

紫花苜蓿不同灌溉方式研究进展及展望

陶 雪，苏德荣

(北京林业大学草地资源与生态研究中心，北京 100083)

摘要 紫花苜蓿是一种高耗水饲草作物，而大部分种植面积分布在我国北方干旱和半干旱地区，灌溉是保证该地区苜蓿高产重要条件。目前关于苜蓿灌溉方式研究的报道有很多，常见包括地表畦灌、大型喷灌、地下滴灌和调亏灌溉等，对苜蓿而言，灌溉方式间的差异主要体现在不同灌溉方式对苜蓿生长发育及水分利用效率等方面。本文从苜蓿不同灌溉方式对苜蓿生长发育及水分利用效率的影响方面对已有的研究进行简要的综述，旨在为苜蓿优质高产的灌溉方式研究提供理论依据，并根据目前的研究现状对相关内容进行展望，以期找到一种更加合理的节水灌溉方式，为我国紫花苜蓿大面积种植和管理提供参考，加快节水灌溉方式的推广，缓解我国北方水资源短缺的现状。

关键字 苜蓿；灌溉方式；生长；水分利用效率；研究进展

Research Progress and Prospect of Alfalfa Different Irrigation Methods

TAO Xue, SU De-rong^{*},

(Center for Grassland Resources and Ecology Research, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Alfalfa is a kind of high water consumption of forage crops, and most of the planting area of distribution in the arid and semi-arid area in north China. Irrigation is an important ensure for high-yielding alfalfa in the region. At present there are many studies of alfalfa irrigation methods, including common surface border irrigation, sprinkler irrigation and subsurface drip irrigation and regulated deficit irrigation, etc. Differences for alfalfa between different irrigation methods are the effect that different irrigation methods on alfalfa growth and water use efficiency, etc. From alfalfa different irrigation methods on the influence of alfalfa growth and water use efficiency of existing in this paper, a brief study aiming at high quality and high yield of alfalfa provides the theory basis for the study on irrigation, and according to the current research status and the paper points out the related content. In order to find a more reasonable way of water-saving irrigation, provide a reference for alfalfa planting and management of large area in our country, accelerate water-saving irrigation methods, and alleviate the present situation of water shortage in north China.

Key words: Alfalfa; Irrigation methods; Growth; Water use efficiency; Research progress

紫花苜蓿(*Medicago sativa L.*)是一种营养价值高、适口性好、优质高产的多年生豆科牧草，被誉为“牧草之王”，主要种植面积分布在我国水资源缺乏的北方干旱和半干旱地区。苜蓿也是一种高耗水饲草作物，孙洪仁^[1, 2]等研究表明紫花苜蓿整个生育期的耗水最大可达2 250 mm，并且苜蓿的生育期长、根系深和频繁刈割收获，因此，灌水对苜蓿的生长发育有着重要的作用，如何利用有限的水资源来促进苜蓿的生产是当前迫切需要解决的问题。因此，发展节水灌溉，保证苜蓿生长期间水分的供给势在必行。

现代节水灌溉主要包括喷灌、滴灌、微灌和调亏灌溉等灌溉技术，国内外在苜蓿节水灌溉上都取得了一定的研究成果。过去的研究表明喷灌和地下滴灌是目前世界上最先进的灌溉方法，节水效率明显，其在高产和节水上的优势明显高于很多地面灌溉，目前这两种灌溉方式在苜蓿种植生产中得到了普遍的应用。调亏灌溉是一种生物节水技术，通过对作物某个或某些生育阶段人为主动施加一定程度的水分胁迫以影响作物的生理生化过程，然后利用作物的自身适应性实现水分的高效利用和品质的改善，因为并不是作物生长的每个阶段都要充足的水分供给，调亏灌溉可以实现适时地为作物提供作物生长所需水分。近年来对苜蓿调亏灌溉的研究也表明它有很好的发展前景，将有限的水资源用到苜蓿生长最关键的时期，不仅起到节水的效果，还可以改善苜蓿质量、提高水分利用效率和产量。研究不同节水灌溉方式对苜蓿生长发育及水分利用效率的影响，制定出最佳的灌溉制度，不仅可以实现苜蓿的高产稳产和水资源的合理利用，而且对苜蓿的标准化、规模化及节水生产具有重要意义。

1 水分对苜蓿的作用

水是作物生长发育必需的要素之一，作为营养元素吸收、合成及运转的媒介，它是植株体内生理生化活动的参与者和介质。水分更是苜蓿生长发育过程中极为重要的环境因素，它不仅是构成苜蓿的主要成分，而且参与苜蓿的生理、生化、代谢和光合作用，并溶解矿物质和氧、二氧化碳，参加体内各种循环，同时水分还影响其他环境因子，对苜蓿产生间接作用，如灌溉水中的盐分也是影响苜蓿生长的因素^[2]。研究表明如果水分供应不足会造成苜蓿减产，并且苜蓿干物质产量与水分利用效率呈负线性关系^[3]，缺水对苜蓿生长发育及产量会产生负面影响，尤其是反映在一系列形态变化、生理生化和生产性能^[4]，这也可以体现灌水对旱区苜蓿生长的重要性。

1.1 水分对苜蓿根茎叶和幼苗生长的影响

国内外研究表明，在水分充足的条件下，紫花苜蓿植株茎-节数和茎节长度均得到增加，而在水分胁迫下，成熟植株叶片和茎的生长速率明显减小^[5]，叶面积减少，加速叶子的衰老和脱落，光合速率明显下降^[6]。Gindel^[7]也认为在水分胁迫下紫花苜蓿产量、枝条密度、植株高度及叶片大小都会减小。水分过多会影响紫花苜蓿根系生长。Teutsch等^[8]在美国俄亥俄州立大学农业研究与发展中心对播种后生长27 d和21 d的紫花苜蓿分别进行淹水15 d和11 d的田间试验，发现淹水处理0~15 cm土层单株根系生物量显著低于未淹水对照，淹水影响根系的呼吸作用，导致苜蓿生长受到阻碍，更有可能造成植株死亡。Thompson等^[9]在美国康奈尔大学进行盆栽试验，发现淹20 d后，生长8周的Honeoye苜蓿根系生物量减少80%。最新研究结果表明，随着灌水量的增加，苜蓿不同生育期的植株高度呈增高趋势^[10]，可见，相对充足灌水有利于植株的生长发育，而干旱并不利于苜蓿生长。李翔宏^[11]进行了水

第六届中国苜蓿发展大会

分对苜蓿幼苗生长的影响的研究，研究了紫花苜蓿捷达品种在幼苗生长过程中受水分影响情况，发现水分的影响作用很大，在种子出苗后，使土壤中有效含水量保持在 60%~75%左右，对苜蓿幼苗生长最有利。

1.2 水分对苜蓿产量的影响

水分是苜蓿的作用组成部分，苜蓿的水分主要通过根系吸收，所以土壤中水分含量对苜蓿的生长有重要意义。刘沛松等^[12]对宁南旱区不同生长年限紫花苜蓿草地土壤水分消耗及粮草轮作水分恢复效应进行了研究，结果表明随着苜蓿生长年限延长，在 1~6 年内苜蓿草地土壤湿度下降迅速，产草量逐年上升，7 年后土壤湿度下降趋于平缓，但苜蓿产草量下降迅速，表明苜蓿生长强烈耗水引起深层土壤干燥化，导致苜蓿生长逐渐衰败，苜蓿平均降水生产效率逐年下降。

程积民等^[13]的研究表明紫花苜蓿在退耕地生长年限一般为 10 年，生长的高峰期为第 4 年第 5 年，到第 6 年，由于土壤水分过耗严重，生物量开始逐年下降。张芮^[14]的研究结果表明过少的土壤含水量不利于苜蓿群体干物质的积累，苜蓿具有较高经济效益时所对应的土壤含水量为 65%左右，使苜蓿具有较高的水分利用效率（WUE）和经济效益的土壤含水率下限区间为 53%~65%。

1.3 节水灌溉对苜蓿生长的重要性

综上所述，在一定灌水条件下，随着灌水量的增加，苜蓿生物量是会有所提高的。无论是干旱还是水分过多都会影响苜蓿的生长，节水灌溉就是根据这一点出发进行的一种有效利用水资源的方法，既不影响苜蓿正常生长，又能达到节水的目的。节水灌溉是指在充分利用天然降水满足作物水分需求，尽量少用或不用人工灌溉补水的前提下，优化调配开发利用各种可用于灌溉的水资源，减少田间输水过程中的损失和田间灌水过程中的损失，提高灌溉水效率的灌溉方式。随着全世界水资源的严重缺乏和现代科技的快速发展，现代节水灌溉取得了长足的进展，各种节水灌溉方式得到了广泛的应用，特别是地下滴灌这种精准的灌溉方式不断地在改进，对节水增产起到了重要的作用。

2 不同节水灌溉方式对苜蓿生长的影响

根据灌溉方式的不同，节水灌溉可以分为地面灌溉、喷灌、地下滴管和调亏灌溉等，依据作物的不同生产要求、灌水现状条件和经济预算等各种因素选择适合的节水灌溉方式能有效地提高苜蓿产量和改善苜蓿品质。

2.1 地面灌溉对苜蓿生长的影响

地面灌溉（surface irrigation）是灌溉水在地面流动过程中借重力和毛细管作用浸润土壤的灌水技术，表面灌溉的特点是简单，零能量消耗，没有专业劳动和易于维护。根据灌溉水渗入土壤的方式，分为：畦灌、沟灌、湿润灌、漫灌和水平池灌等，这几种不同的地面灌溉对作物的生长发育和节水效果是不相同的。研究报道，在使用地面灌溉时，如果提高灌水的分布均匀性可以实现更高效的用水效果^[15]。王琦^[16]等通过不同灌溉方式对苜蓿生长影响的对比试验，结果表明：在各个生育关键时期，常规漫灌和畦灌的干物质量均大于沟灌和隔沟灌，在紫花苜蓿整个生育期，在各处理中畦灌水分利用效率(WUE)最高，常规漫灌 WUE 略低于畦灌，但常规漫灌的 WUE 大于沟灌和隔沟灌，畦灌节水增产效益最明显。

从以往的研究我们知道地面灌溉作为传统的灌溉方式，灌溉水分利用效率较低，灌水不均匀，产生了土壤养分、肥料及农药淋洗损失对地下水的污染问题，还可能导致地下水位上升，引起土壤盐碱化，破坏生态环境。尤其是漫灌造成的土壤板结和水分地表径流等不利影响，在节水效果上不如喷灌和滴灌好。Lamm^[17]的试验结果表明，畦灌的水分灌溉利用效率是从 0.008 6 到 0.056 $\text{tha}^{-1}\text{mm}^{-1}$ ，而喷灌和地下滴灌分别是从 0.004 4 到 0.065 9 $\text{tha}^{-1}\text{mm}^{-1}$ 和从 0.028 3 到 0.227 $\text{a}^{-1}\text{mm}^{-1}$ ，因此畦灌不能有效地提高灌溉水的利用效率。但是不同的农作地区会因为喷灌和滴灌的大成本而限制其推广，如在摩洛哥的 Gharb 山谷，喷灌由于其高能源成本和维护问题已经被证明是失败的，相反地面灌溉在当地被广泛地使用^[18]，所以在很多地区，地面灌溉任然是常用的灌溉方式。

一种有效地灌溉方式取决于它的灌水能力、有充足的水分和减少水分的损失。Rancisco^[19]对葡萄不同灌溉方式的研究表明，沟灌的葡萄果实、根系的含氮量和水分利用率都高于滴灌，因此沟灌更有利于葡萄的生长。Hanson^[20]研究了不同灌溉方式对苜蓿生长的影响，结果表明沟灌和地下滴灌的苜蓿产量相似，灌溉方式从沟灌到滴灌的转变，尽管有可能增产、减少水肥的利用和减少耕作成本，但是这些有利的条件都不是很确定的，相比沟灌来说滴灌有很多潜在的成本存在，如滴灌灌溉系统的成本、对滴灌加压的能量消耗和维护滴灌设备费用等。刘海军^[21]的研究结果表明，与地面灌相比，喷灌灌水定额较小，每次灌水湿润土层也较浅，这样作物根系相对集中在土壤表层，而地面灌溉的根系相对分布要比喷灌的要广，有利于根系向下层生长吸收过多水分。

地面灌溉的一个难点是预测渗透参数，确定适时的灌溉时间。史学斌^[22]的研究表明，若能改进地面灌溉灌水技术、完善灌水方案，地面灌溉同样有着较高水分利用效率和灌水均匀度。随着技术的不断发展，地面滴灌也在不断更新，因此研究地面灌溉理论，改进、完善地面灌水技术，成为灌溉农业可持续发展的一个重要课题。

2.2 喷灌对苜蓿生长的影响

喷灌（sprinkler irrigation）是一种具有节水、增产、节地、省工等优点的先进节水高效灌溉技术，可人为控制灌水量，对作物进行适时适量灌溉，不产生地表径流和深层渗漏，与地面灌溉相比可节水 30%~50%，增产 20%~30%，而且灌溉均匀、质量高，有利于作物生长发育、减少占地，能扩大播种面积 10%~30%，并且能够调节田间小气候，提高农产品质以及对某些作物病虫害起防治作用，有利于实现喷灌机械化、自动化^[23]。近 30 年来，我国在喷、微灌技术研究和推广应用方面积累了丰富的经验，但主要是以蔬菜、瓜果、花卉等为研究对象，大田作物中对小麦、棉花的研究较多，而对于牧草的研究较少，特别是对于喷灌、滴灌、地面灌溉几种灌溉方式下，苜蓿节水效果和增产性的对比性实验更是缺乏研究^[24]。

Albaji^[25]等的研究结果表明不同类型的灌溉技术的比较表明，喷灌比地面灌溉更有效地提高土地生产率。Montazar^[26]等研究应用水和喷灌均匀度对苜蓿生长和干草产的影响量，结果表明在喷灌系统中配水对苜蓿增长、干草产量、水分生产力有直接影响，增加喷灌喷头的灌水均匀性可以提高苜蓿水分生产力 2.41kgm^{-3} 。喷灌相比漫灌更有利于减少地表板结，尤其是在早春播种时，喷灌也有利于苜蓿早期的发芽。Idris^[27]研究不同喷灌灌水间隔天数对苜蓿的影响，结果表明间隔 8 天灌溉的苜蓿鲜重、干重和茎叶比都比间隔 12 天灌水的要高。作物在喷灌作用下，其根系一般会相对集中在表层。白文明

第六届中国苜蓿发展大会

[²⁸]研究了灌溉对干旱沙区紫花苜蓿生物学特性的影响，结果表明不同水分处理对紫花苜蓿植株高度、根系伸长生长和地上生物量形成的影响是不同的，较多的灌水有利于植株高度的生长，对于根系长度则相反，说明适当的干旱可以促进紫花苜蓿根系伸长生长，地上生物量则是灌水量居中的喷灌处理最高。宫飞^[29]等对小麦的研究表明，喷灌尽管每次灌水量较少，但其土壤贮水量的下降速率明显低于畦灌，喷灌使灌溉水大部分集中于0~60 cm土层，有利于冬小麦的水分利用，喷灌可以在不降低光合的前提下减小作物的蒸腾速率，在喷灌的各生育期间作物耗水量较畦灌减少，耗水强度也相对较小，喷灌可以在产量基本不减或稍有提高的情况下节约大量灌溉水，从而提高作物对灌溉水的利用效率，所以喷灌有明显改善灌溉水利用效率的作用。

喷灌作为一种高效节水灌溉，广泛地应用到苜蓿种植中可以有效地节约用水，缓解水资源短缺的压力。但是有研究表明，喷灌会因为蒸发和冠层截留造成水分浪费。Stambouli^[30]等的研究表明在喷灌过程中，有很大一部分水分在到达地面之前就会被蒸发，从而降低了水分的利用率。Lamm^[31]的研究表明，在高温生长季节时，喷灌会引起苜蓿叶片烧伤，并且阶段性的喷灌也可能会降低苜蓿产量。

2.3 地下滴灌对苜蓿生长的影响

地下滴灌技术(Subsurface Drip Irrigation, SDI)是指水通过地埋毛管上的灌水器缓慢流出，渗入附近土壤，再借助毛细管作用或重力作用将水分扩散到整个根层，供作物吸收利用的灌溉方式。1913年，美国的House首先进行地下滴灌的研究，由于条件受限，他得出的结论是该技术没有增加根区土壤含水量，而且应用成本太高，到1920年，美国加利福尼亚州的char1申请了一个多孔灌溉瓦罐的技术专利，这就是世界上最早的地下滴灌技术^[32]。Mitcnel等^[33]研究并总结出的地下滴灌系统设计、安装和运行管理指南，这项成果的推出意味着地下滴灌技术开始步入成熟阶段。

由于地下滴灌灌水过程中对土壤结构扰动较小，有利于保持作物根层疏松通透的环境条件，并可减少土面蒸发损失，故地下滴灌技术具有明显的节水效益。Ayars等^[34]研究总结了地下滴灌在西红柿、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。与地面灌溉技术相比，地下滴灌具有减少地表无效蒸发、改善作物根区土壤条件、方便田间管理作业、防止毛管老化等优点^[35]。对苜蓿进行喷灌时，由于水分蒸发可能加大，会降低灌溉利用效率，发展紫花苜蓿地下滴灌种植有着极其重要的意义^[37]。研究报道通过试验得出，应用了地下滴灌技术的苜蓿产草量要比常规灌溉增产近40%，增产效果显著^[36]。Hanson^[20]的研究表明滴灌的水量是沟灌的44%左右，然而沟灌发生地表径流会影响到沟灌水分的利用。

因紫花苜蓿是多年生豆科植物，一般在3年以上倒茬，其根系可深达2 m以上，采用地下滴管技术，一方面可大大降低滴管系统的投入成本，另一方面可减少因地面强烈蒸发提高苜蓿的水分利用率，因此地下滴管紫花苜蓿具有较高的推广价值。苜蓿根系生物量大、根系体积大和侧根发生多，具有较强的抗旱和丰产性能。Lamm^[31]的研究结果表明在干旱的苜种植地区，地下滴灌条件下一年生杂草的竞争力比地表灌溉和喷灌都有所降低，因此地下滴灌对于杂草防除也有一定效果。

地下滴灌对苜蓿生长的影响主要体现在滴灌带的流量大小、埋设深度和埋设间距等方面。吴文奇^[38]等用试验研究了不同地下滴灌带布设方式对紫花苜蓿的植株高度、茎粗、分枝数、根系生长、根系密度和产量等指标的影响，结果表明，滴管带埋设深度和间距不同对苜蓿各个生育期生长特性指标影

响不同，在苗期埋设深度为 10 cm 间距为 90 cm 的处理，有利于苜蓿生长，从分枝期起，埋设深度为 30 cm、间距为 90 cm 的处理优于其他处理。

2.4 调亏灌溉对苜蓿生长的影响

调亏灌溉（Regulated Deficit Irrigation）是由澳大利亚持续灌溉农业研究所于上世纪 70 年代中期提出的一种灌溉理论，是一种人为地让作物经受适度的缺水锻炼，从而影响光合同化产物向不同组织器官的分配，以调节作物的生长进程，达到节水高效、高产优质和提高水分利用效率为目的的非充分灌溉技术^[39]。调亏灌溉的研究表明，在作物生长的某一阶段进行调亏处理，可以不减少甚至可以增加产量^[40]。调亏灌溉多用在大田作物上，如大豆、土豆、玉米等，对苜蓿调亏灌溉的研究也有报道。苜蓿在不同的生育期所需要的水分是各不相同的，因此有效的灌水应该是满足苜蓿对水分最为敏感的时期。

通过调亏灌溉可以实现水分和作物生产力的优化。李雪峰等^[41]研究结果表明苜蓿分枝期是营养物质快速积累时期，应控制灌水，可减少苜蓿徒长倒伏，现蕾—初花期灌水有利于花芽分化，提高结实率，形成较高苜蓿种子产量，结荚期适当的补充水分，有利于苜蓿籽粒饱满。在现蕾—初花期灌水和结荚期灌水种子产量最高，达 773.41 kg/hm²，比对照增产 53.13%。Steiner^[42]等的研究结果表明，紫花苜蓿种子生产时，需要调节土壤水分，使之产生一定的水分胁迫状况，植株保持连续，缓慢的生长，促进小花结荚，避免营养徒长和严重的水分胁迫情况的发生，可以获得最高种子产量。董国峰^[43]的研究表明对苜蓿的轻度调亏灌溉可以提高灌区水资源的有效利用率，产生一定的节水效应，为进一步扩大牧草种植面积和其他作物灌溉面积乃至对灌区供水方案的调整都将起到积极的推动作用。此外，轻度调亏灌溉下苜蓿的粗蛋白含量和经济效益最优，这将有利于促进灌区农牧业效益的提高和增加农民收入、改善农民生活水平。

调亏灌溉理论认为根系对于水分利用率的提高起到决定作用。根冠功能平衡学说认为根和冠既相互依赖又相互竞争^[44]，作物根系在调亏灌溉条件下产生了一定的有益反应。研究认为前期（尤其是苗期）进行调亏灌溉可使作物得到干旱锻炼，增大根冠比和根活力，促进后期籽粒形成和降低根系衰老速度，有利于作物根系在时间和空间上的合理分布，促进根系的发展进而影响苜蓿的生长^[39]。根冠比加大有利于水分吸收和胁迫解除后的补偿生长，这是作物适应环境胁迫的表现。适期调亏，建立庞大根系，以及在经过干旱锻炼迫使根系向纵深发展，可提高苜蓿后期抗旱能力。因此，干旱条件下，建立合理的根冠比对水分利用和产量提高是很重要的。

调控亏水灌溉理论是将水作为一种信号因子调节作物自身的抗旱潜能提高水分利用率，在一定时期主动施加一定程度的有益的亏水度，使作物经历有益的亏水锻炼后，达到节水增产，改善农产品的质量。而对作物产量没有不利影响，从而达到省水、高产和提高作物水分利用效率的一种灌溉技术，调亏灌溉既有经济效益，又具生态效益，特别是在水资源短缺或用水成本较高的北方干旱地区和半干旱地区。研究缺水条件下苜蓿调亏灌溉机理与指标，对于科学合理的利用水资源，发展补充灌溉，抗御干旱，提高苜蓿产量，改善生态环境，具有重要的意义。调亏灌溉的效应与多种因素有关，包括气候因子、作物因素及土壤条件等，因此还需在不同地域，不同气候条件下进行研究。

植物对外界环境都有一定的适应性，并且能根据具体的胁迫条件去改变自己去适应环境的变化。

第六届中国苜蓿发展大会

因此，通过先进的现代分子育种手段，结合水分调亏灌溉，研究苜蓿对干旱的忍耐性，最终育成耐干旱的苜蓿品种，这是今后关于苜蓿的一个研究方向。

3 结语

近年来，畜牧业的快速发展，对饲料的种类、数量和质量提出了越来越高的要求，苜蓿具有“牧草之王”的美称，其蛋白质含量高达 20%以上，是畜禽最好的牧草之一。许多国家均以苜蓿作为农牧业的支柱作物，苜蓿已成为美国五大作物之一，与国外相比，我国苜蓿生产较为落后，多年来苜蓿的种植还停留在传统阶段，苜蓿作为饲草的巨大生产潜力未能充分发挥，因此今后要加大对苜蓿高产和优质的研究。随着科学技术不断地大力发展，传统的灌溉理论已经逐步被现代灌溉理论所取代。现代灌溉理论所强调的，一是要寻找作物需水的关键期(或称敏感期)，即这个时期缺水对作物产量影响最大；二是要根据作物需水的关键期制定优化灌溉制度，今后在灌溉研究上要强化田间节水灌溉配套农艺技术的研究与推广。

农业节水将是缓解我国水资源供需矛盾的主要途径。随着灌溉技术的不断发展和改进，喷灌、滴灌、微喷灌和地下滴灌等节水灌溉系统被广泛地应用到各种作物的种植中，也更好地为研究紫花苜蓿提供了条件，每一种灌溉系统都有它的优点和缺点，通过合理科学的设计，它们都能很好地达到节水的效果，能有效地缓解水资源紧缺的状况。而调亏灌溉技术作为一种新的节水灌溉技术是一种既具有经济效益又具有生态效益的灌溉方法，适用于水资源短缺或用水成本较高的地区，因此今后应在苜蓿的调亏灌溉方面多做些努力，并且能将不同灌溉方式与调亏灌溉结合起来研究，促进苜蓿高产节水的种植生产。

参考文献（略）