40% 灌溉的水分利用效率 (26.50 kg/(hm²·mm)) 最高。张富仓等^[9]研究表明,适当施肥可以有效保持土壤水分,提高土壤贮水量,降低作物对水分的吸收和消耗。本试验结果表明,施磷能增加紫花苜蓿耗水量,使施磷 60, 120 和 180 kg/hm² 的土壤贮水量低于不施磷处理,但各施磷处理之间相差不显著。

根系是最活跃的养分吸收器官,适宜的水和肥条件可促进根系发育,根系发达有利于提高紫花苜蓿产量^[20]。供水充分有利于根系生长,轻度水分亏缺可以诱发紫花苜蓿侧根生长。本试验结果表明,常规灌溉和节水 20% 灌溉的根重显著高于节水 40% 灌溉,节水 20% 灌溉和常规灌溉差异不显著。紫花苜蓿根系生长需要适宜磷肥供应,缺磷不仅限制植株生长,而且缺磷影响苜蓿根瘤氮固定和吸收。多数研究表明,中等施磷量能显著促进紫花苜蓿根系生长^[21]—^[22]。丁洪等^[23]研究表明,适量磷肥可以促进结瘤和固氮,进而加快紫花苜蓿根系的生长发育,但过多

也会抑制根瘤的固氮效果,进而减缓紫花苜蓿根系的生长。本试验结果表明,施磷 120 kg/hm² 的根重显著高于施磷 0, 60 和 180 kg/hm²。尽管节水 20% 灌溉引起紫花苜蓿根重的降低,但节水 20% 灌溉的紫花苜蓿根重与常规灌溉相差不显著,同时节水 20% 灌溉比常规灌溉具有较高 WUE。高灌溉将引起灌溉用水紧张和 WUE 下降,同时大量灌溉产生地表径流和渗漏损失,从而导致地表水和地下水污染。

4 结论

在紫花苜蓿整个生育期,3 个灌溉处理间或 4 个施磷处理间土壤贮水量差异均不显著,说明灌溉与施磷对建植 3 a 紫花苜蓿土壤水分保持无显著性影响。紫花苜蓿耗水强度随灌溉量的增加而增加,常规灌溉的紫花苜蓿全生育期耗水强度 (2.94 mm/d) 显著高于节水 20% 灌溉 (2.51 mm/d),节水 20% 灌溉显著高于节水 40% 灌溉 (1.98 mm/d)。施磷对紫花苜蓿耗水强度影响不显著。WUE 随灌溉量的增加而明显降低。施磷 120 kg/hm² 的紫花苜蓿全生育期水分利用效率 (26.50 kg/(hm²·mm)) 为最大值。紫花苜蓿根重随灌溉量增加而增加。紫花苜蓿根重随施磷量增加先增加再降低,施磷 120 kg/hm² 的根重 (1 320.78 g/m²) 显著高于其他施磷处理。

[参 考 文 献]

- [1] Li Wenxue, Li Long, Sun Janhao, et al. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 105(3): 483-491.
- [2] 王琦,李锋瑞,赵文智. 黑河绿洲新垦沙地农田灌溉与施氮量对春小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 51-57.
- [3] 程旺大,赵国平,张国平,等. 水稻节水栽培的生态和环境效应[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 191-194.
- [4] 董君. 西部地区苜蓿产业化发展的战略思考[C]//北京: 首届中国苜蓿发展大会, 2001.

- [5] Rampino P, Pataleo S, Gerardi C, et al. Drought stress response in wheat: Physiological and molecular analysis of resistant and sensitive genotypes [J]. *Plant Cell Environment*, 2006, 29(12):2143-52.
- [6] 万素梅,胡守林,王龙昌,等. 不同紫花苜蓿品种土壤水分动态变化研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4):161-163.
- [7] 陈林,王磊,宋乃平,等. 灌溉量和灌溉次数对紫花苜蓿耗水特性和生物量的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4):91-94.
- [8] Aggarwal P K, Singh A K. Performance of wheat and triticale cultivars in a variable soil-water environment: Evapotranspiration, WUE, harvest index and grain yield [J]. *Field Crop Research*, 1983, 13(7):303-315.
- [9] 张富仓,康绍忠,李志军,等. 施肥对旱地土壤供水特征的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2004, 35(5/6):408-410.
- [10] 刘青林,张恩和,王琦,等. 灌溉与施氮对留茬免耕春小麦产量,水分利用效率及氮肥表观利用效率的影响[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(5):1195-1200.
- [11] 徐亮,王月福,程曦,等. 施磷对花生根系生长发育和产量的影响[J]. *花生学报*, 2009, 38(1):32-35.
- [12] Mackay A D, Barber S A. Soil temperature effects on root growth and phosphorus uptake by corn[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, 48(9):818-823.
- [13] Chassot A, Richner W. Root characteristics and phosphorus uptake of maize seedlings in a Bilayered soil [J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94 (5):118-127.
- [14] 廖红,戈振扬,严小龙. 水磷耦合胁迫下植物磷吸收的理想根构型:模拟与应用[J]. *科学通报*, 2001, 46(8):641-646.
- [15] 孙洪仁,武瑞鑫,李品红,等. 紫花苜蓿根系入土深度[J]. *草地学报*, 2008, 16(3):307-312.
- [16] 刘小刚,张富仓,田育丰,等. 水氮互作对石羊河流域春小麦群体产量和水氮利用的影响[J]. *西北农林科技大学学报*, 2009, 37(3):107-113.
- [17] 马红彬,王宁,高继飞,等. 宁南山区苜蓿草产业化发展的可行性初探[J]. *宁夏农学院学报*, 2000, 21(4):25-2.
- [18] 杨启国,张旭东,杨兴国,等. 甘肃中部半干旱区紫花苜蓿耗水规律及土壤水分变化特征研究[J]. *中国农业气象*, 2003, 24(4):37-40.
- [19] 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.
- [20] 李永山. 栽培措施对棉花根系生长的影响及其与地上部和产量的关系[J]. *棉花学报*, 1992, 4(2):59-66.
- [21] 王泽环. 不同磷水平对黄花苜蓿产量和品质的影响[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古师范大学, 2008.
- [22] 李圣昌,朱树森. 紫花苜蓿施用磷肥试验研究[J]. *草业科学*, 1993(2):41-43.
- [23] 丁洪,李生秀. 磷素营养与大豆生长和共生固氮的关系[J]. *西北农业大学学报*, 1998, 26(5):67-70.

(上接第 158 页)

- [12] 范玉贞,崔兴国. 不同种植年限深州蜜桃土壤微生物及酶活性的变化[J]. *北方园艺*, 2011(16):181-182.
- [13] 薛蕙,刘国彬,张超,等. 黄土丘陵区营造果园后土壤质量效应分析[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(15):3154-3161.
- [14] 肖宏,于明革. 不同连作苹果园土壤酶活性及微生物状况的调查研究[J]. *山西果树*, 2006(4):5-6.
- [15] 李东坡,武志杰,陈利军. 有机农业施肥方式对土壤微生物活性的影响研究[J]. *中国农业生态研究*, 2005, 13(12):178-181.
- [16] 高文胜. 果树重茬病及其防治[J]. *中国果树*, 2002(3):51-52.
- [17] 苏少华,刘合满,董丽娜,等. 黄土丘陵区不同生长年限刺槐林土壤无机磷的变化规律[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(3):171-175.
- [18] 刘梦云,寇宝平,常庆瑞,等. 安塞小流域土壤养分分布特征研究[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2002, 30(6):21-24.
- [19] 陆景陵. *植物营养学(下)*[M]. 北京:中国农业出版社, 2003:251-252.