

适宜灌溉方式利于苜蓿生长并提高草产量

陶 雪¹, 苏德荣¹, 寇 丹²

(1.北京林业大学草地资源与生态研究中心, 北京 100083; 2.中国科学院植物研究所, 北京 100093)

摘要 为研究不同灌溉方式对紫花苜蓿生长的影响, 在田间试验基础上进行灌溉处理, 设置了地下滴灌(SDI)和喷灌(SI)2种灌溉方式。结果表明: 0~100 cm 土层内, SDI 的土壤体积含水率最高; SDI 的苜蓿株高、分枝数及单株干重均显著高于 SI, 但其茎叶比显著低于 SI; SDI 两茬的苜蓿草产量分别为 4815.87 kg hm⁻² 和 4300.41 kg hm⁻², 相较 SI, SDI 下第 2 茬和第 3 茬苜蓿草产量分别提高了 14.92% 和 23.60%; SDI 两茬苜蓿的水分利用效率分别为 2.66 kg m⁻³ 和 2.50 kg m⁻³, 相较 SI, SDI 下第 2 茬和第 3 茬苜蓿水分利用效率分别提高了 21.46% 和 34.41%。与 SI 相比, SDI 既能促进从苜蓿生长也有利于产量和水分利用效率的提高。

关键词 苜蓿; 灌溉方式; 生长; 水分利用效率

Rational Irrigation Methods Improving Growth and Yield of Alfalfa

TAO Xue¹, SU Derong^{1*}, KOU Dan²

(1. Center for Grassland Resources and Ecology Research, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China, 2. Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: In order to explore the effects of different irrigation methods on alfalfa (*Medicago sativa*) growth, a field experiment was carried out to study the change of alfalfa growth under two different irrigation methods, including subsurface drip irrigation (SDI) and sprinkler irrigation (SI). Results showed that different irrigation methods had different effects on soil water content, and SDI treatment had the highest soil water content during the experimental stage. Plant height, primary shoot number, dry-fresh ratio and weight of each plant of SDI treatment increased significantly compared with that of SI treatment($P<0.05$), but stem-leaf ratio of SDI treatment decreased significantly compared with that of SI treatment($P<0.05$). In addition, this study presented that different irrigation treatments had different effects on alfalfa yield and water use efficiency. Yield of the second cutting and the third cutting alfalfa of SDI treatment were 4815.87 kg hm⁻² and 4300.41 kg hm⁻², respectively. Compared with SI treatment, yield of two cuttings alfalfa of SDI increased by 14.92% and 23.60%, respectively ($P<0.05$). Water use efficiency of the second cutting and the third cutting alfalfa of SDI treatment were 2.66 kg m⁻³ and 2.50 kg m⁻³, respectively. Compared with SI treatment, water

use efficiency of two cuttings of SDI increased by 21.46% and 34.41%, respectively ($P<0.05$). Therefore, considering growth, yield and water use efficiency of alfalfa, the subsurface drip irrigation was the most suitable irrigation method in arid northwest China.

Keywords: Alfalfa; Irrigation methods; Growth; Water use efficiency

石羊河流域是我国西北旱区典型的旱区，水分亏缺一直是限制这里苜蓿增产的主要非生物因素，该流域地处我国西北干旱内陆，全年降水稀少(多年平均降水量为 164.4 mm)，蒸发强烈昼夜温差大(多年平均蒸发量 1200 mm)^[1]，只要具备一定的灌溉条件，这里的苜蓿刈割后自然干燥快，营养损失小，适合苜蓿干草的规模化生产。苜蓿作为多年生饲草作物，其生育期长，一年多茬收割，耗水量较一般大田作物高^[2]。因此，在石羊河流域发展苜蓿规模化种植，必须选择节水的灌溉方式。地下滴灌作为一种节水的微灌技术，具有节水、增产及提高作物品质等优点，其土壤水分主要分布在地表以下及根际附近，可显著减少土壤水分蒸发损失，关于其节水和增产效果的研究很多^[3]。研究还表明，在旱区地下滴灌灌水不仅能改善苜蓿生长的微环境，促进苜蓿生长，还能显著提高苜蓿产量和水分利用效率^[4]，而苜蓿规模化大型喷灌机灌溉蒸发损失严重，降低了水分利用效率，耗水量较大，造成水资源的浪费^[5, 6]。因此，研究地下滴灌和地面灌溉对苜蓿生长及产量的影响，对石羊河流域发展苜蓿种植具有重要意义。

国内外已有关于紫花苜蓿的研究主要涉及水肥^[7, 8]、营养品质^[9]、种质基因遗传^[10, 11]、生理病害^[11]等方面，针对紫花苜蓿的灌溉方式也做了许多研究，主要集中在漫灌、喷灌、地下滴灌及调亏灌溉等^[12, 13]。如 Ayars^[14]等的研究总结了地下滴灌在番茄、甜玉米、紫花苜蓿上的应用，结果显示地下滴灌不仅提高了作物产量，而且提高了水分利用效率。然而，苜蓿喷灌会因水汽飘移蒸发和冠层截留造成水分损失，从而降低了水分利用效率^[15]。本文针对我国西北干旱地区特殊气候条件，进行地下滴灌和喷灌 2 种灌溉方式下苜蓿水分利用效率和增产效果的对比性试验，探索提高紫花苜蓿水分利用效率及干草产量的灌溉方式，以期为我国西北旱区石羊河流域紫花苜蓿规模化种植选择高效节水灌溉方式提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2014 年在中国农业大学石羊河流域农业与生态节水试验站 (N 37°52', E 102°51') 进行，该站位于甘肃省武威市凉州区东河乡王景寨村，属典型的内陆干旱荒漠气候区。海拔 1581 m，多年平均降水量 164.4 mm，主要集中在 7—8 月份，年蒸发量 1131.5~1508.7 mm，日照时间 3000 h 以上，无霜期 150 d 以上，年均气温 8℃，土质为砂壤土，有机质含量中等，0~100 cm 土层内的平均土壤容重为 1.48 g/cm³，田间持水量为 26.6%。

1.2 试验材料

以北京克劳沃草业技术开发中心提供的苜蓿品种‘皇冠’(*Medicago sativa* ‘Phabulous’)为试验材料，于 2012 年 4 月 30 日播种，人工条播，播量 30 kg/hm²，播深 2 cm，行距 22.5 cm。喷灌材料：采用美

国科雨公司提供的散射式喷头，喷嘴型号为 kv8，流量 $0.66 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ，弹出高度 75 mm，喷射半径 270 cm。地下滴灌材料：采用甘肃大禹节水有限公司提供的旁壁式滴灌带，内径 16 mm，壁厚 0.4 mm，滴头间距 30 cm，滴头流量 3.0 L h^{-1} 。

1.3 试验设计

试验共设地下滴灌（SDI）和喷灌（SI）2 种灌溉处理，每个处理设 3 个重复，共 6 个小区。地下滴灌、小区面积为 $6.0 \text{ m} \times 2.7 \text{ m}$ ，喷灌小区面积为 $2.7 \text{ m} \times 2.7 \text{ m}$ 。为避免喷灌灌水对地下滴灌灌溉处理造成影响，喷灌小区布设在地下滴灌小区的边缘，各小区间设 1m 宽的保护带，并用黑色薄膜垂直隔离 1 m。地下滴灌处理的每个小区布设 3 条滴灌带，滴灌带行距 90 cm，埋深 30 cm，1 条滴灌带控制 4 行苜蓿，喷灌的每个小区布设 2 个位于对角的喷头。2 种灌水处理的灌水时间和灌溉量相同，所有灌水量由装在支管上的水表计数，灌溉下限的设置主要依据地下滴灌不同生育期土壤含水率对苜蓿的生长及产量的影响，并参考当地苜蓿灌溉量和以往的研究结果进行设置，即在地下滴灌的 3 个重复小区 0~100 cm 以上土层的平均土壤体积含水率达到田间持水量的 55%~65% 时开始灌水，每次灌水量均为 40 mm。紫花苜蓿第 1 莖生育期间受低温天气和降雨的影响，且前一年冬灌充足，在苜蓿第 1 莖生长期各小区的土壤含水率已超过设定的灌溉下限，直至生长后期土壤含水率才下降至灌溉下限，在紫花苜蓿第 1 莖生长期没有灌水。在苜蓿第 1 莖试验期间，由于处理间各指标数据一致，差异不显著。因此本文试验数据主要取自苜蓿生长第 2 莖和第 3 莖的数据。试验进行期间，除草、病虫害防治、施肥等田间管理各处理保持一致。

1.3 测定指标与方法

土壤含水率测定：用便携式土壤水分廓线仪（Diviner2000，Sentek Pty Ltd, Australia）测土壤 1 m 深的水分含量，每 10 cm 1 层，5~7 d 测 1 次，每次灌溉前后和降雨后加测。每个小区布设 2 根测管，离滴灌带均为 22.5 cm。2 根测管土壤含水率校正后的平均值代表小区的土壤含水率。利用水量平衡法计算紫花苜蓿生育期耗水量：

$$Q = P + I + K - R - D - \Delta W \quad (1)$$

其中 Q 为苜蓿生育期耗水量（mm）； P 为有效降雨量（mm）； I 为灌水量（mm）； K 为地下水补给量（mm）； R 为地表径流量（mm）； D 为深层渗漏量（mm）； ΔW 为土壤贮水量的变化量（mm）。试验地地下水位已达到 30~40 m 深，地势较平坦，且小区四周畦垄，通过观察土壤水分变化发现 100 cm 处的水分变化较小，故地表径流量（ R ）、地下水补给量（ K ）和深层渗漏量（ D ）均省略不计，均取值为 0。

生长指标测定：在苜蓿分枝期、现蕾期和初花期三个主要生育期，每个小区随机取 10 株，用直尺测株高（cm）；用游标卡尺测定茎粗（mm）；数植株主茎长出的分枝数，为一级分枝数；分别将它们的茎和叶分离，烘干后称重，计算茎叶比；每个小区随机选取 100g 左右的鲜物质，烘干后称重，计算鲜干比。

单株重、干草产量及水分利用效率测定：每个小区随机选取 5 株，烘干测单株重；初花期刈割时，各小区苜蓿测整个小区鲜重，取 500g 左右鲜物质烘干称重，计算苜蓿含水率，依据苜蓿含水率和鲜重计算单位面积苜蓿干草产量，再根据干草产量和耗水量。

$$WUE = \frac{W}{Q} \quad (2)$$

1.4 数据处理

利用 Excel 2010 进行数据整理、简单统计分析和绘图，利用 SPSS 17.0 进行方差分析和显著性检验，方差分析多重比较采用 LSD 法进行 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉方式对土壤含水率的影响

由图 1 可知，不同灌溉方式下土壤 0~100 cm 土层的体积含水率不同。第 1 莗处理间土壤含水率差异不明显，其中几个土壤含水率高峰主要受降雨的影响。在第 2、第 3 莗试验期间，SDI 的土壤含水率最高，其中第 2、第 3 莗的最大值可分别达到 18.02% 和 22.24%，明显高于 SI。试验期间各处理土壤含水率呈现一致的动态趋势，伴随灌水和降雨都会出现含水率的小高峰，且第 3 莗各处理的土壤含水率比第 2 莩高，且波动较大，表明地下滴灌能够提高土壤含水率。

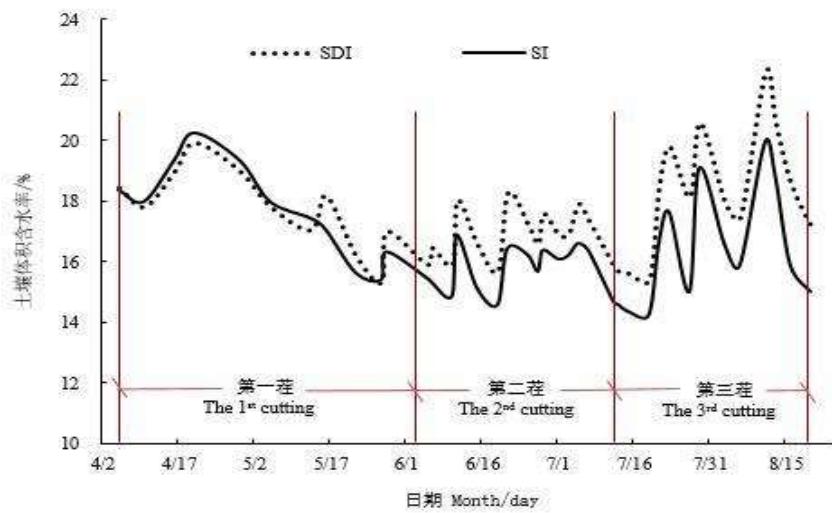


图 1 不同灌溉方式对土壤水分动态的影响

2.2 不同灌溉方式对苜蓿生长指标动态的影响

试验结果显示不同灌溉方式下苜蓿株高变化趋势不一致（表 1）。SDI 的株高最大，其中第 2 莩最大值可达 104.12 cm，第 3 莩可达 97.67 cm。分枝期，两茬试验中，SDI 和 SI 的株高差异不显著；现蕾期，各处理第 2 莩和第 3 莩苜蓿的株高从高到低依次为 SDI>SI，SDI 的株高显著高于 SI；苜蓿株高第 2 莩和第 3 莩初花期的结果与现蕾期一致，第 2 莩和第 3 莩初花期 SDI 的株高比 SI 分别提高 8.66% 和 16.43%。

试验期间茬次间苜蓿茎粗在整个生长阶段存在差异。两个处理茎粗的变化不大，而在苜蓿整个生育期内，第 3 莩的茎粗各处理间均表现为 SDI 显著大于 SI，且各处理第 2 莩的茎粗较第 3 莩大（表 2）。

表 3 显示，分枝期，SDI 和 SI 间分枝数差异不显著；现蕾期，苜蓿 SDI 处理的分枝数显著多于

第六届中国苜蓿发展大会

SI; 初花期, 苜蓿收割时, 以 SDI 处理的分枝数最多, 第 2 茁和第 3 茁分别可达 14.2 和 15.6 枝, 相比 SI, 第 2 茁 SDI 处理的分枝数提高了 8.98%, 第 3 茠提高了 15.56%。综上所述, 相比 SI, SDI 有效地提高了苜蓿的株高、茎粗和分枝数, SDI 有利于苜蓿生长的优势得到证明。

表 1 不同灌溉方式对苜蓿株高的影响 cm

茬次	处理	分枝期	现蕾期	初花期
Cuttings	Treatments	Branching period	Squaring period	Pre-flowering period
第二茬	地下滴灌 SDI	53.13a	79.58a	104.15a
The 2 nd cutting	喷灌 SI	50.77a	69.24b	95.85b
第三茬	地下滴灌 SDI	50.60A	77.33A	97.67A
The 3 rd cutting	喷灌 SI	46.07A	65.35B	83.89B

注: 同列不同小写字母表示变量之间在 $P<0.05$ 水平差异显著; 同列不同大写字母表示变量之间在 $P<0.05$ 水平差异显著; 下同。

Note: Different small letters in same line indicate significant difference among treatment groups with irrigation treatment at 0.05 level; Different big letters in same line indicate significant difference among treatment groups with irrigation treatment at 0.05 level; the same below.

表 2 不同灌溉方式对苜蓿茎粗的影响 mm

茬次	处理	分枝期	现蕾期	初花期
Cuttings	Treatments	Branching period	Squaring period	Pre-flowering period
第二茬	地下滴灌 SDI	3.06a	3.28a	3.34a
The 2 nd cutting	喷灌 SI	2.77b	3.21b	3.23a
第三茬	地下滴灌 SDI	2.45A	2.70A	3.38A
The 3 rd cutting	喷灌 SI	2.12B	2.30B	2.67B

表 3 不同灌溉方式对苜蓿一级分枝数的影响

茬次	处理	分枝期	现蕾期	初花期
Cuttings	Treatments	Branching period	Squaring period	Pre-flowering period
第二茬	地下滴灌 SDI	5.47a	10.47a	14.20a
The 2 nd cutting	喷灌 SI	5.17a	9.80b	13.03b
第三茬	地下滴灌 SDI	7.13A	11.10A	15.60A
The 3 rd cutting	喷灌 SI	6.27A	9.40C	13.53B

2.3 不同灌溉方式对苜蓿茎叶比和鲜干比的影响

试验期间各灌溉方式处理的茎叶比存在显著差异, 且各处理之间的差异性不一致(表 4)。其中分枝期, SDI 的茎叶比显著低于 SI ($P<0.05$), 相比 SI, 第 2 茁 SDI 的茎叶比分别降低了 8.33%, 达到

显著差异水平 ($P<0.05$)，第3茬 SDI 与 SI 的茎叶比差异不显著；现蕾期，相比 SI，第2茬 SDI 的茎叶比降低了 4.12%，第3茬降低了 6.98%，差异均显著 ($P<0.05$)；初花期，相比 SI，SDI 的茎叶比降低了 4.96%，差异依然显著，SDI 第3茬的茎叶比显著低于 SI 处理。

表 4 不同灌溉方式对苜蓿干重茎叶比的影响

茬次 Cuttings	处理 Treatments	分枝期 Branching period	现蕾期 Squaring period	初花期 Pre-flowering period
第二茬 The 2 nd cutting	地下滴灌 SDI	0.99b	1.15c	1.34b
	喷灌 SI	1.08a	1.20b	1.41a
第三茬 The 3 rd cutting	地下滴灌 SDI	1.01B	1.20B	1.39B
	喷灌 SI	1.04AB	1.29A	1.57A

试验期间各处理的鲜干比均随着生育期的延长逐渐降低的趋势（表 5）。SDI 处理的鲜干比最大，但在分枝期和初花期，第2茬 SDI 处理与 SI 差异不显著，第三各处理在分枝期的鲜干比差异不显著 ($P>0.05$)；现蕾期，相比 SI，第2茬 SDI 的鲜干比提高了 15.06%，第3茬提高了 9.92%，达到显著水平 ($P<0.05$)；初花期，相比 SI，第3茬 SDI 的鲜干比提高了 16.24%，达到显著水平 ($P<0.05$)。

表 5 不同灌溉方式对苜蓿鲜干比的影响

茬次 Cuttings	处理 Treatments	分枝期 Branching period	现蕾期 Squaring period	初花期 Pre-flowering period
第二茬 The 2 nd cutting	地下滴灌 SDI	7.78a	6.19a	5.01a
	喷灌 SI	7.93a	5.38b	4.59a
第三茬 The 3 rd cutting	地下滴灌 SDI	7.29A	6.54A	4.58A
	喷灌 SI	7.35A	5.95B	3.94BC

2.4 不同灌溉方式对苜蓿产量和水分利用效率的影响

本试验结果显示，不同灌水方式下紫花苜蓿的产量和水分利用效率存在显著差异，各处理两茬的单株重、产量和水分利用效率逐渐降低，而灌水利用效率逐渐增加（表 6）。相比 SI，第2茬苜蓿 SDI 的耗水量减少了 5.52%，第3茬减少了 8.18%。两茬苜蓿单株干重和产量依次减少的顺序是 SDI > SI，其中 SDI 第2茬和第3茬的单株重分别为 2.51 和 2.24g。各处理间，SDI 处理的产量最高，第2茬为 4815.87 kg hm⁻²，第3茬为 4300.41 kg hm⁻²，相比 SI，第2茬 SDI 的产量提高了 14.92%，第3茬提高了 23.60%，均达到显著水平 ($P<0.05$)；与 SI 相比，第2茬 SDI 的水分利用效率提高了 21.46%，第3茬提高了 34.41%。总体上各处理第2茬的产量和水分利用效率大于第3茬。

第六届中国苜蓿发展大会

表 6 不同灌溉方式对苜蓿单株重、干草产量、耗水量和水分利用效率的影响

茬次 Cuttings	指标 Indexes	地下滴灌 SDI	喷灌 SI
第二茬 The 2 nd cutting	单株干重 Dry weight of each plant/g	2.51a	2.28b
	干草产量 Hay yield/kg hm ⁻²	4815.87a	4190.33b
	耗水量 Water consumption/ mm	181.20b	190.99a
第三茬 The 3 rd cutting	水分利用效率 WUE/kg m ⁻³	2.66b	2.19c
	单株干重 Dry weight of each plant/g	2.24a	1.99b
	干草产量 Hay yield/kg hm ⁻²	4300.41a	3479.77b
The 3 rd cutting	耗水量 Water consumption/ mm	171.71b	187.02a
	水分利用效率 WUE/kg m ⁻³	2.50a	1.86b

注：同行不同小写字母表示变量之间在 $P<0.05$ 水平差异显著。

Note: Different small letters in same row indicate significant difference among treatment groups with irrigation treatment at 0.05 level.

3 讨论

在干旱地区，灌溉是影响土壤水分含量最重要的因素^[16]。通过对不同灌溉方式下土壤含水率的研究发现，地下滴灌灌水时，湿润层主要集中在地表以下，靠近苜蓿根部，大部分水分能被根系吸收，降低了土壤蒸发量；喷灌灌水最大问题是灌水时喷头喷出的水分会出现飘散现象，在空气干燥时段灌水时造成的水汽漂移及蒸发损失不容小觑，所以喷灌处理的含水量明显比地下滴灌低，这与郭学良^[5]等的研究结果一致。地下滴灌有利于保持土壤含水量，降低土壤水分蒸发。

在土壤水分达到胁迫程度时，会使得植物呈现旱生状态的结果特征，不利于植物生长^[17]。本研究表明，灌溉方式的不同引起土壤含水率的差异，由于各个处理的土壤含水率不同，造成苜蓿不同程度的亏水，尤其是对照的苜蓿已呈现旱生生长状态，相比地下滴灌，喷灌处理的苜蓿生长也不同程度地受到抑制，使得苜蓿株高要低于地下滴灌的处理。在苜蓿生育期，各处理间分枝数的差异性变化是持续上升的。

茎叶比和鲜干比是衡量苜蓿品质和含水率的重要指标。紫花苜蓿蛋白质含量非常丰富，蛋白含量可达 21%以上，而其蛋白质主要集中在叶片。因此，叶片在紫花苜蓿植株中所占的比例是影响紫花苜蓿蛋白质含量多少重要因素。茎叶比越小，叶片的比例越高，营养物质含量就越多，牧草的品质也就越好，饲草就越柔软，适口性就越好，牧草饲用价值和经济价值就越大^[9]。本研究发现，各处理间随着土壤水分胁迫程度的减小，苜蓿茎叶比也在降低，尤其是地下滴灌的茎叶比最小，表明地下滴灌有利于降低茎叶比，提高苜蓿叶片的量。鲜干比是指鲜草重与干草重的比例，苜蓿的鲜干比与品质呈正相关，鲜干比越高，蛋白质的含量就越高，适口性就越好，苜蓿的鲜干比在不同生长阶段的变化趋势与生物量的积累密切相关，随着生物量的增加而减小，生物量的积累速度与鲜干比的变化速度呈正相关^[9]。

本文研究显示，在苜蓿生育期间，水分的短缺会导致苜蓿产量下降，这与陈萍^[18]等对苜蓿的研究结果一致。在灌水时间和灌溉量相同的条件下，相比喷灌，地下滴灌的水分利用效率第2茬分别提高了21.46%，第3茬提高了34.41%；地下滴灌第2茬和第3茬的产量分别为 $4815.87 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $4300.41 \text{ kg hm}^{-2}$ ，相比喷灌，地下滴灌的产量第2茬分别提高了14.92%，第3茬分别提高了23.60%，均达到显著水平($P<0.05$)，表明相较畦灌，地下滴灌能有效地提高水分利用效率，并显著提高苜蓿产量，结果与Grimes^[19]及孟季蒙^[20]等的研究结果一致。

4 结论

在我国西北干旱地区，相比喷灌，地下滴灌有利于保持土壤含水量，降低水分蒸发，提高水分利用效率，具有节水的效果。在苜蓿生育期，地下滴灌有利于苜蓿生长，不仅提高了苜蓿株高、鲜干比、分枝数及单株干重，且有效地降低了苜蓿茎叶比，提高了叶片在苜蓿植株中的比例。相较喷灌，地下滴灌显著地提高了苜蓿的产量。因此从苜蓿生长、产量及水分利用效率角度来看，地下滴灌是西北干旱地区最为适宜的灌溉方式。本试验研究了不同灌溉方式对紫花苜蓿生长、产量及水分利用效率的影响，对不同灌溉方式下紫花苜蓿生产综合经济效益的比较还有待于进一步研究，以便为西北旱区紫花苜蓿种植生产选择一种经济合理、技术可行的灌溉技术提供理论及数据依据。

参考文献（略）