

北京林业大学优秀博士论文基金资助丛书

国外优良草本植物 在黄土高原引种的适应性与 生态经济价值

胡建忠 著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

国外优良草本植物在黄土高原引种的适应性与生态经济价值/胡建忠著. —北京: 中国环境科学出版社, 2004.7
(北京林业大学优秀博士论文基金资助丛书)
ISBN 7-80163-845-X

I. 国… II. 胡… III. 黄土高原—草本植物—引种—研究 IV. S812.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 038464 号

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.cn>
电子信箱: bjzhouyu@126.com
电话(传真): 010—67112734

印 刷
经 销 各地新华书店
版 次 2004 年 9 月第一版 2004 年 9 月第一次印刷
印 数 1—3000
开 本 850×1168 1/32
印 张 10.5 彩 页 1
字 数 274 千字
定 价 20.00 元

【版权所有, 请勿翻印、转载, 违者必究】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

序

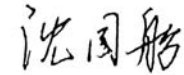
科学技术水平是知识经济时代评价一个国家国力的重要标准。科技水平高则国力强盛，无论在政治、经济、文化、信息、军事诸方面均会占据优势；而科技水平低则国力弱，就赶不上时代的步伐，就会在竞争日趋激烈的国际大舞台上处于劣势。江泽民同志在庆祝北京大学建校 100 周年大会上也强调指出：“当今世界，科学技术突飞猛进，知识经济已见端倪，国力竞争日益激烈。”因此，提高科学技术水平，提高科技创新能力已为世界各国寻求高速发展时所共识。我国将“科教兴国”作为国策也表明了政府对提高科技水平的决心。博士研究生朝气蓬勃，正处于创新思维能力最为活跃的黄金年龄，同时也是我国许多重要科研项目中的中坚力量，他们科研成果水平的高低在一定程度上影响着一个高校、一个科研院所乃至我国科研的整体水平。国务院学位委员会每年一度的“全国百篇优秀博士学位论文”评选工作是对我国博士研究生科研水平的集体检阅，已被看做是博士研究生的最高荣誉，对激励博士勇攀科技高峰起到了重要的促进作用。北京林业大学不仅积极参加“全国百篇优秀博士学位论文”的推荐工作，还依此为契机每年评选出三篇校级优秀博士学位论文并设立专项基金全额资助论文以丛书形式出版，这是一项非常有意义的工作，对推动学校科研水平的提高将发挥重要作用。

从人才培养的角度来看，如何提高博士研究生的创新思维能力和综合素质，高质量地向社会输送人才备受世人关注。提高培养质量的措施很多，但在培养中引入激励机制，评选优秀博士学位论文并资助出版，不失为一种好方法。博士生和导师可据此证明自

己的学术能力，确立自己的学术地位；也可激励新入学的研究生尽早树立目标，从而在培养的全过程严格要求自己，提高自身的素质。

因学科的特殊性，要想出色完成林业大学的博士学位论文有许多其他学科所不会遇到的困难，如研究周期长，野外条件难于严格控制，工作条件艰苦等等。非常欣慰的是北京林业大学的博士生们不仅克服困难完成了学业，而且已经有人中选“全国百篇优秀博士学位论文”。而该丛书资助出版的“校级优秀博士学位论文”所涉及的研究领域、研究成果的水平也属博士学位论文中的佼佼者，令我欣喜。对这些博士生所取得的成果我表示祝贺，同时也希望他们以及今后的同学们再接再厉，取得更好的成绩报效祖国。

中国工程院副院长、院士



2002年8月10日

前 言

积极引进、驯化利用外来植物是加速农林牧业生产和国土整治的重要途径，它的作用明显，收效快，增产潜力大，能在短期内以较小的投入获得较大的成效。植物引种既可以丰富引进地区的植物资源，提供价值高的可开发利用的优良植物，又可以充分发挥引进地区的自然优势，增加多种产品供应，充分发挥植物的多种效益。尤其在自然条件恶劣的地区，引进优良适生植物，使原来无法绿化的地区，能够有适宜的植物供栽培选用，使栽培植物单一的地区有较为丰富的植物，这是一项重大的技术突破，其效益是难以用数字来表达的！

中国黄土高原地区幅员辽阔，具备多种气候带和气候类型，加之立地条件类型复杂多样，形成了多种多样的生态气候区，为引进植物的生长与繁衍提供了优良条件与场所，增加了成功的可能性。但在生产实践中，却普遍存在着这样两个方面的突出问题，一是在生态环境建设中，重视树体高大的木本植物，而对植物群落重要组成部分的草本植物重视不够；二是在草本植物栽培工作中，过分强调经济效益，忽视了草本植物的生态效益。因此，引进生态、经济、社会“三大效益”俱佳的优良草本植物，进行引种栽培，开展适应性与生态经济价值等系统研究，至关重要。

在黄土高原地区生态环境建设中，草本植物越来越显示出其重要性。它不仅是林草间作的主要成分，甚至在有些地区、有些立地条件下扮演着主栽品种的角色，并且逐步成为许多地区群众退耕还林还草的主要种植材料。因为，草本植物具有实施周期短、投资少、见效快的优势。目前，在黄土高原地区能够应用于生态

环境建设的、适销对路的草本植物不多，真正的当家品种也就是紫花苜蓿等屈指可数的寥寥数种植物。按照“气候相似论”的观点，从植物资源与研究大国—美国，选择与黄土高原生态条件较为接近的中西部地区，引进优良草本植物，按照“初选试验—区域性试验—生产性试验”的程序进行引种试验，对引进植物的物候、抗逆性、生长发育规律、经济价值、生态价值以及栽培技术等系统进行研究，逐步筛选出适应黄土高原地区的优良草本植物，为区内正在实施的退耕还林还草工程、三北防护林体系建设工程等生态环境建设服务。这是一条多快好省的科学引种途径，也是迅速扩大植物资源的重要手段，能达到少走弯路、多办实事的目的。开展草本植物引种工作，在黄土高原地区具有广阔的发展前景。

草本植物引种工作是生态环境建设的重要组成部分，是整个过程中的一个十分重要的环节。草本植物引进之后围绕引种的栽培及其他试验研究工作，则起到非常重要的衔接作用，她使国外优良草本植物资源能够与黄土高原生态、经济环境得以“扬弃式”结合，物竞天择，适者生存。这个结合过程，是检验国外引进草本植物能否引种成功的试金石，这中间有许多工作要做。比如，如何解决草本植物引种后的适应性问题；如何应用适宜技术进行集约栽培问题；如何充分开发引进植物的生态经济价值问题等，研究内容十分丰富。本专著正是在这些方面开展的有关探讨。

这本专著是在作者博士论文的基础上稍加修改而成。感谢导师、北京林业大学校长朱金兆教授对我的悉心教导和大力关怀。感谢中国林科院潘志刚研究员、北京林业大学沈熙环教授、陕西省农林科学院于精忠研究员等老师，他们在我论文所依托的项目立项及完成过程中，出谋划策，精心指导。感谢4个主要试验区的项目完成人员，他们是水利部黄委会西峰水保站闫晓玲工程师、天水水保站雷启祥高级工程师、绥德水保站党维勤高级工程师、山西省水保所王子科高级工程师等，他们伴随我4年时间，完成

了许多外业试验研究工作。感谢上面未曾列及的其他各位老师、同事、朋友多年来对我的厚爱，限于篇幅，不能一一道谢。

“一个人是渺小的，当回忆过去所刻画的轨迹，只是在各种社会力和自然力的作用下完成的。在回忆中，也许感动惊奇，而在当时，却是奋斗或挣扎。”（引自肖纪美院士《梳理人、事、物的纠纷—问题分析方法》一书的后语）本专著能够成书出版也正是如此。在写作过程中，作者查阅了大量的国内外文献资料，计有专著数十部，文献数百篇，她们汇集了前辈们在植物引种栽培试验研究方面的心血，反映了不同阶段的植物引种栽培研究的坎坷历程。在写作中，作者参阅、选用了他们许多珍贵的资料，书中融进了国内外同行在此方面研究的许多精华。可以说，作者正是在向他们学习过程当中，完成了这部书稿的写作。因此，这本书中浸透了有关人员多年来共同努力工作的心血。在此书脱稿之日，向辛勤战斗在植物引种栽培、生态环境建设的各位同行们，表示由衷的谢意。

本书能够正式出版，也要感谢北京林业大学研究生院优秀博士论文基金资助项目，他们为莘莘学子提供了一个充分展示才华的舞台。还要再次特别感谢师长的谆谆教诲，同事的协商争论，学生的不耻下问，更有家人的风雨同舟.....。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中疏漏、不妥、甚至错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。来信请发至

E-mail: jianzhonghu@sohu.com。

胡建忠

2004年1月8日

目 录

1 引言	1
1.1 植物引种的目的、意义	1
1.2 植物引种的主要理论	3
1.3 植物引种的历史回顾	11
1.4 本论文所要解决的主要问题	15
2 材料与方法	17
2.1 技术路线	17
2.2 试验材料	17
2.3 试验布设	30
2.4 研究方法	62
3 生物学特性	112
3.1 多年生香豌豆	112
3.2 美丽鹌鹑豆	114
3.3 犹他甜苕子	115
3.4 牧场草	117
3.5 黄兰沙梗草	117
3.6 康巴早熟禾	120
4 适应性评判	122
4.1 物候表现	122
4.2 抗逆性能	141

4.3 适生条件与范围	153
5 生长发育规律	194
5.1 高生长	194
5.2 生物产量	215
5.3 草层结构	225
5.4 根系分布	235
6 生态经济价值	248
6.1 经济价值	248
6.2 生态价值	268
7 栽培技术与模式	283
7.1 栽培技术	283
7.2 优化模式	293
8 结论与讨论	298
8.1 大部分引进草本植物在黄土高原地区的 适应性较好	298
8.2 引进草本植物在黄土高原地区的 生长发育普遍良好	303
8.3 引进草本植物具有多方面的生态经济价值	305
8.4 引进草本植物的栽培及建模技术均简单易行	308
参考文献	311

1 引言

植被建设 (vegetation construction) 是生态工程的重要组成部分, 是实现环境与发展相统一的关键和纽带, 在实现国家可持续发展战略中具有不可替代的作用。通过植物引种 (plant introduction) 手段, 丰富当地植物种质资源, 是一种多快好省的途径 (吴中伦, 1983)。外来植物 (exotic plant) 是植物遗传资源 (genetic resources) 的重要组成部分, 具有一些本地植物难以替代的优势。外来植物资源可持续经营的核心问题是植物或种源的正确选择, 为此, 保存和丰富必要的基因资源 (gene resources) 就显得极为重要。外来植物具有一定程度的环境风险, 但并没有人们想像的那样大。对当地生物多样性的影响有利有弊, 关键是如何科学运作, 包括确定合适的地域范围, 与当地植物的合理空间布局, 以及如何使之在当地生态系统中形成密不可分的生物链, 和平相处, 造福一方 (潘志刚等, 1994)。

1.1 植物引种的目的、意义

我国目前正在集中力量实施天然林资源保护工程、“三北”和长江中下游地区等重点防护林体系建设工程、退耕还林还草工程、环北京地区防沙治沙工程、野生动植物保护及自然保护区建设工程、以速生丰产用材林为主的林业产业基地建设工程等六大生态重点工程 (张志达, 1995; 蒙忠祺, 2000; 孟宪政, 2000)。实施这六大生态工程, 不仅是对我国林业建设工程的系统整合, 也是对林业生产力的一次战略性调整。六大工程建成后, 我国生

态面貌将有根本性改观, 到 2010 年时, 将初步建立起乔灌草搭配、点线面协调、带网片结合, 具有多种功能与用途的森林生态网络和林业两大体系框架, 重点地区的生态环境将得到明显改善, 与国民经济发展和人民生活改善要求相适应的木材及林产品生产能力将基本形成 (彭珂珊, 2000; 李自珍, 1997; 蒋丽娟, 2000)。

但从我国生态环境工程建设实施的主要地区来看, 植物资源还是极为贫乏, 具有生态、经济、社会效益的植物资源相当缺乏。适度引进国外优良植物种质资源, 不断地充实和加强植物资源基因库, 丰富植物品种的生态多样性 (ecological diversity)、遗传多样性 (genetics diversity) 和种质优异性 (species superiority) 是一项十分重要的工作 (南京林产工业学院, 1980; 中国林学会, 1989)。引进优良植物资源, 加强繁育开发已成为我国生态环境工程建设以及经济开发的当务之急 (盛桂诚, 1979; 张宇和, 1982; 董保华, 1989; 王名金, 1990; 谢孝福, 1994)。

引进外来植物, 为生态环境建设提供优良植物, 可以治理我国严重的生态环境问题。我国许多地区气候干燥, 地形破碎, 土质疏松, 林草品种较少, 种质退化相当严重。从当地生态、经济、社会等多方面综合考虑, 引进国外优良植物, 驯化后推广种植, 可解决该区栽培植物单一、“四料” (燃料、饲料、肥料、木料) 短缺等实际问题, 对治理水土流失、改善生态环境等都具有十分重要的意义 (王豁然等, 1995)。

引进外来植物, 为生产建设提供优良植物, 可以很好地促进我国生态环境脆弱地区各业生产的蓬勃发展。我国西部地区特别是黄土高原地区林草种植结构较为单一, 建立复合式立体林草种植模式, 对提高土地利用效率, 发展林牧业, 显得十分重要。该区土壤瘠薄, 粮食产量低下, 充分利用豆科植物固氮能力强的特性, 进行草田轮作 (rotation of grass and crops)、间作 (intercropping) 及混种 (mixed seeding) 等, 增加土壤肥力, 提高作物产量。

引进外来植物, 可以适度丰富我国的植物基因资源库。基因

资源是当今社会一类十分重要的资源。拥有了种类繁多的基因，就拥有了对生物工程的控制权。从国外引进不同种类的植物基因，进行异地保存，防止基因资源的丧失，并通过外来基因资源与国内资源不同组合之间的缺失（deficiency）、重复（duplication）、倒位（inversion）、易位（translocation）等，可为综合开发利用提供丰富的物质材料。

1.2 植物引种的主要理论

植物引种是从外地或外国引进本地区或本国所没有的植物，经过驯化培育，使其成为本地或本国的栽培植物。有些引进植物长成后能够开花结实，自行繁衍传播，成为当地的当家植物，即所谓“乡土化”（domestication）。

世界各个地区的植物种类，各有它们自己的进化体系和分布领域。就大的门类来说，如北半球针叶树与南半球的差别很大，北半球的松科（*Pinaceae*）树木分布广泛，数量众多，成为广大地区植物群落中的优势建群种。松科树木适应性很强，不少种耐寒冷、耐瘠薄，是北半球重要的用材树种（傅紫芝，1992；罗伟祥，1998；李书靖，2001；陈金海，2001）。而在南半球，除了松属中的南亚松跨越赤道以南到印度尼西亚的苏门答腊岛以外，其他针叶树在南半球几乎完全没有自然分布。相反，针叶树中的南洋杉科（*Araucariaceae*）的两个属（南洋杉及贝壳杉）则分布于南半球。南洋杉属（*Araucaria*）全部分布于南半球的南美洲诸国、澳大利亚、巴布亚新几内亚、新喀里多尼亚、新赫布里底群岛；贝壳杉属（*Agathis*）主要也分布在南半球的新西兰、澳大利亚、新喀里多尼亚、新赫布里底群岛、斐济群岛、所罗门群岛，只有个别种越过赤道到印度尼西亚的北部、菲律宾及马来西亚。同样，阔叶树的自然分布也有类似情况。如壳斗科中最大的属一栎属（*Quercus*），在北半球的温带、亚热带广泛分布，是重要的

用材树种（Bohlmann D., 1971; Fober H., 1998; 汪企明等, 2000），但在南半球只有少数种见于赤道附近的热带地区的高山，如南美洲的哥伦比亚及亚洲的印度尼西亚爪哇岛。桉属（*Eucalyptus*）拥有 500 多种树种，种类繁多，但绝大多数分布于澳大利亚，少数分布于巴布亚新几内亚及南太平洋的一些岛屿，只有一个种的自然分布向北分布到菲律宾群岛南部的棉兰老岛（约北纬 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ）。

对于一种植物来说，它的自然分布范围和该种的发生历史、适应能力、传播能力和条件、分布中的障碍以及分布区适宜该植物范围的大小等因素有关。从植物种的发展来说，有些种处于发展扩大阶段；有些种则因不适应于气候环境条件的变化而在逐渐缩小，处于衰退阶段，而常常呈现出间断的岛状分布。我国的黄杉属（*Pseudotsuga*）、福建柏属（*Fukienia*）、银杉属（*Cathaya*）、珙桐属（*Davidia*）目前已处于衰退阶段。有些种分布范围不断缩小，终于成为局部狭窄地区的残遗分布，如水杉（*Metasequoia glyptostroboides*）在上白垩纪，广泛分布于北美洲、西欧、格陵兰、西伯利亚、日本北部及我国东北地区并向南传播；经冰期后，绝大部分地区的水杉都已灭绝，现在水杉的自然分布仅限于我国湖北、四川、湖南 3 省的狭隘范围。人为的破坏也会使许多植物的自然分布区日益缩小，甚至绝迹。这就要求对稀有植物加以保护，并设立自然保护区（natural reserve）。虽然各种植物局限于各自然分布区，并不是它们不能生长于其他地区，只是由于还没有传播出去，特别是因传播上的障碍而不能或很难扩散，如海洋、山岭等。这种障碍形成目前许多植物只分布于一定的区域之内。有些植物的自然分布区很小，如我国的水杉、美国的辐射松（*pinus radiata*）等。辐射松原产美国太平洋沿岸，自然分布在南北长约 200 km，东西宽约 10 km 的范围（潘志刚，1994；杨云海，2000）。另一方面，有些国家和地区乡土植物资源很少，但这也并不是说这些国家或地区不适宜生长更多的植物，只是由于许多植物不能

自然传播进去，或者因地质时代的气候变迁，许多植物因不能适应变化而灭绝，以至到气候复原时，灭绝的植物已不能再生。

植物引种就是运用人为传播的方法，克服植物在传播上的距离障碍，扩大植物的栽培范围，使许多地区和国家增加新的外来植物。国内外引种成功外来植物、被驯化利用的优良植物大量推广，导致农、林、牧业生产迅速发展的例子不胜枚举。植物引种已得到越来越多国家和地区的重视，无论是植物资源丰富的国家，或是乡土植物资源十分稀少的国家，概不例外。

植物引种主要遵循有以下几个方面的理论（潘志刚，1994；吴中伦，1983；I. V. Muchurin, 1949）。

1.2.1 达尔文学说

查理·达尔文（Charles Darwin, 1809—1882）是19世纪著名的英国博物学家，是生物进化论的创始人。他在《物种起源》（*The Origin of Species*）（达尔文，1859）中指出，凡世间一切生物都是进化（*evolution*）的产物，不管进化的过程是快是慢，“进化是历史事实”。在没有人工干预的情况下，“自然选择（*natural selection*）是进化的机制”。在长期的生存竞争中，各种生物都遵循“优胜劣汰，适者生存”的自然法则。一般地，自然选择是个相当缓慢的过程，除非碰上一些偶然的因素，如火灾、地震、火山爆发等等，自然进化由量变到质变的过程要成千上万年，有时甚至更长时间。所以，其进化结果往往只能通过地质学研究和考古研究才能被发现。人类进入农业社会以后，食物来源已不仅是靠采集和狩猎，他们发明了耕种和养殖，用以获取较稳定的食物来源，这便导致了最初的引种驯化。引种驯化是按人的需要，通过人为控制使生物向前进化的过程，这便是达尔文的“人工选择（*artificial selection*）”。对植物而言，人工选择是按照人的喜好，通过栽培措施来选择自然界里野生的或栽培的优良个体或品种，去劣存优，使其逐渐朝着人们所预期的方向发展。由于加进了人为因素，所以，

人工选择时植物进化的速度要比自然选择快得多。在达尔文看来，不管是何种选择，其基本原理都是生物变异（*variation*）的普遍性和变异能遗传的特殊性。选择之所以成为可能，是因为有变异存在而且产生的变种或类型具有适应新的环境条件的潜力。

达尔文的遗传变异学说对引种驯化有着重大的指导意义。它使人们首次清晰地认识到，植物与生俱来便有适应风土条件的能力，它适应新环境的机制是遗传变异。植物变异的动因是外界环境的变化、植物本身的器官运动、授粉（*pollination*）和杂交（*hybridization*）等。变异可分为逐渐形成和突变形成两种形式，两种形式都可以遗传给后代。植物可以通过自然选择或人工选择，保持、发展有利变异，并将其驯化为能适应新环境的品种（类型）。同一植物分布于不同地区的个体会产生不同的变异，即变异具有多样性。植物的地理分布不仅决定于现代因子，还与历史因素有关。上述这些基于实践的认识，为后来的引种驯化实践和理论研究提供了令人信服的理论依据。

1.2.2 气候相似论

德国著名林学家玛依尔（Mayr H.）是继达尔文之后的植物引种驯化理论家。他主要从事园林和绿化树木引种工作。他在《欧洲外地园林树木》和《在自然历史基础上的林木栽培》两著作中，提出了林木引种必须遵循“气候相似原则”（*rules of similar climate*）的思想和科学依据。他指出，木本植物引种成功与否，最重要的是看原产地气候条件与引种地气候条件是否相似。林木引种时，引种地和原产地的气候条件必须相似，引种的林木才能正常生长发育，这是“气候相似论”（*similarity of climate*）的核心所在。于是，他拟定以温度为主的几个气候指标，用代表温度条件的野生群落中的典型树种做指示植物（*indicator plant*），把北半球划分为六个“并行”的林带，即棕榈带、月桂带、板栗带、山毛榉带、冷杉带和极寒带，以严格限制植物引种的活动范围。

他指出在这些林带之内迁移植物，应该是没有什么困难的。在他所做的大量引种尝试中，有成功亦有失败。他基本上把失败归咎于气候不适所致。所以，他极力倡导“先研究，后尝试”的引种方针，具有积极意义。

“气候相似论”是诸引种理论中应用最为普遍的一种。她引导人们选择引种对象和确定引种地区，避免引种的盲目性。然而其不足之处是只强调温度条件，而忽视气候是一个综合的因素；只强调了遗传的保守性而没有看到遗传的可塑性，并设法利用后来来改造植物。所以，它限制了人们的引种范围。

1.2.3 风土驯化学说

俄罗斯园艺和育种学家米丘林（И. В. МИЧУРИН）根据他将近 60 年的果树引种和品种选育经验，提出了著名的“风土驯化学说”。它的基本原理是，生物体与其赖以生存的环境之间存在着对立统一的关系，生物体的遗传可塑性使得它经过驯化而适应新的环境成为可能。它的核心是改造植物的遗传保守特性，使其适应新的环境。具体做法是，用植物的遗传不稳定、最易动摇的幼龄实生苗作为风土驯化材料，采用逐步迁移（每次纬度北移 300 km）的办法，使其在新的环境影响下，逐步改变原有的本性，最终适应预定的新环境，达到驯化的效果，即：{（种子→实生苗→优树选择）→逐步北移→（种子→实生苗→优树选择）}×多次循环。这一方法的依据，一是植物在个体发育的幼龄阶段，变异性较大；二是实生苗对新环境有较大的适应能力，但也有一定的限度。当引种地与原产地差异太大时，引种不能一步到位，必须采取逐步迁移的办法逐步驯化。采种繁育实生苗时，幼树首次结实的种子比成年树的要好，杂种后代的种子比纯种的要好。

“风土驯化学说”在植物引种驯化，特别是果树引种驯化领域有着重要的指导意义。与其理论相配套的苗木培育方法（实生苗斯巴达式锻炼法、嫁接苗蒙导法）和育种方法（远缘杂交法、定

向培育法）均有重要的参考价值。此外，米丘林十分注重立地选择（site selection）和栽培技术的研究，这也是他取得成功的又一条经验。“风土驯化学说”也存在明显的不足之处。采用此法进行果树引种，时间长，速度慢，果实品质劣变严重；用实生苗繁殖普遍存在分离现象，需要用长时间进行筛选工作；一律采用种子作为亲本材料，并不适合所有树种，特别是引种地与原产地条件差异不大时，这样做实无益处。

1.2.4 生态历史分析法

原苏联植物学家库里奇亚索夫（M. B. Кулбуаасов）于 1953 年提出植物引种驯化的“生态历史分析法”（张日清，2001），这是原苏联总植物园在试验了 3000 多种植物后总结出来的。该理论认为，一些植物的现代分布区是地质史上冰川运动时被迫形成的，并不一定是它们的最适生长区，有时把它们引种到另一些地方后，有可能生长发育得更好些。例如，天山蓝花苜蓿（*Medicago tianschanica*），现分布于天山干旱地区，属旱生性植物，但当它被原苏联的总植物园引种到湿生地区后，生长得更好一些，产量亦成倍提高了。这说明此种植物历史上原本是湿生性的，是后来受到环境所迫而迁移到现在的分布区的。所以，当它被引回到最初的生境后，生长发育又恢复到原来的水平。据此，库里奇亚索夫指出，引种时应以被引对象的植物区系为总体单位，通过分析植物区系中植物成分的起源，来揭示这些成分的生态历史本质，并以此作为确定引种地区和制定栽培技术措施的依据，使引种工作取得良好效果。生态历史分析法对自然区系植物的引种具有较大的实用价值。随着古植物学、古地质学和植物地理学的发展，该理论在植物引种中的应用前景将更加广阔。

美国林木遗传育种学家怀特（Wright）在 1976 年也曾指出，单型属或少型属种在引种中具有重要的地位，它们大多属于古老树种，没有严重的病虫害，如我国的银杏、水杉、金钱松、杜仲

等, 引种到国外数十个国家后均表现很好。这些树种在地质时代原分布很广, 具有很强的适应潜力。所以, 引种时应充分考虑一种植物的发生历史, 以充分发挥其不同地区的生产潜力。

1.2.5 栽培植物起源中心说

从 19 世纪中期开始便有许多学者对栽培植物起源中心这一问题颇感兴趣并进行了研究。近代植物地理学创始人汉姆波特 (Humboldt) 可能是有记载的最早提出这一问题的人。这位德国科学家在 1807 年谈及一些农作物和果树时说, 关于它们的原产地和起始栽培年代仍然是个谜。接下来, 德·坎道尔 (De Candolle) 在其《栽培植物考源》(1882) 中指出, 栽培植物各有其起源的地方, 但是一个物种最丰富的地区不一定是该物种的起源中心。他经过研究后认为, 中国、西南亚和埃及、热带亚洲这 3 个地区可能是植物最早被驯化的地点。达尔文亦在前人的基础上进行过研究, 认为虽然绝大多数栽培植物的来源无从考证, 但它们都毫无疑问地在选择条件下发生了大的变化。奥地利遗传学家孟德尔 (Gregor Johann Mendel) 则从纯遗传学的角度断言, 栽培植物是在野生状态下由于杂交和选择而演化来的 (浙江农业大学, 1979)。

前苏联植物地理学家瓦维洛夫 (H. N. Babulob) 等人集所有前人研究之大成, 经过将近十年、足迹遍及 60 多个国家的考察, 于 1935 年将世界栽培植物起源中心分为 8 个大区和 3 个亚区, 即中国、印度、中亚、近东、地中海、埃塞俄比亚、墨西哥、中美和南美 8 个大区, 印度—马来西亚、智利、巴西-巴拉圭 3 个亚区 (张日清等, 2001)。瓦维洛夫提出的引种驯化的“植物地理学差率法”, 主张把世界上的植物收集到同一生态条件下进行栽培试验, 供选种、育种和引种使用。显然, 此法对引种没有指导意义, 只对了解植物进化规律有所帮助。1956 年, 达林顿 (Darlington) 参照他人的意见, 将世界栽培植物起源中心划分为 9 个区和 6 个亚区。1970 年, 茹可夫斯基 (Л. И. Жуковский) 将瓦维洛夫的分

区法修改为 12 个中心, 增加了澳大利亚、非洲 (含埃塞俄比亚)、欧洲西伯利亚和北美。1975 年, 泽文 (Zeven) 和茹可夫斯基合作编著了《栽培植物及其演变中心辞典》, 总结了世界各国学者对栽培植物起源的观点, 并按 12 个起源中心, 列出了 167 科 2297 种栽培植物和野生近缘种的拉丁名称。总之, 关于栽培植物起源中心的学说, 对引种工作选择种源和确定适宜的引种地具有很大的参考价值。

1.2.6 专属引种法

1950 年前苏联植物学家鲁萨诺夫 (X. H. Руснов) 根据其引种木槿属 (*Hibiscus*)、蔷薇属 (*Rosa*)、丝兰属 (*Yucca*) 等的引种实践, 提出了专属引种法的理论和方法 (潘志刚等, 1994)。这是一种以植物分类学上的“属” (genus) 为总体单位的引种方法。该法主张尽可能全面地收集同一属内的种 (species)、变种 (subspecies) 及地理生态类型 (geo-ecotype), 通过在同样的条件下繁殖、栽培, 观察其适应性、生长、变异情况, 并研究其生物学、生态学、生理学、经济性状、观赏价值等, 从而比较选出期望的其他优良品种 (类型), 研究种属的系统发育历史。这一方法特别适合植物园引种驯化, 在我国也得到了广泛应用并取得了成功。

1.2.7 生态因子综合分析法

植物引种仅局限于气候显然过于简化, 必须对引种地区生态因子进行综合分析。在充分考虑温度、降水指标的前提下, 还应注重土壤等立地条件, 把环境条件扩大为地理生态条件, 并应高度重视植物的生物学特性和适应性, 最后通过严格的对比试验, 才能正确地选择引种植物。

巴西高尔法里 (Golfari) 于 1978 年根据气候、植被类型、海拔、温度、降水及季节分布、干旱程度、霜害等因子将巴西划分

为 26 个生物气候区，根据多年试验列举出每个区应发展的植物。

1.2.8 其他

鲁萨诺夫还针对树种的竞争问题提出了引种驯化的“优势种法”。其理论依据是，植物的优势种在自然界生存竞争中，竞争力强，遗传可塑性大，容易引种成功。

1920—1928 年间，美国生态学家克莱门兹（Clements）提出了“平行指示植物法（植物测量法）”。该理论认为，植物的指示作用可以代表某些特定的气候条件，在具有相同指示植物的地方引种容易取得成功。实践证明，这一方法比较适合防护树种的引种驯化工作。

前苏联植物学家库尔米里琴根据原苏联尼基塔植物园多年的经验，于 1956 年提出引种“区系发生法”。该法建立在区系成分及其形成历史研究的基础上，认为那些在起源上有亲缘关系和某些共性的区系之间的植物容易引种成功。

20 世纪 70 年代，国外还出现过一些其他的引种驯化理论，如农业气候法（小气候法）、过去引种经验统计分析法、果树引种嫁接法、改变生存条件使之适合植物本性的引种法和比较研究引种植物古代自然分布区和现代引种区法，都从不同角度丰富了引种驯化理论（潘志刚，1994；张日清，2001）。

1.3 植物引种的历史回顾

植物引种的历史源远流长。从世界范围看，在南半球范围内，包括澳大利亚、新西兰、非洲南部、南美洲（特别在巴西、智利、阿根廷、秘鲁），近百年来广泛引种北半球的松科树种，如松属中的辐射松、湿地松（*Pinus elliottii*）、西黄松（*Pinus ponderosa*）等等，取得了出色成绩。这些针叶树的引进，促进了南半球许多国家林业生产的发展，特别在提供长纤维造纸原料和通直的建筑

用材方面取得了良好效果。辐射松在新西兰引种后树高达 49 m，而在原产区树高才 36.6 m，并在新西兰可以 40 年为轮伐期，间伐两次，木材年生长量达 24 m³/hm²；在南非最好立地辐射松木材年生长量达 35 m³/hm²。湿地松主要在亚热带和部分热带国家高海拔地区种植，火炬松（*Pinus taeda*）在湿润的暖温带和一些亚热带国家栽植，这两个树种已有 1/3 在原产地以外地区引种栽植。原产澳大利亚的桉树，以其生长快、耐干旱的特征，为许多热带、亚热带国家所引种（洪长福等，1997）。原产美国东部的刺槐（*Robinia pseudoacacia*）、紫穗槐（*Amorpha fruticosa*）等，现已在许多国家和地区引种，成为全世界温带及北亚热带地区引种最为广泛的树种之一。杨属（*Populus*）植物在引种中也十分重要，特别是欧美杨系列，其杂交种类型极为复杂，有许多杂交变种或无性系生长很快，单位面积产材量很高，已被温带地区各国广泛栽植，成为大量生产木材的重要树种（杨淑敏，2000）。南半球杨属原先无自然分布，但现在新西兰、非洲南部及南美洲也广泛引种了欧美杨，并取得了良好效果。

世界一些发达国家都很重视国外草本植物品种资源的引进（哈斯其其格，1999；奎嘉祥，1998）。俄国在沙皇时期就开始引种国内外草本植物资源，共保存有草本植物种质资源 30 多万份。美国曾收集国内外草本植物种质资源 50 万份，保留了约 25 万份。美国农业部的杜威博士，几乎收集了全世界禾本科（*Gramineae*）小麦族草本植物的全部种质资源。据不完全统计，美国在冰草（*Agropyron cristatum*）、中间偃麦草（*Elytrigia intermedia*）、赖草（*Aneurolepidium dasystachys*）、羊茅（*Festuca ovina*）等禾本科草本植物品种里，有 50 余种是利用他国的草本植物种质资源来培育出的新品种。上述国家在引进别国的草本植物种质资源方面，千方百计地广泛收集，及时利用，使草本植物引种工作逐步趋于国际化、网络化，形成了一整套完备的体系。

我国引进国外优良植物也有着十分悠久的历史。据史书记载，

我国广泛种植的核桃 (*Juglans regia*)、石榴 (*Punica granatum*)、葡萄 (*Vitis vinifera*) 是西汉张骞出使西域时 (公元前 114 年) 带回来的, 到现在已有 2000 多年的历史。核桃在我国新疆可能原来就有自然分布。石榴原产于地中海地区到喜马拉雅区西部 (印度西北部), 是一个外来树种。据西晋张华 (公元 232—300 年) 所撰《博物志》载, “张骞出使西域, 得涂林安石国榴种以归, 故名‘安石榴’”。葡萄原产里海地区或高加索地区及印度西部。我国在南方各省已经比较普遍栽植的油橄榄 (*Olea europaea*), 引种历史也已超过 1000 年。菩提树 (*Ficus religiosa*) 在广东、广西、福建、云南等地均有零星栽植。还有三球悬铃木 (*Platanus orientalis*), 据传 (陈嵘, 1937 年) 系鸠摩罗什法师 (公元 344—413 年) 于 403 年引进到西安, 距今已有 1500 多年历史。我国古代引进的植物种类很多。15 世纪以前从国外引进的植物主要来自东南亚、马来群岛和中亚细亚地区。引进树种以果树、药用植物和有宗教色彩的树种为多, 如核桃、石榴、葡萄、诃子、菩提树等等。

近代交通发达之后, 我国从国外引进植物的数量逐步增加。19 世纪中叶以后, 我国引进植物的种类和数量得到很大发展, 其中有不少由华侨、留学生、外国传教士、外交使节和洋商传来的, 极大多数是城市绿化树种、果树和经济植物。引进地区主要为沿海通商城市。不少教会学校的校园往往成为国外树种的标本园。华北地区引进的树种比较少, 其中有些可能还是先引进到南方城市再转引到北方。东北地区引进数量较大的有日本落叶松 (*Larix kaempferi*)。

原产美国的刺槐早已在我国广为栽培, 在华北平原、低山, 东北平原南部, 西北黄土高原, 以及华东、华中、西南等地大面积栽植, 总面积已超过原产地美国。紫穗槐原产美国东部 (从康涅狄格州到明尼苏达州, 向南到路易斯安那州和佛罗里达州), 已引种栽培在我国华北、华东、东北南部和西北南部、华中等地

区, 面积很大, 也已超过了原产区。紫穗槐在我国这些地区的“四旁”绿化中, 广泛栽种于沟边、坡地、零星隙地; 特别在公路两侧、河渠两岸种植于乔木之下, 乔灌结合充分利用光能和地力, 在发挥防护作用的同时, 提供了大量绿肥、饲料、编织条子及燃料, 收到很大的经济效益。加勒比松 (*Pinus caribaea*) 分布于加勒比海地区, 我国广东、海南和广西 3 省区已有加勒比松人工林 2.5 万 hm^2 以上。我国引种栽培的湿地松、火炬松面积规模很大, 仅次于原产地美国, 这两个树种已成为广东省在 20 世纪实现基本绿化的主要树种之一, 它们的引种成功与推广对促进我国南方低山、丘陵和沿海台地的林业生产起了重要作用。20 世纪 50 年代以来引入的杨树速生品种对北方平原地区造林绿化, 60 年代引入火炬树 (*Rhus typhina*) 对北方干旱地区造林, 池杉 (*Taxodium ascendens*)、落羽杉 (*Taxodium distichum*) 对长江下游平原绿化, 雪松 (*Cedrus deodara*) 对我国城市绿化等, 都起了重要的促进作用。

20 世纪 70 年代以来, 由中国农业科学院作物品种资源研究所牵头的协作组, 通过多种渠道从 40 个国家和地区共引进果树品种资源 1680 份, 涉及 28 个科 36 个属 131 个种。存活 1429 份, 除去重复, 实际为我国增加果树品种资源 1177 份, 其中苹果 336 份, 桃 64 份, 葡萄 134 份, 柑橘 269 份, 枇杷 18 份, 香蕉 15 份, 其他果树 341 份。根据引进种类、品种资源的适应性和适应地区, 由承担国家果树种质资源保存的科研单位和条件较好的其他单位分别负责保存、试种、研究, 经过检疫、核实品名、明确分类地位后, 提供保存和进一步研究利用。已保存在国家果树种质圃的共计有苹果、桃、葡萄、柑橘、枇杷、香蕉等 746 份。有些种类虽未进入国家种质圃, 也已就地保存。至今已完成 764 份品种资源特征、特性、地区适应性、生长结果表现等的观察与鉴定, 为有效利用提供了科学依据 (国外果树引种协作组, 1997)。

从我国引种草本植物的历史来看, 早在两千多年前的汉武帝

时代, 就已开始引种紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)。中华人民共和国成立以来, 我国在引种国外优良草本植物方面更是做了大量的工作, 使我国的草本植物栽培育种工作有了长足进步 (苏加楷, 1983; 包兴国, 1997; 刘建宁, 1997; 郭孝, 1998; 奎嘉祥, 1998; 彭玉梅, 1998; 李立, 1998; 陈敏, 1998; 胥晓刚, 1999; 宋显成, 1999; 王宏生, 2000)。据不完全统计, 共引种草本植物和饲料作物 4000 多种, 对草原建设和畜牧业生产的发展起了重要作用。截至 1995 年, 在全国牧草品种审定委员会审定登记的 163 个新品种里, 有引进品种 40 余种, 野生栽培种 30 个, 引进品种多于野生栽培品种 (哈斯其其格, 1995)。在育成品种和地方品种里也有不少是利用引进品种培育而成, 引种选育出的无芒雀麦 (*Bromus inermis*)、披碱草 (*Elymus dahuricus*)、老芒麦 (*Elymus sibiricus*)、苏丹草 (*Sorghum sudanense*)、岩黄芪 (*Hedysarum fruticosum*)、沙打旺 (*Astragalus adsurgens*) 等优良草本植物资源已在生产实践中得到大面积推广应用; 紫花苜蓿品种里的公农一号和二号、草原一号和二号等品种, 对我国苜蓿栽培向北推进, 做出了突出的贡献。

1.4 本论文所要解决的主要问题

在我国生产实践中, 普遍存在着这样两个方面的突出问题, 一是在生态环境建设中, 重视树体高大的林木, 而对植物群落重要组成部分的草本植物重视不够; 二是在草本植物栽培工作中, 过分强调经济效益, 忽视了草本植物的生态效益。因此, 从国外引进生态、经济、社会“三大效益”俱佳的优良水土保持草本植物, 进行引种栽培、生态经济价值等系列研究, 至关重要。本论文所要研究解决的主要问题是:

(1) 试验研究引进植物的适应性, 包括物候、抗逆性、生长发育规律等, 进而提出引进植物的适生条件和栽培范围;

(2) 试验研究引进植物的经济价值、生态价值, 为不同开发利用提供科学依据;

(3) 试验研究引进植物的栽培技术, 为生产实践提出可供运用的不同植物复合栽培模式。

2 材料与amp;方法

2.1 技术路线

本论文所依托的试验以“气候相似论”为主要依据，引进生态经济效益俱佳的优良水土保持植物，在黄土高原地区进行试验研究，通过初选试验、区域性试验、生产性试验，对引进植物的物候、抗逆性、生长发育特性、生态经济价值、栽培技术与模式等进行系统研究，借以筛选出适宜在黄土高原地区栽培的植物种，为大面积推广提供科学依据。整个试验实施过程如图 2.1 所示。

2.2 试验材料

2.2.1 引种植物

根据黄土高原地区气候干旱、土壤贫瘠、水土流失严重、风沙频繁等特征，引进植物的选择首先要符合抗旱、耐瘠的特征，其次要具有一定的生态经济价值。经过资料检索查询（Robert F. Barnes, 1995; L. E. Moser, 1996; J. Frame, 1997; D. T. Fairey and J. G. Hampton, 1998），以及国内外专家推荐，初步选定了 6 种草本植物供引种试验研究，见表 2.1。

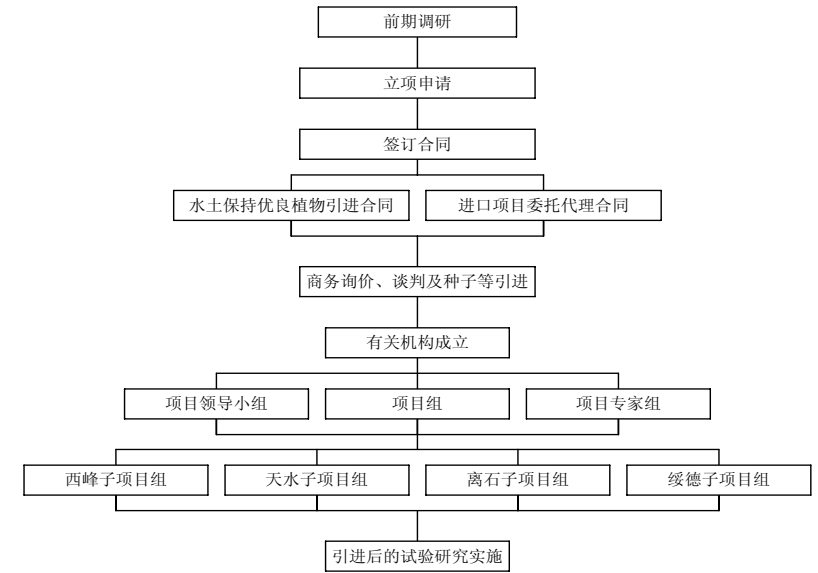


图 2.1 水土保持优良草本植物引进工作程序框图

表 2.1 引进草本植物种质资源情况

拉丁名	英文名	中文名	品 种	类 别	引入年份
<i>Lathyrus latifolius</i>	Perennial pea	多年生香豌豆	Lancer	多年生草	1998、 1999、2000
<i>Chamaecrista fasciculata</i>	Partridge pea	美丽鹌鹑豆	—	一年生草	1998、 1999、2000
<i>Hedysarum boreale</i>	Utah sweet vetch	犹他甜苕子	—	多年生草	1998、1999
<i>Bromus biebersteinii</i>	Meadow brome grass	牧场草	Regar	多年生草	1998、 1999、2000
<i>Bothriochloa ischaemum</i>	Yellow bluestem	黄兰沙梗草	Spar	多年生草	1998、 1999、2000
<i>Poa canbyi</i>	Cambar bluegrass	康巴早熟禾	Cambar	多年生草	1998

这些植物中, 多年生香豌豆、美丽鹌鹑豆、犹他甜苕子是 3 种豆科草本植物, 除美丽鹌鹑豆外, 均适用于黄土高原地区的温凉气候条件, 直根系, 根系发达, 可以固土, 根部具根瘤菌可固氮肥地, 且是很好的饲料植物及水土保持植物 (SCS of USDA, 1997)。牧场草、黄兰沙梗草、康巴早熟禾是 3 种禾本科草本植物, 需要温凉或温暖气候条件, 是改良天然牧场的优良植物, 放牧适口性好; 同时, 多为根茎—疏丛型或疏丛型, 根系在表土层中密集分布, 抗冲性能良好, 可以发挥其良好的水土保持作用; 康巴早熟禾主要作为草坪草利用。

主要对照植物选用了黄土高原地区生产实践中已栽培多年的一些当家草本植物, 详见表 2.2。

表 2.2 主要对照植物基本情况

拉丁名	英文名	中文名	用途
<i>Medicago sativa</i>	Alfalfa	紫花苜蓿	豆科草本植物对照 (ck)
<i>Lolium multiflorum</i>	Italian ryegrass	多年生黑麦草	禾本科草本植物对照 (ck)

2.2.2 种源区

引种种源区或产地主要按照“气候相似论”的观点, 主要引种植物大部分来自气候条件与黄土高原地区较为接近的美国中西部地区, 其引种产地见图 2.2。

1998—2000 年引种产地除美丽鹌鹑豆从具有“冬雨型”气候特征的加利福尼亚州引进外, 其他种或品种从气候条件基本与黄土高原地区较为接近的具有“夏雨型”气候特征的内布拉斯加、犹他、怀俄明、俄克拉荷马、华盛顿 5 个州引进见表 2.3-2.7。

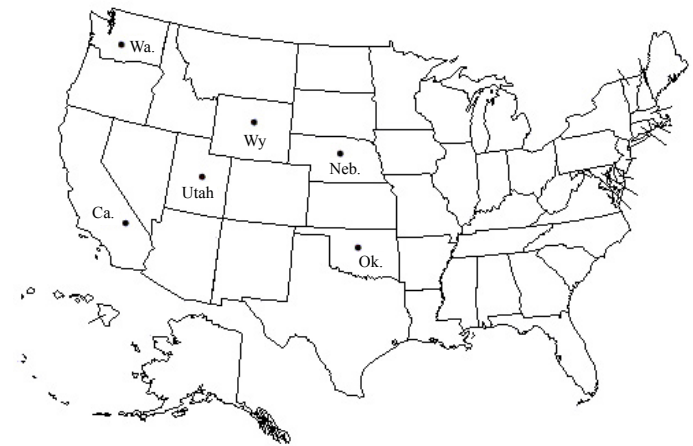


图 2.2 引进草本植物产地示意图

表 2.3 引进草本植物原产地的基本情况

植物名	州名	地名	纬度	经度	海拔 (m)	气象资料年限
多年生香豌豆	Nebraska	ANSELMO 2 SE	41°36'	99°50'	794	1961—1990
美丽鹌鹑豆	California	SANTA BARBARA F S 5	34°26'	119°43'	130	1941—2000
犹他甜苕子	Utah	SALT LAKE CITY NWSFO	40°47'	111°57'	422	1948—2000
牧场草	Wyoming	KAYCEE	43°43'	106°38'	466	1961—1990
黄兰沙梗草	Oklahoma	CLINTON-SHERMAN	35°33'	99°20'	586	1971—2000
康巴早熟禾	Washington	BICKLETON 3 ESE	45°59'	120°14'	277	1931—2000

表 2.4 引进草本植物原产地的月平均气温

地名	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
ANSELMO 2 SE	-5.9	-2.9	2.2	8.9	14.7	20.1	23.4	22.1	16.5	10.1	1.8	-4.4	8.9
SANTA BARBARA F S 5	12.1	12.8	13.6	15.0	16.1	17.5	19.3	19.9	19.3	17.6	14.9	12.7	15.9
SALT LAKE CITY NWSFO	-1.8	1.2	5.5	9.8	15.0	20.3	25.2	24.3	18.5	11.6	4.3	-0.9	11.1
KAYCEE	-6.5	-3.3	0.9	6.1	11.2	17.0	20.9	19.8	13.5	7.7	-0.1	-5.4	6.8
CLINTON-SHERMAN	1.8	4.8	9.4	14.7	20.1	25.5	28.4	27.7	23.0	16.2	8.6	3.2	15.3
BICKLETON 3 ESE	-1.9	0.5	3.6	7.2	11.3	15.2	19.5	19.4	15.2	9.4	2.4	-0.9	8.4

表 2.5 引进草本植物原产地的月平均最低气温

地名	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
ANSELMO 2 SE	-13.2	-10.1	-5.3	0.6	6.6	12.1	15.7	14.2	8.3	1.4	-5.8	-11.5	1.1
SANTA BARBARA F S 5	5.8	6.8	7.7	9.2	10.8	12.4	14.1	14.5	13.7	11.4	8.1	6.2	10.1
SALT LAKE CITY NWSFO	-6.6	-4.1	-0.3	3.3	7.8	12.4	16.9	16.2	10.7	4.4	-1.3	-5.6	4.5
KAYCEE	-15.4	-11.7	-7.4	-2.2	2.8	7.9	11.1	9.7	3.5	-2.1	-8.9	-14.1	-2.2
CLINTON-SHERMAN	-5.1	-2.6	1.8	7.2	13.3	19.0	21.3	20.6	16.1	8.9	1.7	-3.3	8.3
BICKLETON 3 ESE	-5.7	-3.5	-1.2	1.3	4.7	7.9	11.5	11.6	8.3	3.5	-1.7	-4.6	2.7

表 2.6 引进草本植物原产地的月平均最高气温

地名	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
ANSELMO 2 SE	1.2	4.2	9.7	17.1	22.7	27.9	31.2	29.9	24.6	18.7	9.4	2.7	16.6
SANTA BARBARA F S 5	18.4	18.7	19.4	20.8	21.3	22.6	24.6	25.3	25.0	23.8	21.6	19.2	21.7
SALT LAKE CITY NWSFO	3.0	6.4	11.3	16.3	22.2	28.3	33.6	32.4	26.3	18.8	10.0	3.7	17.7
KAYCEE	2.4	5.1	9.1	14.4	19.5	26.0	30.8	29.9	23.6	17.3	8.6	3.2	15.8
CLINTON-SHERMAN	8.6	12.2	16.9	22.1	26.7	32.0	35.4	34.7	29.8	23.5	15.4	9.8	22.3
BICKLETON 3 ESE	1.8	4.5	8.3	13.1	18.0	22.3	27.4	27.2	22.2	15.3	6.6	2.7	14.1

表 2.7 引进草本植物原产地的月平均降雨量

地名	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
ANSELMO 2 SE	11.2	14.2	38.9	64.5	91.9	100.1	87.1	77.0	57.4	34.0	27.4	13.5	617.2
SANTA BARBARA F S 5	95.5	103.4	70.9	31.0	7.6	2.3	0.5	0.8	3.8	11.9	41.4	76.2	445.3
SALT LAKE CITY NWSFO	35.1	33.0	45.0	52.3	46.2	23.1	18.5	20.8	27.4	33.8	33.5	33.5	402.3
KAYCEE	11.7	9.7	19.3	40.4	62.5	56.9	27.9	20.6	28.2	24.6	13.5	11.9	327.2
CLINTON-SHERMAN	26.7	29.7	63.8	65.0	128.5	103.1	58.4	74.7	91.7	76.5	47.0	34.8	799.8
BICKLETON 3 ESE	50.3	39.9	30.2	19.6	19.8	19.8	6.4	7.9	11.4	23.6	51.1	58.9	338.8



图 2.3 草本植物在黄土高原地区引种试验点的分布图

2.2.3 试验区

黄土高原地区主要包括黄土高原沟壑区 (2.7 万 km^2)、黄土丘陵沟壑区 (23.7 万 km^2 , 又分为一区、二区、三区、四区、五区等 5 个副区)、黄土阶地区 (1.9 万 km^2)、冲积平原区 (6.7 万 km^2)、土石山区 (9.4 万 km^2)、干燥草原区 (4 万 km^2)、高地草原区 (6.7 万 km^2)、风沙区 (1.9 万 km^2)、林区 (3.6 万 km^2) 和湖泊 (0.07 万 km^2) 10 种类型。其中, 水土流失区主要分布于黄土丘陵沟壑区、黄土高原沟壑区这 2 种类型区, 面积 26.4 万 km^2 , 侵蚀模数平均为 5000~20000 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 其中窟野河神木至温家川区间输沙模数高达 40000 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 以上, 为黄河流域高产沙区; 后 7 种类型的水土流失相对较轻, 平均为 1000~4000 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 其中林区一般在 500 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的容许侵蚀

量之下。因此，本研究的试验布设主要安排在水土流失严重的黄土高原沟壑区、黄土丘陵沟壑区这两大类型区，主要试验点布设见图 2.3。

试验区主点选在甘肃西峰、天水，陕西绥德，山西离石等地，在各主点进行了初选试验、区域性试验、生产性试验，4 个主点的基本情况详见表 2.8；试验期间各主点的主要气象数据见表 2.9 至表 2.12。

表 2.8 国外优良草本植物引进各试验主点的基本情况

项目	西峰	天水	离石	绥德
地貌类型	黄土高原沟壑区	黄土丘陵沟壑区三副区	黄土丘陵沟壑区二副区	黄土丘陵沟壑区一副区
东经	107°38'	105°43'	111°24'	110°13'
北纬	35°44'	34°57'	37°30'	38°14'
海拔(m)	1050~1423	1270~1450	950~1110	855~955
年平均气温(°C)	8.3	10.9	8.8	9.7
极端最低气温(°C)	-22.6	-19.2	-25.5	-25.4
极端最高气温(°C)	35.7	38.2	38.9	38.4
1月平均气温(°C)	-5.6	-2.5	-7.7	-7.5
7月平均气温(°C)	20.9	23.1	23	24
≥10℃积温(°C)	2783.6	3516.9	3253.5	3503.1
日照时数(h)	2449	2013.2	2592.5	2619.6
降雨量(mm)	561.5	546	490.6	487.2
蒸发量(mm)	1503.5	1291	1830	2061.7
无霜期(d)	162	180	190	156
资料年限	1937—2001	1935—2001	1956—2001	1950—2001

表 2.9 西峰试验主点在试验期间的主要气象资料

项目	年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
气温 (°C)	1998	-5	-0.2	2.8	13.5	13.7	20.3	21.7	19.9	17.5	10.3	6.4	0.3	10.1
	1999	-2.4	0.7	4.8	11.4	15.7	19.5	21	21	11.7	9.8	3.4	2.7	9.9
	2000	-5.2	-2.2	6.3	11.4	18.4	19.3	22.9	19.6	15.6	7.8	1.2	0	9.6
	2001	-3.6	-0.2	5.8	9.5	17.1	20.3	22.8	20.4	14	9.8	3.8	-3.7	9.7
降水量 (mm)	1998	6.8	2.5	41.4	76.6	114.1	24.5	157.2	87.9	25.3	31	0	0	567.3
	1999	0	0	11.2	53.4	75.9	47.4	137.6	25.1	36.5	29.8	6.8	0.9	424.6
	2000	15.1	9.6	18.5	4.5	16.8	98.8	52	123.2	76.4	66	9.3	1	491.2
	2001	24.3	18.5	6.9	43.8	7.9	71.3	87.7	92.5	211.3	31.5	4.5	2.6	602.8
蒸发量 (mm)	1998	42.2	62.9	80.5	185.4	130.8	228.8	170.7	142.5	166.8	90.6	106.7	70.8	1478.7
	1999	65.9	100	123.8	163.3	220.1	198.3	171.3	215.8	115.7	97.9	64.6	61.9	1598.6
	2000	33.2	47	145.5	225.1	302.2	197.4	242.5	141.5	127.8	49.1	46	55.8	1613.1
	2001	41.1	51.4	154.9	135.8	264.7	234.8	273.7	192.3	68	60.8	66.4	38.9	1582.8

表 2.10 天水试验主点在试验期间的主要气象资料

项目	年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
气温 (°C)	1998	-1.9	3.3	6.2	16.5	16.6	23	23.5	22	18.9	12.5	6.8	1.7	12.4
	1999	-0.3	3.9	7.6	14.2	17.3	21.1	22.7	23.5	18.9	11.8	5.9	-0.4	12.2
	2000	-1.3	0.8	8.4	13.7	19.8	21.7	26.2	21.9	17.8	10.9	3.8	1.4	12.1
	2001	-2	2	10	13	18	22	28	23	17	14	7	-1	12.6
降水量 (mm)	1998	5	1.4	13	61.5	65.2	15.8	120.1	87.5	29.1	48.9	1.8	11.4	450.7
	1999	4.9	0	9.9	37	71.6	33.3	117.3	20.1	69.3	51	13.4	1.6	429.4
	2000	5.4	4.6	14.6	36.8	27.8	64.7	12	132.3	68.9	72.9	17.3	2.1	459.4
	2001	8.7	8	0.9	31.5	21.5	106.9	68.3	63	153.7	11.5	4.3	7.2	485.5
蒸发量 (mm)	1998	42.2	64	98.5	189.8	146.9	261.2	200.5	176.1	161.4	89	81.2	55.3	1566.1
	1999	52.3	84	109	181.7	201	174.6	180.8	235.1	126.8	77.5	59.2	39.7	1521.4
	2000	37.8	47.4	116	187.3	259.3	234	326.3	188.7	119.5	67.5	39.4	37.4	1660.4
	2001	35.8	52.6	152	133.5	234.7	205.6	252.5	202.8	93	93.3	70.5	36.7	1563.1