



KANGHAN JIESHUI
ZAOLIN JISHU JIQI YINGYONG

抗旱节水 造林技术及其应用

李吉跃 周平 何茜 姜枫 著



中国林业出版社



KANGHAN JIESHUI
ZAOLIN JISHU JIQI YINGYONG

抗旱节水 造林技术及其应用

李吉跃 周平 何茜 姜枫 著



中国林业出版社

水逐渐成为地球上的稀缺资源，对于中国来说情况更为突出。中国的干旱、半干旱地区，再加上年内降水严重不均易于受到旱害的地区，面积广大，问题突出，全面制约经济社会的发展，对于农业发展影响深远，对于林业的发展也有深刻的影响。

森林植被按自然规律应该是生长在湿润、半湿润地区的。但即使在中国的湿润、半湿润地区，由于季风气候及其年际变化的影响，也经常出现干旱问题，特别是春旱在中国北方及西南地区带有普遍性。在中国的干旱、半干旱地区，有人认为不适合森林生长，实则不然。在干旱半干旱地区，也有森林，也要造林育林，主要有3种情况：一是在干旱、半干旱地区的高山上，例如祁连山、天山、贺兰山等山区，由于温湿条件的垂直变化，在一定海拔范围的垂直带内是适合生长森林的，因而也要做更新培育等营林工作；二是在河流两侧的漫滩地上，如塔里木河和河西走廊诸河的河漫滩及尾间上也是生长着森林的（如胡杨、柽柳等），尤其是在利用这些河流水资源发展的灌溉农区（绿洲），为了保护农田、增加收益而发展的农田防护和果木经济林，就更需要大量的造林营林活动；三是在真正的干旱、半干旱的土地上，在基本上为干草原和荒漠的情况下，也是需要有一定的木本植被相间配置的。在这里既有极耐干旱的沙生木本植物，如梭梭、沙拐枣等，也有相当耐干旱，能在有限雨量条件下顺利生长的灌木树种，如柠条、沙柳、沙棘等。这些树种可在防止土地荒漠化及提高土地生产力方面发挥积极的作用。

因此，无论在我国的湿润、半湿润地区，还是干旱、半干旱地区，都有森林生长，也都需要进行造林营林的活动。在进行这些活动中，如何应对林木成活生长和水分的关系问题，主要是应对水分不足的问题，实为林学的一个大课题，这个问题由于其科学认识的复杂性以及实际处理的困难性，长期以来引起世界各国林学家们的关注。李吉跃教授从他的学术生涯最初年代起（二十多年前攻读硕士、博士研究生期间）就投身于林木与水分关系的研究，

并卓有成效。长期以来，他和他的学生们不断开拓这一研究领域，不但在林木水分生理机制方面，而且在采用技术措施实施抗旱节水造林方面也有所建树，逐步成为了我国在这个领域的一个研究中心。我不想在这里再重复叙述他们在这方面取得的研究成果，相信在书中会有全面的介绍。我主要想以昔日博士生导师的身份在此向以李吉跃教授为首的研究团队表示祝贺，并鼓励中青年学者再接再厉，静下心来，拒浮躁，深入实际，多做一些实实在在的研究工作，对已经出现在地平线上的中国现代林业发展做出更大的贡献！

中国工程院院士

沈国舫

2010年9月5日

水是地球上最丰富的资源，覆盖地球表面 71 % 的面积，然而，干旱缺水却是全世界面临的一个重要问题，干旱与半干旱地区遍布世界 60 多个国家，总面积约为 60 亿公顷，占全球陆地面积的 1/3。我国是世界上干旱面积大、水资源严重不足的国家之一，其干旱、半干旱区占全国土地面积的 52.5%，其中西北干旱区占到了我国总土地面积的 24.5%。干旱、半干旱地区的最大特点就是降水量少，蒸发强烈，土壤水分严重亏缺，严重的干旱缺水已成为干旱、半干旱地区森林植被恢复、生态环境建设最为主要的限制因子。在干旱缺水地区，如何充分利用有限的水资源，节约用水，合理用水和科学用水，并在此基础上选择合适的造林树种，从而解决林木存活及生长，提高造林成活率和保存率，恢复森林植被，扩大森林资源，改善生态环境，以有效的水分消耗换取较大的经济、生态和社会效益，这不仅是一个十分重要的理论问题与实践问题，更是一个发展战略中亟待解决的重大问题。

解决干旱条件下的苗木存活、林木生长及植被恢复问题，主要应从三个方面入手：一是选择抗旱节水的植物材料，即从植物本身的形态解剖结构、生长发育特性、生理生态及遗传特征上进行研究，选择抗旱性强、耗水少的抗旱节水植物材料；二是应用科学的抗旱节水造林技术，维持植物体内的水分平衡，即采取蓄水保墒的技术措施以及利用各种抗旱节水新材料，改善土壤水分状况，维持植物体内的水分平衡，满足植物生存与生长对水分的需求；三是采取合理的空间密度配置，即根据植物的耗水能力和土壤水分承载量，确定合理的空间密度配置，保证林木生存与生长的最佳水分及营养面积。其中，筛选抗旱节水植物材料是抗旱节水造林成功的基础，而维持植物体内水分平衡及合理的空间密度配置是抗旱节水造林成功的保障，在干旱缺水条件下只有满足了这样的基础和两个技术保障才能使抗旱节水造林真正取得成功。

第1章从全球及中国水资源状况、干旱、半干旱地区现状及抗旱节水造林技术研究等方面论述了国内外相关研究最新进展；第2章至第5章分别对植物生长调节剂、固体水、控水袋及痕量灌溉等4种抗旱节水造林新技术及其应用进行了详细论述，重点阐述了这些抗旱节水造林新技术的作用原理对苗木成活、生长及生理生化特性的作用效应，以及这些新技术在生产实践中的应用与推广。

本书内容是长期研究的积累，试验资料量较大，涉及的内容较广，难免有疏漏之处，敬请专家、学者和广大读者批评指正。

作者
2010年9月

序
前言

第 1 章 抗旱节水造林技术研究进展	(1)
1.1 全球水资源与水分亏缺	(1)
1.1.1 水资源定义与分类	(1)
1.1.2 全球水资源总量	(1)
1.1.3 全球水资源分布	(2)
1.2 中国水资源状况	(2)
1.2.1 中国水资源总量	(2)
1.2.2 中国水资源分布	(2)
1.3 干旱半干旱地区	(4)
1.3.1 干旱的概念	(4)
1.3.2 全球干旱地区的地理分布	(4)
1.3.3 全球干旱区特征	(5)
1.3.4 我国干旱和半干旱区分布	(5)
1.3.5 我国干旱和半干旱区的发展状况	(6)
1.4 抗旱节水造林技术研究	(7)
1.4.1 筛选抗旱节水植物材料	(8)
1.4.2 调节植物体内水分平衡	(13)
1.4.3 改善土壤水分状况	(19)
1.4.4 配置合理的空间密度	(40)
1.4.5 “3S”技术在抗旱造林的应用	(43)
1.4.6 与抗旱节水技术有关的模型	(44)
第 2 章 植物生长调节剂抗旱节水造林技术	(46)

2.1.1	对种子发芽率的影响	(48)
2.1.2	对种子发芽势的影响	(49)
2.1.3	对种子平均发芽时间的影响	(50)
2.2	植物生长调节剂对苗木生长及结实能力的作用效应	(50)
2.2.1	对苗木地径生长的影响	(50)
2.2.2	对苗木高生长的影响	(52)
2.2.3	对苗木叶片生长的影响	(54)
2.2.4	对苗木生物量的影响	(55)
2.2.5	对林木生长恢复的影响	(57)
2.2.6	对林木结实能力的影响	(59)
2.3	植物生长调节剂对苗木水分生理及蒸腾耗水的作用效应	(60)
2.3.1	对苗木水分生理的影响	(60)
2.3.2	对苗木耗水特性的影响	(62)
2.4	植物生长调节剂对苗木气体交换及光合特性的影响	(70)
2.4.1	对净光合速率的影响	(71)
2.4.2	对蒸腾速率的影响	(72)
2.4.3	对瞬时水分利用效率的影响	(73)
2.4.4	对叶片叶绿素含量的影响	(74)
2.5	植物生长调节剂对林木保护酶活性及抗逆性的影响	(76)
2.5.1	“施丰乐”对展叶期板栗叶片酶活性的影响	(76)
2.5.2	对质膜透性的影响	(80)
2.6	植物生长调节剂在抗旱节水造林中的应用	(81)
2.6.1	对造林成活率及保存率的影响	(81)
2.6.2	对苗木生长的影响	(82)
2.6.3	对气体交换能力的影响	(84)

第3章 固体水抗旱节水造林技术 (86)

3.1	固体水特性及释水机理	(87)
3.1.1	固体水释水规律	(90)
3.1.2	固体水时效性分析	(95)
3.1.3	影响固体水释水的因素	(96)
3.1.4	固体水对土壤的影响	(100)
3.2	固体水对苗木的作用效应	(103)
3.2.1	对苗木根系生长的影响	(103)
3.2.2	对苗木水分生理的影响	(105)

3.2.3	对苗木气体交换能力的影响	(111)
3.2.4	复水对苗木生长及光合生理的影响	(118)
3.2.5	固体水不同施用方式对苗木的影响	(121)
3.3	固体水在抗旱节水造林中的应用	(125)
3.3.1	田间条件下固体水释水与作用效应机理	(125)
3.3.2	固体水对造林成活率及保存率的影响	(129)
3.3.3	固体水对苗木生长的影响	(137)
3.3.4	固体水对苗木气体交换能力的影响	(139)
3.3.5	固体水抗旱节水造林的经济分析	(141)
第4章	控水袋抗旱节水造林技术	(147)
4.1	控水袋及其作用原理	(147)
4.2	控水袋释水特性及其机理	(148)
4.2.1	控水袋释水规律	(149)
4.2.2	影响控水袋释水速率及释水量的因素	(152)
4.3	控水袋对苗木的作用效应	(156)
4.3.1	控水袋对苗木生长的影响	(156)
4.3.2	控水袋对苗木水分生理及光合特性的影响	(158)
第5章	痕量灌溉抗旱节水造林技术	(167)
5.1	痕量灌溉的释水规律	(168)
5.1.1	释水连日变化	(168)
5.1.2	释水总量	(168)
5.2	痕量灌溉对苗木的作用效应	(169)
5.2.1	对苗木生长的影响	(169)
5.2.2	对苗木水分生理的影响	(173)
5.2.3	对苗木气体交换及光合特性的影响	(176)
参考文献		(181)
后记		(195)

抗旱节水造林技术研究进展

1.1 全球水资源与水分亏缺

1.1.1 水资源定义与分类

水资源是人类社会一切生产、生活的物质基础,没有水和水资源就没有人类。在《英国大百科全书》中,水资源被定义为“全部自然界任何形态的水,包括气态水、液态水和固态水”。联合国科教文组织和世界气象组织对水资源的定义为:作为资源的水应当是可供利用或可能被利用,具有足够的数量和质量,并适合对某地水需求而能长期供应的水源。在《中国大百科全书》大气科学、海洋科学、水文科学卷中,水资源被定义为“地球表层可供人类利用的水,包括水量(水质)、水域和水能资源,一般指每年可更新的水量资源;在水利卷中,水资源则被定义为“自然界各种形态(气态、固态或液态)的天然水,并将可供人类利用的水资源作为供评价的水资源”。

水资源一般分为两大类,地表水资源和地下水资源。陆地上的淡水资源只占地球水体总量的3.5%左右,其中近70%是固体冰川,分布在两极地区和中、低纬度地区的高山冰川。地表水资源包括冰川和冰盖,湖泊、内陆海和河流占1.78%,地下水占1.69%。人类主要利用的淡水资源约350亿 m^3 ,占全球总储水量的2.53%。

1.1.2 全球水资源总量

水是地球上最丰富的资源,覆盖地球表面71%的面积,但是,地球上的水有约96.5%是既不能供人饮用,也无法灌溉农田的海水。在余下的淡水中而在这少得可怜的淡水中,大部分存在于冰川冰盖及大气和土壤深层。人类在现有条件下可以利用的淡水资源仅占全球水资源总量的0.003%。虽然科学家们正在研究冰川的利用方法,但在目前技术条件下还无法大规模利用。除此之外,地下水的淡水储量也很大,但绝大部分是深层地下水,开采利用的也很少。人类目前比较容易利用的淡水资源,主要是河流水、淡水湖泊水以及浅层地下水。这些淡水储量只占全部淡水的0.3%,占全球总水量的十万分之七,即全球真正有效利用的淡水资源每年约

有 9000km^3 。

1.1.3 全球水资源分布

全球淡水资源不仅短缺而且地区分布极不平衡，这与降水资源的分布不均有密切的联系。图 1-1 显示了全球年平均降水分布情况，降水比较匮乏的地区主要有非洲北部、亚洲中部和北部、北美中部和北部、欧洲地中海部分、大洋洲西部等区域。从地域来看，拉丁美洲是水资源最为丰富的地区，水资源约占全球总量的三分之一，其次是亚洲，水资源约占全球总量的四分之一。欧洲水资源分布极为不均，欧洲大陆 18% 的人口居住在水资源匮乏地区(彩图 1)。按国家水资源分布显示，巴西、俄罗斯、加拿大、中国、美国、印度尼西亚、印度、哥伦比亚和刚果等 9 个国家的淡水资源占了世界淡水资源的 60%~65%，而约占世界人口总数 40% 的 80 个国家和地区严重缺水。

目前，全球 80 多个国家约 15 亿人口面临淡水不足，其中 26 个国家的 3 亿人口完全生活在缺水状态，据联合国儿童基金会和世界卫生组织 2009 年 7 月公布的一份报告，全球 8.84 亿人无法获得安全的饮用水，其中亚洲国家约占一半，撒哈拉以南非洲国家约占 40%。一个国家人均水量在 1000m^3 以下的就是严重缺水国。全世界共有 15 个严重缺水国。中国人均水量不足，是缺水国之一。我国的水资源总量每年 2.8 万亿 m^3 ，其中，可用水储量只有 1.1 亿 m^3 。年人均占有水量 2333m^3 ，仅为世界人均占有量的 $1/4$ ，居世界第 110 位。中国年均降水总量约为 6 万亿 m^3 。全国 688 个城市中约有 400 个供水不足。我国到 2030 年缺水量将达到 400 亿~500 亿 m^3 。《世界水资源开发报告》指出，人类对水的需求正以每年 640 亿 m^3 的速度增长，预计到 2025 年，全世界将有 30 亿人口缺水，涉及的国家 and 地区达 40 多个，到 2030 年，全球将有 47% 的人口居住在用水高度紧张的地区。21 世纪水资源正在变成一种宝贵的稀缺资源，水资源问题已不仅仅是资源问题，更成为关系到国家经济、社会可持续发展和长治久安的重大战略问题。

1.2 中国水资源状况

1.2.1 中国水资源总量

中国水资源总量为 2.8 万亿 m^3 ，占全球水资源的 6%，居世界第 6 位。其中地表水 2.7 万亿 m^3 ，地下水 0.83 万亿 m^3 ，由于地表水与地下水相互转换、互为补给，扣除两者重复计算量 0.73 万亿 m^3 ，与河川径流不重复的地下水资源量约为 0.1 万亿 m^3 。

1.2.2 中国水资源分布

我国水资源地域分布不均，南多北少。我国年平均降水量为 630mm，较全球陆

地值 800mm 偏低约 21%，比亚洲平均值 740mm 偏低 15%，因此中国是水资源较为贫乏的国家。我国的降水量自东南沿海向西北内陆递减，等雨量线呈东北—西南走向，张家口、大通、兰州、玉树至拉萨附近。此线的东南依次为湿润区，年降水量为 400~2000mm，等值线西北一侧为干旱、半干旱区，直至极端干旱的沙漠。长江流域及其以南地区国土面积只占全国的 36.5%，其水资源量占全国的 81%，属于人多、地少、经济发达、水资源相对丰富的地区；黄淮流域及其以北地区的国土面积占全国的 63.5%，其水资源量仅占全国水资源总量的 19%，属于人多、地多、经济相对发达、水资源短缺的地区。据统计，目前我国有 400 多个城市缺水，110 个城市严重缺水。

虽然西部 12 个省市水资源和水能资源十分丰富，但是，无论是西北还是西南，缺水都是制约其发展的最关键因素。西部水资源总量 13342 亿 m^3 ，占全国总量(2.8 万亿 m^3)的 47.7%，但分布极不均匀，南多北少，其中西南地区水资源总量 11316 亿 m^3 ，约占西部总量的 84.8%，占全国总量的 40.4%，单位面积产水量(51.2 万 m^3/km^2)大大高于全国(29.2 万 m^3/km^2)平均水平；西北地区水资源总量 2025 亿 m^3 ，约占西部总量的 15.2%，占全国总量的 7.2%，单位面积产水量(5.9 万 m^3/km^2)不到全国平均水平的 1/5，为全国最小，是水少地多的最不利组合的地区。

西北地区因地处欧亚大陆腹地，远离海洋，降雨量少，蒸发强烈，多风沙，是干旱、半干旱地带。该地区气候干旱少雨，地多水少，年平均降雨量 230mm，其中 40% 地区的年平均降水量在 100mm 以下，而蒸发量却高达 1000~2600mm，蒸发消耗量大，是世界上干旱缺水最严重的地区之一。其特点是不仅降雨时空分布不均，而且水资源量在地域分布上也很不均匀。例如，新疆的降水量(3340.7 亿 m^3)和水资源总量(978.9 亿 m^3)最大，分别是宁夏的 20 倍(162.1 亿 m^3)和 87 倍(11.2 亿 m^3)。水资源严重匮乏已成为西北地区生存、生态环境及社会经济发展的首要制约因素。

水资源补给年内与年际变化大，旱涝灾害频繁。受季风影响，我国降水年内分配极不均匀。图 1-1 显示了我国部分城市不同季节的降水分配情况，基本上夏秋多，冬春少，呈现明显的雨热同期。大部分地区年内连续四个月降水量占全年的 70% 左右(南方 60%，北方 80% 左右)，中国水资源约 2/3 是洪水径流量，年内分布集中，降雨量主要集中在汛期(7~8 月)。降水和径流的年际变化大，连续丰水或连续枯水年较为常见，是造成水旱灾害频繁、开发利用难度大和水资源供需矛盾十分尖锐的主要原因。

人均和单位面积(以亩为单位)均水资源分布不均。按照国际公认的标准，人均水资源低于 3000 m^3 为轻度缺水；人均水资源低于 2000 m^3 为中度缺水；人均水资源低于 1000 m^3 为重度缺水；人均水资源低于 500 m^3 为极度缺水。目前长江流域及其以南地区，人均水资源量 3490 m^3 ，亩均水资源 4300 m^3 ，而以北地区人均水资源量仅 770 m^3 ，亩均 471 m^3 ，黄淮流域水资源短缺则尤为突出，宁夏、河北、山东、河南、山西、江苏等 6 个省(区)人均水资源量低于 500 m^3 。中国目前有 16 个省(区、市)

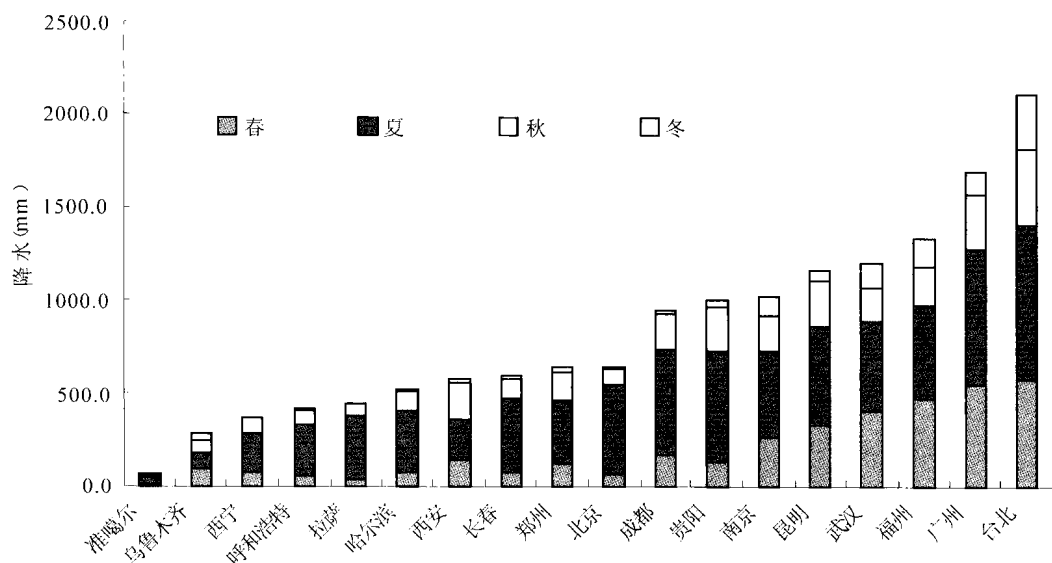


图 1-1 中国部分城市年降水量四季分配

人均水资源量(不包括过境水)低于严重缺水线。

1.3 干旱半干旱地区

1.3.1 干旱的概念

干旱指降水异常偏少,造成空气过分干燥,土壤水分严重亏缺,地表径流和地下水量大幅度减少的现象。降水不足是干旱问题的症结所在,但是由于一个地方是否干旱或者发生旱情还取决于降水量和蒸发量以及水源使用量的关系,所以干旱地区通常指那些极端干旱、干旱和半干旱地区,但是一些干燥的半湿润地区由于蒸发大于降水或者用水不足,也可以成为干旱地区。通常将年降水量在 200mm 以下的地区称为干旱区,年降水量 200~400mm 的地区称为半干旱区。

干旱和旱灾是两个不同的科学概念。干旱一般是长期的现象,而旱灾却不同,它属于偶发性的自然灾害,甚至在通常水量丰富的地区也会因一时的气候异常而导致旱灾,某些半湿润地区甚至湿润地区发生旱灾往往就是如此。例如,2010 年春季发生在西南三省(云南、四川、贵州)的特大旱灾。

1.3.2 全球干旱地区的地理分布

干旱是一个世界性的问题,造成干旱的原因主要是大气环流、区域地理位置及区域森林分布。资料显示,干旱与半干旱地区遍布世界 60 多个国家,总面积约为 60 亿 hm^2 , 占全球陆地总面积的 35%, 主要分布在南北纬 $15^\circ\sim 35^\circ$ 的副热带和北纬 $35^\circ\sim 50^\circ$ 的温带、暖温带大陆内部。其中 9 亿多 hm^2 为极端干旱的沙漠地区,近 52

亿 hm^2 为干旱、半干旱和某些干燥的半湿润地区，这些地区都曾是人类聚居区。

从地域分布来看，世界的干旱地区主要分布在亚洲大部分地区、澳大利亚大部、非洲大部、北美西部和南美西部，各区域干旱面积比例分布为，其中澳大利亚 75%，非洲 64%，亚洲 46%，欧洲、北美洲和南美洲约 1/3。

1.3.3 全球干旱区特征

干旱区特征主要表现在以下几个方面：①土地干旱、降水极少、蒸发旺盛。全年的降水常集中在一个短促的时间内。②植被稀疏、旱生特征发育。半干旱区植被主要为干草原，干旱区植被主要为荒漠草原和荒漠。干旱区生长的植物一般具有矮小、少叶或无叶、带绒毛或带角质、耐旱、耐盐、生长期短、根系发达等特征。组成群落的植物种类非常贫乏，但是植物生长型多样，有旱生小半灌木、半灌木、灌木和半乔木等。③内陆水系。在雨量稀少、蒸发旺盛而降水又易于渗漏的条件下，干旱区几乎没有当地地面径流所形成的河流，绝大部分干旱区属于无水外泄的内陆流域，多数河流流向盆地中心或低地，常因强烈蒸发而中途干枯。④风沙强盛。风是干旱地区最活跃的营力，干旱区风沙频繁，风成地貌广泛分布。⑤人口密度小，畜牧业发达。干旱区的人口主要分布在水分条件较好的绿洲，农业活动也主要在绿洲进行。其他广大地区人口稀少，许多地方无人定居。整个干旱区以畜牧业为主。1977 年，联合国荒漠化会议曾提出干旱区人口临界指标为每平方千米 7 人，半干旱区人口临界指标为每平方千米 20 人。

1.3.4 我国干旱和半干旱区分布

我国干湿地区可分为湿润、半湿润、半干旱和干旱地区(表 1-1)。我国是世界上干旱面积大、水资源严重不足的国家之一，其干旱区和半干旱区占全国土地面积的 52.5%，其中西北干旱区(指 35°N 以北，106°E 以西的内陆干旱区，包括新疆全境、甘肃河西走廊及内蒙古贺兰山以西的地区)占到了我国总土地面积的 24.5% (彩图 2)。

表 1-1 我国干湿地区分布

干湿地区	干湿状况	分布地区	植被
湿润地区	年降水量 > 800mm 降水量 > 蒸发量	秦岭—淮河以南地区、东北三省东部、黑龙江西北、内蒙古东北部和青藏高原东南边缘	森林
半湿润地区	年降水量 400 ~ 800mm 降水量 > 蒸发量	东北平原、华北平原、黄土高原南部和青藏高原东南部	森林草原
半干旱地区	年降水量 200 ~ 400mm 降水量 < 蒸发量	内蒙古高原、黄土高原和青藏高原大部分	草原
干旱地区	年降水量 < 200mm 降水量 < 蒸发量	新疆、内蒙古高原西部和青藏高原西北部	多荒漠

半干旱区分布东起东北平原西部,西到内蒙古中部和宁夏的盐池一带。半干旱区以西则为广阔的干旱区,其中贺兰山以东地区属于荒漠草原地带;贺兰山以西的广大地区,包括阿拉善地区、河西走廊、准噶尔盆地等,属于干旱荒漠地带,而在新疆东部和塔里木盆地中部和东部地区,年雨量在 50mm 以下,为极端干旱荒漠地带。青藏高原干旱地区包括柴达木盆地、羌塘高原、昆仑山—阿尔金山和喀喇昆仑山。青藏高原半干旱区包括柴达木盆地与羌塘寒漠以东除东南角半湿润地区以外的广大地区。

如果按照干燥度指数 D 为 0.03、0.2、0.5 和 1.0 把中国分为极干旱、干旱、半干旱、半湿润和湿润 5 个干湿区,则湿润状况显著增加的地区主要为我国的西南部、新疆西北部,干旱化显著的地区主要在青海的东部、甘肃的南部和四川北部;干湿状况变化从中国的东部向西部逐渐增大,中国的西南地区干湿状况最为稳定;20 世纪 80 年代初全国平均干湿状况发生变化,由于干旱趋向湿润,多年来半湿润、湿润地区干湿状况年际变化大,半干旱区和湿润区增多,半湿润区减少。整个西北地区降水的变率比蒸发的变率大,新疆南部、青海大部、甘肃河西走廊中部和甘南伏期干旱严重,干旱频率超过了 80%,中度干旱出现最多。

50 多年来中国北方地区,在东经 100° 以东地区,半干旱区和半湿润区的分界线不断波动向东推进,20 世纪 90 年代比 60 年代向东和向南扩展,半干旱区面积扩大,半湿润区面积缩小,气候趋向干旱化;东经 100° 以西地区,极端干旱区面积在缩小,湿润指数有增大趋势。而在过去 50 年里中国干湿气候界线波动显著,区域差异大,呈现出整体移动和东西、南北相异波动的特征。

如果按照干燥度指数,并据其将我国划分为干旱区($D < 0.20$),半干旱区($0.20 < D < 0.50$),湿润区($D > 0.50$),则可以得出,近 50 年我国干旱半干旱区降水量与蒸发量均在减小,但降水量的减小速度大于蒸发量,气候在变干,我国气候的干湿变化主要取决于降水量的变化。并且进入 20 世纪 90 年代,西南区和西北东部气候有变干迹象,华北区西部气候的干旱程度有所增加,华北区东部有所减弱,东北区气候进一步变湿的趋势。如果采用降水指数和干湿分类函数作为干湿区域的划分标准,将中国划分成三个干湿等级的区域:干旱区、半干旱区和湿润区。所得到的结论是:无论以哪种指数作为衡量干湿的标准,我国的干旱总面积,即干旱区面积和半干旱区面积之和,均为扩大趋势,湿润面积则为减小趋势,这种情况在近 10 年表现得尤为显著。

1.3.5 我国干旱和半干旱区的发展状况

近 50 年来,西北干旱区随水土资源开发利用规模的不断扩展,使区域内工农业与经济得以稳定持续发展,但同时也引起一系列生态环境变化:①大多数河流下游水量锐减,甚至断流,河道缩短,终端湖泊萎缩或干涸,水质咸化和污染趋势加剧。②土壤沙漠化和盐碱化,沙漠化土地面积达 $674.93 \times 10^4 \text{ hm}^2$,盐碱化耕地面积逾 $135.56 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。③植被退化,生物多样性减少,与 20 世纪 50 年代初相比,

天然林面积减少 49%~58%，草地面积减少 16%~92%。④沙尘暴灾害发生频数增加，灾害程度加剧。

我国的干旱半干旱地区 80% 都分布在广大的西部地区，其余大部分地区也经常遭受周期性和难以预期的干旱，如半湿润地区的季节性干旱、西南地区的干旱干热河谷等。因此，如何在水资源严重亏缺的地区，解决造林成活率、保存率，恢复森林植被，改善生态环境，已成为生态环境建设必须解决的重大课题。

1.4 抗旱节水造林技术研究

严重的干旱缺水已成为干旱半干旱地区森林植被恢复、生态环境建设最为主要的限制因子(朱俊凤, 2000)。如何在干旱缺水地区，充分利用有限的水资源，选择合适的树种，解决林木存活及生长、提高造林成活率和保存率、恢复森林植被、扩大森林资源、改善生态环境，已成为一个亟待解决的重大问题。

国外从 20 世纪 40 年代起开始进行干旱半干旱地区造林，此后从树种选择、立地气候、土壤和水文状况对造林的影响、苗木处理、种植技术等方面进行了初步研究，直到 60 年代末 70 年代初 Goor. A. R & Bankney. C. W 1968 年才对美国科拉来多州等干旱地区造林进行了系统的总结，撰写了 *Forest Tree Plantings in Arid and Semiarid Zones* 一书。1970 年，Kaul R. N. 系统叙述了西班牙、意大利、美国、非洲、中亚等地区在这期间所做的有关干旱地区造林的工作。1986 年，Peter Felker 收集了 20 世纪 70 年代以来干旱地区造林工作的部分研究成果和论文，内容包括土壤肥力、土壤水分、抗旱性种源筛选及早地林分生产研究等，研究工作逐步深入并取得了很大进展。

我国的干旱地区造林技术研究也可以追溯到 20 世纪 40 年代中叶，起初主要是选用侧柏、油松、白皮松等进行抗旱试验；此后干旱地区造林试验得到了广泛的开展，王九龄(1979)详细总结了这方面的研究工作。从 20 世纪 80 年代开始，我国在适地适树、林分蒸腾量的测定、土壤蓄水保墒措施等方面进行了大量研究(王九龄, 1991)，并在树木水分关系及耐旱机理(李吉跃, 1988、1989、1990、1991a-f；李吉跃, 张建国, 1993；张建国, 李吉跃, 姜金璞, 1994a、1994b；李吉跃, 张建国, 姜金璞, 1994；张建国, 李吉跃, 沈国舫, 2000)、集水蓄水保墒技术(李永芳, 袁德榜等, 1996；王百田等, 1997；王百田, 1993；王斌瑞, 罗彩霞, 王克勤, 1997；王斌瑞, 王百田, 张府娥, 1997；王克勤, 孟菁玲, 1996；王克勤, 王斌瑞, 1998；彭祚, 宋廷茂, 张鸿雁, 1996)及节水灌溉技术(李远华等, 1999)研究方面取得了较大的进展。同时在植物抗旱生理性状的遗传及分子标记方面进行了初步研究(景蕊莲, 1999)，利用生物工程技术在破译抗旱、抗逆基因组成和结构基础上，进行编码合成和培养多抗基因植物，培育出抗旱性强的植物品种方面有了初步研究(上官周平, 邵明安, 1999)。

通过长期的抗旱节水造林实践及研究，我们认为解决干旱条件下的苗木存活、

林木生长及植被恢复问题,主要应从三个方面入手:一是选择抗旱节水的植物材料,即从植物的形态解剖结构、生长发育特性、生理生态及遗传特征上进行研究,选择抗旱性强、耗水少的优良抗旱节水植物材料;二是维持植物体内的水分平衡,即采取蓄水保墒的技术措施以及利用各种抗旱节水新材料和新技术,改善土壤水分状况,维持植物体内的水分平衡,满足植物生存与生长对水分的需求;三是采取合理的空间密度配置,即根据土壤有效水含量、土壤水分承载量及植物需水特征与耗水能力,采用合理的乔灌木比例、适宜的空间密度配置、适度的生物量及覆盖率,保证植物生存与生长的最适水分及营养面积,并利用各种数学模型、“3S”技术及计算机技术进行干旱地区水分状况和墒情的监测与管理。其中,筛选抗旱节水植物材料是抗旱节水造林成功的基础,而维持植物体内水分平衡及合理的空间密度配置是抗旱节水造林成功的保障,在干旱缺水条件下只有满足了这样的基础和二个技术保障才能使抗旱节水造林真正取得成功。

1.4.1 筛选抗旱节水植物材料

1.4.1.1 植物抗旱节水的概念

植物的节水性与抗旱性是密不可分又是相互区别的,正如植物水分利用效率(WUE)与植物的抗旱性有关,但两者不是同一概念,抗旱植物的水分利用效率不一定高,如景天酸代谢植物是抗旱植物,水分利用效率高,但深根耗水型抗旱植物的水分利用效率不高,水分利用效率受品种、栽培技术和环境条件等许多因素的影响。节水性主要是指植物蒸腾耗水少、水分利用效率高、保持水分能力强,以最小的水分消耗获取最大的产量;抗旱性主要是指对植物干旱胁迫的适应能力和解除干旱后的恢复能力,在干旱生境下利用有限的水量保持光合生产力,获取最高生长量,从而维持生存的能力。

1.4.1.2 植物抗旱节水性的综合评价

树木的抗旱节水性是一种复杂综合的性状,受多种因素的影响和制约,如何正确、有效地对树木节水抗旱性进行评价一直是众多学者关注的问题。单一的抗旱性评价指标,难以反映出植物对于干旱适应的综合能力,因此只有应用多种参数进行综合评价才能较好地反映植物的抗旱特性。

(1) 评价指标

树木的抗旱节水性是一种复杂综合的性状,受多种因素的影响和制约。早在20世纪80年代末和90年代初,李吉跃(1988, 1989, 1990, 1991f)就依据树木耐旱性是一种从形态解剖、水分生理生态特征,及生理生化反应到组织细胞、光合器官乃至原生质结构特征的复合性状的特点,通过测定1~3年生苗木的叶解剖构造、叶子的运动和脱落,叶水势及水分饱和亏缺、叶肉质化程度和比叶面积、叶失水速率、水分释放曲线、PV曲线的水分参数、渗透调节和细胞弹性模量,蒸腾作用和